

海岸波浪のソリトンスペクトル表示

土屋 義人*・安田 孝志**・山下 隆男***・武山 保徳****

1. 緒 言

ソリトンスペクトル理論¹⁾は、ソリトンの優れた特性に立脚した極浅海域における不規則波理論であり、対象とする海岸波浪の波峰間隔が相互干渉を無視できる程度に大きい場合には、これによる波形の表示式は K-dV 方程式の解となり、その波形は力学的に実在することになる。この理論の最大の特徴は、ソリトンを成分波とすることにより、従来の海岸波浪の力学観と全く異なった視点に立つことにある。

従来の力学的な不規則波の表現法であるスペクトル解析法では、その成分波は正弦波である。そして、波浪の非線形性による影響もせつ動展開によって高周波成分に置き換え、海岸波浪を無限の周波数帯を持つ正弦波の集合としている。この力学観に立つ限り、非線形性の増大に伴うパワースペクトルの変形が不可避となるだけでなく、碎波現象やそれに至る過程での周波数に独立となってくる波の伝播特性の説明が全く不可能となり、海岸波浪に対する力学観の修正を迫られることになる。

ソリトンスペクトル理論による力学観は、非線形性が本質的に卓越する海岸波浪においては、非線形性と分散性が平衡することによって、ソリトンを成分波とする全く新しい1つの力学的秩序、すなわちソリトン構造が形成されており、海岸波浪は周波数に独立な粒子的構造を持つ波となっているという立場である。これは、周波数を重要なパラメータとし、周期性を波動の前提としてきた従来の力学観と大きく異なる。しかしながら、それによって、観測される波浪に対する周期性の仮定が不要になり、非線形項評価のための高周波成分の増大という問題は生じなくなる。また、碎波現象の説明が容易になることも期待され、海岸波浪の波峰ごとの独立性の増大にも対応できることになる。さらに重要なことは、この力学観が海岸波浪の力学的構造を正しく反映しているならば、ソリトンスペクトル理論の海岸波浪およびそれに伴う海浜流などの諸現象への適用によって、沿岸海域に

おける流体力学的諸現象の究明に対して、新しい試みを期待することができる。

本研究では、このような観点から、著者らの力学観を裏付け、ソリトンスペクトル理論の海岸波浪への適用性を明らかにするため、現地海岸での観測データにこの理論を適用し、伝播特性を含めた水面変動の表示法について考察する。

2. 海岸波浪の波形の表示

各波峰が重なり合っていないうねり性の海岸波浪を対象とすれば、平均海面を基準面とした波形の表示は、ソリトンの連なりとして次式のようになる。

$$\eta = \sum_{i=1}^N A_i \operatorname{sech}^2 g_i - \eta_0 \dots \dots \dots (1)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} g_i &= \sqrt{3A_i/4} (x/h - c_i t \sqrt{g/h} + \delta_i), \\ c_i &= 1 + A_i/2 - 3\eta_0/2, \\ \eta_0 &= -(2/T^*) \sqrt{A_i/3} \tanh g_i|_0^* \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (2)$$

であり、 δ_i ：各ソリトンの波峰の座標、 h ：平均水深、 T^* ：無次元観測時間、 N ：観測波中のソリトンの個数、 A_i ：ソリトンの固有値、および g ：重力の加速度である。対象とする波の波峰間隔が十分に大きく、相互干渉が無視できる場合には、式 (1) は K-dV 方程式の解となる。

これから、 δ_i はスペクトル解析法における周波数に相当するものであるが、空間的には保存されず、波の特性とは無関係のパラメータである。したがって、固有値 A_i と観測波全体の統計的特性を反映する η_0 のみがソリトンを支配する不変量となるが、より根本的には A_i のみが海岸波浪の特性を支配しているはずである。

また、式 (1) は水面変動の連続性を満足し、観測波全体の平均海面は静水面に一致しているが、成分波であるソリトンは波谷面を基準面とするため、ソリトンスペクトル理論においては波谷面が重要となる。いま、一定の波谷面が存在して、ソリトンが伝播するものとすれば、ソリトンの波高の変化に応じて、見掛け上平均海面は昇降することになる。そして、ソリトンとして輸送されてきた水塊によっても 'set up' が生じるが、これによるも

* 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

**** 学生会員 岐阜大学大学院工学研究科

どり流れとソリトンによる質量輸送の間に成立する質量の連続性によって、平均海面が維持されることになる。これに対して、海岸波浪の力学的な基準面と考えられる波谷面には、質量の連続性によって必然的に変動が生じ、海岸波浪のソリトンスpekトルの固有値の統計的特性に依存するため、波谷面の一義的決定は困難である。したがって、ここでは、波谷面の位置は統計量として扱うことにする。

3. 波浪観測の概要

ここでは、ソリトンスpekトル理論の適用性を確かめるために行った波浪観測の概要とその結果の整理法について述べる。

(1) 波浪観測の方法

海岸波浪の観測データは、京都大学防災研究所附属大潟波浪観測所の波浪観測システム(4台の超音波式波高計よりなるラインアレイ、12台の容量式波高計群、観測データ収録用14chデータレコーダー、マイコン、および砕波観測用ビデオ)を用いて得られたものである。図-1は、これらの波高計群の観測機橋(帝国石油KK所有)上の設置位置、波高計番号および水深を示す。

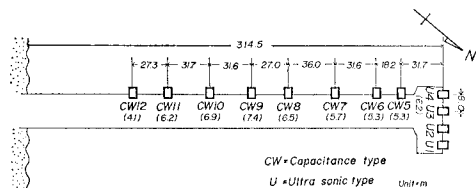


図-1 波高計の設置点と番号(カッコ内の数字は水深)

(2) 観測結果の整理法

観測データは、0.16 secのサンプリング間隔でA/D変換された後、データ番号(DNO)を付して大型計算機センターのデータセットに収納され、各種解析に応じられるようにしてある。ここでは、1981年3月7日および8日に観測されたDNO 7および8のデータに加えて、3月15日から17日にわたって観測されたDNO 27, 31および34のデータを用いることにした。図-2は、後者の観測期間における風速および風向変化とデータ番号との対応を示す。DNO 7および8はいずれもうねり性

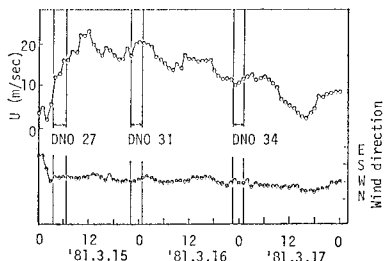


図-2 観測時の風速および風向

の long-crested waves であり、機橋に対する入射角はほとんどゼロであった。DNO 27 は、図-2 から推察されるように、発達期の short-crested waves であり、機橋に対する入射角も W 方向に約 29° 傾いていた。DNO 31 および 34 は、それぞれ最盛期および減衰期の波であり、その入射角はいずれもほとんどゼロであった。また、ビデオモニターによる機橋先端付近での砕波率は、DNO 7, 8, 27, 31 および 34 においてそれぞれ 0%, 0%, 30%, 100% および 60% であった。なお、DNO 27 の砕波率が高くなっているのは、風の影響であると考えられる。

直交化法によって実測波形から固有値を決定するには、各波峯に対する正確な波谷面の決定が必須となるが、前述したように、波谷面は時空間的に変動しているものと考えられ、その表示は時空間関数に依らねばならない。しかし、海岸波浪の伝播のように時空間において連続的に現象を取扱う場合には困難であるため、平均海面と同様に、観測データに対して一定値とする方が望ましい。したがって、まず観測データから長周期波などの影響を除去するため、対象とする波の10分間記録からパワースpekトルを求め、これより観測データに含まれている長周期波のパワーを推定し、最適な cut frequency を定め、これによる high-pass filter 処理を行い、この処理波形を対象とする実測波形とした。ついで、これから平均海面を決定して基準面とし、平均海面下の波谷点の頻度分布を調べ、これより波谷点の代表値を決定し、波谷面はこの代表値によって代表されるものとした。代表値の決定法としては種々考えられるが、各波谷面に対して波形の表示精度を比較検討した結果、有義波の考え方に対応した $1/3$ 最大波谷点に波谷面を設定した場合に、式(1)の観測波全体に対する表示精度が最良になることを見出したので、以下ではこの方法を採用し、各10分間観測データごとに一定値として与えられる平均海面と波谷面との差を決定した。

4. 海岸波浪の力学的構造とそのソリトンスpekトル表示

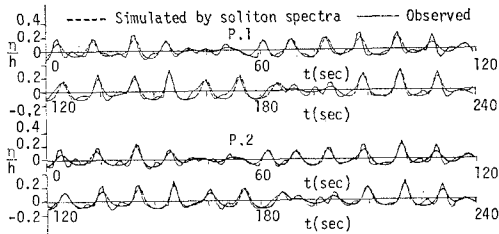
ここでは、前述の観測によって得られた海岸波浪の観測データにソリトンスpekトル理論を適用し、伝播を含めた波形の表示に関して、この理論が十分な適用性を持つことを示し、この立場から、海岸波浪がソリトン構造を持つことを明らかにする。さらに、発達期から減衰期までの広範囲の条件下における海岸波浪に対してこの理論を適用し、その適用性を考察する。

(1) 海岸波浪の力学的構造

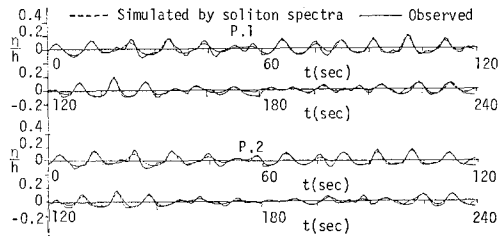
ソリトンスpekトル理論の伝播特性を含めた適用性を検証するため、伝播過程において砕波や相互干渉の影響を受けていないと考えられた水深 5.7 m 地点に 8.75

m 間隔で設置された 2 台の容量式波高計によるデータ (DNO 7 および 8) を用いる。

図-3 には, 8.75m の間隔にある測点 1 (P. 1) および 2 (P. 2) における DNO 7 および 8 の実測波形と式 (1) によるソリトン合成波形との比較を, また 図-4 には, 測点 1 でのソリトン合成波を測点 2 までソリ

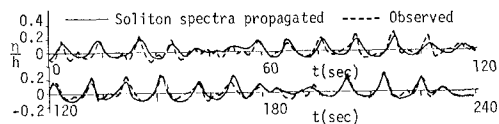


(a) DNO 7

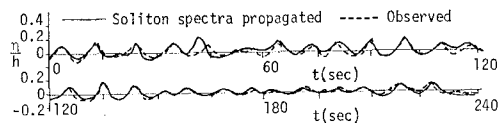


(b) DNO 8

図-3 実測波形とソリトン合成波形との比較



(a) DNO 7



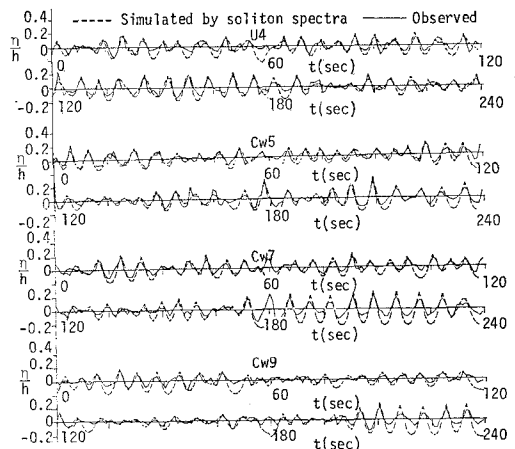
(b) DNO 8

図-4 測点 2 での伝播波形と実測波形との比較

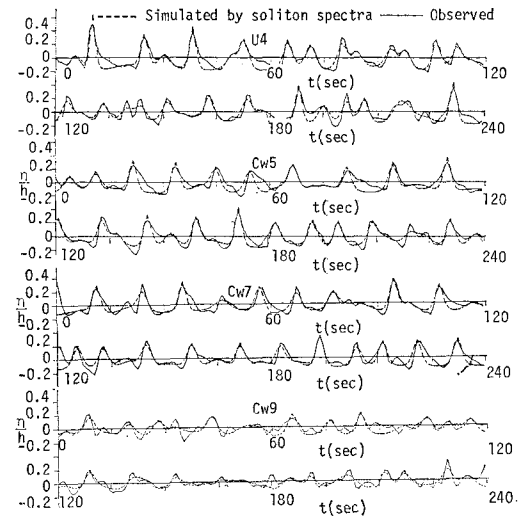
ンとして伝播させて実測波形と比較したものを示す。波形の主要部分についてのソリトンスペクトル理論の表示精度は極めて良好であり, この理論が少なくとも海岸波浪の波形の表示法としても実用上の意義を持つといっ

てよいであろう。伝播については, 測点間隔が狭く, 各波峰間の伝播速度の相違の影響が現れ難いという問題はあるが, 実測波形と伝播波形との対応は良好であり, 各波峰はソリトンとして伝播していると考えて不都合は認められない。

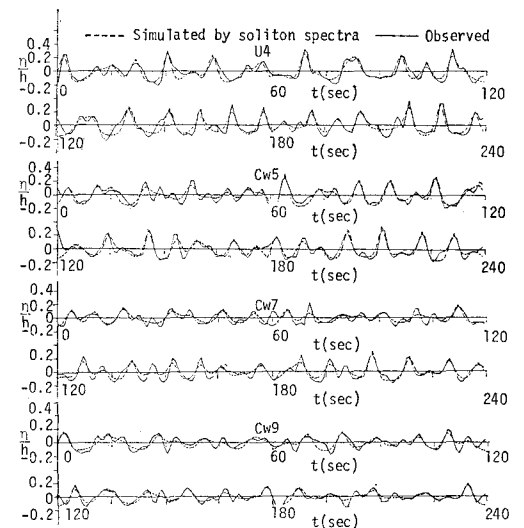
以上の結果は, ソリトンスペクトル理論が海岸波浪の波形の表示および伝播に関して優れた適用性を持つことを示すものであり, 言いかえれば海岸波浪はソリトン構造を持つという著者らの仮説がある程度裏付けられたよ



(a) DNO 27



(b) DNO 31



(c) DNO 34

図-5 発達期から減衰期にわたる海岸波浪の実測波形とソリトン合成波形との比較

うに思われる。

(2) ソリトンスpekトル理論による海岸波浪の表示とその適用領域

さらに広範な海象条件下にある海岸波浪への適用性を検証するため、発達期、最盛期および減衰期の海岸波浪の観測データである DNO 27, 31 および 34 に対して同様な解析を試みる。

図-5 は、DNO 27, 31 および 34 の海岸波浪の測点 U4, CW5, CW7 および CW9 での実測波形とソリトン合成波形との比較である。これから、発達期から減衰期にわたる海岸波浪の主要部分について、ソリトンスpekトル理論の波形の表示精度はかなり高く、波形表示においてこの理論が十分に実用性をもつことがわかる。言うまでもなく、岸側の測点になるに従って、伝播の過程で生じる砕波に伴って波が分裂するため、波峰間隔が狭くなり、隣接波の影響が増大してくるため、直交化法によるソリトン分解能は若干低下することになる。

図-6 は、測点 U4 でのソリトン合成波を 31.7 m 離

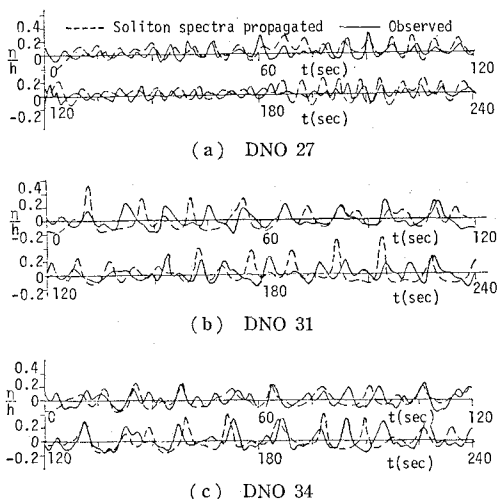


図-6 CW5 での実測波形と伝播波形との比較

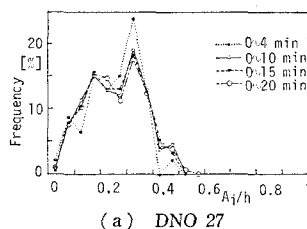
れた測点 CW5 までソリトンとして伝播させ、そこでの合成波と比較したものである。このうち DNO 27 の場合は、砕波率が 30% であるが、桟橋に対する入射角が 29° の short-crested waves であるため、当然のことながら両者の相違は著しい。DNO 31 では、桟橋に沿って伝播するうねりであり、その砕波率は約 100% であるため、砕波による波形の変化は著しく、この場合も両者の対応はよくない。これに対して、DNO 34 では、砕波率が 60% 程度の桟橋に沿って伝播するうねり性の long-crested waves であるため、上述の場合に比べれば両者の対応は良好である。しかし、部分的に位相が大きくずれている場合もあって、この場合の波浪の伝播現象へのソリトンスpekトル理論の適用性は必ずしも明らかでは

ない。

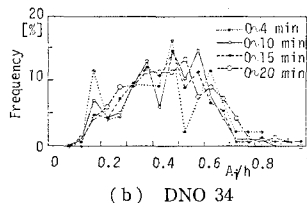
このように波形の表示に関しては、発達期から減衰期までの海岸波浪への適用性を明らかにしたが、前述した DNO 7 および 8 の場合と異なり、伝播現象をこの理論によって十分に説明することはできなかった。この理由としては、砕波による波の変形が考えられる。たとえば、うねりが卓越してきた DNO 34 では、DNO 31 に比べて伝播に関する表示精度が確実に改善されている。これらを波形の表示精度に関する結果と併せて考えれば、海岸波浪は極浅海域では基本的にはソリトン構造を持つと考えられるが、砕波などによってソリトンスpekトルの固有値の個数および絶対値が変化するため、砕波頻度の高い海岸波浪に対しては、固有値を不変量とするソリトンスpekトル理論の適用性が低下するものと考えられる。したがって、今後は、海岸波浪がソリトン構造を持つという基本的認識のうに、砕波などによる固有値の変化をも考慮した理論の展開が必要であろう。

(3) ソリトンスpekトルの分布特性

前述したように海岸波浪は基本的にはソリトン構造を



(a) DNO 27



(b) DNO 34

図-7 ソリトンスpekトル分布の収束状況

持つと考えられることから、その統計的特性はソリトンの固有値の頻度分布(ソリトンスpekトル分布)によって評価できよう。

図-7 には、DNO 27 および 34 の場合の U4 でのソリトンスpekトル分布の観測時間による変化を示す。これから、この場合の観測結果では、観測時間が 10

分以上になると、スペクトル分布はほぼ一定値に収束することがわかる。

図-8 には、各測点におけるソリトンスpekトル分布の比較を示す。このうち、DNO 27 では、U4 から CW5 までスペクトル分布がほぼ一定であるのに対し、DNO 31 では、測点 U4 での砕波率が 100% に達することもあって、U4 から CW5 までの相違は大きい。CW5 から CW9 まではほぼ一定の分布となっており、また、DNO 34 では、伝播波形が前述の 2 ケースに比べて比較的対応しており、U4 から CW5 において同様な傾向を保っている。

以上の結果から、砕波の影響がなければ、直交化法によって計算されるソリトンスpekトル分布は、空間的に

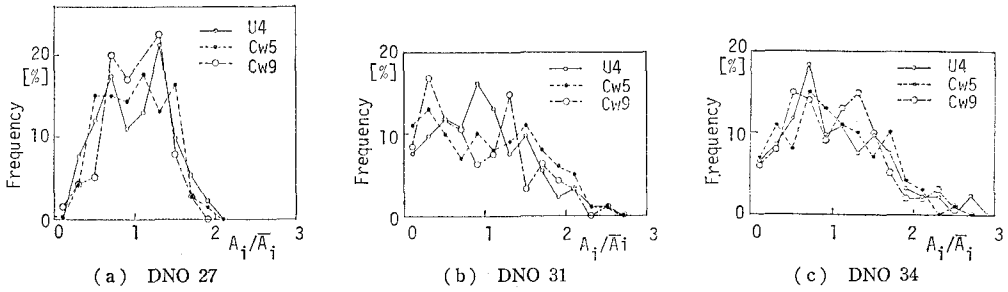


図-8 ソリトンスペクトル分布の空間的变化

よく保存されており、統計量として必須条件である保存性が高いといえる。

5. 結 語

浅海における海岸波浪はソリトン構造を持つという力学観から、広範な海象条件下における波浪観測データにソリトンスペクトル理論を適用し、この理論の波形の表示精度が極めて優れていることを述べた。さらに、砕波の影響が小さいうねり性の海岸波浪の伝播現象が、この理論によって十分説明され、その固有値の頻度分布を表すソリトンスペクトル分布の空間的保存性が高いことを見

い出し、砕波などによる固有値の変化がなければ、ソリトンスペクトル理論によって波浪の形状や伝播特性の表示が十分可能であることを示した。

なお、波浪観測に御協力いただいた白井亨助教授および内山清枝官に感謝するとともに、本研究は昭和 55, 56 年度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。

参 考 文 献

- 1) 土屋義人・安田孝志・武山保徳：相互干渉を無視した場合のソリトンスペクトルの理論，第 28 回海岸工学講演会論文集，1981，pp. 89～93.