

Experimental validation of energy efficiency improvement by optimal control propeller pitch at sea

大阪大学大学院工学研究科
地球総合工学専攻 船舶海洋工学コース
国際船舶安全性環境研究イニシアティブ
梅田研究室

松 長 泰 典

緒言

地球温暖化は全人類にとっての脅威である。地球温暖化を防ぐために、国ごとの温室効果ガス (GHG) 排出規制のほかに、航空や海運など国際交通機関からの GHG についても排出規制を行う必要がある。このため、国連専門機関である国際海事機関 (IMO) では 2011 年の海洋環境保護委員会 (MEPC) において、2015 年以降に作られる新造船について 10-30% の二酸化炭素排出規制を要求することを採択し、この規制は 2013 年 1 月に発効した。このためには燃費の改善が求められるが、船舶の省エネルギー化は過去のエネルギー危機の度に船体、スクリュー・プロペラおよび機関のそれぞれの分野で限界まで行われてきたといわれている。従って、さらなる燃費改善には、これまでに注目されてこなかった、船体、プロペラと機関の 3 要素を同時に扱う方法論による必要があると考えられる。本研究では、船体、可変ピッチプロペラ、ディーゼル機関を相互に干渉し時間に依存する微分方程式でモデル化し、そこでの燃費を最小とするように最適制御理論を適用することを試みた。さらにそのモデルにおける数値計算結果を基に長さ 121m の船体に直径 3.6m の可変ピッチプロペラと 3880KW の低速ディーゼル機関を装備したセメント運搬船を用いて実証実験も行った。大分県津久見港を出港後、神奈川県横浜港までの太平洋上において、翼角制御の効果を計測した。ここでは、プロペラトルクと回転数を連続計測し、そこからプロペラ流入速度を算出し、その将来予測を時系列解析により行った。その予測値にもとづき、理論計算通りに、プロペラの翼角を時々刻々変化させた。

システム方程式

本研究で用いた最適制御システムには船舶の前後運動方程式、軸回転の運動方程式、プロペラ翼角についての運動方程式を考慮した。また、回転数と燃料投入

量制御のためにガバナー制御システムを導入した¹⁾。

最適制御理論

規則向波の条件下、目的関数、制約関数を定めて燃料消費が最小となる最適制御解を探索する。本研究では最適化手法として、数値計画法に基づく計算法を用いることとした。このような状態変数についての拘束を含む問題に対して、変分法に基づく最適化手法を適用することは一般に難しいことが知られている²⁾。それに反して本研究で採用した数値計画法に基づく手法は、状態量拘束を容易に考慮できる点に大きな特徴がある。また問題を非線形計画問題の一般的定式化に変換さえすれば容易に最適解を導くことができ、頑健性が極めて高いといえる^{4) 13)}。また本研究では具体的な最適化手法として、SQP 法 (Sequential Quadratic Programming method)³⁾ を用いて数値計算を行った。この SQP 法とは Lagrange 乗数形式に大域的収束性を持つ修正 Newton 法を適用したものである。本モデルにおける最適制御問題に用いる目的関数は総燃料投入量として定義した。また等式拘束条件、不等式拘束条件を本研究で用いた供試船に適合するように定義した。

数値計算結果

以上の定式化を用いて様々な波条件下にて数値計算を行った。以下に示す一例はプロペラピッチ一定解 (図には Constant と記載) と前記の最適制御を用いた最適解 (図には Optimised と記載) との比較を、燃料投入量比、回転数、プロペラピッチ比、プロペラトルクについてそれぞれ行ったものである。なお、波条件は規則向波、波長 120m、波高 1.2m である。

この条件下では約 1.0% の燃費改善が見込まれた。また、プロペラ効率という点ではピッチ比一定解 (Constant) と最適解 (Optimised) との差が波一周

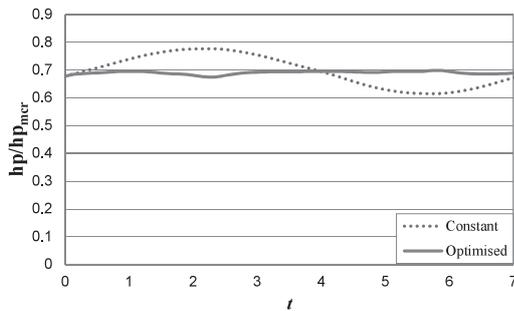


図1 燃料投入量比

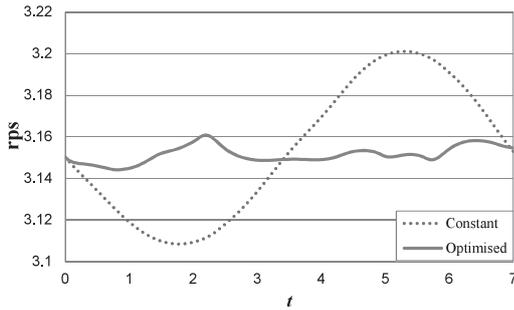


図2 回転数

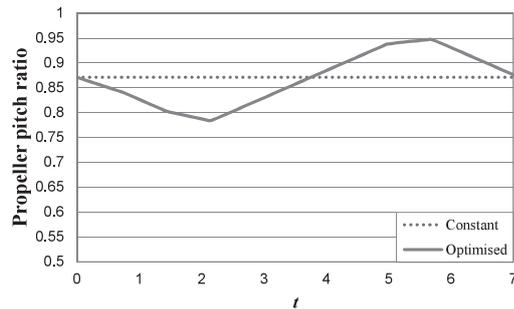


図3 プロペラピッチ比

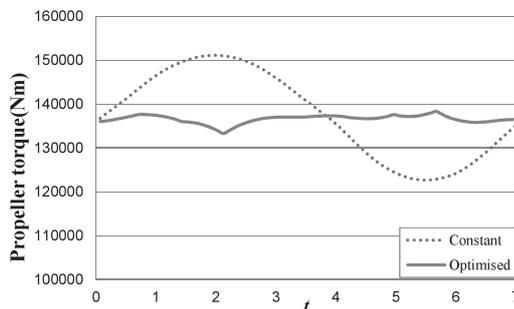


図4 プロペラトルク

期間通してほぼ見られず、一方でトルク変動のグラフを見るとピッチ比一定解 (Constant) は波に応じて変動しているのに対して最適解 (Optimised) は波一周期間通して変動が抑えられている。この回収されたエネルギーが燃費改善に直接関係していると考えられる。

実船実験

本研究で用いた最適制御システムをあるセメント運搬船に実際に搭載して、津久見 (大分県) - 横浜 (神奈川県) 間にて実験を行った。実験は、回頭角変更時と避航時、そして危険度が高まる夜間を除いた区間で、翼角制御と制御なしを約十分毎に切り替えながら行った。表1に実船実験を行った日時を記載する。

表1 実験日時

4th Nov.	13:00~15:29	
5th Nov.	8:58~11:02	13:58~14:59
23rd Dec.	9:38~10:56	14:57~16:46
24th Dec.	10:00~11:50	14:52~16:55

最適翼角解の解析

実船実験を行うにあたり、プロペラ流入速度計算にはトルク一致法を用いた⁴⁾。一方、最適翼角解は規則波中の航行を前提としており、実海域航行時の制御実験を行うためには不規則波に対応した制御システムを設計する必要がある。従って最適翼角解をプロペラ流入速度の関数として表現し、最小二乗法によって係数を同定した。一方、実船実験ではトルク一致法によってプロペラ流入速度が計測できる環境が整備されている。そこで、時々刻々計測されるプロペラ流入速度に対してヒルベルト変換とARモデルに基づいた時系列解析手法を施して波形特性の瞬時値を算出するアルゴリズムを開発し、前述の最適翼角解を内挿するアルゴリズムに組み込むことでオンライン制御システムを構築して供試船への実装を行った⁴⁾。

実船実験結果

上記に示した方法で線形化された最適翼角解を制御システムに組み込み、実際の運航中に翼角最適制御を行った。以下に実験結果を示しており、図中の点はそれぞれ約十分の制御間での総燃料消費量の平均値を表している。

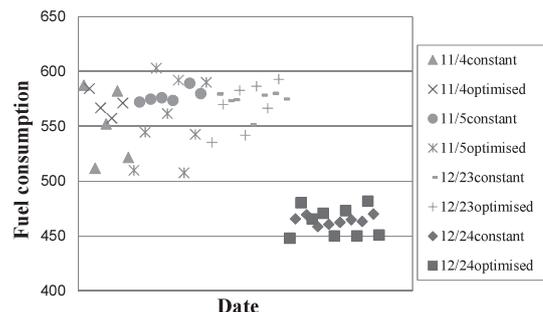


図5 計測日時毎の平均燃料投入量

Case1 11/5 右斜め追波（有義波高 1.96m、平均波周期 8.3 秒）

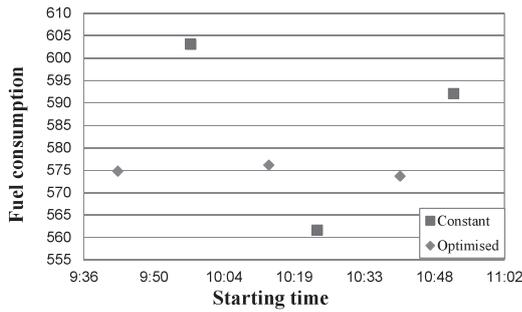


図 6 燃料投入量

Case2 12/23 左斜め向波（有義波高 2.02m、平均波周期 8.1 秒）

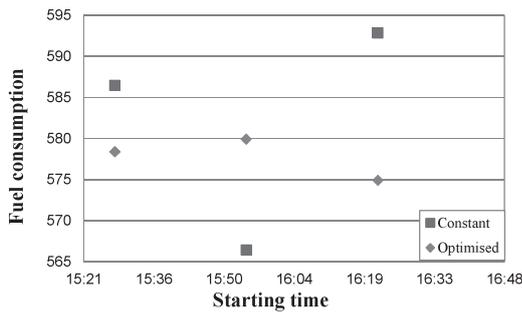


図 7 燃料投入量

Case3 12/24 右斜め追波（有義波高 2.02m、平均波周期 8.6 秒）

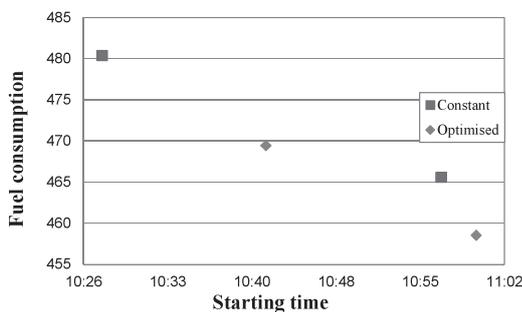


図 8 燃料投入量

Case4 12/24 左斜め追波（有義波高 1.98m、平均波周期 8.4 秒）

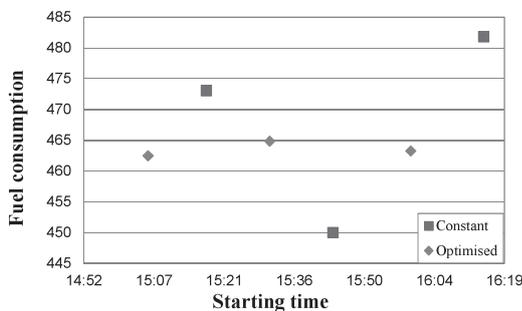


図 9 燃料投入量

図 5 に表す結果は実験で得られた総データを記載しているが、時々刻々波条件は変化している。そのため燃料消費量について比較するには等しい波条件で行う必要がある。すなわち、波条件・平均船速・平均翼

角が等しい計測データでの比較が必要である。従って、以下に計測した波条件下における翼角一定解と最適解の比較の一例を図 6-9 に示す。なお、各図に示す各々の値は制御間での平均値を表しており、波主方向は 0° が向波、90° が右横波、180° が追波、270° が左横波を表す。

ここで各々の Case における翼角一定制御による燃料消費量の総計と翼角最適制御による燃料消費量の総計を比較すると以下の表 2 のように 0.71-1.90% の改善が見られた。

表 2 計測日時毎の燃費改善率

Date	Case	Improvement rate of fuel efficiency
4th Nov.	Case1	1.83%
5th Nov.	Case2	0.71%
23rd Dec.	Case3	1.90%
24th Dec.	Case4	1.02%

実験結果と数値計算との比較と結言

一方で実験では波浪計測用 X バンドレーダーを用いて Case 毎に有義波高と波周期も計測した。ここで、波周期は周波数スペクトルのピーク波成分の周波数から求めており、計測時に最も主要な波成分の周期である。計測された有義波高と波周期により個別波の発生確率を求め、その確率に応じた燃費改善率を Case 毎に計算した。その結果を以下に示すとともに上記で得られた実験結果と数値計算結果を比較した。

表 3 数値計算による燃費改善率

Date	Case	following waves	head waves
4th Nov.	Case1	1.73%	0.41%
5th Nov.	Case2	1.73%	0.40%
23rd Dec.	Case3	1.87%	0.41%
24th Dec.	Case4	1.73%	0.40%

表 4 実験結果と数値計算結果の比較

Date	Case	experimental results	simulation results
4th Nov.	Case1	1.83%	1.73%
5th Nov.	Case2	0.71%	0.40%
23rd Dec.	Case3	1.90%	1.87%
24th Dec.	Case4	1.02%	1.76%

実験航海は穏やかな波浪条件となり、燃料投入量から直接求めた燃費最改善率は、0.71-1.9% に留まった。しかしながら、そのときの波浪レーダーによる計測値に対応する理論計算は、実験航海での燃費改善率と概略一致した。これより、本研究で導いた最適制御の理論計算法は実機で検証されたことになり、この方法による通年の太平洋航行時の運航に対する理論計算によれば 4% 程度の燃費改善も期待できることとなる。

謝辞

本研究は鉄道運輸機構による「ECO 運航支援システムの開発」プロジェクトの一環として実施したものであり、海上技術安全研究所様、かもめプロペラ様、東海運様に謝意を表します。また、本研究を進めるにあたりご指導をいただいた梅田直哉准教授に心より御礼申し上げます。

<参考文献>

- 1) Oleksiy Bondarenko : Dynamics of Diesel Engine in the Framework of Ship Propulsion Plant, 日本船舶海洋工学会講演会論文集, 第 8 号, pp.335-338, 2009
- 2) 加藤寛一郎 : 工学的最適制御, 東京大学出版会, 1988
- 3) 茨城俊秀, 福島雅夫 : FORTRAN77 最適化プログラミング, 岩波書店, 1991
- 4) 北川泰士, 谷澤克治他 : プロペラ推力・トルクに及ぼす動的変動の影響, 日本船舶海洋工学会講演論文集, 13 号, 2011
- 5) 丸尾孟, 石井昭良 : 簡易化公式による向波中抵抗増加の計算, 日本造船学会論文集, 第 140 号, 1976
- 6) 藤井斉他 : 肥大船の波浪中抵抗増加に関する実験的研究, 日本造船学会論文集, 第 137 号, 1975

- 7) 牧敦生 : 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の研究, pp.86-118, 2008
- 8) 梅田直哉 : 中層トロールの最適レギュレータ制御系, 水産工学研究所研究報告, 第 12 号, 1991
- 9) 杉原雄太 : 波浪中船舶電気推進への最適制御理論の応用, 大阪大学卒業論文, 2010
- 10) 松長泰典 : 可変ピッチ・電気推進の最適制御による波浪中燃費改善, 大阪大学卒業論文, 2011
- 11) 畔上秀幸 : 領域最適化問題の一解法, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol.60, pp.1479-1486, 1994
- 12) 辻本勝 : A Practical Correction Method for Added Resistance in Waves, 日本船舶海洋工学会論文集, 8 号, 2008
- 13) 鈴木真二 : 最適制御問題の数値解法, 計測と制御, 36, 11, pp.784-786, 1997



日本郵船株式会社
技術グループ技術基準チームにおいて、就航船からのフィードバック業務、ベンダーマネジメント業務、QMS 管理業務に従事。

(船舶海洋 平成 23 年卒 25 年前期)