操船中における転心の位置推定とその特性分析に関する研究

井上 欣三*・江 鈞懋**・石畑 崔郎***

Estimating the Position of the Pivot Point in Ship Handling and Analysing its Characteristics

Kinzo INOUE, Jun Mao JIANG
and Sairo ISHIHATA

Abstract

When a ship is turning, the rotational motion is about a vertical axis. The position of this axis is influenced by the ship's shape, the ship's motion and the point of impact of various forces acting on the ship. The axis moves about with a change in the lateral and rotational motion of the ship, we call the position of this axis a pivot point.

In the present paper, how the pivot point wanders about with a change in the forces that affect the ship is discussed taking into account the rudder effect, the propeller effect, the wind effect and the effect of tug assistance. The numerical examinations were carried out using a computer analysing system which can generate ship's motion under the mathematical simulation model and show simultaneously the estimated position of the pivot point on a graphic display.

1. はじめに

船体を舵、タグ、スラスター等の力によって回頭させたり、風などの外力が船体に作用して船首が回頭するとき、船体上のどこか一点に運動変化が生じない点が存在する。船体はこの点を中心に回転するが、この点は船体に働く外力の作用位置の変動に応じて移動する。このような点を転心と呼ぶ。

転心の位置については、従来から停止中や定常旋回中についてはそれぞれの目安が与えられているが、港内操船のように停止から低速移動に移る過渡的運動状態における転心の位置については、転心位置の移動の実情も含めて明らかになっていない。

そこで、本研究では、船体運動を数学モデルのもとで再現する操船シミュレーションによれば船体が過渡的な運動状態にあるときでもその時々刻々の外力の作用位置の変動の様子やその結果として生じる運動要素の変化を推定することが可能となることに着目し、パーソナルコンピュータを使用した操船シミュレータを中心とする解析システムを構成して、これを用いて風等の外力を受けながら舵、主機、タグ等を使用する種々の操船状態について転心の位置とその移動の様子を系統的に整理し、分析を行った。

2. 転心の力学的解析とその定義

2.1 船体静止時の転心位置

船体重心を原点とする直交座標系を図 1 のように設定する。ただし、矢印の向きを正とする。いま、水上に浮かび静止している船体に瞬間的な力が作用する場合を考える。ただし、ここでは簡略化のために付

* 正会員 神戸商船大学 (〒658 神戸市東灘区深江南町 5-1-1)

** 正会員 日本船主責任相互保険組合 (〒103 東京都中央区日本橋 2-1-10)

*** 正会員 内海水先人会 (〒650 神戸市中央区波止場町 5-4)

加質量や水圧抵抗は考えない。

重心 G からある距離はなれた点 C に船体正横方向に力積 S の瞬間力 F を作用させるとき、

$$S = \int_{t_1}^{t_2} F \cdot dt \quad (1)$$

これにより船体運動に生じる変化は、重心の速度変化については瞬間力の作用した方向と同じ向きに Δv 、回頭角速度の変化については瞬間力によるモーメントの方向と同じ向きに Δr である。

また、その他の船体各部の点についてもそれぞれこの Δv と Δr の大きさに応じて突然の運動変化を生じる。しかし、船体上のどこか一点にこの突然の運動変化が生じない点がある。このような点を P とすると、この点に関する運動条件は、

$$\Delta v - GP \cdot \Delta r = 0 \quad (2)$$

と表せる。ただし、

$$\Delta v = S/M \quad (3)$$

$$\Delta r = (S \cdot GC)/I \quad (4)$$

なお、

$$I = M \cdot k^2 \quad (5)$$

ここに、 I : yawing に関する回転慣性モーメント、 M : 船の質量、 k : yawing に関する回転半径である。そして、これらの関係を(2)式に代入すると、

$$S/M - GP \cdot (S \cdot GC)/I = 0 \quad (6)$$

$$GP \cdot GC = I/M \quad (7)$$

$$\therefore GP = \frac{k^2}{GC} \quad (8)$$

このように、船体のどこかに瞬間的な力が作用しても運動変化を生じない点、つまり、船体に瞬間力が作用したときの瞬間回転軸の位置が船体静止時の船の転心である。したがって、船体静止時における瞬間力の作用位置が知れば、その船のそのときの転心位置は(8)式により容易に推定できる。

2.2 船体運動中の転心位置

静止している船体の一点 C に正横方向に外力が作用しつづけると、船体の重心は速度 v (作用力の方向と同じ向き) で横滑りを始め、同時に重心回りに角速度 r (作用力によるモーメントの方向と同じ向き) で回頭しはじめる。このとき、横滑り速度 v は船首尾線上の各点において異なり、その大きさは転心からの距離に比例する。そして、横滑り速度 v の符号は転心を境に変わり、その方向は転心より船尾側では旋回の外向き、船首側の各点では内向きとなる。なお、この特徴はドリフトアングルについても同様である。したがって、旋回運動中の船体の転心の位置は、横滑り速度およびドリフトアングルがちょうどゼロとなるような船首尾線上の一点として特定することができる。

以上のことを考慮するとき、運動中の船の転心の位置を点 P とすると、この点における運動の条件は、

$$v - GP \cdot r = 0 \quad (9)$$

$$\therefore GP = \frac{v}{r} \quad (10)$$

すなわち、静止から運動に移る過程で時々刻々の船体の横流れ速度 v の値と回頭角速度 r の値を知ることができれば、(10)式の関係を基に任意の船体運動の状態において転心位置を推定することが可能となる。

なお、(10)式は、船の重心の速度ベクトルを U とすると、 $v = U \cdot \sin \beta$ (β : 重心におけるドリフトアングル) の関係があるので、

$$GP = \frac{v}{r} = \frac{U \cdot \sin \beta}{r} \quad (11)$$

と書き換えることができる。一方、運動中の船体の転心位置は、図2に示すように幾何学的には旋回圏の中心から船首尾線に降ろした垂線の足として説明することができる。ここに、転心の位置を旋回半径 R

図1 座標系

を用いて表現すると、 $R=U/r$ の関係があるので、

$$GP = \frac{v}{r} = \frac{U \cdot \sin \beta}{r} = R \cdot \sin \beta \quad (12)$$

とも書ける。したがって、旋回圏の半径 R を基に運動中の船の転心位置を求めることも可能である。

2.3 運動の過渡状態における転心の位置変化の力学的意味

(8) 式や (11) 式の構成を見てわかるように、船体が静止状態のときは船体に外力が働かない限り転心は存在しない。つまり、転心は船体に外力が加わった瞬間に突如船首尾線上のどこか一点に出現し、その後、 v 、 r の発達状態に応じて移動していくものである。

この過渡状態では、船体に作用する力は一点に作用する外力だけでなく、船体の運動に応じて水圧抵抗や遠心力などの他の力も作用し始める。いま、船体静止の状態 ($t=t_1$) からある時間経過後 ($t=t_2$) におけるこれらの各作用力の力積と力積のモーメントを求めると、

$$\text{力積} = \sum_i \int_{t_1}^{t_2} F_i \cdot dt \quad (13)$$

$$\text{力積のモーメント} = \sum_i GC_i \int_{t_1}^{t_2} F_i \cdot dt \quad (14)$$

力積のモーメントと力積の比をとって得られる値は、船体に働く複数の作用力を総合した合力の作用点を意味し、それを重心からの距離で表して GC' とすると、

$$GC' = \frac{\sum_i GC_i \int_{t_1}^{t_2} F_i \cdot dt}{\sum_i \int_{t_1}^{t_2} F_i \cdot dt} \quad (15)$$

一方、“この間の運動量の変化はその間に作用した外力の力積の合計に等しい” から、

$$M \cdot v = \sum_i \int_{t_1}^{t_2} F_i \cdot dt \quad (16)$$

また、“角運動量の変化はその間に作用した力積のモーメントの合計に等しい” から、

$$I \cdot r = \sum_i GC_i \int_{t_1}^{t_2} F_i \cdot dt \quad (17)$$

(16) 式と (17) 式の比をとり、(15) 式の関係から次式が導かれる。

$$\frac{I \cdot r}{M \cdot v} = \frac{\sum_i GC_i \int_{t_1}^{t_2} F_i \cdot dt}{\sum_i \int_{t_1}^{t_2} F_i \cdot dt} (=GC') \quad (18)$$

また、 $I = M \cdot k^2$ の関係より、次式が導かれる。

$$\frac{k^2}{GC'} = \frac{v}{r} = GP \quad (19)$$

このように外力が作用しつづける船体に運動が生じた後の転心位置 GP は、合力の作用点の位置 GC' の変動に応じて変化することになるが、一方ではこの GC' の変動は結果として船体の横流れ速度 v や回頭角速度 r に変化を促すことになる。

したがって、運動の過渡状態では船体に作用する力の合力の作用点を推定するか、または、その結果として現れる船体運動要素の値の変化に着目すれば転心位置を求めることができる。

3. 転心位置の求め方

船体運動を数学モデルのもとで再現できる操船シミュレーションによれば、船体が過渡的な運動状態に

図2 船体運動中の転心位置

あるときでもその時々刻々の運動要素の変化を推定することができる。

そこで、本研究では、パーソナルコンピュータを使用した操船シミュレータを中心とする解析システムを構成し、これを用いて種々の操船状態における転心位置の分析を行った。このシステムは操船シミュレータと解析システムを一体化したもので、シミュレータ本体からは時々刻々の船体運動データが RS-232C 通信回路を通じて解析用コンピュータに転送される。解析用コンピュータではこのデータを計算処理し、(8)(11)式に基づいて時々刻々の転心位置やその他の加工情報を計算しながら結果をグラフィックス情報として解析用コンピュータの CRT 上に表示する。

ところで、(8)式は船体が静止しているときの計算式であり、(11)式は船体が運動状態にあるときの計算式であるが、船体の静止状態から運動状態への計算上のつながりはコンピュータアルゴリズムの上では次のように考えた。つまり、船が停止状態のとき、または、船が運動状態にあっても船首回頭がなく直進しているときは(8)式に拠り、船が運動状態にあり、なおかつ、船首が回頭しているときは(11)式に拠るものとした。

また、船のあらゆる運動状態において転心位置は+GPは重心より船首側、-GPは重心より船尾側と表現できるようにした。なお、外力の作用位置Cの符号については重心より船尾側に作用するときは+GC、重心より船首側に作用するときは-GCと定義して転心位置の符号の整合性を取った。

転心位置の推定計算に必要な船体運動データは、三井造船昭島研究所製の「ハーバースター」操船シミュレータから出力した。このシミュレータに用いられている数学モデルは実船実験と模型実験との比較検証⁽¹⁾⁽²⁾もなされており、あらゆる運動状態とは言えないまでも基本的な運動については十分な精度で妥当性を有していると考えてよい。

4. 種々の操船局面における転心位置の算定

4.1 供試船および計算条件の設定

転心位置の算定には2,800TEU型コンテナ船を使用した。この船の主要目を表1に示す。船体コンディションに関しては、満載状態とバラスト状態の2状態を設定してコンディションの違いによる転心位置の変化の相違を比較することにした。なお、このとき旋回に関する回転半径(k)の値は、満載、バラスト状態とも $\frac{1}{4}L$ (L は船長)とした。さらに、転心位置に対する浅水影響をみるため4種類の水深を設定した。ただし、deep waterの場合は水深喫水比(H/D)は ∞ になるように設定した。

4.2 操舵回頭時の転心位置

4.2.1 前進中に操舵回頭を行う時の転心位置

転心は、船体に外力が作用した瞬間に船首尾線上のどこか一点に現れ、その後、船体の運動変化に応じてその位置が移動する。つまり“転心は一定点に留まらずに動く”ものであるといわれている。しかしながら、運動の過渡状態において転心がどのように動くのかはこれまでのところ明らかにはなっていない。ここでは、一定速力で前進中に操舵によって船首が回頭をはじめた後の過渡状態から旋回が定常状態に移るまでを対象に、このとき転心がどのような経過をたどってどのように動くのかを算定した。

図3は、一定速力21.67ノットで直進中のコンテナ船の転舵後における転心位置の過渡的变化の

表1 コンテナ船主要目

船 種	2,800TEU型コンテナ船	
垂線間長	230.0m	
幅	32.2m	
	Full Load	Ballast
喫水	11.5m	6.34m
トリム	0	3.5m
重心位置	-5.55m	-11.9m
排水量	53,875ton	25,200ton
速 力	Nav. Full	21.67kts
	S/B Full	10.62kts
		11.74kts

図3 前進旋回中の転心の移動

様子を船首の回頭角度との関連で示している。この図にみられるように、転舵直後は転心は重心の前方 $0.13L$ (L は船長) 付近のところに現れ、その後、旋回の発達にしたがって徐々に船首方向に移動し、船首が 50 度ほど回頭し旋回が定常になるころには、転心位置はほとんど重心の前方 $0.3L$ 付近の位置に落ち着くことがわかる。そして、全体として転心位置は舵角が小さいときは大きいときと比べてやや船首側に寄る傾向がみられる。なお、図には示していないが速力を種々に変えて転心位置の変化を求めた結果によると、船首回頭角と転心位置の変化の様子は船速とはほとんど無関係であることがわかった。

4.2.2 後進中に操舵回頭を行う時の転心位置

久々宮⁽³⁾⁽⁴⁾は、実験を通じて「転心は後進旋回が十分発達した段階ではミッドシップの後方にある。」「静止状態から後進するときは転心はいったん船首側に出現してしだいに後方(船尾側)に移動するようである。」「といった知見を得ているが、測定値のばらつきが大きく明確な回答を与えるには至っていない。ここでは、コンテナ船を対象に一定速力で後進中に舵をとった場合の転心位置の変化の様子について分析を試みる。

図4は、一定速力 -3.5 ノットで後進中のコンテナ船の転舵後における船首回頭角と転心位置の変化の様子を示す。これによると、後進中転舵により回頭する時は転心は最初重心の前方 $0.13L$ 付近のところに現れ、その後旋回の発達に伴って後方に移動し、船首が 15 度ほど回頭するころには転心は重心付近まで後退し、旋回が定常になるとほぼ重心の後方 $0.1L$ 付近のところに落ち着くという結果を得た。これは、このモデルのもとで出力される横移動速度に着目すると、転舵直後は船体の横移動速度の方向が転舵側の向きであったものが旋回の発達に伴ってその向きが途中で逆向きに転じることに因るものと推定される。

転舵から定常に至るまでの旋回の過渡状態における転心位置は、舵角が小さいときは大きいときよりも船尾側に寄る傾向がみられる。これは、このモデルのもとで出力される運動要素に着目すると横移動速度の発達傾向は舵角の大きさに無関係にほぼ同じ値で推移するのに対し、回頭角速度については小舵角の時ほど小さな値となることに因るものと推定される。なお、この場合も図示はしていないが、速力を種々に変えて転心位置の変化を求めた結果によると、船首回頭角と転心位置の変化の様子は速力に無関係に一定となるようである。

4.2.3 船体コンディションと水深の影響

転舵後の転心位置の変化の様子は、満載、バラストといった載貨状態でどうか変わるか、また、水深によってどのような変化をきたすかといった点についてもこれまでのところ明らかにはなっていない。ここでは、コンテナ船を対象にこれらの点について分析を行う。

図5は、初期速力 10.62 ノットで deep water の水域を直進中に、舵角 35 度で旋回するときの船首回頭角と転心位置の変化の様子を示している。図5における満載とバラストの比較からみてとれるように、転心位置の過渡的变化傾向はバラスト状態の場合も満載状態の場合も大きな差はないが、全体として転心はバラスト状態の方が満載状態に比べてやや船首寄りに位置する。なお、転舵直後に最初に現れる転心的位置は満載の場合は重心の前方 $0.13L$ 付近、バラスト状態の場合は $0.14L$ 付近である。

図4 後進旋回中の転心の移動

図5 船体コンディションと転心の移動

図6は、初期速力10.62ノット満載状態で直進中、種々の水深条件のもとで舵角35度で旋回するときの船首回頭と転心位置の変化の様子を示している。喫水に比べて水深が浅い水域で操舵旋回するとき船体は大きな流体抵抗を受け、回頭角速度、横移動速度ともにその発達が妨げられる。このような浅水中では船体運動の変化の現れ具合に応じて転心位置の過渡的变化傾向にも特徴的な変化を生じる。

まず、水深の影響は転心の移動の素早さの面に現れる。すなわち、水深が深い場合は、転舵後転心は徐々に船首方向に移動し、船首回頭角が50度ほどになるころに転心は重心の前方0.3Lの位置に落ち着く。一方、水深が浅い場合は、船首が10度ほど回頭するころには既に転心はほとんど一定の位置に落ち着くようになる。水深喫水比が2.0を切るようになると転心が最終的に落ち着く位置は0.15L付近であり、水深が深い場合よりも重心に近い位置に止まるようである。そして、余裕水深が喫水の10%を切るような極めて水深が浅い場合には転心は操舵直後に最初に現れた位置よりも後退し、重心にかなり近いところに位置するようになる。

4.2.4 船型の影響

ここでは、高速船型のコンテナ船と全く違った船型として肥大船型のVLCCを選び、転心の位置変化と船型の関係について比較を試みる。船の主要目を表2に示す。なお、このときも旋回に関する回転半径(k)の値は $\frac{1}{4}L$ とした。

図7は、一定速力15.4ノット満載状態で直進中のVLCCが、異なる舵角で転舵した後の船首回頭角と転心位置の変化の様子を示している。図7をみてわかるように、転舵直後最初に転心が現れる位置は重心の前方0.12L付近でありコンテナ船の場合と大きな違いはなく、また、転舵から定常に至るまでの旋回の過渡状態における転心の移動の様子はコンテナ船の場合と傾向は類似している。しかし、コンテナ船の場合と異なる点は、転心が一定の位置に落ち着くようになるのは船首が約80度以上も回頭した時点であり、また、一定の位置に落ち着く時の転心位置は重心の前方0.4L付近とコンテナ船の場合より明らかに船首寄りの位置に存在することである。

4.3 タグの使用と転心位置

静止している船体の一点にタグ推力を作用させるとき、その作用位置によって最初の転心出現位置は異なり、また、その後の船首回頭や船体の横移動運動の発達消長の様子に応じて転心は移動していく。ここでは、タグ推力の作用位置を船首端から船尾端までパラメトリックに変化させたときの転心の位置変化の様子を調べてみた。

供試船はコンテナ船の満載状態とし、水深は $H/D=1.3$ のshallow water、タグ推力は一律22.5トン、タグ推力の作用方向は常に船首尾線に直角方向とした。

表2 VLCCの主要目

船 種	23万DWT級VLCC	
垂線間長	305.0m	
幅	58.9m	
	Full Load	Ballast
喫水	19.33m	8.17m
トリム	0.03m	5.38m
重心位置	+8.91m	+11.64m
排水量	269,799ton	104,255ton
速	Nav. Full	15.4kts
	S/B Full	12.1kts
		13.5kts

図6 水深と転心の移動

図7 前進旋回中の転心の移動

図8 タグ推力の作用位置と船体運動軌跡

図8は、船首から船尾まで代表的な作用位置6点にタグ推力を持続的に作用し続けたときの船体の運動軌跡を示し、図9は、その間の転心位置の移動の様子を船首回頭角と対応させて示したものである。

図9の縦軸上の値は、タグ推力が作用した瞬間に出現する転心位置である。これは船体に作用する外力の作用位置にのみ依存して現れるものであり、推力の大きさとは無関係である。船首尾端にタグ推力を作用させるときは瞬間転心は重心近傍に現れるが、船体中央寄りにタグ推力を作用させると瞬間転心は船首尾端の方に現れる。

瞬間的に現れたこの転心はその後の船体の動きによって移動を始める。船首尾端に推力を作用させる場合は、転心はいったん船首尾端の方へ大きく移動するが船首尾端から外にはみだすことはなく、60度ほども回頭するころには再度重心の近傍にまで戻るようである。しかし、推力の作用位置が重心に近い場合には、船首が15度から20度ほど回頭した時点で転心はすでに船首尾端から大きくはみだしたままとなり再度戻る様子はみられない。つまり、重心

図9 タグ推力の作用位置と転心の移動

に近い位置にタグ推力を作用させると船体は大きく横滑りしながらわずかに回頭を始めることになるので、転心は船首尾から遠く離れた位置に移動することになる。この結果をみてわかるように、転心は必ずしも船上にあるわけではなく、船体の運動状況によっては船首尾線上遠く離れた位置にも出現する。

4.4 港内における大角度変針と転心位置

4.4.1 タグ支援法と転心位置の関係

アプローチ水路から大角度の変針を行ってバースに着桟する操船方法は港内操船ではよく行われる。ここでは、コンテナ船がタグの支援を得て90度の大角度変針を行う操船をとりあげ、このときのタグ支援法と転心位置の関係に着目し、併せて、そのときの船尾の振り出しや回頭に要する水域面積等を比較することにより大角度変針における合理的なタグ支援方策について考察を加える。

大角度変針の操船方法として、まず、操舵のみによる自力回頭操船を基本として、このほかに操舵とタグ支援を併用した3種の操船方法を取りあげる。それぞれの操船パターンを図10にとりまとめた。Aは操舵のみによる操船、Bは2隻のタグで船首を押させるとともに舵効も併用して回頭する方法。Cは2隻のタグで船尾を押させながら舵効も併用して回頭する方法。Dは船首のタグを引かせ、船尾のタグを押させて舵効も併用して回頭する方法である。

具体的な計算にあたっては、コンテナ船は満載状態とし初速を4ノット、水深はdeep water、操舵舵角は35度、使用する各タグの推力は7.5トンと設定した。なお、タグ推力の作用位置は船首尾いずれの場合も船体中央より103メートル(0.45L)の点とし、

図11に、コンテナ船がA～Dのそれぞれの操船パターンで90度回頭する間の転心の移動の様子を示す。そして、これら4種類の操船方法の得失を比較するため、表3に90度回頭に要する時間、その間に使用する水域面積、船尾キック、回頭終了時の残存速力などを一覧表に整理した。ここに、水域使用面積については、90度回頭終了時点までの重心移動を原針路軸とその直交軸上で縦距離、横距離として求め、その積で表した。また、船尾キックの量は原針路軸からの船尾端の非回頭舷への最大はみ出し量として求めた。

これらの結果から、まず一般的な特徴として、舵力のみによって自力回頭するときに比べ、タグ支援を得ながら回頭するときは回頭時間が約70%、使用水域が約50～60%にまで小さくなることがわかる。しかし、回頭終了時の残存速力はタグ使用時はタグ推力による加速効果により自力回頭時に比べてやや大きくなる。

一方、3種類のタグ使用法はいずれの場合も重心周りに同等の回頭モーメントを作り出すので結果としてはほぼ同じ回頭角速度の発達を促すが、しかし、タグ推力の作用に伴う重心の横流れ効果はそれぞれのタグ使用法によって異なる。したがって、回頭中の転心位置についてはタグの使用法によってそれぞれ異なった特徴が見られる。

2隻のタグで船首を押すBの操船方法は転心が最も重心寄りに位置する特徴をもつ。最初、瞬間転心は重心の後方に現れ、その後、旋回の発達に伴って船首の方へ移動するが最終的には+0.16L付近に位

図10 タグ支援による大角度変針時のタグ配置

図11 タグ支援操船と転心の移動

表3 タグ支援操船の特質比較

船 種	2,800 TEU型コンテナ船			
初 速	+4 kts			
舵 角	+35°			
タグ支援有無	無し	タグ支援有り		
操船パターン	A	B	C	D
回頭所要時間[sec]	504	370	356	359
縦距離/Lpp	2.7	2.1	2.1	2.1
横距離/Lpp	1.5	1.2	1.0	1.1
面積/(Lpp×B)	2.8	1.9	1.5	1.6
船尾キック/Lpp	0.17	0.15	0.21	0.18
瞬間転心/Lpp	0.13	-0.13	0.15	0
最終転心/Lpp	+0.3	+0.16	+0.3	+0.23
残存速力[kts]	2.2	2.57	2.28	2.42

置ることになり、転心は概して重心近傍に位置する。これは操舵による重心の横流れ作用とタグの横押しによる重心の横流れ作用が互いに相殺して結果的に重心の横移動速度の発達が小さくなることに因るものである。そのため船尾キックは小さく抑えられるが、しかし、タグが船首を回頭舷側に押すことによる船体の加速効果によって横移動が大きくなり水域使用面積が大きくなる。したがって、この B の操船パターンのように転心を重心近傍に位置させるようなタグの使用法は、アプローチ水路からバースに着栈するとき変針後の前方水域に余裕がある場合に適すると考えたほうがよい。

次に、2 隻のタグで船尾を押す C の操船方法は 3 種類のタグ使用法の中では最も転心が船首寄りに位置する特徴をもつ。つまり、最初の瞬間転心は重心の前方に現れ、旋回の発達につれてさらに船首の方へ移動し最終的には $+0.3L$ 付近に落ち着く。これは操舵による重心の横流れ作用とタグの横押しによる重心の横流れ作用が互いに重畳して結果的に重心の横移動速度の発達が大きくなることに因るものである。そのため船尾キックは大きく現れるが、しかし、水から受ける抵抗が増して比較的早く減速するのでそのため回頭中の横進出距離が短くなって使用する水域面積が小さくてすむ。したがって、この C の操船パターンのように転心を船首寄りに位置させるようなタグの使用法は、非回頭舷に障害物がないことが条件になるが、アプローチ水路からすぐ至近のバースに着栈させるときなど回頭後の行脚を小さく抑えたい場合に適すると考えることができる。

ところで、図 11 にみられるように、船尾をタグで押す C の操船法とタグを使用せずに操舵のみによる自力回頭操船の場合とは転心位置の変化傾向に大きな差がみられない。これは、C の操船法における船尾の 2 隻のタグ推力は旋回の過程で重心の横移動速度と回頭角速度を共に大きく発達させるものの、それを比の値でみると操舵のみによる自力操船の場合と同程度の値となることに因るものである。

なお、船首と船尾に 1 隻ずつタグをとる操船方法 D はそれぞれのタグによる重心の横流れ効果は互いのタグ推力の間でキャンセルし合うので、転心位置やその他の要素は、結局、操船方法 B と C の中間的な特徴をもつことになる。

4.4.2 風外力下での大角度変針と転心位置

実際の操船においては、アプローチ水路からすぐ至近のバースに着栈させるとき、回頭終了直後にはほとんど行脚のない状態にしたいケースがある。このような場合にはタグを船首両舷に 1 隻ずつとり、このタグでブレーキをかけながら舵効のみを利用して回頭する操船方法が行われることがある。ところが、この操船法では減速が顕著に進む分だけ回頭に時間がかかる。このように行脚の小さい状態で長い時間をかけて回頭を行う操船においてはその間に受ける風などの外力影響が懸念される。

そこで、ここでは、コンテナ船が船首両舷にとったタグの推力を船首尾線に対し 15 度方向に作用させブレーキとして使用しながら舵効のみを利用して右に 90 度回頭する操船を行うとき、風外力を受けると転心の移動傾向がどのような特徴的な変化を示すかについて分析を行った。ただし、計算条件は前項と同様とし、回頭中は風の影響に対しそれを制御するような操船は行わないものとした。

図 12 は、原針路に対し主要 8 方位から風速 8m/sec の風外力を受けるとい条件のもとで右 90 度変針するときの転心位置の変化を回頭角との対応で示している。これによると回頭角が 60 度になるまでの期間は船体はまだ多少の前進行脚を残しながら回頭している状態であるが、このときの転心位置の変化傾向は大きく 2 つに分けることができる。

ひとつは回頭につれて転心が船首の方へ移動していくグループで、これは風を右正横または正横より後から受けるときに現れる。特に右正横および右斜め後ろから風を受けるときは転心はほとんど船首端にありそのため船尾を大きく振るような回頭となる。

図 12 風外力下での大角度変針と転心の移動

他のひとつは回頭につれて転心が船尾の方へ後退していくグループで、これは風を左正横または正横より前から受けるときに現れる。特に左正横および左斜め前から風を受けるときは転心は重心より後方にあるのでそのため船尾キックは小さくなり船首が落とされるような回頭となる。

なお、回頭角が60度を超えると行脚がほとんど無い状態となるので船の運動は風による圧流に左右され、その結果、転心位置は船首の回頭や船体の横移動の状態に応じて極めて特徴的な変化傾向を示すことになる。

5. むすび

近年船舶が大型化し、また、コンテナ船、自動車専用船、LNG船などのように風の影響を受けやすい船の出現により、操船者は種々の操船局面において転心の位置を把握しておくことは勿論、外力の変動に伴う転心位置の変化についても知識を備えておくことが要請される。特に狭い港内で回頭を伴う操船を行う場合、操船者はこの転心についての知識を基に、与えた操作に対して次の瞬間に船首または船尾がどのように振り出し、回頭に際しどれほどの水域面積を必要とするかを予測できることが安全操船につながり、併せて主機、舵、タグ等の合理的な使用につながる。

本論文では、船体運動を数学モデルのもとで再現する操船シミュレーションにより種々の操船状態について転心の位置と船体の過渡的運動状態における転心の移動について分析を行った。ここで得られた知見が実際の操船に役立てば幸いである。

参 考 文 献

- (1) 平野、高品、福島、森谷：船舶の操縦運動計算システムの開発、三井造船技報、第122号、昭和59年6月
- (2) M.Hirano, J.Takashina and S.Moriya : A Practical Prediction Method of Ship Manoeuvring Motion and its Application, International Conference on Ship Manoeuvrability, The Royal Institution of Naval Architects, 1987
- (3) 久々宮 他：後進旋回中の船の転心について一実船実験一、日本航海学会論文集、第52号、1974年12月
- (4) 久々宮 他：後進旋回中の船の転心について一模型実験一、日本航海学会論文集、第54号、1976年1月

質 疑 応 答

小川陽弘(船舶技術研究所)：1. 浅水時の転心の移動の図は実験値ですか。2. 一番浅いときに転心が負になる意味を説明してください。

井上欣三：1. 転心の移動の図はすべて数学モデルのもとでの数値実験の結果を示しています。2. 水深が最も浅い場合でも転心位置は負になるわけではなく、操舵直後に現れる瞬間転心の位置よりも後退し、重心に近い位置に移動することになります。何故そうなるかについては、付図に示すように旋回角速度と横移動速度の発達が発達が浅水影響による抵抗増加のために妨げられ、なかでも船体の横滑りが抑制される度合いが大きいため、結果として v/r の値が小さな値を取るようになるためと考えられます。

北沢昌永(東京湾水先人会)：実務上大変貴重なご研究であり有り難く感謝したい。1. 曳船による回頭中の転心の位置変化について、船首部を曳船で押させた場合と船尾部を押させた場合とでの相違はどうして生じるのか。2. 曳船は本船の回頭中常に直角に押し続けることは難しく、推力は必ずしも船首尾線に直角に作用しない。一般に船首曳船は後方への分力をもち船尾曳船は前方への分力をもつ。こうした実感が転心の位置変化の差に関係するのではないか。

井上欣三：船体静止の状態から押しはじめたときの瞬間転心の位置については(8)式に示すように曳船推力の作用位置にのみ依存して決まり、船体が曳船推力のもとで運動を始めた後は(11)式に示すように船体運動要素の発達消長に応じて決まりますが、1.の質問については、端的に言えば、船首を押した場合は船体後半部に水の抵抗が大きく作用するので重心より後方が回転軸になり、船尾を押した場合はその

逆となると考えればよいと思われます。また、2. の質問については、曳船の押し角度が変われば推力の船首尾方向成分と正横方向成分の配分が異なり、これに応じて v と r が異なった発達を示すと思いますので転心位置についても多少差が見られるものと考えます。