

# 海岸波浪の非線形性の卓越化に伴う ソリトン構造への遷移について

土屋 義人\*・安田 孝志\*\*・山下 隆男\*\*\*

## 1. 緒 言

深海域から極浅海域にわたる波浪は、その非線形性と分散性との関係で、線形理論では説明できないきわめて興味ある挙動を示す。分散性に比べて非線形性が弱い深海域から浅海域にかけては、単弦波を成分波とする取り扱いが合理性を持つが、変調不安定性によって自己変調を余儀無くされ、包絡ソリトン<sup>1)</sup>が形成されて安定化し、搬送波が波束を形成するいわゆる波群構造が形成される。一方、浅海域から極浅海域においては、非線形性がより卓越し、変調不安定性に代わって、成分波自体の不安定性のためにモード間のエネルギー輸送が活発となり、ソリトン<sup>2)</sup>を成分波とするいわゆるソリトン構造<sup>2)</sup>を形成して安定化するものと考えられる。このため、単弦波を成分波とする取り扱いでは合理性を欠き、海岸波浪の力学的構造を反映しない単なる統計的手法に過ぎなくなってしまう。

分散波である波浪のこうした変調現象は、その非線形性と不規則性によっている。深海域では、波束が包絡ソリトンを形成し、また極浅海域では成分波がソリトンとなって、それぞれ安定化する点において共通性があると思われる。前者では、平均海面を波動の基準面とする波束内の搬送波が、一定の束縛を受けて、波群構造を形成している。後者では、搬送波が固有値に一義的に支配されて伝播するソリトンとなるため、波群は形成されず、波動の基準面も波谷面となり、平均海面は質量の保存則との関係で意味を持つに過ぎなくなる。

以上、著者らの海岸波浪についての力学観を述べたが、波浪の示す多様な運動形態も、基本的にはその非線形性と分散性との関係で規定されるものと考えられる。したがって、より合理的な設計波浪の取扱い法の確立も、こうした力学的機構を踏まえてなされるべきであろう。そのためには、前述したような波浪の挙動を観測データから見出すことによって、その力学的機構の究明を進める必要がある。特に、ソリトン構造の形成によって安

定化した海岸波浪においては、波群構造の崩壊や波動基準面の変化が生じていると考えられるので、これらを波浪の非線形性との関係で見出すことができれば、極浅海域における波浪の力学的秩序とソリトン構造との関係を明らかにすることができよう。

本研究では、こうした観点から、広範な海象条件下の観測記録を取り扱い、海岸波浪の非線形性を skewness および Ursell 数によって評価する。ついで、非線形性の卓越化に伴ない、Funk-Mansard<sup>3)</sup>の提案による SIWEH (Smoothed Instantaneous Wave Energy History) で評価した波群構造が弱体化すると同時に、波谷点の包絡波形が平坦化することを示して、海岸波浪の非線形性の卓越化に伴うソリトン構造への遷移がこれらの変化に現れることを明らかにする。

## 2. 波浪観測の概要

海岸波浪の観測は、京都大学防災研究所附属大渦波浪観測所の波浪観測システム<sup>2)</sup>を用いて行われた。表-1 には、本研究で用いた観測データの番号とその観測日時を示すとともに、観測用棧橋の先端における砕波頻度、棧

表-1 観測データ番号と海象特性

| データ番号<br>(DNO) | 観測年月日     | 入射角<br>(度) | 砕波率<br>(%) | 風 速<br>(m/s) | 風 向 |
|----------------|-----------|------------|------------|--------------|-----|
| 7              | 1981.3. 7 | 0          | 0          | 2            | S   |
| 27             | " 3.15    | 29         | 30         | 14           | W   |
| 31             | " 3.16    | 0          | 100        | 19           | NW  |
| 34             | " 3.17    | 0          | 60         | 11           | N   |
| 40             | 1982.3. 6 | 0          | 0          | 2            | S   |
| 41             | " 3. 8    | 0          | 0          | 2            | S   |

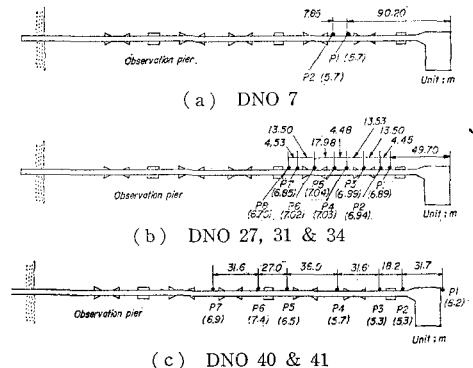


図-1 棧橋上の波高計位置とその水深

\* 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

表-2 観測波浪の特性

| DNO | 測点 | $U_s$ | Skewness | $h/L$ | GF   | $\sigma$ | DNO | 測点 | $U_s$ | Skewness | $h/L$ | GF   | $\sigma$ |
|-----|----|-------|----------|-------|------|----------|-----|----|-------|----------|-------|------|----------|
| 7   | P1 | 45.92 | 1.161    | 0.090 | 0.45 | 0.44     | 34  | P5 | 1.60  |          | 0.099 | 0.87 | 0.64     |
|     | P2 | 42.14 | 1.152    | 0.097 | 0.39 | 0.49     |     | P6 | 4.47  | 0.092    | 0.122 | 0.40 | 0.63     |
| 27  | P1 | 4.71  | 0.489    | 0.153 | 0.65 | 0.57     | 40  | P7 | 6.83  | 0.310    | 0.111 | 0.46 | 0.59     |
|     | P2 | 6.45  | 0.476    | 0.144 | 0.77 | 0.60     |     | P1 | 5.68  | 0.968    | 0.101 | 0.74 | 0.46     |
|     | P3 | 5.69  | 0.297    | 0.145 | 0.70 | 0.64     |     | P2 | 5.07  | 1.12     | 0.099 | 0.78 | 0.52     |
|     | P4 | 5.91  | 0.484    | 0.144 | 0.79 | 0.64     |     | P3 | 4.02  | 0.845    | 0.108 | 0.74 | 0.53     |
|     | P5 | 4.67  | 0.330    | 0.160 | 0.66 | 0.53     |     | P4 | 4.69  | 0.848    | 0.110 | 0.85 | 0.62     |
|     | P6 | 2.36  | 0.287    | 0.171 | 0.91 | 0.72     |     | P5 | 5.37  | 0.734    | 0.106 | 0.80 | 0.61     |
|     | P7 | 3.43  | -0.044   | 0.161 | 0.84 | 0.73     |     | P6 | 4.95  | 0.018    | 0.106 | 0.72 | 0.66     |
|     | P1 | 18.03 | 1.234    | 0.084 | 0.53 | 0.54     | 41  | P7 | 4.93  | 0.013    | 0.100 | 0.92 | 0.74     |
| 31  | P2 | 18.12 | 0.824    | 0.079 | 0.42 | 0.50     |     | P8 | 5.47  | 0.082    | 0.100 | 0.85 | 0.69     |
|     | P3 | 19.51 | 1.040    | 0.081 | 0.46 | 0.52     |     | P1 | 7.64  | 0.721    | 0.107 | 0.72 | 0.49     |
|     | P4 | 14.12 | 1.132    | 0.079 | 0.45 | 0.53     |     | P2 | 6.23  | 0.826    | 0.109 | 0.73 | 0.49     |
|     | P5 | 6.26  | 1.421    | 0.100 | 0.41 | 0.49     |     | P3 | 7.29  | 0.618    | 0.104 | 0.73 | 0.60     |
|     | P6 | 3.12  | 0.637    | 0.123 | 0.42 | 0.59     |     | P4 | 5.75  | -0.022   | 0.109 | 0.64 | 0.63     |
|     | P7 | 5.17  | 0.488    | 0.124 | 0.48 | 0.54     |     | P5 | 6.54  | 0.127    | 0.107 | 0.64 | 0.61     |
| 34  | P1 | 11.10 | 1.110    | 0.105 | 0.48 | 0.52     |     | P6 | 5.13  | 0.162    | 0.110 | 0.69 | 0.67     |
|     | P2 | 11.53 | 0.637    | 0.098 | 0.44 | 0.55     |     | P7 | 5.75  | -0.276   | 0.118 | 0.68 | 0.66     |
|     | P3 | 12.01 |          | 0.096 | 0.47 | 0.80     |     | P8 | 5.83  | -0.173   | 0.112 | 0.68 | 0.66     |
|     | P4 | 9.16  | 0.962    | 0.107 | 0.45 | 0.53     |     |    |       |          |       |      |          |

橋に対する入射角，風向および風速を併記してある。

図-1 は各観測時における棧橋上の波高計の設置位置とその水深を示す。

### 3. 海岸波浪の非線形特性

海岸波浪の非線形性は，その動力学の構造と密接に関わっており，それに注目すれば，海岸波浪の特性の究明と併せてソリトン構造への遷移が存在するかどうかの解明できるものと考えられる。このため，まずここで用いる非線形性指標を定義し，ついで，観測波浪の特性をこれらの指標によって明らかにする。

#### (1) 非線形性指標の定義

ここで取り扱う海岸波浪は，局在海域におけるものであるため，その水位分布における正規分布からのズレをすべて非線形性に帰着させることはできないが，このズレを表す skewness によって波の非線形性を評価する手法は広く受け入れられている。これは，非線形性の卓越化に伴う波形変化によるものであり，とくに成分波がソリトンで表されるようになれば，波形の上下非対称性が skewness に反映されることになると考えられる。したがって，skewness と非対称性の関係は必ずしも自明ではないが，波形の非対称性が部分的ではあっても skewness に反映されると考えることは可能である。

単弦波を基本成分とする取り扱いでは，非線形性はスペクトル間のエネルギー輸送の原因として理解され，その評価もこのエネルギー輸送量を基礎として行われるべきこととなる。エネルギー輸送量に着目した非線形性の指標としては，スペクトル間の二次干渉の程度を評価する bispectrum と非線形干渉による各スペクトルのパワーの変化をパワースペクトルの相関係数によって評価するコヒーレンス (COH) がある。前者の場合にはその定量的評価が困難であるため，観測データ間の非線形性の大小関係を論じることが容易でないという問題がある。また，後者でも同様な問題とともに，コヒーレンスの値が測点間の距離に依存するという問題はあがあるが，スペクト

ル間のエネルギー輸送の影響を直接評価できるという利点がある。

波の伝播における非線形性の評価は，波形を単弦波で与えたときの分散性に対する比として定義される Ursell 数 ( $U_s$ ) によって行うことができる。不規則波の場合には，こうした力学的意味は若干失われるが， $U_s \rightarrow \infty$  においてすべての波が孤立波に収束する点を考慮すれば，見掛けの波形から直接定義される  $U_s$  は，基本的にはソリトン構造への遷移を支配する非線形性の指標にもなりうるであろう。

以上より，ここでは skewness および Ursell 数を非線形性の指標として用い，併せてコヒーレンスによっても非線形性の評価を試みる。

#### (2) 海岸波浪の非線形性

表-2 には，各観測データの測点ごとの skewness，波浪を線形長波と仮定して trough to trough 法によって求めた水深・波長比  $h/L$  および Ursell 数の平均値を示す。

図-2 は，砕波の影響が無視でき，かつ非線形性が最も弱いと判断される DNO 40 のパワースペクトルの空間的变化を示す。これから，COSINE 型データウィンドーによってスペクトルの平滑化を行っていることもあって，スペクトル形自体は空間的によく保存されているが，非線形干渉による高調波成分の存在を確認することができる。図-3 は，これらのコヒーレンスの空間的变化を示す。これから，伝播に伴うコヒーレンスの低下は大きく，特にピーク周波数付近を除いた部分で著しく，スペクトル形状自体は保存されているにもかかわらず，スペクトル間

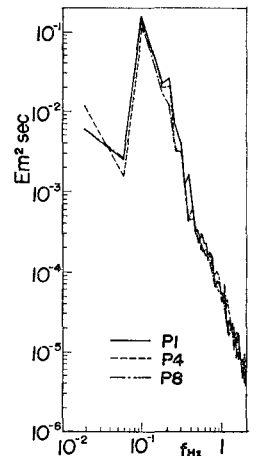
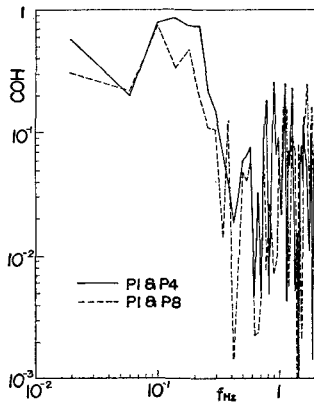


図-2 パワースペクトルの空間的变化



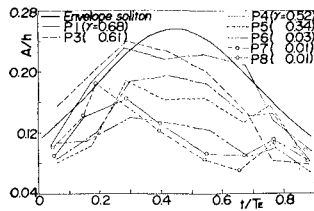
図—3 コヒーレンスの空間的变化

深海域では変調による不安定性の結果として包絡ソリトンが形成され、成分波は波群ごとに一定の束縛を受けて伝播するが、浅海域では成分波のソリトン化に伴って波群からの独立性が強まり、波群構造は弱体化するものと思われる。ここでは、前述の SIWEH によって波群構造を評価し、その非線形性指標との関係およびそれらの空間的变化を基にして、海岸波浪に見られる波群構造の実態について考察する。

前述したことからすれば、海岸波浪の観測データに見られる波群構造は、深海域で形成された包絡ソリトンの残影と考えられる。表—2 に示した各測点における水深・波長比  $h/L$  はいずれも変調不安定臨界値  $0.217^{11)}$  より

も小さく、波速の過大評価を考慮しても DNO 27 の場合以外は変調不安定は発生しておらず、波群構造は弱体化の傾向にあると判断できる。

図—4 は、DNO 41 の場合の測点 P1 で



図—4 観測包絡波形の空間的变化および理論波形との比較

の包絡波形を包絡ソリトンと見なし、次式の理論波形  $A(t)^{11)}$  との比較を示し、また両者の重相関係数  $\gamma$  の値を付記してある。

$$A(t) = (2\alpha/\beta)^{1/2} \text{sech}(\alpha^{1/2}t) \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここに、 $\alpha$  および  $\beta$  は実測包絡波形から決定される定数である。これから、包絡波形の減衰が著しいこともあって、伝播に伴って重相関係数  $\gamma$  の値は急減少しており、波束形状の変形が急速に進み、包絡ソリトンとし

のエネルギー輸送はきわめて活発に進んでいるものと判断される。これらの結果から、DNO 7, 27, 31, 34 および 41 における非線形性の程度が理解されよう。

#### 4. 海岸波浪の波群構造の特性

前述したように、

ての安定性は失われていることがわかる。したがって、観測データに現れる波群構造を変調不安定理論によって評価することは無意味ではないかと判断される。このため、その力学的基礎は必ずしも明解ではないが、波群構造の定量的評価が可能な次式で定義される SIWEH  $E(t)$  を用いることにする。

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

$$Q(\tau) = \begin{cases} 1 - |\tau|/T_p, & |\tau| \leq T_p \\ 0, & |\tau| > T_p \end{cases} \quad \dots\dots\dots(3)$$

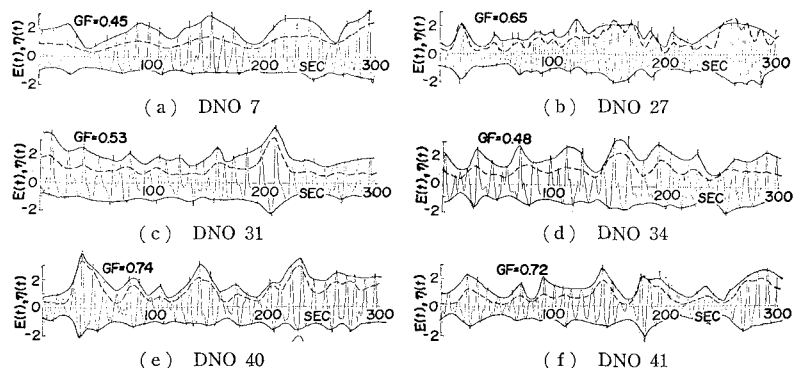
ここに、 $\eta$ ; 平均水面周りの規準化観測波形、および  $T_p$ ; パワースペクトルのピーク周期である。さらに、次式で定義される Groupiness Factor ( $GF$ ) によって、波群構造の強弱が定量化される。

$$GF = \left[ \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} \{E(t) - \bar{E}\}^2 dt \right]^{1/2} / \bar{E} \quad \dots\dots\dots(4)$$

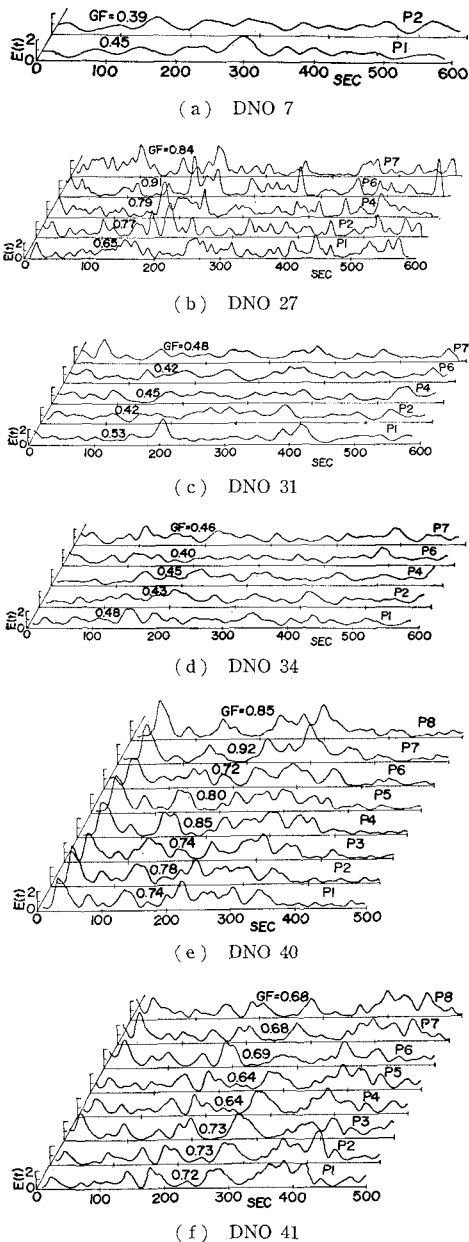
$$\bar{E} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} E(t) dt = \int_0^{\infty} S(f) df \quad \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $T_n$ ; 波浪観測の継続時間、および  $S(f)$ ; パワースペクトルである。これらによって波群構造が的確に評価されるためには、 $\eta(t)$  に含まれる長周期成分波が除去されている必要があるため、臨界周波数  $f_c = 0.05$  Hz の数値フィルターによる処理波形に対して SIWEH を計算し、 $GF$  の値を前述の表—2 に示す。

図—5 は、各 DNO ごとの測点 P1 における前述の処理波形、その包絡波形、SIWEH および  $GF$  の値を示す。いずれの場合も波群構造の存在が認められ、その強弱は  $GF$  によって適切に評価され、表—2 に示した Ursell 数や skewness と密接に対応していることがわかる。また、包絡波形と SIWEH とはいずれの場合もよく対応しているが、波谷包絡波形に関しては DNO 27 以外ではほぼ無相関であり、Ursell 数や skewness の増大に伴って、波谷包絡波形が平坦化する傾向にあることがわかる。これらは、このときの搬送波がすでにソリトン化し、ソリトンとして伝播しながら、その位相に初期条件として



図—5 包絡波形と SIWEH の比較 (—: 処理波形, — —: 包絡波形, - - -: SIWEH)



図—6 SIWEH の空間的变化

の包絡ソリトンの影響が残る、見かけ上なお波群構造を維持しているけれども、それは単なる残影に過ぎないことを示すものであろう。

図—6 は、各 DNO ごとの SIWEH の空間的变化を示す。DNO 27 の場合、浅瀬に対する入射角が約  $30^\circ$  であることに加え、強風のために砕波率が 30% に及んでいることもあって、SIWEH の時間的および空間的变化が著しく、波群構造が顕著に現れているが、一定の波群構造の存在は認められない。また、表—2 に示したように、伝播に伴って  $U_s$  の値が減少しており、これに対応

して  $GF$  の値は増大している。DNO 31 の場合は、砕波率が 100% に達しており、成分波のソリトン化および砕波変形が著しいこともあって、波群構造の弱体化が進み、一定の秩序は認められない。DNO 34 の場合も砕波率が 60% であるため、DNO 31 の場合と同様な傾向が見られ、一定の秩序を持った波群の伝播は認められない。また、DNO 7 では、砕波率が 0% のうねりであることもあり、波群構造の弱体化が進んでいるが、一定の波群の伝播が認められる。しかし、伝播距離が短いいため、このことの力学的有意性は必ずしも明らかではない。これらに対し、DNO 40 および 41 では、比較的非線形性の弱いうねりであるため、一定の秩序を持った波群構造の伝播が明瞭に認められ、搬送波のソリトン化に伴う波群構造の弱体化は余り進んでいないように見受けられる特に、DNO 40 の場合、海底地形の関係で伝播に伴って水深が微増していることもあり、波群構造は伝播に伴って逆に強化されており、 $U_s$  の減少とは逆に  $GF$  は増大している。このように非線形性の卓越化に伴って、波群構造は弱体化する傾向にあるが、砕波変形のない場合には、一定の秩序を持った波群の存在が極浅海域においてなお認められる。これは、現地海岸では成分波がソリトン化して砕波するまでの区間が短いため、ソリトン相互の追い越しなどによる波群の消失が十分に進まないことによるものと思われる。

## 5. 非線形性の卓越化に伴うソリトン構造への遷移

前章では、非線形性の卓越化に伴って搬送波のソリトン化が進み、これが海岸波浪の波群構造の弱体化や波谷面の平坦化に現れていることを観測波形の比較から示した。ここでは、こうした傾向を定量的に評価するため、SIWEH の計算と同様に規準化波形  $\eta$  を用い、波谷面の平坦度を評価する平坦度指標  $\sigma$  を次式によって定義する。

$$\sigma = \sum_{i=1}^N (\eta_{ii} - \bar{\eta}_i)^2, \quad \bar{\eta}_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_{ii} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 $N$ ;  $T_n$  時間の観測波形に含まれる波谷点の個数、および  $\eta_{ii}$ ;  $i$  番目の波谷点の平均海面からの水位である。表—2 には、各測点ごとのこれらの値を示す。

図—7 および 8 は、非線形性の指標である Ursell 数  $U_s$  と式 (6) による平坦度指標  $\sigma$  および式 (4) による  $GF$  との関係を示したものである。これから、砕波の影響などもあって、データのバラツキはあるが、 $U_s$  の増大に伴い、 $\sigma$  および  $GF$  がいずれも一様に減少していることがわかる。

図—9 および 10 は、非線形性の指標として skewness を用いた場合の同様な比較であり、この場合も skewness の増大に伴って  $\sigma$  および  $GF$  が一様に減少している。

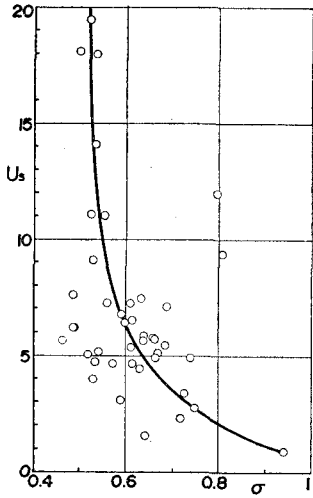
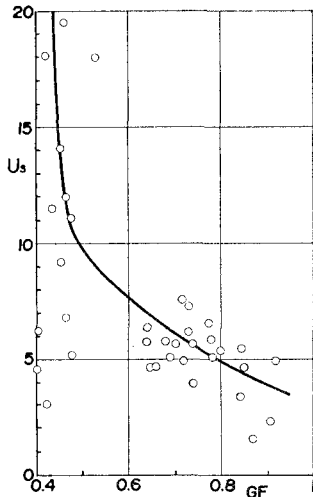
図-7 Ursell 数と平坦度指標  $\sigma$  との関係

図-8 Ursell 数と Groupiness Factor との関係

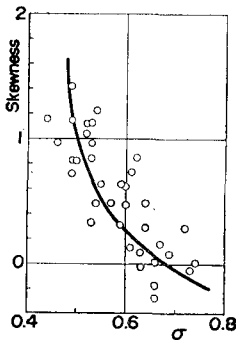
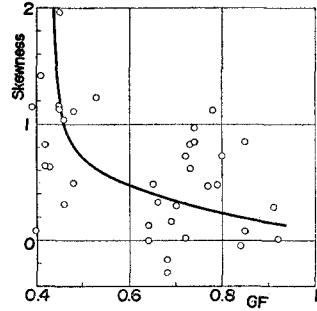
図-9 Skewness と平坦度指標  $\sigma$  との関係

図-10 Skewness と Groupiness Factor との関係

これらの結果は、非線形性の卓越化に伴う波群構造の弱体化や波谷面の平坦化が、海岸波浪の普遍的な特性であることを示しており、こうした特性こそ海岸波浪がソリトン構造を持ち、それが非線形性の卓越化に伴って強化されるという海岸波浪の動力学的構造の反映にほかならないと言えよう。

## 6. 結 語

広範な海象条件下の観測データを取り扱い、非線形性の卓越化に伴って、波群構造が弱体化すると同時に、波谷面の平坦化が強まることを見出し、これらが海岸波浪の普遍的特性として評価できることを明らかにした。そしてこうした特性は、成分波のソリトン化に伴うものであり、海岸波浪がソリトン構造を持つことの証左にほかならないという観点から、間接的ながら、非線形性の卓越化に伴って、波浪の動力学的構造が波群構造からソリトン構造に移行し、新たな力学的秩序が形成されるのではないかと結論したい。

なお、本研究は文部省特定研究による研究成果の一部であることを明記するとともに、データ解析に熱心に協力して頂いた大学院生 武山保徳君（現在、岐阜県土木部）に深謝する。

## 参 考 文 献

- 1) Hashimoto, H. and H. Ono: Nonlinear modulation of gravity waves, Jour. Phys. Soc. Japan, Vol. 33, No. 3, pp. 805~811, 1972.
- 2) 土屋義人・安田孝志・山下隆男・武山保徳: 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.
- 3) Funke, E. R. and E. P. D. Mansard: On the synthesis of realistic sea states in a laboratory flume, Hy. Lab. Rep. LTR-HY-66, NRC of Canada, p. 55, 1979.