

バックウォッシュと巻き砕波による砕波帯内流速場の構造

柴山 知也*・樋口 雄一**・岡安 章夫***

1. はじめに

砕波帯内は波高減衰、物質拡散、漂砂移動などが活発に起っている場所であり、このような場における流速の特性を明らかにすることは、海岸工学の中でも極めて重要な問題である。砕波帯における流速場は非常に複雑であるが、近年の流速測定技術の進歩により、直接内部流速場の測定を行い、砕波帯内流速場の構造を解明しようとする研究が多く行われるようになってきた。酒井ら¹⁾、青野ら²⁾、日野ら³⁾、三村ら⁴⁾のそれぞれ一連の研究は、砕波帯内流速場について、特に砕波によって直接に生じる大規模渦及びそれが崩壊した後に生じる乱れの構造に関するものであった。一方において、例えば砕波帯内の漂砂移動を沖浜帯におけるものと比較して特徴づけるものは、上記の砕波による大規模渦及び乱れの他に、段波状に進行する波の作用及び砕波の質量輸送あるいは swash zone からのバックウォッシュに起因する砕波帯内沖向き定常流の存在である。この沖向き定常流は、undertow（底びき流れ）と呼ばれることもあり、現地観測においてしばしばその存在が指適されてきたものである。本研究では砕波帯内の流速場を特徴づけるものとして 1) 巻き砕波 (plunging breaker) 2) 段波状に進行する波 3) swash zone からのバックウォッシュに起因する沖向き流れ の三者を考え、傾斜海浜上での流速場の詳細な測定を行うことによって、その構造を明らかにすることを目的とした。

2. 実験方法

実験には、長さ 23 m、幅 0.8 m の二次元波動水槽を

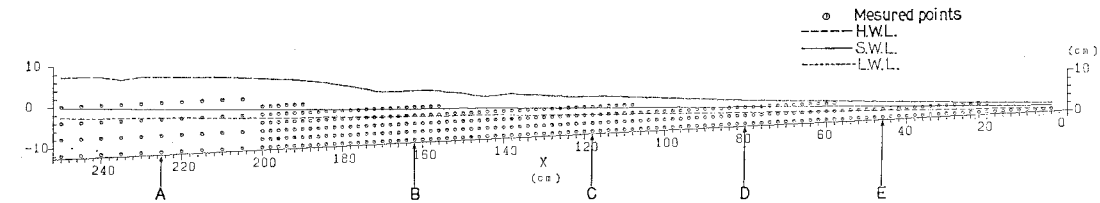
用い、現象の二次元性をよくするために、水路中央に仕切り板を設けた。実験地形は 1/20 一様勾配斜面を 10 m にわたって作成した。沖側一様水深部の水深は 40 cm である。実験条件は典型的な巻き砕波が生じることを条件に表一に示すように定めた。

実験において測定した項目は、水位変動と流速である。測定領域は、岸沖方向は静水位訂線から 4 cm より砕波点沖側まで、鉛直方向は底面上 0.7 cm からである。測定点は 2 cm 格子とし、砕波点より沖側の一部で岸沖方向 5 cm 間隔、鉛直方向 4 cm 間隔とした。鉛直方向の測点位置は底面を基準としているため、結果として測定格子は斜交系となる。全測点の配置を図一に示す。また上記の測定点配置とは別に底面の極く近傍の流速場を調べる目的で、5 断面において流速測定を行った。断面の位置を図一に A～E の記号をつけて示してある。砕波点は断面 A に相当しており、B は突込み点、C はボア発生地点、D はボアが最も発達した地点、E はボアの消滅地点である。

各測定点における水面変動と流速の測定には、容量式波高計と熱膜流速計とを対にして用いた。熱膜流速計のスプリットフィルムセンサーは、一方向の流速・流向とそれに直交する他の一方向の流速の絶対値を計測することができる。そこで本実験では通常型スプリットフィルムと境界層型スプリットフィルムをそれぞれ用いて同一

表一 実験条件

T (周期)	H_0 (換算沖波波高)	H_0/L_0 (換算沖波波形勾配)	H_0/h_b (砕波波高水深比)
1.50 s	7.36 cm	0.015	0.901



図一1 測定点の配置

* 正会員 工博 東京大学講師 工学部土木工学科
** 正会員 大成建設(株)
*** 学生会員 東京大学大学院工学系研究科

の条件で実験を2回繰り返すことにより、水平成分、鉛直成分をそれぞれ計測した。

3. データの処理

測定した水位変動と流速のデータは、サンプリング間隔 12 ms で AD 変換し、大型計算機によって処理した。得られた流速データには、空中に露出した期間のもの、気泡の影響を受けているものなどが含まれているが、これらに関しては三村ら⁴⁾と同様の処理をした。

平均流速は 30 波分のデータを用いた位相平均法により水平方向、鉛直方向それぞれの成分 $\bar{u}$, $\bar{w}$ を求めた。また乱れは位相平均流速からの偏差として定義し、同じく位相平均法によって乱れ強度 u' , w' を算定した。また、定常流速成分は上記の $\bar{u}$, $\bar{w}$ を一周期にわたって平均して求めた。この他に気泡の影響があるとして除外したデータの扱いは三村ら⁴⁾と同様である。

4. 測定結果

(1) 位相平均流速と乱れ強度

上のようにして求めた位相平均流速をベクトルによって表わした結果を 1/10 周期毎に図化した結果が 図-2 である。また乱れ強度の空間分布を等強度線で表わし、1/10 周期毎に図化したものが 図-3 である。図には紙面の都合上、半周期分だけを示してある。

まず 図-2 において、波峰突込み点 ($X=162$ cm) 付近で流速値が小さく表わされている。突込み点付近では通常、水平渦⁵⁾が形成されているが、本実験では碎波自体の変動性のために渦の発生位置がずれ、位相平均したことによって互いに打ち消し、その結果として流速値が小さく計算されたと考えることができる。同じ場所について乱れ強度分布をみると、波頭の突込み位相 ($t/T=0.4$) で乱れ強度が強く示されている。これは上述の水平渦に起因する流速場に伴う乱れであり、三村ら⁴⁾の計測でも同様の結果が得られている。

次に、乱れ強度分布図において、 $X=40\sim 80$ cm で乱れが強いことがわかる。これは水表面付近を岸向きに進行する段波状の波と、swash zone からのバックウォッシュに起因する戻りによって生じる渦構造⁶⁾の存在を示すものである。swash zone における遡上波の変動性のために、この渦構造も、位相平均流速図よりも乱れ分布図にはっきり表われている。

(2) 定常流速

図-4 に示したのは、定常流速の分布図である。全体に底面近傍で沖向きの定常流速が観測されるが、その特徴は、汀線より $X=80$ cm 付近までは次第に強くなり、それより沖に向かうにつれて次第に弱くなることである。この様に沖向き定常流が最強地点をもつことは、泉

宮・堀川⁷⁾も指摘している。

(3) 底面付近の流速場

図-1 に示した A~E の各点において、底面より 3~20 mm の領域で計測した定常流速 U の分布図を 図-5 に示す。点 A (碎波点) において底面から 5 mm 付近までが岸向き定常流であることを除いて、碎波帯内での底面付近の定常流はすべて沖向きである。またこの定常流速の鉛直分布はほぼ一様であり、その大きさは 10 cm/s 程度である。

まず点 A ($X=225$ cm) においては岸向き定常流が表われており、ここでは進行波による底面境界層が発達していると考えられる。この境界層厚さは通常の進行波による境界層厚さ ($\delta \approx 4\sqrt{\nu T/\pi} \approx 3$ mm, ν : 動粘性係数) とほぼ一致している。一方、点 B より岸側すなわち波峰突込み点より岸側の領域では、底面より 3 mm 以上の領域には岸向き定常流は現われず、全て沖向きである。これは磯部⁸⁾が染料の運動に基づいて指摘しているように、碎波による水面付近からのかく乱が大きく、底面境界層が発達しないためであろう。従って碎波帯内の流速場は水面付近からのエネルギー供給が支配的で、底面からの影響は小さいものと考えられる。また底面境界層は、碎波帯外に比して薄いものとなる。

5. 考 察

ここでは主として碎波帯内沖向き定常流について考察を加える。沖向き定常流については、質量保存則及び運動量保存則の2つの面から考えることができる。

(1) 質量保存則による計算

碎波帯内における沖向き定常流速は、質量保存則により、水面付近の岸向き質量輸送速度と一致するはずである。泉宮・堀川⁷⁾は、波による Euler 質量流速を微小振幅波理論で計算し、さらに長波の領域で波高が水深に比例するものとして計算し、断面平均沖向き定常流速 U_m を

$$U_m = \gamma^2 \sqrt{g(h+\xi)}/8 \quad \dots\dots\dots (1)$$

γ : 波高水深比 (0.73 とおく), h : 水深, ξ : 平均水位上昇で計算している。

一方、磯部⁸⁾は、空間波形において波高減少量 ΔH 分に対応する体積が一周期に沖向き定常流により輸送される水粒子量とつり合うと考えて次式を得ている。

$$U_m = K \sqrt{gh} \frac{\partial H}{\partial X} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで比例係数 K は 2.8 で与えられる。式 (1) 及び式 (2) それぞれの算定結果を実測値と比較したのが 図-6 である。いずれの算定値も実測値を下まわっているが (1) の結果よりも (2) の方が実測値との一致度が良いようである。

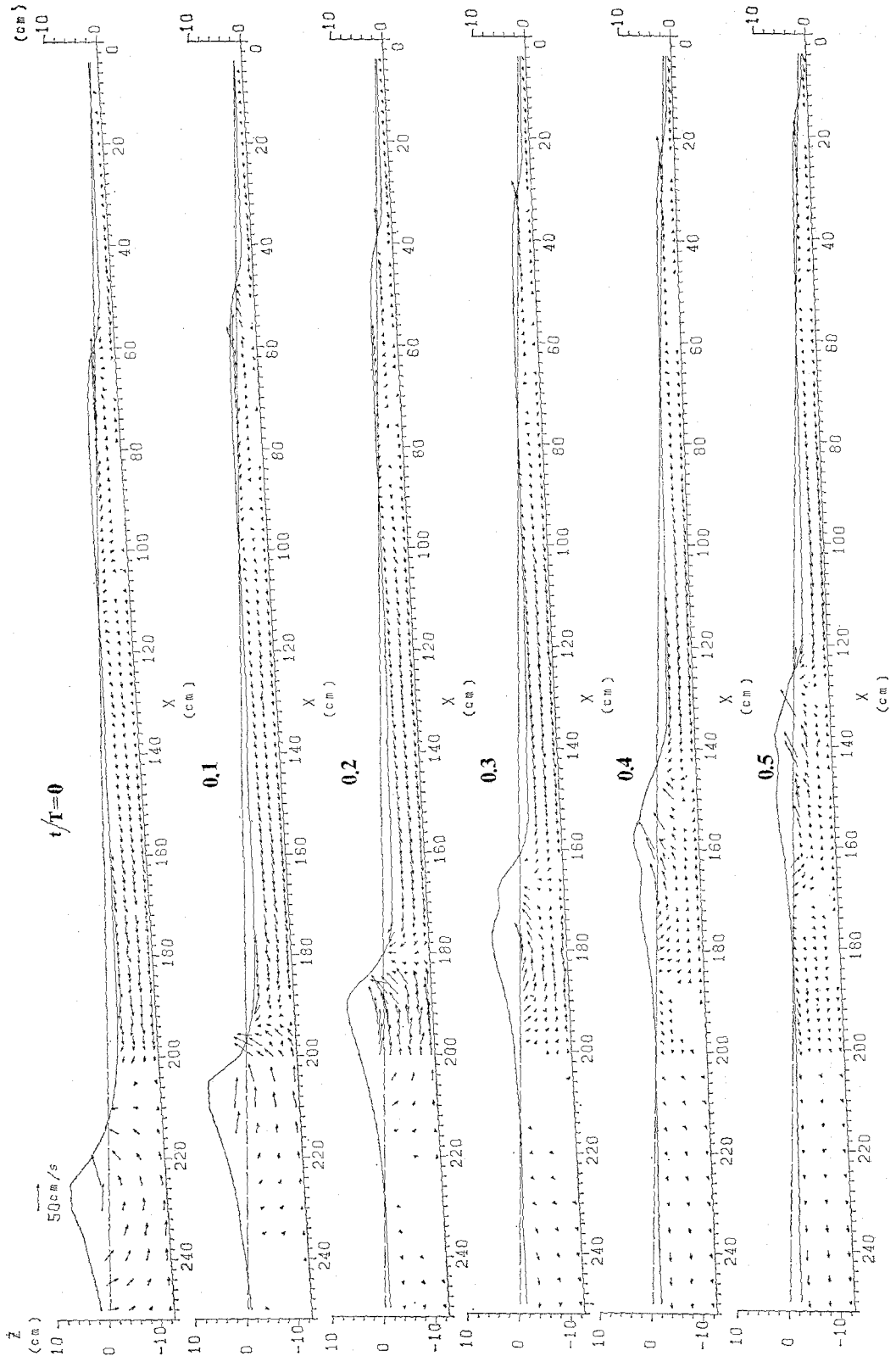


図-2 位相平均流速

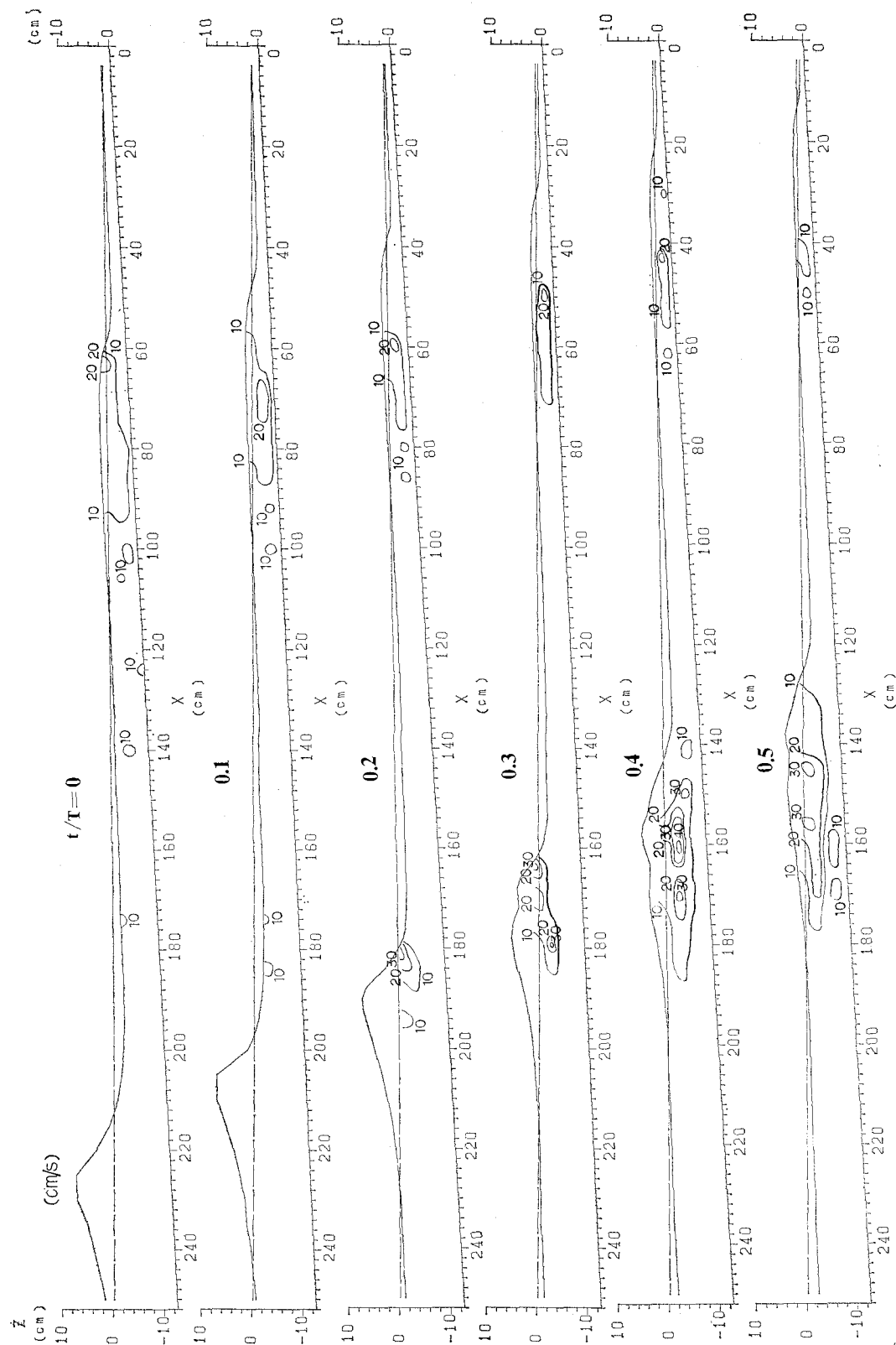
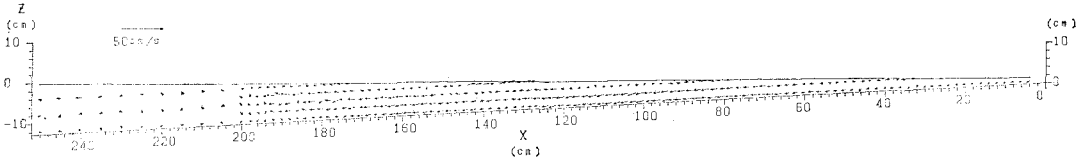
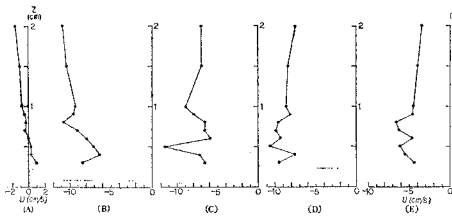


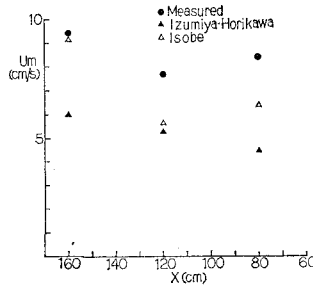
図-3 水平方向乱れ強度空間分布 (単位: cm/s)



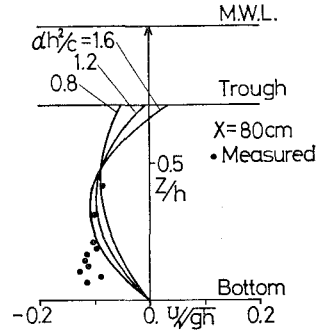
図—4 定常流速の空間分布



図—5 底面付近の定常流速分布



図—6 断面平均冲向き定常流の理論値との比較



図—7 定常流鉛直分布の理論値との比較

(2) 運動量保存則

Svendsen⁹⁾ は、底びき流れ (undertow) の鉛直分布を求めるにあたり、渦動粘性係数 ν を用いて、運動量保存式を次式で表わしている。

$$\frac{\partial u^2}{\partial x} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x} \{ \rho g (b-z) \} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \dots (3)$$

u : 水平流速, b : 平均水位変化, $—$: 時間平均
一般に ν は z の関数であるが、ここで ν を水深方向に一定と仮定すると、定常流速の分布は放物線となる。Svendsen⁹⁾ は、底面境界条件として進行波による境界層内の質量輸送速度を与えているが、ここでは上述の実験結果により底面境界層が発達しないことがわかっているため、底面での質量輸送速度を 0 とおいて解を求めた。図—7 は上記のようにして求めた理論値と、実験値を比較したものである。図中の α は次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\partial}{\partial x} (u_w^2 + gb) / \nu \dots (4)$$

ただし u_w : 波動流速である。また h は水深, c は波速である。

図より Svendsen⁹⁾ の解は、底面付近で特に現象との一致度が良くない。この傾向は ν の値を水深によって指数関数的に変化させても同様である。Svendsen⁹⁾ の解は、定常流の断面分布を求める際の基礎となるものであるが、 ν の値の鉛直分布、段波状で進行する波のもとの流速分布の仮定などを含めて、より一層の検討が必要である。

6. 結 論

一様勾配固定床斜面上で熱膜流速計を用いた密な流速測定を行ない、以下の結論を得た。

1) 砕波帯内では砕波の突込み点付近及び汀線付近に大きな乱れを生じる。前者は巻き砕波による大規模渦に

起因し、後者は岸向きに段波状に進行する波と冲向きの swash zone よりのバックウォッシュとの相互作用による。

2) 砕波帯の底面付近に生じる冲向き定常流にも、段波の質量輸送とバックウォッシュに起因するものと、砕波による渦の作用によるものの 2 つがある。

3) 砕波帯内では水面からのじょう乱が大きいために、底面境界層は沖浜におけるようには発達しない。したがって底面のごく近傍まで定常流速の大きさは上層の流速場の構造から決まる。

参 考 文 献

- 1) 酒井哲郎・三反畑勇: 砕波による乱れのレイノルズ応力について, 第 30 回海岸工学講演会論文集, pp. 30~34, 1984.
- 2) 青野利夫・服部昌太郎: 砕波下での大規模乱れ構造に関する実験的研究, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 6~10, 1985.
- 3) 日野幹雄・灘岡和夫・小俣 篤: 砕波帯内の乱れの組織的運動と水粒子運動について, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 1~5, 1985.
- 4) 三村信男・岡安章夫・柴山知也・P. Kamronrithisorn: Plunging 砕波によって発生する砕波帯内流速場の構造, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp. 11~14, 1985.
- 5) 榎本 亨・岩田好一朗・松本 昇: 砕波後の波の変形に及ぼす乱れの効果について, 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 565~570, 1973.
- 6) 松永信博: 定在型バックウォッシュボルテックスと剝離型バックウォッシュボルテックス, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 169~172, 1982.
- 7) 泉宮尊司・堀川清司: 砕波帯における定常流に関する実験的研究, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 34~38, 1981.
- 8) 磯部雅彦: 砕波帯付近における底面質量輸送速度に関する研究, 第 29 回海岸工学講演会論文集, pp. 140~144, 1982.
- 9) Svendsen, I. A.: Mass flux and undertow in a surf zone, Coastal Eng., Vol. 8, pp. 347~365, 1984.