

# 海事産業における IoT 技術導入の意思決定支援に関する研究

47-156698 上野 隆治

指導教員 稗方 和夫 准教授

Maritime industry, today, is trying to utilize IoT technology, which is the cutting-edge technology of many industries, for enhancing their competitiveness to overcome today's severe economic situation. In this study, a decision support methodology for introducing IoT technology to maritime industry is proposed. To select reasonable criteria to evaluate many kinds of IoT technology, the technic of systems approach is applied for system analysis of maritime industry. As an evaluation method, ship operation simulation is conducted, which can evaluate the function of IoT technology toward QCD requirement of cargo owner for the shipping service. As a case study, a decision making of introducing 25 IoT technologies to maritime industry was conducted and the utility of the proposed methodology was assessed.

Key words: IoT Technology, Systems Approach, Maritime Industry, Decision Making

## 1 序論

近年の海事産業は世界経済の落ち込みに伴う不況の波に曝されており、効率化・コスト削減・競争力強化に励んでいる。一方で海事産業内では IoT (Internet of Things) という新たな技術革新の機会が訪れており、従来はリアルタイムに得ることが難しかった運航中船舶の船用機器などの大量のデータを、陸上へ送信・分析し、船舶へフィードバックすることができるようになった<sup>1)</sup>。現在、海事産業全体で IoT 技術利活用環境整備が進められており、IoT 技術の効果的な利活用方法が模索・検討されている。

本研究では、海事産業界において効率化・競争力強化に有効な IoT 技術の導入意思決定を支援することを目的とする。海事産業をシステムの観点から分析し、各 IoT 技術を比較評価できる枠組みを提案することで、海事産業界にとって有効な IoT 技術導入の意思決定支援を行う。

## 2 海事産業のシステム分析

### 2.1 はじめに

IoT 技術の導入効果を比較評価するために、一元的な評価軸を合理的に選定する必要がある。そこで評価手法を決定する事前準備として、Systems Approach の手法<sup>2) 3)</sup>を用いた海事産業のシステム分析を行い、本研究で対象とする海事産業の機能と要求について整理する。

### 2.2 海事産業の要求分析

海事産業や周辺の利害関係者とその関係性を SVN (Stakeholder Value Network)<sup>4)</sup>を用いて表したものを図 1 に示す。海事産業には様々な利害関係が存在するが、不況下における海事産業の競争力強化という背景から、本研究では、このうち太線で示した船会社と荷主間の「Shipping⇔Money」の関係性に着目し、IoT 技術導入の最終的な価値は“海事産業を中心とした荷主への運航サービス”の向上に関係するものとした。

また、海事産業における運航サービスが応えるべき要求を、以下に示す荷主の QCD 向上であると定義した。

- ・安全で確実な輸送 (Quality)
- ・安価な輸送 (Cost)
- ・確実納期な輸送 (Delivery)

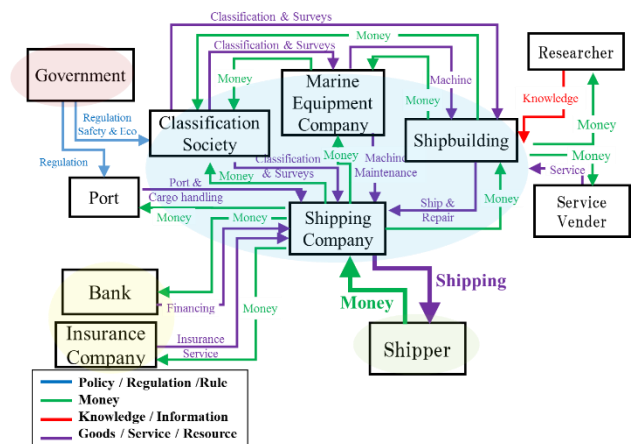


Fig. 1 Stakeholder analysis of maritime industry

### 2.3 海事産業の機能分析

荷主の“安全・確実な輸送”，“安価な輸送”，“確実納期な輸送”の要求に対して海事産業が追及する機能を、システムモデリング手法 OPM<sup>5)</sup>を用いて記述したものを図 2 に示す。OPM は海事産業に関する参考文献<sup>6)</sup>と海事産業の有識者へのインタビューをもとに筆者が作成・編集した。荷主の QCD 向上という要求に対して、海事産業が取り組むべき機能をプロセス（図中丸印）で表現している。Systems Approach の考えでは、海事産業に導入される IoT 技術はこれらの機能を実現するためのシステムの形態であり、本研究で評価対象とする IoT 技術は図中の機能実現を行うものであると定義する。

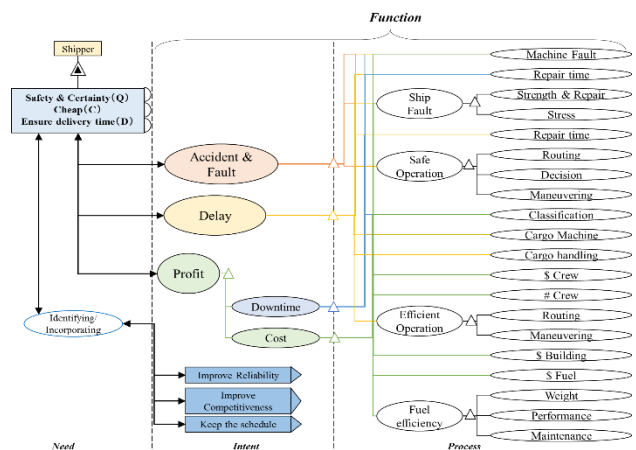


Fig. 2 System modeling of maritime industry by OPM

### 3 IoT 技術の評価手法

#### 3.1 はじめに

海事産業界の分析に基づいて IoT 技術の一元的な評価軸を以下の3つと定義する。

- ・Quality：運航サービスにおける事故・故障の発生件数
- ・Cost：運航サービスにおける船会社の運航利益
- ・Delivery：運航サービスにおける遅延時間

また、IoT 技術が実現し得る機能と評価軸に与える関係を海事産業の分析をもとに整理し、図3に示した。IoT 技術導入の評価には、図中において四角で囲まれた項目の影響を考慮した評価機能が必要となる。本研究では、これらの機能変更を考慮可能な運航シミュレータを作成することにより、IoT 技術の比較評価を行う。

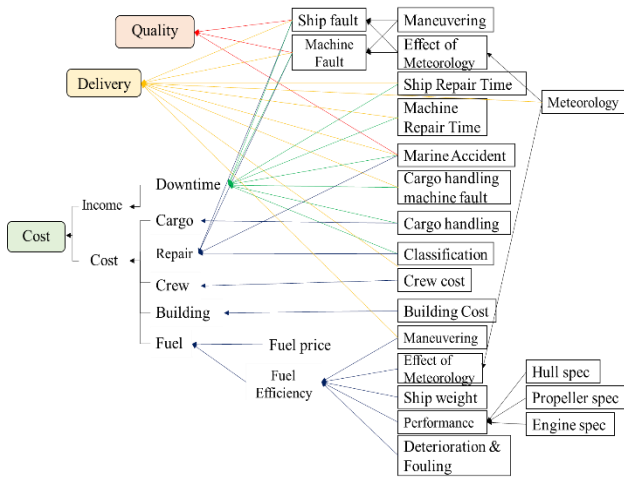


Fig. 3 The requirements for evaluating maritime IoT

#### 3.2 評価手法概要

評価手法の概要を図4に示す。

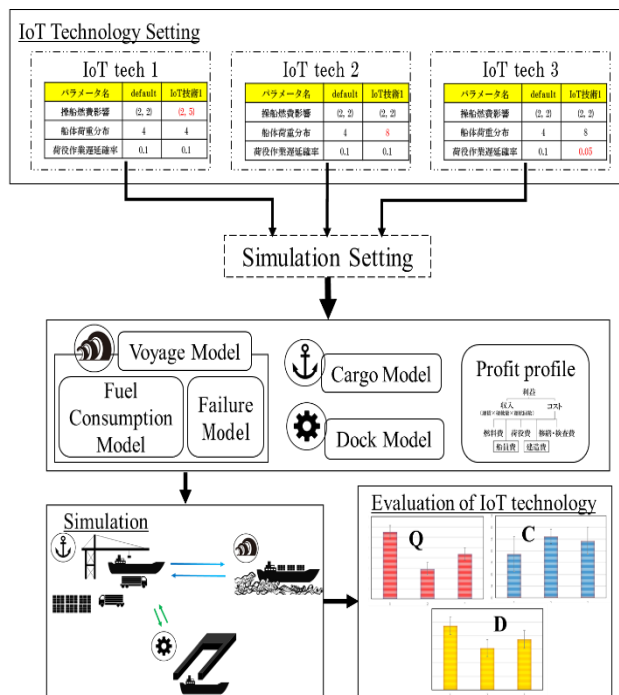


Fig. 4 Overview of simulation for IoT evaluation

船舶運航シミュレーションを行うにあたって、運航中の船舶がとり得る状態を運航・荷役・入渠の3状態であるとしたうえで、3.1で整理されたシミュレータの必要機能を運航モデル、荷役モデル、入渠モデルの3つおよび利益に直接関係する利益モデルに分類して作成する。

評価軸のうち、運航利益は海運業の利益構造において影響が大きい運航利益・燃料費・荷役費（貨物費・港費）・船員費・修繕費を考慮する。また外部影響として気象影響のみを考慮し、市場変動の影響は考慮しない。また、事故・故障数は運航中の事故・故障数と考えられ、遅延時間は運航（事故・故障）および荷役（荷役作業遅れ・荷役装置遅れ）によって発生するものとした。

よって、運航モデルとして燃費と事故・故障及び気象、荷役モデルとして荷役作業と荷役故障、入渠モデルとして船級検査を定義し、図4のように必要な評価機能を分類しモデル化した。

#### 3.3 モデルの作成

燃費モデルは、先行研究<sup>7)</sup>のモデル化手法を参考に一般的な船舶性能の算出法<sup>8)</sup>に経年・汚損影響を考慮するとともに、ベータ分布を用いて操船・気象による燃費悪化の影響を組み込みモデル化した。

荷役モデルは荷役作業遅延時間確率と荷役故障確率を与えて定義した。

船級検査モデルは入渠間隔、疲労度合、劣化・汚損度、から入渠を判断するモデルをそれぞれ作成した。

#### 3.4 シミュレーションの手順

シミュレーションは各設定値の入力を行った後に、運航期間が終了するまで航海ごとに以下の手順を繰り返す。

1. 荷役作業影響の算出：荷役モデルに基づいて、荷役装置故障と荷役作業遅延の有無を取得し、それに伴う遅延時間、ダウンタイム、費用を算出する。
2. 気象の取得：気象モデルより遭遇する気象を取得する。
3. 事故・故障影響の算出：気象と事故・故障モデルに基づいて、船体故障と舶用機器故障、海難事故の有無を取得し、遅延時間、ダウンタイム、費用の算出を行う。
4. 燃費の算出：気象と運航モデルに基づいて、航海中の燃料消費量を算出する。
5. 収支の計上：利益モデルに基づいて収入とコストから利益を算出する。また遅延時間、事故・故障数、合計時間の集計を行う。
6. 経年・疲労影響の更新：燃費モデルの経年・汚損影響モデルに基づいて、船舶推進性能を更新する。また、船体・舶用機器故障モデルに基づいて、船体・舶用機器の疲労度合を更新する。
7. 入渠判断：入渠モデルに基づいて入渠有無の判断を行う。入渠有りの場合のみ入渠費用と入渠時間を計上し、同時に船舶の生物汚損率と疲労度合を0にリセットする。

IoT 技術導入効果の評価は、対応する入力パラメータの値を変更することで IoT 技術を定義し、モンテカルロシミュレーションによって、3つの評価軸に対する各 IoT 技術の導入効果を計算する。

### 4 ケーススタディ

#### 4.1 はじめに

ケーススタディとして、海事産業で考案されているもの

を含む 25 個の IoT 技術導入の意思決定を行う。具体的には、海事産業の分析結果に基づいて IoT 技術の機能を分類し、作成した評価シミュレータ上で該当する入力パラメータの変更値を設定し、荷主の QCD 向上への影響を比較評価することで海事産業界の競争力強化に有効な IoT 技術について検討する。

#### 4.2 基本設定

ケーススタディにおいて評価する IoT 技術と機能及び変更パラメータの一覧を表 1 に示す。

Table. 1 List of IoT and the function for the case study

Technology ID	IoT technology	Parameter
1	Ship Equipment monitoring(Main engine)	Main engine error rate[case/h]
2	Ship equipment monitoring(Navigation equipment)	Navigation equip. error rate[case/h]
3	Ship Equipment monitoring(Auxiliary machinery)	Auxiliary machinery error rate[case/h]
4	Remote maintenance of ship equipment (Main engine)	Main engine recovery time[h/case] # of crews[man]
5	Remote maintenance of ship equipment (Navigation equipment)	Navigation equipment recover time[h/case] # of crews[man]
6	Remote maintenance of ship equipment (Auxiliary machinery)	Auxiliary machinery recovery time[h/case] # of crews[man]
7	Development of high-strength ship	Average time between troubles[year]
8	Support for load control(Decreasing load)	Fatigue distribution
9	Support for load control(Weight reduction)	Weight ratio of ship
10	Monitoring of ship's structure(Information sharing)	Recovery time[h]
11	Monitoring of ship's structure(Decision support for dock-in)	Dock-in timing
12	Weather routing	Weather condition
13	Maneuvering support for safety(Support for decision making)	Accident ratio
14	Maneuvering support for safety(Employ low-paid workers)	Salary[\$/(man*month)]
15	Risk based Inspection	Inspection cost[\$] & time[h]
16	Monitoring of cargo handling equipment	Error rate of handling equipment[case/port] Recovery time[h/case]
17	Remote & automatic operation system of cargo handling	Cargo handling cost[\$/port] Delay rate[case/port] Delay time[h]
18	Management system for port work	Port work cost[\$/port] Delay rate[case/port] Delay time[h]
19	Remote & automatic operation ship	Salary[\$/(man*month)] # of crews[man]
20	Maneuvering support for energy efficiency	Fuel oil consumption rate of maneuvering
21	Introduction of IoT or automation technology to ship yard	Construction cost[\$]
22	Integration of design and development by IoT	Construction cost[\$]
23	Development of energy efficient ship (Hull form)	Wave resistance coefficients
24	Development of energy efficient ship (Propeller)	Propeller efficiency
25	Development of energy efficient ship (Engine)	Fuel oil consumption rate of engine

また、シミュレーション評価において想定する設定として、東京ーロサンゼルス間(8,843km)を船速 19knot(50%出力)で往復運航する 6600TEU 積みのコンテナ船をとし、運航期間は 20 年間とした。

#### 4.3 結果

各 IoT 技術導入による事故数・故障数、運航利益、遅延時間のシミュレーション結果を図 5 に示す。上から順に事故数・故障数、運航利益、遅延時間の結果である。横軸は IoT 技術の Technology ID であり、Table. 1 中における左端の ID と対応している。エラーバーは各 IoT 技術に対して 1000 回のモンテカルロシミュレーションを行った際の標準偏差を示している。また IoT 導入を考慮しない場合の平均値、標準偏差をそれぞれ実線と点線で示した。

事故・故障数の低減を主目的とした場合、荷重制御支援(荷重軽減)(ID. 8)の効果が大きいことが分かる。この理由として、荷重制御支援の IoT 技術は船体疲労度と船用機器疲労度の両方を軽減することで、複数の機器の故障率を削減することが可能だからであると考えられる。

運航利益の向上を主目的とした場合、荷重制御支援技術(船体重量軽減)(ID. 9)の効果が最も高いことが分かる。これは建造費中の材料費削減が効果的であることを示している。また、荷役作業の効率化(ID. 17, ID. 18)やエンジン性能向上(ID. 25)も効果的だと読み取れる。

遅延時間の削減を主目的とした場合、船用機器復旧時間に関わる船用機器リモートメンテナンス(補機)(ID. 6)やと荷役遅れに関わる荷役遠隔操作・自動荷役システム(ID. 12)などの効果が大きいことが分かる。一方、荷役故障検知(ID. 16)の効果は荷役作業自体の遅延削減効果よりも小さいことが分かる。

以上のように、シミュレーションの入力として種々の IoT 技術の機能をパラメータとして与えることで、IoT 技術の導入効果を比較検討し、各評価軸の観点から有効な IoT 技術の選定の議論が可能になる。

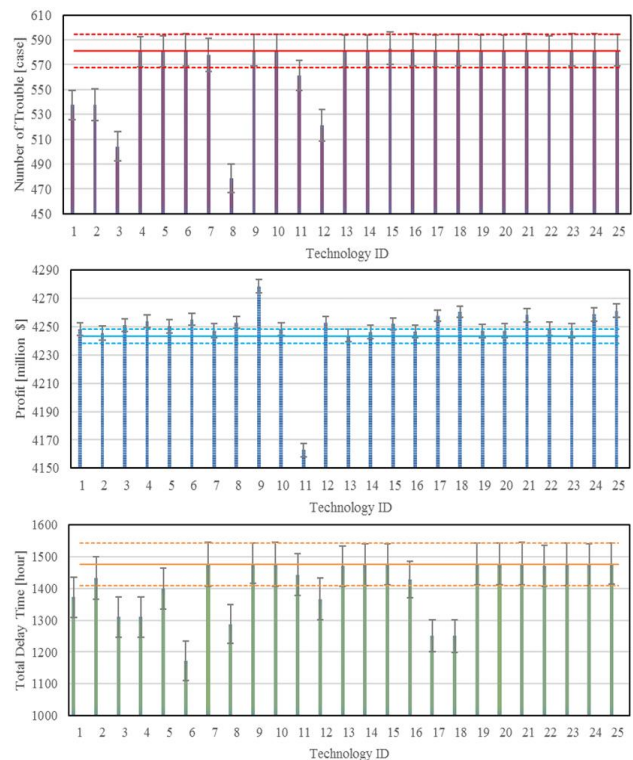


Fig. 5 The result of evaluation of each IoT technology

#### 4.4 技術成熟度を考慮した検討

技術成熟度の違いを想定して複数のパラメータ変更値で導入評価を行うことで、IoT 技術のパラメータ設定値精査の必要性や技術成熟度向上の効果について考察した。図 6 に感度分析結果を示す。i が技術成熟度の低い場合、ii が中程度の技術成熟度、iii が技術成熟度の高い場合を想定した値である。なお、4.3 では ii の値を用いている。

事故・故障数の観点では、船用機器モニタリング(ID. 1, ID. 2, ID. 3)と荷重制御(ID. 8)、ウェザールーティング(ID. 12)の効果が大きい。特にウェザールーティングによる荒天回避の効果が 4.3 の結果よりも大きいことが窺える。またこれらの技術は遅延時間への感度に関しても同様の関係があることが読み取れる。運航利益の観点では、荷重制御支援技術(ID. 9)の感度が高いことが分かる。技術どうしの優劣は 4.3 の結果と大きくは変わらないが、船体構造モニタリングによる入渠時期の柔軟化(ID. 11)は、入渠ルールの設定方法によって効果の有無が明確に分かれる結果となった。具体的には入渠判断の閾値が船体疲労 1%の場合および 5%の場合は運航利益が大きく下がり、船体疲労 3%の場合は運航利益が微増する。遅延時間の観点では、事故・故障数の関係する技術に加えて船



用機器メンテナンス（補機）の向上（ID. 6）と荷役関連技術（ID. 17, ID. 18）の感度が大きいことが分かる。

このように技術成熟度を考慮したパラメータ感度分析を行うことの利点は、技術成熟度の精査が必要な技術や積極的な投資の価値がある技術を特定できることである。つまり、上述した IoT 技術は、導入の意思決定の際に妥当な評価を下すためには IoT 技術の技術成熟度を精査することで現実的な効果（パラメータ設定値）を見積もることが重要になる。一方で、導入・開発レベルに応じて着実に価値向上が期待できるので、積極的に技術レベル向上の投資を行う価値はあるだろう。

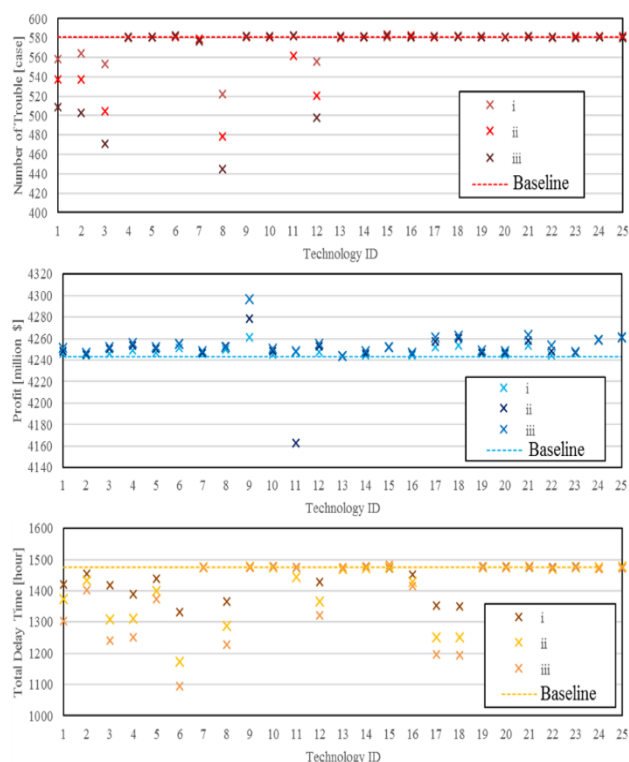


Fig. 6 Sensitivity analysis for input

以上より、本研究で提案した手法を用いることで、海事産業への IoT 技術導入の価値評価を荷主の QCD への効果の観点で議論できることを示した。

## 5 考察

本研究では、海事産業界における IoT 技術の導入効果を荷主の QCD を評価軸として選定することで一元的に評価した。一方で、多種多様な IoT 技術の中には環境安全性や CSR など、本研究で定義した評価軸ではその機能を十分に評価できないものも存在する。その場合、Systems Approach の手法に則って、利害関係者の選定と要求定義、機能分析を行うことで、評価方法や意思決定方法について考察することができる。

また、実際の IoT 技術開発や技術導入の意思決定においては、導入の過程で発生する新たな付加価値や必要技術、技術的困難性は考慮していない。技術の導入・開発コストに関しても検討していない。導入段階でこれらの新たな検討が必要になった場合は、本手法ではその都度、新たに意思決定を行うことで対応することを想定しており、再検討

の容易さという側面でも本手法は有用性がある。

本評価手法では、船舶運航シミュレータのモデル化にあたって一隻の船の運航モデルを作成したが、IoT 技術の中には船団に導入することで効果を発揮するものや船種によって効果が異なるものも存在する。このような異なる状況での IoT 技術利用を評価する場合は、シミュレーションモデルを新たに作成する必要がある。

## 6 結論

本研究では海事産業における競争力強化に有効な IoT 技術導入の意思決定を支援することを目的として、Systems Approach の手法を用いて海事産業の要求と機能について分析し、荷主の QCD の観点から各 IoT 技術導入の評価を行う手法を提案した。

また、実際に本手法を用いて、現在考案されているものを含む 25 個の多様な IoT 技術導入の意思決定を行うことで有用性の検証を行った。具体的には、Systems Approach の手法により各 IoT 技術が実現する機能と向上させる価値を整理し、評価軸に基づく海事産業能に対応して作成した運航シミュレータを用いて、IoT 技術の効果をシミュレーションの入力パラメータ変更で表現することで、その価値を相対的に評価・判断できることを示した。また、感度解析によって、導入の際に IoT 技術の技術レベルを精査する必要がある項目や、導入・開発の投資価値がある技術についても議論することができた。

## 文献

- 1) 安藤英幸: 環境負荷低減のための運航モニタリング、計測と制御, 50(6), 2011-6, pp. 398-404.
- 2) E. Crawley, B. Cameron, D. Selva: System Architecture, PEARSON, 2016.
- 3) M. J. Kinnunen: Complexity Measures for System Architecture Models, Master thesis, Massachusetts Institute of Technology System Design and Management Program, 2006.
- 4) B. G. Cameron, E. F. Crawley, G. Loureiro, E. S. Rebentisch: Value flow mapping: Using networks to inform stakeholder analysis, Acta Astronautica, Vol. 62, 2008, pp. 324-333.
- 5) D. Dori: Object-Process Methodology: A Holistic Systems Paradigm, Springer, 2002.
- 6) 松倉洋史, M. Buen-Tumilba, 大和裕幸: 海上輸送シミュレーションによる工場間物流の外乱評価, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 12, 2010, pp. 175-184.
- 7) 稗方和夫, 満行泰河, Moser Bryan, 大和裕幸, 齋藤智輝, 和中真之介: リアルオプションを導入した船舶のライフサイクル価値向上に関する研究, 日本船舶海洋工学会論文集, Vol. 23, 2016, pp. 231-237.
- 8) 鈴木和夫, 佐々木紀幸, 川村隆文: 船舶海洋工学シリーズ②「船体抵抗と推進」, 成山堂書店, 2013.