

大型造波水路実験による岸沖漂砂量分布のモデル化

清水隆夫*・斉藤昭三**・丸山康樹*
長谷川 寛**・鹿島 遼一*

1. ま え が き

著者らは海岸変形予測手法開発の一環として、大型造波水路による岸沖海浜変形実験を実施してきた^{1),2)}。その間、粗砂海浜の岸沖漂砂をモデル化した³⁾が、今回、その後の実験結果を踏まえた一般的な岸沖漂砂量分布モデルについて述べ、このモデルを用いて作成した岸沖漂砂量分布形推定図を提案する。

モデル開発の基礎とした岸沖海浜変形実験は既に発表した14ケース^{1),2)}のうち初期地形を一様勾配斜面に整地した9ケースおよび表一に実験条件を示した8ケース³⁾の合計17ケースである。各ケースで得られた最終地形はいずれもほぼ平衡状態に達しており³⁾、著者ら²⁾が類型化した地形変化と漂砂量分布に分類することができた³⁾。

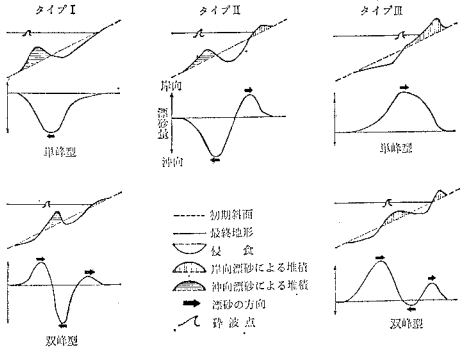
岸沖漂砂量分布のモデル化は図一の類型化された分布形の推定を目標にして行った。

表一 実験条件

CASE	中央粒径 D_{50} (mm)	斜面勾配 $\tan \beta$	周 期 T (s)	沖波波高 H_0 (m)	波作用時間 (hr)
3-4	0.27	5/100	3.1	1.62	76.1
4-1			3.5	0.34	100.0
4-2			4.5	1.06	78.0
4-3			3.1	1.61	100.0
5-1		2/100	5.8	0.30	87.2
5-2			3.1	0.80	103.0
6-1		10/100	5.0	1.78	59.0
6-2			7.5	1.10	30.5

2. モデル化の考え方

類型化された図一の漂砂量分布のうち、分布形が最も複雑なタイプⅠとタイプⅢのそれぞれ双峰型は碎波点の沖側と岸側および汀線付近の3ヶ所に極値を持っている。その他のタイプでも1つまたは2つの極値が同様の場所に生じていることから、沖浜帯・碎波帯・スウォッシュゾーン



図一 類型化された地形変化と漂砂量分布

シュゾーンの領域毎に機構の異なる3つの漂砂現象が存在し、これらが複合して全体の分布形を構成していることが推定できる。そこで、これら3領域の漂砂現象を波浪下の流体運動が持つ特徴と関係付けて次のように解釈した。

沖浜帯：浅水変形によって底面付近の流体運動は岸向流速の大きな非対称振動流に変化する。流速の3～6乗に比例するといわれる瞬間漂砂量を一周期積分した net の漂砂量は岸向となる。

碎波帯：碎波変形によって水面付近では段波状となった波による強い岸向の平均流が生じる。底面付近にはこれを相殺するように沖向の平均流が生じ、漂砂の方向も沖向となる。

スウォッシュゾーン：砂を巻き込んで斜面をはい上がった水が、引き波のときに砂層へ浸透して砂を取り残す場合は岸向漂砂となる。波が打ち上がるときに砂を浮き上がらせ、引き波がこれを持ち去る場合は沖向漂砂となる。

これらの解釈で重要となる底面水平流速波形の岸沖非対称性 S_u と平均流速 $\bar{u}$ のそれぞれ岸沖分布を図二、3に示した。流速は岸向を正とし、 S_u は次式で定義した。

$$S_u = \frac{u_{\max} - \bar{u}}{\bar{u}} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 $u_{\max}$ は岸向最大流速、 $\bar{u}$ は流速全振幅であり、底面から約0.2m上方での測定値である。図中には各ケース1～3回の測定結果を地形変化のタイプ別にプロ

* 正会員 工修 (財)電力中央研究所 土木研究所環境部
** (財)電力中央研究所 土木研究所環境部

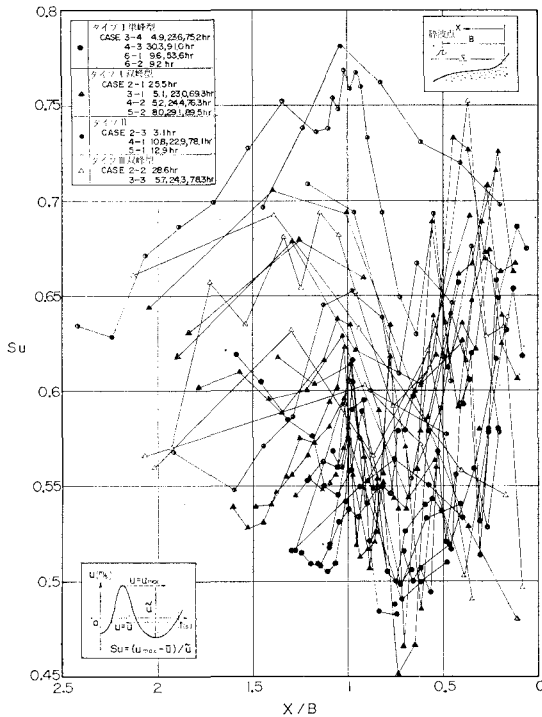


図-2 底面水平流速波形の岸沖非対称性

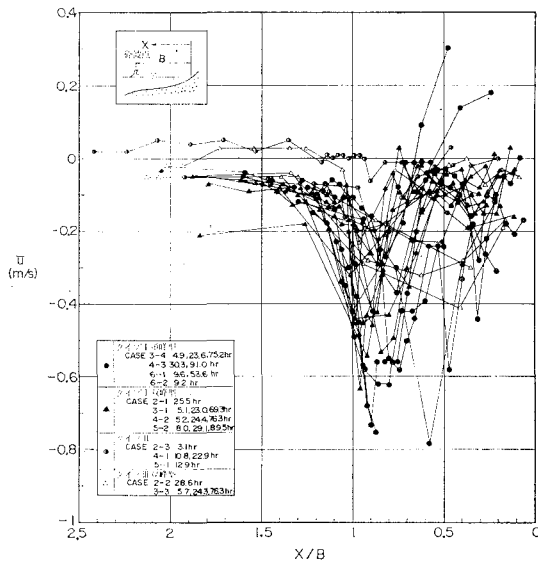


図-3 底面水平流速の時間平均

ットした。また、岸沖距離 X は砕波帯幅 B で無次元化した。両図ともプロットの局所的な変動が激しくタイプ別の傾向も判然としないが、3領域における漂砂現象の解釈が概ね妥当であることを示している。即ち、砕波点沖側と汀線付近で非対称性が強く、砕波点岸側と汀線付近で岸向平均流速が大きくなっている。

上で述べた漂砂現象の領域別解釈および底面流速波形

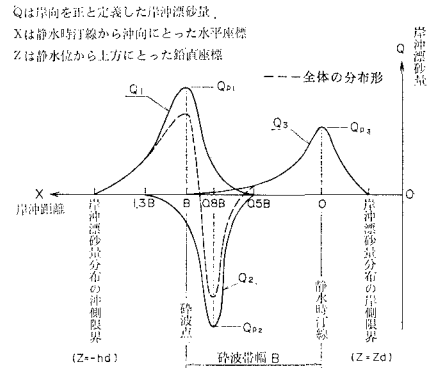


図-4 岸沖漂砂量分布モデル

の岸沖非対称性と平均流速の検討から、岸沖漂砂量分布を図-4のようにモデル化した。このモデルは実線で示した3つの分布形 Q_1 , Q_2 , Q_3 の和として破線で示した漂砂量分布全体を表わそうとするものである。 Q_1 , Q_2 , Q_3 はそれぞれ沖浜帯、砕波帯およびスウォッシュゾーンにおける流体運動の特徴によって方向付けられる漂砂量分布である。

このモデルの骨格をなす要素のうち図-4に示した岸沖漂砂量分布の岸側限界・沖側限界およびピーク値 Q_{p1} , Q_{p2} , Q_{p3} の算定方法について以下で述べる。

3. 岸沖漂砂量分布の岸側限界と沖側限界

遡上限界点までは波による砂移動とその結果としての地形変化が生じ得ると考えれば、岸沖漂砂量分布の岸側限界高さ、地形変化の岸側限界高さおよび波の遡上高の3者は等価となる。そこで、Rector (1954) と Swart (1974) の地形変化上限高と Savage (1959) と Hunt⁴⁾ の遡上高を遡上高の推定値として遡上高の実測値と比較した結果、Hunt による推定値のばらつきが非常に小さいことがわかった。そこで、Hunt の式を変形して係数を調整し、岸沖漂砂量分布の岸側限界高さ Z_a を算定する次式を提案する。

$$\frac{Z_a}{H_0} = 1.00 \frac{\tan \beta}{\sqrt{H_0/L_0}} \quad \dots (2)$$

ここで、 H_0 , L_0 は沖波の波高と波長、 $\tan \beta$ は斜面勾配である。

岸沖漂砂量分布の沖側限界における水深 h_a については著者ら²⁾が指摘したように佐藤・岸 (1952) の全面移動限界水深あるいは佐藤・田中 (1962) の完全移動限界水深とほぼ一致し、今回、回帰分析によって次式を得た。

$$\frac{H_0}{L_0} = 2.22 \left(\frac{D_{50}}{L_0} \right)^{0.377} \left(\sinh \frac{2\pi h_a}{L} \right) \frac{H_0}{H} \quad \dots (3)$$

ここで、 D_{50} は砂の中央粒径、 H と L は水深 h_a での波高と波長である。

4. 岸沖漂砂量分布のピーク値

前述したモデル化の考え方に従えば、本モデルを構成する3つの分布形のピーク値 Q_{p1} , Q_{p2} , Q_{p3} のうち、 Q_{p1} は底面水平流速波形の非線形性 S_u によって、 Q_{p2} は冲向平均流速 $\bar{u}$ によって、 Q_{p3} は S_u と $\bar{u}$ によって決まる。しかし、図-2, 3 で示したように地形変化のパターンと S_u あるいは $\bar{u}$ の関係は明瞭でない。そこで、これら漂砂量のピーク値は従来の研究に倣って底面剪断応力のべき乗に比例すると考えた。ただし、スウォッシュゾーンの漂砂量を代表する Q_{p3} については底面剪断応力の評価が未だ容易でないで、砂村⁵⁾の提案式を用いた。

(1) 沖浜帯と砕波帯のピーク漂砂量 Q_{p1} , Q_{p2}

図-4 に示したように3つの分布形のピーク値は合成された分布形の極値とほぼ一致するので、地形変化から推定した漂砂量分布の砕波点付近に生じた岸向と冲向の極値を読み取り、無次元漂砂量 Φ とシールズ数 Ψ_m の関係として図-5 と図-6 に示した。 Φ と Ψ_m の定義は次式のとおりである。

$$\Phi = (1-\lambda) \frac{Q}{wD_{50}}, \quad \Psi_m = \frac{\frac{\rho}{2} f_{ow} \hat{u}^2}{\rho(s-1)gD_{50}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 λ と w と s は砂の空隙率と沈降速度と比重、 ρ は水の密度、 g は重力加速度、 f_{ow} は田中・首藤⁶⁾の波・流れ共存下の底面摩擦係数、 $\hat{u}$ は底面流速振幅である。両図には大型造波水路実験の結果を黒丸 ($D_{50}=0.47$ mm) と白丸 ($D_{50}=0.27$ mm) でプロットし、比較のために利穂ら⁷⁾の室内実験結果を黒三角 ($D_{50}=0.7$ mm) と白三角 ($D_{50}=0.2$ mm) でプロットした。また図-5 では砕波点のデータに縦棒を砕波帯のデータに横棒を付け、図-6 では砕波点のデータに縦棒を沖浜帯のデータに横棒を付けた。

図-5, 6 より、沖浜帯の岸向漂砂量と砕波帯の冲向漂砂量がともに図-5 中実線で示した渡辺⁷⁾の式と同形の式で表示できることがわかる。また、砕波帯の冲向漂砂量が沖浜帯の岸向漂砂量に比べて大きくばらついていることもわかる。そこで、砕波帯の冲向漂砂量については砕波帯内底面付近の冲向平均流速が平均水位勾配さらには斜面勾配に比例することを考慮して Q_{p1} と Q_{p2} を次式のようにモデル化した。

$$(1-\lambda) \frac{Q_{p1}}{wD_{50}} = A_w(\Psi_m - \Psi_{mo})\Psi_m^{1/2} \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$(1-\lambda) \frac{Q_{p2}}{wD_{50}} = -A_w A_f(\Psi_m - \Psi_{mo})\Psi_m^{1/2} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ただし、 $\Psi_m < \Psi_{mo}$ ならば $Q_{p1}=0$, $Q_{p2}=0$ 。ここで、 A_w は粒径によって決まるパラメータ、 Ψ_{mo} は砂が net

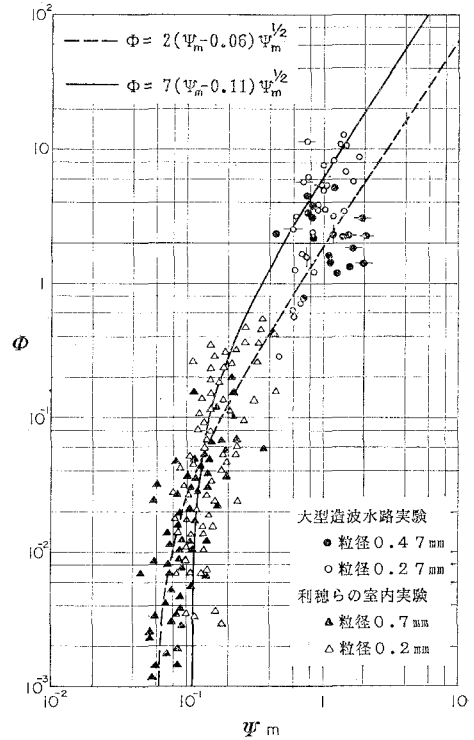


図-5 無次元漂砂量 Φ とシールズ数 Ψ_m (岸向漂砂)

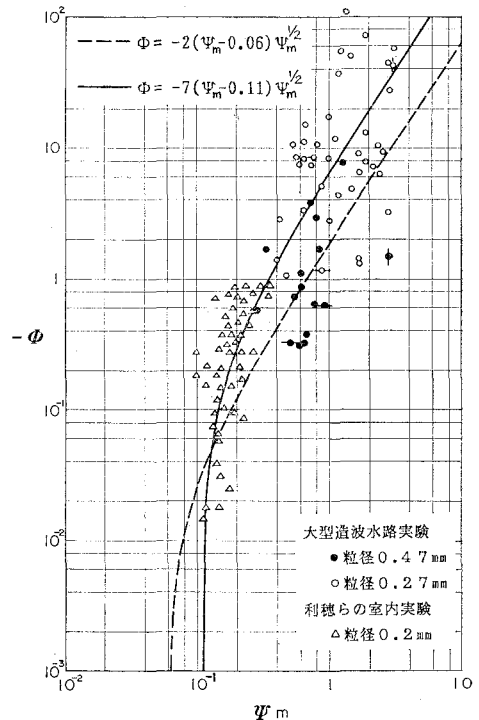


図-6 無次元漂砂量 Φ とシールズ数 Ψ_m (冲向漂砂)

で移動を開始する限界シールズ数、 A_f は斜面勾配の効果を表わすパラメータである。

A_w については粒径によって異なることは明らかであるが、シールズ数が大きな領域のデータが大型造波水路実験の2種類に限られているため定量的な評価が難しい。しかし、ここでは A_w が粒径の増加にともなって減少するような次式で算定することとした。

$$A_w = 1.11 \left(\frac{gD_{50}}{w^2} \right)^{2.39} \dots\dots\dots (7)$$

Ψ_{mc} については岩垣 (1956) の式を参考にして次式で算定することとした。

$$\left. \begin{aligned} R_* \geq 44.9 \text{ ならば } \Psi_{mc} &= 0.06 \\ R_* \leq 44.9 \text{ ならば } \Psi_{mc} &= 0.317 R_*^{-7/18} \\ R_* &= \frac{\sqrt{(s-1)gD_{50}^3}}{\nu} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

ここで、 ν は水の動粘性係数である。

A_f については斜面勾配、特に砕波水深を砕波帯幅で除した砕波帯内平均勾配 $\tan \beta_0$ が砕波帯内の冲向漂砂量に与える効果について検討した。結果を図-7に示す。図には $\tan \beta_0$ が初期斜面勾配にほぼ等しいと見なすことのできる各ケースの初期段階におけるデータと勾配変化の大きかった3ケースの経時的なデータとをプロットしてある。図の縦軸は式(6)を A_f について解いたものである。 $\tan \beta_0$ と A_f の関係は CASE 6-1 などに明瞭に現われている。 A_f の算定式としてはプロット全体から次式のように定めた。

$$A_f = 9.85 \times 10^3 (\tan \beta_0)^{2.71} \dots\dots\dots (10)$$

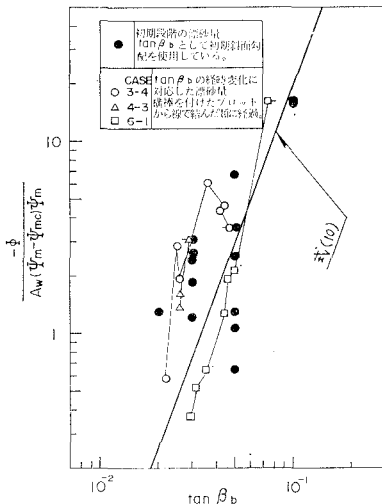


図-7 砕波帯内の冲向漂砂量と平均勾配の関係

(2) スウォッシュゾーンのピーク漂砂量 Q_{ps}

砂村⁵⁾が提案した一様勾配斜面上の静水時汀線における岸沖漂砂量 Q_s の算定式を変形すると次式を得る。

$$\frac{gQ_s}{u_s^3} = AK \frac{g^{7/6}(s-1)^{1/6}\nu^{-1/3}D_{50}^{1/2}T}{u_s} - K \dots\dots (11)$$

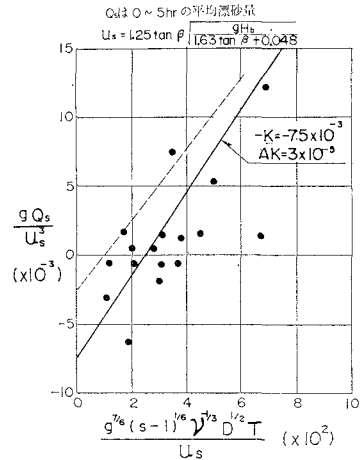


図-8 静水時汀線における岸沖漂砂量

ここで、 T は波の周期、 u_s は静水時汀線の底面付近における最大流速、 K と A は無次元の実験定数である。そこで、大型造波水路の実験結果を整理して式(11)の関係を調べたのが図-8である。プロットにかなりのばらつきがあるものの右上がりの傾向が見られ、図中に実線で示したように $-K = -7.5 \times 10^{-3}$ 、 $AK = 3 \times 10^{-5}$ が得られた。なお、図中破線は砂村⁵⁾が室内実験から求めた定数による。

5. 岸沖漂砂量分布形推定図

図-1のように類型化された地形変化あるいは岸沖漂砂量分布形の何れが生じるかを海浜条件と波浪条件から直接読み取ることができる岸沖漂砂量分布形推定図を上述のモデルを用いて作成した。推定図を図-9に示す。

推定図の作成は合田の新破波指標と佐伯・佐々木⁹⁾の砕波変形に関する実験曲線を用いて外力としての波高を求め、3つの漂砂量ピークの大小関係を分類して行った。

6. おわりに

今回提案した岸沖漂砂量分布形推定図によって実規模岸沖海浜変形の概略を簡便に推定することが可能となった。しかし、ここで用いた岸沖漂砂量分布モデルは大型造波水路における限られた条件下での実験結果に基づいている。また、漂砂量分布の沖側限界と限界シールズ数の関係等解明すべきいくつかの問題点を含んでいる。今後新たなデータの蓄積を待って改良を加えていきたい。

参考文献

- 1) 鹿島遼一・清水隆夫・丸山康樹・斉藤昭三：大型造波水路による岸沖漂砂の実験的研究，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 197~201, 1981.

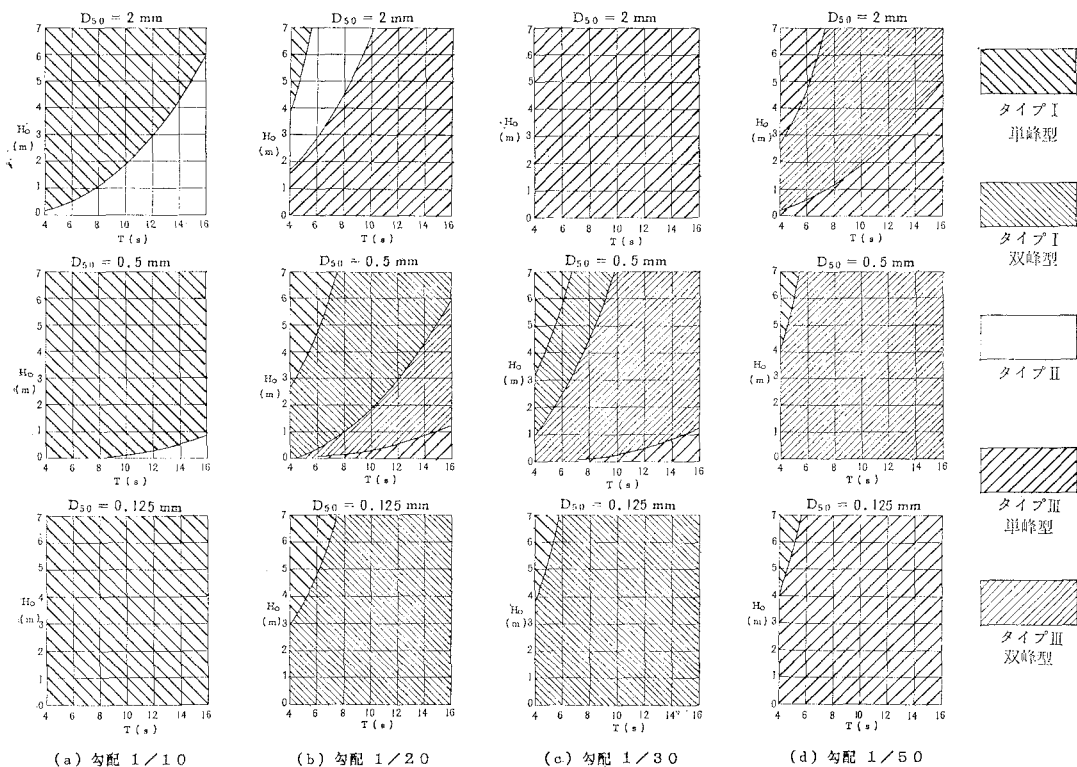


図-9 岸沖漂砂量分布形推定図

- 2) 鹿島遼一・清水隆夫・丸山康樹・斉藤昭三：大型造波水路による岸沖漂砂の実験的研究(2)——粗砂海浜($D_{50}=0.47 \text{ mm}$)の岸沖漂砂のモデル化，第29回海岸工学講演会論文集，pp. 228~232, 1982.
- 3) 清水隆夫・斉藤昭三・丸山康樹・長谷川 寛・鹿島遼一：大型造波水路実験による岸沖漂砂量分布のモデル化，電力中央研究所研究報告，No. 384028, 60 p., 1985.
- 4) Hunt, I. A. Jr.: Design of sea walls and breakwaters, Trans. ASCE, Vol. 126, Part IV, pp. 542~570, 1961.
- 5) 砂村継夫：Swash zoneにおける岸沖漂砂量の算定式，第30回海岸工学講演会論文集，pp. 214~218, 1983.
- 6) 田中 仁・首藤伸夫：波・流れ共存場の抵抗則と境界層の領域区分，土木学会論文報告集，第342号，pp. 19~25, 1984.
- 7) 利徳吉彦・渡辺 晃・堀川清司：二次元海浜変形と岸沖漂砂，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 217~221, 1981.
- 8) 渡辺 晃：海浜流と海浜変形の数値シミュレーション，第28回海岸工学講演会論文集，pp. 285~289, 1981.
- 9) 佐伯 浩・佐々木幹夫：砕波後の波の変形に関する研究(1)，第20回海岸工学講演会論文集，pp. 559~564, 1973.