

海浜の碎波による酸素取り込み機能に関する実験的再考察

角野昇八*・斉藤 満**・山西和也***

1. 緒 言

海域の生態系の成育や水質浄化、さらには沿岸域の環境保全に大きな役割を果たしていると考えられる海水中の溶存酸素の供給は、水中植物による光合成のほか、空中から水中への酸素の直接的な取り込み作用（再曝気作用）によるものも無視できない。海域での再曝気現象は、海面のみならず海浜、海岸構造物近傍などさまざまな場所で生ずると考えられるが、とりわけ海浜での碎波による再曝気は、特に豊富な生物相がみられる海岸線付近の海域において、機能的（強度的）にも、あるいは量的（面的）にも、総量的に大きな貢献をなしているものと考えられる。したがって、海浜の碎波による酸素の取り込み機能の評価に関する研究は、海域の環境保全の観点から重要な課題といえる。この現象の解明はまた、最近問題となっている地球温暖化に関わる空中の炭酸ガスの海水中への移動・溶存という現象の解明とも関連して重要である。しかしながら、気液界面における物質移動の実態にはまだ十分に明らかにされていない点が多い現状にある。

2. 波面からの酸素取り込み機能に関する従来の実験手法とその改良

海浜の碎波や海岸構造物近傍の波浪波面からの酸素の水中への取り込み作用によって水中の溶存酸素濃度が上昇する。濃度上昇速度定数に相当する量、すなわち酸素取り込み時間率に対応するものがいわゆる再曝気係数（ k_L ）とよばれる係数である。したがって、実験的には波浪作用下における曝気源近傍の溶存酸素濃度の時間的上昇率を測定して再曝気係数を評価できれば研究の第一段階がすんだことになる。しかしながら、開水路流れの場合のように水面全体のみが曝気源であって、酸素が水面全体をとおして輸送され、しかも現象が水路の長さ方向に一樣であるような場合とは異なり、造波水槽の水域で行われる実験では、海岸（構造物）模型の主要曝気源

以外に波面や水槽端の造波板、消波構造などにも曝気源があるという相違点がある。このため、主要曝気源近傍で取り込まれた溶存酸素は水槽内の長さ方向に移流あるいは拡散してしまったり、あるいは主要曝気源から離れた地点の波面をとおした酸素の取り込みや造波板あるいは消波装置で取り込まれた溶存酸素の影響が混入することが考えられ、これらの点で係数値を正確に評価できていなかったことを指摘することができる。

ところで再曝気係数（ k_L ）は、ある一定の曝気面積（ A ）と曝気容積（ V ）の下で、曝気源から取り込まれた酸素の時間回復速度に相当する係数値であるが、曝気源そのものの酸素取り込み機能に相当する量は物質移動係数とよばれる係数であり、再曝気係数と

$$K_L = (V/A)k_L \dots \dots \dots (1)$$

の関係にある。開水路流れのように正確な曝気面積や曝気容積の値が明らかであるような場合には（ $V/A=h$ 、 h は一樣流れの水深）、実験で得られた再曝気係数値より上式をとおして曝気源に固有の物質移動係数の値を求めることができる。しかるに、造波水槽内での実験では、既述のように曝気面積および曝気容積の正確な値が一般に不明であるため、曝気面積や曝気容積を同定するための特別の工夫が必要となる。

以上のような従来の実験およびその結果の解析手法における難点に鑑み、著者らは波動はほぼ完全に伝達させるが物質は全く透過させないような材質と構造の薄膜（ポリエチレン膜）で主要曝気源である海岸構造物模型を含む水域を遮断し、曝気に関わる容積（曝気容積）を特定した状態で波浪実験を行い、再曝気係数の正確な評価をめざした実験を行った（角野ほか、1994）。また、同時に、静水面を含む進行波波面および部分重複波波面からの酸素取り込み機能についても評価するとともに、それらの影響を取り除いた構造物自体の酸素取り込み機能の評価を試みた。

本論文では、この研究に引き続き、緩斜面模型上の碎波による酸素取り込み機能の正確な評価をめざして、碎波水深の沖側をポリエチレン膜で遮断して曝気容積を限定した状態で行った実験の結果をとりまとめたものである。

* 正会員 工博 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科

** 正会員 工修 大阪市 建設局

*** 東洋建設（株） 東京支店

3. 緩斜面での砕波による酸素取り込み機能に関する実験

(1) 実験方法

実験は、図-1に示すような長さ20 m、幅および高さ0.5 mの2次元造波水槽を用い、その一端に1/20勾配の木製の斜面滑面を設置して行った。水深は全ケースで0.3 mで一定とした。

水域を限定するためのポリエチレン膜は厚さ0.04 mmのものをを用い、図-1および図-2に示すように水槽内に設置した。膜の設置位置は、試行錯誤の結果、砕波水深の1.5倍以内の水深位置であれば一定の再曝気係数の値が得られることが判明したため、各ケースごとにその水深位置に移動させ、波による膜の揺動を妨げないようにして固定した。また、比較のために、ポリエチレン膜で曝気容積を限定しない状態での実験もすべてのケースについて行った。

溶存酸素計 (YSI 社製 58 型) は砕波点の位置に1台設置し、サンプリング間隔20 secで最高72時間自動計測した。

波高は、一様水深部に設置した波高計によるデータを入力分離法により求めた。表-1は、実験波の特性とともに、砕波水深 (h_b)、砕波波高 (H_b)、曝気面積 (A)、曝気容積 (V)、さらに砕波形態の種別を示す。実験波の

表-1 実験条件および実験結果

RUN	T (sec)	H_0 (cm)	H_0/L_0	h_b (cm)	H_b (cm)	A (cm ² /cm)	V (cm ³ /cm)	t (°C)	TYPE	k_2 ($\times 10^{-3}$ 1/sec)	nk_2 ($\times 10^{-2}$ cm/sec)
R1	0.88	7.3	0.060	10.2	7.8	204	1380	26.1	SP	1.87	1.27
R2	0.88	9.3	0.077	13.2	9.6	264	2740	29.9	SP	1.90	1.97
R3	0.88	11.1	0.092	16.2	11.3	324	6150	25.1	SP	1.39	2.64
R4	1.00	7.4	0.047	10.4	8.4	208	1380	24.4	SP	2.17	1.44
R5	1.00	9.0	0.058	12.6	9.7	252	2740	29.2	SP	1.81	1.97
R6	1.00	11.6	0.074	16.3	12.0	326	4970	25.4	SP	1.43	2.18
R7	1.10	5.3	0.028	7.8	6.9	156	770	26.1	PL	1.27	0.62
R8	1.10	7.1	0.038	10.3	8.5	206	2050	30.1	SP	0.78	0.77
R9	1.10	8.6	0.045	12.2	9.9	240	2050	28.7	SP	1.64	1.40
R10	1.20	4.9	0.022	7.5	6.6	150	770	24.1	PL	1.95	1.00
R11	1.20	6.7	0.030	9.9	8.5	198	1160	32.0	PL	1.43	0.84
R12	1.20	7.6	0.034	11.1	9.3	222	2500	30.7	PL	1.58	1.78
R13	1.40	3.5	0.012	5.9	5.8	118	770	23.0	PL	1.40	0.91
R14	1.40	4.6	0.015	7.4	6.9	148	1160	30.1	PL	1.04	0.81
R15	1.40	6.7	0.022	10.3	9.3	206	1160	30.6	PL	1.70	0.95

* SP : spilling breaker
PL : plunging breaker

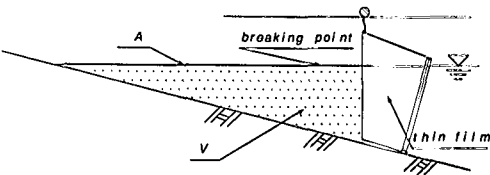


図-3 曝気面積および曝気容積の取り方

周期は0.88 secから1.40 secまでの4周期とし、周期別に沖波波形勾配を3種類変化させた。砕波水深および砕波波高の算定は合田 (1970) による砕波指標を用いるとともに目視によってもその値を確認した。砕波形態の判別は Iversen (1952) などによる出現区分図 (岩垣, 1987) によった。表中の曝気面積および曝気容積の値は、図-3に示すように、静水面の水深線と砕波点 (線) で形成される表面積およびポリエチレン膜で現に限定された容積をとった。

(2) 実験結果

a) 溶存酸素濃度時間回復曲線

既述のように、曝気面積をとおした曝気容積への酸素取り込みの程度を表すのは再曝気係数であり、それは溶存酸素濃度の時間回復曲線の勾配より判断できる。すなわち、 C を溶存酸素濃度、 C_s を飽和溶存酸素濃度、 C_0 を初期溶存酸素濃度として表した無次元溶存酸素濃度負荷 D^*

$$D^*(t) = (C_s - C(t)) / (C_s - C_0) \dots \dots \dots (2)$$

の時間曲線より

$$-\ln D^*(t) = k_2 t \dots \dots \dots (3)$$

の関係をとおして再曝気係数を求めることができる。図-4は、ポリエチレン膜で曝気容積を限定した本実験手法による無次元溶存酸素濃度負荷の時間曲線とそれをしてしない旧来の実験手法による同条件の実験結果の比較の一例を示したものである。同図に示すように、従来手法による時間回復曲線は、主要曝気源である緩斜面上の砕

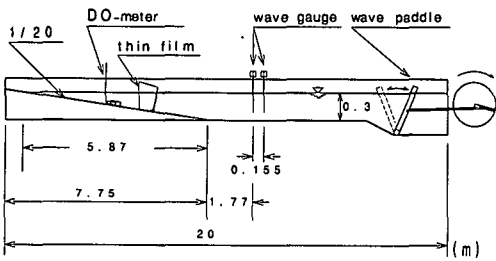


図-1 実験装置概要

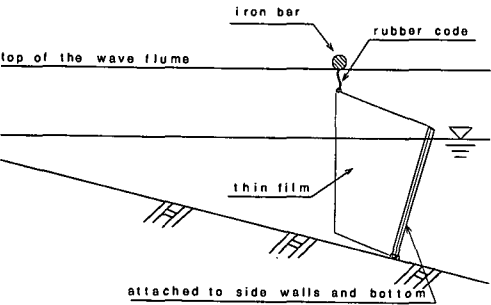


図-2 薄膜設置状況

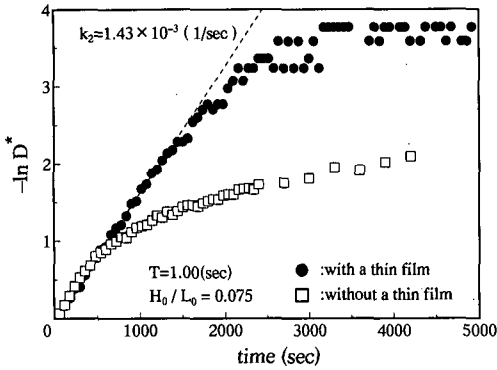


図-4 無次元溶存酸素濃度負荷の時間曲線の薄膜の有無による違い

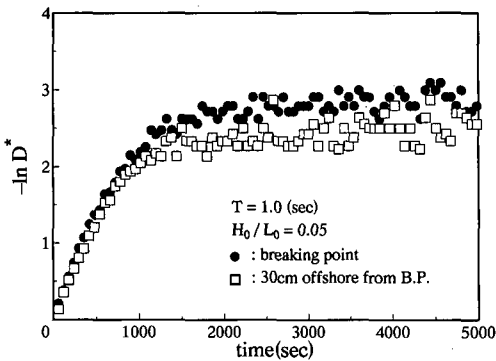


図-5 無次元溶存酸素濃度負荷の時間曲線の計測位置による違い

波帯域から取り込まれた溶存酸素が造波水槽内沖側に拡散・移流してゆく影響のために、勾配は比較的短時間のうちから徐々に緩やかになっていき、再曝気係数をどの勾配から決定すべきか判断が困難な不確実性があった。これに対して、今回の実験では、一定の勾配で直線的に回復する初期の部分(1000秒～1500秒)と曝気容積内がほぼ飽和して緩慢な回復となったとみられるそれに引き続く部分の2つの部分とからなり、係数値は前者より一義的に決定できることが容易に判断される。また、図-5は、RUN 4の実験条件において、溶存酸素の計測位置を砕波点とそれより30cm沖側に移した場合の時間曲線の比較の結果を示す。計測位置によらずほぼ同じ勾配の時間曲線が得られており、砕波点の1点で計測した今回の実験の妥当性が示されている。

以上の結果より、海岸構造物を対象とした研究(角野ほか, 1994)と同様に、緩斜面上での砕波による酸素取り込み機能に関する実験においても、曝気容積を限定した状態での実験の妥当性を確認することができた。

b) 再曝気係数および物質移動係数

無次元溶存酸素濃度負荷時間曲線の勾配より求められる再曝気係数 k_2 およびそれと式(1)の関係をとおして求めることのできる物質移動係数 K_L を算定し、表-1に示した。表中の再曝気係数値は実験値を 20°C の値に換算したものである。また、緩斜面上での砕波を対象とする本実験では、曝気面積は図-3に示したような静水面での面積ではなく、砕波面の乱れや水中に連行された気泡の存在の影響などで実際にはそれより大幅に大きくなっていることが考えられる。そこでここでは、実際の曝気面積は静水面での面積 A の n 倍となっているものと考え、

$$K_L = (V/nA)k_2 \quad \text{..... (4)}$$

の関係式より得られる

$$nK_L = (V/A)k_2 \quad \text{..... (5)}$$

より求められる nK_L の値を示した。なお、本実験においても砕波帯域より沖側のポリエチレン膜までの非砕波波面からの曝気の影響も考えられるが、その影響を前報(角野ほか, 1994)に述べたのと同じ手法により評価したが、その量は僅少であったのでここではその影響を差し引かない値をそのまま記した。

4. 物質移動係数と波の特性量との関係

進行波面および部分重複波面と縦スリット堤、捨石堤近傍波面の酸素取り込み機能を扱った著者らのこれまでの研究(角野ほか, 1994)において、物質移動係数あるいは再曝気係数は、単位面積当たりの波動のエネルギーの平方根値(あるいは波高)と線形関係にある(進行波面および部分重複波面の場合)、堤体での損失エネルギーと線形関係にある(縦スリット堤の場合)、あるいは堤体での損失エネルギーの平方根値と線形関係にある(捨石堤の場合)かのいずれかであった。一方、細井ほか(1982, 1983)は、巻き波の場合、再曝気係数を沖波の波形勾配と関連づけ、また崩れ波砕波の場合には波形勾配のほかに関係式を得ている。そこで

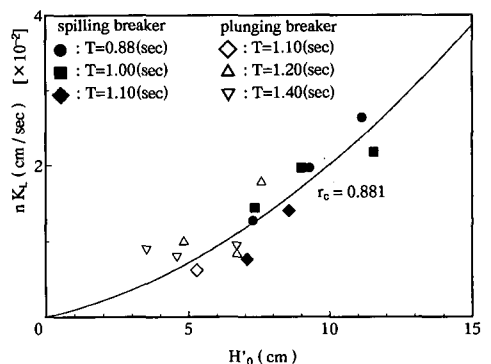


図-6 物質移動係数と沖波波高の関係

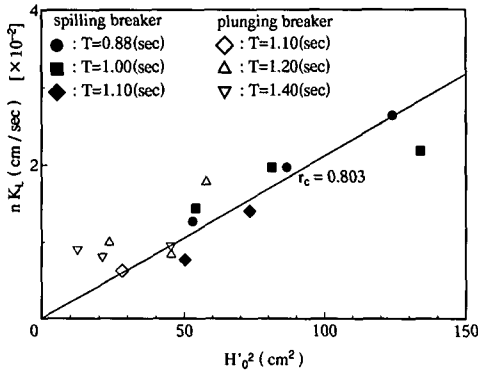


図-7 物質移動係数と沖波波高の自乗値の関係

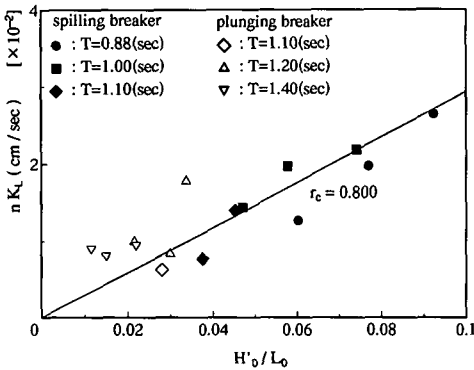


図-8 物質移動係数と沖波の波形勾配の関係

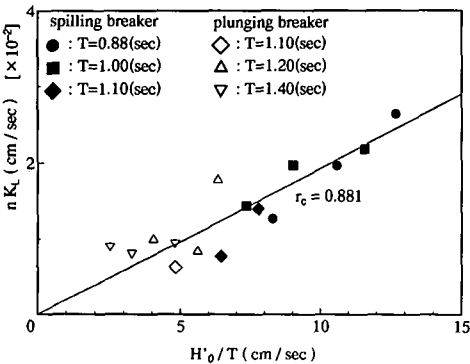


図-9 物質移動係数と沖波波高/周期の関係

本研究では、先の nK_L を沖波波高 (H_0)、およびその自乗値、沖波波形勾配 (H_0/L_0)、沖波波高/周期 (H_0/T) の各量で整理し、それぞれ図-6～図-9 に表した。このうち、波高の自乗値は、緩斜面上で波のエネルギーがすべて損失されると考えた場合の損失エネルギーに比例した量となり、また H_0/T は水粒子速度に比例した量となる。各図中では、データを巻き波砕波および崩れ波砕波別に区分して表すとともに、データ全体にもっとも近い直線ある

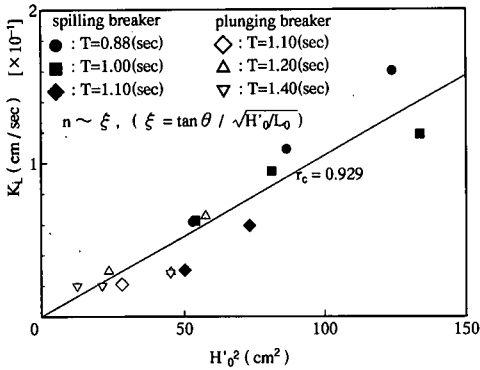
いは 2 次曲線を示し、同時にその相関係数値 (r_c) を示した。

これらの図より、まず、 nK_L は波の周期や砕波の形態によらずに原点を通る 1 本の直線ないし 2 次曲線で表すことができることがわかる。また、波高の関数として表す場合、その関係は 2 次曲線で表され、それ以外の場合の関係は線形的となることが明らかである。線形的関係が得られる場合のうち、もっとも相関係数が高いのは H_0/T に対する関係 ($r_c=0.881$) である。しかしながら、その各ケース間の差異は小さく、どの関係がもっとも相関が強くなっているかをこれらの図からだけで結論づけるには困難さがある。その結論を得るためには、本条件とは異なる斜面勾配上での砕波やスケールを変えた実験条件の値をさらに集積して、より詳細な解析を進める必要がある。ただし、波形勾配で整理する場合には、スケールの異なる場での現象においても波形勾配が同じでさえあれば同じ nK_L の値が得られることになるという不合理性が残されることになるので、考察の対象からは外すべきであろう。また、各図において巻き波砕波の場合のデータに多少のばらつきがみられるが、これは予想されるようにこのタイプの砕波に特徴的な乱れの強さのばらつきに対応しているものと思われる。すなわち、崩れ波砕波の場合、擾乱の程度は巻き波砕波に比べて小さく、また気泡の分布も表面付近に限られているとともにその水中の存在時間も短かく、したがって酸素の取り込まれ方にも大きな乱れは生じないものと考えられる。これに対して巻き波砕波の場合には、砕波後の大規模な擾乱と水中に連行された多数の大小の気泡の底面付近までの分布が考えられるとともに、波の砕け方にもばらつきがあり、それに応じて酸素の取り込み方にも乱れが現れるものと考えられる。

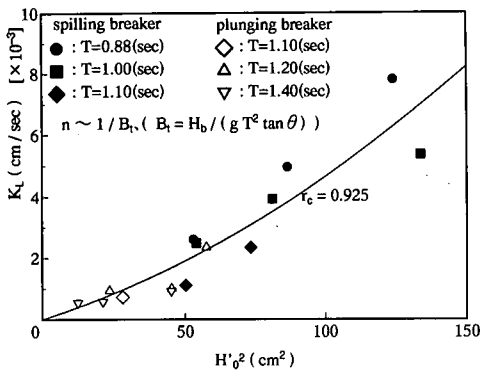
5. 実水面係数の評価

先の nK_L より n を分離して K_L 自体を評価しようとするれば、実際の曝気水面面積の曝気域の静水面面積 (A) に対する比 n (以後、「実水面係数」と称する) を別途評価する必要がある。この係数は、当然のことながら砕波形態に大きく依存することが予想されるので、ここでは、この係数を砕波形態を区分するパラメーターの関数として表現することを試みた。

砕波形態は海底勾配 $\tan \theta$ と沖波波形勾配とで一般に区分されるが、Battjes (1974) は両者を組み合わせたサーフシミュラリティパラメーター、 $\xi = \tan \theta / \sqrt{H_0/L_0}$ を提案し、この値が大きくなるにしたがって崩れ波砕波、巻き波砕波、砕け寄せ波砕波に分類されるとしている。また、同様の指標として、Galvin (1968) によるブレーカータイプパラメーター、 $B_L = H_0 / (gT^2 \tan \theta)$ があるが、この指標



図一10 実水面係数を考慮した物質移動係数と沖波波高の自乗値の関係（実水面係数～サーフシミュラリティパラメーターの場合）



図一11 実水面係数を考慮した物質移動係数と沖波波高の自乗値の関係（実水面係数～ブレイカータイプパラメーターの逆数の場合）

の場合、その値が小さくなるにつれて上記の砕波形態の移行が現れることになる。そこでここでは、実水面係数 n の値は、上記のように、砕波形態が崩れ波砕波から巻き波砕波移行するにつれて大きくなるはずであることを考慮して、

$$n \sim \xi = \frac{\tan \theta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad n \sim \frac{1}{B_1} = \frac{1}{H_0/gT^2 \tan \theta} \quad \cdots (6a, b)$$

の n と両パラメーターの比例関係を仮定した。ここに“ $\sim$ ”は比例関係にあることを表している。図一10 および図一11 は式 (6) の比例関係において、比例係数を 1 として n を求めて nK_L より物質移動係数 K_L を分離し、 K_L と沖波波高の自乗値との関係を示したものである。

これらの図によれば、サーフシミュラリティパラメーターあるいはブレイカータイプパラメーターを導入すれば、物質移動係数を沖波波高の自乗値の一義的な関数として前

者では線形的に表現でき、後者では 2 次関数として表現できるとともに、 nK_L として表現した場合の巻き波の場合にみられたデータのばらつきもおさまリ、相関度も高まっていることが明らかである。ただし、真の K_L 値の評価のためには、比例係数値を正確に評価する必要がある。また、本研究での砕波形態は崩れ波砕波あるいは巻き波砕波のみであったが、砕け寄せ波砕波の形態下での実験を行うことによって、ここで仮定した式 (6a, b) の比例関係の妥当性を検証する必要もあろう。

6. 結 論

砕波水深の 1.5 倍以内の水深位置をポリエチレン膜で遮断し、曝気容積を限定した状態で緩斜面上の砕波による酸素の取り込み機能を評価するための実験を行い、以下の結論を得た。

- 1) 溶存酸素濃度の時間曲線の形状より、この種の実験においても曝気容積を限定した状態で実験を行うことの妥当性を確認できた。
- 2) 物質移動係数と実水面係数（実際の曝気水面面積/曝気域の静水面面積）の積は沖波波高の自乗および沖波の波形勾配、沖波波高/周期の各量に対して線形的関係にあり、また沖波波高に対しては 2 次曲線で表される関係にある。
- 3) 実水面係数がサーフシミュラリティパラメーターに比例するものとして表した物質移動係数は、沖波波高の自乗値に対して線形的関係にある。同様に、ブレイカータイプパラメーターに比例するものとした場合には、2 次曲線で表される関係になる。

参 考 文 献

- 岩垣雄一 (1987): 最新海岸工学, 森北出版, p. 111.
 角野昇八・仲田義弘・斉藤 満・中谷成智・芳田利春・小田一紀 (1994): 海岸構造物の曝気能に関する実験的再考察, 海岸工学論文集, 第 41 巻, pp. 1036-1040.
 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.
 細井由彦・村上仁士・大東正男 (1982): 巻き波砕波による再曝気に関する研究, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 565-569.
 細井由彦・村上仁士・大東正男 (1983): 崩れ波砕波による再曝気に関する研究, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 551-555.
 Battjes, J. A., (1974): Surf similarity, Proc. 14th Coastal Engrg. Conf., 14, 1974, pp. 466-480.
 Galvin, C. J. Jr., (1968): Breaker type classification on three laboratory beaches, J. Geoph. Res., 73, 12, 1968, pp. 3651-3659.