

浅海域における波浪特性に関する現地観測

角 野 隆*・関 野 高 志*・梅 沢 一 之**

1. ま え が き

浅海域における波浪は、非線型な水面境界条件の影響を強く受けるため、成分波間の位相のランダム性が崩れており、それらの線型和である表面波形に対して中心極限定理を適用することができない。このため、浅海域における波浪に関しては、ガウス過程を前提とした種々の理論解析を適用することができず、これらの理論的な取り扱いには非常に複雑なものとなっている。

そこで本報においては、その確率過程がガウス過程ではない浅海域における波浪データを解析し、現地における波浪の種々の非線型的な性質を、合田により提案されたパラメータ¹⁾を用いて簡潔に記述することを試みる。

2. 観 測 施 設

観測は写真-1 に示した実海域実験構造物において実施した。この実験構造物は北海道開発局が海洋構造物の構成部材に作用する波力に関する現地観測を行うため、留萌港外の水深 7 m 地点に建設したものである。この地点の平均海底勾配は 1/20 で 対岸距離は約 160 m である。実験構造物を建設した付近の海岸には毎年冬期に大波浪が来襲し、59年度の計測では最大波高 7.25 m を記録した。実験構造物には波高計のほか全方向波力計、流速計など合計 46 個の計測器が取り付けられている。表-1 には今回の解析に用いた超音波式波高計および水圧式波高計の仕様を示す。

冬期間風浪のため実験構造物に渡ることができないので、計測コントロールおよびデータ収録は陸上観測室において行った。計測データは 2.6 kHz でサンプリングし、光ファイバーケーブルを介して陸上観測室まで伝送する。その後 D/A 変換を行い、カットオフ周波数 250 Hz のローパスフィルターを通して 21 チャンネルアナログデータレコーダーに収録する。データを再度アナログに戻したのはデータを圧縮して収録するためで、このようにすると一巻のテープに 8 時間×21 チャンネル分のデータを収録することができる。一回の計測は 30 分



写真-1 実海域実験構造物

表-1 波高計の仕様

	測 定 範 囲	最小分解能	サンプリング 周波数
超音波式波高計	-2.5~+6.5 m	4 mm	10 Hz
水圧式波高計	0~20 tf/m ²	0.1 tf/m ²	—

間でそのうち解析対象としたデータは前後 5 分間を除いた 20 分間の記録である。計測は起動波高、再起動禁止時間を設定して自動モードで可能であるが、今回は各波高階級のデータを効率的に取得するために手動モードを併用している。

3. データ処理の方法

21 チャンネルのアナログデータは、後述のノイズ除去を考えて 50 Hz でサンプリングを行い、ビット操作により大型計算機で処理が可能なフォーマットに変換する。さらに、その後続アクティビティとして、較正値の処理、ノイズの除去、一次元不規則波の統計解析、方向スペクトル解析を行う。これらの処理を行った後、各チャンネル 20 分間の生の波形データをパーソナルコンピュータで取り扱える形式でフロッピーディスクにセーブする。このときのデータのサンプリング周波数は 5 Hz で 1 チャンネルあたり 6000 データとなる。なお、ここで利用した一次元不規則波の統計解析および方向スペクトル解析プログラムは港湾技術研究所より提供して

* 正会員 北海道開発局 土木試験所

** 正会員 畑技術事務所

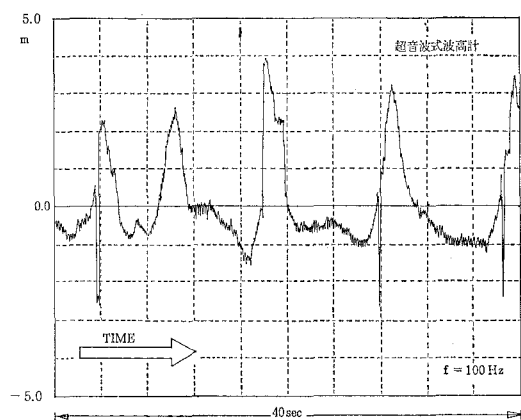


図-1 超音波式波高計によるデータの一例

表-2 腰掛け部のおよぼす影響

	η_{rms}	$\sqrt{\beta_1}$	β_2
生データ	1.286	1.185	4.156
補正データ	1.284	1.179	4.138

いただいたものである。

超音波式波高計のデータには白色雑音的なノイズの他に図-1に示したように次の2種類のノイズが含まれる。

- ① 波面勾配が急な位相において、超音波パルスが受波器に戻らず、信号がホールドされるために生じるデータの腰掛け部
- ② 上と同じ条件のもとで、超音波パルスが実験構造物等で反射することにより生じるデータのドロップアウト

データのドロップアウトは判断条件を試行錯誤により定めて、これらを直線補間することにより補正した。この操作の後、カットオフ周波数 2.5 Hz の数値ローパスフィルターを通して白色雑音を除去した。また、データの腰掛け部については特に補正は行わないこととした。

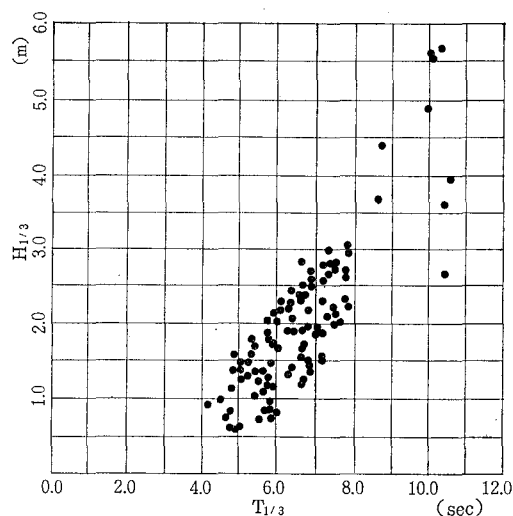


図-2 データの波高・周期別の分布

図-1に示したのはかなり極端な場合の例であり、腰掛け部は通常これほど顕著には現われない。この現象は波面勾配が急な静水面と波頂の中間部分で生じているので、ゼロクロス法による波高および周期には全く影響をおよぼさない。表-2は腰掛け部が顕著なケースについてデータをマニュアルで補正し、 η_{rms} 、 $\sqrt{\beta_1}$ および β_2 におよぼす影響を調べたものである。ここに示した例では η_{rms} を 0.1%、 $\sqrt{\beta_1}$ および β_2 を 0.4% それぞれ過大評価していることになるが、これらは十分無視する量である。

4. データの概要

今回の解析の対象としたのは昭和59年度の冬期に取得した141ケースのデータである。ただし、1回の計測で連続する2時間のうちに3ケースのデータを取得しているので、これらのうち独立のデータと考えることができるのは47組となる。なお、連続的に取得した3個のデータの変動は、有義波周期では概ね5%以内であるが、有義波高では最大40%程度にまでおよぶ。

データのゼロダウクロス法による波高・周期別の分

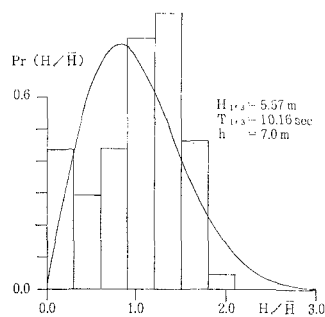
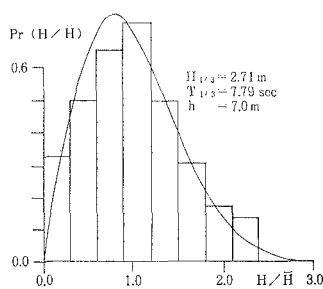
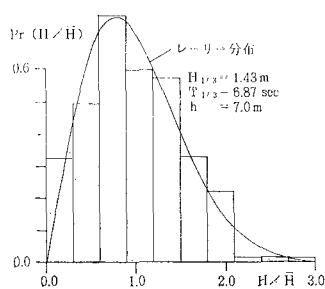
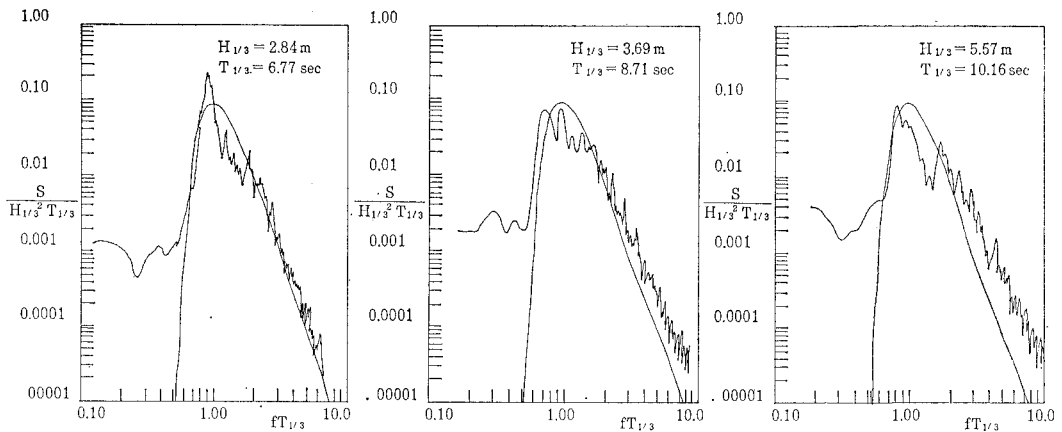


図-3 相対波高分布の例

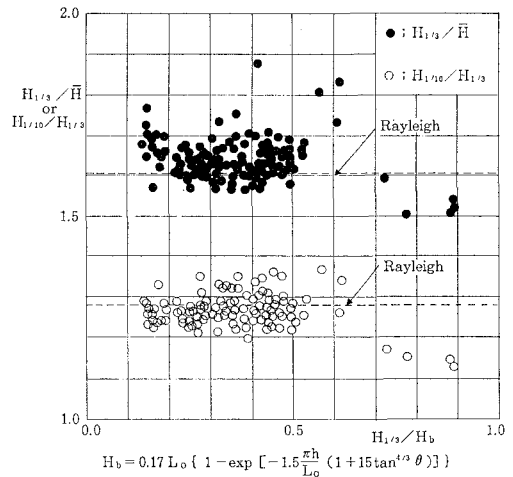


図—4 周波数スペクトルの例

布は図—2 に示す。データの範囲は有義波高で 0.61～5.67m, 有義波周期で 4.17～10.62 sec である。これには、線型的な波から成分波の位相のランダム性が崩れた非線型的な波、さらには碎波の影響を受ける波までが含まれる。図—3 は 3 個の波群についてその相対波高分布を示したものである。ここに示したように波高の大きい領域の取得データは線型性とスペクトルの狭帯域性を仮定したレーリー分布には全く一致しない。また、図—4 には 3 個の波群についてスペクトル形状を示したが、波高の大きい場合には非線型効果により見かけ上のピークが現われている。なお、図中には参考のためブレットシュナイダー・光易型の標準スペクトルを示してある。

5. データの解析結果^{2),3)}

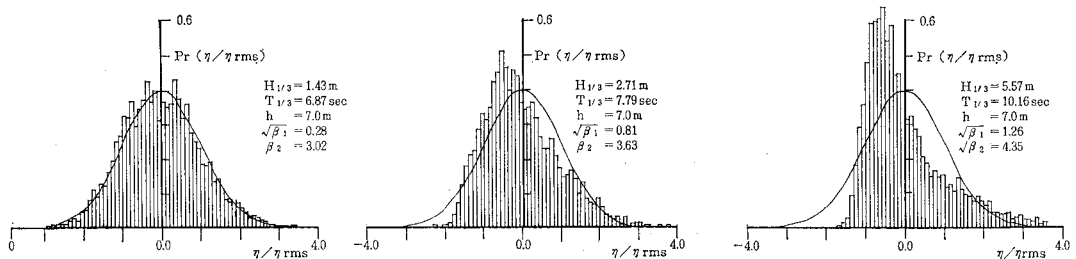
図—5 にはゼロダウクロス法で定義した代表波高間の比率を示す。図の横軸は有義波高を進行波の碎波限界波高で無次元化したものである。また図中の破線はレーリー分布を仮定した場合の代表波高間の比率である。ここに示したデータからは非線型性の影響は必ずしも明らかではないが、碎波による波高の頭打ちの様子ははっきりと認められる。有義波高が碎波限界波高の 50% 以下のデータについてのみ平均値を求めると、1/10 最大波高と有義波高の比率は 1.27 ± 0.03 , 有義波高と平均波



図—5 代表波高間の関係

高の比率は 1.64 ± 0.05 となり、レーリー分布を仮定した場合の計算値 (1.27 および 1.60) とはほぼ一致する。

図—6 は水面波形の相対度数分布を示したものである。海の波が無数の正弦波がランダムな位相で重なり合ったものと考えられるとき、中心極限定理によりこの分布は正規分布となる。ここに示した例でも比較的波高の



図—6 水面波形の相対度数分布

小さい場合には正規分布によく一致するが、波高が大きくなるに従い非線型効果により成分波間の独立性が失なわれ、正規分布からは大きくはずんだ形状となることがうかがえる。以下では、このような海の波の非線型の性質のいくつかについて観測データをもとにして検討を加える。

ここでは海の波の非線型の性質は式(1)に示す合田の非線型パラメーター¹⁾を用いて記述する。

$$\Pi_{1/3} = (H_{1/3}/L_A) \cdot \coth^3 k_A h \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに

$$(2\pi/T_{1/3})^2 = g k_A \tanh k_A h, \\ k_A = 2\pi/L_A \quad \dots\dots\dots (2)$$

式(1)の関数形は深海域の波浪の非線型性を記述する波形勾配 H/L と長波領域の非線型性を記述するアーセ

ル数 HL^2/h^3 とを滑らかに接続するように選ばれたものである。今回解析の対象としたデータは $\Pi_{1/3}$ が波形勾配とアーセル数を接続する $k_A h = 0.5 \sim 1.8$ の範囲におけるものであるので、今回の検討によりパラメーターの妥当性を例証することができる。

図-7 は水面波形の相対度数分布の skewness ($\sqrt{\beta_1}$) と $\Pi_{1/3}$ の関係を示したものである。 $\sqrt{\beta_1}$ は分布の左右非対称性を示すもので正規分布の場合は0となる。 $\sqrt{\beta_1}$ は $\Pi_{1/3}$ によりよく整理されており、 $\Pi_{1/3} < 0.2$ では略算式 ($\sqrt{\beta_1} = 4.2 \Pi_{1/3}$)¹⁾ がよく成立する。図-8 には水面波形の kurtosis (β_2) と $\Pi_{1/3}$ の関係を示す。 β_2 は平均値付近への相対的な集中の程度を示すもので、正規分布の場合は3となる。kurtosis は skewness よりも統計的な変動が大きいため、 $\sqrt{\beta_1} \sim \Pi_{1/3}$ の図よりは若

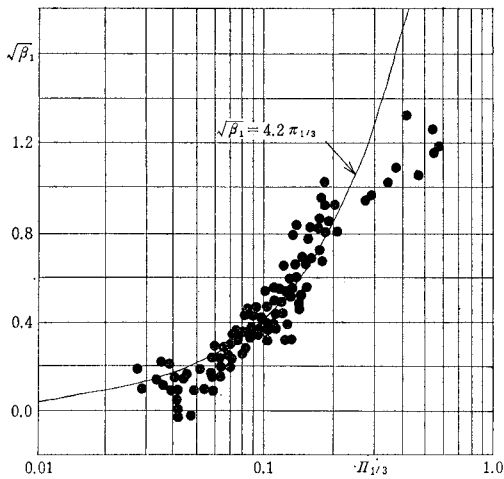


図-7 skewness と非線型パラメーターの関係

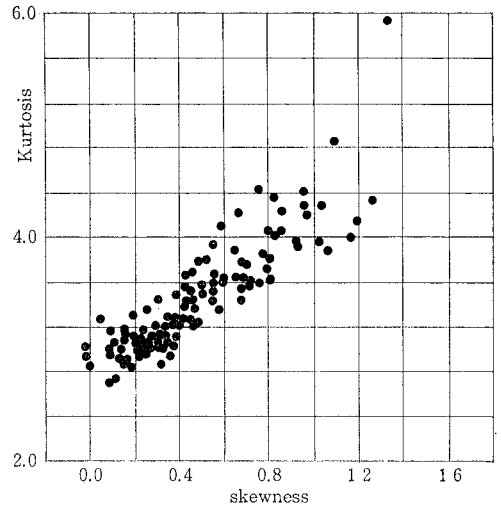


図-9 skewness と kurtosis の関係

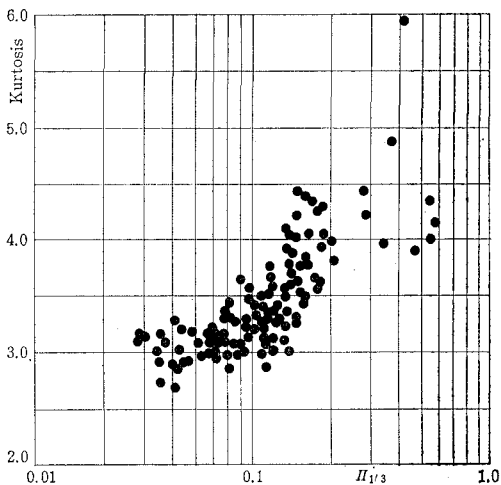


図-8 kurtosis と非線型パラメーターの関係

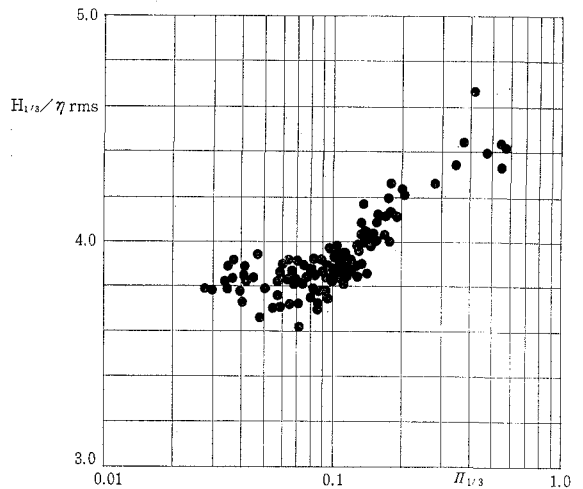
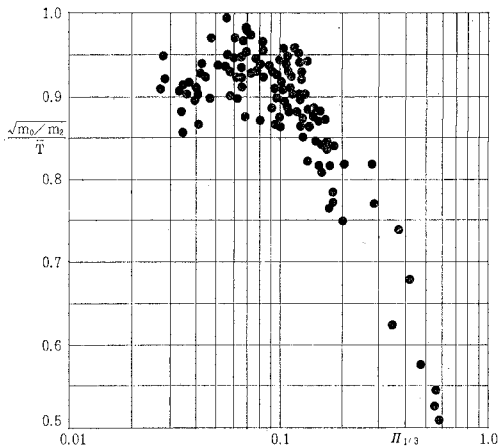


図-10 $H_{1/3}/\eta_{rms}$ と非線型パラメーターの関係

図-11 $\sqrt{m_0/m_2}/\bar{T}$ と非線型パラメーターの関係

干ばらつきが大きい、非線形パラメーターにより比較的良好に整理されている。また、図-9には skewness と kurtosis の関係を示したが、両者の間にははっきりとした相関関係がみられる。

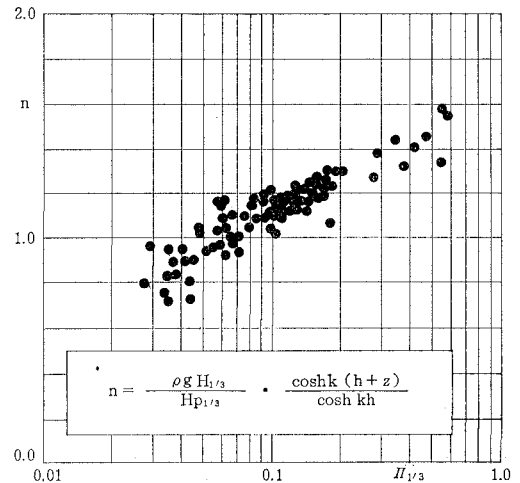
図-10 は波形の標準偏差と有義波高の比率 $H_{1/3}/\eta_{rms}$ を非線型パラメーターにより整理したものである。 $H_{1/3}/\eta_{rms}$ は $H_{1/3}$ によりよく整理されており、 $H_{1/3} < 0.1$ での平均値は 3.82 ± 0.07 となる。レーリー分布を仮定して計算を行うと $H_{1/3}/\eta_{rms} = 4.004$ となるが、実際にはスペクトルの広帯域性のためこのような値にはならず、一般に報告されている値はここで示した値にほぼ一致する。

海の波が線型で中心極限定理を適用することができるような場合には、ゼロクロス平均周期は、

$$T_{02} = \sqrt{m_0/m_2} \quad \dots\dots\dots (3)$$

となる。ここに m_i は周波数スペクトルの i 次モーメントである。図-11 は式 (3) によりスペクトルのモーメントから計算した平均周期とゼロクロス法で直接求めた平均周期の比率を非線型パラメーターにより整理したものである。スペクトルによる平均周期は $H_{1/3}$ が 0.1 を超える付近から非線型効果 (m_2 が相対的に増大する) により急激に短くなる。また、 $H_{1/3} < 0.1$ での両者の比率は 0.93 ± 0.03 となり、スペクトル法とゼロクロス法による平均周期の間には系統的な差異がみられる。

一般に水圧式波高計により計測を行う場合には、水圧変動を微小振幅波理論を用いて水面変動に換算した後、補正係数 n を乗じて波高を求める。図-12 には有義波の諸元についての補正係数と非線型パラメーターの関係を示す。ただし、ここで用いた水圧波高はゼロダウ

図-12 補正係数 n と非線型パラメーターの関係

ロス法にはよらず、水面波形のゼロダウクロス時刻を基準にして定義したものである。ここに示したように、補正係数 n は $H_{1/3}$ により非常によく整理することができる。

6. あとがき

本報においては浅海域における波浪データを解析し、種々の非線型的な性質が合田の非線型パラメーターにより統一的によく記述されることを示した。今後これに引き続き、浅海域における水粒子速度の特性、さらには波の方向分散性の影響等について検討する予定である。

なお本研究は科学技術振興調整費による「大波浪海域における海洋構造物の実海域実験研究」の一環として実施したもので、研究推進にあたっては現地海洋構造物調査検討委員会（委員長、尾崎 晃、委員；近藤俊郎、堀武男、石井進一、合田良実、高石敬史、蒔田 実、板倉忠興）の各位に御指導をいただいた。また研究の全体計画策定および実験構造物の建設は北海道開発局室蘭港湾建設事務所 永井豊所長（前 土木試験所港湾研究室副室長）によるところが大きい。ここに厚く御礼申し上げる次第である。

参考文献

- 1) Goda, Y.: A unified nonlinearity parameter of water waves, Rept. Port and Harbour Res. Inst. vol. 22 No. 3, pp. 3~30, 1980.
- 2) 合田良実: 港湾構造物の耐波設計, 鹿島出版会, 237p., 1977.
- 3) 合田良実: 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, 1985.