

離岸堤の堆砂機構に関する実験的研究

野田 英明*・野田 和久**・清水 康生***

1. 緒 言

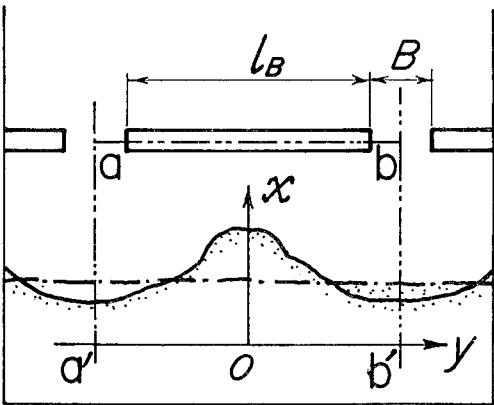
離岸堤は、沿岸漂砂の一部を阻止してトンボロを形成させる機能をもつというのが従来からの常識であった。ところが、近年わが国にも数多くの離岸堤が建設され、沿岸漂砂が顕著でない海岸でも、トンボロが形成されることが明らかとなり、離岸堤を設置するとその沖側の砂が岸側に輸送されることがわかってきた。この研究は、離岸堤が設置された時、波の作用によって沖の砂が岸側に輸送される機構を明らかにしようとするものであって本研究はその第1段階として、2次元および平面水槽による実験の結果を中心として離岸堤の堆砂機構を検討する。

2. 実験装置および実験方法

実験は、鳥取大学工学部海洋土木工学科にある2次元波動水槽および平面水槽を用いて行った。2次元水槽は長さ23m、幅0.5m、高さ0.6mの鋼製一部ガラス張りである。この実験の目的は、透過型離岸堤の空隙を通過して堤内に堆積する岸冲向漂砂量を明らかにしようとするものである。実験の方法は1/10の一定勾配模型海浜に波を作用させて平衡海浜を形成させたのち、この海浜に水槽全幅にわたって異形ブロックによる離岸堤を設置し、再び波を作用させて離岸堤の岸沖両側の地形変化を測定し、その結果から堤を通過して堤内に堆積する漂砂量を算定することである。表一1は実験に用いた波の特性を示すものであって、使用した底質は中央粒径 $d=0.17\text{mm}$ の標準砂であり、また離岸堤の空隙率はほぼ50%である。ここに、 H_0 ：換算された沖波波高、 L_0 ：沖波波長、 T ：周期、 h ：水槽水平部の水深（ $h=40\text{cm}$ ）である。なお、表一1に示す2つのタイプの波、すなわ

ち侵食型（Bタイプ）と堆積型（Sタイプ）の波を用いた理由は後述する。

一方、平面水槽による実験の目的は、離岸堤沖側の砂が堤内に輸送される機構を明らかにすることであって、基本的には図一1に示すように離岸堤を配置して波を作用させ、地形変化、波高・波向の分布を測定するとともに、蛍光砂による底質の移動、離岸堤内における沿岸流の流速・流向を測定した。平面水槽は長さ12cm、幅5m、深さ0.6mである。実験の方法は、まず最初、水槽の一端に勾配1/10の模型海浜を作り、汀線に直角方向の波向をもつ波を作用させて平衡海浜を形成させたの



図一1 座標系と離岸堤諸元

表一2 平面水槽実験の条件 (B-Bタイプ)

区分 No.	$T(\text{sec})$	$L(\text{cm})$	$H_0(\text{cm})$	$h(\text{cm})^*$	H_0/L_0	H_0/d
Run A	1.19	221	5.7	30	0.026	335
Run B	0.73	83	7.2	25	0.087	424

注：* h ：水槽水平部の水深

区分 No.	X/X_b	l_B/L_0	B/L_0	X/l_B
Run A	1	0.50	0.724	0.44
	2	0.75		0.66
	3	1.00		0.88
Run B	1	0.39	0.60	0.44
	2	0.56		0.63
	3	0.78		0.94
	4	2.90		0.63

表一1 2次元水槽における実験条件

区分 タイプ	$T(\text{sec})$	$L_0(\text{cm})$	$H_0(\text{cm})$	H_0/L_0	H_0/d
Bタイプ	1.20	224.6	6.90	0.03	400
Sタイプ	1.28	255.6	2.74	0.01	150

* 正会員 工博 鳥取大学教授 工学部海洋土木工学科

** 正会員 工修 (株)大林組

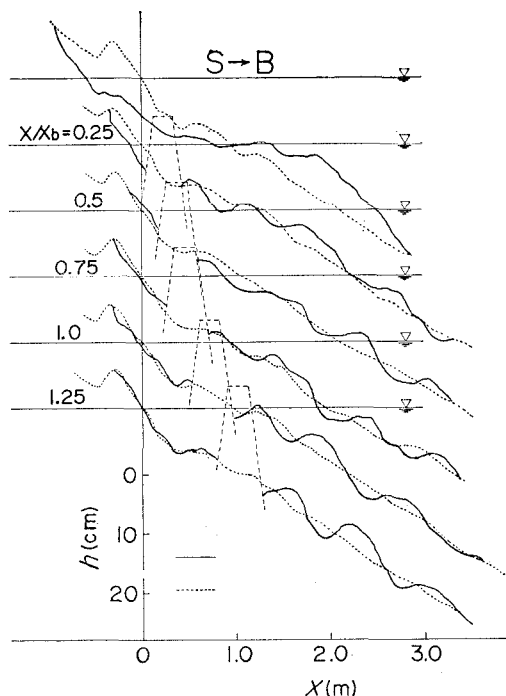
*** 正会員 工修 (株)日本水道コンサルタント

ち、汀線に平行に離岸堤を設置して、再び同じ波を作用させて堤内における地形変化の様相を調べた。表—2 は実験条件を示すものであって、用いた波の特性とともに、離岸堤に関する諸元をも示してある。ここに、 l_B : 離岸堤の長さ、 B : 離岸堤間の開口幅、 X および X_b : それぞれ離岸堤設置以前の平衡海浜における汀線を原点とし、沖向きにとった離岸堤中心までの水平距離および砕波点までの距離である。

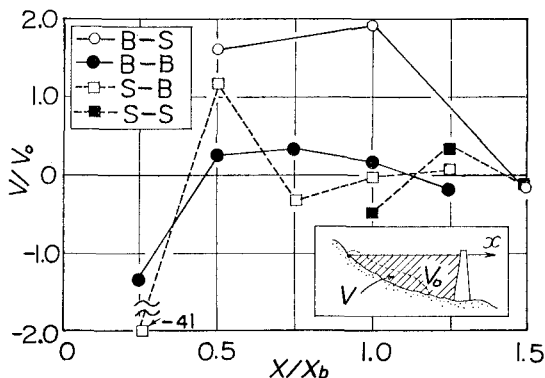
3. 実験結果と考察

3.1 2次元水槽実験の結果

表—1 に示したように、この実験で2種の波を用いた理由をまず説明しよう。離岸堤設置以前と以後で同じタイプの波を作用させるか、あるいは異なるタイプの波を作用させるかによって堆砂効果が異なると考えられる。そこで、この実験では堤設置の前後で B-B、S-S、B-S および S-B の組み合わせの波を用いて堆砂効果を調べた。図—2 は、無堤時 S タイプの波を作用させて平衡海浜（図中の点線）を形成させたのち、堤を種々の位置に設置して、タイプBの波を作用させて離岸堤の堆砂効果を調べた結果である。図中の最上段は無堤のままで S→B の波を作用させた結果であって、当然予想されるように、汀線が大きく後退しているのがわかる。一方、 $X/X_b \geq 0.75$ では堤内地形は無堤時の平衡断面形状とほとんど変わらないこと、 $X/X_b = 0.25$ のように、離岸堤が汀線に近すぎると効果の小さいこと、 $X/X_b = 0.5$ の



図—2 離岸堤位置による平衡海浜形状の変化の一例



図—3 離岸堤設置位置による堆砂量の変化 (2次元実験)

場合、若干ではあるが堤内に堆砂の見られることがわかる。図—3 は離岸堤設置位置 X/X_b による堤内堆砂量 V/V_0 の変化を波の4種の組み合わせごとに示したものであって、この図から明らかなように、堤沖側から堤内の空隙を透過して堤内に堆積する砂の量は、作用させた波の組み合わせと離岸堤の設置位置によって大きく異なることがわかる。ここで注目すべき点は、いずれの組み合わせの波であっても、 $X/X_b = 0 \sim 1.5$ の間で V/V_0 の値が最大となる点の存在すること、しかしその最大値となる X/X_b の値は4ケースで異なることがわかる。さらに当然の結果ではあるが、ケース B-S が最も堆砂量の多いこともわかる。

3.2 平面水槽実験の結果

いま、離岸堤設置後から最終形状に達するまでの、図—1 に示す $abb'a'$ の範囲内の総堆砂量を Q 、開口部からの単位幅あたり総流入砂量を Q_0 、離岸堤単位長さ当たりの総透過量を V とすると、

$$Q = Q_0 B + V l_B \dots \dots \dots (1)$$

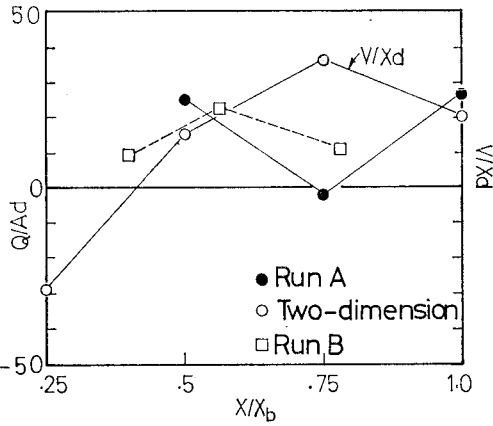
の関係がなりたつ。この式を変形すると、

$$\frac{Q_0}{V} = \frac{Q}{VB} - \frac{l_B}{B} \dots \dots \dots (2)$$

となる。式 (2) の左辺は離岸堤開口部単位長さ当たりの総流入砂量と離岸堤透過砂量との比 Q_0/V を表わすことになる。そこで、実験結果から Q を算定し、かつ2次元実験における透過砂量 V を利用すると、式 (2) の右辺が計算できることになる。図—4 は、B-B タイプの波を用いた Run A に対する Q/Ad の X/X_b による変化を示したものであって、図中には、2次元実験の B-B に対する V/X_d と X/X_b ならびに Run B の同様の結果も示してある。ここでは、実験条件がほぼ等しい2次元実験の結果 V/X_d と Run A の結果 Q/Ad を用いて式 (2) を計算する。表—3 はその計算結果であって、

表—3 Q_0/V の X/X_b による変化

X/X_b	Q_0/V
0.5	3.6
0.75	-3.4
1.0	2.4

図-4 離岸堤内総堆砂量の X/X_b による変化

この表からわかるように、 $X/X_b=0.5$ と 1.0 の場合 Q_0/V の値が $2.4 \sim 3.6$ となっている。これは開口部からの流入砂量が堤透過砂量に比べて単位長さあたり約 3 倍になることを示している。本実験では、 $L_B/B \approx 3$ であるので、開口部全幅からの流入砂量と離岸堤全長からの透過砂量はほぼ等しいことがわかるが、 L_B/B の値が変わればどう変化するかについてはまだ十分に検討していない。一方、 $X/X_b=0.75$ の場合、 $Q_0/V=-3.4$ と負の値となっている。これは離岸堤を透過して流入する漂砂量の約 3 倍の漂砂量が開口部から流出したことを示している。ただし、さらに詳細な観察をするならば、上述した結果はあまりにも単純であることがわかる。図-5 は Run A, $X/X_b=0.75$ の場合、離岸堤中央部および開口部中央部の海浜断面形状を示したものであって、離岸堤中央部では汀線が前進し、トンボロが形成されているが、離岸堤の直背後では洗掘されていること、開口部では離岸堤設置後大きく侵食されていることがわかる。この結果から、 $X/X_b=0.75$ の場合、開口部岸側の砂が多量に沖に持ち去られたことが推定できる。こうした傾向は、 H_0/L_0 の値がさらに大きい Run B に対しても見られる。なぜ $X/X_b=0.75$ の場合 Q_0/V の値が負になるかという原因については、さらに実験を重ねて詳細に検討

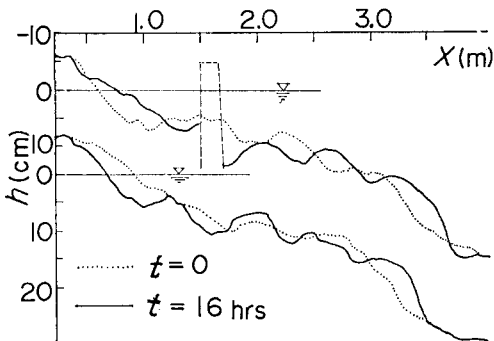
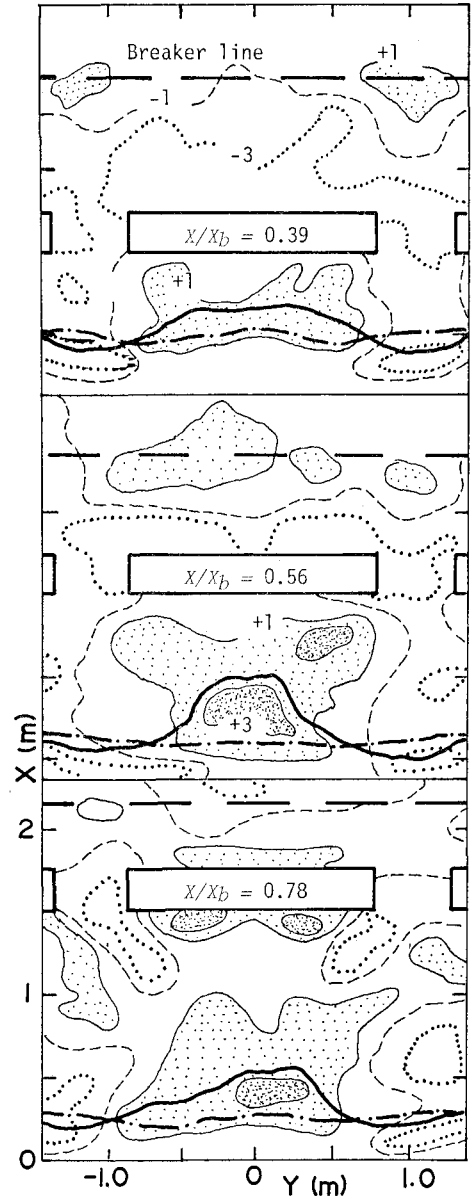


図-5 離岸堤中央部と開口部における海浜断面形状の比較

する必要がある。

図-6 は、Run B に対する実験結果を示すものであって、 $X/X_b=0.39, 0.56$ および 0.78 に対する最終汀線形状を離岸堤の設置直前の汀線形状と比較したものである。さらに、この図には、砂の堆積部分と侵食部分がわかるようにしてある。これらの図からわかるように、 $X/X_b=0.56$ の場合トンボロが最も発達している。 $X/X_b=0.39$ の場合には、篠原・椿ら²⁾も指摘している二山のトンボロの発達が見られる。三村・清水・渡辺ら²⁾および前出の篠原らの用いた離岸堤は不透過堤であり、また入射波の条件(三村らは $H_0/L_0=0.045$, 篠原らは $H_0/L_0=0.02 \sim 0.046$)が著者らのそれ($H_0/L_0=0.087$)とかな

図-6 X/X_b の相違によるトンボロ形状の比較

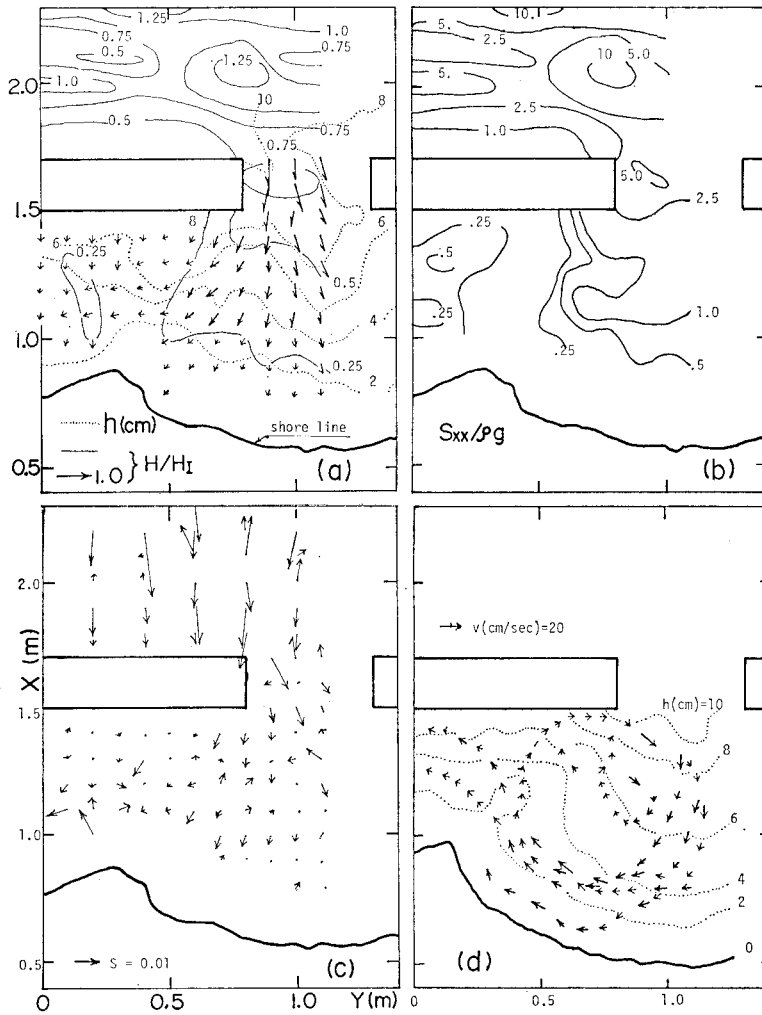


図-7 波高・波向, Radiation stress, 沿岸流の場所的变化 (Run B-2)

り異なるため直接比較はできないが、トンボロの形成発達にとって開口部、離岸堤長、離岸堤の設置位置等が重要な役割を果すことがわかる。本実験では実験ケースが少ないため、これらの関係について十分満足すべき結果は得られていないが、 $X/X_b=0\sim0.5$ の中でトンボロが最も発達する X/X_b の値の存在することが推定される。

3.3 波特性・流況

前述した Run B の中で、最も堆砂量の多い $X/X_b=0.56$ のケースについて、離岸堤内外の波高・波向を測定するとともに、浮子を用いて流況を観察した。図-7 (a), (b), (c) および (d) はそれぞれ波高・波向の分布、Radiation stress の分布の一例、Radiation stress の分布から計算される応力項 S および浮子による沿岸流の流速および流向を表わすものである。同図 (a) は堤内における波高と一定水深部における入射波高の比 H/H_I を矢印の長さと同波高線、波向を矢印の方向で示してある。この図から、堤沖側では、部分重複波の発達が顕著であ

ること、開口部の付近では回折波が明瞭であること、堤背後では透過波が見られることなどがわかる。そこで、図-8 に示すように、波高測定点を原点にとり、波の進

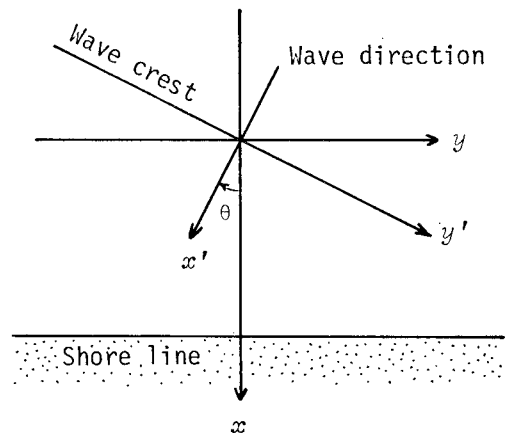


図-8 Radiation stress 算定のための座標系

行方向に x' 軸を定め、さらに沖から岸向きに x 軸をとり、 x' 軸と x 軸とのなす角を θ とすると、この測定点における Radiation stress は以下のようにテンソル表示される。すなわち

$$\begin{pmatrix} S_{xx} & S_{xy} \\ S_{yx} & S_{yy} \end{pmatrix} = E \begin{pmatrix} n \cos^2 \theta + n - 0.5 & -0.5n \sin 2\theta \\ -0.5n \sin 2\theta & n \sin^2 \theta + n - 0.5 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2hk}{\sinh 2kh} \right), \quad E = \frac{1}{8} \rho g H^2, \quad k = \frac{2\pi}{L} \quad \dots\dots\dots(4)$$

である。図-7 (b) は式 (3) に、測定された波高、波向を代入して計算した Radiation stress の一例 $S_{xx}/\rho g$ の等値線を示すものである。さらに、Radiation stress の場の所的变化による Radiation 応力項は

$$\left. \begin{aligned} R_x &= -\frac{1}{\rho gh} \left(\frac{\partial S_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yx}}{\partial y} \right) \\ &\doteq -\frac{1}{\rho gh} \left(\frac{\Delta S_{xx}}{\Delta x} + \frac{\Delta S_{yx}}{\Delta y} \right) \\ R_y &= -\frac{1}{\rho gh} \left(\frac{\partial S_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial S_{yy}}{\partial y} \right) \\ &\doteq -\frac{1}{\rho gh} \left(\frac{\Delta S_{xy}}{\Delta x} + \frac{\Delta S_{yy}}{\Delta y} \right) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(5)$$

で与えられるので、図-7 (b) 等の結果を式 (5) の右辺に代入して、 R_x および R_y を算定し、 $S = \sqrt{R_x^2 + R_y^2}$ として求めた結果が図-7 (c) である。なお S の方向は $\theta' = \tan^{-1} R_y/R_x$ によって求められる。図-7 (c) と図-7 (d) の沿岸流の流向を比較すると時計回りの循環流の発達が見られ、離岸堤内における沿岸流の推定に一つの有力な手段を与えることが予想される。

以上の結果ならびに紙数の関係で、ここには示し得なかった結果をも総合して、波や流れに関する結果を要約すると次のようになる。すなわち、

- 1) 堤内における波高・波向測定をかなり密に行えば、Radiation 応力項の算定精度を向上させることが可能となり、流速パターンを推定することも不可能ではない。
 - 2) 透過堤の場合、離岸堤の設置位置によっては堤を透過する伝達波がかなり大きくなる。
- などである。ただし、開口部から侵入した波は、回折・屈折の影響を受けるため、堤内における波高や Radiation stress の分布は非常に複雑であって、特徴的な現象を見出すまでには至っていない。

4. 結 語

二次元水槽実験ならびに平面水槽実験の結果、得られた結論を要約すると次のようである。すなわち、

1) 今回の二次元実験の範囲内で、堤内に砂を堆積させるのに最も有効な離岸堤設置位置は、作用する波が B タイプの場合、 $X/X_b=0.5$ 、S タイプの場合 $X/X_b=1.0$ 付近であることがわかった。

2) 離岸堤を砕波点より沖側に設置した場合、堤内に透過してくる砂量はほとんど皆無であり、逆に汀線のごく近くに設置すると、もどり流れの影響で沖に砂が持ち去られる場合のあることがわかった。

3) 離岸堤内に輸送される漂砂は、堤を透過するものと開口部から流入するものとがあり、離岸堤の諸元を適切に選べば、開口部単位長さあたりの流入砂量は離岸堤透過砂量の約 3 倍になることがわかった。

4) 今回の実験の範囲内では、堤内堆砂に最も効果的な堤設置位置は $X/X_b=0.5$ 付近であった。さらに他の条件でも、定量的に上の関係がなりたつかどうかは明らかでない。

5) 堤内における波高・波向の分布を精密に測定すれば、それらを用いて、Radiation stress, Radiation 応力項が算定でき、堤内における沿岸流の流速パターンを推定しうることがわかった。

なお、堤内における波の回折・屈折を考慮した Liu および Mei ら³⁾の波浪変形計算法ならびにそれにもとづく汀線形状変化モデルによる計算結果と実験結果との比較については紙数の関係で示すことができなかった。別の機会に発表する予定である。

最後に、この研究は文部省科学研究補助金(自然災害特別研究、代表者尾崎 晃、北海道大学教授)による研究の一部であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) Shinohara, K. and T. Tsubaki: Model study on the change of shoreline of sandy beach by the offshore breakwater, Proc. of 10th Conference of Coastal Engineering, Vol. 1, pp. 550~563, 1966.
- 2) 三村信男・清水琢三・渡辺 晃: 離岸堤による波浪海浜流場の変化と海浜変形, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 299~303, 1982.
- 3) Liu, P. L. F. and C. C. Mei: Water motion on a beach in the presence of a breakwater, 1. Waves, JGR, Vol. 81, No. 18, pp. 3079~3084, 1976.