(昭和 53 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

大角度不規則横揺れの減衰係数について

正員 竹 沢 誠 二* 正員 平 山 次 清*
正員 長 嶋 英 行**

On the Roll Damping Coefficient obtained from the Irregular and
Large Amplitude Forced Rolling Experiments

by Seiji Takezawa, *Member* Tsugukiyo Hirayama, *Member*
Hideyuki Nagashima, *Member*

Summary

The authors developed a compact new apparatus for making the irregular and large amplitude forced roll, and after the experiments, compared the obtained equivalent linearized roll damping coefficient with that from regular forced roll experiment made by another investigator.

From this result, it is said that the equivalent linearized damping, similar to that from regular or transient forced roll experiment, is also obtained from large amplitude irregular forced roll.

1 緒 言

Strip 法による船体運動の推定は、横揺れを除いてはば実用化されたといえる。横揺れに関しては、他の運動モードと比較して、運動振幅が大きくなり、非線形な特性を有することになって、線形理論では運動が過大評価となってしまうことが知られている。また、前進速度影響も大きいとされている。そのため、従来は理論計算の際に静水中の自由横揺れ実験による減衰係数、あるいは系統的な模型実験による実験式(文献5など)を採用していたわけであるが、船型が与えられただちに等価線型減衰係数が求まる実用的な手法の開発が望まれる。現在、横揺れの非線形性に関しては、付加慣性モーメントの非線形性は小さいという観点で、各所で鋭意研究が進められているが¹⁰⁾、従来からこの問題に関して、大別して2種のアプローチが試みられてきた。一つは、規則横揺れにおける減衰係数を、造波、造渦、摩擦などの各成分ごとに考察し、最終的にはそれらの合成により規則横揺れに対する減衰係数を組上げる方法。もう一つは、より実用的な観点から、減衰係数の非線形の程度が、応答スペクトルに及ぼす影響、ひいてはその極値分布への影響などを摂動法による理論的な方法²⁾、あるいは電子計算機でシミュレートされた時系列を解析することにより考察する方法である⁹⁾。前者に関しては、ビルジキールな

ど個々の成分について、自由横揺れ、規則強制横揺れなどにより実験的にもいろいろと試みられており、最近実用的な観点から、姫野ら^{13),14)}が理論と実験の統一的な組上げを試みている。

後者に関してもデータは整いつつあり、不規則波中の減衰係数は最小偏差法により決定されるものがよいとの高木ら¹⁰⁾のシミュレーション結果もあるが、大角度規則横揺れにおける減衰係数と大角度不規則強制横揺れにおける減衰係数の結びつきを実験的に確認した例はない。これには、大角度不規則強制横揺れが可能な実験装置の設計自体がむずかしいという理由もあるわけで、著者らは数年来大角度不規則強制横揺れを実施し得るコンパクトな装置を作製し改良してきた。今回、航走時、最大横揺れ片振幅 40 度程度までの大角度不規則強制横揺れ実験を実施し、他の研究機関による規則強制横揺れの結果との比較を行ないうるデータが得られたので、ここに報告するしだいである。モデルとしては、実際にも大なる横揺れの出やすい、また比較可能な減衰係数のデータのある SR-108-S7 の 2m モデルを選んだ。参考として、従来縦運動に関して成功を収めてきた過渡強制動揺法を適用した大角度強制横揺れ実験結果も合わせて報告するが、非線形現象であっても有意な等価線形化が見出されれば、十分実用性があると考えられる。

2 解析方法

横揺れ軸を固定した Pure Roll の強制横揺れ試験時

* 横浜国立大学工学部

** 横浜国立大学大学院工学研究科

に反力モーメントのみを測定した場合、線形な運動は次式で表わされる。

$$A_{44}(\omega)\ddot{\phi}(t) + B_{44}(\omega)\dot{\phi}(t) + C_{44}\phi(t) = M(t) \quad (1)$$

いま、 $\phi = \phi_0 e^{i\omega t}$ とすると、横揺れモーメントには位相差 α があり、 $M = M_0 e^{i(\omega t + \alpha)}$ のようになる。復原項 C_{44} を既知量として、 ϕ 、 M を測定値であるとする、慣性係数 $A_{44}(\omega)$ 、減衰係数 $B_{44}(\omega)$ は次式で求まる。

$$A_{44}(\omega) = [C_{44} - (M_0/\Phi_0) \cos \alpha] / \omega^2 \quad (2)$$

$$B_{44}(\omega) = [(M_0/\Phi_0) \sin \alpha] / \omega \quad (3)$$

ここで $(M_0/\Phi_0) \cos \alpha$ 、 $(M_0/\Phi_0) \sin \alpha$ は横揺れ角 ϕ を入力とし横揺れモーメント M を出力とする、周波数応答関数のサイン成分とコサイン成分である。

ここで、線形運動の場合は1回の過渡強制横揺れで A_{44} 、 B_{44} が ω ベースに求まることは明らかで、 $\phi(t)$ のフーリエスペクトルを $\Phi_0(\omega)$ 、 $M(t)$ のフーリエスペクトルを $M_0(\omega) e^{i\alpha(\omega)}$ とすれば計算式は(2)、(3)と同一である。

非線形な、過渡強制横揺れならびに不規則強制横揺れの場合にも、得られたフーリエスペクトル、クロススペクトルなどに(2)、(3)式を機械的に適用すると、 ω ベースの特性曲線として、 $A'_{44}(\omega)$ 、 $B'_{44}(\omega)$ が得られる。非線形横揺れ運動を適確に表現しうる運動方程式はまだ明らかでないが、通常は線形方程式を拡張した形で、また A_{44} は線形であるとして、次式が採用されている。

$$A_{44}\ddot{\phi} + B_1\dot{\phi} + (B_2\phi|\dot{\phi}| + \dots) + C_1\phi + (C_3\phi^3 + \dots) = m \quad (4)$$

われわれもこの運動方程式を採用することになると、もちろん A'_{44} 、 B'_{44} は A_{44} 、 B_1 には一致しない。しかれば、 A'_{44} 、 B'_{44} は何を評価しているかといえ、(4)式をエネルギー的に等価線形化した1つの例である次式の係数⁷⁾

$$A_{44}\ddot{\phi} + B_{44E}\dot{\phi} + C_{44E}\phi = M \quad (5)$$

ただし、

$$B_{44E} = B_1 + \frac{8}{3\pi}(\omega\phi_0)B_2 \quad (6)$$

$$C_{44E} = C_1 + \frac{1}{2}C_3\phi_0^2 \quad (7)$$

あるいは、横揺れ角の絶対値 $\phi_0(\omega)$ の定義できない不規則横揺れの場合は^{3),6)}

$$B_{44E} = B_1 + \sqrt{\frac{8}{\pi}} \cdot \sigma_\phi B_2 \quad (8)$$

$$C_{44E} = C_1 + 3\sigma_\phi^2 C_3 \quad (9)$$

で表わされる係数、すなわち等価線形減衰係数 B_{44E} および復原力の非線形性の影響を考慮されていない A_{44} に相当するものを評価していることになる。ここで(6)と(7)および(8)と(9)による表現では互いに独立な等価線形化のため、復原項の非線形性が減衰係数に影響を及ぼさない型となっている。つまり、この場合減衰

係数は応答関数のサイン成分のみで決まるというわけである。また、(2)式の C_{44} の代わりに(7)、(9)の C_{44E} を用いれば得られる A'_{44} は、線形の値に近づくことが予想される。(8)式で σ_ϕ は不規則横揺れの角速度の標準偏差であり、非線形減衰力 $(B_1\dot{\phi} + B_2\phi|\dot{\phi}|)$ と等価線形減衰力 $B_{44E}\dot{\phi}$ の差 δ の二乗の時間平均 δ^2 が最小になるようにした、いわゆる最小偏差法によるものである。(9)式の復原項もまったく同様にして得られたものである。ここに σ_ϕ は不規則横揺れ角度の標準偏差である。(4)式の B_1 、 B_2 は一般には周波数の関数であるが、(3)式による B'_{44} の ω ベースの結果から、最小二乗法により B_1 、 B_2 などを求める方法だと、この係数は周波数ベースでも一定の評価となり、線形な造波減衰の周波数影響も B_2 に入ってくることになる¹³⁾。 B_1 、 B_2 が周波数にかかわらず一定との仮定の下では、(6)式からもわかるように、角速度振幅一定 ($\omega\phi_0 = \text{const}$) の実験では B_{44E} が周波数ベースに一定となることが予想される。

3 シミュレーションによる検証

非線形横揺れの(3)式による機械的な解析が、つまりは等価線形減衰係数を評価していることになる点は、先にも述べたとおりである。どのような等価線形化が最良であるかについては明確ではないが、ここでは最近しばしば採用されている(6)式を考えることにする。その場合シミュレートされたタイムヒストリーから数値計算により求まる、(6)式で定義されるような B_1 、 B_2 が(4)式の表現における B_1 、 B_2 とはたしてどの程度一致し得るかを、決定論的な過渡強制横揺れについて、検証しておくことは、必要な実験精度を判断するためにも、是非必要なことであると考えられる。(4)式が完全に成立する系でシミュレーションし、(3)式により、最初に与えた B_1 、 B_2 が求まらないのであれば(6)式による等価線形化はもともと意味がないわけである。

具体的にはまず、実験との直接の対応を考えて、有次元表示の運動方程式(4)の各係数に過去の模型実験で得られている平均値的なものを使用することにして、以下の手順で(3)式による減衰係数の再評価を行なう(Fig. 1 参照)。

まず横揺れ角 $\phi(t)$ のフーリエスペクトル $\Phi(i\omega)$ を指定する。これより、 $\dot{\phi}(t)$ 、 $\ddot{\phi}(t)$ のフーリエスペクトルは $i\omega\Phi$ 、 $-\omega^2\Phi$ で与えられるから、タイムヒストリー ϕ 、 $\dot{\phi}$ 、 $\ddot{\phi}$ が微分演算なしにフーリエ逆変換により求まり、ひいては $\phi|\dot{\phi}|$ 、 ϕ^3 のタイムヒストリーが求まる。したがって(4)式の左辺の時系列から $m(t)$ のスペクトル $M(i\omega)$ が求まり(3)式による B_{44E} の評価ができるというわけである。

同様なことは不規則強制ロールについても行なえるわけであるが、今回は記載していない。

(a) 横揺れ振幅一定 ($\phi_0 = \text{const}$) の場合

Fig. 2 中に示されるような (4) 式の係数ならびにスペクトル形を与えて B'_{44} を求めた結果が Fig. 2 に示してある。ただし C_3 の値は実際より大き目となっている。同一のスペクトル振幅でも sweep time が長くなれば平均揺れ角 ϕ_0 は小さくなり B'_{44} のバラツキも小さくなるわけであるが (Fig. 3 参照)。実験の際の解析との兼合いを考慮して、sweep time を 15 秒に固定した場

Fig. 1 Flowchart of the simulation of a nonlinear forced roll

Fig. 2 Simulated result of forced transient roll (constant amplitude)

合、 B'_{44} のスペクトル振幅影響を示したのが Fig. 2 である。図中の直線は、与えられた B_1 , B_2 とタイムヒストリー上で読んだ平均揺れ角 ϕ_0 を用いた (6) 式による等価線形減衰係数であり、折れ線と直線が一致すれば、等価線形化の手法が妥当であることがいえるわけである。 $B_2 = C_3 = 0$ の完全に線形な場合でも $\hat{\omega}$ で 0.6 以下の低周波で、バラツキが出ていることから、実験結果の低周波部分は B_1 , B_2 の決定の際には除外した方がよさそうである。 A_{44} は復原項の非線形影響を考慮した C_{44E} を (2) 式で使用していないことから予想されるように、低周波数でその影響が大きくなって、かなりの負の付加慣性モーメントが存在するという誤った結果となっている。したがって A_{44} に関しては後述のように復原項の非線形性も考慮した方がよい。復原項の非線形性を完全に修正するには、時間軸上で $M(t) - C_3\phi^3$ を改めて $M(t)$ としてやればよい。

(b) 角速度振幅一定 ($\omega\phi_0 = \text{一定}$) の場合

$1/\omega$ に比例するようなスペクトル振幅 (Fig. 4 中) をもつ信号のタイムヒストリーもほぼ、 $\omega\phi_0 = \text{const}$ なる特性を有する。結果を同じ Fig. 4 に示す。sweep time は後出の実験で採用した約 15 秒としている。高周波数領域で意外に変動があるが、平均値的なものは damping 係数の違いをはっきり示している。事実横揺れ角タイムヒストリー分布を $\omega\phi_0 = \alpha$ とみた α の値より (6) 式を用いて求めた B_{44E} と Fig. 4 の折線平均値はおおののスペクトルの場合について 5% 以内で一致している。

Fig. 3 Simulated result of forced transient roll (sweep time is changed)

Fig. 4 Simulated result of forced transient roll (amplitude of angular velocity is constant)

線形運動方程式では、横揺れ応答のピーク値は直接 B_{44} が効いて、 $1/B_{44}$ に比例するわけであるから、横揺れ応答関数のピークの推定誤差を±5%以内におさえようとすると B_{44} もその程度の精度で推定する必要があり $\omega\phi_0 = \text{const}$ の実験はかなり注意が必要であろう。

本論で使用した無次元化は次のとおりである。

$$\begin{aligned}\hat{A}_{44} &= (A_{44}/\rho \nabla B^2) \\ \hat{B}_{44} &= (B_{44}/\rho \nabla B^2) \cdot \sqrt{B/2g} \\ \hat{C}_{44} &= (C_{44}/\rho \nabla B^2) \cdot (\sqrt{B/2g})^2 \\ \hat{\omega} &= \omega \cdot \sqrt{B/2g}\end{aligned}$$

ただし、 ρ は密度、 g は重力の加速度

4 不規則強制横揺れ装置

規則強制横揺れ実験は、従来からなされた例も多いが、片振幅で 30° を越える大角度までなされた例は数例しかない^{1),10)}。まして不規則強制横揺れ実験をしかも甲板縁が没水する以上の大角度(約 40° 近く)まで実施した例は聞かない。これは、バックラッシュなしで任意の可逆回転が可能で、しかもトルクが大なるコンパクトな装置を作製すること自体に難点があることにもよると思われるが、今回われわれは、イナーシャの少ないプリントモータを使用し、何段階かの改良を重ねた後 Fig. 5 のような装置を作製した。ただし、横揺れ回転軸は fix である。横揺れに関しては、このような余分な摩擦源となる軸受をもたない、シンプルでコンパクトな型が最良であるように思われる。ストレンゲージタイプの検力計を介してモデルを高速可逆回転させるため、弾性振動が出

Fig. 5 Apparatus for the large amplitude arbitrary forced roll

るのは避けられないが、これらはフィルターや解析方法の検討によって克服できるものである。検力計の中心位置は重心 G に合わせている。

モデルの Bulwark が支柱に当たるため、満載状態では可能な最大揺れ角は 40° 程度となっているが、竹沢ら¹⁵⁾の SR 108 型船の実船解析から得られた結果によると、100 年間に遭遇する横揺れ片振幅の極大異常値として 31° という結果が得られているので十分であろう。

5 実験および解析結果

SR 108-S7 型船の 2m モデルを用い、満載状態および常用状態で、強制信号の特性を変え、過渡強制および不規則強制ピュア・ロールの実験を行なった。

モデルの主要目および実験状態を Table 1 に示す。フルード数 F_n は 0, 0.1, 0.2, 0.275 で最大横揺れ角は約 35° 程度とした。使用した幅 8m の本学の長水槽では側面消波板を使用し $F_n=0$ ではモデルを水槽と直角に置いた。満載状態では約 25° の傾斜で甲板縁が没水する (Fig. 6) ので、船体中央に長さ 60cm、高さ 6cm のアクリル板をたてて、浸水を防ぎ、最大 40° までは傾斜可能とした。モデルの慣性モーメントは、相対的に Damping が大きくできるように、意識的に小さくしてある。参考までに常用状態での実験結果も一部挿入するが、とくに断りのない場合はすべて満載状態である。なお、過渡強制動揺法に関しては文献 4) を参照されたい。

1) 過渡強制横揺れ試験

a) 振幅一定 ($\phi_0 = \text{const}$) の場合

横揺れ角 $\phi(t)$ の振幅がタイムヒストリーで一定となるような駆動信号を、機械系の伝達関数を考慮して作成した。このとき ϕ_0 はフーリエスペクトラム上でもほぼ振幅一定となる (Fig. 7)。フーリエスペクトルは高速フ

Table 1 Used model ship and its condition

SR-108-S7 ;Scale=2/175 Ship Form	Full Load Condition	Normal Condition
L	2.000 (m)	2.000 (m)
B	0.290 (m)	0.290 (m)
D	0.176 (m)	0.176 (m)
d	0.1086 (m)	0.0971 (m)
Trim	0.0 (m)	0.0 (m)
C_b	0.570	0.559
∇	0.0359 (m ³)	0.0315 (m ³)
Rolling Period T (in Water)	1.630 (sec)	1.245 (sec)
Rolling Frequency ω_ϕ	3.854 (rad/s)	5.047 (rad/s)
Nondimensional Roll.Freq. $\hat{\omega}_\phi$	0.4688	0.6139
KM	0.1202 (m)	0.1187 (m)
GM	0.0116 (m)	0.0216 (m)
KG=d	0.1086 (m)	0.0971 (m)
K_{xx}/B in Water at $F_n=0$	0.302	0.315
K_{xx}/B in Air	0.273	0.289
Bilge Keel :Length= $L_{FP}/4$ Breadth	0.5 (m) 0.0051 (m)	0.5 (m) 0.0051 (m)
Rudder	with	with

Fig. 6 Limit of the roll angle

Fig. 7 An example of large amplitude forced transient roll (constant amplitude)

ーリエ変換 (F. F. T) によった。

フルード数ごとに整理した Fig. 8~Fig. 10 の B_{44} に示されるように、周波数ベースで減衰係数 B_{44} は右上りの傾向がはっきりと出ている。この右よりの傾向は横揺れ角が大きくなるほど強くなるが、これらを直線近似し

Fig. 8 $\hat{B}_{44}$ and $\hat{A}_{44}$ by forced transient roll ($F_n=0.1$)

て (6) 式にあてはめれば、 $\hat{\omega}=0$ の値より $\hat{B}_1$ が、傾きから $\hat{B}_2$ が求まる。ここでは、同一フルード数で $\hat{B}_1$ は一定とみなして、最小二乗近似より $\hat{B}_2$ を求めた結果を、横揺れ角ベースで Fig. 17, 18 に、フルード数ベースで Fig. 19, 20 に示す。角度に関して等価線形化された (6) 式が妥当であれば、 $\hat{B}_1$, $\hat{B}_2$ は、横揺れ角に対して一定値となるはずであるが、 $\hat{B}_2$ は、右下りとなり、フルード数の増大とともにこの傾向は弱まる。 $F_n=0.275$

Fig. 9 $\bar{B}_{44}$ and $\bar{A}_{44}$ by forced transient roll ($F_n = 0.2$)

Fig. 10 $\bar{B}_{44}$ and $\bar{A}_{44}$ by forced transient roll ($F_n = 0.275$)

の高速では、やや右上りとなっている。右下りの傾向が弱まることは Fig. 18 の常用状態の結果からいえる。

田才ら^{9),10)}が求めた比較的小角度 ($5^\circ \sim 15^\circ$) の規則強制ロールによる $\bar{B}_1$ の値 ($F_n = 0.275$) に比べて過渡強制によるものが大きめの値となっているが、シミュレーションにも示されたように、低周波数で大き目の B_{44} となることが $\bar{B}_1$ をおし上げているようである。

フルード数ベースに $\bar{B}_1$, $\bar{B}_2$ を見てみると、 $\bar{B}_1$ はほぼ原点を通る直線で示すことができ (Fig. 19, 20), これに対する $\bar{B}_2$ はフルード数の増大に伴い直線的に減少する。これは常用状態でも同じである。

慣性項 $\bar{A}_{44}$ については、大角度でも (2) 式の C_{44} に初期復原力係数を用いていると過少評価であるから、 $\bar{A}_{44}$ も過少評価となる。これはシミュレーションからいえること (Fig. 2) であるが、Fig. 8~Fig. 10 の $\bar{A}_{44}$ にもはっきりと出ており空中での慣性モーメント (一点鎖線) と比較して大なる負の付加慣性モーメントがあるという正しくない結論となる。これを修正するには復原力曲線を等価線形化した (7) 式の C_{44E} を、(2) 式の C_{44} の代わりに使用すればよく、例を Fig. 11 に示す。

また、おのおのの図には、どの程度修正されるかという意味で、1点ずつの修正例を示してある。これらの結果およびストリップ法による結果 (点線) との比較から判断して、復原力曲線の非線形性を考慮してやれば $\bar{A}_{44}$ はほぼ線形 (角度ベースに変化しない) であるとの従来の説は大角度過渡強制の場合にもあてはまるようである。strip 法による $\bar{A}_{44}$ は周波数ベースにほぼ一定であり、高周波数では実験値に重なっている。

b) 角速度振幅一定 ($\omega\phi_0 = \text{const}$) の場合

ロール角速度 $\phi(t)$ のタイムヒストリー上での振幅が一定となるように作成した駆動信号を用いた実験を行ない、これに対する $\bar{B}_{44}$ を求めた。この時は $\phi(t)$ のフーリエスペクトル $\Phi(\omega)$ の振幅もほぼ一定となり、目的どおりの実験ができたことがわかる (Fig. 12)。

フルード数ごとに整理した結果を Fig. 13~Fig. 15 に示す。 $\bar{B}_{44}$ の特性は、(6) 式から予想されるように、ほぼ一定となるが、大なる角速度振幅ではバラツキが大きい。これらの平均値から得られた $\bar{B}_{44}$ を $\omega\phi_0$ ベースに整理したのが Fig. 16 である。これを直線近似して (6) 式のあてはめにより得られた $\bar{B}_1$, $\bar{B}_2$ が Fig. 17~Fig.

Fig. 11 Correction of $\hat{A}_{44}$ by the nonlinear term of restoring force

Fig. 12 An example of forced transient roll with constant amplitude of angular velocity

20 に記載されている。ただし $\hat{B}_1$ は先の振幅一定の過渡強制ロールによるものと等しいとしている。

横揺れ角ベースでみた $\hat{B}_2$ (Fig. 17, 18) の平均値的なものは振幅一定強制ロールとはほぼ一致する。フルード数ベース (Fig. 19, 20) で $\hat{B}_2$ が右下りの傾向は振幅一定の場合と同じであるが、常用状態では傾斜がきつくなっている。 $\hat{A}_{44}$ についても、振幅一定の場合と同様のことがいえる。

2) 不規則強制横揺れ試験

実船では、大角度横揺れ時は同調横揺れであることが大部分で、横揺れ角のパワースペクトラムは、横揺れ固有周波数をピーク周波数とした三角形の狭帯域スペクトラムになる場合が多い。したがって、このようなスペクトラムをもつ不規則ロールをさせた場合の減衰係数の実態値が実用上最も重要な意味をもつ。

大角度横揺れ時の実船試験データを参考として、不規則駆動信号を作成した。タイムヒストリーの横揺れ角分布およびスペクトラムの例を Fig. 21 に示す。横揺れ角速度の標準偏差 $\sigma_{\dot{\phi}}$ も算定する必要上 $S_{\dot{\phi}\dot{\phi}}(\omega)$ も求めている。

Fig. 13 $\hat{B}_{44}$ and $\hat{A}_{44}$ by the forced transient roll ($\omega\phi_0=\text{const}$, $F_n=0.1$)

Fig. 14 $\hat{B}_{44}$ and $\hat{A}_{44}$ by the forced transient roll ($\omega\phi_0=\text{const}$, $F_n=0.2$)

Fig. 15 $\hat{B}_{44}$ and $\hat{A}_{44}$ by the forced transient roll ($\omega\phi_0 = \text{const}$, $F_n = 0.275$)

Fig. 16 $\hat{B}_{44}$ arranged by the parameter $\omega\phi_0$

実験における横揺れ角に対する横揺れモーメントのクロススペクトラムと、横揺れ角のオートスペクトラムから、横揺れ角に対する横揺れモーメントの応答関数(線形の場合は周波数伝達関数)が求まる。これを(2)、(3)式に機械的に代入してやれば、何らかの意味で等価線形化されたものとしての $\hat{A}_{44}$ 、 $\hat{B}_{44}$ が周波数の関数として求まることは過渡強制の場合と同じである。

得られた $\hat{B}_{44}$ 、 $\hat{A}_{44}$ を、フルード数ごとに示したのが、Fig. 22~Fig. 24 であるが、横揺れ角振幅 ϕ_0 が周波数により異なるので値はばらついている。この傾向は横揺れ角が大きくなるに従って強くなっているが、不規則動揺の場合の減衰係数は統計値として求まると考え

Fig. 17 Final results for full load condition (concerning to roll-angle)

Fig. 18 Final results for normal condition (concerning to roll angle)

られるので、スペクトラムの周波数範囲で $\hat{B}_{44}$ の平均値を求めれば、その実験の角速度の標準偏差 σ_ϕ に対応して $\hat{B}_{44}$ が1個決まることになる。したがってこれらの結果を(8)式にあてはめてやれば(Fig. 25, 26) 過渡強制横揺れと同様 $\hat{B}_1$ 、 $\hat{B}_2$ が求まるわけで、結果は過渡強制と一緒に、Fig. 17~Fig. 20 にまとめている。ただし、満載状態の $\hat{B}_1$ 値は振幅一定の過渡強制結果と同程度なので同一の値として、 $\hat{B}_2$ を最小二乗近似で求めたため Fig. 19 の $\hat{B}_1$ は一本の直線となっている。

これら4枚の図から、不規則強制横揺れにおける減衰係数の実態値は意外に過渡強制横揺れにおける値と定性的にも定量的にも一致しているといえよう。とまかく見ると $\hat{B}_2$ はフルード数ベースの変化がより小さく、田才ら^{9),10)} の片振幅 $5^\circ \sim 15^\circ$ の規則強制横揺れの結果より $\hat{B}_2$ が大き目になっているのが目につくが、大角度で比

Fig. 19 Final result for full load condition (concerning to F_n)

Fig. 20 Final result for normal condition (concerning to F_n)

較しうるデータはない。

満載状態と常用状態の差異は、無次元化の際に異なる排水量を使っていることを考えてやれば、多少の傾向の違いは別にして、ほぼなようである。

Fig. 22~Fig. 24 の $\hat{A}_{44}$ が、低周波で、空中の慣性モーメントに比べてかなり低い値になっている点に関しては過渡強制の場合と同様の議論がなりたつ。不規則横揺

Fig. 21 An example of forced irregular roll

Fig. 22 $\hat{B}_{44}$ and $\hat{A}_{44}$ by the forced irregular roll ($F_n=0.1$)

れの場合の等価線形復原力係数は復原力曲線の C_1 , C_3 を用いて、(9) 式のように σ_ϕ^2 をパラメータとして表現されるから、これを C_{44} の代わりに使用すれば、Fig. 27, 28 のように修正される。Fig. 22~Fig. 24 にも最低点に対する修正を示してあるが、 $\hat{A}_{44}$ には復原力曲線の非線形性だけでは説明しきれない量も多少あるようである。

今回の実験のような狭帯域の不規則強制ロールの場合

Fig. 23 $\hat{B}_{44}$ and $\hat{A}_{44}$ by the forced irregular roll ($F_n=0.2$)

Fig. 24 $\hat{B}_{44}$ and $\hat{A}_{44}$ by the forced irregular roll ($F_n=0.275$)

平均揺れ角、有義揺れ角などのうち、どのような統計量を ϕ_0 とみなせば、つまりどの程度の揺れが、規則強制、過渡強制の B_{44} と一致するかを見たものが Fig. 29 である。過渡強制については Fig. 10 で、 $\hat{\omega}$ を模型船の固有周波数に固定して ϕ_0 ベースに B_{44} を描いたもの

Fig. 25 $\hat{B}_{44}$ concerning to $\hat{\phi}_0$

Fig. 26 $\hat{B}_{44}$ concerning to $\hat{\phi}_0$

であり、大角度で規則強制結果を外挿したものより大きく目となっている。不規則強制において、1つの実験の横揺れ角の平均値、あるいは有義値を ϕ_0 として、その実験から得られた B_{44} を描いたものは、規則あるいは過渡

Fig. 27 Corrected example of $\hat{A}_{44}$ by nonlinear term of restoring force

Fig. 28 Corrected example of $\hat{A}_{44}$ by nonlinear term of restoring force

Fig. 29 Arranged $\hat{B}_{44}$ concerning to ϕ_{AV} , or $\phi_{1/3}$ as the corresponding roll amplitude

強制横揺れによるものと比べて大幅にずれている。これは今回のような不規則強制ロールから得られる等価線形減衰係数が平均値あるいは有義値に対応するのではなく、より大きな角度となる統計量の減衰係数に対応していることを示していると思われる。

6 結 言

規則強制ロール時の減衰係数と、大角度不規則強制並びに大角度過渡強制ロール時の減衰係数を、等価線形減衰係数の観点から比較するために、新たに強制横揺れ装

置を作製し実験を実施した。得られた横揺れ角のスペクトルから判断して、この強制横揺れ装置はほぼ目的を満たすものである。

本論の実験結果は Fig. 17, 18 および Fig. 19, 20, 29 の減衰係数に集約されているが、これらの図から得られる結論を以下に要約する。

1) (6), (8) 式で定義される等価線形減衰係数にあてはめて解析した減衰係数のうち B_1 は、フルード数 F_n に比例する形で、 $\hat{B}_2$ は F_n に関して直線的に減少する形で整理することができる。

2) 甲板縁が没する (約 25°) こともある大角度不規則並びに過渡横揺れであっても、今回示したような平均線で整理する方法では減衰係数に急激な変化は見られない。

3) 過渡、不規則強制ロールより得られた減衰係数と他の研究機関の規則強制による減衰係数がほぼ同程度の値となることから、今回採用した等価線形化の妥当性が間接的に示されたと考えられる。

4) 固有周期付近で、横揺れ角による減衰係数の Total の値を比較した結果 (Fig. 29) では、平均揺れ角または有義横揺れ角を ϕ_0 とみなして置点した B_{44} と、規則あるいは過渡強制による B_{44} との間に大きな違いを見せており、不規則強制ロールの等価線形減衰係数を代表する揺れ角は、平均揺れ角あるいは有義揺れ角ではないと思われる。

5) (2) 式でも明らかにように慣性モーメントの算出には復原項の非線形性が効いてくるが、等価線形化した復原項を使って修正した結果は、今回のような大角度でも、慣性モーメントの非線形性が小さいことが明らかとなった。

謝 辞

本論文に関する実験実施に際しては、全面的に本学の宮川清助手、高山武彦技官に負っている。また本論文に使用したデータ、図面の作製には、学生の鈴木健悟、原口譲治君、さらに数年来の基礎データ蓄積には寺尾裕工学修士 (文献 11)、並びに重信和夫、鈴木 孝、松本俊之、堀田淳二、塩川朋久、寺田剛志の各工学士に負うところが大きい。紙面を借りて厚くお礼申し上げる。

また、本研究の一部は日本造船研究協会 部会 SR 161 の研究として実施されたものであり、中村彰一部会長をはじめ、御討論いただいた委員各位に御礼申し上げるとともに、一部文部省科学研究費の補助を受けていることを付記させていただく。

参 考 文 献

- 1) 元良誠三他：強制動揺法による大角度横揺減衰係数の測定について、造船協会論文集 第 100 号

- (1956).
- 2) 山内保文：波浪中船の応答特性の統計的解析に関する二、三の考察，日本造船学会論文集 第117号 (1965).
 - 3) Kaplan, R. : Lecture Notes on Non linear Theory of Ship Roll Motion in a Random Seaway, 11 th. I.T.T.C Report (1966 Tokyo).
 - 4) 竹沢誠二：船体縦運動における過渡応答法による船型試験，造船学会論文集 第130号 (1971).
 - 5) 福田淳一他：波浪中の船体運動と船体表面に働く変動水圧及び横強度に関する理論計算，造船学会論文集 第129号 (1971).
 - 6) Vassiloupoulos, L. : Ship Rolling at Zero Speed in Random Beam Seas with Nonlinear Damping and Restoration, Journal of Ship Research (December 1971).
 - 7) 高木幹雄，田才福造：横運動方程式の流体力について，西部造船会会報 第46号 (1973).
 - 8) Dalzell, J. F. : A note on the Distribution of Maxima of Ship Rolling, Journal of Ship Research Vol. 17, No. 4 (1973).
 - 9) SR 131 研究部会：波浪外力に関する水槽試験報告書，造研資料 No.213 (1975).
 - 10) SR 161 研究部会：船舶の波浪中性能推定の精度向上とその実証に関する研究報告書，造研資料 No.257 (1976), No.275 (1977), No.291 (1978).
 - 11) 寺尾 裕：不規則強制横揺れによる横揺れ減衰係数の評価，横浜国立大学修士論文 (1977).
 - 12) 竹沢誠二，梶田悦司，高橋 雄：耐航性に関する動的船型試験法，第2回耐航性シンポジウムテキスト，日本造船学会 (1977).
 - 13) 姫野洋司：横揺減衰力，日本造船学会第2回耐航性シンポジウムテキスト (1977).
 - 14) 池田良穂，姫野洋司，田中紀男：前進時の横揺れ減衰力成分について，日本造船学会論文集 第143号 (1978).
 - 15) 竹沢誠二，福田 豊：波浪中船体運動の極値長期分布について，日本造船学会論文集 第143号 (1978).
-