船舶の操縦性能の差異を踏まえた 必要航路幅員の算定

赤倉 康寛¹・安部 智久²

¹正会員 京都大学 防災研究所 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄)

E-mail:akakura.yasuhiro.6n@kyoto-u.ac.jp

²正会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所 (〒239-0831 神奈川県横須賀市長瀬3-1-1)

E-mail:abe-t252@ysk.nilim.go.jp

航路計画に当たっては、対象船舶と航行環境が特定できる場合には、船舶の諸元値や航行速度等の計画条件を物理的・定量的に説明できる第2区分照査法が用意されている。しかし、公共航路の計画において、対象船舶を、ある特定の一隻に確定することは困難である。

以上の状況を踏まえ、本研究では、第2区分照査法の公共航路への適用性の向上を目的として、同一船種・船型における、操縦性能の差異による航路幅員算定値の変動幅を算定した。その結果、75%カバー率において、操縦性能の差異による変動を明示的に確保するには、モデル船算定値に、単航路で3%、往復航路で6%の余裕分を考慮すれば十分であるとの結論を得た。

Key Words : port plan, public fairway, width, safety factor, J-Fairway

1. 序論

航路幅員の計画に当たっては、対象船舶と航行環境が特定できる場合には、船舶の諸元値や航行速度等の計画条件を物理的・定量的に説明できる第2区分照査法を使用することができる(港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁾、以下「技術基準」という。)。しかし、公共航路の計画において、対象船舶を、ある特定の一隻に確定することは困難である。以上の状況を踏まえ、本研究は、第2区分照査法の公共航路への適用性の向上を目的として、同一船種・船型における、操縦性能の差異による航路幅員算定値の変動幅を算定したものである。

日本の港湾の航路計画手法では、2007年改訂の技術基準¹⁾より、第2区分照査法が追加された。これは、従来の第1区分照査法が、単純で長い間改訂されずに使用されてきたものの、今日のように操縦性能が異なる大小様々な船舶に対して必ずしも適応できていない²⁾ことを踏まえて、開発されたものである。同照査法は、2014年には、国際航路協会(PIANC)報告書³⁾にも記載され、今後海外においても使用される見込みである。また、様々な計画条件を考慮した複雑な算定を、比較的容易に行うことが出来るように、算定プログラムJ-Fairwayも開発されている。一方で、同照査法は従来に比べて厳密な算定となるが故に、算定結果が当該船舶にしか適用されないとも

みなし得る。ある国内港湾での航路計画においては、公共航路では計画対象の船舶が明確には特定されないとの理由で、適用が見送られている。

航路計画における対象船舶に関係する主な変動要因は、①船舶の大きさ及び②船舶の操縦性能に大別される。①は、従来より、平均より少し大き目(カバー率:75%)の諸元値を用いる¹⁾ことにより対応されてきた。このカバー率:75%値には、明確な根拠は見当たらないが、整備水準として長年使用され、大きな問題が出ていないことから妥当なものともみなされている。換言すれば、同クラスの25%の船舶は、計画に使用した諸元値より大きいことが、計画に含まれる様々な余裕度により、対応可能との考え方であり、これは、第2区分照査法においても有効である。一方、②については、第2区分照査法により、船舶の操縦性能が航路幅員の算定値に直接影響を与えることとなって始めて現れた問題である。この点について、開発当時は、実際の航路計画では、算定結果を切りの良い数字(例えば50m単位)まで切り上げることから大きな問題とはならないとみなされていた。しかし、同照査法には、不確定要素を考慮する項目がなかったことは事実であり、PIANC³⁾への掲載に当たっては、その他考慮できない項目等への対応として、算定結果に対し最大30%のSafety Factorを加味することが可能とされた。

港湾施設の供用期間は非常に長く、その間には、同一

表-1 選定船舶の概要 (各11隻)

項目	バルクキャリア (Capesize)	コンテナ船 (Panamax)
竣工年	~'94:2隻, '95~'99:3隻, '00~'04:2隻, '05~:4隻	~'94:5隻, '95~'99:3隻, '00~'04:1隻, '05~:3隻
建造会社	9社	9社
載貨重量トン数	15.0万~18.0万t	3.6万~6.0万t
TEU Capacity	—	3.6千~5.1千TEU
全長	280.0~292.0m	245.0~294.1m
舵面積比	0.0123~0.0158	0.0121~0.0190
水面上側面投影面積	2,741~3,746m ²	5,630~7,637m ²

船種・船型の船舶においても、操縦性能にも変化が生じる得る。そのために、本研究では、同一船種・同船型で、竣工年代や建造会社の異なる船舶における、操縦性能の差異による第2区分航路幅員算定値の変動幅を把握するものである。なお、航路水深については、操縦性能が算定結果に直接の変化をもたらさないため、従来どおりのカバー率の船舶諸元値を用いて算定することで、問題はない。

2. 対象船舶の詳細諸元の収集

本研究では、分析対象の船種・船型として、Capesizeバルクキャリア及びPanamaxコンテナ船の2船種・船型を選定した。これらは、ある程度長い期間建造されている汎用船型であるため、データの入手が比較的容易であった。収集したのはそれぞれ10隻であり、さらに、もともと基準・同解説¹⁾にモデル船として掲載されていた1隻を加えた。

航路幅員の算定に必要な諸元値は、以下のとおり。

- ①主要寸法：載貨重量トン数、全長、垂線間長、型幅、満載喫水
- ②詳細諸元：ブロック係数、水面上投影面積（正面・側面）、舵面積、舵アスペクト比、舵干渉係数、側面積の図心位置

①主要寸法は、従来の計画でも必要とされた基礎的な数値であり、②詳細諸元は、第2区分照査法で必要とされる操縦性能に関わる数値である。諸元値の収集は、文献4)のバックナンバーや、IHS-F, Clarkson等の船舶諸元データにより整理した。なお、ブロック係数の算定に必要な排水トン数が不明な船舶については、載貨重量トン数との平均的な関係式¹⁾より推計した。舵干渉係数は、ブロック係数との平均的な関係式¹⁾により推計した。側面積の図心位置は、船舶のシルエットより測定した。

選定された船舶の概要を、表-1に示す。竣工年代や建造会社がなるべく異なった船舶を選定した結果、主要寸法の載貨重量トン数や全長に加え、詳細諸元の舵面積比や水面上側面投影面積でも、ある程度の幅が見られた。

3. 各船の影響対応幅員値の算定

(1) 考え方

実際の航路計画においては、算定プログラムJ-Fairwayに、主要寸法と航行環境を入力することにより、技術基準¹⁾に準拠した第2区分照査法による必要航路幅員が算定できる。この場合、J-Fairwayでは、予めモデル船によって算定された、各影響への対応に必要な幅員値（以下「影響対応幅員値」という。）を基礎数値として用いている。すなわち、船舶の操縦性能は、ある特定の船の数値を使用している。

各影響対応幅員値は、次のように算定される。まず、船舶が、考慮すべき影響による外力に対して、操舵により針路を確保した平衡状態は、漂流角 β 、舵角 δ を用いて、船体の横方向及び回転の運動方程式により、以下に表現できる（無次元表示）。

$$Y'_{\beta} \cdot \beta + Y'_{\delta} \cdot \delta + C_F = 0 \quad (1)$$

$$N'_{\beta} \cdot \beta + N'_{\delta} \cdot \delta + C_M = 0 \quad (2)$$

ここに、 C_F, C_M ：船体に作用する力・モーメント

Y'_{β}, N'_{β} ：反力係数・モーメント係数

Y'_{δ}, N'_{δ} ：舵力係数・モーメント係数

この流体力係数 Y' 及び N' は、船舶の主要寸法及び詳細諸元から求まる。影響は、風、航路側壁、船舶の行き会い及び追い越しであり、それぞれの想定条件の入力により、各船の影響対応幅員値を算定した。

(2) 算定結果

風影響に対しては、様々な風向角において斜航する場合に、当舵角15度の条件下での最大漂流角と、斜航により必要となる対応幅員値（m単位及びB（型幅）換算）を算定した。その結果を、表-2に示す。ここで、風力に対する漂流角と対応幅員値との関係を図-1に示すが、漂流角が数度の範囲で変化しても、対応幅員値には大きな変化は出ない。そのため、表-2では、最大漂流角は船による差が相対的に大きいのが、対応幅員値では差はわずかであった。

その他の影響に対しては、側壁影響では当舵角5度、他船による影響では当舵角15度との条件¹⁾における対

表-2 風影響対応幅員値の算定結果

	バルクキャリア (Cape)		コンテナ船 (P'max)	
	最大	平均	最大	平均
最大漂流角(度)	0.72	0.61	1.30	1.04
対応幅員(m)	48.7	48.0	38.7	37.3
対応幅員(B換算)	1.08	1.07	1.20	1.16

図-1 風力に対する漂流角と対応幅員値の関係

表-3 側壁・行き会い・追い越し影響対応幅員値の算定結果

		バルクキャリア (Cape)		コンテナ船 (P'max)	
		最大	平均	最大	平均
側壁	対応幅員	52.9	50.5	61.1	55.2
	B換算	1.18	1.12	1.90	1.71
行き会い	対応幅員	99.5	94.3	116.7	104.7
	B換算	2.21	2.10	3.62	3.25
追い越し	対応幅員	163.2	155.1	182.7	164.9
	B換算	3.63	3.45	5.67	5.12

応幅員値を算定した。その結果が、表-3であるが、3つの影響で傾向は似ており、最大値と平均値との差は、バルクキャリアで約5%、コンテナ船で約11%となっていた。また、いずれにおいても、m単位の対応幅員値と、B(型幅)換算数値に傾向の差は見られなかった。

(3) 要因分析

以上の算定により、各船の影響対応幅員値は、船舶の操縦性能の差異により、変動することが確認された。ここでは、その変動の要因を少し分析する。

まず、風影響については、水面上投影面積が支配的である。図-2に、コンテナ船について、風による漂流角と水面上投影面積との関係とを示す。縦軸の漂流角は、一定の風力として、風速船速比:3(風速12m/sで船速7.8kt)における数値とした(前節の最大漂流角は同じ舵角に対する数値で、船舶により風力が異なる)。横軸は、水面上風圧側面積比(水面上風圧面積/垂線間長/満載喫水)とした。この図より、風影響は、水面上投影面積が主要な要因であると言える。

一方、その他の影響については、想定される要因が多

図-2 コンテナ船の風力影響漂流角と投影面積比

図-3 行き会い影響の重回帰分析

い。そこで、旋回直径を説明する要因⁵⁾を踏まえ、船型関係でブロック係数及び長さ幅比(垂線間長/型幅)を、舵性能関係で舵面積比及び舵アスペクト比を説明変数の候補として、重回帰分析を行った。目的変数の影響については、代表例として、行き会い影響を取り上げ、全船で同じ外力値とするため、排水トン数の1/3乗による無次元化値(図中「行き会い影響無次元化値」とした(前節の幅員値は、同じ船舶同士の数値で、船舶の大きさにより外力値が異なる)。説明変数の組合せは、総当たりの中で、符号条件及びAICにより選定した。

回帰式及びその再現精度を示したのが、図-3である。説明変数は、バルクキャリアでは、候補として挙げた4つ全てが、コンテナ船では、舵アスペクト比を除く3つ全てが、1%有意水準で有効との結果であった。両船種

図-4 カバー率に応じた相互比率算定の概念図

とも、説明変数が1つや2つでは、説明力の高い回帰式は得られなかったことから、風影響とは異なり、船型や舵性能の多くの要因が関与していると言える。

4. 影響対応幅員値の変動幅

(1) 考え方

これまでの算定により、2船型×11隻の船舶の各影響対応幅員値が求まった。この結果を直接用いれば、当該船種・船型における、技術基準¹⁾記載のモデル船からの、各船の算定値の変動幅が、一応、求められる。しかし、他の船種・船型では、モデル船の算定値が、大きめなのか、小さめなのかを知る方法がないため、この結果を、直接、他の船種・船型へ適用することは困難である。

そこで、これまでの算定結果を広く他の船種・船型へも適用可能とするため、モデル船の影響対応幅員値が、当該船種・船型で、どの位置にあるのかも不確定要因と捉え、全11隻のいずれにもなり得るとみなして、確率的に処理をすることとした。図-4に概念図を示すが、まず、全11隻それぞれについて、残り10隻に対する影響対応幅員値の相互比率を求める。その相互比率について、一般化するために正規分布を当てはめた上で、カバー率を設定すると、それに応じた相互比率が定まる。この相互比率を、モデル船の影響対応幅員値に掛け合わせる割増率とすることで、モデル船の幅員値がどの位置にあるのかも含めた中での、操縦性能の差異による変動幅を踏まえた影響対応幅員値が算定できる。

(2) 算定結果

図-5に風影響の結果を示す。ここで、実際の航路計画においては、風影響は、横方向潮流と共に斜航の角度を入力することになるため、最大漂流角の結果を示した。その相互比率は、バルクキャリア：0.731～1.368、コンテナ船：0.691～1.447と広く分布しており、正規分布を当てはめた場合のカバー率75%値はバルクキャリア：1.097、コンテナ船：1.120となった。

図-6に行き会い影響の対応幅員算定値の結果を示す。

図-5 風影響対応の最大漂流角算定値の相互比率の分布

図-6 行き会い影響対応の必要幅員算定値の相互比率の分布

相互比率の分布は、やはり、コンテナ船の方が、バルクキャリアより広がっており、バルクキャリア：0.885～1.130に対し、コンテナ船：0.752～1.330の範囲となっていた。なお、側壁・追い越し影響の算定結果は、行き会い影響の結果と大きな差はなかった。

全般的にバルクキャリア (Capesize) に比べて、コン

テナ船 (Panamax) の方が相互比率の広がりが大きかった, すなわち, 各船の操縦性能の差が大きかったのは, フルコンテナ船の出現が1950年代後半以降であり, バルクキャリアに比べて通算の建造年数が短いため, 相対的に船型が安定していないことが大きな要因と考えられる. 例えば, 表-1では, Panamaxコンテナ船には, 全長もパナマ運河の制限最大長に合わせたPanamax-maxと, これより50mほど全長の短い船型が混在している. また, 少し古い情報にはなるが, 過去のPanamaxコンテナ船は, 燃料油単価により, 航行速度が上下し, その影響で満載喫水等の船型に変化が出ていた⁶⁾. 2008年以降の燃料油高騰により, コンテナ船では減速運航が定着しており, 設計速度の低下は, 船型や操縦性能を変化させていると考えられる. なお, 造船技術の進歩により操縦性能が向上すれば, 影響対応幅員値が小さくなると想定されるが, この2船種・船型では明確な傾向は見られなかった.

5. 変動幅を考慮した航路幅員の算定

(1) 変動幅の設定

前章では, 各船の操縦性能の相違による各影響対応幅員値の変動幅を算定した. この結果を踏まえて, 航路計画時に考慮すべき変動幅を設定する.

まず, カバー率の設定であるが, 1章で述べたとおり, 対象船舶に関係する変動要因のうち, 船舶の大きさについては, 従来より, 75%カバー率をもって計画をしている. そこで, 本研究では, 船舶の操縦性能についても, 同じカバー率を採用した. また, 算定結果においては, コンテナ船 (Panamax) の方が, バルクキャリア (Cape-size) より変動幅が大きかった. そのため, 安全側の設定として, コンテナ船の結果 (図-5及び図-6) に対して, さらに余裕を見て, 変動幅を以下のように設定した.

- ・風影響の最大漂流角: 算定結果12.0%→設定15%
- ・側壁・行き会い・追い越し影響対応幅員: 算定結果8.3~9.0%→設定10%

(2) ケース算定

変動幅の設定により, モデル船の風影響の最大漂流角及びその他の影響対応幅員値を割り増しし, その上で様々なケースでの航路幅員を算定した. 算定対象とした船種・船型の主要寸法 (技術基準¹⁾ 掲載のカバー率75%値) を表-4に, 算定を行った各ケースの航行環境 (算定条件) を表-5に示す. ここで, 「貨物船」は, 一般貨物船とバルクキャリアの総称である. 算定ケース数は, 4つの対象船舶に対して, ①単航路及び②往復航路 (追い越しなし) で, それぞれ216ケース, ③往復航路 (追い越しあり) の場合, 横偏位認知方法に目視・レーダーを

表-4 ケース算定の対象船舶の主要寸法¹⁾

	載貨重量 トン数	全長	垂線 間長	型幅	満載 喫水
貨物船	70,000	233m	222m	32.3m	13.8m
	150,000	292m	279m	44.7m	17.7m
コンテナ船	50,000	274m	258m	32.3m	12.7m
	165,000	381m	363m	53.8m	16.0m

表-5 ケース算定における航行環境 (算定条件)

航路種別	単航路	往復航路 (追越なし)	往復航路 (追越あり)
船速	5.0kt, 7.5kt, 10.0kt		
風速	12m/s, 15m/s		
風向角	船首方向から見て30度, 60度, 90度		
横方向潮流	0.2kt, 0.5kt		
横偏位認知方法	目視, レーダー (2度), GPS		GPS
前方浮標距離	全長×7 (m)	全長×3.5 (m)	
航路水深	満載喫水×1.1 (m)		
航路外水深	航路水深×0.5 (m)		
側壁勾配	45度以下, 45度より大		

表-6 ケース算定の結果

①単航路

船種	載貨重量 トン数	モデル船 平均 (m)	含変動幅 平均 (m)	増加率	
				最大	平均
貨物船	7万	145	146	1.19%	0.46%
	15万	182	183	1.24%	0.46%
コンテナ船	5万	162	164	1.87%	0.74%
	16.5万	233	235	2.42%	0.96%

②往復航路 (追い越しなし)

船種	載貨重量 トン数	モデル船 平均 (m)	含変動幅 平均 (m)	増加率	
				最大	平均
貨物船	7万	342	352	3.93%	3.00%
	15万	430	442	3.89%	2.98%
コンテナ船	5万	397	411	4.83%	3.58%
	16.5万	565	586	5.25%	3.66%

③往復航路 (追い越しあり)

船種	載貨重量 トン数	モデル船 平均 (m)	含変動幅 平均 (m)	増加率	
				最大	平均
貨物船	7万	895	930	3.99%	3.85%
	15万	1,093	1,136	4.11%	3.95%
コンテナ船	5万	1,010	1,055	4.77%	4.51%
	16.5万	1,384	1,449	5.11%	4.67%

選択できないので, 72ケースとなる.

算定結果を, 表-6に示す. ここで航路幅員のうち, 横偏位認知に必要な幅員及び横方向潮流への対応幅員には, 操縦性能の差異による変動幅が含まれない. これらが, いずれの航路種別においても必ず含まれるため, 設定した変動幅に比べて, ケース算定による, 変動幅を考慮しないモデル船算定結果からの増加率は, ①単航路: 0.5~1.0%, ②③往復航路: 3.0~4.7%と小さくなった. 増加率の最大値でも, ①単航路: 1.2~2.4%, ②③往復航路: 3.9~5.2%であった.

(3) 航路計画への適用

これまで述べてきた通り、実際の航路計画では、代表値として、特定の船舶諸元や操縦性能の船舶を対象として幅員値を算定する。この中には、既にある程度の余裕分が含まれている。例えば、横偏位認知のために必要な幅員の算定では、目視では操船者の99.8%が認知できる幅を確保している他、精度の低いレーダ（方位測定誤差：2度）やGPS（単独GPS：最大誤差30m）が使用可能となっており、通常、レーダーやGPSを使用した航路計画では、安全側として、精度の低い方が選択されている。また、少し大きめの船舶の主要寸法を用いるのも、この余裕分の一つである。

本研究では、航路計画における変動要因のうち、船舶の操縦性能の差異を対象とし、幅員算定値の変動幅を把握した。その結果、カバー率75%において、Panamaxコンテナ船の影響対応幅員値に、さらに余裕を持たせた設定で、最大、単航路で2%強、往復航路で5%強の増加であった。この結果が、概ねの船種・船型に適用可能であるとみなして、操縦性能の差異による変動を明示的に確保する場合には、算定プログラムJ-Fairwayでの算定結果に、単航路で3%、往復航路で6%の余裕分を考慮（割り増し）すれば十分であると言える。この余裕分はそれ程大きなものではなく、計画手法の開発当時に考えられていたように、切り上げにより含まれ得る程度ではある。しかし、この変動幅を明示的に考慮することで、公共の航路への適用性が向上する。さらには、PIANC報告書³⁾を踏まえ、その他の要素も含めてSafety Factorとして考慮することも一つの方法であろう。

6. 結論

本研究は、第2区分照査法の公共航路への適用性の向上を目的として、同一船種・船型における、操縦性能の差異による航路幅員算定値の変動幅を算定したものであ

る。本研究の結論は、以下のとおりである。

- (1) 対象とした2船種・船型について、操縦性能の差異による風影響対応幅員の差はわずかであり、側壁・行き会い・追い越し影響対応幅員の最大と平均との差は、大きい方のコンテナ船で約11%であった。
- (2) 操縦性能の差異による航路幅員算定結果の変動幅を明示的に確保するには、カバー率75%においては、従来の算定結果に対して、単航路で3%、往復航路で6%の余裕分を考慮すれば十分である。

本研究の成果により、航路幅員の第2区分照査における変動要因の一つを定量化することができた。このような研究を進めていくことにより、所要の安全性に対する計画値の変動量を、少しずつ、狭めていくことが可能と考えている。引き続き、航路計画手法の高度化に資する研究を進めていきたい。

謝辞：本研究の実施に当たり、天津皓平東京海洋大学名誉教授、芳村康男北海道大学教授、津金正典東海大学元教授及び高橋宏直みなと総合研究財団客員研究員の皆様に、貴重なご助言を頂きました。ここに記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人日本港湾協会、国土交通省港湾局監修：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007。
- 2) 天津皓平、平野雅祥、芳村康男、津金正典、高橋宏直：新しい航路設計基準、KANRIN, No.20, pp.2-14, 2008。
- 3) PIANC: Harbour Approach Channels Design Guidelines, Report No 121, 2014。
- 4) The Royal Institution of Naval Architects: *Significant Ships of 2011*, 2012。
- 5) 関西造船協会編：造船設計便覧、海文堂、1983。
- 6) 高橋宏直、赤倉康寛：日本に寄港したコンテナ船の大型化に関する分析、運輸政策研究, Vol.2, No.4, pp.30-39, 2000。

AN EVALUATION OF THE REQUIRED FAIRWAY WIDTH BASED ON THE DIFFERENCE OF MANEUVERABILITY IN THE SAME TYPE AND CLASS SHIPS

Yasuhiro AKAKURA and Motohisa ABE

About planning of fairway, in the case that the design ship and navigation environment is designated, class 2 verification method can be used. But, for the public fairway, the design ship can not be designated to the specific ship.

Against this background, this study evaluated the fluctuating range of required fairway width based on the difference of maneuverability in the same type and class ships, with the aim of progress of applicability of class 2 verification method to public fairway. As a result, under 75% cumulative probability, safety margin to fluctuating by ship maneuverabilities was evaluated as 3% for one-way and 6% for two-way fairway.