

# 日本沿岸における波の持続特性の推定について

加藤 始\*・小松崎泰光\*\*・信岡尚道\*\*\*・永井紀彦\*\*\*\*

## 1. 緒 言

各種の海上工事に伴う作業の計画や積算のためには対象地域における波の持続特性の予測が必要である。持続性の推定方法としては, Kuwashima・Hogben (1986) が提案した経験式による NMI 法や半ば理論式に基づいた Mathiesen (1994) のモデルがある。加藤ら (1995, 1996) (以後論文 I, II という) はそれらの日本沿岸数地点の波への適用性を調べ, NMI 法はある程度持続性の妥当な推定値を与えるが, 地点ごとに実測値で修正した改良式を使うと推定精度が向上することを示した。また, Mathiesen モデルの検討は十分とはいえなかった。一方, 一般の使い易さのためには, 多少精度を犠牲にしても, 日本沿岸域において広範囲に適用できる推定式が必要と考えられた。そこで本研究では, まず日本沿岸域において選定した 15 地点の 10 年間以上の波浪データを使って各地域の波浪の持続特性を把握し, さらに日本全域を対象とした実用的で汎用性のある持続時間累積回数の推定式を導くことを目的とする。

## 2. 解析データと解析手法

### 2.1 解析データ

本研究で使用したデータは, 全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS) の苫小牧・むつ小川原・常陸那珂・鹿島・潮岬・志布志・名瀬・中城湾・留萌・深浦・酒田・輪島・鳥取・浜田・玄界灘の計 15 地点の有義波高データである。

### 2.2 NMI 法における波高の持続特性の解析方法

いまある期間  $T$  (時間単位) 内における一連の有義波高 (以下, 単に波高と記す) の中で, ある限界波高  $H'$  以上の波群を超過波と呼び,  $H'$  未満の波を未超過波と呼ぶ。NMI 法では波高  $H$  の累積超過確率  $Q(\geq H')$  をワイブル分布式を使って

$$Q(\geq H') = \exp(-BH_n^{\alpha}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

で近似する。ただし  $H_n = H'/H_m$  ( $H_m$ : 平均波高),  $\gamma$  は

形状パラメーター,  $B$  は scale parameter で,

$$B = [\Gamma(1+1/\gamma)]^{\gamma} \quad \dots\dots\dots (2)$$

と表される ( $\Gamma$  の記号はガンマ関数を示す)。

また, 設定波高  $H'$  を越える波の平均持続時間  $\bar{\tau}_0$  を

$$\bar{\tau}_0 = A[-\log Q(\geq H')]^{-\beta} \quad \dots\dots\dots (3)$$

のように表し, 係数  $A$  と  $\beta$  も  $\gamma$  の経験式で

$$A = 35/\gamma^{0.5} \quad \dots\dots\dots (4a)$$

$$\beta = 0.6/\gamma^{0.287} \quad \dots\dots\dots (4b)$$

のように与えている。 $\gamma$  は波の持続特性をよく表し, これが NMI 法が異なる地点での波に適應できると期待されている所以である。式 (3) によって  $\bar{\tau}_0$  が得られれば, 未超過波の平均持続時間  $\bar{\tau}_i$  は

$$\bar{\tau}_i = \bar{\tau}_0[1 - Q(\geq H')]/Q(\geq H') \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表され, さらに超過波 (未超過波) の持続時間  $t$  ごとの累積超過確率は

$$X_0 = t/\bar{\tau}_0, X_i = t/\bar{\tau}_i \quad \dots\dots\dots (6)$$

と正規化した持続時間  $X_0, X_i$  を使って

$$R_0(\geq X_0) = \exp[-D_0 X_0^{\alpha_0}] \quad \dots\dots\dots (7a)$$

$$R_i(\geq X_i) = \exp[-D_i X_i^{\alpha_i}] \quad \dots\dots\dots (7b)$$

と表される。そしてこの式 (7a, b) の形状パラメーター  $\alpha_0, \alpha_i$  も式 (1) の形状パラメーター  $\gamma$  を使って, 次のような式で与えられている。

$$\alpha_0 = 0.267\gamma(H_n)^{0.4} \quad \dots\dots\dots (8a)$$

$$\alpha_i = 0.267\gamma(H_n)^{-0.4} \quad \dots\dots\dots (8b)$$

これらの関係から, ある海域における波高の確率分布がわかれば, 累積超過確率  $Q(\geq H')$  とそれを近似するワイブル分布パラメーター  $\gamma$  の値から, 想定する限界波高  $H'$  に対する超過波 (または未超過波) の平均持続時間  $\bar{\tau}_0$  ( $\bar{\tau}_i$ ) および持続時間の累積超過確率  $R_0(R_i)$  を求めることができ, 持続時間ごとの累積生起回数が計算される。

### 2.3 Mathiesen のモデル

Mathiesen (1994) は水面波形データの level crossing の理論 (Ochi, 1982) を有義波の時系列に適用し, 超過波と未超過波の平均持続時間の式を導いた。すなわち, 単位時間にある波高を越える超過波の平均個数  $\nu(H)$  は

$$\nu(H) = (1/2) \int_{-\infty}^{\infty} |H'| \nu(H, H') dH' \quad \dots\dots\dots (9)$$

で表せるとした。ここに,  $H' (= dH/dt)$  は波高の時間変化

\* 正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科  
 \*\* 学生会員 茨城大学大学院理工学研究科  
 \*\*\* 正会員 工修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科  
 \*\*\*\* 正会員 工博 運輸省港湾技術研究所水工部 海象調査研究室長

率であり、 $p(H, H')$  は  $H$  と  $H'$  の結合確率である。ここで次の式を使う。

$$p(H, H') = f(H)g(H'|H) \dots\dots\dots (10)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} |H'|g(H'|H)dH' = S(H) \dots\dots\dots (11)$$

$f(H)$  は  $H$  の確率密度関数、 $g(H'|H)$  は  $H$  による  $H'$  の条件付き確率、 $S(H)$  は絶対値をとった変化率の平均値を表している。以上から

$$\nu(H) = (1/2)f(H)S(H) \dots\dots\dots (12)$$

という関係が導かれ、超過波の平均持続時間  $\bar{\tau}$  の式  $\bar{\tau} = T \cdot Q(\geq H')/N \dots\dots\dots (13)$

( $N$ : 期間  $T$  での超過回数) を考慮すると、 $\bar{\tau}$  は  $\bar{\tau} = 2Q(\geq H')/[f(H)S(H)] \dots\dots\dots (14)$

と表される。また、 $f(H)$  と  $Q(H)$  は 3 パラメーターワイブル分布式で局所パラメーターを 0 とおいた次の式を使っている。

$$f(H) = \frac{\gamma}{X_0} \left(\frac{H}{X_0}\right)^{\gamma-1} \exp\left[-\left(\frac{H}{X_0}\right)^\gamma\right] \dots\dots\dots (15)$$

$$Q(H) = \exp[-(H/X_0)^\gamma] \dots\dots\dots (16)$$

Mathiesen は波高の時間変化率  $S(H)$  が次のように波高のある指数関数で表せることを見いだした。

$$S = q(H/H_0)^\gamma, (H_0 = 1.0 \text{ m}) \dots\dots\dots (17)$$

ここに、 $q$  と  $r$  は地点ごとに異なる定数である。

式 (14)~(17) と式 (3) とから、Mathiesen の方法によると NMI 法の式 (4a, b) の定数  $A$  と  $\beta$  が次式の  $A_M$  と  $\beta_M$  のように理論的に導かれることになる。

$$A_M = 2[\gamma(X_0/H_0)^\gamma]^{-1}(q/H_0) \dots\dots\dots (18a)$$

$$\beta_M = (\gamma - r + 1)/\gamma \dots\dots\dots (18b)$$

また、Mathiesen はワイブル分布の変異係数  $K$  の理論式が形状パラメーター  $\alpha$  の式で与えられることに着目し、NMI 法の式 (7) における  $a_0, a_1$  が持続時間  $X_0, X_1$  の変異係数  $K$  を使を使って近似的に

$$\alpha \approx 1/K \dots\dots\dots (19)$$

と表せることを見いだした。またこの  $K$  について、超過波の変異係数を  $K_1$ 、未超過波の変異係数を  $K_2$  としたとき、

$$K_1(H_n) = a_1 + b_1 \exp(-c_1 H_n^3) \dots\dots\dots (20a)$$

$$K_2(H_n) = 1 + a_2(H_n + b_2)^2 \exp(-c_2 H_n^2) \dots\dots\dots (20b)$$

という式で表している。ここで、 $a_1, b_1, c_1, a_2, b_2, c_2$  は実測値から決まる係数である。

これで式 (20a, b) のパラメーターが求まれば、超過波 (未超過波) の変異係数  $K_1$  ( $K_2$ ) が求まり、そして式 (19) よりワイブル分布の形状パラメーター  $\alpha_0, \alpha_1$  が求まる。あとは NMI 法と同じ方法で持続時間  $\tau$  ごとの累積生起回数を推定することができる。

各地点ごとに超過波 (未超過波) の変異係数  $K_1$  ( $K_2$ ) を求めた結果の一例を図-1~2 に示す。(式は図中に示

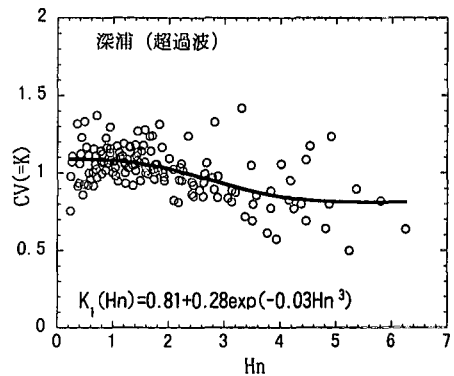


図-1 波高  $H_n$  と変異係数  $K_1$  の関係 (深浦: 超過)

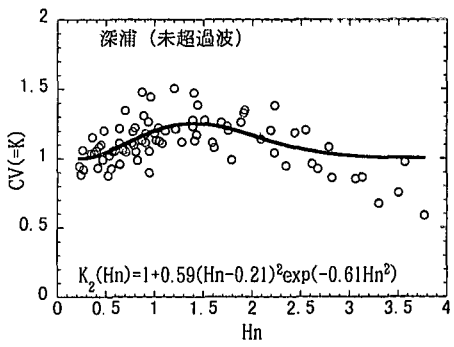


図-2 波高  $H_n$  と変異係数  $K_2$  の関係 (深浦: 未超過)

してある.)

### 3. 地域推定式の算出

#### 3.1 A と $\beta$ の式

論文 I, II では、日本沿岸における波浪の持続時間を各地点ごとに NMI 法で推定するとき、式 (4a, b) や式 (8a, b) の改良式を用いると、持続時間  $\tau$  ごとの累積生起回数の推定精度が向上すること、Mathiesen のモデルである式 (18a, b) の  $A_M, \beta_M$  を用いて計算した平均持続時間  $\bar{\tau}$  は、全体的に見て NMI 法より劣ることを示した。

図-3~4 は各地点ごとに式 (4a, b) の NMI 法改良式を求めた例である。このように NMI 法の改良式は実測値データを反映して各地点ごとの特性をよく示す反面、地域毎の共通の関係は見いだしにくく、地域ごとに共通の式にまとめるのは困難である。そこで  $A$  と  $\beta$  の式としては、全地点にある程度共通性を持つ NMI 法の式 (4a, b) の値を使用することにした。

#### 3.2 Mathiesen のモデルの適用

NMI 法で式 (7a, b) の  $a_0, a_1$  を求めるには限界波高  $H'$  が平均波高  $H_m$  の場合の超過波の  $\alpha$  ( $=\alpha_m$ ) の値を実測値から求め、形状パラメーター  $\gamma$  に対してプロットして

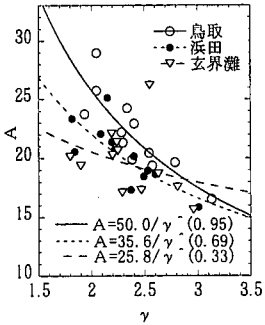


図-3 A と  $\gamma$  の関係

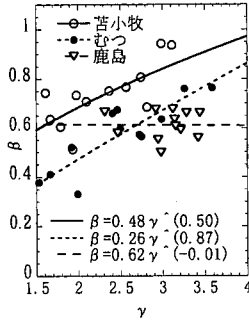


図-4  $\beta$  と  $\gamma$  の関係

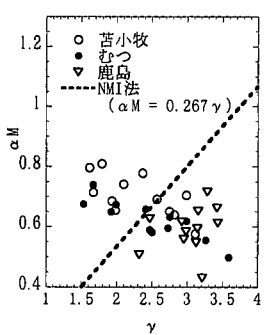


図-5  $\gamma$  と  $\alpha_M$  の関係

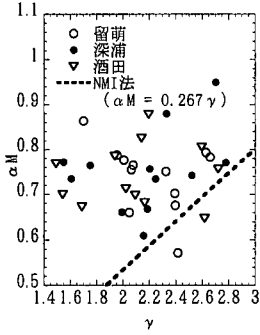


図-6  $\gamma$  と  $\alpha_M$  の関係

$\alpha_M = a\gamma$  ( $a$ : 定数) という直線式で表す。図-5~6 は日本全域の数地点のデータについて  $\alpha_M$  と  $\gamma$  の関係を示したものであるが、とても NMI 法の形の直線式では表せない。

一方、Mathiesen のモデルを適用して、式 (20a, b) の形に各地点ごとの変異係数  $K_1$ ,  $K_2$  を求めると、図-7~10 のように、太平洋側と日本海側で係数の変化傾向がまとめられた。これらをまとめた結果、超過波  $K_1$  と未超過波  $K_2$  ごとに、太平洋側 (苫小牧・むつ小川原・常陸那珂・鹿島・潮岬・志布志・中城湾) は式 (21a, b) のようになる。

$$K_1(H_n) = 0.76 + 0.76 \exp(-0.07H_n^2) \quad \dots\dots (21a)$$

$$K_2(H_n) = 1 + 0.8(H_n + 0.14)^2 \exp(-0.72H_n^2) \quad \dots (21b)$$

また、日本海側 (留萌・深浦・酒田・輪島・鳥取・浜田・玄界灘・名瀬) においても式 (22a, b) のように示すことができることがわかった。

$$K_1(H_n) = 0.42 + 0.75 \exp(-0.015H_n^2) \quad \dots\dots (22a)$$

$$K_2(H_n) = 1 + 0.3(H_n + 0.07)^2 \exp(-0.42H_n^2) \quad \dots (22b)$$

従って、太平洋側と日本海側において、超過波・未超過波ごとに、それぞれ 1 つの式でまとめられる地域式を得ることができた。

持続時間に関する累積超過確率  $R_0$ ,  $R_i$  を、NMI 法における式 (8a, b) 及び Mathiesen のモデルによる式 (21a,

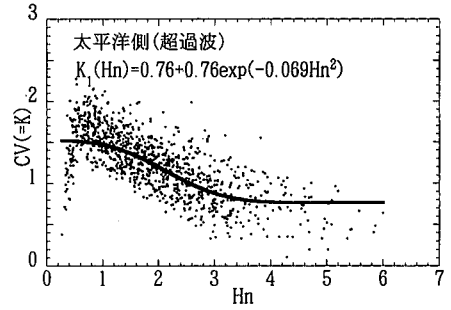


図-7 波高と変異係数  $K_1$  の関係 (太平洋側: 超過)

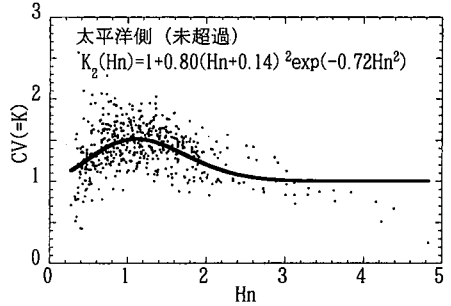


図-8 波高と変異係数  $K_2$  の関係 (太平洋側: 未超過)

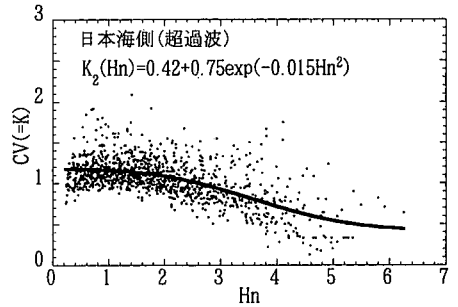


図-9 波高と変異係数  $K_1$  の関係 (日本海側: 超過)

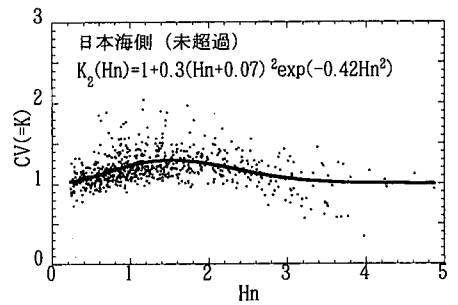


図-10 波高と変異係数  $K_2$  の関係 (日本海側: 未超過)

b), (22a, b) とを使って求めた結果の一例を図-11, 12 に示す。これらを実測値と比較すると、Mathiesen のモデルの方が実測値と一致している。従って、累積超過確率  $R_0$ ,  $R_i$  の算出には Mathiesen のモデルによって求めた

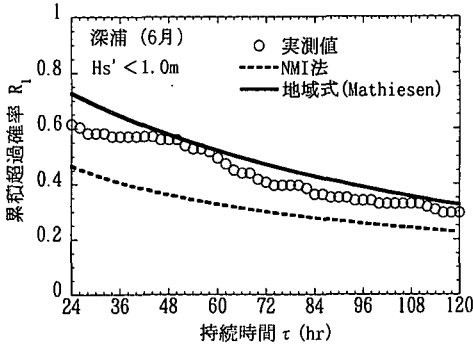


図-11 持続時間に関する累積超過確率  $R_i$

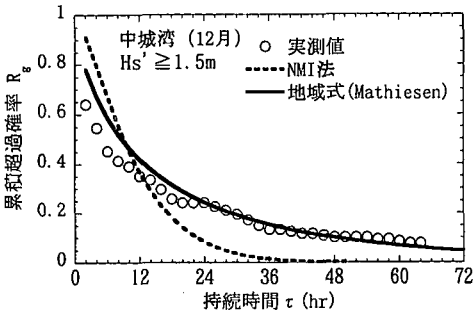


図-12 持続時間に関する累積超過確率  $R_g$

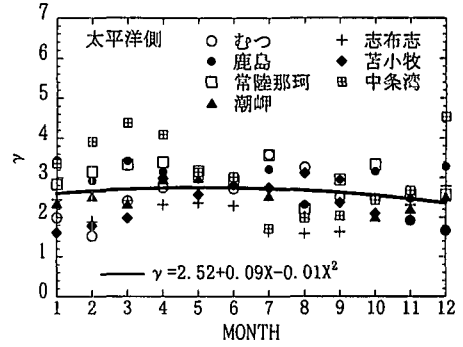


図-13  $\gamma$ の月ごとの変動 (太平洋側)

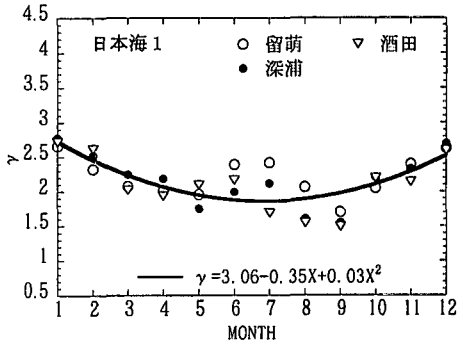


図-14  $\gamma$ の月ごとの変動 (日本海1側)

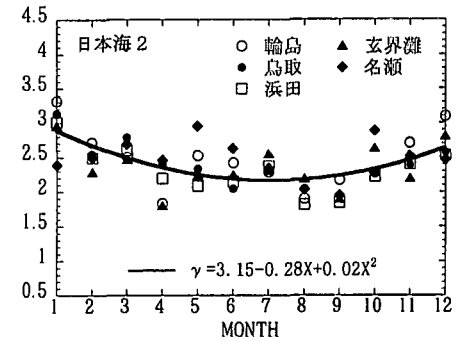


図-15  $\gamma$ の月ごとの変動 (日本海2側)

地域式を使用することにした。

### 3.3 形状パラメータ $\gamma$ の地域分類

NMI法を用いて波の持続特性の推定を行う場合、式(1)の形状パラメータ  $\gamma$  は、地点ごと・季節ごとの傾向を示す重要なパラメータである。これまで、 $\gamma$  の値は各地点において月ごとの値を使用してきた。波浪データがない場合でも使える地域推定式を導くにあたって、各地点ごとの各月の  $\gamma$  の変動をプロットし、共通の傾向をまとめると図-13~15が得られた。その結果、太平洋側(苦小牧・むつ小川原・常陸那珂・鹿島・潮岬・志布志・中城湾)は1地域に、日本海側においては2地域(日本海1側:留萌・深浦・酒田、日本海2側:輪島・鳥取・浜田・玄界灘・名瀬)をそれぞれ1つにまとめて、 $\gamma$  の月ごとの変動を示す地域式として、以下のような関係を得た。

$$\gamma = 2.52 + 0.09X - 0.01X^2 \quad (\text{太平洋側}) \quad \dots\dots (23a)$$

$$\gamma = 3.06 - 0.35X + 0.03X^2 \quad (\text{日本海1側}) \quad \dots\dots (23b)$$

$$\gamma = 3.15 - 0.28X - 0.02X^2 \quad (\text{日本海2側}) \quad \dots\dots (23c)$$

ただし、 $X$  は月数とする。太平洋側の中城湾のように、地点によっては多少のばらつきがあるが、全体的には使用可能なものと考えられる。

### 4. 地域推定式の適用

今回提案する波の持続特性の地域推定式をまとめること、まず式(23a~c)を使用して各地域ごと、月ごとの

$\gamma$  の値を算出する。それをもとに、式(1)~(3)から平均持続時間  $\bar{\tau}$  を求める。ここで、式(3)における係数  $A$ 、 $\beta$  にはNMI法で定義されている式(4a, b)の値を使用する。次にMathiesenの理論を適用し、地域ごとに分類された式(21a, b)、(22a, b)から限界波高  $H'$  ごとの変異係数  $K_1$ 、 $K_2$  を求め、式(19)から求まる  $a_g$ 、 $a_i$  を使って(7a, b)から超過波・未超過波の持続時間に関する累積超過確率  $R_g$ 、 $R_i$  を求める。これで、設定した限界波高  $H'$  の超過波・未超過波の中で、持続時間  $\tau$  以上の累積生起回数が算出できるわけである。地域式を適用した際の、超過波・未超過波の持続時間に関する累積生起回

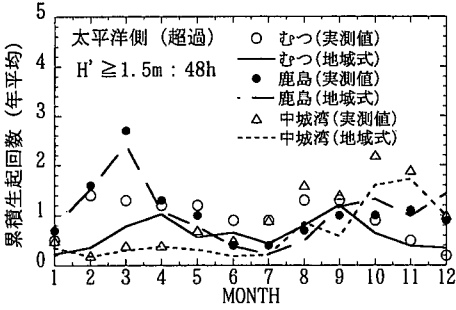


図-16 超過波の累積生起回数 (太平洋側)

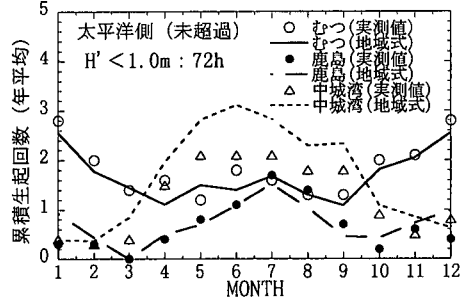


図-18 未超過波の累積生起回数 (太平洋側)

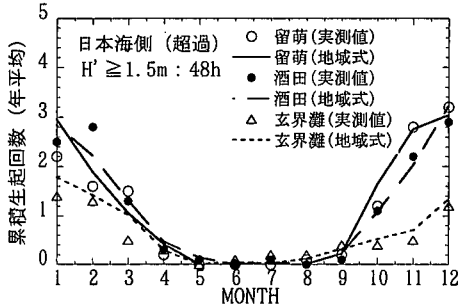


図-17 未超過波の累積生起回数 (日本海側)

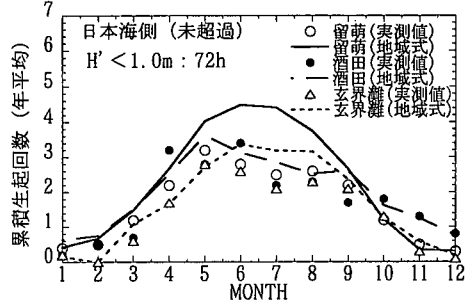


図-19 未超過波の累積生起回数 (日本海側)

数 (年平均) の算出結果の一例を図-16~19に示す。ここでは、限界波高  $H' = 1.5\text{m}$  で持続時間  $\tau = 48$  時間の超過波の累積生起回数と、限界波高  $H' = 1.0\text{m}$  で持続時間  $\tau = 72$  時間の未超過波の累積生起回数 (年平均) が示してある。これらの図より、未超過波の中城湾・留萌の5月~8月のように実測値との合い方がやや悪い点もみられるが、全体的に超過波・未超過波とも一致度は良好である。つまり、今回提案した地域推定式は、現地の平均波高ささえわかれば各地点ごとの季節的な持続特性の傾向をかなりよく推定することができるわけである。各地の月ごとの平均波高の変動を図-20に示す。

5. 結 論

日本沿岸域において選定した15地点の10年間以上の波浪データを使って、NMI法及びMathiesenのモデルより、広範囲に適用できる持続時間の累積生起回数を計算する地域推定式を導いた。本研究の主要な結論は以下の通りである。

- (1) 超過波・未超過波の持続時間における累積生起回数を、地域的な推定式を導いて求めるにあたり、NMI法の式(7a,b)よりもMathiesenのモデルである式(20a,b)を適用した方が、有効であることがわかった。
- (2) NMI法及びMathiesenのモデルにおける各地点ごとの関係式を導いた上で、地域ごとに共通な傾向を

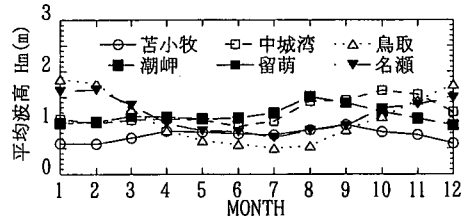


図-20 各地の平均波高の変動

考慮し、日本沿岸を超過波・未超過波それぞれ2地域に分類して持続時間に関する累積生起回数の推定法を提案した。これは、各地点ごとの季節的な持続特性の傾向をかなりよくとらえている。

参 考 文 献

加藤 始・信岡尚道・金原和彦・戸引 勲・永井紀彦 (1995): 茨城沿岸における波浪の持続特性の解析, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 311-315.  
 加藤 始・信岡尚道・平井宜典・永井紀彦 (1996): 波浪の持続特性解析法の再検討, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 226-230.  
 Kuwashima, S. and Hogben, N. (1986): The estimation of wave height and wind speed persistence statistics from cumulative probability distributions, Coastal Eng., Vol. 9, pp. 563-590.  
 Mathiesen, M. (1994): Estimation of wave height duration statistics, Coastal Eng., Vol. 23, pp. 167-181.  
 Ochi, M. (1982): Stochastic analysis and probabilistic prediction of random seas, Adv. Hydrosci., Vol. 13, pp. 217-375.