研究報告第３７巻　（通巻４０号）

総説

１）水路計画に関する研究
奥山　育英 …… 1

２）軸・軸受および歯車の変形による歯車の等価組付誤差
小出　隆夫 …… 19

業績リスト －2006－ …… 29

学科による編集
○土木工学科
・大山倉吉軽石不撹乱試料のサクション測定一面せん断試験
清水　正喜・山本　大輔 …… 61

○応用数理工学科
・蒸発・凝縮過程による同軸円筒状凝縮相間の流れ
－凝縮相のもつ有限熱伝導性と潜熱の影響－
大西　善元・藤　　貴洋 …… 67

・有限熱伝導性をもつ平面凝縮相からの強い蒸発流のシミュレーション
－支配系としての流体力学的定式化の適用方法－
大西　善元・岸本　健治 …… 75

・内部構造としての温度場をもつ凝縮相からの２次元蒸発・凝縮流のシミュレーション
大西　善元・村山　太一 …… 81

・沙漠環境風洞の特性計測 （定常風と脈動風）
林　　農・原　　豊・康　　仁勝・加藤　　優・藤本　裕己・若　　良二・
田川公太朗・神近　牧男 …… 89

・ヒット現象の数理モデルとマーケティング・サイエンス
石井　　晃・吉田　就彦・新垣　久史・山崎　富美　…… 107

水路計画に関する研究

奥山育英
鳥取大学工学部社会開発システム工学科

Research on Water -way Planning

Yasuhide OKUYAMA
Department of Social Systems Engineering, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: okuyama@sse.tottori-u.ac.jp

Abstract: According to the request of the committee of Reports of the Faculty of Engineering, Tottori University to retiring faculty members, the author summarizes his major researches during his life in Tottori University. Especially the research of the water-way planning in public enterprises is emphasized by which the department of social systems engineering was nominated for the best nine department in the field of civil engineering planning in Japan, in 2002.

Key Words: Water-way Planning, Capacity of waterway, Suez Canal, Panama Canal, Waiting time for entering the waterway

１．はじめに

9 月 22 日に「工学部編集委員会では，本年から本学部の代表的な業績を総説として研究報告に掲載し，これを工学部ホームページに掲載することとなりました．つきましては，先生のこれまでのお仕事を総説としておまとめいただきますようお願いいたします.」という依頼が届いた．これは，本年度科学研究業績表彰を受けた教員および本年度で退職する教員に依頼するもので初めての試みだそうである．表彰を受けた教員への依頼は納得できるが，定年直前の教員に対しては勝手がよくわからず，大学生活の総合評価をされるようではなはだ気が重い．拒否してもよいという注釈はあったが鳥取大学における教育･研究生活を終えるに際して最後の義務と老骨に鞭打って引き受けることとした．

私が所属する社会開発システム工学科地域開発計画学研究室は，旧教育学部の地域学部への名称変更に伴い都市計画研究室に変更したものの，都市･地域計画の分野は非常に広くてどれが私の代表的な研究か決め難い．学科の説明パンフレットにも「時代が大きく変わり，この変化に対応するには全体を捉えるソフトなまなざしが必要で，社会開発システム工学科は，21 世紀の新しい時代を創るエンジニアを養成する.」と具体的な研究内容は何も記述されていない．

地域開発計画学研究室の紹介には，「自然が好き．人間が好き．だから地球の未来を創りたい.」の下に交通･土地利用･環境･過疎過密･環日本海経済圏など多分野にわたり「広く社会の要請に応えていくのが私たちの大きなテーマであり，理工系の視点にとらわれず，柔軟な地域発展の方法を考えています」と謳っている．

学生は志望学科を選ぶに当ってこの紹介文を参考にする場合も多く，多様な抱負をもって地域開発計画学研究室を志望してくる．謳い文句上，可能な限り志望に合わせるので，他の研究室と比べて研究対象が非常に広範になる．教育学部が地域学部と名称変更したことからもわかるように地域を対象とする研究分野は 1 研究室には広すぎる．

この広範な研究については**５**で簡単に触れるが，ここでは私の代表的研究として，交通の範疇に属する「水路計画に関する研究」を紹介したい．これは，国立大学の独立法人化が取沙汰され，現在の COE 研究の前身とも言える「トップ 30」とか「トップ 10」とかが話題になり始めた 2002 年に「わかる学問の最先端　大学ランキング【理科系編】」のタイトルで「いま，科学の最前線が俄然おもしろい　わかる学問の最先端」のサブタイトルを付けて，河合塾編・著で宝島社から出版された別冊宝島 577 号に挙げられている研究である．

この本の表紙には「偏差値でなく，実績や教育内容の充実ぶりで理科系の大学を格付け！各分野

でユニークな大学・学部も紹介，進学資料にも最適」とあり，大分類を「宇宙とエネルギー」,「地球」,「自然界の原理」,「IT」,「生命科学」,「医薬品と食品」,「ものづくり」,「建物や都市の空間」の 8 分野とし，小分類を 94 分野にまで細分して，SUPER EXCELLENCE，NEXT EXCELLENCE，UNIQUE，WORLD EXCELLENCE，WORK の 4 評価項目を設け大学の学科を研究分野ごとにランク付けした本である．SUPER EXCELLENCE にはその小分類におけるトップ 10 の日本の大学の学科が，NEXT EXCELLENCE にはそれに続く学科が，UNIQUE には名前の通り特色のあるユニークな研究をしている学科が, WORLD EXCELLENCE にはその分野で著名な外国の大学が，WORK にはその分野の民間会社あるいは民間研究所が挙げられている．この学問分野ごとに，多くの研究者のアンケートとインターヴューを行い，研究を中心としている学部・学科・研究科・専攻・研究所を順位として紹介している．調査は 2000 年に行われた．

大分類「建物や都市の空間」のうちの小分類「土木計画学」のトップ 9 に,「システム工学的な見地から，さまざまな研究を行っている．とくに水路の計画などの土木工学の問題に取り組む.」の説明付きで「鳥取大学工学部社会開発システム工学科，工学研究科社会開発システム工学専攻」が掲載されている．この「水路の計画」が地域開発計画学研究室で実施している研究の一つである．

この本に取り上げられている鳥取大学の他の研究を探すと，SUPER EXCELLENCE には大分類 PART6「人間=化学反応体を補正する医薬品と食品に始まる新医療」の大分類の下に小分類「医療薬学」の分野で医学部附属病院薬剤部がトップ 9 に挙げられている．大分類 PART7「ものづくりは，人と環境へのやさしさを追求する」の小分類「機械要素・トライボロジー・設計工学」で，工学部機械工学科が歯車の研究で NEXT EXCELLENCE に，UNIQUE な研究として工学部応用システム工学科が，大分類 PART3「自然界の原理」の下の小分類「流体物理学」で，航空工学の視点から水面上を飛ぶ新しいタイプの船の開発が挙げられている．

国立大学法人化を境として，研究の第 3 者評価が叫ばれているが，2000 年頃に，土木計画の部門で全国大学トップ 9 にランクされた鳥取大学社会開発システム工学科で“とくに”と名指しされた研究がここで取り上げる「水路の計画」である．社会開発システム工学科は，日本技術者教育認定機構(JABEE)では経営工学関連分野で認定を取得しており, 土木計画学は 2 研究室で実施している．

２．水路計画の研究へ向けて

私は 19 年前の昭和 63 年 4 月 1 日に運輸省港湾技術研究所(現在は国土交通省国土技術政策総合研究所と独立行政法人港湾空港技術研究所に分離)から, 現東京都知事で当時の石原慎太郎運輸大臣の辞令「文部省に出向させる」により，また同日付で当時の中島源太郎文部大臣辞令「文部教官教育職(鳥取大学教授工学部)に転任させる」，さらに当時の高木篤鳥取大学長による同日付辞令「鳥取大学大学院工学研究科の担当を命ずる」で鳥取大学大学院工学研究科へ赴任し，併せて工学部社会開発システム工学科で奉職することになった．

この学科が他の機械，電気・電子，土木，化学等名称だけで研究・教育内容を類推できる学科と異なり，学科名だけからでは内容を理解し難い学科である，水路計画の研究を少しでも理解して頂くために，まずその辺の事情から説明する．

運輸省入省は昭和 39 年で，この時期は大企業や中央官庁が使い道もわからないまま時代の潮流に乗り遅れまいと大型電子計算機を導入した頃であった．港湾技術研究所においても私の入所半年前に大型電子計算機が導入された．しかし，膨大な計算量を要する岸壁の円形すべり計算が人力から電子計算機へと変わった程度で，その他は瞬時に終わる簡単な計算が主で計算機の利用は非常に低かった．国家公務員試験の数学職の私が土木・機械が主体の港湾技術研究所に採用された理由はこの計算機をフルに使いこなすためであった．

当時はマシンコードで計算機のプログラマーは希少価値があり，特殊技能者であった．入所してすぐ先輩から 2 冊の手引書で半日のマンツーマン講義を 2 回受けただけで，使ったことも無い電子計算機を使い始めた．以後，計算機の習得はすべて企業による研修と自己学習であった．

大学時代に，電子計算機が一般化しつつある状況から数学科に電子計算機の臨時講義が設けられたが，専ら純粋数学に取り組んでいた私にとって中国語訳の「電脳」ならいざ知らず,「電子計算機」の日本語訳では「算盤のお化け」くらいの認識しかなく，頭から馬鹿にしきって興味すら持たなかった．その自分が，将来，計算機を使うようになるとは知る由もなかった．それが，大学院入試の小手調べとして受けた国家公務員上級試験(数学職)に合格したことから, 大学院受験を急遽取りやめて，国立の研究所に就職することになってしまった．研究所ならば，学費を払わず給与を貰って好きな研究が自由に出来る．

このように国の行政機関も研究機関も電子計算機を導入したものの遊ばせておくだけという状態だったので，電子計算機と数学科学生は全く関係ないにもかかわらず，数学職の新規採用者は引く手数多だった．17 人の合格者に 40 近い行政官庁や研究機関から採用申出があった．周囲から卒業後の就職を心配されたが数学の勉強をしたいだけで進学した数学科が，いざ就職する段になると計算機のおかげで花形学科に変わっていた．この頃を契機に計算機を主体とする応用数理，計数工学，情報工学など，電子計算機の基礎，応用，利用に関する学科が，続々と誕生するのである．

電子計算機会社や製造業の電子計算機部門へ配属された大学時代の同級生は，高価で貴重な電子計算機の利用は，予定表が組まれて週 1 時間も使えないという状態であった．彼らと比較すると，私の場合は今のパソコン並みに自由に使え，新米研究者にとって非常にプラスになった．さらに，新入研究員に対して適切な指導者が居なかったので，専ら外部の電子計算機会社による研修に参加させられた．勤務時間の半分近くは各電子計算機メーカーによる研修を受けまくり，さらに電子計算機を利用した数値計算の研修や当時注目され始めたオペレーションズリサーチの講習会など，参加費が数万円，ときには 10 万円を越える民間の講習会に参加させられた．研究所では，電子計算機の利用に関する和書，洋書を参考にして，必要もない電子計算機を利用するプログラムを作りまくった．この経験から，著者が自分自身の実践を通して本を著しているか，専ら子引き･孫引きで本を書いているか，あるいは出版者の強引な要請で書かされたのかがある程度わかるようになり，併せて，権威に対する批判の目も研ぎ澄まされた．

港湾技術研究所に数学職が入って来たということで，水理・水工分野や土質・構造分野の研究者から計算機の利用と併せて数学に対する問い合わせも多くあった．初めて出したレポートは共著であるが防波堤による波の回折に関する研究であり，杭の横抵抗に関するレポートも共著で著した．圧密沈下の微分方程式，高潮津波計算も扱った．

電子計算機の利用が浸透するにつれて，研究所内ばかりか，運輸本省，地方支分局，また地方公共団体や JICA の前身である国際技術協力事業団(OTCA)関係者からも計算依頼が舞い込み，科学技術計算から今日の行政に必要な計画･調査，調査結果の整理解析，果ては人事の適正配置に至るまで多種多様な注文に応じるようになった．当時，「ラーメンからミサイルまで」という商事会社のコマーシャルが流行っていたが，まさに計算機を利用できそうな業務については何から何まで大忙しの毎日を過ごした．

昭和 40 年代前半は第 2 次全国総合開発計画(新全総)が打ち出され，それまで経験と勘に頼っていた計画の科学化が叫ばれ始めた．公共事業の分野では，名神高速道路の建設費を世銀から借款したことから世銀の調査団に計画の不備を指摘され，当時の建設省の道路計画が科学的計画法に一変した．それが運輸省港湾技術研究所にも波及し，土木と機械の研究所に計画部門を設ける契機となり，本格的な計画研究に打ち込むことになった．

この間，1969 年から 1 年間科学技術庁の長期在外研究員として，自動車交通計画のメッカであるアメリカ合衆国カリフォルニア州立大学バークレー校に留学し，港湾計画では外国に学ぶところがほとんど無かったので陸上の自動車交通計画を学んで港湾計画に適用しようと考えて，土木工学大学院交通運輸工学専攻科に在籍した．その 30 年後に鳥取大学とカリフォルニア大学バークレー校とで学術交流協定を締結したが，相手側の土木工学研究科長のカナファニ教授は当時の学友である．レーガン大統領がカリフォルニア州知事の頃で，公立大学ながら授業料が非常に高かったので猛勉強して，3 学期 9 ヶ月間で修士課程を修了した．

帰国後は，主として埠頭と物流の研究をしたが，計画研究も軌道にのり計画の研究室が設立され，2 年後には 2 つの計画系研究室が認められた．そこで，既往研究の実績が多い埠頭と物流の研究は他の研究室に任せ，港湾とは造るためのものではなく使うためにあるということを強く感じていた私は，主として海上交通，すなわち，船舶の交通に関する研究に着手した．港湾は物流の一大拠点であるが，船舶の利用があってこその港湾である．バークレー校で習得した世界最先端の陸上交通計画の手法を未成熟な海上交通計画研究に生かそうという意気込みがあった．海上交通は世界的にもほとんど手をつけられていない分野で，日本の東京商船大学(現在，東京水産大学と合併して東京海洋大学)と神戸商船大学(現在，神戸大学と合併して神戸大学)，運輸省電子航法研究所(現在,独立行政法人)ほかほんの一部の研究者が研究を始めたばかりであった．

運輸省の港湾技術研究所は本省の付属機関ではあったが，建設省の道路局や河川局のような事業官庁である港湾局と予算や人事交流で強いつながりがあった．したがって，港湾技術研究所も事業を遂行するための研究が主体であり，岸壁，防

波堤，航路を如何に安く壊れないように造るかといった研究が盛んであった．それが時代の流れによって造る技術のための計画＝設計から，建設した港湾を如何にうまく利用するかといった利用するための計画が重視されるようになったのである．

港湾を利用する船舶の交通に関する研究に着手し，その先にある船舶が利用する水路計画の研究が必然的に芽生えて来た．

３．水路計画の研究

計算機の利用で職場内に先達が居なかったように．船舶交通の側面からの水路計画の研究は研究所内に研究者が居ないばかりか，外部にもほとんど研究者が居ない点が計算機と異なっていた．しかし，陸上交通における計画の科学化は海上交通へも影響して，日本航海学会に海上交通工学研究部会が設立され，この分野の数少ない研究者が一堂に会する場が設けられその点では研究をし易くなった．

海上交通計画も陸上交通と同じように，まず第1 段階は現象の把握であることから海上交通の観測を重視した．当時，海上保安庁ではミリ波レーダー観測車で全国主要狭水道の船舶交通観測を行い，船舶振興会の補助金によってそれをマニュアルで写し取って海上交通の現況を把握していた．そこで，レーダー画像の複写までは人手によるものの，レーダー画像情報と時刻や船種・船型を調べる目視観測の情報をすべてコンピュータに入力し，それらの解析までを実行する海上交通観測・解析システムを開発した.このシステムを用いて，以後の海上交通観測及び解析･分析は飛躍的な発展を遂げた．当時は大規模プロジェクトを開発方式とする新全国総合開発計画期間の真只中にあって予算も潤沢であった上に，大規模プロジェクトは大規模港湾あるいは関西国際空港建設プロジェクトに見られるような大規模埋め立てを伴うことから，船舶交通との関わりが大きな問題として取り上げられ，海上交通観測と結果の分析は計画に必須となっていた，そのため，舶用センチ波レーダーの陸上利用の許可を取得して海上交通観測レーダー車を装備し，要請があれば，また自らの研究のために，全国の港湾，沿岸，狭水道における船舶交通を観測し,交通特性を分析･解析した．このように，レーダー像と目視観測による船種・船型を合体させて，船舶の交通を時系列データとして，すべて電子化して海上交通の現況が容易に把握できるようになった．

現実の船舶交通の実態がわかると，次は大規模開発を海上交通の面からどのように行えば他への負の影響が少なくできるかという問題に直面する．そこでは,交通量の予測から始まって経路の推定，時間に依存する船舶交通の変動など，計画目標時期の船舶の交通特性を知る必要がある．それをもとに当該計画完了後の交通状況の問題点とその解決策を見出すことが要請される．

そのために船舶交通シミュレーションを開発した．シミュレーションは最終的に 3 手法を準備した．マクロ的に交通流を評価するネットワークシミュレーション，1 船 1 船の操縦性能や操船行動を追って海上交通を再現するミクロシミュレーション，さらに船舶操縦シミュレータ(シミュレータとは人が機械を動かすマンマシンシステムにおいて，機械の操作を人が容易に出来ることを目的としたシミュレーション)までをも海上交通計画策定に利用した．簡単なシミュレータは右転・左転を決める舵に関する運動方程式と増減速を決定する運動方程式を利用してリアルタイムで操舵行動，増減速行動を入力することによって船舶の運動方程式を瞬時に解いて船舶の運動を得るものである．精緻なシミュレータは専門の造船会社に任せたが，船舶性能のほかに浅水影響，側壁影響，2 船舶の吸引現象，載荷状況，トリムなど現実の海域で直面する周辺環境もすべて取り入れて航海士の操船教育・研修，永い陸上勤務の後の海上勤務に戻る船長の操船感覚のリハビリに利用される．

このようにして，日本全国の港湾，沿岸域，狭水道において海上交通のシミュレーション手法による計画の妥当性の検証を実施した．

また，実態調査による海上交通の現況及びシミュレーションによる海上交通の様相は，当時開発されたばかりのディスプレー画面をフィルムに焼き付ける COM(Computer Output Microfilm)システムで，フィルム焼付け費用は当時 1 枚 200 円程度であったが，それをつなぎ合わせて映画を作製した．コンピュータで映画を作製することは現在ではアニメーション作成で当たり前だが，この試みはわが国では初めてであった．これは予算がかかることから鳥取大学へ来る前の話である.その後，東京電力が微分方程式の解を同じ手法でコンピュータを利用して映画化している．

このようにして，浦賀水道，明石海峡，伊良湖水道，備讃瀬戸航路，関門海峡をはじめとした狭水道，潮岬沖，伊豆半島沖他沿岸域，東京湾，大阪湾，伊勢湾他の広域湾，神戸港，横浜港，大阪港，名古屋港，苫小牧港，鹿島港，むつ小川原港，

茨城新港(現常陸那珂港)他多くの港湾計画，関西国際空港建設，羽田空港の沖合展開事業，神戸新空港建設計画,中部国際空港建設など実現したビッグプロジェクト，さらには計画のみで消えた秋田湾広域港湾，周防灘開発他多くの実現しなかったビッグプロジェクト等々，北海道から沖縄に至るまで，海上交通に影響を及ぼす計画には，航行実態観測と解析からシミュレーションによる検証まで必ず関わらされた.

研究では，このように現況の把握，シミュレーションによる現況の再現と計画案の予測をプロジェクトごとにまた海域ごとに実施したが，水域を利用する船舶に関する分析･解析も実施した.これは，全世界の船舶についてはロイドレジスターに記載の 7 万隻に及ぶ船舶を対象に，また船舶諸元の項目が異なっている日本船舶明細書をもとにして 1 万余隻に及ぶ日本船舶を対象として，船種，船型(各種トン数)，船幅，喫水，船高，エンジンの種類，船舶免許他，船舶統計を整理するとともに併せて多変量解析等による特性の分析も行った.

このような海上交通に関する研究を継続的に実施していたので，鳥取大学へ赴任してから，中国の江沢民元国家主席の出身校であり中国人が設立した最古の大学である上海交通大学から海上交通シミュレーションの講義で 1 週間の招待を受けた．渡航費は当方負担で，宿泊費及び国内交通費は交通大学が負担の招待で，移動には自転車一辺倒だったその頃の中国で公用車を提供してくれた.講義の受講者は学生ではなく 10 数名ほどの教授，助教授，助手であった.

また，ヨーロッパで 2 年半の間に 7 回開催された国際航路学会(PIANC)の海上交通シミュレーションに関する作業部会に日本政府代表として都合のつかなかった 1 回を除いて 6 回出席した.

さらに，鳥取大学工学部が中心となって鳥取大学と学術交流協定を結んでいる釜山の韓国海洋大学校の設立 50 周年記念に招待されて記念講演を行った．このときは全費用を負担してくれ，当時の鳥取大学長も元工学部長も祝賀行事に参列した.この縁もあってか，韓国海上交通政策研究所の海上交通政策論文誌の編集委員に任命された.

この頃，国際海運の大きな問題として，開戦から 6 日間で停戦を迎えた第 3 次中東戦争ではあったが,この戦争によって 1967 年以降スエズ運河が使用不能となっていた．アジアとヨーロッパを行き来する船舶はアフリカ南端の喜望峰回りを余儀なくされ，7,600km もの航行距離の増加は，船舶と船員の不足，燃料消費の出費増は海運会社の経営合理化を促し，VLCC(Very Large Crude Oil Carrier)や ULCC(Ultra Large Crude Oil Carrier)といった 30 万トンから 50 万トンに及ぶマンモスタンカーの建造を進めた．その結果，1975 年にスエズ運河が再開したときには，スエズ運河を通航できる船舶は激減していた．そこでエジプト政府は巨大化した船舶がスエズ運河を通過できるよう運河の拡幅・増深を計画し，運河幅 200m，有効航路幅 80m,水深 19mとする第 1 期拡張計画を立案した．建設費は世銀や日本からの借款で賄った．貸主の調査団が事業の妥当性や返済計画を精査するが，返済計画がフランスのコンサルタントによるものであったことから，世銀調査団は自分の財布は自分で勘定するようにと外部に委託しないで自前の経営部門を備えるよう勧告した．エジプト政府は過去，英仏にスエズ運河を支配された苦い思いがあることから，スエズ運河のビッグユーザーであり，お金は出すが口は出さない極東の日本国に経営部門の設立調査を依頼するに至った.

この少し前にエジプト政府がコンサル料約 30 億円でスエズ運河再開に向けて全世界に増進拡幅計画の公募をしたので日本政府はプロジェクトチームを結成し，航海学会の海上交通工学研究会のメンバーも交えて,受託料 30 億円のフィージブルスタディのプロポーザルを作成した．これは，最終的にフランスのコンサルタント，ソグレア社が受注した．先に述べた国際航路会議の作業部会は欧州各国を持ち回りで開催したが，その際．フランス国グルノーブル市にあるソグレア社付属研究所で行われたときに，所内実験場の広大な水面にスエズ運河の模型水路が造られていて，ここに負けたのかと感慨ひとしおであった.

しかしながら，スエズ運河庁に経営部門を設立する調査はエジプト政府の依頼を受けて日本の政府開発援助(ODA)で実施することになった．調査団は三菱総研と海事産業研究所からなる JV と政府の作業監理委員で構成され，3 年間で総額約 3 億円の予算でスエズ運河庁に新たな組織，エコノミックニットを設立する調査にとりかかることになった．私は政府の作業監理委員として全体作業を統括した．これと併せて，スエズ運河庁に第 1 期計画の FS(Feasible Study)，第 2 期計画の FS，航行安全の FS をわが国の ODA で実施した．FS は国際臨界開発センター（OCDI）が実施し，私は OCDI の非常勤職員のかたちで鳥取大学に居ながら協力した．その作業の過程で，運河の容量の必要性を感じ次の **4** に述べる研究を着想した．以下に，その研究の概要を記す.

４．長大運河の交通容量

4.1 はじめに

大型船を利用した水上交通による貨物輸送はエネルギー的に最も効率的であるばかりでなく，トラック輸送と比較して排気ガスによる大気汚染といった地球環境面からも望ましく，ヨーロッパの内陸部や中国においては多くの運河が建設され利用されている．また，アジアとヨーロッパの海上距離を著しく短縮したスエズ運河や太平洋と大西洋をつなぐパナマ運河は，世界貿易を促し人類に多大なる恩恵を与えてきた．しかし，経済性を追求した大型船の出現や交易の興隆がもたらした交通量の増大は，既存の運河だけでは対応が難しくなり，新運河の建設計画や見直しが続出し，第2スエズ運河や第2パナマ運河の計画がなされるに至っている．

その際に運河の交通容量の算定は，運河の建設費が莫大であることから，非常に重要である．しかし，船舶の船種・船型・性能の差異は陸上交通の自動車と比較すると千差万別であることから運河の容量を単純に船舶隻数で与えることは危険である．また，建設コストを考慮すると道路の様に往復2車線としないで片側交通による交互利用，そのための待機場所や行き合い場所の適切な配置も重要である．さらに，長大運河では地形的に航行環境を最良にすることも適わない箇所が生じて，その結果，船種や船型によっては，夜間航行の制限，行き合いの規制といったケースも見られる．

このような状況下で運河の交通容量を算定するために，誰もが納得する実用に適った交通容量を定義する必要がある．ここでは，そのような交通容量として陸上交通の容量の考え方を取り入れた実隻数や標準船を定めて換算隻数を採用するという方法をとらないで，水路航行が可能な時間幅の長さを交通容量と等価な量というかたちで **4.2** で提案する．現実の交通容量である船舶数は，得られた時間幅を船種や船型に応じて異なる必要船間時間隔で割り振ることによって求める．この場合，船種・船型の構成比は所与であるとした．この考え方は運河のように船舶が直線状に航行する場合に適用できる有効な考え方である．具体的な適用例として，**4.3** でスエズ運河を **4.4** でパナマ運河をとりあげる．

また，実用的な交通容量を求めるにあたっては，「待ち」の側面からの検討も必要であることから，運河を通航する際の待船状況を解析する手法を提案する．これによって，一旦事故が起きた場合に事故の影響がいつ無くなるか，また，早く平常に戻すための手法を提案し，計算結果を示した．

4.2 水路の交通容量（交通容量等価時間）

長大運河においては，建設費が莫大であることから，運河全体を往復航行で計画しないで片側通航水路で計画し，水路の一部に往復可能な区間を設置する場合や，反対方向に進行する船舶をやり過ごすための待機水路等が計画される場合が多い．ここでは長大運河の水路掘削計画代替案ごとに交通容量の増減を検討する際に有効な交通容量を提案する．

海上交通における交通容量の概念は陸上の自動車交通工学と比較すると難しく，単純な隻数では巨大船と小型船の差が表わせない．陸上の自動車交通における交通容量は自動車台数で与えられ，大型トラックや大型バスが混在する場合には，乗用車換算当量 （passenger-car equivalent volume）を用いて，例えば，バス1台が乗用車2台分に相当するといった換算を行う．しかし，海上では，10万トン以上の巨大船と100トンにも満たない小型船が同一の水域を航行し，大きさばかりか速力をはじめとして加減速や変針といった操船性能も著しく異なり，単純に換算隻数を設けても，陸上交通における換算当量ほどには万人を説得し難い．

海上交通においては，船の全長をLとして，操船の難易度は L^2 に，エネルギー的には L^3 に比例する．また，海上交通は面交通であることから，通航するおのおのの船舶の周囲には他船の侵入を拒む閉塞領域(ship domain)と呼ばれる領域が存在し，その大きさは，多くの観測結果から船首方向 a×L，横方向 b×L(a，b は定数)を長軸，短軸とする楕円であると報告されている．したがって，閉塞領域が L^2 に比例することから換算当量として L^2 換算を用いることが多い．さらに，精密な解析を行って α を求めて L^{α} 換算値を利用することもある．また目的によっては全長そのものである L 換算値を利用する場合もある．これらの換算によって結果は大幅に異なり，船舶の速力差や操船性能の差までを考慮すると，計画の目的に応じて実用に適った交通容量をその度ごとに定義することも多い．

ここでは水路の特性を生かして，交通容量を，実隻数や換算隻数で与えずに，水路進入が可能である継続した時間幅で定義する．すなわち，その時間幅の長さをもって交通容量と等価な量とし，以下，この量を水路の交通容量等価時間と呼ぶ．具体的には，水路の容量が，例えば，交通容量等価時間で2時間と与えられたとき，それを実際の

交通量に換算するには，対象船舶が最小必要船間時間20分の大型船のときには,与えられた交通容量等価時間2時間を，大型船の必要最小船間時間20分で除して，2×60/20＝6隻とするのである．

より一般的に，大小船舶が混在している場合には，この水路を利用する船舶の船型の分布と船型に応じた最小必要船間時間から，各々の船舶に必要な最小船間時間の隻数荷重つき平均値を求め，交通容量等価時間をその値で除すると平均的隻数が求まる．若干の操作を施して各々の船舶の実隻数に変換して,実際の交通容量を求める.例えば，上の大型船に加えて,最小必要船間時間が10分の中型船と5分の小型船が混在する水路で，大型・中型・小型船舶の隻数比が，1:3:2であるときは，

$$2\times 60/((1x20+3\times 10+2\times 5)/(1+3+2))= 12$$

により，この水路の交通容量が12隻と求められ，この12隻の船型別内訳は，1:3:2であるから，大型船2隻，中型船6隻，小型船4隻である．

以上の操作によって，大小船舶の混在する海上交通における容量決定の困難さは，容量を求める時点ではなく,個々の計画がたてられて船種･船型分布が具体的に決った時点に移行させることが可能となり，一般的に水路交通計画案の各代替案の比較検討の時点では，個々の船舶に関する情報を必要としないから，作業を著しく容易とする．複雑極まる速力差の問題にしても，その時間幅の中で個々の検討を別途行えばよい．

実際に，水路計画を策定するには，通過船舶に関する情報，水路に関する経済・社会条件および自然条件をも考慮せねばならず，当然それらは個々の水路ごとに異なることから，可能な限り交通容量と分離して検討することが賢明であり，本論は，その線に沿って展開する．

4.3　交通容量に関する解析

4.3.1　概説

本節では，片道通航水路の交通容量を，与えられた交通方式ごとに，**4.2** で定義した交通容量等価時間のかたちで求める．片道通航水路は，水路の距離を縦軸に，経過時間を横軸とし，**図 1～図 5**，次節の**図 7** のように時空グラフで表示する．図の上方を北方向とし，下方を南方向として，運河南端を原点Oとし,距離はOから北方へ正とする．水路の全長をDとし，運河の全区間を(O，D)で，途中の地点をD_1，D_2，D_3，… で表わす．

交通容量等価時間は，**4.2** で定義したように水路利用可能時間幅であるが，水路利用可能時刻は水路入口からの距離に応じて刻々と変り,従って,水路利用可能時間幅は時刻の経過とともに，水路の各地点を移動する．北航のこの速力をVn，南航の速力を Vs で表わす．また，ここで述べる通航方式は，北航，南航が交互に水路を利用する方式であることから，同じ状態が出現するまでの時間をコントロールの周期と呼び記号Cで表わす．

求めるべき交通容量と同値である交通容量等価時間は，北航，南航で異なっても構わないが，一般的には両者は往復の関係にあることから等しいとして，Tと記す．北航と南航の平均交通量が等しくない場合には，北航Tに対して南航をαTとして同様の方法を用いることができるから差支えない．また，一周期の内でも比率αが時刻tとともに変る場合，すなわち，αがα_tの型で与えられてもα_tが既知ならば,以下の方法が適用可能である．以下，**4.3.2** から **4.3.6** で各種交通方式における最大交通容量を，交通容量等価時間のかたちで求める．

4.3.2　交互交通方式

片道通航水路における通航方法の内,ここでは,片道通航水路を二つの方向が同一の一定時間Tだけ利用し，それが周期Cで繰り返される場合を考える．この場合は，横軸に時間，縦軸に距離をとると,水路利用可能時間幅の移勁は**図 1** で示され,単純な幾何学を利用して

$$T\leqq(C-D\times(1/Vn\ +\ 1/Vs))/2 \qquad (1)$$

が成立することがわかる．従って，最大交通容量等価時間 Tmax は上式の等号成立のときである．

$$Tmax=(C-D\times(1/Vn+1/Vs))/2 \qquad (2)$$

式(2)から,周期Cを大きくすると交通容量は増大し，また Vn，Vs を大きくすると，すなわち，スピードを上げると容量は大きくなり，水路延長Dが長くなると容量は小さくなることがわかる．

とくに，

$$C\leqq D\times(1/Vn+1/Vs) \qquad (3)$$

となると交通容量は0となり，通航不能に陥る．

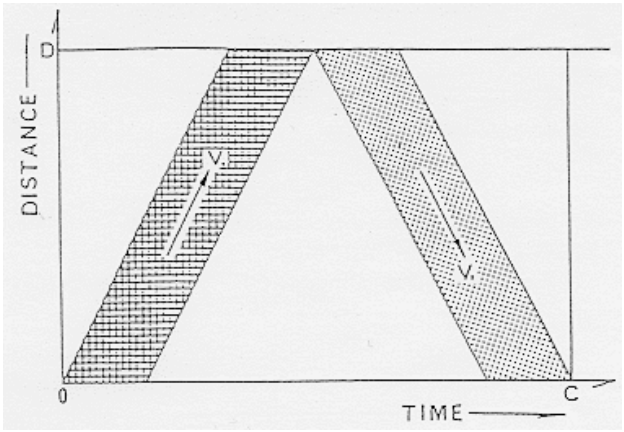


図 1　交互交通方式

4.3.3 中間すれちがい方式

この方式は，**4.3.2** で交通容量が頭打ちになった場合に，それを打開して容量増加を図るために，水路の途中の区間(D_1，D_2)間を往復水路として，そこで各々の方向の船舶をすれ違わせる方法で，観光地の登山電車に見られる方式である．

この場合は，**図２**に示されるように，D_1 上で両方向の時間幅 T が等しいとおくことにより，

$$T=(D_2-D_1)\times(1/Vn+1/Vs)/2 \qquad (4)$$

が 1 周期の交通容量 Tmax として得られる．

このとき，周期 C は

$D-D_1 \geqq D_2$ のとき

$$C \geqq (D-D_1)\times(1/Vn+1/Vs) \qquad (5)$$

$D-D_1 < D_2$ のとき

$$C \geqq D_2-(1/Vn+1/Vs) \qquad (6)$$

を満たさねばならず，C が両不等式を満たさないときは T=0 である．

往復水路区間の長さ D_2-D_1 が長いほどまた速力が早いほど容量は増加することがわかる．周期 C は短いほど単位時間あたりの容量は増加する．しかし，C は式(5)，(6)に示す条件によって，ある値以上は小さくとれないから，上の不等式の等号成立のときに単位時間当たりの交通容量は最大となる．

複線区間 D_2-D_1 を一定値としてその始点 D_1 と終点 D_2 の位置は，水路の中央に近い方が交通容量の点からは望ましいことが容易に導かれる．往復区間を水路の中間にとらずに端に設けて，すなわち，$D_2=D$ とし，周期 C を上の不等式で等号成立のときの値にとると，**4.3.2** の結果と一致する．

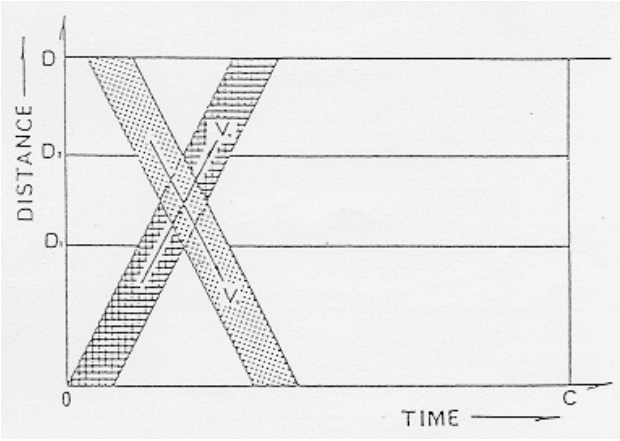


図２　中間すれ違い方式

4.3.4 中間待機方式

水路の中間部に往復水路を設けて，そこで両方向の船舶を行き合わせる **4.3.3** の方法では，最大交通容量を与える周期 C は水路長 D に依存することから端数を生じ実用的ではない．また，容量増に関しても 4.3.6 で考察するように大幅な増加は望めない．そこで，行き合い可能な往復部分を改良して往復部分に待機機能をもたせて，容量増を図る方式が考えられる．

この場合，行き合いおよび待機の場所は **4.3.3** と同様に(D_1，D_2)の区間とする．行き合いや待機方法はさまざまな型が考えられ，**図３**にどちらの方向の船舶も相手側の船舶が一方交通水路を通過完了するまで待機する場合を，**図４**に南航船は待機しないで，北航船のみが往復部で待機し，南航船が(D_2, D)間を通航し終ってはじめて待機解除となり航行開始する場合を示す．

この場合の容量 Tmax を求めると，**図 3**，**図 4** のバターンはともに等しくなる．すなわち，

$$T \leqq (C-D')\times(1/Vn+1/Vs))/2 \qquad (7)$$

が導かれる．Tmax は等号成立のときで，D'は D_1 と($D-D_2$)の大なる方である．

式(7)で D'の係数は負であるから D'が小さいほど，すなわち，待機部分が長いほど容量が大きくなることがわかる．また，式(7)から，待機部分が中央に位置するほど，また速力が速いほど，交通容量が大になることがわかる．

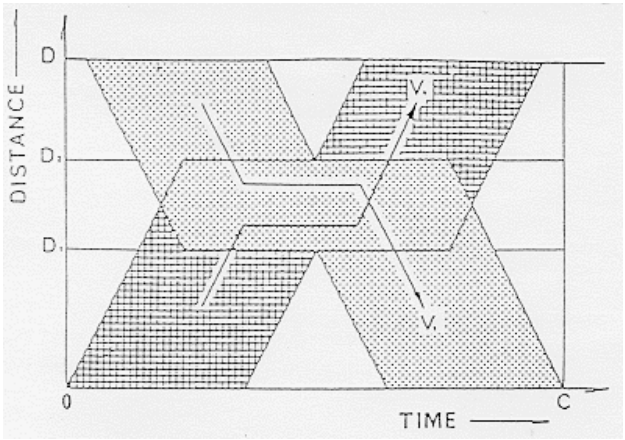


図３　中間待機方式(その 1)

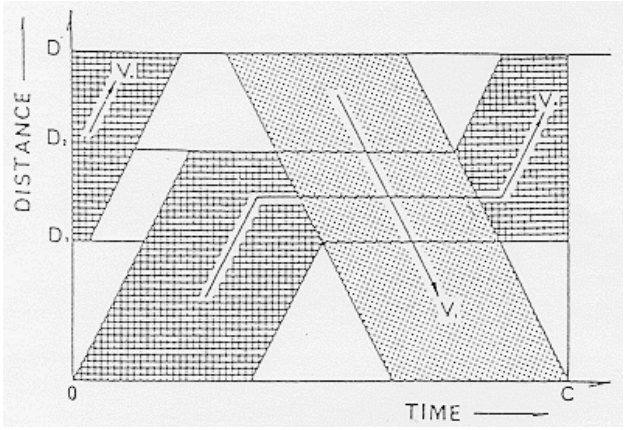


図４　中間待機方式(その 2)

4.3.5　一方向二待機方式(スエズ週河現状航行パターン)

これは，待機場所が(D_1，D_2)のほかにもう 1 ヶ所(D_3，D_4)にもある場合で，南航船はノンストップで水路を通過し，北航船は 2 船団に分けて水路に進入し，第 1 船団は途中(D_3，D_4)で待機し，第 2 船団は途中(D_1，D_2)で待機する方法である．南北を逆にするとスエズ運河の航行方式である．この場合の最大交通容量 Tmax は，北航第 1 船団及び第二船団の時間幅を各々T_1，T_2 とし，$T_1+T_2=T$ の下で関係式を求めると

$$T \leqq (2C-(D+D_3-D_2)\times(1/Vn+1/Vs))/3 \qquad (8)$$

または

$$T \leqq (C-D_1\times(1/Vn+1/Vs))/2 \qquad (9)$$

が成立し，従って Tmax は，(8)，(9)式の右辺の値の小なる方である．

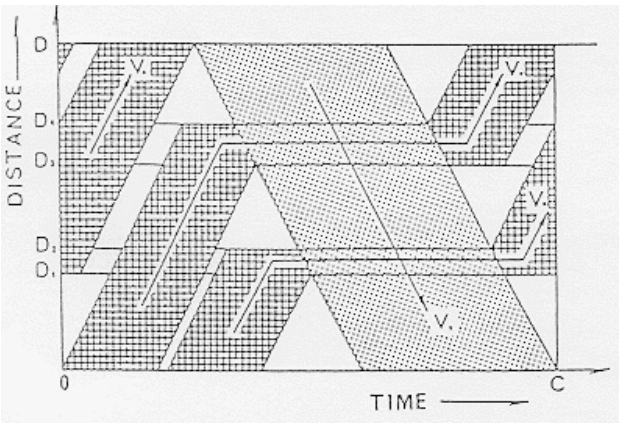


図５　一方向 2 待機方式(スエズ運河)

4.3.6　各代替案における容量の比較

ここでは，**4.3.2**～**4.3.5** で述べた方式による水路容量等価時間を実際の片道通航水路であるスエズ運河に適用する．スエズ運河は，**図６**のように地中海側にある北端ポートサイドと紅海にある南端スエズ間を結ぶ全長が 162.4km の地中海とインド洋を結ぶ世界でも代表的な片道通航水路である．

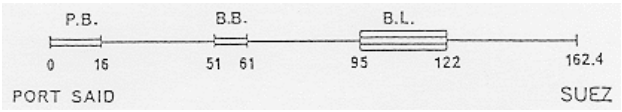


図６　ス エ ズ 運 河

スエズ運河は**図５**の航行形式をとり，地形的には**図６**のように，北端のポートサイドを 0km 地点として 16km 地点までは往復可能なポートサイドバイパス(P.B.)が完成している，そこから 51km 地点までは片道通航水路である．51km から 61km までの 10km の区間がバラバイパス(B.B.)で往復可能な水路である．現行では南航の第 2 船団が北航船団の通過を待つ待機水路として機能している．61km 地点から 95 地点までが，片道通航水路である．95km 地点から 122km 地点までがビター湖である．ここは旧約聖書の出エジプト記にあるモーゼとその民がエジプト兵に追われたときに海の水が分かれたという有名な場所である．この区間は往復交通が可能であるばかりでなく待機も可能な広大な湖であり，現状では南航第 1 船団が北航船団をかわす待機場所として利用されている．122km 地点から紅海側の出口である 162.4km 地点のスエズまでが片道通航水路となっている．この区間は，他の区間が砂漠の砂地盤であるのに対して，海底地盤が岩盤で硬く増深が困難な区間である．

運河内における船舶の航行速力は，遅い船でも約 15km/時であることが現実の観測から得られており，これは南航，北航とも同じである．

以上より，**4.3.2** の交互通航方式で交通容量を求めてみる．D＝162.4km としてすべてのバイパスはないものとするとコントロールのサイクル C を C＝24 として式(4)を用いて，

$$Tmax=(24-162.4\times 2/15)/2 = 1.173 \qquad (10)$$

時間である．

これをビター湖で行き合わせることにすると **4.3.3** の中間すれちがい方式で D=162.4，D_1=95，D_2 =122 として式(2)により，

$$T=(122-95)\times (2/15)/2=1.8 \qquad (11)$$

時間であり，この場合は周期 C を C=122×(2/15)＝16. 26 時間とするのが容量の上からは最も理想的であるから，一日あたりの交通容量は，

$$T= 1.8\times 24/16.26=2.56 \qquad (12)$$

時間と増加する．しかし，周期が 16.26 時間と端数であるから，現実的には不便である．交互通航方式，中間すれちがい方式は，スエズ運河の現状とはかけ離れており，ここでは計算例および他の方式との比較の対象として試算した．

4.3.4 および **4.3.5** の通航方式は，現実性を帯びてくるので，16km まで往復水路であるポートサイドバイパスを外して基点を 16km 地点へ移し，バラバイバスの始点，終点，ビター湖の始点，終点，および出口のスエズ地点の位置 51，61，95，122，162.4km から，各々16km を減じて 35，45，79，106，146.4km 地点とする．

現状の方式で D_1=35, D_2 =45, D_3＝79, D_4=146.4, C=24 として T を求めると，式(10)より

$$T=(2\times 24 -(146.4+79-45)\times 2/15)/3 =7.98 \qquad (13)$$

となる．南航は T_1,T_2 と 2 つに分かれるが，**4.3.5** の計算を行って，T_1＝5.484, T_2＝2.498 と求まる．

ここで，バラバイパスの貢献度をみるために

4.3.4 の方式でバラバイパスの部分を片道通航水路とみなし往復部はビター湖のみとして計算する．この場合には，D_1＝79，D_2＝106，D=146.4 として式(7)に代入して，

$$T=(24-79\times 2/15)/2=6.73 \quad (14)$$

時間となり，7.98－6.73＝1.25 時間貢献している．

現在，スエズ運河の拡張が検討きれているが，さらに 61km 地点と 9.5km地点の片道水路を拡幅して，中間すれちがい方式とすると，式(9)に D_1＝35，D_2＝106，D＝146.4 を代入して，

$$T=1/2(24-40.4\times(2/15))=9.306 \quad (15)$$

時間に増え，現状の約 1.17 倍となる．

さらに，16km 地点と 51km の区間をすべて往復化すると，D=40.4 として **4.3.2** の交互交通航行方式の適用となるから，式(1)より，9.306 時間となり容量が変わらない．したがって，この拡幅は，安全性の向上や操船の容易さ等，他の面での利点は生じても，交通容量の増加には効果はないことがわかる．全区間を両側交通とすると T＝24 だから一挙に上の値の 2.5 倍近くに増え，現状の容量と比較して，24/7.98～3 だから，3 倍の交通容量になることがわかる．

4.4 パナマ運河の航行容量

4.4.1 概説

前節で長大運河の航行容量をスエズ運河に例をとって算定した．この手法のパナマ運河への適用を以下に述べる．

パナマ運河は，ニューヨーク-サンフランシスコ間を 15,000km 短縮した太平洋と大西洋を結ぶ運河である．スエズ運河と異なり航行する船舶は約 30m の高さの山を越えねばならない．そのため，昇りに 3 基，降りるのに 3 基，合計 6 基のロック(lock＝閘門)を設けている．ロックとは，水面に高低差のある場所で，水面を昇降させて船を行き来させるための装置である．船をロックに入れてから前後の扉を仕切って，昇るときは注水して船を上昇させ，降りるときは排水して船を下降させて，ロックを出た直後の水位と合わせてから進行方向の扉を開けて船を進ませる．こうして水面の高低差を克服している．上昇と下降のロックの間には広大な人造湖ガツン湖，岩盤で工事が難航したクレブラ水路があり，船舶がパナマ運河を 1 回通航するとガツン湖の水位が数 cm 下がる．ロックを利用するたびに夥しい量の水を使用することから，運河周辺には雨水を貯めておくために数多くの人造湖が建設されている．熱帯地方にあるパナマ地峡の年間 3,000mm を越す降水量をもたらす熱帯雨が頼りの運河である．

ロックの長さと幅と深さから決まるパナマ運河通航可能な最大船型をパナマックスと呼ぶ．船の全長が 294.13m，全幅が 32.13m，喫水が 12.14m クラスの船を指す．

スエズ運河の航行方法と異なる 2 番目の点は，パナマ運河は一部巨大船を除いて両側通航である点である．パナマ運河を航行する船舶のうち，船幅が 28.5m 以下の船舶は運河内のどこの部分においても，両側交通であり，24 時間往復航行が可能である。船幅が 28.5m 越える船舶は，クレブラ水路部分では往復航行が禁止されているばかりか，昼間のみしか航行できない．このように，巨大船を除いて往復航行が可能なこと，巨大船は一部一方通行になる上，夜間航行が禁止されているので，交通容量(交通容量等価時間)の算定に当たっては前節の方法に若干の工夫を加える必要がある．本節ではそれらを考慮して,現状のパナマ運河の航行容量をフリートミックス(船種・船型の混在)で算定する。

4.4.2 現状のパナマ運河航行

パナマ運河の長さは正式には 83.43km であり，大西洋から入る船はガツンロックまで 12km 航行し，ガツンロックにある 3 基のロックでガツン湖の水位まで 26m 上昇する．ガツンロックの全長はアプローチ部を含めて 2.2km ある．ロックを出ると水位が最高 30m に達するガツン湖が広がり，水路幅が他より狭いクレブラ水路まで，43.5km 航行する．長さ 14.8km のクレブラ水路は岩盤で工事が難航した箇所で水路幅が他よりも狭いことから船幅が 28.5m を超える巨大船は一方通行を義務つけられ他船との行き合いはできない．さらに夜間航行も禁止される．クレブラ水路は，この難工事を完遂させたゲイラード大佐に因んでゲイラード水路とも呼ばれる．クレブラ水路を出ると長さが 1.2km で 1 段のペドロミゲルロックで水位が約 9.4m 下げられ，2 段ロックで長さが 1.9km のミラフロアロックで太平洋の水位に下げられる．

各々のロックにおけるゲートの開閉に要する時間は約 2 分,注排水には 6 分かかるが,船舶がロックを通過する時間は,船舶の大きさによって異なり,パナマ運河委員会(PCC)では,14 船型分類でロックごとに設定している．**表 1** は，本研究で採用した 3 船型分類の値である．クレブラ水路で行

表 1 船型別平均ロック通過時間(分)

	船 幅	ミラフロア	ペドロミゲル	ガツン
船型Ⅰ	95フィート～	80	55	100
船型Ⅱ	～95フィート	50	40	70
船型Ⅲ	タンデム	50	40	70

き合わせない船幅 95 フィートを超える船を船型Ⅰ，それ以下の船でロックを 1 隻で使用する船を船型Ⅱ，ロックを同時に複数隻(TANDEM)で利用する船を船型Ⅲとした．なお**表 1** は,ロックの能力ではなく PCC の管理表である。

4.4.3　方向別の利用可能時間幅の求め方

パナマ運河ではロック通過時間で交通容量が決まる．また，クレブラ水路における巨大船の一方通航と夜間航行禁止で交通容量が制限されるので，この 2 側面からの容量の検討が必要である．

1)　ロック通過時間による交通容量

どのロックも往復可能で 24 時間稼動できるから，制限はロック通過時間である．**表 1** でミラフロアは 2 段，ペドロミゲルは 1 段，ガツンは 3 段ロックであることから，ペドロミゲルロックがボトルネックであることがわかる．したがって，1 船型だけの場合は，一方向の交通容量として船型Ⅰが 1440/55=26 隻，船型Ⅱ，Ⅲが 1440/40=36 隻であることがわかる．ただし，船型ⅢはTANDEM であり,1 回に平均 2.2 隻通過するので 36×2.2=79 隻である．船型が混在しているときは船型の隻数比で配分して，交通容量が実隻数で求められる．

2)　クレブラ水路の交通容量の算定

クレブラ水路では，船型Ⅱ，Ⅲの行き合いは可能であるが，船型Ⅰと船型Ⅰ，Ⅱ，Ⅲとの行き合いは禁止されている．さらに船型Ⅰのクレブラ水路の航行は昼間の時間帯に限られる．

このような場合には，行き合いを許さない船型Ⅰの通航可能時間幅 T_1と，行き合い可能な船舶の通航可能時間幅 T_2の 2 つの時間幅を求めてから，船間時間間隔を考慮して船舶隻数を求める．

交通容量を算定するために必要な情報は，行き合い不可能な水路長 D，船型Ⅰ，Ⅱ，Ⅲの隻数構成比 $r_1:r_2:r_3$，船型Ⅰ，Ⅱ，Ⅲの保安距離とも言うべき必要前方船間時間隔 d_1，d_2，d_3，北航船の速力 Vn，南航船の速力 Vs，および交互交通の周期 C である．速力 Vn，Vs は，その方向で最も遅い船舶の速力をとる．

これらの諸量から，まず，船型Ⅰの通航可能時間幅 T_1 と船型Ⅱと船型Ⅲを合わせた通航可能時間幅 T_2の比率 a を $T_2=a\cdot T_1$ となるように求める．この a は，船型Ⅰと船型Ⅱと船型Ⅲの隻数構成比 $r_1:r_2:r_3$ と必要前方船間時間隔 d_1，d_2，d_3 から，T_1 と T_2 の比が$(r_1\times d_1) : (r_2\times d_2 + r_3\times d_3)$となるので，$a=((r_2\times d_2 + r_3\times d_3) / (r_1\times d_1)$で与えられる．

T_1 と T_2 の値を求めるために,船型Ⅰの通航可能時間幅を T と置くと，船型Ⅱと船型Ⅲを合わせた通航可能時間幅 S は，S=a・T で与えられる．

ここで，船型Ⅰの通航可能時間幅 T は，対航する船型Ⅰ,Ⅱ,Ⅲの船舶と行き合うことはできないので，船型Ⅰの船舶はまとめて船団（コンボイ）を組んで航行させること,すなわち，航行容量を増やすために,船型Ⅰの船舶をまとめて通過させる．現実的には，パナマ運河を利用する船舶は，到着順に利用させないで，船型Ⅰの船舶のみで，また船型Ⅱおよび船型Ⅲの船舶のみでコンボイを組んで通すようにする．

コンボイの順番は幾つかの組合せが考えられるが，**図 7** のように，北航船は行き合えない船(船型Ⅰ)だけで第 1 コンボイ (N_1)を組み，行き合える船(船型Ⅱと船型Ⅲ)で第 2 コンボイ (N_2)を組む．反航する南航船については，行き合える船のみで第 1 コンボイ (S_1)を組み，行き合えない船だけで第 2 コンボイ (S_2)を組むときが容量最大になる．

行き合えない船(船型Ⅰ)が水路を利用できる最大利用可能時間幅を Tmax として，行き合える船舶が水路を利用できる最大利用可能時間幅を Smax とする．このとき，Tmax と Smax の間には，既に述べたように Smax=a・Tmax の関係がある．

図 8 と船速 Vn，Vs，水路長 D，周期 C，比率 a および Tmax と Smax の関係式から，

$$Tmax = (C-D\times(1/Vn + 1/Vs)) / (a+2) \quad (16)$$

$$Smax=a\cdot Tmax \quad (17)$$

が容易に求められる．

現状のパナマ運河のクレブラ水路では大型船は昼間航行の条件があるので，**図 7** でコンボイ(N1)と(S2)は昼間の時間帯に限る．図からわかるように周期 C を一日周期, すなわち, 24 時間とすると，行き合い可能な船舶の最大利用可能時間幅(**図 7** の RU)が 12 時間よりも大きければ, 大型船の昼間航行が可能となる．大型船の昼間航行の条件を満たすためには，C=24 だから RU (＝QS)が 12 時間

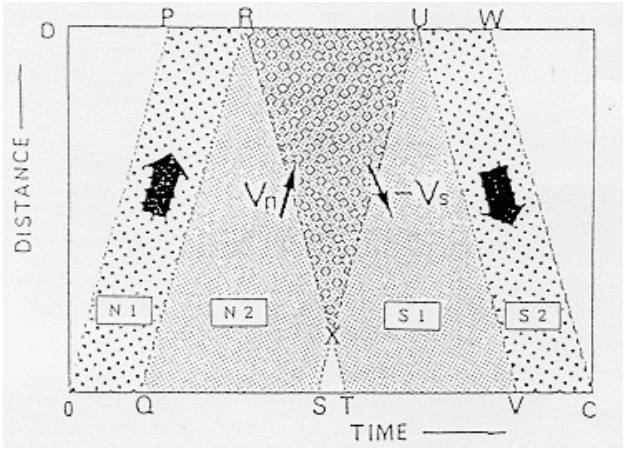


図 7　行き合い可能･不可能船混在時の航行方式

より大という条件を付加すればよい．

ここで a=0 とすると，当然ながら式(2)で与えられる**図 1** の最大航行時間幅の値 Tmax と一致する．

4.4.4 現状のパナマ運河の航行容量の算定

船舶は安全に航行するために，運河内では並航や追い越しをしないので，前方船とある程度の距離をとる．この距離は，パナマ運河航行船舶のデータが得られれば算出できるが，現在の時点では得られていないので，1 ロック当たりの閘門通過時間の最も大きいペドロミゲルロックの通過所要時間をもって前方必要船間時間隔とする．この値の最小値は，**表 1** では 40 分とあるが,これは船型を集約して平均を取ったからであり，比較的小型船で 30 分がある．スエズ運河の巨大タンカーでもたかだか 30 分であることから,船間時間としては安全サイドの値である．ロック通過時間の方が必要船間時間隔よりも大きいことがわかる．ただし，この場合，同一ロックでは同じ方向の船舶は 1 隻のみに限ることを前提としている．タンデム船は 40 分であるので，ロック内平均 2.2 隻を 3 隻と見ても船間時間は 40/3=13 分強で，水路内最低速度 6 ノットから最短船間距離は 6×1852×13/60＝2408m であり，TANDEM 船の全長 L は最長でも 150m(ロック長の半分)以下であるから前方船間距離は 16L あり，一般的に安全といわれている 8L よりも十分過ぎるほど余裕がある．

パナマ運河では，船舶の速力を運河の各地点における通過時刻の記録から求めることは難しい．明らかに停泊していたとしか思えない値が見られるからである．これは広大なガツン湖でクレブラ水路へ入るためにコンボイを組むための待機，あるいはクレブラ水路を出てガツン湖で停泊する船舶が多いことから生じる．

通航容量算定のために，最大利用可能時間幅 Tmax をまず求める．その際に必要な情報および今回の試算に用いた具体的数値を以下に列挙する．

(a)片道通航水路長　　D=12.9(クレブラ水路長)
(b)船舶の航行速力　　Vn=Vs=6knot=6･1.852km/H
(c)交互通航の周期　　C=24 時間
(d)船型区分　前出の船型Ⅰ，船型Ⅱ，船型Ⅲ
(e)最小船間時間隔　d
　船型Ⅰ　d_1=0.85 時間
　船型Ⅱ　d_2=0.75 時間
　船型Ⅲ　d_3=0.80 時間

船型Ⅲについては TANDEM で平均 2.2 隻の時間であることから実船間時間は 0.8/2.2=0.37 時間(約 21 分間)である．これらの船間時間は現実の最小船間時間よりも長く安全サイドの値である．

(f)船型別隻数構成比　$r_1:r_2:r_3$ =6:9:7

以上の値をもとに，1 方向の最大利用可能時間幅 Tmax および交通容量を算定する．

式(26)の a の値は，

$$a= (0.75･9+0.8･7/2.2)/(0.85･6)=1.31 \quad (18)$$

と求まるから，これらの値を式(16)に代入して，

$$Tmax=(24－2･12.9/(6･1.852))/(2+1･31)=5.67 \quad (19)$$

$$Smax=a･Tmax = 10.34 \quad (20)$$

が得られる．この場合，Smax=10.34<12 だから，船型Ⅰの船舶は夜間も通航することとなる．

このときの船型Ⅰ，Ⅱ，Ⅲに割り当てられる時間幅は，各々，5.67，7.50，2.83 時間である．これを船舶隻数に換算すると，船型Ⅰ，Ⅱ，Ⅲは，5.67/0.85=6.7 ，7.50/0.75=10，2.83/0.75･2.2=8.0 隻となる．すなわち，1 日当たり，24.7 隻が最大交通容量となり,両方向で 49.4 隻/日で,船型比が 6:7：9 とすると年間約 18,000 隻がパナマ運河の物理的な最大交通容量と算定される．

以上の計算は,船型Ⅰの船舶のクレブラ水路の夜間航行を認めている．規則通りに夜間航行を認めないと，昼間の時間を 12 時間として計算し，船型Ⅰは片方向で(12－10.34)/2＝0.83 時間だけ夜間に通航していることがわかるから，その分 1 隻分を両方向から差し引いて約 17,300 隻が年間交通量として求められる．

4.5 待ちに関する解析

4.5.1 概説

前節までに，方向別の進入可能時間帯を設けて与えられた制限のもとでその時間幅の最大化を論じた．ここでは，進入待ちについて論じる．

片道通航水路における待ちの問題には，2 種類の待ちがある．第 1 種の待ちは，通航方式に起因するもので，その方式を採用する限り不可避な進入可能となるまでの待機のための待時間であり，簡単な算術で容易に求められる．

第 2 種の待ちは，到着した船舶が多過ぎて進入可能となる時間帯には進入しきれずに，次の進入可能時間まで待たされる待ちであり，片道通航水路がさばける交通容量を超えて船舶が到着する時に生ずる待ちである．

ここでは，第 2 種の待ちを求める．

4,5.2 片道通航水路の待ち合わせモデル

待ち合わせ理論は，交通容量に制限のある交通処理施設に交通量の負荷をかけたときに，交通混雑に関する情報をあらかじめ知るために利用される．待ち合わせ理論によると，交通量が交通容量に近づくにつれて待ちが指数的に増加しその系は機能を失うことが知られている．したがって，**3**

～4 で各交通方式に対して交通容量が求められたが，平均交通量が交通容量を上まわらないというだけで現実の交通量をスムーズにさばけるかは全く別の問題で,交通混雑の検討を行う必要がある．そのために,以下の待ち合わせモデルを開発した．

まず，片道通航水路は 3～4 で述べた通航形式をとることとする．この場合容量制限による待ちの考察は，片道であるとか水路であるとかの問題ではなく，ある周期をもって利用可能時間と利用不可能時間とが交互に生ずる窓口が一つあって，そこに 1 人当たりのサービス時間が異なる客が到着してサービスを受けて立ち去るという型の待ち合わせのシステムの輻輳問題となる．ここで，船が客にあたり，客によって異なるサービス時間とはその船の前後に考えられる保安のための船間時間隔であり，船に与えるサービスとは運河の進入可能時間である．したがって，両方向を同時に考察する必要はなく一方向のみのモデルを作成し，それを各々の方向に適用すればよい．以上により次のような待ち合わせモデルを開発した．

i)片道通航水路は 周期 C で，T 時間だけ進入可能な時間帯があり，その時間帯にのみ船舶は水路へ進入可能である．

ii)進入可能な時間帯に進入しようとする船舶は，遅くとも進入可能な時間帯の以前の時刻に到着していなければならない．進入可能な時間帯内に到着した船はその時間帯には進入できないこととし，その船は次のサイクル以降の進入時間帯に進入する．

iii)到着する船舶はランダム到着とする．

iv)到着する船舶は，船間間隔をとって水路内を航行する．船間間隔は，距離間隔ではなく，時間隔で表わし，ある確率分布に従う．

上で述べた i)～iv)のうち ii)はスエズ運河，パナマ運河で進入数時間前の到着を義務づけている．数学的に iii)と iv)を表現すると，水路への船舶の到着分布はランダムであることから，単位時間あたりの到着数はボアソン分布であり，到着船に伴う船間時間隔の到着は複合ポアソン分布である．

ここで，以下に解析の手順を簡潔に記す．

①到着船はランダムに到着し，各々の船は時間長という特性を持つ．

②時間長はある確率分布に従う．

③到着を船でなく時間長が到着すると考えると，時間長はポアソン分布と②の時間長分布で決まる複合ポアソン分布に従う．

④到着した時間長の総和は，周期的に一定時間長だけサービスを受ける。この一定時間長を超える時間長は次のサービス開始まで待つ。この一定時間長とは水路利用可能時間の長さである．

⑤以上の待ち合わせ問題の定常状態確率を求める。

⑥事故等で水路が使用不能になった時の復旧時間を知るために,与えられた初期状態のもとで任意の時刻における遷移状態確率を求める。

精密な数式の展開は参考文献[5]に譲ることとして，ここでは上の手順について具体的に解析手法を述べる．なお，その船が必要とする船間時間隔の長さを当量とよぶ．周期 C は 1 日とした．

①水路進入開始時刻から翌日の進入開始時刻までの間に水路に到着する総当量が k 分である確率を求める（k=0,1,2,…,N）．これは船間時間の分布に従う船舶がランダムに到着するから複合ポアソン分布として求まる．N は本来∞まで取り得るが,確率が非常に小さくなる N で止める．

②上で求めた 1 日間に到着する所要船間時間の総和 i から水路利用可能時間 T を減じた値を j とする．ただし，j<0 のときは j=0 とする．

③前の日に i の当量，その次の日に j の当量である確率 p_{ij} を,①,②を用いて求めて(i,j=1,2,…,N)行列 $P=[p_{ij}]$を作る．ここで，当量は水路が利用可能となって最大 T の当量が水路に進入した直後の時点で計る．そのサイクルで進入できなかった残存当量を計る．p_{ij} は水路が前日の状態 i から当日の状態 j へ変わる推移状態確率であり，P は i-j 要素が p_{ij} である推移確率行列である．

④Lim P^n を求める．ここで Lim は n→∞である．

実際には，n を十分大に取ると，この行列の列ベクトルはすべて等しくなること($p_{ij}\rightarrow p_j$)を利用して等しくなった時点で止める．ここで求まった p_j は $\Sigma p_j=1$ を満たし(Σ は j=1 から N までの総和)，水路が利用開始されて十分に日数が経過したときの定常状態確率である．

以上から理解されるように，このモデルは，到着が複合ポアソン分布で，サービスが周期 C のバルクサービス(1 回の処理量が T)の窓口 1 の待ち合わせモデルであり，水路利用開始時直後の残存数がマルコフチェインである隠れマルコフチェインである．

さらに，遷移状態確率を求めるには，初期条件として初日に k 当量あるとして，n 日後の残存当量の遷移状態確率分布は，N 次元確率横ベクトルとして r_n で表わすと，

$$r_n=r_0P^n \tag{21}$$

で求められる．ここで，r_0 は初日の残存当量を表わす横ベクトルで，k 番目のみが 1 で他は 0 の N 次元横ベクトル

$$r_0=(0,0,\cdots,0,1,0,\cdots,0) \quad (22)$$

である．

これによって,事故等で水路が 2 日閉鎖されたときの残存当量が k あったときに何日かかったら平常時の状態に戻るかをあらかじめ予測することが可能となる．

スエズ運河の例では 30 万トンの空船タンカーの交通料は約 20 万米ドルにも及ぶことから運河の閉鎖は運河収入が激減することから，スエズ運河庁では万全を尽くして事故処理を行う．現実の事故対策は推移行列 P の要素を変えることにつながり,どの対策が復旧に効果的かの検討が可能となる．具体的な対応策は，T を大きくするか，T を変えずに必要船間時間を短くすることになる．タグボートでそれを達成するか，休み中のパイロットを緊急に応召するか等，経費と効果を勘案して検討が可能になる．

4.5.3 スエズ運河への適用例

ここでは前項で開発したモデルをスエズ運河に適用する．ここで扱うデータは，**3** の最後の部分で紹介したスエズ運河庁への経営部門の設立調査で，現地で研修教材として扱った資料である．

1979 年 1 年間のスエズ運河の交通量は**表 2** であり，1 日あたりの交通量に変換すると，北航 28.9 隻/日，南航 26.9 隻/日で両方向で両方向合計して 55.8 隻/日である．また，到着分布は，数多くの調査からボアソン到着と見なすことができた．

必要船間時間隔は，1979 年 8 月の約 2 週間の調査より**表 3** が得られた．この表で，30 分以上の船間距離であった船舶については，必要船間時間ではなく，何か別の理由によるとして除外し，船間時間分布を作成した．満載の V.L.C.C.で 24 分，空荷で 17 分という最小船間時間隔に照らしてみても妥当であるといえよう。この平均値と分散は，**表 4** から北航で 9.22，35.96，南航で 12.17 ，26.36 である (30 分以上を除く).

現状のスエズ運河の最大交通容量等価時間 T は，**4.3.7** の(13)で求めたように 7.98 時間である．航行の方向が北航から南航あるいは南航から北航と逆転するときに安全性を見込んで余裕時間を 0.98 時間とり，7 時間として以後の計算を行う．

T=7 時間=420 分の場合に，南航・北航の船間時間分布を**表 5** とすると，北航で最大隻数は平均 420/9.70=43.3 隻であり，南航では 420/12.17=34.5 隻である．既に述べたように，交通容量と等しい交通量までは通過可能であるが，現実的には交通容量に近づくと待ちが増えて航行不可能となることから,**表 2** に示される 1979 年交通量の北航 28.9

表 2 スエズ運河交通量

	To North	To South	Total
Jan.	873	830	1703
Feb.	748	780	1528
Mar.	977	821	1798
Apr.	870	835	1705
May	908	865	1773
June	852	812	1664
July	897	830	1727
Aug.	923	749	1672
Sep.	861	762	1623
Oct.	907	816	1723
Nov.	836	832	1668
Dec.	903	876	1779
Total	10555	9808	20363
Ships/Day	28.92	26.87	55.79

表 3 船 間 時 間

X	Number of Ships	
	To North	To South
1	0	0
2	3	1
3	5	0
4	13	2
5	55	3
6	57	35
7	43	3
8	40	5
9	27	11
10	47	230
11	25	0
12	13	6
13	14	3
14	11	1
15	11	49
16	12	3
17	6	0
18	7	0
19	6	1
20	4	42
21	2	1
22	3	0
23	4	0
24	1	1
25	3	17
26	1	0
27	1	0
28	4	0
29	1	0
30	0	6
30<	36	25
Total	455	445

表 4 船間時間の統計量

STATISTICS OF X		
	To North	To South
N	419	420
ΣX	3863	5112
ΣX^2	50263	73292
$\bar{X}=\Sigma X/N$	9.22	12.17
$VAR(X)=\Sigma X^2/N-\bar{X}^2$	34.96	26.36
$\sigma=\sqrt{VAR(X)}$	5.91	5.13

隻/日，南航 26.9 隻/日を勘案して，北航については 1 日平均交通量 E (N)を 28 隻から 40 隻まで 2 隻おきに 7 ケース，南航については 1 日平均交通量 E (S)を 25 隻から 32 隻まで 2 隻おきに 4 ケース，南北航合計 11 ケースで待ちの計算を行った．

まず，到着船舶の船間時間隔 X の分布は**表３**で，X の統計量は**表４**である．1 周期内で船舶は平均 E(N)のボアソン分布で到着することから，1 周期内での必要総船間時間を L とすると L の到着分布は，平均 E(L)および分散 V(L)が

$$E(L)=E(N)\times E(X) \qquad (23)$$

$$V(L)=E(N)\times V(X)+V(N)\times E^2(X) \qquad (24)$$

の複合ボアソン分布である．標準偏差は分散の平方根であることから，これらの統計量を 11 ケースについて**表 5** にまとめる．

表 5　計算ケース

To North

E(N)	V(N)	E(X)	V(X)	E(L)	V(L)	σ(L)
28	28	9.70	25.93	271.6	3360.56	57.97
30	30	9.70	25.93	291.0	3600.60	60.00
32	32	9.70	25.93	310.4	3840.64	61.97
34	34	9.70	25.93	329.8	4080.68	63.88
36	36	9.70	25.93	349.2	4320.72	65.73
38	38	9.70	25.93	368.6	4560.76	67.53
40	40	9.70	25.93	388.0	4800.80	69.29

To South

E(N)	V(N)	E(X)	V(X)	E(L)	V(L)	σ(L)
26	26	12.17	26.36	316.42	4536.19	67.35
28	28	12.17	26.36	340.76	4885.13	69.89
30	30	12.17	26.36	365.10	5234.07	72.35
32	32	12.17	26.36	389.44	5583.00	74.72

この複合ボアソン分布はいずれも平均値が 4 倍の標準偏差より大であるから，平均 E(L)，分散 V(L)の正規分布で近似でき，1 周期内に到着する総必要船間距離が k 分である確率 p_k が計算され，それを用いて推移確率行列 Pij が定まる.この推移確率行列 Pij を用いて定常状態確率$\{r_k\}$が求まり，これは運河へ入航する制限時間内に船舶が到着していながら，そのときに客量オーバーで入航できなかった船舶が，運河内を航行するときの総所要船間時間 W が k 分である確率である．

W の平均値 E(W),分散 V(W)は

$$E(W)=\Sigma k\cdot r_k \qquad (25)$$

$$V(W)=\Sigma k^2\cdot r_k-E(W)^2 \qquad (26)$$

で得られる．記号Σは k=0 から∞間での和である．

各ケースごとの状態確率の累積分布すなわち k 分以内の確率

$$\{\Sigma\ r_k\}\quad (k = 1,2,3,\cdots) \qquad (27)$$

を計算して，k を分から時間に直して，図示すると，北航については**図８**に，南航については**図９**となる．

水路の客量は 7 時間としたので，**図８**，**図９**より，待たされた船舶は南航で E(N)=32 のケースを除くと，次の周期で運河を通航できることがわかり，南航 E(N)=32 のケースでは確率約 0.01 で翌々日まで待たされることがわかる．

E(N)の値いくらをもって，拡張計画を行うかは**図８**，**図９**より，待機泊地の規模，運河入口までの航行条件等の自然条件，滞船による船舶側の必要経費と混雑によってスエズ運河通航を避けるといった経済的条件，混雑による安全性の条件等によって計画者がその他の特殊事情も勘案して決定すべきことである．

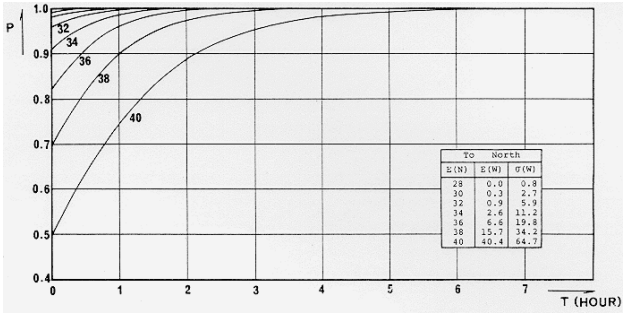


図８　待ちの状態確率累積分布(北航)

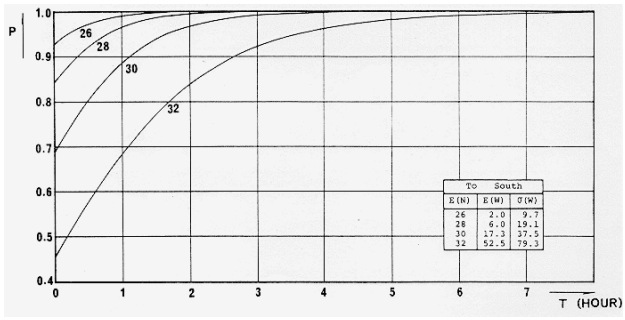


図９　待ちの状態確率累積分布(南航)

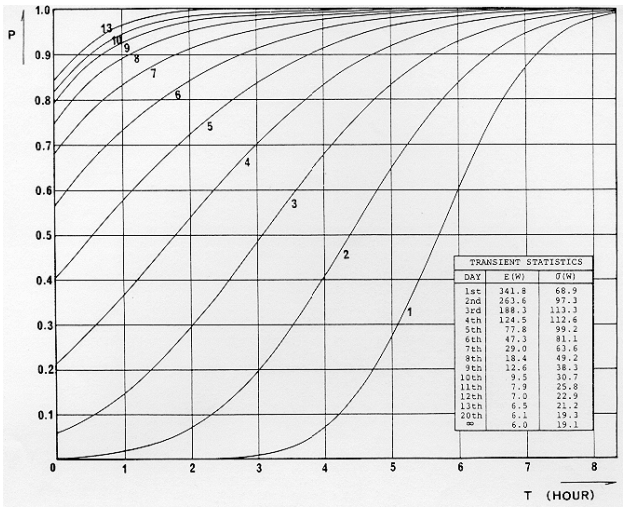


図 10　待ちの遷移状態確率累積分布

以上で定常解は求まるが，式(21)からわかるように，初期確率 r_0 を与えさえすれば，r_n は次々に求まるので，事故やその他のトラブルで一時的に運河が利用不可能となり，多くの船が待っている状態から，運河利用が再開されて待ち船が次々に運河へ進航していくときの一日毎の待ち船の総必要船間時間分布(遷移確率分布)が得られる．

ここでは，その例として南航で E(N)=28 隻のときに初期の待ち船の総必要船間時間を 2×T すなわち 840 分としたときの一日毎の制限時間直後の待ち船の総必要船間時間の累積確率分布を求め，**図 10** に示した．

図 10 によると，13 日目に定常解とほぼ重なり，平均すると 13 日ぐらいで，何か特別な対応策をとらない限りトラブルの影響はなくなると考えてよい．**図 10** より 4 日後には 20%以上の確率で待ちが 0 になることが示されていることから，5 回に 1 回は，4 日後に平常に戻ると考えてよい．また，この図より平常に戻るのが遅いと思われるときには，その期間については船間時間隔を平常より少くするといった能力を向上させる方策をとって，短縮させることが考えられるが，その場合の遷移状態確率も，パラメーターC，T，Vn，Vs，E (X)，V(X)を変えることによって求められる．

4.5.4 まとめ

片道通航水路は，日本のみならず全世界に見られ.往復にこしたことはないのだがさまざまな制約条件から片道として計画せざるを得ないのもまた現実である．したがって，本論では，片道通航水路の最大容量を，両方向から来る船舶が時間をわけあって利用せざるを得ない事実に着目して水路利用可能最大時間をもって容量等価の量として交通容量等価時間を導入し，水路ごとに異なる利用船型に関する煩わしさを一掃し,容量についてはすっきりまとまったと思われる．

なお．**3**，**4** は,日本政府がエジプト国のスエズ運河第 2 期拡張計画の協力を行った際に，またパナマ国にパナマ運河の交通容量の検討の際に使用した手法であり，**5** は交通容量に待時間の理論を付加したものである．

以上より，以下の点が結論的に言える．

(1)ここで提案した水路の容量に見合う交通容量等価時間の概念は，非常に有効に働くことが確認された．これによって片道通航水路の容量問題に関しては比較的一般的に論ぜられるようになった．

(2)片道通航水路の容量が,水路の諸条件により求める計算式が開発された

(3)交通容量問題からスエズ運河の拡張計画をみると，全区間を拡張し往復通航水路 にした場合，交通容量は現状の 3 倍まで増加することが(2)により計算される．

(4)パナマ運河の容量を決定するのは，現時点においては，ロック通過時間と巨大船の往復航行を許さないクレブラカットにあることがわかり，その影響の度合いも数量的に把握することが可能となった．

(5)運河の航行方式によって異なる船舶の入航待ちを評価する手法を確立した．

５．その他の研究

鳥取大学における全国大学トップ 10 の研究として，水路の計画に関する研究の概要を，主として長大水路の容量に関して紹介した．本研究は運輸省時代に完全な体系がほぼ完成し，鳥取大学でそれを補完した．当地においては，重要港湾として境港と鳥取港があるが，大規模プロジェクトを対象とする水路計画の研究は馴染み難く，簡便シミュレータを開発し，鳥取港入港の際の危険回避に関する研究を実施したのみである．水路計画の研究としては，「ミクロシミュレーションの開発」ですべてをモジュールで構成する取替え可能型シミュレータを開発した．これは，操船性能の理論は非常に精密なものから簡単なものまで数多くあることから，それらを開発能力・開発段階に応じて取り替え可能としたものである．他船の動向の確認や見張りもモジュール化されているので，完全情報を有するときや不完全なときに応じてモジュール化しさえすればその部分を取り替えればよい．また，船舶も時代の要請に応じて変わっていることから日本船舶明細書によって船種･船型等船舶に関する研究も継続的に行っている．船舶航行を引き起こす貨物の動向も，電子化された昭和 53 年以後のすべての港湾統計を保管し，内貿，外貿貨物統計から海上貨物の分析をするとともに簡便な図表･グラフ作成システムも開発した．併せて，関西国際空港第 2 期計画，神戸新空港整備計画，中部国際空港整備計画，関門海峡整備計画，東京湾ハイウエイ構想調査などに参画した．これはシミュレーションや交通データ解析システムがその後も頻繁に利用されていたからである．しかし，陸上交通のコンサルタントが無数にあるのと比較して皆無であった海上交通のコンサルタント業界に，日本郵船グループの株式会社「日本海洋科学」，商船三井グループの株式会社「エム･オー･マリンコンサルティング」が大資本をバックに乗り出して

きて私が開発したシミュレーションや海上交通観測解析が改良・機能付加されて大々的に実施されるようになった．高度経済成長をバックに発展を続けていた私の研究も後継されたといえよう．

以上，水路計画に関する研究を主に述べてきたが，鳥取大学へ赴任してから実施してきた主な研究を以下に概説して本稿を終えたい．

鳥取へ来て強く感じたことは，空港もJR駅もバス路線もありながら交通が非常に不便なことであった．赴任直後に直ぐにも東京へ行かねばならない緊急事態が発生じた．連絡があったのは正午近くだった．すぐに時刻表で東京行きを調べたが結局6時間後に出発する飛行機が一番早くいらいらしながら時間が来るのを待った．この経験から，いくら交通インフラを整備しても交通サービスが伴わなければ「あって無きが如し」と，公共交通の交通頻度の研究に着手した．方法はJRおよび私鉄の時刻表，航空ダイヤをすべてコンピュータに打ち込んでおき，出発地・出発時刻・目的地を入力して最も早く目的地に着く時刻を求めるものである．また，出発時刻よりも目的地の到着時刻が優先することが多いので，出発地・到着地・希望到着時刻を与え，逆算して最遅出発時刻を求めた．全国主要都市間で出発時刻や希望到着時刻をいろいろ変えて最短交通時間の全都市への平均を取って短い順に並べると東京，大阪，名古屋と続き，4番目に鉄道利便性の高い都市は岡山市であった．新幹線があり，名古屋の次に日本の中心にあることから当然の結果であろう．因みに鳥取は出発時刻や到着時刻の指定で多少の変動はあるものの，下から1桁の位置にあり，鉄道に関しては陸の孤島とである．この種の試みは，鉄道と航空と長距離バスをすべて対象としたり，国内航空線のみとしたり，交通ダイヤが変わることを考慮して数年ごとに実施してきた．また，鳥取東部地区のバス路線のみでも実施した．智頭線が開通したときも，その効果を本研究の手法で測った．この研究を始めたのは赴任直後の昭和63年であったが，その後JRが時刻表を電子媒体で売り出すようになった途端に学生はそれを見つけ出したので研究室で購入して，時刻表を打ち込む作業はなくなった．その後，JRは電子媒体のダイヤの販売をやめたがインターネットの「えきスパート」他で列車や運賃までも簡単に検索出来るようになった．

この研究は伝統があるので，時刻表の入力も容易になり，解析方法も格段と進歩して，担当学生の負担は著しく軽減したにもかかわらず，昨今の学生は直感的に安易な方法を選ぶ．学生が示す解析結果を見て追加の作業を指示したところ，数週間かかると聞いて驚いた．最新の時刻表がコンピュータに入っているのだから，所要の条件の入力には5分とかからない．入力すれば1時間も経たずに全都市間の最短時間はコンピュータが計算してくれる．何故，数週間かかるか尋ねたら彼は最新時刻表をコンピュータに入力しないで，インターネットの路線情報で発駅・着駅・出発時刻あるいは希望到着時刻を打ち込んで最早到着時刻あるいは最遅出発時刻を１つ１つ求めていたのであった．それでは全都市間を新たな条件で検索するには何週間もかかるのは当たり前である．当世学生気質かと驚きかつあきれた．

鳥取大学では地域開発計画学研究室であったことから，**1**でも触れたように卒論，修論は学生の要望に合わせるようにしたので対象とする研究分野は非常に広かった．交通を筆頭に環境，過密過疎の地域計画，景観，福祉，観光等の課題主導型があれば，課題は問わずに数理計画，シミュレーション，データ解析整理，アンケート調査等の手法志向型もあった．県の依頼で県教職員の同和アンケートの整理解析を手伝った関係で県教職員の同和問題に対する考え方に関する研究も行った．研究所時代に「ラーメンからミサイルまで」という感じでどんな仕事でもこなしていたことが，地域計画という広範にわたる研究に対応できた．

運輸省時代，計画の研究をするからには研究所ばかりでなく計画の現場を経験したいと総理府首都圏整備委員会事務局に1年余出向して行政の現場を経験したことも地域計画を専門として研究するのにプラスに作用した．そこは，旧建設省都市局・住宅局・道路局・河川局の建設関連，旧運輸省港湾局・自動車局・鉄道監督局が主体の交通・通信関連，旧通産省主体の工業・商業関連と，各省の出城の様相を呈し，縦割り行政そのものの組織であったが，ここで港湾行政以外の分野を知り，他省庁の方々との人脈を得たことは，鳥取大学における研究・教育活動に非常に役立った．

６．おわりに

四囲を海に囲まれ資源の乏しいわが国が戦後飛躍的な発展を遂げた理由として，日本人の勤勉性，器用さ，忍耐強さ，優秀さ等々，いろいろな理由が挙げられる．しかし，原材料を外国から輸入しそれを加工し付加価値をつけて外国に輸出することによって億の民が豊かな生活を享受出来る大きな要因の１つに四囲を海に囲まれている自然

条件を最大限に活用して，資源と製品を運ぶ船舶の重要性と船舶が貨物を積み卸しする港湾の役割を忘れてはならない．外国では港の整備が悪くて貨物船が長期間も港で足止めされ，そのための経費が物価に上乗せされて経済が混乱する事例が数多く報告されている．海運と港はわが国の生命線である．それが，物流の主流となった国際コンテナ取扱い貨物量では，かってベスト 5 に横浜港，神戸港と 2 港あり，さらに東京港，大阪港，名古屋港が続いていたのが，現在ではベスト 5 にシンガポール，香港，高雄（台湾），釜山（韓国）とアジアの 4 港が入り，日本の港は 10 位以内から姿を消した．

海運の重要性はどこでも認識されており，パナマ運河は運河で最も狭くネックであったクレブラ水路を約 3 億ドルかけて 40m 拡幅して 192m にする工事が 2001 年 11 月に完了し，この部分だけは幅が狭く巨大船は一方通行しかできなかったのが、すれ違いが可能となって通航能力が 20％増したということである．

今年の 10 月 22 日に行われたパナマ国の国民投票で拡張計画が約 80％に及ぶ賛成を得て，パナマ運河開通 100 周年の 2014 年に完成させることが承認された．この計画はパナマ運河の通航過多を緩和するとともに既存のロック幅 33.5m の閘門に加えて 55m の閘門を増設するもので船幅 49m の船舶も通航可能となる能力向上も兼ねる総事業費 52 億 5,000 万ドル(約 6,300 億円)の大事業である．これで 30 年近く前から続いていた第 2 パナマ運河も決着が付いた．航空母艦を通そうということから始まった第 2 パナマ運河構想が，ソ連の崩壊で頓挫してしまったが，このたびは軍用でなく民間の要請からの決定は喜ばしいことである．

このような情勢を受けてか，それから 5 日後の 11 月 27 日に，海運 3 社投資 4 兆円の見出しが新聞紙面を飾った．国内海運大手 3 社の投資額が 2010 年までに 4 兆円を超える見通しになったという内容である．投資の内訳は，日本郵船が 1 兆 9000 億円，商船三井が 1 兆 2500 億円，川崎汽船が 8000 億円で，世界の海上貨物輸送量が前年比 3.5％増の過去最高の 67 億トンという実績を受けて，LNG(液化天然ガスタンカー)，PCC(自動車専用船)，コンテナ船など大型船の新造船が中心である．

このような経済性を追求する船舶の大型化は，一旦，海難事故が起きたときの損害は従来の事故とは比較にならないくらい大きな影響を社会生活に与える．これは過去に起こった大型タンカーの事故によって，船舶の損害ばかりでなく流失した原油による環境破壊と沈没船あるいは座礁による航行機能の麻痺など，世界経済を揺るがす地球的規模の問題となりかねない．

そうならないことを願って水路計画に関する研究を鳥取の地において今なお続けている次第であるが，わが国の国民生活の海運依存度の大なる現実からも，国民 1 人 1 人がもっと外国との交易とそれを担う船舶交通を知って欲しいと願っている．

ついでに言わせて頂けば，地方分権拡大の渦中にあって何を言うかと叱られるかも知れないが，国営港湾の復活を提言する．主要な道路・河川・空港は国全体として調和を図って国家が主導して計画・管理している．しかしながら，港湾には国営港湾は存在しない．港湾の経営・管理・運営は地方公共団体が行う．このことは，四囲が海であり加工貿易立国のわが国にとっては，由々しい問題である．船舶が通行する水路が地方公共団体を超えて国家的見地から計画・管理されると同様に，一部主要港湾の国家による計画・管理・運営を，本稿の読者が真剣に考えて頂けたら望外の幸せである．

参考文献）3，4 章関連で入手可能なものに限る．

1) Suez Canal Authority, Yearly Report. Monthly Report, Suez Canal Authority.
2) Panama Canal Commission, Panama Canal Commission Annual Report, Yearly Report.
3) 長野雅之:パナマ運河の開発計画の史的考察,港研報告 31 巻 3 号,運輸省港湾技術研究所, 1992.
4)Y.Okuyama: Traffic Capacity of Panama Cana1: Pianc 28th International Navigation Congress, 1994.
5) 奥山育英:長大運河の容量，巨大プロジェクトに関する OR，日本オペレーションズ・リサーチ学会報文集 T-95-1, pp.153-183, 1995

謝　辞

カタカナ文字が使われた国立大学初の学科として 22 年前に社会開発システム工学科が設立され，4 年生の研究室配属に合わせて，大規模プロジェクトの端っこで地域開発を分担していたということから社会開発システム工学科地域開発計画学研究室に運輸省から赴任してきました．大規模プロジェクトの地域開発と鳥取地方の地域開発とは内容が全く異なり，多くの問題に苦闘しながら四苦八苦しているうちにあっという間に 19 年間が経過して定年を迎えることになりました．その間，多くの方々に大変お世話になりました．この場をお借りして厚くお礼申し上げます．

どうもありがとうございました．

（受理　平成18年11月30日）

軸・軸受および歯車の変形による歯車の等価組付誤差

小出　隆夫
鳥取大学工学部機械工学科

Equivalent Misalignment of Gears Due to Deformation of Shafts, Bearings and Gears

Takao KOIDE
Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: koide@mech.tottori-u.ac.jp

Abstract: This paper describes a model for calculating the equivalent misalignment of gears due to deformations of shafts, bearings and gears in gear box. This modeling consists of calculating the bending and torsional deformations of gear shaft considering the bearing stiffnesses (radial and moment stiffnesses) and gear body, and a method for calculating the equivalent misalignment of gears was obtained. The calculation program was developed using MS Visual Basic and the validity of the calculation program developed was examined by comparing the results of this program with those presented by United States, Germany and France to the ISO TC60 WG6. This program makes Japan catch up these countries in terms of usage of ISO 6336 standard for load carrying capacity of cylindrical involute gears in practice of international technical/industrial affairs.

Key Words: Gear, Shaft, Bearing, Bearing stiffness, Misalignment, Bending deformation, Torsional deformation

１．はじめに

筆者は，2006 年 2 月に鳥取大学科学研究業績表彰を受けた.本稿は当該業績[1]の内容を紹介するものである.

歯車の歯に負荷が加わるとき，軸・軸受および歯車本体の変形等により歯面の空間的位置が変化し，歯面には組付誤差に相当する誤差（等価組付誤差 $F_{\beta x}$）が発生して歯すじ方向荷重分布が変化する．そのため，歯車の強度が大きく変わる．このような状況を考慮するため，当然ながら従来の歯車強度設計式[2]～[4]においても等価組付誤差は考慮されている．ところが，歯車装置の構造から等価組付誤差を推定する方法については，装置の個別対応になる可能性が高いため，規格計算式の形にまとめるのが困難であった.しかし,最近，たとえば，ISO 式[5]ではこの考慮の重要性が認識され，設計式中に単純な等価組付誤差の推定法が導入されている．ところが，等価組付誤差は歯車装置の構造，使用する軸受の剛性などによって大きく変わるため，現 ISO 式中の単純な方法による推定では極めて不十分であることが一般的に認識されている．等価組付誤差の詳細な計算法は ISO 式中には示されていないため，ISO 式による強度的信頼性の推定結果に一般性が失われているのが実状である．このような背景のもとに，米，独，仏では，等価組付誤差の計算プログラムをそれぞれ独自に開発して，それを ISO 規格の一部として構成するよう位置づけ，商業ベースで販売しようとしている．ISO TC60 WG6 委員会ではこれらのプログラムで計算された等価組付誤差の比較を行っているが[6]～[8]，それらの結果は大きく異なる場合もあり（図１５，１６参照），また各国の計算法の詳細も明らかにされていないため，ISO 規格本体の評価にも影響を及ぼしている．さらに，このような等価組付誤差計算プログラムがなければ ISO 規格の運用自体も困難になるため，我が国においてもより正確な等価組付誤差の計算プログラムの開発が急務となっている．これは本来，古典的な材料力学の問題のように思えるが，歯車装置の軸・軸受および歯車本体の変形の計算にはどのような構造のモデルを取り上げるべきかは不明であり，これが等価組付誤差の計算結果を左右しているようである.

本研究では，歯車の等価組付誤差の計算プログラムを開発するためのモデルを提案し，その妥当

性を検討する．すなわち，まず軸受剛性（ラジアル剛性，モーメント剛性）を考慮して，大，小歯車軸の曲げたわみ,ねじり変形を求める式を導く．つぎに，これらの式と軸受剛性，ガタ，および，歯車と軸の結合条件に基づいて，一段および二段歯車減速装置の等価組付誤差を求める計算式を導き，それらをプログラム化する．作成した計算プログラムにより，ISO TC60 WG6 資料中に示されている 3 種類の歯車減速装置に対して等価組付誤差の計算を行い，米，独，仏各国の計算結果との比較検討を行って，本モデルと計算プログラムの妥当性を確かめる．さらに，これらの等価組付誤差が歯車の接触・歯元応力に及ぼす影響について，ISO 規格強度計算式（ISO 6336）に基づいて検討を加える．

２．等価組付誤差 $F_{\beta x}$の計算

一段および二段歯車減速装置の等価組付誤差を計算するために，まず歯車減速装置を各歯車・軸の組合わせに分解し，各歯車・軸に対して，軸受の剛性（ラジアル剛性，モーメント剛性）を考慮して，段付き軸（三段および五段）の曲げたわみおよび軸受荷重，軸受変位を求める計算式を導いた．図１は，正面歯面法線荷重 F_{bt} およびスラスト F_a による三段段付き軸の曲げたわみ計算モデルを示す．ここで，F_n：歯直角歯面法線荷重，F_{bt}：正面歯面法線荷重，F_a：スラスト，F_{wt}：かみ合いピッチ円上における円周力，l_1，l_2：A，B 側の軸長さ，d_{s1}，d_{s2}：A，B 側の軸直径，b：歯幅，I_1，I_2：A，B 側軸の断面二次モーメント，I_G：歯車部断面二次モーメント，d_{b1}，d_{w1}：歯車基礎円直径，かみ合いピッチ円直径，β_b：基礎円筒上ねじれ角，α_{wt}：正面かみ合い圧力角，R_A，R_B：F_{bt}による軸受荷重，R_A'，R_B'：F_aによる軸受荷重，M_A，M_B：F_{bt} による軸受モーメント，M_A'，M_B'：F_a による軸受モーメント，k_A，k_B，k'_A，k'_B：軸受ラジアル剛性，$k_{\theta A}$，$k_{\theta B}$，$k'_{\theta A}$，$k'_{\theta B}$：軸受モーメント剛性である．モーメント剛性は，図１中に示すように，軸受を単位角度回転させるのに必要なモーメントである．

歯車箱の剛性も，当然ながら等価組付誤差に大きな影響を与える．歯車箱剛性は，歯車箱図面より，たとえば FEA（有限要素法解析）などの構造解析により推定し，できるならばそれを実験により，より精度を上げて決定する必要がある．その詳細については本研究の範囲外であるためここには述べないが，そのようにして決定された歯車箱剛性を軸受の剛性に加えることにより，軸受＋歯車箱という歯車軸支持剛性が得られる．ここに開発する等価組付誤差計算モデルならびに計算プログラムにおいては，これを広義の軸受剛性と考えることにより，等価組付誤差の推定にそのまま利用することが可能になる．

歯面荷重 F_{bt}，F_aは全歯幅に等分布するとして，これらの荷重による曲げたわみδ_{ytb}，δ_aと F_{bt}によるねじれ変位δ_{ytt}を求める計算式を導いた．なお，軸のせん断変形は考慮していない．つぎに，軸受ガタによる歯すじ変位δ_{yl}および歯車と軸の結合条件を考慮した歯すじ変位δ_{ys}を求める計算式を導いた．

以上の計算式によって求めた各変位は，一段および二段歯車減速装置の歯車・軸の配置より計算した各歯車対の作用面上に変換し，各歯車の作用面上の歯すじ変位δ_y，各歯対の作用面上の相対歯すじ変位を求め，これらを用いて等価組付誤差 $F_{\beta x}$を求めた．図２は，三段段付き軸の作用面上の歯すじ変位の計算例を示す．ここで，δ_{ytb}：F_{bt} による曲げたわみ，δ_a：F_a による曲げたわみ，δ_{ya}：δ_aを作用面上に変換した値，δ_{ytt}:歯車のねじれ変位，δ_{yl}：軸受ガタによる歯すじ変位，δ_{ys}：歯車と軸の結合条件による歯すじ変位，δ_y：作用面上の全歯すじ変位，$F_{\beta x2}$:歯すじ変位の最大値と最小値の差である．δ_yより相対歯すじ変位を求め，さらに等価組付誤差を計算することができる．

２．１ 軸と歯車の曲げたわみの計算

図１に示すような，軸受によって支持されている三段段付き軸の変形を考える．歯車の等価直径としては，かみ合いピッチ円直径 d_{w1} をとっている．垂直力 F_{bt} による軸・軸受および歯車本体の曲げ変形は，軸受荷重 R_A，R_Bと F_{bt}との力のつりあい条件，A 点まわりのモーメントのつりあい条件，$x = l_1$，l_1+bにおける連続条件，$x = 0$，lにおける境界条件から求めることができる．

スラスト F_aによる軸･軸受および歯車本体の曲げ変形および他の段付き軸の場合においても同様に考えることができる．

２．２ 歯車のねじれ変位の計算

歯車本体の歯幅方向の位置 xにおける作用面上のねじれ変位δ_{ytt}は，有効歯元円直径 d_eを等価直径とする円筒に対して求める．

２．３ 軸受ガタによる歯すじ変位の計算

軸受ガタによる作用面上の軸・歯車の変位δ_{yl}は，A，B 端における軸受ガタより求める．

２．４ 歯車・軸結合条件による歯すじ変位の計算

歯車と軸の結合がスプライン，キーなどで行われている場合，一体構造の場合よりも結合剛性が低下し，これが歯面の変位に影響を及ぼすと考えられる．図３は，歯車と軸の結合条件による歯すじ変位の計算モデルを示す．歯車と軸は剛体であると仮定し，歯車がハブ両端でそれぞれこわさ k_{hA}, k_{hB} のばねで支持されているとして，歯車･軸結合条件による作用面上の歯すじ変位δ_{ys}を計算する．

２．５ 歯車配列・トルクフロー

種々の歯車配列とトルクフローの場合に対して，等価組付誤差の計算を行う必要がある．一段および二段歯車減速装置を例にとると，後述の図７(a)に示すような６種類について扱うことになる．

２．６ 歯車のねじれ方向と入力軸回転方向の組合わせによるスラスト方向の決定

曲げたわみの計算に用いるスラスト F_a の方向は，各歯車のねじれ方向と入力軸回転方向の組合わせによって決める．

２．７ たわみ方向の変換

各たわみはすべて作用線方向の値に変換する．図４は，二段歯車減速装置の B 側から見た歯車配

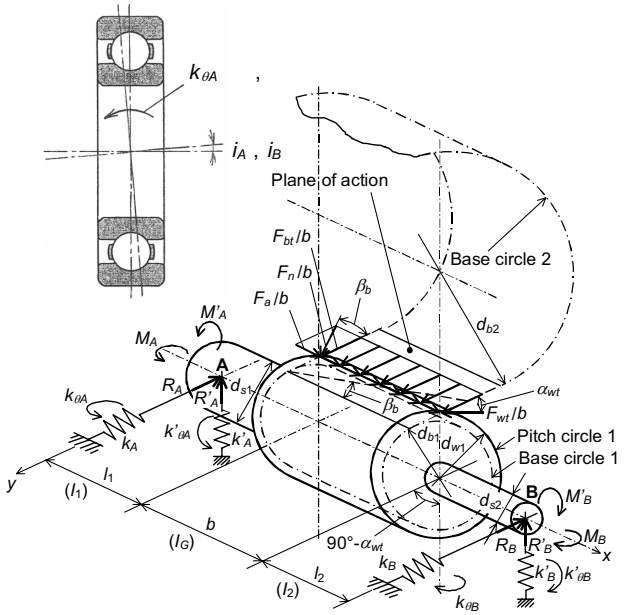


Fig.1 Calculation model of gear･shaft deflection due to applied load $F_{b\,t}$ and F_a

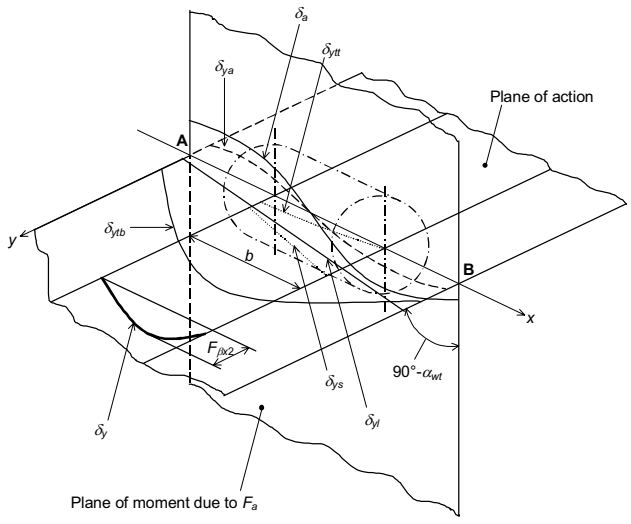


Fig.2 Deflection due to F_{bt} and F_a

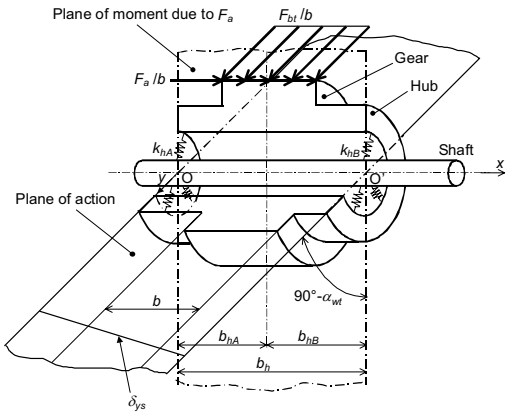


Fig.3 Calculation model for positioning deviation of lead δ_{ys}

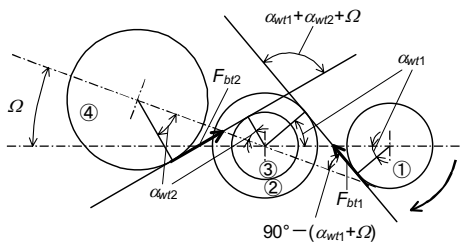


Fig.4 Gear arrangement (view from B side)

置を示す．軸に２つの歯車がついている場合，一方の歯車に負荷される垂直力およびスラストによるたわみをもう一方の歯車の作用線方向に変換する必要がある．軸１，２を含む平面と軸２，３を含む平面とのなす角を配置角度Ωとし，これを考慮してたわみ方向の変換を行う．

２．８ 等価組付誤差の出力

作用面上の各歯すじ変位より，図５に示すような４種類の等価組付誤差 $F_{\beta x1}$ ～ $F_{\beta x4}$ を求める．$F_{\beta x1}$ は両歯幅端における歯すじ変位の差，$F_{\beta x2}$ は歯すじ変位の最大値と最小値の差，$F_{\beta x3}$ は $F_{\beta x2}$ に 1.33（放物線たわみを直線たわみに変換する場合に，ISO[5]で提案されている係数）を乗じた値，$F_{\beta x4}$ は歯すじ変位を最小二乗法によって直線近似したときの両歯幅端におけるたわみの差である．

３．等価組付誤差の計算プログラム

３．１ 計算フロー

２章で導いた計算式に基づく，相対歯すじ変位および等価組付誤差の計算プログラムを，Visual Basic によって作成した．図６は，作成した計算プログラムのフローチャートを示す．まず，設計者によって入力された歯車装置の図面情報より，一段あるいは二段歯車減速装置を各歯車・軸の組合せに分解し，歯車・軸の配置より，各歯車対の作用面方向および各歯車・軸の負荷，負荷位置を計算する．つぎに，各歯車・軸の曲げ，ねじり変形を計算する．作用面上の歯すじ変位を計算した後に，歯車と軸が一体でない場合は，歯車・軸結合条件による歯すじ変位を計算する．また一つの軸についている歯車の数が二つの場合には，もう一方の作用面上の歯すじ変位を計算する．すべての歯車・軸に対して作用面上の歯すじ変位の計算が終了した後，各歯車対の作用面上の相対歯すじ変位を計算する．変位が妥当であると設計者が判断した場合，等価組付誤差 $F_{\beta x}$，軸受荷重，変位を出力し，妥当でないと判断した場合は，歯車・軸結合条件，軸受剛性等のデータを入力し直し，歯すじ変位を再計算することができる．

３．２ ユーザーズインターフェース

図７は，入力画面を示す．図７(a)では，入力軸回転方向，入力トルク，歯車配列とトルクフローを入力する．図７(b)では，各歯車の諸元を，図７(c)では軸受剛性，軸受ガタ，歯車箱剛性を，図７(d)では軸寸法を入力し，最後に図７(e)において歯車・軸結合条件と歯車軸の配置角度Ωを入力したのち，”計算”をクリックすると計算が実行され，出力画面が表示される．

図８は，出力画面を示す．出力画面では，各歯車および歯車対の作用面上の相対歯すじ変位，４種類の等価組付誤差（図５）が表示される．また，各相対歯すじ変位の図をクリックすると歯幅方向の位置と変位が数値で表示される．

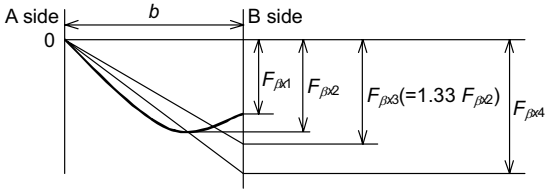


Fig.5 Definition of different kinds of equivalent misalignment $F_{\beta x1}$~$F_{\beta x4}$

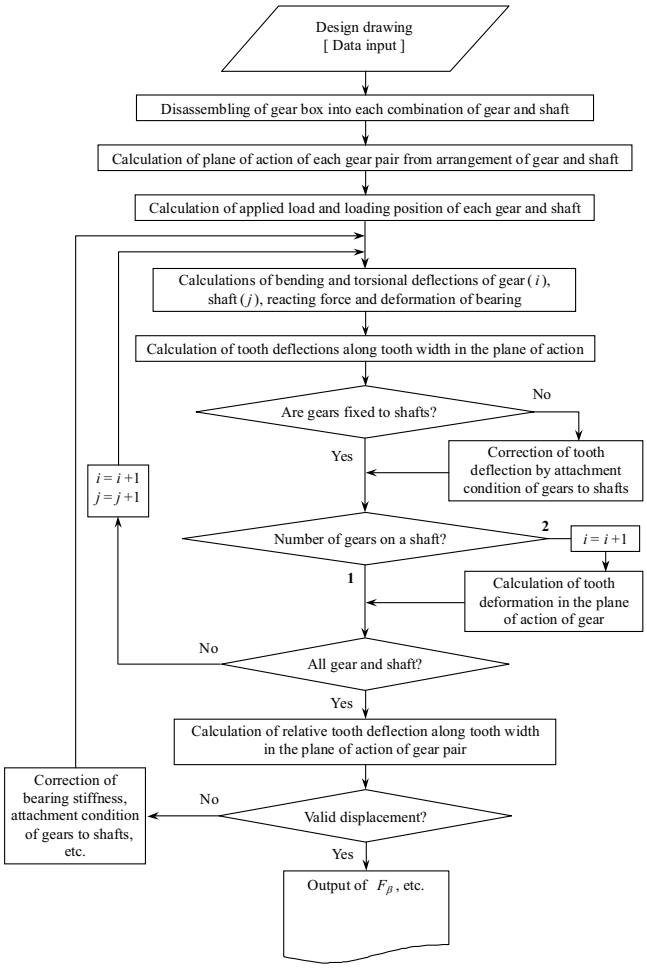


Fig.6 Flow chart for calculation of $F_{\beta x}$

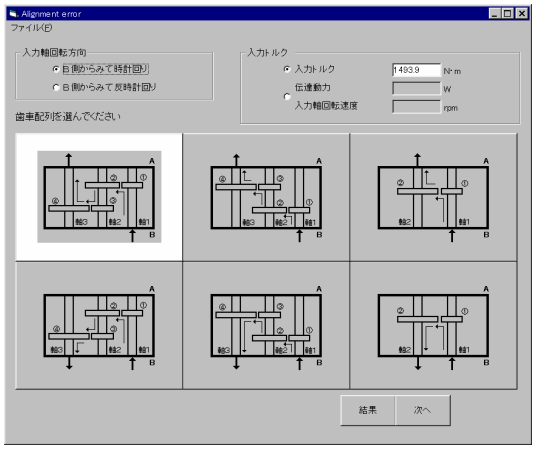
三段以上の歯車減速装置に対する等価組付誤差は，二段減速の場合の結果を組合わせることにより求めることができる．

このように．本研究で開発したプログラムは，歯車装置の図面データさえあれば，とくに歯車についての専門的な知識がなくても，等価組付誤差を容易に計算することができるように構成した．

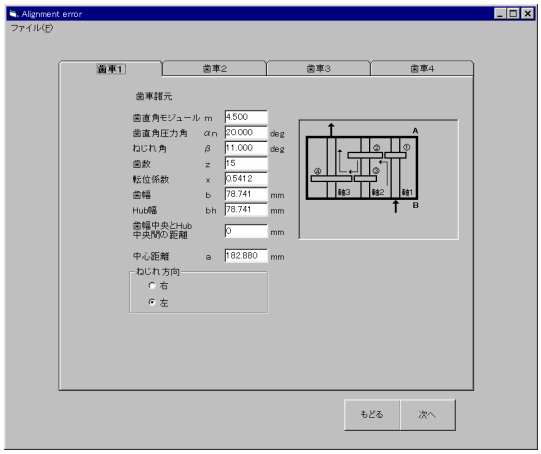
４．計算結果および考察

４．１ たわみ計算値の検証

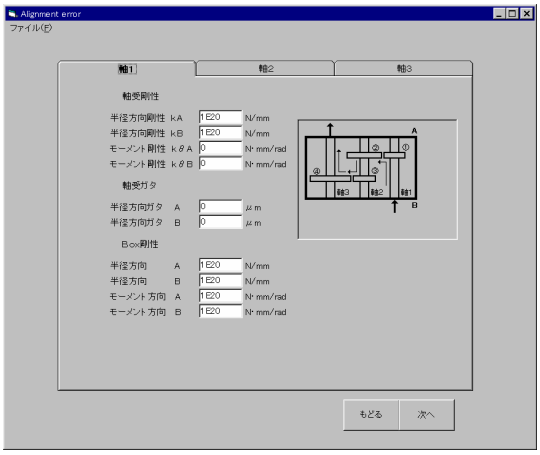
図１０は，図９に示す平滑軸に対して，本研究で作成した計算プログラムによるたわみ計算値と理論値を比較して示す．軸端支持部のモーメント剛性を０および∞とした場合のたわみ計算値は，それぞれ両端単純支持および両端固定支持はりの理論値とよく一致しており，今回作成したたわみ計算プログラムの妥当性の一端が示されていると考えられる．



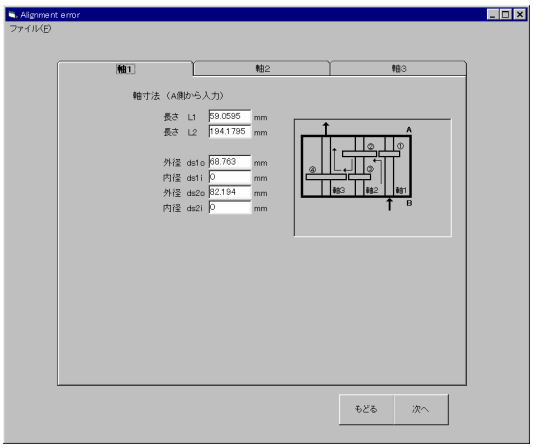
(a)



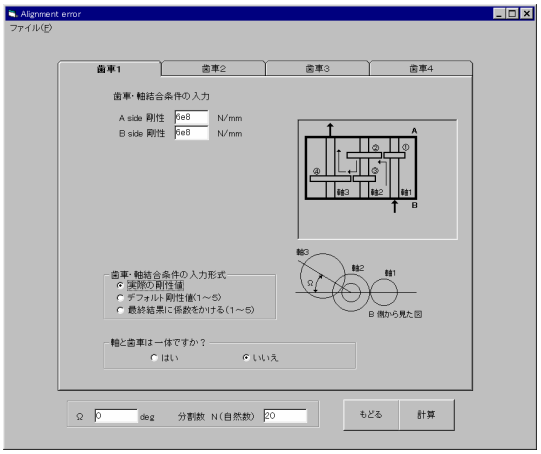
(b)



(c)



(d)



(e)

Fig.7 Example of input window for considering shafts arrangement and torque flow

４．２ 各国で計算された相対歯すじ変位の比較

図１１～１３は，ISO TC60 WG6 委員会で等価組付誤差の検討の対象とされている歯車減速装置を示す．また，表１～６に歯車の諸元と軸寸法を示す．図１４～１６は，米，独，仏の各国で開発された計算プログラムによる相対歯すじ変位[6]～[8]と本研究で開発した計算プログラムによる結果を，横軸に A 側歯幅端からの距離をとって示す．仏による結果は二段歯車減速装置に対するものしか示されていない．本研究による結果は，軸受のラジアル剛性は $k_A=k_B=\infty$ と一定とし，モーメント剛性を $k_{\theta A}=k_{\theta B}=0,\infty$ としたものを示している．

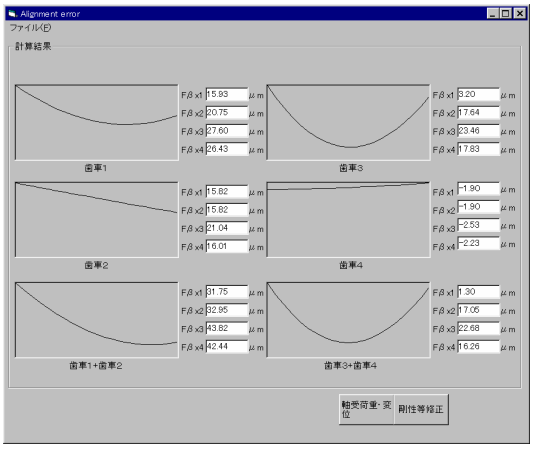


Fig.8 Example of output window

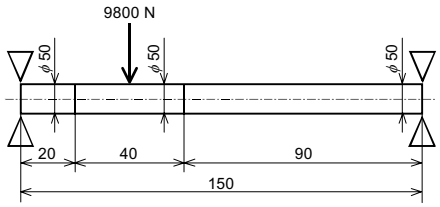


Fig.9 Sample model for examining the calculated deflection

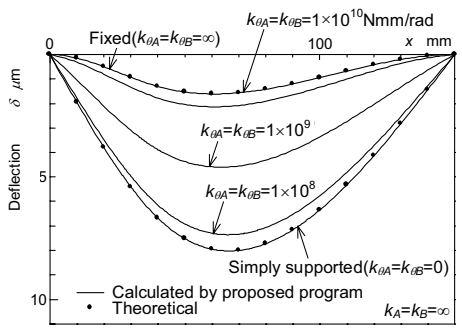


Fig.10 Comparison of program output with theoretical results

他国の計算方法の詳細は公式には明らかにされていないが，ISO TC60 WG6 の審議過程の話からは，おそらくこの条件に対応しているものと思われる．図１４より，一段減速装置の場合には，米，独および本研究の相対歯すじ変位は，大きさ，傾向ともほぼ等しいことが認められる．図１５より，二段減速装置の場合は，米，独の相対歯すじ変位はかなり近いが，仏の結果は少し異なること，および，本研究の相対歯すじ変位は，高速段の $k_{\theta A}=k_{\theta B}=\infty$ の場合を除いて，各国の結果のばらつきの範囲にほぼ入っていることがわかる．図１６より，三段減速装置の場合は，米，独の相対歯すじ

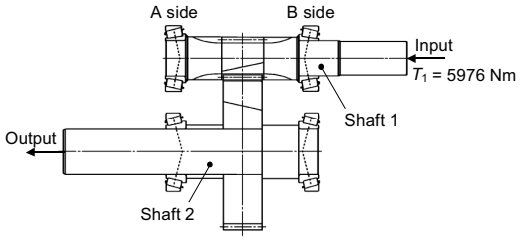


Fig.11 Sample of 1 stage gear reducer

Table 1 Dimensions of gears for 1 stage gear

		Pinion	Gear
Normal module	m_n	8.0	
Normal pressure angle	α_n	20°	
Number of teeth	z	14	59
Helix angle	β	11°	
Addendum modification coefficient	x	0.5317	0.4612
Face width	b	137mm	127mm
Center distance	a	304.8mm	

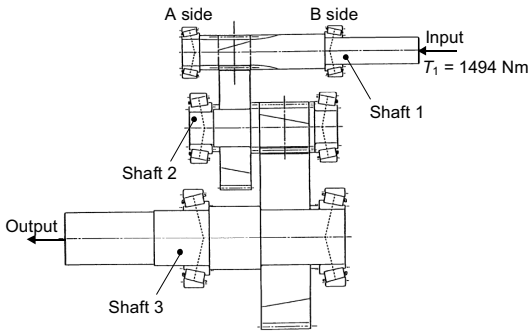


Fig.12 Sample of 2 stage gear reducer

Table 2 Dimensions of shafts for 1 stage gear

	Shaft 1	Shaft 2
l_1	135.54mm	132.93mm
l_2	135.54mm	132.93mm
d_{s1}	114.300mm	146.050mm
d_{s2}	114.300mm	171.45mm

変位の差が一段，二段減速の場合よりも大きくなっており，とくに中速段の場合には分布傾向が左右逆になっていること，および，本研究の相対歯すじ変位は，中速段を除いて米，独と同様の分布傾向を示すことが認められる．このように，各国および本研究の相対歯すじ変位は，減速装置の段

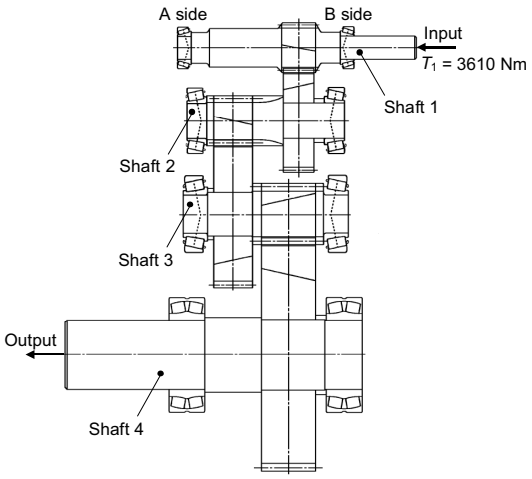


Fig.13 Sample of 3 stage gear reducer

Table 3 Dimensions of gears for 2 stage gear reducer

		High speed		Low speed	
		Pinion	Gear	Pinion	Gear
Normal module	m_n	4.5		6	
Normal pressure angle	α_n	20°		20°	
Number of teeth	z	15	63	17	69
Helix angle	β	11°		11°	
Addendum modification coefficient	x	0.54	0.44	0.52	0.46
Face width	b	78.7mm	76.2mm	121mm	121mm
Center distance	a	182.890mm		266.700mm	

Table 4 Dimensions of shafts for 2 stage gear reducer

	Shaft 1	Shaft 2	Shaft 3
l_1	59.06mm	38.59mm	104.09mm
l_2	194.18mm	20.96mm	36.46mm
l_3	—	32.11mm	—
d_{s1}	68.76mm	88.90mm	152.40mm
d_{s2}	82.19mm	103.91mm	133.35mm
d_{s3}	—	103.91mm	—

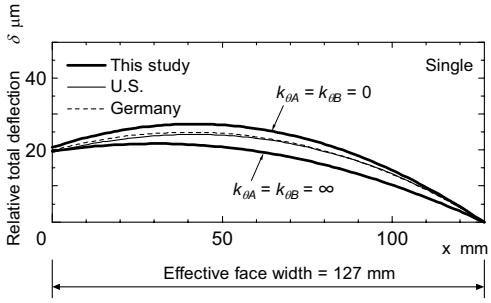
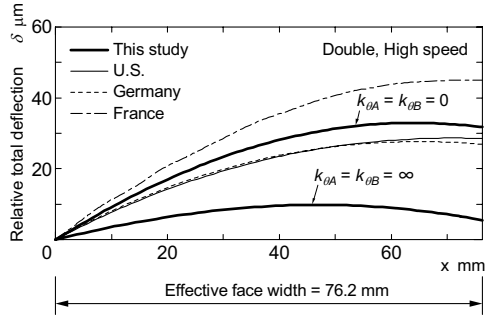
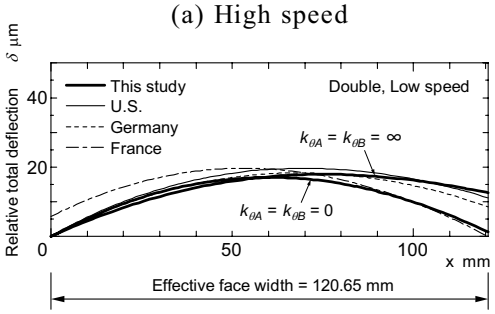


Fig.14 Comparison of results for relative total deflection between meshing tooth flanks reported by different countries (1 stage gear reducer)



(a) High speed



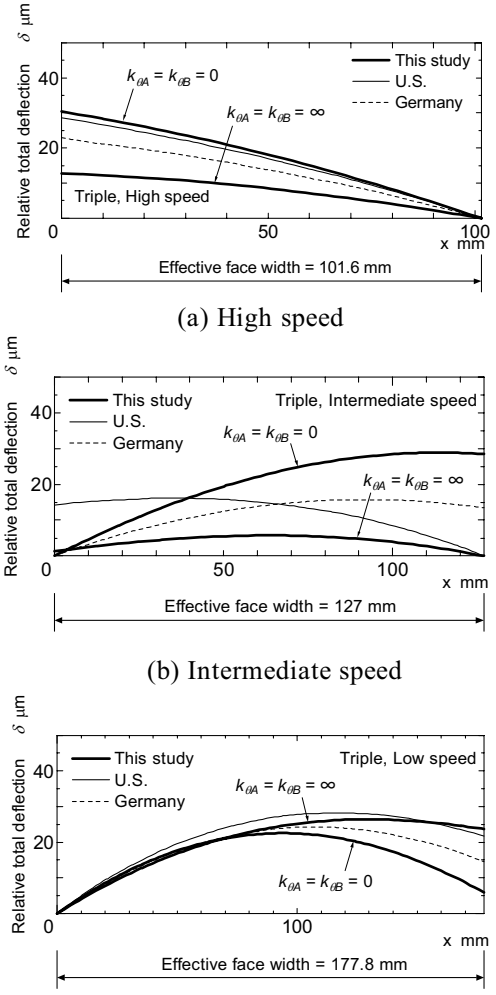
(b) Low speed

Fig.15 Comparison of results for relative total deflection between meshing tooth flanks reported by different countries (2 stage gear reducer)

Table 5 Dimensions of gears for 3 stage gear reducer

		High speed		Intermediate speed		Low speed	
		Pinion	Gear	Pinion	Gear	Pinion	Gear
Normal module	m_n	7		9		11	
Normal pressure angle	α_n	20°		20°		20°	
Number of teeth	z	20	44	15	50	15	63
Helix angle	β	11°		12°		12°	
Addendum modification coefficient	x	0.5749	0.7037	0.4086	0.2740	0.6940	1.2271
Face width	b	112mm	102mm	127mm	127mm	178mm	178mm
Center distance	a	236.220mm		304.800mm		457.200mm	

数が増えるとその差が増大する傾向にあり，等価組付誤差を算出するための構造モデル構築の難しさが認められるとともに，未だこの取り扱いについては未解決であることがわかる．このような問題点はあるものの，本研究で開発した計算法は，各国の計算法の結果と概ね一致しており，ISO 6336 規格運用の一環として十分実用可能であると考えられる．なお，相対歯すじ変位は軸受剛性によって大きく変わるので，等価組付誤差の計算には，軸受剛性を考慮する必要があるが，具体的なこの数値データの現状はその信頼性に欠け，歯車の等価組付誤差を必要な精度で求めるには不十分であり，信頼性のある計算法の開発あるいは開示が求められる．



(a) High speed

(b) Intermediate speed

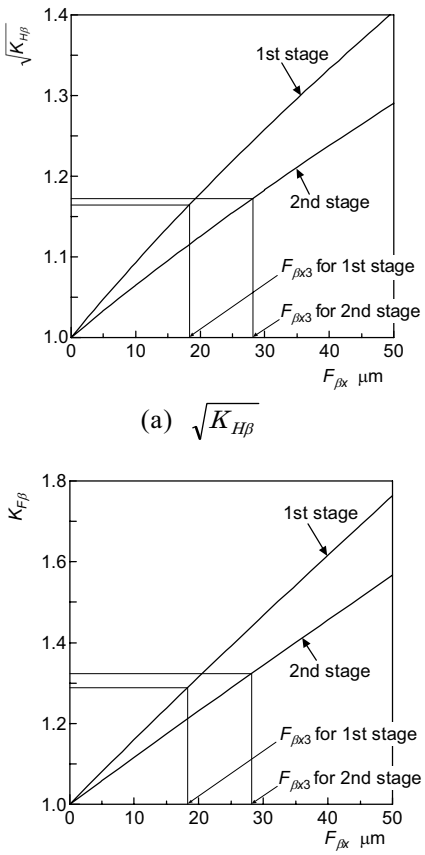
(c) Low speed

Fig.16 Comparison of results for relative total deflection between meshing tooth flanks reported by different countries (3 stage gear reducer)

４．３ 接触・歯元応力に及ぼす等価組付誤差の影響

等価組付誤差 $F_{\beta x}$ による，接触，歯元応力の変化を ISO 式[5]について調べた．ISO 式では，$F_{\beta x}$ を用いて計算される歯すじ荷重分布係数 $K_{H\beta}$，$K_{F\beta}$ によって $F_{\beta x}$ が各応力に及ぼす影響を考慮するようになっており，接触応力に対しては $\sqrt{K_{H\beta}}$ を，歯元応力に対しては $K_{F\beta}$ を乗じることによって等価組付誤差のある場合の接触，歯元応力を求めるようになっている．

図１７は，$F_{\beta x}$ の値を種々変えた場合の ISO 式による $\sqrt{K_{H\beta}}$，$K_{F\beta}$ の計算結果を示す．図中の $F_{\beta x3}$ は，実際に用いられている歯車装置おける値を示す．図より，いずれの計算式においても，接触応力（$\sqrt{K_{H\beta}}$），歯元応力（$K_{F\beta}$）は，$F_{\beta x3}$ の増加につれてかなり増大すること，実際に使用されている負荷条件においても接触・歯元応力は，等価組付誤差を考慮しない場合よりも 10～30％程度も増大する可能性があることがわかる．このように等価



(a) $\sqrt{K_{H\beta}}$

(b) $K_{F\beta}$

Fig.17 Effect of $F_{\beta x}$ on $\sqrt{K_{H\beta}}$ and $K_{F\beta}$ calculated by ISO formula

組付誤差は，接触・歯元応力に大きく影響を及ぼすので，歯車強度設計には等価組付誤差を考慮する必要があるものと考えられる．

５．おわりに

歯車の強度的信頼性に極めて大きな影響を与える等価組付誤差を，歯車装置図面より推定する際のモデリングを提案し，とくに歯車についての専門知識がなくても，等価組付誤差を容易に求めることができる計算プログラムを作成した．

ISO 6336 歯車強度計算式規格運用のための道具として，米，独，仏で開発された等価組付誤差計算プログラムによる結果と本研究により開発したプログラムの結果との比較検討を行い，本研究で開発した計算プログラムが十分実用可能であることを確かめ，ISO 6336 規格運用について日本の出遅れを取り戻すことができた．

本研究は，日本機械学会 RC156 コンペティティブ歯車装置のための最新設計製造技術調査研究分科会の調査・研究活動の一環として行ったものであり，ISO 資料の入手，評価，RC156 運営委員会社のプログラム等による評価，検討に関し，同分科会の協力を得た．関係各位に謝意を表す．本研究を行うにあたり，熱心に協力された鳥取大学技術専門職員・難波千秋氏に対し，厚くお礼申し上げる．

参考文献

[1] 小出隆夫・小田哲・松浦昇吾・久保愛三：軸・軸受および歯車の変形による歯車の等価組付誤差（計算モデルの提案とプログラム開発），日本機械学会論文集，67-659，C(2001)，pp.2329-2336.
[2] 日本機械学会，歯車強さ設計資料，(1979)，6.
[3] JGMA402-02，(1974).
[4] AGMA218.01，(1982).
[5] ISO6336，(1995).
[6] ISO/TC60/SC2/WG6/AH3，Doc N7，(1999).
[7] ISO/TC60/SC2/WG6/AH3，Doc N14，(1999).
[8] ISO/TC60/SC2/WG6，Doc N761，(1999).

（受理　平成 18 年 11 月 24 日）

業 績 リ ス ト



－2006－

機　械　工　学　科	29
知 能 情 報 工 学 科	31
電 気 電 子 工 学 科	33
物　質　工　学　科	40
生 物 応 用 工 学 科	44
土　木　工　学　科	48
社会開発システム工学科	51
応 用 数 理 工 学 科	57
工　学　研　究　科	59

機械工学科

Measurement of Contact Pressure by Electrodeposited Copper Foil (Measurement of Cyclic Pressure Using Grain Growth and Surface Roughness of Electrodeposited Copper Foil)
北岡征一郎, 長谷川達也[*] ([*]Nakanihon Automotive College)
Review of Automotive Engineering JSAE, Vol.26, No.3, pp.327-333, Jul. 2005.

微小円孔を有するニッケル合金薄膜による平均応力検出法（精度の向上と周波数の影響）
小野勇一，北岡征一郎，池上洋一[*]，田中赴夫，鳥山真澄（[*]トヨタ自動車（株））
日本機械学会論文集(A 編)，第 71 巻，704 号，pp.636-641，2005 年 4 月

RC-205 歯車装置に関する実用技術革新のための調査研究分科会研究報告書
小出隆夫
日本機械学会，pp.21-29, 64-76，2005年4月

Reduction of Gear Noise by Adopting Hybrid Gear Structure
小出隆夫，安川英孝[*1]，小田　哲[*2]，五家政人[*3]，山浦秀樹[*3]，小間由己[*3]，遠藤誠一[*3]，宮近幸逸（[*1]鳥取大・院，[*2]福山大，[*3]日立金属）
International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (EGE-202 on CD-ROM), (4p), Jun. 2005.

Effects of Carburized Parts on Residual Stresses of Case-Carburized Thin-Rimmed Spur Gears with Asymmetric Web Arrangement
宮近幸逸, 薛　衛東[*1], 小田　哲[*2], 小出隆夫，藤尾博重[*3]（[*1]横浜国大，[*2]福山大，[*3]京都大）
International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (EGI-201 on CD-ROM), (4p), Jun. 2005.

Measurement of Oil Film Thickness by Ultrasound Method
矢壁正樹[*1]，大塚　茂[*1]，宮近幸逸, 小出隆夫（[*1]米子高専）
International Conference on Manufacturing, Machine Design and Tribology (GE-201 on CD-ROM), (4p), Jun. 2005.

三次元 FEM による高周波焼入れ過程の温度・応力の計算
宮近幸逸，馬田秀文[*1]，松岡　徹[*2]，小田　哲[*3]，坪井　始[*3]（[*1]鳥取県金属熱処理協業組合，[*2]鳥取三洋電機，[*3]福山大）
日本設計工学会誌, 第 40 巻, 第 6 号, pp.311-318, 2005 年 6 月

ADI 歯車の曲げ疲労損傷の AE 特性
宮近幸逸，鄭　銀玲[*1]，小出隆夫，小田　哲[*2]（[*1]鳥取大･院，[*2]福山大）
日本機械学会論文集(C編)，第71巻，707号，pp.2392-2398，2005年7月

Residual Stress and Bending Fatigue Strength of Case-Carburized Thin-Rimmed Spur Gears with Symmetric Web Arrangements
宮近幸逸, 薛　衛東[*1], 馬田秀文[*2], 小出隆夫，小田　哲[*3]，藤尾博重[*4]（[*1]横浜国大，[*2]鳥取県金属熱処理協業組合，[*3]福山大，[*4]京都大）
VDI-BERICHTE NR. 1904-2, pp.1203-1218, Sep. 2005.

Surface Durability and Wear Characteristics of Plasma-carburized Rollers
小出隆夫, 坪倉公治[*1], 中谷真之[*2], 宮近幸逸, 矢壁正樹[*3], 難波千秋，小田　哲[*4]（[*1]松江高専，[*2]ツバキエマソン，[*3]米子高専，[*4]福山大）
Proceedings of The 3rd Asian Conference on Heat Treatment of Materials, pp.177-179, Nov. 2005.

Effects of Heating Time, Electric Power and Frequency on Bending Fatigue Strength of Induction Hardened Gears
宮近幸逸, 織田一輝[*1], 片沼秀明[*2], 岩永　淳[*2], 小田　哲[*3]（[*1]イシダ，[*2]電気興業，[*3]福山大）
Proceedings of The 3rd Asian Conference on Heat Treatment of Materials, pp.249-251, Nov. 2005.

Simulation of Induction Hardening Process of Sintered Metal Shafts
宮近幸逸, 小出隆夫, 小田　哲[*1], 本岡直樹[*2], 上本圭一[*3], 松本泰久[*4], 難波千秋, 馬田秀文[*5], 坪井　始[*1]（[*1]福山大，[*2]住友電工焼結合金，[*3]住友電工，[*4]オムロン倉吉，[*5]鳥取県金属熱処理協業組合）

Proceedings of The 3rd Asian Conference on Heat Treatment of Materials, pp.362-364, Nov. 2005.

浸炭焼入れ薄肉対称ウェブ構造歯車の残留応力に及ぼす浸炭部の影響
宮近幸逸，薛　衛東[*1]，小田　哲[*2]，藤尾博重[*3]（[*1]長安大学，[*2]福山大，[*3]京都大）
日本設計工学会誌，第40巻，第12号，pp.632-638, 2005年12月.

Study on Ball End Milling of Cylindrical Surface (Influence of Cutting Direction on Machining Error)
Lin LU, 田中久隆, 佐藤昌彦, Bernard W. IKUA[*1], 前田義人[*2], 杉山直総，吉田浩志（[*1]ジョモケニヤッタ農工大，[*2]ポリテクセンター鳥取）
Proceedings of The Third International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, pp.933-938, Oct. 2005.

Measurement of Binderless CBN Tool Tip Temperature in End Milling by Infrared Radiation Pyrometer
佐藤昌彦，上田隆司[*]，田中久隆　（[*]金沢大学）
Proceedings of The Third International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, pp.911-914, Oct. 2005.

ファイバ連結型熱放射温度計によるバインダレスcBNエンドミル加工温度の測定
佐藤昌彦，上田隆司[*]，田中久隆　（[*]金沢大学）
精密工学会誌 71 巻 11 号，pp1437-1441, 2005 年 11 月

A Fluid-Dynamic Interpretation of the Asymmetric Motion of Singly Flagellated Bacteria Swimming Close to a Boundary
後藤知伸，中田晃壮，馬場健作，西村正治，曲山幸生[*1]（[*1]食品総合研究所）
Biophysical Journal, Vol.89, No.6, pp.3771-3779, Dec. 2005.

Feedback Control of an Active Sound Insulation Unit
金森直希，西村正治，三代巧
Proc. of VSTech 2005, pp.196-201, Jun. 2005.

Effect of Several Kinds of Pile-Fabrics on Reducing Aerodynamic Noise
西村正治，後藤知伸，小林清高
Proc. of 11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference, CD-ROM, AIAA 2005-3079, pp.1-10, May 2005.

騒音対策についての基礎知識（騒音対策の考え方）
西村正治
ターボ機械協会　第 66 回セミナーテキスト，pp.14-24, 2005 年 8 月

Analysis of Free Flight Model-Airplane with Sudden Loss of the Vertical Tail by Single Video Camera Method
川添博光，森田真司，岩田　博
AIAA Paper, No.2005-4900, pp.1-7, Jun. 2005.

Effects of Leading Edge Separation Vortex of Flexible Structure Delta Wing on Its Aerodynamic Characteristics
川添博光，加藤　督
Proc. of Int. Conf. on Jets, Wakes and Separated Flows, ICJWSF-2005, Toba, No.P-023, pp.1-7, Oct. 2005.

A Flow Visualization Study on Lubricating Oil Movement around Piston Skirt in Reciprocating Air Compressor
落合義孝，鈴木豊彦、金田浩和
Proceedings of the 8th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization CD-ROM Proceedings Paper 344. Aug. 2005.

On Dynamic Variation of Lubricating Oil Film Distribution within Piston-Cylinder Clearance in Four Stroke Internal Combustion Engine
落合義孝，鈴木豊彦，堤　章
Proceedings of the 8th International Symposium on Fluid Control, Measurement and Visualization, CD-ROM Proceedings Paper 345, Aug. 2005.

A Study of Simultaneous Measurement of Vocal Fold Vibrations and Flow Velocity Variations Just above Glottis
有井士郎，片岡英幸，落合義孝，長谷川賢作，北野博也，鈴木豊彦
Proceedings of the 16th International Symposium on Transport Phenomena, Prague Czech CD-ROM Proceedings Paper 134L, Aug. 2005.

知能情報工学科

Development of Semantic Pattern Dictionary for Non-linear Structures of Complex and Compound Sentences
池原　悟, 徳久雅人, 村上仁一, 佐良木昌*1（*1 日本大学）
Proceedings of the ESSLLI'05 Workshop on Empirical Challenges and Analytical Alternatives to Strict Compositionality, pp.79-98, Aug. 2005.

Semantic Pattern Dictionary for Translating Non-linear Structures of Complex and Compound Sentences
池原　悟, 徳久雅人, 村上仁一, 佐良木昌*1, 池田尚志*2, 宮崎正弘*3 (*1 日本大学, *2 岐阜大学, *3 新潟大学)
Proceedings of PACLING, pp.170-179, Aug. 2005.

Speech Recognition using Valency Patterns
村上仁一, 佐伯　亮, 池原　悟
Proceedings of PACLING, pp.252-257, Aug. 2005.

Evaluation of Pattern Generalization Effect under Development of Pattern Dictionary for Machine Translation
徳久雅人, 遠藤久美子, 金澤佑哉, 村上仁一, 池原　悟
Proceedings of PACLING, pp.311-318, Aug. 2005.

意味類型論による言語の等価的変換方法の研究
池原　悟
TELECOM FRONTIER, SCAT-Technical Journal, No.48, pp.4-12, 2005.

音節波形接続型音声合成の文節への適用
村上仁一, 加藤琢也, 池原　悟
電子情報通信学会技術研究報告, SP2005-19, pp.43-50, 2005 年 5 月

非線形な重文複文の表現に対する文型パターン辞書の開発
池原　悟, 徳久雅人, 村上仁一, 佐良木昌*1, 池田尚志*2, 宮崎正弘*3 (*1 日本大学, *2 岐阜大学, *3 新潟大学)
情報処理学会研究報告, 2005-NL-170, pp.157-164, 2005 年 11 月

多変量解析による最適文型パターンの選択方式
岡田敏, 村上仁一, 徳久雅人, 池原　悟
言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, A1-7, pp.25-28, 2005 年 3 月

文型パターンにおける時制・相・様相表現の汎化とその効果
金澤佑哉, 徳久雅人, 村上仁一, 池原　悟
言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, A1-8, pp.29-32, 2005 年 3 月

感情表現に着目した日本語副詞の日英対照分析
佐伯美香, 徳久雅人, 村上仁一, 池原　悟
言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, A1-9, pp.33-36, 2005 年 3 月

結合価パターンを用いた動詞句の翻訳可能性の調査
石上真理子, 徳久雅人, 村上仁一, 池原　悟
言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, A2-6, pp.364-367, 2005 年 3 月

文型パターンにおける任意要素の記述方法とその効果
遠藤久美子, 徳久雅人, 村上仁一, 池原　悟
言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, A2-7, pp.368-371, 2005 年 3 月

単文文型パターン辞書の構築
西山七絵, 村上仁一, 徳久雅人, 池原　悟
言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, A2-8, pp.372-375, 2005 年 3 月

文型パターンによる日英翻訳のための名詞句パターン辞書の構築
神野絵理, 徳久雅人, 村上仁一, 池原　悟
言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, A2-9, pp.376-379, 2005 年 3 月

情緒推定の手がかりについて
徳久雅人, 村上仁一, 池原　悟
言語処理学会第 11 回年次大会発表論文集, S3-2, pp.652-655, 2005 年 3 月

話速変換を用いた音節接続型音声合成方法の検討
村上仁一, 池原　悟
日本音響学会講演論文集, 1-6-12, pp.245-246, 2005 年 9 月

アクセントを用いた音声認識精度向上の検討
堀田波星夫, 菊井玄一郎*1, 山本博史*1, 村上仁一（*1 ATR）
日本音響学会講演論文集, 1-P-21, pp.193-194, 2005 年 9 月

名詞句パターン辞書を用いた日英機械翻訳の試作 – – – bi-gram による訳出選択の場合
吉岡篤志, 徳久雅人, 村上仁一, 池原　悟
平成 17 年度電気･情報関連学会中国支部連合大会論文集, pp.305-306, 2005 年 10 月

電気電子工学科

球面 SOM を用いた変圧器の異常診断
松浦弥三郎、小林琢磨*[1]、白井隆、大北正昭、中塚大輔、徳高平蔵*[2]（*[1]北陸電力、*[2]有限会社 SOM ジャパン）
第６回自己組織化マップ（SOM）研究会 2005　講演論文集 pp.5-8,2005 年.

SOM を用いた変圧器の劣化診断
大北正昭、松浦弥三郎、白井　隆、小林琢磨*（*北陸電力）
第６回自己組織化マップ（SOM）研究会 2005　講演論文集 pp.9-11,2005 年.

球面 SOM を用いたアヤメデータベースの解析
中塚大輔、藤村喜久郎、徳高平蔵*、大北正昭（*有限会社 SOM ジャパン）
第６回自己組織化マップ（SOM）研究会 2005　講演論文集 pp.51-54,2005 年.

Cluster Analysis and Glyptic Visualization using Spherical SOM
中塚大輔、徳高平蔵*、藤村喜久郎、大北正昭（*有限会社 SOM ジャパン）
Proc. of 17th IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, July 11-15, Paris, France , T3-I-112-0984、2005

A Method of Deterioration Diagnosis in Substation Transformers based on the Self-Organizing Map (SOM)
松浦弥三郎、乾正　博*[1]、小林琢磨*[2]、大北正昭（*[1]松下産機システムエンジニアリング株式会社、*[2]北陸電力）
Proc. of 17th IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, July 11-15, Paris, France ,T3-I-112-1018, 2005

Obstacle Avoidance by Pattern Matching of Image Templates based on the Self-organizing Map
大北正昭、宮野智幸*、大木誠（*バンドー化学）
Proc. of 17th IMACS World Congress on Scientific Computation,　Applied Mathematics and Simulation, July11-15, Paris, France , T3-I-112-1017、2005

Self- Tuning of fuzzy rules with different types of Membership functions for multi input and output learning data
権田英功*、宮田仁志*、大北正昭（*米子高専）
Proc.　of IMACS World Congress on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation, July11-15, Paris, France , T5-R-00-0140、2005

Genome Analize by using Spherical SOM
松浦弥三郎、池村淑道*[1]、阿部貴志*[2]、徳高平蔵*[3]、大北正昭（*[1]綜合研究大学院大学葉山高等研究センタ、*[2]国立遺伝学研究所、*[3]有限会社 SOM ジャパン）
Proc. of The 16th International Conference on Genome Informatics December 19-21, 2005, Yokohama Pacifico, Japan, GIW 2005 Poster Abstract: pp.106, 2005.

The Identification of a Cancer Cell Gene by using SOM
松浦弥三郎、拓亜（Tuoya）*[1]、妹尾昌治*[1]、徳高平蔵*[2]、大北正昭(*[1]岡山大学、*[2]有限会社 SOM ジャパン）
Proc. of The 16th International Conference on Genome Informatics
December 19-21, 2005, Yokohama Pacifico, Japan
GIW 2005 Poster Abstract: P106, 2005.

鳥取大学工学部電気電子工学科における教育改革と評価
大北正昭、岸田　悟、中井生央、伊藤良生、小西亮介
日本工学教育、第 53 巻、3 号、pp.81-86, 2005 年

自己組織化マップ(改訂版)
T. コホネン著、徳高平蔵*[1]、大藪又茂*[2]、堀尾恵一*[3]、藤村喜久郎、大北正昭　訳・監修（*[1] 有限会社 SOM ジャパン、 *[2] 金沢工業大学、*[3] 九州工業大学)、
シュプリンガ・フェアラーク東京、2005 年 6 月.

周期性騒音の低減法に関する検討
脇坂契一*，藤井健作*，笹岡直人，伊藤良生（*兵庫県立大）
信学技報 EA2004-119，2005 年 1 月

提案マイクロホンアレーシステムの実機による検証

網谷智博[*1]，宮田哲[*2]，前田和昭[*1]，藤井健作[*1]，伊藤良生（[*1]兵庫県立大，[*2]TOA 株式会社）
信学技報 EA2004-121，2005 年 1 月

OFDM 信号の周期性を利用した OFDM 変調用雑音除去システムに関する検討
團野志保，笹岡直人，伊藤良生，斉培恒[*]（[*]ローム株式会社）
信学技報 SIS2004-67，2005 年 3 月

Pre-inverse 適応システムの一構成法
小林正樹[*]，鈴木勝統[*]，塚本光三郎[*]，伊藤良生（[*]中部大）
電子情報通信学会 2005 年総合大会講演論文集，p.102，2005 年 3 月

パラレル構成型適応ノッチフィルタの極半径に関する考察
川村　新[*]，飯國洋二[*]，伊藤良生（[*]阪大）
電子情報通信学会 2005 年総合大会講演論文集，p.103，2005 年 3 月

OFDM 変調用雑音除去システムに関する一検討
笹岡直人，團野志保，伊藤良生，斉培恒[*]（[*]ローム株式会社）
電子情報通信学会 2005 年総合大会講演論文集，p.350，2005 年 3 月

A Noise Reduction Method for Non-stationary Noise Based on Noise Reconstruction System with ALE
笹岡直人，伊藤良生，藤井健作[*]（[*]兵庫県立大）
IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E88-A, No.2, pp.593-596, Feb. 2005.

A Noise Reduction Method Based on Linear Prediction with Variable Step-size
川村　新[*]，飯國洋二[*]，伊藤良生（[*]阪大）
IEICE Trans. Fundamentals, Vol.E88-A, No.4, pp.855-861, Apr. 2005.

Noise Cancellation Method for OFDM Systems
笹岡直人，團野志保，伊藤良生，斉培恒[*]（[*]ローム株式会社）
Proc. 2005 International Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, pp.525-528, May 2005.

A New Noise Reduction System Based on ALE and Noise Reconstruction Filter
笹岡直人，角圭介，伊藤良生，藤井健作[*]（[*]兵庫県立大）
Proc. 2005 IEEE International Symposium on Circuits and Systems, pp.272-275, May 2005.

周期性騒音の低減法に関する検討
脇坂契一[*]，藤井健作[*]，笹岡直人，伊藤良生（[*]兵庫県立大）
信学技報 EA2005-9，2005 年 5 月

80MHz 帯域 OFDM 方式無線通信システムの検討と OFDM 変復調回路の設計
吉澤真吾[*1]，菅原浩二[*1]，宮永喜一[*1]，尾知博[*2]，伊藤良生，畑岡信夫[*3]，斉培恒[*4]，高山憲久[*5]，平田雅規[*6]（[*1]北大，[*2]九工大，[*3]日立製作所，[*4]ローム株式会社，[*5] 三洋電機株式会社，[*5] 半導体理工学研究センター）
信学技報 SIS2005-6，2005 年 6 月

ALE および逆フィルタを利用した騒音抑圧法の演算量削減に関する検討
笹岡直人，伊藤良生，脇坂契一[*]，藤井健作[*]（[*]兵庫県立大）
信学技報 SIS2005-14，2005 年 6 月

適応アルゴリズムに基づいた OFDM 変調用雑音除去法に関する検討
木下雅晴，笹岡直人，團野志保，伊藤良生，斉培恒[*]（[*]ローム株式会社）
信学技報 SIS2005-34，2005 年 9 月

騒音再合成法のステップサイズ制御に関する検討
笹岡直人，伊藤良生，藤井健作[*]（[*]兵庫県立大）
電子情報通信学会 2005 年ソサイエティ大会講演論文集，p.261，2005 年 9 月

音声に重畳した周期性騒音の低減法
藤井健作[*]，杉原裕司[*]，笹岡直人，伊藤良生（[*]兵庫県立大）
日本音響学会誌, Vol.61, No.11, pp.636-644, 2005 年 11 月

騒音再合成法のステップサイズ制御による騒音推定精度改善に関する一検討
笹岡直人，伊藤良生，藤井健作[*]（[*]兵庫県立大）
信学技報 SIS2005-48，2005 年 11 月

A Study on Less Comuputational Load of Noise

Reduction Method Based on ALE and Noise Estimation Filter
笹岡直人，伊藤良生，脇坂契一*，藤井健作*（*兵庫県立大）
Proc. of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems，pp.685-688, Dec. 2005.

A Study on Noise Cancelling System Based on Adaptive Filter for OFDM system
木下雅晴，笹岡直人，團野志保，伊藤良生，斉培恒*（*ローム株式会社）
Proc. of 2005 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems，pp.697-700, Dec. 2005.

On-Line Signature Verification Based on Subband Decomposition by DWT and Adaptive Signal Processing
中西功，西口直登，伊藤良生，副井裕
Electronics and Communications in Japan, Part 3, vol. 88, No.6, pp.1-11, Jun. 2005.

Multi-matcher On-line Signature Verification System in DWT Domain
中西功，坂本大征，伊藤良生，副井裕
Proc. of IEEE 2005 International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP2005), vol.II，pp.965-968，Mar. 2005.

DWT Domain Multi-matcher On-line Signature Verification System
中西功，坂本大征，伊藤良生，副井裕
Proc. of IEEE 2005 International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2005), pp.5413-5416, May 2005.

Optimal User Weighting Fusion in DWT Domain On-line Signature Verification
中西功，坂本大征，西口直登，伊藤良生，副井裕
Proc. of IEEE 2005 International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS2005), pp.1698-1701, May 2005.

DWT Domain On-Line Signature Verification Using Pen-movement Angle
坂本大征，中西功，原秀樹，伊藤良生，副井裕
Proc. of International Technical Conference on Circuits/Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC2005), pp.3-4, Jul. 2005.

Optimal User Weighting Fusion in DWT Domain On-Line Signature Verification
中西功，坂本大征，伊藤良生，副井裕
T. Kanade, A. Jain, and N. Ratha (Eds.), AVBPA2005, LNCS3546, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp.758-766, Jul. 2005.

Speech Noise Reduction System Based on Frequency Domain ALE Using Modified DFT Pair
中西功，浅倉健徳，伊藤良生，副井裕
Proc. of 2005 International Workshop on Acoustic Echo and Noise Control (IWAENC 2005), pp.137-140, Sep. 2005.

球面 SOM を用いたアヤメデータベースの解析
中塚大輔，藤村喜久郎，大北正昭，徳高平蔵[*1]（[*1]有限会社 SOM ジャパン)
第 6 回自己組織化マップ研究会 2005 講演論文集，pp.51-54, 2005 年 3 月

自己組織化マップを用いた指尖容積脈波の解析
浦瀬新也，馬庭芳朗[*1]，藤村喜久郎，徳高平蔵[*2]，大北　正昭，副井　裕（[*1]公立おおや先端地域医学研究所，[*2]有限会社 SOM ジャパン)
第 6 回自己組織化マップ研究会 2005 講演論文集，pp.63-66, 2005 年 3 月

Analysis of Finger Plethysmogram using the Self-Organizing Map
浦瀬新也，藤村喜久郎，大北正昭，副井裕
Proceenings of 5th Workshop on Self-Organizing Maps, Paris, pp.613-619, 5-8th Sept. 2005.

自己組織化マップを用いた健康診断システムの開発
山村進，田中 淳，馬庭芳朗[*1]，徳高平蔵[*2]，藤村喜久郎，副井 裕（[*1]公立おおや先端地域医学研究所，[*2]有限会社 SOM ジャパン)
第 21 回ファジィシステムシンポジウム講演論文概要集，講演番号 9E1-3, p.106, 2005 年 9 月

自己組織化マップを用いた指尖脈波解析
浦瀬新也，馬庭芳朗[*1]，徳高平蔵[*2]，藤村喜久郎，副井裕（[*1]養父市立南谷診療所，[*2]有限会社 SOM ジャパン

第 18 回年次大会講演論文集，pp.131-134，2005 年 10 月

面接触型氷温センサによる生肉試料氷結温度の検出
山本英樹*，雑賀憲昭*，西守克己（*米子高専）
氷温科学，第 8 巻 1 号，pp.19-23，2005 年 9 月..

ＧＡによるコジェネレーションシステムの中小商業地域への最適化配置とコスト計算
西守克己，土居正和，西村 亮，石原永伯
第 21 回ファジィシステムシンポジウム講演論文集，pp. 300-303, 2005 年 9 月

Arrangement of fictitious charges and contour points in charge simulation method for electrodes with 3-D asymmetrical structure by immune algorithm
西村 亮，西守克己
Journal of Electrostatics Vol. 63, 6-10, pp.743-748, June 2005

電荷重畳法における仮想電荷と輪郭点の免疫アルゴリズムによる自動配置
西村　亮，西守克己
静電気学会講演論文集’05(2005)，pp. 199−202, 2005 年 9 月

表面・界面工学大系 上巻 基礎編（分担執筆）
小西亮介
フジ・テクノシステム，pp. 534-539，2005 年 3 月

携帯電話・ネットワークを利用した個人用の防犯・生活支援システム
小西亮介
計測と制御，Vol.44，No.3，pp. 180-184，2005 年 3 月

自己組織化マップを用いたハーブ種の判別
尾崎知幸，大島直也，齊藤剛史，小西亮介
計測自動制御学会論文集，Vol.41，No.5，pp.383-387，2005 年 5 月

Lip Detection and Visual Speech Recognition
齊藤剛史，福井康仁，小西亮介
SICE Annual Conference 2005, pp. 2951-2954, Aug. 2005

Real-Time Invader Tracking System with Surveillance Camera
大島直也，齊藤剛史，小西亮介
SICE Annual Conference 2005, pp. 3364-3367, Aug. 2005

Automatic Speaker Detection based on Voice and Image Processing
齊藤剛史，大島直也，小西亮介
SICE Annual Conference 2005, pp. 3368-3371, Aug. 2005

照射形赤外線カメラによる人物追尾
大島直也，齊藤剛史，小西亮介
計測自動制御学会第 22 回センシングフォーラム，pp.9-13，2005 年 9 月

動画像処理を利用した簡易的なネットワークテレビ会議システム
小林隼人，大島直也，尾崎知幸，齊藤剛史，小西亮介
計測自動制御学会第 22 回センシングフォーラム，pp.85-90，2005 年 9 月

Lip Reading based on Sampled Active Contour Model
齊藤剛史，小西亮介
International Conference on Image Analysis and Recognition (ICIAR2005), Lecture Notes in Computer Science(LNCS) 3656, pp.507-515, Sept. 2005

超五感センサの開発最前線（分担執筆）
小西亮介，齊藤剛史
NTS，pp. 487-494，2005 年 11 月

自然画像に基づく花画像の自動認識
齊藤剛史，金子豊久*（*豊橋技術科学大学）
電子情報通信学会論文誌，Vol.J89-D-II，No.12，pp.2341-2349，2005 年 12 月

An Electronic Ballast Using Back-Boost Converter
横関一郎*[1]，加藤義人，倉谷俊寛，岡村優希，大北正明，高橋信雄*[2]（*[1] ハリソン東芝ライティング，*[2] 松江高専）
Journal of Light & Visual Environment
Vol.29,No.1,2005,pp.34-38

Development and application of neutral point type down inverter for compact lamp
横関一郎*[1]，加藤義人，岡村優希，倉谷俊寛，大北正明，高橋信雄*[2]（*[1]ハリソン東芝ライティング，*[2]松江高専）
Vol.29,No.2,2005,pp.62-66

Electronic Ballast Using Neutral Point Type Step-down Converter
加藤義人，中村正明，高橋信雄*[2]，横関一郎*[1]
（*[1]ハリソン東芝ライティング，*[2]松江高専）
IEEE PEDS 2005, pp.672-675

Study on Improvement of Buck-boost Inverter Suitable for Compact Self-ballast Fluorescent Lamp
高橋信雄，加藤義人，中村正明（*[1]松江高専）
IEEE PEDS 2005, pp.659-662

新世代工学シリーズ　パワーエレクトロニクス
（分担執筆）
加藤義人
オーム社

強磁性体/超伝導体構造の製作とその特性に関する研究
江原 祐樹，日高 一幸，岸田 悟
真空，第48巻，3号，pp.166-168，2005年3月

堆積部位に磁場を印加しつつ堆積した高周波マグネトロンスパッタ法による $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nOy$ 超伝導薄膜の作製
大西 隆洋, 斎藤 賢治, 尾内 由香里, 藤原 直樹, 岸田 悟
真空，第48巻，3号，pp.181-183，2005年3月

Improvement of Preprocessing Method on Fingerprint
Identification System by Layered Neural Networks
西村 晃一，岸田 悟，渡部　徹[*1] ([*1]松江高専)
Int. Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, (NSIP 2005), pp.217-220, 2005.

Deposition of $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$ (Bi-based) Superconducting Thin Films by rf Magnetron Sputtering Method Under External Magnetic Field
藤原直樹，大西 隆洋，岸田 悟
IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.3074-3077, 2005.

Enlargement Effect of the Crucible Size on $Bi_2Sr_2CaCu_2O_y$ Single Crystals Grown by a Modified Vertical Bridgment Method
田中　博美，越前 裕次，岸田 悟，安東孝止
IEEE Trans on Applied Superconductivity, Vol.15, No.2, pp.3133-3136, 2005.

Effect of magnetic field during deposition on growth of $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$ superconducting films
大西 隆洋，藤原直樹，岸田 悟
Physica C, Vol.426-431, pp.1439-1443, 2005.

Superconducting characterization of non-superconductors/high-Tc cuprate superconductors
江原祐樹，日高 一幸，岸田 悟
Physica C, Vol.426-431, pp.1434-1438, 2005.

Growth of Bi-2212 single crystals by a vertical Bridgman method using large crucibles
越前 裕次，田中　博美，岸田 悟
Physica C, Vol.426-431, pp.583-587, 2005.

Preparation of $Bi_2Sr_2Ca_{n-1}Cu_nO_y$/NiO/Ni tapes by chemical solution method
村上 協司，中村 卓誉，安池重暁，徳田 寿教，岸田 悟
Physica C, Vol.426-431, pp.1155-1158, 2005.

Effect of Al_2O_3 seeding on growth of Bi-based whiskers in glassy quenched platelet method
岡部将典，岸田 悟
Physica C, Vol.426-431, pp.579-582, 2005.

電気電子工学科における教育改革
大北正昭，岸田 悟他
工業教育，第53巻, 3号, pp.81-86，2005年.

磁気シード法による赤土濁水の固液分離処理
猪迫耕二，岸田 悟，大木　誠，田熊勝利，久保里美
畑地農業，561号, pp.1-6，2005年.

Preprocessing of Fingerprint Identification System

in Three Layered Neural Networks
岸田 悟，西村 晃一，田中 章浩
CIRAS 2005 (The 3rd Int. Conf. on Computational Intelligence, Robotics and Autonomous Systems), NFS1-5, 14-16 Dec. 2005.

Growth of Bi-2212 supercondcting single crystals by a self-flux method with large crucibles
今尾浩也[*1]，岸田 悟 ([*1] 松江高専)
Physica C, Vol.426-431, pp.573-578, 2005.

ニューラルネットワークを用いた指紋照合システムの性能の改善
高巣 聡，西村 晃一，岸田 悟，渡部 徹*1 (*1 松江高専)
ニューロコンピューティング研究会，信学技報，NC2004-137～168，pp.137-142，2005 年 3 月

Crystallographic and Luminescent Characteristics of Red Emitting Ba_2ZnS_3: Mn Thin Film Electroluminescent Devices Prepared by Electron-Beam Evaporation
大観光徳，原勝彦，山崎倫敬，尾内由香里，小林洋志[*1]，([*1] 徳島文理大学)
Jpn. J. Appl. Phys., Vol.44, pp.L1535-L1537, 2005

Development of a new blue $CaMgSi_2O_6:Eu^{2+}$ phosphor for PDPs
國本崇[*1], 小林洋志[*1], 吉松良, 本田晋吾, 畠英介, 山口茂康，大観光徳（[*1] 徳島文理大学）
J. Society for Information Display, Vol. 13, pp. 929 940, 2005

Synthesis and Characterization of $Ca(La,Gd)_4SiO_{13}$:Tb Green PDP Phosphor for VUV Excitation
山根明，山口茂康，國本崇[*1]，邵彦林，大観光徳，小林洋志[*1]（[*1]徳島文理大学）
Proc. 12th Int. Display Workshops, pp. 555-558, 2005

Red Emitting Ba_2ZnS_3:Mn Thin Film Electroluminescent Devices Prepared by Electron-Beam Evaporation
原勝彦，山崎倫敬，尾内由香里，大観光徳，小林洋志[*1]，([*1] 徳島文理大学)
Proc. 12th Int. Display Workshops, pp. 1609-1612, 2005

XAFS Study of Luminescent Center in Blue PDP Phosphor $CaMgSi_2O_6$:Eu
本間徹生[*1]，國本崇[*2]，山口茂康，邵彦林，大観光徳，小林洋志[*2]（[*1] 高輝度光科学研究センター、[*2] 徳島文理大学）
Proc. 12th Int. Display Workshops, pp. 551-554, 2005

BaS:Mn^{2+}緑色薄膜 EL 素子の基礎的研究
小枝章宏，原勝彦，臼井慎太郎，大観光徳，小林洋志[*1]，([*1] 徳島文理大学)
電子情報通信学会技術研究報告、Vol. EID2004-58, pp. 25-28, 2005 年 1 月

Xe_2 分子線励起用 $CaLa_4Si_3O_{13}:Tb^{3+}$緑色 PDP 蛍光体の作製と評価
山口茂康、國本崇[*1]，邵彦林、大観光徳、小林洋志[*1]，([*1] 徳島文理大学)
Vol.EID-2004-64, pp. 49-52, 2005 年 1 月

II-VI 族化合物蛍光体の作製と光学特性
大観光徳
日本学術振興会　光電相互変換第 125 委員会　本委員会第１８７回研究会資料、pp. 10-13, 2005 年

High Gain and High Sensitive Blue-Ultraviolet Avalanche Photodiodes (APDs) of ZnSSe n+-i-p Structure Molecular Beam Epitaxy (MBE) Grown on p-type GaAs Substrates
阿部友紀，安東孝止，井汲克之，前田裕康，成瀬純次，三木耕平，江原明宏，笠田洋文
Jpn. J. Appl. Phys., Vo.44, No.17, pp.L508-510, Apr. 2005.

Electrical and optical properties of radiation-induced dominant recombination center in $In_xGa_{1-x}P$ space solar cells
足立真寛, A. Khan, 安東孝止, N. J. Ekins-Daukes, H. S. Lee, 山口真史
Phys. Rev. B, Vo.72, No.15, p.155320, Oct. 2005.

Feature of Fluorescence Spectra of Polyethylene Terephthalate Films
大内伊助[*1], 中井生央, 小野光政[*2], 木村真一[*3] ([*1] 徳島文理大，[*2]帝人デュポンフィルム，[*3]分子研）
Jap. J. Appl. Phys. Vol. 43, pp. 8107-8114, 2004.

Simultaneous fitting with constraints for EXAFS study of anharmonic vibrational system

D.S. Yang[*1], H.M. Park[*1], 中井生央 ([*1]韓国忠北大)
Physica Scripta Vol. T115, pp. 240-242, 2005.

Electronic states of Cu-3d electrons in concentrated amorphous Gd-Cu alloys
矢野一雄[*1], 谷中義一[*2], 中井生央, 福岡淳, 山田真司, 田中秀樹, 北畠史基, 桜井浩[*3], 安達弘通[*4], 河田洋[*4] ([*1]日本大, [*2]理研, [*3]群馬大, [*4]高エネルギー研)
Photon Factory Activity Report 2004 No. 22 Part B, p 113, 2005.

The local structure of amorphous Gg-Ag alloys
中井生央, 北畠史基, 田中秀樹, 藤田泰史, 熊屋雅史, 新田知紀, 中田晃平, 舩越聡貴, 市野邦男
SPring-8 User Experiment Report No.15 2005A, p. 8, 2005.

Molecular Beam Epitaxy of ZnCrS for Ferromagnetic Semiconductor Material
市野邦男, 森本康治, 小林洋志[*] ([*]徳島文理大学)
Ext. Abst. 24th Electronic Materials Symp., Matsuyama, Japan, pp. 49-50, Jul. 2005

物質工学科

Ammonia IRMS-TPD Study on the Distribution of Acid Sites in Mordenite
丹羽　幹，鈴木克生，片田直伸，叶木朝則*，後口隆*（*宇部興産）
J. Phys. Chem., B, Vol.109, pp.18749 - 18757 (2005).

IRMS-TPD of Ammonia for Characterization of Acid Site in β Zeolite
丹羽　幹，西川慎治，片田直伸
Microporous and Mesoporous Materials, Vol.82, pp.105 - 112 (2005).

Distribution of Acid Sites in Mordenite
鈴木克生，片田直伸，丹羽　幹
Chem. Lett., Vol.34, pp.398-399 (2005).

シリカの化学蒸着による触媒の高機能化
丹羽　幹，片田直伸
触媒, Vol.47, pp.358-364 (2005).

Formation of Selective Adsorption Cavity by Chemical Vapor Deposition of Molecular Sieving Silica Overlayer on Alumina using Molecular Template in the Presence of Acetic Acid
片田直伸，赤澤幸子，西明範子，矢野結子，山北尚平，林健太郎，丹羽　幹
Bull. Chem. Soc. Jpn., Vol.78, No.6, pp.1001-1007, 2005.

Shape-Selective Adsorption of Substituted Benzaldehyde Isomers by a Molecular Sieving Silica Overlayer Prepared by the Chemical Vapor Deposition Method Using Organic Template on Tin Oxide
山北尚平，片田直伸，丹羽　幹
Bull. Chem. Soc. Jpn., Vol.78, No.8, pp.1425-1430, 2005.

Detection of Active Sites for Paraffin Cracking on USY Zeolite by ^{27}Al MQMAS NMR Operated at High Magnetic Field 16 T
片田直伸，中田真一[*1]，加藤純雄[*1]，金橋康二[*2]，齊藤公児[*2] ([*1]秋田大学，[*2]新日鐵)
J. Mol. Catal., A: Chem., Vol.236, No.1-2, pp.239-245, 2005.

Standardization of Catalyst Preparation Using Reference Catalyst. Ion Exchange of Mordenite Type Zeolite 1: Remarkable Dealumination Accompanying Ion Exchange,
片田直伸，竹口竜弥[*1]，鈴木達也[*2]，福嶋敏久[*3]，稲垣欣哉[*3]，徳永節男[*3]，島田広道[*4]，佐藤剛一[*4]，瀬川幸一[*5]，仲井和之[*6]，庄司　宏[*7]，呉　鴎[*8]，辰己　敬[*8]，小松隆之[*9]，増田隆夫[*1]，堂免一成[*9]，依田英介[*9]，野村淳子[*9]，奥原敏夫[*1]，景山泰吉，丹羽　幹，小倉　賢[*9]，松方正彦[*10]，菊地英一[*10]，岡崎文保[*11]，高橋　基[*11]，多田旭男[*11]，多和田尚吾[*12]，窪田好弘[*12]，杉　義弘[*12]，東尾保彦[*13]，鎌田正彦[*13]，木岡由紀代[*13]，山本幸平[*13]，小路孝幸[*13]，有馬悠策[*14]，岡本康昭[*15]，松本英之[*16] ([*1]北海道大学，[*2]住友化学工業，[*3]東ソー，[*4]産業総合研究所，[*5]上智大学，[*6]日本ベル，[*7]丸善石油化学，[*8]横浜国立大学，[*9]東京工業大学，[*10]早稲田大学，[*11]北見工業大学，[*12]岐阜大学，[*13]広栄化学工業，[*14]触媒化成工業，[*15]島根大学，[*16]セレス企画)
Appl. Catal., A: Gen., 283, Vol. 1-2, pp.63-74, 2005.

Standardization of Catalyst Preparation Using Reference Catalyst. Ion Exchange of Mordenite Type Zeolite 2: Origin of Dealumination and Recommended Standard Conditions
片田直伸，竹口竜弥[*1]，鈴木達也[*2]，福嶋敏久[*3]，稲垣欣哉[*3]，徳永節男[*3]，島田広道[*4]，佐藤剛一[*4]，瀬川幸一[*5]，仲井和之[*6]，庄司　宏[*7]，呉　鴎[*8]，辰己　敬[*8]，小松隆之[*9]，増田隆夫[*1]，堂免一成[*9]，依田英介[*9]，野村淳子[*9]，奥原敏夫[*1]，金井岳英，丹羽　幹，小倉　賢[*9]，松方正彦[*10]，菊地英一[*10]，岡崎文保[*11]，高橋　基[*11]，多田旭男[*11]，多和田尚吾[*12]，窪田好弘[*12]，杉　義弘[*12]，東尾保彦[*13]，鎌田正彦[*13]，木岡由紀代[*13]，山本幸平[*13]，小路孝幸[*13]，里川重夫[*14]，有馬悠策[*15]，岡本康昭[*16]，松本英之[*17] ([*1]北海道大学，[*2]住友化学工業，[*3]東ソー，[*4]産業総合研究所，[*5]上智大学，[*6]日本ベル，[*7]丸善石油化学，[*8]横浜国立大学，[*9]東京工業大学，[*10]早稲田大学，[*11]北見工業大学，[*12]岐阜大学，[*13]広栄化学工業，[*14]東京ガス，[*15]触媒化成工業，[*16]島根大学，[*17]セレス企画)
Appl. Catal., A: Gen., Vol.283, No.1-2, pp.75-84, 2005.

昇温スペクトル
片田直伸，宍戸哲也[*] ([*]広島大学)
固体表面キャラクタリゼーションの実際 田中庸

裕，山下弘巳編，講談社，東京, pp.138-145, 2005.

Chemical Vapor Deposition of Silica Overlayer using an Organic Molecule as Template on Metal Oxide Surface: Application to Molecular Sieving Sensor and Adsorbent
片田直伸，丹羽　幹
Molecular Imprinting of Polymers ed. by S. Piletsky, A. Turner and I. Nicholls, Landes Bioscience / Eurekah. Com., Georgetown, pp.41-49, 2005.

The Re-birth of Molecular Imprinting on Silica
片田直伸，丹羽　幹
Molecular Imprinting of Polymers ed. by S. Piletsky, A. Turner, I. Nicholls, Landes Bioscience / Eurekah. Com., Georgetown, pp. 26-40, 2005.

The Active and Reusable Catalyst in the Friedel-Crafts Alkylation Derived from a Heteropoly Acid
奥村 和，山下克彦，平野美穂，丹羽 幹
J. Catal., Vol.234, No.2, pp.300-307, Sep. 2005.

Quick XAFS Studies on the Y-Type Zeolite Supported Au Catalysts for CO-O_2 Reaction
奥村 和，芳野勝彦，加藤和男，丹羽 幹
J. Phys. Chem. B, Vol.109, No.25, pp.12380-12386, Jun. 2005.

Active and Reusable Catalyst in the Friedel-Crafts Alkylation Derived from a Heteropoly Acid
奥村 和，山下克彦，平野美穂，丹羽 幹
Chem. Lett., Vol.34, No.5, pp.716-717, 2005.

Catalytic Performance and Elution of Pd in the Heck Reaction over Zeolite Supported Pd Cluster Catalyst
奥村 和，野田久美子，吉田景子，丹羽 幹
J. Catal., Vol. 231, No.1, pp.245-253, Apr. 2005.

Selective Catalytic Reduction of NO by Methane over Pd Loaded on heteropolyacids/SiO_2 at Low Temperature
奥村 和，吉本亮介，鈴木克生，丹羽 幹
Bull. Chem. Soc. Jpn., Vol.78, No.2, pp.361-366, Feb. 2005.

Spontaneous Dispersion of PdO and Generation of Metal Pd cluster in Zeolites Studied by Means of in situ DXAFS
奥村 和，吉本亮介，横田 滋*，加藤和男*，谷田肇*，宇留賀朋哉*，丹羽 幹（*JASRI）
Physica Scripta, Vol.T115, pp.816-818, 2005.

Effect of Reductants in N_2O Reduction over Fe-MFI Catalysts
信川 健*，吉田正典*，奥村 和，冨重圭一*，国森公夫*（*筑波大学）
J. Catal., Vol.229, No.2, pp.374-388, Jan. 2005.

Fe-MFI 触媒上の N_2O 還元反応における還元剤の種類による影響と活性点の構造解析
菅原　康*，信川　健*，野口義雄*，奥村　和，伊藤伸一*，冨重圭一*，国森公夫*（*筑波大学）
表面科学，第 26 巻, 7 号, pp.385-391, 2005 年

Speciation of Osmium in an Iron Meteorite and a Platinum Ore Specimen Based on X-ray Absorption Fine-Structure Spectroscopy
榊原直樹*，高橋嘉夫*，奥村 和，清水 洋*（*広島大学）
Geochemical Journal, Vol.39, No.4, pp.383-389, 2005.

X 線吸収微細構造法によるゼオライト細孔内における金属クラスターの形成過程観察
奥村 和，加藤和男
表面，第 42 巻, 8 号, pp.233-242, 2005 年

環境触媒としてのパラジウム触媒におけるゼオライトの担体効果
奥村 和，丹羽 幹
触媒，第 47 巻, 1 号, pp.21-25, 2005 年

真空蒸着法により調製したリチウム二次電池用合金 Mg_2Ge 膜の負極特性
坂口裕樹，戸田隆文，江坂享男
Electrochem.，第 **73 巻**, 7 号, pp.505-509, 2005 年 7 月.

Diffusion Coefficient Measurements of $La_{2/3-x}Li_{3x}TiO_3$ Using Neutron Radiography
高井茂臣，萬代昇央，川端祐司*，江坂享男　(*京大原子炉)
Solid State Ionics, Vol.176, No.29, pp.2227-2233, 2005.

中性子ラジオグラフィーによる高温型プロトン伝導体の水素吸蔵/拡散機構の解析
江坂享男
NSG Foundation for Materials Science and Engineering Report, 23 号, pp.42-47, 2005 年.

Educational Experiments for University Students Using Natural Radioactrivity. - Development of an Additional Experiment to Measure the Increase of ^{214}Pb and ^{214}Bi Produced From ^{222}Rn
中村麻利子, 江坂享男, 鎌田正裕* (*東京学芸大)
Proc. 3rd Inter. Symp. on Radiation Education (JAERI-Conf 2005-001), pp.570-577, 2005.

Radiation Education Using Local Environment - Educational Experiment Using Masasa Spring Water
中村麻利子, 鎌田正裕*, 江坂享男 (*東京学芸大)
Proc. 3rd Inter. Symp. on Radiation Education (JAERI-Conf 2005-001), pp.447-454, 2005.

燃料電池蓄電池に使用されるイオン伝導体の特性試験方法の標準化調査−鳥取大学における試験結果
江坂享男
平成 16 年度新発電システム等調査研究成果報告書(日本ファインセラミックス協会), pp.70-73 & p.131, 2005 年.

中性子ラジオグラフィーを用いた機能性材料中の元素分布のイメージング
江坂享男
Electrochem., 第 73 巻, 1 号, pp.77-82, 2005 年 1 月.

Construction of Solid/Solid Interface Between Hydrogen Storage Alloy Electrode and Solid Electrolyte for Battery Application
岩倉千秋, 井上博史, 古川直治, 野平慎士, 坂口裕樹, 森田昌行
Solid State Ionics for Batteries ed. by T. Minami, Springer-Verlag, pp.133－186, 2005

Optically Active gem-Difluorocyclopropanes; Synthesis and Application for Novel Molecular Materials
伊藤敏幸
"Fluorine-Containing Synthons," ACS Symposium Series #911, Ed, V. A. Soloshonok, Oxford University Press/ American Chemical Society: Washington DC, Chapter 25, pp. 430-439（2005）

イオン液体−常識を覆す不思議な塩−
北爪智哉[1], 淵上寿雄[2], 沢田英夫[3], 伊藤敏幸（[1]東京工業大院生命理工, [2]東京工業大院総合理工, [3]弘前大院理工）
コロナ社, 東京 (2005), pp. 32-77.

Possible Origin of Modified EAG-Activity by Point-fluorination of the Insect Pheromone Eldanolide
早瀬修一, Michel Renou[1], 伊藤敏幸（[1]INRA (France)）
Eur. J. Org. Chem. **2005**, 2722-2781.

Hafnium Trifluoromethanesulfonate [Hf(OTf)$_4$] Catalyzed Conjugate Addition of Indoles to α, β-Enones
川面 基*, 油谷幸子[1], 上西潤一[1]（[1]京都薬科大学）
Synlett. **2005**, 2492-2494.

Palladium-Catalyzed Construction of Amino Acid Derivatives Possessing Vicinal Chiral Quaternary and Tertiary Carbon Centers at the a and b Positions
池田大次[1], 川面 基*, 上西潤一[1]（[1]京都薬科大学）
Tetrahedron Lett. **2005**, *46*, 6663-6666.

化学の木に登らせる方法？
伊藤敏幸
化学と教育, **2005**, 53(10), 523 (巻頭言).

触媒的ヒドロアミノ化反応
川面 基
ファルマシア, **2005**, *41*, 675-679.

Analysis of D-Glucosamine in Human Serum using High Performance Liquid Chromatography with Pulsed Amperometric Detection
高森吉守[*1], 西林友子, 森本 稔[*2], 斎本博之, 重政好弘（[*1]甲陽ケミカル, [*2]生命機能研究支援センター）

Chitin Chitosan Res., Vol.11, No.1, pp.14-19, Apr. 2005.

Preparation and Biocompatibility of Novel UV-Curable Chitosan Derivatives
蓮佛映子[*1]，弘瀬　勝[*1]，大村善彦[*1]，中坪文明[*2]，岡村泰彦[*3]，岡本芳晴[*3]，斎本博之，重政好弘，南三郎[*3]（[*1]大村塗料，[*2]京大農，[*3]鳥大農）
Biomacromolecules, Vol.6, No.5, pp.2385-2388, Sep. 2005.

"Synthesis and Conformational Properties of Resorcin[4]arenes with Unsubstituted Methylene Bridges"
小西久俊
New Trend in Structural Organic Chemistry, ed. by Takemura H., Research Signpost. Kerala, India, pp.145-153, 2005

Sc(OTf)$_3$-catalyzed Cyclocondensation of 2,4-Dialkoxybenzyl Alkohols. Formation of Resorcin[n]arenes Peralkyl Ethers
森川　修，石坂友伯，榊原　聖，小林和裕，小西久俊
Polymer Bull., Vol.53, No.2, pp.97-107, Jan. 2005.

Synthesis of 2-(3-Iminoisoindolin-1-ylidene)carboxylate Derivatives by Reactions of Ester Magnesium Enolates with Phthalonitrile Derivatives
小林和裕，本間清人，近藤　静，森川　修，小西久俊
Heterocycles, Vol. 65, No. 3, pp.619–623, Mar. 2005.

Synthesis of Benzazetine Derivatives by Intramolecular Iodoamination of *o*-(Acylamino)styrene Derivatives
小林和裕，宮本和奈，森川　修，小西久俊
Bull. Chem. Soc. Jpn., Vol.78, No.5, pp.886–889, May 2005.

Synthesis of Thienobenzofuranquinone Derivatives by Photoinduced and CAN-Mediated 3+2-type Cycloaddition Reactions
小林和裕，米田恵一，林　一貴，森川　修，小西久俊
Heterocycles, Vol. 65, No. 6, pp. 1321–1327, Jun. 2005.

A Convenient Synthesis of 3-(1-Aminoalkyl)-quinolin-2(1*H*)-one Derivatives
小林和裕，淵本雄平，林　一貴，真野正明，丹松美由紀，森川　修，小西久俊
Synthesis, No.16, pp.2673–2676, Oct. 2005.

Concise Route to 4,5-Dioxo-4,5-dihydronaphtho-[1,2-*b*]thiophene-2-carboxylates
小林和裕，山根　智，宮本和奈，森川　修，小西久俊
Heterocycles, Vol.65, No.12, pp.2973–2977, Dec. 2005.

Synthesis of 11*H*-Indolo[3,2-*c*]quinoline Derivatives Carrying a Substituent at the 6-Position
小林和裕，和泉悠一，林　一貴，森川　修，小西久俊
Bull. Chem. Soc. Jpn., Vol.78, No.12, pp.2171–2174, Dec. 2005.

教育用情報ネットワークの利用状況
榊原正明，石川雅雄[*]（[*]大教総センター）
大学教育年報，第 10 巻，pp.65-68，2005 年 3 月

情報リテラシの課題の誤答分析
榊原正明，西本倫子
大学教育年報，第 10 巻，pp.69-71，2005 年 3 月

生物応用工学科

Enhancing effect of calcium and vanadium ions on thermal stability of bromoperoxidase from *Corallina pilulifera*
E. Garcia-Rodriguez*, 大城　隆, 相原利昭, 和泉好計, J. Littlechild* （*Univ. Exeter）
J. Biol. Inorg. Chem., Vol.10, No. 3, pp. 275-282, May 2005.

Dibenzothiophene desulfurizing enzymes from moderately thermophilic bacterium *Bacillus subtilis* WU-S2B: Purification, characterization and overexpression
大城　隆, 石井義孝*, 松原俊之, 上田浩一, 和泉好計, 木野邦器*, 桐村光太郎* （*早稲田大）
J. Biosci. Bioeng., Vol. 100, No. 3, pp. 266-273, Sep. 2005.

Reaction of serine-glyoxylate aminotransferase with the alternative substrate ketomalonate indicates rate-limiting protonation of a quinonoid intermediate
W. E. Karsten*, 大城　隆, 和泉好計, P. F. Cook* （*Univ Oklahoma）
Biochemistry, Vol. 44, No. 48, pp. 15930-15936, Nov. 2005.

油脂分解微生物を用いた小規模含油排水処理に関する実用化研究
黒住　悟, 北村卓也*1, 坪田順一, 和泉好計, 倉根隆一郎*2 （*1旭産業（株）, *2（株）クボタ）
日本食品工学会誌, 第 6 巻, 4 号, pp. 245-251, 2005 年 12 月.

Amyloid-like Fibril Formation of Co-chaperonin GroES: Nucleation and Extension Prefer Different Degrees of Molecular Compactness
日暮卓志, 八木寿梓, 溝端知宏, 河田康志
J. Mol. Biol. Vol. 351, No. 5, pp. 1057-1069, 2005.

Hsp60 is Required for Blastema Formation and Maintenance during Regeneration
牧野伸司*, Whitehead, G.G.*, Lien, C-L.*, 河野茜, 河田康志, Keating, M.T.* (*Harvard University)
Proc. Natl. Acad. Sci. USA, Vol. 102, No. 41, pp. 14599-14604, 2005.

Evidence for Proteasomal Degradation of Kv1.5 Channel Protein
加藤克*, 小倉一能*, 三明淳一朗*, 佐々木紀仁*, 谷口晋一*, 井川修*, 吉田昭雄*, 星川淑子*, 村田光延*, 難波栄二*, 倉田康孝*, 河田康志, 二宮治明*, 森崎隆幸*, 北風政史*, 久留一郎* （*鳥取大学医学部）
Biochem. Biophys. Res. Commun. Vol. 337, No. 1, pp. 343-348, 2005.

Amyloid Fibril Formation of α-Synuclein is Accelerated by Preformed Amyloid Seeds of Other Proteins: Implications for the Mechanism of Transmissible Conformational Diseases
八木寿梓, 日下永子, 本郷邦広, 溝端知宏, 河田康志
J. Biol. Chem. Vol. 280, No. 46, pp. 38609-38616, 2005.

Roles of Hinges Between GroEL Domains in the Chaperonin Function
河田康志
Proceedings of International Symposium on Life of Proteins –Maturation, Translocation, and Quality Control in the Cell— Abstracts p.18, 2005.

Molecular cloning and characterization of thermophilic aspartase from *Thermotoga maritima*
河田康志, 西田憲一, 坂根勲, 本郷邦広, 溝端知宏
Proceedings of The International Chemical Congress of Pacific Basin Societies, Pacifichem 2005, CD Abstracts No. 154, 2005.

Na^+チャンネル遮断薬ピリジカイニドのイオンチャンネル増加作用の分子機構：リドカインとの比較
飯塚和彦*, 加藤克*, 小倉一能*, 三明淳一朗*, 井川修*, 二宮治明*, 坂根　勲, 河田康志, 山本康孝*, 星川淑子*, 佐々木紀仁*, 久留一郎* （*鳥取大学医学部）
心電図, 第 25 巻, 6 号, pp.502-516, 2005 年 11 月

Electroreductive Acylation of Aromatic Ketones with Acylimidazoles
木瀬直樹, 平野裕貴, 田中義

J. Org. Chem., Vol. 70, No. 23, pp. 9407-9410, Nov. 2005.

Carbon-TiO_2 Hybrid Spherical Microbeads with Photocatalytic Activity Prepared using Cellulose-Inorganic Hybrid-sphering Technique
永岡昭二[*1]，有賀賢二[*2]，久保博美[*2]，櫻井敏彦，高藤誠[*2]，伊原博隆[*2]（[*1]熊本県工業技術センター，[*2]熊本大学）
Transactions of the Materials Research Society of Japan, Vol. 30, No. 4, pp. 1135-1138, 2005.

Formation of Microtubular Suprastructures through Nanofabrication with Mono Alkyl L-Glutarimide Derivative
高藤誠[*1]，原田博孝[*1]，吉良佳子[*1]，櫻井敏彦[*1]，鉢迫博[*2]，伊原博隆[*1]（[*1]熊本大学，[*2]崇城大学）
e-Polymers, on Polymers for Advanced Technologies, pp. 1-3, 2005.

Preparation of Spherical Nano Particles Using Novel Oligosaccharide Pendant Polymers and their Characterization
佐藤崇雄[*1]，永岡昭二[*2]，櫻井敏彦，高藤誠[*1]，伊原博隆[*1]（[*1]熊本大学，[*2]熊本県工業技術センター）
Transaction of the Material Research Society of Japan, Vol. 30, pp. 1139-1142, 2005.

A new method for evaluation of mobility of Silica-grafted Alkyl chains by suspension-state ^{1}H-NMR
H. R. Ansarian[*], M. Derakhshan[*], M. M. Rahman[*], 櫻井敏彦，高藤誠[*]，伊原博隆[*]（[*]熊本大学）
Candian Journal of Chemistry, Vol. 83, pp. 1792-1798, 2005.

Poly(4-vinylpyridine) as a novel organic end-capping reagent for silica and its specific selectivity for PAHs and dinitropyrenes in a reversed phase
伊原博隆[*1]，福井愛[*1]，三牧崇雅[*1]，春藤敦臣[*1]，W. Dong[*1], M. Derakhshan[*1], 櫻井敏彦，高藤誠[*1]，永岡昭二[*2]（[*1]熊本大学，[*2]熊本県工業技術センター）
Analytica Chimica Acta, Vol. 548, pp. 51-57, 2005.

Evaluation of microstructural features of a new polymeric organic stationary phase grafted on silica surface: A paradigm of characterization of HPLC-stationary phases by a combination of suspension-state ^{1}H-NMR and solid-state ^{13}C-CP/MAS-NMR
H. R. Ansarian[*], M. Derakhshan[*], M. M. Rahman[*], 櫻井敏彦，高藤誠[*]，伊原博隆[*]（[*]熊本大学）
Analytica Chimica Acta, Vol. 547, pp. 179-187, 2005.

Dioctadecyl L-glutamide-derived lipid-grafted silica as a novel organic stationary phase for RP-HPLC
高藤誠[*]，M. M. Rahman[*]，H. R. Ansarian[*]，M. Derakhshan[*]，櫻井敏彦，伊原博隆[*]（[*]熊本大学）
Journal of Chromatography A, Vol. 1074, pp. 223-228, 2005.

Self-assembled organic phase for RP-HPLC
伊原博隆[*1]，高藤誠[*1]，櫻井敏彦，佐川尚[*2]，永岡昭二[*3]（[*1]熊本大学，[*2]京都大学，[*3]熊本県工業技術センター）
Enclycopedia of Chromatography, pp. 1528-1535, 2005.

Characterization of cellulose microbeads prepared by a viscose phase separation method and their chemical modification using acid anhydride
永岡昭二[*1]，戸畑温子[*2]，谷口[*2]，佐藤崇雄[*2]，櫻井敏彦，高藤誠[*2]，伊原博隆[*2]（[*1]熊本県工業技術センター，[*2]熊本大学）
Journal of Applied Polymer Science, Vol. 97, pp. 149-157, 2005.

Cellulose/TiO2 hybrid spherical microbeads prepared by a viscose phase separation method: Control of the distribution of TiO2 particles in a sphering system
永岡昭二[*1]，久保宏美[*2]，櫻井敏彦，高藤誠[*2]，伊原博隆[*2]（[*1]熊本県工業技術センター，[*2]熊本大学）
Polymer Journal, Vol. 37, No. 3, pp. 186-191, 2005.

Molecular-length and chiral discriminations by beta-structural poly(L-alanine) on silica
春藤敦臣[*1]，櫻井敏彦，高藤誠[*1]，永岡昭二[*2]，伊原博隆[*1]（[*1]熊本大学，[*2]熊本県工業技術センター）
Journal of Chromatography A, Vol. 1073, pp. 169-174, 2005.

Ethanol production from cellobiose by *Zymobacter palmae* carrying the *Ruminocuccus albus* β-glucosidase gene
簗瀬英司、山本桂子、佐藤大、岡本賢治
J. Biotech., Vol. 118, pp. 35-43 2005.

Ethanol production from cellulosic materials by genetically engineered *Zymomonas mobilis*
簗瀬英司、野崎浩司、岡本賢治
Biotechnology Letters, Vol. 27, pp. 259-263, 2005.

Purification and characterization of Extracellular 1,2-a-L-fucosidase from *Bacillus cereus*
三浦豊和、岡本賢治、簗瀬英司
J. Biosic. Bioeng., Vol. 99, No. 6, pp. 629-635, 2005.

Cyanide fishing and cyanide detection on coral reef fish using chemical tests and biosensors
K.K. W. Mak*, 簗瀬英司, R. Renneberg*（*The Hong Kong Univ. of Science and Technology）
Biosensors and Bioelectronics, Vol. 20, pp. 2581-2593, 2005.

Application of cyanide hydrolase from *Klebsiella* sp. In a biosensor system for the detection of low-level cyanide
K.K.W.Mak*, A.W.C.Law*, 徳田俊輔, 簗瀬英司, R. Renneberg*（*The Hong Kong Univ. of Science and Technology）
Appl. Microbiol. Biotechnol., Vol. 67, pp. 631-636, 2005.

Novel optical biotest for determination of cyanide traces in marine fish using microbial cyanide hydratase and formate dehydrogenase
K.K.W.Mak*, 簗瀬英司, R.Renneberg*（*The Hong Kong Univ. of Science and Technology）
Biosensors and Bioelectronics, Vol. 149, 131-135, 2005.

新規エタノール発酵細菌ザイモバクターの育種
簗瀬英司
エコバイオエネルギーの最前線、植田充美・近藤昭彦監修, pp .53−59, 2005.

Retention of cyclodextrin complex shiitake (Lentinus edodes) flavors with spray drying
吉井英文、安田正史、古田　武、桑原浩誠、大川原正明*1、P. Linko*2（*1 大川原化工機㈱、*2 ヘルシンキ工科大学）
Drying Technology, Vol. 23, pp. 1217-1227, 2005.

Stability of alcohol dehydrogenase (ADH) during spray drying and storage
吉井英文、大橋哲也、釘本祐樹、古田　武、P. Linko*（*ヘルシンキ工科大学）
Drying Technology, Vol. 23, pp. 1205-1215, 2005.

Influence of emulsion and powder size on the stability of encapsulated *d*-limonene by spray drying
A. Soottitantawat, F. Bigeard*1、吉井英文、古田　武、大川原正明*2、P. Linko*2（*1ENSBANA、*2 大川原化工機㈱、*3 ヘルシンキ工科大学）
Inn. Food Sci. and Emerg. Technol., Vol. 6, pp. 107-114, 2005.

Microencapsulation of *l*-menthol by spray drying and its release characteristics
A. Soottitantawat, 高山耕平、吉井英文、古田　武、大川原正明*1、P. Linko*2（*1 大川原化工機㈱、*2 ヘルシンキ工科大学）
Inn. Food Sci. and Emerg. Technol., Vol.6, pp. 107-114, 2005.

Interaction of modified cyclodextrins with cytochrime P-450
石川　稔*, 吉井英文、古田　武（*三共㈱）
Biosci. Biotechnol. Biochem., Vol. 69, No. 1, pp. 246-248, 2005.

Flavor release behavior of cyclodextrin-encapsulated flavor in slurry solution under boiling condition
吉井英文、T-L. Neoh、白　鮮和, 古田　武
Proceedings of the 3rd Asian Cyclodextrin Conference (ACC2005) Nankai University, Tianjin, China May 8-12, 2005.

Encapsulation and release characteristics of inclusion complex of carbon dioxide (CO2) and alpha-cyclodextrin (α-CD)
古田　武、T-L. Neoh、白　鮮和, 吉井英文
Proceedings of the 3rd Asian Cyclodextrin Conference (ACC2005) Nankai University, Tianjin,

China May 8-12, 2005.

噴霧乾燥粒子の形態変化(morphology)
古田　武、吉井英文、A.　Soottitantawat、大橋哲也
ケミカルエンジニヤリング Vol. 50, pp. 107-114, 2005.

高度不飽和脂肪酸（PUFA）およびそのオイルの酸化速度
吉井英文、古田　武、
水産資源の先進的有効利用法、 (株)エヌテイエス pp. 448-453, 2005.

土木工学科

海中ケーブルで係留された浮体橋の地震時応答特性
福田　功[*1]，上田　茂，菅野高弘[*2],中野則夫[*3]，小鴨竜智[*4]，平尾壽雄[*5]（[*1] 関西空港㈱，[*2](独）港湾空港技術研究所，[*3](財）沿岸技術センター，[*4] 中電技術コンサルタント㈱，[*5](社）日本海洋開発建設協会）
海洋開発論文集, Vol.21, 土木学会, pp. 1101-1106. 2005．7.

海中ケーブルで係留された浮体橋の波浪中応答特性
福田　功[*1] ，上田　茂，菅野高弘[*2],中野則夫[*3]，日下　理[*4]，平尾壽雄[*5]（[*1] 関西空港㈱，[*2](独）港湾空港技術研究所，[*3](財）沿岸技術センター，[*4] 中電技術コンサルタント㈱，[*5](社）日本海洋開発建設協会）
海洋開発論文集, Vol.21, 土木学会, pp. 1095-1100. 2005．7.

Examination of Ship Suffering at the Hatsukaichi Area Lumber Wharf
上田　茂, 紀村　亮[*1] , 日根野元裕[*2],([*1] 宇部市，[*2]㈱三井造船昭島研究所）
Proc. of the 2nd International Coastal Synposium, A3-3　pp．1-22

Rocking dynamics of unanchored model flat-bottom cylindrical shell tanks subjected to harmonic excitation
谷口朋代
Journal of Pressure Vessel Technologies, ASME, Vol. 127, Issue 4, pp. 373-386, 2005.

Governing equations of motion of walking behavior of unanchored flat-bottom cylindrical shell model tanks
谷口朋代，今井康二
PVP, Seismic Engineering, ASME, Paper No. PVP2005-71288, 2005.

Effects of Current Induced Static Response on Total Response of Offshore Structures Subjected to Wave and Current
谷口朋代，河野健二[*]（[*]鹿児島大学）
The 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Volume I, pp. 283-288, 2005.

Seismic Engineering-2005; Seismic Response of Structures
C. S. Tsai [*] (including 谷口朋代) ([*] Feng Chia University)
ASME, PVP Division, 2005.

Fluid-Structure Interaction-2005; Problems Involving Thermal-Hydraulics, Liquid Sloshing and Extreme Loads on Structures
F. Moody [*1] (including D. Brochard[*2], 谷口朋代 and D.C. Ma[*3]) ([*1] General Electronic (Retired), [*2]Commissariat a l'Energie Atomique, [*3]Argonne National Laboratory)
ASME, PVP Division, 2005.

Field Investigation on Turbidity caused by Dredging using the Watertight Bucket
松田信彦[*]，五明美智男[*]，松原雄平，檜谷　治，黒岩正光（[*]東亜建設工業㈱）
Proc. of The 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.650-655, June, 2005.

洪水流入の影響を考慮した一次元貯水池流動モデ DYRES の検討
矢島　啓，吉川　栄[*1]・稲若孝治[*2]
（[*1] 西谷技術コンサルタント㈱，[*2] 国土交通省中国地方整備局）
水工学論文集，Vol.49，pp.1129-1134，2005 年 2 月

異高同時選択取水によるダム貯水池の水質保全効果に関する研究
矢島　啓，吉川　栄[*1] ([*1]西谷技術コンサルタント㈱）
水工学論文集，Vol.49，pp.1135-1140，2005 年 2 月

常射流混在場における段落ち下流部の局所洗掘現象に関する数値計算
梶川勇樹，道上正規[*]，檜谷　治，中村真郷（[*]財団法人とっとり政策総合研究センター）
水工学論文集，Vol.49，pp.775-780，2005 年 2 月

Dynamic theory of rigid-plasticity
榎　明潔, BinXuan Luong[*1], 岡部　登[*2], 伊藤　勝久[*3]（[*1] 鳥取大学大学院博士後期課程, [*2] ㈱ニュージェック, [*3] 関西総合情報研究所）
Soil Dynamics and Earthquake, Elsevier, Amsterdam, pp.635-647, 2005.

Temperature and Time Effects on the Secondary Compression of a Highly Plastic Clay: Bentonite
清水正喜，勝原宙貴*（*やまこう建設㈱）
Proc. 15th Int. Offshore and Polar Eng. Conf., Int. Soc. of Offshore and Polar Engineers, Vol.1, pp.498-502, June, 2005.

一次元圧密試験における逆解析手法の適用
清水正喜，石飛善行*（*㈱大林組）
地盤と建設，地盤工学会中国支部論文報告集，第23巻，1号，pp.65-71，2005年12月

火山灰質土ーその性質と設計施工ー．4.火山灰質粘性土の工学的性質
清水正喜，風間基樹*（*東北大学大学院）
土と基礎, 地盤工学会誌, 第53巻, 12号, pp.107-114, 2005年12月

コンクリート診断士合格必携
笠井芳夫[*1]，田澤榮一[*2]，井上正一，他10名（[*1] 日本大学名誉教授，[*2] 広島大学名誉教授）
技術書院，2005年2月

アルカリ骨材反応試験方法と試験方法に関連する最近の動向
井上正一，黒田　保
自然環境下のコンクリート性能評価研究委員会報告書，日本コンクリート工学協会，pp.124-136，2005年6月

フライアッシュの性質が混和剤の添加量に及ぼす影響
吉野　公，井上正一，黒田　保，村山真一
コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.175-180，2005年

技術者倫理教育における事例演習
吉野　公
平成17年度工業・工学教育研究講演会講演論文集，pp.28-29，2005年

NaOH溶液に浸せきしたコンクリートのASR膨張に与える保存条件の影響
黒田　保，井上正一，吉野　公，西林新蔵*（*中研コンサルタント）
コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第5巻，pp.159-166，2005年10月

2000年鳥取県西部地震によるアスファルト舗装道路の被害とその記録
藤村　尚,坂口雅範*（*㈱NIPPOコーポレーション）
地盤工学会中国支部,「地盤と建設」,Vol.23,No.1, pp.59-64，2005年.

鳥取県岩石データベースの作成−岩石の顕微鏡写真とその有効利用−
藤村　尚, 山口健二[*1], 今村直人[*2]（[*1]㈱鵬技術コンサルタント，[*2]㈱荒谷建設コンサルタント）
地盤工学会中国支部,「地盤と建設」,Vol.23,No.1, pp.91-94，2005年.

水底における表面波探査の適用のための現場実験
北　高穂*, 藤村　尚, 林　宏一*, 斉藤正徳*, 鴨下智裕*（*㈱応用地質）
地盤工学会関西支部, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム論文集，pp.1-6，2005年.

鳥取県岩石データベースの作成
藤村　尚
地盤工学会, 土と基礎,
Vol.53,No.6, pp.22-24，2005年6月.

Rockfall path analysis using a three-dimensional numerical method
西村　強，金 美錦，木山英郎，谷口洋二*（*サンイン技術コンサルタント）
Proceedings of International conference on landslide risk management, Vancouver, CD-ROM,　2005.6

非静水圧荷重下の円形トンネルの弾塑性解析に関する検討
福田　毅，古川　耕平，西村　強，木山　英郎，
土木学会第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.357-362，2005年1月

Rockfall path analysis using a three-dimensional numerical method
西村　強，金 美錦，木山英郎，谷口洋二
Proceedings of International conference on landslide

risk management, Vancouver, CD-ROM, 2005.6

非静水圧荷重下の円形トンネルの弾塑性解析に関する検討
福田 毅，古川 耕平，西村 強，木山 英郎，土木学会第 34 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.357-362，2005 年 1 月

1943 年鳥取地震の被害状況と地盤震動特性の関係
野口竜也，窪田彰夫*，西田良平（*白兎設計）
第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集，CD-ROM，No.58，2006 年 11 月

重力及び微動データの併合処理による地盤構造推定手法の適用性の検討
坂井公俊*1，盛川 仁*2，野口竜也（*1 鉄道総合技術研究所，*2 東京工業大学）
第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集，CD-ROM，No.42，2006 年 11 月

島根県松江平野の常時微動から推定される地盤構造
足立正夫*1, 元木健太郎*2, 瀬尾和大*2, 野口竜也，西田良平（*1 米子工業高校，*2 東京工業大学）
第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集，CD-ROM，No.46，2006 年 11 月

福井平野のレファレンスポイントの H/V スペクトルの特性について
安井 譲*1，植本安彦*1，野口竜也，小嶋啓介*2，前田寿朗*3（*1 福井工業大学，*2 福井大学，*3 早稲田大学）
第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集，CD-ROM，No.59，2006 年 11 月

1943 年鳥取地震における建物被害と地盤震動特性の関係
野口竜也，窪田彰夫*，西田良平（*白兎設計）
東濃地震科学研究所報告，Seq. NO.19 ，地震防災分野，震害連鎖特集（2），pp.1-7，2006 年 11 月

A Comprehensive and Effective Earthquake Information System: Contributions to Earthquake Hazard Mitigation for Local Government
渡辺邦彦*，橋本学*，野口竜也，平野憲雄*，*James J. Mori（*京都大学防災研究所）
Annuals of Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.49C, pp.55-59 Apr. 2006.

Hydrothermal System beneath Mt. Fuji volcano inferred from Magnetotellurics and Electric Self-potential
相澤広記，吉村令慧，大志万直人，山崎健一，宇都智史，小川康雄，S. B. Tank，神田 径，坂中伸也，古川勇也，橋本武志，上嶋 誠，小河 勉，塩崎一郎，A. W. Hurst
EARTH AND PLANETARY SCIENCE LETTERS 235 (1-2): 343-355 JUN 30 2005

Resistivity imaging across the source region of the 2004 Mid-Niigata Prefecture earthquake (M6.8), central Japan
上嶋 誠，小川康雄，本蔵義守，小山 茂，氏原直人，茂木 透，山谷祐介, 原田 誠，山口 覚，塩崎一郎，野口竜也，桑波吉紘，田中嘉一，望戸裕司，真鍋典子，西原正典，坂守，芹澤正人
EARTH PLANETS AND SPACE 57 (5): 441-446 2005

海岸景観評価システムの確立に関する研究
松原雄平，犬山 正*1，山形浩一*1，市村 康*2，磯打千雅子*2（*1 国土交通省，*2 日本ミムニヤ㈱）
海岸工学論文集，第 52 巻，pp.1231-1235，2005 年 10 月

沿岸域のマッピング手法に関する研究
市村 康*1，松原雄平（*1 日本ミムニヤ㈱）
海岸工学論文集，第 52 巻，pp.1436-1440，2005 年 10 月

混合粒径砂の分級と汀線変化を考慮した 3 次元海浜変形予測モデル
黒岩正光，口石孝幸*1，加藤憲一*1，松原雄平，野田英明*2，中本良平*3（*1 いであ㈱，*2 アイ・シー・イー，*3 西谷技術コンサルタント）
海岸工学論文集，第 52 巻，pp.521-525，2005 年 10 月

冠水・干出を考慮した 3 次元潮汐流数値シミュレーションに関する研究
黒岩正光，中平順一*1，松原雄平（*1 八千代エンジニヤリング）
海洋開発論文集，Vol.21，pp.623-628，2005 年 7 月

社会開発システム工学科

Proceedings of the Eleventh ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, , St. Louis, Missouri, U.S.A., August 4-6, 2005, pp.1-369.
H. Pham[*]，山田茂（[*]Rutgers University）

A Software Reliability Tool with Economical Analysis for Distributed Development Environment
田村慶信[*1], 山田茂, 木村光宏[*2]（[*1]鳥取環境大学, [*2]法政大学）
Recent Developments in Quality, Reliability and Information Technology, ed. by Kapur, P.K., pp.34-41, Narosa Publishing House, New Delhi, 2005.

A Software Reliability Growth Model for Distributed Environment with Logistic Learning Function
P.K. Kapur[*]，D.N. Goswami[*]，A. Gupta[*]，山田茂（[*]Delhi University）
Recent Developments in Quality, Reliability and Information Technology, ed. by Kapur, P.K., pp.74-84, Narosa Publishing House, New Delhi, 2005.

信頼度成長モデルを用いたソフトウェアの処理性評価
得能貢一，山田茂
ソフトウェア工学の基礎 XII－日本ソフトウェア科学会 FOSE 2005（レクチャーノート／ソフトウェア工学シリーズ 31），権藤克彦・小林隆志編，pp.37-42，近代科学社，東京，2005 年 11 月.

オープンソース共同開発環境に対するソフトウェア信頼性評価法に関する考察
田村慶信[*1], 山田茂, 木村光宏[*2]（[*1]鳥取環境大学, [*2]法政大学）
電子情報通信学会論文誌，Vol.J88-A，No.7, pp.840-847, 2005 年 7 月.

Bayesian Approach to Optimal Release Policy of Software System
H.S. Kim[*1], 山田茂, D.H. Park[*2]（[*1]Chosun University, [*2]Hallym University）
IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Science, Vol.E88-A, No.12, pp.3618-3626, December 2005.

A Software Reliability Assessment Tool for Distributed Software Development Projects
田村慶信[*1]，山田茂，（[*]鳥取環境大学）
Opsearch, Vol.42, No.4, pp.297-309, December 2005.

Flexible Software Reliability Models for Distributed Systems
P.K. Kapur[*]，D.N. Goswami[*]，A. Gupta[*]，山田茂（[*]Delhi University）
Opsearch, Vol.42, No.4, pp.378-398, December 2005.

Reliability Assessment Method Based on Logarithmic Poisson Execution Time Model for Open Source Project
田村慶信[*]，山田茂（[*]鳥取環境大学）
Proc. Second IASTED International Multi-Conference on Software Engineering (ACIT-SE), Novosibirsk, Russia, June 20-24, 2005, pp.54-59.

A Method of Software Reliability Assessment for Xfce Open Source Project
田村慶信[*]，山田茂（[*]鳥取環境大学）
Supplement Volume of the Proce. 2005 IEEE International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN 2005), Yokohama, Japan, June 28-July 1, 2005, pp.34-35.

Comparison of Software Reliability Assessment Methods for Open Source Software
田村慶信[*]，山田茂（[*]鳥取環境大学）
Proc. Eleventh IEEE International Conference on Parallel and Distributed Systems (ICPAD'05) (Volume 2) (The First IEEE International Workshop on Reliability and Automatic Management in Parallel and Distributed Systems (RAMPDS'05), Fukuoka, Japan, July 20-22, 2005, pp.488-492.

A Software Reliability Assessment Tool Based on AHP and SRGM for An Open Source Software
田村慶信[*]，山田茂（[*]鳥取環境大学）
Proc. Eleventh ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, St. Louis, Missouri, U.S.A., August 4-6, 2005, pp.1-5.

A Reliability Assessment Method Based on ANP for an Open Source Software

入口修一，田村慶信*，山田茂（*鳥取環境大学）
Proc. Eleventh ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, St. Louis, Missouri, U.S.A., August 4-6, 2005, pp.12-16.

Discrete Software Reliability Models Based on Software Failure-Occurrence Times Distribution
井上真二，山田茂
Proc. Eleventh ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, St. Louis, Missouri, U.S.A., August 4-6, 2005, pp.87-91.

Markovian Operational Software Reliability Measurement Based on Accelerated Life Testing Model
森田創，得能貢一，山田茂
Proc. Eleventh ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, St. Louis, Missouri, U.S.A., August 4-6, 2005, pp.204-208.

Early-Stage Product Quality Prediction by Using Software Process Data
福島利彦*，福田篤，山田茂（*(株)日新システムズ）
Proc. Eleventh ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, St. Louis, Missouri, U.S.A., August 4-6, 2005, pp.261-265.

A Software Reliability Growth Model with Module Composition
藤原隆次*，井上真二，山田茂（*富士通周辺機(株)）
Proc. Eleventh ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, St. Louis, Missouri, U.S.A., August 4-6, 2005, pp.266-270.

A Generalized Discrete Software Reliability Model and Its Application to Optimal Release Problems
森田創，得能貢一，山田茂
Proc. 2005 International Workshop on Recent Advances in Stochastic Operations Research (2005 RASOR), Canmore, Alberta, Canada, August 25-26, 2005, pp.88-95.

Validation of an OSS Reliability Assessment Method Based on ANP and SRGM's
田村慶信*，山田茂（*鳥取環境大学）
Proc. Eleventh ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, St. Louis, Missouri, U.S.A., August 4-6, 2005, pp.273-280.

Comparison of Software Reliability Assessment Methods for Open Source System Development
田村慶信*1, 山田茂, 木村光宏*2 (*1 鳥取環境大学, *2 法政大学)
Proc. International Conference on Quality '05-Tokyo (ICQ'05-Tokyo), Tokyo, Japan, September 13-15, 2005, V-11-0-1. PDF.

Software Development Effort Estimation Based on COCOMO and Its Practical Application
藤原隆次*，山田茂（*富士通周辺機(株)）
Proc. 3rd World Congress for Software Quality (3WCSQ), Munich, Germany, September 26-30, 2005, pp.I-303-I-312.

ソフトウェア信頼性に影響を及ぼす品質工学的アプローチに基づく人的要因分析と信頼性予測
山田茂，冨高功介
日本信頼性学会誌（信頼性），Vol.27，No.7, pp.439-448，2005 年 10 月.

高品質・信頼性ソフトウェア開発のためのプロジェクトマネジメント技術
福島利彦*，山田茂（*(株)日新システムズ）
日本信頼性学会誌（信頼性），Vol.27，No.7, pp.483-494，2005 年 10 月.

不完全デバッグ環境下におけるソフトウェアの最適リリース問題
井上真二，山田茂
統計数理研究所共同研究リポート 178「最適化：モデリングとアルゴリズム 18」，pp.376-381，2005 年 3 月.

分散ソフトウェア開発環境に対する不完全デバッグを考慮した最適リリース問題
田村慶信*，内田雅也，山田茂（*鳥取環境大学）
統計数理研究所共同研究リポート 178「最適化：モデリングとアルゴリズム 18」，pp.382-390，2005 年 3 月.

ソフトウェア可用性を考慮したデバッグ回数に基づく最適リリース問題
得能貢一，山田茂
統計数理研究所共同研究リポート 178「最適化：モデリングとアルゴリズム 18」，pp.391-398，2005 年 3 月.

離散型モデルに基づくソフトウェア信頼性評価の高精度化に関する一考察
井上真二，山田茂
第35回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集，2005年6月，東京，pp.191-196.

オープンソース･プロジェクトにおけるソフトウェア信頼性評価ツールの開発
田村慶信，咽原良浩，山田茂
第35回信頼性・保全性シンポジウム発表報文集，2005年6月，東京，pp.197-202.

ソフトウェア信頼性に影響を及ぼす人的要因に対する品質工学的アプローチと信頼性予測に関する考察
山田茂
2005年安全性・信頼性ワークショップ論文集，広島大学，東広島市，2005年9月22日，pp.96-105.

ソフトウェアコンポーネント間の相互作用を考慮したOSSに対する信頼性評価法
福永康裕*，田村慶信*，山田茂（*鳥取環境大学）
第7回IEEE広島支部学生シンポジウム（HISS）論文集，2005年11月，岡山市，pp.221-223.

プロセスデータに基づく早期ソフトウェア品質予測に関する研究
福田篤，福島利彦*，山田茂（*(株)日新システムズ）
第7回IEEE広島支部学生シンポジウム（HISS）論文集，2005年11月，岡山市，pp.246-247.

AHPに基づくデスクトップ環境に対するソフトウェア信頼性評価に関する研究
入口修一，田村慶信*，山田茂（*鳥取環境大学）
第7回IEEE広島支部学生シンポジウム（HISS）論文集，2005年11月，岡山市，pp.248-249.

マルコフモデルを用いたソフトウェアの運用信頼性評価法に関する考察
森田創，得能貢一，山田茂
第7回IEEE広島支部学生シンポジウム（HISS）論文集，2005年11月，岡山市，pp.250-251.

混入フォールトを考慮したソフトウェア信頼性評価に関する一考察
井上真二，山田茂
第7回IEEE広島支部学生シンポジウム（HISS）論文集，2005年11月，岡山市，pp.307-308.

離散時間待ち行列におけるスマート客問題
小柳 淳二，河合　一
京都大学数理解析研究所講究録 1457 「不確実性科学と意思決定の数理と応用」，pp. 194—199, 2005.

An optimal policy to minimize delay costs due to waiting time in a queue
小柳 淳二，河合　一
Recent Advances in Stochastic Operations Research (Proc. of RASOR 2005), Canmore, Canada, pp. 118—123, 2005.

Therapeutic Decision Making for Uncertainty Averse Patient
佐藤毅，河合　一
Advanced Reliability Modeling II, Reliability Testing and Improvement,　pp.76--767, 2006.

Inspection Thresholds under Imperfect Inspection
佐藤毅，河合　一
Proceedings of 12th International Conference on Reliability and Quality in Design, pp.163--166, 2006.

Hit and Target Models for DNA Damage with Indirect Action
佐藤毅，河合　一
Computers & Mathematics with Applications, vol.51, No.2, pp.257--268, 2006.

不確実性回避的患者の治療戦略について
佐藤毅，河合　一
京都大学数理解析研究所講究録，第1504巻，情報決定過程論展開，pp.59-66，2006年7月

製品回収公表時期に関する考察
柏木厚人，佐藤毅，河合　一
京都大学数理解析研究所講究録，第1504巻，情報決定過程論展開，pp.52--58，2006年7月

不完全情報に基づく逐次点検方策について
佐藤毅，河合　一
京都大学数理解析研究所講究録，第1477巻，不確実性の下での意思決定と数理モデル，pp.193-198，2006年3月

Age-Dependent Failure Interaction

趙清，佐藤毅，河合　一
Reliability Modeling, Analysis and Optimization, Vol.9, pp.45--483, 2006.

Lifecycle Cost Evaluation of Maintenance Policy - The case of the water transmission system in Kobe
K. Tanimoto, M. Matsushita and H. Tatano
Systems and Human Science -For Safety, Security, and Dependability -(Eds.: T. Arai, S. Yamamoto, K. Makino), Elsevier, pp.147-158, 2005.

Empirical Study on Fair Cost Allocation of Joint Project by Cooperative Game Theory - A Case of Local Bus Transportation Service in Japan –
谷本圭志，喜多秀行
Interdisciplinary Information Sciences 11, No.1, pp.59-67, 2005.3

Air Service Development of Local Airports and its Influence on the Formation of Aviation Network
喜多秀行，小池淳司，谷本圭志
Global Competition in Transportation Markets: Analysis and Policy Making, Research in Transportation Economics 13 (Eds.: A. Kanafani and K. Kuroda), Elsevier, pp.233-249, 2005.

過疎地域における路線バスサービス水準の設定に関する考察
谷本圭志，喜多秀行
土木計画学研究・講演集，No.31, CD-ROM, 2005.6.

満足度調査結果からみた過疎地域におけるバス交通サービスに関する研究
宮崎耕輔[*1]，徳永幸之[*2]，菊池武弘[*3]，喜多秀行，谷本圭志([*1]金沢大学大学院，[*2]東北大学，[*3]青森県自動車団体連合会)
土木計画学研究・講演集，No.31, CD-ROM, 2005.6.

移動距離が外出頻度と活動水準に及ぼす影響のモデル分析
喜多秀行，月岡修一，谷本圭志
土木計画学研究・講演集，No.31, CD-ROM, 2005.6.

バスサービスの運行委託契約に関する一考察
喜多秀行，松永拓也，谷本圭志
土木計画学研究・講演集，No.31, CD-ROM, 2005.6.

防災の経済分析　リスクマネジメントの施策と評価
谷本圭志（分担執筆）
勁草書房，pp.247-257, 2005.6.

Cost Allocation in Joint Replacement for Multi-State Deteriorating Systems
谷本圭志
Proc. of the 2005 IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics, CD-ROM, pp.1150-1155, 2005.10.

公共交通のサービスレベル低下による生活行動の格差分析
宮崎耕輔[*1]，徳永幸之[*2]，菊池武弘[*3]，小枝昭[*3]，谷本圭志，喜多秀行([*1]金沢大学大学院，[*2]東北大学，[*3]青森県自動車団体連合会)
土木計画学研究・論文集，Vol.22, No.3, pp.583-591, 2005.10.

環境管理施設の共同更新のための費用配分に関する研究
谷本圭志
環境システム研究論文集，pp.295-303，Vol.33, 2005.11.

走行サービスの質の評価に関するドライバーの認識構造
喜多秀行，小坪英公，谷本圭志
土木計画学研究・講演集, No.32, CD-ROM, 2005.12.

地方部における公共交通と移動の自由に関する一考察
谷本圭志
土木計画学研究・講演集, No.32, CD-ROM, 2005.12.

Spatial Benefit Incidence Analysis of Airport Capacity Expansion: Application of SCGE Model to the Haneda Project
上田孝行，小池淳司，山口勝弘，土谷和之
Research in Transportation Economics Volume 13, Global Competition in Transportation MarketsAnalysis and Policy Making, pp.165-196, Elsevier, 2005.

Economic Damage Assessment of Catastrophe by using Spatial Computable General Equilibrium Analysis
小池淳司，上田孝行
The 19th Pacific Regional Science Conference, Nihon

University, 2005.

International Freight Transport Demand Forecasting by SCGE Model
国田　淳，水谷　誠，土谷和之，秋吉盛司，小池淳司，石川良文，石黒一彦
The 19th Pacific Regional Science Conference, Nihon University, 2005.

地域間のフェイス・トゥ・フェイス・コミュニケーションによる生産性の向上を考慮したSCGEモデルの検討
土谷和之[*1]，小池淳司，上田孝行[*2]（[*1]㈱三菱総合研究所，[*2]東京大学）
土木計画学研究・論文集，Vol.22，pp.111-120，2005年

DEA手法による上水道事業の効率性分析
小池淳司，平井健二[*1]，細井由彦（[*1]㈱エイトコンサル）
環境工学研究論文集，Vol.42，pp.183-192，2005年

将来社会経済シナリオ下でのSCGEモデルによる道路投資評価
小池淳司，宮下光宏[*1]，右近　崇[*1]，佐藤　尚[*1]（[*1]㈱ＵＦＪ総合研究所）
土木計画学研究・講演集 Vol.32，CD-ROM，2005年

規模の経済を考慮した準動学 SCGE モデルによる都市部交通渋滞の影響評価
小池淳司，川本信秀[*1]（[*1]鳥取大学大学院）
土木計画学研究・講演集 Vol.32，CD-ROM，2005年

スマトラ沖地震の経済被害評価
小池淳司，大田垣聡[*1]（[*1]鳥取大学大学院）
土木計画学研究・講演集 Vol.32，CD-ROM，2005年

社会資本スピルオーバー効果の県間比較
小池淳司，西尾明子[*1]（[*1]鳥取大学大学院）
土木計画学研究・講演集 Vol.32，CD-ROM，2005年

SCGEモデルにおける地域間交易の代替弾力性に関する検討
土谷和之[*1]，秋吉盛司[*2]，小池淳司（[*1]㈱三菱総合研究所，[*2]エム・アール・アイ　システムズ㈱）
応用地域学会第19回研究発表会，明海大学，2005年

貨物車の時間価値計測に関するレビュー
牧浩太郎[*1]，土谷和之[*1]，小池淳司，Lóránt. A. Tavasszy[*2]（[*1]㈱三菱総合研究所，[*2]TNO Inro, Delft, The Netherlands）
応用地域学会第19回研究発表会，明海大学，2005年

国際コンテナ港湾整備の経済評価—国際 SCGE モデル・国内エントロピーモデルによる実証分析—
小池淳司，上田孝行[*1]，土谷和之[*2]（[*1] 東京大学，[*2]㈱三菱総合研究所）
応用地域学会第19回研究発表会，明海大学，2005年

防災の経済分析—リスクマネジメントの施策と評価—
小池淳司
勁草書房，第8章（分担執筆），pp.136-150，2005年

Low frequency free waves induced by a mega-float in random sea
木村 晃，藤井秀和[*]（[*](株)いであ）
Proc. of Fifth International Symposium WAVES 2005, Paper No.98, July 2005

人工湧昇流マウンド基材の投入方法の最適化に関する研究
五明美智男[*]，志村豊彦[*]，大野嘉典[*]，松見吉晴（[*]東亜建設工業）
海洋開発論文集，第21巻，pp.337-342，2005年7月

魚礁マウンド構築における投入工法管理システムの開発
松見吉晴，住谷圭一[*]，浅沼丈夫[*]（[*]東亜建設工業）
海洋開発論文集，第21巻，pp.343-348，2005年7月

土運船による土砂投入堆積形状に関する簡易予測図表の提案
矢内栄二[*1]，松見吉晴，伊東　剛[*2]，住谷圭一[*3]（[*1] 千葉工業大学，[*2] 港湾空間高度化環境研究セ

ンター，[*3] ドラムエンジニアリング）
海岸工学論文集，第 52 巻，pp.861-865，2005 年 11 月

断面変形を伴う人工リーフ上での波浪変形計算について
太田隆夫，小林信久[*]，木村　晃（[*]デラウェア大学）
海岸工学論文集，第 52 巻，pp.51-55，2005 年 11 月

分散して存在する小規模な水道施設の維持管理の効率化に関する研究
細井由彦，Dagnachew Aklog，増田貴則，中村真理子
土木学会論文集 No.804/VII-37, pp.125-135,2005 年

Consideration on Optimal Water Leakage Inspection Interval for Areas with Mixture of Different Leakage Outbreak Rates
細井由彦
Proc. of International conference on optimal operation of water distribution system and leakage management technology, pp.83-96, 2005.3

浄水施設の機能の管理と改善
細井由彦，市川浩
新しい浄水技術，（財）水道技術研究センター，技報堂，pp.371-412，2005 年

水循環のシステム
細井由彦
生活水資源の循環技術, 森沢眞輔編著, コロナ社, pp.31-66,2005 年

A study of SS Size Distribution during Runoff and Fractionation of Phosphates depending on Soil Size in Agricultural Watershed
史承煥[*1]，増田貴則，細井由彦（[*1] 江原大学）
Water Science & Technology, Vol.51, No.3-4, pp.393-400, 2005

降雨および農業イベント時に水田から流出する溶存有機炭素の生分解性と流出量
沈秀用[*1]，増田貴則，細井由彦，史承煥[*2]（[*1] 春川市水道局，[*2] 江原大学）
環境工学研究論文集，第 42 巻，pp.137-143，2005 年

Dessolved Organic Matter from Agricultural Fields in the Irrigation Period
Shim Sooyong[*1], Bumchul Kim[*2]，細井由彦，増田貴則（[*1] 春川市水道局，[*2] 江原大学）
Water Science & Technology, Vol.52, No.12, pp.233-241, 2005

Export Rate of Dissolved Organic Matter from Paddy Fields during Cultivation-Activity Events
Shim Sooyong[*1], Bumchul Kim[*2]，細井由彦，増田貴則（[*1] 春川市水道局，[*2] 江原大学）
Paddy and Water Environment, Vol.3, pp.211-218, 2005

Outflow of Dissolved Organic Matter from Agricultural Fields in an Irrigation Period
Shim Sooyong[*1], Bumchul Kim[*2]，細井由彦，増田貴則（[*1] 春川市水道局，[*2] 江原大学）
Jouranl of Korean Society on Water Quality, Vol.21, No.2, pp.141-146, 2005

Production of L-lactic acid from garbage by thermophilic fermentation
赤尾聡史，津野　洋[*1]（[*1] 京大院工）
Proceedings of the 14th Joint KAIST-KYOTO-NTU -NUS Symposium on Environmental Engineering, pp.41-47, Jun. 2005.

半連続培養による未滅菌生ごみからの高光学純度 L-乳酸の生成
赤尾聡史，津野　洋[*1]（[*1] 京大院工）
環境工学研究論文集，第 42 巻，pp.539-544，2005 年 11 月

応用数理工学科

Flying Characteristics in the Free Molecular Region (Influence of Accommodation Coefficients)
Fukui, S., Shimada, H., Yamane, K. and Matsuoka, H.
Microsystem Technologies, Vol. 11, No. 8-10, pp. 805-811, Aug. 2005.

Dynamic Characteristics of Flying Head Slider with Ultra Thin Spacing (CIP Method and Linearized Method)
Fukui, S., Matsui, H., Yamane, K. and Matsuoka, H.
Microsystem Technologies, Vol. 11, No. 8-10, pp. 812-818, Aug. 2005.

Corrected Expression of the van der Waals Pressure for Multilayered System with Application to Analyses of Static Characteristics of Flying Head Sliders with an Ultrasmall Spacing
Matsuoka, H., Ohkubo, S. and Fukui, S.
Microsystem Technologies, Vol. 11, No. 8-10, pp. 824-829, Aug. 2005.

Dynamic Meniscus Models for MEMS Elements
Matsuoka, S., Matsumoto, S. and Fukui, S.
Microsystem Technologies, Vol. 11, No. 8-10, pp. 1132-1137, Aug. 2005.

Electronic states of the clean Ge(001) surface near the Fermi energy
K. Nakatsuji, Y. Takagi, F. Komori, H. Kusuhara and A. Ishii
Phys. Rev. B72, 241308(R), pp.1-4, 2005.

The kinetic Monte Carlo Simulation scheme of the homoepicaxial growth of GaAs(001) for heterostructural growth on GaAs(001) substrate
A.Ishii, M. Tsukao, N. Toda, S. Oshima
cond-mat/0501233, 2005.

Nanoscale structures formed in silicon cleavage studied with large-scale electronic structure calculations: Surface reconstruction, steps, and bending
星　健夫, 井口雄介*, 藤原毅夫*
(*東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻)
Phys. Rev. B72, 075323, 2005.

Theory of large-scale electronic structure calculation and nanostructures formed in silicon cleavage simulation: surface reconstruction, step and bending
星　健夫, 井口雄介*, 藤原毅夫*
(*東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻)
Mater. Res. Soc. Symp. Proc. 832, Warrendale, PA , F.7.9, 2005.

Theory for large scale electronic structure calculations : fracture and surface reconstruction of silicon
藤原毅夫*1, 星　健夫, 高山 立*2
(*1 東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻,
*2 科学技術振興機構)
CURRENT TOPICS IN PHYSICS -In Honor of Sir Roger J Elliott, edited by R A Barrio and K. K. Kaski, Imperial College Press, London, pp. 299-310, 2005.

Difference in Bacterial Motion between Forward and Backward Swimming Caused by the Wall Effect
Y. Magariyama*1, M. Ichiba, K. Nakata, K. Baba, T. Ohtani*1, S. Kudo*2 & T. Goto (*1NFR , *2Toin University of Yokohama)
Biophys. J. Vol. 88, pp.3648-3658, May. 2005.

De Novo Formation of Left-Right Asymmetry by Posterior Tilt of Nodal Cilia
S. Nonaka*1, S. Yoshiba*1, D. Watanabe*1, S. Ikeuchi*1, T. Goto, W. F. Marshall*2, H. Hamada*1 (*1Osaka University, *2University of California)
PLoS Biology Vol. 3, No. 8, pp.1467-1472, Aug. 2005.

A fluid-dynamic interpretation of the asymmetric motion of singly flagellated bacteria swimming close to a boundary
T. Goto, K. Nakata, K. Baba, M. Nishimura & Y. Magariyama* (*NFR)
Biophys. J. Vol. 89, pp.3771-3779, Dec. 2005.

Wind Tunnel Tests on a Different Phase Three - Stage Savonius Rotor
林　農, 岩　李, 原　豊
JSME International Journal, Series B, Vol. 48, No. 1, pp.9-16, Feb. 2005.

A Study on a Water Maker System using Peltier Devices
林　農，劉　薇，野嶋賢吾*，原　豊，田川公太朗 (*鳥取県産業技術センター)
Proc. 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Jeju, KOREA, GA.13 (CD-ROM), Mar. 2005.

Wind Tunnel Test on Improving the Starting Characteristics of Savonius Rotors
林　農，岩　李，原　豊
Proc. 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Jeju, KOREA, GA.65 (CD-ROM), Mar. 2005.

Development of a Measuring System with Two Force Sensors of Aerodynamic Forces Acting on a Two-Dimensional Wing
原　豊，康　仁勝，守屋智弘，有安健一，林　農
Proc. 6th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Jeju, KOREA, JE.08 (CD-ROM), Mar. 2005.

Measurements of Torque Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbine with Inclined Straight Blades
原　豊, 康　仁勝, 林　農, Ion Paraschivoiu* (*Ecole Polytechnique Montreal)
Proc. EXPO World Conference on Wind Energy, Renewable Energy, Fuel Cell (WCWRF 2005), Hamamatsu, Japan (CD-ROM), June 2005.

Characteristics of a Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine in Periodically Varying Wind
康　仁勝，有安健一，原　豊，林　農，Ion Paraschivoiu* (*Ecole Polytechnique Montreal)
Proc. EXPO World Conference on Wind Energy, Renewable Energy, Fuel Cell (WCWRF 2005), Hamamatsu, Japan (CD-ROM), June 2005.

A Study on Water Making System Using Renewable Energy in Tottori Sand Dune
林　農, 田中健司，原　豊，劉　薇，野嶋賢吾*，田川公太朗 (*鳥取県産業技術センター)
Proc. EXPO World Conference on Wind Energy, Renewable Energy, Fuel Cell (WCWRF 2005), Hamamatsu, Japan (CD-ROM), June 2005.

Development of Fresh Water making Systems using of Peltier Devices or Moisture Absorbent
林　農, 原　豊, 田川公太朗, 劉　薇, 田中健司，野嶋賢吾* (*鳥取県産業技術センター)
Proc. 30th Annual Congress of the American Romanian Academy of Arts and Sciences (ARA), Chisinau, Moldova, pp.593-596, July 2005.

Aero**dynamic Forces on an Airfoil in Pitching and/or in a Periodically Varying Wind**
原　豊，康　仁勝，守屋智弘，林　農
Proc. 30th Annual Congress of the American Romanian Academy of Arts and Sciences (ARA), Chisinau, Moldova, pp. 559-562, July 2005.

Wind Tunnel Tests on Deciding the Optimum Overlap Ratio of Savonius Rotors
林　農，岩　李，原　豊
Proc. 4th World Wind Energy Conference & Renewable Energy Exhibition 2005, Melbourne, Australia, Nov. 2005.

工 学 研 究 科

EFFECTS OF MICROSCOPIC SPHERICAL PARTICLES MIXED IN LUBRI-CATING OIL ON FRICTIONAL CHARACTERISTICS OF LINEAR SLIDE GUIDE

上原一剛，小幡文雄

Proceedings of WTC2005, World Tribology Congress Ⅲ, WTC2005-63595, pp.1-2, Sep. 2005.

Frictional Characteristics of Newly Developed Hybrid-type Linear Guide

上原一剛，小幡文雄

Proceedings of The Third International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century, pp.455-458, Oct. 2005.

大山倉吉軽石不撹乱試料のサクション測定一面せん断試験

清水　正喜・山本　大輔*
鳥取大学工学部土木工学科・*株式会社ウエスコ

Shear Box Tests with Measurement of Suction on Undisturbed Samples of Daisen Kurayoshi Pumice

Masayoshi SHIMIZU, Daisuke YAMAMOTO*
Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: mshimizu@cv.tottori-u.ac.jp
* Wesco Co. Ltd., Shimane Branch Office, Matsue, 630-0047 Japan

Abstract: Shear strength characteristics of a volcanic cohesive soil, Daisen Kurayoshi Pumice (DKP), which is a representative problematic soil in Japan, are complicated because of its partial saturation and inhomogeneous nature. A direct shear box testing machine was newly developed to measure the suction in both stages of consolidation and shearing. Direct shear tests were carried out under a normal stress lower than the consolidation yield stress pc. The results showed that: (1) shear strengths were different between specimens although they were tested under a particular normal stress; (2) however, the difference was rationally explained by using the variables of the suction and the normal stress measured below the base of the shear box that is fixed in the vertical direction; and (3) the relationship between the shear strength and the suction was non-linear.

Key Words: Suction, Direct shear box tests, Unsaturated soil, Volcanic cohesive soil

１．はじめに

日本を含め極東および東南アジアは世界でも有数の火山地帯でありいわゆる火山灰質土に広く覆われている．我が国の火山灰質粘性土（細粒分が支配的な火山灰質土）の多くは工学的な取り扱いが困難な問題土である[1]．

本研究は西日本で代表的な問題土である大山倉吉軽石（DKP）のせん断強度特性を明らかにすることを目的としている．この土は比較的飽和度の高い不飽和の状態で存在し，高含水比・高間隙比を有し，撹乱によって極端に強度が低下する超鋭敏な土である．

飽和土のせん断強度特性は間隙比および有効応力とその履歴で説明できるが，この土の不飽和状態でのせん断強度特性をそのようなパラメーターで説明することは容易でない[2]．特に，垂直応力が圧密降伏応力より低い場合，例えば，通常の定圧一面せん断試験において同じ垂直応力を作用させてもせん断強さが大きくばらついたり，垂直応力を大きくするとせん断強さが低くなったりすることもある．

これまでにサクションを考慮すれば試料のせん断強度特性をより合理的に評価できることを明らかにしている[3]が，せん断中のサクションの挙動が不明であった．そこで新たにサクション測定が可能な一面せん断試験装置を開発した．本論文は，主としてその装置を用いて行った一面せん断試験の結果に基づいて圧密・せん断過程におけるサクションの挙動，ならびにせん断強さと垂直応力およびサクションとの関係について考察するものである．

２．試料

鳥取県倉吉市で採取した不撹乱試料を用いた．本研究で用いた試料は過去の研究[1]で用いたものと区別するために DKP3 と呼称する．不撹乱試料ブロックを識別するために B4 や T5 などの記号を用いる．

主な物理的性質は次のようである：
ρ_s=2.81(g/cm^3)，w_L=125%，w_P=81%，細粒分含有

率 30%以上．これらの指標は試料の乾湿履歴の影響を強く受け[4]，一義的に決定できないので平均的な値を記した．

図 1 に力学試験用に整形した供試体から測定した試料の初期状態を間隙比と含水比の関係にして示す．参考までに過去の研究[2]で用いた試料（DKP2）のデータも併せて示している．

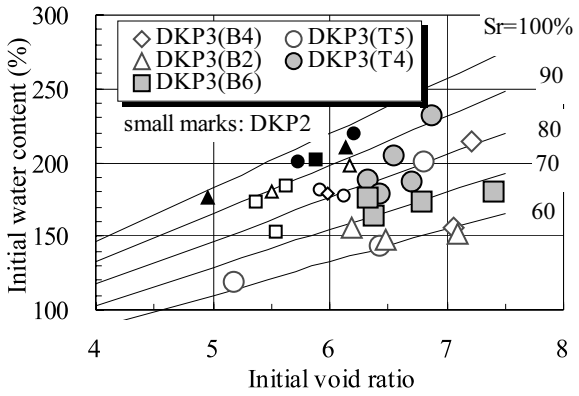


図１．供試体の初期状態

DKP3（B4，B2，T5）は最も最近に試験に供したものでやや乾燥が進んで含水比が低い．DKP2 のうち黒く塗りつぶしたマークは強制的に真空脱気したものである．それらを除いて含水比が 150%以上，間隙比が 5 以上，飽和度が約 80%である．試料採取時に測定した値と大きな差はない．

これまでに行った試験から，この試料の圧密降伏応力 p_c は 160kPa 程度，圧縮指数 C_c は 3.8 と推定されている[3]．C_c はコンシステンシー限界から予測される値より大きい[2]．

３．装置と方法

３．１ 試験装置

不飽和土用一次元圧密試験装置[5]と２種類の一面せん断試験装置を用いた．せん断試験装置の一つはサクションの測定ができないもので改良型一面せん断試験機（三笠式）である．他は新しく開発したもので圧密およびせん断の両過程でサクションの測定が可能である．

サクション測定が出来ない装置でせん断試験を行った場合は圧密過程を不飽和土用一次元圧密試験装置で実施し，圧密過程およびせん断直前のサクションを測定した．この方法で試験した結果の一部は既に公表している[3]が考察を進める上で再度引用することもある．

３．２ サクション測定可能な一面せん断試験装置

この装置は市販の一面せん断試験装置を改良したものである(図２)．装置は上箱が水平方向固定で下箱が水平方向可動であり，下箱の下の荷重計で垂直応力（反力板垂直応力；σ_L）を測定する形式である．

次の二点を改良した．まず加圧版側の垂直応力（σ_U）を測定できるように加圧板上部に荷重計を設置した．次に，供試体底面でサクションを測定できるようにした．即ち，下箱の底部に，供試体底面が接するようににセラミック円板を設置し，下箱外部に圧力変換器を取り付けた．また，供試体の間隙空気圧を測定・制御できるようううにせん断箱全体を圧力セルで覆った．

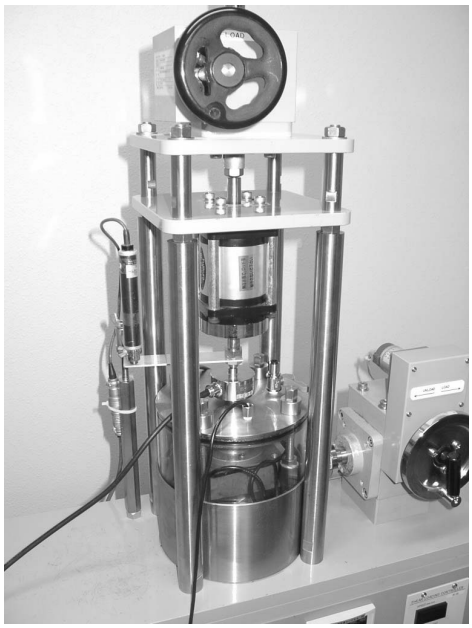


図２．サクション測定が可能な一面せん断試験装置

３．３ 方法

サクション測定可能な装置を用いて行った一面せん断試験の方法を述べる．圧密中の間隙水圧またはサクションの挙動を調べるために底面非排水・上面排水で圧密した．垂直応力σ_U=80kPa で圧密した後，定圧または定体積の条件でせん断した．圧密降伏応力 p_c（=160kPa）より低い垂直応力でのせん断強度特性を解明するためである．
せん断速度は 0.05mm/分または 0.02mm/分で行った．

４．結果と考察

４．１ 圧密圧力によるサクションの変化挙動[3]

一つの供試体に対して圧密圧力 p を段階的に 640kPa まで作用させ，次に 80kPa まで除荷してせん断した．人工的な過圧密の履歴を与えたことになる．この供試体の試験結果を利用して圧密時のサクションの挙動について述べる．

一定の間隙空気圧 u_a を作用させ，圧密荷重 p を段階的に作用させると間隙水圧 u_w は p とともに上昇する．p が低いときは u_w は u_a より小さいが p がある大きさ以上になると u_w は u_a と等しくなる．

間隙水圧 u_w は時間的に変化する．載荷の瞬間に u_w はある量だけ上昇し時間とともに低下して一定になる．p が相対的に低い場合は，載荷の瞬間も平衡時にも u_w は u_a より小さい，即ち，サクションは常に正である．一方，相対的に大きい荷重を載荷すると，u_w は瞬間に上昇して u_a を超え，時間が経つと u_a と等しい大きさで収束する．この実験では 320kPa 以上のの荷重を作用させるとサクションはゼロになった．

除荷時には u_w は一旦減少し，時間とともに回復する．平衡時には u_w と u_a が等しくなった．即ちサクションはゼロのままである．

荷重変化量に対する間隙水圧変化量の割合（B値）と p の関係について述べる．この供試体では，p が低い段階では B 値は 0.2 程度と小さいが p が 400kPa 以上になると 0.5 を超えた．サクションが 0 になるような高い p に対しても B 値はせいぜい 0.6 程度であった．ただし，このような高い荷重段階では供試体の上面から排水が生じた．また，計算上も飽和度は 100%に達した．

４．２ サクション測定一面せん断試験の結果

（1）圧密段階の挙動

圧密圧力を載荷する前に供試体の初期サクションを測定した（図３）．この例では u_w は約 100 分以降ほとんど変化せず，u_a と u_w の差が 55kPa で平衡状態に達している．即ち，初期サクションは 55kPa である．

図４は 80kPa の垂直応力を作用させたときの u_a，u_w，加圧板側垂直応力 σ_U，反力版側垂直応力 σ_L および鉛直変位（圧密量）d の時間的変化である．まず，u_w は垂直応力載荷とともにやや時間的な遅れを伴って増加しその後減少している．鉛直変位 d は載荷とともにほぼ瞬間的に生じ，その後，わずかに二次圧密的な挙動を示している．反力板側垂直応力 σ_L は作用させた垂直応力（σ_U）の変化と同時に変化しているが低い値で収束している．これは圧密によって供試体が圧縮し，供試体周面に上向きの摩擦力が働いたためである．この周面摩擦の影響は，後述するように，せん断強度を評価する際にも問題を複雑にする要因になる．

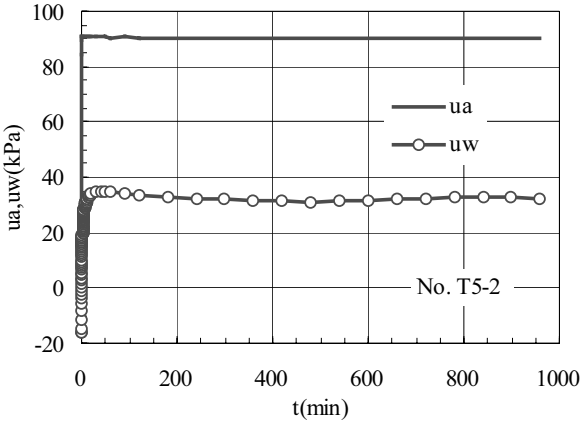


図３．供試体の初期サクションの測定例

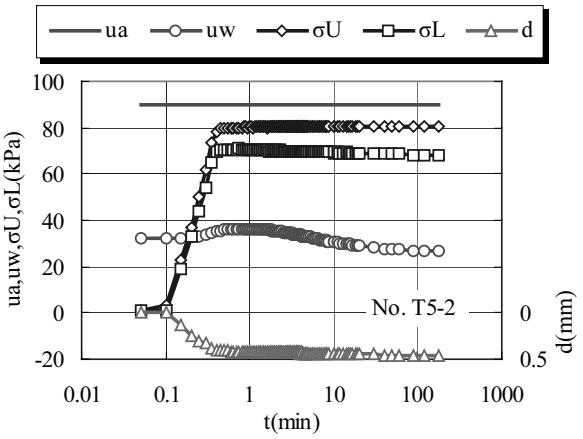


図４．σ=80kPa を作用させたときの u_a，u_w，σ_U，σ_L および d の時間的変化

（2）せん断時の挙動

せん断過程での u_a，u_w，σ_U，σ_L，d およびせん断応力 τ とせん断変位 δ の関係を図５に示した．

加圧板側の垂直応力 σ_U は設定通り一定値（=80kPa）に保たれていることがわかる．一方，反力板側垂直応力 σ_L はせん断開始時にわずかに増加し，すぐに減少に転じてせん断終了まで減少傾向を続けている．

せん断の進行とともにせん断応力は増加してこの例では δ=2mm でピークに達し，その後緩やかに減少している．鉛直変位（ダイレタンシー量）

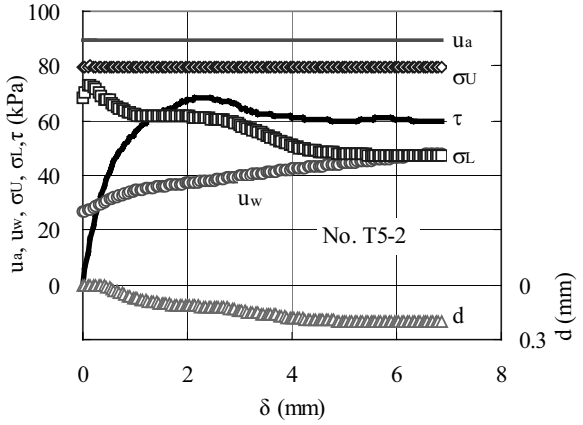


図５．せん断過程での u_a，u_w，σ_U，σ_L，d および τ と δ との関係

d はせん断開始時に極めて微小であるが膨張しその後すぐに体積収縮に転じ，せん断終了まで体積は収縮しつづけた．この d の変化挙動は上述のσ_Lの変化挙動と符合している．即ち，体積が膨張する時は供試体周面に下向きの摩擦力が作用しその結果σ_L は上昇する．体積が収縮する時は反対に上向きの周面摩擦力が作用してσ_Lは減少する．

間隙水圧はせん断中上昇を続けている．定圧条件の試験（飽和土の排水試験に相当）を企図したがこのように供試体底面の間隙水圧が変化した．この供試体のせん断速度は 0.05mm/分であったが，速すぎた可能性もあったので，他の供試体に対してせん断速度を 0.02mm/分と遅くした．遅い速度せん断してもやはり間隙水圧は変化した（間隙水圧が変化しなかった場合もある）．間隙水圧を測定しているので，間隙水圧の応答に対処できる速度であれば問題がないと考えられる．この問題は飽和土の場合にも起こりうることであって今後検討する必要がある．

４．３ せん断強度特性

（1）せん断強度と垂直応力の関係

過去の研究[2][3]から明らかになったせん断強度に関する基本的な特性をまず述べる．

この試料は圧密降伏応力 p_c 以上の垂直応力の下ではせん断強度は Mohr-Coulomb の破壊基準で説明できるが，p_c より低い垂直応力の下では複雑なせん断強度特性を示す（図６参照）．

飽和土の場合，p_c 以下の垂直応力の下での強度は過圧密の履歴を考慮することによって説明できる．この試料は，先に示したように，p_c 以下では不飽和であり，また，人工的な過圧密の履歴を与えない限り，圧密の履歴が明らかでない．

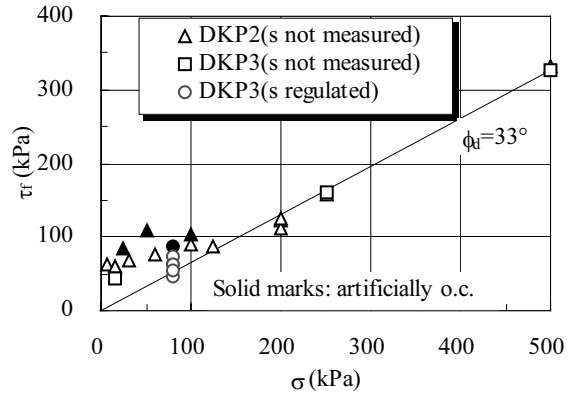


図６．DKP2 および 3 の基本的強度特性[1][2]

不飽和土のせん断強度は正味の垂直応力 σ_{net}（$=\sigma-u_a$）とサクションの関数である，というのが定説である．そこで，p_c より十分小さい σ=80kPa のもとで供試体のサクションを制御してせん断強さに対するサクションの影響について調べた（図の○DKP3(s regulated)）．図では同じ垂直応力に対して異なったせん断強さがあるように見えるがサクションが異なっているためである．サクションと垂直応力の関係については詳細を後述する．

次に，サクション測定可能な一面せん断試験によって得られた結果に基づいてせん断強度と垂直応力の関係をより詳細に検討する．図７にせん断中のせん断応力 τ と二種類の垂直応力（σ_U，σ_L）の関係を示す．原点を通る直線は，p_c より十分大きい垂直応力で試験した時のせん断強度線で図６の直線と同じである．

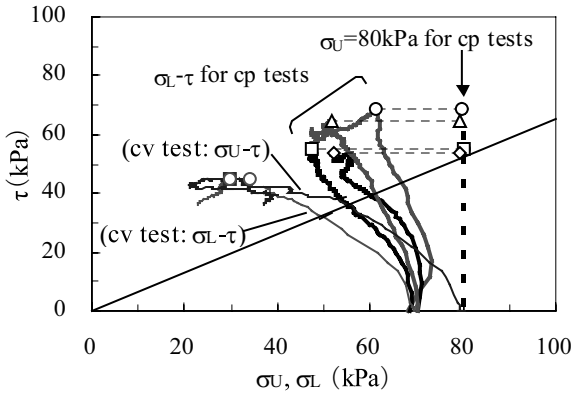


図７．せん断中のせん断応力 τ と垂直応力（σ_U，σ_L）の関係

まず，定圧せん断試験（cp test）の結果について考察する．上に述べたようにσ_L はせん断中に減少する．せん断強さ（τ のピーク値：τ_f）をσ_U に対してプロットすると同じ垂直応力に対してせん断強さが異なり，強度がばらつくという認識に至る．一方，τ_f をσ_L に対してプロットすると，やはりばらつきは見られるものの，σ_L が大きいほど τ_f が大きいという相関性が見られる．このばらつきは後述するようにサクションの隠れた効果に起因する．

次に定体積せん断試験（cv test）の結果を見る．この試験ではσ_U もσ_L も変化している．ピーク強度 τ_f とσ_L の関係は先の定圧試験で見られた傾向と矛盾していない．

（2）せん断強度とサクションの関係

図８はせん断中のせん断応力 τ とサクションの関係である．○はせん断開始時のサクション s_c と τ_f の関係を表している．また，過去の研究で得られたせん断強さと圧密終了時のサクション（s_c）の関係も併せて示している（図の△）．

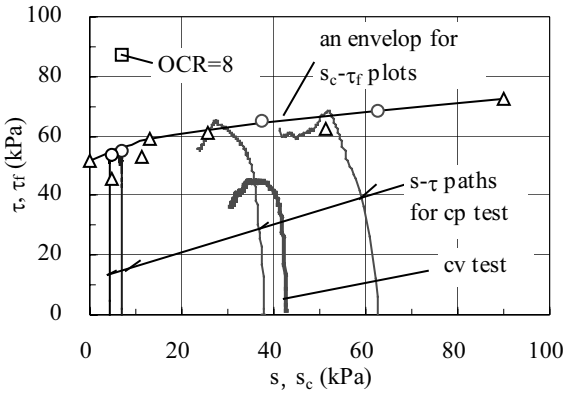


図８．せん断中のサクション s とせん断応力 τ との関係およびせん断開始時のサクション s_c と τ_f の関係

せん断中にサクションは変化した場合とほとんど変化しなかった場合があった．せん断開始時のサクションが大きいものはせん断中のサクションが大きく減少する傾向がある．せん断応力のピーク τ_f と s_c の関係を連ねて一つの包絡線を引くと図のようになった．定体積試験を除いて，この包絡線は過去の研究の結果（一部を除いて）をも説明し得ることがわかる．また，せん断強さと垂直応力の関係（図６）で指摘したばらつきが解消されていることに注意したい．

なお，包絡線は直線でなく，非線形性を有している．この種の非線形性は多くの研究者によって指摘されていて（例えば[6],[7]），Fredlund らの提案式[8]の適用性の限界を示していると言える．

５．結論

一次元圧密におけるサクションの挙動として次の知見を得た：

圧密降伏応力 p_c より小さい圧密荷重 p を載荷すると載荷直後に底面間隙水圧 u_w は上昇するが時間とともに低下し，ある大きさのサクションは保たれる．一方，p_c より大きい p を載荷すると載荷直後に u_w は間隙空気圧 u_a よりも大きくなり，時間とともに低下して u_a に等しくなる，即ち,サクションは消滅する．サクションが消滅するような大きな p を載荷すると供試体はほぼ飽和状態に至る．

サクション測定可能な一面せん断試験の結果に基づいて次の知見を得た．

同じ垂直応力（加圧板側垂直応力）でせん断した場合，せん断強さは供試体によって異なるが，反力板側垂直応力が大きい場合ほどせん断強さが大きいという相関性が見られた．せん断強さとせん断開始時のサクションとの間には極めて高い相関性がある．その関係は Fredlund らの提案式[8]のように線形ではない．

謝辞

不撹乱試料の採取に際して西谷技術コンサルタント(株)新仁修氏にお世話になった．試験装置の開発に本学技術職員岩成敬介氏の助力を得た．また，本研究の一部は科学研究費補助金（No.1365043 研究代表者清水正喜）による成果に基づいている．記して謝意を表する．

なお，本論文の主要部分は第二著者の本学大学院工学研究科博士前期課程在学中に行った研究の成果であることを付記する．

参考文献

[1] Shimizu, M. (1998) "Geotechnical features of volcanic-ash soils in Japan." Special Report B, *Proc. Int. Sym. on Problematic Soils, IS-Tohoku'98*, Japanese Geotechnical Society, 2, 907-927.

[2] Shimizu, M. (2004) "Shear strength of undisturbed samples of weathered pumice soils." *Advances in Geotechnical Engineering: the Skempton Conference*, ICE, UK, 1, 618-629.

[3] Shimizu, M. Yamamoto, D. and Tahara, Y.

(2006) "Suction and its effects on shear strength of unsaturated undisturbed samples of a volcanic pumiceous soil", *Proc. of the 4th Int. Conf. on Unsaturated Soil,* UNSAT2006, ASCE, Vol.1, pp.1235-1246.

[4] 清水正喜・山本大輔(2004) 大山倉吉軽石不撹乱試料の物理的性質：測定方法の影響, 鳥取大学工学部研究報告, 第 35 号, pp.31-34.

[5] Shimizu, M. and Nambu, K. (2003) "One-dimensional consolidation of unsaturated soils and problems in experiments." *Proc. of the 2nd Asian Conference on Unsaturated Soils* (UNSAT-ASIA 2003), Japanese Society of Geotechnical Engineering, 117-122.

[6] Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. and Clifton, A. W. (1996) "Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction." *Can. Geotech. J.* 33, 379-392.

[7] Gan, J. K. M., Fredlund, D. G. and Rahardjo, H. (1988) "Determination of the shear strength parameters of an unsaturated soil using the direct shear test." *Can. Geotech. J.* 25, 500-510.

[8] Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., and Widger, R. A. (1978) "The shear strength of unsaturated soils." *Can. Geotech. J.* 15, 313-321.

（受理　平成 18 年 12 月 8 日）

蒸発・凝縮過程による同軸円筒状凝縮相間の流れ
– 凝縮相のもつ有限熱伝導性と潜熱の影響 –

大西 善元、藤 貴洋
鳥取大学工学部応用数理工学科

On evaporation and condensation flows of a vapor between the cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity
– Coupling effects of the finite thermal conductivity and the latent heat –

Yoshimoto ONISHI and Takahiro FUJI

Department of Applied Mathematics and Physics, Faculty of Engineering,
Tottori University, Tottori 680-8552, Japan
E-mail: onishi@damp.tottori-u.ac.jp

Abstract: Motions of a vapor between the coaxial cylindrical condensed phases have been studied based on the *fluid dynamic formulation*. Owing to the fact that the thermal conductivity of the condensed phases is finite compared to that of their vapor, the cylindrical condensed phases have temperarture fields as their internal structures. The existence of the internal structures has already been found to change drastically the roles of the latent heat parameter, leading to the existence of the maximum values of the mass and energy flows. The present study is concerned with these maxima of the mass and energy flows as the coupling effects of the finite thermal conductivity ratio of the cylindrical condensed phases and of the latent heat parameter.

Key Words: Fluid Dynamic Formulation, Phase changes, Cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity, Condensed phase with temperature field as its internal structure.

1. はじめに

凝縮相 (液相、固相) のもつ熱伝導係数は、通常の場合、気相のそれに比べて一桁以上大きい。これを、思い切って無限大として、此れまで多くの蒸発・凝縮問題が、理論解析、数値シミュレーションを問わず、解析されてきており、定性的ならびに定量的に多くの知見、情報が得られている。ところが、最近になって、凝縮相のもつ有限熱伝導性が蒸発・凝縮過程によって形成される流れ場に大きな影響を及ぼすことが、気体論方程式系 [1] に基づくシミュレーション解析 [2,3] において、具体的な形で、明らかにされ、以来、此れに関する幾多の研究が、気体論的方程式系のみならず**流体力学的定式化**[4] に基づいてなされてきている。「流体力学的定式化」は、気体論方程式系と等価な流体力学的レベルでの支配方程式系である。凝縮相の熱伝導性が気相のそれに対して有限か無限大かということは、凝縮相内にその内部構造としての温度場が形成されるか否かということである。凝縮相有限熱伝導性の最たる影響は、蒸発・凝縮量およびエネルギー流量に最大値を与える潜熱が存在するということであろう。凝縮相の熱伝導性を無限大と理想化した場合、蒸発・凝縮量およびエネルギー流量は潜熱パラメーターと共に比較的単純に増加する。このことを考え合わせると、凝縮相有限熱伝導性の影響によって、潜熱パラメーターの果たす役割が定性的に大きく異なってくることが分かる。このことは工学的に非常に重要である。つまり、熱・エネルギー輸送システムにおける作動流体として、どのような潜熱をもつ媒質が適切であるかということを教えてくれる。

蒸発・凝縮量およびエネルギー流量と潜熱パラメーターとの関係および流量の最大値等について、我々の研究室でかなりの研究が既になされてきている。ここでは、有限熱伝導性をもつ凝縮相が曲率をもつ場合に、流量と潜熱パラメーターとの関係がどのような影響を受けるのか、そしてまた、系の Knudsen 数あるいは Reynolds 数の影響がどのような形で流量に現れるのかを調べてみた。取り上げた問題は同軸円筒状凝縮相間の蒸発・凝縮問題である。支配方程式系は、当然ながら、気体論方程式系 [1] であるべきであるが、ここでは、それと等価でかつ比較的扱い易い流体力学的レベルでの支配系、つまり、流体力学的定式化 [4] を使う。

この種の問題において生じる最大の困難は、凝縮相の界面温度は、未知の変数で (時間の関数)、境界条件として予め指定することはできないということにある。そのため、未知の界面温度を時々刻々予測する何某かの適切な方法を開発し、シミュレーションスキームに

組み込む必要がある。この方法は既に開発済みであるが、これを組み込んでも、この種の問題ではまだまだ相当膨大な計算時間を必要とする。この状況は、気体論方程式系に基づく解析においては一段と深刻な問題となる。このような事情からも、相変化を伴う流れ問題を通常の流体力学的レベルで取り扱える支配系としての流体力学的定式化の有用性は認識できよう。

2. 問題の定式化

同軸円筒状凝縮相間の凝縮性気体の流れ場を考える。内側凝縮相は内外径としてそれぞれ R_0、R_1 をもち、その厚さは D_1 ($R_0 < R_1 = R_0 + D_1$) とし、外側凝縮相については内外径 R_2、R_3、厚さ D_2 ($R_2 < R_3 = R_2 + D_2$) であるとする。ここで考える凝縮相の熱伝導率は気相のそれに比べてかなり大きいが有限である。したがって、凝縮相にはその内部構造として必然的に温度場が形成される。この系は、初期に、温度 T_0 で完全静止平衡状態にあるとし、そのときの気相の密度と圧力をそれぞれ ρ_0、P_0 とする。ある瞬間 ($t = 0$) に、内側凝縮相の内端 ($r = R_0$) および外側凝縮相の外端 ($r = R_3$) での温度を T_0 から、それぞれ、$T_c^{(1)}$ および $T_c^{(2)}$ へと変化させる。つまり、高温あるいは低温浴槽に接触させるとする。一定時間経過後、凝縮相内部を通しての熱伝導によって、凝縮相界面 ($r = R_1$ と $r = R_2$) の温度が変化し、それによって、界面で蒸発あるいは凝縮過程が生じ、種々の波動を伴った非定常流れ場が形成される。流れ場に対する支配方程式系としての**流体力学的定式化**[4] は次の構成をもつ。すなわち、それぞれの凝縮相内の温度場 $\tilde{T}^{(\alpha)}$ ($\alpha = 1, 2$) に対しては、一定な拡散係数 κ_c をもつ単純な熱伝導方程式、つまり

$$\frac{\partial \tilde{T}^{(\alpha)}}{\partial t} - \kappa_c \frac{\partial^2 \tilde{T}^{(\alpha)}}{\partial x_j^2} = 0 \quad (\text{第 } \alpha \text{ 凝縮相内部で}) \tag{1}$$

を、そして、気相の流れ場に対しては、通常の圧縮性 Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_i \\ \rho(e + \frac{1}{2}u^2) \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x_j}\begin{bmatrix} \rho u_j \\ \rho u_i u_j + P\,\delta_{ij} - \tau_{ij} \\ \rho u_j (h + \frac{1}{2}u^2) - u_i \tau_{ij} + q_j \end{bmatrix} = 0 \tag{2}$$

$$P = \rho R T \tag{3}$$

$$\tau_{ij} = \mu\Big(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\Big) - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij} \tag{4}$$

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \tag{5}$$

$$h = \gamma e = c_p T = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R T \tag{6}$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{T}{T_0}, \qquad \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{T}{T_0}, \qquad \gamma \equiv \frac{c_p}{c_v} \tag{7}$$

である。ここで、t は時間、x_i は空間座標、ρ は気体の密度、u_i は速度ベクトル、P は圧力、T は温度、e および h はそれぞれ単位質量当たりの内部エネルギーとエンタルピー、τ_{ij} は粘性応力テンソル、q_i は熱流束ベクトルである。δ_{ij} は Kronecker の delta を表わす。μ と λ は粘性係数および熱伝導係数で、温度 T に比例する (μ_0、λ_0 は温度 T_0 での粘性係数と熱伝導係数)。R は単位質量当たりの気体定数、γ は比熱比 (ここでは、$\gamma = 5/3$) で、c_v と c_p はそれぞれ気体の定積比熱と定圧比熱である。

初期条件は、この問題に対して

$$\left.\begin{aligned} &\tilde{T}^{(\alpha)} = T_0 \qquad (\text{第 } \alpha \text{ 凝縮相内部至る所で}) \\ &u_i = 0, \quad P = P_0, \quad T = T_0 \quad (\text{気相中で}) \end{aligned}\right\} \tag{8}$$

流体力学的定式化における境界条件は、凝縮相界面上 ($r = R_1$ および $r = R_2$) において

$$\left.\begin{aligned} &u_i t_i = 0 \\ &\frac{P - P_W^{(\alpha)}}{P_W^{(\alpha)}} = C_4^* \frac{u_i\, n_i}{(2RT_W^{(\alpha)})^{1/2}} \\ &\frac{T - T_W^{(\alpha)}}{T_W^{(\alpha)}} = d_4^* \frac{u_i\, n_i}{(2RT_W^{(\alpha)})^{1/2}} \\ &-\lambda_c \frac{\partial \tilde{T}^{(\alpha)}}{\partial x_i} n_i \\ &\qquad = q_i n_i + \Big(h_L + \frac{1}{2}u^2\Big)\rho\, u_i n_i - u_i \tau_{ij} n_j \\ &\qquad C_4^* = -2.132039, \qquad d_4^* = -0.446749 \end{aligned}\right\} \tag{9}$$

で与えられる。ここで、n_i は凝縮相界面上での外向き単位法線ベクトル、t_i は界面上における一つの単位接線ベクトル、$T_W^{(\alpha)}$ は第 α 凝縮相の界面温度で、$P_W^{(\alpha)}$ は温度 $T_W^{(\alpha)}$ に対する飽和蒸気圧力である。ここでの問題においては、$T_W^{(\alpha)}$、したがって、$P_W^{(\alpha)}$ も、未知量で、時間の関数となっていることに注意する。(9) 式の上 3 つの関係式は、気体論方程式系に基づいた凝縮性気体の一般的な運動に対する弱非線形漸近解析 [5] から得られた巨視的条件である。また、(9) 式の最後の関係式は界面でのエネルギー流束連続条件を表わす式で、λ_c は凝縮相の熱伝導係数である。飽和蒸気圧力 $P_W^{(\alpha)}$ は、次の Clapeyron-Clausius の式

$$\frac{P_W^{(\alpha)}}{P_0} = \exp\left[-\Gamma\left(\frac{T_0}{T_W^{(\alpha)}} - 1\right)\right], \quad \Gamma \equiv \frac{h_L}{RT_0} \tag{10}$$

で温度 $T_W^{(\alpha)}$ と結び付いている。上式における h_L は単位質量当たりの潜熱で、その無次元数 Γ を潜熱パラメーターと呼ぶことにする。さらに、凝縮相端点 ($r = R_1 - D_1$ および $r = R_2 + D_2$) における境界条件として

$$\left.\begin{aligned} &\tilde{T}^{(1)} = T_c^{(1)} \qquad \text{at} \quad r = R_1 - D_1 \\ &\tilde{T}^{(2)} = T_c^{(2)} \qquad \text{at} \quad r = R_2 + D_2 \end{aligned}\right\} \tag{11}$$

ここで、$T_c^{(\alpha)}$ は、第 α 凝縮相の端点に接する恒温浴槽の温度である。

3. 無次元特性パラメーター

さて、解析に際して、長さのスケール L として内側凝縮相界面の曲率半径 R_1 を、速度のスケールとして初期状態での気体の音速 $c_0 = (\gamma RT_0)^{1/2}$、そして時間スケールとして $\tau_0 = L/(2RT_0)^{1/2}$ をとる。これらのスケールに加えて、初期状態での流体力学的諸量を基準量にとり、支配方程式系および初期、境界条件を無次元化すれば、系の振る舞いは

$$\left.\begin{array}{llll} \dfrac{T_{c1}}{T_0}, & \dfrac{T_{c2}}{T_0}, & \dfrac{D_1}{L}, & \dfrac{D_2}{L}, \quad \dfrac{R_2}{L}, \quad \Gamma \equiv \dfrac{h_L}{RT_0} \\ \dfrac{\lambda_c}{\lambda_0}, & \dfrac{\kappa_c}{\kappa_0}, & Re \equiv \dfrac{\rho_0 c_0 L}{\mu_0}, & Pr \equiv \dfrac{c_p \mu_0}{\lambda_0} \end{array}\right\} \quad (12)$$

なる無次元パラメーターで特性づけられる。ここで、λ_c/λ_0 は凝縮相の熱伝導係数比、κ_c/κ_0 は温度拡散係数比、Re は Reynolds 数、Pr は Prandtl 数、R_2/L は 2 つの凝縮相界面の曲率半径比、D_1/L、D_2/L はそれぞれの凝縮相厚さの比である。そして、μ_0、λ_0、$\kappa_0 \equiv \lambda_0/(\rho_0 c_p)$ は、それぞれ、初期状態での気体の粘性係数、熱伝導係数および温度拡散係数である。また、気体論方程式系に基づく結果 [6] との比較のために、$Kn \equiv l_0/L$ で定義される Knudsen 数 Kn を導入すると、Knudsen 数と Reynolds 数 Re との間に

$$Re = \left(\frac{8\gamma}{\pi}\right)^{1/2} \frac{1}{Kn}, \qquad Kn \equiv \frac{l_0}{L}$$

なる関係がある。ここで、l_0 は初期状態での分子の平均自由行路で、$l_0 \equiv (\mu_0/P_0)(8RT_0/\pi)^{1/2}$ で定義される。

4. 結果と考察

スキームとしては単純明快な MacCormack 法を使い、前節の無次元特性パラメーターの多数のセットに対してシミュレーションを行った。まず、諸量の分布の代表例として、圧力、密度、温度および速度の時間発展的な分布を Fig. 1 と 4 に示す。前者の 2 つの図、Figs. 1 と 2、は潜熱パラメーターが $\Gamma = 11.0$ の場合の同じ流れ場の諸量の分布で、蒸発・凝縮過程がやや弱い場合、後者の 2 つ、Figs. 3 と 4、は $\Gamma = 3.0$ で、蒸発・凝縮過程がやや強めの場合である。いづれの場合も、$t/\tau_0 = 1000$ 以上時間経過すると、諸量の分布状態は実質的に定常と見做せる状態になる ($t/\tau_0 = 1000$ と $t/\tau_0 = 3000$ での分布の差は殆ど識別不能)。$\Gamma = 3.0$ の場合には、蒸発・凝縮流は $\Gamma = 11.0$ の場合に比べて比較的強く、そのため凝縮側界面 ($r = R_2$) 近傍で、温度が比較的急激に変化する領域が現れる。つまり、$0 < x/L < 0.9$ 程度の範囲の領域では対流項が優勢で、凝縮側界面近傍で拡散項が効いてくることによる。これらのグラフによって、凝縮相内部および気相中での温度分布の推移が把握できると同時に、凝縮相界面上での温度の「跳び」の存在も、これが蒸発又は凝縮過程の生じる原因であるが、認識できよう。 この問題の定常状態に対する理論解析も大西、藤 [7] によって行われているので、それらと比較した定常な温度分布

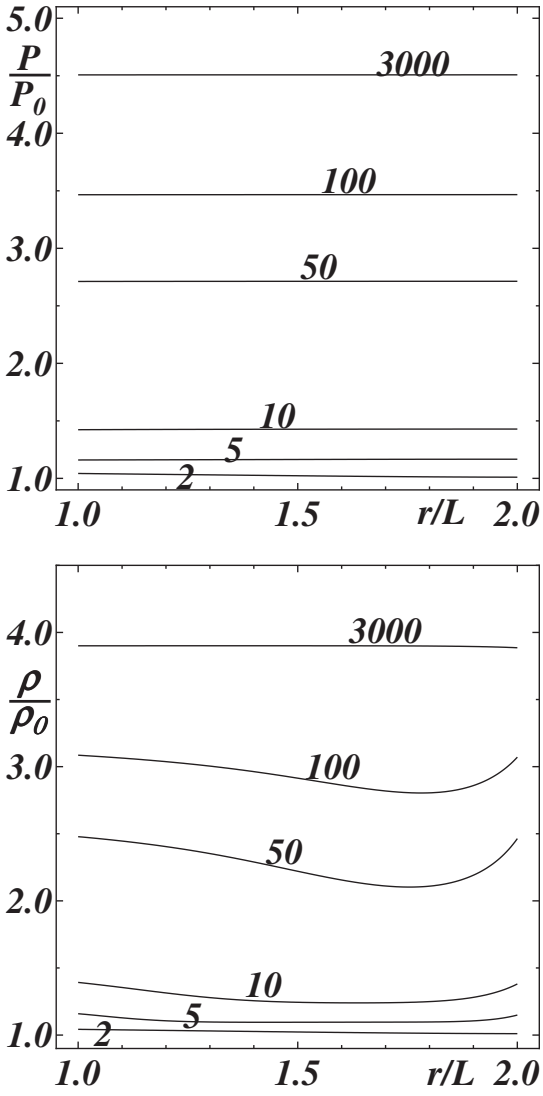


Fig. 1: The transient distributions of the pressure and density of a vapor between the coaxial cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity ratio of $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$. $T_c^{(1)}/T_0 = 1.5$, $T_c^{(2)}/T_0 = 1.0$, $D_1/L = D_2/L = 0.1$, $R_2/R_1 = 2.0$, $\underline{\Gamma = 11.0}$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Re = 412.03$ ($Kn = 0.005$), $Pr = 1.0$. The numbers in the figures indicate the time t/τ_0.

を Fig. 5 に示してみた。この理論解析は、気体論方程式系 [1] に対する (Knudsen 数小さいとしての) 漸近解析より導かれた一般論 (任意形状をもつ単一気体 2 相系の一般的な流れ場を対象とした解析) に基づいたもので、気体論方程式系に基づく直接的な解析と等価なものである (しかしながら、ここでの理論解析は Knudsen 数展開における第 1 近似レベルまでに留めている)。温度分布に関して言えば、両者は、凝縮界面近傍の温度境界層辺りで多少の数値的隔たりがあるものの全体としてかなり良好な一致を示していると言える。

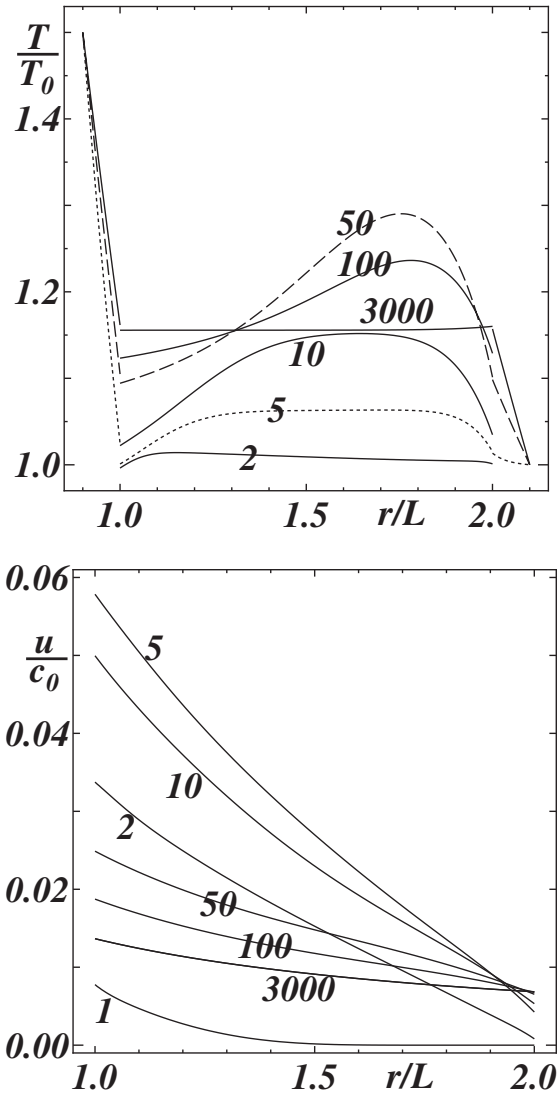


Fig. 2: The transient distributions of the temperature and velocity of a vapor between the coaxial cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity ratio of $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$. The caption of this figure is the same as in Fig. 1.

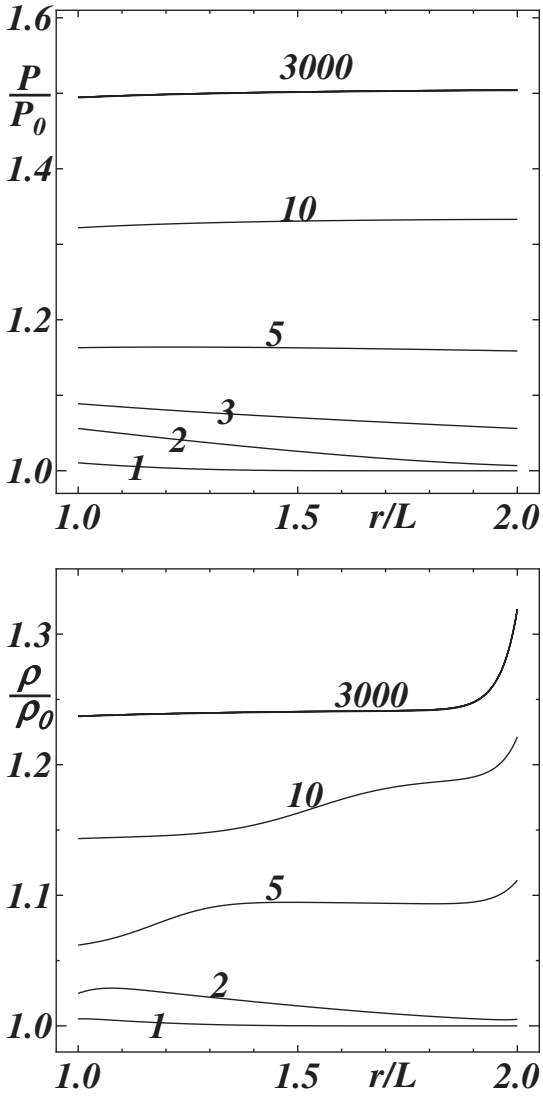


Fig. 3: The transient distributions of the pressure and density of a vapor between the coaxial cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity ratio of $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$. $T_c^{(1)}/T_0 = 1.5$, $T_c^{(2)}/T_0 = 1.0$, $D_1/L = D_2/L = 0.1$, $R_2/R_1 = 2.0$, $\underline{\Gamma = 3.0}$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Re = 412.03$ ($Kn = 0.005$), $Pr = 1.0$. The numbers in the figures indicate the time t/τ_0.

次に、工学的には最も重要な質量流束 $\rho u/\rho_0 c_0$ およびエネルギー流束 $E/\rho_0 c_0^3$ を Figs. 6 と 7 に示す。前者の図は内側円筒状凝縮相界面からの蒸発過程、後者は外側凝縮相界面からの蒸発過程により生じている流れ場の場合で、共に、定常状態での質量流束およびエネルギー流束が潜熱パラメーター Γ の値によってどのように変化するかを示したものである。気相に対する凝縮相の熱伝導係数比 λ_c/λ_0 が大きくなるにつれ、質量流量およびエネルギー流量の最大値およびその最大値を与える潜熱パラメーターの値も少しづつ大きくなる傾向のあることは既に分かっている [3]。そこで、ここでは熱伝導係数比を一定にして、系の Knudsen 数 Kn $[= (\pi/8\gamma)^{1/2}(1/Re)]$ による傾向の変化を調べてみた。熱伝導係数比を無限大とした場合 ($\lambda_c/\lambda_0 \to \infty$)、質量流量およびエネルギー流量は潜熱パラメーターと共に単純に増大するが、有限の場合には ($\lambda_c/\lambda_0 \sim O(1)$)、それらの流量はある潜熱パラメーターの値に対して最大値をとる。流量のこのような振る舞いは、有限熱伝導係数比の場合に特徴的であり、また、系の Knudsen 数 Kn が小さくなっても、この傾向は同じである。しかし、全体としての流量の値は小さくなる。この理由は、Knudsen 数 Kn が小さい場合には、分子間の衝突が多くなり蒸発過程したがって最終的には凝縮過程も抑えられてしまうからと考えられる。また、凝縮相の

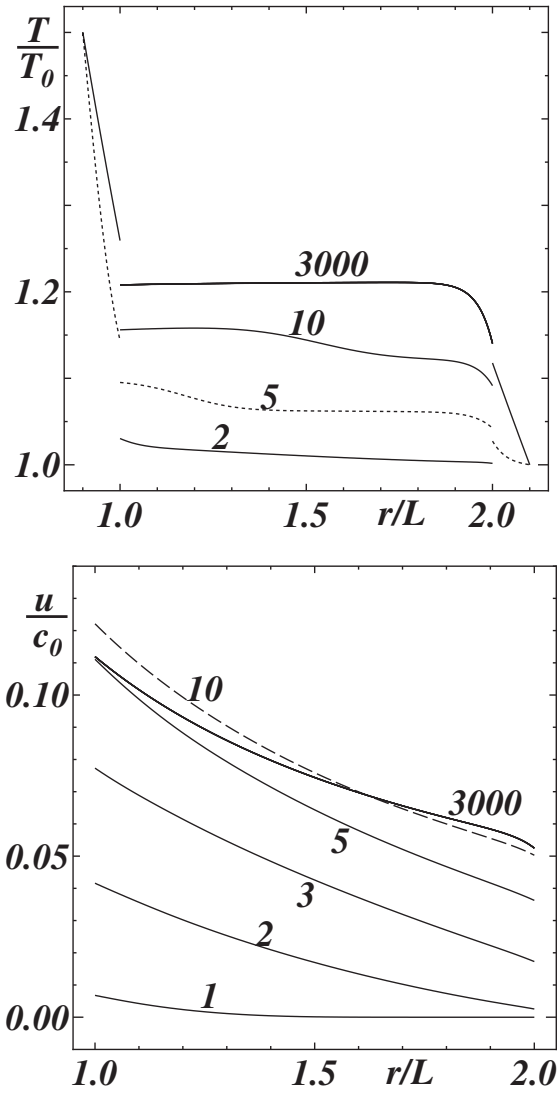


Fig. 4: The transient distributions of the temperature and velocity of a vapor between the coaxial cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity ratio of $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$. The caption of this figure is the same as in Fig. 3.

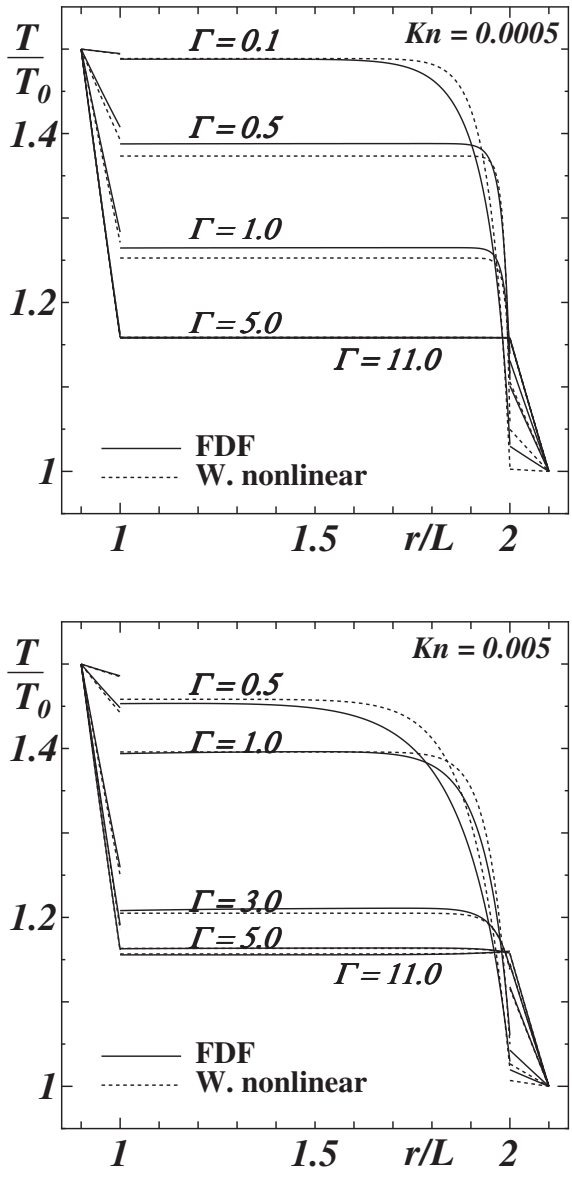


Fig. 5: The steady temperature distributions T/T_0 of a vapor between the coaxial cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity ratio of $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$. $T_c^{(1)}/T_0 = 1.5$, $T_c^{(2)}/T_0 = 1.0$, $D_1/L = D_2/L = 0.1$, $R_2/R_1 = 2.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Pr = 1.0$. **FDF**: the present results based on the Fluid dynamic formulation [4]. **W. nonlinear**: the theoretical results of Onishi & Fuji [7] based on the general asymptotic theory by Onishi & Sone [5].

曲率の影響は殆どみられない。

最後に、気体論方程式系 [1] に基づく数値シミュレーション結果 [6] との比較のグラフを Fig. 8 –10 に示しておく。気体論方程式系に基づくこの問題の数値シミュレーションは非常に難しく、十分時間発展した流れ場の結果ではなく、$t/\tau_0 = 10.0$ までの結果である。図から、少なくとも、この程度の時間発展までは、両者の結果は非常に良く一致していることが分かる。気体論方程式系に基づく解析は、計算機の記憶容量および計算時間の点から、流れ場の十分な時間発展は殆ど望めないが、ここで用いた流体力学的定式化に基づけば、ほぼ定常状態と見なせる状態まで無理なく計算を進めることが可能となっている。

この研究に対して、宇宙科学研究所情報解析センターの支援を受けたことに感謝する。

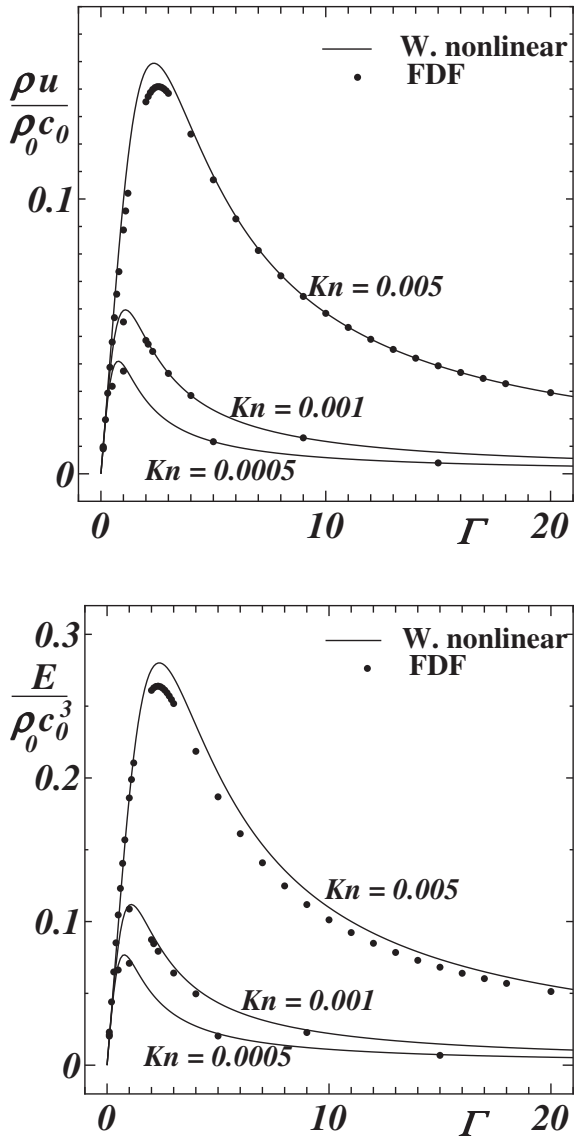


Fig. 6: The steady mass and energy flows of a vapor between the coaxial cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity ratio of $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$. $T_c^{(1)}/T_0 = 1.5$, $T_c^{(2)}/T_0 = 1.0$, $D_1/L = D_2/L = 0.1$, $R_2/R_1 = 2.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Pr = 1.0$. **FDF**: the present results based on the Fluid dynamic formulation [4]. **W. nonlinear**: the theoretical results of Onishi & Fuji [7] based on the general asymptotic theory by Onishi & Sone [5].

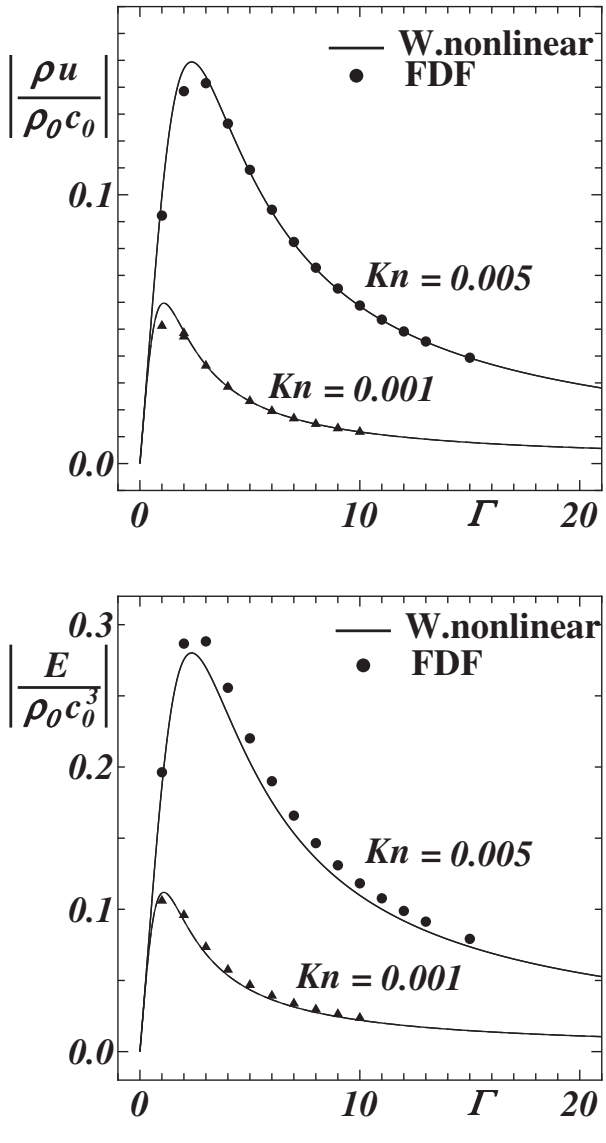


Fig. 7: The steady mass and energy flows of a vapor between the coaxial cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity ratio of $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$. $T_c^{(1)}/T_0 = 1.0$, $T_c^{(2)}/T_0 = 1.5$, $D_1/L = D_2/L = 0.1$, $R_2/R_1 = 2.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Pr = 1.0$. **FDF**: the present results based on the Fluid dynamic formulation [4]. **W. nonlinear**: the theoretical results of Onishi & Fuji [7] based on the general asymptotic theory by Onishi & Sone [5].

参考文献

[1] P.L. Bhatnagar, E.P. Gross and M. Krook: A model for collision processes in gases. (I) Small amplitude processes in charged and neutron one-component systems. *Phys. Rev.* **94** (1954) 511–525.

[2] Y. Onishi and K. Yamada: Evaporation and Condensation from or onto the Condensed Phase with an Internal Structure. *Rarefied Gas Dynamics* (AIP Conference Proceedings: Volume 663), edited by A.D. Ketsdever and E.P. Muntz (American Institute of Physics, New York, 2003) pp. 630–637.

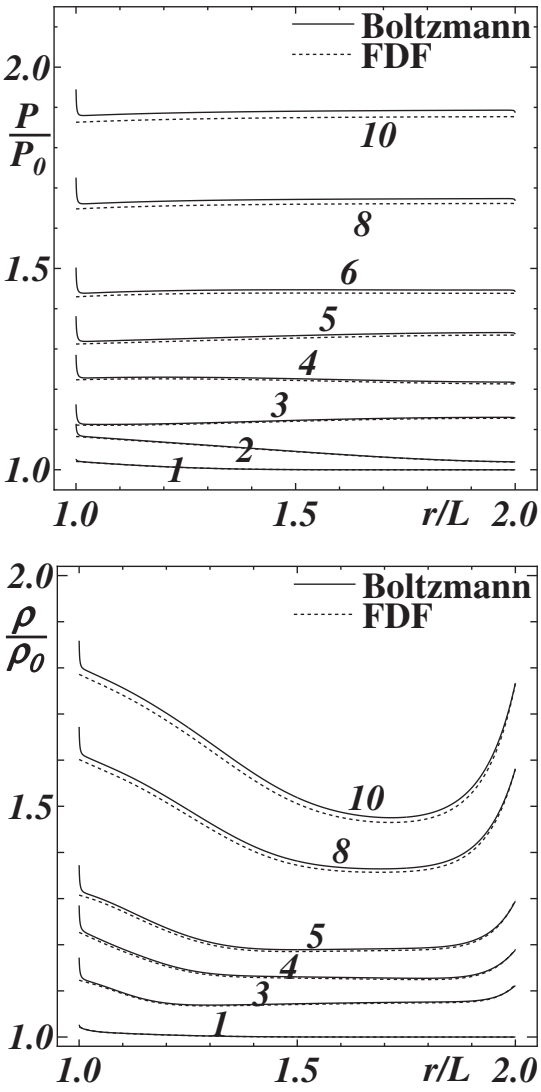


Fig. 8: The transient distributions of the pressure and density of a vapor between the coaxial cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity ratio. $T_c^{(1)}/T_0 = 2.0$, $T_c^{(2)}/T_0 = 1.0$, $D_1/L = D_2/L = 0.1$, $R_2/R_1 = 2.0$, $\Gamma = 11.0$, $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Re = 412.03$ ($Kn = 0.005$), $Pr = 1.0$. The numbers in the figures indicate the time t/τ_0. **FDF**: the present results based on the Fluid dynamic formulation [4]. **Boltzmann:** the results by Onishi [6] based on the kinetic equation [1].

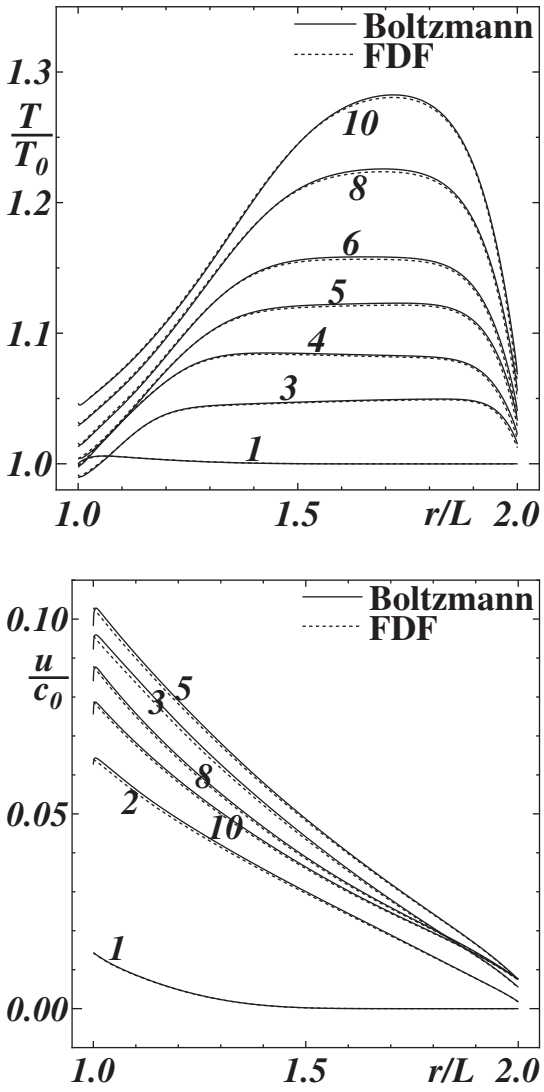


Fig. 9: The transient distributions of the temperature and velocity of a vapor between the coaxial cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity ratio. The caption of this figure is the same as in Fig. 8.

On the treatment of strong evaporation and condensation flows of a vapor at the fluid dynamic level – Fluid dynamic formulation for phase change problems –.
Rarefied Gas Dynamics to be published. [あるいは、大西善元:「蒸発・凝縮過程を伴う非平衡流とその解析法」第 50 回理論応用力学講演会講演論文集 (パネルディスカッション PD5-3: 2001 年 1 月) pp. 61–64.]

[3] Y. Onishi and T. Ooshida: Flows of a Vapor due to Phase Change Processes at the Condensed Phases with Temperature Fields as their Internal Structures.
Rarefied Gas Dynamics, edited by M. Capitelli (American Institute of Physics, Melville, New York, 2005), pp. 644–649.

[4] Y. Onishi, T. Tanaka, D. Ichieda and H. Miura:

[5] Y. Onishi and Y. Sone: Kinetic theory of slightly strong evaporation and condensation – Hydrodynamic equation and slip boundary condition for finite Reynolds number –. *J. Phys. Soc. Japan* **47**

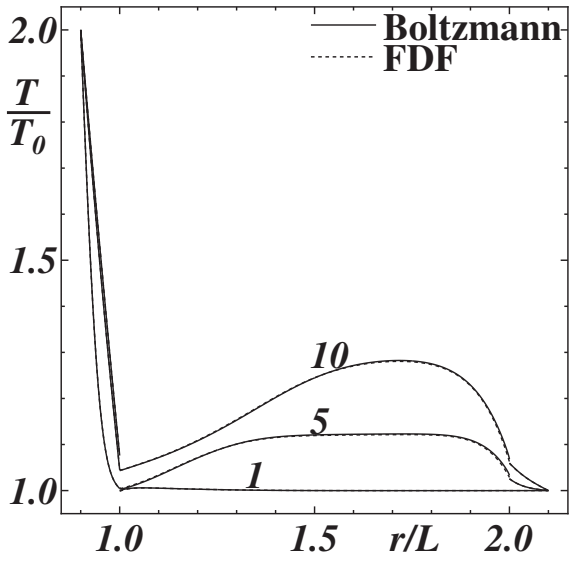


Fig. 10: The transient distributions of the temperature field in the whole flow field for evaporation and condensation between the coaxial cylindrical condensed phases with finite thermal conductivity ratio. The caption of this figure is the same as in Fig. 8.

(1979) 1676–1685.

[6] Y. Onishi: in preparation.

[7] 大西善元、藤 貴洋: 内部構造をもつ同軸円筒状凝縮相間の蒸発・凝縮流に対する漸近理論解析 (An asymptotic analyis on flows of a vapor between the cylindrical condensed phases with internal structures). 日本機械学会鳥取地方講演会 (中国四国支部・九州支部 合同企画) 講演論文集 (2006 年 11 月)

(受理　2006 年 11 月 30 日)

有限熱伝導性をもつ平面凝縮相からの強い蒸発流のシミュレーション – 支配系としての流体力学的定式化の適用方法 –

大西 善元、岸本健治
鳥取大学工学部応用数理工学科

On simulations of strong evaporation flows of a vapor from its plane condensed phase with finite thermal conductivity – Method of application of the Fluid Dynamic Formulation as the governing system –

Yoshimoto ONISHI and Kenji KISHIMOTO

Department of Applied Mathematics and Physics, Faculty of Engineering,
Tottori University, Tottori 680-8552, Japan
E-mail: onishi@damp.tottori-u.ac.jp

Abstract: Flow problems associated with phase change processes even if they are within the range of the continuum limit have to be dealt with based on the kinetic equations because the nonequilibrium nature of the Knudsen layer, which is always existent in the close vicinity of the interface, is the cause for the phase-change processes to occur at the interface. Recently, a new governing system of equations has been proposed by Onishi *et. al.* to deal with at the ordinary fluid dynamic level various flow problems, transient to steady, due to phase change processes. This new system, called the Fluid Dynamic Formulation, can be used as the substitute of the kinetic equations for the analyses of flow problems of such kind. However, the method of application of this new governing system is not so straightforwad as is expected. The present paper will show 1) how to use the Fluid Dynamic Formulation as the governing system of equations in place of the kinetic system by taking up simple one-dimensional problems and 2) the approriateness of the results obtained by comparison with the corresponding results obtained based on the kinetic system.

Key Words: Fluid Dynamic Formulation, Phase changes, Condensed phase with internal structure

1. はじめに

ヒートパイプをはじめとする熱交換器などの熱・エネルギー輸送システムにおいて、相変化現象およびそれに関わる流れ場の解析の重要性は疑問の余地のないところであろう。これらは、また、宇宙ステーションなどでの小規模で高性能な物質、熱・エネルギー輸送システムの開発・設計に一段と重要になってきているばかりでなく、超高速飛翔体の大気圏再突入時における極度な空気力学的加熱に対する熱防護システムとしての蒸気冷却膜形成の確立に向けての有用な情報をも与え得るものと期待できる。相変化に伴うこのような流れ場を定性的に正しく取り扱うためには、厄介な気体論方程式系 (例えば、[1]) に基づく必要がある。この理由は、相変化は界面近傍に生じる気体の非平衡性に起因し、考えている系が如何に連続体の極限であっても、相変化が存在する限りこの非平衡性は消滅することはないからである。しかしながら、最近になって、それらの問題の解析を、厄介な気体論方程式系に立ち返らずとも、通常の流体力学的レベルで取り扱える支配方程式系、所謂、蒸発・凝縮問題に対する**流体力学的定式化**[2] が提案され、ほぼ確立された支配系となった。この新しい支配系としての流体力学的定式化は、当然ながら、流れ場の大域的な振る舞いが連続体近似の範囲内であると見做せるような場合に対して有効であり、基本的には次のような構成をもつ: 1) 流れ場を支配する方程式系として、通常の圧縮性 Navier-Stokes 方程式系を、そして、2) 凝縮相界面での境界条件として、気体論方程式系に基づく理論解析 [3] から導出された凝縮相界面で成り立つ理論的な巨視的条件および幾多の数値シミュレーション結果から算出された凝縮相界面での数値的な巨視的条件を使う。この巨視的条件を使う凝縮相界面での境界条件がこの定式化の重要なポイントである。ここでいう巨視的条件は、気体論レベルで現れる Knudsen 層 (非平衡領域) とその影響が、流体力学的レベルにおいて諸量に反映された結果と考えてよい。残念ながら、この流体力学的定式化は、凝縮相界面での境界条件に 2 つの大きな問題を抱

えている。つまり、1) 蒸発・凝縮過程が比較的弱い場合には理論式 [3] が存在するが、強い場合には数値表の形でしか存在しない (数表については、[4]-[6] 参照)。しかも、2) いづれの場合も**定常状態**において導出あるいは算出された条件である。蒸発・凝縮過程が比較的弱い場合には、この**定常性**の制限はほとんど問題にならないが、強い場合には、定常状態に対して得られた条件を非定常流れ場にそのままの形で用いることはできない。非定常な場合にでも使えるための何某かの特別な工夫が、特に蒸発・凝縮過程が強い場合には、必要となるのである。この問題は、一部分を除いて、Onishi et. al. [2] によって解決されたと考えてよい。つまり、圧縮性気体力学でよく知られているリーマン問題を凝縮相界面のごく近傍で適切な形で当てはめることで、既存の**定常状態での条件**を任意の**非定常流れ場**の場合にも適用可能としているのである。これの有効性も、気体論方程式に基づく数値解析との比較において、既に確かめられている。

しかしながら、此れまで扱われてきた蒸発・凝縮問題の殆どが、凝縮相の熱伝導性が気相のそれに比べて極めて良い、つまり、凝縮相の熱伝導係数比が無限大であるとして解析されてきた。確かに、通常の場合、凝縮相のもつ熱伝導係数は気相のそれに比べて一桁以上大きい。凝縮相の熱伝導性が気相のそれに比べて有限か無限大かということは、凝縮相内にその内部構造としての温度場が形成されるか否かということである。ところが、最近になって、凝縮相のもつ有限熱伝導性、つまり、その内部構造としての温度場が蒸発・凝縮過程による気相中の流れ場に大きな影響を及ぼすことが気体論方程式系に基づくシミュレーション解析 [7] で明らかにされ、以来、此れに関する研究が、気体論的方程式系に基づく解析も少数ながら存在はするが、特に流体力学的定式化に基づいて数多く行われてきた。凝縮相有限熱伝導性の最たる影響は、蒸発・凝縮量およびエネルギー流量に最大値を与える潜熱が存在するということである (例えば、[8] 参照)。これに対し、凝縮相の熱伝導性を無限大とした場合、蒸発・凝縮量およびエネルギー流量は潜熱パラメーターと共に比較的単純に増加する。この事実は工学的に非常に重要で、熱・エネルギー輸送システムにおける作動流体として、選択すべき適切な媒質を示唆してくれる。しかしながら、流体力学的定式化に基づくこれまでの解析は蒸発・凝縮過程が比較的弱い場合に限られてきた。この理由は、これまでの流体力学的定式化では、強い蒸発・凝縮過程に伴う流れ場の解析はできなかったからである。

そこで、今回、有限な熱伝導性をもつ凝縮相からの強い蒸発過程による流れ場を新しい流体力学的定式化に基づいて解析してみた。これによって、相変化を伴う非平衡流に対して、相変化過程の強弱に拘わらず (数値表を使う煩雑さは避け難いが)、また、凝縮相の熱伝導性有限、無限大に拘わらず、通常の流体力学的レベルで定性的にも定量的にもきちんとした解析が行えることが示せると考えている。

ついでながら、この種の問題では、**凝縮相の界面温度は未知量で、境界条件として界面温度を予め指定することはできない**。これが、この種の問題における大きな困難の一つである。この困難を克服するためには、未知の界面温度を時々刻々予測する何某かの適切な方法を開発し、シミュレーションスキームに組み込む必要がある。この方法は、境界条件から、既に、理論的に導出している。しかし、この方法を組み込んでも、この種の問題ではまだまだ相当膨大な計算時間を必要とする。しかも、この状況は、気体論方程式系に基づく解析においては一段と深刻な問題となる。このような事情からも、相変化を伴う流れ問題を通常の流体力学的レベルで取り扱える支配系としての流体力学的定式化の有用性は認識できよう。

2. 問題の定式化

平面凝縮相とその凝縮性気体からなる単一気体 2 相系の比較的強い流れ場を考える。凝縮相と気相は、それぞれ、$-D < x < 0$ および $x > 0$ なる領域を占め、凝縮相界面は $x = 0$ の位置にある。ここでは凝縮相の熱伝導率は気相のそれに比べてかなり大きいが有限であるとする。したがって、凝縮相内にはその内部構造としての温度場が形成される可能性をもつ。この系は、初期に、温度 T_0 で完全静止平衡状態にあるとし、そのときの気相の密度と圧力をそれぞれ ρ_0、P_0 とする。ある瞬間 ($t = 0$) に、凝縮相の一方の端 ($x = -D$) での温度を T_0 から T_c へと変化させる (例えば、高温浴槽に接触させる)。一定時間経過後、凝縮相内部を通しての熱伝導によって、凝縮相の界面温度が変化し、それによって、界面で蒸発過程が生じ、種々の波動 (衝撃波、接触領域等) を伴った非定常流れ場が形成される。この流れ場の推移過程および定常状態での振舞いの解析に当たって用いる支配系としての**流体力学的定式化** [2] の具体的な構成は次のようになっている: すなわち、凝縮相内の温度場 $\tilde{T}$ に対しては

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} - \kappa_c \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x_j^2} = 0 \qquad \text{(凝縮相内部で)} \tag{1}$$

ここで、κ_c は凝縮相の温度拡散係数 (ここでは、一定と仮定) である。次に、気相の流れ場に対しては、圧縮性 Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_i \\ \rho(e + \frac{1}{2}u^2) \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x_j}\begin{bmatrix} \rho u_j \\ \rho u_i u_j + P\,\delta_{ij} - \tau_{ij} \\ \rho u_j(h + \frac{1}{2}u^2) - u_i \tau_{ij} + q_j \end{bmatrix} = 0 \tag{2}$$

$$P = \rho R T \tag{3}$$

$$\tau_{ij} = \mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij} \tag{4}$$

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \tag{5}$$

$$h = \gamma\, e = c_p T = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R T \qquad \left(\gamma \equiv \frac{c_p}{c_v}\right) \tag{6}$$

で、簡単のため、熱量的な完全性を仮定している。ここで、t は時間、x_i は空間座標、ρ は気体の密度、u_i は速度ベクトル、P は圧力、T は温度、e および h はそれぞれ単位質量当たりの内部エネルギーとエンタルピー、τ_{ij} は粘性応力テンソル、q_i は熱流束ベクトルである。δ_{ij} は Kronecker の delta を表わす。R は単位質量当たりの気体定数、γ は比熱比 (ここでは、$\gamma = 5/3$) で、c_v と c_p はそれぞれ気体の定積比熱と定圧比熱である。μ と λ は気体の粘性係数および熱伝導係数で、温度 T に比例するものとする、つまり、μ_0、λ_0 を、それぞれ、初期状態 (温度 T_0) での気相の粘性係数と熱伝導係数とすれば

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{T}{T_0}, \qquad \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{T}{T_0}$$

と書ける。

初期条件としては、ここでの問題に対して

$$\left.\begin{array}{ll} \tilde{T} = T_0 & \text{(凝縮相内部至る所)} \\ u_i = 0, \quad P = P_0, \quad T = T_0 & \text{(気相の至る所)} \end{array}\right\} \quad (7)$$

次に、凝縮相界面での境界条件としては

1) 相変化が比較的弱い場合:

$$\left.\begin{array}{l} u_i t_i = 0 \\ \dfrac{P - P_W}{P_W} = C_4^* \dfrac{u_i\, n_i}{(2RT_W)^{1/2}} \\ \dfrac{T - T_W}{T_W} = d_4^* \dfrac{u_i\, n_i}{(2RT_W)^{1/2}} \\ -\lambda_c \dfrac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} n_i \\ \qquad = q_i n_i + \left(h_L + \dfrac{1}{2}u^2\right)\rho\, u_i n_i - u_i \tau_{ij} n_j \\ C_4^* = -2.132039, \qquad d_4^* = -0.446749 \end{array}\right\} \quad (8)$$

なる関係式を使う。ここで、n_i は凝縮相界面上での外向き (気相中への) 単位法線ベクトル、t_i は界面上における一つの単位接線ベクトルである。(8) 式の第 2 と第 3 の関係式は、気体論方程式系に基づいた凝縮性気体の一般的な運動に対する弱非線形漸近解析 [3] から得られた巨視的条件である。また、(8) 式の最後の関係式は界面でのエネルギー流束連続条件を表わす式で、λ_c は凝縮相の熱伝導係数である。(8) 式における T_W は凝縮相の界面温度で、P_W は温度 T_W に対する飽和蒸気圧力である。両者は、h_L を単位質量当たりの潜熱とすれば、次の Clapeyron-Clausius の式

$$\frac{P_W}{P_0} = \exp\left[-\Gamma\left(\frac{T_0}{T_W} - 1\right)\right], \qquad \Gamma \equiv \frac{h_L}{RT_0} \quad (9)$$

で結び付いている。注意すべきことは、界面温度 T_W は未知量で、解の一部として決まる量であるということである。これが解析を複雑かつ困難にする。ついでながら、無次元数 Γ は潜熱パラメーターと呼ばれている。

2) 相変化が強い場合:

数表([4]–[6] 参照) で与えられた巨視的条件に、リーマン問題の解析解を当てはめて使う (**数値的条件**と呼ぶことにする)。参考までに、蒸発過程の場合の界面での数表を Table 1 に示しておく。数表中での $*$ 印の数値は Onishi [6] によって与えられたものである。

さらに、温度 T_c をもつ恒温浴槽に接する凝縮相端点 ($x = -D_1$) では

$$\tilde{T} = T_c \qquad \text{(凝縮相端点で)} \quad (10)$$

そして、無限遠 ($x \to \infty$) では、気体は初期状態を保っているとして、それに対応する条件を課す。

3. 無次元特性パラメーター

さて、解析に際して、長さのスケール L として、$L = (\sqrt{\pi}/2)\, l_0$ をとる。l_0 は初期状態での気体分子の平均自由行路で、$l_0 \equiv (\mu_0/P_0)(8RT_0/\pi)^{1/2}$ で定義される。さらに、速度のスケールとして、初期状態での気体の音速 $c_0 = (\gamma RT_0)^{1/2}$、そして、時間スケールとして、$\tau_0 = L/(2RT_0)^{1/2}$ をとる。これに加えて、初期状態での流体力学的諸量を基準量にとる。これによって、系の振る舞いは

$$\left.\begin{array}{llllll} \dfrac{T_c}{T_0}, & \dfrac{D}{L}, & \Gamma, & \dfrac{\lambda_c}{\lambda_0}, & \dfrac{\kappa_c}{\kappa_0} & \\ Pr \equiv \dfrac{c_p\, \mu_0}{\lambda_0} & & & & & \end{array}\right\} \quad (11)$$

で特性付けられる。ここで、T_c/T_0 は凝縮相端点の温度比、D/L は凝縮相厚さの比、Γ は潜熱パラメーター、λ_c/λ_0 は熱伝導係数比、κ_c/κ_0 は温度拡散係数比、Pr は Prandtl 数である。κ_0 は初期状態での気体の温度拡散係数で、$\kappa_0 \equiv \lambda_0/(\rho_0 c_p)$ で定義されている。

4. 結果と考察

意識的に強い蒸発過程により形成される流れ場に対して数値シミュレーションを行った。得られた結果の分布状態を Figs. 1 – 3 に示す。これらの図は同じ流れ場における流体力学的諸量の時間的推移過程を示したものである。Figure 2 は凝縮相界面近傍における圧力と密度の分布を拡大して示したもので、これにより凝縮相界面近傍における流体力学的諸量の様子を少し分かるであろう。有限な熱伝導性をもつ凝縮相の一方の端 ($x = -D_1$) が温度 T_c の高温浴槽に接触して後、凝縮相内を通しての熱伝導により、凝縮相界面温度 T_W が変化し、同時に、界面温度に対応する飽和蒸気圧力 P_W がかなり大きく上昇する。これによって、界面上で比較的強い蒸発過程が生じ、衝撃波そしてそれに伴う接触領域が気相中を伝播し、非定常な流れ場が形成される。この種の流れ場の詳細についての説明は、気体論方程式系に基づく数値シミュレーション解析を行った Onishi & Yamada [7] の論文に与えられているので、それを参照して頂きたい。ここでは、強い相変化によ

Table 1: Relations among the fluid dynamic quantities at the evaporation surface. c is the local sound speed of the vapor defined by $c = \sqrt{\gamma RT}$. The cases with $*$ have been given by Onishi [6].

u/c	P/P_W	T/T_W	u/c	P/P_W	T/T_W
* 0.01151428	0.9779109	0.9960865	0.40	0.4900	0.8470
* 0.01781781	0.9660689	0.9929670	* 0.4116336	0.4805556	0.8431526
* 0.03528261	0.9341734	0.9856512	0.45	0.4520	0.8290
0.05	0.9083	0.9798	* 0.4680458	0.4397356	0.8205349
* 0.08560052	0.8491672	0.9656550	0.50	0.4178	0.8113
0.10	0.8267	0.9599	* 0.5073304	0.4126337	0.8093412
* 0.1100452	0.8113436	0.9560329	* 0.5257805	0.4008900	0.8030579
* 0.1347011	0.7755454	0.9458628	0.55	0.3867	0.7938
0.15	0.7539	0.9404	* 0.5890503	0.3640470	0.7810847
* 0.1597824	0.7406096	0.9366845	0.60	0.3585	0.7765
* 0.1632782	0.7359386	0.9353294	* 0.6432188	0.3369601	0.7588155
* 0.1710500	0.7256723	0.9323459	* 0.6451976	0.3346759	0.7621847
0.20	0.6891	0.9212	0.65	0.3331	0.7594
* 0.2089165	0.6781106	0.9178766	* 0.6594658	0.3279153	0.7571200
* 0.2097766	0.6770806	0.9175442	0.70	0.3099	0.7424
* 0.2192439	0.6658809	0.9139038	* 0.7415711	0.2906557	0.7300204
0.25	0.6309	0.9022	0.75	0.2888	0.7256
* 0.2554473	0.6249500	0.9002396	* 0.7751735	0.2772709	0.7187124
* 0.2565422	0.6240294	0.8991350	0.80	0.2695	0.7088
* 0.2951540	0.5835681	0.8854928	0.85	0.2519	0.6923
* 0.2984796	0.5802365	0.8843041	* 0.8865858	0.2372958	0.6813442
0.30	0.5789	0.8836	* 0.8912829	0.2345309	0.6805655
* 0.3022338	0.5764978	0.8829758	0.90	0.2357	0.6758
0.35	0.5321	0.8652	0.95	0.2210	0.6595
* 0.3825696	0.5039204	0.8536502	1.00	0.2075	0.6434

る流れ場をも記述可能な新しい支配系としての流体力学的定式化の有効性をチェックするため、気体論方程式系に基づく数値シミュレーション結果 [7] も点線で載せてみた。凝縮相界面近傍に分子の平均自由行路程度の厚さ (今の場合、$x/L \sim O(1)$) をもつ Knudsen 層の存在が気体論に基づく結果から分かる (Fig. 2 参照)。Knudsen 層は、気体論的境界層とも呼ばれ、そこでは、流体力学的諸量は非常に大きな勾配をもつ。流体力学的レベルの解像度ではこの Knudsen 層は、当然ながら、認知できない。したがって、その領域に相当する凝縮相界面近傍では、流体力学的定式化に基づいて得られた流体力学的諸量はほぼ一様となっている。しかし、例え薄い領域と言えども、現実に存在するこの Knudsen 層は、そこでの諸量の大きな勾配のため、流れ場全体に影響を及ぼし、その結果、流体力学的定式化と気体論方程式系に基づく両者の結果に定量的な差を生じさせている。このことは、本来、気体論レベルで取り扱うべき問題を通常の流体力学的レベルで取り扱ったために必然的に生じる差であり、避けることはできない。この事情を考慮すれば、2 つの支配系に基づく結果は流体力学的レベルの範疇では良く一致していると言える。と同時に、流体力学的定式化に基づく結果の妥当性が窺えよう。

ついでながら、工学的にも重要な蒸発過程による質量流量と潜熱パラメーター Γ との関係を Fig. 4 に示す。この種の問題では、流れ場の定常状態は厳密には存在しない。しかし、十分な時間経過後、凝縮相界面近傍において、流れ場が殆ど時間的に変化していないと見做せる領域が現れるという意味においてある種の定常状態 (pseudo-steady state) が確立したと言える。図における質量流量は界面におけるこのときの値である。図から分かるように、ある潜熱パラメーターの値に対して、質量流量が最大となっている。この現象は、此れまでにも比較的弱い蒸発・凝縮過程による流れ場において見られたものであるが ([7]、[8] 参照)、ここでの場合のようにかなり強い蒸発過程に伴う流れ場でも存在するということが分かる。このことは、ある与えられた条件下で、質量流量を最大にする物質 (流体) が存在するということである。このことを踏まえれば、実際の熱・エネルギー輸送システムにおける作動流体としての適切な物質の選択に大きく役立つであろう。

この研究に対して、宇宙科学研究所情報解析センターの支援を受けた。

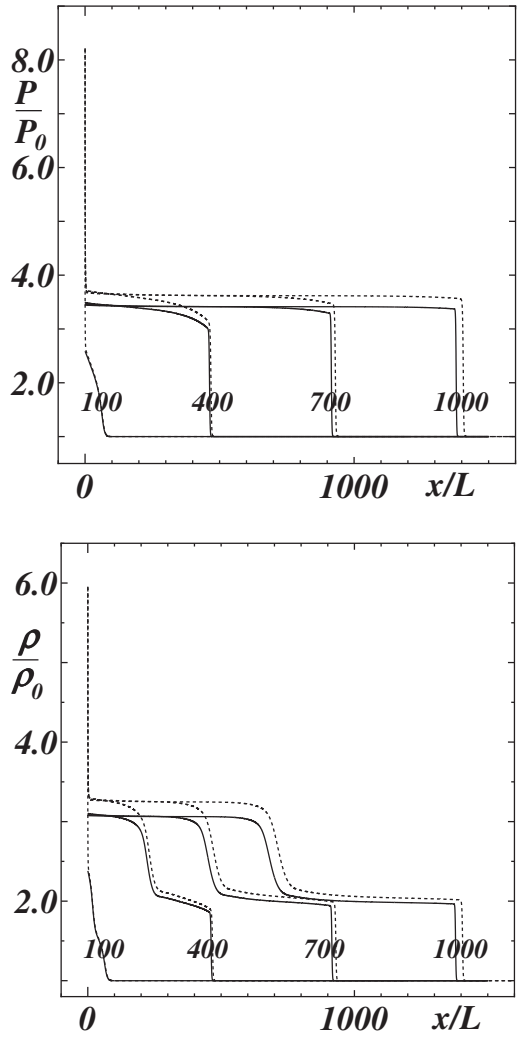


Fig. 1: Transient pressure and density distributions of a vapor due to strong evaporation from its plane condensed phase with finite thermal conductivity ratio $\lambda_c/\lambda_0 = 100$. $T_c/T_0 = 3.0$, $D/L = 10.0$, $\Gamma = 7.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.5$, and $Pr = 1.0$. The numbers in the graphs indicate the time t/τ_0, τ_0 being defined by $\tau_0 \equiv L/(2RT_0)^{1/2}$. **Solid lines**: the present results based on the Fluid Dynamic Formulation (Riemann applied) [2]. **Dotted lines**: the results by Onishi & Yamada [7] based on the kinetic equation [1].

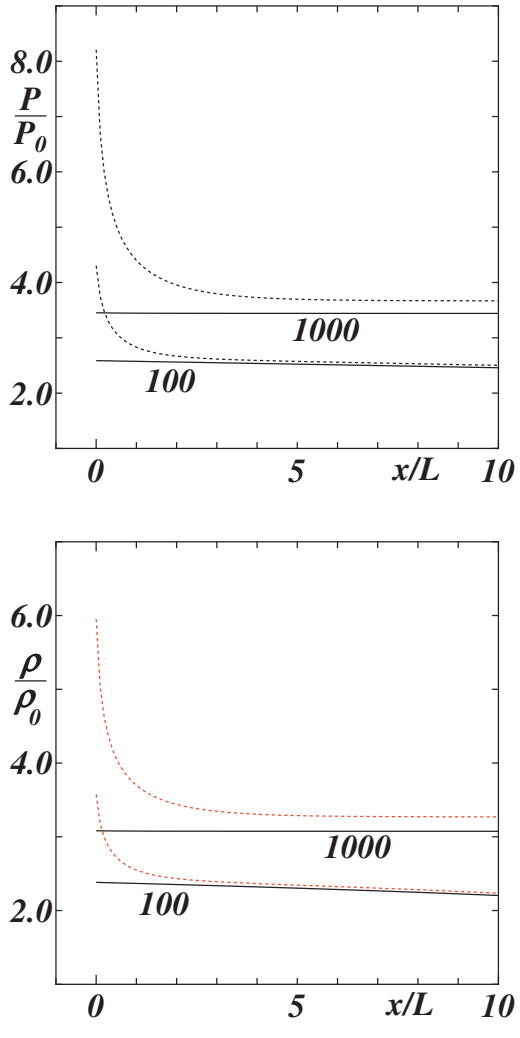


Fig. 2: The enlarged portions of the transient pressure and density distributions of a vapor due to strong evaporation from its plane condensed phase with finite thermal conductivity ratio $\lambda_c/\lambda_0 = 100$. The caption of this figure is exactly the same as that in Fig. 1.

参考文献

[1] P.L. Bhatnagar, E.P. Gross and M. Krook: A model for collision processes in gases. (I) Small amplitude processes in charged and neutron one-component systems. *Phys. Rev.* **94** (1954) 511–525.

[2] Y. Onishi, T. Tanaka, D. Ichieda and H. Miura: On the treatment of strong evaporation and condensation flows of a vapor at the fluid dynamic level – Fluid dynamic formulation for phase change problems –.
Rarefied Gas Dynamics to be published. [see also 大西善元:「蒸発・凝縮過程を伴う非平衡流とその解析法」第 50 回理論応用力学講演会講演論文集 (パネルディスカッション PD5-3: 2001 年 1 月) pp. 61–64.]

[3] Y. Onishi and Y. Sone: Kinetic theory of slightly strong evaporation and condensation – Hydrodynamic equation and slip boundary condition for finite Reynolds number –. *J. Phys. Soc. Japan* **47** (1979) 1676–1685.

[4] K. Aoki and Y. Sone, Gas flows around the condensed phase with strong evaporation or conden-

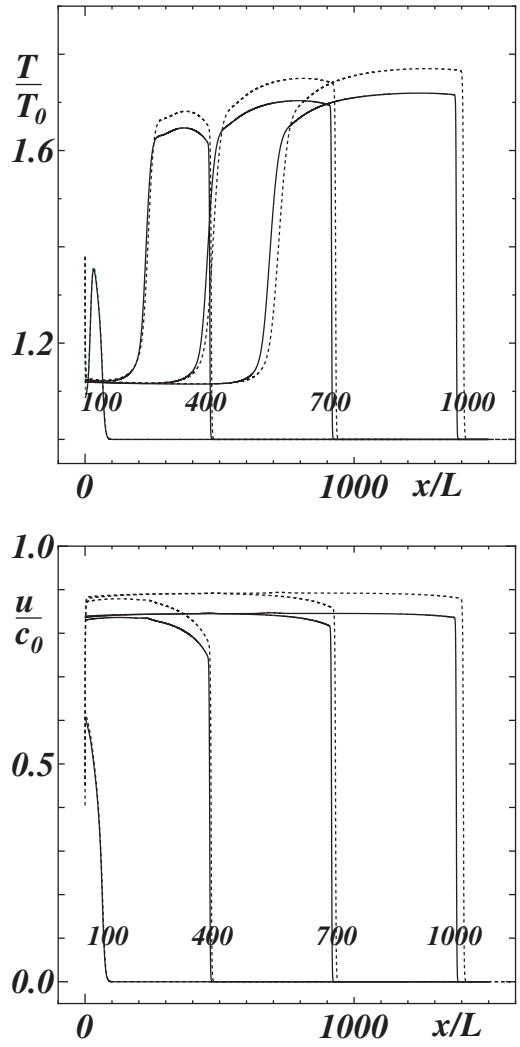


Fig. 3: Transient temperature and velocity distributions of a vapor due to strong evaporation from its plane condensed phase with finite thermal conductivity ratio $\lambda_c/\lambda_0 = 100$. The caption of this figure is exactly the same as that in Fig. 1.

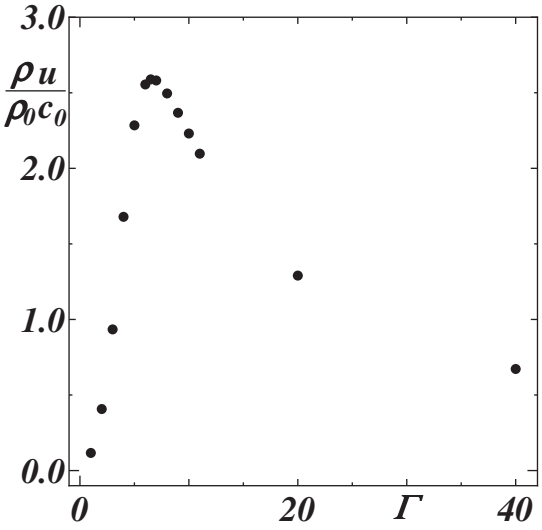


Fig. 4: Mass flows $\rho\, u/\rho_0 c_0|_{x=0}$ versus the latent heat parameter Γ for pseudo-steady state flows of a vapor due to strong evaporation from its plane condensed phase with finite thermal conductivity ratio. $T_c/T_0 = 3.0$, $D/L = 10.0$, $\lambda_c/\lambda_0 = 100$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.5$, and $Pr = 1.0$.

sation – Fluid dynamic equation and its boundary condition on the interface and their application –. *Advances in Kinetic Theory and Continuum Mechanics*, Springer-Verlag, Berlin, 1991, pp. 43–54.

[5] Y. Sone and H. Sugimoto: Strong evaporation from a plane condense phase. *Adiabatic Waves in Liquid-Vapor Systems*, edited by G.E.A. Meier and P.A. Thompson, Berlin: Springer-Verlag, 1990, pp. 293–304.

[6] Y. Onishi: in preparation.

[7] Y. Onishi and K. Yamada: Evaporation and condensation from or onto the condensed phase with an internal structure. *Rarefied Gas Dynamics*, edited by A.D. Ketsdever and E.P. Muntz (American Institute of Physics, U.S.A., 2003), pp. 630–637.

[8] 大西善元、藤 貴洋: 内部構造をもつ同軸円筒状凝縮相間の蒸発・凝縮流に対する漸近理論解析 (An asymptotic analyis on flows of a vapor between the cylindrical condensed phases with internal structures). 日本機械学会鳥取地方講演会 (中国四国支部・九州支部 合同企画) 講演論文集 (2006 年 11 月)

(受理　2006 年 11 月 30 日)

内部構造としての温度場をもつ凝縮相からの 2次元蒸発・凝縮流のシミュレーション

大西 善元、村山太一
鳥取大学工学部応用数理工学科

A simulation of two dimensional flows of a vapor due to evaporation and condensation from the condensed phase with finite thermal conductivity

Yoshimoto ONISHI and Taichi MURAYAMA

Department of Applied Mathematics and Physics, Faculty of Engineering,
Tottori University, Tottori 680-8552, Japan
E-mail: onishi@damp.tottori-u.ac.jp

Abstract: Motions of a vapor in a two dimensional space due to evaporation process occurring at the interface of the condensed phase have been studied based on the *fluid dynamic formulation*. The condensed phase, which is embedded in a plane adiabatic solid wall of infinite expanse, has a temperature field as its internal structure because of its thermal conductivity being finite compared to that of its vapor. Owing to this internal structure, the temperature of the interface itself can not be specified beforehand in the boundary conditions, which complicates the problem. The present study, which is a trial in dealing with two-dimensional problems of this kind, is concerned with one of the prototype problems with particular attention being paied to the effects of the finite thermal conductivity ratio of the condensed phase on the flow fields.

Key Words: Fluid Dynamic Formulation, Two dimensional flows due to Phase changes, Condensed phase with finite thermal conductivity ratio, Condensed phase with internal structure.

1. はじめに

凝縮相のもつ有限熱伝導性が界面での蒸発・凝縮過程によって形成される流れ場に大きな影響を及ぼすことが最近の一連の研究 [1] – [4] によって明らかにされている。その最たる影響は、蒸発・凝縮量およびエネルギー流量と潜熱パラメーターとの関係を大きく変化させるということであろう。通常、凝縮相のもつ熱伝導係数は気相のそれに比べて一桁は大きい。この事実を踏まえて、凝縮相の熱伝導係数を気相のそれに対して思い切って無限大とした場合には、殆どのこれまでの解析はそうであるが、蒸発・凝縮量およびエネルギー流量は潜熱パラメーターと共に比較的単純に増加する。しかし、凝縮相の有限熱伝導性を陽に考慮した場合、流量は潜熱パラメーターに対して単純な振る舞いをするのではなく、そのパラメーターの特定な値に対して最大値をとるという興味ある振る舞いをする。このように、凝縮相の有限熱伝導性とのカップリングにおいて、潜熱パラメーターの果たす役割が定性的に大きく異なってくることは、理論的に興味があるだけでなく、工学的にも非常に重要である。熱・エネルギー輸送システムにおける作動流体の選択に大きく関わるからである。

凝縮相の熱伝導性が気相のそれに比べて有限か無限大かということは、凝縮相内にその内部構造としての温度場が形成されるか否かということに関わる。後者の場合には、凝縮相内では温度は単純に一様となっており、凝縮相界面での温度は境界条件として予め指定できる。これに対して、前者の場合、凝縮相における温度場構造の存在のために、凝縮相界面では境界条件としての界面温度の指定ができない、つまり、界面温度は未知の量 (一般的には、時間の関数) で、解の一部として決まることになる。非常に厄介で困難を伴う問題なのである。このような状況にも拘わらず、凝縮相の有限熱伝導性を考慮して、1 次元問題ではあるが、我々の研究室においては理論解析、数値シミュレーション解析等を通して幾多の流れ場を定性的かつ定量的に調べてきた。その結果、いくつかの新たな事実をも解明している。ここでは、2 次元問題においても、凝縮相のもつ有限熱伝導性の影響を調べておきたい。その手始めとして、無限平面断熱壁中に埋め込まれた有限の熱伝導率をもつ有限幅の凝縮相を考え、それからの 2 次元半無限空間への蒸発・凝縮問題を取り上げた。2 次元問題のプロトタイプ的な問題である。相変化現象は、界面近傍での系の極度な非平衡性による。したがって、支配方程式系は、当然ながら、気体論方程式系 [5] であるべきであるが、ここでは、それと等価な結果を与え、かつ、比較的扱い易い流体力学的レベルでの支配系、つまり、「流体力学的定式化 [6]」を

使う。この主な理由は、前述のように、凝縮相の界面温度が未知量であるため、界面での境界条件としての温度指定ができないという新たに直面した困難さにある。この困難を克服するためには、未知の界面温度を時々刻々予測する適切な方法の開発が必要となるのは当然で、既に、支配方程式系と境界条件から理論的に界面温度予測の条件式を導出しており ([1] – [2] 参照)、その有効性も確かめてはいる。つまり、その方法を気体論方程式系と流体力学的定式化という 2 つの支配方程式系に基づくシミュレーション・スキームに組み込んで種々の問題 (1 次元問題) を解析し、その有効性を確かめた訳である。界面温度については比較的速やかに適切な値を推定するが、それでも気体論方程式系に基づく解析となるとやはり相当膨大な計算時間を必要とする。このような事情を踏まえれば、気体論方程式系の代わりに、流体力学的レベルでは等価な流体力学的定式化を支配系として用いて解析を進める理由が分かるであろう。

2.　問題の定式化

$x-y$ 平面上において、無限の広がりをもつ平面断熱壁中に、幅 $L = X_2 - X_1$、厚さ D の凝縮相が埋め込まれているとして、それからの蒸発・凝縮過程によって形成される半無限空間における流れ場を考える (Fig. 1 参照)。この系は、初期に、温度 T_0 で完全静止平衡状

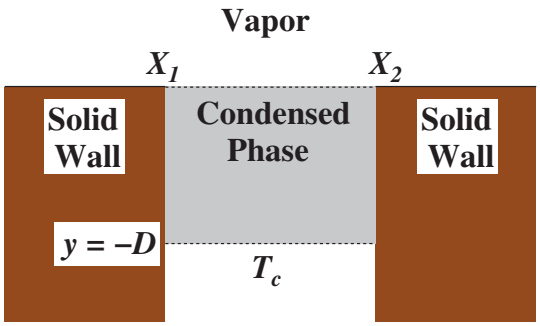


Fig. 1: A schematic view of a two dimensional flow of a vapor from or onto its condensed phase with finite thermal conductivity, which is embedded in the adiabatic plane solid wall of infinite expanse placed at $y = 0$. $L = X_2 - X_1$ and D are the width and the thickness of the condensed phase, respectively.

態にあるとし、そのときの気相の密度と圧力をそれぞれ ρ_0、P_0 とする。ある瞬間 ($t = 0$) に、凝縮相の端 ($y = -D$) の温度を T_0 から T_c へと変化させる。つまり、高温あるいは低温浴槽に接触させる。一定時間経過後、凝縮相内部を通しての熱伝導によって、凝縮相界面 ($y = 0$、$X_1 < x < X_2$) の温度が変化し、それによって、界面で蒸発あるいは凝縮過程が生じ、気相中に種々の波動を伴った非定常流れ場が形成される。当然ながら、気相に対する凝縮相の有限熱伝導性を考慮すると、凝縮相にはその内部構造として温度場が形成される。流れ場に対する支配系としての**流体力学的定式化** [6] は、次のような形で与えられる: まづ、凝縮相内の温度場 $\tilde{T}$ に対しては、κ_c を凝縮相の温度拡散係数とすれば

$$\frac{\partial \tilde{T}}{\partial t} - \kappa_c \frac{\partial^2 \tilde{T}}{\partial x_j^2} = 0 \qquad \text{(凝縮相内部で)} \qquad (1)$$

次に、気相の流れ場に対しては、通常の圧縮性 Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial}{\partial t}\begin{bmatrix} \rho \\ \rho u_i \\ \rho(e + \frac{1}{2}u^2) \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial x_j}\begin{bmatrix} \rho u_j \\ \rho u_i u_j + P\,\delta_{ij} - \tau_{ij} \\ \rho u_j (h + \frac{1}{2}u^2) - u_i \tau_{ij} + q_j \end{bmatrix} = 0 \qquad (2)$$

$$P = \rho R T \qquad (3)$$

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3}\mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l}\delta_{ij} \qquad (4)$$

$$q_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \qquad (5)$$

$$h = \gamma\, e = c_p\, T = \frac{\gamma}{\gamma - 1} R T \qquad (6)$$

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \frac{T}{T_0}, \qquad \frac{\lambda}{\lambda_0} = \frac{T}{T_0}, \qquad \gamma \equiv \frac{c_p}{c_v} \qquad (7)$$

である。ここで、t は時間、$x_i = (x_1, x_2, x_3) = (x, y, z)$ は空間座標、ρ は気体の密度、u_i は速度ベクトル、P は圧力、T は温度、e および h はそれぞれ単位質量当たりの内部エネルギーとエンタルピー、τ_{ij} は粘性応力テンソル、q_i は熱流束ベクトルである。δ_{ij} は Kronecker の delta を表わす。μ と λ は粘性係数および熱伝導係数で、温度 T に比例する (μ_0、λ_0 は温度 T_0 での粘性係数と熱伝導係数)。R は単位質量当たりの気体定数、γ は比熱比 (ここでは、$\gamma = 5/3$) で、c_v と c_p はそれぞれ気体の定積比熱と定圧比熱である。

初期条件は、この問題の場合

$$\left.\begin{array}{ll} \tilde{T} = T_0 & \text{(凝縮相内部の至る所で)} \\ u_i = 0,\ P = P_0,\ T = T_0 & \text{(気相の至る所)} \end{array}\right\} \qquad (8)$$

となる。凝縮相界面 ($y = 0$、$X_1 < x < X_2$) での境

界条件は、流体力学的定式化においては

$$\left.\begin{aligned} & u_i t_i = 0 \\ & \frac{P-P_W}{P_W} = C_4^* \frac{u_i\, n_i}{(2RT_W)^{1/2}} \\ & \frac{T-T_W}{T_W} = d_4^* \frac{u_i\, n_i}{(2RT_W)^{1/2}} \\ & -\lambda_c \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} n_i \\ & \quad = q_i n_i + \left(h_L + \frac{1}{2}u^2\right)\rho\, u_i n_i - u_i \tau_{ij} n_j \\ & C_4^* = -2.132039, \qquad d_4^* = -0.446749 \end{aligned}\right\} \quad (9)$$

で与えられる。上の条件 (9) は、気体論方程式系 [5] に基づいた凝縮性気体の一般的な運動に対する弱非線形漸近解析 [7] から得られた巨視的条件で、最後の関係式は界面でのエネルギー流束連続条件を表わす。λ_c は凝縮相の熱伝導係数である。n_i は境界面上での外向き単位法線ベクトル、t_i は境界面上における一つの単位接線ベクトルである。(9) 式における T_W は凝縮相の界面温度で未だ未知の量である (時間の未知関数)。P_W は温度 T_W に対する飽和蒸気圧力で、両者は次の Clapeyron-Clausius の式

$$\frac{P_W}{P_0} = \exp\left[-\Gamma\left(\frac{T_0}{T_W}-1\right)\right], \qquad \Gamma \equiv \frac{h_L}{RT_0} \quad (10)$$

で結び付いている。上式における h_L は単位質量当たりの潜熱で、その無次元数 Γ は潜熱パラメーターと呼ばれている。Γ の値は、例えば H_2O の場合 $\Gamma = 19$ ($T_0 = 25^oC$)、アルゴンの場合 $\Gamma = 9$ ($T_0 = -186^oC$)、アンモニアの場合 $\Gamma = 8$ ($T_0 = 25^oC$) 程度である。

また、断熱平面壁上 ($y = 0,\ x < X_1,\ x > X_2$) では

$$u_i n_i = u_i t_i = 0, \qquad \frac{\partial T}{\partial x_i} n_i = 0 \quad (11)$$

凝縮相の端点と側壁上では

$$\left.\begin{aligned} & \tilde{T} = T_c \qquad (\, y = -D,\ X_1 < x < X_2\,) \\ & \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} n_i = 0 \qquad (\, x = X_1,\ -D < y < 0\,) \\ & \frac{\partial \tilde{T}}{\partial x_i} n_i = 0 \qquad (\, x = X_2,\ -D < y < 0\,) \end{aligned}\right\} \quad (12)$$

で与えられる。ここで、T_c は恒温浴槽の温度である。

3. 特性無次元パラメーター

さて、解析に際して、長さのスケールとして、$L = X_2 - X_1$ を、速度のスケールとして初期状態での気体の音速 $c_0 = (\gamma\, RT_0)^{1/2}$、そして時間スケールとして $\tau_0 = L/(2RT_0)^{1/2}$ をとる。これに加えて、初期状態での流体力学的諸量を基準量にとる。これらによって、支配方程式系および初期、境界条件を適切に無次元化すれば、系の振る舞いを特性づける無次元パラメーターとして

$$\left.\begin{aligned} & \frac{T_c}{T_0}, \quad \frac{D}{L}, \quad \Gamma \equiv \frac{h_L}{RT_0}, \quad \frac{\lambda_c}{\lambda_0}, \quad \frac{\kappa_c}{\kappa_0} \\ & Re \equiv \frac{\rho_0 c_0 L}{\mu_0}, \quad Pr \equiv \frac{c_p \mu_0}{\lambda_0} \end{aligned}\right\} \quad (13)$$

を得る。ここで、λ_c/λ_0 は凝縮相の熱伝導係数比、κ_c/κ_0 は温度拡散係数比、Re は Reynolds 数、Pr は Prandtl 数である。μ_0、λ_0、$\kappa_0 \equiv \lambda_0/(\rho_0 c_p)$ は、それぞれ、初期状態での気体の粘性係数、熱伝導係数および温度拡散係数である。また、将来行われるであろう気体論方程式系に基づく結果との比較のために必要となる $Kn \equiv l_0/L$ で定義される Knudsen 数 Kn を導入すると、Knudsen 数と Reynolds 数 Re との間に $Kn = (8\gamma/\pi)^{1/2}(1/Re)$ なる関係がある。ここで、l_0 は初期状態での分子の平均自由行路で、$l_0 \equiv (\mu_0/P_0)(8RT_0/\pi)^{1/2}$ で定義される。

4. 結果と考察

(13) 式における無次元パラメーターのいくつかのセットに対してシミュレーションを行った。スキームは単純明快な MacCormack 法である。計算領域は、基本的には、$-10 \leqq x/L \leqq 10$、$-D/L \leqq y/L \leqq 10$ とし、領域の境界線上では、単純な流出条件ではなく、これまでも使用してきた方法であるが、1 階の線形波動方程式でもって各種の disturbance を歪ませることなく計算領域外に送り出す方法を採った。

さて、結果のグラフを次に示すが、全ての結果において、凝縮相内部の温度場は、単純な分布で、凝縮相の側壁が断熱されているため 1 次元の場合と変わらない。Figure 2 に速度ベクトル線図を示す。明らかに、凝縮相界面 ($-0.5 \leqq x/L \leqq 0.5,\ y/L = 0$) で、蒸発過程が生じ、流れが 2 次元領域に広がっていく様子が見える。今の場合、時間が $t/\tau_0 = 2.5$ から $t/\tau_0 = 10.0$ 程度になると、界面近傍での蒸発流の速さは c_0 (初期状態での気相の音速) の約 5%から 8%程度となっていることが分かる。圧力、密度および温度場については、Figs. 3 – 5 に、それぞれ時刻 $t/\tau_0 = 2.5, 5.0$ および 10.0 での鳥瞰図で示す。温度 T_c の高温浴槽から熱が凝縮相内を伝わり、凝縮相界面に達して蒸発過程が生じる。その過程に付随して生成された弱い衝撃波、接触領域が 2 次元領域を伝播していく様子が捉えられている。断熱壁と接している凝縮相界面の端点 ($y/L = 0$, $x/L = \pm 0.5$) で、**境界条件が不連続**となっているために、その近傍での諸量、特に、圧力と密度に overshoot している部分が見られる。この現象は避け難く、現在のところ、如何ともし難い。しかしながら、大域的な流れ場としては、合理的な様相を示しており、この境界条件の不連続性による overshoot の影響は大きくはないように思える。次に、$y/L = 0.0, 0.1$ および 1.0 なる断面での x/L に対する圧力、密度および温度分布を Figs. 6 – 8 に示す。$y/L = 0.0$ なる断面上では、前

述した境界条件の不連続性のため、諸量の分布にかなり大きな overshoot が現れているが、界面あるいは壁面から離れるにしたがって、合理的な分布状態となっている。圧力、密度、温度分布は、初期状態に近い時間帯では、異なる様相を示しているが、時間経過と共に同様な分布をもつようになる。本来は、密度と温度分布には、弱い衝撃波背後に接触領域が認識できるはずであるが、波動が 2 次元領域に減衰しつつ広がっていくため、明確には把握できない。

最後に、この種の 2 次元問題では、多大な計算時間を必要とするため、現時点では、計算領域の拡大もままならず、十分な時間発展を追うことができなかった。しかし、内部構造としての温度場をもつ凝縮相からの 2 次元蒸発･凝縮問題を始めて扱ったことになる。残念ながら、気体論方程式系に基づいたシミュレーション結果が、現在のところ、存在しないので、結果の比較検討はできないが、ここでの「流体力学的定式化」で十分定性的には正しい結果が得られていると考えている。今後、気体論方程式系に基づく数値シミュレーションも行い、結果の比較検討を行いたい。さらに、これらの結果を踏まえて、ヒートパイプ内の実際的な流れ場のシミュレーションへと発展させるつもりである。

この研究に対して、宇宙科学研究所情報解析センターの支援を受けた。

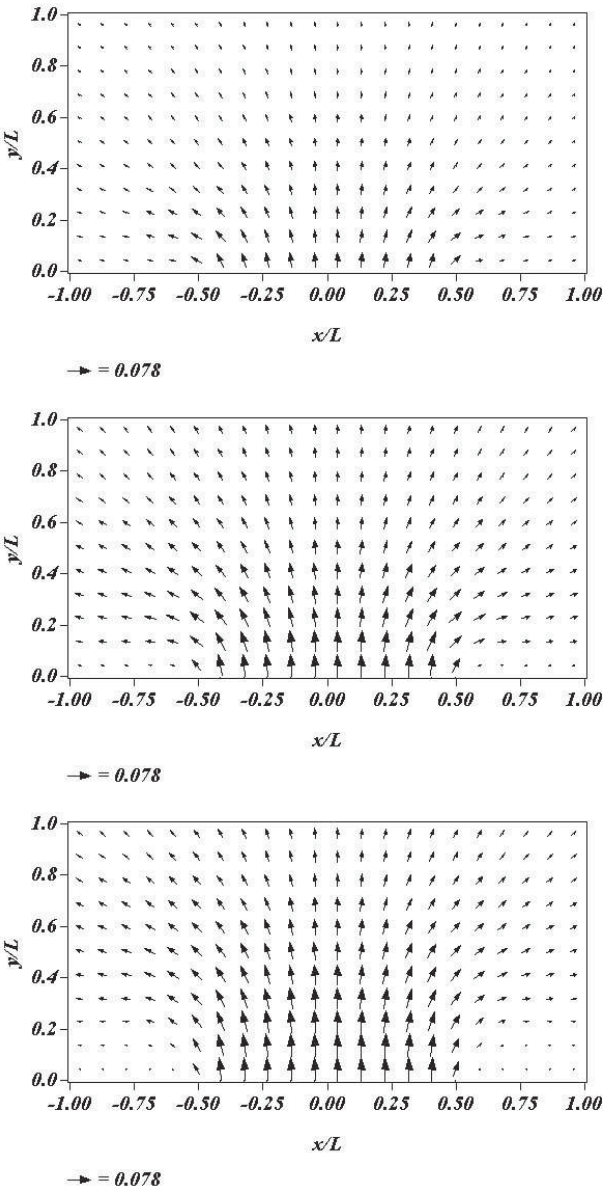


Fig. 2: The diagrams of the velocity vector $(u, v)/c_0$ at different times $t/\tau_0 = 2.5$, 5.0 and 10.0. The interface of the condensed phase is at $y/L = 0$ and $-0.5 \leqq x/L \leqq 0.5$. $T_c/T_0 = 1.5$, $D/L = 0.1$, $\Gamma = 11$, $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Re = 412.03$, $(Kn = 0.005)$, $Pr = 1.0$. **Above:** $t/\tau_0 = 2.5$. **Middle:** $t/\tau_0 = 5.0$. **Bottom:** $t/\tau_0 = 10.0$.

参考文献

[1] Y. Onishi and K. Yamada: "Evaporation and Condensation from or onto the Condensed Phase with an Internal Structure," *Rarefied Gas Dynamics* (AIP Conference Proceedings: Volume 663), edited by A.D. Ketsdever and E.P. Muntz (American Institute of Physics, New York, 2003) pp. 630–637.

[2] Y. Onishi, K. Yamada and T. Nakajima: "Simulation of Evaporation Flows from the Condensed Phase with an Internal Structure based on the Fluid Dynamic Formulation," *Rarefied Gas Dynamics* (AIP Conference Proceedings: Volume 663), edited by A.D. Ketsdever and E.P. Muntz (American Institute of Physics, New York, 2003) pp. 654–661.

[3] Y. Onishi and K. Yamada: "Evaporation and Condensation Flows of a Vapor-Gas Mixture from or onto the Condensed Phase with an Internal Structure," *Rarefied Gas Dynamics*, edited by M. Capitelli (American Institute of Physics, Melville, New York, 2005), pp. 485–490.

[4] Y. Onishi and T. Ooshida: "Flows of a Vapor due to Phase Change Processes at the Condensed Phases with Temperature Fields as their Internal Structures," *Rarefied Gas Dynamics*, edited by M. Capitelli (American Institute of Physics, Melville, New York, 2005), pp. 644–649.

[5] P.L. Bhatnagar, E.P. Gross and M. Krook: "A model for collision processes in gases. (I) Small amplitude processes in charged and neutron one-component systems," *Phys. Rev.* **94** (1954) 511–525.

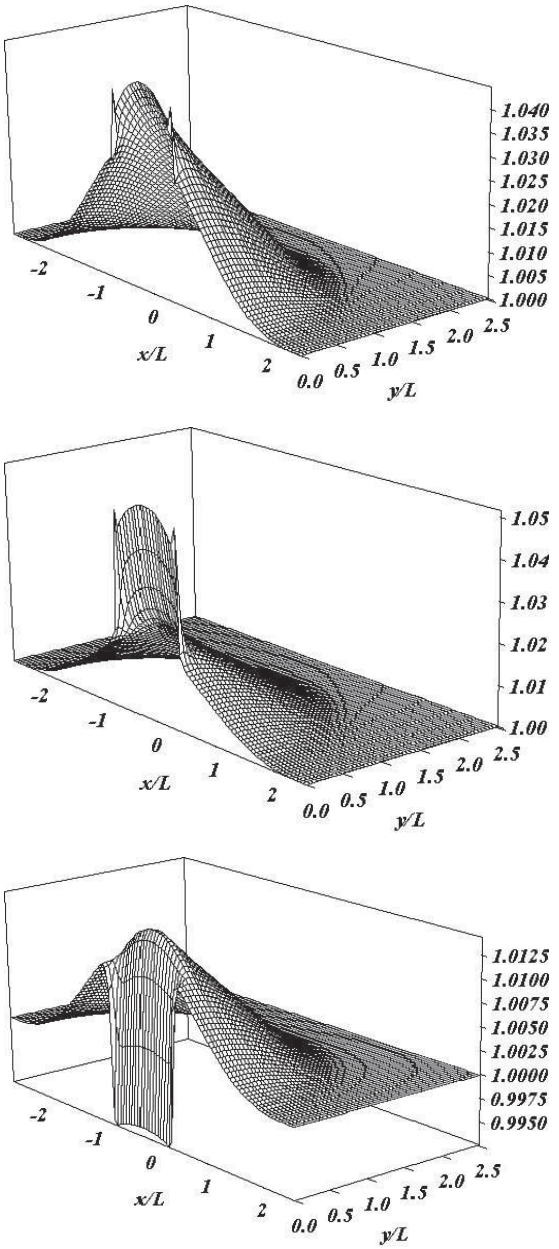


Fig. 3: The contours of the pressure, density and temperature at time $t/\tau_0 = 2.5$. The interface of the condensed phase is at $y/L = 0$ and $-0.5 \leqq x/L \leqq 0.5$. $T_c/T_0 = 1.5$, $D/L = 0.1$, $\Gamma = 11$, $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Re = 412.03$, $(Kn = 0.005)$, $Pr = 1.0$. **Above:** pressure P/P_0. **Middle:** density ρ/ρ_0. **Bottom:** temperature T/T_0.

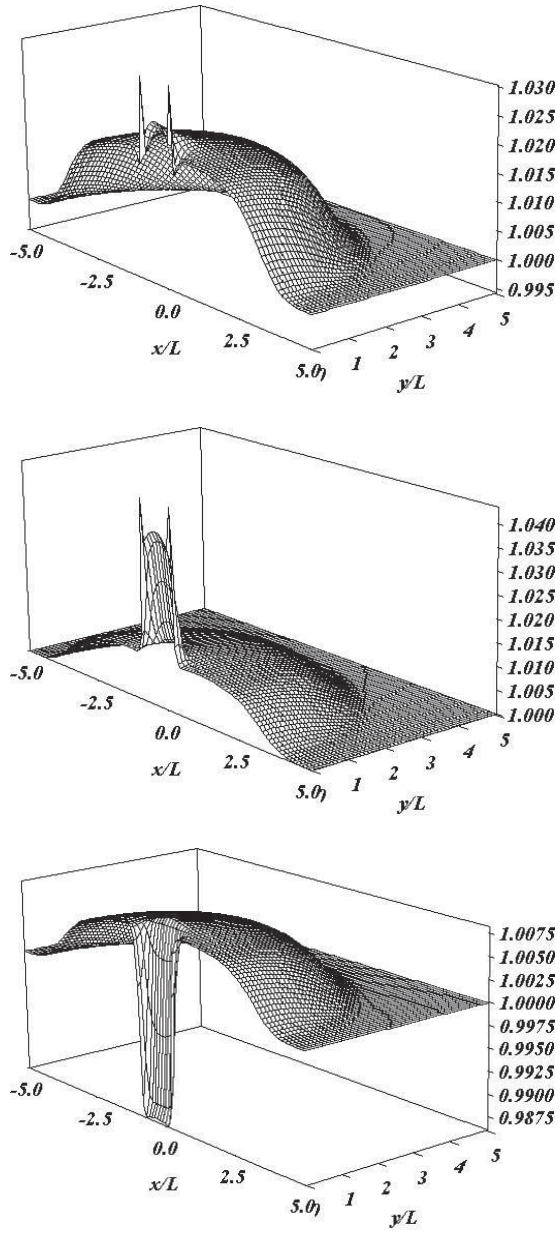


Fig. 4: The contours of the pressure, density and temperature at time $t/\tau_0 = 5.0$. The interface of the condensed phase is at $y/L = 0$ and $-0.5 \leqq x/L \leqq 0.5$. $T_c/T_0 = 1.5$, $D/L = 0.1$, $\Gamma = 11$, $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Re = 412.03$, $(Kn = 0.005)$, $Pr = 1.0$. **Above:** pressure P/P_0. **Middle:** density ρ/ρ_0. **Bottom:** temperature T/T_0.

[6] Y. Onishi, T. Tanaka, D. Ichieda and H. Miura: "On the treatment of strong evaporation and condensation flows of a vapor at the fluid dynamic level – Fluid dynamic formulation for phase change problems –," *Rarefied Gas Dynamics* to be published. [あるいは、また、大西善元:「蒸発・凝縮過程を伴う非平衡流とその解析法」第50回理論応用力学講演会講演論文集 (パネルディスカッション PD5-3: 2001年1月) pp. 61–64.]

[7] Y. Onishi and Y. Sone: "Kinetic theory of slightly strong evaporation and condensation – Hydrodynamic equation and slip boundary con-

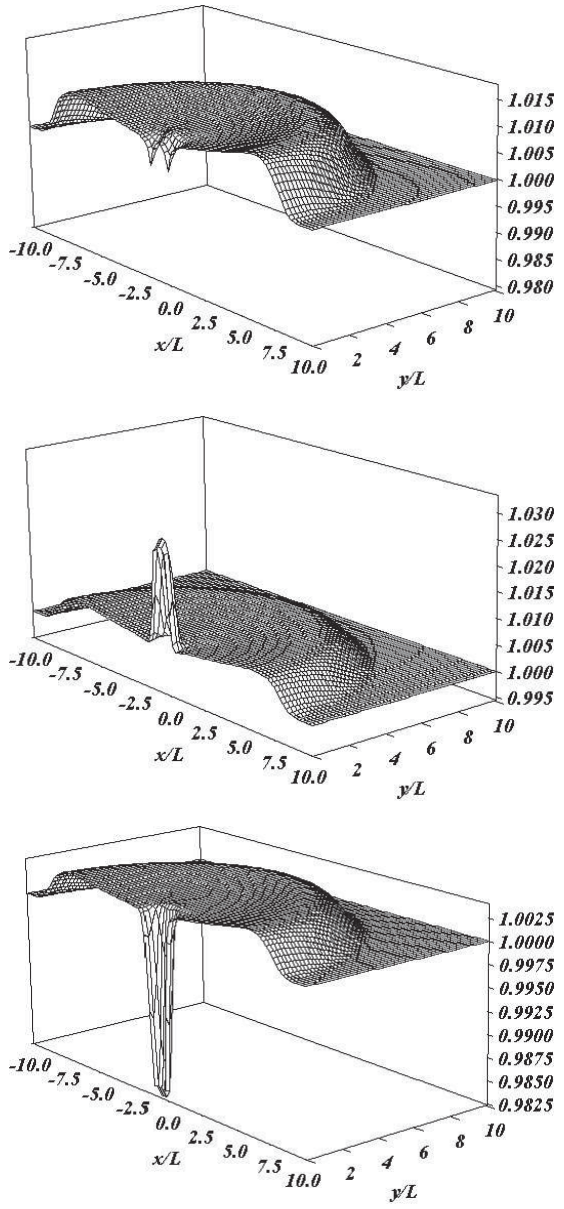


Fig. 5: The contours of the pressure, density and temperature at time $t/\tau_0 = 10.0$. The interface of the condensed phase is at $y/L = 0$ and $-0.5 \leqq x/L \leqq 0.5$. $T_c/T_0 = 1.5$, $D/L = 0.1$, $\Gamma = 11$, $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Re = 412.03$, ($Kn = 0.005$), $Pr = 1.0$. **Above:** pressure P/P_0. **Middle:** density ρ/ρ_0. **Bottom:** temperature T/T_0.

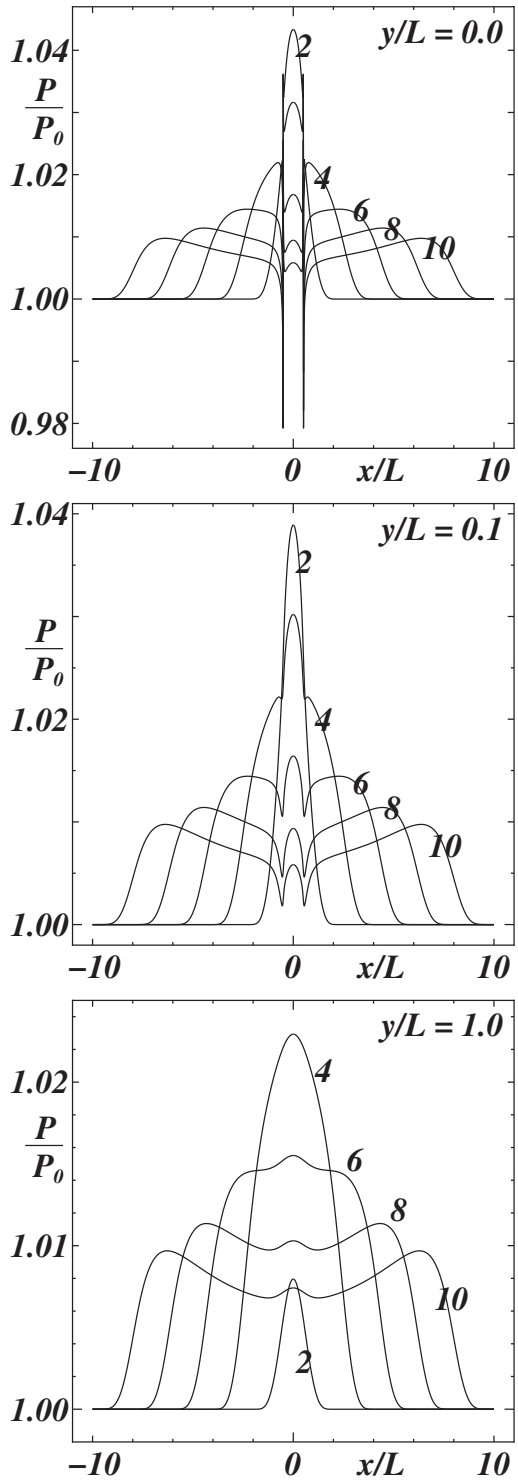


Fig. 6: The transient pressure distributions P/P_0 at the sections of $y/L = 0.0$, 0.1 and 1.0, respectively. The interface of the condensed phase is at $y/L = 0$ and $-0.5 \leqq x/L \leqq 0.5$. $T_c/T_0 = 1.5$, $D/L = 0.1$, $\Gamma = 11$, $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Re = 412.03$, $Pr = 1.0$. The numbers in the figures indicate the time t/τ_0.

dition for finite Reynolds number –," *J. Phys. Soc. Japan* **47** (1979) 1676–1685.

(受理　2006 年 11 月 30 日)

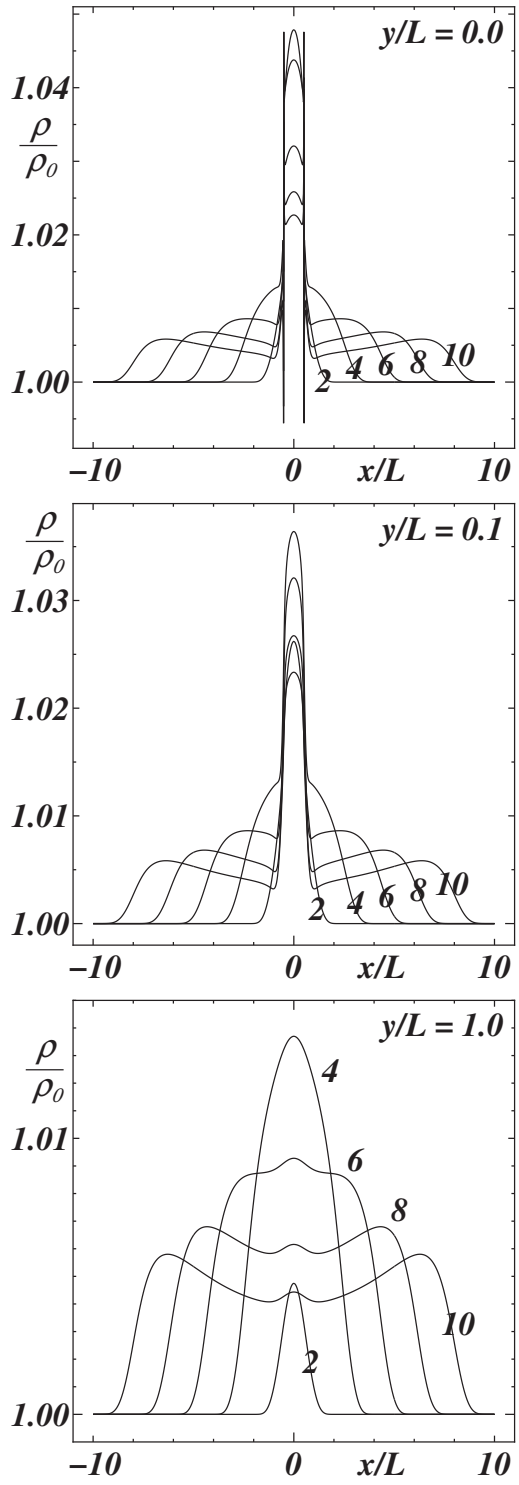


Fig. 7: The transient density distributions ρ/ρ_0 at the sections of $y/L = 0.0$, 0.1 and 1.0, respectively. The interface of the condensed phase is at $y/L = 0$ and $-0.5 \leqq x/L \leqq 0.5$. $T_c/T_0 = 1.5$, $D/L = 0.1$, $\Gamma = 11$, $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Re = 412.03$, $Pr = 1.0$. The numbers in the figures indicate the time t/τ_0.

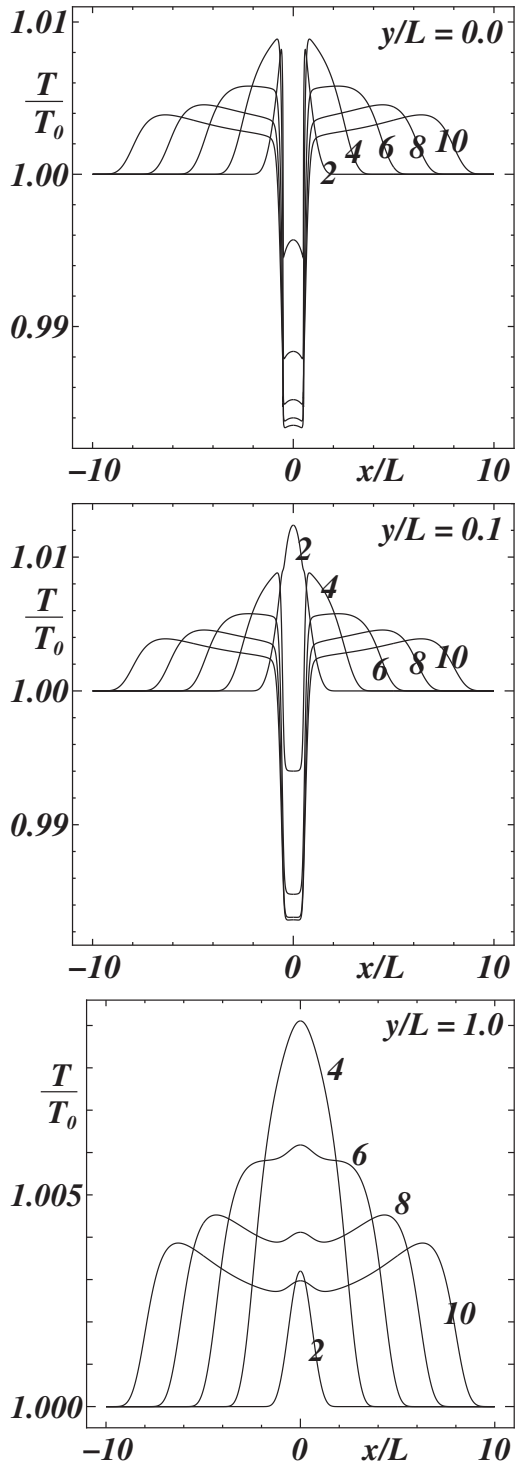


Fig. 8: The transient temperature distributions T/T_0 at the sections of $y/L = 0.0$, 0.1 and 1.0, respectively. The interface of the condensed phase is at $y/L = 0$ and $-0.5 \leqq x/L \leqq 0.5$. $T_c/T_0 = 1.5$, $D/L = 0.1$, $\Gamma = 11$, $\lambda_c/\lambda_0 = 30.0$, $\kappa_c/\kappa_0 = 0.32$, $Re = 412.03$, $Pr = 1.0$. The numbers in the figures indicate the time t/τ_0.

沙漠環境風洞の特性計測（定常風と脈動風）

林　　農・原　　豊・康　仁勝・加藤　優・藤本 裕己
若　良二[*1]・田川 公太朗[*2]・神近 牧男[*3]
鳥取大学工学部応用数理工学科
[*1] 鳥取大学国際交流センター・[*2] 鳥取大学地域学部・[*3] 鳥取環境大学

Measurements of the Wind generated by Desert Environment Wind Tunnel (Constant Speed Wind and Periodically Varying Wind)

Tsutomu HAYASHI, Yutaka HARA, In-Seung KANG, Masaru KATO, Yuuki FUJIMOTO
Ryoji WAKA[*1], Kotaro TAGAWA[*2] and Makio KAMICHIKA[*3]
Department of Applied Mathematics and Physics, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail:hayashi@damp.tottori-u.ac.jp
[*1] Center for International Affairs of Tottori University
[*2] Faculty of Regional Sciences, Tottori University
[*3] Tottori University of Environmental Studies, Tottori, 689-1111 Japan

Abstract: Wind characteristics generated by the wind tunnel named Desert Environment Wind Tunnel, which can generate arbitrary pattern of wind speed variation by changing the angle of pitch of the blower blades, were investigated with both of a hot-wire anemometer and a ultrasonic anemometer. Distributions of the wind velocity components (v, w) in a plane perpendicular to the mainstream (u-direction), whose wind speed varies like a sine wave, were measured downstream at x = 1.5m from the exit of wind tunnel nozzle. The experimental results revealed that the flow expands when it accelerates and, in reverse, the flow contracts when slowing down.

Key Words: Measurement, Wind tunnel, Periodically varying wind, Wind turbine, Desert environment

１．はじめに

2006 年は国連により定められた「砂漠と砂漠化に関する国際年」であり，グローバルな環境問題の一つである沙漠化とその対処に世界の注目が集められている．平成 12 年度－14 年度に科学研究費補助金（地域連携推進研究費）「砂漠化防止・沙漠緑化に活躍する新技術風車の研究開発」によって，沙漠環境風洞と名付けた変動風を発生可能な風洞を設置した[1]．この風洞によって，沙漠環境で予想される激しく変動する風の中における風車の運転特性を調べることが可能となった．この風洞の導入が契機となって，鳥取大学の 21 世紀 COE プログラム「乾燥地科学プログラム」のなかに，乾燥地において健康的な人間生活の営みを保障するために自然エネルギーを利用する研究グループが誕生した．自然エネルギー利用グループでは，乾燥地に生活する人々の生活向上や，砂漠化防止・沙漠緑化を推進するために，乾燥地に豊富に存在し環境に優しい風力や太陽エネルギーを利用した技術パッケージを構築することを目的として，農学と工学の融合を目指している．これまでに乾燥地における砂漠化防止・緑化支援技術の一つとして沙漠環境で活躍する乾燥地に適した風力タービンの研究開発を行っている[2]-[9]．

本研究では，この沙漠環境風洞が発生する変動風の特性を明らかにすることを目的とし，風速分布および風向変化について熱線流速計と超音波風速計を用いた計測を行う．

２．沙漠環境風洞の概要

本研究で使用した沙漠環境風洞の主要部分の写真を図 1 から図 3 に示す．また，図 4 に風洞の概略寸法を示す.沙漠環境風洞は吹出し型であり，吹出し口サイズ(図 3 (a))は 1.5 m×1.5 m，最大風速は 25m/s 以上が可能であり,風速 0m から 25m の任意の風速を発生させることができる.ただし，



図 1　沙漠環境風洞本体

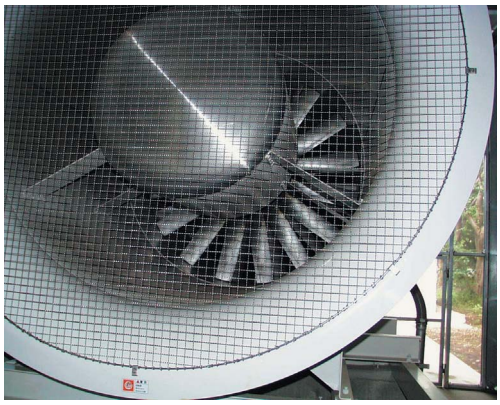


図 2　吸込みベルマウスと軸流送風機

通常は異物の混入を防ぐため，吸込み口に防塵フィルタ（PS/300，日本バイリーン㈱）を取付けて実験を行なっており，この場合の最大風速は約20m/s となる．表 1 に沙漠環境風洞の主な仕様を示す．この沙漠環境風洞の最大の特徴は，ピッチ可変機構(可変範囲:0°～60°)を備えた軸流送風機(図 2 参照,ローターブレード数 16 枚)を有していることである．送風機駆動用のインバータ周波数 f_B[Hz]（送風機回転数：n_B[rpm] ≒ 0.983 × 120f_B/6)と最大ピッチ角および最小ピッチ角とピッチ角変化の周期を適宜与えることで，風速一定の定常風（図 5（a））のほか，周期的に風速が変化する脈動風（図 5（b)），急激に風速が変化する突風（図 5（c)），瞬間的に風速が変化する瞬間風（図 5（d））などの任意の風パターンを発生可能である．

風洞吹出し口には，大きさが 1.5m(幅)×1.5m(高さ)×3.0m(長さ)の着脱式のテストセクション(図 3（b）および図 4 の赤色部分)が接続可能であり，これはレール上に載せられていて容易に移動可能である．本論文で行なう風洞特性計測や風車の特性計測を行う場合には，テストセクションは吹出し口から取り外して移動させ，図 3(a)の



(a)　　**(b)**

図 3　(a) 風洞吹出し口と 2 軸トラバース装置，
(b) テストセクション

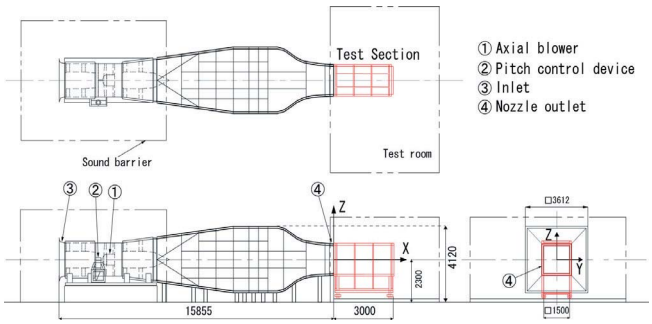


図 4　沙漠環境風洞の概略図

表 1　沙漠環境風洞の仕様

型　式	吹出し型風洞
吹出し口寸法	1.5m×1.5m
風速可変範囲	1～25m/s 以上
軸流送風機	口径：φ1.8m, 定格回転数：1180rpm, 風量：3800m^3/min, 全圧：980Pa.TP
送風機用電動機	3 相交流，200V, 6 極，90kW
縮流ノズル	縮流比：1:5.138, 縮流曲線：Rose & Hassen 式
脈動風の範囲	変動幅：平均風速の±30% 最短周期：T=2s
突風の範囲	最低風速：V_1=2m/s 最大風速：V_2=15m/s 最短変化時間：T=1s
瞬間風の範囲	瞬間最大風速：一定風速×1.5 最短変化時間：T=2s

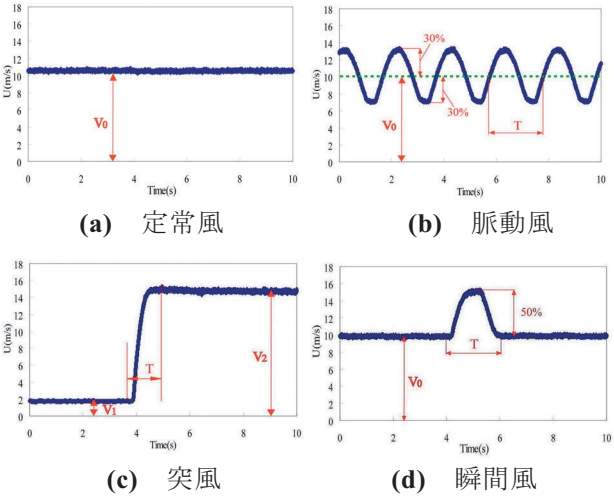


図 5　発生可能な風パターン

ように吹出し口からオープンスペースに直接噴き出してくる噴流を実験に使用する.

本風洞装置に設置してある 2 軸トラバース装置(図 3(a))の移動可能範囲は縦および横方向にそれぞれ 1500mm であり，位置精度は±0.75mm 以下である.

本風洞で調査すべき課題は次の事項である.

① 4 種類の風パターンの制限値を超えた限界値を見極める.
② 突風の逆ステップ(高速から低速へ)を可能にする.
③ 変動流の平均速度特性について解析する.
速度分布の捩れ特性，静圧，動圧，全圧，速度偏向特性.
④ 変動流の乱流特性について解析する.
⑤ 各種の砂漠対応風車の特性試験.

3．実験装置と計測方法

図 4 に示すように，座標系は風洞吹出し口の中心に原点をとり，主流方向に X 軸，それに垂直な面内において水平方向に Y 軸，垂直方向に Z 軸をとった.

本研究ではまず定常風の風速分布と乱れ度分布の計測を行った．この計測では I 型熱線プローブを使用し，これを 2 軸トラバース装置に取付け主流に垂直な平面内(Y-Z 面)で移動させた．トラバース装置は吹出し口からの距離 X が 0m，1.5m，3m の 3 ヶ所（図 6 参照）に設置した．各位置においてプローブを Y-Z 面内で移動させて計測点に位置決めした．各計測点における計測データ数は

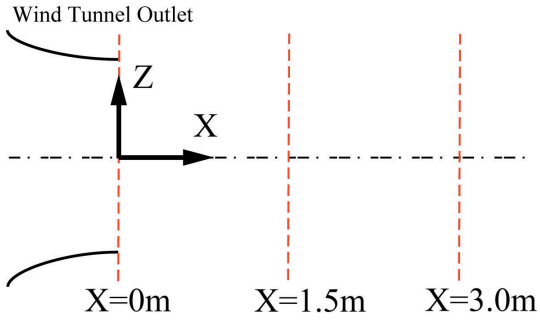


図 6　定常風の測定位置



図 7　超音波風速計

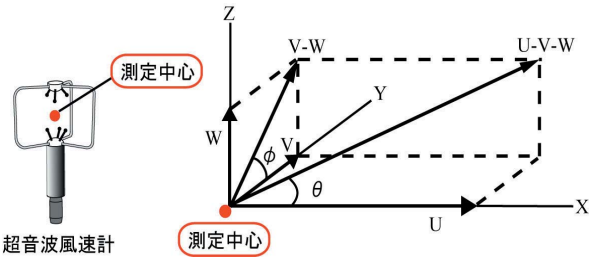


図 8　偏向角 θ と方位角 φ

30,000 個，サンプリング周波数は約 4kHz として主流方向(風速 U 成分)の風速データを計測した.

次に吹出し口後流における定常風の風向分布を把握するために,超音波風速計(図 7 参照,Model 81000，YOUNG 社製)を使用して風速 3 成分の計測を行なった．図 8 に座標 XYZ と風速 3 成分 U,V,W の関係を示す．本研究では，風速 3 成分の合成ベクトル(U-V-W)が主流方向(X 軸)と成す角度を偏向角 θ，主流に垂直な風速 2 成分(V，W)の合成ベクトル(V-W)が Y 軸方向と成す角度を方位角 φ と定義する.熱線プローブによる計測と同様に,X=0m, 1.5m, 3m の 3 ヶ所の Y-Z 面内で超音波風速計を移動させて計測を行った．サンプリング周波数は

表 2　脈動風発生条件

No.	平均中心風速：U_A	回転数：n_B
1	1.4 m/s	197 rpm
2	3.0 m/s	393 rpm
3	4.9 m/s	590 rpm
4	6.9 m/s	786 rpm
5	8.8 m/s	983 rpm
6	10.3 m/s	1180 rpm

32Hz（時間間隔：0.03125ｓ），各計測点における取得データ数は 300 個（計測時間：10 秒）とした．

沙漠環境風洞が発生する脈動風の特性を調べるために，超音波風速計を使用して，上記と同様の計測を行なった．脈動風発生条件は，軸流送風機のピッチ角を最大振幅となる 0° から 60° の間において変化させ，脈動風周期は実際の運転上における最短周期と考えられる T=1.29 秒とした．この条件下において送風機回転数を変え，表２に示す６つの平均中心風速状態で脈動風を発生させた．この実験では，X=1.5m の位置における Y-Z 面内の風速分布（風速３成分）の計測を行なった．サンプリング周波数は 32Hz ，各計測点における取得データ数は 3840 個（計測時間：120 秒）である．

４．実験結果と考察

４．１　定常風の風速分布と乱れ度分布

図９から図１１に，中心風速 15m/s の定常風を発生させたときの，X=0m，1.5m，3m の位置における各 Y-Z 面内で熱線流速計を用いて計測した速度分布を示す．各図の(a)は Z 座標を固定して Y 方向にプローブを移動させて計測した風速 U 成分の Y 方向分布をグラフで表したものであり，(b)は Y 座標を固定して Z 方向に計測した結果得られた風速 U 成分の Z 方向分布のグラフである．図９～11 ではグラフが重ならないように，隣り合うグラフのデータは 5m/s の間をおいて上下方向にスライドさせて表示してある．これらの結果より，風洞吹出し口の直後では，噴流のコアに相当する速度一定領域は広いが，下流に進むにつれてコアの領域が狭くなることがわかる．また，吹出し口直後では，ノズル内壁（Y=±750 mm と Z=±750）の位置の外側で急激に風速は減少しているが，下流側では速度減少の勾配は小さくなっており，より広い範囲まで噴流が広がっている様子が理解される．図 9 から図 11 の各図における(a)と(b)を比較すると，それほど大きな違いは見られないので，本風洞が発生する噴流は Y および Z 方向に関してほぼ対称な風速分布になっていると考えられる．なお，吹出し口直後（図９）において顕著であるが，噴流コア内において中央部分が相対的に速度が遅くコアの境界において若干速度が増加する傾向が見られる．

次に定常風の噴流コア内において，より詳細な風速分布と乱れ度の分布を計測した．計測手段は I 型熱線プローブである．計測断面は図 6 に示した３ヶ所とし，計測点は各 Y-Z 断面内において -700mm≦Y≦700mm，-700mm≦Z≦700mm の範囲における 100mm 間隔の格子点上とした．定常風の平均風速は約 5m/s，10m/s，15m/s，20m/s の４種類で計測を行った．図１２から図１５に X=0m における計測結果を，図１５から図１９に X=1.5m における計測結果を，図２０から図２３には X=3m における計測結果を示す．各図の(a)には，噴流のコアを含むと考えられる -500mm≦Y≦500mm，-500mm≦Z≦500mm の範囲における平均風速を基準とした各計測点の風速の偏差をカラーマップ表示している．図の下に記載している平均偏差とは，平均風速を算出している上記領域内における偏差の絶対値の平均である．一方各図の(b)には，乱れ度の分布をカラーマップ表示してある．ここで乱れ度とは，各計測点における時系列風速データから算出される平均風速からの各計測データの偏差の二乗平均の平方根（R.M.S.）を平均風速を基準とする百分率で表したものである．なお，図の下に記載している平均乱れ度とは，-500mm≦Y≦500mm，-500mm≦Z≦500mm の範囲における乱れ度の平均である．

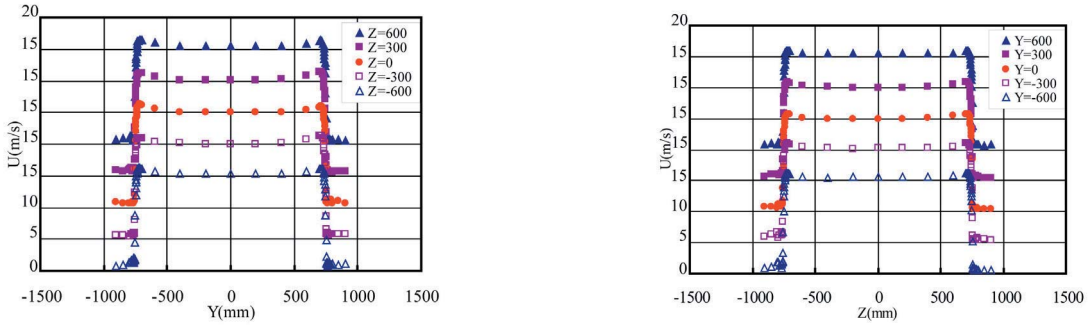
X=0m の断面の結果（図 12～15）を見ると，風速分布は噴流中心部分において偏差がマイナスとなっており，逆にコア周辺において偏差がプラスになっていて，図 9～11 で見られた風速分布の傾向がより明瞭になっている．この断面におけるコア領域の乱れ度はほとんど一様になっており，乱れ度の値も 1.3～1.8%の低い値が得られている．

X=1.5m の断面の結果（図 16～19）を見ると，風速分布はいぜんとして中心部が相対的に低くなる傾向が見られるが，平均偏差の値を参考にすると，風速 15m/s 以下では，X=0m の断面よりも中心部における風速の一様性は増加していると言える．しかし，｜Y｜＞600mm および｜Z｜＞600mm の領域では，急激に偏差が増加しており，噴流コア領域が狭くなっている様子がうかがえる．また，乱れ度の分布をみると，風速分布以上に一様な領域が狭くなっていることが分かる．

X=3m の断面の結果（図 20～23）を見ると，風速分布からは風速が一様と言える領域はおおよそ，-500mm≦Y≦500mm，-500mm≦Z≦500mm の範囲と考えられる．しかし，乱れ度の一様領域はさらに小さく，せいぜい-400mm≦Y≦400mm，-400mm≦Z≦400mm の範囲と考えられる．

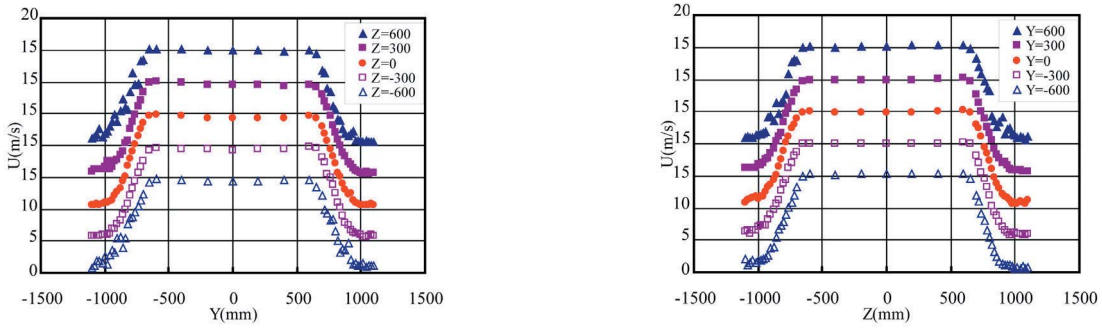
4．2　定常風の偏向分布

定常風の偏向状態を調べるために，超音波風速計を用いて風速の３成分(U, V, W)の計測を行った．計測対象とした定常風の中心風速は約 5m/s，10m/s，15m/s の３種類である．計測断面は図６に示した３ヶ所とし，計測点は各 Y-Z 断面内において-700mm≦Y≦700mm，-700mm≦Z≦700mm の範囲における 100mm 間隔の格子点上とした．図２４から図２６に X=0m における計測結果を，図２７から図２９に X=1.5m における計測結果を，図３０から図３２には X=3m における計測結果を示す．各図の(a)には，主流に垂直な風速成分の合成ベクトル



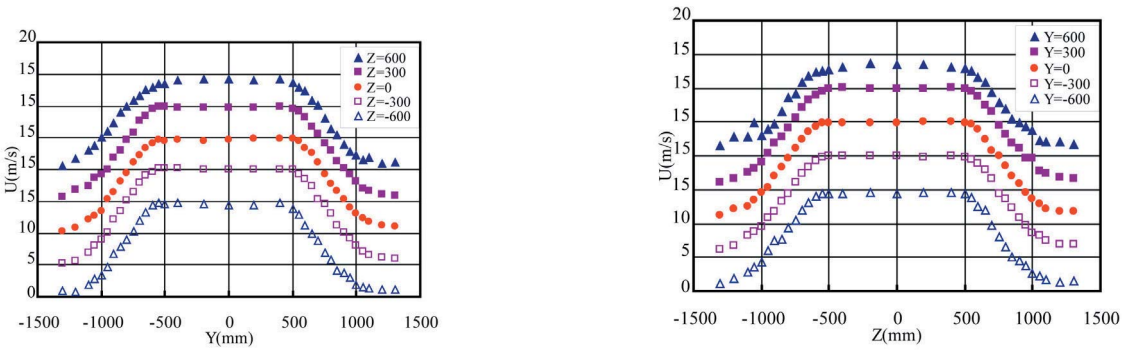
(a) 風速 U 成分の Y 方向分布　　**(b)** 風速 U 成分の Z 方向分布

図 9　中心風速 15 m/s の定常風　（X = 0 m）



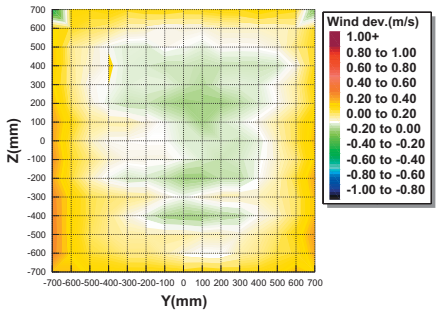
(a) 風速 U 成分の Y 方向分布　　**(b)** 風速 U 成分の Z 方向分布

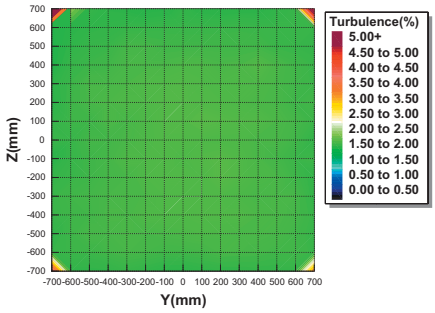
図 10　中心風速 15 m/s の定常風　（X = 1.5 m）



(a) 風速 U 成分の Y 方向分布　　**(b)** 風速 U 成分の Z 方向分布

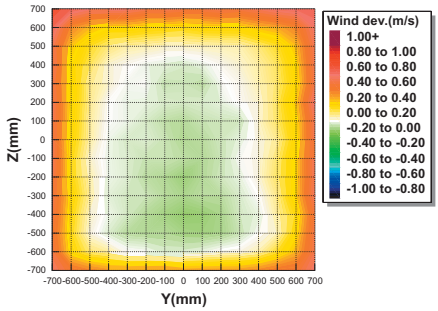
図 11　中心風速 15 m/s の定常風　（X = 3 m）

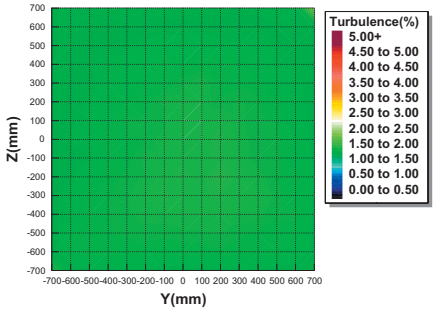




(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.046 m/s）　　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：1.8 %）

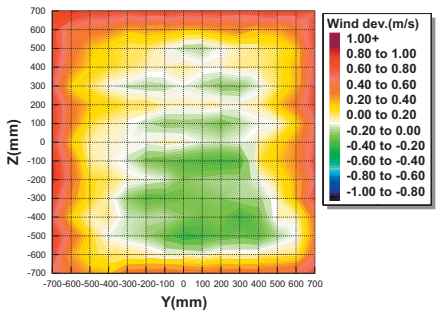
図 12　平均風速 5.3 m/s の定常風　（X=0m）

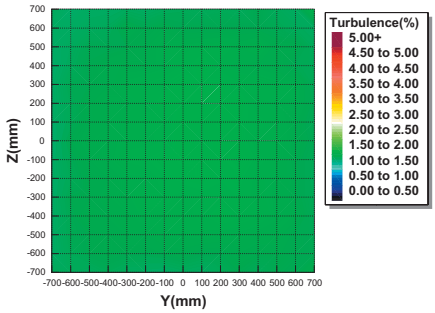




(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.055 m/s）　　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：1.6 %）

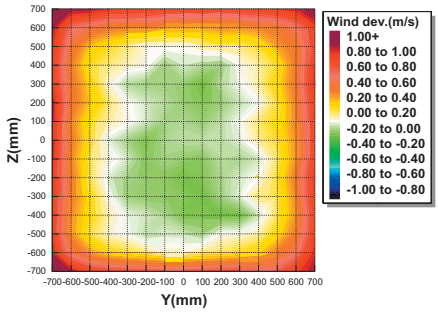
図 13　平均風速 10.4 m/s の定常風（X=0m）

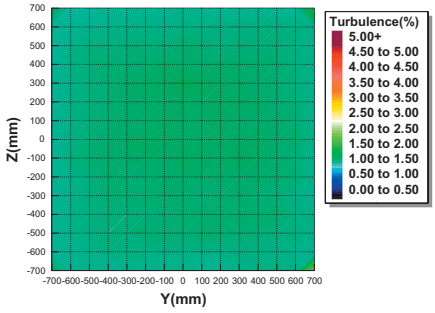




(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.109 m/s）　　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：1.4 %）

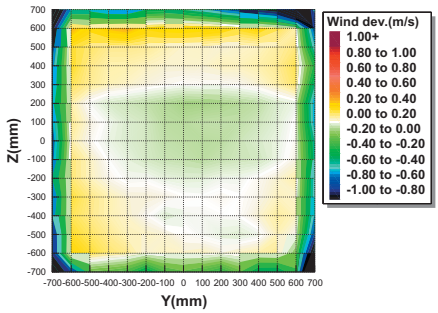
図 14　平均風速 15.3 m/s の定常風（X=0m）

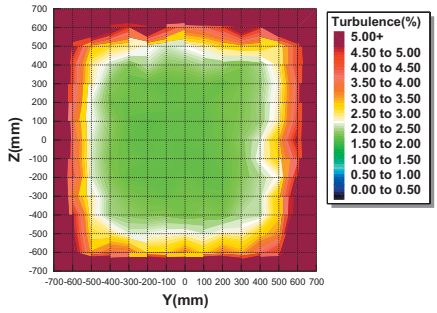




(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.099 m/s）　　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：1.3 %）

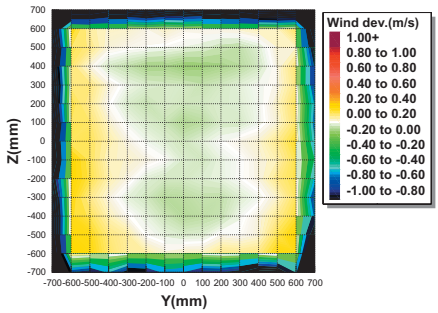
図 15　平均風速 19.0m/s の定常風（X=0m）

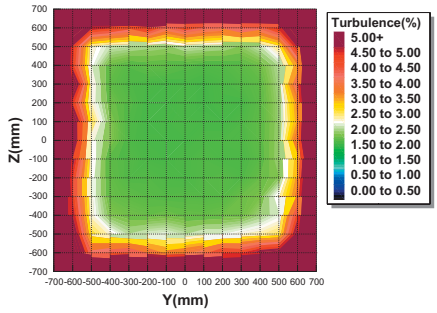




(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.042 m/s）　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：2.3 %）

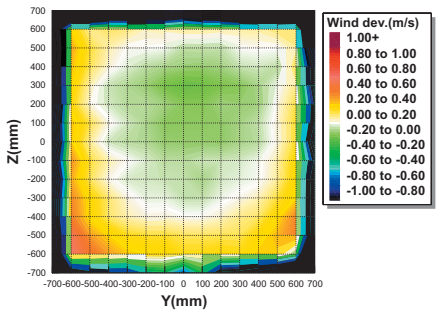
図 16　平均風速 5.1 m/s の定常風（X=1.5m）

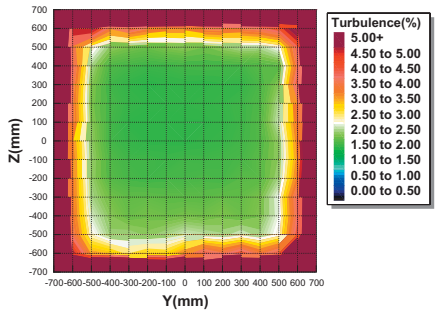




(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.046 m/s）　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：2.1 %）

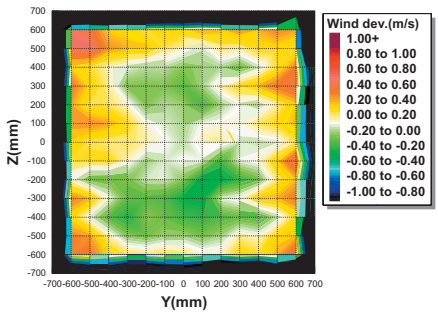
図 17　平均風速 10.1 m/s の定常風（X=1.5m）

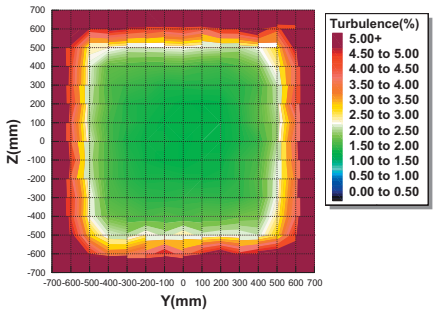




(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.085 m/s）　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：2.0 %）

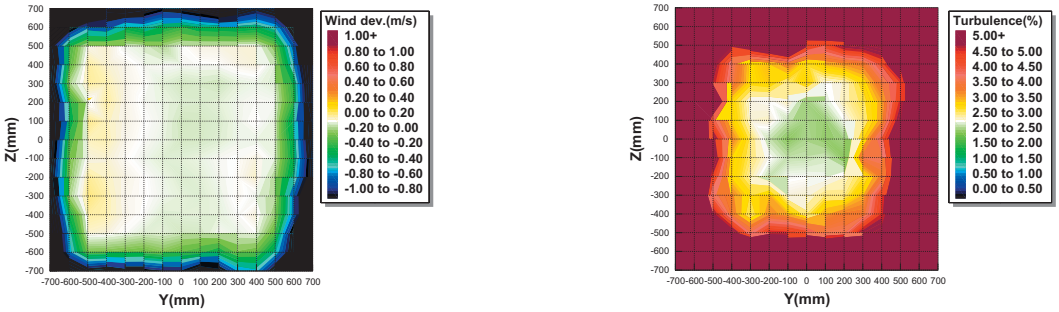
図 18　平均風速 15.1 m/s の定常風（X=1.5m）





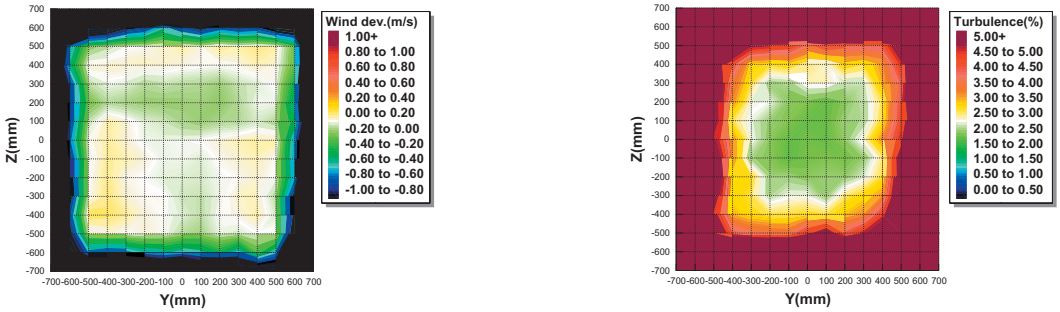
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.154 m/s）　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：2.0 %）

図 19　平均風速 19.6 m/s の定常風（X=1.5m）



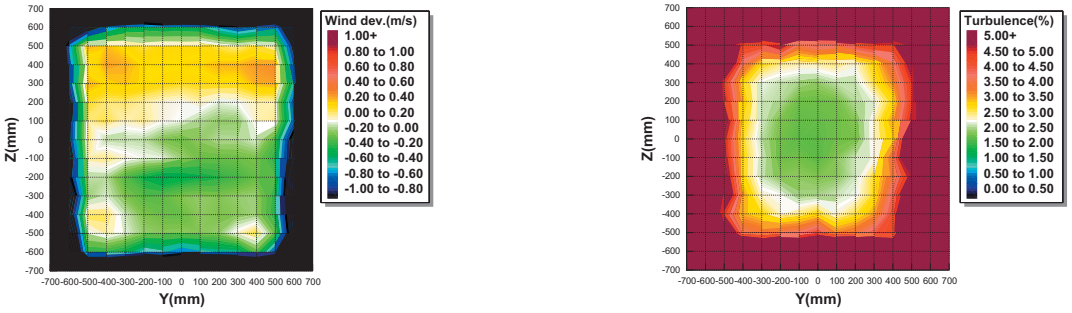
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.029 m/s）　　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：3.9 %）

図 20　平均風速 5.6 m/s の定常風（X=3.0m）



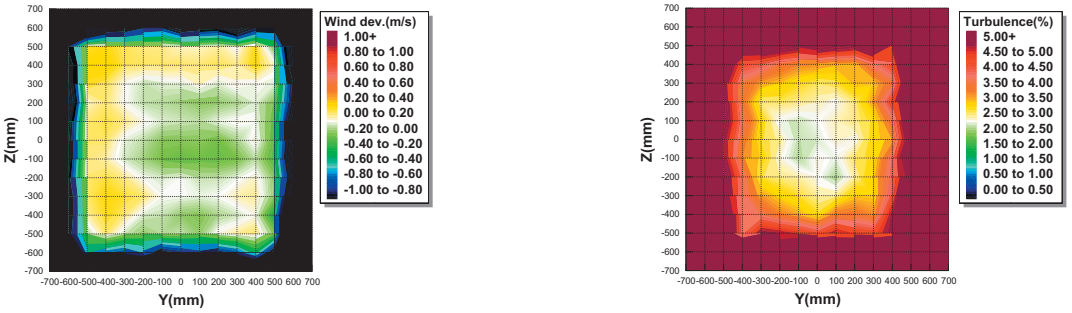
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.047 m/s）　　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：3.6 %）

図 21　平均風速 10.8 m/s の定常風（X=3.0m）



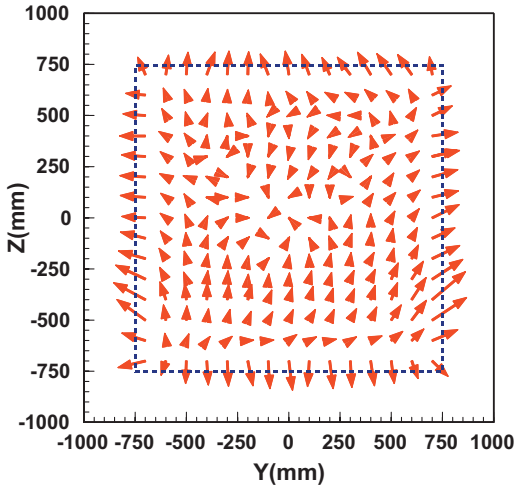
(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.160 m/s）　　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：3.6 %）

図 22　平均風速 15.5 m/s の定常風（X=3.0m）

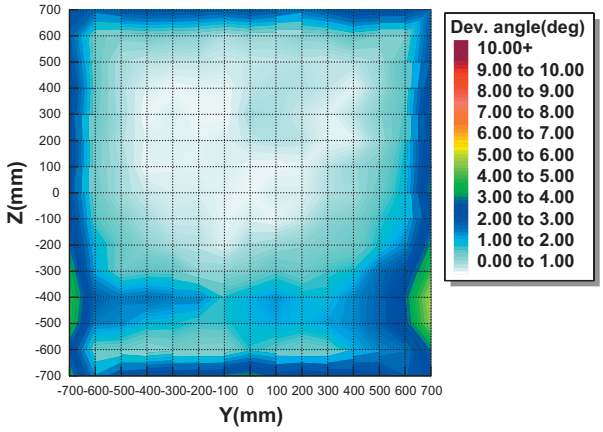


(a) 平均風速からの偏差（平均偏差：0.094 m/s）　　**(b)** 乱れ度（平均乱れ度：4.2 %）

図 23　平均風速 19.6 m/s の定常風（X=3.0m）

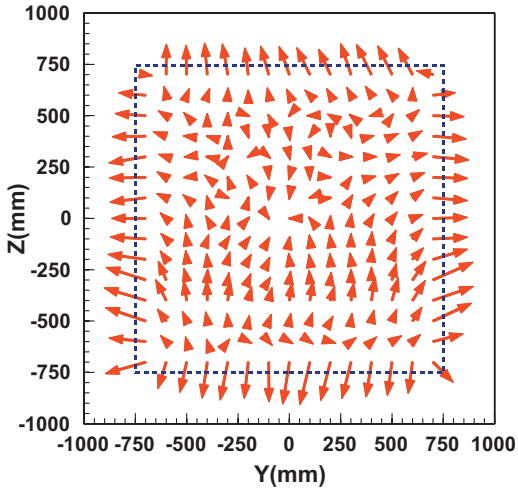


(a) V-W 合成ベクトル

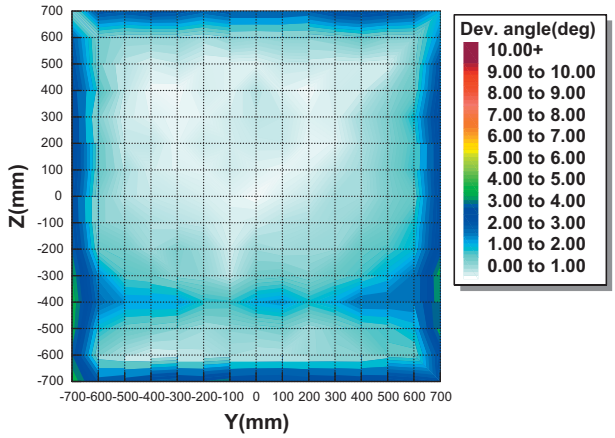


(b) 偏向角 θ の分布

図 24　中心平均風速 4.8 m/s　（X = 0 m）

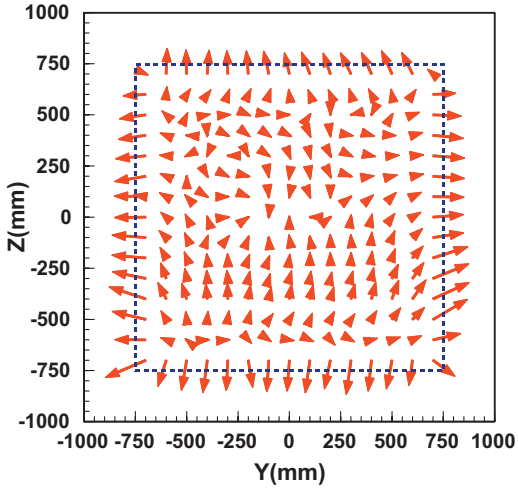


(a) V-W 合成ベクトル

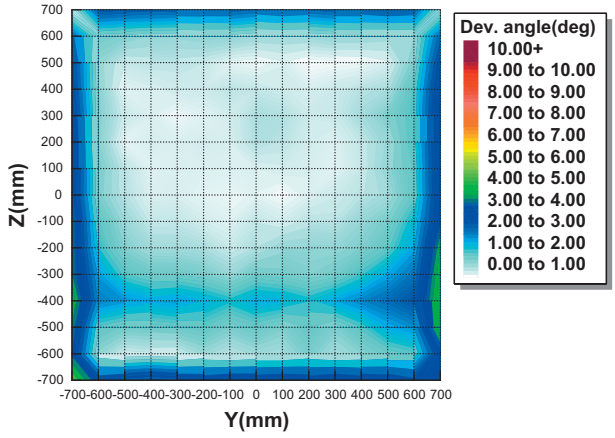


(b) 偏向角 θ の分布

図 25　中心平均風速風速 10.1 m/s　（X = 0 m）

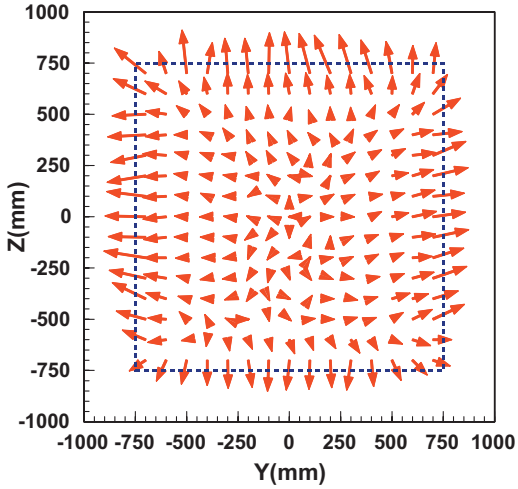


(a) V-W 合成ベクトル

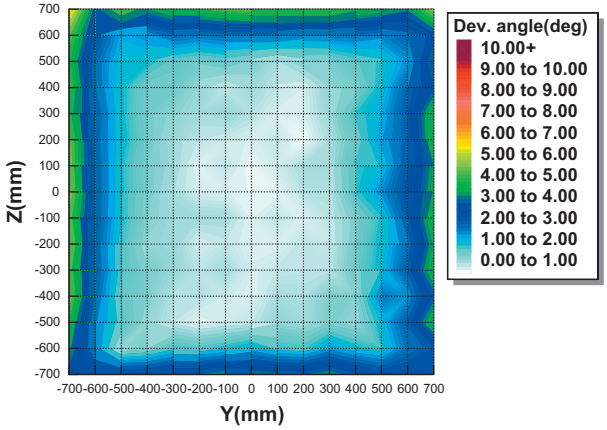


(b) 偏向角 θ の分布

図 26　中心平均風速風速 14.9 m/s　（X = 0 m）

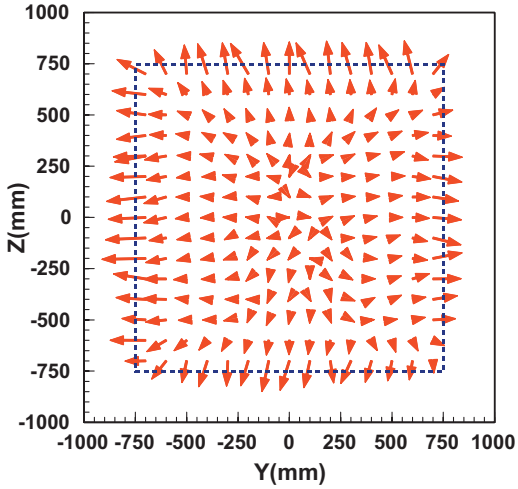


(a) V-W 合成ベクトル

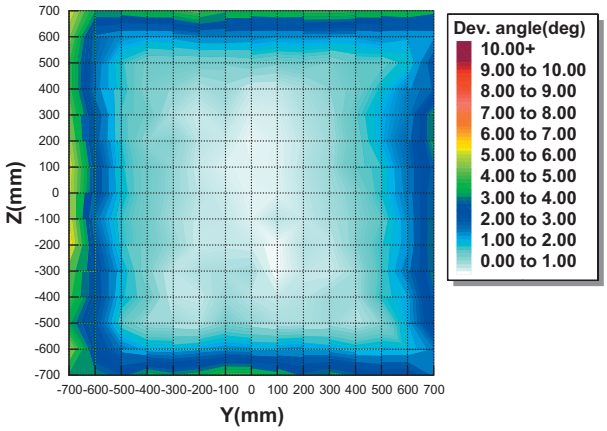


(b) 偏向角 θ の分布

図 27　中心平均風速風速 5.0 m/s　（X = 1.5 m）

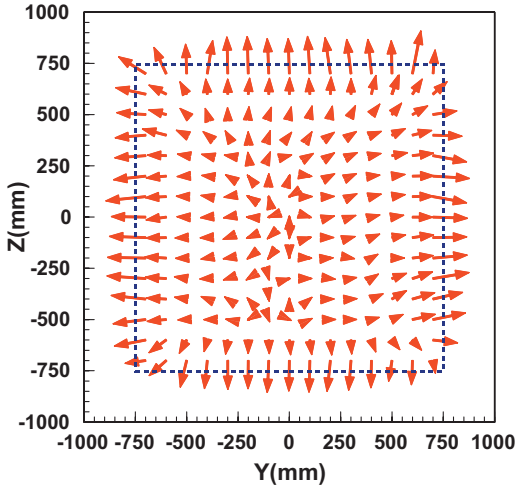


(a) V-W 合成ベクトル

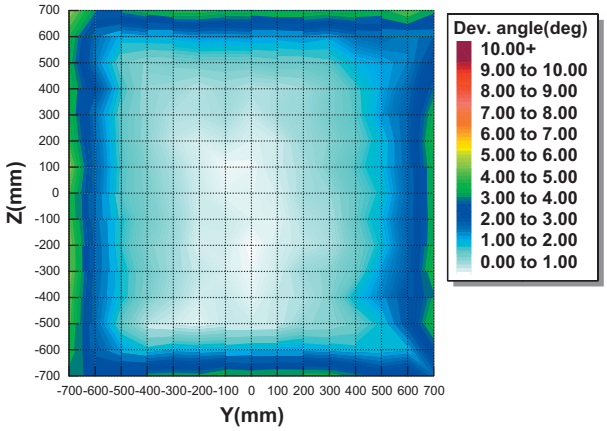


(b) 偏向角 θ の分布

図 28　中心平均風速風速 10.0 m/s　（X = 1.5 m）

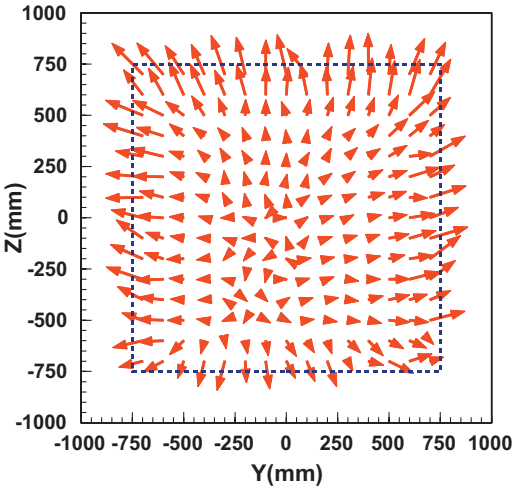


(a) V-W 合成ベクトル

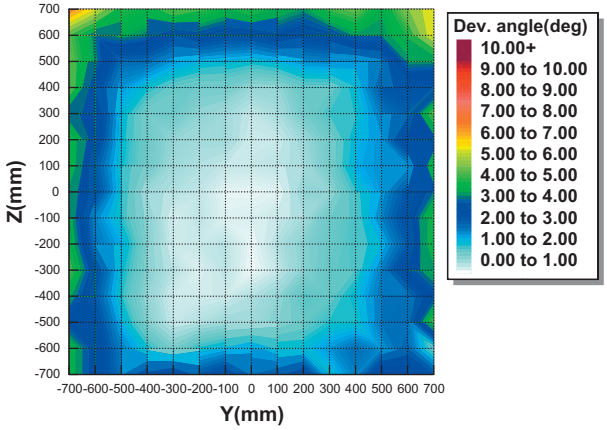


(b) 偏向角 θ の分布

図 29　中心平均風速風速 14.9 m/s　（X = 1.5 m）

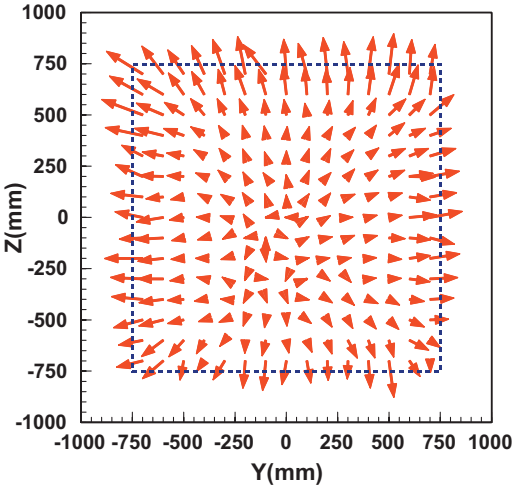


(a) V-W 合成ベクトル

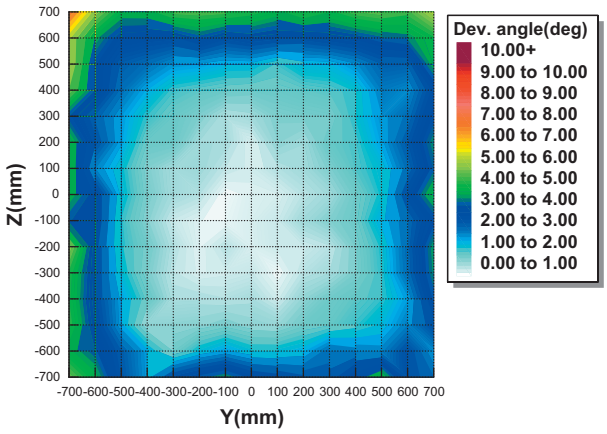


(b) 偏向角 θ の分布

図 30　中心平均風速風速 5.0 m/s　（X = 3.0 m）

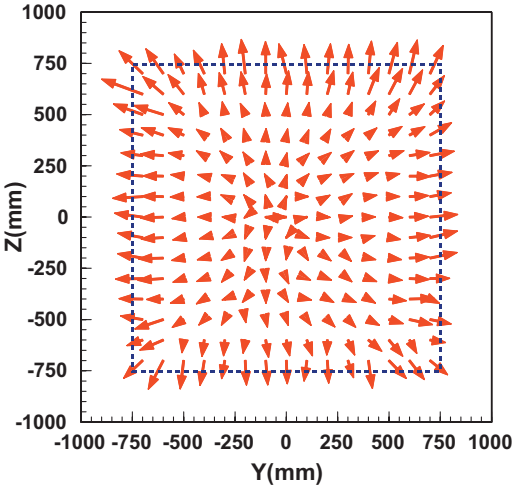


(a) V-W 合成ベクトル

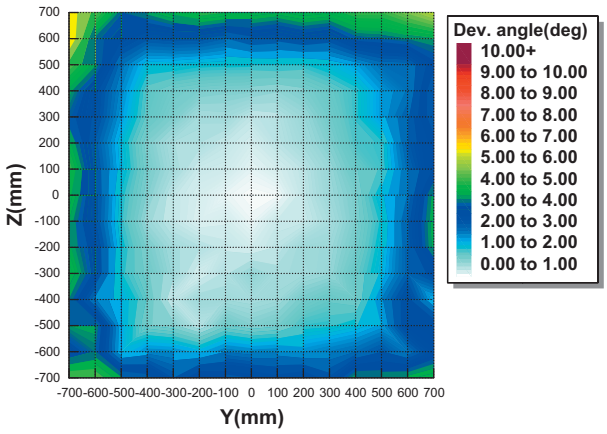


(b) 偏向角 θ の分布

図 31　中心平均風速風速 10.0 m/s　（X = 3.0 m）



(a) V-W 合成ベクトル



(b) 偏向角 θ の分布

図 32　中心平均風速風速 14.6 m/s　（X = 3.0 m）

(V-W)を図示する.図中の点線の四角形は吹出し口の内壁に相当する位置を示す．各図の(b)は，図８で定義した風速ベクトル(U-V-W)が主流方向(X軸)と成す偏向角θ(deg)をカラーマップ表示したものである.

X=0m の断面（図 24～26）では，風速によらず，噴流のコア内ではおおよそ主流方向に向って平行に風が流れていることが分かる．ただし，コア領域の境界と考えられる｜Y｜= 700mm および｜Z｜= 700mm のライン上では外向きに V-W 合成ベクトルが向いており，この場所における偏向角は約 2～3 度となっている．X=0m の断面では，Z=-400mm のラインに沿って，周囲に比較して上向きに大きな偏向角を示す領域が見られる．原因は明らかでないが，これは計測プローブの移動方向を変えて再計測を行った結果でも同様であり，本風洞の構造に起因するかもしれない.

X=1.5m の断面（図 27～29）では，-500mm≦Y≦500mm，-500mm≦Z≦500mm の範囲において，偏向角は 2 度未満となっており，ほぼ平行で一様な流れが形成されている.

X=3m の断面（図 30～32）でも，X=1.5m の場合と偏向角の分布において大きな差は無く，-500mm≦Y≦500mm，-500mm≦Z≦500mm の範囲において，偏向角は 2 度未満である．また，偏向角の分布に関しては，風速の大きさはあまり影響が無いようである.

４．３　脈動風の計測結果

表２に示した６種類の脈動風に対する超音波風速計を使用した計測を行った．図３３に示すグラフは各脈動風の中心部分で計測した 93 周期分の風速データをアンサンブル平均した結果である．これより，ピッチ角変化の条件を同一として，送風機の回転数を増加させ平均風速を大きくする時，発生する脈動風の最大風速と最小風速は増加し，風速変化が大きくなることがわかる.

図３４は図３３のグラフを，縦軸を各脈動風の最大振幅(U_{max}-U_{min})で規格化し，横軸は脈動風周期で規格化したグラフである．図３４より，平均風速 1.4m/s の場合は高周波成分が見られるが，平均風速を増加し脈動風の最大風速を大きくした場合には，風速に依らずほぼ相似の風速変化パターンが得られている.

図３５～４０は図３４に示したそれぞれの脈動風の A 点から D 点までの各位相における V-W 成分の合成ベクトルの分布図である.計測は X=1.5m の位置にある Y-Z 断面内の-400mm≦Y≦400mm，-400mm≦Z≦400mm の範囲における 200mm 間隔の格子点上とした．各図の上部の矢印は測定箇所 25 点の風速 U 成分の平均値に相当する長さを示したものである.計測データは各計測点において 93 周期分の風速 3 成分のデータを取得し，各成分について周期を基準としたアンサンブル平均をとった結果に基づいて V-W 合成ベクトルを求めている.

例えば，平均風速 U_A=4.9m/s の脈動風において得られた V-W 合成ベクトルの分布図(図３７(a)-(d))を見てみると，加速流となる図３７(a)(図３４の A 点に相当)では風は放射状に外に向かって拡がっており，吹出し口の外側に近いほど偏向角が大きくなることがわかる．最大風速に到達した図３７(b)(図３４の B 点に相当)では,偏向角はほぼ 0° となる．減速流となる図３７(c)(図３４の C 点に相当)では各 V-W 合成ベクトルは中心方向を向いており流れが収縮していると考えられる．最小風速に到達した図３７(d)(図３４の D 点に相当)では風は全体的に多少左方向に偏

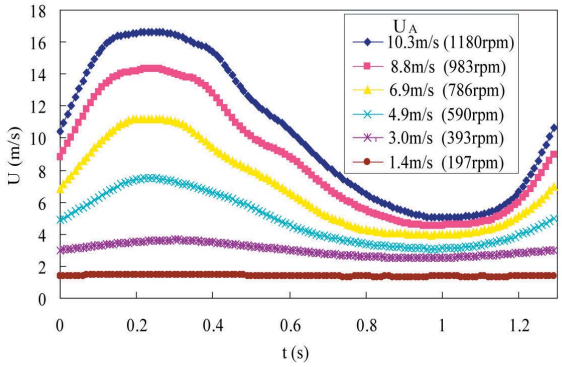


図 33　中心風速 U 成分（アンサンブル平均）

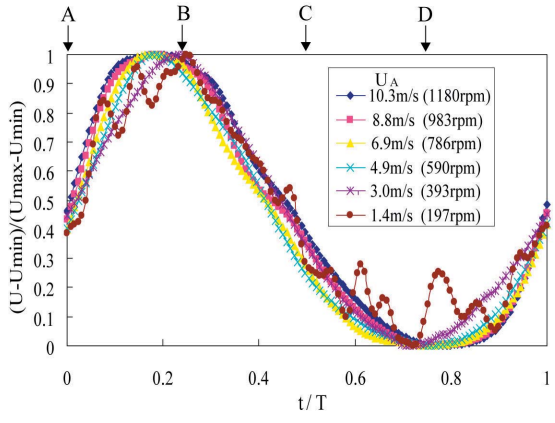
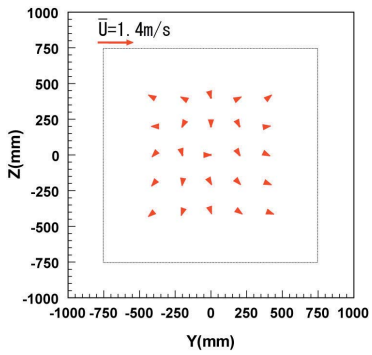
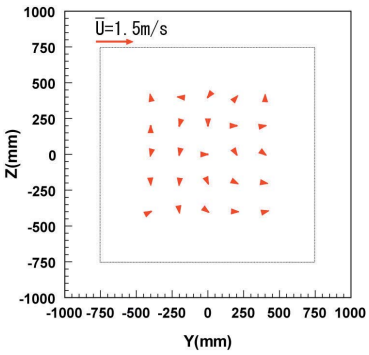


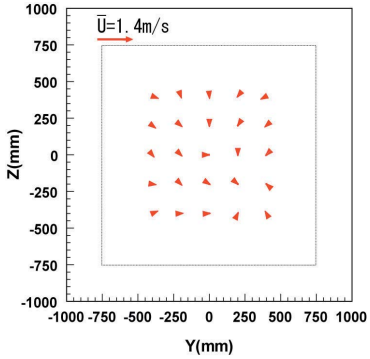
図 34　中心風速 U 成分（規格化）



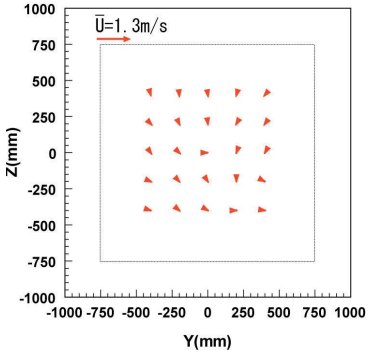
(a) A〔t / T=0〕



(b) B〔t / T=0.25〕

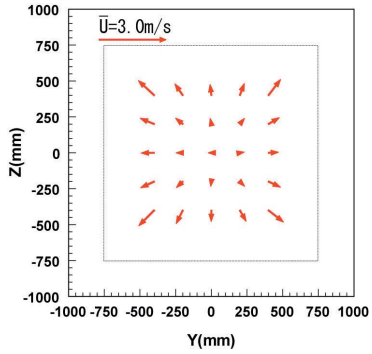


(c) C〔t / T=0.5〕

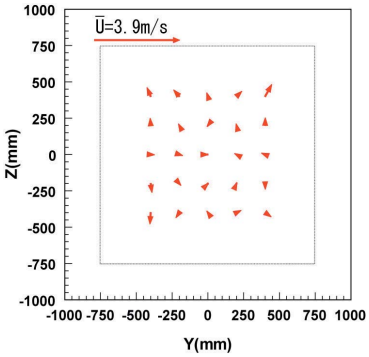


(d) D〔t / T=0.75〕

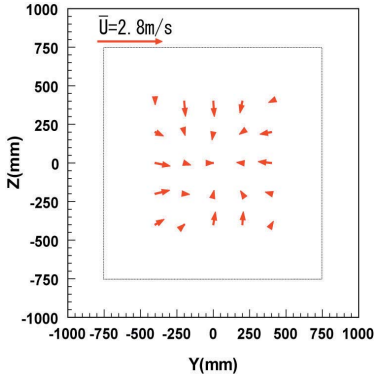
図 35　V-W 合成ベクトル（U_A=1.4m/s，197rpm）



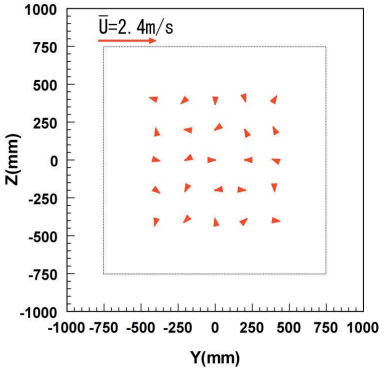
(a) A〔t / T=0〕



(b) B〔t / T=0.25〕

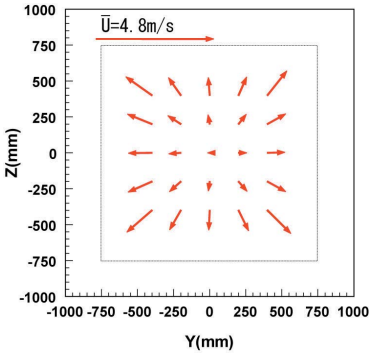


(c) C〔t / T=0.5〕

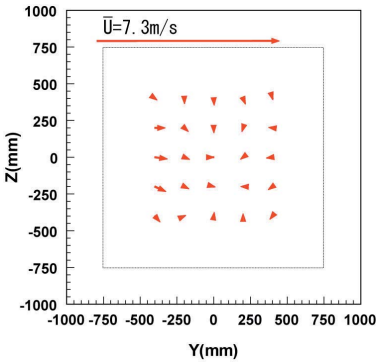


(d) D〔t / T=0.75〕

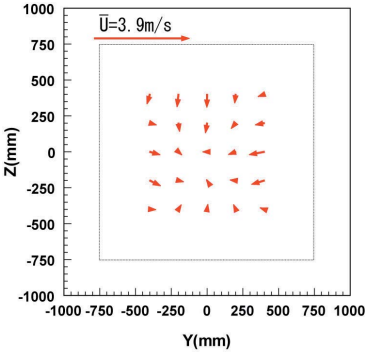
図 36　V-W 合成ベクトル（U_A=3.0m/s，393rpm）



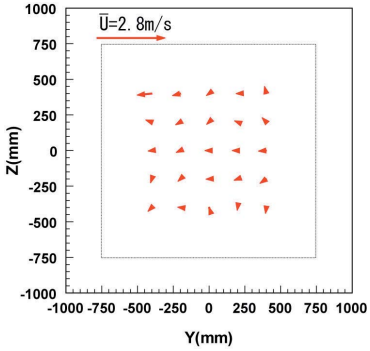
(a) A〔t / T=0〕



(b) B〔t / T=0.25〕

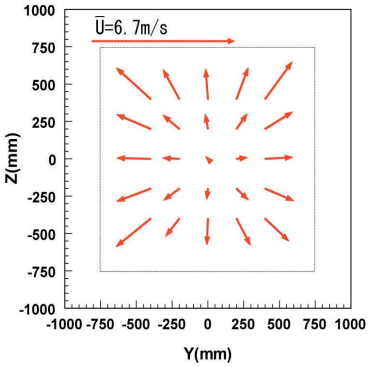


(c) C〔t / T=0.5〕

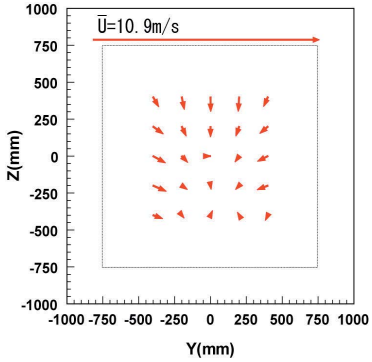


(d) D〔t / T=0.75〕

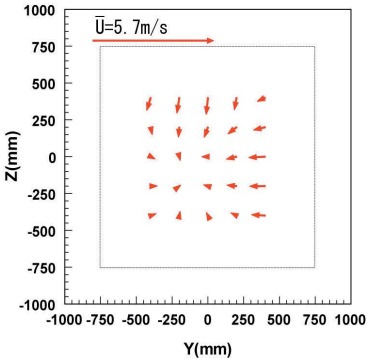
図 37　V-W 合成ベクトル（U_A=4.9m/s，590rpm）



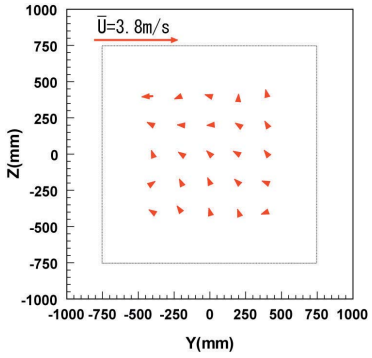
(a) A〔t / T=0〕



(b) B〔t / T=0.25〕

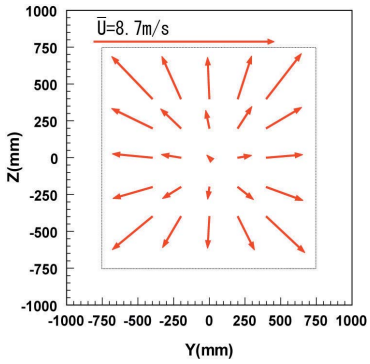


(c) C〔t / T=0.5〕

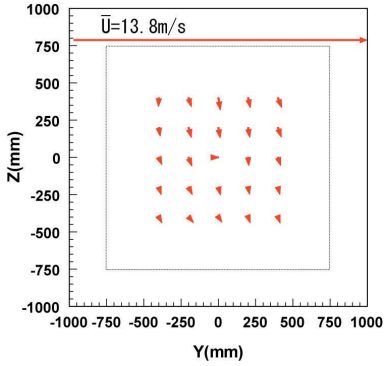


(d) D〔t / T=0.75〕

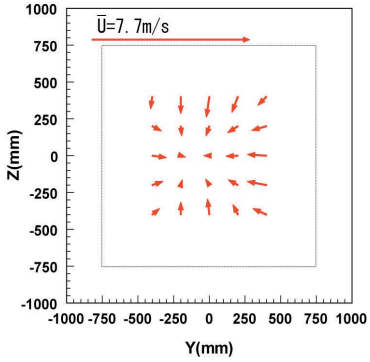
図 38　V-W 合成ベクトル（U_A=6.9m/s，786rpm）



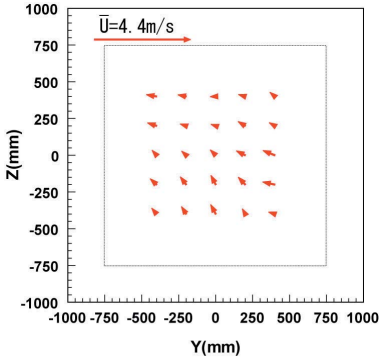
(a) A〔t / T=0〕



(b) B〔t / T=0.25〕

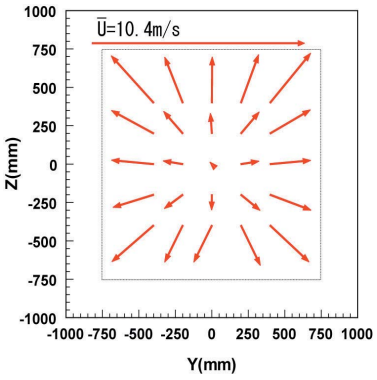


(c) C〔t / T=0.5〕

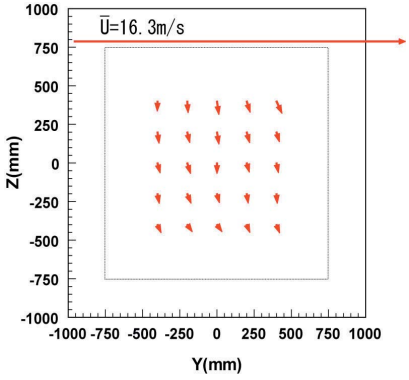


(d) D〔t / T=0.75〕

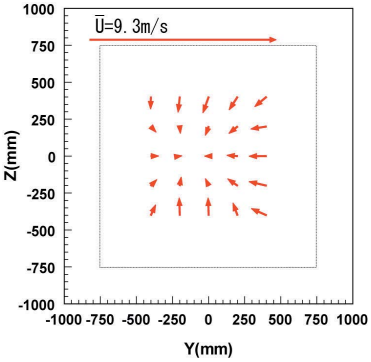
図 39　V-W 合成ベクトル（U_A=8.8m/s，983rpm）



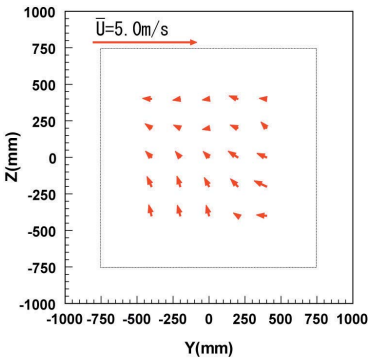
(a) A〔t / T=0〕



(b) B〔t / T=0.25〕



(c) C〔t / T=0.5〕



(d) D〔t / T=0.75〕

図 40　V-W 合成ベクトル（U_A=10.3m/s，1180rpm）

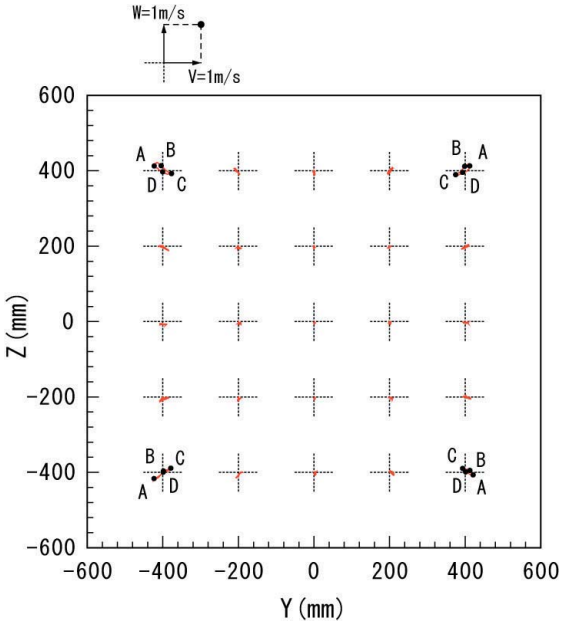


図 41 V-W 合成ベクトルの軌跡
（U_A=1.4m/s，197rpm）

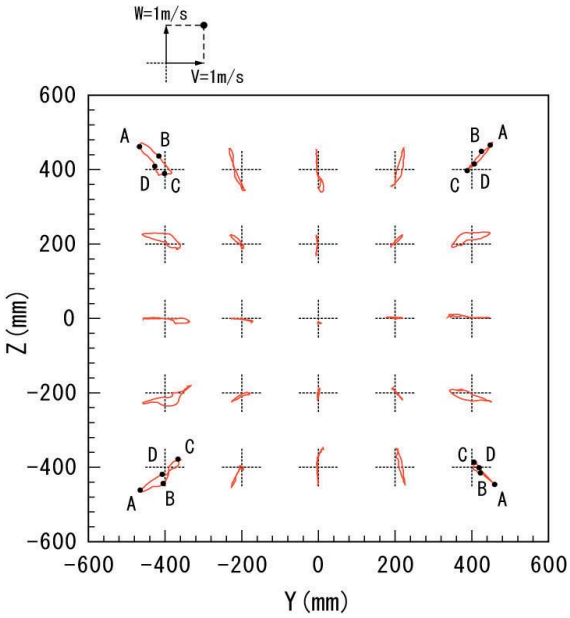


図 42 V-W 合成ベクトルの軌跡
（U_A=3.0m/s，393rpm）

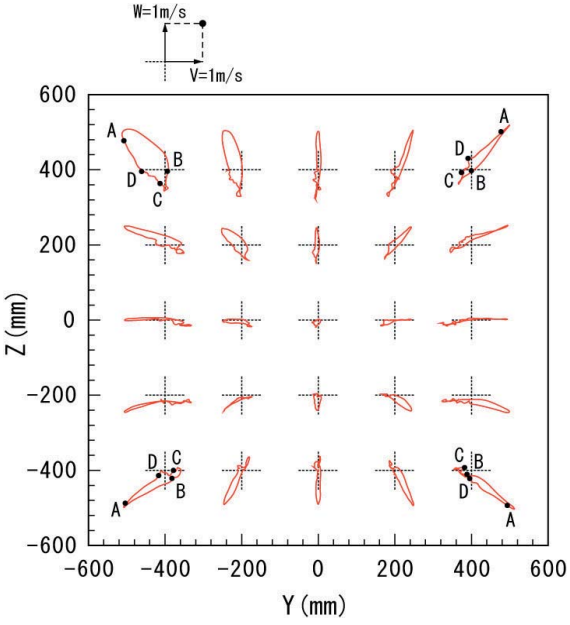


図 43 V-W 合成ベクトルの軌跡
（U_A=4.9m/s，590rpm）

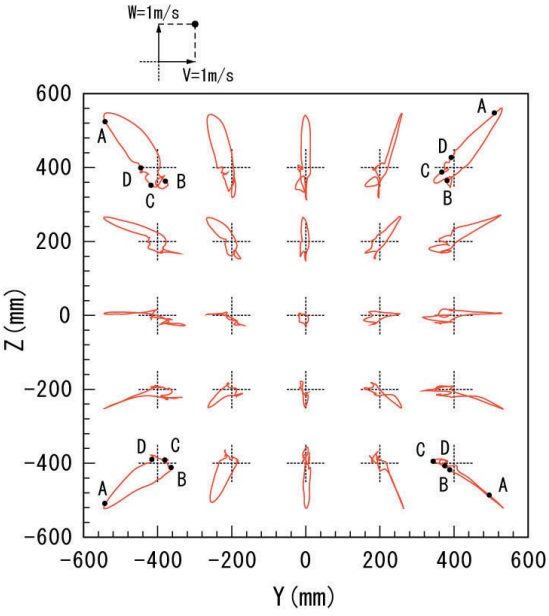


図 44 V-W 合成ベクトルの軌跡
（$U_{A=}$6.9m/s，786rpm）

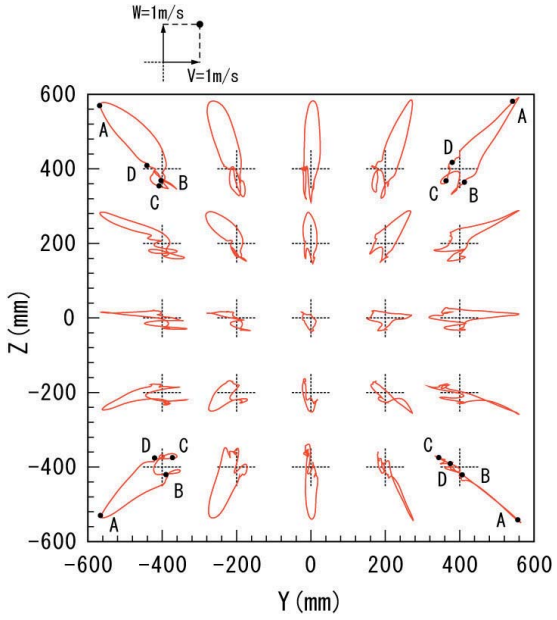


図 45 V-W 合成ベクトルの軌跡
（U_A=8.8m/s，983rpm）

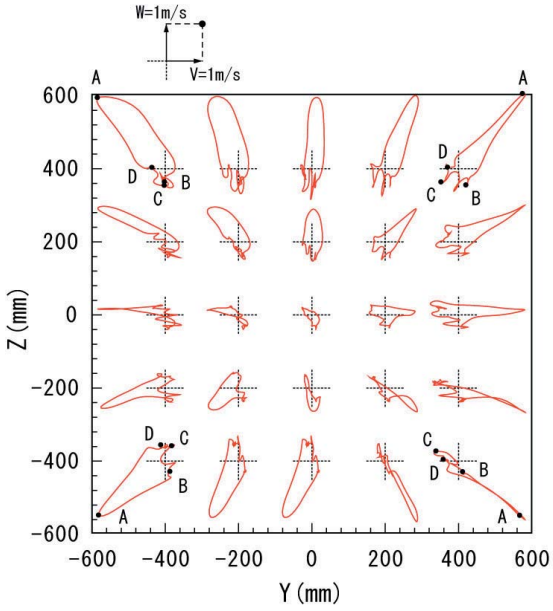


図 46 V-W 合成ベクトルの軌跡
(U_A=10.3m/s，1180rpm)

向している．他の平均風速をもつ脈動風でも，A 点に相当する V-W 合成ベクトルの分布は中心から外向きであり，C 点におけるベクトルは内側を向く傾向が見られている．したがって大きなピッチ角度変化（0° ～60° ）によって発生した脈動風の特徴として，風速が加速するときは吹出し口後流において流管は膨張し，逆に風速が減速するときには流管は収縮するといえる．

次に脈動風 1 周期中の V-W 合成ベクトルの連続的な変化を見るために，図４１～４６に V-W 合成ベクトルの軌跡を示す．図中に示す各＋印を原点として，この位置で計測された V-W 合成ベクトルの始点を＋印に置いた時のベクトルの終点が 1 周期の間に移動する軌跡を描いている．図４１～４６に示した点 A～D はそれぞれの計測位置における脈動風の主要位相点（図 34 の A～D）の V-W 合成ベクトルの終点に相当し，点 A-B-C-D-A とたどるならば，それは風速ベクトルの方位角 φ の変化を表す．

平均風速が U_A=1.4m/s の場合（図 41），方位角はほとんど変化していないが，平均風速 U_A=3.0m/s になると（図 42），ほとんどの場所の軌跡はひしゃげた形状となり，風向が噴流中心から外向きと内向きの２方向の間で周期的に変化していることがわかる．平均風速が U_A=4.9m/s の場合のベクトル軌跡（図 43）を見ると，左上の隅に近い所では軌跡はループ状に拡がっていて方位角が 1 周期の間に回転しており，螺旋状に風が吹いていることを示している．平均風速が増加すると（図 44～46），この現象はより顕著になり，その他の隅近傍でも方位角の回転が明瞭になってくる．方位角変化の回転方向は，平均風速が U_A=4.9m/s 以上の脈動風では（図 43～46），ベクトル軌跡の明らかな広がりが観測される左上，左下，右上の隅近傍において，それぞれ下流側から見て時計方向，反時計方向，時計方向になっているが，その回転方向に関する規則性は存在しない．

５．　おわりに

本研究では，沙漠環境風洞が発生する定常風と脈動風の特性を，熱線風速計と超音波風速計を用いて調査した．以下に得られた主な知見を示す．

(1) 定常風は，風速がほぼ一定となるコア内において，噴流中心付近で相対的に風速が低く，コア境界で風速が高くなる傾向が観測された．
(2) 軸流送風機のピッチ角変化により発生した脈動風は，ピッチ角の変化条件が同一の場合，送風機回転数に依らずほぼ相似な風速パターンとなる．
(3) 脈動風は加速流ではコア領域の流管が膨張

し，減速流では収縮する．
(4) 正方形の吹出し口から発生した脈動風は吹出し口の隅に近い場所では螺旋状に風向が変化し渦を形成している．

謝辞

沙漠環境風洞は平成 12〜14 年度の文部科学省科学研究費補助金（地域連携推進研究費）「砂漠化防止・沙漠緑化に活躍する新技術風車の研究開発」によって設置された．また，本研究は 21 世紀 COE プログラム“乾燥地科学プログラム”の一部として実施された．ここに付記し，謝意を表す．

参考文献

[1] 林　農：平成 12 年度－14 年度科学研究費補助金（地域連携推進研究費）「砂漠化防止・沙漠緑化に活躍する新技術風車の研究開発」研究成果報告書，2003
[2] T. Kawamura, T. Hayashi and K. Miyashita : Application of the Domain Decomposition Method to the Flow around the Savonius Roter, 12th International Conference on Domain Decomposition, Methods, Edited by: Tony Chan, et.al., Olivier Pironneau, pp.393-400, 2001
[3] Kawamura, K. Ootsuki and T. Hayashi : Numerical Study of the Flow around the Cross Flow Turbine of Many Blades Type with Accessories for Improvement of its Performance, Proc. World Wind Energy Conference, Berline, 2002
[4] T. Kawamura, A. Nagaoka and T. Hayashi : Numerical Simulation and Visualization of the Flow around High-Speed Wind Turbine, Proc. World Wind Energy Conference, Berline, 2002
[5] 林 農, 李　岩, 原 豊：新型サボニウス風車のトルク計測, 第 20 回西日本乱流研究会シンポジウム, 2002
[6] Yutaka HARA, In-Seung KANG, Tsutomu HAYASHI and Ion PARASCHIVOIU : Measurements of Torque Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbine with Inclined Straight Blades, Proc. of the EXPO World Conference on Wind Energy, Renewable Energy, Fuel Cell (WCWRF 2005), Hamamatsu, Japan, CD-ROM, 2005
[7] T. HAYASHI, Y. LI, Y. HARA : Wind Tunnel Tests on a Different Phase Three-Stage Savonius Rotor, JSME International Journal, Series B, Vol. 48, No. 1, pp.9-16, 2005
[8] 有安健一，康　仁勝，原　豊，林　農：風速変化に対する直線翼垂直軸風車の応答特性，日本機械学会第 83 期流体工学部門講演会 CD-ROM 版講演論文集，CD-ROM，No. 1817，2005
[9] 有安健一，康　仁勝，原　豊，林　農，イオン　パラシブイユ：脈動風中における直線翼垂直軸風車の特性計測，中国四国支部第 43 期総会・講演会講演論文集，No. 055-1，pp. 123-124，2005

（受理　平成 18 年 11 月 30 日）

ヒット現象の数理モデルとマーケティング・サイエンス

石井　晃・吉田　就彦[*1]・新垣　久史[*1]・山崎　富美[*2]
鳥取大学工学部応用数理工学科・
[*1]デジタルハリウッド大学大学院・[*2]テクノラティジャパン

Mathematical model for hit phenomena and marketing science

Akira ISHII, Narihiko YOSHIDA[*1], Hisafumi ARAKAKI[*1] and Fumi YAMAZAKI[*2]
Department of Applied Mathmatics and Physics, Faculty of Engineering
Tottori University, Tottori, 680-8552 Japan
E-mail: ishii@damp.tottori-u.ac.jp
[*1] Digital Hollywood University, Tokyo, 120-0000 Japan
*2TechnoratiJapan, Osaka, 545-0000 Japan

Abstract: Mathematical model of hit phenomena is presented as time-dependent non-linear, non-equilibrium phenomena. The derived equation include the marketing share model and the Bass model. The indirect communication as rumor or popularity plays an important role in hit phenomena. The decay of rumor is also studied using our hit equation and the decay length is only two days.

Key Words: Hit, Entertainment, Marketing, Econophysics

１．はじめに

経済現象の中で特にエンタテインメント産業と呼ばれる分野を数理的に扱うモデルを構築して、『大ヒット曲』などが生まれるヒット現象[1]を数理的な側面から捉えてこれを実験検証することを目的とする。これが成功すればマーケティングに有効な手法を与えるはずである。

いわゆる大ヒットなどのヒット現象は売れる商品が売れない商品に対して桁違いに売れるという点で特異である。その商品自体の魅力が１０倍程度しか違わないとしても、その売り上げは、ヒット曲で言えば数千枚から百万枚までの違いとなる。このことは、売り上げがその商品自体の魅力に対して非線形的に決まるということを示唆する。

また、ヒット現象は時間に依存した現象で、発売後（封切り後）短時間で盛り上がり、そして減衰していくのが特徴である。そのため、通常の経済現象の基本である需要と供給の均衡が見られない。需要と供給が均衡するのは、発売から数年経ってほとんど売れなくなった頃である。その意味では均衡はあるとも言えるが、少なくとも興味あるものではない。つまり、ヒット現象とはきわめて時間に敏感に依存した非平衡経済現象である。

また、エンタテインメント産業にはある種の特殊性がある。それぞれの商品の個別性である。例えば中島美嘉のＣＤを買いに行った人が、そのＣＤが品切れで、店員の薦められるままに浜崎あゆみや倖田來未を買うことはまずない。しかし、例えばこれがＨＤＤレコーダなら、松下が品切れで東芝を買う人などは、珍しくないであろう。その意味で、エンタテインメント産業ではマーケティングシェアというものが存在しない。ＣＤやダウンロードの売り上げで、ソニーミュージックとＡＶＥＸが激しいシェア争いを展開するという話は聞いたこともない。そもそも、それぞれの曲が次々に現れては短時間で売り上げが終わって消えていく繰り返しで、シェアなど存在しない、あるいは時々刻々のシェアは存在しても、あまり意味はない。

さらに普通の経済活動と大きく違うのは価格である。日本の音楽産業の場合、ＣＤにしろダウンロードにしろ一曲ごと（あるいは一枚ごと）の販売価格は決まっていて、それぞれの曲ごとに需要と供給のバランスから価格が決定されることはない。しかも、一曲ごとの単価がきわめて安いため、少なくとも一ヶ月に数曲購入する程度であれば、あまり価格は気にせずに購入するのが普通である。

従って、売り上げ等の分析において、価格はまったく役割を演じない。

このように、ＣＤなどのヒット現象は、経済現象としてはいくつかの特異な特徴のある現象と言える。本論文では、以前に発表した石井・吉田(2005)の論文[2]で提出されたヒット現象の数理モデルの方程式を基礎とし、この式をマーケティングサイエンスの中で位置づけることと、ヒット現象の減衰あるいうは収束を取り入れることを行う。また、最後に論文[2]で導入された平均場近似といえる「均等近似」から踏み出して、シミュレーションを行う。

２．数理モデル

２．１　消費者個人の視点でのモデル化

まず、最も単純な場合から考えていく。ある商品が店頭に並んでいるとする。今考えている社会の人口がＮ人であるとして、それらの人で１日にその店に行く人の割合を R_{shop}、さらに店に入った人の中でその商品を実際に購入する人の割合を店へ訪れるごとに R_{fb} とし、一人が一つ商品を購入したとすると、１日に商品が売れる数は

$$R_{fb} R_{shop} N \qquad (1)$$

である。時間の単位が１日であるとすれば、Δt の時間で商品が売れる数 ΔI は

$$\Delta I = R_{fb} R_{shop} N \Delta t \qquad (2)$$

となる。直接購入された商品の数ではなく、”購入意欲(Purchase-Intention)”という量を考える。発売初日の販売数が発売日までの購入意欲の総和と考え、発売日以降は購入意欲がそのまま実販売数と仮定したのが図１であり、このように発売初日に販売数が集中する場合も購入意欲としては発売日以前から少しずつ盛り上がっていく連続量と考える。

インターネット経由の場合店に行く必要がない。着目するＷｅｂへのアクセス数は以前にそこを見ていたアクセス数に比例すると考え、前日のアクセス数のＣ倍だけ翌日にアクセスがあると考えると

$$\Delta I_i(t) = C_i I_i(t) \Delta t \qquad (3)$$

がインターネットアクセスでの基本的な購入意欲の増加項であろう。

消費者に商品の購入やＷｅｂへのアクセスを誘う場合、ＴＶ、雑誌、街頭などを利用した宣伝行為は、数理的に見ればいわば外場を加える働きをすることである。商品の販売であれば、ある宣伝で１日あたり確実にＡ個売れるとすると、その宣伝による時間Δｔあたりの販売数は

$$\Delta I = A \Delta t \qquad (4)$$

である。個人の視点であれば、この ΔI は小数であり、これが累積して１になった時に購入すると考えれば同じモデルが適用できる。

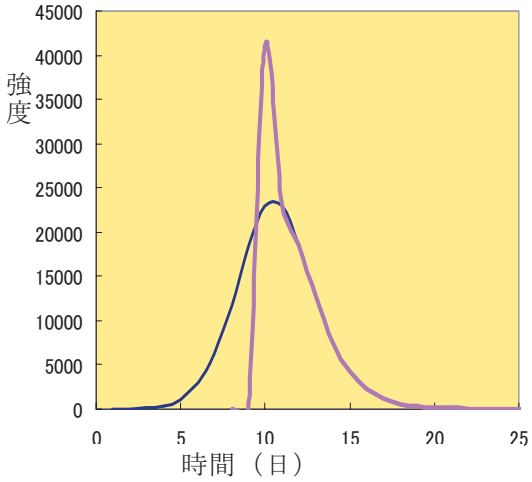


図１　購入意欲と売り上げの関係
購入意欲（黒）と売り上げ（ピンク）の時間的推移を表す。t=9 が発売日に相当する。

商品の購入、あるいはＷｅｂアクセスの増加は、口コミや評価記事等さまざまな媒体でのポジティブな評判が消費者に届き、それが購入を促す働きをする。そして、そのような購入を促がす働きが各エージェント相互に働き合うことで、商品の購入が加速する。つまり、そのような『評判』の効果を採り入れるのが、ヒット現象のような爆発的な購入現象のメカニズムを解明するには不可欠なのである。前節で導入した個人視点でモデル化した方程式は、このような評判をモデル化して方程式に採り入れるのに好都合な形式になっている。

評判の効果は大きく３つに大別できると考えられる。それは以下の３つである。

1. 購入した人本人から聞いた情報で買う
2. 購入した人同士のコミュニケーションを参考にして買う
3. 売れているという評判で買う

この３つのそれぞれが、時間 Δt あたりにどのような効果を購入意欲に与えるかをモデル化する必要がある。

２．２　購入意欲の３要素

購入意欲は、宣伝・プロモーションと、購入した人から勧められる直接コミュニケーション、そして、世の中の“もっぱらの噂・評判”として影響を受けて購入する間接コミュニケーションの３つの影響に分けられると考えられる。このうち、宣伝・プロモーションは外場 *A(t)*として扱う。

次に直接コミュニケーションである。購入した人からの情報は、当然ながらそれまでに購入した人数に比例する。i 番目の人が j 番目の人から情報を聞いて購入する気になる確率を D_{ij} と定義すると、購入した人自身からの情報によって i 番目の人が購入する割合は

$$\sum_{j\neq i}^{N} D_{ij} I_j(t) \qquad (5)$$

とおけるであろう。

次は間接コミュニケーションである。間接コミュニケーションでは、購入した人同士の情報は購入した人で作る対の数に比例する。購入した人同士の情報交換は、口コミの場合もあれば、ブログやネットの掲示板への書き込みなどでなされると思われ、その情報量の総数が問題となる。そこで、その購入した人同士の情報交換によって影響されて購入する確率は

$$\sum_{j}\sum_{k} P_{ijk} I_j(t) I_k(t) \qquad (6)$$

で定義できるであろう。ここで j,k は i を含まない。係数 P_{ijk} はその商品に対する評価であり、購入した人に評判がいいほど、この係数は大きな値となる。逆に購入した人に評判が悪い場合、この係数は負となる。

２．３　ヒット現象の方程式

これら３つの評判の項を含めると、一人一人の個人による商品の購入量の時間変化を表す微分方程式は次のようになると考えられる。[2]

$$\frac{dI_i(t)}{dt} = R_{fb}R_{shop} + A(t) + \sum_{j\neq i}^{N} D_{ij} I_j(t) + \sum_{j}\sum_{k} P_{ijk} I_j(t) I_k(t) \qquad (7)$$

この式を平均場近似（均等近似）を仮定して変形すると、以下のようになる。すべての人間が均等な購入意欲を持つと近似し、平均された一人の購入意欲を *I(t)*と表そう。

$$I(t) = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} I_j(t) \qquad (8)$$

さらに係数 D_{ij}、P_{ij} も一人一人の個人に依存せず全て同じ値 D、P を持つと近似すれば、

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^{N} D_{ij} I_j &= D\sum_{j=1}^{N} I_j(t) \\ &= (N-1)DI(t) \\ &= C_d I(t)\end{aligned} \qquad (9)$$

$$\begin{aligned}\sum_{j=1}^{N}\sum_{k=1}^{N} P_{jk} I_j(t) I_k(t) &= P\sum_{j=1}^{N} I_j(t)\sum_{k=1}^{N} I_k(t) \\ &= (N-1)(N-2)PI^2(t) \\ &= C_p I^2(t)\end{aligned} \qquad (10)$$

と簡単化できる。この均等近似においてヒット現象の方程式は次のように近似することが出来る。

$$\frac{dI(t)}{dt} = R_{fb}R_{shop} + A(t) + C_d I(t) + C_p I^2(t) \qquad (11)$$

全ての人が同じ動向をすると仮定しているので、かなり粗い近似ではあるが、モデルとして宣伝の効果や評判の効果がどのような働きをするのかを具体的に見ていくのには十分であろう。この方程式を用いたいくつかの計算例については文献[2]を見られたい。また、図１はこの（１１）式の数値解を用いて説明している。

３．マーケティング・サイエンスとの関係

宣伝とそれによる売り上げの関係は、マーケティングサイエンスの分野で既に多くの研究がなされている。時間依存のマーケティング理論は多くはないのだけれど、それらの代表的なものと、本研究で提示しているヒットの方程式との関連を示そう。ここではいわゆるマーケティングシェアのモデルと、口コミを扱う古典的なモデルと位置づけられている Bass モデルを取り上げる。

３．１　マーケティングシェアモデルとの関係

マーケティング・シェアとは、あるブランド i の売り上げが、その市場全体に占める割合を意味

する。各ブランドの売り上げを Q_i 、その市場全体の売り上げを $Q=\sum_i Q_i$ とすると、マーケティング・シェア S_i は、

$$S_i=\frac{Q_i}{Q} \tag{12}$$

よく用いられる仮定として、売り上げはマーケティング努力 M_i に比例するとする。すると、

$$Q_i=kM_i \tag{13}$$

なので、マーケティング・シェアはマーケティング努力によって決まることになる。

$$S_i=\frac{M_i}{\sum_i M_i} \tag{14}$$

ヒット現象においては、時々刻々の売り上げを問題にしたいので、上のマーケティング・シェアを時々刻々のマーケティング･シェアに拡張して、以下のように考えよう。

$$s_i(t)=\frac{q_i(t)}{q(t)} \tag{15}$$

ここで、全ブランド（市場）の時々刻々の売り上げを $q(t)=\sum_i q_i(t)$ とする。その日のブランド i への購入意欲を $\Delta I_i(t)$ として、その日その日の購入意欲がそのまま購入、即ち売り上げに結びつくとすると、

$$q_i(t)=\Delta I_i(t) \tag{16}$$

となるであろう。以下、ヒット現象の方程式を競合する複数ブランドの場合に拡張して考える。

ここで、j 番目の人の製品 i への購入意欲を $I_{ij}(t)$ とする。複数ブランド競合の場合に拡張したヒット現象の方程式は

$$\frac{dI_{ij}(t)}{dt}=k_{ij}M_{ij}(t)+\sum_\ell D_{ij\ell}I_{i\ell}(t)+\sum_\ell\sum_m P_{ij\ell m}I_{i\ell}(t)I_{im}(t) \tag{17}$$

となる。その日その日の差分で考えると、これは次のように書ける。

$$\Delta I_{ij}(t)=k_{ij}M_{ij}(t)\Delta t+\sum_\ell D_{ij\ell}I_{i\ell}(t)\Delta t+\sum_\ell\sum_m P_{ij\ell m}I_{i\ell}(t)I_{im}(t)\Delta t \tag{18}$$

そこで、購入意欲で表した、時々刻々のマーケティング・シェアは

$$s_i(t)=\frac{\sum_j \Delta I_{ij}(t)}{\sum_i\sum_j \Delta I_{ij}(t)} \tag{19}$$

となる。もし、購入意欲がマーケティング努力だけで決まるとすると、

$$\Delta I_{ij}(t)=k_{ij}M_{ij}(t)\Delta t \tag{20}$$

となるから、これを代入すると、時々刻々のマーケティング・シェアは次のようになる。

$$s_i(t)=\frac{\sum_j \Delta I_{ij}(t)}{\sum_i\sum_j \Delta I_{ij}(t)}=\frac{\sum_j k_{ij}M_{ij}(t)}{\sum_i\sum_j k_{ij}M_{ij}(t)} \tag{21}$$

これにより、ヒット現象の方程式で宣伝の項だけを残した

$$\frac{dI_i(t)}{dt}=R_{fb}R_{shop}+A(t) \tag{22}$$

からマーケティング・シェアの式を導出出来ることがわかった。従って、ヒット現象の方程式は、マーケティング・シェアの考えを含んでいることがわかった。

３．２　Bass モデルとの関係

Bass モデル[3-5]とは古くからマーケティングの分野で知られている、口コミの効果を表すと言われているモデルである。ここで、宣伝・店頭販売の項を一つにまとめて、ヒット現象の方程式を次のように書こう。

$$\frac{dI_i(t)}{dt}=A_i+\sum_j D_{ij}I_j(t)+\sum\sum P_{ijk}I_j(t)I_k(t) \tag{23}$$

全体の人数を m として、平均の購入意欲を考える。

$$\langle I(t)\rangle=\frac{1}{m}\sum_i I_i(t) \tag{24}$$

着目している製品が買われた量を N とすると、こ

れは購入意欲と全体の人数から次のように書ける。

$$\sum_i I_i(t) = m\langle I(t)\rangle = N(t) \tag{25}$$

宣伝は、買ってない人にだけ伝わるとすると、

$$\begin{aligned}\sum_i A_i &= a(m - N(t)) \\ &= \sum_i a\end{aligned} \tag{26}$$

ここで、和は買ってない人だけで取る。

ヒット現象の方程式で、直接口コミの項 $\sum_i \sum_j D_{ij} I_j$ は係数 D_{ij} が買ってない人と買った人に関わる係数だけが $D_{ij}=d$ で、他の場合（買った人同士、買ってない人同士）にはゼロになると考える。すると、買った人については既に購入意欲は満たされてしまってるとして、$I_j = 0$ とすると、以下のようになる。

$$\begin{aligned}\sum_i \sum_j D_{ij} I_j &= (m - N(t))N(t) d\langle I\rangle \\ &= (m - N(t))N(t) b\end{aligned} \tag{27}$$

従って、ヒット現象の方程式を i について和を取って

$$\frac{d\sum_i I_i(t)}{dt} = \sum_i \left[A_i + \sum_j D_{ij} I_j(t) + \sum_j \sum_k P_{ijk} I_j(t) I_k(t) \right] \tag{28}$$

とすれば、この方程式は以上の議論を代入して

$$\begin{aligned}\frac{dN(t)}{dt} &= a(m - N(t)) + (m - N(t))N(t) b \\ &\quad + \sum_i \sum_j \sum_k P_{ijk} I_j I_k\end{aligned} \tag{29}$$

ここで P_{ijk}=0 と間接コミュニケーションを無視すれば、以前から知られている Bass モデルの式となる。

4．ヒットの収束

先の石井・吉田の論文[2]ではヒットが起こる初期過程のみを考え、ヒットがやがて収束することは扱っていなかった。ここでは噂・評判に時間的な減衰を採り入れ、ヒットの収束を議論できるようにヒット現象の方程式を拡張することを考えよう。

噂・評判の項は２次の項で与えられている。この項の意味は、i の人と j の人がブログ上で噂のやりとりをする様子を第三者が影響を受けることである。ここで、第三者が影響を受けるのは現時点での書き込みだけではなく、過去に遡っての書き込み全てであるはずである。そこで、過去の書き込み（噂）にも影響されているとすると、次のような積分形で表されるはずである。

$$\int_{-t}^{0} I_i(t+\tau) I_j(t+\tau) d\tau \tag{30}$$

しかし、この形のままでは、遠くの過去に遡ればどのどん項の値が大きくなってしまう。しかし、実際には遠くの過去に遡れば遡るほど影響が薄れていくと考えられ、これを指数関数型の減衰で考えると、

$$\frac{1}{t}\int_{-t}^{0} I_i(t+\tau) I_j(t+\tau) e^{\alpha\tau} d\tau \tag{31}$$

であろう。ここで規格化は $\frac{1}{t}$ で与えているが、実際は指数関数的減衰で、無限の過去からの寄与はない。そこで規格化定数を決めるため、

$$\int_{-t}^{0} e^{\alpha\tau} d\tau = \frac{1}{\alpha}\left(1 - e^{-\alpha t}\right) \tag{32}$$

と計算すれば、規格化定数はだいたい α でいいだろう。従って、過去の噂まで遡って影響をうける様子は次のように表現できる。

$$\alpha \int_{-t}^{0} I_i(t+\tau) I_j(t+\tau) e^{\alpha\tau} d\tau \tag{33}$$

さらに、その噂の元が時刻 $t = 0$ で始まっているとすると、ここから時刻が経過するごとに影響は薄れていくと考えられ、その分でやはり指数関数型の減衰因子を考えるのが自然であろう。そこで、この因子を $e^{-\alpha t}$ として、噂による影響は

$$\alpha\, e^{-\alpha t} \int_{-t}^{0} I_i(t+\tau) I_j(t+\tau) e^{\alpha\tau} d\tau \tag{34}$$

という項になると考えられる。

この項の時間的変化を見積もるため、簡単に $I_i(t) = I_j(t) = I_0$ と定数に置いてしまうと、ここで

考えている噂の効果の時間的減衰に影響された時間的変動だけが抽出できて、

$$\alpha I_0^2 e^{-\alpha t}\int_t^0 e^{\alpha\tau}d\tau = I_0^2\ e^{-\alpha t}\left(1-e^{-\alpha t}\right) \quad (35)$$

この式を検証し減衰定数αを決めるため、ブログ検索エンジンを開発した米国テクノラティ社の日本法人テクノラティジャパンの協力で時系列で日本中のブログの書き込みの９割以上を対象に平成１７年９月に閉幕した「愛・地球博」と平成１７年７月～９月期に話題となったＴＶドラマ「女王の教室」という言葉をキーワードに書き込みの時間的変化を追った。その結果を図に示す。「愛・地球博」で実測データのピークが閉幕日に相当し、その前にあるピークは閉幕の前の週の週末に対応する。また、「女王の教室」の実測データのピークは最終回の放送日であり、その前にあるピークは前の週の放送日である。ブログ検索による実測データは式とよく一致し、噂・評判の減衰時間定数α=0.5、つまり２日間で噂や評判はほぼ減衰することがわかった。

以上から噂・評判の時間的な減衰を扱う項では基本的に減衰因子は、時間の単位を１日として

$$e^{-0.5t} \quad (36)$$

と結論づけられる。

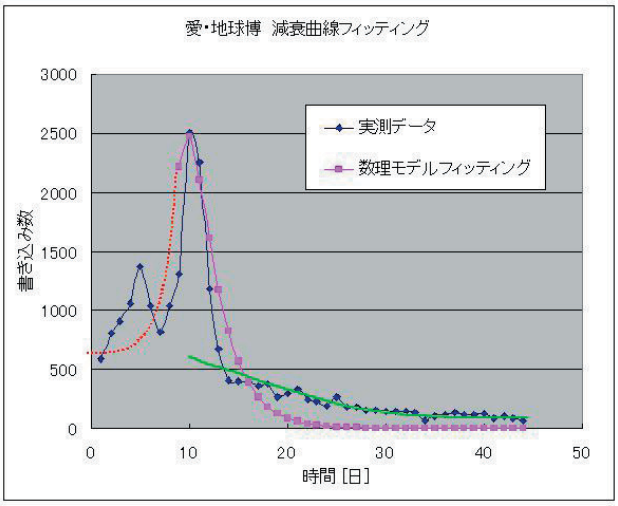
以上のように時間的減衰を採り入れたヒット現象の方程式は次のようになる。

$$\frac{dI_i(t)}{dt} = A(t)+\sum_{j\neq i}^{N} D_{ij}I_j(t) + \alpha e^{-\alpha t}\sum_j\sum_k P_{jk}\int_t^0 I_j(t+\tau)I_k(t+\tau)e^{\alpha\tau}d\tau \quad (37)$$

これを差分方程式に直すと

$$\Delta I(t+\Delta t) = A(t)+C_d I(t) + C_p\alpha e^{-\alpha t}\sum_{n=-\frac{t}{\Delta t}}^{0} I^2(t-n\Delta t)e^{-\alpha n\Delta t} \quad (38)$$

この方程式の解が図１に示した購入意欲の曲線である。このように、このモデルだと急激に立ち上がり、ゆっくり減衰する左右非対称のピーク曲線が得られ、これは実際のブログ測定データと一致する。



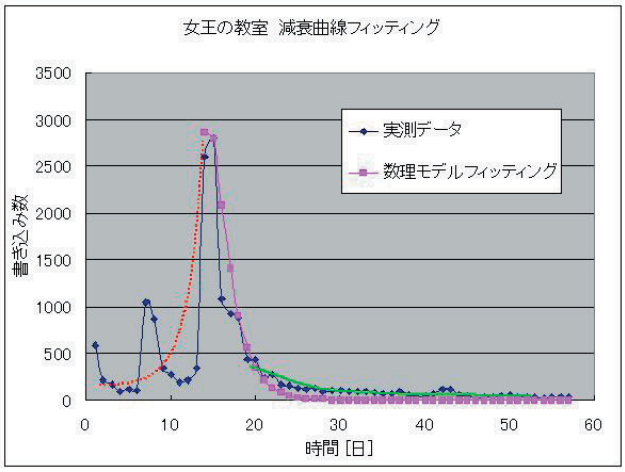


図２　「愛・地球博」最終日付近と
ＴＶドラマ「女王の教室」最終回付近のブログ書き込み数の実測と理論計算

５．考察

減衰が２日間と短いことから、ヒット現象の数理モデルの手法で売り上げデータの分析を行うには、週単位の売り上げデータではなく、１日単位の売り上げデータが必須となることがわかる。Bass モデルは口コミや宣伝を扱うモデルとして１９６９年に提唱されながら、当初は実データを説明するのにうまくいかなかった経緯があるが、それは１日単位のような時間間隔の短いデータで分析することが当時ははなかったことが主因とも考えらる。

減衰を入れた計算は、ブログの実測とよく合い、各係数をどう決めるかはこれからの問題として、本研究で提案しているヒット現象の数理モデル自

体は、ヒット現象をよく説明しうるモデルになっていることが示されたと言える。

本研究と同じように、売り上げの時間的推移が重要であると指摘した研究も、ハリウッドの映画について現れてきている[6]ので、本研究で提示しているヒット現象の方程式で売り上げの時間的推移を解析し、各係数を決めていくことから、売り上げ予測やヒットの可能性の予測に役立ちうるモデルになっていくことが期待される。

６．まとめ

本研究では、ヒット現象を説明する数理モデルとして連立非線形方程式を提示した。その方程式は従来のマーケティング・サイエンスで知られている理論であるマーケティング・シェアモデルやBassモデルを内包していることが示された。また、噂・評判の時間的減衰を採り入れることからヒットの立ち上がりから収束までを計算で示すことが出来るようになった。ブログの書き込み数の解析から、噂・評判は２日間で減衰することがわかった。

参考文献

[1] 吉田就彦「ヒット学〜コンテンツ・ビジネスに学ぶ６つのヒット法則」（ダイヤモンド社、2005）

[2] 石井晃、吉田就彦、鳥取大学工学部研究報告３６　(2005) 71

[3] Bass, Frank M., “A New Product Growth for Model Consumer Durables,” *ManagementScience*, Jan. 1969, Vol. 15, No.5; pp.215-227.

[4] Bass, Frank M., “Product Policy: The Relationship Between Diffusion Rates, Experience　Curves, and Demand Elasticities for Consumer Durable Technological Innovations,” *TheJournal of Business (pre-1986)*, Jul. 1980, Vol. 53, Iss. 3; pp. IIS51-67.

[5] Bass, Frank M., Trichy V. Krishnan and Dipak C. Jain, “Why the Bass Model Fits without　Decision Variables,” *Marketing Science*, Summer 1994, Vol. 13, Iss. 3; pp.203-223.

[6] Sitabhra Sinha and Raj Kumar Pan, "Blackbusters, Bombs and Sleepers: The income ditribution of movies" cond-mat/0504198

（受理　平成 18 年 11 月 30 日）