

統計モデルによる小型船舶の動特性解析について

中谷俊彦*

Dynamics analysis of the small training boat through a statistical model

Toshihiko NAKATANI

Abstract

This paper describes results of dynamic analysis through a statistical model on data collected from the sea trial of a small training boat. After upgrading the navigational system of an actual small training boat Sazanami, the experiments were carried out under various sea conditions. In order to analyze the real data collected from the sea trial, multivariate auto regressive model was fitted to these data using minimum AIC estimate procedure. From the estimated model, useful tools for the statistical analysis, such as a noise contribution, can be obtained. As results of statistical analysis, dynamics of Sazanami was found.

1 まえがき

航海中の船舶は、ロール、ピッチ等の複雑な立体運動をしている。これらの特性は、船舶の大きさや形状によっても変化する。船体運動の特性がわかれば操船上の目安を得ることができるため、大型船においては操縦性能試験等を通じて船体運動が解析される事例は多い。しかし小型船舶においては定量的に解析された事例は少なく、洋上で得られた航海データの蓄積も少ないのが現状である。そこで本報告では、富山商船高等専門学校が所有する小型船舶「さざなみ」を供試船として、いわゆるパラメトリックモデルによる統計的解析手法を航海中に得られた実船データに適用し、各種の解析を実施することとした。

2 小型船舶「さざなみ」

供試船である小型船舶「さざなみ」(以下、本船)の概観を写真1に、主要目等を表1に示す。実船実験時のデータ収集等で必要となる本船のデータ処理装置については以前報告したが¹⁾、本船の信号系統の改修工事が終了した後、船体運動のデータを収録するため、光ファイバジャイロ(FOG: Fiber Optical Gyro)を搭載した。FOGの概観を写真2に示し、実験時の配置を写真3に示す。また、搭載したFOGの計測項目と各フルスケール値を表2に示す。



写真1 小型船舶「さざなみ」

表1 さざなみの主要目等

全長	16.00m
全幅	4.10m
総トン数	15トン
主機関	ディーゼル主機関 最大517PS 1基
速力(試運転最大)	約20.0kt
速力(巡航)	約18.0kt
定員	乗組員 2名 その他 23名
資格	JCI 沿海



写真2 光ファイバジャイロ

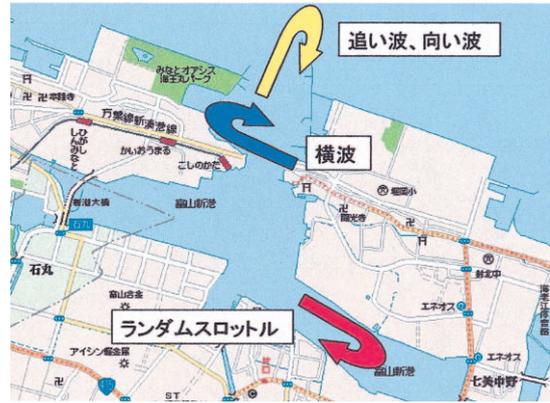


図1 実験海域

表-2 FOGの計測項目

計測項目	フルスケール値
ロール角	±45deg
ピッチ角	±45deg
ヨー角	±180deg
3軸加速度	±19.6m/sec ²
3軸角速度	±100deg/sec

表3 向い波/横波/追い波中の実験時の気象・海象

風向	北東
風速	15m/s
波高	1.5m

表4 ランダムスロットル実験時の気象・海象

風向	南
風速	1.5m/s
波高	0.5m



写真3 データ収録実験時の船内

3-2 統計モデルによる解析

ここでは、富山湾における洋上実験で得られた実船実験データを用いてパラメトリックモデルによる解析を行う。具体的には、実船データに式(1)

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

$X(n)$: k 次元状態変数ベクトル

$A(m)$: $k \times k$ の自己回帰行列

$U(n)$: k 次元ホワイトノイズベクトル

3 実船実験データの解析

3-1 航海中の実船データ収録

本研究では主として2つの観点からデータ解析を行うことを目的にデータ収録を行った²⁾。1つは、向かい波、横波、追い波における手動操舵と自動操舵の違いによる解析である。もう1つは主機回転数に対する船体姿勢角への影響の調査である。

データ収録実験は、2日間にわたって富山県射水市の富山新港で実施した。初日に種々の波向きでデータを収録し、2日目には静穏な海域で主機回転数を制御しながら船体運動データを同時収録した。実験海域の概要を図1にまた、その時の気象・海象を表3、4に示す。

で表現される自己回帰モデルと呼ばれる統計モデルをあてはめ、スペクトル解析、ノイズ寄与率やインパルス応答などの解析を実施した³⁾。

4 解析結果

4-1 波向きの違いについて

まず波向きの違いによる運動特性の比較について解析を行う。代表的なデータとして、横波中の自動操舵中に得られた時系列データを図2に示す。

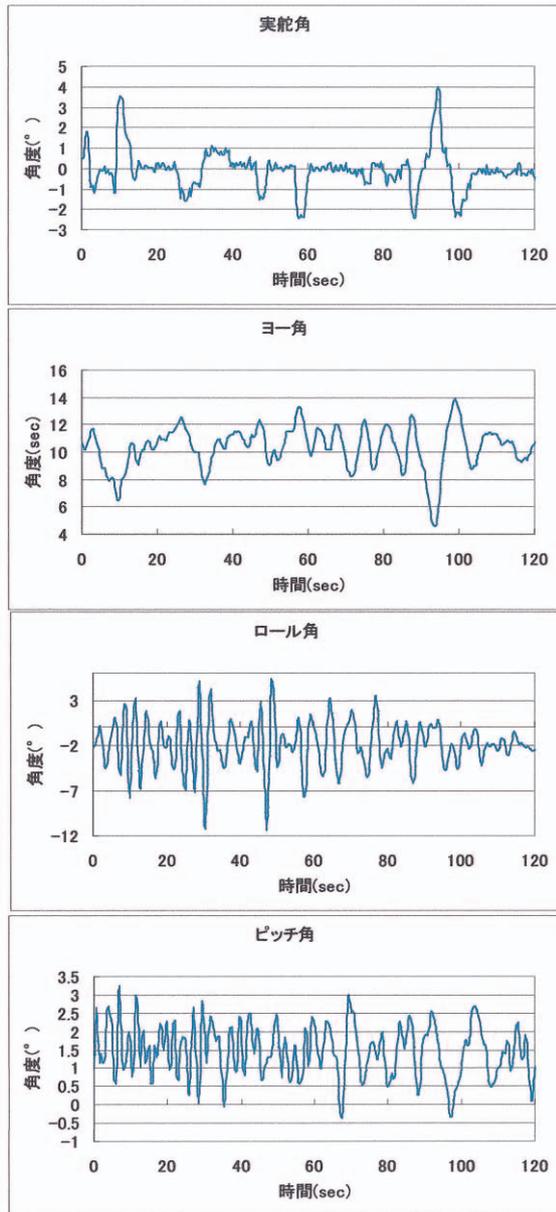


図2 時系列波形の一例（横波：自動操舵）

4-1-1 スペクトル解析

ここでは、航海中に得られた種々のデータから、知見が得られた代表的な解析結果について述べる。図3は、向かい波、横波、追い波におけるロール角のパワースペクトルを示したものである。スペクトル解析から、ロール角のパワースペクトルでは全ての波向きにおいて約0.3Hz付近にピークが観察される。このことから、さざなみのロール固有周期はこの付近にあると考えられる。

図3の向かい波の場合パワースペクトルを見ると、0.2Hz付近にもピークが観察される。スペクトル解析だけでは、このピークの原因が何であるかは不明である。

4-1-2 ノイズ寄与率解析

次に、各波向きにおけるヨー角へのノイズ寄与率解析を行った結果を図4に示す。横波および追い波のときは、ヨー自身の寄与だけでなく、ロールからの寄与が大きい。このことからロールによってヨーが引き起こされていることがわかる。向かい波のときのノイズ寄与率では、他の場合に比べてピッチからの寄与が大きい。この解析に使用した自己帰帰モデルの次数は4次元モデルであった。またこのデータを収録したときは、悪天候で波が船底をたたく状態であった。これらのことから、この4次元モデルでは、ピッチからヨーへの影響が現れているのかもしれない。

4-1-1の図3において、向かい波のときのロール角パワースペクトルで0.2Hz付近にピークが観察されたが、この原因は不明であった。このときのロール角へのノイズ寄与率解析を行った結果を図5に示す。この図の0.2Hz付近のノイズ源に着目すると、実舵角からの寄与が大きい。したがってこの0.2Hz付近のパワーは、ロール自身のものではなく、操舵が原因となって引き起こされたものであることがわかる。

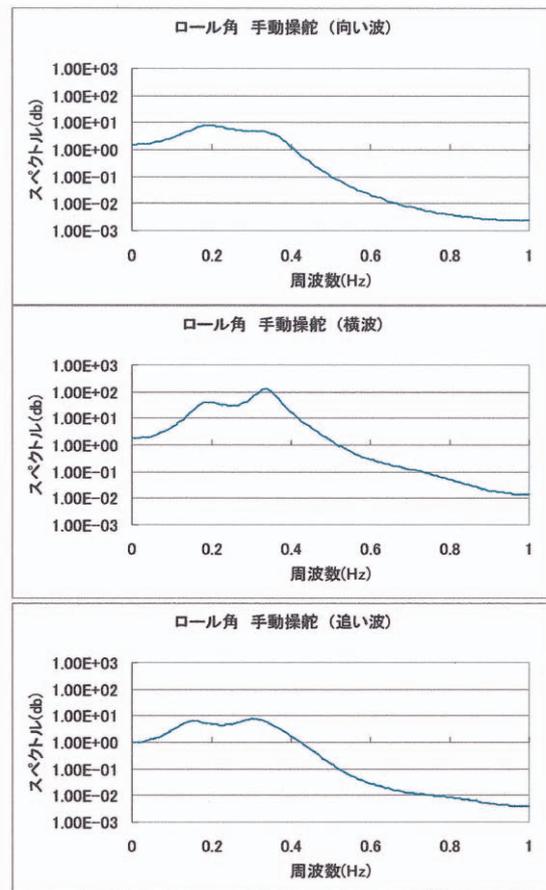


図3 ロールのパワースペクトルの一例

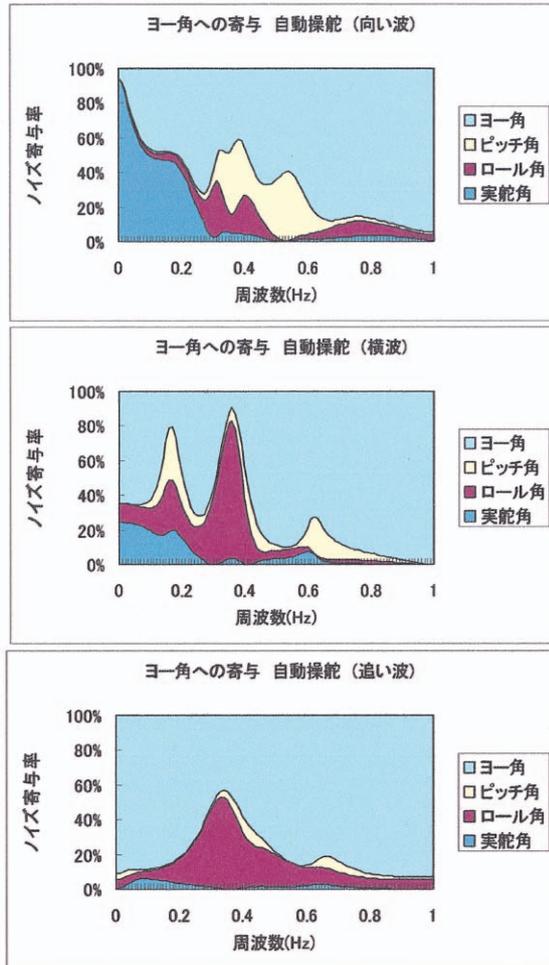


図4 ヨーへのノイズ寄与率

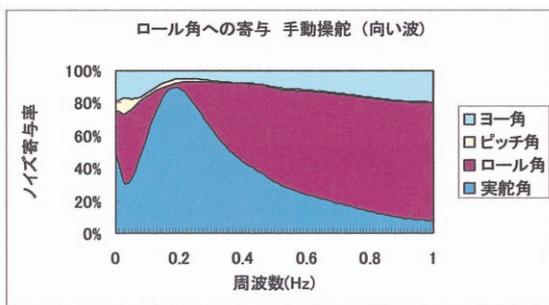


図5 ロールへのノイズ寄与率

4-1-3 インパルス応答解析

次に、保針制御系の特性を時間軸上で把握するため、各波向きにおいてヨーから舵角へのインパルス応答解析を行った。図6に、自動操舵装中のヨーから実舵角へのインパルス応答を示す。向い波のときでは、インパルスのヨーに対して、保針のためにまず反対舷に操舵し、約3秒付近で当て舵を取っており、典型的な保

針パターンであることがわかる。横波のときでは、向い波のときほど典型的ではないが、保針操舵と当て舵を観察することができる。これらに対して、追い波中では、当初は保針操舵が観察されるが、その後も振動的操舵が続く。このことから、よく言われるような追い波中における保針の困難性が推察される。

4-2 エンジンスロットルと船体姿勢角について

最後に、主機回転数と船体運動との関連性の解析を行う。小型船舶では前方の波浪状況に応じて操船者がスロットルレバーを適切に調整することがある。この操作の理由の一つは船体動揺の抑制であるが、洋上での操船経験や勘に基づいて実施されるものであり、小型船舶で定量的に解析された例は少ない。もし、このような解析から、主機回転数を操作することにより動揺を抑制できる可能性が見出されれば、より快適な航海が期待できる。そこで、自動操舵操船中に主機回転数を制御するスロットルレバーをステップ状およびランダムに操作しながら、各種のデータを収録した。

まず基礎実験として、主機回転数をステップ状に変化させる実験を行った。図7はスロットルレバーを操作して主機回転数を2000rpmから200rpmごとに下げた場合のピッチ角および主機回転数の時系列波形である。図より回転数が下がるにつれ、ピッチ角が小さくなり船首が下がっていることがわかる。この実験から主機回転数とピッチ角に相関があることがわかる。

次に、スロットルレバーを操作して主機回転数が1000rpmと1800rpmになるように操作してデータを収録し、主機回転数と船体運動との関係を解析することにした。実験時の主機回転数は先に述べたように1000rpmと1800rpmの2値信号として、可能な限り種々の周期成分が入力されるように、スロットルを調整した。これを2値ランダムスロットル実験と名付けた。2値ランダムスロットル実験で収録したデータの時系列を図8に示す。収録時間は500秒、データのサンプリング時間は0.5秒である。

4-2-1 スペクトル解析

前節の場合と同様に、まずスペクトルによる解析を行う。ランダムスロットル時のパワースペクトルを図9に示す。主機回転数のパワースペクトルでは顕著なピークは観察されずフラットな形である。このことから、意図したとおりスロットル操作がほぼランダムに実施されていることがわかる。尚、ロールのパワースペクトルでは、この実験でも約0.3Hz付近にロール固有周期と考えられるピークが観察された。

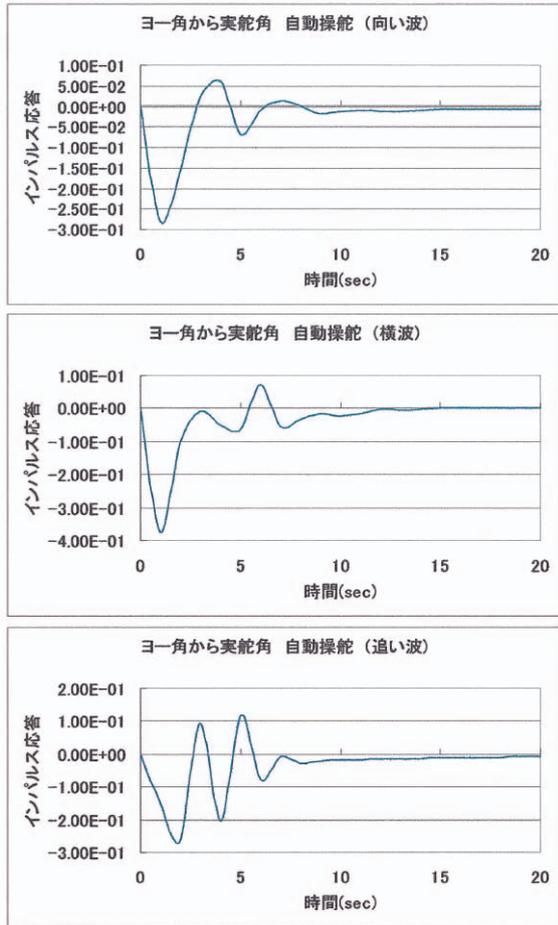


図6 ヨーから舵角へのインパルス応答

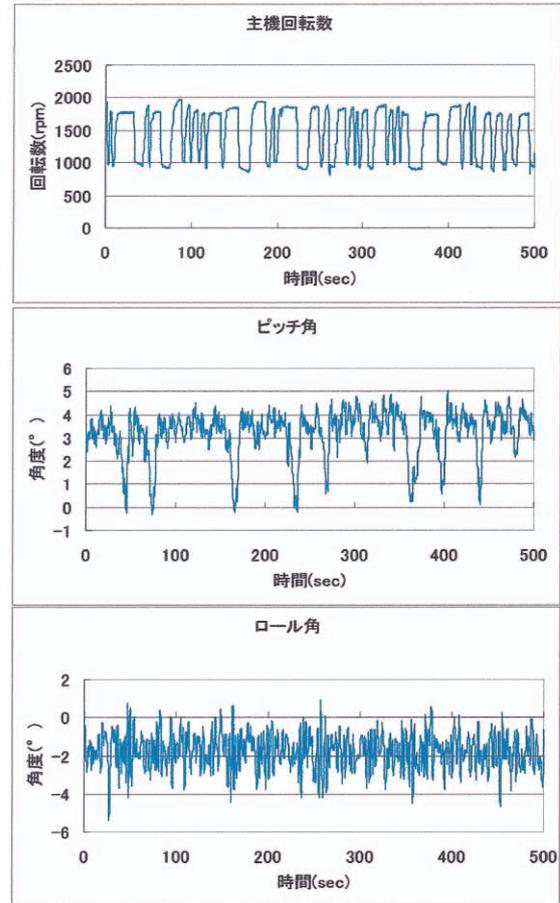


図8 2値ランダムスロットル実験時の時系列

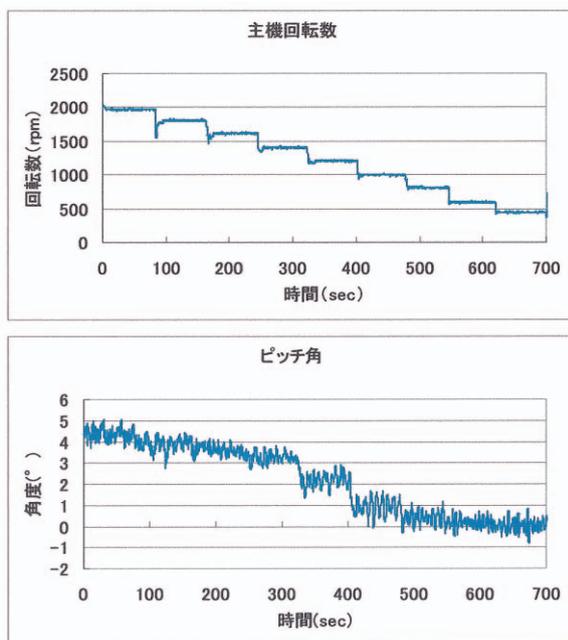


図7 主機回転数とピッチ角との関係

4-2-2 ノイズ寄与率解析

続いて、2値ランダムスロットル実験におけるノイズ寄与率解析を行った結果を図10に示す。主機回転数に対するノイズ寄与率では、全域にわたって主機回転数自身からの寄与がほとんどある。この実験では操船者が意図的にランダムにスロットルレバーを操作していることから、この寄与率は当然の結果と言える。ピッチ角へのノイズ寄与率に着目すれば、低域から約0.5Hz付近にかけて、主機回転数からピッチへの寄与がある。このことは、主機回転数とピッチ運動との関連性の存在を示唆している。ノイズ寄与率解析から、主機回転数を変化させることによってピッチング運動を発生させ得ることが周波数軸上で確認することができた。

4-2-3 インパルス応答解析

解析の最後として、主機回転数からピッチ角への応答の様子を時間軸上で確認するため、インパルス応答解析を行った。求めたインパルス応答を図11に示す。

この図から、インパルス的な主機回転数上昇に対して船首上がりのピッチング応答が観察される。インパルス応答解析から、時間軸上でも、主機回転数の変化とピッチング運動との関連性を見出すことができた。

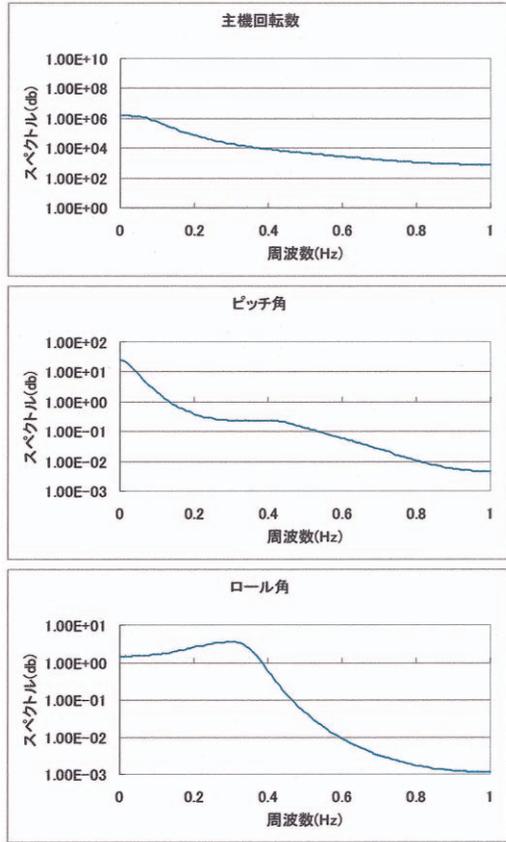


図9 ランダムスロットル時のパワースペクトル

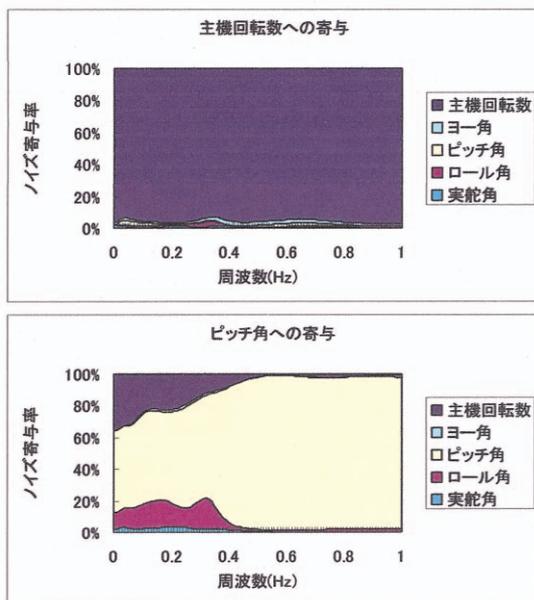


図10 ランダムスロットル時のノイズ寄与率

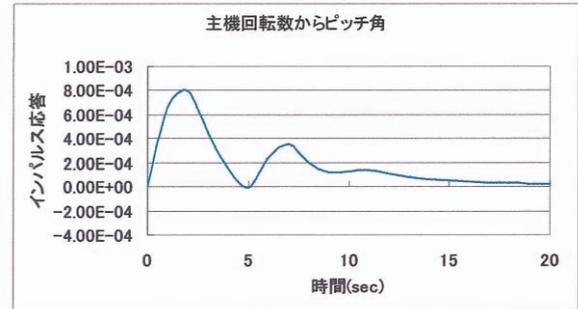


図11 主機回転数からピッチ角へのインパルス応答

5 結論

本研究で得られた成果は

- ① 小型船舶において各種の航海データを収録するシステムを構築し、種々の気象・海象状態でデータを収録する実験を行った。
- ② 洋上で得られた実船データに統計モデルをあてはめ、船体運動解析を実施した。その結果、供試船のロール固有周期を見出した。
- ③ 操舵法の違いや、波向きの違いによる比較から、ヨー・ロール連成運動や、保針制御系の特性を明らかにした。
- ④ エンジンスロットルレバーをステップ状に変化させながら船体運動データも同時収録した。その結果、主機回転数とピッチ角との間に、定常的な関係があることがわかった。
- ⑤ 2値ランダムスロットル実験を行い、主機回転数と船体運動との関連性について統計的解析を行った。ノイズ寄与率解析の結果、低域から0.5Hz付近にかけて主機回転数からピッチへの寄与があることがわかり、また、インパルス応答解析からは、主機回転数に対するピッチング運動の応答を明らかにした。等である。

今後の課題として

- ① 種々の気象・海象において、さらにデータ収録を行って、系統的な解析を行うこと。
- ② 主機回転数を操作してピッチング運動を抑制する新しい制御系の提案等があげられる。

最後に、実船実験で御強力頂きました技術第一班・田近茂樹班長、河原俊雄（前）班長、技術補佐員・井口眞司さん、東山茂勝さん、技術職員・浦恵里夏さん、図表作成でご協力を頂きました専攻科・中島悠樹さんに心から感謝致します。

参考文献

- 1) 中谷俊彦：小型船舶のデータ処理装置について，富山商船高等専門学校研究収録，第38号，2005
- 2) 中島悠樹：小型船舶の船体運動解析，平成20年度富山商船高等
- 3) 赤池弘次，中川東一郎：ダイナミックシステムと統計的解析と制御（新訂版），サイエンス社，2000