

# 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ビューを行い、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「文部省に外向させる」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、数学科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い、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ブリスサーチの講習会など、参加費が数万円、ときには10万円を超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科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であって予算も潤沢であった上に、大規模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、船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マイ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したが、船舶性能のほか浅水影響、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イ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, スエズ運河岸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岸に新たな組織, エコノミックユ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, スエズ運河岸に第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、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  $a \times L$ 、横方向  $b \times L$  ( $a, b$  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  $\alpha$  を求めて  $L^\alpha$  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、 $2 \times 60 / 20 = 6$  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、 $2 \times 60 / ((1 \times 20 + 3 \times 10 + 2 \times 5) / (1 + 3 + 2)) = 12$  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  $D_1, D_2, D_3, \dots$  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  $V_n$ 、南航の速力を  $V_s$  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  $\alpha T$  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  $\alpha$  が時刻  $t$  とともに変る場合、すなわち、 $\alpha$  が  $\alpha_t$  の型で与えられても  $\alpha_t$  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動は図 1 で示され、単純な幾何学を利用して

$$T \leq (C - D \times (1/V_n + 1/V_s)) / 2 \quad (1)$$

が成立することがわかる。従って、最大交通容量等価時間  $T_{\max}$  は上式の等号成立のときである。

$$T_{\max} = (C - D \times (1/V_n + 1/V_s)) / 2 \quad (2)$$

式(2)から、周期  $C$  を大きくすると交通容量は増大し、また  $V_n, V_s$  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のがわかる。

とくに、

$$C \leq D \times (1/V_n + 1/V_s) \quad (3)$$

となると交通容量は 0 となり、通航不能に陥る。

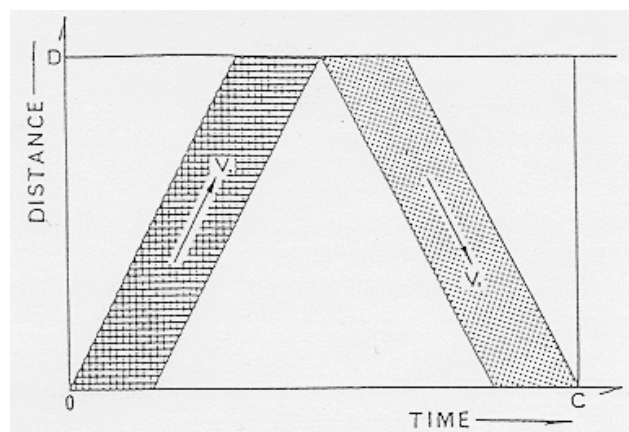


図 1 交互交通方式

### 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、

$$T = (D_2 - D_1) \times (1/V_n + 1/V_s) / 2 \quad (4)$$

が1周期の交通容量  $T_{max}$  として得られる。

このとき、周期  $C$  は

$D - D_1 \geq D_2$  のとき

$$C \geq (D - D_1) \times (1/V_n + 1/V_s) \quad (5)$$

$D - D_1 < D_2$  のとき

$$C \geq D_2 - (1/V_n + 1/V_s) \quad (6)$$

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。

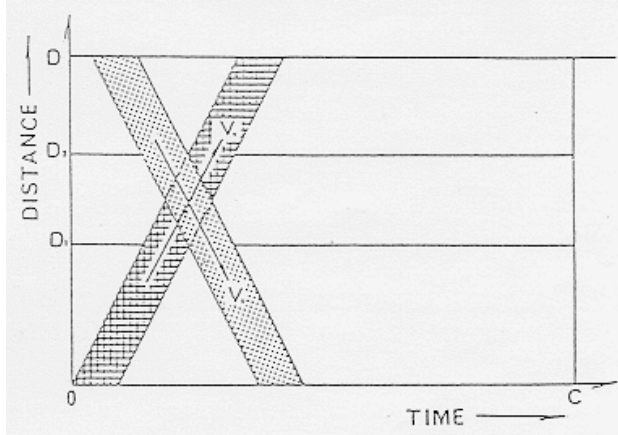


図2 中間すれ違い方式

### 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  $T_{max}$  を求めると、図3、図4のパターンはともに等しくなる。すなわち、

$$T \leq (C - D') \times (1/V_n + 1/V_s) / 2 \quad (7)$$

が導かれる。 $T_{max}$  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。また、式(7)から、待機部分が中央に位置するほど、また速力が早いほど、交通容量が大になることがわかる。

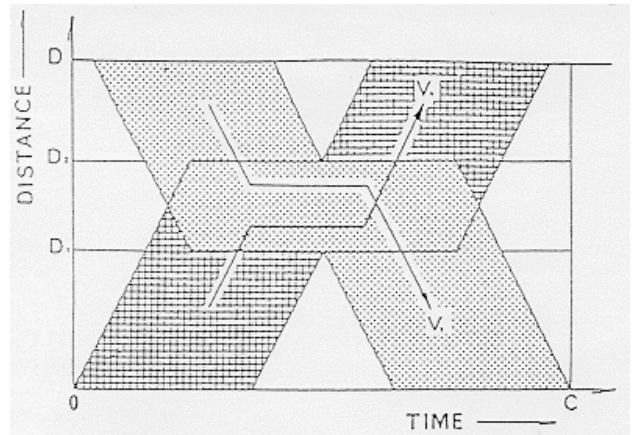


図3 中間待機方式(その1)

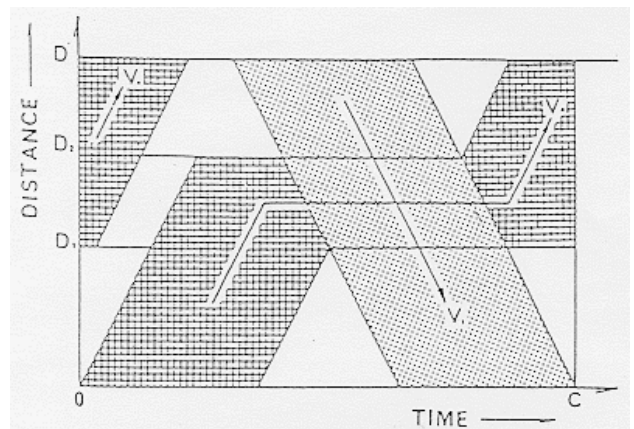


図4 中間待機方式(その2)



#### 4.3.5 一方向二待機方式(スエズ運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  $T_{max}$  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

$$T \leq (2C - (D + D_3 - D_2) \times (1/V_n + 1/V_s)) / 3 \quad (8)$$

または

$$T \leq (C - D_1 \times (1/V_n + 1/V_s)) / 2 \quad (9)$$

が成立し、従って  $T_{max}$  は、(8), (9)式の右辺の値の小さな方である。

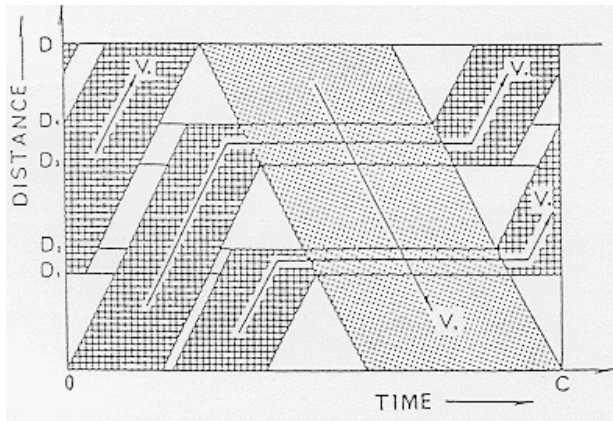


図5 一方向2待機方式(スエズ運河)

#### 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度は、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。 $D=162.4$ kmとしてすべてのバイパスはないものとする。コントロールのサイクル  $C$  を  $C=24$  として式(4)を用いて、

$$T_{max} = (24 - 162.4 \times 2/15) / 2 = 1.173 \quad (10)$$

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、

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

時間であり、この場合は周期  $C$  を  $C=122 \times (2/15) = 16.26$  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、

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

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、バラバイパスの始点、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

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

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で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されているが、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、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、 $24/7.98 \sim 3$  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。

ロックの長さや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 を越える船舶は、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も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づ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 時間稼働できるから, 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  $36 \times 2.2=79$  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間隔  $d_1, d_2, d_3$ , 北航船の速力  $V_n$ , 南航船の速力  $V_s$ , および交互交通の周期  $C$  である. 速力  $V_n, V_s$  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,  $S=a \cdot T$  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 ( $S_2$ ) を組むときに容量最大になる.

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  $T_{max}$  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  $S_{max}$  とする. このとき,  $T_{max}$  と  $S_{max}$  の間には, 既に述べたように  $S_{max}=a \cdot T_{max}$  の関係がある.

図 8 と船速  $V_n, V_s$ , 水路長  $D$ , 周期  $C$ , 比率  $a$  および  $T_{max}$  と  $S_{max}$  の関係式から,

$$T_{max} = (C-D \times (1/V_n + 1/V_s)) / (a+2) \quad (16)$$

$$S_{max} = a \cdot T_{max} \quad (17)$$

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 ( $N_1$ ) と ( $S_2$ ) 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

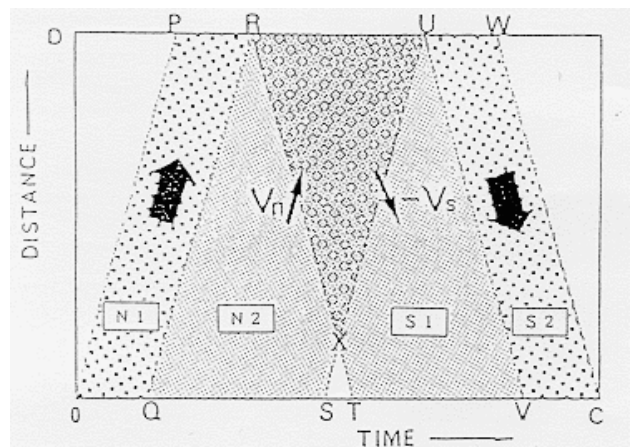


図 7 行き合い可能・不可能船混在時の航行方式



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  $T_{max}$  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  $6 \times 1852 \times 13/60 = 2408\text{m}$  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  $T_{max}$  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  $V_n=V_s=6\text{knot}=6 \cdot 1.852\text{km/H}$
- (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  $T_{max}$  および交通容量を算定する。

式(26)の  $a$  の値は、

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

と求まるから、これらの値を式(16)に代入して、

$$T_{max} = (24 - 2 \cdot 12.9 / (6 \cdot 1.852)) / (2 + 1 \cdot 31) = 5.67 \quad (19)$$

$$S_{max} = a \cdot T_{max} = 10.34 \quad (20)$$

が得られる。この場合、 $S_{max}=10.34 < 12$  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、 $5.67/0.85=6.7$ ,  $7.50/0.75=10$ ,  $2.83/0.75 \cdot 2.2=8.0$  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った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ポアソン分布であり、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<sup>5)</sup>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 ( $k=0,1,2,\dots,N$ )。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  $\infty$  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 ( $i,j=1,2,\dots,N$ ) 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。
- ④  $\text{Lim } P^n$  を求める。ここで  $\text{Lim}$  は  $n \rightarrow \infty$  である。

実際には、 $n$  を十分大にとると、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。ここで求めた  $p_j$  は  $\sum p_j=1$  を満たし ( $\sum$  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、

$$r_n = r_0 P^n \quad (21)$$

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

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

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、 $T$  を変えずに必要な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、数多くの調査からポ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
$\Sigma X$	3863	5112
$\Sigma X^2$	50263	73292
$\bar{X} = \Sigma X/N$	9.22	12.17
$VAR(X) = \Sigma X^2/N - \bar{X}^2$	34.96	26.36
$\sigma = \sqrt{VAR(\bar{X})}$	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  $E(N)$  のポ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

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

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

の複合ポアソン分布である. 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						
$E(N)$	$V(N)$	$E(X)$	$V(X)$	$E(L)$	$V(L)$	$\sigma(L)$
28	28	9.70	25.93	271.6	3360.55	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						
$E(N)$	$V(N)$	$E(X)$	$V(X)$	$E(L)$	$V(L)$	$\sigma(L)$
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

この複合ポ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  $P_{ij}$  が定まる. この推移確率行列  $P_{ij}$  を用いて定帯状態確率  $\{r_k\}$  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, そのときに容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

$$E(W) = \sum k \cdot r_k \quad (25)$$

$$V(W) = \sum k^2 \cdot r_k - E(W)^2 \quad (26)$$

で得られる. 記号  $\Sigma$  は  $k=0$  から  $\infty$  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

$$\{\sum r_k\} \quad (k = 1, 2, 3, \dots) \quad (27)$$

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

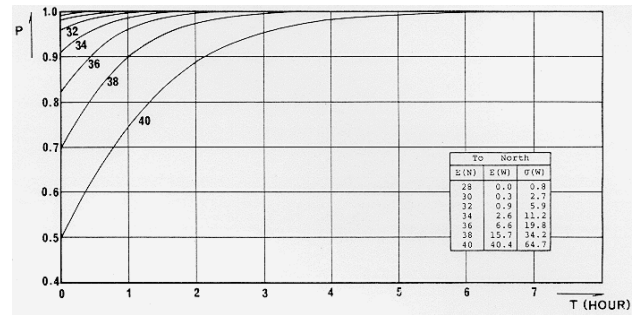


図 8 待ちの状態確率累積分布(北航)

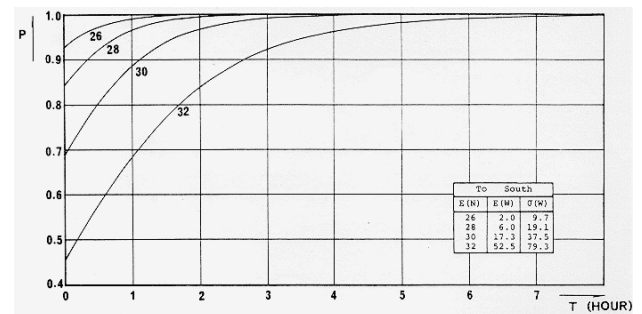


図 9 待ちの状態確率累積分布(南航)

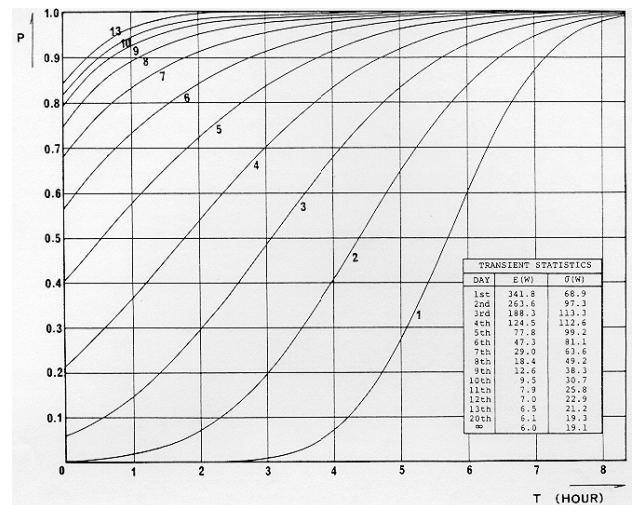


図 10 待ちの遷移状態確率累積分布

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.

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  $2 \times T$  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小さ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  $C, T, V_n, V_s, E(X), V(X)$  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、「マイ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、東京湾ハイウェ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した。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「あつて無きが如し」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がった。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、かつてベスト 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ていたが、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きな現実からも、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で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 Canal: 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つという間に 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)