

|              |   |
|--------------|---|
| Title        | 船舶の実海域性能に関する研究  |
| Author(s)    | 辻本, 勝   |
| Citation     | 大阪大学, 1998, 博士論文  |
| Version Type | VoR   |
| URL          | <a href="https://doi.org/10.11501/3143923">https://doi.org/10.11501/3143923</a> |
| rights       |   |
| Note         |   |

*Osaka University Knowledge Archive : OUKA*

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

Osaka University

# 船舶の実海域性能に関する研究

平成10年1月

辻 本 勝

# 目次

|  |    |
|--|----|
| 第1章 緒論   | 1  |
| 第2章 船舶の実海域性能   | 4  |
| 2.1 船速   | 4  |
| 2.1.1 船速低下に影響を及ぼす要因                                      | 5  |
| 2.1.2 経年劣化による船速低下  | 6  |
| 2.1.3 生物汚損による船速低下  | 6  |
| 2.1.4 波浪による船速低下  | 8  |
| 2.1.5 風による船速低下   | 17 |
| 2.1.6 海流による船速低下  | 19 |
| 2.1.7 実海域における船速低下  | 19 |
| 2.1.8 船速低下の計算  | 19 |
| 2.1.9 経年劣化と生物汚損による船速低下の平均値および分散値が船速低下の確率密度関数に及ぼす影響に関する考察 | 22 |
| 2.1.10 経年劣化による船速低下量に関する考察                                | 23 |
| 2.1.11 生物汚損による船速低下量に関する考察                                | 24 |
| 2.1.12 波浪中自航要素に関する考察                                     | 25 |
| 2.1.13 船速低下量の尺度影響に関する考察                                  | 27 |
| 2.1.14 実海域における実船性能の推定に関する考察                              | 29 |
| 2.1.15 風による操船に関する考察                                      | 29 |
| 2.2 燃料消費量  | 30 |
| 2.2.1 燃料ハンドル一定の場合  | 30 |
| 2.2.2 燃料ハンドルを変化させる場合の燃料消費量の変化                            | 32 |
| 2.2.3 意識的変針を行う場合の燃料消費量の変化                                | 33 |
| 2.2.4 燃料消費量変化の計算   | 33 |
| 2.3 主機馬力   | 35 |
| 2.3.1 燃料ハンドル一定の場合  | 35 |
| 2.3.2 燃料ハンドルを変化させる場合の主機馬力の変化                             | 35 |

|            |                                  |           |
|------------|----------------------------------|-----------|
| 2.3.3      | 意識的変針を行う場合の主機馬力の変化               | 36        |
| 2.3.4      | 主機馬力変化の計算                        | 36        |
| 2.4        | 実船の航海実績                          | 38        |
| 2.4.1      | 航海実績の項目                          | 38        |
| 2.4.2      | 航海実績と理論との比較                      | 38        |
| 2.5        | 第2章のまとめ                          | 39        |
| <b>第3章</b> | <b>実海域性能の評価手法</b>                | <b>40</b> |
| 3.1        | 確率論に基づく評価法                       | 40        |
| 3.1.1      | 性能評価点数による評価                      | 40        |
| 3.1.2      | 性能評価関数                           | 41        |
| 3.2        | シーマージンに対する考察                     | 44        |
| 3.3        | 船舶の総合評価への応用                      | 45        |
| 3.4        | 船舶の総合評価項目に対する考察                  | 45        |
| 3.5        | 第3章のまとめ                          | 47        |
| <b>第4章</b> | <b>実海域性能の長期予測法への応用</b>           | <b>49</b> |
| 4.1        | 福田による長期予測法                       | 49        |
| 4.2        | 長期予測法の問題点                        | 50        |
| 4.2.1      | 波浪統計資料の精度による影響                   | 50        |
| 4.2.2      | 短期波高分布の違いによる影響                   | 54        |
| 4.2.3      | 船速分布を考慮した長期予測法の提案                | 57        |
| 4.3        | 第4章のまとめ                          | 58        |
| <b>第5章</b> | <b>結論</b>                        | <b>60</b> |
| <b>付録A</b> | <b>実海域の用語について</b>                | <b>62</b> |
| <b>付録B</b> | <b>波浪中自航要素を考慮した船速低下式</b>         | <b>64</b> |
| B.1        | 波浪中の釣合式                          | 64        |
| B.2        | 繰り返し計算法                          | 66        |
| B.3        | 微分係数法                            | 68        |
| <b>付録C</b> | <b>船速低下量と主機回転数、主機馬力、燃料消費量の関係</b> | <b>70</b> |
| C.1        | 主機回転数                            | 70        |
| C.2        | 主機馬力                             | 70        |

|                 |     |
|-----------------|-----|
| C.3 燃料消費量 ..... | 72  |
| 表               | 74  |
| 図               | 86  |
| 参考文献            | 124 |
| 謝辞              | 129 |

# 表 目 次

|      |  |    |
|------|--|----|
| 2.1  | Coefficient of regression line about ship speed loss due to aging effect . . .   | 74 |
| 2.2  | Coefficients of regression curve about ship speed loss due to fouling effect .   | 75 |
| 2.3  | Data of ship speed loss due to fouling effect ; one year past after dock out .   | 75 |
| 2.4  | Seakeeping criteria . . . . .  | 75 |
| 2.5  | Principal dimensions of SR-108 container ship . . . . .  | 76 |
| 2.6  | Sections of SR-108 container ship . . . . .  | 77 |
| 2.7  | Static conditions of SR-108 container ship . . . . .   | 78 |
| 2.8  | Hull and propeller characteristics of SR-108 container ship . . . . .  | 78 |
| 2.9  | Division of sea area on PSW route . . . . .  | 79 |
| 2.10 | Occurrence probability of observed wave heights ( $H_V$ [m]) and observed<br>wave periods ( $T_V$ [s]) on PSW route . . . . .  | 79 |
| 2.11 | Occurrence probability of observed wave directions ( $\chi$ [deg.]) on PSW route   | 80 |
| 2.12 | Occurrence probability of mean wind velocity ( $V_w$ [m/s]) and mean wind<br>directions ( $\gamma$ [deg.]) on PSW route . . . . .  | 80 |
| 2.13 | Division of sea area on PNW route . . . . .  | 81 |
| 2.14 | Occurrence probability of observed wave heights ( $H_V$ [m]) and observed<br>wave periods ( $T_V$ [s]) on PNW route . . . . .  | 81 |
| 2.15 | Occurrence probability of observed wave directions ( $\chi$ [deg.]) on PNW route   | 82 |
| 2.16 | Occurrence probability of mean wind velocity ( $V_w$ [m/s]) and mean wind<br>directions ( $\gamma$ [deg.]) on PNW route . . . . .  | 82 |
| 4.1  | Maximum wave height of 1/N . . . . .   | 83 |
| 4.2  | Variations of long term prediction for vertical bending moment changing<br>wave statistics of observed wave heights ( $H_V$ [m]) and observed wave peri-<br>ods ( $T_V$ [s]) on PSW route ( $\alpha = 10^{-5}$ , $Q_q = 10^{-8}$ ) . . . . . | 84 |
| 4.3  | Variations of long term prediction for vertical bending moment changing<br>wave statistics of observed wave direction ( $\chi$ [deg.]) on PSW route ( $\beta =$<br>$10^{-5}$ , $Q_q = 10^{-8}$ ) . . . . .                                   | 84 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 4.4 | Variations of long term prediction for horizontal bending moment changing wave statistics of observed wave heights ( $H_V$ [m]) and observed wave periods ( $T_V$ [s]) on PSW route ( $\alpha = 10^{-5}$ , $Q_q = 10^{-8}$ ) . . . . . | 85 |
| 4.5 | Variations of long term prediction for horizontal bending moment changing wave statistics of observed wave direction ( $\chi$ [deg.]) on PSW route ( $\beta = 10^{-5}$ , $Q_q = 10^{-8}$ ) . . . . .                                   | 85 |

## 目 次

|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.1  | Time history of ship speed after ship delivery . . . . .   | 86  |
| 2.2  | Propulsive system . . . . .  | 87  |
| 2.3  | Coordinate system for calculation of added resistance due to wave reflection   | 88  |
| 2.4  | Coordinate system for calculation of added resistance due to ship motion<br>in waves . . . . .   | 88  |
| 2.5  | Wave direction and ship course . . . . .   | 89  |
| 2.6  | Deliberate course change for ship speed calculation . . . . .  | 89  |
| 2.7  | Wind direction and ship course . . . . .   | 90  |
| 2.8  | Propeller open chart . . . . .   | 91  |
| 2.9  | Sea area . . . . .   | 92  |
| 2.10 | PSW route . . . . .  | 93  |
| 2.11 | PNW route . . . . .  | 94  |
| 2.12 | Probability density function of ship speed loss due to aging deterioration .   | 95  |
| 2.13 | Probability density function of ship speed loss due to biological fouling . .  | 95  |
| 2.14 | Probability density function of ship speed loss due to wave . . . . .  | 96  |
| 2.15 | Probability density function of ship speed loss due to wind . . . . .  | 96  |
| 2.16 | Probability density function of ship speed loss due to ocean current . . . .   | 97  |
| 2.17 | Probability density function of ship speed loss in actual seas for 10 years<br>on PSW route ( $V_0=23.5$ [knot]) . . . . .                             | 97  |
| 2.18 | Parametric study on aging deterioration . . . . .  | 98  |
| 2.19 | Parametric study on biological fouling . . . . .   | 98  |
| 2.20 | Parametric study on ship speed loss . . . . .  | 99  |
| 2.21 | Comparison of time history due to aging deterioration between linear and<br>quadratic fitting . . . . .  | 100 |
| 2.22 | Variations of probability density function of ship speed loss due to aging<br>deterioration (in case of quadratic curve of the time history) . . . . . | 100 |
| 2.23 | Probability density function of ship speed loss in actual seas on PSW route  | 101 |
| 2.24 | Distribution of random variables . . . . .   | 102 |



|      |  |     |
|------|--|-----|
| 2.25 | Comparison of assumed and simulated probability density function of ship speed loss due to biological fouling . . . . .  | 102 |
| 2.26 | Comparison of time history due to biological fouling between linear and quadratic fitting . . . . .  | 103 |
| 2.27 | Probability density function of ship speed loss due to biological fouling (from dock-out to dock-in) . . . . .   | 103 |
| 2.28 | Comparison of probability density function of ship speed loss due to biological fouling between assumed and simulated one (linear and quadratic fitting of time history due to biological fouling) . . . . . | 104 |
| 2.29 | Probability density function of ship speed loss in actual seas for 10 years on PSW route . . . . .   | 105 |
| 2.30 | Error factors of estimation on ship performance in actual seas . . . . .   | 105 |
| 2.31 | Trial result with B-spline fitting . . . . .   | 106 |
| 2.32 | Deliberate course change . . . . .   | 106 |
| 2.33 | Probability density function of fuel oil consumption due to aging deterioration  | 107 |
| 2.34 | Probability density function of fuel oil consumption due to biological fouling   | 107 |
| 2.35 | Probability density function of fuel oil consumption due to wave . . . . .   | 108 |
| 2.36 | Probability density function of fuel oil consumption due to wind . . . . .   | 108 |
| 2.37 | Probability density function of fuel oil consumption due to ocean current .  | 109 |
| 2.38 | Probability density function of fuel oil consumption in actual seas for 10 years on PSW route ( $\Lambda_0=3750$ [kg/hr.]) . . . . .   | 109 |
| 2.39 | Probability density function of main engine power due to aging deterioration   | 110 |
| 2.40 | Probability density function of main engine power due to biological fouling  | 110 |
| 2.41 | Probability density function of main engine power due to wave . . . . .  | 111 |
| 2.42 | Probability density function of main engine power due to wind . . . . .  | 111 |
| 2.43 | Probability density function of main engine power due to ocean current . .   | 112 |
| 2.44 | Probability density function of main engine power in actual seas for 10 years on PSW route ( $P_0=19000$ [PS]) . . . . .   | 112 |
| 2.45 | Voyage data and histogram of fuel oil consumption of PSW container ship (SR-108) . . . . .   | 113 |
| 3.1  | Transition of probability density function of ship speed . . . . .   | 114 |
| 3.2  | An example of performance evaluation function . . . . .  | 114 |
| 3.3  | Performance evaluation score . . . . .   | 115 |
| 3.4  | Factors of performance evaluation score using exponential curve . . . . .  | 115 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 3.5  | Effect of sea margin on ship service speed for 10 years . . . . .   | 116 |
| 3.6  | Effect of sea margin on ship service speed for 20 years . . . . .   | 116 |
| 3.7  | Difference between PSW route and PNW route on ship service speed for<br>10 years . . . . .  | 117 |
| 4.1  | Response amplitude function of vertical bending moment at midship . . . .   | 118 |
| 4.2  | Response amplitude function of horizontal bending moment at midship . .   | 118 |
| 4.3  | Variance of vertical bending moment . . . . .   | 119 |
| 4.4  | Variance of horizontal bending moment . . . . .   | 119 |
| 4.5  | Comparison between Rayleigh distribution and Crest-to-Trough wave height<br>distribution for normalized wave height . . . . .     | 120 |
| 4.6  | Exceedance probability of two wave height distributions for normalized<br>wave height . . . . .                                   | 120 |
| 4.7  | Comparison of long term prediction for vertical bending moment between<br>two wave height distributions in short term . . . . .   | 121 |
| 4.8  | Comparison of long term prediction for horizontal bending moment between<br>two wave height distributions in short term . . . . . | 121 |
| 4.9  | Long term prediction for vertical bending moment considering ship speed<br>loss in actual seas . . . . .                          | 122 |
| 4.10 | Factors of long term prediction for vertical bending moment considering<br>ship speed loss in actual seas . . . . .               | 122 |
| 4.11 | Long term prediction for horizontal bending moment considering ship speed<br>loss in actual seas . . . . .                        | 123 |
| 4.12 | Factors of long term prediction for horizontal bending moment considering<br>ship speed loss in actual seas . . . . .             | 123 |

# 第1章 緒論

船舶は、実際の航海で遭遇する海象の中で効率良く航行することができる性能の良いものが船主、運航者により望まれる。また建造者にはその船舶の建造が、研究者にはその性能の説明が要求される。このことは人類が初めて船舶を製作して以来、常に求められてきたことである。しかし航海中での船舶の性能は、船舶新造時の波や風のない状態の性能に比べて低下する。その性能を低下させる要因は、第2章で述べる通り全て不規則現象に基づいている。このため確率論を用いて現象を説明する必要があるが、性能の低下に対する建造者、研究者側の回答は経験的なもの、あるいはほとんどが決定論に基づくものであった。

また「効率の良い」「性能の良い」という言葉は船舶の使用される目的、使用する立場によって異なるが、経済性を考えれば燃料消費量が重視され、船舶を運航する立場からは実際の船速がどうなるか、運航スケジュールがいかに保てるかということが問題となり、船速が重視されることになる。

今日、船舶の性能は、船主と建造者である造船所および船級の承認を行う船級協会の立ち会いの下で行われる公式試運転で確認される。この公式試運転では各種搭載機器の試験が行われるとともに、船体関係では速力試験、旋回試験、停止試験が行われる。この試運転で最も重視される速力試験は静穏海域中をわずか1マイル航走することにより行われ、試験項目には、長期間の航海中に遭遇する海象でどの程度船速が低下するかについて直接触れられていない。このことを実際にどう考慮しているかといえば、速力の低下分は主機馬力に余裕を持たせることによって補われているのである。つまり船速の問題は搭載主機の馬力の問題となっている。

実際には、長期間の航海中に遭遇する海象で必要な主機馬力の推定は、新造時静水中を航行するのに必要な主機馬力からの嵩上げ量を付加して行われている。この主機馬力に対する嵩上げ率のことをシーマージンと呼ぶが、このシーマージンの値は経験的に定められたものであり、合理的に定められた値ではない。

そこでこの主機馬力に対するシーマージンが船速の立場からどのような意味を持つのか調べる。そして船舶の性能として船速、燃料消費量、主機馬力について、実海域中における合理的な推定法を確立する。さらにこの推定法を用いて性能の評価法の提案を行い、実際の設計に応用することが本論文の目的である。

本論文の主題を説明する中で、実際の海象を表す用語として実海域という用語が重要な

役割を果たしている。この用語についての統一的な説明や解説を行うのは今回が初めてであるので、付録 A で実海域の用語の説明を行う。

本論文の構成は以下の通りである。

第 1 章は緒論である。本論文の目的を述べ、構成を記している。

第 2 章は実海域中における船舶性能の推定法について説明を行っている。ここで船舶性能としては船速、燃料消費量、主機馬力を取り上げている。そして理論的に求めた性能の分布（確率密度関数）と航海実績を解析して求めた性能の分布の比較を行い、その結果について記している。

第 2 章の論点は、実海域は不規則現象に支配されることから、確率論を用いて船舶性能の理論推定法を構築するところにある。そこでこの第 2 章では実海域中における船速低下量を求め、その結果を使って燃料消費量、主機馬力の構築を行っている。

波浪による平均抵抗増加によって生じる自然減速量の研究については、中村・内藤<sup>1)</sup>、内藤・中村・原<sup>2)</sup>の研究がある。中村・内藤<sup>1)</sup>の方法の特徴は、船体、プロペラ、主機の 3 つの要素を用いて定式化を行っている点にある。内藤・中村・原<sup>2)</sup>の方法の特徴は、中村・内藤<sup>1)</sup>の方法では陰関数表示であった船速低下量の表示を、微分係数を用いて表示することで計算し易くした点にある。

意識的減速量の研究については、内藤・中村・原<sup>2)</sup>、中村・内藤・原・松本<sup>3)</sup>の研究がある。内藤・中村・原<sup>2)</sup>の方法の特徴は、耐航性能の評価基準を用いて、船長が意識的減速を命令する海象状態を特定し、その状態が緩和されるまで船速を低下させる点にある。中村・内藤・原・松本<sup>3)</sup>の方法の特徴は、内藤・中村・原<sup>2)</sup>の方法で意識的減速量を、船体応答の分散値に関する 1 階の微分係数を用いて表示した点を、船体応答の分散値の 2 次式で近似することで改良を行った点にある。

しかしこれらの手法を用いた長期にわたる船速低下量の理論的な推定は行われていない。また実験的に検討することも実船と模型船との間に複雑な尺度影響があるため難しい<sup>4)</sup>。

そこで第 2 章では長期にわたる船速低下量は以下の手順により理論的な推定を行う。

1. 自然減速量の計算は中村・内藤<sup>1)</sup>の方法の拡張を行い、短期海象中の平均抵抗増加を用いた短期海象中の自然減速量を求める。
2. 意識的減速量の計算は中村・内藤・原・松本<sup>3)</sup>の方法を用いる。
3. 意識的変針による減速相当量の計算は、変針により航路長が延びるために生じる到着遅れを考慮して求める。

そしてこの長期にわたる船速低下量の確率密度関数を用いて、その確率密度関数を用いて実海域における燃料消費量、主機馬力の長期にわたる推定も行っている。

第3章は、第2章で述べた船舶性能の理論推定法を用いた、実海域における船舶性能の評価法について記している。

船舶性能の評価を行う際に問題となる点は、船舶の就航後の長期間にわたる運航形態が国際情勢、政策、市場動向、港湾設備、配船状態、企業戦略、突発的な事件によって常に変化することにある。これら全てを理論の中に組み込むことは現状では不可能に近いが、運航形態を一定とした条件下であれば実海域における性能の評価は理論的に可能である。そこで確率論の立場から評価を行うとともに、望ましい評価のあり方について考察している。

さらに従来慣例的に行われている主機馬力の嵩上げ率であるシーマージンと、そのときの船速について調べ、シーマージンのもつ意味を船速の立場から説明し、船速維持率を用いて実海域における船舶の性能保証について考察を行い、船舶性能の総合評価についても方針を示している。

第4章は設計で用いる長期間にわたる船舶性能を予測する方法、いわゆる長期予測法に対する問題点に関して調査、検討を行っている。

従来から船舶の設計の際に用いられてきた長期予測法<sup>5)</sup>には次の問題点がある。

(1) 波浪統計資料の精度、(2) 短期波高分布の仮定、(3) 船速一定の仮定

この問題点に対して調査、検討を行った内容は以下である。

(1) 船体応答の長期予測を行うときに用いる波浪統計資料は船上で目視観測されたものでありその精度に問題がある。そこで波浪統計資料の精度が長期予測値にどの程度影響を与えるか調べるために波浪統計資料の感度解析を行い、その結果と船体応答との関係を考察している。

(2) 従来短期波高分布はレーリー確率密度関数により表現されてきたが、波高の大きなところでは海洋波の非線形性の影響がありレーリー確率密度関数からずれてくる。そこで海洋波の非線形性を良く表現するクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数を用いて船体応答の長期予測を行う。そして従来のレーリー確率密度関数を用いた長期予測の結果とクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数を用いた長期予測の結果を比較し、海洋波の非線形性の影響が船体応答の長期予測値にどの程度影響を与えるのかを調べ考察している。

(3) 実海域において船舶は船速を低下させて航行しているので、このことを考慮して船体応答の長期予測を行う必要がある。そこで第2章で理論的に推定した実海域における船速の分布を用いて長期予測を行った結果と船速一定として長期予測を行った結果との両者でどの程度差があるのか調べる。そして第2章で検討した船速低下を生じる要因が長期予測値に与える影響について考察している。

第5章は本論文の結論であり、本研究で得られた結果と将来の課題を記している。

## 第2章 船舶の実海域性能

実海域中での船舶の性能の低下の実際について触れる。ここで以下で言う船舶の性能とは船速、燃料消費量、主機馬力のことを指す。

大洋を航行する船舶は、波浪や風といった自然環境によって船舶が本来持っている性能を低下させる。そして船舶が長期間航行することを考えれば船体表面、推進器、搭載主機は経年劣化し、また浸水表面には生物付着による汚損が生じる。この経年劣化、生物汚損による性能の低下は時間の経過とともに進行する。また極めて厳しい海象に遭遇し、このままの状態では航行に危険が生じる場合には、船長の判断により意識的に減速もしくは変針を行う場合がある。この場合にも人為的とは言え、船舶は性能を低下させて航行する。

ここに示した、実際の航海で船舶性能（船速、燃料消費量、主機馬力）がどのように低下するかについては船舶の運航、建造を考えると興味のある問題であり、過去船速については<sup>6)7)8)</sup>に始まり、船速<sup>9)</sup>とその航海実績の解析法<sup>10)11)</sup>について、さらには船速を補償するための主機馬力に対するシーマージンについて理論的検討<sup>12)13)14)15)</sup>が行われてきた。

しかしこれらの船舶性能の低下を引き起こす現象は波浪に代表されるように、全てが不規則現象である。同時にこの実海域を航行する船舶も不規則現象に支配されている。この不規則現象を記述するには確率論が有効な役割を果たす。次節以降、確率論を用いた船舶性能の推定法を示す<sup>16)17)18)</sup>。

### 2.1 船速

本章で取り扱う船舶性能の内、規則波中での推定法が確立していて、実験との一致も一部の状態を除き良好である船速を、船舶性能の推定の中心に据えて理論の構築を行う。

なお本節では船速低下量は船速の低下を正とする。 $V$  を実海域中での船速、 $V_0$  を新造時静穏海域中での船速（設計船速）、 $\delta V$  を船速低下量とすると

$$V = V_0 - \delta V \quad (\delta V : \text{低下を正}), \quad (2.1.1)$$

$$\begin{cases} V & : \text{航海船速,} \\ V_0 & : \text{設計船速,} \\ \delta V & : \text{船速低下量,} \end{cases}$$

と表現される。

### 2.1.1 船速低下に影響を及ぼす要因

実海域では様々な要因によって船速が低下するが、山崎<sup>19)</sup>は、船速の低下に影響を及ぼす要因を以下の20通りに分類している。

1. 自然現象に基づいて発生するもの
  - (a) 海洋微生物による船体及び推進器の汚損
  - (b) 自然損耗に伴う船体、推進器及び機関の経年変化
  - (c) 風圧力及び保針のための操舵
  - (d) 波浪による船体運動
  - (e) 海流・潮流及び水温等
  - (f) 浅・狭水路
2. 人為的なものによって発生するもの
  - (a) 船体運動の激化に伴う主機の操作
  - (b) 船体運動の激化に伴う航路の変針
  - (c) 船体運動の激化に伴う推進器のレーシング等の回避のためにとられる排水量増加・トリム変化
  - (d) 入渠間隔の長短に伴う汚損と経年変化への影響
  - (e) 塗装効果に伴う汚損と経年変化への影響（質と塗膜厚に関係）
  - (f) 塗面の良否に伴う汚損と経年変化への影響（質と仕上げに関係）
  - (g) 港内並びに陸上施設の輻輳等のための滞船（汚損の増加）
  - (h) 経済上の要請による主機の操作
  - (i) 入港時間調整のための主機の操作
  - (j) 計画出力と運航出力との不一致
  - (k) 交通輻輳のための主機操作・操舵
  - (l) 航路選択（海・潮流の利用）
  - (m) 主機特性からくる出力の制約
  - (n) 故障・改装その他（推進器換装、積荷増減、不安定船のための操舵頻度等の増加）

この他に、流氷、着氷により抵抗が増加するおよび排水量が増加することによって生じる船速低下が挙げられる。

これらの内

- (1) 経年劣化、(2) 生物汚損、(3) 波浪、(4) 風、(5) 海流
- の5つを、船速低下に影響を及ぼす主要な因子と考える。以下この5つの因子が船速低下に及ぼす影響を定量的に把握する。

また船舶の竣工後、時間の経過とともに船速が変化の様子を Fig.2.1に模式的に示す。ここで波浪による影響、風による影響、海流による影響はまとめて季節影響と呼ばれる。

### 2.1.2 経年劣化による船速低下

船体表面、プロペラ面、主機の経年劣化により船速は低下する。この影響の特徴は、船速の低下が時間の経過とともに進行し、再び元の状態に回復することはないことである。

この影響による船速低下量を調べるために、まず航海実績から出渠後の船底が清浄な状態で、季節影響による船速低下の無視できる海象中の船速低下量を取り出す。次に竣工後の経過時間を横軸に、そのときの船速低下量を縦軸に並べる。このグラフの形状から、経年劣化による船速低下量は時間の経過に対して1次式で近似できることが分かる。すなわち経年劣化による船速低下量  $\delta V_a$  は時間  $t$  を用いて

$$\delta V_a = at, \quad (2.1.2)$$

と表される。ここで今までに報告されている  $a$  の値を Table 2.1に示す。

船速低下が時間の経過に対して一次式で近似できるとすると、経年劣化による船速の確率密度関数は一様分布となる。

$$p_a(\delta V_a) = \begin{cases} \frac{1}{2\mu_a} & (0 \leq \delta V_a \leq 2\mu_a), \\ 0 & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (2.1.3)$$

$\mu_a$  は平均値である。

### 2.1.3 生物汚損による船速低下

船舶の浸水表面に生物が付着して生育することを船体の汚損と呼ぶ<sup>20)</sup>。

この汚損はマイクロ汚損とマクロ汚損の2つに分けることができる。

マイクロ汚損とは船体表面に取り付いたバクテリアによる汚損のことである。このバクテリアは粘液を船体浸水表面に分泌し、数百 [ $\mu\text{m}$ ] の厚さの皮膜を形成する。この皮膜のことを一般にスライムと呼ぶが、スライムは年間を通じて発達し、水温の高低にはあまり関係しない特徴がある。

次にマクロ汚損とは、船舶の航行時または停泊時に船体浸水表面に海洋生物が付着することによる汚損である。

このスライムの発達、海洋生物の付着、生育により船体表面粗度が大きくなり抵抗が増加するため船速が低下する。この生物汚損の特徴は、船舶の入渠時に船底を清浄することにより再び元の状態に回復することである。



この生物汚損による船速低下量を調べるために、航海実績のデータから出渠から入渠までの間で、季節影響による船速低下の無視できる海象中の船速低下量を取り出す。次に、出渠後の経過時間を横軸に、そのときの船速低下量を縦軸に並べる。このグラフの形状から、生物汚損による船速低下量が時間の経過に対してどのように近似できるか分かる。

ここで今までに報告されている結果を Table 2.2, 2.3 に示す。ここで Table 2.2 には

$$\delta V_f = \alpha t^\beta, \quad (2.1.4)$$

で表現される回帰式で表現した結果を記し、Table 2.3 には、今までに報告されている生物汚損による船速低下量と時間の関係から、出渠後 1 年間の船速低下量を読みとった結果を記している。

生物汚損による船速低下は複雑な生物現象に依存するため決定論による取り扱いが困難である。そこで確率論を用いて生物汚損による船速低下を表現する。

まず、船舶の出渠から次の入渠までの一入渠間を考える。このとき汚損による船速低下量  $\delta V_f$  を時間  $t$  の 1 次式で近似すると、確率密度関数  $p_{f0}(\delta V_f)$  は次式で示される一様分布となる。

$$p_{f0}(\delta V_f) = \begin{cases} \frac{1}{2\mu_{f0}} & (0 \leq \delta V_f \leq 2\mu_{f0}), \\ 0 & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (2.1.5)$$

$\mu_{f0}$  は平均値である。

次に Fig.2.1 に示すように、生物汚損による船速低下を表す直線は、出渠から入渠までの間毎回傾きが異なり、さらに出渠から入渠までの時間も異なる。このことから、一入渠間の生物汚損による船速低下を表す確率密度関数は一様分布であるが、船舶の竣工後の生物汚損による船速低下を表す確率密度関数は、一様分布からずれたものになることが分かる。

このことを確率論を用いて表現すれば、このずれは自然現象に基づくものなので正規分布に従うと考えられる。すなわち、一様分布の平均値  $\mu_{f0}$  が統計的平均値  $\mu_f$  を中心に、ある統計的分散値  $\sigma_f^2$  をもって正規分布すると仮定することができる。

そこで、生物汚損による船速低下を表す確率密度関数を正規分布の累積分布関数を用いて、次式で仮定する。

$$p_f(\delta V_f) = p_{f0}(\delta V_f)|_{\mu_{f0}=\mu_f} \left\{ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\delta V_f - \mu_f}{\sqrt{2}\sigma_f}\right) \right\}. \quad (2.1.6)$$

(2.1.5) 式を代入すると

$$p_f(\delta V_f) = \frac{1}{2\mu_f} \left\{ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\delta V_f - \mu_f}{\sqrt{2}\sigma_f}\right) \right\}, \quad (2.1.7)$$

となる。ここで  $\text{erf}(x)$  は誤差関数で、次式で定義される。

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi. \quad (2.1.8)$$

#### 2.1.4 波浪による船速低下

実海域を航行する船舶にとって最も厳しい自然環境は波浪である。

通常の穏やかな海象中を航行するときは、燃料ハンドルは一定の状態である。このとき波浪により船速は低下するが、これを自然減速と言う。

荒天海域を航行する時には、船体動揺が激しくなり、海水打ち込み、スラミング、プロペラレーシングという現象が発生する。これら船舶の航行に危険を及ぼす現象が高頻度で起こるようになると、船長は乗組員や荷物の安全を守るため、自らの判断で減速もしくは変針を命令する。これを意識的減速、意識的変針と言う。この意識的減速、変針の実際の状況についても調べられている<sup>21)22)23)</sup>。

これら波浪による船速低下を Fig.2.2に示す船体ブロック、推進器ブロック、主機ブロック、船長ブロックの4つのブロック<sup>24)</sup>に分けて考える。

以下、船速を低下させるこれらの現象について、確率論を用いた推定法を述べる。

##### 自然減速

波浪による抵抗の増加は、波浪により造波抵抗が増加することによるものと波浪により浸水表面積が変化し、粘性抵抗が変化することによるものの2つに分けられる。

波浪による粘性抵抗の変化の時間平均値は、波浪による造波抵抗の増加の時間平均値に比べて小さいので無視し、以下、波浪による抵抗の増加は造波抵抗の増加によるものだけを考える。

規則波中における造波抵抗の増加に基づく平均抵抗増加  $R_{AW}$  はその発生機構の違いにより2つの抵抗成分に分けることができる。

1つ目は波浪が船体にあたり、反射することによる平均抵抗増加、 $R_{AWR}$  である。

2つ目は波浪と船体動揺との位相の相対関係による平均抵抗増加、 $R_{AWM}$  である。すなわち

$$R_{AW} = R_{AWR} + R_{AWM}, \quad (2.1.9)$$

である。

反射波による平均抵抗増加の計算法は Faltinsen, Minsaas, Liapis and Skjördal によって導かれた方法<sup>25)</sup>を Sakamoto and Baba が修正した方法<sup>26)</sup>を用いて計算を行う。座標系を

Fig.2.3に示すように選ぶ。このとき反射波による平均抵抗増加  $R_{AWR}$  は次式で表される。

$$R_{AWR} = \frac{1}{2} \rho g \zeta_a^2 \alpha_1 \left\langle \int_I \left[ \sin^2(\chi - \beta) - \frac{2\omega V}{g} \{ \cos \chi - \cos \beta \cos(\chi - \beta) \} \right] \sin \beta dl \right. \\ \left. + \int_{II} \left[ \sin^2(\chi + \beta) - \frac{2\omega V}{g} \{ \cos \chi - \cos \beta \cos(\chi + \beta) \} \right] \sin \beta dl \right\rangle. \quad (2.1.10)$$

$$\sin \beta dl = dy, \quad (2.1.11)$$

$$\alpha_1 = \frac{\pi^2 I_1(1.5kd)^2}{\pi^2 I_1(1.5kd)^2 + K_1(1.5kd)^2}, \quad (2.1.12)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho : \text{海水密度,} \\ g : \text{重力加速度,} \\ \zeta_a : \text{入射波振幅,} \\ \omega : \text{入射波の角周波数,} \\ \chi : \text{入射波と船体とのなす角,} \\ \beta : \text{船体水線面の傾斜角,} \\ V : \text{船速,} \\ I_1 : \text{1次の第1種変形ベッセル関数,} \\ K_1 : \text{1次の第2種変形ベッセル関数,} \\ I : \text{船体右舷の積分範囲,} \\ II : \text{船体左舷の積分範囲,} \\ dl : \text{船体水線面上の微小線素.} \end{array} \right.$$

ここで  $\alpha_1$  は喫水影響係数と呼ばれるもので喫水  $d \rightarrow \infty$  のとき

$$\lim_{d \rightarrow \infty} I_1(x) = \infty, \quad \lim_{d \rightarrow \infty} K_1(x) = 0 \quad \text{であることから}$$

$$\lim_{d \rightarrow \infty} \alpha_1 = 1, \quad (2.1.13)$$

となる。

この(2.1.10)式の計算は、3次のBスプライン曲線を用いて船体の水線面形状を表現して行ったが、ベジェ曲線を用いて船体の水線面形状を表現して計算を行う方法<sup>27)</sup>もある。この方法<sup>27)</sup>の特徴は、反射波に基づく抵抗増加量  $R_{AWR}(\omega, \chi)$  を入射波と船体のなす角  $\chi$  に関してフーリエ級数展開を行うことで、容易に短波頂不規則波中の抵抗増加量を計算することができることにある。

波浪と船体動揺との位相の相対関係による平均抵抗増加の計算法は丸尾<sup>28)</sup>によって導かれている。これを追波中での精度を考慮して改良した高木<sup>29)</sup>の方法を用いて計算を行う。座標系を Fig.2.4に示す。

$$R_{AWM} = \frac{\Delta R' K_e^2 + \Delta R''}{K_e^2 + 1}, \quad (2.1.14)$$

$$\begin{aligned} \Delta R' \sim 4\pi\rho \left( -\int_{-\infty}^{-K_1} + \int_{K_3}^{\infty} \right) \frac{m - K \cos \chi}{\sqrt{1 - \frac{K_3^2}{m^2}}} |H(m)|^2 dm \\ + 4\pi\rho \int_{-K_2}^{K_4} \frac{m - K \cos \chi}{\sqrt{1 - \frac{m^2}{K_0^2} \tau^4}} |H(m)|^2 dm, \end{aligned} \quad (2.1.15)$$

$$\begin{aligned} \Delta R'' \sim 4\pi\rho K_0 \sqrt{K_0} \{J_2 + (K_3 - K \cos \chi) J_1\} \\ + 4\pi\rho K_0 \sqrt{K_0} \{J_3 + (K_3 - K \cos \chi) J_4\}, \end{aligned} \quad (2.1.16)$$

$$|H(m)|^2 = |H_1(m)|^2 + \frac{(m + K_0 \tau)^4 - K_0^2 m^2}{K_0^2} |H_2(m)|^2, \quad (2.1.17)$$

$$H_1(m) = \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \sigma(x) \exp \left[ -\left\{ K_e - \frac{(K_0 \tau + m)^2}{K_0} \right\} h(x) + imx \right] dx, \quad (2.1.18)$$

$$H_2(m) = \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \mu(x) \exp \left[ -\left\{ K_e - \frac{(K_0 \tau + m)^2}{K_0} \right\} h(x) + imx \right] dx, \quad (2.1.19)$$

$$K_1 = \frac{1}{2} K_0 (1 + 2\tau + \sqrt{1 + 4\tau}), \quad (2.1.20)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} K_0 (1 + 2\tau - \sqrt{1 + 4\tau}), \quad (2.1.21)$$

$$K_3 = \frac{1}{2} K_0 (1 - 2\tau + \sqrt{1 - 4\tau}), \quad (2.1.22)$$

$$K_4 = \frac{1}{2} K_0 (1 - 2\tau - \sqrt{1 - 4\tau}), \quad (2.1.23)$$

$$J_1 = \sqrt{\pi} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} f(x) \frac{df^*}{d\xi} \sqrt{|x - \xi|} \{ \text{sgn}(x - \xi) + i \} dx d\xi, \quad (2.1.24)$$

$$J_2 = \frac{\sqrt{\pi}}{K} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \frac{df}{dx} \frac{df^*}{d\xi} \sqrt{|x - \xi|} \{ i \text{sgn}(x - \xi) - 1 \} dx d\xi, \quad (2.1.25)$$

$$J_3 = 2\sqrt{\pi} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \frac{dg^*}{d\xi} \frac{d^2 g}{dx^2} \sqrt{|x - \xi|} \{ \text{sgn}(x - \xi) + i \} dx d\xi, \quad (2.1.26)$$

$$J_4 = 2\sqrt{\pi} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \int_{-\frac{\ell}{2}}^{\frac{\ell}{2}} \frac{dg^*}{d\xi} \frac{dg}{dx} \sqrt{|x - \xi|} \{ i \text{sgn}(x - \xi) - 1 \} dx d\xi, \quad (2.1.27)$$

$$f(x) = \sigma(x) e^{iK_3 x}, \quad (2.1.28)$$

$$g(x) = \mu(x) e^{iK_3 x}, \quad (2.1.29)$$

$$\sigma(x) = ig \overline{A_H} e^{i\epsilon_H} \frac{V_H}{4\pi\omega_e^2}, \quad (2.1.30)$$

$$\mu(x) = -\overline{A_S} e^{i\epsilon_S} \frac{V_S}{4\pi\omega_e^4}, \quad (2.1.31)$$

$$K_0 = \frac{g}{U^2}, \quad (2.1.32)$$

$$K = \frac{\omega^2}{g}, \quad (2.1.33)$$

$$K_e = \frac{\omega_e^2}{g}, \quad (2.1.34)$$

$$\tau = \frac{U\omega_e}{g}, \quad (2.1.35)$$

$$V_H = i\omega_e(\eta_3 - x\eta_5) + i\zeta\omega e^{-ixK \cos \chi}, \quad (2.1.36)$$

$$V_S = i\omega_e(\eta_2 + x\eta_6 - bl_w\eta_4) + \zeta\omega \sin \chi e^{-ixK \cos \chi}, \quad (2.1.37)$$

$$h(x) = -\frac{S(x)}{B(x)}, \quad (2.1.38)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho : \text{海水密度,} \\ g : \text{重力加速度,} \\ \zeta : \text{入射波振幅,} \\ \omega : \text{入射波の角周波数,} \\ \omega_e : \text{波と船体との出会い角周波数,} \\ \chi : \text{入射波と船体とのなす角,} \\ L : \text{船長,} \\ B(x) : \text{船幅,} \\ S(x) : \text{断面積,} \\ b : \text{船体半幅,} \\ l_w : \text{横揺れモーメントレバー,} \\ \overline{A_H} : \text{上下揺進行波振幅比,} \\ \varepsilon_H : \text{上下揺と進行波との位相差,} \\ \overline{A_S} : \text{左右揺進行波振幅比,} \\ \varepsilon_S : \text{左右揺と進行波との位相差.} \end{array} \right.$$

次に短波頂不規則波中における平均抵抗増加  $\overline{R_{AW}(\chi)}$  を求める。座標系を Fig.2.5 に示す。

短波頂不規則波中における平均抵抗増加  $\overline{R_{AW}(\chi)}$  は、規則波中における平均抵抗増加  $R_{AW}(\omega, \alpha)$  と方向スペクトラム  $E(\omega, \theta)$  を用いて次式で表現される。

$$\overline{R_{AW}(\chi)} = 2 \int_{-\pi}^{\pi} \int_0^{\infty} \frac{R_{AW}(\omega, \alpha)}{\zeta_a^2} E(\omega, \alpha - \chi) d\omega d\alpha. \quad (2.1.39)$$

ここで方向スペクトラム  $E(\omega, \theta)$  を波浪スペクトラム  $S(\omega)$  に Pierson-Moskowitz 型を用い、方向分布関数  $G(\theta)$  に光易の表示式 ( $n = 2$ ) を用いて表現する。

$$E(\omega, \theta) = S(\omega)G(\theta), \quad (2.1.40)$$

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} 0.11 H_V^2 T_V \left( \frac{T_V}{2\pi} \omega \right)^{-5} \exp \left\{ -0.44 \left( \frac{T_V}{2\pi} \omega \right)^{-4} \right\}, \quad (2.1.41)$$

$$G(\theta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{\Gamma(1 + \frac{n}{2})}{\Gamma(\frac{1}{2} + \frac{n}{2})} \cos^n \theta = \frac{2}{\pi} \cos^2 \theta \quad \left( -\frac{\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \right), \quad (2.1.42)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega : \text{波の角周波数,} \\ H_V : \text{目視観測波高,} \\ T_V : \text{目視観測平均波周期,} \\ \chi : \text{不規則波の平均進行方向と船体とのなす角,} \\ \alpha : \text{素成波の進行方向と船体とのなす角,} \\ \Gamma : \text{ガンマ関数.} \end{array} \right.$$

(2.1.39) 式を用いて、ある  $\chi$  のときの短波頂不規則波中における平均抵抗増加  $\overline{R_{AW}(\chi)}$  が求められる。そこで波浪統計資料から、不規則波の平均進行方向と船体とのなす角  $\chi$  の発現確率  $p_\chi(\chi)$  を用い短期海象中の平均抵抗増加  $\widetilde{R_{AW}}$  は

$$\widetilde{R_{AW}} = \int_{-\pi}^{\pi} \overline{R_{AW}(\chi)} p_\chi(\chi) d\chi, \quad (2.1.43)$$

と求められる。

次に、波浪による抵抗増加によって生じる自然減速量  $\delta V_n$  を求める方法については、中村・内藤<sup>1)</sup>、内藤・中村・原<sup>2)</sup>の研究がある。

前者<sup>1)</sup>の方法の特徴は船速低下の表示が陰関数表示されていることにあり、後者<sup>2)</sup>の方法の特徴は、陰関数表示であった船速低下の表示を微分係数を用いて陽に表示したことにある。

ここでは、安定して計算が行える陰関数表示による船速低下量の計算法<sup>1)</sup>を用いて計算を行う。この方法による船速低下量は次式で与えられる。

$$\delta V_n(\omega, \alpha) = \frac{R_C(V) - R_C(V_0) + R_{AW}(\omega, \alpha; V)}{(1 - t_0)(1 - w_0) \left( P_{TU} + \frac{P_{TN} P_{QU}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \right)}. \quad (2.1.44)$$

ただし、ここでは自航要素が平水中と波浪中とで同一と仮定している。この波浪中自航要素と船速低下量の議論は 2.1.12 節で詳しく行う。

この (2.1.44) 式を短期海象中で計算が行えるように、次式のように拡張する。

$$\delta V_n = \frac{R_C(V) - R_C(V_0) + \widetilde{R_{AW}}(V)}{(1 - t_0)(1 - w_0) \left( P_{TU} + \frac{P_{TN} P_{QU}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \right)}, \quad (2.1.45)$$

$$\left\{ \begin{array}{l}
R_C : \text{平水中全抵抗,} \\
1 - t_0 : \text{平水中推力減少係数,} \\
1 - w_0 : \text{平水中伴流係数,} \\
\eta_{R0} : \text{平水中プロペラ効率比,} \\
\eta_t : \text{伝達効率,} \\
r : \text{ギア比 } (N_E = rN_P), \\
P_{TN} = \left. \frac{\partial T_P}{\partial N_P} \right|_{N_P=N_{P0}}, P_{TU} = \left. \frac{\partial T_P}{\partial U} \right|_{V=V_0} : \text{プロペラ推力に関する偏微分係数,} \\
P_{QN} = \left. \frac{\partial Q_P}{\partial N_P} \right|_{N_P=N_{P0}}, P_{QU} = \left. \frac{\partial Q_P}{\partial U} \right|_{V=V_0} : \text{プロペラトルクに関する偏微分係数,} \\
E_{QN} = \left. \frac{\partial Q_E}{\partial N_E} \right|_{N_E=N_{E0}}, E_{Q\Lambda} = \left. \frac{\partial Q_E}{\partial \Lambda} \right|_{\Lambda=\Lambda_0} : \text{主機トルクに関する偏微分係数,} \\
T_P(N_P, U) : \text{プロペラ推力,} \\
Q_P(N_P, U) : \text{プロペラトルク,} \\
N_P : \text{プロペラ回転数,} \\
U : \text{プロペラへの流入速度,} \\
Q_E(N_E, \Lambda) : \text{主機トルク,} \\
N_E : \text{主機回転数,} \\
\Lambda : \text{燃料投入量.}
\end{array} \right.$$

(2.1.45) 式は自然減速量  $\delta V_n$  を求めるために船速  $V$  における平水中抵抗  $R_C$  と短期海象中における平均抵抗増加  $\widetilde{R_{AW}}$  が必要になる式で、陰関数表示になっている。そこで繰り返し計算を行い  $\delta V_n$  を求める。

### 意識的操船

船舶が荒天に遭遇した場合の操船法には次の3つの方法がある<sup>30)</sup>。

(a) 脚躡ちちゅう (Heave to)

船首を風浪にあてて操舵力を保持する最小の速力をもって前進する方法。

(b) 漂躡 (Lie to)

機関を停止し、船を風浪下にそのまま漂流させ風浪に逆らわないようにする方法。脚躡が危険な場合採用される。

(c) 順走 (Scudding)

風浪を斜め船尾方向に受けながら、波に追われる姿勢で航走する方法。脚躡の方法で激しい衝撃がある場合、または風下に十分な余地があるときに採用される。

これらの用語は、「船首を風浪にあてて」「波に追われる姿勢で」と曖昧な表現をしている点があるので、以後は意識的減速、意識的変針という用語を用いることにする。

またここで言う躊躇は意識的減速に相当し、順走は意識的変針に相当する操船法である。

次に船長が意識的減速と意識的変針のどちらの操船を行うかを定めるには、別の条件が必要となる<sup>2)</sup>。そこでこの条件を自然減速量を含めた意識的減速量  $\delta V_{nd}$  と自然減速量を含めた意識的変針による減速相当量  $\delta V_{nc}$  との両者を比較して、船速低下量のより小さい操船を船長が選択し、命令すると考える。

$$\delta V_{wave} = \min(\delta V_{nd}, \delta V_{nc}). \quad (2.1.46)$$

さらに海象状態があまりにも厳しく、意識的減速、意識的変針のいずれの操船も行うことができない場合には漂滞 ( $V = 0$ ) を行うとする。この考え方により短期海象中における船速低下量を知ることができる。

以下、意識的減速と意識的変針を行う場合の計算法について述べる。

#### (i) 意識的減速の取り扱い

意識的減速を行うかを判断するための指標はいくつかあるが<sup>31)</sup>、ここでは船体、貨物、主機の安全性を考慮する現象の代表例として、海水打ち込み、プロペラ露出、船首部上下加速度、スラミングの4つの現象を考慮する。

これらの現象は船体応答によって表現される。すなわち、海水打ち込みは船首部での波と船体との相対変位、プロペラ露出はプロペラ面位置での波と船体との相対変位、スラミングは S.S.8 1/2 位置での波と船体との相対変位と相対速度を用いて表現される。

またこれらの船体応答は、海洋波に基づく不規則現象であるのでその極値分布は狭帯域を仮定すればレーリー確率密度関数に従う。このとき船体応答振幅の限界値  $C_0$  を超過する確率が、ある限界確率  $A_0$  以上となったときに意識的減速を行うことになる。

この4つの現象の限界値および限界確率は Table 2.4 に示す値を用いる。

次に意識的減速量を求める。自然減速量を含めた意識的減速後の船速  $V_{nd}$  は中村・内藤・原・松本<sup>3)</sup>によれば

$$V_{nd} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4a(c - \sigma^2)}}{2a}, \quad (2.1.47)$$

で与えられる。ただし  $a, b, c$  は、不規則波中応答の分散値  $\sigma^2$  を

$$\sigma^2 = aV^2 + bV + c, \quad (2.1.48)$$

と速度の2次式で近似するときの各係数である。また  $\sigma_0^2$  は限界値  $C_0$  かつ限界確率  $A_0$  となるとき限界分散値で、不規則波中応答の極値分布をレーリー分布と仮定すれば、 $\sigma_0^2, C_0, A_0$  の間には次の関係がある。

$$\sigma_0^2 = \frac{C_0^2}{-2 \log A_0}. \quad (2.1.49)$$



この関係式から、Table 2.4で与えた  $C_0, A_0$  を用いて  $\sigma_0^2$  を求め、(2.1.47) 式に代入して意識的減速後の船速が求まる。

ただしスラミングの場合は、船体応答として波と船体との相対変位、相対速度の2つの応答を使うので別の取り扱いが必要である。

スラミングの限界確率を相対変位、相対速度が互いに独立な事象として表現する。

$$A_0 = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{C_d^2}{\sigma_d^2} + \frac{C_v^2}{\sigma_v^2} \right) \right\}. \quad (2.1.50)$$

次に相対変位、相対速度の分散値  $\sigma_d^2, \sigma_v^2$  を船の速度  $V$  の2次式で近似する。

$$\frac{C_d^2}{\sigma_d^2} + \frac{C_v^2}{\sigma_v^2} = \hat{a}V^2 + \hat{b}V + \hat{c}. \quad (2.1.51)$$

この(2.1.51) 式を(2.1.50) 式を用いて速度について解けば、自然減速量を含めた意識的減速後の船速  $V_{nd}$  が求まる。

$$V_{nd} = \frac{-\hat{b} \pm \sqrt{\hat{b}^2 - 4\hat{a}(\hat{c} + 2 \log A_0)}}{2\hat{a}}. \quad (2.1.52)$$

ここで  $C_d, C_v$  はそれぞれ波と船体との相対運動、相対速度の限界値である。

以上で海水打ち込み、プロペラ露出、船首部上下加速度、スラミングの4つの現象について自然減速量を含めた意識的減速後の船速  $V_{ndi}$  ( $i = 1, 2, 3, 4$ ) が求まるが、これらの現象が全て限界確率内に収まらないと安全な航海はできない。そこでこれらの船速のうちで最も小さいものが、最終的に船長が判断する船速  $V_{nd}$  である。すなわち

$$V_{nd} = \min_i(V_{ndi}) \quad (i = 1, 2, 3, 4), \quad (2.1.53)$$

$$\begin{cases} i = 1 & : \text{船首部海水打ち込み,} \\ i = 2 & : \text{プロペラ露出,} \\ i = 3 & : \text{船首部上下加速度,} \\ i = 4 & : \text{スラミング,} \end{cases}$$

である。ここで自然減速量  $\delta V_n$ 、意識的減速量  $\delta V_d$  を含めた減速量  $\delta V_{nd} = \delta V_n + \delta V_d$  は次式となる。

$$\delta V_{nd} = V_0 - V_{nd}. \quad (2.1.54)$$

よって意識的減速量  $\delta V_d$  は

$$\delta V_d = V_0 - V_{nd} - \delta V_n, \quad (2.1.55)$$

である。

(ii) 意識的変針の取り扱い

船舶は荒天海域に遭遇する前に、気象情報により事前にどの海域が荒天であるか、またその海域の詳しい海象状態を知ることができる。この情報を基に、船長は荒天海域を航行するか、荒天海域を回避して航行するかの判断を行う。

ここでは意識的変針を行う場合について考える。意識的変針を行うことにより航路長は増大するから、目的地までの到着時間が遅れ、運航の立場からは船速が低下したのと同じ影響を与える。

このことの定式化を行うために Fig.2.6 に示すある海域を A 点から B 点へ航行することを考える。 $\overline{AB}$  の中間点 C を中心に荒天域があり、船は A 点で  $\Theta$  変針し、D 点で折り返し B 点へ向かうものと仮定する。

ここで次の 2 つの状態を考える。

1. 荒天を避航せずに意識的減速を行って A 点から B 点へ向かう状態。

$\overline{ACB}$  を船速  $V_1$  で  $2T_1$  時間航行する。

2. A 点で意識的変針を行い D 点で折り返し B 点へ向かう状態。意識的減速は行わない。

$\overline{AD}$  を船速  $V_2'$  で航行する。

$\overline{DB}$  を船速  $V_2''$  で航行する。

船が進む距離  $\overline{ACB}$  と  $\overline{ADB}$  は

$$\overline{ACB} = 2T_1 V_1, \quad (2.1.56)$$

$$\overline{ADB} = 2T_1 V_1 \sec \Theta, \quad (2.1.57)$$

となる。

また  $\overline{ACB}$  を進むのにかかる時間  $T_{ACB}$  と  $\overline{ADB}$  を進むのにかかる時間  $T_{ADB}$  は

$$T_{ACB} = 2T_1, \quad (2.1.58)$$

$$T_{ADB} = T_1 V_1 \sec \Theta \left( \frac{1}{V_2'} + \frac{1}{V_2''} \right), \quad (2.1.59)$$

となる。

ここで意識的減速を行わずに変針だけした結果、航行距離が長くなったことを、速度が遅くなったこととして考慮する。

時間  $T_{ADB}$  かけて  $\overline{ACB}$  を航行したと見直す見掛け船速  $V_2$  を

$$V_2 = \frac{\overline{ACB}}{T_{ADB}}, \quad (2.1.60)$$

と定義すると、(2.1.56), (2.1.59) 式より  $V_2$  は

$$V_2 = \frac{2V_2'V_2''}{V_2' + V_2''} \cos \Theta, \quad (2.1.61)$$

として求まる。ここで自然減速量  $\delta V_n$ 、意識的変針による減速相当量  $\delta V_c$  を含めた減速量  $\delta V_{nc} = \delta V_n + \delta V_c$  は次式となる。

$$\delta V_{nc} = V_0 - V_2. \quad (2.1.62)$$

よって意識的変針による減速相当量  $\delta V_c$  は

$$\delta V_c = V_0 - V_2 - \delta V_n, \quad (2.1.63)$$

である。

### 波浪による船速低下の確率密度関数

波浪統計資料<sup>32)</sup>から目視観測波高  $H_V$  と目視観測平均波周期  $T_V$  の発現確率  $p_w(H_V, T_V)$  が得られる。この  $(H_{V_i}, T_{V_j})$  の全ての組み合わせについて船速低下量  $\delta V_{wave}(H_{V_i}, T_{V_j})$  を求めると

$$\delta V_{wave}(H_{V_i}, T_{V_j}) = \delta V_n(H_{V_i}, T_{V_j}) + \min(\delta V_d(H_{V_i}, T_{V_j}), \delta V_c(H_{V_i}, T_{V_j})), \quad (2.1.64)$$

となるので、次の考え方により船速低下の確率密度関数が求まる。

船速低下量  $\delta V_{wave}(H_{V_i}, T_{V_j})$  と波浪発現確率  $p_w(H_V, T_V)$  を

$$\delta V_{wave}(H_{V_i}, T_{V_j}) = a_w \text{ [knot]}, \quad (2.1.65)$$

$$p_w(H_{V_i}, T_{V_j}) = b_w \text{ [%]}, \quad (2.1.66)$$

とすれば、波浪によって  $a_w$  [knot] の船速低下が生じる確率  $p_{wave}(a_w)$  は  $b_w$  [%] であるから

$$p_{wave}(a_w) = b_w \text{ [%]}, \quad (2.1.67)$$

と表現される。これを  $\delta V_{wave}$  について小さいものから順に並べれば、波浪による船速低下の確率密度関数が得られる。

### 2.1.5 風による船速低下

風圧抵抗  $R_A$  は過去の船舶のデータを整理して得られた抵抗係数を用いて次式で計算する<sup>33)</sup>。

$$R_A = \frac{1}{2} \rho_a k(\theta) C_{x0} A_x V_r^2, \quad (2.1.68)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho_a : \text{空気密度,} \\ k(\theta) : \text{風向影響係数,} \\ C_{x0} : \text{正面風圧抵抗係数,} \\ A_x : \text{水線面上船体の正面投影面積,} \\ V_r : \text{相対風速,} \\ \theta : \text{相対風向} \end{array} \right.$$

ここで Fig.2.7に示す座標系を用いて、絶対風速  $V_w$ 、絶対風向  $\gamma$  と相対風速  $V_r$ 、相対風向  $\theta$  との関係は、船速を  $V$  とすれば

$$V_r^2 = (V_w \sin \gamma)^2 + (V_w \cos \gamma - V)^2 = V_w^2 + V^2 - 2V_w V \cos \gamma, \quad (2.1.69)$$

$$\tan \theta = \frac{-V_w \cos \gamma + V}{V_w \sin \gamma}, \quad (2.1.70)$$

と表現される。

この  $R_A$  を (2.1.45) 式の  $\widetilde{R}_{AW}$  と入れ替えれば風による船速低下量  $\delta V_{wind}$  が計算できる。

相対風速の大きさによっては操船が不可能となる場合も生じるので、操船可能な範囲を 2.1.15 節で調べている。しかし、実際に計算を行えば、操船が不可能になる前に大きな風圧抵抗が船体に働くことで航行が不可能となることが分かる。また実際の状態では、このように相対風速が大きくて航行が不可能となる状態のときは、同時に波浪により航行が不可能となっている状態である。そこで相対風速が大きくて航行が不可能となる場合は、波浪によりすでに航行が不可能と判断されているとして、計算から除くことにする。

#### 風による船速低下の確率密度関数

波浪統計資料から絶対風速  $V_w$  と絶対風向  $\gamma$  の発現確率  $p_v(V_w, \gamma)$  が得られる。そこで波浪による船速低下の確率密度関数を求めた場合と同様にして  $(V_{w_i}, \gamma_j)$  の全ての組み合わせについて  $\delta V_{wind}$  を求めれば、船速低下の確率密度関数が得られる。

$$\delta V_{wind}(V_{w_i}, \gamma_j) = a_v \text{ [knot]}, \quad (2.1.71)$$

$$p_v(V_{w_i}, \gamma_j) = b_v \text{ [%]}, \quad (2.1.72)$$

とすれば、風によって  $a_v$  [knot] の船速低下が生じる確率  $p_{wind}(a_v)$  は  $b_v$  [%] であるから

$$p_{wind}(a_v) = b_v \text{ [%]}, \quad (2.1.73)$$

と表現される。これを  $\delta V_{wind}$  について小さいものから順に並べれば、風による船速低下の確率密度関数が得られる。

### 2.1.6 海流による船速低下

海流中では流速が変化することから、そこを航行する船舶の船速も変化する。しかし海流の流速変化量は常に一定ではなく絶えず変化している。この流速変化は自然現象に基づくものなので、その流速変化の分布は正規分布で近似することができる。同様に海流による船速変化の分布も、統計的平均値  $\mu_{oc}$ 、統計的分散値  $\sigma_{oc}^2$  に従う正規分布で近似できる。

海流による船速の変化の確率密度関数を次式で表現する。

$$p_{oc}(\delta V_{oc}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{oc}} \exp \left\{ -\frac{(\delta V_{oc} - \mu_{oc})^2}{2\sigma_{oc}^2} \right\}. \quad (2.1.74)$$

### 2.1.7 実海域における船速低下

経年劣化、生物汚損、波浪、風、海流による船速低下を互いに独立と仮定すれば、この5つの船速低下の確率密度関数を順番に畳み込み積分することにより実海域における船速低下の確率密度関数を求めることができる。

$$\delta V = \delta V_a + \delta V_f + \delta V_{wave} + \delta V_{wind} + \delta V_{oc}, \quad (2.1.75)$$

$$p(\delta V) = p_a * p_f * p_{wave} * p_{wind} * p_{oc}. \quad (2.1.76)$$

ただし \* は畳み込み積分を示す記号で、以下の積分演算を意味する。

$$h(v) = f * g = \int_{-\infty}^{\infty} f(\nu)g(v - \nu)d\nu. \quad (2.1.77)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta V_a \quad : \text{経年劣化による船速低下量,} \\ p_a \quad : \text{経年劣化による船速低下の確率密度関数,} \\ \delta V_f \quad : \text{生物汚損による船速低下量,} \\ p_f \quad : \text{生物汚損による船速低下の確率密度関数,} \\ \delta V_{wave} \quad : \text{波浪による船速低下量,} \\ p_{wave} \quad : \text{波浪による船速低下の確率密度関数,} \\ \delta V_{wind} \quad : \text{風による船速低下量,} \\ p_{wind} \quad : \text{風による船速低下の確率密度関数,} \\ \delta V_{oc} \quad : \text{海流による船速低下量,} \\ p_{oc} \quad : \text{海流による船速低下の確率密度関数.} \end{array} \right.$$

### 2.1.8 船速低下の計算

#### (1) 船型

計算は船型に SR-108 一軸コンテナ船<sup>34)</sup>を用いる。SR-108 一軸コンテナ船の主要目を Table 2.5 に、横断面形状を Table 2.6 に示す。また静水中での抵抗、船側波高を Table 2.7 に、プロペラ主要目とプロペラ単独特性を Table 2.8 と Fig.2.8 にそれぞれ示す。この Table 2.8 中に示す  $k_{t0}$ ,  $k_{t1}$ ,  $k_{t2}$ ,  $k_{q0}$ ,  $k_{q1}$ ,  $k_{q2}$  の係数はプロペラ単独特性における推力係数  $K_T$  とプロペラトルク係数  $K_Q$  を次に示す 2 次式で近似したときの各係数である。

$$K_T = k_{t0} + k_{t1}J + k_{t2}J^2, \quad (2.1.78)$$

$$K_Q = k_{q0} + k_{q1}J + k_{q2}J^2. \quad (2.1.79)$$

ここで

$$\begin{cases} J = \frac{U}{N_P D_p} & : \text{前進常数,} \\ U & : \text{プロペラへの流入速度,} \\ N_P & : \text{プロペラ回転数,} \\ D_p & : \text{プロペラ直径,} \end{cases}$$

である。

そしてこの船舶が新造時静穏海域を航行するときの船速  $V_0$  は 23.5 [knot] とする。

## (2) 航路

計算対象とする航路は北太平洋航路 (PSW : Pacific-South West coast route 及び PNW : Pacific-North West coast route) とする。この航路上の波浪統計資料は運輸省船舶技術研究所の北太平洋に関する資料<sup>32)</sup>を用いる。この波浪統計資料には目視観測波高、目視観測平均波周期、目視観測平均波向、平均風速、平均風向について発現確率が記されている。

この波浪統計資料に記載されている海域を Fig.2.9 に示し、PSW 航路と PNW 航路を Fig.2.10 と Fig.2.11 に示す。

## (3) 航路上の波浪発現確率

航路上の波浪発現確率  $p_w$  を求めるには、海域ごとの通過時間を用いるのが正しいが、長期にわたる海域ごとの通過時間は分からないので、ここでは海域ごとの航路長を用いて求める<sup>35)</sup>。

$$p_w = \sum_{k=1}^N w_k p_{wk}, \quad (2.1.80)$$

$$w_k = \frac{L_k}{L}, \quad (2.1.81)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} w_k : \text{航路長比,} \\ L : \text{総航路長,} \\ L_k : \text{海域 } k \text{ での航路長,} \\ p_{wk} : \text{海域 } k \text{ での波浪発現確率,} \\ N : \text{海域の総数.} \end{array} \right.$$

そこで通過海域と航路長比、針路の関係を Table 2.9, 2.13に示す。

次に航路上の目視観測波高、目視観測平均波周期の発現確率を Table 2.10, 2.14に示す。同様に目視観測波高、目視観測平均波向の発現確率を Table 2.11, 2.15に示し、平均風速、平均風向の発現確率を Table 2.12, 2.16に示す。

#### (4) 経年劣化による船速低下

経年劣化による船速低下は Table 2.1に示す過去の航海実績から 0.1 [knot/year] というデータを用いる。このとき船舶の運航期間として 10 年間を考えると  $2\mu_a$  は 1.0 [knot] となる。

この経年劣化による船速低下の確率密度関数を Fig.2.12に示す。

#### (5) 生物汚損による船速低下

生物汚損による船速低下の統計的平均値  $\mu_f$ 、統計的分散値  $\sigma_f^2$  の決定を行う。

船舶が平均して 2 年毎に入渠すると仮定すれば、出渠から入渠までの間の生物汚損による船速低下量は、Table 2.2, 2.3から 1.0 [knot/year] という値を用いて  $\mu_f = 2.0$  [knot] となる。また確率密度関数の形状から判断して  $\sigma_f^2 = 0.1$  [knot<sup>2</sup>] とする。

この生物汚損による船速低下の確率密度関数を Fig.2.13に示す。

#### (6) 波浪による船速低下

波浪による船速低下の確率密度関数は 2.1.4 節に示す方法を用いて計算する。

この確率密度関数を Fig.2.14に示す。

#### (7) 風による船速低下

風による船速低下の確率密度関数は 2.1.5 節に示す方法を用いて計算する。

この確率密度関数を Fig.2.15に示す。

#### (8) 海流による船速低下

海流による船速低下の統計的平均値  $\mu_{oc}$ 、統計的分散値  $\sigma_{oc}^2$  の決定を行う。

海流はその空間分布、流速分布が明らかでないため海流による船速の変化を精度良く推定することは困難である。しかし同じ航路を同じ載貨条件で往復航海すると仮定すれば、往航と復航で海流の影響は船速に対して正負対称となる。

この仮定の下で計算を行い、平均値は  $\mu_{oc} = 0$  [knot]、分散値は、海流による船速変化の確率密度関数の形状から  $\sigma_{oc}^2 = 0.05$  [knot<sup>2</sup>] とする。

この海流による船速低下の確率密度関数を Fig.2.16に示す。

## (9) 実海域における船速低下

実海域における船速低下の確率密度関数は 2.1.7 節に示す畳み込み積分を行うことにより求まる。

この実海域における船速低下の確率密度関数を Fig.2.17 に示す。

### 2.1.9 経年劣化と生物汚損による船速低下の平均値および分散値が船速低下の確率密度関数に及ぼす影響に関する考察

この節では経年劣化、生物汚損による船速低下の確率密度関数の平均値および分散値が、実海域中における船速低下の確率密度関数にどのような影響を及ぼすかを調べる。

経年劣化による船速低下の確率密度関数の平均値  $\mu_a$  を  $\mu_a = 0.25, 0.5, 1.0$  [knot] とした場合と経年劣化しない場合の 4 状態について、実海域中における船速低下の確率密度関数を求めた結果を Fig.2.18 に示す。

この結果から経年劣化の平均値  $\mu_a$  の違いが直接ピーク値を与える船速に影響することが分かる。

次に生物汚損による船速低下の確率密度関数の平均値  $\mu_f$ 、分散値  $\sigma_f^2$  を  $\mu_f = 1.0, 2.0$  [knot],  $\sigma_f^2 = 0.01, 0.10$  [knot<sup>2</sup>] とした場合と生物汚損がないとした場合の 5 状態について、実海域中における船速低下の確率密度関数を求めた結果を Fig.2.19 に示す。

この結果から平均値  $\mu_f$  の違いはピーク値を与える船速に影響する。分散値  $\sigma_f^2$  の違いは確率密度の値に影響するが、その影響は小さいことが分かる。

これらのことから、経年劣化しない場合、生物汚損がない場合の影響を調べるために次の 5 状態について実海域中における船速低下の確率密度関数を求める。

1. 経年劣化、生物汚損、波浪、風、海流による船速低下
2. 経年劣化、波浪、風、海流による船速低下
3. 生物汚損、波浪、風、海流による船速低下
4. 波浪、風、海流による船速低下
5. 波浪、風による船速低下

これら 5 つの確率密度関数を Fig.2.20 に示す。この結果から確率密度関数のピーク値が経年劣化、生物汚損により船速低下の大きな方に移動していくことが分かる。それは (2.1.75), (2.1.76) 式から経年劣化、生物汚損を表す確率密度関数のピークを与える船速の分だけ移動するためである。さらに海流による船速低下の平均値が 0 であることから、海流が船速低下量に与える影響は小さいことが分かる。



### 2.1.10 経年劣化による船速低下量に関する考察

経年劣化を調査した結果<sup>40)</sup>から経年劣化による船速低下量  $\delta V_a$  が時間  $t$  の 2 次式と 1 次式の組み合わせで近似される場合を考える。これを Fig.2.21 に示す。

$$\delta V_a = \begin{cases} \alpha_2 t^2 + \beta_2 t & (0 \leq t < t_0), \\ \beta_1 t + \gamma_1 & (t \geq t_0). \end{cases} \quad (2.1.82)$$

この確率密度関数  $p_a(\delta V_a)$  を次式で示す。

(i)  $0 \leq t < t_0$  のとき

$$\begin{aligned} p_a(\delta V_a) &= p(t) \frac{1}{\left| \frac{d(\delta V)}{dt} \right|}, \\ &= \begin{cases} \frac{1}{t} \frac{1}{\sqrt{\beta_2^2 + 4\alpha_2 \delta V}} & (0 \leq t < t_0), \\ 0 & (\text{otherwise}). \end{cases} \end{aligned} \quad (2.1.83)$$

(ii)  $t_0 \leq t$  のとき

$$\begin{aligned} p_a(\delta V_a) &= p(t) \frac{1}{\left| \frac{d(\delta V)}{dt} \right|}, \\ &= \begin{cases} C_a \frac{1}{t_0} \frac{1}{\sqrt{\beta_2^2 + 4\alpha_2 \delta V}} & (0 \leq t < t_0), \\ C_a \frac{1}{t - t_0} \frac{1}{\beta_1} & (\text{otherwise}). \end{cases} \end{aligned} \quad (2.1.84)$$

ここで  $C_a$  は  $\int_{-\infty}^{\infty} p(\delta V) d(\delta V) = 1$  より定まる次の係数である。

$$C_a = \frac{2t_0 \alpha_2 \beta_1}{\beta_1 \left( \sqrt{\beta_2^2 + 4t_0 \alpha_2} - \beta_2 \right) + 2t_0 \alpha_2}. \quad (2.1.85)$$

この関数の形状を Fig.2.22 に示す。ここで 120 型鉦石船の航海実績 (E 丸)<sup>40)</sup> から各係数を次の通り定める。

$$\begin{cases} t_0 = 6 & [\text{year}], \\ \alpha_2 = -0.024 & [\text{knot/year}^2], \\ \beta_2 = 0.37 & [\text{knot/year}], \\ \beta_1 = 0.039 & [\text{knot/year}], \\ \gamma_1 = 1.1 & [\text{knot}]. \end{cases}$$

さらに(2.1.83),(2.1.83)式から求まる経年劣化による船速低下の確率密度関数を Fig.2.22 に示す。さらに実海域中における船速低下の確率密度関数を、経年劣化を1次式で近似した場合と2次式と1次式の組み合わせで近似した場合とについて、船舶の就航後2年、10年、20年で求めた結果を Fig.2.23に示す。

この Fig.2.23から船舶の就航後10年で計算を行った場合に経年劣化を1次式で近似した場合と2次式と1次式の組み合わせで近似した場合との差が最も大きいことが分かる。これは Fig.2.21に示す経年劣化の時系列において、船速低下量の差が最も大きい箇所となっている。

### 2.1.11 生物汚損による船速低下量に関する考察

生物汚損による船速低下の確率密度関数は正規分布の累積分布関数を用いて(2.1.7)式と仮定した。これは生物汚損による船速低下量を表す直線は、出渠から入渠までの間毎回傾きが異なり、さらに出渠から入渠までの時間も異なることを考慮したものである。

本節では最初にこの仮定の妥当性を確認し、その後一入渠間隔での生物汚損による船速低下が直線で表されるのではなく2次式で表される場合の生物汚損による船速低下の確率密度関数について考察を行う。

生物汚損による船速低下の確率密度関数を正規分布の累積分布関数を用いて表現することの妥当性について数値シミュレーションして得られる確率密度関数と、(2.1.7)式の確率密度関数の比較を行う。

数値シミュレーションは、一入渠間隔での生物汚損による船速低下の確率密度関数を表す一様分布の平均値  $\mu_{f0}$  が統計的平均値  $\mu_f$  を中心に、ある統計的分散値  $\sigma_f^2$  をもって正規分布することを表現する。この数値シミュレーションを行った確率変数の分布と確率密度関数を Fig.2.24, 2.25に示す。

この結果、数値シミュレーションを行って得られる確率密度関数と(2.1.7)式の確率密度関数が良く一致することから(2.1.7)式の有効性を確認することができる。

次に、船舶の出渠から次の入渠までの一期間を考えたときに、汚損による船速低下量  $\delta V_f$  が時間  $t$  の2次式で近似される場合を考える<sup>17)</sup>。

$$\delta V_f = a_2 t^2 \quad (a_2 \geq 0). \quad (2.1.86)$$

この確率密度関数  $p_{f0}(\delta V_f)$  は次式で示される。

$$p_{f0}(\delta V_f) = \begin{cases} \frac{1}{2A\sqrt{a_2}} \frac{1}{\sqrt{\delta V_f}} & (0 \leq \delta V_f \leq a_2 A^2), \\ 0 & (\text{otherwise}). \end{cases} \quad (2.1.87)$$

この関数の形状を Fig.2.27に示す。

次に (2.1.6),(2.1.87) 式から、生物汚損による船速低下量は

$$p_f(\delta V_f) = \frac{1}{2A\sqrt{a_2}} \frac{1}{\sqrt{\delta V_f}} \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{\delta V_f - \mu_f}{\sqrt{2}\sigma_f} \right) \right\}, \quad (2.1.88)$$

と表現される。そこで船舶の出渠から次の入渠までの一期間の生物汚損による船速低下量を 1 次式で近似した場合と同様に、数値シミュレーションを行う。そしてこの確率密度関数と (2.1.88) 式とを比較したものを Fig.2.28に示す。ここで  $A = 2$  [year],  $a_2 = 0.75$  [knot/year<sup>2</sup>],  $\mu_f = 3$  [knot],  $\sigma_f^2 = 0.1$  [knot<sup>2</sup>] としている。

さらに (2.1.88) 式を用いて実海域中における船速低下の確率密度関数を求めた結果を Fig.2.29に示す。

この Fig.2.29から一般的な状態、すなわち Fig.2.26に示すように  $0 < \frac{a_1}{a_2} < A$  が成立する場合、2 次曲線近似した場合のほうが 1 次近似した場合より船速低下の幅が広がるため、全体の船速低下の確率密度関数の幅は広がる。また Fig.2.28を見て分かるように、2 次曲線近似した場合は 1 次近似した場合に比べ船速低下量が 0 に近いところで確率密度が大きくなるので、実海域中における船速低下の確率密度関数も船速低下量が小さいところで確率密度が大きくなる事が分かる。

## 2.1.12 波浪中自航要素に関する考察

自航要素（伴流係数： $1-w$ 、推力減少係数： $1-t$ 、プロペラ効率比： $\eta_R$ ）の値は、波浪中と平水中とで異なる。この影響が船速低下に与える影響を調べ、波浪中自航要素の変化量が波高に比例すると仮定した場合の船速低下について考察する。

最初に自航要素を求めるために必要なプロペラ単独特性について触れる。

穏やかな海象中のプロペラ単独特性の時間平均的な挙動は、プロペラの没水深度が十分あれば、平水中のプロペラ単独特性と一致することが示されている<sup>43)</sup>。

荒天中のプロペラ単独特性は平水中のプロペラ単独特性と異なるが、この場合に荒天中の自航要素を求めて、船速や馬力の推定を行うことが可能かが問題となる<sup>44)</sup>。また荒天中では船速の推定に必要な自航要素の議論よりも、船舶の安全性を議論することが重要であり、2.1.4 節に示した通り意識的減速の計算には自航要素は必要でない。

そこで自然減速を行う穏やかな海象を対象として、波浪中での自航要素の値が平水中での値から微小変化した場合の船速低下式を用いて、波高と船速低下量との関係を考察する。

この船速低下式を (2.1.90), (2.1.91) 式に示し、その導出は付録 B に示す。なお本節で

は付録 B とは異なり、船速の変化量  $\delta V$  は船速の減少を正とする。式で表せば

$$V = V_0 - \delta V \quad (\delta V : \text{低下を正}), \quad (2.1.89)$$

である。

(a) 繰り返し計算法

船速低下量  $\delta V$  は次式で表現される。

$$\begin{aligned} R_{AW}(V, \lambda) - V_0 \left( 2C_0V_0 + \frac{\tilde{w}_0 \tilde{t}_0 P_{TN} P_{QU}}{P_{QN} - r^2 \eta_{r0} \eta_t E_{QN}} - \tilde{w}_0 \tilde{t}_0 P_{TU} \right) \varepsilon_v \\ = \tilde{t}_0 \left\{ \frac{P_{TN}}{P_{QN} - r^2 \eta_{r0} \eta_t E_{QN}} (\varepsilon_\eta Q_{P0} - \tilde{w}_0 \varepsilon_w P_{QU} V_0) + (1 + \varepsilon_t) \tilde{w}_0 P_{TU} V_0 \right\} + \tilde{t}_0 \varepsilon_t T_{P0}, \end{aligned} \quad (2.1.90)$$

(b) 微分係数法

船速低下量  $\delta V$  は次式で表現される。

$$\begin{aligned} \delta V = - \frac{R_{AW}(V_0, \lambda)}{C_{PE} - C_{RV}} \left\{ 1 - \frac{C_{PE}}{C_{PE} - C_{RV}} (\varepsilon_w + \varepsilon_t) \right\} + \frac{\varepsilon_t \tilde{t}_0 T_{P0}}{C_{PE} - C_{RV}} + \frac{\varepsilon_w V_0 C_{RV}}{C_{PE} - C_{RV}} \\ - \frac{\varepsilon_\eta}{C_{PE} - C_{RV}} \frac{\tilde{t}_0 Q_{P0} P_{TN}}{r^2 \eta_{r0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} + \varepsilon_w V_0, \end{aligned} \quad (2.1.91)$$

$$C_{PE} = \tilde{w}_0 \tilde{t}_0 \left( P_{TU} + \frac{P_{QU} P_{TN}}{r^2 \eta_{r0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \right), \quad (2.1.92)$$

$$C_{RV} = \frac{\partial R_C}{\partial V} \Big|_{V=V_0} + \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \Big|_{V=V_0}. \quad (2.1.93)$$

(c) 波高と船速低下量との関係

波浪中の自航要素と波高との関係は中村, 細田, 内藤, 井上<sup>45)</sup> によって実験的に調べられている。

この論文<sup>45)</sup> 中で波浪中の伴流係数と静水中の伴流係数の比  $\frac{1-w}{1-w_0}$  と波高  $H$  との関係はおおよそ直線 ( $\frac{1-w}{1-w_0} = a_w H + 1$ ) で近似できることが実験的に示されている。この波浪中の伴流係数と静水中の伴流係数の比は

$$\frac{1-w}{1-w_0} = \frac{(1-w_0)(1+\varepsilon_w)}{1-w_0} = 1 + \varepsilon_w, \quad (2.1.94)$$

と変形できることから、伴流係数の平水中から波浪中への変化量  $\varepsilon_w$  が波高  $H$  の 1 乗に比例することが予想される。

そこで、 $\varepsilon_w, \varepsilon_t, \varepsilon_\eta$  が波高  $H$  の 1 乗に比例すると仮定した場合の船速低下量を求める。

波浪中平均抵抗増加は波高  $H$  の 2 乗に比例するので、

$$\begin{cases} R_{AW} = a_{AW}H^2, \\ \varepsilon_w = a_wH, \\ \varepsilon_t = a_tH, \\ \varepsilon_\eta = a_\eta H, \end{cases} \quad (2.1.95)$$

と表現し、 $R_{AW}\varepsilon_w$ ,  $R_{AW}\varepsilon_t$  の項を省略すると微分係数法による船速低下式 (2.1.91) 式は

$$\delta V = -\frac{1}{C_{PE} - C_{RV}} \left\{ a_{AW}H^2 + \left( -a_t\tilde{t}_0T_{P0} - a_wC_{RV}V_0 + a_\eta \frac{\tilde{t}_0Q_{P0}P_{TN}}{r^2\eta_{R0}\eta_tE_{QN} - P_{QN}} \right) H \right\} + a_wV_0H, \quad (2.1.96)$$

となり、波高の 2 乗と、波高の 1 乗に比例する船速低下量が求められる。

なお、繰り返し計算法による船速低下式 (2.1.90) 式は陰関数表示になっているので (2.1.96) 式の様には陽に表現することはできない。

また波浪中の自航要素については、その周波数依存性を含めてまだ不明な点が多いため、具体的に (2.1.96) 式を計算することはできない。

### 2.1.13 船速低下量の尺度影響に関する考察

実船と模型船とで力学的に相似な流れを実現させることを考える。このとき幾何学的に相似な模型を用いるが、複合する物理現象の全てを同時に相似にすることはできない。このため相似にできない現象について模型の縮尺に応じてでてくる影響を尺度影響と言う。そこで以下、船速低下量の尺度影響に関する考察を行う<sup>4)</sup>。

実海域での船速低下は 2.1.1 節で述べたように次の 5 つの要因から成り立っていると考える。

- (1) 経年劣化、(2) 生物汚損、(3) 波浪、(4) 風、(5) 海流

ここで経年劣化、生物汚損、海流による船速低下は、定量的な特性を知るための模型実験が行われるわけでもないので論じない。

波浪による船速低下は (2.1.44) 式で表される。この波浪による船速低下式は模型実験も行われ、理論と良く合致していると報告されている<sup>1)</sup>。

(2.1.44) 式の表現による尺度影響を検討するために、波浪中の自航要素は平水中の値と同じと仮定し、模型船の船速低下と実船の船速低下の比を取ったものを (2.1.97) 式に示す。

$$\frac{\delta \bar{V}_m}{\delta \bar{V}_s} \sim \frac{R_{AWm}}{R_{AWs} + R_{As}} \frac{\tilde{w}_s}{\tilde{w}_m} \frac{\tilde{t}_s}{\tilde{t}_m} \frac{\left( P_{TU} + \frac{P_{QU}P_{TN}}{r^2\eta_{R0}\eta_tE_{QN} - P_{QN}} \right)_s}{\left( P_{TU} + \frac{P_{QU}P_{TN}}{r^2\eta_{R0}\eta_tE_{QN} - P_{QN}} \right)_m}$$

$$\left\{ \frac{1 - \frac{\left( \frac{\partial R_C}{\partial V} \Big|_{V=V_0} + \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \Big|_{V=V_0} + \frac{\partial R_A}{\partial V} \Big|_{V=V_0} \right)_s}{\tilde{w}_s \tilde{t}_s \left( P_{TU} + \frac{P_{QU} P_{TN}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \right)_s}}{1 - \frac{\left( \frac{\partial R_C}{\partial V} \Big|_{V=V_0} + \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \Big|_{V=V_0} \right)_m}{\tilde{w}_m \tilde{t}_m \left( P_{TU} + \frac{P_{QU} P_{TN}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \right)_m}} \right\}. \quad (2.1.97)$$

ここで下付き添字の  $m$  は模型、 $s$  は実船を表す。また実船の抵抗増加  $R_{AW}$  は、風圧抵抗  $R_A$  を加えた ( $R_{AWs} + R_{As}$ ) としている。

この (2.1.97) 式から分かるように右辺第1項の波浪中抵抗増加の項は、ポテンシャル理論に基づく非定常造波抵抗であるので模型の縮尺だけで定まる。しかし厳密に言えば、波浪中の抵抗増加には小さいながら船首砕波や、船体表面上の変動流などによる抵抗増加もあり、ここに尺度影響は存在する。また風圧抵抗には尺度影響があるが、船速低下の模型実験では風を吹かせることはないので関係ない。

右辺第2項、第3項は自航要素の項であり、尺度影響を考える必要があるが、平水中の推進性能分野の研究成果を利用すればよい。

右辺第4項はプロペラ特性、主機特性の項である。プロペラ特性については、実船と模型とで相似な推進器を使えば、船速低下に関しては推進器の尺度影響はない。しかしながら主機の尺度影響は全く分かっていない。模型実験に使用するモーターに回転数一定や、トルク一定あるいは馬力一定の制御を施しても、それが実機との関係で正確かどうか分からない。ただ回転慣性モーメントについては検討されていて、模型実験時に使用するモーターの方が相対的に「強い」機関になっていることは知られている。

右辺第5項は自航要素の他、平水中の抵抗曲線の微分値の項を含むために平水中抵抗の大きな尺度影響がそのまま影響を及ぼすことになる。

この (2.1.97) 式は波浪中での自航要素の変化を無視したものであるが、これだけでも現在の研究段階では尺度影響を定量的に示すことは難しく、ましてや波浪中での自航要素の変化まで考えると非常に複雑になることが分かる。

波浪中船速低下の尺度影響に関する問題点を述べたが、以上の議論は耐航性能分野で線形の仮定が成り立つ比較的穏やかな海象についてのものである。荒れた海象ではさらに海水打ち込み、スラミング、プロペラ露出といった非線形性の強い現象が生じるが、これらの原因によって生じる船速低下についてその尺度影響を考えることは非常に難しい問題である。

### 2.1.14 実海域における実船性能の推定に関する考察

ここでは実海域での実船の船速低下推定の問題点について考察する。

(2.1.44) 式中には波浪中の抵抗増加や自航要素、プロペラ特性の項があり、これらの実海域での船舶性能の推定は次の手順で推定される。

1. 模型から実船への推定（平水中）
2. 平水中から波浪中への推定（模型）
3. 平水中の模型から波浪中の実船への推定

このうち推定の1,3の段階には模型から実船の推定を行うため尺度影響が存在する。また、推定の1,2の段階には計測に伴う誤差がある。そしてその誤差はある確率分布に従うと考えられる。

1,2は互いに独立であるので、確率論を用いれば3は1と2の結合確率分布となる。すると3についての誤差は、1による誤差と2による誤差の単なる代数和だけでなく、1と2の積の項も含まれることになる。このことを模式的に Fig.2.30に示す。

ここに示したとおり、実海域での実船の現象を把握するには模型から実船への推定の問題点を理解することが重要である。

### 2.1.15 風による操船に関する考察

船体の受ける相対風速が大きくなると船速は低下し、場合によっては舵が効かず操船不能となる。これを回避するため、船長は意識的に減速もしくは変針を行う。

このことを定量的に把握するため、絶対風速と船速を用いた操船の可能、不可能の領域を井上・石橋の方法<sup>46)</sup>を用いて調べる<sup>31)</sup>。操船可能の範囲は

$$\begin{cases} \frac{K}{100} \left( \frac{A_y/S}{A_r/S} \right)^{0.6} \leq 4 & : \frac{A_y/S}{A_r/S} < 100, \\ \frac{K}{100} \left( \frac{A_y/S}{A_r/S} \right)^{0.5} \leq 4 & : \frac{A_y/S}{A_r/S} \geq 100, \end{cases} \quad (2.1.98)$$

である。ここで

$$K = \frac{V_w}{V}, \quad (2.1.99)$$

$$\begin{cases} A_y : \text{喫水線上の側面投影面積,} \\ A_r : \text{舵の側面投影面積,} \\ S : \text{水線下の側面投影面積,} \\ V_w : \text{絶対風速,} \\ V : \text{船速,} \end{cases}$$

である。また、ここで言う操船可能とはあらゆる風向の風を受けた場合を考慮して、「舵角 35 度で左右に、しかも自由に操船できる」<sup>46)</sup>ことである。

次に SR-108 一軸コンテナ船型を使って、操船が可能な限界を調べる。 $A_y = 2500.0$  [m<sup>2</sup>],  $A_r = 32.5$  [m<sup>2</sup>] より、 $\frac{A_y}{A_r} = 76.9$  となるので、 $K = 4.5$  と求められ、このとき船速を  $V = 24.0$  [knot] とすれば、絶対風速は、 $V_w = KV = 55.6$  [m/s] となる。すなわち  $V_w > 55.6$  [m/s] のときに操船は不可能となる。

## 2.2 燃料消費量

船舶の実海域における性能について考えるには経済性の面から燃料消費量について調べることが必要となる。

そこで本節では 2.1 節に示した実海域における船速の推定法を用いて燃料消費量の推定を行う。

船舶の性能の低下は、船速について考えれば 2.1.1 節に示したように主に次の 5 つの要因

(1) 経年劣化、(2) 生物汚損、(3) 波浪、(4) 風、(5) 海流  
によって生じる。

これらを燃料の投入の立場から考えると

- (a) 燃料ハンドル一定の場合（経年劣化、生物汚損、波浪による自然減速、風、海流）
- (b) 燃料ハンドルを変化させる場合（波浪による意識的減速）
- (c) 意識的変針を行う場合（燃料ハンドル一定）

の 3 つ場合に分類することができる。

ここで (c) 意識的変針を行う場合は燃料ハンドル一定の状態であるが、意識的変針により航路長が延びることにより燃料消費量が増大するので、特別な取り扱いが必要である。

### 2.2.1 燃料ハンドル一定の場合

事象  $x$  と事象  $y$  の関係  $y = f(x)$  が求められたとき、事象  $y$  の確率密度関数  $p(y)$  は事象  $x$  の確率密度関数  $p(x)$  を用いて

$$p(y) = p(x) \frac{1}{\left| \frac{dy}{dx} \right|} = p(x) \frac{1}{|f'(x)|}, \quad (2.2.1)$$

と求められる。ただし  $y = f(x)$  は 1 つの  $x$  に対し 1 つの  $y$  が対応する関数である。

ここで船速と燃料消費量との関係について調べ、(2.2.1) 式から燃料消費量変化の確率密度関数を求める。



船舶が燃料ハンドル一定の状態です水中から実海域中へ移ったときの以下の諸量の変化量を、増加を正として記述すると

$$\left\{ \begin{array}{l} C_n = C_0 + \delta C_n \quad : \text{実海域中での燃料消費量,} \\ \Lambda_n = \Lambda_0 + \delta \Lambda_n \quad : \text{実海域中での単位時間当たりの燃料消費量,} \\ F_n = F_0 \quad : \text{実海域中での単位主機回転当たりの燃料消費量 (平水中の値と同一),} \\ N_{En} = N_{E0} + \delta N_{En} \quad : \text{実海域中での主機回転数,} \\ V_n = V_0 + \delta V_n \quad : \text{実海域中での船速,} \\ T_n = T_0 + \delta T_n \quad : \text{実海域中での航海時間,} \end{array} \right.$$

となる。下付き添字の 0 は平水中航行時の値を表す。

実海域中での燃料消費量の変化量  $\delta C_n$  は

$$C_n = \Lambda_n T_n, \quad (2.2.2)$$

$$\Lambda_n = F_0 N_{En}, \quad (2.2.3)$$

の関係を用いて

$$\begin{aligned} \delta C_n &= C_n - C_0 = \Lambda_n T_n - \Lambda_0 T_0 \\ &= F_0 (N_{E0} \delta T_n + T_0 \delta N_{En} + \delta N_{En} \delta T_n) \\ &= F_0 T_0 \left( N_{E0} \frac{\delta T_n}{T_0} + \delta N_{E0} + \delta N_{E0} \frac{\delta T_n}{T_0} \right) \\ &= F_0 T_0 \left\{ N_{E0} \frac{\delta T_n}{T_0} + \delta N_{E0} \left( 1 + \frac{\delta T_n}{T_0} \right) \right\}, \end{aligned} \quad (2.2.4)$$

と表せる。

ここで航海距離  $L$  が一定の条件

$$L = V_0 T_0 = V_n T_n, \quad (2.2.5)$$

を代入することにより

$$V_0 \delta T + T_0 \delta V + \delta V \delta T = 0, \quad (2.2.6)$$

となる。ゆえに

$$\frac{\delta T_n}{T_0} = -\frac{\delta V_n}{V_0 + \delta V_n}, \quad (2.2.7)$$

となるので (2.2.4) 式は次式となる。

$$\delta C_n = F_0 T_0 \left( -N_{E0} \frac{\delta V_n}{V_0 + \delta V_n} + \delta N_{E0} \frac{V_0}{V_0 + \delta V_n} \right). \quad (2.2.8)$$

ここで船速と主機回転数の関係は付録 B に示す通り自航要素が平水中と波浪中とで変化しないとすると

$$\begin{aligned}\delta N_{En} &= r \frac{P_{QU}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \tilde{w}_0 \delta V_n \\ &\equiv A_n \delta V_n,\end{aligned}\quad (2.2.9)$$

であるので (2.2.14) 式は次式となる。

$$\delta C_n = F_0 T_0 \frac{(A_n V_0 - N_{E0})}{V_0 + \delta V_n} \delta V_n. \quad (2.2.10)$$

ここで平水中航海時間  $T_0$  が分からないときは両辺を  $T_0$  で割って

$$\delta \hat{\Lambda}_n = F_0 \frac{(A_n V_0 - N_{E0})}{V_0 + \delta V_n} \delta V_n, \quad (2.2.11)$$

と表現すればよい。ただし  $\delta \hat{\Lambda}_n$  は

$$\delta \hat{\Lambda}_n \equiv \frac{\delta C_n}{T_0} = \delta \Lambda_n + \Lambda_0 \frac{\delta T_n}{T_0}, \quad (2.2.12)$$

で定義される量である。(付録 C.3 参照)

よって単位時間当たりの燃料消費量の変化  $\delta \Lambda_n$  は

$$\begin{aligned}\delta \Lambda_n &= \delta \hat{\Lambda}_n + \Lambda_0 \frac{\delta V_n}{V_0 + \delta V_n}, \\ &= \frac{F_0 (A_n V_0 - N_{E0}) + \Lambda_0}{V_0 + \delta V_n} \delta V_n,\end{aligned}\quad (2.2.13)$$

となる。そしてこの燃料の変化量の確率密度関数は (2.2.1) 式より

$$p(\delta \Lambda_n) = \frac{f V_0}{(f + \delta \Lambda_n)^2} p(\delta V_n), \quad (2.2.14)$$

$$f = F_0 (A_n V_0 - N_{E0}) + \Lambda_0, \quad (2.2.15)$$

となる。

## 2.2.2 燃料ハンドルを変化させる場合の燃料消費量の変化

意識的減速を行う場合は燃料ハンドルを変化させて、1 回転当たり主機に投入する燃料を制限することで船速を低下させる。

このときの燃料消費量の変化は、試運転で計測された船速  $V$  と単位時間当たりの燃料消費量  $\Lambda$  の関係<sup>2)</sup>を 3 次の B スプライン曲線を用いて近似する。この近似した結果を Fig.2.31 に示す。

そしてこの近似曲線を用いて意識的減速後の船速  $V_{nd}$  が求められたときの単位時間当たりの燃料消費量  $\Lambda_{nd}$  を求める。

### 2.2.3 意識的変針を行う場合の燃料消費量の変化

意識的変針を行う場合は、燃料ハンドル一定で航行するが、変針により航路長が増大することにより目的地までの到着時間が遅れるので、その影響を含めた扱いが必要となる。そこで船速について定式化を行ったのと同様に Fig.2.32を参考にして説明を行う。

$\overline{AD}$  間を航行するとき、意識的変針を行ったことによる航海時間の増加率は  $T_{AC} = T_{CB} = T_1$  より

$$\frac{T_{AD}}{T_{AC}} = \frac{T_1 V_1 \sec \Theta}{V_2'} = \frac{V_1}{V_2'} \sec \Theta, \quad (2.2.16)$$

である。このときの主機馬力は 2.3.3 節より  $P_2' = P_0 + \delta P_2'$  なので  $\overline{AD}$  間を航行するとき、単位時間当たりの燃料消費量  $\Lambda_c'$  は

$$\Lambda_c' = \Lambda_0 \frac{V_1}{V_2'} \sec \Theta (P_0 + \delta P_2'), \quad (2.2.17)$$

となる。

同様に  $\overline{DB}$  間を航行するとき、単位時間当たりの燃料消費量  $\Lambda_c''$  は

$$\Lambda_c'' = \Lambda_0 \frac{V_1}{V_2''} \sec \Theta (P_0 + \delta P_2''), \quad (2.2.18)$$

となる。

以上から  $\overline{ADB}$  間を航行するとき、単位時間当たりの燃料消費量  $\Lambda_c$  は航行時間に関して平均化すれば

$$\Lambda_c = \frac{T_{AD}\Lambda_c' + T_{DB}\Lambda_c''}{T_{AD} + T_{DB}} = \frac{\Lambda_2' V_2'' + \Lambda_2'' V_2'}{V_2' + V_2''}, \quad (2.2.19)$$

となる。

燃料消費量の変化量  $\delta\Lambda_{nc}$  は次式となる。

$$\delta\Lambda_{nc} = \frac{\Lambda_2' V_2'' + \Lambda_2'' V_2'}{V_2' + V_2''} - \Lambda_0. \quad (2.2.20)$$

### 2.2.4 燃料消費量変化の計算

燃料消費量変化の計算は船速低下の計算結果を用いて行う。

経年劣化、生物汚損、風、海流による燃料消費量変化の確率密度関数は (2.2.14) 式から船速低下の確率密度関数を用いて求まる。

波浪による燃料消費量の変化量  $\delta\Lambda_{wave}$  は 2.1.4 節の結果から短期海象毎に船舶の航行している状態、すなわち自然減速のみしている状態、意識的減速をしている状態、意識

的変針をしている状態のいずれの状態であるかが分かる。短期海象毎の燃料消費量の変化量は自然減速のみを行う場合の燃料消費量の変化量  $\delta\Lambda_n$  は (2.2.14) 式、意識的減速を行う場合の燃料消費量の変化量  $\delta\Lambda_{nd}$  は Fig.2.31、意識的変針を行う場合の燃料消費量の変化量  $\delta\Lambda_{nc}$  は (2.2.20) 式から求まる。よって波浪による燃料消費量変化の確率密度関数  $p_{wave}(\delta\Lambda_{wave})$  は 2.1.4 節と同様にして求まる。

これら経年劣化、生物汚損、波浪、風、海流による燃料消費量変化の確率密度関数を Fig.2.33から Fig.2.37に示す。

実海域における燃料消費量変化の確率密度関数は、経年劣化、生物汚損、波浪、風、海流による燃料消費量変化を互いに独立と仮定すれば、この5つの燃料消費量変化の確率密度関数を順番に畳み込み積分することにより求まる。

$$\delta\Lambda = \delta\Lambda_a + \delta\Lambda_f + \delta\Lambda_{wave} + \delta\Lambda_{wind} + \delta\Lambda_{oc}, \quad (2.2.21)$$

$$p(\delta\Lambda) = p_a * p_f * p_{wave} * p_{wind} * p_{oc}. \quad (2.2.22)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta\Lambda_a : \text{経年劣化による燃料消費量変化量,} \\ p_a : \text{経年劣化による燃料消費量変化の確率密度関数,} \\ \delta\Lambda_f : \text{生物汚損による燃料消費量変化量,} \\ p_f : \text{生物汚損による燃料消費量変化の確率密度関数,} \\ \delta\Lambda_{wave} : \text{波浪による燃料消費量変化量,} \\ p_{wave} : \text{波浪による燃料消費量変化の確率密度関数,} \\ \delta\Lambda_{wind} : \text{風による燃料消費量変化量,} \\ p_{wind} : \text{風による燃料消費量変化の確率密度関数,} \\ \delta\Lambda_{oc} : \text{海流による燃料消費量変化量,} \\ p_{oc} : \text{海流による燃料消費量変化の確率密度関数.} \end{array} \right.$$

ここで単位時間単位主機馬力当たりの燃料消費量  $\Gamma_0$  は

$$\Gamma_0 = 148.0 \text{ [gr./ (hr.} \cdot \text{PS)]}, \quad (2.2.23)$$

であり、その時の主機馬力  $P_{EHP0}$  は

$$P_{EHP0} = 19000.0 \text{ [PS]}, \quad (2.2.24)$$

である。

これから単位時間当たりの燃料消費量  $\Lambda_0$  は

$$\Lambda_0 = \Gamma_0 P_{EHP0} = \frac{1}{\eta} \Gamma_0 P_{EHP0} = 3408.5 \text{ [kg/hr.]}, \quad (2.2.25)$$

となる。

## 2.3 主機馬力

船舶の実海域における性能について考えるとき、実海域における船速を補償するために用いられてきた主機馬力に対するシーマージンについて調べるために、実海域における主機馬力の推定を行う。

主機馬力の変化を生じる要因を2.2節と同様に、船舶の性能の低下を燃料の投入の立場から考えて

- (a) 燃料ハンドル一定の場合（経年劣化、生物汚損、波浪による自然減速、風、海流）、
- (b) 燃料ハンドルを変化させる場合（波浪による意識的減速）、
- (c) 意識的変針を行う場合（燃料ハンドル一定）

の3つ場合に分類する。そして2.1節に示した実海域における船速の推定法を用いて主機馬力の推定を行う。

### 2.3.1 燃料ハンドル一定の場合

船速と主機馬力の関係は付録Bに示す通り自航要素が平水中と波浪中とで変化しないとすると

$$\begin{aligned}\delta P_{EHPn} &= \frac{2\pi}{75} (Q_{P0} + r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} N_{P0}) \frac{P_{QU}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \tilde{w}_0 \delta V, \\ &\equiv B_n \delta V,\end{aligned}\tag{2.3.1}$$

である。

この主機馬力の変化量の確率密度関数は、(2.2.1)式より次式となる。

$$p(\delta P_{EHPn}) = \frac{1}{B_n} p(\delta V).\tag{2.3.2}$$

### 2.3.2 燃料ハンドルを変化させる場合の主機馬力の変化

意識的減速を行う場合は2.2.2節と同様に船速と主機馬力の関係が試運転で計測されているので<sup>2)</sup>それを3次のBスプライン曲線を用いて近似する。この近似した結果をFig.2.31に示す。

ここで主機馬力が制動馬力  $P_{BHP}$  で計測されているのでそれを有効馬力  $P_{EHP}$  に換算する。

$$P_{EHP} = \eta P_{BHP} = \eta_t \eta_H \eta_0 \eta_R P_{BHP},\tag{2.3.3}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta : \text{推進効率,} \\ \eta_t : \text{伝達効率,} \\ \eta_H : \text{船殻効率,} \\ \eta_0 : \text{プロペラ単独効率,} \\ \eta_R : \text{プロペラ効率比.} \end{array} \right.$$

そしてこの近似曲線を用いて意識的減速後の船速  $V_{nd}$  が求められたときの主機馬力  $P_{EHPnd}$  を求める。

### 2.3.3 意識的変針を行う場合の主機馬力の変化

意識的変針を行う場合の主機馬力を見掛けの主機馬力を用いて表示する。

見掛けの主機馬力  $P_2$  を

$$P_2 \equiv \frac{T_{AD}P'_2 + T_{DB}P''_2}{T_{AD} + T_{DB}}, \quad (2.3.4)$$

と定義すると、 $T_{AC} = T_{CB} = T_1$  より

$$T_{AD} = T_1 V_1 \sec \Theta \frac{1}{V'_2}, \quad (2.3.5)$$

$$T_{DB} = T_1 V_1 \sec \Theta \frac{1}{V''_2}, \quad (2.3.6)$$

であるので、 $\overline{ADB}$  間を航行するとき見掛けの主機馬力  $P_2$  は航行時間に関して平均化すれば

$$P_2 = \frac{T_{AD}P'_2 + T_{DB}P''_2}{T_{AD} + T_{DB}} = \frac{P'_2 V''_2 + P''_2 V'_2}{V'_2 + V''_2}, \quad (2.3.7)$$

となる。

見掛けの主機馬力変化量  $\delta P_{EHPnc}$  は次式となる。

$$\delta P_{EHPnc} = \frac{P'_2 V''_2 + P''_2 V'_2}{V'_2 + V''_2} - P_0. \quad (2.3.8)$$

### 2.3.4 主機馬力変化の計算

主機馬力変化の計算は船速低下の計算結果を用いて行う。

経年劣化、生物汚損、風、海流による主機馬力変化の確率密度関数は (2.3.2) 式から船速低下の確率密度関数を用いて求まる。

波浪による主機馬力の変化量  $\delta P_{wave}$  は 2.1.4 節の結果から短期海象毎に船舶の航行している状態、すなわち自然減速のみしている状態、意識的減速をしている状態、意識的

変針をしている状態のいずれの状態であるかが分かる。短期海象毎の主機馬力の変化量は自然減速のみを行う場合の主機馬力の変化量  $\delta P_{EHPn}$  は (2.3.2) 式、意識的減速を行う場合の主機馬力の変化量  $\delta P_{EHPnd}$  は Fig.2.31、意識的変針を行う場合の主機馬力の変化量  $\delta P_{EHPnc}$  は (2.3.8) 式から求まる。よって波浪による燃料消費量変化の確率密度関数  $p_{wave}(\delta P_{wave})$  は 2.1.4 節と同様にして求まる。

経年劣化、生物汚損、波浪、風、海流による主機馬力変化の確率密度関数を Fig.2.39 から Fig.2.43 に示す。

実海域における主機馬力変化の確率密度関数は、経年劣化、生物汚損、波浪、風、海流による主機馬力変化を互いに独立と仮定すれば、この 5 つの主機馬力変化の確率密度関数を順番に畳み込み積分することにより求まる。

$$\delta P = \delta P_a + \delta P_f + \delta P_{wave} + \delta P_{wind} + \delta P_{oc}, \quad (2.3.9)$$

$$p(\delta P) = p_a * p_f * p_{wave} * p_{wind} * p_{oc}. \quad (2.3.10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \delta P_a : \text{経年劣化による主機馬力変化量,} \\ p_a : \text{経年劣化による主機馬力変化の確率密度関数,} \\ \delta P_f : \text{生物汚損による主機馬力変化量,} \\ p_f : \text{生物汚損による主機馬力変化の確率密度関数,} \\ \delta P_{wave} : \text{波浪による主機馬力変化量,} \\ p_{wave} : \text{波浪による主機馬力変化の確率密度関数,} \\ \delta P_{wind} : \text{風による主機馬力変化量,} \\ p_{wind} : \text{風による主機馬力変化の確率密度関数,} \\ \delta P_{oc} : \text{海流による主機馬力変化量,} \\ p_{oc} : \text{海流による主機馬力変化の確率密度関数.} \end{array} \right.$$

有効馬力  $P_{EHP}$  と制動馬力  $P_{BHP}$  の関係を求めるために推進効率  $\eta$  の推定を行う。プロペラ単独効率  $\eta_0$  は Fig.2.8 に示すプロペラオープンチャートから求める。

推進効率  $\eta$  は

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_0 = 0.67 : \text{プロペラ単独効率,} \\ \eta_t = 1.0 : \text{伝達効率,} \\ \eta_H = 1.232 : \text{船殻効率,} \\ \eta_R = 1.0 : \text{プロペラ効率比,} \end{array} \right.$$

であるので

$$\eta = \eta_t \eta_H \eta_0 \eta_R = 0.825, \quad (2.3.11)$$

となる。

## 2.4 実船の航海実績

実船の航海実績は日本造船研究第 108 部会<sup>47)48)</sup>で行われた実船試験の結果を用いる。

この実船試験は SR-108 一軸コンテナ船と同型のコンテナ船 6 隻（箱根丸、榛名丸、あめりか丸、ごうるでんげいとぶりっじ、加州丸、ジャパンエース）が PSW 航路を 9 往復航海したデータである。

### 2.4.1 航海実績の項目

日本造船研究第 108 部会<sup>47)48)</sup>で行われた実船試験の計測項目は次の 3 つの項目に分けることができる。

#### 1. 船舶の状態

排水量、喫水（船首、船尾）、メタセンター高さ、ガバナーインデックス、燃料ノッチ、針路、舵角

#### 2. 船舶の性能

平均船速（対地船速、対水船速）、燃料消費量（燃料消費率）、主機馬力（制動馬力）、主機回転数、縦揺角、縦揺周期、横揺角、横揺周期、船首揺角、上下加速度（船首部）、左右加速度（船首部）、見掛けスリップ比

#### 3. 海気象

風速、風向、風波の波高、風波の波向、うねりの波高、うねりの平均波周期、うねりの波向、風力階級、風浪階級、うねり階級

ただしこれらのデータは全ての航海で計測されているとは限らない。

本計算で用いた船速は 9 往復航海、燃料消費量は 6 往復航海、主機馬力は 2 往復航海のデータである。

この航海実績には 1 日毎の平均値が記されているのでその値を読みとり、性能  $x$  に関する頻度分布を求め、面積が 1 になるようにすれば性能  $x$  の確率密度関数  $p(x)$  が得られる。

一例として燃料消費量の航海実績とその頻度分布を Fig.2.45 に示す。なおこの航海実績の横軸はデータ番号であるが、同型船の航海実績を適当につなげたものである。

### 2.4.2 航海実績と理論との比較

理論推定値の有効性を確認するため航海実績から得られる確率密度関数と本章で理論的に推定した確率密度関数との比較を行う。



船速について航海実績の確率密度関数と理論推定した確率密度関数を Fig.2.17に、燃料消費量については Fig.2.38に、主機馬力については Fig.2.44にそれぞれ示す。

これらの結果から実海域中での船舶性能の理論推定法は船速、燃料消費量、主機馬力の航海実績をいずれも良く表しており、このことから本理論推定手法の有効性を確認することができる。

## 2.5 第2章のまとめ

1. 実海域中における船舶性能として船速、燃料消費量、主機馬力を取り上げ、その推定を確率論を用いて行った。確率密度関数を用いて実海域中の船舶性能を表現した結果は、航海実績から求められる性能の確率密度関数と良く合い、実海域における船舶の性能を理論的に推定する本手法の有効性が確かめられた。
2. 波浪中自航要素を考慮した船速低下、主機回転数、主機馬力の計算式を導き、波高との関係を明らかにした。その結果から波高の1乗に比例する船速低下量の存在が示された。
3. 波浪による船速低下の推定に意識的操船（意識的減速、意識的変針）を考慮した手法を開発し、船長は最短航海時間の条件の下で操船判断を行うとして計算を行った。

## 第3章 実海域性能の評価手法

船舶性能の評価は商慣習上、静穏海域中で行われる試運転時に契約速度を達成したかどうかで判断される。このことが船舶性能の定義とその評価法が未成熟である一つの原因となっている<sup>49)</sup>。

高い技術力を持った造船所では高性能の船舶を建造することが可能であり、同時に高性能の船舶を建造することによる建造技術の評価もされるべきである。

そのためにも船舶性能の評価法を確立し、高性能の船舶を建造するための指針を得ることが必要である。

本章では第2章で理論的に推定することが可能となった船舶性能の確率密度関数を用いて船舶性能の評価を行う。

そして従来船舶の設計の際に用いられてきた主機馬力に対するシーマージンについても、船速の立場から考察を行う。

### 3.1 確率論に基づく評価法

船舶の就航後、計画速力の維持が不可能になると運航者は荷主からクレームをつけられることになる。実海域中の船舶の性能推定を行うことの必要性はこの性能低下をどう評価するかにある<sup>50)</sup>。

性能評価を行うにあたっては、性能を表す確率密度関数の形状の違いを表す尺度を導入し、性能を定量的に表すことが重要になる。以下この点について述べる。

#### 3.1.1 性能評価点数による評価

性能評価は以下の手順で行う。ただし

|   |  |            |
|---|--|------------|
| { | 確率変数 (random variable)                     | : $x$      |
|   | 船舶性能の確率密度関数 (probability density function) | : $p(x)$   |
|   | 性能評価関数 (performance evaluation function)   | : $f_p(x)$ |
|   | 性能評価値 (performance evaluation value)       | : $F_p$    |
|   | 性能評価点数 (performance evaluation score)      | : $S_c$    |

とする。

確率密度関数  $p(x)$  と重み関数である性能評価関数  $f_p(x)$  を用いて、次式で性能評価値  $F_p$  を定義する。

$$F_p \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f_p(x)p(x)dx. \quad (3.1.1)$$

この性能評価値は性能の良い船舶は値が小さく、性能が悪い船舶は値が大きくなる評価指標で、規格化していないため性能評価値の示す数字からは性能の良否が判定できない。そのため相対的な評価指標となっている。このままでは性能の良否が感覚的に分かり難いので、100点満点で点数付けする指標を考える。

性能が計画通りで性能低下の全く無い状態を100点、いかなる場合も性能が発揮されず最悪な場合を0点とする。

そこで性能評価値  $F_p$  をその最大値  $F_{pmax}$  で規格化し、性能評価点数  $S_c$  [score] を

$$S_c \equiv 100 \left\{ 1 - \frac{1}{F_{pmax}} \int_{-\infty}^{\infty} f_p(x)p(x)dx \right\}, \quad (3.1.2)$$

と定義する。

性能評価関数  $f_p(x)$  に  $n$  次式を用いれば性能評価点数  $S_c$  は  $n$  次モーメントの関数となるが、性能評価点数に狭義の統計量である2次までのモーメント（平均値、分散値）を含めたい場合には性能評価関数に2次式を選べばよい。また性能評価点数に  $n$  次モーメント ( $n \rightarrow \infty$ ) を含めたい場合には

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-x)^n}{n!}, \quad (3.1.3)$$

の関係から性能評価関数を指数関数とすればよい。

そこで以下性能評価関数が2次式の場合、指数関数の場合の2通りの場合について性能評価点数を調べる。

### 3.1.2 性能評価関数

#### (i) 2次関数

性能評価関数  $f_p$  を性能  $x$  に関する2次式

$$f_p(x) = a_p x^2 + b_p x + c_p, \quad (3.1.4)$$

で表すことを考える。

性能評価関数の形状は、

1. 計画値  $x_0$  からのずれが大きいほど性能低下が大きい
2. 計画値では性能低下が無い
3. 計画値を上回ればその分性能が向上する

ことを表現するものである。

この条件は

$$\left\{ \begin{array}{l} 1. a_p \geq 0 \text{ (関数は下に凸)} \\ \quad f_p(x) \geq 0 \quad : (0 \leq x \leq x_0) \\ 2. f_p(x_0) = 0 \\ 3. f_p(x) \leq 0 \quad : x_0 \leq x \leq x_{max} \end{array} \right.$$

である。

さらに

$$\left\{ \begin{array}{l} 4. \text{性能の最大到達値で極小値となる} \\ \quad \left. \frac{df_p}{dx} \right|_{x=x_{max}} = 0 \end{array} \right.$$

の条件を付加すると性能評価関数が定まる。ただし  $x_{max}$  は性能の最大到達値である。

この性能評価関数  $f_p(x)$  と性能評価値  $F_p$  は

$$f_p(x) = a_p \{(x - x_{max})^2 - (x_{max} - x_0)^2\}, \quad (3.1.5)$$

$$F_p = a_p \{\sigma_x^2 + \mu_x^2 + 2x_{max}(x_0 - \mu_x)\}, \quad (3.1.6)$$

となる。ただし (3.1.6) 式から定数項  $-a_p x_0^2$  は除いてある。また性能評価値の最大値  $F_{pmax}$  は

$$F_{pmax} = 2a_p x_{max} x_0, \quad (3.1.7)$$

であるので、(3.1.2) 式から性能評価点数  $S_c$  は

$$S_c = 100 \left\{ 1 - \frac{\sigma_x^2 + \mu_x^2 + 2x_{max}(x_0 - \mu_x)}{2x_{max}x_0} \right\}, \quad (3.1.8)$$

となる。

この性能評価点数は平均値  $\mu_x$ 、分散値  $\sigma_x^2$  と性能の最大到達値  $x_{max}$ 、計画値  $x_0$  を含んだモデルとなっており (3.1.8) 式で示すようにそれらの値が性能評価点数  $S_c$  の中に陽の形で含まれているため、その値を低減させる方針が立てやすいことにある。

## (ii) 指数関数

性能評価関数  $f_p$  を性能  $x$  に関する指数関数

$$f_p(x) = \alpha_p e^{-\beta_p x} + \gamma_p, \quad (3.1.9)$$

で表すことを考える。

性能評価関数の形状は、

- $$\left\{ \begin{array}{l} 1. \text{ 計画値 } x_0 \text{ からのずれが大きいほど性能の低下が大きい} \\ 2. \text{ 計画値では性能の低下が無い} \\ 3. \text{ 計画値を上回れば性能の低下が軽減される} \end{array} \right.$$

ことを表現するものである。

この条件は

- $$\left\{ \begin{array}{l} 1, 3. \alpha_p \geq 0 \text{ and } \beta_p \geq 0 \quad (\text{単調減少関数}) \\ 2. f_p(x_0) = 0 \end{array} \right.$$

である。

この性能評価関数  $f_p(x)$  と性能評価値  $F_p$  は

$$f_p(x) = \alpha_p(e^{-\beta_p x} - e^{-\beta_p x_0}), \quad (3.1.10)$$

$$F_p = \alpha_p M_x(-\beta_p), \quad (3.1.11)$$

となる。ただし (3.1.11) 式から定数項  $-\alpha_p e^{-\beta_p x_0}$  は除いてある。また性能評価値の最大値  $F_{pmax}$  は

$$F_{pmax} = \alpha_p, \quad (3.1.12)$$

であるので、(3.1.2) 式から性能評価点数  $S_c$  は

$$S_c = 100\{1 - M_x(-\beta_p)\}, \quad (3.1.13)$$

となる。

ここで  $M_x$  は積率母関数 (Moment Generating Function) であり次式で表される。

$$M_x(\xi) = \int_{-\infty}^{\infty} e^{\xi x} p(x) dx = E[e^{\xi x}]. \quad (3.1.14)$$

なお積率母関数の特徴は

$$M_x(\xi)^{(n)} = \int_{-\infty}^{\infty} x^n e^{\xi x} p(x) dx = E[x^n e^{\xi x}], \quad (3.1.15)$$

$$M_x(0)^{(n)} = E[x^n], \quad (3.1.16)$$

である。

この性能評価点数は  $n$  次モーメントによって表現されている。この  $n$  次モーメントを表すものが積率母関数である。この意味から性能評価点数に指数関数を用いると確率密度関数の形状の特性を全て含むことになる。

なお  $a_p, \alpha_p$  は倍率を表すパラメータ、 $\beta_p$  は減衰の強さを表すパラメータであり、今回の計算では  $\beta_p = 1$  としている。これらの性能評価関数の形状の一例を Fig.3.2に示す。

## 3.2 シーマージンに対する考察

シーマージン  $SM$  [%] は次式で定義される。

$$SM = 100 \frac{P - P_0}{P_0}. \quad (3.2.1)$$

ただし

$P$  : 航海速力を維持するのに必要な馬力,

$P_0$  : 新造時に静水中を設計船速で航行するのに必要な馬力,

である。

船舶の建造前に実海域を航行する船舶の性能を推定することは困難であったため、あらかじめ船主がシーマージンを指定することで搭載主機の選定が行われてきた。そしてシーマージンに相当する分、主機馬力を嵩上げすることにより船速、燃料消費量に対して補償が行われてきた。しかしこのシーマージンの値は経験的に定められたものであり、合理的に定められた値ではない。

また運航の立場からは船速の推定が必要であり、現在のシーマージンの考え方では、船速の問題は搭載主機の馬力の問題となっている。

そこで以下馬力に対するシーマージンと船速維持率の関係を調べる。

まず 15 % シーマージンを考慮して設計した場合とシーマージンを考慮しない場合とで 2.1 節に示した方法で船速の確率密度関数  $p(V)$  を求め、船速維持率  $Q(V \geq V_k)$  を次式で求める。

$$Q(V \geq V_k) = 1 - P(V \geq V_k) = 1 - \int_0^{V_k} p(V) dV. \quad (3.2.2)$$

この 10 年間 PSW 航路を航行した場合について船速維持率を求めた結果を Fig.3.5 に、20 年間航行した場合の結果を Fig.3.6 に示す。

この結果から 10 年間で船速 20 [knot] を維持する確率は、15 % シーマージンで設計した場合には 60 %、シーマージンを考慮しない場合は 40 % となる。また 20 年間で船速 20 [knot] を維持する確率は、15 % シーマージンで設計した場合には 50 %、シーマージンを考慮しない場合は 25 % となり、その差に 2 倍の差があることが分かる。

次に航路を PSW (Pacific—South West coast) 航路と PNW (Pacific—North West coast) 航路に選び、そのときの船速の確率密度関数を求めた。この結果を Fig.3.7 に示す。これから船速維持率の立場では 20 [knot] 程度まで両者に大きな差は見られないが、船速低下の大きな所で PNW 航路を航行する方が船速維持率が低いことが分かる。

### 3.3 船舶の総合評価への応用

船舶の性能を定義する場合に最も重要なことは、その評価手法と評価項目を何に選ぶかである。

船舶性能の総合評価を考えたとき、その評価の方法には総合評価を行う項目に点数付けを行い、それをレーダーチャートで表現してその形状で評価する方法、各項目に重みづけを行い、それらの和や積の大小で評価を行う方法、無差別曲線による評価<sup>51)</sup>がある。そしていずれの場合も実海域における船舶の性能評価を行った結果が必要となる。

次に総合評価を行う項目はいくつか考えられるが、項目の選択、その評価指標については今後検討が必要である。

もし総合評価を行う項目とその評価指標が定めれば、これらの項目と船舶に与えられた任務<sup>52)</sup>を考慮して総合評価を行うことが考えられる。

また従来は船速、燃料消費量に対してシーマージンという概念を用いて主機馬力の立場から補償が行われていた。しかし本手法を用いて、船舶性能の評価を行えば実海域中での船舶の性能（船速、燃料消費量）を総合評価の項目に含めることができ、船舶性能の総合評価をより合理的に行うことが可能となる。

またこのような船舶性能の評価法を精度良いものにしていくためには長期間にわたる実海域航行のデータが必要である。そのために最低限必要なデータは

1. 船速
2. 燃料消費量
3. 載貨状態（もしくは喫水）
4. 位置
5. 海気象データ（有義波高, 平均波周期, 波向, 風速, 風向）
6. 海流（空間分布、流速分布）

であり、このようなデータ収集システムを作ることが望まれる。

### 3.4 船舶の総合評価項目に対する考察

総合評価を行う項目については今後、さらに検討を行う必要があるが、658 隻の船舶の要目を用いてクラスター分析を行った結果<sup>53)</sup>によれば船舶の基本的な特徴は船舶の大きさ、船舶の速力の2つの主成分でほとんど決定される。

また交通機関に関する総合評価は、交通機関の価値が時間を節約することにあると考えて試みられているが<sup>51)</sup>、輸送機関としての船舶の総合評価については評価項目、評価指標を何に選ぶかという議論が未成熟のため明確になっていないのが現状である<sup>54)</sup>。

そこで輸送機関としての船舶の総合評価項目と評価指標について考察を行う。  
総合評価項目として

- 1. 輸送能力
- 2. 船速
- 3. 経済性
- 4. 安全性
- 5. 操縦性
- 6. 耐航性

の6つの項目を提案する。その評価指標は

- 1. 載荷重量
- 2. 実海域中の船速に関する性能評価点数
- 3. 船価と燃料費
- 4. 復原性基準  $C$  値に関する評価指数
- 5.  $K, T$  指数に関する評価指標
- 6. 船体動揺に関する評価指標

である。

1. 輸送能力の評価指標は、船舶に搭載できる荷物量を表す載荷重量が考えられる。
2. 船速の評価指標は本章で示した性能評価点数であり、この性能評価点数による評価法は実海域を長期間航行するときの船速の確率密度関数を用いるため設計値、最高到達値などあらゆる情報が含まれ、性能の評価を行うのに適している。
3. 経済性評価指標には、年間運航費用、年間収益、資本回収率の3つがよく用いられる<sup>51)</sup>。

船舶の経済性を考えるとき、タンカーや鉱石輸送船などの原材料輸送船では年間運航費用の最小化が求められ、コンテナ船などの製品輸送船では年間利益の最大化が求められる。そのため船舶の目的に応じて評価指標を選定する必要がある。

以下にその計算方法を示す。

(A) 年間運航費用を単位輸送トン・海里で表した単位運航費用は次式で計算する。

$$(\text{単位運航費用}) = \frac{(\text{年間運航費用})}{(\text{年間輸送量 } [DW \cdot NM])} \quad (3.4.1)$$

(B) 年間収益は次式で計算する。

$$(\text{年間収益}) = (\text{年間運賃収入}) - (\text{年間運航費用}). \quad (3.4.2)$$



(C) 資本回収率は次式で計算する。

$$(\text{資本回収率}) = \frac{(\text{年間粗利益})}{(\text{船価})}. \quad (3.4.3)$$

ここで年間粗利益は、資本費を除いた年間費用を年間運賃収入から差し引いたものである。また船価には船舶の建造費に若干の付帯費用を加える。

ここで、これら3つの評価指標のうち何を用いるかによって経済性評価の結果は異なったものになるが、いずれかの指標を選ぶにせよ船価と燃料費が必要である。すなわち A, B では年間運航費用に船価と燃料費が含まれ、C では年間粗利益に燃料費が含まれる。

ここで燃料費の推定には実海域を航行する船舶の燃料消費量の推定が必要となる。そこで第2章で示した実海域を長期間航行するときの燃料消費量の確率密度関数  $p(\Lambda)$  から、燃料費  $C_F$  を求めると

$$C_F = \int_{-\infty}^{\infty} p(\Lambda) \Lambda T d\Lambda = T \mu_{\Lambda}, \quad (3.4.4)$$

となる。ここで  $\Lambda$  は単位時間当たりの燃料消費量、 $T$  は総航行時間、 $\mu_{\Lambda}$  は実海域中での燃料消費量の平均値である。

この実海域を航行することを考慮した燃料費を用いて経済性の評価を行えば良い。

4,5,6 に対する評価指標は明確でない。これらの評価指標については何を選ぶかは今後の検討が望まれるが、以下に方針を記す。

4. 安全性の評価指標は復原性の良否を表す  $C$  値を考慮した評価指標が考えられる。
5. 操縦性の評価指標は旋回性の良否を表す  $K$  指数（旋回力指数）、操舵に対する追従性、針路安定性の良否を示す  $T$  指数（追従性・針路安定性の指数）を考慮した評価指標が考えられる。
6. 耐航性の評価指標は乗り心地の観点から船体動揺を考慮した評価指標が考えられる。

### 3.5 第3章のまとめ

- 1 実海域を航行する船舶の性能を、船舶性能の確率密度関数を用いて点数化して評価する手法の提案を行った。
- 2 実海域における船舶性能の評価を行うとき、確率論の立場から望ましい評価法は性能評価関数に指数関数を用いたものであり、設計を行う立場からは性能評価関数に2次関数を用いても良いということが明らかとなった。
- 3 従来波浪に対する設計余裕として用いられてきた馬力に対するシーマージンと船速との関係を調べ、シーマージンの持つ意味を定量的に明らかにした。そして就航期

間、就航航路とともにある船速を維持する確率を与えれば、そのときに必要なシーマージンが定まることを示した。

- 4 船舶性能の評価を精度良く行うために長期間にわたって収集が望まれるデータを示した。
- 5 実海域性能を考慮した船舶性能の総合評価について指針と今後検討が必要な項目について示した。

## 第4章 実海域性能の長期予測法への応用

船舶が長期間にわたって実海域を航行するとき、あらかじめその性能を推定することは重要な問題である。

従来船舶の分野で行われている方法に福田によって示された長期予測法<sup>5)</sup>がある。この福田法と呼ばれる方法は計算の対象とする現象により次の2種類に分類される。

- (a) 長期にわたる数多くの航海中に著しく航海性能の損なわれる航海状態の累積時間が全航海時間に対してどの程度の割合になるかを予測する計算法
- (b) 船の一生の間の長期にわたる応答の長期分布を予測する計算法

(a) は海水打ち込み、スラミング、プロペラ露出といった航海中で船舶が耐えることができる性能、すなわち耐航性能に関する予測を行い、(b) は波浪曲げモーメント、船体動揺加速度、相対水位変動といった船体応答に関する予測を行う。

これらの計算法をそれぞれ (a) 耐航性能長期予測法と (b) 船体応答長期予測法と呼ぶことにする。

本章ではこの福田法について問題点を示し、それに対する考察を行う<sup>55)56)57)</sup>。

### 4.1 福田による長期予測法

#### (a) 耐航性能長期予測法

長期累積確率  $Q_q$  は次式で計算される。

$$Q_q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \int_{H_s(q)}^{\infty} p_w(H, T) p^*(\theta) dH dT d\theta. \quad (4.1.1)$$

これは波浪発現確率を短期海象が存在する時間の確率と考えて、航海性能の損なわれる短期海象の確率を足し合わせる計算となっている。

#### (b) 船体応答長期予測法

長期累積確率  $Q_q$  は次式で計算される。

$$Q_q = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} p_w(H, T) q(H, T, \theta) p^*(\theta) dH dT d\theta. \quad (4.1.2)$$

これは長期間にわたる船体応答の超過確率の期待値を予測する計算法となっている。

ここで

$$\left\{ \begin{array}{ll} H & : \text{有義波高,} \\ T & : \text{平均波周期,} \\ \theta & : \text{船舶の針路と不規則波の主方向（波向）とのなす角,} \\ p^*(\theta) & : \theta \text{ の発現確率,} \\ H_s(q) & : \text{限界有義波高,} \\ q(H, T, \theta) & : \text{限界確率,} \\ p_w(H, T) & : \text{波浪発現確率,} \\ Q_q & : \text{長期累積確率,} \end{array} \right.$$

である。

## 4.2 長期予測法の問題点

長期予測法にはその仮定や精度の点で以下の検討されなければならない問題点がある。

- $$\left\{ \begin{array}{l} 1. \text{ 波浪統計資料（有義波高、平均波周期、波向）の精度} \\ 2. \text{ 短期波高分布の仮定} \\ 3. \text{ 船速一定の仮定} \end{array} \right.$$

これらの問題点について次節以降順番に調査、検討を行う。

### 4.2.1 波浪統計資料の精度による影響

長期予測計算を行うときに用いる波浪統計資料の精度の問題がある。この波浪統計資料は船舶から目視で観測された波高（有義波高）、平均波周期、波向によって記されたものであり、必ず観測誤差が含まれている。そこで、海象状態を  $N$  件調査して長期波浪発現確率を作成した後、さらに1件調査して長期波浪発現確率を作成することを考える。この両者の相違を調べることにより、波浪統計資料の精度が長期予測値に及ぼす影響を調べる<sup>55)</sup>。

このことは以下のように表現できる。有義波高と平均波周期に関して、ある短期海象中  $(H_i, T_j)$  の波浪発現確率  $p_w(H_i, T_j)$  が  $p_w(H_i, T_j) + \alpha$  になったとする。この  $\alpha$  を加えた新しい波浪発現確率を  $p'_w(H, T)$  とする。

$$p'_w(H, T) = \left\{ \begin{array}{ll} \frac{1}{1 + \alpha} \{p_w(H_i, T_j) + \alpha\} & (H = H_i \text{ かつ } T = T_j) , \\ \frac{1}{1 + \alpha} p_w(H, T) & (\text{otherwise}) . \end{array} \right. \quad (4.2.1)$$

デルタ関数を用いて表現すれば

$$p'_w(H, T) = \frac{1}{1 + \alpha} \{p_w(H, T) + \alpha \delta(H - H_i, T - T_j)\}, \quad (4.2.2)$$

となる。

この  $p'_w(H, T)$  を用いた長期累積確率を  $Q'_q$  とする。

(a) 耐航性能長期予測法

$Q'_q$  は (4.1.1) 式を用いて

$$\begin{aligned} Q'_q &= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{H_s(q)}^\infty p'_w(H, T) p^*(\theta) dH dT d\theta, \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{H_s(q)}^\infty \frac{1}{1 + \alpha} \{p_w(H, T) + \alpha \delta(H - H_i, T - T_j)\} p^*(\theta) dH dT d\theta, \\ &= \frac{1}{1 + \alpha} \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{H_s(q)}^\infty p_w(H, T) p^*(\theta) dH dT d\theta \right. \\ &\quad \left. + \alpha \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{H_s(q)}^\infty \delta(H - H_i, T - T_j) p^*(\theta) dH dT d\theta \right\}, \end{aligned} \quad (4.2.3)$$

となる。ここで  $\int_0^\infty \int_0^\infty \delta(H - H_i, T - T_j) dH dT = 1$  であるので

$$Q'_q = \begin{cases} \frac{1}{1 + \alpha} \left\{ Q_q + \alpha \int_0^{2\pi} p^*(\theta) d\theta \right\} & (H_i \geq H_s(q)), \\ \frac{Q_q}{1 + \alpha} & (H_i < H_s(q)), \end{cases} \quad (4.2.4)$$

となり、さらに  $\int_0^{2\pi} p^*(\theta) d\theta = 1$  であるので

$$Q'_q = \begin{cases} \frac{1}{1 + \alpha} (Q_q + \alpha) & (H_i \geq H_s(q)), \\ \frac{Q_q}{1 + \alpha} & (H_i < H_s(q)), \end{cases} \quad (4.2.5)$$

となる。ここで  $\alpha \ll 1$  なので  $\frac{1}{1 + \alpha} = 1 - \alpha + O(\alpha^2)$  と冪級数展開すれば

$$Q'_q = \begin{cases} Q_q + \alpha(1 - Q_q) + O(\alpha^2) & (H_i \geq H_s(q)), \\ (1 - \alpha)Q_q + O(\alpha^2) & (H_i < H_s(q)), \end{cases} \quad (4.2.6)$$

となる。

(b) 船体応答長期予測法

$Q'_q$  は (4.1.2) 式を用いて

$$Q'_q = \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty p'_w(H, T) q(H, T, \theta) p^*(\theta) dH dT d\theta,$$

$$\begin{aligned}
&= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{1}{1+\alpha} \{p_w(H, T) + \alpha\delta(H - H_i, T - T_j)\} q(H, T, \theta) p^*(\theta) dH dT d\theta, \\
&= \frac{1}{1+\alpha} \left\{ \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty p_w(H, T) q(H, T, \theta) p^*(\theta) dH dT d\theta \right. \\
&\quad \left. + \alpha \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty \delta(H - H_i, T - T_j) q(H, T, \theta) p^*(\theta) dH dT d\theta \right\}, \\
&= \frac{1}{1+\alpha} \left\{ Q_q + \alpha \int_0^{2\pi} q(H_i, T_j, \theta) p^*(\theta) d\theta \right\}, \tag{4.2.7}
\end{aligned}$$

となる。ここで  $\alpha \ll 1$  なので幕級数展開すれば

$$\begin{aligned}
Q'_q &= \{1 - \alpha + O(\alpha^2)\} \left\{ Q_q + \alpha \int_0^{2\pi} q(H_i, T_j, \theta) p^*(\theta) d\theta \right\}, \\
&= Q_q + \alpha \left\{ \int_0^{2\pi} q(H_i, T_j, \theta) p^*(\theta) d\theta - Q_q \right\} + O(\alpha^2), \tag{4.2.8}
\end{aligned}$$

となる。

同様に波向を考慮する場合は、ある波向の発現確率  $p^*(\theta_k)$  に確率  $\beta$  を加える。この  $\beta$  を加えた波向の発現確率を  $p^{*'}(\theta)$  とする。

$$p^{*'}(\theta) = \frac{1}{1+\beta} \{p^*(\theta) + \beta\delta(\theta - \theta_k)\}, \tag{4.2.9}$$

である。

この  $p^{*'}(\theta)$  を用いた長期累積確率を  $Q''_q$  とする。

#### (a) 耐航性能長期予測法

$Q''_q$  は (4.1.1) 式を用いて

$$\begin{aligned}
Q''_q &= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{H_s(q)}^\infty p_w(H, T) p^{*'}(\theta) dH dT d\theta, \\
&= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_{H_s(q)}^\infty p_w(H, T) \frac{1}{1+\beta} \{p^*(\theta) + \beta\delta(\theta - \theta_k)\} dH dT d\theta, \\
&= \frac{1}{1+\beta} \left\{ Q_q + \beta \int_0^\infty \int_{H_s(q)}^\infty p_w(H, T) dH dT \right\}, \tag{4.2.10}
\end{aligned}$$

となる。ここで  $\beta \ll 1$  なので幕級数展開して

$$\begin{aligned}
Q''_q &= \{1 - \beta + O(\beta^2)\} \left\{ Q_q + \int_0^\infty \int_{H_s(q)}^\infty p_w(H, T) dH dT \right\}, \\
&= Q_q + \beta \left\{ \int_0^\infty \int_{H_s(q)}^\infty p_w(H, T) dH dT - Q_q \right\} + O(\beta^2), \tag{4.2.11}
\end{aligned}$$

となる。

(b) 船体応答長期予測法

$Q_q''$  は (4.1.2) 式を用いて

$$\begin{aligned} Q_q'' &= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty p_w(H, T) q(H, T, \theta) p^{*'}(\theta) dH dT d\theta, \\ &= \int_0^{2\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty p_w(H, T) q(H, T, \theta) \frac{1}{1+\beta} \{p^*(\theta) + \beta\delta(\theta - \theta_k)\} dH dT d\theta, \\ &= \frac{1}{1+\beta} \left\{ Q_q + \beta \int_0^\infty \int_0^\infty p_w(H, T) q(H, T, \theta_k) dH dT \right\}, \end{aligned} \quad (4.2.12)$$

となる。ここで  $\beta \ll 1$  なので冪級数展開して

$$\begin{aligned} Q_q'' &= \{1 - \beta + O(\beta^2)\} \left\{ Q_q + \beta \int_0^\infty \int_0^\infty p_w(H, T) q(H, T, \theta_k) dH dT \right\}, \\ &= Q_q + \beta \left\{ \int_0^\infty \int_0^\infty p_w(H, T) q(H, T, \theta_k) dH dT - Q_q \right\} + O(\beta^2), \end{aligned} \quad (4.2.13)$$

となる。

有義波高と平均波周期に関する波浪統計資料の精度が船体応答の長期予測値に及ぼす影響の計算

計算は船体応答に中央断面での波浪縦曲げモーメントと波浪水平曲げモーメントを選び、SR108 一軸コンテナ船が PSW (Pacific South-West coast) 航路を設計船速  $V_0 = 24.0$  [knot] で航行する状態で行う。

中央断面での波浪縦曲げモーメントの周波数振幅応答関数を Fig.4.1 に波浪水平曲げモーメントの周波数振幅応答関数を Fig.4.2 に示す。そして短期海象の観測 100,000 件のうちの 1 件に相当する確率  $\alpha = 10^{-5}$  を用いて  $Q_q = 10^{-8}$  の状態で長期予測値の感度  $\frac{Q_q'}{Q_q}$  の計算を行い、その結果を波浪縦曲げモーメントは Table 4.2 に示し、波浪水平曲げモーメントは Table 4.4 に示す。

次に波向分布  $p^*(\theta)$  を利用した次式

$$\sigma^2 = \int_0^{2\pi} \sigma^2(\theta) p^*(\theta) d\theta, \quad (4.2.14)$$

から計算した中央断面での波浪縦曲げモーメントの分散値を Fig.4.3 に、中央断面での波浪水平曲げモーメントの分散値を Fig.4.4 に示す。

これらの結果から分散値が最大となる短期海象の箇所 ( $H_v, T_v$ ) で長期予測値の感度  $\frac{Q_q'}{Q_q}$  は最大となることが分かる。

ここで波浪縦曲げモーメントと波浪水平曲げモーメントに対する長期予測値の感度  $\frac{Q_q'}{Q_q}$  に差が生じていることは、波浪縦曲げモーメントと波浪水平曲げモーメントの分散値の大きさが異なることから説明できる。

## 波向に関する波浪統計資料の精度が船体応答の長期予測値に及ぼす影響の計算

船体応答の長期予測に用いられる、船上で目視観測された波向分布の精度を調べるため(4.2.13)式の計算を行う。

計算は船体応答として中央断面での波浪縦曲げモーメントと波浪水平曲げモーメントを選び、SR108 一軸コンテナ船がPSW (Pacific South-West coast) 航路を設計船速  $V_0 = 24.0$  [knot] で航行する状態で行う。

波浪縦曲げモーメントと波浪水平曲げモーメントについて、波向の観測 100,000 件のうちの 1 件に相当する確率  $\beta = 10^{-5}$  を用いて  $Q_q = 10^{-8}$  の状態で長期予測値の波向に対する感度  $\frac{Q_q''}{Q_q}$  の計算を行った結果を波浪縦曲げモーメントは Table 4.3 に、波浪水平曲げモーメントは Table 4.5 に示す。

この結果から波向の精度が長期予測値に及ぼす影響は小さいことが分かるが、この波向の中でも船体応答の分散値が最も大きくなる波向が長期予測値により大きな影響を与えることが分かり、その波向の観測がより重要となる。

### 4.2.2 短期波高分布の違いによる影響

船体応答の短期予測はレーリー確率密度関数を用いて行われる。これは海洋波の短期波高分布がレーリー確率密度関数に従うこと、海洋波に対して船体応答が線形であることを仮定している。しかし海洋波の観測結果から、波高の高いところで短期波高分布がレーリー確率密度関数からずれていることが指摘され<sup>58)59)</sup>、同時に波高の高いところで海洋波に対して船体応答が線形では無いことから、短期波高分布の仮定の違いによって船体応答の長期予測値が異なる。

そこで本節では、波高の高いところを含めて海洋波の観測結果と良い一致を示すクレスト・トゥ・トラフ波高分布<sup>58)59)</sup>を取り上げ、レーリー確率密度関数と比較することによって波浪の非線形性が船体応答の長期予測値に与える影響を調べる<sup>56)</sup>。

海洋波の瞬時値が正規確率過程に従い、角周波数  $\omega_0$  を中心とする狭帯域な現象と仮定すれば、正側の極値、負側の極値はそれぞれレーリー確率密度関数に従う。このレーリー確率密度関数  $p_R$  は

$$p_R(A) = \frac{A}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{A^2}{2\sigma^2}\right), \quad (4.2.15)$$

で表される。ここで波高  $H$  は正側の極値分布と負側の極値分布が同一であることから  $H = 2A$  と定義される。また確率密度関数の面積が 1 であることを用いて波高の分布は

$$p_R(H) = \frac{H}{4\sigma^2} \exp\left(-\frac{H^2}{8\sigma^2}\right), \quad (4.2.16)$$



となる。

しかし実際の海洋波は正側の極値分布と負側の極値分布が同一ではなく、その波高は隣り合う山  $A_1(t)$  と谷  $A_2(t + \tau)$  の足し合わせ

$$H = A_1(t) + A_2(t + \tau), \quad (4.2.17)$$

で定義される。そして海洋波が角周波数  $\omega_0$  を中心とする狭帯域な現象であると仮定すると、波高の分布は次式で示されるクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数  $p_{CT}$  となる。

$$p_{CT}(H, \tau) = \frac{1}{\sigma^4 - r_0(\tau)^2} \int_0^H (H - x)x I_0 \left[ \frac{(H - x)x r_0(\tau)}{\sigma^4 - r_0(\tau)^2} \right] \exp \left[ -\frac{(H - x)^2 + x^2}{2\{\sigma^4 - r_0(\tau)^2\}} \sigma^2 \right] dx. \quad (4.2.18)$$

ここで波の山と谷を平均化した振幅  $A = \frac{H}{2}$  に関するクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数は次式で表される。

$$p_{CT}(A, \tau) = \frac{16}{\sigma^4 - r_0(\tau)^2} \int_0^A (A - x)x I_0 \left[ \frac{4(A - x)x r_0(\tau)}{\sigma^4 - r_0(\tau)^2} \right] \exp \left\{ -2\sigma^2 \frac{(A - x)^2 + x^2}{\sigma^4 - r_0(\tau)^2} \right\} dx. \quad (4.2.19)$$

ここで

$$\left\{ \begin{array}{l} H = A_1(t) + A_2(t + \tau) : \text{波高,} \\ \omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} : \text{中心角周波数,} \\ T_0 : \text{平均波周期,} \\ \sigma^2 = \int_0^\infty S(\omega) d\omega : \text{波の分散,} \\ r_0(\tau)^2 = \rho(\tau)^2 + \lambda(\tau)^2 : \text{相関係数,} \\ \rho(\tau) = \int_0^\infty S(\omega) \cos \{(\omega - \omega_0)\tau\} d\omega, \\ \lambda(\tau) = \int_0^\infty S(\omega) \sin \{(\omega - \omega_0)\tau\} d\omega, \\ I_0(x) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{x \cos \phi} d\phi : \text{0 次の第 1 種変形ベッセル関数,} \end{array} \right.$$

である。このクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数の特徴は周期依存性、すなわちパラメータに  $\tau$  が含まれることである。

この山と谷との時間間隔  $\tau$  は確率密度関数  $p(\tau)$  に従うが、ここでは  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$  を中心とする狭帯域な現象と仮定しているので

$$\tau = \frac{T_0}{2} = \frac{\pi}{\omega_0}, \quad (4.2.20)$$

と定める。このとき  $\tau = \tau(\omega_0)$  である。

ここで波浪スペクトラムとしてピアソン・モスコビッツ型を用いる場合には

$$S(\omega) = 0.11H_v^2 \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-5} \exp\left\{-0.44\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4}\right\}, \quad (4.2.21)$$

ただし  $H_v$ : 目視観測波高,

であるので、相関パラメータ  $\rho, \lambda$  は

$$\rho(\omega_0) = \int_0^\infty 0.11H_v^2 \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-5} \exp\left\{-0.44\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4}\right\} \cos\left\{(\omega - \omega_0)\frac{\pi}{\omega_0}\right\} d\omega, \quad (4.2.22)$$

$$\lambda(\omega_0) = \int_0^\infty 0.11H_v^2 \frac{1}{\omega_0} \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-5} \exp\left\{-0.44\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^{-4}\right\} \sin\left\{(\omega - \omega_0)\frac{\pi}{\omega_0}\right\} d\omega, \quad (4.2.23)$$

となる。ここで  $\frac{\omega}{\omega_0} = w$  と変数変換を行えば

$$\rho(\omega_0) = \int_0^\infty 0.11H_v^2 w^{-5} \exp(-0.44w^{-4}) \cos\{(w-1)\pi\} dw = \rho(H_v), \quad (4.2.24)$$

$$\lambda(\omega_0) = \int_0^\infty 0.11H_v^2 w^{-5} \exp(-0.44w^{-4}) \sin\{(w-1)\pi\} dw = \lambda(H_v), \quad (4.2.25)$$

となり、相関係数  $r_0 = \sqrt{\rho^2 + \lambda^2}$  は波高  $H_v$  のみの関数となり中心角周波数  $\omega_0$  の関数では無くなることが分かる。

このことと (4.2.20) 式から波浪スペクトラムにピアソン・モスコビッツ型を用いると、クレスト・トゥ・トラフ確率密度関数が平均波周期  $T_0$  の変化に関係しない関数になることが分かる。

そしてピアソン・モスコビッツ型の波浪スペクトラム (4.2.21) 式を用いて相関係数  $r_0$  の計算を行うと  $r_0 = 0.68$  と一定値になる。

#### 短期波高分布が船体応答の長期予測値に及ぼす影響の計算

レーリー確率密度関数  $p_R$  とクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数  $p_{CT}$  の形状を Fig.4.5 に示す。

このレーリー確率密度関数とクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数 ( $r_0 = 0.68$ ) について  $1/N$  最大波高を求めたものを Table4.1に示す。

また波浪スペクトラムの標準偏差  $\sigma$  で正規化した波高  $\frac{H}{\sigma}$  に対するレーリー確率密度関数の超過確率  $q_R$  とクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数 ( $r_0 = 0.68$ ) の超過確率  $q_{CT}$  を Fig.4.6に示す。

計算は、SR108 一軸コンテナ船が、PSW (Pacific South-West coast) 航路を設計船速  $V_0 = 24.0$  [knot] 航行する状態で行う。

中央断面での波浪縦曲げモーメントと波浪水平曲げモーメントについてレーリー確率密度関数とクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数の両方で長期予測を行った結果を Fig.4.7 と Fig.4.8にそれぞれ示す。

この短期波高分布を従来のレーリー確率密度関数とした場合と、波浪の非線形性を良く表現するクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数とした場合との長期予測値を比較することで、波浪の非線形性が長期予測値に及ぼす影響は小さいことが分かる。

### 4.2.3 船速分布を考慮した長期予測法の提案

長期予測の計算は船速一定の仮定の下で行われているが、実海域における船舶は船速を低下させて航行している。このことを考慮して長期予測を行う必要があるが、従来検討が行われたのは波浪により船速が低下することのみ考慮して長期予測を行ったもの<sup>60)</sup>、船速に関する就航実績を統計的に処理して長期予測を行ったもの<sup>61)</sup>であり、実海域における船速低下が長期予測値に及ぼす影響についての理論的検討は行われていない。

そこで本節では第 2 章の結果から理論的に求まる実海域における船速の分布を用いた長期予測法の提案を行い、船速低下を生じさせる要因が長期予測値にどの程度影響を与えるか調べる<sup>57)</sup>。

船速の低下が船体応答に及ぼす影響を海象状態に依存しないもの、海象状態に依存するものの 2 つに分類する。

- |   |                        |
|---|------------------------|
| { | (i) 船速低下量が短期海象に関係しないもの |
|   | — 経年劣化、生物汚損、風          |
| { | (ii) 船速低下量が短期海象に関係するもの |
|   | — 波浪                   |

ここで海流によって海面と船体との相対流速は変化しないので本節での船体応答の長期予測法では海流の影響は考慮しない。

#### (i) 船速低下量が短期海象に関係しない場合

船速低下量が短期海象に関係しないので、船速が低下する影響だけを考慮すればよい。

船速一定の状態で求めた長期累積確率  $Q_q(V_0)$  から (i) の状態で船速の低下を考慮して求めた長期累積確率を引いた長期累積確率の変化量  $\delta Q_{v1}$  は次式となる。

$$\delta Q_{v1} = Q_q(V_0) - \int_0^{\infty} p_a(V)Q_q(V)dV - \int_0^{\infty} p_f(V)Q_q(V)dV - \int_0^{\infty} p_{wind}(V)Q_q(V)dV, \quad (4.2.26)$$

- |   |                 |                       |
|---|-----------------|-----------------------|
| { | $p_a(V)$ :      | 経年劣化により低下する船速の確率密度関数, |
|   | $p_f(V)$ :      | 生物汚損により低下する船速の確率密度関数, |
|   | $p_{wind}(V)$ : | 風により低下する船速の確率密度関数.    |

## (ii) 船速低下量が短期海象に関係する場合

船速低下量が短期海象に関係すると同時に、船体応答も短期海象に関係するので、船速一定の状態では求めた長期累積確率  $Q_q(V_0)$  から (ii) の状態で船速の低下を考慮して求めた長期累積確率を引いた長期累積確率の変化量  $\delta Q_{v2}$  は次式となる。

(a) 耐航性能長期予測法の場合

$$\delta Q_{v2} = Q_q(V_0) - \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \int_{H_s(q;V)}^{\infty} p_w(H,T) p^*(\theta) dH dT d\theta. \quad (4.2.27)$$

限界有義波高  $H_s(q;V)$  に船速低下の影響が含まれる。

(b) 船体応答長期予測法の場合

$$\delta Q_{v2} = Q_q(V_0) - \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} p_w(H,T) q(H,T,\theta;V) p^*(\theta) dH dT d\theta. \quad (4.2.28)$$

超過確率  $q(H,T,\theta;V)$  に船速低下の影響が含まれる。

(i) と (ii) から求まる長期累積確率の変化量  $\delta Q_{v1}$ ,  $\delta Q_{v2}$  を用いて、船速を考慮した長期累積確率  $Q_v$  は

$$Q_v = Q_q(V_0) - \delta Q_{v1} - \delta Q_{v2}, \quad (4.2.29)$$

と求められる。

## 船速低下が船体応答の長期予測値に及ぼす影響の計算

計算は、船体応答として波浪縦曲げモーメントと波浪水平曲げモーメントを選び、SR108 一軸コンテナ船で、PSW (Pacific South-West coast) 航路を設計船速  $V_0 = 24.0$  [knot] で航行する状態で行う。

実海域における船速低下を考慮して長期予測を行った結果を Fig.4.9 と Fig.4.11 に示す。そして実海域における船速低下を生じさせる要因が長期予測値に与える影響を Fig.4.10 と Fig.4.12 に示す。

この結果から経年劣化、生物汚損、波浪、風によって船速が低下し、同時に長期予測値も変化することが定量的に分かる。そして波浪によって船速が低下することが長期予測値に大きな影響を与えることが分かる。

## 4.3 第4章のまとめ

- 1 波浪統計資料に記されている短期海象発現確率の精度が船体応答の長期予測値に及ぼす影響を調べた。その結果、長期予測値に最も大きな影響を及ぼす短期海象の箇所は船体応答の最も大きい短期海象の所である。

- 2 海洋波の非線形性を考慮して長期予測を行うために短期波高分布を波浪の非線形性を良く表現するクレスト・トゥ・トラフ確率密度関数として船体応答の長期予測を行った。その結果から波浪の非線形性の影響が船体応答の長期予測値に与える影響は小さいことが明らかとなった。
- 3 実海域中で船速が低下することを考慮して長期予測を行った。その結果、経年劣化、生物汚損、波浪、風による船速の低下が長期予測値がどの程度影響を与えるか明らかとなり、同時に波浪による船速低下が長期予測値に大きな影響を与えことが分かった。

## 第5章 結論

本研究は実海域を航行する船舶の性能の把握を目的としたものである。

船舶は実海域、すなわち波浪、風、海流が存在する自然環境中を経年劣化、生物汚損を生じさせながら航行する。そしてこのとき船速、燃料消費量、主機馬力に代表される船舶性能は絶えず変化している。この実際に船舶の運航する状態での船舶性能の合理的かつ精度良い把握を目的として本研究を行った。

本研究の結果得られた結論を以下に纏めて示す。

- 1 船速を低下させる要因を経年劣化、生物汚損、波浪、風、海流の5つに分類し、それぞれの要因によって生ずる船速低下量の確率密度関数を推定した。そしてこの確率密度関数を用いて実海域中における船舶性能（船速、燃料消費量、主機馬力）の理論的推定を行った。その結果は船速、燃料消費量、主機馬力のいずれについても航海実績から求めた確率密度関数と良く合い、本理論推定法の有効性が確かめられた。
- 2 波浪中自航要素を考慮した船速低下、主機回転数、主機馬力の計算式を導き、波高との関係を明らかにした。その結果から波高の1乗に比例する船速低下量の存在が示された。
- 3 波浪による船速低下の推定に意識的操船（意識的減速、意識的変針）を考慮した手法を開発し、船長は最短航海時間の条件の下で操船判断を行うとして計算を行った。
- 4 実海域における船舶性能の推定法によって得られる確率密度関数を用いて船舶性能の点数化を行い、船舶性能を評価する手法を明らかにした。その結果から、確率論の立場から望ましい評価法は性能評価関数に指数関数を用いたものであり、設計を行う立場からは性能評価関数に2次関数を用いても良いということが明らかとなった。
- 5 従来波浪に対する設計余裕として用いられてきた馬力に対するシーマージンと船速との関係を調べ、シーマージンの持つ意味を定量的に明らかにした。そして就航期間、就航航路とともにある船速を維持する確率を与えれば、そのときに必要なシーマージンが定まることを示した。
- 6 実海域における船舶性能の評価法を利用した船舶の総合評価について指針を示した。

- 7 長期予測を行うときの波浪統計資料の精度について検討を行った。その結果、長期予測値に最も大きな影響を及ぼす短期海象の箇所は船体応答の最も大きい短期海象の所であり、そのとき長期予測値に与える影響が定量的に明らかとなった。
- 8 従来長期予測に用いられてきたレーリー確率密度関数と異なる短期波高分布を仮定した場合に、その短期波高分布の超過確率を知ることにより従来のレーリー確率密度関数を用いた長期予測値から異なるかについて検討を行った。その結果から短期波高分布の超過確率と長期予測値との関係を明らかにし、短期波高分布の違いは長期予測値に大きな影響を与えないことが分かった。
- 9 従来船速一定の条件下で行われてきた長期予測法に対して、実海域における船速の確率密度関数を用いることによって、実際に船速を低下させながら航行する状態での長期予測を行った。その結果、経年劣化、生物汚損、波浪、風による船速の低下が長期予測値がどの程度影響を与えるか明らかとなり、同時に波浪による船速低下が長期予測値に大きな影響を与えことが分かった。

本研究は実海域における船舶性能を保証することについて新しい道を拓くものである。この新しい道は、波の無い状態での船舶性能を保証する従来の方法とは違い、船舶の性能は時間と空間、すなわち就航期間、就航航路に依存して示される。このことから就航期間、就航航路に応じて最適な船舶の設計が可能となり、効率的な運航計画が可能となる。同時に船舶の性能に対する議論が深まり、船舶性能の向上のために必要な要素技術がより一層明確となるであろう。さらには海気象予報と、船舶の航海状態のモニタリングデータを用いて、船舶の最適航法を定めるウェザー・ルーティングサービスへの応用、船舶に搭載して船速、燃料消費量、耐航性能、船体荷重を予報して操船者に知らせる、船体状態予報システムの構築への応用が考えられるが、これらは将来の課題である。

## 付録 A 実海域の用語について

実海域は、波浪、風、海潮流、氷など自然現象が同時に存在する環境を指す。この中で「実」という言葉は「実際の」という意味である。また「海域」という言葉は海域毎に波浪、風、海潮流などの様子が異なることを意味している。また、この実海域という言葉は大洋を航行する船舶を対象としている。

次に実海域の定義を示す。これは考える対象により2種類考えられる。

まず、波浪、風、海潮流、氷などの存在する環境を指し示す場合が考えられる。この場合は船舶の航行、海洋構造物の設置は考えない。これを狭義の実海域という。

次に、船舶が長期間航行する、または海洋構造物が長期間設置される場合は、波浪、風、海潮流、氷などの存在する環境に加えて、経年劣化および船体浸水表面の汚損を考慮する必要がある。これを広義の実海域という。

これをまとめると以下の通りである。

狭義の実海域 : 波浪、風、海潮流、氷などの自然現象が同時に存在する環境

広義の実海域 : 波浪、風、海潮流、氷などの自然現象と、船舶または海洋構造物の経年劣化、生物汚損が同時に存在する環境

次に実海域の英語訳について解説する。今までに実海域の英語訳として以下の言葉が使われてきた。

- (a) actual seas 辻本・内藤<sup>17)18)</sup>
- (b) the sea 内藤・高岸<sup>62)</sup>
- (c) at sea 推進性能研究委員会第6回シンポジウム<sup>63)</sup>、折戸<sup>64)</sup>
- (d) seaway 宮本<sup>65)</sup>
- (e) real sea Real Sea '98<sup>66)</sup>

ここに挙げたように、人によって異なっており、まだ英語訳が確立していないことが分かる。

実海域を単に“sea”と訳したのでは何を指しているのか曖昧になる。また「風波」を示す“sea”と区別する必要がある。

“at sea”は「航海中の」という意味だが、前置詞が変わると意味が変わるので使いづらい面がある。

“real sea”は「本物の」という意味合いが強い。また Real Sea という名で波浪水槽の実験技術に関するワークショップ<sup>66)</sup>が行われている。



”seaway”は「航路」という意味であるが、従来より耐航性関係で使われており<sup>25)</sup>、必ずしも実海域を正確に意味して使われていない背景がある。

”actual seas”は「現実の」という意味合いがあり、実海域を示すのに適当と考えられる。

また”sea”という単語は、到る所という意味を込めて複数形”seas”とするのが良いと考える。

そこで「実海域」の英訳として”actual seas”を提案する。

## 付録 B 波浪中自航要素を考慮した船速低下式

### B.1 波浪中の釣合式

まず、波浪中の自航要素が平水中の値から微小変化すると仮定する。すなわち  $\delta w \ll \tilde{w}_0$ ,  $\delta t \ll \tilde{t}_0$ ,  $\delta \eta \ll \eta_{R0}$  とする。ここで次の記号を定義する。

$$\tilde{w} \equiv 1 - w = 1 - w_0 + \delta w = \tilde{w}_0 + \delta w, \quad (\text{B.1.1})$$

$$\tilde{t} \equiv 1 - t = 1 - t_0 + \delta t = \tilde{t}_0 + \delta t, \quad (\text{B.1.2})$$

$$\eta_R = \eta_{R0} + \delta \eta_R, \quad (\text{B.1.3})$$

$$\left\{ \begin{array}{ll} \tilde{w} : \text{波浪中伴流係数,} & w : \text{波浪中伴流率,} \\ \tilde{w}_0 : \text{平水中伴流係数,} & w_0 : \text{平水中伴流率,} \\ \delta w : \text{伴流係数の平水中から波浪中への変化量,} & \\ \tilde{t} : \text{波浪中推力減少係数,} & t : \text{波浪中推力減少率,} \\ \tilde{t}_0 : \text{平水中推力減少係数,} & t_0 : \text{平水中推力減少率,} \\ \delta t : \text{推力減少係数の平水中から波浪中への変化量,} & \\ \eta_R : \text{波浪中プロペラ効率比,} & \eta_{R0} : \text{平水中プロペラ効率比,} \\ \delta \eta_R : \text{プロペラ効率比の平水中から波浪中への変化量.} & \end{array} \right.$$

また式展開の分かり易さのため、本付録中に限り船速の変化量  $\delta V$  は船速の増加を正とする。式で表せば

$$V = V_0 + \delta V \quad (\delta V : \text{増加を正}), \quad (\text{B.1.4})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V : \text{航海船速,} \\ V_0 : \text{設計船速,} \end{array} \right.$$

である。なお船速低下量を求めるには最終的に得られた  $\delta V$  に負号を付けばよい。

次に波浪中での釣合式を示す。

船速  $V$  とプロペラ流入速度  $U$  の釣合式は次式である。

$$\tilde{w}V = U. \quad (\text{B.1.5})$$

主機回転数  $N_E$  とプロペラ回転数  $N_P$  の釣合式は次式である。

$$N_E = rN_P. \quad (\text{B.1.6})$$

船体抵抗  $R$  とプロペラ推力  $T_P$  の釣合式は次式である。

$$R(V, \chi) = \tilde{t}T_P(N_P, U). \quad (\text{B.1.7})$$

次にプロペラトルク  $Q_P$  と主機トルク  $Q_E$  の釣合式は次式である。

$$Q_P(N_P, U) = r\eta_R\eta_t Q_E(N_E, \Lambda). \quad (\text{B.1.8})$$

船体抵抗  $R$  とプロペラ推力  $T_P$  の釣合式 (B.1.7) 式を 1 次の項までテイラー展開すると

$$R(V_0) + R_V\delta V + R_\chi\delta\chi = \tilde{t}(T_{P0} + P_{TN}\delta N_P + P_{TU}\delta U), \quad (\text{B.1.9})$$

となる。ただし

$$R_V = \frac{\partial R}{\partial V}, \quad R_\chi = \frac{\partial R}{\partial \chi}, \quad (\text{B.1.10})$$

である。さらに船速  $V$  とプロペラ流入速度  $U$  の釣合式 (B.1.5) 式を用いて

$$\begin{aligned} R_V\delta V + R_\chi\delta\chi &= \tilde{t}T_{P0} - R(V_0) + \tilde{t}(P_{TN}\delta N_P + P_{TU}\delta U) \\ &= (\tilde{t} - \tilde{t}_0)T_{P0} + \tilde{t}\{P_{TN}\delta N_P + P_{TU}(\tilde{w}_0\delta V + \delta wV_0)\} \\ &= \tilde{t}\{P_{TN}\delta N_P + P_{TU}(\tilde{w}_0\delta V + \delta wV_0)\} + \delta tT_{P0}, \end{aligned} \quad (\text{B.1.11})$$

となる。ここでは自然減速のみを考えるので変針は行わない、すなわち  $\delta\chi = 0$  であるので

$$R_V\delta V = \tilde{t}\{P_{TN}\delta N_P + P_{TU}(\tilde{w}_0\delta V + \delta wV_0)\} + \delta tT_{P0}, \quad (\text{B.1.12})$$

となる。

次に波浪中でのプロペラトルク  $Q_P$  と主機トルク  $Q_E$  の釣合式 (B.1.8) 式を、平水中から波浪中への変化量を用いて表現すれば

$$Q_{P0} + \delta Q_P = r\eta_t(\eta_{R0} + \delta\eta_R)(Q_{E0} + \delta Q_E), \quad (\text{B.1.13})$$

となる。ここで  $\delta\eta_R\delta Q_E$  の項は 2 次の項なので無視すると

$$\delta Q_P = r\eta_t(\eta_{R0}\delta Q_E + \delta\eta_R Q_{E0}), \quad (\text{B.1.14})$$

となる。ここで (B.1.14) 式を微分係数を用いて書き換えると

$$P_{QN}\delta N_P + P_{QU}\delta U = r\eta_t\{\eta_{R0}(E_{QN}\delta N_E + E_{Q\Lambda}\delta\Lambda) + \delta\eta_R Q_{E0}\}, \quad (\text{B.1.15})$$

となるので、船速  $V$  とプロペラ流入速度  $U$  の釣合式 (B.1.5) 式と主機回転数  $N_E$  とプロペラ回転数  $N_P$  の釣合式 (B.1.6) 式を用いると

$$P_{QN}\delta N_P + P_{QU}(\tilde{w}_0\delta V + \delta w V_0) = r\eta_t\{\eta_{r0}(E_{QN}r\delta N_P + E_{Q\Lambda}\delta\Lambda) + \delta\eta_R Q_{E0}\}, \quad (\text{B.1.16})$$

となる。ここでは自然減速のみを考えるので燃料投入量の操作は行わない、すなわち  $\delta\Lambda = 0$  であるので

$$P_{QN}\delta N_P + P_{QU}(\tilde{w}_0\delta V + \delta w V_0) = r^2\eta_{r0}\eta_t E_{QN}\delta N_P + r\eta_t\delta\eta_R Q_{E0}, \quad (\text{B.1.17})$$

となる。

ここで船体抵抗の変化の取り扱い方法には2種類の方法が考えられるので次節以降、この釣合式 (B.1.12), (B.1.17) 式を解き船速低下式を導出する。

## B.2 繰り返し計算法

船体抵抗  $R$  は変針を行わないとき

$$\begin{aligned} R(V, \chi) &= R_C(V) + R_{AW}(V, \chi) \\ &= R_C(V_0) + R_V\delta V, \end{aligned} \quad (\text{B.2.1})$$

となるので、

$$\begin{aligned} R_V\delta V &= R_C(V) + R_{AW}(V, \chi) - R_C(V_0) \\ &= \left. \frac{\partial R_C}{\partial V} \right|_{V=V_0} \delta V + R_{AW}(V, \chi), \end{aligned} \quad (\text{B.2.2})$$

と表現される。

ここで平水中抵抗  $R_C$  は速度  $V$  の2次式

$$R_C(V) \approx C_0 V^2, \quad (\text{B.2.3})$$

で良く近似できるので、船速に関する微分は

$$\left. \frac{\partial R_C}{\partial V} \right|_{V=V_0} \approx 2C_0 V_0, \quad (\text{B.2.4})$$

と近似できる。したがって (B.2.2) 式は

$$R_V\delta V \approx 2C_0 V_0 \delta V + R_{AW}(V, \chi), \quad (\text{B.2.5})$$

となる。

さらに次の記号

$$\varepsilon_w = \frac{\delta w}{\tilde{w}_0}, \quad \varepsilon_t = \frac{\delta t}{\tilde{t}_0}, \quad \varepsilon_\eta = \frac{\delta \eta_R}{\eta_{R0}}, \quad (\text{B.2.6})$$

を用いれば

$$\tilde{w} = \tilde{w}_0(1 + \varepsilon_w), \quad (\text{B.2.7})$$

$$\tilde{t} = \tilde{t}_0(1 + \varepsilon_t), \quad (\text{B.2.8})$$

$$\eta_R = \eta_{R0}(1 + \varepsilon_\eta), \quad (\text{B.2.9})$$

である。

以上の (B.1.12), (B.1.17), (B.2.5), (B.2.7)~(B.2.9) 式を用いて船速変化量  $\delta V$  (増加が正) は次式を解いて求まる。

$$\begin{aligned} & R_{AW}(V, \chi) \\ & + \left\{ 2C_0 V_0 - \tilde{w}_0 \tilde{t}_0 (1 + \varepsilon_w)(1 + \varepsilon_t) \left( P_{TU} + \frac{P_{TN} P_{QU}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \right) + \tilde{w}_0 P_{TU} V_0 \right\} \delta V \\ & = \tilde{t}_0 (1 + \varepsilon_t) \left\{ \frac{P_{TN}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \left( \tilde{w}_0 \varepsilon_w P_{QU} V_0 - \varepsilon_\eta Q_{P0} \right) + \tilde{w}_0 P_{TU} V_0 \right\} + \tilde{t}_0 \varepsilon_t T_{P0}. \end{aligned} \quad (\text{B.2.10})$$

ここで (B.2.10) 式は陰関数表示になっているので  $\varepsilon_w, \varepsilon_t, \varepsilon_\eta$  について1次の項を取り上げるには

$$\varepsilon_v = \frac{\delta V}{V_0}, \quad (\text{B.2.11})$$

とする。

そして  $\varepsilon_w, \varepsilon_t, \varepsilon_\eta, \varepsilon_v$  について1次の項を取り上げると

$$\begin{aligned} & R_{AW}(V, \chi) + V_0 \left( 2C_0 V_0 + \frac{\tilde{w}_0 \tilde{t}_0 P_{TN} P_{QU}}{P_{QN} - r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN}} - \tilde{w}_0 \tilde{t}_0 P_{TU} \right) \varepsilon_v \\ & = \tilde{t}_0 \left\{ \frac{P_{TN}}{P_{QN} - r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN}} (\varepsilon_\eta Q_{P0} - \tilde{w}_0 \varepsilon_w P_{QU} V_0) + (1 + \varepsilon_t) \tilde{w}_0 P_{TU} V_0 \right\} + \tilde{t}_0 \varepsilon_t T_{P0}, \end{aligned} \quad (\text{B.2.12})$$

となる。

### B.3 微分係数法

船体抵抗  $R$  は変針を行わないとき (B.2.1) 式で表現される。この (B.2.1) 式を平水中から波浪中への船体抵抗の変化  $R_V$  が微小として1次の項までテイラー展開すると、

$$\begin{aligned} R_V \delta V &= \left( \frac{\partial R_C}{\partial V} \Big|_{V=V_0} + \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \Big|_{V=V_0} \right) \delta V + R_{AW}(V_0, \chi) \\ &= C_{RV} \delta V + R_{AW}(V_0, \chi), \end{aligned} \quad (\text{B.3.1})$$

となる。ここで

$$C_{RV} \equiv \frac{\partial R_C}{\partial V} \Big|_{V=V_0} + \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \Big|_{V=V_0}, \quad (\text{B.3.2})$$

である。

次に (B.1.12), (B.1.17), (B.3.1), (B.2.7)~(B.2.9) 式を用いて船速変化量  $\delta V$  を求めると次式となる。

$$\delta V = \frac{R_{AW}(V_0, \chi) - \tilde{t}_0 \varepsilon_t T_{P0} - V_0 \left( \frac{\varepsilon_w}{1 + \varepsilon_w} \right) C_{RV} + \varepsilon_\eta \frac{\tilde{t}_0 (1 + \varepsilon_t) Q_{P0} P_{TN}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}}}{\tilde{w}_0 \tilde{t}_0 (1 + \varepsilon_w) (1 + \varepsilon_t) \left( P_{TU} + \frac{P_{TN} P_{QU}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \right) - C_{RV}}. \quad (\text{B.3.3})$$

次に (B.3.3) 式を  $\varepsilon_w, \varepsilon_t, \varepsilon_\eta$  について1次の項まで冪級数展開する。

まず、(B.3.3) 式は

$$f(\varepsilon_w, \varepsilon_t) = \frac{1}{C_{PE}(1 + \varepsilon_w)(1 + \varepsilon_t) - C_{RV}}, \quad (\text{B.3.4})$$

の形をしているので、この式を  $\varepsilon_w, \varepsilon_t$  について1次の項まで冪級数展開する。

$$f(\varepsilon_w, \varepsilon_t) = \frac{1}{C_{PE} - C_{RV}} \left\{ 1 - \frac{C_{PE}}{C_{PE} - C_{RV}} (\varepsilon_w + \varepsilon_t) \right\}. \quad (\text{B.3.5})$$

次に (B.3.3) 式の分子には

$$g(\varepsilon_w) = \frac{\varepsilon_w}{1 + \varepsilon_w}, \quad (\text{B.3.6})$$

の形も含まれるので、この式を  $\varepsilon_w$  について冪級数展開する。

$$g(\varepsilon_w) = \varepsilon_w + O(\varepsilon_w^2). \quad (\text{B.3.7})$$

この (B.3.5), (B.3.7) 式を用いれば微分係数法による船速変化量  $\delta V$  (増加が正) は次式で表現される。

$$\delta V = \frac{R_{AW}(V_0, \chi)}{C_{PE} - C_{RV}} \left\{ 1 - \frac{C_{PE}}{C_{PE} - C_{RV}} (\varepsilon_w + \varepsilon_t) \right\} - \frac{\varepsilon_t \tilde{t}_0 T_{P0}}{C_{PE} - C_{RV}} - \frac{\varepsilon_w V_0 C_{RV}}{C_{PE} - C_{RV}}$$

$$+ \frac{\varepsilon_\eta}{C_{PE} - C_{RV}} \frac{t_0 Q_{P0} P_{TN}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} - \varepsilon_w V_0, \quad (\text{B.3.8})$$

$$C_{PE} = \tilde{w}_0 \tilde{t}_0 \left( P_{TU} + \frac{P_{QU} P_{TN}}{r^2 \eta_{R0} \eta_t E_{QN} - P_{QN}} \right), \quad (\text{B.3.9})$$

$$C_{RV} = \left. \frac{\partial R_C}{\partial V} \right|_{V=V_0} + \left. \frac{\partial R_{AW}}{\partial V} \right|_{V=V_0}. \quad (\text{B.3.10})$$

# 付録 C 船速低下量と主機回転数、主機馬力、燃料消費量の関係

## C.1 主機回転数

B.1節に示した4つの釣合式(B.1.5)~(B.1.8)式を用いれば、船速変化量  $\delta V$  (増加が正)を用いて主機回転数の変化量  $\delta N_E$  (増加が正)が求まる。

最初にプロペラ回転数の変化量  $\delta N_P$  (増加が正)は(B.1.17)式より、

$$\delta N_P = \frac{P_{QU}(\tilde{w}_0\delta V + \delta w V_0) - r\eta_t\delta\eta_R Q_{E0}}{r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN} - P_{QN}}, \quad (C.1.1)$$

となるので、(B.1.8), (B.2.7)~(B.2.9)式を用いて書き換えれば

$$\delta N_P = \frac{\tilde{w}_0 P_{QU}(\delta V + \varepsilon_w V_0) - \varepsilon_\eta Q_{P0}}{r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN} - P_{QN}}, \quad (C.1.2)$$

と求まる。

次に主機回転数の変化量  $\delta N_E$  (増加が正)は、主機回転数とプロペラ回転数の釣合式(B.1.6)式より

$$\delta N_E = r \frac{\tilde{w}_0 P_{QU}(\delta V + \varepsilon_w V_0) - \varepsilon_\eta Q_{P0}}{r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN} - P_{QN}}, \quad (C.1.3)$$

となる。

また自航要素が平水中と波浪中とで変化しないとすれば、 $\varepsilon_w = \varepsilon_\eta = 0$ より

$$\delta N_E = r \frac{P_{QU}}{r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN} - P_{QN}} \tilde{w}_0 \delta V, \quad (C.1.4)$$

と表現できる。

## C.2 主機馬力

主機馬力(有効馬力)  $P_{EHP}$ 、プロペラ回転数  $N_P$ 、プロペラトルク  $Q_P$  について、平水中から波浪中への変化量を増加を正にとり

$$P_{EHP} = P_{EHP0} + \delta P_{EHP}, \quad (C.2.1)$$

$$N_P = N_{P0} + \delta N_P, \quad (C.2.2)$$

$$Q_P = Q_{P0} + \delta Q_P, \quad (C.2.3)$$



と表現すると、主機馬力（有効馬力）の変化量  $\delta P_{EHP}$  は

$$P_{EHP0} + \delta P_{EHP} = \frac{2\pi}{75}(N_{P0} + \delta N_P)(Q_{P0} + \delta Q_P), \quad (C.2.4)$$

の係数を用い、 $\delta N_P \delta Q_P$  の項は他の項に比べて小さいとして省略すれば

$$\delta P_{EHP} = \frac{2\pi}{75}(N_{P0}\delta Q_P + Q_{P0}\delta N_P), \quad (C.2.5)$$

となる。

次に主機トルク  $Q_E$  と主機回転数  $N_E$  の関係は微分係数を用いて

$$\delta Q_E = E_{QN}\delta N_E + E_{Q\Lambda}\delta\Lambda, \quad (C.2.6)$$

と表せる。今、自然減速を考えているので  $\delta\Lambda = 0$  より

$$\delta Q_E = E_{QN}\delta N_E, \quad (C.2.7)$$

となる。

次に、主機トルクとプロペラトルクの釣合式 (B.1.8) 式を用いてプロペラトルクの変化量  $\delta Q_P$  は

$$\delta Q_P = r\eta_R\eta_t E_{QN}\delta N_E = r^2\eta_R\eta_t E_{QN}\delta N_P, \quad (C.2.8)$$

と表せる。

この (C.2.8) 式を用いれば主機馬力の変化量  $\delta P_{EHP}$  は

$$\delta P_{EHP} = \frac{2\pi}{75}(N_{P0}r^2\eta_R\eta_t E_{QN} + Q_{P0})\delta N_P, \quad (C.2.9)$$

$$= \frac{2\pi}{75}\left\{Q_{P0} + r^2\eta_{R0}(1 + \varepsilon_\eta)\eta_t E_{QN}N_{P0}\right\} \frac{\tilde{w}_0 P_{QU}(\delta V + \varepsilon_w V_0) - \varepsilon_\eta Q_{P0}}{r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN} - P_{QN}}, \quad (C.2.10)$$

となる。

ここで (C.2.10) 式の 2 次以上の高次の項を無視すると主機馬力の変化量  $\delta P_{EHP}$  は

$$\delta P_{EHP} = \frac{2\pi}{75}\left\{(Q_{P0} + r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN}N_{P0}) \frac{\tilde{w}_0 P_{QU}(\delta V + \varepsilon_w V_0) - \varepsilon_\eta Q_{P0}}{r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN} - P_{QN}} + \varepsilon_\eta r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN}N_{P0} \frac{P_{QU}}{r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN} - P_{QN}} \tilde{w}_0 \delta V\right\}, \quad (C.2.11)$$

また自航要素が平水中と波浪中とで変化しないとすれば、 $\varepsilon_w = \varepsilon_\eta = 0$  より

$$\delta P_{EHP} = \frac{2\pi}{75} \frac{P_{QU}(Q_{P0} + r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN}N_{P0})}{r^2\eta_{R0}\eta_t E_{QN} - P_{QN}} \tilde{w}_0 \delta V, \quad (C.2.12)$$

と表現できる。

また有効馬力  $P_{EHP}$  と制動馬力  $P_{BHP}$  の関係は

$$P_{EHP} = \eta P_{BHP} = \eta_t \eta_H \eta_0 \eta_R P_{BHP}, \quad (C.2.13)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta : \text{推進効率,} \\ \eta_t : \text{伝達効率,} \\ \eta_H : \text{船殻効率,} \\ \eta_0 : \text{プロペラ単独効率,} \\ \eta_R : \text{プロペラ効率比,} \end{array} \right.$$

である。

### C.3 燃料消費量

実海域中での燃料消費量  $C$ , 航海時間  $T$  を平水中での燃料消費量  $C_0$ , 航海時間  $T_0$  を用いて

$$C = C_0 + \delta C = C_0(1 + \varepsilon_C), \quad (C.3.1)$$

$$T = T_0 + \delta T = T_0(1 + \varepsilon_T). \quad (C.3.2)$$

と表現する。また燃料消費量  $C$  と航海時間  $T$  の間には次の関係がある。

$$C = \Lambda T = FN_c T. \quad (C.3.3)$$

このとき単位時間当たりの燃料消費量の変化  $\delta\Lambda$  は

$$\delta\Lambda = \Lambda - \Lambda_0 = \frac{C}{T} - \frac{C_0}{T_0} = \frac{C_0(1 + \varepsilon_C)}{T_0(1 + \varepsilon_T)} - \frac{C_0}{T_0}, \quad (C.3.4)$$

となる。ここで  $\varepsilon_T \ll 1$  について冪級数展開すると

$$\frac{(1 + \varepsilon_C)}{(1 + \varepsilon_T)} = (1 + \varepsilon_C)\{1 - \varepsilon_T + O(\varepsilon_T^2)\}, \quad (C.3.5)$$

となる。このとき (C.3.4) 式は  $\varepsilon_C, \varepsilon_T$  の 1 次の項まで考えると次式となる。

$$\delta\Lambda = \frac{C_0}{T_0}(1 + \varepsilon_C - \varepsilon_T) - \frac{C_0}{T_0} = \frac{\delta C}{T_0} - \Lambda_0 \frac{\delta T}{T_0}, \quad (C.3.6)$$

ここで航海距離  $L$  が一定の条件

$$L = V_0 T_0 = (V_0 + \delta V)(T_0 + \delta T). \quad (C.3.7)$$

より次式が得られる.

$$\frac{\delta T}{T_0} = -\frac{\delta V}{V_0 + \delta V}. \quad (\text{C.3.8})$$

さらに燃料消費量の変化

$$\begin{aligned} \delta C &= C - C_0 = \Lambda T - \Lambda_0 T_0 \\ &= F_0(N_{e0}\delta T + T_0\delta N_e + \delta N_e\delta T), \end{aligned} \quad (\text{C.3.9})$$

に (C.3.8) 式を用いて次式が得られる.

$$\frac{\delta C}{T_0} = F_0 \frac{(AV_0 - N_{e0})}{V_0 + \delta V} \delta V. \quad (\text{C.3.10})$$

ただし  $A$  は  $\delta N_e = A\delta V$  なる定数で, 自航要素が平水中と同一である場合次の関係がある<sup>1)</sup>.

$$A = r \frac{P_{QU}}{r^2 E_{QN} - P_{QN}} (1 - w_0). \quad (\text{C.3.11})$$

ここで (C.3.8), (C.3.10) 式を (C.3.6) 式に代入すれば単位時間当たりの燃料消費量の変化  $\delta\Lambda$  が求まる.

$$\delta\Lambda = F_0 \frac{(AV_0 - N_{e0}) + \Lambda_0}{V_0 + \delta V} \delta V. \quad (\text{C.3.12})$$

Table 2.1 : Coefficient of regression line about ship speed loss due to aging effect

| $\delta V_a = at$ |             | Kind of ship  |
|-------------------|-------------|---|
| $a$               | [Dimension] |   |
| 0.05~0.20         | [knot/year] | Full/ballast condition ship <sup>19)</sup>  |
| 0.08              | [knot/year] | Full condition ship <sup>36)</sup>  |
| 0.15              | [knot/year] | Ballast condition ship <sup>36)</sup>   |
| 0.10~0.30         | [knot/year] | Diesel ship <sup>37)</sup>  |
| 0.05~0.25         | [knot/year] | Turbine ship <sup>37)</sup>   |
| 0.10~0.12         | [knot/year] | Diesel ship <sup>38)</sup>  |
| 0.10~0.15         | [knot/year] | Full condition ship equipped with fixed pitch propeller/controllable pitch propeller <sup>39)</sup> |
| 0.12              | [knot/year] | 120,000 [DW] ore carrier <sup>40)</sup>   |
| 0.11~0.12         | [knot/year] | 180,000 [DW] ore/oil carrier <sup>40)</sup>   |
| 0.11              | [knot/year] | 15,000 [DW] container liner <sup>40)</sup>  |
| 0.05              | [knot/year] | 35,000 [DW] container liner <sup>40)</sup>  |
| 0.11              | [knot/year] | 11,000 [DW] general cargo ship <sup>40)</sup>   |
| 0.13              | [knot/year] | 130,000 [DW] tanker <sup>40)</sup>  |
| 0.07              | [knot/year] | 60,000 [DW] LPG carrier <sup>40)</sup> (in speed decreased service)                                 |
| 0.10              | [knot/year] | 165,000 [DW] ore carrier (Japan–Australia route) <sup>41)</sup>                                     |
| 0.06              | [knot/year] | 100,000 [DW] ore carrier (Japan–Australia route) <sup>41)</sup>                                     |
| 0.03~0.05         | [knot/year] | (described without data) <sup>42)</sup>   |

Table 2.2 : Coefficients of regression curve about ship speed loss due to fouling effect

| $\delta V_f = \alpha t^\beta$      |         | Kind of ship  |
|------------------------------------|---------|---|
| $\delta V_f$ : [knot], $t$ : [day] |         |   |
| $\alpha$                           | $\beta$ |   |
| $1.73 \times 10^{-4}$              | 1.5     | 165,000 [DW] ore carrier (Japan–Australia route) <sup>41)</sup>                                       |
| $4.00 \times 10^{-5}$              | 1.5     | 100,000 [DW] ore carrier painted with self-polishing copolymer (Japan–Australia route) <sup>41)</sup> |

Table 2.3 : Data of ship speed loss due to fouling effect ; one year past after dock out

| $\delta V_f = \alpha t$ |             | Kind of ship  |
|-------------------------|-------------|---|
| $\alpha$                | [Dimension] |   |
| 0.5~1.5                 | [knot/year] | Full/ballast condition ship <sup>19)</sup>  |
| 0.5~1.1                 | [knot/year] | Full condition ship <sup>36)</sup>  |
| 0.5~1.8                 | [knot/year] | Diesel ship <sup>38)</sup>  |
| 1.25~1.75               | [knot/year] | Full condition ship equipped with fixed pitch propeller/controllable pitch propeller <sup>39)</sup> |
| 0.2                     | [knot/year] | Painted with self-polishing copolymer (described without data) <sup>42)</sup>                       |

Table 2.4 : Seakeeping criteria

| Phenomenon                              | Critical value          | Critical probability |
|---|-------------------------|----------------------|
| Deck wetness at F.P.                    | Effective freeboard*    | 0.02                 |
| Propeller emersion                      | Propeller tip emersion* | 0.25                 |
| Vertical acceleration at F.P.           | 0.8g                    | 0.001                |
| Slamming                                | —                       | 0.01                 |
| bottom emersion at S.S.8 1/2            | Draft*                  | —                    |
| relative vertical velocity at S.S.8 1/2 | $0.09\sqrt{L_{pp}g}$    | —                    |

\* including the static swell up

Table 2.5 : Principal dimensions of SR-108 container ship

| Principal dimension   | Character                | Value   | Dimension         |
|---|--------------------------|---------|-------------------|
| Ship length between perpendiculars  | $L_{pp}$                 | 175.0   | [m]               |
| Maximum ship breadth  | $B_{max}$                | 25.4    | [m]               |
| Maximum ship draft  | $d_{max}$                | 9.5     | [m]               |
| Block coefficient   | $C_B$                    | 0.5716  | [—]               |
| Volume  | $\nabla$                 | 24742.0 | [m <sup>3</sup> ] |
| Distance from midship to center of gravity<br>( + means forward )           | $\overline{OG}_x$        | -2.479  | [m]               |
| Distance from still water line to center of gravity<br>( + means downward ) | $\overline{OG}_z$        | 0.0     | [m]               |
| Metacenter height   | $\overline{GM}$          | 1.0     | [m]               |
| Nondimensional radius of roll inertia                                       | $\frac{k_{xx}}{B_{max}}$ | 0.328   | [—]               |
| Nondimensional radius of longitudinal inertia                               | $\frac{k_{yy}}{L_{pp}}$  | 0.24    | [—]               |
| Nondimensional radius of yaw inertia  | $\frac{k_{zz}}{L_{pp}}$  | 0.24    | [—]               |
| Front wind resistance coefficient   | $C_x$                    | 0.7     | [—]               |
| Front projected area above water  | $A_x$                    | 635.0   | [m <sup>2</sup> ] |
| Side projected area above water   | $A_y$                    | 2500.0  | [m <sup>2</sup> ] |
| Side projected area of radder   | $A_r$                    | 32.5    | [m <sup>2</sup> ] |
| Deck height at F.P.   | $F_B$                    | 11.0    | [m]               |

Table 2.6 : Sections of SR-108 container ship

| S.S. No.<br>$x$ | Draft<br>$d(x)$ [m] | Half breadth<br>$b(x)$ [m] | Sectional area<br>$A(x)$ [m <sup>2</sup> ] | Weight ratio<br>$\frac{w(x)}{w(5)}$ |
|-----------------|---------------------|----------------------------|--|-------------------------------------|
| F.P.            | 9.35                | 0.0000                     | 11.703                                     | 0.119                               |
| 9 1/2           | 9.50                | 1.5621                     | 27.385                                     | 0.260                               |
| 9               | 9.50                | 3.1496                     | 44.940                                     | 0.402                               |
| 8 1/2           | 9.50                | 5.0165                     | 68.580                                     | 0.502                               |
| 8               | 9.50                | 7.0231                     | 98.072                                     | 0.502                               |
| 7 1/2           | 9.50                | 8.9154                     | 130.840                                    | 0.601                               |
| 7               | 9.50                | 10.5156                    | 163.375                                    | 0.701                               |
| 6 1/2           | 9.50                | 11.6840                    | 192.632                                    | 0.802                               |
| 6               | 9.50                | 12.4206                    | 215.804                                    | 0.900                               |
| 5 1/2           | 9.50                | 12.6873                    | 229.380                                    | 1.000                               |
| 5               | 9.50                | 12.7000                    | 234.061                                    | 1.000                               |
| 4 1/2           | 9.50                | 12.7000                    | 233.125                                    | 1.000                               |
| 4               | 9.50                | 12.7000                    | 226.805                                    | 1.000                               |
| 3 1/2           | 9.50                | 12.6365                    | 213.698                                    | 0.920                               |
| 3               | 9.50                | 12.3190                    | 193.100                                    | 0.840                               |
| 2 1/2           | 9.50                | 11.6967                    | 165.715                                    | 0.759                               |
| 2               | 9.50                | 10.6553                    | 133.181                                    | 0.679                               |
| 1 1/2           | 9.50                | 9.0932                     | 97.603                                     | 0.599                               |
| 1               | 9.50                | 7.0485                     | 61.558                                     | 0.519                               |
| 1/2             | 9.50                | 4.4958                     | 23.640                                     | 0.352                               |
| A.P.            | 0.703               | 1.5494                     | 1.170                                      | 0.185                               |

$$w(5)=200.6 \text{ [ton/m]}$$

Table 2.7 : Static conditions of SR-108 container ship

| Static condition                                 | Froude number |       |       |        | Dimension |
|--|---------------|-------|-------|--------|-----------|
|  | 0.15          | 0.20  | 0.25  | 0.30   |           |
| Resistance in still water                        | 224.6         | 392.3 | 646.3 | 1085.6 | [kN]      |
| Wave height at F.P. in still water               | 0.68          | 0.88  | 1.26  | 1.73   | [m]       |
| Wave height at S.S. 8 1/2 in still water         | 0.27          | 0.41  | 0.64  | 0.88   | [m]       |
| Wave height at propeller plane<br>in still water | 0.42          | 1.00  | 1.70  | 2.19   | [m]       |

Table 2.8 : Hull and propeller characteristics of SR-108 container ship

| Hull and propeller dimension                 | Character            | Value     | Dimension |
|--|----------------------|-----------|-----------|
| Thrust deduction fraction in still water     | $(1 - t_0)$          | 0.85      | [—]       |
| Wake fraction in still water                 | $(1 - w_0)$          | 0.69      | [—]       |
| Relative rotative efficiency in still water  | $\eta_{R0}$          | 1.0       | [—]       |
| Gear ratio                                   | $r$                  | 1.0       | [—]       |
| Transmission efficiency                      | $\eta_t$             | 1.0       | [—]       |
| Propeller diameter                           | $D_p$                | 6.5       | [m]       |
| Propeller pitch ratio                        | $\frac{P_{it}}{D_p}$ | 1.055     | [—]       |
| Depth of propeller chip                      | $D_{tip}$            | 2.75      | [m]       |
| 0th coefficient of propeller matrix (thrust) | $k_{t0}$             | 0.49346   | [—]       |
| 1st coefficient of propeller matrix (thrust) | $k_{t1}$             | -0.30741  | [—]       |
| 2nd coefficient of propeller matrix (thrust) | $k_{t2}$             | -0.13645  | [—]       |
| 0th coefficient of propeller matrix (torque) | $k_{q0}$             | 0.081916  | [—]       |
| 1st coefficient of propeller matrix (torque) | $k_{q1}$             | -0.041704 | [—]       |
| 2nd coefficient of propeller matrix (torque) | $k_{q2}$             | -0.023661 | [—]       |



Table 2.9 : Division of sea area on PSW route

| Sea area<br>No. | Route length ratio<br>$w_k$ | Ship course against north<br>(outward and homeward in degree) |
|-----------------|-----------------------------|---|
| E05S            | 1.5/31                      | ( 60, 240)  |
| E06S            | 0.5/31                      | ( 60, 240)  |
| E06N            | 1/31                        | ( 60, 240)  |
| M09N            | 3/31                        | ( 60, 240)  |
| M07S            | 3.5/31                      | ( 90, 270)  |
| M08W            | 6.5/31                      | ( 90, 270)  |
| W08             | 6/31                        | ( 90, 270)  |
| W09             | 4/31                        | ( 90, 270)  |
| W12             | 2.5/31                      | (120, 300)  |
| W13             | 2.5/31                      | (120, 300)  |

Table 2.10 : Occurrence probability of observed wave heights ( $H_V$  [m]) and observed wave periods ( $T_V$  [s]) on PSW route

| $H_V \setminus T_V$ | 0.0-    | 5.0-    | 6.0-    | 7.0-    | 8.0-    | 9.0-    | 10.0-   | 11.0-   | 12.0-   | 13.0-   | 14.0-   |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 14.75-              | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 13.75-              | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 12.75-              | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 11.75-              | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00010 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00002 |
| 10.75-              | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00005 |
| 9.75-               | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00002 | 0.00012 | 0.00005 | 0.00022 | 0.00002 | 0.00014 | 0.00002 | 0.00014 |
| 8.75-               | 0.00000 | 0.00000 | 0.00005 | 0.00007 | 0.00019 | 0.00019 | 0.00019 | 0.00007 | 0.00019 | 0.00002 | 0.00017 |
| 7.75-               | 0.00000 | 0.00000 | 0.00007 | 0.00014 | 0.00036 | 0.00031 | 0.00053 | 0.00019 | 0.00043 | 0.00014 | 0.00036 |
| 6.75-               | 0.00000 | 0.00005 | 0.00183 | 0.00096 | 0.00145 | 0.00094 | 0.00130 | 0.00048 | 0.00099 | 0.00026 | 0.00070 |
| 5.75-               | 0.00010 | 0.00055 | 0.00111 | 0.00142 | 0.00282 | 0.00200 | 0.00308 | 0.00104 | 0.00195 | 0.00041 | 0.00118 |
| 4.75-               | 0.00039 | 0.00152 | 0.00251 | 0.00359 | 0.00742 | 0.00559 | 0.00728 | 0.00236 | 0.00347 | 0.00067 | 0.00152 |
| 3.75-               | 0.00147 | 0.00506 | 0.00990 | 0.01453 | 0.02546 | 0.01453 | 0.01412 | 0.00344 | 0.00448 | 0.00096 | 0.00202 |
| 2.75-               | 0.00737 | 0.02074 | 0.03498 | 0.04223 | 0.04823 | 0.01860 | 0.01604 | 0.00349 | 0.00460 | 0.00104 | 0.00226 |
| 1.75-               | 0.04059 | 0.06620 | 0.07167 | 0.05452 | 0.04659 | 0.01515 | 0.01253 | 0.00275 | 0.00369 | 0.00123 | 0.00318 |
| 0.75-               | 0.09841 | 0.06989 | 0.03960 | 0.02356 | 0.01951 | 0.00602 | 0.00561 | 0.00128 | 0.00188 | 0.00067 | 0.00154 |
| 0.00-               | 0.03006 | 0.00607 | 0.00145 | 0.00079 | 0.00084 | 0.00024 | 0.00041 | 0.00017 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |

Table 2.11 : Occurrence probability of observed wave directions ( $\chi$  [deg.]) on PSW route

| $\chi$ | Probability |
|--------|-------------|
| 0.0    | 0.07209     |
| 30.0   | 0.08232     |
| 60.0   | 0.07918     |
| 90.0   | 0.09727     |
| 120.0  | 0.10693     |
| 150.0  | 0.09452     |
| 180.0  | 0.10416     |
| 210.0  | 0.11269     |
| 240.0  | 0.07752     |
| 270.0  | 0.05275     |
| 300.0  | 0.04905     |
| 330.0  | 0.05679     |

Table 2.12 : Occurrence probability of mean wind velocity ( $V_w$  [m/s]) and mean wind directions ( $\gamma$  [deg.]) on PSW route

| $V_w \setminus \gamma$ | 345-    | 015-    | 045-    | 075-    | 105-    | 135-    | 165-    |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 70-                    | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00001 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00001 |
| 60-                    | 0.00001 | 0.00000 | 0.00001 | 0.00010 | 0.00002 | 0.00004 | 0.00009 |
| 50-                    | 0.00011 | 0.00020 | 0.00033 | 0.00057 | 0.00043 | 0.00055 | 0.00042 |
| 40-                    | 0.00113 | 0.00228 | 0.00258 | 0.00366 | 0.00359 | 0.00374 | 0.00226 |
| 30-                    | 0.00646 | 0.01185 | 0.01218 | 0.01704 | 0.01816 | 0.01759 | 0.00926 |
| 20-                    | 0.01976 | 0.04003 | 0.03986 | 0.04815 | 0.05657 | 0.05573 | 0.02582 |
| 10-                    | 0.03164 | 0.06386 | 0.06424 | 0.07051 | 0.07824 | 0.07971 | 0.03806 |
| 0-                     | 0.01355 | 0.02492 | 0.02470 | 0.02884 | 0.02704 | 0.02842 | 0.01645 |

Table 2.13 : Division of sea area on PNW route

| Sea area<br>No. | Route length ratio<br>$w_k$ | Ship course against north<br>(outward and homeward in degree) |
|-----------------|-----------------------------|---|
| E05S            | 0.5/11                      | ( 30, 210)  |
| E05N            | 0.5/11                      | ( 30, 210)  |
| E06N            | 0.2/11                      | ( 30, 210)  |
| E04S            | 0.5/11                      | ( 30, 210)  |
| M06S            | 0.2/11                      | ( 30, 210)  |
| M06N            | 0.7/11                      | ( 30, 210)  |
| M03             | 0.5/11                      | ( 60, 240)  |
| M04             | 1.2/11                      | ( 60, 240)  |
| M02W            | 2/11                        | ( 90, 270)  |
| W03             | 2/11                        | ( 90, 270)  |
| W04             | 2.2/11                      | ( 90, 270)  |
| W07             | 0.5/11                      | (120, 300)  |

Table 2.14 : Occurrence probability of observed wave heights ( $H_V$  [m]) and observed wave periods ( $T_V$  [s]) on PNW route

| $H_V \setminus T_V$ | 0.0-    | 5.0-    | 6.0-    | 7.0-    | 8.0-    | 9.0-    | 10.0-   | 11.0-   | 12.0-   | 13.0-   | 14.0-   |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 14.75-              | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00004 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00002 |
| 13.75-              | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 12.75-              | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |
| 11.75-              | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00002 | 0.00002 | 0.00009 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00002 |
| 10.75-              | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00002 | 0.00000 | 0.00006 | 0.00000 | 0.00004 |
| 9.75-               | 0.00000 | 0.00000 | 0.00008 | 0.00006 | 0.00021 | 0.00019 | 0.00034 | 0.00006 | 0.00024 | 0.00006 | 0.00017 |
| 8.75-               | 0.00000 | 0.00000 | 0.00011 | 0.00011 | 0.00021 | 0.00017 | 0.00028 | 0.00011 | 0.00019 | 0.00006 | 0.00024 |
| 7.75-               | 0.00000 | 0.00000 | 0.00017 | 0.00023 | 0.00060 | 0.00036 | 0.00068 | 0.00024 | 0.00051 | 0.00009 | 0.00040 |
| 6.75-               | 0.00000 | 0.00000 | 0.00166 | 0.00105 | 0.00186 | 0.00122 | 0.00188 | 0.00055 | 0.00126 | 0.00030 | 0.00075 |
| 5.75-               | 0.00026 | 0.00073 | 0.00132 | 0.00188 | 0.00358 | 0.00250 | 0.00416 | 0.00113 | 0.00232 | 0.00053 | 0.00122 |
| 4.75-               | 0.00060 | 0.00183 | 0.00328 | 0.00446 | 0.00943 | 0.00612 | 0.00811 | 0.00218 | 0.00350 | 0.00070 | 0.00130 |
| 3.75-               | 0.00196 | 0.00546 | 0.01135 | 0.01581 | 0.02637 | 0.01423 | 0.01397 | 0.00335 | 0.00431 | 0.00085 | 0.00154 |
| 2.75-               | 0.00798 | 0.02035 | 0.03727 | 0.04186 | 0.04662 | 0.01749 | 0.01355 | 0.00356 | 0.00407 | 0.00100 | 0.00190 |
| 1.75-               | 0.04124 | 0.06443 | 0.07324 | 0.05148 | 0.04241 | 0.01367 | 0.01143 | 0.00260 | 0.00318 | 0.00102 | 0.00248 |
| 0.75-               | 0.10243 | 0.06575 | 0.04070 | 0.02197 | 0.01741 | 0.00533 | 0.00508 | 0.00098 | 0.00154 | 0.00049 | 0.00134 |
| 0.00-               | 0.03403 | 0.00648 | 0.00237 | 0.00100 | 0.00090 | 0.00030 | 0.00038 | 0.00008 | 0.00000 | 0.00000 | 0.00000 |

Table 2.15 : Occurrence probability of observed wave directions ( $\chi$  [deg.]) on PNW route

| $\chi$ | Probability |
|--------|-------------|
| 0.0    | 0.11200     |
| 30.0   | 0.08196     |
| 60.0   | 0.07119     |
| 90.0   | 0.05847     |
| 120.0  | 0.06705     |
| 150.0  | 0.10283     |
| 180.0  | 0.11200     |
| 210.0  | 0.08196     |
| 240.0  | 0.07119     |
| 270.0  | 0.05847     |
| 300.0  | 0.06705     |
| 330.0  | 0.10283     |

Table 2.16 : Occurrence probability of mean wind velocity ( $V_w$  [m/s]) and mean wind directions ( $\gamma$  [deg.]) on PNW route

| $V_w \setminus \gamma$ | 345-    | 015-    | 045-    | 075-    | 105-    | 135-    | 165-    |
|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 70-                    | 0.00001 | 0.00005 | 0.00005 | 0.00002 | 0.00005 | 0.00005 | 0.00001 |
| 60-                    | 0.00002 | 0.00007 | 0.00005 | 0.00002 | 0.00005 | 0.00007 | 0.00002 |
| 50-                    | 0.00030 | 0.00062 | 0.00043 | 0.00028 | 0.00043 | 0.00062 | 0.00030 |
| 40-                    | 0.00204 | 0.00395 | 0.00335 | 0.00256 | 0.00335 | 0.00395 | 0.00204 |
| 30-                    | 0.00898 | 0.01798 | 0.01574 | 0.01379 | 0.01574 | 0.01798 | 0.00898 |
| 20-                    | 0.02518 | 0.04984 | 0.04499 | 0.04043 | 0.04499 | 0.04984 | 0.02518 |
| 10-                    | 0.03930 | 0.07317 | 0.06653 | 0.06090 | 0.06653 | 0.07317 | 0.03930 |
| 0-                     | 0.01569 | 0.02887 | 0.02658 | 0.02663 | 0.02658 | 0.02887 | 0.01569 |

Table 4.1 : Maximum wave height of 1/N

| $N$ | $\frac{H_{1/N}}{\sigma}$ |                 | Remarks                       |
|-----|--------------------------|-----------------|-------------------------------|
|     | Rayleigh                 | Crest-to-Trough |                               |
| 10  | 5.095                    | 4.887           | Significant Wave<br>Mean Wave |
| 5   | 4.501                    | 4.232           |                               |
| 3   | 4.006                    | 3.930           |                               |
| 1   | 2.507                    | 2.506           |                               |

Table 4.2 : Variations of long term prediction for vertical bending moment changing wave statistics of observed wave heights ( $H_V$  [m]) and observed wave periods ( $T_V$  [s]) on PSW route ( $\alpha = 10^{-5}$ ,  $Q_q = 10^{-8}$ )

| $H_V \setminus T_V$ | 0.0-    | 5.0-    | 6.0-    | 7.0-    | 8.0-     | 9.0-     | 10.0-   | 11.0-   | 12.0-   | 13.0-   | 14.0-   |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 14.75-              | 0.99999 | 1.00009 | 1.52644 | 6.28317 | 10.99069 | 10.31716 | 6.63073 | 3.40007 | 1.73700 | 1.16300 | 1.02585 |
| 13.75-              | 0.99999 | 1.00000 | 1.17580 | 3.46653 | 6.11665  | 5.72357  | 3.65324 | 1.99915 | 1.25845 | 1.04590 | 1.00556 |
| 12.75-              | 0.99999 | 0.99999 | 1.04537 | 1.96290 | 3.23935  | 3.04159  | 2.04770 | 1.33857 | 1.07086 | 1.00959 | 1.00083 |
| 11.75-              | 0.99999 | 0.99999 | 1.00829 | 1.29580 | 1.79401  | 1.71261  | 1.32650 | 1.08708 | 1.01396 | 1.00134 | 1.00007 |
| 10.75-              | 0.99999 | 0.99999 | 1.00094 | 1.06542 | 1.21095  | 1.18556  | 1.07354 | 1.01534 | 1.00174 | 1.00010 | 0.99999 |
| 9.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 1.00005 | 1.00910 | 1.03731  | 1.03197  | 1.01048 | 1.00158 | 1.00011 | 0.99999 | 0.99999 |
| 8.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 1.00064 | 1.00364  | 1.00301  | 1.00076 | 1.00007 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 7.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 1.00001 | 1.00014  | 1.00011  | 1.00001 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 6.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999  | 0.99999  | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 5.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999  | 0.99999  | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 4.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999  | 0.99999  | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 3.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999  | 0.99999  | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 2.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999  | 0.99999  | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 1.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999  | 0.99999  | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 0.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999  | 0.99999  | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 0.00-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999  | 0.99999  | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |

Table 4.3 : Variations of long term prediction for vertical bending moment changing wave statistics of observed wave direction ( $\chi$  [deg.]) on PSW route ( $\beta = 10^{-5}$ ,  $Q_q = 10^{-8}$ )

| $\chi$ | $\frac{Q_q''}{Q_q}$ |
|--------|---------------------|
| 0.0    | 1.00000             |
| 30.0   | 0.99999             |
| 60.0   | 0.99999             |
| 90.0   | 0.99999             |
| 120.0  | 0.99999             |
| 150.0  | 1.00000             |
| 180.0  | 1.00003             |

Table 4.4 : Variations of long term prediction for horizontal bending moment changing wave statistics of observed wave heights ( $H_V$  [m]) and observed wave periods ( $T_V$  [s]) on PSW route ( $\alpha = 10^{-5}$ ,  $Q_q = 10^{-8}$ )

| $H_V \setminus T_V$ | 0.0-    | 5.0-    | 6.0-    | 7.0-    | 8.0-    | 9.0-    | 10.0-   | 11.0-   | 12.0-   | 13.0-   | 14.0-   |
|---------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 14.75-              | 0.99999 | 0.99999 | 1.00000 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 13.75-              | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 12.75-              | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 11.75-              | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 10.75-              | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 9.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 8.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 7.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 6.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 5.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 4.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 3.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 2.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 1.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 0.75-               | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |
| 0.375-              | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 | 0.99999 |

Table 4.5 : Variations of long term prediction for horizontal bending moment changing wave statistics of observed wave direction ( $\chi$  [deg.]) on PSW route ( $\beta = 10^{-5}$ ,  $Q_q = 10^{-8}$ )

| $\chi$ | $\frac{Q_q''}{Q_q}$ |
|--------|---------------------|
| 0.0    | 0.99999             |
| 30.0   | 0.99999             |
| 60.0   | 1.00003             |
| 90.0   | 1.00001             |
| 120.0  | 0.99999             |
| 150.0  | 0.99999             |
| 180.0  | 0.99999             |

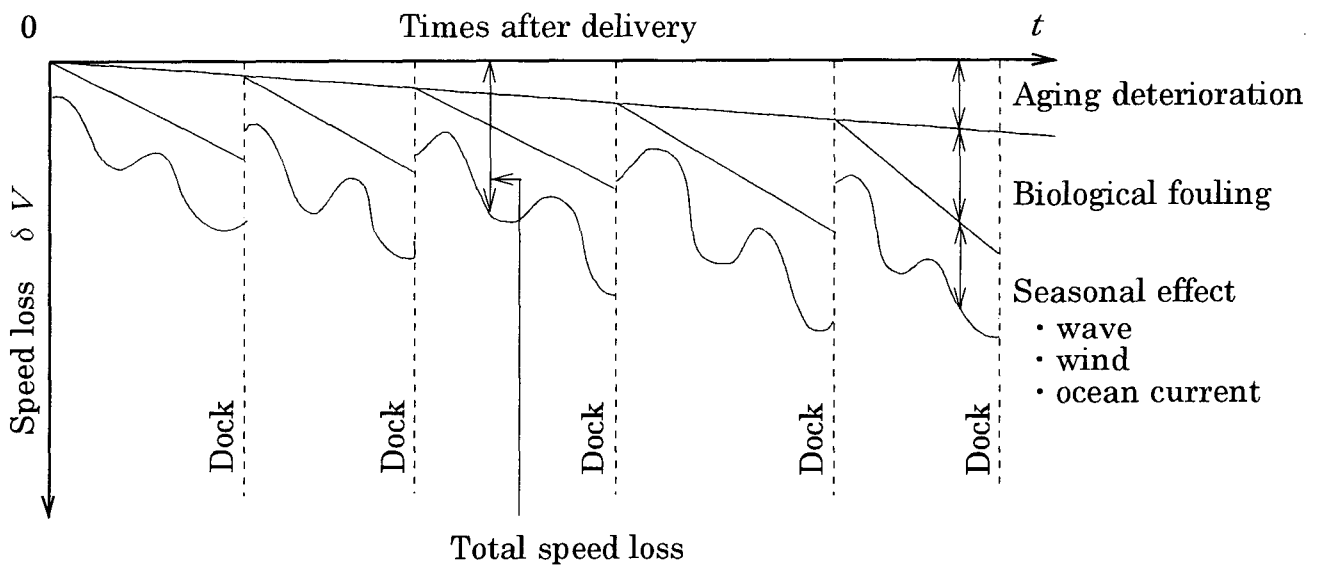


Fig.2.1 : Time history of ship speed after ship delivery



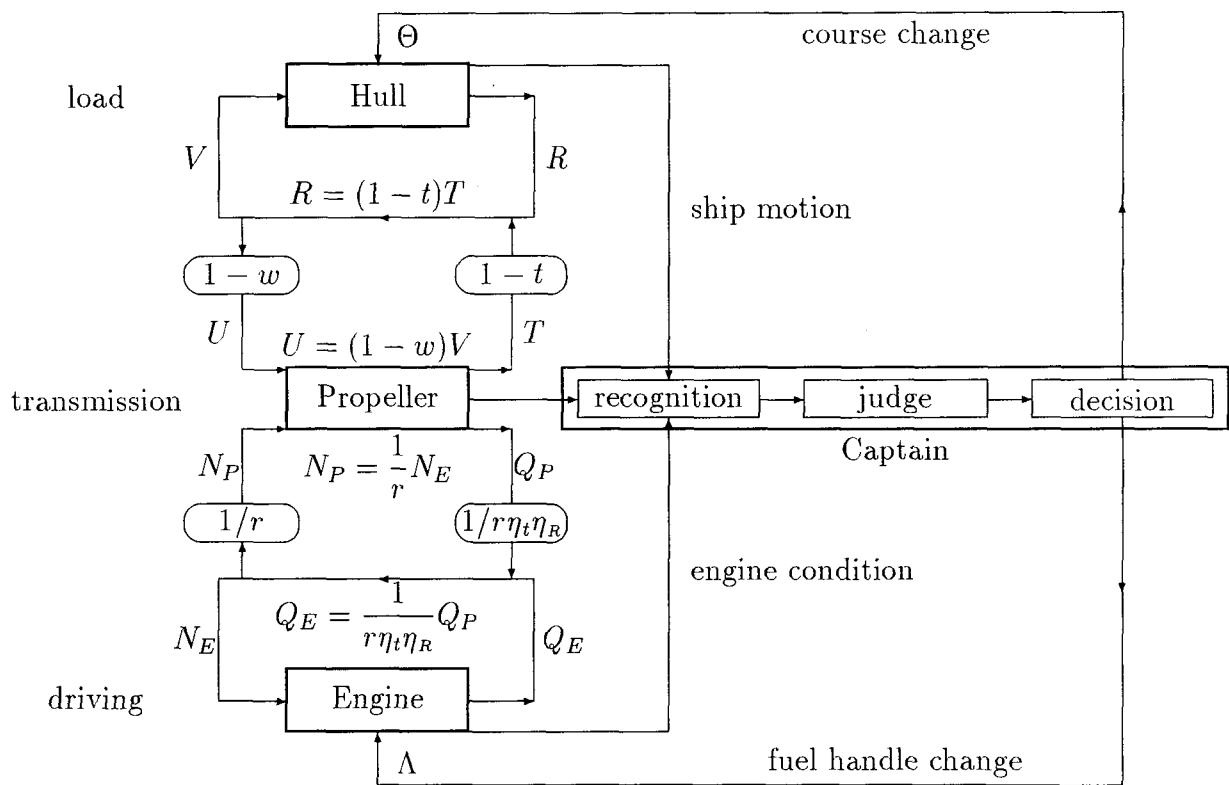


Fig.2.2 : Propulsive system

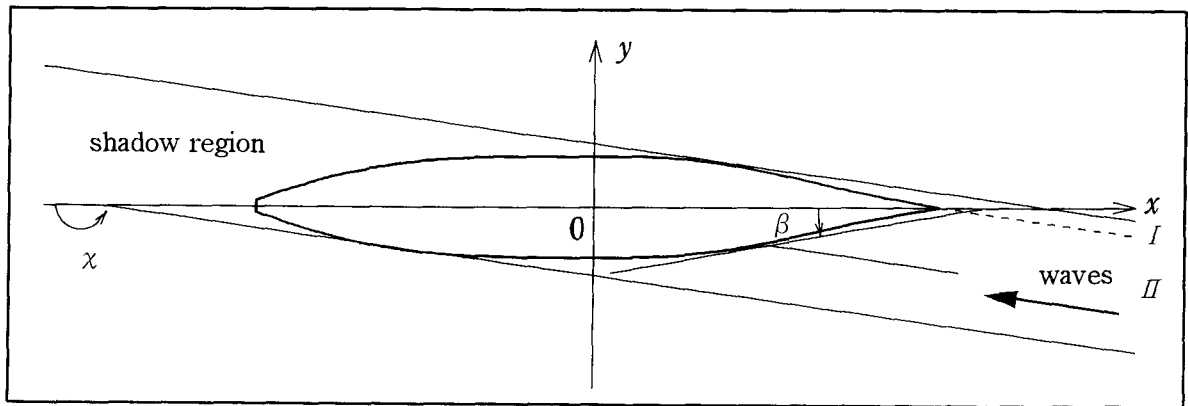


Fig.2.3 : Coordinate system for calculation of added resistance due to wave reflection

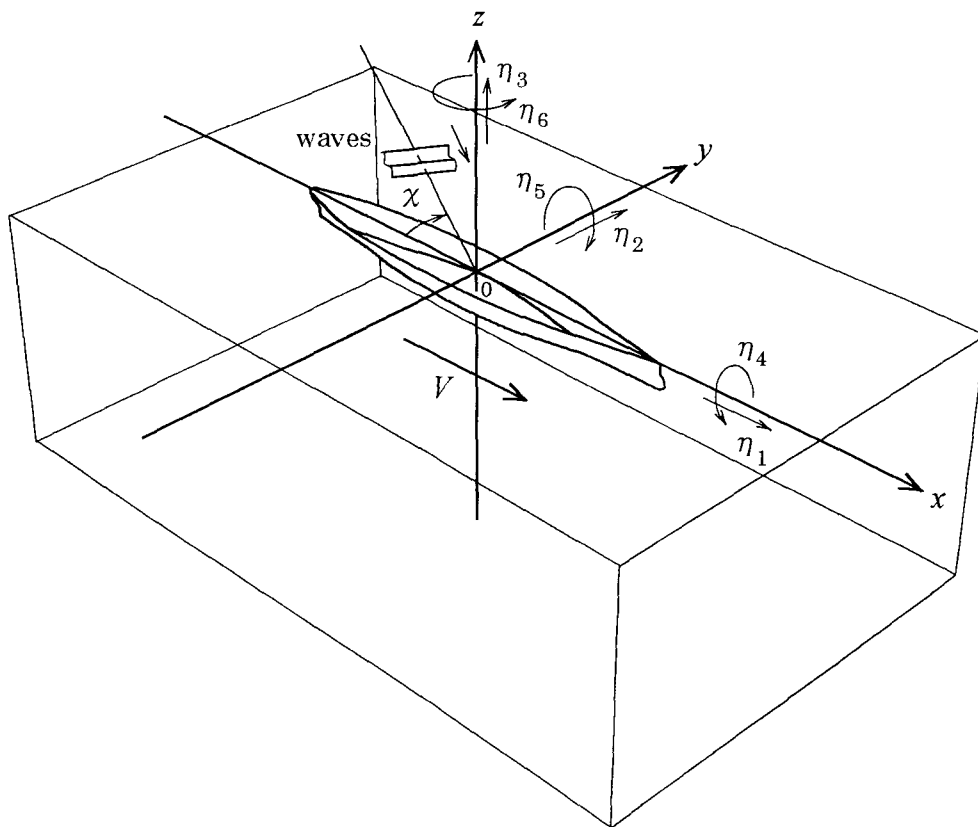


Fig.2.4 : Coordinate system for calculation of added resistance due to ship motion in waves

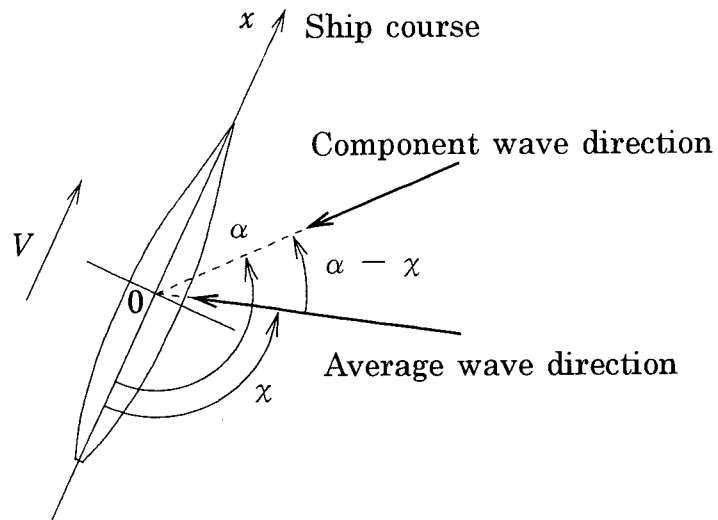


Fig.2.5 : Wave direction and ship course

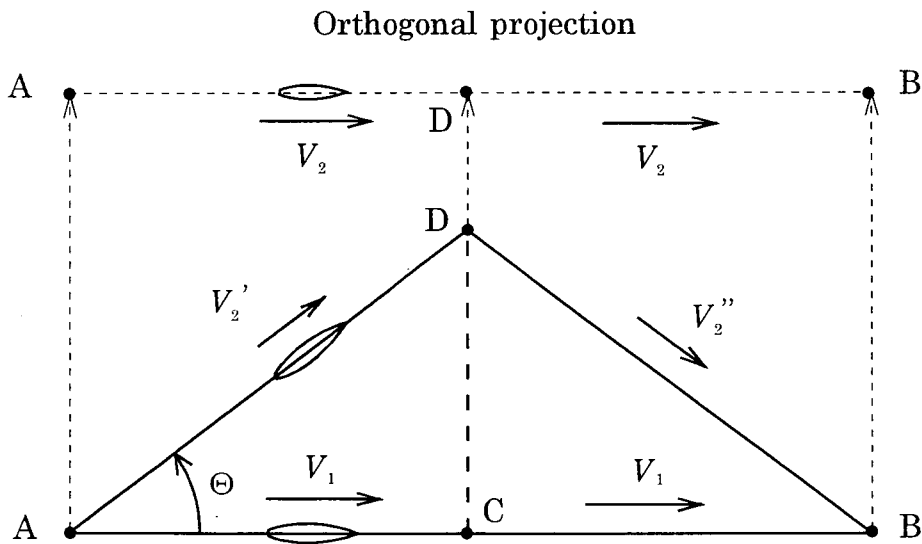


Fig.2.6 : Deliberate course change for ship speed calculation

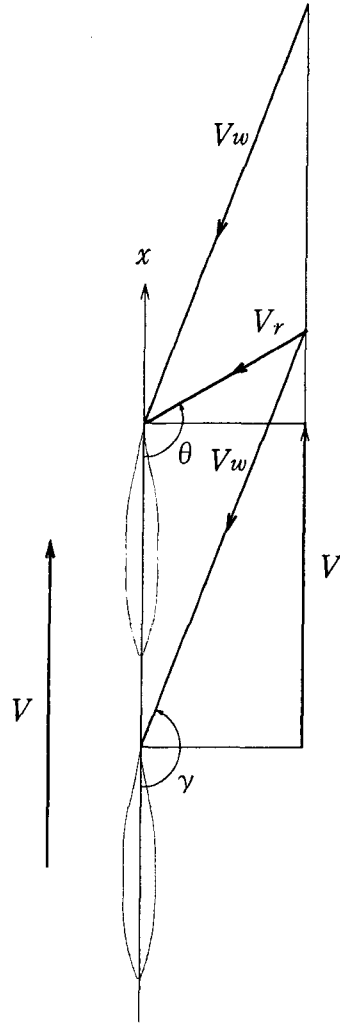
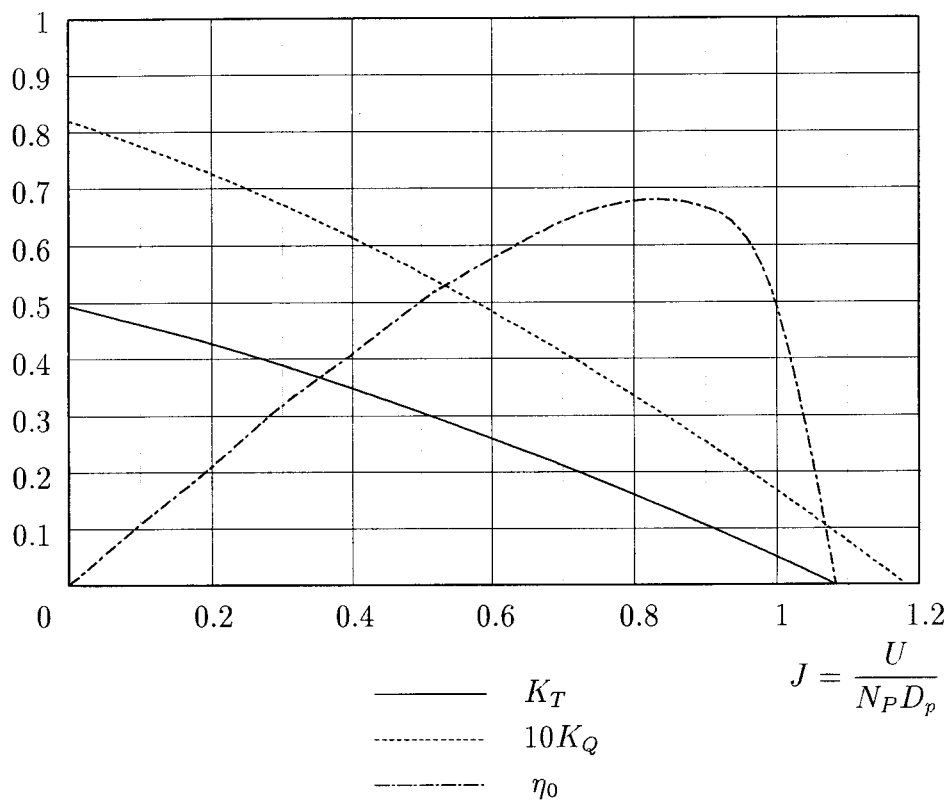


Fig.2.7 : Wind direction and ship course



$U$  : propeller advance speed  
 $N_P$  : propeller revolution number per unit time  
 $D_p$  : propeller diameter  
 $K_T = k_{t0} + k_{t1}J + k_{t2}J^2$   
 $K_Q = k_{q0} + k_{q1}J + k_{q2}J^2$

Fig.2.8 : Propeller open chart

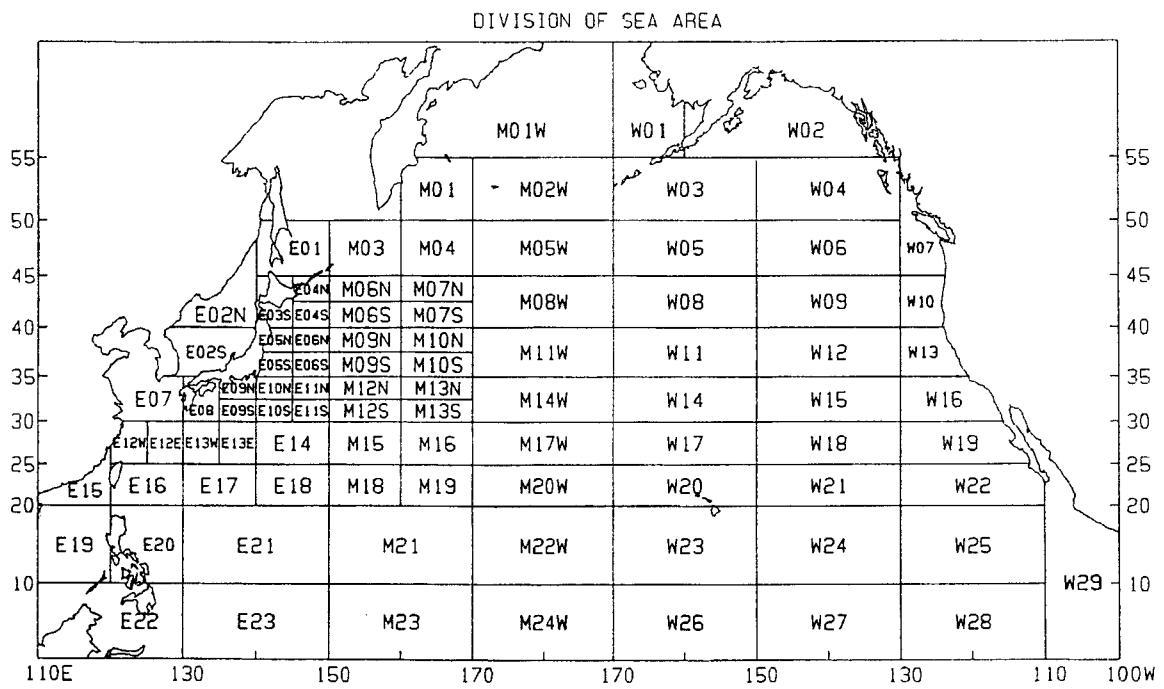


Fig.2.9 : Sea area

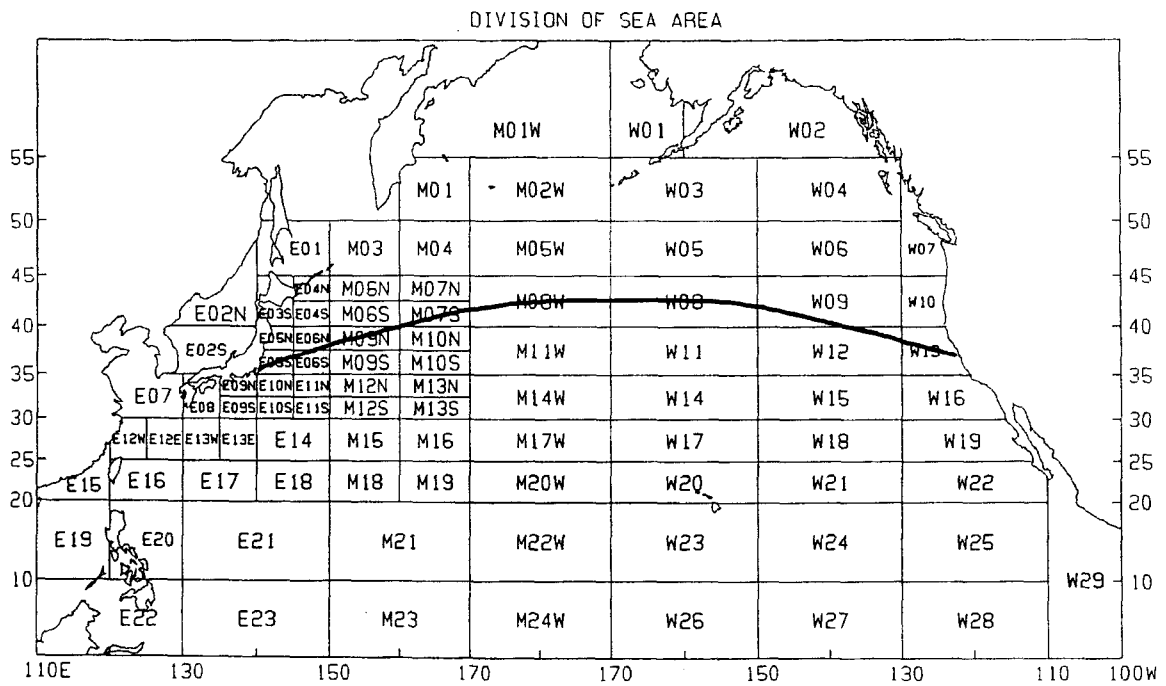


Fig.2.10 : PSW route

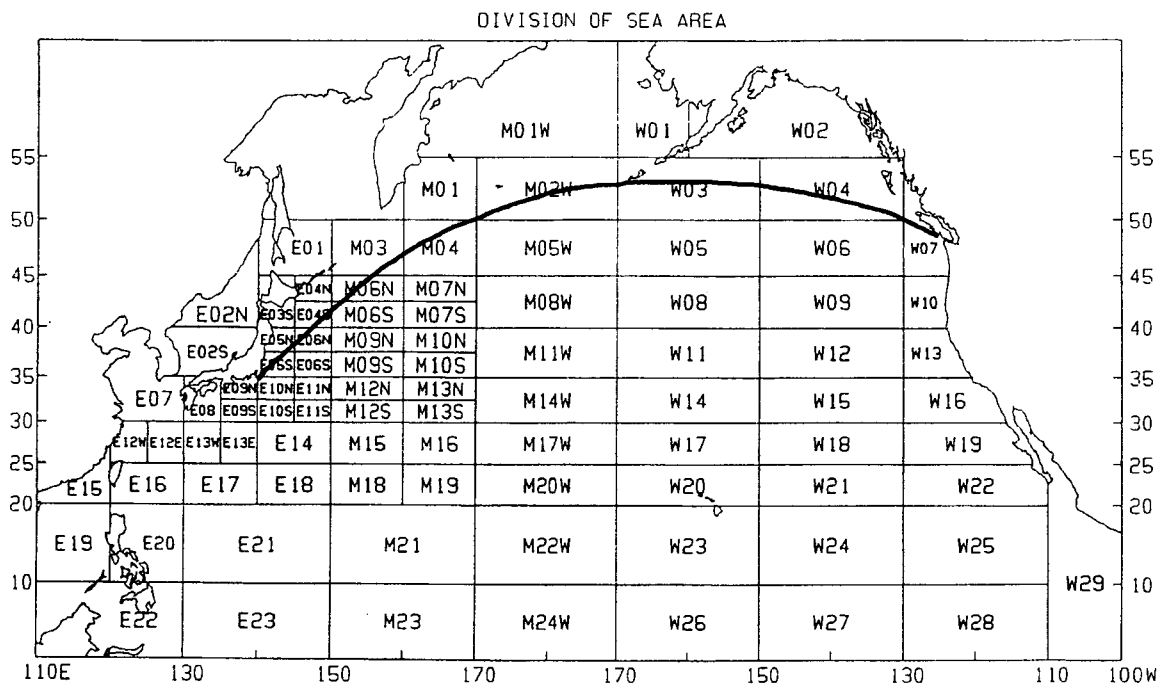


Fig.2.11 : PNW route



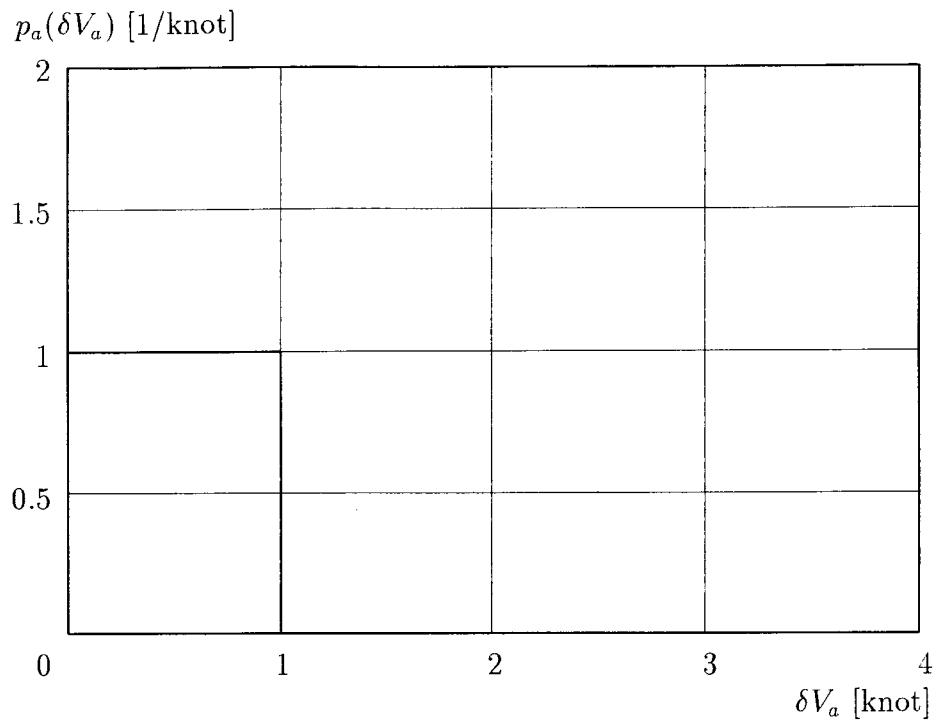


Fig.2.12 : Probability density function of ship speed loss due to aging deterioration

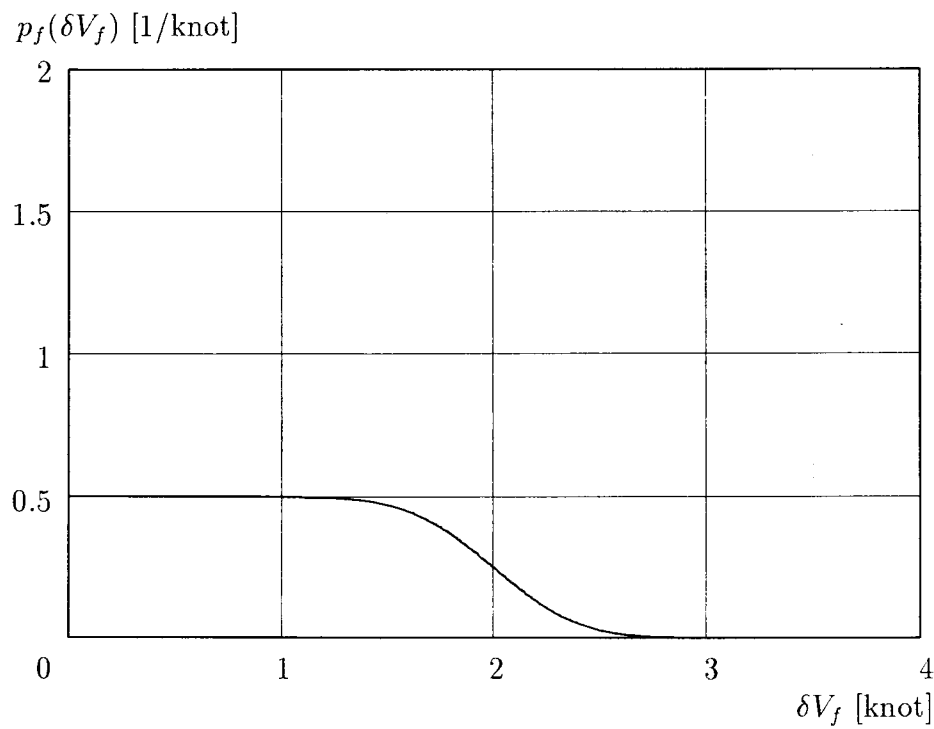


Fig.2.13 : Probability density function of ship speed loss due to biological fouling

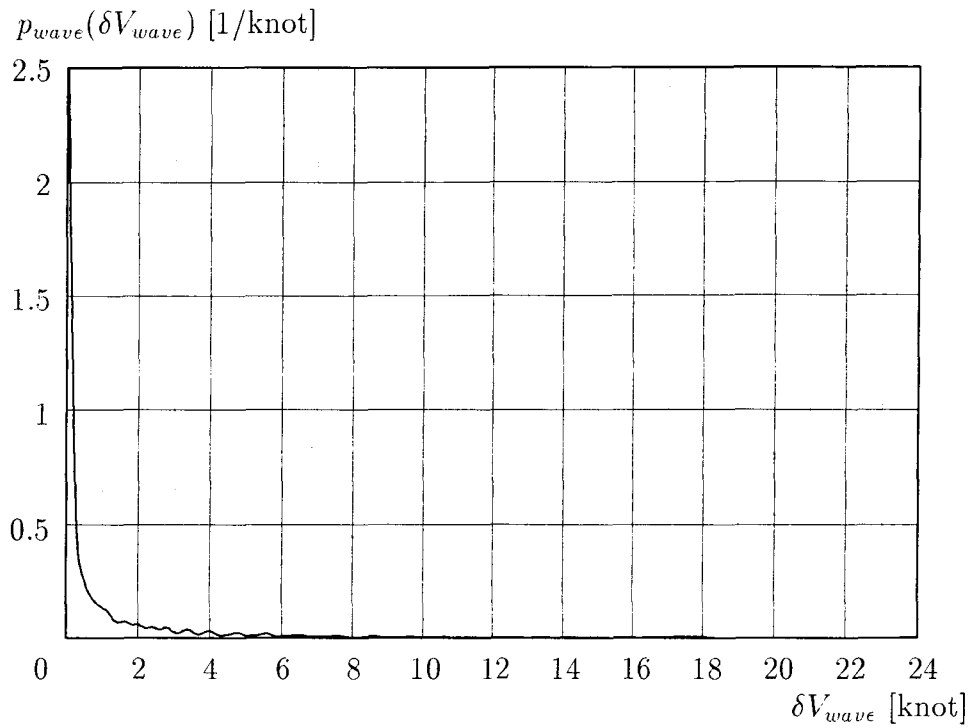


Fig.2.14 : Probability density function of ship speed loss due to wave

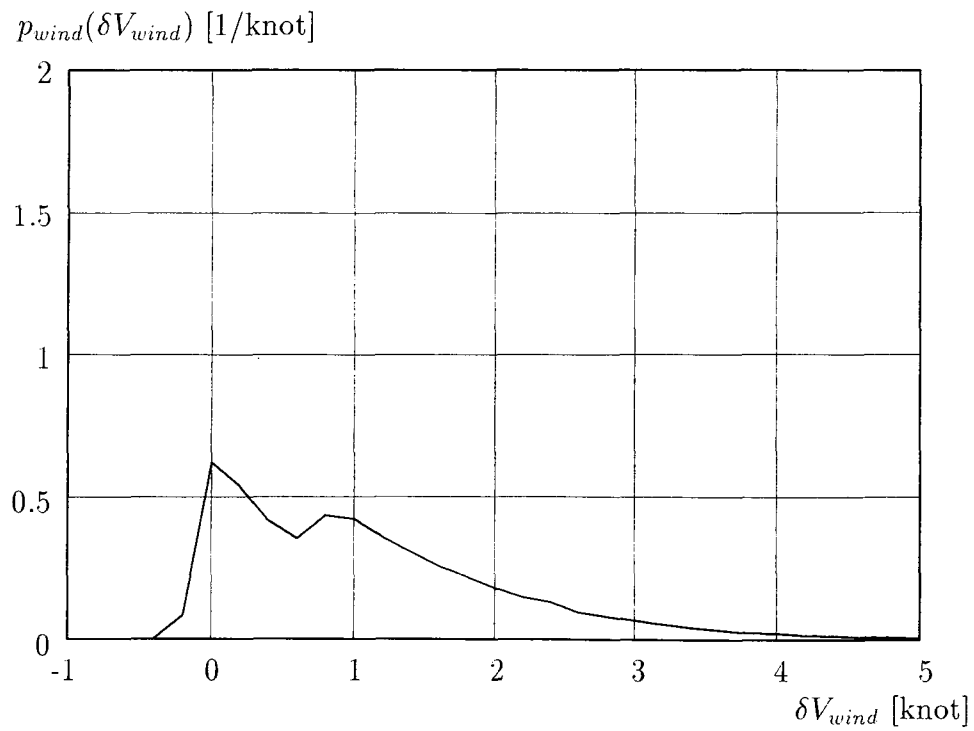


Fig.2.15 : Probability density function of ship speed loss due to wind

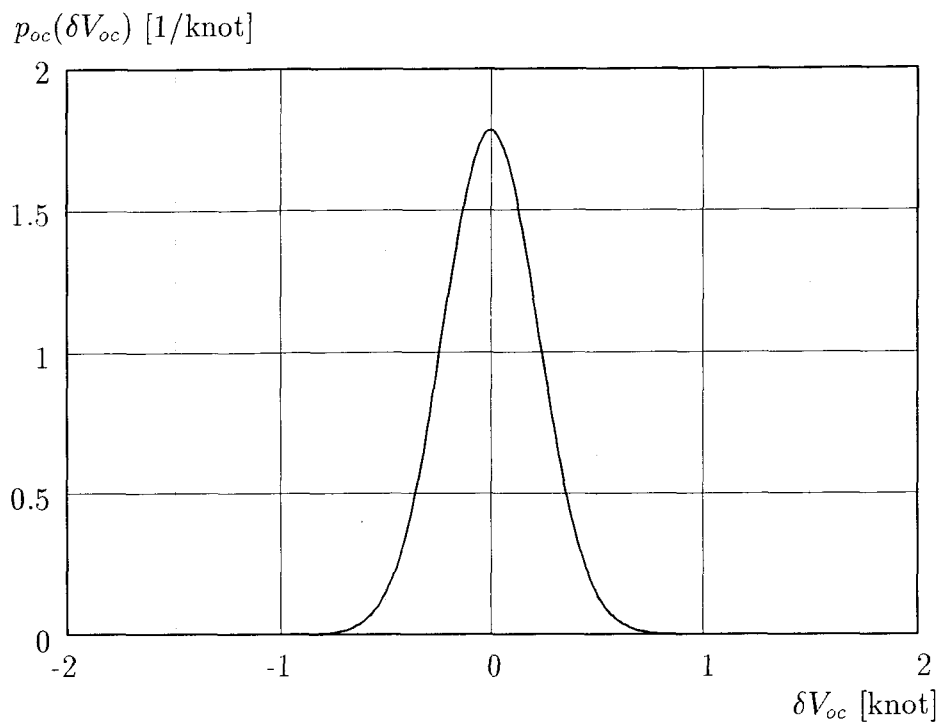


Fig.2.16 : Probability density function of ship speed loss due to ocean current

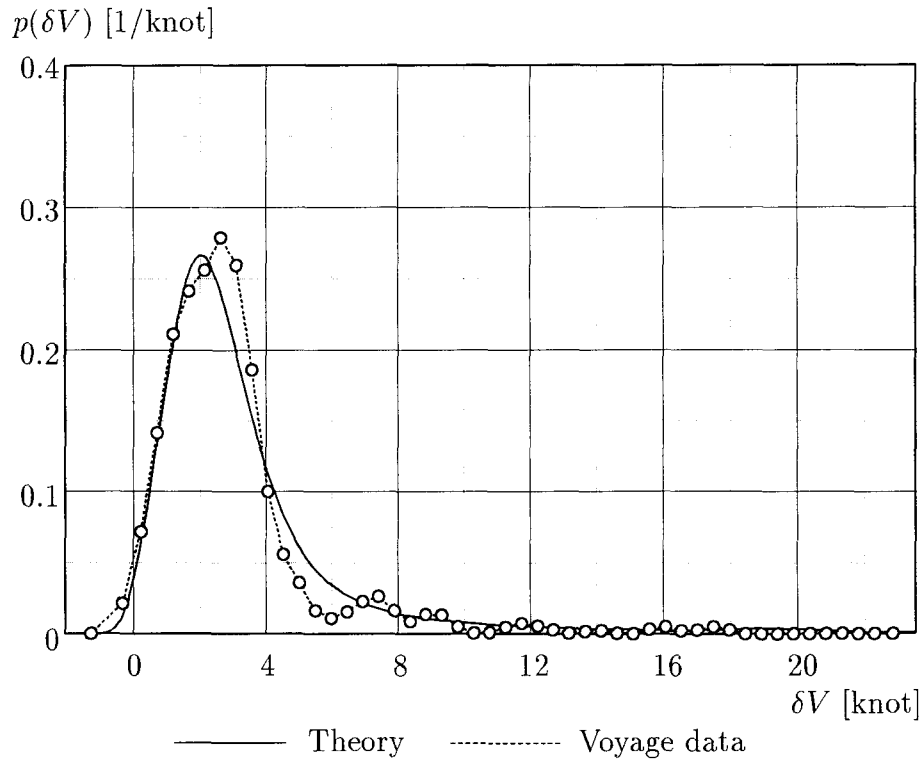


Fig.2.17 : Probability density function of ship speed loss in actual seas for 10 years on PSW route ( $V_0=23.5$  [knot])

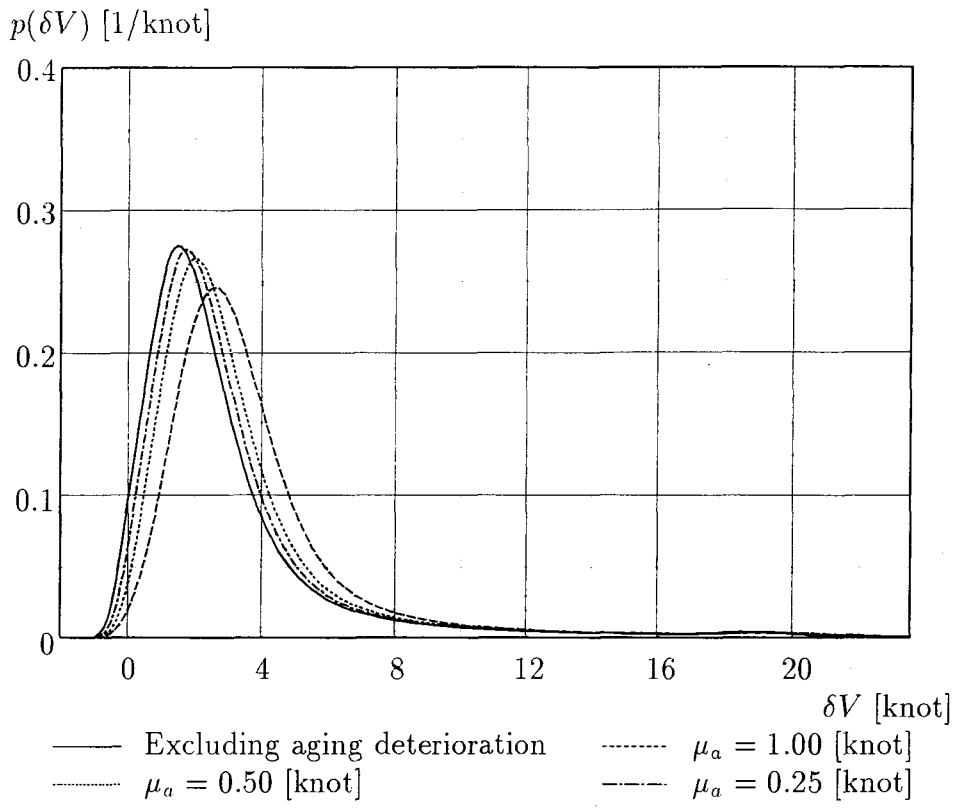


Fig.2.18 : Parametric study on aging deterioration

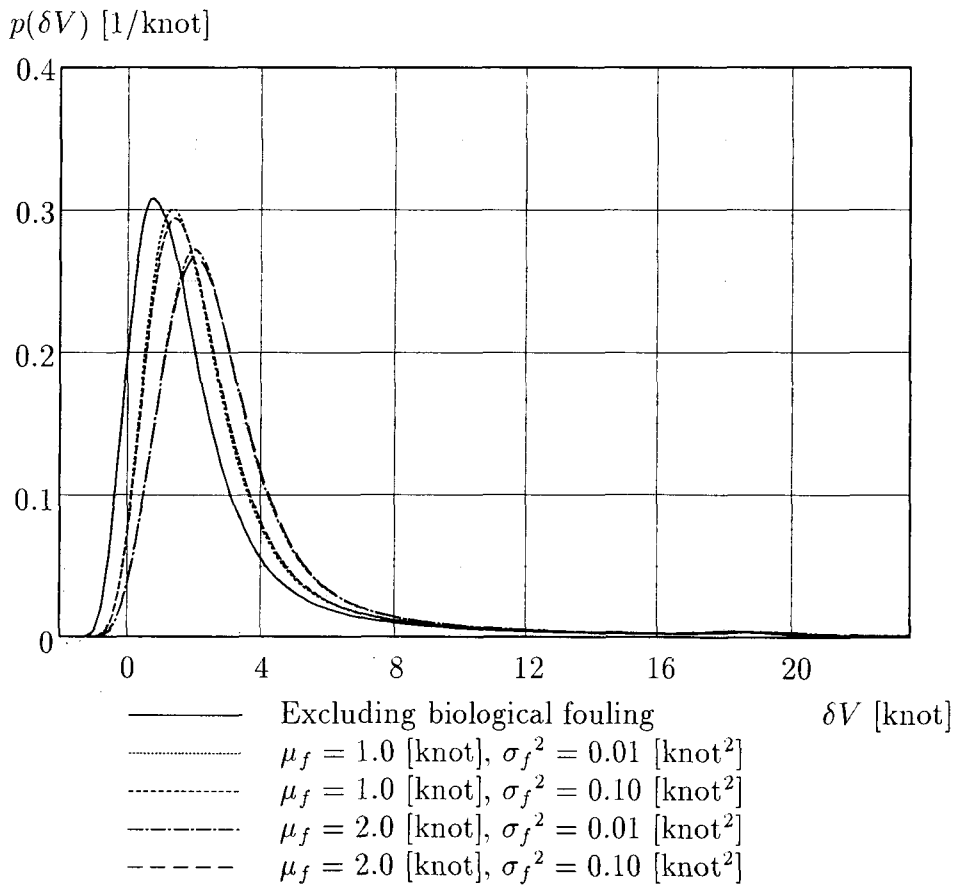


Fig.2.19 : Parametric study on biological fouling

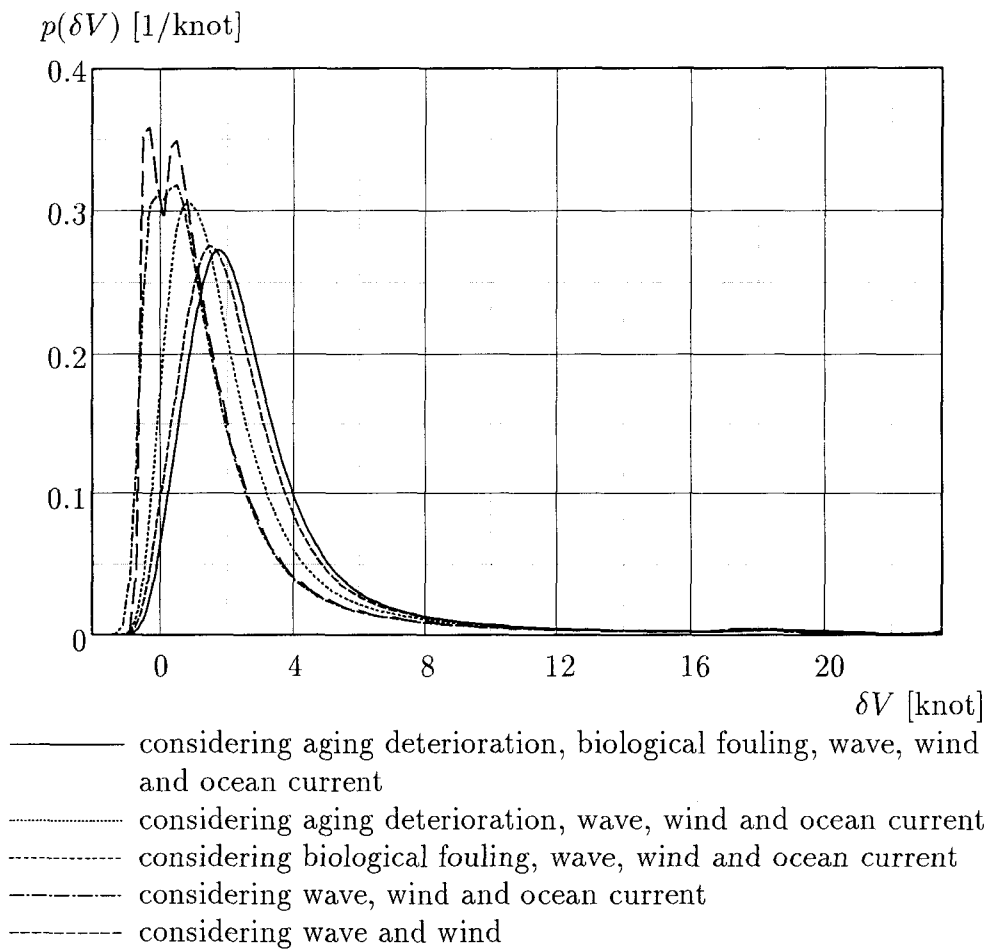


Fig.2.20 : Parametric study on ship speed loss

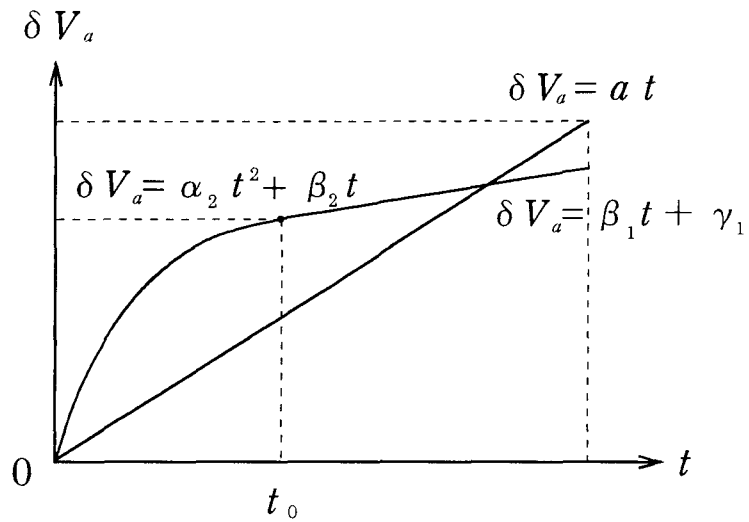


Fig.2.21 : Comparison of time history due to aging deterioration between linear and quadratic fitting

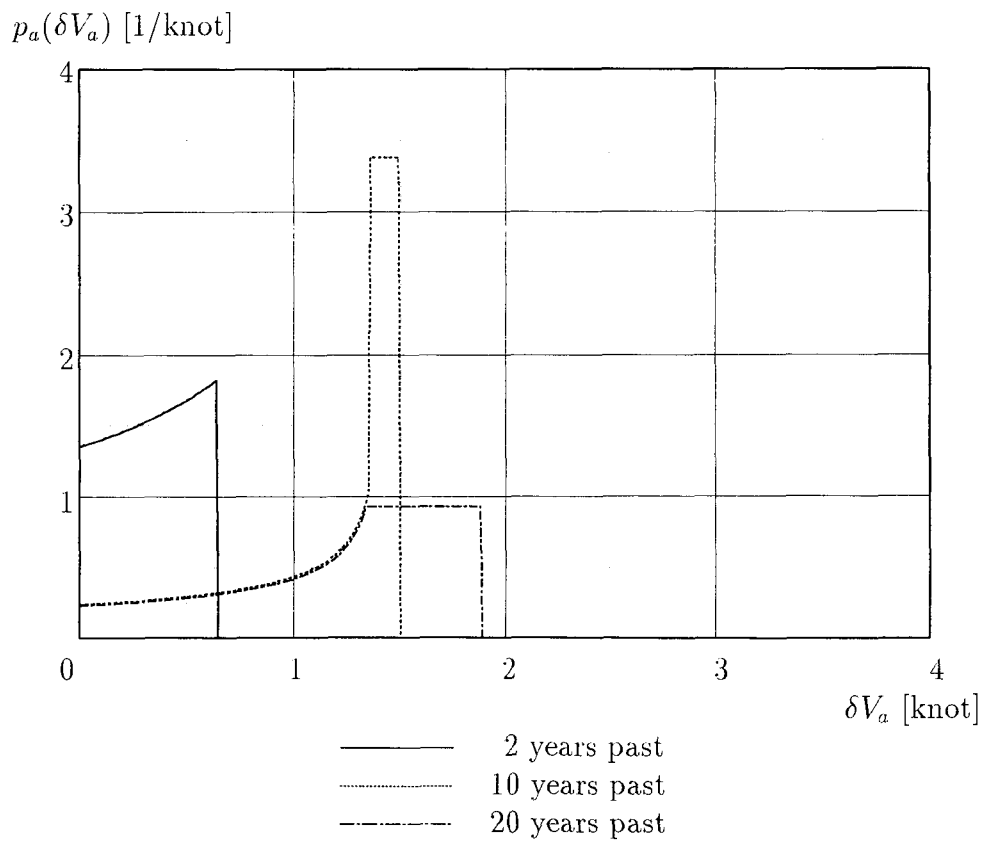


Fig.2.22 : Variations of probability density function of ship speed loss due to aging deterioration (in case of quadratic curve of the time history)

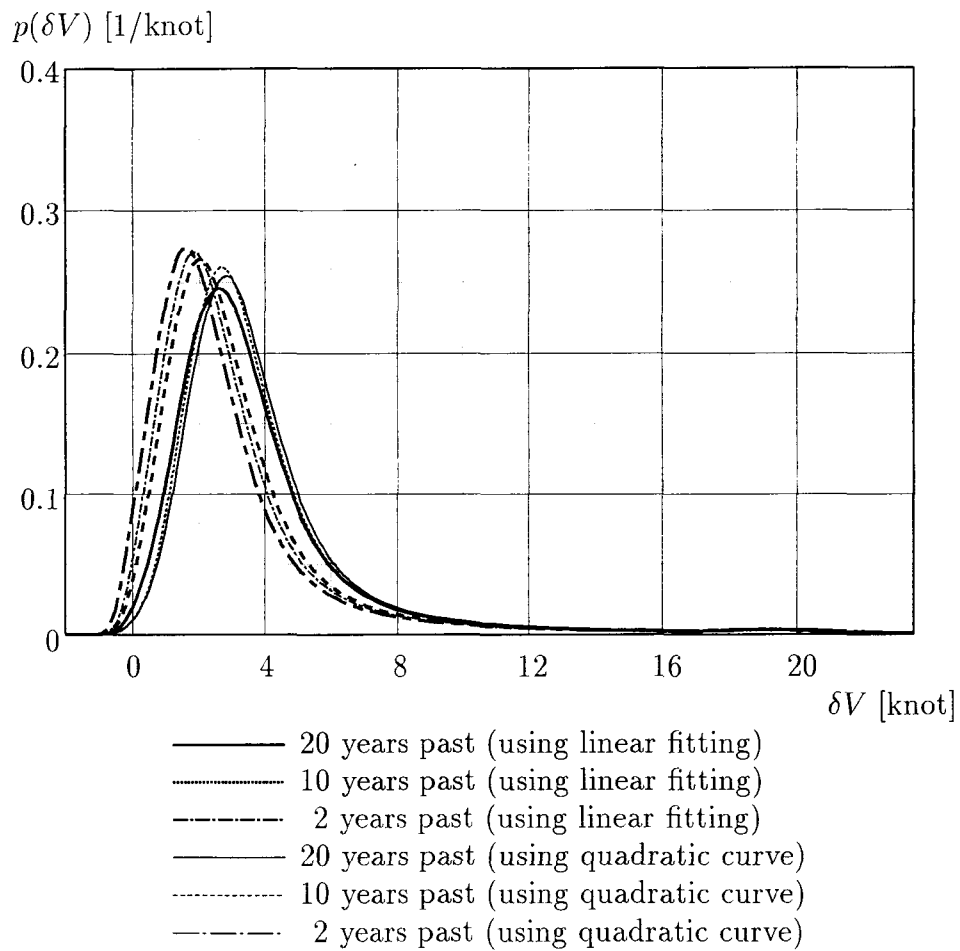


Fig.2.23 : Probability density function of ship speed loss in actual seas on PSW route

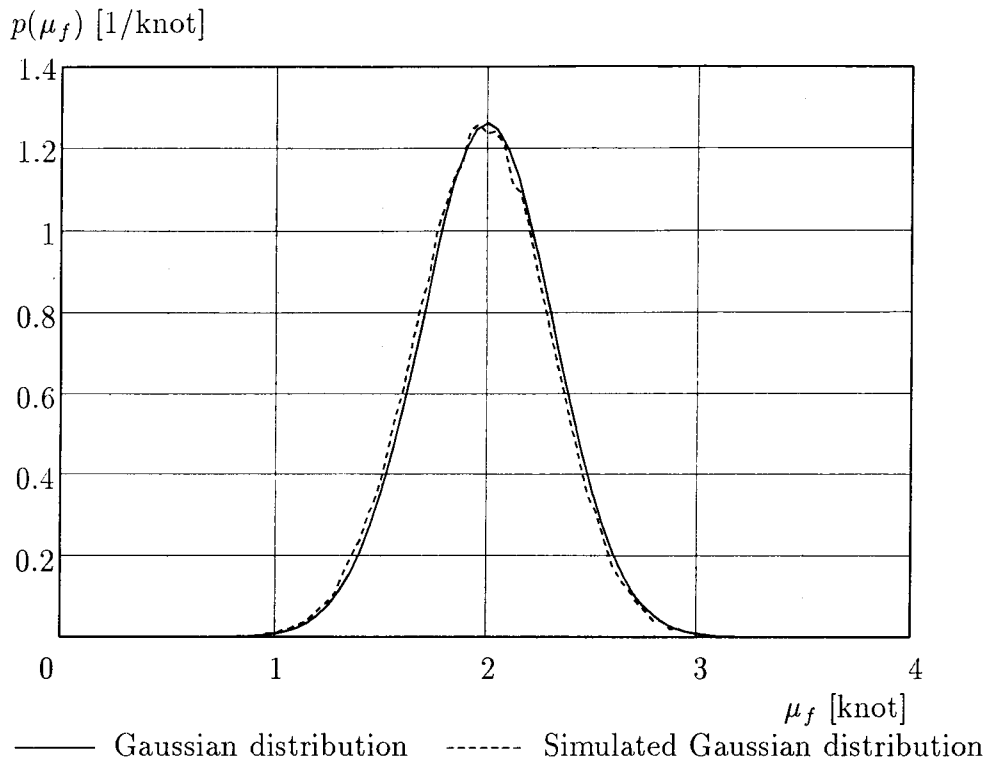


Fig.2.24 : Distribution of random variables

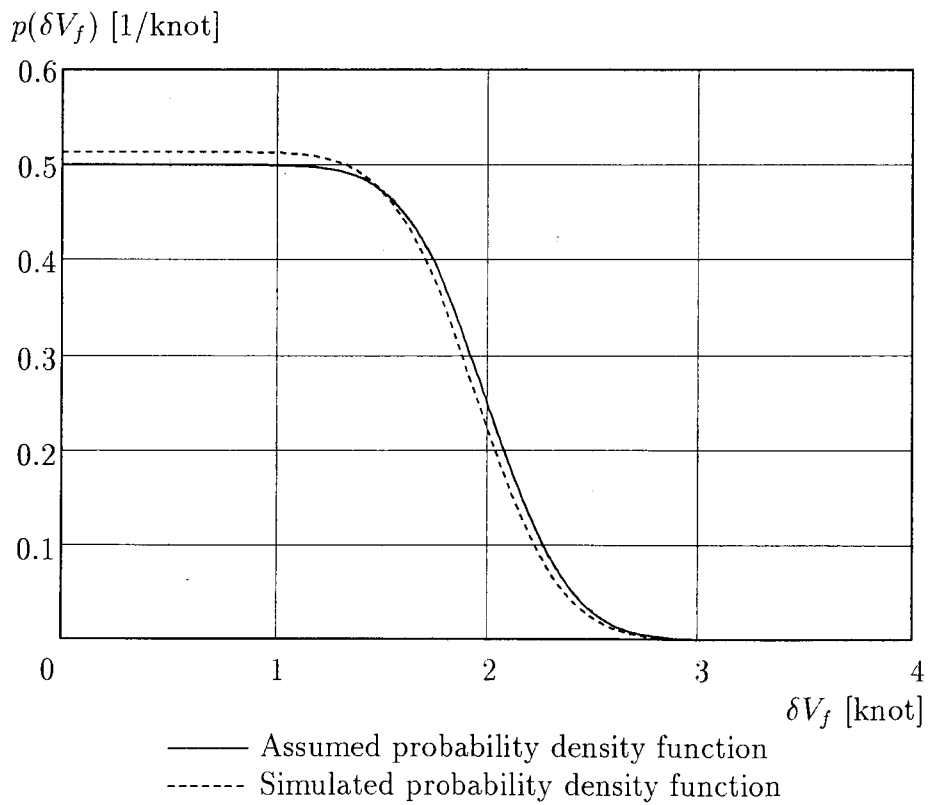


Fig.2.25 : Comparison of assumed and simulated probability density function of ship speed loss due to biological fouling



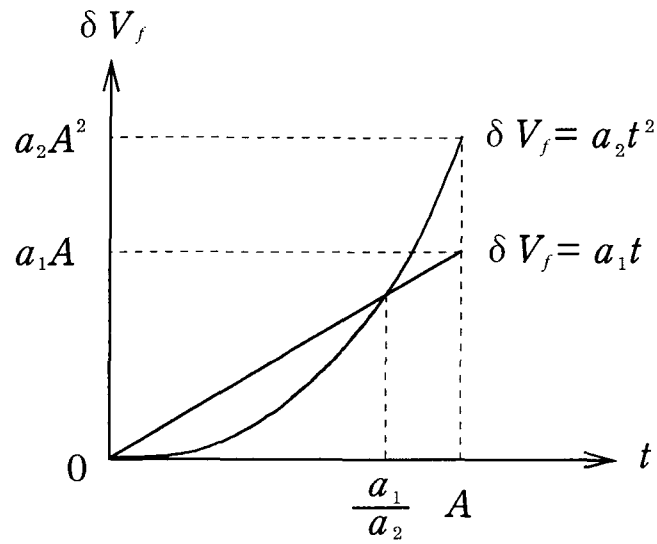


Fig.2.26 : Comparison of time history due to biological fouling between linear and quadratic fitting

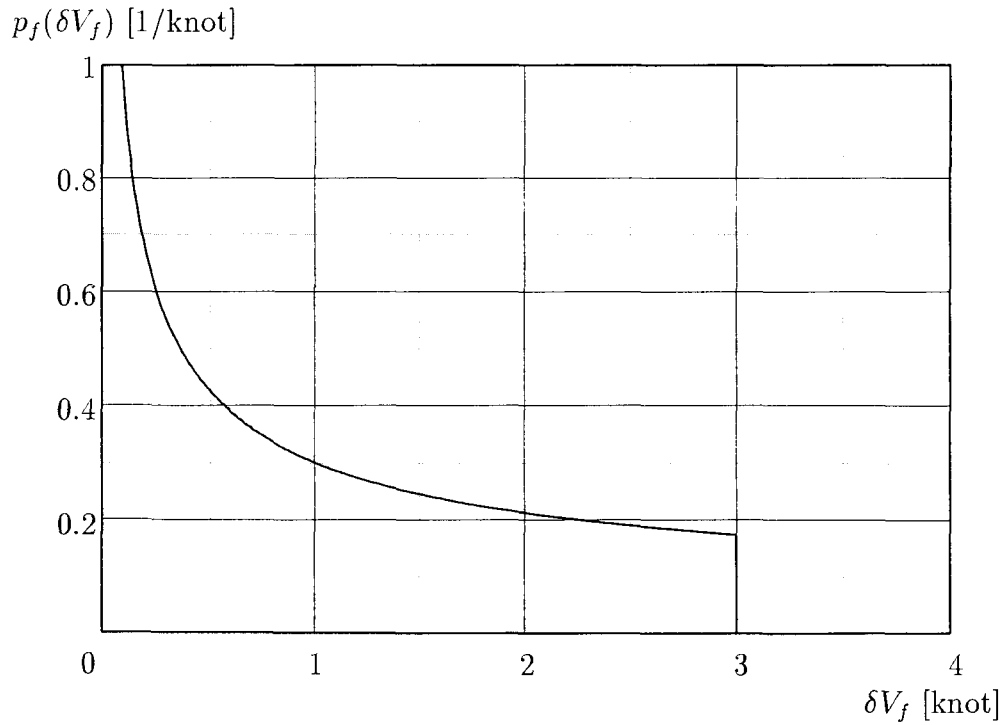


Fig.2.27 : Probability density function of ship speed loss due to biological fouling (from dock-out to dock-in)

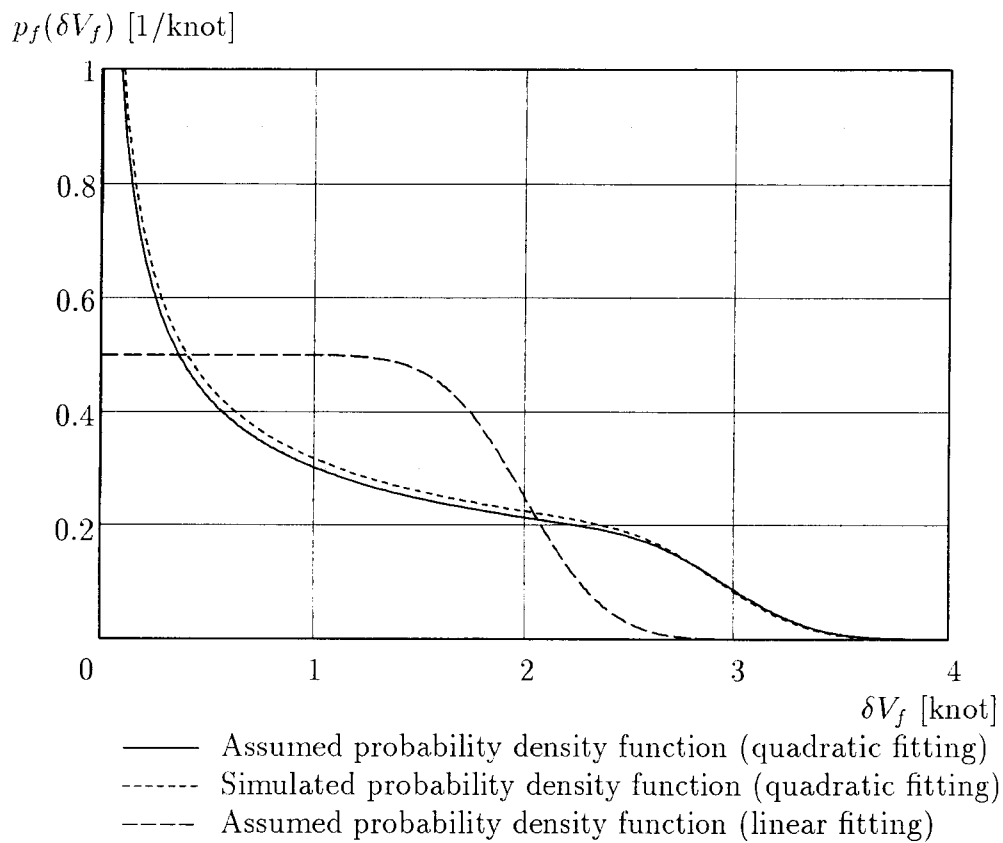


Fig.2.28 : Comparison of probability density function of ship speed loss due to biological fouling between assumed and simulated one (linear and quadratic fitting of time history due to biological fouling)

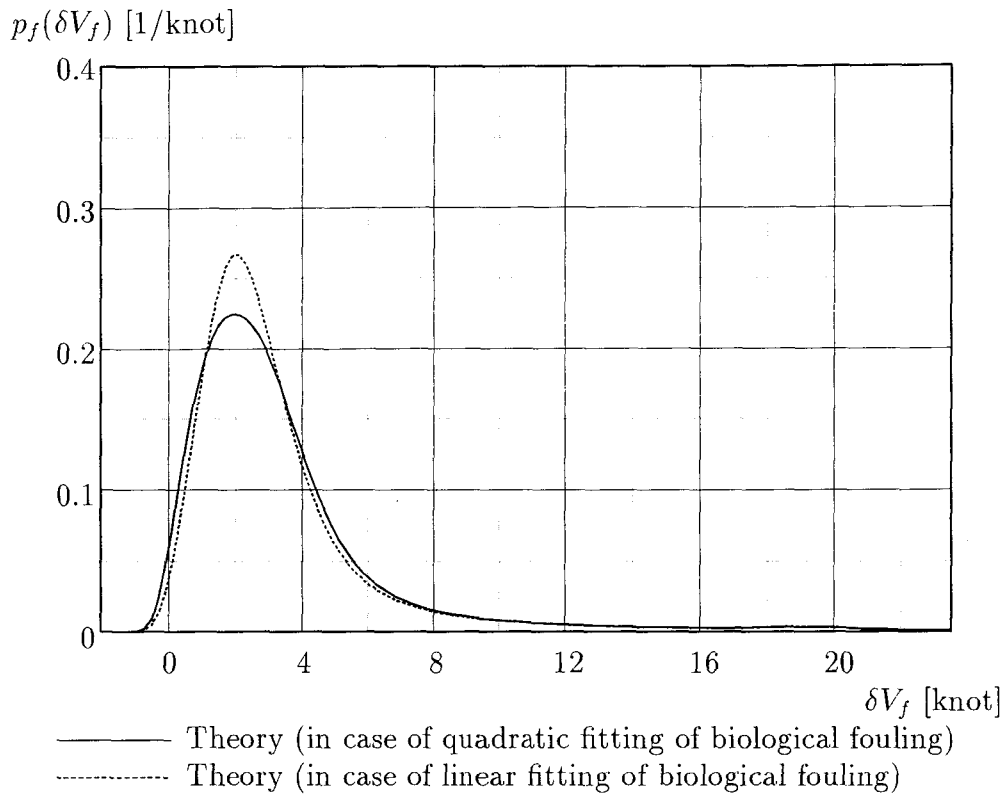


Fig.2.29 : Probability density function of ship speed loss in actual seas for 10 years on PSW route

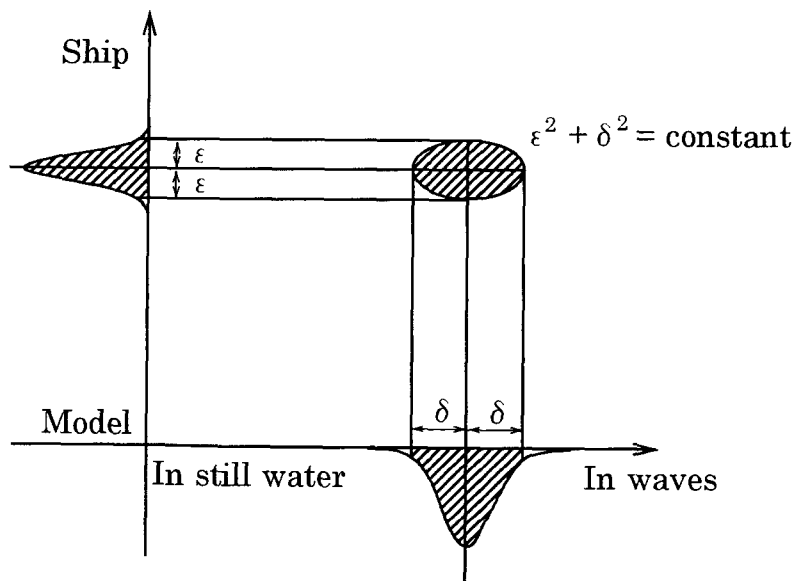


Fig.2.30 : Error factors of estimation on ship performance in actual seas

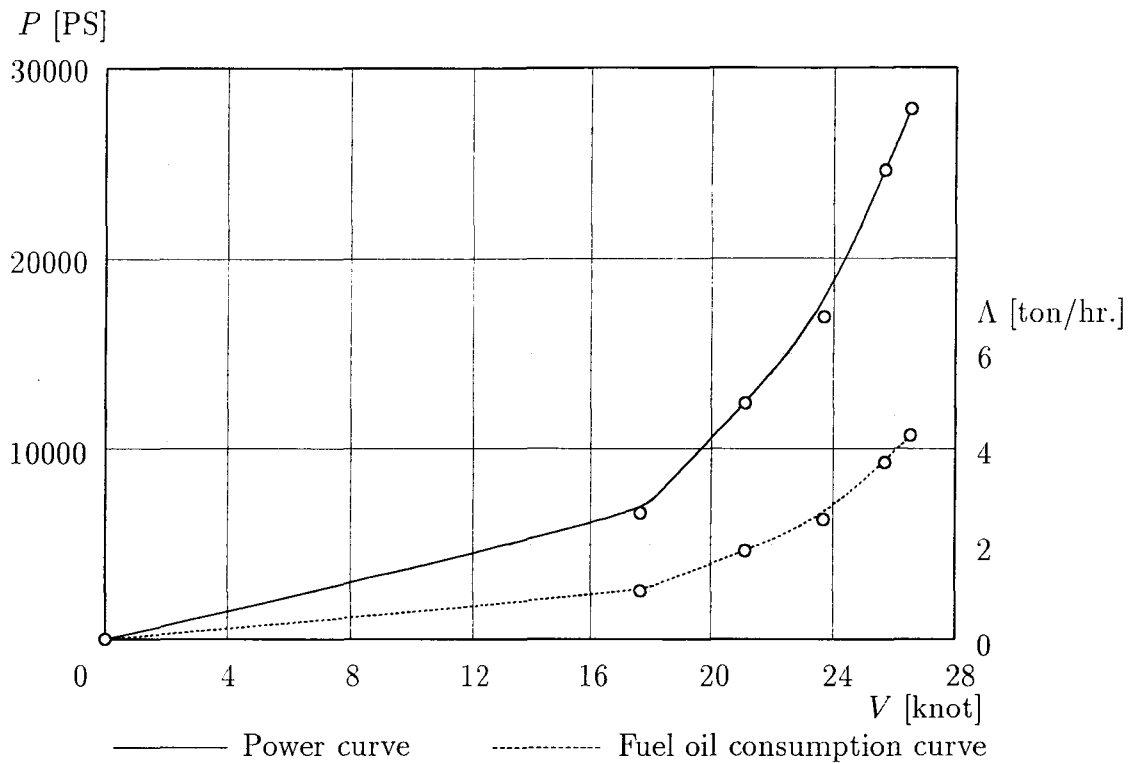


Fig.2.31 : Trial result with B-spline fitting

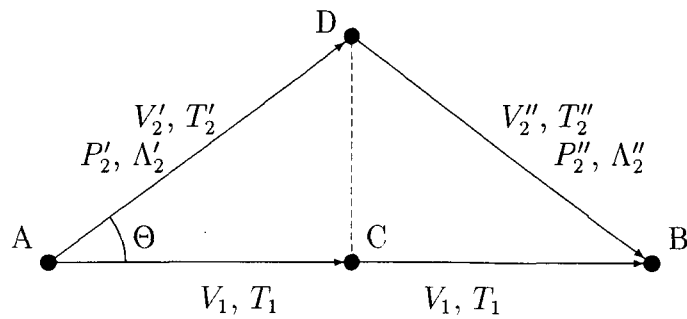


Fig.2.32 : Deliberate course change

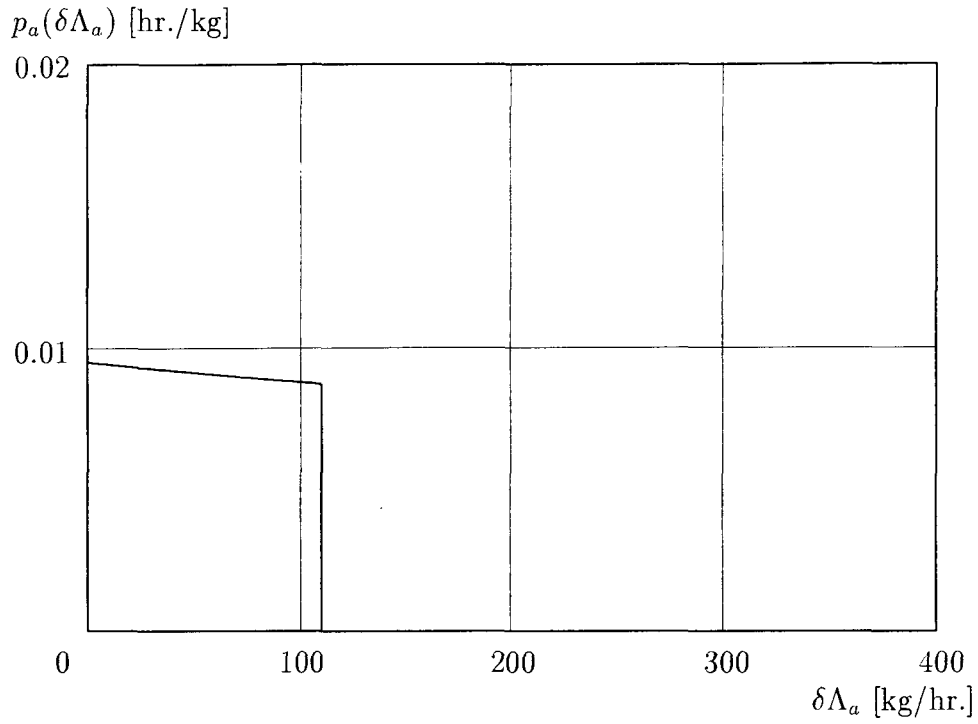


Fig.2.33 : Probability density function of fuel oil consumption due to aging deterioration

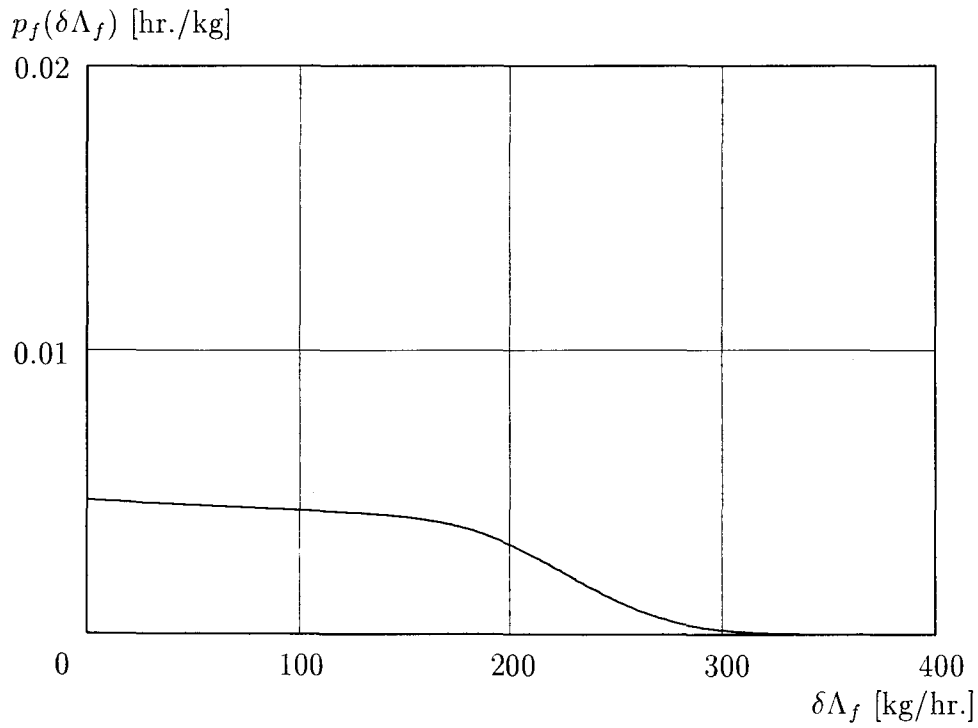


Fig.2.34 : Probability density function of fuel oil consumption due to biological fouling

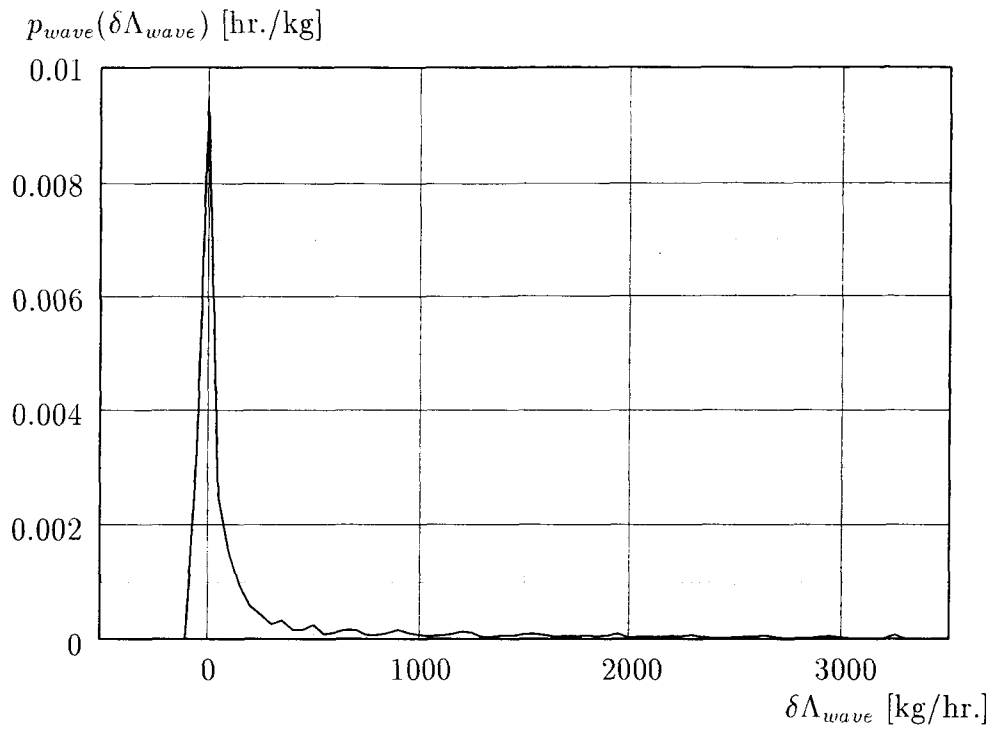


Fig.2.35 : Probability density function of fuel oil consumption due to wave

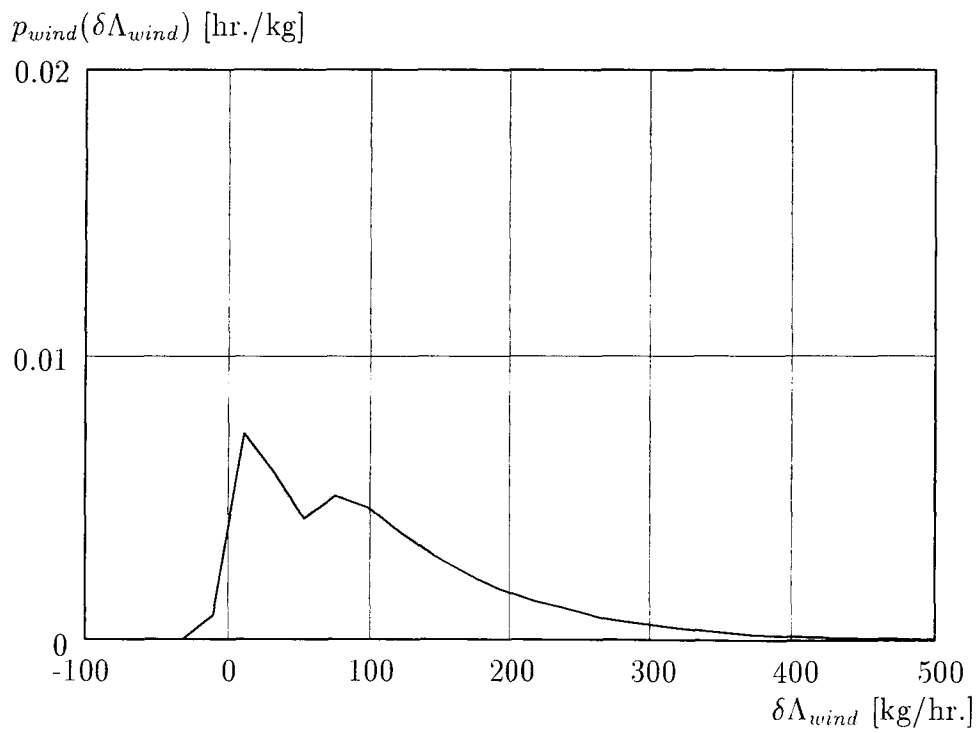


Fig.2.36 : Probability density function of fuel oil consumption due to wind

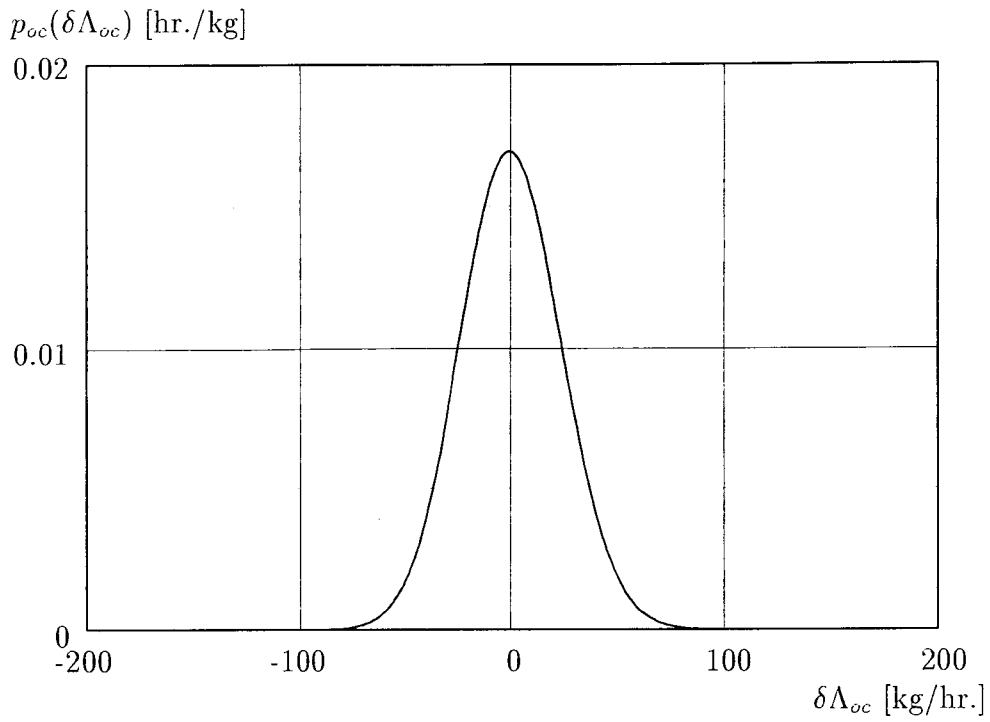


Fig.2.37 : Probability density function of fuel oil consumption due to ocean current

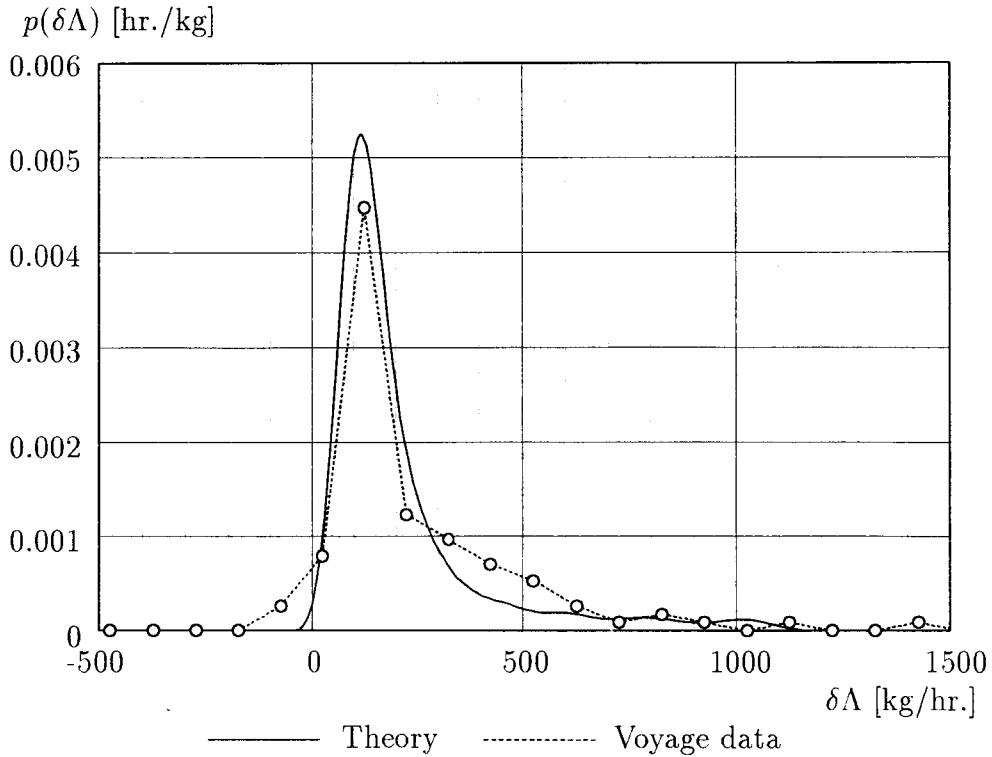


Fig.2.38 : Probability density function of fuel oil consumption in actual seas for 10 years on PSW route ( $\Lambda_0=3750$  [kg/hr.])

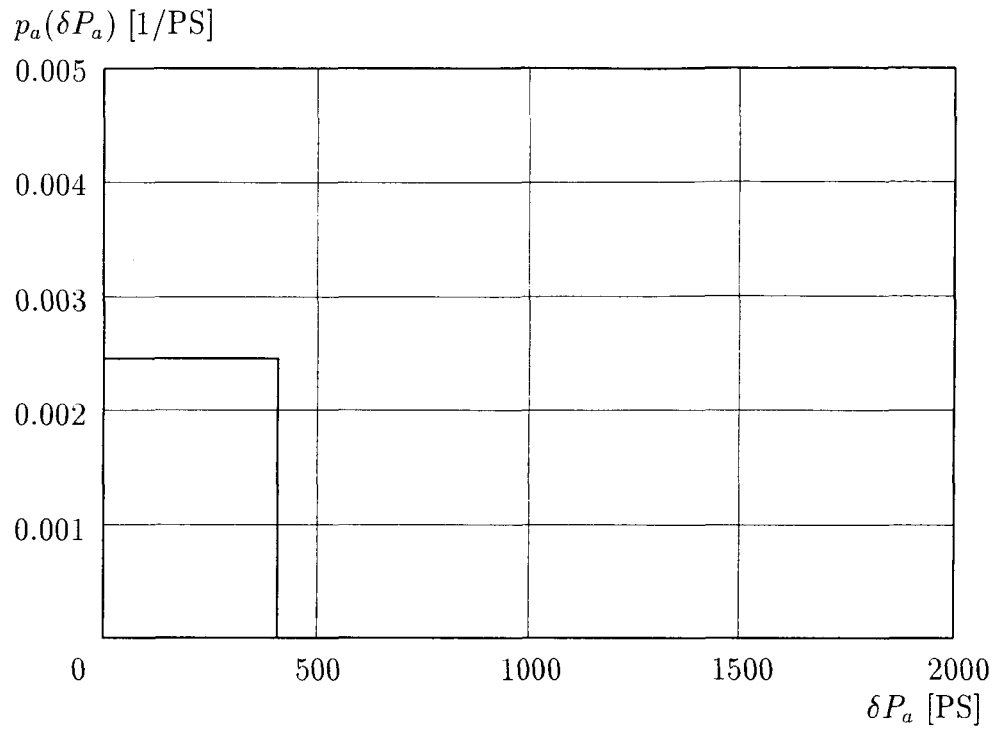


Fig.2.39 : Probability density function of main engine power due to aging deterioration

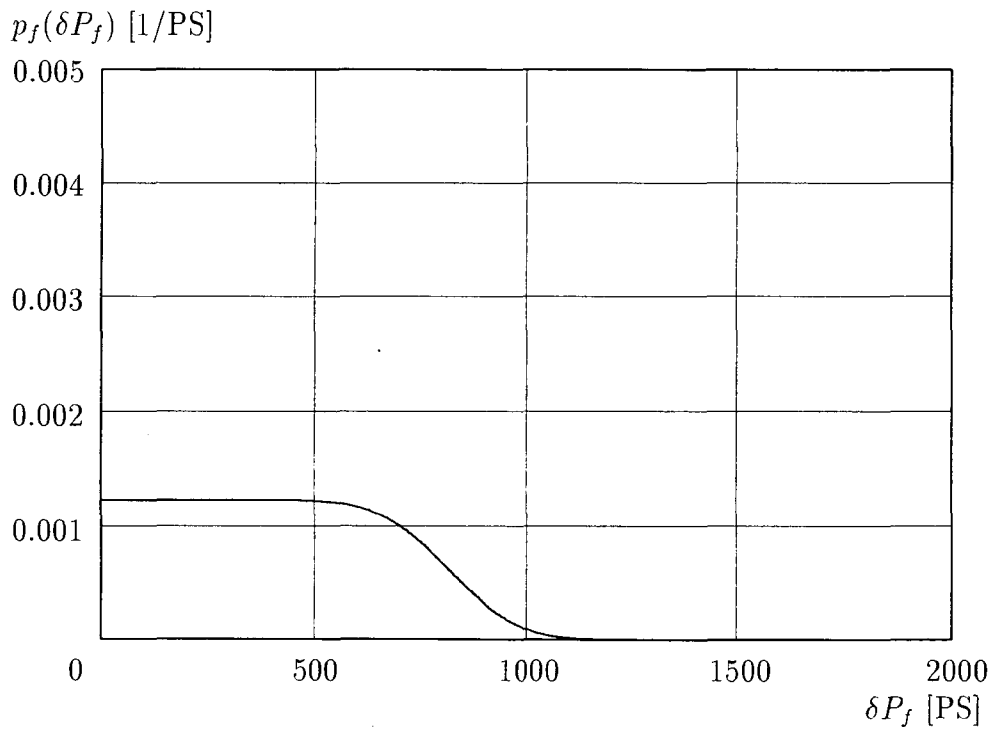


Fig.2.40 : Probability density function of main engine power due to biological fouling



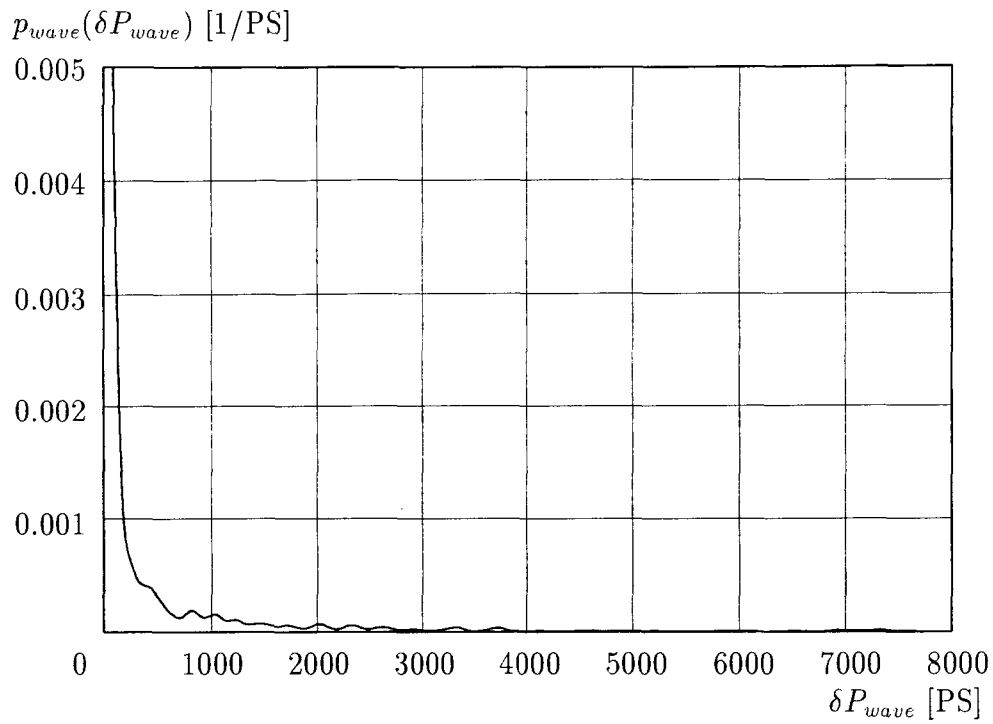


Fig.2.41 : Probability density function of main engine power due to wave

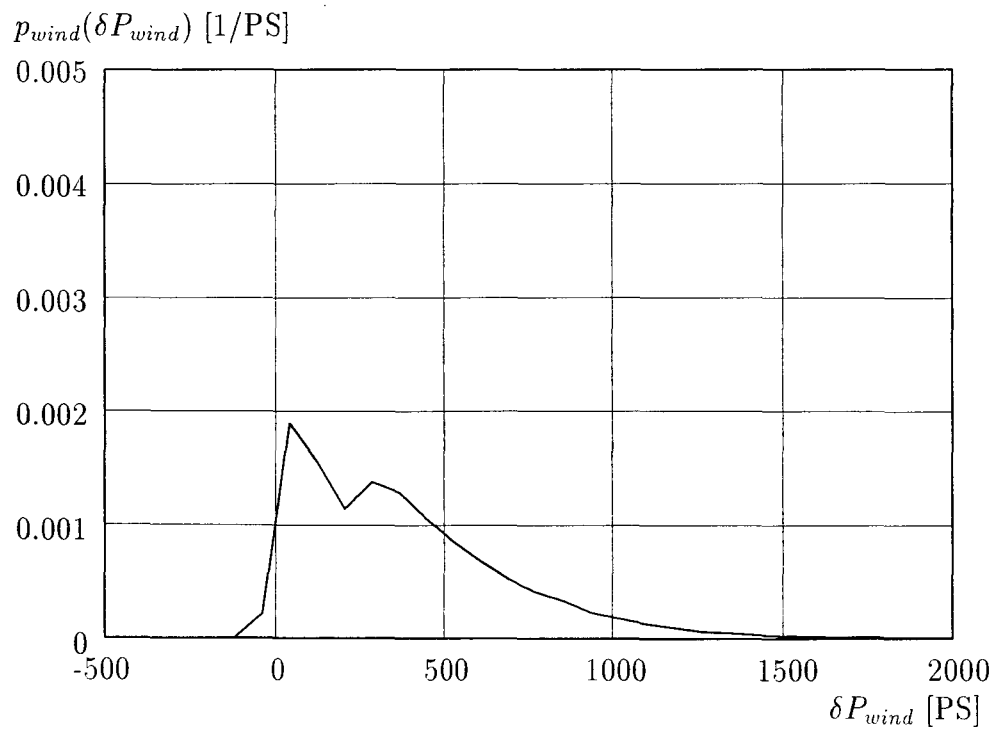


Fig.2.42 : Probability density function of main engine power due to wind

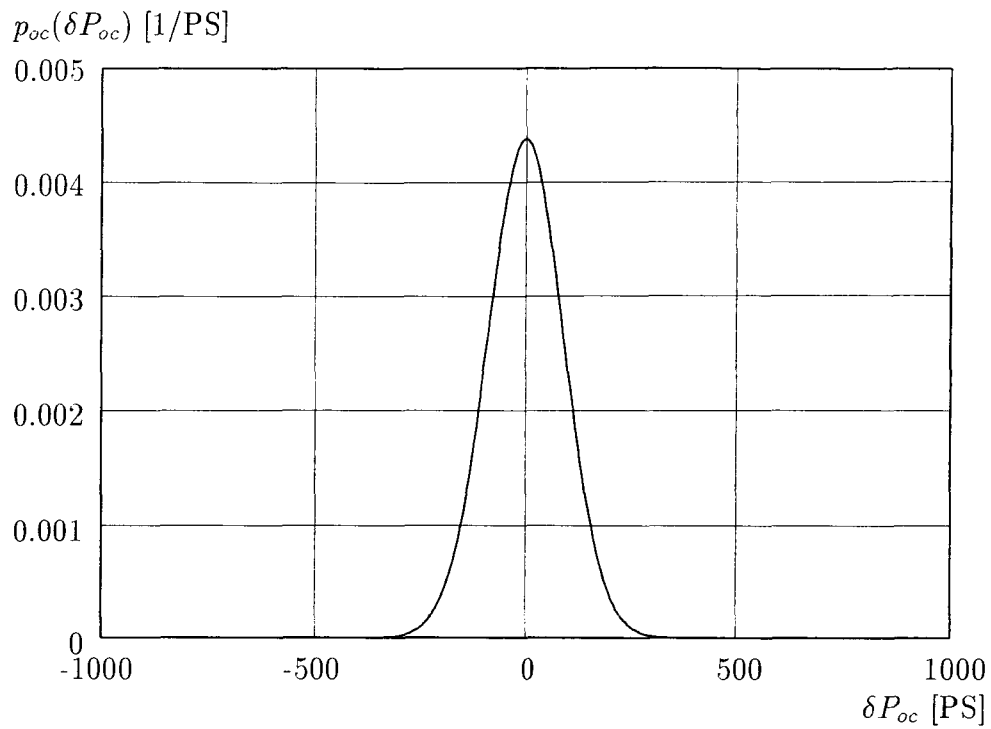


Fig.2.43 : Probability density function of main engine power due to ocean current

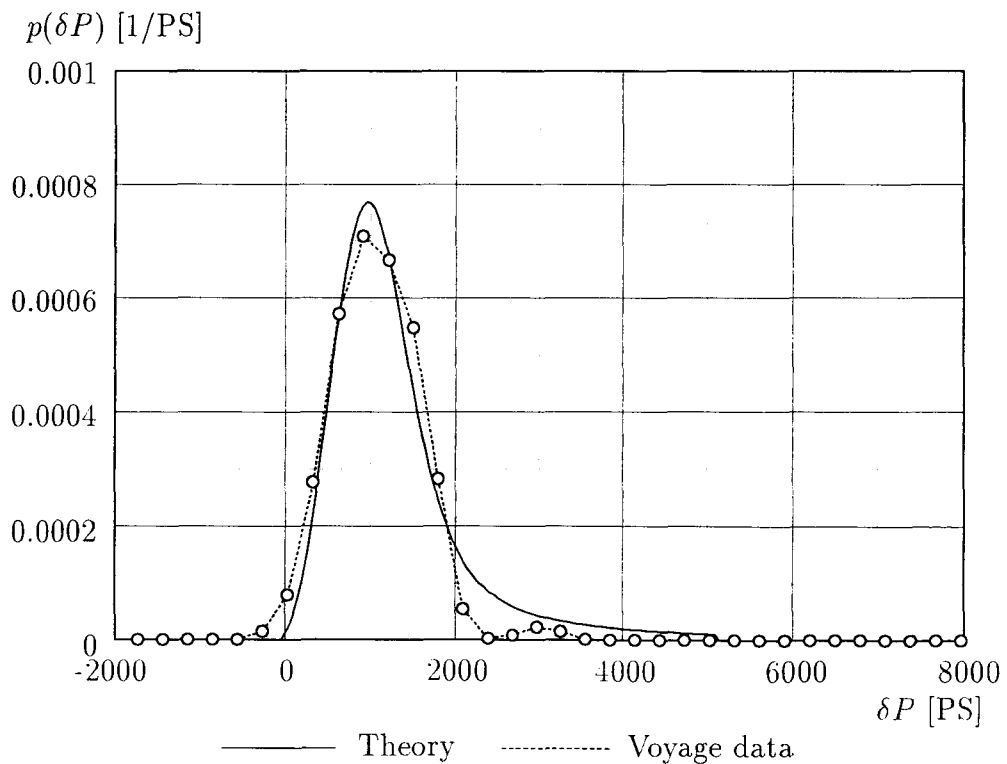


Fig.2.44 : Probability density function of main engine power in actual seas for 10 years on PSW route ( $P_0=19000$  [PS])

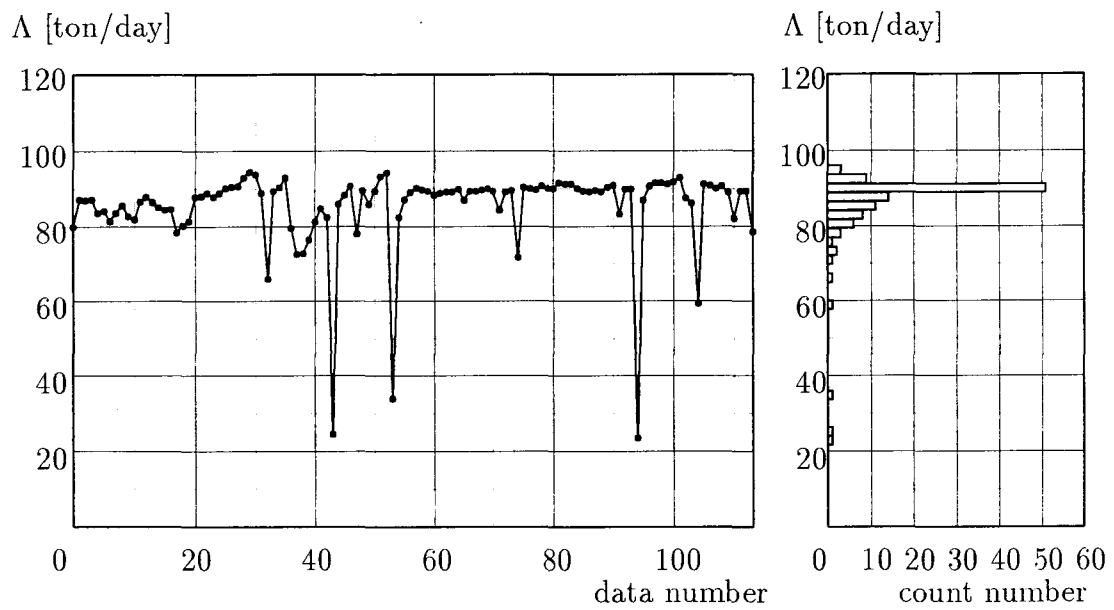


Fig.2.45 : Voyage data and histogram of fuel oil consumption of PSW container ship (SR-108)

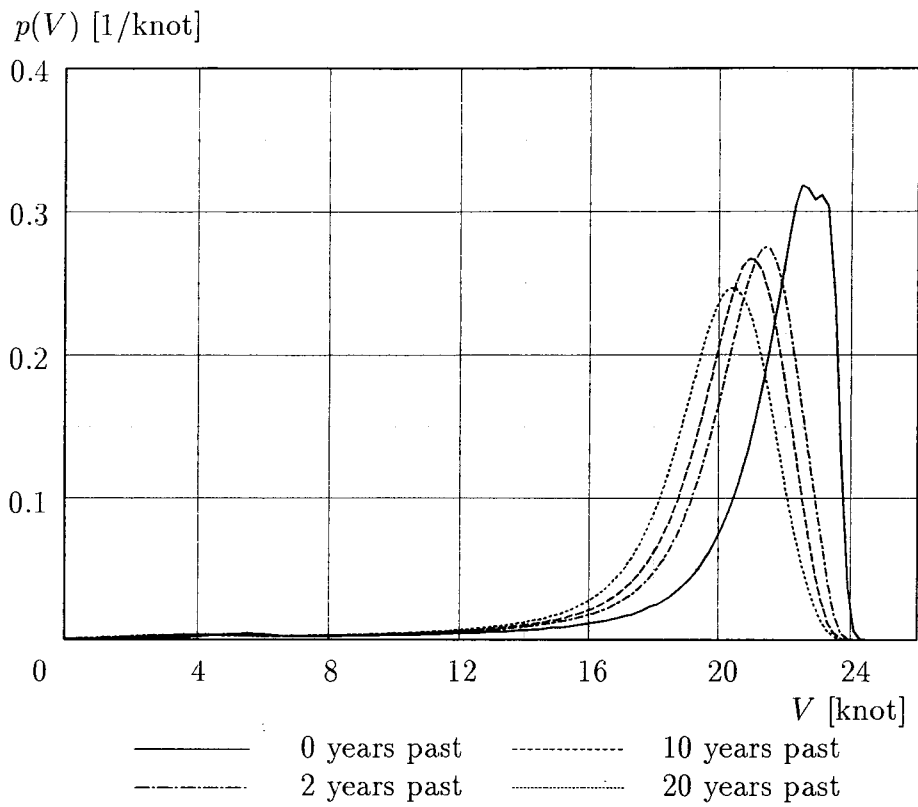


Fig.3.1 : Transition of probability density function of ship speed

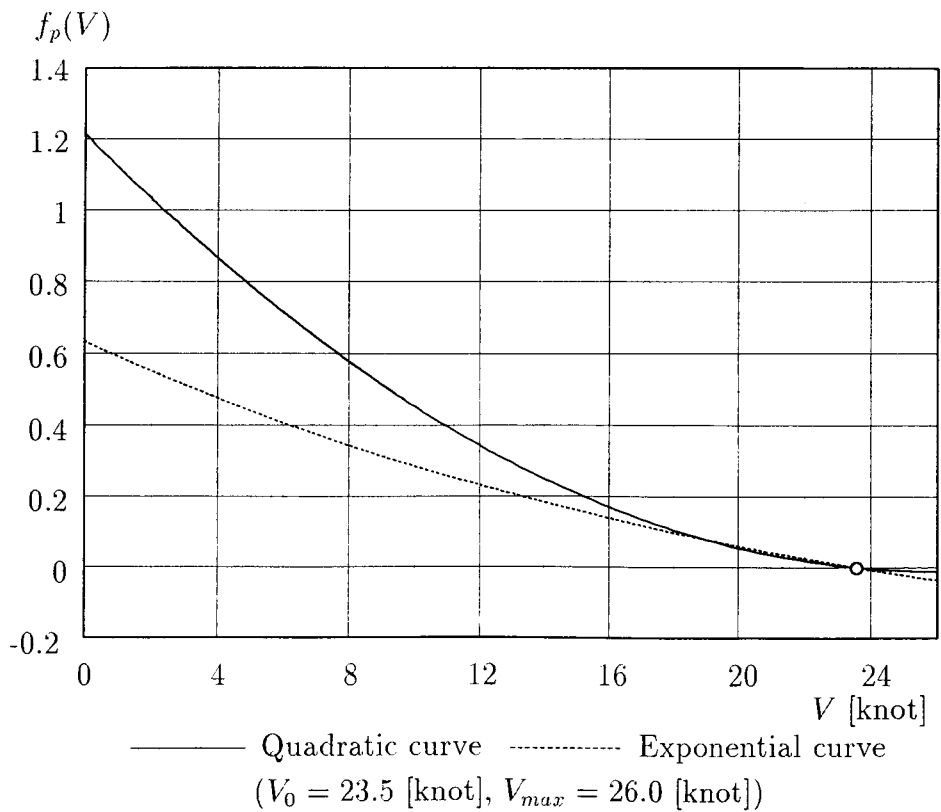


Fig.3.2 : An example of performance evaluation function

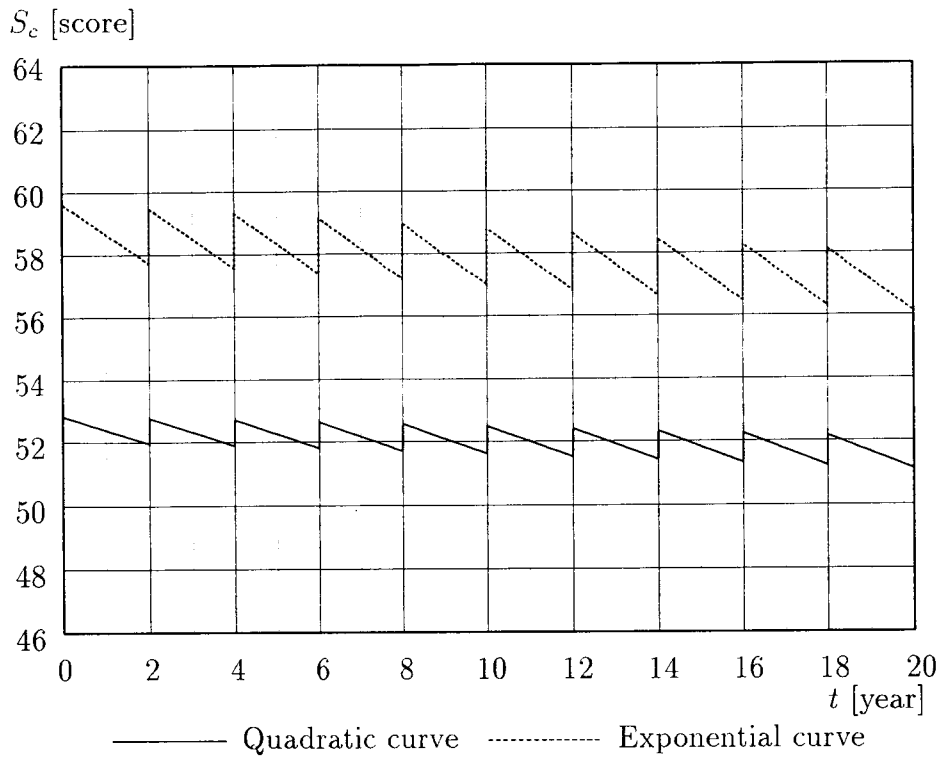


Fig.3.3 : Performance evaluation score

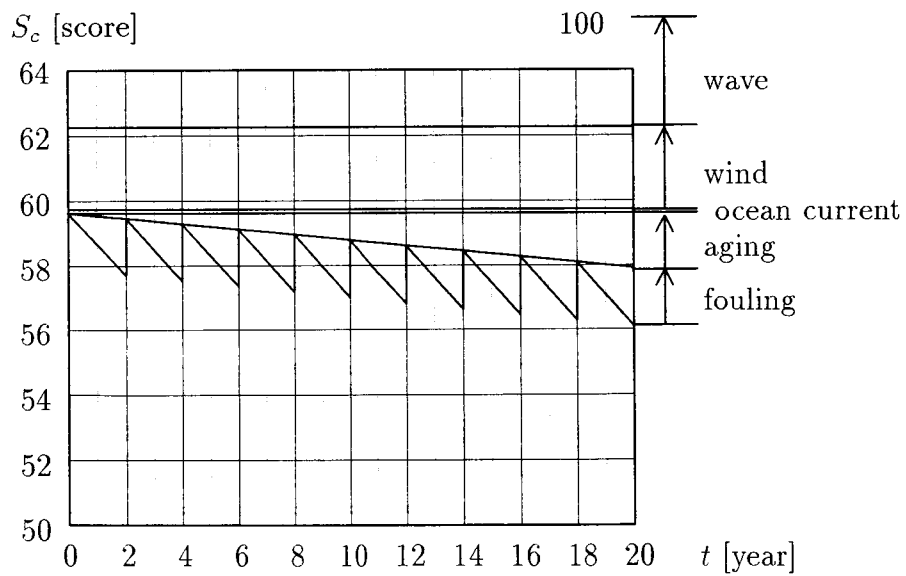
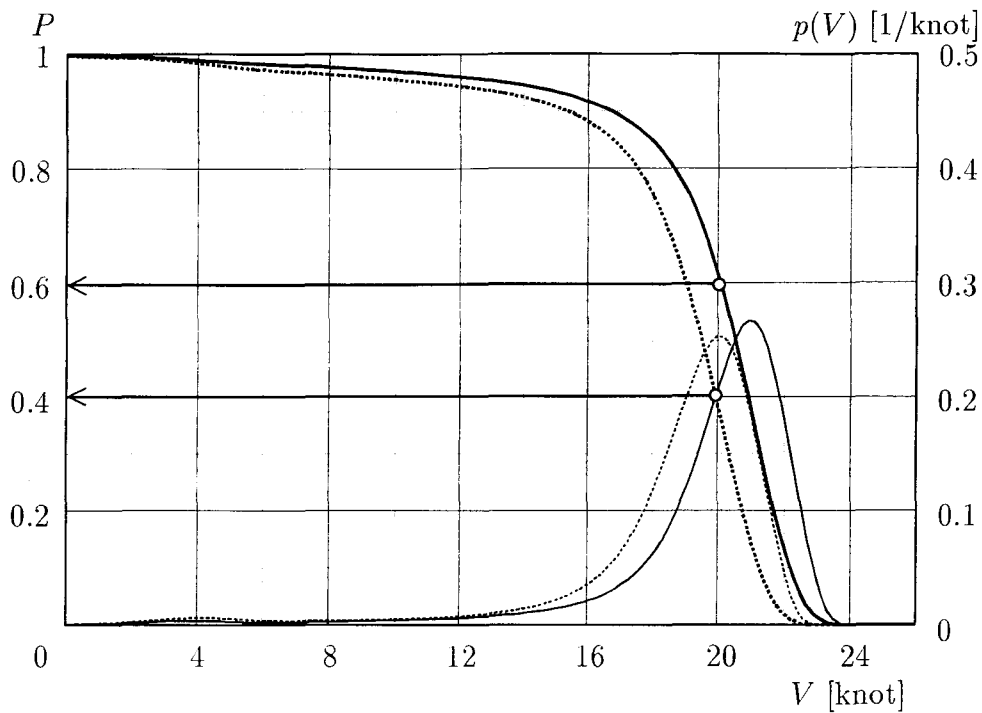
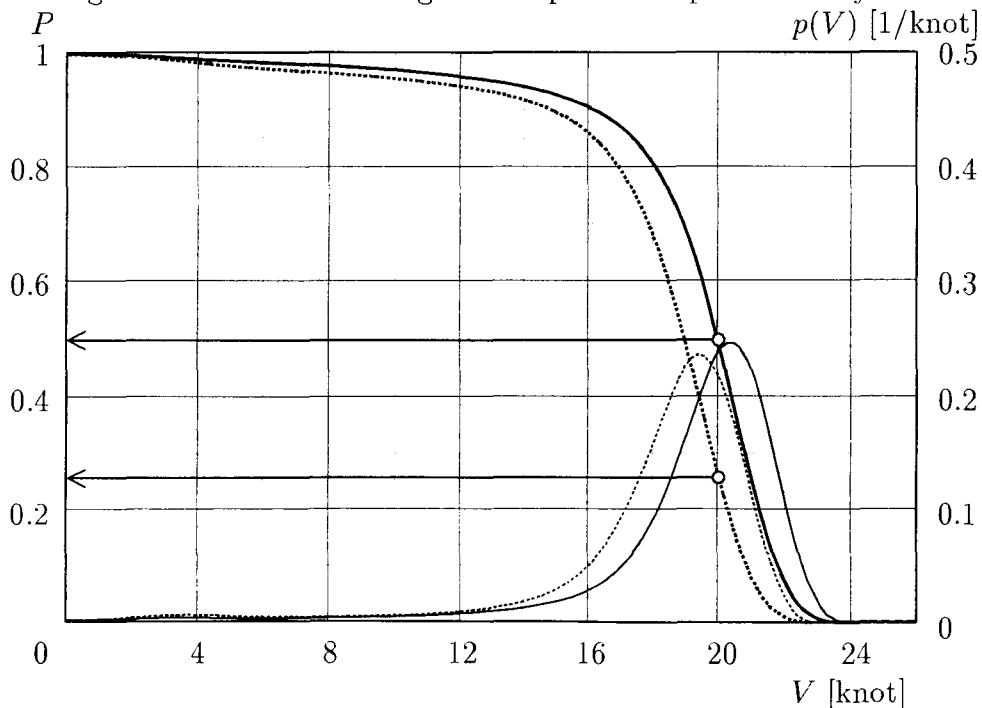


Fig.3.4 : Factors of performance evaluation score using exponential curve



- Probability density function considering 15 % sea margin of main engine power
- ..... Probability density function without considering sea margin
- Cumulative distribution function considering 15 % sea margin of main engine power
- ..... Cumulative distribution function without considering sea margin

Fig.3.5 : Effect of sea margin on ship service speed for 10 years



- Probability density function considering 15 % sea margin of main engine power
- ..... Probability density function without considering sea margin
- Cumulative distribution function considering 15 % sea margin of main engine power
- ..... Cumulative distribution function without considering sea margin

Fig.3.6 : Effect of sea margin on ship service speed for 20 years

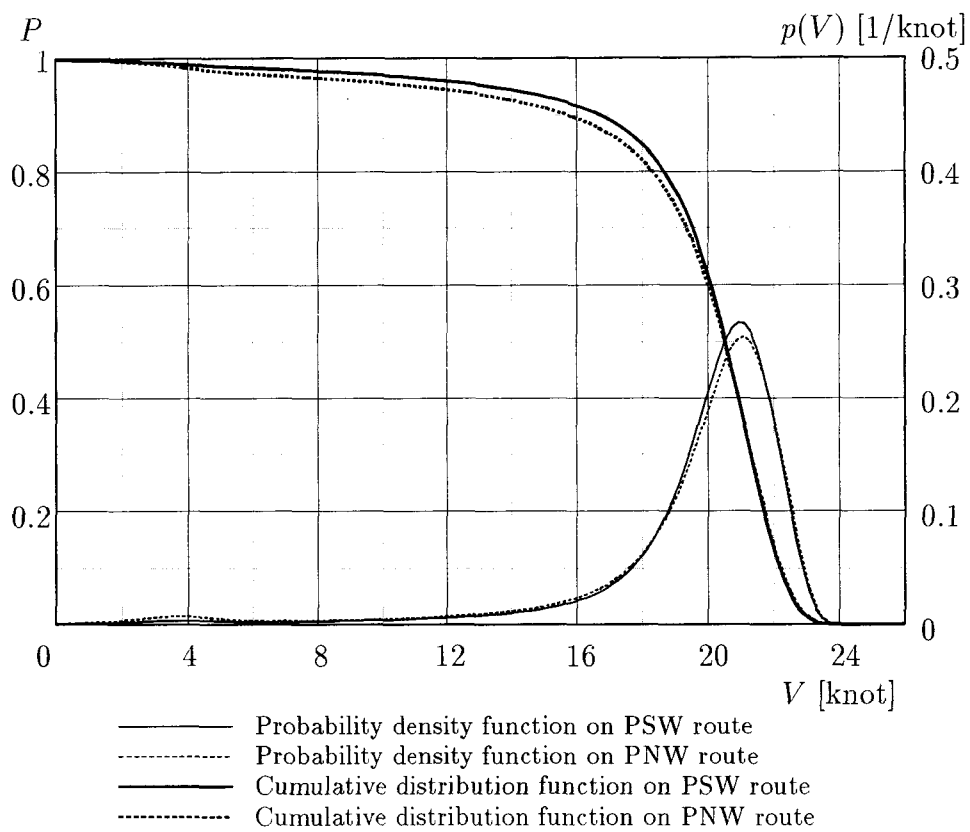


Fig.3.7 : Difference between PSW route and PNW route on ship service speed for 10 years

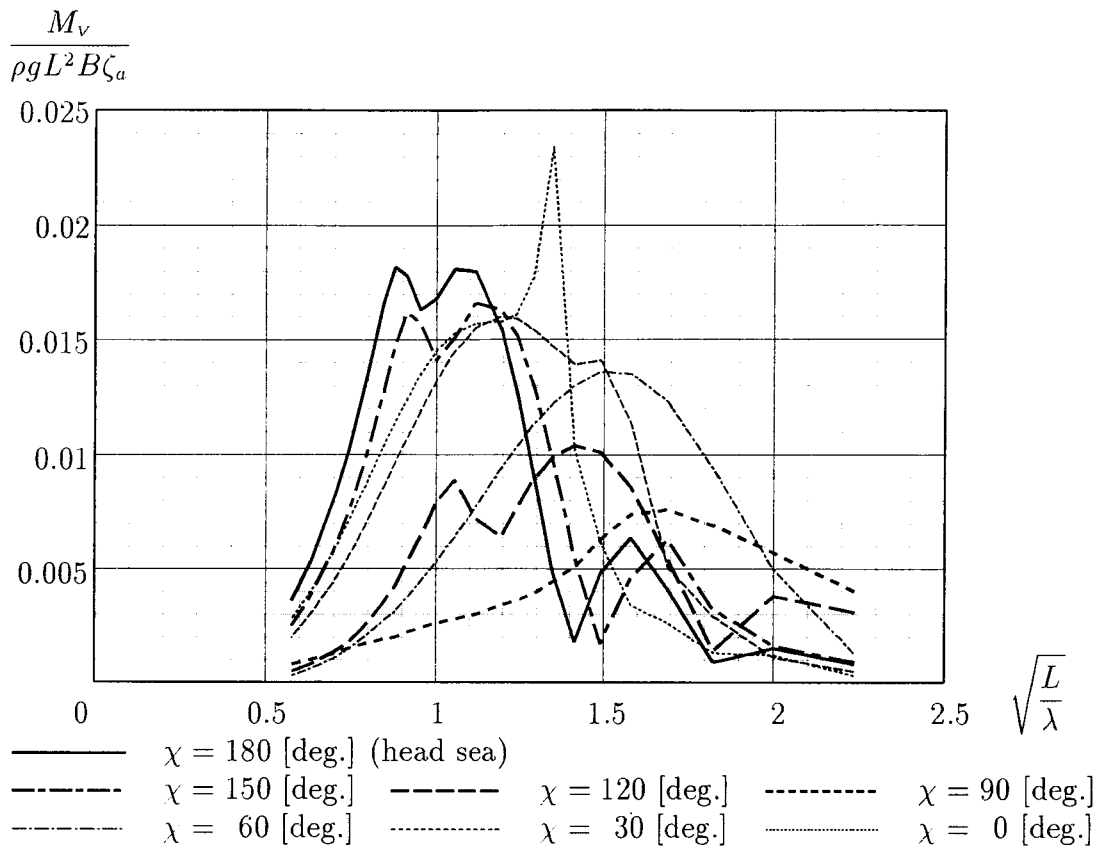


Fig.4.1 : Response amplitude function of vertical bending moment at midship

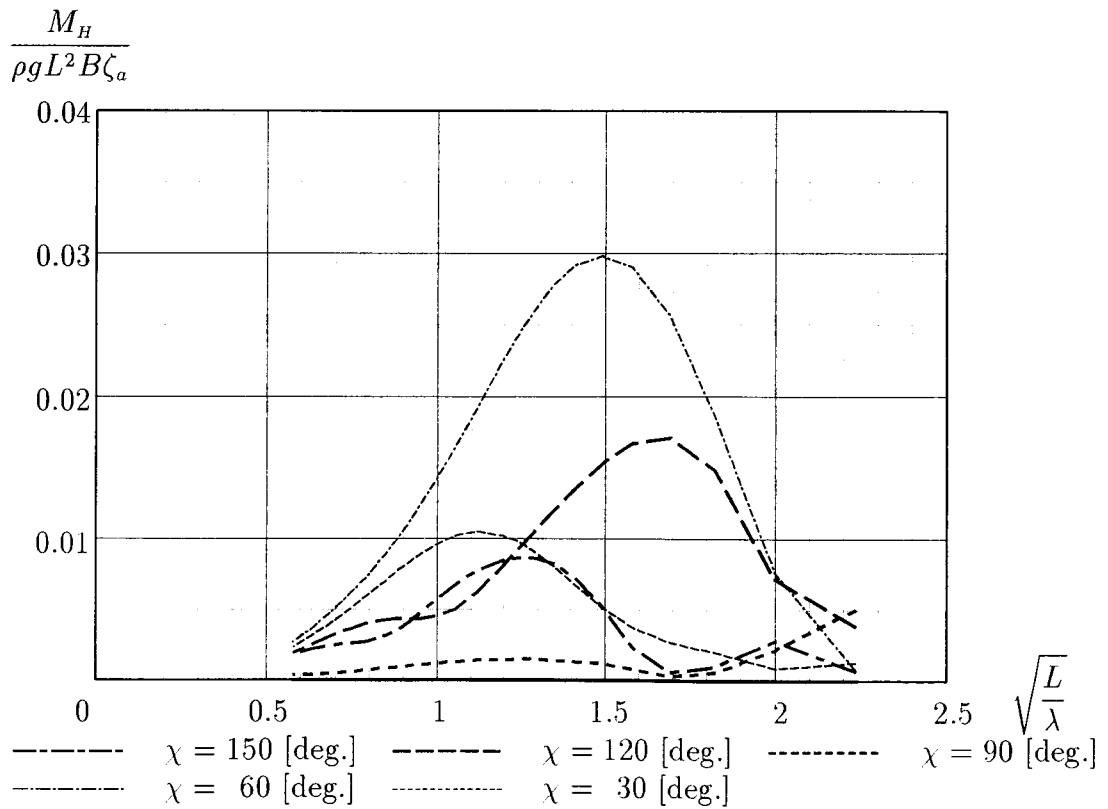


Fig.4.2 : Response amplitude function of horizontal bending moment at midship



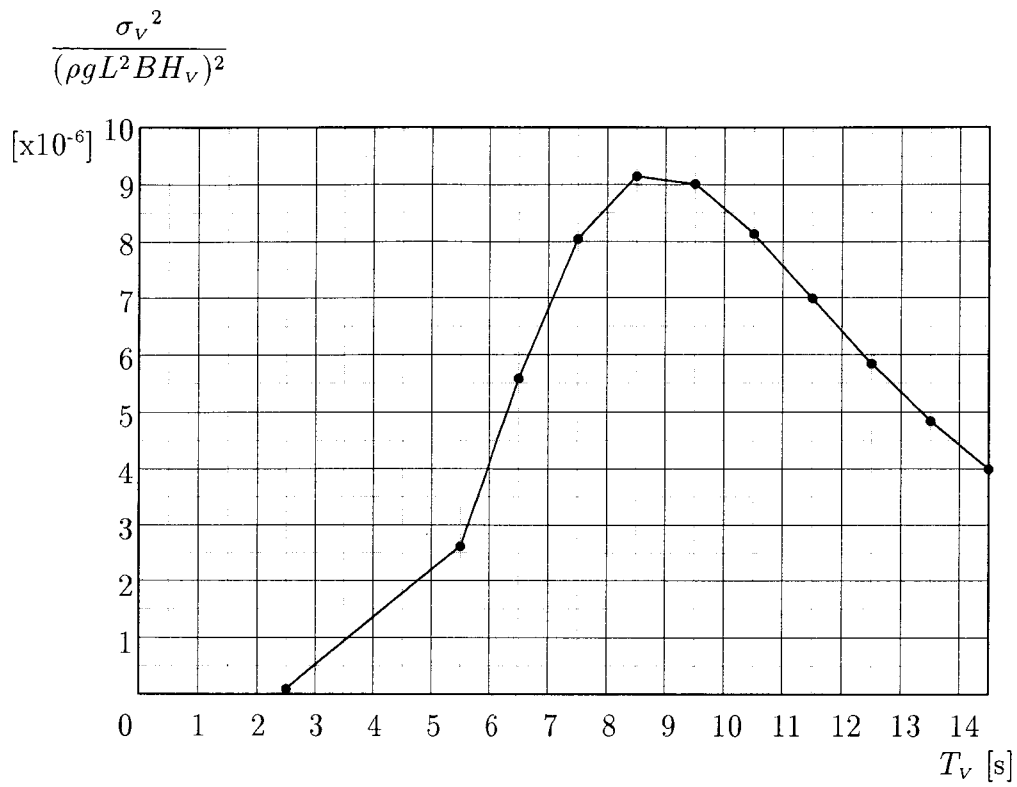


Fig.4.3 : Variance of vertical bending moment

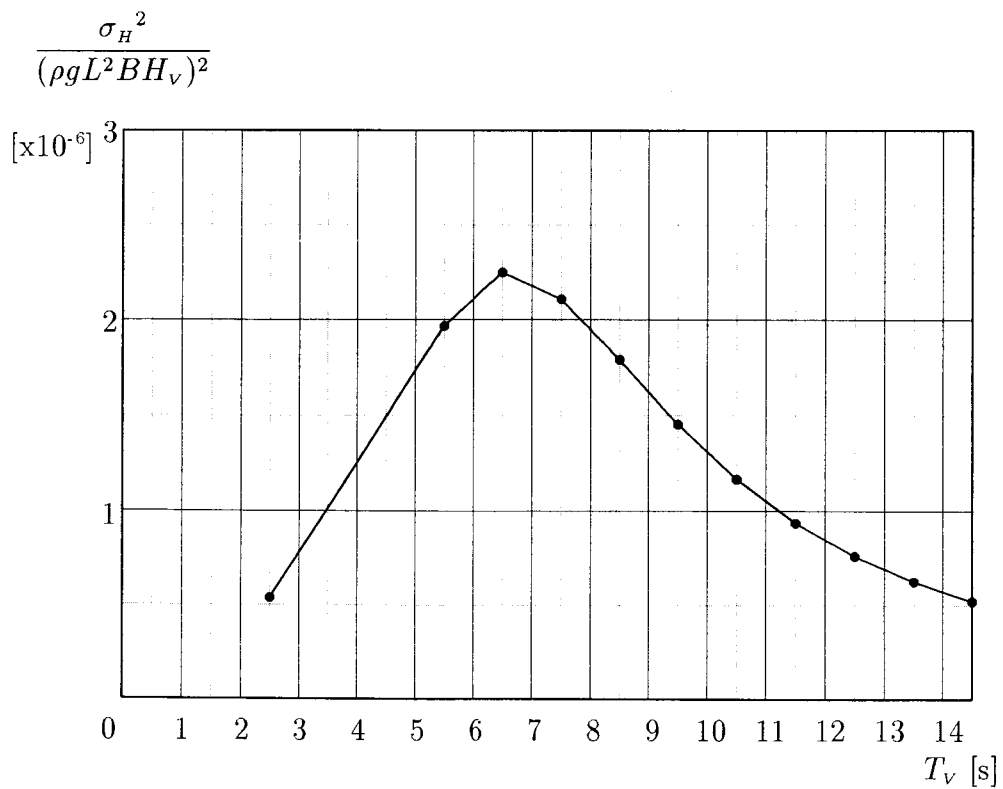


Fig.4.4 : Variance of horizontal bending moment

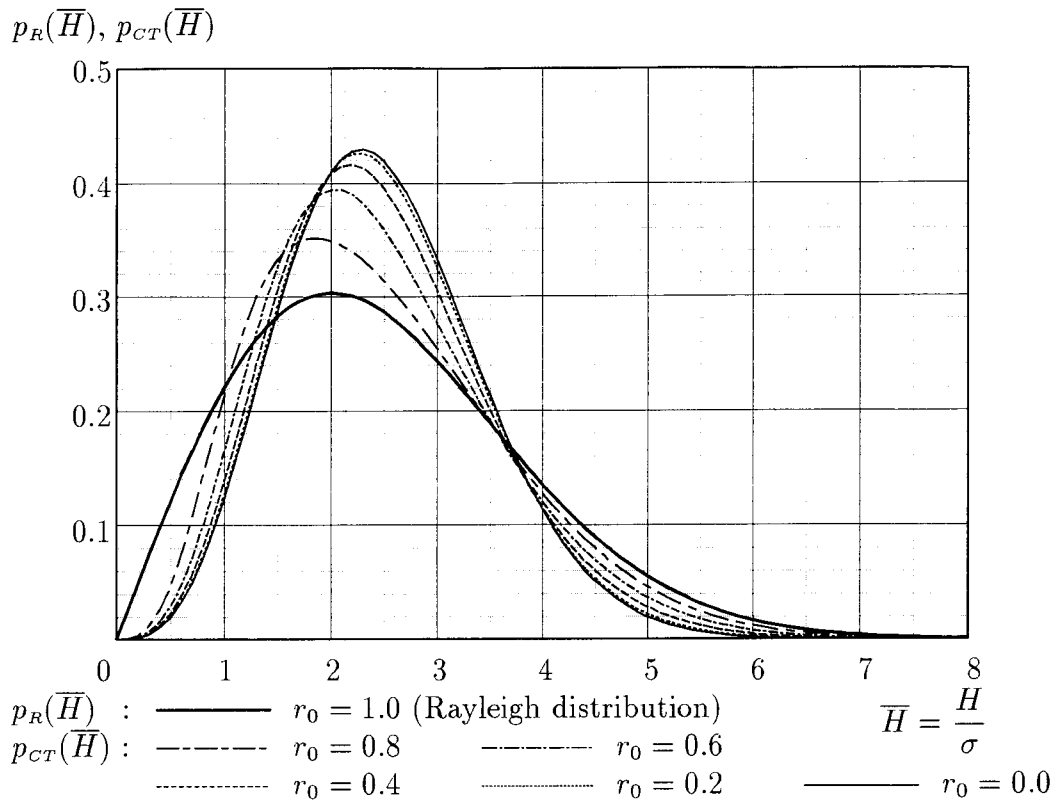


Fig.4.5 : Comparison between Rayleigh distribution and Crest-to-Trough wave height distribution for normalized wave height

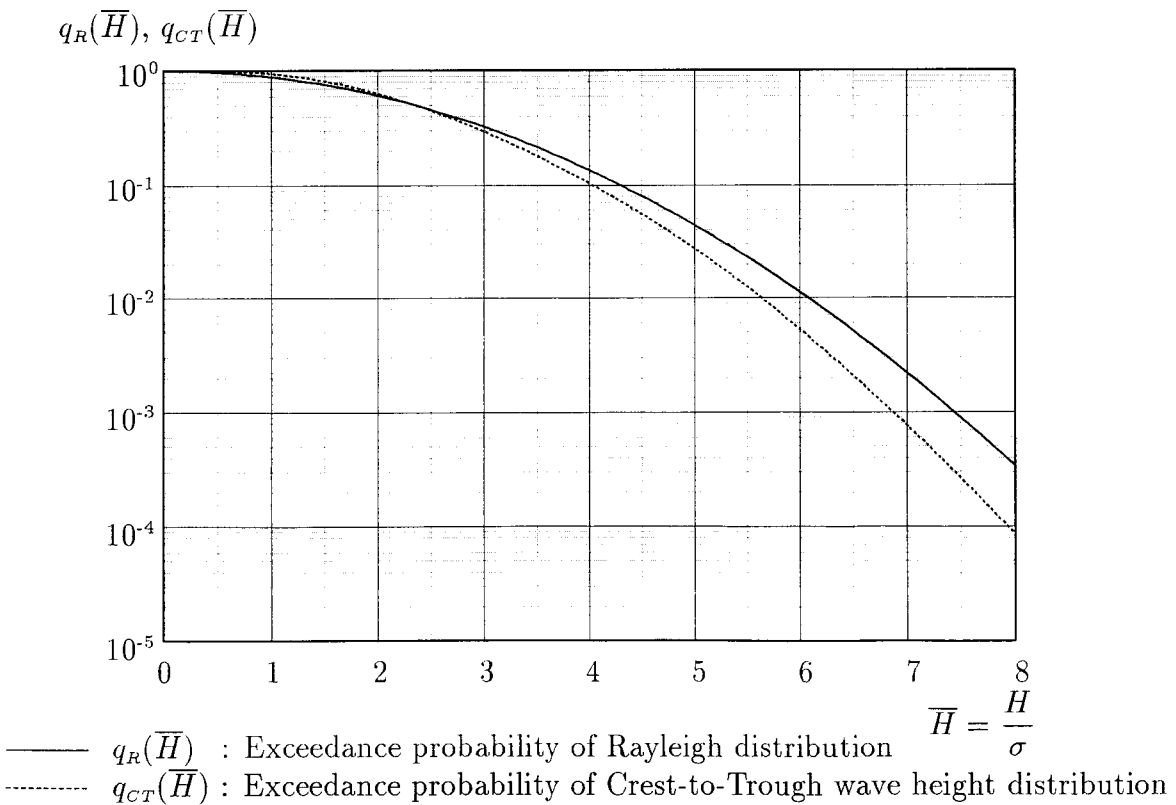
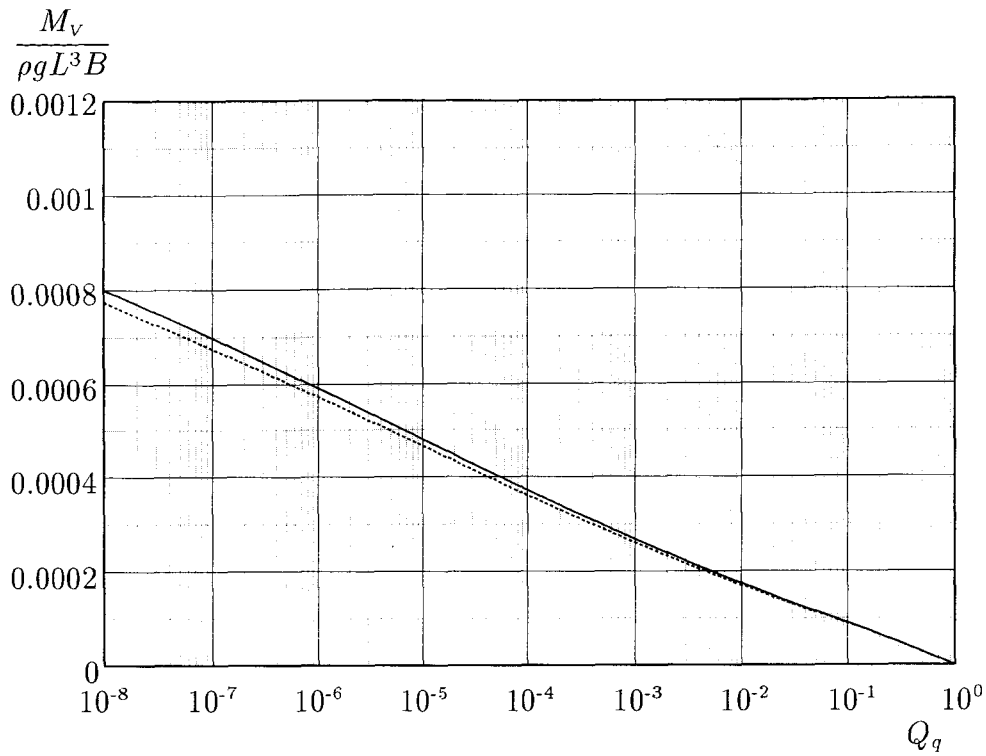
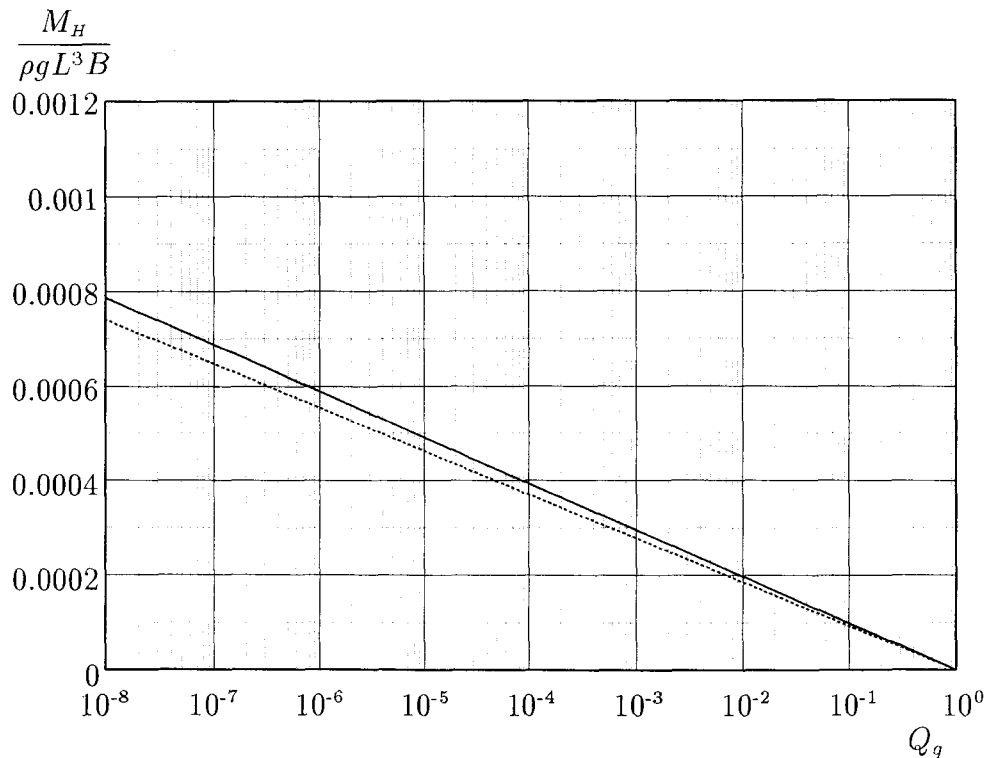


Fig.4.6 : Exceedance probability of two wave height distributions for normalized wave height



—— Rayleigh distribution    ..... Crest-to-Trough wave height distribution  
 Fig.4.7 : Comparison of long term prediction for vertical bending moment between two wave height distributions in short term



—— Rayleigh distribution    ..... Crest-to-Trough wave height distribution  
 Fig.4.8 : Comparison of long term prediction for horizontal bending moment between two wave height distributions in short term

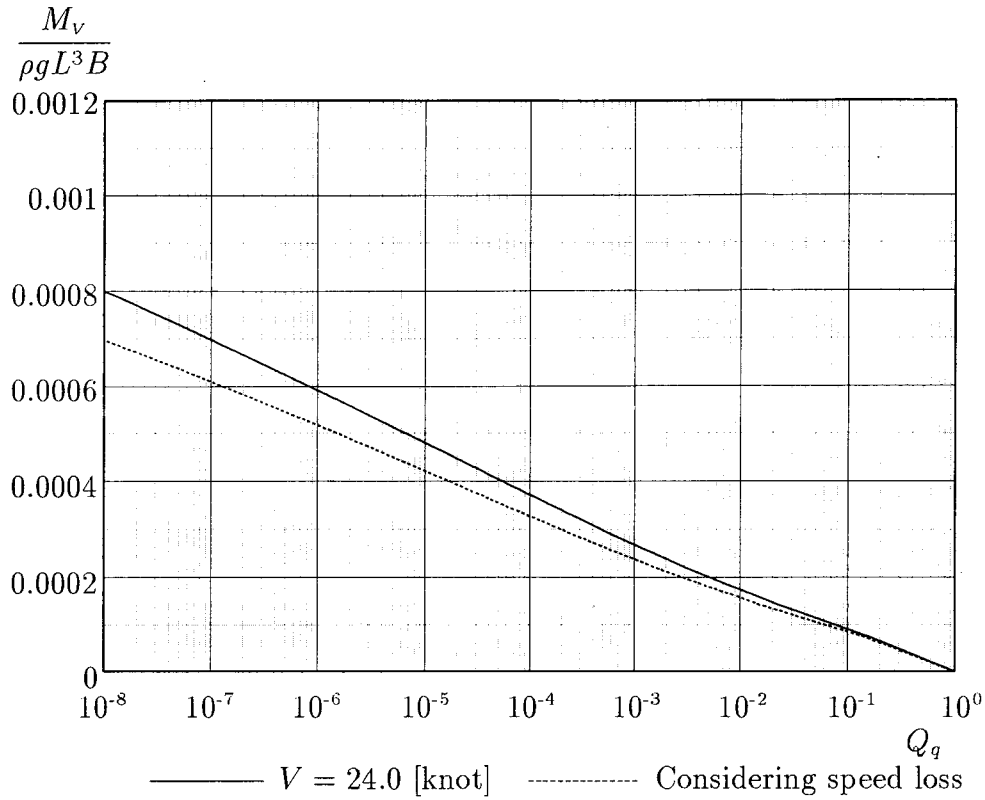


Fig.4.9 : Long term prediction for vertical bending moment considering ship speed loss in actual seas

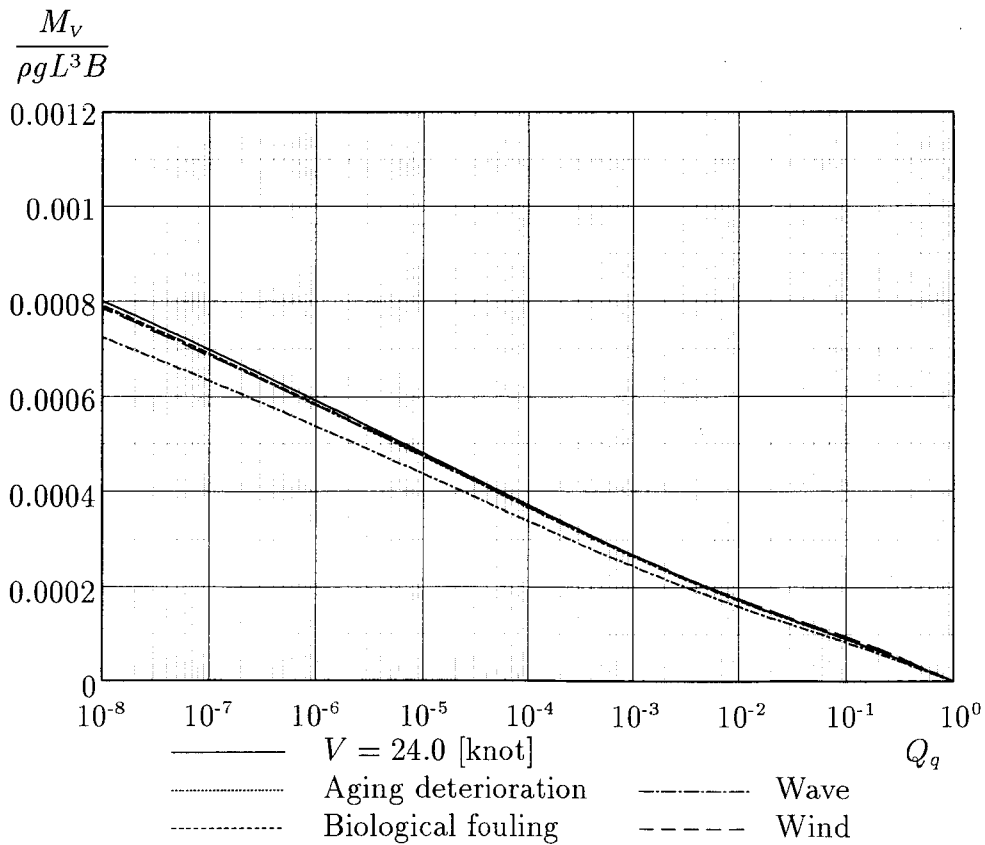


Fig.4.10 : Factors of long term prediction for vertical bending moment considering ship speed loss in actual seas

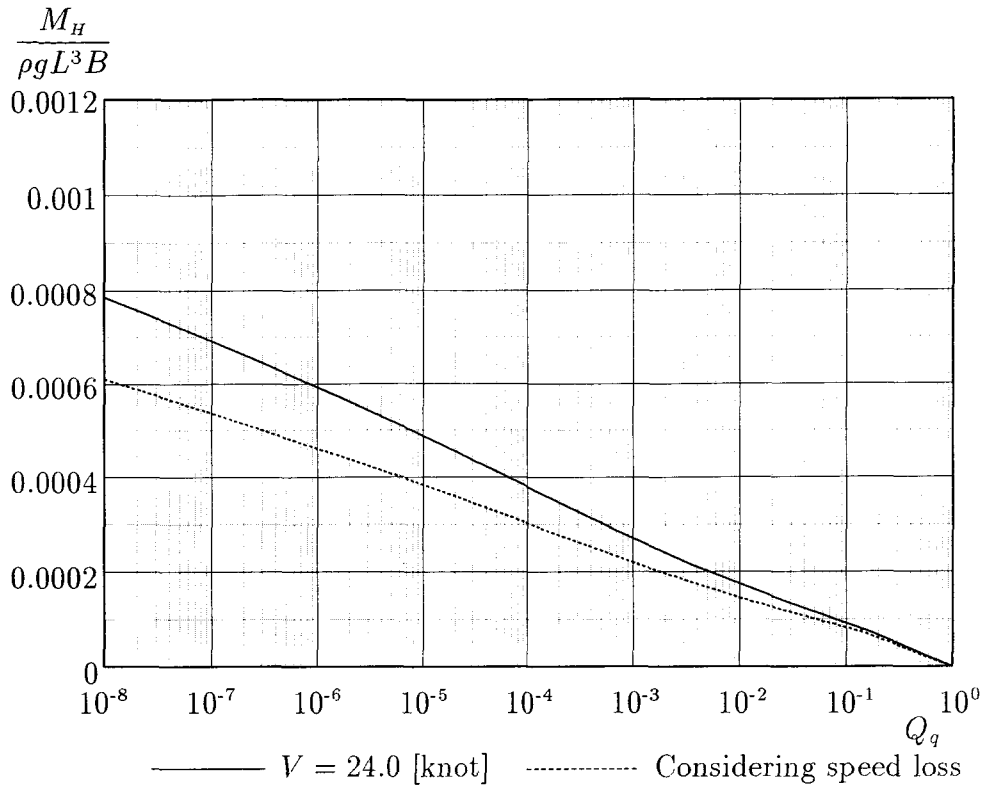


Fig.4.11 : Long term prediction for horizontal bending moment considering ship speed loss in actual seas

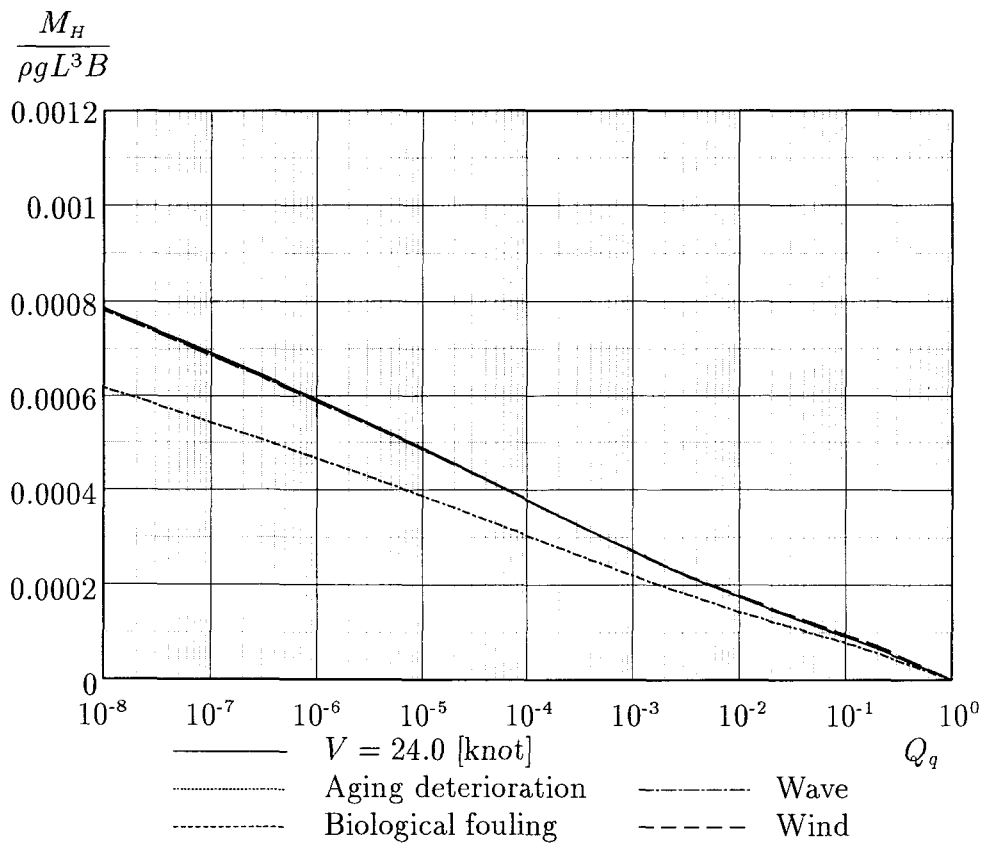


Fig.4.12 : Factors of long term prediction for horizontal bending moment considering ship speed loss in actual seas

## 参考文献

- 1) 中村 彰一, 内藤 林 : 波浪中における船速低下及び推進性能について, 関西造船協会誌第 166 号, 昭和 52 年 9 月.
- 2) 内藤 林, 中村 彰一, 原 正一 : 波浪中における船速低下の推定法に関する研究, 日本造船学会論文集第 146 号, 昭和 54 年 11 月.
- 3) 中村 彰一, 内藤 林, 原 正一, 松本 光一郎 : 波浪中における船舶の意識的減速に関する研究, 関西造船協会誌第 179 号, 昭和 55 年 12 月.
- 4) 内藤 林 : 船速低下の尺度影響, 日本造船学会誌第 801 号, 平成 8 年 3 月.
- 5) 福田 淳一 : 応答の統計的予測, 耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, 昭和 44 年 7 月.
- 6) 出淵 巽 : 船底の汚れに因る船體抵抗の増加, 造船協會論文集第 55 号, 昭和 9 年 12 月.
- 7) 谷口 中 : 燃料消費最小の航法と經濟馬力の決定について, 造船協會論文集第 84 号, 昭和 23 年 11 月.
- 8) 田才 福造 : 荒天に於ける船の速度低下に就て, 西部造船会々報第 1 号, 昭和 23 年 12 月.
- 9) 山崎 芳嗣, 坂本 衛 : 航海速力の研究, 日本造船学会論文集第 146 号, 昭和 54 年 11 月.
- 10) 川口 昇, 武隈 克義, 橋口 清, 伊勢 辰治, 清水 徹 : 就航実績の新しい解析方法について, 関西造船協会誌第 152 号, 昭和 49 年 3 月.
- 11) Tadao Yamano, Yasuo Saito, Kazunori Taguchi, Sho Takeda, Kenjiro Takenaga, Takashi Watanabe : An Analysis Method of Voyage Data, Journal of the Kansai Society of Naval Architects, Japan, No.219. 1993.3.
- 12) 矢崎 敦生 : シーマージンに関する一考察, 造船協会誌第 425 号, 昭和 39 年 12 月.

- 13) 山崎 芳嗣, 立木 正昭 : シーマージンについて, 西部造船会々報第 39 号, 昭和 44 年 11 月.
- 14) Zubaly, R. B. : Average Power Increase due to Waves for a Ship on a Specified Trade Route, I.S.P., Vol.17, No.189, 1970.5.
- 15) 宮本 雅史 : 限界速力による主機およびプロペラの決定について, 日本造船学会誌第 574 号, 昭和 52 年 4 月.
- 16) Masaru Tsujimoto and Shigeru Naito : Estimation of Speed Margin by Probabilistic Methods, 3rd Korea-Japan joint workshop on ship & marine hydrodynamics, 1996.7.
- 17) 辻本 勝, 内藤 林 : 実海域における船速に関する研究—船速の確率密度関数—, 関西造船協会誌第 228 号, 平成 9 年 9 月.
- 18) 辻本 勝, 内藤 林 : 実海域における船舶の性能評価に関する研究—船速, 燃料消費量, 主機馬力—, 関西造船協会誌第 229 号, 平成 10 年 3 月.
- 19) 山崎 芳嗣 : 肥大船の航海速力の研究, 日本造船学会誌第 631 号, 昭和 57 年 1 月.
- 20) 中尾 学 : 船舶の塗料と塗装, 船舶技術協会, 昭和 63 年 12 月.
- 21) 鞠谷 宏士 : 荒天運航の実状—大型専用船のログブックの解析—, 船舶の荒天運航に関するシンポジウム, 日本航海学会, 昭和 48 年 2 月.
- 22) 植竹 正雄, シンポジウム実行委員会編 : 荒天避航の実例 [1]・[2], 船舶の荒天運航に関するシンポジウム, 日本航海学会, 昭和 48 年 2 月.
- 23) ウェザー・ルーティング研究グループ編 : ウェザー・ルーティング—気象情報に基づく最適航法—, 成山堂書店, 平成 4 年 4 月.
- 24) 内藤 林, 菅 信 : 船速低下の推定法, 日本造船学会運動性能研究委員会第 1 回シンポジウム波浪中推進性能と波浪荷重, 昭和 59 年 12 月.
- 25) Faltinsen, O. M., Minsaas, K. J., Liapis, N. and Skjørdal, S. O. : Prediction of Resistance and Propulsion of a Ship in a Seaway, Proc. 13th Symp. on Naval Hydrodynamics, 1980.10.
- 26) Sakamoto, T. and Baba, E. : Minimization of Resistance of Slowly Moving Full Hull Forms in Short Waves, Proc. 16th Symp. on Naval Hydrodynamics, 1986.

- 27) 内藤 林, 高岸 憲璽 : 短波頂不規則波中抵抗増加を少なくする船首形状に関する研究, 関西造船協会誌第 225 号, 平成 8 年 3 月.
- 28) Maruo, H. : Resistance in Waves, Research on Seakeeping Qualities in Japan, The Society of Naval Architects of Japan, 60th Anniversary Series, Vol. 8, 1963.
- 29) 高木 健 : 波浪中における抵抗増加, 定常横力及び定常回頭モーメントの近似計算法, 関西造船協会誌第 216 号, 平成 3 年 9 月.
- 30) 和田 忠 : 船舶運用学の基礎, 成山堂, 昭和 52 年 7 月.
- 31) 金 順甲, 内藤 林, 中村 彰一 : 船舶の波浪中耐航性能評価に関する研究, 日本造船学会論文集第 155 号, 昭和 59 年 5 月.
- 32) 渡辺 巖, 富田 宏, 谷澤 克治 : 北太平洋の波と風 (1974~1988) , 運輸省船舶技術研究所報告別冊第 14 号, 平成 4 年 5 月.
- 33) 中村 彰一 : 耐航性の諸要素, 耐航性に関するシンポジウム, 日本造船学会, 昭和 44 年 7 月.
- 34) 日本造船研究協会第 108 研究部会 : 高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究報告書, 日本造船研究協会研究資料 No.110, 昭和 45 年 3 月.
- 35) 山本 修 : 波浪中経済速力について, 関西造船協会誌第 191 号, 昭和 58 年 12 月.
- 36) 別府 健次, 山崎 芳嗣, 立木 正昭 : S.S. Orient Giant 号の運航性能について, 西部造船会々報第 39 号, 昭和 44 年 11 月.
- 37) 表原 功, 横山 二郎, 平山 義則 : 船舶の経年変化に対する統計的考察, 日本造船学会誌第 586 号, 昭和 53 年 4 月.
- 38) 羽田 知所 : 船舶の経年速度変化, 日本造船学会誌第 606 号, 昭和 54 年 12 月.
- 39) 横田 幸平, 大久保 重博, 出口 一彦, 松田 正康 : 船舶の推進性能の経年変化, 住友重機械技報 Vol.28 No.83, 昭和 55 年 8 月.
- 40) 折戸 博允, 柿沼 勝 : 船体表面粗度と船速低下について, 日本造船学会誌第 616 号, 昭和 55 年 10 月.
- 41) 細田 龍介, 吉野 邦昭 : 船舶のシーマージンの確率論的検討, 日本造船学会論文集第 167 号, 平成 2 年 5 月.



- 42) 松原 知之：就航実績から見た船の推進性能, 日本造船学会推進性能研究委員会第 6 回シンポジウム実海域における船の推進性能, 平成 7 年 5 月.
- 43) 高橋 雄, 溝口 純敏, 足達 宏之, 井上 隆一：波浪中抵抗増加、推進性能に関する実験技術, 日本造船学会運動性能研究委員会第 1 回シンポジウム, 日本造船学会, 昭和 59 年 12 月.
- 44) 内藤 林：波浪中推進性能に関する問題で計算可能なこと不可能なこと, パネル討論：運航と推進性能, 日本造船学会推進性能研究委員会第 6 回シンポジウム実海域における船の推進性能, 平成 7 年 5 月.
- 45) 中村 彰一, 細田 龍介, 内藤 林, 井上 盛夫：コンテナ船の波浪中推進性能に関する研究（第 4 報）, 関西造船協会誌第 159 号, 昭和 50 年 12 月.
- 46) 井上 正祐, 石橋 賢論：操縦性に対する風の影響 (III) (Isherwood の風圧係数を使用した場合), 西部造船会々報第 46 号, 昭和 48 年 5 月.
- 47) 日本造船研究協会第 108 研究部会：高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究報告書, 日本造船研究協会研究資料 No.125, 昭和 46 年 3 月.
- 48) 日本造船研究協会第 125 研究部会：超高速コンテナ船の耐航性に関する研究報告書, 日本造船研究協会研究資料 No.157, 昭和 47 年 3 月.
- 49) 中村 彰一：波浪中における船舶等の挙動とその性能評価, 船舶と海洋への夢—中村彰一教授退官記念セミナー集—, 波浪中推進性能懇談会, 昭和 63 年 5 月.
- 50) 細田 龍介, 高橋 雄：シーマージンと就航実績, 日本造船学会運動性能研究委員会第 1 回シンポジウム波浪中推進性能と波浪荷重, 昭和 59 年 12 月.
- 51) 赤木 新介：エンジニアリングシステム設計工学, 共立出版, 昭和 57 年 7 月.
- 52) 細田 龍介, 小山 初見, 国武 吉邦, 三宅 成司郎, 丸山 秀樹, 中村 博, 松山 正和, 田口 賢士：船舶の初期設計における耐航性能の総合的評価に関する研究（第 1 報）, 日本造船学会論文集第 153 号, 昭和 58 年 5 月.
- 53) 平本 文男, 小山 健夫, 森谷 周行, 新井 克治郎, 佐藤 和仁：多変量解析による船の分類について, 日本造船学会論文集第 138 号, 昭和 50 年 11 月.
- 54) 細田 龍介：船舶の最適運航と性能評価, ウェザー・ルーティングに関するセミナー, 運輸省運輸政策局, 昭和 62 年 12 月.

- 55) 濱中 誠司：船体応答の長期予測に対する波浪統計資料の精度影響に関する研究, 大阪大学工学部船舶海洋工学科卒業論文, 平成8年3月.
- 56) 瀬川 進：短期波高分布が応答の長期予測に及ぼす影響に関する研究, 大阪大学工学部船舶海洋工学科卒業論文, 平成9年3月.
- 57) 柴田 憲一：船速分布を考慮した船体応答の長期予測に関する研究（仮題）, 大阪大学工学部船舶海洋工学科卒業論文, 平成10年3月.
- 58) Massel, S. R. : OCEAN SURFACE WAVES : THEIR PHYSICS AND PREDICTION, Advance Series on Ocean Engineering — Volume 11, World Scientific Publishing, 1996.
- 59) Tayfun, M. A. : Distribution of Crest-to-Trough Wave Height, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, 1981.8.
- 60) 永元 隆一, 塚本 修, 森 俊哲：波浪中における速力低下と波浪外力について, 西部造船会々報第47号, 昭和48年11月.
- 61) 小川 剛孝, 渡辺 巖：航海実績を加味した波浪荷重等の長期予測について, 関西造船協会誌第224号, 平成7年9月.
- 62) 内藤 林, 高岸 憲璽：実海域を航行する大型船の推進性能に関する研究—時間平均的な挙動について—, 関西造船協会誌第229号, 平成10年3月.
- 63) 日本造船学会推進性能研究委員会：日本造船学会推進性能研究委員会第6回シンポジウム実海域における船の推進性能, 平成7年5月.
- 64) 折戸 博允：エンジン性能・プロペラ性能の実態, 日本造船学会推進性能研究委員会第6回シンポジウム実海域における船の推進性能, 平成7年5月.
- 65) 宮本 雅史：実海域中推進性能を考慮した船舶基本設計, 日本造船学会推進性能研究委員会第6回シンポジウム実海域における船の推進性能, 平成7年5月.
- 66) Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering : Real Sea '98, International Workshop on Modeling of Ocean Environments in Wave & Current Basin, 1998.2.

## 謝辞

本研究を遂行するにあたって大阪大学工学部船舶海洋工学科教授 内藤 林 先生には研究指導のみならず、研究生活全般に亘り御指導いただきました。内藤研究室で学んだことは今後の人生に重要な意味を持つものと確信しています。ここに感謝の意を表し、心からお礼申し上げます。

また大阪大学工学部船舶海洋工学科助教授 高木 健 先生には数多くの疑問に対して暖かい助言をいただきました。ここにお礼申し上げます。

大阪大学工学部船舶海洋工学科助教授 長谷川 和彦 先生にはティーチングアシスタント、リサーチアシスタントを通じてお世話になりました。ここにお礼申し上げます。

旧波浪中推進性能懇談会、実海域推進性能研究会の委員の方々には数々の有益な意見をいただきました。お礼申し上げます。

共に研究室で学んだ先輩、同級生、後輩そして KFR-Jr. のの方々には様々な議論をしていただきました。ここにお礼申し上げます。

第4章の長期予測法関連の計算は平成7年度4年生 濱中 誠司 君、平成8年度4年生 瀬川 進 君、平成9年度4年生 柴田 憲一 君の卒業研究の一環として行ったものであり、ご協力いただいたことに感謝いたします。

最後に本論文を纏めるにあたり物心両面に亘って惜しみ無い応援、支援をいただきました妻 あかね および両親、大井家の方々、大阪大学教職員の方々に心からお礼申し上げます。