

(昭和 40 年 5 月造船協会春季講演会において講演)

Anti-pitching Tank の効果に関する実験的研究

正員 田 坂 銳 一* 正員 元 良 誠 三**

正員 見 学 道 彦*** 正員 伊 田 力**

正員 小 柳 雅志郎**

An Experimental Study of the Effectiveness of Anti-pitching Tanks

By Eiichi Tasaka, *Member* Seizo Motora, *Member*Michihiko Kengaku, *Member* Tsutomu Ida, *Member*Masashiro Koyanagi, *Member*

Summary

The Authors have been investigating into the effectiveness of anti-pitching tanks in reducing pitching motion of ships. The idea is to put openings at the side of fore or aft-peak tanks to let sea water flow in and out at 90 degrees phase lead to the pitching and therefore will result in increase of damping for pitching motion.

Through fundamental researches, the Authors found that the larger the water plane area of the tank the more effective the tank and that shallower the position of the openings the more effective the tank. It was also found that if the openings are attached by ducts of certain length, the tank will be more efficient.

A full scale ship trial was made on a buoy tender HOKUTO of 537. 63 G. T. Fore-peak tank only was provided by under water openings. The waterplane area of the fore peak tank was 1.7% of ship's waterplane area. The tank was also provided by two air ducts which can be blocked to make the tank inactive for comparison.

Trial data at the opening of Tokyo Bay show that pitching motion was reduced by 30% to 50%. This figure almost doubles the predicted effectiveness of the tank by model experiments. Cause of this discrepancy has not yet been clarified.

1 緒 言

船の船首槽あるいは船尾槽に開孔を設けて海水をピッチングに対して 90° の位相差で流入、流出せしめてピッチングを減ずるいわゆる Anti-pitching tank は日立造船技術研究所により既に試みられ、その成果は昭和 38 年秋の関西造船協会に発表されており、ある程度の効果があることが理論および模型実験により確かめられた¹⁾。

またアメリカ海軍も理論計算を行ない約 10% の pitching 減少を得た由である²⁾。著者等は海上保安庁におけ

原稿受付 昭和 39 年 12 月 20 日

* 海上保安庁船舶技術部

** 東京大学工学部船舶工学科

*** 日本鋼管株式会社船舶部

高性能消防艇の開発に関して昭和 38 年度に科学技術庁特別研究促進調整費の交付を受け、昭和 38 年 4 月以来、模型および実験による研究を進めてきたが、今回実船試験で模型試験より予想された効果を大幅に上回る効果を認めたので、ここに発表しご批判をあおぐ次第である。タンクの効果を論ずるには、タンクが船と共に水面を上下する場合のタンクの中の水の動きの特性を知ることと、さらに、タンクが船の運動と共に波に対してどのような相対運動をするかを調べる必要があるが、後者は前出の論文 1) で詳しく取扱われているので本論文では静水中を上下するタンクの中の水の動き、特にそのピッチングに対する減衰効果と実船試験とに問題を絞ってみたい。

2 基礎的研究

実際の船型に入る前に、孔のあいたタンク内の水がタンクの上下に伴つてどのような運動をするかを理論的に取扱い、模型実験と比較して見た。

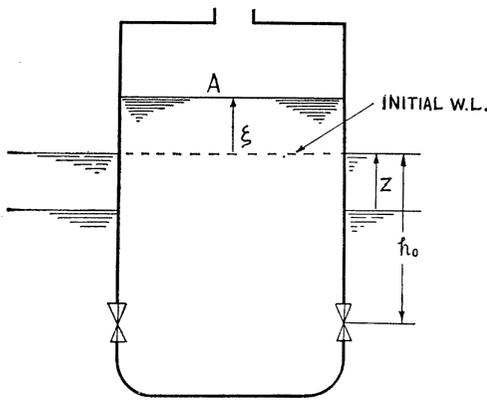


Fig. 1

一方、 $av = A\dot{\zeta}$ より $v = \frac{A}{a}\dot{\zeta}$

(3) 式を (2) 式に代入して次式を得る。

$$h_0\ddot{\zeta} \pm \frac{1}{2}\left(\frac{A}{a}\right)^2\dot{\zeta}^2 + g\zeta = -[gz + h_0\ddot{z}] \quad (4)$$

ただし、 $+\zeta > 0$ $-\dot{\zeta} < 0$

(4) 式が水の動きに対する基本の運動方程式である。 $z = \bar{z}e^{i\omega t}$ の形のときは

$$h_0\ddot{\zeta} \pm \frac{1}{2}\left(\frac{A}{a}\right)^2\dot{\zeta}^2 + g\zeta = +[h_0\omega^2 - g]\bar{z}e^{i\omega t} \quad (5)$$

の形となる。(5) 式よりわかることは

$$(1) \quad h_0\omega^2 - g = 0 \quad \text{すなわち} \quad \omega = \sqrt{\frac{g}{h_0}} \quad (6)$$

のときは、 \bar{z} の大きさいかにかかわらず tank 内の水は全然動かない。従つて $\omega_0 = \sqrt{g/h_0}$ を Zero-response frequency と名づける。 ω_0 が pitching の周波数と等しいときは明らかにタンクは効かないので ω_0 を pitching の自己周波数よりなるべく遠ざける必要がある。そのためにはなるべく h_0 を小さくし水面近くに孔をあける必要がある。しかしながら余り水面に近くすると pitching したとき、孔が水面に出てしまうので選択が難しい。

(2) tank の中の水の動きの自己周波数は

$$\omega = \sqrt{\frac{g}{h_0}} \quad (7)$$

であり、これは Zero-response frequency ω_0 と一致する。一方、水面の上下の動きの pitching (この場合は heaving) に対する位相差は自己周波数の時 90° となり damping としては最も有効となるわけであるから自己周波数が Zero-response frequency と一致することは非常に具合が悪い。従つて、このような Wall sided

2.1 Wall sided tank

Fig.1 において、Tank の水線面積 = A 孔の総面積 = a 孔の静止水面からの深さ = h_0 タンクの浮上り量 = z タンク内の水の静止水面よりの上昇 = ζ とし $z = \bar{z}e^{i\omega t}$ なる正弦運動をすると考える。

孔の位置における外圧は $\rho g(h_0 - z)$ であり

内圧は $\rho(h_0 + \zeta)(g + \ddot{z} + \dot{\zeta})$

$$= \rho gh_0 + \rho g\zeta + \rho h_0\ddot{z} + \rho h_0\dot{\zeta} + \rho\zeta(\ddot{z} + \dot{\zeta})$$

であるから、差圧 Δp は高次の微小量を省略して

$$\Delta p = -[\rho g(z + \zeta) + \rho h_0\ddot{z} + \rho h_0\dot{\zeta}] \quad (1)$$

となる。

一方、穴より流入する水の流速 v は Toricelli の定理により

$$v^2 = \frac{2|\Delta p|}{\rho} = 2|g(z + \zeta) + h_0\ddot{z} + h_0\dot{\zeta}| \quad (2)$$

$$(3)$$

tankに孔をあけた場合には tank の効果は極めて少ないことが予想される。(3) 孔の面積と tank の水面の面積の比で水の動きに対するdampingがきまる。孔が小さい程 damping が大きく水の動きは少なくなる。

(5) 式の解は $\zeta = \bar{\zeta} e^{i(\omega t + \epsilon)}$ とおき、かつ、非線型項を $\pm \left(\frac{A}{a}\right)^2 \bar{\zeta}^2 = \left(\frac{A}{a}\right)^2 \bar{\zeta}_0 \bar{\zeta} \omega$ ($\bar{\zeta}_0$ は予想される振幅) として線型化することにより

$$\left. \begin{aligned} \bar{\zeta}^2 &= \frac{(g - h_0 \omega^2)^2}{\frac{1}{2} \left(\frac{A}{a}\right)^4 \omega^4} \\ &\times \left[-1 + \sqrt{1 + \frac{\left(\frac{A}{a}\right)^4 \omega^4 \bar{z}^2}{(g - h_0 \omega^2)^2}} \right] \\ \tan \epsilon &= -\frac{\frac{1}{2} \left(\frac{A}{a}\right)^2 \bar{\zeta}_0 \omega^2}{g - h_0 \omega^2} \end{aligned} \right\} (8)$$

第8式の $\bar{\zeta}$ を周波数 base に示すと Fig.2 (a), (b) の如くなる。一例として長さ 20 cm, 幅 15 cm 孔の深さ $h_0 = 11$ cm の tank を $\bar{z} = 4$ cm で上下に動かしたときの水の動き $\bar{\zeta}$ を $A/a = 4.17$ および 6.52 につき計算してみると Fig.3 の実線のごとくなる。図中のplotは同じ寸法の tank を強制上下動させて実測した水位の変化である。実験値と理論値は ω_0 で $\bar{\zeta} = 0$ となるところは良く一致しているが、全般的に実験値の方が小さくでている。これは非線型方程式を近似的に解いた誤差と孔のときの eddy loss によるものと思われる。(5)式において、左辺第2項の係数を2倍にすると(すなわち A/a を $\sqrt{2}$ 倍すると) Fig.3 の破線のようになり理論と実験は良く一致する。これは孔の面積 a がみかけ上 $1/\sqrt{2}$ になつたということである。

水の動きの上下動に対する位相 ϵ は Fig.4 のごとくなり自己周波数 ω_0 で 90° となる。

tankの水による上下方向の力の振幅 \bar{F} は

$$F = \bar{F} e^{i(\omega t + \epsilon_F)} = \rho A (g - h_0 \omega^2) \bar{\zeta} e^{i(\omega t + \epsilon)} \quad (9)$$

であるから前述の tank につき、 $A/a = 4, 6, 8$ の場合のheavingに対するdamping $\bar{F} \sin \epsilon_F$ を計算してみると、Fig.5 のごと

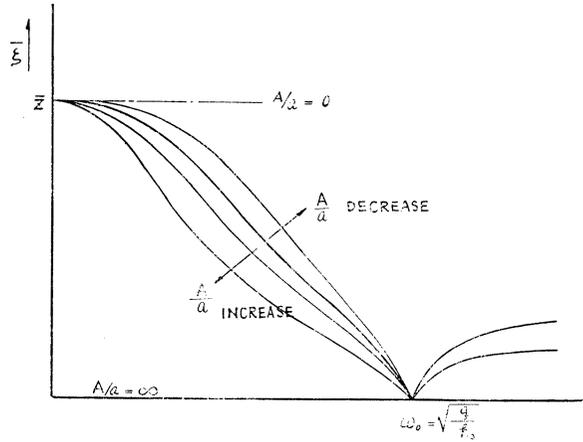


Fig. 2 (a) Effect of A/a

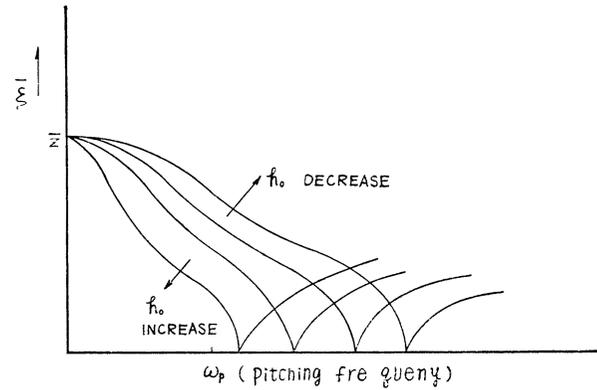


Fig. 2 (b) Effect of h_0

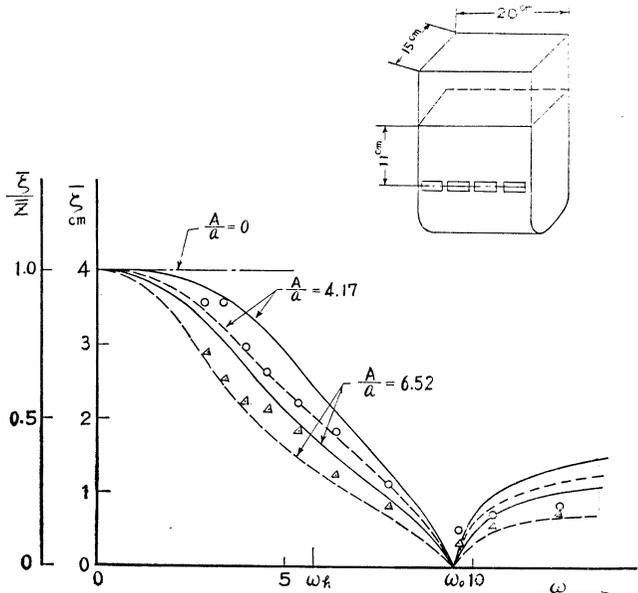


Fig. 3 Movement of tank water

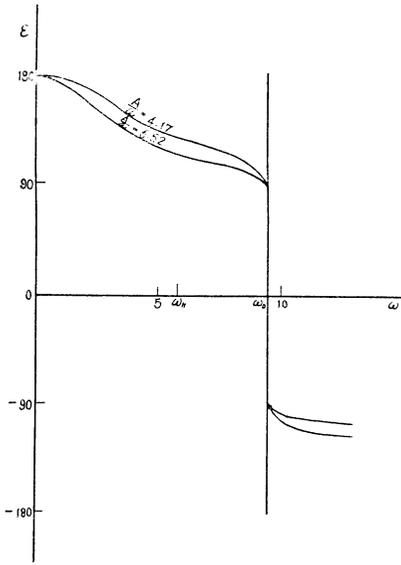


Fig. 4 Phase lead

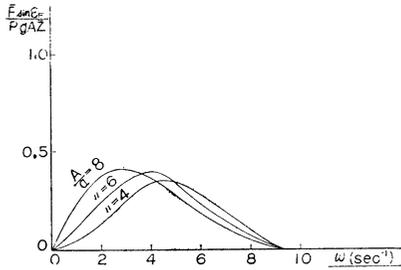


Fig. 5

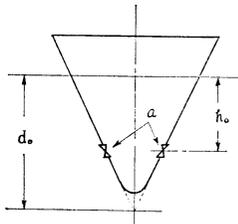


Fig. 6 Tank with flared walls

$$\int_0^{h_0'} \left(\frac{A}{A_l} \right) dl \ddot{\zeta} + \frac{1}{2} \left(\frac{A}{a} \right)^2 \dot{\zeta}^2 + g\zeta = (h_0\omega^2 - g) \bar{z} e^{i\omega t} \quad (11)$$

(5) 式の h_0 の代りに $h_0' = \int_0^l \left(\frac{A}{A_l} \right) dl$ が入った形となる。 $\int_0^l \left(\frac{A}{A_l} \right) dl$ は Hydraulic length とよばれるもので、断面 A_l が小さければ小さい程、また水の流れる長さ l が長い程大きくなるから、 h_0' を任意に選ぶことも可能である。従つて tank の水の上下動の自己周波数を ω_0 より遠く離すことができ、かつ、船の pitching の自己周波数に等しくすることができるので tank の有効度はずっと大きくなるはずである。この場合の水の動きの振幅は

$$\bar{z}^2 = -\frac{(g - h_0'\omega^2)^2}{\frac{1}{2} \left(\frac{A}{a} \right)^4 \omega^4} \left[-1 + \sqrt{1 + \left(\frac{A}{a} \right)^4 \omega^4 \frac{(h_0\omega^2 - g)^2}{(h_0'\omega^2 - g)^4}} \right] \bar{z}^2 \quad (12)$$

とくなる。これより見て、wall sided tank では damping に有効な tank の水の上下動の量は tank の位置での heaving 量の 5 割に満たないことが判る。

2.2 Flare を有する場合 (Fig. 6 参照)

Wall sided tank の時と違ってタンク内の水の加速度が断面積によつて変化するので (5) 式の第 1 項が変化して

$$d_0 \ln \frac{d_0}{d_0 - h_0} \ddot{\zeta} + \frac{1}{2} \left(\frac{A}{a} \right)^2 \dot{\zeta}^2 + g\zeta = (h_0\omega^2 - g) \bar{z} e^{i\omega t} \quad (10)$$

の形になる。すなわち h_0' が $h_0' = d_0 \ln \frac{d_0}{d_0 - h_0}$ の形となり、 d_0 が小さい程 h_0' は h_0 に比べて大きくなる。このことは tank の水の上下動の自己周波数 $\omega_0' = \sqrt{\frac{g}{h_0'}}$ が Wall sided tank の場合に比べて小さくなっていくことを意味する。一方、zero-response frequency $\omega_0 = \sqrt{\frac{g}{h_0}}$ は不変であるから、flare が大きい程、 ω_0 と ω_0' が離れるわけで、tank の効きは良くなるわけである。

2.3 flare および duct を有する場合 (Fig. 7 参照)

孔の内部に duct をつけタンク内の断面形を水の流れに沿つて測つた長さを l その場所での面積を A_l とすると

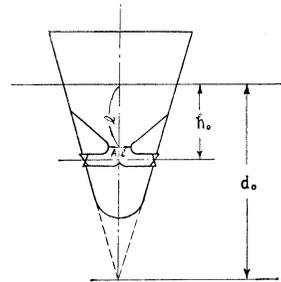


Fig. 7 Tank with ducted holes

となる。一例として ω_0' を ω_0 の 1/2 に選んだ場合の $\bar{\zeta}$, \bar{F} , ϵ_F および damping の有効成分 $\bar{F} \sin \epsilon_F$ を $A/a=6$ の場合について計算したものを Fig. 8 (a)~(d) に示してある。damping の有効成分は Fig. 5 の場合に比較してかなり大きくなっていることがわかる。 ω_0' を ω_0 よりもつと離せば有効度はもつと大きくなるであろう。

3 効果の推定

前節の結果を用いて tank の水の動きが船の縦揺れに対する減衰をどれだけ増すかについて概算を行なつて見る。船自体の damping moment $M_s = N_p \phi = N_p \phi \omega$

ただし ϕ は pitching angle

$$N_p = N_p' \frac{WL^2}{\sqrt{gL}} \text{ で } C_b = 0.6 \sim 0.7 \text{ } L/B = 7 \text{ で } N_p' \approx 0.1 \text{ また } \omega_p \approx 3 \sqrt{\frac{g}{L}}$$

したがつて、 $M_s \approx 0.3 WL \phi$ の程度である。

一方、tank の damping moment は前節の pitching と 90° の位相差を持つ damping として有効な上下力の成分を Fig. 8 (d) より見て、最大

$$\bar{F}_T \sin \epsilon = 0.7 \rho g A \bar{z}$$

とすると

$$\text{damping moment } M_T = 0.7 \rho g A l^2 \bar{\phi}$$

ただし、 l は船の重心より tank の水面の中心までの距離である。

$A = c A_w$ とおき、 $l = 0.45 L$, $L/d = 15$, $C_{vp} = 0.7$ に取ると

$$M_T = 3.03 c WL \bar{\phi}$$

$$c \quad \frac{M_T}{M_s} \quad \text{damping の増加率}$$

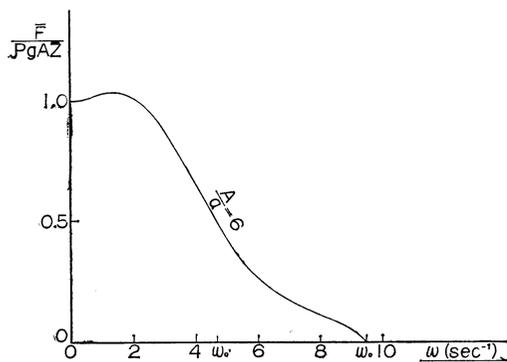


Fig. 8 (a)

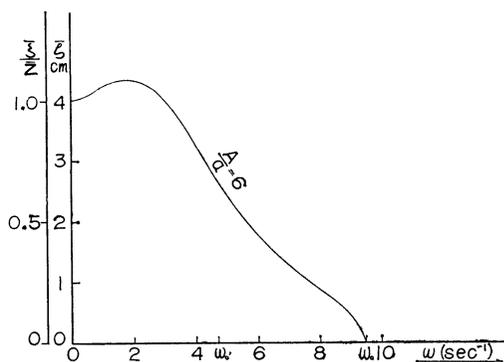


Fig. 8 (b)

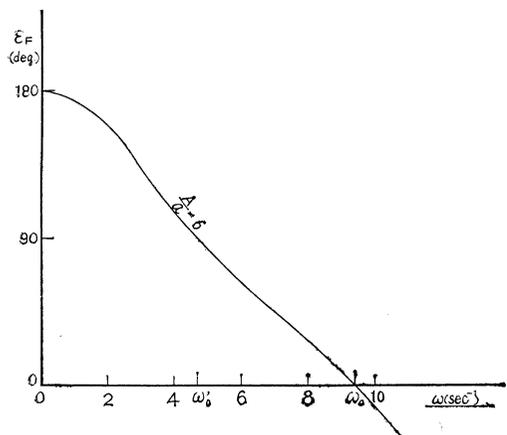


Fig. 8 (c)

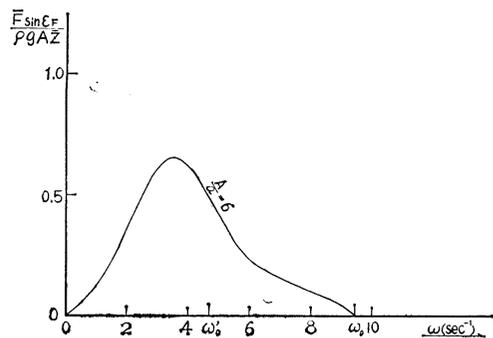


Fig. 8 (d)

$\frac{1}{100}$	0.101	10%
$\frac{5}{100}$	0.505	50%

したがって、tank の水面の面積が船の水線面積の 1% に対し damping moment の増加約 10% の割となるわけである。

4 模型実験

模型実験は実船試験供試船である海上保安庁水路部設標船北斗および双胴消防艇の試設計について行なわれた。おのおの実船および模型の寸法は Table 1 (a), (b) に、タンク部の側面図は Fig. 9(a), (b) に示してある。模型は pitching および heaving のみ自由として曳行車に固着して曳航し、pitching の角度をポテンシヨメーターで測つた。Fig. 10 に北斗, Fig. 11 に消防艇の実験結果を示す。北斗のタンクの水線面積は船の水線面積の 1.7% であるから、3の概算によればdamping の増加は約 17% となり、pitching の減少率は約 15% となるはずである。Fig.10を見ると波長の小さい場合を除けば $\lambda/L=1.25$ で最大 15% 程度の減少が見られ、ほぼ計算値と一致する。波長の小さい場合には最高 30% 近く減少の少率が見られるが、pitching の角度そのものが小さいので誤差の割合も大きくあまり信用できない。

Table 1 a)

ほくと

	実船	模型
L_{pp}	43.200 ^M	2.000 ^M
B	10.250 ^M	0.475 ^M
D	4.650 ^M	0.215 ^M
d_f	2.500 ^M	0.116 ^M
d_a	3.650 ^M	0.169 ^M
A/A_w	1.7%	1.7%
A/a	6.10	6.52
ho	0.700 ^M	0.032 ^M
エアダクト	350φ x 2	28φ x

Table 1 b)

消防艇 (双胴)

	実船(計画)	模型
L_{pp}	22.000	2.000
B	3.000 (各舷)	0.273
D	3.400	0.309
d	1.800	0.164
A/A_w	5.0%	5.0%
A/a	8.0	8.0
ho	0.770	0.070
エアダクト		30φ x 1

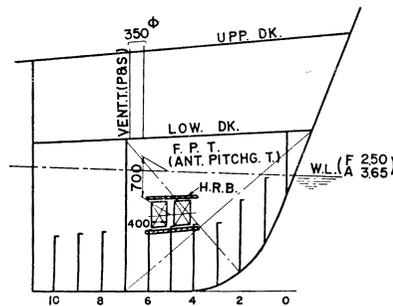


Fig. 9 (a) Hokuto

5 実船試験

実船試験は前記模型試験に用いられた海上保安庁の設標船北斗について 11 月 5 日、20 日および 24 日の 3 日にわたつて行なわれた。北斗は試験に先立ち 11 月 1, 2 日、日本鋼管浅野ドックに入渠して開口部およびタンク部の甲板上にエアダクトを設ける工事がなされた。Fig. 12 (a), (b) はそれぞれタンクの水面下開口と甲板上的エアダクトを示す。エアダクトはタンクの効果を比較するため、バルブにより開閉されるようになっている。pitching 角はスベリー式動揺計および振り式動揺計で計測され、船首部の上下加速度、エアダクトの空気の入出速度も測定された。

5.1 第一次試験

第一次試験は昭和 39 年 11 月 5 日東京湾口で行なわれた。当日は静穏で余り実験向きの天候ではなく、波長も短かすぎてピッチングは全般的に少なかった。当日の海象は Table 2 のごとくである。Fig. 13 にピッチングの記録例を船速 6.0kt の場合について示してある。また、ピッチングの振幅をタンク作動時と停止時について示すと Fig. 14 (a), (b), (c), (d) のようになる。船速 4.1 ノットの場合は減少率は実に 50% におよび、その他の場合でも 25% から 30% の減少が認められた。船速 4.1 ノット (Fig. 14 (c)) では乗っていて明らかに差を感じ、また、船首の波の砕け方に明らかな違いが認められた。また、(b) の場合も全員が差を感じ、その他の場合は船首にいた人がクッションがやわらかくなったような感じをもつた程度である。全般的に模型実験から予想されたより大幅に効果が認められた。なお、出会周期を取つてみると、すべてタンク作動時の方がタンク

を作動させない時に比べて短かくでているのは非常に興味深い。これだけの結果から断定を下すのははなはだ危険であるが、タンクが作動している間はピッチングが少ないため、船速が増したと考えられないこともない。

Fig 9 (b)
CATAMARAN (MODEL)

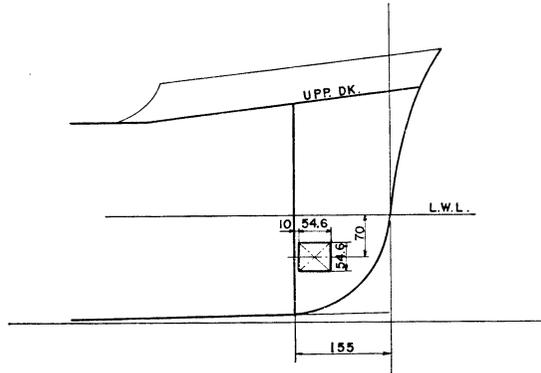


Fig. 9 (b) Catamaran (model)

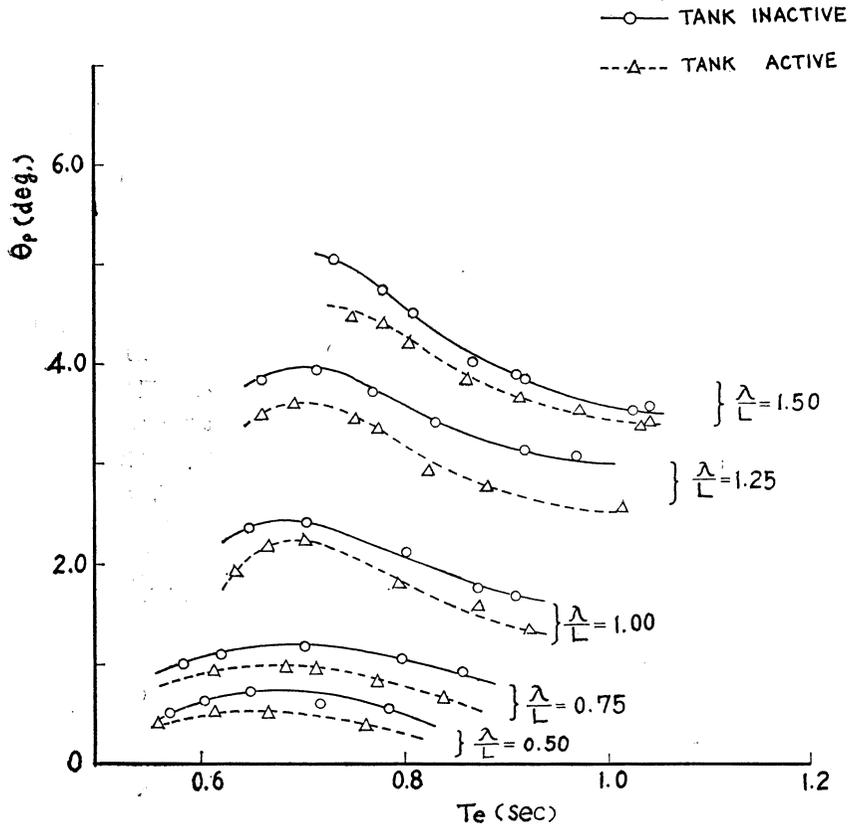


Fig. 10 Bouy tender "hokuto"

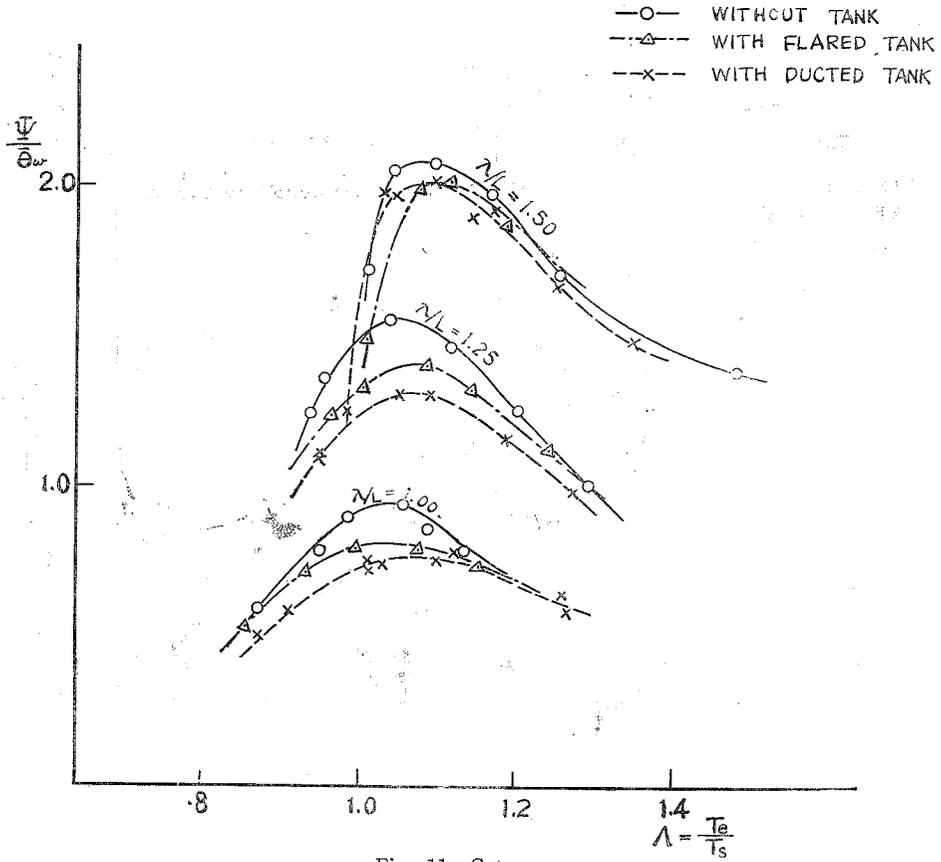


Fig. 11 Catamaran



Fig. 12 (a)

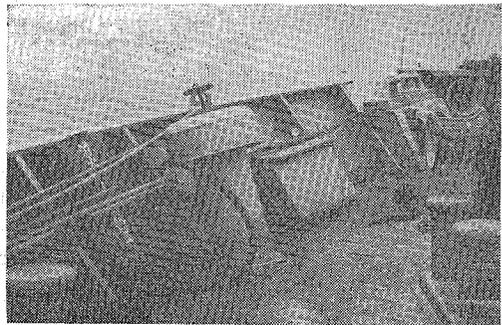


Fig. 12 (b)

Table 2

才1次試験時の海象
 波長 20 ~ 25m
 波高 0.8 ~ 1.2m
 風速 6^m/sec
 風向 210°

試験は向波で船速を 7.5 kt (124rpm)
 6.0 kt (90rpm)
 4.1 kt (60rpm)
 0 kt (最慢速)
 の4種変えて行った。

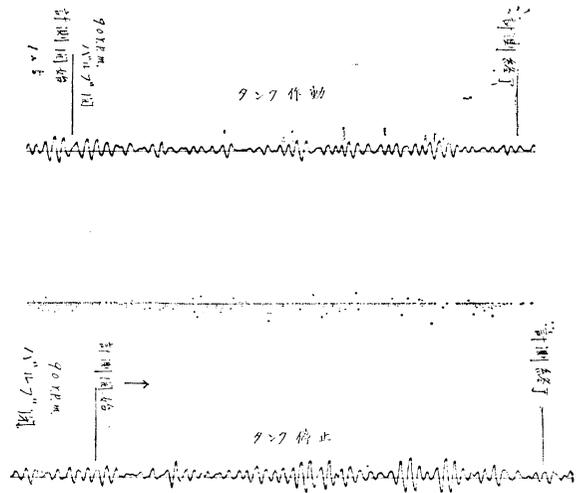


Fig. 13

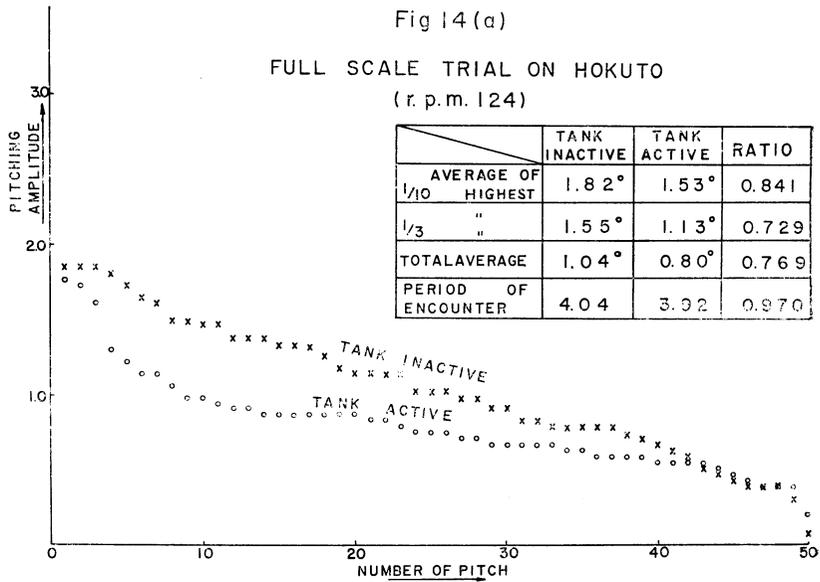


Fig. 14 (a) Full scale trial on Hokuto (r. p. m. 124)

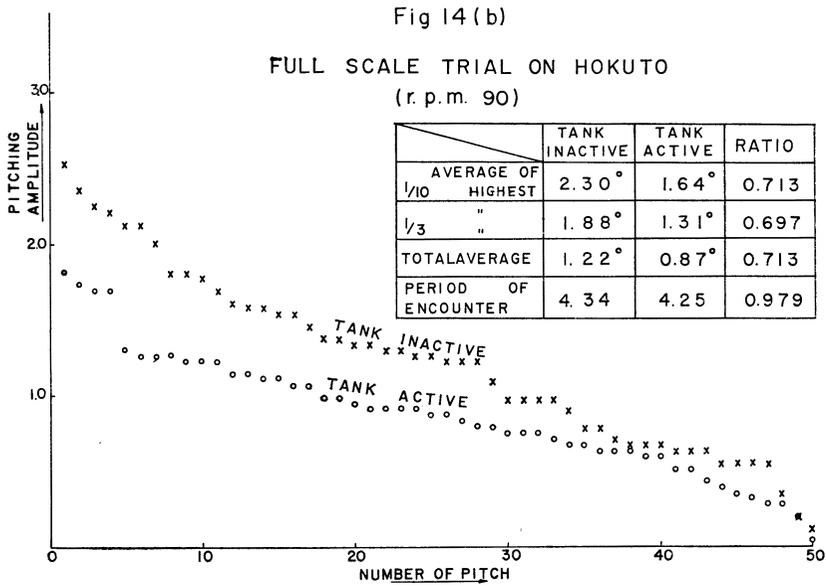


Fig. 14 (b) Full scale trial on Hokuto (r.p.m.90)

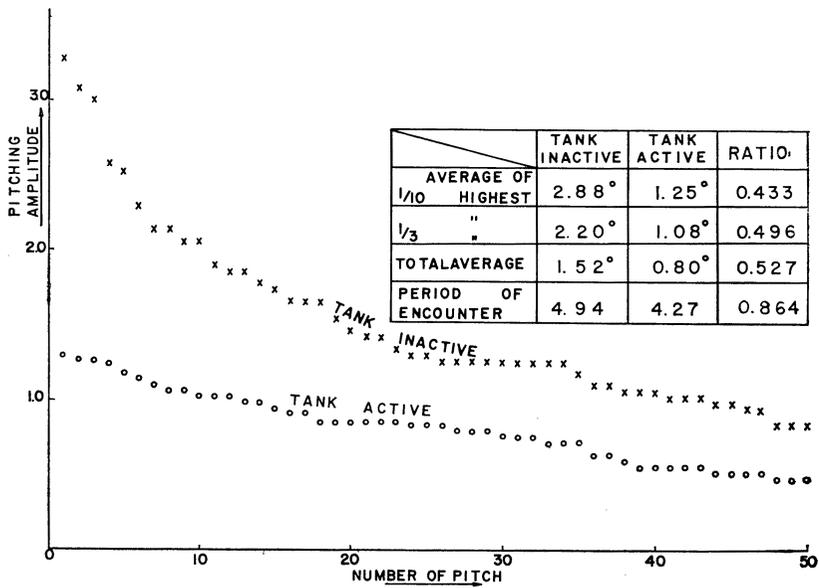


Fig. 14 (c) Full scale trial on Hokuto (r.p.m.60)

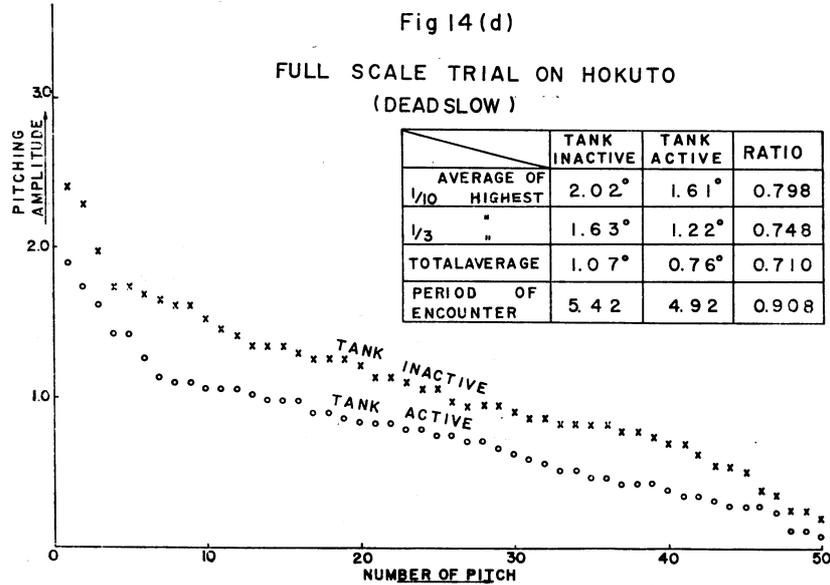


Fig. 14 (d) Full scale trial on Hokuto (Dead slow)

Tadle 3

第3次試験時の海象
 波長 50~70m
 波高 2.5~3m
 風速 8m/sec
 風向 240°

試験は向波で船速を 7.5^{kt} (122vpm)
 4.1^{kt} (60vpm)
 の2種変えて行った。

この点はさらに検討を要する。

5.2 第二次試験

第一次試験では予想外にタンクの効果があつたが、当時の波が非常に小さかつたので、あるいはそのために効いたかもしれないという懸念もあつたので 11月20日に第二次試験を行なつた。しかし当日は全く平穏でデータが得られなかつた。

5.3 第三次試験

北斗は設標作業の都合上、11月末にタンクを撤去する約束であつたので最後の機会として11月24日、本船が下田ドックに撤去工事のため回航するのときを利用して第三次試験を行なつた。当日はかなりの荒天に遭遇し、十分大角度のピッチングにおけるデータが得られた。当日の海象は第3表の通りである。試験は船速 7.5ノットおよび 4.1ノットの状態について

向い波で行なわれた。記録例を Fig. 15 に、振幅の比較を第 16 図 (a), (b) に示す。減少率はやはりに 20%~30% に達しており、模型試験の予想を大幅に上回っている。

結 論

- (1) タンクの開口位置は *o*-response frequency をなるべくピッチングの自己周波数と離すためになるべく浅い所につけなければならない。しかし余り浅いとピッチングにより水面上に完全に露出するので注意を要する。
- (2) タンク内壁はフレアーを持たせるか、または開口にダクトを付してタンクの水の上下の自己周波数を *o*-response frequency からなるべく離すようにする方がよい。
- (3) 開口の面積はタンクの水の動きに対する減衰に関係があり、開口が小さいと減衰が大きくなる。
- (4) タンクによるピッチングの減衰の増加百分率は大体タンクの水線面積の船の水線面積に対する百分率の約 10 倍である。
- (5) 模型試験では大体上記の割合の減衰の増加に伴うピッチングの減少が認められた。
- (6) 実船による試験では模型船で予想された減少率の 2 倍以上の効果が認められた。その原因は今のところ不明である。

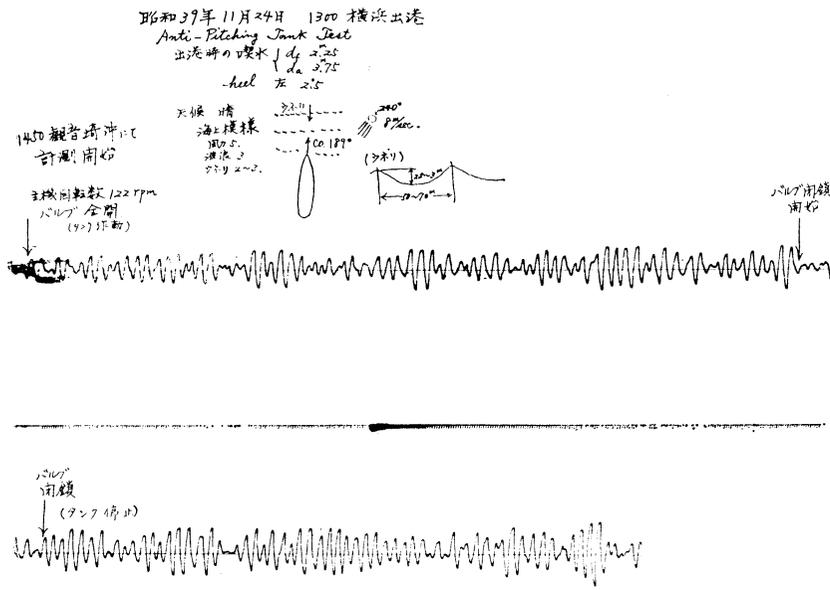


Fig. 15

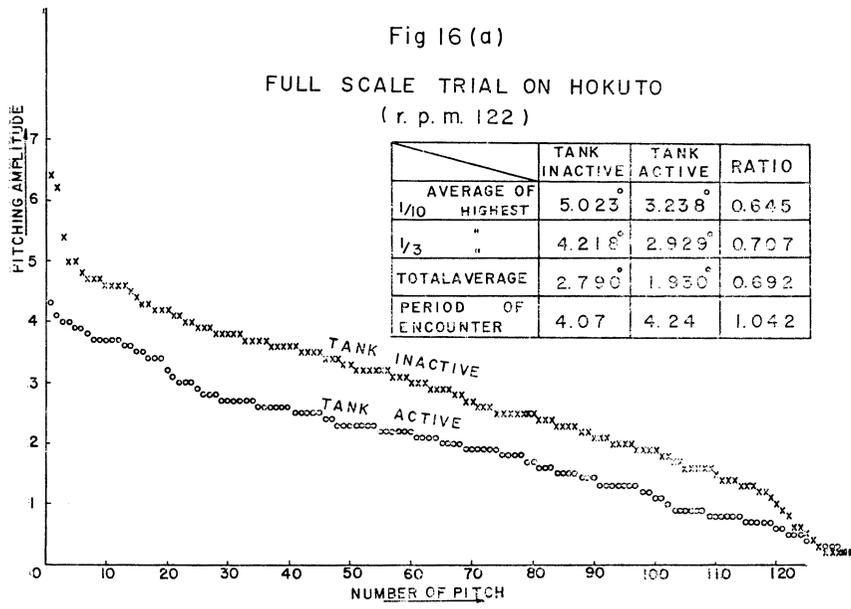


Fig. 16 (a) Full scale trial on Hōkuto (r. p. m. 122)

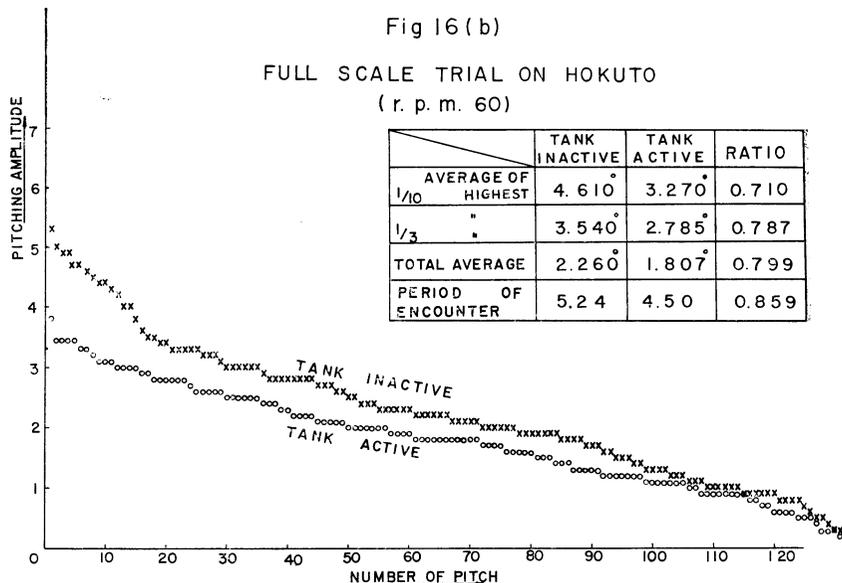


Fig. 16 (b) Full scale trial on Hokuto (r. p. m. 60)

結 言

本試験研究に関し終始ご理解とご鞭撻を戴いた芥川前科学技術庁研究調整局長（現運輸省船舶局長）にこの機会を借りて厚くお礼申し上げますと共に本研究の遂行に協力を惜しまれなかつた海上保安庁船舶技術部徳永補佐官以下関係各位および日本鋼管浅野ドック関係各位に対し感謝の意を表わしたい。また、理論計算は東大大学院山川順雄氏に負うところが多かつたことを付記し感謝の意を表す。

参 考 文 献

- 1) Anti-pitching Tank の理論的ならびに実験的研究, 根角幸明, 松井政博著, 関西造船協会, 昭和 38 年
- 2) "5th Symposium Naval Hydrodynamics" における A. J. Giddings の討論 1964, 9月 Bergen.