

現地海岸波浪の波群の伝播

間瀬 肇*・長谷川 順一**

1. ま え が き

混沌としてとりとめのなさそうな海の波にも、種々の統計法則や力学法則が内在している。風波は通常多数の微小振幅波の重ね合わせで表現され、線形理論の枠組みの中でその性質が議論されることが多いが、近年波の非線形性に起因する興味深い性質が注目されてきた。

風波のピーク周波数以上の成分波の波速はほぼ一定であり、その値はピーク周波数の成分波のそれに等しいという結果¹⁾は、線形理論では説明できず、弱非線形波列の変調という観点から説明される^{2),3)}。波群は、多数の微小振幅波の重ね合わせによるシミュレーションによって統計的に再現され、主にスペクトル形との関連においてその性質が調べられる。しかし、波の伝播過程においてスペクトルがほとんど変化しない場合にも、伝播に伴って波群性が強まる、あるいは弱まるという現象が見られ、これは波の変調不安定と波群の形成、および波群の伝播変形といった観点から説明される⁴⁾。また著者ら⁵⁾は、現地波浪の高波の繰り返し特性を波の変調不安定現象の観点から考察している。

現地における弱非線形波列の諸特性の解明、その一つとして現地波浪の波群構造と波群の伝播特性の研究は、今後ますます重要になるであろう。この度、浅海海岸波浪の変形特性、方向スペクトル特性、ならびに海浜流を調べることを目的として現地観測が行われ、観測データが得られた。本研究は、現地海岸波浪の種々の性質のうち、主として a) 波の発達・減衰に伴う wave grouping の変化、b) 波群の伝播変形に関する現地観測結果と非線形 Schrödinger 方程式による計算結果との対応、c) 波の伝播に伴う wave grouping の変化について解析・検討するものである。

2. 現地観測

2.1 現地観測の概要

観測は、京都大学防災研究所附属大渦波浪観測所の T 型漂砂観測用栈橋を用いて、1987 年 11 月 27 日から 12 月 8 日の期間中に行われた。

方向スペクトル観測用のラインアレイ（空中発射式超音波波高計 4 台 US.1~4、容量式波高計 4 台 C.1~4）、岸沖方向の波浪の伝播変形観測用の波高計群（容量式波高計 5 台 C.5~9、超音波波高計 3 台 US.5~7）、海浜流観測用の超音波流速計が 3 台（CM.1~3）、および栈橋の延長線上約 3 km 沖合いの水深 30 m 地点に沖波観測用の Wave Rider が設置された。図-1 に、観測で用いた波高計と流速計の識別番号、および設置位置が示し

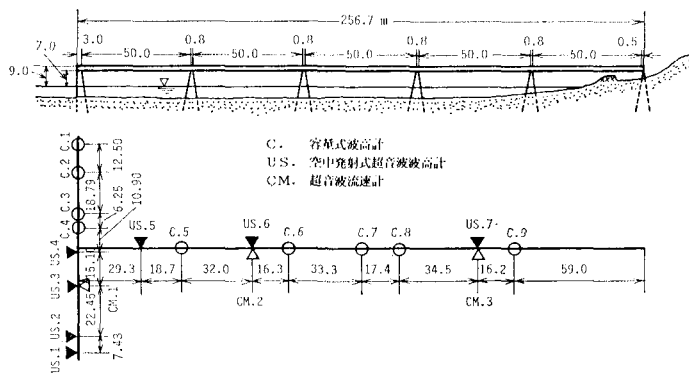


図-1 波高計、流速計の識別番号および設置位置

てある。

波高計 C.4 から C.8 の設置水深は約 5.1 m であり、この間はほぼ一定水深となっている。栈橋周辺の海底地形については、文献 6) を参照されたい。

波高計および流速計からの出力は、大渦波浪観測所本館の波浪観測室へ有線で電圧値として送られ、3 時間毎に 90 分間、2 台の 14 チャンネルアナログデータレコーダーに収録された。

2.2 データ処理

水位変動記録は、サンプリング間隔 0.256 sec、サンブ

* 正会員 工博 京都大学助手 工学部土木工学科

** 工修 三井物産(株)

リング個数 1 チャンネル当たり 21,000 個で AD 変換された。その後、各計器の検定結果よりスケール換算され、磁気テープに保存された。

これらのデータは、特別な処理はされておらず、高周波ノイズあるいは長周期変動を含んだ生データである。解析する対象に応じて、FFT 法を用いた数値フィルターによって不要な周波成分を除去することとした。

3. 解析結果および考察

3.1 波浪状況および波の発達・減衰に伴う wave grouping の変化

図-2 は、波高計 C.4 による観測期間中の有義波高 $H_{1/3}$ 、有義波周期 $T_{1/3}$ 、Groupiness Factor GF 、波高の平均連長 $\overline{j(\bar{H})}$ の時系列を示したものである。計算に当たっては、スペクトルのピーク周波数の 0.5 倍以下および 6 倍以上の周波数成分を除去した水位変動データを用いた。波高の増加につれて GF は減少し、波高の減少につれて GF は増加している。 $\overline{j(\bar{H})}$ は、ばらつきが若干見られるが、 GF の変化傾向とほぼ同じである。

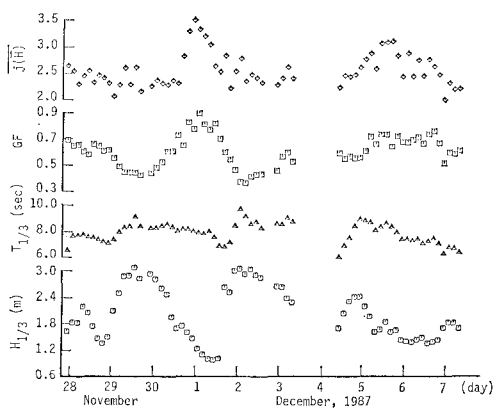


図-2 観測期間中の波の統計諸量の時系列

波の減衰期の後半で、 GF と $\overline{j(\bar{H})}$ はともに大きく、波群性が顕著である。ここではスペクトルのピークがかなり鋭く、このことが波群化の主たる原因である。波の最盛期では、 GF と $\overline{j(\bar{H})}$ がともに小さくなっている。これは、観測桟橋の沖側で波がすでに碎波しており、碎波変形により波群性が弱まっているためであると考えられる。

著者ら⁷⁾ の一様傾斜海浜 (海底勾配 1/20) における wave grouping の変化を調べた結果によると、碎波変形によりある地点で GF と $\overline{j(\bar{H})}$ がともに極小値を取り、その値はそれぞれ約 0.33 および 2.2 である。波の最盛期における GF と $\overline{j(\bar{H})}$ は、著者らの実験結果の値とほぼ同じである。しかし、実験においては、これらの値を

取る地点は $h/H_0 \approx 0.8$ (h : 水深, H_0 : 沖波有義波高) であるのに対し、波の最盛期においては $h/H_0 \approx 1.6$ であった。観測桟橋沖側の海底勾配は 1/100 程度であり、実験結果と観測結果との相違は、海底勾配の差異によるのではないかと考えられる。すなわち、海底勾配が緩いと碎波帯は h/H_0 の値が大きくなるから始まるので、碎波帯内の GF および $\overline{j(\bar{H})}$ が極小値を取る地点の h/H_0 は、海底勾配が急な場合に比べて大きくなるものと考えられる。

3.2 波群の伝播変形に関する現地観測結果と数値計算結果

非線形 Schrödinger 方程式は、弱非線形波列の包絡波形的変化を記述する方程式である。ここでは、波群の伝播変形に関する観測結果と数値計算結果を比較するが、非線形 Schrödinger 方程式は非常にスペクトル幅が狭い 2 次元的な波に対する理論であるので、比較対象とする現地観測データとしてその条件に近いものを選び出した。

図-3 は、それらのうちファイル番号 B0703 (1987 年 12 月 1 日 2:30-4:00) および B0704 (同 5:30-7:00) の波のスペクトルを示したものである。スペクトルはかなり尖鋭化しており、方向スペクトルは若干幅が広いものの、搬送波の波向はほぼ汀線に直角 (桟橋に平行) であった。

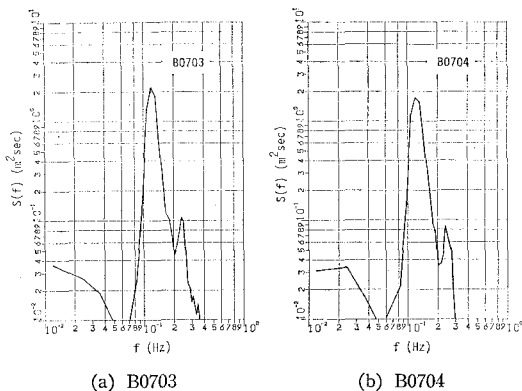
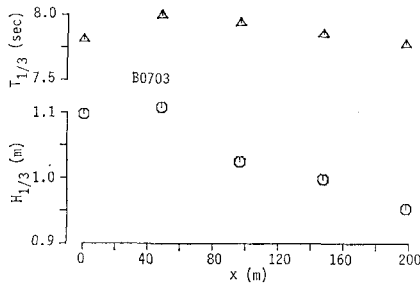


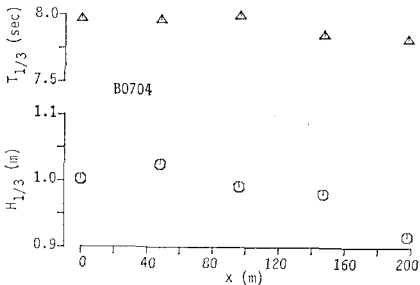
図-3 波のスペクトル

桟橋に沿った有義波高、周期の変化を図-4 に示す。波高計 C.5 から C.9 に向かって有義波高が約 10% 減少している。観測中に撮影された写真によると、これらのケースでは碎波が見られなかったため、この有義波高の減少は碎波減衰によるものとは考えられず、また底面摩擦にしては減衰率が過大であり、この波高減衰の原因については定かでない。

波高計 C.4 から C.8 の区間は、ほぼ一定水深となっている。水平床に対する底面粘性摩擦を考慮した非線形 Schrödinger 方程式は次式で表される⁸⁾。



(a) B0703



(b) B0704

図-4 岸沖方向の有義波高, 周期の分布

$$\frac{\partial A}{\partial x} + i\alpha \frac{\partial^2 A}{\partial \xi^2} + i\beta |A|^2 A + \frac{(1-i)\epsilon_b}{L} A = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\xi = x/C_g - t \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで, A は包絡波形, α は分散係数, β は非線形係数, ϵ_b は粘性摩擦による波高減衰率, L は搬送波の波長, C_g

は群速度, x は波の伝播方向の座標, t は時間, i は虚数単位である. 2 次のオーダーの水位変動は次のように表される.

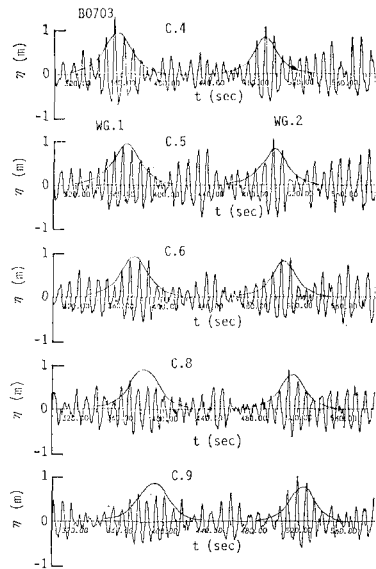
$$\eta = \frac{1}{2} (A e^{i\psi} + *) + \left\{ \frac{C_g(2\omega \operatorname{ch}^2 q + k C_g)}{2 \operatorname{sh} 2q (C_g^2 - gh)} - \frac{k}{2 \operatorname{sh} 2q} \right\} |A|^2 - \left(\frac{1}{2\omega} + \frac{q \operatorname{sh} q}{2k C_g \operatorname{ch} q} \right) \cdot \left(i \frac{\partial A}{\partial \xi} e^{i\psi} + * \right) + \frac{k \operatorname{ch} q (2 \operatorname{ch}^2 q + 1)}{8 \operatorname{sh}^3 q} \cdot (A^2 e^{2i\psi} + *) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\phi = kx - \omega t, \operatorname{ch} = \cosh, \operatorname{sh} = \sinh, q = kh \quad \dots\dots\dots (4)$$

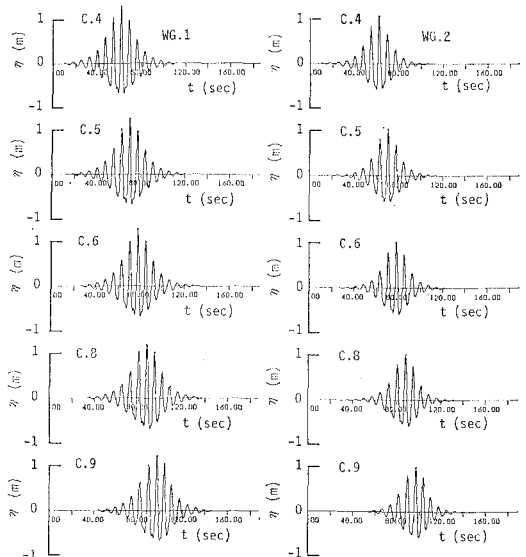
ここで, k は波数, ω は角周波数, $*$ は共役複素数を表す.

図-5(a) は, B0703 の岸沖方向に設置した波高計群による波形記録の一部を示したものである. 図-5(b) は, スペクトルのピーク周波数の 0.5 倍以下および 1.5 倍以上の周波数成分を除去した波高計 C.4 の水位変動記録から波群を算定し, それぞれに双曲線関数 sech をあてはめたものを計算の初期値として, その後の波群の変化を計算した結果である. ただし, 長周期水位変動 (式 (3) の $|A|^2$ に比例する項) は除去されている. 包絡波形の計算結果については, (a) 図の中にプロットしてある. 搬送波の周期としては, 波群を構成する個々波の周期の平均値を用いた.

波群 WG.2 については, 観測結果と計算結果はかなり良い一致を示している. しかし, 波群 WG.1 については, 観測結果は伝播に伴って波群がわからなくなってしまう傾向にあるのに対し, 計算結果は安定に伝播して

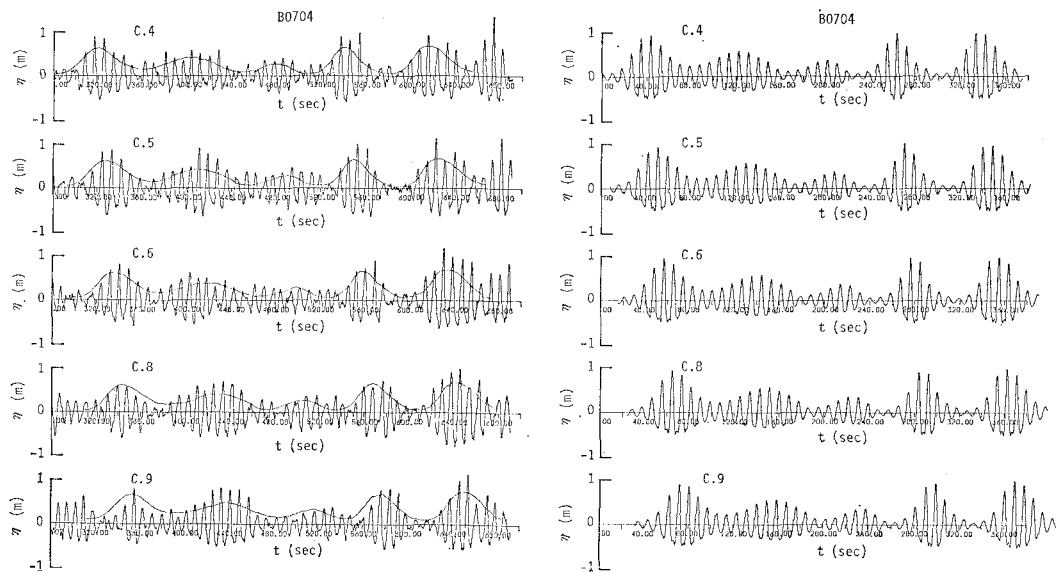


(a) 観測結果



(b) 計算結果

図-5 波群の伝播変形に関する観測結果と計算結果の比較 (B0703)



(a) 観測結果

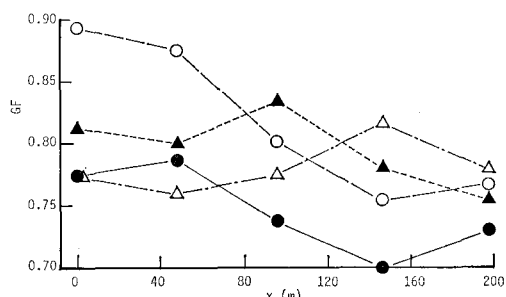
(b) 計算結果

図—6 波群の伝播変形に関する観測結果と計算結果の比較 (B0704)

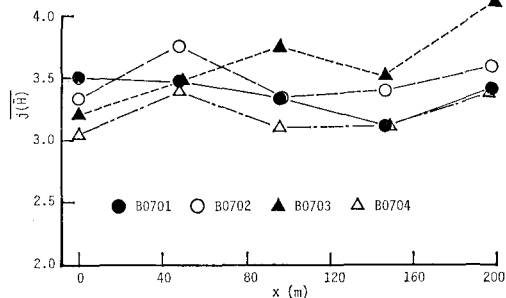
いるところが異なる。また、WG.1とWG.2の間の、波高計 C.4 では見られない波群が、波高計 C.5 以後現れてくる。波の方向分散性、波高計 C.4 が C.5~C.9 のラインからずれていることが原因の一つである。

図—6 は、B0704 の波群の伝播変形に関する観測結果と計算結果を比較したものである。包絡波形の初期値は、数値フィルターによって狭帯域化した波高計 C.4 の水位変動の包絡線を滑らかに結んだものとした。搬送波の周期としては、スペクトルのピーク周期を用いた。観測結果を見ると、波の方向分散性のために、伝播に伴って波群が消滅してしまう場合や途中から波群が現れてくる場合もあるが、計算結果との対応は比較的よい。観測結果の波形の谷の部分にはところどころ2次波峰が見られるが、計算結果も同様である。しかし、計算結果は高周波数成分の変動を表せない。また、伝播距離は約 200 m (これは波長の約 4 倍の長さ) と短く、この間で計算結果はあまり変化しない。

土屋⁹⁾は、浅海域における非線形不規則波浪を不規則なソリトンの連なりとして扱う方法を提案し、その適用性を検討している。これによると波浪がソリトンを基準モードとしたコヒーレントな力学的構造を形成している場合には、その振幅は伝播過程において保存され、各ソリトンはその振幅に比例した速度で伝播するため、長い距離を経ると波群は崩壊し、波群は存在しないことになる。しかし、現実の海岸波浪には波群が見られることを指摘し、この波群性は不規則ソリトン列の振幅に関する時系列特性と評価された¹⁰⁾。その理由の一つとして、



(a) Groupiness Factor



(b) 波高の平均連長

図—7 岸沖方向の Groupiness Factor と波高の平均連長の変化

波群が約 300 m を伝播する過程において、この時の波群が非線形 Schrödinger 方程式に従うとしたときに予測される波群の平坦化 (波高の平均連長の伝播に伴う増加)

が見られないことを挙げている。

しかし、この時の波浪の平均周期は約 13 sec であり、水深を 7 m とすると波長は約 100 m となり、300 m という伝播距離は波群の平坦化がはっきり現われるに十分に長い距離とはいえない。本観測においても波長に対して観測区間が十分に長いとはいえないが、次に示すように岸沖方向の GF と $j(\bar{H})$ の変化を調べてみると、伝播に伴う波群の平坦化の傾向が見られた。

3.3 伝播に伴う wave grouping の変化

図-7 に、砕波が見られず、また波群が顕著であったデータ B0701 (11月30日 20:30-22:00), B0702 (11月30日 23:30-12月1日 1:00), B0703 および B0704 の岸沖方向の GF と $j(\bar{H})$ の変化を示す。B0701 および B0702 については、 $j(\bar{H})$ はほぼ一定で、 GF は減少している。B0703 については、 GF の減少、 $j(\bar{H})$ の増加傾向が見られる。これらは、伝播に伴う波群の平坦化傾向を示すものである。

4. あとがき

本研究は、現地海岸波浪の性質のうち、波の発達・減衰に伴う wave grouping の変化、波群の伝播変形、伝播に伴う wave grouping の変化について検討したものである。その結果、1) 波の減衰期の後半に、スペクトルの尖鋭化により波群性が顕著であること、2) 波の最盛期では、観測栈橋の沖側で波が砕波し、砕波変形により波群性が弱まること、3) 条件を限れば、波群の伝播変形に関する観測結果と非線形 Schrödinger 方程式の計算結果は比較的良く一致すること、4) 浅海域を伝播するに伴って波群の平坦化傾向が見られることを示した。

最後に、京都大学防災研究所土屋義人教授ならびに名城大学理工学部岩垣雄一教授(京都大学名誉教授)には御教示、御助言を頂き、深く感謝の意を表します。本研究で用いた波浪データは、防災研究所海岸災害部門、同研究所付属大渦波浪観測所の教職員の方々の御努力によって得られたものであり、貴重なデータを解析する機会

を与えて頂きましたことを感謝致します。観測データの一次処理ならびに方向スペクトルの計算は山下隆男助手によるものであり、ここに謝意を表します。また、本研究は文部省科学研究費総合研究(A) (No. 62302045 代表者土屋義人教授) による成果であることを付記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Mollo-Christensen, E. and A. Ramamonjisoa: Modeling the presence of wave groups in a random wave field, Jour. Geophys. Res., Vol. 83, No. C8, pp. 4117~4122, 1978.
- 2) Lake, B. M. and H. C. Yuen: A new model for nonlinear wind waves, Part 1. Physical model and experimental evidence, Jour. Fluid Mech., Vol. 88, pp. 33~62, 1978.
- 3) Crawford, D. R., B. M. Lake, P. G. Saffman and H. C. Yuen: Effects of nonlinearity and spectral band-width on the dispersion relation and component phase speeds of surface gravity waves, Jour. Fluid Mech., Vol. 112, pp. 1~32, 1981.
- 4) Mase, H. and Y. Iwagaki: Evolution of wave groups in shallow water and wave group properties of random waves, Coastal Eng. in Japan, Vol. 30, No. 1, pp. 19~32, 1987.
- 5) Mase, H. and Y. Iwagaki: Wave group analysis of natural wind waves based on modulational instability theory, Coastal Eng., Vol. 10, No. 4, pp. 341~354, 1986.
- 6) 河田恵昭・吉岡 洋・芹沢重厚・土屋義人: T型栈橋を用いた高波浪時の海底地形計測法, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 191~195, 1988.
- 7) 間瀬 肇・松本明男・松元和伸・岩垣雄一: 波群特性が異なる不規則波の浅水・砕波変形特性, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 169~173, 1986.
- 8) 間瀬 肇・松元和伸・岩垣雄一: 波群の伝播変形に及ぼす粘性摩擦の効果, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 147~151, 1987.
- 9) 土屋義人・安田孝志・山下隆男: 海岸波浪のソリトンスペクトル表示, 第29回海岸工学講演会論文集, pp. 41~45, 1982.
- 10) 篠田成郎・安田孝志・川口智也・土屋義人: 海岸波浪の時系列特性とソリトンモード, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 141~145, 1987.