規則波中で横揺れしている同型2船間の の相対横揺れについて

矢野 健 爾*

On the Relative Rolling Angle between the Two
Ships of the Same Type in Regular Waves

K. Yano

Abstract

When the two ships of the same type are rolling in regular waves with the phase difference of ε , the amplitude of $|\Delta\theta|$ of the relative rolling angle between both ships is expressed by $\left|\frac{\Delta\theta}{\theta}\right| = 2 |\sin \varepsilon/2|$ derived from the equation of rolling.

In this case, $|\theta|$ represents the amplitude of rolling angle of the ship in regular waves.

Utilizing the above equation, the present writer discusses in this paper the phase difference on the optimum distance between both ships in rescue operation.

1. 緒 言

巡視船の業務には、波浪中で横揺れしている遭難船に対し、或る距離を保ちながら平行に占位し、救助作業を行なう例が屢々起こっている。

例えば

- イ) 救命艇、ゴムボート等による人命救助作業
- ロ) ブリーチエス・ブイの利用による人員の移乗
- ハ) 曳索の搬送

等々。

かかる場合、これら諸作業を安全且つ迅速に行なうためには、両船間の相対横揺れ角を最小にするよう、波に対する位相を選ぶことが重要な要素であつて、遠洋における漁船相互間の救助作業、自衛艦の high line による洋上給油作業等においても、考慮すべきことであろう。

そこで、本稿は規則波中の横揺れの運動方程式を用いて、理論的扱いの最も簡単な同型2隻の船を遭難船及び救助船に仮定し、相対横揺れ角の大小を考察した。

これによると、相対横揺れ角 $\Delta\theta$ は位相差 ε が $2n\pi$ の時0になるが、現場の状況によつてはこの最適条件を満足する相対位置に占位出来ない場合も起り得る。かかる場合の位相差 ε の推定についても、一つの基準を示した。

本稿で得られた結果は、従来経験的に言われていた事実にも合致するものである。

* 海上保安大学校（呉市若葉町）

2. 運動方程式とその解

第1図

規則波中で抵抗横揺れしている船の運動方程式は

$$(I_x + I_x')\ddot{\theta} + N\{\dot{\theta}\} + K\{\theta\} = M$$

で表わされる。

ここで

$$I_x + I_x' = I = W/g \cdot \kappa^2$$

$$N\{\dot{\theta}\} \doteq I \cdot 2\alpha \cdot \dot{\theta}$$

$$K\{\theta\} \doteq W \cdot GM \cdot \theta$$

$$M \doteq W \cdot GM \cdot \gamma \theta_w$$

ただし γ ; 有効波傾斜係数

と仮定すると、上式は

$$\ddot{\theta} + 2\alpha \cdot \dot{\theta} + \omega_0^2 \cdot \theta = \omega_0^2 \cdot \gamma \Theta_w \sin \omega t \dots \dots \dots (1)$$

$$\text{ただし } \omega_0^2 = W \cdot GM / I, \quad \theta_w = \Theta_w \sin \omega t, \quad \Theta_w = \pi H_w / L_w$$

となる。

従つて救助船及び遭難船の運動方程式は、両船間の位相差を ε とすると(1)より

$$\ddot{\theta}_1 + 2\alpha_1 \cdot \dot{\theta}_1 + \omega_{10}^2 \cdot \theta_1 = \omega_{10}^2 \cdot \gamma_1 \Theta_w \sin \omega t \dots \dots \dots (2)$$

$$\ddot{\theta}_2 + 2\alpha_2 \cdot \dot{\theta}_2 + \omega_{20}^2 \cdot \theta_2 = \omega_{20}^2 \cdot \gamma_2 \Theta_w \sin (\omega t - \varepsilon) \dots \dots \dots (3)$$

となる。

ここで、上記2船はほぼ同一の大きさ、同一の船型を有するものと仮定すると

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &\doteq \alpha_2 \equiv \alpha \\ \omega_{10} &\doteq \omega_{20} \equiv \omega_0 \\ \gamma_1 &\doteq \gamma_2 \equiv \gamma \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

また、両船間の相対横揺れ角を

$$\Delta\theta = \theta_1 - \theta_2 \dots\dots\dots (5)$$

と定義すると

$$\left. \begin{array}{l} \Delta\dot{\theta} = \dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2 \\ \Delta\ddot{\theta} = \ddot{\theta}_1 - \ddot{\theta}_2 \end{array} \right\} \dots\dots\dots (6)$$

を得る。

(2～6) 式より、両船間の相対横揺れの運動方程式を求めると

$$\Delta\ddot{\theta} + 2\alpha \cdot \Delta\dot{\theta} + \omega_0^2 \cdot \Delta\theta = 2\omega_0^2 \gamma \Theta_w \sin \varepsilon/2 \cos (\omega t - \varepsilon/2) \quad (7)$$

の関係が成立する。

初期条件を $\Delta\theta = \Delta\theta_0$, $\Delta\dot{\theta} = \Delta\dot{\theta}_0$ として(7)式のLaplace変換を求めると

$$\begin{aligned} L\{\Delta\ddot{\theta}\} + 2\alpha \cdot L\{\Delta\dot{\theta}\} + \omega_0^2 \cdot L\{\Delta\theta\} &= 2\omega_0^2 \gamma \Theta_w \sin \varepsilon/2 \cdot L\{\cos(\omega t - \varepsilon/2)\} \\ \therefore L\{\Delta\theta\} &= \frac{(s+\alpha) \cdot \Delta\theta_0}{(s+\alpha)^2 + (\omega_0^2 - \alpha^2)} + \frac{\alpha \cdot \Delta\theta_0 + \Delta\dot{\theta}_0}{(s+\alpha)^2 + (\omega_0^2 - \alpha^2)} \\ &\quad + \frac{A \cos \varepsilon/2 \cdot s}{(s^2 + \omega^2) \{(s+\alpha)^2 + (\omega_0^2 - \alpha^2)\}} + \frac{A \sin \varepsilon/2 \cdot \omega}{(s^2 + \omega^2) \{(s+\alpha)^2 + (\omega_0^2 - \alpha^2)\}} \quad (8) \\ &\quad \text{ただし } A = 2\omega_0^2 \gamma \Theta_w \sin \varepsilon/2 \end{aligned}$$

ここで $\omega_0 > \alpha > 0^*$ であるから

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= L^{-1}[L\{\Delta\theta\}] \\ &= e^{-\alpha t} [\Delta\theta_0 \cdot \cos \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \cdot t + \frac{\alpha \cdot \Delta\theta_0 + \Delta\dot{\theta}_0}{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} \cdot \sin \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \cdot t \\ &\quad + \frac{A}{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}} \{ \omega \sin \varepsilon/2 \cdot \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \cdot t + \phi_2) + \omega_0 \cos \varepsilon/2 \cdot \\ &\quad \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \cdot t + \phi_3) \}] \\ &\quad + \frac{A}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}} [\cos \varepsilon/2 \cdot \sin(\omega t + \phi_4) - \sin \varepsilon/2 \cdot \sin(\omega t + \phi_5)] \\ &\quad \text{ただし } \phi_2 = \tan^{-1} \frac{2\alpha \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}}{\omega^2 - \omega_0^2 + 2\alpha^2} \\ &\quad \phi_3 = \tan^{-1} \frac{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}}{-\alpha} - \tan^{-1} \frac{2\alpha \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}}{\omega^2 - \omega_0^2 + 2\alpha^2} \\ &\quad \phi_4 = \pi/2 - \tan^{-1} \frac{2\alpha \omega}{\omega_0^2 - \omega^2} \\ &\quad \phi_5 = \tan^{-1} \frac{2\alpha \omega}{\omega^2 - \omega_0^2} \end{aligned}$$

更に変形して

$$\begin{aligned} \Delta\theta &= \frac{e^{-\alpha t}}{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}} [\omega_0 \cdot \Delta\theta_0 \cdot \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \cdot t + \phi_1) + \Delta\dot{\theta}_0 \sin \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \cdot t \\ &\quad + \frac{A}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}} \{ \omega \sin \varepsilon/2 \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \cdot t + \phi_2) + \omega_0 \cos \varepsilon/2 \\ &\quad \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2} \cdot t + \phi_3) \}] \end{aligned}$$

* 例えば文献【2】 P103 $\frac{2\alpha}{\omega_0}$ は小角度では0.15～0.2位から大角度では0.6位の範囲

$$+\left[\frac{A}{\sqrt{(\omega_0^2-\omega^2)^2+4\alpha^2\omega^2}}\cos(\omega t-\sigma')\right]\dots\dots\dots(9)$$

ただし

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}}{\alpha}$$

$$\sigma' = \phi_6 + \varepsilon/2$$

$$\phi_6 = \tan^{-1} \frac{2\alpha\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$$

3. 解 の 吟 味

相対横揺れ角 $\Delta\theta$ は(9)式右辺に示されたように2項からなり、第1項は $e^{-\alpha t}$ がかかっているの
で、初期条件の如何に関せず、時間とともに減衰してなくなってしまう。

このため相対横揺れ角は第2項の強制項のみで決定される。したがって定常状態では(9)式は

$$\Delta\theta = \frac{\omega_0^2 \gamma \Theta_w 2\sin \varepsilon/2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}} \cos(\omega t - \sigma') \dots\dots\dots(10)$$

で表わすことが出来る。

救助作業を安全且つ容易に行なうためには

イ) $\Delta\theta$ を出来るだけ小さくする。

ロ) $\Delta\theta$ の周期的変動を少なくする。

の2要素を満足するよう占位することが必要であるが、ロ)は両船が機関を使用して波の遭遇周期を変更することであり、斜め波中の横揺れを意味するので今回は考えない。従つてイ)について考えることにする。

$$\text{今} \quad |\Delta\theta| = \frac{\omega_0^2 \gamma \Theta_w \cdot 2|\sin \varepsilon/2|}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\alpha^2 \omega^2}} = \gamma \Theta_w \cdot \mu \cdot 2|\sin \varepsilon/2| \dots\dots\dots(11)$$

を振幅と考えると、この μ は単船が波浪中で抵抗横揺れしているときの magnification factor と同じものである。

単船の波浪中での抵抗横揺れの振幅を $|\theta|$ とすると

$$|\theta| = \gamma \Theta_w \mu$$

で与えられるので、(11)に代入すると

$$|\Delta\theta/\theta| = 2|\sin \varepsilon/2| \quad (12)$$

の関係が成り立つ。

第2図は単船の横揺れについて μ と ω/ω_0 との関係を示したものである。

$$\text{また}\mu\text{の値は}\omega/\omega_0 = \sqrt{1 - 2\left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right)^2}$$

の時最大になり、最大値は

$$\frac{1}{2\left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right) \sqrt{1 - \left(\frac{\alpha}{\omega_0}\right)^2}} \doteq \frac{\omega_0}{2\alpha}$$

で与えられる。

同型船、規則波と言う条件から、 $|\theta|$ は自動的に決まりました、相対横揺れ振幅 $|\Delta\theta|$ は ε にのみ左右される。

第3図は ε と $2|\sin \varepsilon/2|$ 即ち $\left|\frac{\Delta\theta}{\theta}\right|$ との関係を示し、第

第2図

第3図

第4図

第5図

4図は $\left| \frac{\Delta\theta}{\theta} \right|$ と ω/ω_0 との関係を第2・3図を組合わせて求めたものである。

したがって(11)(12)式及びこれらの図を考察すると

- ① ω/ω_0 (または T_0/T) = 0 のとき

両船共, $\mu = 1$ (第2図) となり波面に垂直であるから $|\Delta\theta|$ の大小は両船間の位相差 ε により異なる (第3・4図)

また, 起振力と相対横揺れ角との位相遅れ ϕ_6 は $\phi_6 = 0$ (第5図) となる。

- ② ω/ω_0 (または T_0/T) = 1 のとき

両船共, μ はほぼ最大になりその値は約 $\omega_0/2\alpha$ となる (第2図)。

従つて $|\theta|$ は最大になり, $|\Delta\theta|$ もまた最大になる。この最大値は位相差 ε により異なる (第3・4図)。

ϕ_6 は $\pi/2$ になる (第5図)。

- ③ ω/ω_0 (または T_0/T) = ∞ のとき

両船共, 波面傾斜の如何に拘らず, 横揺れし難くなり (第2図), $|\theta| \div 0$ になるので, $|\Delta\theta| \div 0$ になる。

したがつて $|\Delta\theta|$ は ε の値には無関係になる (第4図)。作業能率を考えるとこの場合は接舷することを意味する。

ϕ_6 は $\pi/2$ から π に近づく。

- ④ ω/ω_0 (または T_0/T) が上記③以外の任意の値のとき

第2図より単船の場合の $|\theta|$ が決まるので, $|\Delta\theta|$ の大小は ε のみを考えればよい (第3・4図)

即ち(12)式及び第3図より

$$\varepsilon = 2n\pi \text{ のとき } \left| \frac{\Delta\theta}{\theta} \right| = 0$$

$$\varepsilon = (2n \pm \frac{1}{3})\pi \text{ のとき } \left| \frac{\Delta\theta}{\theta} \right| = 1$$

$|\Delta\theta|$ は単船が波浪中で抵抗横揺れしている時の振幅 $|\theta|$ に等しい。

$$\varepsilon = (2n \pm 1)\pi \text{ のとき } \left| \frac{\Delta\theta}{\theta} \right| = 2$$

$|\Delta\theta|$ は $|\theta|$ の2倍になる。

従つて、 $\varepsilon=2n\pi$ になるよう占位するのが最適条件と考えるが、この条件に保てぬ場合でも、単船の横揺れ振幅より小さくする、即ち見掛上の鎮浪効果と言う意味で

$$(2n-1/3)\pi < \varepsilon < (2n+1/3)\pi$$

とすることが望ましい。

特に同調点付近では $\left| \frac{\Delta\theta}{\gamma\theta_w} \right|$ が大きくなる（第4図）ので、上記条件を満足するよう占位することが特に重要である。

なお、定常風を受けている場合は、両船間の距離が充分あれば、ほぼ同量の風圧及び風圧モーメントを両船が受けるため傾斜角度、圧流速度ともほぼ等しくなり、波速に比し圧流速度が無視出来る場合は相対横揺れ角には、風の影響は殆んど現われて来ない。

然し両船が互いに接近し、風上船が風下船の風圧を乱す場合は

- ① 風圧モーメント差に起因する相対横揺れ角が加わる
- ② 風圧差により風上船が風下船に接近する。
- ③ 風下船の風圧が乱されて、回頭作用が発生する。

等の現象が起き、思わぬ接触事故が起きる要因になるので、操船上注意が必要となる。

4. む す び

以上、要約すれば

- ① 両船間の波に対する位相差が $\varepsilon=2n\pi$ になるよう、占位することが最適条件であり、この時の相対横揺れ角は0となる。
- ② $\varepsilon=2n\pi$ に保てぬ場合でも、見掛上の鎮浪効果と言う意味で

$$\left| \frac{\Delta\theta}{\theta} \right| = 2|\sin \varepsilon/2| < 1$$

即ち、 $(2n-1/3)\pi < \varepsilon < (2n+1/3)\pi$

になるよう占位することが望ましい。

- ③ 船の固有横揺れ周期と波の周期がほぼ等しい海面においては、相対横揺れ角はほぼ最大になるので、操船に当つては、①②の条件を考慮することが特に必要になつてくる。

breeches buoy のごとく、両船間をロープで結んだ場合には、両船間にロープの張力による強制力が更に加わるので、この場合の運動については今後の研究課題である。

なお、遠洋海域に出漁している漁船には、同型船が多いと思われるので、これら漁船相互間の諸作業に、本稿が少しでも役立てば幸いである。

最後に、本稿をまとめるにあたり終始有益なる助言を賜つた、本校三好教授、藤崎教授、佐々木教授に深甚なる謝意を表します。

質 疑 応 答

実際に操船、占位する場合、船から位相差を見出すことは困難であると思うが、どのような方法が考えられますか。（鞠谷）

〔答〕海の波は極めて不規則であるため、その位相差を見出すことは、おおせのとおり困難です。かかる不規則波の場合の扱いについては、今後の研究課題です。

本稿では、海の波を極めて単純化し、規則波として扱っております。

この条件を満足する海面（うねりの如き）では、例えば両船間の位相差 ε を $\varepsilon=2n\pi$ と仮定すると、これは波長の整数倍を意味しているので、波長を計測すれば、位相差は直ちに距離に換算出

来ます。

したがって、位相差を距離に換算してこれを基準に占位することは、比較的簡単であると考えます。

なお、波長の計測については、各種の文献に紹介されている方法によりますが、この他に、最近種々の波高計が実用化されているので、これの利用も考えております。

参 考 文 献

1. 日本造船研究会 海難船舶の調査及び転覆機構の解明に関する研究 昭和38年6月
2. 元良誠三 船体運動力学 共立出版
3. 加藤弘 艦船の横動揺試験成績の新解析法 造船協会々報58号
4. 菅井和夫外 強制動揺法による船の横揺れ特性の研究 造船協会論文集114号
5. 田宮 真 非対称横揺れの性質について(その2) 造船協会論文集120号
6. S. N. Blagoveshchensky Theory of Ship motions Dover publications, Inc