旋回中の船の横傾斜について

稲葉 恭人*

On the Transverse Heeling of Ship while Turning

Y. Inaba

Abstract

The ship heels inwardly toward the center of a turning circle about her fore and aft longitudinal axis immediately after her rudder is put over, and then heels on the opposite side as shown in Figs. 4 and 7. This is due to the fact that the transverse changeable forces act at different vertical positions. The greatest angle of heel involves a significance for the safety of a ship. The author has developed some treatments on dynamical investigation by means of analog computer, and got calculations regarding the following subjects:

- (1) Variations of heeling angle in accordance with the change of metacentric height.
- (2) Variations of heeling angle in accordance with the resistance to rolling of a ship.
- (3) Variations of heeling angle in accordance with the acting of periodic force.
- (4) Variations of heeling angle effected by initial heeling when ship's rudder is put over.
- (5) Variations of heeling angle in accordance with ship's rudder was put back suddenly while turning.

The ratios of heeling angle to the static angle of heel to which the ship finally settles down are discussed.

1. ま え が き

荒天中の操船の問題として、大角度操舵による旋回は、その横傾斜が転覆事故につながるものとして注意されている。旋回中の横傾斜角については、従来より、旋回初期の復原モーメントと舵圧によるモーメントを等置して求めたもの、および定常旋回時における水面下側圧力と遠心力によるモーメントを前記モーメントに加えて考えたものが知られているが、最大の横傾斜は、これら両者の間の非定常状態時に現われるので、船の安全性を考える上からは、この非定常状態を動力学的に解明しなければならない。この問題について二、三の報告[1], [2], [3], [4]はされているが未だ充分なものとは言えない。著者は公試運転その他の資料の手許にある練習船おしよ丸をモデルとして選び、その旋回力試験結果より旋回角速度および船体重心速度を求め、これらに基づき一定の仮定のもとに遠心力、水面下側圧力、舵圧力の時間的变化を算出、前記の傾斜モーメントを決定した。この公式運転時を船の基準状態として、横傾斜角に関する運動方程式を導き、それを analog computer によりシミュレートして、下記各項について計算した。横傾斜角の時間的变化は、傾斜モーメントによる強制傾斜に、誘起された抵抗横揺れを重ねたような形

* 北海道大学水産学部 (函館市港町 3-1-1)

で複雑であるが、一応の結果が得られたので報告する。

- (1) 重量物の上下移動等による GM 変化に対する横傾斜角の変化
- (2) 船体の横揺れ抵抗値による変化
- (3) 変針等に基因する周期的外力が作用する場合の変化
- (4) 転舵発動時にすでに横傾斜角がある場合の変化
- (5) 旋回中急に舵を戻した場合の変化

2. 横傾斜に関する運動方程式

2.1 基準状態時の運動方程式

本報告において基準状態としたおしよ丸の試運転時の要目および状態を Table に示す。

Table 基準状態時のおしよ丸の要目および状態

Lpp	60.5m	Disp	1,114.86ton
B	11.0m	C_b	0.540
D	5.4m	GM	0.800m
f. d.	1.79m	T	10.53sec
a. d.	4.22m	A_R	6.00m ²
m. d.	3.01m		

船体重心 G に原点をとり、慣性主軸方向に船体運動座標系 $G-xyz$ をとると、空間に固定した座標系に対する横傾斜角 θ に関する運動方程式は次式となる[5]。

$$(I_x + J_x)\ddot{\theta} + f_1(\dot{\theta}) + f_2(\theta) + f_3(\dot{y}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{z}) = \sum M \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに $\sum M$: 傾斜モーメント

見掛けの慣性モーメント J_x を含む $(I_x + J_x)$ の量は Table の Disp., GM , 動揺周期 T より計算, $f_1(\dot{\theta})$ については, 舵角 35° での旋回時の実測 Froude No. が 0.311 より始まり定常になつて 0.169 となることから, 非線型項は消え[6], 無次元減衰抵抗値 $2\kappa=0.2$ として計算, $f_2(\theta)$ については, analog computer の演算要素数の制限より線型表示として計算, 共に kg-m-sec の重力単位とし, $f_3(\dot{y}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{z})$ の影響は無いものとする, 次式が得られる。

$$2505313.392\ddot{\theta} + 298132.294\dot{\theta} + 891888\theta = \sum M \quad \dots\dots\dots(2)$$

2.2 旋回時の傾斜モーメント $\sum M$ について

旋回中の船の正横方向に加わる力としては[5], 舵のほぼ中心に舵圧力 $F_R \cos \delta$, 重心 G に慣性力 $m\dot{v}$ および遠心力 $m \frac{V^2}{R} \cos \beta$, 見掛け質量中心 G' に慣性力 $m_y \dot{v}$ および遠心力 $m_x \frac{V^2}{R} \cos \beta$, 吃水の約半分のところ[1], [7], [13]に水面下側圧力 Y が働く。それぞれの力の横方向の釣り合いを考えると次式が得られる。

$$(m + m_y)\dot{v} + Y = (m + m_x) \frac{V^2}{R} \cos \beta + F_R \cos \delta \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに m : 船の質量

m_x : x 方向の見掛け質量

m_y : y 方向の見掛け質量

$\dot{v}$: 横方向加速度

V : 重心速度

R : 旋回の曲率半径

δ : 舵角

β : 横流れ角

F_R : 舵の垂直力

舵圧力中心および見掛け質量中心 G' が Y の作用点に一致すると仮定すると, 傾斜モーメント $\sum M$ は次式となる。

$$\Sigma M = GG'(m_y \dot{\psi} + Y - F_R \cos \delta - m_x \frac{V^2}{R} \cos \beta) \dots\dots\dots (4)$$

$m \doteq m_y$ として(3), (4)式より $\dot{\psi}$ を消去すれば,

$$\Sigma M = \frac{GG'}{2} \{Y + (m - m_x) \frac{V^2}{R} \cos \beta - F_R \cos \delta\} \dots\dots\dots (5)$$

Fig. 1 おしよ丸の旋回力試験結果

おしよ丸の旋回力試験の結果より読み取った旋回角 ψ° , 旋回角速度 $\psi \text{ rad/sec}$ および $V \text{ m/sec}$ の左右旋回の平均と転舵発動時よりの経過時間 $t \text{ sec}$ との関係を Fig. 1 に示す。 $\psi = 270^\circ$ 頃より定常状態とみることが出来, 右方点線でつないだのがその値である。これらの ψ および V の実測値, 重心軌跡の R^m , 無次元旋回角速度 γ' よおよび Cole の関係式[8] より横流れ角 $\beta \text{ rad}$ が同図に示すような結果として得られる。

これらを用いて(5)式の各項を計算する。 Y については次式[9], [10], [11]を用いる。

$$Y = \frac{1}{2} \rho L d V^2 (\kappa_1 \pi \lambda_1 \beta + 0.4 \kappa_1 \pi \lambda_1 \gamma' + 0.8 \kappa_2 \beta^2 + 0.4 \kappa_2 \beta \gamma') \dots\dots\dots (6)$$

ここに $\lambda_1 = 2d/L$

L : 船長 $\doteq L_{pp}$

ρ : 海水密度

d : 吃水 $\doteq m.d.$

$\kappa_1 = 0.8$ とし $C_b = 0.54$ より $\kappa_2 = 0.3$ として計算した結果をモーメントにして Fig. 2 に示す。

Fig. 2 旋回中の横傾針モーメント

$(m-m_x)\frac{V^2}{R}\cos\beta$ については $m_x \doteq 0.1m$ として計算, $F_R\cos\delta$ については次式 [9], [11] を用いる。

$$F_R\cos\delta = \frac{1}{2}\rho V^2 A_R (1-\omega)^2 (1+3.6s^{1.5}) \frac{6.1\lambda_2}{\lambda_2+2.2} \sin\delta\cos\delta \quad \dots\dots\dots(7)$$

ここに $s=1-(1-\omega)V/n\phi$

λ_2 : 舵の aspect ratio=1.5

ω : 伴流係数

ϕ : ピッチ

n : 推進器毎秒回転数

C_δ の値より $\omega=0.25$ とし, 追従装置の働きおよび転舵所要時間 13.5sec を考慮し, 整流効果係数[12] を 0.3 として求めた結果を同図に示す。

GG' はこの状態でほぼ 3.1m となる。これら 3 個のモーメントを(5)式に代入して ΣM が求まる。

各モーメントが時間と共に減少するのは, 主として V の低下によるものである。以後の計算においては, 傾斜による Y , $F_R\cos\delta$, GG' 等の変化は無視している。

Fig. 3 運動方程式の block diagram

Fig. 4 GM を変えた場合の記録例

3. analog computer による simulation

(2)式の block diagram を Fig. 3 に示す。点線で囲んだ部分で Fig. 2 に示された ΣM を発生する。

time scale factor は実時間即ち 1 と固定し, scale factor は必要に応じて 25.05~100.213 と変えたが, これは同図中 potentiometer P_M の調節で, ΣM の係数を変えることにより達成出来る。computer は日立 WAC 3030-21 であり, Function Generator は NF low frequency model FG-102 C を使用した。

4. 計算およびその結果

4.1 GM を変化した場合の横傾斜の変化

GM の大きさは Fig. 3 の P_1 を変えることにより任意にとることが出来る。船体の横傾斜は Fig. 4 の 3 個の記録例に示されるように, GM が大, 即ち抵抗横揺れの周期 T が小さくなるにつれて, 非定常外傾部に動揺の波が

Fig. 5 GM を変えた場合の傾斜角の変化 Fig. 6 GM を変えた場合の経過時間の変化

Fig. 7 横揺れ抵抗値を変えた場合の傾斜角の記録例

現われる。同図Aは抵抗横揺れの減衰曲線を示し、Bはその各々に対応する傾斜角 θ の変化の記録であるが、scale factor も変えているので量的な比較ではない。外傾斜波形の山の傾斜角 θ の値を、経過時間と共に $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ とし、内傾斜の傾斜角を θ_x として、定常旋回時の傾斜角 θ_0 との比をとると、Fig. 5 に示すような結果となる。 $GM = 0.8m$ の点線の位置が基準状態で、Fig. 4 の $P_1=0.36$ にあたり、山は2個で θ_3 は現われていない。復原性モーメントが増加するにつれて動揺が加わり、山の数が増すが θ の変化を考慮すれば、最大の傾斜角は減少する。内傾斜角 θ_x も同様に減少する。転舵開始時より $\theta_x, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ の傾斜角までの経過時間 t_x, t_1, t_2, t_3 と周期 T との比はFig. 6 に示すようになる。 GM が増加するにつれて、抵抗横揺れのみが残って平行となり、 $(t_3/T - t_2/T), (t_2/T - t_1/T)$ は周期 T に漸近する。 $(t_1/T - t_x/T)$ は揺れとすれば半周期にあたるが、 $\frac{1}{2} \cdot T$ とはならず、 $0.58T$ 位で強制モーメントの影響を受けている。 t_x の実時間は7sec ~ 6sec で差は少なく、従って t_x/T の傾きは主として T により決まる。

4.2 船体の横揺れ抵抗値を変えた場合の変化

Froude No. が小さくなると、無次元減衰抵抗値も変るが、非線型項の影響も無視出来なくなる[6]。このような横揺れ抵抗値 $f_1(\theta)$ の変化はFig. 3 の P_2 の調節により任意に得られる。基準状態 $P_2=0.12$ を中にして、抵抗値に比例する P_2 の係数値を0.05から1.00まで順次変えると、Fig. 7 に示すような記録が得られる。同図には傾斜モーメント ΣM の曲線の記録も示す。 P_2 の値と傾斜角および経過

Fig. 8 横揺れ抵抗値を変えた場合の傾斜角および経過時間

時間の関係としては Fig. 8 が得られる。これら両図より抵抗値の増加は抵抗横揺れおよび傾斜角を抑制するが、その現われる経過時間は増加することが判る。

4.3 周期的外力が作用する場合の変化

追風追波のときの転舵が危険である等[5]言われているが、船体に作用する風浪等の外力は、船首尾線に対する迎角の周期函数として考えると 360° で1回転する。基準状態における、外力の方向を一定とした場合その $1/4$ 周期にあたる、 90° 旋回の所要時間が 39sec であるので、 $39 \times 4 = 156$ sec を周期とする正弦波形で外力を近似し、これを入力として F.G. から傾斜モーメントに加え、その位相を順次変えて計算を試みた。振幅は最大傾斜モーメントの $1/6.5$ の 4.47volt とした。又実際には外力が作用すれば、転舵発動時にすでに横傾斜角の存在する場合が多いが、これは次項に譲り無視した。正弦波形が負より正に変る時刻から転舵発動時までの経過時間 t_d をパラメーターとして計算結果を図示すれば Fig. 9 が得られる。経過時間 t/T の変化は殆んどないが、傾斜角 θ/θ は点線で示す外力なしの基準状態を中心にし、外力に比例して規則的に増減する。 θ_k , θ_1 , θ_2 の最大値の位置は、それぞれの基準状態の $t_k = 6.33$ sec, $t_1 = 12.4$ sec, $t_2 = 23.5$ sec を $1/4$

Fig. 9 周期的外力が作用する場合の傾斜角および経過時間

周期 39sec から差引いた t_d の値と一致する。即ち基準状態の山の位置に外力の最大値が重なった場合にその傾斜角は最大となる。ここでは変針による外力の変化として考えているが、風の息等による外力の周期的変化に対しても同様となる。内傾すべき θ_k が一部外傾側にあるのは、初

Fig. 10 転舵発動時に横傾斜角のある場合の傾斜角および経過時間

の一部は外傾側に移る。又復原モーメントのため、内傾斜より時間的に早く、外傾斜の山 θ_M , t_M が現われるのが特色である。経過時間は一般的にみて、両モーメントの和又は差としてあらわれるその方向および量によつて、 θ_{1c} の正側から負側に向け漸増するが、内傾以後の $(t_1/T - t_x/T)$, $(t_2/T - t_1/T)$ はほぼ一定となり、4.1 項の場合と同じく $0.58T$, T 位の値となる。

4.5 旋回中急に舵を戻した場合の変化

(5)式および Fig. 2 で示す通り、舵による傾斜モーメントは、その他のモーメントとは方向が反対で内傾斜の向きに働く。従つて旋回初期の内傾斜の場合を除き旋回中急に舵を戻すとそれだけ外傾斜が増加することになる。この問題のシミュレーションの方法としては4.3項と同じ

Fig. 11 旋回中急に舵を戻した場合の傾斜角の増加

期の内傾モーメントが外力のモーメントにより打消された結果である。90° 旋回時の傾斜角 θ_{90} は、予想通り $t_d=0$ で最大値をとるが、時間的には収束に向かう非定常状態の終りであり、傾斜角の絶対値は小さい。

4.4 転舵発動時に任意の横傾斜角のある場合の変化

転舵発動時に $\theta=0$ でなく、すでに初期値 θ_{1c} がある場合 (ただし $\dot{\theta}=0$) については、Fig. 3 において、 P_3 により初期値を任意にとることによりシミュレートすることが出来る。その結果を Fig. 10 に示す。 θ_{1c} の正負は外傾斜、内傾斜の方向である。 $\theta_{1c}=0$ の線が基準状態であり、転舵発動時に時間的に近い θ_x , θ_1 , θ_2 の順で影響を受けている。 θ_1/θ , θ_2/θ は共に正負非対象ではあるが、 $|\theta_{1c}|$ の増加につれて、発動時の復原項の作用により抵抗横揺れ振幅が増加して大きくなる。 θ_{1c} が正の場合は、復原モーメントと初期の内傾モーメントは同方向となり、内傾斜角も急激に増大し大角度の横揺れとなるので注意を要する。 θ_{1c} が負の場合は内傾モーメントと θ_{1c} による復原モーメントは方向が反対となり、 θ_{1c} の小さい部分では、 θ_x は小さく θ_1 , θ_2 も変化しないが、復原モーメントの増加につれて、内傾モーメントに優越して働き、 θ_x/θ

シミュレーションの方法としては4.3項と同じ F.G. を使用し、長周期の square 波を発生、振幅は任意の時間の舵圧力によるモーメントと等しくして ΣM に加えた。即ち舵角は任意の時間に瞬間的に0に戻ることとなり、実際とは若干異なる。舵角 35° の転舵完了所要時間は 13.5sec であるが、転舵開始後舵戻しまでの時

間 t_R を 10sec より 42.5sec まで順次変えて計算した。

基準状態で t_k , t_l はほぼ 6.33sec, 12.4sec であり, t_R を 10sec から始めたので, θ_k , θ_l は殆んど影響なく, $t_2=23.5\text{sec}$ の傾斜角 θ_2 のみが増加した。その結果を基準状態よりの θ_2/θ の増加分 $\Delta\theta_2/\theta$ として Fig. 11 に示す。 t_R が約 18sec で $\Delta\theta_2$ は最大となり, θ_2/θ にして 0.85, 度数にして約 3° 傾斜角が増す。 θ_2 も t_R が 23.5° 以上になれば影響は無くなり, 収束する傾斜角の波形が若干乱れる程度となる。

5. あとがき

以上船舶の旋回時の横傾斜に関し, 具体的な五つの状態について考察した。実際に海上においては, これらは種々の組合せとして現われるものと考えられる。比較的小型船の転覆事故は後を絶たない。著者の知る漁船では通常航海速力における最大舵角を 25° に抑えて傾斜を防いでいた。復原力不足が原因と考えられる海難においても, その直接のきつかけは, 積荷の移動を含む大角度転舵であるものが相当数あるものと思われる。本報告が海難防止上多少なりとも参考になれば幸甚である。

参考文献

- [1] 渡辺恵弘：転舵時及類似の場合に於ける船の横傾斜に就いて, 造船協会々報, 第58号, (1936)
- [2] 赤崎 繁：船の旋回中の横傾斜に就て, 造船協会々報, 第69号, (1941)
- [3] W. P. A. VAN LAMMEREN, L. TROOST, J. G. KONING : Ships and Marine Engines, vol. II, (1948)
- [4] 神中竜雄他：高速船型の旋回に関する二・三の問題, 造船協会論文集, 第111号, (1962)
- [5] 元良誠三：船体運動力学, (1957)
- [6] 山内保文：船の波浪中動揺応答の解析法について (その1), 造船協会論文集, 第109号, (1961)
- [7] 造船協会：船舶工学便覧, 第1分冊, (1960)
- [8] COLE A. P. : Destroyer Turning Circle, TINA, vol. 80, (1938)
- [9] 野本謙作：操縦性の研究の現状と問題点, 造船協会誌, 第451号, (1967)
- [10] 井上正祐：旋回中船体に働く力の非線型項について, 西部造船会々報, 第32号, (1966)
- [11] 井上正祐他：平水中の船の旋回軌跡について, 西部造船会々報, 第37号, (1969)
- [12] 岡田正次郎：舵の性能およびその設計について, 造船協会誌, 第424号, (1964)
- [13] 加藤 弘：小型航洋船の復原性に就て, 造船協会々報, 第83号, (1951)

〔質問〕

- ① 定常旋回の3～4倍の原因は？
- ② 横揺れ周期を変えたとき, 見掛けの慣性モーメントはどう変えたか？
- ③ 最大横傾の起こる付近の山の変化(数)は GM とどう対応するか？ (岩井 聡)

〔解答〕

- ① 傾斜モーメントのピーク時と定常状態時の V^2/R の比の値が, 一般の平均が 1.55[13] であるのに対し, 本報告の場合は 2.62 (Fig. 2 参照) になっていることに最大原因があると思います。
- ② 本報告では変えておりません。 $(I_x + J_x)$ は修正を要し, 特に T の変化の大きい (GM の小さい) 部分では変えるべきであつたと思います。
- ③ GM が 22cm までは1ヶ, それ以上が2ヶとなり 100cm 以上が3ヶ, 最大の 222cm で4ヶ目が現われます。(Fig. 4, Fig. 5 参照) 大きさは後方のもの程 (ピークに近い程) 大きい

が一般的です。

〔質問〕

同船最悪状態（航行可能な範囲）における旋回中の横最大傾斜はどの程度になるか。また、急に反対かじを取ったときの影響如何。（田中岩吉）

〔解答〕

- ① 基準として試運転時の状態($GM=80\text{cm}$, $\text{range } 90^\circ$ $\theta_{\text{max}} 11.8^\circ$)をとっていてそれ自体問題があります。最悪状態を決めるのは困難ですが一応 $GM=40\text{cm}$, $\text{range } 75^\circ$, $T=15\text{sec}$, $\theta_{\text{max}} 23^\circ$ あたりが限界かと思います。計算は $\theta_{\text{max}} 81^\circ$ までやってみました。航行可能な状態とは言えず、運動方程式そのものも仮定がくずれ意味を失ってしまいます。
- ② 瞬間的に反対舵となれば 4・4 の (一) θ_{L} がある場合がそつくり再現しますが、実際の場合は転舵の角速度と船の減衰能力の関係で種々の組合せが出来、舵角 0 の時点で残っていた横揺れが、本報告の横傾斜に重なった形で現われるものと思われます。

〔質問〕

非定常状態の傾斜角が定常旋回状態の 3～4 倍に達するという結果はまったく新しい事からで興味深く拝聴しました。 GM の影響ばかりでなく船速や舵角を変えたときの影響についてもご検討なさるようお願いします。（野原威男）

〔解答〕

そのような方向で今後努力致したいと思います。御指導をお願い申し上げます。