

波浪観測データ処理の一例について

高橋 智晴*・ 広瀬 宗一**・ 佐々木 徹也**・ 副 島 毅***

1. 緒 言

海洋施設の建設, 利用等に関する計画, 設計, 施工等における技術の急速な進歩と共にその技術成果の活用についての基準化が進められている。これに必要な全国沿岸波浪の統計的性質を統一的基準によって解明し, 基本情報の一元の整備を図ると共に港湾工事の急速施工, 及び工事海域の広域化によってリアルタイムなデータ処理法が要求されている。本稿はこのような情勢を背景として現地データにより上記手法の検討を行った成果例を示したものである。

2. 有義波算定の簡易法について

(1) 現行手法の問題点

現在有義波の算定は通常ゼロアップ・クロス法により行われているが, 毎日の工事計画, 施工管理等に波浪情報を利用しようとする場合には記録紙上のアナログ記録から大まかに波高を読み取るか, 有義波演算装置あるいはミニコンピュータで算出されている。しかし, 現況ではインク書アナログ記録から人為的読取作業によって有義波の算出を行う場合が大半であり, またデジタル記録を用いて電算機処理をする場合でもデジタル記録計の故障等による欠測の場合には人為的作業によって処理される場合がしばしば生じる。以下に背景となる理論, 及び具体例について述べる。

(2) 波高の統計的性質

ある観測時間間隔の波浪記録が与えられた時, スペクトルが狭い周波数バンドから成り, また波が狭い周波数バンド内の多くの sinusoidal 成分の合成の結果であるとすると Longuet-Higgins⁹⁾ の示したように波高の確率分布は次の Rayleigh 分布に従う。

$$p(H)dH = (H/\sqrt{2}\eta_{rms}) \exp(-H^2/8\eta_{rms}) \cdots (1)$$

ここに, η_{rms} は平均水面からの水位変動の2乗の時間平均で波の持つエネルギーを表わし, 周波数スペクトル $S(f)$ と次の関係にある。

$$\eta_{rms} = \int_0^\infty S(f)df \cdots (2)$$

また η_{rms} と有義波高 $H_{1/3}$ の間には次の関係がある。

$$H_{1/3} = 4.00\eta_{rms} \cdots (3)$$

η_{rms} の2倍に E の記号を用い, E -value と呼んでいる。ただし, 周期に関する情報は別途の算出が必要である。

式(3)は波形の全体的分布から有義波高を推定する方法であるが, 一連の波形の crest 及び trough の M.W.L. からの振幅の大きいものを二つずつ (その大きさを A , B 及び C , D とする) 選び, これらと zero crossings の数 (N_z とする) を用いて推定する方法に Tucker 法¹⁰⁾ がある。この方法ではこれらの測定値から $H_1 = A + C$, $H_2 = B + D$ が定義され, これと N_z を用いて波高パラメーターが計算される。Tucker は N_z の値に対応する $K_1 = H_{1/3}/H_1$, $K_2 = H_{1/3}/H_2$ の値をグラフに示しており, それぞれの値に測定された H_1 及び H_2 の値を乗じ, 得られた値を平均して有義波高とするものである。

K_1 及び K_2 は以下のようにして得られる。

H_1, H_2 は N_z の関数として次式で表わすことができる^{2), 10)}。

$$H_1 = 2\eta_{rms}(2\theta)^{1/2}(1 + 0.289\theta^{-1} - 0.247\theta^{-2} + \cdots) \cdots (4.1)$$

$$H_2 = 2\eta_{rms}(2\theta)^{1/2}(1 - 0.211\theta^{-1} - 0.113\theta^{-2} + \cdots) \cdots (4.2)$$

なお第3位まで取り, 同様に H_3 を定義すると,

$$H_3 = 2\eta_{rms}(2\theta)^{1/2}(1 - 0.461\theta^{-1} - 0.156\theta^{-2} + \cdots) \cdots (4.3)$$

ただし, $\theta = \ln N_z$ である。

式(5)は波形の瞬時値が正規分布をする場合に導かれる。一連の波形に含まれるエネルギーが狭い周波数バンドに分布する場合には式(3)が成立するから, これを式(4)に代入して変形すると,

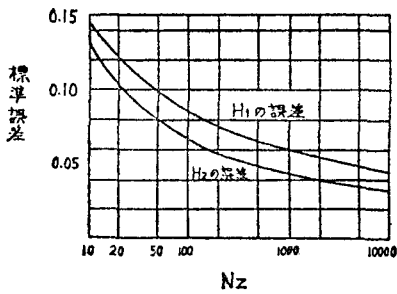
$$K_1 = (H_{1/3}/H_1) = 2/[(2\theta)^{1/2}(1 + 0.289\theta^{-1} - 0.247\theta^{-2} + \cdots)] \cdots (5.1)$$

$$K_2 = (H_{1/3}/H_2) = 2/[(2\theta)^{1/2}(1 - 0.211\theta^{-1} - 0.113\theta^{-2} + \cdots)] \cdots (5.2)$$

* 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部 海象観測研究室長

** 正会員 運輸省港湾技術研究所水工部 海象観測研究室研究員

*** 正会員 元運輸省港湾技術研究所 (現運輸省第四港湾建設局下関調査設計事務所)



図—1 H_1 あるいは H_2 の測定値から波高を求める時の Random Error (Tucker (1962) より)

が得られる。図—1 に H_1 , H_2 の測定値から波高を計算した時の標準誤差を示す。これによると H_2 の相対誤差は H_1 のそれに比し小さくなっているが、先の H_3 を加えて $H_{1/3}$ を推定すると更に精度が良くなることは明らかである。 H_1 と H_2 の値を用いる場合、Cartwright⁽²⁾ の理論は A, B, C, D の値が個々の値をとっている場合のみ適用可能である。すなわちこれらの値に対して隣り合う crests の相関は許容できるが crest と隣りの trough の間に相関があってはならない。試算によると、この仮

定は風域内で発生する風波については正しいが、うねりの場合には図—1 の値の $\sqrt{2}$ 倍まで誤差が大きくなる。

(3) 有義波の算定例

E-value から有義波高を推定した場合 (以後 E-value 法と呼ぶ), ならびに Tucker 法から有義波高を計算した場合と通常の有義波処理法で計算した場合の比較例について示す。筆者らは、金沢、酒田、八戸、鹿島、波浮、那覇、中城の各港について計算を実施したが、ここでは代表的な金沢、波浮、那覇の三港について述べる。データとしては 0.5 秒間隔のデジタルデータを用いた。

図—2 (a) ~ (f) は各港についての解析結果を示している。おのおのについて直線関係を仮定して回帰を行うと金沢港については、

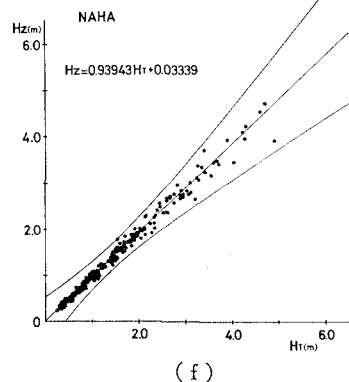
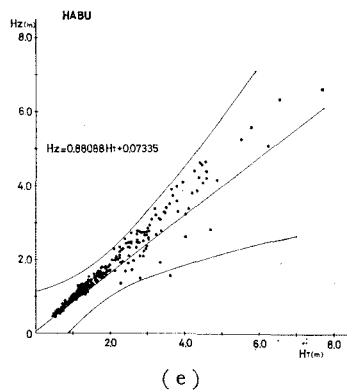
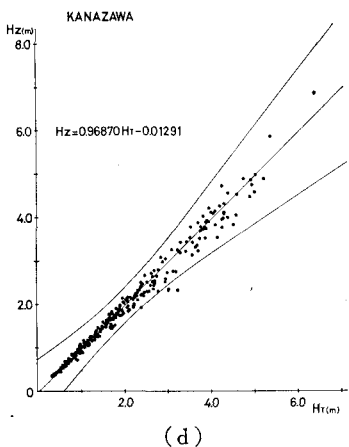
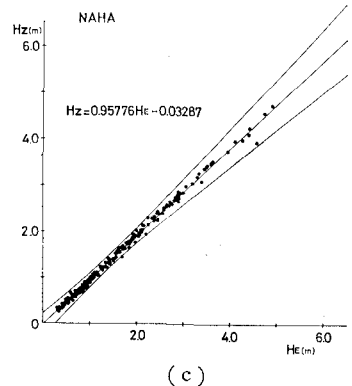
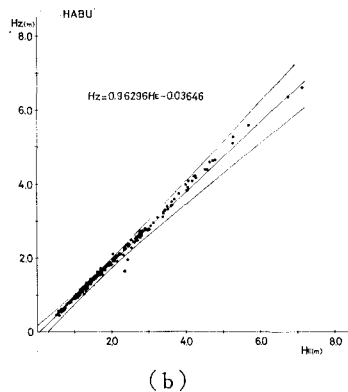
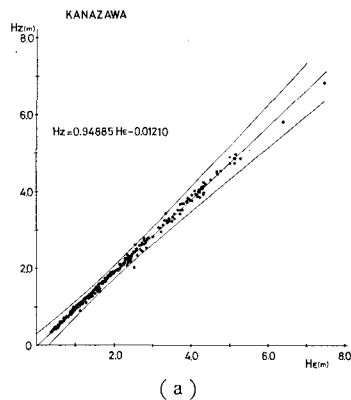
$$H_z = 0.94885 H_E - 0.01210$$

$$(R=0.99866, \sigma=0.06199) \dots\dots\dots (6.1)$$

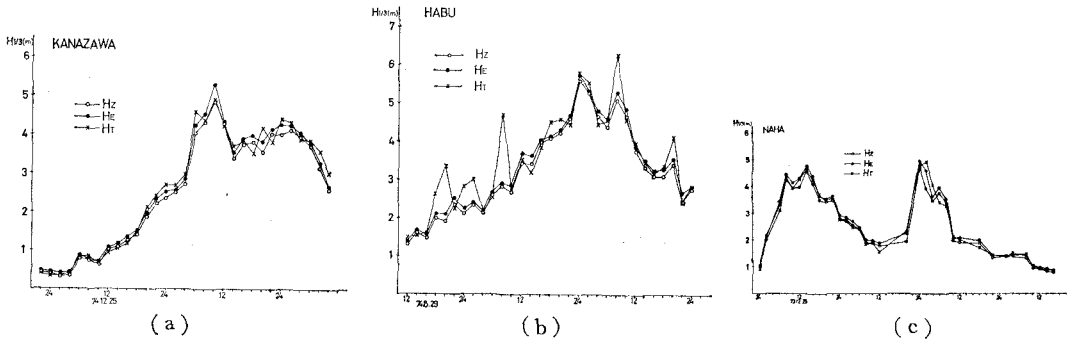
$$H_z = 0.96870 H_T - 0.01291$$

$$(R=0.99154, \sigma=0.15548) \dots\dots\dots (6.2)$$

誤差の程度を見積る関係で、平均値±標準偏差の形で表わすと、



図—2 zero up cross 法 (H_z), Tucker 法 (H_T), E-value 法 (H_E) の相関図 (曲線は 99% confidence limit を示す)

図-3 H_z , H_E , H_T の比較図

$$H_z/H_E = 0.93648 \pm 0.03789 \quad \dots\dots\dots (7.1)$$

$$H_z/H_T = 0.96015 \pm 0.06388 \quad \dots\dots\dots (7.2)$$

波浮港については

$$H_z = 0.96296 H_E - 0.03646 \\ (R = 0.99875, \sigma = 0.05024) \quad \dots\dots\dots (8.1)$$

$$H_z = 0.88088 H_T + 0.07335 \\ (R = 0.97474, \sigma = 0.22413) \quad \dots\dots\dots (8.2)$$

平均値±標準偏差の形で示すと、

$$H_z/H_E = 0.93380 \pm 0.03496 \quad \dots\dots\dots (9.1)$$

$$H_z/H_T = 0.93947 \pm 0.09053 \quad \dots\dots\dots (9.2)$$

那覇港については

$$H_z = 0.95776 H_E - 0.03287 \\ (R = 0.99823, \sigma = 0.05491) \quad \dots\dots\dots (10.1)$$

$$H_z = 0.93943 H_T + 0.03339 \\ (R = 0.93943, \sigma = 0.10867) \quad \dots\dots\dots (10.2)$$

平均値±標準偏差の形で示すと、

$$H_z/H_E = 0.92353 \pm 0.05311 \quad \dots\dots\dots (11.1)$$

$$H_z/H_T = 0.11299 \pm 0.07124 \quad \dots\dots\dots (11.2)$$

上記解析結果によると、金沢港については E-value 法と Tucker 法で推定精度はほぼ同等であったが、波浮港、及び那覇港では Tucker 法の推定精度は E-value 法のそれより悪くなっている。しかし、比で表わした場合の

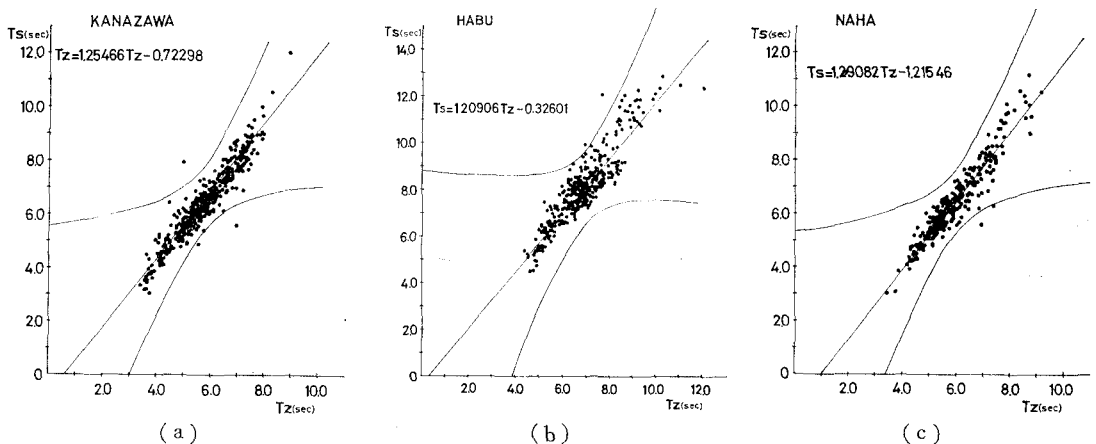
平均値からのばらつきでは差はほとんどなくなる。E-value 法の推定精度は金沢港と波浮港、那覇港で推定精度はほぼ同等であるが、残差の散らばりの点で後者が若干良好である。これには次のような原因が考えられる。まず、Tucker 法では前述のごとくうねり場合には推定精度の落ちることが考えられる。また Colonell & Perry³⁾, Draper^{5), 6), 7)}, 他⁴⁾ によると波高の分布はスペクトル幅パラメーター ϵ の影響を特に受け易いことはないとしているが、金沢港と波浮、那覇港で E-value 法の推定精度に差がなかったことはこのことの正しさを示唆しているようである。ただし、この計算例ではデジタル感度が金沢港で 4cm/dig、波浮、那覇港で 12cm/dig であることの影響が含まれている。図-3 (a)~(c) に比較的高波時における time domain での比較を示す。

(4) 周期の関係について

Tucker は zero crossing 周期 T_z を測定時間/ N_z で表わしている。これは平均周期 T_{mean} であり、有義波周期 T_s と次の関係がある^{2), 17)}。

$$T_s/T_z = 1.139 \pm 0.112 \quad \dots\dots\dots (12)$$

ここで、右辺第1項は平均値、第2項は標準偏差である。Dattatry⁴⁾ はインド西海岸の Mangalore 港での観測値を用いて次式を得ている。

図-4 T_s と T_z の相関図 (曲線は 99% confidence limit)

$$T_S = 1.315T_z - 2.56 \dots\dots\dots (13)$$

これは水圧式波高計から得られたデータであり、その大半はうねりである。また Darlington¹²⁾ は次式を得ている。

$$T_S = 1.67T_z - 4.10 \dots\dots\dots (14)$$

Dattatray⁴⁾ は上記 2 式を比較し、長周期の波に対しては有義波周期は zero crossing 周期より若干大きくなることを指摘している。ここで用いたデータはすべて超音波式波高計より得られたものである。有義波周期に対する zero crossing 周期のプロットを 図-4 (a)~(c) に示す。このプロットに対する回帰式は次の通りである。

$$\begin{aligned} \text{金沢: } T_S &= 1.25466T_z - 0.72298 \\ (R &= 0.9493, \sigma = 0.4435) \dots\dots\dots (15.1) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{波浮: } T_S &= 1.20906T_z - 0.32601 \\ (R &= 0.9244, \sigma = 0.5791) \dots\dots\dots (15.2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{那覇: } T_S &= 1.29082T_z - 1.21546 \\ (R &= 0.9499, \sigma = 0.4411) \dots\dots\dots (15.3) \end{aligned}$$

これらはいずれも非常に有意な結果であり、どの場合も有義波周期が 10~15% zero crossing 周期に比べて大きいという結果になっている。またこれらの結果、式 (13)、式 (14) が長周期を主とした波形記録によるものであることから考えて、長周期成分が卓越するほど有義波周期は zero crossing 周期より大きくなる傾向にあることがわかる。

(5) 波高と周期の結合確率分布について

波高におけると同様、個々の周期の平方は Rayleigh 分布に従うと考えられることがよくある。波の周期の平方に対する式は次式で与えられる。

$$p(T)dT = (2.7T^3/T_z^4) \exp(-0.675T^4/T_z^4)dT \dots\dots\dots (16)$$

しかし、Harris⁹⁾ は上記分布式は良い相関を示すこともあれば 0.3 程度のこともあり、対数正規分布の方が妥当であるとしている。H_s と T_z の結合確率分布に対して Wiegel は次のような関数関係を示した。

$$H_S = aT_z^2 \dots\dots\dots (17)$$

これは H_s が Rayleigh 分布に従う時、波の周期の平方が Rayleigh 分布に従うという仮定の下に成り立つ。

Harris⁹⁾ は波の発生 mechanism 理論について考え、次の関係式を与えた。

$$H_S = aT_z^2 + bT_z \dots\dots\dots (18)$$

Chakrabatti & Snider¹¹⁾ は北大西洋での記録から次式を得ている。

$$H_S = 0.249T_z^2 \quad (\text{単位: ft}) \dots\dots\dots (19.1)$$

$$H_S = 0.0968T_z^2 + 1.56T_z \quad (\text{単位: ft}) \dots\dots\dots (19.2)$$

同様に波のスペクトルデータから次式を得た。

$$H_S = 0.350T_z^2 \dots\dots\dots (20.1)$$

$$H_S = 0.453T_z^2 - 0.748T_z \dots\dots\dots (20.2)$$

これらの係数は Wiegel¹²⁾ の係数 (0.45) より少し小さい。

金沢、波浮、那覇の各港での H_z に対する T_z のプロットを 図-5 (a)~(c) に示す。回帰式は以下の通り。

$$\text{金沢} \begin{cases} H_z = 0.05337T_z^2 \quad (\sigma = 0.77124) \dots\dots\dots (21.1) \\ H_z = 0.10495T_z^2 - 0.31668T_z \\ (\sigma = 0.70506) \dots\dots\dots (21.2) \end{cases}$$

$$\text{波浮} \begin{cases} H_z = 0.03192T_z^2 \quad (\sigma = 0.74025) \dots\dots\dots (21.3) \\ H_z = 0.05246T_z^2 - 0.15104T_z \\ (\sigma = 0.71984) \dots\dots\dots (21.4) \end{cases}$$

$$\text{那覇} \begin{cases} H_z = 0.03828T_z^2 \quad (\sigma = 0.69930) \dots\dots\dots (21.5) \\ H_z = 0.05208T_z^2 - 0.08741T_z \\ (\sigma = 0.69316) \dots\dots\dots (21.6) \end{cases}$$

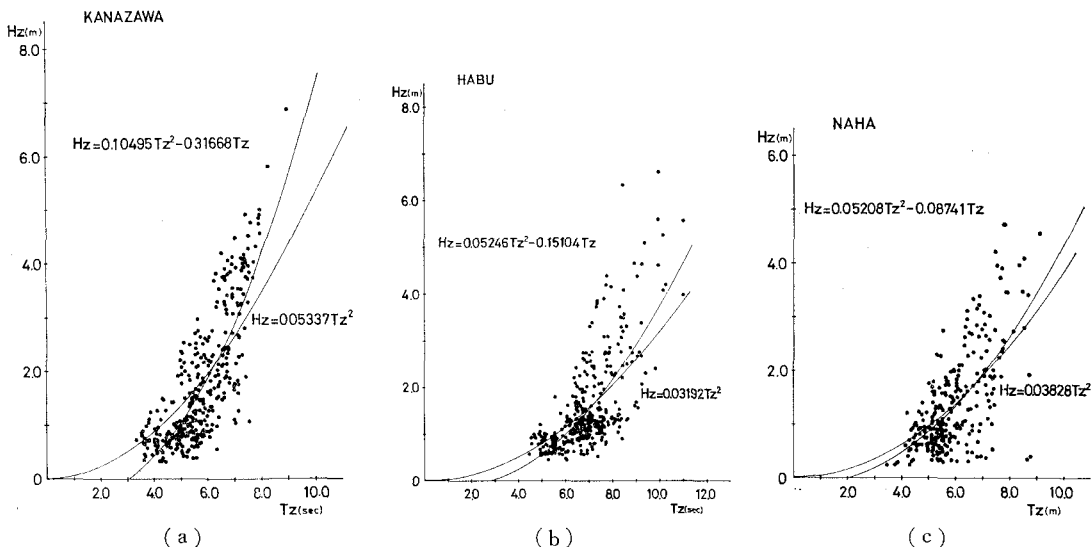


図-5 有義波高と平均周期の結合確率分布

残差の散らばりの点からいずれの港においても第2式の方が妥当であるが、単相関係数は順に 0.77367, 0.66840, 0.65304 と金沢港がまずまずの他は有意とはいえず、実用には無理があるものと思われる。

3. 波浪に関する拠点観測港における波浪統計例

(1) 波浪に関する拠点観測体制

昭和45年10月運輸省において“波浪に関する拠点観測実施要綱”が策定された。この要綱に基づき昭和45年度より各港湾建設局では波浪のデジタル記録を取得し、港湾技術研究所で電算機による集中処理を行っている^{13), 14)}。ルーチンワークとしての異常波浪統計の試算結果について述べる。

(2) 異常波浪統計

異常波浪とは、通常1年に数回発生するようなレベルの波浪状況を対象としている。このような波浪状況は海岸構造物に対し重大な被害をもたらす危険性を持っており、異常波浪統計資料を整備することは構造物の計画、設計に対して欠くべからざるものである。統計期間としては本来数十年が望まれるが、現在のところ観測期間が十分でなく、また統計方法も確立されていない。ここで用いた方法は Petruaskas・Aagaard¹⁶⁾ の示した方法を用いた。手法の説明は省略するが、実際の作業にあたっては極大波の限界値の設定の仕方、及び欠測率の多少による対象期間の補正の仕方等问题点が残されている。これらはいずれも再現期間から設計波高を決定するという本来の目的を考えると見逃すことのできないことであり、各観測地点の特性を考慮した上で行うべきである。

(3) 統計例

今回の統計整理にあたっては5年程度の統計期間をとることができ、かつある程度の観測水深を持つという条件で次の九港について行った。すなわち、留萌、釧路、苫小牧、八戸、酒田、金沢、東京湾口、潮ノ岬、端島の

各港であり、各港の極値時系列¹⁵⁾ (Partial Duration series) から上位30位までの極大波高を選び分析を行った。統計期間は昭和45年～49年である。ここでは上記九港の算定例のうち金沢、端島の二港について示す。この二港の有効統計年数はそれぞれ3.66年、2.59年である。図—6(a), (b) は最良近似式と確率波高を示したものである。図中 R_p は再現期間 (Return Period) を意味する。

Petruaskas・Aagaard¹⁶⁾ によると未超過確率の分布は Weibull 分布の指数が 2.00 の時最も適合度が良いとされているが、ここでの試算結果によると地域によってかなりのばらつきが見られる。しかし、ここでの試算は前述のように極大波高を30個選んだ結果であり、資料個数を更に増大すればまた異なった結果になることが予想される。特に再現期間については統計期間の長さが 1/10 以上ずれると 0.2 以上も変わる可能性のあることが知られている。前述の九港について結果をまとめると次のようになる。

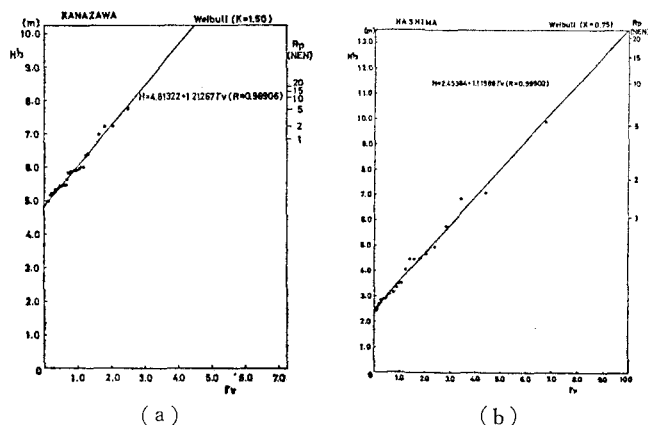
- i) 日本海沿岸地域では比較的分析結果が良好であり、確率波高は比較的大きく再現期間2年に対して 7.0～8.0m である。また統計分布型は Weibull 分布の指数が 1.25～2.00 で適合度が良かった。
- ii) 太平洋岸では概して確率波高は小さく、再現期間2年に対して 3.5～5.0m 程度となる。統計分布型は Weibull 分布の指数が 0.75～1.00 で良好であった。

4. 結 語

有義波相当波高の算定において、Tucker 法の精度はうねりが卓越するところでは E-value 法のそれに比し若干劣るが実用に供し得るものであることがわかった。E-value 法の精度は全般的にかなり良好であり、各地点で大して差が見られないことからスペクトル幅パラメーターの影響は大きくないものと思われる。これにはうねり成分の多いところでも種々の方向からのうねりが重なり合う結果スペクトル幅パラメーターの分布が広がることもその一因となっていると考えられるが、一方 E-value 法では波形の瞬時値の Gauss 分布からの変動量が小さいことによる影響も考えられる。E-value 法による有義波演算を行う場合、式(3)の係数 4.00 は 3.7～3.8 程度の方が妥当となる。

また、筆者らはこの方法により現地においてオンライン・リアルタイムに E-value を求めるための簡易演算装置の実用化を進めている。

異常波浪統計の算定例は“波浪に関する拠点観測五カ年統計(昭和45年～49年)”¹⁴⁾の



図—6 最良近似式と確率波高 (図中の r_0 は変換確率)

内容の一部を紹介したものである。

なお、この報告に使用した資料は、運輸省港湾関係機関による波浪に関する拠点観測成果の一部を活用したものであり、関係各位の波浪観測に対する日頃の御尽力によるところが多い。記して深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) Cartwright, D.E., M.S. Longuet-Higgins: The statistical distribution of the maxima of a random functions, Proc. Roy. Soc., Ser. A, Vol. 237, pp. 212-232, 1956.
- 2) Cartwright, D.E.: On estimating the mean energy of sea waves from the highest waves in a record, Proc. Roy. Soc., Ser. A, Vol. 247, pp. 22-48, 1958.
- 3) Colonell, M.J., Perry B.: Laboratory simulation of sea waves, Jour. of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 94, No. WW2, pp. 159-174, 1968.
- 4) Dattatri, J., Runukaradhy, P.S.: Wave forecasting for West Coast of India, Jour. of Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 97, No. WW3, pp. 505-515, 1971.
- 5) Draper, L.: The analysis and presentation of wave data—A plea for uniformity, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., pp. 1-11, 1966.
- 6) Draper, L.: Derivation of a design wave from instrumental records of sea waves, Proc. Inst. Civil Eng., Vol. 26, pp. 291-303, 1966.
- 7) Draper, L.: Waves at Secondi, Ghana, Proc. 10th Conf. Coastal Eng., ASCE, pp. 12-17, 1966.
- 8) Harris, D.L.: Characteristics of wave records in the coastal zone, Advanced seminar on waves and beaches, Academic Press, New York, 1972.
- 9) Longuet-Higgins, M.S.: On the statistical distribution of the heights of the sea waves, Jour. Mar. Res. Vol. 11, pp. 245-266, 1952.
- 10) Tucker, M.J.: Analysis of records of sea waves, Proc. Inst. Civil Engrs., Vol. 26, No. 10, pp. 305-316, 1966.
- 11) Chakrabarti, S.K., Snider, R.H.: Waves statistics for March 1968 North Atlantic Storm, Jour. Geophys. Res., Vol. 79, No. 24, pp. 3449-3458, 1974.
- 12) Wiegel, R. L.: Oceanographycal Engineering, Prentice-Hall, Inc., Eaglewood Cliff, 1964.
- 13) 副島 毅・佐々木弘・高橋智晴: 波浪データの取得・処理法について, 昭和50年度港湾技術研究所講演会講演集, pp. 1-52, 1975.
- 14) 高橋智晴・金子大二郎・佐々木徹也・広瀬宗一・佐々木弘・副島 毅: 波浪に関する拠点観測五カ年統計 (昭和45年~49年), 港湾技研資料, No. 234, 1976.
- 15) 合田良実: 波浪に関する二, 三の考察, 港湾技研資料, No. 39, 1967.
- 16) 合田良実: 波浪の統計的性質とその応用, 土木学会水理委員会, 水工学シリーズ 75-B-1, 1975.
- 17) 合田良実・永井康平: 波浪の統計的性質に関する調査・解析, 港湾技研報告, 第13巻, 第1号, 1974.