主機関の統計的同定と最適制御に関する研究 (第2報)

正員 石 塚 正 則* 正員 大 津 皓 平**
堀 田 敏 行*** 正員 堀 籠 教 夫****

Statistical Identification and Optimal Control of Marine Engine System (Part 2)

by Masanori Ishizuka *Member* Kohei Ohtsu *Member*
Toshiyuki Hotta Michio Horigome *Member*

Summary

This paper deals with a new digital type of marine engine governor which can regulate fluctuations of not only propeller revolution but also torque. The basic models for predicting their fluctuations are a control type of multi-variate auto regressive model which is fitted by minimum AIC estimate procedure. Using these models, the authors designed two types of marine engine governor. Actual on-board experiments are carried out by using a small type of training ship with a controllable pitch propeller.

In this paper, the authors report on the results of the actual experiments and make clear that the newly proposed engine governor can regulate the propeller rpm and the torque at the same time.

1. ま え が き

船舶用ディーゼル機関には、プロペラ回転数を一定に保持するため調速機（ガバナ）が取り付けられている。そのうち機械式ガバナは、ワットの蒸気機関制御のため作られた遠心制御式調速機を起源とし、安定化のための種々の工夫がなされ今日に至っている¹⁾。一方、最近の電子技術の発展は、電子式ガバナの開発を生み、多種多様な要求に対応するため、さまざまな機能を持ったガバナが今日開発されている²⁾。著者等も古典的な制御則を基本とするCPP用電子ガバナを開発し実船試験によりその有効性をすでに確認した³⁾。しかし最近、燃費低減、低質油対策などの要因により、船用機関のロングストローク化や低速化が進み、それに伴い、

- (1) 制御にとって好ましくないむだ時間 (Dead Time) の増大

- (2) シリンダ内最高圧力 (P_{Max}) の増大による回転むらの増加

等の問題が生じてきている⁴⁾。

しかしながら、従来の回転数の変化により作動する機械式ガバナでは、これらの問題や要求に充分対応出来ず、しかも結果として回転数変動を増長させ不安定になることが懸念されている。特に、従来から荒天中のレーシングやトルクリッチなどに対しては、より強靱な制御が要求されてきた。このような背景から著者等は、第1報⁵⁾において上記の事項を実現させるため従来の古典的制御規則で働くガバナにかわって、多変数の場合にも拡張可能な現代制御論による最適制御型ガバナの開発を提唱し、具体的に2つのシステム構成を提案した(第1報 Fig. 1, Fig. 2)。そして、実際に稼働中のデータを用いてガバナ回転数系の統計的同定から、その系のインパルス応答関数、周波数応答関数を推定しこのような系の伝達関数のモデル形を新しく提案した。ところで、第1報で提案した第2の方式(Fig. 1)では、特にプロペラ回転数変動に関与する外乱の周波数オーダの相違を考慮し、2重ループを構成した。しかしながら、このうち長周期の外乱源が何に起因するかについては、種々の原因が考えられ、それらのうち制御の面からみてどのような状態変数が統計的に有意であるかさらに検討すべき必要がある^{6)~9)}。そこで本論文では、このループは今回考慮せ

* 日本郵船(株)技術開発センター

** 東京商船大学海洋工学講座

*** 東京商船大学汐路丸

**** 東京商船大学交通電子制御工学講座

Fig. 1 Schematic Diagram of New Governor System Proposed in the Former Paper⁵⁾

ず、もう一方の従来のガバナが担ってきた部分、すなわち Fig. 1 で言えば下側のループについて考えることとする。そして、まず回転数を入力とし、その変動を抑制するための制御信号をアクチュエータを通してラック棒に与える制御について、このシステムの統計的モデルによる最適制御システムの設計法、シミュレーション結果ならびに実船実験の結果について報告する。また、回転数の他にトルクの変動を抑える目的をガバナに与えた場合の制御系の設計法も示し、その実船試験の結果についても報告する。

2. 供試主機関の概要

本論文における一連の実験では、第1報と同様に東京商船大学練習船汐路丸のディーゼル主機関システムを制御対象として実船実験を行った（汐路丸及び同主機関の主要目については第1報を参照されたい⁵⁾）。なおこの主機関には、PID 演算を基本とする船舶用電子ガバナシステム（以後、これを機側ガバナと称する）も備わっている。その概要は、Fig. 2 の上半分に示す通りであり、バックアップ用として機械油圧式ガバナも内蔵している。ところで、すでに第1報⁹⁾で述べたように、著者らは Fig. 2 の下側にあるようなシステムを付加し機側ガバナから計算機制御へ移行す

Fig. 2 A Newly Developed Engine Governor System for DDC Experiment

Table 1 Specification of New High Speed Computer System

項目	仕様
CPU	プロセッサ 数値演算プロセッサ
メモリ	ROM RAM
内部補助記憶装置	3.5インチ HDD
外部補助記憶装置	3.5インチ FDD
CRT	14インチ カラーモニタ
LAN方式	ML ライン

る手法を開発した。この手法によれば、手動により安全かつ完全に研究室内の計算機に制御権を移行することが可能である。なお、今回制御に用いた計算機は、第1報で使用したものより高速なもの（YEWMAC 600）であり、Table 1 にその仕様を示す。また、原等の実験結果によれば³⁾、計算機モードに移行した場合、指令ガバナ入力信号に対して忠実に燃料ポンプラックを作動させるため、アクチュエータにサーボループを設けた方が制御効果の改善が見込めることが明かになった。したがって、本システムにもこの方法をソフト的に実現して実験を行った。なお本文において、操作入力として用いるガバナアクチュエータの部分をガバナ操作量と表現したり燃料ポンプラック位置と表現しているが、前者はアクチュエータへの計算機からの指令、後者は実際の燃料ポンプラック棒の位置を意味している。

3. 多次元的回帰モデルによる回転数最適制御系の設計

3.1 設計モデル

船用主機関の回転数最適制御系を設計するために、(1) 式のような制御型多次元自己回帰モデルを考える。このモデルによる制御法はすでに著者の一人が、オートパイロットの設計において用いた方法である^{10),11)}

$$X(n) = \sum_{i=1}^M a(i) X(n-i) + \sum_{i=1}^M b(i) Y(n-i) + U(n) \quad (1)$$

ここで、 $X(n) = (x_1(n), x_2(n), \dots, x_r(n))^t$ で一般に r 次元の状態ベクトルとし、本論文では主機関回転数 (rpm)、あるいはトルク（従って $r=1$ もしくは 2 ）とする。また、 $Y(n) = (y_1(n), y_2(n), \dots, y_l(n))^t$ で l 次元の操作変数ベクトルとし、本論文では、ガバナ操作量 ($l=1$) とする。

$U(n) = (u_1(n), u_2(n), \dots, u_r(n))^t$ は、 $X(n)$ の偶然変動を表す r 次元白色雑音ベクトルである。

また $a(i)$, $b(i)$ はそれぞれ $r \times r$, $r \times l$ の回帰係数行列である。そしてその推定量は、統計的偏差が生じないように、第一報で用いたような出来るだけフィードバックをかけないランダムなガバナ操作を行った場合の時系列データの組 $\{X(n), Y(n), n=1, 2, \dots, N\}$ から最小二乗法により決定される。

また、モデルの最適次数 M は、赤池情報量準則 AIC (Akaike's Information Criterion),

$$AIC(M) = N \log(\det(d_{r,M})) + 2r(r+l)M + r(r+1) \quad (2)$$

によって決定する。ここで

N : データ長

$d_{r,M}$: データにモデル式をあてはめた後の残差 $u_i(n)$ の分散共分散行列

とする。また M は次数であり実用的観点から、1 次より最大次数 19 次程度とし、その領域で AIC が最小となる次数を選択する。

次に、(1) の制御型自己回帰モデルを状態空間表現に変換する。この変換は一意的ではないが、ここでは得られた観測値が、将来使われる形式で保存され、次の制御信号が非常に短い時間で得られるように、次のような変換法を用いる。

いま、新しく状態変数 $Z_0(n), \dots, Z_{M-1}(n)$ を考え、最新情報 $X(n)$ が得られたとき、それを予測値 $Z_0(n)$ の実現値と見なし

$$\begin{cases} Z_0(n) = X(n) \\ Z_i(n) = Z_{i+1}(n-1) + a(i+1)Z_0(n-1) \\ \quad + b(i+1)Y(n-1), \quad i=1, 2, \dots, M-2 \\ Z_{M-1}(n) = a(M)Z_0(n-1) + b(M)Y(n-1) \end{cases} \quad (3)$$

とする。さらに、

$$Z(n) = (Z_0(n)^t \dots Z_{M-1}(n)^t)^t$$

$$W(n) = (U(n)^t 0 \dots 0)^t$$

$$\Phi = \begin{pmatrix} a(1) & I & \dots & \dots & 0 \\ a(2) & 0 & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ a(M-1) & 0 & \dots & \dots & I \\ a(M) & 0 & \dots & \dots & 0 \end{pmatrix}, \quad \Gamma = \begin{pmatrix} b(1) \\ b(2) \\ \vdots \\ b(M-1) \\ b(M) \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$H = (I \quad 0 \quad \dots \quad 0)$$

と置くと、状態空間表現

$$\begin{cases} Z(n) = \Phi Z(n-1) + \Gamma Y(n-1) + W(n) \\ X(n) = HZ(n) \end{cases} \quad (5)$$

を得る。この表現では、 $X(n)$ の 1 ステップ先の予測が

$$\hat{X}(n) = Z_1(n-1) + a(1)X(n-1) + b(1)Y(n-1) \quad (6)$$

と極めて簡単な演算で得られると言う利点がある^{11), 12)}。本論文でも、この表現法を用いることにする。次に、このシステムを p ステップ間の 2 次評価関数

$$I_p = E \left[\sum_{n=1}^p [X(n)^t Q X(n) + Y(n-1)^t R Y(n-1)] \right] \quad (7)$$

Q : 被制御変数に対する $r \times r$ 重み非負行列

R : 制御変数に対する $l \times l$ 重みの非負行列

E : 統計的期待値

のもとで $Y(n-1)$ を最適に操作し、 I_p を最小にするような最適制御則を導く。この解は良く知れているように

$$P_0 = Q$$

から出発して

$$\begin{cases} M_i = P_{i-1} - \Gamma^t (R + \Gamma^t P_{i-1} \Gamma)^{-1} \Gamma^t P_{i-1} \\ P_{i-1} = \Phi^t M_i \Phi + Q \\ G_i = -(R + \Gamma^t P_{i-1} \Gamma)^{-1} \Gamma^t P_{i-1} \Phi, \quad i=1, \dots, p \end{cases} \quad (8)$$

と逐次計算を進めることにより求まる。このとき p 段先を考慮した最適制御を行うには現時点では、

$$Y^*(n) = G_p Z(n) \quad (9)$$

と制御入力を与えれば良い。そして p を長くすれば定常システムの場合固定ゲインのフィードバック制御

$$Y(n) = GZ(n) \quad (10)$$

G : 制御ゲイン行列

となることが知られている¹²⁾。

3.2 シミュレーションによる制御ゲインの選択

具体的な設計に入る前に、まず前報で述べたようにランダムな入力を与えた時の出力を得るために、ディジタル型 PI 制御を基本とし、その上にそれまでに得られたガバナ操作量の分散値の平均の 30% の分散に相当する分散をもつ白色雑音を印加したデータを採用した。そして 3.1 で述べた方法で制御型自己回帰モデルによる同定を行い最適制御ゲイン G を計算した。

制御周期は、0.1 sec と決定した。ところで、ゲイン計算の場合、重み関数 Q, R については適当なものを設計者が選定する必要がある。

この手続きとして、下式のホワイトノイズによるディジタルシミュレーションにより適当な判断を加えながら Q, R を修正し、制御系を設計する方法がある。ここで $W(n)$ の分散は、モデル (1) の残差の分散と一致するように発生する。

$$\begin{cases} Z(n) = \Phi Z(n-1) + \Gamma Y(n-1)^* + W(n) \\ Y(n)^* = GZ(n) \end{cases} \quad (11)$$

そして、シミュレーションの評価は、シミュレーションの全期間の各変数の変動の最大、最小、平均値及び分散値によって行う。

以上まとめると、次の手順に従って最適系の設計を行うことになる。

- (1) ランダムなガバナ操作量による時系列データ (PI 制御に適当な乱数を重畳した操作入力をガバナアクチュエータに与えたときの回転数変動、トルク変動データ) の収集。
- (2) MAICE 法による制御型自己回帰モデル (1) の当てはめ。
- (3) 実データのモデルにおける $U(n)$ の分散値と一致した分散をもつ乱数列の作成。
- (4) 重み係数 Q, R の選択。
- (5) 選択した Q, R に対する制御ゲイン G の計算。

- (6) (11)式による適当な長さのシミュレーションの実行。
- (7) ステップ(4)～(6)の繰り返しによる適切なゲインの探索。

3.3 回転数・ガバナ系の最適制御シミュレーション

まず、被制御変数として主機回転数、制御変数としてガバナ操作量を採用した場合のモデルを、第1報で述べた同

Table 2 Optimal Gains and Simulation Results of the Optimal RPM-Governor Rack System

ゲイン名	rpm Q(1.1) / R(1.1)	Variance (rpm)	Variance (ordered rack)
A 0 0 0 1	0.001 / 1.0	13.5790	0.00154
A 0 0 0 5	0.005 / 1.0	7.9387	0.01951
A 0 0 1	0.010 / 1.0	5.1275	0.04375
A 0 0 5	0.050 / 1.0	1.4252	0.13902
A 0 1	0.100 / 1.0	0.9199	0.18251
モデル作成用 オリジナルデータ	—	10.9110	0.29736

Fig. 3 Simulation Results of the Optimal RPM-Governor Rack System by Various Gains with Different Q/R Weights

Fig. 4 Time Histories of Simulation by Gain with Q/R (0.01/1.0)

定用データを用いて作成した。この時のモデルは6次モデルが採用された。Table 2は、このモデルを予測モデルとして使い、重み係数比 Q/R を左から2番目の欄の値にしたときのシミュレーション結果を示している。ここで R は、常に1.0と固定しているが、その理由は1入力1出力系を考える場合、 Q と R の比が同一であると、与えられたゲインは同一値となることによる。Fig. 3はこれらのゲインに対するシミュレーションの結果得られた回転数の変動とガバナ操作量の分散を、 Q/R 比を基準にして示す。また、Fig. 4はこのうち $Q : R = 0.01 : 1$ (A 001 ゲイン) の場合についてのシミュレーション結果を図中の SWITCH の左半分に、モデル作成のためのオリジナルデータを右半分に描いたものである。これらの図から分かるように、 Q が上昇するにつれてガバナ操作量が大きくなるが、いずれの場合も現用ガバナ操作量より少ない操作で回転数変動を抑えることが出来ることがわかる。また操作量の変動速度も、現用アクチュエータで十分に追従することが出来る程度であることもわかる。

3.4 回転数、トルク・ガバナ系の最適制御シミュレーション

3.3の回転数・ガバナシステムは、従来の回転数変動のみを抑制する制御系であった。ところで、特に荒天中機関は回転数のみならず負荷の変動が激しくなり、これがトルクリッチ、レーシング、サージング等の現象を誘発する^{6)~9)}。従って、回転数のみならずこの負荷変動も極力抑制するガバナの開発も必要であろう。そこで状態変数として回転数及びトルク、操作変数としてガバナ操作量を採用する1入力2出力系のガバナの開発も同時に試み、シミュレーションを行った。このときのモデル(1)の次数は、9次であった。この場合、 Q, R の選択に当っては、3.3で述べたような1入力1出力系と異なり、1入力2出力系であるので、同一比の Q, R に対して同一ゲインが得られる保証はない。そこで、次のような値を目安として、種々のシミュレーションにより検討した。

- (1) Q の対角項については、モデル(1)によって自己回帰モデルを当てはめ、そのとき生じた残差に対応する項の2乗の逆数を目安とする。
- (2) R としては、操作変数として許容可能な分散の逆数を目安とする。
- (3) (11)式に従いシミュレーションを行い、操作変数 $Y(n)$ の分散を求める。この分散が操作変数の変動の許容限界内であれば、評価関数における操作入力への重みを小さくする。許容範囲を越えておれば、操作入力への重みを大きくする。

このような方針でシミュレーションを繰り返し、最適ゲインを数種用意した。Table 3は、用意したゲインとそのシミュレーション結果の一覧表である。この結果から回転数のみならず、トルクの変動も0.1 sec 間隔の燃料ガバナ操

Table 3 Optimal Gains and Simulation Results of the Optimal RPM, Torque-Governor Rack System

ゲイン 名	rpm torque rack Q(1.1)/Q(2.2)/R(1.1)	Variance (rpm)	Variance (torque)	Variance (ordered rack)
S 1 0	0.8 / 0.007 / 30.0	2.7024	0.0043417	0.080915
S 0 9	1.0 / 0.007 / 30.0	2.4129	0.0043590	0.089574
S 0 8	1.2 / 0.007 / 30.0	2.2192	0.0043771	0.096809
S 0 7	1.4 / 0.007 / 30.0	2.0805	0.0043946	0.103050
制御系作成用 オリジナルゲイン	—	25.6707	0.0056299	0.450825

作量により,十分に抑えることが可能であることがわかる。

4. 実 船 実 験

3.3, 3.4 で検討したシミュレーションの結果によると,本論文で目指す回転数-ガバナ系, 回転数, トルク-ガバナ系とも 3.1 で提案した最適制御法による制御効果は, 大きいことがわかった。

本章では,すでに述べた設計法に基づいて開発した最適制御ガバナ (以下最適制御ガバナという) による実船実験について報告する。本実船実験はこの2年間数度にわたって実施されてきた。ここで, 報告する結果はその代表的な結果の一部である。

4.1 最適制御ガバナ系の構成

これまで述べてきたガバナ系をまとめると, 次の2種類の制御系となる。

- (1) 回転数-ガバナ系
被制御変数: 回転数
制御変数: ガバナ操作量
- (2) 回転数, トルク-ガバナ系
被制御変数: 回転数, トルク
制御変数: ガバナ操作量

実船実験もこの2種類について行った。本実験の制御における基本サンプリング時間間隔は, 0.1 sec で行い, 使用ゲインについてはシミュレーションから良好と判定した Table 2, 3 に示すゲイン行列を使用した。実船実験は, Fig. 2 に示した供試船のデジタルガバナシステム内の切替スイッチを計算機制御モードとすることにより実施した。なお, 機側ガバナから計算機制御への切替スイッチは, 手動スイッチである。しかし, これは機械 (有接点) 式であるので, 切替時に 10 rpm 程度の回転数変動が生ずる。このため実際の切替え作業は, 機側と計算機側の出力制御信号レベルを一致させた状態で行った。さらに, 切替え直後の回転数変動を安定させるためデジタル PI 型制御を行うことにし, 最適制御ガバナ実験は, すべてこの PI 型制御によって回転数が十分安定した後に実施された。

4.2 最適制御ガバナの実験とその解析

4.2.1 実験状態

本節以降では, 実船試験の結果を示す。実験はなるべく

同じ気象, 海象条件となるよう連続的に実施した。また, 本船装備の機側ガバナとの比較を行うため, 一連の最適制御ゲインによる実験の直前と直後に機側ガバナによる実験を実施した。従って, ほぼ同条件のもとで各実験が実施されたと判断しても差し支えないであろう。

4.2.2 回転数-ガバナ型システムによる実船実験

回転数を被制御変数に, ガバナ操作量を操作変数に選んだ時の最適制御ガバナによる実験結果を Fig. 5 に示す。このときのゲインは Table 2 の A 001 ゲイン ($Q: R = 0.001: 1.0$) であった。本実験シリーズを実施した時の気象, 海象は風力 2 で左舷正横より風波を受け, 約 12 k/t で航行中であった。

また Fig. 6 は, 上述の実験直後に行った機側ガバナによる実験結果である。両図とも, 上から回転数, 燃料ポンプラック位置を表わす。Table 4 は, 最適制御ガバナ実験と前後して行われた最適制御ガバナ及び機側ガバナの実験結果のまとめである。また, Fig. 7 はこの実験の回転数変動および実際のガバナラック位置の分散値を各ゲイン比につい

Fig. 5 Time Histories of the Actual Experiment of the Optimal RPM-Governor Rack System by Gain with $Q/R(0.01/1.0)$

Fig. 6 Time Histories of the Actual Experiment of the Conventional Governor System

Table 4 Statistics on the Series Experiments of the Optimal RPM-Governor Rack System

系	Item	Variance (rpm) ゲイン			Variance (FO pump rack position) ゲイン		
		A0001	A0005	A001	A0001	A0005	A001
最適制御型ガバナ		7.1952	2.2512	1.2730	0.01963	0.02541	0.07563
機側ガバナ		4.0120			0.171

Fig. 7 Evaluation of the Actual Experiment of the Optimal RPM-Governor Rack System by Gains with Different Q/R s

て示したものである。これらの図や表で分かるように、回転数変動は、その分散値において一番低い A 0001 ゲインを除き、機側ガバナと比較し、最適制御ガバナのほうが減少していることがわかる。また、その場合の燃料ポンブラック位置の変動量は、いずれの場合も少ない量で回転数を制御していることが分かる。さらに Fig. 5 と Fig. 6 の時系列を比較すると、最適制御型ガバナでは、機側ガバナに比較して、高周波の制御を行っていることもわかる。

Fig. 8 と Fig. 9 は、ラグ 0, 0.1~0.5 sec における回転数と燃料ポンブラック位置の散布図で、前者は最適制御ガバナの場合、後者は機側ガバナの場合である。両図の比較から、最適制御ガバナの場合、回転数変動に対するこのガバナの制御が負の線型制御を行っているが、機側ガバナでは、散布状況にバラツキがあり、非線型制御要素の存在などをうかがわせる結果となっていることがわかる。

次に各データのスペクトラム解析の結果を Fig. 10 (最適制御ガバナ)、Fig. 11 (機側ガバナ) に db 表示で示す。Fig. 10 を見ると、回転数変動、燃料ポンブラック位置ともに約 4 sec に 1 回程度の周期で変動している。またさらに高周波側 (1.2 sec に 1 回付近) にもう一つの変動がある。これに対して、Fig. 11 の機側ガバナには、最適制御ガバナの場合と同じく 4 sec に 1 回の周期変動が見られ、この周辺のパワーは最適制御の場合よりもはるかに大きいパワーとなっ

FO Pump Rack Position

Fig. 8 Scattering Diagrams of the RPM vs the Governor Rack with lag 0~0.5 sec in the Optimal Governor by Gain with Q/R (0.01/1.0)

FO Pump Rack Position

Fig. 9 Scattering Diagrams of the RPM vs the Governor Rack with lag 0~0.5 sec in the Conventional Governor

Fig. 10 Power Spectra of the RPM and the Governor Rack in the Optimal Governor by Gain with Q/R (0.01/1.0)

Fig. 11 Power Spectra of the RPM and the Governor Rack in the Conventional Governor

ている。最適制御ガバナの場合、この周波数付近の制御に成功した結果、変動の分散値が少なくなったものと見られる。しかし機側ガバナでは、1.2 sec 付近の変動は見られない。これらの帯域における変動の要因については、今の所不明であり今後さらに解析を進める必要がある。またその解析結果などによっては、Fig. 1 における上側の制御ループの変数選択に影響を及ぼすであろう。

4.2.3 回転数、トルクガバナ型システム

次に、回転数、トルクを被制御変数、ガバナ操作量を制御変数とした場合の、最適制御ガバナによる機関制御の計測データの比較を同様に Fig. 12 に示す。上から回転数、トルク変動及び燃料ポンプラック位置データを表わし、またこのときの気象、海象条件は、風力2で斜めより風を受け

Fig. 12 Time Histories of the Actual Experiment of the Optimal RPM, Torque-Governor Rack System by Gain with Q/R (1.2/0.007/30.0)

Fig. 13 Time Histories of the Actual Experiment of the Conventional Governor

た状態である。最適ゲインは、Table 3 中の S08 ゲインである。Fig. 13 はほぼ同時に採られた機側ガバナの結果であり、Table 5 はこの実験シリーズの統計量を示す。Table 5 によると、回転数は機側ガバナよりその分散は悪い結果となっている。しかしこれに対して、トルクの変動幅、分散値は最適制御ガバナのほうが格段に小さくなっており、分散値で約 1/2 である。しかも燃料ポンプラック位置の変動量は、機側ガバナにくらべ極めて少ない量(約 1/2)である。したがって、回転数変動を抑えるため、評価関数における回転数の項にさらに重みを置いたゲインを用いても良いかもしれない。次に、最適制御ガバナの場合の回転数、燃料ポンプラック位置、トルクのスペクトラムを示した図が Fig. 14、同じく機側ガバナの場合が Fig. 15 である。

回転数スペクトラムをみると、機側ガバナで 4 sec の周

Table 5 Statistics on the Series Experiments of the Optimal RPM, Torque-Governor Rack System

Item	系	最適制御型ガバナ	機側ガバナ
r p m	maximum	703.369	703.064
	minimum	696.960	697.876
	mean	699.794	700.728
	variance	1.147	0.527
t o r q .	maximum	2.676	2.469
	minimum	2.374	2.146
	mean	2.542	2.311
	variance	0.002	0.004
r a c k	maximum	25.983	24.609
	minimum	24.609	22.641
	mean	25.377	23.561
	variance	0.074	0.155

Fig. 14 Power Spectra of the RPM (left), the Torque (middle) and the Governor Rack (right) in the Optimal Governor by Gain with Q/R (1.2/0.007/30.0)

Fig. 15 Power Spectra of the RPM (left), the Torque (middle) and the Governor Rack (right) in the Conventional Governor

期にピークがあるが、最適制御ガバナになると長周期変動とともに約 1.3 sec の周期付近にピークがみられる。このことは、回転数—ガバナ系の場合と同じ傾向である。ただし、ピーク周波数がそれぞれ異なっているので船体運動に起因する変動である可能性もある。燃料ポンプラック位置のスペクトラムを比較すると、機側ガバナ、最適制御ガバナともに長周期変動から下がるが、最適制御ガバナにおいては周期 1.3 sec にピークが存在している。このピーク位置は最適制御ガバナにおける回転数の場合と一致している。トルクのスペクトラムでは、機側ガバナ、最適制御ガバナともに回転数のスペクトラムとピーク位置は似通っている。ただし、これらいずれのピークも、機側ガバナより最適制御ガバナの方が量的に少ない。これらの結果を総合すると実際の運航状況においてトルク一定モードとした時の利点あるいは欠点に関しては様々な意見があろうが、ここではそのような運転モードへの切替もトルクの情報を状態変数として組み入れるだけで可能であることを示していると言える。

なおここでは、1 入力 1 出力型、および 1 入力 2 出力型のオンライン制御実験時における気象、海象など外的環境条件がそれぞれ異なるので、この両者の比較は行わないことにする。

5. 結 論

第 1 報⁵⁾では、船体運動の影響を考慮した新しい電子ガバナシステムの必要性を述べ、その構成法を提示し、実際に実船データを用いてシステムの統計的同定を試みた。本報では、その新しい電子ガバナ設計のための統計的モデルを提示し、そのモデルに基づいた最適制御システムの設計法を述べた。そして第 1 報で得られた航行中の同定用データを用いて最適制御ガバナを試作し、実船 (CPP 装備小型練習船) の主機関システムにおいてオンライン制御実験を行った。その結果、

- (1) 制御時間間隔 0.1 sec で設計された主機回転数を状態変数、ガバナ操作量を操作変数とする 1 入力 1 出力型最適制御ガバナでは、ほぼ同時に計測された機側ガバナより極めて少ない燃料ポンプラック位置の変化により、プロペラ回転数変動を機側ガバナの回転数変動の分散の最高約 1/4 に抑えることができた。
- (2) 制御時間間隔 0.1 sec で設計された主機回転数、トルクを状態変数とし、ガバナ操作量を操作変数とする、主として負荷変動を小さくすることを目的とした 1 入力 2 出力型の多変数最適制御ガバナでは、主機回転数はやや機側ガバナよりもその分散量において劣るもののトルクを分散で約 1/2 に抑制する制御成績を得た。そして、その時燃料ポンプラック位置の変動は極めて少なく、したがってさらに回転数変動を抑制するようなゲインのガバナの設計も可能であると考えられることが確認できた。

今後の検討すべき課題として、

- (1) 本論文で得られた結果を Fig. 1 で示したガバナの下半分の基本系として用い、その上で図の上半分のループすなわち主機関に働く船体運動や操舵信号を入力情報とした時の主機関回転数の変動予測情報から最適設定回転数を設定し、結果として、回転数及びトルク変動量をさらに少なくする制御系の設計を行い、実船実験を行うこと。
- (2) 運転状況、海象、気象状況に応じた最適制御ゲインを選択及び作成できるような制御系の構成を行うこと。

等がある。

最後に本研究を行うにあたって、実船実験等で東京商船大学汐路丸船長松村助教授以下乗組員の方々には大変協力して頂きました。ここに深甚の謝辞を表します。また、実験結果について検討していただきました東京商船大学原誠技官に謝意を表します。また、たびたび貴重なアドバイスを頂いた統計数理研究所北川源四郎博士、およびいつも暖かく筆者等を励まして頂いている同所長赤池弘次博士、三

井造船昭島研究所顧問山内保文博士, 小山健夫東京大学教授, 日本郵船株式会社技術開発センター所長上田一郎氏に深く感謝の念をささげます。

参 考 文 献

- 1) ポントリャーギン著, “常微分方程式”, 木村俊房訳, 共立出版, 1963, pp. 208~214
- 2) 林直司, 徳光洋文, “電子ガバナとその動向”, 日本船用機関学会, Vol. 24, No. 12, 1989
- 3) 原誠, 堀籠教夫, 堀田敏行, 大津皓平, DDC によるディーゼル主機関回転数制御について(1), (2)” 第44回, 45回, 船用機関学会講演前刷, 1989, 1990
- 4) 堀籠教夫, “推進機関システムの自動化” 船の運航自動化技術, 日本造船学会, 運動性能研究委員会第8回シンポジウム, pp. 133~162, 1992
- 5) 石塚正則, 大津皓平, 堀田敏行, 堀籠教夫, “主機関の統計的同定と最適制御に関する研究(第1報)”, 日本造船学会論文集, Vol. 170, 1992
- 6) 中村彰一, 内藤林他, “波浪中におけるプロペラ単独特性と負荷変動について”, 関西造船協会誌, 159号, 1975
- 7) 小川原陽一, 岩田省治, 辻田孝, 佐々木弘蔵, “コンテナ船のような高速船舶用ディーゼル主機の荒天時における調速”, 三菱重工技報, 第8巻, 第1号, 1971
- 8) 内藤林, 中村彰一, “レーシング時のプロペラ単独特性および負荷変動について”, 関西造船協会誌, 第172号, 1979
- 9) 金順甲, 内藤林, 中村彰一, “波浪中における低速船の推進性能に関する研究”, 関西造船協会誌, 第196号, 1985
- 10) K. Ohtsu, M. Horigome and G. Kitagawa, “A New Ship's Autopilot Design through a Stochastic Model”, Automatica, Vol. 15, No. 3, 1979
- 11) 大津皓平, “船体運動の統計的最適制御に関する研究(1), (2)”, 日本造船学会論文集, Vol. 152, Vol. 153, 1983
- 12) 赤池弘次, 中川東一郎 “ダイナミックシステムの統計的解析と制御”, サイエンス社, 1985