航路航行船の船首時間間隔と横断船の避航挙動

辻 啓介*・喜多秀行**・奥山育英**

Time Headway of Ships Observed from a Crossing Ship in Giveway Motion

Keisuke TSUJI, Hideyuki KITA and Yasuhide OKUYAMA

Abstract

We propose an alternative definition of time headway of ships in fairway traffic flow, which is a basic traffic characteristics in analyzing traffic phenomena in fairway crossing, based on their relative positions to the crossing ships in this study.

The conventional definition of this headway has been defined as the time difference of consecutive ships arriving at a certain line fixed in transverse with the traffic flow. However, the major interest of a navigator who wishes to cross the flow is the distance to the closest ships both in right and left hand sides measured in time at the instance when the crossing ship crosses the sailing courses of ships in the flow. Taking this fact into consideration, new time headway is defined.

The case study based on selected observation data shows that the proposed model is useful to analyze crossing behavior of the ships by tracing giveway motions along time.

1. はじめに

本研究は、航路幅を考慮した航路航行船の船首時間間隔（以下、船首間隔という）を新たに定義するとともに、実態観測における航跡データから、新たに定義した船首間隔を算定し、従来の定義に基づく船首間隔との比較を行ったものである。さらに、新たに定義した船首間隔を用いて横断船の避航挙動を解析し、横断船の避航挙動分析の道具としての有効性などを検討する。

海上交通の交通特性の 1 つである船首間隔は、任意に設定された見通し線を通過する船舶の到着時間分布と定義されている⁽¹⁾。これは、ある道路断面を通過する自動車の時間間隔と定義された、道路交通における「車頭時間」をイメージするものである。しかし、航路は、道路とは違って、車線にあたる航行区分がなく、かつ、航路幅が広いため、横断方向の航行位置が重要な意味を持つと考えられる。

航路を横断する横断船の避航領域や航路交差部における交通現象については、いくつかの解析^{(2)~(5)}がある。いずれも、船首間隔が重要な交通特性として用いられ、著者の知る限り、そこでは、船舶は同一コース上を航行するものと仮定されている。この場合、船首間隔は従来の定義通り見通し線への到着時間間隔として扱われている。

実際は航路には幅があり、航路航行船は航路の幅方向にばらついて航行している。横断船にとっては、この航路航行船の航路幅方向のばらつきは無視できない。そこで、異なる船首間隔を持った複数レーンを横断するモデルが提案された⁽⁶⁾。しかし、航路には車線のような航路区分はなく、特殊な場合を除き航路航行船は自動車のように直線上を並んで航行することはない。航路内を航行している船舶は相互の存在を意識しているため、各レーン上の船舶が独立に航行しているとは言えず、また、船型による占有幅が異な

* 正会員 大島商船高等専門学校（〒742-21 山口県大島郡大島町大字小松 1091-1）

** 正会員 鳥取大学工学部社会開発システム工学科（〒680 鳥取市湖山町南 4-101）

り、かつ、大小さまざまな船舶が混在して航行しているため、航路が複数のレーンから構成されていると見なすのは難しい。

航路を横断しようとする横断船の操船者は、航路航行船の間に横断できそうなすき間を捜し横断する。横断可能な船首間隔が見出せない場合、横断船は針路もしくは速度またはその両者を変更することにより、横断に必要な船首間隔を形成する。

横断船の挙動を観測していると、ある程度の側方間隔をあけて並走する2船の航路航行船間を航行する横断船が少なからず見受けられる。すなわち、見通し線上への到着時間間隔として定義された従来の船首間隔では同時到着であっても、横断船にとっては横断可能な間隔が存在していることとなる。このことは、横断船の航路航行船に対する関心事が、個々の航路航行船の進路を横断する時点での各船との位置関係にあることを意味しており、横断船の操船環境および避航挙動等を評価するうえにおいて、航路航行船の航路幅方向の航行位置を考慮した船首間隔の新たな定義を必要とすることを示唆している。

従来の船首間隔に航路幅方向のばらつきを考慮する場合、見通し線上通過位置に関する変数、例えば見通し線上の座標値 y などを定義し、見通し線への到着時間間隔 Δt との2変数表現となる。しかし、2変数による表現よりも、両変数を組合わせた1変数による表現が簡単で、しかも便利である。そこで、新たな船首間隔を「横断船からみた船首間隔」として、次のように定義する。

2. 横断船からみた船首間隔

2.1 定義

並航している2隻の航路航行船 B 船、C 船および両船の進路を直角に横断しようとしている横断船 A 船が、時刻 $t=t_0$ で図1に示す A、B、C の位置を航行しているとする。そのときの各船の速度を V_0 、 V_B 、 V_C とする。

A 船が B 船の進路前方を横切る時刻 $t=t_1$ に、A 船は A_1 にあり、B 船は B_1 にある。その時の両船の交差距離を Δd_B とする。 Δd_B は、A 船が両船の進路交差点へ到着したときの B 船までの距離であり、A 船に対する B 船の相対軌跡が、A を通り B 船の進路方向に平行な直線を切る点 B' と A との距離と等価である。B 船の速度は V_B であるから、両船間の交差時間差 Δt_B は、

$$\Delta t_B = \Delta d_B / V_B \quad \text{..... (1)}$$

として求めることができる。以下では、この交差時間差をタイムラグと言う。

同様に、A 船が C 船の進路後方を横切る時刻 $t=t_2$ に A 船は A_2 にあり、C 船は C_2 にある。両船の交差距離を Δd_C とすると、A 船と C 船との交差時間差 Δt_C は、

$$\Delta t_C = \Delta d_C / V_C \quad \text{..... (2)}$$

で与えられる。

次に、タイムラグの計算方法について説明する。図2において、横切り関係にある A 船と B 船がそれ

図1 横断船からみた船首間隔の概念

図2 タイムラグ計算のベクトル三角形

ぞれ A、B にあり、両船の進路が交差する点を Q とする。この時の A 船に対する B 船の相対位置をベクトルで示し、 Δ_P とする。また、A 船と B 船の速度をベクトル Δ_A 、 Δ_B で表わす。

A 船は t_n 分後に、B 船は t_m 分後に進路交差点 Q に到着するものとすれば、ベクトル三角形 ABQ において、

$$t_n \cdot \Delta_A = t_m \cdot \Delta_B + \Delta_P \quad \dots\dots\dots (3)$$

が成り立つ。式(3)から t_m と t_n を求めることができる。 t_m と t_n は進路交差点 Q までの航行時間であるから、A 船の B 船に対するタイムラグ Δt_B は、

$$\Delta t_B = t_n - t_m \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。

航路航行船が横断船よりも後に Q 点に到着する場合、横断船は航路航行船の前方を通過することになる。この時のタイムラグを前方ラグと言う。すなわち、横断船が航路航行船の前方に確保できるタイムラグを前方ラグとし、 $t_n < t_m$ の場合であるから、 $\Delta t < 0$ である。交差点距離 Δd を、横断船からみた航路航行船までの距離とし、航路航行船の進路方向を正とすれば、式(1)においても $\Delta t < 0$ となる。逆に、航路航行船が横断船よりも先に Q 点に到着する場合に、横断船が航路航行船の後方に確保できるタイムラグであり、後方ラグと言い、 $\Delta t > 0$ である。図 1 の状況では、 Δt_B は前方ラグであり、 Δt_C は後方ラグである。

以上で定義されたタイムラグより、航路を先行して航行する B 船の横断船 A 船に対するタイムラグを Δt_B 、後続する C 船の A 船に対するタイムラグを Δt_C として、横断船 A 船からみた BC 間の船首間隔 $\Delta T_{(BC)}$ を、次式で与えることとする。

$$\Delta T_{(BC)} = \Delta t_C - \Delta t_B \quad \dots\dots\dots (5)$$

すなわち、「相続く 2 隻の航路航行船と横断船とのタイムラグの差」を、本研究で新たに提案する「横断船からみた船首間隔」と定義する。なお、具体的な計算手順については文献⁷⁾を参照されたい。

2.2 従来の定義との比較

新たに定義した「横断船からみた船首間隔 ΔT 」と、従来の定義に基づく「見通し線上の到着時間間隔としての船首間隔 ΔT_L 」との違いを、実態観測の航跡データを用いて比較をした。利用した航跡は、昭和 61 年 3 月に行われた明石海峡航行実態観測調査⁸⁾において得た航跡データである。

明石海峡航路は、航路航行船の交通量が多く、明石と岩屋間にはフェリーおよび旅客船が 1 日約 80 往復しており、横断船も多い。また、海上交通安全法において航路に指定されており、航路航行船優先の航路であり、横断船が避航義務を負うことになる。そのため、航路航行船と横断船の遭遇が頻繁に発生し、横断船は常に航路航行船を避航しなければならないという点で今回の解析に適した水域である。

図 3 は、横断船 A 船が明石港から岩屋港へ向かう南航のフェリーで、西航の 3 隻の航路航行船 B、C、D 船と交差した状況を示している。図中の各船の矢印は、各船の速度ベクトルを示している。

A 船の現在位置から A 船の針路方向に見通し線を設定し、航路航行船 3 隻がそれぞれ図 3 に示す地点から見通し線上を通過するまでの経過時間を各船の航跡から算定した。その結果、B 船は 5.09 分後に見通し線に到着し、C 船は 6.06 分後、D 船は 7.60 分後であった。したがって、設定した見通し線には、BCD の順で到着したことになる。各船間の到着時間差を求めることで、BC 間および CD 間の従来の定義に基づく船首間隔 $\Delta T_{L(BC)}$ と $\Delta T_{L(CD)}$ は次の通りとなる。

$$\Delta T_{L(BC)} = 0.57 \text{ 分}$$

$$\Delta T_{L(CD)} = 1.54 \text{ 分}$$

次に、航路航行船の A 船に対するタイムラグを式(3)および式(4)に従って求めたところ、

$$\Delta t_B = -3.20 \text{ 分}$$

$$\Delta t_C = 0.64 \text{ 分}$$

$$\Delta t_D = -3.03 \text{ 分}$$

であり、通過は CDB の順となる。

ここで着目すべきは、従来の船首間隔で航路上を BCD の順で見通し線に到着したが、新たな定義の下では CDB の順となり、B 船の順序が入れ替わっ

図 3 横断の状況 (1)
(新旧の船首間隔の比較)

ていることである。しかも、 Δt_c は後方ラグであり、 Δt_b と Δt_B は前方ラグであることから、横断船 A 船は C 船の通過後、D 船および B 船の前を横断できることが本指標のみから理解できる。

このように算定した各船のタイムラグ Δt_b 、 Δt_c 、 Δt_D を式 (5) に代入して求めた横断船からみた船首間隔は、それぞれ次のとおりである。

$$\Delta T_{(CD)} = 3.67 \text{ 分}$$

$$\Delta T_{(DB)} = 0.17 \text{ 分}$$

新旧の定義による船首間隔の違いを図 4 で比較する。下段には新たな定義に基づく船首間隔、すなわち、横断船 A 船に対する各航路航行船のタイムラグを描いた。タイムラグ $\Delta t = 0$ の位置が A 船の横断位置である。上段の時間軸には、D 船の位置を下段と一致させ、従来の定義に基づく船首間隔で各船の位置を描いた。

図 3 と図 4 において、B 船と C 船に注目しよう。従来の定義によれば、両船の船首間隔は 0.57 分であり極めて接近している。しかし、互いにある程度の側方距離をあけて並走しているため、新たな定義の下では船首間隔が 3.84 分となり、横断できないほど接近しているわけではないことがわかる。実際の航跡によれば、A 船はこの 2 船間を横断している。

次に C 船と D 船に注目すれば、従来の船首間隔では 1.54 分であるが、新たな船首間隔は 3.67 分であり、2 船間の横断は可能であった。また、B 船と D 船とに注目すれば、従来の船首間隔は 2.11 分であるが、新たな船首間隔は 0.17 分しかなく、この状況では、BD 船間を横断することは不可能であることがわかる。

以上の違いは、航路航行船の航路幅方向の航行位置が異なるために生じたものである。新たな定義に基づく船首間隔が、横断するか否かの判断と比較的よく対応していることがわかる。

A 船にとっては、B 船および D 船とは 3 分以上の前方ラグがあり、C 船とは後方ラグが 0.64 分である。CB 間および CD 間の船首間隔は横断可能な間隔であると判断した A 船の操船者は、C 船に注目しながら横断したものと推測できる。道路を横断しようとする歩行者に例えれば、C 船の通過直後に、引き続いて接近してくる B 船および D 船とのタイムラグが十分であると判断して横断したと考えられる。

3. 提案した船首間隔で見た避航挙動

前章では、ある時点での船首間隔に注目していた。

避航挙動とは、自船の針路・速力および自船位置を制御することにより避航領域を確保する操船者の行動である。横断船が航路を横断する際に、航路航行船の間に十分な間隔が確保できない場合、避航動作により相対運動を変更する行動として現れ、横断可能な船首間隔を確保することになる。

船首間隔の確保は、一瞬の行動ではなく時間の流れの中で、徐々に形成されていくものである。新たに定義した船首間隔を用いて、明石海峡の実航跡データから、横断船の避航挙動の時間的推移、および避航動作による船首間隔の変化について解析した。

3.1 船首間隔の確保行動

図 5 は、北航の横断船 A 船に対して交差する 3 隻の東航船 B、C、D 船の 1 分毎の航跡を示している。また、図 6 は、横断船が各航路航行船の進路の前方または後方を横切る時刻を $t=0$ として、その 7 分前 ($t=-7$) から 1 分後 ($t=+1$) までの航路航行船のタイムラグの推移を 1 分毎に示している。タイムラグの算定には式 (3) を用いるが、その際、速度として航跡の起点から終点までの平均速度、針路として起点と終点を結ぶ方位を航跡上の全ての地点で用いた。実際には避航動作をとることにより針路は変化するが、ここでは横断可能なすき間を見つけしだい当初の針路に向けて横断すると考え、このような取り扱いをすることとしたものである。

図 6 から、横断船 A 船は CD 間の船首間隔を横断しようとしていることが理解できる。しかし、D 船に対する前方ラグが小さく D 船の直前を横断する状況にある。そこで、C 船との後方ラグを犠牲にして D

図 4 新旧の定義による船首間隔の比較

上段－従来の定義に基づく船首間隔

下段－新たな定義に基づく船首間隔

図5 避航挙動の航跡図 (1)

図6 避航挙動によるタイムラグの推移 (1)

船に対する前方ラグを大きくする避航挙動をとったものと考えられる。実際の避航動作は、わずかな右変針であるが、航路航行船は航路入口付近で変針するため、結果的にCD間には十分な船首間隔が確保できている。

図7および図8は、同じように南航の横断船A船が3隻の東航船B、C、D船を避航した際の1分毎の航跡と、タイムラグの推移を示している。図8から、 $t = -4$ の時点までは、直接の避航対象であるC船に対して約1.5分の前方ラグがあり、C船とその先行船B船との間の船首間隔は約3.5分であった。しかし、実際には、右変針することによってC船の直後を横断している。この時、後続のD船との船首間隔もBC間の間隔とほぼ同じ約3.5分であったが、この横断船A船の操船者は、前方ラグ1.5分程度しかないAC間ではなくC船の直後を横切ることによって、より大きな前方ラグを確保することができるCD間を通過するという避航挙動をとったものと考えられる。

このように、新たに定義した船首間隔を用いれば、実航跡データの横断船がどこに注目して横断したか、また、避航行動を起した際にどのような考え方でよってその避航動作を採用したかを推測することが可能となる。

図7 避航挙動の航跡図 (2)

図8 避航挙動によるタイムラグの推移 (2)

3.2 船群に対する避航挙動

次に、集団をなして航行している複数の船舶、すなわち船群に対する避航挙動について解析した。

図9は、東航船によって航路内がほとんど閉塞された状況下を、北航の横断船が横断しようとしている状況を示している。この横断船は、図中の破線で示した船舶の間を横断した。図10にその時のタイムラグの推移を示す。 $t = -5$ の時点までは横断位置付近には横断可能な船首間隔が存在しないが、 $t = -4$ の時点で横断のための船首間隔を見出し、 $t = -2$ の時点までにその船首間隔を利用して横断できる位置に到達していることが理解できる。そして、見出した約2分の船首間隔を利用して横断した。

横断船が見出した船首間隔は、時間軸上にタイムラグとして表示された避航領域と考えられ、船群の中に避航領域が徐々に形成されて行く様子が如実に示されている。これは、新たに定義した船首間隔が船群に対する避航挙動を分析する上でも有効であることを示唆するものと理解される。

3.3 行動仮説としての船首間隔の確保

前節までは、横断船の針路・速度は一定と考えてきた。これは、航路を横断する際には航路筋になるべく直交して航行するという航法の原則に則した記述を行うためであった。しかし、

2隻の船が並航しているなど当初の針路で横断することが困難な場合は航路に対して斜めに針路を変更し、当該2船の間を抜ける行動がしばしば見られる。新たに定義した船首間隔は、式(3)に示したベクトルの関係式で与えられ、したがって針路および速度の関数となっている。これは、避航操船によって針路または速度を変更することにより、当初の針路・速度のままでは十分な間隔を確保できない航路航行船に対する船首間隔を変化させていることに相当する。すなわち、横断船は避航動作をとることにより、必要とする船首間隔を確保しているものと推察される。そこで以下では、変針による船首間隔の変化を解析した。

南航する横断船が西航の6隻の航路航行船と交差している状況下(図11)で、A船が左右にそれぞれ 30° まで 10° ごとに変針することにより、航路航行船の船首間隔がどのように変化するかを時間軸上に示したものが図12である。現在の針路に対応する船首間隔の上方に左変針を想定したもの、下方に右変針を想定したものを示している。横断船A船と各船のタイムラグそのものはいずれも大きく変化しているが、ほぼ同一コース上を航行していると考えられるB船とE船、およびC船とF船、ならびに、並航しているがA船からの距離があまり変わらないD船とE船の船首間隔はあまり変化していない。しかし、A船からの距離が大きく異なるC船とE船、F船とG船の船首間隔は大きく変化し、その順序も入れ替わっている。このように、航路航行船の航路幅方向の位置関係によって、横断船の変針による船首間隔の変化の様子が大きく異なることが確認できた。これは、変針することにより、横断船からの距離にある程度の差がある2隻の航路航行船の船首間隔を変化させうることを示している。同時に、同一変針角に対するタイムラグの変化量は横断船から航路航行船までの距離が長いほど大きい。したがって、限られた変針角の下では早期に避航動作をとることにより、航路航行船との間に確保できる間隔の範囲を広くすること

図9 横断前に航路内が閉塞された状況

図10 タイムラグの推移

(タイムラグにより避航領域が形成される様子)

図 11 横断の状況 (2)
(変針による変化)

図 12 変針によるタイムラグおよび船首間隔の変化

ができる。

さらに、現在の針路では F 船の直前を横断することになるが、右 $20^{\circ} \sim 30^{\circ}$ の変針をすることで、C 船および E 船との後方ラグは短くなるものの F 船との前方ラグを大きくすることができることを示し、また、 20° 以上の左変針をすることにより、この船群の後方を横断することができることをも示している。実際には、この横断船は左に大きく変針することによって、EF 間を横断していた。これは、ある船が数隻からなる船群に対して避航動作を取ろうとする際に、避航動作後の各船とのタイムラグを求めることのみで新たな針路を推測することができることを意味している。すなわち、横断船は必要な船首間隔を確保するために避航動作をとるという仮説がある程度確認された。したがって、横断時の交通流が与えられれば、横断船がとるであろう避航挙動を時々刻々と推測することが可能となる。

4. おわりに

本研究では、これまで「見通し線上への到着時間間隔」として定義されていた航路航行船の船首間隔を「横断船とのタイムラグの差」として新たに定義し、航路幅方向の通過位置のばらつきを考慮しうる指標とした。そして、船舶航行実態調査結果から切り出した航跡データを用いて、同一の状況下で従来の船首間隔と新たに提案した船首間隔の比較を行った。その結果、提案した船首間隔が横断船の避航判断と密接な関係にあり、横断船の避航挙動の解析の指標となり得ることを示した。また、新たな定義に基づく船首間隔によって、航路を閉塞するような船群に遭遇した横断船が、避航動作をとることによって船群の中に横断可能な船首間隔を見出して行く過程を示すことができた。これは、提案した船首間隔が避航領域の形成過程を分析する上で一つの道具となる可能性を示唆している。このように、新たに定義した船首間隔は海上交通の実態把握の 1 つの指標となり得るものと考えている。

しかし、この認識は、特定の局面におけるある 1 隻の横断船に対する限定された検討結果に基づくものでしかない。航路横断時に確保する船首間隔はその時々状況や操船者によっても異なるため、さらに多くの航跡を対象に解析を進め、統計的特性を検討することが必要である。今後は、新たに定義した船首間隔を利用して、航路交差部における避航挙動に対する理解を深めるとともに、合流現象等の横断以外の交通現象解析への利用を検討したいと考えている。

参 考 文 献

- (1) 原 潔：船舶交通の統計的特性—I，日本航海学会誌，35 号，pp.77-83，1966 年
- (2) 例えば，大島良三・藤井弥平：横切りの避航直径と避航領域，日本航海学会論文集，47 号，pp.103-108，1972 年
- (3) 例えば，原 潔・本田啓之輔・松木 哲・橋本 武：複線交差航路の解析とその応用，日本航海学会論文集，47 号，pp.93-102，1972 年
- (4) 長畑 司：船舶の航路横断における待合せ問題について，日本航海学会論文集，55 号，pp.133-142，1976 年
- (5) 例えば，平野新太郎：船舶の直交交差における待ち時間分布および交差容量について，日本航海学会論文集，57 号，pp.145-153，1977 年
- (6) 平野新太郎：避航動作を考慮した場合の航路交差部の交通容量についての一考察，日本航海学会論文集，60 号，pp.51-60，1979 年
- (7) 辻 啓介・喜多秀行・奥山育英：航路横断船からみた主航路航行船舶の船首時間分布，鳥取大学工学部研究報告，25 巻，pp.271-278，1994 年
- (8) 本州四国連絡橋公団第一建設局：昭和 60 年度明石海峡船舶交通実態調査報告書，1986 年