縦揺れ制止ひれによる船の動揺軽減について

正員 別 所 正 利* 正員 経 塚 雄 策*
山 内 茂* 正員 林 田 雅 行**

On the Ship Motion Reduction by Anti-Pitching Fins in Head Seas

by Masatoshi Bessho, *Member* Yusaku Kyojuka, *Member*
Shigeru Yamauchi Masayuki Hayashida, *Member*

Summary

The ideal aim of the ship motion reduction by anti-pitching fin in waves might be a heaving-less and/or pitching-less state. Equations of motion at this state give conditions to be satisfied by fin's location, area and aspect ratio. These equations mean that wave-exciting force and moment of main hull are cancelled by fin's ones.

Calculating such fin's particulars with respect to a container-cargo ship, conclusions are :

(1) heaving-less and pitching-less state may be possible by two-pairs of fairly large fin installed at appropriate location.

(2) pitching-less or heaving-less state may be obtained by one-pair of fin. The fin area is smaller, the location be nearer F.P. in general. Optimum aspect ratio of the fin, especially for anti-pitching, is very small and lies out of assumption, so that another theoretical approach might be necessary.

The experiments in head waves are carried out and confirmed theoretical conclusions. The present results are of a container-cargo ship, there might not be much difference in general tendencies but in details for the other types of ship.

記 号 表

$A_f = C_f \cdot S_f$: ひれ面積 (片側)

A. R. : アスペクト比

A_w : 船の水線面積

a : 入射波振幅

b_{fj} : j 番目のひれの支点からばねの距離

C_{fj} : j 番目のひれの弦長

C_L : 揚力係数

C_T, C_F : 全抵抗係数, 摩擦抵抗係数

$c = \omega_0 / K$: 波の位相速度

$F_n = V / \sqrt{gL}$: フルード数

g : 重力加速度

$h = h_G, h_f$: 上下揺れ振幅

I_j, I_j' : 上下揺れ速度

$K = 2\pi / \lambda = \omega_0^2 / g$: 入射波波数

k_j (kg/m), $k_j' = k_j \cdot b_{fj}$: j 番目のひれのばね定数

L : 船長または揚力

l_j, l_m, l_c : j 番目のひれの位置

l_p : 上下揺れを制止する船体位置

$l_w = |V_2 / V_1|$: 波強制力のモーメントレバー

m_j, m : j 番目のひれの付加質量

N : 2次元減衰係数

R : 抵抗増加

R_f : ひれによる抵抗増加

T_f : ひれによる推力

V : 船速

V_j : j モードの波強制力またはモーメント

v_{wj}, v_{rj} : j 番目のひれ位置における波粒子速度,
相対速度

W : 単位時間の散乱エネルギー

Z_{ij} : j モードの動揺による i モードのインピー
ダンス

z_j : j 番目のひれのインピーダンス

ω_0 : 入射波円周波数

$\omega = \omega_0 + KV$: 出合いの円周波数

ψ : 縦揺れ

$\alpha = \arg \{V_2 / V_1\}$: 波強制力のモーメントレバーの位相角

* 防衛大学校機械工学科

** 海上自衛隊員造修所

δ_j : j 番目のひれの羽ばたき角

θ_j : j 番目のひれの迎え角

1 序 論

縦揺れ制止ひれの効果については、いくつかの理論的実験的研究が報告されている。

まず、Abkowitz³⁾は、2, 3の船型について、水線面積の 3~7% の固定ひれを用いて、縦揺れを半減させうることを示し、松井ら^{4), 5)}は中型客船に 3% のひれを装備して、能動制御により最もよく効く点では、縦揺れをなくすることに成功している。

この両者の研究では、ひれの付加質量効果は無視されているが、Vugts はそれも考慮に入れて、流体力を成分ごとに測定し、ストリップ法を適用して、理論と実験の一致を確かめている⁶⁾。

また、Abkowitz, 松井らは、ひれの減揺効果をその発生揚力による減衰係数の増大に帰しているが、同じ力は入射波との相対運動からも生じるわけであるから、波強制力の変化⁵⁾も考慮する必要がある。

一般に、動揺を軽減するには、同調を避けることを除いて、減衰を増す方法と強制外力を減らす方法の 2 つあるわけであるから、この問題を波強制力を小さくするという観点からも考察できるわけである。

この際、よく知られているように、いわゆる半没水型船を用いて⁹⁾、あらゆる方向からの入射波に対し、適当な波長で、波強制力をなくする方法も考えられるが、同時に造波減衰も小さくなって具合が悪いという欠点がある。

しかし、向い波に対してのみ、波強制力をなくすることを考えると、造波減衰はなくなるないので具合が良い^{7), 8)}。

さて、このようにして動揺を減らすとして、どこまで減らせばよいのかということは、運用上の要求によるものであるから、しばらくおくとして、どこまで減らせるかと考えてみると、零以外に考えられないし、実際に概略、縦揺れがなくなることが実証されている^{4), 5), 7)}。

そこで、本報告では、この理想的状態つまり全く縦揺れも上下揺れも起こさない状態、または縦揺れのみ起こさない状態にするためのひれの面積、アスペクト比、位置などがありうるかということを考えてみることにした。これは運動方程式から容易に求められることは求められるが、ひれ面積が負になるなどの意味のない解が多いので、ばねを入れて、受動的に動くことにより自由度を増すと、解の幅も広がることがわかる。

最後に、理論計算の精度を確かめるために、コンテナ船による模型試験を行い、動揺と抵抗増加を測定した。

2 理 論

ある波長の向い波の中を速度 V で進む船の動揺を、1 組もしくは 2 組のひれによって止めることが可能かどうかをストリップ法によって計算してみよう。座標系は、Fig. 1 のようにとり、ひれは Fig. 2 のように船側でヒンジされ、ばねで支えられたものを考える。横揺れ安定装置として実用されているひれでは、迎え角を変化させているが、図のような羽ばたき式でもよいわけで、この方式では、前進速度のない場合でも力を出しうる点に魅力がある。ひれに働く力は、付加質量効果も考えて、付録 A のように仮定する。また、迎え角を変化させる場合との対応についても、そこで述べてある。

具体的な計算は、Table 1, Fig. 3 のコンテナ船型を

Fig. 1 Coordinate system

Fig. 2 Flapping fin

Fig. 3 Body plan of the ship

Table 1 Principal dimensions of ship and model

	Ship	Model
Length between perpendiculars (m)	250	3
Breadth moulded (m)	32	0.384
Draft loaded (m)	11.5	0.138
Block coefficient		0.632
Midship coefficient		0.964
Volume of displacement (m ³)	58126	0.1004
Waterplane area (m ²)	6870	0.9893
Wetted surface area (m ²)	10073	1.4505
Radius of gyration / Lpp		0.25
$\bar{G}$ / Lpp	*	-0.01824
$\bar{F}$ / Lpp	**	-0.0578

* $\bar{G}$: distance of C.G. from** $\bar{F}$: distance of center of flotation from

選んで実行したが、船型によって、結論は量的に異なってくることも考えられるし、また、船型の改良により、その他の性能を損うことなく、動揺性能を改善する可能性とともに、今後、検討してゆきたい。

2.1 運動方程式^{1),2)}

上下揺れ、縦揺れの速度振幅を I_1, I_2 とし、波強制力、モーメントを V_1, V_2 とすると、ひれのないときの船の運動方程式は、次のように書ける¹⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 &= V_1, \\ Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 &= V_2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 Z_{ij} はインピーダンスで、波強制力とモーメントとともに、普通のストリップ法で計算されるものとする。

次に、重心より前方 l_1 のところに前部ひれを装備し、その中心の上向き速度振幅を I_3 、それに働く波強制力を V_3 、重心より後方 l_2 のところに後部ひれを置き、速度振幅 I_4 、波強制力を V_4 としよう。ひれと船体は、Fig. 2 のように、ばねでつながれているので、直接に船体に加わる力は、ばねの反力だけである。ひれとひれ、またひれと船体との流体力学的相互干渉を無視すれば、運動方程式は次のように書くことができる。

$$\left. \begin{aligned} Z_{11}'I_1 + Z_{12}'I_2 + Z_{13}I_3 + Z_{14}I_4 &= V_1 \\ Z_{21}'I_1 + Z_{22}'I_2 + Z_{23}I_3 + Z_{24}I_4 &= V_2 \\ Z_{31}I_1 + Z_{32}I_2 + Z_{33}I_3 &= V_3 \\ Z_{41}I_1 + Z_{42}I_2 + Z_{44}I_4 &= V_4 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

まず

$$Z_{13} = Z_{31} = \frac{i}{\omega} k_1 \left(\frac{2b_{f1}}{S_{f1}} \right), \quad Z_{14} = Z_{41} = \frac{i}{\omega} k_2 \left(\frac{2b_{f2}}{S_{f2}} \right) \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{23} &= l_1 Z_{13}, \quad Z_{24} = -l_2 Z_{14}, \\ Z_{32} &= Z_{23} + \frac{iV}{\omega} z_1, \\ Z_{42} &= Z_{24} + \frac{iV}{\omega} z_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 z_j は (A.3) による。

$$\left. \begin{aligned} Z_{11}' &= Z_{11} - Z_{13} - Z_{14} \\ Z_{12}' &= Z_{12} - Z_{23} - Z_{24} \\ Z_{21}' &= Z_{21} - Z_{23} - Z_{24} \\ Z_{22}' &= Z_{22} - l_1 Z_{23} + l_2 Z_{24} \\ Z_{33} &= z_1 + i\omega m_1 - Z_{13} \\ Z_{44} &= z_2 + i\omega m_2 - Z_{14} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここに、 m_j はひれの質量。

$$\left. \begin{aligned} V_3 &= z_1 v_{w1}, \quad V_4 = z_2 v_{w2} \\ v_{w1} &= i\omega_0 a e^{KZ_1 - iKl_1} \\ v_{w2} &= i\omega_0 a e^{KZ_2 - iKl_2}, \quad \omega_0 = \sqrt{K/g} = \omega - KV \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

v_{wj} は、ひれ位置における波の上向き速度である。ひれの羽ばたき角を δ_j とすると、

$$\left. \begin{aligned} I_3 &= I_1 + l_1 I_2 + I_3', \quad I_3' = -\frac{S_{f1}}{2} \delta_1 \\ I_4 &= I_1 - l_2 I_2 + I_4', \quad I_4' = -\frac{S_{f2}}{2} \delta_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

なる関係があるから、(3)~(5)の関係とともに、(7)を(2)に代入すると、ひれの羽ばたき角については、

$$\left. \begin{aligned} Z_{11}''I_1 + Z_{12}''I_2 + z_1 I_3' + z_2 I_4' &= V_1 + V_3 + V_4, \\ Z_{21}''I_1 + Z_{22}''I_2 + l_1 z_1 I_3' - l_2 z_2 I_4' &= V_2 + l_1 V_3 - l_2 V_4, \\ Z_{31}''I_1 + Z_{32}''I_2 + Z_{33}I_3' &= V_3, \\ Z_{41}''I_1 + Z_{42}''I_2 + Z_{44}I_4' &= V_4 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} Z_{11}'' &= Z_{11} + z_1 + z_2, \\ Z_{12}'' &= Z_{12} + \left(l_1 + \frac{iV}{\omega} \right) z_1 - \left(l_2 - \frac{iV}{\omega} \right) z_2, \\ Z_{21}'' &= Z_{21} + l_1 z_1 - l_2 z_2, \\ Z_{22}'' &= Z_{22} + l_1 \left(l_1 + \frac{iV}{\omega} \right) z_1 + l_2 \left(l_2 - \frac{iV}{\omega} \right) z_2, \\ Z_{31}'' &= z_1, \quad Z_{41}'' = z_2, \\ Z_{32}'' &= \left(l_1 + \frac{iV}{\omega} \right) z_1, \quad Z_{42}'' = \left(-l_2 + \frac{iV}{\omega} \right) z_2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ひれ固定のときは、これらの式で $\delta_j = 0$ とおけばよい。

2.2 2組のひれ

2組のひれによって、上下揺れをともに止めることを考えよう。

運動方程式(2)または(8)を解いて、

$$I_1 = I_2 = 0 \quad (10)$$

とおけば、これから所要のひれが求められるが、逆に上式を(2)または(8)に代入しても同じ結果を得る。

まず(8)に(10)を代入して、すぐわかることは、ひれを固定すると、右辺の波強制力とモーメントが0になればよいことがわかる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} V_1 + V_3 + V_4 &= 0 \\ V_2 + l_1 V_3 - l_2 V_4 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

両式から, V_3, V_4 を求め, (6) を代入すると

$$\left. \begin{aligned} V_3 &= z_1 v_{w1} = -\frac{l_2 V_1 + V_2}{l_1 + l_2} \\ V_4 &= z_2 v_{w2} = -\frac{l_1 V_1 - V_2}{l_1 + l_2} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

いま,

$$V_2 = l_w V_1 e^{i\alpha} \quad (13)$$

$$l_1 + l_2 = 2l_m, \quad l_1 - l_2 = 2l_c \quad (14)$$

とおいて, 2式を辺々割算すると, 次式を得る。

$$\frac{z_1}{z_2} e^{2iKl_m} = \frac{l_m - l_c + l_w \cos \alpha + il_w \sin \alpha}{l_m + l_c - l_w \cos \alpha - il_w \sin \alpha} \quad (15)$$

いま, 簡単のために, 前後のひれは同じとすると, $z_1 = z_2$ であるから, 上式から

$$\left. \begin{aligned} l_c &= l_w \cos \alpha \\ \tan Kl_m &= \frac{l_w}{l_m} \sin \alpha \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

でなければならない。

この式によって, l_1, l_2 は定まる。この辺の直観的理解をたすけるために, Fig. 4 には Fig. 3 のコンテナ船の V_1, V_2 をベクトル表示し, Fig. 5 に l_w, α などを示す。Fig. 4 は, 後出の Fig. 9, 12, 13 のひれに対応していて, ひれによる強制力の変化の様相がよくわかる。なお, モーメントの位相変化は, 複雑なので拡大してある。

これらの値を代入して, (12) の例えば, 第1式から,

$$\begin{aligned} z_1 &= -\frac{(l_m + il_w \sin \alpha) V_1 e^{-KZ_1 - iK(l_m + l_c)}}{2l_m(i\omega_0 a)} \\ &= -\frac{\sqrt{l_m^2 + l_w^2}}{2i\omega_0 a l_m} V_1 e^{-KZ_1 - iKl_c} \end{aligned} \quad (17)$$

この値から, ひれの諸元は (A. 3) によって, 計算される。それゆえ, (17) の右辺の実部, 虚部はともに正でなければ, 意味のある解ではない。

しかし, 容易に想像しうるように, そのようになってるのは, 大変まれであろう。つまり, 固定ひれでは,

Fig. 4 Vector representation of wave-exciting force and moment

Fig. 5 l_w, l_1, l_2 and α

動揺を完全に止めるのは困難であると予想されるので, もう一度元に戻って, (8) 式で (10) を仮定すると,

$$\left. \begin{aligned} z_1 I_3' + z_2 I_4' &= V_1 + V_3 + V_4 \\ l_1 z_1 I_3' - l_2 z_2 I_4' &= V_2 + l_1 V_3 - l_2 V_4 \\ Z_{33} I_3' &= V_3, \quad Z_{44} I_4' = V_4 \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

を得るから, δ_1, δ_2 を消去し, (9) を代入すると,

$$\left. \begin{aligned} \frac{Z_{13}}{Z_{33}} V_3 + \frac{Z_{14}}{Z_{44}} V_4 &= V_1 \\ \frac{l_1 Z_{13}}{Z_{33}} V_3 - \frac{l_2 Z_{14}}{Z_{44}} V_4 &= V_2 \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

これを解いて, 次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} (l_1 + l_2) \frac{Z_{13}}{Z_{33}} V_3 &= l_2 V_1 + V_2 \\ (l_1 + l_2) \frac{Z_{14}}{Z_{44}} V_4 &= l_1 V_1 - V_2 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

ここで再び, 前後のひれもばねも同じとし, 辺々割算すると, (15) 式を得る。すなわち, この場合も, (16) によって, ひれの位置が定められる。

ひれの位置が定めれば, それを (20) の例えば第1式に代入して,

$$\frac{Z_{13}}{Z_{33}} z_1 = \frac{V_1 e^{-KZ_1 - iKl_c}}{2i\omega_0 a \cos Kl_m} \quad (21)$$

によって, 求まることになる。

ここで, Z_{13} は (3) 式にみるように, 純虚数で, Z_{33} は (5) によって与えられるが, ひれの質量 m_j はその付加質量に対し, 小さいとして無視すると,

$$Z_{33} \doteq z_1 - Z_{13}, \quad Z_{44} \doteq z_2 - Z_{14} \quad (22)$$

となるから, 上式を次のように書くことができる。

$$\frac{1}{Z_{13}} - \frac{1}{z_1} = \frac{2i\omega_0 a}{V_1} \cos Kl_m e^{KZ_1 + iKl_c} \quad (23)$$

アスペクト比をあらかじめ与えておくと, 右辺の実部から, $1/z_1$ の実部が与えられ, それから, ひれの大きさが決まり, 虚部から, Z_{13} が定まる。このとき, ばね定数が負となるときがあるが, これは, 上式右辺の虚部が正

	$A_F(m^2)$	$C_F(m)$	A.R.	$l_1(m)$	$l_2(m)$	$k'(Kg)$	Cal.
Without Fin							—
2P. Flapping	0.053	0.163	2.0	-1.671	5.751	19.80	---
2P. Fixed	do.	do.	do.	do.	do.	∞	---

design point : $\lambda/L = 1.0$

(a)

	$A_F(m^2)$	$C_F(m)$	A.R.	$l_1(m)$	$l_2(m)$	$k'(Kg)$	Cal.
Without Fin							—
2P. Flapping	0.063	0.177	2.0	1.249	3.024	62.35	---
2P. Fixed	do.	do.	do.	do.	do.	∞	---

design point : $\lambda/L = 1.1$

(b)

	$A_F(m^2)$	$C_F(m)$	A.R.	$l_1(m)$	$l_2(m)$	$k'(Kg)$	Cal.
Without Fin							—
2P. Fixed	0.015	0.307	0.154	-5.986	9.314	∞	---

design point : $\lambda/L = 0.95$

(c)

Fig.6 Amplitude response of heave and pitch ; $F_n=0.18$

であることを示しており、このときは、ひれは固定でよく、そのかわり、アスペクト比は、上式から ($Z_{13}=\infty$ とおいて) 定まる。右辺の実部が正のときは、ひれ面積が負となって、解としてはとれないが、(16)の解は無数個あるので、最初の根もしくは2番目の根のどちらか面積の正となる方をとればよい。

Table 2 に計算結果を示すが、Fig. 5 からわかるように、ひれの位置、特に後部ひれのそれが、速く船外にはみ出てしまい、またその面積も従来考えられていたものに比し、格段に大きい(表中の数字は 3m 模型に対する実寸)。Fig. 6 にその波浪中応答の例を示すが、図中点線は、それを固定したときの応答で、特に縦揺れは、可動とほとんど変わらないことがわかる。また、所要ひれ面積は、 $\lambda/L=0.95, 1$ で最も小さく、アスペクト比の影響は小さい。ここでは、アスペクト比の大きい方が面積は小さいが、他の波長では、アスペクト比の小さい方が面積も小さい。また、固定ひれでよい場合は、表にみるように、ひれ面積はかなり小さいけれど、一方アスペクト比が極端に小さくなり、現実的ではない。

この船の巡航速度は、フルード数 0.26 であるので、当初の計算では、その速度で行ったが、実験は都合で、0.18 となったので、再計算してみたところ、ひれの面積が少し大きくなる点以外、他の諸元はあまり変わらなかったで、図表には、後の結果のみを記してある。

2.3 1組のひれ

まず、1組のひれで縦揺れと上下揺れを同時に止められるだろうか。

いまは、後部ひれがないとして、(19)、(20)の条件は、

$$\frac{Z_{13}}{Z_{33}} V_3 = V_1 \quad (24)$$

$$l_1 V_1 = V_2 \quad (25)$$

となる。

(25) から、(13) の関係を使えば、 l_1 は実数でなければならぬゆえ、

$$\alpha=0 \text{ or } \pi \quad (26)$$

を得、Fig. 5 から、この船の場合、 $\lambda/L \doteq 0.654, 0.942$ において、 $\alpha=\pi$ となり、 $l_1=-l_w=-0.079L$ 、 $-2.53L$ となる。しかし、ひれ面積は負となり、結局、不可能であることになる。

そこで縦揺れのみを止めることを考えよう。この場合も前同様、(2)または(8)において、ひれは前部のみ

Table 2 Calculated fin particulars of two-pairs, flapping fin for model ship to stabilize heaving and pitching oscillations ; $F_n=0.18$

λ/L	Fins Position		Fin's Particular			Remarks
	$l_1(m)$	$l_2(m)$	$A_f(m^2)$	$C_f(m)$	$K'(Kg)$	
0.9	-3.097	4.653	0.113	0.336	23.39	(1)
0.95	-5.986	9.314	0.057	0.240	-6.23	(2) Fixed Fin $A_f=0.0146, AR=0.154$
1.0	-1.671	5.751	0.058	0.240	11.16	(2)
1.05	0.486	3.707	0.158	0.398	-48.48	(2) Fixed Fin $A_f=0.0452, AR=0.239$
1.1	1.249	3.024	0.068	0.261	25.35	(2)
1.2	1.805	2.643	0.124	0.351	26.27	(2)
1.4	2.236	2.643	0.268	0.518	51.85	(2)
1.6	2.539	2.835	0.397	0.630	76.44	(2)
1.8	2.823	3.076	0.510	0.714	98.08	(2)
2.0	3.106	3.339	0.616	0.785	117.43	(2)

Notes

(1) : The first root of equation (16).

(2) : The second root of the above equation.

A.R. = 1.0, $k' = k \times b_f$.

とし、 $I_2=0$ とおき、所要のひれとばね定数を求める。

条件式は、(2) から求める方が少し簡単で、(5) を考察して、ひれの下添字を略して、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} Z_{11}I_1 + Z_{13}(I_3 - I_1) &= V_1 \\ Z_{21}I_1 + Z_{23}(I_3 - I_1) &= V_2 \\ (Z_{31} + Z_{33})I_1 + Z_{33}(I_3 - I_1) &= V_3 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

第 1, 2 式から、 $Z_{23}=IZ_{13}$ であることを使って、

$$I_1 = \frac{IV_1 - V_2}{IZ_{11} - Z_{21}}, \quad I_3 - I_1 = \frac{V_2 Z_{11} - V_1 Z_{21}}{(IZ_{11} - Z_{21})Z_{13}} \quad (28)$$

これを第 3 式に代入すると、

$$\frac{1}{IZ_{11} - Z_{21}} \left[(IV_1 - V_2)(Z_{33} + Z_{13}) + \frac{Z_{33}}{Z_{13}} (V_2 Z_{11} - V_1 Z_{21}) \right] = V_3$$

(6)、(22) を使って、整理すると、

$$\frac{1}{Z_{13}} - \frac{1}{z} = \frac{v_w(IZ_{11} - Z_{21}) - (IV_1 - V_2)}{V_2 Z_{11} - V_1 Z_{21}} \quad (29)$$

を得、(23)と同型式であるから、同様にして、ひれ諸元を計算できる。この場合は、前節の場合と異なり、位置は与えられていないので、ひれの位置とアスペクト比を与えて、上式から、ひれ面積とばね定数を計算した結果をアスペクト比 1 の場合について、Table 3 に示す。一般にアスペクト比が小さい方が、面積は小さくなっている。この場合、ひれ面積は、当然のことながら船首にゆくほど小さい。また、Table 3 では、ばね定数はすべて負になっているので、前述のように、これは固定でよいことを示しており、その結果を Table 4 に示す。この表によれば、ひれ面積は船首より $0.1L$ 程度後の方が、ひれ面積は小さくなるが、アスペクト比は大変小さく、ひれというよりは、ビルジキールに近く、理論の仮定(ひれの力は 1 点に集中している)からも遠く離れてい

るので、改めて計算し直す必要があろうが、ここでは一応このままで、応答例を Fig. 7 に示す。

このように、アスペクト比の大変小さいひれは、(A.3) (A.4) からわかるように、減衰に比して、付加質量効果が大変大きいことを意味する。そして、付加質量だけ増やすのならば、その付近で、それだけ船体を膨らませてよい⁷⁾わけであるから、この計算結果は少なくとも、この船型については、船型を少し変えることで、波浪中応答を改善しうる可能性のあることを示している。

最後に、同じ要領で、重心から前方 l_p のところの上下揺れを止める問題を考えよう。

すなわち、

$$I_1 + I_p I_2 = 0 \quad (30)$$

(27) の場合と同様に、

$$\left. \begin{aligned} Z_{12}''' I_2 + Z_{13} I_3 &= V_1 \\ Z_{22}''' I_2 + Z_{23} I_3 &= V_2 \\ Z_{32}''' I_2 + Z_{33} I_3 &= V_3 \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{12}''' &= Z_{11}' l_p + Z_{12}', \quad Z_{22}''' = Z_{22}' + Z_{21}' l_p \\ Z_{32}''' &= Z_{32} + Z_{31} l_p \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

なる条件式を得るが、(27) と同型ゆえ、同様にして、ひれ諸元を計算できる。

$l_p = 0$ の場合についての結果を Table 5, 応答の例を Fig. 8 に示す。

ひれの面積は、縦揺れを止める場合より、全般に小さめでよく、位置は船首がよい。また、ひれを固定しても縦揺れの応答はあまり変わらなかったが、この場合は、

Table 4 Calculated particulars of one-pair, fixed fin for model ship to stabilize pitching oscillation ; $F_n = 0.18$

Fins Posi. (m)	Fin's Dim.	λ/L						
		1.05	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
1.1	$A_p(m^2)$					0.042	0.066	0.081
	$C_F(m)$	*	*	*	*	1.366	1.000	0.937
	A.R.					0.022	0.066	0.092
1.2	A_p				0.046	0.065	0.077	0.087
	C_F	*	*	*	1.000	0.820	0.794	0.795
	A.R.				0.046	0.096	0.122	0.138
1.3	A_p			0.040	0.062	0.072	0.081	0.090
	C_F	*	*	1.015	0.701	0.679	0.688	0.706
	A.R.			0.039	0.126	0.157	0.171	0.180
1.4	A_p		0.050	0.061	0.069	0.076	0.083	0.090
	C_F	*	0.884	0.655	0.593	0.598	0.618	0.641
	A.R.		0.064	0.143	0.197	0.213	0.218	0.219
1.5	A_p	0.077	0.075	0.072	0.074	0.078	0.084	0.089
	C_F	0.746	0.627	0.550	0.526	0.540	0.564	0.590
	A.R.	0.138	0.189	0.238	0.267	0.268	0.263	0.256

Note) * means no solution

Table 3 Calculated particulars of one-pair, flapping fin for model ship to stabilize pitching oscillation ; $F_n = 0.18$

Fins Posi. (m)	A.R.	Fin's Dim.	λ/L						
			1.05	1.1	1.2	1.4	1.6	1.8	2.0
1.1	1.0	$A_p(m^2)$					1.256	0.643	0.553
		$C_F(m)$	*	*	*	*	1.121	0.802	0.744
		$k'(kg)$					-125.7	-96.9	-94.1
1.2	1.0	A_p				0.659	0.425	0.391	0.386
		C_F	*	*	*	0.812	0.652	0.625	0.621
		k'				-90.1	-76.7	-76.1	-77.5
1.3	1.0	A_p			0.688	0.310	0.284	0.287	0.298
		C_F	*	*	0.830	0.556	0.533	0.536	0.546
		k'			-97.7	-66.9	-64.7	-65.5	-67.1
1.4	1.0	A_p		0.523	0.275	0.218	0.217	0.227	0.242
		C_F	*	0.723	0.525	0.466	0.466	0.477	0.491
		k'		-109.1	-72.9	-60.5	-58.5	-58.7	-59.7
1.5	1.0	A_p	0.378	0.261	0.195	0.171	0.176	0.188	0.202
		C_F	0.615	0.511	0.441	0.414	0.419	0.433	0.450
		k'	-145.	-101.1	-72.8	-58.5	-55.0	-54.1	-54.2

Note) * means no solution

例えば Fig. 8 (b) のように、かなり変わってくる。

このように、ひれによって、波浪中の応答振幅は大幅に変わるが、位相についても同様で、その変化の様子はベクトル表示¹⁰⁾した方が、理解に便利なので、Fig. 9 にその例を示す。これは、前述のように、前出 Fig. 4, 後出 Fig. 12, 13 に対応し、ひれによる船体応答の変化を示している。また、この図のうえで、ベクトル加算をすれば、船体上の任意の点の上下揺れ振幅と位相が求められる。

3 実 験

上述の計算結果を確認するために、Fig. 3, Table 1 のコンテナ船型の 3m 模型について、防衛庁技術研究本部第 1 研究所第 3 部の中水槽において、抵抗試験および規則波中動揺試験を行った。

まず、昭和 56 年 9 月に、2 組のひれをばねで支持したものを装備して、予備的試験を行った¹¹⁾。その結果、計算と実験はよく一致するが、計算の示すとおり、ばねの効果はあまりないことがわかり、また、ばねの動きの計測結果では、前部ひれについては、計算とよく合うが、後部ひれはよく合わないことがわかった。また、このときの模型速度は、フルード数で実船相当の 0.26 としたが、水槽が短く、実験に不便を感じたので、57 年 9 月には、Fig. 10 に示す 2 組の固定ひれを用意し、フルード数 0.18 で実験した。

前述のように、計算のうえでは、速度の影響は小さく、速度が高いと、ひれ面積が 1~2 割減少するだけで、定性的には、大きい変化はなかった。

まず、抵抗試験結果は、Fig. 11 に示すとおりで、ひれの固有抵抗が大変大きいのが目立つ。ひれによる増加抵

Table 5 Calculated particulars of one-pair, flapping fin for model ship to stabilize heaving oscillation at C.G. ; $F_n=0.18$

Fins Posi. (m)	A.R.	Fin's Dim.	λ/L				
			0.9	0.95	1.0	1.05	1.1
1.1	1.0	$A_F(m^2)$	0.023	0.028	0.038	0.053	0.082
		$C_F(m)$	0.150	0.168	0.194	0.231	0.286
		$k'(Kg)$	13.4	9.3	9.7	12.0	17.2
1.2	1.0	A_F	0.020	0.026	0.034	0.049	0.076
		C_F	0.142	0.160	0.185	0.221	0.275
		k'	9.3	7.1	7.6	9.5	13.6
1.3	1.0	A_F	0.018	0.024	0.032	0.046	0.073
		C_F	0.136	0.154	0.179	0.214	0.270
		k'	6.9	5.7	6.2	7.8	11.3
1.4	1.0	A_F	0.017	0.022	0.030	0.044	0.072
		C_F	0.132	0.149	0.174	0.211	0.269
		k'	5.5	4.7	5.2	6.7	9.8
1.5	1.0	A_F	0.017	0.021	0.029	0.044	0.074
		C_F	0.129	0.146	0.172	0.209	0.273
		k'	4.5	4.0	4.5	5.9	8.8

(Note) No solution over the range of $\lambda/L = 1.2$

	$A_F(m^2)$	$C_F(m)$	A.R.	$l(m)$	$k'(Kg)$	Cal.
Without Fin						—
1P. Fixed	0.166	0.577	0.5	1.5	∞	---

	$A_F(m^2)$	$C_F(m)$	A.R.	$l(m)$	$k'(Kg)$	Cal.
Without Fin						—
1P. Fixed	0.074	0.627	0.189	1.5	∞	---

design point : $\lambda/L = 1.1$ (a) (b)
Fig. 7 Amplitude response of heave and pitch ; $F_n=0.18$

抗をひれ面積で割った抵抗係数に直してみると、1枚ひれで約 0.012、2枚ひれで 0.019 となり、ひれ単独の場合に比し、特に2枚ひれの場合、大きすぎるように思われるので ($Re 10^6$ で $0.006^{(12)}$)、ひれが相対的に迎え角をもっていることが予想される。

この大きい固有抵抗は、実用上、最も大きい障害と考えられるので、ひれの取付け角とともに、収納機構をも

つことは必要であろう。

次に、規則波中で、上下揺れ、縦揺れと抵抗増加を測定した。その結果を Fig. 12, 13, 14, 15 に示す。Fig. 12 の2組ひれは、 $\lambda/L=1.0$ で、上下、縦揺れを止めるように計画したもので、後部ひれの位置から考えて実用的ではないが、計算の精度を確かめる目的で行った。なお、ひれ寸法などは、実験の都合で、少し理論値からず

	$A_F(m^2)$	$C_F(m)$	A.R.	$l(m)$	$k'(Kg)$	Cal.
Without Fin						---
1P. Flapping	0.014	0.085	2.0	1.5	9.420	---
1P. Fixed	do.	do.	do.	do.	∞	---

design point : $\lambda/L = 0.9$

(a)

	$A_F(m^2)$	$C_F(m)$	A.R.	$l(m)$	$k'(Kg)$	Cal.
Without Fin						---
1P. Flapping	0.056	0.333	0.5	1.5	4.534	---
1P. Fixed	do.	do.	do.	do.	∞	---

design point : $\lambda/L = 1.1$

(b)

Fig. 8 Amplitude response of heave and pitch ; $F_n=0.18$

Fig. 9 Vector representation of heave and pitch

れている。図に示すとおり、実験値との一致は良いといえよう。計算式中、ひれの揚力などの見積もりが過大になっているので、その補正の意味で、実際のひれ寸法を1割縮めた計算値を Fig. 12, 13 中、鎖線で示すが、この方がより良いようにみえる。

Fig. 13 の1組ひれは、1枚の4角なものを F.P. 船底に取付けたものであり、 $\lambda/L=1.1$ で、縦揺れを止めるように計画されており、種々の都合でびたりと0にはなっていないが、計算値と実験値との一致は良いといえよう。

Fig. 10 Arrangement of fins

Fig. 14 は、2組のひれ、Fig. 15 は、1組のひれの場合の規則波中抵抗増加曲線を示す。図中、実線は、ゲリツマの簡略化公式によるひれなしの場合の理論値である。点線は、ともにひれ付きの場合のひれを除く抵抗曲線である。というのは、ひれは一方では、推力を発生することも考えられ、また、ひれの波浪中抵抗増加が、どのように与えられるかについても、よくわからず、付録 B に考察したように推定すると、今度の場合、ほぼ同程度で打消し合っていると考えられるからである。

Fig. 11 Resistance in calm sea

	$A_F(m^2)$	$C_F(m)$	A.R.	$l_1(m)$	$l_2(m)$	$K(Kg)$	Cal.	Exp.
Without Fin							—	●
2P. Fixed	0.050	0.160	1.938	1.14	3.14	∞	---	○
2P. Fixed	0.040	0.144	do.	do.	do.	do.	---	—

Fig. 12 Experimental results of amplitude response (two-pairs)

実験値からみると、ひれによって、抵抗増加はあまりなく、 $\lambda/L \leq 1.0$ の辺で、むしろ少なくなっているようにみえ、Stefun の実験結果の傾向に一致する¹³⁾。また、ゲリツマの公式は、ひれのある場合については、考慮の余地があることを示している。

4 結 論

縦揺れ制止ひれの減揺効果の理想的な姿として、縦揺れ、上下揺れともない状態、あるいは、どちらかがない状態を想定し、そのために必要なひれの位置、面積、アスペクト比などの計算を試みた。

	$A_F(m^2)$	$C_F(m)$	A.R.	$l_1(m)$	$K(Kg)$	Cal.	Exp.
Without Fin						—	●
1P. Fixed	0.080	0.40	0.5	1.50	∞	---	○
1P. Fixed	0.065	0.36	do.	do.	do.	---	—

Fig. 13 Experimental results of amplitude response (one-pair)

Fig. 14 Resistance increase in waves (two-pairs)

計算の過程からみると、これは、ひれによって、波の強制力、モーメントを打消す方法になっている。

その結果、

(1) 縦揺れと上下揺れをともに止めるためには、一般に 2 組のひれが必要で、その位置が重要であり、計算に使用した船型 (コンテナ船) では、後部ひれが船体のはるか後方にあるという難点を生じた。

(2) 縦揺れ、または上下揺れを止めるには 1 組のひ

Fig. 15 Resistance increase in waves (one-pair)

れでよく、一般に船首付近の方が、ひれ面積は小さくてすむ。また、アスペクト比は、一般に小さいものが良い結果となっている。特に、縦揺れでは、アスペクト比の大変小さいものが良い結果を与えることになっているが、これは今回の理論の仮定の範囲外に出るので、今後の検討が必要である。なお、どちらの場合も、ひれの所要面積は、従来検討されたものに比し、数段大きい。

(3) このような計算結果を確認するために、規則波中の動揺試験を行った。実験との一致は、従来いわれているとおり、良好であった。

本報告では、具体的にコンテナ船型を取りあげて、検討してみたが、この船型は幅が広く、また浮面心がかなり後方にあるなど、一般貨物船船型とは大分異なるので、結論がどの程度一般性をもつかについては、今後の研究に待たねばなるまい。

最後に、水槽試験の実施に当って、御協力頂いた防衛庁技術研究本部第1研究所第3部、住友重機械工業株式会社研究所の諸氏に深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本造船学会：耐航性に関するシンポジウム，昭和44年7月。
- 2) 日本造船学会：第2回耐航性に関するシンポジウム，昭和52年12月。
- 3) Abkowitz, M. A.: The Effect of Anti-Pitching Fins on Ship Motion, S. N. A. M. E., 1959.
- 4) 松井政博，根角幸明，空中 勝，高木又男：可動 Anti-Pitching Fin について，造船協会論文集，第119号，昭和41年6月。
- 5) 松井政博：可動 Anti-Pitching Fin の減揺効果に関する一考察，関西造船協会誌，第123号，昭和41年12月。
- 6) Vughts, Ir. J. H.: Pitching and Heave with Fixed and Controlled Bow Fins, I. S. P., No. 153, 1967.
- 7) 別所正利，鶴田英輔：縦揺れ軽減に関する一寄与，西部造船会会報，第38号，昭和44年。
- 8) 別所正利：動揺問題における波なし分布について，造船協会論文集，第117号，昭和40年6月。
- 9) Fein, J. A., Ochi, M. D. and McCreight, K. K.: The Seakeeping Characteristics of a SWATH Ship, 13th O. N. R. Simp. Tokyo, 1980.
- 10) 田崎 亮：向波中における甲板上への海水打込について，造船協会論文集，第107号，昭和35年7月。
- 11) 林田雅行：船舶の動揺軽減法，防衛大学校研究科卒業論文，昭和57年3月。
- 12) Abott, I. H. and Von Doenhoff, A. E.: Theory of Wing Section, Dover Publications, Inc., 1959.
- 13) Stefun, G. P.: Model Experiments with Fixed Bow Anti-Pitching Fins, J. S. R., Vol. 3, No. 2, Oct. 1959.
- 14) 寺尾 裕：波に向って進む浮体（波浪推進器の可能性について），関西造船協会誌，第184号，昭和57年3月。
- 15) Isshiki, H.: A Theory of Wave Devouring Propulsion (1st Report), 日本造船学会論文集，第151号，昭和57年6月。
- 16) 別所正利：水波工学入門，日本造船学会誌，第634号，昭和57年4月。

付録 A ひれに働く力について

Fig. 2 において、ひれの受ける力は、反り角にはあまり関係しないから、簡単のために、翼幅の中心点に集中して働くものと仮定する。

ひれの上向き対水速度を v 、ひれは平板翼と仮定し、揚力 L と付加質量 m は、準定常的に次式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} L &= \frac{\rho}{2} V v S_f C_f C_L' \\ C_L' &= \frac{2\pi}{1 + \frac{1}{A.R.}}, \quad A.R. = S_f / C_f \end{aligned} \right\} \quad (A.1)$$

$$m = \frac{\pi}{4} \rho C_f^2 S_f \quad (A.2)$$

ここにアスペクト比の影響は、楕円翼のものをとり、船体の鏡像効果を加味してある。それゆえ、左右一對のひれの流力的インピーダンスは、

$$\begin{aligned} z &= \frac{2L}{v} + 2i\omega m \\ &= \frac{2\pi\rho V A_f}{\left(1 + \frac{1}{A.R.}\right)} \left[1 + \frac{i\omega C_f}{4V} \left(1 + \frac{1}{A.R.}\right) \right] \end{aligned} \quad (A.3)$$

アスペクト比が十分小さいときは、細長翼理論により、

$$z = \pi\rho V S_f^2 \left(1 + \frac{i\omega C_f}{V}\right) \quad (A.4)$$

ひれの迎え角を θ 、ひれ中心の重心より前方 l の点の上方変位を h_f とすると、船体運動も含めて、ひれの上向き対水速度 v_r は、

$$v_r = V(\theta + \phi) - i\omega h_f - v_w \quad (A.5)$$

$$h_f = h_G + l\phi + \frac{S_f}{2}\delta \quad (A.6)$$

であるから、ひれに働く力 F は、

$$F = z v_r = z \left[V\theta - i\omega \delta \frac{S_f}{2} + \phi(V - i\omega l) - i\omega h_G - v_w \right] \quad (\text{A.7})$$

ここに、 δ は羽ばたき反り角であるが、この式から、ひれに働く力を迎え角変化のみで、羽ばたき反り角のみの場合と同じにするには、

$$\theta = -\frac{S_f}{2V} \dot{\delta} \quad (\text{A.8})$$

の関係があればよいことがわかる。それゆえ、本文の議論は、上式の関係代入すれば、すべて迎え角を変化させる場合に等しくなる。

付録 B ひれによる波浪中抵抗増加と推力について

波浪中抵抗増加に関するゲリツマの簡略化公式は、

$$R = \frac{W}{(c+V)} \quad (\text{B.1})$$

$$W = \frac{1}{2} \int N |v_r|^2 dx \quad (\text{B.2})$$

ここに、 c は入射波の速度、 N 、 v_r は各断面の減衰、上向き相対速度である。 W は単位時間のエネルギー散逸である。これは、丸尾の原式の第1項に相当し、入射波が船に対してなす仕事を $(c+V)$ で割ったもので、入射波の運動量損失に基づく抵抗である。したがって、ひれの場合も、ひれの減衰を代入すればよいと考えられる。ひれの減衰は、(A.3) により (一対について) 与えられるゆえ、抵抗増加は、

$$R_f = \frac{\pi \rho V A_f |v_r|^2}{(c+V) \left(1 + \frac{1}{A.R.}\right)} \quad (\text{B.3})$$

次に、ひれが振動すると、推力が発生するはずで、その量を準定常的に推定しよう。固定ひれにおいて、ひれの位置における上下量を h 、縦揺れ角を ψ とすると、幾何学的迎え角 α_G は

$$\alpha_G = \frac{i\omega}{V} h - \psi \quad (\text{B.4})$$

揚力を楕円分布と仮定すると、有効迎え角は、

$$\alpha_e = \frac{\alpha_G}{1 + \frac{1}{A.R.}} \quad (\text{B.5})$$

揚力は左右一対で、

$$L = 2\pi \rho V^2 A_f \alpha_e \quad (\text{B.6})$$

この L の前進方向分力の時間平均が推力であるから、

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} L \alpha_e = \pi \rho V^2 A_f |\alpha_e|^2 \\ &= \frac{\pi \rho A_f}{\left(1 + \frac{1}{A.R.}\right)^2} |\omega h + iV\psi|^2 \end{aligned} \quad (\text{B.7})$$

となるが、一般にひれのところでは、 ωh は大きく、

Fig. 16 Resistance increase and thrust of fins (two-pairs)

Fig. 17 Resistance increase and thrust of fins (one-pair)

($V\psi$) は小さいゆえ、

$$T \doteq \frac{\pi \rho A_f |v_r|^2}{\left(1 + \frac{1}{A.R.}\right)^2} \quad (\text{B.8})$$

と近似できよう。

Fig. 16, 17 に (B.3), (B.8) を描いてみたが、それぞれの量は Fig. 14, 15 と比べればわかるように、船体自身のものに比して同程度の量であるが、結果的には、互いに打消し合って、特に1組ひれの場合はほとんどゼロになる。また、式からもわかるように、推力を大きくするには、アスペクト比を大きくとるべきである。2組ひれの場合は、かなり大きい推力となり、これを本体の部分に加えると、実験値が説明できる波長もあるが、全体としては首肯できない。また、上式は準定常的取扱いで、振動数による影響も考えねばならないなど、不明の点が多いので、Fig. 14, 15 の中には、これらの値を算入しないこととした。