



|              |                                                                                                                                                 |
|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Title        | 非線形力学系理論・最適制御理論に基づく追波・斜め追波中船舶操縦不能現象の研究                                                                                                          |
| Author(s)    | 牧, 敦生                                                                                                                                           |
| Citation     | 大阪大学, 2009, 博士論文                                                                                                                                |
| Version Type |                                                                                                                                                 |
| URL          | <a href="https://hdl.handle.net/11094/49594">https://hdl.handle.net/11094/49594</a>                                                             |
| rights       |                                                                                                                                                 |
| Note         | 著者からインターネット公開の許諾が得られていないため、論文の要旨のみを公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、<a href="https://www.library.osaka-u.ac.jp/thesis/#closed">大阪大学の博士論文について</a>をご参照ください。 |

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

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

The University of Osaka

| 【95】          |                                                                                                              |         |        |  |
|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|--------|--|
| 氏 名           | まき<br>牧                                                                                                      | あつ<br>敦 | お<br>生 |  |
| 博士の専攻分野の名称    | 博 士（工 学）                                                                                                     |         |        |  |
| 学 位 記 番 号     | 第 2 2 9 8 6 号                                                                                                |         |        |  |
| 学 位 授 与 年 月 日 | 平 成 21 年 3 月 24 日                                                                                            |         |        |  |
| 学 位 授 与 の 要 件 | 学位規則第4条第1項該当<br>工学研究科地球総合工学専攻                                                                                |         |        |  |
| 学 位 論 文 名     | 非線形力学系理論・最適制御理論に基づく追波・斜め追波中船舶操縦不能現象の研究                                                                       |         |        |  |
| 論 文 審 査 委 員   | (主査)<br>准教授 梅田 直哉<br><br>(副査)<br>教 授 長谷川和彦 教 授 戸田 保幸<br>横浜国立大学大学院環境情報研究院教授 上野 誠也<br>徳島大学高度情報化基盤センター准教授 上田 哲史 |         |        |  |

論 文 内 容 の 要 旨

本論文は、転覆などの重大な海難事故の原因となる追波・斜め追波中操縦不能現象について、非線形力学系理論と非線形最適制御理論の観点から考察し、このような現象が生じる要因の解明と閾値の計算手法に重点を置いて検討を行った。

第1章では、本論文の背景と目標を述べた。本論文の主題とした波浪中操縦不能現象のなかでもブローチング

は大傾斜や転覆の要因となるため古くより船乗りにも恐れられてきた。本論文ではブローチングを波乗り現象と波乗り後の操縦運動の二つに分けて考察し、各々に対して非線形力学系理論と非線形最適制御理論を応用することで、現象の解明ならびに危険が生じる条件を効率的に探索する手法を新たに導くことを目標とした。

第2章ではまず、ブローチング発生の必要条件の一つである波乗り現象を数値的に効率よく求める手法を提案し、数値的な検証を行った。そしてパラメータ空間内において波乗り限界を連続的に探索して、大域的傾向を把握することに成功した。また現在審議中の国際船舶復原性基準策定では、簡易にブローチングの危険性を把握する手法が必要になると予想され、この目的には解析解が最も適当であるとの考えに基づき、これまでに提案されている解析的近似推定式の検討を行った。しかしながらその導出の過程に、実際の現象には一致し難い近似があることを確認し、前後揺れ方程式を区分線形近似することにより新たな解析的近似推定式を導いた。さらに前後揺れ方程式を多項式近似することによっても別の近似解析解を求めた。加えてこれら二手法を導出する際の数学的過程についても詳細に検討を加えた。そして提案した二つの解析的近似推定式を検証するために自由航走模型実験を行った。その結果、提案した二手法は実験結果と定性的傾向が一致し、そのなかでも区分線形近似により導いた推定式は定量的にもすぐれた結果を与えることを確認した。また船体の船首揺れに生じる分数調波現象を実験的に確認し、非線形力学の観点から数値的な検証を行った。その結果、このような分数調波現象はI型分岐により生じることを数値的に確認した。また状態空間内における軌道の不安定性に関しても論じ、この分岐が連続的に生じる結果カオスに至ることをリアプノフ指数の計算から明らかにした。

第3章では、ブローチングを操縦運動、とりわけ舵の制御則の観点から論じた。ブローチングは「最大限の保針努力にもかかわらずその進路を維持できない現象」と定義される。この中の「最大限の保針努力」は比例・微分・積分制御に基づくオートパイロットでは実現不可能であると考えられる。そのため最適制御理論により限界的な保針操船法を見出し、ブローチングについて考察することを目的とした。初めに変分法に数学的基礎を置く数値最適化手法により最適な舵角入力求め、本論で用いた状態方程式の下では制約集合の頂点のみをとるBang-Bang入力となることを数値的に、またポントリャーギンの最小値原理より理論的に確認した。しかしこの計算法は頑健とは必ずしもいえず、そのため数理計画法を用いた計算法を適用し、変分法により得られた結果との比較を行った。その結果、両計算法に差が無いことを数値的に示し、計算精度に高い信頼性があることを確認した。そして数理計画法による数値最適化手法を用いてブローチングが生じうる条件に対して計算を行い、船体が安定平衡点の近傍に捕捉されている間に、状態変数がつくる相空間においてYaw方向に運動が発達するならば、それまでの運動の過程が最適制御か否かに依存せずブローチング現象に移行することを数値的に示した。

第4章では、以上を総括して結論とした。

## 論文審査の結果の要旨

本論文は、転覆などの重大な海難事故の原因となる追波・斜め追波中操縦不能現象について、非線形力学理論と非線形最適制御理論の観点から考察し、このような現象が生じる要因の解明と閾値の計算法に重点を置いて検討を行っている。

第1章では、本論文の背景と目標を述べている。本論文の主題とした波浪中操縦不能現象のなかでもブローチングは大傾斜や転覆の要因となるため古くより船乗りにも恐れられてきている。本論文ではブローチングを波乗り現象と波乗り後の操縦運動の二つに分けて考察し、各々に対して非線形力学理論と非線形最適制御理論を応用することで、現象の解明ならびに危険が生じる条件を効率的に探索する手法を新たに導くことを目標としている。

第2章ではまず、ブローチング発生の必要条件の一つである波乗り現象を数値的に効率よく求める手法を提案し、数値的な検証を行っている。そしてパラメータ空間内において波乗り限界を連続的に探索して、大域的傾向を把握することに成功している。また現在審議中の国際船舶復原性基準策定では、簡易にブローチングの危険性を把握する手法が必要になると予想され、この目的には解析解が最も適当であるとの考えに基づき、これまでに提案されている解析的近似推定式の検討を行っている。しかしながらその導出の過程に、実際の現象には一致し難い近似があることを確認し、前後揺れ方程式を区分線形近似することにより新たな解析的近似推定式を導いている。さらに前後揺れ方程

式を多項式近似することによっても別の近似解析解を求めている。加えてこれら二手法を導出する際の数学的過程についても詳細に検討を加えている。そして提案した二つの解析的近似推定式を検証するために自由航走模型実験を行っている。その結果、提案した二手法は実験結果と定性的傾向が一致し、そのなかでも区分線形近似により導いた推定式は定量的にもすぐれた結果を与えることを確認している。また船体の船首揺れに生じる分数調波励起現象を実験的に確認し、非線形力学の観点から数値的な検証を行っている。その結果、このような分数調波励起現象はI型分岐により生じることを数値的に確認している。また状態空間内における軌道の不安定性に関しても論じ、この分岐が連続的に生じる結果カオスに至ることをリアプノフ指数の計算から明らかにしている。

第3章では、ブローチングを操縦運動、とりわけ舵の制御則の観点から論じている。ブローチングは「最大限の保針努力にもかかわらずその進路を維持できない現象」と定義される。この中の「最大限の保針努力」は比例・微分・積分制御に基づくオートパイロットでは実現不可能であると考えられる。そのため最適制御理論により限界的な保針操船法を見出し、ブローチングについて考察することを目的としている。初めに変分法に数学的基礎を置く数値最適化手法により最適な舵角入力求め、本論で用いた状態方程式の下では制約集合の頂点のみをとるBang-Bang入力となることを数値的に、またポントリャーギンの最小値原理より理論的に確認している。しかしこの計算法はロバストとは必ずしもいえず、そのため数理計画法を用いた計算法を適用し、変分法により得られた結果との比較を行っている。その結果、両計算法に差が無いことを数値的に示し、計算精度に高い信頼性があることを確認している。そして数理計画法による数値最適化手法を用いてブローチングが生じうる条件に対して計算を行い、船体が安定平衡点の近傍に捕捉されている間に、状態変数がつくる相空間においてYaw方向に運動が発達するならば、それまでの運動の過程が最適制御か否かに依存せずブローチング現象に移行することを数値的に示している。

第4章では、以上を総括して結論としている。

以上のように、本論文は、重大海難防止のため国際的に注目されている追波・斜め追波中操縦不能現象について新たな理論的観点から、その発生条件の解析的な推定法の提案とその発生への操船努力の限界を解明するものであり、未解決的な課題に最終的な結論を与えるという学術上の貢献に止まらず、我が国から国連機関へ提案する船舶安全性基準の骨格のひとつとなっているなどその実用的な価値も卓越している。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。