長期予測法のための新しい統計学的数理モデルの構築

——船体応答予測への応用——

正員 新 開 明 二* 学生員 万 順 濤**

A Stochastic Model for the Long-Term Prediction
——Application of the Model to Predicting Ship Responses——

by Akiji Shinkai, *Member* Shuntao Wan, *Student Member*

Summary

This paper discusses the reconstruction on the algorithm of the long-term prediction by using a stochastic model. The model is a rational long-term stochastic model for calculating the long-term statistics of sea waves which was proposed by G. A. Athanassoulis et al. On the basis of the same framework of treating the wave climate as a stochastic model, the algorithm for the long-term stochastic prediction of ship responses in ocean waves is examined and improved for the purpose of using the combination of some long-term wave frequency data which presented with some differences in data format. The long-term predictions of vertical acceleration induced on the bow of a container ship are executed for a few patterns of combination of wave data, and further investigations for reconstruction of the algorithm are discussed.

1. 緒 言

大洋の波浪中を航海する船を設計する際に、種々の船体応答の統計的予測¹⁾を行うことが必須である。そのためには、長期間にわたって就航する海域で船が遭遇すると考えられる海象（特に、波浪等）を的確に予測することが必要となる。本報では、海象の長期的特性の手掛りを与える長期波浪統計データの質^{2)~4)}と長期予測の基礎をなすアルゴリズムの両面から検証を加え、船体応答の統計的予測法の基本アルゴリズムの再構成を計ることを目的としている。

船舶が就航する主要海域について、各種の長期波浪統計資料^{5)~11)}が提供されており、例えば、略々地球全海域をカバーする海域について船舶からの目視観測通報データに基づく Hogben ら⁸⁾の波浪統計図表、北太平洋について船舶通報データに基づく、山内ら⁹⁾の波浪統計図表、高石ら¹⁰⁾の波浪統計図表、渡辺ら¹¹⁾の波浪統計図表等が挙げられる。特に、渡辺らの統計図表では、船舶通報データに基づくも

の他に波浪追算に基づく統計図表とブイデータに基づく統計図表が合わせ示されており、北太平洋の海象情報のデータベースの構築が企図されている。このように、統計学的意味から、海象の実態をより反映したデータベースの作成が試みられて海象の長期的特性が従来に較べて飛躍的に明らかになりつつあり、さらに、人工衛星の利用による新しいデータ収集技法¹²⁾の開発、波浪の長期統計解析の新しいモデルの提案¹³⁾等により、船体応答の統計的予測の立場から新しい利用可能性に期待が寄せられる状況にある。

船体応答の長期予測法については、長期分布を理論式で表わす方法と波浪発現確率を利用して数値積分に依る方法に大別することができる。前者の理論式で表わす方法では、対数正規分布を利用する Jasper¹⁴⁾の方法、Gumbel¹⁵⁾の極値統計理論を利用する Yuille¹⁶⁾の方法、Weibull 分布を利用する Nerdenström¹⁷⁾の方法が代表的なもので、Jasper 以来、種々の方法が提案されているが大旨これら三つの方法の系統を引くものである。後者の数値積分に依る方法は、いわゆる、長期分布を数値計算のみによって求める福田¹⁸⁾の方法（以後、福田法と称す）であり、実用計算に便利のために、船の耐航性能の予測、船体波浪荷重とこれらの荷重によって船体構造部材に誘起される応力の異常値を推定する問題¹⁹⁾等に適用されるなど船の初期計画の有力な手

* 九州大学工学部

** 九州大学大学院工学研究科

段として広く実用に供されてきており、近年の国際満載喫水線条約の再検討²⁰⁾にも取り入れられている。しかし、長期予測法のアルゴリズムについては、真能ら²¹⁾、土岐ら²²⁾の検討例はあるものの、方法の提示から30有余年経過したにもかかわらず、その本質への検証が十分に試みられたとは言えない。

本報では、波浪統計データの質の相異まで考慮した長期予測法を開発するために、新しい長期の波浪モデル¹³⁾を参考にして長期予測で利用される長期波浪発現確率の定義を検証し、異なる波浪統計資料間の統計データを合成²³⁾し利用する立場から、長期予測のアルゴリズムについて検討する。波浪統計資料として北太平洋に関する統計データを例として採用し、コンテナ船の船体応答の長期予測計算を実施し、再構成したアルゴリズムの適用の是非について考察した結果を報告する。

2. 海象の統計学的数理モデル

海象（以下、波浪と同義）をどのように捉えるかが長期予測法の性格を左右する。一般に、波浪を短期海面の定常確率過程として捉えエルゴード性の仮定のもとにスペクトル計算を行い、線形問題の場合には線形重ね合わせの理論²⁴⁾に従って船体応答のスペクトル計算を行う¹⁾。スペクトルの特性値の長期特性に理論式を当てはめる場合が文献¹⁴⁾¹⁶⁾¹⁷⁾の長期予測法であり、スペクトルの特性値で代表される海象（短期波浪海面）の発現確率を直接利用する場合が福田法¹⁸⁾である。アルゴリズムが一見異なるようであるが、海象のモデル化において長期特性の導入方式に違いがあるだけで本質に差があるわけではない。Athanasoulisら¹³⁾は、これらの両方式を包括する形での長期波浪海面の新しい統計モデルを提案している。同様な考え方のもとに、長期予測で利用される長期波浪発現確率について説明すれば次のようである。

海象の中の波浪について、短期と長期に分けて取り扱うことを統計学的に厳密化するために、現象について2種類の時間的スケールを導入し、次のように定義している¹³⁾。

t : short-term, fast or fine time scale

τ : long-term, slow or coarse time scale

ここに、海象状態（風浪階級等と同義）を時間スケール t で捉えるとき、従来と同じ短期波浪海面の取り扱いを意味するが、その短期の集成として長期の海面隆起を時系列 $\eta(t)$ で与え、対応するスペクトルの特性値を時間スケール τ を導入して $\bar{A}(\tau)$ と定義している。個々の海象状態の標本過程は、 i 番目の海象状態のスペクトル特性値 $\bar{A}_i$ と海象の持続時間（現実には海象の観測継続時間を意味する） ΔT_i を用いて確率系列 $\Xi(i) = \{\Delta T_i, \bar{A}_i\}$ として定めている。Athanasoulisら¹³⁾の提案の要点は、確率論の立場から $\eta(t)$ 、 $\bar{A}(\tau)$ 、 $\Xi(i)$ を確率過程とみなして取り扱う処にある。その基本仮定は確率系列 $\Xi(i)$ に季節的な定常性を付与するこ

と、言葉を換えると、各海域において、海象状態の空間的位置と季節に関する母集団の確率密度関数 $p(\Delta T, \bar{A})$ の存在を仮定することである。この仮定のもとに、確率過程 $\eta(t)$ と確率系列 $\Xi(i)$ の間の関係を示す一組の作用素 $\mathcal{G}$ と $\mathcal{G}^{-1}$ が導入されて、確率系列の統計解析に基づき、長期波浪海面の隆起 $\eta(t)$ の確率的特性の表示が示され、その応用例として、波浪海面の波の片振幅と波高の長期確率密度が求められている¹³⁾。この結果は即文献¹⁴⁾¹⁶⁾¹⁷⁾の長期予測法に適用可能であるし、スペクトル特性値が、 $\bar{A}(\tau) = [H(\tau), T(\tau)]$ (H : 有義波高, T : 平均波周期) であることを考慮すれば、計算が可能であるかどうかは別として、形式上、福田法のアルゴリズムも同様な考え方のもとに記述することができる。

船が就航する海域において、海象状態の長期発現確率を $p(\Delta T, \bar{A})d\bar{A}$ と表わすとき、船体応答 r の短期確率（例えば、超過確率等）を $q(r; \Delta T, \bar{A})$ とすれば、船体応答 r の長期確率は次式によって与えられる。

$$Q(r|\Delta T) = \int_{\bar{A}} q(r; \Delta T, \bar{A}) p(\Delta T, \bar{A}) d\bar{A} \quad (1)$$

ここに、 $\{\bar{A}\}$ は積分範囲を示す。

海象状態の発現確率 $p(\Delta T, \bar{A})d\bar{A}$ を ΔT に無関係として $p(\bar{A})d\bar{A}$ とみなし、さらに、 $\bar{A} = [H, T]$ であるとして $p(H, T)dHdT$ と置き、必然的に船体応答の短期確率を $q(r; \bar{A})$ と置くことが福田法のアルゴリズムと言える。(1)を計算することは現実問題として可なり困難を伴うが、人工衛星の利用による新しいデータ収集技法¹²⁾の開発により波浪統計の充実が進めば、 $p(\Delta T, \bar{A})d\bar{A}$ の計算が可能となり、実現の可能性は多分にあると考える。次節において、海象の持続時間（現実には海象の観測継続時間を意味する） ΔT と意味は異なるが、福田法の長期予測のアルゴリズムにおいて相似な機能が要求される波浪統計データの合成²³⁾の問題を例にとりアルゴリズムの再構成について説明する。

3. 長期予測のアルゴリズム

船がある海域を長期間にわたって航海していると仮定し、その海域の長期波浪発現確率 $p(\bar{A})d\bar{A} = p(H, T)dHdT$ を利用して2.の記述に従えば、船体応答の長期確率は次のように表示される。

$$Q = \int_{\bar{A}} q(r; \bar{A}) p(\bar{A}) d\bar{A} \quad (2) \\ = \iint_{\{H, T\}} q(r; H, T) p(H, T) dHdT$$

ここに、 $\{H\}$ と $\{T\}$ はそれぞれの積分範囲を意味する。

(2)の統計学的解釈は、次のようである。即ち、海域（同じ海域でも海象の観測期間が異なれば別の空間とみる）が複数の物理空間 $A^m (m=1 \sim M)$ として Fig. 1 のように概念図が画けると、対応する標本空間群 $S^m (m=1 \sim M)$ は、各物理空間における海象状態 $s_i (i=1, \dots, n, \dots)$ を要素

Fig. 1 Conceptualized diagram of wave data sample space

として $S^m = \{s_1^m, s_2^m, \dots, s_n^m, \dots\}$ と表示でき、各海象状態の発現確率 $P_n^m = P\{s = s_n^m : n=1, 2, \dots; m=1, 2, \dots, M\}$ を付与する。海象状態を $s_n^m = (H, T)_n^m = (H_i, T_j)_n^m : i=1, 2, \dots; j=1, 2, \dots$ とし、各海象状態の発現確率を $p_n^m = p_n^m$ と表示すれば、海域 A^m における船体応答の長期予測が(2)を用いて計算できる。また、標本空間 S^m の発現確率 $P(S^m)$ が既知であれば、複数の海域に跨って長期予測を行うことができる。これが異なる波浪統計資料間の統計データの合成²³⁾において採用されたアルゴリズムである。

具体的な例で説明する。まず、対象の海域が、個別に波浪統計データが示されている複数の小海域から構成される場合は次の通りである。Fig. 2 のような海域とその海域の海象状態の標本空間が画けると、海域 A^m と海域 A^{m+1} における海象の集合 S^m と S^{m+1} は、次式のように与えられる。

$$S^m = \{s_1^m, s_2^m, \dots\}, S^{m+1} = \{s_1^{m+1}, s_2^{m+1}, \dots\} \quad (3)$$

ここに、 $S^m \cap S^{m+1} = \phi$ の場合に、小海域の和を考えた場合に全体の標本空間 S は次式となる。

$$S = \bigcup_{m=1}^M S^m = \{s_1^1, \dots, s_1^m, s_2^m, \dots, \dots, s_1^M, s_2^M, \dots\} \\ = \{s'_1, s'_2, \dots\} \quad (4)$$

Fig. 2 Union of different sea area's wave data sample

各小海域の各海象状態の発現確率を、 $P_n^m = P\{s = s_n^m\}$, $P_n^{m+1} = P\{s = s_n^{m+1}\}$ と与えるとき海域の和に対する海象状態の発現確率は、 $P'_n = P\{s = s'_n\}$ となり、対象とする小海域の発現確率 $P(S^m)$ を用いて次式のように与えられる。

$$P'_n = \sum_{m=1}^M P(S^m) P\{s = s'_n | S^m\} \quad (5)$$

小海域の発現確率 $P(S^m)$ は、一種の条件確率で問題の性質によって推定の方法は一つに定め難いが、例えば、航路別の長期予測²⁵⁾では海域の重み係数に相当する。

次に、対象の海域が、波浪統計データが示されている小海域の部分の海域である場合には次のような考え方を採用する。Fig. 3 に模式図を示すように、小海域 A^m が、複数の部分海域 ${}^1A^m$ に分割される時、部分海域 ${}^1A^m$ の海象状態の標本空間は形式的に ${}^1S^m = \{s_1^m, s_2^m, \dots, s_n^m, \dots\}$ と書くことができる。海象状態の発現確率を ${}^1P_n^m = P\{s = {}^1s_n^m\}$ とおけば、小海域で統計的に均質と仮定できるときには、 $P_n^m = {}^1P_n^m = \dots = {}^lP_n^m = \dots$ とすれば良い。波浪統計資料が波浪発現頻度の形式で与えられている場合には、統計資料の質を顧慮するために、部分海域の面積に比例する重みを導入する必要がある²³⁾。

$$\text{Sea areas} \quad A^m = {}^1A^m + {}^2A^m + \dots$$

$$\text{Sample space} \quad S^m = {}^1S^m + {}^2S^m + \dots$$

Fig. 3 Division of sea area's wave data sample

4. 船体応答長期予測例と考察

4.1 長期波浪統計資料

船舶が就航する主要海域について、各種の長期波浪統計資料^{5)~11)}が提供されている。Hogben らの GWS (Global Wave Statistics)⁸⁾の統計資料では、北大西洋、北太平洋等の主要海域を含み略々地球全海域をカバーする 104 の小海域について、それらの海域を航行する船舶からの約 130 年間 (1854 年~1984 年) の目視観測通報データ (波と風の相関表) の解析の結果として各小海域ごとに波高一波周期の同時確率分布が求められて波高一波周期の組合わせの海象に対応する発現確率が示されている。全観測データ数は約 5,500 万個にのぼる。

北太平洋については、船舶通報データを基にした、山内ら⁹⁾の波浪統計図表(1954年～1963年)、高石ら¹⁰⁾の波浪統計図表(1964年～1973年)、渡辺ら¹¹⁾の波浪統計図表(1974年～1988年)等が公表されている。いずれもGWSの場合と異なり波浪データは波高・波周期の発現頻度表(いわゆる相関表)の形で提示されている。全観測データ数は、山内らの波浪統計図表で約48万個、高石らの波浪統計図表で約356万個、渡辺らの波浪統計図表の内目視によるもので約490万個である。各資料のデータ数の相互関係を明示するために、データ数を幾何形状(例えば、円)の面積で表示する概略面積図表にて、Fig. 4に示す。図には、参考のために、北大西洋に関する、Roll⁵⁾の波浪統計図表とWalden⁶⁾の波浪統計図表についても同様の形式でデータ数の規模を示している。この概略面積図表より、GWSの観

測データ数が、他の波浪統計図表のそれに較べて地球全海域をカバーしているのが圧倒的な規模になっていることと北太平洋に関する山内ら、高石ら、渡辺らの三つの波浪統計図表の大部分を含みまた山内ら、高石ら、渡辺らの統計データがお互いに独立していることが示されている。

北太平洋の波浪統計資料についてさらに詳細に検討する。本報告で検討した北太平洋の全海域とは、文献3)で採用した海域と同じであり、Fig. 5に示しているGWSにおけるArea No.: 6, 7, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 22, 28, 29, 30, 31, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 52, 53, 54, 62, 63の26個の小海域から構成される海域ならびにその相当海域に対応する。図中太い線(ユーラシア大陸東海岸、北米西海岸、赤道)で囲まれた海域は、渡辺ら¹¹⁾が設定した北太平洋の海域に相当する。

山内ら、高石ら、渡辺らの波浪統計図表は、合計で35年間の長期間にわたる統計資料となっており、データのフォーマットに若干の相異があるものの、ほぼ同じ基本方針のもとにデータの解析と整理が行われて、波浪の発現頻度図表が提供されている。各データを合成して利用するための簡易的合成法について文献23)で論じたが、その裏付けとなるアルゴリズムを3.で説明した。北太平洋の全海域と2つの特定海域(GWSの小海域Area No. 42と小海域Area No. 20)について、各波浪データの観測数を概略面積図表でFig. 6に示している。図からわかるように、北太平洋の全海域のGWSのデータ数が約1185万個に対して山内ら三つの統計資料のデータ数の合計が約894万個であり略々きつ抗していること、また、2つの特定海域の各波浪データの全観測数はよりGWSの対応する小海域の観測数に近接しているが、その観測数そのもののオーダーは北太平洋の全海域のそれに較べて一桁小さいことがわかる。特定海域について、波浪発現頻度表を作成するためには、3.で説明した小海域の和のアルゴリズムを用いればよく、例えば、特定

Fig. 4 Relationship of different wave data (the globe)

Fig. 5 Map of calculated sea areas

Fig. 6 Relationship of different wave data (the North Pacific)

海域 (GWS Area No. 20) に対して、渡辺らと高石らの波浪統計図表では小海域番号 M 03, M 04…の合成を、山内らの波浪統計図表では小海域番号 2, 15, 16…の合成を行うことになる。特に、山内らの波浪統計図表では一般に小海域が広く (海域分割が粗) のために合成を行う際に 3. で説明した海域の分割のアルゴリズムを用いた。

4.2 長期予測結果

コンテナ船を計算対象として、前節で説明した北太平洋の全海域、特定海域等について船体応答の長期予測を実施した。コンテナ船は、船長 $L=175$ m, 方形係数 $C_b=0.572$ の一軸船である。主要目を Table 1 に示す。船体応答として、船首部に誘起される垂直方向加速度を採用した。主要

Table 1 Principal dimensions of the container ship

Item	SR108 Container ship
L_{pp} (L_{wp}) (m)	175.00
B (m) : breadth	25.40
D (m) : depth	15.40
d (m) : draught	9.50
Δ (ton)	24,742.00
L_{pp}/B	6.890
B/d	2.674
l_{cb} (% L_{pp})	-0.01417
C_b	0.572
C_m	0.970

な結果を Fig. 7~9 に示す。

Fig. 7 には、北太平洋の全海域について、山内らの波浪統計図表、高石らの波浪統計図表、渡辺らの波浪統計図表の内目視によるものおよびこれらの三つの波浪統計データの合成 (combined) の各々に基づく、正面向波状態で船速 $F_n=0.30$ の場合の垂直方向加速度の長期予測値を示している。図には、超過確率 10^{-8} の長期予測値を GWS に基づく長期予測値で除した相対値をそれぞれの波浪統計資料の観測データ数の関数として示している。GWS については、長期波浪発現確率の復元修正 (modified)^{2)~4)} に基づく結果である。図によれば、三つの波浪統計データを合成して得られた発現確率に基づく長期予測値が、GWS の復元修正を施した長期予測値に漸近する様子が示されており、文献 23) で垂直方向相対変位について得られた結果と同様な傾向を与えている。

Fig. 8 には、特定海域 (GWS の小海域 Area No. 20) に

Fig. 7 Relative values of long-term prediction of vertical acceleration at bow, as a function of object numbers (All sub zones)

Fig. 8 Relative values of long-term prediction of vertical acceleration at bow, as a function of object numbers (Area No. 20)

Fig. 9 Relative values of long-term prediction of vertical acceleration at bow, as a function of object numbers (Area No. 42)

ついて、山内らの波浪統計図表、高石らの波浪統計図表、渡辺らの波浪統計図表の内目視によるものおよびこれらの三つの波浪統計データの合成(combined)の各々に基づく、正面向波状態で船速 $Fn=0.30$ の場合の垂直方向加速度の長期予測値を示している。これらの波浪統計図表の算出にあたり小海域の和のアルゴリズムを用いていることは3.で説明した通りである。図には、超過確率 10^{-8} の長期予測値をGWSに基づく長期予測値で除した相対値をそれぞれの波浪統計資料の観測データ数の関数として示している。図によれば、三つの波浪統計データを合成して得られた発現確率に基づく長期予測値が、GWSの復元修正を施した長期予測値に漸近する様子が示されているが、北太平洋の全海域の場合に較べて漸近の程度が不十分である。この原因は特定海域における観測データ数のオーダーが低いために山内らの個々の波浪統計図表の影響が直接に合成(combined)の結果に表れるためであると推測される。

Fig. 9には、特定海域(GWSの小海域 AreaNo.42)について、同様に、山内らの波浪統計図表、高石らの波浪統計図表、渡辺らの波浪統計図表の内目視によるものおよびこれらの三つの波浪統計データの合成(combined)の各々に基づく、正面向波状態で船速 $Fn=0.30$ の場合の垂直方向加速度の長期予測値を示している。図には、超過確率 10^{-8} の長期予測値をGWSに基づく長期予測値で除した相対値をそれぞれの波浪統計資料の観測データ数の関数として示している。図によれば、三つの波浪統計データを合成して得られた発現確率に基づく長期予測値が、GWSの復元修正を施した長期予測値に漸近する様子が示されている。この場合も、漸近の程度が不十分であるが、その原因は、特定海域(Area No. 42)における山内ら、高石ら、渡辺らの波浪統計資料の観測データ数のオーダーが低いことにある。しかしながら、GWSのこの小海域(Area No. 42)の観測データ数は三つの波浪統計データを合成した場合の

観測データ数よりも低いことから判断して、合成されたデータに基づく長期予測値の方がGWSに基づく長期予測値よりも相対的により信頼度が増した結果を与えているものと推測される。

5. 結 言

長期予測の基礎となる統計学的数理モデルについて検討し、波浪統計資料のデータ収集期間、収集方法等の違いにより統計データの質が異なる場合に、波浪統計データの簡易合成を行うアルゴリズムを明確化して、船体応答の長期予測を行う際の基本アルゴリズムを再構築した。北太平洋の海域等について、各種の波浪統計資料を合成して利用する例を示すとともに、コンテナ船の船首に誘起される垂直方向加速度の長期予測計算を実施して、提案したアルゴリズムに基づき波浪統計データの合成を行った波浪統計図表を利用することによりより信頼度が増した結果を得る可能性があることを確認した。福田の長期予測法の結果は本来船体応答の相対値の予測であり、予測値の目盛の精度向上について、長期予測法のアルゴリズムと波浪統計データの質の両面から検討を加えたが、波浪追算等で作成された波浪統計図表等との比較検討が今後の課題である。

「北太平洋の波と風(1974~1988)」のパソコン版海象データベースの利用に際し、種々のご配慮を頂いた(財)シップ・アンド・オーシャン財団の関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。また、本研究の遂行にあたり協力された九州大学工学部船舶海洋システム工学教室岩本才次氏、図面の整理にあたった藤野容子さんに謝意を表します。本計算は、主として、パーソナルコンピュータ(PC-9821 Xa 10/C 12)を用いて実施したが、計算出力処理の一部に九州大学大型計算機センターFACOM M 1800/20, OS: MSP-EXを利用した。本研究は文部省科学研究費の援助を受けて実施されたことを付記し関係各位に感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 福田淳一：船体応答の統計的予測、耐航性に関するシンポジウム、日本造船学会(1969)。
- 2) 新開明二、万順濤：波浪統計データの特値と船体応答長期予測、西部造船会々報、第89号(1995)。
- 3) 新開明二、万順濤：北太平洋の波浪統計データの利用と長期予測、西部造船会々報、第90号(1995)。
- 4) 万順濤、新開明二：海洋の波浪統計データの特値と船体応答長期予測値の評価、日本造船学会論文集、第178号(1995)。
- 5) Roll, H. U.: Height, length and steepness of seawaves in the North Atlantic and dimensions of sea waves as functions of wind force (English Translation), Technical and Research Bulletin, No. 1~19, SNAME (1958)。
- 6) Walden, H.: Die Eigenschaften der Meerswellen im Nordatlantischen Ozean, Deutscher Wetterdienst Seewetteramt, Einzerveröffentlichungen,

- Nr. 41, Hamburg (1964).
- 7) 福田淳一：波浪中の船の Deck Wetness に関する長期予測, 日本造船学会論文集, 第 124 号 (1968)。
 - 8) British Maritime Technology (Primary contributors; Hogben, N., Dacunha, L. F. and Olliver, G. F.) : Global wave statistics, Unwin Brothers Limited, London (1986).
 - 9) Yamanouchi, Y. and Ogawa, A. : Statistical diagram on the winds and waves on the North Pacific Ocean, 船舶技術研究所報告, 別冊 2 号 (1970)。
 - 10) 高石敬史, 大松重雄：北太平洋の風と波の統計図表 (1964 年～1973 年), 船舶技術研究所報告, 別冊 3 号 (1980)。
 - 11) 渡辺巖, 富田宏, 谷沢克治：北太平洋の波と風 (1974 年～1988 年), 船舶技術研究所報告, 別冊 14 号 (1992)。
 - 12) H. de Sury, M. Olagnon, P. Charriez and P. Lasnier : Contribution of satellite data to Meteo-Oceanic Site characterization: A case study, Proceedings of the Fourth (1994) International Offshore and Polar Engineering Conference, Osaka, Japan April 10-15 (1994).
 - 13) G. A. Athanassoulis, P. B. Vranas and T. H. Soukissian : A new model for long-term stochastic analysis and prediction-Part 1: Theoretical background, Journal of Ship Research, Vol. 36, No. 1 (1992).
 - 14) N. H. Jasper : Statistical distribution patterns of ocean waves and of wave-induced ship stresses and motions, with engineering applications, Trans. SNAME, Vol. 64 (1956).
 - 15) E. J. Gumbel : Statistics of Extremes (極値統計学), (日本語訳), 広川書店 (1963).
 - 16) I. M. Yuille : Longitudinal strength of ships, Trans. RINA, Vol. 105 (1963).
 - 17) N. Nordenström : Calculations of wave-induced motions and loads, Progress Report No. 4, A Pilot Study with the Computer Program NV 403, Det Norske Veritas Report No. 66-11-S (1966).
 - 18) 福田淳一：長期の波浪曲げモーメント異常値の傾向について, 日本造船学会論文集, 第 123 号 (1968)。
 - 19) 例えば, J. Fukuda and A. Shinkai : Predicting the longitudinal stress induced on a large oil tanker in sea waves, International Shipbuilding Progress, Vol. 25, No. 291 (1978).
 - 20) M. Takaki and Y. Takaishi : Development of expression for estimating bow freeboard and assesment of the 1966 Load Line Convention, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 174 (1993).
 - 21) 真能創, 上野洋純：波浪に対する各種船体応答の長期分布の近似推定法とその応用, 日本造船学会論文集, 第 132 号 (1972)。
 - 22) 土岐直二：設計海象の設定法に関する研究, 西部造船会々報, 第 89 号 (1995)。
 - 23) 新開明二, 万順濤：各種の長期波浪統計資料の特性値の傾向について, 西部造船会々報, 第 91 号 (1996)。
 - 24) M. St. Denis and W. J. Pierson Jr. : On the motions of ships in confused seas, Trans. SNAME, Vol. 61 (1953).
 - 25) 塚本修, 森俊哲：波浪外力の航路別長期予測について, 西部造船会々報, 第 47 号 (1973)。
-