

航海データ解析による船舶の推進性能評価

正会員 杞尾 憲治*
正会員 足達 宏之

正会員 安東 潤**
正会員 玉島 正裕*

Evaluation of Propulsion Performance of Ship by Analyzing Service Data

by Kenji Mokuo, Member
Hiroyuki Adachi, Member

Jun Ando, Member
Masahiro Tamashima, Member

Key Words: Propulsion performance, Service analysis, Service performance

1. 緒 言

近年、世界的な温室効果ガス排出量低減の気運の中、省エネ船舶の建造および運航が求められている。対策として船型の最適化、塗料、付加物、燃料や主機関等、多岐に渡る検討が進められている。船舶の推進性能は平水中性能と航海中性能で構成されるが、省エネ化の評価は通常平水中の推進性能において評価される。評価をする手段として、新造時の平穏な海象での速力試験が挙げられるが、計測結果には風、波浪、潮流、水深等の外乱影響が含まれている。速力試験の外乱影響を補正する方法は、IMO、ISO、ITTCにて議論され世界的な標準として確立されている¹⁾。

一方、航海中の船舶は風、波浪、潮流、水深、船体およびプロペラ汚損、経年変化等の外乱影響を多分に受けている。航海中の計測データから省エネ化を平水中推進性能において評価するには、速力試験と同じように外乱影響を補正しなければならない。従来よく用いられた外乱影響を補正する方法は、平穏な海象、例えばビューフォースケール3以下というようなデータをスクリーニングする方法である²⁾。さらに統計的手法により平水中性能と比較して評価される。この手法では、平穏な海象のデータを収集できなければ解析することができない。また、荒天時のデータは用いられないで航海中の推進性能が求められない。

本解析手法は全ての航海中データが運動力学的な釣り合い状態に基づいているものとして取り扱い、航海中推進性能評価を行うことが特徴である。つまり、平穏な海象のデータのみをスクリーニングすることなく、荒天時のデータのみでも現状の平水中推進性能と航海中推進性能を評価することが可能となる。

本論文では、全ての気象・海象における船舶推進性能を評価できる手法を提案すべく、実船の航海データを基にした新たな性能評価技術を検討し、その妥当性を示す。

2. 航海データの解析法について

航海中の影響は主に船体抵抗の増加に現われるが、抵

抗增加を計測することは困難である。航海データから得られた情報と平水中の推進性能を基に解析を行い、航海時の出力増加と推進効率を求め、出力増加から船体抵抗增加 ΔR_{AW} を求める方法が提案されている³⁾。通常、航海データとして船の速力 V （対水もしくは対地）、プロペラの回転数 N 、機関出力 P_B および燃料消費量などが記録される。平水中推進性能は、出力曲線、機関特性曲線、プロペラ単独性能曲線および自航要素によって構成されている。

また、航海時の喫水は一定でなく航海喫水 d_i で運航しており、これにより排水量も一定でない。一定排水量での推進性能を比較するため、基準喫水または基準排水量に修正し評価する。排水量を修正する場合、アドミラルティ係数を用いた修正が広く用いられている。それに対し、本解析における排水量修正方法は、異なる排水量における有効馬力 P_E を推定し⁴⁾、さらにプロペラ荷重 C_T を用いて排水量修正後の推進性能を推定する方法を用いている。これにより、船体抵抗と推進効率を分けて取り扱うことが可能となる。ここで、平水中と航海中の外乱影響を含んだ喫水を以下のように定義する。

d_0 : 基準喫水 (m), d_i : 航海喫水 (m)

\bar{d}_0 : 平水中基準喫水, \bar{d}_i : 平水中航海喫水

\tilde{d}_0 : 航海中基準喫水, \tilde{d}_i : 航海中航海喫水

添え字*i*はサンプルデータ番号を示す。

(1)式を用いて与えられた基準喫水 d_0 における平水中 P_E 曲線から航海喫水 d_i の平水中 P_E を推定する。航海喫水が大きく変化している場合は、推進性能が大きく変化するため複数の基準喫水を設けて取り扱う。

$$P_E[d_i] = P_E[d_0] \cdot (P_E)_R \quad (1)$$

ここで、

$$(P_E)_R = 1 + [(d)_R - 1] \cdot A$$

$$(d)_R = \frac{d_i}{d_0}$$

$$A = \alpha + \frac{V}{\sqrt{L}}\beta + \left(\frac{V}{\sqrt{L}}\right)^2\gamma$$

$$\alpha = 0.789 - 0.270[(d)_R - 1] + 0.529C_b\left(\frac{L}{10d_0}\right)^{0.5}$$

$$\beta = 2.336 + 1.439[(d)_R - 1] - 4.605C_b\left(\frac{L}{10d_0}\right)^{0.5}$$

$$\gamma = -2.056 - 1.485[(d)_R - 1] + 3.798C_b\left(\frac{L}{10d_0}\right)^{0.5}$$

C_b : 方形肥育係数, P_E : 有効馬力 (kW)

V : 速力 (m/s), L : 垂線間長 (m)

* 流体テクノ㈱

** 九州大学大学院工学研究院

原稿受付 平成31年3月15日

公開日 令和元年5月27日

春季講演会において講演 令和元年6月3,4日

©日本船舶海洋工学会

次に、航海中 \tilde{d}_i における速力で計測されたプロペラ回転数および機関出力を、基準喫水 \bar{d}_0 におけるプロペラ回転数および機関出力と比較すると異なっている。これは喫水差による排水量影響と外乱影響によるためである。航海データを解析する場合、これらを分けて取り扱うことが望ましい。

本解析法では排水量影響と外乱影響を分けるために、基準喫水 d_0 における平水中プロペラ荷重度 $C_T[\bar{d}_0]$ 、航海喫水 d_i における平水中プロペラ荷重度 $C_T[\tilde{d}_i]$ および航海中プロペラ荷重度 $C_T[\tilde{d}_i]$ を求め、これらの差を用いて基準喫水 d_0 における航海中プロペラ荷重度 $C_T[\tilde{d}_0]$ を推定する。排水量影響による C_T の差 ΔC_{T0} は平水中における基準喫水 \bar{d}_0 と航海喫水 \tilde{d}_i の C_T 差から求められる。ここで航海喫水 d_i における有効馬力 $P_E[\tilde{d}_i]$ は(1)式によって求められているため、排水量影響による有効馬力差 ΔP_{E0} は航海喫水 d_i における有効馬力 $P_E[\tilde{d}_i]$ と基準喫水 d_0 における有効馬力 $P_E[\bar{d}_0]$ との差によって求められる。 ΔP_{E0} から求まる ΔC_{T0} を用いて次式より $C_T[\tilde{d}_i]$ が求まる。

$$C_T[\tilde{d}_i] = C_T[\bar{d}_0] + \Delta C_{T0} \quad (2)$$

ここで、

$$\Delta C_{T0} = \frac{8}{\pi} \cdot \frac{\Delta P_{E0}}{\rho \cdot D p^2 \cdot V^3 \cdot (1-t) \cdot (1-w_s)^2}$$

$$\Delta P_{E0} = P_E[\tilde{d}_i] - P_E[\bar{d}_0]$$

外乱影響による C_T の差 ΔC_{T1} は航海喫水 d_i における平水中プロペラ荷重度 $C_T[\tilde{d}_i]$ と航海中プロペラ荷重度 $C_T[\tilde{d}_0]$ との差から求められる。 ΔC_{T1} を基準喫水 d_0 におけるプロペラ荷重度 $C_T[\bar{d}_0]$ に加えることにより、次式より航海中プロペラ荷重度 $C_T[\tilde{d}_0]$ が求まる。

$$C_T[\tilde{d}_0] = C_T[\bar{d}_0] + \Delta C_{T1} \quad (3)$$

ここで、

$$\Delta C_{T1} = C_T[\tilde{d}_i] - C_T[\bar{d}_i]$$

この $C_T[\tilde{d}_i]$ からプロペラ単独性能を用いて基準喫水 d_0 における航海中 \tilde{d}_0 のプロペラ回転数 n 、プロペラ出力 P_B およびプロペラ効率 η_P が求まる。ここで、基準喫水 d_0 における航海中 \tilde{d}_0 での伴流係数 $(1-w_s)[\tilde{d}_0]$ は、航海中に計測された機関出力から求められた値を用いた。これにより全ての航海データを基準喫水 d_0 の推進性能に修正することができ、最終的に評価される基準喫水航海中 \tilde{d}_0 のデータは平水中の推進性能に外乱影響のみが付加されたデータとなる。

風波等の外乱は抵抗増加となり P_E に影響を与える。航海喫水 d_i における航海中 $P_E[\tilde{d}_i]$ と平水中 $P_E[\tilde{d}_i]$ の差 ΔP_{E1} が外乱影響によるものと考えられる。外乱影響における抵抗増加を ΔR_{Aw} とすると、

$$\Delta R_{Aw} = \frac{\Delta P_{E1}}{V_i} \quad (4)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} \Delta P_{E1} &= P_E[\tilde{d}_i] - P_E[\bar{d}_i] \\ P_E[\tilde{d}_i] &= P_B[\tilde{d}_i] \cdot \eta[\tilde{d}_i] \\ \eta[\tilde{d}_i] &= \eta_R[\tilde{d}_i] \cdot \eta_P[\tilde{d}_i] \cdot \eta_H[\tilde{d}_i] \cdot \eta_T \end{aligned}$$

$\eta_H[\tilde{d}_i]$ を構成する伴流係数 $(1-w_s)[\tilde{d}_i]$ は $P_B[\tilde{d}_i]$ から求め

た値、推力減少係数 $(1-t)$ は \bar{d}_0 の値を用いている。

速力 V において航海喫水 d_i の抵抗増加を $\Delta R_{Aw}[\tilde{d}_i]$ とし、基準喫水 d_0 での抵抗増加を $\Delta R_{Aw}[\bar{d}_0]$ とする。このとき両喫水の差が小さくなるように基準喫水 d_0 を設けると、気象海象は同じであるので抵抗増加量はほぼ変わらないとすることができ、基準喫水 d_0 における航海中 $P_E[\tilde{d}_0]$ は次式によって求まる。

$$P_E[\tilde{d}_0] = P_E[\bar{d}_0] + \Delta P_{E1} \quad (5)$$

ここで、

$$\Delta R_{Aw}[\tilde{d}_i] \doteq \Delta R_{Aw}[\bar{d}_0]$$

一方、航海中におけるプロペラ推力 $T_p(n, V)[\tilde{d}_i]$ は船体抵抗 $R(V)[\tilde{d}_i]$ と釣り合っており、次式の関係が成り立つ。

$$R(V)[\tilde{d}_i] + \Delta R_{Aw} - (1-t)T_p(n, V)[\tilde{d}_i] = 0 \quad (6)$$

ここで、

$$R(V)[\tilde{d}_i] = R(V)[\bar{d}_i] + \Delta R_{Aw}$$

プロペラ推力 $T_p[\tilde{d}_i]$ はプロペラ回転数 n と速力 V の関数である。推力減少係数 $(1-t)$ は航海中と平水中では同じと仮定すると、抵抗増加 ΔR_{Aw} と推力増加 ΔT_w は次式のように表される。

$$\Delta R_{Aw} = (1-t)\Delta T_w \quad (7)$$

$$\Delta T_w = T_p(n, V)[\tilde{d}_i] - T_p(n, V)[\bar{d}_i] \quad (8)$$

抵抗増加 ΔR_{Aw} は、(4)式の有効馬力および(7)式のプロペラ推力の両者から求めることができ、同じ値となるはずである。抵抗増加 ΔR_{Aw} が異なっていれば解析に問題があることを示すことになる。

ここで、航海中 \tilde{d}_i 性能から求めた伴流係数 $(1-w_s)[\tilde{d}_i]$ と基準喫水 d_0 における平水中伴流係数 $(1-w_s)\bar{d}_0$ を比較すると必ずしも一致しない。航海喫水 d_i が基準喫水 d_0 と大きく変わらないとき、喫水違いによる伴流係数は平水中では同一とし、また航海中でも同一とする。さらに航海中の伴流係数と平水中の伴流係数は異なるとする。

航海データをこの方法で解析すると、基準喫水 d_0 において平水中 \bar{d}_0 と航海中 \tilde{d}_0 の機関出力 P_B や速力 V の差が求められる。抵抗増加 ΔR_{Aw} に対する ΔP_B 、 ΔV 、シマージン S_w 、推進効率 η から基準喫水 d_0 における平水中推進性能や航海中推進性能特性が求まる。すなわち、 ΔR_{Aw} がゼロのときの速力と機関出力が平水中の値であり、 ΔR_{Aw} が変化したときの速力および機関出力の変化が航海中の推進性能特性となる。 ΔP_B 、 ΔV 、 S_w はそれぞれ次式より求められる。

$$\Delta P_B(V_i) = P_B(V_i)[\tilde{d}_0] - P_B(V_i)[\bar{d}_0] \quad (9)$$

$$\Delta V_i(\Delta R_{Aw}) = V_i(\Delta R_{Aw})[\tilde{d}_0] - V_i(\Delta R_{Aw})[\bar{d}_0] \quad (10)$$

$$S_w = \frac{\Delta P_B(V_i)[\tilde{d}_0]}{P_B(V_i)[\bar{d}_0]} \quad (11)$$

解析するために設定した基準喫水 d_0 における平水中 \bar{d}_0 の推進性能と航海データから求められる基準喫水 d_0 における平水中 \tilde{d}_0 の推進性能に差が生じると、Fig. 1 のように ΔR_{Aw} がゼロのとき ΔP_B がゼロにならない場合がある。これは風、波浪以外の出力増加と見なすことができる。すなわち、船体、プロペラの汚損、経年変化または平水中性能

推定の誤差が含まれる。

また、Fig. 2 のように ΔR_{AW} がゼロのとき ΔP_B がゼロという関係が成り立つとき、航海データから求められる現状の平水中推進性能ということになる。Fig. 1 および Fig. 2 のデータは 3 章に記載する解析対象船のデータではなく他船のデータである。

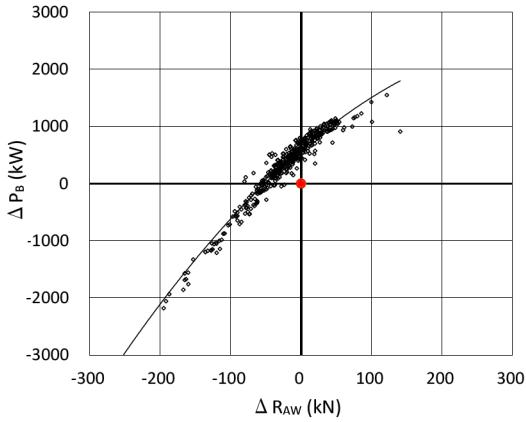


Fig. 1 Relationship between ΔR_{AW} and ΔP_B before correction

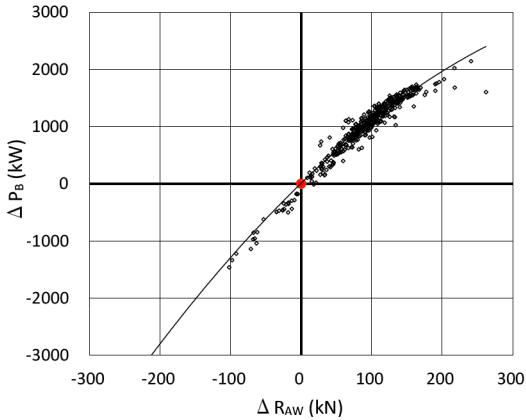


Fig. 2 Relationship between ΔR_{AW} and ΔP_B after correction

また、解析によって航海データの信憑性を検討できる。例として、2 隻の船の解析結果を Fig. 3 に示す。左図は解析値が一本のラインにまとまっており、そのラインから外れた解析値は、航海データに何らかの問題があると推察できる。また、右図はラインが 2 本もしくは 3 本あるように見える。これは計測器のゼロ点がシフトした可能性などと考えられる。

最終的に解析データは正常なデータのみを抽出し最小二乗法で近似して評価される。その際、赤池情報量基準 (AIC)⁵⁾ を用いて最適な尤度を求め、近似式の次数を決定する。

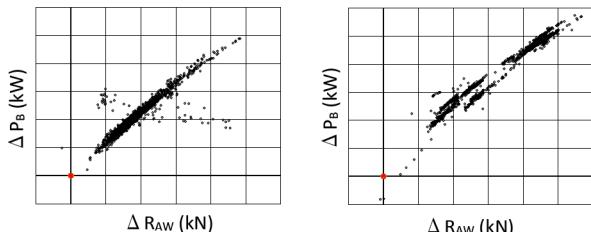


Fig. 3 Sample of relationship between ΔR_{AW} and ΔP_B

解析の流れを Fig. 4 に示す。

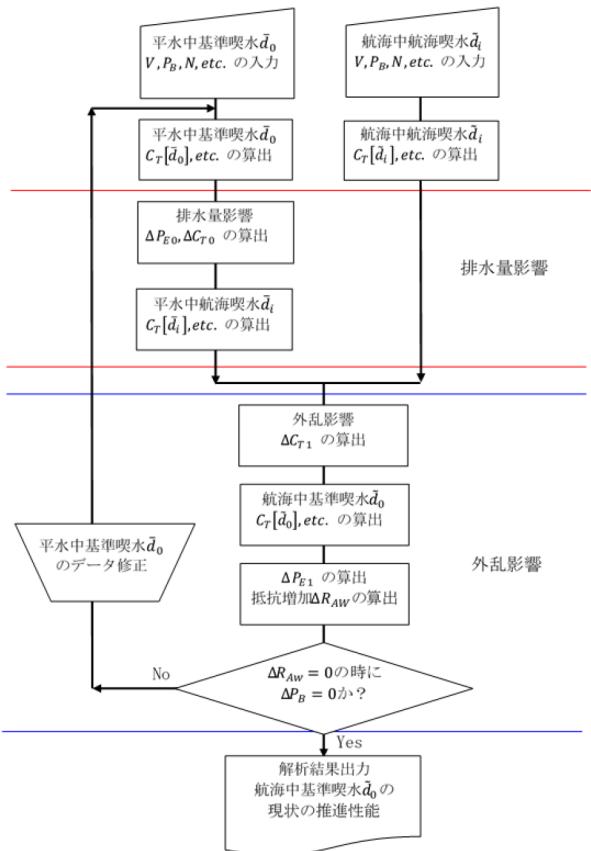


Fig. 4 Flow chart of analysis

3. 航海データの解析結果

3.1 解析対象船について

本解析法を用いて解析した例として内航船を挙げる。本船の主要目を Table 1 に示す。本船には速力、方位、機関データ等を記録するデータロガーが搭載されている。このログデータの中から、速力、プロペラ回転数、機関出力の毎分データを解析に用いた。データをログした期間は高知県から千葉県へ満載状態で運航した 1 航海（約 40 時間）である。また、本船の基準喫水 d_0 の推進性能およびプロペラ単独性能はプロペラ設計計算書によって与えられる。

Table 1 Main items of target ship

船種	貨物船
全長	約 120 m
載貨重量	約 8000 ton
最大出力	3840 kW

3.2 解析結果

航海データの解析結果を Fig. 5 から Fig. 8 に示す。図中の丸印は基準喫水における平水中 d_0 の推進性能を示しており、赤色へ近づくほどプロペラ回転数が高いことを示している。さらに、中空の印はプロペラ設計計算書で与えられた性能を、中塗の印は航海データを解析して求まる平水中の性能を示している。菱形印は解析して求まる基準喫水における航海中 d_0 のデータを示している。

Fig. 5 に、船体抵抗変化と機関出力変化の関係を示す。

傾きが小さいほど、抵抗変化が機関出力に与える影響が小さい。

Fig. 6 に、船体抵抗変化と速力の関係を示す。傾きが小さいほど、抵抗が変化しても速力の変化が小さい。つまり、波浪中でも速力の変化が小さい。

Fig. 7 に、船体抵抗変化とシーマージンの関係を示す。

Fig. 8 に、速力とシーマージンの関係を示す。傾きが大きいほど、シーマージンに対する速力変化が小さくなる。また、シーマージン 0% の速力が平水中の速力となる。

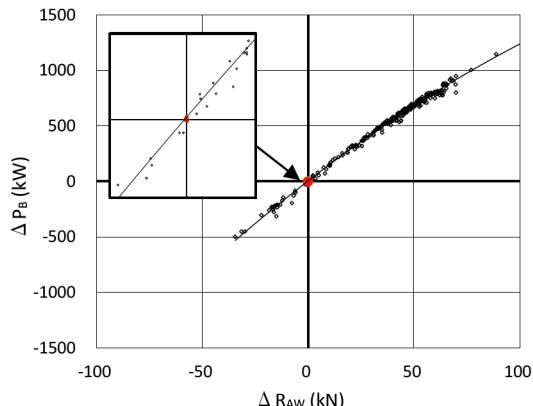


Fig. 5 Relationship between ΔR_{AW} and ΔP_B

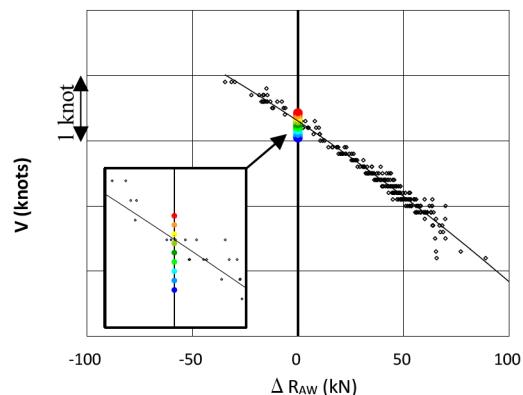


Fig. 6 Relationship between ΔR_{AW} and V

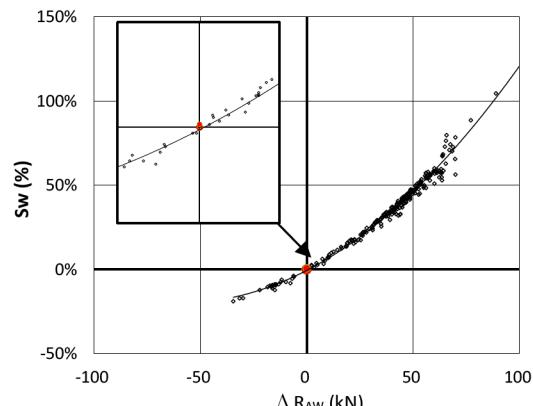


Fig. 7 Relationship between ΔR_{AW} and S_w

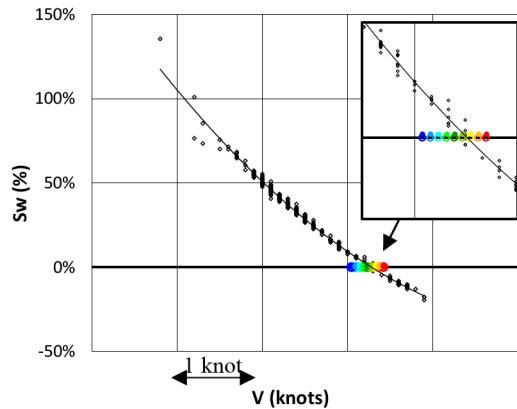


Fig. 8 Relationship between V and S_w

4. 結 言

本手法により航海データを解析した結果は、ばらつきが少ない結果となっており、精度良く解析できたと考えられる。また、一航海の航海データから、現状の平水中および航海中の推進性能を得ることができた。統計的手法のように航海データをスクリーニングする必要がないため、少ない航海データでも現状の推進性能を短期間で把握することができた。

また本手法では、風波による船体抵抗の変化量に対する速力および機関出力の変化量を求める。したがって、各船体の風波に対する特性を把握することができ、風波が激しい航路には航海中推進性能に特化した船を充て、一方風波の穏やかな航路には平水中推進性能が優れた船を用いるといった、船の適材適所による新たな省エネ運航を可能にできるものと考えられる。

さらに、本手法で航海データを解析した結果、平水中推進性能が水槽試験や新造時試運転の平水中推進性能と大きく異なった場合には、船体汚損やプロペラ汚損による推進性能の低下が存在する可能性がある。この場合には、プロペラの粗度を計測して汚損したプロペラの性能低下を評価するとともに、船体汚損の程度も推定可能となると考えられる。

謝 辞

本研究に関し、航海データをご提供頂いた船主殿に深くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) ISO 15016:2015 (Guidelines for the assessment of speed and power performance by analysis of speed trial data)
- 2) 櫻田顕子 他 : 実運航シミュレーションによる実船データ解析, 日本船舶海洋工学会論文集 第 25 号, pp.33-38, 2017.
- 3) 荻原誠功, 山崎正三郎, 芳村康男, 足達宏之 : 船舶海洋工学シリーズ⑪船舶性能設計, 成山堂書店, pp.211-249, 2013.
- 4) Anthony F. Molland, Stephen R. Turnock, Dominic A. Hudson : Ship Resistance and Propulsion, Cambridge University Press, pp.201, 2011.
- 5) 赤池弘次, 室田一雄 : 赤池情報量基準 AIC モデリング・予測・知識発見, 共立出版, 2007.