

複合型碎波の碎波後の波形変化と波高減衰特性

安田孝志*・陸田秀実**・水谷夏樹***
大屋敦嗣***・多田彰秀****・福本 正****

1. 緒 言

人工リーフや潜堤などによる波浪制御・海岸保全工法は、碎波を利用して消波を図る点で原理的に優れ、多くの利点を有しているが、消波機能が必ずしも十分ではない点に問題を残している。このため、断面諸元の増大や堤体の透水化などによって消波機能の改善が図られ、要求される波浪減勢に応える工夫がなされたりしているが、十分に要求に応じているとは言えず、経済性や堤体の安定性に問題を残す結果となっている。

こうした問題を解消し、人工リーフ工法(潜堤を含む)を抜本的波浪制御・海岸保全工法に発展させていくには、この工法の原理的拠り所である碎波の消波機能を改善し、これをより積極的に活用していく必要がある。すなわち、単純に断面諸元を増大させるのではなく、断面の最適化によって要求される波浪減勢に応えられる碎波を発生させ、経験工学の枠を一步超えて流体力学的立場から波浪制御を進めて行く必要がある。しかしながら、これまで知られている碎波は一樣斜面で生じる崩れ波型や巻き波型碎波など(Galvin, 1968; Smithら, 1991)に限られ、人工リーフ工法の消波機能を格段に改善するものにはなっていない。

著者らはこうした要求に応えられる碎波を見い出すべく様々な検討を行い、その過程で最大規模の巻き波型碎波の3倍近い規模のジェットを放出させる全く新しい碎波(複合型碎波; 安田ら, 1995)を発見した。この碎波は従来型碎波では生じないような強大なジェットに特色があり、これをリーフや潜堤によって発生させれば著しいエネルギー逸散が進み、効果的な波浪制御が可能になるものと期待できる。

そこで本研究では、この新しく発見された複合型碎波による碎波後の波形や波高の変化について調べ、その波浪減衰特性を明らかにするとともに、複合型碎波の巻き込みジェットの突っ込みによる渦拡散によって著しい波高減衰が生じ、この碎波が波浪減勢に極めて有効である

ことを実証する。

2. 実験方法および条件

複合型碎波は、一樣斜面上にステップを設けることや、リーフ先端を階段状にしたりするなど底面形状を複断面化することによって生じるが、ここではリーフ先端を2段ステップにしたダブルリーフ上で複合型碎波を発生させ、その波形変化について調べる。

このため、西松建設(株)技術研究所の片面ガラス張り2次元波浪水槽(幅1m×高さ2m×長さ65m)内に43個の鋼製ユニット(幅1m×高さ0.13m×長さ0.50m)を図-1のように上下2段に並べてリーフ(最長12m)を設置した。下段ステップ位置は造波板から16mの位置に固定する一方、上段ステップ位置については適宜変化させた。

入射波は定常孤立波とし、これを造波するための信号を造波機に入力して期待通りの孤立波を発生させた。波形の計測は16台の容量式波高計を図-1に示す16測点に設置して行うとともに、高速度ビデオ(Nac製, 200コマ/秒)によって碎波限界前後の波形を撮影し、巻き込みジェットの形状やその変形過程の計測を行った。なお、入射波高および反射波の波高は下段ステップ前方6mの位置に固定された測点W01での波形により求めた。

実験では、ダブルリーフ上で複合型碎波を発生させる一方、上段および下段ステップの先端を揃えて1段ステップにしたシングルリーフ上においても従来型の碎波を発生させた。なお、種々の碎波形式による碎波後の波形や波高変化を調べるため、水深を31.0cmに固定した上で、入射波高 H_i を9.15cm~16.90cmと変化させるとともに、上下段ステップ間の間隔 X_1 を0.0cm(シングルリーフ)~250.0cmまで変化させ、実験条件を合計19ケースとした。また、各ケースについてBIM(境界積分法)

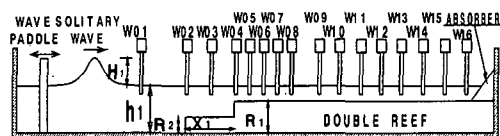


図-1 模型リーフの概略と波高計の位置

* 正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科
** 正会員 工修 岐阜大学助手 工学部土木工学科
*** 学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科
**** 正会員 工修 西松建設(株)技術研究所 技術部海洋技術課

(安田ら, 1991)による数値計算を併せて実施し, その計算波形よりジェット放出過程の波形変化やジェットサイズを求めた。

3. 砕波後の波形変化

複合型砕波の波形的特徴および砕波後の波形変化の特性を明らかにするため, 数値計算によるジェット放出過程の波形に加え, 水理実験によるジェット放出から突っ込み, さらに減衰過程の波形も示し, これらを基に波形変化特性について検討する。

3.1 砕波限界およびジェット落下限界時の計算波形

複合型砕波は砕波限界時の冠を戴いた波形によって特徴づけられるが, その本質は強大なジェットの生成にあるため, 砕波後の波形変化もジェットの規模に関連して検討する必要がある。そこで, ジェットサイズ指標 β_s (安

田ら, 1995)を用いてジェット落下限界時(ジェットの下面が水平になり, ジェットの落下が始まる瞬間)のジェットの規模を評価するため, 実験と同一条件の下でBIMによる計算を行い, ジェット落下限界までの波形変化を計算した。

図-2は代表的な2ケースについてジェット落下限界時の波形とこれにより求められる β_s の値を示したものである。

3.2 空間波形

写真-1は, ダブルリーフ上での複合型砕波のジェット放出直後から突っ込み, さらにこの突っ込みによって著しい渦や乱れが生成される状態までを示している。これから, 複合型砕波を特徴づけるジェット放出直後の特異な戴冠波形とともに, それによって生成されるジェットの突っ込みの様子や, その後の著しく攪乱されたポアフロントの様子がよくわかる。

図-3は, この時のビデオ画像により得られたジェット放出から突込み直前までの波形変化を示したものであり, これからも複合型砕波の特異な戴冠波形とともに, 波形に対するジェットサイズの大きさがよくわかる。

3.3 時間波形

波高計による時間波形では砕波形式による違いや乱れを伴ったポアフロントの様子が不明瞭などの問題はありますが, 波高の空間変化を調べるには有効である。

そこで, 入射波高 $H_1/h_1=0.42$ の孤立波をそれぞれ2種類のシングルリーフ(相対天端高 $R_1/h_1=0.43$ および 0.85) およびダブルリーフ(上段天端高 $R_1/h_1=0.85$, 下段天端高 $R_2/h_1=0.43$, ステップ間隔 $X_1/h_1=3.23$ および 8.06)に入射させた場合に加え, 後者のダブルリーフに $H_1/h_1=0.30$ および 0.55 の孤立波を入射させた場合の計6通りのケースについて, それぞれの時間波形 $\eta(t)$ の

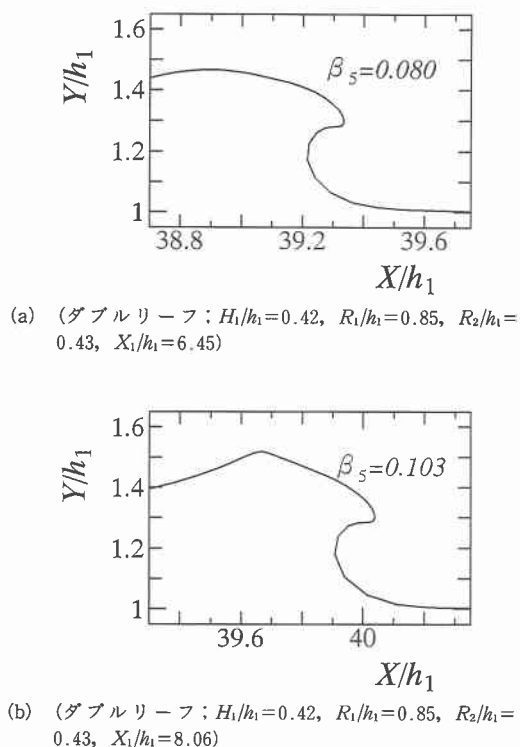


図-2 代表的な実験ケースのBIMによるジェット落下限界時の波形

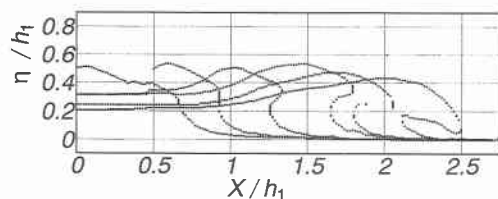


図-3 画像解析による複合型砕波のジェット放出過程

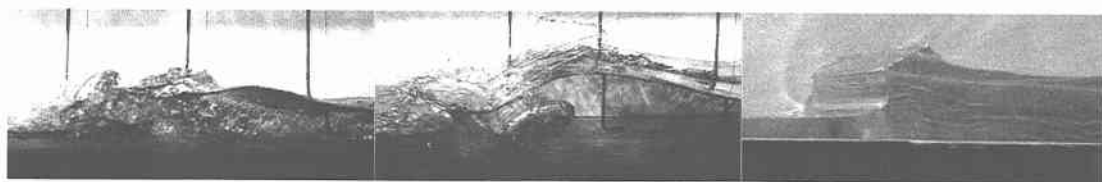


写真-1 複合型砕波の波形と突っ込み後の水面形状

空間変化を代表例として図-4に示す。図-4(a)の場合、リーフの天端高 R_1/h_1 が0.43と低く、崩れ波型碎波となるため、波高の低下も小さくソリトン列となって伝播して行く。これに対し、同じシングルリーフでも R_1/h_1 が0.85となると巻き波型碎波が発生し、ポアとして伝播することがわかる。ダブルリーフの場合では、入射波高 H_1/h_1 やステップ間隔 X_1/h_1 に関係なくいずれも碎波によって一気にポアとなって伝播して行き、波高減衰が伝播とともに進むことがわかる。換言すれば、波高減衰に若干の差異はあっても、時間波形に関する限りいずれもシングルリーフ上の巻き波型碎波と良く似た波形となっている。このため、時間波形では、複合型碎波を他の碎波に対して識別することはできず、巻き波型碎波と同類と扱われることになる。ただし、このことは碎波後の時間波形の変化が碎波形式に関係なく波高変化のみによって評価できることを示すものとして意味がある。

4. 碎波後の波高減衰特性

上述したように、時間波形に関する限り、波高が重要なパラメータとなるため、ここでは波高に着目して複合型碎波による減衰特性について考察する。

4.1 波高変化

同一の入射波高の下での碎波形式の違いによる碎波後の波高変化の差異を明らかにするため、入射波高 $H_1/h_1=0.30, 0.42$ および 0.55 の孤立波を2種類のシン

グリーフ ($R_1/h_1=0.43$ および 0.85)、およびダブルリーフ ($R_1/h_1=0.85, R_2/h_1=0.43, X_1/h_1=8.06$) にそれぞれ入射させ、その時の波高変化について調べる。この場合、リーフの条件によって反射率が異なるため、それぞれの碎波限界前の最大波高 H_{max} で碎波後の波高変化を規準化し、リーフ先端からの無次元距離 X_2/h_1 (ダブルリーフでは上段ステップ先端からの距離) との関係について比較した。図-5はその結果を示す。ソリトン列として安定化する崩れ波型碎波による波高減衰に比べ、ポアフロントを形成して進む巻き波および複合型碎波による波高減衰はこれを大きく上回り、両者の違いは際立っている。また、同様にポアフロントを形成しても、巻き波型碎波では $X_2/h_1 \approx 25.0$ 付近で波高減衰がほぼ止まってしまうのに対し、複合型碎波ではなお減衰が続き、ジェットの突っ込みによる乱れが巻き波型碎波によるものを上回っていることがわかる。これは、ダブルリーフの場合の X_2 がリーフ先端の下段ステップではなく上段ステップからの距離になっているため、シングルリーフの場合の X_2 に比べてリーフ上の伝播距離としては X_1 だけ短くなっていることにもよっている。

このようにダブルリーフ上では測点 W16 においてもなお減衰が進み、過渡の状態にあるが、そこでの波高を透過波高 H_T とし、これとリーフ上の最大波高 H_{max} との差を波高減衰高 ($H_{max}-H_T$)、これの H_{max} に対する比 ($1-H_T/H_{max}$) を減衰率と定義し、これに及ぼす碎波形式

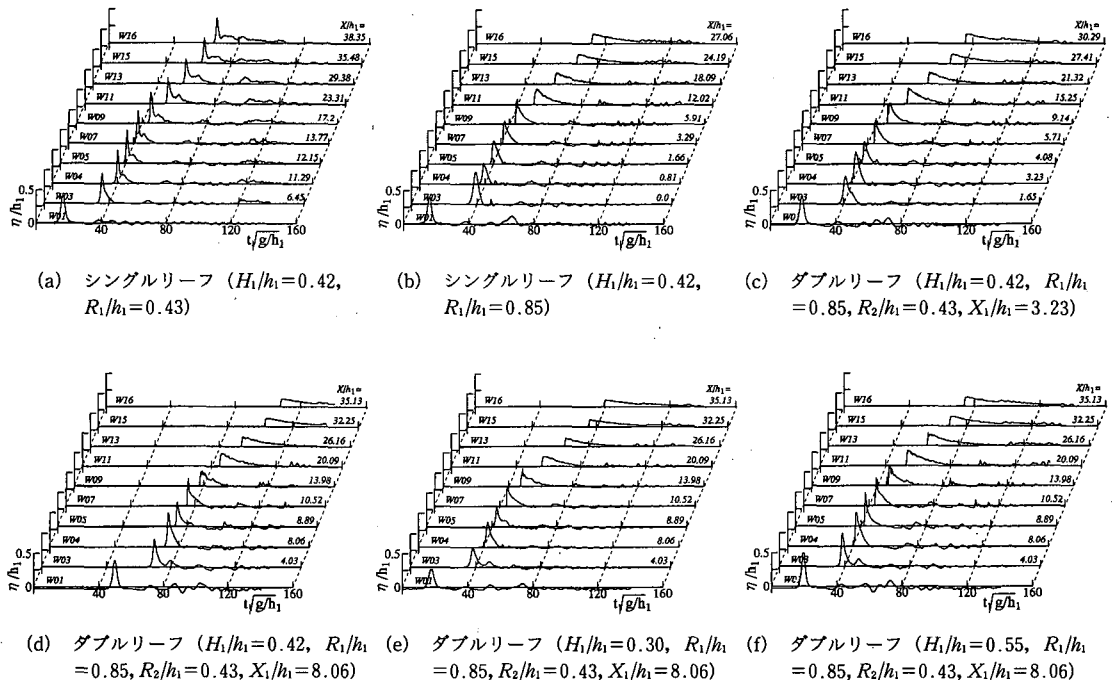


図-4 各測定点で測定された時間波形の比較：Xは下段リーフ先端からの各測定点までの距離

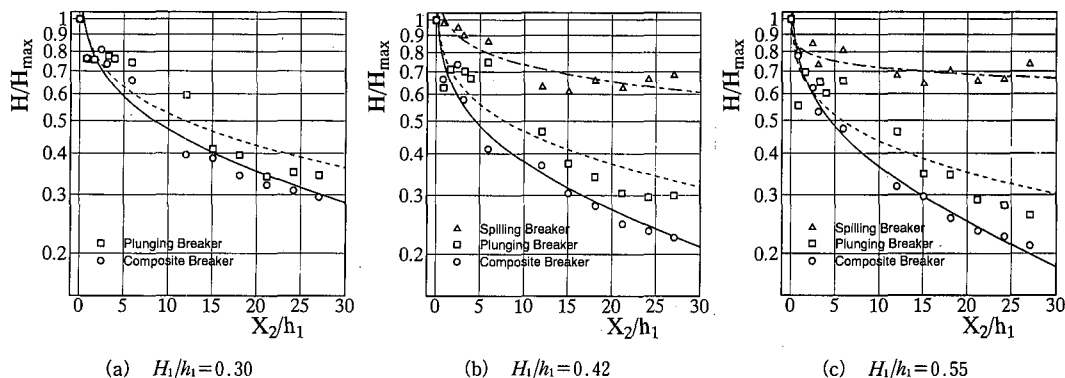


図-5 従来型碎波（崩れ波型および巻き波型）と複合型碎波の波高減衰特性の比較： X_2 はシングルリーフ（ $R_1/h_1=0.43$ および0.85）ではステップ法先から、ダブルリーフ（ $R_1/h_1=0.85$, $R_2/h_1=0.43$, $X_1/h_1=8.06$ ）では上段リーフ法先からの距離

の影響について検討する。このため、シングルリーフ（ $R_1/h_1=0.85$ ）上の巻き波型碎波とダブルリーフ（ $R_1/h_1=0.85$, $R_2/h_1=0.43$, $X_1/h_1=8.06$ ）上の複合型碎波による減衰率（ $1-H_T/H_{\max}$ ）との比較を行い、その結果を図-6に示す。同一のリーフ上では、減衰率は碎波形式によらず入射波高とともに増大するが、入射波高が $H_1/h_1=0.42$ の場合、巻き波型碎波に比べて減衰率が15%程度増大し、複合型碎波によって波高減衰がより短い碎波後の伝播距離で進んで行くことがわかる。

4.2 透過率および反射率

複合型碎波によって波高減衰が従来型碎波によるものに比べて各段に進むことが明らかとなった。これはそのジェットの規模から予想される期待通りの結果であるが、入射波高の透過率として捉えた場合については明らかになっていない。そこで、 X_2 が最長となる測点 W16での波高を透過波高 H_T とし、これの入射波高 H_1 に対する比として透過率 $K_T=H_T/H_1$ を定義する一方、測点 W01での反射波の波高 K_R の H_1 に対する比として反射率 $K_R=H_R/H_1$ を定義し、これらの碎波形式による差異について検討する。

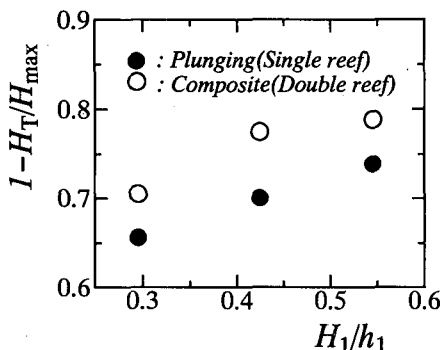


図-6 入射波高と減衰率の関係への碎波形式の影響

図-7は、入射波高 $H_1/h_1=0.30$, 0.42 および 0.55 の孤立波をシングルリーフ（ $R_1/h_1=0.85$ ）およびダブルリーフ（ $R_1/h_1=0.85$, $R_2/h_1=0.43$, $X_1/h_1=8.06$ ）にそれぞれ入射させたときの透過率 K_T および反射率 K_R を示したものであり、シングルリーフ上では巻き波型、ダブルリーフ上では複合型でそれぞれ碎波している。この場合、リーフ天板が塗装鋼板による滑面ということもあって共に透過率は若干大きくになっているが、シングルリーフに比べてダブルリーフでは透過率および反射率共に大きく減少していることがわかる。すなわち、シングルリーフの場合、 $H_1/h_1=0.42$ の入射波に対して反射率が0.31、透過率が0.37であるのに対し、それよりも断面の小さいダブルリーフでは反射率が0.20に減少するのは当然であるが、複合型碎波の発生によって透過率も0.28まで低下する。さらに、 $H_1/h_1=0.55$ の入射波に対しては透過率が0.24まで低下し、透過波の波高も高々 $H_T/h_1=0.13$ 程度に抑えられることがわかる。このように、同一の入射波およびリーフ天端高の条件下であっても、ステップを1段（シングルリーフ）ではなく、 $X_1/h_1=8.06$ 程度の間隔を持つ2段ステップ（ダブルリーフ）とすることによ

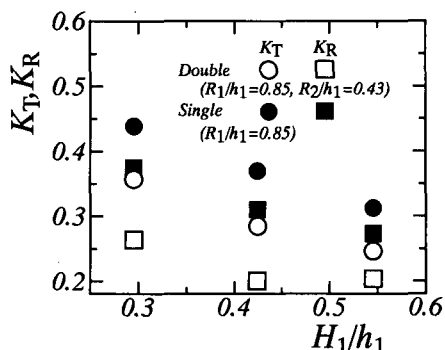
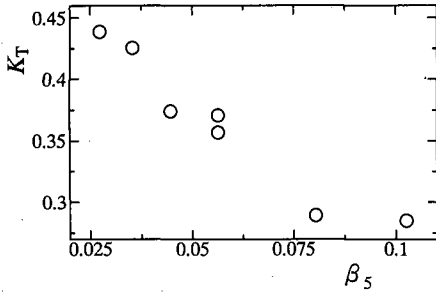
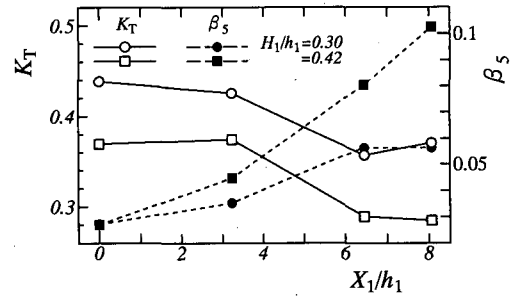


図-7 シングルリーフ（巻き波型碎波）とダブルリーフ（複合型碎波）の反射率 K_R および透過率 K_T の比較

図-8 ジェットサイズ指標 β_s と透過率 K_T の関係図-9 ステップ間隔 X_1/h_1 の透過率およびジェットサイズへの影響

て、反射率を低下させられるだけでなく、複合型碎波の発生によって透過率も減少させることができ、複合型碎波を発生させるダブルリーフが波浪減勢に優れていることがわかる。

こうした碎波形式による差異はジェットの突っ込みによって生じる乱れ強度に対応するものと考えられ、波高減衰特性から逆に碎波形式を規定するジェットサイズを評価することも可能となる。それ故、透過率 K_T と、上述のジェットサイズ指標 β_s との関係を調べれば、両者の間には一義的対応が成立するはずである。図-8 はその結果を示したものであり、ジェットサイズの増大とともに透過率が減少し、碎波による波高減衰がジェットサイズに支配されていることがわかる。この結果は、消波機構の改善にはより規模の大きいジェットを伴う碎波を発生させることが有効となることを示している。

4.3 ステップ間隔の影響

限定された条件下であるが、ダブルリーフによる複合型碎波の発生条件が既に明らかにされている(安田ら, 1995)。しかしながら、同じ複合型碎波であってもステップ間隔 X_1 に応じてジェットの大きさに違いが生じるため、それが透過率にも現われるものと予想される。

そこで、 X_1/h_1 と透過率 $K_T = H_T/H_1$ およびジェットサイズ指標 β_s との関係について調べ、その結果を入射波高 $H_1/h_1 = 0.30$ および 0.42 の場合について図-9 に示す。これから、ステップ間隔が増すに従ってジェットサイズが増大し、これに伴って透過率が低下することがわかる。ただし、 H_1/h_1 が 6 を超えるようになると、透過率の低下が見られなくなる。したがって、透過率を減少させるという観点から見れば、 $X_1/h_1 \approx 6$ がステップ間隔としては最適値と判断される。このことは、単純に天端の高いリーフを設置して断面諸元を増大させるよりも、まず下段ステップで入射波を不安定化させ、ついで $X_1/h_1 \approx 6.0$ 付近の上段ステップで複合型碎波を発生させる方が波浪減勢には有効であり、碎波に対する一歩進んだ理解が必要

でかつ有用なことを示している。

5. 結 語

2 段ステップを持つダブルリーフによって複合型碎波を発生させ、その碎波後の波形変化や波高減衰特性について実験的検討を行い、ジェットサイズの増大とともに波高減衰率も増加し、リーフの消波機能の改善にはより規模の大きいジェットを伴う碎波を発生させることが有効となることを見出した。そして、強大なジェットを伴う複合型碎波の発生によって強い乱れが生成され、顕著な波高減衰が進むことを明らかにした。また、複合型碎波による場合でも、碎波後の時間波形は巻き波型碎波によるものと変わらないが、波高減衰に顕著な差異が現われ、入射波高を $H_1/h_1 = 0.42$ 、リーフ天端高を $R_1/h_1 = 0.85$ とした場合、シングルリーフ上での巻き波型碎波によるものに比べ、反射率を約 35 % および透過率を約 25 % にそれぞれ低下させることができることを見出した。

このように、ダブルリーフ上で複合型碎波を発生させることによって、減衰率が増して透過率が大きく低下するだけでなく、反射率も同時に減少するため、このダブルリーフで複合型碎波を発生させることが波浪減勢に有用なことを実証することができた。

参 考 文 献

- Galvin, C. J. (1968): Breaker type classification on three laboratory beaches, J. Geophys. Res., Vol. 73, No. 12, pp. 3651-3659.
- Smith, R. and N. C. Kraus (1991): Laboratory study of wave-breaking over bars and artificial reefs, Proc. ASCE, WPCOE, Vol. 117, No. 4, pp. 307-324.
- 安田孝志・原 正典・榊原幸雄 (1991): BIM を用いたステップによる孤立波の碎波を伴う変形とその法則, 土木学会論文集, No. 429/II-15, pp. 87-96.
- 安田孝志・陸田秀実・水谷夏樹・大屋敦嗣・多田彰秀 (1995): 複合型碎波の発見とその発生条件, 海岸工学論文集, 第 42 巻.