

船舶用ハイブリッド式減揺装置の開発と実海域試験

小池 裕 二 技術本部技術研究所機械鉄構開発部 研究員
 谷田 宏 次 技術本部技術研究所機械鉄構開発部 担当課長 工学博士
 牟田口 勝 生 機械鉄構事業本部鉄構事業部開発部 専門課長
 村田 保 機械鉄構事業本部鉄構事業部開発部
 今関 正 典 機械鉄構事業本部鉄構事業部開発部
 広重 栄 基 船舶海洋事業本部艦船技術部

Development of Hybrid Anti-Rolling System for Ships and Sea Experiments

Yuji Koike, Koji Tanida, Masao Mutaguchi
 Tamotsu Murata, Masanori Imazeki, Eiki Hiroshige

An actively controlled anti-rolling system has been developed to reduce the rolling motion of a ship by the movement of a mass controlled by an actuator. The hybrid type system combines the pendulum-base passive type using a moving mass on an arc-shaped rail, with the active type driven by a relatively small electric motor. Sea experiments were performed with a ship (weight approx. 190 tons) to verify the damping effects of the hybrid anti-rolling system. Rolling was reduced to about 1/3 in beam seas when the ship was stationary.

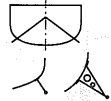
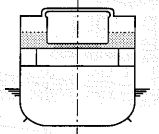
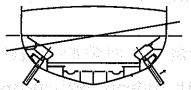
1. 緒 言

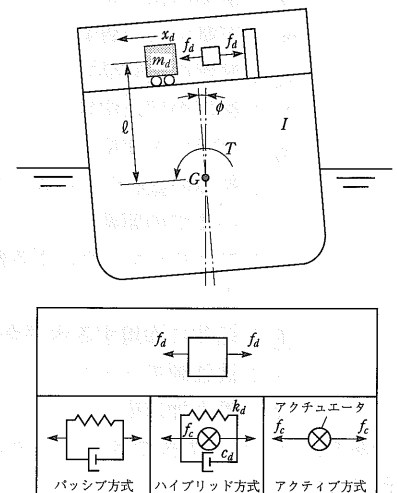
観測船、調査船などの船舶では、海上での観測作業のため停船時および、低速航走時の横揺れ低減が重要な要求性能となる。従来、船舶の横揺れを低減するための装置としては、第1表に示すアンチローリングタンク(ART)やフィンスタビライザが一般に用いられているが、フィンスタビライザは、通常、航走時の減揺を目的としており、作動時には流体抵抗が速力低下の要因となる。また、ARTは、普通、上甲板より上部に設けられることが多いため、船の後方への見通しが悪くなることや、一度設計するとタンクの固有周期が固定されてしまうため、船体の固有周期が変化

した場合には減揺効果が著しく低減するなどの問題点がある。このような観点から、筆者らは、これまでにセンサで検出した船体の横揺れに基づき可動マスをアクチュエータ駆動することで減揺効果を得る能動型減揺装置を提案し、水槽による模型実験および小型船を用いた海上試験から良好な性能を確認している⁽¹⁾。

ところで、可動マスを減揺装置に用いる方法としては、第1図に示すように減揺力を発生させる要素の違いによりパッシブ方式、アクティブ方式、ハイブリッド方式の3方式があげられる。このうち、後者二方式は、いずれも、アクチュエータ駆動する能動型であるが、ハイブリッド方式で

第1表 減揺装置の分類
 Table 1 Classification of anti-rolling system

種別	項目	構 造	長 所	短 所
ビルジキール			1. 停船中、航走中ともに有効 2. 安価 3. 安定技術	1. 減揺効果小
アンチローリングタンク			1. 停船中、航走中ともに有効(横揺れ角を約1/2に低減) 2. 構造が簡単 3. 比較的安価	1. 船の動揺周期、波周期の変化で減揺効果が低減 2. 自由液面により復原性能が低下 3. 上部に設けた場合、後部の見通しが悪い
フィンスタビライザ			1. 設計点での効果大 2. 横揺れ周期の変化に対して最適制御が可能	1. 低速では減揺効果が低減 2. 高価 3. 船体付加物のため、船速低減の要因



第1図 力学モデル
 Fig. 1 Dynamic model

は、ばね要素と減衰要素がアクチュエータと並列に入っており、パッシブ方式とアクティブ方式を組み合わせた構造となっている。そのため、アクティブ方式に比べ少ない制御力で同等の効果を発揮することができるほか、停電時や何らかの故障が生じた場合にもパッシブ方式として有効であるなどの長所をもっていることから、大型船を対象とした場合にはもっともすぐれていると考えられる^{(2), (3)}。

そこで、本研究では、排水量約190tの調査監督船を対象に、あらたにハイブリッド方式の減揺装置を開発し、海上試験による性能確認を行なった。その結果、停船時の横揺れが、約1/3に低減できるだけの顕著な性能を発揮することが確認されたので以下に報告する。

2. 制御系の設計

第1図の力学モデルで、船体の運動に以下の仮定を設ける。

- (1) 横揺れを船体重心回りの回転とみなし、そのほか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、ハイブリッド方式における船体と可動マスの運動方程式を線形化して表すと次式のようになる。

$$I\ddot{\phi} + R\dot{\phi} + W\overline{GM}\phi = T + m_d g(x_d - \ell\phi) - f_d \ell \quad \dots\dots (1)$$

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

$$f_d = f_c + c_d(\ell\dot{\phi} - \dot{x}_d) + k_d(\ell\phi - x_d) \quad \dots\dots (3)$$

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

\overline{GM} ：メタセンタ高さ

ϕ ：船体横揺れ角

m_d ：可動マスの質量

c_d ：装置の減衰係数

k_d ：装置のばね定数

x_d ：可動マス変位

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

f_d ：船体に作用する水平合力

T ：波強制モーメント

g ：重力加速度

であり、パッシブ方式では、 $f_c = 0$ とすればよい。

また、アクチュエータには電動モータを用いたので、その動特性を考慮する。

本装置では、変位制御により駆動し、制御入力 u に対する可動マスの設置位置における相対変位 $z (= x_d - \ell\phi)$ の周波数応答を実験的に同定し、以下の2次遅れ系で近似した。

$$\ddot{z} + 2\zeta_m \omega_m \dot{z} + \omega_m^2 z = \omega_m^2 u - \ell \ddot{\phi} + g\phi \quad \dots\dots (4)$$

ここで、 ω_m および ζ_m は、それぞれ等価固有角振動数、等価減衰比を表す。制御系の設計には、LQ制御理論を適用した。 $\mathbf{x} = [\phi \ z \ \dot{\phi} \ \dot{z}]^T$ 、 $\mathbf{w} = T$ と定義し、(1)~(4)式を状態方程式の形で表すと次式となる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u + \mathbf{d}w \quad \dots\dots (5)$$

評価関数 J をつぎの2次形式で与える。

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

ここで、

\mathbf{Q} ：重み行列

r ：重み係数

これを最小にする制御入力は、次式に示す Riccati 方程式

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} - \mathbf{P}\mathbf{b}\mathbf{b}^T \mathbf{P}/r = 0 \quad \dots\dots (7)$$

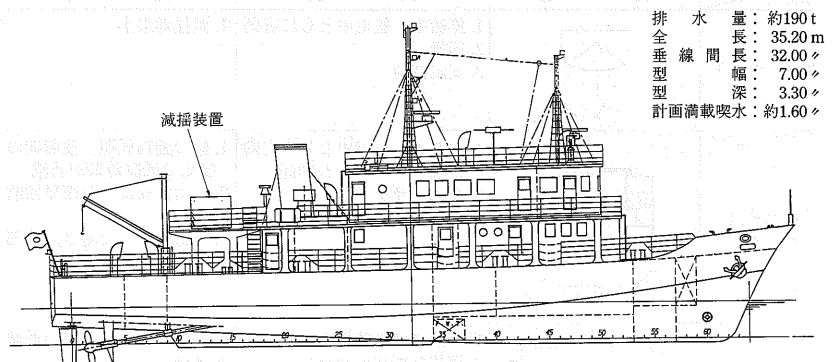
の解によって

$$u = -\mathbf{b}^T \mathbf{P} \mathbf{x} / r = -\mathbf{k} \mathbf{x} \quad \dots\dots (8)$$

で与えられる。

3. 試験装置

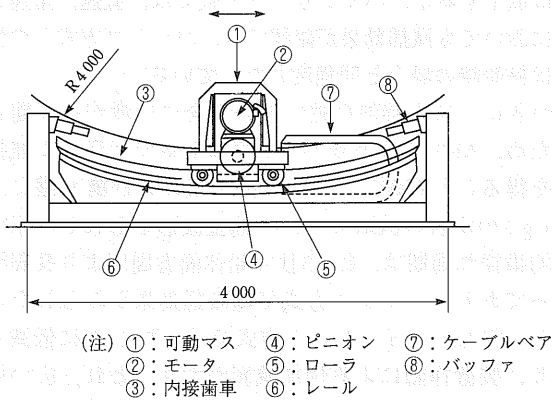
本研究に用いた供試船を、第2図に示す。本船は、排水量約190tの調査監督船で、チェーンをもち、かつ浅喫水の高速船の一種である。減揺装置は、船体上部構造物後部に新設した甲板上に設置した。第3図と第4図に減揺装置の構造および概観を示す。可動マスには、電動モータ、減速



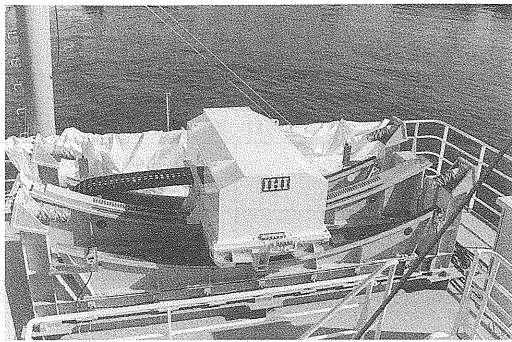
第2図 ハイブリッド式減揺装置を設置した対象船の概観

Fig. 2 Schematic view of ship equipped with hybrid anti-rolling system

可動マス質量：3.5t モータ容量：11kW
 最大変位：±1.1m 外形寸法：4.0×1.8×1.5m



第3図 ハイブリッド式減揺装置の構造 (単位: mm)
 Fig. 3 Hybrid anti-rolling system-key components (unit: mm)

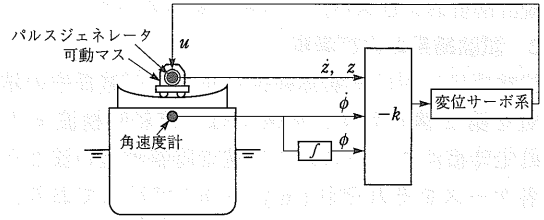


第4図 ハイブリッド式減揺装置の概観
 Fig. 4 Hybrid anti-rolling system-general view

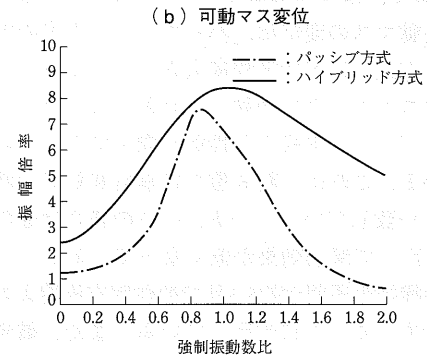
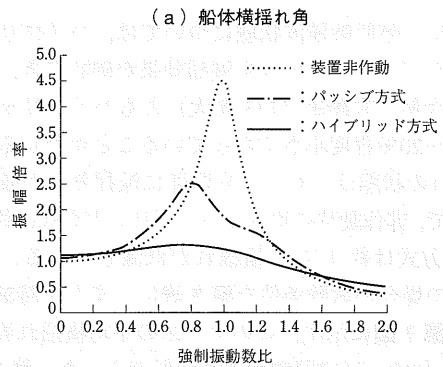
機が搭載されており、それ自体が、円弧レール上を歯車機構を介して揺動する。可動マスの質量は3.5tで排水量の約1.8%に相当する。可動マスの軌道を円弧とすることで、振り子の原理に基づくパッシブ方式の要素を持たせており、吊り機構、ばね機構を必要としないコンパクトな構造となっている。この機構に、電動モータ制御を加えることで装置全体としてハイブリッド方式が実現されている。本装置では、可動マスの固有周期は、船体の横揺れ固有周期と一致させた。また、減衰は、装置単体での自由振動結果より、等価粘性減衰が約30%であることを確認した。

第5図に制御系の構成を示す。船体には、角速度計が取り付けられており、角速度および、これを積分した角変位が得られる。一方、電動モータのパルスジェネレータから可動マスの速度、変位が得られる。これらの4個の信号に(8)式で求めたフィードバックゲインを乗じ、加算した信号を制御入力とした。

海上で装置を動作させるのに先立ち、減揺効果の予測解析を行なった。第6図は、装置非作動、ハイブリッド方式、パッシブ方式の各場合の周波数応答で、それぞれ点線、実線、一点鎖線で示している。ここで、同図の横軸は船体の横揺れ固有振動数に対する強制振動数比を、また縦軸は、 ϕ/ϕ_{st} (船体横揺れ) および、 $z/(\ell\phi_{st})$ (可動マス変



第5図 制御系
 Fig. 5 Control system



第6図 周波数応答
 Fig. 6 Frequency response

位、ここで、 ϕ_{st} : 静的角変位) で定義される振幅倍率を表す。ハイブリッド方式では、装置非作動時の約1/3～1/4に低減することを想定してフィードバックゲインを定めた。また、パッシブ方式の場合には、いわゆる最適同調、最適減衰は実現されていないが、非作動時の約1/2に低減できることがわかる。

4. 実海域試験

4.1 試験方法

実際の波浪中の横揺れに対する減揺効果を確認するため、装置を一定時間作動または非作動状態にし、以下の要領で実海域試験を行なった。

試験は、東京湾口から相模湾の海域において1994年2月15日～2月18日までの4日間、船速(停船, 低速, 全速)や船体の波との出会い角(横波, 斜め追い波)の影響について調べた。また、装置をパッシブ方式とした場合についても行ない、ハイブリッド方式との性能を比較した。各試験項目につき、計測時間は15分間とし、船体横揺れ角、可動マス変位、モータトルクなどの時刻歴波形を計測した

後、統計解析およびスペクトル解析を行なった。

4.2 試験結果および考察

各試験項目における船体横揺れ角および減揺率の結果の一覧を第2表に示す。同表では、停船時横波4ケース、航走時横波2ケースおよび航走時斜め追い波2ケースの各ケースをそれぞれ(a)~(h)で示しており、減揺率は欄外で定義している。また、船体横揺れの固有周期は、減揺装置による強制動揺試験の結果、4.83秒であった。

はじめに、停船時横波状態については、ハイブリッド方式、パッシブ方式のいずれも減揺効果が確認でき、横揺れ振幅の最大値、有義値(1/3最大)ともハイブリッド方式の方が15~20%程度小さくなっていることがわかる。条件(b),(d)の状態は、もっとも顕著に減揺効果が確認できたケースで、非作動時に比べてハイブリッド方式は約1/3、パッシブ方式は約1/2に横揺れが低減している。このうち、(b)の場合の試験条件を第3表に、また、時刻歴波形を第7図に示す。このケースの平均横揺れ周期は約4.9秒で、ほぼ同調横揺れ状態であった。第7図より、可動マスの変位は、ハイブリッド方式の方がパッシブ方式に比べ10%程度大きくなっており、可動マスのストロークを制御により若干大きめにとることで、パッシブ方式より性能が向上できていることがわかる。これは、第6図の数値計算結果の特性と良好に一致している。一方、(c)の場合は他の3ケースに比べて減揺効果が低くなっているが、これは、平均横揺れ周期が約5.1秒で船体固有周期よりやや長めであったことに起因している。また、航走

時横波では船体の減衰が大きくなるため、見かけ上、減揺率は低下するが、ハイブリッド方式では、低速、全速いずれにおいても減揺効果が確認でき、パッシブ方式との性能差は停船時の場合と同程度となっている。

つぎに、航走時斜め追い波の場合には波が長周期となるため、ARTのようなパッシブな装置では顕著な減揺効果を得ることが難しくなる。第3表および第8図に、条件(g)の場合の試験条件、時刻歴波形をそれぞれ示す。平均横揺れ周期は、約5.3秒で船体固有周期より長周期となっており、パッシブ方式では減揺効果がみられない。それに対し、ハイブリッド方式では、約1/2に低減しており、装置作動による付加減衰が大きくとれ、広い周波数領域でほぼフラットな特性を持たせる本方式では、航走時の長周期な横揺れに対しても十分な減揺性能が確保できていることがわかる。

第3表 海上試験条件

Table 3 Conditions for sea experiments

項目	試験条件	停船時横波：(b)	航走時斜め追い波：(g)
試験海域		東京湾口	城ヶ島沖
年月日		1994年2月16日	1994年2月17日
天候		晴れ	晴れ
目視波高(m)		0.25	0.6
目視波長(m)		5~6	8
目視波出会角		船体に対し右舷90度方向	船体に対し右舷135度方向
風速(m/s)		6	5~7
風向		船体に対し右舷40~90度方向	船体に対し右舷110~150度方向
船速(kt)		0	5.3

第2表 試験結果の一覧

Table 2 Experimental results

試験項目	種別	停船時横波				航走時横波		航走時斜め追い波		
		(a)	(b)	(c)	(d)	(e) 低速	(f) 全速	(g) 低速	(h) 全速	
船体横揺れ角 (片振幅) (度)	最大	非作動	6.13	5.81	5.79	4.81	2.77	2.95	5.52	5.02
		ハイブリッド作動	3.01 (51)	1.91 (67)	3.77 (34)	1.55 (68)	1.59 (43)	2.39 (19)	3.01 (45)	2.72 (46)
		パッシブ作動	4.00 (35)	2.86 (51)	4.40 (23)	2.83 (41)	2.01 (28)	3.22 (-9)	5.76 (-4)	—
	1/10 最大	非作動	4.70	4.38	4.29	4.07	2.03	2.19	4.35	3.49
		ハイブリッド作動	2.18 (54)	1.46 (67)	2.88 (33)	1.35 (67)	1.04 (49)	1.97 (10)	2.46 (43)	2.42 (31)
		パッシブ作動	2.90 (38)	2.23 (49)	3.42 (20)	2.51 (38)	1.73 (15)	2.51 (-15)	4.39 (-1)	—
	1/3 最大	非作動	3.77	3.25	3.41	3.44	1.60	1.76	3.55	2.82
		ハイブリッド作動	1.70 (55)	1.16 (64)	2.16 (37)	1.17 (66)	0.82 (49)	1.59 (10)	1.97 (45)	2.03 (28)
		パッシブ作動	2.33 (38)	1.66 (49)	2.70 (21)	1.98 (42)	1.56 (15)	1.99 (-13)	3.41 (4)	—
	平均	非作動	2.43	2.05	2.11	2.35	1.04	1.16	2.26	1.84
		ハイブリッド作動	1.13 (53)	0.74 (64)	1.35 (36)	0.79 (66)	0.53 (49)	0.47 (16)	1.28 (43)	1.38 (25)
		パッシブ作動	1.53 (37)	1.07 (48)	1.76 (17)	1.32 (44)	0.87 (16)	1.26 (-9)	2.15 (5)	—

(注) () 内は次式で定義される減揺率 (%) を示す

$$\left(1 - \frac{\text{船体横揺れ角 (装置作動)}}{\text{船体横揺れ角 (装置非作動)}} \right) \times 100$$

5. 結 言

船舶の停船時における横揺れを低減するため、排水量 190 t の調査監督船を対象に可動マス 3.5 t のハイブリッド方式の能動型減揺装置を開発し、海上試験による性能確認を行なった。その結果、以下の結論が得られた。

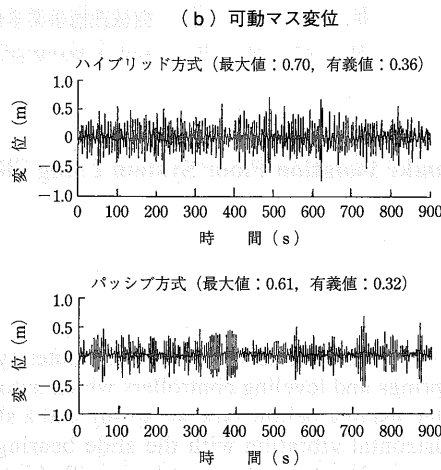
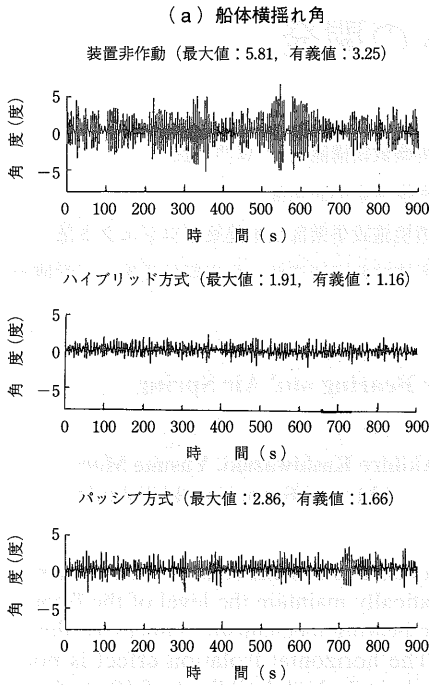
1. ハイブリッド方式により、停船時横波中の船体横揺れ角を約 1/3 に低減することができた。これは、ART に代表されるパッシブ方式に比べて 15% 程度性能が向上できたことに相当する。
2. パッシブ方式では低減が困難である航走時斜め追い波中においても、制御を取り入れたハイブリッド方式を採用することにより、船体横揺れ角を約 1/2 に低減することができた。
3. 実測結果は、理論計算結果と良好に一致した。

参 考 文 献

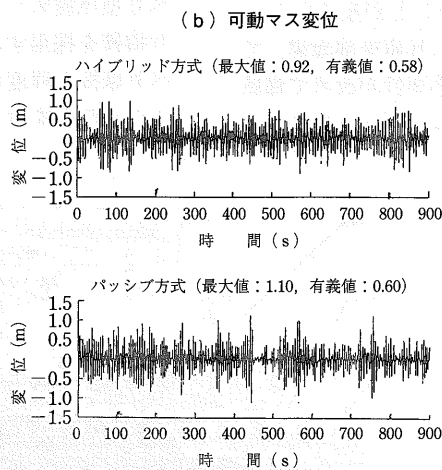
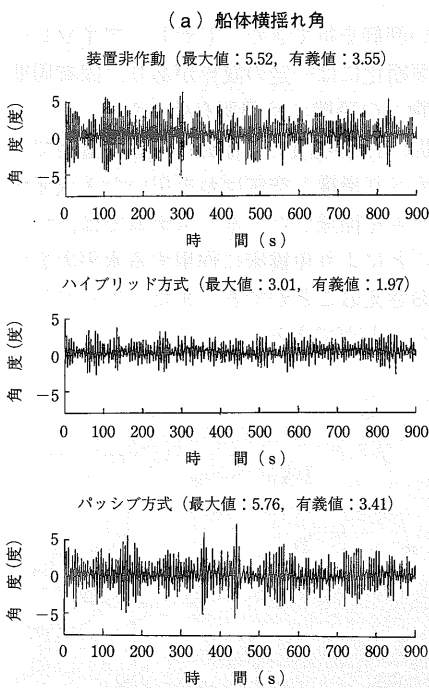
- (1) 及川未紀, 小池裕二, 茶谷光一, 重松祥三: 能動型減揺装置の開発と実海域試験 日本造船学会論文集 第174号 1993年 pp.217-223
- (2) 谷田宏次, 小池裕二, 牟田口勝生, 宇野名右衛門: アクティブとパッシブを組み合わせたハイブリッド式制振装置の開発 日本機械学会論文集 57-534 C 1991年 pp. 143-148
- (3) 谷田宏次: 長大構造物へのアクティブ制御技術の適用状況 日本造船学会誌 第777号 1994年 pp. 62-67

— 謝 辞 —

本研究に際して、株式会社郵船海洋科学の森 正彦博士(元, 当社技監)から真摯なご指導をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。



第 7 図 停船時横波に対する船体と可動マスの時刻歴波形 (実測値)
Fig. 7 Time history of responses of stationary ship and damper mass in beam seas (measured)



第 8 図 航走時斜め追い波に対する船体と可動マスの時刻歴波形 (実測値)
Fig. 8 Time history of responses of ship in forward motion and damper mass in following seas (measured)