能動型減揺装置の開発と実海域試験

正員 及 川 未 紀* 正員 小 池 裕 二**
正員 茶 谷 光 一* 正員 重 松 祥 三*

Study and At-sea Experiment on Actively Controlled Anti-Rolling System

by Miki Oikawa, *Member* Yuji Koike, *Member*
Kouichi Chatani, *Member* Shozo Shigematsu, *Member*

Summary

This paper describes the new type of anti-rolling system that is capable of reducing the rolling motion of a ship by active control of the moving mass. Similar system has been already realized for the reduction of the vibration of large-bridge towers and high-rise building structures. Present anti-rolling system is an application of the system.

Model experiments in a wave tank were carried out with the ship model installed with the anti-rolling system. Roll amplitudes in regular waves with the anti-rolling system are similar to the amplitudes of the ship model with an anti-rolling tank in which the weight of moving water is about two times of the moving mass of the present system. Then the moving mass system are more effective for roll reduction than anti-rolling tank. Effects of the incident wave height, forward speed, and position of the moving mass on the anti-rolling performance are investigated.

Next, at-sea experiment were performed with a small vessel ($L=5.93\text{ m}$) having the smaller prototype anti-rolling system. The effectiveness of the present system was confirmed from the measured data of roll amplitudes.

1. 緒 言

乗船者の居住性, 安全性および作業性を向上させるため, 減揺装置を設けて船体の横揺れを減らす試みは古くから行われている^{1), 2), 3), 4)}。

従来, 観測船, 巡視船などの特殊船には停船時の減揺装置として Anti-Rolling Tank (以下, A. R. T. と記す) が用いられている。これは受動型の減揺装置に分類されるもので, 機構が簡単である半面, つぎの問題点を持つ。1) 一般にタンク内の水の重量は小型船で排水量の 3~4%, 大型船で 1~2% 程度必要とし, またタンクは上甲板より上部に

設けられることが多いため, 広い空間が必要になるとともに操船のための見通しが悪くなる, 2) 一度設計するとタンクの固有周期が固定されてしまうため, 船体の横揺れ固有周期が変わった場合には減揺効果が著しく低減する。また最適減衰の調整確認も困難である。

ところで, 可動マスをアクチュエータ駆動することにより振動を減らす能動型制振装置は, 近年, 研究が盛んに行われ, 土木, 建築の分野では構造物の風や地震による揺れを低減するために一部で実用化されてきた^{5), 6)}。本方式は, 受動型に比べ, 可動マスの重量の軽減, 制御性能の向上などの利点を備えているため, 様々な分野への応用が考えられる。

そこで, 本研究では能動型制振装置を船体の横揺れに適用した新しい減揺装置を提案し, そのモデリング, 制御系の設計を行い, 模型船による基礎実験および排水量約 2.5 t の小型船を用いた海上試験を行った。その結果, 停船時の横揺れを 1/2 以下に低減できるだけの減揺効果を確認し,

* 石川島播磨重工業(株)船舶海洋事業本部

** 石川島播磨重工業(株)技術研究所

装置の実用性を実証したので以下に報告する。

2. 制御系の設計

能動型減揺装置を船体重心の上方に設置した力学モデルを Fig. 1 に示す。このモデルでは船体の運動を以下の仮定のもとで取り扱う。

(1) 横揺れを重心回りの回転とみなし、その他の自由度との連成は無視する。

(2) 船体に作用する減衰は粘性減衰とする。
このとき、船体および可動マスの運動方程式は次式となる。

$$I\ddot{\phi} + R\dot{\phi} + WGM \sin \phi = T + m_d g \cos \phi (x_d - l\phi) - f_c l \quad (1)$$

$$m_d \ddot{x}_d = m_d g \sin \phi + f_c \quad (2)$$

ここで、 I : 船体の重心回りの慣性モーメント

R : 船体の減衰係数

W : 船体の排水量

GM : メタセンタ高さ

m_d : 可動マスの質量

l : 船体の重心から可動マス重心までの距離

f_c : アクチュエータによる制御力

T : 波強制モーメント

g : 重力加速度

であり、式(1)の右辺第二項および式(2)の右辺第一項は、可動マスが移動した際の重力効果を表す。

また、アクチュエータには電動モータを用い、変位制御により駆動したため、その動特性を考慮する。可動マスの設置位置に対する相対変位を $z (= x_d - l\phi)$ とおき、制御入力 u に対する周波数特性を実験的に求め、以下の二次遅れ系で近似する。

$$\ddot{z} + 2\zeta_m \omega_m \dot{z} + \omega_m^2 z = \omega_m^2 u - l\ddot{\phi} + g \sin \phi \quad (3)$$

制御系の設計には、LQ 制御理論を適用した。そのため、 $\sin \phi \approx \phi$, $\cos \phi \approx 1$ において線形化した後、 $\mathbf{x} = [\phi \ z \ \dot{\phi} \ \dot{z}]^T$, $\mathbf{w} = T$ と定義し、式(1), (2), (3)を状態方程

Fig. 1 Dynamic Model

式で表すとつぎのようになる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u + \mathbf{d}w \quad (4)$$

式(4)につぎのような状態フィードバックを施す。

$$u = -\mathbf{k}\mathbf{x} \quad (5)$$

フィードバックゲイン $\mathbf{k}$ は、評価関数を

$$J = \int_0^\infty (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + r u^2) dt \quad (6)$$

$\mathbf{Q}$: 重み行列

r : 重み係数

と設定すれば、 J を最小にする u を求めることにより

$$\mathbf{k} = \mathbf{b}^T \mathbf{P} / r \quad (7)$$

となる。ここに、 $\mathbf{P}$ は、つぎのリカッチ方程式の解である。

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} - \mathbf{P}\mathbf{b}\mathbf{b}^T \mathbf{P} / r = 0 \quad (8)$$

3. 模型実験

3.1 実験装置

可動マスを用いた能動型減揺装置の性能を確認するため、模型船による水槽実験を行った。供試模型船の主要目を Table 1 に示す。模型船の横揺れ固有周期は 1.7 秒である。

次に模型実験用の能動型減揺装置の概観を Fig. 2 に示す。可動マスは、タイミングベルトを介し電動モータで水平方向に駆動される。装置取付部には角速度センサを設置し、船体の横揺れ角速度が検出される。また装置の船体に対する相対速度および相対変位はそれぞれタコジェネレー

Table 1 Principal Particular of Model Ship

船長	2.750 m
幅	0.399 m
深さ	0.242 m
船中央部喫水	0.113 m
排水量	0.068 t
GM	0.037 m
減衰係数 N_{10}	0.031
(非作動時 可動マス重量: 0.9 kg 横揺れ固有周期 1.7 s)

Fig. 2 Actively Controlled Anti-Rolling System for Model Ship

Fig. 3 Anti-Rolling Tank

タおよびポテンショメータにより検出される。演算器では、これらの信号から前章の式(5)に基づく制御入力を得られ、可動マスが駆動される。

また、減揺効果の比較対象として模型の A. R. T. を製作し、その作動時の実験も行った。A. R. T. の概観を Fig. 3 に示す。A. R. T. の水の重量は 1.76 kg で船体の排水量の 2.6% であるが、この質量比は実船の A. R. T. のそれと同等である。また A. R. T. の横幅は模型船の船幅とほぼ等しい。

3.2 実験条件

模型実験は、規則波中および不規則波中において、基本的に停船/横波状態で実施した。減揺装置は可動マスの位置が模型船の上甲板の位置になるように設置し、可動マス重量は 0.9 kg (排水量の 1.3%) を基準としている。規則波中の実験では入射波の波高は 73.7 mm とし、波周期に対する横揺れ振幅を計測した。また可動マス重量影響、波高影響、船速影響、装置取付位置影響を見るため、これらのパラメータを変えた実験も行った。不規則波中の実験での平均波周期は 1.6 秒、有義波高は 70 mm とし、計測したデー

Fig. 4 Position of the Devices

Table 2 Conditions of Model Experiments

(1) IN REGULAR WAVES

Test No.	制御装置	マス重量 w (kg)	制御ゲイン	取付位置	船体固有周期 T (s)	船速 V (m/s)	波高 ζ_w (mm)
1	A.C.*1	0.9	非作動	A	1.7	0	73.7
2	A.C.	0.9	作動	A	1.7	0	73.7
3	A.C.	0.9	非作動	A	2.0	0	73.7
4	A.C.	0.9	作動	A	2.0	0	73.7
5	A.C.	1.5	作動	A	1.7	0	73.7
6	A.C.	0.9	非作動	A	1.7	0	110.6
7	A.C.	0.9	作動	A	1.7	0	110.6
8	A.C.	0.9	非作動	A	1.7	1.557	73.7
9	A.C.	0.9	作動	A	1.7	1.557	73.7
10	A.C.	0.9	非作動	C	1.7	0	73.7
11	A.C.	0.9	作動	C	1.7	0	73.7
12	A.C.	0.9	非作動	B	1.7	0	73.7
13	A.C.	0.9	作動	B	1.7	0	73.7
14	A.R.T.	(1.76)	作動	—	2.0	0	73.7

(2) IN IRREGULAR WAVES

Test No.	制御装置	マス重量 w (kg)	制御ゲイン	取付位置	船体固有周期 T (s)	船速 V (m/s)	平均波周期 (s)	有義波高 $H_{1/3}$ (mm)
15	A.C.	0.9	非作動	A	2.0	0	1.6	70
16	A.C.	0.9	作動	A	2.0	0	1.6	70
17	A.R.T.	(1.76)	作動	—	2.0	0	1.6	70

*1 A.C. = Actively controlled Anti-Rolling System

タに対し統計解析およびスペクトル解析を行った。実験項目を Table 2, 装置取付位置を Fig. 4 に示す。

3.3 実験結果及び考察

まず本減揺装置の性能確認実験結果について述べる。

Fig. 5 は装置の作動時と非作動時の横揺れ振幅の比較である。横軸に横揺れ固有周期と波周期との比 ($T\phi/T_w$), 縦軸に横揺れ振幅の応答 ($\phi_A/k\zeta_A$) をとっている。図は、船体の横揺れ固有周期を A. R. T. を積んだ状態の固有周期 (2.0

Fig. 5 Responses of Roll Amplitude

秒)に調節した場合の結果を併記している。図から装置による減揺効果を見ると、どちらの固有周期の場合も、横揺れ振幅の最大値では非作動時の40~50%に横揺れ振幅が低減しているのがわかる。Fig. 6に装置を途中から作動させた場合の横揺れの時系列波形を示す。装置を作動させると横揺れは速やかに減少し、3周期目ではほぼ定常状態に達している。これより本減揺装置の追従性の良さは明らかである。

Fig. 7は可動マス重量を1.5 kg(排水量の2.2%)に変えた場合の比較である。(A)は横揺れ振幅応答の比較で、可動マス重量を増やすと減揺効果が上がることがわかる。また(B)は可動マスのストロークの比較で、縦軸はストロークを波高で無次元化(M_w/ζ_H)した値をとっている。ストロークの最大値は、可動マス重量0.9 kgの場合108 mm、1.5

Fig. 6 Time History of the Rolling Motion in Regular Waves

Fig. 7 Effect of the Weight of Moving Mass

kgの場合67 mmであり、両振幅で比較するとそれぞれ模型船の船幅の27%, 17%となっている。これより、本装置が排水量の1.3%可動マス重量と船幅の約1/4のストローク(両振幅)で減揺効果をえられること、可動マス重量が増えることによってストロークが小さくなることがわかる。

Fig. 8は波高, 船速, 装置取付位置を変えた場合の比較で

(A) Effect of the Wave Height

(B) Effect of the Forward Speed

(C) Effect of the Vertical Position of the Device

(D) Effect of the Horizontal Position of the Device

Fig. 8 Effect on the Roll Amplitudes

ある。波高が大きくなっても(A), また船速がある場合でも(B), 両者とも応答は変化前と同程度となっている。よってこれらの条件が変化しても, 横揺れの応答に及ぼす影響は小さいことがわかる。また, 装置の取付位置を上方へ移動した場合を比較すると(C), 取付位置が船体重心から遠いほうがモーメントの腕の長さがとれるので減揺効果が高くなる。一方, 装置の取付位置を船首方向へ移動させた場合は(D), 波高, 船速影響と同様に横揺れの応答は変化前と同程度である。このとき装置の作動による船首揺れへの影響はほとんど見られなかった。

次に本減揺装置と A. R. T. との性能比較結果について述べる。この実験は船体の横揺れ固有周期を, 減揺装置を搭載した状態と A. R. T. の自由水の影響がある状態が同等となるように調整したときのものである。

Fig. 9 Responses of Roll Amplitude

Fig. 10 Time Histories of the Rolling Motion in Irregular Waves

Fig. 9 は船体横揺れ振幅の応答を示したもので, 応答量の最大値は両者ほぼ同程度になっている。この結果から, 本装置の可動マス重量が A. R. T. の水の重量の約半分であるにもかかわらず, 本装置は A. R. T. と同等の減揺効果を生み出すことができるといえる。

Fig. 10 は不規則波中での減揺装置作動, 非作動時および A. R. T. 作動時の横揺れの時系列波形である。統計解析による横揺れ振幅の有義値は, 減揺装置非作動時の場合の 6.3 度に対し減揺装置作動時は 3.3 度, A. R. T. 作動時は 3.8 度であり, それぞれ 48%, 40% の横揺れ低減になっている。またスペクトルの面積から求めた横揺れの有義値は, 減揺装置非作動時 6.5 度に対し, 減揺装置作動時 3.5 度 (46%), A. R. T. 作動時 4.0 度 (38%) となっており, 統計解析の結果とよくあっている。これより不規則波中では本装置の方が A. R. T. より減揺効果が大いことが確認された。これは, 本装置が能動的に動揺を制御していること, 外力に対する追従性の良いことによるものと考えられる。

4. 実海域試験

4.1 試験装置

本減揺装置の実海域での性能を確認するため, 排水量約 2.5 t の小型船による実海域試験を行った。供試船は F. R. P. 製の高速艇の一種で, チェーンをもつ船型であり浅喫水である。Fig. 11 に全体写真を示す。Table 3 に, 本船の主要目, および実海域試験に先だって行った重量・重心査定試験および自由横揺れ試験で計測した排水量, 重心高さ, 横揺れ周期, 減減係数の値を示す。

次に実海域試験用の能動型減揺装置の概観を Fig. 12 に示す。ボールねじと AC サーボモータにより可動マスを水平方向に駆動する方式をとっている。実海域での不規則な船体運動の中でも可動マスが安全に作動するように, 可動マスをボールネジとリニアレールではさみ込むようにしている。可動マスの制御は模型実験用の装置と同じ方法で行っている。

Fig. 11 A Vessel installed with the Actively Controlled Anti-Rolling System

Table 3 Principal Particular of a Vessel

船名	スターライナー
船長	5.930 m
幅	2.550 m
深さ	1.150 m
船中央部喫水	0.489 m
船首部喫水	0.465 m
船尾部喫水	0.513 m
排水量	2.529 t
GM	0.656 m
横揺れ固有周期 (非制御時 可動マス重量:35Kg)	2.566 s
減減係数 N_{10} (非制御時 可動マス重量:35Kg)	0.015

Fig. 12 Actively Controlled Anti-Rolling System for a Vessel

4.2 試験条件

実海域試験は東京湾本牧沖で行った。船体を右舷 90° の横波中に停船させ、減揺装置を作動させたときと作動させないときの二つの状態について試験を行った。試験時の条件を Table 4 に示す。

減揺装置は Fig. 11 に示すように操舵室の天井部分に設置した。可動マス重量は 35 kg で排水量の 1.4% である。

試験中は波との出会角が一定に保たれるように必要最小限のあて舵をとった。また船体の横揺れ計測には、ジャイロ傾斜計を用い、1 回の計測時間は 10 分間とし、装置作動試験と非作動試験を連続で行った。こうして計測したデータに対して統計解析およびスペクトル解析を行った。

Table 4 Condition of At-sea Experiment

試験海域	東京湾本牧沖
年月日	平成 5 年 1 月 28 日
天候	晴
目視波高	0.5 m
目視波周期	1.5 秒
目視波出会角	船体に対し右舷 90° 方向
風速	8 m
風向	船体に対し右舷 90° 方向
船速	0 knot
可動マス重量	35 Kg
装置	作動/非作動

4.3 試験結果及び考察

Fig. 13 は装置作動時と非作動時の船体横揺れ角の時系列データを示したものである。統計解析によれば、装置非作動時および作動時の横揺れ角(有義値)はそれぞれ 4.4 度および 2.9 度、最大横揺れ角はそれぞれ 8.2 度および 4.9 度である。有義値で 34%、最大値で 40% の横揺れ低減になる。またこの時の平均横揺れ周期は 2.3 秒であり、船はほぼ横揺れ固有周期で揺れている。

横揺れ角のスペクトルを Fig. 14 に示す。図から装置作動時の横揺れ低減は明らかであるが、スペクトルの面積から求めた横揺れの有義値は、装置非作動時で 4.16 度、作動時で 2.74 度であり統計解析の結果とほぼ同じである。

このように、小型船を用いた実海域試験においても、本減揺装置は船体の横揺れを 34~40% 低減させることが確認された。

Fig. 13 Time Histories of the Rolling Motion in Irregular Waves

Fig. 14 Spectra of the Rolling Motion in Irregular Waves

5. 結 論

船舶の横揺れ低減を目的とした、新しい能動型減揺装置の開発をするべく、試作機を製作し、模型実験及び実海域試験を行った。その結果、本装置の有効性を確認することができた。得られた結果を要約すると以下ようになる。

(1) 本減揺装置は、模型実験において搭載船の排水量の1.3%の可動マス重量で船舶の横揺れを約1/2に低減することを確認した。また停船時、航走時ともに同程度の横揺れとなる。

(2) A. R. T.との比較実験では、水の重量の約1/2の可動マス重量と、A. R. T.の横幅の約1/4の可動マストローク（両振幅）で同等以上の効果が得られる。特に不規則波中では、本減揺装置はA. R. T.にくらべて有義値で13%減揺効果が大きくなっている。

(3) 排水量約2.5tの小型船を用いて実海域試験を行った結果、排水量の1.4%の可動マス重量で、横揺れ振幅を有義値で34%低減する。

今回、本装置の効果の有効性を確認することができた。船舶における減揺装置の効果は、単に居住性、作業性の向上だけではなく、能動型の特長を生かせば、貨物の積載量の増加、貨物の損傷防止などにも期待できるので、今後はより大型の船舶へ適用するべく研究を進めてゆく予定である。

最後に、本研究に対しご指導頂いた(株)郵船海洋科学森正彦博士（技術顧問）に厚く御礼申し上げます。また、実海域試験はアイ・エイチ・アイ・クラフト(株)の社船スターライナーをお借りして実施したものであり、営業部杉田邦博課長ほか同社の方々の協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Thornycroft, J. I. : Steadying Vessels at Sea, TINA, Vol. 33, 1892
- 2) Den Hartog, J. P. : Mechanical Vibrations, McCrawhill Book Company, Inc., 1956
- 3) 渡辺四郎：動揺軽減法(2)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，(1969)，p. 156
- 4) Marshfield, W. B. : Active moving weight roll stabilisers, RINA, March, (1978)
- 5) 谷田宏次，小池裕二，牟田口勝生，能勢卓，角谷常宏：2軸ハイブリッド式制振装置の開発と適用例，アクティブ制震（振）シンポジウム，日本建築学会，(1992. 3)，p. 271
- 6) 谷田宏次，牟田口勝生，小池裕二，村田保，丸岡正典，石井孝二，竹中康雄，有田友彦：V字型ハイブリッドマスダンパの開発と超高層ビルへの適用，日本機械学会第3回「運動と振動の制御」シンポジウム，(1993. 7)，(投稿中)