

ハイブリッド式船用減揺装置の運転と制御

小林 日出雄 船舶海洋事業本部船舶海洋技術統括部 部長代理
 小池 裕 二 技術開発本部機械・プラント開発センター大型機械システム開発部 課長
 今関 正典 機械鉄構事業本部鉄構事業部土木・鉄構技術部
 山下 高広 船舶海洋事業本部船舶海洋技術統括部

Operation and Control of Hybrid Anti-Rolling System on Ships

KOBAYASHI Hideo, KOIKE Yuji
 IMAZEKI Masanori, YAMASHITA Takahiro

The hybrid anti-rolling system is automatically controlled to maintain the safety and reliability of both the ship and the system, using the following conditions. When the ship rolling is below the design condition, the mass displacement is controlled so that the designed effect of the system can be obtained. When the ship rolling is extreme, the mass movement is controlled not to reach the stroke end even if the system would overshoot the ordered point. When the ship rolling is small, the system stops automatically (auto-sleep). The control method of the hybrid anti-rolling system is described with reference to the first system applied to the oceanographic research vessel "MIRAI", and operated continuously for almost one year without any problem.

キーワード：動揺制御，船体動揺，能動制御，受動制御，横揺れ，減揺装置，観測船

1. 緒言

「揺れない船」は乗船する人々の夢であり、造船技術者および機械技術者にとっては長年の課題である。すでにアンチローリングタンクやフィンスタビライザなど横揺れ低減技術が実用化されているが、アンチローリングタンクは船舶の積付状態による横揺れ固有周期の変化や波周期の変化に追従することが困難であり、またフィンスタビライザは高速で航行している時だけ効果があり、低速航行時や停船時には効果がないなど、適用船が限定される。

ハイブリッド式船用減揺装置は、停船時も航行時も減揺効果が発揮できることを目標として開発された。

2. ハイブリッド式減揺装置の概要

本装置は横揺れを減じる方向に可動マスを移動させることを基本とし、振り子の力を利用する受動制御と、動力で可動マスの移動を制御する能動制御を組合せ利用している。

海洋科学技術センターへ納入した海洋地球研究船「みらい」(第1図)へその実用第1号機(第2図)は搭載された。荒天海域での停船観測時や観測点への航海時のいずれにおいても横揺れ低減が必要であり、本装置が採用された。「みらい」は長さ(垂線間)116 m, 幅(型)19 m,

深さ(型)10.5 mである。減揺装置は、排水量の約1%に相当する100 tの可動マス重量を110 kW×3基の電動機で最大ストローク左右4 mの範囲で移動させる。観測作業が行われる海象条件の上限シーステート5(有義波高4 m)において、船体横揺れを約50%程度に低減できることが確認されている⁽¹⁾。

3. 制御系設計

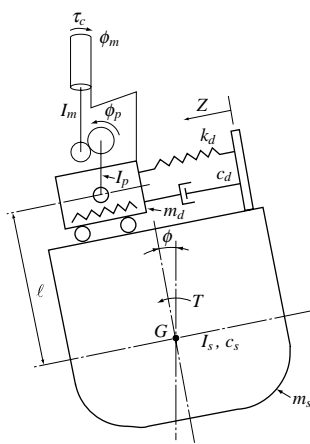
船体に減揺装置を設置した力学モデルを第3図に示す。本装置では、モータ3台による同期制御が行われるため、



第1図 海洋科学技術センター向け海洋地球研究船「みらい」
 Fig. 1 Oceanographic research vessel "MIRAI" of JAMSTEC



第2図 100 t マス型ハイブリッド式船用減揺装置
Fig. 2 Hybrid anti-rolling system with 100t mass weight



第3図 船体に減揺装置を設置した力学モデル
Fig. 3 Dynamic model of hybrid anti-rolling system on a ship

制御力の評価には駆動系の回転慣性の影響が無視できない。そのため、本モデルでは、船体と可動マスの2自由度系⁽²⁾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している。船体の運動を重心回りの横揺れとみなし、減衰には等価線形化した粘性減衰を仮定する。まず、以下の記号を定義する。

- m_s : 船体の質量 (可動マス含まず)
- I_s : 船体横揺れの質量慣性モーメント
- I_p : ピニオン軸系の質量慣性モーメント
- I_m : モータ軸系の質量慣性モーメント
- m_d : 可動マスの質量
- c_s : 船体の横揺れ減衰係数
- c_d : 可動マスの減衰係数
- GM : メタセンタ高さ
- k_d : 可動マスのばね定数
- ϕ : 船体横揺れ角
- z : 可動マス変位 (船体に対する相対変位)

- ϕ_p : ピニオン軸の回転角
- ϕ_m : モータ軸の回転角
- l : 装置設置高さ (船体重心から上向きを正)
- n_p : ピニオン軸の回転から可動マスの重心変位への変換係数 ($z=n_p\phi_p$)
- n_m : モータ軸の回転からピニオン軸の回転への変換係数 ($\phi_p=n_m\phi_m$)
- f_c : 制御力 ($\tau_c / (n_p n_m)$, τ_c : モータトルク)
- T : 波制御モーメント
- g : 重力加速度

この2自由度系の運動方程式をラグランジュの運動方程式より導出し、線形化を行うと次式が得られる。

$$(I_s + m_d l^2) \ddot{\phi} + c_s \dot{\phi} + (m_s g \overline{GM} - m_d g l) \phi = T + m_d g z - m_d l \ddot{z} \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$(m_d + I_p / n_p^2 + I_m / (n_p n_m)^2) \ddot{z} + c_d \dot{z} + k_d z - m_d g \phi + m_d l \ddot{\phi} = f_c \quad \dots\dots (2)$$

本制御では、船体横揺れ角、横揺れ角速度、可動マス変位および可動マス速度のみをフィードバックするとし、制御入力を次式の出力フィードバック形式で与える。

$$u = -k y \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$y = C x \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 $y = [\phi \dot{\phi} z \dot{z}]^T$ である。 k はフィードバックゲインで、準最適制御法(最小ノルム法)⁽³⁾を用いて決定した。そのために、アクチュエータの動特性とフィルタの特性を考慮に入れた拡大系を次式の状態空間で表示する。

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

ここで、 $x = [\phi \dot{\phi} \eta x_f]^T$ であり、 x_f はフィルタの状態変数である。また、 η はアクチュエータの状態変数であり、ここではその動特性を次式の周波数特性で与えている。

$$z(s)/u_d(s) = (b_1 s + b_0) / (a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0) \quad \dots\dots (6)$$

ここで、 u_d は変位入力、 s はラプラス演算子を表す。 $a(i=0, 1, 2, 3)$ および $b(i=0, 1)$ の各係数は、地上での装置単体試験で得られた周波数応答を曲線適合することによって同定した。

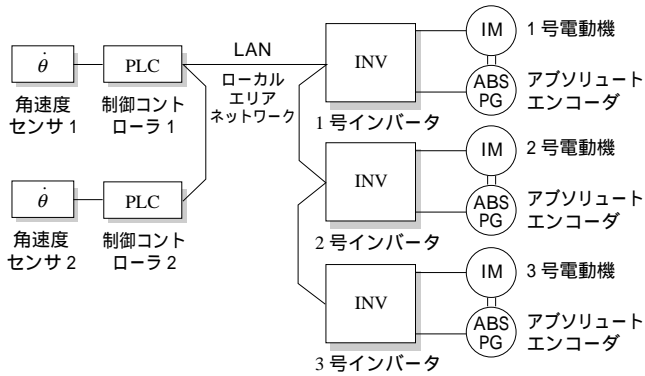
準最適制御法によれば、フィードバックゲインは、LQ制御理論で求めた最適制御ゲイン k_{opt} と観測マトリクス C から次式で与えられる。

$$k = k_{opt} C^T (C C^T)^{-1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

4. 制御システム

制御システムのシステム系統図を第4図に示す。設計対象条件下で2台で運転可能な容量の電動機と制御用インバータユニットを各3台構成とし、内1台故障時には2台運転で使用を可能にするとともに、切換運転可能な制御コントローラを2式設置した。電動機は速度制御には、大容量電動機は速度制御に優れた特性をもつベクトルインバータを使用した。制御コントローラには、保守性、信頼性、メンテナンス性を考慮し、汎用PLC（プログラマブルコントローラ）を採用した。

本機の制御機能は、制御コントローラのプログラムとしてPLC内部のメモリに格納されている。制御ブロック図を第5図に示す。制御ブロックは船体角速度・角変位演算部、



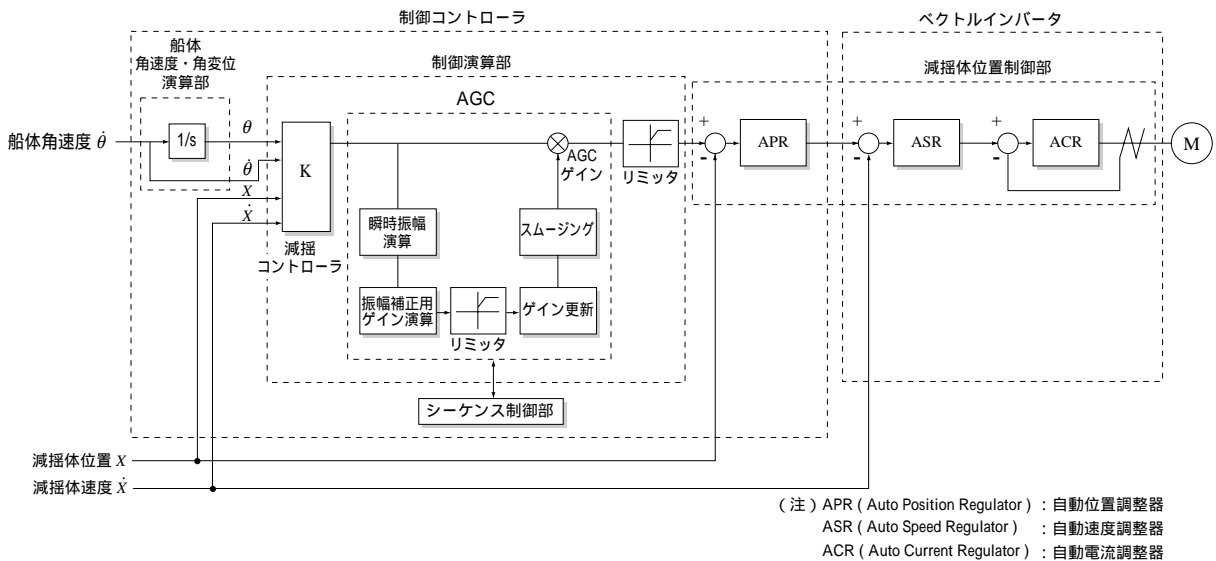
第4図 制御システム系統図
Fig. 4 Control system diagram

制御演算部、減揺体位置制御部、シーケンス制御部からなる。船体角速度・角変位演算部では、船体に取り付けられた角速度センサから船体横揺れ角速度を検出し、横揺れ角変位は横揺れ角速度を積分して算出する。制御演算部には、減揺コントローラの出力段にAGC（Auto Gain Controller）および変位リミッタを装備し、コントローラからの過大な出力を制限し、減揺体の運動を限定されたストローク内に制御できるようにした。

減揺体位置制御部では、電動機軸に取り付けたアブソリュートエンコーダから減揺体の位置および速度を検出する。減揺体の位置は、インバータのもつ速度制御ループに比例制御ループを重ねた多重ループ系によって制御され、3台の電動機を同期運転する。シーケンス制御部では、装置の起動停止および故障警報を制御するシーケンス制御に加え、減揺体速度信号を差分して得られる減揺体加速度と船体角速度から装置が船体を減揺・加振のいずれに働いているか演算し、加振した場合に警報を発する逆加振検出機能を付加した。

(1) AGC

本制御の特徴であるAGCは、外乱の増大に対して減揺体の運動振幅を目標範囲内（AGC上限および下限）に収まるようにゲインを自動的に調整する機能である。開発初期段階の制振装置では、位置指令の増大によって減揺体が振幅上限値を超えて装置が停止したり、減揺体変位指令がソフトウェアリミッタで保持されることによって高調波が発生し、逆に系を励振して



(注) APR (Auto Position Regulator) : 自動位置調整器
ASR (Auto Speed Regulator) : 自動速度調整器
ACR (Auto Current Regulator) : 自動電流調整器

第5図 制御ブロック図
Fig. 5 Control block diagram

しまうという問題があった。これらの問題を解決するため AGC は開発され、制振装置に適用されてきた。本機においてもその適用は設計当初から計画された。しかしながら、本機が船体の横揺れ低減に使われることを考えると、ランダムに発生する 1 発の大波にも安全に対応できるものでなければならない。このため本機においては、陸上の制振装置の AGC に比較して、ゲインの絞り込み遅れや戻し遅れを小さくし、滑らかな絞り込み特性を実現できる回路を採用した。

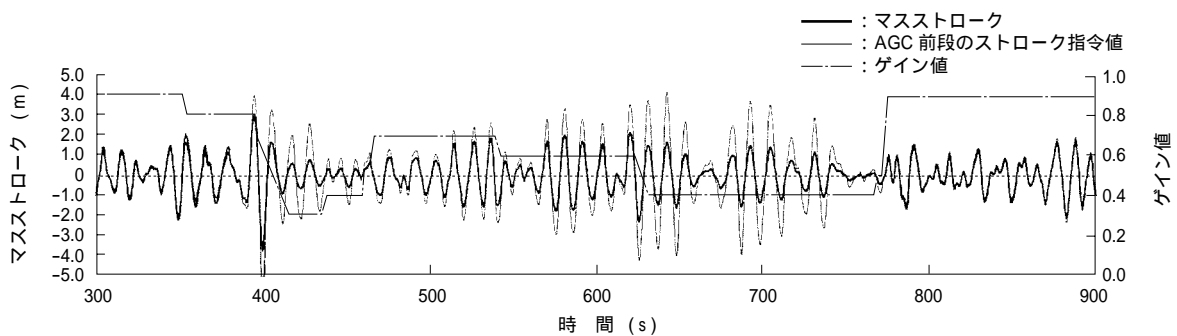
(2) AGC 設定項目 (荒天 / 通常モード)

本機では、AGC の操作項目として、荒天 / 通常モードの選択ができるようになっている。このモード選択は AGC の目標振幅を切り替えるものであり、通常モードに対して荒天モードでは AGC の目標振幅が小さく設定される。このため荒天モードを選択すると、減揺体の移動ストロークを小さく抑制すると同時に、減揺体の速度および電動機に要求される制御力についても抑制が可能である。この荒天モードを選択することによって、設計当初、装置の常用海象条件として想定したシーステート 5 を超える荒天海域においても、駆動電動機の力量の範囲内において装置を使用できる。

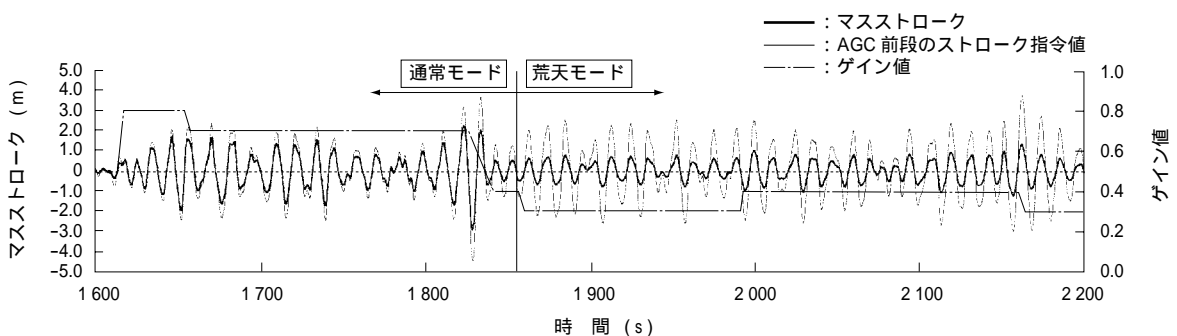
5. 波浪中での減揺装置の運転状況

「みらい」は、1997 年 9 月末に海洋科学技術センターへ引き渡された後、荒海域として代表的な北太平洋高緯度海域の冬季観測を始め、北は夏季の北極海、南は赤道海域からオーストラリアまで、太平洋全般の海洋観測航海に従事している。減揺装置は一時期、電線支持装置の故障があったが、その改良対策を 1999 年 4 月に終え、その後は現在に至るまで電源が常時「入」のまま連続運転されている。この間、荒天海域においても制御が計画どおり行われており、装置の安全性および高信頼性が実証された。

実航海中に継続的に計測・記録された装置の挙動および船体運動に関するデータから、制御の状況を報告する。AGC によるゲイン調整の実際の様子を第 6 図に示す。太実線はマスストローク、実線は AGC 前段のマスストローク指令値、一点鎖線はゲイン値である。マスの変位指令値すなわちゲイン値が、船体動揺の状況に合わせて変化しているようすが分かる。400 秒付近で船体が大きく動揺しストローク指令値が大きくなったため、ゲインを 0.8 から 0.2 まで下げているが、その後、動揺が収まると再びゲインを 0.9 まで戻している。第 7 図に運転モードを通常モードから荒天モードへの切替時の時系列データを示す。



第 6 図 マスストローク制御時系列
Fig. 6 Time series data of mass stroke control



第 7 図 荒天モードへ切替時のマスストローク制御時系列
Fig. 7 Time series data of mass stroke control at switchover to rough sea mode

1 800 秒から 1 900 秒の間で通常モードから荒天モードへ切り替えている。1 800 秒付近で 3.0 m 近くまでマスがストロークしているが、その後、操船者の判断で荒天モードに切り替えたものと考えられる。切替後はゲインが下がり、ストロークを抑えた状態で運転を継続している。

平均横揺れ角速度 - 最大マスストロークの関係を、2000 年 1 ~ 2 月のデータに基づき、通常モードと荒天モードに分けて第 8 図に示す。平均横揺れ角速度、最大マスストロークの各点の統計解析時間は各々 1 625 秒間である。

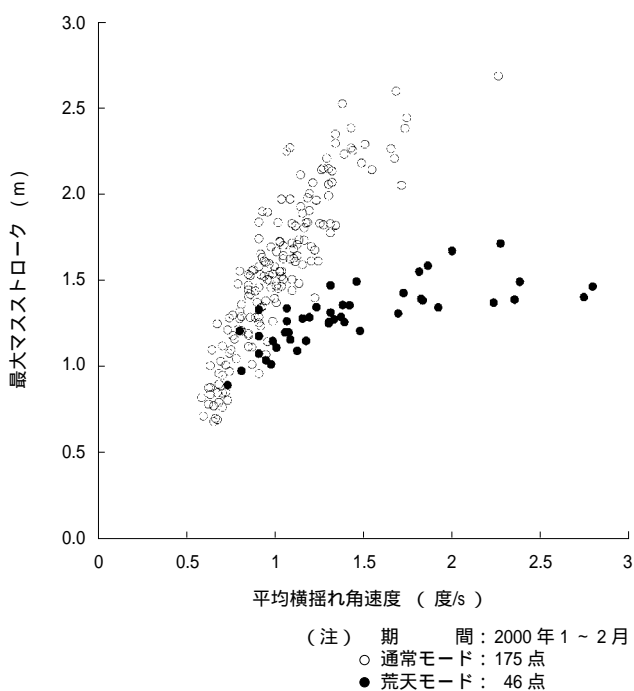
通常モード：2.5 m、荒天モード：1.5 m のオートゲイン開始点付近まではおおむね横揺れ角速度に最大マスストロークは比例し、オートゲイン開始点を超えるとマスストロークはほぼ一定になる。荒天時にはゲイン変更の遅れによるオーバシュートが発生することが予想されていた。実際には、荒天時モードに切替えることによってオーバシュート量は小さく抑えられている。

6. 結 言

1999 年度には、海洋地球研究船「みらい」は年間航海日数 280 日、夏季の北極海、冬季の高緯度北太平洋を含む広範囲の海域で運航された。その間、減揺装置の電源を一度も「切」にすることなく運転を行うことができ、さまざまな運転条件下で高い減揺効果・安全性・信頼性を発揮することが実証できた。

参 考 文 献

- (1) 小池裕二, 佐伯愛一郎, 牟田口勝生, 今関正典, 宮部宏彰, 山下誠也: ハイブリッド式船用減揺装置の実船への適用 日本造船学会論文集 第 185 号 1999 年 6 月 pp.111 - 117
- (2) 小池裕二, 吉海 研, 広重栄基, 谷田宏次, 牟田口



第 8 図 運転モードによる最大マスストローク
Fig. 8 Maximum mass stroke in the different operation modes

勝生: 能動型減揺装置の開発と実海域試験 - 続報 - 日本造船学会論文集 第 176 号 1994 年 11 月 pp.137-143

- (3) R. L. Kosut: Suboptimal Control of Linear Time Invariant System Subject to Control Structure Constraints IEEE Trans. on Automatic Control (1970) pp.557 - 563

謝 辞

減揺装置の開発および運転データの取得に当たっては、海洋科学技術センターおよびグローバル・オーシャン・デバイスロップメント株式会社から多くのご助言とご協力をいただきました。ここに記し、深く感謝いたします。