

# 船体運動と主機回転数変動の関係について

中谷 俊彦\*

## The Effect of Ship's Motions on Engine Speed under Various Sea Conditions

Toshihiko NAKATANI

### Abstract

This paper describes the results of statistical analysis using a Multivariate Auto Regressive (MAR) model on data collected from the sea trial of a small training ship, the WAKASHIO MARU.

Diesel engines are equipped with governor systems to keep their speed constant. These systems regulate the fuel supply based on measurements of engine speed. In order to design better marine governor systems, it is necessary to analyze the governor-engine system not only in terms of the system's input-output data (engine speed and fuel supply regulation), but also in terms of the ship's motion. It is shown that the speed of the ship's propeller is strongly influenced by the ship's motions.

### 1. はじめに

船舶は、船首揺れ、横揺れ、縦揺れなどの3次元的な運動をしながら航行している。また、搭載されているメインエンジンもこのような船体運動の影響を受けて複雑な回転数変動が引き起こされる。コンピュータシステムの発達により個々のデータを高周波サンプリングかつ長時間にわたってデータを収録することは可能となった。しかし、航海中に種々の海象条件下で得られた船舶データを、航海系/機関系の区別無くトータル的に取り扱って解析した例は極めて少ない<sup>1)</sup>。このような解析が進めば、船用制御系設計の立場では、例えば自動操舵系とエンジン制御系を統合した新しい制御系の実現も可能となるかもしれない。

このような背景から、本研究では、まず、3種類の波浪条件で、主機回転数変動がどのような船体運動と関連性があるかを調査することにした。

### 2. 統合解析の概念

図1は船体運動系とエンジン制御系とを総合的に捉えた概念図である<sup>1)</sup>。本研究では、操舵系の基本デー

タである船首方位と舵角にエンジン制御系の基本データであるエンジン回転数とガバナを加え、さらに、これら基本データに横揺角、縦揺角の船体運動を組み合わせて解析を行うこととする。

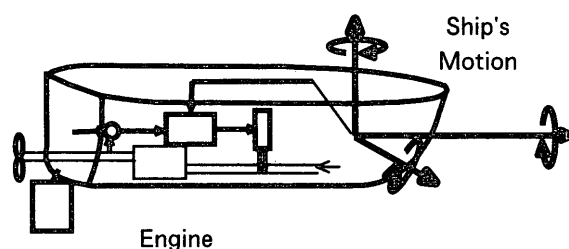


図1 統合解析の概念

### 3. 航海データの収録と解析手順

解析の具体的な方法を以下に示す。

- ① 本校の附属練習船・若潮丸において航海系/機関系のデータを同時収録する。具体的な収録チャンネルと信号名称は

1ch - Pitch	縦揺角
2ch - Roll	横揺角
3ch - Heading	船首方位

## 2 船体運動と主機回転数変動の関係について

4ch - rpm	エンジン回転数
5ch - Rudder	実舵角
6ch - Load-Index	ガバナ (燃料ポンプ ラック位置)

の6変数である。尚、サンプリング周期は0.2秒、収録時間は1セット300秒(1500個/ch)とした。

### ② 波浪の向きによって

- i) 向かい波
- ii) 横波
- iii) 追い波

の3セットのデータ群を収録する。

### ③ 得られたデータから自己回帰モデル<sup>2),3)</sup>と呼ばれる統計モデルを作成する。

### ④ モデルから推定される、パワースペクトル、ノイズ寄与率<sup>2),3)</sup>、インパルス応答などを計算する。

図2から図4に、解析用に収録した時系列データを示す。

## 4. 時系列解析に用いる統計モデル

本研究では、収録データを6次元の定常時系列データとみなし、

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

$X(n)$ : 6次元状態変数ベクトル

$A(m)$ :  $6 \times 6$ の自己回帰係数行列

$U(n)$ : 6次元ホワイトノイズベクトル

$M$ : 赤池の情報基準(AIC)<sup>2),3)</sup>

によって決定されるモデルの次数

で表現される自己回帰モデル<sup>2),3)</sup>によって同定を行った。

(1)式のような時間領域におけるモデルが決定すれば、フーリエ変換により時間領域から周波数領域に移せばスペクトルを求めることができる。(1)式のスカラ表現は、

$$x_i(n) = \sum_{m=1}^M \sum_{j=1}^6 A_{ij}(m)x_j(n-m) + \varepsilon_i(n) \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (2)$$

であるから、 $A_{ij}(0) = -1(i=j), = 0(i \neq j)$ と定義すれば、

$$R_{\varepsilon_i \varepsilon_j}(\ell) = \sum_{m=0}^M \sum_{0r=0}^M \sum_{1s=1}^6 \sum_{1}^6 A_{ir}(m)A_{js}(n)R_{rs}(\ell-m+n) \quad (3)$$

が得られる<sup>2)</sup>。ここで、 $R_{\varepsilon_i \varepsilon_j}(\ell)$ は $\varepsilon_i(n)$ と $\varepsilon_j(n)$ の相互相関関数、 $R_{rs}(\ell)$ は $x_r(n)$ と $x_s(n)$ の相互相関関数である。相互相関関数とクロススペクトルの関係を考慮すると(3)式は、

$$\sigma_{ij} = \sum_{r=1}^6 \sum_{1s=1}^6 A_{ir}(f)P_{rs}(f)\overline{A_{js}(f)} \quad (i,j=1,2,\dots,6) \quad (4)$$

と表現できる。ただし、 $\overline{A_{js}(f)}$ は $A_{js}(f)$ の共役複素行列を表し、

$$A_{ih}(f) = \sum_{m=0}^M A_{ih}(m)\exp(-i2\pi fm) \quad (5)$$

である。

従って、 $x_i(n)$ と $x_j(n)$ のクロススペクトル $P_{ij}(f)$ は、

$$P_{ij}(f) = \sigma_{ij} \left( \sum_{r=1}^6 \sum_{1s=1}^6 A_{ir}(f)\overline{A_{js}(f)} \right)^{-1} \quad (6)$$

によって与えられる。

(6)式をマトリックスで表現すると、

$$P(f) = (A(f))^{-1} \Sigma (A(f)^T)^{-1} \quad (7)$$

となる。ここで、 $P(f)$ はその要素が $P_{ij}(f)$ 、 $\Sigma$ はその要素が $\sigma_{ij}$ 、 $A(f)$ はその要素が $A_{ij}(f)$ となる行列である。

また、(2)式で表現される6次元自己回帰モデル、

$$x_i(n) = \sum_{j=1}^6 \sum_{1m=1}^M A_{ij}(m)x_j(n-m) + \varepsilon_i(n) \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (8)$$

を多次元インパルス応答モデルで表現すると、

$$x_i(n) = \sum_{j=1}^6 \sum_{1m=0}^{\infty} C_{ij}(m)x_j(n-m) + u_i(n) \quad (i=1,2,\dots,6)$$

$$C_{ij}(1) = A_{ij}(1)$$

$$C_{ij}(m) = A_{ij}(m) + \sum_{\ell=1}^{m-1} A_{ij}(\ell)a_{ij}(m-\ell) \quad (m=2,3,4,\dots) \quad (9)$$

となり、自己回帰モデルからインパルス応答関数 $C_{ij}(m)$ が求められる<sup>2)</sup>。

また、この多次元のフィードバックシステムにおける $j$ ループから $i$ ループへの周波数 $f$ におけるノイズ寄与率は、

$$q_{ij}(f) = |b_{ij}(f)|^2 p_{u_j}(h) \quad (10)$$

$b_{ij}(f): x_j(n)$  から  $x_i(n)$  への閉ループの  
周波数応答関数

$p_{u_j}(f)$ : 外乱  $u_j(n)$  のパワーベクトル

によって与えられる<sup>2)</sup>。

## 5. 解析結果

図5に、1次元自己回帰モデルを使って推定したエンジン回転数のパワースペクトルを示す。

スペクトルのピーク周波数は、向かい波、横波、追い波のとき、それぞれ、0.175Hz(5.7秒)、0.2Hz(5秒)、0.075Hz(13.3秒)であった。尚、ピークの値自体は追い波のときが最も大きく、後方からの波浪によってエンジン回転数が大きく変動することが窺われる。

スペクトル解析からは、これ以上の知見は得られない。そこで、6変数全てを用いて多次元自己回帰モデルを作成し、ノイズ寄与率を計算する。ノイズ寄与率からは、回転数変動がどのような変数によって引き起こされているかを知ることができる。

図6に、回転数に対するノイズ寄与率を示す。ノイズ寄与率は、各変数からの寄与率の総和がそれぞれの周波数で1(=100%)になるように規格化されている。したがって、先のパワースペクトルのピーク周波数付近に注目しながら観察することにより、どの変数がピーク付近のパワー源になっているかを知ることができる。

向かい波の場合、回転数変動のほとんどが縦揺角によって引き起こされていることがわかる。それに対して横波の場合、横揺角の影響が向かい波の場合よりも大きい。また、主機回転数自身からの寄与も大きい。さらに低域では船首方位からの寄与も注目される。追い波の場合、ピーク付近では船体運動系からの寄与は小さく、回転数自身とガバナからの寄与がほとんどである。特にガバナによる寄与が大きいことは、本来、回転数変動を抑えるための装置であるガバナが、逆に回転数変動を引き起こしていることを意味する。

時間領域で議論するために、インパルス応答解析も実施したが、現段階では全ての解析を終了しておらず、波向きによる違いについての知見は得られていない。

## 6. まとめ

今回の研究では、波浪の向きを変化させてデータを収録し、そのデータを基に航海系/機関系を統合して解析を行った。その結果、エンジンの回転数変動と船体運動との関連性や波浪条件による違いについて知見が得られた。

今回は、若潮丸を使った航海データ収録システムの構築に時間を費やしてしまい、詳細な定量的解析を完了できていない。

また、各波浪状況において、寄与率の高い船体運動信号を取り入れた場合のガバナ制御系シミュレーション

も今後の課題であると考えている。

最後に、冬の日本海で動揺する若潮丸を、著者の希望する針路に快く向けて下さった藤重船長、佐々木機関長、横井一等航海士、篠島一等機関士以下、乗組員の方々に心から御礼申し上げます。

なお、本研究は、財団法人富山県高等教育振興財団平成14年度助成事業(第5号)助成金によることを付記し、理事長はじめ関係各位に深く感謝致します。

## 参考文献

- 1) 坂本, 濱田, 水口: 船体運動とメインエンジンの統合解析に関する研究, 平成14年度富山商船高等専門学校卒業研究報告, 2002
- 2) 赤池弘次, 北川源四郎: 時系列解析の実際 I, 初版, 朝倉書店, 1994
- 3) 中川東一郎: エンジニアのためのプロセス解析と制御 -SILTAC活用事例-, 第1版, 工業技術社, 1995

4 船体運動と主機回転数変動の関係について

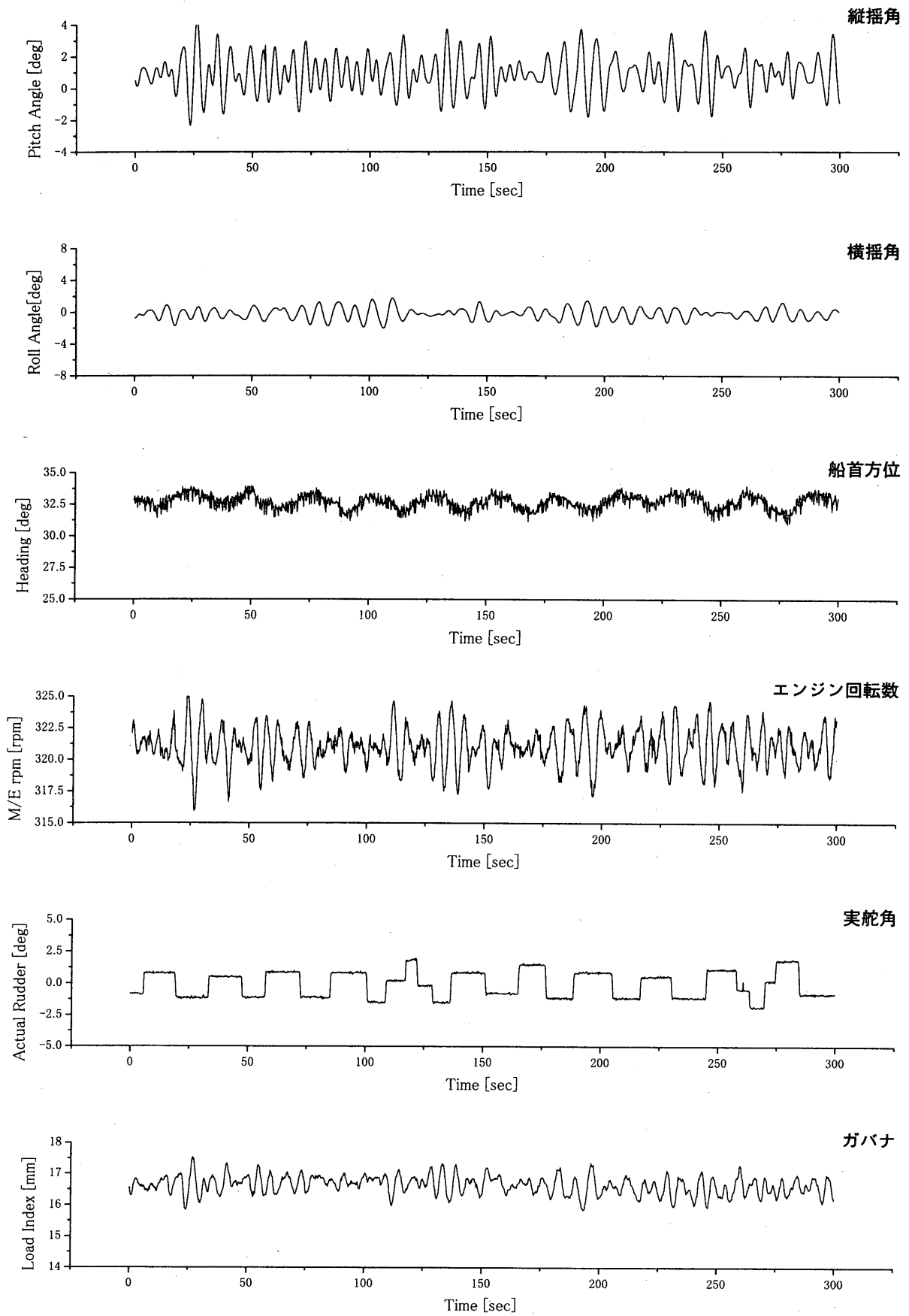


図2 向かい波で収録した時系列データ

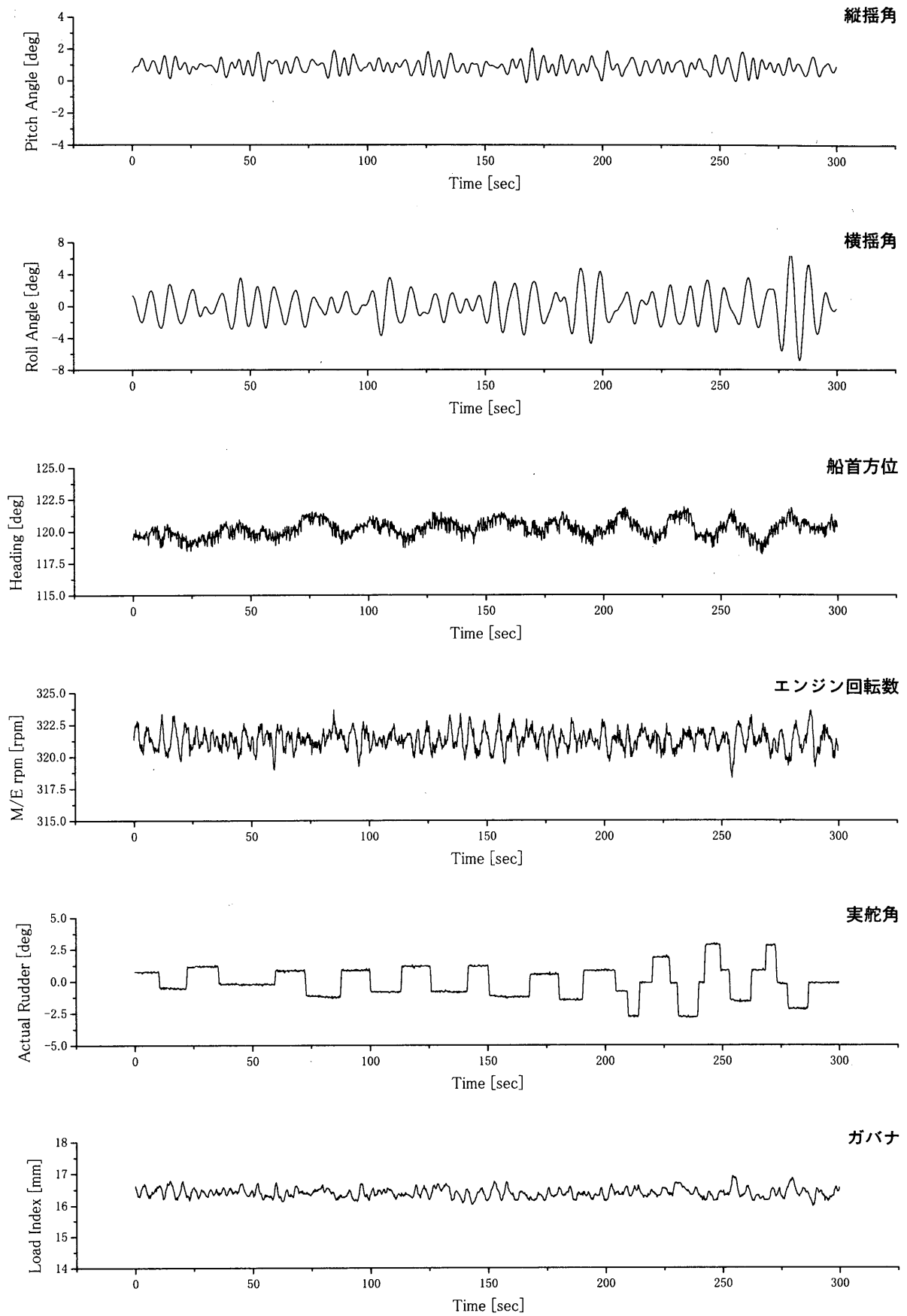


図3 横波で収録した時系列データ

6 船体運動と主機回転数変動の関係について

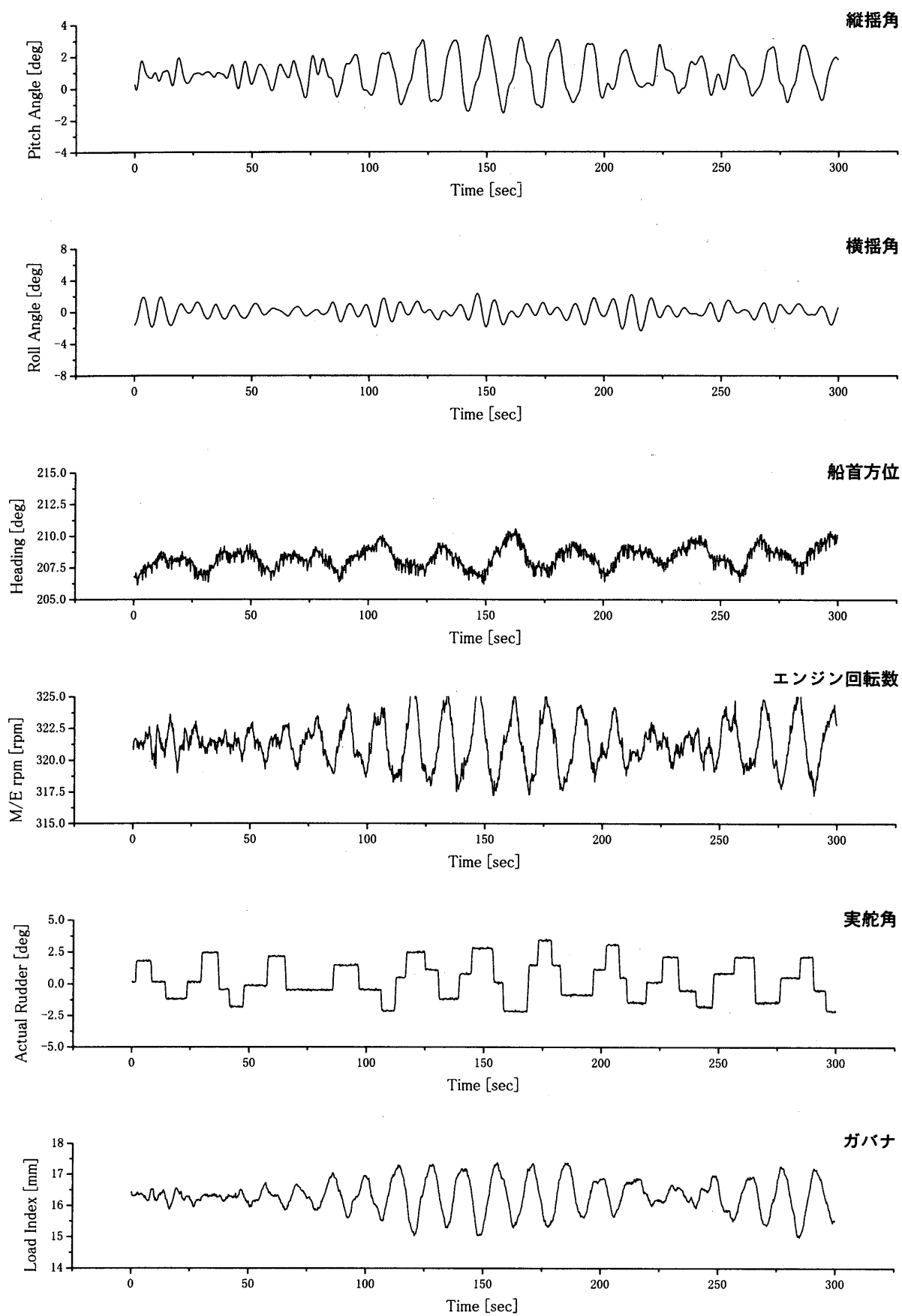


図4 追い波で収録した時系列データ

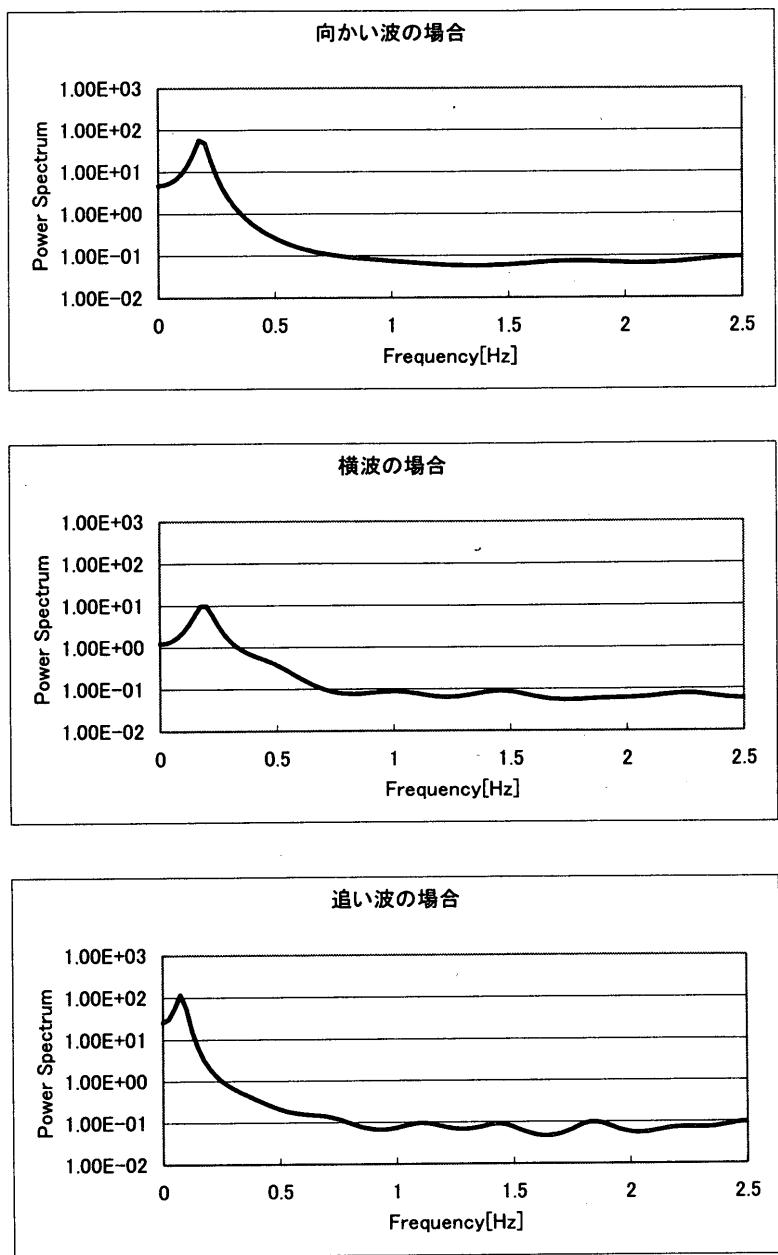
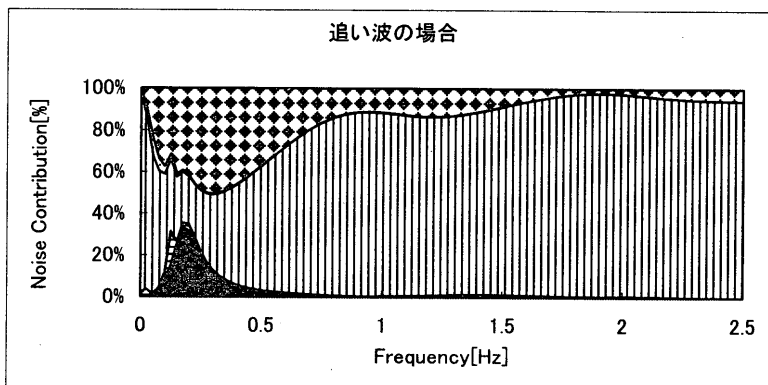
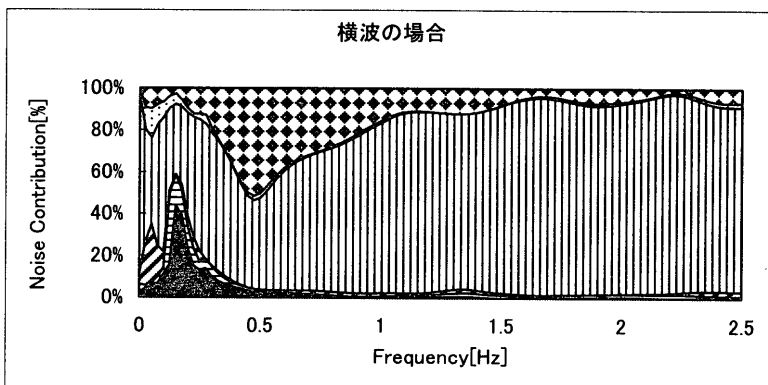
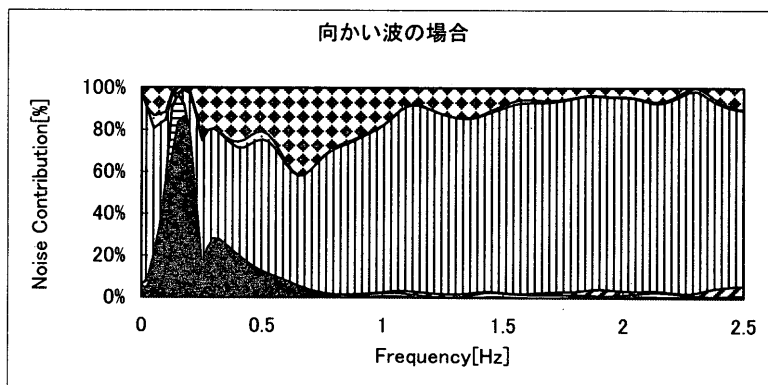


図5 エンジン回転数のパワースペクトル



-  エンジンガバナからの寄与
-  実舵角からの寄与
-  エンジン回転数自身の寄与
-  船首方位からの寄与
-  横揺角からの寄与
-  縦揺角からの寄与

図6 エンジン回転数に対するノイズ寄与率