風圧影響下における変針操船支援情報に関する研究

原 大地*・井上 欣三**

A Study on the Supporting Information in Altering Maneuver under Wind Effect

Daichi HARA, Kinzo Inoue

Abstract

Recently, the dimension of vessels calling ports of Japan such as container vessels or LNG carriers is tendency of enlargement. The depth and width of waters should be adapted for the dimension of vessels for securing safety. However the areas of fairway and basin aren't cope with the enlargement of the dimension of vessels, because dredging for the waters expansion takes long time and costs a great deal. Therefore, the opportunity to maneuver large vessels, which the wind effect acts on easily, is increasing at narrow waters. Ship -handling environments in ports will become severe gradually for mariners.

It is difficult to predict the wind effect acts on the ship motion for even mariners experienced in maneuvering large vessels in ports. To predict precisely the wind effect is one of the causes of difficulty to maneuver large vessels. If the prediction of the wind effect is uncertain, the risk of the accident such as grounding a shoal or collision to a quay may increase, especially when a vessel navigates in low speed because the wind velocity become fast relatively. Therefore, it is important and meaningful to provide mariners useful information that shows the wind effect on maneuvering.

In preceding study, the authors had developed the method to provide mariners information as the diagrams that show the wind effect in berth -approaching maneuver. In this paper, to develop the supporting information in every situation of the maneuvering in ports, the authors predicted the ship motion under wind effect using simulation in altering maneuver and extracted key indexes for mariners from the result, and then developed the supporting information diagram from the value of the extracted key indexes in altering maneuver.

Keyword : Marine traffic engineering, Altering maneuver, Supporting information, Wind effect, Simulation

キーワード : 海上交通工学、変針操船、操船支援情報、風圧影響、シミュレーション

1. はじめに

近年、国内を寄港する船舶は大型化の傾向にある。例えば、LNG 船は現在国内に入港する船舶の最大船型 145,000m³ から将来大型化される計画があり、コンテナ船では、平成 18 年に最大積載量にして 11,000TEU、全長 397m、幅 56m、17 万総トンの世界最大級の船舶が国内のコンテナターミナルに入港している。

一方、港湾施設、特に水域施設は、拡大するのに時間と費用がかかり、船型の大型化には必ずしも対応できていないのが実情である。地方の港湾では、既存施設のまま、より大型の旅客船や自動車専用船を受け入れたいという要請も多い。このため、船型大型化に伴って操船水域が相対的に狭くなり、また、船型大型化によって受風面積が増し、操船時の風圧影響が拡大することから、操船者にとって操船環境

* 正会員 株式会社日本海洋科学 (〒212-0013 川崎市幸区堀川町 580 番地) hara@yms.co.jp
 ** 正会員 神戸大学大学院海事科学研究科 (〒658-0022 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

はより一層厳しくなっている。

このような船型大型化については、港内操船の安全性確保のための対応策が、関係者によってそれぞれの港や海域毎に検討されているが⁽¹⁾⁽²⁾、タグボートの配備隻数や入出港中止基準等、限界条件を設定するに留まり、基本的にどのような操船を実施するかは操船者に委ねられている。

また、平成19年4月からは、改正水先法により、水先人の養成制度が開始された。これにより、外航船長としての実歴を有しない水先人候補者に対し、操船シミュレータを活用した操船技術教育が行われることとなった。将来的には、これまでのように船員としての実務経験豊富な水先人候補者の確保が難しくなっているという側面もあり、その意味で、操船時の判断基準を個々の操船者の経験と勘に頼るだけでなく、本論で提案するような“操船支援情報”を構築し、操船者に対して操船時の参考として提供する意義及び必要性は高いといえる。特に港内操船は低速航行のため外力影響を受けやすく、また、制約された水域であることから、風圧影響の予測が不適切であった場合、岸壁衝突や浅瀬乗揚等の事故を招くおそれがある。

著者らは、これまでに、港内操船のうち、特に風の影響を受けやすいバースアプローチ時を対象に、操船に及ぼす風圧影響をダイアグラム化し、操船者に支援情報として提供する手法を開発した⁽³⁾⁽⁴⁾。しかし、港内操船のあらゆる局面に対応した操船支援情報を提供するには、舵を使用しての変針操船支援情報も欠かすことのできない支援項目である。

そこで、本報において、舵を使用して目標針路に設定する変針操船局面を対象に、特に風圧影響が大きい自動車専用船をモデルとし、アプローチ操船で開発した操船支援情報の構築手順に則って、風圧影響を予測・分析し、風圧影響を把握するための変針操船支援情報ダイアグラムを構築した。

本研究は、Fig.1 に示す手順により検討を進めた。まず、風圧影響を予測するためのモデル船の操縦モデルを作成し、風向、風速、水深、初期前進速力、舵角及び変針角等のパラメータを設定した。そして、種々の条件のもと操船シミュレーションを実施することにより、風の影響を受けたときの船体運動を予測し、その結果から変針操船にとって重要なインデックスを抽出して操船支援情報ダイアグラムを作成した。

Fig.1 Flow Chart

2.変針操船時の重要なインデックス

Fig.2 は、変針時の旋回の様子を模式的に示した図である。風の影響がないときは破線で示した航跡を描き、風の影響を受けながら変針するときは実線の航跡を描くとする。

ある舵角 (Rudder angle: δ [deg]) である目標針路 (Altering course: ϕ [deg]) に変針しようとするとき、操船者が把握すべき情報としては、変針開始地点を基準としたとき的前方進出距離 (Advance: dy [m]) と横移動距離 (Transfer: dx [m]) がまず重要なインデックスとして挙げられる。また、操舵に伴って前進速力 (Headway speed: U [knots]) と横移動速度 (Lateral speed: V [m/s]) がどれ程変化したか、変針によって回頭角速度 (Rate of turn: R [deg/min]) と漂流角 (Drift angle: β [deg]) がどれ程変化したかも重要なインデックスである。加えて、無風時のときの変針後位置を基準に、風の影響を受けたときの変針後位置がどの方向にどの程度偏位したかを方位 (Da [m]) と距離 (Dd [m]) で示すことにより、変針操船における風圧影響を量的に把握することができる。

δ : Rudder angle[deg]
 Φ : Direction from initial pos[deg]
 ψ : Altering course[deg]
 R : Rate of turn[deg/min]
 β : Drift angle[deg]
 dx : Transfer[m]
 dy : Advance[m]
 U : Headway speed[knots]
 U_i : Initial Headway speed

V : Lateral speed[m/s]
 Da, d : Deviation[deg, m]
 W_v : Wind speed[m/s]
 W_θ : Wind direction[deg]

Fig.2 Key Indexes at Altering Course

Table 1 Principal particulars of Model Ship

Type of Ship	4,500Units PCC
Lateral Projection Area : A_w [m ²]	4,355
Length between perpendicular : L [m]	170
Breadth: B [m]	32.2
L/B	5.28
Draft : d [m]	8.8
Depth of water : H [m]	16
H/d	1.818
$A_w/L \cdot d$	2.911

風圧影響を受けながら変針するときの船体運動は、いわゆる MMG モデルと呼ばれる操縦モデル⁽⁵⁾⁽⁶⁾を使用してシミュレーションした。この操縦モデルは、アプローチ操船支援情報⁽⁴⁾を開発する際に使用したのと同じモデルである。

船体に作用する風圧力は以下の算出式で求められるが、風圧力の計算に必要な風圧力係数 (C_{XW} , C_{YW} 及び C_{XYM}) は、山野らの式⁽⁷⁾で Fig.3 のとおり推定した。

$$\begin{aligned}
 F_X &= \frac{1}{2} \times C_{XW} \times \rho_w \times V_w^2 \times B_w \\
 F_{Yf} &= \frac{1}{2} \times C_{Ywf} \times \rho_w \times V_w^2 \times A_w \\
 F_{Ya} &= \frac{1}{2} \times C_{Ywa} \times \rho_w \times V_w^2 \times A_w \\
 C_{Ywf} &= \frac{1}{2} C_{YW} + C_{XYM} \\
 C_{Ywa} &= \frac{1}{2} C_{YW} - C_{XYM}
 \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、

F_X : 船首尾方向に作用する風圧力[kg-f]

F_{Yf} : 船体前部に作用する横風圧力[kg-f]

F_{Ya} : 船体後部に作用する横風圧力[kg-f]

ρ_w : 空気密度 (0.125 [kg · sec²/m⁴])

C_{XW} : 船首尾風圧力係数

C_{Ywf} : 横風圧力係数

(添え字 f は船体前部、添え字 a は船体後部)

C_{XYM} : 風圧モーメント係数

A_w : 水面上の側面積[m²]

B_w : 水面上の正面積[m²]

V_w : 風速[m/s]

W_θ : 風向角[deg]

(船首方位を 0° とし、時計回りを正)

3. 変針時の風圧影響予測

3.1 モデル船の諸元とシミュレーション条件

モデル船は Table 1 に示すとおり、風の影響を受けやすい 4,500 台積自動車専用船とした。ここで、 A_w は水面上の側面投影面積[m²]、 L は垂線間長[m]、 B は船幅[m]、 d は喫水[m]、 H は水深[m]を示している。水深は変化がなく一定とし、特定港における標準的な航路水深 16m を設定した。

Fig.3 Wind force/moment coefficient of 4,500Units PCC

Table 2 はシミュレーション計算条件を示している。前進初期速力は、モデル船の Dead Slow Ahead 設定速力である 5 ノットとし、舵中央、機関を Dead Slow Ahead で開始し、横方向速度と回頭角速度は初期状態ではいずれもゼロとした。

風向角は 30 度刻みで設定し、風速と初期前進速力の比（以下「風速船速比」）は 1、2、3、4、5 及び 6 となる風速を設定した。つまり、それぞれ 5、10、15、20、25 及び 30 ノットとした。なお、風は絶対風向・風速で設定し、風速は変動風で、ここでのいう風速は平均値である。

Table 2 Simulation Condition

Engine	Dead Slow Ahead
Initial Headway Speed	5 knots
Rudder Angle	Starb'd 15, 25, 35
Course Alteration	015, 030, 045
Wind Direction	000,030,060,090,120,150 180,210,240,270,300,330
Vw/Ui	1, 2, 3, 4, 5, 6

3.2 変針操船時の風圧影響予測

Fig.4 及び Fig.5 は、右舵 35° で変針したときの航跡図であり、Fig.4 は風向角 90°、Fig.5 は風向角 270° の航跡図である。これらは、風速船速比 1~4 のときの船体運動を示している。

変針時においては、変針しようとする側から風が吹く場合、いわゆる風上への船首切り上がり現象により風の吹く方向へ回頭力が作用するため、いずれの風速も回頭可能であるが、変針しようとする反対側から風が吹くと回頭力が変針方向と逆方向に働くため変針しにくくなり、270° の風向角では、風速船速比 4 以上で舵効が得られず制御不能となっている。

Fig.4 Tracks at altering(Wind direction:090)

Fig.5 Tracks at altering(Wind direction:270)

Fig6~11 は、舵角 35° で変針を開始し、変針角が 30° となった時点における各インデックスの値を、横軸に風向角、縦軸に風速船速比で示した図である。これらの図を用いることにより、どの風向からどれ程の風が吹けば、目標とした操船（この場合、舵角 35° で 30° 変針しようとする操船）が、どのような結果になるかを予測することができる。

風向角 210~330 の範囲では、風速によっては舵効が得られずに制御不能 (Uncontrollable) となった。これは、所定の舵角 35° をとつても目標針路 30° まで到達させることができなかった風向・風速領域である。

Fig.6 Counter Line Chart of Advance
(Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

Fig.7 Counter Line Chart of "Transfer"
(Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

Fig.8 Counter Line Chart of "Rate of Turn"
(Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

Fig.9 Counter Line Chart of "Drift Angle"
(Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

Fig.10 Counter Line Chart of "Headway speed"
(Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

Fig.11 Counter Line Chart of "Lateral speed"
(Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

4. 変針操船支援情報の構築

4.1 関連するインデックス同士の合成図

Fig.12~14 は、それぞれ前方進出距離 (Advance) と横移動距離 (Transfer)、前進速力 (Headway speed) と横移動速度 (Lateral speed) 及び回頭角速度 (Rate of turn) と漂流角 (Drift angle) の各インデックスを縦軸と横軸に示した図であり、操船支援情報ダイアグラムの基本となる図である。

これらのグラフはいずれも蜘蛛の巣のような形状をしており、この蜘蛛の巣の中心から放射状に延びる実線は風向角を、同心円状に描かれる破線は風向船速比を示す。これらの図を使用することにより、操船者は与えられた風向・風速条件下で変針操船を行おうとするとき、各々のグラフの縦軸と横軸の値を読み取ることで、目標針路に至ったときの前方進出距離 (Advance) などの各インデックスを変針開始位置からの値として知ることができる。

また、この蜘蛛の巣の中心となる値は、無風で変針したときの船体運動を表していることから、グラフの原点を、この蜘蛛の巣の中心にシフトしたダイアグラムを作成すると、無風時を基準とし、風によって船体運動にどのような影響を受けるかについて、量的に示すことも可能である。

Fig.12 Diagram of Advance and Transfer
(Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

Fig.13 Diagram of Headway speed and Lateral speed
(Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

Fig.14 Diagram of Rate of turn and Drift angle
(Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

4.2 変針操船支援情報ダイアグラム

変針操船においては、操船者が与えられた水路内において、目標の操船を安全に遂行できるかどうかことが重要であることから、変針を開始してから目標針路に到達するまでの前方進出距離 (Advance) と横移動距離 (Transfer) が、特に重要なインデックスであると考えられる。

Fig.12~14 をみると、変針操船では、変針しようとする側から風が吹く場合と、変針しようとする反対側から風が吹く場合のそれぞれで船体運動が大きく異なることがわかる。

Fig.15~17 は、変針しようとする側から吹く風と変針しようとする反対側から吹く風のそれぞれに分けて、縦軸に Advance、横軸に Transfer を示した図である。

この内、Fig.15 は、Advance - Transfer の図に前後速力 (Headway speed : U) と横方向速力 (Lateral speed : V) のスケールを重ねた図であり、Fig.16 は、Advance - Transfer の図に回頭角速度 (Rate of turn : R) と漂流角 (Drift angle : β) のスケールを重ねた図である。また、Fig.17 は、ある風向・風速の風が吹いたとき、変針操船に及ぼす風の影響を無風時のときの船体運動を基準とし、どの方向にどれ程偏位するかを示すスケールを重ねた図である。この図を使用

することにより、操船者は変針操船時に船体に作用する風の影響の程度を、無風時を基準として偏位する方向と距離で把握することができる。

このように、縦軸に Advance、横軸に Transfer を示した図を基準に、他のインデックスを示すスケールを重ねることにより、3つの基本図を一つにまと

めることが可能となる。

これらの図が、操船者が変針操船時において、自身がこれから行おうとする操船行動が、どの程度の風圧影響を受けるかを事前知るための“変針操船支援情報ダイアグラム”である。

Fig.15 Diagram of Advance and Transfer (Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

※[d/m]=[deg/min]

Fig.16 Diagram of Rate of turn and Drift angle (Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

Fig.17 Diagram of Deviation (Rudder angle=35[deg], Altering course=30[deg])

4.3 風速が変針舵角と変針角に及ぼす影響

変針操船に及ぼす影響の大きい風向は、変針しようとする反対側から吹く風であり、Fig.15~17からもわかるとおり、特に風向角 270° の風は、無風時からの偏位量 (D_a [deg], D_d [m]) が最も大きくなる。

Fig.18~20 は、風向角 270° について、舵角を 15°、25° 及び 35°、変針角を 15°、30° 及び 45° とし、風速船速度比 (V_w/U_i) を 1 から 3 へと徐々に強めたときの偏位距離 (D_d [m]) を示したものである。

変針操船は、舵角と変針角がパラメータとなるため、各々の風向について、Fig.18~20 のような舵角、変針角と偏位の関係を示す図を作成しておくことにより、与えられた水路環境において、どの程度の舵を使用すればよいかの目安を得ることができる。

Fig.18 Relation between rudder angle and deviation (Wind direction=270[deg], $V_w/U_i=1$) Fig.19 Relation between rudder angle and deviation (Wind direction=270[deg], $V_w/U_i=2$) Fig.20 Relation between rudder angle and deviation (Wind direction=270[deg], $V_w/U_i=3$)

5. アプローチ操船と変針操船の比較

Table 3 は、風圧影響を把握するための支援情報について、過去に検討したアプローチ操船と今回検討した変針操船の相違点を整理したものである。

バースアプローチ操船局面は、着岸に備えて徐々に減速することから、機関は舵効の維持できる最少速力 (Dead slow ahead) から機関停止 (Stop engine) の範囲が対象となる。舵効が期待できる速力域ではコースを維持しようと舵を適宜使用し、舵効が期待できない速力域では舵は中央となる。一方、変針操船局面においては、舵角は通常、変針に使用する最少舵角 5° から最大の 35° まだが対象となり、機関は港内操船であることから、Dead slow ahead ~ S/B Full ahead の速力域が対象となる。

いずれの操船局面についても、風向・風速をパラメータとしてダイアグラムを作成する。アプローチ操船時は、風の影響が左右対称に現われるため、風向角は右舷側もしくは左舷側のいずれかを対象とすればよいが、変針操船局面では、変針しようとする側から吹く風と変針しようとする反対側から吹く風で風圧影響が異なるため、両側から吹く風を対象とする必要がある。また、変針操船局面においては、舵角 (Rudder angle) と目標変針角 (Altering course) がさらにパラメータとして加わる。

操船支援情報ダイアグラムを作成する基準時間は、アプローチ操船局面においては、船体が 1Loa (Loa は全長) 進むまでを基準とし、変針操船局面においては、任意の変針角となる時点を基準としてダイアグラムを作成する。

また、アプローチ操船局面では、風の影響を受け始める地点からみて、1Loa 進む間に船位がどの方向に偏位するか (Course deviation)、及び船首方位角が原針路に対してどの程度偏位するか (Heading deviation) が最も重要なインデックスとなる。一方、変針操船局面においては、変針開始地点から、船首方位が目標の変針角となるまでの前方進出距離 (Advance) と横移動距離 (Transfer) が重要なインデックスとなる。また、無風時の変針後位置からみて、風の影響でどの方向にどれほど偏位したかを方位 (Da) と距離 (Dd) で表すことにより、変針時における風圧影響を量的に把握できるようにしておくことも重要である。

Table 3 Distinction between Approaching and Altering

	Approaching	Altering
Rudder	Midships, Course keeping	S5~35, P5~35
Engine (Speed)	Stop engine~ Dead slow ahead (Reduce, Fixed)	Dead slow ahead ~ S/B Full ahead (Fixed)
Parameter	Wind direction, Wind speed, Ship speed	Wind direction, Wind speed, Ship speed, Rudder angle, Altering course
Base Period	Advance = 1/4Loa ~ Loa	Altering course = 0 ~ 180
Key Indexes	Course deviation, Heading deviation (Headway speed, Lateral speed, Advance, Transfer)	Advance, Transfer Dd, Da (Headway speed, Lateral speed Rate of turn, Drift angle)

6. まとめ

ここで提示した、風圧影響下における変針操船支援情報ダイアグラムを活用することにより、操船者は自身がこれから取ろうとする変針操船行動が、風の影響によってどのような影響を受けるかを瞬時かつ容易に把握することが可能となる。また、与えられた水路条件、風向・風速条件下において変針操船を行おうとするとき、どの時期にどれほどの舵を使用するのが適切であるかの判断も行える。

さらに、無風時の変針後地点を基準としたダイアグラムを使用することにより、風によってどれ程偏位するかを、無風時の変針後地点からの偏位量と偏位角で把握でき、あらゆる風向、風速について、変針時における船体運動への風の影響を量的に示すことが可能となる。

過去に検討されたアプローチ操船局面における操船支援情報ダイアグラムと、本論において提示した変針操船局面での操船支援情報ダイアグラムを併せることにより、港内操船のほぼ全操船局面に対応した支援情報を操船者に提供することが可能となる。

代表的な船種・船型については、予め様々な船体コンディションでの風圧影響による船体運動をシミュレーションで予測しておき、その予測結果から重要なインデックスを抽出して、アプローチ操船及び変針操船局面のそれぞれで操船支援情報ダイアグラムを作成し、船種・船型毎に小冊子に整理して操船者に提示する方法が有効であろう。

参考文献

- (1) 社団法人神戸海難防止研究会：コンテナ船「マースク PS」神戸港入港航行安全対策調査報告書、平成 18 年 11 月
- (2) 社団法人伊勢湾海難防止協会：平成 18 年度名古屋港 93・94 号岸壁に着離岸する大型コンテナ船（全長 398m）の航行安全に関する調査研究（その後）報告書、平成 18 年 9 月
- (3) 原 大地・井上 欣三・朴 榮守・櫻井 美那子：「風圧影響下におけるアプローチ操船支援情報に関する研究」、日本航海学会論文集第 115 号、平成 18 年 9 月
- (4) 原 大地・井上 欣三：「風圧影響下におけるアプローチ操船支援情報に関する研究-II」、日本航海学会論文集第 116 号、平成 19 年 3 月
- (5) 日本造船学会：第 3 回操縦性シンポジウム、昭和 56 年 12 月
- (6) 日本造船学会：操縦性研究の設計への応用—運動性能研究委員会 第 12 回シンポジウム—、平成 7 年 12 月
- (7) 山野 惟夫・斎藤 泰夫：「船体に働く風圧力の一推定法」、関西造船協会誌第 228 号、平成 9 年 9 月

質疑応答

山田 多津人（海上保安大学校）：

操船支援情報をどのような形で操船者に提供するのか、何か知見（予定）等があれば教示下さい。

原 大地：

操船者に操船支援情報を提供する方法として、代表的な船種・船型別に小冊子にまとめて提供する方法が現実的であろうと考えます。また、種々の条件下で風圧影響による船体運動を予測した結果をデータベース化し、携帯可能な小型 PC 上に、条件を入力するとそれに合致するダイアグラムが瞬時に表示されるシステムを開発することも考えられます。

川島 裕：

実験に用いたモデルシップのドラフト、トリムの相違によって風圧影響は大きく異なると思われるが、その点について説明してください。

原 大地：

ご指摘のとおり、同一の船舶であっても喫水、トリム、水深等のコンディションによって支援情報ダイアグラムは異なります。本論で示したダイアグラムは、ある喫水、ある水深条件のものです。したがって、様々な喫水、トリム、水深条件で船体運動を予測し、支援情報ダイアグラムを作成しておく必要があります。