

操船者からみた防波堤配置計画の評価

Evaluation of Harbour Entrance Planning from Mariners' View Point

井上 欣三*・玉井 勝也**

by Kinzo INOUE and Katsuya TAMAI

Mariners' preference should be considered into the design process of the layout of break water and the dimension of harbour entrance. In the present paper, evaluation model is proposed to estimate the sense of safety that mariners would feel during the passing manoeuvre at the harbour entrance by a quantitative index. On the basis of this studies, it is possible to know how much percentage of mariners can accept the plan of layout and dimensions of the break water designed by port administrator.

1. はじめに

防波堤は、港内を静穏に保ち港湾機能を維持するために設置される。しかし、防波堤の配置に関しては、静穏性向上の点からは港外からの侵入波を防ぐため開口部を狭く閉じるのが都合が良いが、そうすると操船が難しくなるという問題が付きまとう。これは施設提供者と操船者の両者が長年抱えて来たジレンマである。

このような防波堤の設計上の要求と船舶の航行安全上の要求との折り合いをみつけたすのは容易ではないが、この種の問題を解決するためには、すくなくとも操船者としては、計画され

た防波堤配置に対しそれが操船者にとってどれほど好ましいのかを測るための指標や基準を明確にしておくことが第一に重要な点である。

この研究では、防波堤の配置形状に対する操船者側の価値観を明らかにするため、まず、港口部を通過する操船局面において、このとき船橋の操船者から見える自船と防波堤までの視覚的な水面の広がりを対象に、これまで操船者の意識の中にあって漠然と捕らえられることの多かった操船上の余裕や負担の感覚を明示的に表現し、定量化するためのモデルを提案する。そして、このモデルから出力される指標値が実際の操船者の感覚とどのような対応関係にあるかを関係づけた上で、本提案モデルを用いて種々の防波堤配置条件について操船者の基本的な選好性を明らかにするとともに、その結果を基に防波堤配置のあり方に対する操船者側の意向をとりまとめる。

keyword : 港口部計画、操船者、3D-visual

* 正会員 工学博士 神戸商船大学 教授
(〒658 神戸市東灘区深江南町5-1-1)

** 非会員 商船学修士 大阪商船三井船舶(株)
(〒105 東京都港区虎ノ門2-1-1)

2. 三次元視覚モデルの提案

与えられた防波堤配置計画について操船者の安全感覚をもとにその計画の好ましさを検討するには、防波堤開口部を通過するときに操船者が感じる心理的負担感を無視することはできない。

船橋の操船者からみると船体や甲板上的の積載物は船の周囲に見える水面範囲に死角を作る。一般的な操船者の感覚としては、このブラインドエリアの内側に危険対象物を入れることを好まないし、逆に、このブラインドエリアの外側に見える水面が対象物との間に広く確保される場合は、その広がりがいかに操船者にとっては余裕の感覚が生まれる。

ここに提案するモデルは、このような船橋の操船者から見える水面の広がりを対象に、操船者の視覚を通して感じる余裕や負担の感覚を定量的表現しようとするものである。

図1の上図は、船が一文字型防波堤に向かって進む様子を鳥瞰図で表し、図1の下図は、船橋の操船者の目から見えるそのときの前方視界の様子を三次元透視図として描いたものである。いま、評価対象水域内に障害物がないときの水面の広がりをもとに、ブラインドエリアの外側にあって障害対象物との間に確保される水面の広がり(鳥瞰図の斜線部分)を S とすると、

$$M = S / S_0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

の値は操船者の視界内に確保される余裕水域の大きさを表現する。

しかし、同じ大きさの面積の広がりでも至近のものと遠方のものとは操船者から見た重要性が異なる。そこで、このモデルではこのような操船者の感覚をとり入れるために、視点位置から距離 D 遠方にある横幅 X の大きさのものは三次元透視図上では $x \propto X/D$ 、奥行き Y のものは $y \propto Y/D^2$ となる性質を利用して、指標値 M を三次元透視図上で求めることにする。

さらに、同じ障害物でもそれが正船首方向にあるときと側方にあるときとはそれに対して操船者が感じる負担は同じではない。そこで、このような方位方向の重みを考慮に入れるため

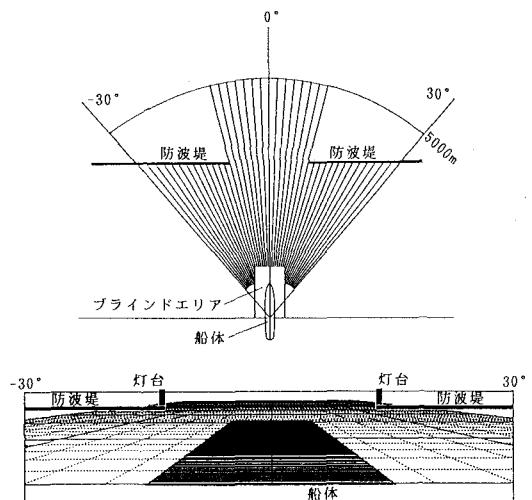


図1 防波堤通過時の鳥瞰図と3次元透視図

に正船首方向で1、操船者の意識の限界方位で0となるような重み関数 $w(\theta)$ を取り入れる。

いま、図1の鳥瞰図上で操船者の位置から見た微小角度 $d\theta$ の水面の広がりにおいて、ブラインドエリアの外側と障害物の間に存在する水域の面積を a 、障害物がないと仮定したときのブラインドエリアから評価対象距離の範囲までに広がる水域の面積を a_0 とすれば、(1)式の値は次式をもとに求めることができる。

$$M = \frac{S}{S_0} = \frac{\int_{-\theta}^{+\theta} (a/a_0) \cdot w(\theta) d\theta}{\int_{-\theta}^{+\theta} 1 \cdot w(\theta) d\theta} \quad \dots\dots (2)$$

本研究では、物体の存在を視覚的に認識できる距離の限界として5,000m、通常の人が見覚的に意識する方位の限界として $\pm 30^\circ$ を考え⁽¹⁾、これらによって囲まれる扇状の範囲を評価対象水域とした。また、方位に関する重み関数には $w(\theta) = \cos 3\theta$ を与えて、(2)式の値を三次元透視図上で求めた。

したがって、このモデルでは、評価対象水域内に障害物が全く無い場合は M の値は1となって操船者の感じる余裕は最大、そして、ブラインドエリアの外側に障害物との間に確保される水面が狭まるほど M の値は0に近づいて、それにつれて操船者の感じる余裕は失われて行くと

考える。

なお、操船者の感じる余裕と負担の感覚は互いに補数の関係にあると考えて操船者の感じる負担感については次式で表現する。

$$R = 1 - M \quad \dots\dots\dots (3)$$

3. モデル出力値と操船者感覚との対応

(1) 一文字型防波堤に対する負担感

ここでは、長さ230m、幅32.2m、喫水11.5m、眼高22mの2,800TEU型コンテナ船を供試船とし、この船が可航幅の異なる一文字型防波堤の港口部を通過する操船を想定して、そのとき操船者が感じるであろう負担感覚をこのモデルにより求めた。

計算にあたっては、操船者は船橋中央に位置するものとし、このときの操船者位置からのブラインドエリアは33.3m×58mの長方形で近似した。なお、窓枠下端が作る死角として操船者位置を中心とする半径100mの範囲もブラインドエリアとして考慮に入れた。そして、港口部の可航幅は250m、200m、154m、68mの4種とし、船は防波堤まで2マイル手前の位置から水路中央を10ノットの速力で直進するものとして計算した。

図2は、一文字型防波堤の港口部通過操船中に操船者が感じる負担感を時間ベースに示したものである。可航幅が狭くなると操船者が感じる負担が増加する様子や防波堤に接近につれて負担感が増し防波堤至近になるとかえって港口部が開けて見えるようになり負担感が減じて行く様子など、一般に操船者が経験する感覚がこのモデル出力値によく反映されている。

(2) 傾斜型防波堤に対する負担感

船の入港針路に対して防波堤が斜めに配置されるものをここでは傾斜型防波堤と呼ぶ。ここに、水路に対して防波堤が直角に配置される場合を傾斜角0°として、これを基準に傾斜角が30°、45°、60°の場合を設定し、このように角度をもった防波堤に向進する場合に操船者が感じるであろう負担感覚を求めた。ただ

し、防波堤間の開口部の広さはいずれの場合も200mとしたので、防波堤の傾斜角度が大きくなると船上の操船者から見通せる港口部の幅はそれだけ狭くなる。

図3は、前項において使用したと同じ供試船、同じ計算条件で傾斜型防波堤の港口部を通過する際に操船者が感じる負担感を求めた結果を示している。防波堤の傾斜角度が増すにつれて操船者が感じる負担が大きくなる様子が出力値に表現されている。

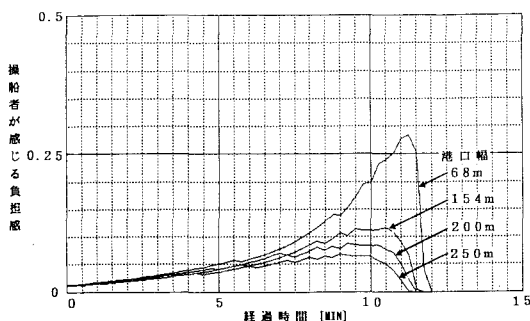


図2 操船者の負担感
(一文字型防波堤通過時)

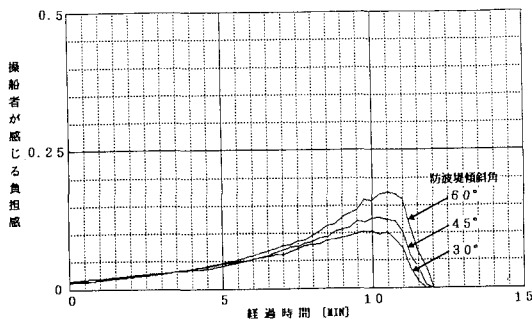


図3 操船者の負担感
(傾斜型防波堤通過時)

(3) モデル出力値と操船者感覚との対応

次に、このモデルから出力される指標値が実際の操船者の感覚とどのような対応関係にあるかを関係づけるために、図2、図3に求めたモデル出力値と別途行ったシミュレータ実験⁽²⁾およびアンケート調査⁽³⁾より得られた結果との相関をとった。

シミュレータ実験には神戸商船大学のビジュアル式操船シミュレータを使用した。実験にあたっては(1)節に述べたと同じ設定条件のシナリオを作成し、現役船長とパイロット合計14

名がそれぞれのシナリオのもとで実際に与えられた可航域を航過する操船を行った。そして、各実験終了ごとに設定された可航域に対する航過の可否判断をヒアリングして操船者の選好性を調査した。一方、アンケートは国内の現役パイロット652人を対象に行ったもので(回収率約30%)、その中で設問の一部として防波堤配置形状に対する操船者の選好性を調査している。

図4は、本モデルによる負担指標値の出力と実験およびアンケートによる実際の操船者の選好性との対応関係を示している。図の縦軸は、与えられた防波堤の可航幅および傾斜角条件に対してそれを許容不可と考える操船者の割合で与えている。なお、横軸の値については、図2、図3のような変化を示す出力値を総合化して表現できるように、一連の操船過程における平均負担値と最も大きな瞬間負担値の2つの要素に着目して、それらの相加平均値をもってモデル出力値を代表させた。

したがって、図4に示したモデル出力値と操船者感覚との両者の対応関係を用いることにより、与えられた防波堤配置条件に対する操船者の選好性を操船者集団の許容率の形で表現することが可能となる。

なお、これまでの計算では、操船者が感じる負担の評価は船速を10ノットと設定しこれを基準速力としている。いくつかの防波堤配置案を比較するときなど計画代替案の相対比較評価に際しては港口通過時の船速はとくに何ノットでなければならないというのではなく、通常の航行速力の範囲内で代表的な速力を設定すれ

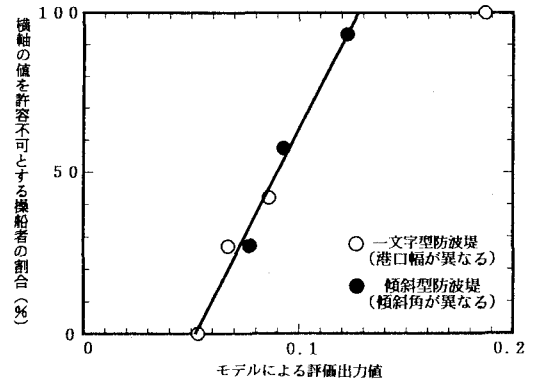


図4 モデルによる負担指標出力値と操船者の選好性の対応

ばよい。その意味からここでは10ノットを基準速力に設定した。

しかし、操船者の感覚としては、同じ条件の港口部でも船速を減じて航行すれば負担感は和らぎ、速力を増して航行すれば負担感は増す。このように操船者の感じる負担感は船速に依存すると考えるのが一般的であるが、このような操船者感覚の船速依存の様子をモデルに取り込むための考え方については別稿にゆずる。⁽⁴⁾

4. 操船者からみた防波堤配置計画の評価

ここでは、第3章に提案したモデルを用いて、一字型防波堤、傾斜型防波堤、ハの字型防波堤、片折れ型防波堤などを対象に操船者が感じる負担感を基に防波堤配置に対する操船者の基本的な選好性を明らかにするとともに、防波堤配置のあり方に対する操船者側の意向をとりまとめる。ここで扱う典型的な防波堤の配置形状とその呼称を図5に示す。

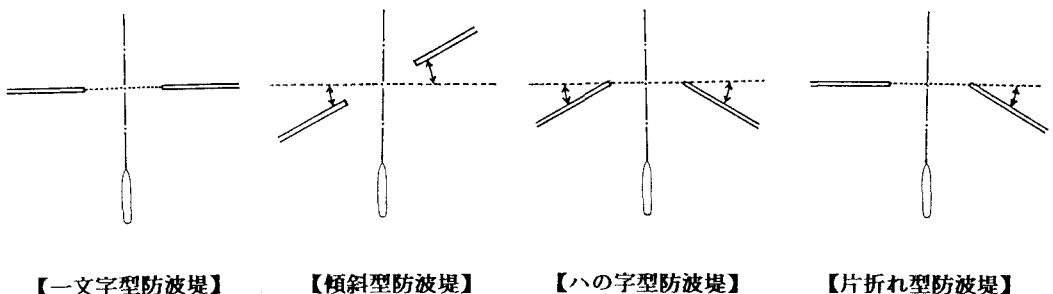


図5 防波堤の配置形状とその呼称

表1 計算対象船舶

	小型船型	中型船型	標準船型 《2800TEU型コンテナ船》	大型船型
船 長	50 m	100 m	230.0 m	350 m
船 幅	10 m	16 m	32.2 m	55 m
喫 水	3 m	7 m	11.5 m	27 m
眼 高	5.5 m	11 m	22 m	33 m
ブラインドエリア 長さ	83.5 m	167 m	333 m	500 m
ブラインドエリア 幅	14.5 m	29 m	58 m	87 m
基準下端によるブラインドエリア	半径25 mの円弧	半径50 mの円弧	半径100 mの円弧	半径150 mの円弧
速 力	10 KTS	10 KTS	10 KTS	10 KTS

(1) 港口部の幅に対する評価

港湾に入出港する際、操船者にとって最も気掛かりなのは港口部の広さである。港口幅がどれほど以上あれば操船者は大きな負担を感じることなく操船できるようになるのか、一文字型防波堤を対象に港口部の広さに対する操船者の選好性を調査した。

計算にあたっては表1に示すような標準船型を基準に、4種類の大きさの異なるブラインドエリアを持つ計算対象船舶を設定した。

評価の手順の第一ステップは、まず自船を設定して、そして、与えられた幅の防波堤開口部の中央をその船が通過するとき時々刻々操船者が感じるであろう負担感をモデル式にしたがって求めることである。第二のステップは、港口部通過操船中に操船者が感じた負担の時系列データから平均負担値と最大負担値の相加平均を求めてモデル出力の代表値とする。第三ステップは、この出力代表値を基に図4の関係を用いて、与えられた港口部の幅に対する操船者の選好性を操船者集団の許容率の形で求める。

なお、一連の評価に際しては基準速力を10ノットとして防波堤の手前2マイルの位置から港口部を通過し終わるまでを対象に計算を行った。図6は、このようにして求めた一文字型防波堤の港口部の幅に対する操船者の選好性を取りまとめたものである。

これによると、いずれの大きさの船についても港口部の幅は最小限1L（Lは船長）以上は必要としていることがわかる。それより狭くなると船橋の操船者からみた前方視界内に広がる

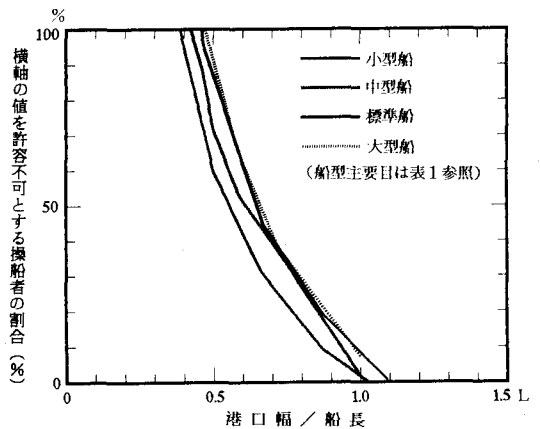


図6 港口幅に対する操船者の選好性

水域空間の視覚的ゆとりが失われて操船者が感じる負担感が増し、その港口幅を許容できないとする操船者の割合が増えることになる。

(2) 防波堤の配置形状に対する評価

防波堤は航路法線に対して直角真一文字に配置されるのが操船者には最も好まれる。しかし、港湾の自然条件や地理特性によっては防波堤が航路法線に対して傾斜して配置される場合がある。この場合操船者はどれほどの傾斜まで許容することができるか、防波堤の傾斜角度に対する操船者の選好性について調査した。

計算にあたっては表1に示した標準船型を自船として設定し、港口部の幅をパラメトリックに変化させた。そして、前項と同様、基準速力を10ノットとして防波堤まで2マイルの位置から計算を始め、港口部を通過し終え防波堤が前方視界から消えるまでを対象に計算を行った。

図7は、傾斜型防波堤に関する操船者の選好性を取りまとめたものである。一般に防波堤の傾斜角度が大きくなるにつれてその状態を許容不可とする操船者の割合は増加する。これは防波堤の傾斜角度が大きくなると船上の操船者から見通せる港口部の幅がそれだけ狭くなることに因るものである。

また、図8、図9にハの字型防波堤と片折れ型防波堤に関する操船者の選好性を取りまとめた。防波堤がハの字に配置される場合もその傾斜角が大きくなると操船者の前方視界の広がりが増圧されて操船者が感じる負担は大きくなるが、ハの字型防波堤の場合は傾斜型防波堤の場合と異なり、操船者から見通せる港口幅の大きさに変化を生じないので操船者に強いられる負担は軽くてすむ。

一方、片折れ型防波堤の場合は水域空間の視覚的圧迫は片側の防波堤だけに限られるので操船者が感じる負担はハの字型防波堤の場合よりも軽減される。図の曲線の右上がりの傾向が極めて緩やかであることを見てわかるように、傾斜型防波堤やハの字型防波堤に比べて片折れ型防波堤は防波堤が傾斜して配置されるにしても最も操船者に受け入れられやすいタイプといえる。

(3)防波堤傾斜に対する港口幅の補償余裕

防波堤が傾斜して配置されても港口部の幅が十分広い場合には船上の操船者から見通せる水域空間の広がりはおお確保される。操船者から見える前方の水域空間に視覚的ゆとりが生まれると、その効果により結果として操船者はある程度の防波堤の傾斜を許容するようになると考えられる。

確かに図7、図8、図9に見られるように、港口部の幅が概ね1L(計算対象船舶の船長Lは230m)より広がると操船者はある程度の防波堤の傾斜を許容するようになる。

このことは、逆に言うと、防波堤が航路法線に対し傾斜して配置される場合、操船者がそれを許容するためには、港口部の幅は最小限必要

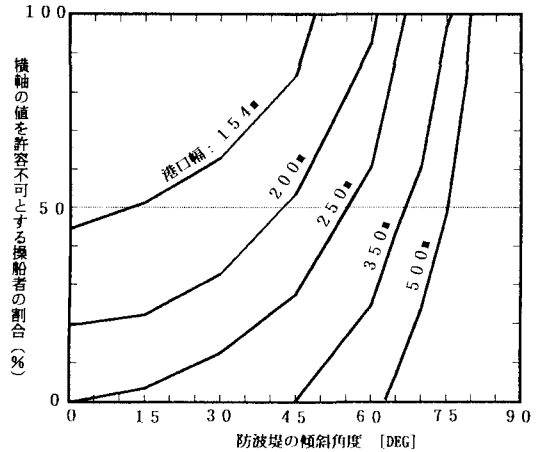


図7 傾斜型防波堤に対する操船者の選好性

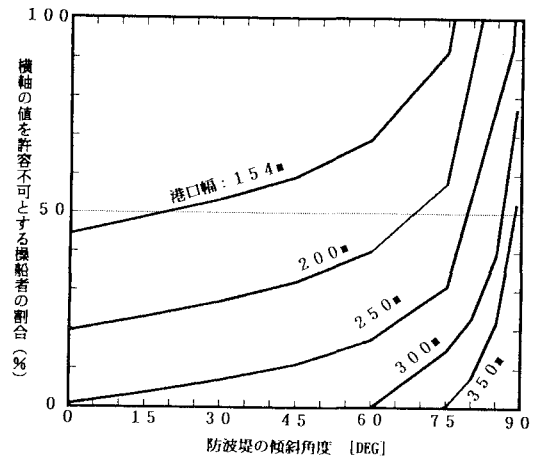


図8 ハの字型防波堤に対する操船者の選好性

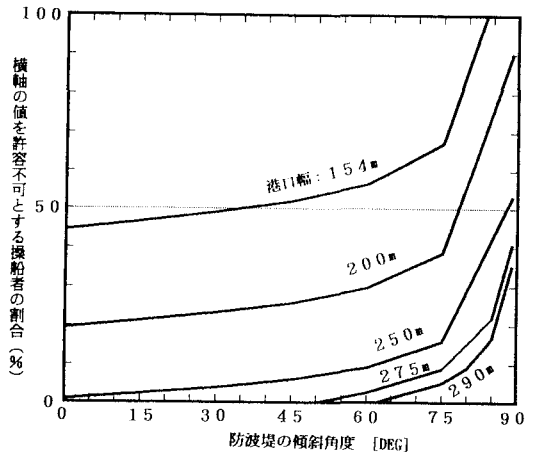


図9 片折れ型防波堤に対する操船者の選好性

な幅（約1 L）にさらに余裕を付加して、より広く確保する必要があることを意味している。

防波堤が傾斜して配置されてもすべての操船者が許容できるような港口幅の余裕の見積もり値の目安は、図7、図8、図9に示したように港口幅をパラメトリックに変化させて得られる曲線が横軸をよぎるときの角度の値とそのときの港口幅の値の組み合わせから求めることができる。

図10は、そのようにして防波堤傾斜に対する港口幅の補償値を求めた結果を示している。これによると、例えば60°の傾斜角に対して、片折れ型防波堤の場合は20%、ハの字型防波堤では50%、傾斜型防波堤では120%の補償余裕を見積もる必要があることがわかる。

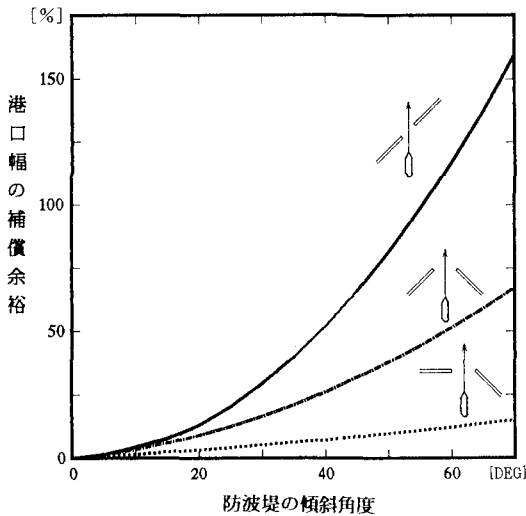


図10 防波堤の傾斜に対する港口幅の補償余裕

(4) 外乱に対する港口幅の補償余裕

港口部を通過する際は、操船者はできるだけ防波堤開口部の中央を見通すルート上に占位するように心掛ける。しかし、実際には思いがけない外乱影響により左右いずれかに偏して航行することを余儀なくされることもあり、また、風潮外力によるリーウエイを消去するために船首偏角をもちながら進航することもある。このように外乱が存在するために偏位や偏角を伴っ

た状態で進航する場合は、水路中央を直進する理想の操船に比べ操船者は余分の負担を強いられることになる。

いま、表1に示した標準船型の船が一文字型防波堤に向かって進むとき、航行ルート of 水路中央からの偏位が大きくなるにつれて、それを許容不可とする操船者の割合が増加していく様子を求めた結果を図11に示す。計算にあたっては港口部の幅をパラメトリックに変化させ、そして、基準速力を10ノットとして防波堤まで2マイルの位置から計算を始め、港口部を通過し終えるまでを対象に計算を行った。

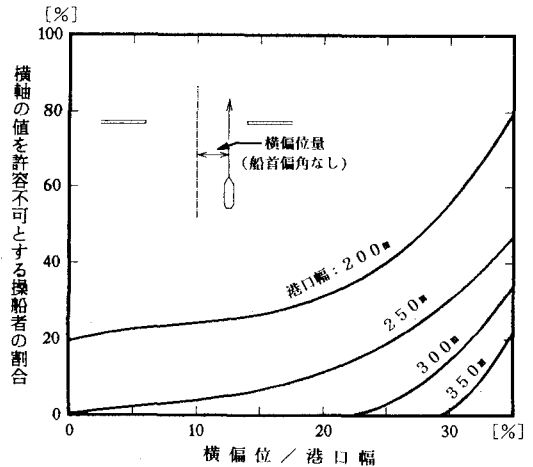


図11 航行ルートの横偏位に対する操船者の選好性

この場合も港口部の幅が概ね1 L（計算対象船舶の船長Lは230 m）より広くなると操船者から見える前方の水域空間に視覚的ゆとりが生まれ、その結果、操船者はある程度の外乱に起因する横変位を許容するようになる。

言い換えれば、このことは、外乱影響を考慮にいたした港口部通過操船を考える場合、操船者がそれを許容するためには、港口部の幅は最小限必要な幅（約1 L）にさらにこのような偏位や偏角を伴って進航するときに操船者が強いられる負担の増加を補償するだけの余裕を付加して、より広く確保する必要があることを意味している。

このような外乱に対する港口幅の補償余裕の

目安は、図11に示したように港口幅をパラメトリックに変化させて得られる曲線が横軸をよぎるときの角度の値とそのときの港口幅の値の組み合わせから求めることができるが、ここではこの計算を種々の横偏位と船首偏角の組み合わせについて行い、その結果を図12に示すような表現方法でとりまとめた。

図12によれば、想定される外乱の程度に応じて見積もるべき港口幅の補償値を取り出すことができる。具体的には一般に生じ得る最大の横偏位を想定し、さらに必要に応じて風潮外力によるリーウエイ角を考慮して外乱に対する補償余裕を見積もればよい。

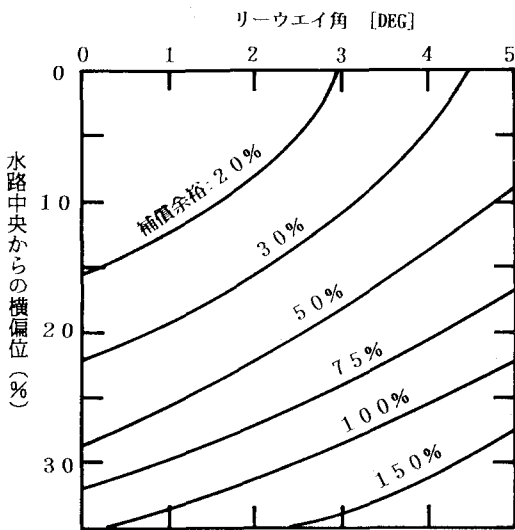


図12 外乱に対する港口幅の補償余裕

5. むすび

本論文では、船橋の操船者から見える前方視界内の水面の広がりを対象に、操船者の視覚を通して感じる操船上の余裕や負担の感覚を定量化するための考え方について述べ、そして、操船者の意識としての余裕と負担を定量表現するためのモデルとして「3次元視覚モデル」を提案した。そして、本モデルの構築にあたっては船種、船型の違い、操船方法や速力の違い、さらには外力の影響をも評価値に反映できるように工夫した。

このモデルでは、現役船長とパイロットを被験者とした操船シミュレータ実験を通じて、モデルから出力される指標値が実際の操船者の感覚とどのような対応関係にあるかを関係づけることによりモデルの現実性を保証しているので、例えば与えられた防波堤の配置条件が操船者にとってどの程度受け入れることができるレベルにあるかといったように操船者側からの評価が可能となる。

また、本提案モデルを通じて防波堤配置に対する操船者の選好性の情報が得られるので、港湾の施設提供者がこれを基に操船者の意向を事前に計画段階で検討できるようになる点で実用面への応用性は高い。

なお、港口部の幅と防波堤の配置形状に関する操船者の選好性の要点は以下のようにとりまとめることができる。

- (1) 防波堤が航路法線に対し直角真一文字に配置される場合、港口部の幅は最小限1Lは確保されるべきこと。
- (2) 操船者が防波堤の傾斜を許容するためには、港口部の幅は最小限必要な幅に加えてさらに補償余裕を見積もる必要があること。
- (3) 外乱影響を受ける場合は、操船者が強いられる負担の増加を補償するだけの余裕を付加してより広く確保する必要があること。
- (4) 防波堤が航路法線に対し角度をもって配置される場合は、傾斜型防波堤やハの字型防波堤に比べて片折れ型防波堤が操船者に受け入れられやすいタイプといえる。

【参考文献】

- (1) 樋口忠彦：景観の構造、技報堂
- (2) 井上, 原, 柴田：可航域が閉塞されときの操船行動に関するシミュレータ実験、日本航海学会論文集、第87号、1992年9月
- (3) 井上, 富久尾, 菅沼：操船者の安全感覚にもとづく港湾水域施設の評価基準について、日本航海学会論文集、第85号、1991年9月
- (4) 井上, 玉井：防波堤の配置計画に対する操船者の選好性評価 — 三次元視覚モデルの提案 —、日本航海学会論文集、第89号、1993年10月(掲載予定)