井形航路交差部に対する航行管制について (第 2 報)

正員 小 林 弘 明* 正員 小 山 健 夫**

The Study of the Marine Traffic Control on the Parallel Route Crossing (2nd report)

by Hiroaki Kobayashi, *Member* Takeo Koyama, *Member*

Summary

Traffic flow in the crossing points is the important factor for the traffic capacity as well as the safety of navigation. In order to improve the capacity and safety, the time sheared control were studied at the parallel route crossing. Two control system were considered, one is the priority in order of arrival (first come first service system), the other is the signal system.

In the previous report, the authors have assumed that ships navigate in a line (single line navigation), this report treated with navigating two or three abreast (parallel navigation) in the fairway.

As, the arrival time distribution of large ships have a great influence on the traffic flow in the crossing points (a number of large ship arrive to control area in a short time, traffic volume exceed the crossing capacity), pre-scheduling for large ships before arriving to the control area was considered in this report.

Some results of Digital Simulation are shown;

(1) The effectiveness of parallel navigation are shown in the case of priority system, unallocatable ships decrease to 1/10 compared with single line navigation.

(2) Pre-scheduling of large ships is very practical and useful control. In the priority system, number of unallocatable ships reduces to 1/5.

(3) Priority system with pre-scheduling for large ship is most useful control. If the maximum permissible limit of unallocatable ship rate are assumed 2%, the traffic capacity of crossing point has more than 420 (ships/day/crossing point) within 10 min. mean delay time under condition of DA=10,000 m.

1 序

Lloyd 海難集計¹⁾によると、全海難の 1/4 が衝突事故で、海難中第 1 位を占めている。更に、衝突海難は^{2), 3), 4)}、乗り揚げ、その他の海難に比べて、船舶の増加に伴い、年々増加の一途をたどっている。衝突事故の原因の多くは、操船ミスと天候不良となっており、船同士が互いに他の船の運動状態が十分にわからないために、不適切な操船をする場合や、視界不良により相手船の行動が把握できない場合が多いの事故原因となっている。これらのことから、相手船の運動の予測の困難度が、衝突事故を誘発していることがわかる。航行管制の目的は、船全体の運動をパターン化し、船同士が相手船の運動を予測しやすくすることにある。

我が国でも、航路指定、航路分離、速力指定を中心と

した海上航行管制が行われている。しかし、海上交通においても、航路の安全度と航行容量は、その航路に存在する交差部の航行状況に大きく依存している。

筆者らは、前回の報告^{5) 6)}において、航路交差部における航行の安全と効率的運用方法を調査する目的で、井形航路交差部に通行時刻指定の航行管制を行った時の交差部航行容量を調査した結果を報告した。前回の報告では、船舶は、各航路上を 1 列で航行する場合を考えたが、現実には、大型船の航行可能な航路幅がある場合には、中・小型船は並列して航行することが一般である。

本報告においては、同航する船舶の組合せにより、並列航行が可能となるケースを考慮し、管制下の交差部航行容量を調査したものである。更に、本報告では、交差部における交通流が大型船の管制域への到着状況により大きく影響を受けることから、大型船に対して、管制域到着以前から予備的に管制を行う場合の効果についても調査している。

* 東京商船大学

** 東京大学

2 交通流のデジタル・シミュレーション

調査は、前回の報告と同じくデジタル・シミュレーションにより、管制下における船舶の交差点航行の調査を行った。

管制側は航行船に対し、管制域到着時に連続する二つの交差点の通過時刻を指定する。この場合、第1交差点には指定時刻に到着しても、その時の船速および第1交差点と第2交差点との距離関係によっては第2交差点の指定時刻を満たすことが著しく困難になることも起こる。そこで、管制側は通過時刻の決定に当っては、船の性能に応じて通過時刻とともに交差点通過時の船速も考慮する必要がある。

航行船は、管制側の指定する時刻に定速で交差点を通行するために、速力調整により、交差点到着時刻を調整することになる。時間・速力調整が可能か否かは、調整距離上で、最短時間制御により加減速操船を行った場合、得られる調整時間量を基準にとり、この時間量より必要調整時間量が大なる時、時間調整不能船と判断する。時間調整不能船発生数の大小をもって、管制方式の比較を行い、交差点航行容量を求めることとする。なお、最短時間制御は、許容制御量の範囲での Bang-Bang 制御となるが、針路制御の要求を考慮し、機関の操作位置は、プロペラ逆転は避け、港内 Full と遊転の間とし、速力は 2.5 m/s 未満に低下することのないように制限した。

今回のシミュレーションでは、航行船は全速で管制海域へ到着するとしているので航行船はすべて交差点到着時間を遅らせることとなる。

2.1 管制海域 (Fig. 1)

航行船は、管制海域に到着すると、管制側から第1交差点を通過すべき時刻と交差点間の速力を指示されることになる。本報告においては、この時間、速力を調整するための調整距離 (DA) は、10,000 m と 20,000 m を考える。交差点間距離 (DC) は、先着船優先方式で 3,000 m、信号方式で 2,000 m を考える。航路の幅は

Fig. 1 Traffic control area

Table 1 Mean arrival time interval (T_M, T_C)

min/shiP	16	12	9.6	8	6.9
ship/day	90	120	150	180	210

Table 2 Kinds of the passing vessels

	Large Tanker	Large Cargo C.	Small Cargo C.
Length (m)	240	150	50
Speed (m/s)	6.0	7.5	5.0
Gene. rate (%)	3	27	70

700 m とする。

2.2 航行船の船種・船速

航行する船舶の種類は、大型タンカー、大型貨物船、小型貨物船の3種で代表し、その船長、最高速力、発生割合は Table 2 とする。

2.3 航行船の到着時間間隔

各航路の船舶は、互いに独立に、次の平均時間間隔で、管制域端部に、ポアソン到着する。東西・南北の各2航路は、各々同じ平均到着時間間隔 (T_M, T_C) とし、Table 1 の5状態をそれぞれ考える。

2.4 航行条件

2.4.1 並列航行条件

同航路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もとづき、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。占有する左右の航路幅は、240 m 船で 768 m、150 m 船で 480 m、50 m 船で 160 m となる。一方、航路幅 700 m の現実の航路においては、50 m 船長程度の船舶でも、4列並行航行するのはまれであるので、並列航行できる船舶の組合せは次の通りとする。

- ① 240 m 船は、1隻で航路全幅を占有する。
- ② 150 m 船は、50 m 船1隻と並列航行可能とする。
- ③ 50 m 船同士は、3隻まで並列航行可能とする。

即ち、各航路は、見掛け上、3レーンを有し、240 m 船は3レーン全部を、150 m 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となる。

2.4.2 追越し条件

航行船は、自分の占有するレーン以外のレーン上の船舶を追越しことは可能とする。

2.4.3 レーン変更

管制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。

2.4.4

交差点の使用航路が、切り替える時は、交差点は一時空にする。

3 管 制 方 式

各船舶の交差点通過時刻を決定する方式として、次の2種を取り上げた。

3.1 先着船優先方式 (P. SYSTEM)

優先順位は、管制域に到着する時刻により、順位付けされ、管制側はその順位に従い、次のステップで通行レーン、ならびに第1、第2交差点の通行時刻を決定する。

(1) 同航路の各レーンの中で、先航船が最も早く交差点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）に走行レーンを、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1交差点通過時刻とする。

(3) 第2交差点通過時刻は、第1交差点から全速力で、第2交差点へ向った場合を第2交差点最早到着時刻とし、その時刻を基準として最も調整時間の短い通行可能時刻を求める。

(4) 決定した第1、第2交差点の通行時間帯が、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。

3.2 信号方式 (S. SYSTEM)

信号周期は、前報と同じく、1,600秒とし、青信号時間、黄信号時間は660秒、140秒としている。

井形の交差点すべてを時間的に連動する系統信号とするために、交差点間を航行する船舶の航行速力の基準を決める必要がある。本例では、通行船速は5.0m/secとしている。

管制側は、管制域に到着した船舶に対し、定時間間隔で切り換える信号のどの青信号帯を使用するか、またどのレーンを走行レーンとするかを次のステップで決定し指示する。

(1) 最早到着する信号帯を求める。

(2) 先着船優先方式における(1)と同様にして、走行レーンを仮り決める。

(3) 該当信号帯に、該当船相当の余席がない時は、次の信号帯に余席を求める。

(4) 交差点占有時間決定後、先着船優先方式の(4)と同様にしてレーンの決定をする。

3.3 予 備 管 制

航路の走行レーンを3レーンにした場合においても、大型船が、一度、調整不能船となると、後続する他の船舶は、追越しが不可能に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、大型船が、初めに調整不能となり、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見られる。交差点の航行容量を増加させるためには、大型船の調整不能船発生を防ぐことが有効であり、このために、大型船の優先通行や、大型船専用レーンの設定等のいくつかの方法が考えられる。しかし、これらの方法では、混在して管制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、有効な方法とはいえない。

大型船が、通行不能船となるのは、一定時間内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。いま、240mの大型船1隻は、占有面積で50mの小型船で約15隻分に相当する。大型船の通行は、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1隻で、多くの占有時間、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。

本報告においては、大型船の集中到着を規制する予備管制を行う場合の効果进行调查した。予備管制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。予備管制対象の船舶としては、240mの大型タンカー、150mの大型貨物船を考えた。

大型船の到着率は、信号方式の交差点容量を参考とし、1,600秒間に、1航路当り2隻以上の大型船が到着することを制限した。これは信号方式において、青信号1回に収容できる大型船の上限である。

管制海域端部において、初めて、到着状況のわかる小型船は、これら大型船の空き時間、空きレーンを利用して交差点を通過することになる。大型船に対するこの到着率は、今回のシミュレーションの条件でもある、大型船の発生率30%の枠内では、十分許容できるものであり、かつ、管制域前方10マイルにおいて、到着時刻の指定を受ければ、着到時刻調整可能な範囲である。

4 シミュレーション結果

Fig. 2 から Fig. 5 に並列航行による交差点通行のシミュレーション結果を示す。

Fig. 2 は、調整距離 10,000m、交差点間距離 3,000mの管制海域で、先着船優先方式の航行管制を行った場合に発生する時間調整不能船の発生率を示している。Fig. 3 は、このケースに大型船（船長：150m、240m）に管制域に到着する時刻を規制する予備管制を行った場合の結果を示している。

Fig. 4 は、調整距離 10,000m、交差点間距離 2,000mの管制海域に対し、定時切換えの信号方式の航行管制

Fig. 2 The rate of unallocatable ship controlled by priority system (DA=10,000 m, DC=3,000 m)

Fig. 3 The rate of unallocatable ship controlled by priority system with pre-scheduled for large ship (DA=10,000 m, DC=3,000 m)

Fig. 4 The rate of unallocatable ship controlled by signal system (DA=10,000 m, DC=2,000 m)

Fig. 5 The rate of unallocatable ship controlled by signal system with pre-scheduled for large ship (DA=10,000 m, DC=2,000 m)

Fig. 6 The rate of unallocatable ship controlled by priority system, single line navigation (DA=10,000 m, DC=3,000 m)

Fig. 7 The rate of unallocatable ship controlled by signal system, single line navigation (DA=10,000 m, DC=2,000 m)

を行った場合に発生する時間調整不能船の発生率を示している。Fig. 5 は、このケースで、大型船に予備管制を行った場合を示している。また、Fig. 6, Fig. 7 は、先に報告した各航路1列航行時の不能船の発生率を示している。

先着船優先方式における不能船の発生率は、並列航行を行うことにより、1列航行時の発生率に対し、約1/10に減少する。更に、大型船に予備管制を行うことにより、発生率は、更に約1/5に減少することになる。

信号方式では、並列航行を行うことによる調整不能船

Fig. 8 Traffic flow controlled by priority system

Fig. 9 Traffic flow controlled by priority system with pre-scheduled for large ship

の発生率の減少は $1/3$ である。減少率が低い原因は、並列航行により、交差点占有時間が減少しても、空き時間が交差点航路に転用することがないので、交差点航路に船舶が集中している場合、交差点航路側で、調整不能船の発生が起ることによっている。即ち、信号方式の効率の悪い面が表面化し始めていることによる。信号方式において予備管制を行うと、不能船の発生率は約 $1/2$ に減少する。

Fig. 8 は先着船優先方式による航行管制のもとに井形航路交差点を航行する船舶の状況を示している。時間調整距離は $10,000\text{ m}$ 、交差点間距離 $3,000\text{ m}$ で、航行密度は全航路が平均到着時間間隔 8 分 の場合である。図中、①は船長 240 m 、②は船長 150 m の船を示し、各矩形の大きさは対象とする船舶の閉塞領域全体を表わしている。その他の小さな矩形は 50 m の船を示している。矩形に斜線の入っているものは、時間調整不能な船を示している。シミュレーションでは、これら時間調整不能船にも交差点通行の時間帯は割り当てられるが、時間調整中の船速は 2.5 m/sec 以下となる。

Fig. 9 は同じケースのものに、大型船に対する予備管制を行ったものである。大型船の集中した到着が規制され、調整不能船の発生が無いことがわかる。大型船の到

Fig. 10 The rate of unallocatable ship controlled by priority and signal system with and without pre-scheduled ($DA=10,000\text{ m}$) Fig. 11 The mean delay time controlled by priority and signal system with and without pre-scheduled ($DA=10,000\text{ m}$)

着状況が異なるために小型船の航行状態も多少異なっている。

次に、1 交差点当りの航行隻数と不能船の発生率の関係を Fig. 10 に示す。調整不能船の発生は、長時間の航行状況を考える時、必ず発生しうるものであり、現実の管制においては、調整不能船発生時の対処方法を調べておく必要がある。いま、 2% の不能船の発生を上限とした場合、1 列航行時においては、先着船優先方式で 1 日当り 210 隻が上限となり、信号方式では 180 隻でも 2% を超える結果が得られている。

並列航行を行う今回の結果によると、先着船優先方式で 290 隻、更に予備管制を行うと、今回のシミュレーション範囲の上限 1 日当り 420 隻まで、 2% 以内に納まることがわかった。

Fig. 11 は、1 交差点当りの航行隻数を通行船の平均遅れ時間の関係を示している。調整不能船発生率 2% 以下においては、先着船優先方式が、遅れ時間は短く、予備管制を行う先着優先方式では 600 秒以下となっている。

なお、今回シミュレーション調査を行った調整距離、

20,000 m の各場合は、先着船優先方式、信号方式の両方式とも、1交差点1日当り 420 隻の通行量においても、時間調整不能船の発生率は 2% 以内となっている。

5 結 び

井形に交差する航路交差点において、各航路で、大型船と小型船、小型船と小型船が、並列航行する現実の航行状況を考慮した場合について、航行管制下の交差点航行容量を調査した。

結果を要約すると次の通りである。

(1) 1列航行に比較し、並列航行の効果が顕著に現われるのは、先着船優先方式の場合であり、時間調整不能船の発生は約 1/10 に減少する。

(2) 大型船のみに対する予備管制は、現実的であり、かつ、その効果は大きく、先着船優先方式において、時間調整不能船の発生は約 1/5 になる。

(3) 調整距離が、10,000 m の場合、今回対象とした管制方式の中では、大型船に対する予備管制を行う先着船優先方式が最も有効で、時間調整不能船発生率の上限を 2% とした場合、1交差点当り1日 420 隻の航行量は十分収容可能である。その時の平均遅れ時間は 10 分以内である。

現在、我が国において輻輳する航路交差点の一つである備讃東航路では、昭和 46 年の調査によると1日当り 1交差点、平均 510 隻の通航量があると報告されている。510 隻の内容は漁船から大型船まで多様に分布しているが、これを今回のシミュレーションの船種と対応して長さ換算し、通航隻数を求めると 410 隻となる。即ち、平均 2 回の避航操船を行わなければ航行できないといわれている備讃東航路は、結論(3)の管制方式により、大きく改善されることが明らかとなった。

参 考 文 献

- 1) 大型船の海域別海難発生率の期待値, 日本造船研究協会, 第 106 号.
- 2) 神島: 関門海峡における衝突海難の分析, 日本航海学会, 航海 第 45 号.
- 3) Fujii and Shiobara: Study in Marine Traffic Engineering, 英国航海学会誌.
- 4) 阿土, 福井: 来島海峡の安全通航に関する考察, 日本航海学会・航海 第 43 号.
- 5) 小林, 小山: 海上交通管制からみた交差点通過問題, 日本造船学会論文集, 第 148 号.
- 6) 小林, 小山: 井形航路交差点に対する航行管制について(第1報), 日本造船学会論文集, 第 153 号.
- 7) 藤井, 他: 海上交通工学, 海文堂.