海岸工学論文集，第 49 巻（2002）
土木学会，156-160

浅海域における多方向不規則波の砕波限界に関する研究

熊　亜希子*・佐藤慎司**・磯部雅彦***

多方向不規則波の砕波特性を室内実験および現地計測データに基づいて解析した．平面水槽における実験では，多方向不規則波の砕波を砕波の第 1 開始点，第 2 開始点などに分類し，合計 151 個の砕波データを取得した．砕波条件を合田の砕波指標と比較したところ，波群中で波高が相対的に大きい波ほど砕けやすいことが明らかになったため，無次元水深 $h/H_{1/3}$ を用いた砕波指標を提案し，現地波浪データと比較した．また，砕波指標に対するデータのばらつきは，相対水深が小さな領域においては後続の谷の影響や砕波開始時の多方向性の大小の影響が主要因であり，相対水深が大きな領域においては，砕波直前の波形のばらつきとの関係が示唆された．

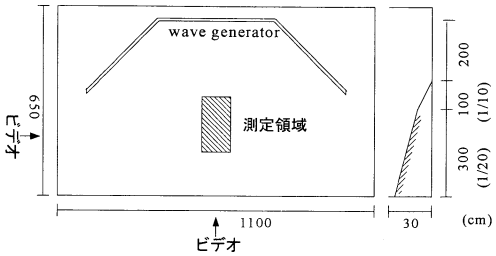
1. はじめに

浅海域における砕波限界については合田（1970）の規則波の砕波指標が広く用いられている．しかし現実の海の波は，多方向へ進行する無数の成分波で構成される多方向不規則波浪場であり，その砕波については，これを模擬する実験装置が少なく，また現地観測は極めて困難であることから，研究がほとんどなされていなかった．多方向不規則波の個々波の砕波特性については，不規則性，多方向性など複雑な要因を考慮しなければならず，砕波の機構については不明な点が多い（大橋ら，2000）．

本研究では，多方向不規則波の個々波の砕波条件を調べ，その特性を明らかにすることを目的とする．まず，幅広い実験条件で室内実験を行い，規則波および一方向不規則波と多方向不規則波の実験データを比較するとともに砕波指標を提案する．また，現地の波浪データを解析し，砕波点近傍の変形特性を解明するとともに，室内実験で明らかになった砕波特性との比較・検討を行う．

2. 実験の方法と条件

実験には，**図—1** に示した幅 11 m，奥行き 6.5 m，深さ 30 cm の平面水槽を用いた．岸側から 3 m までは 1/20 勾配，これに続き 1 m が 1/10 勾配となっている．一様水深部の水深は，実験ケースによって 21.8 cm～23.0 cm の範囲とした．容量式波高計を水槽の沿岸方向に 1～5 本設置し，サンプリング周波数 50 Hz で波形の記録を行った．岸側からスポットライトで光を照射し，砕波した瞬間に波面が白く光る現象を利用して砕波の判定を行った．また，波の様子は，水槽の側面，岸側正面に設置されたビデオカメラ 2 台で記録した．側面のビデオカメラは，測定地点の周囲の様子がわかるように広い範囲を撮影した．波形データとビデオは，ブザー音を利用して同期させた．



図—1　実験装置

表—1　一方向不規則波の実験条件

ケース	H_{max} (cm)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)	波の数
1	6.17	0.83	4.07	51
2	6.23	0.70	4.14	100

表—2　多方向不規則波の実験条件

ケース	H_{max} (cm)	$T_{1/3}$ (s)	$H_{1/3}$ (cm)	波の数
1	6.50	0.82	4.55	105
2	6.06	0.87	3.92	198
3	6.02	1.28	3.77	136
4	5.65	0.89	3.74	196
5	6.60	0.68	3.90	240
6	3.83	1.81	2.36	60
7	3.99	0.85	2.33	107

計測時間は，砕波率が低い領域における測定では，約 5 分 20 秒間，それ以外は約 2 分 40 秒間である．実験条件を，**表—1**，**2** に示す．最大波高 H_{max}，有義波高 $H_{1/3}$，有義波周期 $T_{1/3}$ については造波板から 70 cm 岸側の一様水深部で測定した値，波の数はゼロダウンクロス法で定義した個々波の総数である．平均波向きを汀線に直角，方向集中度 S_{max} の値を 25 とし，規則波を含めて全 12 ケースの実験で合計 141 個の砕波データを得た．

多方向不規則波の砕波は，波峰線が沿岸方向に対し平面的に凹凸を持ち，また沿岸方向の鉛直断面で切ると波高も凹凸を持っているのが特徴である．このふくらみが大きいと，波は波頂部から砕け始め，波峰にそって徐々

*　修(工)　(前)東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
** 正会員　工博　東京大学教授　大学院工学系研究科社会基盤工学専攻
*** フェロー　工博　東京大学教授　大学院新領域創成科学研究科環境学専攻

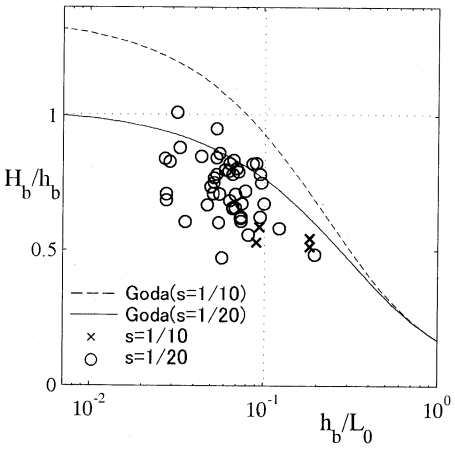
に砕波が左右沿岸方向に伝播していく様にみえる．このように時間差をおいて波峰線上の各点でおこる砕波は，その砕波限界が波峰線上の各点で異なる可能性があるが，その詳細は明らかにされていない．そこで，一つの波峰線上で最初に砕け始める点を砕波の第1開始点，既に第1開始点から砕け始めた波があらたに砕け始める点を砕波の第2開始点と定義し，両者を区別して砕波特性を調べた．対象とした砕波は完全砕波であり，波形の本格的な崩壊に至らない部分砕波は対象としていない．

3. 多方向不規則波の砕波指標

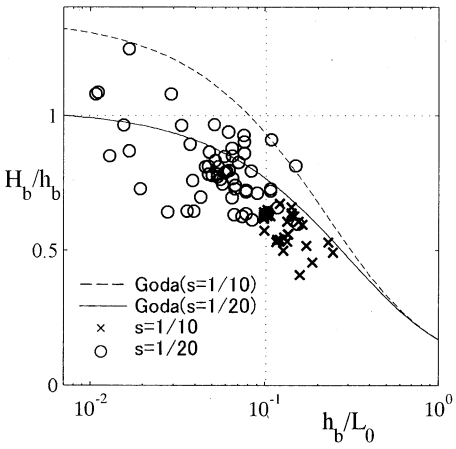
(1) 合田の砕波指標との比較

砕波の第1開始点について，横軸に相対水深，縦軸に相対波高をとり合田の規則波の砕波指標と比較した．個々波の定義はゼロダウンクロス法によっている．一般的な定義の水深に対する砕波特性を検討するため，木村・瀬山（1986）による水深補正は行っていない．一方向不規則波，多方向不規則波の整理結果が図—2, 3であり，図中の曲線は，合田の砕波指標の近似式である．砕波の第2開始点についても同様の整理を行ったところ，両者に有意な差は見られないことがわかった．すなわち，相対水深と相対波高をパラメタとして用いる限り，第2開始点も第1開始点と同程度の砕波限界を満たしていることが確かめられた．

一方向不規則波については，データのばらつきが大きく，全体的に指標に比べ砕けやすいという，従来不規則波の砕波特性とされている傾向が確認された．多方向不規則波については，相対水深の大きい領域では波の屈折が進まず多方向性が強いので，既往の研究（渡辺ら，1983）から推測すれば砕けにくい傾向が現れると予想されたが，実際には水深が大きい $s=1/10$ の領域では，指標に比べると非常に砕けやすいことがわかる．また，相対水深の小さい領域については，一方向不規則波よりさらにばらつきが大きくなっている．



図—2　規則波の指標との比較（一方向不規則波）

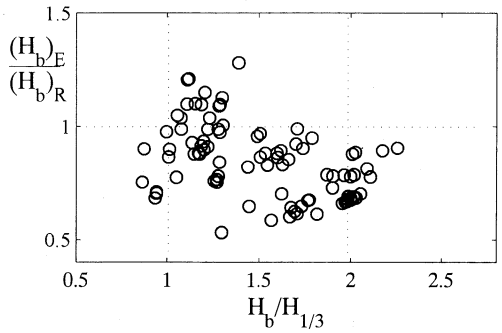


図—3　規則波の指標との比較（多方向不規則波）

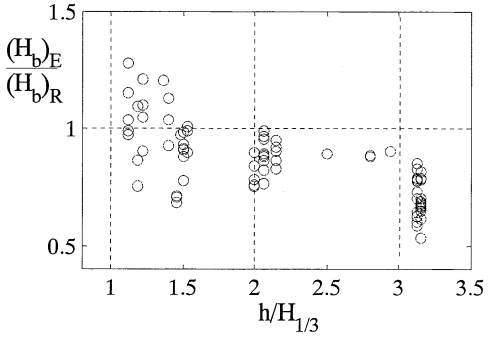
(2) 波群中の波の相対的大きさによる整理

図—3より，入射波群中の波の相対的大きさが大きい波，つまり沖側で砕ける波は非常に砕けやすいことがわかった．そこで，波群中の個々波の相対的大きさを表すパラメタを導入して砕波データの再整理を行った．個々波の大きさのパラメタとして砕波波高 H_b，波群の波の大きさを表すパラメタとして波群の有義波高 $H_{1/3}$ をとり，両者の比により個々波の相対的大きさを表すことにした．なお，$H_{1/3}$ の値は，測定点ごとの局所的な値である．多方向不規則波についての整理結果を図—4に示す．横軸に $H_b/H_{1/3}$，縦軸に実験データの砕波波高 $(H_b)_E$ と合田の指標による砕波波高 $(H_b)_R$ の比 $(H_b)_E/(H_b)_R$ をとっている．以後 $(H_b)_E/(H_b)_R$ を砕けやすさのパラメタと呼ぶ．

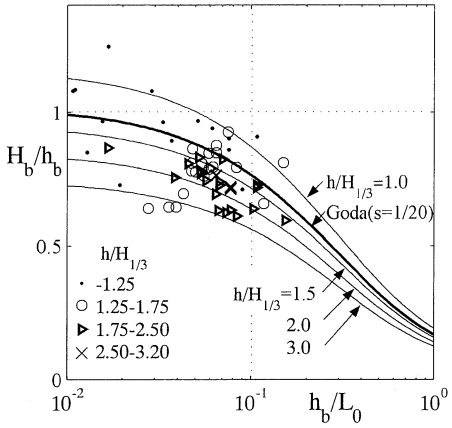
図—4を見ると，波群中で相対的に大きい波が砕けやすいことがわかる．この性質は，現地波浪に関して，堀田ら（1984）により指摘された特性と一致する．ただし，図—4からわかるように，$H_b/H_{1/3}$ が同じ値をとっても砕けやすさの値には大きなばらつきが残っている．

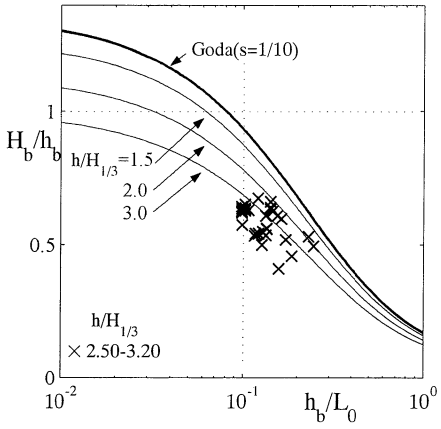


図—4　波群中の波の相対的大きさと砕けやすさ



図—5　無次元化した水深と砕けやすさ





図—6　修正砕波指標によるデータ整理

（3）　水深による整理

波群中大きい波は沖側で砕け，水深が小さくなると小さい波が砕けるようになる．そこで，水深をパラメタにとり砕けやすさを整理したのが図—5である．横軸は，無次元化した水深 $h/H_{1/3}$，縦軸は砕けやすさのパラメタ $(H_b)_E/(H_b)_R$ である．右下がりの傾向がみられ，大きい水深で砕波する波ほど砕けやすい傾向が表れている．図—4に比べるとデータのばらつきも小さいので，この $h/H_{1/3}$ をパラメタに用いて砕波指標を修正することにした．図—6は，図—5から得られる次式の回帰直線を用いて，多方向不規則波の砕波データを再整理したものである．

$$\frac{H_b^*}{H_b}=-0.13\left(\frac{h}{H_{1/3}}\right)+1.17 \quad \cdots\cdots(1)$$

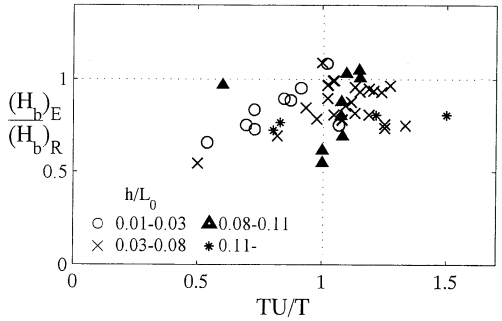
ここで，H_b^* は，修正後の砕波波高，H_b は合田の指標による砕波波高を表す．パラメタ $h/H_{1/3}$ を導入することにより，多方向不規則波の砕波限界の予測精度が向上していることがわかる．

4.　砕波現象のばらつき

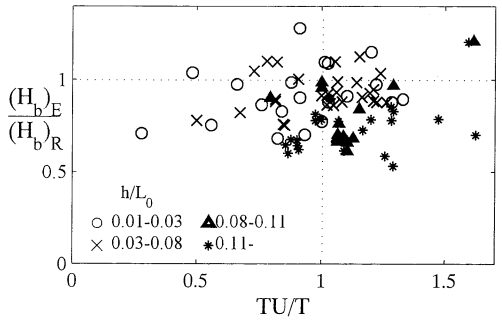
波群中における個々波の相対的な大きさを導入することにより，多方向不規則波の砕波特性を表現したが，図—6においてもデータのばらつきは残されている．相対水深の小さい領域におけるばらつきの要因としては，反射波，surf-beat，流れなどの重畳，屈折の影響などが指摘されている（佐藤ら，1988）．ここでは，相対水深の大きい領域でも顕著となる要因として，前後の谷の影響，砕波形式，砕波直前の波形を考え，それらが砕波特性に与える影響を調べた．

（1）　後続の谷の影響

図—7，8は，ゼロアップクロス法による周期 TU とゼロダウンクロス法による周期 T の比 TU/T と砕けやす



図—7　後続の谷の影響（一方向不規則波）



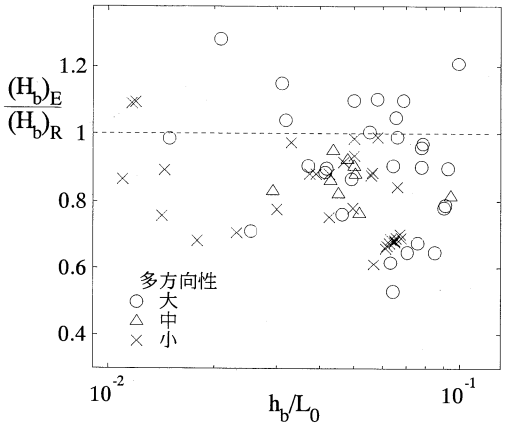
図—8　後続の谷の影響（多方向不規則波）

さの関係を相対水深別に表したものである．一方向不規則波の相対水深が小さいデータをみると，TU/T が小さいほど砕けやすい傾向がみられる．水口ら（1988）による二成分合成波を用いた実験でも，TU/T の値と砕けやすさを比べると，TU/T が小さいほど砕けにくくなる傾向が指摘されている．多方向不規則波の実験結果については，相対水深が最も小さい領域で同じ傾向がわずかに見えるものの，一方向不規則波に比べるとその傾向は極めて弱い．後続の谷の深さの影響を表す HU/H についても相対水深で整理したが，同様な傾向がみられた．すなわち，屈折により多方向性が小さくなる相対水深の小さな領域では，後続の谷の影響が顕著となる．これは，相対水深の小さな領域では，分散性が小さく個々波の独立性が高まることも関係していると考えられる．

（2） 砕波開始時の形態

次に，砕波形式および砕波開始時の形態の影響を検討した．砕波形式はほとんどの波が Plunging 砕波であったため，砕波形式の違いの影響は検討できなかった．砕波開始時の形態については，砕波が開始する時に波峰上の1点から砕波が始まる砕け方，波峰上複数個所で同時に砕波が始まる砕け方，およびそれらの中間的な砕け方，として多方向性の大きさによって三つの形態に分類した．

図—9 は，横軸に相対水深，縦軸に砕けやすさのパラメタをとり，砕波開始時の形態で分類したものである．相対水深が小さい領域で砕ける波については，多方向性が大きい方が砕けにくくなっている．これは，多方向性を有する波は砕けにくいという既往の研究で指摘されている傾向と一致する．一方相対水深が大きい領域で砕ける波についてみると，砕波開始時の形態による区別は不明瞭であり，多方向性が顕著な波でも砕けやすい波と砕けにくい波が混在している．

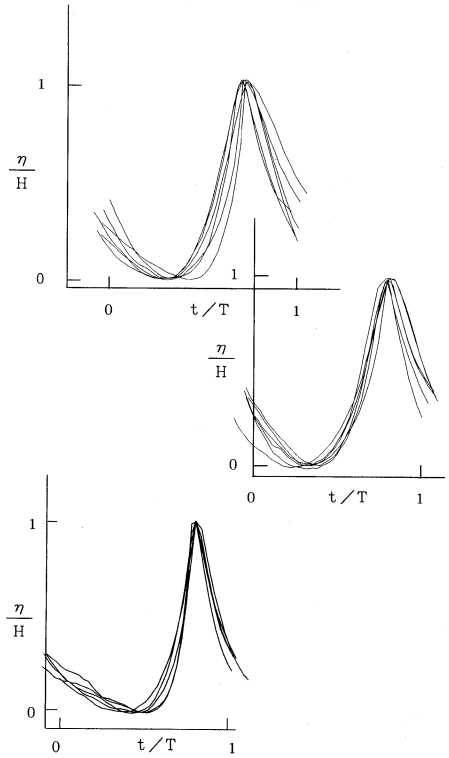


図—9　砕け始め方と砕けやすさ

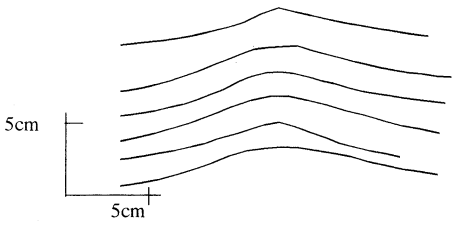
（3） 砕波直前の波形

図—10 は，実験ケース1，2，4の砕波データに対して，個々波の波形を正規化し，重ねたものである．データの取得水深は，ケース1では14.7 cm，ケース2では14.2 cm，ケース4では6.5 cmである．波群中最も大きいクラスの波の砕波である実験ケース1および2の砕波波形はばらつきが大きいのに対し，波群中の小さい波が砕けた実験ケース4の砕波波形はばらつきが小さい．

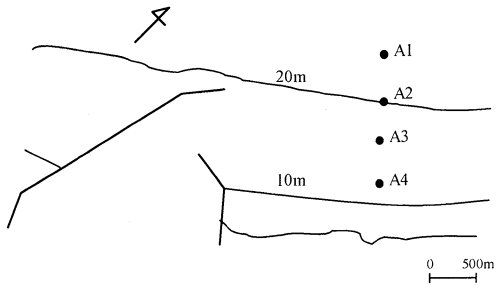
さらにケース2の波群中大きい波が砕波した時の波頂部の形を，微小振幅波理論の波速を用いて空間波形に変換して示したのが**図—11** である．砕けやすさのパラメタの値が小さいものほど下へ並べてある．同図より，砕けやすい波は波頂部の形が丸みを帯びた形のまま砕波する傾向があることがわかる．



図—10　正規化した波形（上からケース1，2，4）



図—11　波頂部の形状



図—12　現地の地形

このように砕波現象のばらつきに注目して砕波時の波形を検討した結果，波群中の小さい波の砕波では，後続の谷の影響，多方向性がばらつきの主要因となっており，波群中の大きい波の砕波については，波形のばらつきが大きな要因となっていることがわかった．

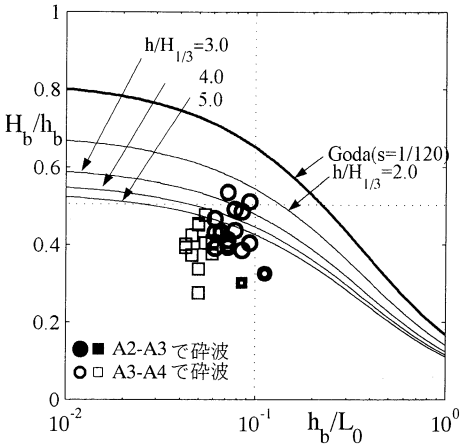
5.　現地データの解析

1999年1月18日から2月18日にかけて，新潟県直江津港内外で現地観測したデータ（中畑ら，2001）を分析した．現地の地形は**図—12**に示したように，等深線が汀線にほぼ平行な緩勾配斜面で，岸沖方向に並んでいるA1からA4まで4地点のデータを解析の対象とした．データは，各地点で水圧センサー付き超音波波高計で測定された水圧値，波高値で，サンプリング周波数は2 Hzである．期間中最大波浪が来襲した2月13日午前11時から1時間について解析した結果を述べる．

各地点でゼロダウンクロス法で抽出した個々波について，その伝播をA1からA4まで追跡し，隣接測定地点間の波高の変化から砕波/非砕波を判定した．すなわち，ひとつ岸側の測定地点より波高が減少しているものは，その間で砕波したものとみなし，また，気泡混入による超音波波高値の乱れが認められるものは，その地点で砕波としているものとした．室内実験結果から $h/H_{1/3}$ を用いて拡張した多方向不規則波の修正砕波判定図に，推定砕波データをプロットしたのが**図—13**である．各地点における有義波高値（および $h/H_{1/3}$ の値）は，A2で4.8 m (4.2)，A3で6.3 m (2.6)，A4で6.3 m (1.9) である．これをみると，室内実験結果と現地データの一致が概ね良好であることと，パラメタ $h/H_{1/3}$ が不規則波の砕波の特性を表すパラメタとして妥当であることが認められる．

6.　おわりに

本研究では，多方向不規則波の砕波特性を室内実験および現地計測データに基づいて解析し，以下の結論を得た．



図—13　現地データへの修正砕波指標の適用

（1）　多方向不規則波では，波群中で波高が相対的に大きい波ほど砕けやすい．その傾向は無次元水深 $h/H_{1/3}$ を用いて良好に表現できる．このパラメタは現地波浪についても，有効であることがわかった．

（2）　砕波の第1開始点と第2開始点とでは，砕波特性に有意な違いはみられない．

（3）　相対水深が小さな領域における砕波限界のばらつきは，後続の谷の影響や砕波開始時の多方向性の大小の影響が主要因である．相対水深が大きな領域における砕波限界のばらつきは，砕波直前の波形のばらつきと関係がある．

謝辞：本研究の実施にあたり，上越共同火力発電株式会社および五洋建設株式会社技術研究所から現地データを，鳥取大学の木村　晃教授には実験データを提供していただいた．関係各位に深く感謝します．

参　考　文　献

大橋弘明・有川太郎・磯部雅彦・渡辺　晃（2000）：多方向不規則波の砕波条件に関する研究，海岸工学論文集，第47巻，pp. 66-70.

木村　晃・瀬山　明（1986）：斜面上の不規則波の砕波限界について，第33回海岸工学講演会論文集，pp. 174-178.

合田良実（1970）：砕波指標の整理について，土木学会論文報告集，第180号，pp. 39-49.

佐藤愼司・尾崎元久・柴山知也（1988）：二成分合成波の砕波限界と長周期変動の相互関係に関する研究，第35回海岸工学講演会論文集，pp. 187-191.

中畑　禎・落合敏浩・柏原裕彦・花山格章・森屋陽一・関本恒浩（2001）：冬期日本海の現地観測に基づく浅海域への入射長周期波の評価，海岸工学論文集，第48巻，pp. 256-260.

堀田新太郎・磯部雅彦・泉宮尊司・遠沢真人（1984）：現地波浪の砕波限界，第31回海岸工学講演会論文集，pp. 44-48.

水口　優・渡辺武士・竹村要一・伊藤　満（1988）：斜面上の不規則波の砕波条件について，第35回海岸工学講演会論文集，p. 178-181.

渡辺　晃・原　　哲・堀川清司（1983）：重合した波浪場における砕波について，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 5-9.