(昭和 55 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

海上交通管制からみた交差点通過問題

正員 小林 弘 明* 正員 小山 健 夫**

The Study of the Passing Through the Crossing Point from
Viewpoint of the Marine Traffic Control

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

Summary

Traffic control at crossing points will be a important problem for the future marine traffic control system in congested waters. Fairways necessarily cross each other in large harbours. Crossing points must be time shared by traffic from different directions.

Fairway network system was studied by Koyama and Arai using GPSS simulation. According to that study, traffics at crossing can be controled successfully by reservation system (booking the specified time to pass the crossings) as long as the traffics remain not too many. GPSS simulation provides with the estimation of the maximum time which must be adjusted by speed control of ships to pass a crossing under the traffic control.

The required distance to adjust the time schedule at crossings was studied in this paper in relation with the maneuvering characteristics of ships. A large ship needs longer distance than a small ship to adjust the time. The evaluation of this distance is one of the most important parameter in designing a control system at crossings.

Minimum time control theory was employed as a base index of this distance. The obtained value (L_{min}) by this method is the minimum in which the adjustment can be attained, so that a human operator can not follow this control law. Simulator studies were made to know the relation between the minimum distance (L_{min}) and the practically necessary distance by human operators by the ship maneuvering simulator at The University of Tokyo Marcantile Marine.

According to this study, the minimum distance is a very good index for our purpose. The practically necessary distance seems to be 1.5 and 2 times longer than (L_{min}) for smaller and larger ships respectively.

1 緒 言

かつては全く自由であった船舶の航行は、船舶数の増大と安全航行に対する社会的要求により、一部の船舶輻輳水域では航行管制が実施されるに至っている。わが国でも船路指定、航路分離、速力指定を中心とした海上交通管制が行なわれている。

航行管制を行なうことによって船側の自由度は減少するが船全体の運動は一定のパターンを成すことになる。パターン化された船同士は互いに相手船の運動を予測しやすくなり、衝突回避等の操船がより安全になされることになる。各船が自由に航行するとき、互いの運動を予測することは、船舶数が増大した場合、大変困難なものになるのでパターン化の効果は著しいものとなる。交通

管制は、多数の船舶の運動をパターン化することによって交通流の安全を増すことを目的とするものである。

東京湾で現在行なわれている浦賀水道、中ノ瀬航路での航行管制も船舶数の増大に伴い、より広域にわたる管制が必要となってきた。管制が広域に広がった場合、管制域内にいくつもの航路交差点が生ずることになる。立体交差が不可能な海上交通においては、異なる方向へ進む船舶が交差点を時間分割して使用することになる。二方向の船舶の流れを円滑に交差点を通過させるためには、交差点における航行管制が必須なものとなる。

どのような形式で時間分割するとしても、船側は、与えられた通過時刻に交差点を通過するために、速力調整により時間調整をする必要がある。当然、管制も船の速力調整の性能を無視して行なうことはできないので、船の性能に合った管制を行なうには、指定された時間調整を余裕をもって行なえる調整距離を船側に与えなければ

* 東京商船大学

** 東京大学

ならないことになる。

筆者らの一人は、さきに東京湾における航路体系の研究に関連して、GPSS (General Purpose Simulation System) を用いて湾内交通流の研究を行なった¹⁾。その中で、船舶数が昭和49年度における2倍程度なるまでは、交差点の管制は予約方式が適当であり、時間調整量も95%の船舶が10分以内であることを指摘している。

予約方式とは、個々の船舶が個別に交差点通過の時刻を予約し、そのスケジュールに合わせて航行するものである。信号方式のように一定時間毎に通行方向が切り替えられるのに対して、通行量が比較的少ない場合に信号待ちのロスが少ない利点がある。

本論文においては、いろいろな形として存在する交差点通過問題を一般化することにより定点定時定速通過問題に置き換えられることを示し、つづいて、時間調整のために必要な調整距離を与える指標として最短時間制御による時間調整操船を考える。そして、この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、現実の管制においては、上記指標の何倍程度の調整距離が必要であるかという観点から操船シミュレート実験による調査を行なった。

2 定点定時定速通過モデルの特性

2.1 交差点交通問題の一般化

1カ所の交差点交通問題においては、交差点を定時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点を連続して通過しなければならない。この場合、第一の交差点には指定時刻に到着しても、そのときの船速および第一交差点と第二交差点との距離の関係によっては第二交差点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 Fig. 1 に示す。横軸に時間、縦軸に距離をとった場合、第一、第二、第三交差点の通過時刻を○印のように指定されたとすれば、それらの指定を守る操船を行なうためには、船の性能に応じて通過時刻と共に通過時の船速についても調整が必要になる。

船の性能と交通管制の関係は、指定位置の指定時刻、指定船速での通過と必要時間調整量との関係、いいかえれば、必要な時間調整を行なった上で、交差点を定時、定速で通過する制御モデルに一般化できることになる。

ここでは、これを定点定時定速通過モデルと呼ぶこととする。

Fig. 2 において、A点の状態にある船がそのまま速力を保持するとB点において交差点を通過する。一方、管制側からC点において速力 V_0 で通過するよう要求をされたとすると、必要調整時間は BC となる。この時間調整を余裕をもって行なうためには図に示す調整距離をど

Fig. 1 Passing through the sequential crossing

Fig. 2 Passing model at the specified time and speed

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。この関係こそが、交差点管制のあり方と船の性能要件との接点となる問題である。

文献 1) より昭和49年の横浜沖航路交差点における船舶交通量の2倍の交通量では、95%の船に対する必要調整時間量は10分であることが判かっている。

2.2 必要時間調整量と必要調整距離

管制側から一定の調整時間量が指示されたとき、個々の船がその調整を余裕をもって行なうに要する距離は初速 V_1 および交差点通過指定船速 V_0 の関数となる。

すなわち、

$$L = f(T_{\max}, V_0, V_1)$$

$T_{\max}$: 必要調整時間量

V_0 : 交差点通過指定速力

V_1 : 制御開始時の初速

となり、これが各船型別に求められる。

ここで「余裕をもって」という表現は、平均的能力をもった操船者が操縦した場合という意味であり、必要調整距離は操船者の加減速制御法の関数でもある。

平均的能力をもつ操船者がどのような制御を行なうかは、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。しかし、交通管制と船の性能の关系到問題を限定した場合、マクロな問題であることを考慮すればより簡便な方法も許されるであろう。

そこで、本論においては、必要時間調整 $T_{\max}$ を行なうに際し、これを最短時間制御則によって行なう場合

Fig. 3 Assumed control law using minimum time control theory ($L=300$ m) ($V_0=4.5$ m/s)

の必要調整距離を求め、これを一つのよりどころとして議論を進める。

最短時間制御は周知のとおり許容制御量の範囲内での Bang-Bang 制御となる。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 Full と遊転の間とした。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した。

Fig. 2 において、刻々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。 $\Delta x(t)$ 、 $V(t)$ の位相面を考え制御則を Fig. 3 のように仮定する。中央の曲線が切替線を示しており、切替線上左上半分の状態であればプロペラを遊転させることにより、また右下半分の状態にあるときはプロペラを Full 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。したがって、位相面上で現在の状態が切替線の右側にあるときは遊転、左側にあるときは Full 回転させて切替線上まで状態を移し、その後は逆に Full 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仮定である。

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、許容される範囲内での最小値であるから、これ以上短くすることはできない。その意味でこれを $L_{\min}$ と呼ぶ。求めたいのは最大調整時間 $T_{\max}$ に対して余裕をもって調整できる調整距離である。制御則によって求まる調整距離 ($L_{\min}$) 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である。

2.3 最小調整必要距離 $L_{\min}$

必要調整距離は、船の性能、 $T_{\max}$ 、 V_0 、 V_1 の関数となるが、 $T_{\max}=5$ 分とし、超大型、中型、小型 ($L=300, 150, 50$ m) の 3 種の標準的船型を選び、 V_0 、 V_1 をパラメータとして $L_{\min}$ を求めた。

Fig. 4 The relation between the $L_{\min}$ and the size of ship

Fig. 5 The relation of the $L_{\min}$ V_0 , V_1

計算結果を Fig. 4, Fig. 5 に示す。Fig. 4 は L を横軸にとり、船型による $L_{\min}$ の相違を示したものである。当然のことながら船が大きくなるほどより長い調整距離を要する。また、この関係は初速 V_1 に対し指定船速 V_0 が大きくなるにつれて拡大される。

この関係を超大型船のみについて Fig. 5 に示す。初速に対し通過船速を下げる制御 ($V_1 > V_0$) に対し、上げる制御 ($V_1 < V_0$) の場合は大変長い調整距離を必要とすることがわかる。

計算結果を要約するとつぎのようになる。

- 1) 指定船速が大きくなると $L_{\min}$ は増える。
- 2) 初期船速 V_1 が指定船速 V_0 にくらべて小さいと $L_{\min}$ は激増する。この傾向は大型船ほど著しい。
- 3) 船型の影響は V_0 が大きいとき顕著となるが小さいときは少ない。
- 4) 図には示さないが、 $T_{\max}$ がふえると $L_{\min}$ は大きくなるが、その増加は線形的であり、急激な上昇はない。

3 シミュレータによる検証

3.1 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、すなわ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できた。

本節においては、最短時間制御則による計算結果が人

間による実際の操船方法にくらべ非常識なものでないかを検証するととも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。

実験は東京商船大学の操船シミュレータ²⁾を用いて行なわれた。本シミュレータで用いられている操縦運動の数学モデルは次のとおりである。

(1) 回頭運動の応答方程式

1) プロペラ正転の場合

$$T_1'T_2'\left(\frac{L}{V}\right)^2\ddot{\psi} + (T_1' + T_2')\left(\frac{L}{V}\right)\dot{\psi} + \alpha'\left(\frac{L}{V}\right)^2\dot{\psi}^3 \\ = g(s)K'\left(\frac{V}{L}\right)\left\{\delta + T_3'\left(\frac{L}{V}\right)\dot{\delta}\right\}$$

ただし

$$g(s) = \frac{1 + ks^{1.5}}{1 + ks_0^{1.5}} \\ k = 3.2$$

s : プロペラスリップ比

$$\left(= 1 - \frac{V(1-w)}{nP}\right)$$

s_0 : 定常直進中のプロペラスリップ比

2) プロペラ逆転の場合

$$T_1'T_2'\left(\frac{L}{V}\right)^2\ddot{\psi} + (T_1' + T_2')\left(\frac{L}{V}\right)\dot{\psi} + \alpha'\left(\frac{L}{V}\right)^2\dot{\psi}^3 \\ = a_R'\left(\frac{V}{L}\right)/J_S^2$$

ただし

$$J_S = \frac{V}{nD}$$

(2) 船速の応答方程式

1) プロペラ正転の場合 (遊転を含む)

$$\dot{V} + a_{VV}V^2 + a_{rr}\dot{\psi}^2 + a_{\delta\delta}V^2\delta^2 = a_{nn}n^2 + a_{nv}nV \\ (0 < J_S)$$

2) プロペラ逆転の場合

$$\dot{V} + a_{VV}V^2 + a_{rr}\dot{\psi}^2 = \begin{cases} a_{nn1}n^2 & (J_{ST} < J_S < 0) \\ a_{nn2}n^2 + a_{nv2}nV & (J_S < J_{ST}) \end{cases}$$

(3) 操舵機の応答特性

$$T_E\dot{\delta} + \delta = \delta^* \quad (|\delta^* - \delta| \leq \delta_c)$$

$$\dot{\delta} = \text{sign}(\delta^* - \delta)|\dot{\delta}_{\max}| \quad (|\delta^* - \delta| > \delta_c)$$

ただし

δ^* : 指令舵角

δ : 実舵角

$$\dot{\delta}_c : \text{先進角} (= |\dot{\delta}_{\max}| \cdot T_E)$$

(4) 主機回転の応答方程式

1)

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

ただし

n^* : 指令回転数

n_E^* : 主機指令回転数

n_i : 遊転回転数 ($= 0.7(1-w)V/P$)

2)

$$T_n\dot{n} + n = n^*_E$$

ただし

T_n : 主機時間おくれ

ここに各記号は次の諸定数を示している。

L : 船長

V : 船速

ψ : 回頭角

n : プロペラ回転数

δ : 舵角

D : プロペラ直径

P : プロペラピッチ

w : 船体伴流係数

$T_1', T_2', T_3', K', \alpha'$: 旋回運動に対する操縦性指数の無次元表示

$a_{VV}, a_{rr}, a_{\delta\delta}, a_{nn}, a_{nv}, a_{nn1}, a_{nn2}, a_{nv2}$: 船速の応答特性指数

供試船は SR 175・加減速時における操船性能に関する研究³⁾において使用された、船長が 300m, 150m, 50m の針路安定船である。各船に対する操縦特性の諸定数を Table 1 に示す。最短時間制御則による時間調整の性能は Fig. 4, Fig. 5 に示すとおりである。実験は時間調

Table 1 Maneuvering quality indices

	V.L.C.C.	LINER	SMALL CARGO
L	300m	150m	50m
a_{VV}	$1.11 \cdot 10^{-4}$	$2.26 \cdot 10^{-4}$	$7.0 \cdot 10^{-4}$
a_{rr}	$2.28 \cdot 10^2$	$9.99 \cdot 10^1$	$3.89 \cdot 10^1$
$a_{\delta\delta}$	$3.43 \cdot 10^{-4}$	$1.63 \cdot 10^{-3}$	$2.66 \cdot 10^{-3}$
a_{nn}	$5.31 \cdot 10^{-3}$	$1.05 \cdot 10^{-2}$	$5.0 \cdot 10^{-3}$
a_{nv}	$-6.13 \cdot 10^{-4}$	$-1.69 \cdot 10^{-3}$	$-2.12 \cdot 10^{-3}$
a_{nn1}	$-4.26 \cdot 10^{-3}$	$-8.43 \cdot 10^{-3}$	$-4.02 \cdot 10^{-3}$
a_{nn2}	$1.41 \cdot 10^{-3}$	$2.81 \cdot 10^{-3}$	$1.34 \cdot 10^{-3}$
a_{nv2}	$1.02 \cdot 10^{-3}$	$2.81 \cdot 10^{-3}$	$3.52 \cdot 10^{-3}$

K'	1.6
T_1'	3.2
T_2'	0.35
T_3'	0.60
$\alpha' \text{ (deg}^{-2}\text{)}$	0.00009
$T_E \text{ (sec)}$	2.5
$ \dot{\delta}_{\max} \text{ (deg/sec)}$	3.0
$a_R'/T_1'T_2'$	0.024

整量を5分として行なった。

操船者は船橋模型内において操船を行なった。船橋内には通常の航海計器（コンパス、速力計、プロペラ回転計、時計等）と制御入力部（操舵輪、エンジンレグラフ）等がある。操船者はこの他に、スクリーン上に投影されたブイの映像と X-Y レコーダに記録される時間ベースの航程の変化（Fig. 2）を情報源として操船をしている。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ガイド・ラインが示されており、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。

3.2 実験結果

交差点通過時の指定時刻、指定船速に対する操船結果の誤差量を Fig. 6 から Fig. 8 に示す。横軸は調整距離を、制御則によって得られた L_{min} に対する余裕の度合として示している。各図左図は指定通過船速 V_0 に対する速度誤差 ϵ_v 、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、初期船速と通過船速の組合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とおりである。

(1) どの船の場合も、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らかでない。

(2) 通過時刻の誤差量は船が大型化するほど増大している。

交差点通過時の速度精度に調整距離の影響が表われていない理由としては、一つには速度変化を読み取りにくいことと目的船速に対応する機関操作位置がないために

Fig. 7 Passing speed and time error respected to the distance for adjustment ($L=150$ m)

Fig. 6 Passing speed and time error respected to distance for adjustment ($L=50$ m)

Fig. 8 Passing speed and time error respected to the distance for adjustment ($L=300$ m)

Fig. 9 Adjusting trajectory to pass through the crossing ($L=150$ m)

Fig 10 Adjusting trajectory to pass through the crossing ($L=300$ m)

一度カイト・ラインに乗ったあとと目的船速付近で振動しながら交通部を通過しているためである。

調整距離の増加に伴い通過時刻誤差は減少するわけだが、50m, 150m の船では L_{min} の 1.5 倍以上になっても通過時刻誤差が一定量 (4 秒) 以下に改差されることはない。この傾向は 300m の船でも表われ、 L_{min} の 2 倍の調整距離の場合同様の誤差量を示している。

3.3 必要調整距離に対する考察

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が、調整距離の影響は時間調整の過程を見ると一層明らかである。

時間調整の過程を船速と位置誤差の位相面上にプロットしたものが Fig 9, Fig 10 の各左図、これに対応する時間ヘースの航程図が各右図である。a 図中の破線、実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。調整距離の余裕が減少し、計算値の 1.2 倍となると曲線と略一致し、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。また、このことから本論文で仮定した制御則はよく操船者の制御則を表わしていることもわかる。

次に各船の調整距離に対する時間調整の誤差をみると、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。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る。

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ようにいえるであろう。

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 倍以上、300m の大型船では 2 倍以上の調整距離を必要とする。

4 結 言

将来、幅狭水域で実施されるであろう交差点管制につ

いて、交通管制の方法と船の性能との基礎的な相互関係について言及した。まだ実施されていない管制ではあるが本論をとらして管制方法と船の性能が重要な関わりをもつことが明らかになった。

以上の結論を列挙すると次のとおりである。

(1) 必要時間調整量に応じて必要調整距離 (管制区間) がきまり、この距離が管制の方式と船の性能の接点となる。

(2) 必要調整距離の推定にあたり、最短時間制御則により求めた L_{min} は指標として有意義である。

(3) シミュレーション結果によれば、必要調整距離は小型船で L_{min} の 1.5 倍、大型船で 2.0 倍程度必要となる。

L_{min} の計算結果をみると、大型船では初速に対して著しく大きな交差点通過船速を指定した場合、たいへん大きな調整距離を必要とすることがわかる。交通管制側からみた場合、大型船の存在は管制を著しく困難にさせることになるが、なんらかの予備管制を行ない、管制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邪魔にはならないと考えられる。

今後、予備管制の方法や交差点における船舶相互間の問題、管制情報についても整理する必要がある。

終りに、本研究は日本造船研究協会第 175 部会の事業に関連して行なわれたことを付記し、元良教授、野本教授をはじめ研究部会関係各位に感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) 小山健夫, 荒井 誠: 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, 日本造船学会論文集, 第 140 号 (1976).
- 2) 谷 初蔵, 小林弘明, 遠藤 真: 東京商船大学船舶操縦シミュレータの紹介, 日本航海学会・航海 50 号 (1976).
- 3) 日本造船研究協会第 175 部会報告書—加減速時における操縦性能に関する研究, 研究資料第 330 号 (1980).