後進旋回中の船の転心について— I.

— 実 船 実 験 —

久々宮 久* 師岡 洋一**

塩田 重須** 中村 保博**

On the pivot Point when Ships run astern— I.

—Ship Experiment—

Hisashi KUGUMIYA, Yoichi MOROOKA,
Nobumochi SHIOTA and Yasuhiro NAKAMURA

Abstract

Suppose that a ship is advancing on a straight pass with a constant speed, when her rudder is deflected and held at a fixed angle. The pivot-point appears and moves generally as follows,

- (1) the pivot-point appears at the centre of percussion, which is the dynamical point when a blow is given to the position of rudder, and
- (2) with the growth of her turning, the point moves to forward, and
- (3) when her turning reaches to steady state, the point settles down at ca. $L_{pp}/3$ from midship.

There is no definite theory, however, on the location of the point when a ship goes astern.

Authors tried to find out the point by experiments using two ships, and concluded that the pivot-point exists afterpart of the ship at least when the astern turning reaches to steady state.

1. 序 論

斉一な流れに固定された座標系を $Y-X$ 系, 船体に固定された座標系を $y-x$ 系とかく。旋回している船体上の1点が有する, $Y-X$ 系に関する速度ベクトルを V とする。このとき転心は次の物理的性質をもつ。

- (1) V を $y-x$ 系に関して,

$$V = v + u$$

ただし, $v:V$ の y 成分, $u:V$ の x 成分 と表わしたとき, 転心においては, $v=0$ である。

- (2) 転心は, 船の旋回軌跡の瞬間曲率中心を $Y-X$ 系で表わして (Y^0, X^0) とするとき, (Y^0, X^0) を $y-x$ 系に座標変換したときの x 座標値である。

船体が定常前進中に転舵して旋回するときの転心は次のように出現する。

- (1) 転心は転舵と同時に, 舵位置に打撃を与えられたときの撃心位置に出現する。
これは [転舵所要時間]/[船体応答遅れ時間] $\ll 1$ としたときの力学的結論である。
- (2) 転心はその後, 旋回の発達とともに前方に移動し, 定常旋回となったときの転心位置は一般に $L_{pp}/3$ の前方 $L_{pp}/3$ 付近に在る。

以上は前進中の転心についてである。後進旋回中の転心位置については定説がない。

後進の場合, もし定常直後進状態が実現できて, その状態の下で転舵するならば, 転舵直後の転心は前進の場合と同様に撃心位置に出現する筈である。撃心と打撃の作用点とは見掛質量の中心を中にはさむから, 後進の場合も転心は船首側に出現することになる。

* 正会員, 東京商船大学 (東京都江東区越中島 2-1-6)

** 正会員, 航海訓練所 (東京都千代田区霞ヶ関 2-1-3)

その後、旋回の発達とともに転心がどのように移動し、どこに落ち着くかは明らかでない。著者等は定常直後進状態の現出が困難であることを予想して、後進定常旋回の場合と水に対して静止の状態から後進をさせた場合との2つの場合の転心位置を求めるための実船実験を行い、一応の結論を得た。

2. 実 験

2.1 供 試 船

供試船は、東京商船大学実験練習船汐路丸と、航海訓練所練習船大成丸である。両船の主要目、実験時のコンディション、実験海面などを表1に示す。

表 1

		汐 路 丸 (S)		大 成 丸 (T)	備 考
		S 1 ~ S12	S13 ~ S33		
L_{PP}		37.00m		89.80m	*1 基準ピッチ *2 仰角測定目標の x座標。+: 〇の 前方, -: 〇の後 方
B		8.00m		12.20m	
D		3.70m		6.42m	
d	d_f	2.16m	2.08m	3.61m	
	$d_{\text{〇}}$	2.71m	2.81m	4.03m	
	d_a	3.22m	3.54m	4.46m	
C_b		0.567	0.576	0.681	
Δ		441 t	472 t	3000 t	
$A_R/L \cdot d$		1/32.21	1/33.65	1/61.60	
推 進 器	D	1.630m		3.800m	
	P	0.500 *1		1.058	
	a_E	0.400		0.441	
	Z	3		4	
$\text{〇}O^{*2}$		-2.00m		+7.150	
実 験 海 域		館 山 湾 水深30m以上		渥美湾 水深 18m	

2.2 実験の方法

中・小型船の旋回試験では、一般に海上に浮べた旋回目標に対する船体の相対位置を求めるという方法がとられる。

著者等は旋回目標として、マストを立てたテンマ（汐路丸の場合）または life boat（大成丸の場合）を使用した。この旋回目標に sextant をもった計測員が乗って本船の無線方向探知儀用の loop antenna（汐路丸の場合）もしくは Radar scanner（大成丸の場合）の仰角を計測し、同時に旋回目標からの本船の仰角計測目標方位を計測して相対船位を計算した。

汐路丸においては後進旋回径も小さく、また針路安定性も非常に悪いことが予想されたので旋回目標は旋回軌跡の外側に占位させて実験した。大成丸の場合は、静止状態からの後進であり、後進旋回径も大きいことを予想し、また旋回目標が棧付救命艇であることなどの条件を総合して、旋回目標は旋回軌跡の内側に占位させた。

2.3 実験の種類と内容

実施した実験の種類, 整理番号, 実験内容などをまとめて表2に示す。

表2 実験の種類

整理番号	実験番号	実験条件			備考
		prop.r.p.m.	pitch 角	舵 角	
S 1 ^{*1}	P1-1-1	300 ^{*2}	-5° ^{*3}	0	^{*1} S: 汐路丸 ^{*2} 主機は 900 r.p.m. ^{*3} -は後進ピッチを表す。 ^{*4} +は右舵角を示す。 ^{*5} 強制的に右旋回角速度を与えて (初期条件として) 計測した。 ^{*6} H: 前進を示す
S 2	P1-1-2	//	//	+15° ^{*4}	
S 3	P1-1-3	//	//	+30°	
S 4	P1-1-4	//	//	-15°	
S 5	P1-1-5	//	//	-30°	
S 6	S1-1-3 ^{*5}	//	//	//	
S 7	S1-2-3 ^{*5}	//	-10°	//	
S 8	P1-2-1	//	//	0°	
S 9	P1-2-2	//	//	+15°	
S10	P1-2-3	//	//	+30°	
S11	P1-2-4	//	//	-15°	
S12	P1-2-5	//	//	-30°	
S13	6-0-1	//	-6°	0°	
S14	6-0-2	//	//	//	
S15	6-15-1	//	//	+15°	
S16	6-15-2	//	//	//	
S17	6-30-1	//	//	+30°	
S18	6-30-2	//	//	//	
S19	6-15'-1	//	//	-15°	
S20	6-15'-2	//	//	//	
S21	6-30'-1	//	//	-30°	
S22	12-0-1	//	-12°	0°	
S23	12-0-2	//	//	//	
S24	12-15-1	//	//	+15°	
S25	12-15-2	//	//	//	
S26	12-30-1	//	//	+30°	
S27	12-30-2	//	//	//	
S28	12-15'-1	//	//	-15°	
S29	12-15'-2	//	//	//	
S30	12-30'-1	//	//	-30°	
S31	12-30'-2	//	//	//	
S32	H6'-15-1 ^{*6}	//	+6°	+15°	
S33	H6'-15'-1	//	//	-15°	
T 1 ^{*7}	P35	-49 ^{*8}	(4.020m) ^{*9}	-35°	^{*7} T: 大成丸を示す。 ^{*8} Full astern 相当 ^{*9} 大成丸は固定ピッチである。
T 2	P20-1	//	//	-20°	
T 3	P20-2	//	//	//	
T 4	PS00	//	//	0°	
T 5	S35-1	//	//	+35°	
T 6	S35-2	//	//	//	

整理番号のSシリーズが後進定常旋回中の計測を目指した実験であり, Tシリーズが静止状態から後進した場合の実験である。

3. 解 析

3.1 記 号^{*}

O: 仰角計測目標

Y-X系: 斉一な流れに固定された座標系。第1回目の計測時のO位置を原点とし, そのときの船首方向をXの正の方向とする。

(Y_i, X_i): 第*i*番目のO位置。(Y_1, X_1)=(0, 0)である。

^{*} 本論の記号は, ほぼ参考文献(1)に準ずる。

$$\bar{Y}, \bar{X} : \bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i / n, \bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i / n$$

n : 計測点の数。

$$\theta_i : \theta_i = \tan^{-1} \left(\frac{X_i - \bar{X}}{Y_i - \bar{Y}} \right)$$

$$r_i : r_i^2 = (Y_i - \bar{Y})^2 + (X_i - \bar{X})^2$$

$y-x$ 系 : 船体に固定の座標系。慣用による。原点は O におく。

$\eta-\xi$ 系 : 旋回目標を原点とし、真北の方向を ξ の正の向き、真東の方向を η の正の向きとする座標系。

ϕ_i : 第 i 番目の観測時の船首方位。

$$\phi_i : \phi_i = \phi_i - \phi_1$$

$$d_i : d_i^2 = \eta_i^2 + \xi_i^2$$

$$\gamma_i : \gamma_i = \tan^{-1}(\xi_i / \eta_i)$$

t_i : 第 1 回目の計測時点から計測した第 i 番目計測迄の経過時間。 $t_1 = 0$

$$v_i : v_i = |r_i - r_{i-1}| / (t_i - t_{i-1}), \quad i = 2, 3, \dots, n$$

$\bar{v}$: 旋回中の平均スピード。

(Y_i^c, X_i^c) : 回帰曲線 $X = f(Y)$ 上の点 (Y_i, X_i) における曲率中心。

$p x_i$: 第 i 番目の計測時における転心位置。

3.2 転心位置の計算

実船実験から転心位置を求めるには幾つかの方法が考えられるが、著者等は、 n ヶの相対船位から回帰曲線を計算して、その回帰曲線の曲率中心を求めてこれを $y-x$ 系に座標変換するという方法によった。この計算方法は著者の 1 人が前進旋回に適用して検証が終っている⁽¹⁾。この手順を図 1 に示す。

汐路丸についての計測船位 (軌跡中の折線)、回帰曲線、計測された旋回角速度、転心位置の数例を図 2、図 3 に示す。これらの図の下半のグラフの横軸は旋回角度であって、計測開始からの船首方位変化を示す。しかし計測は定常旋回状態をねらって開始したからこれらの図の旋回角度は相対的な意味しか有しない。

図 1 転心計算方法の説明

計算によって得られた転心位置を無次元化し、まとめて図 4 に示す。明確な傾向がつかめないのので 3 例についてプロットを折線で結んだ。そして転心位置の平均値を図 4 の右端に示した。なおこの平均値には、変化の様子を示していない他の実験についても、混乱しない範囲でその平均値を示してある。

図 2 後進旋回軌跡、回帰曲線と転心位置の変化 (S10)

図3 後進旋回軌跡，回帰曲線と転心位置の変化 (S30)

図5 大成丸の旋回軌跡 (T1, T6)

図4 転心位置の変化 (汐路丸)

図6 旋回軌跡 (一部)，回帰曲線と転心位置の変化 (T1)

図5は大成丸の計測船位のプロットである。汐路丸の計測は卒業研究として行なわれたので計測者は sextant の扱いに不慣れた学部の学生であった。しかるに大成丸では航海士2名と、帆船による遠洋航海を終了している航海科実習生3名の計5名がそれぞれ sextant による仰角測定を担当した。図5はその正確さを示す一例である。大成丸の場合は計測船位に充分の信頼がおけるので、以後の解析は先任航海士の計測値を使用して行う。

図6，図7に計測船位，回帰曲線，計算された転心位置と速度の一例を示す。

図8は，大成丸についての計算された転心をまとめたもので，汐路丸の図4に対応する。

図2～図4の場合とは違って，図5～図8のφ軸は絶対的な意味を有する。

4. 考 察

4.1 汐路丸について

図2, 図3に例示した如く, 後進旋回中の転心は巨視的には定常旋回と見做せる場合にも定点ではなく, 相当大きい周期で移動するようである。回帰曲線の計算に使用した多項式に基因する制約があって, 転心移動の短周期の変化はむしろ平均化して滑らかにすべきものである。ここでは数式処理の必ずしも完全でないことを示す意味で敢てそのままにして示した。

これらの図には, rate gyro の出力を自記させて得た旋回角速度を併記した。必ずしも定常とはいえない記録が得られている。このことは転心位置に影響を与える筈である。図2, 図3で角加速度と転心位置とは相関があるらしいことが認められる。しかしながら, 前述の程度の基礎データから計算された転心位置でこの相関について迄検討するのは冒険であると思われる。

図2, 図3を一見して十分に発達した後進旋回においては, 汐路丸では, 転心は大体において midship よりも船尾側にあることが読み取れる。

計算された転心のうち12ケースをまとめてプロットしたものが図4である。転心位置の変化について一定の傾向は認められない。これは, 計測開始を後進旋回が十分に発達した時点からとしたために, 図4の ϕ 軸が相対的な意味しか持たないから当然である。しかし転心が midship よりも船尾側にあることは明らかである。図4右端に示した平均値もすべて上述の結論を裏づけている。

4.2 大成丸について

大成丸についての計算された転心位置の例示が図6, 図7である。これらをみると, 水に対して静止

の状態から後進させた場合転心は最初は船首側に出現して, その後, 旋回の発達とともに船尾側に移動するようである。この両図には, 回帰曲線に依って計算した後進速度を併記したが, ほぼ定常速度となった時点からは転心もほぼ定点に落ち着くものと思われる。それは大成丸の場合 midship の後方 $0.3 L_{pp}$ 付近である。

図8は大成丸についての転心をまとめたものであるが, 汐路丸の場合の図4に比較して計算された転心のばらつきは少ない。

更に図8には, T6について作図解析して求めた転心位置の変化を併置した。作図解析というのは, 計算された (X_i, Y_i) を縮率 1/1,000 の方眼紙上に置点し, 作図によって曲率中心を求めて, そこから船首尾線上に垂線をおろすという方法である。この方法では曲率中心の決定にやや不安があるがこれは止むを得ない。この制約にも拘らず, 計算によって求めた転心位置との比較から明らかなように, 両者はよく一致しているといえるであろう。この解析作業の例を写真1に示す。

4.3 後進時の舵効について

X_A , X_B , $Max. Y$ をそれぞれ図9に示すように定義する。図9は汐路丸が後進中の舵角と X_A , X_B , 並に

図7 後進旋回軌跡, 回帰曲線と転心位置の変化 (T4)

図8 転心位置の変化 (大成丸)

図9 後進旋回時の舵効（汐路丸）

写真1 作図による転心位置（T6）

図10 後進旋回時の舵効（大成丸）

$Max. Y$ の関係を示す。

$X_A - X_B$ は後進中の舵効を示すと見られる。汐路丸は右旋 c.p.p. 船で一般に後進のとき左転するから $+\delta$ は後進旋回を助長する向きに作用し、 $-\delta$ は減少する向きに作用する。それが図9に明らかに表わされている。同様の考察が $Max. Y$ についても妥当する。

図10は大成丸についての $\delta \sim X_A, X_B, Max. Y$ の関係を示す。大成丸は右旋単暗車船であって後進時には一般に右転する。したがって旋回方向と舵角との関係は汐路丸とは逆であるが、ここでも後進中の舵効は明らかに認められる。

また、図10から、 X_B/L_{pp} がほぼ2ていどであって、一定であることがわかる。後進であるから、head reach に対して back reach と仮称すれば、静止状態から後進旋回をするとき、back reach は舵角に無関係に一定であり、大成丸の場合はその値は略200m ていどである。

5. 結 論

後進旋回中の転心位置を確認するために、2隻の供試船による実船実験を行った。解析は、旋回目標方位と旋回目標からの本船の仰角値とを一次資料として転心位置を計算する迄をもっぱら数式計算に依るという方法を主とし、作図によって転心を求めるという方法を併用した。

転心は、後進旋回が十分発達した段階では艀の後方にある。そしてその位置は一定ではなくて可成りの幅で前後に移動する。

静止状態から後進するときは、転心は一たん船首側に出現して後、しだいに後方（船尾側）に移動するようである。

本報告で我々は実船実験の結果を報告した。今後模型実験と理論計算とを続けたいと考えている。

実船実験に際して、積極的に御協力を頂いた大成丸の船長、乗組員並に実習生各位、汐路丸の船長、乗組員各位に深謝する。

なお本実験の一部は文部省科学研究費の補助を得て行ったものである。

参 考 文 献

- (1) 久々宮 久：旋回軌跡の数式表現，日本航海学会論文集第50号，昭和48年12月
- (2) John P. Comstock(Editor), Principles of Naval Architecture, SNAME, 1967
- (3) W.E. デミング：推計学によるデータのまとめ方，岩波，1972. 7
- (4) 滝 保夫：確率統計現象Ⅱ，岩波，1968. 6.
- (5) 谷 初蔵：船の転心について，航海第22号，昭和40年9月
- (6) 赤崎 繁：船の旋回に関する実験的研究，造船協会報第61号，昭和42年12月
- (7) 相沢研治他：後進旋回時の転心位置について，東京商船大学第21回 卒業論文，昭和48年9月
- (8) 国見 洋他：船舶の後進性能に関する研究，東京商船大学第22回卒業論文，昭和49年9月

質 疑 応 答

大津皓平：後進中の転心は力学的には図9より前にあるという説とは逆に出ているようですが，力学的意味と幾何学的意味は異なるのですか。

久々宮 久：御討論を感謝します。転心に二様あるわけではありません。幾何学的に求められた転心は，その求める過程に問題がなければ，正に転心そのものです。力学的に解析することが我々の研究の今後の課題ですが，模型実験を併用して追求したいと考えています。

岩井 聡：貴重な研究成果の発表に感謝します。次の2点について伺います。

1. 舵効について，後進旋回が始まって後も持続しますか，その時舵を中央に戻すとどうなりますか。
2. 結論的に転心への撃心の考え方の適用について，後進時にはどのように考えられますか。

久々宮 久：御討論をいただき有難うございます。舵効について；図9，図10がそれぞれ，前者は後進定常旋回のもの，後者は非定常～定常の過渡状態を含むものです。この両図は，明らかに同質の舵効を示しています。したがって，お尋ねのような転舵をすれば，船体は $\delta = 0$ のときに示す応答を示すものと思われます。その場合 X_B は図10のようではなく，図9に類似の値になると考えます。

転心と撃心について；撃心の考えは，転舵直後について適用できるべきもので，その後旋回が発達しはじめて後の転心はすでに撃心とは何の関係もありません。これは前進旋回と全く同様であります。