



Title	統計的最適制御理論を用いた操舵による横揺減揺制御に関する研究
Author(s)	織田, 博行
Citation	大阪大学, 1992, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.11501/3063625">https://doi.org/10.11501/3063625</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

統計的最適制御理論を用いた

観能による横撻減撻制御に関する研究

平成4年6月

織田博行

①

統計的最適制御理論を用いた  
操舵による横揺減揺制御に関する研究

平成4年6月

織田博行

## 目次

### 緒論

A.1	本論文の背景	1
A.2	本論文の目的	6
A.3	本論文の構成	8
	参考文献	9
	図表	12

### 第1章 操舵と横揺減揺制御

1.1	緒言	16
1.2	操舵の横揺に及ぼす影響	17
1.2.1	操舵による横揺応答	17
1.2.2	横揺と船首揺との関連	18
1.3	横揺減揺制御の考え方とその現状	20
1.4	フィンスタビライザによる横揺減揺制御	21
1.5	結言	23
	参考文献	24
	図表	25

### 第2章 船体運動の自己回帰モデル表現

2.1	緒言	31
2.2	定常確率過程とその意味	32
2.3	定常時系列モデルの表現	33
2.4	自己回帰モデルの定常性と予測機能	35
2.5	自己回帰モデルの係数推定	37
2.6	統計モデルにおけるモデルの選択	39
2.7	自己回帰モデルによる横揺の予測	42
2.8	結言	43
	参考文献	44
	図表	46

第3章	自己回帰モデルによる横揺を含めた保針制御系の解析	
3.1	緒言 .....	51
3.2	多次元時系列のスペクトル解析 .....	52
3.3	フィードバック系のシステム解析 .....	55
3.4	実船データによる横揺を含む保針制御系の解析 .....	60
3.4.1	方位角、横揺角速度及び舵角の自己回帰モデル表現 .....	60
3.4.2	自己回帰モデルによる保針制御系のデータ解析 .....	61
3.5	結言 .....	65
	参考文献 .....	66
	図表 .....	67
第4章	制御型自己回帰モデルを用いた統計的最適制御系の 設計方法	
4.1	緒言 .....	77
4.2	制御型自己回帰モデルの同定 .....	79
4.3	制御型自己回帰モデルの状態空間表現 .....	81
4.4	統計的最適制御ゲインとその推定方法 .....	83
4.5	結言 .....	86
	参考文献 .....	87
	図表 .....	88
第5章	操舵による横揺減揺制御系のシミュレーション	
5.1	緒言 .....	91
5.2	実船データを用いた舵減揺制御 .....	92
5.3	操縦運動シミュレーションデータを用いた舵減揺制御 ...	96
5.3.1	横揺を含む操縦運動の数学モデル .....	96
5.3.2	操縦運動のハイブリッドシミュレーション .....	98
5.3.3	シミュレーションデータを用いた舵減揺制御 .....	100
5.4	結言 .....	102
	参考文献 .....	103
	図表 .....	104

## 第6章 舵減揺制御装置の機能と構成

6.1	緒言	123
6.2	舵減揺制御装置の設計方針	124
6.3	舵減揺制御装置の制御機能と特徴	126
6.4	舵減揺制御装置の構成	128
6.5	舵減揺制御装置の操作方法	131
6.6	結言	132
	参考文献	133
	図表	134

## 第7章 実船による舵減揺制御実験

7.1	緒言	153
7.2	実船実験供試船	154
7.3	A船による舵減揺制御実験	155
7.3.1	実験目的及び実験手順	155
7.3.2	舵減揺制御実験結果	157
7.3.3	舵減揺制御効果とその分析	158
7.3.4	変針実験結果	161
7.4	B船による舵減揺制御実験	163
7.4.1	実験目的及び実験手順	163
7.4.2	舵減揺制御実験結果	165
7.4.3	舵減揺制御効果とその分析	165
7.4.4	変針実験結果	169
7.4.5	強制動揺実験結果	169
7.5	C船による舵減揺制御実験	171
7.5.1	実験目的及び実験手順	171
7.5.2	舵減揺制御実験結果	172
7.5.3	舵減揺制御効果とその分析	173
7.5.4	変針実験結果	175
7.5.5	強制動揺実験結果	176
7.6	結言	177

参考文献 ..... 179

図表 ..... 180

第 8 章 舵減揺制御に対する検討

8.1 緒言 ..... 248

8.2 舵減揺制御による波浪中横揺減揺効果 ..... 249

8.3 舵減揺制御時の横揺減揺効果に及ぼす要因 ..... 255

8.4 諸外国における舵減揺制御実船実験 ..... 258

8.5 結言 ..... 260

参考文献 ..... 262

図表 ..... 263

結論

B.1 本論文のまとめ ..... 278

B.2 あとがき ..... 283

謝辞 ..... 284

## 緒論

### A.1 本論文の背景

造船工学者にとってできるだけ動揺の少ない船を造ることは、大きな目標の一つである。特に最近ではプレジャーボート、高速艇さらには大小の客船が多く建造されるようになり一般の乗船客からも乗り心地、快適性が非常に要求されてきている。また、積み荷管理あるいは種々の船内作業を行ううえで、乗組員自身の中からもできるだけ揺れない船の要望は根強い。このような問題を解決するために、以前から船型改良や制御技術の発展を通して動揺を軽減、あるいは防止しようとする研究開発が盛んに行われてきた。

それら研究開発の成果として、船舶の横揺を減少させるビルジキール、あるいは制御装置としてフィンスタビライザ、減揺タンクさらにジャイロスタビライザなどが開発されてきた。しかしながら、これらの制御装置を実際に装備する段階では、価格あるいは設置スペースなどの面から種々の制約を受けることが現実問題として多い。

さて、船体の横揺に操舵が少なからず影響を与えていることは、造船学者のみならず、航海者にもよく知られているところである。操舵することによって、舵面に舵力が生じて船体は旋回運動を開始する。この時、舵力中心と船体重心とのレバーによって、横揺モーメントを生じ船体は旋回方向に傾斜する。この横傾斜を内方傾斜と呼ぶ。平水中で保針操舵中に生じる横揺の大半は、この内方傾斜に起因する動揺である。

このようにして生じた横傾斜は、船底形状の左右非対称性を新たに引き起こし、その結果として左右非対称船首揺モーメントを誘起し、船体は船首揺を起こすこととなる。さらに、この船首揺が船体正面圧力の左右不均衡を生むこととなり、これが横揺を誘起することとなる。このような連成運動がやがて不安定現象を起こし、激しい船体動揺を引き起こすことも知られている (Roll - Yaw - Rudder Instability)。

そこで、このような船首揺と横揺の連成影響による運動をできるだけ減少させるような操舵装置の研究開発も必要となる。

ところで、上に述べた操舵初期の内方傾斜を逆に利用して、積極的に横揺を考慮した既存の操舵装置による減揺制御を行うことによって、横揺減揺効果が得られないかと考えることは自然である。フィンスタビライザや減揺タンクほどの減揺効果は期待できなくとも、このような制御装置の実現は、上記の要求を満たすためには非常に有効である。

W. E. Cowley[A. 1]、[A. 2]は早くからこの問題を取りあげ、操舵装置を使って横揺が制御できる可能性を述べている。また、高石[A. 3]は操舵と横揺の関連性を模型実験及び理論計算などで確認している。近年、欧米では C. G. Kallstrom[A. 4]、J. Van Amerongen[A. 5]、M. Blanke[A. 6]、A. E. Baitis[A. 7]によって、フィンスタビライザを装備していない艦船、小型の高速艇あるいは客船などを対象とした、舵による横揺減揺制御の研究開発が盛んに行われており、最近ではフィンスタビライザと舵の併用を考慮した制御装置の開発も行われている。

しかし、これらの実施例は我が国の船舶における操舵或は速度に比べて、かなり高速な場合のものがほとんどであり、横揺減揺効果についての報告は数多くあるものの、舵本来の保針性能について言及した例は比較的少ない。

そこで、横揺の制御を考慮した自動操舵装置の開発が、制御工学的に可能かどうかについて考察する。波浪中を航行する船舶の代表的な制御問題としては、舵・フィンスタビライザなど船体運動に関するものと、エンジンガバナ・プロペラなど主機関に関するものがある。これらの中でも、大洋中を航行する場合に必要な船舶の操舵制御系は、古くから典型的なフィードバック制御系の例として多くの研究者の研究対象になり、現在でも新しい自動制御理論の実践の場として利用されている。

しかし、このような船舶の制御システムにおける制御則は、基本的には1入力1出力系である。しかるに、本論文で考察するような船首揺の抑制のみならず、横揺の減揺をも考慮した制御系の設計においては、少なくとも二つ以上の被制御変数を取り入れた多変数制御系となる。

従って、基本的には1入力1出力系を制御対象とする古典制御理論[A.8]では、このような多入力多出力系に対して有効に対処できないことが判る。しかし、対象となる制御系を適切なモデルによって表現し、そのモデルを二次評価関数のもとに最適な制御系を設計する現代制御理論では、このような多入力多出力制御系設計も原理的には充分可能である。そして、多岐にわたる現代制御理論の一部は、船舶の操舵制御系をはじめとして多くの制御系設計に応用されてきた[A.9]、[A.10]、[A.11]。このような背景のもと、現代制御理論の成果を利用することが、操舵による横揺減揺制御システム実現のために好都合である。

さて、この現代制御論を使う場合に直ちに必要なものは、操舵した場合の船首揺や横揺を精度よく予測するモデルである。その一つの方法は、船の建造時に行われる水槽試験などによって、流体力学的な数学モデルを求め、そのモデルを予測モデルとして使う方法である。しかし、この方法はかなりの手間と費用を要するという以外に、波浪中のような外乱の大きい海上を航行する場合の実船の運動予測モデルとしては、適切であろうかという問題が考えられる。

ところで、非常にランダムな特性を持った不規則波中を航行する船体運動の解析は、船体運動を一つの確率過程（ランダム過程）と考えると、時系列理論と呼ばれる統計的な方法により行われてきた。海洋波などの不規則現象を確率過程として捉え、これら確率過程の統計的解析から線形予測などの問題に有効な定常時系列の理論は、N. Wiener[A.12]によって確立され、R. B. Blackman[A.13]らによって、これが統計的に実用面に耐えられるように工夫された。そして、G. Neumann[A.14]、W. J. P. Pierson[A.15]、山内[A.16]によって、この時系列解析の理論が海洋波の研究に応用され、さらに波浪中での船体動揺の問題についても、M. St. Dennis[A.17]、山内[A.18]によって適用されてきた。

この時系列解析では、主としてシステムの特性を周波数領域でパワースペクトラム、周波数応答関、コヒーレンス関数などを使って解析する[A.19]、[A.20]。これを、一般的にノンパラメトリックによる解析と呼んでいる。

一方、時間領域でモデルを構築してこのモデルがシステムを表現するものと考えて解析する方法の研究も、G. U. Yule [A. 21]、G. E. P. Box [A. 22]らによって行われてきた。彼らの提案した時系列モデルは、自己回帰モデルや自己回帰移動平均モデルと呼ばれるモデルが主であり、この方法は一般的にはパラメトリックモデルによる解析と呼ばれている。

この時系列モデルは原理的には、容易に多変数時系列にも拡張でき、かつパラメータの推定も容易である。そして、これらのモデルを動的なシステムの挙動の予測に用いるために、状態空間表現と呼ばれるモデルに変換して現代制御理論と結びつけることによって、多変数制御系の設計も理論的には可能となった。

しかし、この方法の最大の難関はモデルの次数の決定であった。赤池は、それまでの統計的検定論を用いる次数決定を主観的であるとし、この問題に F P E (最終予測誤差) と呼ばれる客観的な評価規準を提案してこれを解決した [A. 23]。そして、この概念をさらに情報量理論的に発展させて、A I C (赤池情報量規準) と呼ばれる評価規準を提唱した。この方法は、現在では時系列モデルの次数決定のみならず、パラメトリックモデルの選択に際して数多く用いられ、実用面でも既に定着している。 [A. 24]。

このようにして、海洋波などの不規則現象の時間領域でのモデル構築法が確立された結果、波浪中での船体運動制御系のような多入力多出力の確率的なダイナミックシステムを、多次元自己回帰モデルのような時系列モデルで表現し、このモデルを現代制御理論で用いる状態空間表現に変換して、統計的最適制御理論の問題として、多変数制御系の制御系設計問題を捉える道が開けた。

今日、造船工学においても海洋波中の船体運動を確率過程と考え、上記の情報量規準 A I C を用いて、船体運動の解析及び制御系の問題を取り扱う基本的な技術が定着してきている。それは、航海中に得られた船舶の動揺データに対して多次元自己回帰モデルをあてはめ、さらに状態空間表現を導き二次評価関数のもとに最適制御系を設計する方法である。これを統計的最適制御理論または統計的最適予測に基づく制御と呼んでいる。

この統計的最適予測理論に基づく船体運動の解析及び制御実施例として、大津[A.25]、[A.26]、織田[A.27]、[A.28]は自動操舵系の解析及び制御系設計を行い、さらに制御装置を開発することによって何隻かの実船実験にも成功している。

現在のところ、国内で操舵による保針制御と横揺制御の同時制御を実施した実船実験例はなく、大津[A.29]が船体運動と舵角のデータから多次元自己回帰モデルを用いて横揺と操舵の関連性を統計的に解析した結果、横揺を積極的に操舵制御系に取り入れることによって、保針制御とともに横揺減揺効果が期待できることをシミュレーションによって確認した例があるにすぎない。

## A.2 本論文の目的

本論文では、前節で述べた多次元自己回帰モデルを使ったMAICE法による統計的同定法を用いて、操舵による横揺の連成影響を実船実験で得られた時系列をもとに解析する。次に、同じく制御型自己回帰モデルで横揺を予測しつつ現代制御理論に基づいた最適操舵によって、横揺減揺制御を行う方法について考察する。さらに、実際に制御装置を開発して実船実験によってその制御効果を検証することを目的とする。

そのために、操舵によって船首揺以外に横揺をも同時に制御できることを、実船データを用いた多次元自己回帰モデルによる統計的解析によって明確にする。さらに、制御型自己回帰モデルを状態空間表現に変換して、二次評価関数のもとで最適制御則を導く。

そして、このような理論的背景を基として、実用化を目標とした制御装置を開発する。最後に、シミュレーション技法を併用しつつ開発した装置を用いて、3隻の異なる船舶において実施した操舵による横揺減揺制御の実船実験結果を示し、同時に得られたデータの統計的な解析を行う。

本論文において、このような時系列モデルを基本モデルとする統計的最適制御論を使用する理由は、

- (1) 波浪中での船舶は、非常に確率的外乱のもとで航行しておりこのような船体運動の表現には、時系列を表現する時系列モデルが最適であること、
- (2) 時系列モデル確定には、事前情報として実際に航行中の時系列データ以外には必要がなく、水槽試験などが不必要であること、
- (3) 本目的のような制御システムは、多変数制御系となるがそれには現代制御理論が最適であること、

などの点が挙げられる。

そして、本論文の特徴は、

- (1) 実稼働システムから得られた時系列データに対して、多次元自己回帰モデルと呼ばれる統計的モデルを一貫して用いて、操舵と横揺の関連性について解析し、その結果に物理的考察を行ったこと、
- (2) 横揺を考慮した制御型自己回帰モデルを構築し、横揺減揺型の最適保針制御系を提案して実船実験を行ったこと、
- (3) このような複雑な制御系の設計に際しても、船上で得られた時系列データのみを用いて行ったこと、

などが挙げられる。

### A.3 本論文の構成

本論文は、次のような各章で構成されている。

第1章では、操舵と横揺の関係及び従来の横揺減揺制御装置についての確認を行い、操舵による横揺減揺制御の可能性について検討する。

第2章では、船体運動の時系列から自己回帰モデルを同定する方法及び自己回帰モデルの特性、さらに情報量規準 (AIC) による最適モデルの選択方法などについて述べる。

第3章では、自己回帰モデルによる横揺を含めた船体運動、保針操舵系、横揺減揺制御系の解析方法及び実船データの解析結果について示す。

第4章では、自己回帰モデルから状態空間表現を導き、二次評価関数のもとに最適制御ゲインを求める方法について述べる。

第5章では、白色雑音による制御シミュレーション及び横揺を考慮した数学モデルによる操縦運動のシミュレーションを行い、統計的最適制御を用いた操舵による横揺減揺制御の有効性を確認する。

第6章では、実船実験用に開発した操舵による横揺減揺制御装置の機能及びハードウェア・ソフトウェア構成などについて述べる。

第7章では、試作開発した制御装置を用いた3隻の異なる船舶での操舵による横揺減揺制御の実船実験及び横揺減揺効果などについて述べる。

第8章では、操舵による横揺減揺制御効果を設計段階で推定する簡易的な方法について示すとともに、評価計算と実船実験結果の比較を行う。さらに、操舵による横揺減揺制御に影響すると考えられるいくつかの要因について考察する。最後に、今後の研究課題などについても検討する。

本論文では船体運動は船首揺、横揺、データは方位角 (Yaw)、横揺角 (Roll)、横揺角速度 (Roll Rate) と表現する。舵については制御動作を操舵、データを表現する場合は舵角 (Rudder) と示す。また、本論文では以後、操舵による横揺減揺制御を舵減揺制御と表現する。なお、本論文で使用する船体運動に関する座標系及び記号をまとめて図A.1、表A.1、確率統計に関係する記号をまとめて表A.2に示す。

参考文献

- [A.1] W.E.Cowley, T.H.Lambert  
The use of the rudder as a roll stabilizer, Proceedings 3rd Ship Control Systems Symposium, Bath, UK, 1972.
- [A.2] W.E.Cowley, T.H.Lambert  
Sea trials on a roll stabilizer using the ship's rudder, Proceedings 4rd Ship Control Systems Symposium, Hague, Netherlands, 1975.
- [A.3] 高石敬史、猿田俊彦  
高速コンテナ船の操舵による動揺について、関西造船学会誌、第161号、昭和51年。
- [A.4] C.G.Kallstrom  
Control of yaw and roll by a rudder/fin stabilization system, Proceedings 6th Ship Control Systems Symposium, Ottawa, Canada, 1981.
- [A.5] J.van.Amerongen, P.G.M.van der Klugt, J.B.M.Pieffers  
Model tests and full scale trials with a rudder roll stabilization system, Proceedings 7th Ship Control Systems Symposium, Bath, UK, 1984.
- [A.6] M.Blanke, P.Haals, K.Kudsk Andreasen  
Rudder roll damping experience in Denmark, Proceedings of CAMS'89, Denmark, 1989.
- [A.7] A.E.Baitis  
The development and evaluation of a rudder roll stabilization system for the WHEC Hamilton class, DTNSRDC Report, Bethesda, USA, 1980.
- [A.8] 高橋安人  
システムと制御（上下）、岩波書店、1978.
- [A.9] K.J.Astrom  
Introduction to stochastic control theory, Academic Press, 1970.

- [A.10] K.J.Astrom, B.Wittenmark  
On self tuning regulators, Automatica, 9, 1973.
- [A.11] L.D.Landau  
Adaptive control - The model reference approach, Marcel Dekker, 1979.
- [A.12] N.Wiener  
The Extrapolation, Interpolation and Smoothing of stationary time series, Technology Press of MIT and John Wiley, 1949.
- [A.13] R.B.Blackman, J.W.Tukey  
The measurement of power spectra from the point of view of communications engineering, Dover, 1959.
- [A.14] G.Nuemann  
On ocean wave spectra and a new method of forecasting wind generated sea, Tech. Memo, No.43, Beach Erosion Board, 1953.
- [A.15] W.J.Pierson Jr., L.Moskowitz  
A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of S.A. kitaigorodskii, J. of Geo. Res. Vol.69, No.24, 1964.
- [A.16] 山内保文  
海洋波について（その3、その4）、日本造船学会誌、第495号、第497号、1970.
- [A.17] M.St.Dennis, N.W.Pierson  
On the motions of ships in confused seas, Trans. SNAME, Vol.61, 1953.
- [A.18] 山内保文  
船の波浪中動揺応答の解析法について（その1、その2）、造船協会論文集、第109号、第110号、1961.
- [A.19] G.M.Jenkins, D.G.Watts  
Spectral analysis and its applications, Holden Day, 1968.

- [A.20] J.S.Bendat, A.G.Piersol  
Random data, analysis and measurement procedures, John Wiley and Sons, 1978.
- [A.21] G.U.Yule  
On a method of investigating periodicities in disturbed series with special reference to Wolfer's sunspot numbers, Phil. Trans., A226, 1927.
- [A.22] G.P.E.Box, G.M.Jenkins  
Time series analysis: forecasting and control, Holden Day, 1970.
- [A.23] H.Akaike  
Fitting autoregressive models for prediction, Ann. Inst. Statist. Math., Vol.21, 1969.
- [A.24] H.Akaike  
A new look at the statistical model identification, IEEE Trans. AC19, 1974.
- [A.25] 大津皓平、堀籠教夫、北川源四郎  
保針運動の統計的同定と最適操舵、日本造船学会論文集、第139号、1976.
- [A.26] 大津皓平、堀籠教夫、山内保文、平野雅祥、織田博行  
統計的最適制御による省エネルギー型自動操舵システムの開発、三井造船技報、第120号、1983.
- [A.27] 織田博行、平野雅祥、大津皓平、烏野慶一、蛇沼俊二  
自己回帰型自動操舵装置による最適制御実船実験、第15回制御理論・第12回システム合同シンポジウム、計測自動制御学会、1986.
- [A.28] 織田博行、増田紀義、烏野慶一、大津皓平、蛇沼俊二  
多次元自己回帰モデルを用いた低速航行時の保針制御系設計、第14回システムシンポジウム、計測自動制御学会、1988.
- [A.29] 大津皓平、堀籠教夫、北川源四郎、原誠  
保針運動の統計的同定と最適制御（続）、日本造船学会論文集、第143号、1978.

# 図表一覧表

表 A.1 船体運動に関する記号表

表 A.2 確率・統計に関する記号表

図 A.1 船体運動に関する座標系

The image shows two tables, Table A.1 and Table A.2, which are mostly illegible due to fading. Table A.1 is titled '表 A.1 船体運動に関する記号表' and Table A.2 is titled '表 A.2 確率・統計に関する記号表'. Both tables appear to be organized into columns and rows, with some text visible in the top row of each table.

表 A.1 船体運動に関する記号表

船 体	$L_{pp}$	垂線間長
	$B$	幅
	$d$	喫水
	$\Delta$	排水量
舵	$b$	舵の幅
	$h$	舵の高さ
	$t$	最大厚さ
	$\Lambda$	縦横比(h/b)
	$A_R$	舵面積
プロペラ	$D_p$	プロペラ直径
	$P$	プロペラピッチ
	$A_E$	プロペラ展開面積
座 標 系	$O-x_0, y_0, z_0$	空間固定座標
	$G-x, y, z$	物体固定座標
	$u, v, w$	$x, y, z$ 軸方向の速度
	$\phi, \theta, \varphi$	横揺角、縦揺角、方位角
	$p, q, r$	横揺角速度、縦揺角速度、方位角速度

力・モーメント	$X, Y, Z$	力の $x, y, z$ 軸方向成分
	$K, M, N$	モーメントの $x, y, z$ 軸まわりの成分
	$X_R, Y_R, Z_R$	舵の $x, y, z$ 軸方向成分
	$F_L$	揚力
	$F_D$	抗力
	$F_N$	舵の直圧力
	$F_T$	舵の抵抗成分
	$T_p$	プロペラスラスト
	$Q_p$	プロペラトルク

慣性特性	$m$	質量
	$m_x, m_y, m_z$	$x, y, z$ 方向の付加質量
	$I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$	慣性モーメント
	$J_{xx}, J_{yy}, J_{zz}$	付加慣性モーメント
	$k_{xx}, k_{yy}, k_{zz}$	慣性半径
	$i_{xx}, i_{yy}, i_{zz}$	付加慣性半径
運 動	$V$	速度
	$x_0, y_0, z_0$	変位
	$\delta$	舵角
	$Fn$	フルード数 ( $V/\sqrt{gL_{pp}}$ )
	$n$	プロペラ回転数
	$\omega = 2\pi/T$	円周波数
流 体	$\rho$	流体密度
	$\mu$	動粘性係数
	$g$	重力の加速度
	$\lambda$	波長
	$\zeta_w$	波高
	$k$	波数 ( $2\pi/\lambda$ )
	$\chi$	波の進行方向 (向い波 $\chi=180^\circ$ )
	$\omega = 2\pi/T_w$	波の円周波数
	$\omega_e = 2\pi/T_{we}$	出合いの円周波数
	$T_w$	波の周期
$T_{we}$	出合いの周期	

表 A.2 確率・統計に関する記号表

$A$	マトリクス、 $i$ 行 $j$ 列要素は $A_{ij}$ と記す。
$X(n)$	$n\Delta t$ 時刻におけるスカラー過程、 $X_i(n)$ を要素とするベクトル過程
$A^T, X^T(n)$	$A$ の転置マトリクス、 $X(n)$ 過程の転置ベクトル
$A^{-1}$	マトリクス $A$ の逆行列
$I$	単位行列
$\det(A)$	$A$ マトリクスの行列式
$E[X]$	確率変数 $X$ の統計的期待値
$i$	$\exp(i2\pi fm)$ の場合は $i = \sqrt{-1}$
$\Delta t$	サンプリング周期
$N$	データ個数

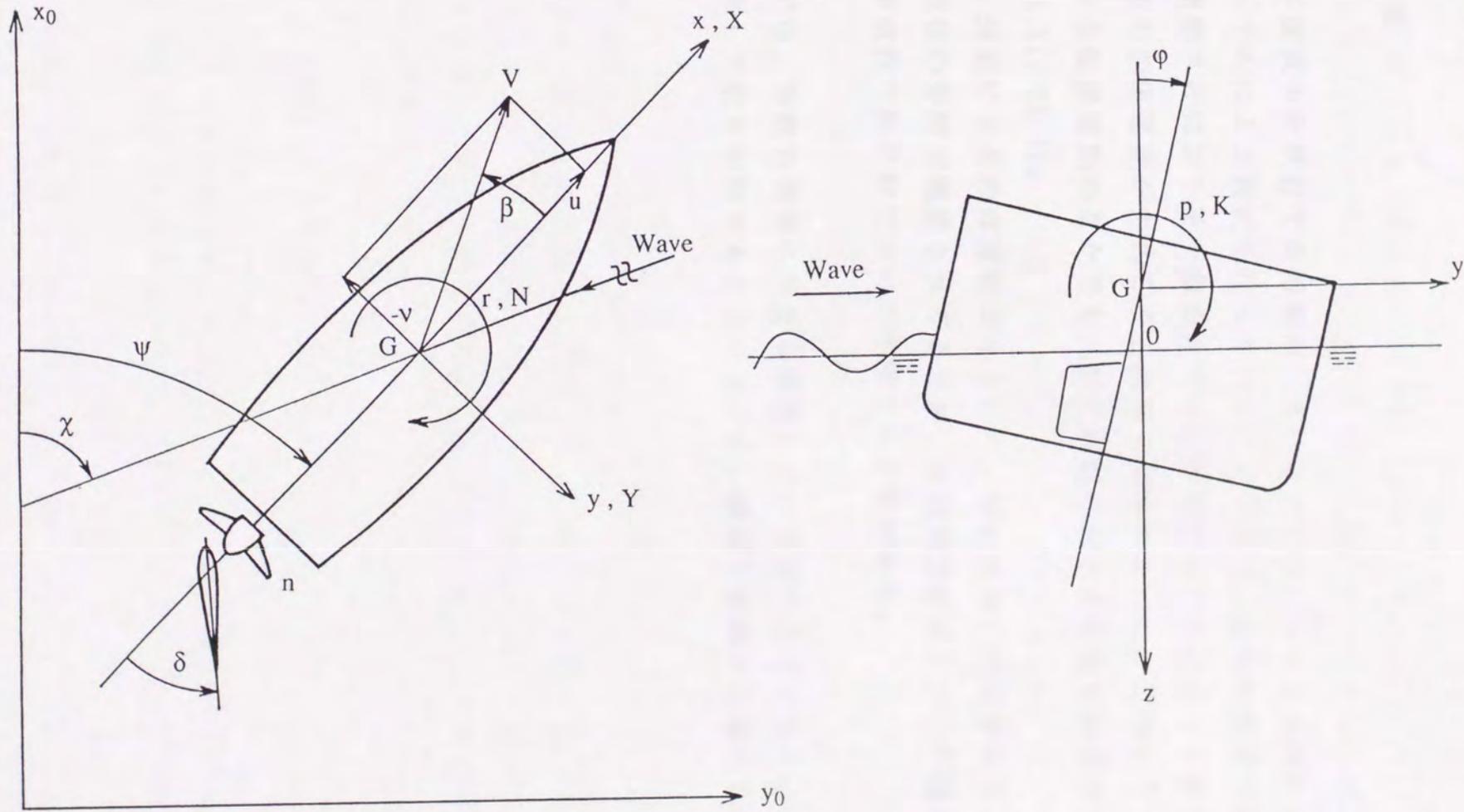


図 A.1 船体運動に関する座標系

## 第1章 操舵と横揺減揺制御

### 1.1 緒言

一般に波浪中を航行する船舶は、オートパイロットによる保針制御あるいはマニュアルによる操舵を行っている。ところで、比較的高速で航行する艦船、巡視船さらにコンテナ船などでは、操舵することによって船首揺のみならず、他の船体運動が生じることは良く知られている。このような操舵することによる船体運動のなかでも、特に横揺に対する影響が無視できない場合がある[1.1]、[1.2]。

従来、操舵による船体運動は主として、保針制御に代表されるようないわゆる操縦性の分野で議論されてきたが、横揺減揺制御という問題の場合は操縦性と耐航性の両分野について考慮する必要がある。

本章では、操舵の横揺に与える影響について述べるとともに、この影響を逆に利用して舵を制御することによって、横揺を制御する考え方について考察する。

## 1.2 操舵の横揺に及ぼす影響

船舶が航行中にある舵角  $\delta$  だけ操舵した場合、舵には直圧力  $F_N$  が作用し船体には横方向の加速度  $\dot{v}$  が生じるが、操舵直後のため船体の横流れ速度  $v$  及び旋回角速度  $r$  はまだあまり発達しておらず、これらに起因する船体に対する外力は無視できると考えられる。船体の質量を  $m$ 、横方向の付加質量を  $m_y$  とすると、船体に対する横方向の外力は図 1.1 [A] に示すように船体重心  $G$  に作用する慣性力  $m\dot{v}$ 、水面下の船体に作用する慣性力  $m_y\dot{v}$  そして舵直圧力  $F_N \cos\delta$  である。例えば慣性力  $m_y\dot{v}$  と舵直圧力  $F_N \cos\delta$  の着力点が水面下喫水の  $1/2$  の所にあるとすると、横方向の釣合は

$$(m + m_y)\dot{v} = F_N \cos\delta \quad (1.1)$$

で示されるとともに、水面上の船体を旋回中心側に傾斜させるモーメント  $M$

$$M = \frac{m}{m + m_y} F_N \cos\delta \left( z + \frac{d}{2} \right) \quad (1.2)$$

が作用することになる。ここで、 $z$  は  $O G$  間の距離、 $d$  は喫水である。

航行中に操舵による旋回運動を行った場合、図 1.1 [A]、図 1.1 [B] に示すように操舵した直後には、船体にはこの舵の直圧力によるモーメントによって旋回中心側に傾斜（内方傾斜）が生じる[1.3]。しかし、やがて旋回運動が発達するにつれて遠心力が発生して、船体は次第に旋回中心と反対側に傾斜（外方傾斜）する。従って、操舵した直後に船体に作用するモーメントによる傾斜、つまり内方傾斜が保針運動中の操舵による横揺の主な原因と考えられる[1.4]。

### 1.2.1 操舵による横揺応答

対象とする船体運動を横揺のみとして、舵による外力のうち横揺モーメントだけを考慮して他の運動との連成がないとすると、その時の横揺運動方程式は

$$I_\phi \ddot{\phi} + B_\phi \dot{\phi} + K_\phi \phi = C_\phi \delta \cos\omega t \quad (1.3)$$

と表わすことができる。ここで、 $I_\phi$ は横揺付加慣性モーメントを含めたX軸まわりの横揺慣性モーメント、 $B_\phi$ は横揺減衰係数、 $K_\phi$ は横揺復元係数、 $\omega$ は運動の円周波数（角周波数）そして $C_\delta$ は単位舵角による横揺モーメント係数である。

次に、操舵による影響を考慮しない規則波浪中の横揺運動方程式は

$$I_\phi \ddot{\phi} + B_\phi \dot{\phi} + K_\phi \phi = W \overline{GM} \gamma \Theta_w \cos \omega t \quad (1.4)$$

で表わされ、同調周期における横波中での横揺応答（振幅）は

$$\frac{\phi}{\Theta_w} = \frac{\gamma W \overline{GM}}{\omega_\phi B_\phi} \quad (1.5)$$

で与えられる。ここで、 $\gamma$ は有効波傾斜係数、 $\Theta_w$ は最大波傾斜、 $\omega_\phi$ は横揺の同調周波数である。次に、このように与えられる横揺運動方程式に、操舵による制御力が加わった場合の効果について検討する。操舵の横揺に対する影響（減揺効果）として、例えば横揺角速度に対する比例制御ゲインを $K_R$ として、見かけ上の横揺ダンピングを増すと、横揺の応答は

$$\frac{\phi}{\Theta_w} = \frac{\gamma W \overline{GM}}{\omega_\phi (B_\phi + K_R C_\delta)} \quad (1.6)$$

と表わすことができる[1.5]。この式から横揺角速度に対する制御ゲイン $K_R$ の値によっては、横揺を操舵によって減衰させることができることを示唆している。

### 1.2.2 横揺と船首揺との関連

従来の操舵系に関する多くの研究は、船首揺をいかに精度よく制御するかが主な課題であった。しかし、舵で横揺をも制御する場合には、横揺と船首揺の関連などについて確認しておく必要がある。例えば、GMが小さく、かつ比較的高速で航行するような船舶、船首バルブを有する前後非対称な船舶、そして大きな舵面積を持った船舶では横揺、船首揺、左右揺の連成が無視できないことが知られている[1.2]。また、船体が横傾斜することによって、図1.2のように船体の中心線が左右非対称になり、これによって横揺を誘起す

るような船首揺モーメントが発生することも判っている[1.2]。さらに、横揺、船首揺、左右揺及び操舵系の連成によって不安定現象が起こることも、シミュレーションなどによって確認されている[1.6]、[1.7]、[1.8]。

また、自動操舵による蛇行運動が大きくなると、激しい横揺を引き起こす現象、あるいは突発的な外乱で横揺が励起されると船首揺も誘起されることも実船によって確認されている。これらの現象は、Roll - Yaw - Rudder Instability と呼ばれている。このような連成運動の存在は、適切な操舵を行うことによって横揺を抑制できれば、その制御効果により船首揺も減少して、上記のような連成運動あるいは不安定現象を回避できる可能性を示唆している。

このような横揺、船首揺及び舵角の関連性については、実船実験のデータ解析から確認することができる。この解析方法及び解析結果などについては後の章で示す。

### 1.3 横揺減揺制御の考え方と現状

船舶が航行する時、波浪による横揺が励起され、この横揺をなんらかの方法で減少させようとする装置が横揺減揺装置である。この装置が、波浪による船体を横揺させようとする外力に対して打ち勝つだけの制御力を発生させることができれば横揺は減少することになる。すなわち、横揺減揺装置はこのような制御力をいかに効率よく発生させるかがその装置の性能を左右する。図1.3 [A] のように静水中で船体が $\phi$ だけ横傾斜した場合、復元モーメントとして  $W \overline{GM} \sin\phi$  が作用して、船体の傾きをもとに戻そうとする。

しかし、実際の海面では図1.3 [B] のように波浪中で船体は波浪面とともに傾斜し、減揺装置は船体を見かけの垂直線に戻そうと復元モーメントを発生し、結果的には波浪面との相対的な横傾斜を減少しようとしていることになる。ちなみに、人間は船体の中心線と見かけ上の垂直線が一致すると、横揺が減少したと感じると言われている。

横揺は減揺装置を使用することによって、横揺を減少することはできても完全に零にすることは不可能であり、そこには残存横揺角が存在する。その要因としては周期、振幅とも不規則な波浪成分によって横揺が励起されていること、それらすべての要素に対して制御が不可能なこと、そして横揺を検出してから制御開始までの制御系に時間遅れがあることなどが考えられる。

従来の横揺減揺装置としては、ビルジキールのように船体に付加物を装備して横揺減揺効果を増加させているもの、ウェイトまたは液体の移動による装置、ジャイロロータやフィンスタビライザ制御装置などがある。これらは構造上、外部装備装置と内部装備装置に分類され、さらに作動方法によって受動型と能動型に分けられる。受動型の減揺装置はそれ自身は動力源を持たず、船体運動によって発生される力によって作動するものであり、能動型の場合は、船体運動をフィードバックして制御することによって、運動を安定化させるものである。表1.1に現状の横揺減揺装置の比較を示す[1.9]。次に、これら減揺装置の中で、本論文の舵による横揺減揺制御と基本的な考え方で関連の深い、フィンスタビライザによる横揺制御について確認する。

#### 1.4 フィンスタビライザによる横揺減揺制御

フィンスタビライザは船体運動から横揺角度、横揺角速度、横揺角加速度などをフィードバックしてフィン角を制御し、図 1.4 に示すような原理で船体の横揺を減揺制御している。横揺角が特に大角度ではないとき、フィンスタビライザによる制御を考慮した船体の運動方程式は

$$I_{\phi} \ddot{\phi} + B_{\phi} \dot{\phi} + K_{\phi} \phi = W \overline{GM} \gamma \Theta_w - F \quad (1.7)$$

で表わされ、フィンスタビライザによる制御力  $F$  は

$$F = K_1 \phi + K_2 \dot{\phi} + K_3 \ddot{\phi} \quad (1.8)$$

で表わされる [1.10]、[1.11]。ここで、 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  は横揺角、横揺角速度、横揺角加速度に対する制御定数である。式(1.8)の制御力は、横揺を減揺させる方向に制御装置の制御力が作用するので、波浪による外力とは逆の符号である。この制御力は横揺角度、横揺角速度、横揺角加速度などをフィードバックしてフィン角を制御することを意味しており、式(1.7)と式(1.8)から

$$(I_{\phi} + K_3) \ddot{\phi} + (B_{\phi} + K_2) \dot{\phi} + (K_{\phi} + K_1) \phi = W \overline{GM} \gamma \Theta_w \quad (1.9)$$

が得られ、これがフィンスタビライザを装備した場合の運動方程式となる。

舵による横揺減揺制御系を設計するにあたって、横揺のどの成分を制御変数として採用するかを検討するために、横揺の各要素が横揺減揺制御にとって、どのような働きをするかを次に示す。

##### (1) 横揺角

船体が横揺した場合、その傾斜角に比例した制御信号を出力して、傾斜を止めようとする制御力を発生させたとすると、式(1.9)から見かけ上  $\overline{GM}$  が大きくなったことになり、横揺の周期が短くなることが判る。しかし、この信号だけをフィードバック信号として用いることは、横揺検出装置や制御系の時間遅れなどが存在するため完全な制御は難しい。

## (2) 横揺角速度

横揺角速度をフィードバックして制御信号を与えるということは、式(1.9)から判るように、船体運動のうち横揺減衰（ダンピング）係数が増加したことを意味する。いいかえれば、横揺角速度の項を入れることにより減衰力が大きくなり、定常状態に速く落ち着くことを意味している。このような理由から、横揺を安定化するうえでは横揺角速度は効果的な要素である。

## (3) 横揺角加速度

横揺角加速度をフィードバックしてフィンを制御するという事は、式(1.9)から船体の横揺慣性モーメントを大きくすることを意味していることが判る。つまり、横揺の周期を大きくして同調点をずらすような効果があり、横揺の安定化にとって有効な要素のひとつである。

基本的に横揺を減少させる制御力を構成している要素は、例えばフィンスタビライザの翼面に発生する直圧力と、その圧力中心と船体重心間の距離によって得られるモーメントである。しかし、図1.5に示すように舵による横揺減揺制御の場合は、舵の直圧力中心と船体重心間の距離がフィンスタビライザに比べて短いうえに、操舵速度もフィンスタビライザに比べて遅く、横揺減揺効果はフィンスタビライザに比べると当然小さくなる。そのため、舵による横揺減揺効果を、さらに向上させるためには2軸2舵など舵面積の増加、フラップ舵による舵力の増加、さらに操舵装置のパワーアップによる操舵速度の高速化などの手段が考えられる。

## 1.5 結言

舵による横揺減揺制御を実施するにあたって、操舵が横揺に及ぼす影響、船首揺と横揺の関連及び操舵による横揺減揺制御の可能性について検討し、さらにフィスタビライザに代表される横揺減揺制御装置における各制御要素の働きについて確認した。

以下に本章で考察した結果をまとめて述べる。

- (1) 操舵直後に発生する船体を旋回中心側に傾斜させるモーメントが横揺を励起し、結局このモーメントが舵による横揺減揺で使用する制御力となる。
- (2) 波浪中での船体運動で横揺減衰力を増加することによって、横揺が減衰するため操舵による見かけ上の減衰力の増加は有効である。
- (3) 操舵と横揺の連成影響については、理論計算、シミュレーション計算あるいは実船でも確認されている。そこで、操舵によって船首揺と横揺を同時に舵で制御できる場合は、舵による横揺の連成による不安定現象を起こさないような、制御系を設計できる効果もある。
- (4) 横揺減揺制御系にフィードバックする横揺の情報としては、横揺角速度、横揺角加速度、横揺角の順で有効である。
- (5) 舵による横揺減揺制御の効果を向上するためには、操舵速度の高速化、舵面積の増加などが考えられる。

参考文献

- [1.1] W.E. Cowley  
Development of an autopilot to control yaw and roll, The Naval Architect, Jan., 1974.
- [1.2] H. Eda  
Rolling and steering performance of high speed ships, Proc. of 13th ONR Symp. on Naval Hydrodynamics, Tokyo, 1980.
- [1.3] 小山健夫、藤野正隆、前田久明  
船体と海洋構造物の運動学、成山堂、1982.
- [1.4] 元良誠三  
船体運動力学、共立出版、1967.
- [1.5] 平野雅祥、高品純志、森谷周行、中嶋利夫  
RO/RO船の運動性能に関する研究、三井造船技報、Vol.105、1979.
- [1.6] L.J. Rydill  
A linear theory for the steered motion of ships in waves, RINA, Vol.101, 1959.
- [1.7] H. Eda  
Directional stability and control of ship in wave, J. of Ship Research, Vol. 16, No. 3, 1972.
- [1.8] 孫景浩、野本謙作  
高速コンテナ船の操縦運動と横揺との連成挙動について、日本造船学会論文集、第150号、昭和56年.
- [1.9] 渡部四郎  
動揺軽減法(2)、耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、1969.
- [1.10] 大津皓平、押見国孝  
船舶の操縦と横揺の制御、マリンビークルの運動制御、運動性能研究委員会、第6回シンポジウム、日本造船学会、1989.
- [1.11] J. H. Chadwick  
On the stabilization of roll, Trans., SNAME, 1955.

図表一覧表

表 1.1 横揺減揺装置の一覧表

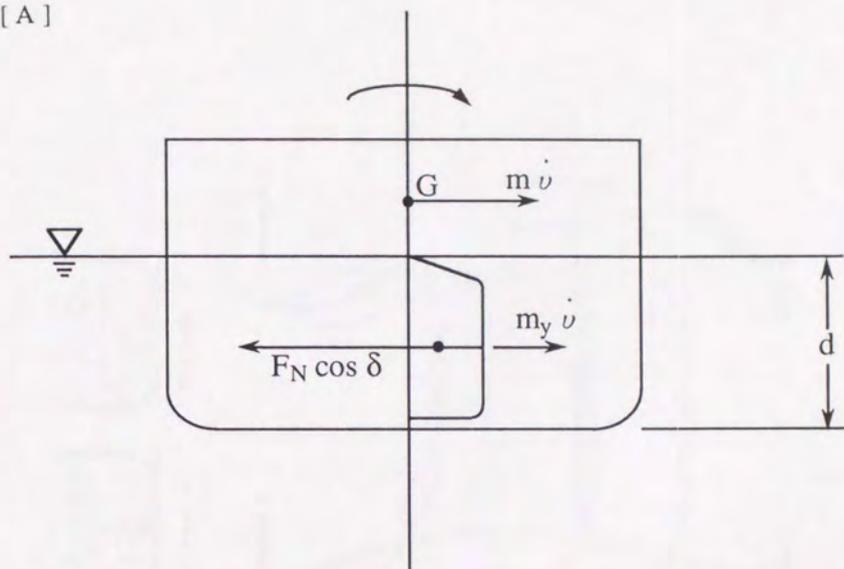
- 図 1.1 操舵による船体の横傾斜
- 図 1.2 横傾斜による船体中心線の非対称性
- 図 1.3 横傾斜による復原力と横揺減揺
- 図 1.4 フィンスタビライザによる横傾斜の制御
- 図 1.5 フィンスタビライザと舵による横傾斜復原モーメント

図表番号	図表内容
図 1.1	操舵による船体の横傾斜
図 1.2	横傾斜による船体中心線の非対称性
図 1.3	横傾斜による復原力と横揺減揺
図 1.4	フィンスタビライザによる横傾斜の制御
図 1.5	フィンスタビライザと舵による横傾斜復原モーメント

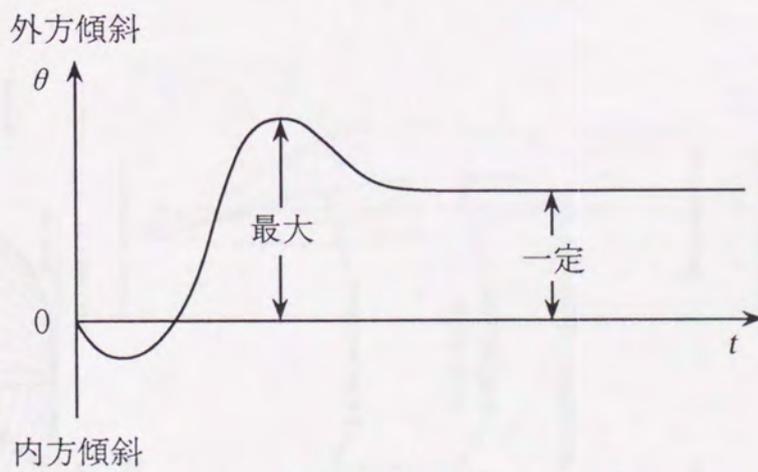
表 1.1 横揺減揺装置の一覧表

形 式	外 部 形				内 部 形					既存型
	受 動 形		能 動 形		受 動 形		能 動 形			能動型
	ビルジ キール	固定 フィン	格納 フィン	非格納 フィン	タンク (減揺水槽)	ウェイト (重量移動)	タンク (減揺水槽)	ウェイト (重量移動)	ジャイロ スコープ	舵
動揺減少量	35%	資料なし	90% (EWS5')	85%	50% (EWS3')	資料なし	80% (EWS2') 40% (EWS5')	資料なし	45%	40%
低速時の効果	有効	無効	無効	無効	有効	有効	有効	有効	有効	無効
載貨重量の減少	ほとんど なし	ほとんど なし	排水量の 1%	排水量の 0.6%	排水量の 1~4%	タンクと ほぼ同じ	受動形より やや大	タンクと ほぼ同じ	排水量の 2%	なし
静的復原力の減少	無	無	無	無	有	有	有	有	無	なし
前進抵抗の増加	わずかに 有	わずかに 有	作動時に 有	固定フィン に同じ作 動時に有	無	無	無	無	無	わずかに 有り
動力消費量	無	無	小	小	無	無	大	大	大	小
船内占有容積	無	無	中	小	大	大	大	大	大	なし
船内横断面積	不要	不要	不要	不要	必要	必要	必要	必要	不要	不要
外部から受ける損傷	有	有	格納時 無	有	無	無	無	無	無	有
価 格	非常に 安い	普通	高い	比較的 高い	普通	比較的 高い	高い	高い	非常に 高い	安い
保守費用	安い	普通	比較的 高い	比較的 高い	安い	普通	普通	比較的 高い	高い	安い

[A]



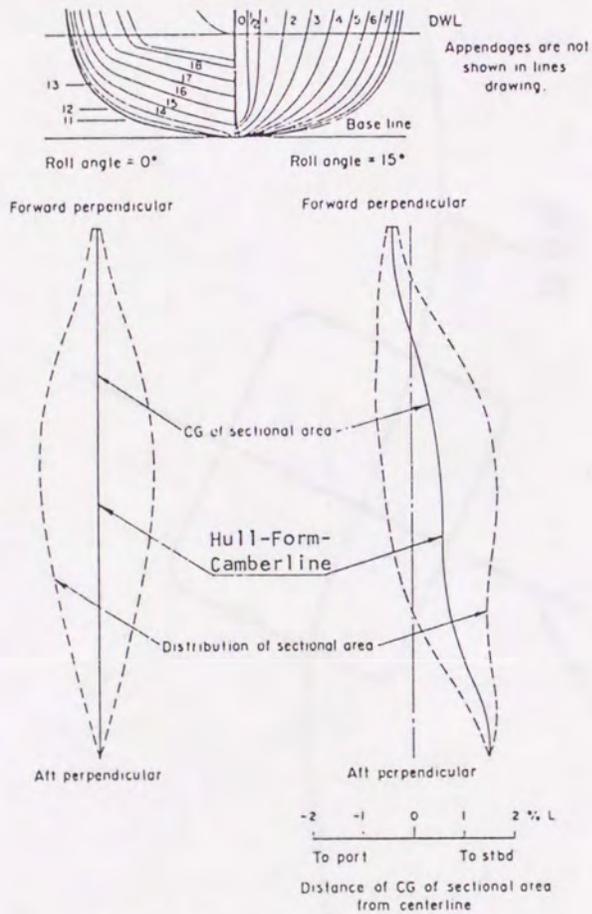
[B]



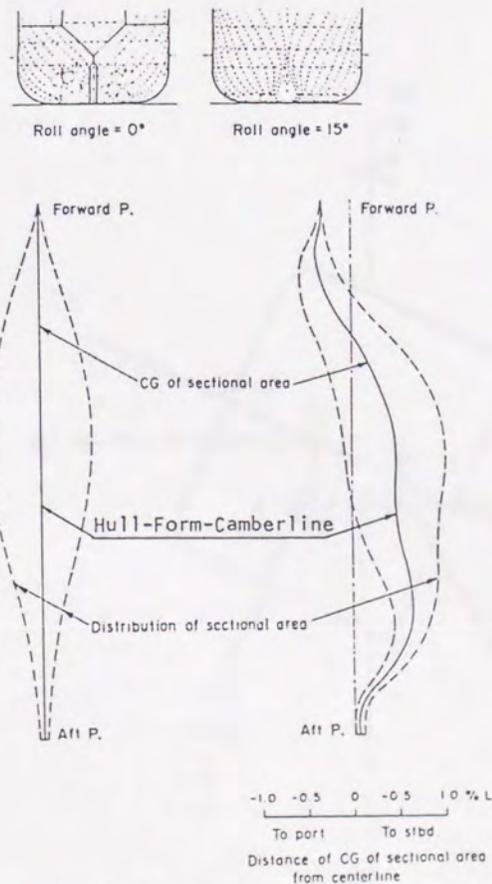
[A] 操舵直後の内方傾斜

[B] 操舵による内方傾斜と外方傾斜

図 1.1 操舵による船体の横傾斜



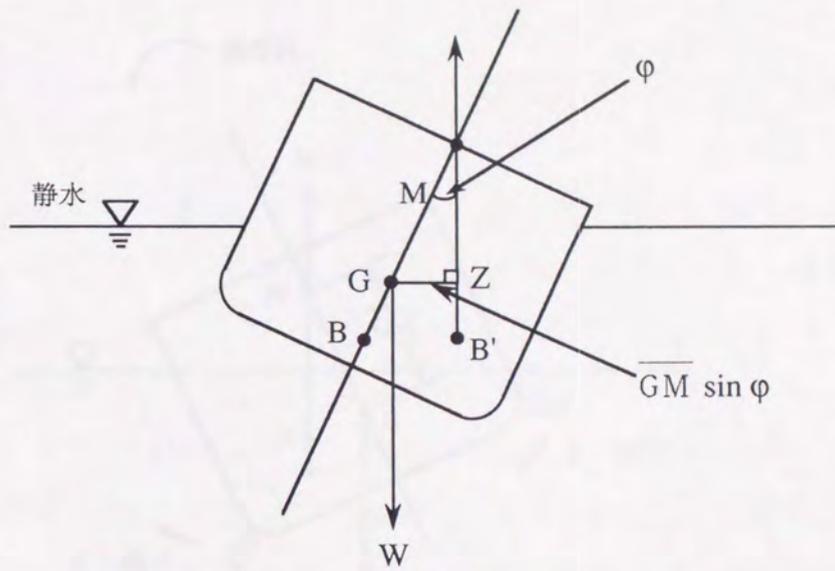
Longitudinal Asymmetry Due to Roll (Destroyer)  
[Hull-Form-Camberline]



Longitudinal Asymmetry Due to Roll (High Speed Container Ship).  
[Hull-Form-Camberline]

図 1.2 横傾斜による船体中心線の非対称性 [1.2]

[A]



[B]

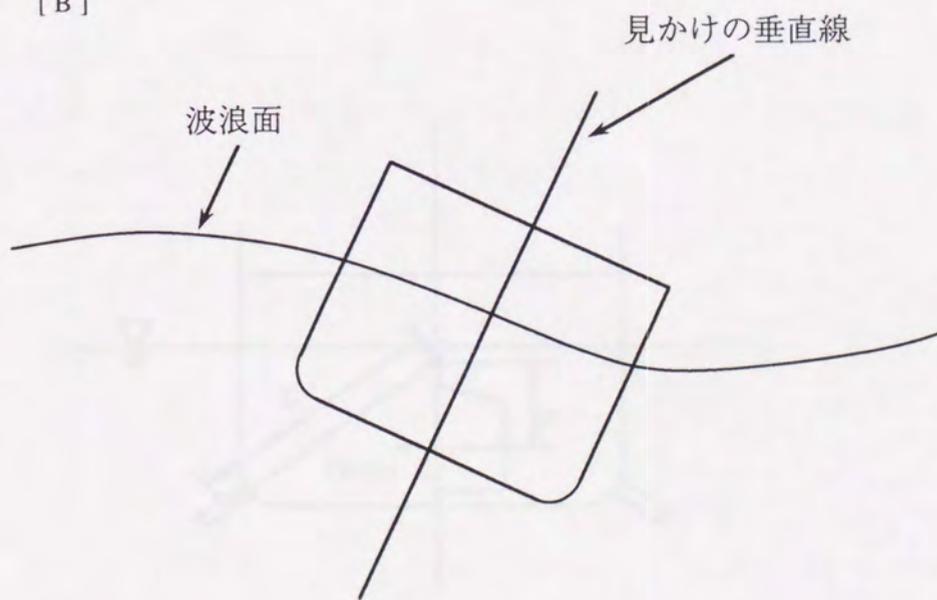


図 1.3 横傾斜による復原力と横揺減揺

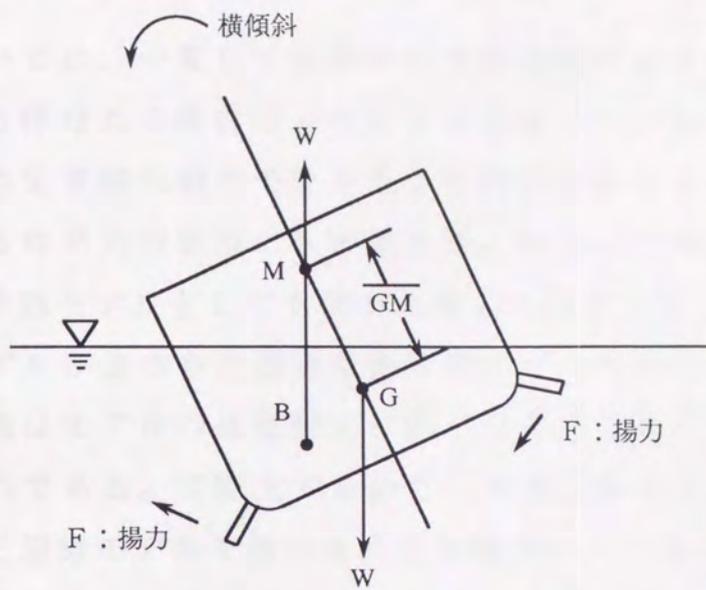


図 1.4 フィンスタビライザによる横傾斜の制御

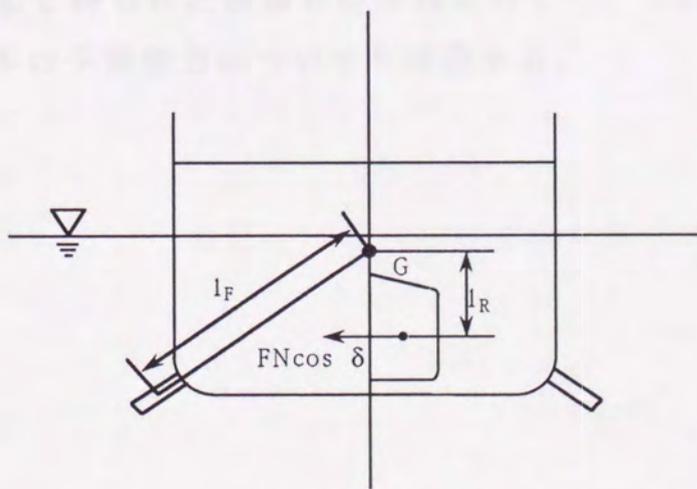


図 1.5 フィンスタビライザと舵による横傾斜復原モーメント

## 第2章 船体運動の自己回帰モデル表現

### 2.1 緒言

本論文においては、一貫して波浪中の保針運動のような定常時系列を、自己回帰モデルと呼ばれる統計モデルにより表現している。このモデルは、もともと一次元の定常時系列のモデル表現に用いられたものである。その後、多変数からなる時系列の表現にも拡張され、あるいは本論文の後半の目的である制御型時系列モデルとしても使われるようになった。

自己回帰モデルが他の自己回帰移動平均モデルのようなモデルに比べて、多用される理由はモデルの係数推定に最小自乗法が使用でき、計算が非常に簡単であるためである。本論文でも必ずしも物理的なモデルと一対一で対応しないこの自己回帰モデルを用いる大きな理由の一つもそこにある。

本章では、多次元自己回帰モデルあるいは制御型自己回帰モデルについて述べるまえに、自己回帰モデルが横揺などのスカラ時系列を表現することが可能であるかを確認するために、スカラ型の自己回帰モデルを導入して、その統計的な特性及びモデルの同定方法などについて述べる。

さらに、実船で得られた横揺の時系列に対して、この自己回帰モデルをあてはめ、モデルの予測能力についても確認する。

## 2.2 定常確率過程とその意味

海洋波あるいは波浪中での船体運動は、近い将来の現象さえ不確定で非常に予測しにくい。このような現象を不規則過程、ランダム過程あるいは確率過程と呼んでいる[2.1]。本論文で取り扱う確率モデルは、これらの不規則現象を支配する確率的な法則をモデル化し、ある程度の誤差をもって将来の船体運動の予測を行い、その結果を制御に役立てることができるものである。確率モデルでは、船体運動のような時間的に変動する不規則な量を確率変数として表現している。

本論文で対象とする確率変数は、横揺角、方位角、舵角などの不規則確率過程を  $\Delta t$  ごとに離散化した時系列  $\{x(1\Delta t), x(2\Delta t), \dots, x(N\Delta t)\}$  である。以後、本論文では  $\Delta t$  を省略して  $\{x(1), x(2), \dots, x(N)\}$  と表記する。また、ここで対象とする時系列は定常性とエルゴード性を仮定する。確率過程が定常であるということは、その統計的性質が時間とともに変化しないということである。対象とする時系列に平均値と相関関数が存在して、これらが図 2.1 のように時間原点の移動に対して不変であるときは、その確率過程を弱定常過程と呼び、通常は定常過程という場合には弱定常過程を意味している。

定常過程では、 $x(n)$  の平均値を零と仮定しても一般性を失わないので、以後取り扱う時系列は、平均値まわりの変動値つまり平均値を差し引いた時系列を対象とする。また、通常の定常過程ではエルゴード性が成り立っていると考えられるので、平均値及び共分散は測定される時系列から、時間平均の操作によって推定することができる[2.2]、[2.3]。

なお、以降の記述で  $x(n)$  はスカラ変数の場合であったり、ベクトル変数の場合であったりするが、本章ではスカラ変数を対象とする。

### 2.3 定常時系列モデルの表現

波浪中での船体運動のような、外乱の比較的強いダイナミックシステムは、図2.2に示すような入力  $Y(n)$  を出力  $X'(n)$  に変換する応答系  $A(m)$  とシステム内部に存在する雑音源  $U(n)$  から構成され、この雑音源の不規則変動がシステムを複雑に変動させていると考えることができる。ここで、 $Y(n)$ 、 $X'(n)$  及び  $U(n)$  は全て平均0の定常過程で、 $Y(n)$  と  $U(n)$  は無相関である。また、 $U(n)$  は単に雑音としているが、より一般的には入力と無相関な雑音とシステムの非線形性の影響が合成されたものである。

ここで、適当な時間間隔で離散化された  $N$  個の一次元時系列  $\{x(1), x(2), \dots, x(N)\}$  が定常過程であるとして、これを簡潔に表現するモデルを考える。よく知られているように、時系列が線形定常であれば現時点  $n$  での  $x(n)$  は、互いに独立な白色正規雑音  $\varepsilon(n)$  の無限和として

$$x(n) = \sum_{m=0}^{\infty} G(m) \varepsilon(n-m) \quad (2.1)$$

によって表現することができる。ここで、白色正規雑音  $\varepsilon(n)$  は平均値0、分散  $\sigma_{\varepsilon}^2$  の正規分布に従う確率過程、 $G(m)$  はインパルス応答関数である。しかし、このインパルス応答表現は、一般には無限の過去からの影響までを考慮する必要があるため実用的ではない。

ところが、ある仮定のもとに時系列  $x(n)$  を  $\varepsilon(n)$  のみで表現するのではなく、自分自身の過去の値と白色雑音の過去の値による有限個の和として

$$x(n) + \sum_{m=1}^M a(m) x(n-m) = \varepsilon(n) + \sum_{j=1}^L b(j) \varepsilon(n-j) \quad (2.2)$$

と表現できることが知られている。ここで、 $a(m)$ 、 $b(m)$  はシステムの特性を表現する係数である。このモデルを自己回帰移動平均モデル (Auto Regressive Moving Average Model) と呼び、このモデルを利用することに

よって、極めてわずかな係数で時系列を表現することができる[2.4]、[2.5]。

自己回帰移動平均モデルは、理論的には最も優れたモデル表現であるが、係数の推定に非常に計算時間を要するという実用面からの短所がある。

一方、式(2.2)の右辺第2項を消去し

$$x(n) = \sum_{m=1}^{\infty} a(m)x(n-m) + \varepsilon(n) \quad (2.3)$$

と表現する。このモデル表現を自己回帰モデル (Auto Regressive Model) と呼ぶ。自己回帰モデルは他のモデルと異なって、係数の推定演算が線形計算だけで行えるという実用上の利点を備えている[2.6]。そこで、以後の解析及び制御系設計では、この自己回帰モデルを採用することとする。

## 2.4 自己回帰モデルの定常性と予測機能

定常時系列  $\{x(n), n=1, 2, \dots, N\}$  が得られたとき、例えば次数  $M$  の自己回帰モデルは

$$x(n) = \sum_{m=1}^M a(m)x(n-m) + \varepsilon(n) \quad (2.4)$$

と表現される。ここで、 $a(m)$  は自己回帰モデルの特性を表現する係数である。このモデルでは  $n$  時点での値  $x(n)$  は

$$x(n) = \text{統計モデル} + \text{偶然誤差}$$

によって表わされるものと考える。このうち統計モデルの部分は、 $M$  時点の過去までの自分自身の値に対する重み係数  $a(m)$  の線形和によって表現され、偶然誤差  $\varepsilon(n)$  は平均 0、分散  $\sigma_\varepsilon^2$  の白色雑音である。式(2.4)の自己回帰モデルの特性方程式

$$|1 - a(1)\lambda - \dots - a(M)\lambda^M| = 0 \quad (2.5)$$

の  $M$  個すべての特性根  $\lambda_i$  が単位円内に存在するとき、つまり

$$|\lambda_i| < 1 \quad i=1, 2, \dots, M \quad (2.6)$$

が成立するとき、自己回帰モデルは定常過程となる[2.7]。

定常過程  $\{x(n), n=\dots, -1, 0, 1, \dots\}$  の時刻  $(n-1)$  までの測定データだけから、次の時刻  $n$  における値を予測することを考える。いま、 $x(n)$  の期待値は常に 0 とし、 $M$  個の係数  $\{a(m), m=1, 2, \dots, M\}$  を用いて

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^M a(m)x(n-m) \quad (2.7)$$

によって  $x(n)$  の値を予測し、このようにして得られる予測値  $\hat{x}(n)$  を  $M$  次の線形予測 (Linear Predictor) と呼ぶ。

そして、無限長のデータ  $\{x(1-M), x(2-M), \dots, x(1), x(2), \dots\}$  から予測誤差 (Prediction Error)

$$\varepsilon(n) = x(n) - \hat{x}(n) \quad n = 1, 2, \dots, \infty \quad (2.8)$$

の自乗平均

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^N \frac{\varepsilon^2(n)}{N} \quad (2.9)$$

が最小になるように、係数  $a(m)$  を選択したときの線形予測子をM次最良線形予測子と呼ぶ[2.8]。

また、 $\varepsilon(n)$  がM次最良線形予測子の予測誤差であるとする、次数Mを大きくとると、 $\varepsilon(n)$  と  $\{x(n-1), \dots, x(n-M)\}$  は無相関となる。すなわち、式(2.9)を最小にするように線形予測子の係数を選択することによって、対象としている時系列の最良線形予測子を決定することができる。そして、そのときの予測誤差の系列  $\{\varepsilon(n), n=1, 2, \dots, \infty\}$  は互いに相関を持たない平均0、分散が一定の白色雑音過程となる。

## 2.5 自己回帰モデルの係数推定

ここで、本論文で使用する自己回帰モデルの係数が、比較的簡単な計算で得られることについて以下に示す。

式(2.4)のM次自己回帰モデルにおいて、

$$E[x^2(n)] = \sum_{m=1}^M a(m) E[x(n-m)x(n)] + \sigma_\varepsilon^2 \quad (2.10)$$

$$E[x(n)x(n-k)] = \sum_{m=1}^M a(m) E[x(n-m)x(n-k)]$$

$k=1, 2, \dots$

及び

$$\begin{aligned} E[\varepsilon(n)\varepsilon(n)] &= E[\varepsilon^2(n)] = \sigma_\varepsilon^2 \\ E[\varepsilon(n)x(n-k)] &= 0 \end{aligned} \quad (2.11)$$

が成立すると仮定する。

ここで、ラグ数  $k$  の自己共分散関数を  $R_{xx}(k) = E[x(n)x(n-k)]$  と定義し、 $R_{xx}(-k) = R_{xx}(k)$  の関係を使用して、 $k=1, 2, \dots, M$  と変化させると

$$\begin{bmatrix} R_{xx}(0) & R_{xx}(1) & \cdots & R_{xx}(M-1) \\ R_{xx}(1) & R_{xx}(0) & \cdots & R_{xx}(M-2) \\ & \vdots & & \\ R_{xx}(M-1) & R_{xx}(M-2) & & R_{xx}(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A(1) \\ A(2) \\ \vdots \\ A(M) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{xx}(1) \\ R_{xx}(2) \\ \vdots \\ R_{xx}(M) \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

が得られる。また、 $k=0$  の時は

$$\sigma_{xx}^2 = R_{xx}(0) - A(1)R_{xx}(1) - A(2)R_{xx}(2) \cdots - A(M)R_{xx}(M) \quad (2.13)$$

である。なお、 $m < 1$  または  $m > M$  の場合は  $a(m) = 0$  とする。

以上の式(2.12)、式(2.13)がYule - Walker方程式[2.9]と呼ばれる表現であり、 $R_{xx}(k)$ , ( $k=0, 1, \dots, M$ )を与えて自己回帰モデルの係数  $a(m)$  の推定値  $\hat{a}(m)$  を計算する基礎的な関係式である。

ところで、このYule - Walker方程式から求まる推定値  $\hat{a}(m)$  は式(2.4)の自己回帰モデルに最小自乗法をあてはめ、 $\hat{a}(m)$  を求める場合に得られる方程式とも一致する。さらに、このYule - Walker推定値あるいは最小自乗推定値が、自己回帰モデルの尤度(Likelihood)と呼ばれる量を最大にする最尤推定量(Maximum Likelihood Estimator)とも一致することが判っている[2.7]。

このように、自己回帰モデルではその係数の推定法として、Yule-Walker法、最小自乗法さらに最尤推定法のいずれの推定方法を用いても、同じ推定結果が得られるという特徴がある。

## 2.6 統計モデルにおけるモデルの選択

母集団から得られた標本過程をもとに、その過程の生成された母集団の特性、構造を最も適切に表現する統計モデルを選択するとき、どのような統計モデルを採用するかは本質的な問題である。前節で得られたような自己回帰モデルにおいて、統計モデルを確定するためにはモデルの次数及び係数を推定する必要がある。このうち係数の推定は自己回帰モデルの場合、最小自乗法の適用によって、簡単に統計的に偏差のない推定値を求めることができるが、最適な次数の選択は困難である。

例えば、定常時系列  $\{x(1), x(2), \dots, x(N)\}$  の自己回帰モデル

$$x(n) = \sum_{m=1}^M a(m)x(n-m) + \varepsilon(n) \quad (2.14)$$

の次数  $M$  の選択において、次数  $M$  を大きく取りすぎると推定されたモデルは、データに含まれる偶然誤差と見なせる要因まで過剰に応答し信頼性が損なわれる。一方、次数  $M$  を少なくしすぎると推定結果に偏りが生じる結果となる。そこで、統計モデルの次数を決定するための合理的な規準が必要となる。

このような問題を解決したのが、赤池によって提案された最終予測誤差 (FPE: Final Prediction Error) である [2.10]。最小自乗法により推定された予測モデルの係数を用いて得られる  $x(n)$  の予測値を  $\hat{x}(n)$  とするとき、 $\hat{x}(n)$  の FPE は

$$FPE = E[x(n) - \hat{x}(n)]^2 \quad (2.15)$$

で定義され、 $M$  次における FPE ( $M$ ) は

$$FPE(M) = \frac{1 + M/N}{1 - M/N} \hat{\sigma}^2(M) \quad (2.16)$$

で表わされる。なお、 $N$  はデータ数、 $M$  は自己回帰モデルの次数そして  $\hat{\sigma}^2(M)$  は残差分散の推定値である。従って、測定データ  $N$  について次数 1 から順番に自己回帰モデルをあてはめ、 $\hat{\sigma}^2(M)$  の最小自乗推定値が得られれば、逐次 FPE が計算できこの値を最小にする次数を選択すれば予測誤差が最小となる自己回帰モデルを選択したことになる。

この F P E を情報論的に発展させた規準が赤池情報量規準 (A I C : Akaike's Information Criterion) である [2.11]。情報量規準 (A I C) は自己回帰モデルなどの時系列モデルに限らず、パラメトリックな統計モデルに対して

$$\text{AIC} = -2 \log (\text{Maximum Likelihood}) + 2 (\text{Number of Parameters}) \quad (2.17)$$

によって定義される。M 次の自己回帰モデルにおける A I C (M) の場合は

$$\text{AIC} (M) = N \log \{ \sigma^2 (M) \} + 2 (M + 1) \quad (2.18)$$

で表わされる。

この A I C を最小にするモデル選択の方法を、M A I C E 法 (Minimum AIC Estimate Method) という [2.12]。本論文では、A I C を用いて自己回帰モデルなどを選択することとする。

自己回帰モデルの次数及び係数を実際に推定する方法として、次数 M による漸化式によって、順々に推定することのできるアルゴリズムとして、次の Levinson - Durbin 法が有名である [2.13]。

いま、式 (2.14) の M 次の自己回帰モデルを Levinson - Durbin 法を用いることによって、次の手順で自己回帰モデルを選択することができる。

(1) n 個の測定データ  $x(n)$  から平均値を引く。

$$x(n) = x(n) - \bar{x} \quad (2.19)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n)$$

(2)  $x(n)$  の相関関数を計算する。

$$R_{xx}(s) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^{N-1} x(n+s)x(n) \quad s = 0, \dots, L \quad (2.20)$$

L の目安は  $2\sqrt{N}$  から  $3\sqrt{N}$  とする。

(3)  $a_0(m) = 0 \quad m = 1, \dots, L \quad (2.21)$

$$\sigma^2(0) = R_{xx}(0)$$

(4)  $\{ a_m(m), m = 1, \dots, M \}, \sigma^2(M)$

を  $m = 0, \dots, L$  に対して、M に関する漸化式

$$a_{M+1}(M+1) = \left\{ \sigma^2(M) \right\}^{-1} \quad (2.22)$$

$$\left\{ R_{xx}(M+1) - \sum_{m=1}^M a_M(m) R_{xx}(M+1-m) \right\}$$

$$a_{M+1}(m) = a_M(m) - a_{M+1}(M+1) a_M(M+1-m) \quad m = 1, \dots, M$$

$$\sigma^2(M+1) = \sigma^2(M) \left[ 1 - \left\{ a_{M+1}(M+1) \right\}^2 \right]$$

により計算する。

(5) これと同時に A I C を

$$A I C (M) = N \log \left\{ \sigma^2(M) \right\} + 2(M+1) \quad (2.23)$$

によって計算し、 $M=0, \dots, L$ のうちで最小値を与える  $M$  をモデルの次数とする。

このようにして式(2.14)の自己回帰モデルが得られると、 $x(n)$ のスペクトル  $P(f)$  は

$$P(f) = \frac{\sigma^2(M)}{\left| 1 - \sum_{m=1}^M a(m) e^{-2\pi i f m} \right|^2} \quad (2.24)$$

で推定することができる。本論文で示すスペクトルはいずれもこの方法で計算した結果である。

ここで、ある実船実験で計測された横揺角のデータに対して、M A I C E 法を適用した場合の A I C の挙動を図 2.3 に示す。図 2.3 から次数を上げるにしたがって、式(2.18)第一項の残差分散  $\sigma^2(M)$  は単調に減少し、式(2.18)第二項のパラメータ数  $2(M+1)$  は単調に増加することが判る。この両者の和が最小となる次数が、M A I C E 法によって選択された最適次数となる。この図では、M A I C E 法によって 3 次のモデルが選択されることを意味している。

この手法は、後の章で述べる多次元自己回帰モデルの場合についても同様に適用可能である。

## 2.7 自己回帰モデルによる横揺の予測

ここで自己回帰モデルがこれから取り扱う船体の横揺についてどの程度の予測能力を持っているかを、次のような方法で確認する。いま、横揺角のデータ  $\{x(n), n=1, 2, \dots, N\}$  が得られたとする。この  $x(n)$  が平均が零の定常過程であるとする、MAICE法によって選択されるM次の自己回帰モデルは

$$\hat{x}(n) = \hat{a}(1)x(n-1) + \dots + \hat{a}(M)x(n-M) \quad (2.25)$$

で表現される。つまり、 $x(n)$  の予測値  $\hat{x}(n)$  は、M次の時に推定された係数  $\hat{a}(m)$  と  $(n-1)$  時点以前に得られた測定値とによって計算することができる[2.14]、[2.15]。

次に、横揺角について総トン数約2000トンの高速コンテナ船で得られた、1秒サンプリングの1000個のデータのうち800個のデータに対して、MAICE法を用いて自己回帰モデルをあてはめ、得られた自己回帰モデルをもちいて801個以降の値を予測する。801個以降の1秒先の横揺を予測した時系列が図2.4であり、\*印が実際の測定データで・印が予測値である。この図によると、1秒先の予測を行う限りは予測値と実際の値の差はほとんどないことが判る。また、予測するステップ（何秒先までを予測するか）を変化させた場合の予測誤差を図2.5に示す[2.16]。

このように自己回帰モデルは、適切な次数が選択されることにより、選択された自己回帰モデルは優れた予測性能を発揮することが確認できる。このことは統計的最適制御においても、このモデルが舵角などの情報を取り入れることにより、さらに優れた予測能力が発揮されることを意味している。

## 2.8 結言

波浪中での横揺を含む船体運動の時系列を、定常確率過程として取り扱うために時系列の定常性、エルゴード性を仮定し、これらをパラメトリックモデルの一つである自己回帰モデルで表現することを提案した。さらに、自己回帰モデルの予測機能などの特徴、及び測定データから実際にモデルをあてはめる時に有効な情報量規準AICの適用について、具体的な計算方法とともに示した。

そして、最後に横揺角の計測データについて自己回帰モデルを適用して、モデルは予測能力にも優れていることも確認した。

本章で行った時系列に対する仮定、モデルの選択方法などについて以下にまとめて示す。

- (1) 波浪中における横揺などの船体運動の時系列を、弱定常確率過程として取り扱い、かつエルゴード性も成立すると考える。
- (2) 時系列を表現するモデルとして、自己回帰移動平均モデル表現や自己回帰モデル表現などがあるが、本論文では計算方法など実用面で優れている自己回帰モデルを用いる。
- (3) 自己回帰モデルは、それを構成している係数によって、モデルの安定性、定常性などの特性を確認することができる。
- (4) 時系列から統計的に最適な時系列モデルを選択する評価規準として、FPEあるいはAICが有効である。本論文ではAICを用いたMAICE法によって自己回帰モデルの選択を行なう。
- (5) 自己回帰モデルを用いて実船で計測された横揺角のデータに関して予測を行ったところ、非常に良好な予測が可能であることが判った。

参考文献

- [2.1] A. Papoulis  
Probability random variables and stochastic processes,  
MacGraw Hill, 1965.
- [2.2] J. S. Bendat, A. G. Piersol  
Random data, analysis and measurement procedures, John Wiley  
and Sons, 1978.
- [2.3] E. J. Hannan  
Time series analysis, Methuen, 1960.
- [2.4] G. P. E. Box, G. M. Jenkins  
Time series analysis : forecasting and control, Holden Day, 1970.
- [2.5] E. A. Robinson, M. T. Silvia  
Digital foundations of time series analysis, Holden Day, 1979.
- [2.6] 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、1972.
- [2.7] U. Grenander, M. Rosenblatt  
Statistical analysis of stationary time series, John Wiley, 1957.
- [2.8] O. D. Anderson  
Time series analysis: The Box-Jenkins approach, Butterworths,  
1976.
- [2.9] G. M. Jenkins, D. G. Watts  
Spectral analysis and its applications, Holden Day, 1968.
- [2.10] H. Akaike  
Autoregressive model fitting for control, Ann. Inst. Statist.  
Math., Vol. 22, 1970.
- [2.11] H. Akaike  
Information theory and an expression of the maximum likelihood  
principle, 2nd Inter. Symp. on Information Theory, Akademiai  
Kiado, 1973.

[2.12] H. Akaike

A new look at the statistical model identification, IEEE Trans.  
AC19, 1974.

[2.13] J. Durbin

The fitting of time series models, Rev. Internat. Statis. Inst.,  
Vol.23, 1960.

[2.14] C. R. Nelson

Applied Time Series Analysis, Holden-Day, 1982.

[2.15] 得丸英勝

大気汚染濃度予測のモデリング、数理科学、No.153、1976.

[2.16] 山内保文、大津皓平、北川源四郎、織田博行

データ解析の動向（その1、その2）、日本造船学会誌、第589号、  
第591号、1978.

図表一覧表

- 図 2.1 弱定常確率過程の例
- 図 2.2 線形定常システムの構成
- 図 2.3 自己回帰モデルの次数による A I C の挙動
- 図 2.4 計測値と自己回帰モデルによる予測値の比較
- 図 2.5 予測ステップと予測誤差の関係



図 2.1 弱定常確率過程の例



図 2.2 線形定常システムの構成

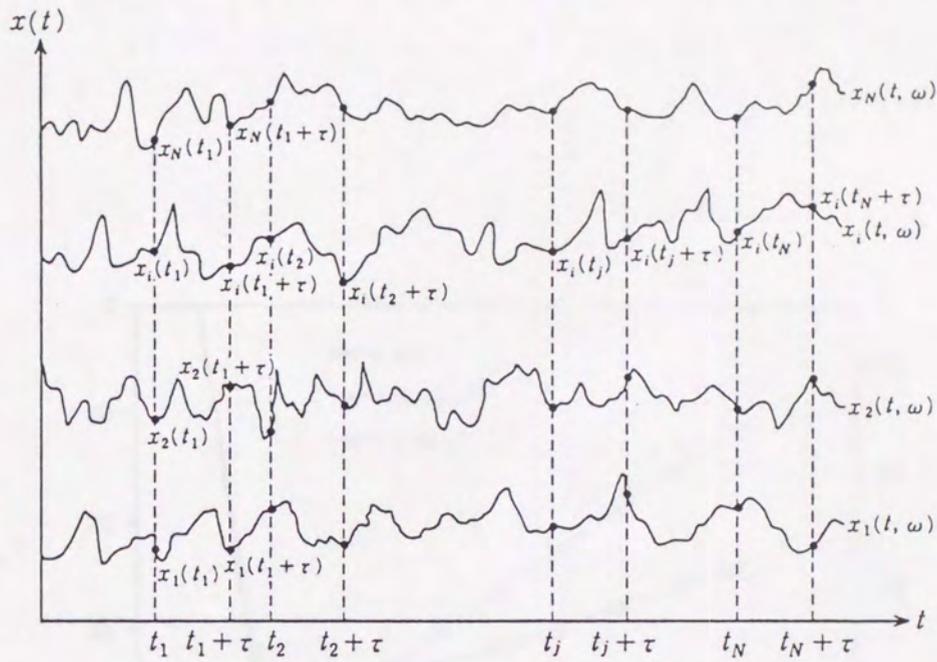


図 2.1 弱定常確率過程の例

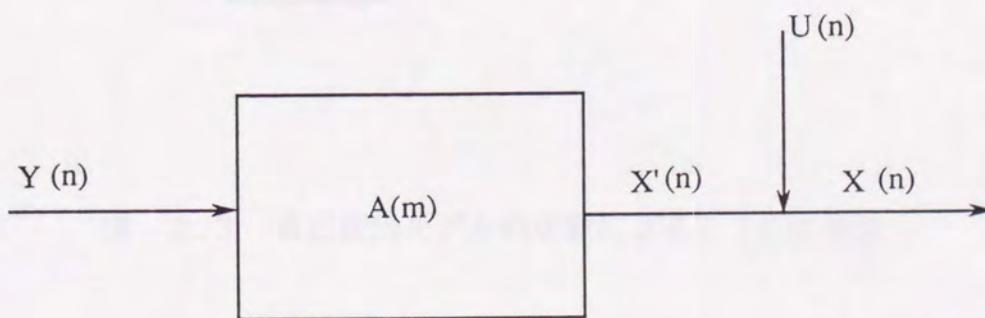


図 2.2 線形定常システムの構成

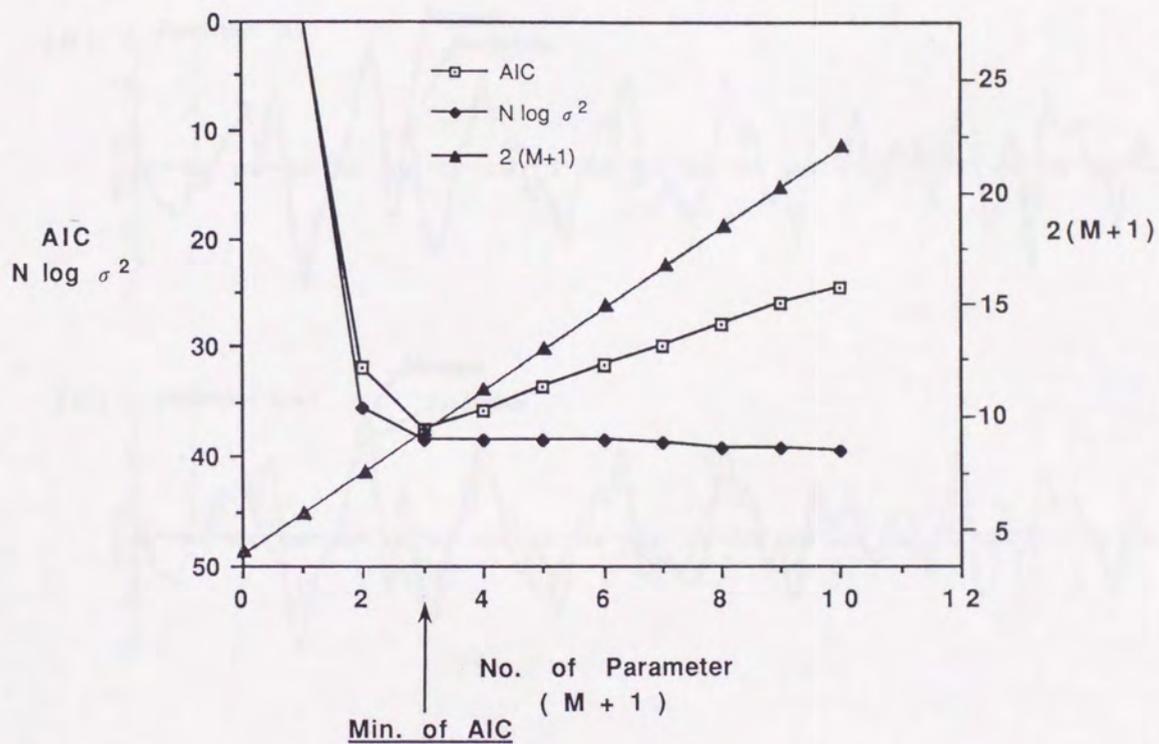
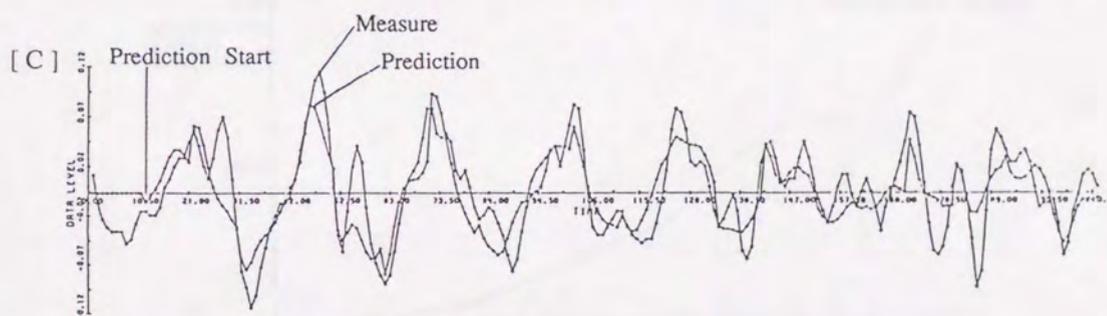
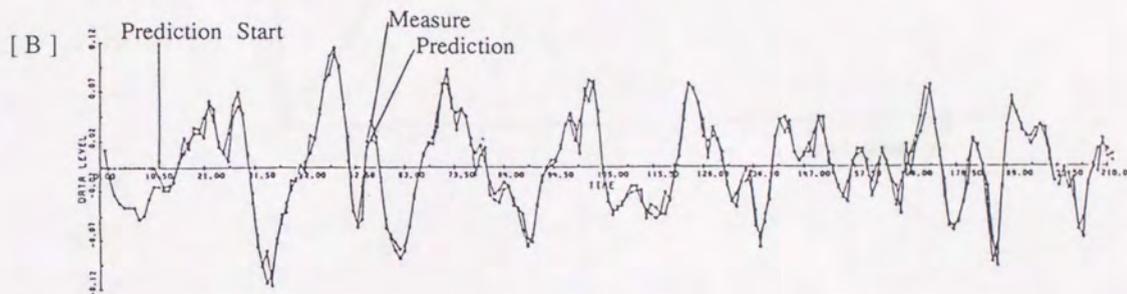
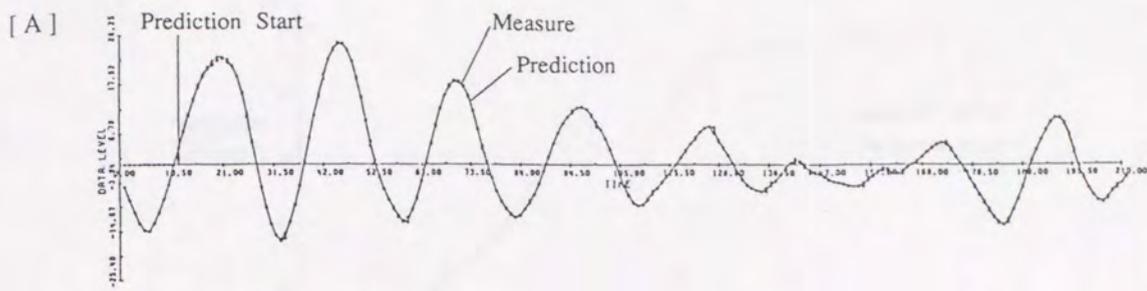


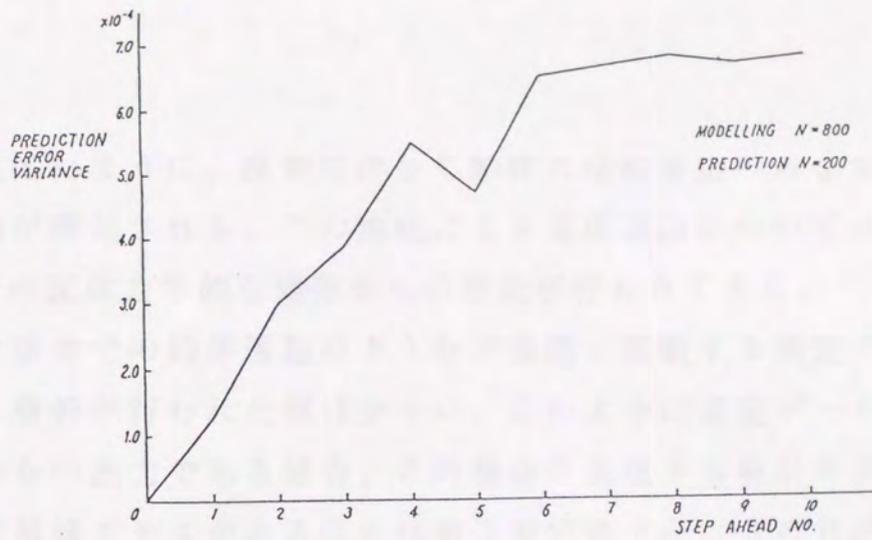
図 2.3 自己回帰モデルの次数によるAICの挙動



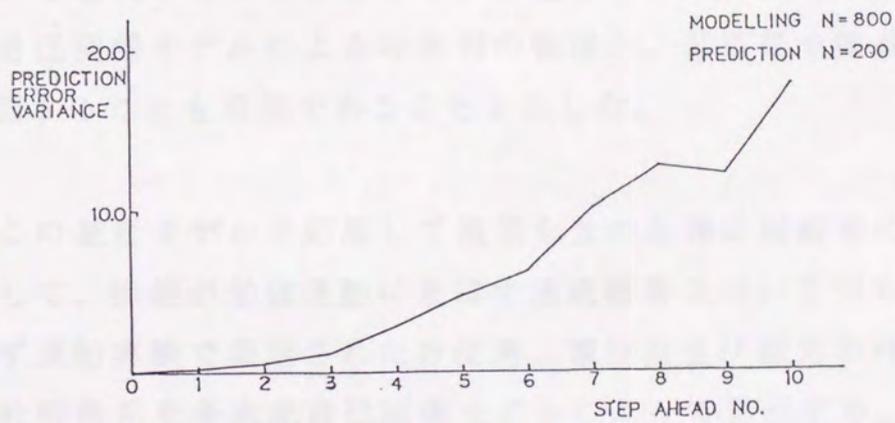
- [A] 1ステップ先の予測 (横揺角の例)
- [B] 1ステップ先の予測 (左右揺の例)
- [C] 10ステップ先の予測 (左右揺の例)

図 2.4 計測値と自己回帰モデルによる予測値の比較

[A]



[B]



[A] 横揺角の例  
 [B] 左右揺の例

図 2.5 予測ステップと予測誤差の関係

### 第3章 自己回帰モデルによる横揺を含めた保針制御系の解析

#### 3.1 緒言

第1章で述べたように、操舵に伴って船体には船首揺のみならず、そのほかの船体運動が誘起される。この操舵による連成運動については、これまでは主としてその流体力学的な側面からの研究が行われてきた。

しかし、波浪中での船体運動のような不規則に変動する測定データに対して、統計的な解析が行われた例は少ない。このように測定データが一定の確率的な構造からの出力である場合、この構造を表現する統計モデルのひとつとして、自己回帰モデルがあることは第2章で述べた。この自己回帰モデルの次数を決定するための評価規準として、最終予測誤差 (FPE) や情報量規準 (AIC) を導入することによって、最適なモデルが得られることも示した。また、自己回帰モデルによる時系列の表現が、船首揺や横揺などの将来の動きを予測することも可能であることを示した。

本章では、この統計モデルを応用して横揺を含めた保針制御時の実船データの解析を通して、操舵が船体運動に及ぼす連成影響について明らかにする。そのため、まず実船実験で測定された方位角、横揺角及び舵角の時系列から、横揺を含む保針制御系を多次元自己回帰モデルによって表現する。次に、この多次元自己回帰モデルを用いて、変数間の雑音寄与率及びインパルス応答などを推定する方法について述べた後、横揺を含めた保針制御時の実船データの解析を行い統計的な性質を明らかにする。

なお、本論文で図示するスペクトル、雑音寄与率及びインパルス応答はいずれも、MAICE法によって同定された自己回帰モデルから計算したものである。

### 3.2 多次元時系列のスペクトル解析

ここで、横揺に関係する方位角、横揺角及び舵角からなる  $k$  次元の時系列  $X(n) = (x_1(n), \dots, x_k(n))^t$  を考え、これらの時系列を  $M$  次の多次元自己回帰モデルで表現すると

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m) X(n-m) + U(n) \quad (3.1)$$

となる。ここで、 $A(m)$  は  $k * k$  次元の自己回帰係数、 $U(n)$  は  $k$  次元の白色雑音ベクトルである。これらの時系列に対する多次元自己回帰モデルのあてはめにおいて、どの程度の過去までのデータ（情報）をモデルに取り入れるか、つまりモデルの次数の決定が本質的な問題である。これを解決するのが第2章で述べた MAICE 法である。次数  $M$  の多次元自己回帰モデルの AIC は

$$AIC(M) = N \log |\Sigma_M| + 2k^2(M+1) \quad (3.2)$$

で与えられる [3.1]。ここで  $\Sigma_M$  は  $U(n)$  の分散、共分散行列の推定値である。

次に、確定した多次元自己回帰モデルから得られるスペクトルについて述べる [3.2]。時間遅れ作用素  $B^m$  を用いて、 $X(n-m) = B^m X(n)$  によって定義すると、式 (3.1) は

$$\left\{ I - \sum_{m=1}^M A(m) B^m \right\} X(n) = U(n) \quad (3.3)$$

と表わすことができ、さらに

$$X(n) = \left\{ I - \sum_{m=0}^M A(m) B^m \right\}^{-1} U(n) \quad (3.4)$$

と書ける。

ここで、 $A(0) = -I$  とすると、 $U(n)$  から  $X(n)$  への閉ループの周波数  
 応答関数は

$$A(f)^{-1} = - \left\{ \sum_{m=0}^M A(m) e^{-2\pi i f m} \right\}^{-1} \quad (3.5)$$

によって表現される。ここで、

$$A(f) = \begin{bmatrix} A_{11}(f) & \dots & A_{1k}(f) \\ \vdots & & \vdots \\ A_{k1}(f) & \dots & A_{kk}(f) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

で定義され、 $i * j$  行列の成分は

$$A_{ij}(f) = \sum_{m=0}^M a_{ij}(m) e^{-2\pi i f m} \quad (3.7)$$

である。

ここで、 $X(n)$  は  $U(n)$  が入力で周波数応答関数が  $A(f)^{-1}$  であるよう  
 なシステムにおける出力と考えられるので、クロススペクトル行列は

$$P(f) = A(f)^* P_U(f) A(f)^{-1} \quad (3.8)$$

で表現される。ただし、 $P_U(f)$  は入力  $U(n)$  のスペクトルを意味している  
 が、 $U(n)$  は白色雑音であるので、その共分散行列に一致するので

$$P(f) = A(f)^* \Sigma_M A(f)^{-1} \quad (3.9)$$

と表現することができる。従って、多次元自己回帰モデルが推定されるとそ  
 のパラメータを式(3.8)に代入することによって、それぞれの変数間のクロス  
 スペクトルを推定することができる[3.3]。

さらに、クロススペクトル行列  $P(f)$  を用いることによって、変数  $X(n)$   
 間の周波数応答関数を求めることができる。すなわち、 $x_i(n)$  のパワース  
 ペクトルは  $P(f)$  の対角成分  $p_{ii}(f)$  によって与えられ、 $x_i(n)$  と  $x_j(n)$   
 のクロススペクトルは  $p_{ij}(f)$  の要素によって求められる。

このとき変数  $x_i(n)$  から  $x_j(n)$  に対する周波数応答関数  $a_{ij}(f)$  は

$$a_{ij}(f) = \frac{p_{ij}(f)}{p_{ii}(f)} \quad (3.10)$$

から求められる。

### 3.3 フィードバック系のシステム解析

ところで、船舶の保針制御系は舵角と目標方位角及びその偏差からなる、図3.1に示すようなフィードバックシステムである[3.4]、[3.5]。ここで、 $x(n)$ は舵角、 $y(n)$ は方位角偏差、 $A$ は舵角による船体運動特性、 $B$ は制御系の応答特性、波浪などの外乱の影響が $u(n)$ そして制御系の応答のふらつきなどが $v(n)$ である。このようなフィードバックシステムを解析するためには、 $A$ と $B$ の応答特性だけでなく、システムを駆動している雑音 $u(n)$ と $v(n)$ の特性についても把握する必要がある。

いま、簡単のため図3.1のフィードバックシステムを考える。このとき2つのサブシステム $A$ 、 $B$ における入出力関係が、線型インパルス応答モデル

$$y(n) = \sum_{m=1}^{\infty} a(m)x(n-m) + u(n) \quad (3.11)$$

$$x(n) = \sum_{m=1}^{\infty} b(m)y(n-m) + v(n)$$

で表わされると仮定する[3.6]。ここで、 $a(m)$ と $b(m)$ は $A$ と $B$ のインパルス応答関数で、 $u(n)$ と $v(n)$ は互いに無相関な雑音（外乱）と仮定するが、必ずしも白色雑音でなくても良いとする。

ところで、この係数 $a(m)$ 、 $b(m)$ の推定方法として、最小自乗法の利用が考えられるが、最小自乗推定量が偏よりのない推定値を与えるためには、 $u(n)$ と $\{x(n-1), \dots, x(n-m)\}$ が無相関であることが必要である。しかし、フィードバックシステムでは、 $u(n) \rightarrow y(n) \rightarrow x(n)$ という信号の流れがあるために、 $u(n)$ が白色雑音でない限り $x(n)$ と $u(n)$ は無相関とはならない。この問題を解決する方法として、 $u(n)$ 及び $v(n)$ の白色化と呼ばれる手法を用いる[3.7]。

すなわち、 $u(n)$  と  $v(n)$  に対しても自己回帰モデルをあてはめる。

$$u(n) = \sum_{s=1}^{\infty} c(s)u(n-s) + \zeta(n) \quad (3.12)$$

$$v(n) = \sum_{s=1}^{\infty} d(s)v(n-s) + \eta(n)$$

ただし、 $\zeta(n)$  と  $\eta(n)$  は互いに無相関な白色雑音とする。ここで、式(3.12)の第1式に式(3.11)の第1式を代入して整理すると

$$y(n) = \sum_{s=1}^{\infty} c(s)y(n-s) + \sum_{m=1}^{\infty} A(m)x(n-m) + \zeta(n) \quad (3.13)$$

のような自己回帰モデル表現が得られる。ここで、 $A(m)$  は

$$\begin{aligned} A(1) &= a(1) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$A(m) = a(m) - \sum_{s=1}^{m-1} c(s)a(m-s), \quad m = 2, \dots, \infty$$

である。式(3.13)の表現では  $y(n)$  自身の過去の値、 $\zeta(n)$  が白色雑音であること、さらに  $x(n)$  についても同じような表現ができることを考慮すると、これは二次元の自己回帰モデルと考えることができる。従って、このモデルは情報量規準 A I C を用いて同定することができ、通常の有次元の次数による自己回帰モデルとなる。

このことを、 $k$  次元のフィードバックシステムについて拡張して適用すると、 $k$  変数の時系列  $X(n) = \{x_1(n), \dots, x_k(n)\}$  の場合は、次のようにして解析を行うことになる。

- (1)  $k$  変数の自己回帰モデルをMAICE法で同定する。  
 次数 $M$ の自己回帰モデルは、次のように表現される。

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m) X(n-m) + u(n) \quad (3.15)$$

$$A(m) = \begin{bmatrix} A_{11}(m) & \cdots & A_{1k}(m) \\ \vdots & & \vdots \\ A_{k1}(m) & \cdots & A_{kk}(m) \end{bmatrix}$$

モデルの次数 $M$ はAICにより決定する。このときAICは

$$AIC(M; k) = N \log |d_M| + k^2 (M+1) \quad (3.16)$$

となる。ここで、 $N$ はデータ数で $|d_M|$ は雑音項の共分散行列の行列式である。

- (2) ノイズの自己回帰モデルを求める。  
 モデルの次数は $M$ で、そのときの係数は

$$C_i(m) = A_{ii}(m), \quad m=1, \dots, M \quad (3.17)$$

となる。

- (3) 変数 $x_j(n)$ から $x_i(n)$ へのインパルス応答関数を求める。

$$a_{ij}(m) = A_{ij}(m) + \sum_{k=1}^{m-1} c_i(k) a_{ij}(m-k), \quad m=1, \dots, M$$

$$a_{ij}(m) = \sum_{k=1}^M c_i(k) a_{ij}(m-k), \quad m=M+1, \dots \quad (3.18)$$

以上のような解析によって、推定されたフィードバックシステムでは $i$ 番目の変数 $x_i(n)$ は

$$X_i(n) = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^M a_{ij}(m) x_j(n-m) + u_i(n), \quad i=1, \dots, k \quad (3.19)$$

と表現される。ただし、 $a_{ii}(0) = 0$ と仮定する。 $u_i(n)$ は $x_j(n)$ の変動が

$x_i(n)$  に伝えられる経路をすべて切断した場合に、なお残る  $x_i(n)$  の変動を表わしている。

このとき  $x_i(n)$  から  $x_j(n)$  への周波数応答関数は

$$a_{ij}(f) = \sum_{m=1}^M a_{ij}(m) e^{-2\pi i f m} \quad (3.20)$$

によって与えられ、雑音  $u_i(n)$  のスペクトルは

$$P_{u_i}(f) = \frac{\sigma^2}{\left| 1 - \sum_{m=1}^M c_i(m) e^{-2\pi i f m} \right|^2} \quad (3.21)$$

によって与えられる。さらに

$$A(f) = \begin{bmatrix} 1 & -a_{12}(f) & \cdots & -a_{1k}(f) \\ -a_{21}(f) & 1 & \cdots & -a_{2k}(f) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -a_{k1}(f) & -a_{k2}(f) & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

と置くと

$$B(f) = A(f)^{-1} = \begin{bmatrix} b_{11}(m) \cdots b_{1k}(m) \\ b_{21}(m) \quad b_{2k}(m) \\ \vdots \quad \quad \quad \vdots \\ b_{k1}(m) \cdots b_{kk}(m) \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

で定まる、 $b_{ij}(f)$  は  $u_i(n)$  から  $x_j(n)$  への閉ループの周波数応答関数を表している。この時、 $u_i(n)$  間の無相関性のもとでは、 $x_i(n)$  のスペクトルは

$$p_{ii}(f) = \sum_{j=1}^k |b_{ij}(f)|^2 p_{u_i}(f) \quad (3.24)$$

のような  $k$  個の成分に分解できる。

ここで

$$q_{ii}(f) = |b_{ij}(f)|^2 p_{ui}(f) \quad (3.25)$$

は周波数  $f$  において、 $x_i(n)$  のスペクトルの中で、 $u_j(n)$  に起因する部分を表わしている。式(3.24)と式(3.25)で与えられる比率

$$\gamma_{ij}(f) = \frac{q_{ij}(f)}{p_{ii}(f)} \quad (3.26)$$

を雑音寄与率 (Noise Contribution) という[3.6]。そして、

$$R_{ij}(f) = \sum_{h=1}^j \gamma_{ih}(f) \quad (3.27)$$

$j = 1, 2, \dots, k$

はその累積比率を表わしている。これを累積雑音寄与率 (Integrated Noise Contribution) を呼ぶ。

本論文では、式(3.27)の累積雑音寄与率による表現を雑音寄与率として表示する。この雑音寄与率の値についての物理的な意味については、後の保針制御系における雑音寄与率解析でさらに説明する。

### 3.4 実船データによる横揺を含む保針制御系の解析

ここでは、実船から得られたマニュアルによる保針操舵時のデータを、操舵による横揺の連成影響の立場から、これまで述べた方法、つまりスペクトル解析、雑音寄与率解析、さらにインパルス応答解析を用いて検討する。ここで対象とする実船データは、東京商船大学練習船『汐路丸』における実験で得られたものである。本船の主要目を表3.1に示す。

なお、本実験は横揺に関する情報を、操舵制御系にフィードバックしない通常の操舵装置を用いて実施した。船速は約13 (k'ts) でマニュアル操舵による保針操舵を行い、方位角、横揺角速度及び舵角を0.5秒間隔でサンプリングした900個のデータについて解析を行った[3.8]。

以下に、これらの時系列解析から得られたスペクトル、インパルス応答さらにフィードバック系における各変数間の関連性を示す雑音寄与率を示す。ここで解析に用いた時系列を図3.2、実験状況を表3.2に示す。図3.2は上から方位角、横揺角速度そして舵角であり、それぞれ図中ではYaw、Roll Rate、Rudderと記入している。図の横軸は時間、縦軸はそれぞれの有次元値を表示している。なお、方位角については目標方位からの偏差を表示しているが、ここではこれを方位角と表示している。また、時系列表示の横軸と平行な破線は平均値を意味している。本論文中での時系列表示については、以後同様な表示方法を用いる。

#### 3.4.1 方位角、横揺角速度及び舵角の自己回帰モデル表現

実船実験によって得られたデータに対して、第2章で示した自己回帰モデル及びMAICE法を適用し、方位角、横揺角速度及び舵角の自己回帰モデルを求める。

マニュアルによる操舵によって得られた、方位角、横揺角速度及び舵角のそれぞれのデータに対して、MAICE法を用いて自己回帰モデルをあては

めた場合の情報量規準 A I C の挙動を図 3.3、得られた自己回帰モデルの次数、係数及び残差の分散値を表 3.3 に示す。

これらの図から、方位角は 9 次、横揺角速度は 8 次そして舵角は 6 次の自己回帰モデルが選択されていることが判る。このことは、例えば横揺角速度の現時点の値は横揺角速度の場合、8 次\*0.5 秒つまり 4 秒程度の過去からの影響を受けているとしたモデルが最適であることを意味している。

### 3.4.2 自己回帰モデルによる保針制御系のデータ解析

#### [1] 方位角、横揺角速度及び舵角のスペクトル解析

次に、M A I C E 法で選択された方位角、横揺角速度及び舵角の自己回帰モデルから、図 3.2 のそれぞれの変数のスペクトルを推定した結果が図 3.4 である。なお、スペクトル  $P(f)$  の表示は、スペクトルピークを明瞭に示すことのできる、次の dB (デシベル) 表示を用いた。

$$P_{dB}(f) = 10 \log P(f)$$

以下に、これらのスペクトル解析から得られた結果を示す。

- (1) 方位角のスペクトルは、周波数零付近の低周波数側から高周波数側に単調に減少する。
- (2) 横揺角速度は、本船の固有周期である 0.16 Hz (6.25 秒) 付近に単峰性のスペクトルピークが認められる。
- (3) 舵角は、方位角と横揺角速度のスペクトルピークの間 0.06 Hz 付近に認められる。また、人間は比較的 low 周波数側で保針操舵を行い、あまり高周波数の運動には応答してないことが判る。

#### [2] 保針制御系における雑音寄与率解析

フィードバック系における、各変数間の関連性を確認するために、上記データに対して方位角、横揺角速度及び舵角の三変数からなる時系列に対して

多次元自己回帰モデルをあてはめ、その時の情報量規準AICの挙動を図3.5に示す。この図から9次のモデルを採用することが最適であることが判る。さらに、前節で示した方法で計算した方位角、横揺角速度及び舵角に対する雑音寄与率を図3.6に示す。

図3.6において、例えば方位角に対する舵角からの雑音寄与率の値は周波数0(Hz)付近で0.3~0.4程度であり、この比率に同じ周波数における方位角のパワースペクトルを乗じた量が、そのパワースペクトルへの舵角からの寄与がどの程度であることを示していることになる。従って、雑音寄与率は対応する変数のパワースペクトラムと合わせて評価する必要がある。

このような視点から、図3.4と図3.6を評価すると次のことが判る。

(1) 方位角に対する影響 (図3.6 [A])

方位角のスペクトルが大きい低周波数側から舵角のスペクトルピーク付近0.06(Hz)までは、舵角から方位角に与える影響が大きいことが判る。また、横揺角速度のスペクトルピーク付近では、横揺角速度から方位角に与える影響が大きく、これらの運動に連成があることを示している。

(2) 横揺角速度に対する影響 (図3.6 [B])

舵角のスペクトルのピーク周波数付近で、舵角から横揺角速度に対する影響が大きく、操舵に伴う横揺現象の存在を示している。このことは逆に、舵角を適切に制御することにより横揺を制御できることを意味している。また、舵角のスペクトルピークから、横揺角速度のスペクトルピークの周波数にかけて方位角からの影響が強いが、これは、舵角を介して方位角に起因する横揺角速度の連成影響があることを示している。

(3) 舵角に対する影響 (図3.6 [C])

この図からは、舵角がどのような変数をフィードバックして動いているかを確認することができる。ここでは、方位角のスペクトルが大き

い低周波数域で、方位角からのフィードバックを受けて操舵していることが判る。なお、横揺角速度からの影響はこのスペクトルピーク付近でも認められない。このことは、マニュアルによる保針操舵の場合は、低周波数の方位角に対しては応答しているが横揺角速度には応答していないと考えられる。

### [3] 保針制御系のインパルス応答解析

次に、多次元自己回帰モデルから式(3.18)のインパルス応答を推定して、時間領域におけるこれらの変数間の応答特性を確認する。舵角と方位角、舵角と横揺角速度さらに方位角と横揺角速度に関するインパルス応答を一括して図3.7に示す。

これらの図から、次のような結果が得られる。

#### (1) 舵角と方位角の特性 (図3.7 [A]、図3.7 [B])

図3.7 [A]の舵角から方位角に対する特性は、インパルスの入力に対して、まず若干の逆応答があり、その後遅れ時間を伴って方位角が変化して最後に積分特性を示す成分が残る。初期の応答は操舵に対する時間遅れ、逆応答は操舵時のキックと考えられる[3.9]。

一方、図3.7 [B]の方位角から舵角に対する特性から、操舵手は方位角を補正するように、まず方位角の変化と反対側に操舵しその後、あて舵的な補正をしていることが判る。

#### (2) 舵角と横揺角速度の特性 (図3.7 [C]、図3.7 [D])

図3.7 [C]の舵角に対する横揺角速度の特性は、舵角のインパルスの入力に対して、若干振動しながら横揺角速度は減衰していくことが判る。また、本船の横揺応答は、極めて減衰が弱い事も判る。

また、マニュアル操舵による保針制御では、積極的に横揺角速度をフィードバックしていないため、図3.7 [D]の横揺角速度から舵角に対する特性については物理的な意味は比較的少ない。

(3) 方位角と横揺角速度の特性 (図 3.7 [E]、図 3.7 [F])

図 3.7 [E] の方位角から横揺角速度に対する特性は、方位角のインパルス的な入力変化に対して、振動しながら横揺角速度は減衰していくことが判る。一方、図 3.7 [F] の横揺角速度から方位角に対する特性からは、例えば横揺の右傾斜に対して、方位角が左回頭するような傾向にあることが判る[3.10]。

### 3.5 結言

本章では、実船データに多次元自己回帰モデルをあてはめ、操舵が与える横揺への連成影響の統計的解析を行うことを目的とした。そのため、まずあてはめられた自己回帰モデルから、どのようにして時系列のスペクトル及びフィードバック系における、各変数間の特性あるいは影響を統計的に解析するかについてその方法を示した。

次に、実船実験で得られたマニュアル操舵による保針操舵時のデータをもとに、自己回帰モデルの同定からスペクトル解析、雑音寄与率解析そしてインパルス応答解析を行い、次のような結果を得た。

以下に本章で得られた結果をまとめて示す。

- (1) 方位角のスペクトルが大きい低周波数側から舵角のスペクトルピーク付近までは、舵角から方位角に与える影響が大きいことが判った。横揺角速度のスペクトルピーク付近では、横揺角速度から方位角に与える影響が大きく、これらに連成影響のあることが判った。
- (2) 舵角のスペクトルピーク周波数付近で、舵角から横揺角速度に対する影響が大きいことが判った。このことは、舵角を適切に制御することにより横揺を制御できることを意味している。
- (3) 方位角のスペクトルパワーが大きい低周波数域では、人間は方位信号の変化を忠実にフィードバックしていることが判った。
- (4) 舵角から方位角に対する特性は、舵角のインパルスの入力に対して、若干の遅れ時間を伴って方位角が変化し、その後積分特性成分を残しながら減衰することが判った。逆に、方位角のインパルスの変化に対する操舵手による舵角応答は、その方位角変化を補正するように、舵角が一次応答的に応答していることが判った。
- (5) 舵角に対する横揺角速度の特性は、舵角のインパルスの入力に対して、若干振動しながら横揺角速度は減衰していくことが判った。
- (6) 横揺角速度から方位角に対する特性から、例えば右傾斜の横揺が生じた時、方位角が左回頭するような傾向にあることが判った。

参考文献

- [3.1] H. Akaike  
A new look at the statistical model identification, IEEE Trans.  
AC19, 1974.
- [3.2] H. Akaike  
Stochastic Theory of Minimal Realization, IEEE. Trans. Autom.  
Contr., AC-19, No.6, 1974.
- [3.3] H. Akaike  
Spectrum Estimation Through Parametric Model Fitting,  
IUTAM Symp., 1976.
- [3.4] K. J. Astrom, B. Wittenmark  
Adaptive control, Addison-Wesley, 1989.
- [3.5] G. G. Goodwin  
Dynamic system identification: Experiment design and data  
analysis, Math. Science & Engineering, Academic Press, 1977
- [3.6] 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、  
1972.
- [3.7] H. Akaike  
On the Use of a Linear Model for the Identification for Feedback  
Systems, Ann Inst. Statist. Math., 20, 1968.
- [3.8] 織田博行、大津皓平、佐々木学、関佳之、堀田敏行  
制御型多次元自己回帰モデルを用いた舵による横揺減揺制御  
関西造船協会誌、第216号、1991.
- [3.9] 大津皓平  
船体運動の統計的解析と最適操舵に関する研究、博士論文、1982.
- [3.10] 孫景浩、野本謙作  
高速コンテナ船の操縦運動と横揺との連成挙動について、  
日本造船学会論文集、第150号、昭和56年.

図表一覧表

- 表 3.1 東京商船大学練習船「汐路丸」の船体主要目
- 表 3.2 保針操舵時の実験状況
- 表 3.3 自己回帰モデルの係数および予測誤差  
(マニュアル操舵：方位角、横揺角速度、舵角)
- 図 3.1 船体運動と制御系によるフィードバックシステム
- 図 3.2 マニュアル保針操舵時の時系列 (S 4 0 0)
- 図 3.3 自己回帰モデルの次数とA I Cの挙動  
(マニュアル操舵：S 4 0 0)
- 図 3.4 マニュアル操舵時のスペクトル (S 4 0 0)
- 図 3.5 多次元自己回帰モデルの次数とA I Cの挙動  
(マニュアル操舵：S 4 0 0)
- 図 3.6 マニュアル操舵時の累積雑音寄与率 (S 4 0 0)
- 図 3.7 マニュアル操舵時のインパルス応答特性 (S 4 0 0)

表 3.1 東京商船大学練習船「汐路丸」の船体主要目

Hull	Lpp	46.00 m
	B	10.00 m
	D	3.80 m
	d	3.01 m
	$\Delta$	425.0 ton
	T $\phi$	6~7 (sec)
Engine	Type PS * REV.	Diesel 1.400 PS * 700 rpm
Propeller	Type Dia * REV.	C <sub>pp</sub> (4) 2.200 mm * 300 rpm
Rudder	AR	4.25 m <sup>2</sup>
	$\Delta$	1.47
	T $\delta$	3~5 (deg/sec) : variable
Thruster	Bow	2.4 ton
	Stern	1.8 ton

表 3.2 保針操舵時の実験状況

Test No.	Control Mode	Head (deg)	Speed (k'ts)	Wave Direction	Standard Deviation		
					Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)
S400	Man	55	13.6	SSE	0.92	0.65	1.15
S308	AP	13	13.9	SSE	0.54	1.22	1.87

表 3.3 自己回帰モデルの係数および残差  
(マニュアル操舵：方位角、横揺角速度、舵角)

Item No. of Coef.	Yaw	Roll Rate	Rudder
A (1)	0.8426	1.0859	1.2481
A (2)	0.6254	- 0.4661	- 0.3621
A (3)	- 0.3591	0.1815	0.0494
A (4)	- 0.0313	- 0.3725	- 0.0286
A (5)	- 0.0539	- 0.0318	0.0455
A (6)	- 0.0195	0.0572	- 0.0862
A (7)	- 0.0920	- 0.0640	----
A (8)	- 0.0815	- 0.0671	----
A (9)	0.1318	----	----
A (10)	----	----	----
Variance of Noise	0.0212	0.0476	0.1724

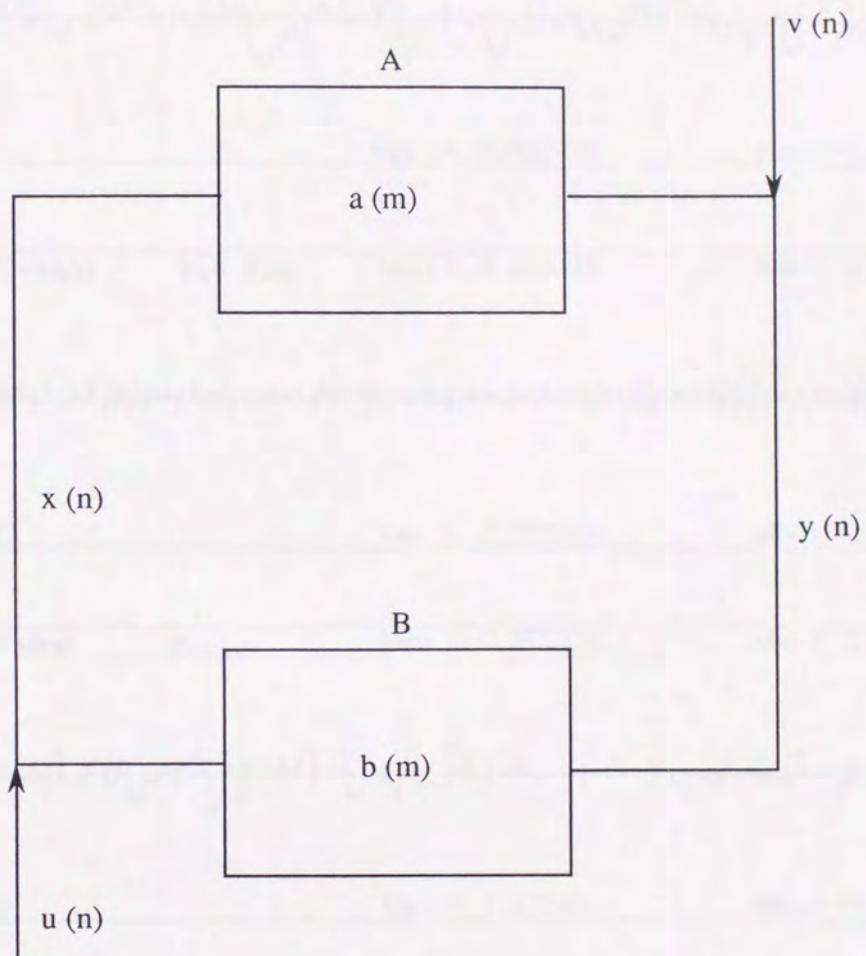
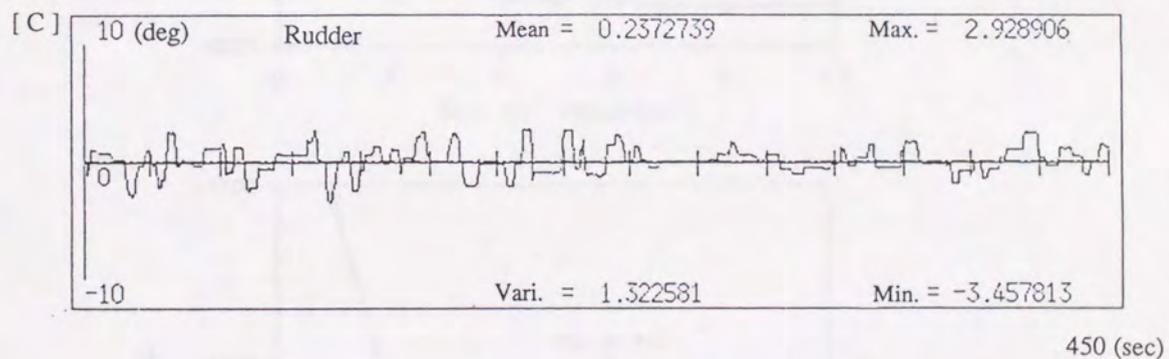
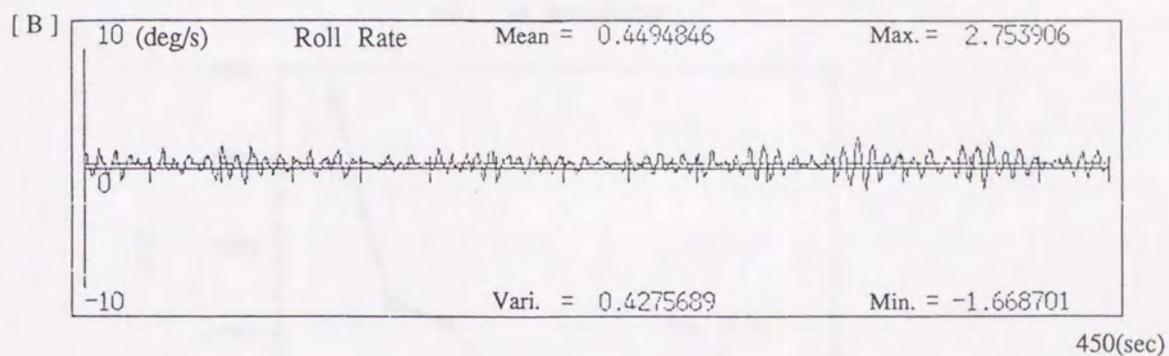
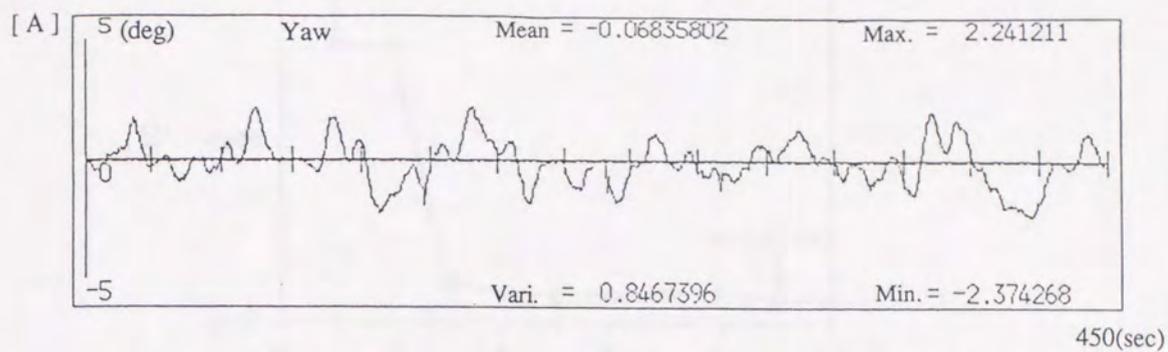


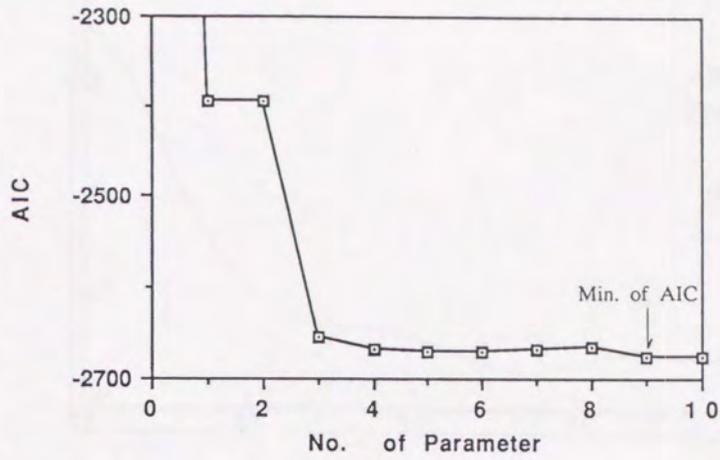
図 3.1 船体運動と制御系によるフィードバックシステム



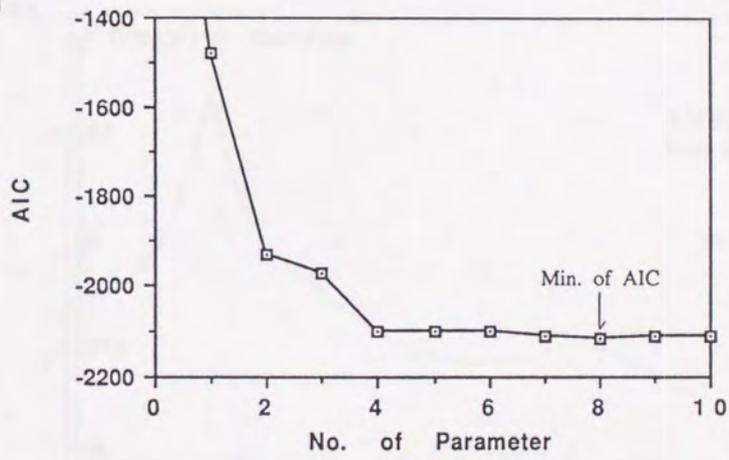
- [A] 方位角
- [B] 横揺角速度
- [C] 舵角

図 3.2 マニュアル保針操舵時の時系列 (S400)

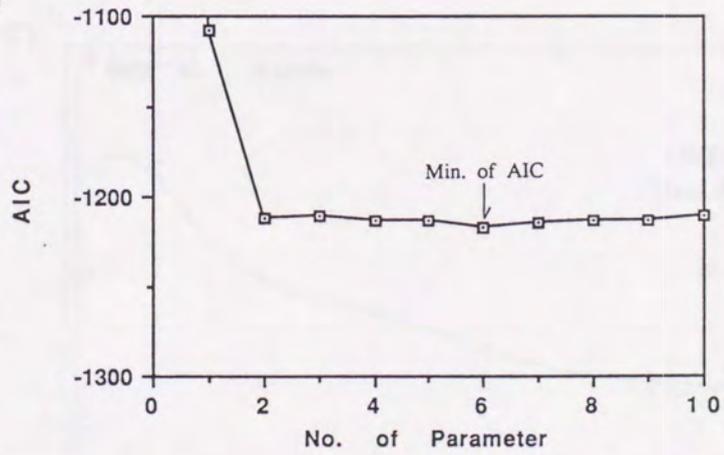
[A]



[B]

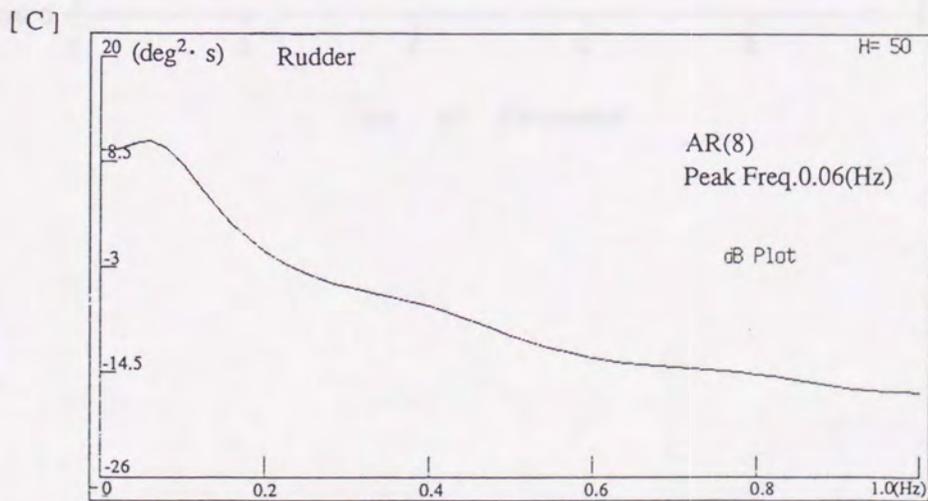
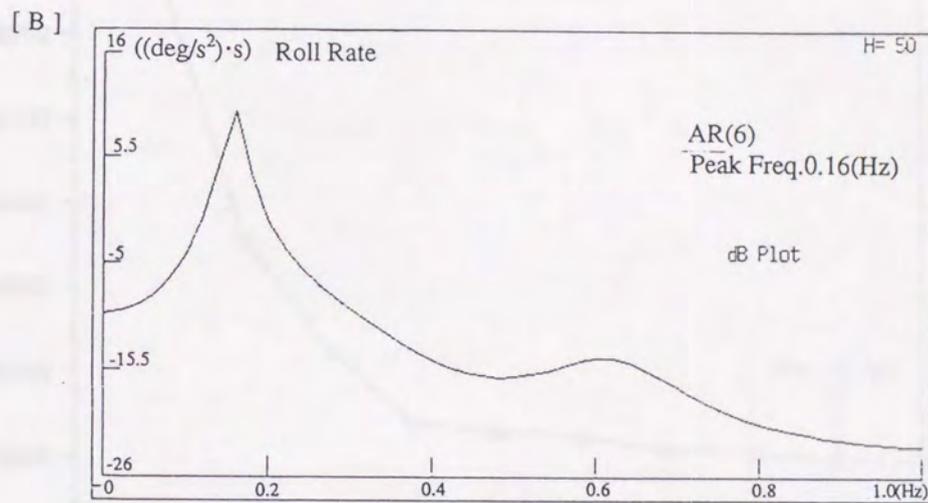
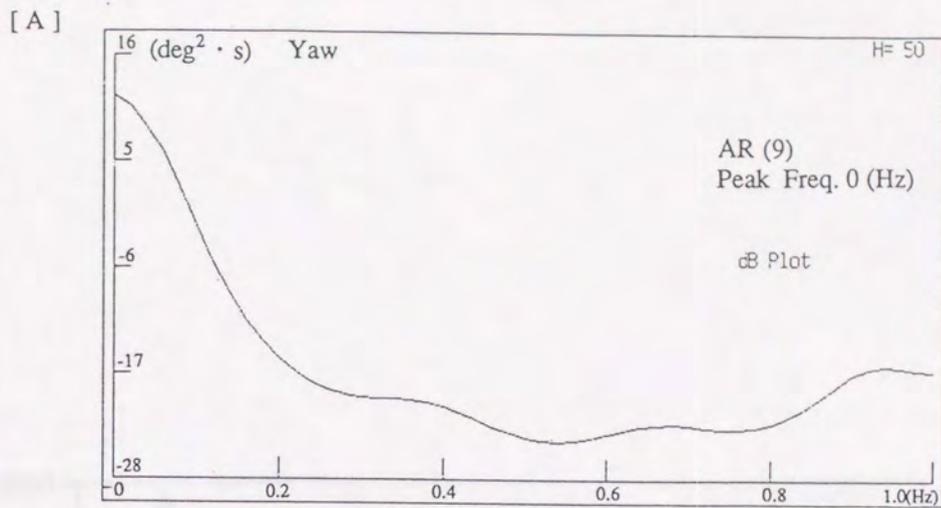


[C]



- [A] 方位角
- [B] 横揺角速度
- [C] 舵角

図 3.3 自己回帰モデルの次数とAICの挙動 (マニュアル操舵: S400)



- [ A ] 方位角  
[ B ] 横揺角速度  
[ C ] 舵角

図 3.4 マニュアル操舵時のスペクトル (S 4 0 0)

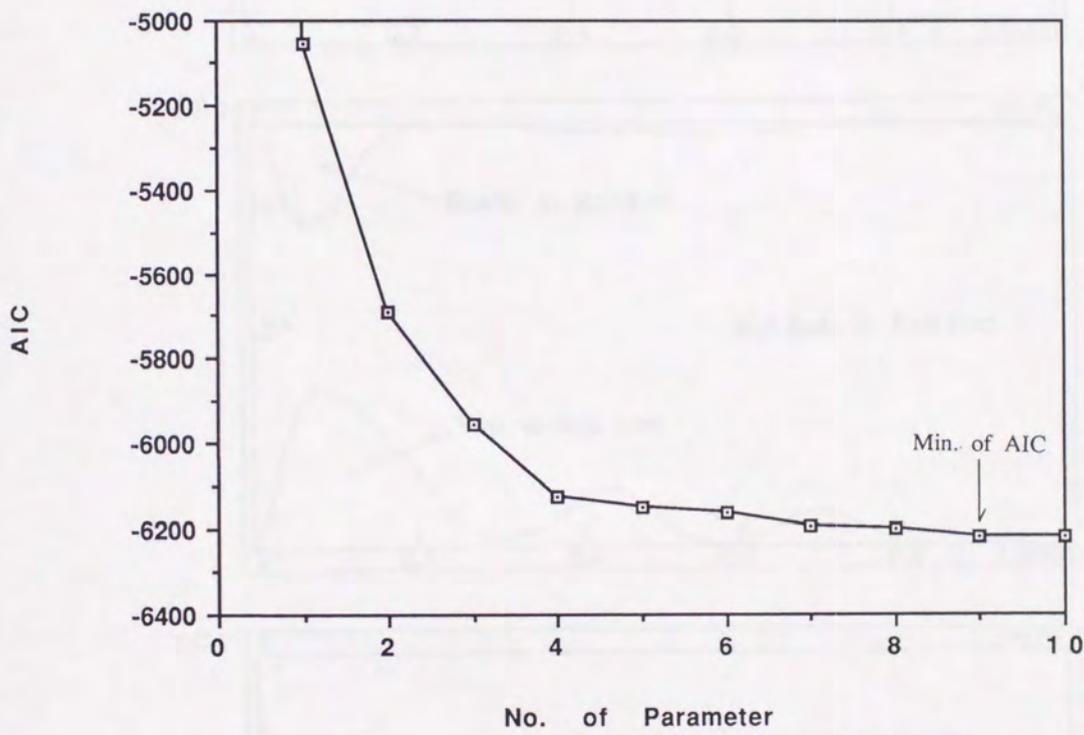
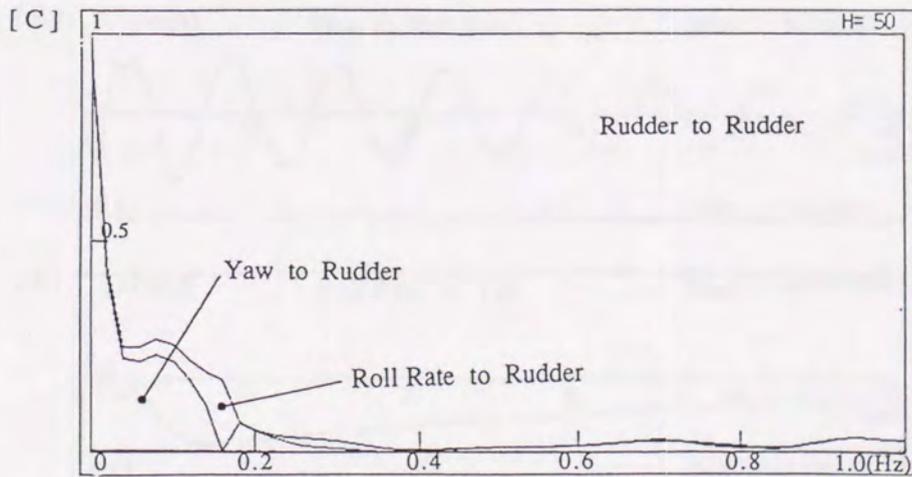
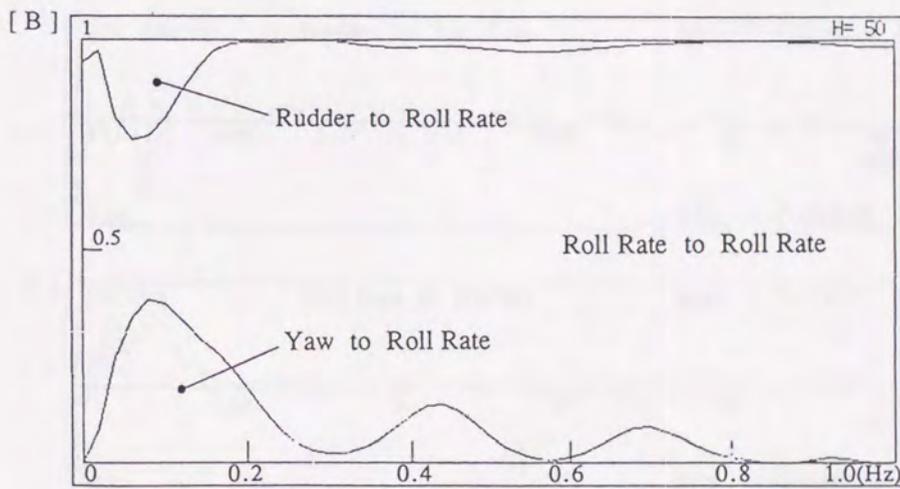
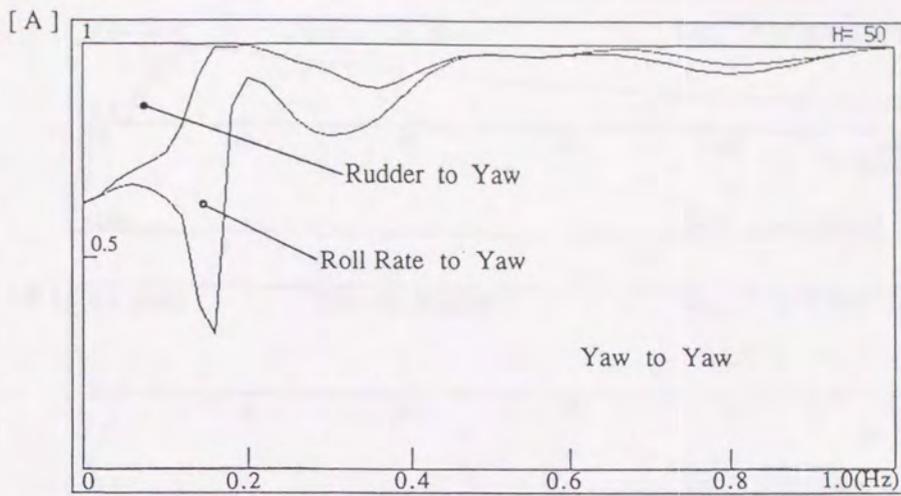
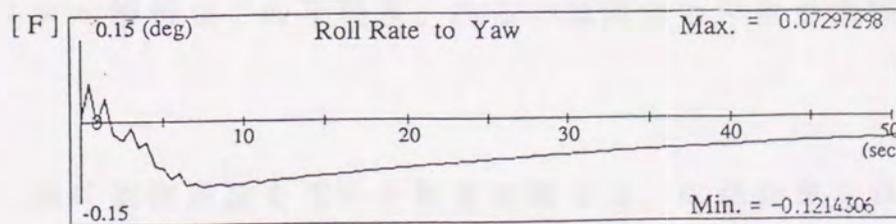
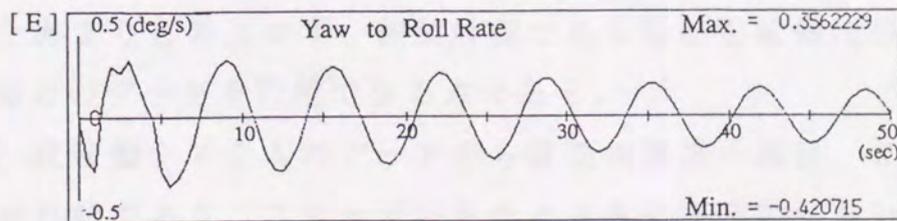
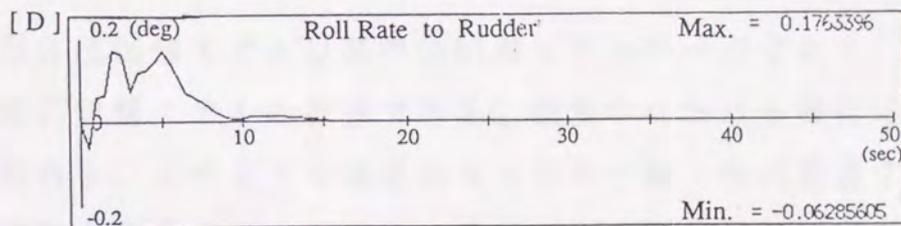
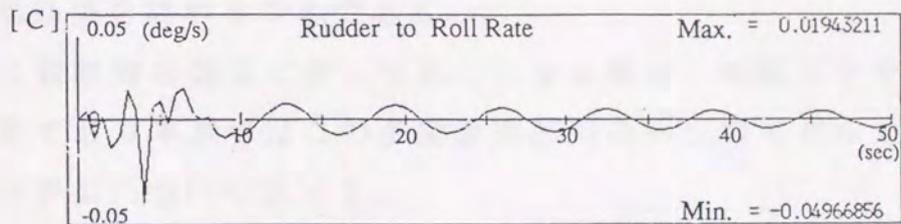
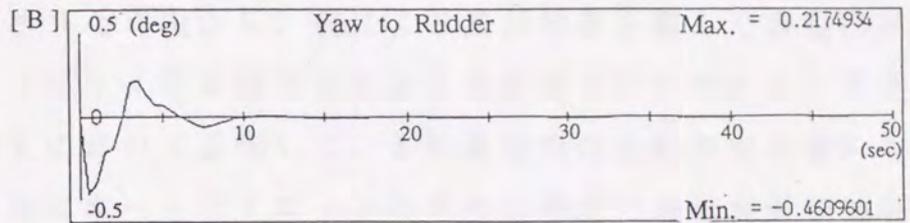
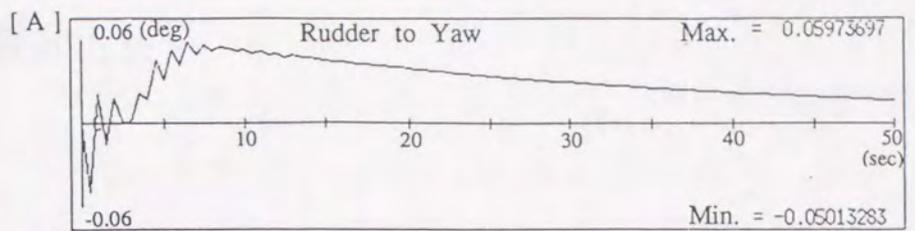


図 3.5 多次元自己回帰モデルの次数とAICの挙動 (マニュアル操舵：S400)



- [A] 方位角に対する累積雑音寄与率  
 [B] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率  
 [C] 舵角に対する累積雑音寄与率

図 3.6 マニュアル操舵時の累積雑音寄与率 (S400)



- [A]、[B] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C]、[D] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E]、[F] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

図 3.7 マニュアル操舵時のインパルス応答特性 (S400)

## 第4章 制御型自己回帰モデルを用いた統計的最適制御系の設計方法

### 4.1 緒言

第1章で述べた理由から、舵による減揺効果を備えた自動操舵装置の開発がフィンスタビライザとほぼ同じような原理で可能であると考えられる。しかし、本論文において目指している舵減揺型の自動操舵装置の場合において解決すべき点はオートパイロットの本来の機能である保針制御機能を保持しつつ横揺減揺効果を高めることである。

このように被制御変数などが二つ以上になる場合、制御工学では多変数制御系と呼ばれており本章ではこの多変数制御系の一つのモデルである、制御型自己回帰モデルについて述べる。

この制御型自己回帰モデルは確率的制御モデルの一つであり、第3章で述べた多次元自己回帰モデルの拡張である。波浪中における横揺応答などの船体運動及び舵角を、このような確率的なモデルで統一的に表現することによって横揺の制御を行うことの利点は、操舵による船体運動制御系の詳細な物理的な知識をあまり必要とせず、制御対象である船舶を稼働状態に置いて、その入力と出力のデータを利用できる点である。

すなわち、実稼働システムのデータから直接制御系の設計、さらには制御の実施までが可能であり、ステップ応答など古典制御理論において必要とされているシステム解析などの手続き、あるいは流体力学的な実験が不要なことである。

ところで、現代制御理論を用いた最適制御では、制御対象を状態空間表現と呼ばれる数学的なモデルで統一的に表現されるものと仮定する。その後適当に定められた評価関数を最小にするように制御入力を決定する。二次評価関数を使用する場合は、制御対象は線形な状態空間表現によって表現されるものとする、できるだけ少ない制御量で目標値からの偏差をできるだけ小

さくするための制御ゲインを設計することができる[4.1]、[4.2]。従って、上で述べた制御型自己回帰モデルを現代制御理論で用いられる状態空間表現に変換できれば、現代制御理論による最適制御理論の枠組で制御系の設計ができることになる。

本章では、横揺を考慮した多変数型のオートパイロットを設計するため、まず制御型自己回帰モデルによって制御対象を表現し、このモデルから状態空間表現を導き、さらに二次評価関数のもとに最適制御ゲインを決定する方法について述べる。

## 4.2 制御型自己回帰モデルの同定

大津[4.3]、[4.4]はオートパイロットの設計に際し制御型自己回帰モデルを提案して、統計的最適予測型オートパイロットの基本モデルとした。しかし、本論文では被制御変数は方位角と横揺（横揺角あるいは横揺角速度）の二つである。従って、多変数型にモデルを拡張する必要がある。そこで、以下では多変数による制御型自己回帰モデルを導入して最適制御則を導く。

制御変数として舵角、被制御変数として方位角及び横揺角あるいは横揺角速度で構成される多変数時系列に対する多次元自己回帰モデルは、第3章で示したように

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m) X(n-m) + U(n) \quad (4.1)$$

で表現できる。しかし、制御系を設計する場合は制御変数の部分を予測することは無意味である。そこで、全体の  $k$  個の変数を制御変数と被制御変数に分けて考えることとし、 $X(n)$  を  $r$  個 ( $r = k - s$ ) の被制御変数  $X(n)$  と  $s$  個の制御変数  $Y(n)$  から構成されるとして、次のモデルで表現する。

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m) X(n-m) + \sum_{m=1}^M B(m) Y(n-m) + U(n) \quad (4.2)$$

このような多変数からなるモデル表現を制御型自己回帰モデルと呼ぶ[4.3]、[4.5]。ここで、 $A(m)$  は  $r * r$  の係数行列、 $B(m)$  は  $s * r$  の係数行列である。

しかるに

$$X(n) = \begin{bmatrix} X(n) \\ Y(n) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$U(n) = \begin{bmatrix} U(n) \\ * \end{bmatrix}$$

と定義し、

さらに

$$A(m) = \begin{bmatrix} A(m) & B(m) \\ * & * \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

と置くと、式(4.2)は式(4.1)と同じような表現となる。従って、式(4.2)の同定を行なうためには、第3章で示した多次元自己回帰モデルの同定法のうち、式(4.3)の左辺  $X(n)$  の中で不要となる部分の計算を省略して同定を行えば良いこととなる。つまり、式(4.3)及び式(4.4)の\*印の部分がそれに該当する行列の要素である。また、式(4.1)の多次元自己回帰モデルは、第2章で述べたMAICE法によりモデルの次数及び係数を推定することができる。なお、制御型自己回帰モデルの場合の情報量規準AICは次数がMのとき

$$AIC(M) = N \log |\Sigma_{r,M}| + 2Mr(r+s) + r(r+1) \quad (4.5)$$

と表わされる[4.5]。そして、それぞれの次数についてAICを計算し、そのうちでこの値が最小となる次数を最適な制御型自己回帰モデルとして採用する[4.3]。ここで、 $\Sigma_{r,M}$  は被制御変数に対応する制御型自己回帰モデルのあてはめ後の予測誤差の分散、共分散行列のうちの左上隅 ( $r * r$ ) 要素からなる行列である。

### 4.3 制御型自己回帰モデルの状態空間表現

多変数制御系における予測制御を実現するために、対象とする制御系を制御型自己回帰モデル

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m)X(n-m) + \sum_{m=1}^M B(m)Y(n-m) + U(n) \quad (4.6)$$

で表現し、これを状態空間表現に変換することによって、二次評価関数のもとに統計的最適制御を実現することができる[4.5]。

現在を  $(n-1)$  時点とした場合の  $n$  時点における値  $X(n)$  を、現在及び過去の値  $\{X(n-m), Y(n-m), m=1, 2, \dots, M\}$  を使って予測するモデルは

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m)X(n-m) + \sum_{m=1}^M B(m)Y(n-m) \quad (4.7)$$

で表現できる。

さて、現代制御理論では状態空間表現と呼ばれるモデルで、システムを統一的に表現する。しかしながら、この状態空間表現への変換は一意的ではなく、いろいろな変換方法が提案されている。本論文では、制御信号を極めて効率良く得られる変換方法を用いることとする。この変換方法を選択するためには、制御信号を出力した後で状態ベクトルを、次の制御信号の計算に使用しやすいように構成し、逐次制御信号を極めて少ない計算量で行えることを考慮する必要がある。

そこで、現在までに得られているデータを将来使用しやすい形式で保存し、最新のデータが得られた時に簡単な計算で逐次先々の値が予測できるような制御型自己回帰型モデルの表現法として、次のような状態変数  $Z_i(n)$  の表現がある。

すなわち、最新情報  $X(n)$  が得られたとき、それを予測値  $Z_0(n)$  の実現値と見なして

$$Z_0(n) = X(n)$$

$$= Z_1(n-1) + A(1)X(n-1) + B(1)Y(n-1) + U(n)$$

$$Z_p(n) = Z_{p+1}(n-1) + A(p+1)Z_0(n-1) \quad (4.8)$$

$$+ B(p+1)Y(n-1) \quad (p=1, \dots, M-2)$$

$$Z_{M-1}(n) = A(M)Z_0(n-1) + B(M)Y(n-1) \quad (p=M-1)$$

とする。さらに、

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

$$\Phi = \begin{bmatrix} A(1) & I & 0 & \cdots & 0 \\ A(2) & 0 & I & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A(M-1) & 0 & 0 & \cdots & I \\ A(M) & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} B(1) \\ B(2) \\ \vdots \\ B(M-1) \\ B(M) \end{bmatrix}$$

$$W^T(n) = [U(n), 0, \dots, 0], \quad H = [I, 0, \dots, 0] \quad (4.9)$$

と置く。ここで、 $\Phi$ は遷移行列、 $\Gamma$ は駆動行列、 $H$ は観測行列そして $W$ は白色雑音ベクトルである。また、 $I$ は $(r \times r)$ の単位行列である。これらの仮定によって、次の状態空間表現

$$Z(n) = \Phi Z(n-1) + \Gamma Y(n-1) + W(n) \quad (4.10)$$

$$X(n) = HZ(n)$$

を得る。この表現では $(n-1)$ 時刻において、観測値 $X(n-1)$ が得られたとき、次の時刻の $X(n) = Z_0(n)$ の予測値 $\hat{X}(n)$ は

$$\hat{X}(n) = Z_1(n-1) + A(1)X(n-1) + B(1)Y(n-1) \quad (4.11)$$

によって、極めて簡単な演算で求めることができる[4.6]。

このような過去及び現在の情報から、 $(0, 1, \dots, M-1)$ ステップ将来への情報を伝達する状態変数を $\{Z_0(n), Z_2(n), \dots, Z_{M-1}(n)\}$ で表すと図4.1のように図式的に表現することができる。

#### 4.4 統計的最適制御ゲインとその推定方法

フィードバックシステムにおける制御の目的は、安定な作動状況のもとに、制御対象の状態  $Z(n)$  を定められた一定の状態に維持することである。そこで、できるだけ少ない操作量で設定値からの偏差を小さくするために、次の二次評価関数を最小化するような制御ゲインを構成する[4.7]、[4.8]。

$$J_I = E \left[ \sum_{n=1}^I \left\{ Z^T(n) Q Z(n) + Y^T(n-1) R Y(n-1) \right\} \right] \quad (4.12)$$

ここで、 $Q$  は被制御変数に対する重み、 $R$  は制御変数に対する重み、 $I$  は最適化を試みる区間、そして  $E$  は統計的期待値である。

次に、式(4.10)のもとで  $Y(n-1)$  を最適に操作することによって、二次評価関数  $J_I$  を最小にするような最適制御則を導く。このような最適制御問題における最適ゲインは、リカッチの方程式の解として次の手続きで求めることができる[4.9]、[4.10]。

$$P_0 = Q \quad (4.13)$$

から出発して

$$M_i = P_{i-1} - P_{i-1} \Gamma (R + \Gamma^t P_{i-1} \Gamma)^{-1} \Gamma^t P_{i-1}$$

$$P_i = \Phi^t M_i \Phi + Q \quad (4.14)$$

$$G_i = (R + \Gamma^t P_{i-1} \Gamma)^{-1} \Gamma^t P_{i-1} \Phi$$

と逐次計算を進めると、最適制御としては

$$Y(I-i) = G_i Z(I-i) \quad (4.15)$$

と決定される。ここで、 $i = I$  に対応して

$$G_I = (R + \Gamma^t P_{I-1} \Gamma)^{-1} \Gamma^t P_{I-1} \Phi \quad (4.16)$$

を考えると、これは  $n = 1$  において、これから先  $I$  ステップ間のシステムの動きを考えた場合の最適制御入力となる。そこで、定常な線形システムの場合、 $I$  を固定つまり  $G_I$  も固定して常に、

$$Y(n) = G_I Z(n) \quad (4.17)$$

なるフィードバック制御を行えば、この制御は現在から I ステップ先までを考慮して、その間を最適にする制御の第 1 段目の制御入力を与えることになる。そして、安定で定常なシステムの場合は I を非常に長くとることによって、事実上  $G_1$  は一定値  $G$  となり

$$Y(n) = GZ(n) \quad (4.18)$$

が最適制御入力となる。

予測ステップ数 I に対する制御ゲイン  $G(n)$  の収束状況の一例を図 4.2 に示す。図の横軸は予測ステップ数、縦軸は制御ゲインの値である。例えば、この図の場合には制御ゲイン  $G(n)$  は 30 ないし 40 ステップあたりからは、ほとんど一定値に収束している様子が判る。

最適制御系を設計するためには、式(4.12)における  $Q$ 、 $R$  をどのように設定するかが重要である。測定データが通常の動作状態を表しているとする、この時の制御量の分散値は、ほぼ現実的な制御変数の変動に関する指針を与えていると考えられる。そこで、 $Q$ 、 $R$  を対角行列とする。そして、制御変数の動きとして許容できる分散を設定すると、制御変数は最大でもこの分散値を越えることはない。また、制御型自己回帰モデルをあてはめた後の被制御変数の残差の分散は、到達するべきの一つの目標値と考えられる。

これらのことを考慮して、二次評価関数の重み行列  $Q$  及び  $R$  の目安として、次のような考え方を採用する [4.5]、[4.11]。

- (1)  $Q$  の初期値の目安としては、モデルをあてはめたときの残差分散行列  $\Sigma_{r,m}$  の左上隅の対角要素の逆数を用いる。
- (2)  $R$  の初期値の目安としては、制御変数  $Y(n)$  の各要素の分散の許容限度の逆数を、対応する対角線上の要素とする対角行列を用いる。
- (3) 上記の  $Q$ 、 $R$  に対して得られる制御ゲイン  $G$  を用いた、適当な長さの時間に対応する白色雑音によるシミュレーションを行い、被制御変数及び制御変数の分散を求める。

- (4) (3) のシミュレーションの結果、制御変数  $Y(n)$  の分散の推定値が、制御変数の変動の許容限度より大であれば、対応する  $R$  の対角要素を大きくする。また、許容限度より小であれば、対応する  $R$  の対角要素を小さくする。この修正は演算の初期には、もとの対角要素の値にシミュレーションによって得られた分散の推定量と、その許容限度との比を掛け算することによって容易に行うことができる。
- (5) (3) 及び (4) を適当な回数繰り返し実施する。この場合シミュレーション用の白色雑音を与える乱数列は、毎回共通な時系列を用いる。これによって、ほぼ実用的な制御ゲイン  $G$  に近い結果が得られると予想される。
- (6) 実システムの稼働状況などを確認しながら、さらに  $Q$ 、 $R$  に適当な修正を加えて調整する。

以上のことから、被制御変数である  $X(n)$  の変動幅を抑えたければ  $Q$  を大きく設定し、制御変数である  $Y(n)$  の操作量を抑えたければ  $R$  を大きく設定して、適切な制御ゲインを求めることとなる。しかし、多入力多出力系において、バランス良く  $Q$ 、 $R$  を調整するには、一般にさらに試行錯誤を繰り返す必要がある。これを効率良く決定するための一つの手段として、次章に述べる白色雑音を用いたデジタルシミュレーションも有効である。

## 4.5 結言

船首揺と横揺を同時に制御する場合のような、多変数制御系のパラメトリックモデルとして、制御型自己回帰モデルを提案しこのモデルから状態空間表現を導き、さらに二次評価関数のもとにどのようにして最適制御ゲインを求めるかについて、その方法及びそれらの意味について示した。

以下に統計的最適制御系設計に関する要点をまとめて述べる。

- (1) 制御型自己回帰モデルは、多変数時系列に対する多次元自己回帰モデルの変形であり、モデルの同定方法は基本的には同じである。
- (2) 制御型自己回帰モデルから状態空間表現を導くことにより、二次評価関数の最小化のもとに、最適制御ゲインを決定することができる。
- (3) 線形システムにおける二次評価関数を最小にする制御ゲインは、計算（予測）ステップを大きくとることによって、一定値に収束する傾向にあり、このことから固定ゲインによる制御が実行可能となる。
- (4) 二次評価関数における重み係数の初期設定は、制御型自己回帰モデルを当てはめた後、なお残る対応する被制御変数の残差分散を利用した合理的な方法によって行うことができる。

参考文献

- [4.1] K. J. Astrom  
Introduction to Stochastic Control Theory, Academic Press, 1970.
- [4.2] 相良節夫、秋月影雄、中溝高好、片山徹  
システム同定、計測自動制御学会、1980.
- [4.3] 大津皓平、堀籠教夫、北川源四郎  
保針運動の統計的同定と最適操舵、日本造船学会論文集、第139号、  
1976.
- [4.4] 大津皓平、堀籠教夫、北川源四郎、原誠  
保針運動の統計的同定と最適制御（続）、日本造船学会論文集、  
第143号、1978.
- [4.5] 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、1972.
- [4.6] 大津皓平  
船体運動の統計的解析と最適操舵に関する研究、博士論文、1982.
- [4.7] H. Akaike  
Stochastic Theory of Minimal Realization, IEEE. Trans. Autom.  
Contr., AC-19, No.6, 1974.
- [4.8] 成田成之助  
デジタルシステム制御：理論と応用、昭晃堂、昭和58年.
- [4.9] H. Kwakernaak, R. Sivan  
Linear Optimal Control System, Wiley-Interscience, 1972.
- [4.10] 得丸英勝、柴田碧他共編  
統計工学ハンドブック、培風館、昭和62年.
- [4.11] 北川源四郎、大津皓平  
船の保針運動の統計的制御、統計数理研究所報告、Vol.23、2、1976.

図表一覧表

図 4.1 状態空間表現の概念図

図 4.2 二次評価関数における予測ステップによる制御ゲインの収束状況



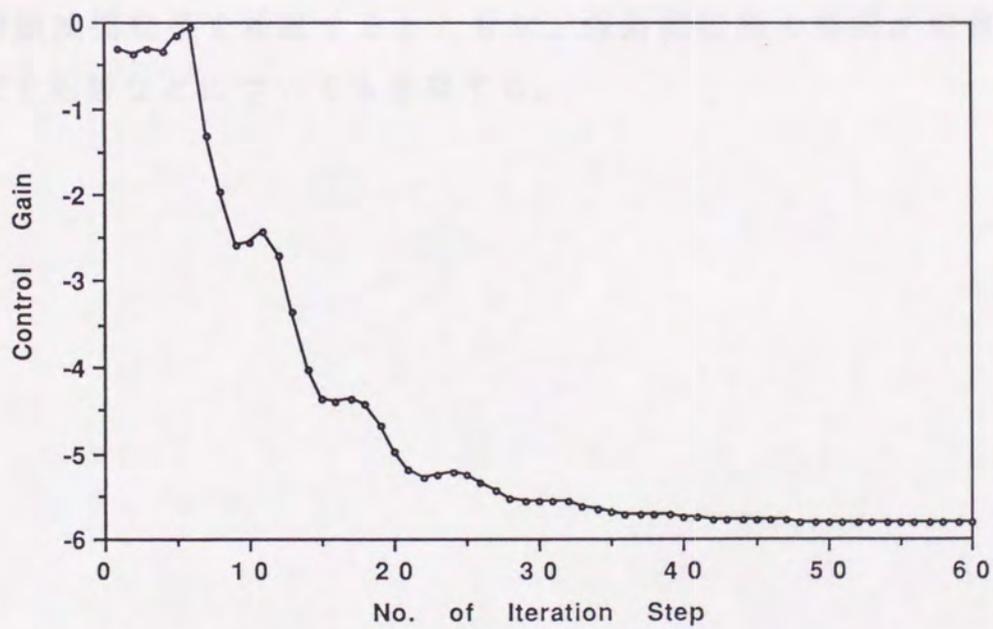
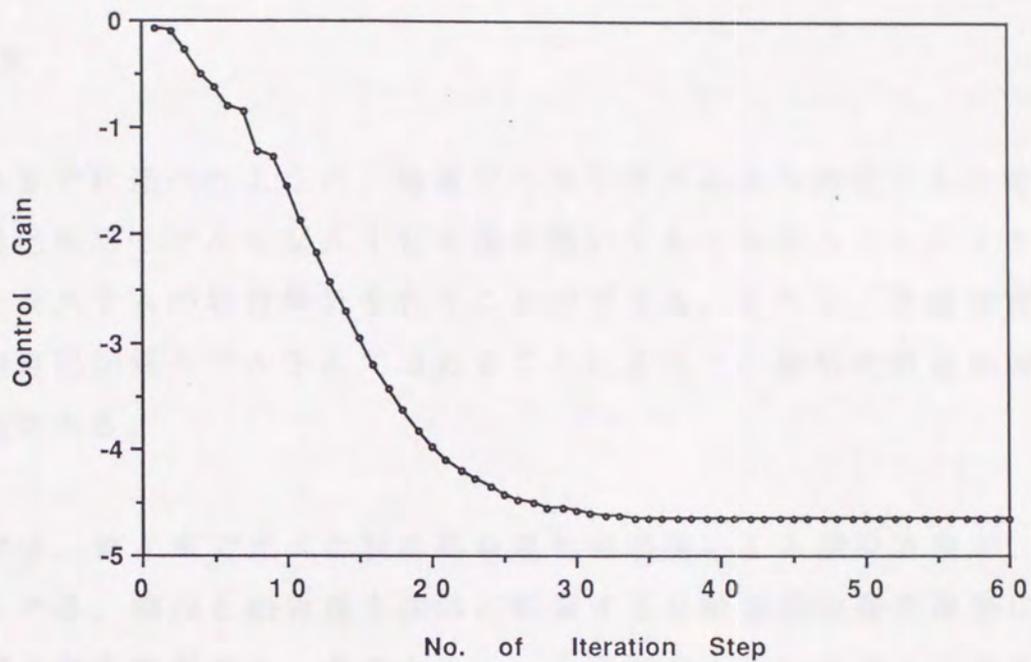


図 4.2 二次評価関数における予測ステップによる制御ゲインの収束状況

## 第5章 操舵による横揺減揺制御系のシミュレーション

### 5.1 緒言

第4章までに述べたように、稼働中の実システムから測定された時系列に対して自己回帰モデルをMAICE法を用いてあてはめることにより、ダイナミックシステムの特性格解析を行うことができる。さらに、予測機能を持った制御型自己回帰モデルをあてはめることによって、統計的最適制御系の設計が可能である。

本章では、第4章で述べた統計的最適制御理論による設計方法が、本論文で目的とする、横揺と船首揺を同時に制御する自動操舵装置の開発に有効であるかどうかを検討する。そのために、白色雑音を用いたデジタル制御シミュレーション、及び横揺を考慮した操縦運動数学モデルによるアナログコンピュータを用いたリアルタイムシミュレーションを実施する。そして、操舵による横揺減揺効果を検証するとともに、保針操舵時の操舵が船首揺及び横揺に及ぼす影響などについても考察する。

## 5.2 実船データを用いた舵減揺制御

自己回帰モデルを用いた統計的最適制御にもとづく操舵によって、どの程度方位角制御及び横揺減揺制御の効果が得られるかを、実船実験を行うのに先だって前評価する。そのために、まず船首揺、横揺及び操舵に関する実船データをもとに制御モデルをあてはめ、制御ゲインを作成する。このようにして得られた制御モデル及び制御ゲインを用いて、白色雑音による制御シミュレーションを次の方法で行う[5.1]。いま、船体運動の制御系が

$$Z(n) = \Phi Z(n-1) + \Gamma Y(n-1) + W(n) \quad (5.1)$$

$$X(n) = HZ(n)$$

によって駆動しているとする。ここで、 $W(n)$ は後で述べる性質を持った白色雑音である。このとき制御則

$$Y(n) = GZ(n) \quad (5.2)$$

によって舵が制御されるとすると、式(5.2)を式(5.1)に代入することによって

$$\begin{aligned} Z(n) &= (\Phi + \Gamma G)Z(n-1) + W(n) \\ &= PZ(n-1) + W(n) \end{aligned} \quad (5.3)$$

を得る。ここで、

$$P = \Phi + \Gamma G$$

である。

ところで、制御シミュレーションを行うにあたって、式(5.3)の $W(n)$ に白色雑音を外力として入力している。この場合、もとのランダム操舵によって得られたデータに制御型自己回帰モデルをあてはめた後に、なお残る予測誤差の分散を $W(n)$ の分散とした白色雑音を時々刻々入力することによって、ほぼ現実の現象と合致すると考えられる。ここでは、このような考え方に基づいた制御シミュレーションを行い、状態 $Z(n)$ を調べることにする。

そして、この白色雑音による制御シミュレーションを式(4.10)の二次評価関数における重み係数 $Q$ 、及び $R$ を種々組み合わせを変えながら行うこと

によって、現実的な係数  $Q$ 、 $R$  の値を選択することにする。そのとき、重み係数  $Q$ 、 $R$  の初期値としては、第 4 章の最後に述べた方法を用いる。

東京商船大学練習船『汐路丸』による実船実験データを用いて、具体的にどのようにして白色雑音による制御シミュレーションを行ったかを示すとともに、重み係数  $Q$ 、 $R$  の初期設定値による、制御効果の違いなどについて計算例を示す[5.2]。

舵による横揺減揺制御の効果及び二次評価関数の重み係数  $Q$ 、 $R$  の目安を得るために、マニュアルによる周期、振幅ともにランダムな操舵を行い、方位角、横揺角速度さらに舵角の各データを収録した。この方位角、横揺角速度及び舵角の時系列を図 5.1 に示す。なお、船速は約 13 (k'ts) で行った。

このランダム操舵の目的は、なるべくフィードバックの少ないデータを得ることと、広範囲な周波数帯でのシステムにおける入出力関係を把握することであり、針路を保持しながら横揺を適当に励起するように操舵する。

次に、方位角、横揺角速度及び舵角のスペクトルを図 5.2 に示す。これらの図から、方位角及び舵角のスペクトルピークはいずれも 0.02 (Hz) 及び 0.04 (Hz) 付近と比較的近接しており、舵角の操舵周期で方位角についても変動していることが判る。また、横揺角速度の変動は、ランダム操舵によって励起された本船の固有周期である 0.16 (Hz) 付近にスペクトルピークが現れていることから約 6 秒周期で起こっていることが判る。

ここで、方位角、横揺角速度及び舵角の変数からなるデータに対して、MAICE 法で多次元自己回帰モデルをあてはめた結果、4 次のモデルが得られた。ここで、得られた係数行列を表 5.1 に示す。

このような解析結果をもとに、被制御変数である方位角、横揺角速度に対する重み係数  $Q$ 、及び制御変数である舵角に対する重み係数  $R$  の違いによって、どのように操舵量と横揺減揺効果の関係が得られるかについて検証した。まず、方位角に対する重み係数  $Q(1,1)$ 、横揺角速度に対する重み係数  $Q(2,2)$  及び舵角に対する重み係数  $R(1,1)$  を何種類か変更しながら

制御ゲインを作成した。

次に、これらの制御ゲインを用いた場合の各制御変数に対する制御効果を確認するために、白色雑音による制御シミュレーションを行った。シミュレーション結果として、方位角、横揺角速度、舵角に対する重み係数を種々変えた場合の各変数の標準偏差を表5.2に示す。

以降、本論文では船首揺に対する重み係数  $Q(1,1)$  を  $Q1$ 、横揺に対する重み係数  $Q(2,2)$  を  $Q2$ 、そして舵角に対する重み係数  $R(1,1)$  を  $R$  と示す。

表5.2から次のようなことが判る。

- (1) 方位角に対する重み  $Q1$  を 10、20、80 と変化させた場合、方位角の標準偏差は減少する傾向にある。
- (2) 横揺角速度に対する重み  $Q2$  を 1、10、50 と変化させた場合、横揺角速度の標準偏差は、方位角のそれに比べて重みの違いによる差は少ないが、減少することは判る。
- (3) 方位角、横揺角速度両方の重みを大きくすると、舵角の操舵量は増加する傾向となる。
- (4) 各変数ともシミュレーション結果は、ランダム操舵時の半分程度の標準偏差の値となる。

ここで、表5.2のシミュレーション結果を  $Q1$  と  $R$  及び  $Q2$  と  $R$  の比率ベースに整理したものを図5.3に示す。図5.3 [A-1]、[B-1]、[C-1] は、横揺角速度に対する重み  $Q2$  を固定した場合の、 $Q1/R$  の影響について示した。また、図5.3 [A-2]、[B-2]、[C-2] は方位角に対する重み  $Q1$  を固定した場合の、 $Q2/R$  の影響を示した。これらの図において横軸は重み係数の比率、縦軸はシミュレーションで計算された各変数の標準偏差である。

図 5.3 から次のことが判る。

(1) 図 5.3 [A-1]、[B-1]、[C-1] の  $Q^1 / R$  ベースの結果から、方位角の標準偏差は  $Q^1 / R$  が大きくなるに従って減少し、それにもなって操舵量が増加する。

また、この場合は横揺角速度の標準偏差はほとんど変化しない。

(2) 図 5.3 [A-2]、[B-2]、[C-2] の  $Q^2 / R$  ベースの結果から、横揺角速度の標準偏差は  $Q^2 / R$  が大きくなるに従って減少する傾向にあり、それにもなって操舵量も増加する傾向にある。また、この場合は方位角の標準偏差はほとんど変化しない。

さらに、図 5.4 に重み係数  $[Q^1 : Q^2 : R]$  が

$$\cdot [\text{方位角 } Q^1 : \text{横揺角速度 } Q^2 : \text{舵角 } R] = [10 : 50 : 1]$$

$$\cdot [\text{方位角 } Q^1 : \text{横揺角速度 } Q^2 : \text{舵角 } R] = [50 : 10 : 1]$$

の場合の、制御ゲインによるシミュレーション結果を比較した時系列を示す。図の右半分の横揺角速度に重みを置いた場合は、横揺角速度の変動が小さくなり、左半分の方位角に重みを置いた場合は、方位角の変動が小さくなっていることが判る。また、舵角は横揺角速度制御よりも方位角制御に重みを置いた場合の方が、操作量は増加することも判る。

以上の白色雑音による制御シミュレーション結果から、各変数に対する重み係数を変化させることによって、方位角優先制御あるいは横揺減揺制御優先さらに舵角優先制御など、いくつかの制御モードを実現することも可能であることが確認された。

### 5.3 操縦運動シミュレーションデータを用いた舵減揺制御

ここでは、詳細な数学モデルによって横揺を含む波浪中での操縦運動をシミュレートし、実船実験で舵による横揺減揺効果がどの程度期待できるかを評価する。

#### 5.3.1 横揺を含む操縦運動の数学モデル

船舶の操縦運動計算は通常、前進・横流れ及び旋回の運動方程式のもとに船体運動が計算されるが、舵減揺制御では操舵による横揺に注目する必要があるので、横傾斜の連成を考慮する必要がある。そこで、横傾斜及びプロペラ回転変動の連成を含めた運動方程式を、次のように表現する[5.5]、[5.6]。

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u} - v r) &= X_H + X_P + X_R \\
 m(\dot{v} + u r) &= Y_H + Y_R \\
 I_{zz} \dot{r} &= N_H + N_R \\
 I_{xx} \dot{\phi} &= K_H + K_R \\
 2\pi I_P \dot{n} &= Q_E + Q_P
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

ここで、 $m$ は船の質量、 $I_{xx}, I_{zz}$ はそれぞれ $x$ 軸、 $z$ 軸まわりの慣性モーメント、 $I_{PP}$ はプロペラ回転系の慣性モーメント、 $U, v$ は船速の $x$ 軸、 $y$ 軸方向成分、 $r$ は回頭角速度、 $\phi$ は横傾斜角そして $n$ はプロペラ回転数である。また、式(5.4)の右辺の各項で、添字 $H, R$ はそれぞれ主船体に働く流体力、舵力そして $X_P, Q_P$ はそれぞれプロペラ有効推力、プロペラ有効トルク、 $Q_E$ は主機関トルクを表わしている。式(5.4)の $X$ 力の各項を、

$$\begin{aligned}
 X_H &= -m_x \dot{u} + (m_y + X_{vr}) v r + X(u) \\
 X_P &= (1 - t_p) \rho n^2 D^4 K_T(J_p)
 \end{aligned} \tag{5.5}$$

$$X_R = -F_N \sin \delta$$

で表わす。なお、

$$X(u) = X_{uu} u^2, \quad J_p = u(1 - w_p)/(nD)$$

$$F_N = \frac{1}{2} \rho \frac{6.13 \lambda}{\lambda + 2.25} A_R V_R^2 \sin \alpha_R \quad (5.6)$$

$$V_R = V (1 - W_R) [1 + k s^{1.5}]^{1/2}, \quad s = 1 - u (1 - w p) / (n p)$$

$$\alpha_R = \delta + \delta_0 - \gamma [\beta + (x_R / L) r], \quad \beta = -\sin^{-1}(v') \equiv -v'$$

である。次に、式 (5.4) の Y 力の各項を

$$Y_H = -m_y \dot{v} - m_x u r + Y_{H0}(v, r) + Y_{H1}(v, r, \varphi)$$

$$Y_R = -(1 + a_H) F_N \cos \delta \quad (5.6)$$

で表わす。ここで

$$Y_{H0}(v, r) = \frac{1}{2} \rho L d V^2 [Y'_{vv} v' + Y'_{rr} r' + Y'_{v|v|} v'|v'| + Y'_{v|r|} v'|r'| + Y'_{r|r|} r'|r'|]$$

$$Y_{H1}(v, r, \varphi) = 0 \quad (5.7)$$

である。さらに、式 (5.4) のモーメント N の各項を

$$N_H = -J_{zz} \dot{r} + N_{H0}(v, r) + N_{H1}(v, r, \varphi) + (Y_{H0} + Y_{H1}) X_M$$

$$N_R = -(1 + a_H) X_R F_N \cos \delta \quad (5.8)$$

で表わす。ここで

$$N_{H0}(v, r) = \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2 [N'_{vv} v' + N'_{rr} r' + N'_{v|r|} v'|r'| + N'_{r|r|} r'|r'|]$$

$$N_{H1}(v, r, \varphi) = \frac{1}{2} \rho L^2 d V^2 [N'_{\varphi\varphi} \varphi + N'_{v|\varphi|} v'|\varphi| + N'_{r|\varphi|} r'|\varphi|] \quad (5.9)$$

である。さらに、式 (5.4) の横傾斜の各項を

$$K_H = -J_{xx} \ddot{\varphi} - N(\dot{\varphi}) - W GZ(\varphi) - Y_H Z_H$$

$$K_R = (1 + a_H) Z_R F_N \cos \delta \quad (5.10)$$

で表わす。なお、

$$N(\dot{\varphi}) = \kappa \dot{\varphi}, \quad GZ(\varphi) = GM \varphi \quad (5.11)$$

である。

最後に、式 (5.4) のプロペラ回転の各項を

$$Q_E = \rho n^2 D^5 K_Q (J_P) \quad (Q_E \leq Q_{E_{\max}})$$

$$Q_E = Q_{E_{\max}} \quad (Q_E > Q_{E_{\max}}) \quad (5.12)$$

$$Q_P = -2\pi J_{pp} \dot{n} - \rho n^2 D^5 K_Q (J_P)$$

で表わす。ここで、 $Q_{E_{\max}}$  は主機関の許容最大トルクである。

以上の横揺を含む操縦運動の数学モデルを、次に示すハイブリッドシミュレーションシステムで構築し、波浪外乱中でのマニュアル操作によるランダム操舵のシミュレーションを実施し、制御系設計のためのオリジナルデータを収集する。

### 5.3.2 操縦運動のハイブリッドシミュレーション

操縦運動をリアルタイムでシミュレーションするために、ここで用いたシステムは、微分方程式を解くためのデジタル微分解析機、数値演算を行うためのデジタル計算機及び操作入力、外乱入力などを行うアナログ計算機を結合したハイブリッドシミュレーションシステムである[5.3]。このシステムは、マニュアルによる操舵のみならず自動操舵などのフィードバック制御系のリアルタイムシミュレーションも可能である。さらに、このシステムでは外部装置から波浪外乱などを時系列として入力することができる。このハイブリッドシステムの基本構成を図5.5、各装置の性能を表5.3に示す。

なお、アナログ及びデジタル計算機を結合して、船舶などの操縦運動などをリアルタイムでシミュレーションする場合、物理的時間と計算機内部の論理時間及び物理量のスケール変換などに注意する必要がある。これら、アナログシミュレーションを実施する場合の詳細については専門書に譲る[5.4]。

シミュレーションを実施するにあたっては、船体の各種特性及び流体力係数などが既知であり、試運転解析結果などが整っている代表的なコンテナ船を対象とした[5.7]。コンテナ船の船体主要目を表5.4、シミュレーション

に用いた数学モデルの各係数などをまとめて表5.5に示す。

本船のシミュレーション結果として、スパイラル特性を図5.6、35度操舵による旋回特性を図5.7、そして10度Z操舵特性を図5.8に示す。さらに、これらの図中には試運転解析結果をあわせて記入した。これらの結果から、前節に示した横揺を含む操縦運動の数学モデルを用いたシミュレーション結果は試運転解析結果と良く一致していることが判る。この結果から、ハイブリッドシステムによるシミュレーションは、横揺を含めた操縦運動に関しても満足できる精度であることが確認された。

数学モデルの平水中での操縦運動の精度については先に検証したが、次に波浪外乱中でランダム操舵を行ったときの船首揺、及び横揺のシミュレーションを行う。そして、シミュレーション結果として方位角、横揺角及び舵角の時系列を収録し、これらのデータをもとに制御型自己回帰モデルの同定、制御ゲインの決定及び白色雑音による制御シミュレーションを行い、舵減揺制御を実船実験を行ううえでの減揺効果などを確認する。

ところで、シミュレーションにおける波浪外乱の表現方法及びその入力方法については、いくつかの方法が提案されているが[5.8]、[5.9]、ここでは波浪外乱として、ピアソン-モスコビッチ型の不規則波スペクトルと計算から得られた波浪外力の応答関数から波浪外力の時系列を作成し、この時系列信号をアナログ計算機から入力して、船首揺及び横揺の項に付加しながらシミュレーションを行う方法を採用した。ランダム操舵はアナログ計算機のポテンショダイヤルを人間がなるべくランダムに操作することによって実現した。また、シミュレーションで使用したスペクトルは、図5.9のピアソン-モスコビッチ型の不規則波スペクトルで有義波高1.5 (m)、平均波周期15 (sec)である。

このような、不規則波中でのランダム操舵シミュレーションを行い方位角、横揺角及び舵角の時系列データを1.0秒サンプリングで600点を収録した。このときの時系列を図5.10の左半分にし、自己回帰モデルから得られた各時系列のスペクトルを図5.11に示す。

図5.11 [A] の方位角のスペクトルからは、低周波数帯での運動が主であるが本船の横揺固有周期 (0.06 (Hz)) 付近にもスペクトルピークの存在が認められる。また、図5.11 [B] の横揺角は、本船の横揺固有周期付近である0.06 (Hz) にスペクトルのピークが存在していることが判る。さらに、図5.11 [C] から、このときのランダム操舵は低周波数帯を中心に操舵されたことも判る。

次に、ランダム操舵時の方位角、横揺角及び舵角のデータをもとに多次元自己回帰モデルの同定をMAICE法で行い、その結果8次のモデルを得た。そして、このモデルから計算した雑音寄与率を図5.12に示す。図5.12 [A] の方位角に対する横揺角からの影響、図5.12 [B] の横揺角に対する方位角及び舵角からの寄与から、船首揺と横揺の連成影響がハイブリッドシステムによる、操縦運動のシミュレーションによっても再現されていることが判る。

### 5.3.3 シミュレーションデータを用いた舵減揺制御

波浪中でのランダム操舵による操縦運動シミュレーションから得られた方位角、横揺角及び舵角のデータに対して、MAICE法を用いて制御型自己回帰モデルをあてはめ8次のモデルを得た。この制御モデルをもとに、二次評価関数における方位角、横揺角及び舵角に対する重み係数 [  $Q1 : Q2 : R$  ] を変化させた場合の、白色雑音による制御シミュレーションを行った。

この制御シミュレーションから得られた方位角、横揺角及び舵角の時系列を図5.10の右半分に示す。図5.10のランダム操舵と白色雑音による制御シミュレーション結果を比較すると、方位角、横揺角さらに舵角のいずれも、その変動が減少していることが判る。表5.6に方位角、横揺角及び舵角の標準偏差及び制御モデル作成のオリジナルデータであるランダム操舵時の各変数の値もあわせて示す。

表5.6の白色雑音による制御シミュレーションの結果から、

- (1) 方位角に対する重み  $Q1$  を10、50と変化させた場合、方位角の標準偏差は、重みが大きい方が若干の減少する傾向にある。

- (2) 横揺角に対する重み  $Q_2$  を 10、50、100 と変化させた場合でも、横揺角の標準偏差はほとんど変化しない。
- (3) 舵角に対する重み  $R$  を 0.5、1、2 と変化させた場合、舵角の標準偏差は、重みが大きい方が減少する傾向にある。
- (4) 標準偏差で方位角、舵角はランダム操舵時の約半分、横揺角は 30 (%) 程度減少する。

ことなどが判る。

以上の結果は、コンテナ船のような比較的大型の船舶においても、本論文で述べる統計的最適制御理論を用いた舵減揺制御が、横揺の減揺効果に有効であることを示している。

## 5.4 結言

自己回帰モデルから状態空間表現を導き、最適制御系を設計するにあたって、実際にどの程度の横揺減揺効果が期待できるかを確認するために、東京商船大学練習船『汐路丸』で得られた実船によるランダム操舵のデータを用いて、白色雑音による制御シミュレーションを行った。

また、操縦運動の数学モデルを用いて大型コンテナ船を対象とした、波浪中での横揺を含む操縦運動のランダム操舵シミュレーションをハイブリッドシミュレーションシステムで行い、それぞれのデータを収録した。

そして、このような実船あるいはシミュレーションによるデータをもとに、制御モデルの同定及び制御ゲインの決定を行った。さらに、得られた制御ゲインを用いて白色雑音による制御シミュレーションを行い、制御ゲインの選択基準及び制御型自己回帰モデルによる、舵減揺制御の実船への適用の可能性について検証した。

以下に本章で得られた結果をまとめて示す。

- (1) 制御変数である方位角、横揺角速度に対する重み係数  $Q$ 、及び制御変数である舵角に対する重み係数  $R$  を何種類か変更しながら白色雑音による制御シミュレーションを行うことによって、実船実験における重み係数の初期設定値に関する情報が得られることを示した。
- (2) 横揺を含めた数学モデルによる操縦運動の平水中及び波浪中でのシミュレーション結果、及び得られたデータのスペクトル解析、雑音寄与率解析の結果から方位角、横揺角さらに舵角との連成影響について確認した。
- (3) 実船及びシミュレーションによって得られたランダム操舵時の方位角、横揺角速度あるいは横揺角、舵角などのデータをもとに白色雑音による制御シミュレーションを行った結果、統計的最適制御を用いた保針と横揺減揺制御を行う舵減揺制御は、実船においても横揺減揺効果が得られる可能性があることが判った。

参考文献

- [5.1] 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、1972.
- [5.2] 織田博行、大津皓平、佐々木学、関佳之、堀田敏行  
制御型多次元自己回帰モデルを用いた舵による横揺減揺制御  
関西造船協会誌、第216号、1991.
- [5.3] 古谷一、堀籠教夫、原誠、小林弘明  
ハイブリッド方式による船用制御シミュレータについて、  
東京商船大学報告、30、昭和55年.
- [5.4] 本田敏明  
アナログコンピュータの基礎と演習、コロナ社、1977.
- [5.5] 平野雅祥  
初期設計時における船の操縦運動計算法について、  
日本造船学会論文集、147、1980.
- [5.6] 浜本剛実  
MMG一報告(その2)、操縦性数学モデルの理論的背景、  
日本造船学会誌、第577号、1977.
- [5.7] 大津皓平、堀籠教夫、山内保文、平野雅祥、織田博行  
統計的最適制御による省エネルギー型自動操舵システムの開発、  
三井造船技報、第120号、1982.
- [5.8] 第151研究部会報告書  
日本造船研究協会、1977.
- [5.9] 長谷川和彦、石山忠治、梅田宏規  
オートパイロットによる針路不安定船の許容限界に対する  
考察(第1報)、日本造船学会論文集、148、1979.

図表一覧表

- 表 5.1 方位角、横揺角速度、舵角による多次元自己回帰モデルの  
係数行列（ランダム操舵時の方位角、横揺角速度、舵角）
- 表 5.2 二次評価関数の重み係数の違いによる白色雑音  
シミュレーション結果（オリジナルデータ：汐路丸におけるランダム操舵）
- 表 5.3 ハイブリッドシミュレーションシステムの基本性能
- 表 5.4 コンテナ船の船体主要目
- 表 5.5 操縦運動シミュレーションに用いる流体力係数および各種係数
- 表 5.6 二次評価関数の重み係数の違いによる白色雑音  
シミュレーション結果（オリジナルデータ：ランダム操舵シミュレーション）
- 図 5.1 汐路丸におけるランダム操舵時の時系列
- 図 5.2 ランダム操舵時のスペクトル
- 図 5.3 二次評価関数の重み係数の違いによる白色雑音  
シミュレーション結果
- 図 5.4 二次評価関数の重み係数の違いによる白色雑音  
シミュレーション結果
- 図 5.5 操縦運動ハイブリッドシミュレーションシステムの構成
- 図 5.6 コンテナ船のシミュレーションと実船試験における  
スパイラル特性
- 図 5.7 コンテナ船のシミュレーションと実船試験における  
35度旋回特性
- 図 5.8 コンテナ船のシミュレーションと実船試験における  
10度Z操舵特性
- 図 5.9 シミュレーションに用いた不規則波スペクトル  
（有義波高：1.5 m、平均波周期：15秒）
- 図 5.10 ランダム操舵と白色雑音シミュレーションの時系列（コンテナ船）
- 図 5.11 ランダム操舵シミュレーション時のスペクトル
- 図 5.12 ランダム操舵シミュレーション時の累積雑音寄与率

表 5.1 方位角、横揺角速度、舵角による多次元自己回帰モデルの係数行列  
(ランダム操舵時の方位角、横揺角速度、舵角)

Order = 1

	Yaw [ $A_1(*,1)$ ]	Roll Rate [ $A_2(*,2)$ ]	Rudder [ $A_3(*,3)$ ]
Yaw [ $A_1(1,*)$ ]	1.1981	0.0262	- 0.0065
Roll Rate [ $A_2(2,*)$ ]	- 0.0332	1.1554	0.0086
Rudder [ $A_3(3,*)$ ]	- 0.3590	0.2528	1.5039

Order = 2

	Yaw [ $A_1(*,1)$ ]	Roll Rate [ $A_2(*,2)$ ]	Rudder [ $A_3(*,3)$ ]
Yaw [ $A_1(1,*)$ ]	0.0936	- 0.0085	0.0122
Roll Rate [ $A_2(2,*)$ ]	- 0.0575	- 0.0423	0.0056
Rudder [ $A_3(3,*)$ ]	- 1.0973	- 0.1143	- 0.8456

Order = 3

	Yaw [ $A_1(*,1)$ ]	Roll Rate [ $A_2(*,2)$ ]	Rudder [ $A_3(*,3)$ ]
Yaw [ $A_1(1,*)$ ]	- 0.1303	- 0.0250	0.0129
Roll Rate [ $A_2(2,*)$ ]	0.1832	0.1159	- 0.0271
Rudder [ $A_3(3,*)$ ]	1.3517	- 0.4454	0.1962

Order = 4

	Yaw [ $A_1(*,1)$ ]	Roll Rate [ $A_2(*,2)$ ]	Rudder [ $A_3(*,3)$ ]
Yaw [ $A_1(1,*)$ ]	- 0.1563	0.0048	- 0.0025
Roll Rate [ $A_2(2,*)$ ]	- 0.0891	- 0.3443	0.0065
Rudder [ $A_3(3,*)$ ]	- 0.0991	0.4646	0.0779

表 5.2 二次評価関数の重み係数の違いによる白色雑音シミュレーション結果  
 (オリジナルデータ：汐路丸におけるランダム操舵)

Weight Matrix			Standard Deviation		
Yaw (Q1)	Roll Rate (Q2)	Rudder (R)	Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)
10	10	1	1.47	0.81	1.77
10	50	1	1.51	0.64	2.69
20	10	1	1.17	0.80	2.55
80	1	3	1.08	0.89	2.96
80	10	3	1.08	0.85	2.96
80	50	3	1.09	0.75	3.08
Original Data (Random)			2.45	1.10	5.46

表 5.3 ハイブリッドシミュレーションシステムの基本性能

System	Device	Performance
YHP-1000	CPU	16bit, 64kW
	CRT	Character / Graphic Display
	MT	1600 BPI
	Card Reader	300 ( card / sec )
	Tape Reader	500 ( character / sec )
	System Disk	20 MB
	Interface	6 ch. ( 16bit )
	Printer	180 (character / sec )
DS-1000	CPU	Digital Analyzer
	Analogue Out	4 ch. ( 12bit, $\pm 10V$ )
	Analogue Input	4 ch. ( 12bit, $\pm 10V$ )
	Hybrid Interface	16 bit
	Cassette MT	2 drives
ALS-200X	Integrator	9 sets
	Adder	8 sets
	Multiplyer	2 sets
	Potentiometer	30 sets
	Program	pin board
Connection Board	A / D Converter	16 ch.
	D / A Converter	8 ch.
	Controler	1 set
Console	Key board	2 sets

表 5.4 コンテナ船の船体主要目

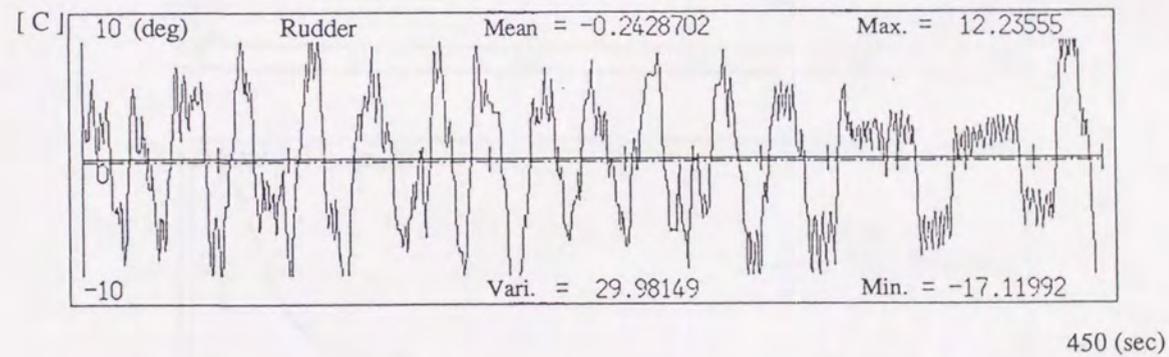
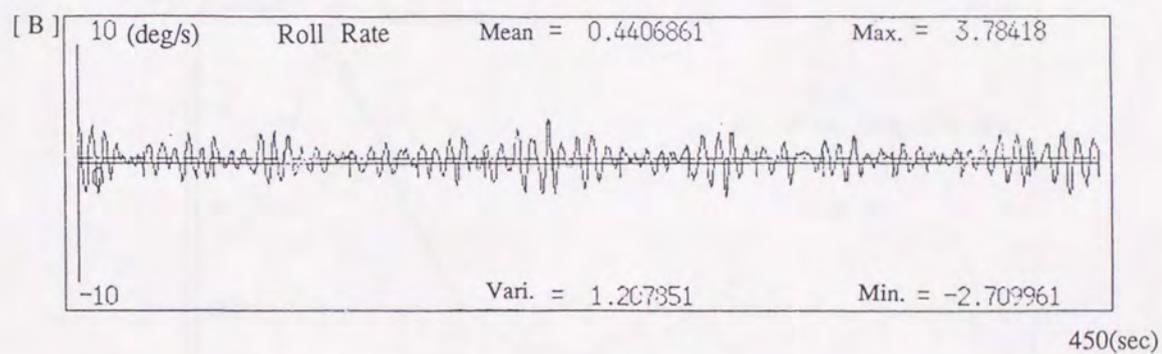
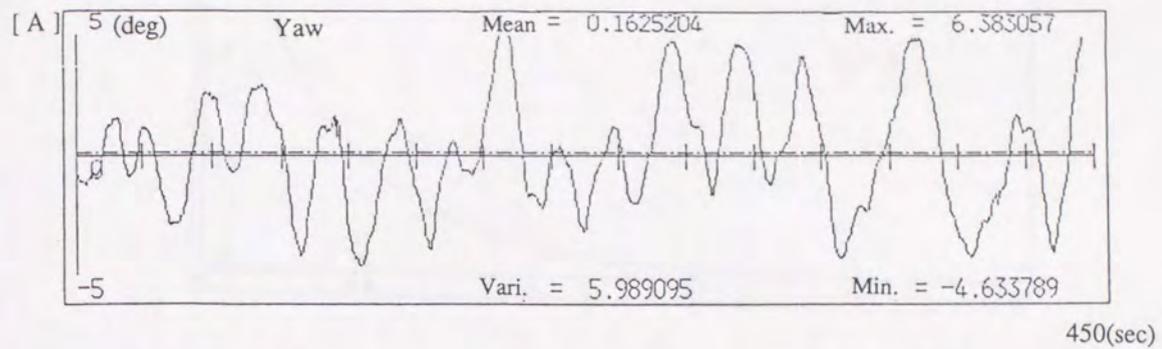
Kind of Ship		Container Carrier
Hull	$L$ (m)	202.00
	$B$ (m)	31.20
	$d$ (m)	6.93
	$\tau$ (m)	1.95
	$CB$	0.518
Rudder	$AR/Ld$	1/48.1
	$\lambda$	1.40
Propeller	$D$ (m)	7.10
	$P/D$	1.04
	$Z$	6

表 5.5 操縦運動シミュレーションに用いる流体力係数および各種係数

Hull	$L_{pp}$	202.0 m	Condition	$V$	25.9 kn	
	$B$	31.2 m		$J_{p0}(U_0(1-w)/n_0D)$	0.780	
	$D$	18.9 m		$FN$	0.299	
	$d$	6.93 m		Engine	R.P.M (MCO)	114 rpm
	$C_B$	0.518			B.H.P	40,900 HP
	$l_{CB}$	- 3.57 m			$IEE$	$2.194 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$
	$x_M$	5.86 m			$I_{pp}$	$1.146 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$
	$\tau$	1.954 m			$J_{pp}$	$0.25 \times I_{pp}$
	$KG$	11.7 m			$I_p$	$3.628 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$
	$GM$	3.7 m			Derivativas	$Y_v'$
	$x_R$	- 95.14 m		$Y_r'$		0.005
	$z_H$	9.968 m		$Y'_{v v }$		- 0.761
	$W$	23,200 ton		$Y'_{r r }$		- 0.060
	$\nabla$	22,634 m <sup>3</sup>		$N_v'$		- 0.471
$m$	$2.367 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$	$N_r'$	- 0.052			
$I_{xx} + J_{xx}$	$2.823 \times 10^8 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$ $6.037 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$	$N'_{v v }$	- 0.032			
Rudder	$AR$	29.1 m	$N'_{r r }$	0.0		
	$AR/Ld$	1/48.1	$N'_{vvr}$	- 0.042		
	$\lambda$	1.40	$N'_{vrr}$	- 0.392		
	$l-wR$	0.75	$N'_{vrr}$	- 0.086		
	$l+aH$	1.21	$N \phi'$	- 0.008		
	$k$	3.5	$N'_{v \phi }$	- 0.137		
	$\gamma$	0.45	$N'_{r \phi }$	0.070		
	$C$	0.5	$m_x$	$0.497 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$		
Propeller	$D$	7.10 m	$m_y$	$1.584 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$		
	$H/D$	1.04	$J_{zz}$	$5.711 \times 10^9 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$		
	$AE$	0.891	$m_y + X_{vr}$	$9.504 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}$		
	$Z$	6	$K_{\phi} \left( \frac{2\pi(I_{xx} + J_{xx})}{T_R} \cdot k \right)$	$3.799 \times 10^7 \text{ kg} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}$		
			$T_R$	15 ~ 16 s		
			$\kappa$	0.3		

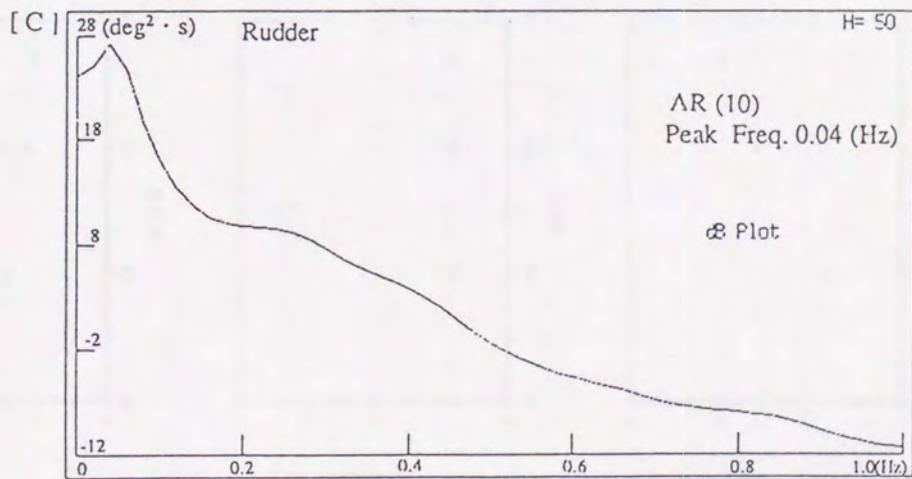
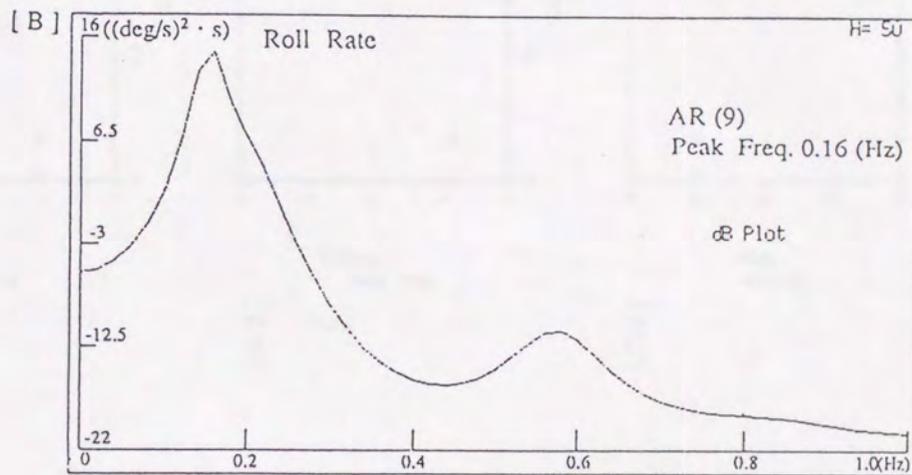
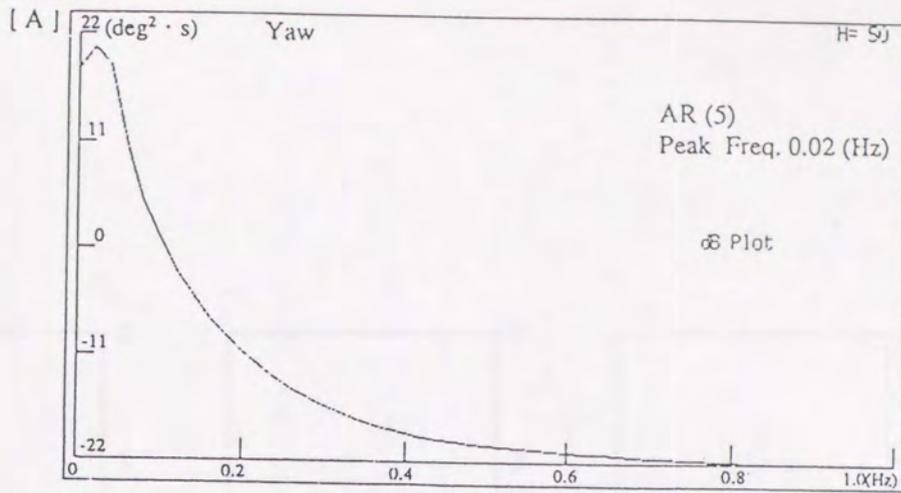
表 5.6 二次評価関数の重み係数の違いによる白色雑音シミュレーション結果  
 (オリジナルデータ：ランダム操舵シミュレーション)

Weight Matrix			Standard Deviation		
Yaw (Q1)	Roll (Q2)	Rudder (R)	Yaw (deg)	Roll (deg)	Rudder (deg)
10	10	1	1.38	0.32	2.27
10	50	1	1.39	0.31	2.28
10	50	2	1.45	0.32	2.27
10	50	0.5	1.34	0.30	3.08
10	100	1	1.40	0.30	2.33
50	10	1	1.29	0.31	4.18
Original Data (Random)			2.16	0.42	6.75



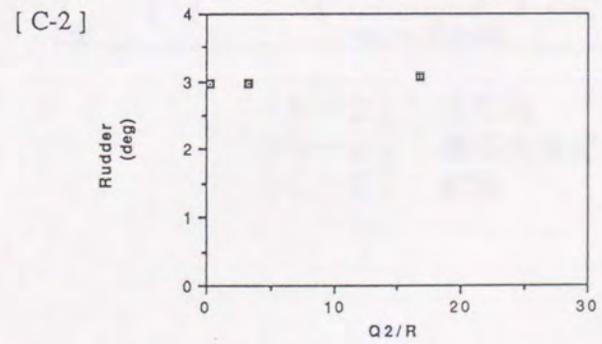
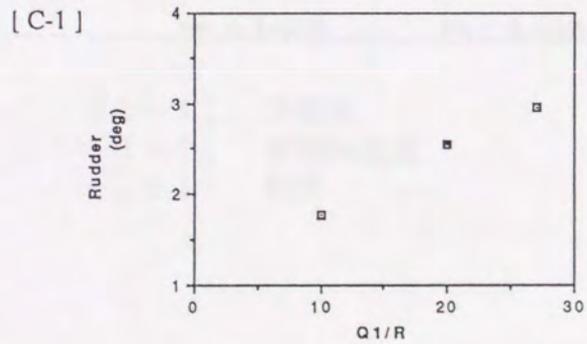
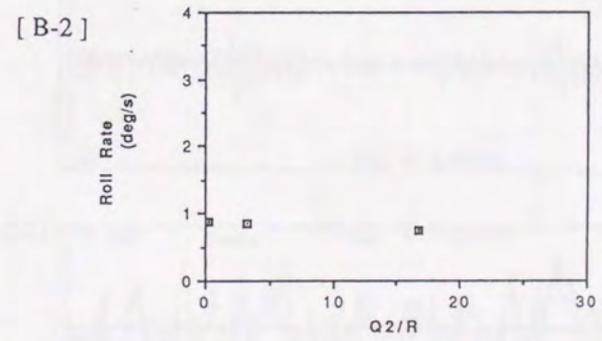
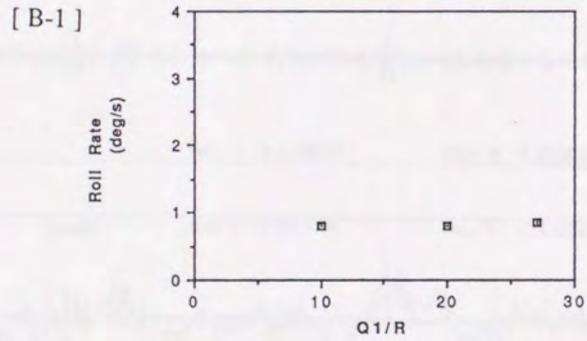
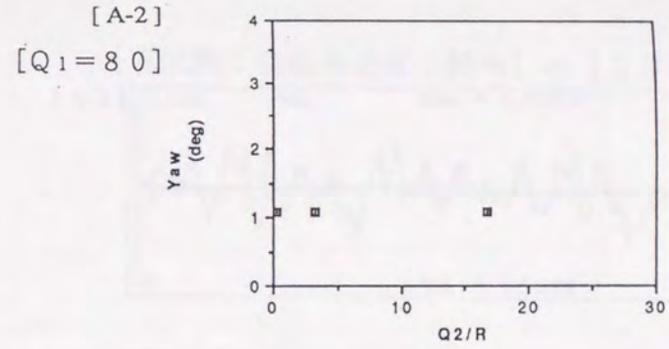
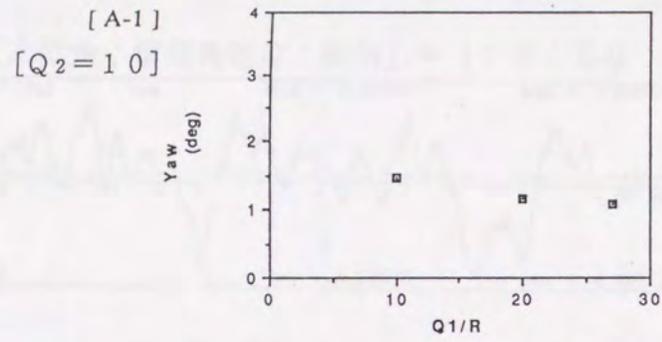
- [ A ] 方位角
- [ B ] 横揺角速度
- [ C ] 舵角

図 5.1 汐路丸におけるランダム操舵時の時系列



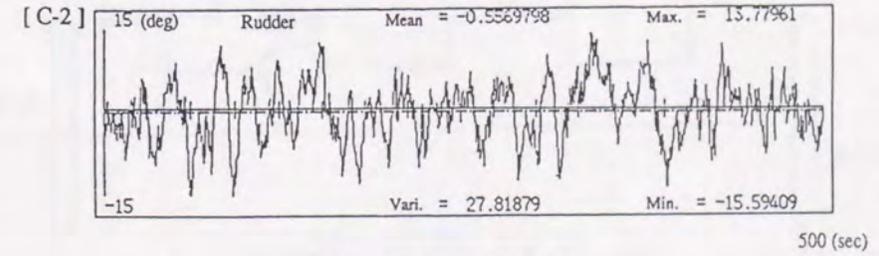
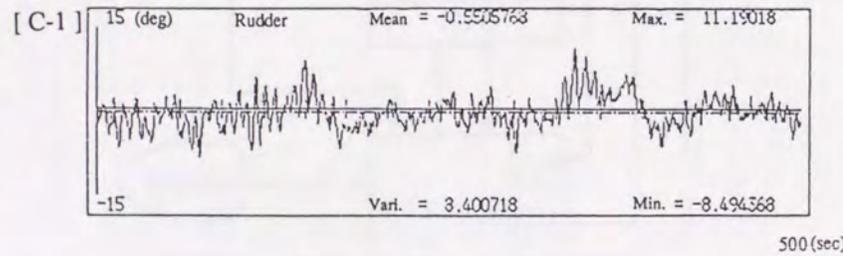
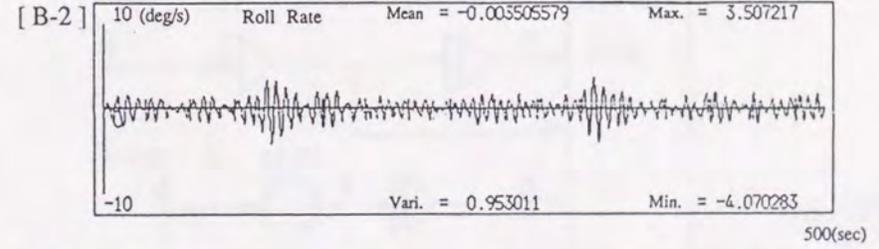
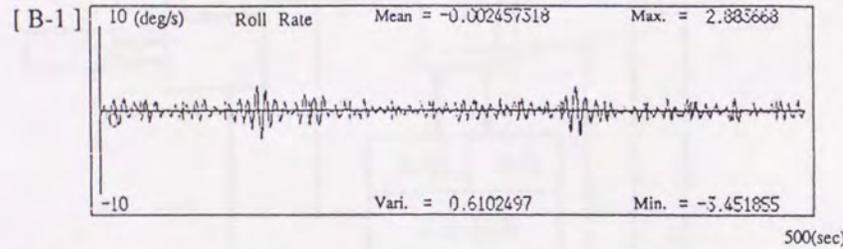
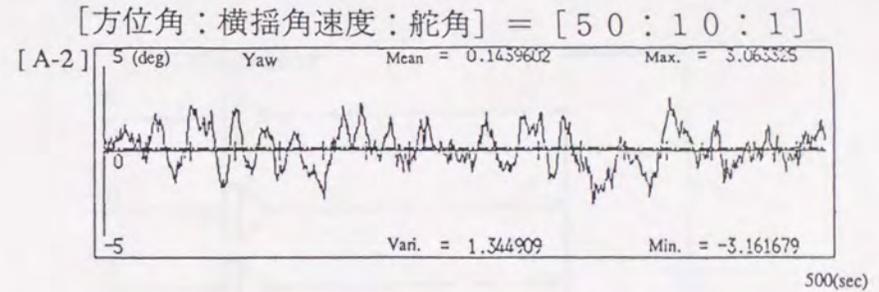
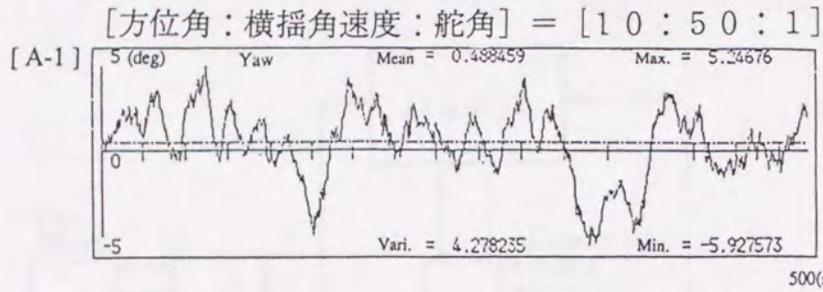
- [A] 方位角  
[B] 横揺角速度  
[C] 舵角

図 5.2 ランダム操舵時のスペクトル (汐路丸)



[A-1] [B-1] [C-1] 方位角と舵角の比率を変化  
[A-2] [B-2] [C-2] 横揺角速度と舵角の比率を変化

図 5.3 二次評価関数の重み係数の違いによる白色雑音シミュレーション結果



[A-1] 方位角  
 [B-1] 横揺角速度  
 [C-1] 舵角

[A-2] 方位角  
 [B-2] 横揺角速度  
 [C-2] 舵角

図 5.4 二次評価関数の重み係数の違いによる白色雑音シミュレーション結果

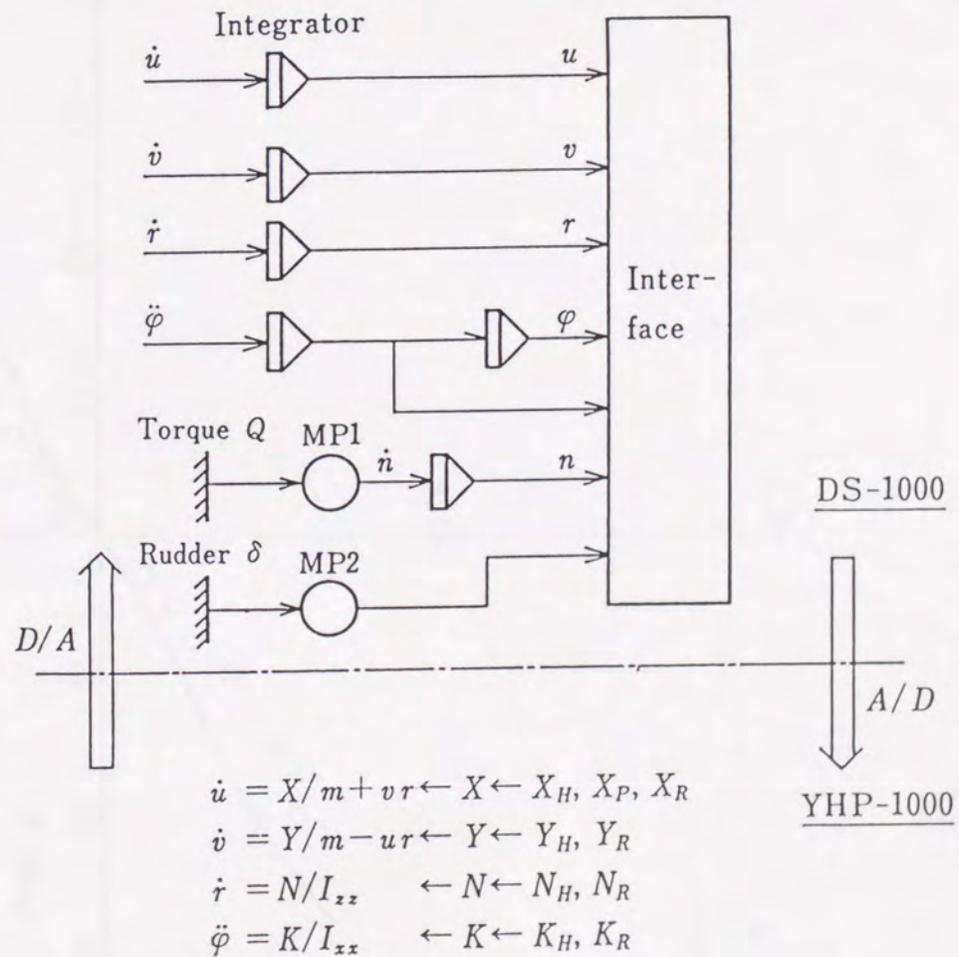
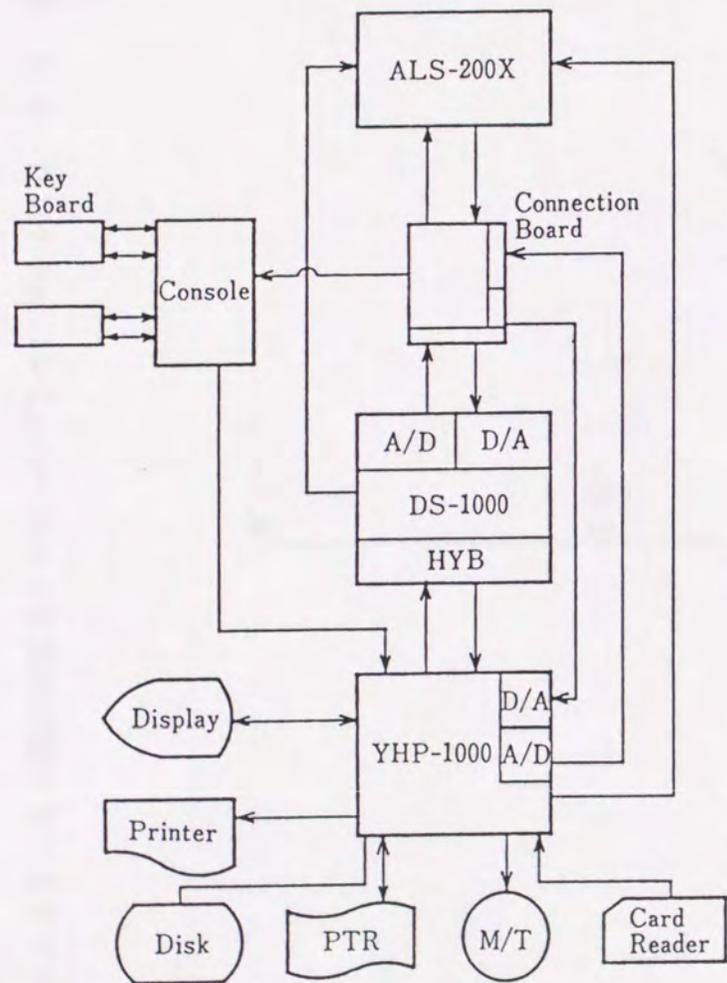


図 5.5 操縦運動ハイブリッドシミュレーションシステムの構成

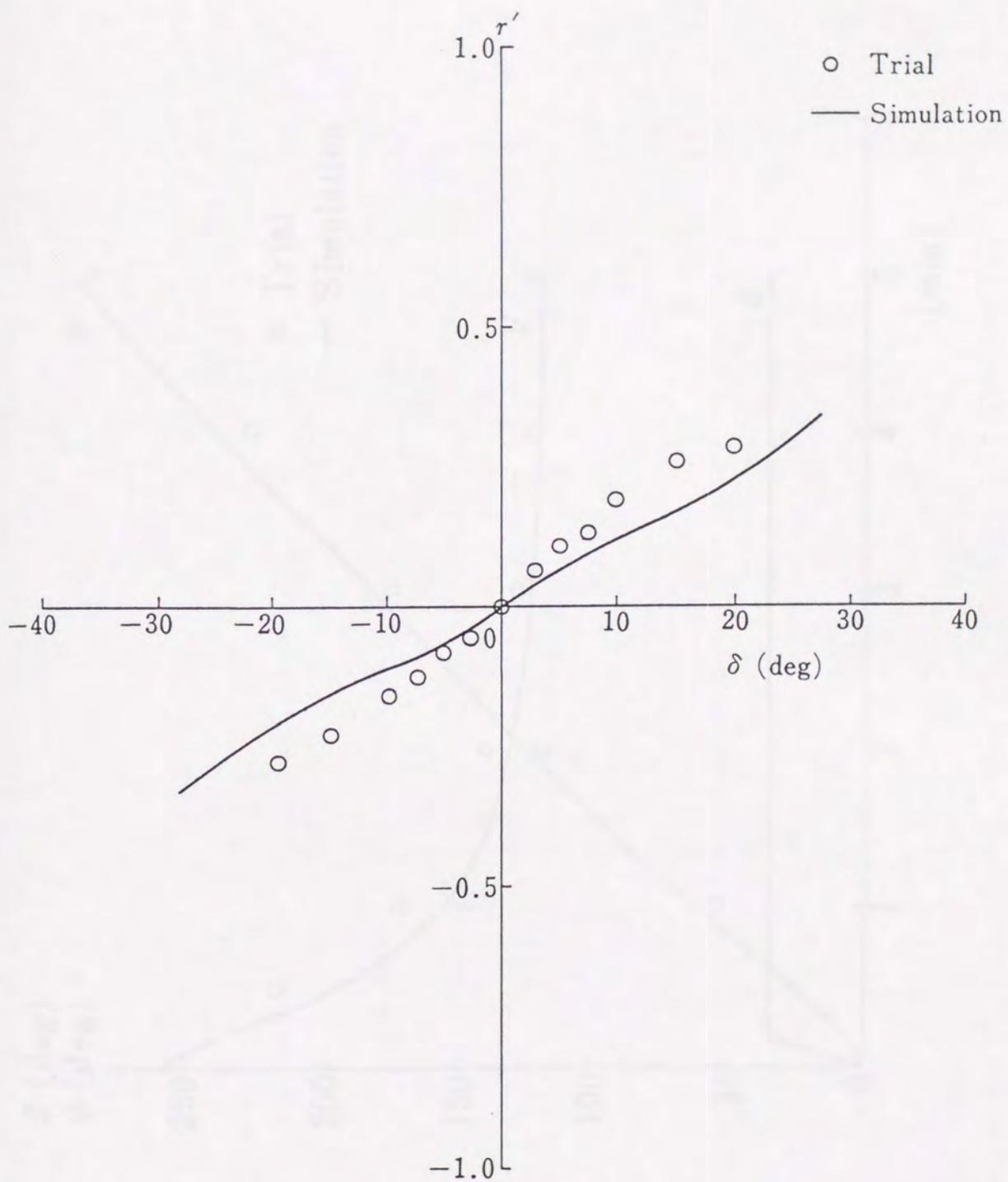


図 5.6 コンテナ船のシミュレーションと実船試験におけるスパイラル特性

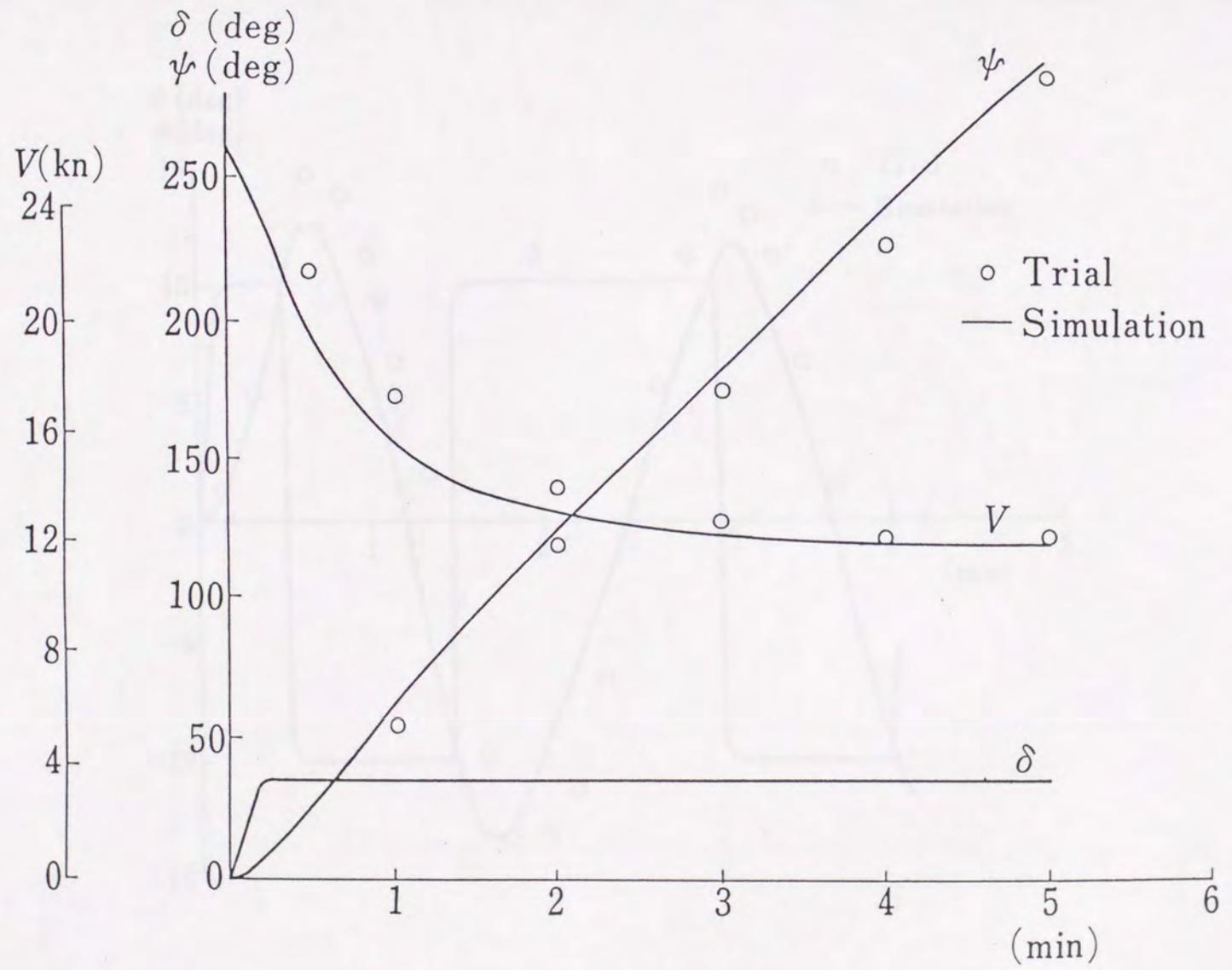


図 5.7 コンテナ船のシミュレーションと実船試験における35度旋回特性

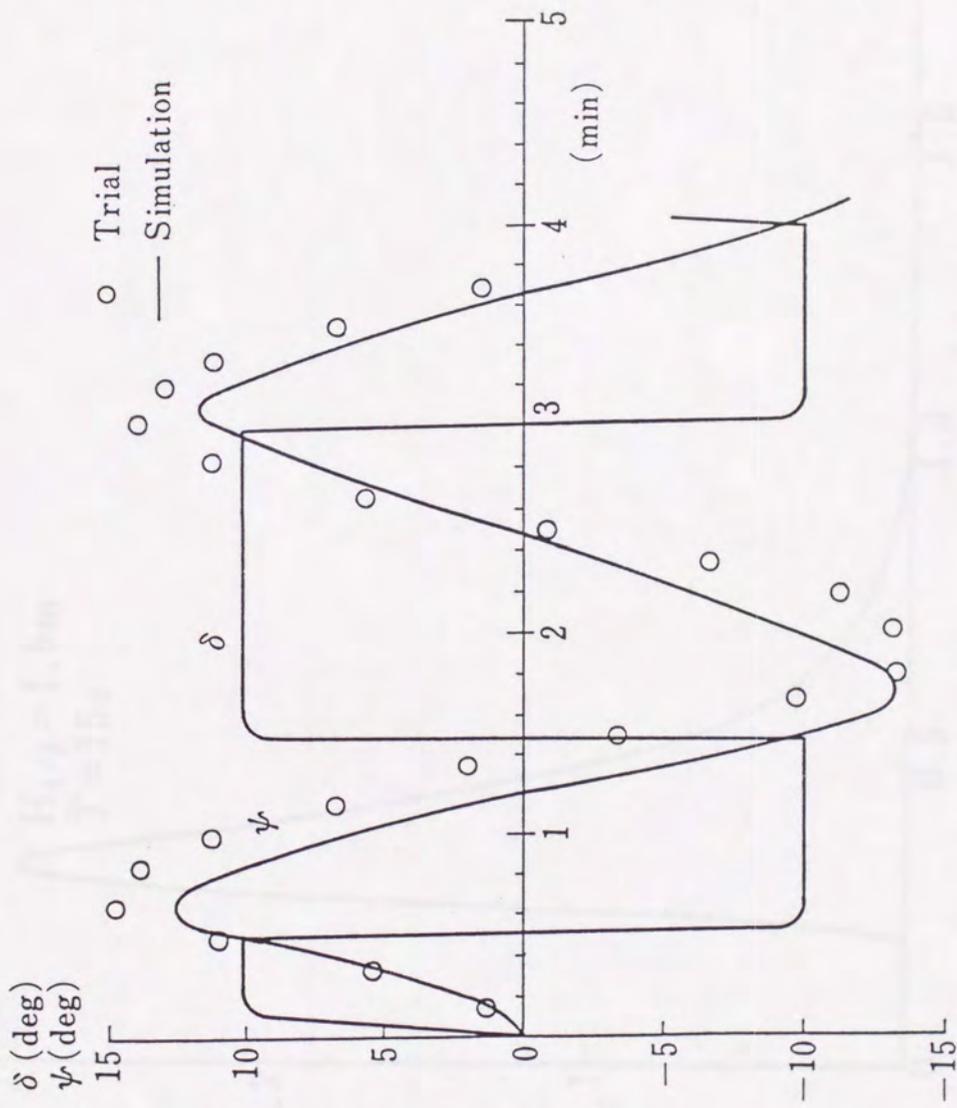


図 5.8 コンテナ船のシミュレーションと実船試験における 10 度 Z 操舵特性

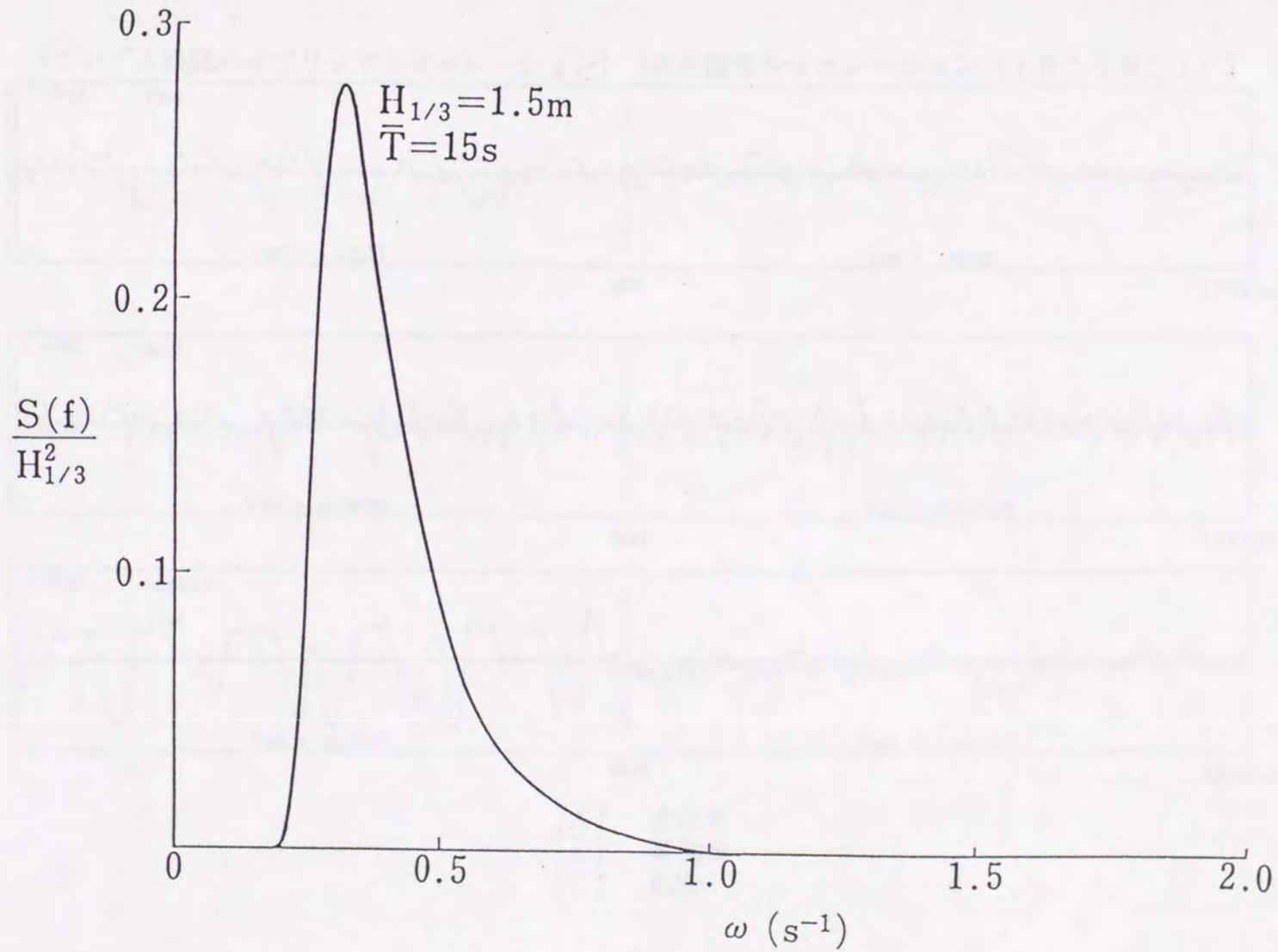


図 5.9 シミュレーションに用いた不規則波スペクトル  
(有義波高: 1.5 m 、平均波周期: 15 秒)

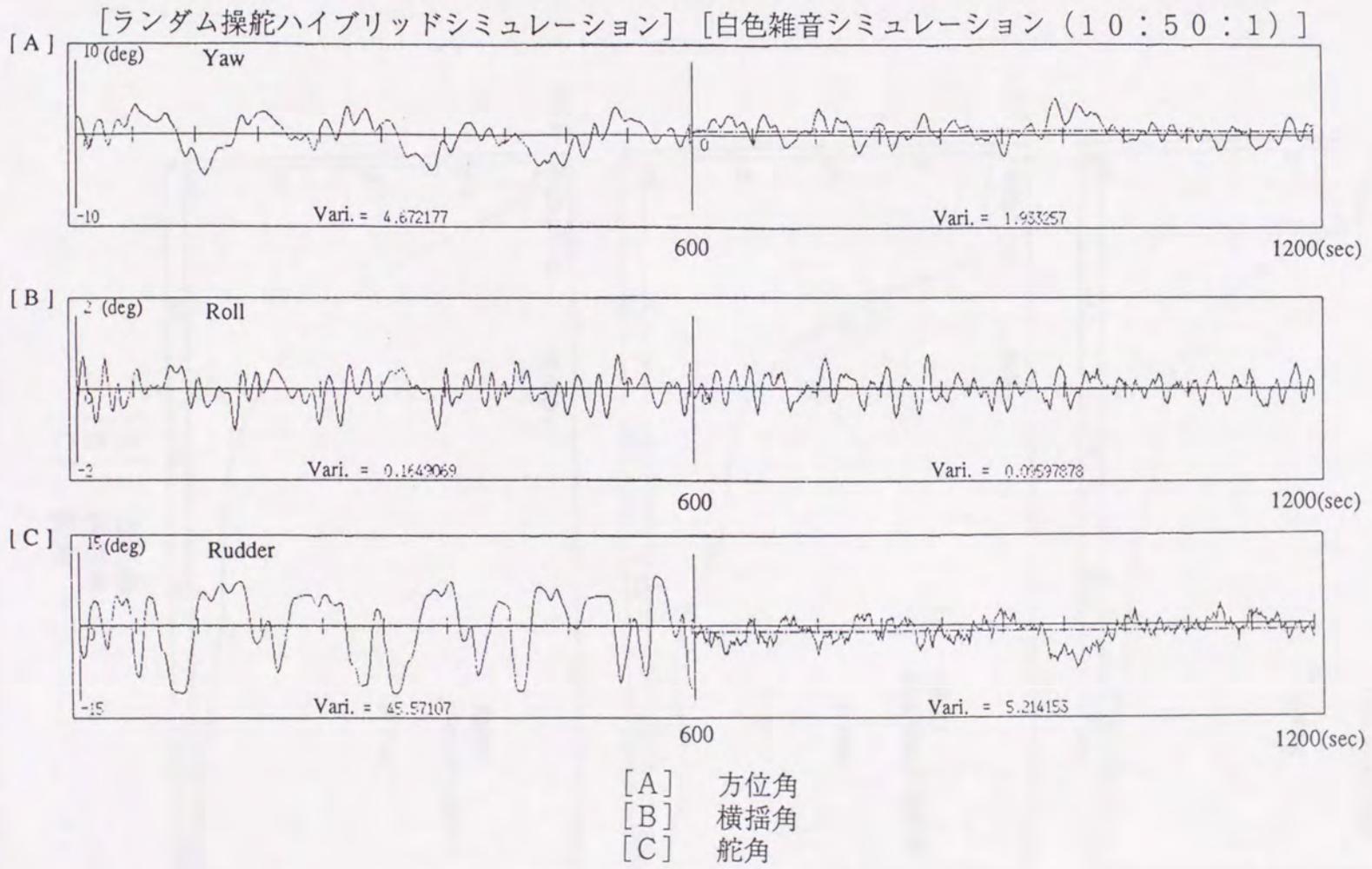
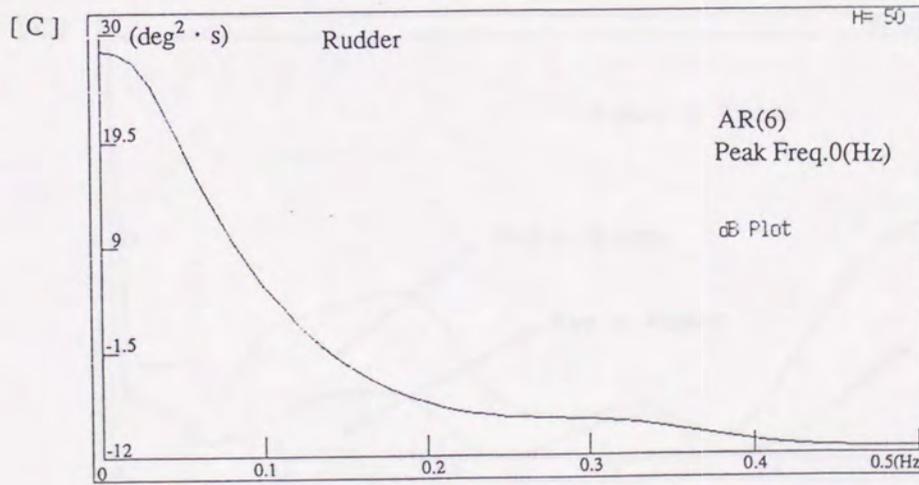
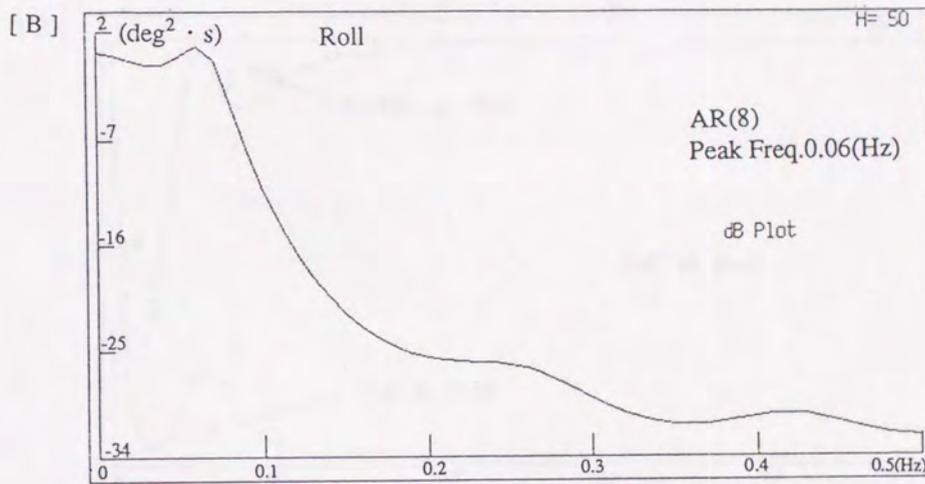
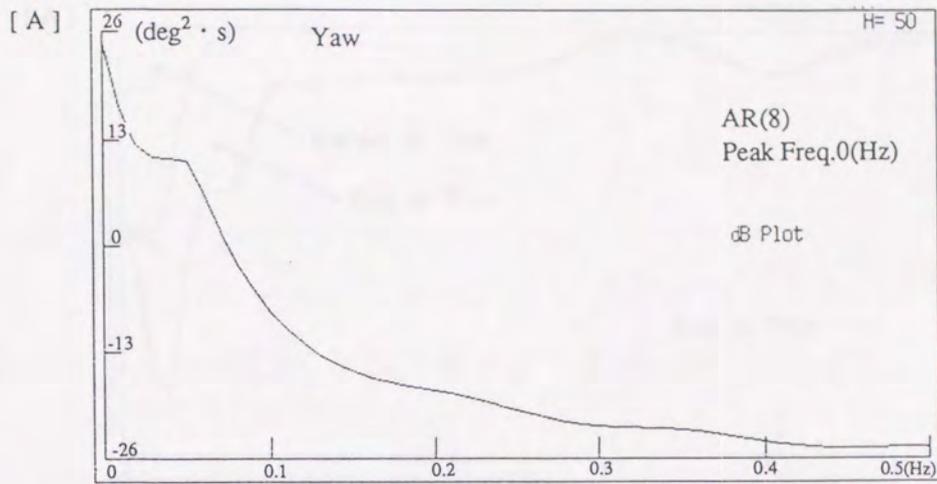
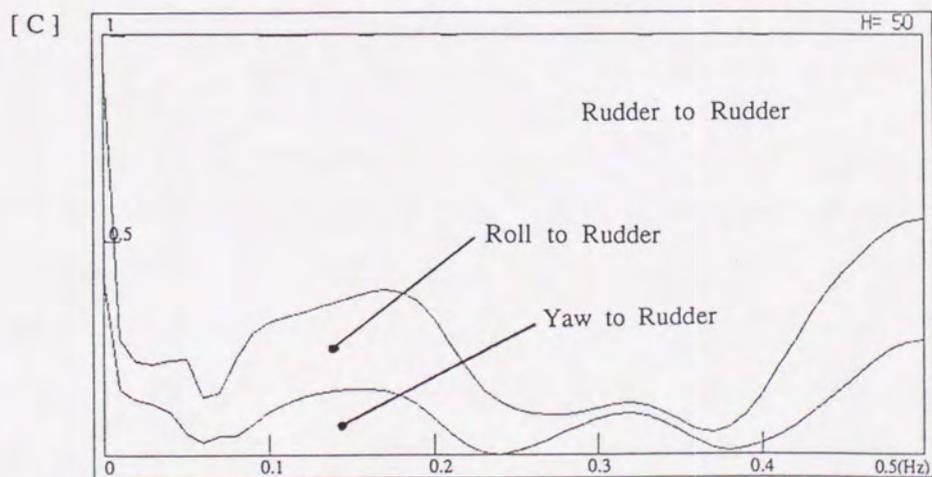
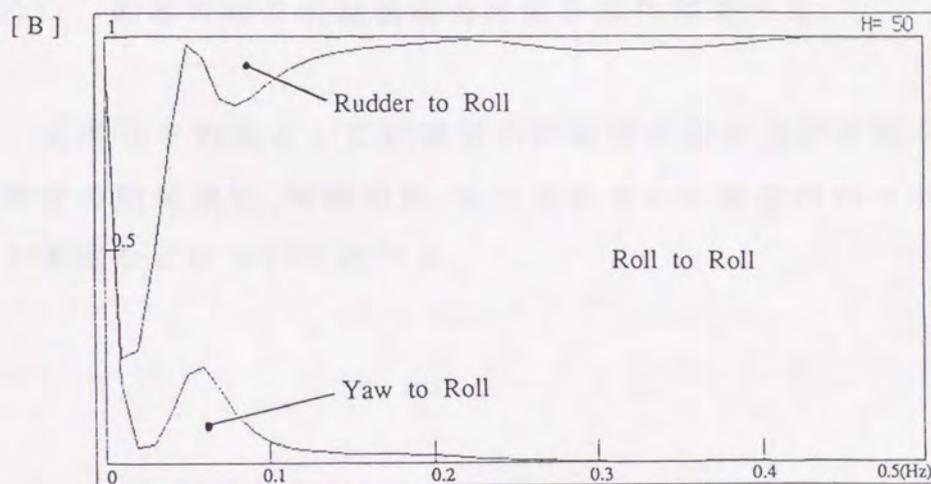
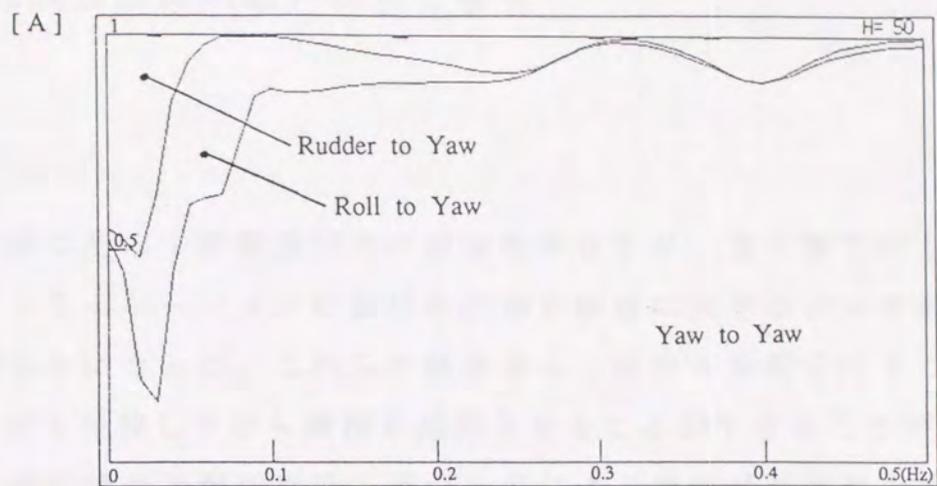


図 5.10 ランダム操舵と白色雑音シミュレーションの時系列 (コンテナ船)



- [ A ] 方位角
- [ B ] 横揺角
- [ C ] 舵角

図 5.11 ランダム操舵シミュレーション時のスペクトル



- [A] 方位角に対する累積雑音寄与率  
 [B] 横揺角に対する累積雑音寄与率  
 [C] 舵角に対する累積雑音寄与率

図 5.12 ランダム操舵シミュレーション時の累積雑音寄与率

## 第6章 舵減揺制御装置の機能と構成

### 6.1 緒言

操舵の横揺に及ぼす影響及びその減揺効果などが、第5章で示した実船実験あるいはシミュレーションにおける舵角と横揺に関するデータの解析などを通して明らかになった。これらの結果から、適切な操舵を行うことによって、保針性能を保持しながら横揺を減揺させることができることが判った。

そこで、統計的最適制御理論を用いた舵による横揺減揺制御を実船実験で確認するために、船載可能な舵減揺制御装置を試作開発する。

本章では、実用化を前提とした舵減揺制御装置の設計方針を明らかにするとともに、装置の開発過程、制御機能、操作方法さらに装置のハードウェア・ソフトウェア構成などについて述べる。

## 6.2 舵減揺制御装置の設計方針

本装置の目的である操舵による横揺減揺制御の効果を、実船で確認するための制御装置を開発するにあたって、設計条件として装置構成をどのようにするか、入出力を含めた制御プログラムをどのように構築するか、そして試作装置として、どのような制御及び操作機能を備えておくべきかなどについて検討する。

(1) 舵減揺制御装置は、以下のような方針で開発した。

- ・ 舵減揺制御装置は制御演算装置、横揺角速度検出装置そして操作装置で構成する。
- ・ 既存船、新造船の操舵系あるいは搭載機器と入出力信号が容易に接続可能とする。
- ・ 横揺を検出するバーチカルジャイロ、あるいはレートセンサなどは通常の船舶では搭載していないため本装置内に内蔵する。
- ・ 実船実験の環境（振動、塩害、防滴、電源など）を考慮した装置構成とする。
- ・ 演算装置、操作装置の設置場所は、基本的には船橋内であり、小型軽量の可搬タイプとする。

(2) 舵減揺制御装置の操作部は、以下のような方針で開発した。

- ・ データ収録、モデル作成、目標方位角設定さらに制御開始及び停止などの操作はタッチパネル面に対話形式で行う。
- ・ 操作装置としてタッチパネルを採用し、モデル作成、ゲイン作成そして制御の実行など、全てパネル上の項目を選択（軽くタッチ）することによって行う。
- ・ 目標方位角、制御ゲインの変更については、制御中随時割り込み可能とする。

- (3) 舵減揺制御装置の制御プログラムは、以下のような方針で開発した。
- ・基本的な制御機能は、操舵による方位角及び横揺角速度の同時制御である。
  - ・対象船舶ごとに入出力信号あるいは操舵装置などが異なるため、制御演算部と船内装置との入出力部は個別に保守可能な構成とする。
  - ・船上でデータ入力から制御モデル、制御ゲイン作成までの演算処理を行いながら、同時に減揺制御を行い、さらに制御状況を監視することのできるシステムとする。
  - ・複数の演算処理（マルチタスク）を行いながら、リアルタイムで制御が可能なOS（オペレーティングシステム）として、リアルタイム拡張型UNIXを採用する。
  - ・ハードウェア及びソフトウェアに、異常が発生した場合の緊急停止機能を設ける。

### 6.3 舵減揺制御装置の制御機能と特徴

舵減揺制御装置は、舵本来の機能である保針制御を行いながら同時に横揺をも積極的に制御して、その減揺効果を得ることを目的として開発した制御装置である。

本装置の入力信号は方位角、横揺角速度及び舵角応答であり、これらの時系列を船上で収録し、オンライン処理によって制御型自己回帰モデルを推定し、状態空間表現と二次評価関数のもとに最適制御ゲインを計算することができる。このような制御系設計の作業と並行して、得られた制御ゲインによるリアルタイム制御が実行され、制御信号として舵角指令が操舵装置に出力される。舵減揺制御装置による操舵システムの概略を図6.1に示す。

ところで、本装置は舵による横揺減揺制御を行うための横揺に関する情報として、横揺角速度を用いている。その理由は第1章で述べたように、

- (1) 横揺角速度を制御対象とすることによって、横揺の減衰が速くなり定常状態に早く収束すること、
  - (2) 横揺角速度の方が横揺角に比べて、乗り心地に深く関係していること、
  - (3) 横揺角速度は比較的簡単な装置で、精度よく検出できること、
- などを考慮したためである。

本装置では、次のようないくつかの処理（タスク）が、リアルタイムで並行して行われている。

- (1) ジャイロコンパスからの方位角信号、レートセンサーからの横揺角速度、操舵装置からの舵角応答の各種信号の入出力を行うタスク。
- (2) 第4章で述べたMAICE法による、制御型自己回帰モデル作成から二次評価関数のもとで最適制御ゲイン作成まで行うタスク。
- (3) 制御信号及び船体運動などのデータを収録するタスク。
- (4) 制御モードの変更及び制御状況をモニタリングするタスク。

さらに、本装置は制御ゲインを計算する段階で方位角と横揺角速度に対する重み係数を種々の組み合わせで行うことによって、方位角制御優先、横揺減揺制御優先などのモードを実現することも可能である[6.1]、[6.2]。

また、本装置による制御信号の最小出力時間間隔は0.5秒、モニタリングは1.0秒間隔であり、制御ゲインの変更、目標方位角の変更などは、随時割り込み処理される。本装置の基本的な制御機能の流れを図6.2に示す。

## 6.4 舵減揺制御装置の構成

舵減揺制御装置は制御演算装置、操作装置、横揺角速度検出装置そして入出力装置などで構成されている。本制御装置の構成及び設置方法を図6.3、装置の外観を写真6.1に示す。

入力信号はジャイロコンパスからの方位角、舵角追従装置からの舵角応答、及び本制御装置内蔵の横揺角速度検出装置からの横揺角速度である。そして、出力信号は本制御装置から舵角指令である。

演算装置としては、マルチタスク・リアルタイム制御が実行可能な、F A 用32ビット/20 (MHz) の計算機及び専用の入出力装置を採用することによって演算の高速化を図った[6.3]。演算装置の構成及び仕様を図6.4、表6.1に示す。また、入出力装置としては8ビットデータバスラインを採用して、アナログ及びデジタル入出力を行っている。入出力装置の仕様を表6.2に示す。

操作装置としてはタッチパネルを用い、プログラマブルなメニュー形式による操作方式を採用することによって、任意の操作パネルイメージを構成することができる。タッチパネルの構成及び仕様を図6.5、表6.3そしてタッチパネルの表示例を写真6.2に示す。

横揺角速度検出装置としては、振動ジャイロの原理によるレートセンサを採用することによって、軽量小型化を実現している。振動ジャイロの原理及び仕様を図6.6、表6.4に示す。

本制御装置のソフトウェア構成は、舵減揺制御を実施するいくつかのタスク、各種装置との入出力信号の管理を行うタスク及びそれらをOSレベルで管理するタスクなどで構成されている。

次に、それぞれのソフトウェアについてそれぞれの機能などを説明する。舵減揺制御を実現するための制御演算部は、入力データから相関関数を計算するプログラム、制御型自己回帰モデルを推定するプログラム、制御ゲインを作成するプログラムそして制御シミュレーションを行うプログラムなどで構成され、いずれもフォートラン言語で記述されている[6.4]、[6.5]。

これらのプログラム名及び演算内容を以下に示す。

(1) CORREL

方位角、横揺角速度、舵角のデータから自己相関関数、相互相関関数を計算する。

(2) ARMDL

情報量規準AICが最小となるような、制御型自己回帰モデルを選択して、モデルの係数、残差分散などを計算する。

(3) OPTDES

二次評価関数において、被制御変数の重みと制御変数の重みを設定し、制御ゲインGを計算する。

(4) OPTSIM

OPTDESで得られた制御ゲインを用いた、白色雑音による制御シミュレーションを行い、方位角、横揺角速度及び舵角の分散を計算する。

(5) SELECT

OPTDESとOPTSIMで得られた、いくつかの制御ゲインから最適な制御ゲインを選択する。

本装置で採用している計算機では、これら複数のプログラムはいずれも計算機内部の共有メモリを介してデータの授受が行われている。

また、実際にこれらのプログラムでどのような演算が行われているか、計算例を演算内容及び結果などとともに図6.7に示す。

また、操作装置及び入出力装置との間の各種データを管理しているプログラムはいずれもC言語で記述されている。また、先にも述べたように操作装置としてELタイプのタッチパネルを採用し、このタッチパネルは専用のCPUを持っているため、対話形式のプログラムでパネル上に操作用の各種ボタン、スイッチ及びモニターなどを任意に作成することができる。

最後に、これらすべてのタスクを管理しながらマルチタスク、リアルタイム制御を実現しているのがOSであり、本装置ではその基本部にUNIX SYSTEM / Vを採用している[6.6]。

以上に示したように制御演算部はフォートラン言語、マルチタスク制御及び信号の入出力はC言語でそれぞれ開発し、これらのプログラムをリンクすることによって、全体の制御を実現している[6.7]。

なお、本制御装置全体の実行プログラムのサイズは70(KB)程度であり、OS部分も含めてROM化が可能である。そこで、写真6.1の試作1号機に続いて、試作2号機としてROM稼働による舵減揺制御装置を開発し、操作装置、入出力装置の小型軽量化を実現するとともに、操作の簡素化を図った。本制御装置で使用した計算機の仕様を表6.5、外観を図6.8及び写真6.3に示す。

## 6.5 舵減揺制御装置の操作方法

本制御装置を実船に搭載して、どのような操作手順で制御系設計から制御実行までを行うかについて、以下に具体的に述べる。

- (1) 航行中に人間あるいは計算機によって、振幅・周期ともなるべくランダムに操舵しながら、10～20分程度の間保針操舵を行う。
- (2) 船首揺及び横揺が、励起された状態でタッチパネル [データ収録] を選択し、方位角、横揺角速度及び舵角応答の各データを本装置内に収録する。
- (3) タッチパネル [モデル作成] を選択し、制御型自己回帰モデルの推定を開始する。
- (4) タッチパネル [ゲイン作成] を選択し、方位角、横揺角速度及び舵角に対する初期重み係数を入力し、制御ゲインを作成した後にゲインファイルを作成する。
- (5) タッチパネル [目標値入力] を選択し、目標方位及び制御ゲインファイルを選択する。なお、本制御装置では目標横揺角速度はプログラムで0 (deg/s) に設定されている。
- (6) タッチパネル [制御開始] を選択し、舵減揺制御を開始する。
- (7) タッチパネル [モニター] を選択し、現在の制御状況を確認する。
- (8) タッチパネル [制御終了] を選択し、舵角制御信号は零となり制御は停止する。

なお、本制御装置はマルチタスクの環境下で動作するため、舵減揺制御を行いながら制御ゲインの変更、及び目標方位角の変更などを行うことが可能である。

## 6.6 結言

統計的最適制御による、舵減揺制御の減揺効果を実船実験で確認するために、試作装置を開発した。本制御装置の制御機能、特徴さらにハードウェア・ソフトウェア構成そして実際のオペレーション方法などについて述べた。

以下に、試作開発した舵減揺制御装置についてまとめる。

- (1) 舵減揺制御装置の基本的な機能は、実船データからの制御型自己帰帰モデル作成、制御ゲイン作成そしてオンラインでのリアルタイム制御の実行である。
- (2) 実船に搭載可能なハードウェア構成とし、特に計算機については船用に耐える仕様のものを選定し、実用化を目標とした装置開発を行った。
- (3) 横揺角速度は一般には船上では得られ難いため、本制御装置にレートセンサを内蔵した。
- (4) プログラム可能なタッチパネルを採用することによって、操作性、拡張性にすぐれた操作装置を開発した。
- (5) ソフトウェアは、目的に応じてフォートラン言語、C言語を併用し、これらをリンクすることによって、0.5秒間隔の制御を実現した。

参考文献

- [6.1] 織田博行、平野雅祥、大津皓平、烏野慶一、蛇沼俊二  
自己回帰型自動操舵装置による最適制御実船実験、第15回制御理論・  
第12回システム合同シンポジウム、計測自動制御学会、1986.
- [6.2] 織田博行、増田紀義、烏野慶一、大津皓平、蛇沼俊二  
多次元自己回帰モデルを用いた低速航行時の保針制御系設計、  
第14回システムシンポジウム、計測自動制御学会、1988.
- [6.3] (株) 東芝  
G200Vユーザーリファレンスマニュアル、1989.
- [6.4] 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、1972.
- [6.5] 統計数理研究所  
TIMSAC(Time Series Analysis and Control) Package, 1974.
- [6.6] 石田晴久訳  
UNIX プログラミング環境、アスキー社、1989.
- [6.7] 織田博行、大津皓平、佐々木学、関佳之、堀田敏行  
制御型多次元自己回帰モデルを用いた舵による横揺減揺制御  
関西造船協会誌、第216号、1991.

## 図表一覧表

- 表 6.1 舵減揺制御装置用計算機の仕様
- 表 6.2 舵減揺制御装置用入出力装置の仕様
- 表 6.3 舵減揺制御装置用タッチパネルの仕様
- 表 6.4 横揺角速度検出用振動ジャイロの仕様
- 表 6.5 舵減揺制御装置用計算機の仕様 (ROM稼働版)
- 
- 図 6.1 舵減揺制御装置による操舵システム
- 図 6.2 舵減揺制御の演算内容と構成
- 図 6.3 舵減揺制御装置の設置例および構成
- 図 6.4 舵減揺制御装置用計算機の機能および構成
- 図 6.5 舵減揺制御装置用タッチパネルの機能および構成
- 図 6.6 横揺角速度検出用振動ジャイロの原理および外形図
- 図 6.7 (1) 舵減揺制御プログラムにおける計算出力例  
(収録データの例、相関関数の計算例)
- 図 6.7 (2) 舵減揺制御プログラムにおける計算出力例  
(自己回帰モデルの推定例)
- 図 6.7 (3) 舵減揺制御プログラムにおける計算出力例  
(最適制御ゲインの推定例)
- 図 6.7 (4) 舵減揺制御プログラムにおける計算出力例  
(白色雑音によるシミュレーション例)
- 図 6.8 舵減揺制御装置用計算機の外観 (ROM稼働版)
- 
- 写真 6.1 舵減揺制御装置の外観
- 写真 6.2 タッチパネル表示例  
(制御ゲイン作成に関する表示)
- 写真 6.3 舵減揺制御装置 (ROM稼働版) の外観

表 6.1 舵減揺制御装置用計算機の仕様

項 目	仕 様
CPU	プロセッサ 180386 (20MHz) & i80387 (20MHz)
メモリ	キャッシュメモリ 32k バイト
	メモリ容量 標準 4Mバイト
	ROM 64kバイト
内部補助記憶装置	3.5インチフロッピーディスク装置 1.2Mバイト (2HD) , 720kバイト (2DD)
	3.5インチハードディスク装置 100Mバイト
標準インターフェイス	RS-232Cインターフェイス 2チャンネル
P I/O装置	デジタル入出力カード DI 16点 (うち8点は割り込み機能付き) , DO 16点
	P I/Oインターフェイス 8ビットバスPI/Oインターフェイス, 16ビットバスPI/Oインターフェイス, シリアルPI/Oインターフェイス
通信インターフェイス	端末インターフェイス RS-232C 4チャンネル (2チャンネルはRS-485に変更可能) , (調歩同期のみサポート)
	通信インターフェイス BSC/ベーシック手順 2チャンネル
	GP-IBインターフェイス 2チャンネル
LANインターフェイス	イーサネット・チパネットインターフェイス 1回線
周囲条件(基本部)	温度,湿度 5° ~40°C , 20~80% RH
ソフトウェア	OS リアルタイムUNIX : RTUX/386
	言語 C , BASIC , FORTRAN
その他	標準機能 RAS診断機能、カウンタ機能、ON/OFFリモートパワー機能、リモートインシャリス機能
	寸法,電源 480(W) (取手含) ×149(H)×414.5(D)mm , 100VAC±100% (47~63Hz)

表 6.2 舵減揺制御装置用入出力装置の仕様

型式	点数	コモン 点数	定 格	応答		OFF/ON レベル	表示	絶縁	内部 電流 (+5v時)	外部 電流
				ON ディレー	OFF ディレー					
DC入力	16	8	12~30VDC 10mA(24V)	10ms	15ms	4.8/9.6V	○	PC	50mA	--
DC出力	16	8	10~30vdc 0.5A/点 5A/8点	1ms	1ms	--	○	PC	140mA	24VDC 50mA
アナログ入力	8	2	±10VDC,1~5VDC 4~20mADC, ±2000カウント 0~4000 カウント	変換速度 2.2ms/8点		精度 ±0.2%	×	PC	250mA	
アナログ出力	2	1	±10VDC, ±20mA ±2000カウント	変換速度 1ms		精度 ±0.2%	×	PC	100mA	24VDC 200mA

表 6.3 舵減揺制御装置用タッチパネルの仕様

CPU, NDP	i80C286(16MHz), i80C287	
メモリ	BIOS+ROM (DOS)	128KB
	アプリケーション用ROM DISK	128KB~512KB
	メインメモリ (DRAM)	1MB
BIOS	IBM PC/AT	
OS	MS-DOS ROM Version3.22	
FEP	ROM化辞書 12万語	
表示機能	ELディスプレイ (16階調) 640×480 ドット	
インターフェイス	タッチパネル	16×12 + ファンクションキー
	メモリーカード	JEIDA Ver4.0 準拠
	シリアル	RS-232C準拠 × 2ch, RS-485準拠 × 1ch
	プリンタ	セントロニクス準拠
拡張性	PC/AT ハーフサイズボード 2スロット	
電源	AC85~125V 50/60Hz 消費電力 130VA	
サイズ (mm)	310(W)×270(H)×120(D)	

表 6.4 横揺角速度検出用振動ジャイロの仕様

項 目	仕 様
最大入力角速度	$\pm 200 \text{ }^\circ / \text{S}$
スケール・ファクタ	約 $50 \text{ mV} / (\text{ }^\circ / \text{S})$
分解能	$0.02 \text{ }^\circ / \text{S}$
直線性	0.2% FS.
出力信号	アナログ直通電圧
出力インピーダンス	$100 \text{ } \Omega$ 以下
周波数特性	50 Hz (-3db)
起動時間	約 1 秒
使用温度範囲	$-10 \sim 70 \text{ }^\circ \text{C}$
耐振動性	JIS D1601 3 類 A種準拠
耐衝撃性	50 G 11msec
電 源	+ 15 V 15mA - 15 V 15mA
外形寸法	66(L) × 55(D) × 32(H) mm

表 6.5 舵減揺制御装置用計算機の仕様 (ROM稼働版)

項 目	仕 様
メインプロセッサ	i80386SX (16MHz)
数値演算プロセッサ (オプション)	i80387SX (16MHz)
ブートROM	128kバイト
メインメモリ	4Mバイト
ファイルシステムメモリ (FS-ROM/RAM)	2Mバイト (ROM/RAM 混在可) RAM設定時は電池によりバックアップ
メインテナンスポート	1ポート RS-232C
SIOインターフェイス	1ポート RS232C
DI/DOインターフェイス	絶縁入出力 2チャンネル×2
FDDインターフェイス	1ドライブ接続可
カレンダークロック	日付、時計機能 電池によりバックアップ
I/Oスロット	PC/ATバス 2スロット J/3100バス 1スロット
動作温度	0~50℃
動作湿度	10~90%RH (結露しないこと)
寸法, 重量	288×149×408 , 8kg
定格入力電圧, 周波数範囲	100VAC (47~63Hz)

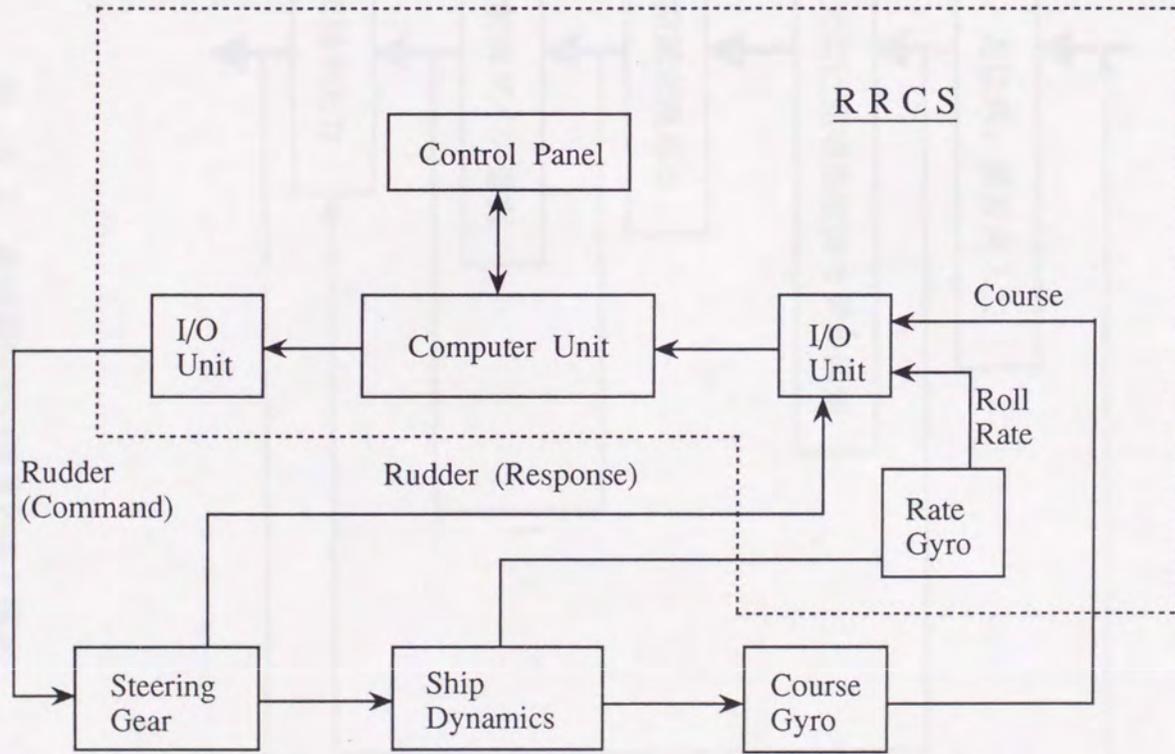


図 6.1 舵減揺制御装置による操舵システム

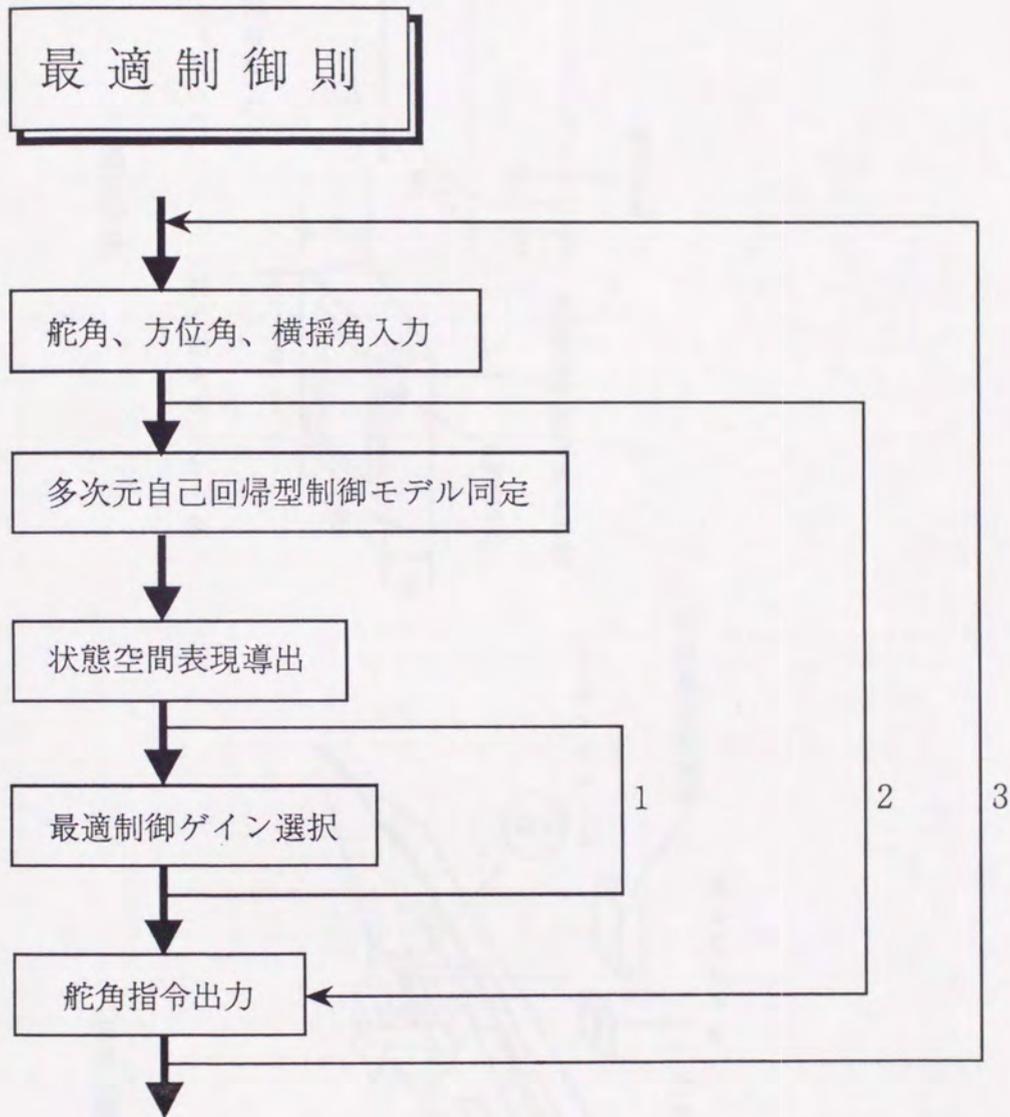
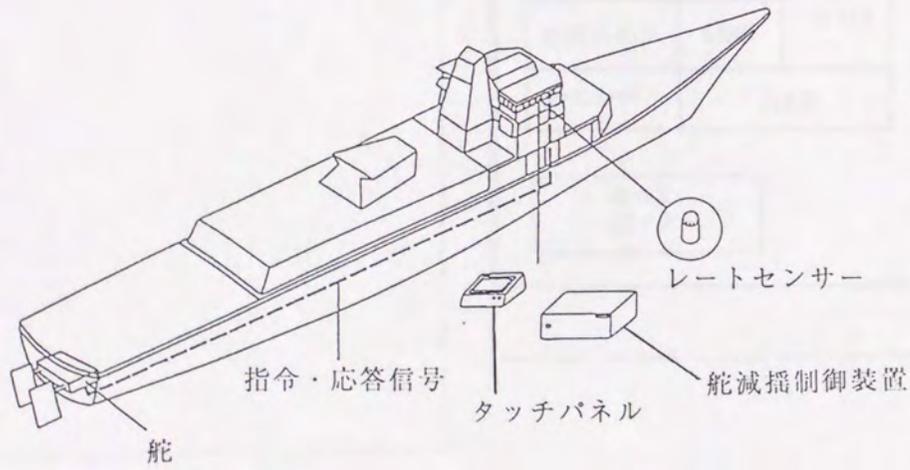


図 6.2 舵減揺制御の演算内容と構成

[舵減揺装置設置例]



[外形寸法]

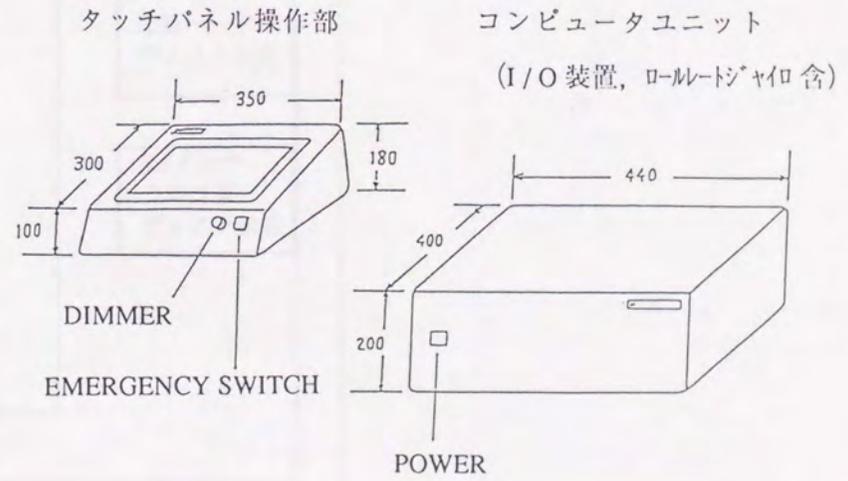


図 6.3 舵減揺制御装置の設置例および構成

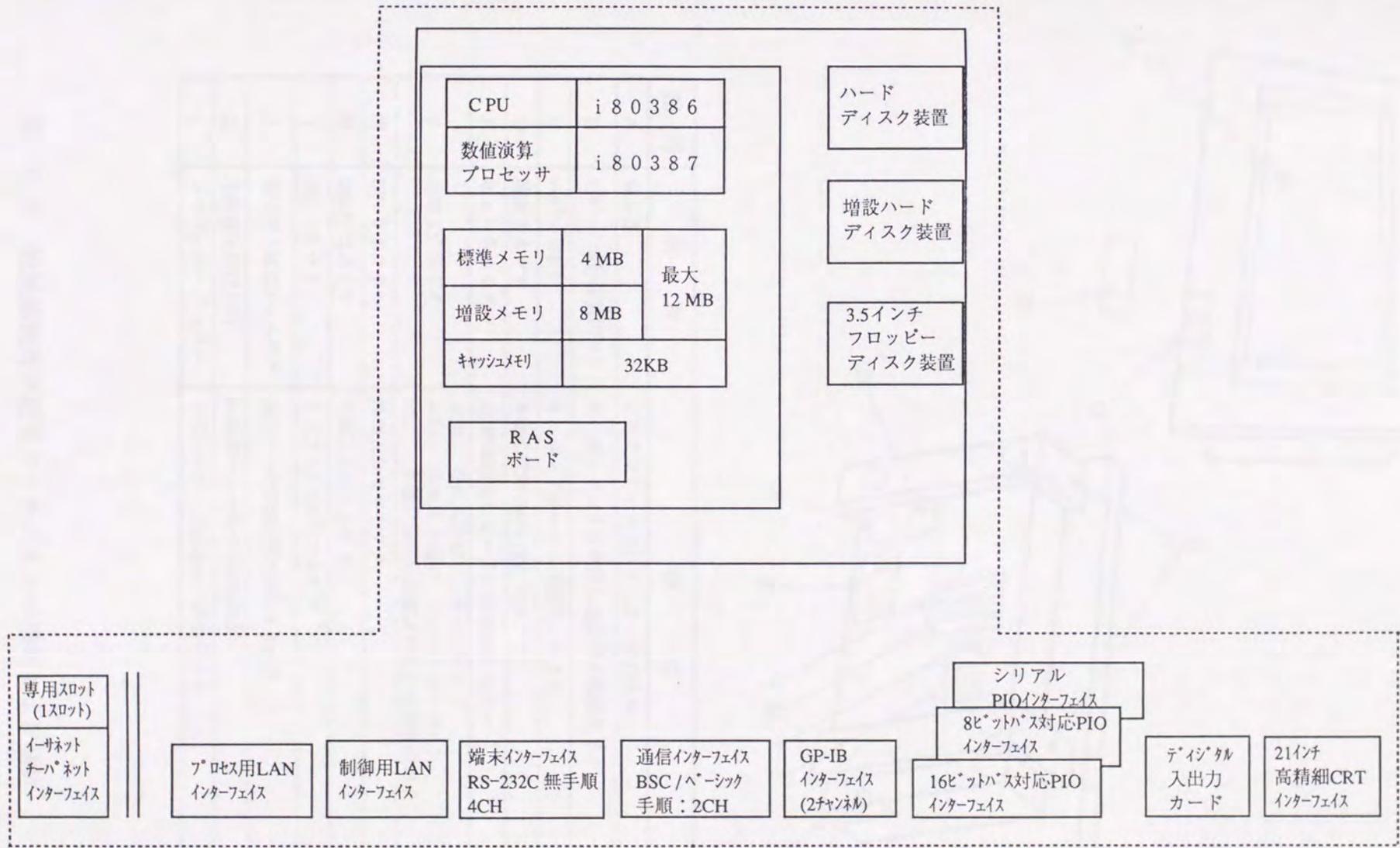
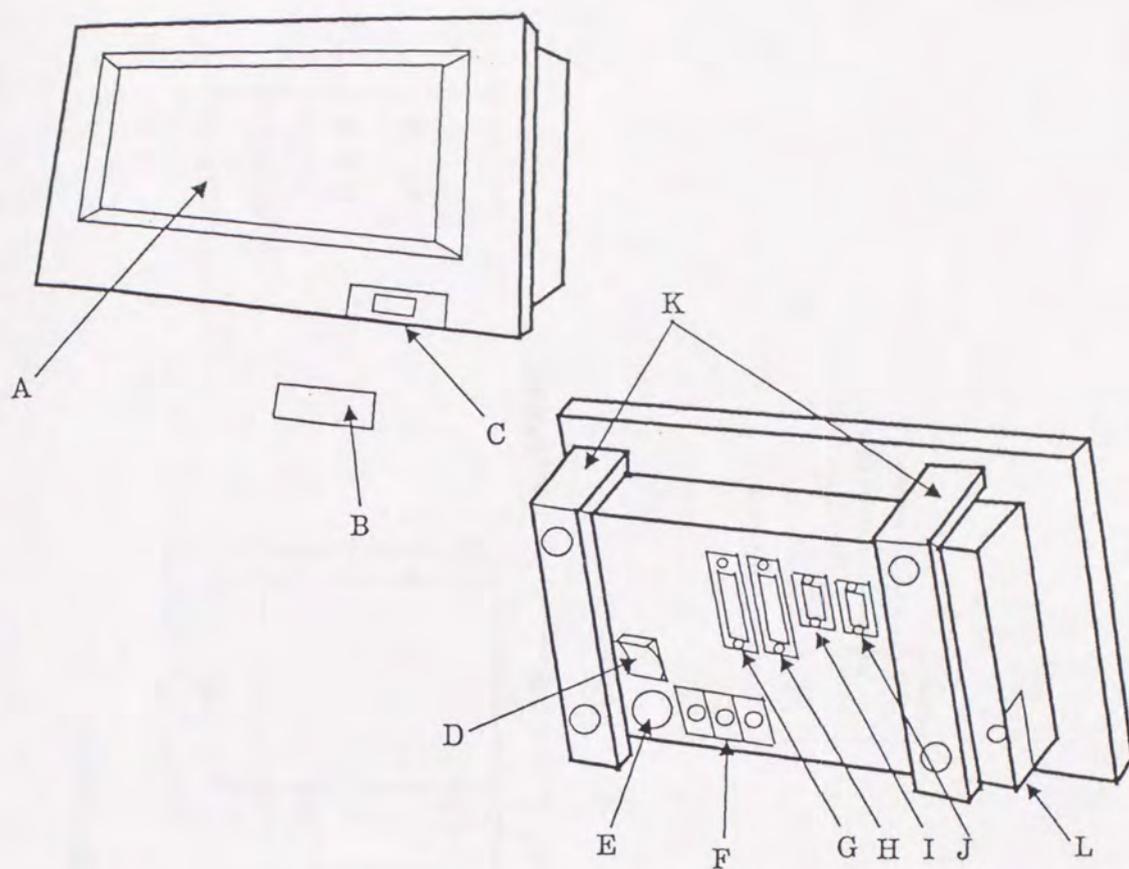


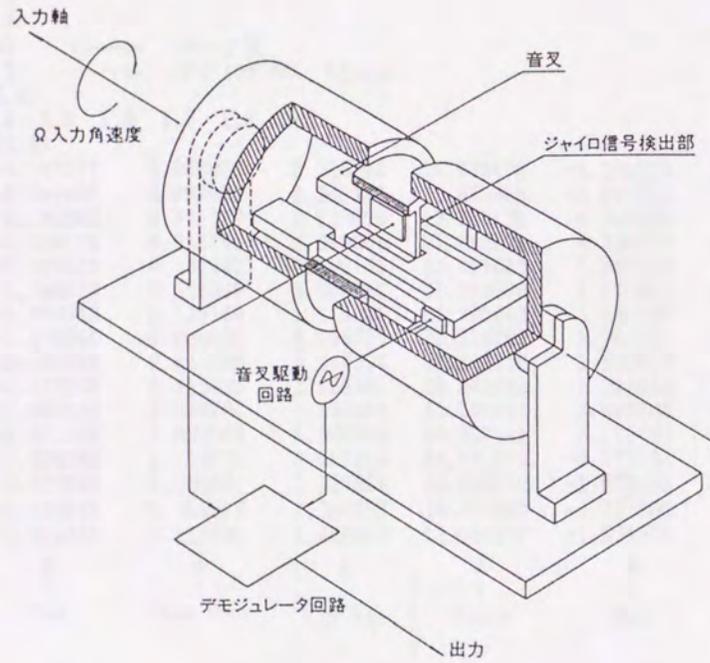
図 6.4 舵減揺制御装置用計算機の機能および構成



記号	名称	機能
A	表示部	プラズマディスプレイとタッチパネル
B	キーボードコネクタ保護用フタ	キーボードコネクタ差し込み口の保護用フタ
C	キーボードコネクタ	キーボードケーブル接続用コネクタ
D	電源スイッチ	本機の電源 ON / OFF 用スイッチ
E	ヒューズホルダー	AC側保護用ヒューズ2A装着用ホルダー
F	電源入力端子台	AC(L) 交流入力端子 ライブライン AC(N) 交流入力端子 ニュートラルライン FG 本機の筐体に接続されている接地用端子
G	DIN コネクタ	外部入力用コネクタ
H	DOUT コネクタ	外部入力用コネクタ
I	SIO コネクタ	シリアル I / F 用コネクタ
J	保守用 VIDEO コネクタ	保守用 VIDEO 信号出力用コネクタ
K	本体取り付け金具	本体のパネル取り付け用金具
L	メモリーカードカバー	メモリーカード差し込み口保護用フタ

図 6.5 舵減揺制御装置用タッチパネルの機能および構成

[作動原理図]



[外形寸法図]

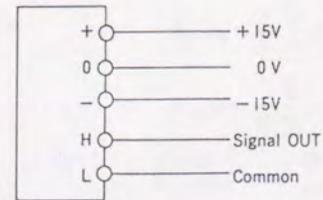
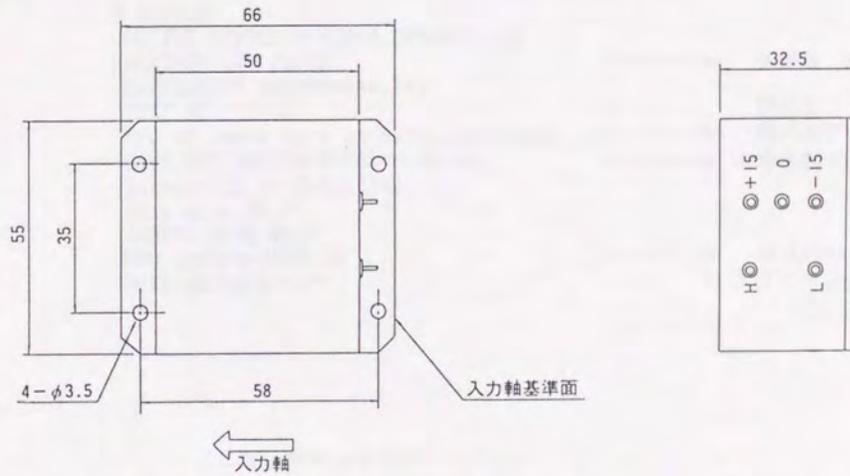


図 6.6 横揺角速度検出用振動ジャイロの原理および外形図

[収録データの例]

```

$ pg rr14.dat
00014
6
703   → データ数
0.5   → サンプリング時間 0.5 sec
(6F5.1)
1.0 1.0 1.0 1.0 1.0
(6F12.6)
-6.347657  0.000000  0.916748  14.530470  -0.349121  1.346436
-6.347657  0.000000  0.949707  16.659380  -0.061035  1.394043
-6.185303  0.324707  0.830078  18.905470  0.295410  1.150889
-5.930176  0.510254  0.917969  21.092970  0.646973  1.396404
-5.837403  0.185547  0.670166  23.241409  1.059570  1.470947
-5.744629  0.185547  0.906902  25.389839  1.477051  1.223145
-5.675049  0.139160  1.174316  24.706249  1.591797  1.180420
-5.675049  0.000000  0.396728  22.518749  1.708984  0.726318
-5.466309  0.417480  0.986328  20.477730  1.525879  0.122070
-5.257569  0.417480  1.320801  20.946480  1.303711  0.118408
-5.002442  0.510254  1.633301  21.024611  0.825195  -0.574951
-4.492108  1.020500  1.621094  18.837111  0.175781  -0.683594
-3.935547  1.113281  1.699219  19.032419  -0.573731  -0.601807
-3.587647  0.695001  1.437988  16.630079  -1.054688  0.047607
-2.915039  1.345215  1.547852  14.579300  -1.291504  1.066895
-2.358399  1.113281  1.428099  13.495310  -1.054688  1.405596

```

↑                    ↑                    ↑                    ↑                    ↑                    ↑

Yaw                  Yaw Rate        Yaw Rate        Rudder            Roll              Roll Rate

[相関関数の計算例]

```

$ correl
OUTPUT DEVICE ? (LP=0,CRT=6(I1))6
MAXIMUM LAG NO=10
EXPERIMENT NO(XXXXXXXXXX)=1
TEST NO (I5)=1
Nr. of input data in calculating=500
DATA SET NAME(MAX=20)=rr10.dat
Integer(1) or Real(2)=2
Skip data Nr.=
Reject data Nr.=
Key control=100110
Data write(0/1)?=

```

→ ラグ数 lag

→ 読み込む  
時系列データ数 N

→ 時系列データファイル名  
(実船試験採集データ)

→ 時系列の6種類のデータのうち  
3つを読み込む  
(Yaw, Rudder, Roll)

ここで、求めるものは

自己相関関数  $R_{xx}(k)$  と、相互相関関数  $R_{xy}(k)$   
( $k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm lag$ )

入力したラグ数

$$R_{xx}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) x(n+k)$$

$$R_{xy}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x(n) y(n+k)$$

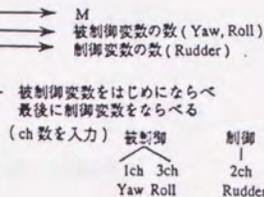
( $x(n)$ :            ( $n = 1, 2, \dots, N$ )  
( $y(n)$ :            ( $n = 1, 2, \dots, N$ )

図 6.7 (1) 舵減揺制御プログラムにおける計算出力例

```

$ armdl
OUTPUT DEVICE ? (LP=0,CRT=6(I1))6
MAXIMUM ORDER OF MODEL(UPPER LIMIT=19)=10
NO OF CONTROLLED VARIABLES=2
NO OF CONTROL VARIABLES=1
THE CHANNEL ORDER(INW)(10I1)=132
DETAIL OUTPUT?

```



k次元の定常時系列  $x(n) = \begin{pmatrix} x_1(n) \\ x_2(n) \\ \vdots \\ x_k(n) \end{pmatrix}$  について

一般的な自己回帰モデル表現(k次元)は

$$x(n) = \sum_{m=1}^M A(m)x(n-m) + U(n)$$

状態空間表現で表すと

$$Z(n) = \Phi Z(n-1) + \Gamma Y(n-1) + W(n)$$

- Zn: 時刻 n の状態
  - Zn-1: 時刻 n-1 の状態
  - Yn: 制御変数
  - Wn: 雑音 (ホワイトノイズ)
  - Φ: 制御変数に関する係数
  - Γ: 制御変数に関する係数
- この係数 Φ, Γ の推定を行う

```

AUTO REGRESSIVE MODEL FITTING FOR CONTROL
EXPERIMENT NO= 1. TEST NO= 1
*****
* DATA LOG *
*****

```

```

NUMBER (N)= 500 DATA. → データ数
CONTROLLED VARI. (R)= 2 CH. → 制御変数の数
MANIPULATED VARI. (L)= 1 CH. → 制御変数の数

```

FITTING UP TO THE ORDER M= 10 IS TRIED



最終予測誤差  $FPEC(M) = |dr.M| \frac{1+M/N}{1-M/N}$

I	FPEC	RFPEC
0	.119500+01	.100000+01
1	.190350-01	.159290-01
2	.101910-02	.852860-03
3	.990460-03	.828070-03
4	.997060-03	.834390-03
5	.985060-03	.824340-03
6	.982580-03	.822270-03
7	.967350-03	.809520-03
8	.960250-03	.810280-03
9	.979350-03	.819570-03
10	.995080-03	.832730-03

MINIMUM FPEC= .967350-03 MINIMUM RFPEC= .809520-03 ATTAINED AT M= 7

定常時系列の状態空間表現の式  $Z(n) = \Phi Z(n-1) + \Gamma Y(n-1) + W(n)$

AUTO REGRESSIVE MODEL

MODEL ORDER= 7 AIC=

M	A(I, J)		
1	1.50431125	-.00731857	-.00179024
1	-.05861925	1.56823552	.10139919
2	-.47077494	-.01930493	.01303895
2	-.01331567	-.75219439	-.00245740
3	-.14258677	.00602792	.03339669
3	.07313008	-.20633203	-.07700866
4	-.12573500	-.02591850	.07007486
4	.10612975	-.06130186	.00122043
5	.21382933	.02437671	-.11564866
5	-.11378244	.09956532	.06688713
6	.04706537	-.07514915	-.05160603
6	.18602025	.12159409	-.12103950
7	-.00942065	.02717167	.02052363
7	-.24609419	-.14046054	.01158279

Zn: システムの状態  
Yn: 制御変数  
Wn: 雑音 (ホワイトノイズ)  
Φ: 制御変数に関する係数  
Γ: 制御変数に関する係数

行列 dr.M は、制御変数に対応する r × r 行列でホワイトノイズ共分散の推定値を与える

INNOVATION MATRIX OSD (II, JJ)

II	1	2
1	.132580-01	.178580-02
2	.178580-02	.513760-01

Yaw に関する Roll に関する

r × r 行列 dr.M (2 × 2)

r × r 行列の行列式の値  
r: 制御変数の数

図 6.7 (2) 舵減揺制御プログラムにおける計算出力例 (自己回帰モデルの推定例)

```

$ optdes
OUTPUT DEVICE ? (LP=0,CRT=6(I1))6
Nr. of D.P. Stage=10
Q MATRIX
Weight to 1-CH XXX.XX
1.0
Weight to 2-CH XXX.XX
1.0
R MATRIX
Weight to 1-CH XXX.XX
1.0

```

評価関数 → できるだけ少ない制御入力で目標値からの偏差を  
できるだけ小さくする

2次評価関数

$$J_k(Z(0), Y) = E \sum_{n=1}^{\infty} [Z(n)^T Q Z(n) + Y(n-1)^T R Y(n-1)]$$

状態変数の  
完全停止状態  
からの偏差  
(Yaw, Rollの偏差)  
出力  
制御変数の  
操作量  
(Rudderの操作量)  
入力

において、JR を最小にするYS が最適制御を与える  
Q, R は、被制御変数、制御変数に対する重み行列

最適な制御入力  $Y_{m-i}$  を与える制御ゲイン  $G_i$  を決定する

$$Y_{m-i} = G_i Z_{m-i}$$

入力 | 状態  
 制御ゲイン

FILE NAME for OUTPUT GAIN=WORK2.DAT → 制御ゲイン格納用ファイル名の入力

```

Gain Matrix G
1 .5183496E-01
2 -.5831139E+00
3 -.3213487E-01
4 -.4154772E+00
5 -.9428211E-01
6 -.4622872E-01
7 -.3947947E-01
8 .2537827E+00
9 .1102988E+00
10 .4166205E+00
11 .3107516E+00
12 .4871918E+00
13 .3986279E+00
14 .4627157E+00

```

Y = QZ  
→ 制御ゲインG

Nr. of D.P. Stage=10

```

Q MATRIX
Weight to 1-CH XXX.XX → Yaw に対する重みを設定
1.0
Weight to 2-CH XXX.XX → Roll に対する重みを設定
1.0
R MATRIX
Weight to 1-CH XXX.XX → Rudder に対する重みを設定
1.0

```

Optimal Controller Design

Initial Condition

N= 500M= 7  
IR= 2L= 1NS= 10

Q1(I, J)

```

0 MATRIX 2 X 2
0 1 .10000E+01 .00000E+00
0 2 .00000E+00 .10000E+01

```

→ 被制御変数に対する重み行列  
Yaw, Roll

R(I, J)

```

0 MATRIX 1 X 1
0 1 .10000E+01

```

→ 制御変数に対する重み行列  
Rudder

First IR Columns Of Transition Matrix (AI'S)

```

0 MATRIX 14 X 2
0 1 .15043E+01 -.73186E-02
0 2 -.58619E-01 .16682E+01
0 3 -.47877E+00 -.19305E-01
0 4 -.13316E-01 -.75219E+00
0 5 -.14259E+00 .60279E-02
0 6 .73130E-01 -.20633E+00
0 7 -.12573E+00 .25818E-01
0 8 .10613E+00 -.61302E-01
0 9 .21383E+00 .24377E-01
0 10 -.11378E+00 .99565E-01
0 11 .47865E-01 -.75149E-01
0 12 .18683E+00 .12159E+00
0 13 -.89438E-01 .27172E-01
0 14 -.24688E+00 -.14046E+00

```

→ 状態空間表現の式  
 $Z(n) = \Phi Z(n-1) + \Gamma Y(n-1) + W(n)$   
の係数  $\Phi$  の再表示

Gamma Matrix (BI'S)

```

0 MATRIX 14 X 1
0 1 -.17982E-02
0 2 .10140E+00
0 3 .13939E-01
0 4 -.82457E-01
0 5 .33397E-01
0 6 -.77089E-01
0 7 .70075E-01
0 8 .81228E-01
0 9 -.11565E+00
0 10 .66987E-01
0 11 -.51687E-01
0 12 -.12104E+00
0 13 .28524E-01
0 14 .11583E-01

```

→ 同式の係数  $\Gamma$  の再表示

図 6.7 (3) 舵減揺制御プログラムにおける計算出力例  
(最適制御ゲインの推定例)

```

$ optsim
OUTPUT DEVICE ? ( LP=0, CRT=5(I1))6
Nr. of simulation=500
PRINT TIME HISTORY(OFF=1,ON=2)?=1
Input gain file name=WORK2.DAT
    
```

→ シミュレーション時系列の数を入力

→ 制御ゲインファイルの読み込み

```

Optimal Control Simulation
Initial Condition
N= 500M= 7IR= 2L= 1NS= 500
Q1(I,J)
0 MATRIX 2 X 2
0 1 .10000E+01 .00000E+00
0 2 .00000E+00 .10000E+01
    
```

→ Q 重み行列の再表示

```

R(I,J)
0 MATRIX 1 X 1
0 1 .10000E+01
    
```

→ R 重み行列の再表示

```

First 14 Columns Of Transition Matrix (AI"S)
0 MATRIX 14 X 2
0 1 .15043E+01 -.73186E-02
0 2 -.50619E-01 .16602E+01
0 3 -.47077E+00 -.19305E-01
0 4 -.13316E-01 -.75219E+00
0 5 -.14259E+00 .60279E-02
0 6 .73130E-01 -.20633E+00
0 7 -.12574E+00 .25918E-01
0 8 .10613E+00 -.61302E-01
0 9 .21303E+00 .24377E-01
0 10 -.11370E+00 .99565E-01
0 11 .47065E-01 -.75149E-01
0 12 .10603E+00 .12159E+00
0 13 -.89430E-01 .27172E-01
0 14 -.24608E+00 -.14046E+00
    
```

→ 係数 A の再表示

```

Gamma Matrix (BI"S)
0 MATRIX 14 X 1
0 1 -.17902E-02
0 2 .10140E+00
0 3 .13939E-01
0 4 -.02457E-01
0 5 .33397E-01
0 6 -.77009E-01
0 7 .70075E-01
0 8 .01220E-01
0 9 -.11565E+00
0 10 .66907E-01
0 11 -.51507E-01
0 12 -.12104E+00
0 13 .28524E-01
0 14 .11503E-01
    
```

→ 係数 B の再表示

```

GAIN MATRIX
0 MATRIX 1 X 14
0 1 .51035E-01 -.60313E+00 -.52195E-01 -.41540E+00 -.94202E-01 -.46221E-
01 -.39479E-01 .25378E+00 .11030E+00 .41662E+00
    
```

→ 制御ゲインの再表示

```

Time series output file=WORK3.DAT
FILE NUMBER=1
Sampling rate(FS.1)=0.5
Starting Number For Generator 53 95 27 4
    
```

→ シミュレーション時系列格納ファイル名を入力

→ サンプルングタイムの設定(0.5sec)

```

INS= 1
I X(I) W(I)
1 -.14440E+00 -.14440E+00
2 -.23595E+00 -.23595E+00
I Y(I)
1 .15369E+00
INS= 2
I X(I) W(I)
1 -.21611E+00 -.21201E-03
2 -.22535E+00 .14421E+00
I Y(I)
1 .65125E-01
INS= 3
I X(I) W(I)
1 -.24033E+00 .51072E-03
2 .31331E+00 .50325E+00
I Y(I)
1 -.30605E+00
    
```

→ ホワイトノイズ W(I) 作成用の乱数の初期値

→ ホワイトノイズ

→ Yaw Rudder Roll

	Mean Of X	Sum Of X**2	Mean Of Y**2	Variance Of X	
I	Mean Of X	Sum Of X**2	Mean Of Y**2	Variance Of X	分散
1	-.71985E-01	.11608E+03	.23375E+00	.22857E+00	→ Yaw
2	.11566E-01	.12704E+04	.25560E+01	.25566E+01	→ Roll

	Mean Of Y	Sum Of Y**2	Mean Of Y**2	Variance Of Y	
I	Mean Of Y	Sum Of Y**2	Mean Of Y**2	Variance Of Y	分散
1	.52071E-02	.20525E+03	.41050E+00	.41047E+00	→ Rudder
1	-.7190507E-01	.1160761E+03	.2337522E+00	.2285703E+00	→ 上記のまとめ
2	.1166501E-01	.1270392E+04	.2556704E+01	.2556640E+01	
1	.5207061E-02	.2052513E+03	.4105025E+00	.4104746E+00	

分散

分散の√をとったものが偏差になる  
 よって、これらの分散が小さくなるような  
 制御ゲインを選び出す

図 6.7 (4) 舵減揺制御プログラムにおける計算出力例  
 (白色雑音によるシミュレーション例)

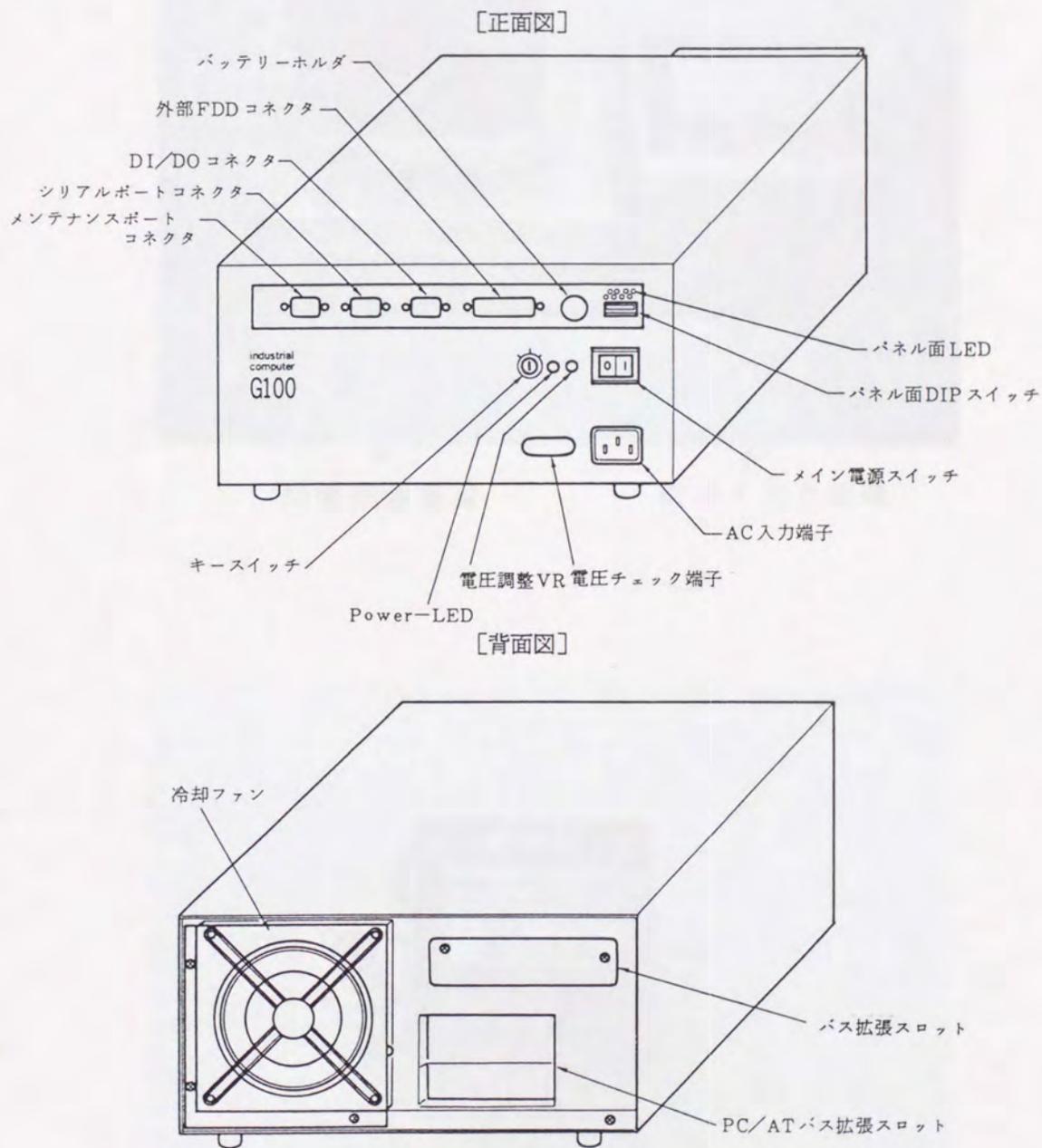


図 6.8 舵減揺制御装置用計算機の外観 (ROM稼働版)

モニター用CRT  
↓

操作用タッチパネル  
↓



↑  
制御演算装置

↑  
信号入出力装置



↑  
横揺角速度検出用  
レートジャイロ

写真 6.1 舵減揺制御装置の外観

(制御ゲイン作成に関する表示)

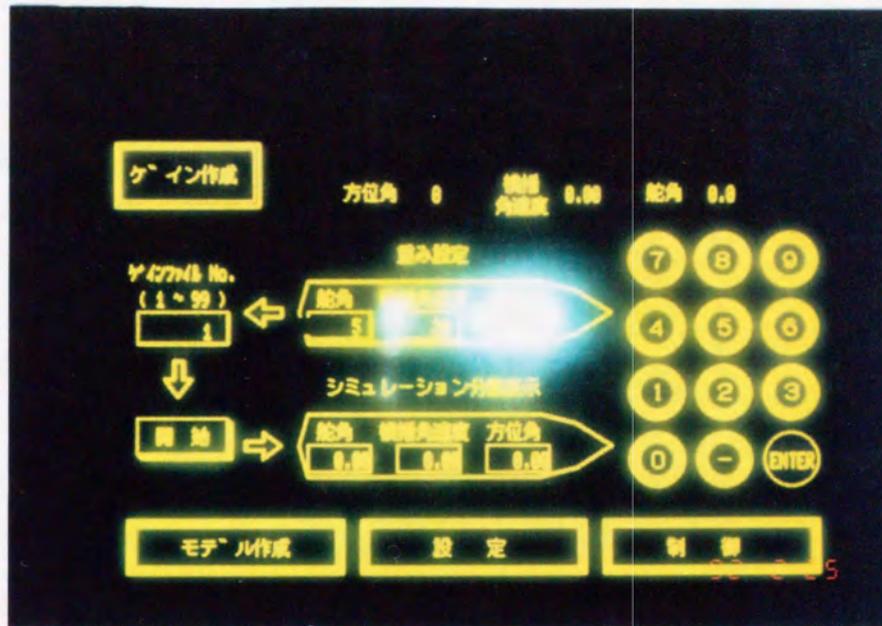


写真 6.2 タッチパネル表示例

小型操作装置

信号入出力装置



制御演算装置

写真 6.3 舵減揺制御装置の外観  
(ROM稼働版)

## 第7章 実船による舵減揺制御実験

### 7.1 緒言

第6章で試作開発した舵減揺制御装置を用いて3隻の異なるタイプの船舶によって、舵による横揺減揺制御実験、変針実験及び舵又はフィンスタビライザによる強制動揺からの減衰実験などを実施した。

本章では、3隻の船舶による舵減揺制御実験の結果を示すとともに、得られたデータの統計解析を行う。なお、解析にあたっては第3章で説明した統計的な方法を用いることによって、本章で取り扱うようなフィードバック系に対して、偏りのない解析結果を与えることができる。

解析を行うに際しては、本論文で述べる舵減揺制御装置と従来のオートパイロットとの

- (1) 制御結果の比較
- (2) 制御方法の相違

などに視点を置いて検討する。また、同時に横揺における

- (3) 連成運動の特徴
- についても検討する。

なお、図表の記載においては今後、舵減揺制御装置による制御システムをRRCS (Rudder Roll Controll System) と略記する。

## 7.2 実船実験供試船

本章で舵減揺制御装置を搭載して実船実験を行う3隻の船舶について、それらの主要目を表7.1、横揺減減係数を表7.2に示す[7.1]、[7.2]。また、A船及びB船については、それらの一般配置図を図7.1、全景を写真7.1に示す。

これらの船舶の特徴をまとめて以下に示す。

- (1) A船は小型の練習船で、通常一枚舵を持つ船舶、B船は横揺減揺装置として、アンチローリングタンク (ART) を装備し、舵はフラップ舵そしてC船は2軸2舵で、非格納式フィンスタビライザを装備している。
- (2) A船、B船及びC船はいずれも、ビルジキールを標準装備しており、ブロック係数 ( $C_b$ ) はA船が0.56、B船が0.53そしてC船が0.5で同程度である。
- (3) 横揺の固有周期は、A船が最も短く6~7 (sec)、B船及びC船は10~11 (sec) 程度である。
- (4) 通常航海時の速力はA船が約14 (k'ts)、B船が16 (k'ts) そしてC船は18 (k'ts) 程度である。
- (5) 横揺減衰力を評価する一つの規準としての、横揺減減係数の一次の係数は、A船の場合が0.18、B船で0.25そしてC船で0.31であり、A船、B船、C船の順に横揺減衰力は大きい。

### 7.3 A船による舵減揺制御実験

本船は、舵減揺制御装置の開発当初より制御対象としてきた船であり、練習船であるとともに研究船でもあるため、船体運動測定装置以外にも数々の測定装置、制御用コンピュータを中心としたLANシステム等が装備されており、このような開発実験に最適の船である。

本船用の舵減揺制御装置を製作する段階で、最初に必要となる制御モデル作成用のランダム操舵によるデータ収録では、全て本船に装備のセンサーから得られた信号を用いた。方位角信号はジャイロレピータ、舵角応答信号は操舵装置、そして横揺角速度信号は本船搭載のレートジャイロから収録した。

舵減揺制御装置から出力される操舵信号の基本周期は0.5秒間隔とした。この制御周期は、本船でのこれまでのオートパイロット設計段階での経験及び横揺、船首揺のスペクトルのピーク周波数の位置から決定した。なお、舵減揺制御の実船実験にあたっては、舵角リミットを7度に設定して行った。実験システムの構成を図7.2、実験状況を写真7.2示す。

#### 7.3.1 実験目的及び実験手順

A船による実船実験では、開発した舵減揺制御装置が保針制御を行いながら、どの程度の横揺減揺効果が得られるかを種々の制御ゲインを用いて確認することに実験の主眼をおいた。また、本制御装置を変針操舵に用いた場合の制御効果などについても確認した[7.3]。

本船の横揺固有周期を求めるために、静穏な海域において約13(k'ts)で航走し、舵角を変えながら種々の周期で正弦操舵を行いその時の横揺角を測定した。図7.3は周期操舵による横揺応答特性である。この結果、本船の横揺同調周期は船速が約13(k'ts)で6~7秒程度であることが判る。

ここで、舵減揺制御の予測制御に用いる制御型自己回帰モデルを作成するために、ランダム操舵を行った。ランダム操舵は、操舵手に大体の針路を指

示し大きくその針路を逸脱しない範囲でできるだけ多くの周波数の要素を含むような操舵を依頼して行った。収録データは方位角、横揺角速度、応答舵角などを、0.5秒毎にサンプリングした900点の時系列から構成されている。これらの時系列は第5章の図5.1に示したものである。

このようにして得られたランダム操舵時のデータに対して、第4章で示した制御型自己回帰モデルをあてはめ、表5.1に示す4次モデルを得た。この制御型自己回帰モデルをもとに、第4章で述べた方法に従って種々の制御ゲインを用いて白色雑音によるシミュレーションを行った。種々の制御ゲインを用いて行ったシミュレーションによる各変数の標準偏差とランダム操舵時の各変数の標準偏差をあわせて表5.2に示した。

第5章において得られた結果をまとめると、表5.2から

- (1) 横揺角速度に重みを置いた場合は、その変動量は減少すること、
  - (2) 方位角に重みを置いた場合は、その変動量は減少すること、
  - (3) 横揺角速度あるいは方位角に重みを置いた場合は、操舵量は増加する傾向にあること、
  - (4) ランダム操舵時に比べるといずれの変数も減少していること、
- などが判る。

次に、ランダム操舵と白色雑音による制御シミュレーション（[方位角  $O_1$  : 横揺角速度  $O_2$  : 舵角  $R$ ] = [1 0 : 5 0 : 1]）による時系列の比較を図7.4に示す。この図からランダム操舵に比べて、横揺減揺制御を行ったシミュレーションの方が、横揺角速度は減少していることが判る。さらに、方位角と横揺角速度を制御しているシミュレーションでは、舵角が方位角変動及び横揺固有周期の成分を含んでいることも判る。

これらの前評価を行った結果、保針性能を保持しながら横揺減揺効果が得られることが立証されたので、同じ制御ゲインを用いて実船実験を行うこととした。実船実験では、本船のオートパイロットと舵減揺制御装置を交互に切り替えて10分程度づつ操舵しながらデータを収録した。従って、一連の

実験は横揺の減揺効果が比較できる程度にはほぼ同じ気象、海象状態で行ったと考えることができる。

また、舵減揺制御装置による実験時に用いた横揺角速度の信号は、本装置内蔵の横揺角速度センサーから得たものであり、本船搭載のレートセンサーからのデータは使用していない。

### 7.3.2 舵減揺制御実験結果

表 7.3 に示す制御ゲインを用いて実施した、実船実験結果をまとめて表 7.4 に示す。この表において、例えば S 3 0 0 から S 3 0 3 までは一つの実験シリーズとして比較することが可能である。また、A P はオートパイロット、R R C S は舵減揺制御を表している。

海象状況は船から見ると、S 3 0 0 から S 3 0 3 までは、比較的大きなウネリを船首斜め方向から受けた状態、S 3 0 5 から S 3 0 8 は、比較的大きなウネリを船尾斜め方向から受けた状態、S 3 1 0 から S 3 1 6 は、ウネリを船尾斜め方向から受けた状態そして S 3 1 8 から S 3 2 0 は、ウネリも少なく静穏な状態であった。表中には方位角 (Yaw)、横揺角 (Roll)、横揺角速度 (Roll Rate)、舵角 (Rudder) の標準偏差を示すとともに、横揺角速度に関する減揺効果を減少率 (%) で評価した値である。なお、本論文では、目標方位からの偏差分を方位角 (Yaw) と表現している。

ここで、横揺減揺効果を示す減少率 (%) は、舵減揺制御時の横揺角速度 (R R C S) の標準偏差と、同じシリーズのオートパイロット (A P) による横揺角速度の標準偏差を使って

$$\text{Reduction} (\%) = \frac{\text{AP} - \text{RRCS}}{\text{AP}} * 100 \quad (7.1)$$

によって定義した値である。

図 7.5 及び図 7.6 に、本船オートパイロットと舵減揺制御による代表的な実験例を比較した時系列を示す。図 7.5 が向かい波状態、図 7.6 が追い

波状態であり、図中上から方位角 (deg)、横揺角速度 (deg/s)、舵角 (deg) の順に示してある。

また、図 7.7 はそれぞれの実験時の船速 (電磁ログ) の時系列である。図 7.7 [A-1]、図 7.7 [B-1] はそれぞれ向かい波状態での、オートパイロットと舵減揺制御、そして図 7.7 [A-2]、図 7.7 [B-2] はそれぞれ追い波状態でのオートパイロットと舵減揺制御の場合である。

### 7.3.3 舵減揺制御効果とその分析

表 7.4、図 7.5 及び図 7.6 から判断できるように、舵減揺制御による実船実験から初期の目的を達していると言える。すなわち、表 7.4 で比較できる同じ実験シリーズ内の、本船オートパイロットによる場合と舵減揺制御による場合を比べると、いずれも横揺角速度の減少率が正であり、横揺に関しては減揺効果が充分発揮されていることが判る。

また、舵減揺制御の場合、方位角の変動は本船オートパイロット (図 7.5 [A-1]、図 7.6 [A-1]) に比べて標準偏差は大きくなるが、図 7.5 [A-2] 及び図 7.6 [A-2] の変動を見ても判るように、その程度は許容できる範囲であり、乗組員にとって操船するうえで特に不安を与えることはない。

以上から、舵減揺制御は本船のオートパイロットに比べて若干方位角変動の増加はあるが、20~40 (%) 程度の横揺減揺効果があることが判る。

ただし、本船の場合は舵減揺制御における舵角量が大きく、また頻繁に取られているが、この原因は制御モデル構築時と制御実験の場合とで異なる横揺角速度のセンサーを用いたこと、さらに本船は3隻の実船実験対象船の中で横揺減減係数が最も小さく、一旦励起された横揺が短時間で減衰しにくいことも原因と考えられる。

図 7.7 の電磁ログによる船速の時系列からは、この頻繁な操舵による船速低下の現象は顕著には認められないが、操舵による抵抗増加は存在するものと考えられる。

舵減揺制御実験で収録した表7.4のデータのうち、代表的な実験ケースについて、得られた時系列をもとにスペクトル解析、雑音寄与率解析さらにインパルス応答解析を行い、舵減揺制御及び本船オートパイロットにおける操舵系の特性、さらに船首揺と横揺の連成影響などについて統計的な面からの分析を行う。

#### [1] スペクトルによる解析

向かい波中における本船のオートパイロット (S300) 及び舵減揺制御 (S301) による実験で得られた各変数のスペクトルを図7.8、追い波中でのオートパイロット (S308) 及び舵減揺制御 (S306) による各変数のスペクトルを図7.9にそれぞれ示す。なお、各スペクトルの横軸は、周波数 (Hz) そして縦軸は、有次元値を db 表示したものである。

向かい波及び追い波いずれの場合も、舵減揺制御が本船のオートパイロットと比べて最も異なるところは、舵減揺制御の場合には舵角のスペクトルピーク (図7.8 [C-2]、図7.9 [C-2]) が、横揺角速度のスペクトルピーク、すなわち横揺固有周期 (約6秒) とほぼ一致する点である。

通常のアートパイロットの場合 (図7.8 [C-1]、図7.9 [C-1]) は、舵角のスペクトルピーク的位置が方位角のスペクトルピーク周波数の位置に一致するが、舵減揺制御の場合は横揺角速度からのフィードバック制御を行っているため、図7.8 [C-2] 及び図7.9 [C-2] に見られるように横揺が顕著な場合は、スペクトルピークがこのように移動するものと考えられる。

#### [2] 雑音寄与率による解析

次に、上で得られたデータを用いて雑音寄与率の解析を行うことによって、船体運動の連成影響などについて解析を行う。

図7.10は、先の図7.8 [A-1]、[B-1]、[C-1]のスペクトル

解析で示した、向かい波状態におけるオートパイロット及び図7.8 [A-2]、[B-2]、[C-2]の舵減揺制御における方位角、横揺角速度及び舵角の各スペクトルに対する、自分自身も含む変数からのフィードバックループを介しての寄与の割合を示している。

また、図7.11はそれらのスペクトルが図7.9 [A-1]、[B-1]、[C-1]に対応する追い波状態でのオートパイロット及び図7.10 [A-2]、[B-2]、[C-2]に対応する舵減揺制御の図中の変数のスペクトルに対する雑音寄与率を示したものである。

これらの雑音寄与率と対応する各変数のスペクトルを比較することによって、次のようなことが判る。

図7.10 [A-1]、[A-2]及び図7.11 [A-1]、[A-2]の方位角に対する他の変数からの雑音寄与率を見ると、0.18 (Hz)付近において、特に横揺角速度からの影響を強く受けており、オートパイロット、舵減揺制御いずれの場合においても、横揺に伴う船首揺への影響が強いことが判る。

オートパイロット (図7.10 [B-1]、[B-2])あるいは舵減揺制御 (図7.11 [B-1]、[B-2])の場合にも、舵角から横揺角速度への影響を示す領域は狭く、操舵が横揺を誘起している様子は認められない。従って、両者とも比較的よくチューニングされており、無駄な舵の動きが少ないことが判る。

次に、オートパイロットあるいは舵減揺制御における舵角 (制御変数) の変動が、どのような船体運動 (被制御変数) をフィードバックすることによって生じているかを確認するために、図7.10 [C-1]、[C-2]及び図7.11 [C-1]、[C-2]の舵角に対する雑音寄与率について検討する。

図7.10及び図7.11では、舵減揺制御とオートパイロットを一对で比較すると、それぞれの図の[C-2]において、横揺角速度から舵角に対する寄与の範囲が広いことから、舵減揺制御は明らかに広い周波数帯から方位角のみならず、横揺角速度のフィードバック制御を行っていることが判る。

### [3] インパルス応答による解析

次に、スペクトル解析と同じデータを用いて、インパルス応答による解析を行い、船体運動の応答特性を明らかにする。

向かい波状態での、オートパイロット及び舵減揺制御による操舵時の方位角、横揺角速度及び舵角の各変数間のインパルス応答を図7.12、追い波状態でのインパルス応答を図7.13に示す。なお、各インパルス応答は50秒間分を表示した。

舵角から横揺角速度へのインパルス応答は、向かい波及び追い波いずれの状態でも、舵減揺制御（図7.12 [C-2]、図7.13 [C-2]）はオートパイロット（図7.12 [C-1]、図7.13 [C-1]）に比べて、横揺角速度の減衰がはやい様子が認められる。このことは、横揺を減衰させるような制御を行っている舵減揺制御の現われである。

また、図7.12 [A-2]あるいは図7.13 [A-2]のように、舵角から方位角に対する応答において、操舵系の特徴である定常偏差成分の残存が認められる。さらに、図7.12 [D-2]及び図7.13 [D-2]の横揺角速度に対する舵角応答系列からは、舵減揺制御ではマイナス舵角からプラス舵角を当て舵的に操舵していることが判る。

#### 7.3.4 変針実験結果

オートパイロット及び舵減揺制御で、30度変針を行った実験結果を図7.14に示す。図中で変針を開始した時点にstartマークを記入した。

図7.14 [A-1]から、オートパイロットの場合は変針完了までの時間は約45秒、行き過ぎ角は約1度であり、図7.14 [A-2]の舵減揺制御の場合は、変針完了までの時間は約50秒、行き過ぎ角は約2度であることが判る。このことから両者は同じような変針性能を有していることが判る。

また、変針中及び変針後も図7.14 [B-2]の横揺角速度は、舵減揺制御の方が、図7.14 [B-1]のオートパイロットより減衰が速く減揺効果のあることが判る。

これらの結果からも、舵減揺制御は操舵による初期傾斜を減少するような操舵をしており、このことが減揺効果をもたらしている要因であることが確認できる。

これらから、特にA船のような比較的小型の船舶が大角度の変針操舵を行うような場合には舵減揺制御は横揺減揺効果があり、より安全に変針することができると考えられる。

## 7.4 B船による舵減揺制御実験

本船の特徴は減揺装置として、減揺タンクを装備していること、そして舵としてフラップラダーを採用していることである。

本船による実験では、第6章で述べた舵減揺制御装置を搭載して、制御モデルから制御ゲインの作成までを船上でオンラインで処理し、その後直ちに舵減揺制御実験を行った。入力信号としては、本船の方位ジャイロコンパスからシンクロデジタルコンバータを介して方位角、舵減揺制御装置内蔵のレートセンサーから横揺角速度、そして舵角応答の各信号をアナログ信号として取り込んだ。

また、舵角指令はオートパイロット内部に設けた、スイッチを切り換えることによって操舵装置に出力した。各種データの入出力及び制御時間の間隔は、A船と同様で0.5秒で行った。なお、舵減揺制御の実船実験にあたっては、舵角リミットを7度に設定して行った。実験システム及び船上での実験手順の概略を図7.15、実験状況を写真7.3に示す。

### 7.4.1 実験目的及び実験手順

本船における舵減揺制御実験では、A船で制御モデル作成時と制御実施時に異なる横揺角速度センサーを用いて、解析結果の一部に不確定要素を残した事を考慮して、舵減揺制御装置内蔵のレートセンサーを採用した。また、本制御装置がオンライン制御を行いながら、同時に制御ゲイン作成、データファイリング及びモニタリングなど、複数のタスクを並行して処理できることも確認した[7.4]。

なお、本船は減揺タンクを装備しているため、舵による横揺減揺制御と減揺タンクを併用した場合の、主として安全性の観点から制御時の動作を確認した。

本船による実船実験では、舵減揺制御実験、変針実験及びマニュアル操舵による強制動揺からの舵減揺制御による強制動揺実験を実施した。また、本船は減揺タンクを備えているため、減揺タンクの空気バルブ開（減揺機能最大）、空気バルブ閉（減揺機能減少）及びタンク内の水を投棄した場合（減揺効果なし）について舵減揺制御実験を実施した。

舵減揺制御実験を開始するにあたって、制御モデル作成及び制御ゲイン決定のために、減揺タンクの空気バルブ開閉及びタンク内の水を投棄した状態でマニュアルによるランダム操舵を行った。それらの結果を、図 7.16 にまとめて示す。収録したデータは 0.5 秒サンプリングで 300 秒分の方位角、横揺角速度及び舵角応答である。

これらのランダム操舵のうちで、減揺タンクの空気バルブ閉の状態で行ったランダム操舵時のデータ（TK6）に対して、多次元自己回帰モデルをあてはめた結果 6 次のモデルを得た。

減揺タンクの異なる状態について、二次評価関数における各変数に対する重み係数を変化させた場合の白色雑音による制御シミュレーション結果を表 7.5 に示す。

表 7.5 [A] のシミュレーションの結果からも判るように、減揺タンクが機能している場合（バルブ開）は、減揺タンクによって横揺がかなり減揺するため、操舵による横揺減揺効果はあまり期待できない。

しかし、表 7.5 [B] の減揺タンクの機能が減少している場合（バルブ閉）及び表 7.5 [C] の減揺タンクが機能していない場合（タンク空）には 50（%）程度の横揺減揺効果が期待できることが判る。

これらのことを総合的に判断して、舵減揺制御装置による横揺減揺効果が期待されたため実船実験を行うこととした。

舵減揺制御実験は、得られたデータの評価が行いやすいように、同じような海象状況のもとで、舵減揺制御とオートパイロットを続けて交互に実施した。また、同じ制御ゲインを用いて、船速を 16 (k'ts) と 7 (k'ts) での舵減揺制御実験も行った。

#### 7.4.2 舵減揺制御実験結果

表7.6に示す制御ゲインを用いて実施した実船実験結果について、減揺タンクの状態、各変数の標準偏差そして横揺角速度に関する減揺効果などをまとめて表7.7に示す。海象状況は、船から見るとTK8からTK13は、小さなウネリを船首から受けた状態、TK19からTK21は、小さなウネリを右舷方向から受けた状態そしてTK40からTK44は、小さなウネリを船尾後方から受けた状態であった。

表中のAPは本船のオートパイロット、RRCSは舵減揺制御による操船を意味しており、減揺効果などについては、時間的に海象状況がほぼ同一と見なせる範囲、例えばTK8からTK10までを一組の実験として比較することができる。減揺効果は、A船と同様にオートパイロットに対する舵減揺制御の横揺角速度の標準偏差の減少率(%)で表現した。

減揺タンクの空気バルブを閉にした場合のオートパイロットと舵減揺制御による操舵時の方位角、横揺角速度及び舵角の時系列を図7.17、空気バルブを開にした時の時系列を図7.18、そしてタンク内の水を投棄した場合の時系列を図7.19に示す。各図の横軸は時間(時間=データ数\*0.5秒)、縦軸はそれぞれの有次元値である。

#### 7.4.3 舵減揺制御効果とその分析

表7.7を詳細に検討すると、減揺タンクの空気バルブが閉の場合、(例えばTK9)及びタンク内の水がない場合(例えばTK43)は、横揺角速度で20~40(%)程度の減揺効果が得られるが、減揺タンクの空気バルブが開の場合(例えばTK13)は、減揺タンクによる減揺効果が大きいため、舵による減揺効果は5~10(%)程度あるいは、ほとんど変化がない場合もある。

図7.20に示すように、舵減揺制御と減揺タンクを併用した場合でも、方位角及び横揺角速度に発散現象などの不安定要因は認められず、減揺タンク併用時にも操舵による横揺減揺制御に、悪影響を与えないことが判る。

本船による実験では、横揺角速度の減揺制御に重点を置いた舵減揺制御を実施したため、表7.7からも判るように方位角の変動量がオートパイロットに比べて若干大きくなる傾向にある。しかし、その時の操舵量は、オートパイロットと同程度もしくは減少していることが判る。また、A船における舵減揺制御の場合の操舵量に比べて、本船ではかなり操舵量が減少していることも判る。

さらに、TK43とTK44は同一の制御ゲインを用いて、船速を変化させた実験結果であるが、減揺効果の顕著な劣化は認められなかった。ただし、この点については、さらに種々の条件で実船実験を試みる必要がある。

舵減揺制御実験で収録した表7.7のデータのうち、代表的な実験ケースについて、得られた時系列をもとにスペクトル解析、雑音寄与率解析さらにインパルス応答解析を行い、舵減揺制御及び本船オートパイロットにおける操舵系の特性、船首揺と横揺の連成影響さらに減揺タンクとの関連性などについて統計的な面からの分析を行う。

#### [1] スペクトルによる解析

減揺タンクのバルブが閉の状態、オートパイロット(TK8)及び舵減揺制御(TK10)による操舵時の各変数のスペクトルを図7.20、減揺タンクのバルブが開の場合(TK11、TK12)を図7.21、そして減揺タンクが空の場合(TK40、TK42)を図7.22に示す。各スペクトルは横軸は周波数(Hz)、縦軸は有次元値をdb表示したものである。

オートパイロット及び舵減揺制御いずれの場合にも、舵角(図7.20[C-1]、[C-2])及び横揺角速度(図7.20[B-1]、[B-2])は横

揺固有周期付近にスペクトルピークが一致している。また、この傾向は図7.20、図7.21及び図7.22のいずれにも認められ、減揺タンクの使用状態の違いによる、各変数のスペクトルには顕著な差異は認められないことが判る。

また、例えば図7.20 [A-1]、[A-2]の方位角、図7.20 [B-1]、[B-2]の横揺角速度及び図7.20 [C-1]、[C-2]の舵角に認められる、0.5~0.6 (Hz) 付近のスペクトルピークは、実験時の雑音の可能性もあるが今後検討する必要がある。

## [2] 雑音寄与率による解析

次に、スペクトル解析と同じデータを用いて、雑音寄与率の解析を行う。

図7.23、図7.24及び図7.25は、オートパイロット及び舵減揺制御の方位角、横揺角速度及び舵角の各スペクトルに対する、自分自身も含む他の変数からのフィードバックループを通じての寄与の割合を示している。

減揺タンクのバルブが閉の場合、オートパイロット及び舵減揺制御による操舵時の各変数間の雑音寄与率を図7.23、減揺タンクのバルブが開の場合を図7.24、そして減揺タンクが空の場合を図7.25に示す。各雑音寄与率は横軸は周波数 (Hz)、縦軸は累積比率で表示したものである。

図7.23 [C-2]、図7.24 [C-2] 及び図7.25 [C-2] の舵減揺制御の場合は、横揺角速度をフィードバックして制御しているため、横揺角速度に対する舵角からの寄与は、横揺角速度のスペクトルピークを中心に大きく現われている。さらに、これらの図から舵角に対する寄与は、低周波数域では方位角からの寄与が存在することも判る。

また、図7.24 [B-2] に見られるように、減揺タンクが機能している場合は、舵角から横揺角速度への寄与はほとんどないことも判る。

図7.23 [C-1]、[C-2]、図7.24 [C-1]、[C-2] そして図7.25 [C-1]、[C-2] の舵角に対する方位角の低周波数域での寄与

についてはオートパイロット、舵減揺制御とも顕著な差異はなく方位角の制御は、両者同程度の精度で行われていると考えられる。

さらに、図7.23 [B-1]、[B-2]の比較すると、方位角から横揺角速度に対する寄与率が0.5~0.6 (Hz)付近で舵減揺制御によってオートパイロットに比べて減少しており、なんらかの意味があるのかについては、今後確認しなければならない。

### [3] インパルス応答による解析

次に、時系列表示及びスペクトル解析で用いたデータについて、インパルス応答を求め、各変数間の応答特性について解析する。

減揺タンクバルブが閉の場合、オートパイロット及び舵減揺制御による操舵時の各変数間のインパルス応答を図7.26、減揺タンクバルブが開の場合を図7.27、そして減揺タンクが空の場合の結果を図7.28に示す。各インパルス応答は50秒間分を表示した。

オートパイロット及び舵減揺制御いずれの場合についても、減揺タンクが機能している場合(図7.26 [C-1]、[C-2])、タンク内に水はあるがバルブを閉めた場合(図7.27 [C-1]、[C-2])そしてタンクが空の状態(図7.28 [C-1]、[C-2])の順番に、舵角のインパルス入力に対する横揺の減衰は弱くなっていることが判る。

さらに、図7.26 [D-2]、図7.27 [D-2]及び図7.28 [D-2]から、舵減揺制御では横揺角速度のインパルス入力に対する舵角の応答が、負から正の舵角を取って、あて舵的に操舵していることが判る。

#### 7.4.4 変針実験結果

減揺タンクバルブ閉の状態でのオートパイロット、舵減揺制御及びマニュアル操舵時の30度変針実験結果を図7.29から図7.31に示す。なお、図中で変針を開始した時点でstartマークを記入した。

図7.29 [A]のオートパイロットの場合は、変針完了までに約40秒、方位角の行き過ぎ角は1度未満、図7.30 [A]の舵減揺制御では約45秒、行き過ぎ角は2度程度であり、オートパイロットと同程度の変針性能があることが判る。なお、図7.31 [A]のマニュアル操舵の場合は、変針完了までに約70秒を要している。

横揺角速度については、変針後その振幅はオートパイロット（図7.29 [B]）に比べて、舵減揺制御（図7.30 [C]）の方が減少しており、変針及び旋回時の横揺角速度も減少していることが判る。また、同時に計測した横揺角についても、オートパイロットに比べて舵減揺制御では最大傾斜角で、40（%）前後の減揺効果が得られていることも判る。

これらのことから、B船のような中型船舶にとっては大角度の変針操舵を行う場合にも、舵による横揺減揺制御は安全性の面から有効である。

#### 7.4.5 強制動揺実験結果

マニュアル操舵によって船体を強制動揺させた後、舵角を中立に保持した場合（自然減揺）、強制動揺からオートパイロットに切り換えた場合、さらに強制動揺から舵減揺制御に切り換えた場合の3ケースについて、強制動揺実験を行った。

図7.32が減揺タンクバルブ閉、図7.33がバルブ開そして図7.34がタンク内の水を排水した状態である。マニュアル操舵によって強制動揺を励起した後、それぞれの方法で減揺を開始した時点で図中startマークを記入した。

図7.33 [B] の減揺タンクの空気バルブ開の状態での自然減揺の場合は、横揺角速度の振幅が0.5 (deg/s) の範囲に整定するまでに1.5周期、同じ状態で舵減揺制御の場合は1周期で整定している。

また、図7.32 [B] 及び図7.34 [B] の減揺タンクの空気バルブが閉、及びタンク内の水を排水した状態での自然減揺の場合はいずれも4周期、同じ状態での舵減揺制御の場合は3周期で整定しており、舵減揺制御の方が、オートパイロットあるいはマニュアル操舵に比べて、横揺の減衰がはやいことが判る。なお、これらの強制動揺減揺実験結果をまとめて表7.8に示す。

## 7.5 C船による舵減揺制御実験

本船の特徴は減揺装置として、フィンスタビライザを装備していること及び2軸2舵による操舵装置を装備していることである。

本船による実験は、B船と同じ舵減揺制御装置を搭載して、データ収録から制御実施まで同じ手順で行った。実験では方位角、舵角は本船のジャイロコンパス及びオートパイロットから変換装置を介して入力した。横揺角速度は舵減揺制御装置内蔵のレートセンサ、さらに横揺角は本船のバーチカルジャイロの信号を入力した。

舵角指令は、オートパイロットに増設した、切り換えスイッチを通して本船の操舵装置に0.5秒間隔で出力した。なお、舵減揺制御の実船実験にあたっては、舵角リミットを7度に設定して行った。実験状況を写真7.4に示す。

### 7.5.1 実験目的及び実験手順

本船は非格納式フィンスタビライザを装備しているため、通常のビルジキールのみを装備している船舶に比べると横揺減衰力が大きい。このような船舶において、操舵による横揺減揺効果がどの程度期待できるか、さらに舵減揺制御にとって、2軸2舵は通常の舵に比べてどのようなメリットが期待できるかなどについて、実船実験を通して確認することとする[7.4]。

船速一定で舵角を2～6度、操舵周期を4～16秒で操舵した場合の舵角に対する船体の横揺応答特性を図7.35に示す。横軸は操舵周期、縦軸は横揺角を舵角で割った値である。この結果から、横揺同調周期は船速が約17(k'ts)の場合、10～12秒程度であることが確認できた。

本船による実船実験では、舵減揺制御実験、変針実験及びフィンスタビライザによる強制動揺から舵減揺制御による強制動揺実験などを実施した。

まず、制御モデル及び制御ゲイン推定のために実施したランダム操舵時の方位角、横揺角速度及び舵角の時系列を図7.36に示す。このランダム操舵によるデータは、0.5秒サンプリングで300秒間収録したものである。ランダム操舵によって得られたデータについて、制御型自己回帰モデルをあてはめた結果6次のモデルが得られた。

次に、どのような制御ゲインを採用するかを検討するために行った、二次評価関数における各変数に対する重み係数を変化させた場合の、白色雑音による制御シミュレーション結果を表7.9に示す。これらシミュレーション結果から、ランダム操舵に比べると方位角、横揺角速度及び舵角の変動量は標準偏差で半減することが判る。また、横揺角速度は方位角、舵角に比べると制御ゲインによる変化は少ないことも判る。

#### 7.5.2 舵減揺制御実験結果

表7.10に示す制御ゲインを用いて実施した実船実験結果について、方位角、横揺角速度及び舵角などの変数の標準偏差、減揺効果をまとめて表7.11に示す。表中でAPはオートパイロット、RRC Sは舵減揺制御による操船である。

風浪は船から見て、記述の方向に向かって吹いていることを意味しており、海象状況はTN4からTN6は、平穏な海象で斜め向かい波状態、TN23とTN24はほぼ横波、TN281からTN283は、斜め向かい波そしてTN31からTN33は、斜め追い波状態である。

なお、減揺効果はA船、B船と同様にオートパイロットに対する舵減揺制御の横揺角速度の減少率(%)で表現した。

追い波(TN31、TN32)と向かい波(TN281、TN283)状態での、オートパイロットと舵減揺制御による操舵時の方位角、横揺角速度及び舵角の時系列を図7.37及び図7.38に示す。なお、各図の横軸は時間(時間=データ数\*0.5秒)、縦軸はそれぞれの有次元値である。

### 7.5.3 舵減揺制御効果とその分析

表7.11の横揺角速度に関する減揺率から、フィンスタビライザが装備されている場合でも、20～40（%）程度の減揺効果が得られていることが判る。また、横揺角速度の減揺制御に重点を置いた舵減揺制御を実施したため、方位角の変動量がオートパイロットに比べて、若干大きくなる傾向にあるが操舵量はオートパイロットと同程度もしくは減少ぎみであることも判る。

図7.37 [C-1]、図7.38 [C-1]のオートパイロットと図7.38 [C-2]、図7.38 [C-2]の舵減揺制御では、操舵パターンがかなり異なることが判る。ちなみに、本船のオートパイロットは2軸2舵による保針操舵を行っていることを考え合わせると、そのときの操舵量が比較的大きく、横揺を励起している感があり、制御ゲインのチューニング不足が考えられる。

舵減揺制御実験で収録した表7.11のデータのうち、代表的な実験ケースについて、得られた時系列をもとにスペクトル解析、雑音寄与率解析さらにインパルス応答解析を行い、舵減揺制御及び本船オートパイロットにおける操舵系の特性、さらに船首揺と横揺の連成影響などについて統計的な面からの分析を行う。

#### [1] スペクトルによる解析

追い波（TN31、TN32）と向かい波（TN281、TN283）状態での、オートパイロットと舵減揺制御による操舵時の方位角、横揺角速度及び舵角のスペクトルを図7.39、図7.40に示す。各スペクトルは横軸は周波数（Hz）、縦軸は有次元値をdb表示したものである。

オートパイロットでは、追い波と向かい波いずれの場合にも方位角（図7.39 [A-1]、図7.40 [A-1]）のスペクトルピークは横揺角速度（図7.39 [B-1]、図7.40 [B-1]）及び舵角（図7.39 [C-1]、

図7.40 [C-1]) のスペクトルピークとほぼ一致していることが判る。

舵減揺制御では、横揺角速度をフィードバックしているために、横揺角速度 (図7.39 [B-2]、図7.40 [B-2]) のスペクトルピーク付近に舵角 (図7.39 [C-2]、図7.40 [C-2]) のそれが一致していることが判る。

また、オートパイロット (図7.39 [B-1]) に比べて、舵減揺制御 (図7.40 [B-2]) の方が、横揺角速度のスペクトルのパワーは減少していることも判る。

## [2] 雑音寄与率による解析

時系列表示及びスペクトル解析を行ったデータを用いて、雑音寄与率の解析を行う。

追い波と向かい波状態での、オートパイロットと舵減揺制御による操舵時の方位角、横揺角速度及び舵角に対する雑音寄与率を図7.41、図7.42に示す。各雑音寄与率は横軸は周波数 (Hz)、縦軸は累積比率である。

追い波状態でオートパイロットの場合、図7.41 [B-1] の舵角から横揺角速度に対する寄与が認められ、このことはオートパイロットによる操舵で横揺が励起されたとする実験員の体感とも一致している。

次に、舵減揺制御の場合は、横揺角速度をフィードバック制御しているため、図7.41 [C-2]、図7.42 [C-2] の横揺角速度から舵角に対する寄与は、横揺角速度のスペクトルピークを中心に広い周波数範囲で大きく現れている。

また、方位角と横揺角速度の連成影響については、オートパイロット (図7.41 [A-1]、図7.42 [A-1]) 及び舵減揺制御 (図7.41 [A-2]、図7.42 [A-2]) いずれの場合にも認められる。

なお、横揺角速度から舵角に対する寄与が、0.6 (Hz) 付近で舵減揺制御 (図 7.4 1 [B-2]) の方が、オートパイロット (図 7.4 1 [B-1]) に比べて減少しており、なんらかの意味があるのかについては今後確認する必要がある。

### [3] インパルス応答による解析

次に、時系列表示及びスペクトル解析で用いたデータについて、インパルス応答を求め、各変数間の応答特性を解析する。

追い波と向かい波状態での、オートパイロットと舵減揺制御装置による操舵時の方位角、横揺角速度及び舵角間のインパルス応答を図 7.4 3、図 7.4 4 に示す。各インパルス応答は A 船、B 船と同様に 50 秒間分を表示した。

図 7.4 3 [C-1]、[C-2] 及び図 7.4 4 [C-1]、[C-2] に示す舵角に対する横揺角速度のインパルス応答によると、本船は他の 2 隻に比べて、横揺の減衰がかなり速いことが判る。このことは、本船がフィンスタビライザを装備してこと、さらに表 7.2 の横揺減減係数が、他の 2 隻の船舶に比べて大きい値であることから明らかである。

### 7.5.4 変針実験結果

オートパイロット、舵減揺制御及びマニュアル操舵による 30 度変針実験結果を図 7.4 5 から図 7.4 7 に示す。なお、図中で変針を開始した時点に start マークを記入した。

変針に要する時間は図 7.4 5 [A] のオートパイロットでは、約 70 秒で行き過ぎ角は認められない。次に、図 7.4 6 [A] の舵減揺制御の場合は、変針完了までに約 60 秒で行き過ぎ角は 2 度程度である。そして、図 7.4 7 [A] のマニュアル操舵では 90 秒以上を要しており、行き過ぎ角も 10 度以上となる。

これらのことから、変針性能については、本船のオートパイロットの方が精度的には高いが、舵減揺制御による変針性能についても実際の操船上は特に問題ないことが判る。

#### 7.5.5 強制動揺実験結果

フィンスタビライザによる強制動揺から、自然減揺させた結果を図7.48、フィンスタビライザによる強制動揺から舵減揺制御で強制減揺させた結果を図7.49、さらにフィンスタビライザによる強制動揺からフィンスタビライザによる強制減揺させた結果を図7.50にそれぞれ示す。フィンスタビライザによって強制動揺を励起した後、それぞれの方法で減揺を開始した時点として図中にstartマークを記入した。

図7.50 [B] のフィンスタビライザによる減揺効果が最も大きく、横揺角が±1度以内に整定するまでに要する横揺周期は、1周期程度である。次は、図7.49 [B] の舵減揺制御による減揺で2周期を要している。そして、図7.48 [B] の自然減揺の場合で横揺角が±1度以内に整定するまでに、4周期以上要していることが判る。

これら強制動揺試験結果として、横揺角が1 (deg) 以内に整定するまでの横揺周期をまとめて表7.12に示す。

## 7.5 結言

3隻の異なるタイプの船舶で、舵減揺制御装置による実船実験を行い得られた実験結果を以下にまとめる。

### (1) A船による舵減揺効果

- ・舵減揺制御は横揺制御と方位角制御の機能を同時に発揮できる。  
また、このとき特に操船上の問題はない。
- ・本船のオートパイロットに比べて、横揺角速度の標準偏差で20から40(%)の減揺効果が得られる。
- ・舵減揺制御による変針性能は、オートパイロットに比べて、若干劣るものの実用上問題はない。
- ・変針操舵時の横揺軽減は、本船のような小型船にとっては安全面で有効である。

### (2) B船による減揺効果

- ・舵減揺制御を用いることにより、オートパイロットに比べて、減揺タンク併用の場合でも5~10(%)、減揺タンクを併用しない場合には、20~40(%)の横揺減揺効果が得られる。
- ・舵減揺制御と減揺タンクの併用時においても、相互影響による船体動揺の発散など、制御するうえで問題となるような現象は認められない。
- ・舵減揺制御による変針性能は、オートパイロットに比べて、若干劣るものの実用上問題はない。
- ・変針操舵時の横揺軽減は、本船のような中型船にとっても、操船上効果的である。
- ・強制動揺実験からも、舵減揺制御の横揺減揺効果が確認される。

### (3) C船による減揺効果

- ・舵減揺制御はオートパイロットに比べて、20~30(%)の横揺減揺効果があり、保針性能についても操船上特に問題はない。

- ・本船と同程度の船舶で、フィンスタビライザを装備していない場合は、30～50（%）程度の減揺効果が期待できる。
- ・舵減揺制御による変針性能は、オートパイロットに比べても十分な性能を有している。
- ・強制動揺実験からも、舵減揺制御による横揺減揺効果が十分期待できる。

### (3) その他

- ・制御モデル作成及び制御実施時のセンサ類の相違は、モデルのミスマッチなどにつながり、制御上問題となる場合があるため注意を要する。
- ・舵として、通常舵よりもフラップラダーあるいは2軸2舵などを採用することにより、小舵角で大きな舵力を得ることができ、舵減揺制御にとっては有効である。
- ・船体運動が小さい場合の解析結果には、誤差要因の混入が多くなるため、動特性などの解析を行う場合はできるだけ大きく船体を動揺させることが好ましい。
- ・横揺角速度から方位角に対するインパルス応答で、正の横揺角速度（右傾斜）に対して、負の方位角（左回頭）が残存する場合があります、このことは流体力学的にも興味深い結果の一つである。

参考文献

- [7.1]元良誠三  
船体運動力学、共立出版、1967.
- [7.2]姫野洋司  
設計に関するトピックス：横揺減衰力、  
第2回耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、昭和52年.
- [7.3]織田博行、大津皓平、佐々木学、関佳之、堀田敏行  
制御型多次元自己回帰モデルを用いた舵による横揺減揺制御  
関西造船協会誌、第216号、1991.
- [7.4]H. Oda, K. Ohtsu, M. Sasaki, Y. Seki, T. Hotta  
Rudder roll stabilization control system through multivariate  
auto regressive model, CAMS'92, Italy, 1992.

図表一覧表

- 表 7.1 舵減揺制御実船実験対象船の船体主要目
- 表 7.2 舵減揺制御実船実験対象船の横揺減減係数
- 表 7.3 実船実験の制御モードと二次評価関数の重み係数 (A 船)
- 表 7.4 A 船における舵減揺制御実船実験結果
- 表 7.5 二次評価関数の重み係数の違いによる  
白色雑音シミュレーション結果 (B 船)
- 表 7.6 実船実験の制御モードと二次評価関数の重み係数 (B 船)
- 表 7.7 B 船における舵減揺制御実船実験結果
- 表 7.8 B 船における強制動揺実験結果
- 表 7.9 二次評価関数の重み係数の違いによる  
白色雑音シミュレーション結果 (C 船)
- 表 7.10 実船実験の制御モードと二次評価関数の重み係数 (C 船)
- 表 7.11 C 船における舵減揺制御実船実験結果
- 表 7.12 C 船における強制動揺実験結果

- 図 7.1 A 船および B 船の一般配置図
- 図 7.2 A 船の LAN システムと舵減揺実験システム
- 図 7.3 A 船の正弦操舵による横揺応答特性
- 図 7.4 ランダム操舵と白色雑音シミュレーションの時系列 (A 船)
- 図 7.5 A 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の  
時系列 (向かい波)
- 図 7.6 A 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列 (追い波)
- 図 7.7 A 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の船速 (電磁ログ)
- 図 7.8 A 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル  
(向かい波)
- 図 7.9 A 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル  
(追い波)

- 図 7.1 0 A 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の  
累積雑音寄与率（向かい波）
- 図 7.1 1 A 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の  
累積雑音寄与率（追い波）
- 図 7.1 2 A 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の  
インパルス応答特性（向かい波）
- 図 7.1 3 A 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の  
インパルス応答特性（追い波）
- 図 7.1 4 A 船におけるオートパイロットと舵減揺制御による  
30 度変針実験
- 図 7.1 5 B 船における実験システムと実験手順
- 図 7.1 6 B 船におけるランダム操舵時の時系列
- 図 7.1 7 B 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列  
（減揺タンクのバルブ閉）
- 図 7.1 8 B 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列  
（減揺タンクのバルブ開）
- 図 7.1 9 B 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列  
（減揺タンク空）
- 図 7.2 0 B 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル  
（減揺タンクのバルブ閉）
- 図 7.2 1 B 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル  
（減揺タンクのバルブ開）
- 図 7.2 2 B 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル  
（減揺タンク空）
- 図 7.2 3 B 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の  
累積雑音寄与率（減揺タンクのバルブ閉）
- 図 7.2 4 B 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の  
累積雑音寄与率（減揺タンクのバルブ開）
- 図 7.2 5 B 船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の  
累積雑音寄与率（減揺タンク空）

- 図 7.26 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性（減揺タンクバルブ閉）
- 図 7.27 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性（減揺タンクバルブ開）
- 図 7.28 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性（減揺タンク空）
- 図 7.29 B船におけるオートパイロットによる30度変針実験（減揺タンクバルブ閉）
- 図 7.30 B船における舵減揺制御による30度変針実験（減揺タンクバルブ閉）
- 図 7.31 B船におけるマニュアル操舵による30度変針実験（減揺タンクバルブ閉）
- 図 7.32 B船における強制動揺実験（減揺タンクバルブ閉）
- 図 7.33 B船における強制動揺実験（減揺タンクバルブ開）
- 図 7.34 B船における強制動揺実験（減揺タンク空）
- 図 7.35 C船の正弦操舵による横揺応答特性
- 図 7.36 C船におけるランダム操舵時の時系列
- 図 7.37 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列（追い波）
- 図 7.38 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列（向かい波）
- 図 7.39 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル（追い波）
- 図 7.40 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル（向かい波）
- 図 7.41 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の累積雑音寄与率（追い波）
- 図 7.42 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の累積雑音寄与率（向かい波）

- 図 7.4.3 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性（追い波）
- 図 7.4.4 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性（向かい波）
- 図 7.4.5 C船におけるオートパイロットによる30度変針実験
- 図 7.4.6 C船における舵減揺制御による30度変針実験
- 図 7.4.7 C船におけるマニュアル操舵による30度変針実験
- 図 7.4.8 C船におけるオートパイロットによる強制動揺減衰実験
- 図 7.4.9 C船における舵減揺制御による強制動揺実験
- 図 7.5.0 C船におけるフィンスタビライザによる強制動揺実験

- 写真 7.1 A船およびB船の全景
- 写真 7.2 A船における舵減揺制御実験の状況
- 写真 7.3 B船における舵減揺制御実験の状況
- 写真 7.4 C船における舵減揺制御実験の状況

表 7.1 舵減揺制御実船実験対象船の船体主要目

Ship	A	B	C
Lpp (m)	46.0	83.0	83.0
B (m)	10.0	15.0	10.5
D (m)	3.8	9.2	4.5
$\Delta$ (ton)	425.0	2630.0	993.0
Cb	0.56	0.53	0.50
GM (m)	1.48	1.46	0.81
KB (m)	1.56	3.46	2.08
GoZ (m)	0.46	0.62	0.54
$T\psi$ (sec)	6~7	11~12	10~11
AR (m <sup>2</sup> )	4.25×1	10.0×1 *1	4.298×2
$T\delta$ (sec)	3~5	~2.3	~3.3
Stabilizer	— —	Anti Rolling Tank *2	Fin Stabilizer *3

\*1 Flap Rudder

\*2 Volume ~30ton

\*3 Fin 3.5m<sup>2</sup> \* 2

表 7.2 舵減揺制御実船実験対象船の横揺減減係数

Ship	Speed (kts)	Extinction coefficient		Stabilizer
		a	b	
A	12	0.18	0.01	-----
B	11.5	0.25	0.09	Anti rolling tank
C	18.5	0.31	0.01	Fin stabiliser

$$\Delta \varphi = a \varphi' (n) + b \varphi'^2 (n)$$

$$\Delta \varphi = \varphi (n) - \varphi (n+1)$$

$$\varphi' (n) = \frac{\varphi (n) + \varphi (n+1)}{2}$$

表 7.3 実船実験の制御モードと二次評価関数の重み係数 (A 船)

Control Mode	Weight Matrix		
	Yaw (Q1)	Roll Rate (Q2)	Rudder (R)
RRCS(22)	10	50	1
RRCS(26)	20	10	1
RRCS(27)	5	50	1
RRCS(28)	10	50	2
RRCS(29)	10	100	1

表 7.4 A船における舵減揺制御実船実験結果

Test No.	Control Mode	Head (deg)	Speed (kts)	Wind Direction (deg)	Standard Deviation				Reduction of Roll Rate(%)
					Yaw (deg)	Roll (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)	
S300	AP	220	13.2	SSE	0.42	2.07	1.99	0.60	...
S301	RRCS(22)	205	13.8	SSE	0.51	1.42	1.40	3.14	30
S302	RRCS(27)	205	13.7	SSE	0.73	1.53	1.53	3.20	23
S303	RRCS(29)	210	13.8	SSE	0.83	1.62	1.60	3.70	20
S305	RRCS(26)	345	13.6	SSE	0.71	1.36	1.22	1.92	3
S306	RRCS(29)	15	13.6	SSE	0.91	0.98	0.88	3.44	30
S307	RRCS(27)	15	13.8	SSE	0.86	1.30	1.00	3.37	21
S308	AP	13	13.9	SSE	0.99	1.47	1.26	1.84	...
S310	RRCS(27)	230	13.8	NNE	0.92	1.34	1.32	3.05	23
S311	AP	240	13.6	NNE	0.33	1.77	1.72	0.59	...
S313	RRCS(29)	210	13.7	NNE	1.06	1.25	1.18	3.82	31
S314	RRCS(27)	240	13.6	NNE	0.87	1.54	1.45	3.58	16
S316	AP	195	13.7	NNE	0.44	1.76	1.73	0.99	...
S318	AP	55	13.2	NNE	0.83	0.98	0.87	1.75	...
S319	RRCS(28)	55	13.6	NNE	0.95	0.93	0.83	1.64	5
S320	RRCS(22)	55	13.5	NNE	0.53	0.69	0.56	2.11	36

表 7.5 二次評価関数の重み係数の違いによる白色雑音シミュレーション結果  
(B船)

[A] 減揺タンクバルブ開

[B] 減揺タンクバルブ閉

[C] 減揺タンク空

[A]

Weight Matrix			Standard Deviation		
Yaw (Q1)	Roll Rate (Q2)	Rudder (R)	Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)
1	1	1	9.69	0.40	0.88
5	50	1	1.66	0.35	3.84
10	50	1	2.13	0.35	2.99
10	100	1	2.26	0.32	3.14
50	10	1	4.33	0.54	2.11
100	50	1	5.20	0.56	2.06
Original Data (random)			6.73	0.52	8.10

[B]

Weight Matrix			Standard Deviation		
Yaw (Q1)	Roll Rate (Q2)	Rudder (R)	Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)
1	1	1	3.16	0.28	0.58
5	50	1	1.53	0.24	2.66
10	50	1	1.21	0.26	2.11
10	100	1	1.25	0.22	2.18
50	10	1	0.68	0.50	4.41
Original Data (random)			5.02	0.62	7.54

[C]

Weight Matrix			Standard Deviation		
Yaw (Q1)	Roll Rate (Q2)	Rudder (R)	Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)
1	1	1	6.53	0.24	1.26
5	50	1	3.97	0.26	3.26
10	50	1	3.44	0.35	5.04
10	100	1	3.50	0.30	4.84
50	10	1	2.77	1.56	4.54
Original Data (random)			15.06	0.59	8.15

表 7.6 実船実験の制御モードと二次評価関数の重み係数 (B 船)

Control Mode	Anti Rolling Tank	Weight Matrix		
		Yaw (Q1)	Roll Rate (Q2)	Rudder (R)
RRCS(21)	Open	10	100	1
RRCS(42)	Close	10	100	1
RRCS(62)	Empty	5	50	1

表 7.7 B船における舵減揺制御実船実験結果

Test No.	Control Mode	Anti Rolling Tank	Head (deg)	Speed (kts)	Wind Direction (deg)	Wind Speed (m/s)	Standard Deviation				Reduction of Roll Rate(%)
							Yaw (deg)	Roll (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)	
TK8	AP	Close	90	16	80	4.6	0.27	0.56	0.36	0.78	...
TK9	RRCS(21)	Close	90	16	80	4.6	0.89	0.34	0.23	0.75	36
TK10	RRCS(42)	Close	90	16	80	4.6	0.34	0.35	0.25	0.56	30
TK11	AP	open	90	16	80	4.6	0.28	0.33	0.25	0.77	...
TK12	RRCS(21)	open	90	16	80	4.6	0.47	0.29	0.25	0.76	2
TK13	RRCS(42)	open	90	16	80	4.6	0.39	0.30	0.24	0.55	4
TK19	RRCS(21)	Close	80	10	170	7	0.49	0.48	0.33	0.98	30
TK20	RRCS(42)	Close	80	10	170	7	0.43	0.61	0.38	0.81	20
TK21	AP	Close	80	10	170	7	0.27	0.77	0.47	0.87	...
TK32	AP	open	190	10	180	5.3	0.29	0.13	0.07	0.49	...
TK33	RRCS(21)	open	190	10	180	5.3	0.97	0.18	0.06	0.49	12
TK34	RRCS(42)	open	190	10	180	5.3	0.60	0.12	0.06	0.44	5
TK36	AP	Close	190	11	180	5.3	0.44	0.13	0.07	0.52	...
TK37	RRCS(21)	Close	190	11	180	5.3	0.24	0.10	0.06	0.43	20
TK38	RRCS(42)	Close	190	11	180	5.3	0.36	0.12	0.07	0.46	80
TK40	AP	Empty	0	12	190	6.6	0.23	0.34	0.17	0.59	...
TK41	RRCS(21)	Empty	5	10	190	6.6	0.41	0.34	0.21	0.59	- 23
TK43	RRCS(62)	Empty	10	13	190	6.6	0.46	0.23	0.10	0.50	43
TK44	RRCS(62)	Empty	10	7	190	6.6	0.60	0.21	0.11	0.52	33

表 7.8 B船における強制動揺実験結果

Test		Cycle ( $\dot{\phi} < 0.5 \text{ deg/s}$ )
Anti Rolling Tank (Open)	RRCS	1
	AP	2
	Free Dumping	1.5
Anti Rolling Tank (Close)	RRCS	1
	AP	2.5
	Free Dumping	3
Anti Rolling Tank (Empty)	RRCS	2
	AP	3
	Free Dumping	4

表 7.9 二次評価関数の重み係数の違いによる白色雑音シミュレーション結果 (C船)

Weight Matrix			Standard Deviation		
Yaw (Q1)	Roll Rate (Q2)	Rudder (R)	Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)
1	1	1	1.86	0.26	0.41
1	10	1	1.91	0.24	0.45
1	50	1	2.07	0.20	0.66
10	1	1	0.61	0.28	1.21
10	1	2	0.82	0.26	0.88
10	1	10	1.86	0.26	0.41
10	50	1	0.71	0.22	1.29
10	100	1	0.77	0.22	1.38
50	1	1	0.36	0.39	2.16
Original Data (Random)			3.97	0.79	8.79

表 7.10 実船実験の制御モードと二次評価関数の重み係数 (C船)

Control Mode	Weight Matrix		
	Yaw (Q1)	Roll Rate (Q2)	Rudder (R)
RRCS (82)	10	1	1
RRCS (87)	10	100	1

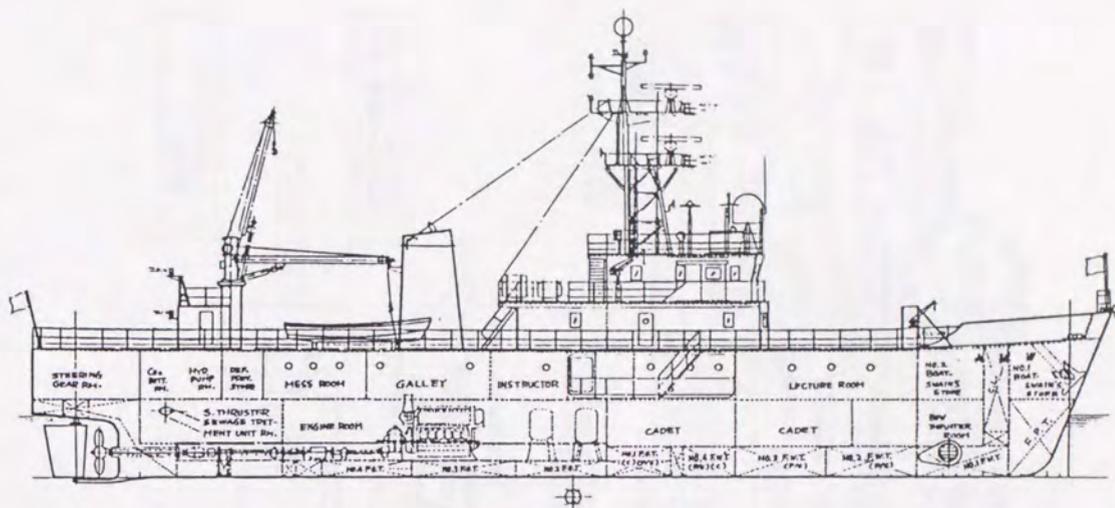
表 7.11 C船における舵減揺制御実船実験結果

Test No.	Control Mode	Head (deg)	Speed (kts)	Wind Direction (deg)	Standard Deviation				Reduction of Roll Rate(%)
					Yaw (deg)	Roll (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)	
TN4	AP	275	18.8	NE(1)	0.39	1.41	0.77	2.31	...
TN5	RRCS(82)	275	18.8	NE(1)	0.46	0.82	0.45	0.84	41
TN6	MAN	290	19.0	NE(1)	0.46	0.57	0.31	0.83	...
TN23	RRCS(87)	130	18.5	NE(2)	0.97	1.04	0.59	2.19	18
TN24	AP	130	18.5	NE(2)	0.85	1.35	0.71	2.23	...
TN281	AP	190	18.3	NE(2)	0.65	1.33	0.67	2.34	...
TN282	MAN	190	18.3	NE(2)	0.68	1.50	0.79	1.47	...
TN283	RRCS(87)	190	18.3	NE(2)	0.72	1.01	0.53	2.09	21
TN31	AP	350	18.5	NE(2)	0.85	1.59	0.73	2.52	...
TN32	RRCS(87)	350	18.5	NE(2)	1.23	1.26	0.54	2.46	26
TN33	MAN	350	18.5	NE(2)	0.98	1.86	1.01	1.26	...

表 7.12 C船における強制動揺実験結果

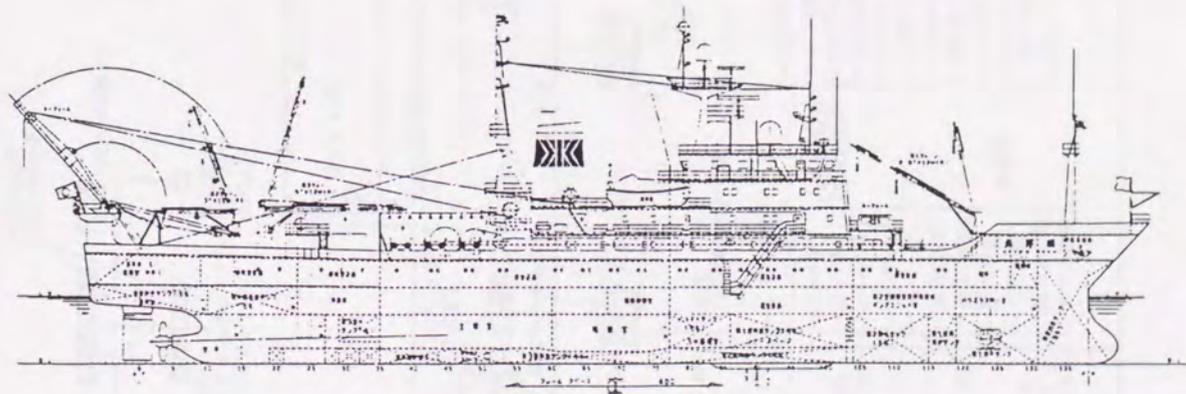
Test	Cycle ( $\phi < 1.0$ deg)
Fin Stabilizer	1
RRCS	2
Free Dumping	4

A 船



東京商船大学 練習船「汐路丸」

B 船



水産庁 漁業調査船「開洋丸」

図 7.1 A 船および B 船の一般配置図

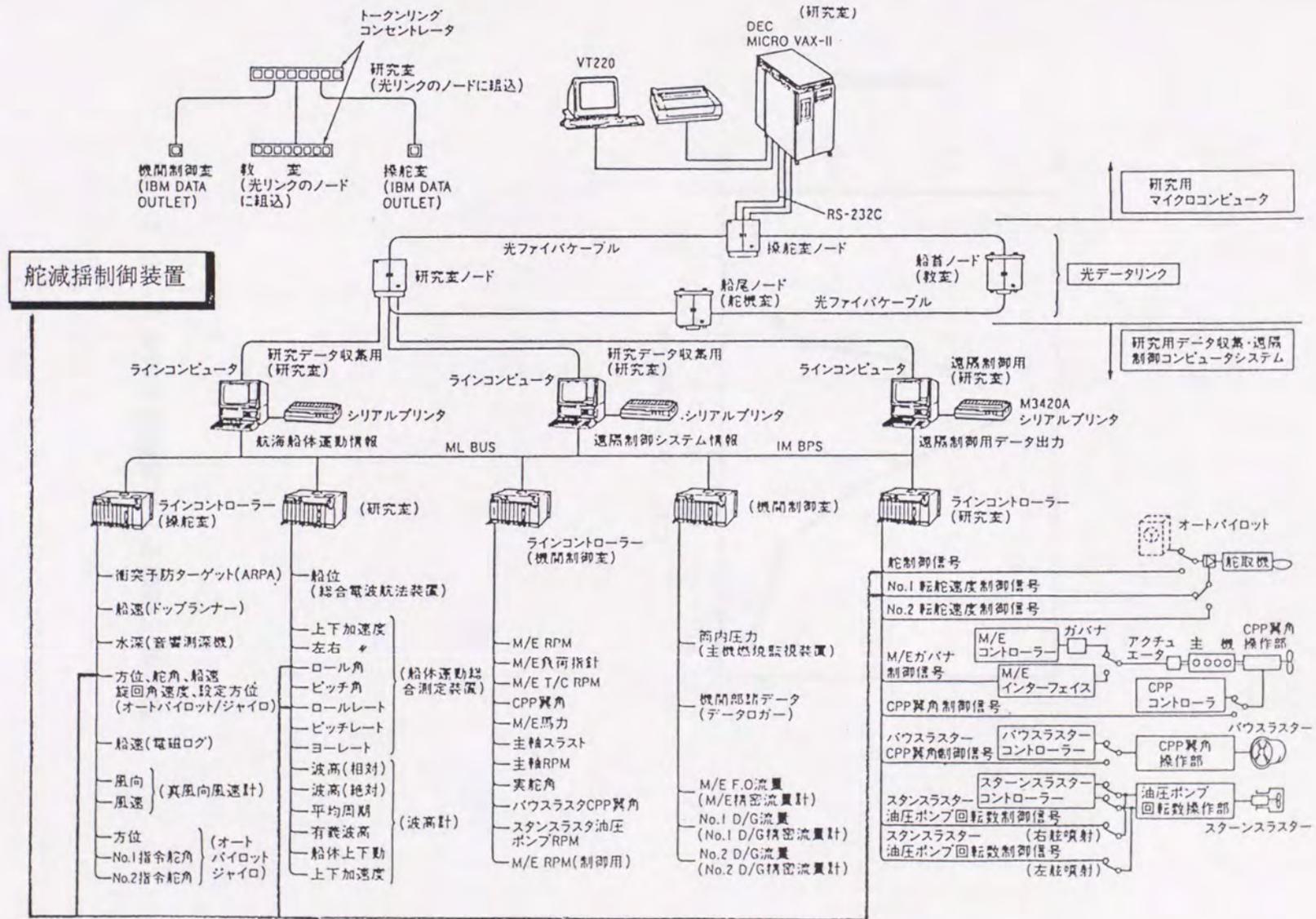


図 7.2 A船のLANシステムと舵減揺実験システム

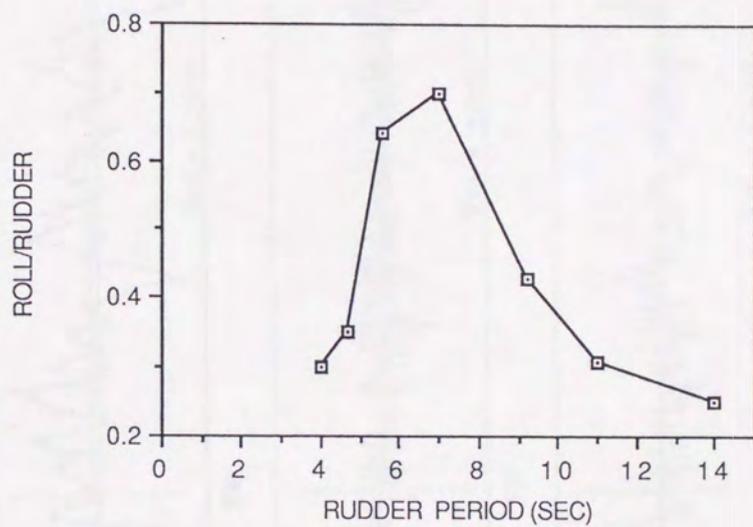


図 7.3 A船の正弦操舵による横揺応答特性

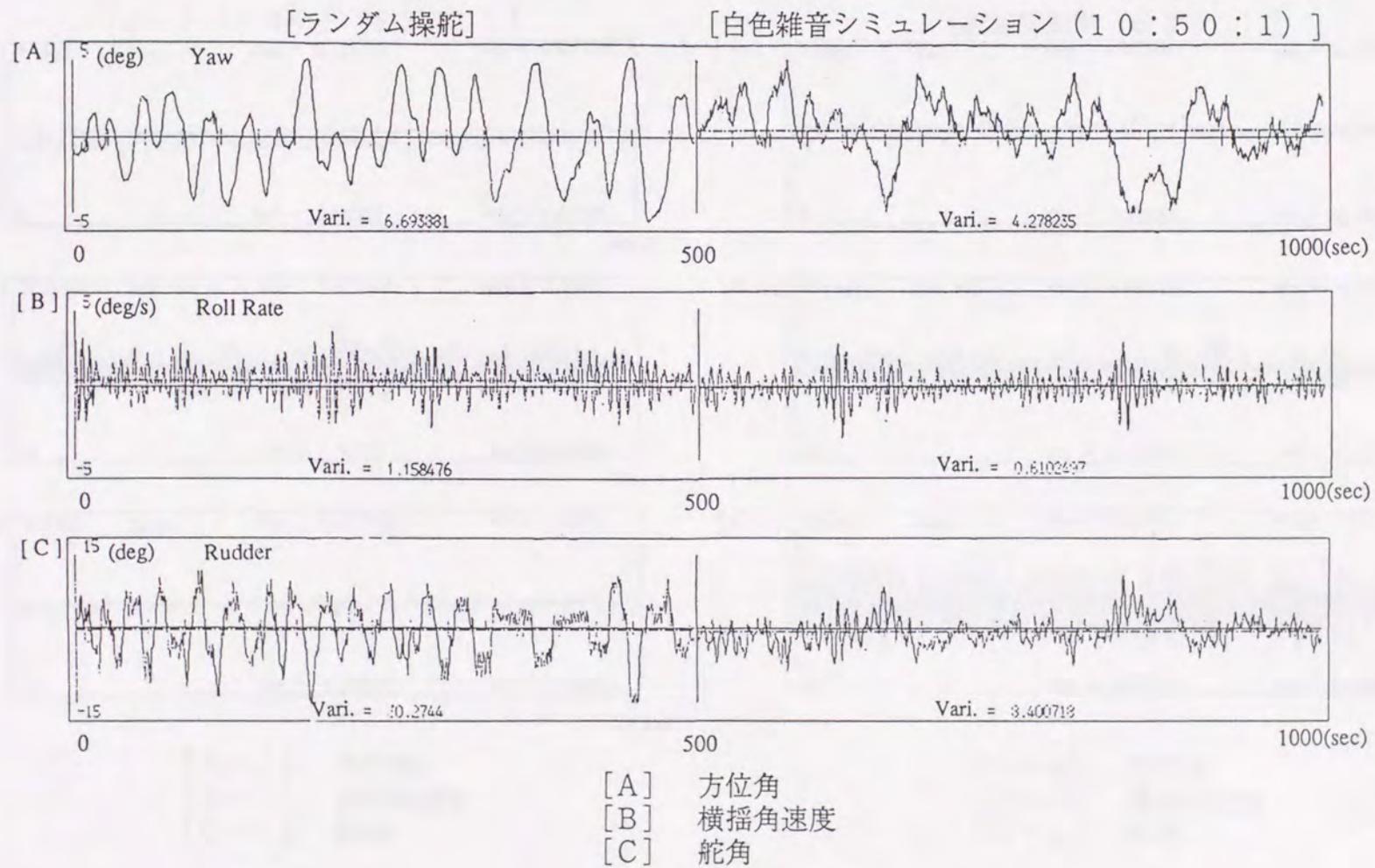
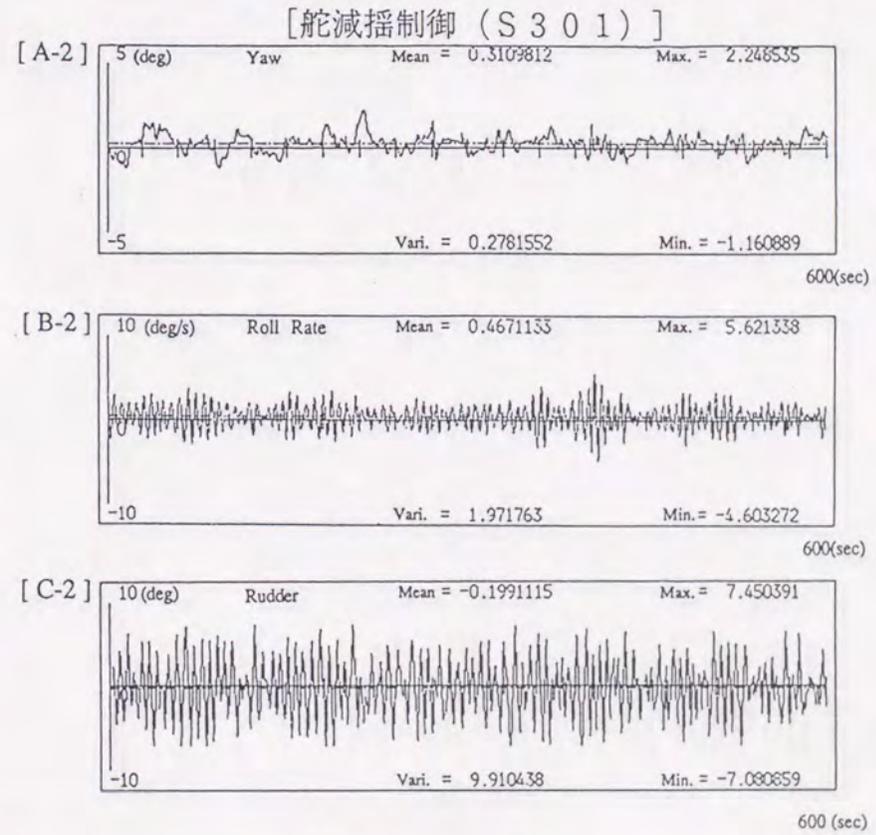
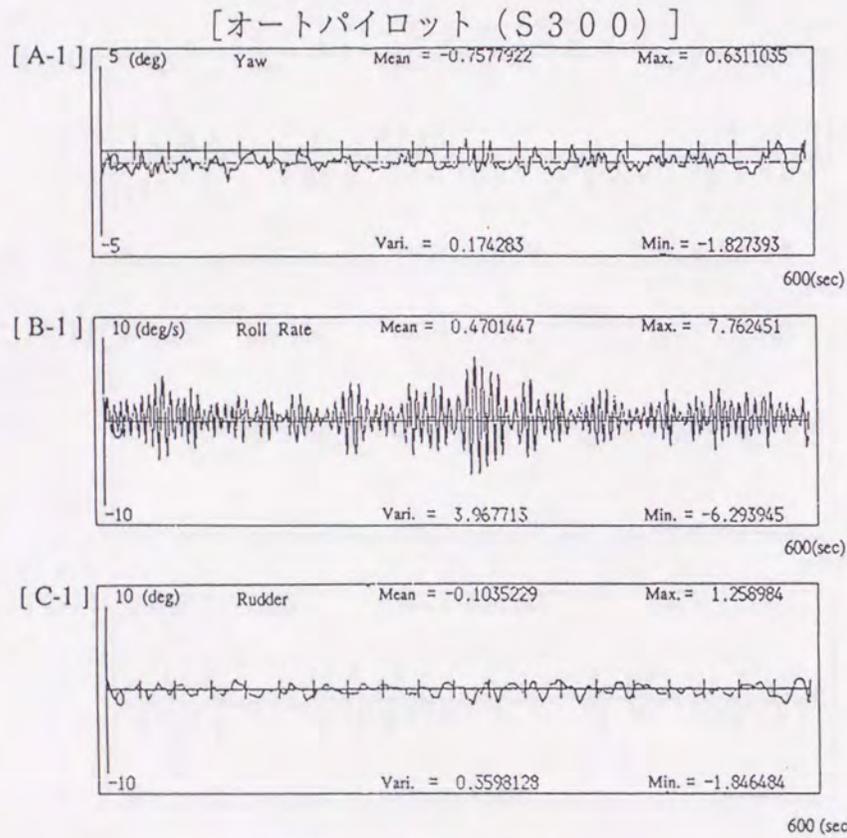


図 7.4 ランダム操舵と白色雑音シミュレーションの時系列 (A船)

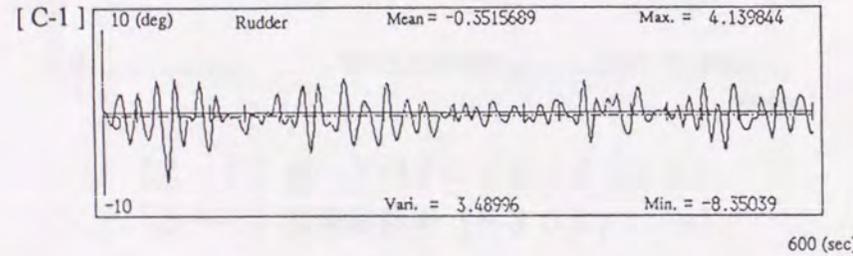
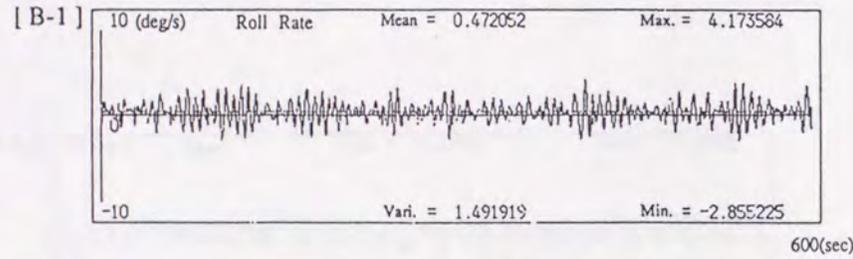
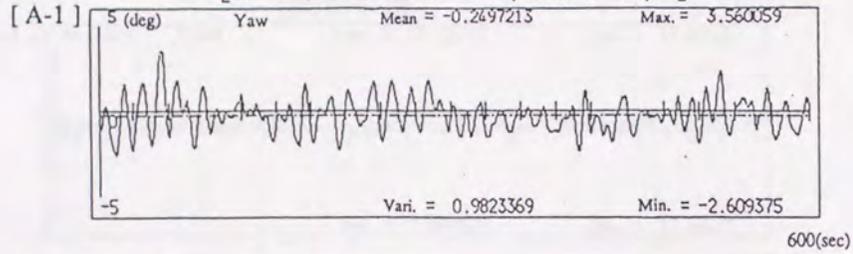


[A-1] 方位角  
[B-1] 横揺角速度  
[C-1] 舵角

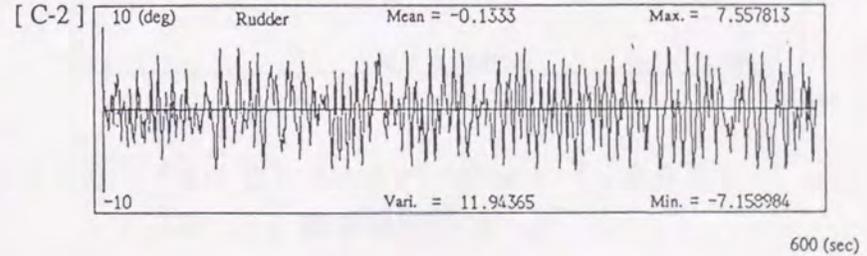
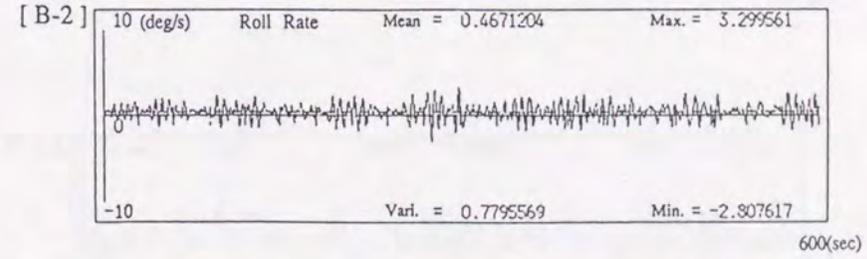
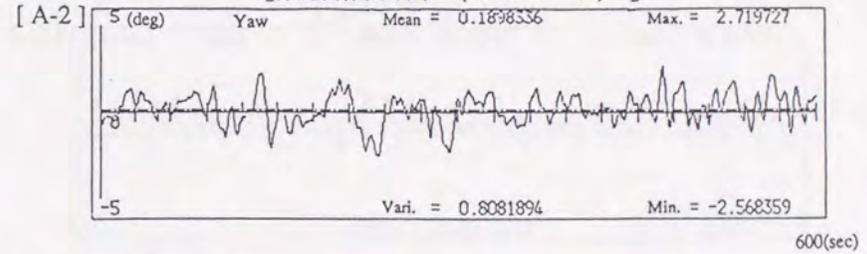
[A-2] 方位角  
[B-2] 横揺角速度  
[C-2] 舵角

図 7.5 A船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列 (向かい波)

[オートパイロット (S308)]



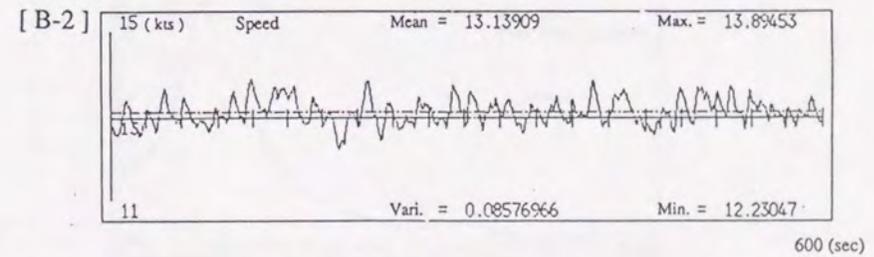
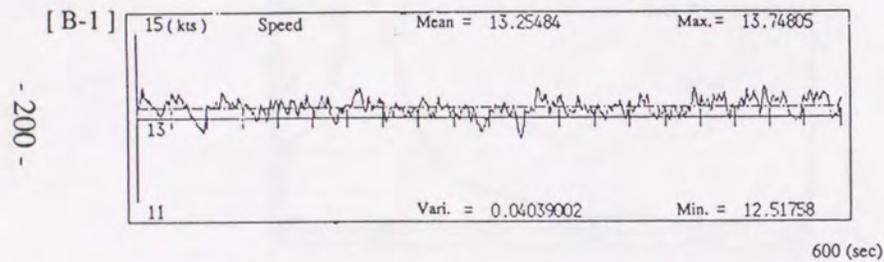
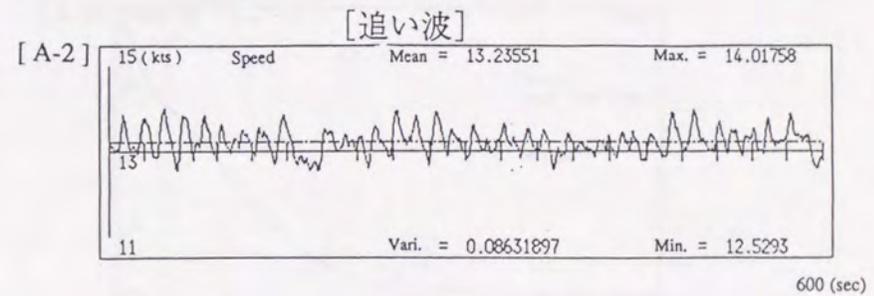
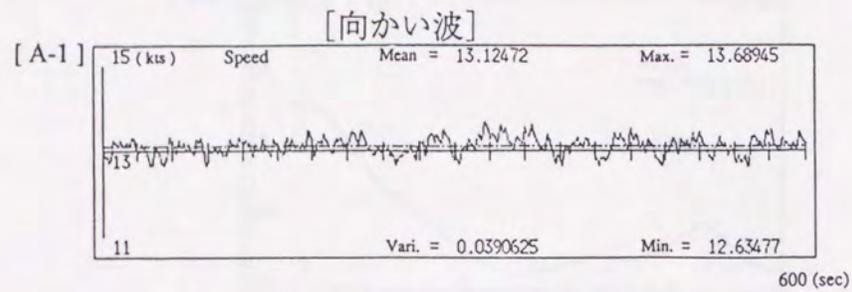
[舵減揺制御 (S306)]



[A-1] 方位角  
[B-1] 横揺角速度  
[C-1] 舵角

[A-2] 方位角  
[B-2] 横揺角速度  
[C-2] 舵角

図 7.6 A船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列 (追い波)

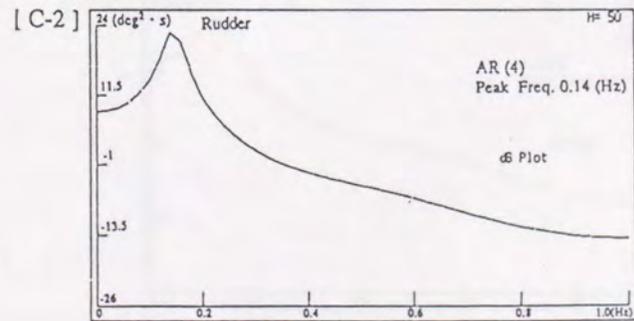
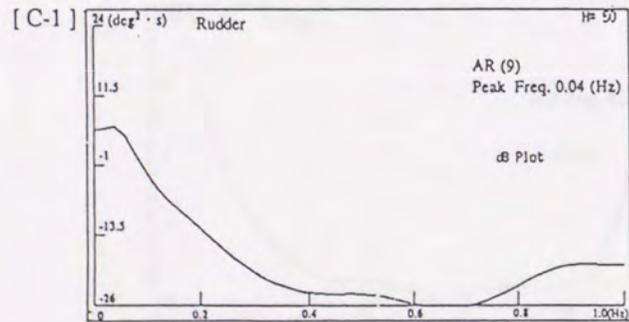
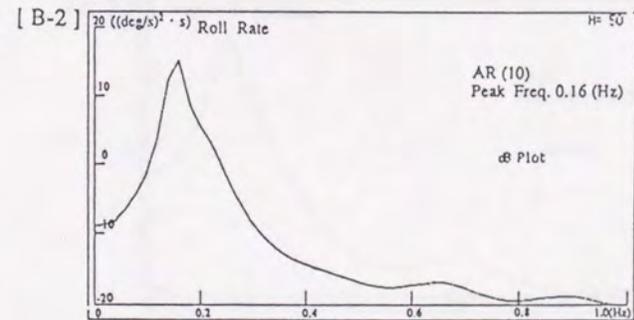
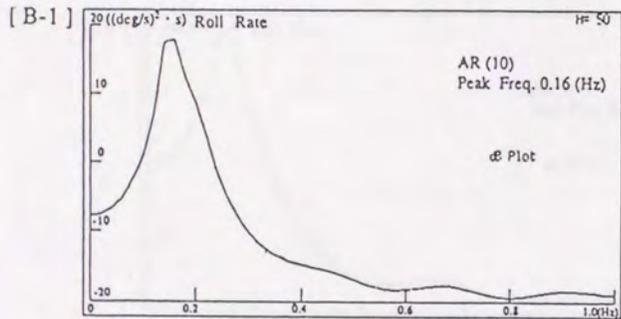
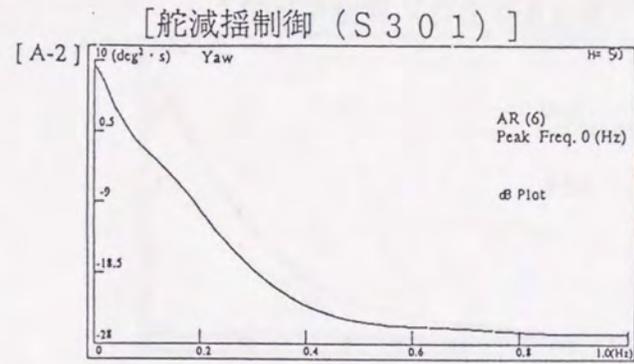
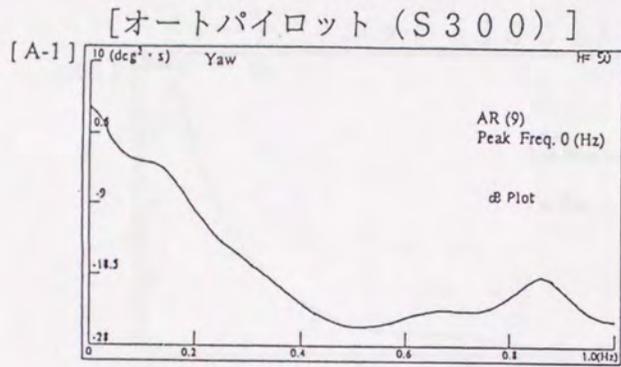


-200-

[A-1] オートパイロット (S300)  
[B-1] 舵減揺制御 (S301)

[A-2] オートパイロット (S308)  
[B-2] 舵減揺制御 (S306)

図 7.7 A船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の船速 (電磁ログ)

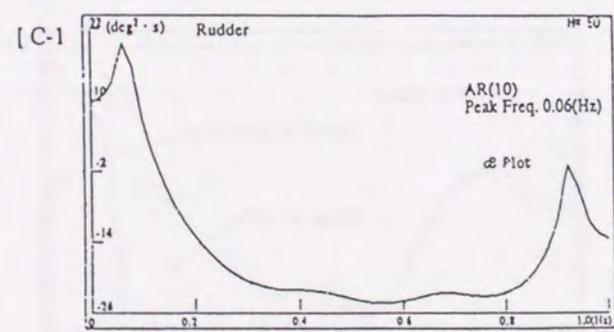
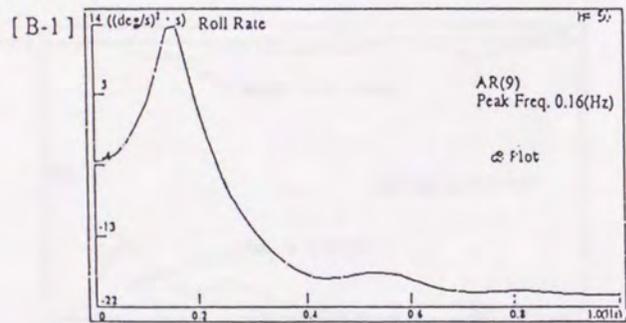
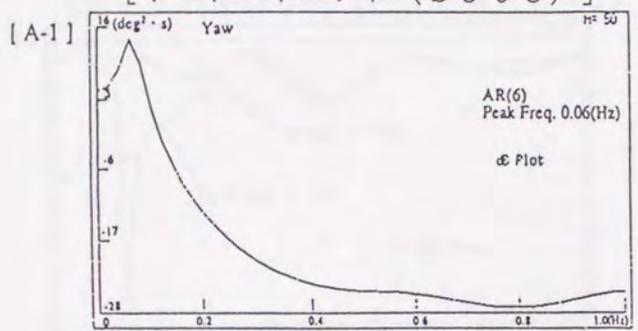


[A-1] 方位角  
[B-1] 横揺角速度  
[C-1] 舵角

[A-2] 方位角  
[B-2] 横揺角速度  
[C-2] 舵角

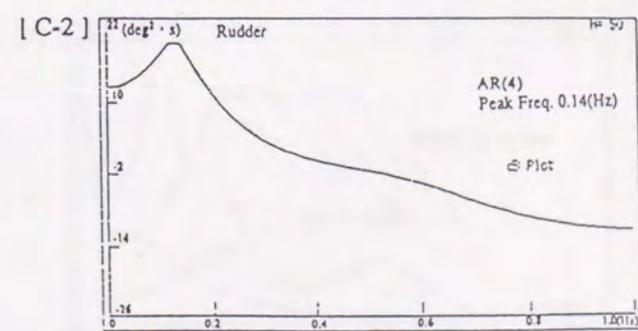
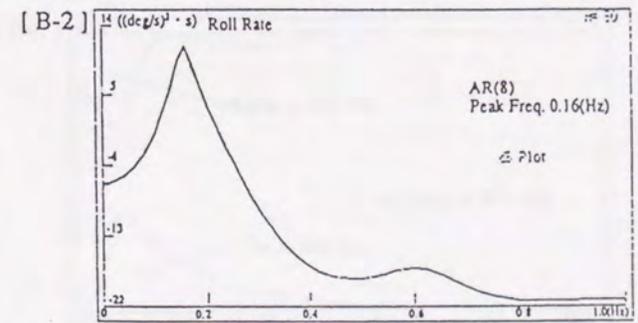
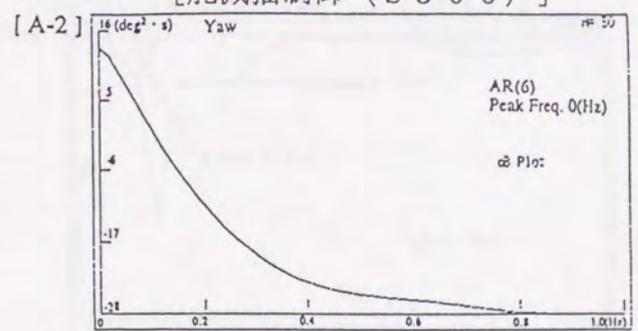
図 7.8 A船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル (向かい波)

[オートパイロット (S308)]



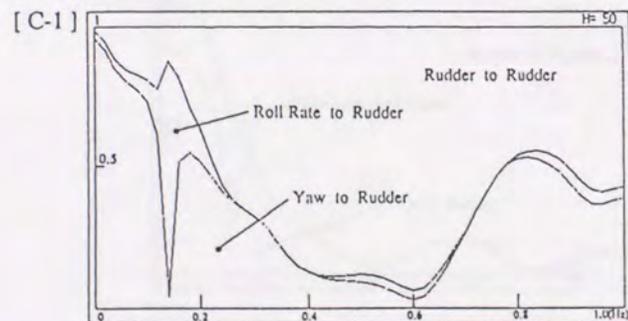
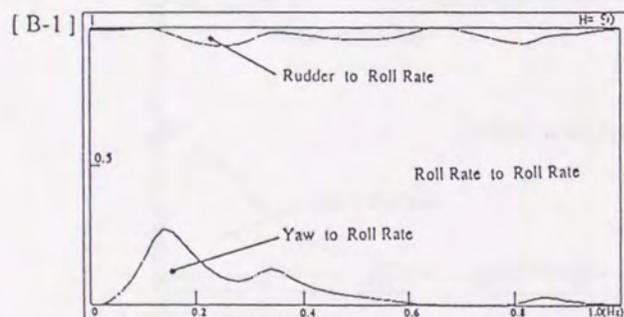
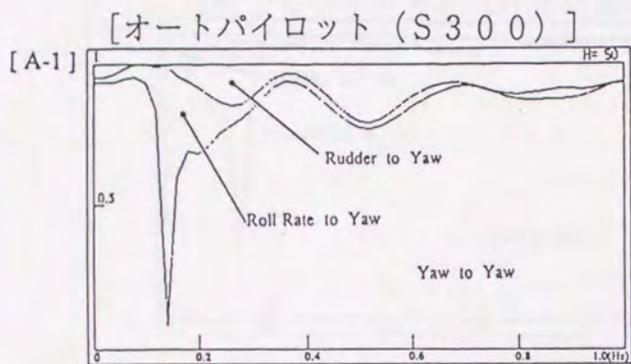
[A-1] 方位角  
 [B-1] 横揺角速度  
 [C-1] 舵角

[舵減揺制御 (S306)]

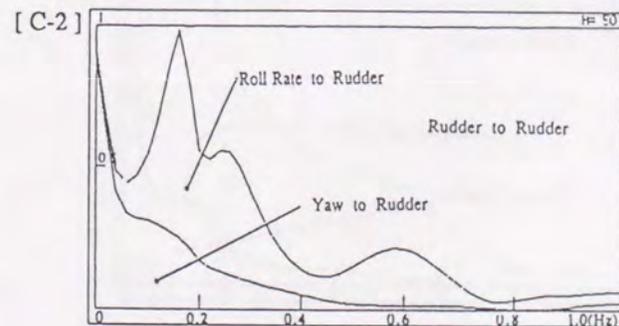
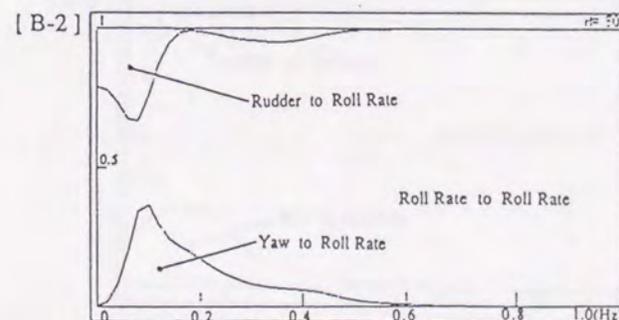
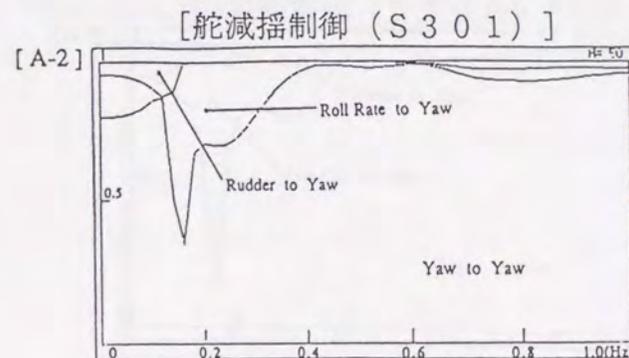


[A-2] 方位角  
 [B-2] 横揺角速度  
 [C-2] 舵角

図 7.9 A船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル (追い波)

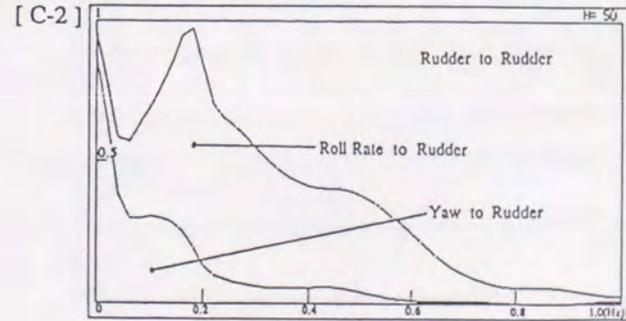
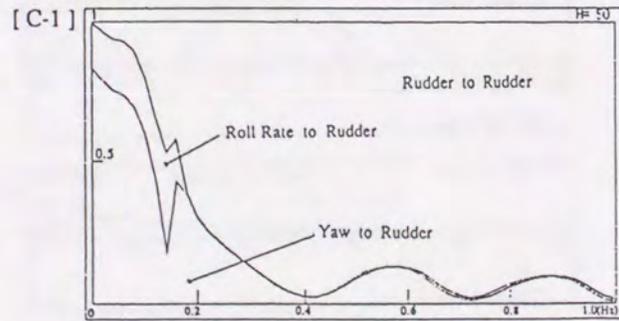
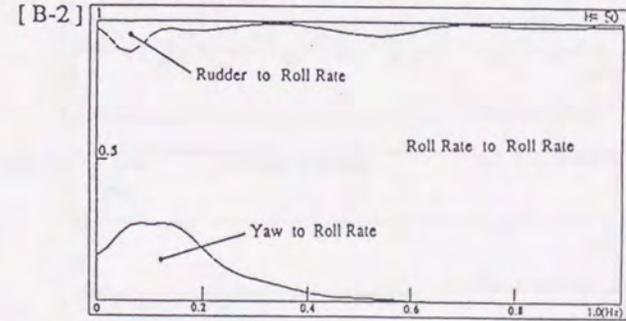
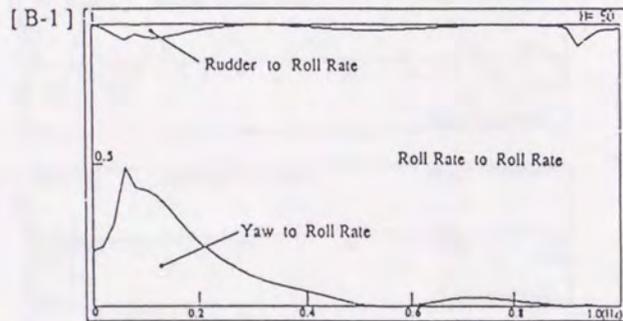
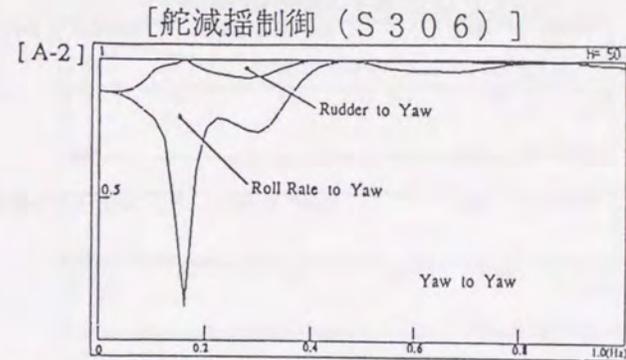
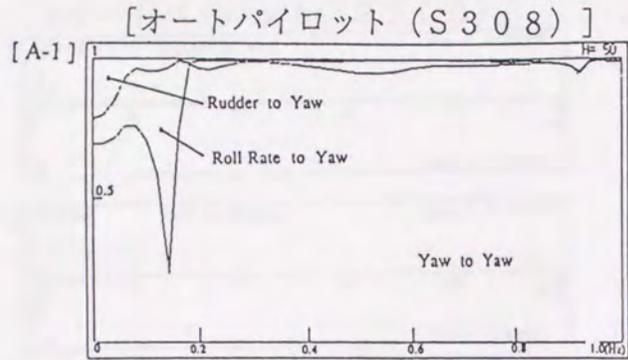


- [A-1] 方位角に対する累積雑音寄与率
- [B-1] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率
- [C-1] 舵角に対する累積雑音寄与率



- [A-2] 方位角に対する累積雑音寄与率
- [B-2] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率
- [C-2] 舵角に対する累積雑音寄与率

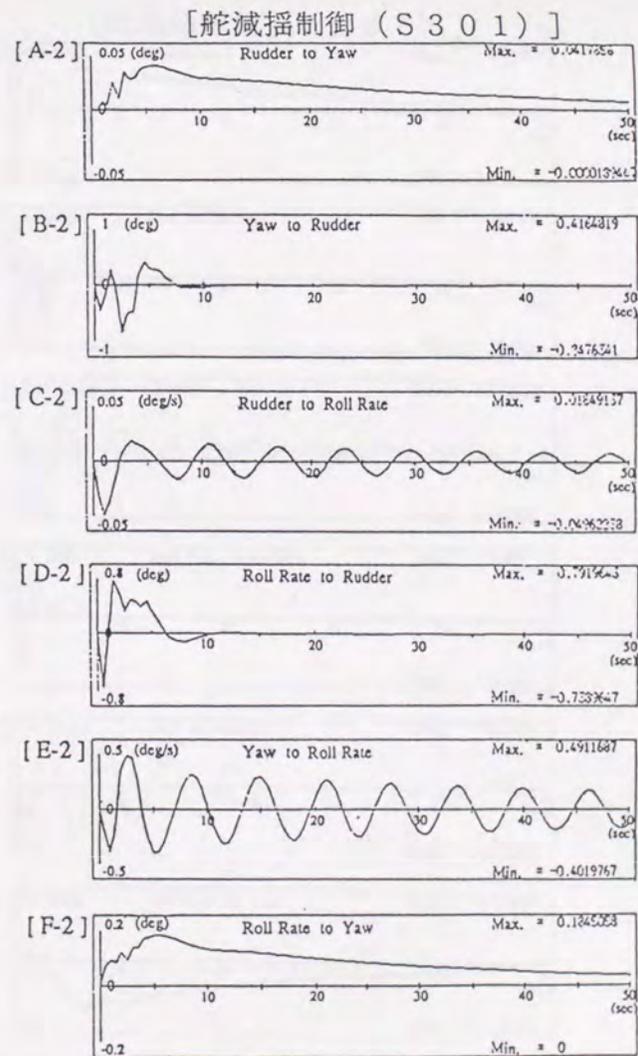
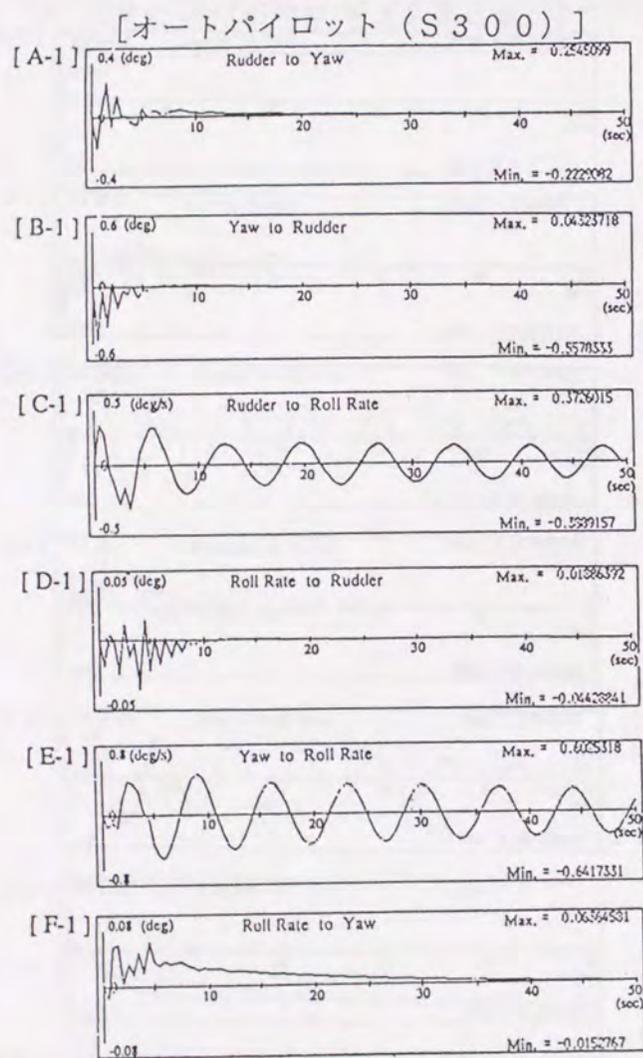
図 7.10 A船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の累積雑音寄与率 (向かい波)



- [A-1] 方位角に対する累積雑音寄与率
- [B-1] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率
- [C-1] 舵角に対する累積雑音寄与率

- [A-2] 方位角に対する累積雑音寄与率
- [B-2] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率
- [C-2] 舵角に対する累積雑音寄与率

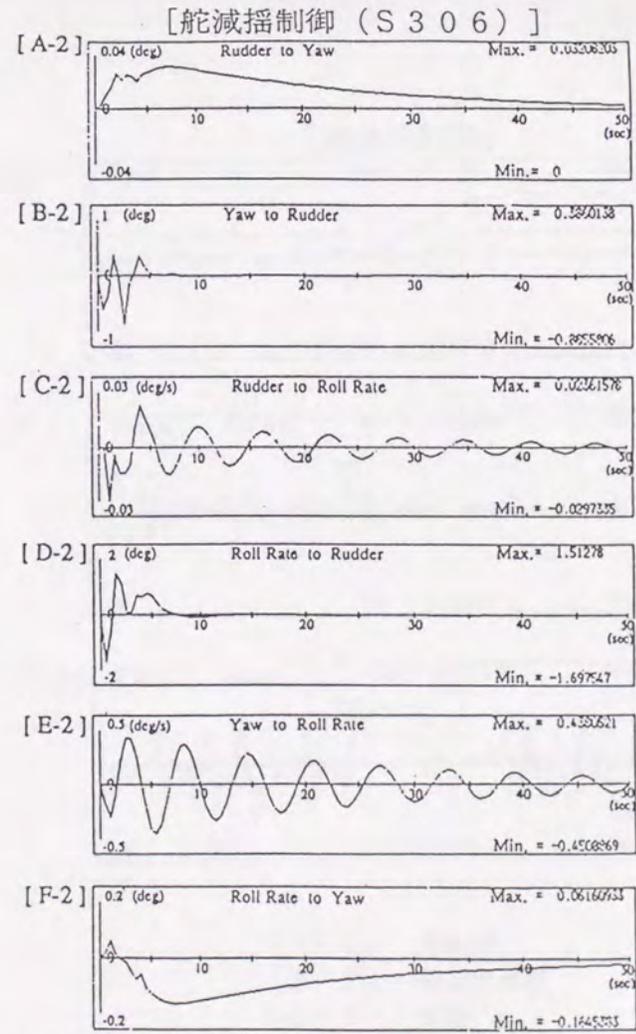
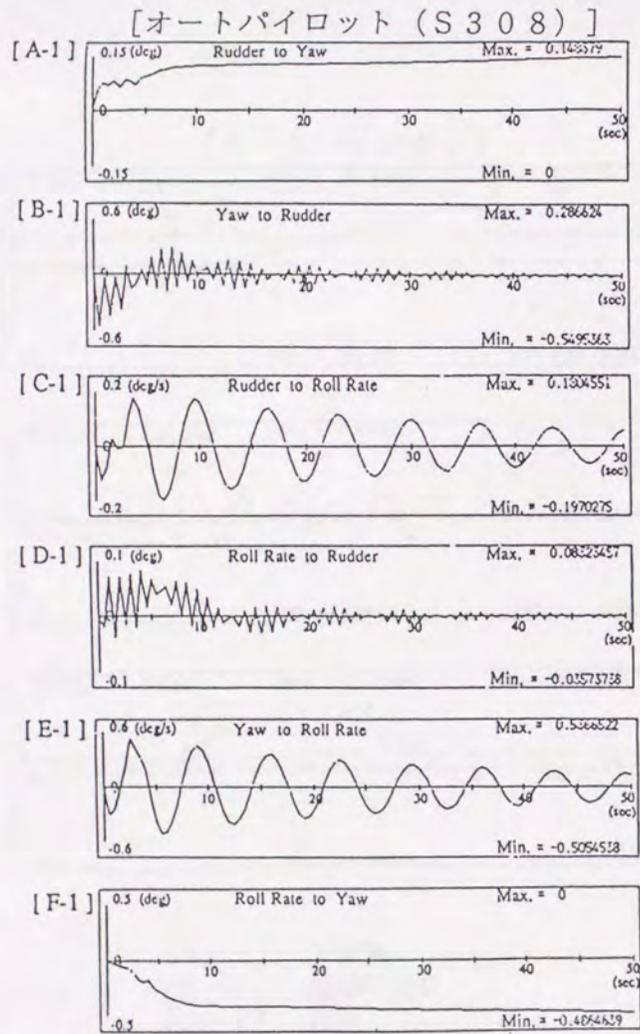
図 7.1.1 A船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の累積雑音寄与率 (追い波)



[A-1]、[B-1] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-1]、[D-1] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-1]、[F-1] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

[A-2]、[B-2] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-2]、[D-2] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-2]、[F-2] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

図 7.12 A船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性 (向かい波)

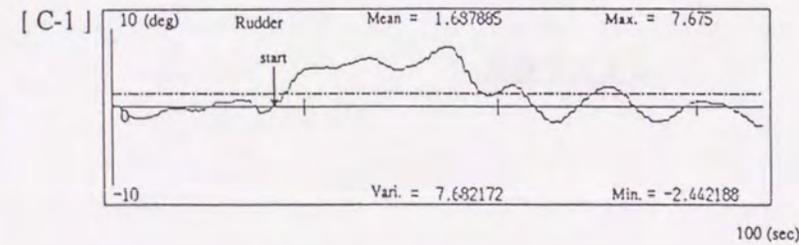
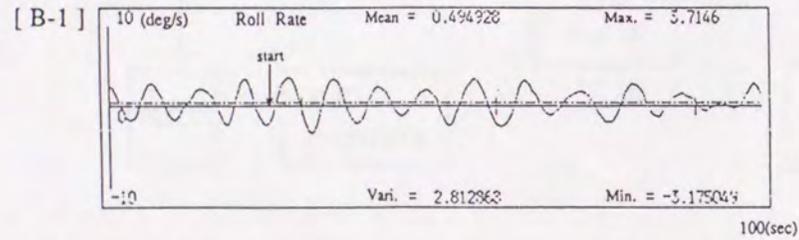
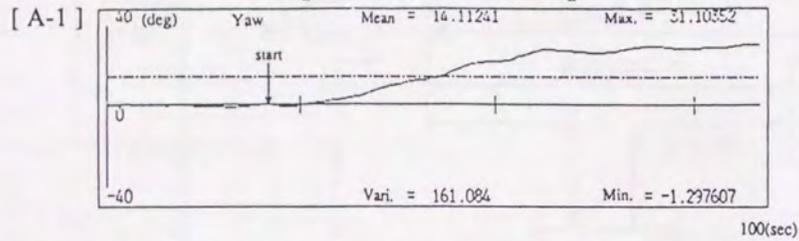


[A-1]、[B-1] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-1]、[D-1] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-1]、[F-1] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

[A-2]、[B-2] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-2]、[D-2] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-2]、[F-2] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

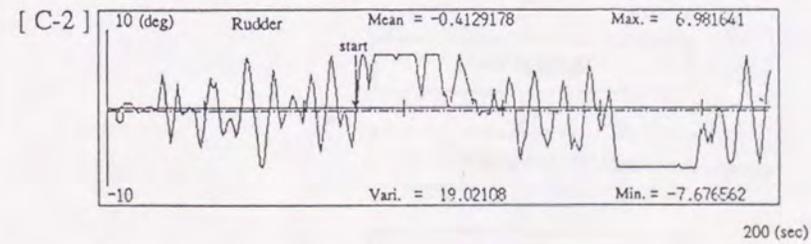
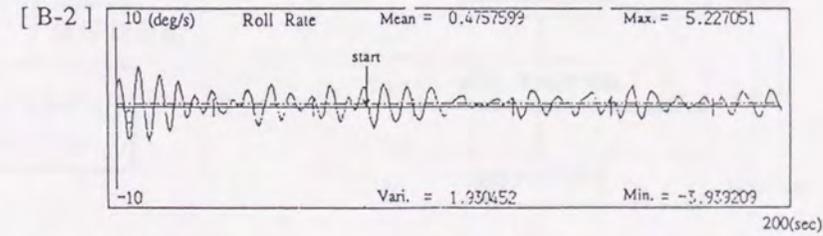
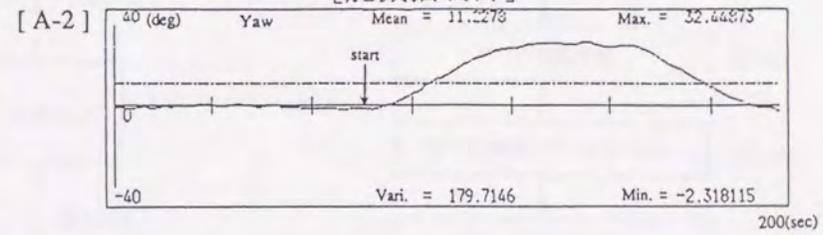
図 7.13 A船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性 (追い波)

[オートパイロット]



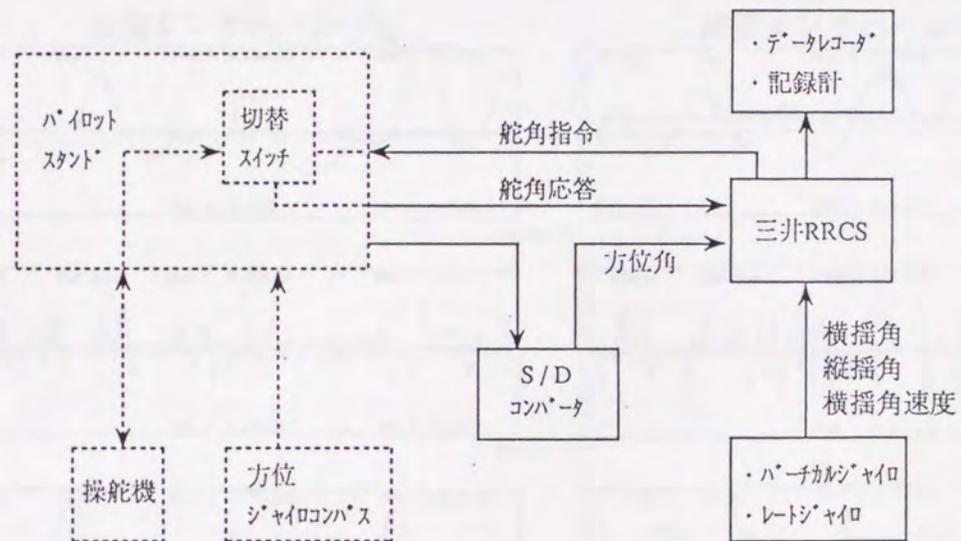
[A-1] 方位角  
[B-1] 横揺角速度  
[C-1] 舵角

[舵減揺制御]



[A-2] 方位角  
[B-2] 横揺角速度  
[C-2] 舵角

図 7.14 A船におけるオートパイロットと舵減揺制御による30度変針実験



実験システム

実験手順

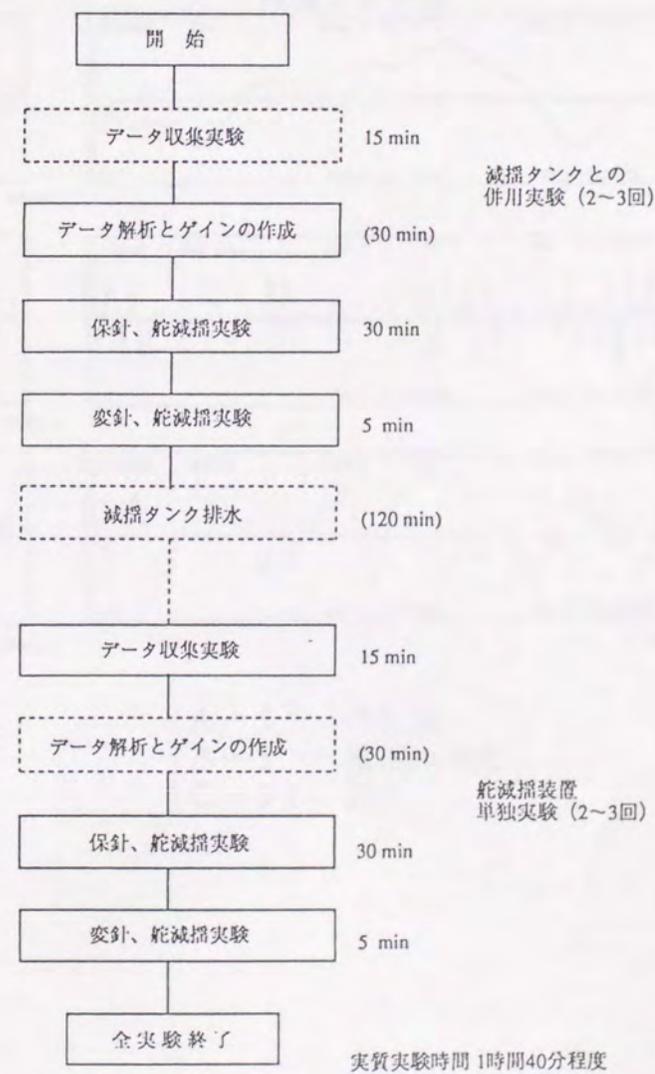
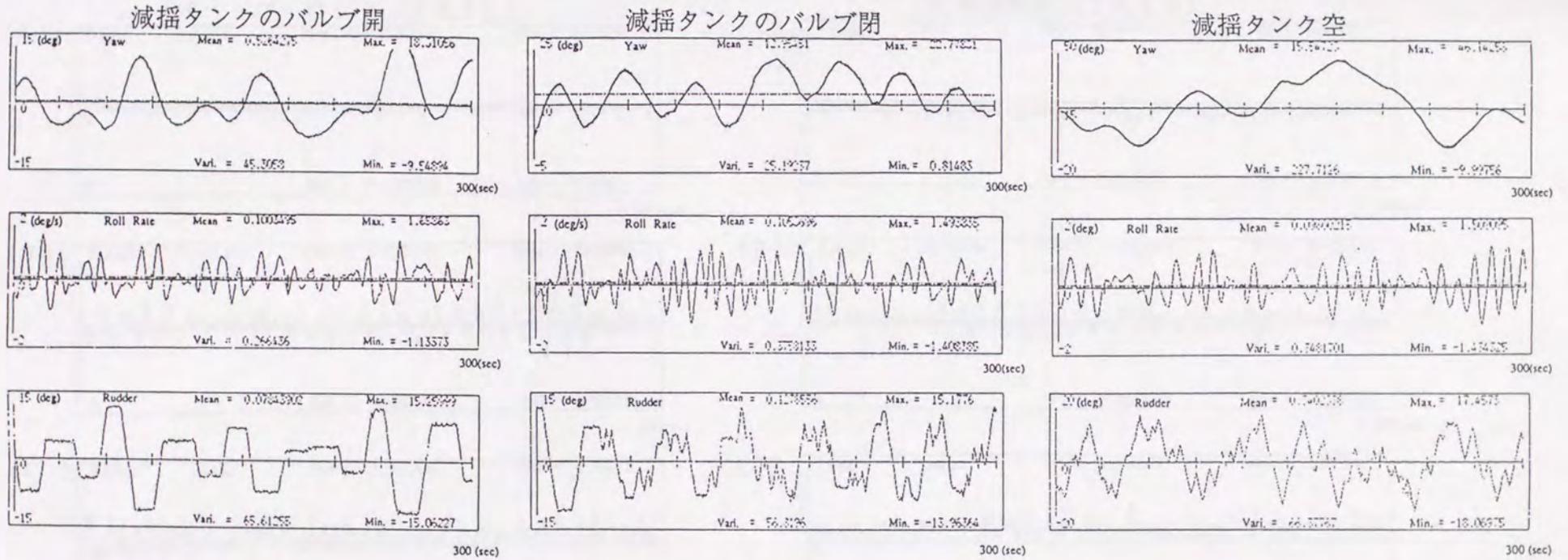


図 7.15 B船における実験システムと実験手順

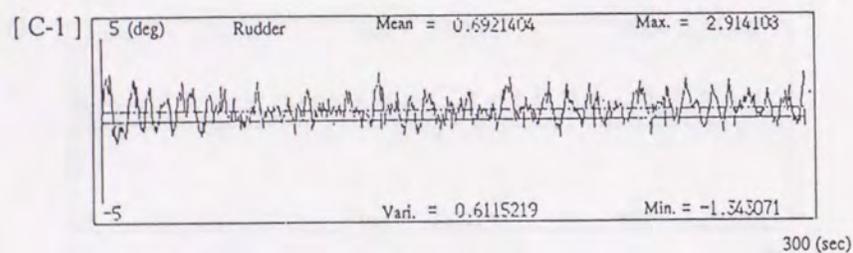
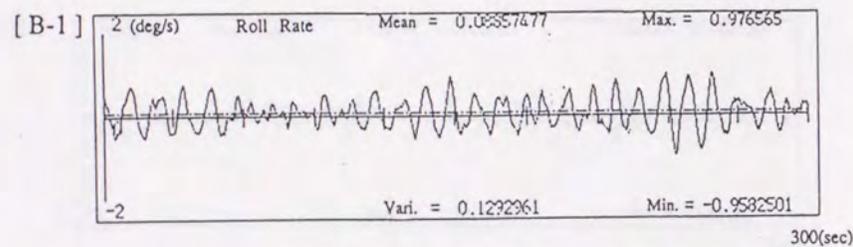
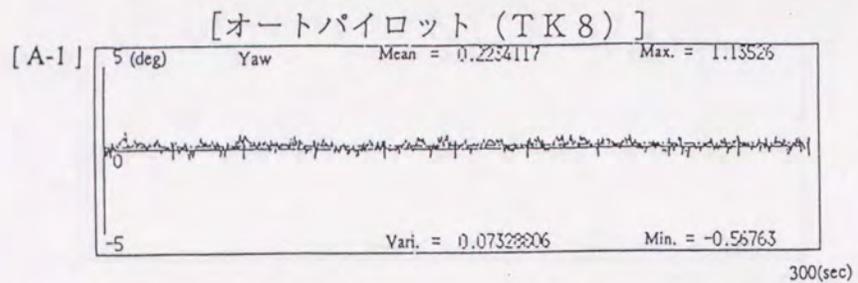


[A-1] 方位角  
 [B-1] 横揺角速度  
 [C-1] 舵角

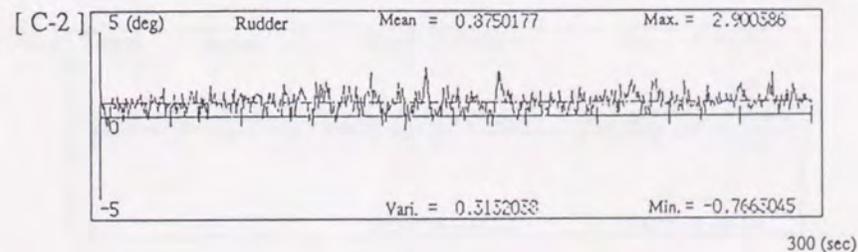
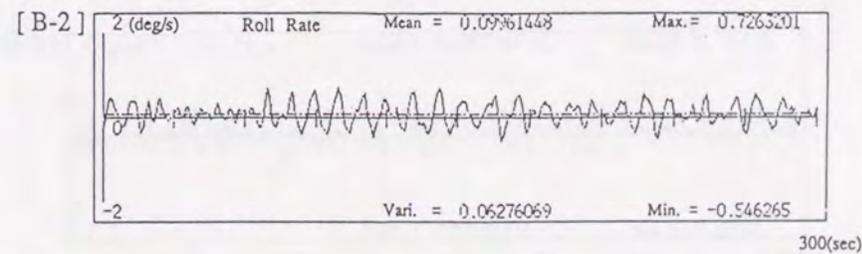
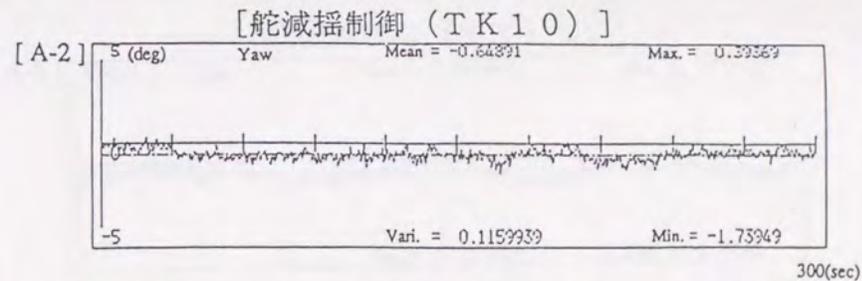
[A-2] 方位角  
 [B-2] 横揺角速度  
 [C-2] 舵角

[A-3] 方位角  
 [B-3] 横揺角速度  
 [C-3] 舵角

図 7.16 B船におけるランダム操舵時の時系列

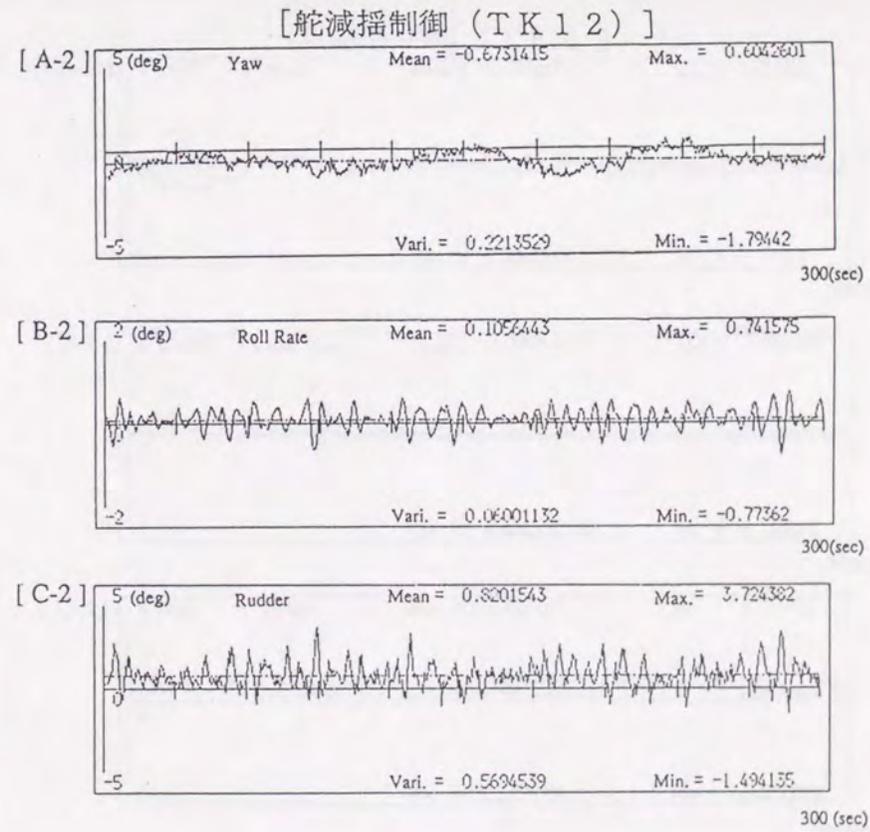
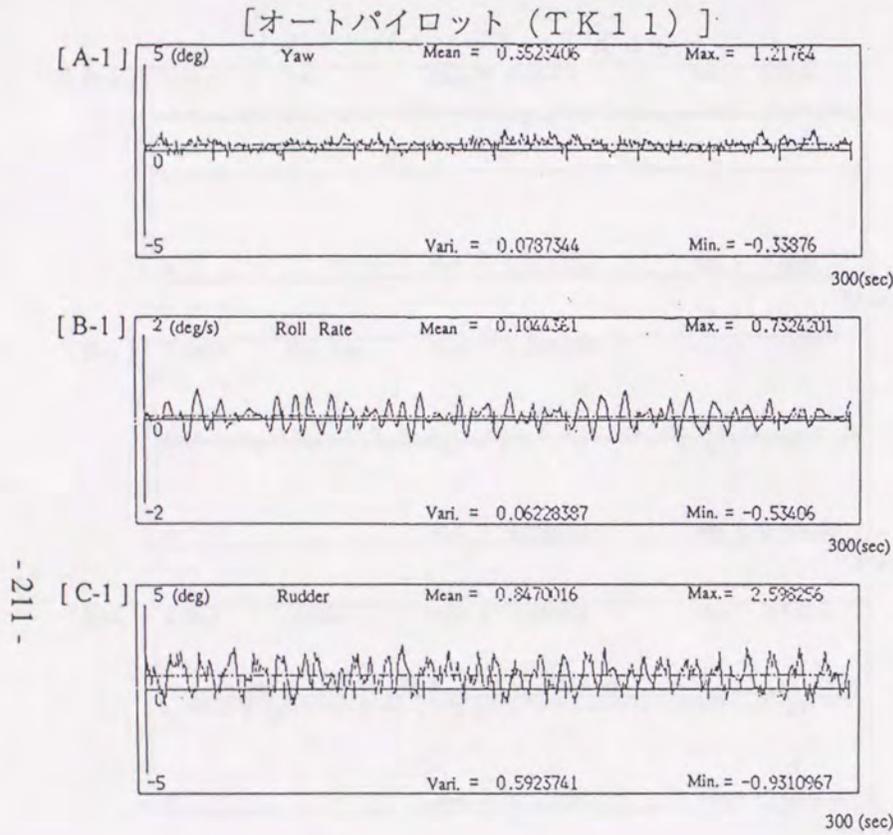


[A-1] 方位角  
[B-1] 横揺角速度  
[C-1] 舵角



[A-2] 方位角  
[B-2] 横揺角速度  
[C-2] 舵角

図 7.17 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列  
(減揺タンクのバルブ閉)



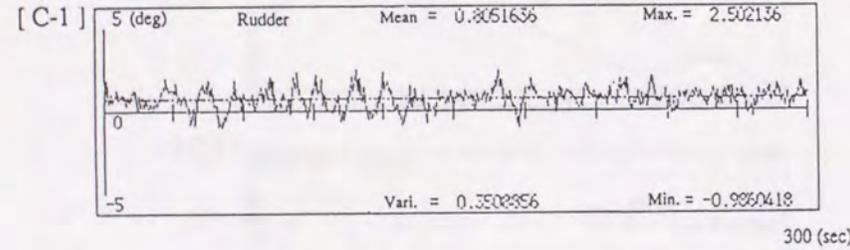
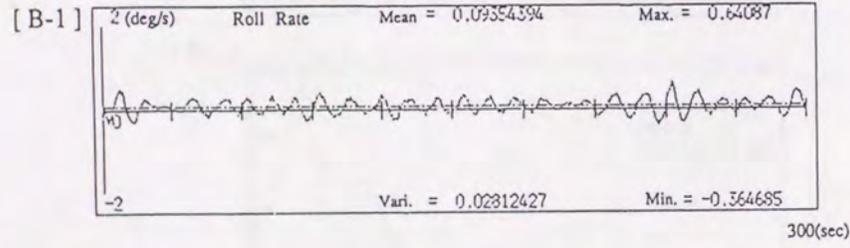
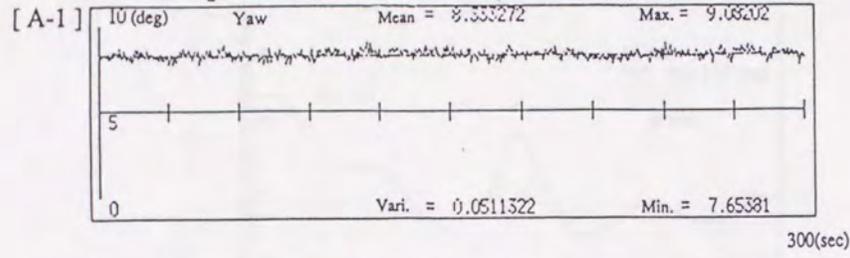
- 211 -

[A-1] 方位角  
 [B-1] 横揺角速度  
 [C-1] 舵角

[A-2] 方位角  
 [B-2] 横揺角速度  
 [C-2] 舵角

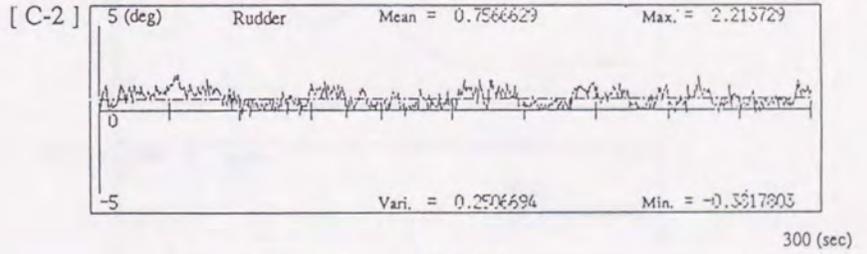
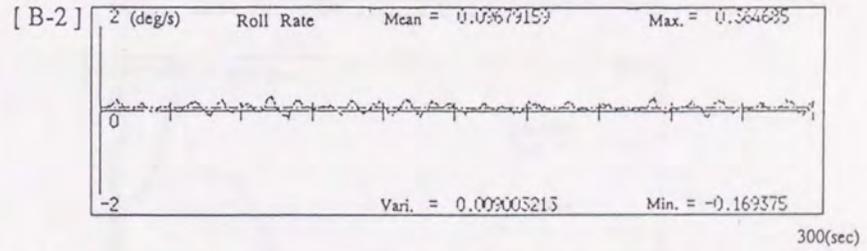
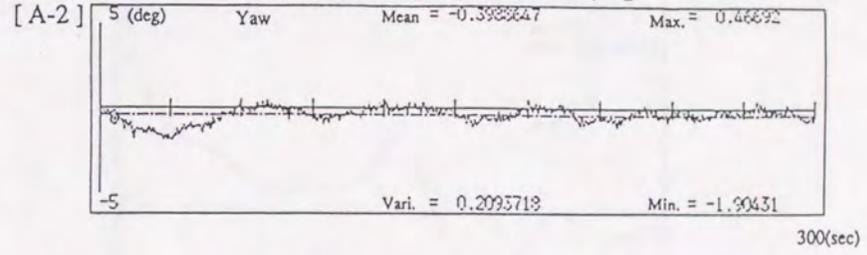
図 7.18 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列  
 (減揺タンクのパルプ開)

[オートパイロット (TK40)]



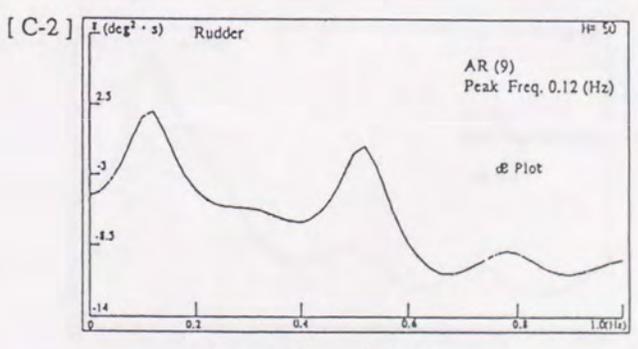
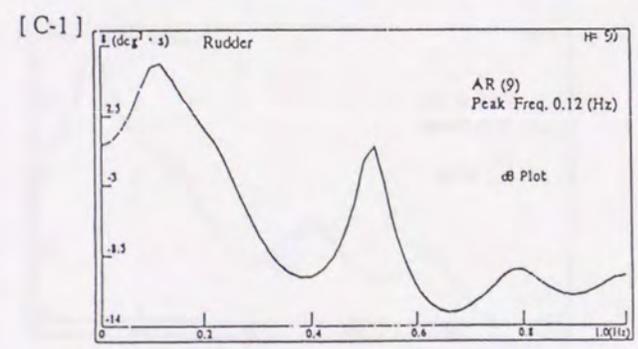
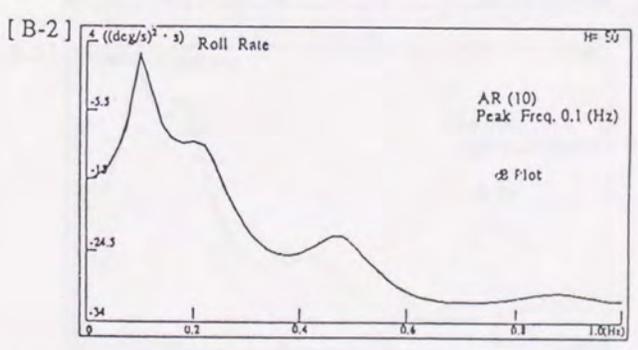
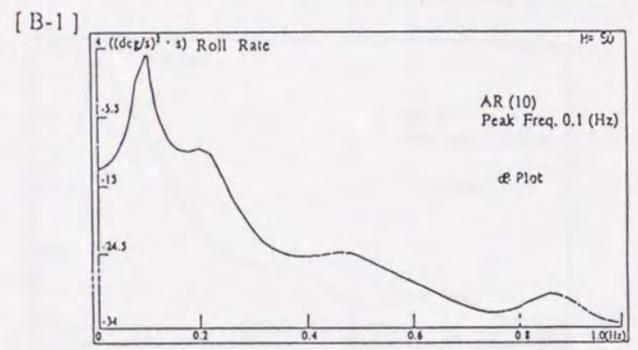
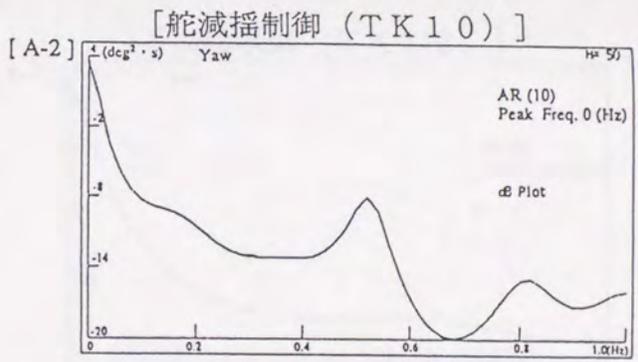
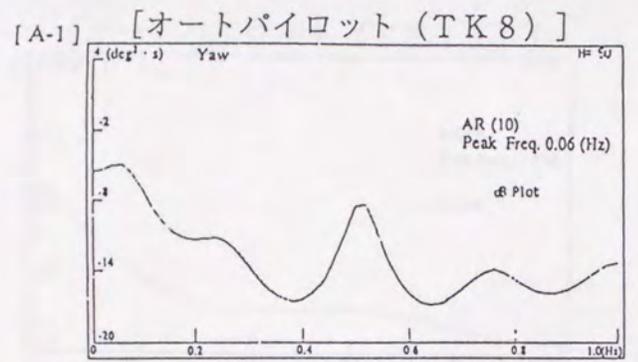
[A-1] 方位角  
 [B-1] 横揺角速度  
 [C-1] 舵角

[舵減揺制御 (TK43)]



[A-2] 方位角  
 [B-2] 横揺角速度  
 [C-2] 舵角

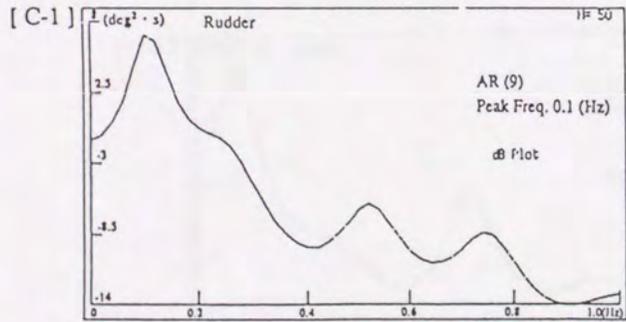
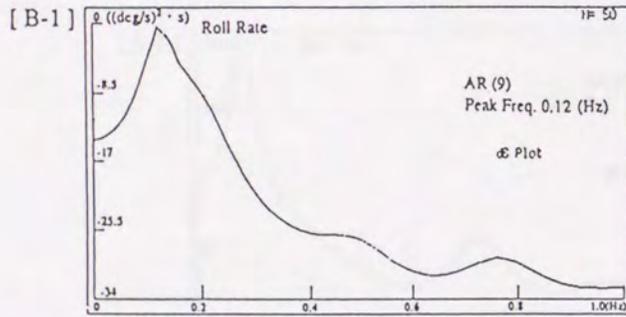
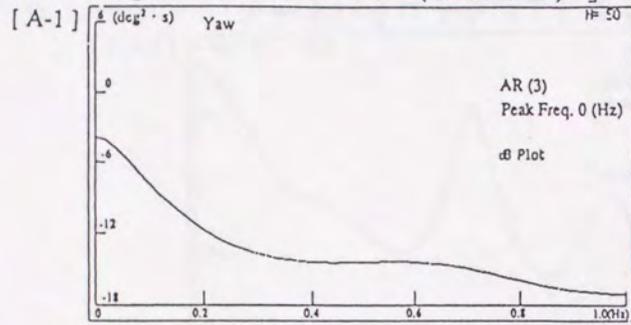
図 7.19 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列  
 (減揺タンク空)



- [A-1] 方位角
- [B-1] 横揺角速度
- [C-1] 舵角
- [A-2] 方位角
- [B-2] 横揺角速度
- [C-2] 舵角

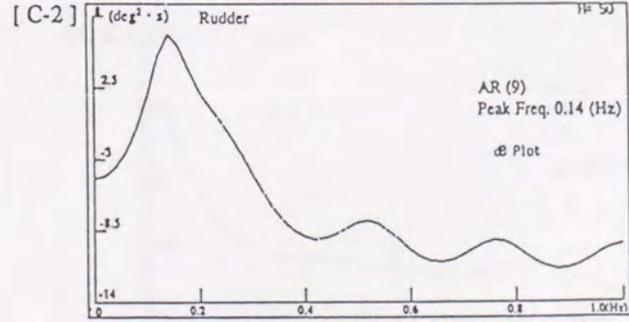
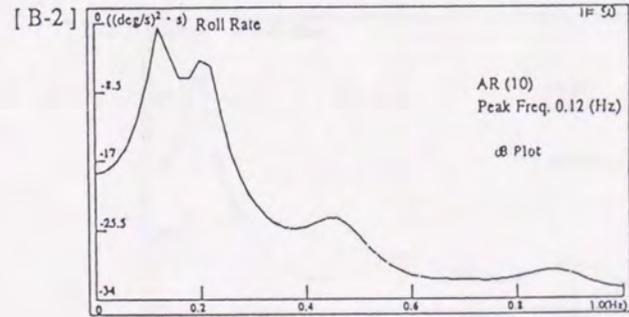
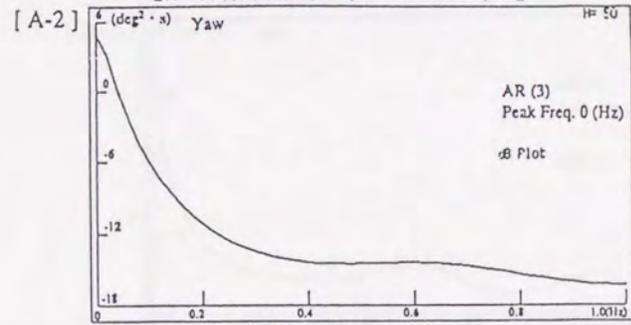
図 7.20 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル (減揺タンクバルブ閉)

[オートパイロット (TK11)]



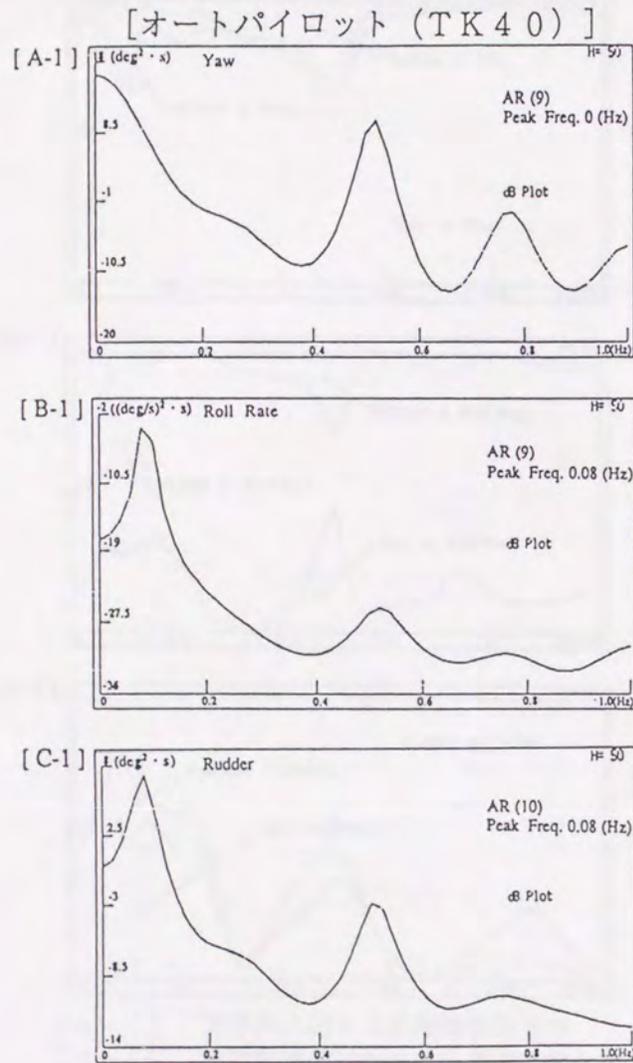
[A-1] 方位角  
 [B-1] 横揺角速度  
 [C-1] 舵角

[舵減揺制御 (TK12)]

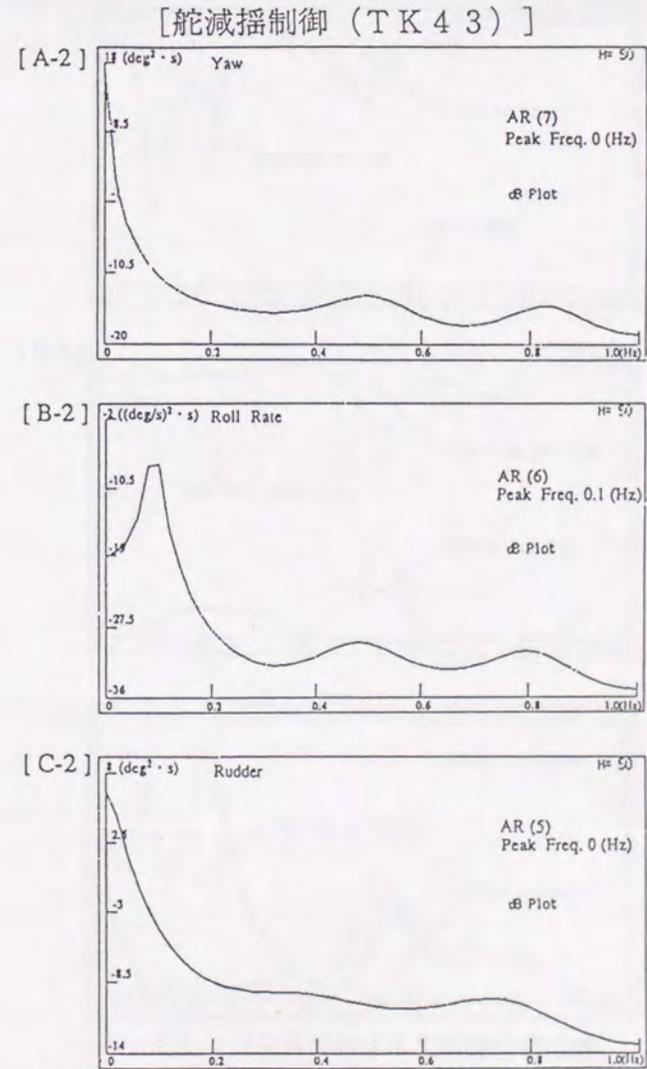


[A-2] 方位角  
 [B-2] 横揺角速度  
 [C-2] 舵角

図 7.2 1 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル  
 (減揺タンクバルブ開)

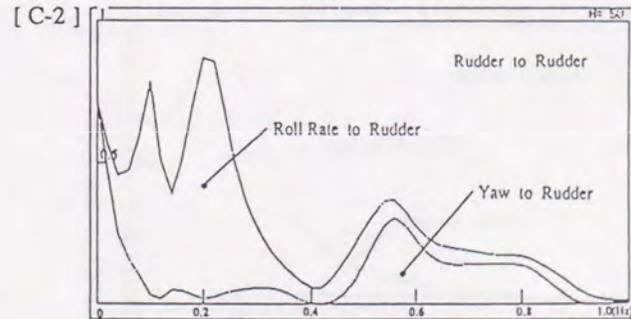
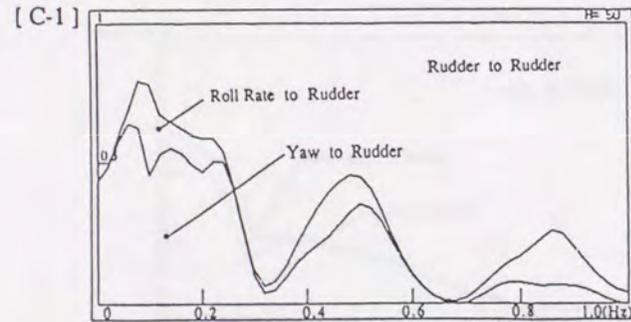
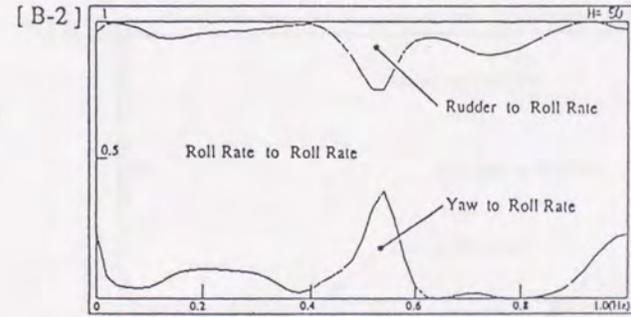
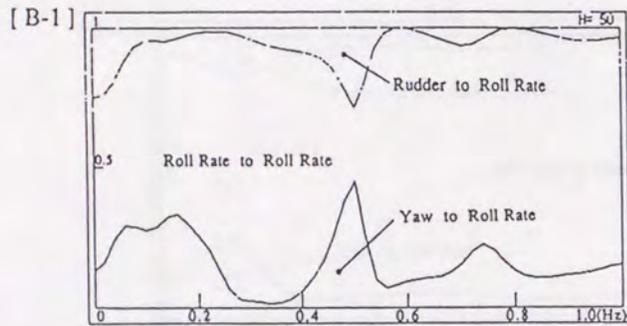
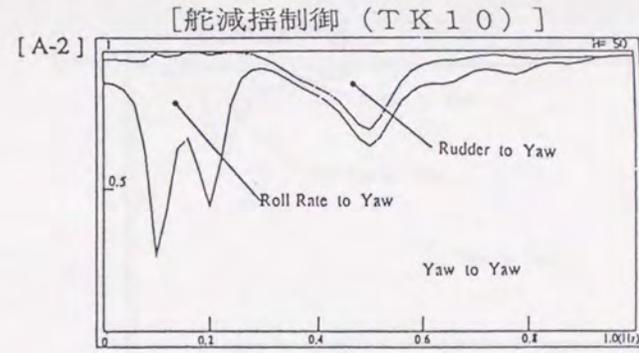
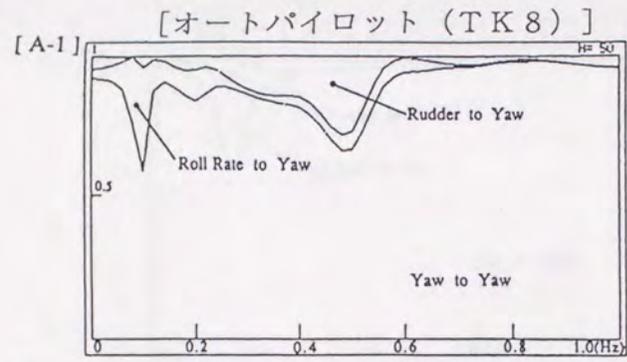


[A-1] 方位角  
[B-1] 横揺角速度  
[C-1] 舵角



[A-2] 方位角  
[B-2] 横揺角速度  
[C-2] 舵角

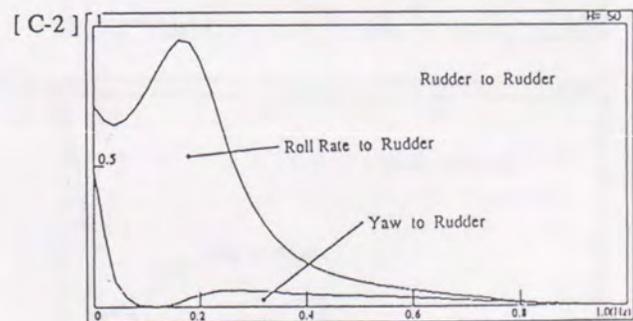
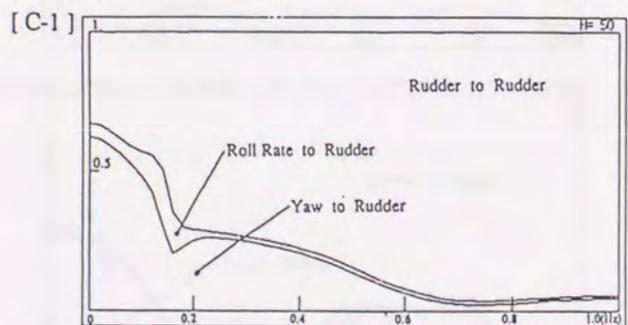
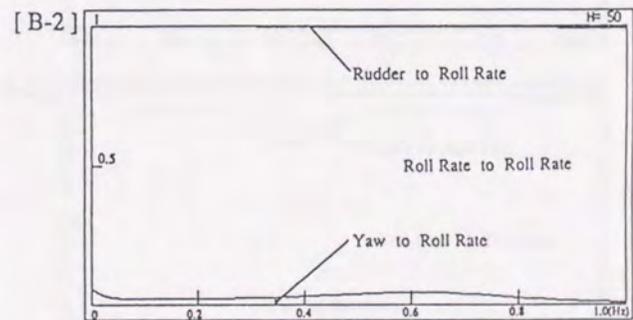
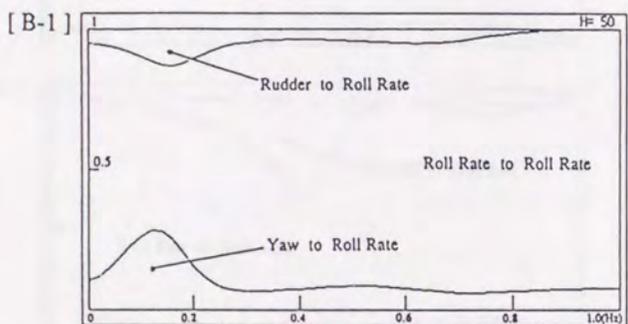
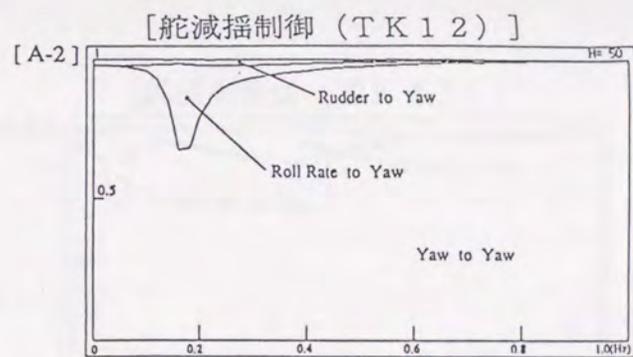
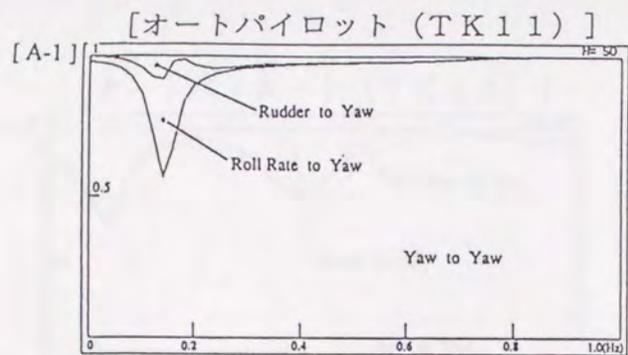
図 7.22 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル  
(減揺タンク空)



- [A-1] 方位角に対する累積雑音寄与率
- [B-1] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率
- [C-1] 舵角に対する累積雑音寄与率

- [A-2] 方位角に対する累積雑音寄与率
- [B-2] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率
- [C-2] 舵角に対する累積雑音寄与率

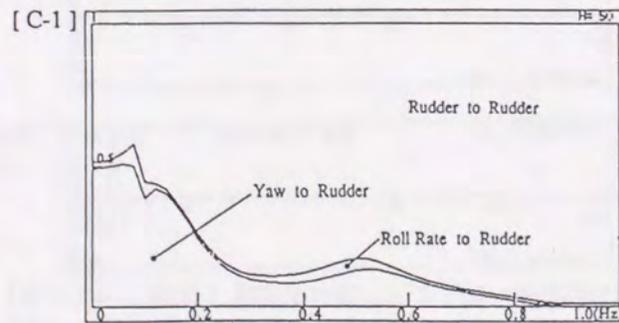
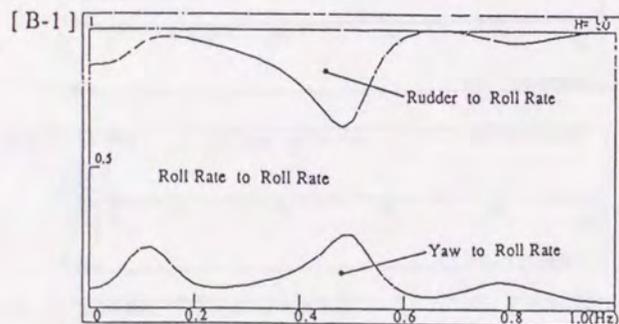
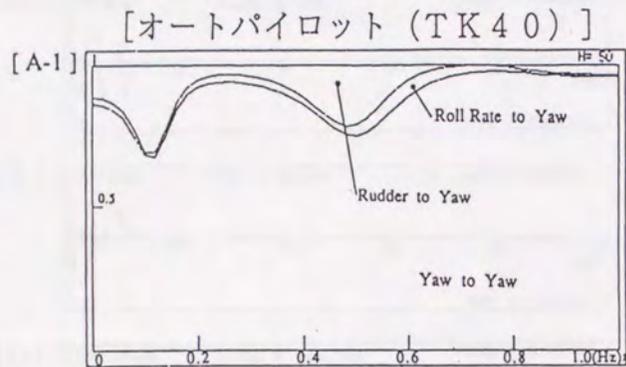
図 7.23 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の累積雑音寄与率  
(減揺タンクのパルプ閉)



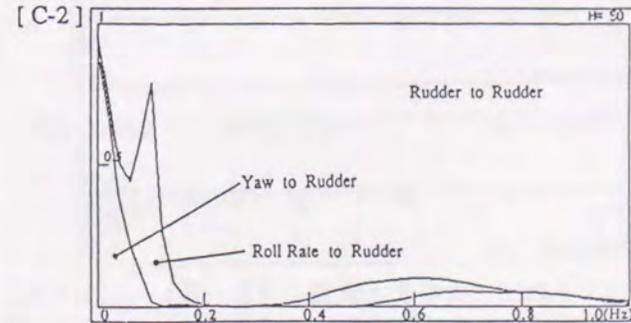
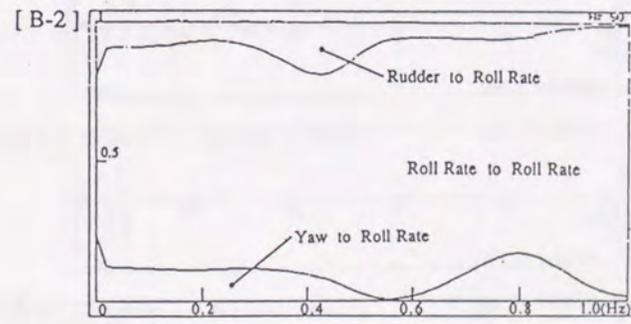
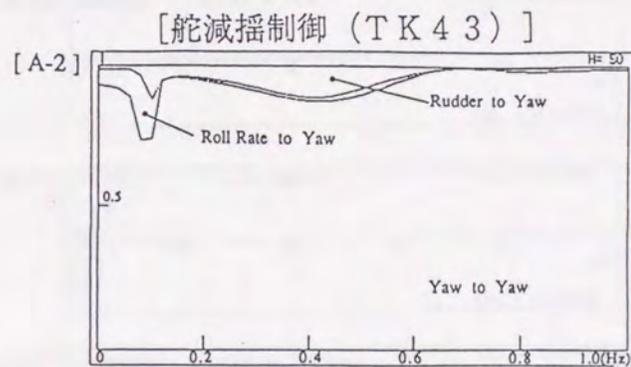
- [A-1] 方位角に対する累積雑音寄与率
- [B-1] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率
- [C-1] 舵角に対する累積雑音寄与率

- [A-2] 方位角に対する累積雑音寄与率
- [B-2] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率
- [C-2] 舵角に対する累積雑音寄与率

図 7.24 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の累積雑音寄与率  
(減揺タンクのパルプ開)



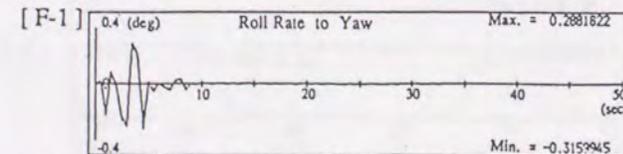
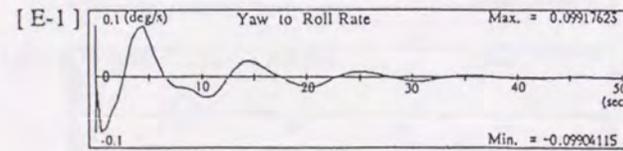
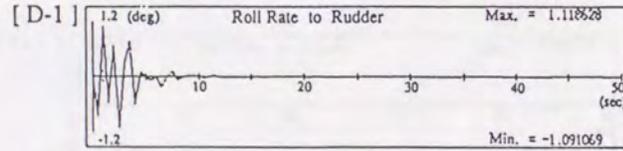
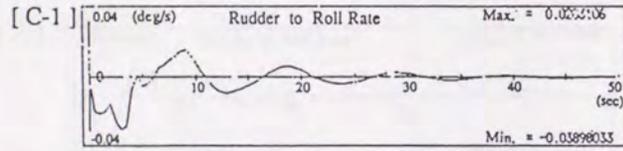
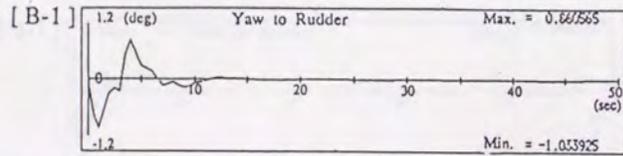
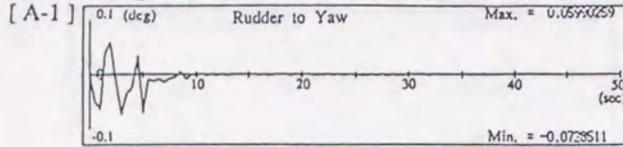
[A-1] 方位角に対する累積雑音寄与率  
 [B-1] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率  
 [C-1] 舵角に対する累積雑音寄与率



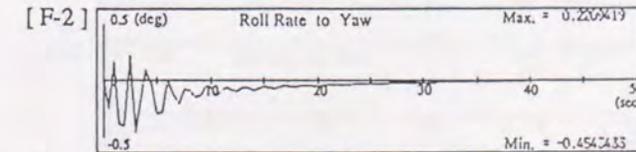
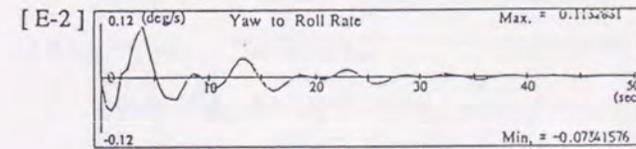
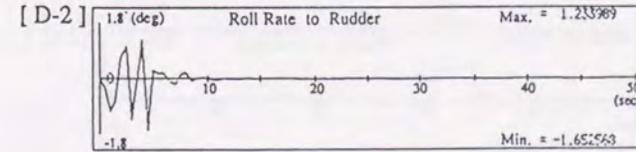
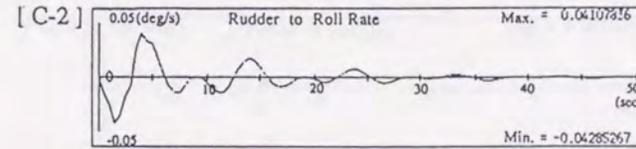
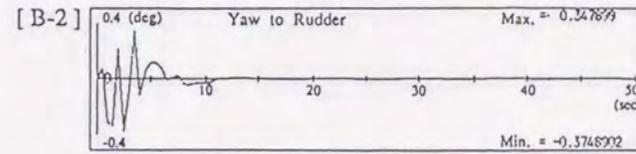
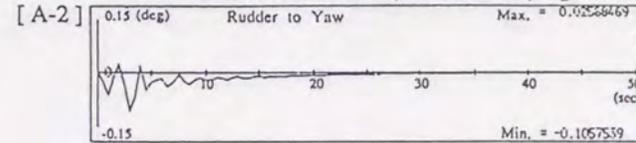
[A-2] 方位角に対する累積雑音寄与率  
 [B-2] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率  
 [C-2] 舵角に対する累積雑音寄与率

図 7.25 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の累積雑音寄与率  
 (減揺タンク空)

[オートパイロット (TK8)]



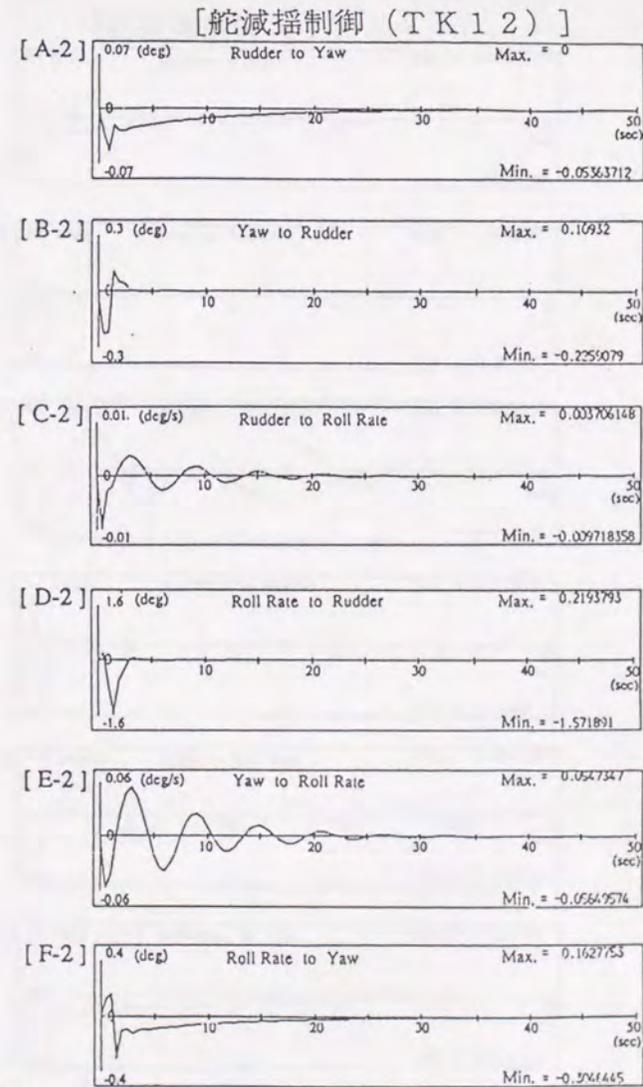
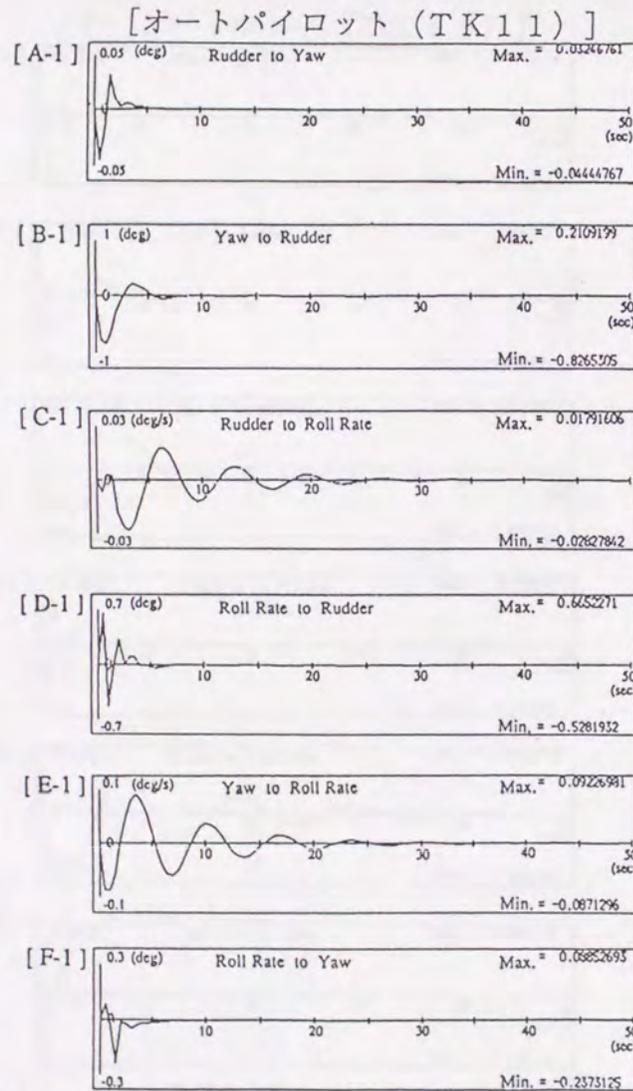
[舵減揺制御 (TK10)]



[A-1]、[B-1] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-1]、[D-1] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-1]、[F-1] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

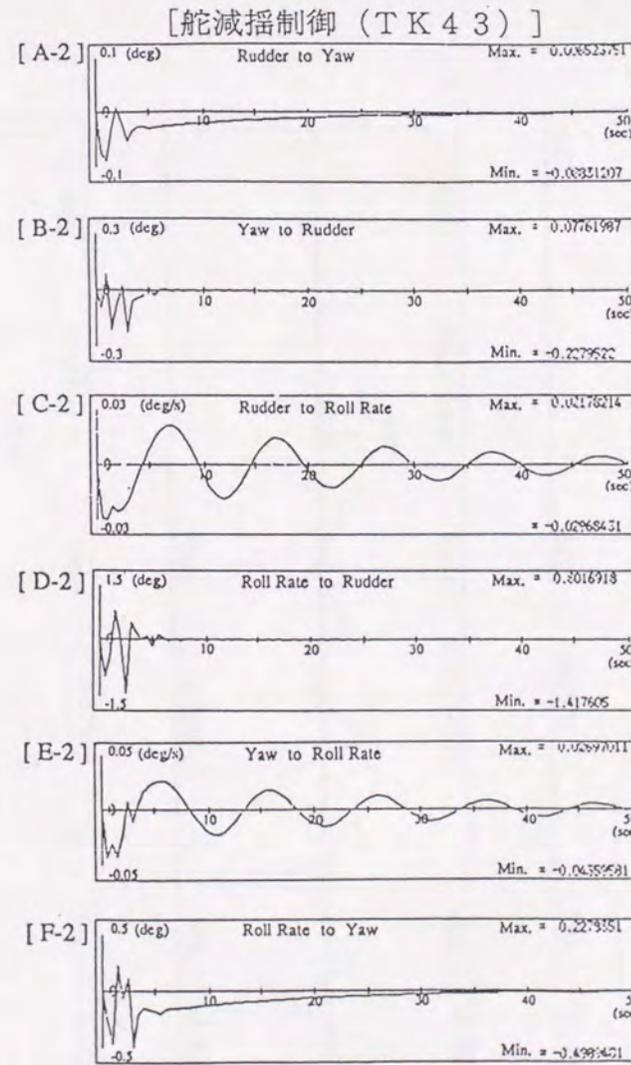
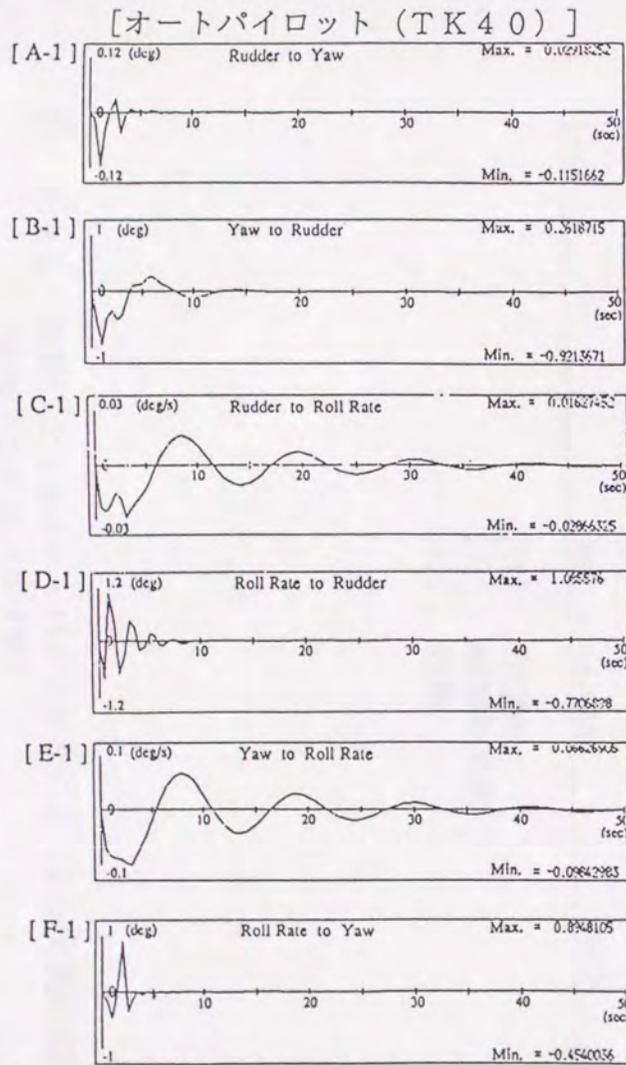
[A-2]、[B-2] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-2]、[D-2] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-2]、[F-2] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

図 7.26 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性 (減揺タンクのバルブ閉)



- |             |                       |             |                       |
|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|
| [A-1]、[B-1] | 舵角と方位角の間のインパルス応答特性    | [A-2]、[B-2] | 舵角と方位角の間のインパルス応答特性    |
| [C-1]、[D-1] | 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  | [C-2]、[D-2] | 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  |
| [E-1]、[F-1] | 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性 | [E-2]、[F-2] | 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性 |

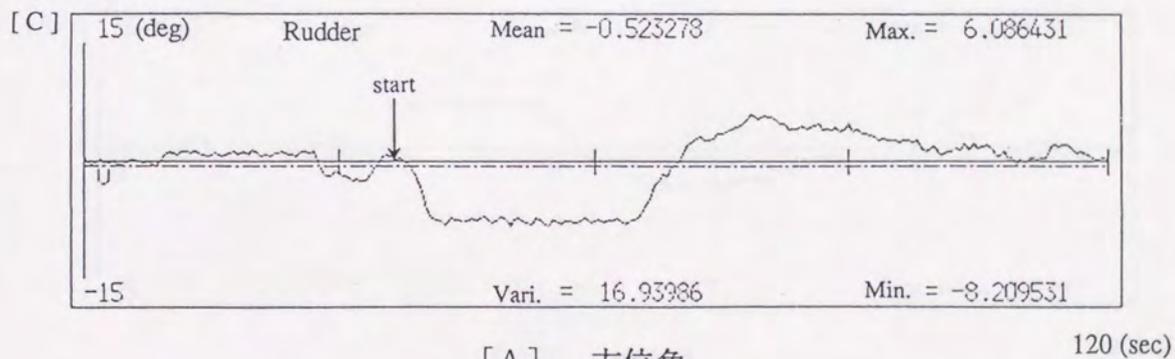
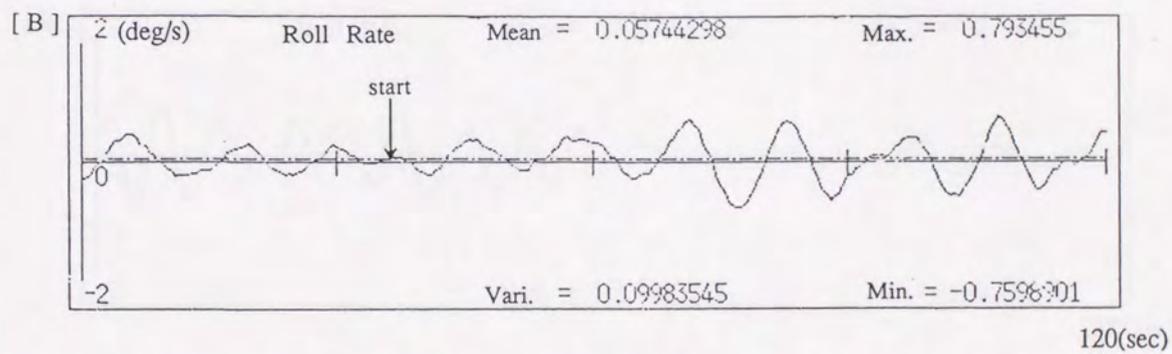
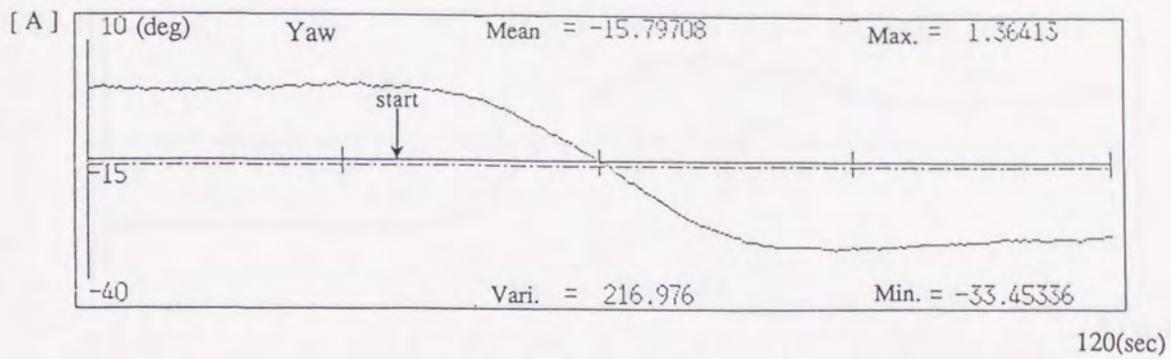
図 7.27 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性  
(減揺タンクのバルブ開)



[A-1]、[B-1] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-1]、[D-1] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-1]、[F-1] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

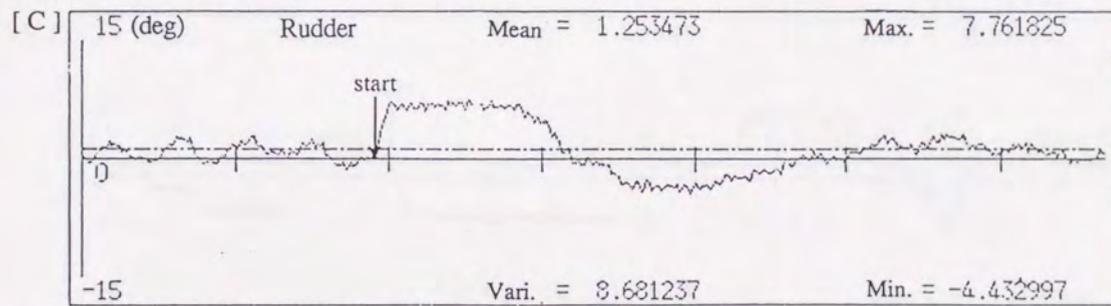
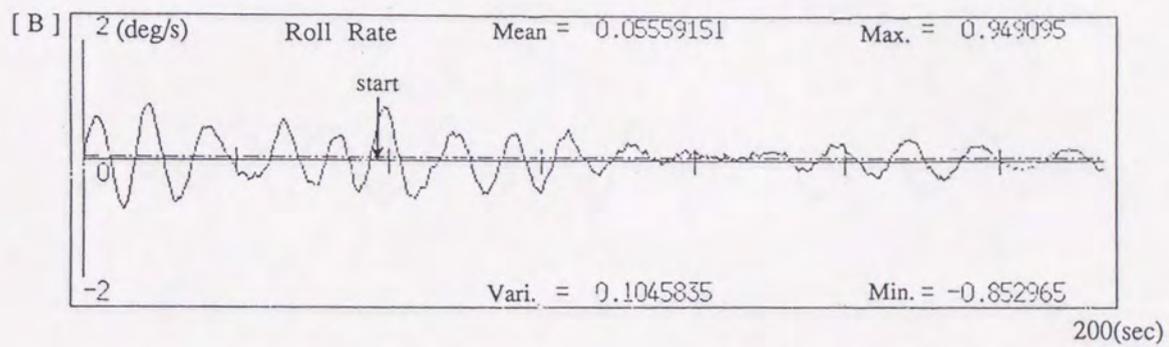
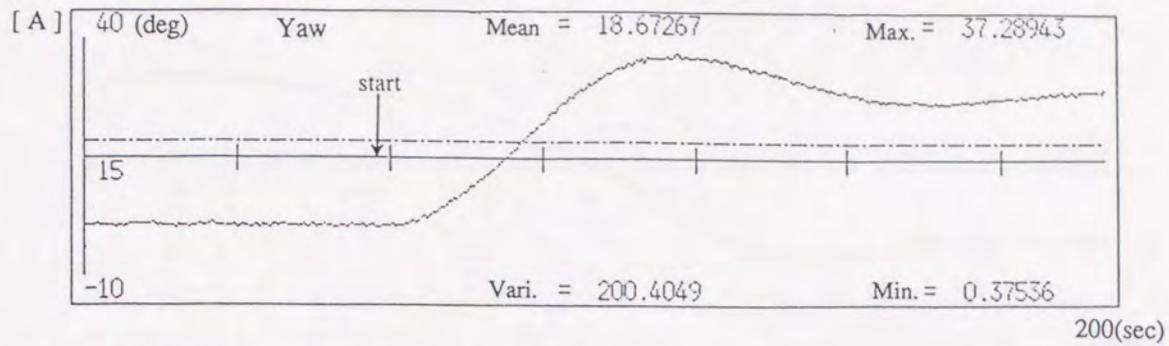
[A-2]、[B-2] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-2]、[D-2] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-2]、[F-2] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

図 7.28 B船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性  
 (減揺タンク空)



[A] 方位角  
[B] 横揺角速度  
[C] 舵角

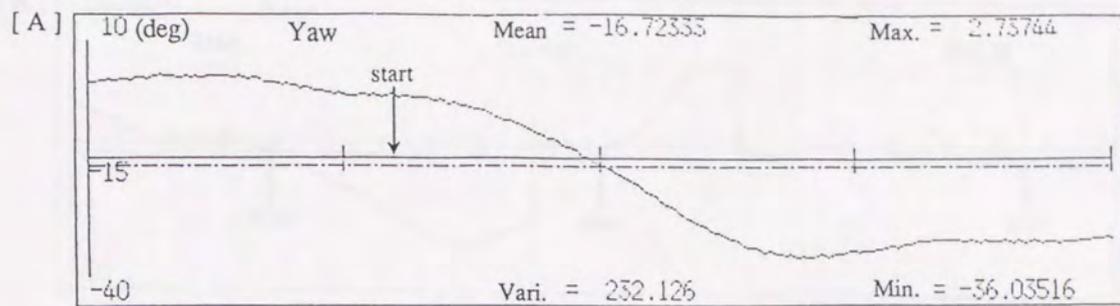
図 7.29 B船におけるオートパイロットによる30度変針実験  
(減揺タンクバルブ閉)



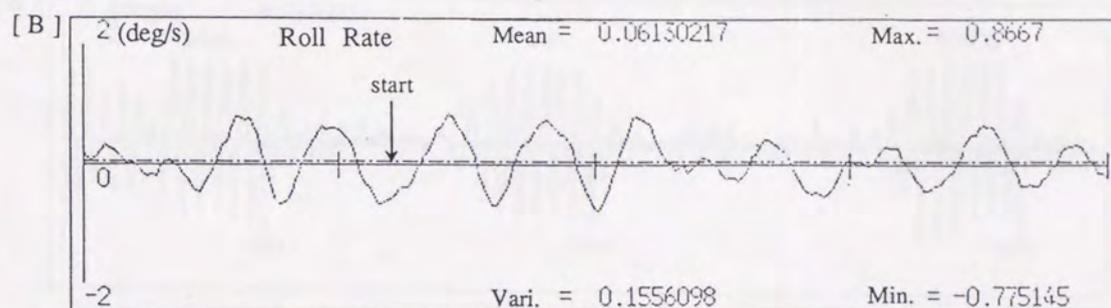
- [A] 方位角  
 [B] 横揺角速度  
 [C] 舵角

200 (sec)

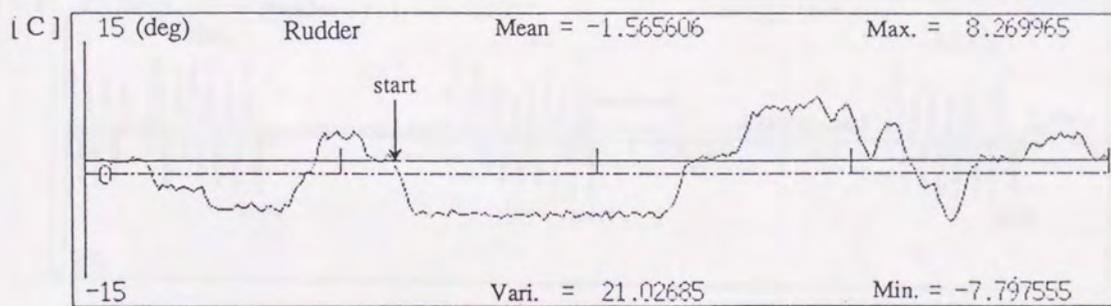
図 7.30 B船における舵減揺制御による30度変針実験  
 (減揺タンクのパルプ閉)



120(sec)



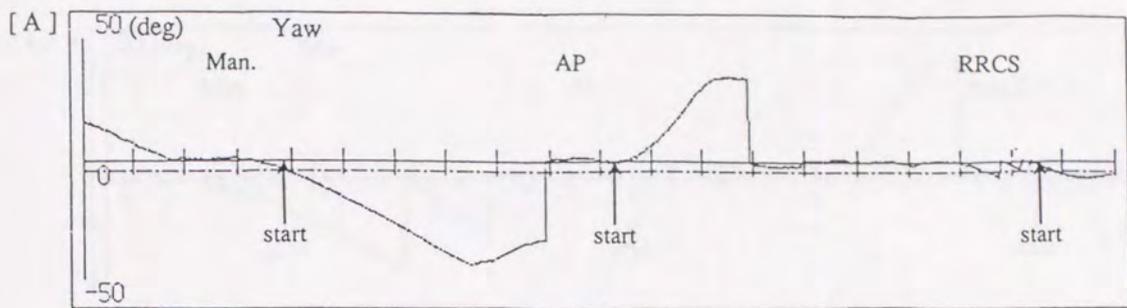
120(sec)



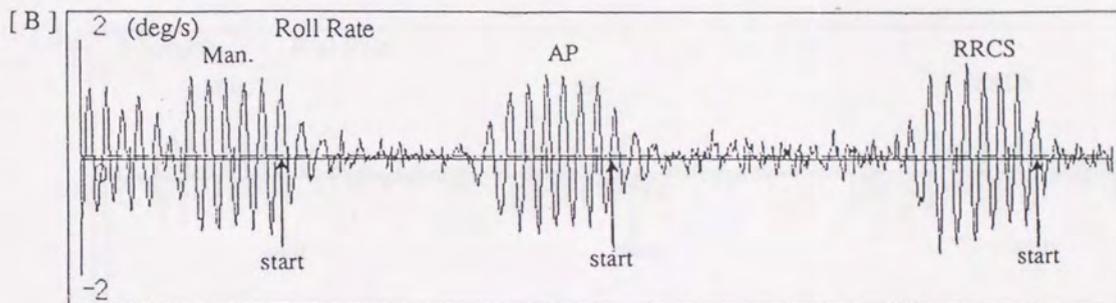
120 (sec)

- [A] 方位角
- [B] 横揺角速度
- [C] 舵角

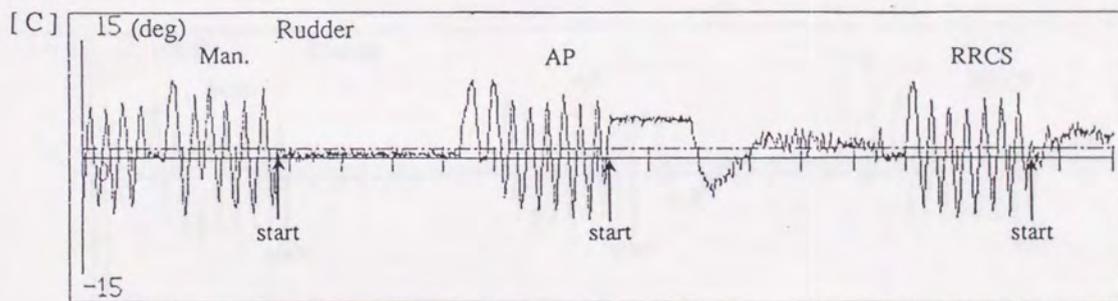
図 7.3 1 B船におけるマニュアル操舵による30度変針実験  
(減揺タンクのパルプ閉)



600(sec)



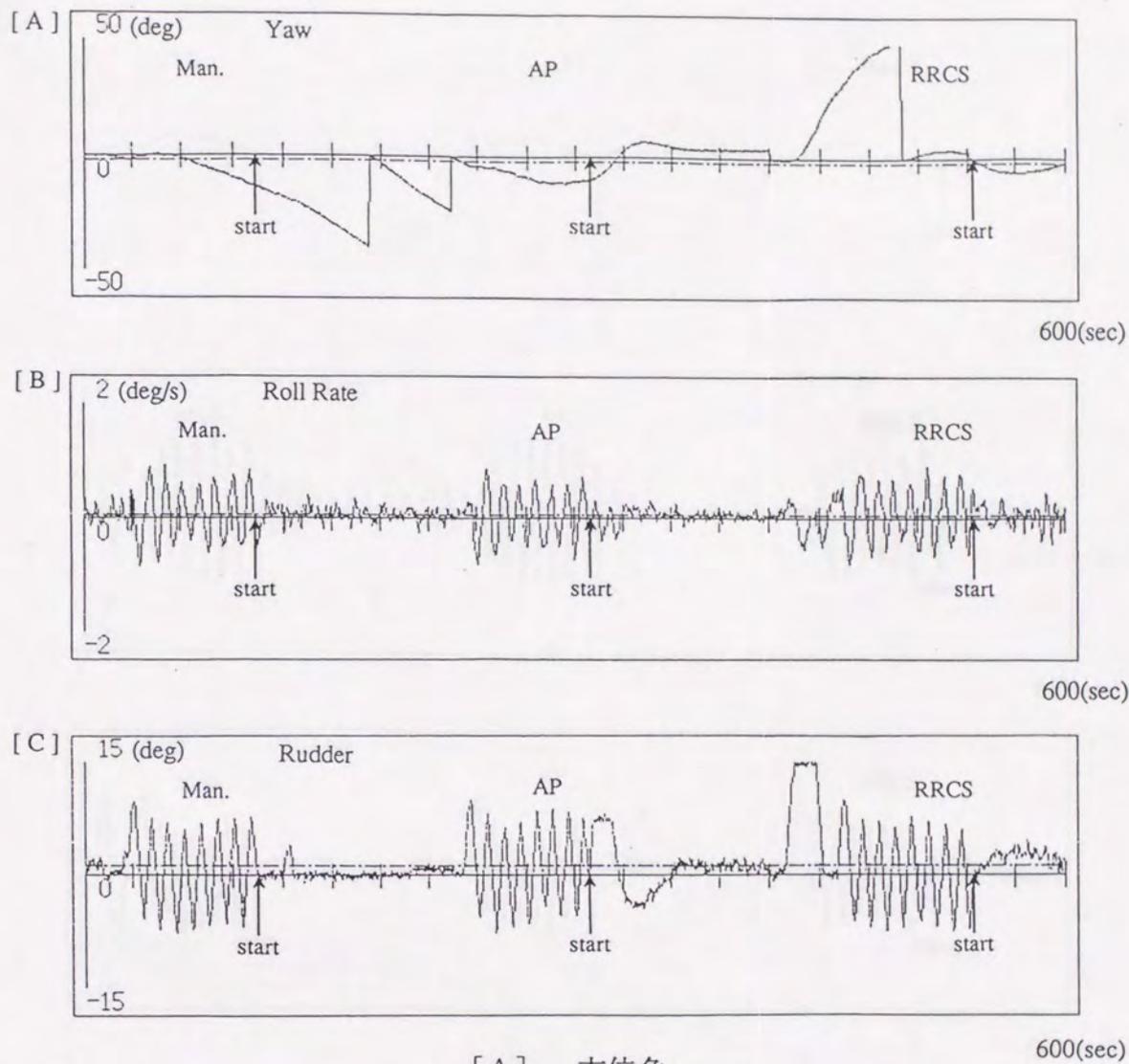
600(sec)



600(sec)

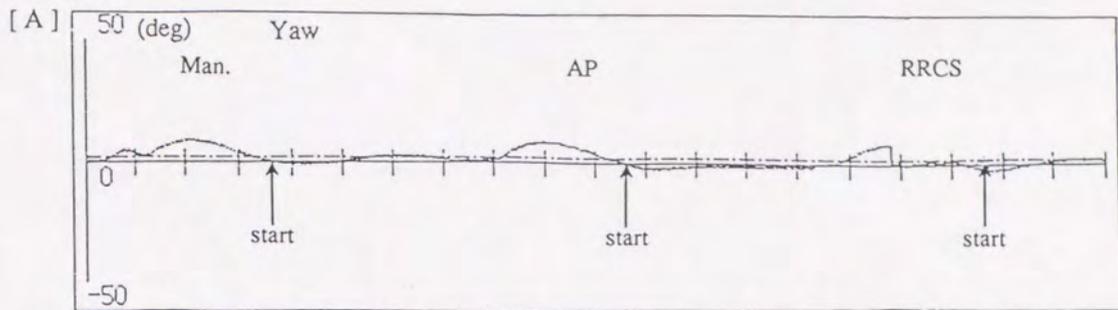
- [ A ] 方位角
- [ B ] 横揺角速度
- [ C ] 舵角

図 7.3 2 B船における強制動揺実験 (減揺タンクのパルプ閉)

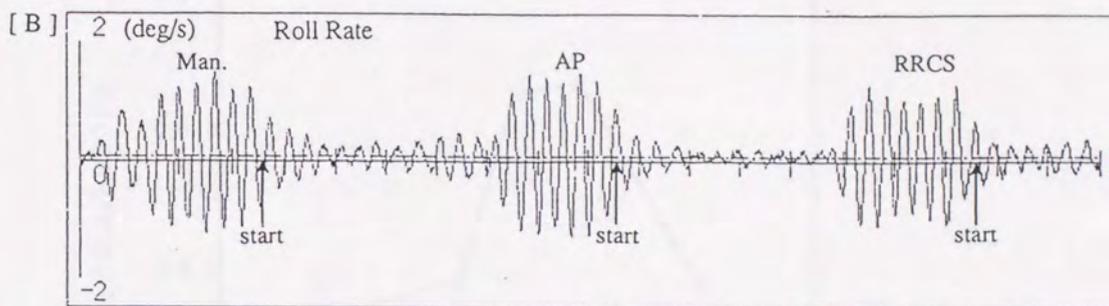


- [A] 方位角
- [B] 横揺角速度
- [C] 舵角

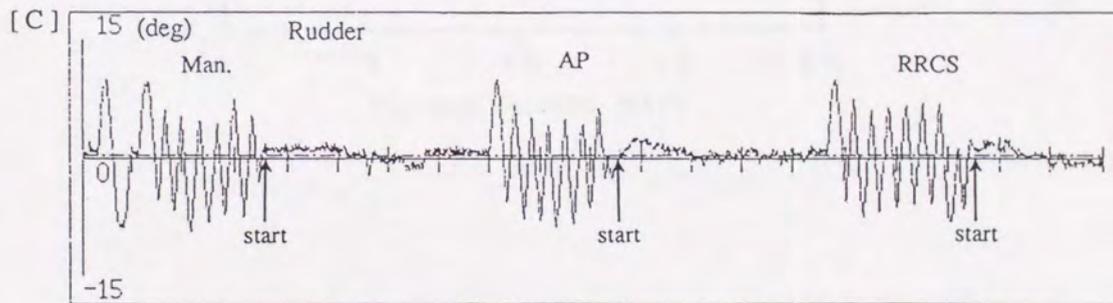
図 7.33 B船における強制動揺実験 (減揺タンクのパルプ開)



600(sec)



600(sec)



600(sec)

- [A] 方位角
- [B] 横揺角速度
- [C] 舵角

図 7.34 B船における強制動揺実験 (減揺タンク空)

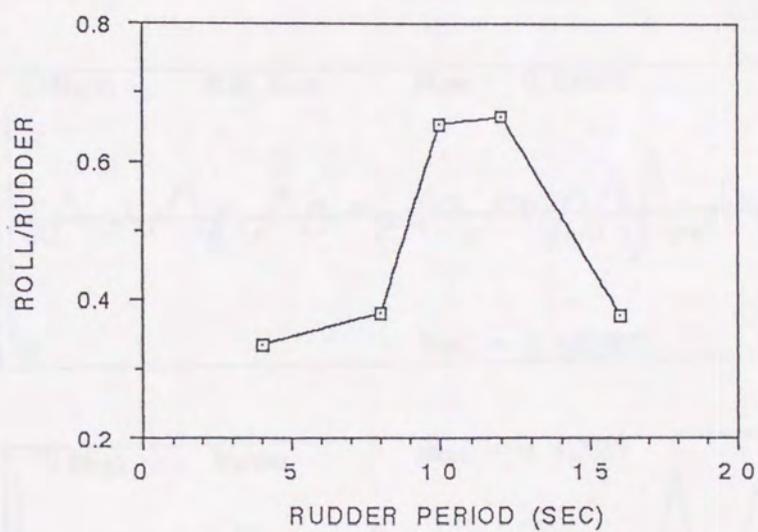
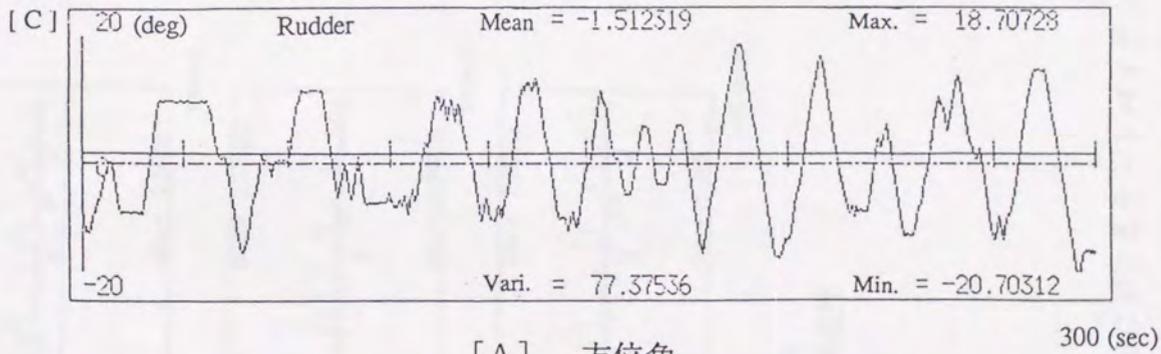
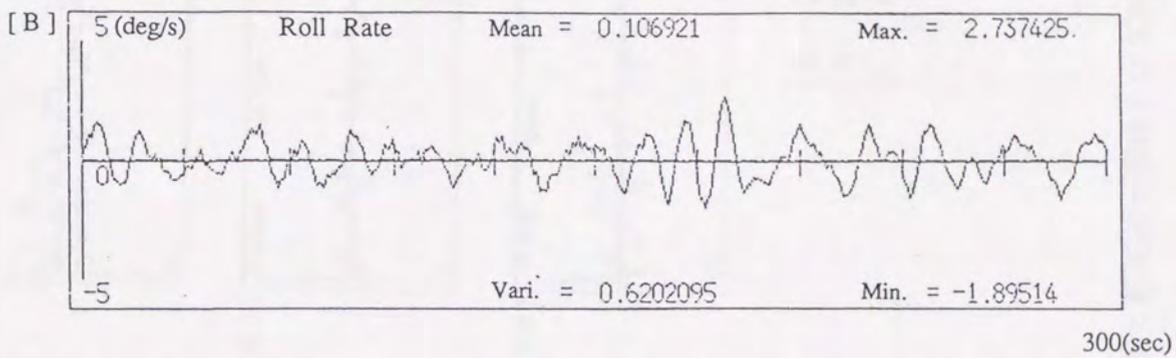
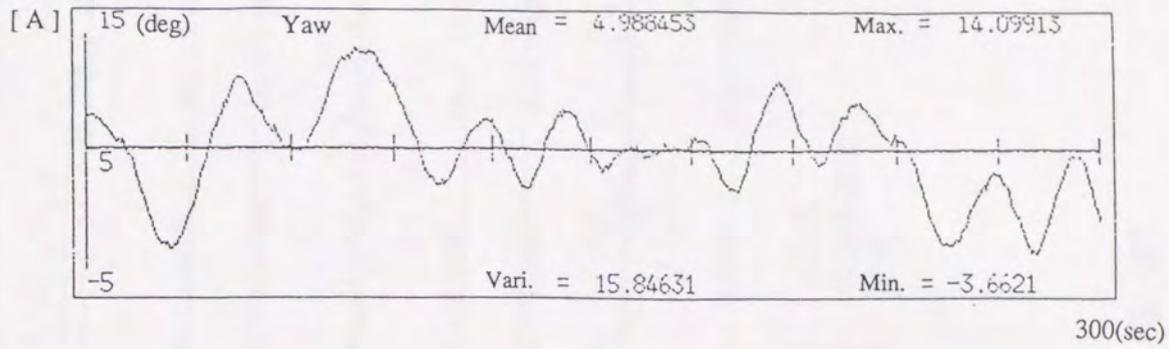


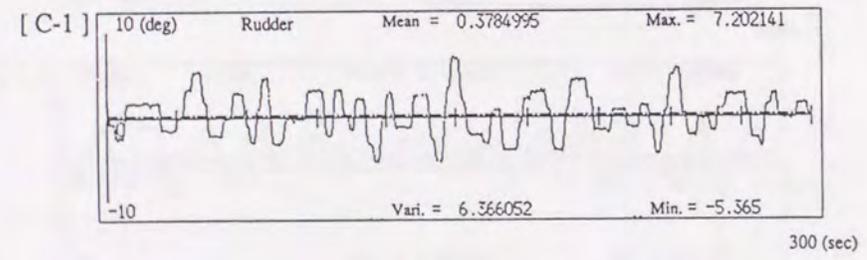
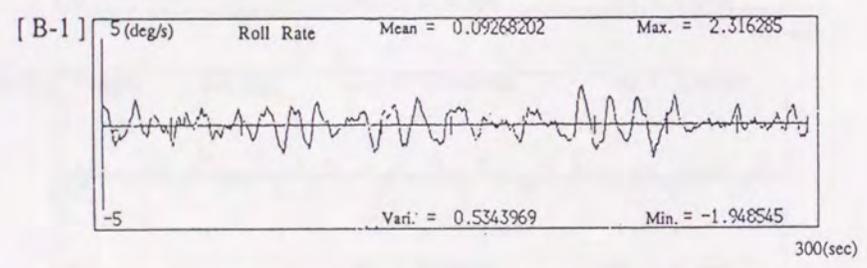
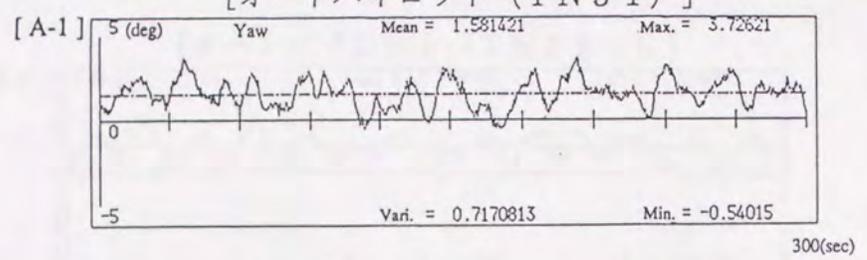
図 7.35 C船の正弦操舵による横揺応答特性



- [A] 方位角
- [B] 横揺角速度
- [C] 舵角

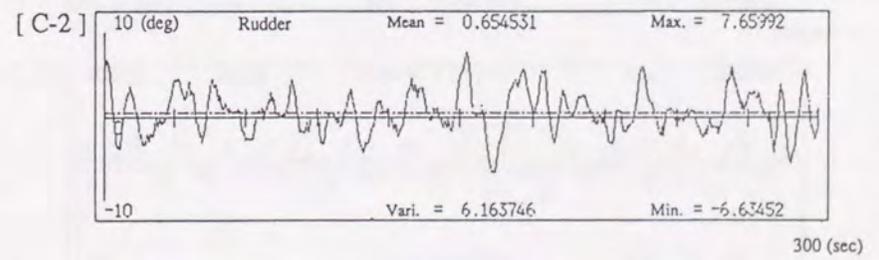
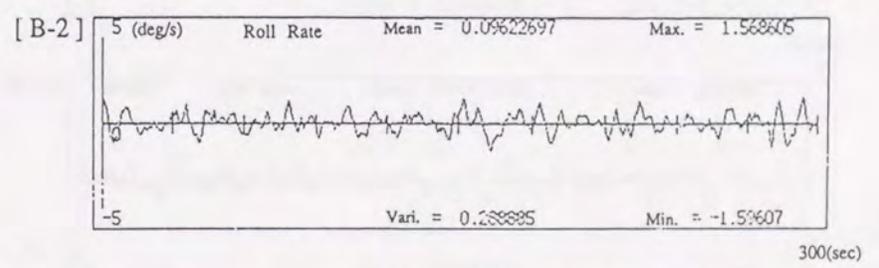
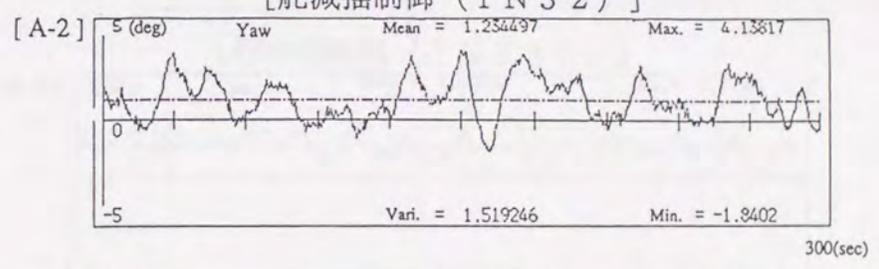
図 7.36 C船におけるランダム操舵時の時系列

[オートパイロット (TN31)]



[A-1] 方位角  
[B-1] 横揺角速度  
[C-1] 舵角

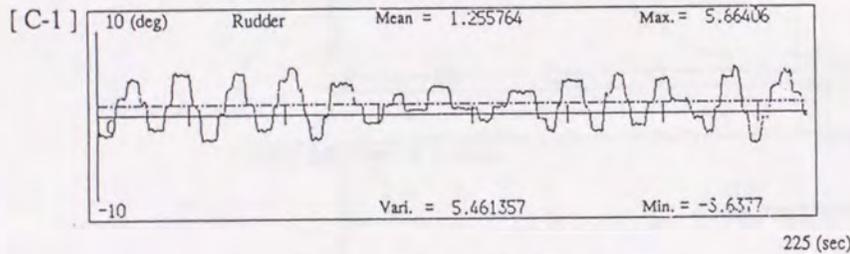
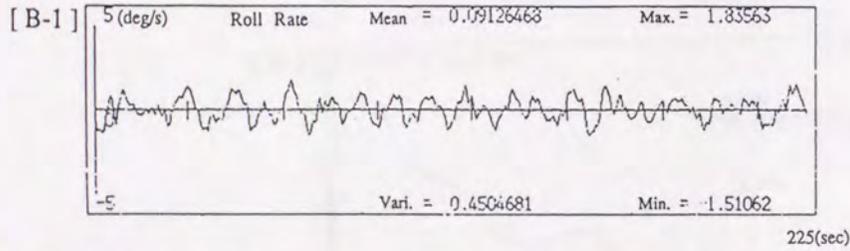
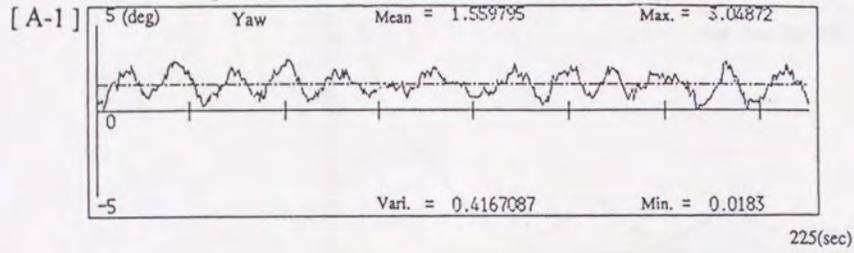
[舵減揺制御 (TN32)]



[A-2] 方位角  
[B-2] 横揺角速度  
[C-2] 舵角

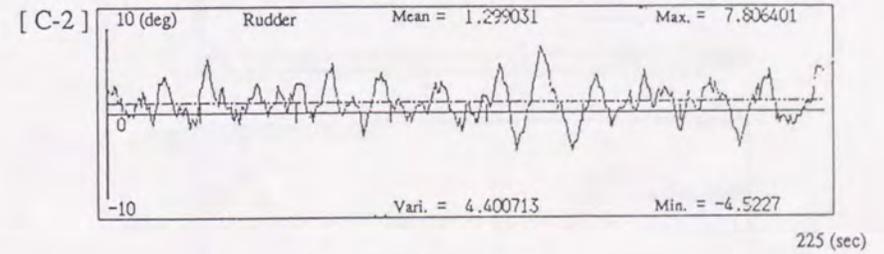
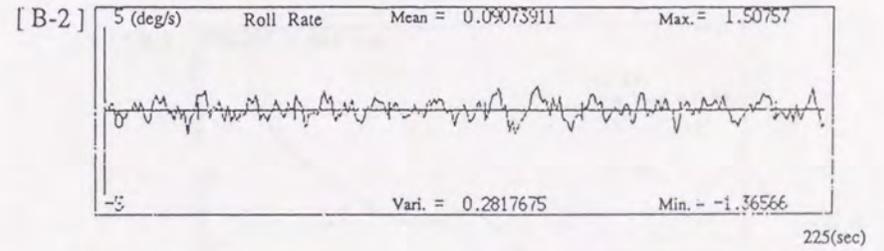
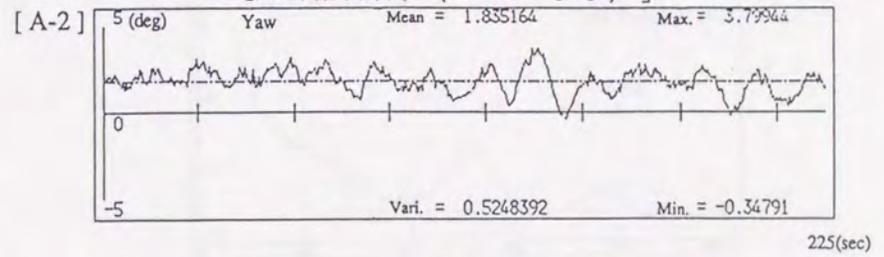
図 7.37 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列 (追い波)

[オートパイロット (TN281)]



[A-1] 方位角  
[B-1] 横揺角速度  
[C-1] 舵角

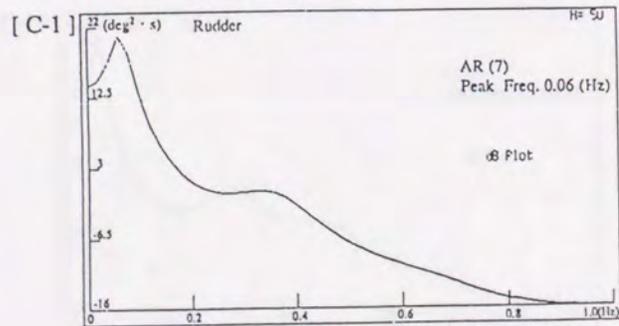
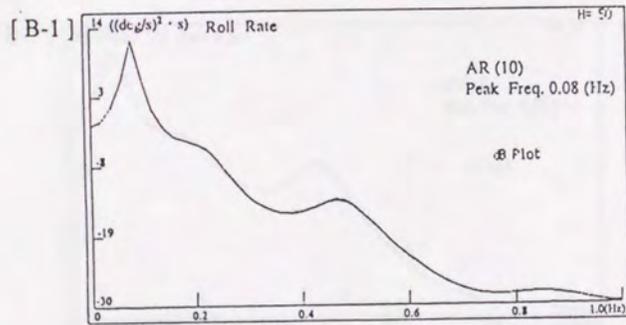
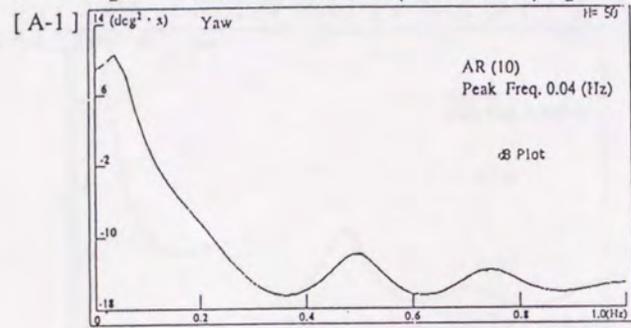
[舵減揺制御 (TN283)]



[A-2] 方位角  
[B-2] 横揺角速度  
[C-2] 舵角

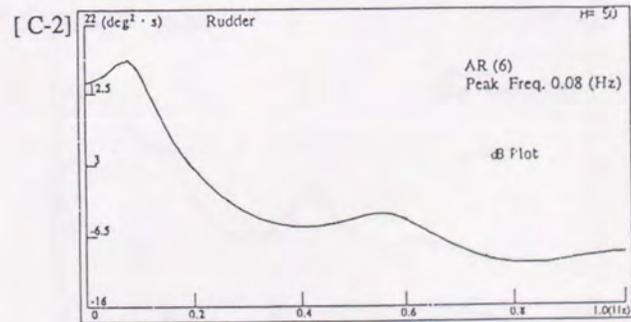
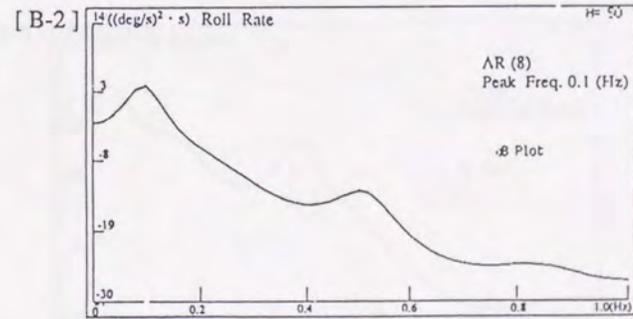
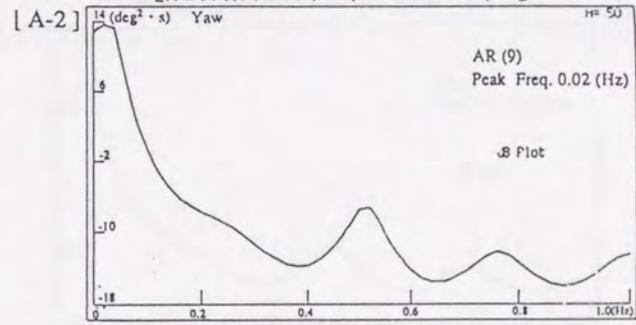
図 7.38 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の時系列 (向かい波)

[オートパイロット (TN31)]



[A-1] 方位角  
[B-1] 横揺角速度  
[C-1] 舵角

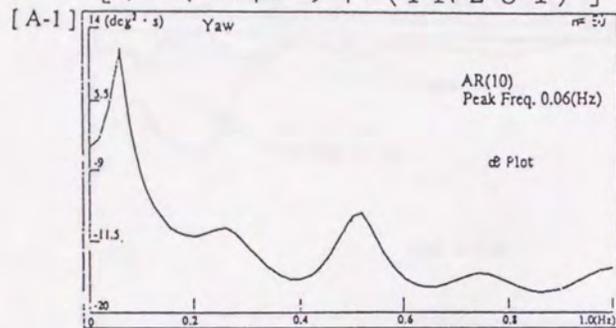
[舵減揺制御 (TN32)]



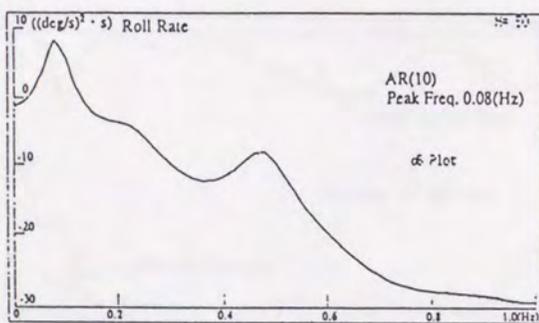
[A-2] 方位角  
[B-2] 横揺角速度  
[C-2] 舵角

図 7.39 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル (追い波)

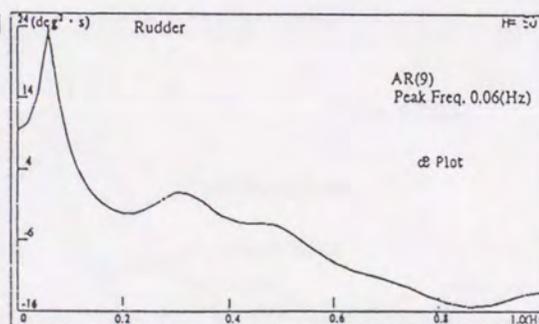
[オートパイロット (TN281)]



[B-1]

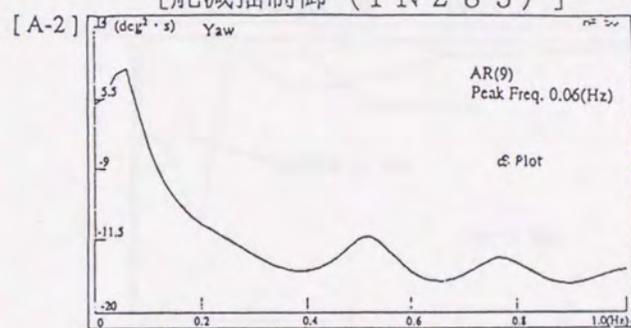


[C-1]

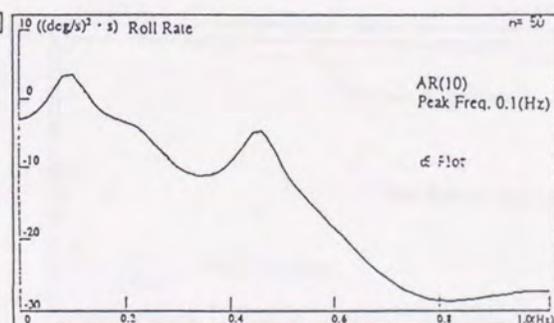


[A-1] 方位角  
[B-1] 横揺角速度  
[C-1] 舵角

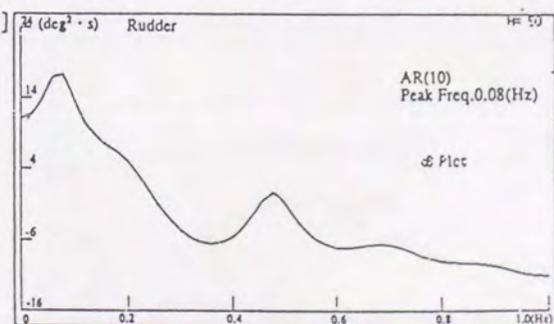
[舵減揺制御 (TN283)]



[B-2]

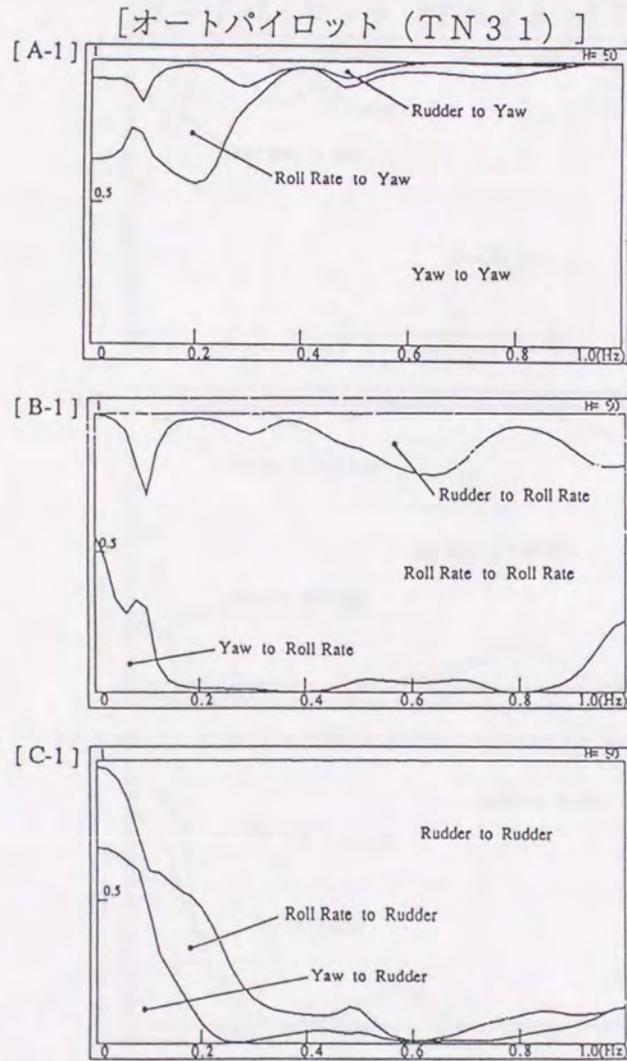


[C-2]

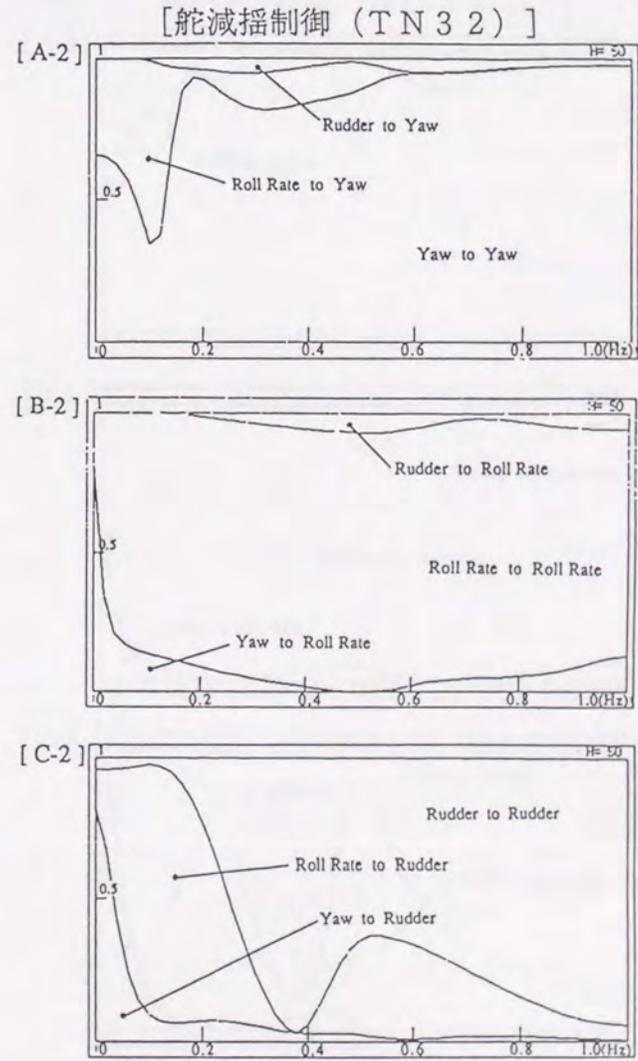


[A-2] 方位角  
[B-2] 横揺角速度  
[C-2] 舵角

図 7.40 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のスペクトル (向かい波)

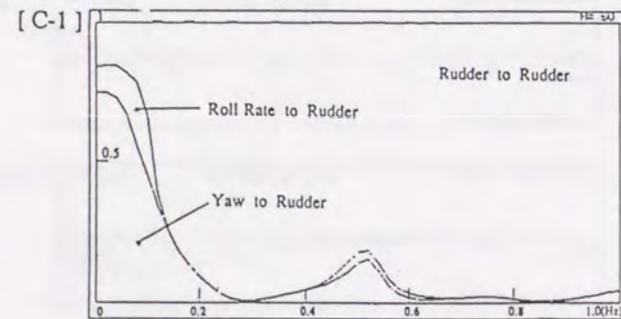
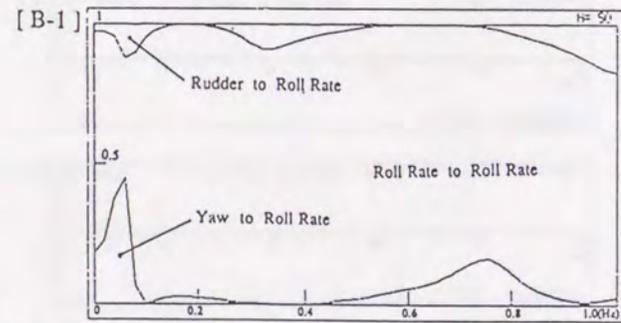
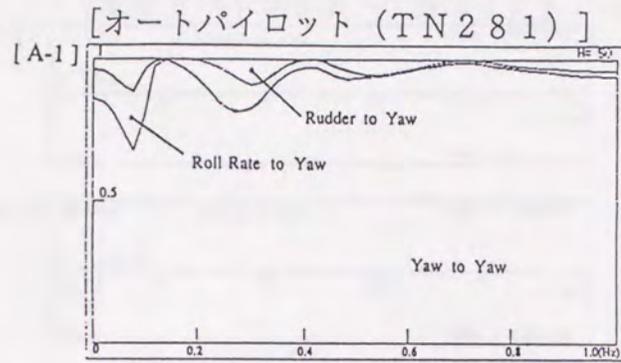


[A-1] 方位角に対する累積雑音寄与率  
 [B-1] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率  
 [C-1] 舵角に対する累積雑音寄与率

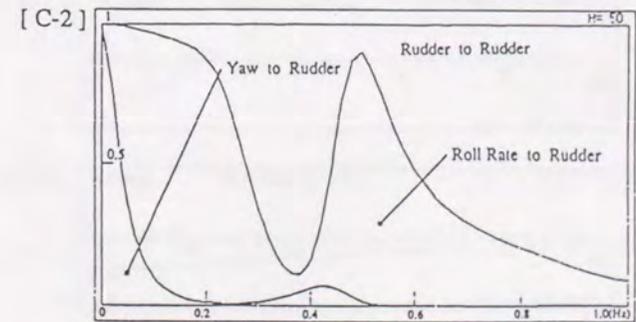
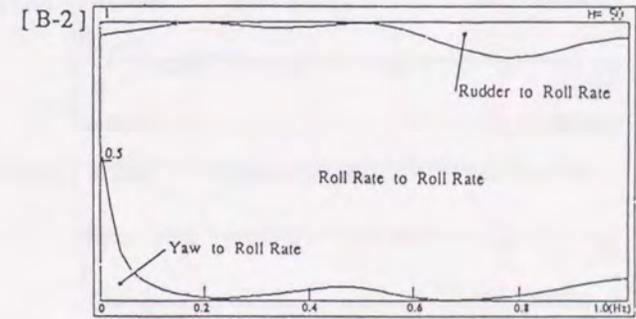
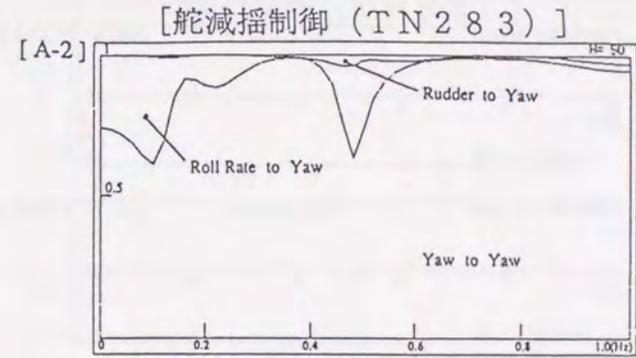


[A-2] 方位角に対する累積雑音寄与率  
 [B-2] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率  
 [C-2] 舵角に対する累積雑音寄与率

図 7.4 1 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の累積雑音寄与率 (追い波)

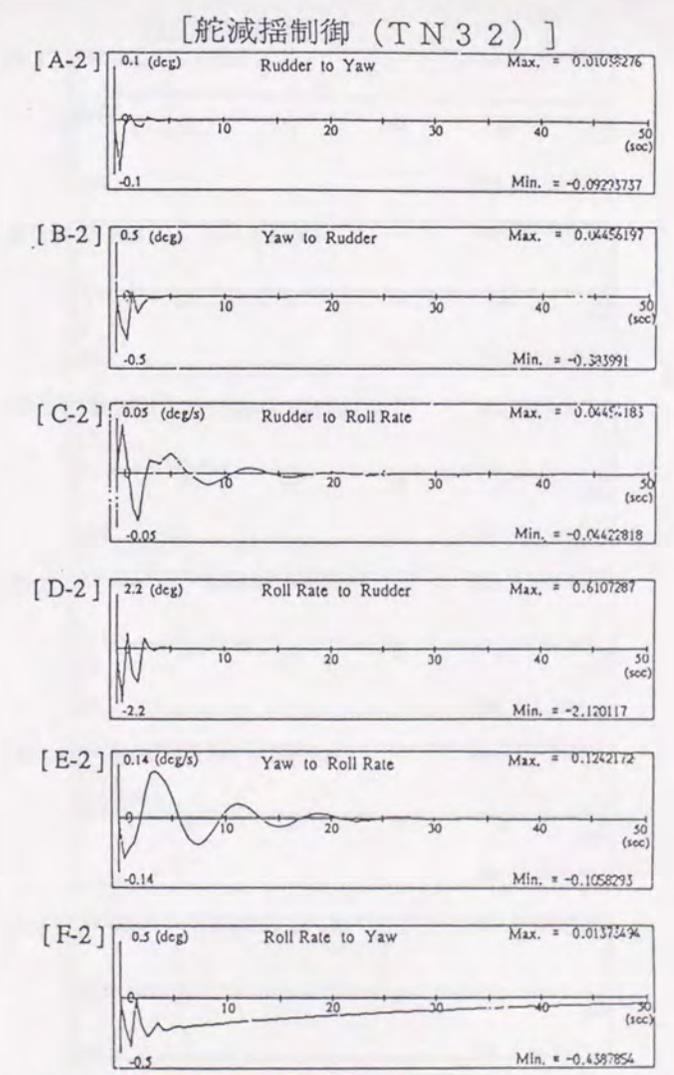
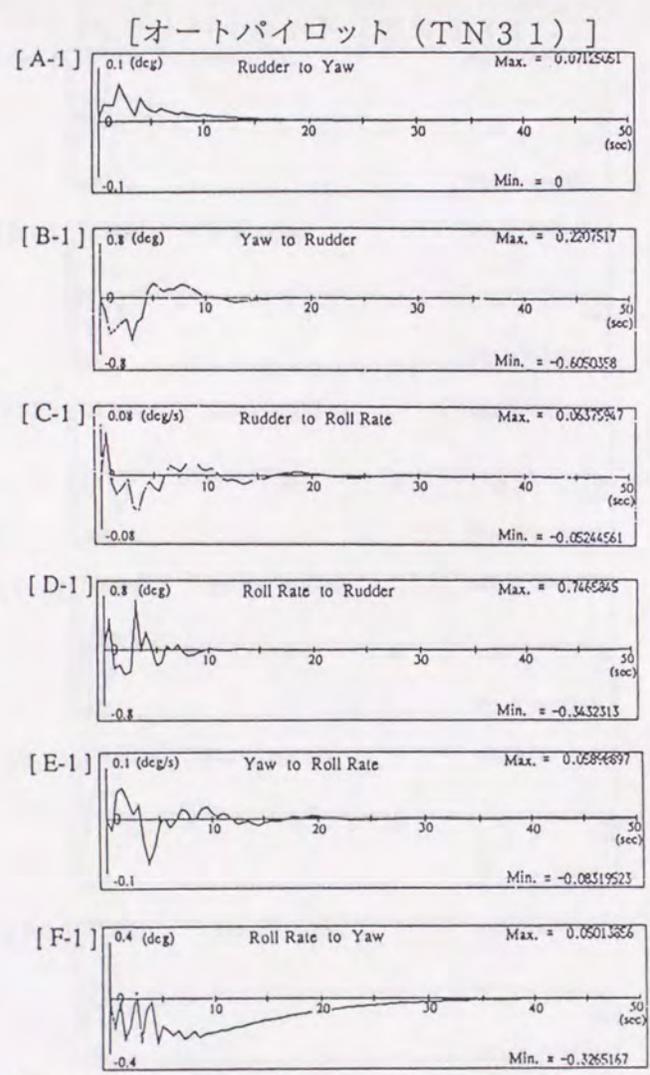


- [A-1] 方位角に対する累積雑音寄与率
- [B-1] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率
- [C-1] 舵角に対する累積雑音寄与率



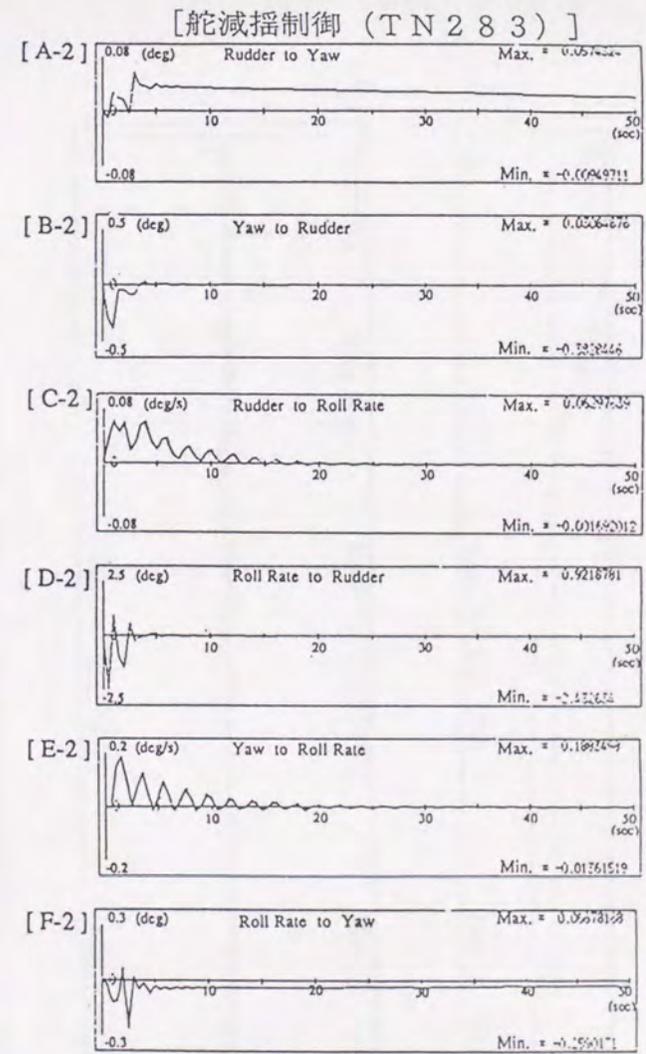
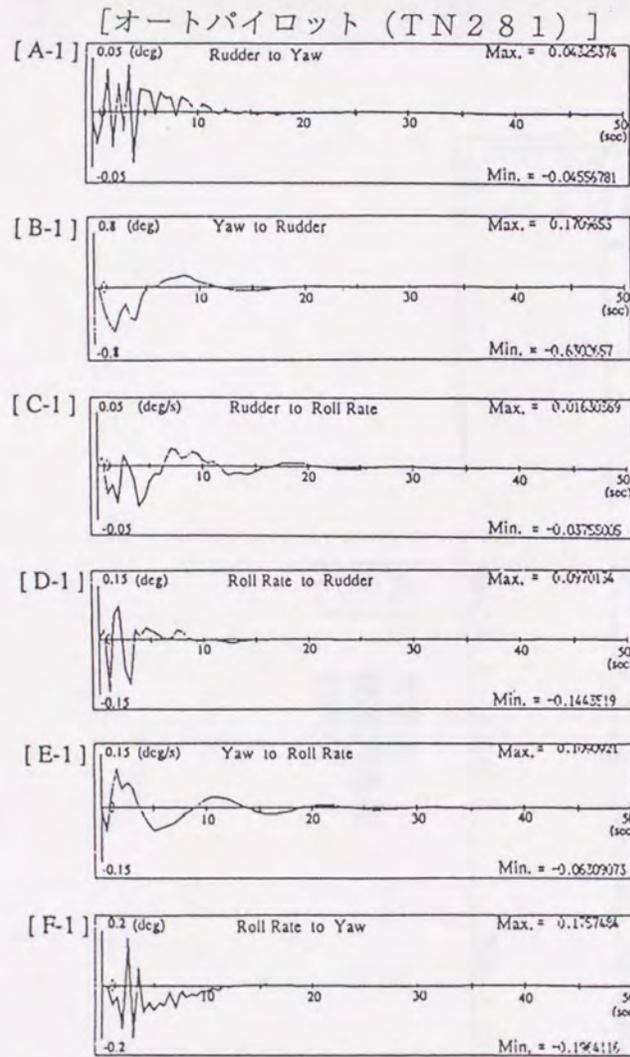
- [A-2] 方位角に対する累積雑音寄与率
- [B-2] 横揺角速度に対する累積雑音寄与率
- [C-2] 舵角に対する累積雑音寄与率

図 7.4 2 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時の累積雑音寄与率 (向かい波)



[A-1]、[B-1] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-1]、[D-1] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-1]、[F-1] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [A-2]、[B-2] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-2]、[D-2] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-2]、[F-2] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

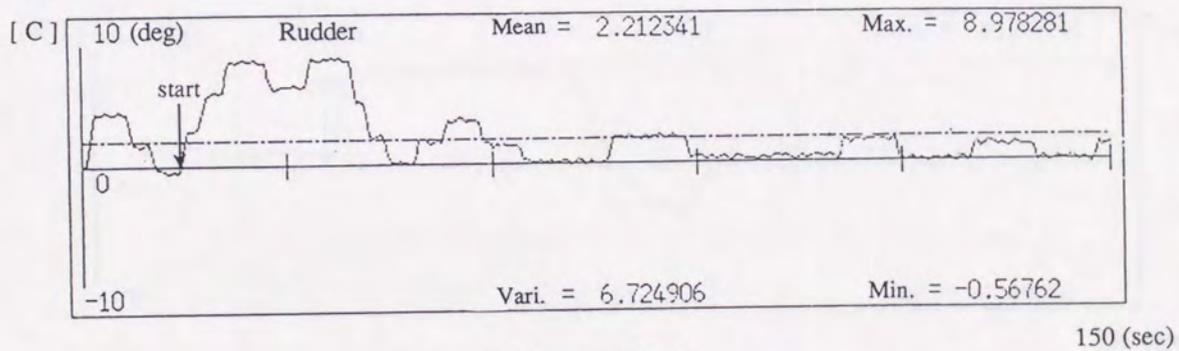
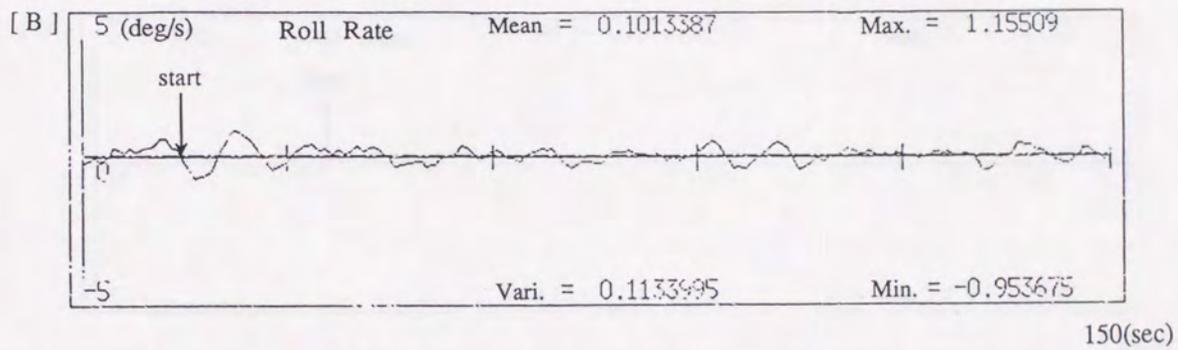
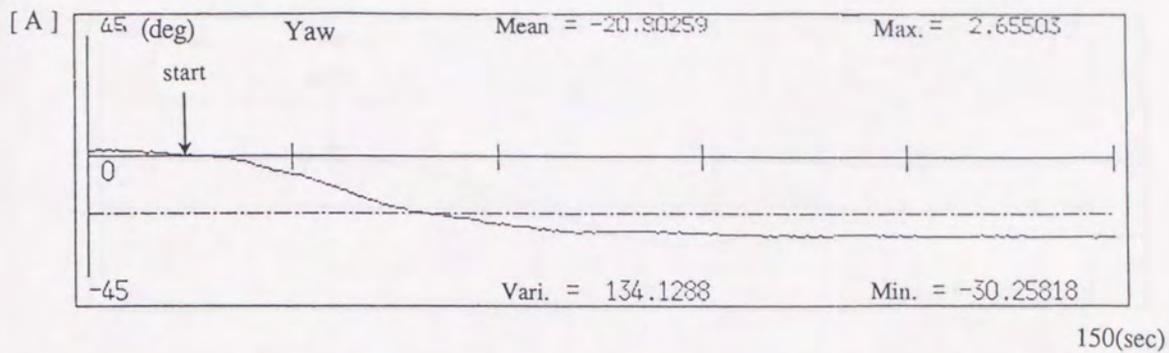
図 7.43 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性 (追い波)



[A-1]、[B-1] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-1]、[D-1] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-1]、[F-1] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

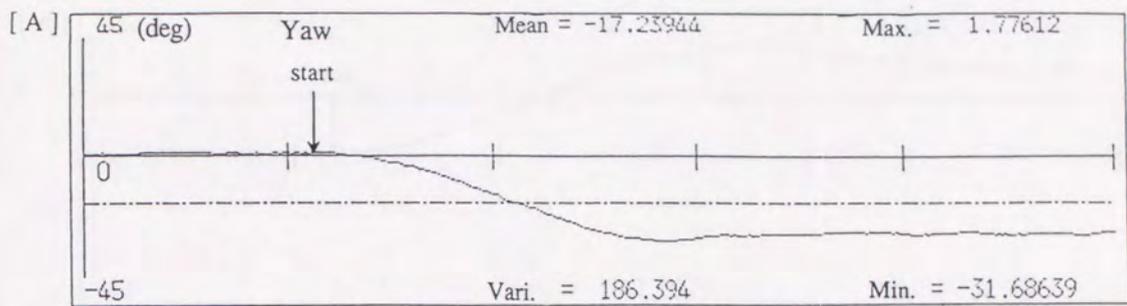
[A-2]、[B-2] 舵角と方位角の間のインパルス応答特性  
 [C-2]、[D-2] 舵角と横揺角速度の間のインパルス応答特性  
 [E-2]、[F-2] 方位角と横揺角速度の間のインパルス応答特性

図 7.44 C船におけるオートパイロットと舵減揺制御時のインパルス応答特性 (向かい波)

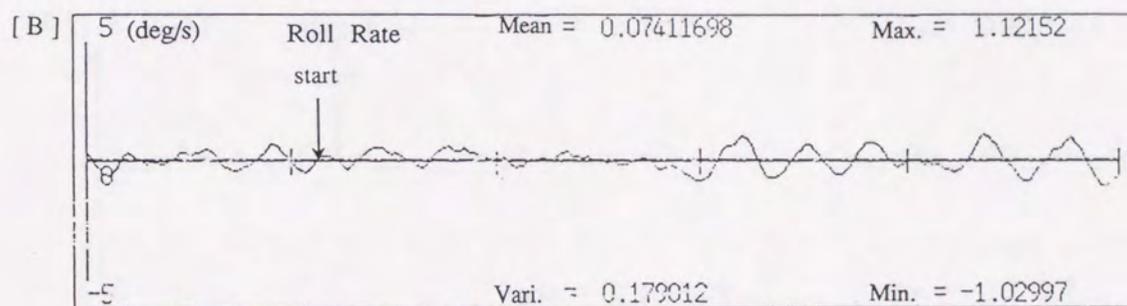


- [A] 方位角
- [B] 横揺角速度
- [C] 舵角

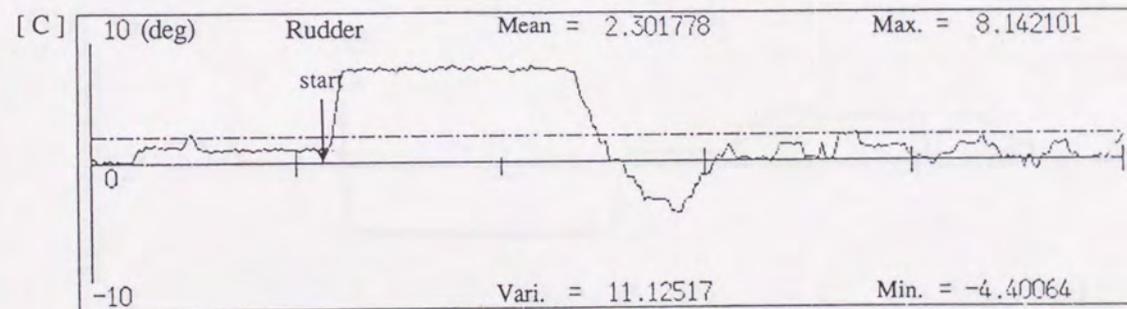
図 7.45 C船におけるオートパイロットによる30度変針実験



150(sec)



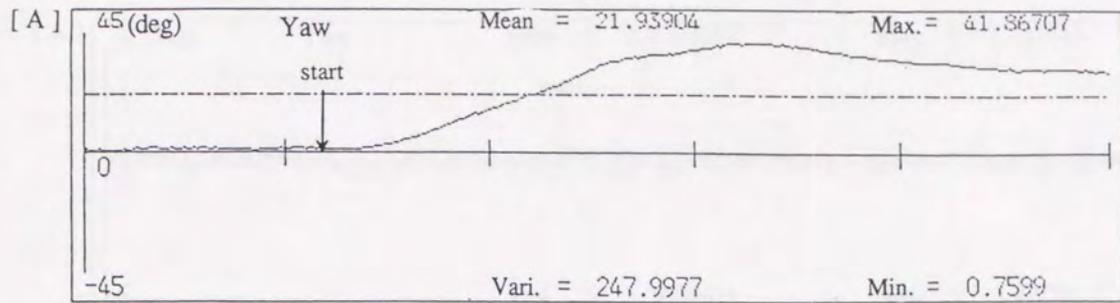
150(sec)



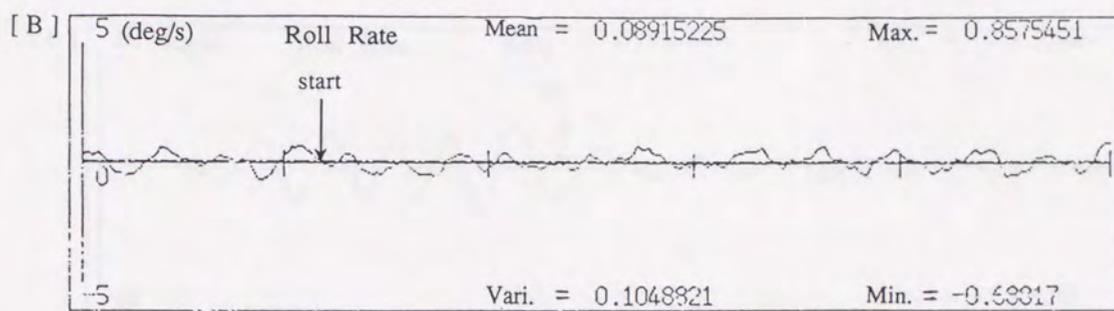
150 (sec)

- [A] 方位角
- [B] 横揺角速度
- [C] 舵角

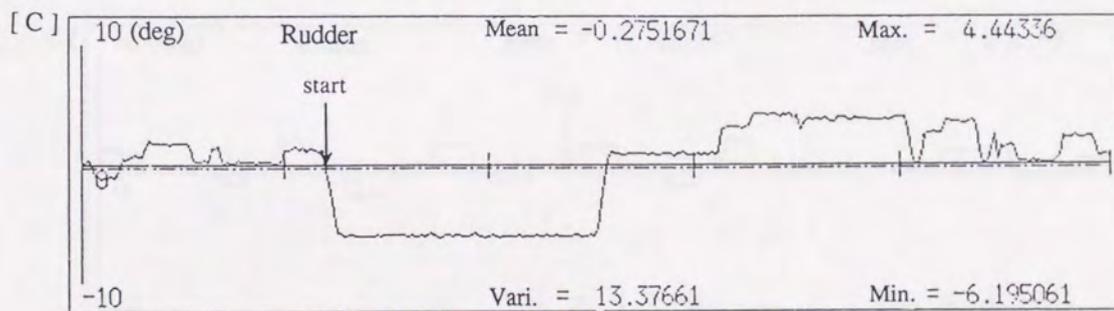
図 7.46 C船における舵減揺制御による30度変針実験



150(sec)



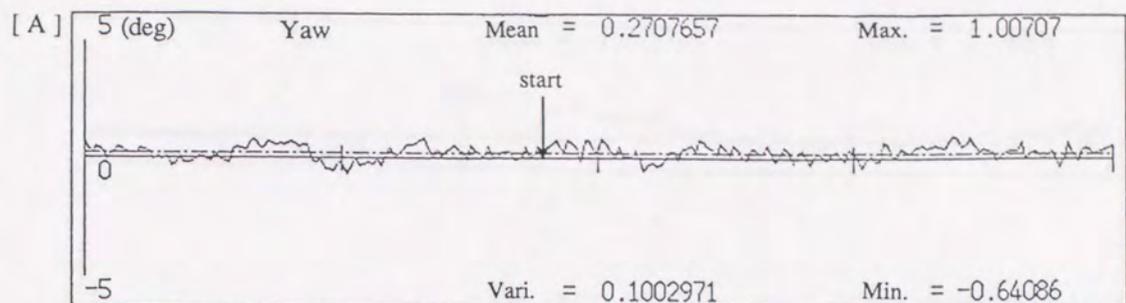
150(sec)



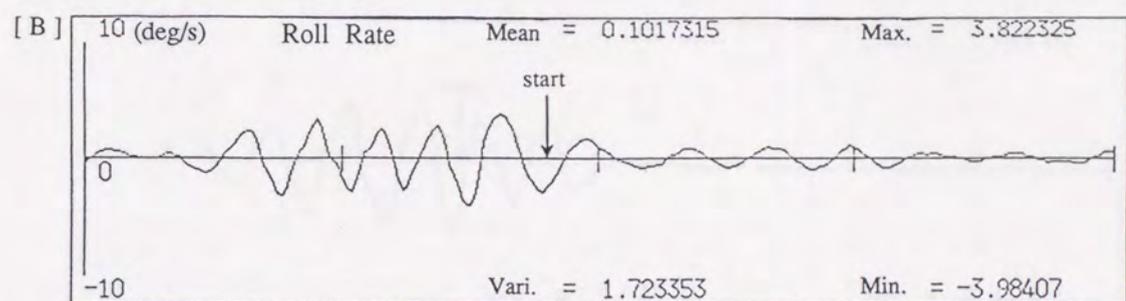
150 (sec)

- [ A ] 方位角
- [ B ] 横揺角速度
- [ C ] 舵角

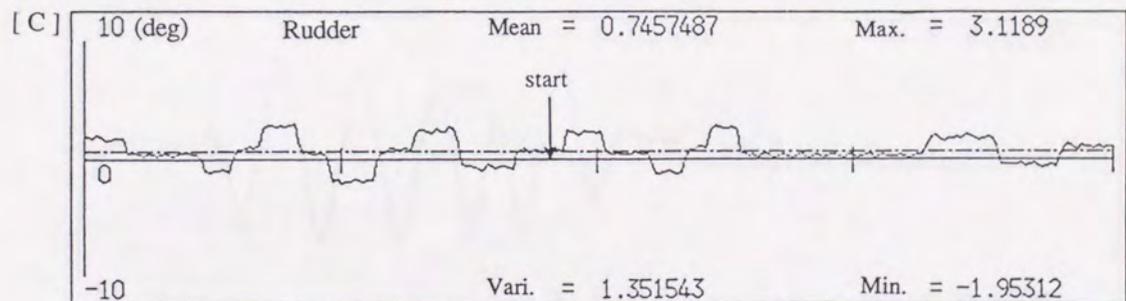
図 7.4 7 C船におけるマニュアル操舵による30度変針実験



120(sec)

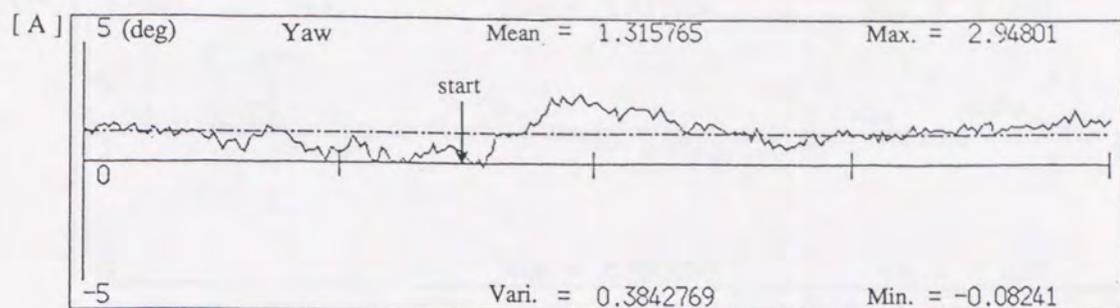


120(sec)

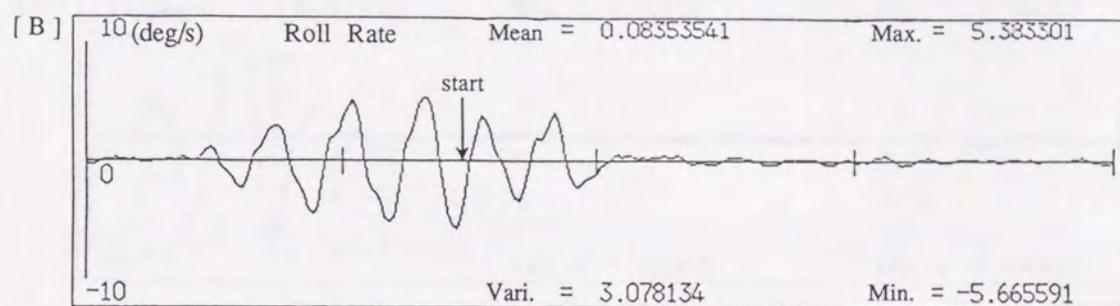


- [ A ] 方位角 120 (sec)  
 [ B ] 横揺角速度  
 [ C ] 舵角

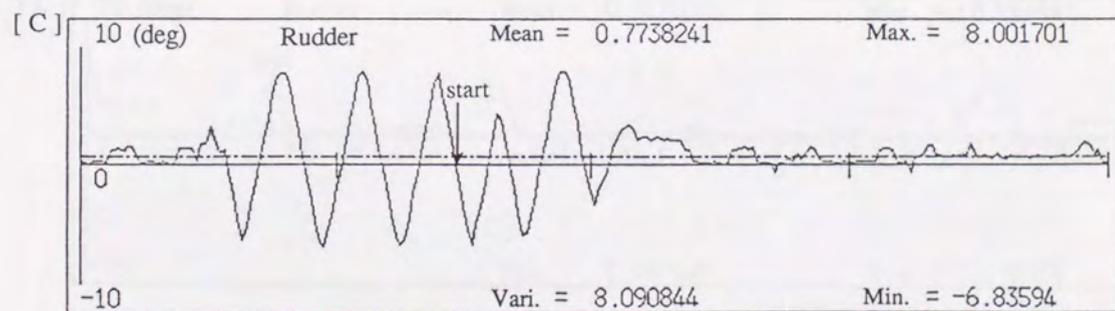
図 7.48 C船におけるオートパイロットによる強制動揺実験



120(sec)



120(sec)



120 (sec)

[ A ] 方位角  
 [ B ] 横揺角速度  
 [ C ] 舵角

図 7.49 C船における舵減揺制御による強制動揺実験

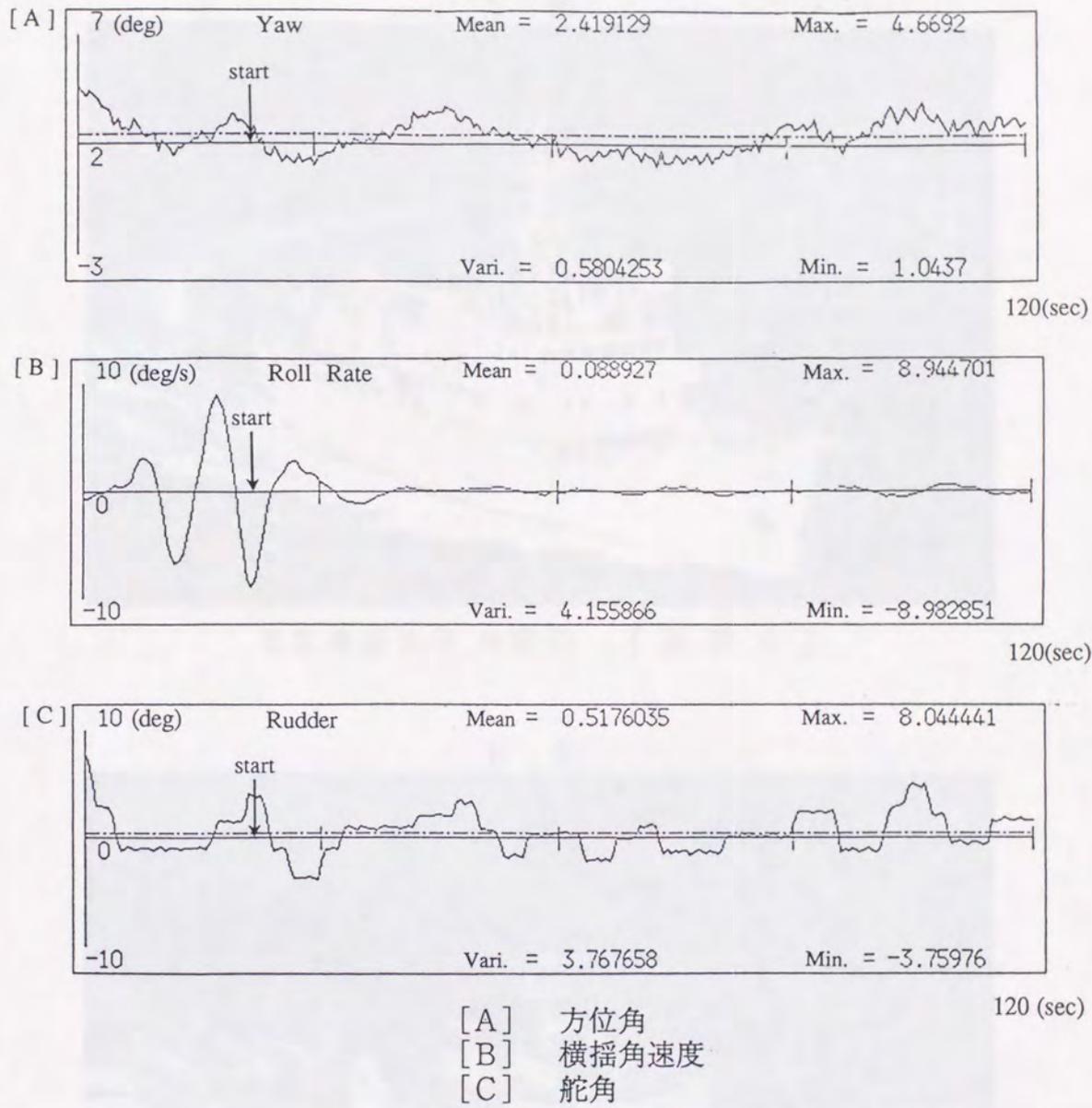


図 7.50 C船におけるフィンスタビライザによる強制動揺実験

A 船



東京商船大学 練習船 『汐路丸』

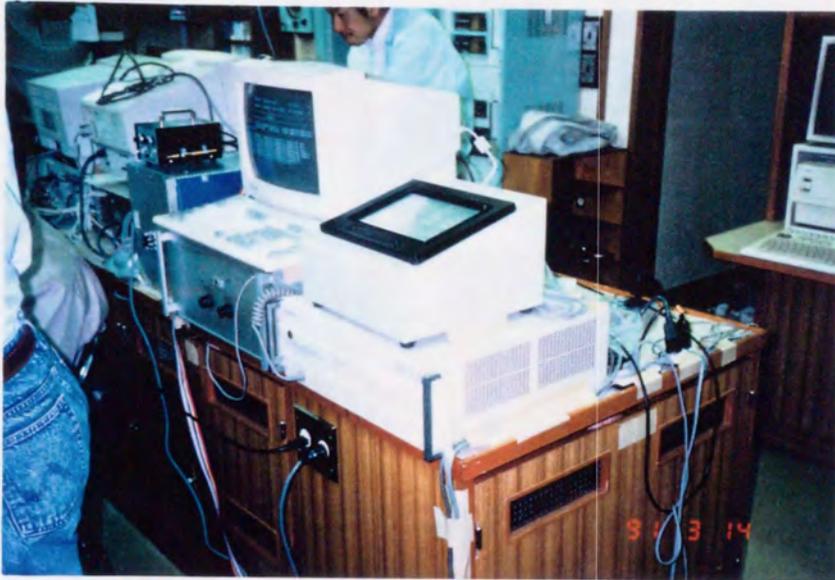
B 船



水産庁 漁業調査船 『開洋丸』

写真 7.1 A 船および B 船の全景

モニター用CRT      操作用タッチパネル  
↓                      ↓



↑                      ↑  
信号入出力装置      制御演算装置



↑  
横揺角速度検出用  
レートジャイロ

写真 7.2 A船における舵減揺制御実験

操作用タッチパネル



モニタ用CRT



制御演算装置



データレコーダ



記録計



バーチカルジャイロ  
レートジャイロ

写真 7.3 B船における舵減揺制御実験



## 第8章 舵減揺制御に対する検討

### 8.1 緒言

第7章において、統計的最適制御理論を用いた舵減揺制御の横揺減揺効果が、3隻の異なるタイプの実船実験を通して確認された。ところで、一般商船、艦艇、巡視船、調査船、練習船、さらに小型の高速艇など種々の船舶を対象とした舵減揺制御装置を開発する場合、対象船の仕様、作業海域などの条件によって、どの程度の横揺減揺効果が期待できるかを、事前に把握しておくことは、今後本制御装置の他船への適用を考える場合重要である。

また、舵減揺制御に関係すると思われる種々の要因について、それらと減揺効果の関係を整理しておくことは、装置の設計段階で非常に有効な資料となる。

本章では、まず波浪中での横揺減揺効果を評価するための簡易的な方法について述べるとともに、第7章で示した3隻の船舶についてこの方法で推定した減揺効果と実船実験結果との比較を行う。

次に、本論文で実施した舵減揺実船実験の結果をもとに、制御ゲイン、船速及び操舵速度と横揺減揺効果の関係などについても考察する。

最後に、本論文で実施した舵減揺制御実船実験の結果と諸外国で実施されている舵減揺に関する実船実験結果を比較する。

## 8.2 舵減揺制御による波浪中横揺減揺効果

波浪中での横揺応答の分散が、舵を操作することによって、どの程度減少するかを評価する簡易的な方法について検討する。

ところで、波浪中での船体運動を予測する一つの方法として、線形重ね合わせ理論を応用したエネルギースペクトル法を用いて、船体応答の分散で評価する方法はよく知られている[8.1]、[8.2]。

この方法では、不規則波海面における波スペクトルが与えられ、規則波中での横揺応答が求められれば、線形重ね合わせ理論によって不規則波浪中での応答のエネルギースペクトルを求めることができる。ここでもこの方法を応用して、舵による横揺応答を評価することとする。

この方法で、波浪中での操舵による横揺減揺効果を評価するにあたっては、次のような条件のもとに計算を行う。

- (1) 対象とする船体運動を横揺とし、舵による外力のうち横揺モーメントのみを考慮して計算を行う。すなわち、横揺の運動方程式として舵による横揺減衰項を加えた線形運動方程式を用いる。
- (2) 横揺角速度に対する舵角の制御ゲインは、舵減揺制御で用いる制御ゲインマトリクスの中の、横揺角速度に対応する要素成分が減衰項に対応するとして等価的に使用する。
- (3) 波スペクトルを波傾斜スペクトルに変換し、横揺応答関数との線形重ね合わせによって、横揺応答のスペクトルを求める。
- (4) 応答計算については、船舶が一定速度、一定針路を保って航走している状態、つまり長波頂不規則中応答を求めた後に、波方向成分を考慮した短波頂不規則波中応答を求める。

次に、評価の方法について述べる。まず、横揺減衰係数項に、舵による減衰項を考慮した横揺に関する運動方程式を

$$I_{\phi} \ddot{\phi} + K_D \dot{\phi} + W \overline{GM} \phi = W \overline{GM} \gamma \Theta_w \cos \omega t \quad (8.1)$$

で表現する。

ここで、横揺減衰係数  $K_D$  は、船体による本来の成分  $K_S$  と舵による成分  $K_R$  の和で構成されると考える。

$$K_D = K_S + K_R \quad (8.2)$$

$$K_S \equiv a \frac{2}{\pi} \sqrt{W GM I_\phi} \quad (8.3)$$

$$K_R = \frac{1}{2} \rho A_R \frac{6.13 \Lambda}{\Lambda + 2.25} G_R V^2 L_R \quad (8.4)$$

ここで、 $a$  は減衰係数である。また、 $K_R$  を表現する式 (8.4) の  $G_R$  は横揺角速度に対する舵角の制御ゲインである。この制御ゲインは舵減揺制御で用いる制御ゲインと、次に述べるような等価的な関係にあると仮定する。

第4章で示した固定ゲインによる制御則  $Y = GZ$  で、例えば式 (4.1) の制御型自己回帰モデルの次数が2次の場合を考えると、制御信号である舵角  $\delta(n)$  は、方位角偏差  $\phi(n), \phi(n-1)$ 、横揺角速度  $\dot{\phi}(n), \dot{\phi}(n-1)$  及び制御ゲイン  $\{g_1, g_2, g_3, g_4\}$  によって

$$\delta(n) = g_1 \phi(n) + g_2 \dot{\phi}(n) + g_3 \phi(n-1) + g_4 \dot{\phi}(n-1) \quad (8.5)$$

で計算されることになる。このうち、 $g_2$  と  $g_4$  が横揺角速度に対する制御ゲインで、しかも、 $g_2$  は横揺角速度に対する舵角の最も近い時刻に対する比例ゲインと見なすことができる。そこで、仮に代表的に  $G_R \equiv g_2$  とし式 (8.4) にこの値を代入する。

ところで、規則波中の横揺応答関数は式 (8.1) から、その振幅特性は

$$\frac{\phi}{k \Theta_w} = \frac{\gamma W \overline{GM}}{\sqrt{(W \overline{GM} - I_\phi \omega^2)^2 + (K_D)^2 \omega^2}} \quad (8.6)$$

で表わされる。ここで、横揺減衰係数  $K_D$  は式 (8.2) の船体主要目から決定される成分と、いま仮定した制御ゲイン  $G_R \equiv g_2$  を用いた操舵による成分の和である。なお、 $k$  は波数

$$k = \omega^2 / g \quad (8.7)$$

である。

いま、波浪海面を次のようなピアソン-モスコビッチ型の波スペクトルで表現する。

$$S_w(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H_w^2 T_w \left( \frac{T_w}{2\pi} \omega \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \left( \frac{T_w}{2\pi} \omega \right)^4 \right\} \quad (8.8)$$

ここで、 $H_w$  は有義波高、 $T_w$  は平均波周期である。この波スペクトル  $S_w(\omega)$  から波傾斜スペクトル  $S_\theta(\omega)$  は

$$S_\theta(\omega) = S_w(\omega) \frac{\omega^4}{g^2} \quad (8.9)$$

によって求められる。

次に、式(8.6)の $(\omega)$ ベースの横揺応答関数を、船速及び波方向を一定とした出会い周波数

$$\omega_e = \omega - \frac{\omega^2}{g} V \cos \chi \quad (8.10)$$

によって表現する。そして、この出会い周波数 $(\omega_e)$ ベースに変換した、横揺応答関数と波傾斜スペクトル  $S_\theta(\omega)$  の分散  $R_\theta$  から

$$R_\phi = \left( \frac{\phi}{k \Theta_w} \right)^2 R_\theta \quad (8.11)$$

によって、横揺応答の分散  $R_\phi$  を求める[8.3]。以上の評価方法の概略の流れを図8.1に示す。

以上の評価方法を検証するために、高石[8.4]、[8.5]が角水槽で実施したRO/RO船の操舵による、横揺軽減効果に関する模型実験結果を参考にす。評価計算の対象としたRO/RO船の主要目を表8.1に示す。舵による横揺減揺制御時の外乱としては、模型実験のときと同じ不規則波スペクトルを用いて評価計算を行い得られた結果を図8.2に示す。

ここでは、横揺に対する舵の制御は、簡単な比例制御のみであるとしている。図中で制御ゲイン  $G_R(0)$  という計算結果は、舵による横揺減揺制御を行っていない状態を意味しており、例えば  $G_R(3)$  は横揺角速度  $1$  (deg/s) に対して、舵角  $3$  (deg) を取るという比例制御を行っていることを意味している。

図 8.2 [A] は、波向き及び制御ゲインを変化させた場合の横揺応答の標準偏差について、実験結果と計算結果を比較したものである。この図から、舵による制御を行っていない状態の実験結果と制御ゲイン  $G_R(0)$  の計算結果は良く一致していることが判る。なお、計算値は一定速度で波に対して一定の針路を保っている場合、つまり長波頂不規則波中での横揺応答である。

図 8.2 [B] は、横波中 ( $KAI = 90$  (deg)) において、制御ゲインを変化させた場合の横揺応答の実験結果と計算結果を比較したものである。この図から、制御ゲイン  $G_R$  を変化させた場合の計算結果は、実験結果と比較的良く一致していることが判る。

なお、図 8.2 [C] は、模型実験時に用いたピアソン-モスコビッチ型の波スペクトルである。

このようにして、図 8.2 [A] の波向きの違いによる横揺応答の計算結果と実験結果の比較、さらに図 8.2 [B] の制御ゲインの違いによる横揺応答の比較から、以上で述べた評価方法で簡易的に舵による横揺応答、及び通常のオートパイロットに対する減揺効果が計算できることが確認された。

以下に、第 7 章で舵減揺実船実験を行った A 船、B 船及び C 船について、この評価方法を用いて実験結果の評価を行う。

#### [1] A 船における舵減揺制御効果の評価

本船の舵減揺実船実験時の波浪状況は目視によると、有義波高で 1.5 (m)、平均波周期が 6 (sec) 程度であった。また、舵減揺制御で使用した制御ゲインマトリクス of 横揺角速度に対する要素成分は、 $G_R(6)$  程度に相当する値であった。この制御ゲイン  $G_R(6)$  は、横揺角速度 1 (deg/s) に対して舵角 6 (deg) を取るという比例制御を行うことを意味している。このような海象条件及び等価値的な制御ゲインのもと、船速 13 (kts) の場合のオートパイロット及び舵減揺制御による、操舵時の長波頂不規則波中横揺応答を計算した。

図 8.3 [A] に長波頂不規則波中横揺応答計算結果と、舵減揺実船実験による結果、及び図 8.3 [B] 計算に使用した不規則波スペクトルを示す。図中で応答計算結果の縦軸は横揺角の標準偏差、横軸は波向きで  $K A I = 180$  (deg) が向かい波状態である。また、実船実験結果は、オートパイロットを AP、舵減揺制御を R R C S として図中に記載した。なお、実船実験結果の記載にあたっては、実験値のバラツキを考慮した。

図 8.3 [A] から斜め向かい波状態 ( $K A I = 120$  (deg)) では、舵による横揺制御を行っていない  $G_R(0)$  の計算結果と、オートパイロットによる実船実験結果がよく一致していることが判る。また、舵による横揺制御を行っている  $G_R(6)$  の計算結果と舵減揺制御による実験結果も比較的よく一致していることが判る。この時の横揺角の標準偏差を比較すると  $G_R(0)$  の場合に比べて  $G_R(6)$  の場合は 30 (%) 程度減少しており、舵減揺実船実験時の横揺減揺効果とよく一致している。

## [2] B 船における舵減揺制御効果の評価

図 8.4 [A] に長波頂不規則波中横揺応答から波方向成分を考慮して求めた、短波頂不規則波中横揺応答の計算結果[8.6]と実験結果を示す。横軸は波向き、縦軸は横揺の角の標準偏差である。評価計算は波浪条件として有義波高 0.6 (m)、平均波周期 5.3 (sec)、船速 13 (k'ts) で行った。図 8.4 [B] に計算に使用した不規則波スペクトルを示す。なお、B 船は減揺タンクを装備しているが、計算は減揺タンクが空の状態で行った。

図 8.4 [A] から、斜め追い波状態 ( $K A I = 30$  (deg)) では、オートパイロット (TK 40) 及び舵減揺制御 (TK 43) いずれも計算結果と実船実験結果はよく一致していることが判る。また、このときの横揺減揺効果は 30 (%) 前後となり、実船実験時の減揺結果とよく一致している。

この結果から、横揺減揺効果はオートパイロットと舵減揺制御で、斜め追い波 (30 (deg)) から斜め向かい波 (120 (deg)) の範囲で比

較的その差が顕著であることも判る。

### [3] C船における舵減揺制御効果の評価

図8.5 [A] に長波頂不規則波中横揺応答、短波頂不規則波中横揺応答及び実験結果を併せて示す。横軸は波向き、縦軸は横揺の角の標準偏差である。評価計算では波浪条件として、有義波高が約2 (m)、平均波周期が約7 (sec) そして船速は18 (k'ts) で行った。図8.5 [B] に計算に使用した不規則波スペクトルを示す。なお、C船は非格納式のフィンスタビライザを装備しているため、計算にあたっては、フィンスタビライザ非動作時の横揺ダンピングのみを考慮した。

図8.5 [A] で長波頂不規則波中横揺応答に比べて、応答が平均化された短波頂不規則波中横揺応答の方が波向きを考慮しているため、実船実験結果と比較的よく一致している。この短波頂不規則波中横揺応答と実船実験結果を比較すると、横波状態 ( $KAI = 90$  (deg)) では良く一致しており、計算結果からもオートパイロットに比べて舵減揺制御は横揺減揺効果で35 (%) 程度得られることが判る。そして、この減揺率の値は実船実験結果ともよく一致している。

しかし、斜め向かい波 ( $KAI = 140$  (deg))、あるいは斜め追い波状態 ( $KAI = 45$  (deg)) では、実験値の方が若干大きくなっていることが判る。

### 8.3 舵減揺制御時の横揺減揺効果に及ぼす要因

操舵による横揺減揺制御を行う場合、減揺効果に影響を及ぼすと考えられるいくつかの要因のうち制御ゲイン、船速及び操舵速度の影響について実船実験を通して得られた結果を中心に分析する。

#### [1] 制御ゲインと横揺減揺効果

舵減揺制御に用いる制御ゲインの調整、選択方法などについては、第4章で示したが、ここで再度制御ゲインと横揺減揺効果について検討する。

C船における舵減揺実船実験で二次評価関数の初期値として、方位角に対する重み係数を横揺角速度に対する重み係数よりも重視して制御した場合（方位角：横揺角速度：舵角＝10：1：1）は、オートパイロットに比べて、表8.2に示すように方位角の偏差は小さくなる。一方、逆に横揺角速度を重視した場合（方位角：横揺角速度：舵角＝10：100：1）は、相対的に方位角の偏差は大きくなり、横揺角速度は若干小さくなることが判る。

また、表8.2には白色雑音による制御シミュレーション結果も併せて示したが、この結果からも実船実験結果と同じような傾向が確認できる。

舵減揺制御における制御ゲインの選択方法については、第1章でも述べたように方位角の偏差が大きくなると、その連成影響で横揺も増加する傾向があること、さらに第4章で述べた、制御変数及び被制御変数の初期重みの選択規準があることなどを考慮する必要がある。

#### [2] 船速と横揺減揺効果

船速の増加は、船体自身の減衰力及び舵力の増加を伴うため、舵を適切に制御することでできれば、大きな横揺減揺効果が期待できる[8.7]。

A船による舵減揺実船実験で同一の制御ゲインを用いて、船速を変えた場合の結果を表8.3 [A]に示す。この表から船速が遅くなった場合には、横

揺角速度の標準偏差が増加していることが判る。

B船についても同様に、同じ制御ゲインを用いて船速を変えて行った舵減揺実船実験結果を表8.3 [B]に示す。この結果からは船速が約半分の場合でも、横揺角速度の標準偏差に顕著な差は認められない。

船速と横揺減揺効果の関係については、冒頭で述べたように船速が遅い程、減揺効果は減少すると考えられるが、A船、B船の実船実験結果からはこれまでのところ顕著な速度影響は確認できなかった。この要因は、実験状況(実験点数、海象条件)によって、結果がかなり左右されるためと考えられる。

### [3] 操舵速度と横揺減揺効果

操舵速度の違いによる横揺減揺効果の差を確認するためには、操舵装置の能力アップを図ったうえで操舵速度を変更する必要がある。しかし、国内の通常船舶では表8.4に示すような規準があり、操舵速度は固定されている場合がほとんどである。

舵減揺実船実験を行った3隻のうち、A船のみが図8.6に示すように外部からの電圧指令によって、操舵速度を変更することができる。本船で操舵速度を変更した場合の実船実験結果を表8.5に示す。この表からは、この程度の操舵速度の差では、横揺減揺効果に顕著な差異は認められなかった。

操舵速度と横揺減揺効果の関係は、一般的には操舵速度が速い方が減揺効果が大きくなることが予想される[8.7]。しかし、その影響を確認するためには今回の実船実験で行った以上に操舵速度を大きく変化させる必要がある。

### [4] 横揺減揺制御と燃料消費

舵による横揺減揺制御を行う場合、船首揺のみを制御している通常のオートパイロットに比べて、その操舵量は増加することが考えられ、この操舵量の増加にともなって抵抗増加、船速の低下などが予想される。

船速については、第7章のA船による舵減揺実船実験で、オートパイロットと舵減揺制御を行った場合の船速（電磁ログ）の時系列を図7.7に示したが、この結果からは舵減揺制御による顕著な速度低下は認められなかった。

A船による舵減揺実船実験を実施した際、抵抗増加に関する直接的な計測は行っていないが、オートパイロットと舵減揺制御を交互に切り換えながら操船したときの燃料消費量を計測した結果を図8.7に示す。横軸は5回行った実験ケース、縦軸は燃料消費量である。

5回の実験で、同じ回の計測時間は、オートパイロットと舵減揺制御について同じ計測時間であるが、実験ケースが異なる場合には必ずしも同じ時間の計測値ではない。この5回の計測結果から、いずれの計測においても、舵減揺制御の方がオートパイロットに比べて燃料消費量が多くなっていることが判る。このような燃料消費量の増加は、頻繁な操舵がプロペラを介して主機関になんらかの影響を与えているためと考えられる。

#### 8.4 諸外国における舵減揺制御実船実験

操舵による横揺減揺制御については、造船のみならず制御の分野でも盛んに研究されてきたが、最近の研究開発の段階から実用化の段階に入り実船による実験結果もいくつか発表されている。ここでは、第7章で実施した3隻の実船実験結果と諸外国で実施されている舵減揺実船実験の比較、評価などを行う。なお、諸外国での実船実験例は艦艇がほとんどであり、これらの船舶はかなり高速な操舵速度で実施された結果である。

図8.8 [A] に、デンマーク海軍[8.8]の3軸3舵のStandard Flex 300級艦艇における舵減揺制御結果を示す。図中で左の図が横揺を制御していない通常のオートパイロット操舵で、右の図が横揺を制御した場合である。本船の舵減揺制御システムの特徴は、3舵の中央舵を方位保持制御そして左右の2舵を横揺減揺制御専用に使っている点である。この図から、横揺を制御している左右の舵は、5度前後の舵角で比較的頻繁に操舵していることが判る。本船での横揺減揺効果は通常のオートパイロット操舵時に比べて40～60(%)の減揺率が得られている。

図8.8 [B] に、舵による横揺減揺制御機能を備えたオートパイロットによるオランダ海軍[8.9]の1軸1舵のMクラス級フリゲート艦における舵減揺制御結果を示す。この図は左半分が海象状況3 (Sea State 3) で、右半分が海象状況5 (Sea State 5) であり、海象状況の変化に伴う制御系のロバスト性を確認している。この実船実験から横揺減揺制御を行うために、本船は10度以上の舵角で頻繁に操舵していることが判る。なお、本船はこの操舵装置以外の操舵装置を搭載していないため、通常のオートパイロットとの比較に関する減揺効果についての明記はない。しかし、シミュレーション結果として、横揺を制御しない場合に比べて50(%)前後の減揺率が得られることが述べられている。なお、海象 (Sea State) による有義波高及び平均波周期を表8.6に示す。

本論文の統計的最適制御に基づく、舵減揺制御による実船実験結果と制御方法は異なるが諸外国で実施されている舵による横揺減揺制御の減揺効果を比較した結果を図8.9に示す。図には前節のデンマーク海軍、アメリカ海軍[8.10]、そして第7章で実施したA船における横揺減揺効果を併せて記入した。

図8.9 [A] は、横軸に波向き、縦軸にオートパイロット操舵に対する横揺減揺制御時の減揺率を示している。この図によると、減揺効果にかなりバラツキはあるが、追い波状態の方が向かい波状態に比べて減揺効果が高い傾向にあることが判る。

図8.9 [B] は、船速に対する減揺効果を示したものであるが、同一船でもデータのバラツキが大きく、船速増加による減揺効果の顕著な向上は認められない。なお、アメリカ海軍の艦艇は、操舵速度が7 (deg/s) という高速な操舵速度での実験結果である。

## 8.5 結言

本章では、横揺減揺効果を評価するための簡易的な方法について述べ、この方法で第7章の3隻の船舶について減揺効果を推定し、実船実験の結果と比較した。

また、舵減揺実船実験の結果をもとに、制御ゲイン、船速及び操舵速度と横揺減揺効果との関係について示した。そして、諸外国で実施されている舵減揺制御の実船実験結果との比較も行った。

これらの結果をまとめて以下に示す。

- (1) 舵減揺制御による波浪中での横揺減揺効果を評価するために、舵による横揺減衰項を考慮した運動方程式に対して、舵減揺制御で用いる制御ゲインマトリクスの中の横揺角速度に対応する要素成分を等価的に使用することとし、簡易計算法を提案した。この方法によって得られた計算結果と実船実験結果との比較を行った。

その結果、

- ・ A船についての評価計算では、斜め向かい波状態で横揺減揺効果は25～30(%)となり、実船実験時の結果とよく一致している。
- ・ B船についての評価計算では、斜め追い波状態で実船実験結果はよく一致しており、横揺減揺効果は30(%)前後得られている。
- ・ C船については、オートパイロット及び舵減揺制御による計算値と実船実験結果は横波状態のときがよく一致しており、斜め向かい波あるいは斜め追い波状態では実験値が計算値に比べて大きくなっている。しかし、横波状態での横揺減揺効果は約35(%)程度で実船実験結果とよく一致している。

ことなどが判った。

- (2) 舵による減揺制御を行う場合の制御ゲイン、船速及び操舵速度が横揺れ減揺効果に与える影響について実船実験結果をもとに検討した。

その結果、

- ・ 方位角に対する重み係数を、横揺角速度に対する重み係数よりも重視して制御した場合は、オートパイロットに比べて方位角の偏差は小さくなる。
  - ・ 横揺角速度を重視した場合は、相対的に方位角の偏差は大きくなり、横揺角速度は若干小さくなる。
  - ・ 制御ゲインの選択については、方位角の偏差が大きくなると連成影響で横揺も増加する傾向にあることを考慮する必要がある。
- 等のことが判った。

(4) 本論文で採用した統計的制御理論に基づく舵減揺制御の性能、実用性などについて検討するために、諸外国の主として艦艇、艦船における舵減揺実船結果と本論文で行った実験結果を比較・評価した。

その結果、

- ・ デンマーク海軍の艦艇における舵減揺制御では、3軸3舵のうち左右舷の舵を横揺減揺制御に用いることによってオートパイロット操舵に比べて40～60(%)の減揺率を得ている。
- ・ 舵による横揺減揺制御機能を備えたオートパイロットによる、オランダ海軍の艦艇による舵減揺制御結果からは、海象状況の変化に対する制御系のロバスト性が示された。
- ・ 諸外国の何隻かの実船実験における横揺減揺効果を、波向き及び操舵速度について、整理した結果かなりバラツキはあるが追い波状態の方が、向かい波状態に比べて減揺効果が得られる傾向にある。また、船速に対する減揺効果については、データのバラツキが大きく明確な船速影響は確認できない。

等のことが判った。

参考文献

- [8.1] 山内保文、菅井和夫、高石敬史、安藤定雄、平野雅祥、大津皓平、  
小林正典、織田博行、不規則現象論、海文堂、1986.
- [8.2] W.G.Price, R.E.D.Bishop  
Probabilistic theory of ship dynamics, Chapman and Hall, 1974.
- [8.3] 山内保文  
海洋波中の応答、耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、1969.
- [8.4] 高石敬史、平野雅祥、猿田俊彦、高品純志、中嶋利夫  
フィンスタビライザー及び舵の横揺軽減効果について、  
関西造船学会誌、第171号、昭和53年.
- [8.5] 平野雅祥、高品純志、森谷周行、中嶋利夫  
RO/RO船の運動性能に関する研究、三井造船技報、Vol.105、1979.
- [8.6] 福田淳一  
船体応答の統計的予測、耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会、  
1969.
- [8.7] J.van.Amerongen, P.G.M.van der Klugt, J.B.M.Pieffers  
Rudder roll stabilization: Controller design and experimental  
results, Proceedings 8th Ship Control Systems Symposium,  
Hague, Netherlands, 1987.
- [8.8] P. G. M. Van Der Klugt  
Rudder roll stabilization : The Dutch solution, Naval Engineers  
Journal, 1990.
- [8.9] M. Blanke, P. Haals, K.K. Andreasen  
Rudder Roll Damping Experience in Denmark, Proc. IFAC  
Workshop on Expert Systems and Signal Processing in Marine  
Automation, Lyngby, Denmark, 1989.
- [8.10] A.E.Baitis, D.A.Woolaver, T.A.Beck  
Rudder roll stabilization for coast guard cutters and frigates, Naval  
Engineering Journal, May, 1983.

図表一覧表

- 表 8.1 模型船 (RO / RO 船) の主要目
- 表 8.2 制御ゲインによる制御効果  
(C 船における制御ゲイン影響)
- 表 8.3 船速による制御効果
- 表 8.4 各国の操舵速度に関する基準
- 表 8.5 操舵速度による制御効果  
(A 船における操舵速度影響)
- 表 8.6 海象状況による有義波高および平均波周期
- 
- 図 8.1 波浪中での舵減揺制御効果の簡易評価方法
- 図 8.2 模型実験による舵減揺実験結果と簡易評価方法による減揺効果
- 図 8.3 A 船における実船実験結果と簡易評価方法による減揺効果
- 図 8.4 B 船における実船実験結果と簡易評価方法による減揺効果
- 図 8.5 C 船における実船実験結果と簡易評価方法による減揺効果
- 図 8.6 A 船における操舵速度と外部制御電圧
- 図 8.7 A 船によるオートパイロットと舵減揺制御時の燃料消費
- 図 8.8 諸外国での舵減揺実船実験の例
- 図 8.9 A 船における舵減揺実験結果と諸外国での実船実験結果

表 8.1 模型船 (RO/RO船) の主要目

	Items		Model
Hull	Length P.P	L (m)	5.000
	Breadth Mld.	B (m)	0.734
	Depth Mld.	D (m)	0.261
	Draft	d (m)	0.160
	Trim	t (m)	0.0
	Block Coefficient	$C_b$	0.696
	Displacement Volume	$\nabla$ (m <sup>3</sup> )	0.409
	Position of C.G.	$L_{cb}$ (m)	0.202
	Height of C.G.	KG (m)	0.338
	Metacentric Height	GM (m)	0.057
	Radius of Gyration	$K_{xx}$ (m)	0.309
		$K_{yy}$ (m)	1.220
$K_{zz}$ (m)		1.220	
Rolling Period	$T_\psi$ (m)	2.60	
Bilge	Depth	$db$ (m)	0.012
Keel	Length	$lb$ (m)	1.500
Propeller	Diameter	$D_p$ (m)	$0.117 \times 2$
	Pitch Ratio	$P/D_p$	0.800
	Exp. Area Ratio	$AE$	0.850
	No. of Blade	$Z$	4
Rudder	Area	$A_R$ (m <sup>2</sup> )	$0.010 \times 2$
	Aspect Ratio	$\Delta_R$	1.38
Fin	Area	$A_F$ (m <sup>2</sup> )	$0.0075 \times 2$
	Aspect Ratio	$\Delta_F$	2.33

表 8.2 制御ゲインによる制御効果  
(C船における制御ゲイン影響)

Control Mode	Weight Matrix			Full Scale			W.N.Simulation		
	Yaw (Q1)	Roll Rate (Q2)	Rudder (R)	Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)	Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)
AP	—	—	—	0.44	0.78	1.38	—	—	—
RRCS(82)	10	1	1	0.28	0.44	0.62	0.61	0.27	1.21
RRCS(87)	10	100	1	0.50	0.42	1.58	0.77	0.22	1.38

表 8.3 船速による制御効果

[A] A船における船速影響

[B] B船における船速影響

[A]

Control Mode	Speed (kts)	Standard Deviation		
		Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)
RRCS(22)	13.3	0.80	0.62	2.31
RRCS(22)	9.0	0.61	1.12	3.26

[B]

Control Mode	Speed (kts)	Standard Deviation		
		Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)
RRCS(62)	13.0	0.46	0.10	0.50
RRCS(62)	7.0	0.60	0.11	0.52

表 8.4 各国の操舵速度に関する基準

種 類	規 格	操舵速度 ( $\dot{\delta}$ ) (deg/sec)
船 級 協 会	ABS (アメリカ)	2.32
	DVN (ノルウェー)	2.32
	NK (日本)	2.32
	DNV (サプライボート)	3.25
保安庁規格	船 (巡視船)	2.69
	艇 (小型高速艇)	4.50
防衛庁設計基準	標 準	2.33

表 8.5 操舵速度による制御効果  
(A船における操舵速度影響)

Control Mode	speed (kts)	Rudder Speed (deg/s)	Standard Deviation		
			Yaw (deg)	Roll Rate (deg/s)	Rudder (deg)
RRCS(21)	11.5	3.8	0.39	0.74	0.73
RRCS(21)	11.0	0.5	0.36	0.79	0.82

表 8.6 海象状況による有義波高および平均波周期

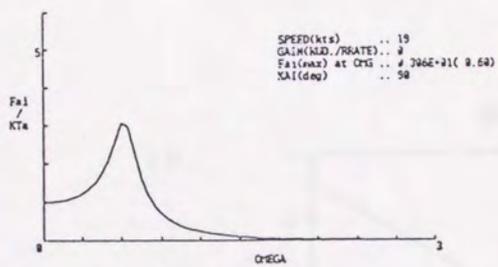
Sea State	Hw (m)	Tw (sec)
0-1	0.05	—
2	0.30	7.5
3	0.88	7.5
4	1.88	8.8
5	3.25	9.7
6	5.00	13.8
7	7.50	13.8
8	11.50	18.0
>8	14.00	20.0

船体主要目

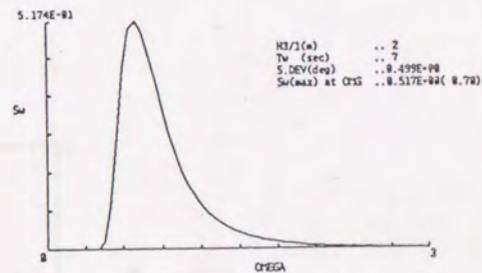
有義波高、波周期

横揺応答関数

波スペクトル



船速  
波向き



出会周波数

横揺スペクトル  
(標準偏差)

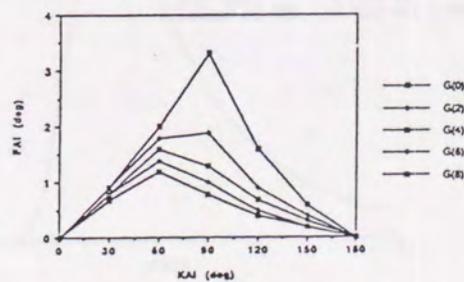
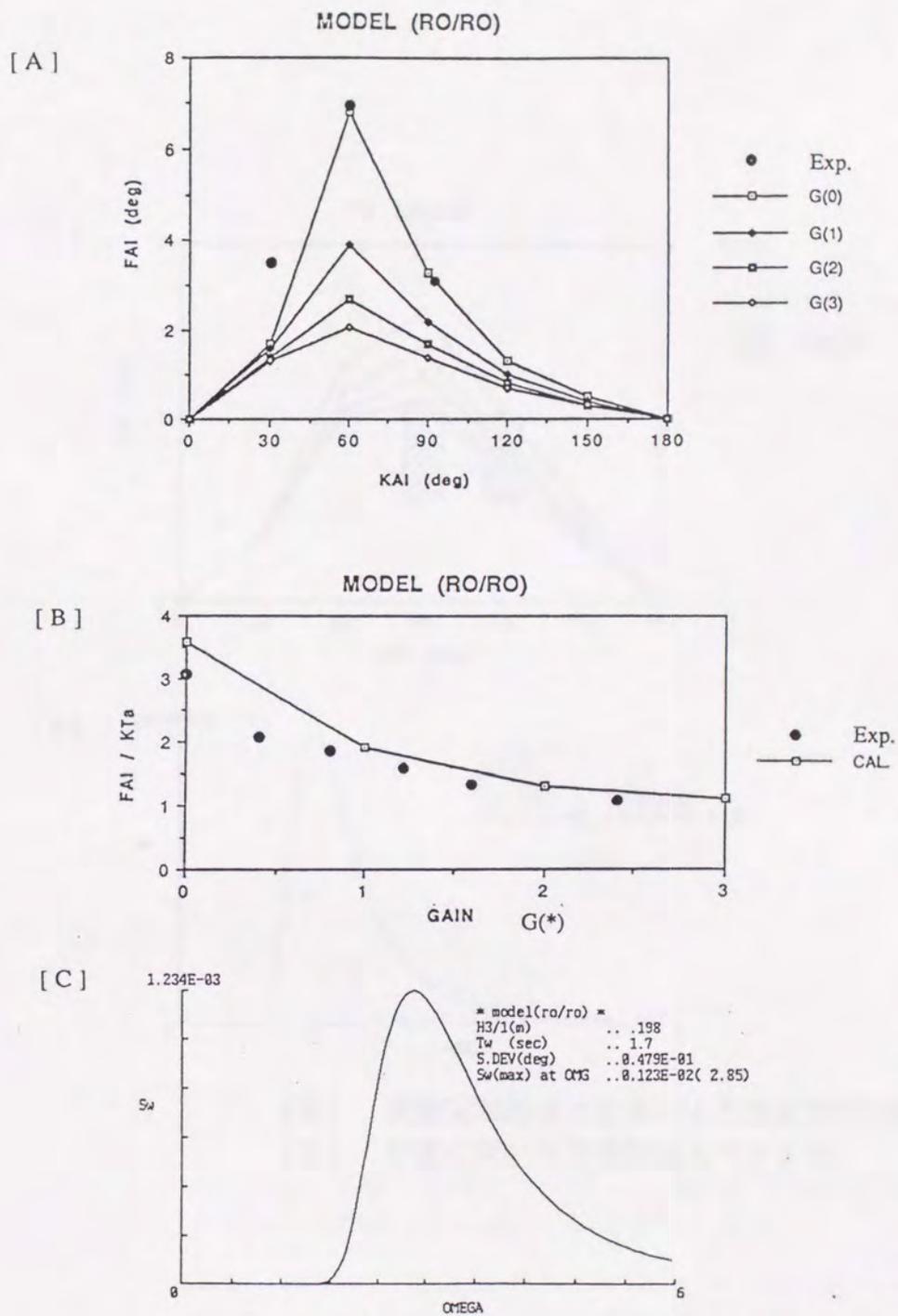
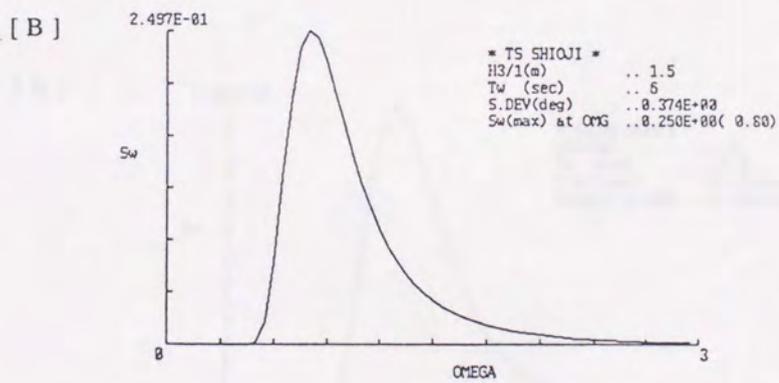
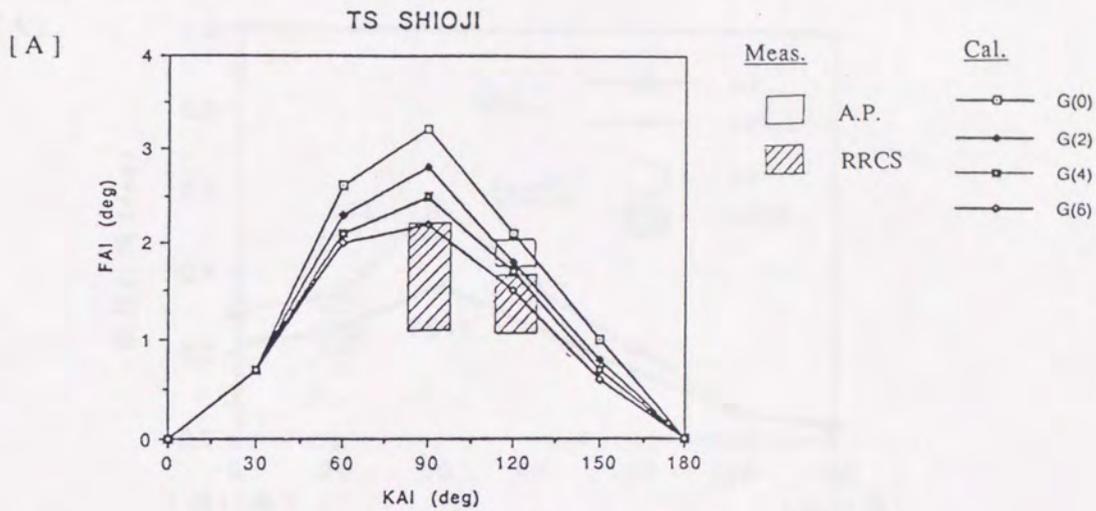


図 8.1 波浪中での舵減揺制御効果の簡易評価方法



- [A] 波向きの違いによる実験結果と計算結果  
 [B] 制御ゲインの違いによる実験結果と計算結果  
 [C] 模型実験に用いた不規則波スペクトル

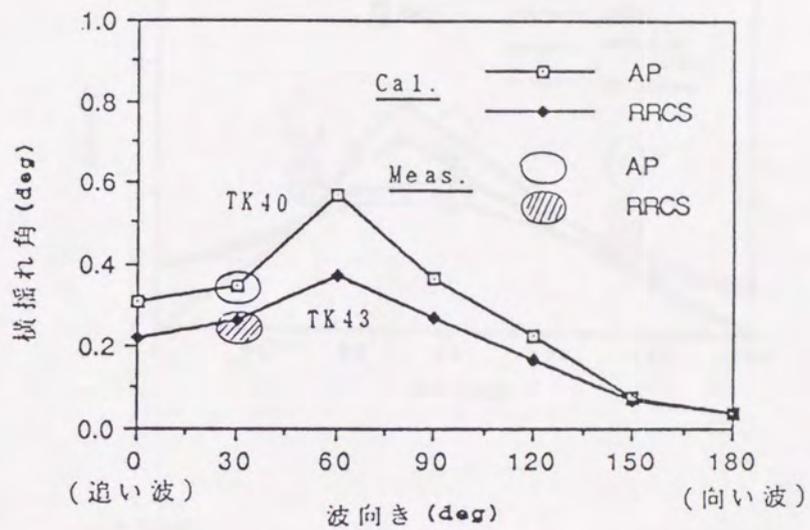
図 8.2 模型実験による舵減揺実験結果と簡易評価方法による減揺効果



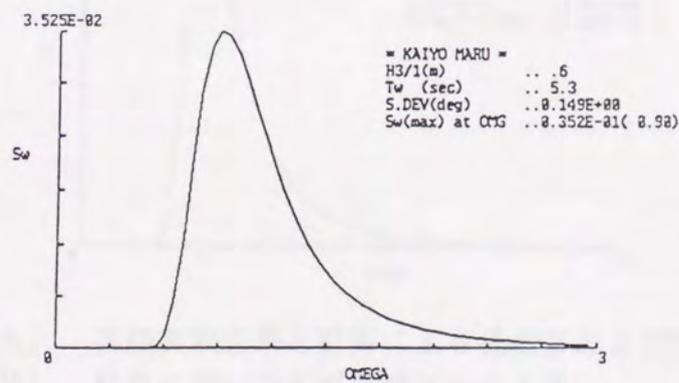
[ A ] 実船実験結果と計算による長波頂不規則波中応答  
 [ B ] 計算に用いた不規則波スペクトル

図 8.3 A船における実船実験結果と簡易評価方法による減揺効果

[A]



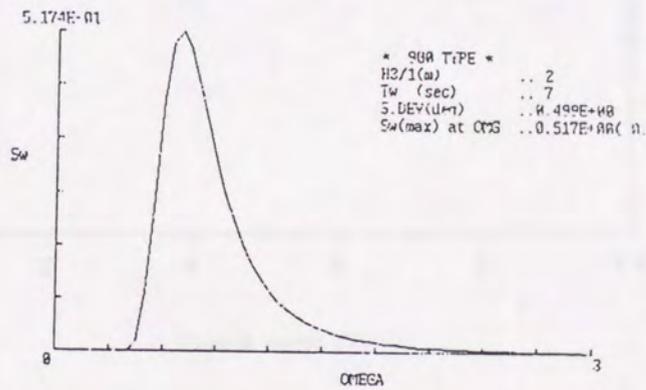
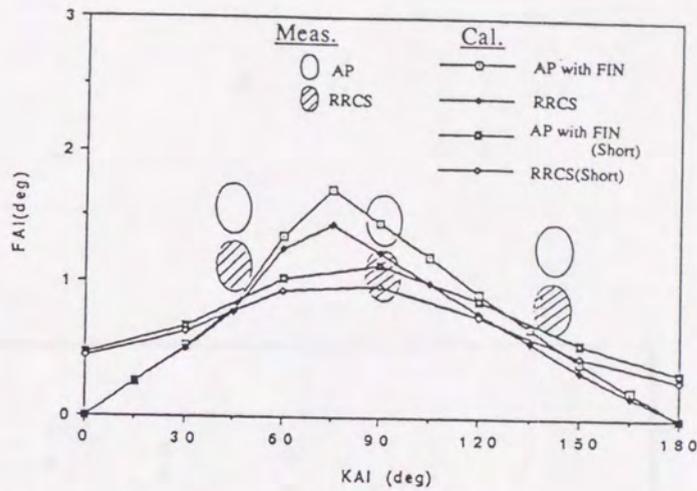
[B]



[A] 実船実験結果と計算による短波頂不規則波中応答

[B] 計算に用いた不規則波スペクトル

図 8.4 B船における実船実験結果と簡易評価方法による減揺効果



- [A] 実船実験結果と計算による長波頂および短波頂不規則波中応答
- [B] 計算に用いた不規則波スペクトル

図 8.5 C船における実船実験結果と簡易評価方法による減揺効果

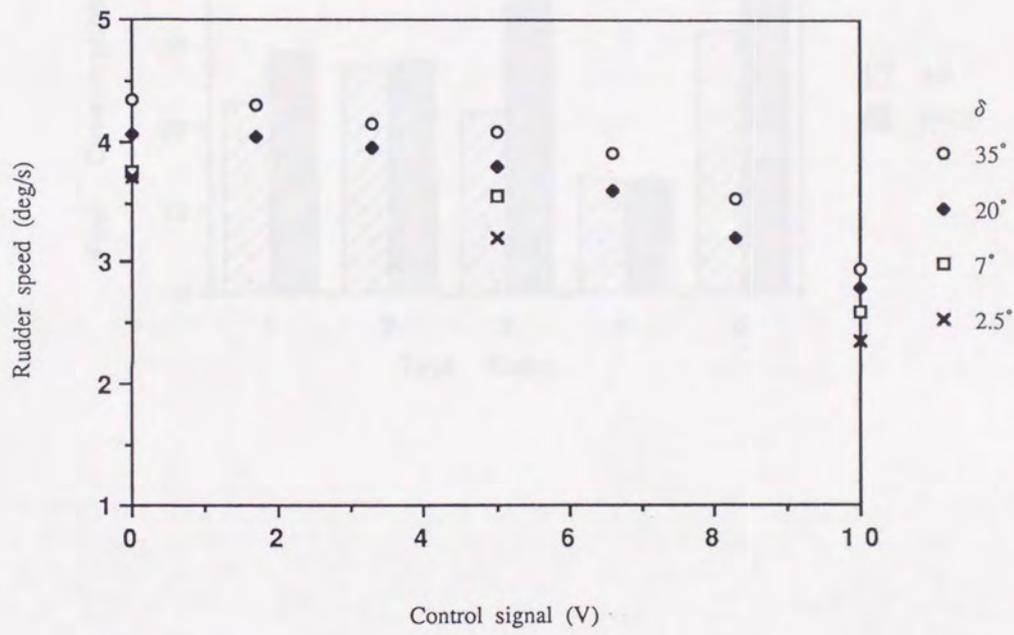


図 8.6 A船における操舵速度と外部制御電圧

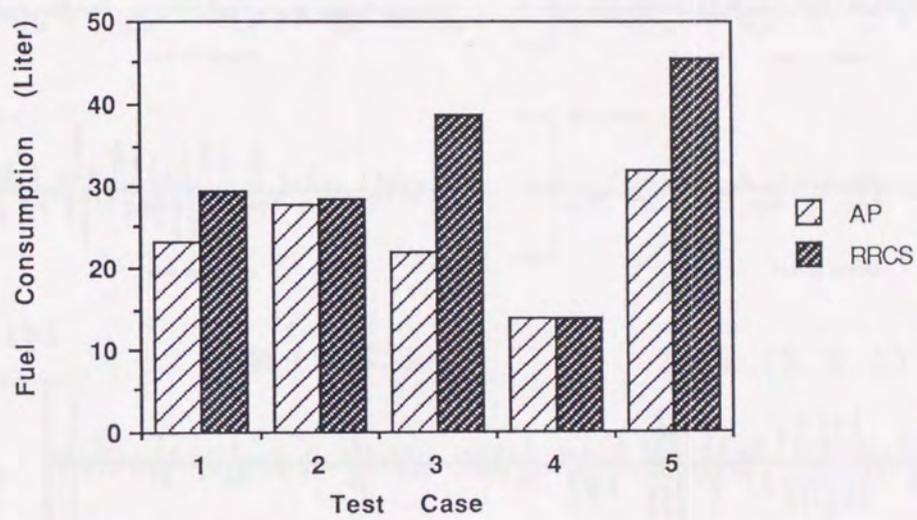
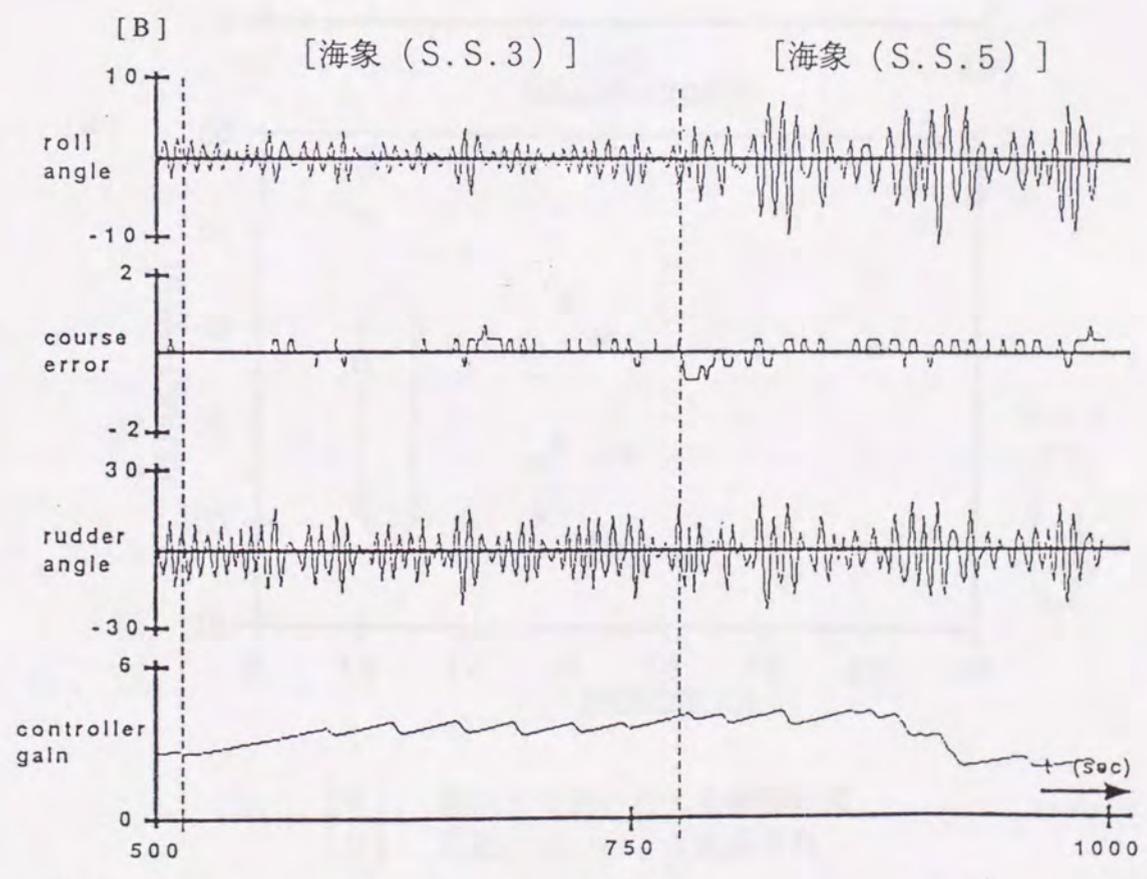
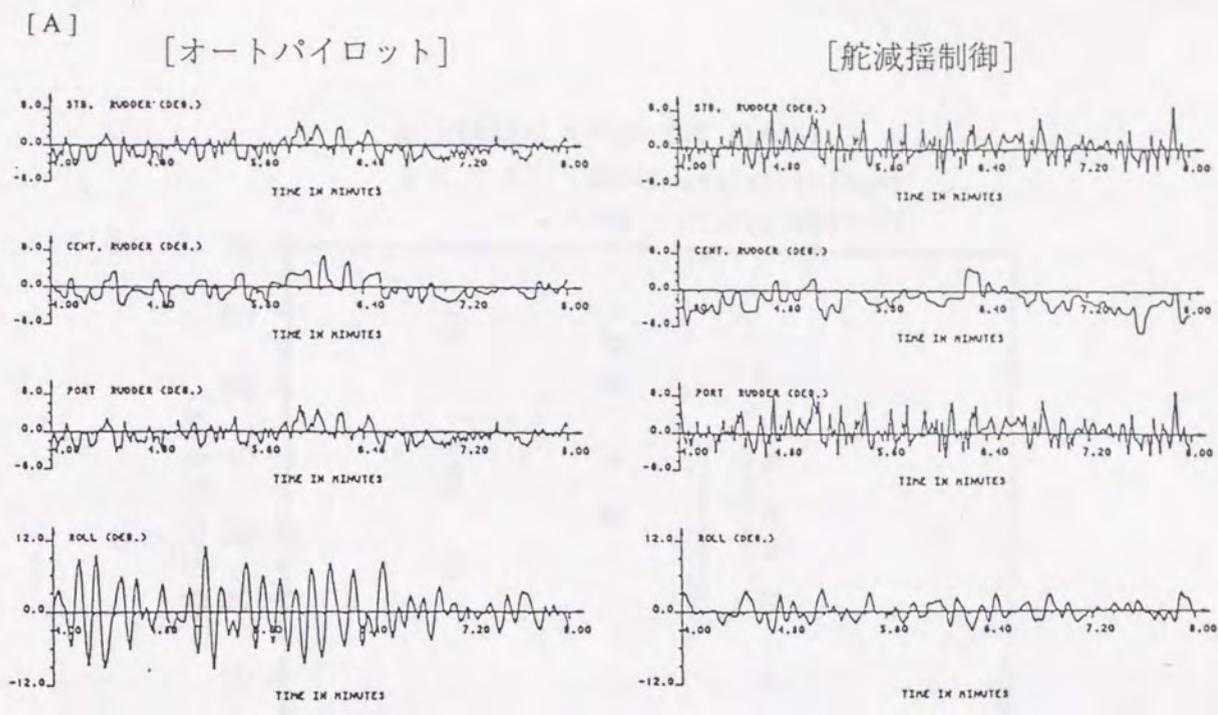
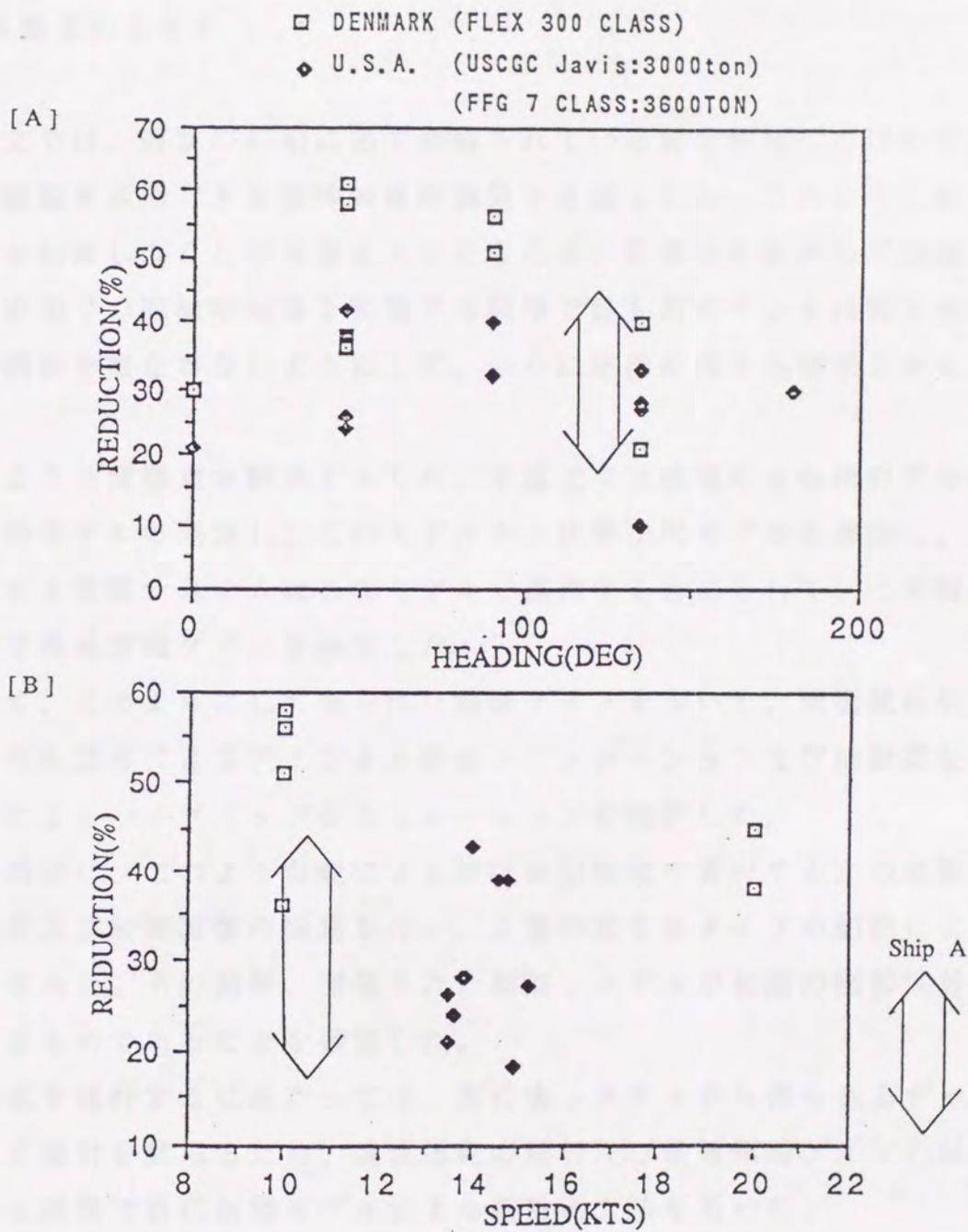


図 8.7 A船によるオートパイロットと舵減揺制御時の燃料消費



[A] デンマーク海軍における実験結果 (オートパイロットと舵減揺制御)  
 [B] オランダ海軍における実験結果 (制御系のロバスト性)

図 8.8 諸外国での舵減揺実船実験の例



[A] 波向きの違いによる減揺効果

[B] 船速の違いによる減揺効果

図 8.9 A船における舵減揺実験結果と諸外国での実船実験結果

## 結論

### B.1 本論文のまとめ

本論文では、通常の船舶に必ず装備されている舵を利用して保針性能を保ちつつ横揺を減揺できる制御装置の開発を目標とした。このように舵を用いて横揺を制御しようとする考え方そのものは、以前から国内外で議論されてきたが実船での舵減揺制御を実施する段階で最大のポイントは舵本来の保針制御の機能を損なわないようにして、いかに横揺減揺を実現するかにあった。

このような問題点を解決するため、本論文では横揺を含む操舵系を制御型自己回帰モデルで同定し、このモデルから状態空間モデルを導出し、さらに対象とする制御システムはこのモデルで遷移するものとして、二次評価関数のもとで最適制御ゲインを決定した。

そして、このようにして得られた制御ゲインを用いて、横揺減揺制御の可能性を白色雑音によるデジタル制御シミュレーション及び操縦運動の数学モデルによるハイブリッドシミュレーションで検討した。

また同時に、このような舵による横揺減揺制御を実現するため実際のシステム設計及び制御装置の開発を行い、3隻の異なるタイプの船舶による実船実験を試みた。その結果、開発された制御システムが初期の制御性能を十分発揮するものであることを確認した。

本研究を遂行するにあたっては、常に実システムから得られるデータを対象とした設計を試みるため、連成運動の解析及び最適制御ゲインの決定等のあらゆる段階で自己回帰モデルによる統計的方法を用いた。

また、本研究を行う過程で舵減揺制御に関する諸外国での研究状況についても調査することによって、舵減揺制御装置を開発していく上での今後の研究課題などを得ることができた。

以下に、本論文の研究成果を各章ごとにまとめる。

第1章では、操舵することによる横揺への影響について、流体力学的な説明を行った。そして、操舵による横揺減揺制御の可能性について、フィンスタビライザなどの他の減揺装置と比較しながら検討を行った。

そして、次の事項を確認した。

- (1) 操舵直後に発生する船体を旋回中心側に傾斜させるモーメントが横揺を励起し、このモーメントが舵による横揺減揺で使用する制御力となり得る。
- (2) 横揺減揺制御系にフィードバックするデータとしては、横揺角速度、横揺角加速度そして横揺角の順で有効である。

第2章では、本論文で一貫して用いる波浪中の横揺のような船体運動を確率過程として取り扱う方法について検討した。

そして、

- (1) 波浪中における横揺などの船体運動の時系列を弱定常確率過程として取り扱い、エルゴード性も成立する。
- (2) 制御系の設計に際して必要な事前情報は、実船によって得られる関連する船体動揺の時系列データのみとする。
- (3) これらの時系列を有効に表現するパラメトリックモデルを用いる。
- (4) 時系列から統計的に最適なモデルを選択する方法として、MAICE法を採用する。

などの仮定のもと、本論文では自己回帰モデルを操舵を考慮した横揺を表現するモデルとして採用することとし、その特性及び同定法などについて考察した。

第3章では、保針操舵に代表されるフィードバック系の自己回帰モデルによる解析方法を示した。さらに、保針操舵時の実船計測データについてスペクトル解析、雑音寄与率解析及びインパルス応答解析などを行った。

その結果、

- (1) 雑音寄与率解析によると、横揺角速度のスペクトルピーク付近では横揺角速度から方位角に与える影響が大きく、これらの運動に連成影響のあることが判った。
- (2) 舵角のスペクトルピーク周波数付近での雑音寄与率から、舵角から横揺角速度に対する影響が大きいことが判った。このことから、舵角を適切に制御することにより、横揺を制御できることが判った。
- (3) 実船データによるインパルス応答解析から、舵角に対する横揺角速度の応答特性は、舵角のインパルスの入力に対して振動しながら減衰することが判った。
- (4) 横揺角速度から方位角に対するインパルス応答特性から、横揺の右傾斜に対して、方位角は左回頭するような傾向にあることが判った。

第4章では、自己回帰モデルから状態空間表現を導く方法、及び二次評価関数のもとに最適制御ゲインを決定する方法などについて示した。

- (1) 制御型自己回帰モデルは、多変数時系列に対する多次元自己回帰モデルの変形であり、モデルの同定方法は基本的には多次元自己回帰モデルと同じである。
- (2) 制御型自己回帰モデルから状態空間表現を導き、二次評価関数の最小化のもとに、最適制御ゲインを決定する。
- (3) 二次評価関数における重み係数の初期設定は、制御型自己回帰モデルをあてはめた後の残差分散を考慮して決定することができる。

以上の事項を明らかにした。

第5章では、白色雑音による制御シミュレーション方法を示した。そして、この方法を、まずランダム操舵による実船データに適用した。次に、横揺を含む数学モデルによって波浪中操縦運動をシミュレートし、これにランダム操舵を加えた実験から得られたデータに対してこの方法を適用した。

これらの結果、

- (1) 被制御変数である方位角、横揺角速度に対する重み係数、及び制御変数である舵角に対する重み係数を何種類か変更しながら、白色雑音による制御シミュレーションを行うことによって、重み係数の初期設定値に関する情報を得ることができた。
- (2) 横揺を含めた数学モデルによる波浪中ランダム操舵運動のシミュレーションで得られたデータの自己回帰モデルによるスペクトル解析、雑音寄与率解析を行い、船首揺と横揺の連成影響について確認できた。
- (3) 実船あるいはハイブリッドシミュレーションによって得られたデータを用いた、白色雑音による制御シミュレーションの結果、統計的最適制御による舵減揺制御は実船においても、十分な減揺効果が得られる可能性のあることが確認できた。

第6章では、実船実験用に試作開発した舵減揺制御装置の機能及びハードウェア・ソフトウェア構成などについて示した。

今回、開発した舵減揺制御装置は制御型自己回帰モデル作成、制御ゲイン作成などを、少なくとも0.5秒間隔でオンライン・リアルタイム制御が可能な機能を有している。

その他にも、次のような特徴を有している。

- (1) 横揺角速度検出用センサーを、本制御装置に内蔵した。
- (2) 操作性、拡張性を考慮してプログラムによって操作面を作ることが可能なタッチパネルを操作装置として採用した。
- (3) 舵減揺制御をリアルタイムで行うために、OSとしてリアルタイムUNIX、言語としてはフォートラン及びC言語を採用した。

第7章では、試作開発した舵減揺制御装置を用いた3隻の異なるタイプの船舶による舵減揺制御実船実験を行い、横揺減揺効果について確認した。

その結果、

- (1) 通常の船舶では、オートパイロットに比べて20～40(%)の減揺効果が得られた。

- (2) 舵減揺制御を行う場合、方位角に対する重み係数を横揺角速度に対する重み係数よりも重視して制御した場合は、オートパイロットに比べて方位角の偏差は小さくなった。
- (3) 舵減揺制御を行う場合、横揺角速度を重視した場合は、横揺角速度の変動は小さくなった。
- (4) 操舵装置本来の保針性能を損なう事なく、横揺減揺制御を行うことができる。
- (5) 減揺タンク併用の船舶においても、5～10(%)程度の横揺減揺効果が得られる。
- (6) 舵減揺制御と減揺タンクとの併用においても、操船上問題となるような現象は認められない。
- (7) 舵減揺制御による変針性能は、通常のオートパイロットに比べて、顕著な差は認められない。しかし、変針操舵時の横揺の減衰が速く、このことは比較的小型の船舶においては有効である。
- (8) フィンスタビライザを装備した船舶においても、20(%)前後の横揺減揺効果が期待できることが判った。

第8章では、舵による横揺減揺効果を推定する簡易的な方法を示し、計算結果と実験結果との比較を行った。さらに、舵減揺制御の減揺効果に影響を与えると考えられる要因及び諸外国での舵減揺制御の状況について整理した。これらの結果から、

- (1) 舵減揺制御による波浪中での横揺減揺効果を評価するために、舵による横揺減衰項を考慮した運動方程式に対して、舵減揺制御で用いる制御ゲインマトリクスのうち横揺角速度に対応する要素成分を等価的に使用した計算結果と実験結果の比較を行い、両者の結果はよく一致することを確認した。
- (2) 実船における横揺減揺効果を、波向き及び操舵速度について整理した結果、かなりバラツキはあるが追い波状態の方が向かい波状態に比べて減揺効果が得られる傾向にあることが判った。

## B.2 あとがき

本論文で述べた、統計的最適制御理論を用いた操舵による横揺減揺制御に関する研究開発を通して得られた舵減揺制御装置は、従来のオートパイロットに比べて付加価値の高い自動操舵装置と位置づけることができると考えられる。

舵減揺制御をさらに実用的な装置として開発・発展させていくためには船舶工学、制御工学のみならずさらに多くの関連領域分野での新しい技術要素を積極的に取り入れていくことが重要である。

ここで得られた結果から、舵減揺制御に関して次のような事項を今後検討する必要がある。

- (1) 舵減揺制御効果を最大限に発揮するために、フラップラダーの採用あるいは舵数の増加も当然であるが、舵力を増すための舵そのものの研究開発なども重要であろう。
- (2) 海象状況などの変化に適宜、適応するような最適制御ゲインの選択方法として、ファジー理論あるいはニューラルネット理論などの応用も考えられる。
- (3) 舵が船体最後尾に装備されており、長いレバーで大きなモーメントが得られることを考慮すると、舵による縦揺減揺制御も一つの制御対象になりうると考えられる。

現在、通常船舶の保針制御のみならず高速艇などの姿勢制御においても、多変数による高度な制御が要求され現代制御理論を用いた装置開発も盛んである。本論文で述べた、統計的最適制御理論も現代制御理論の一つの手法であり、本論文の研究成果から判断してこのような問題に対しても充分適用可能と考えられる。

最後に、本論文での研究を通して開発した舵減揺制御装置が数多くの船舶に搭載され、幾らかでも乗組員あるいは乗客の乗り心地改善につながれば幸いである。

## 謝辞

本論文の完成にあたり、大阪大学工学部船舶海洋工学科・濱本剛實教授には終始懇切丁寧なご指導ならびに貴重なご意見・ご助言を頂きました。また、大阪大学工学部船舶海洋工学科・田中一朗教授、同産業機械工学科・赤木新介教授にはご校閲の労を頂きました。ここに心から厚くお礼申し上げます。

時系列解析、統計的制御の理論から応用さらに実船実験に関するご指導を頂き、また本論文をまとめるにあたり詳細にわたってご指導、ご激励を頂きました。東京商船大学海洋工学講座・大津皓平教授に心から感謝いたします。

船舶工学及び航海学への時系列解析理論の応用について、永年ご指導を頂きました。前運輸省船舶技術研究所所長・山内保文博士（現三井造船（株）技術顧問）に深く感謝いたします。

船舶工学全般に関するご指導を頂き、また本論文作成にあたってご激励を頂きました（株）三井造船昭島研究所技術部長平野雅祥博士に感謝いたします。本研究遂行に際し、船舶工学特に横揺を含む操縦運動に関する的確なご指導と有益なご討論を頂きました同研究所高品純志博士に感謝いたします。

統計論・確率論を実システムの解析及び制御に応用する基礎を、ご教授頂いた文部省統計数理研究所赤池弘次博士（同研究所所長）、さらに直接研究のご指導を頂いた同研究所尾崎統博士、北川源四郎博士に心から感謝します。

東京商船大学堀籠教夫教授、原技官には特にハイブリッドシミュレーション及び実船実験において親切なご指導を頂きました。また、制御理論の実践の場として船を使用させて頂いた、東京商船大学練習船「汐路丸」歴代船長、堀田敏行機関長及び乗組員の方々に貴重なご指導を頂きました。ここに、東京商船大学の関係各位に深くお礼申し上げます。

本研究の開始当初から著者と共にシステム開発、実船実験さらに有益なご意見及び活発なご討論を頂きました三井造船（株）佐々木学氏、関佳之氏に感謝いたします。また、（株）三井造船昭島研究所杉村泰社長には、終始ご激励をしていただきましたことに対し深く感謝いたします。

最後に、本論文の図表などの整理にあたってご協力を頂いた草ヶ谷誠一氏、桑森加寿子さんに謝意を表します。

