

トラップ式ダブルリーフの消波機能 (1)

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

多様な機能を有している自然海浜の保全は、豊かな沿岸環境を維持・創出していく上での中心的課題である。このため、外洋に面した侵食海岸においては、反射率が低く消波効率の高い海浜保全工法が必要とされている。このような要請に対して開発された人工リーフ工法は、多くの利点を有しているものの、離岸堤などに代わって海浜の保全を本格的に進めていく上で消波機能の改善がなお重要な課題として残っている。従来より人工リーフ工法による消波機能に関する種々の研究（例えば、片野ら、1992）がなされてきたが、これまでの結果では周期波に対する伝達率は0.3程度に留まっている（宇多ら、1988）。

著者らは、人工リーフ工法の利点を生かし、さらにその消波効率を向上させるためには、発生する砕波そのものに関する検討が必要という観点から一連の研究を行って来た。その結果、ダブルリーフによって複合型砕波（安田ら、1995a）を発生させた場合、その強大なジェットの突っ込みに伴い発生する渦拡散によって著しい減衰が生じることを見出した。しかしながら、最大規模の巻き波型砕波のジェットの3倍を超えるジェットを伴う複合型砕波を発生させても、入射波を孤立波とした場合の伝達率は0.3程度に留まっていた（安田ら、1995b）。その原因は強大なジェットの突っ込みに伴うスプラッシュと水平渦による波の再生にあり、それが伝達率低下の障害となっていた。そこで、ジェットの突っ込みによるスプラッシュや水平渦の生成を抑え、砕波後の波の再生を防ぐとともに、ジェットの突っ込みを極力渦拡散の生成のみに転化させて消波を積極的に促進し、伝達率を大幅に低下させることが可能になるリーフ構造について検討を行った。

本論文では、上述したような要求に応えられるリーフ構造を有するトラップ式ダブルリーフを考案した背景に

ついて述べるとともに、水理実験結果を基にその消波機能を明らかにする。

2. トラップ式ダブルリーフの考案

砕波による拡散を消波に活用する場合、渦拡散の活発化に伴って消波効率は高まるため、渦拡散を極大化しうる砕波をいかにして発生させるかが課題となる。この場合、砕波による拡散はジェットの突っ込みによって生成されるため、問題は同一の入射波高の下で最大規模のジェットを伴う砕波を発生させることに帰着される。

複合型砕波はその答えである。しかし、ジェットの強大化によって強い拡散が生成されるものの、ジェットの突っ込みに伴うスプラッシュおよび水平渦の生成による造波作用のため、消波効率に限界が生じていた。この限界を打ち破り、消波効率をさらに高めるためには、ジェットの突っ込みによる造波作用を極力抑える必要がある。このような造波作用はジェットの強大化とともに活発になり、ジェットの突っ込みに伴う消波効果を消滅してしまう。したがって、強大なジェットを伴うような複合型砕波によって消波を図る場合には、造波作用よりも消波効果の方が卓越するような対策が特に必要となる。このため、ジェット突入時の水面形状について詳細な観察を行い、得られた知見を基に図-1に示すようなスリット構造を有するトラップ式ダブルリーフを考案・開発した。すなわち、このダブルリーフは、スリットによるジェットの捕捉によってその造波作用を抑制する構造となっている。

3. 水理実験の概要

実験は、西松建設(株)技術研究所の片面ガラス張り水槽（ $65\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1.6\text{ m}$ ）内に上述の図-1に示したトラップ部を組み込んだ鋼製ユニット構造のダブルリーフ（安田ら、1995a）を図-2のように設置して行った。これに孤立波およびその連なりであるクノイド波を入射させ、図中に示す16測点で波形計測を行うとともに、高速ビデオカメラ（NAC製、200コマ/秒）によってジェット突っ込み時のスプラッシュや水平渦生成の状況を調べた。

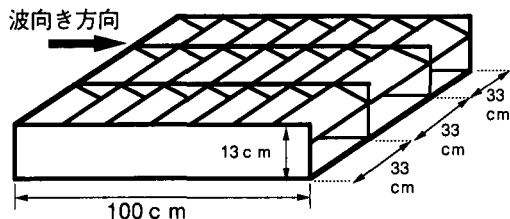
* 正 会 員 工 博 岐阜大学教授 工学部土木工学科

** 正 会 員 工 修 岐阜大学助手 工学部土木工学科

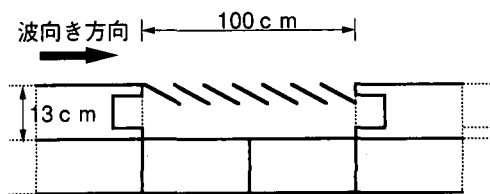
*** 正 会 員 工 修 (株)アルファ水工コンサルタンツ 技術部

**** 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



(a) スリット構造のトラップ部の形状・諸元



(b) トラップ式ダブルリーフの断面形状

図-1 トラップ式ダブルリーフの概略図

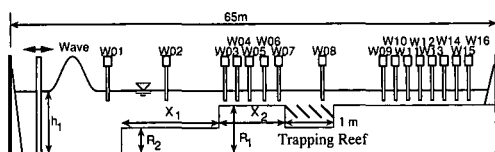


図-2 水槽内のトラップ式ダブルリーフと波高計の位置

入射および反射波高は1段目ステップ前方6mの測点W01で得られた波形データより求めた。なお、比較のためにトラップ部が無い場合の実験を行うとともに、トラップ部の構造の影響を調べるためスリット構造に代えて粒径5~10mmの碎石を充填した場合、および厚さ1mmのゴム膜を天端に張り、その下を中空にした場合の実験も併せて実施した。

水深 h_1 を 31.0 cm に固定し、入射波を孤立波とする場合には入射波高水深比 H_1/h_1 を 0.28, 0.40, 0.44 および 0.50, クノイド波とする場合には無次元周期 $T\sqrt{g/h_1} = 20$ の下で H_1/h_1 を同様に変化させた。ダブルリーフの天端高は下段を $R_2 = 13.2$ cm, 上段を $R_1 = 26.3$ cm に固定し、リーフのステップ間隔 X_1/h_1 を 0.0 (シングルリーフに相当), 3.23, 8.06, 8.89 および 9.53 の5通りに変え、碎波形式を変化させるとともに、上段リーフ法面(2段目ステップ)からトラップ部(長さ1m)沖側端部までの無次元水平距離 X_2/h_1 を 1.61, 3.23 および 4.07 と変化させ、ジェット突っ込みとトラップ部位置との関係について検討した。

4. トラップ効果

4.1. 波形変化

トラップ部をスリット構造とした意図は、ジェットの捕捉によってジェット突っ込みによる造波作用を抑制す

る一方、生成される渦の拡散を促進させることにある。

図-3は、 $H_1/h_1 = 0.44$ の孤立波を $X_1/h_1 = 8.06$ のダブルリーフに入射させ、トラップ部を有する場合(Trapping-reef, $X_2/h_1 = 4.07$) と無い場合(Solid-reef)の波形の比較を示したものである。これから、ほぼ碎波点に一致する測点W05までは当然ながら反射波部分を除いて両者の波形は一致しているが、トラップ部沖側端部の近傍に位置する測点W07より岸側にある測点での波形変化にトラップ部の存在による波高減衰の効果(以後、トラップ効果と呼ぶ)が現れ、それが波形全体に及んでいることがわかる。この結果は、図-1に示すようなスリット構造によって消波効率が期待通り改善されることを実証している。

図-4は、同一の入射波高 $H_1/h_1 = 0.44$ をもつクノイド波($T\sqrt{g/h_1} = 20$)を上述のトラップ式ダブルリーフに入射させた時の波形変化を示す。この場合、リーフからの戻り流のために碎波点が変動しているものの、トラップ部通過後(測点W09より岸側の測点)の減衰は急激であり、図-3で示された孤立波の場合に比べてもそれは著しく、トラップ式ダブルリーフの消波効率がクノイド波の場合に一層顕著となることが読み取れる。すなわち、クノイド波の場合には戻り流の影響なども加わり、これらが消波を助長するものと解釈される。

4.2 波高変化

図-3および図-4からわかるように、いずれもジェット突っ込み後はボア状の相似波形を保っており、波高によって碎波後の減衰特性の評価が可能と考えられる。

図-5は、これらの孤立波およびクノイド波の碎波後における各測点での波高比 H/H_1 に関する空間変化を示したものである。孤立波の場合、トラップ部沖側端部より岸側($X/h_1 > 12.1$)においてトラップ部の有無の影響が明瞭に現れており、波高減衰に対するトラップ部の効果が明らかになっている。さらに、クノイド波の場合には波高減衰が孤立波の場合よりも著しい。すなわち、入射波高およびリーフ諸元は孤立波と同一であるにも関わらず、 H/H_1 の値は $X/h_1 > 30$ において 0.1 を下回っていることがわかる。

4.3 孤立波の波高伝達率と反射率

a) ステップ間隔との関係

トラップ式ダブルリーフでは、ジェットの捕捉によって造波作用が抑えられるため、ジェットの強化とともに消波効率は向上し、最大規模のジェットを伴う複合型碎波の場合にその消波効率は極大に達するものと期待される。複合型碎波のジェットサイズはステップ間隔 X_1/h_1 の増加とともに増大し、上段ステップの位置が碎波点付近になるときに極大となり、その後急減することが明らかにされている(安田ら, 1995a)。ただし、実際

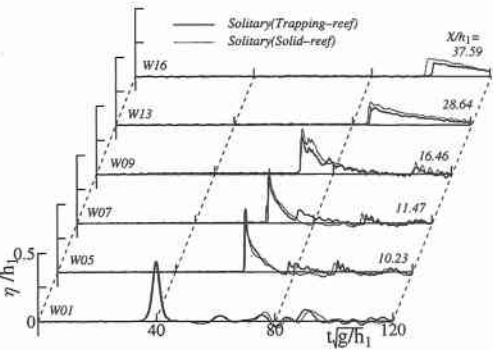


図-3 孤立波による複合型碎波の波形変化に及ぼすトラップ効果； $H_1/h_1=0.44$, $X_1/h_1=8.06$, $X_2/h_1=4.07$ (X は一段目ステップ位置を原点とした岸向き座標)

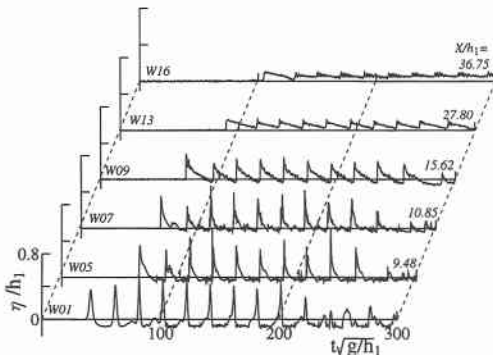


図-4 トラップ式ダブルリーフ上でのクノイド波の波形変化； $X_2/h_1=3.23$, H_1/h_1 , X_1/h_1 および X は図-3 に同じ

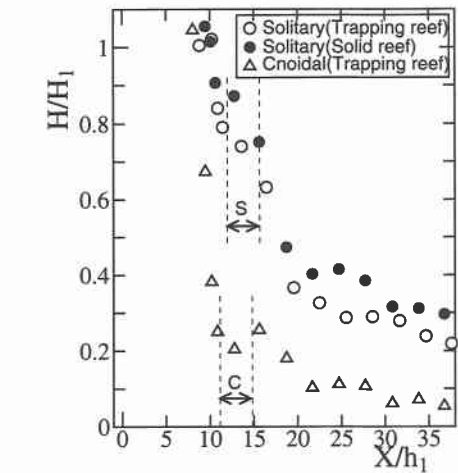


図-5 トラップ式ダブルリーフ上での孤立波およびクノイド波の碎波後の波高変化とトラップ効果； H_1/h_1 , X_1/h_1 および X は図-3 に同じ。図中の矢印 S および C はそれぞれ孤立波およびクノイド波に対するトラップ部位置を示す。



写真-1 強大なジェット放出時の二重碎波

には入射波峯からのジェット放出後も 2 次波峯の発達には継続し、入射波峯が小規模に碎波した後も強大なジェットを伴う 2 次波峯の碎波が生じている (写真-1 参照)。このように入射波峯と 2 次波峯から同時あるいは順番にジェットが放出される碎波は片野ら (1992) による二段碎波と類似しているものの、2 次波峯の発生・発達過程に相違点があり、ここではこれを二重碎波と呼ぶことにする。なお今回の実験では、 $H_1/h_1 \approx 0.4 \sim 0.5$ の孤立波に対して $X_1/h_1=8.06$ で最大規模のジェットを伴う複合型碎波が生じ、 $X_1/h_1=8.89$ および 9.53 でも同程度のジェットを伴う二重碎波が発生した。

図-6 は、上段リーフの位置 X_1/h_1 を変化させた時の、入射波高 $H_1/h_1=0.44$ の孤立波の伝達率 $K_T (=H_T/T_1)$ および反射率 $K_R (=H_R/H_1)$ の変化を示したものである。図中には、トラップ部の有無の影響を把握するため、トラップ部無しの場合の実験結果もプロットされている。なお、 H_T は測点 W16 ($X/h_1=37.59$) における波高および H_R は測点 W01 での反射波の最大波高を示す。また、上述したように X_1/h_1 はジェットサイズを支配しており、その指標と見なすことができる。トラップ部を有する場合は、無い場合に比べて K_T の値が常に小さくなっており、ジェットサイズに関係なくトラップ効果が現れている。さらに、最も発達した複合型碎波が生じる $X_1/h_1=8.06$ においてトラップ部の無い場合の K_T は 0.3 程度に留まっているのに対し、トラップ部を有する場合には消波効率が最大となり、 K_T は 0.22 程度まで減少している。これは、ジェットの強化に伴う造波作用がトラップ部のスリット構造によって抑制される一方、消波効果はそのまま有効に活かされ、二重碎波の領域を含めた $3.2 \leq X_1/h_1 \leq 9.5$ の広い範囲においてトラップ部が有効に機能していることを示すものと言える。

また、図-6 に併記されている反射率 K_R と X_1/h_1 の関係から、 K_R も X_1/h_1 の増大とともに減少し、 $X_1/h_1=8.06$ において 0.2 程度まで低下することが読み取れる。このことは、 X_1/h_1 の増大とともにリーフ上の水深変化率 R_1/X_1 が小さくなることに関連しているものと考えられる。さらに、トラップ部を有する場合の $X_1/h_1 \geq 3.23$ にお

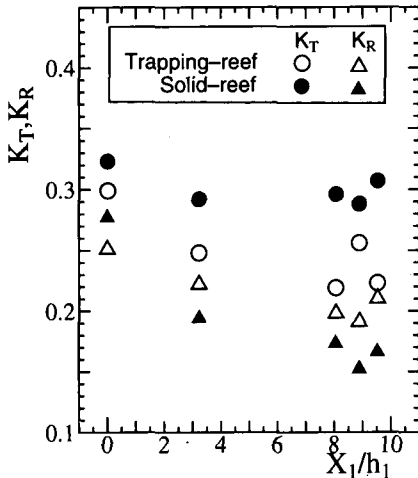


図-6 伝達率 K_T および反射率 K_R とステップ間隔 X_1/h_1 の関係； $H_1/h_1=0.44$ ， $X_2/h_1=4.07$

ける K_R の値がトラップ部の無い場合の値よりも $0.02 \sim 0.03$ 程度増大していることが確認できる。これはトラップ部からの戻り流れが反射波を発達させていることによるものと解釈される。

b) トラップ部位置との関係

トラップ部の機能はジェット捕捉であるため、その機能が十分に発揮されるためにはジェット突っ込み点とトラップ部との位置関係が重要となる。図-7 は、両者の関係を明らかにするため、 $H_1/h_1=0.44$ の孤立波をステップ間隔 $X_1/h_1=3.23$ および 8.06 のトラップ式ダブルリーフに入射させ、トラップ部沖側端部 X_2/h_1 と伝達率 K_T の関係を示したものである。図から、 X_2/h_1 が増加するに従って伝達率はほぼ一様に低下しており、ジェット突っ込み後の上段リーフ上での伝播距離が消波効率に深く関与していることがわかる。

c) 入射波高との関係

$H_1/h_1=0.44$ の入射波高に対しては $X_1/h_1=8.06$ および $X_2/h_1=4.07$ のトラップ式ダブルリーフが最も消波効率が高く、 K_T の値も 0.22 まで低下する。そこで、このリーフを用いて入射波高の伝達率 K_T に及ぼす影響について検討する。

図-8 は、このリーフの伝達率 K_T と入射波高 H_1/h_1 の関係を示したものである。図中には、比較のためにトラップ部の無い同一諸元のリーフ (Solid-reef) における K_T と H_1/h_1 との関係が併記されている。両者の比較から、 H_1/h_1 に関係なくトラップ効果が現れていることが確認できる。また、伝達率は $H_1/h_1=0.44$ で極小となっていることがわかる。これは、入射波高によってリーフの最適諸元が変化し、 $H_1/h_1=0.44$ の入射波高に対して $X_1/h_1=8.06$ ， $X_2/h_1=4.07$ の時のリーフが最適となることを示

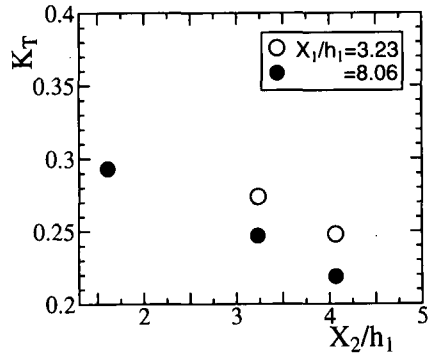


図-7 伝達率 K_T とトラップ沖側端部位置 X_2/h_1 の関係； $H_1/h_1=0.44$

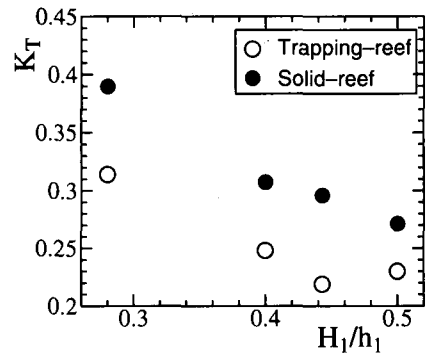


図-8 伝達率 K_T と入射波高 H_1/h_1 の関係； $X_1/h_1=8.06$ ， $X_2/h_1=4.07$

している。なお、伝達率はトラップ部の有無に関係なく H_1/h_1 に対してそれ程大きく変化しないこと、 $H_1/h_1 \geq 0.4$ の入射波高に対してトラップ式ダブルリーフでは概ね $K_T \leq 0.25$ となっていることが確認できる。

d) ステップ構造との関係

トラップ部の構造の違いが消波機能に及ぼす影響を明らかにするため、スリット構造に代えて粒径 $5 \sim 10$ mm の採石を充填した場合並びに厚さ 1 mm のゴム膜を天端に張り、その下を中空にした場合との比較を行った。すなわち、実験に際しては最大規模のジェットが生じる $X_1/h_1=8.06$ のダブルリーフを採用し、 $X_2/h_1=3.23$ の位置に上述したようなトラップ部を設け、伝達率 K_T とトラップ部構造の関係について比較検討した。

図-9 はその結果を示したものである。砕石およびゴム膜とトラップ部に採用した場合の伝達率は両者ともにほとんど差異はないものの、いずれもトラップ部無しの場合よりも伝達率はむしろ大きくなっている。このことは、砕石から成る移動床境界やゴム膜の可動境界では強大なジェットの突っ込みが境界面の変形によって吸収され、突っ込みによる渦拡散の発達が抑制されて伝達率が増大することを示唆しているものと考えられる。した

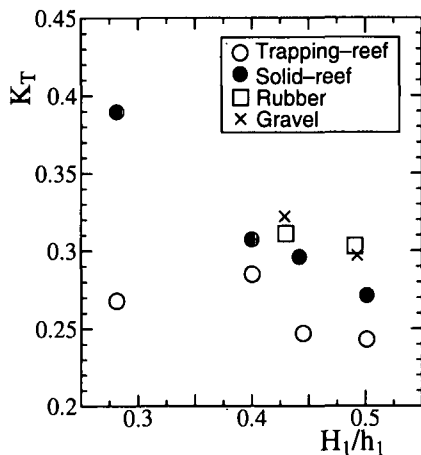


図-9 伝達率 K_T とトラップ構造の関係: $X_1/h_1=8.06$, $X_2/h_1=3.23$

がって、消波効率の向上を目指して単純にリーフを捨石などによる透過構造にすればよいというものではなく、あくまでジェット捕捉機能を有したスリット構造が最適であるものと確認できる。

e) トラップ部の最適仕様

表-1 は、各入射波に対して伝達率を最小とするトラップ式ダブルリーフの諸元を示したものである。 $H_1/h_1=0.28$ の場合、 $X_1/h_1=8.06$ および $X_2/h_1=3.23$ のリーフ諸元の下で K_T の値は 0.27 程度となる。さらに、 $X_2/h_1=4.07$ と大きくすることによって、 $H_1/h_1=4.0 \sim 5.0$ の入射波に対して伝達率を 0.22~0.24 まで低下させることが可能である。これらの結果は、出来るだけ発達した複合型砕波を発生させると同時に、それに伴うジェットをトラップ部の沖側端部に突っ込ませることの可能なリーフが最適仕様となることを示している。

4.4 クノイド波に対する消波効果

図-10 は、 $X_1/h_1=3.23$ および 8.06 のダブルリーフを対象として $X_2/h_1=3.23$ の位置にトラップ部を設け、クノイド波を入射させた場合の伝達率 K_T と波高 H_1/h_1 との関係を示したものである。クノイド波の場合、戻り流れが上段リーフと同様な効果を発揮するため、孤立波の場合と異なり $X_1/h_1=3.23$ において(ただし、 $H_1/h_1=0.5$ を除く)消波効率が最も高くなるとともに、 X_1/h_1 が大きくなるにつれて消波効率は低下傾向にある。換言すれば、クノイド波の場合には戻り流れがステップ間隔以上にジェットサイズに影響を及ぼし、 $H_1/h_1 \geq 0.4$ の入射波に対してはステップ間隔に関係なく K_T はすべて 0.1 以下となっており、戻り流れが消波効率の改善に極めて有効に作用していることがわかる。

表-1 各入射波に対して伝達率を最小とするトラップ式ダブルリーフの諸元

H_1/h_1	X_1/h_1	X_2/h_1	K_T
0.28	8.06	3.23	0.27
0.40	8.06	4.07	0.24
0.44	8.06	4.07	0.22
0.50	8.06	4.07	0.23

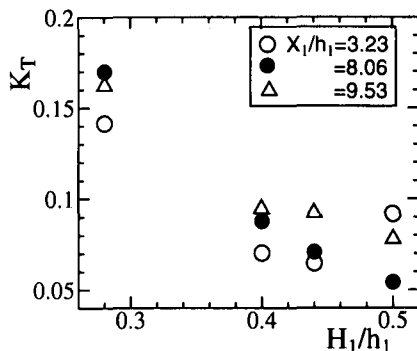


図-10 クノイド波を入射波としたときの伝達率 K_T と入射波高 H_1/h_1 の関係: $T\sqrt{g/h_1}=20$, $X_2/h_1=3.23$

5. 結 語

スリット構造を有するトラップ式ダブルリーフによって、複合型砕波によるジェット突っ込み時のスプラッシュや水平渦の生成が抑えられる一方、渦拡散が強化され、孤立波およびクノイド波を入射波とした場合の伝達率がそれぞれ 0.23 および 0.05 程度まで下げることが可能であることを明らかにした。特に、入射波をクノイド波とした場合には、戻り流れが上段リーフと同様な効果および拡散効果をも強化する一方、スプラッシュや水平渦の生成による造波作用を抑え、消波効果を著しく改善することによって、 $H_1/h_1 \geq 0.4$ の入射波高に対して伝達率が 0.1 以下となることがわかった。

トラップ式ダブルリーフによって砕波の消波機能を最大限に引き出すことが可能となり、人工リーフ工法の消波機能改善の方向を見い出すことができたと考えている。

参 考 文 献

- 宇多高明・小俣篤・横山揚久 (1988): 人工リーフの機能と設計法, 土木研究所資料, 第 2696 号, 79 p.
- 片野明良・村上信一郎・服部昌太郎 (1992): 幅広潜堤の消波特性の表示システム, 海岸工学論文集, 第 39 巻, pp. 646-650.
- 安田孝志・陸田秀実・水谷夏樹・大屋敦嗣・多田彰秀 (1995a): 複合型砕波の発見とその発生条件, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 51-55.
- 安田孝志・陸田秀実・水谷夏樹・大屋敦嗣・多田彰秀・福本正 (1995b): 複合型砕波の砕波後の波形変化と波高減衰特性, 海岸工学論文集, 第 42 巻, pp. 61-65.