

Short Crested Wave中の船体運動と抵抗増加について

経塚, 雄策
九州大学応用力学研究所 : 助教授

大楠, 丹
九州大学応用力学研究所 : 教授

稲田, 勝
九州大学応用力学研究所 : 文部技官

<https://doi.org/10.15017/4743776>

出版情報 : 應用力學研究所所報. 63, pp.205-214, 1987-01. 九州大学応用力学研究所
バージョン :
権利関係 :



経塚雄策[†] 大楠丹[†]
稲田勝^S

津屋崎実験所大水槽の造波装置は8分割でそれぞれ独立に運転可能となっており、Short crested waveが発生できるがこの波は進行方向の異なるLong crested waveの重畳である。従って、偶節波中で水槽中央を航走する船は斜波中で縦運動のみが許された特殊な状態とみなすことができる。本研究では、斜波中の船の抵抗増加に関連してShort crested wave中での実験を行い、既存の理論式との比較を行った。

§ 文部技官、九州大学応用力学研究所

考えられる。また、上述の細田と丸尾・岩瀬の計算結果によると抵抗増加に及ぼす横運動の影響はわずかで、上下揺と縦揺による寄与が支配的であることから、Short crested wave 中で計測された抵抗増加を斜波中の抵抗増加の理論値と比較し、斜波中の理論を検証することが可能であると考えられる。

本研究では、以上の背景から実施された Short crested wave 中の実験結果を示すとともに、これまでに知られている抵抗増加の公式による計算値との比較を行った。

なお、2 節波中の上下揺と縦揺についてはすでに田村らによってなされているが、本報告では 6 節波までの抵抗増加に主眼をおいた実験結果について述べる。

2. 長水槽において発生可能な Short Crested Wave

長水槽において発生可能な Short crested wave とは、図 1 のように水槽長手方向に対し進行方向が逆符号 ($\pm \alpha$) なる 2 つの Long crested wave の重畳であり、深海波とすればその速度ポテンシャルは

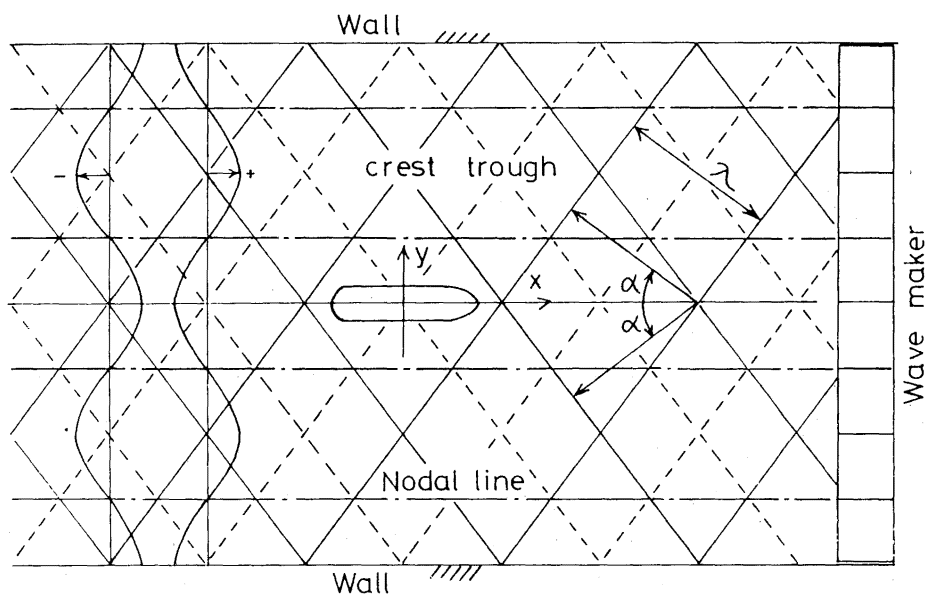


図1 4 節の Short Crested Wave

$$\Phi^e(x, y, z, t) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{iga_w}{\omega} \cos(Ky \sin \alpha) e^{Kz + i(Kx \cos \alpha + \omega t)} \right\} \quad (1)$$

あるいは

$$\Phi^o(x, y, z, t) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{iga_w}{\omega} \sin(Ky \sin \alpha) e^{Kz + i(Kx \cos \alpha + \omega t)} \right\} \quad (2)$$

ただし、

a_w : 波振幅, g : 重力加速度

$K = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega^2}{g}$: 波数, λ : 波長

で与えられる。ここで、 Φ^e は水槽中心線に腹がある偶数節の、 Φ^o は奇数節の Short crested wave であるが本研究では偶数節のものだけを考える。

(1) の速度ポテンシャルが、両側の水槽壁 ($y = \pm B_T/2$) で満足すべき条件は

$$\frac{\partial}{\partial y} \Phi^e(x, \pm B_T/2, z, t) = 0 \quad (3)$$

であるから、 α の条件式は

$$K \sin \alpha \cdot \sin \left(K \frac{B_T}{2} \cdot \sin \alpha \right) = 0 \quad (4)$$

すなわち、

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= n\pi \\ K \frac{B_T}{2} \sin \alpha &= n\pi \end{aligned} \right\} (n = 0, 1, 2, \dots)$$

であるが、 $\alpha = n\pi$ は Long crested wave である。従って、長水槽では波長と水槽幅の比によって発生しうる Short crested wave に制限があり

$$\begin{aligned} \sin \alpha &= n \frac{\lambda}{B_T} = N \frac{\lambda}{2B_T} \leq 1 \\ \text{or} \quad \alpha &= \sin^{-1} \left(N \frac{\lambda}{2B_T} \right) \end{aligned} \quad \left\{ (N = 2, 4, 6, \dots) \right. \quad (5)$$

でなければならない。

当研究所の水槽幅は 8m であり、今回使用した模型船 ($L=2\text{m}$) に対する Short crested wave と入射波角度 α との関係は表 1 のようになっている。

表 1 長水槽で発生可能な節波

λ/L	λ/B_T	α (degree)		
		2 node	4 node	6 node
0.5	0.125	7.2	14.5	22.0
0.6	0.15	8.6	17.5	26.7
0.7	0.175	10.1	20.5	31.7
0.8	0.2	11.5	23.6	36.9
0.9	0.25	13.0	26.7	42.5
1.0	0.25	14.5	30.0	48.6
1.1	0.275	16.0	33.4	55.6
1.2	0.3	17.5	36.9	64.2
1.3	0.325	19.0	40.5	77.2
1.4	0.35	20.5	44.4	*
1.5	0.375	22.0	48.6	*
1.6	0.4	23.6	53.1	*
1.7	0.425	25.2	58.2	*
1.8	0.45	26.7	64.2	*
1.9	0.475	28.4	71.8	*
2.0	0.5	30.0	*	*

Note) * means no solution

L : Length of the model ship (2m)

B_T : Breadth of the experimental tank (8m)

3. 理論計算法

3.1 運動方程式

偶数波中の船体運動は、横運動には無関係であるので縦波中のものと同様に扱うことができる。上下揺と縦揺の連成方程式は

$$\left. \begin{aligned} A_{11} \ddot{Z} + A_{12} \dot{Z} + A_{13} Z + A_{14} \ddot{\theta} + A_{15} \dot{\theta} + A_{16} \theta &= F_w(t) \\ A_{21} \ddot{Z} + A_{22} \dot{Z} + A_{23} Z + A_{24} \ddot{\theta} + A_{25} \dot{\theta} + A_{26} \theta &= M_w(t) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

で与えられるが(6)の左辺は、船体の慣性力、復元力及び静水中で上下揺、縦揺するときの Radiation force/moment であるので縦波中のものと同じである。

一方、右辺は波による強制力および強制モーメントであり、Short crested wave 中では斜波中の表式によって求められる。(1)で与えられる波の中を速度 V で航走する船の出会い円周波数 ω_e は

$$\omega_e = \omega + KV \cos \alpha \quad (7)$$

で与えられるから、波の強制力／モーメントは

$$\left. \begin{aligned} F_w(t) &= \operatorname{Re} \{ (F_{wc} + iF_{ws}) e^{i\omega_e t} \} \\ M_w(t) &= \operatorname{Re} \{ (M_{wc} + iM_{ws}) e^{i\omega_e t} \} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

とおける。(6)。(8)の具体的な計算法はストリップ法 (O. S. M) によっており文献^{6), 12)}に詳述されているのでここでの説明は省略する。

(6)を解いて重心位置での動揺が求められれば、船体上の点 (x, y) における水面との相対変位 ζ_r 、上下方向の相対速度 v_r およびその点の上下方向の加速度 a_{cc} は

$$\left. \begin{aligned} \zeta_r &= Z - (x - \bar{x}_G) \theta - \zeta_w(x, y) \\ &\div Z - (x - \bar{x}_G) \theta - \zeta_w(x, 0) \\ v_r &\div i\omega_e \{ Z - (x - \bar{x}_G) \theta \} + V\theta - i\omega \zeta_w(x, 0) \\ a_{cc} &= -\omega_e^2 \{ Z - (x - \bar{x}_G) \theta \} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ただし、 $\zeta_w(x, y) = a_w \cos(Ky \sin \alpha) e^{ikx \cos \alpha}$: 水面変位
 $(\bar{x}_G, 0)$: 重心位置

によって計算できる。

3.2 抵抗増加の計算公式

Gerritsma-Beukelman⁷⁾の式として縦波中の抵抗増加の計算に多用されている式は

$$R_{Aw}(0) = \frac{K}{2\omega_e} \int_L \left(N - V \frac{\partial S}{\partial x} \right) |v_r|^2 dx \quad (10)$$

ただし、 N : 断面減衰力係数

S : 断面付加質量

V : 船速

であるが、右辺の積分の第2項はしばしば省略されて

$$R_{Aw}(0) \div \frac{K}{2\omega_e} \int_L N |v_r|^2 dx \quad (11)$$

によって近似される。

Beukelman-Buitenhok⁸⁾は(11)を斜波中に拡張した式として

$$R_{Aw}(\alpha) = \frac{K \cos \alpha}{2\omega_e} \int_L N |v_r|^2 dx \quad (12)$$

を与えているが、これは簡便なやり方で類推したもので、斜め追い波状態では負の値となり使えない。

次に、丸尾・岩瀬の簡易化公式は次で与えられる⁹⁾。

$$\begin{aligned} R_{Aw}(\alpha) &= 8\pi^2 \rho \int_L \left[K |\sigma|^2 \cos \alpha + i\sigma^* \frac{d\sigma}{dx} \right] dx \\ &\quad + 8\pi^2 \rho \int_L \frac{\omega^2}{g} \left[K |\mu|^2 \cos \alpha + i\mu^* \frac{d\mu}{dx} \right] dx \end{aligned} \quad (13)$$

ただし、 σ^* 、 μ^* は σ 、 μ の複素共役値

ここで, σ は船体中心線に分布された吹き出し, μ は横方向に軸をもつ二重吹き出しであると解釈され, 本研究では横運動がないので

$$R_{Aw}(\alpha) = 8\pi^2 \rho K \cos \alpha \int_L |\sigma|^2 dx + 8\pi^2 \rho \int_L i\sigma^* \frac{d\sigma}{dx} \cdot dx \quad (14)$$

によって計算できる. また, σ は次式で与えられる.

$$\sigma(x) = -\frac{i}{4\pi} \frac{g}{\omega_e^2} \bar{A}_H e^{i\epsilon_H} \frac{1}{B(x)} \left(i\omega_e - V \frac{\partial}{\partial x} \right) [B(x) \{Z - (x - \bar{x}_G) \theta - \xi_w\}] \quad (15)$$

ただし,

$\bar{A}_H e^{i\epsilon_H}$: 単位振幅の上下揺による発散波の複素振幅

$B(x)$: 船体水線幅

実際の計算では, ストリップ法 (O.S.M) によって上下揺と縦揺を求め, (15) によって船体の21断面で $\sigma(x)$ を求める. $\frac{d\sigma}{dx}$ については, それらの値を使って直接数値微分 (Cubic Spline 法) したが, 今回の計算範囲ではかなりの精度を有しているものと思われる. しかし, もっと短波長域では $\sigma(x)$ の変化が激しくなるので点数を増やす必要があると思われる.

4. 実験

4.1 供試模型船および実験方法

実験模型船は SR108 の 1 軸コンテナ船 ($L/B=6.89$) で $L=2\text{m}$ のものを使用した. その主要目を表 2 に示す. 前進速度は $F_N=0.2$ とし, 上下揺, 縦揺, 前後揺および船首部 (S.S. $8\frac{1}{2}$) における相対水位と上下加速度も計測した. 抵抗増加については, 図2に示すように検力計と定トルク・モータを使って計測した¹⁰⁾. ここで, 定トルク・モータとは D.C. モータ (定格 200 W) を電流制御することによってトルクが可変できるようになっているものをいい, 模型船の推進器のかわりに用いる. 模型船が前後方向にドリフトしている状態では抵抗増加の計測値に誤差が含まれるので実験ではすみやかに抵抗と曳航力をバランスさせドリフトを 0 とする必要があるがトルク・モータではその制御が容易に行えるので便利である. また, 抵抗増加そのものは検力計の歪量から算出されるので, 計測から解析までが自動的に行える点も重力式などの方法に比べて有利である.

表 2 模型船主要目

SR 108 container ship		Model
Length between perpendiculars	$L(m)$	2.0
Breadth moulded	$B(m)$	0.290
Draft	$d(m)$	0.109
Displacement volume	$\Delta(m^3)$	0.036
Block coefficient	C_b	0.572
Midship section coefficient	C_m	0.970
Center of buoyancy abaft midship	l_{cb}	1.42 %L
Longitudinal radius of gyration	k_{yy}	0.24 L

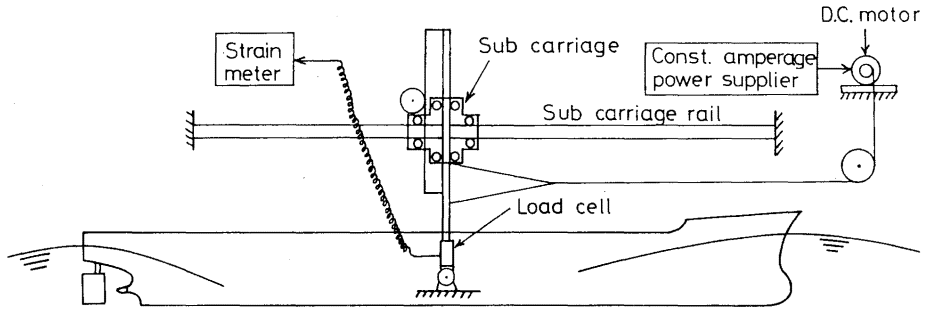


図2 実験装置概略

その他、船体運動は通常のポテンショメータ、上下加速度は加速度計、相対水位は抵抗式波高計（白金線）によって計測した。図3に、4節波中の実験記録の1例を示す。図中、WAVE-1とあるのが水槽中央で計測された入射波、WAVE-Eが模型船重心位置から約3m横で計測された入射波で、この場合には節に近かったために水面変位が小さくなっていることがわかる。ADD-Rが検力計で計測された前後力であり、他の記録とは異なって約4Hzの高周波数の波形が重なっているがこれは検力計のバネ定数による固有振動成分である。なお、この記録では平水中の抵抗分は差し引いてあるのでこの平均値が抵抗増加ということになる。これらの解析は、各チャンネルを60HzでA/D変換した後、定常に達したと思われる10周期についてフーリエ解析した。

なお、諸量の無次元化は以下によった。

$$\bar{Z} = Z/a_w, \quad \bar{\theta} = \theta/Ka_w$$

$$\bar{\xi}_r = \xi_r/a_w, \quad \bar{a}_{cc} = La_{cc}/ga_w$$

$$\bar{R}_{Aw} = R_{Aw}/\rho g (2a_w)^2 (B^2/L)$$

4.2 実験結果および考察

図4は上下揺の振幅応答の計算と実験の比較である。 $N=0$ はLong crested waveであり、計算と実験の対応は $\lambda/L \approx 1.0$ 付近のピークでやや悪くなっているが全般的には良く一致している。一方、Short crested waveでは節数が多いものほど同一の λ/L では上下揺の応答が大きくなる、すなわち横波に近づく程上下揺が大きくなる計算結果となっているが実験値も同様な結果となっている。

図5は縦揺についての同様な比較を示しているが、この場合には上下揺と反対に節数の多いものほど応答が小さくなる。すなわち、横波に近づくほど縦揺は小さくなるという当然な結果であり、計算と実

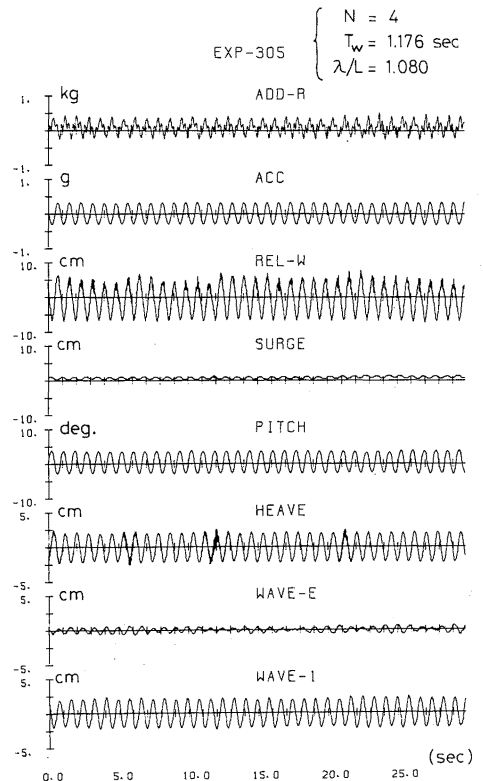


図3 4節波中の実験記録例

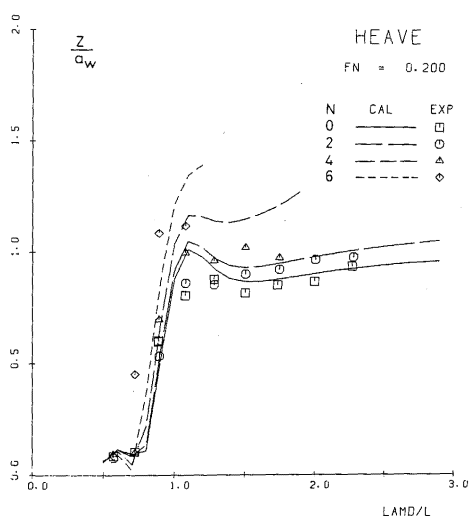


図4 上下揺振幅の計算と実験との比較

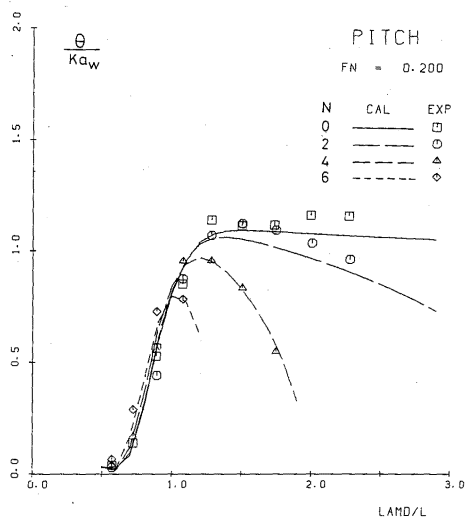


図5 縦揺振幅の計算と実験との比較

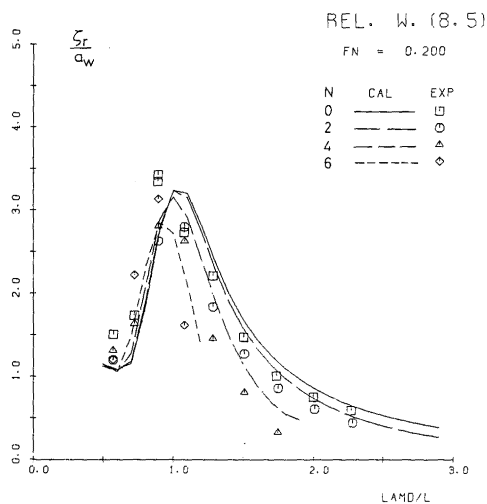


図6 S.S. 8 における相対水面変位の計算と実験との比較

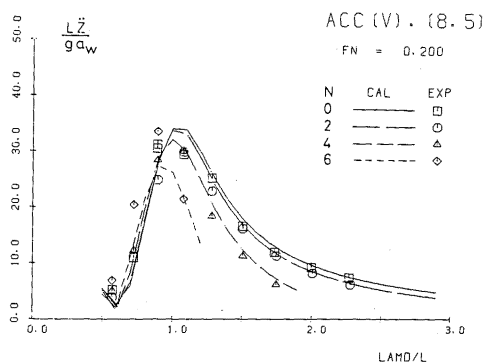


図7 S.S. 8 における上下加速度振幅の計算と実験との比較

験の一致も良好である。なお、 $\lambda/L < 1$ の短波長域では船に対する見かけの入射波が大きくなるので逆に節数の多いものほど縦揺が大きくなっている。

図6, 7は船首部 (S.S. 8½) における相対水面変位と船体上下加速度について比較したものである。これらの波長に対する変化をみると両者とも良く似た形をしており、 $\lambda/L = 1.0$ 付近にピークを有し、節数が多いものほどそのピークは短波長側に移り、値もしだいに小さくなる。両者とも計算と実験の一致は大変良好であるといえる。

以上のように摂動法でいう一次の諸量に対する O.S.M. の計算結果は実験値との対応が良く、Short

crested wave 中についても Long crested wave 中と同程度の信頼性があるといえる。

次に、抵抗増加についてはまず、縦波中での実験結果を他の実験結果と比較してみた。図8は、中村ら¹¹⁾の論文から読み取ったもの(●)を今回の実験(○)と比較したもので、 $\lambda/L \approx 0.7$ の短波長域のものを除くと良く一致していることがわかる。なお、中村らの実験は4.5mの模型船を使用しており、入射波高も $L/50$ として短波長域でも比較的大きな波高で実験しているが、今回の実験では波高と波長の比 ($2a_w/\lambda$) を $1/40$ としたため短波長域では入射波高が小さくなり多少、計測精度が悪かったとも考えられるが、今のところこの原因はわからない。

次に、同図中には Gerritsma らの公式(10)と丸尾・岩瀬の公式(14)による計算結果をそれぞれ、その第1項、第2項およびその和の形で比較して示した。これをみるとまず両者の第1項はほとんど同じ値となっていること、第2項はどちらも短波長域で負の値をとるが長波長域では正の値となること、第2項の絶対値そのものは両者とも小さいとはいいい難いことなどがわかる。

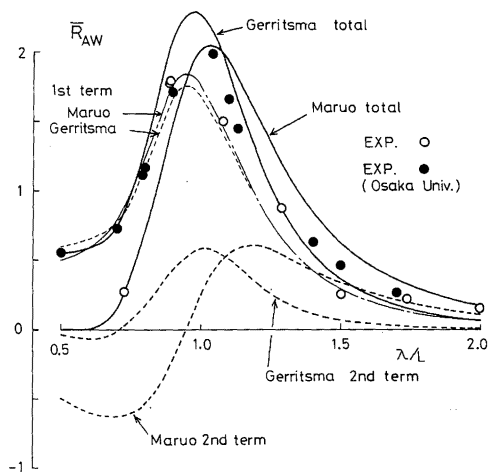


図8 縦波中の抵抗増加の計算と実験との比較

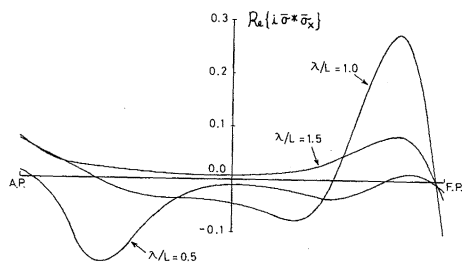


図9 丸尾・岩瀬の式における吹出し分布

丸尾・岩瀬の公式の第2項は短波長域で絶対値がほぼ第1項に等しく負の値となるのでそれらの和はほぼ0になる。図9は、その第2項の被積分関数の船長方向の分布を $\lambda/L = 0.5, 1.0, 1.5$ について比較したもので

$$\bar{\sigma}(x) = \frac{4\pi}{\sqrt{gL} \cdot a_w} \sigma(x)$$

とおいた。 $\lambda/L = 0.5$ のものは船尾付近に負のピークをもち、そのため積分が0となる。 $\lambda/L = 0.5$ と 1.0 の分布の様子がかなり違うのは $\lambda/L \approx 0.7$ 付近で上下揺の位相差が急変するなどが原因していると思われる。波長が長くなると $\lambda/L = 1.5$ の分布にみられるように単調で小さな値となるが、全長にわたって正の値をとる。

さて、図8にもどって、丸尾・岩瀬の式が短波長域でほとんど0に近い値となっているが、この理論は細長体理論に基づくものであり肥大船の場合のように船首部での反射波を考慮する必要がないとすれ

ば当然の結果であろう。また、第2項だけだとピークの位置が実験値より短波長側に寄っているが、第2項を加えると最大値となる波長が実験値と良く一致する点も正しいように思われる。

図10は、Short crested wave 中に抵抗増加について丸尾・岩瀬の式による計算と実験の比較をしたものである。計算では、節数が多いものほど抵抗増加のピークは短波長側へ移り、その値も小さくなってくる。長波長側では Long crested wave 中が最も大きく、節数が増すと抵抗増加は小さくなる。一方、実験値について詳細に調べると矛盾しているところもあるが、全般的な傾向は計算との対応が良い。

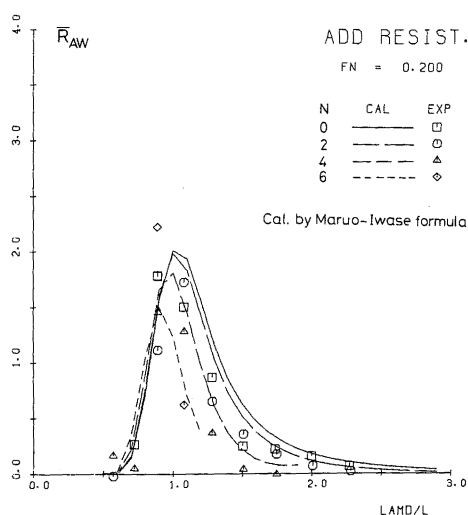


図10 抵抗増加の計算と実験との比較

5. 結 言

本研究では、Short crested wave が進行方向の異なる2つの Long crested wave の重畳であることに着目し、偶数節波中の船体運動と抵抗増加について実験を行い、理論計算と比較した。その結果、

- (1) 上下揺、縦揺、相対水位、上下加速度などについては理論と実験の一致は良好であり、今回の実験範囲である斜め前方からの波に対してによる推定値の信頼性は高い
- (2) Short crested wave 中の抵抗増加についても、今回の実験範囲で丸尾・岩瀬の公式による計算と実験の対応は良かった。なお、この実験範囲では Beukelman らの式を使っても短波長域を除けば同様の結果となる
- (3) トルク・モータと検力計を使って抵抗増加を計測する方法は、種々すぐれた点がありまた、再現性および計測精度も高いと思われるので有用である。

なお、今回の実験で未解決のまま残された短波長域での抵抗増加については、今後予定している追波状態での Short crested wave あるいは奇数節波中での実験の折りに再調査したいと考えている。

終りに、本研究で使ったトルク・モータについてお教えいただきました三菱重工(株)長崎研究所船型研究室高橋雄氏はじめ室員の方々に厚くお礼申し上げます。

なお、本研究の計算は九州大学応用力学研究所電子計算機室 FACOM M360-AP および FACOM M310-E によって行われたことを付記する。

参 考 文 献

- 1) 田崎 亮, 藤井 齊: 波浪中推進性能に関する研究の現状と展望, 波浪中推進性能と波浪荷重, (1984) p.1.
- 2) 丸尾 孟: Resistance in Waves, Researches on Seakeeping Qualities of Ships in Japan, Chap.

- 5, 造船協会60周年記念叢書, Vol. 8, (1963).
- 3) 細田龍介: 斜波中における船体抵抗増加に関する研究, 日本造船学会論文集, 第133号 (1973), p. 7.
- 4) 丸尾 孟, 岩瀬和夫: 斜波における抵抗増加の計算, 日本造船学会論文集, 第147号 (1980), p. 79.
- 5) 高橋 雄^外: 波浪中抵抗増加, 推進性能に関する実験技術, 波浪中推進性能と波浪荷重 (1984), p. 13.
- 6) 田才福造, 要 正博: Short Crested Wave 中を航走する船の縦揺と上下揺, 九州大学応用力学研究所報, 第33号 (1965).
- 7) Gerritsma, j. and Beukelman, W.: Analysis of the Resistance Increase in Waves of Seakeeping Committee, Proc. 13th ITTC, Vol. 2 (1972), p. 902.
- 8) Beukelman, W. and Buitenhok, M.: Full Scale Measurements and Predicted Seakeeping Performance of the Containership "Atlantic Crown", I. S. P., Vol. 21, No. 383 (1974), p. 69.
- 9) 大楠 丹, 小林正典: 波浪中抵抗増加の計算法, 波浪中推進性能と波浪荷重 (1984), p. 37.
- 10) Ohkusu, M and Takahashi, T.: New Directions in Experimental Method, Int. Workshop on Ship and Platform Motions, Berkeley (1983).
- 11) 中村彰一, 細田龍介, 内藤 林: コンテナ船の波浪中推進性能に関する研究 (第1報), 関西造船協会誌, 第156号 (1975), p. 31.
- 12) 高石敬史, 黒井昌明: 波浪中船体運動の実用計算法, 第2回耐航性に関するシンポジウム (1977), p. 109.

(昭和61年 5月31日 受理)