

海岸波浪の非線形性と波群構造

土屋 義人*・安田 孝志**・山下 隆男***・平本 高志****

1. 緒 言

最近の約 10 年間における分散波の非線形変調に関する研究の進展はめざましく、深海から浅海域においても非線形 Schrödinger 方程式で説明される^{1),2)}ことがわかってきた。事実、浅海域における現地波浪データにおいても、海象条件によっては顕著な波群性が認められ、その現象をも含めて現地波浪の波群構造に関する研究成果が数多く報告されている^{3),4),5)}。

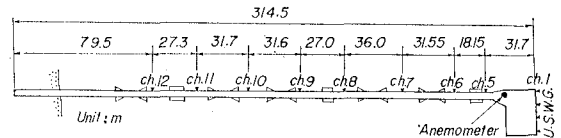
深海域における波群の形成は、弱い非線形性と永年項が生じない条件とを用いて、包絡ソリトン解として表示されるが、これが浅海域に侵入した場合に搬送波の非線形性の増大に伴ってどのような変形（分裂、再帰、消滅）を生じるか、また現地波浪データにおいてはどうかという問題は、極めて興味深い。

本研究では、波浪の現地観測データに基づいて、波群の形成、変形過程を調べるとともに、波群構造と非線形性との関係について検討する。

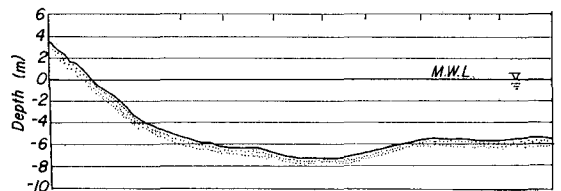
2. 波浪の非線形性の評価

解析に用いた波浪観測データは、1981 年 3 月に京都大学防災研究所附属大渦波浪観測所において実施された集中波浪観測データ⁶⁾で、波高計の配置および海底地形は、図-1 に示すようである。波浪データ番号、観測時刻、目視による砕波率および有義波諸量（ゼロアップクロス法による）を表-1 に示す。

海岸波浪の非線形性を示すパラメータの選定は、対象とする現象により種々のものが考えられる。すなわち、不規則波の線形スペクトルに生ずる倍周波数成分、スペクトル幅をパラメータ表示する方法、波浪をランダムな統計量とみなし、正規分布からの歪で skewness, kurtosis などをパラメータとする方法、波の変形に伴うトラフの平坦度を指標とする方法、さらに浅海域における波浪を対象として非線形性と分散性との比を示す Ursell 数を



(a) 観測用栈橋及び波高計の位置



(b) 海底断面形状

図-1 波高計の設置位置および海底地形

表-1 解析に用いた波浪データの諸元

データ番号	N27	N31	N35	N37
観測時刻	3/15 7 hr	3/16 7 hr	3/17 8 hr	3/17 20 hr
砕波率 (%)	30	100	—	—
$H_{1/3}$ (m)	1.63	2.72	2.36	1.21
$T_{1/3}$ (sec)	5.2	9.2	7.9	5.5
そ の 他	発達期	最 盛 期	減衰期	

定義する方法などが考えられる。ここでは、図-1 に示したように、比較的水深の浅い場での波浪を対象としていること、搬送波の非線形性を示すパラメータとして用いることから、個々波の波高 H 、波長 L および水深 h による Ursell 数 ($U_r = HL^2/h^3$) を非線形性パラメータとして用いることとする。

図-2 は Ursell 数の岸沖方向変化を示すもので、ch. 1 は沖側、ch. 12 は岸側の波高計である。図中、 U_r は 20 分間の波浪データから得られる個々波の Ursell 数の平均値であり、図中の細い破線は欠測を示し、N27~N37 は表-1 に示したデータ番号と対応する。また、図-3 は ch. 5 において得られた 22 分間より求めた周波数スペクトルである。これらの図および表-1 に示した砕波率から判断して、波浪データの非線形特性を以下のよう考える。

(1) 波浪の最盛期であり、砕波および砕波後の波浪

* 正会員 工博 京都大学教授 防災研究所

** 正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科

*** 正会員 工修 京都大学助手 防災研究所

**** 正会員 工修 川崎製鉄(株)エンジニアリング事業部

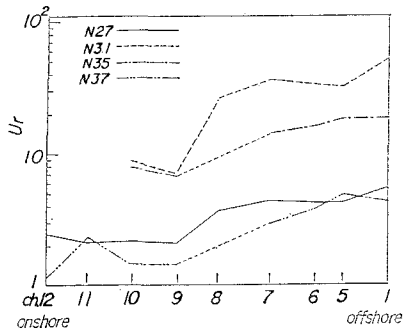


図-2 Ursell 数の空間的变化

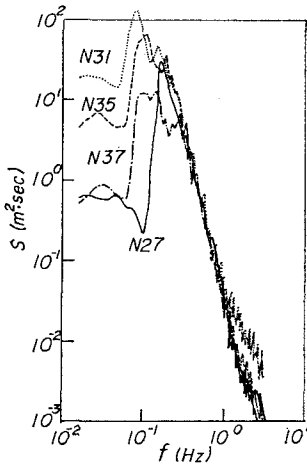


図-3 周波数スペクトル

を含む N31, N35 では, Ursell 数は 8~50 と大きく, 「強い非線形性」の波浪と定義しておく。

(2) 波浪の発達期に対応する N27 および減衰期の N37 では Ursell 数は 8 以下であり, これらは「弱い非線形性」の波浪と考える。また, 両者は Ursell 数からは同程度の非線形性を有する波浪であると考えられるが, そのスペクトル形には顕著な差異が認められ, N27 は短周期の発達期にある波浪, N37 はうねり性の強い波浪であるといえる。

3. 波群性を示すパラメーター

海岸波浪の波群性は, 波浪エネルギーの履歴を示す SIWEH⁷⁾ を用いて定義される GF (Groupiness Factor) や連長によって評価することができ, 以下ではこれらのパラメーターを用いて考察する。

GF は, 観測期間 T_n の波浪データに対して, 次式で定義される。

$$GF = \left[\frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} \{E(t) - \bar{E}\}^2 dt \right]^{1/2} / \bar{E} \dots\dots\dots (1)$$

ここに, $E(t)$ はデータウィンドウ $Q(\tau)$, 周波数ス

ペクトルのピーク周期 T_p を用いて, 次式で定義される SIWEH であり, $\bar{E}$ はその平均値である。

$$E(t) = \frac{1}{T_p} \int_{-\infty}^{\infty} \eta^2(t+\tau) Q(\tau) d\tau \dots\dots\dots (2)$$

Funk & Mansard は, $Q(\tau)$ は $2T_p$ の底辺をもつ三角形ウィンドウを用いているが, 式 (2) から明らかなように, SIWEH の特性はデータウィンドウによって大きく変化する。

図-4 は, 底辺 $2T_p$ の三角形ウィンドウを用いて得られた GF の空間的变化を示すもので, 各波浪データについて顕著な相違はみられない。これは, GF が SIWEH の標準偏差として与えられるため, 大局的な波群性の有無を判断する場合には用いることができようが, 波群構造のスケールを的確に表示するパラメーターとはいえない。

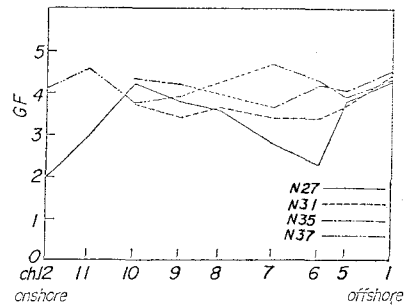
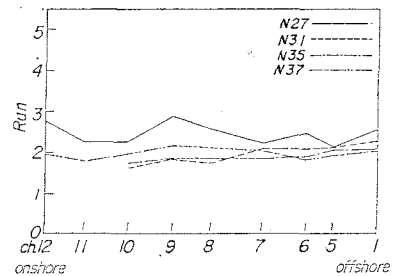
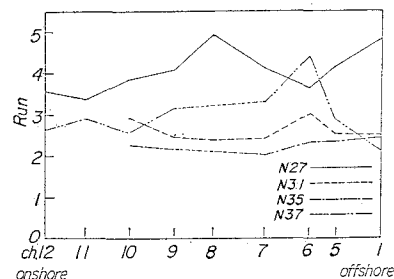


図-4 Groupiness factor の空間的变化



(a) 主データから得られた連長



(b) ピーク周波数以上をカットした場合の連長

図-5 連長の空間的变化

一方、波の連りを定義する指標として、波浪を個々波に分割した場合の連長が用いられる。前述したように、非線形性を示すパラメータとして個々波の Ursell 数を用いることから、ここでは平均波高を threshold とした連長によって波群性を評価する。図-5 (a) は、生データから得られる連長、(b) はピーク周波数以上の高周波成分を除去した波形から得られる連長の空間的な変化を示す。これらの図は、各波浪条件(データ番号に対応)によって平均的な波群性が空間的にどのような変化をするかを示すが、生データから得られる連長では、波群構造の時空間的变化に顕著な相違は見出せない。しかし、図-5 (b) のように、高周波成分を除去して波群構造をより明確にした波形から得られる連長には、波浪条件によって明らかに差異が認められる。

以上のように、浅海域において砕波を含むような波浪データから、そこに内在している波群構造を明確に表示するためには、数値フィルターにより高周波成分を除去し、これから波群性を示すパラメータとして連長を定義することが有効であると考えられる。

4. 波群構造と非線形性

前述したように、波浪の非線形性を示すパラメータとして、個々波の特性で定義される Ursell 数、波群性を評価するパラメータとして平滑化した波形から求められる平均連長を用いることとすると、Ursell 数と連長との関係は、図-6 のようになる。すなわち、「弱い非線形」と定義した N27 および N37 と、「強い非線形」とした N31 および N35 のデータは、Ursell 数5付近で連長との関係が急変する傾向を示す。このことは、波浪の非線形性と波群性とが、次のような関係で結びついていることを示唆している。

(1) 搬送波の平均的な非線形性の強さを示す Ursell 数 $Ur < 5$ の領域においては、非線形変調によって波群

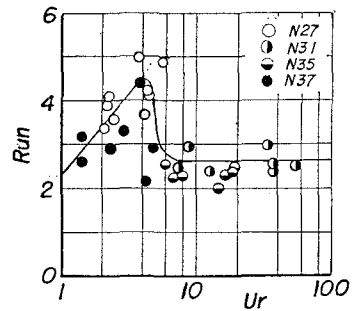


図-6 Ursell 数と連長との関係

が形成(再生)され、安定に伝播するため、非線形性の増大に伴って波群構造が強化される。

(2) 一方、 $Ur > 5$ の領域では、搬送波自身の非線形性が強くなり、その独立性が卓越するため、砕波あるいはソリトン構造への移行によって波群構造が弱体化し、崩壊する。

(3) すなわち、浅海域において砕波を伴うような海岸波浪にも、波群構造は明らかに存在しており、その強さは非線形性(1)および(2)で示したような関係で、2領域に分けられることがわかる。また、その境界は、個々波の特性で定義した Ursell 数で、5~10 程度であるといえよう。

5. 波群の伝播に関する考察

現地波浪における非線形性と波群性とは、浅海域においても明確な関係が認められる。しかし、対象とした波浪データは観測用棧橋に沿う約 300 m の範囲で得られたものである点に留意しなければならない。そのため、以下では波形の伝播特性を、時空間平面上で検討する。

図-7 は、N27 の実測波形 (a) および SIWEH (b)

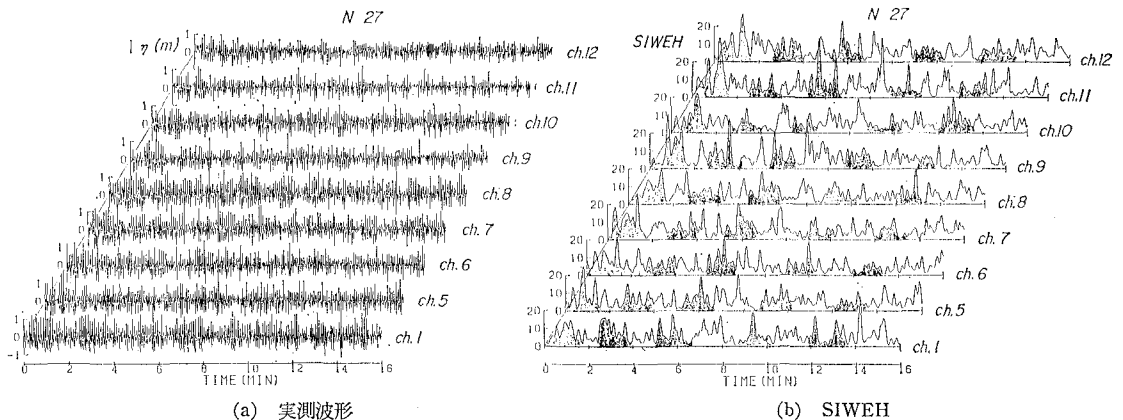


図-7 N27 の実測波形および SIWEH の時空間変化

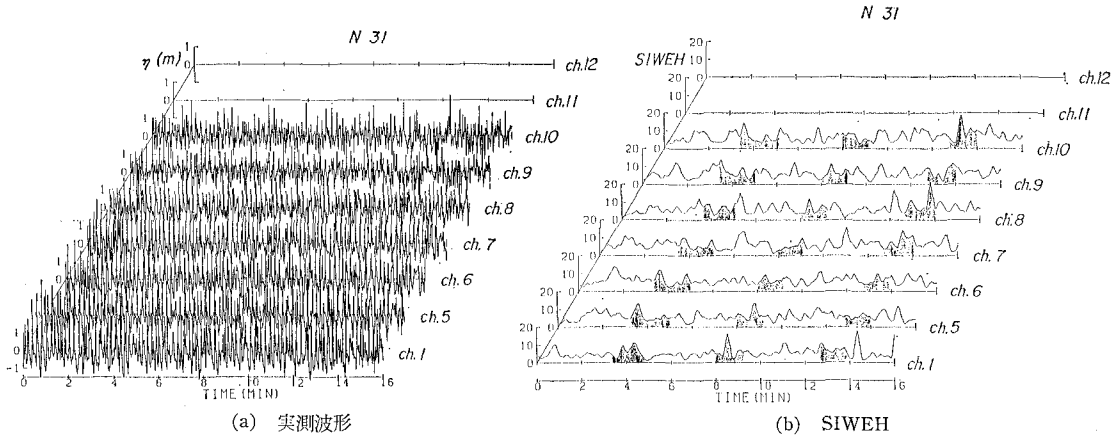


図-8 N31 の実測波形と SIWEH の時空間変化

を示し、図-8 は N31 のそれらを示す。図中、ch. 1～ch. 12 (ch. 1 は空中発射式超音波波高計、その他は容量式波高計) は図-1 に設置位置を示した波高計で得られた記録であることを意味し、横軸は時間を示す。実測波形にも波群性の存在は認められるが、その伝播特性を見出すことは困難である。ただし、ch. 9 より岸側では碎波による波高減衰があることがわかる。一方、SIWEH

による表示には、明らかに波群構造が存在していることが認められ、N27 については伝播に伴って、大半の波群の対応付けができるが、N31 では対応付けのできる波群は極めて少い。このことから、N27 では波群構造が比較的安定であり、N31 では搬送波の非線形性が強まって、波群が分裂しているものと考えられる。

図-9 はピーク周波数以上の高周波成分を除去した波

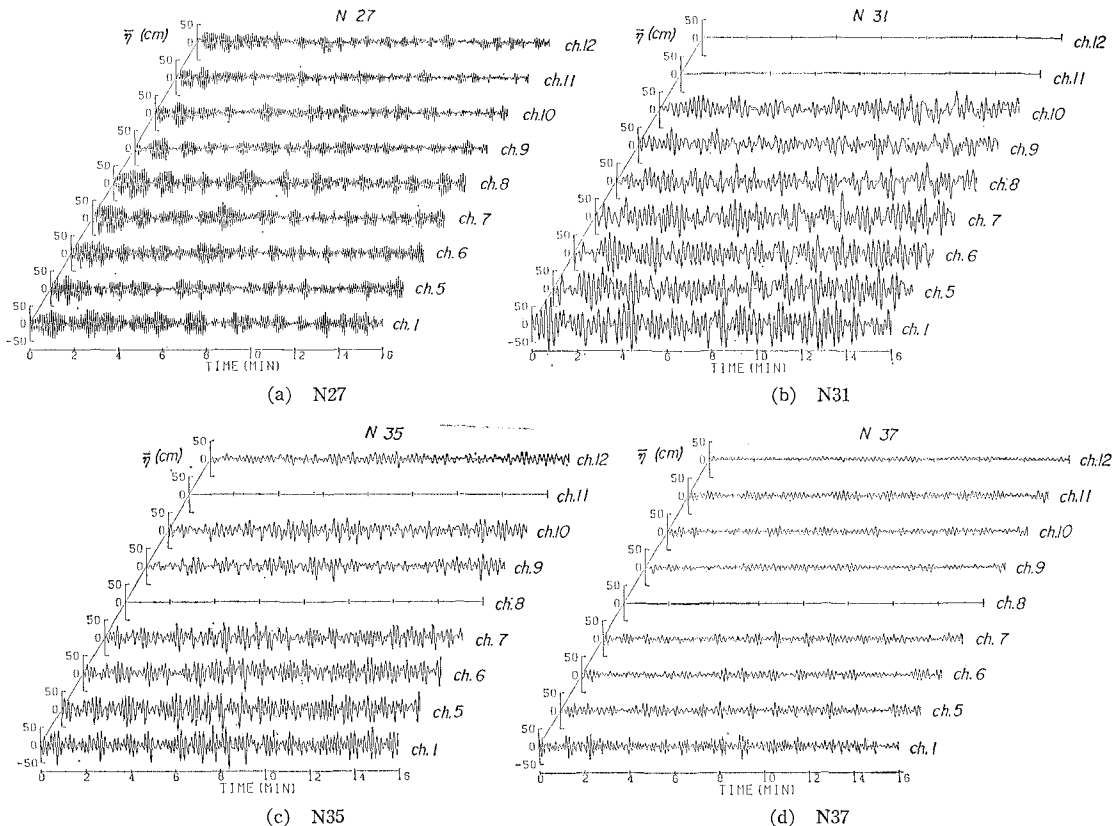


図-9 波群波形の時空間変化

形 (波群波形とよぶ) の時空間変化を示す。これらの図では、全てのデータにおいて波群の形成が認められるが、SIWEH による表示から判断できる波群の伝播特性と同様に、N27 および N37 では、比較的安定に波群が伝播しているのに反して、N31 および N35 では、波群が分裂しているために、その伝播を追跡できるものが極めて少ないことがわかる。

すなわち、浅海域における海岸波浪に内在している波群の伝播特性としては、比較的安定して伝播する場合と、分裂が顕著に生じる場合とに分けて考えることができる。しかしながら、波群が分裂する場合においても、完全に波群構造が消滅することは稀であり、弱体化しながらも波群構造が維持されていることがわかる。

6. 結 語

以上、波浪観測用棧橋に沿う 9 点で観測された波浪データを、波浪の非線形性と波群構造とに着目して解析した結果、浅海域における波群の特性は、以下のように要約される。

(1) 個々波の特性で定義した Ursell 数の平均値 U_r が 5~10 を境として、波群構造と非線形性との関係に明確な差異が認められ、 $U_r < 5$ においては、非線形性の増大に伴って波群構造が強化されるが、 $U_r > 5$ では波群構造は急激に弱体化する。

(2) 波群の伝播特性によれば、搬送波が「弱い非線形性」の場合は、浅海域においても安定な伝播特性を有する波群構造を形成するが、「強い非線形性」の場合には、分裂が顕著であり、その伝播は不安定となる。しか

しながら、波群構造は弱体化しても、波群性が消滅することではなく、どのような波浪条件においても、残影としての波群性は海岸波浪に内在している。

このように、浅海域において観測された波浪データには、波群構造が明らかに存在しており、搬送波の非線形性の強さによってそれが強化、弱体化を繰り返している。かような特性を有する海岸波浪を統一的に記述する場の方程式、たとえば非線形 Schrödinger 方程式を用いて究明していくべきであろう。

参 考 文 献

- 1) Hashimoto, H. and H. Ono: Nonlinear modulation of gravity wave, Jour. Phys. Soc. Japan, Vol. 33, No. 3, pp. 805-811, 1972.
- 2) Davey, A. and K. Stewartson: On three-dimensional packets of surface waves, Proc. Roy. Soc., Series A, Vol. 338, pp. 101~110, 1974.
- 3) 岩垣雄一・間瀬 肇・北 直紀: Wave Group を考慮した不規則波のシミュレーションとその特性, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 55~59, 1982.
- 4) 間瀬 肇・土居宏行・岩垣雄一: 不規則波の遡上特性に及ぼす Wave Grouping の影響に関する実験的研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 114~118, 1983.
- 5) Burcharth, H. F.: A comparison of natural wave and model waves with special reference to wave grouping, Proc. 18th ICCE, pp. 303~318, 1980.
- 6) 土屋義人・河田恵昭・芝野照夫・山下隆男・小林征雄: 現地海岸における水面変動の時空間特性, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 26~35, 1982.
- 7) Funk, E. R. and E. P. D. Mansard: On the synthesis of realistic sea states in a laboratory flume, Hydraulics Laboratory Report, LTR-HY-66, National Research Council of Canada, 1979.