The Society of Naval Architects of Japan

操船者の受ける脅威感と危険感

—航路環境評価と衝突危険性—

正員 松 村 清 重* 浅 利 真 知**

Menace and Danger in Sense of a Captain

—Assessments of Navigation Surroundings and Danger to Ship Collision—

by Kiyoshige Matsumura, *Member* Machi Asari

Summary

A study on psychological aspects is made focusing on two different senses which fall upon a captain in navigation. One sense is called menace which originates in encumbrance for the freedom of the seas with not objects such as ships or islands but the mirror images of the captain's own ship in the boundaries formed by the objects. An analytical hypothesis is set forth to express the menace field by applying the image principle in hydrodynamics for an incompressible fluid. Some important examples of the menace fields are shown to assure the proposed hypothesis. Navigation surroundings are assessed in view of maneuverability of ships. Another sense is called danger how menace is coming or going away. The sense of danger is represented by the time differentiation of the menace field. It is discussed that the sense of danger relates strongly with fears for ship collision.

1. 緒 言

船舶自動航行[1)2)3)]，その安全評価[4)5)6)]，避航操船[7)]，コースラインの設定[8)]，交通管制など，特に輻輳海域や狭水路における操船法，航行環境の評価[9)]に関する研究が最近活発に行われている。これらに共通して衝突危険度の概念が用いられている。従来，レーダー航法に基礎を置いた危険度[10)]が主として用いられてきた。しかし，衝突回避の航行シミュレーションの盛んな今日では，危険領域，避航限界等の現象に基づく概念の多様性，ファジー推論等の制御手法の多様性に加えて，操船シミュレータを用いた心理学実験のような調査手法の多様性もあり，発展過程とはいえ統一的概念の形成には至っていない。

衝突予防と回避の問題は，自船しかいない水域では，物理的な航路環境の把握と当然のことながら自船の性能把握で，解決しうる決定論的問題である。しかし，他船が関与すると，それらの動きを十分には予測できないため，操船者心理のからむ複雑な問題へと一変する。その解決のためには，他船を含めた広義の航路環境を物理面のみならず心理面[11)]からも把握する必要がある。

本論では，操船者は脅威感と危険感という2種類の感覚を抱き，脅威感は閉塞性という水域の状態量に起因する感覚，危険感は脅威感の去就に起因する感覚との考えのもとに，脅威感を危険感の上位感覚に据え，心理的航路環境の評価と衝突危険性について論じたものである。

次節以下で次のことを述べる。脅威感とは自身が醸し出した幻覚であり，それは，脅威対象物に写った自船の鏡像が自船の行動領域を狭める，閉塞性に起因する。脅威対象物が水域に形作る境界は自船の鏡像形成の仲介をし，このような脅威感の性質を記述するために，完全流体力学の鏡像原理に基づく仮説を提案する。仮説に基づき種々の航路環境における脅威感を示し，仮説の妥当性を検討すると共に，航路環境そのものも同じ原理で評価する。脅威感はスカラー場をなし，その時間微分が危険感を表し，従来の衝突危険度と密接な関係にある。

本論で提唱する閉塞性ないしは脅威は，地形，船舶などの形状を厳密に採り入れ，それらの相互作用を解析的に論じうる。この意味で港湾設計や航路設定などの航路環境評

* 大阪大学工学部
** 関西設計(株)（研究当時大阪大学工学部船舶海洋工学科在学）

原稿受理 平成9年7月10日
秋季講演会において講演 平成9年11月14，15日

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

価や，海上交通のような希薄交通の取り扱いに適した概念であると考えられる。十分な考察とはいえないが，ここに，希薄交通心理学といった学問分野の創生を希い，ご報告しご批判を仰ぐ次第である。

2. 閉塞感・脅威感・危険感

本論で考察の対象とするものは，岸壁，防波堤，島，他船などが水域に境界を形成し，本来無限に広い自船の自由航行水域 W_s を狭められている，あるいは奪われている状態，すなわち閉塞状態である。大きくは大陸に閉塞されている。これは Lighthill と Whitham[12] の高密度交通流理論に対応する船舶密度ではない。

問題となる閉塞性は自船の置かれている現時点の環境，たとえば岸壁のそばなのか離れているのか，両岸か片岸の水域か，直線岸か島岸のような曲岸か，凹岸か凸岸か，他船が存在するか否か等の幾何学的状態で高低が決まる。しかし，例えば，小さな岩礁が W_s を閉塞しても，自船からの距離が同じであれば方向に関わらない。前方のみならず，後方や側方への航行の自由，言いかえれば増減速，変針の自由を奪っているからである。自船に接触する境界が形成されたとき，それを衝突の閉塞状態と呼ぶ。閉塞性は通常，時々刻々と変化する。

航行しているとき，操船者は2つの異なる感覚を抱く。一つは「狭くて嫌な水路だ」「もう少し離れろ！」などの感覚であり，もう一つは「ウワーッ，近づいてくる！」「やっと通り過ぎた，もう安全」という感覚である。1つ目は閉塞性という現状態に起因した心理感覚であり，これを閉塞感，逆の感覚を開放感と呼ぶ。閉塞感は主に衝突予防の避航動作をとらせる。2つ目の最初の例は，衝突（またはニアミス）の閉塞状態に近づきつつあるときの心理感を表現しており，これを危険感，逆の感覚を安全感と呼ぶ。危険感は，現在進行形または現在完了形の言葉で言い表されているように，閉塞感または閉塞性の時間変化に関わる感覚であり，それは自船のまわりに形成された境界が近づいてくる方向と速さに依存する。操船者の危険感は第3者的（客観的）危険性を反映していると考えられ，これを単に危険性と呼ぶ。危険感は衝突回避の緊急避航動作をとらせる。

このように，閉塞性(感)と危険性(感)とはそれぞれ異なる性状または感覚であり，閉塞性(感)という状態量の時間変化率が危険性(感)の高低を表していると考えられる。この意味で閉塞感は危険感の上位概念であり，閉塞感はそれを顕在化する能力（ポテンシャル）を表していると考えられる。閉塞感には「嫌」「離れろ！」といった岸壁や他船からの圧迫感，威圧感，逆にそれらに対する怒りの感情が伴う。また受動心理として自船の安全性への無言の暴力，脅威感として体感される。危険感の上位概念としては脅威感の名がふさわしいから，以下，閉塞感と脅威感について考察する。

脅威とは，力のある他に自がおびやかされること，威圧とは威力で他を抑えつけること，威とは自然と恐れ従うような鋭さの意であり自他の間を行き交う念と考えられる。概ね脅威は受動的に，威圧は能動的に用いる。しかし，威をふるう他が存在しても，それを威と感じる自が存在しないかぎり威圧と脅威の関係は成立しない。その逆も然りである。例えば水路を航走すれば両岸からの威を感じる。しかし，一方の岸が他方の岸に威を発しているかどうかは，知る由もなければ，その必要もない。また，他船が威を発しようとも，そこに自船がいなければ脅威は存在しない。他船同士が威を交わし合っても，自らの関知するところではない。このように脅威はあくまでも自を中心に据えたものであり，神から見た絶対的威を計れない以上，岸や他船からの威は自が醸し出したもの，幻覚であると考えざるを得ない。

そのような幻覚は自船の性能，対応能力の限界から生じる。水路を定常航走する場合，現速度では「狭くて嫌」な水路も，減速して航行すれば「広くて安心」な水路に気持ちが切り替わる。これは誤操船による衝突回避に要する時間を，自船の能力以内に収めることで解決されている。船同士の行き合いにしても然りである。相手船の対応能力に期待はしても，その能力や思惑を十分把握できないから，結局，自船の操船能力で対応せざるを得ない。これが脅威感の源である。一方，相手船の立場からは，自船は迷惑な存在であり，自船に脅威を抱いている。自が他に威を感ずること即ち自が他に威をふるうことであり，強弱はあっても威は相互に感じ合うものである。

相手船の能力に期待が持てなければ，動きはしても，それを島や岸と区別する必然性はなくなる。したがって，相手船はその水線によって自船の自由航行水域 W_s を閉塞する存在に過ぎない。相手船から見た自船についても同様であり，自船は相手船の自由航行水域 W_o を閉塞する。ところが，本来の岸壁は W_o を持たないから，閉塞性の相互関係は成り立たない。岸壁は W_s を閉塞するが，自船は一体何を閉塞するのか？ 岸壁の存在によって，自船は岸壁に写った自船の鏡像がもつ自由航行水域 W_s^* を閉塞すると考えれば相互関係が成り立つ。実際，自船の鏡像を相手船とみれば，結局，自船の鏡像が W_s を閉塞することになるからである。同様に，相手船の存在によって，相手船に写った自船の鏡像が W_s を閉塞する。凸面に対する鏡像は小さく，凹面では拡大されるから，凹面ではより大きな鏡像が W_s を閉塞する（Fig. 1 参照）。脅威感または威圧感は閉塞感に伴う感覚であるから，自船を閉塞した境界に写った鏡像が自船を威圧する。脅威対象物を仲介としているが，これは自身が醸し出した脅威感であり，脅威感と閉塞感は全く対応していると考えてよい。したがって，危険感は脅威感の時間変化で表されることになる。

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

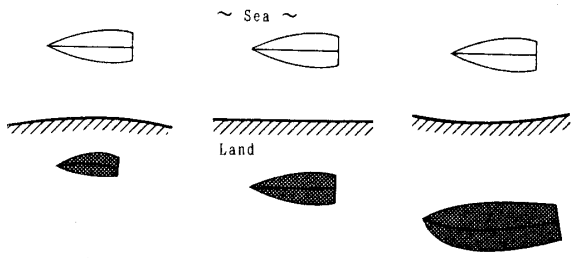


Fig. 1 Encumbrance for the freedom of the seas with the mirror images of a captain's own ship in the boundaries formed by various objects

3. 脅　　威

3.1 脅威の表現

前節の考察の根幹として，無限長の直線岸に沿って自船だけが定常航走している場合を考える。平面的に考え，深さや高さの影響は考えない。岸が x 軸となる複素座標系 $z \equiv \bar{x}+i\bar{y}$ をとり，自船の位置を $\bar{z}=\bar{z}_s$ とする（Fig. 2 参照）。

視線に依らず，全方位的に自船が感じる脅威感を単に脅威 M と呼ぶ。脅威源があるとすれば岸だけである。岸との位置関係によって M が変化するなら，両者の距離 $\bar{y}_s$ だけに依存する。なぜなら岸に個性はないからである。自船にとっての感覚を表すためには，$\bar{y}_s$ を相対化する長さの尺度を必要とし，これを自由行程（テリトリ）の直径とする。操船者の力量に依らず自船の性能，対応能力を兼ねた量として，旋回半径，停止距離，新針路距離などが考えられる。設定情況に依っては採るべきテリトリの直径も異なろうが，後の便宜上，

$$\left.\begin{aligned} &\text{自船の旋回半径：}\bar{R}_s \\ &\text{テリトリの直径：}4\bar{R}_s \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

とする。概ね $\bar{R}_s$ は船速だけに依存する状態量である。避航限界などとテリトリとは別概念である。M は操船者の感受性 Γ にも左右される。感受性が鋭い（Γ が大きい）とは脅威の去就に敏感に反応し，適切な措置を執れる能力である。Γ は無次元とする。本論では次の M を公理的表現ないしは他の対象物による脅威の比較基準にとる。

$$M=-\frac{\Gamma}{2\pi}\log\left(2\cdot\frac{\bar{y}_s}{4\bar{R}_s}\right) \qquad (2)$$

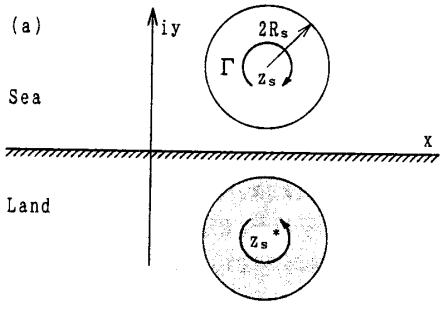
これは無限長直線岸による閉塞感の表現でもある。対数表現は地震エネルギ，音圧など段階を表す際に用いられるが，比較基準であることを旨とする。(2)式は岸から $2\bar{R}_s$ だけ離れた位置，すなわち，そこで旋回をはじめても衝突しない位置で $M=0$ と設定したことになる。岸がテリトリ半径内にあれば $M>0$，特に岸上では $M=\infty$ である。半径外にあれば $M>0$ となる。鏡像を用いて言い換えると，自船のテリトリの鏡像が自船の本来のテリトリを侵せば $M>0$，ちょうど接するとき時を $M=0$，はずれれば $M<0$ としている。M が (+) の時には脅威を感じることになろうが，(−) が直ちに脅威感のなさを表すわけではなく単に脅威レベルが低いだけである。言葉遣いの便利のため，以後，$M>0$ のとき閉塞感，$M<0$ のとき開放感があると言う。(2)式は同じ $\bar{y}_s$ の位置で航行しても，船速を落とし，$\bar{R}_s$ を小さくすれば脅威レベルを落とせることを説明している。なお，定常航走の条件を設定したのは，脅威が状態量であることを明示するためであり，もはや $\bar{y}_s, \bar{R}_s$ を固定する必要はなく時間の関数としてよい。

以後，すべての長さの無次元化にテリトリ直径 $4\bar{R}_s$ を用い，(¯) を付して有次元量を，その無次元量を同じ記号で表す。この約束の下で(2)式を次のように表す。

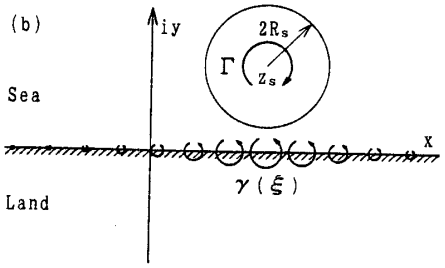
$$M=-\frac{\Gamma}{2\pi}\log(2y_s) \qquad (3)$$

旋回半径以外をテリトリ直径に用いる場合，無次元表示が(3)式に一致するように定数を調節すれば以下の議論は変わらない。(3)式は Fig. 2(a) のように，自船とその岸に対する鏡像点間の無次元距離 $(2y_s)$ に依存して M が変わるとしている。すなわち，無限長岸が絶対的に自船を威圧するのではなく，岸に映った自船の幻影に脅威を感じていることを表現したものである。Γ を自船の感受性としたが，この考えでは自船の鏡像が発する威の強さと解釈してもよい。

種々の閉塞状態における M の表現について検討する。脅威の性格上，境界上で $M=\infty$ を課すことは自然であるが，これは M の微分方程式が得られたとしても境界値問題を構成できないことを意味する。そこで，(3)式を同等な次式に置き換えてみる。



(a) Menace by the image of her own ship



(b) Induced menace in the boundary

Fig. 2

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

$$M=\mathrm{Im}\left[G(z;z_s)+\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(z-z_s)\right]_{z=z_s} \quad (4)$$

$$G(z;z_s)\equiv-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(z-z_s)+\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(z-z_s^*) \quad (5)$$

ここに z_s^* は z_s の共役複素数を表す。(5)式の G は，直線岸上で

$$\mathrm{Im}[G(x;z_s)]=0 \quad (6)$$

を満足している。G は M の補助関数でしかないが，(5)式には(6)式の条件を通して直線岸による物理的閉塞状態が表現されている。M を直接扱う代わりに G を考えれば，$M=\infty$ の条件に代わって(6)式を G の境界条件と見なすことができる。G は助変数 z_s をもつ z の解析関数であり，流体力学的には，自船の位置 z_s に置かれた時計まわり渦糸と，その鏡像点 z_s^* における反時計まわり渦糸で特徴づけられる複素ポテンシャルである。これは鏡像原理に他ならない。曲がった島岸，大船の船側など，どんな滑らかな境界も近接すれば直線岸に過ぎない。したがって，鏡像原理を認め，z_s が境界近傍にある限り，どんな境界に閉塞されても G は同じ鏡像原理に従う必要がある。直線と円以外の境界では，z_s の鏡像は点にはならない。しかし，鏡像である限り非水域（陸地，船体内部）に生じ，G の水域での特異性は z_s に限られる。

流体力学的鏡像原理は複素関数の解析性を通して幾何学的鏡像概念を抽象化しており，単に自船のテリトリとその鏡像の交わりで脅威を表現する以上に有能である。以上の考察をまとめ，脅威公理を拡張した次の仮説で言い替える。

仮説：鏡像脅威の拡張原理

z 平面の実水域を $Z(z)$ で Z 平面に写像し，$Z_s\equiv Z(z_s)$ とすると，脅威 $M(\boldsymbol{x}_s)$ は次式で与えられる。

$$M(\boldsymbol{x}_s)=\mathrm{Im}\left[G(Z;Z_s)+\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(z-z_s)\right]_{z=z_s} \quad (7)$$

$$G(Z;Z_s)=-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(Z-Z_s)+\tilde{G}(Z;Z_s) \quad (8)$$

ここに G は次の条件に従う Z の解析関数である。

1) 対応無限遠点を含む写像水域で，Z_s での対数特異点を除き，G は正則である。 (9)

2) すべての境界上で $\mathrm{Im}[G]=0$ を満足する。 (10)

具体的には(9)(10)式を満足する G を求めた後，次のように M を求める。

$$M(\boldsymbol{x}_s)=\mathrm{Im}\left[\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log\frac{dz}{dZ}+\tilde{G}(Z;Z_s)\right]_{z=z_s} \quad (11)$$

鏡像脅威の仮説は実水域では次のように表現できる。自船の自由航行水域が N 個の境界で閉塞されているとき，(9)(10)式を満足する G は恒に

$$G=-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(z-z_s)+\sum_{n=1}^{N}\frac{1}{2\pi\mathrm{i}}\oint_{C_n}\gamma_n(s;\boldsymbol{x}_s)\log\{z-z_b(s)\}ds+\mathrm{i}K \quad (12)$$

ただし

$$\sum_{n=1}^{N}\oint_{C_n}\gamma_n(s;\boldsymbol{x}_s)ds=\Gamma \quad (13)$$

と表現できる。ここに K は実定数，$C_1\sim C_N$ は境界を表す。$\gamma_1\sim\gamma_N$ は境界に沿って定義された長さ s の実関数であり，(10)式の条件の一部 $\mathrm{Im}[dG]=0$ を満足するからこそ，(12)式積分形で表される。積分項は広い意味での鏡像を表すが，もはや幾何学的鏡像とは言えず，実際に鏡像概念の拡張が行われていることがわかる。(13)式は無限遠点における G の正則性条件である。このような表現は等角写像法より汎用的な M の数値計算法を提供する。すなわち，(13)(10)式を満足する $\gamma_n(s;\boldsymbol{x}_s)$ 及び K を求めれば，(12)(7)式に従って M を計算できる。ただし，γ_n は $\boldsymbol{x}_s$ ごとに求める必要があり，手間がかかる。

仮説の妥当性については次節で検証し，その心理学的意味を述べておく。直線岸，あるいは滑らかな境界の近くでは，(12)式は

$$G(z;z_s)=-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(z-z_s)+\frac{1}{2\pi\mathrm{i}}\int_{-\infty}^{\infty}\gamma(\xi;\boldsymbol{x}_s)\log(z-\xi)d\xi \quad (14)$$

$$\gamma(x;\boldsymbol{x}_s)=\frac{\Gamma}{\pi}\cdot\frac{y_s}{(x-x_s)^2+y_s^2} \quad (15)$$

と書き直すことができ，(15)式は(13)式を満足する。M は

$$M=\mathrm{Im}\left[\frac{1}{2\pi\mathrm{i}}\int_{-\infty}^{\infty}\gamma(\xi;\boldsymbol{x}_s)\log(z_s-\xi)d\xi\right] \quad (16)$$

と書ける。表現が異なるが，(5)と(14)式，または(3)と(16)式は水域では互いに同等であることが容易に示される。(16)式の被積分項

$$m=\mathrm{Im}\left[\frac{\gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(z_s-z_o)\right] \quad (17)$$

を素脅威と呼べば，(16)式の表現は Fig. 2(b)のように岸に沿って強さ密度 $\gamma(x;\boldsymbol{x}_s)$ の素脅威が分布していると解釈できる。しかし，γ は $\boldsymbol{x}_s$ に依存し絶対的な強さではないから，γ は自船が岸に及ぼした単位長さあたりの誘導威圧であると考えるのが妥当である。素脅威を用いて(13)式を解釈すると

(岸に誘導された威の強さの総量)
＝(自船の鏡像が発した威の強さ) (18)

となる。これは仮説の条件 1) の意味である。

$\gamma(x;\boldsymbol{x}_s)$ の存在を仮定すると，$\mathrm{Im}[G]=0$ の条件があるから，鏡像の掃散として

$$\mathrm{Im}\left[\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(z-z_s^*)\right]_{z=z_s}=\mathrm{Im}\left[\frac{1}{2\pi\mathrm{i}}\int_{-\infty}^{\infty}\gamma(\xi;\boldsymbol{x}_s)\log(z_s-\xi)d\xi\right] \quad (19)$$

となる γ が存在する。これは誘導威圧ではなく

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

(鏡像が発する威圧)

=(素脅威分布による威圧) (20)

と感じる誘導脅威γが存在することを表している。すなわち自船は岸の素片に脅威感を覚えると考えてもよい。Fig. 2(b)に渦記号の大きさで示したように,自船の近くの岸に強い脅威を,遠い岸にはほとんど脅威を覚えない。強い脅威を受ける場所は,自船と共に移動する。これは流体力学的にはやや厳しい仮説の条件2)の帰結である。遡れば絶対的脅威を認めないことの帰結である。長谷川ら[1)2)]の自動航行システムでは,岸の作用が自船と共に動く2隻の岸上の仮想船に置き換えられ,衝突危険度の算出に用いられている。これは(15)(16)式に相当する実務的表現と考えられる。

脅威の定義に必要とするのは $\mathrm{Im}[G]$ だけであるから,静電磁気学的アナロジを用いれば容易に3次元に拡張できる。(2)式を公理的表現と述べたのは,後述の危険感を直接うまく説明できるからではなく,種々の閉塞状態へ拡張するのに(3)式の対数関数を選ばざるを得ないからである。したがって3次元脅威の公理表現は3次元ラプラスの式の主解にとる必要がある。これは球状テリトリを有する航空機の脅威に適した表現となろうが,主として2次元交通の場合,得られた M を心理学実験に合致する脅威 M_{psy} に変換する必要があろう。この考え方は,操船者の心拍数や血圧で M_{psy} を表現するときにも有用である。(2)式を比較基準と述べたのも,このためであり,心理学実験が進めば,たとえば

$$M_{psy}\equiv\frac{\Gamma}{2\pi}\exp\left[\frac{2\pi}{\Gamma}M\right] \tag{21}$$

のような表現が有用かもしれない。

3.2 種々の脅威場

脅威は危険感と渾然一体となっており,それ自身の存在証明はできないので,単純だが重要な脅威場をいくつか例示し,それらの場の特徴を解明することで仮説の妥当性の検証に代える。また,M が自船にとっての航路環境評価に有用な概念であることを示す。ただし,すべての結論は $\bar{R}_s$ を旋回半径とした場合のものである。テリトリ直径に何を採用するかによって結論は変わるであろうが,重大な変更はないものと考える。以下,等脅威線の図中の円は,無次元尺度としての旋回円である。

全方位的脅威を考えたため,M は脅威対象と自船の位置関係で定まり,座標系には依らない。したがって $M(\boldsymbol{x}_s)$ はスカラー場を成し,その勾配ベクトル

$$\boldsymbol{d}\equiv\nabla_s M\equiv\boldsymbol{i}\frac{\partial M}{\partial x_s}+\boldsymbol{j}\frac{\partial M}{\partial y_s} \tag{22}$$

が意味を持つ。$\boldsymbol{d}$ は常に脅威が大きくなる方向を向き,勾配の大きさは脅威の対象までの距離に概略反比例することを後に示す。$\boldsymbol{d}$ はなるべく「そちらへ行くな!」という内声を表すと考えられ,その方向と叫びの大きさを示しているから,これを危険ベクトルと呼ぶ。$\boldsymbol{d}$ は Γ に依存し,感受性が強ければ内声も大きい。

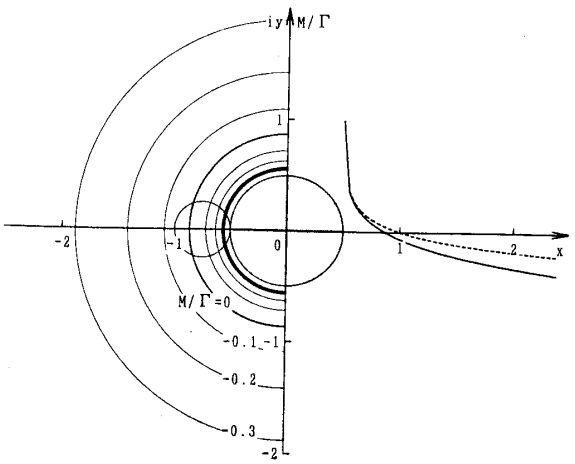


Fig. 3 Contours of menace (left) and menace function (right) around an island in case of the radius=1

1) 円形島(船)の脅威

半径 c,中心を $z=0$ とする円形島に対する G, M は次のようになる。

$$G=-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(z-z_s)+\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log\left\{\frac{z_s^*}{c}\left(z-\frac{c^2}{z_s^*}\right)\right\} \tag{23}$$

$$M(r_s)=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{c}{r_s^2-c^2} \tag{24}$$

$$=\frac{\Gamma}{2\pi}\left\{\log\frac{2\bar{R}_s}{\bar{r}_s-\bar{c}}-\log\frac{\bar{r}_s+\bar{c}}{2\bar{c}}\right\} \tag{25}$$

(25)式第1項目は直線岸の脅威に相当する。第2項目は島の曲率に関係し,常に負値をとる。したがって凸曲岸は直線岸ほどの脅威を感じさせない。これは自船のテリトリ鏡像が縮小されるためである。Fig. 3 に $c=0.5$ の場合の等脅威線と,M を示す。図中の点線は(25)式第1項目,直線岸に対する M である。

島(岩礁)のまわりを半径 $\bar{R}_s$ で旋回するとしたとき,(25)式から $c/\bar{R}_s=(-2+\sqrt{5})\fallingdotseq0.236$ 以下の半径の島であれば閉塞感なしに回れることがわかる。島(岩礁)は旋回半径以内にあるにも関わらず,誤操舵をしても衝突する可能性がないからであろう。

島から遠く離れると

$$M\sim\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{c}{r_s^2}=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{4\bar{R}_s\bar{c}}{\bar{r}_s^2} \tag{26}$$

の挙動をする。距離依存性が r_s の2次になっているから,直線岸の場合より急速に脅威が減じる。(26)式は対象物の心理的大きさが $\sqrt{4\bar{R}_s\bar{c}}$ に比例することを示す。大船と小船の操船者を比べると,同距離,同大の島(船)を,大船の操船者はより大きく感じる。

2) 円形湖岸の脅威

半径 c,中心を $z=0$ とする円形湖を考える。G は(23)式で与えられるが,M は

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

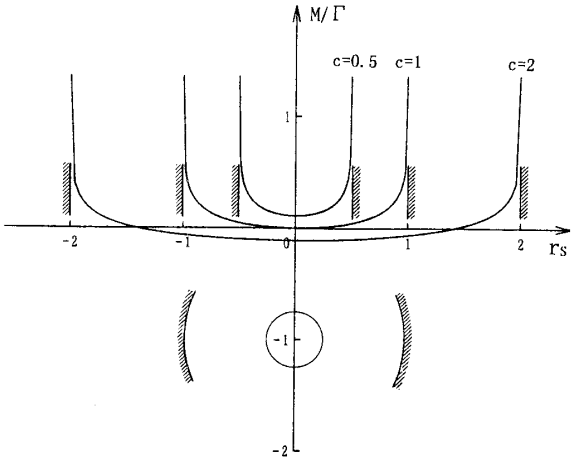


Fig. 4 Menace in a lake for various radius

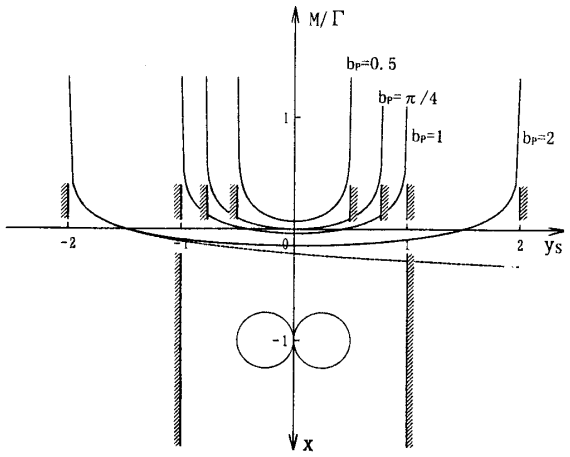


Fig. 5 Menace in a channel with parallel shores

$$M(r_s)=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{c}{c^2-r_s^2} \tag{27}$$

$$=\frac{\Gamma}{2\pi}\left\{\log\frac{2\bar{R}_s}{\bar{c}-\bar{r}_s}+\log\frac{2\bar{c}}{\bar{c}+\bar{r}_s}\right\} \tag{28}$$

となる。(28)式第1項目は直線岸の脅威に相当する。第2項目は湖岸の曲率に関係した項であり，常に正値をとる。したがって，凹曲岸は直線岸より大きな脅威を感じさせる。これは自船のテリトリ鏡像が拡大されるからである。Fig. 4 に c を変化させたときの M を示す。

湖の中央で M は最小値をとり，

$$M(0)=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{1}{c}=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{4\bar{R}_s}{\bar{c}} \tag{29}$$

となる。現実的ではないが，湖の半径がテリトリの半径 ($=2\bar{R}_s$) の2倍より小さくなれば常に閉塞感を強いられる。

湖の中心を半径 R_s で旋回するとき，$\bar{c}/\bar{R}_s=2+\sqrt{5}\fallingdotseq 4.236(>3)$ 以上の半径の湖であれば，閉塞感なしに旋回できる。湖岸側に誤って旋回しても，$\bar{c}/\bar{R}_s>3$ の湖であれば衝突の可能性がないにも拘わらず，より大きな半径の湖でなければ閉塞感に曝される。円島の場合とは逆に，誤操舵による衝突の可能性をより過大に感じることを表している。

3) 水路の脅威

全幅 $2b_P$，x 軸を中心とする平行水路で感じる脅威は，直接鏡像原理で求められ次のようになる。

$$G=-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log\frac{\sinh\dfrac{\pi(z-z_s)}{4b_P}}{\cosh\dfrac{\pi(z-z_s^*)}{4b_P}} \tag{30}$$

$$M(y_s)=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{\pi}{4b_P\cdot\cos\dfrac{\pi y_s}{2b_P}} \tag{31}$$

Fig. 5 に b_P を変化させたときの M を示す。また，点線で片岸の場合を示す。片岸に比べて両岸の場合，閉塞感が増すようすがわかる。水路の中央では

$$M(0)=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{\pi}{4b_P}=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{\pi\bar{R}_s}{\bar{b}_P} \tag{32}$$

となる。$\bar{b}_P\leqq\pi\bar{R}_s$ の水路では，たとえ旋回余裕 ($>2\bar{R}_s$) があっても常に閉塞感にさらされる。言い換えれば，片岸を $\bar{b}_{MIN}$ だけ離れて航行した時ようやく脅威感に耐えうる船舶にとって，半幅 $(\pi/2)\cdot\bar{b}_{MIN}$ 以下の平行水路を同速度で航行することは耐えられない。また，耐えうる脅威感がわかっていれば，今の幅で可能な最大テリトリ，最大速力がわかる。

曲がり水路の場合，半幅 b_c，水路中心の曲率半径を c とすると，詳細[13]は省略するが，次のように b_c を平行水路の見かけ半幅 b_P に直すことができる。

$$b_P=b_c\cdot E\left(\frac{b_c}{c}\right) \tag{33}$$

$$E(\lambda)\sim 1-\frac{\pi^2}{32}\lambda^2+\cdots \quad \text{as} \quad \lambda\to 0 \tag{34}$$

(34)式は，曲率が0から大きくなるにつれて相当水路幅が減少することを示している。逆にいうと，半幅 $\bar{b}_{PMIN}$ の平行水路の脅威感にようやく耐えうる船舶にとって，次の半幅以下の曲がり水路を同速度で航行することは耐えられない。

$$\bar{b}_c=\bar{b}_{PMIN}\cdot\left\{1+\frac{\pi^2}{32}\left(\frac{\bar{b}_{PMIN}}{\bar{c}}\right)^2\right\} \tag{36}$$

4) 防波堤の脅威

開口幅 2a, x 軸を防波堤とする水域 (Fig. 6) は，

$$z=\mathrm{i}\cdot a\cdot\sinh(Z) \tag{36}$$

により Z 平面の半幅 $\mathrm{i}\pi/2$ の帯領域に写像される。G, M は次のようになる。

$$G=-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log\frac{\sinh\dfrac{Z-Z_s}{2}}{\cosh\dfrac{Z-Z_s^*}{2}} \tag{37}$$

$$M=\mathrm{Im}\left[-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log\frac{1}{2a\cdot\cos(Y_s)\cosh(Z_s)}\right] \tag{38}$$

M の等高線を Fig. 6 に示す。防波堤の港側は直線岸の脅威に漸近している。

出入港時に使われる開口中心線の航路上では

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

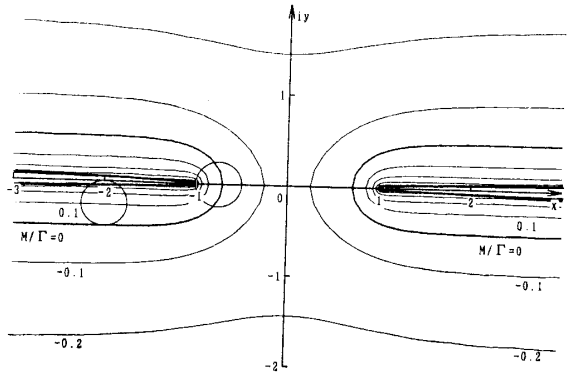


Fig. 6 Menace field around breakwater with an opening

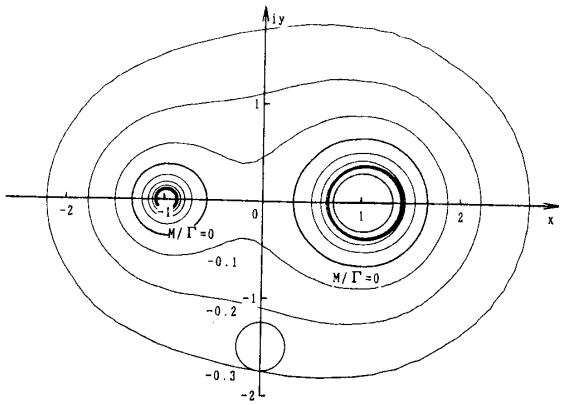


Fig. 7 Menace field around 2 islands in the case of $c_1=0.3$, $c_2=0.1$, $d=2$

$$M(0, y_s)=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{1}{2\sqrt{y_s^2+a^2}} \tag{39}$$

となる。その最大値は開口中央で生じ

$$M(0, 0)=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{1}{2a}=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{2\bar{R}_s}{\bar{a}} \tag{40}$$

となる。開口半幅($=\bar{a}$)として旋回直径$2\bar{R}_s$以上を確保しない限り，操船者は閉塞感を感じる。中心線上で旋回しても防波堤と衝突しないだけの開孔を確保すれば，脅威を感じなくてすむ。$\bar{R}_s$は船長の3～4倍程度であるから通常はそれほどの開口を有してはおらず，操船者は常に閉塞感を感じて出入港しているか，減速して閉塞感を和らげていると思われる。

後節の危険感を計算すると，$(0, \pm a)$の点は最大危険点，最小危険点となることが分かる。これは航路に難所があることを示している。

5) 円形島(船)の脅威

中心間距離dだけ離れた2つの円島がある。それぞれの半径をc_1, c_2とするとき，両円が$(\pm b, 0)$に対するアポロニウスの円となるように座標系を設定できる（Fig. 7参照)。円の中心座標を$(a_1, 0)$と$(a_2, 0)$とすると

$$\left.\begin{aligned} &d\equiv a_1-a_2\\ &a_1=\frac{d^2+c_1^2-c_2^2}{2d},\quad a_2=\frac{-d^2+c_1^2-c_2^2}{2d}\\ &b=\frac{\sqrt{\{d^2-(c_1+c_2)^2\}\{d^2-(c_1-c_2)^2\}}}{2d}\end{aligned}\right\} \tag{41}$$

の関係がある。

$$Z=X+\mathrm{i}\,Y=\log\frac{z+b}{z-b} \tag{42}$$

$$\alpha\equiv\log\frac{a_1+c_1+b}{a_1+c_1-b},\quad \beta\equiv\log\frac{-a_2-c_2+b}{a_2+c_2+b} \tag{43}$$

の写像関数を考えると，円$_1$，円$_2$の周は$X=\alpha$と$X=-\beta$の直線に写像され，実水域全体は$-\beta\leqq X\leqq\alpha$，$-\pi\leqq Y\leqq\pi$の長方形領域に写像される。Gは次のように表される。

$$G=-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\left\{\log\frac{\sigma(Z+Z_s)}{\sigma(Z+2\beta+Z_s^*)}+\frac{2\eta_1}{\omega_1}(\beta+X_s)\cdot(\beta+Z)\right\} \tag{44}$$

ここにσは楕円シグマ関数であり，2重周期は次のように定義している。

$$2\omega_1=2(\alpha+\beta),\quad 2\omega_3=2\pi\mathrm{i} \tag{45}$$

円$_1$，円$_2$のまわりの循環はそれぞれ次のようになる。

$$\Gamma_1=\frac{\beta+X_s}{\alpha+\beta}\Gamma,\quad \Gamma_2=\frac{\alpha-X_s}{\alpha+\beta}\Gamma \tag{46}$$

ここに

$$X_s\equiv\log\frac{r_2}{r_1} \tag{47}$$

$$r_1\equiv\sqrt{(x_s-b)^2+y_s^2},\quad r_2\equiv\sqrt{(x_s+b)^2+y_s^2} \tag{48}$$

ただし$z\to\infty(Z\to 0)$のとき循環が残らないこと，または(13)式を満足する必要から

$$\Gamma=\Gamma_1+\Gamma_2 \tag{49}$$

の関係がある。したがって，例えば$X_s\to\alpha$で円$_1$に近づくとき，円$_2$まわりの循環Γ_2は0となり，円$_1$だけが存在するかのように振る舞う。また，$\beta\to\infty$のとき(44)式は1円島のG，(23)式に漸近することを若干の計算で示すことができる。Mは

$$M=\frac{\Gamma}{2\pi}\cdot\frac{1}{2}\cdot\log\left\{\frac{(2b)^2}{r_1^2\cdot r_2^2}\times\frac{\vartheta_1'(0)^2}{(2\omega_1)^2\cdot\vartheta_1\left(\dfrac{\beta+X_s}{\omega_1}\right)\vartheta_1\left(\dfrac{\alpha-x_s}{\omega_1}\right)}\right\} \tag{50}$$

と表される。ここにϑ_1は楕円テータ関数であり，数学公式III（岩波）の定義に従っている（Abramowitsの定義とは異なるので注意)。Fig. 7に等脅威線の例を示す。

2点島となる極限を考える。$\alpha\to\infty$，$\beta\to\infty(\omega_1\to\infty)$とする。Jacobiの虚変換を用いると

$$M\sim\frac{\Gamma}{2\pi}\cdot\frac{1}{2}\cdot\log\left\{\frac{(2b)^2}{r_1^2\cdot r_2^2}\times\frac{\exp\left[\dfrac{(\beta+X_s)^2+(\alpha-X_s)^2}{\alpha+\beta}\right]}{4\sinh(\beta+X_s)\sinh(\alpha-X_s)}\right\} \tag{51}$$

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

と近似できる。これは全域での良い近似である。

$$\alpha\sim\log\frac{2b}{c_1},\quad \beta\sim\log\frac{2b}{c_2} \tag{52}$$

であることを考慮し，さらに

$$X_s/\alpha\ll 1,\quad X_s/\beta\ll 1 \tag{53}$$

とする。すなわち両島が非常に小さい上に両島から比較的離れている場合，$X_s^2/(\alpha+\beta)$ の項を無視でき，M は

$$M\sim\sum_{n=1}^{2}\frac{\tilde{\Gamma}_n}{2\pi}\cdot\log\frac{c_n}{r_n^2} \tag{54}$$

となる。ここに $\tilde{\Gamma}_n$ は厳密な Γ_n の近似であり，次のように島の大きさと配置だけで決まってしまう。

$$\frac{\tilde{\Gamma}_n}{\Gamma}=1-\frac{\log\dfrac{2b}{c_n}}{\log\left(\dfrac{2b}{c_1}\cdot\dfrac{2b}{c_2}\right)}\quad\text{for}\quad n=1,2 \tag{55}$$

M はそれぞれの島からの脅威の和となっているが，それを仮定したわけではなく，あくまでも脅威仮説から導かれたものである。ただし，(55)式は(46)式の近似であり，脅威強さは厳密には z_s に依存する。したがって，どちらかの円に近接している場合や，円が相対的に大きく見える場合など，近似条件を逸脱すれば(51)または(50)式を用いる必要がある。

6) 多円形島(船)の脅威

$z=z_n$ に半径 c_n の島が N 個分布している場合を考える。等角写像法は使えないから数値計算に委ねるほかはない。しかし，それぞれの島の半径が小さく，かつ自船が遠くにいる場合，1円形島及び2円形島の脅威の類推で G, M は次の漸近展開を持つと推察される。

$$G\sim-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(z-z_s)+\sum_{n=1}^{N}\frac{\tilde{\Gamma}_n}{2\pi\mathrm{i}}\log\left\{\frac{(z_s-z_n)^*}{c_n}\cdot(z-z_n)\right\}\quad\text{as}\quad z_s\to\infty \tag{56}$$

$$M\sim\sum_{n=1}^{N}\frac{\tilde{\Gamma}_n}{2\pi}\cdot\log\frac{c_n}{r_n^2} \tag{57}$$

境界上で $\mathrm{Im}[G]=0$ の条件は近似的に次のように書ける。

$$0=\frac{\Gamma}{2\pi}\log(r_i)-\sum_{\substack{n=1\\n\neq i}}^{N}\frac{\tilde{\Gamma}_n}{2\pi}\log\left(\frac{r_{i,n}}{c_n}\cdot r_n\right)-\frac{\tilde{\Gamma}_i}{2\pi}\log(r_i)\quad\text{for}\quad i=1\ \text{to}\ N \tag{58}$$

ここに

$$r_n\equiv|z_n-z_s|,\quad r_{i,n}\equiv|z_i-z_n|=r_{n,i} \tag{59}$$

と定義した。しかし，未知数は $\tilde{\Gamma}_1\sim\tilde{\Gamma}_N$ の N 個であるから，さらに(13)式の条件

$$\sum_{n=1}^{N}\tilde{\Gamma}_n=\Gamma \tag{60}$$

を課すと過多となってしまう。これは(56)式で $r_1, r_2, \cdots, r_N$ がそれぞれ近似的に等しいことを考慮していないためである。実際，(58)式から作った行列は近似的に悪行列になっており，ほとんど線形独立性が失われている。そこで，(58)式を辺々引き算し，

$$\frac{\tilde{\Gamma}_i}{\Gamma}\log\frac{r_{i+1,1}}{c_i}-\frac{\tilde{\Gamma}_{i+1}}{\Gamma}\log\frac{r_{i,i+1}}{c_{i+1}}-\sum_{\substack{n=1\\n\neq i,\,i+1}}^{N}\frac{\tilde{\Gamma}_n}{\Gamma}\log\frac{r_{i,n}}{r_{i+1,n}}=-\log\frac{r_i}{r_{i+1}}\quad\text{for}\quad i=1\ \text{to}\ N-1 \tag{61}$$

の $(N-1)$ 個の方程式を作り，(60)式を課す。これで $r_1, r_2, \cdots, r_N$ がそれぞれ近似的に等しいことを考慮できる形となり，$\tilde{\Gamma}_1\sim\tilde{\Gamma}_N$ が求められる。

$N=2$ の場合，(55)式の $\tilde{\Gamma}_1, \tilde{\Gamma}_2$ を与える。$r_1\fallingdotseq r_2$ を要求しなければ，厳密な Γ_1 と Γ_2 が得られる。$N\geqq 3$ の場合，規則的な表現を得ることは困難であるので省略するが，単純な計算で $\tilde{\Gamma}_n$ が得られる。

輻輳海域での船舶同士の脅威を表現する上で(57)式は有用であるが，次節で考える危険感の計算は $r_{i,j}$ が時間の関数となるため複雑となる。

7) 細長船の脅威

中心が $z=z_0$，x 軸に対する傾き α，全長 $L(\equiv\bar{L}/4\bar{R}_s)$ の細長船の脅威は，次の写像で求められる（Fig. 8 参照）。

$$z=z_0+\exp[\mathrm{i}\alpha]\cdot\left(Z+\frac{c^2}{Z}\right),\quad c\equiv L/4 \tag{62}$$

$$G=-\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log(Z-Z_s)+\frac{\Gamma}{2\pi\mathrm{i}}\log\left\{\frac{Z_s^*}{c}\left(Z-\frac{c^2}{Z_s^*}\right)\right\} \tag{63}$$

M は陰的であるが

$$M=\mathrm{Im}\left[-\frac{\Gamma}{2\pi i}\log\left\{\frac{Z_s^2}{Z_s^2-c^2}\cdot\frac{c}{Z_sZ_s^*-c^2}\right\}\right] \tag{64}$$

となる。

Fig. 8 は旋回円のスケールからも分かるように，自船は小さく，大きな細長船の場合の等脅感線を示している。細長船から同じ距離だけ離れた位置では，船首船尾近くにいるよりも，船側にいる方が脅威は大きい。一見逆の感じであるが，細長船が船首方向に進行しているとイメージされるための錯覚である。船側方向にも航走できると思えば，逆の感じはしないであろう。脅威感は状態量であるから，進行してゆくイメージを描いてはならない。したがって，

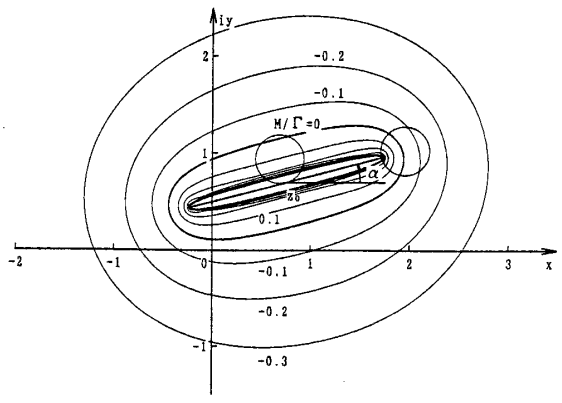


Fig. 8 Menace field around a flat ship in the case of the whole length=2

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

Fig. 8 は細長船船首側では開放感が高く，船側では閉塞感が高く身動きのとりにくい情況を表していると読みとる。また，等脅威線，例えば $M=0$ 上の点同士を比べると，自船の旋回円に細長船船首が入り込み，船側ではほとんどそのようなことはないにも関わらず，脅威感は等しい。脅威感は自船の自由航行域がどれだけ狭められているかに関係し，細長船が自船のテリトリを侵すことと直接的関係はない。危険ベクトルの示す方向以外に自船が今後進むとすれば，細長船船首付近では航路の選択の余地が多く，船側では少ない。これが閉塞感である。いずれにしても，細長船船首近傍にいるとき，自船の物理的鏡像が考えられないにも関わらず，船側にいる場合の脅威にうまく接合している。これは G の解析性に拠るところが大きい。

M を陽に z_s の関数表記しても見にくいので，$z_s\to\infty$ のときの形を調べる。

$$z_s=z_o+r_{os}\cdot\exp[i\theta] \tag{65}$$

と極座標表示すると，M は

$$M\sim\frac{\Gamma}{2\pi}\left\{\log\frac{L}{4r_{os}^2}+\frac{L^2}{8r_{os}^2}\{2-3\sin^2(\theta-\alpha)\}\right\}$$
$$\text{as } r_{os}\to\infty \tag{66}$$

と展開される。主項は半径 $(L/4)$ の円島の脅威にしか相当せず，薄さの影響が現れている。第2項目は方向性の影響を示している。

4. 危険感と危険性

閉塞感ないしは脅威感と，その時間変化率は異なる感覚であることは2節で既述した。ここでは脅威 M の時間微分自身が，種々提案されてきた衝突危険度と密接な関係があり，それの拡張になっていることを示す。M を幾何学ではなく解析的原理で定義しているから，複雑な情況であっても M の時間微分は明快に定義でき，機械的計算に過ぎない。

M は自船の位置 $\bar{\boldsymbol{x}}_s(\bar{t})$，テリトリを代表する大きさ $\bar{R}_s$，および自船をとりまく環境で定まっている。自船の速度 $\bar{\boldsymbol{u}}_s(\bar{t})$ は

$$\bar{\boldsymbol{u}}_s\equiv\frac{d\bar{\boldsymbol{x}}_s}{d\bar{t}}\equiv(\bar{u}_x,\bar{u}_y) \tag{67}$$

であり，やや荒いが

$$\bar{R}_s=\bar{R}_s(\bar{V}_s)\sim\bar{B}\cdot\bar{V}_s^2,\quad \bar{V}_s\equiv|\bar{\boldsymbol{u}}_s| \tag{68}$$

と近似できるとすると，$\bar{R}_s$ も最終的には時間の関数である。島のように時間変化しないものもあるが，他船と自船の動きによって M は時々刻々と変わる。

$$M=M(\bar{\boldsymbol{x}}_s,\bar{R}_s,\bar{t}) \tag{69}$$

とかくと，M の時間微分は

$$\bar{D}\equiv\frac{dM}{d\bar{t}}=\frac{\partial M}{\partial\bar{t}}+\bar{\boldsymbol{u}}_s\circ\bar{\nabla}_s M+\frac{\partial M}{\partial\bar{R}_s}\cdot\frac{d\bar{R}_s}{d\bar{V}_s}\cdot\frac{d\bar{V}_s}{d\bar{t}} \tag{70}$$

で与えられ，$\bar{D}$ を危険性と呼ぶ。それぞれ，第1項目は他船の運動，第2項目は自船の運動，第3項目は自船の加減速に伴うテリトリ変化による脅威の変化率を表している。なお，c や a など，時間依存性のない境界形状を表す長さも $4\bar{R}_s$ で無次元化されているので，微分には注意を要する。ただし，ここでは行わないが，本来は心理変換により適切な M_{psy} を定義し，その時間微分を $\bar{D}$ と定義すべきである。

$\bar{D}$ は [1/(時間)] の次元を持つ。操船者は自船の性能で決まる時間スケール $\bar{T}_s$ を熟知し，脅威の去就を $\bar{T}_s$ で計っている。変針を主とした避航では，$\bar{T}_s$ は応答時間である。一次系運動方程式の応答時間なども考えられるが，ここでは

$$\bar{T}_s\equiv(\text{新針路距離})/(\text{船速}) \tag{71}$$

をとり，

$$D\equiv\bar{D}\cdot T_s \tag{72}$$

を危険感と呼ぶ。

自船の加速度が0のとき，$D,\bar{D}$ に $\bar{R}_s$ が陽に表れることはない。これは2節で述べたテリトリと避航限界などとは無関係の概念であり，それらを $D,\bar{D}$ を用いて定義すべきことを示している。

4.1 危険感と衝突危険性

従来の衝突危険度と D との関係を調べるために，簡単な1対1の出会いを考える。相手船を速度 $\boldsymbol{u}_o$ で動く半径 c の円島とみなすと，(24)式の M は

$$M=\frac{\Gamma}{2\pi}\log\frac{c}{r_{os}^2-c^2} \tag{73}$$

$$r_{os}\equiv|\boldsymbol{x}_o-\boldsymbol{x}_s|=\sqrt{(x_o-x_s)^2+(y_o-y_s)^2} \tag{74}$$

とかける。ここに $\boldsymbol{x}_o$ は相手船(島)の位置ベクトルである。$\boldsymbol{x}_o$ も時間の関数であることを考慮すると

$$D=\frac{\Gamma}{2\pi}\cdot\frac{2\bar{r}_{os}}{\bar{r}_{os}^2-\bar{c}^2}(-\bar{\boldsymbol{u}}_R\circ\boldsymbol{e}_{os})\bar{T}_s$$
$$\sim\frac{\Gamma}{\pi}\cdot\frac{(-\boldsymbol{u}_R\circ\boldsymbol{e}_{os})\bar{T}_s}{\bar{r}_{os}}\quad\text{as } \bar{r}_{os}/\bar{c}\to\infty \tag{75}$$

となる。ここに

$$\bar{\boldsymbol{u}}_R\equiv\bar{\boldsymbol{u}}_o-\bar{\boldsymbol{u}}_s,\quad \boldsymbol{e}_{os}\equiv(\boldsymbol{x}_o-\boldsymbol{x}_s)/r_{os} \tag{76}$$

$\bar{\boldsymbol{u}}_R$ は自船からから見た相手船の相対速度であり，$(-\bar{\boldsymbol{u}}_R\circ\boldsymbol{e}_{os})$ は相手船と自船間の距離の減少率である。$\bar{\boldsymbol{u}}_R=0$ の場合，常に $D=0$ となる。D は正値も負値もとるから，$D=0$ は非常に危険な状態と非常に安全な状態の中間である。

$\bar{\boldsymbol{u}}_R//\boldsymbol{e}_{os}$ でない限り現状を維持して航行しても衝突することはない。最接近点 (CPA) を基礎としたレーダ航法では，最接近距離 $\overline{\text{DCPA}}$，最接近時間 $\overline{\text{TCPA}}$ が衝突の危険性の判断に用いられる。CPA では常に $D=0$ であるのに対し，将来，最大 D_{MAX} と最小 $D_{MIN}(=-D_{MAX})$ を生じる位置がある。これらは，$\bar{\boldsymbol{u}}_R$ に対して斜め 45° 前方と後方の航路上に相手船を見るときにおこる。それぞれ最大危険点 (MDPA)，最小危険点(LDPA)と呼ぶ(Fig. 9 参照)。D_{MAX} は

$$D_{MAX}=\frac{\Gamma}{\pi}\cdot\frac{|\bar{\boldsymbol{u}}_R|\bar{T}_s}{2\overline{\text{DCPA}}} \tag{77}$$

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

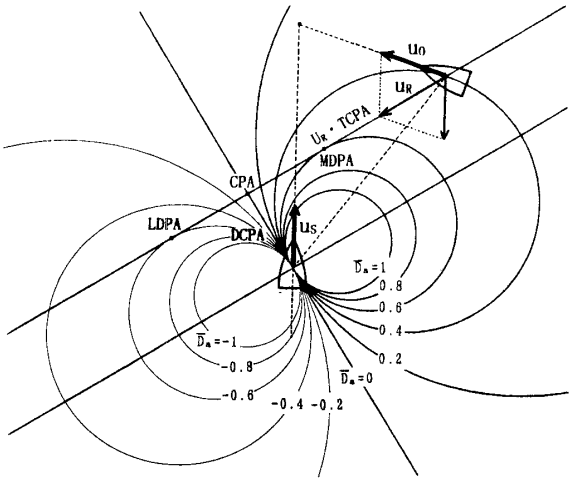


Fig. 9 Contours of danger in a captain's sense and relationship with traffic condition in the radar navigation

$$=\frac{\Gamma}{\pi}\cdot\frac{\bar{T}_s}{\text{MDPA から LDPA までの航過時間}} \tag{78}$$

で与えられる。

(75)式の D をレーダ航法の用語でかくと，

$$D=\frac{\Gamma}{\pi}\cdot\frac{\bar{T}_s}{\overline{\text{TCPA}}\cdot\left\{1+\left(\frac{\overline{\text{DCPA}}}{|\bar{u}_R|\cdot\overline{\text{TCPA}}}\right)^2\right\}} \tag{79}$$

となる。特に $\overline{\text{DCPA}}=0$ で，避航しなければ必ず衝突する場合

$$D=\frac{\Gamma}{\pi}\cdot\frac{\bar{T}_s}{\overline{\text{TCPA}}} \tag{80}$$

となる。$\bar{T}_s$ は自船が新針路に切り替わるのに要する時間であるから，現時点で $D\geqq\Gamma/\pi$ であれば避航動作の有無に関わらず衝突し，それ以下では回避できる可能性がある。このことから，将来，$D_{MAX}\geqq\Gamma/\pi$ を感じるときニアミスを引き起こすと考えられる。間に合うなら，$D=\Gamma/\pi$ または許容危険感 $D_{adm}(\leqq\Gamma/\pi)$ になった時点で避航すれば衝突を含めたニアミスを回避できる。ニアミスとなる円内を危険領域と呼んでもよい。少なくとも1対1の出会いの場合，単に危険感と呼んだ D は衝突危険性の指標を与えるから，これを一般的に用いることは有用であろう。

(79)式分母は，双方の操船者の感覚によらず，共有できる距離，時間，速さで記述されている。したがって(75)式に対応するように

$$\bar{D}_a\equiv\frac{\pi}{\Gamma}\bar{D}=\frac{\pi}{\Gamma}\cdot\frac{dM}{d\bar{t}} \tag{81}$$

$$=\frac{-\bar{u}_R\circ e_{os}}{\bar{r}_{os}} \tag{82}$$

を定義すると，両船で同じ値をとる。(82)式は小林ら[14]の CJ (Collision Judgement) で最重視されている項である。(82)式の主たる結論は，$\bar{D}_a$ が $\overline{\text{TCPA}}$ に反比例することであり，原ら[7]の SJ (Subjective Judgement Value) 他，大なり小なり衝突危険性の判断に用いられている。しかし，後述する2船以上の出会いでは，すべての船が同じ危険性を持つわけではないから，(81)式の $\bar{D}_a$ の定義を客観的危険性とは呼べない。

巨大船の $\bar{T}_s$ は長く，小型高速船などの $\bar{T}_s$ は短いから，客観的危険性が同じでも，前者は強い危険感を，後者は弱い危険感を抱く。このことは高速船が避航義務船で大船が権利船のとき問題となる。高速船の危険感が弱いため，その避航動作は遅れがちになり，大船は相手船を信頼できず，権利船でありながら避航動作をとりたくなるからである[15]。自船の危険感と脅威感をもとにして避航開始時期を決めることは今後の課題であるが，少なくとも現象は良く説明されている。

4.2 危険感に及ぼす種々の影響

1) 多船との出会い

相手船を速度 $\bar{u}_1, \bar{u}_2, \cdots, \bar{u}_N$ で動く多円島とみなし，M の近似式(57)を適用する。$N=2$ の場合，

$$\frac{\pi}{\Gamma}\bar{D}\sim\sum_{n=1}^{N}\frac{\tilde{\Gamma}_n}{\Gamma}\cdot\frac{(-\bar{u}_{ns}\circ e_{ns})}{\bar{r}_n}-\left(1-4\frac{\tilde{\Gamma}_1}{\Gamma}\cdot\frac{\tilde{\Gamma}_2}{\Gamma}\right)\frac{(\bar{u}_1-\bar{u}_2)\circ e_{2,1}}{2\cdot\bar{r}_{1,2}} \tag{83}$$

ここに

$$\bar{u}_{ns}\equiv\bar{u}_n-\bar{u}_s$$

$$e_{ns}\equiv(x_n-x_s)/r_n,\quad e_{i,n}\equiv(x_i-x_n)/r_{i,n} \tag{84}$$

となる。(83)式第2項目は相手船群の配置の変化の影響である。$\tilde{\Gamma}_n$ は最終的には時間の関数となるから，N が大きくなると D は急に複雑になるが，任意性を伴わずに単純な微分で記述できる。

2) 角速度の影響

相手船が一隻で速度 $\bar{u}_o$，角速度ベクトル $\bar{\Omega}_o k$ で回頭しているとする。相手船を細長船とみなし，M の近似式(63)を適用する。自船からみた相手船の回転中心の位置ベクトルを $\bar{r}_{os}$ とすると

$$\frac{\partial M}{\partial\bar{t}}=-\bar{u}_o\circ\bar{\nabla}_s M+\bar{\Omega}_o\frac{\partial M}{\partial\alpha} \tag{85}$$

$$\frac{\partial M}{\partial\alpha}\sim\frac{\Gamma}{2\pi}\cdot\frac{3L^2}{8\bar{r}_{os}^2}\sin\{2(\theta-\alpha)\} \tag{86}$$

となる。テリトリ変化がなく，両者が動けば形式的に

$$\bar{D}=(\bar{u}_s-\bar{u}_o-\bar{r}_{os}\times\bar{\Omega}_o k)\circ\bar{\nabla}_s M \tag{87}$$

とかける。CJ[14], SJ[8]にも角速度の影響が含まれているが，(87)式には全く任意性がない。問題は，自船の回頭角速度 Ω_s の影響を評価できないことである。根本的には全方位的な脅威感を仮定し，M をスカラー量として扱っていることが問題と考えられ，今後の課題とする。

3) テリトリ変化の影響

脅威の出発点であった直線岸に自船が着岸する場合を考える。M は(2)式で定義したから，$\bar{D}$ は

NII-Electronic Library Service

The Society of Naval Architects of Japan

$$\bar{D}=\frac{\Gamma}{2\pi}\left\{\frac{-\bar{u}_y}{\bar{y}_s}+2\frac{\bar{V}_s'}{\bar{V}_s}\right\} \tag{88}$$

となる。第1項目は着岸までの余裕時間の逆数である。(88)式で加速度項（テリトリ変化項）を除いたものは，原らのSJ値とパラメタ構成は同じである。

時刻 $\bar{t}=\bar{t}_o$ に着岸するとし，$\bar{t}<\bar{t}_o$ では

$$\bar{x}_s=0,\quad \bar{y}_s=\frac{\bar{A}}{2}\cdot(\bar{t}_o-\bar{t})^2 \tag{89}$$

のように減速度 $\bar{A}(>0)$ の等加速度減速による着岸を考えると，$\bar{D}$ は $\bar{A}$ によらず

$$\bar{D}=\frac{\Gamma}{2\pi}\cdot\left\{\frac{1}{\bar{t}_o-\bar{t}}+\frac{-1}{\bar{t}_o-\bar{t}}\right\}=0 \tag{90}$$

となる。旋回半径の仮定が荒いので議論に注意を要するが，(90)式はテリトリ変化を考慮したために0となっている。この結果は脅威感がないことを意味するわけではなく，

$$M=\frac{\Gamma}{2\pi}\log(4\bar{A}\cdot\bar{B}) \tag{91}$$

のように一定の脅威感を抱きつづける。したがって，着岸までの時間は長くなるが，$\bar{A}$ を小さくすれば脅威感を減らすことができる。

5. 結　　言

閉塞性という水域の状態量に起因する操船者の心理感覚に着目し，次のことについて論じた。

1) 操船者は閉塞感と危険感という2種類の感覚を抱く。危険感は閉塞感の去就に関する感覚である。閉塞感は脅威感と対応した感覚である。

2) 脅威感は脅威対象物に写った自船の鏡像が自船の行動領域を狭める，すなわち閉塞することに起因する。脅威対象物が水域に作る境界は，自船の鏡像形成の仲介をするに過ぎない。

これらの考察に基づき，

3) 脅威感の表現のために，完全流体力学の鏡像原理に基づく仮説を提案した。

4) 仮説に基づき種々の航路環境における脅威場を示し，仮説の妥当性を検証する材料を示した。

5) 脅威感の立場から，水路や防波堤の航路環境評価ができることを示した。

6) 危険感を脅威の時間微分として定義した。危険感は従来の衝突危険度と密接な関係にあることを示した。また，多船との出会い，回頭角速度の影響，加減速の影響等を解析的に論じうることを示した。

今後，心理学実験の立場から仮説の検証，改良を行うと共に，避航開始時点と脅威感と危険感の関係を明らかにする必要がある。自船の大きさと方向の影響の解明など，残された理論上の課題は多い。

本稿を終えるにあたり，船舶操縦性，避航についてご教示いただきました大阪大学工学部，長谷川和彦助教授にお礼申し上げます。また，熱心なご討論を頂いた同，鈴木敏夫教授に感謝します。

参 考 文 献

1) 長谷川和彦，上月明彦，村松徹，小峰博文，渡部勇治：船舶自動航行ファジイエキスパートシステム(SAFES)，日本造船学会論文集，Vol. 166（1989）
2) 長谷川和彦，滝本忠教，早川勇：Reconfiguration of Ship Auto-Navigation Fuzzy Expert System (SAFES)，関西造船協会誌，Vol. 227（1997）
3) 一色　浩：船舶の衝突回避のアルゴリズム，関西造船協会誌，222号（1994）
4) 不破　健：自動航行システムの安全評価，日本造船学会論文集，Vol. 166（1989）
5) 中村紳也，小瀬邦治：船舶航行の安全性評価，日本航海学会論文集，Vol. 92（1995）
6) 角田和也，萩原秀樹，鶴田三郎，苦瀬博仁，高橋洋二：東京湾の航行安全性向上のための船舶運航について，日本航海学会論文集，Vol. 92（1995）
7) 原　潔：輻輳海域における避航操船基準の有効性，日本航海学会論文集，Vol. 85（1991）
8) 原　潔，田中隆博：コースラインの自動設定に関する研究，日本航海学会論文集，Vol. 96（1997）
9) 井上欣三，原　潔，金子光浩，増田憲司：操船者の危険感に基づく操船環境の評価－評価指標としての環境ストレス値の定義－，日本航海学会論文集，Vol. 95（1996）
10) 避航操船シンポジウム，日本航海学会（1977）
11) クレベルスベルク，D.：交通心理学，企業開発センター交通問題研究室，清文社（1990）
12) Lighthill, M. J., Whitham, G. B.: On Kinematic waves II.A theory of trafic flow on long crowed roads, Proc. Roy. Soc. A, 229（1955）
13) 松村清重，浅利真知：操船者の感じる危険概念のモデリングについて，日本造船学会43回推進性能委員会資料（1997）
14) 小林弘明，遠藤　真：船舶避航操縦の解析－人間機械系解析の観点より－，日本航海学会論文集，Vol. 56（1976）
15) 宮崎恵子他：海上交通の安全に及ぼす高速船航行の影響の評価－操船者が感じる脅威－，日本航海学会論文集，Vol. 87（1992）

NII-Electronic Library Service