

リーフ上の波浪観測データに基づく碎波減衰項の検討

津嘉山正光*・河野二夫**・仲座栄三***・宮里一郎****

1. はじめに

非線形波動方程式を用いて波の碎波変形を数値計算する場合、何らかの形で碎波現象をモデル化する必要が生じる。一般には、支配方程式の中にエネルギー消散項を付加することで、波の碎波現象が数値計算されている(例えば、間瀬ら, 1991; 佐藤ら, 1993)。碎波現象を運動量の拡散という形でモデル化する場合、後で説明するように、エネルギーの減衰は周波数(あるいは波数)の2乗に比例することとなる。一方、摩擦損失などと同じ形で碎波減衰項がモデル化される場合、周波数に関係なく減衰効果が生じることになる。碎波現象が、周期10秒程度の波の急激な変化で特徴づけられることから、それをエネルギー減衰の形でモデル化するならば、碎波モデルとしてはある周波数の範囲内で卓越した作用の仕方をするような形の関数形を取るものと想定される。

碎波帯内は、水深が非常に浅くなっているため波の非線形効果が著しく現れる場所である。ソリトン分裂などで見られるように、碎波帯内では波の非線形干渉によって来襲波のエネルギーは様々な成分波を作り出す。さらに、碎波帯内では水塊の飛び出しや突入に伴うリズミクな非ポテンシャル現象が、波の純粋な非線形干渉と全く異なるメカニズムで新たな成分波を作り出す可能性もある。

上述のようなことを考えると、碎波という現象を普通に行われているように、単にエネルギーの減衰という形でモデル化することに関しては、物理的に考えて問題が生じる場合もあることが予想される。

波高減衰率を、周波数の2乗に比例するとする KdV-Burgers 方程式タイプのもの、周波数に関係なく摩擦減衰的に水位変動の大きさに比例するものの和として考えると、波高変化の激しいところでの波高減衰は前者の形の減衰機構になることが期待される。一方、ステップ上を相当進んだ波の変形は後者の形での減衰機構を有するものと想定される。こうした波高減衰機構を調べる地

形条件としてリーフ海岸は理想的なものと言える。本研究では、リーフ上(一種のステップ海岸上)の波の変形を現地観測し、そのデータを基に、波の碎波現象で何が消散し、また新たに何が形成されるかを明らかにすることで、非線形波動方程式への碎波現象の取り込み方を探る。

2. リーフによる波の変形特性

図-1に、現地観測が行われたリーフ海岸の断面の概略を示す。海域がサンゴの生息域であるため、サンゴ礁の発達している所と未発達部とで水深の変化が著しい所もあり、海底断面の詳細は非常に複雑である(詳細は、津嘉山ら, 1995を参照)。ここでは、数値計算に利用しやすいように、各観測点の水深を直線で結んで示してある。測定には、水圧式波高計と電磁流速計を内蔵した波浪測定器8台を用いた。測定は20分間隔の20分連続で行い、データサンプリングレートは0.5秒とした。観測データは、台風9512号からのうねりと風波とが重合した状態のものである。以下の解析では、水位差が25cm未満となる満潮前後2時間内に観測された5個のデータセット(データセット名:M 091523~24)について検討する。

図-2に、各観測点で得られた水位変動の一例を示す。図-3に、波群化が顕著に見られる時間帯の来襲波の変形を示す。図中 St.1 及び 2 の波形については、波形を比較しやすいように、実際の値を1/2.5倍にして示してある。来襲波は、観測点 St.1-2 間で碎波し、リーフ上を伝播している。リーフ上には、高波群の来襲に伴い、水位の上昇で始まる長周期波の発生が認められる。

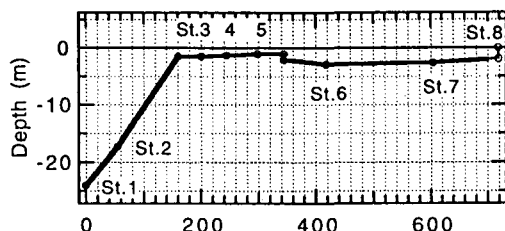


図-1 海底断面概略

* 正会員 工博 琉球大学教授 工学部環境建設工学科
 ** 正会員 工博 宮崎大学教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 工博 琉球大学助教授 工学部環境建設工学科
 **** 工修 (有) 海岸環境調査研究所

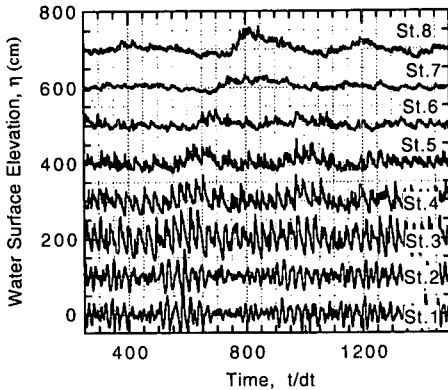


図-2 水位変動波形

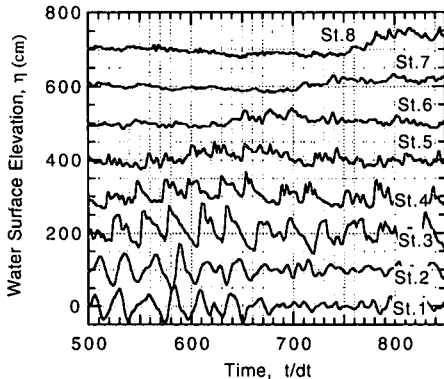


図-3 水位変動波形

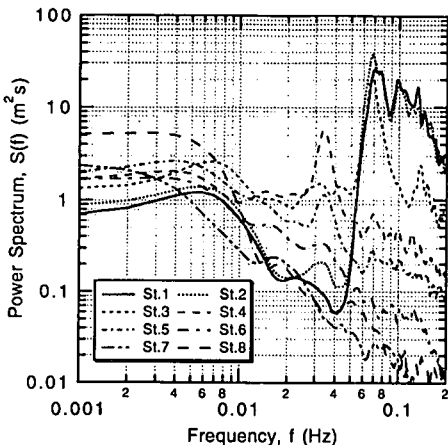


図-4 水位変動のパワースペクトル

図-4に、水位変動のパワースペクトルの変化を示す。ここで示すスペクトルは、5個のデータセットに関する平均値である。来襲波のスペクトルは、リーフ上を進行するにつれて、来襲波のピーク周波数(f_p)よりも高周波数側のパワーを減少させると共に、周波数が0.5 fp とな

る成分波及び、それよりもさらに低い周波数側の成分波のパワーを増大させている。周波数が0.5 fp 付近のパワー増大は非線形性による主成分波の追いつき合体现象として説明され、さらに低周波数側のパワー増大は、非線形拘束波の浅水変形や Symonds (1982) によって指摘された砕波帯内での長周期波の新たな発生を意味する。

3. 砕波現象のスペクトル解析

非線形波動方程式の提案によって、非線形不規則波の浅水変形は、砕波帯内を除いて非常に高い精度で計算できるようになってきている。間瀬ら (1991) は、KdV 方程式をフーリエ変換し、不規則波に含まれる成分波の複素振幅間の連結方程式を導くと共に、比較的深い所でも微小振幅波の分散関係式や浅水変形を満足させるようにした発見的な式の提案を行っている。さらに、砕波減衰項のモデル化も行っている (間瀬・木井, 1992)。間瀬らの砕波モデルでは、砕波減衰項を周波数の2乗に比例する項と全周波数領域で一定となる項とで表せるとしており、含まれる係数を Thornton・Guza (1983) らの個々波の砕波変形に関するモデルで同定している。

一般に、非線形不規則波の複素振幅の空間的な変化は次式で与えられる。

$$dA_n/dX = \text{浅水変形} + \text{分散変形} + \text{非線形干渉} + \text{砕波変形} \quad (1)$$

間瀬のモデルに従えば、式 (1) は次式で与えられる。

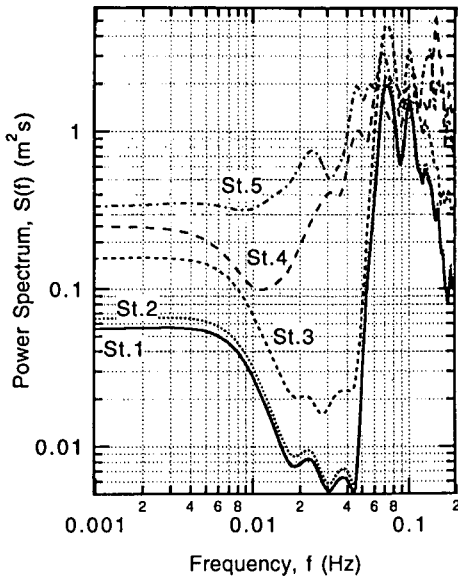
$$\begin{aligned} \frac{dA_n}{dx} + \frac{(C_{gn})_x}{2C_{gn}} A_n - ink_1 \left[\sqrt{\frac{nk_1 h}{\tanh nk_1 h}} - 1 \right] A_n \\ + \frac{3ink_1}{8h} \left[\sum_{l=1}^{n-1} A_l A_{n-l} + 2 \sum_{l=1}^{N-n} A_l^* A_{n+1-l} \right] \\ + a_n A_n = 0 \quad (2a) \end{aligned}$$

$$a_n = a_0 + \left(\frac{f_n}{f} \right)^2 a_1 \quad (2b)$$

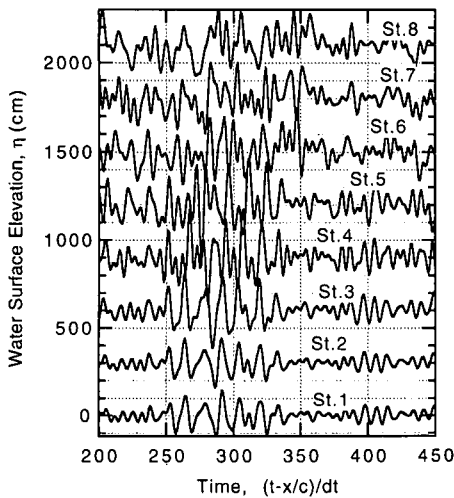
ここで、 A_n は成分波の複素振幅である。式 (2) に含まれる記号説明は、間瀬・木井 (1992) を参照して頂きたい。

ここでの非線形性は2次のオーダーであり、砕波帯内の非線形性を議論するには次数が低すぎると考えられるが、現時点で、数値計算の実用性を考えると空間分解能との関係上、2次のオーダーでの議論にならざるを得ない。その結果、より高次の非線形性の影響は全て砕波減衰の影響として現れることになる。

ここで、非線形性の作用について検討してみることにする。図-5(a), (b) は、観測点 St. 1 で得られた水位変動のスペクトルを基に、リーフ上の波の変形を砕波減衰項を含まない間瀬モデルで計算した結果である。来襲波のスペクトルは、岸に近づくにつれて、浅水変形及び非線形干渉によって高周波数側のエネルギーが増大し、さ



(a) パワースペクトル



(b) 水位変動

図-5 砕波減衰のない場合の計算結果

らに波浪成分に拘束される低周波数側のエネルギーが非常に高くなっている。高周波数側のスペクトル増大は、リーフ上の波が無数のソリトン分裂を起こしていることを示している。また、来襲波のピーク周波数の約半分程度の周波数に対応する成分波のエネルギーがリーフ上でかなり高くなっているのは、先に述べた波の追いつき合体作用を非線形干渉効果で説明したものと言える。

周期が100秒以上の長周期波のエネルギー増大は、例えば、Hamada (1965) が与えた多方向不規則波の二次波に対する核関数が浅水変形に対して非常に敏感であることを考えれば説明されることである。図-6 に、Hamada

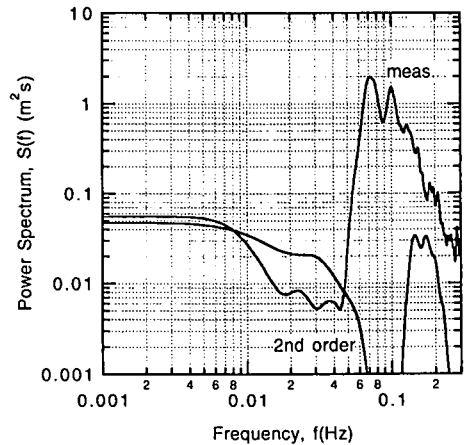


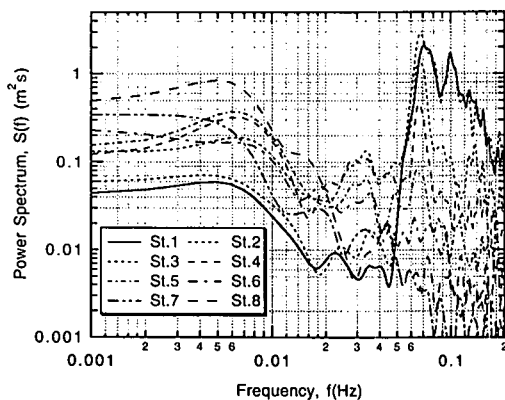
図-6 二次波のパワースペクトルの推定値

の手法で求めた二次波のパワースペクトルを示す。長周期波に対する実測値のスペクトルと計算値とはほぼ一致しており、低周波数側の成分波は拘束波として存在しているものと判断される。

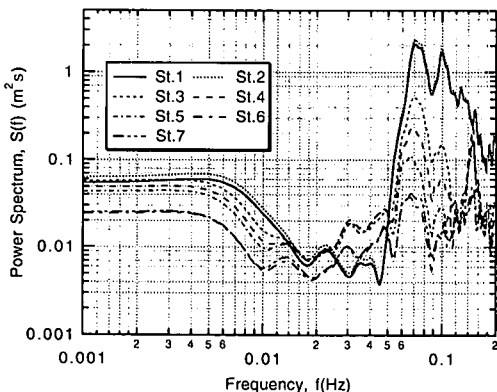
図-7(a), (b) に間瀬モデルを用いて数値計算したスペクトルと実測値を示す。この計算では、砕波モデルの係数に関しては、間瀬が推奨しているものを用い、 $F=0.5$ としている。すなわち、減衰作用として、周波数の2乗に比例するものと周波数に依存しないものとを等しくおいている。図-7(c) は、水位変動波形に関する実測値と計算値との比較である。間瀬のモデルが波高分布を実測値に合わせるようなモデルとなっていることから、波形の大きさに関しては、両者はほぼ一致している。しかしながら、時間波形の詳細に関してはあまり一致していない。スペクトルの比較でも明らかなことであるが、計算値は波がリーフ上を伝播するにつれて長周期波側が極端に減衰した形となっている。これは、周波数に依存しない減衰項が例えば摩擦減衰的な作用として利きすぎていることを示している。

図-8 に、 $F=0.0$ として、減衰項が全て周波数の2乗に比例するような形で作用するとした場合のパワースペクトルを示す。また、実測値が、長周期波に対して汀線からの反射波を含むことを考慮すれば、低周波数側のスペクトル値はほぼ実測値と一致していると言える。しかしながら、今度は高周波数側で極端な減衰を生じている。

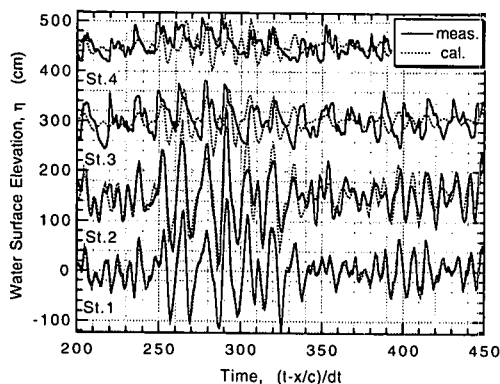
図-9 に、実測によって得られた各観測点間の複素振幅の変化量を示す。図(a) はスペクトル値の減少量を示し、図(b) はスペクトル値の増加(生成)量を示す。図示のとおり、砕波によるエネルギーの減衰域は、砕波が進行するに伴い (St. 1 から St. 6 に近づくにつれ) 高周波数側から低周波数側に広がっている。一方、長周期波については、砕波点付近で来襲波のピーク周期の2倍程



(a) パワースペクトル (実測値)



(b) パワースペクトル (計算値)

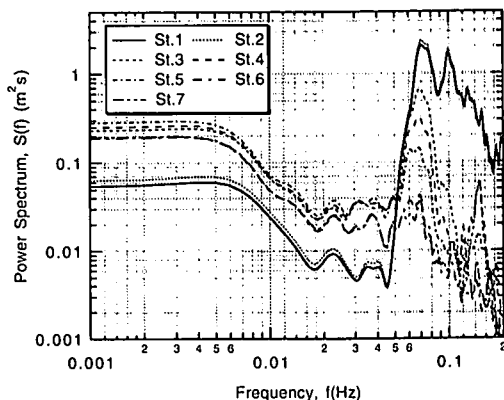


(c) 水表面波形

図-7 砕波を考慮した計算結果と実測値 ($F=0.5$)

度の波が急激に生成されている。また、汀線近くでは反射波による見かけ上のエネルギー増大が見られる。

観測点間の距離が長く、非線形効果の影響を差し引き砕波のみによるエネルギーの変化を取り出すことを行っていないため、この結果をそのまま上記の砕波モデルに反映させることはできない。図-7及び8に示す数値計算結果の問題点を考えると、始めに述べたように砕波減

図-8 パワースペクトルの計算値 ($F=0.0$)

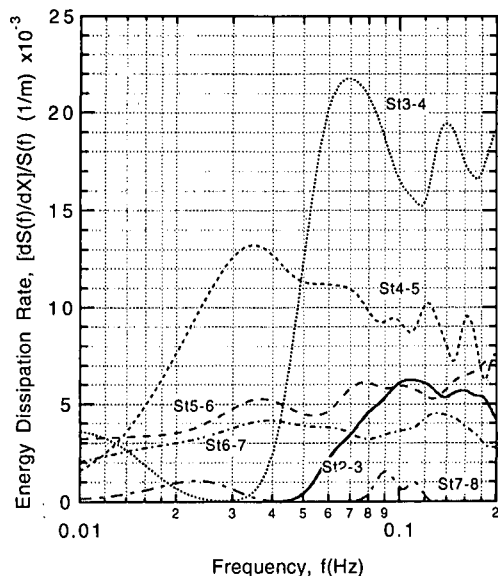
衰項の作用の仕方としては、波浪成分側の限られた周波数帯で卓越して作用するようなモデルでなければならぬことが分かる。

図-10は、現地海岸を想定して行ったモデル実験結果である(Plunging型砕波)。入射波(基本波)としては現地換算波にして波高11m、周期12.8秒相当の規則波を用いている(長さの縮尺は1/100)。ここで示したスペクトル値は、ある点から0.3m先までを予測した計算値(砕波減衰なし)と実測値との差である(いわば、砕波のみによるスペクトルの変化量を示す)。図示のとおり、成分波のスペクトルは砕波の進行に伴い周期的な変化を示しており、特に高次の変化が著しい。このスペクトルの変化は砕波に伴う水塊の突入及び飛び出しの場所的なリズムに丁度対応している。すなわち、砕波帯内では流体力学的な非線形干渉によって生じる成分波のエネルギーカスケードダウンのみでなく、水塊の飛び込みなどによる外的な擾乱の作用で高周波数側の波が生成されることを示している。このことが、KdV-Burgers方程式タイプのように、高周波数側のスペクトルを単に周波数の2乗に比例させて減衰させることを抑制しているものと考えられる。

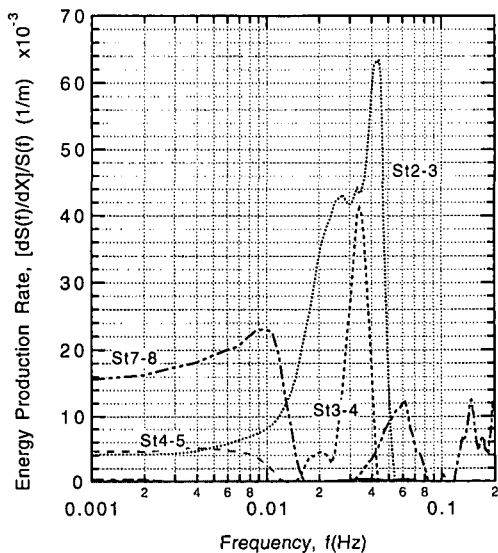
これまで述べてきたことは、水位変動に関してそのスペクトル値と波形そのものを合わせるというような観点から砕波現象を捉えており、いわば波高減衰モデルの構築とでも呼ぶべきものである。砕波を波というもののクライシスと見るならば、砕波とは波としての機能を失うことであり、砕波現象のモデル化としてはエネルギー減衰のみでなく、輸送水量の行方や戻り流れの形成も含めた形にする必要があろう。このことに関しては仲座ら(1996a, b)を参照して頂きたい。

4. おわりに

本研究では、現地観測データを基に、弱非線形モデル



(a) エネルギー減衰率



(b) エネルギー生成率

図9 エネルギーの減衰と生成 (実測値)

を対象とした数値波動解法における砕波のモデル化について検討した。その結果、一般に採用されているような運動量の拡散として作用する砕波減衰モデルでは、高周波数側のエネルギーロスを過大に与えることを示した。さらに、周波数に関係なく全周波数に亘って一定として砕波モデルを構築した場合、ステップ上を長い距離に亘って伝播する波に対しては、長周期波側で相当なエネ

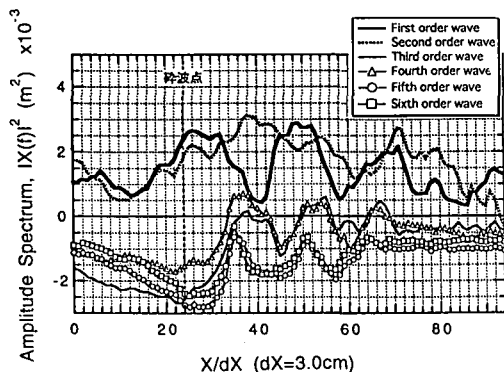


図10 砕波による1次から6次までの成分波の振幅の変化 (実験値)

ルギーロスを与えることなどを示した。現地観測や室内実験結果から、砕波減衰モデルとしては、主波浪成分を含む局所的な周波数帯でその作用が卓越するようなモデルでなければならないことが示された。しかしながら、波動方程式を周波数空間でなく、そのまま時間・空間上で直接数値計算するとき、そのようなモデルがどのような形として表現できるかなどは今後の課題である。

謝辞：本研究の一部は、沖縄県農林水産部漁港課が(財)漁港漁村建設技術研究所を得て琉球大学が行った受託研究(リーフ上の波浪観測)及び科学研究費(一般研究c, 研究代表者：津嘉山正光)の援助を受けている。また、現地データの整理に関しては、海岸環境調査研究所の大城真一研究員の協力を得た。ここに記し感謝の意を表します。

参考文献

- 津嘉山正光・河野二夫・仲座栄三・大城真一・福田孝晴 (1995): リーフ上の波の変形に関する研究, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 176-180.
- 佐藤慎司・M. Kabiling (1993): Boussinesq 方程式を用いた規則波・海浜流・海浜変形の数値計算, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 386-390.
- 仲座栄三・津嘉山正光・浜元朝一郎・日野幹雄 (1996a): サーフビートの発生メカニズムに関する研究, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 171-175.
- 仲座栄三・津嘉山正光・宮里一郎・榎本真久・川満康智 (1996b): 巻き波型砕波に伴う組織的乱流構造に関する研究, 琉球大学工学部紀要, 第52号, 投稿中.
- 間瀬 肇・J. T. Kirby・栗林賢一 (1991): 不規則波浪のハイブリット型浅水変形に伴うスペクトル変化に関する研究, 京大防災研究所年報, 第34号 B-2, pp. 1-13.
- 間瀬 肇・木井敦夫 (1992): 不規則波浪の浅水・砕波変形計算モデル, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 111-115.