

アンチローリングタンクの減揺効果に及ぼす 左右揺れの影響

正員 池 田 良 穂*
学生員 原 田 真 帆*

Effects of sway motion on roll reduction performance of an Anti-Rolling Tank

by Yoshiho Ikeda, *Member* and Maho Harada, *Student Member*

Summary

Effects of sway motion on roll reduction performance of a U-tube-type anti-rolling tank are experimentally investigated. Forced rolling and swaying tests of an anti-rolling tank model show that the water in the tank violently moves in different frequencies in roll and sway modes, respectively. A forced motion test in roll and sway coupling mode of the anti-rolling tank model demonstrates that sway motion significantly affects on its roll reduction performance. In larger frequency region, sway motion reduces the roll damping generated by an anti-rolling tank, and in smaller frequency region, sway motion increases it.

1. 緒 言

波浪中における船舶の横揺れを軽減する装置として、U字管内の水の同調現象を利用したアンチローリングタンク(以下 ART と記す)が広く用いられていたが、揚力を利用したフィンスタビライザーに比べて性能的に劣る面があることから、カーフェリーや官庁船を除くとあまり使われなくなっていた。しかし、最近の痩せ型の高速船において、追波中等での横揺れが問題となり、抵抗増加を伴うフィンスタビライザーに代わって、再び ART を見直す気運が高まっている。

本研究では、これまで検討されていなかった、U字管式 ART の減揺効果に及ぼす左右揺れの影響を実験的に調査した。筆者の一人は、広い自由表面を持つフリューム式 ART について、左右揺れが横揺れ減衰効果に及ぼす影響を調べて、その影響が大きいことを確かめている¹⁾。本研究においても、ほぼ同じ実験手法を用いている。

U字管式 ART 模型を製作し、強制的に、横揺れまたは左右揺れの単独運動、及び両揺れの連成運動をさせ、ART 内の水の運動を調べた結果、左右揺れから非常に大

きな影響を受けることが明らかになった。さらに同 ART 模型を模型船に搭載して、大阪府立大学水槽において規則波中の船体運動実験を実施して、ART の横揺れ減揺効果に及ぼす左右揺れの影響について調べた。

2. ART の強制動揺試験

2.1 ART 模型

実験に用いた ART 模型の概略図を Fig.1 に、寸法を Table 1 に示す。同 ART 模型の両ウィングタンクは、垂直壁により ART_M(幅 34mm)と ART_S(幅 13mm)の2つの区画に分割されており、両ウィングタンクを接続しているエアパイプのバルブを開閉することによって、ART の固有周期を異なる3種類(T_{0ARTL}:全ウィングタンクを使用, T_{0ARTM}:外側ウィングタンクを使用, T_{0ARTS}:内側ウィングタンクを使用)に変化させることができる。このとき、それぞれの固有周期を(1)式^{2) 4) 5)}を用いて推定すると、T_{0ARTL}=1.17sec, T_{0ARTM}=1.0sec, T_{0ARTS}=0.7sec となる。

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{WW_r + 2h_w h_d}{2gh_d}} \quad (1)$$

* 大阪府立大学大学院

原稿受理 平成17年3月28日

Table 1 Dimensions of ART model shown in Fig. 1

Weight of water in ART		0.66 kgf	
W	0.206 m	h_d	0.017 m
W_r	0.05 m	h_w	0.0265 m
W_s	0.058 m	h_{max}	0.08 m

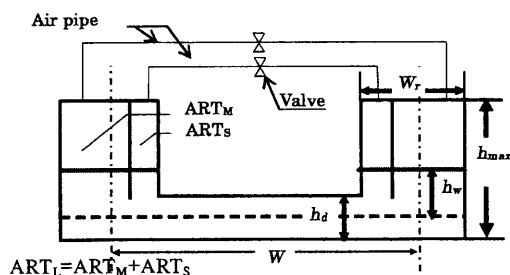
(* W_B : longitudinal length of ART)

Fig.1 ART model used in the experiments.

2.2 横揺れ強制動揺試験

ART 模型を強制的に横揺れさせ、その時の ART 内の水の運動をビデオで撮影し、その画像から左右ウィングタンク内の水位差 h_r と、タンク内の水の運動と横揺れとの位相差 ε_1 を求めた。その結果を Fig.3 及び Fig.4 に示す。

Fig.3 に示す水位差 h_r は、ウィングタンクの高さ h_{max} で無次元化し、横揺れとタンク内の水の運動は Fig.2 に示す座標系の元、それぞれ以下のように定義した。

$$\phi = \phi_a \cos \omega t \quad (2)$$

$$h_r = h_{ra} \cos(\omega t - \varepsilon_1) \quad (3)$$

Fig.3 より、両ウィングタンクの水水位差は、その最大値が、計算された同調点($\omega/\omega_0=1$, ω_0 : (1)式より計算された ART の固有円周波数) 付近に存在しており、この同調点を境に周波数の増加に従って急速に減少していくことがわかる。Fig.4 に示す位相差は、ARTs を除くと $\omega/\omega_0=1$ より若干低い周波数で 90° となっており、粘性減衰等によって実際の同調点が、前述の計算値よりも低周波数側にずれていることがわかる。

Fig.3 及び Fig.4 の実験値を用いると、横揺れ減衰係数 B_{44} (=横揺れ減衰モーメント/($d\phi/dt$))は次式で求められる。

$$B_{44} = \rho g S_w \frac{W}{2} h_{ra} \sin \varepsilon_1 / (\phi_a \cdot \omega) \quad (4)$$

ただし、 S_w はウィングタンク内の水面面積を表す。

上式による横揺れ減衰係数の計算結果を Fig.5 に示す。この図より、(1)式によって計算された ART の同調周波数より若干低周波数側において大きい横揺れ減衰力を得られることがわかる。ただし、(4)式の計算では両ウィングタンク内の水の重さの差に基づく静的モーメント

だけが考慮されているので、計算された B_{44} は、ART による横揺れ減衰力の一部である点に注意が必要である。

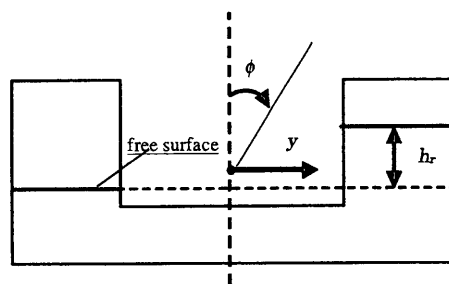
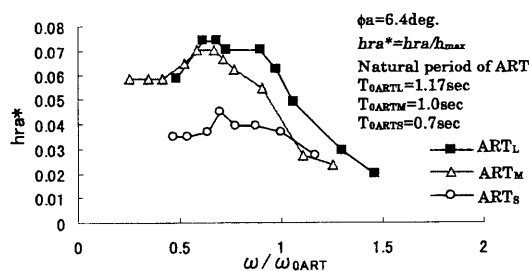
Fig.2 Coordinate system and definition of water level difference h_r .

Fig.3 Amplitude of the water level difference between right and left wing-tanks of ART in forced roll test.

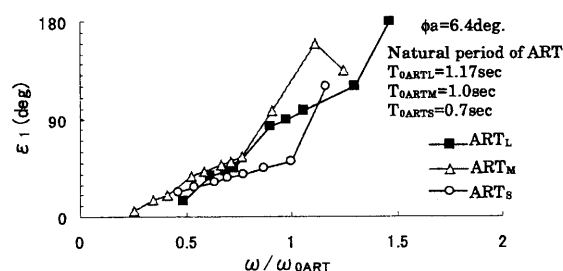


Fig.4 Phase difference between roll motion and motion of the water level difference between right and left wing-tanks of ART in forced roll test.

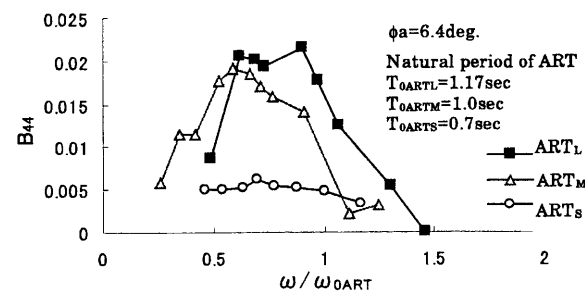


Fig.5 Roll damping coefficient obtained by water level difference between right and left wing-tanks of ART in forced roll test.

2.3 左右揺れ強制動揺試験

ART 模型を強制的に左右揺れさせ、横揺れ強制動揺試験と同様に、ビデオ画像からタンク内の水位差 h_s と、タンク内の水の運動と横揺れとの位相差 ε_2 を求めた。その結果を Fig.6, Fig.7 に示す。この時、左右揺れおよびタンク内の水の運動は、それぞれ以下のように定義した。

$$y = y_a \cos \omega t \quad (5)$$

$$h_s = h_{sa} \cos(\omega t - \varepsilon_2) \quad (6)$$

左右揺れ振幅は 30mm とした。これは実船換算すると、波高 1.8m の横波中における左右揺れに対応する。

Fig.6 に示すウィングタンク内の水位差は、(1)式による ART の固有周波数よりも低周波数領域において最大値を示していることがわかる。また、この時のビデオ画像から、左右揺れによりタンク内の水が激しく運動していることがわかった。

Fig.7 に示す位相差の結果から、ART 内の水が大きく運動する時には、運動との位相差がほぼ 90deg 近くになっていることが判り、この時、一種の同調現象が起っていることが推察される。

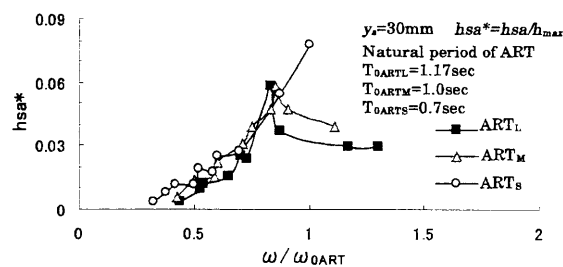


Fig.6 Amplitude of the water level difference between right and left wing-tanks of ART in forced sway test

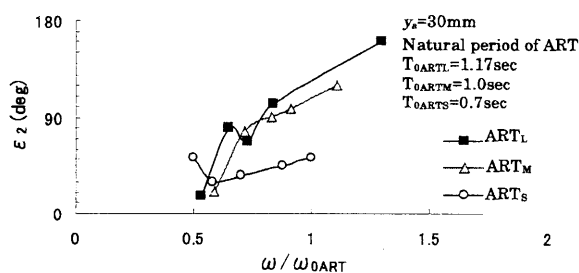


Fig.7 Phase difference between sway motion and motion of the water level difference between right and left wing-tanks of ART in forced sway test.

2.4 横揺れ・左右揺れ連成強制動揺試験

ART の横揺れ減揺効果に対する左右揺れの影響を明らかにするために、ART 模型の横揺れ・左右揺れの連成強制動揺試験を行い、ART 内の水の運動を計測し、その結果から横揺れ減衰力を求めた。

まず、ART の横揺れと左右揺れ運動と、両ウィングの水位差 h_{rs} を次の通りに定義した。

$$\phi = \phi_a \cos(\omega t - \varepsilon_r) \quad (7)$$

$$y = y_a \cos(\omega t - \varepsilon_s) \quad (8)$$

$$h_{rs} = h_{rsa} \cos(\omega t - \varepsilon_3) \quad (9)$$

本連成強制動揺試験では、横揺れ振幅を 6.4° 、左右揺れ振幅を 30mm とし、横揺れと左右揺れの位相差 $\varepsilon_r - \varepsilon_s$ は $0, -\pi/2, -\pi$ の 3 つに変化させた。 $-\pi/2$ の場合は、ちょうど船体が波浪中で横揺れ同調している場合に相当し、 0 は同調の場合よりも低周波数、 π は高周波数の場合に相当する。

Fig.8, Fig.9 に両ウィングタンク内の水位差振幅および、水の運動と横揺れとの位相差を示す。水位差振幅は $\varepsilon_r - \varepsilon_s = -\pi/2, -\pi$ の場合、周波数が増加するにしたがって減少する。しかし $\varepsilon_r - \varepsilon_s = 0$ の場合においては、 $\omega/\omega_0 = 1$ 付近の周波数において最小値をとり、周波数が増加するにしたがって振幅は増加している。この振幅が増加する高周波数域においては、Fig.9 に示す位相差が 270° 前後となっている。すなわち、ウィングタンク内の水の運動は、左右揺れの影響により、周波数の高いところで低周波数の場合とは反対称となっている。このことは、左右揺れによって高周波数領域で負の横揺れ減衰力が発生することを意味している。

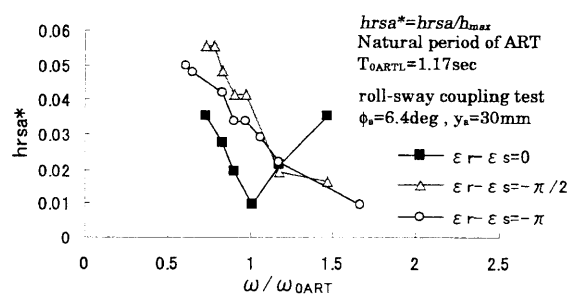


Fig.8 Amplitude of the water level difference between right and left wing-tanks of ART in forced roll-sway coupling test

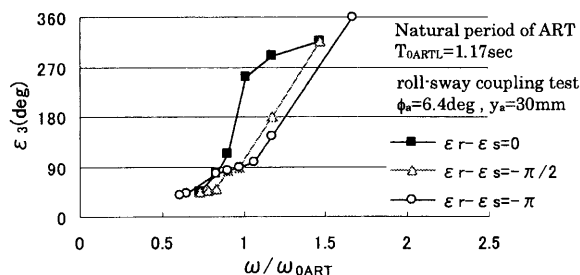


Fig.9 Phase difference between sway motion and motion of the water level difference between right and left wing-tanks of ART in forced roll-sway coupling test

Fig.10 に連成強制動揺試験と横揺れ強制動揺試験によって得られた横揺れ減衰係数の結果の比較を示す。連成時の ART による横揺れ減衰力は、 $\omega/\omega_0=1$ より低周波数領域で横揺れ単独時のものとほぼ一致しているが、 $\omega/\omega_0=1$ より高周波数領域では減少している。特に、 $\varepsilon_r - \varepsilon_s = 0$ の場合、高周波数領域における減少が大きく、負の値になっている。このことは、ART 中の水は、横揺れ減衰力としてではなく、逆に動揺を大きくする、すなわち一種の強制力として働く可能性があることを意味している。

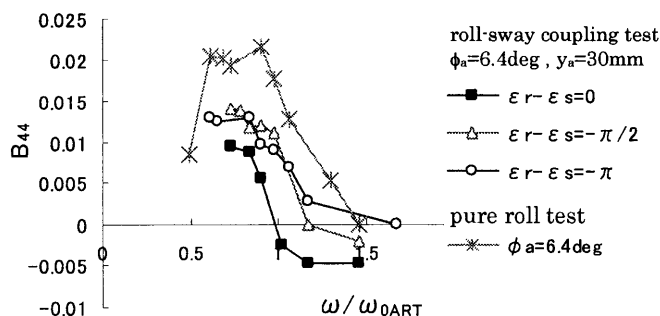


Fig.10 Roll damping coefficient obtained by water level difference between right and left wing-tanks of ART in forced roll-sway coupling test

3. 連成時における ART による減揺効果

3.1 線形重ね合わせによる推定

横揺れと左右揺れとの連成運動をする場合の ART 内の水の運動が、2.2 節および 2.3 節で述べた横揺れ試験と左右揺れ試験で得られた水の運動の線形重ね合わせで求めることができると仮定すると、下式で連成時の水の運動 h_{rs} が推定できることとなる。

$$h_{rs} = h_r + h_s \\ = h_{ra}'' \phi_a l_m \cos(\omega t - \varepsilon_1) + h_{sa}'' y_a \cos(\omega t + \varepsilon_r - \varepsilon_s + \varepsilon_2) \quad (10)$$

ここで、 h_{ra}'' および h_{sa}'' は、横揺れ試験および左右揺れ試験で得られた左右ウィングタンクの水位差を、 ϕ_a および y_a を用いて正規化した無次元振幅であり、 $\varepsilon_r - \varepsilon_s$ は横揺れと左右揺れの位相差を表す。また l_m は $W/2$ である。この時、連成時に ART が発生する横揺れモーメントの減衰力係数 B_{44} は、左右ウィングタンクの水位差によって発生する重力モーメントから、

$$B_{44} = \rho g S_w l_m [h_{ra}'' \phi_a l_m \sin \varepsilon_1 + h_{sa}'' y_a \sin \{-(\varepsilon_r - \varepsilon_s) - \varepsilon_2\}] / (\phi_a \cdot \omega) \quad (11)$$

で表される。

この線形重ね合わせの有効性を確かめるために、推定式に左右揺れ・横揺れ強制動揺試験で得られた水位差・位相差を代入し、連成運動時の横揺れ減衰力を求めた。さらに、連成運動の強制動揺試験で得られた結果と比較することにより、推定式の妥当性を検討した。

3.2 実験値との比較

Figs.11~13 に、横揺れと左右揺れの位相差を、 $\varepsilon_r - \varepsilon_s = 0$ 、 $\varepsilon_r - \varepsilon_s = -\pi/2$ 、 $\varepsilon_r - \varepsilon_s = -\pi$ と変化させた場合の連成試験の実験値と推定式による計算結果との比較をそれぞれ示す。

Fig.11 に示す $\varepsilon_r - \varepsilon_s = -\pi$ の場合には、運動周波数の増加と共に横揺れ減衰力が減少する傾向はよく合っているが、左右揺れ時に ART 内の水が激しく運動する $\omega/\omega_{0ART}=0.84$ 付近でのピークが連成運動試験の結果には現れていない。これは、横揺れ角があることによって左右揺れ試験のような水平振動時の水の激しい運動が抑制されたためであると思われる。このピーク付近を除くと、定量的にも両者は比較的良好に一致している。

Fig.12 に示す $\varepsilon_r - \varepsilon_s = -\pi/2$ の場合には、定性的にはよく一致する結果が得られている。ただし、高周波数域における横揺れ減衰係数の減少は、推定値の方が急で、定量的に若干の差異があることがわかる。

Fig.13 に示す $\varepsilon_r - \varepsilon_s = 0$ の場合、上述の 2 つのケースに比べると一致度が最も悪い。ただし、注意深く見ると、Fig.11 に示すケースと同様に、左右揺れ試験時に水が激しく揺れる周波数での傾向を除くと、推定値は実験値と定性的にはよく似た傾向を示していることがわかる。

以上の推定値と連成実験値との比較から、横揺れ試験および左右揺れ試験の結果を線形重ね合わせして求めた連成時の推定値は、左右揺れ試験において水の激しい運動が現れた付近の傾向を除くと、連成時の ART による横揺れ減衰力を定性的にも定量的にもよく表すことができている。

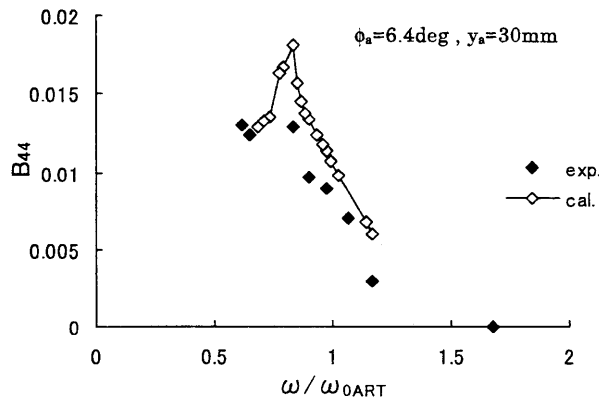


Fig.11 Comparison between estimated and experimental results of roll damping created by ART in roll-sway coupling motion at $\varepsilon_r-\varepsilon_s=-\pi$

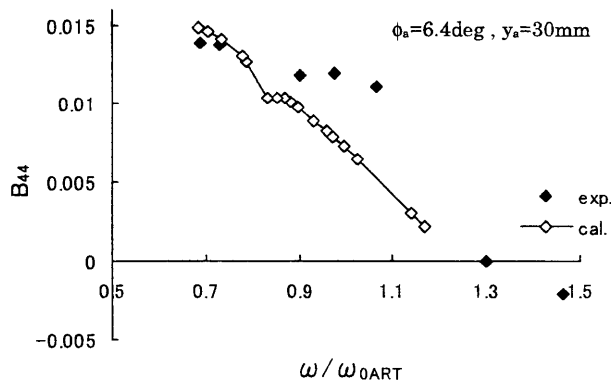


Fig.12 Comparison between estimated and experimental results of roll damping created by ART in roll-sway coupling motion at $\varepsilon_r-\varepsilon_s=-\pi/2$

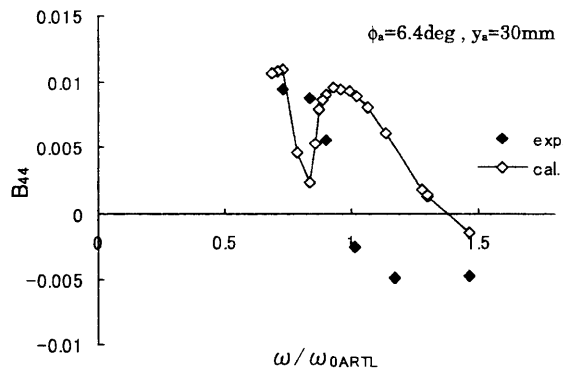


Fig.13 Comparison between estimated and experimental results of roll damping created by ART in roll-sway coupling motion at $\varepsilon_r-\varepsilon_s=0$

3.3 横揺れ減衰力への左右揺れの影響

横揺れと左右揺れの位相差 $\varepsilon_r-\varepsilon_s=-\pi/2$ の時の ART による横揺れ減衰力が、左右揺れ振幅の変化に伴ってどのように変化するかを、前節までに述べた方法で推定した結果を Fig.14 に示す。この結果から、横揺れ減衰力に及ぼす左右揺れの影響が、無次元周波数 $\omega/\omega_0=0.75$ を境に逆転していることがわかる。すなわち、この周波数より高

周波数においては、左右揺れが ART による横揺れ減衰力を減少させ、その減少量は左右揺れ振幅の増加に伴って増加する。また、この周波数より低周波数域においては、左右揺れが ART による横揺れ減衰力を増加させることがわかる。この逆転の境となる無次元周波数は、左右揺れ試験において位相差 ε_r が $\pi/2$ となる周波数、すなわち、左右揺れ時の ART 内の水の運動の同調周期に一致している。また、横揺れ振幅と左右揺れ振幅との比率が ART の減揺効果に大きく影響することがわかる。

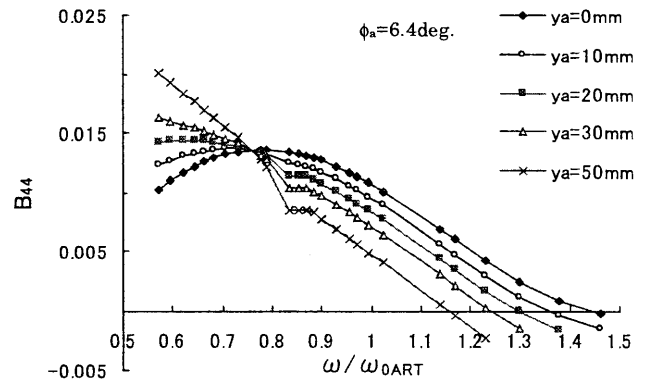


Fig.14 Estimated result of effects of sway amplitude on roll damping created by ART

4. 波浪中動揺試験

4.1 供試模型船

船上に搭載した時の ART の横揺れ減揺効果に及ぼす左右揺れの影響を調べるために、鹿児島大学の漁業練習船“かごしま丸”の 1/40 縮尺模型を用いて、規則的横波中での動揺試験を行った。模型船の主要目は Table 2 の通りである。また、ART 模型の搭載位置を記載した模型船側面図および正面線図を Fig.15 および Fig.16 に示す。

ART 模型内の水の重量は船の排水量の 3% とし、ビルジキールは無し状態で、横揺れ、左右揺れ、縦揺れおよび上下揺れを自由とした。

Table 2 Principal particulars of the model

Items	Actual ship	Model
Scale	1	1/40
$L_{pp}(m)$	62.000	1.550
$B(m)$	12.600	0.315
$D(m)$	9.000	0.225
$Dm(m)$	4.800	0.120
$GM(m)$	1.200	0.030
$KG(m)$	4.800	0.121
$L_{CG}(m)$	-1.860(aft)	-0.0478(aft)
C_b	0.575	0.575

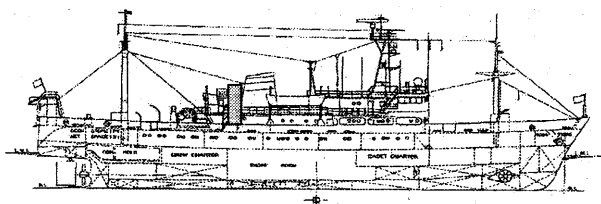


Fig.15 Profile of ship with ART

Location of ART

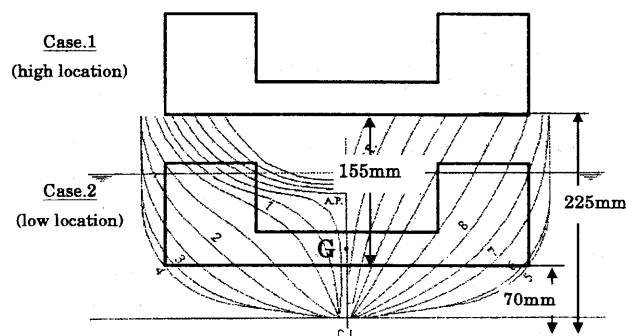


Fig.16 Body plan of ship with ART in high and low location

4.2 実験結果

船の横揺れ固有周期 T_{0S} と ART の固有周期 T_{0ART} の比を変化させるために、船の横揺れ固有周期が、ART の固有周期と同じ場合 ($T_{0S}/T_{0ART}=1$)、ART の固有周期より長い場合 ($T_{0S}/T_{0ART}=1.2$)、ART の固有周期より短い場合 ($T_{0S}/T_{0ART}=0.9$) の 3 通りに変化させ、ART の減揺効果を調べた。また、比較のために ART を搭載していない状態での横揺れをストリップ法(横揺れ減衰力の推定は池田らの方法⁹⁾で計算も行った。

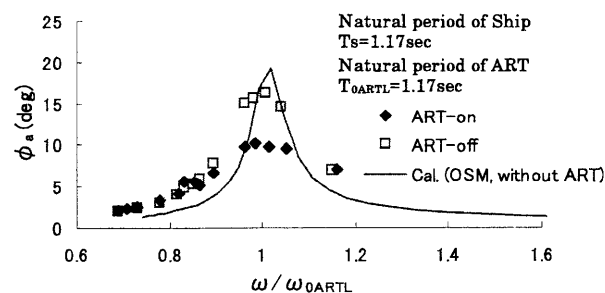
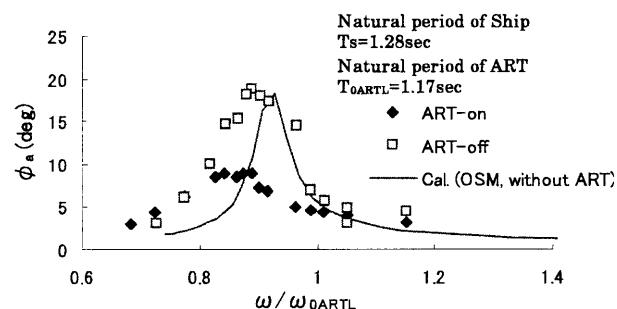
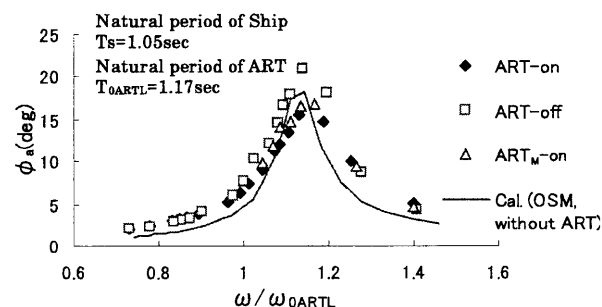
Fig.17 に、船の横揺れ固有周期と ART の固有周期と同じ場合 ($T_{0S}/T_{0ART}=1$) の結果を示す。横揺れ同調付近において、ART が 40% 近い減揺率を示すことがわかる。図を詳細に見ると、周波数 ω/ω_0 が 0.85 付近において ART 作動時に横揺れ振幅が小さなピークを持っているが、これは ART 内の水が左右揺れによって大きく揺れる周波数に対応しており、左右揺れ振幅の影響が出たものと思われるが、その影響は極めて小さい。また、ART が効果のある周波数域は固有周期の $\pm 15\%$ に限られていることがわかる。

Fig.18 に、船の横揺れ固有周期が ART の固有周期より 20% だけ長い場合 ($T_{0S}/T_{0ART}=1.2$) の結果を示す。この場合には、同調時の減揺率が 52% となっており、Fig.17 に示す船と ART の固有周期が一致した場合よりも高い減揺効果が得られている。減揺効果が現れる周波数域は船の固有周期を中心に $\pm 15\%$ と Fig.17 に示す結果と変わらない

いが、高周波数側の減揺効率が高くなっている。

Fig.19 に、船の固有周期が ART の固有周期より 10% だけ短い場合 ($T_{0S}/T_{0ART}=0.9$) の結果を示す。同調時に 27% の減揺効果となっている。

ART の固有周期を減少させるために内側のタンクを停止した ART_M の状態にした結果も示している。この場合、ART の固有周期は船の固有周期にかなり近いが ($T_{0S}/T_{0ART}=0.95$)、タンクの水線面が減少したこともあって ART_L の時の減揺効果とあまり変わらない結果となっている。

Fig.17 Roll amplitude of model ship with and without ART in beam seas when natural periods of ship and ART are same ($T_{0S}=T_{0ARTL}=1.17$ sec)Fig.18 Roll amplitude of model ship with and without ART in beam seas when natural period of ART is smaller than that of ship ($T_{0S}=1.28$ sec, $T_{0ARTL}=1.17$ sec)Fig.19 Roll amplitude of model ship in beam seas ($T_{0S}=1.05$ sec, $T_{0ARTL}=1.17$ sec, $T_{0ARTM}=1.0$ sec)

以上の実験結果より、ART の固有周期を船の横揺れ固有周期より若干短くした方が、高い ART の減揺効果が

得られることが確認できた。この事は、左右揺れの影響によって、ARTの固有周波数より低周波数領域において横揺れ減衰力が増加するという本論文3章での結論と符合している。

5. ART 特性への考察

ARTについては、横揺れ軽減についてはかなりの効果があることが確認されているものの、不自然な横揺れを行うことに対する不快感や、比較的穏やかな海象において予期せぬほどの横揺れが発生することがあるなどが報告されている。

これらの原因として、本研究で調査した左右揺れの影響の可能性があるかどうかについて以下に若干の考察を行った。

まず、本論2.3節で得られた、左右揺れに伴ってART内の水が運動することによる横揺れモーメントによって誘起され得る横揺角を求めた。その結果、排水量843トンの船で、GMが1.5mと仮定した場合、1.54deg程度の横揺れとなることがわかった。ただし、この時の左右揺れ強制試験における振幅は30mm、すなわち実船ベースでの左右揺れ振幅は1.83mに相当する。実際の海域においては、200m程度の波長の長いうねりの中を斜め向波状態で、20ノット程度で航行する場合、もしくは高速船の曳き波を受ける場合には、波による横揺れに加えて、左右揺れの影響でARTによって誘起される横揺れが加わり、横揺れが予想以上に大きくなる状況が発生する可能性があることがわかった。

6. 結言

アンチローリングタンク(ART)の横揺れ減揺性能に及ぼす左右揺れの影響について実験的に研究し、次の結論を得た。

- 1) 船体の左右揺れによってART内の水が運動し、それが横揺れを誘起する可能性がある。特に、横揺れが相対的に小さくなった時に顕著となる。
- 2) 船体の左右揺れがARTの横揺れ減揺効果に大きく影響し、ARTの左右揺れ固有周波数より低周波数域側では横揺れ減衰力を増加させ、高周波数域側では減少させる。
- 3) 左右揺れの影響によって、高周波数域において負の横揺れ減衰力、すなわち横揺れ強制力が発生することがある。
- 4) 横揺れおよび左右揺れの連成運動するART内の水の運動は、横揺れおよび左右揺れの単独運動時の結果を線形重ね合わせすることによって概略推定でき

る。

- 5) 左右揺れの影響を考慮して、ARTの固有周期を船の横揺れ固有周期より若干短い周期に設定する方が大きな減揺効果が得られる。

本研究は、アンチローリングタンクを製造するスタビロ靴との共同研究の一環として実施されたことを記し、松村社長他関係各位に感謝する。また大阪府立大学大学院の片山講師には実験および解析にあたっての指導を頂いた。心から感謝する次第である。

参考文献

- 1) 池田良穂, 芳山朋史 (1991), “アンチローリングタンクに関する研究”, 関西造船協会誌, pp.111-119
- 2) Lloyd, A.R.J.M. (1998) “Seakeeping: Ship Behavior in Rough Weather”, pub. by Lloyd, pp.258-269
- 3) Park, I., Yang, J. & Shin, H. (2004) “Roll Motion Reduction Devices for Harsh Environmental FPSOs,” Proc. of 14th ISOPE, Toulon, pp.682-686
- 4) 渡辺恵弘 (1973), “Anti-Rolling Tanks の理論に就て”, 渡辺恵弘先生講義集, 第I巻, 日立造船株式会社編集, pp.334-348.
- 5) 渡辺四郎 (1969), “動揺軽減法-減揺水槽その他”, 耐航性に関するシンポジウム(日本造船学会)テキスト, pp.156-179
- 6) 池田良穂(1984), “横揺れ減衰力”, 運動性能研究委員会・第1回シンポジウム(日本造船学会)テキスト, pp.241-250