

砕波帯付近における流速場の浅水変化に関する研究

磯部 雅彦*・堀川 清司**

1. 序 論

砕波帯付近における諸現象を理解するためには、水面変動のみならず内部流速を把握することが必要である。このため近年著者らは室内実験〔磯部ら (1979b), 渡辺ら (1980)〕および現地観測〔堀川ら (1979), 磯部ら (1980)〕を行ない、その成果を報告した。これらにおいては、ある水深における水面変動と内部流速との関係に重点を置いた。しかし、入射波の条件のみが与えられた場合に、浅水化にともなう流速場の変化を予測することは、諸現象の定量的評価に不可欠なものである。本論文においては、砕波帯付近における岸沖方向流速の浅水変化に関して行った研究成果について述べる。

砕波以前の波の変形を理論的に取り扱ったものは数多い。それらは仮定された条件により分類され、それぞれの特徴を有する〔磯部 (1979a)〕。ここでは海底勾配の影響は含まないものの、有限振幅性を考慮したエネルギーフラックス法をとりあげ、深海から浅海へ滑らかに接続する計算法を示す。計算結果について、規則波を用いて行なった室内実験および現地観測の結果と比較し、流速の浅水変化に関する検討を行う。

砕波帯においては、室内実験および現地観測の結果を整理して得られた知見について述べる。

2. エネルギーフラックス法による波の浅水変形計算

エネルギーフラックス法とは、エネルギーの連続性より、水深が変化しても一周期平均のエネルギーフラックスの値が不変であることを用いて、各水深において定形進行波であることを仮定した場合の波高等を求める方法である。Le Mehaut・Webb (1964) が有限振幅波理論であるストークス波理論第3次近似解を用いて計算して以来、種々の波動理論を用いた計算が行われてきた。クノイド波理論の簡略解であるハイパボリック波理論を用いたのが岩垣・酒井 (1967, 1968) であり、クノイド波理論第1次近似解を用いたのが Svendsen・Brink-Kjaer

(1972) である。山口・土屋 (1975) は、波速の第2定義を用いた場合のストークス波理論第4次近似解およびクノイド波理論第2次近似解を用いて計算を行い、第1定義を用いた場合との差異を議論した。Stiassnie・Peregrine (1980) は Longuet-Higgins・Fenton (1974) および Cokelet (1977) が Padé 近似によって収束性を改良した高次の孤立波理論およびストークス波理論を用いて計算を行った。また酒井・Battjes (1980) も Cokelet (1977) の結果を用いて波高変化の計算を行ったが、エネルギーフラックス法としては厳密な解であると言える。

従来のようにストークス波理論あるいはクノイド波理論のみを用いると、それぞれに適用限界があり、すべての水深に適用することができなかった。その点は最後の2つの論文では解決されている。しかし、それらによって流速等を計算しようすると多くの労力を要する。そこで著者らがストークス波理論およびクノイド波理論の適用範囲を調べた結果〔堀川ら (1977)〕より、アーセル数25の線を境にして両理論を使い分ければ、全領域で誤差が小さいことに着目して新たな計算を行った。具体的には、定形進行波の場合のエネルギーフラックス F の表示式として次式を用いた。

$$F = c \int_{-d}^{\eta} u^2 dz \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 c は波速、 u は水平流速、 d は水深、 η は水面変動、 z は鉛直座標であり、 $\overline{\quad}$ は一周期平均値を表す。式 (1) にアーセル数に従って波速の第2定義を用いて計算したストークス波理論第5次近似解あるいはクノイド波理論第3次近似解〔磯部ら (1978)〕を代入し、 F の値が一定となる振動核 ε を数値計算によって求めた。

得られた結果に関し、まず波高変化については砕波帯のごく近傍を除いて酒井・Battjes (1980) の結果と一致した。流速振幅については、微小振幅波理論を用いた場合の結果と比較してほぼ1割以内の差の範囲にあることがわかった。これは式 (1) において、支配的なのがまず流速の振幅であり、さらに有限振幅波理論による流速波形が尖っているために自乗平均値が相対的に小さくなるのを、積分範囲の変動が補う形になるからである。したがって、使い易さを考え、微小振幅波理論を用いて計算

* 正会員 工博 横浜国立大学講師 工学部土木工学科

** 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

した場合の水平流速全振幅 $\hat{u}_s$ に補正係数 r を乗ずる形で、誤差が5%以内になるように、有限振幅波理論を用いて計算した場合の水平流速全振幅 $\hat{u}$ を表現した。

$$\hat{u} = r\hat{u}_s \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$r = r_1 - r_2 \exp\{-r_3(d/L_{0s})\} \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$r_1 = 1 \text{ (底面)}, \exp\{-8.6(H_0/L_{0s})^2\} \text{ (平均水面)} \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$r_2 = 3.2(H_0/L_{0s})^{0.65} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$r_3 = -27 \log_{10}(H_0/L_{0s}) - 17 \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、 L_{0s} は微小振幅波理論による沖波波長で、 H_0 は換算沖波波高である。

次に漂砂現象等に重要な要素となる流速波形の非対称性を表わす2種のパラメータを考え、近似式で表現した。

$$(u_c/\hat{u})_a = \lambda_1 + \lambda_2(\hat{u}/\sqrt{gd}) + \lambda_3 \exp\{-\lambda_4(\hat{u}/\sqrt{gd})\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$(T_c/T)_a = (1 - \lambda_1) - \lambda_2(\hat{u}/\sqrt{gd}) - \lambda_3 \exp\{-\lambda_4(\hat{u}/\sqrt{gd})\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\lambda_1 = 0.5 - \lambda_3 \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$\lambda_2 = \lambda_3 \lambda_4 + \lambda_5 \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$\lambda_3 = (0.5 - \lambda_5) / \{\lambda_4 - 1 + \exp(-\lambda_4)\} \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$\lambda_4 = \begin{cases} -15 + 1.35(T\sqrt{g/d}) & (T\sqrt{g/d} \leq 15) \\ -2.7 + 0.53(T\sqrt{g/d}) & (T\sqrt{g/d} > 15) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$\lambda_5 = \begin{cases} 0.0032(T\sqrt{g/d})^2 + 0.000080(T\sqrt{g/d})^3 & (T\sqrt{g/d} \leq 30) \\ 0.0056(T\sqrt{g/d})^2 - 0.000040(T\sqrt{g/d})^3 & (T\sqrt{g/d} > 30) \end{cases} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 u_c は最大岸方向流速、 T_c は u_c および $u_c/2$ となる点を通る正弦曲線を考えた場合の岸方向流速継続時間で、波峯付近の尖度を代表するものである。また T は周期、 g は重力加速度である。

3. 規則波の浅水変形に関する室内実験

規則波の内部流速を測定した研究では、まず、Le Mehauté et al. (1968), 岩垣・酒井 (1969), 土屋・山口 (1971) があり、各種波動理論との比較・検討を行っている。特に砕波点における流速に着目したものとしては岩垣ら (1970, 1973, 1974), 佐藤 (1977) があり、砕波帯については磯部ら (1979) がある。斜面上における流速の変化に関しては岩垣ら (1971), 渡辺ら (1980) があるが、変化を完全に予測するには至っていない。

そこで渡辺ら (1980) の実験に加え、スプリット型フィルムセンサ [Apelt (1979)] を用いて流速の方向をも測定し得るようにした二次元水槽実験を行った。

図-1 は砕波点に至る底面流速全振幅の変化を示したものであり、一点鎖線は式 (2) で表わされた計算結果、二点鎖線は合田 (1970) による各波形勾配での砕波水深を示す。流速計の検定値が不正確であると思われるものがあるが、変化の傾向は計算結果とよく一致している。しかもこれは波谷より下の位置における流速について言えることである。

次に図-2 および 3 は流速波形の非対称性を表わす2種のパラメータの実測値を、実線で示す式 (7) および (8) の計算結果と比較したものである。相対流速全振幅 $\hat{u}/\sqrt{gd}$ の値が0.35以下では両者の対応は良好であるが、それ以上では差が大きい。そこで勾配 $i=1/20, 1/10$ およびステップ型斜面における実測値に一致するような修正式を考えた。

$$(u_c/\hat{u})_m = 0.5 + \{(u_c/\hat{u})_{\max} - 0.5\} \times \tanh \{[(u_c/\hat{u})_{\max} - 0.5] / [(u_c/\hat{u})_{\max} - 0.5]\} \quad \dots\dots\dots(14)$$

$$(T_c/T)_m = 0.5 - \{0.5 - (T_c/T)_{\min}\} \times \tanh \{[0.5 - (T_c/T)_{\min}] / [0.5 - (T_c/T)_{\min}]\}$$

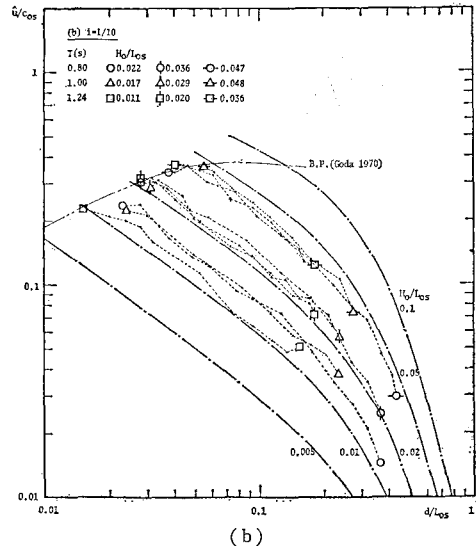
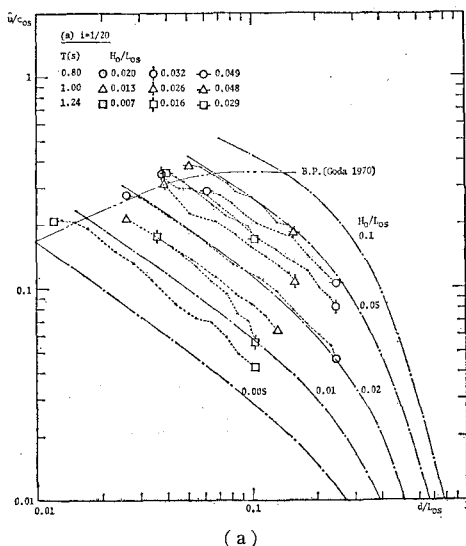


図-1 流速全振幅の浅水変化(規則波)

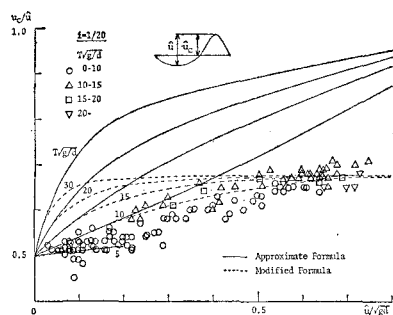


図-2 相対岸方向流速 (規則波)

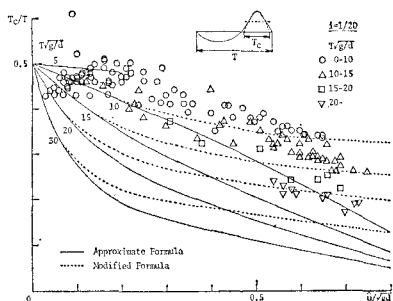


図-3 相対岸方向流速継続時間 (規則波)

$$-(T_c/T)_a / [0.5 - (T_c/T)_{\min}] \cdots (15)$$

ここに,

$$(u_c/\bar{u})_{\max} = 0.62 + 0.003/i \cdots (16)$$

$$(T_c/T)_{\min} = 0.018(T\sqrt{g/d}) \cdots (17)$$

と取るものとし, 結果を図中に点線で示した. なお計算値の図示に際しては, 保存波の存在範囲外にも形式的に拡張してすべて描いた.

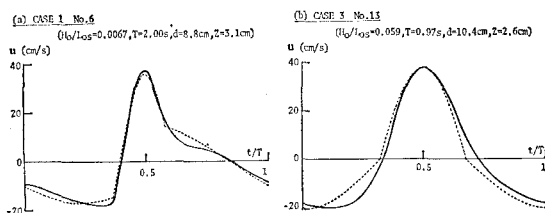


図-4 流速波形の計算結果と実測結果との比較

図-4 の点線は沖波の条件を与えた場合に, 式 (2), (14) および (15) から定まる値と, 流速の平均値が 0 となる条件から, 周期・振幅の異なる 2 種の正弦曲線を位相をずらして半周期分ずつ接続したものである. 実線は同位相平均をとった実測値を示すが, 簡単なモデルにしては両者の対応はよい. なお実測結果における平均流速分について, 差し引いて図示するものとし, ここでは議論しない.

図-5 は静水汀線から砕波点までの相対距離 X'/X_b による相対流速全振幅 $\bar{u}/\sqrt{gd}$ の変化を示すものである. () を付した点は I 型フィルムセンサを用いたために流速の方向を測定し得ず, 同位相平均をとる際に大きな誤

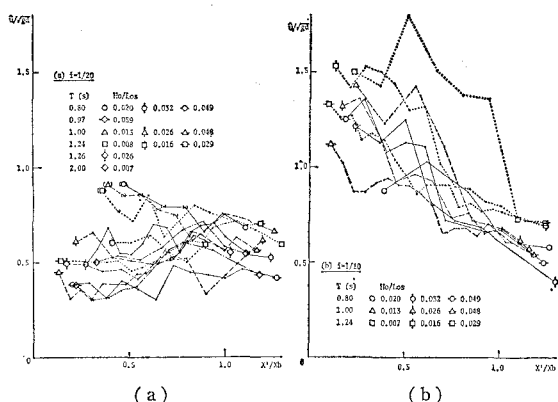


図-5 砕波帯における相対流速全振幅の変化 (規則波)

差を生じたと思われるものである. 1/20 勾配では, 砕波直後に $\bar{u}/\sqrt{gd}$ の値が小さくなった後, ほぼ一定となる傾向が見られるが, 1/10 勾配では増加し続けることがわかる.

4. 不規則波の浅水変形に関する現地観測

不規則波の水面変動と内部流速との関係を扱った室内実験には土屋・山口 (1971), 岩垣ら (1972), 瀬山ら (1979), 現地観測では Thornton et al. (1976), 堀川ら (1979), 磯部ら (1980b) があり, スペクトル解析および波別解析法によって解析されている. Guza・Thornton (1980) は現地観測により, 水面変動および岸沖方向流速の浅水変化をスペクトル解析により扱っているが, 砕波点付近の変化を説明するには至っていない.

著者らは 1980 年 8 月に茨城県大洗海岸において, 砕波帯付近の流速変化に重点を置いた現地観測を 2 回行った. 岸沖方向に配置した 7 ないし 6 台の電磁流速計により底面から 22~51 cm の高さにおける水平 2 成分の流速を測定するとともに, 鹿児島大学製作の容量式波高計 [佐藤ら (1980)] を用いて流速測定点における水面変動をも測定した. 測線上の海底勾配は 1/40~1/50 であり, 1 回目は砕波点まで, 2 回目は砕波点以浅を中心に測定した. データ処理に際しては, 水平 2 方向の流速の相関が 0 となるように岸沖方向を決定し, 波別解析法を適用する場合には周期 25 秒以上の成分を完全に除去するような数値ローパスフィルターを用いた. また浅海域であることより, 流速に関する理論値の計算は海底面における条件で行った.

図-6 は浅海域において分散性が小さいことを利用し, zero-down-cross 法によって定義される一波ごとの波について, 図-1 と同様に流速振幅の変化を示したものである. 点線が Case 1, 実線が Case 2 の観測結果である. なお周期は最も沖側の値を用いることとし, 線が込み合う部分は図示する波の数を適当に減らした. 変化の傾向は計算値とほぼ一致し, 合田 (1970) の砕波指標が

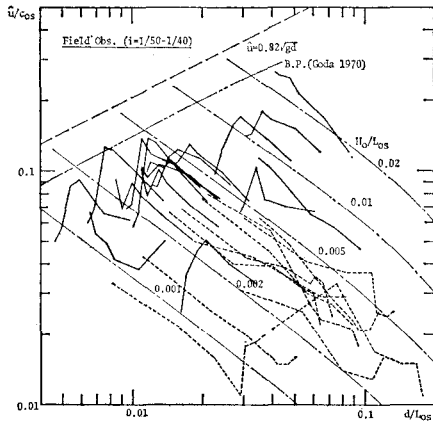


図-6 流速全振幅の浅水変化(不規則波)

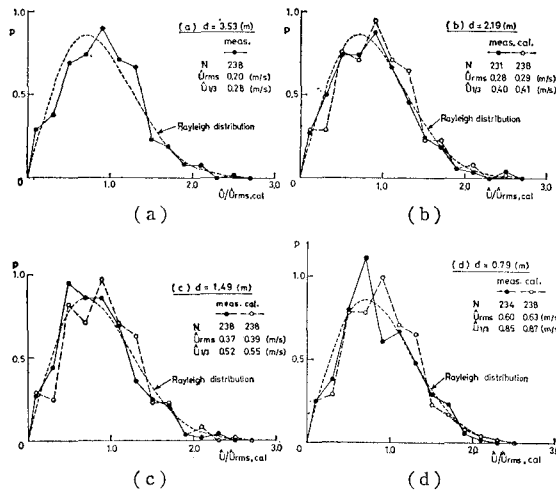


図-7 流速全振幅の確率密度(砕波帯外)

上限値を与えているように見える。図-7 (a)~(d) は Case 1 について、最も深い水深 $d=3.53$ m における測定値から、式(2)を用いて振幅変化を計算した結果を実測結果と比較したものである。実線および破線はそれぞれ実測および計算された確率密度関数を示し、絶対値の比較が容易なように、無次元化に用いる $\hat{u}$ の r.m.s. 値 $\hat{u}_{rms}$ および波の数 N は計算によるものを共通に用いている。砕波点までの変化については両者はほぼ一致していることがわかる。ところがスペクトル解析においては線形理論による値が相当過大になった。これは流速波形が尖ることによるものであると考えられる。実際、個々の波の流速全振幅の r.m.s. 値と流速の時間変化の r.m.s. 値との比 $\hat{u}_{rms}/\sqrt{u^2}$ を計算すると、 $d=3.53$ m および 0.79 m でそれぞれ 2.8 および 3.1 となり、後者は正弦曲線を仮定した値 2.83 より大きくなっている。

図-8 は Case 2 の砕波帯において、図-7 と同様な図を描いたものである。当然のことながら実測値は砕波の影響で小振幅側に移っている。波高変化についてこれ

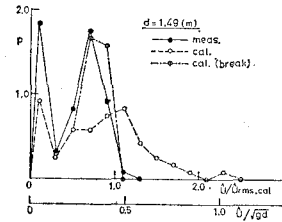


図-8 流速全振幅の確率密度(砕波帯内)

をモデル化したのが合田(1973)である。しかし図-5 (a) および (b) より、緩勾配海岸における砕波の過程は、砕波点において相対流速全振幅 $\hat{u}/\sqrt{gd}$ が最大となり、その後減少してある一定値に近づく傾向にあることによって特徴づけられると思われる。今、このケースについては、線形長波理論で $5/4$ となるような水深減少による相対流速全振幅の指数増大率が、砕波した場合の指数減小率に等しいと見なせば、砕波について、

$$\hat{u}/\sqrt{gd} = \max \{ (\hat{u}/\sqrt{gd})_r, (\hat{u}/\sqrt{gd})_{\max}^2 / (\hat{u}/\sqrt{gd})_{nb} \} \quad (18)$$

となる。ここに添字 $\max$ および r はそれぞれ砕波点および再生点における値、また nb は砕波しないと仮定した場合の計算値を示す。式(18)において $(\hat{u}/\sqrt{gd})_{\max} = 0.44$, $(\hat{u}/\sqrt{gd})_r = 0.28$ として計算した結果が図-8 に一点鎖線で示されているが、実測結果との対応は相当改善される。さらに精度よく評価するためには、磯部ら(1980a)が示すような砕波点のばらつき等を詳細に検討する必要がある。

次に流速波形の非対称性に関しても、図-2 および 3 と同様な図を描いて検討した。その結果、規則波に比較してばらつきが著しいが、式(14)および(15)が分類の目安となり得ることがわかった。

5. 結 論

エネルギーフラックス法を用いた岸沖方向流速全振幅の計算値は、実験室の規則波および現地の不規則波に対する測定値とよく一致する。また流速波形の非対称性についてもある程度の評価が可能となった。

緩勾配斜面において、相対岸沖方向流速全振幅の値は砕波後に減小し、しだいに一定値に近づく傾向にある。この特徴を取り入れた簡単なモデルにより、現地観測から得られた流速振幅の確率分布をある程度説明することができたが、今後さらに詳細な検討を要する。

最後に容量式波高計の製作と現地での使用に際しては、鹿児島大学佐藤道郎助教教授および中村和夫技官に終始お世話になったことをここに記し、謝意を表する。

参 考 文 献

- 磯部雅彦・西村仁嗣・堀川清司：保存波の摂動解の波高に

- よる表示, 第 33 回年次学術講演会講演概要集, II, pp. 760~761, 1978.
- 2) 磯部雅彦: 浅海域における波浪特性, NERC Report No. 9, TR-78-2, 砕波帯のダイナミクスに関する共同研究 (その 1, 自然海岸), 堀川清司編, pp. 29~31, 1979a.
- 3) 磯部雅彦・福田直利・堀川清司: 砕波帯における流速場に関する二次元実験, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 41~45, 1979b.
- 4) 磯部雅彦・西村仁嗣・柄登志彦: 不規則波の砕波変形に関する実験的研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 139~142, 1980a.
- 5) 磯部雅彦・水口 優・堀川清司: 砕波帯付近の波にともなう流速場に関する現地観測, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 148~152, 1980b.
- 6) 岩垣雄一・酒井哲郎: 有限振幅波の Shoaling について, 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp. 1~7, 1967.
- 7) 岩垣雄一・酒井哲郎: 有限振幅波の Shoaling について (2), 第 15 回海岸工学講演会講演集, pp. 10~15, 1968.
- 8) 岩垣雄一・酒井哲郎: 有限振幅波の水粒子速度に関する実験, 第 16 回海岸工学講演会講演集, pp. 15~21, 1969.
- 9) 岩垣雄一・酒井哲郎・関沼淳一・川島 毅: 砕波付近の表面水粒子速度に関する実験, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 67~72, 1970.
- 10) 岩垣雄一・酒井哲郎・川島 毅: 斜面上の波の水粒子速度の鉛直分布について, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 93~96, 1971.
- 11) 岩垣雄一・酒井哲郎・石田 啓: 不規則波の水粒子速度と水面変動との相互関係に関する研究, 第 19 回海岸工学講演会論文集, pp. 149~154, 1972.
- 12) 岩垣雄一・酒井哲郎・月岡康一・沢井信樹: 斜面上の砕波の水粒子速度の鉛直分布と砕波型について, 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 553~557, 1973.
- 13) 岩垣雄一・酒井哲郎: Stream Function Theory による斜面上の砕波の水粒子速度の表現について, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 27~32, 1974.
- 14) 合田良実: 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, 1970.
- 15) 合田良実: 不規則波の砕波指標について, 第 20 回海岸工学講演会論文集, pp. 571~577, 1973.
- 16) 酒井哲郎・J. A. Battjes: Cokelet の理論による波の浅水変形, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 25~29, 1980.
- 17) 佐藤道郎・中村和夫・田村孝義: 砕波帯付近の波浪特性に関する現地観測, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 124~128, 1980.
- 18) 佐藤幸雄: 砕波点における砕波の底面流速に関する研究, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 40~44, 1977.
- 19) 瀬山 明・木村 晃・国友慶記: 浅海域の風波の水粒子速度に関する研究, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 11~15, 1979.
- 20) 土屋義人・山口正隆: 超音波流速計による波の水粒子速度に関する実験的研究, 第 18 回海岸工学講演会論文集, pp. 97~104, 1971.
- 21) 堀川清司・西村仁嗣・磯部雅彦: 有限振幅波理論の適用範囲について, 第 24 回海岸工学講演会論文集, pp. 10~14, 1977.
- 22) 堀川清司・堀田新太郎・水口 優・磯部雅彦: 砕波後の波にともなう流速場に関する現地観測, 第 26 回海岸工学講演会論文集, pp. 46~50, 1979.
- 23) 山口正隆・土屋義人: 有限振幅波理論に基づく波の Shoaling について, 第 22 回海岸工学講演会論文集, pp. 59~63, 1975.
- 24) 渡辺 晃・磯部雅彦・野沢是幸・堀川清司: 斜面上で砕波する波の底面流速に関する実験的研究, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp. 40~44, 1980.
- 25) Apelt, C. J.: Characteristics of split film sensor, AIAA Journal, Vol. 17, pp. 101~102, 1979.
- 26) Cokelet, E. D.: Steep gravity waves in water of arbitrary uniform depth, Phil. Trans. Roy. Soc. Lond., Ser. A, Vol. 286, pp. 183~230, 1977.
- 27) Guza, R. T. and E. B. Thornton: Local and shoaled comparison of sea surface elevations, pressures, and velocities, J. Geophys. Res., Vol. 85, pp. 1524~1530, 1980.
- 28) Le Mehauté, B. and L. M. Webb: Periodic gravity waves over a gentle slope at a third order approximation, Proc. 9th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 23~40, 1964.
- 29) Le Mehauté, B., D. Divoky and A. Lin: Shallow water waves; A comparison of theories and experiments, Proc. 11th Int. Conf. on Coastal Eng., pp., 87~101, 1968.
- 30) Longuet-Higgins, M. S. and J. D. Fenton: On the mass, momentum, energy and circulation of a solitary wave II, Proc. Roy. Soc. Lond., Ser. A, Vol. 340, pp. 471~493, 1974.
- 31) Stiassnie, M. and D. H. Peregrine: Shoaling of finite-amplitude surface waves on water of slowly-varying depth, J. Fluid Mech., Vol. 97, pp. 783~805, 1980.
- 32) Svendsen, I. A. and O. Brink-Kjær: Shoaling of cnoidal waves, Proc. 13th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 365~383, 1972.
- 33) Thornton, E. B., J. J. Galvin, F. L. Bub and D. P. Richardson: Kinematics of breaking waves, Proc. 15th Int. Conf. on Coastal Eng., pp. 461~476, 1976.