船舶技術研究所報告　第9巻　第4号　研究報告

船舶交通システムの研究

—交差交通の研究　その2—

渡　辺　健　次*

Studies on Marine Traffic Systems

— On the Intersection Traffic II —

by

Kenji Watanabe

Abstract

In this paper, the total delay time at the intersection is calculated and the effects of many-bodies interactions and the traffic capacity are discussed in the case of dense traffic. Furthermore, several traffic control procedures and simple non-steady problem are discussed. However, analytical representation is not obtained with the exception of following cases ;

(1) All ships have the same length and speed.

(2) The distribution of the arrival interval or the ship spacing is negative exponential.

The simulation by means of computer would be usefull for other cases.

1.　はしがき

多くの水路のいりくんだ複雑な水域における交通を全体としてひとつの大きなシステムと考え，有効な管制をおこなおうという立場にたって，筆者は，重要なサブシステムのひとつである交差交通システムについて，前報[1]では交通量のちいさい場合にかぎり，そこでの混雑や事故発生の予測，管制が必要となる条件，その設計などを簡単に議論した。

現在の全国各水域における交通状況は，相当混雑しているときでも，前報の結果を適用できる程度の交通量とおもわれるが，将来に交通量が増大することは当然予想され，交通量が大きい場合どのようになるかを検討しておく必要があるようにかんがえられる。

交通量大のときに，交差交通にはつぎの諸影響があらわれてくる。

(1)　多体問題の発生によるもの

交通量が増加するとき，多体encounterの発生が無視できなくなる。前報では時間おくれなどの計算のとき，たとえば三体encounterは，ふたつないし三個の独立なencounterとみなし，それぞれによる時間おくれを加えるというかたちでおこなった。そのときの誤差は，多体問題の発生確率がちいさいものとして無視できた。

交通量の大きいときの時間おくれ計算には，そのようなことはできない。本報では，どのような場合に多体問題が無視できなくなるかを検討し，とくに重要な量である時間おくれへの付加項を，いろいろな場合について計算する。

(2)　容量によるもの

ふたつ以上の船が，同一の水面を共有できないのは当然のことで，水路の有限な範囲にある船の隻数はある上限を持つ。船の到着分布間隔が指数分布であるとか，ある範囲にある船の隻数の期待値がポアソン分布であるとするふつうおこなわれる近似は，この上限以上の隻数の存在を許し，交通量大のときこの上限をこえる確率が大きくなるから，なりたたないことになる。これを容量の影響というが，ここでの容量は管制や水路設計をおこなうときのめやすとしてつかわれる交通容量ではなく，まったく物理的な水面共有不可能性を意味している。

交差交通において容量という概念は，ふたとおりの

*　共通工学部　原稿受付：昭和47年4月25日

意味をもってつかわれるであろう。ひとつは，交差点に流れこむ船の単位時間あたりの隻数がある上限をもつ，という意味で交通容量に似た概念でつかわれる。もうひとつは，交差点がある時間のあいだ（青信号時間）通過できるようになっているとき，通過できる単位時間あたりの隻数が上限をもつという意味においてである。この上限がなければ，どんなみじかい青信号時間でも，そこに待つすべての船（無限隻数もふくめ）が通過できるということになってしまう。交通量がちいさいとき，この誤差は無視できた。

本報では，これら容量の導入がどのように影響するかを時間おくれを計算することによって検討する。この問題は一般的な待ち行列問題に帰着する。

なお，交通量が比較的ゆっくりと変動する場合の非定常問題についても簡単に触れる。

ここで，管制の問題について，前報に述べたことにさらにつけ加えることにする。前報ではごく常識的な青と赤の信号による陸上交通にみられるような方式をあげておいた。しかし，そこにいたる前段階として，よりゆるやかな形で管制をおこなうことがあり得る。

第一にある進路に優先権をあたえるということである。これはひとつの広義の管制とみなすことができる。たとえば一律に右側から交差する進路に優先権をあたえる方式がある。しかし，その進路の交通量や重要性によって，まったく逆の優先権をあたえることがより有効なことがある。

第二に，ある優先ルールがあったときに，それが自己矛盾を生ずる場合がある。その一例は，図-1 のような三体encounterの発生である。右側から交差する進路に優先権をあたえるというルールでは，三すくみの状態におちいり，なんらかの方法で外部から優先順序をあたえてやらねばならない。このような状態の発生確率の式は，前報で計算した三重encounterの確率に，ほぼ似た形になる。

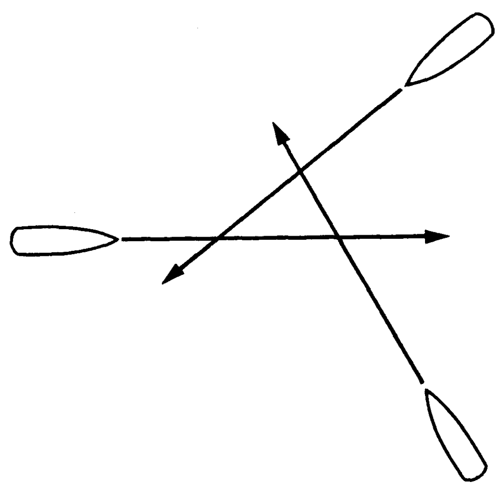


図-1　三体 encounter

第三に，ある交差点が渋滞するとき，そこに流れこむ船をバイパスさせてやるという方式がある。これは交差交通システム固有の問題というよりは，全体の広域交通システムにかかわるもので，ここでは論じないことにする。

管制の必要性の判定にもちいられる基準についてつけ加える。前報では，管制をおこなったときとそうでないときの時間おくれの比較によって判定するという方法をもちいた。ここでは，混雑の度合によって，たとえばバイパスをおこなうなどの方式をとることができるので，その基準としての混雑の度合について考察してみる。前報で単位時間あたりの時間おくれ総和として，優先権をあたえたとき，

$$\frac{1}{2}QQ'\overline{(\tau+\tau')^2}$$

なる式を得た。この量はまた，

$$\frac{\text{時間おくれ総和／交通量}}{\text{単位時間／交通量}}=\frac{\text{平均時間おくれ}}{\text{平均到着間隔}}$$

と書きかえられるから，この交差点における平均の待機隻数となる。この値をMとおき混雑の度合とすることはごく自然であろう。この関係が，交通システムにおける旅行時間にかんする定理[2]からの帰結であることは容易にわかる。

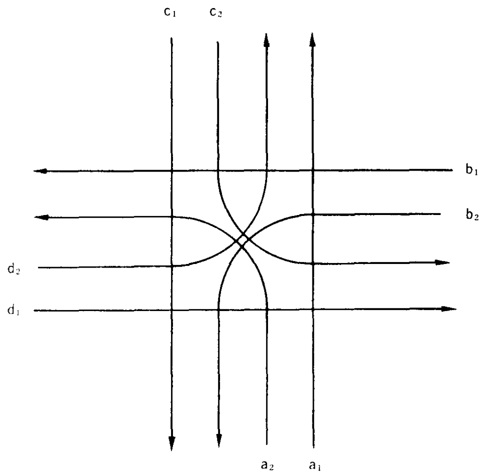
2.　多体問題の影響

2.1　多体問題省略の条件

n本の進路がすべて交差しあう交通状態を完全n差交通とよぼう。完全でない場合，ある進路はそのひとつ上の優先順位の進路にのみ直接的に影響をうけるだけであるが，完全n差交通の場合，優先順位をもつすべての進路に影響される。したがって多体問題の影響は完全な場合に大きい。

また，通常三分岐および四分岐交差点の場合が多いが，三分岐交差点では三組の合流とひと組の完全三差交通が存在し，四分岐交差点では 図-2 からわかるように完全三差交通はあっても完全四差交通は存在しない。したがって二差交通と完全三差交通をくわしくしらべることが必要とおもわれる。

まず三体問題が二体問題にくらべて発生する確率が



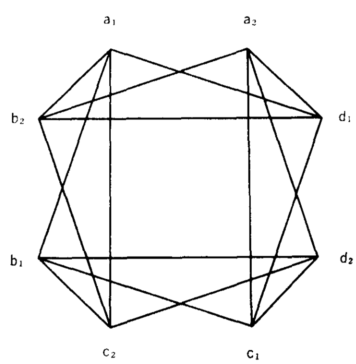


図-2 四分岐交差点での交差関係

ちいさく，省略できる条件をしらべてみる。

完全三差交通の場合をとり，すべての船の速度と長さはひとしく，水路のある長さにふくまれる船の隻数はポワソン分布にしたがうとする。純粋に二体 encounter がおこる期待値は，ふたつの進路について，

$$QQ'(\tau+\tau')e^{-(Q+Q')(\tau+\tau')-Q''(\tau+\tau'')-Q''(\tau'+\tau'')}$$

であって，三つの進路から二つをとる組合せを考えてこの形が三項になる。ダッシュはそれぞれの進路を区別するためにとった。純粋な三体encounterにたいしては，三つの進路のおのおの一隻ずつの組合せに，

$$QQ'Q''(\tau+\tau')(\tau+\tau'')e^{-(Q+Q')(\tau+\tau')-(Q+Q'')(\tau+\tau'')-(Q'+Q'')(\tau'+\tau'')}$$

なる値が得られ，三重encounterをのぞけばこの形が三項存在する。また，三つの進路からふたつをとり，その一方が一隻，他方が二隻である三体encounterは六通りあり，そのおのおのは，

$$\frac{1}{2}QQ'^2(\tau+\tau')^2e^{-(Q'+Q)(\tau+\tau')-2Q''(\tau'+\tau'')-Q''(\tau+\tau'')}$$
$$\cdot\frac{2}{Q(\tau+\tau')^2}\left\{\tau+\tau'+\frac{e^{-Q(\tau+\tau')}}{Q}-1\right\}$$

の形をもっている。ここで，$Q=Q'=Q''$ とし，また $\tau=\tau'=\tau''$ であるから，

二体，$6Q^2\tau\ e^{-8Q\tau}$

三体，$12Q^3\tau^2e^{-12Q\tau}+12Q^3\tau^2e^{-10Q\tau}$
$$\cdot\frac{1}{2\tau^2Q}\left(2\tau+\frac{e^{-2Q\tau}-1}{Q}\right),$$

比，$2Q\tau\left[e^{-4Q\tau}+e^{-2Q\tau}\frac{1}{2\tau^2Q}\left(2\tau+\frac{e^{-2Q\tau}-1}{Q}\right)\right]$

となる。この比と $Q\tau$ の関係を 図-3 にしめす。

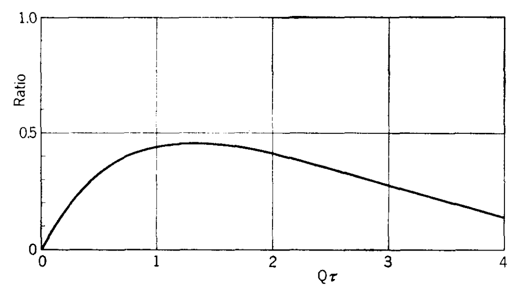


図-3 二体および三体 encounterの期待値の比率と$Q\tau$の関係

これからみると，$Q\tau=0.06$にたっするとこの比が 0.1 になり，二体および三体の期待値が同じオーダーになりだすことがわかる。

四体以上のeucounterの期待値も同様にして得られ因数 $Q\tau$ がつぎつぎにかけられてゆくが，一般に導出には大きな労力を要するので，ここでは議論せず，むしろ次節以下の時間おくれの計算によってその影響を直接見ることにする。

2.2. 二差交通における時間おくれ

簡単のため，これから後は，すべての船の長さと速さがおなじとして，時間おくれの問題を論じる。交差点につぎつぎとはいってくる船の間隔の分布が指数分布，すなわちランダムな交通とみなされる場合を考える。優先権をもつ側の交通量をQ，他をQ'，船の長さL，速さvとする。この場合，換算長さは $2L$ であって，この長さが交差点を通過する時間を $T(\equiv 2L/v)$ とおくと，優先権を持たない側からみると，交差点がランダムに時間間隔 Tをもって閉塞されていることになる。これらの間隔 Tはすべて分離しているわけでな

く，当然，いくつもが重なりあってさらに長い閉塞区間ができる。この重なりがとぎれる確率は，すなわち交差点が開放される確率で，いいかえれば優先側の到着時間間隔がTより大になる確率であって，

$$\int_T^\infty Qe^{-Qx}dx=e^{-QT}$$

である。（図-4）

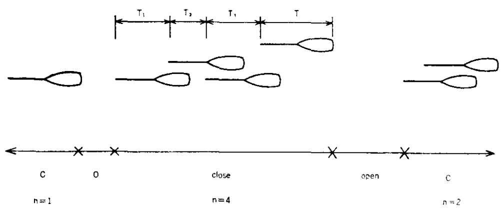


図-4 交差点の閉塞される時間間隔

さらに，n個のTが重なる閉塞区間で各船の間隔がT_1，T_2，$\cdots T_{n-1}$（$<T$）であるようなもののできる確率は，

$$e^{-2QT}Qe^{-QT_1}Qe^{-QT_2}\cdots\cdots Qe^{-QT_{n-1}}dT_1dT_2\cdots\cdots dT_{n-1}$$

である。

この重なった閉塞区間 $T_1+T_2+\cdots+T_{n-1}+T$ のあいだに，他の側から船が平均 Q'（$T_1+T_2+\cdots+T_{n-1}+T$）隻はいってきて，平均 $\frac{1}{2}$（$T_1+T_2+\cdots\cdots+T_{n-1}+T$）だけ待たなければならないから，単位時間あたりの時間おくれの総和は，

$$\sum_{n=1}^{\infty}\int\cdots\int_0^T\frac{1}{2}Q'(T_1+T_2+\cdots+T)^2Qe^{-2QT}Qe^{-QT_1}\cdots dT_1\cdots$$

$$=Q'\left(\frac{e^{2Q\tau}}{Q}-\frac{1}{Q}-2\tau\right)$$

$$=2QQ'\tau^2\left(1+\frac{2}{3}Q\tau+\frac{1}{3}Q^2\tau^2+\frac{2}{15}Q^3\tau^3+\cdots\right)$$

となる。ただし，$\tau\equiv L/v$ である。あきらかにカッコの中の第二項以下は，それぞれ三体，四体，……問題に関係する項である。二体問題のみを考えると，どちらに優先権をあたえても，単位時間あたりの時間おくれの総和はかわらないが，三体問題以上を考慮するとあきらかにことなる。

みちびかれた式は，Q，τ，Q' のすべての値にたいして有限である。これは，はじめに述べたような容量の効果を導入していないことによる。

2.3　三差交通によるもの

完全三差交通における時間おくれは，前節とまったく同じ条件を仮定して，容易に計算できる。優先順位にしたがって交通量を Q，Q'，Q'' とする。第二優先権をもつ進路の時間おくれは，前節とまったく同じ式であたえられる。三番目の進路の船にたいしては，解析的な表現を得るためにいくらか近似をおこなうことにする。まず第一近似としては，第一および第二優先順位の船の相互干渉が無視できるとする。したがってこれら二進路の船の重なりは，

$$(Q+Q')e^{-(Q+Q')x}dx$$

なる到着間隔分布をもっていて，交差点を第三順位の船にたいして閉塞することになる。この近似の結果，

$$Q''\left(\frac{e^{2(Q+Q')\tau}}{Q+Q'}-\frac{1}{Q+Q'}-2\tau\right)$$

$$=2Q''(Q+Q')\tau^2\left[1+\frac{2}{3}(Q+Q')\tau+\cdots\cdots\cdots\right]$$

なる単位時間あたりの時間おくれが生じる。

さらに第二近似として，三体問題の補正をおこなう。すなわち，第一順位と第二順位の船がおのおの一隻ずつeucounterをおこない，第二順位の船が待たされた結果生じる間隔分布によって，第三順位の船が閉塞される場合をとる。計算の結果，

$$\frac{Q''}{2}e^{-4(Q+Q')\tau}\left\{5\tau^2-\frac{4\tau}{Q+Q'}-\frac{2}{(Q+Q')^2}\right.$$

$$\left.+\left[\frac{6\tau}{Q+Q'}+\frac{2}{(Q+Q')^2}\right]\cdot e^{-(Q+Q')\tau}\right\}\cdot\frac{2QQ'}{(Q+Q')^2}$$

$$=\frac{8}{3}QQ'Q''\tau^3\left\{1+\cdots\cdots\right\}$$

なる補正項が得られる。$Q=Q'=Q''$ とおけば全体で，

$$6Q^2\tau^2+\frac{28}{3}Q^3\tau^3+\cdots\cdots$$

となる。二体項三体項の比は $Q\tau=0.064$ で 0.1 となる。

3.　容量の効果

3.1　容量を考慮した船の間隔分布のモデル

まえに述べたように，水路のある範囲内にはいり得る船の隻数には限りがある。すなわち容量を考慮しなければならない。したがって，無限個の船が有限の範囲に存在する確率がゼロとならないポアソン分布，すなわち到着間隔が指数分布，という仮定はなりたたず別の分布関数をもちいるべきである。

容量の効果をもとめることだけが現在の目標であるから，水路巾方向および進行方向の両方に，まったくランダムに，いろいろの長さと速さをもつ船が分布するという，一般的な状態を考えるかわりに，ここではごく簡単化したモデルを提出するにとどめる。

まず船の速さはすべて同じとする。かくて空間分布と時間分布ははっきりと対応することになる。さらに船の長さもすべて同じとし，水路巾を，一隻だけが通過し得る一定巾のいくつかのレーンに分割し，ひとつずつのレーンには前の船尾と後の船首の間隔がランダムであるように，長さLの船が分布しているものとする。

このモデルをとると，1レーンの場合，船の到着間隔分布は，

$$g(x)dx=\begin{cases}0 & ,\ x<\tau\\ \dfrac{Q}{1-Q\tau}e^{-\frac{Q(x-\tau)}{1-Q\tau}}dx & ,\ \tau<x\end{cases}$$

となる。Qは交通量（1レーンあたり），$\tau\equiv L/v$
で今後，

$$\lambda\equiv\frac{Q}{1-Q\tau}$$

とおくことにする。

以下，一般にもちいられる手法[3]にしたがって計算をしてゆく。まず，任意時刻からはかって，はじめて次の船が到着するまでの時間が（$x\sim x+dx$）の間にある確率（Starting Density）は，

$$g_0(x)dx=\begin{cases}Qdx & ,\ x<\tau\\ Qe^{-\lambda(x-\tau)}dx & ,\ \tau<x\end{cases}$$

である。ある時間xのあいだにN隻到着する確率は，

$$P(N=0)=\begin{cases}1-Qx & ,\ x<\tau\\ (1-Q\tau)e^{-\lambda(x-\tau)} & ,\ \tau<x\end{cases}$$

$$P(N=1)=\begin{cases}Qx & ,\ x<\tau\\ 2-Qx-2(1-Q\tau)e^{-\lambda(x-\tau)}, & \tau<x<2\tau\\ \{Qx+2(1-2Q\tau)\}e^{-\lambda(x-2\tau)} & \\ -2(1-Q\tau)e^{-\lambda(x-\tau)}, & 2\tau<x<3\tau\end{cases}$$

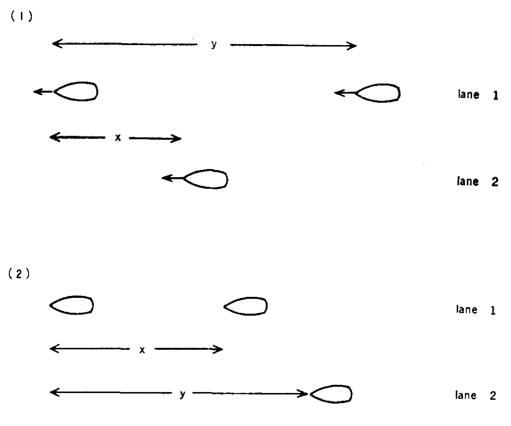


図-5　2レーン到着間隔のふたとおりの状態

$$P(N=2)=\begin{cases}0 & ,\ x<\tau\\ Qx+(1-Q\tau)e^{-\lambda(x-\tau)}-1 & ,\ \tau<x<2\tau\\ \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots & ,\ 2\tau<x<3\tau\end{cases}$$

等となる。

レーン数が多いとき，到着間隔分布はどうなるであろうか。たとえば2レーンの場合，間隔がxであるためには，図-5のような，ふたとおりの状態がある。すなわち，2レーン到着間隔分布は，

$$g^2(x)dx=[g_0(x)P(y>x)+g(x)P_0(y>x)]dx$$
$$=\begin{cases}Qdx & ,\ x<\tau\\ 2Qe^{-2\lambda(x-\tau)}dx & ,\ \tau<x\end{cases}$$

である。この計算をくりかえすと，

$$g^m(x)dx=\begin{cases}(m-1)Q(1-Qx)^{m-2}dx & ,\ x<\tau\\ mQ(1-Q\tau)^{m-2}e^{-m\lambda(x-\tau)}dx, & \tau<x\end{cases}$$

であり，Starting Density は，

$$g_0^m(x)dx=\begin{cases}mQ(1-Qx)^{m-1}dx & ,\ x<\tau\\ mQ(1-Q\tau)^{m-1}e^{-m\lambda(x-\tau)}dx, & \tau<x\end{cases}$$

となる。

mレーン到着間隔分布関数は，図-6のようなかたちになる。もしmが大となれば，曲線はより平滑化され，この分布は指数分布で近似することができよう。すなわち，逆にいえば，レーンがすくないほど容量の効果がでてくる。

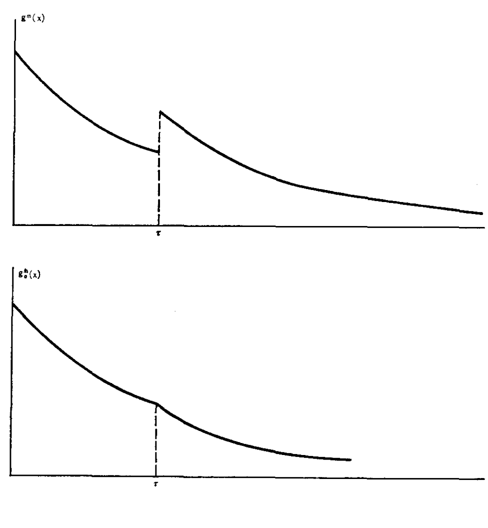


図-6　mレーン交通モデルの到着間隔分布関数およびStarting Density

3.2 優先側のみ容量を考慮したとき

前節の最後に述べたことから，時間おくれにたいする容量の影響をみるために，１レーン二差交通の場合をとりあげるのが適当である。計算の方法は，前とまったく同じであるが，優先側のみ容量を考慮し，他の側の通過容量を考えない。すなわち，非優先側の交通量はまだ小であって，交差点の閉塞がとぎれたとき，いままで待っていたすべての船が通過できるとしても大きい誤差はない程度と仮定する。

結果は，

$$\frac{1}{2}QQ'\left[2\left(\tau+\frac{1}{\lambda}\right)^2 e^{\lambda\tau}-3\tau^2-\frac{6\tau}{\lambda}-\frac{2}{\lambda^2}\right]$$

$$=2QQ'\tau^2\left(1+\frac{13}{12}\lambda\tau+\frac{7}{16}\lambda^2\tau^2+\frac{31}{240}\lambda^3\tau^3+\cdots\cdots\right)$$

$$=2QQ'\tau^2\left(1+\frac{13}{12}Q\tau+\frac{73}{48}Q^2\tau^2+\cdots\cdots\right)$$

である。影響は三体問題以上の項にのみおよぼされ，

$$Q\tau=1$$

のとき無限大となる。すなわち通過できない。

3.3 通過容量の影響

前と同様に１レーン二差交通を考え，すべての船の長さと速さは同一とする。あきらかに時間 $\tau\,(\equiv L/v)$ のあいだに通過できる船は一隻だけである。待ち行列問題を解く方法を利用した計算手順は付録にかかげる。

単位時間あたりの時間おくれ総和，すなわち待ち隻数の平均は，

$$\frac{\beta''[(1-\beta)^2+\beta'(2-\beta)]}{[(1+\beta'')(1-\beta)+\beta'\beta''](1-\beta)}$$

である。ただし，

$$\begin{cases}\beta\equiv\dfrac{qQ'\tau}{p\,(1-Q'\tau)} \quad \beta'\equiv\dfrac{q'Q'\tau}{p\,(1-Q'\tau)} \quad \beta''\equiv\dfrac{Q'\tau}{p'(1-Q'\tau)}\\[2ex] p\equiv\dfrac{Q\tau e^{-\lambda\tau}}{1-e^{-\lambda\tau}} \qquad q=1-p\\[2ex] p'\equiv\left(1-\dfrac{Q\tau}{2}\right)e^{-\lambda\tau} \quad q'=1-p'\end{cases}$$

である。通過中のものもふくめたから，上式から単位時間あたりの通過時間 $Q'\tau$ を減じなければならない。その結果，

$$\frac{Q'\tau(1-Q'\tau)\left(1-e^{-\lambda\tau}+\dfrac{Q\tau}{2}e^{-\lambda\tau}\right)}{p'+\left(q'-2\dfrac{p'}{p}\right)Q'\tau-\left(\dfrac{q'}{p}-\dfrac{p'}{p^2}\right)(Q'\tau)^2}$$

$$=\frac{3}{2}QQ'\tau^2(1+\cdots\cdots\cdots)$$

となる。分母がゼロとなるとき，すなわち時間おくれ無限大となる $Q'\tau$ と $Q\tau$ の関係を 図-7 にしめす。

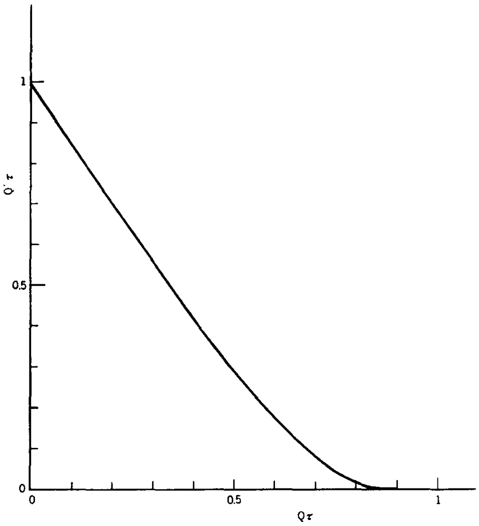


図-7 時間おくれ無限大となるときの $Q\tau$ と $Q'\tau$ の関係

4. 非定常問題

交通量が比較的ゆっくり変動する場合の交差点における状態変化を考察する。ここでは交通量のすくない場合についてのみとりあつかうことにする。前報で述べたように，片側に優先権のある二差交通において，単位時間あたりの時間おくれが $t\sim t+dt$ の間である確率は，

$$\{Q+Q'-QQ'(\bar{\tau}+\bar{\tau}')\}\,\delta(t)dt$$

$$+\ \{QQ'\iint_{t<\tau+\tau'}^{\infty}p(\tau)p'(\tau')d\tau d\tau'\}\,dt$$

となる。$p(\tau)$，$p'(\tau')$ はそれぞれの進路における船の特性時間 $\tau\,(\equiv L/v)$ の分布関数，$\delta(t)$ はデルタ関数である。

まえに筆者が証明したように，一般的なひとつの交通路網をとり，そこに単位時間に流入する船の隻数を Q，内部に存在する隻数を S，流入してから流出するまでに要する時間が，

$$f(t)\ dt$$

なる分布をもつとすれば，これらの間には，

$$\bar{t}=S/Q \qquad \bar{t}=\int_0^\infty t f(t)\,dt$$

の関係がある。また Q が時間的に変動するとき，$f(t)$ の形が変らなければ，この交通路網は線形システムであるといわれ，

$$S(t)=\int_0^\infty f(\xi)\,[\int_{t-\xi}^{t} Q(\xi)\,d\xi]\,d\xi$$

なる関係がある。

たとえば流入量が,

$$\begin{cases} Q & ,\ t<0 \\ Q+\Delta Q, & t>0 \end{cases}$$

なるステップ型の関数形をもつときは,

$$S(t)=Q\bar{t}+\Delta Q\,[t\int_t^\infty f(\xi)\,d\xi+\int_0^t \xi f(\xi)d\xi]$$

となり，また,

$$Q+\Delta S\,\delta(t)$$

なるインパルス型ならば,

$$S(t)=Q\bar{t}+\Delta S\,[1-\int_0^t f(\xi)\,d\xi]$$

となり，それぞれ 図-8 の(1), (2)のようになる。

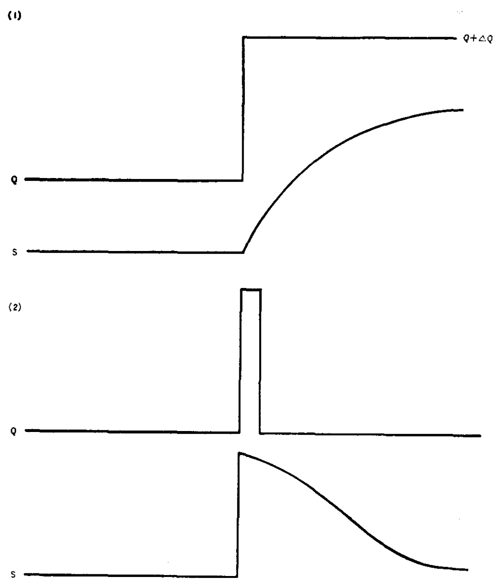


図-8 交通量が変化したときの待機隻数の変化

さて，交差点をこの交通路網の特殊な場合とみなすと，あきらかに，交通量は流入量 Q に，時間おくれ分布は $f(t)$ に，待ち隻数は S に対応する。

非優先側のみに着目すれば，時間おくれ分布は単位時間あたり,

$$[Q'-QQ'(\overline{\tau}+\overline{\tau'})]\,\delta(t)dt + [QQ'\iint_{t>\tau+\tau'}^{\infty} p(\tau)P'(\tau')d\tau d\tau']\,dt$$

となり，一隻あたり,

$$[1-Q(\overline{\tau}+\overline{\tau'})]\,\delta(t)\,dt + [Q\iint p(\tau)p'(\tau')d\tau d\tau']\,dt$$

で，Q' に無関係であるから，線形のシステムと考え得る。

このような簡単な場合をのぞき，Q の変化，通過容量の影響などをいれた場合，解析的表現を得ることは困難である。

5. むすび

以上のように，交通量大なる場合の交差点における時間おくれについて議論し，多体問題および容量のおよぼす効果をもとめた。また簡単な非定常問題をとりあつかった。

ここに得られた結果は，具体的な交差交通システムに適用するとき，相当に大きな効果をあげることができる。しかし，よりくわしい予測や管制方法の決定をおこなおうとするとき，結果の導出に必要な条件によって，大きく制約されていることは否定できない。たとえば，交通量小なるときは，長さや速さがある分布をもっていることをくりいれることができたのにたいし，交通量大なるときはそれを無視して，すべての船の長さや速さは同じであるとして結果をみちびいた。非定常問題においても，線形の場合しか解析的表現を得ることができない。

このような条件的制約をぬけだすためのひとつの方法として，シミュレーションの方法がある。この方法を唯一無二のものであるとするのは問題だが，すくなくとも，encounter や時間おくれが生ずる機構がはっきりしていて，流入船舶の分布や水路条件が厳密にあたえられれば，解析的結果によるものとまったく同様の結果が得られるようなシミュレーションが存在するわけで，これをもちいて解析的表現を得るのが困難な場合を解決できる。

今後は，まずデータの蓄積，それを利用してのシミュレーションというような方向に研究をすすめる。実際の観測データは，理論およびシミュレーション結果のチェックとして有用である。

最後に，船の encounter の判別にともなう問題についてふれておく。encounter するはずなのに，しないと判定してそのまま前進する場合と，しないはずなのにすると判定して待機する場合がおこり得る。前者の場合，やがて正しい判定にもどるであろうが，後者の場合，最後までまちがったままであることがおきる。これは，いいかえれば船の長さを過大に見積ったこと

と等価である。また encounter をぎりぎりの位置で回避することは通常あり得ず，かなり余裕をもっておこなうことであろう。結局，実際の船の長さおよび巾よりも大きな範囲を，それぞれの船にわりふらなければならない。すなわち"閉塞領域"に似た概念がここに必要となる。これは運動性能にもとづいて法規によって定めてもよいが，いずれにせよ物理的にはっきりしたものでない。

筆者は，このようなあいまいな概念をなるべくもちいないようにして，いままで議論してきた。この研究を一歩でも厳密科学にちかづけたいからである。もちろん，必要であれば，このような概念をくりいれてゆくことは可能である。具体的には，諸結果の中の船の長さ L のかわりに，"安全係数" a をかけた aL を代入すればよい。一般に安全係数は最後にとるものであり，はじめから安全係数をかけて議論するとき，重大なあやまりが生ずるとおもう。

付録　通過容量の効果の計算

任意時刻 t において，通過中をふくむ待機隻数 n である確率を $p_n(t)$ とする。これと時刻 $t+\tau$ における $p_n(t+\tau)$ との関係をしらべる。

$$\begin{cases} \text{時間 } \tau \text{ の間に一隻も到着しない確率} & 1-Q'\tau \\ \quad〃 \quad \text{一隻到着する確率} & Q'\tau \\ \quad〃 \quad \text{一隻以上到着する確率} & 0 \end{cases}$$

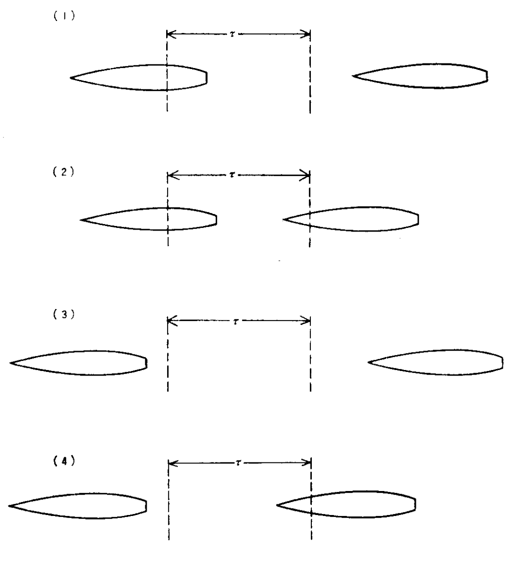


図-9　任意にとった時間間隔 τ と，優先側船舶による閉塞時間との位相関係

τ の間の通過の確率をしらべるために，間隔 τ と，優先側による閉塞時間との関係をみると，図-9 のようになる。

(1)　いかなる場合も通過できない。

$$(1-Q\tau)(1-e^{-\lambda\tau})$$

(2)　〃

$$Q\tau-(1-Q\tau)(1-e^{-\lambda\tau})$$

(3)　t において一隻も存在しなければ通過しない。

$$(1-Q\tau)e^{-\lambda\tau}$$

一隻以上存在すればかならず一隻通過できる。

(4)　t においてゼロ隻ならば通過しない。

$$(1-Q\tau)(1-e^{-\lambda\tau})$$

〃　1隻存在すれば通過確率 $\dfrac{Q\tau}{2}e^{-\lambda\tau}$

〃　2隻以上ならば通過確率

$$\frac{e^{-2\lambda\tau}(1-Q\tau)-e^{-\lambda\tau}(1-2Q\tau)}{1-e^{-\lambda\tau}}$$

$p_n(t)$ のしたがう方程式は，

$$\begin{cases} p_n(t+\tau)=p_n(t)\{pQ'\tau+q(1-Q'\tau)\} \\ \qquad\qquad +p_{n+1}(t)p(1-Q'\tau)+p_{n-1}(t)qQ'\tau \\ \quad\vdots \\ p_2(t+\tau)=p_2(t)\{pQ'\tau+q(1-Q'\tau)\} \\ \qquad\qquad +p_3(t)p(1-Q'\tau)+p_1(t)q'Q'\tau \\ p_1(t+\tau)=p_1(t)\{p'Q'\tau+q'(1-Q'\tau)\} \\ \qquad\qquad +p_2(t)p(1-Q'\tau)+p_0(t)Q'\tau \\ p_0(t+\tau)=p_0(t)(1-Q'\tau)+p_1(t)(1-Q'\tau)p' \end{cases}$$

ただし，

$$\begin{cases} p\equiv\dfrac{Q\tau e^{-\lambda\tau}}{1-e^{-\lambda\tau}},\quad p'\equiv\left(1-\dfrac{Qt}{2}\right)e^{-\lambda\tau}, \\ q=1-p, \qquad q'=1-p' \end{cases}$$

である。

定常状態とすると，

$$\begin{cases} p_{n+1}=p_n\{1+\beta\}-\beta p_{n-1} \\ \quad\vdots \\ p_3=p_2(1+\beta)-\beta' p_1 \\ p_2=p_1\left(\dfrac{p'}{p}+\beta'\right)-\dfrac{p'}{p}\beta'' p_0 \\ p_1=\beta'' p_0 \end{cases}$$

ただし，

$$\beta\equiv\frac{qQ'\tau}{p(1-Q'\tau)},\ \beta'\equiv\frac{q'Q'\tau}{p(1-Q'\tau)},\ \beta''\equiv\frac{Q'\tau}{p'(1-Q'\tau)},$$

である。

確率母関数　$\pi=\sum_{n=0}^{\infty}p_nS^n$　を定義し，上式に S^n をかけて加え整理すれば，

$$\pi=\frac{p_0[(1-\beta S)(1+\beta''S)+\beta'\beta''S^2]}{1-\beta S}$$

$S=1$ で $\pi=1$　であるから，

$$\pi=\frac{(1-\beta)[(1-\beta S)(1+\beta'' S)+\beta'\beta'' S^2]}{[(1+\beta'')(1-\beta)+\beta'\beta''](1-\beta S)}$$

n の平均値は，

$$\sum_{n=0}^{\infty} n p_n = \left(\frac{d\pi}{dS}\right)_{S=1}$$

であるから，

$$\frac{\beta''[(1-\beta)^2+\beta'(2-\beta)]}{(1-\beta)[(1+\beta'')(1-\beta)+\beta'\beta'']}$$

を得る。

参 考 文 献

(1) 渡辺健次；船舶交通システムの研究
一交差交通の研究　その1一
船舶技術研究所報告　第9巻　第3号
1972, p. 1

(2) 渡辺健次；船舶交通システムの研究
一広域交通の理論解析一
第18回船舶技術研究所研究発表会
講演概要，1971，p. 96

(3) HAIGT ; Mathematical Theories of Traffic Flow ; Academic Press ; 1963