

船舶の脱臼性を考慮した航路交差点管理方式の研究

小林 弘 明

①

船舶の動特性を考慮した航路交差部管理方式の研究

小林 弘 明

目 次

第一章 緒論	(1)
第一節 概説	(1)
第二節 海上交通の現状	(3)
(1) 交通量	(3)
(2) 衝突事故の発生状況	(4)
(3) 海上交通法規	(5)
第三節 海上交通の問題点と研究の現状	(8)
(1) 海上交通の問題点	(8)
(2) 交差点交通に関する研究の現状	(11)
第四節 本研究の目的と概要	(14)
第二章 航路交差点通行における船舶の動特性	(21)
第一節 概説	(21)
第二節 交差点交通流の特性	(24)
(1) 交通量と衝突危険発生率	(24)
(2) 交差点時間分割使用時の待ち時間	(25)
第三節 管理下の交差点通過操船のモデル化	(27)
(1) 定点定時定速通過モデル	(27)
(2) 調整時間と必要調整距離	(29)
(3) 必要最小調整距離	(33)
第四節 操船シミュレータによる時間調整操船実験	(38)
(1) 実験の目的と方法	(38)
(2) 操船実験結果	(39)

(3) 必要調整距離に対する考察	(41)
第五節 むすび	(43)

第三章 管理下の交差点交通流の特性 (I)

(シミュレーション技法と対象)	(45)
第一節 概説	(45)
(1) デジタル・シミュレーションの目的	(46)
(2) デジタル・シミュレーションの有すべき条件	(47)
第二節 シミュレーションの設定条件	(49)
(1) 航行船舶	(49)
(2) 航路形状	(50)
(3) 航行船と管理との関係	(50)
(4) 航行条件	(54)
第三節 デジタル・シミュレーションの構成と特徴	(57)
(1) デジタル・シミュレーションの構成	(57)
(2) デジタル・シミュレーションの特徴	(58)

第四章 管理下の交差点交通流の特性 (II)

(シミュレーション結果)	(59)
第一節 概説	(59)
第二節 二航路交差点の交通流特性	(62)
(1) 基準状態における交通流特性	(63)
(2) 二航路の交通量が異なる場合の交通流特性	(64)
(3) 合流交差点における交通流特性	(65)
(4) 航行船種の混合率が異なる場合の交通流特性	(66)

(5) 調整距離が異なる場合の交通流特性	(68)
(6) 到着時間分布と交通流特性	(69)
第三節 十字交差部の交通流特性	(72)
(1) 系統式管理の意義	(73)
(2) 基準状態における交通流特性	(75)
(3) 航行船種の混合率が異なる場合の交通流特性	(77)
(4) 系統式管理を大型船に限定した場合の交通流特性	(77)
第四節 井型交差部の交通流特性	(80)
第五節 予備管理	(81)
(1) 予備管理の統計的考察	(82)
(2) シミュレーションによる予備管理の考察	(90)
第六節 調整距離と交差部容量	(93)
第七節 むすび	(94)
第五章 広域航路交差部管理のための検討	(96)
第一節 概説	(96)
第二節 広域航路交差部管理方式の検討	(99)
(1) 交差部管理における留意事項	(99)
(2) 管理方式の検討	(102)
(3) 管理域の結合基準	(107)
第三節 広域航路交差部管理の設計	(110)
(1) 管理方式決定手順	(110)
(2) 東京湾船舶交通流に対する交差部管理	(115)
第四節 むすび	(124)

第六章	結論	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(125)
謝 辞	・・・・・・・・・・・・・・・・・・		(132)
参考文献	・・・・・・・・・・・・・・・・・・		(133)
図 表	・・・・・・・・・・・・・・・・・・		(135)
付録	・・・・・・・・・・・・・・・・・・		(A-1)
(1)	操船シミュレータの構成	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(A-1)
(2)	用語と記号	・・・・・・・・・・・・・・・・・・	(A-9)

第一章 緒論

第一節 概説

船舶は、交通機関の中で最も古くから利用されてきた輸送機関である。広い海面を一部の水深の制約を除けば、自由な方法でどこへでも行くことができた。安全確保のための交通法規も、一部河川、港を除けばほとんど必要としなかった。

しかし、近年における船舶数の増大に伴い海上交通の輻輳化は著しく、衝突、乗り上げ事故が社会に与える影響は大変大きなものとなった。徹底した安全対策を海上交通に実施する必要性が高まっている。

本研究は、このような背景のもとに、海上交通の安全と効率を支配する交差点の交通管理について研究したものである。

本章、第二節において、我が国の海上交通の状況を交通量、衝突事故の発生状況、海上交通法規の各項目より紹介し、海上交通の現状と、安全を確保するための法規の役割りについて述べている。

第三節では、海上交通の特質とそこに含まれる問題点を示している。海上交通は他の交通機関に比べ、次の各項が特に異なる点であり、そのために海上交通の問題が生じていることも多くある。そして、この特異性を考慮することによって、問題点の改善が画られると考えられる。

- ① 通行方向が均一ではない。
- ② 船舶相互の行動意図の伝達手段が不十分である。
- ③ 船舶相互の運動状態の推定が困難な場合が多く発生する。
- ④ 船舶の運動特性は、他の交通機関に比べ著しく劣っている。
- ⑤ 著しく異なる大きさの船、異なる運動特性の船が同一海面を使用している。

このような海上交通の問題点が、衝突事故の要因となることを指摘し、これに対処するために施行されている交通法規の現状について述べている。そして、現状の交通法規が交通

流の整流化と、航路指定に重点をおいたものであり、交差交通流の航行安全性を確保する点においては、大変不十分であることを述べている。更に、第三節では、海上交通の交差交通流に関する研究の現状をまとめている。

第四節では、船舶の動特性を考慮した航路交差部管理のあり方を研究した本研究の概要を示している。本研究は交差部管理の基本は交差部の時間分割使用であると考え、通行時刻を守るために必要な調整時間量に着目することを出発点としている。本論では、先ず船舶の動特性に基づいて時間調整の可能性について議論し、次に、調整時間量を決定する要因である交通流の内容、管理の方法について検討を行っている。そして、これらの解析結果を統合化することにより、交差部管理方法について検討を行い、管理方法の設計手順を提案している。最後に、現実の航路体系を対象とし、管理方式の設計を行うことにより、本論の検証を行っている。

第二節 海上交通の現状

(1) 交通量

昭和48年から昭和50年の日本沿岸の主要狭水道における交通量は、下の表の通りである(参考文献.1)。交通量の多いこれらの狭水道の中でも一般船では、浦賀水道、明石水道、備讃瀬戸東部、西部、来島海峡、早瀬瀬戸が特に交通量が多いことがわかる。

また、伊良湖水道、明石海峡、来島海峡は、漁船の通行が多いことが注目されている。日本沿岸には、ここに示した海域以外でも、交通が密集する海域がいくつかあるが、ここに示した海域以上の交通量がある所はない。多くの船舶が可航幅を限定された水道や海峡に集中するこれらの海域は、船舶の運航にとって、大変問題の多い所といえる。

	一般船	漁船	計
津軽海峡	172	31	203
浦賀水道	<u>741</u>	66	807
伊良湖水道	279	<u>738</u>	1017
友ヶ島水道	407	282	689
明石海峡	<u>1247</u>	<u>453</u>	1700
鳴門海峡	328	220	548
備讃瀬戸東部	<u>1408</u>	88	1496
備讃瀬戸西部	<u>821</u>	102	923
来島海峡	<u>832</u>	<u>356</u>	1188
釣島水道	307	68	375
クダコ水道	181	95	276
早瀬瀬戸	<u>765</u>	50	715

(2) 衝突事故の発生状況

衝突事故の発生を調べる資料としては、海難統計、要救助海難統計、海難審判裁決録等がある。これらの資料を解析した結果によると、東京湾から瀬戸内海を経て関門海峡にいたる水域が、他の水域に比べ事故の発生が著しく多いことが指摘されている（参考文献。2, 3）。

更に、昭和58年度 要救助海難統計によると、昭和58年度における衝突事故の全国合計は、946隻であり、そのうち40%を占める380隻の事故が、東京湾、伊勢湾、瀬戸内で発生していることがわかる。

この三海域の衝突事故発生隻数、発生率は次の通りである。

全国合計	946 隻	
三海域合計	380 隻	(全国の40%)
東京湾	57 隻	(全国の6%)
伊勢湾	26 隻	(全国の3%)
瀬戸内	297 隻	(全国の31%)

衝突事故の発生に至る船舶相互間の行き合い条件を海難審判採決録より調査した結果（参考文献.4, 5）によると、次のことがわかる。

(衝突時の行き合い状態)

昭和38-39年(505件/年) 昭和57-59年(369件/年)

反航	40%	22%
同航	20%	15%
横切り	8%	31%
操業漁船	—	11%

(衝突事故全体に 対する発生率)

この新旧の事故発生率の差は、昭和43年に施行された海上交通安全法により、法定航路、推薦航路が設定され、同航、反航の見合い関係が明白になったためである。これにより、通行分離が成立し、反航状態の見合い関係が減少し、反航状態の衝突事件数が半減したことになる。

同航状態の衝突も減少しているのは、航路設定による整流の効果と反航船に対して行う避航動作が減少したために、同航船同志の流れが滑らかになったためと考えられる。これも広い意味での航路設定による整流効果と言えるであろう。

これに対し、横切り状態での衝突事故が増加していることが注目される。横切り状態での衝突事故の発生数は、全事故数が減少している中で、101件から114件へ増加している。当然のことながら、全衝突事故の中に占める割合も増加し、4倍にも達し、横切り状態の衝突事故に対する対策が急務であることを示唆している。

(3) 海上交通法規

前述の通り、海上交通安全法の設定により、海上交通の状態は変化し、衝突事故の内容も変化してきた。本項では、現在施行されている海上交通法規について、特に、衝突事故の発生と関係の深い部分について整理する。

交通関連の事項を定めている法規としては、次の三つがある。

海上衝突予防法

海上交通安全法

港 則 法

このうち、海上衝突予防法は、国際的ルールであり、大雑把に衝突回避の方法を定めるものであり、避航の義務等を二船舶間の問題として定め、大洋も港内の輻輳域も区別していない。

また、港則法は、各港湾における特殊性を考慮して制定されたものであるから、輻輳域

共通の考え方とは少し異なる点がある。

これに対し、海上交通安全法は、近年の海上交通の増加と、海上交通事故の実態を反映して、日本の海上交通の輻輳する海域を対象として制定されたものである。この点から、この法規には、輻輳海域に対して共通する基本的な考え方が示されている。

海上交通安全法について、その概略を次に示す（参考文献.6）。この法規は、東京湾、伊勢湾、瀬戸内海の三海域を対象として制定されている。この三海域には、（表1-1）に示す通り、交通の輻輳する航路が計11航路含まれている。航路形状の概略を（図1-1）に示す。

本法における基本をなす交通ルールは、次の通りである。

- ・ 航路指定
- ・ 一方通行
- ・ 速力制限
- ・ 航路横断方法の規定
- ・ 大型船の集中を防止する入域制限

航路指定に関しては、（表1-1）、（図1-1）からわかる通り、通行方向別に航路を分離し、一方方向通行を規定している航路が、11航路の内、8航路である。他の三航路は、航路分離はなく、同一航路を反方向へ向かう船舶が共有している。しかし、この場合も、海上交通の基本ルールである右側通行の原則により、通行船は、出来る限り、航路の右側を通行することが規定されている。

前述の衝突海難の発生率の推移において述べたように、衝突海難の発生率は、本法施行以前は、正面行き合いのケースが最も多かったが、航路分離により、著しく減少している。航路分離は、衝突海難の減少に対して大変有効に寄与していることがわかる。

一方、航路分離のない航路は、この点に関する効果は直接的には、指摘できないが、航路指定により、船舶が整流化され互いの航行意図は、判明しやすくなり、この点において、海難事故の減少に寄与していると思われる。

大型船の集中を防止するための到着規制は、現在、浦賀水道、備讃瀬戸海域、関門海域において実施されている。この海域では、全長200m以上の巨大船は、15分以上の時間間隔をおいて到着するように調整を行っている。又、10000トン以上、200m以下の船舶は、10分以上の時間間隔を保つように調整を行っている。

この規則の基本的な考え方は、安全な運航を実現するためには、通行船の船間距離を確保し均一航行状況を実現することが必要であると云う観点によっている。しかし全船を安全な船間距離で航行させることは、困難なことであるから、一定以上の海難の発生確率を抑えることを目的とし、重大海難に結びつく大型船同志の干渉を取り除くために行われているものである。これらの海域における大型船、巨大船の通行隻数は全通行隻数に対したかだか3%以下ではあるが、全通行船の総トン数に占める割合は約50%以上である。少数の大型船舶を管理することによって、安全に対する大きな効果を期待できることになる。

第三節 海上交通の問題点と研究の現状

(1) 海上交通の問題点

海上交通の安全を考えるにあたって、先ず航行の安全を阻害する要因について考えてみる。主要なものを、船舶操縦の実体験等をもとに列挙すると次の通りとなる。

- 1) 通行方向が均一ではない。
- 2) 船舶相互の行動意図の伝達手段が不十分である。
- 3) 船舶相互の運動状態の推定が困難な場合が多く発生する。
- 4) 船舶の運動特性は、他の交通機関に比べ著しく劣っている。
- 5) 著しく異なる大きさの船、異なる運動特性の船が同一海面を使用している。

① 通行方向が均一ではない。

陸上交通では、通行する各々の車両は、各々異なった目的点までを、規定の道路を各々の目的にあった経路選択を行い、通行することになる。しかし、限られた範囲内では、各車両の通行方向は一定であり、互いに他の行動はかなりの確度で推定可能である。

これに対し、海上交通では、各々の船は、始点から目的点まで最短距離で進むことが基本である。そのために個々の航路線は、交差することが一般であり、その交差角、交差点は一定ではない。操船者の立場からいえば、航路が交差する船に対しては、先ず衝突の発生有無を判断し、交差の地点や最接近距離を推測し、その交差角、交差点により避航量を決定することとなる。一隻の避航対象船でも、以下に述べる数々の要因により、この作業は、負担の多い作業で有り、複数の対象船が発生する輻輳域では、人間の処理能力を超えることも起こってしまう。

② 船舶相互の行動意図の伝達手段が不十分である。

船舶には、車両における方向指示器やブレーキランプに当たる操船の意志表示機器がな

いのが一般である。これらの機器が発達しない理由はあるが、機器がないための不都合さがあることにはかわりはない。他船のその時点における行動状態が仮に判ったとしても、これから先、針路を変更して、衝突の危険が発生するのか、あるいは、逆に、無くなるかは推測の範囲でしか判断出来ないこととなる。自船の行動内容を他船の行動によって、決定する時、他船の将来の行動情報が必要となる。他船の行動意図が分からない場合、不確かな情報に基づいて行動を起こすことになり、適切な行動を起こすことは困難な点が多い。

③ 船舶相互の運動状態の推定が困難な場合が多く発生する。

通常、他船との衝突危険の有無の判定は、自船から計測された他船の方位が変化するか、否かによっている。しかし、3000m—4000m離れた地点を互いに5—6m/sのゆっくりした速度で航行する両船の相対運動は、緩慢であり、方位変化を判定するには、何分かの時間間隔をおいた計測が必要となる。複数の船舶に対し、この様な計測を実施することは人間の持つ能力（情報収集時間、処理時間）から困難な点が多くある。そこで、遠方の静止物標等の目標物との相対運動を計測して自船、他船の相対運動を推定し、これに充てる方法が多用される。しかし、海上においては、霧の発生やもやの発生等で遠方物標が常に見えるとは限らず、この方法も常に行えるものではない。

④ 船舶の運動特性は、他の交通機関に比べ著しく劣っている。

以上、述べてきた問題点は、逆の見方をすれば、船舶が、急速な運動変化ができないために問題となってきた点も多くある。もし、船舶も車のように、急旋回、急加減速が可能であれば、より接近するまで、衝突回避行動を起こす必要はなくなり、前述の問題はかなり緩和されることになる。

しかし、現実の船は、大型化すればするほど、運動の変化は緩慢となり、衝突回避動作を行っても、運動が発達し、目的とする避航行動が実現するためには多大な時間を要し、その間に、状況の変化が起こることもある。

⑤ 著しく異なる大きさの船、異なる運動特性の船が同一海面を使用している。

海上交通では、10m以下の雑種船から300mを超えるVLCCまで同一海面を共用している。このために、小型船と大型船が接近した場合、大型船が小型船の位置が既に危険域に進入していると判断するときでも、小型船側では自船の操縦性能に基ずき、依然十分な回避距離があると判断することがしばしばある。これは各々の操縦性能の差が原因となっている場合であるが、この他にも、速力の違いや交通方法の違い等により、陸上交通にはない問題点が多くある。

以上の様な問題点のある海上交通の安全を維持するために、交通法規や管理がある。航路を設定し、航路航行の義務を規定する海上交通安全法は、ここに述べた問題点のいくつかを解消する効果を持っている。先ず、航路航行によって、交通流を整流化し、交差の発生を大変減少させている。又、航路上を航行する船は、行動が規定されるので、高い精度で他船の行動の予測が可能である。この点において、交通法規や管理は安全のために大きく寄与しているといえる。

以上、海上交通の現状と交通法規との関係について概観したが、未だ対策が十分であるとは言えない点を以下に述べる。

輻輳水域の海上交通の安全を確保するために、施行されているこれらの法規は、交通流の整流化と航路分離を衝突事故防止の主要対策としたものである。確かに、海上交通安全法の施行により、行き合いの衝突は減少し、海上交通は改善された。しかし、これらの規定が航路横断船に対する安全確保の点で、十分な対応が取れているとはいえない。

(表1-1)に示した航路の内、備讃瀬戸東航路は、宇高東航路、西航路と交差しており、水島水道は、備讃瀬戸北航路と交差し、かつ、南航路と合流、分岐の形状をなしている。又、浦賀水道、明石海峡は、航路横断船が多いことでも問題が多い。中の瀬航路や伊良湖水道は航路横断船は少ないが、航路出入口付近での横切り船が多く、交通流の交差を

形成している。

これらの交差点部に対し、海上交通安全法における横断船に関する規定の内容は、

- 1) 航路を横断する船舶は航路をできるかぎり直角に横断しなければならない。
- 2) 航路を横断する船舶は航路内を航行する船舶に対し避航義務がある。

の二点である。このように、避航方法を設定してはいるが、制約された航路内や、水域では、同航・反航船の干渉もあり、安全な避航動作を取りにくい点が指摘される。

周知の如く、交通流の安全は、船同志の干渉が大きい航路交差点部の安全性に依存する点が大きいの。前述したように、海上衝突事故の発生率は、以前の行き合い衝突から横切り衝突の事故が急増しているのが現状である。この問題に対し、現行の交通法が安全確保の点で十分に機能しているとはいえず、交差点部航行の安全確保に対し、一層の検討をする必要があると考えられる。

一方、海上交通の問題点において触れているように、問題点の多くは操船者の処理しきれない量の作業を必要とする点にある。船舶の数が少ない海峡においては、通常の処理内で解決できるので問題とはならないであろう。この点から、海上交通安全法が船舶の航行する特定海域を対象としていることは、妥当であり、全海域に対し実施することは問題である。逆に、航行する海域において、全ての船舶を自由に行動させることは、不合理であることも真実であろう。

(2) 交差点部交通に関する研究の現状

海上交通に関する研究は、海上交通の実態調査から始まり、交通流の特性を観測データに基づき定量的に把握する方向に進んでいる。

また、一方では、コンピュータ・シミュレーションより、海上交通を再現し、各種交通状況に対する交通流の特性把握の研究も行われている。しかし、航路交差点部を問題の中心においた研究は、わずかなのが現状である。以下にその概要を述べる。

平野（参考文献，7）は交差点部航路の交通流に対し、従航路船は主航路の船舶流の間隔をぬ

って航行するものと考え、航行実態観測より横断可能な時間間隔を求め、これより航路横断のために必要な待ち時間を求めている。

長畑（参考文献.8）も同様な考え方に基づき、主航路交通量と横断可能確率、平均待ち時間等を待ち行列理論により求めている。

原ら（参考文献.9）は、複線交差航路の交通流に対し、待ち行列理論を応用し、各交差部に於ける出合い確率を求め、交通渋滞の起こる臨界トラヒック密度を求めている。

平野、長畑両氏による研究は、航路横断の可能性を、被横切り航路上の船と船の間の時間間隔より求めるものである。各種の交通量に対応して、時間間隔は変化し、それに応じて横断船の待ち時間が変化することとなる。待ち時間の分布を求めることに主眼がおかれている。しかし、ここで問題となるのは、要求される待ち時間が、船の性能からみて許容範囲内にあるかという点にある。両氏の議論は、この点について触れられてはいない。

また、原らの研究は、一つの交差部に対する横切り問題については、交差部間距離と調整可能時間量との関係について触れられていず、前者と同様に船の性能は反映されていない。さらに、一つの交差部での待ち行列が伸びて、手前の交差部まで達すると渋滞状態になるとされているが、この様な状態では、船はほぼ停止状態になることになり、現実の交通状況の差異が大きいと考えられる。

以上の研究成果より、航路横断の問題は、横断船に要求される待ち時間が、横断船にとって許容できるか否かが重要な点として残されていることが判る。

一方、海上交通に対し、航行管理を実施し、船舶間に発生する衝突やニアミス等の干渉を除去する研究も件数は少ないが進められている。

代表的なものとして、石谷等による「2次元の自由移動体の管理方式に関する研究」があげられる（参考文献.10）。この研究では、海域内の全船舶の行動の全てを管理することを考えている。この時、個々の船舶には全く自身で判断、行動する自由度はないが、一定の評価基準に基づいた最適な行動を行うこととなる。評価基準の内容は、船間の最近距離と変針、変速量等が含まれている。

一般に、管理方式を考えるにあたって、船の行動をどのレベルまで管理側で決定するかによって管理レベルが決まることとなる。この点から見ると、この方式は最高位の管理レベルを考えていることに当たる。船舶の輻輳化が著しく高くなった場合や無人運転等の場合を考えるときにはぜひ検討しなければならない管理方式である。しかし、現時点における輻輳度や運航体制においては、未だこの様な高レベルの管理は必要ないと思われる。

このような研究状況のなかで、広域の航路ネットワークを対象とした研究の一つとして、小山等によって行われた、「東京湾航路体系のシミュレーションによる評価について」の研究がある（参考文献.11）。この研究は、東京湾全体の主要航路体系を対象として、待ち行列によるシミュレーションを用いて実施されている。マクロな始点からの海上交通の評価を行っている。主たる研究対象は、交差点通行に要する待ち時間であり、異なる航路体系案に対し、交差点通航に要する待ち時間について評価を行っている。研究結果によれば、待ち時間の大半は2分以内であることが示されている。この点から、何等かの交差点管理を行い、交差点への到着時刻の調整を行えば、交差点の時間分割使用が可能となり、交差点交通を大幅に改善できることが示されている。

第四節 本研究の概要

本研究では、海上交通の安全確保のために重要な要件でありながら現在十分な検討がなされていない航路交差点における船舶航行の管理方法について議論するものである。本研究における交差点管理の目的は、「管理側と航行船との交信により、交差点の通行時刻を調整し、交差点において航行船間の衝突や干渉を発生させない通行時刻帯の配分を行う。この時、船舶が交差点を通行するために行う調整は通常の操船範囲内で達成できるものとする。」である。

そして、本論の目的は、広域にわたる輻輳海域に対し、そこに存在する航路交差点に対し、航行管理を実施するにあたって、前述の管理目的を達成するために必要な知識を得ることにある。

海上交通における航路交差点の航行管理においては、交差点の時間分割使用が前提であり、航行船は加減速操船によって交差点通行時刻に合わせて時間調整をすることになると考えられる。船舶は他の交通機関に比べ質量が大きく、加減速操作に対する運動の発達は非常に遅いので、管理に伴う時間調整と船舶の加減速特性の関係については十分な検討が必要である。さらに、海上交通が他の交通機関と異なる点の一つは、大きさ、性能の大幅に異なる船舶が混在し、同一航路を使用する点があげられる。多種多様な船舶を対象とし、合理的な管理基準を設定するためには個々の船の特性を幅広く把握する必要がある。

本論（第二章）では、まず加減速操船による交差点への到着時刻調整のモデルを構築するとともにその妥当性を検証することとなる。

交差点通行の一般的モデルとして、いくつかの交差点を連続して通行する場合を考える。航行船は管理側の指示に従い、時間調整をして指定時刻に第一の交差点を通行することとなる。しかし、交差点通過時の船速が過大あるいは過小の場合には、次の交差点に対する時間調整を第一、第二交差点間の航走中では達成できないことが起きる。交差点通行の調整は時刻と共に交差点通行速力の調整も必要となる。又、交通を管理する側から見た場合、

航行船が交差部を占有する時間を正確に把握する必要があるので、この点からも船舶は交差部を一定の速力で航行する必要がある。以上の点より交差部通行の一般的モデルとしては、交差部を定時定速で通行する操船を考える必要がある。これにより、連続交差部の通行が単一交差部の通行モデルとして表現できることとなる。本論ではこれを定点点定時定速通過操船と呼ぶこととした。

船舶は管理側から要求される時間、速力の調整を一定の距離の航走中に加減速操船により行うこととなる。そのとき調整のために必要とする航走距離（以下、調整距離と呼ぶ）は船の性能によって決ってくる。管理側は要求する調整時間量に見合った調整距離を船側に与える必要がある。この点が交差部管理のあり方と船の性能との接点となる問題である。調整時間量とそれを行うに必要な調整距離との関係を求める必要がある。調整距離は、船の特性と共に操船者の加減速操船方法の関数である。交差部を定時に定速で通行する操船方法は多様であるが、本論ではまず最短時間制御則を操船方法として考えることより、調整時間とそれに必要な調整距離との関係を得ることとした。最短時間制御は制御量範囲でのBang-Bang制御となるが、船の保針特性を考慮しプロペラ逆転による減速や、一定の速度以下に船速が低下することのない範囲で、加減速操船を行う条件を設定した。ここで得られた関係は、船の動特性が反映されたものであり、その結果によると調整のために必要な航走距離は船の種類、調整前の速力、調整時間、交差部通過速力によって大きく変化する事が明かとなった。特に、初速に対し通過速力が大きくなると調整距離は増加し、この傾向は大型船において著しい事が明かとなった。

管理側が航行船の交差部通過時刻を決定すると調整時間量が決まることになる。この調整時間量を達成するためには、通常の操船によって目的を達成できる調整距離を船側に与える必要がある。しかし、計算により得られた調整距離は最短距離であるから、現実の操船においては、計算値以上の調整距離が必要となる。即ち船の動特性に基づき得られた計算値に、操船者の制御特性を加味して評価する必要があることとなる。そこで、操船方法として仮定した制御則の妥当性の検証と調整距離として必要な余裕度を得ることを目的と

し、操船シミュレータ実験を行った。実験は船の種類を大型船から小型船までの3種について行われた。操船状態としては調整開始前の初速3種と時間調整後の速力（交差点通過速力）の3種とを組合せ各船についてそれぞれ9ケースの条件を設定している。実験は一定の調整時間を課してこの各9ケースについて行われた。このとき、与えられる調整距離は、前述の計算値の1.2, 1.5, 2.0倍の距離をそれぞれ設定して行われた。そして、各設定条件に対して、目的の達成度（調整時間量の誤差、通過速力の誤差）と調整距離との関係について求めた。その結果、操船実験により、仮定した制御則が人間による操船をよく代表していることが明かとなった。そして、調整距離としては、計算値の1.5倍程度の距離があれば余裕のある操船が出来ることが判明した。以上の議論により交差点通行のための時間調整と調整距離（必要調整距離と呼ぶ）の関係を操船者特性を含めた船舶加減速性能に基づいて決定することができた。

つづいて、複数の交差点を含む広域航路網に対する交差点管理を設計するため、設計のために必要な資料を調査し、管理下における船舶交通流の特性を求めることとなる。

交差点通行船は管理海域に入域した後に管理側の指示に従い時間調整を行いつつ交差点へ向かうこととなる。管理域の大きさは、航行船が管理域に入域後、管理側から指示された時間調整をその管理域を航行中に達成できる条件により決定する。一方、管理側が通行船に指示する調整時間は、交差点の空き時間の大小によって変化し、空き時間は交通量、航行船種、通行時間帯の配分方法等によって変化する。

このことから、広域航路網に対する交差点管理を設計するためには、交通量、航行船種等の交通要因に対応して、必要となる調整距離を求める必要がある。そこで本論（第三章、第四章）では、管理方法の点から区別される、二つの交差点形状に対し、管理下の交通流の特性を検討している。検討に当たっては、交通流の特性に影響を与える各種の交通要因（交通量、航行船種、管理域の大きさ等）に対し、基準となる状態を考え、その状態における調整距離と調整不能船発生率（与えられた調整距離においては、指示された時間調整

が不可能な船の発生率)の関係をデジタル・シミュレーションにより求めた。調整不能船の発生率の上限値を設定することにより、各種の交通状況に対応した調整距離が得られることとなる。つづいて、各交差点形状において、交通流に大きな影響を与える各要因に対し、その変化によって生ずる交通流特性の変化を比較検討した

先ず、各交差点部を一つ一つ分離した単一交差点部の特性を検討している。単一交差点部の基準状態としては十字交差点部を対象とし、二航路の調整距離、交通量比等を一定として検討を進めた。そして、基準状態に対する変化として、交差点形状が合流である場合、二航路の調整距離や交通量が異なる場合、そして、航行船種の混合率が基準状態と異なる場合について検討を行った。これらの検討の結果、各種の交通要因を含む交通流特性が明らかとなった。中でも、二航路の交通量が異なる場合でも、交通流の特性は交差点部の交通量で整理できること、又、航行船種の混合率が異なる場合も、面積換算の換算隻数によって交通流の特性は整理できること等が明らかとなった。

各交差点部を単一に扱う場合、与えられる調整距離が必要調整距離より小さい場合が発生し得る。即ち、連続する交差点部間の距離が短いために、第一交差点部通過後に第二交差点部の通航のための時間調整が不可能な場合である。このような場合、第一交差点部と第二交差点部を一括管理し、二つの交差点部の通行時間を系統的に割り振ることが有効である。即ち、第一交差点部の通航時間帯の決定に際し、第二交差点部の通行可能時刻帯を考慮することにより、第二交差点部のための調整時間を短い交差点部間距離でも行える範囲にとどめることが可能となる。本論ではこれを十字交差点部に対する系統式管理と呼び、その有効性を示すと共に、この管理特性を検討している。

平行に通る二つの航路を主航路、これを横切る航路を従航路と呼ぶ時、系統管理は従航路船に適用されることとなる。交通流特性の検討は、単一交差点部と同様に、基準状態を設定し、交差点部間距離、管理海域の設定の方法等がおもに論じられている。続いて、航行船種の混合率の問題、系統式管理を大型船に限定した場合等について検討している。

検討の結果、十字交差点部系統管理によって、従航路船の調整不能船は大幅に改善すること

が明らかとなり、系統式管理が交差部管理方法において有効に機能することが判った。そして、系統式管理を大型船に限定した場合にも、ほぼ同様の効果が得られることが確認された。

交差部間距離の短い状態が主航路側で同時に発生することも有り得る。この場合は、 π 系統管理の考え方を主航路側にも拡張し、航路形状が井型を組むものと考えることができる。本論では、交通管理の複数交差部系統への拡張の可能性を示す一例として、この井型交差部に対する管理の特性を示している。

ところで、対象となる交差部に要求される交通容量が大きい場合は、航行船に課せられる調整時間は長くなり、それに見合った調整距離は当然長くならざるを得ない。そして、このために十分な調整距離が確保できない場合や、管理海域が著しく拡大する必要が生じることとなる。検討の結果、調整時間が長大となる主たる原因は、大型船の集中到着によることが明かとなった。そこで集中到着を避けるために大型船に対して、管理海域到達以前から管理を行い、管理域への到着時間を調整する方法が考えられる。本論では、これを大型船に対する予備管理と呼び、その管理の特性と有効性を検討している。

以上の研究を通して交差部管理方式の設計のための基本的知見を得ることができた。つづいて、本論（第五章）ではこれまでの研究結果を統合し、現実の航路体系に対する交差部管理方式の設計方法について検討を行った。本論では次の三種の管理方式を提案し、各方式に対して、通行船の負担、管理の負担について比較検討を行っている。

①全船同等管理

②予備管理付き大小船型別管理

③予備管理付き船種別管理

航行船は管理域へ進入した時点から管理側の指示に従う必要があり、航行上の制約を受

けることとなる。時間調整のために必要な調整距離に対して、管理下におかれる時間が著しく長い場合には、航行の制約は船舶に取って大きな負担となってしまう。この点から、管理域の広さは必要最低限であることが望ましいこととなる。このことは、広域の航路体系に対しても、全域を一括して管理するのではなく、できる限り分割して管理することが望ましいことになる。そして、管理域を分割することにより、副次的に管理方法の設計が系統的に行える利点や、管理の運営において問題が発生した場合にも、その影響を局所的に制限できる利点を確保できることとなる。

結論として、広域にわたる複数の交差点を対象として考える場合にも、管理方式の基本は各交差点を単独に管理することが望ましいことになる。

次に管理域の広さの決定について考えると、時間調整に必要な調整距離は船舶の動特性によって決ってくる。船の性能に応じた管理域の決定が必要であり、性能の異なる小型船と大型船とは異なった管理域を設定する必要がある。一方、現実の海上交通を考えた場合、小型船は全通航船の85-90%を占めることが普通である。15%以下に当たる大型船を基準として全通航船の管理域を設定することは適当でなく、小型船と大型船とは別個に管理域を設定することが妥当となる。

また、管理の効率を向上するためには、交差点の使用を均一化する必要がある。このためには大型船に対し、管理域への到着規制を行う予備管理を併用することが適当となる。本論では、以上の検討結果より、予備管理付き大小船型別管理が、最も適した管理方式と判断している。この管理方式の基準に従い管理域を設定することにより、小型船はその動特性に応じた管理域が設定され、管理に伴う航行上の負担は最少となる。大型船は予備管理により負担は増加することになるが、小型船に比べ早期に通航登録がなされるので、通航時刻配分の上で、優先権が得られることとなる。

さらに本論では、以上の管理方式の基本に従い、管理方式の設計を進めるとき、交差点同士の干渉により全ての交差点に対して単独管理が困難な場合が生じる。このような状態に対する処置として、系統管理を採用することを提案し、その採用の基準を示している。

つづいて、提案した管理方式の設計方法の妥当性を検討するために、東京湾中南部における航路体系に対し、航路交差部の通行管理方式の設計案を示した。東京湾中南部は、船舶交通量が多い代表的海域であるばかりでなく、湾周辺に大きな港が点在するために、出入港の航路は複雑で、互いに交錯している問題の多い海域でもある。検討結果によると、本論で示す管理方式の設計手順により、交差部の管理方式を提示できることが明らかとなった。

本論文は以上の通り、交差部航行の管理方式を研究対象とし、先ず、交差部管理における管理対象である船舶の動特性について、操船者特性を含めてその特性を求めた。次に、各種の交通要因、管理方式に対する交通流の特性を求め、これらの検討結果に基づき管理方式の設計方法を提示し、その具体例を示しているものである。

第二章 航路交差部通行における船舶の動特性

第一節 概要

本章においては、異なる各航路の船舶が、同一の交差部を時間分割して、通行を行うときの、船舶と管理の関係について検討する。管理は管理を受ける船舶の特性を反映したものでなければならない。そこで本章では、管理下における交差部通行の一般的性質について検討を行い、つぎに管理の内容に対応した船舶の特性について検討を進める。

交差部管理の議論に先立ち、本章第二節(1)では、交差交通流における衝突の発生率の概要を把握するために、交通量と衝突発生率との関係を求めている。その結果、現在の多くの航路水域における交通量においても、半数以上の船舶が一回以上の衝突の危険に遭遇していることが明かとなった。

現状の船舶交通においては、衝突危険の回避は、変針避航が一般的である。これは、変針動作が変速動作に対し、応答が早いことに由来している。避航する他船の数が少ない場合は、変針避航で十分であるが、他船の数が増加すると、避航海域が不十分であったり、他船の動向を判断する情報処理量が増加し、人間では処理しきれない事態も発生することになる。このような状態では、変針避航のみで交差する他船との衝突を回避するのは、不十分であり、変速避航が必要となる。船舶が航路し、変速避航が必要となった場合、加減速運動には長い時間がかかるので、交差部のかなり手前から、操作を開始する必要がある。この時、避航対象船が多数有り、かつ遠方であることから、避航のための適切な操作量を決定することは困難なことが多くある。この点を補足することが、管理側の任務となる。

以上のように、船舶が航路し、異なる航路の船が交差部を時間分割して通行する場合、通行船は通過時間待ちを行う必要が生じる。待ち時間の量がどの程度になるかは、交差部を時間分割使用することの有効性を決める点で重要なことである。この点から、第二節(2)では、待ち時間量を待ち行列問題で多用されるGPSSによるシミュレーションより求め

ている。以上の予備的検討により、交差部の時間分割使用は現実的なものと判断でき、第三節以降は、時間分割使用時において重要な役割を果たす、船舶の加減速特性に関して議論している。

二方向の船舶の流れを、円滑に交差部を通過させるための航行管理では、通行時間配分を合理的に行う必要があるが、管理側がどのような形式で、両航路の船に交差部通行時間帯を配分するとしても、船側は、与えられた通過時刻に交差部を通過するために、速力調整により通過時刻調整をする必要がある。当然管理側は、船の速力調整の性能を無視して、船側に、調整時間を課すことは出来ないから、船の性能にあった管理をする必要がある。対象となる船の性能としては、加減速性能と保針性能が考えられる。船舶の加減速性能は、他の交通機関に比べ著しく劣るために、所定の時間量を調整するために多大の時間を要することとなる。いいかえれば、長い距離を航行しながら、その航程において、加減速を行い到着時刻調整を行うこととなる。一方、船舶の保針性能は、舵効きに大きく依存している。しかし、舵効きは、プロペラの作動状態、船速によって異なり、一定の舵効きを確保するためには、一定以上の船速、プロペラ回転数を必要とすることとなる。そのために、プロペラ逆転による急激な減速や船体停止状態で時間調整を行うことは不可能となる。結局、船舶が指定された時間を調整するためには、保針操船を行える条件のもとに、加減速操船を行う必要がある。そして、時間調整を行うためにどれ程の航走距離を必要とするかを明らかにする必要がある。

一方、一般の航路体系においては、複数の交差部を連続して通過しなければならないが、本章第三節においては、複数の交差部通過問題を一般化することにより、交差部を定時定速で通過する、操船モデルとして表せることを示している。本論ではこれを定点点定速通過操船モデルと呼び、交差部通行操船の一般モデルとして扱えることを示している。管理側から交差部を定時定速で通行することを指示された時、船舶は加減速操船によって時間、速力の調整をすることになる。この調整のために必要な航走距離は、船の性能をはじめ、操船方法、初期船速、交差部通行船速等によって決ってくる。第三節では、時間調整

のために必要な調整距離を求める指標として、最短時間制御則による時間調整操船を考え、調整時間と調整距離の関係を求めている。

第四節では、この第三節で仮定した最短時間制御則による操船方法が、実際の操船に対して、不自然なものでないことを、検証するとともに、現実の管理においては、上記指標の何倍程度の調整距離が必要であるかを求める目的から行った操船シミュレータ実験結果について述べる。

第二節 交差交通流の特性

(1) 交通量と衝突危険発生率

本節においては、交差部を航行する船が、衝突回避動作を取らない場合の衝突危険の発生率を検討する。

ここで、衝突危険の発生とは、船同志が、完全に衝突する状況だけでなく、船舶同志の最接近距離が、一定の安全範囲を越えて、接近する状態も含めて考えることとする。

一定の安全範囲としては、海上交通において、一般にいわれている船長の6、4倍の円を船の周囲に設定することとする。この時、航行船は、衝突回避動作を取らないことから、衝突危険の発生は、各船が、何時に、何処を航行するかによって決定する。

次の条件のもとに、衝突危険範囲内に、他船が進入する船舶数を、全通行船に対する割合を持って、衝突危険発生率として求めることとする。

1. 各航路の船舶は、定められた平均到着時間に従い、ポアソン到着し、交差部へ進入する。航行船の船長は100mの一種とする。
2. 各航路幅は、700mとし、各船の航路幅方向の分布は、航路中央を平均値とする正規分布により表現されるものとし、航路に平行に進行する。航路形状と船舶の発生状況を(図2-1)に示す。
3. 問題となるのは、異なる航路を航行する船舶間の衝突危険発生率であるから、同航路船同志の初期船舶間距離は6、4船長以上とし、追越し発生等は考えないこととする。通行船の船速は、5m/secの一定とする。

以上の条件のもとに、二つ航路上の通行船間最接近距離は、次式で表現できる。

$$DCPA = \{ (x'_0 - V \cdot (t - t_1))^2 + (V \cdot (t - t_2) - y_0)^2 \}^{1/2}$$

ここに、

t_1, t_2 : 航路1、ならびに航路2の船舶が交差部へ進入する時刻

y_0, x'_0 : 航路1、2の各船舶の航路幅方向の初期位置

t : 最接近発生時刻

上式を用いて、二航路上の全ての航行船間で発生する最接近距離(DCPA)を求めその値が、船長の6.4倍以下になる状況の発生率を求めたものが、(図 2-2)である。

衝突危険発生率は、通行船舶数の増加とともに、ほぼ、直線的に増加している。一般に、衝突危険は、通行量の二乗で増加するといわれるが、ここに示すものは、一船が二船、三船と接近状況に陥っても、衝突危険発生回数を1と計上しているので、衝突危険発生数は、通行量の二乗で増加せず、ほぼ比例関数を示すことになる。

本図より、一日400隻の交通量のある交差点では、約半数の通行船が、一回以上の避行動作を必要とすることが明かとなった。前述したわが国の輻輳水域における交通量は、航行船の大きさを考慮すると、本シミュレーションの一日400隻の状態に該当する海域も多く存在している。これらの海域では常に衝突事故の可能性がある、衝突の危険性を低下させるための対策が既に必要とされる段階にあることが判る。

(2) 交差点時間分割使用時の待ち時間

本節では、交差する航路上の船が、交差点を時間分割して、使用する場合において、交差点の通行可能な時間帯を見いだすまでに必要な待ち時間について検討する。待ち時間の推定には、待ちを含む系の解析に一般によく用いられるシミュレーション言語、GPSSを使用している。

シミュレーションの条件を次の通りに設定し、待ち時間の発生状況を調べるものとする。

1. 交差点は、同じ時間帯には常に同方向航行船のみが使用する。従って、異なる方向へ進む船が交差点へ到着したときは、交差点を通行中の全船が通過後、交差点へ進入する。
2. 交差点通行の優先順位は、交差点へ早く到着した船から順次割り振られる先着船優先方式とする。
3. 航路形状を(図 2-3)に示し、通行船の船種は前項(1)と同様に100mの一種とする。

4. 交差部は3レーンとし、各船はそれぞれ1レーンを使用することとする。従って、交差部は3隻の船が並行して航行することが出来る。処理時間に対応する交差部通行時間は通行速力、5 m/secと航路幅70.0mに対応し、14.0秒とする。

シミュレーションにより得られた、待ち時間の状況を(図2-4)に示す。今回想定した、一航路当たり210隻の交通量は、現状の海上交通の輻輳水域における交通量にほぼ該当するものであり、この交通量においても、95%の船が、10分以内の待ち時間で交差部の通行ができることになり、航行の安全を考えれば十分許容できる待ち時間であると判断した。

待ち時間の推定方法については、本論文、三、四章において、詳述することとなるが、ここで得られた待ち時間は、通常行われる航路航行シミュレーションで得られる値に対応するものである。交差部通行待ち時間の評価量として、GPS等得られる簡易推定値と、本論により得られる交差部容量との関係を、概略結び付ける目安として今後有用となるであろう。

第三節 管理下の交差部通過操船のモデル化

(1) 定点点定速通過モデル

交差部を各航路ごとに時間分割して使用する場合、管理下における船舶には、管理側から交差部通行時間帯が割り当てられることになる。一カ所の交差部通過問題においては、交差部を定められた時間帯に通過することですむわけだが、一般の航路体系においては、複数の交差部を連続して通過しなければならない。この場合、第一の交差部には指定時刻に到着しても、その時の船速及び第一交差部と第二交差部との距離の関係によっては第二交差部における指定時刻を守ることが著しく困難になることもあり得る。

この関係を(図 2-5)に示す。横軸に時間、縦軸に航程をとった場合、第一、第二、第三交差部の通過時刻を、○印のように指定されたとする。船側は、速力調整により、先ず、第一の交差部への到着時刻を早めるか、あるいは遅らせることになる。この到着時刻の調整により、第一の交差部を指定時刻に通過することになるが、第一交差部通過と同時に、次の交差部への到着時刻の調整を開始しなければならない。

この時、二つの問題が発生する。第一は、船側において、第一交差部の通過速力が、過大、あるいは、過小であった場合、第二交差部を指定時刻に通行するための時間調整に対して、第一、第二交差部間距離が調整距離として不十分な場合である。即ち、第一交差部通過時の速力を初期状態として、いかなる速力制御を行っても、交差部間距離を航走中に、第二交差部通行のための時間調整を行うことが船の動特性から不可能な場合が発生してしまう場合である。この点から第一交差部の通行は、時刻だけでなく通過速力についても考慮しなければならないこととなる。

第二に、管理側からみた場合、通行船が指定時刻に交差部を通行したとしても、交差部の占有時間は、その時の通行速力によって変化する。管理側は、次々に管理域に到着する船舶に対し、交差部通行時刻を指定するためには、先行船の交差部占有時間帯を正確に把握しておく必要があり、この点からも、交差部通行速力を確定しなければならないことと

なる。

以上、二点の条件から、交差部通行問題では、船の性能に応じて、通過時刻とともに、通過時の船速についても調整が必要になる。

船の性能と交通管理の関係は、必要な時間調整を行った上で、交差部を、定時、定速度で通過する制御モデルに一般化できることになる。本論では、これを定点定時定速通過モデルと呼び、交差部通行時における操船の標準モデルとして扱うこととする。

定点定時定速通過モデルの概要を（図 2-6）に示す。（図 2-6）に於て、A 点の状態にある船がそのまま速力を保持すると B 点において交差部を通過する。一方、管理側から C 点において速力 V_p で通過するよう要求されたとすると、必要調整時間は、 \overline{BC} となる。この時間調整を余裕をもって行うためには、図に示す調整距離をどの程度とらなければならないかは、当然、船の性能によって異なるものである。調整時間量とそれを行うに必要な調整距離との関係を得ることが重要な課題となり、この関係こそが、交差部管理のあり方と船の性能条件との接点となる問題である。次項においてはこの点を論ずることとなる。

(2) 調整時間と必要調整距離

管理側から一定の調整時間が指示された時、個々の船が、その調整を余裕をもって行うのに必要とする航走距離は、初速 (V_0)、交差部通過速力 (V_P) の関数となる。これは又、当然、船の加減速特性によっても異なった値を示すことになる。

結局、必要調整距離 (L) は、次のように、調整時間、初速、交差部通過速力、船の動特性の関数となる。

$$L = f(T_{\max}, V_0, V_P, K)$$

T_{\max} : 必要調整時間

V_0 : 制御開始時の初期速度

V_P : 交差部通過指定速力

K : 船の動特性

ここで、「余裕をもって」という表現は、平均的能力を持った操船者が操縦した場合という意味であり、この点から、必要調整距離は、操船者の加減速制御法の関数でもあり、マン・マシン系の問題としてとらえる必要がある。平均的能力を持つ操船者がどのような制御を行うかは、多数の操船実験結果により平均的制御則を求めることにより得られるものであるが、この点は後で述べることにする。

本論においては、先ずマシン特性、即ち船の加減速特性に基づいて時間調整の特性を検討することとなる。

船の性能を最大限に使用して、時間 T_{\max} の調整をおこなうと考えたとき、最短時間制御則に従って本操船を行う場合の必要調整距離を求めることができる。本論では、これをひとつのよりどころとして、議論を進めるものとする。

最短時間制御は、周知の通り、許容制御量の範囲内での Bang-Bang 制御となる。船舶の速力制御は、一般にプロペラ回転数の変化によって行う。船速の増速は、プロペラ回転数の増加、減速はプロペラ回転数の減少、あるいは逆転によって行われる。しかし、

船は、一般に、プロペラを逆転しているとき、舵効きは失われるので、波や風による船首揺に対する針路制御が不可能な状態になる。さらに、プロペラ逆転に伴う回頭モーメントの発生により、船は、回頭運動が誘起され、直進状態を保持できないことになる。この点から通常航行時においては、プロペラ逆転による減速は危険であり、一般的な操船方法ではない。一方、プロペラ回転数として回転数0を指定した場合、プロペラ軸系は、主機駆動系との接続が断たれ、プロペラへの流入水流により水車として回転する遊転状態となる。この状態では、針路制御装置としての舵へ水流が流入し、一定船速以上ならば、舵効きは確保できることになる。運航者の意見によれば、船速が5ノット以上ある場合には、針路制御のための舵効きは、確保できるとされている。

以上のような船体運動の制御特性に対応して、プロペラ回転数の制御量の範囲は、針路制御からの要求を考慮し、プロペラの逆転は避け、港内前進全速 (Maneuvering Full Ahead) と遊転 (Idling) の間として検討を進めることとする。また速力は、5ノット未満に低下することのないよう制限をすることとした。

(図2-6)において、交差部通過指定時刻の点(C)から通過指定速力(VP)の傾きで延長した運動状態を指定状態と呼ぶこととする。ここで、指定状態とは、その状態における運動状態を保持し続けられ、管理側の要求する要件を満たすという意味である。時刻の指定状態からの位置の偏差を $\Delta X(t)$ 、速力を $V(t)$ とする。位置の偏差を横軸、速力を縦軸とする($\Delta X(t), V(t)$)の位相面を考え、制御則を(図2-7)のように仮定する。座標原点の状態は、位置の偏差のない場合で、速力が指定速力VPに一致している状態を意味することとなる。即ち、指定状態の線上にいないことに対応している。中央の座標原点を通るS字をなす曲線が制御切り替え線を示している。この制御切り替え線は、前進全速状態から遊転状態による指定船側までの減速、あるいは、船速 2.5 m/s から前進全速による指定船速までの加速時の刻々の速力変化と、刻々の船位の変化を、各船の動特性に基づいて計算することによりえられる。切り替え線上左半分の状態であれば、プロペラを遊転させることにより、速力が低下し、指定状態である原点へ移動することになる。また右

半分の状態にあるときは、プロペラを前進全速回転させることによって、いずれは、指定状態（原点）に到達できることを示している。従って、位相面上で現在の状態が切り替え線の右側にあるときは、遊転、左側にある時は、前進全速回転させて切り替え線上まで状態を移し、その後は逆に前進全速回転あるいは遊転させれば、指定状態に移行できるというのがこの制御則の考え方である。また、図中、一点鎖線で示すものは、船長が300mの船において、この線に対応する運動状態から、この制御則によって指定状態へ移行するまでに要する時間が500秒、1000秒の場合について示したものである。

（図2-8）、（図2-9）は、この制御則による状態の推移の概略図を示している。（図2-8）は、交差部到着時刻を遅らす場合であり、（図2-7）において、切り替え線より右の状態に該当する。まず、プロペラ回転数（ n ）を遊転状態にし、速力（ V ）の低下を図る。指定状態との差 ΔX は時間遅れの後、減少を開始し、徐々に指定状態に近づいてゆくこととなる。指定状態の手前でプロペラをFULL-AHEAD（前進全速）とし、増速状態に入り、交差部進入時点で、目的の通過船速になるとともに、指定状態に一致し ΔX が0となる。その後は、通過船速に対応するプロペラ回転数を保持すれば、指定状態を保持しつづけることとなる。

（図2-9）は、交差部到着時刻を早める場合であり、（図2-7）において、切り替え線より左の状態に該当する。この場合は、まず、プロペラ回転数をFULL-AHEAD（前進全速）にし、船速増加を図る。指定状態との差 ΔX は負であるが、徐々に差は減少し、指定状態に近づいてゆくことになる。指定状態の手前でプロペラを遊転して交差部進入時点で目的の通過船速まで減速する。交差部進入時点で目標とする船速になるとともに指定状態に一致し、 ΔX は0となり、その後は、通過船速を保持することになる。

当然のことながら、最短時間制御により求めた必要調整距離は、許容される制御範囲内の最小値であるから、調整距離はこれ以上短くすることはできない。その意味で、これを必要最小調整距離（ L_{min} ）と呼ぶこととする。求めたいのは、調整時間 T_{max} に対して余裕を持って調整できる調整距離である。制御則によって得られる調整距離（ L_{min} ）はあ

くまでも指標であり、これをよりどころとして目的とする距離を推定するための手段として用いられる値である。

(3) 必要最小調整距離

必要調整距離は、調整時間 (T_{\max})、船の加減速性能、初速 (V_0)、交差点指定通過船速 (V_p) の関数となる。調整時間 (T_{\max}) を 5 分とし、超大型、大型、中型、小型 (船長 (L) が 300、240、150、50m) の四種の標準的船型を選び、初速 (V_0)、通過船速 (V_p) をパラメータとして、最短時間制御に従い必要最小調整距離 (L_{\min}) を求めることとする。

計算に使用した船の加減速運動に関係する数学モデルは次の通りである。

① 船速の応答モデル

1) プロペラ正転の場合 (遊転を含む)

$$V + a_{vv} V^2 + a_{rr} r^2 + a_{\delta\delta} \delta^2 = a_{nn} n^2 + a_{nv} nV \quad (0 < J_s)$$

2) プロペラ逆転の場合

$$V + a_{vv} V^2 + a_{rr} r^2 = \begin{cases} a_{nn1} n^2 & (J_{ST} < J_s < 0) \\ a_{nn2} n^2 + a_{nv2} nV & (J_s < J_{ST}) \end{cases}$$

② 主機回転の応答方程式

1) 主機指令回転

$$n^* = \begin{cases} n_0 & (n_0 > n_i, n_0 < 0) \\ n_i & (0 < n_0 < n_i) \end{cases}$$

ただし、

n^* : 指令回転数

n_0 : 主機指令回転数

n_i : 遊転回転数

$$(= 0.7 \cdot (1-w) V/P)$$

2) 主機回転の応答方程式

$$T_E \dot{n} + n = n^*$$

ただし、

n : プロペラ回転数

T_E : 主機時間遅れ

ここに各記号は次の諸定数を示している。

L : 船長

V : 船速

r : 回頭角

n : プロペラ回転数

δ : 舵角

P : プロペラ・ピッチ

w : 船体伴流係数

$a_{vv}, a_{rr}, a_{\delta\delta}, a_{nn}, a_{nv}, a_{nr}, a_{n\delta}, a_{nn2}, a_{nv2}$: 加減速運動時の特性定数

各船の特性定数は「SR175: 加減速時における操船性能に関する研究」において使用された船長が300m、240m、150m、50mの針路安定船の値を用いることとした。各船に対する特定定数を(表 2-1)に示す。

以上の応答モデルを用いて、前述の最短時間制御則による調整時間と調整距離の関係を求めた結果を次に示す。

5分間の到着時刻調整を行うために必要とする必要最小調整距離(L_{min})を船長別に(図2-10)から(図2-13)に示す。横軸に初期船速(V_0)をとり、指定船速(V_p)をパラメータとして図示してある。

(図2-10)は50mの小型貨物船に対する計算結果であるが、初速が4m/sから6

m/sの範囲では、初期船速による差は少なく、全体的に約2000mの調整距離を必要としている。通過船速の増加に伴い必要調整距離はわずかながら増加することとなる。初速が4 m/s以下になると必要調整距離は急激に増加し始める。

(図2-11)は150m、(図2-12)は240m、(図2-13)は300m船に対する必要最小調整距離を示しているが、全体的傾向は50m船と同じである。ただし、船が大型化するに従い、加減速特性は劣化するので、必要最小距離も船長に伴い増加することとなる。又、船の大型化に伴い、初期船速と通過船速との組み合わせによる調整距離の差が顕著になってくる。特に初期船速に比べ通過船速が大きい場合、調整距離は、著しく増加することになる。

必要最小調整距離と初速、通過船速、船舶の加減速特性の関係について考察する。まず、初速が同一の場合、通過指定船速が増加すると、必要最小調整距離は増加することになるが、この関係を(図2-14a)を用いて考察する。(図2-14a)は横軸に時間、縦軸は速力を示している。本図において、 T_0 は初速 V_0 を持続した場合に交差部に到着する時刻である。これに対し、交差部通過時刻として T を指定され、かつ通過船速として V_{p1} あるいは V_{p2} を指定されたとする。

V_{p1} の指定に対して図のように T_1 より加減速操船を行う事により目的を達成出来るとする。この時の必要最小調整距離は $V_0 * (T_0 - T_1)$ で求められる。時間調整を行う時の航走距離も、当然これと同じであるが、その値は図では船速曲線の T_1 から T までの面積で示されることになる。この対応は、図において、 T_0 から T までに航走する距離が、 T_1 から T_0 まで初速以下の船速で航走するために残された距離に等しいことに対応している。

次に、指定通過船速が増加し、 V_{p2} の場合を考える。通過船速の増加に伴い速力曲線は図に示すように上方へ移動することになる。前述の内容から判るように、 T_0 から T までの航走距離に対応する距離を T_0 以前に減速によって残す必要がある。このためには、減速開始時期を T_1 より早い T_2 にする必要が生ずる。したがって、必要最小調整距離は、 $V_0 * (T_2 - T_0)$ となり、通過船速が V_{p1} から V_{p2} に増加することによって、必要最小調整距離

は $V_0 * (T_1 - T_2)$ 、増加することとなる。

以上の説明からも理解出来るように、調整距離の増加は、加減速に伴う速度曲線の形に依存することとなる。加速が短時間で行われる小型船の場合には、通過速度の違いによって生ずる航走距離の差は小さく、従って調整距離の増加は少ないこととなる。逆に加減速特性の劣る大型船では通過船速の変化に伴う調整距離の変化は著しいものとなる。

次に、通過船速が同一の場合で、初速が異なる場合について（図 2-14 b）を用いて考察する。図の概要は（図 2-14 a）と同様であるが、初速 V_{01} と V_{02} の場合について考えることとなる。時間・速力調整のために必要とする速力曲線において、 T_0 から T までの航走距離が、減速開始から T_0 までの航走距離と初速のまま航走する距離の差に等しい事も（図 2-14 a）と同様である。（図 2-14 b）より判る様に、初速が V_{02} の場合には、初速の大きな V_{01} の場合に比べ、減速の効果が少ないために、早期から調整を開始する必要が生ずる。時間的に早期であっても、初速が小さいので必ずしも調整距離が増加するとは限らない。この事は（図 2-10）等で、一定範囲の初速の範囲では調整距離が変化していないことと対応している。しかし、初速がその範囲より低い場合には、プロペラ遊転による減速率は著しく小さくなり、所定の航走距離を残すためには、長い距離を航走する必要が生ずることとなる。初期船速が低いほど、船速低下の効果は少なく、従って、一定の航走距離によって得られる調整時間量は小さくなる。例えば、初速 2.5 m/s の場合には、これ以下の船速低下は不可能であることから、到着時刻を遅らすことは出来ないこととなる。

（図 2-15）は船長（ L ）を横軸にとり、船長による L_{\min} の相違を示したものである。指定通過船速（ VP ）が小さいときは、船長による相違は顕著でないが、 VP が大きくなると大変大きな差が生じ、船型の違いにより必要調整距離は 2 倍以上の差に達することになる。

また、 L_{\min} の計算結果は、調整時間が増大したとき増加するが、その傾向は、線型的であり、急激な上昇はない。これは、一定時間以上の時間調整では、船速一定の時間、即ち、

増速時は該当船の最大速力、減速時では $2 \cdot 5 \text{ m/s}$ を保つ時間が増加するためである。このように、調整の方法が決ってくるために、調整に必要とする航走距離も線型的に変化することとなる。

以上の議論により、調整距離と初期船速、通過船速、船の特性の関係が明かとなった。結果を要約すると次のようになる。

- 1) 指定通過船速が大きくなると必要最小調整距離 (L_{\min}) は増える。
- 2) 初期船速 (V_o) が指定通過船速 (V_p) に比べて小さいと (L_{\min}) は激増する。
- 3) 船型の影響は指定通過船速 (V_p) が大きいとき顕著となり、大型船においては初速 (V_o) に対して指定通過船速が大きい場合、必要最小調整距離は著しく増加する。

第四節 操船シミュレータによる時間調整操船実験

(1) 実験の目的と方法

前節までの議論により、時間調整の方法、即ち、制御則として最短時間制御則を考えることにより、必要調整距離に一つの指標を設定することができた。

本節においては、最短時間制御則による操船方法が人間による実際の操船方法に比べ、妥当なものである事を検証すると共に、実際の操船においては、調整距離として計算値の何倍位の余裕が必要であるかを求めることとする。

操船実験は、三種の船型、船長50mの小型貨物船、船長150mの大型貨物船、船長300mの大型タンカーを対象とし、時間調整量を5分として行った。最短時間制御則による時間調整の性能は、前節において示した(図2-10)から(図2-13)の通りである。

操船目標は、指定された時間調整を与えられた調整距離を航走する過程で達成するとともに、交差点通過時点で、指定速力を保つことである。調整の難易度は、初速と指定船速の組合せにより変化することが前述の最短時間制御則による計算結果よりも判断できる。そこで、実験は、小型貨物船と大型貨物船については、初速、3・0m/s、4・5m/s、6・3m/sで指定通過船速3・5m/s、4・5m/s、5・5m/sの組合せ、大型タンカーでは、初速、3・6m/s、4・8m/s、6・0m/s、指定通過船速3・5m/s、4・5m/s、5・5m/s、の組合せについて各船毎に計9ケースについて行なった。

以上の操船目標に対し、時間・速力の調整のために航走する距離を種々変化して操船目標の達成度を評価することになる。調整距離は、最短時間制御則により得られる値を基準として、この値の何倍かの調整距離とすることにより、調整の余裕を変化して必要余裕度を求めることとする。

実験に使用した操船シミュレータは、船舶の操縦性能と操船者特性との関係を研究するために制作されたものであり、詳細は本論文の付録として、末尾に掲載している。

操船実験において、操船者は、船橋模型内において操船を行い、入力情報は、船橋内の通

常の航海計器（コンパス、速力計、プロペラ回転計、時計等）の他に、スクリーン上に投影された交差部位置を示すブイの映像とX-Yレコーダに記録される時間ベースの航程の変化（図2-6）と相当する）を情報源として操船している。X-Yレコーダの記録図には、通過指定時刻と指定船速を示す指定状態が、ガイド・ラインとして示されており、操船は、船の状態をこれに合わせるようにするとともに、時計の指示から通過時刻の調整をしている。

（2）操船実験結果

交差部通過時の指定時刻、指定船速に対する操船結果の誤差量を（図2-16）から（図2-18）に示す。横軸は、調整距離を制御則によって得られた L_{min} に対する余裕の割合として示している。 d が前節において示した最短時間制御により時間調整を行うとき必要となる必要最小調整距離を示している。実験は、この距離の1・2倍、1・5倍、2倍の距離を調整距離として時間調整を行っている。2・0 d は、必要最小調整距離の2倍の調整距離を用いて時間調整を行った場合を示している。

各図の左図は、指定通過船速 V_p に対して実験で得られた通過速度誤差（ ε_v ）を示している。又、各図の右図は指定通過時刻に対する時刻誤差（ ε_t ）を示している。

また、初期船速（ V_o ）と指定通過船速（ V_p ）の組み合わせの違いはシンボル・マークの違いで示している。

実験結果を要約すると次の通りである。

- 1) どの船長の船の場合も、通過時刻の精度は、調整距離の増加に従い向上している。通過速度の精度は、今回の実験範囲では、調整距離の影響は明かではない。
- 2) 通過時刻の誤差量は、船が大型化するに従い増大している。
- 3) 初期船速と指定通過船速の組合せの違いは、時刻誤差、速度誤差には特定の傾向を示さない。

調整距離の影響が交差部通過時の速度精度に表れていない1)の理由としては、一つには、

速度変化を読み取りにくいこと、そして第二の理由は、目的船速に対応する機関操作位置がないために、一度ガイド・ライン上に乗った後、目的船速付近で振動しながら、交差部を通過しているためである。

次に、各船の調整距離に対する時間調整の誤差を見ると、船が大型化するほど一定誤差内に収束するために大きな調整距離を必要としている。これは、船の応答の速さの違いが操船者の判断、予測の精度を左右しているためと思われる。即ち、大型船では、操作に対し、船の応答は緩慢であり、操作のタイミングを正確にとらえることが困難になってくる。このために、船の大型化は計算値に対し、より大きな調整距離の余裕を必要とすることになり、機械特性とは別のヒューマン・ファクターとして理解できる。

調整距離の増加に伴い、通過時刻誤差は、次第に減少し、50m、150mの船では、 L_{min} の1.5倍以上になると、通過時刻誤差が一定量（約4秒）に収束し、調整距離をこれ以上増加しても誤差はこれ以上改善しなくなる。この傾向は、300mの船でも現れ、 L_{min} の2倍の調整距離以上で、ほぼ一定の誤差量を示している。

また、3)の結果が得られたことは、本論に設定した制御則が、現実の操船の特性をよく代表していることを表現していることを示すものである。即ち、5分通過時刻を早めるために、一旦初速より速度を増し、その後指定船速に減速する場合と、5分通過時刻を遅らすために、先ず速力を減じ、その後指定船速へ増速する場合を比較するとき、船の特性は、当然異なるために計算による最少必要調整距離は、異なった値を示す。しかし、人間が操縦する時に必要とする調整距離は、各条件によって得られた計算値に対し、同一の割合の余裕が与えられればよいこととなる。結局、船の特性の違いは、計算段階において反映されているので、人間の操作にかかわる部分は、余裕の与え方という考えかたで整理出来ることが明らかになった。そして、必要とする操船上の余裕は、50m、150m船で計算値の1.5倍、300m船で1.5倍から2.0倍の調整距離となることが明らかとなった。

(3) 必要調整距離に対する考察

操船実験により、通過時刻の精度は計算値に対して調整距離の余裕が増すほど向上することが明らかとなった。そして、この調整距離の影響は時間調整の過程を見ると一層明らかとなる。

時間調整の過程を船速と位置誤差の位相面にプロットしたものが(図2-19)、(図2-20)の各a図、これに対応する時間ベースの航程図が各b図である。

a図中の破線は各初期状態から位置誤差、速度誤差を最短時間制御により調整する場合を示している。図中、○印は、操船目標を達成するために与えられた調整距離が最短時間制御則により得られる必要調整距離(L_{min})の2倍ある場合で、今回の実験で最も調整余裕のある場合である。●印は、調整距離が計算値(L_{min})の1.5倍であり、△は、1.2倍である。調整距離の余裕が減少し、計算値の1.2倍となると最短制御則による操船を示す曲線とほぼ一致し、操船上の自由度がほとんどなくなっていることがわかる。調整距離に余裕がある場合は、時間調整のための速力変化も小さく、計算で仮定した最低船速2.5m/sまでの減速を必要としなくなる。以上のように、加減速操船の基本は、本論で仮定したBang-Bang制御であることが確認された。しかし、理想的な最短時間制御を行うことは、人間には当然不可能である。このために、余裕のある場合は、運動を限界まで発達させることなく、操作切り換えタイミングの誤差による目標の誤差の発生を小さくするように操作することが明かとなった。

以上のことから、本論文で仮定した制御則は、操船者の制御則に対し無理のない、妥当な仮定であると言えるであろう。

最後に、今回得られた操船結果は、今回の実験で操船者に示された情報が提供されている場合であることは注意しておく必要がある。情報の違いによっても、操船の結果は大きく変わることも事実である。実験において提示したX-Yレコーダの記録は、その時々々の航程、時刻、速度等の情報を示すばかりでなく、船の運動の変化を連続的に示し、未来の運動を予測しやすくしている。この点からも、X-Yレコーダの記録は操船者にとって、

かなり上質の情報ということになる。今後、実際の操船の場で、今回の実験のような操船が要求された場合、X-Yレコーダの情報に対応するものがどのような形で操船者（船側）に供給されるかは注意する必要があるだろう。

以上の点から、時間調整のために必要な調整距離の大きさを、調整量の誤差と操船上の余裕の両面から判断すると次の様に言えるであろう。

今回の実験状態と同等の情報が得られるならば、50m、150m、の船では、計算値の1.5倍、300mの大型船では、1.5-2倍以上の調整距離があれば、定点定時定期通過の使命を高い精度で、余裕を持って達成できることが明らかとなった。

第五節 むすび

本章においては、交通管理の方法と船の性能との基本的な相互関係について言及した。そして、管理方法と船の性能との間には次のような重要な関わりがあることが明らかとなった。

本章で得られた項目を列挙すると次の通りである。

- (1) 船舶が連続する交差点を通過するとき、交差点が時間分割使用の交通管理が行われている場合、船舶は各交差点の通行時刻が割り当てられることとなる。その時、この管理方式においては、通過時刻だけでなく、本論で示した理由により、通過速度の特定化も必須のこととなる。これにより、船舶は交差点を定時に定速で通過する操船を必要とすることとなる。本論では、これを定点定時定速通過モデルと表現した。
- (2) 定点定時定速通過を達成するためには、航路上を航行しながら、加減速操船によって、時間、速力調整を行うこととなる。船の特性と操船方法によって、時間調整量に応じ、必要調整距離が決まる。管理側は、必要調整距離以上の調整距離を船側に与えねばならない。従って、調整距離の選定が管理方式と船の性能との接点となることが明らかとなった。
- (3) 時間・船速調整のために必要とする調整距離は、船の加減速特性、初速、交差点通過船速によって変化する。初速の小さい場合や通過船速の大きな場合は、調整距離は、増加し、この傾向は、大型船においてより顕著となる。
- (4) 必要調整距離の推定にあたり、仮定した最短時間制御則は、操船シミュレーション実験より操船者の加減速操船によく対応し、これにより求めた必要最少距離、 L_{min} は、必要調整距離の指標として有意義であることが明らかとなった。
- (5) 加減速操船をマン・マシン系の問題ととらえ、操船シミュレーション 実験を行った。その結果によれば、操船者による定点定時通過操船における必要調整距離は、

50m船、150m船で、必要最少距離 (L_{min}) の1.5倍、300m船で1.5-2.0倍の調整距離を必要とすることが明らかとなった。

L_{min} の計算結果をみると、船長240m以上の大型船では、初速に対して著しく大きな交差点通過船を指定した場合、大変大きな調整距離を必要とすることがわかる。交通管理側からみた場合、大型船の存在は管理を著しく困難にさせることになるが、何等かの予備管理を行い、管理区間内での加速をできるだけ要求しなくてもすむようにすれば、大型船の存在は、さほど問題にはならないと考えられる。この点に関しては4章で詳しく論ずることとなる。

第三章 管理下の交差点交通流の特性(1)

(シミュレーション技法と対象)

第一節 概説

前章の検討により、交差点通行に要する時間調整量と、調整を達成するために必要な調整距離の関係は、船舶の性能に応じて決定することが明らかとなった。交差点の航行管理を行う時、船舶には調整時間量に応じて必要な調整距離が与えられなければならないことになる。そして、どれほどの時間調整が必要になるかは、交通量、交差点の形状、管理方式等、多くの要因によって決ってくる。第四章では、この点について検討を行うこととなるが、本章では、このために開発したデジタル・シミュレーションの内容について説明を行うものである。

これに先立ち、本節では、デジタル・シミュレーションの目的とデジタル・シミュレーションが具備すべき要件について述べている。

本章 第二節では、デジタルシミュレーションにおいて設定する各種の条件について、次の項目ごとに説明をおこなう。

- (1) 航行船舶
- (2) 航路形状
- (3) 航行船と管理との関係
- (4) 航行条件

つづいて、第三節では、前述のシミュレータとして有すべき要件を考慮して作成したデジタル・シミュレーションの構成と特徴を述べる。

(1) デジタル・シミュレーションの目的

前章の検討により、航行船が交差点を通行するために行う時間調整の性能は船の動特性と深い関係があることが明らかとなった。達成できる時間調整量の大きさは、これを行うために与えられた航走距離によって決まってくるものであり、調整のために与えられた航走距離が長ければ、調整できる時間量も大きくなる。当然、加減速性能の優れた船は、劣る船より短い航走距離によって、所定の時間調整が可能となる。

このような特性を持つ船舶を対象として、交差点通行の交通管理を考えることが本論の目的である。管理を行うとき、まず考えねばならないことは、どの範囲を航行中の船舶を管理対象とするかという、管理域の設定が必要となる。先に述べたように、航行船は管理域に入域した時点で、交差点の通過時刻を指示されることとなる。航行船は指示された時刻に交差点へ到着するために、管理域内の交差点までの航路を航走しながら時間調整することとなり、管理域の大きさが調整距離に該当することとなる。管理側が要求する調整時間が大きければ、長い調整距離を確保する必要が生じ、管理域は広がる必要がある。

このように、調整距離は調整時間によって決まってくるものであり、調整時間は、交差点の交通状況によって変化するものである。そこで、調整時間に影響を与える要因について検討する必要がある。

調整時間は、交差点の空き時間帯の大小によって変化するものであるから、これに影響を与える要因としては、通行船舶数がある。そして、通行船の個々の船舶に着目すれば、船の大きさ、速力によって交差点を占有する時間帯は変化することになるので、航行船舶についても考える必要がある。又、交差点の形状が、交差か、合流かによっても、交差点使用航路の切り換え時のむだ時間の有無が決定する。この点から交差点の形状も同様に、交差点の空き時間の大きさを変化させる要因となる。一方、交差点の空き時間の大小とは基本的には異なるが、通行時刻の配分方式も調整時間に影響を与えることとなるるので、管理方式も重要な項目となる。以上の要因を列挙すると次の通りである。

- ① 通行船舶数
- ② 航行船種
- ③ 交差部の形状
- ④ 管理方式

以上の各要因により調整時間は変化することとなり、これに従い、調整距離を決定する必要がある。これら要因と調整距離との関係を求めることがデジタル・シミュレーションの目的である。

交差部の通行を窓口における処理と考えれば、待ち行列の問題として処理できる可能性がある。しかし後に述べるように、対象とする交通流のシミュレーションでは、窓口の予約による使用や、個々の船舶の動特性に基づく通行時刻の変更等の必要が生じる。さきに述べた待ち行列解析のために開発されたGPSは、この点に関し不十分である。そこでこれらの要求に柔軟に対応するためには、コンピュータ内で交通流を再現し、管理方法の規程にのっとり航行船が交差部を航行する処理を行う必要がある。このためには、前述の各要因の変化に応じて処理内容の変更が可能で、個々の航行船の動静を詳細に検討することが必要となる。この目的を達成するためには、次項の条件を満たすデジタル・シミュレーションを行う必要がある。

(2) デジタル・シミュレーションの有すべき条件

管理下の交差部通行船の状況を調査するためには、次の点が反映できるシミュレーションである必要がある。

① 管理方式の内容が表現できること。

交差部の船舶流を制御する管理方法は多様であり、計算機内で発生した個々の船舶が想定する管理方式に従い、交差部の使用、通過を行う必要がある。このためには、個々の船舶は単独に扱われ、かつ、管理基準による順番に従って交差部の通過時刻を付与されるものでなければならない。又、管理方式によっては連続する交差部を円滑に通行させるため

に、一定の基準に従い、意図的に通行時刻を遅らせることもあるので、この点も考慮されている必要がある。

② 船の動特性、船種が表現できること。(属性)

海上交通では、特に、通航船は多様であり、船種により速力制御特性は大幅に異なっている。又、船長、船速も陸上交通に比して、大変広い範囲に分布している。そして、これらの要因は交差点の管理効率を支配する重要な要因であり、海上交通の特殊性をもたらす原因となっているので、個々の特性が反映できるシミュレーションでなければならない。

③ 交差点形状が表現できること。

航行船は交差点を並行して進み、かつ、前後に縦列を作って航行することになる。このように航路交差点は、点ではなく、面積を有するものであり、船舶はどの時点で交差点内のどこに存在しているか把握できる必要がある。また、管理海域が広域化すると、交差点は単一であるばかりでなく、複数の交差点が連続することになる。連続する交差点を通行する船舶の状況が正確に把握できるシミュレーションであることが必要である。

④ 時間調整可能か不可能かの判定が可能であること。

航行船の許容できる調整時間は、調整距離、船の加減速性能により決定する。航行船に課せられる調整量が許容できるものであるか否かを判断出来るシミュレーションであることが必要である。

第二節 シミュレーションの設定条件

本節においては、第四章で検討するデジタル・シミュレーションの基本的な設定条件について述べる。

現実の航路交差点の交通状態は多種多様であるが、四章における検討方法は、主要な交差点形状について、先ず基準状態を設定し検討を行っている。続いて、交差点交通流の特性に影響を与える各種の要因を変化し、基準状態と比較、検討することにより、その要因のもつ意味と交通流への影響度を検討している。

本節では、主に基準状態におけるデジタル・シミュレーションの設定条件を述べるものである。

(1) 航行船舶

① 船種、船速

海上交通の特殊性は大きさ、性能が極端に異なる船舶が同一航路上に混在するところにある。シミュレーションでもこの点を考慮し、航行する船舶の種類は、船長240mの大型タンカー、船長150mの大型貨物船、船長50mの小型貨物船の三種で代表している。その船長、最高速力、発生割合は(表3-1)の通りとする。ここで、現実の海上交通における航行船種の割合をみると、東京港においては50m以下の船舶が全体の85%を占め、約250m以上の船舶は全体の3%以下となっている。東京港は他の港湾に比べ大型船の交通量が多いところではあるが、本論における150m船以上の船舶に対応する船舶の割合は全体の15%である。(参考文献、1) 本論で使用する航行船種の発生割合は、150m以上の船舶で30%であり、大型船の割合が大きく、交通状況としては苛酷であり、単純に通行隻数で評価する場合にはきわめて安全側の評価を行うこととなる。

② 船舶の管理域への到着時間間隔

各航路の船舶は、海上交通の実態観測に基づき管理域入口にボアソン到着するとし、平

均到着時間間隔は（表3-2）の五種の状態について検討を行う。

（2）航路形状（航路長、航路数、交差部配置）

本論では、代表的交差部形状として、十字、十字、井型の三種を取り上げている。十字交差部は交差部形状の基本であり、十字交差部は次に述べる管理方式の点から特異であり、十字交差部と異なる性質を示すものである。又、井形交差部は管理方式の点では、十字交差部と同類であるが、複雑な交差部形状の代表例として取り上げている。概要を（図3-1）、（図3-2）に示す。図において、DAは時間、速力を調整するための調整距離を表す。DCは交差部間距離を示す。航路の幅（B）はわが国の航路の基準とされている700mとする。

（3）航行船と管理との関係

デジタル・シミュレーションでは、各交差部の形状について、一定の管理域を設定し、交差部の航行管理を行った場合の交通流の特性を検討して行くこととなる。本論では、二種の管理方式を考えているが、航行船が管理側の指示する時間調整を実行できるか否かは、時間調整量と調整距離との関係によって決ってくる。そこで、調整の不可能な船の発生顕度を評価対象として検討を進めていくことになるが、本項では、以下、管理方式、評価の基準等について説明する。

① 管理方式

本論において想定している交差部航行管理の基本は、航行船に対し最小限の行動管理を行うことによって、交差部において異航路間の船舶相互の干渉をなくすることにある。そこで、交差部通行の時刻は、船側から申請することを基本とし、管理側は交差部の使用が重複した時、航行船の交差部到着時刻の変更を指示することとなる。管理側が交差部の使用時刻をどのような基準に従って船舶に割り当てるかは、管理の能率を決める上からも、ま

た、航行船の時間調整に伴う負担の面からも大変重要な点である。本論では、通行時刻の配分は不合理な点が少ない先着船優先方式を基準として考えることとする。先着船優先方式とは、管理域への到着が早い船から順に交差点使用時間帯を配分することである。

航行船は、管理域入口に到着した時点で初めて管理側へ交差点通行の予定時刻を申請する。管理側は先着船優先の基準に従い、交差点通行可能な時間帯を調べ、それを航行船へ指示することとなる。申請した時刻と指示された時刻に差がある場合は、船側は時間調整が必要となる。先に述べたように、必要とする時間調整が可能か否かは、調整距離によって決まることになるから、調整距離が小さい場合、必要とする時間調整が不可能な場合が発生する。このような状況も考慮し、本論では、次に示す、二種の管理方式を基本として考えている。

1. 単一交差点に対する先着船優先方式にもとづく単独管理

2. 連続交差点に対する先着船優先方式にもとづく系統式管理

1. は、交差点を使用する二航路上の船に対し、管理域に入域した順に、通行時間帯を配分する管理方式である。2. は、連続する交差点の間の航路長が短いために、初めの交差点を通過後、次の交差点のための管理域に入ってからでは所定の時間調整が不可能な場合について考えられる管理方式である。

系統式管理方式における通行時刻の配分方法について以下に述べる。

系統式管理の対象となる交差点形状としては、十字、あるいは、井形交差点が該当し、これらの交差点形状において、連続する二交差点が近接する形状が該当する。連続二交差点に対する通行時刻の配分は、先ず単独管理と同様に次の過程で決定する。交差点通行の優先順位は、管理域に到着する時刻により順位付けされ、管理側はその順位に従い交差点の空き時間帯を調べ、その中で調整時間が最小となる時間帯を該当船の第一交差点通過時刻とする。第二交差点通過時刻は、第一交差点から全速で第二交差点へ向かった場合を第二交差点最早到着時刻とし、第二交差点の空き時間帯を調べ、最も調整時間の短い通行時刻を求める方式をとる。船側は、管理域に到着時点 (t_0) で第一交差点通過時刻 (t_1) と

第二交差部通過時刻(t_2)、第一交差部通過速力(vp_1)、第二交差部通過速力(vp_2)を指示されることとなる。

(図 3-3)は、井型交差部(図 3-2)の交差部(crossing point c. p)①、④に関する通過時刻配分の一例である。横軸は時間の経過、縦軸は距離を各々示している。ただし、ここでは、説明の簡単化のために、通行船は全て一列をなし、並列航行はない状態を考える。シミュレーションにおいては、後述する通行レーンの決定に基づき、並列航行し、かつ、後述の追越し条件を満足する時は、同行船を追い越して航行することになる。

(図 3-3)において、交差部①は北行航路と西行航路が共用することになる。図で右上がりの船は北行航路を、右下がりの船は西行航路を示している。交差部において占有される時間帯は、船の前後に設定される閉塞領域全体が交差部通過に要する時間帯を示している。また、交差部④に示される③、⑧の船はこの交差部を共用する東行船の交差部占有時間帯を示している。

(図 3-3)において、優先順位②の西航船は①の北航船の通過後、交差部が完全に空になる時点を待って通行する(時間調整 τ_2 を要する)。優先順位④の北航船は③東航船の通過を待った後、全速で第二交差部、交差部①へ向かう。優先順位⑤の北航船は先行する④の船に追従し、第一、第二交差部を通行することとなる。

しかし、以上の方法により決定した時刻を交差部通過時刻として指示された場合、船側は、第二交差部通行の時間調整において、管理側の要求を満たせないことが起こる。

調整距離の短い第二の交差部において調整不能船を発生させない方法としては、第一、第二交差部間において必要とする調整時間を短縮すること、そして、一方では、船の調整できる調整時間量を増大させることが考えられる。後者の具体的方法としては、第二交差部の通行速力を減じることにより実現できる。これは、前章の検討結果より、同一の調整距離においては通過船速が小さいほど、時間調整量は増加することによっている。また、前者の方法としては、第一交差部の通行時刻を遅らせ、第一、第二交差部の通行時刻を接近させる方法が考えられる。第二交差部の通行速力を遅らす方法は、第二交差部の占有時

間が長大化してしまう点に問題がある。これに対し、第一交差部の通過時刻を遅らすことは、通過船速を低下させることなく実現できることも多くある。本論ではこの点に着目し、管理方式の改善を考えることとする。そして、この場合、第二交差部の通行可能時間を既知として第一交差部の通行時間を決める必要性から、第一、第二の交差部を一括して管理する必要が生ずる。この意味から、この管理方式を系統式管理方式と呼ぶこととする。

(図3-3)において北行船⑦は、時間調整無しで交差部④へ進入出来るが第二の交差部①において、先行する⑥のために、過大な時間調整を必要とする。この過大な調整量を減少させるために、第一交差部である④の通行時刻を遅らせることより第二交差部①のための調整時間を短縮出来ることになる。

系統式管理では、先ず第一交差部の通行時刻を求め、次に第二交差部の通行時刻を求めることとなる。第二交差部通行のために必要とする調整時間が、第一、第二交差部の交差部間距離に対して過大な場合、第一交差部の通行時刻を遅らすことになる。遅らす範囲は、第一交差部の通行時刻に対応する調整時間が、第一交差部手前の調整距離で達成出来る範囲内としている。もしこの範囲を越える場合は、第二交差部の通行のための調整不可能として取り扱うこととする。

②評価量の設定

デジタル・シミュレーションを行うことにより、各種の状況における交差部通行のための調整時間を得ることができる。これに第二章で得られた調整時間と調整距離との関係を適用することにより、与えられた航走距離では時間調整が不可能な船の発生を判断できることとなる。

本論では、このような船を時間調整不能船と呼び、その発生率を交差部通行における管理の状態の評価量とした。いかほどの発生率を許容限界とするかは、航行船の種類や管理域に配備される調整不能船に対する援助手段(曳船の数、種類)によって変化すると考えられる。なぜならば、いかに安全を見込んだ発生率を想定したとしても、極度に集中して船

が到着した場合には、調整不能船が発生してしまうことになる。この時、通常の操船方法で時間調整ができない船に対しては、管理側から、曳船等の補助を出さねばならないであろう。援助手段のいかんにより、許容できる調整不能船の発生率が決まることとなる。本論では、一つの基準として発生率が全通行隻数の0.1%以下となる時をその交差点容量と定義して議論を進めることとする。

(4) 航行条件

本項では、デジタル・シミュレーションにおいて設定している航行条件について述べる。

① 並列航行条件

同行船相互の航行の安全を確保するために必要な船間距離は、航路上を航行する船舶に対する航行調査結果に基づき、船の前方は船長の6.4倍、後方と左右は各々船長の1.6倍の閉塞領域を確保するものとする。これに基づいて各船の側方閉塞領域を計算すると、占有する左右の航路幅は、240m船で768m、150m船で480m、50m船で160mとなる。一方、航路幅700mの現実の航路においては、50m船長程度の船舶でも、四列並列航行するのはまれであるから、並列航行できる船舶の組合せは次の通りとする。

- 1) 240m船は、1船で航路全幅を占有する。
- 2) 150m船は、50m船1船と並列航行可能とする
- 3) 50m船同志は、3船まで並列航行可能とする。

即ち、各航路は、みかけ上、3レーンを有し、240m船は3レーン全幅を、150m船は中央のレーンと左右どちらか一つのレーンを占有することになる。

② 追越し条件

航行船は、航路上に自船の通行のために必要な可航幅がある時、自分の占有するレーン以外のレーン上の船舶の追越しを可能とする。

③ レーン変更

管理海域内の航路を航行中は、レーンの変更はしないものとする。

④ 使用航路の切り替え

交差部の使用航路を切り替えるときは、交差部を一時空にする。即ち、交差部を通行中の船舶全てが交差部を通過するまでは、他航路の船舶は、交差部への進入できないものとする。

⑤ 到着船速の分布

通常、船舶は海域に入ると、航海状態から Stand-by 状態となり、航海速力より一段低速の港内全速 (Maneuvering Full) で航行する。そして、特別の速力規制のない限り、港内全速で航行するのが普通である。本シミュレーションにおいても、各船は港内全速に対応する最高速力で管理海域に到着するものとする。従って、交差部通行のための時間調整は全て予定交差部通過時刻より遅らすこととなる。

ただし、系統式管理においては、第一交差部で全速以下に速力低下した場合は増速による時間調整もありうることとなる。

⑥ (通行レーン決定手順)

管理側は、管理域端部に次々に到着する通行船に対し、次の手順で通行レーンを決定するものとする。

- 1) 同行航路の各レーンの中で、先行船が最も早く交差部通行時間帯を占有しているレーン (最も早く通行可能なレーン) に通行レーンを、仮り決める。
- 2) 該当レーンにおいて、追越し禁止の条件のもとに、交差部の空き時間帯を調べ、その中で、調整時間が最小となる時間帯を該当船の交差部通過時刻とする。
- 3) 決定した交差部の通行時間帯が、他のレーンで許容できれば、他のレーンを通行レーンとして、最早通行可能レーンを後続船のためにあける。この操作により、後続する高速船や占有レーン数の少ない小型船は、追越しが可能となり、交差部容量が向上するとともに、交通流自体も現実的なものとなる。

⑦ 時間調整不能船の交差点通過方法

許容値以上の調整時間を課せられた船舶は、自船の運動特性、あるいは通常の操船者の制御方法では、時間調整が出来ないこととなる。これらの時間調整不能船に対しては、管理側の援助あるいは、小型船では航路外での旋回による時間調整等が考えられる。シミュレーションでは、これらの船舶は、航路内を必要とする速力で航行するとしているので、時には、 2.5 m/s 以下の速力で航行することもある。しかし交差点の通行速力は、最低値は、 2.5 m/s で航行するものとしている。又、これに追従する船舶も追越しが出来ない場合は、調整不能船と同様航路内では、 2.5 m/s 以下になるものとしている。

第三節 デジタル・シミュレーションの構成と特徴

(1) デジタル・シミュレーションの構成

本項では、管理下の交差点交通流の特性を検討するために開発したシミュレーションの構成を述べる。

① 条件設定部

条件設定として対象となるものは、交差点形状、各航路交通量であり、全て、シミュレーションの前処理段階でデータ、ファイルが作成される。航路数は最大10航路、交差点は最大9カ所設定可能である。また、各航路の交通量は、独立に、任意の平均発生率によるデータが作成できる。これらのデータ・ファイルは、シミュレーション実行時に指定することにより任意に選択することができる。

② 交通流シミュレーション部

シミュレーション部は、管理方式に応じて、個々の交差点を単独で管理する部分と系統的に管理する部分が選択できる。

③ 調整不能船判定部

航路体系によっては、航路毎に調整距離が異なり、それに対応して調整不能船か否かの判定基準は異なっている。本シミュレーションにおいては、同時に5種の調整距離に基づく判定が可能となっている。

④ 交通状況表示部

各航路、各交差点に対して、管理された結果の交差点の時間配分状況をディスプレイ画面上に表示する部分である。指定により、プロッタへ出力することも可能である。

⑤ シミュレーション結果の保存部

シミュレーションにより得られた各船の各交差点通行時刻、通行船速、使用レーン、また各交差点から見た交差点使用時間、使用航路等がデータ・ファイルとしてディスク上に保存される。

⑥ 交通状況解析部

シミュレーション結果として得られたデータ・ファイルを用いて、調整不能船の発生率、交差点通行後の交通流の特性等が解析できる。

(2) デジタル・シミュレーションの特徴

前述の構成からもわかるように、本シミュレーションには、次の特徴があり、本章の冒頭において述べたシミュレーションの具備すべき条件を満たすものである。

① 航路形状の系統的検討が可能である。

航路の長さ、交差点数は条件に基づいて任意に設定することが可能であるから、各要素を系統的に変化しその影響を検討することができる。

② シミュレーションは高速、高精度である。

交差点の空き時間の探索には、処理時間が長くなる場合がある。本シミュレーションでは、これを避けるために、空き時間のデータ管理の効率化を計っているので、所要時間は大幅に減少している。また、シミュレーションの精度の向上を期するために、一航路につき、2000隻の通行を達成するシミュレーション時間を確保している。

③ 各種の評価が可能である。

ディスプレイ画面上での表示やシミュレーション結果の各種項目のデータ・ファイルにより、管理状況の目視評価、統計的评价が可能である。また、シミュレーション対象となる三種の船舶に対し、管理下において必要とする調整時間と、その時の船の状態（初期船速、通過船速、調整距離毎）の可能調整時間量のデータと対応させて時間調整の可否を評価している。

第四章 管理下の交差部交通流の特性 (II)

(シミュレーション結果)

第一節 概説

本章では、各種の交通量、航行船舶、管理方式、交差部形状に対して交差部交通流の特性を調べることにする。前章で述べたシミュレーションを用いることにより、これら各種の状況における交差部通行のための調整時間を得る事ができる。これに、第二章で得られた調整時間と調整距離との関係を適用することにより、与えられた航走距離では時間調整が不可能な船の発生を判断できることとなる。

本論では、このような船を時間調整不能船とよび、その発生率を交差部通行における管理の評価量とした。いかほどの発生率をもってよしとするかは、前章で述べたように他の要因に左右されるところが多くある。本論では、一つの目安として、その発生率が全通行隻数の0.1%以下となる時を、その交差部の交通容量として、議論を進めることにする。従って、本論で研究対象とする交通流特性とは、各種の交通量、航行船舶、管理方式、交差部形状に対する船舶の調整時間量、調整不能船の発生率、交差部容量の変化などの特性を示すこととなる。

本章ではデジタル・シミュレーションを用いて、交通流特性とこれを決定する各種要因との関係を明らかにすることとなるが、先ず交差部形状を考えてみる。その形状は(図4-1)に示すように多種多様である。

(a)は、一方通行の二航路が交差するケースで、交差部形状の基本となるものである。本論ではこれを十字交差部と呼ぶことにする。

(b)は、一方通行の二航路が一つの航路へ合流して行くもので、合流部においては、十字交差部と同様な干渉が発生することになる。しかし、十字交差部のように、交差部を使用する航路が切り替わるとき、切り替えのための時間を必要としない点に相違がある。本論では、これを合流交差部と呼ぶことにする。

(c) は、極めて近接して平行した二航路を他の航路が横切るケースである。

これは平行する二つの交通流の方向を考えなければ、十字交差部の一種と考えることができる交差部である。

(d) は(c) に比べ、平行した二航路間の距離が大きい場合であるが、二つの交差部を独立に扱うには、交差部間距離の短い場合である。どれほどの交差部間距離をもって二つの交差部を独立で扱い得るかは後に議論するところであるが、ここでは、二つの交差部を系統的に取り扱うものとしてこれを取り上げ、**十字交差部**と呼ぶこととする。

(e) は、近接した二航路同士が互いに交差する形状をなすものであり、(c) と同じく交通流の方向を考えなければ、十字交差部の一種と考えることができる交差部である。

(f) は、(e) に比べ、各航路は離れているが、その距離が短かく、独立に扱うことのできない場合である。本論では、井型交差部と呼び複雑な交差部の一例として検討の対象とする。

本章では、これらの交差部形状の内、次の三種を検討対象とする。なお、前述(b)の合流交差部は、十字交差部の項に含んで検討している。

- ① 十字交差部
- ② 十字交差部
- ③ 井型交差部

交差部形状の他に、交差部容量を支配する要因として次の各項があげられる。

- ① 交通量
- ② 時間調整距離
- ③ 航行船種
- ④ 航行船の到着分布形状

本論では、先ず、各交差部形状ごとに、交差部容量を支配する上記要因の基準状態を設定し、各交差部の特性を検討する。続いて、各要因を変化して、その影響と特性を検討する手順を取っている。

(第二節)では、二航路交差部の交通流特性を検討し、

(第三節)では、十字交差部、

(第四節)では、井型交差部の交通流特性を検討している。

海上交通が、陸上交通の比べ、特異な点の一つは、大きさ、性能の大幅に異なる大、小の船が混在している点である。海上交通においては、大型船がしばしば管制の効率向上の障害となる。この点を改善する目的で、大型船に対する予備管理を考えた。(第五節)においては予備管理方法のあり方、効果について検討することになる。

以上の検討を通して、交差部容量は、各種要因をパラメータとして調整距離によって整理できることが明らかとなる。(第六節)は、本章で検討した結果に基づき、交差部容量とそれに必要な調整距離の関係をまとめている。

第二節 二航路交差部の交通流特性

二つの航路が交差する代表的な交差部形状としては、+字交差部と合流交差部があげられる。

交差部における交通流の特性を交差部が許容できる交通量、即ち交差部容量で評価するとき、交差部容量は、交差の形状、航行船種、航行船の到着時間分布、等によって変化すると考えられる。

一方、交差部には、航行可能な空き時間がある場合でも、その時間への調整が船側で不可能な場合には、その時間帯は、活用されないことになり、交差部容量には反映されないことになる。活用できるか否かは、調整できる時間によって決まるので、調整距離を交差部容量の一要因として取り上げる必要がある。

これ等の個々の要因について順に検討を進めるわけだが、個々の要因の影響度を明らかにするために、先ず基準状態を次のように設定する。

- 1) 交差部形状 : +字交差部
- 2) 航行船種 : 航行船の船長は240m, 150m, 50mの三種とし
その通行隻数比は、3 : 27 : 70とする。
- 3) 調整距離 : 交差する二航路において各航路上の船舶は、互いに等しい
長さの調整距離を与えられるとする。
- 4) 到着時間分布 : 管理域端部へ船舶の到着する時間分布はポアソン到着とする。
- 5) 両航路の通行隻数比 : 両航路上を航行する船舶の通行隻数比は1 : 1の
同量とする。

以上の基準状態に対する検討を先ず行い、つづいて次の各項について検討を進めることとする。

- ① 基準状態
- ② 通行隻数が不均等の場合
- ③ 合流交差の場合
- ④ 航行船種の内訳が異なる場合
- ⑤ 調整距離が二航路で異なる場合
- ⑥ 到着時間分布がポアソン到着でない場合

(1) 基準状態における交通流特性

基準状態におけるシミュレーション結果を(図 4-2)に示す。本図は、一日当り一航路交通量をパラメータとして、調整距離と時間調整不能船発生率の関係を示している。航行船の調整時間は交差部の空き時間率によって変化するが、空き時間は航行密度と航行船速によって決定するものである。(図 4-3)は調整距離6000mにおける交差部通過のための調整時間を船型別に平均した値を示している。本図からも判るように調整時間は大型船ほど大きく、その変化は、航行隻数の増加に対し線形的に増加するものでなく、隻数の増加にともない急激に増加する傾向を示すことになる。そして増加の傾向は大型船ほど著しいものになる。

一方、各航行密度に対する調整不能船の発生率を(図 4-2)における調整距離6000mの条件より見ると一日当り航行量が一航路あたり90隻の状態では調整不能船発生率はほぼ0.1%であり、これ以上交通量が増加すると急激に増加する傾向を示すことになる。これらの原因は交通量の増加に従い調整時間が増加し始めるが、交通量が比較的少ないうちは交差部通行船速もほぼ各航行船の原速で通行することになる。しかし、さらに交通量が増加すると調整時間は増加し、交差部通行船速はしだいに低下し始めることになる。特に大型船では、自船の占有すべきレーン数が大きいために十分なレーン数を確保するために、通行可能な時間帯を見いだす事が困難になる。このために大型船ほど調整時間

は急増し、時間調整が不可能な状況に陥り易くなる。

以上の通り、調整時間は交通量の増加と、これに伴う船速低下により急増することとなり、時間調整不能船の数は交通量増加に対し急増する傾向を示す。

(図 4-2)より、調整距離に対する調整不能船の発生率の変化は、調整距離の短い範囲では、大変大きな変化をするが、6000m以上になると変化はゆるやかとなる。そして、今回対象とした交通量では、6000mから8000mの範囲で調整不能船の発生率は0.1%以下となることが明らかとなり、交差部容量に対応する調整距離を得ることができた。

(2) 二航路の交通量が異なる場合の交通流特性

交差部の全通航船数(NCP)をパラメータとし、二航路の通航船数を变化した場合の調整不能船発生率を求めたものが(図 4-4)である。調整距離を6000mとし、二航路の通航密度の比を横軸に示している。シミュレーション結果によると、交通量比により不能船の発生率は変化することが明らかとなった。

(図 4-4)によると、通航船数が多い場合は、通航密度比の影響は顕著のものとなる。二航路の密度が等しい場合が最も多く調整不能船が発生し、密度比の増加に対応して、発生率は減少することとなる。これは、交差部の空き時間が、交差部の使用時間によってのみ決まるのではなく、交差部の使用航路の切り替え回数の増減にも依存している事を示すものである。即ち、交差部の使用航路が変わるとき、交差部を一時的に空にするための切り替え時間が存在する。切り替え回数の多い二航路同密度の場合が最も多く、その影響を受けることとなる。特に、この傾向は交通量が多く、密度比が1に近づくに従い顕著となる。その理由は交通量の増加に伴い、通行船速が低下し、切り替えの時間が長くなるためである。

これに対し、調整不能船の発生率の小さい場合は、通航速度が高いためにその影響が少ないことと、元々の発生率が小さいことから航行密度比に対する調整不能船の発生率は緩

やかな変化を示すこととなる。

結論として、交差点通行隻数を一定とした場合、二航路の交通量が等しい時、調整不能船の発生率は最大となるので、この時の交差点交通量によって交差点容量を決定することは、最も安全側の評価であり、基本的な評価方法として有用な方法と考えられる。しかし、交通量が多い場合、調整不能船の発生率は、航行密度比による差が大きくなるので、密度比に応じた交差点容量を求めることが必要である。調整不能船は密度比に対応して一定の傾向で減少することになるので、(図4-4)を利用することにより大略の交差点容量を推定することができる。

(3) 合流交差点における調整不能船発生率

合流交差点における交通流と十字交差点における交通流の違いは次の点にある。第三章で述べたように、十字交差点の場合、交差点の使用が一方の航路上の船から他方の航路上の船に切り替わるとき、同時に交差点内に別の方向へ進む船が存在することは避けねばならない。このために十字交差点では、既に使用している航路上の船がすべて交差点を出た後に、別の航路上の船が交差点へ進入することとしている。

これに対し、合流交差点の場合、先に交差点を使用している船が別の航路から交差点へ進入している船であっても、後続する船は針路が交差することなく交差点へ進入し、この船に追従して航行することが可能である。交差点内での航行は同航船に対する追従航行と同様となる。合流交差点では交差点の使用航路切り替えのムダ時間がないために交差点容量は増加すると考えられる。特に十字交差点において、最後に交差点を通行している船の速力が小さい場合、航路切り替え時間が長くなり、他方の航路上の船は長い時間待ち状態となるので、調整不能船の発生率は増加することになる。本項の検討により航路切り替えのための時間の重要性を知ることがとができる。

シミュレーション結果を(図4-5)に示す。十字交差点の調整不能船の発生率と比較すると次のことが言える、

- ① 交差部交通隻数が一日当り420隻の場合、調整不能船発生率は約3/20に減少する。
- ② 交差部交通隻数が一日当り180隻の場合、調整不能船発生率は約1/8に減少する。
- ③ 交差部交通隻数が一日当り420隻の場合、調整不能船発生率は0.1%となる調整距離は7600mから4600mへと減少する。
- ④ 交差部交通隻数が一日当り180隻の場合、調整不能船発生率は0.1%となる調整距離は6000mから4000mへと減少する。

以上のことから、調整不能船の発生率は交通量に対応して約1/7から1/8間に減少をすることが明らかになった。そして、合流交差部の交差部容量は十字交差部に比べ大幅に増加し、同一の交通量に対して、必要調整距離は十字交差部の約2/3に減少することが明らかとなった。

(4) 航行船種の混合率が異なる場合の交通流特性

(図 4-6) は、航行船種の構成内容が交差部容量に与える影響を調べる目的で行われたシミュレーション結果であり調整距離2000mにおける交差部交通量に対する調整不能船発生率を示している。図中SMLは50m船、150m船、240m船の各船の交通隻数が70:27:3の割合で航行することを、SMは50m、150m船が80:20の割合で航行する場合を示している。Sは全船が50m船の場合である。

ここで、全船が50m船である場合を1とし、占有面積換算でSM、SMLの状態を比較すると次のようになる。占有面積の換算は次式の定義で行うこととする。

$$S' = \sum \{ (L_i * N_i) * \rho_i * S / (L * N) \} \quad (i = 1, 3) \quad (4-1)$$

ここに、

S' : 換算占有面積

L, N : 換算基準の船舶の長さ航行必要レーン数

L_i, N_i : 換算対象の船舶の長さ と 航行必要レーン数

ρ_i : 換算対象の船舶の全体に対する隻数割合

S : 換算基準の占有面積

換算基準の船舶の長さを50mとして、定義に従いSML、SMの各ケースの換算占有面積をもとめると、次のようになる。

1) SMLのケース

$$\begin{aligned} S' &= \{(50 \times 1) \times 0.7/50 + (150 \times 2) \times 0.27/50 + (240 \times 3) \times 0.03/50\} \times 50 \\ &= 2.75 \times 50 \end{aligned}$$

2) SMのケース

$$\begin{aligned} S' &= \{(50 \times 1) \times 0.8/50 + (150 \times 2) \times 0.2/50\} \times 50 \\ &= 2.0 \times 50 \end{aligned}$$

3) Sのケース

$$\begin{aligned} S' &= \{(50 \times 1) \times 1/50\} \times 50 \\ &= 1 \times 50 \end{aligned}$$

よって、SM、SMLの各ケースにおける通行船の占有面積は全船50m船のケースに対し、それぞれ、2、2.75倍となる。図中、点線は、面積換算で同値の交通量の場合を結んだものである。交通量が少なく、不能船発生率の低い場合は、調整不能船発生率は面積換算による隻数とほぼ等しいことが判る。

これに対し、交通量の多い場合（図の右側部分）では、わずかではあるが、50m船の混合率が高いケースのほうが調整不能船の発生率は増加している。点線で結すばれる各点は前述の面積換算で等しい占有面積をしめしているの、同じ点線上では50m船の混合率が高い程、航行隻数は多いことになる。航行隻数が多くなれば交差部を占有する航路の切り替え回数も増加し、切り替えのためのムダ時間が増加する。このために、有効に使える時間が減少して、調整不能船が増加するものと考えられる。

以上のことから、調整不能船の発生率がごく小さい場合は、異なる船型に対して面積換算で通行隻数を求めることができると考えられる。

(5) 調整距離が異なる場合の交通流特性

一つの交差点へ進入する二つの航路の条件は異なることが一般である。そこで、本項においては、二航路の長さ、即ち管理海域の範囲が二航路に対して不均等になる場合の影響を検討することとする。

一例として基準状態における調整距離6000mの場合と比較する。比較するものは一方の航路の距離を6000m、他方の航路の調整距離を8000mとする。この時の、調整不能船発生率の状況を(図4-7)に示す。本図では、横軸に一日当りの交差点通行隻数をとっている。調整不能船発生率が0.1%となる交差点容量は、両航路同じ調整距離とする基準状態では180隻/日であり、調整距離が異なる場合で140隻/日と減少している。後者で調整不能船の発生率が増加する理由は次の事によっている。

管理側は、管理域端部に船が到着した時点で、そのとき登録されている航行船の通行状況に基づき、該当船に交差点通行時刻帯を指示することとなる。そのために、航路長の長い航路上の船は、短い航路上の船に比べ、交差点の通行予定時刻に対してより早期に管理側の登録対象になる。本例においても、航路長8000mの船が早期に交差点を占有し、航路長6000m上の船は、先に登録された通行時刻帯をはずして、交差点を占有する必要が生ずる。これにより短い航路上の船の調整時間は増加することとなる。さらに、調整距離が小さいために、許容できる調整時間が小さくなってしまう。このために、調整不能船の全ては、短い航路上の船となる結果が得られている。

航路長が6000m、10000mの不等距離の管理域の場合にもほぼ同様の結果となっている。

以上のことから、交差点通行の登録は、両航路を公平に扱うことが望ましく、扱わない場合は、一方の航路上の船の負担が増大することとなる。よって、十字交差点においては、

調整距離の長い航路を縮小し双方の調整距離を等しくした方が交差点容量は増加する場合がしばしば発生する。

なお、(図 4-7)において、通行量の多い状態では基準状態の方が調整不能船の発生率は高くなっている。この状態では、交通量の増加にともない、先航船が密集しているため、長短両航路上の船は双方とも常に先航船の空き時間帯を見いだす必要が生ずることとなる。そして、この時必要とする調整時間に対し、長い調整距離を有する航路上の船は許容できるので調整不能船の発生率はあまり増加しない。これに対し、基準状態では、両航路でほぼ同数の調整不能船が発生するので、発生率は上回ることとなる。

結論として、対象とする調整不能船発生率が0.1%以下に対しては、二航路の調整距離は等しくすることが望ましいこととなる。調整距離が不均等の場合にはその差の大小はあまり関係せず、交差点容量は調整距離が等しい場合に対し、約2割減することが判った。

(6) 到着時間分布と交通流特性

交通流における船舶の到着状況は、一般に、指数分布によって表現できるとされている。本論においても、船舶の到着時間間隔を指数分布により模擬し、これに連続する二船の間に船の閉塞領域に当たる時間間隔の修正をして用いている。一日の交通量が90隻、150隻、210隻の三状態における到着確率を(図4-8)に示す。

指数分布による到着状況は、同時到着の確率が高いため、船舶集中による一時的な混雑が発生し、管理上は、望ましい状況ではない。しかし、このような交通流も管理を受けることによって、次第に分布状況が変化する可能性がある。

(図4-9)に管理下の十字交差点を通過した後の船舶の通行時間間隔の分布を示す。本図は調整距離8000mの場合で全ての密度において調整不能船の発生が無い状態である。管理域への到着分布に比較すると、100秒以下と500秒付近の確率が上昇している。100秒以下における上昇は、航路切り替えを待っていた複数の船がほぼ同時に通行するためである。又500秒付近における上昇は、航路の平均的切り替え時間間隔にほぼ

該当する時間である。

分布の変形状況を、全体的に見ると到着時の分布に比較してわずかながら分布が一定値に集中する傾向を示している。一定の値に集中することは、到着間隔に規則性があり、管理の能率が向上する可能性を示すものである。

管理面から、到着分布の形状と、交差点の時間分割使用の効率との関係を考えることとする。本論では、平均到着率が同一で、しかも分布形状が異なる場合の交通流特性を検討することにした。この時の分布形状としてはアーラン分布を使用することが適当と考えられる。周知のように、アーラン分布はフェーズにより分布形状が変化し、 $K=1$ の時が指数分布、 $K=\infty$ の時が単一分布となる。

ここでは、分布形状が現実の交通流に近い範囲として $K=2$ 、 $K=5$ の場合について、検討を行うこととする。各状態における、船舶の発生状態を（図4-10）、（図4-11）に示す。 $K=2$ で、平均値付近への集中がわずかに見られ、 $K=5$ では、平均値付近への集中が顕著となる。このデータを用いて、調整距離6000mのケースについてシミュレーションを行った結果を（図4-12）に示す。

交通量が交差点当り、300隻以下の場合には、 K の増加に従い、調整不能船の発生率は、低下し、到着間隔を一定に保つ事の有効性が認められる。しかし、交通量が増加すると、調整不能船の発生傾向は逆転し、 K の増加と共に発生率は上昇することになる。これは、交差点における使用航路の切り替え回数の増加によるものである。交通量の少ないうちは、一隻の通行毎に交差点使用航路が切り替わるとしても、切り替え回数も少なくムダ時間が及ぼす影響は小さい。しかし交通量の増加による切り替え回数の増加は有効な通行可能時間を減少することとなる。交通量の多い場合は、一回の交差点使用時間帯に複数の船舶を同時に通行させる必要が高まることは、当然の事である。一日当り交差点交通量が330隻程度がその境界となることが判る。

これまでの検討をとりまとめると、交通流は、一定の規則を付ける事により、交差点容量を向上させることが出来る。しかし、使用航路の切り替えのムダ時間を増加させないた

めに、交通量の多いときは、同航路船を集中して通行させる配慮が必要である。交通流に一定の規則性を付加することは、実行上新たな調整距離の設定やその他の問題を含むことになるので、交通量が非常に多くならない限りは、不必要と考えられる。

しかし、一方では、管理を一度受けた船舶流は自然に、規則性を有することになるので、本論で対象とする指数分布形状は、連続した交差点に管理を行う場合には、安全側の値を推定しているものと考えられる。

第三節 十字交差部の交通流特性

本節においては、(図3-1)に示した十字形状の連続二交差部に対する管理下交通流の特性をのべる。

十字交差部が十字交差部と異なる点は、単に交差部が複数になったと云う事ではなく、管理方式の違いによって両者の交通流は異質であり、別個に取り扱う必要があるためである。ここで云う十字交差部における管理方式では、交差部を二回通過する船舶に対し、管理海域到着時点で二つの交差部通過時刻を同時に指示することになる。この意味から十字交差部の管理方式は前述の系統式管理方式が前提となる。二つの連続する交差部を系統的に管理することにより、船の性能や地形的条件(交差部間距離、時間調整距離)に見合った交差部通過時刻が指定されることとなる。

以下、本節では、交差部を二回通過する航路、即ち(図3-1)の上下を結ぶ航路を従航路と表現し、交差部を一回通る左右を結ぶ航路を主航路と表現する。

本節では先ず系統式管理の意義を検討し、つづいて、前節と同様に基準状態に対して関係要因の影響を検討して行くこととする。

基準状態を次のように設定する。

1. 交差部形状 : 連続する二つの交差部間の距離を DC とし、三つの航路の初めの交差部までの距離を調整距離とし、 DA で表し、 DA はすべて等しいとする。
2. 航行船種 : 前節と同様に航行船は大型船、中型船、小型船の三種からなりその比率は3:27:70とする。
3. 管理方式 : 主航路の船は前節と同様に最早通過を管理の基準とするが、従航路の船に対しては、第一、第二の交差部の通過時刻を系統的に決定することになるので必ずしも最早通過とはならない。
4. 系統式管理対象船: 従航路上の船全てを対象とする。

以上の基準状態に対する検討を行った後、次の各項について検討する。

- 航行船種の違いによる交通流特性
- 系統式管理を大型船に限定した場合の交通流特性

(1) 系統式管理の意義

本項では、系統式管理の特徴と意義について、**十字**交差部を用いて検討する。

十字交差部の交通流特性の検討結果からも判るように調整距離が短い場合には、交通量にしたがって調整不能船の数は著しく増加することとなる。しかし現実の海面においては、交差部の位置が近接している場合もある。二つの交差部が近接することによって、第二の交差部のための調整距離が十分にとれない場合に対する解決策として、前節で示した系統式管理を考えることとする。これは、第二の交差部において調整不能船を発生させない方法として、第一、第二交差部間において必要とする調整時間を短縮するために、第一交差部の通行時刻を遅らせ、第一、第二交差部の通行時刻を接近させる方法である。しかしこの場合、第二交差部の通行可能時間を既知として第一交差部の通行時間を決める必要性から、第一、第二の交差部を一括して管理することとなり、この意味から、この管理方式を系統式管理方式と呼ぶものである。

十字交差部において系統式管理を受けるのは従航路上の船舶である。系統式管理の意義は、二交差部をそれぞれ単独に管理した場合に発生する調整不能船の発生率と、二交差部に系統式管理を実施した時の発生率を比較すれば明かとなる。

先ず、各交差部における、各航路の登録条件を同等に設定する。これは、前節で示した「調整距離が等しくない場合、調整距離の長い航路上の船が早期に登録手続が行われ、優先権を得ることになる。」と云う事に対応する処理である。**十字**交差部では、全ての航路の調整距離を等しくした場合、従航路が2番目の交差部の通行時刻を登録するのは、(調整距離) + (交差部間距離)の地点にいる時点で行われる。これに対し、同じ交差部を使

用する主航路の船は管理域（調整距離）入口に到着した時点で登録を行う。この両者の登録時期の違いによる優先権の発生を解消して議論を進めることとする。

次の航路条件に対して検討を行う。

主航路の調整距離： 10000m

従航路の調整距離： 8000m

交差点間距離： 2000m

この条件により従航路の第二交差点に対する優先権は、第二交差点を通る主航路上の船と同等となる。この条件のもとに、第二交差点における従航路船の調整不能船発生率を求め、これと2000mの調整距離がある場合の十字交差点における調整不能船発生率とを比較する。以下にその結果を示す。

（系統式管理）

第二交差点における従航路船の調整不能船発生率

90隻/日の時 0.0%

120隻/日の時 0.03%

150隻/日の時 0.08%

180隻/日の時 0.15%

210隻/日の時 0.23%

（単独管理）

調整距離2000mとした場合の調整不能船発生率

90隻/日の時 10.6%

120隻/日の時 26.0%

150隻/日の時 30.0%

180隻/日の時 36.0%

210隻/日の時 40.0%

以上の通り、両者を比較すると調整不能船の発生率は、1/200以下に低下すること

となり、交差部間距離が小さいときには、系統式管理がはるかに有効であることが明かとなった。

(2) 基準状態における交通流特性

各航路の調整距離を等しく設定する基準状態において、交差部間距離を、2 km、4 km、6 km、と三種設定し、交通量、調整距離を変化して、交通流特性を検討した。交差部間距離 8 km 以上については十字交差部の結果から判るように、第二交差部に対して単独管理方式を行っても、今回対象とした交通量を許容できることから、検討対象から除外した。

各交差部間における調整距離と調整不能船発生率の関係を交差部交通量をパラメータとして(図 4-13 a)から(図 4-13 c)に示す。横軸は従航路の調整距離に当たる管理域入口から第一の交差部までの距離を示している。図中、実線は基準状態の場合を示している。又、破線は、主航路の調整距離を、従航路における調整距離と交差部間距離の和に等しくなるように設定した場合である。調整不能船の発生率は調整距離の増加に伴い、十字交差部の場合とほぼ同様に減少している。

基準状態について調整距離と交差部間距離の効果をみるために、一航路交通量 210 隻の場合について、調整不能船の内訳をみることにする。まず、交差部間距離が著しく短い、2 km の場合の調整距離と調整不能船発生率の関係を示したものが(図 4-14 a)である。調整不能船の内訳は従航路船の第二交差部におけるものと、第二交差部を通航する主航路上の船が大半を占めている。(図 4-14 a)より調整距離の増加により全体としての調整不能船発生率は減少するが、その理由は、従航路の第一交差部、主航路の第二交差部の調整不能船の発生が減少しているためであり、従航路の第二交差部の調整不能船発生率はあまり変化していないことがわかる。この事より、従航路上の船舶は系統式管理により十字交差部に比べ負担は大幅に改善されることとなるが、交差部間距離がきわめて短い場合は、第一交差部手前の調整距離の効果は直接的に表れないこととなる。ただし、

交差部間距離が長くなると調整距離の増加は十字交差部と同様な効果を示すこととなる。

一方、(図 4-14b)は、調整距離を6kmとした場合で、交差部間距離と調整不能船の発生率との関係を示している。調整距離が6kmと短いので調整不能船は著しく減少することはないが、交差部間距離が増加するに従い、交差部間において従航路船の可能な調整量が増加し、系統式管理により交差部間距離6kmでは第二交差部の不能船はなくなる。他方、交差部間距離の増加は、第二交差部を通行する主航路上の船に対して従航路上の船に比べ交差部間距離に相当する時間、登録が遅れ、交差部通行の優先権が低下する。このために、主航路上の船の不能船発生率は交差部間距離の増加に対して減少することなく、わずかに増加することとなる。

以上の理由により、(図 4-13)の交差部間距離が短い場合、調整距離の増加に対し、調整不能船の発生率の減少が、十字交差部における調整不能船の減少率に比較して緩やかなこと、又、基準状態では交差部間距離の増加は、従航路船には効果的であるが、主航路船では通行の優先度が低下するために、全体の調整不能船発生率は著しい減少を示さないことが判った。そして、調整距離も単独管理に比べ2-5km延長することとなる。

一方、登録時期の不均一を是正して行ったシミュレーション結果((図4-13)中破線で示されるもの)は、基準状態にたいし、上述の点が改善されるので交差部間距離の効果が顕著に現れている。しかし、この場合も第一交差部において従航路船の調整距離が、主航路船の調整距離に比べ短いので登録時間差の点から調整不能船が残存することとなる。さらに、第一交差部を通行する主航路の調整距離を従航路と同等にすれば、交差部交通流はより改善されることとなる。

管理域の大きさを決定するときには、海域の条件が常に存在することになるので、以上の点を考慮し、より最適な管理域の設定が必要である。

(3) 航行船種の混合率が異なる場合の交通流特性

航行船の船種の内訳が基準状態と異なる場合の交通流特性に対して、十字交差点の場合と同様に、航行船の内訳を変化した場合の、交通量と調整不能船発生率との関係を求めたものが(図 4-15)である。図は、調整距離6000m、交差点間距離2000mの交差点形状を対象としている。図中SMLは基準状態であり、50m船、150m船、240m船の混合率が70:27:3の状態を示している。又、SMは240mは無く、50m船、150m船が80:20の割合で航行する場合を示している。全船が50mの場合については、Sで示している。図中破線は、十字交差点の項で述べた面積換算による等価隻数の点を結んだものである。系統式管理が適用される十字交差点においても、十字交差点と同様に、調整不能船発生率の低い場合には、異なる船型に対して面積換算で通行隻数を求めることができることが確認された。

(4) 系統式管理を大型船に限定した場合の交通流特性

連続する二つの交差点が近接する場合に、系統式管理が有効である事は、前述の通りである。系統式管理が有効である理由は、第二交差点通過のために必要とする調整時間に対して調整距離としての交差点間距離が短い場合に、第一交差点以前の調整距離を時間調整に利用できるためであった。

ところで、必要とする調整時間に対応する調整距離は船型により異なっていることは(第二章、第三節、(3)必要最小調整距離)で述べた通りである。一定の調整時間に対しては、大型船程、調整距離は長くなる。第二交差点通航のための調整時間に対する調整距離が船型により異なり、交差点間距離が小型船に対しては十分であり、かつ、大型船に対しては不十分な場合がある。このような場合には、大型船のみを対象とした系統式管理が考えられる。これにより、小型船は単独管理となり、小型船の管理域を縮小することが可能となる。ただし、この場合小型船は各交差点毎の単独管理となるので、第二交差点において、大型船に対し登録時間差による通行優先権の低下が発生することとなる。本節では、

大型船のみを系統管理するときの効果と小型船への影響について検討を進めることとする。

十字交差部における各船種毎の調整不能船の内訳を（図4-16a）に示す。本図は調整距離2000mの場合で、調整不能船の合計は通航全船の31%である。図中折れ線は、調整不能船の中に占める各船種割合を表わしている。また、棒グラフは、各船種別の通航船数に対する各船種毎の調整不能船の発生率を示している。

（図4-16a）より、全調整不能船の中で、50m船と150m船が各々約48%を占め、240m船は5%を占めていることがわかる。しかし、各船種別の調整不能船の発生率を見ると、150m船、240m船は通航船の半分以上が調整不能船になっていることになる。

一方、（図4-16b）は、交差部間距離2000mの連続交差部に対し、全船系統式管理を実施した場合について示している。交差部形状は、第一交差部手前に主航路、従航路共に6000mの調整距離を有し、第二交差部を使用する主航路の調整距離は8000mとし、従航路船と交差部使用申請を同時期とし、優先権に差を生じないようにした場合である。図に示す調整不能船は従航路船の第二交差部におけるものである。全船に系統式管理を行うことによって、第二交差部における調整不能船の発生率は0.4%に減少している。そして、その内訳は150m、240mに若干あるが、大変小さな値である。

（図4-16c）は、同じ交差部形状に対し、大型船のみに系統式管理を実施した場合のものである。大型船としては150m船と240m船を対象とする。50m船は第二交差部に対しても独立の管理方式が適用されるので、2000mの調整距離になる。この場合当然、大型船の調整不能船の発生率は、低い値を示すが、小型船のそれは全船系統式に比べ、増加することとなる。しかし、その値は（図4-16a）に比べると低い値を示している。これは、大型船の調整不能船の発生が少ないために交差部の空き時間が増加していることによっている。そして、小型船の通行優先権の低下に伴う調整不能船発生率の増加は、極わずかであることが判る。これは優先権を有する大型船の数が少数であること、そして小型船の必要とする通行時間帯が出現頻度の高い短い空き時間であることによって

いる。

以上の通り、大型船のみを対象とした系統式管理でも近接二交差部に対する系統式管理の目的はかなりの範囲達成できることが明らかとなった。上述した交差部形状に対し、さらに調整距離を長くした場合の調整不能船発生率の変化を（図4-17）に示す。

大型船のみの系統式管理では、全船系統式管理の場合に比べ、調整不能船の発生率は増加するが、その差はわずかな範囲であり、調整距離の増加により無視できる範囲となる。

ただし、交差部間距離が極端に短く、2000m程度の場合には、第二交差部で従航路上の小型船が調整不能船となる。（図4-17）において、交差部交通量が300隻、420隻の曲線が0.1%以下に低下しないのはこのためである。

しかし、交差部間距離が4000m以上になると、今回対象とした全ての交通量において調整不能船の発生は0.1%以下とする調整距離が存在する。

以上、近接二交差部において、大型船のみの系統式管理を検討としたが、次の点が明らかとなった。

交差部間距離が小型船の必要とする調整距離を満たしている場合には、大型船のみの系統式管理により、二交差部の交通管理が全船系統時とほぼ同様に実施できる。その時の第一交差部手前の調整距離は、全船系統時とほぼ同等の距離である。現実の海上交通において全通航船に占める小型船の比率は85%以上であり、それらを系統式管理から外すことができる利点は大変大きいものと考えられる。

第四節 井型交差部の交通流特性

本項では、十字、井字に対して、交差部が複合している一例として、(図 3-2)の井型交差部に対する航行管理について考察する。

井型交差部が、十字、井字交差部と異なる点は、四つの交差部が比較的近接している点にある。このために、個々の交差部を独立に航行管理を施すと、第一交差部通過後の船舶は、第二交差部通行のための時間調整が短い交差部間距離では、不可能な状況になる場合が発生することがある。

実海面における航路体系では、後に示すように、複数にわたる交差部も、十字、井字の二種で分割整理できる場合が多い。しかし、稀に、四交差部接近の状況も起こることがある。

本項では、この様な交差部形状に対しても、本論で考えている系統式管理方式が拡張、利用できることを確認するため、井型交差部に対し、航行管理下の交通流に対し考察するものである。

一例として、交差部間距離が2000mの場合と4000mの場合の交差部形状に対し、調整距離を変化した場合の調整不能船発生率の変化を(図4-18)示す。管理は全船に対し系統式管理を行い、航行船種等は、井字交差部の標準状態と同一である。

調整不能船の発生率を比較すると、井型交差部の発生率は、井字交差部の基準状態に対し、約3倍から4倍の値となっている。これは全航路において登録時期に伴う優先権の発生により調整不能船の発生率が増加するためである。

いずれにしても、井型交差部のように近接した四交差部に対しても、交差部手前に一定の調整距離があれば、系統式管理により航行管理が可能であることが明かとなった。

第五節 予備管理

管理下の交通流を詳細に検討することによって、管理下の交通流特性が判明し交通流の問題点を改善することができる。特に、交差部通行に対し管理側から許容値以上の調整時間を要求される調整不能船の発生パターンを検討することは、交差部管理の障害を知り、改善の方法を見いだすために重要な手がかりとなる。

調整不能船の中でも、150m船や240m船のような大型船は占有するレーン数が多いので、大型船一隻が調整不能となると、後続する他の船舶は、追越しが不可能となり連続して調整不能船となる場合が多く発生する。一方、調整不能船の発生状況を見ると、大型船は、交差部通過のために長い時間を必要とするために、通過可能な時間帯の発生の出現を長時間待つこととなる。特に大型船が集中到着し、出現頻度の少ない長時間の空き時間を待つことは、著しい時間調整を必要とすることとなる。このために大型船が初めに調整不能船になり、長時間の時間調整のために速力は低下し、極低速で交差部を通行することとなる。そのために、交差部占有時間が長大化し、これに続く船がその影響を受けて、連鎖的に調整不能となるケースが多くみられる。交差部の航行容量を増加させるためには、大型船の調整不能船の発生を防ぐことが有効であると考えられる。このために大型船専用レーンの設定等、いくつかの方法が考えられるが、これらの方法では、集中して管理域に到着する小型船に対して、全く通行時間帯の配分が不可能になる場合が発生することや、大型船通行のために、逆に、全体の航行容量が減少することにもなり、有効な方法とは言えない。

通常の交通においては、船舶が集中し、平均値以上の船舶が数多く到着することは当然考えなければならない。この場合でも、小型船ばかりが集中する限りでは、並列航行等の能率を考えれば、残された余裕時間の範囲でかなりの部分まで対処可能であり、それほど問題とはならない。しかし、大型船が集中して到着した場合には、交差部通行の困難度は急激に増加する。

シミュレーションにおいても、大型船が通行不能船となるのは、一定時間には処理しきれない多くの大型船が集中して到着する場合が極めて多い。今、240mの大型船一隻は、占有面積で、50mの小型船で約15隻分に相当する。240m船の通行は、一時に、小型船15隻が集中して到着することに対応し、これは大変な混雑に相当する。このように一隻で多くの占有面積を必要とする大型船が短時間に集中して到着することは、交差点容量を超過し、調整不能船の発生を導くことになる。

そこで、本節では、大型船の集中到着を規制する予備管理の効果を検討する。

(予備管理の目的)

調整不能船発生の原因は、短時間に交差点容量を超える多くの船が集中到着することにある。集中到着を緩和し、交差点への到着を平均化することによって、調整不能船の発生を改善する。以上が予備管理の目的であり、このためには、管理域到着以前において、航行を規制し、管理域入口への到着時刻を予め調整する必要がある。

予備管理を大型船のみに限ることは、通信設備、その他の船舶の現状を考えた場合、極めて、現実的な方法であろう。予備管理対象の大型船としては、240mの大型タンカー、150mの大型貨物船を考えることとする。

(1) 予備管理の統計的考察

本論において採用しているように、船舶の到着はポアソン到着するものとして取り扱うことが一般的である。本論のシミュレーションにおいても、通行船の発生は各平均値に従い、指数分布により発生時刻を決定している。この時の単位時間当りの通行隻数は次式でも表現される。

$$P(X) = \frac{\lambda^x}{X!} \exp(-\lambda) \quad (4-2)$$

ここに、

$P(X)$: 単位時間に通行船が x 隻到着する確率

λ : 単位時間における平均到着隻数

また、通行船を大型船と小型船に二分して各々の平均到着隻数を用いて考える場合は、次式のように示すことが出来る。

$$P(X) = \sum \{ P(S, N) * P(L, X-N) \} \quad (4-3)$$

$$= \sum_{N=0}^X \left\{ \frac{\lambda_s^N}{N!} \exp(-\lambda_s) \frac{\lambda_l^{X-N}}{(X-N)!} \exp(-\lambda_l) \right\} \quad (4-4)$$

ここに、

$P(S, N)$: 小型船 N 隻が到着する確率

$P(L, X-N)$: 大型船 $(X-N)$ 隻が到着する確率

λ_s : 小型船の平均到着隻数

λ_l : 大型船の平均到着隻数

即ち、全体として X 隻到着する確率は、小型船が N 隻、大型船が $(X-N)$ 隻到着する確率を $N=0$ から、 $N=X$ までの全ての場合について合計したものに等しくなる訳である。

① 大型船に予備管理を行う場合の到着分布

大型船に対し、到着規制をする予備管理を実施する場合、大型船の到着はポアソン到着ではなくなるので、このときの到着確率は、(4-3)式における $P(L, X-N)$ が (4-4)式にはならず次のようになる。

今、予備管理として、単位時間に到着する大型船の到着隻数を1隻以下とする到着規制を行う場合を考える。単位時間に大型船が一隻到着する確率を λ_l とすると、大型船が一隻も到着しない確率は $(1-\lambda_l)$ となり、小型船、大型船が合計 X 隻到着する確率は

$$P(X) = \sum_{N=0}^X \{ P(S, N) * P(L, X-N) \} \quad (4-5)$$

$$= \exp(-\lambda_s) \left\{ \frac{\lambda_s^{X-1}}{(X-1)!} \lambda_l + \frac{\lambda_s^X}{X!} (1-\lambda_l) \right\}$$

(4-6)

となる。(4-6)括弧内の第一項が、小型船が $(X-1)$ 隻、大型船が1隻、計 X 隻到着する確率を示し、第二項は、小型船のみが X 隻到着し、大型船が到着しない場合の確率を示すことになる。

大型船の到着を1隻以下とする単位時間としては、船舶の航行密度に応じて設定することが妥当であろう。大型船の航行密度が大きい場合は、到着規制の時間間隔は小さくしなければならない。また、同一の航行密度においても、到着規制の時間間隔の大小により、大型船の負担が変化するとともに、全体の交通流の特性も変化することとなる。

以上の点から、本論では、各航行密度に対し、大型船のみの平均到着時間間隔を基準とし、その $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ 、 $4/4$ の時間を設定した場合の交通流特性を求めることとした。到着時間規制をこのように設定した場合、到着規制を受ける大型船の平均隻数は待ち行列理論より次式で近似される。

$$L(t) = \rho / (1 - \rho) \quad (4-7)$$

ここで ρ はトラフィック密度を示し、 λ/μ (=平均到着率/平均サービス率)で表される。今、 λ は大型船の平均到着率が該当し、 μ としては、到着規制時間間隔より算出されるサービス率が相当する

これより、四種の設定時間の内、 $4/4$ は現実的でないことがわかる。一方、各交通密度における大型船の平均到着時間は、大型船の混合率を30%、即ち、基準状態を考えると次のようになる。

$$T = (24 \times 3600) / (0.3 \times N) \quad (a)$$

ここに、

N : 一日の全通航隻数

また、規制時間を kT ($k = 1/4, 1/2, 3/4, 4/4$) とすると、各規制時間内に到着する平均到着率は次のようになる。

(予備管理がない場合、規制時間 (k T) 内に到着する船の平均到着確率)

$$\lambda = (N * k T) / (24 * 3600) = k / 0.3 \quad (b)$$

(予備管理がある場合、規制時間 (k T) に到着する小型船の平均到着確率)

$$\lambda_s = (0.7 N * k T) / (24 * 3600) = 7 k / 3 \quad (c)$$

(予備管理がある場合、規制時間 (k T) に到着する大型船の平均到着確率)

$$\lambda_l = (0.3 N * k T) / (24 * 3600) = k \quad (d)$$

となり、全通行隻数Nは残らず、各交通密度に対して、各々の規則時間内に到着する平均到着確率は同一となる。

これらの値を(4-4)、(4-6)に代入し、予備管理のある場合とない場合の規制時間内に到着する船舶数の分布を求めてたものが(図4-19a)から(図4-19d)である。

(図4-19)において、白ぬきの棒グラフは、通常のポアソン到着における到着確率((4-4)式)を示し、黒ぬりの棒グラフが大型船に到着規制する予備管理を行った場合の到着確率((4-6)式)を示している。

到着数のごく少ない範囲と多い範囲では、通常のポアソン到着の方が到着率は高く、予備管理を行う場合の到着確率は平均的な到着隻数前後で通常の到着確率を上回る結果となる。即ち、全通行船の30%を占める大型船の到着分布を均一化することにより全体の到着隻数は、ごく少ない船舶の到着する確率と集中的に多数の船が到着する確率が減少し、全体的に均一化する効果が生じることになる。そして、この傾向は規制時間が長い場合ほど顕著に現れている。

到着数の確率という形式で予備管理を見ると、(図4-19)のように、到着隻数の均一化という形で表現できることになる。しかし、(図4-19)でみる限り、その到着隻数の確率において、両者に著しい差は認められない。

② 大型船に予備管理を行う場合の面積換算による到着分布

予備管理の目的を再考してみると到着隻数の均一化もさることながら、大型船の占有面積の問題解決が重要であった。即ち、大型船一隻の交差部通過に必要とする占有面積は小型船の占有面積に比較すると、150m船で6隻、240m船で14・4隻分に相当することとなる。一隻で大きな占有面積を必要とする大型船の集中到着を緩和することが予備管理の目的である。従って、予備管理の効果は、単に到着隻数の比較のみでは十分でなく、単位時間に必要とする占有面積の均一化を議論する必要がある。予備管理によって、大きな占有時間を必要とする状態の発生確率を低減化することが出来れば、その目的が達成されたことになる。

当然のことながら、予備管理を行う場合でも、通行船隻数、船種内訳は、予備管理を行わない場合と同一である。従って、大きな占有面積を必要とする状態の発生確率が低下すれば、必然的に平均的な占有面積を必要とする状態の確率は増加することになる。即ち、発生確率は、平均的な占有面積付近に集中し、全体として、単位時間に必要とする占有面積が均一化されることになる。

以下、占有面積を50m船の場合を1として、各々の状態における到着確率について議論することとする。

予備管理のある場合の n 隻の到着確率は、(4-6)式に示したように、一隻の大型船と $(n-1)$ 隻の小型船の組合せの到着確率と n 隻全てが小型船の場合の到着確率の和として表現できた。今、その各到着確率を $P_{LS}(n)$ 、 $P_S(n)$ とすると大小合計 n 隻到着の確率 P は、

$$P(n) = P_S(n) + P_{LS}(n) \quad (4-8)$$

で表される。

この時、大型船の50m船に対する占有面積換算の係数を η とすると占有面積 n 隻が到着する発生確率 $P'(n)$ は、

$$P'(n) = P_s(n) \quad (n < \eta) \quad (4-9a)$$

$$= P_s(n) + P_{Ls}(1+n-\eta) \quad (n \geq \eta) \quad (4-9b)$$

ここに、

$$P_{Ls}(1+n-\eta) = P(S, n-\eta) P(L, 1)$$

$$= \frac{\lambda_s^{n-\eta}}{(n-\eta)!} \exp(-\lambda_s) \lambda_L \quad (4-10)$$

となる。

(4-9a)は、小型船のみでn隻面積を占める場合の確率であり、 $P_s(n)$ と表示する。また、(4-9b)は、n隻面積が大型船一隻の面積より広い場合であり、 $P_{Ls}(1+n-\eta)$ は(4-10)で表され、大型船一隻を含んで小型船n隻面積となることを意味し、この時の小型船数は $(n-\eta)$ 隻となる。よって、全到着隻数は、大型船一隻+小型船 $(n-\eta)$ 隻となり、合計 $(n+1-\eta)$ 隻の到着状態となる。これに、小型船ばかりn隻到着する確率 $P_s(n)$ を加えたものが到着確率となる。

即ち、占有面積が小型船n隻に相当する状態の発生確率は、小型船ばかりn隻到着する確率と、大型船1隻と小型船が $(n-\eta)$ 隻到着する場合の確率との和として表現できることになる。

今回の検討対象としている船種区別としては、大型船として2船種考えているので、大型船の50m船に対する平均換算係数 η は次式により得られる。

$$\lambda = 27/30 * 6 + 3/30 * 14, 4 = 6, 84 \quad (e)$$

大型船としては、150m船と、240m船とがあるが、この予備管理では、どちらの大型船が来るかは不確定であり、平均的に考えた場合、1隻の大型船の到着は、小型船約7隻が到着したものと考えることにする。

一方、大・小型船が混合して到着する予備管理のない場合の占有面積n隻が到着する確率は次式で示される。

$$\begin{aligned}
 P^*(n) &= \sum \{ P(S, I) * P(L, n-I) \} \\
 &= \sum_{I=0}^n \left\{ \frac{\lambda_s^I}{I!} \exp(-\lambda_s) \frac{\lambda_l^{n-I}}{(n-I)!} \exp(-\lambda_l) \right\} \quad (4-11)
 \end{aligned}$$

単位時間内に大型船が到着する隻数によって、占有面積 n 隻が到着する確率は、次のようにそれぞれ表される

$$\begin{aligned}
 P_1'(n) &= \frac{\lambda^n}{n!} \exp(-\lambda_s) \exp(-\lambda_l) \\
 &\quad (n < \eta) \quad (4-12a)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_2'(n) &= P_1'(n) + \frac{\lambda_s^{n-1} \lambda_l}{(n-1)!} \exp(-\lambda_s) \exp(-\lambda_l) \\
 &\quad (\eta \leq n < 2\eta) \quad (4-12b)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_3'(n) &= P_2' + \frac{\lambda_s^{n-2} \lambda_l^2}{(n-2)!} \exp(-\lambda_s) \frac{\lambda_l^2}{2!} \exp(-\lambda_l) \\
 &\quad (2\eta \leq n < 3\eta) \quad (4-12c)
 \end{aligned}$$

(4-12a) は、大型船一隻の占有面積 η 以下の占有面積が到着する確率を示めている。この場合は、大型船0隻到着で、小型船のみ n 隻到着する確率に当たる。

(4-12b) は、大型船一隻以上二隻までに相当する占有面積が到着する確率を示している。この場合は、二つのケースが考えられ、一つは、小型船のみで n 隻到着するケースで、もう一つのケースは大型船一隻と小型船 $(n-\eta)$ 隻到着するケースである。

第一項、第二項が各々のケースに対応する確率を表している。(4-12c) は、大型船二隻以上三隻までに相当する占有面積が到着する確率を示している。この場合は、三種

のケースが考えられ、小型船のみのケース、大型船一隻と小型船($n-\eta$)のケース、大型船二隻と小型船($n-2\eta$)の三種のケースである。各項が各々のケースに対応している。

(図 4-20 a) から (図 4-20 d) には、以上の考え方に基づき、占有面積が単位時間内に到着する確率分布を求めたものである。単位時間としては、前項と同様に大型船の平均到着時間間隔を基準として 4 種類を考えている。白ぬきの棒グラフが予備管理のない場合の到着分布であり、黒ぬりの棒グラフが予備管理を行った場合の到着分布を示している。

(図 4-20 a) は、 k を $1/4$ に設定した場合で、規制時間間隔の最も短い場合である。規制時間間隔が短いために、到着隻数の少ない 0 隻、1 隻の到着確率に集中している。7 隻から 16 隻の範囲は、到着船の内訳が全て船が小型船であるか、大型船 1 隻と小型船が 0 隻から 6 隻到着している場合となる。ただし、6 隻の到着の確率が極低率であることから、小型船のみで 6 隻以上の到着は極低率と考えてよく、7 隻以上の到着状態では、大型船が 1 隻以上到着していると考えることができる。予備管理を行う場合、時間内に 7 隻、8 隻分の占有面積を必要とする到着確率は 10% 前後あり、予備管理がない場合に比べ高率となっている。14 隻相当の到着する確率は、予備管理を行うとき無くなるが、予備管理を行わない場合には、2% から 3% の確率で発生し得ることとなる。

(図 4-20 b) , (図 4-20 c) は、 k の値を $1/2$ 、 $3/4$ 、と次第に到着規制の時間間隔を長くした場合である。(図 4-20 b) 以降は (図 4-20 a) に比し、縦軸のスケールが変わっているのに注意する必要がある。

到着規制時間間隔が長くなるに従い、到着隻数の少ない範囲 0-6 隻の到着確率は減少し、かわりに、多数の面積換算隻数が増加することとなる。

予備管理のない場合は、14 隻以上の到着が発生することとなるが、予備管理を行う場合は、14 隻以上の到着確率はほぼ 0% である。予備管理により、到着隻数の少ない範囲の確率と集中到着の確率の減少は、7 隻から 13 隻の範囲の発生確率の増加へと結びつく

こととなる。

以上のことから、予備管理を行うことは、管理域への到着隻数を時間的に平均化し、極端に到着隻数の少ない状態や多い状態を解消することとなる。

なお、予備管理としては、現実的には採用することはできないが、 $k=1$ の設定に対する到着確率を(4-20d)に示す。本図より、予備管理のない場合には、21隻以上の到着確率も5%以上の確率で存在することがわかる。

(2) シミュレーションによる予備管理の考察

本項では、前項の(予備管理の統計的考察)で述べた内容を予備管理として実行した場合の交通流特性を検討する。

管理域への到着時刻が管理側の基準により決定される形式は、現在でも、わが国、東京湾浦賀水道をはじめ、船舶の輻輳する航路への到着規制として行われている。この管理により、航行を限定された航路への大型船の集中到着を緩和し、航路航行の安全性向上に効果を上げている。このことから、大型船の予備管理は、十分現実的な方法であることがわかる。

一方、本論では、交差点での大型船の集中到着緩和を目的として、管理域への到着規制を行うことを考えている。本来的には、交差点への到着時刻を基準として、到着規制を行うことが目的に合うことになるが、大型船が管理域に到着後、管理域内の航路をどのような速力で航行し、交差点通過時刻として何時が割り当てられるかは、大型船が管理域へ到着以前に管理域に到着する小型船の状態によって変化してしまうことになる。

そこで、本論では、管理域到着時刻を基準として、大型船の到着規制を行う場合を考えることとする。これを実現するために、管理域入口において、大型船の到着予定時刻を一定時間毎に区切り、一定時間内に規定数以上の大型船が到着する船がある場合は、該当する大型船の到着を次の時間区画の先頭まで遅らす方法が考えられる。しかし、この方法で

は、区切られた連続する区間の切れ目の前後にそれぞれ大型船が配置されることもある。大型船の到着間隔を一定時間確保することが、予備管理の目的であることから、本論では、大型船の最小到着時間間隔を一定時間間隔以上離す予備管理を行うこととする。

最小到着時間間隔は、前項と同じに、各状態に置ける大型船の平均到着時間間隔の $1/4$ 、 $1/2$ 、 $3/4$ の3状態について検討を行った。以下、三種の交差点形状に対して予備管理を行った結果を示す。

① 十字交差点における予備管理

(図4-21)は、調整距離6000mの基準状態に対して予備管理の効果をみたものである。横軸に一日当りの交差点通行隻数を、縦軸には調整不能船発生率をとっている。予備管理のない状態に比べ、大型船の最小到着時間間隔が長くなるに従い(k の増加に従い)、調整不能船の発生率は低下し、改善されていることがわかる。このように、最小到着時間間隔が長くなれば、管理域内の航行は、円滑になるが、一方では、予備管理によって管理域への到着調整を行う船は増加することになる。今回対象とした最小到着時間間隔の中で、最も長い場合($k=3/4$)では、平均3隻の船が到着調整を行うことになるが、このあたりが上限と考えられる。

② 十字交差点における予備管理

(図4-22)は、調整距離8000m、交差点間距離2000mの基準状態に対して予備管理の効果をみたものである。この例では、最小到着時間間隔が平均到着時間間隔の $1/4$ で予備管理のない状態と調整不能船は概略等しい結果となっている。これは、この予備管理の基準を管理域入口での到着時間間隔としているために、交差点地点での両航路船の到着時間間隔に対しては効果を示しにくい点にあると考えられる。十字交差点の場合は、両航路船が干渉し合う機会が1回であるが、十字、井型交差点となり、二回の干渉を受ける状態ではこの点が顕在化してくるものと考えられる。いずれにしても、規制する時間間隔を長くすれば、このような状態は起こりづらくなるので、予備管理自体の効果は明らかといえる。

③ 井型交差部

(図4-23)は、調整距離8000m、交差部間距離2000mの井型交差部における予備管理の効果をみたものである。到着規制の時間間隔が短い場合には、十字交差部と同様、予備管理の効果は見られない。しかし、時間間隔を長くすることによって、予備管理の効果は明らかとなっている。

以上、三種の交差部について、予備管理の効果を検討してきた。予備管理による大型船の到着時間間隔の効果は、規制時間間隔が平均到着時間の $1/2$ ぐらいから明らかとなり、 $3/4$ になると調整不能船の発生率は、予備管理のない場合に比べ、大幅に減少することが明らかとなった。

第六節 調整距離と交差部容量

前節までの検討により、交差部での航行を円滑に管理できるか否かには多くの要因が関与していることが明かとなった。本論では、これらの各要因を一定の基準に従って設定した基準状態からの変化として取り扱ってきた。各要因の影響度は各節においてまとめているので、ここでは基準状態について全体を整理する。

管理によって交差部を通航させ得る船舶の数は、通行のために必要とする時間調整量に対して、調整距離が船舶に与えられているか否かにより決定する。そこで本節では、前節までに得られた結果より交差部容量と調整距離の関係を集めることとする。これは、次章における広域における交差部管理方式の検討において基本となる事項となる。

前節までは、交差部の交通流特性の評価量として調整不能船の発生率を取り上げてきた。調整不能船の発生率をどれほどに限定するかは、調整不能船に対する支援体勢や周囲の環境状態によっても変化するであろう。ここでは、議論は、そこまで広げずに、一つの目安として、調整不能船発生率が0.1%となる交差部交通量をもって交差部容量と定義することとする。

各交差部形状における基準状態での調整距離と交差部容量を(図4-24)から(図4-26)までに示す。

(図4-24)は、十字交差部、合流交差部に対する関係を示す。SMLは基準状態を示し、SML(Pre.)は予備管理付きの基準状態を示している。

(図4-25)は、交差部間距離が2000m、4000m、6000m、における十字交差部に対する関係を示す。全船を系統管理した場合と大型船のみを系統管理した場合の二種を示している。

(図4-26)は、交差部間距離が2000m、4000m、における井型交差部に対する関係を示している。

第七節 むすび

本節においては、管理下の交差点交通流の特性を支配する要因について、各交差点形状毎にその内容と交通流に与える特性を議論した。以下にその要点を列記する。

(1) 二航路交差点

- 1 十字交差点、合流交差点に対し調整距離と交差点容量との関係は、(図4-24)で示すことが出来た。
- 2 航行船の内訳が基準状態と異なる場合については、通航船の面積換算による換算隻数を用いることにより、基準状態へ換算が出来る。これにより、航行船種が異なる場合にも上述(図4-24)が利用出来る。
- 3 交差する二つの航路に交通量の差がある場合、調整不能船の発生率は両航路の交通量が同一の場合に最も大きくなる。従って、交差点容量として二航路の交通量が同一の場合の合計隻数で代表することは、最も安全側の評価であり、交差点交通流の評価方法として簡便かつ有用な方法である。
- 4 交差する二航路の調整距離が異なる場合、調整距離の短い航路は、調整可能な時間が短いことに加えて、登録時期が遅くなるために調整不能船を発生し易くなる。よって両航路の航路長は、同一とすることが望ましい。

(2) 十字交差点

- 1 系統式管理は、交差点間距離の短い航路形状において大変有効に機能することが明かとなった。
- 2 十字交差点の基準状態に対し、交差点間距離をパラメータとして調整距離と交差点容量との関係を(図4-25)で示すことが出来た。
- 3 航行船の内訳が基準状態と異なる場合については、十字交差点と同様に面積換算による換算隻数で整理できることが明かとなった。
- 4 短い交差点間によって発生する調整不能船は大型船に多いので、系統管理を

大型船にのみ適用することは有効である。大型船のみの系統式管理でも、小型船に与える影響は極わずかであり、全船系統管理の場合をほぼ同じ交差部容量を確保することが出来る。

(3) 井型交差部

- 1 複雑な交差部形状の一例として井型交差部に対して航行管理を適応した結果、本論で示す管理方式により管理可能であることが明かとなった。
- 2 交差部間距離をパラメータとして調整距離と交差部容量との関係を(図4-26)に示す。

(4) 大型船の集中到着を規制する予備管理

交差部管理において、大型船が短時間内に集中して到着した場合、交差部の容量を越えてしまうことがしばしば発生する。大型船の集中到着を防止するために管理域への到着時刻を予め規制する予備管制を提案した。検討結果によれば、大型船の最小到着時間間隔を、平均到着時間の $3/4$ とした場合、調整不能船の発生率は半減することが判った。

第五章 広域航路交差部管理のための検討

第一節 概説

前章までは、交差部管理を計画するとき、考慮すべき各要素について順次検討を進めてきた。第二章では、管理を受ける個々の船舶の動特性について、操船者と船の操縦特性を対象として検討を行った。その結果、管理下における船舶の動特性は、調整時間と調整距離との関係で表現できることが明かとなった。又、第四章では、交差部に交通管理を行う場合の船舶の交通流の特性について検討を行った。ここで交通流の特性とは、管理方法、管理域の範囲、航行船の条件等々が航行船に要求される調整時間量、交差部容量等へ与える効果を示している。四章の検討によって、これらの要因と交差部交通流の関係が明らかとなった。

本章では、これまでに得られた知識を統合化し、現実の航路に対して交差部管理を行うことを考えるものである。より一般的な状況に対しても、本論の適用範囲を広げる目的から、対象とする航路体系は複数の交差部を含む広域航路網を考え、その管理方法を検討することとする。

(本章・第二節 広域航路交差部管理方式の検討)では、次の項目を検討している。

本論の初めにも述べた交差部管理の目的に基づき、次の三点を考慮した管理方式を設計することを目的として検討を進める。

- 1 各交差部において、必要とされる交通容量を確保する。
- 2 航行船の負担を少なくする。
- 3 全ての船舶に合理的な航行管理を行うと共に、管理の負担を少なくし、信頼性をあげる。

以上の設計基準に従い、前章の検討結果から次に示す三種の管理方式が、実行上、可能性の高い方式として取り上げられている。

1 全船同等管理

交差部を通航する全ての船に対し、同一の管理域を設定し、全ての通航船は管理域へ到着した時点で、交差部通航時間帯が指示される。通航時間帯の割り振りは先着船優先で行われるので、船の大小に関係なく、全ての船舶は同等の通航権をもつこととなる。

2 予備管理付き大小船型別管理

通航船を小型船と大型船とに二分し、それぞれの船舶に対し別々の広さの管理域を設定する。各管理域の広さは、船の加減速性能に基づいて決定されるので、大型船の管理域は小型船のものより広域となる。さらに、交差部の使用を時間的に平均化させるために大型船に対しては管理域への到着規制となる予備管理を併用する。

3 予備管理付き船種別管理

通航船を、小型、中型、大型の三種、あるいはそれ以上の種類に分割し、それぞれの性能に相当する管理域を設定する。併せて、予備管理を実施する。

この三種の管理方式は、各々特徴があり、設計基準にしたがって比較検討をおこなっている。その結果、本論では、通航船の負担、管理の合理性、管理の負担を評価することにより、「予備管理付き大小船型別管理」が最も妥当であると判断している。この管理方法によれば、小型船は必要最小限の時間、管理下を航行することになり、管理下を航行するために生じる航行の制約は最小限のものとなる。又、航行船の85%以上を占める小型船に対し、小さな管理域が設定されるので、管理が容易となり管理対象船数も減少するので管理の負担も減少する。一方、大型船は予備管理の対象となるので、負担は増加するが管理域が広いので管理域への到着が小型船に比べ早期となり、交差部通航時刻の割り振りが

早期に行われ通航の優先権を得ることとなる。以上のように、この管理方法は小型船の負担の軽減、大型船は負担の増加の代償としての通行の優先権取得があり、通航船全船に対して負担の均一化が図られる。さらに、管理の対象船舶が減少するので管理の負担を軽減することができる。以上の各視点による評価からこの管理方法が最も妥当であると判断した。

つづいて、各交差部を前述の管理方式に基づいて決定した場合、個々の管理域は各交差部ごとに分割されることとなる。しかし、交差部が接近している場合には、当該交差部と前段の交差部とを一括して二つ交差部を系統的に管理する方法が考えられる。第二節では、系統管理を採用する基準を示している。そして、二つの交差部を系統式管理する場合、系統管理を大型船に限るか、全船系統管理にするかを決定する必要がある。この両者の判断は交差部間距離が小型船対応の調整距離に満たない場合、全船系統管理となり、満たす場合は大型船のみの系統管理となる事が述べられている。

（本章・第三節 広域航路交差部管理の設計）では、第二節の検討に基づいて管理方法を設計する具体的手順を示している。現実の航路体系、交差部における船舶の流れを検討の対象とし、本論で得られた結果の適用方法を示している。

続いて、典型的な広域航路体系の一例として、東京湾南部の航路体系に対して、本論の結果に基づいて管理方式を検討している。

第二節 広域航路交差部管理方式の検討

(1) 交差部管理に対する留意事項

交差部管理の目的は「船舶が必要最小限の航行の調整を行うことによって、交差部における船舶の衝突、干渉を除去し、円滑で安全な交差部航行を実現する」ことである。この目的に含まれる内容を実現するためには、管理方式の設計段階において次の点を考慮する必要がある。

1. 各交差部において必要とされる交通容量を確保する。
2. 航行船の負担を少なくする。

1の交差部交通容量が確保されることによって、その交通流は同航船に対しては十分な船間距離を保持し、他の航路上の船舶とは安全な距離を確保して航過することとなる。管理目的の後半部が実現できることとなる。

次に、2の航行船が受ける負担は管理目的の前半部に関連するものである。航行船は、管理下に入った時点で、交差部通航の時間が決定し、時間調整が必要な場合にはその操作を行うこととなる。これ自体は、交差部における安全航行を得るために行うべきものであるから負担と言うには適さない内容であろう。これに対し、管理下に入ることによって、航行上の制約を受けることになるが、その時間が本来の調整のために必要とする時間を大きく越えてしまう場合には、これに伴う航行上の制約は明らかに航行船にとっては負担となる。例えば、航行上の制約には次のような点がある。。

(第三章、第二節、シミュレーションの設定条件)の中で、シミュレーションに関わる航行条件について述べている。その中の多くは、シミュレーションを行うに当たり必要な仮定としての航行条件であるばかりでなく、現実的にも、航行の安全を確保するために必要な条件でもある。例えば、航路内を並行して航行できる船の組合せは、船舶の大きさによって決まっている。これは、現実においても、各航行船が安全上必要とする閉塞領域の

確保という点から必要なものである。他方、航路内に設定された航行レーンの変更と追越し条件については、レーンの変更が可能ということになれば、先行する船を追いつくこともできることになる。管理域内では、各船が決まった行動計画に従って行動しているの、他の船の走行レーンの前方へ移動することは危険であり、また、計画を乱すことになるので避けなければならない。しかし、追越しは、管理域外では、自由に行うのが通常である。管理域内において、航行の自由を必要以上に束縛することは、航行船にとって明らかに負担になる。

以上の点から必要以上の長時間にわたって、管理下におかれることは、航行船の負担となるので、適正な管理域の設定が必要である。

交差部管理の目的と直接結び付く事項ではないが、管理方式の設計段階においては管理そのものが全ての船舶に対し平等で合理的であることも十分留意しなければならない。管理の対象となる全船舶を全く同一の条件で、管理した場合、一見それは、各船を平等に扱っているかに見えるが、必ずしもそうではない。海上交通の特性の一つに船種、船型の大幅に異なる船舶が同一の航路を使用することが上げられる。全く特性の異なる船舶を同一に扱うことは決して平等な扱いにはならないことになる。交差部通航時刻の配分もこの点を留意し、異なる性能の船は異なる基準で取り扱う必要がある。

又、管理側の負担についても考える必要がある。管理側は管理域の船を全て把握し、計画の完全の実施を確保する必要がある、管理域が広がることによって、対象とする船舶数が増加し、その作業量も莫大なものとなり、管理側の負担に結び付くことになる。

以上の点から、管理方式を考えるにあたっては、適切な範囲の管理域を設定するとともに、航行船に対して合理的な管理方法を目標としなければならない。そのために、広域航路交差部管理は、全範囲を一括管理域と設定せず、各交差部毎に必要最小限の管理域を各々独立に設定することが望ましいといえる。このように、管理域を分割することによって、

航行船が管理の意図に反する行動をした場合、あるいは、管理下でない小型船の進入など、管理下の船舶流を乱す状態が発生した場合、その影響は、個々の管理域の中にとどまり、全体への波及を防止することができる。このことは、管理に対する信頼性の点から重要なことである。

又、各交差部の特徴にもとずいて、管理方式を順次決定してゆくことになるので、管理方式の設計段階において、管理上の各交差部の問題点が明らかになると共に、交差部相互の関連についても検討が可能になる。

(2) 管理方式の検討

前項では管理方法を考えるに当たって、留意しなければならない項目について示した。本項では、具体的な管理方法として考えられる三種の管理方法について内容を述べ、つづいて航行船の負担と、管理の特徴と負担に関して検討を行う。

① 全船同等管理

この管理方式では、航行全船に対し、同一の管理域を設定するものとする。交差部の通航時刻の配分は、船舶が管理域に到着した時刻に従って、先着船優先の基準によって割り当てるものである。この方式では、通航船は全て同等に時間配分が行われるので、特定の船に通航上の優先度は発生しない。しかし、管理域の広さは、時間調整の困難な大型船に合わせて設定されるために、小型船は時間調整量からみると不必要な長時間にわたって管理下におかれることになる。このために、前述の航行上の負担は増加することとなる。管理側からみると、大型船対応の広い管理域が設定されているので、その中の小型船を含む多数の船舶を扱うこととなる。

次に、全船同等管理における問題点を考慮することによって次の管理方式が考えられる。

② 予備管理付き大小船型別管理

(① 全船同等管理)における主たる問題点は、性能の異なる船舶を同等に扱う点にあった。現実の臨海水域の多くは、航行船の85%から90%が1000トン以下の小型船であり、10%余りの大型船に対応した管理域を設定することに問題がある。

そこで、ここに示す第二の管理方法では、航行船を小型船とそれ以外的大型船とに二分し、各船型の運動特性に応じて、各々の管理域の大きさを設定するものである。これにより、小型船は、その運動特性に見合った必要最小限の管理域が設定されることになる。このために、管理下におかれる時間は短縮され、負担は減少することになる。一方、大型船はその特性から、長い調整距離を必要とするので、管理域も拡大することになる。

さらに、この方法では、大型船に対し、予備管理を行うこととする。前述のように予備管理を行うことによって、大型船の集中到着は緩和され、交差部使用の均一化が図られるために、調整時間は短縮されることとなる。

一方、交差部通航時刻の配分は、小型船は小型船用の管理域の入口へ到着時点、大型船は大型船対応で設定された管理域入口へ到着した時点で行われることとなる。従って、大型船は小型船に比べ、早期に交差部通航時刻の配分が行われることとなる。すなわち、大型船は小型船に対し、時刻配分の上で優先権が与えられることとなる。

ここで問題となるのは、大型船が優先的に通航時刻を割り当てられるために、小型船の負担が増加することである。そして、このための調整時間量の増加は大型船の混合率が高い程大きくなる。

小型船の時間調整量の増加について考えることとする。前章で述べた基準状態は現実の海上交通の大型船の混合率に比べ非常に混合率の高い場合に相当する。しかし、混合率30%のこの場合でも、大型船に優先権を与えた場合、小型船の調整時間は約10%増加するだけであり、調整距離は500m伸びるものの、(1 全船同等管理)に比べると半分程度の距離を必要とするに過ぎない。大型船に優先権を与えることにより発生する問題は、その効果に比べ大きくないことが明らかとなった。

第四章において、ひとつの交差部を使用する二つの航路において、一方の航路長が長いために、交差部通航時刻割付において、優先権が生ずることを述べている。そして優先権の発生により、交差部容量は減少することを述べている。この点と今対象としている大型船に優先権がある場合を比較すると同レベルでは論じられないこととなる。両者の違いは優先権を持つ船の絶対数の違いによっている。航路長が長い場合は、その航路上の船、全船が早期に交差部使用時刻を得る。そして、それらの使用時間は、ほとんど調整を要しないで設定されるので、船舶の到着状況そのままの分布したものとなる。このために、他方の航路上の船は全て残された空き時間を利用することになるので、調整時間は長くなってしまう。特に、長時間の空き時間を確保することは難しくなるので、大型船に調整不能船

が続出することになる。

これに対し、大型船のみが優先権を持つ場合は、その絶対数が少ない上に、空き時間を利用する小型船が必要とする通航時間は短いので、調整時間は、それ程増大することなく、前述のようなわずかな調整距離の延長で処理が可能となるわけである。

結局、この管理方法の考え方は、先ず、前項の結論に従い、各交差部は単独に管理を行うこととする。そして、航行船が受ける負担を妥当な範囲とする目的から、通航船の運動特性に見合った管理域を設定する。この時、大型船は、通航時刻配分上の優先権を受ける代わりに、交差部の集中使用を避けるために、予備管理を受けることになる。しかも、この場合でも、予備管理の対象船は高々3隻で有り、管理の負担の許容内と考えられる。以上がこの管理方法の基本的考え方である。この時の管理側が扱う船舶数は（1 全船同等管理）より大幅に減少させることができることとなる。

次に述べる第三の管理方法は（② 予備管理付き大小船型別管理）の船型の区分をさらに細分化し、通航船負担をより妥当なものにするという考え方によるものである。

③ 予備管理付き船種別管理

この方法では、通航船を小、中、大の三種あるいは、それ以上の船種に区別し、各船種毎にその運動特性に見合った管理域を設定することになる。管理域の広さは、小型船、中型船、大型船の順に大きくなる。従って、通航時刻配分の優先順位は、これの逆で、大、中、小順になる。この管理によって、中型船に対しても、管理域が妥当な大きさとなり、②に比べ、負担は軽減されることになる。

この場合の管理側が取り扱う船舶数は②よりさらに減少することになるが、中型船の数は本来小型船よりはるかに少ないので、その減少率はあまり大きくない。航行船と管理の負担はともに小さくなるが、船種を細分化するために、管理の内容が複雑化する欠点が生ずることとなる。

以上、三種の管理方法についてその管理方法と特徴を述べてきたが、それらを一括し、比較したものが(表5-1a)である。なお表中、中型船は大小船型別管理において管理上大型船と同一の扱いを受けるとして評価している。(表5-1b)は(表5-1a)の内容をより端的に示すものである。

各船舶における負担は、主に、管理下で航行する時間が該当している。全船舶同等管理の小型船に×印が記入されている理由は、不必要に長時間にわたって管理下におかれているためである。又中型船、大型船型が他の二つの管理方式において△印が記入されているのは、予備管理の対象となるので管理域手前で若干の航行規制を受けるためである。次に優先度は、交差点通行時刻の登録時期と、それによって生ずる交差点通行時刻の配分における優先度の高低が該当している。○印は、他に比べて優先度を有する場合を意味し、△印は、他に同等あるいは若干の優先度の低い状態を示している。小型船が大小船型別管理、船種別管理で△となっているのは、登録時期においては大型船と大きく異なるものの、大型船の通行量が少ないので実質的には、大きな優先度の低下が発生しないことによっている。

つづいて、管理側の負担の内容としては、管理海域の広さと、管理対象船舶数、そして管理の複雑さなどが評価の対象となっている。全船同等管理で、×印がついているのは、広い管理域を対象としているのでその中に含まれる多数の小型船が対象船となることによっている。又、大小船型別管理と船種別管理で△印がついているのは予備管理のため若干対象船舶数が増加することによっている。しかし、その数は僅かであるから、△印ではあるが、さほど負担は増加するとは言えない範囲である。これに対して、船種別管理における△印は、管理の複雑さが加わることになり、大小船型別管理より管理上の負担が大きいことによっている。大小船型別管理が○印に近い△印であり、船種別管理は△印と×印の中間と言うことになる。

先に述べたように、全ての船舶、管理側に対して、最適な状態を確保することは困難なことになる。現実的視点から見ると、特定の部分に負担が集中せず、なおかつ効率良い管

理方式が望まれることになる。この視点によれば、全船同等管理は、小型船の負担が大きすぎるので望ましくないことになる。又、予備管理付き船種別管理は管理内容が複雑化するわりには、管理の効果は向上しないこととなる。

結論として、負担が分散し、かつ効率を保持できる予備管理付きの大小船型別管理が適当な管理方法といえるであろう。

(3) 管制域の結合基準

前項の議論より連続する交差点も個々に独立して管理することが望ましいこととなるが第四章で述べたように、交差点が近接する場合には調整距離が十分に確保できない場合がある。このような場合には、連続する交差点を一括して系統的に管理することにより、連続する交差点の通過時刻を互いに調整することによって、短い交差点間距離でも時間調整が達成できることが判っている。

そこで本項では連続する交差点をそれぞれ単独に管理すべきか、あるいは二つの交差点を一括して系統的に管理すべきかを判断するための判定基準を求めることとする。

今、対象とする二つの近接する交差点の第一の交差点の交通量を C_1 、与えられた調整距離を DA とする。又、第二の交差点の交通量を C_2 、調整距離を DC とする。一方、 C_1 、 C_2 の交差点容量に対応する必要調整距離を DA^* 、 DC^* とすると、 $DC^* < DC$ ならば第二の交差点に対しても、必要な調整距離が確保できるので、この二つの交差点は独立に管理し得る事になる。

しかし、交差点間距離が短く $DC < DC^*$ となる場合には系統式管理を考える必要がある。この時、必要とする交差点容量は C_1 、 C_2 の大きい方をとることとし、この交差点容量と交差点間距離 DC より系統式管理において必要とする調整距離 DA^* を考える必要がある。求める第一交差点手前の調整距離がこの値 DA^* より大きければ系統式管理により、対象とする二つの交差点の管理が出来ることとなる。もし $DA < DA^*$ となる場合には、交差点の移動を考える必要がある。

単独管理と系統式管理の判断を行うためのグラフを(図5-1)に示す。この図には次の4種類のグラフが描かれている。

① 交差点を単独管理する場合に必要な小型船の調整距離

このグラフは、大型船に管理域への到着規制である予備管理を行い、かつ、大型船と小型船で管理域の大きさを別個に設定した場合の必要調整距離を示したものである。横軸の交通量は大型船、小型船の双方を含む全通航船数を示し、大型船の混合率は本論の基準状

態を考えている。

② 交差部を単独管理する場合に必要な大型船の調整距離

このグラフは、①の状態における大型船対応の調整距離を示している。大型船に対しては、管理域の長さとして、この値が採用されることになるので、予備管理による到着規制はこの管理域入口への到着規制となる。

③ 二つの交差部において、通航全船に対し、系統管理を実施した場合に必要な第一交差部手前の調整距離

系統管理においては、交差部間距離も交通量に影響を与えるので、交差部間距離をパラメータとして3本のグラフが示されている。なお、この場合も、大型船には予備管理が実施されているものとしている。

④ 二つの交差部において、大型船のみにに対して系統管理を実施した場合、大型船に対して必要となる第一交差部手前の調整距離

このグラフの対象となる状態は、小型船は二つの交差部を各々単独に管理できる調整距離を有し、かつ、大型船に対しては交差部間距離が短い場合である。従って、小型船の第一交差部用の管理域は、前述の①より得ることができることになる。調整距離は交差部間距離が2 kmの場合を除いて全船系統時の調整距離とほぼ同一の値を示している。

単独管理において必要な調整距離は左縦軸で得られるものであり、系統管理において必要な第一交差部手前の調整距離は右縦軸によって示されている。系統式管理方法の判断、手順を具体的に述べると次のようになる。

まず、第二交差部の交通量を横軸に求め、この点における十字交差部の曲線を用いて、大型船、小型船各々に対し、交差部容量に必要な調整距離 $DC^*(L)$ 、 $DC^*(S)$ を求める。この値が先に示した DC^* に該当するものであるから、現実の DC と比較することにより、 $DC^*(L)$ 、 $DC^*(S)$ とともに DC より小さければ、大型船、小型船共に単独管理の可能性を判断できることになる。

もし、 $DC^*(S) < DC$ 、でかつ、 $DC < DC^*(L)$ となる場合は大型船のみの系統管理を考える。この場合は、二つの交差点容量のうち大きい方の値を横軸に求め、この点より上方へ線を上げ、十字交差点の交差点間距離の値が現実の交差点間距離(DC)に一致する曲線上の点で見いだす。もし、該当する交差点間距離のグラフがない場合は、補間によりこれを求める。そして、この点に該当する右縦軸の値を求めると、これが系統管理において必要となる第一交差点手前の調整距離 $DA^*(L)$ である。現実の調整距離が $DA^*(L)$ よりも大きければ、この交差点は大型船のみの系統式管理により管理可能となる。

また、 $DC < DC^*(S)$ 、でかつ、 $DC < DC^*(L)$ となる場合は、小型船も単独管理不可能となるので、全船に対する系統管理を考える。探索の方法は大型船のみ系統の場合と同じである。

全船系統管理を考えた場合に第一交差点手前の調整距離が不十分な場合には、交差点を移動し、交差点間距離を拡大する必要が生ずることになる。あるいは、航路の形を変化させることによって交差点の交通量を分散させるなどの処置が必要となってくる。