ハイブリッド減揺装置の北太平洋における運用結果

正員 月 岡 哲* 門 馬 大 和**
正員 竹 内 倶 佳*** 正員 上 田 聡*

Operation of the hybrid anti-rolling system on board the R/V Mirai in the North Pacific Ocean

by Satoshi Tsukioka, *Member* Hiroyasu Mommah,
Tomoyoshi Takeuchi, *Member* Satoshi Ueda, *Member*

Summary

A hybrid anti-rolling system was equipped on board of the oceanographic research vessel "MIRAI" (8,672GT). The greatest advantage of the system is capable of reducing rolling motion by fifty percent. As it is the first system which was applied to a large vessel, it is necessary to examine operational conditions of the system at sea. Rolling and wave heights data collection was carried out to investigate not only the system performance, but also oceanic conditions corresponding to wave heights and wind velocities. Then, the measurement data were analyzed by statistical method. The system was operated up to Sea State 6 in the North Pacific Ocean. It was proved that the system functioned very well and had high reliability.

1. 緒 言

海洋地球研究船「みらい」(Photo 1) (8,687GT) は世界最大級の研究船として 1998 年に運用を開始した¹⁾。大型船としての利点を生かし、荒天でも観測作業が期待できる。観測作業を支援するため大型船として初めてハイブリッド式船用減揺装置(以下、「減揺装置」と称す)を搭載した²⁾。減揺装置は観測や甲板作業など停船時に効果が期待できるよう可動質量をコンピュータで制御し、横揺れを低減させることができる。減揺装置の実海域での運転状況を調査するため、減揺装置制御データ、波高計データおよび風データを連続記録した。本論文では、船体動揺角度と減揺装置の可動質量変位の関係を求めた。また、実海域データから船体横揺れ角度と可動質

量変位の関係を明らかにして減揺装置の能力を求めた。その結果、減揺装置はシーステート 6 までの海象で能力を発揮し、可動質量の変位にまだ余裕があることがわかった。荒天時も含め航海日数の約 60[%]で連続運転でき、高い信頼性を持つことが実証された。Table 1 と Table 2 にそれぞれ「みらい」と減揺装置の主要目を示す。

Photo 1 Oceanographic Research Vessel "Mirai" in the arctic ocean³⁾.

* 海洋科学技術センター
** 日本海洋事業株式会社
*** 電気通信大学

Fig.1 The side view of research vessel MIRAI. Anti-rolling device is mounted on high place near midship.

Table 1 Principal Particulars of research vessel MIRAI.

Length Overall	128.6m
Breadth	19m
Design Draft	6.5m
Displacement	9,400tf
Accommodations	80
Range	12,000n.m. cruising at 16knots

Table 2 Principal Particulars of a hybrid anti-rolling device.

Weight of the Moving Mass	100tf
Stroke of the Moving Mass	± 4.0m
Natural Period	13sec
Electric Motor	AC110kWx3

Fig. 2 Dynamic model of a hybrid anti-rolling device
A mass is held by spring and damper.

Fig.1 は船体の側面図を示す。減揺装置の効果を高めるために、減揺装置は船体重心付近のなるべく高いところに設置した。

2. 減 揺 装 置

減揺装置は、船上で船幅方向に移動する錘の位置をコンピュータで制御して、船体横揺れ角を低減するモーメントを発生する。船体に減揺装置を設置した力学モデルを Fig.2 に示す。本モデルでは船体と可動質量の 2 質量系にモータおよび減速機の駆動系を加え、これらの慣性モーメントの影響も考慮する。船体の横揺れは、横揺れ角度が小さいと仮定して線形近似する。

$$I_s \ddot{\phi} + R \dot{\phi} + (WGM) \phi = Tw + m_d g z - f_d l \quad (1)$$

$$m_d \ddot{x}_d + \left(\frac{I_p}{n_p^2} + \frac{I_m}{(n_p n_m)^2} \right) \ddot{z} = m_d g \phi + f_d \quad (2)$$

$$f_c = f_d + c_d \dot{z} + k_d z \quad (3)$$

ここで、

- I_s : 船体の重心周りの慣性モーメント
- R : 船体の減衰定数
- W : 船体の排水量
- $\overline{GM}$: 横メタセンタ高さ
- ϕ : 船体の横揺れ角
- x_d : 可動質量の絶対変位
- z : 可動質量設置位置における相対変位
 $z = x_d - l\phi$
- m_d : 可動質量の質量
- c_d : 装置の減衰係数
- k_d : 装置のばね定数
- l : 船体の重心から可動質量までの距離
- f_c : モータによる制御力
- f_d : 装置が船体に及ぼす水平合力
- I_p : ピニオン軸周りの慣性モーメント
- r_p : ピニオンの半径
- I_m : モータ軸周りの慣性モーメント

Fig.3 Transfer function of roll motion and mass displacement.

Table 3 Principal particulars of wave height meter.

Type	Ship-borne
Measurement method	Microwave Doppler radar
Range of wave height	0 ~ ±20[m]
Range of wave period	1 ~ 20[sec]
Resolution	1.4[cm]
Accuracy	±10[%] of measured value

Table 4 Principal particulars of anemometer.

Type	Wind vane
Wind direction	Synchro
Wind speed	AC generator
Start wind speed	2[m/s] or less
Wind speed resistance	90[m/s] or more
Heater	600[W]
Accuracy	±0.5[m/s] under 10[m/s] ±5[%] over 10[m/s]

 Fig.4 Block diagram of wave height meter¹⁾

n : モータ軸とピニオン軸回転数の係数

T_w : 波強制モーメント

g : 重力加速度

である。

モータが発生する力 f_r はラックピニオンを介して船体に横揺れ抑制モーメントを与える。可動質量とモータによる運動方程式は次式であらわされる。

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

u : 制御入力

ω_m : 等価固有角振動数

ζ_m : 等価減衰比

である。

(1)式から(4)式で示される船体と可動質量の連成運動を、船体の横揺れ角度 ϕ と可動質量の船体に対する変位 z から以下の状態方程式であらわすことができる。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{b}u + \mathbf{d}T_w, \quad \mathbf{x} = [\phi \quad z \quad \dot{\phi} \quad \dot{z}]^T \quad (5)$$

船体横揺れは波周期に大きく影響される。そこで、船体の横揺れ角度を小さくするための制御は周波数整形 LQG⁴⁾を適用した。周波数整形フィルタの状態変数を $\mathbf{X}_q$ と $\mathbf{X}_r$ として、以下の拡大システムを定義した⁴⁾。

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{x}}(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_q(t) \\ \dot{\mathbf{x}}_r(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{b}_q & \mathbf{A}_q & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{A}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(t) \\ \mathbf{x}_q(t) \\ \mathbf{x}_r(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{b}_r \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} \mathbf{d} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} T_w \quad (6)$$

拡大システムを最適レギュレータ問題として扱うため、評価関数を以下の2次形式で記述した。

$$J = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{E}[\mathbf{x}_{aug}^T(j\omega) \mathbf{Q}_{aug}(j\omega) \mathbf{x}_{aug}(j\omega) + \mathbf{U}_{aug}^T(j\omega) \mathbf{R}_{aug}(j\omega) \mathbf{U}_{aug}(j\omega)] d\omega \quad (7)$$

*は複素共役転置をあらわす。周波数重み行列 $\mathbf{Q}_{aug}$ と

$\mathbf{R}_{aug}$ はそれぞれ以下のように示される。

$$\mathbf{Q}_{aug} = \begin{bmatrix} \mathbf{D}_q^T \mathbf{D}_q & \mathbf{D}_q^T \mathbf{C}_q & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_q^T \mathbf{D}_q & \mathbf{C}_q^T \mathbf{C}_q & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_r^T \mathbf{C}_r \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_{aug} = \mathbf{D}_r^T \mathbf{D}_r \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{D}_{q,r}$ はそれぞれのフィルタの伝達ベクトルであ

る。制御エネルギーを最小にする制御入力は、リカッチ方程式の解から以下のように与えられる。

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{k}_x \mathbf{x}(t) - \mathbf{k}_q \mathbf{x}_q(t) - \mathbf{k}_r \mathbf{x}_r(t) \quad (9)$$

船体横揺れ角度から可動質量変位への閉ループ伝達関数は、フィードバックベクトルを $\mathbf{k}$ として以下のように与えられる。

$$\frac{z(s)}{\phi(s)} = \frac{c(s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{k})}{|s\mathbf{I} - \mathbf{A} + \mathbf{b}\mathbf{k}|} \quad (10)$$

Fig.3 は(10)式の周波数特性を示す。感度は13[sec](0.077[Hz])が最も高く4[sec]から13[sec]において21[dB]から29[dB]に変化することがわかる。

Table 5 Results of Attenuation ratio of anti-rolling device.

case	Att. ratio [%]	Anti-rolling device	Roll		Mass		Wave	
			Double amp. 1/3 [deg]	Period [sec]	Double amp. 1/3 [m]	Period [sec]	Height 1/3 [m]	Period [sec]
2-3	39	on	2.9	10.5	1.89	8.8	3.8	10.3
		off	4.7	12.4	-	-	4.4	10.4
5-6	34	off	5.9	12.8	-	-	3.2	8.7
		on	3.9	12.4	2.14	10.5	3.2	9.9

Fig.6 The time history of rolling motion shows the effect of anti-rolling system at sea state 5.

Fig.7 Time history of wave height.

3. 海象観測機器

海象観測機器として Fig.1 のように、波高計と風速計がそれぞれ船首と前後部のマストに設置された。Table 3 は波高計の主要目を示す。マイクロ波を利用したドップラー効果を用いて、船舶上の固定位置より海面の上下変位を測定して海面波高を測定する。Fig. 4 は波高計のブロック図を示す⁵⁾。ドップラーセンサーのマイクロ波発信器からのマイクロ波は、ホーンアンテナにより海面に向けて発射され、海面からの反射波がセンサー部で受信される。受信された信号はセンサー部の2組の検波ダイオードによって、海面上下動によって発生したドップラー周波数がその上下動の極性も含めて検出する。よって、測定した波高は船体の上下動の影響を受けるので、加速度計で上下動を計測し、変位を演算するために二重積分してドップラーセンサー部の上下変位置を求め、波高計測値を補正して絶対海面波高を算出する。Table4 は風速計の主要目を示す。設置位置は、前部と後部風速計がそれぞれキールから 30[m]と 43[m]である。前部風速計の計測データに本船のジャイロによる方位およびドップラーセンサーによる補正を行い、平均風速および真風向が求められる。風速の高さ補正は行っていない。

3. 実海域運用

3.1 減揺効果

2001年2月16日に航行中に減揺装置作動と非作動時の船体横揺れを計測した。両者を比較し、減揺装置の効果を確認した。Fig.5 は記録方法を示す。可動質量変位は波高データと同時にハードディスクに記録した。可動質量変位と波高計のサンプリング周波数はそれぞれ 4[Hz]と 2[Hz]で行った。また、風速計データを同時に記録した。運用条件として、船速と方位はそれぞれ 15[kn]と 160[deg]で一定であった。風向は 250[deg]から 310[deg]で最大風速は 20[m/sec]であった。Table 5 は計測結果のまとめを示す。船体横揺れ角度、可動質量変位

Fig.5 A block diagram of on board data collection method. (ARS data is stored on a hard-disk to synchronize with wave data.)

Fig.9 Results of statistical analysis of roll motion, mass motion and wave height in twenty days (MR00-K06 Leg.1).

Fig.8 Vessel track on MR00-K06

Table 6 Summary of MR00-K06 from Leg.1 to Leg.3.

Wave Height H _{1/3} [m]	Sea State	Times [points]	Frequency [%]	Roll angle double 1/3 [deg]
0 - 1.25	0-3	1839	48.1	3.41
1.25 - 2.5	4	1635	42.7	5.36
2.5 - 4.0	5	317	8.28	9.06
4.0 - 6.0	6	36	0.941	11.6
total	-	3827	100	-

および波高データは、ゼロアップクロス法⁶⁾で有義値と周期を求めた。減揺装置が作動して 30[%]から 40[%]横揺れが低減したことがわかった。可動質量の有義両振幅は約 2[m]であった。Fig.6 はそれぞれ減揺装置作動時と非作動時の船体横揺れと可動質量変位の時刻層波形を示す。(a)から case2 から case3 では装置を作動から非作動としたので、横揺れ角度が増大することがわかる。case2 と 3 では、非作動のほうが有義波高は高めであるが、補正は行っていない。Case5 から case6 では装置を非作動から作動させたので、横揺れ角度が低減することがわかる。Fig.7 は試験時の波高時刻層波形を示す。波高時刻層データを 30[min]ごとに区切り、有義波高を求めた結果 3.2[m]から 4.4[m]であった。

3.2 船体横揺れ角度と可動質量変位

Fig.8 は 2000 年 8 月 4 日から 10 月 14 日に実施された研究航海「北極海観測研究」⁷⁾ (以下 MR00-K06 と称す)の航跡を示す。Table 6 に計測結果のまとめを示す。MR00-K06 は Leg.1 から Leg.3 の 3 つの期間からなり、Leg.1 は関根浜からシアトル(米)まで、Leg.2 はシアトルからダッチハーバー(米)まで、Leg.3 はダッチハーバー

Fig. 10 Significant double roll angle and mass amplitude on MR00-06 from Leg.1 to Leg.3.

Fig. 11 Relationship between significant double amplitude and maximum amplitude of mass.

Fig. 12 Relationship between significant double amplitude and number of round trip of mass.

から関根浜までであった。データ記録方法は Fig.5 と同一である。Leg.1 から Leg.3 を通じて、可動質量変位と波高時刻暦データをそれぞれ 20 分毎に区切って解析を行った結果、約 5,200 データ、寄港時を除外すると約 3,800 データを得た。Fig.9 は最も海象が厳しかった Leg.1 における(a),(b)および(c)は船体横揺れ角、可動質量運動、波高の時刻暦データを 20[min]ごとに区切り、有義値で示す。(a)から関根浜を出港して7日後、船体横揺れ角度が急激に増加し、両振幅で最大 11.8[deg]に達したことがわかる。このとき(b)から減揺装置は作動し、可動質量の変位は有義値で最大 2.8[m]であることがわかる。(c)から有義波高は 4.8[m]でシーステート 6 であったことがわかる。(d)と(e)は風速、風向の平均値を示す。風速は最大 20[m/sec]に達し、風向は大きな変化が見られず、130[deg]から 180[deg]を示している。よって、海面には南から南東方向の波浪があったと推定できる。(f)は船首方位を示す。船首方位がスパイクノイズのように見えるのは、停船している場合である。出航後5日後の船首方位は約 60[deg]を示している。よって、船体は 40[deg]から 120[deg]の方向から波を受けていたと推定できる。船体はほぼ横波を受け、減揺装置は厳しい条件で運用されていたと考えられる。

Fig. 10 は船体横揺れ角度と可動質量の有義両振幅の関係を示す。船体横揺れ角度と可動質量の振幅は 2 つの傾向に区分できる。まず横揺れ角が 6[deg]以下では両者は比例する。船体横揺れ角度が両振幅で 5[deg]のとき、可動質量は両振幅で 3.1[m]であることがわかる。両者の比をとると 35.6[m/rad](31.0[dB])となる。Leg1 における船体横揺れの有義周期は 4[sec]から 18[sec]であった。Fig.3 からその周期における利得は 21[dB]から 29[dB]の利得を示している。船体横揺れは不規則なので、周波数応答と比較することは難しいが、ほぼこの帯域での最大値と等しいと考えられる。次に、横揺れ角が 4[deg]を超え 12[deg]までは、可動質量の振幅がほぼ一定となる。可動質量の変位はレール長で制限されているので、振幅が大きくならないように変位を制限したためである。切り替えは手動で通常運転モードから荒天モードに切り替えた。これは、Fig.9(a)の船体横揺れ角度が最大となる時と一致する。Fig.11 は可動質量の有義両振幅と最大振幅の関係を示す。可動質量の振幅はレール長で制限されるので、有義両振幅と最大変位を求めた。はほぼ理論的に推定されるように船体運動振幅、従って可動質量の振幅分布はレイレイ分布になると予想される⁸⁾。Fig.12 は 20 分ごとに統計解析を行った時系列データにおいて、最大振幅と山数の関係を示す。可動質量の有義両振幅が 1[m]より大きい場合、統計解析を実施した山数

Fig.13 Significant wave height and double roll angle on MR00-06 from Leg.1 to Leg.3.

は 100 山であることがわかった。よって、最大片振幅／有義片振幅 $\div 1.6$ (理論値)となる⁸⁾。Fig.11 で見ると $2[m]/2.5[m]/2=1.6$ と理論値とはほぼ一致している。よって、可動質量変位が有義両振幅で $4.8[m]$ 以内であれば可動質量は、レール長 $(8[m])$ を超えないと推定できる。Fig.13 は有義波高と船体横揺れ角度の関係を示す。船体への波向かい角を考慮していないので、有義波高と船体横揺れ角はばらついている。包絡線を取り上側が横波を受け、減揺装置の運転において最も過酷な条件と仮定すれば有義波高と船体横揺れ角の関係を推定することができる。船体横揺れ角が $6[deg]$ となるのは、有義波高で $3.5[m]$ である。よって、MR00-K06 では有義波高 $3.5[m]$ まで減揺装置を効果的に使用できた。

結 言

実海域で減揺装置の作動時および非作動時の船体横揺れを計測した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 減揺装置作動時と非作動時で船体横揺れ角度は有義値で比較した結果、減揺装置作動によって最大 $40[\%]$ 減少し、横揺れ低減に効果が見られた。
- 2) 減揺率は一定でないと考えられ、検討課題とする。研究航海「MR00-K06」において、減揺装置運転データと波高データを記録した。減揺装置の船体横揺れ角度と可動質量変位および船体横揺れ角度と有義波高との関係を求めた。その結果、以下の結果が得られた。
 - 1) 船体横揺れ角度と可動質量変位はほぼ比例する。
 - 2) 可動質量両振幅の有義値と最大振幅は理論的に推定されるようにほぼ比例する。
 - 3) 可動質量の両振幅の有義値が $4.8[m]$ 以下ならば、最大変位も $4[m]$ 以下となり、装置の能力を最大限活用することができる。

用することができる。

- 4) 運用では可動質量の有義両振幅の最大値は約 $3[m]$ である。可動質量のストロークは $4[m]$ であるので、減揺装置には余裕があると考えられる。
- 5) 減揺装置は海象が穏やかで休止していた時間を除外すると、全航海時間の約 $60[\%]$ 、シーステート 6 までの海象で常時作動し、信頼性が高いことを実証した。

謝 辞

実験データの収集には赤嶺船長をはじめとする「みらい」乗組員の方々にご協力を頂きました。株式会社マリンワークジャパン海洋科学部伊藤淳雄氏、白石健太郎氏にはデータ回収に際して、ご助力をいただきました。日本海洋事業株式会社海洋科学部樋泉昌之氏には航跡図を作成していただきました。また、石川島播磨重工業株式会社の精谷毅一氏、小林日出雄氏ならびに山下高広氏には多大なご助言を賜りました。ここに深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) MIRAI Data Web: <http://w3.jamstec.go.jp/mirai>.
- 2) 岡哲、佐伯愛一郎、宮部宏彰、藤田俊助: ハイブリッド式船用減揺装置の開発と実海域試験、日本造船学会論文集、第 184 号(1999)、191-196.
- 3) 海洋科学技術センター北極海研究グループホームページ, http://w3.jamstec.go.jp:8338/index_j.htm.
- 4) 岡哲、竹内俱佳: ハイブリッド式船用減揺装置の電力特性と動揺抑制力、日本造船学会論文集、第 190 号(2001)、641-647.
- 5) Akio Yasuda, et. al. (April 1985): Ship-borne Type Wave Height Meter for Ocean Going Vessels with Microwave Doppler Radar, IEEE.J. of Ocean Engineering, Vol.OE-10.No.2, 138-143.
- 6) 光易恒: 海洋波の物理、26-39、岩波書店.
- 7) Takatoshi Takizawa: "MR00-K06" Cruise Report, http://w3-jamstec.go.jp/mirai/2000/0006_cruise_report.html.
- 8) Stanislaw R. Massel(1996): Ocean Surface Waves: Their Physics and Prediction, 136-142, World Scientific.