

# 茨城沿岸における波浪の持続特性の解析

加藤 始\* ・ 信岡尚道\*\* ・ 金原和彦\*\*\*  
戸引 勲\*\*\*\* ・ 永井紀彦\*\*\*\*\*

## 1. ま え が き

港湾工事に伴う海上作業を行える限界波高は一般に有義波高(以下  $H_s$  と書く)で1mとされている。大型ケーソンの据え付け工事には  $H_s \leq 1\text{m}$  の静穏波が3日以上連続する期間が必要とされ、これらの作業の計画と積算のためには対象地域における波浪の持続特性の予測が必要である。ある設定波高以上の波の平均継続時間に関しては Lawson・Abernethy (1975), 広瀬・高橋 (1983) の研究があるが、連続した観測データが入手出来ない場合でも、波侯の持続特性を推定したい要請は強い。これに対して Graham (1982) は波高の確率分布だけから波侯の持続特性を推定する方法を提案し, Kuwashima・Hogben (1984, 1986) はこれを一般化して NMI 法と呼んで提案した。これは主に北海の深海波データを基に構築されたもので、日本沿岸域の波浪に対する適用性は知られていない(合田, 1985)。本研究では、主として茨城県の鹿島と常陸那珂における波浪データに対する NMI 法の適用性を調べ、持続性の推定法の改良を図る。さらに日本海沿岸の3地点の波へのその適用性を検討する。

## 2. 解析データと解析手法

### 2.1 解析データ

本研究で主として使用した波浪データは、茨城県の鹿島港及び常陸那珂港(旧阿字ヶ浦)で運輸省により毎偶数正時1日12回観測された波浪観測台帳データである。その期間は鹿島が1984年～92年の9年間、常陸那珂が1980年～92年の13年間である。この他にも日本海沿岸等数地点の1991～93の3年間の同様のデータを使用した。

### 2.2 NMI法による波高の持続性の解析方法

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  $H_s$  以上の波群を荒天波と呼び、 $H_s$  未満の波を静穏波と呼ぶ。

まず波高の累積超過確率を2パラメーターワイブル分布式を使って

$$Q(\geq H_n) = \exp(-BH_n^\gamma) \quad (1)$$

で近似する。ただし  $H_n$  は平均波高で正規化した波高(=  $H_s/\bar{H}_s$ ) である。 $B$  は scale parameter,  $\gamma$  は形状パラメーターと呼ばれ、ワイブル分布式の特性から

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

の関係がある ( $\Gamma$  の記号はガンマ関数を示す)。

Graham (1982) に従うと、荒天波の平均継続時間  $\bar{\tau}_g$  は波高累積超過確率  $Q(\geq H_s)$  によって次式の形に表される。

$$\bar{\tau}_g = A[-\ln Q(\geq H_s)]^{-\beta} \quad (3)$$

Kuwashima・Hogben (1984) は多くのデータから、式(3)の定数  $A, \beta$  を式(1)における形状パラメーター  $\gamma$  によって

$$\left. \begin{aligned} A &= 35/\gamma^{0.5} \\ \beta &= 0.6\gamma^{0.287} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

のように表わした。これが NMI 法が異なる地域での波に適用出来ると期待されている所以である。式(3)によって  $\bar{\tau}_g$  が得られれば、静穏波の平均継続時間  $\bar{\tau}_i$  は 
$$\bar{\tau}_i = \bar{\tau}_g[1 - Q(\geq H_s)]/Q(\geq H_s) \quad (5)$$
 で得られることになる。

さらに荒天波、あるいは静穏波それぞれの継続時間に対する累積超過確率は

$$\left. \begin{aligned} X_g &= \tau'/\bar{\tau}_g \\ X_i &= \tau'/\bar{\tau}_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

と正規化した継続時間  $X_g, X_i$  を使くと

$$\left. \begin{aligned} R(\geq X_g) &= \exp[-D_g X_g^{a_g}] \\ R_i(\geq X_i) &= \exp[-D_i X_i^{a_i}] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

と表わされる。そしてこの式の形状パラメーター  $a_g, a_i$  も式(1)の形状パラメーター  $\gamma$  を使って、さらに次のように導かれている。

$$\left. \begin{aligned} a_g &= 0.267\gamma(H_s/\bar{H}_s)^{0.4} \\ a_i &= 0.267\gamma(H_s/\bar{H}_s)^{-0.4} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(7)における  $D_g, D_i$  もまた次の関係を満足する。

$$\left. \begin{aligned} D_g &= [\Gamma(1+1/a_g)]^{a_g} \\ D_i &= [\Gamma(1+1/a_i)]^{a_i} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

これらの関係から、ある海域における波高の確率分布

\* 正会員 工博 茨城大学教授 工学部都市システム工学科  
\*\* 正会員 工修 茨城大学助手 工学部都市システム工学科  
\*\*\* 東亜建設工業(株)  
\*\*\*\* 運輸省第二港湾建設局横浜開設  
\*\*\*\*\* 運輸省港湾技術研究所海洋水理部  
\*\*\*\*\* 正会員

がわかれば、累積超過確率  $Q(\geq H_s)$  とそれを近似するワイブル分布式の形状パラメータ  $\gamma$  の値から、想定する限界波高  $H_s$  に対する荒天波 (または静穏波) の平均継続時間  $\bar{t}_0(\bar{t}_i)$  および持続時間の累積超過確率  $R_0(R_i)$  が推定できることになる。

なお、「期間  $T$  (hr) における、ある限界波高  $H_s$  の荒天波あるいは静穏波の中である想定持続時間  $t$  以上の回数  $N_0, N_i$ 」はそれぞれつぎの式で計算できる。

$$N_0 = T \cdot Q(\geq H_s) \cdot R_0(\geq t) / \bar{t}_0 \quad \cdots \cdots (10)$$

$$N_i = T \cdot P(< H_s) \cdot R_i(\geq t) / \bar{t}_i \quad \cdots \cdots (11)$$

### 2.3 欠測の補正法

NMI 法自体は波浪データに欠測があるときでも波侯の持続性を推定できる方法であるが、その結果を検証するための実測値に欠測があると正確な評価が出来ないことになる。そこで欠測 6 回までは線形補間により、それ以上で 1 カ月未満については、鹿島と常陸那珂の波高間の単純回帰式を利用して欠測データの補正を行った。

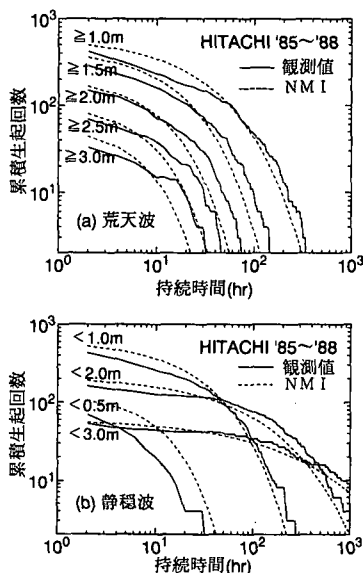


図-1 NMI 法による持続時間回数

### 3. 茨城沿岸の波への NMI 法の適用性の検討

本研究では、鹿島と常陸那珂の有義波データを 1 年毎、4 年分の季節毎、9 年分の月毎と様々な切り方をして NMI 法の適用性を調べた。Kuwashima・Hogben (1984, 1986) は、NMI 法による波の持続性の推定結果の実測値による検証を、荒天波・静穏波のそれぞれにつき、いろいろな限界波高に対して計算した持続時間回数 (式 (10), (11) 参照) の推定値と実測値の比較により行っている。本研究でも同様の比較を行った。ここではその典型的な例として、常陸那珂の 1985~88 年のものを図-1 に示す。図の上が荒天波、下が静穏波に対するものである。

他の切り方のデータでもほぼ同様であるが、この図からわかるように、NMI 法の推定結果はかなり茨城沿岸の持続特性を表現しているとも言えるが、持続時間の短いところで実測値よりもやや大きめ、長いところで小さめの回数 (持続時間の発生確率) を与える傾向が見られる。すなわち、NMI 法は茨城沿岸の波の持続特性を十分に表現しているとは言えず、これは式 (3) の係数  $A, \beta$  等がこれらの地点の波の特性に十分適合していないためではないかと考えられる。そこで、実測データを用いて式 (3) の  $Q$  と  $\bar{t}_0$  を計算し、最小自乗法で  $A, \beta$  を求め、それらと形状パラメータ  $\gamma$  との関係調べてみた。

Kuwashima・Hogben (1984) は冬~秋の各季節ごとに  $\gamma$  と  $A$ 、および  $A$  と  $\beta$  の関係をプロットし、式 (4) の関係を導いている。ここでは常陸那珂の '81~'92 年のデータを 4 年ずつの 3 つのグループに分けて、各季節ごとの  $\gamma, A, \beta$  を計算した。図-2 は  $\gamma$  と  $A$  の関係を示しており、バラツキはかなりあるが、 $A$  は NMI 法の式とほぼ等しい次式

$$A = 34.1\gamma^{-0.473} \quad \cdots \cdots (12)$$

で与えられる。

図-3 は  $\gamma$  と  $\beta$  の関係をプロットしたもので、バラツキは多いが、ベキ乗近似した図中の実線の式として

$$\beta = 0.441\gamma^{0.346} \quad \cdots \cdots (13)$$

という関係が得られる。NMI 法の  $\beta$  の値も図中に破線で示してあるが、実測値は 0.2 程度小さくなっている。

次に式 (8) の  $\alpha_0$  と  $\alpha_i$  の値も実測データから求めてみ

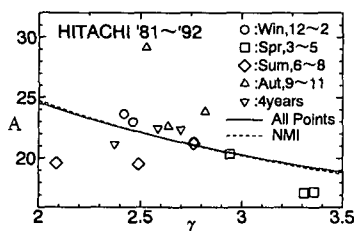


図-2  $\gamma$  と  $A$  の関係

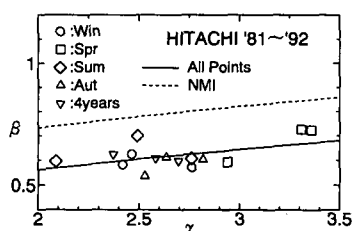


図-3  $\gamma$  と  $\beta$  の関係

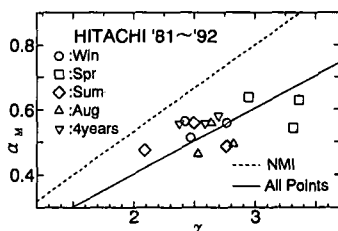
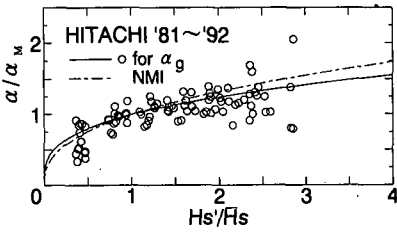
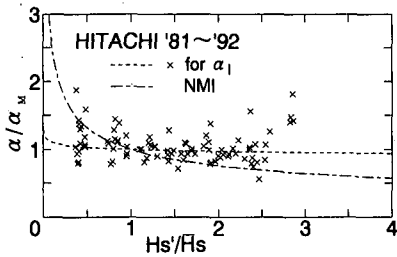


図-4  $\gamma$  と  $\alpha_m$  の関係

図-5 荒天波の  $\alpha_g$ 図-6 静穏波の  $\alpha_i$ 

た。図-4は  $H_s = \bar{H}_s$  の場合の荒天波に対する式(7)の  $\alpha (= \alpha_M)$  の値を実測データについて求め、形状パラメータ  $\gamma$  に対してプロットしたものである。NMI法では

$$\alpha_M = 0.267\gamma \quad (14)$$

の関係が得られているので、パラツキはかなりのあるが、同形の関係(図中の実線)を求めると

$$\alpha_M = 0.202\gamma \quad (15)$$

が得られる。荒天波、静穏波のそれぞれにつき、いろいろな限界波高  $H_s$  にたいして計算した  $\alpha$  の値を式(15)の  $\alpha_M$  で無次元化して  $H_s/\bar{H}_s$  に対してプロットしたのが図-5と図-6である。図-5は荒天波についてのもので、実線のようにベキ乗曲線で近似すると

$$\alpha_g/\alpha_M = (H_s/\bar{H}_s)^{0.318} \quad (16)$$

が得られる。図-6は静穏波についての結果であるが、こちらも破線の関係

$$\alpha_i/\alpha_M = (H_s/\bar{H}_s)^{-0.044} \quad (17)$$

が得られる。今回実測値から求めたこれらの関係式はNMI法の式(8)の関係とは少し異なる形となった。

鹿島港のデータは常陸那珂に比べて欠測が多いので、鹿島だけでこれらの値を求めてみたところ、点のパラツキはやや多いが、次のような関係が得られた。

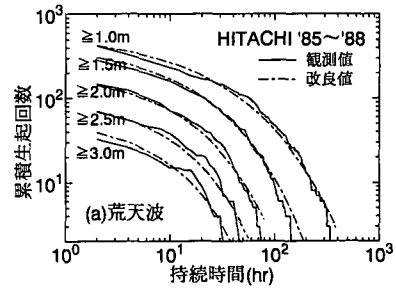
$$A = 18.0\gamma^{-0.205} \quad (18)$$

$$\beta = 0.662\gamma^{-0.046} \quad (19)$$

$$\alpha_g = 0.212\gamma(H_s/\bar{H}_s)^{0.209} \quad (20)$$

$$\alpha_i = 0.212\gamma(H_s/\bar{H}_s)^{-0.024} \quad (21)$$

上に求めた  $A, \beta, \alpha$  の式を本来のNMI法の式の代わりに使って、持続時間回数の推定値を求め直してみたところ、ほとんどの場合について実測値との一致度が良く



(a) 荒天波

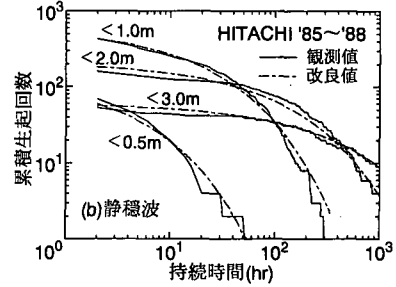


図-7 改良式による計算結果

なった。図-7は前に示した図-1に対応するものであるが、全般的に実測値との一致度がかなり改善されている。

#### 4. 日本海沿岸へのNMI法の適用性

次に日本海沿岸の3地点、酒田、新潟沖、輪島の'91~'93の波浪データにNMI法を適用して実測値との一致度を調べた。なお連続5回までの欠測は線形補間した。図-8は新潟沖の荒天波の累積生起回数をNMI法の推定値と実測値とで比べたものであるが、茨城沿岸の波浪の場合とほぼ逆行向のずれ方を示す。そこでこの場合は3地点のデータをまとめて実測値からNMI法のパラメータを求めてみた。  $A, \beta, \alpha_M$  と  $\gamma$  との関係を求めるためのプロットが図-9~11である。これらの図の点の変動は常陸那珂の場合より多いが、次のような関係が得られた。

$$A = 28.2\gamma^{-0.466} \quad (22)$$

$$\beta = 0.954\gamma^{-0.585} \quad (23)$$

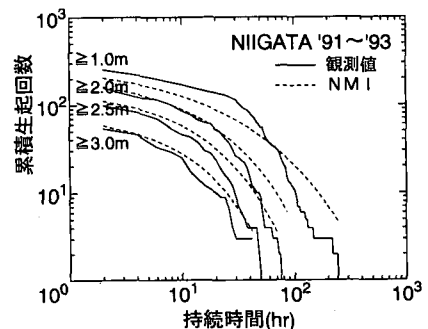


図-8 NMI法による持続時間回数(新潟沖)

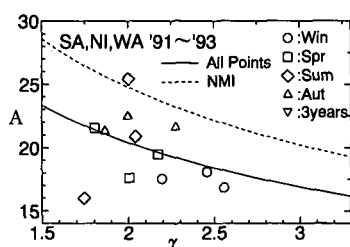
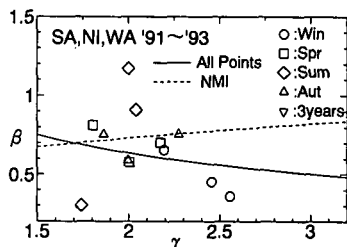
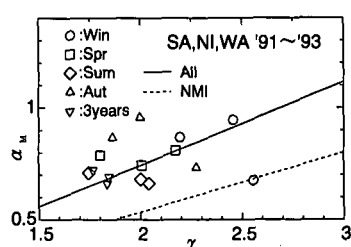
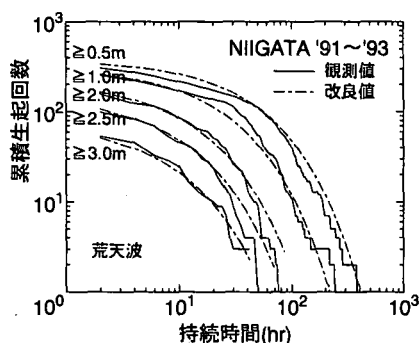
図-9  $\gamma$  と  $A$  (日本海側)図-10  $\gamma$  と  $\beta$  (日本海側)図-11  $\gamma$  と  $\alpha_M$  (日本海側)

図-12 改良式による計算結果 (新潟沖)

$$\alpha_M = 0.372\gamma \dots \dots \dots (24)$$

また  $\alpha_g, \alpha_l$  についてプロットした結果は図-5, 6 とほぼ同様なので省略するが, 次の関係が得られた。

$$\alpha_g/\alpha_M = (H_s/\bar{H}_s)^{0.151} \dots \dots \dots (25)$$

$$\alpha_l/\alpha_M = (H_s/\bar{H}_s)^{-0.138} \dots \dots \dots (26)$$

図-12 は, 図-8 の場合について式(22)~(25)を用いて計算し直したものであるが, 計算値の実測値との一致度は向上しており, 改良式の有効性を示している。

## 5. 考 察

図-9~11 の結果を常陸那珂の場合の図-2~4 と比べると, 日本海側 3 地点の方が常陸那珂と比べて  $A$  は小さく,  $\alpha_M$  は大きいことが分かる。今回は限られたデータについてだけの検討結果なので断定は出来ないが, このことから判断すると, 2 パラメータワイブル分布の形状パラメータ  $\gamma$  だけで異なる地域での波浪の持続特性を推定しようとする NMI 法は, 日本沿岸の波浪に対しては地域的なパラメータの補正が必要ではないかと考えられる。

次に, 常陸那珂は 9 年間, 日本海側地点は 3 年間を通しての月毎の解析結果の 1 例を図-13 と図-14 に示す。これらの図は限界波高  $H_c \leq 1.0$  m に対する静穏波が 72 時間以上持続する月毎の回数の実測値と, 改良式を使った NMI 法による推定値を月毎にプロットしたもので, 図-13 は輪島, 図-14 は常陸那珂のものである。なお鹿

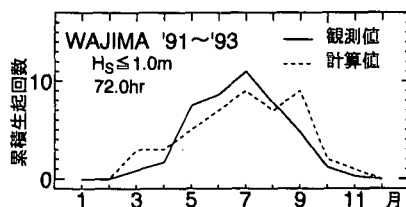


図-13 月毎の静穏波出現回数 (輪島)

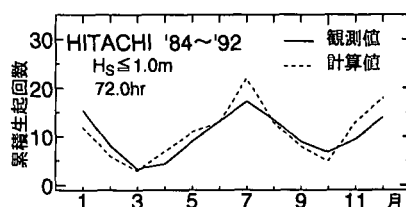


図-14 月毎の静穏波出現回数 (常陸那珂)

島の結果は常陸那珂のものに近く, 酒田と新潟沖の結果は輪島のものに類似している。図-14 の常陸那珂が夏と冬に持続時間が長いのに対して, 日本海側では夏前後の 5~9 月に静穏な日が続きやすいことを表している。

桑島・Hogben (1985) は日本海側の酒田沖と太平洋側の波浮での月毎の波高分布に大きな差があることを示し, NMI 法ではその波高分布の差がワイブル分布の形状パラメータ  $\gamma$  の違いで表現されていると説明している。ここでも参考のため上に示した輪島と常陸那珂について, 月毎の波高の確率密度分布を図-15, 16 に示す。図-15 の輪島の波高分布は図-16 の常陸那珂に比べて月毎の変化がやや大きく, ピーク値はやや小さいことが分かる。

## 6. 結 語

茨城沿岸の常陸那珂港と鹿島港, 及び日本海側 3 地点の波浪観測データを使って, 波高の持続特性を推定する NMI 法の適用性を検討した。主な結果をまとめると以下の通りである。

- (1) 茨城沿岸の波の持続特性の推定に NMI 法を適用してみたところ, かなり実測値と合うが, 厳密にみ

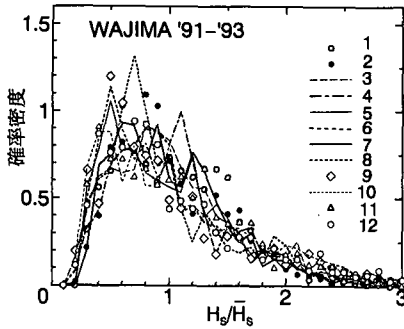


図-15 月別波高の確率密度分布 (輪島)

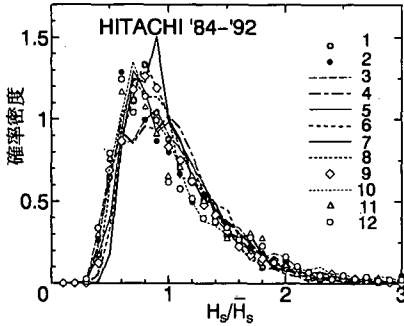


図-16 月別波高の確率密度分布 (常陸那珂)

ると系統的なずれを示す。実測値に基づいた改良式を使うと、推定精度は向上することがわかった。

- (2) 日本海側の3地点へNMI法を適用してみると、茨城沿岸とはやや逆のずれ方を示した。そこで実測値に適したパラメータを求めると、NMI法のオリジナルな値に対して、茨城沿岸とは逆方向のずれが得

られた。このことは日本沿岸の波浪の持続特性の推定にNMI法を使用する場合には地域的なパラメータの補正が必要なことを示唆しているといえる。

- (3) 実測値から求めたNMI法のパラメータには年毎のパラツキがかなり見られた。このパラツキの原因については、今後さらに検討する必要がある。

最後に、貴重なNMI法に関する参考文献を御提供下さった東京商船大学の桑島進教授に心より感謝致します。また本研究の初期段階で、当時学生の佐藤勇雄君(現福島県庁勤務)が計算法の基礎作りをしたことを記し謝意を表します。

### 参考文献

- 桑島 進・Hogben N. (1985): 波浪の持続性について, 「航海」, 第84号, pp. 54-59.
- 合田良實(1985): 波浪の統計的性質について, 土木学会論文集, 第357号/II-3, pp. 1-12.
- 広瀬宗一・高橋智晴 (1983): 沿岸波浪の出現特性 (その2), 第30回海岸工学講演会論文集, pp. 168-172.
- Graham, C. (1982): The parameterisation and prediction of wave height and wind speed persistence statistics for oil industry operational planning purposes, Coastal Engg., Vol. 6, pp. 303-329.
- Kuwashima, S. and Hogben, N. (1984): The estimation of persistence statistics from cumulative probabilities of wave height, Report of N. M. I., London, No. R183, 72 p.
- Kuwashima, S. and Hogben, N. (1986): The estimation of wave height and wind speed persistence statistics from cumulative probability distributions, Coastal Engg., Vol. 9, pp. 563-590.
- Lawson, N. V. and Abernethy, C. L. (1975): Long term wave statistics off Botany Bay, Proc. 2nd Australian Conf. Coastal and Ocean Engg., pp. 167-176.