

海浜流に関する研究(第4報)

——緩勾配海岸の海浜流——

堀川 清 司*・佐々木民雄**・堀田新太郎***・久保田 進****

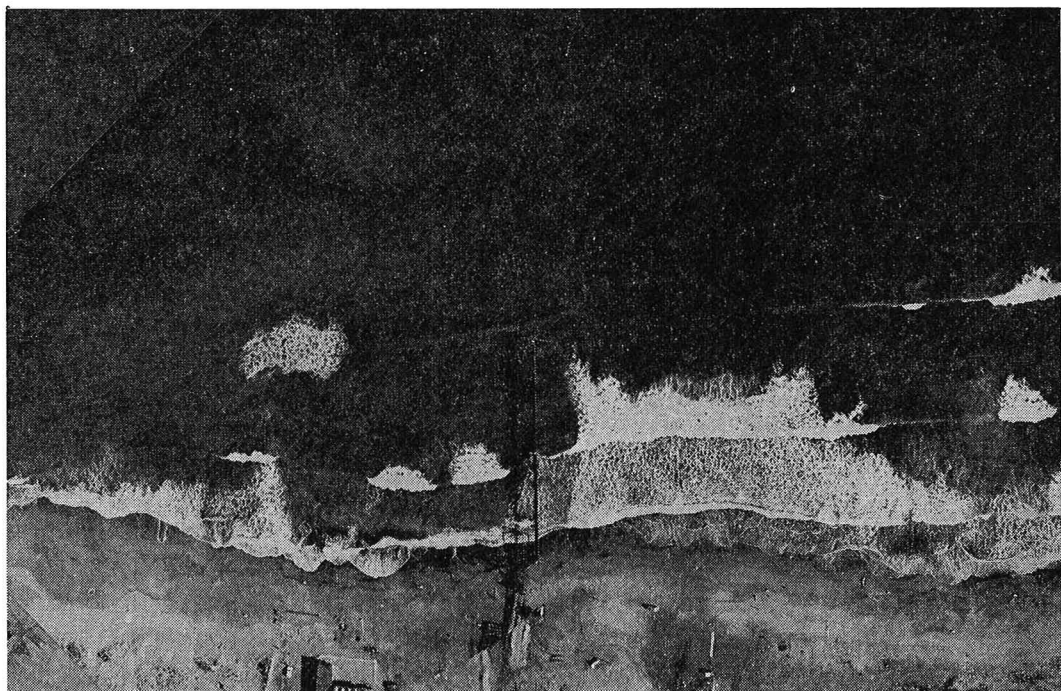
1. 概 説

海浜流のモデルは Bowen (1967)¹⁾ 以来, Sonu (1972)²⁾, Noda (1972)³⁾, 橋本・宇多 (1974)⁴⁾, Noda et al. (1974)⁵⁾, 佐々木 (1974)⁶⁾, Liu and Mei (1974)⁷⁾, および Birke-meier and Dalrymple (1975)⁸⁾ と数多く提案されているが, 依然として, それらを検証するに足る現地観測データは充分とはいえない。著者らは第3報(1975)⁹⁾ において海浜流系の規模を海底勾配と入射波の波形勾配に対する比を示す Iribarren No.¹⁰⁾ によって, 3つの領域, すなわち, ① edge wave 領域, ② 不安定領域, および ③ 外重力波領域とに分け, ① には Bowen and Inman (1969)¹¹⁾ の edge wave 理論が, ② には日野 (1973)¹²⁾ の不安定理論が対応することを示し, ③ に対しては周

期 30 sec より 10 min の波として定義される外重力波が支配的と考える外重力波領域の仮説を提案すると共に, この領域における離岸流の発生間隔の予測式を提案した。

以上3つの領域はほぼ, 急勾配の海岸, 中位の勾配の海岸および緩勾配の海岸に対応する。当, 第4報においては中位から緩勾配の海岸に対応する茨城県阿字が浦海岸において, 昭和50年12月に実施した現地観測結果をもとに, 勾配の緩い海岸における海浜流の機構を考察する。

今回の観測においては BACS を同時に2つ用い立体写真撮影によって, 流速場・波高分布・平均水位分布および外重力波の同時観測を実施した。



写真—1 STEREO-BACS-751218

* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 (株)アイ・エヌ・エー新土木研究所

*** 正会員 工修 東京都立大学助手 工学部土木工学科

**** 正会員 東京大学工学部受託研究員

2. 阿字が浦海岸における現地観測

昭和50年12月18日に建設省土木研究所の棧橋(長さ約100m)のある阿字が浦海岸で現地観測を実施した。この日はほとんど無風であり、周期11~12sec, 碎波波高1.2~1.7mのうねりが海岸にほぼ直角に入射していた(写真-1)。

(1) STEREO-BACS

波高分布を流速場と同時観測するためには Horikawa and Sasaki (1972)¹³⁾のように2機のヘリコプターを用いるのが、精度の上では最もよいが、今回は簡便な方法として気球に吊した6×6版モーター・ドライブ・カメラ(Hasselblad 500EL)を2組用いて立体写真撮影を試みた。レンズにはZeissの40mm Distagonを用いた。2つのカメラは高度約280mに約180m離して係留した。撮影写真縮尺は約1/7000である。写真は3倍に伸してポジフィルムをつくり、図化機にかけ1/500の縮尺で図

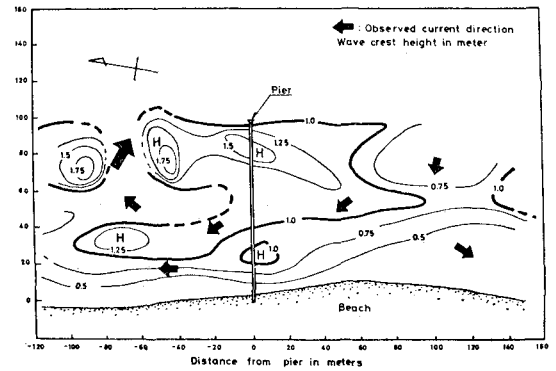


図-3 最高峯高分布 (STEREO-BACS-751218)

化した。

(2) 流速場

図-1は午前11時50分より約15分間の間の流速分布である。カメラの高度が高く、また、カメラを2台使用したので撮影区域は飛躍的に広がったが、フロート

を人間が投入する上での制約があり、図-1では沿岸方向に約300mの区域の流れがとらえられている。波が小さかったために碎波点付近にまでフロートを投入できなかったため、碎波帯の沖から水が流入し、離岸流になって沖へ出る1つのプロセスを同時に観測するのに初めて成功した。流速40cm/secのコンターが流れの形を浮き彫りにしている。離岸流の最大流速は約70cm/secであり、その幅を半値幅で定義すれば、最狭で約20mである。2つの南北からの沿岸流が合流して離岸流になる位置は前回と同じく岸から碎波帯の幅の約1/2沖へ行った地点である。

図-2はフロートの波乗り効果の少ない沿岸方向流速成分より求めた輸送流れ関数 Ψ ¹⁴⁾である。

(3) 波高分布

図-3は5モデルの図化した水面形状図より求めた平均水面上の波の峯高の分布である。6×6版のカメラによる写真の図化のため誤差は小さくないが、波高分布のパターンを観測することができる。棧橋北側の離岸流の両側で最も波高が高く、離岸流はその間の波の砕けていない谷間から沖側へ流出している。離岸流の背後では岸近くで碎波が生じている。

(4) 平均水位分布

図-4は流速場の観測を実施した後、続けて実施した平均水位の観測結果であ

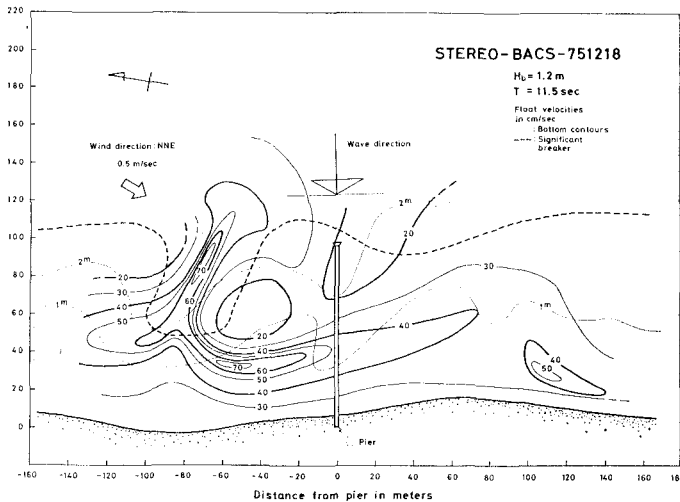


図-1 流速場

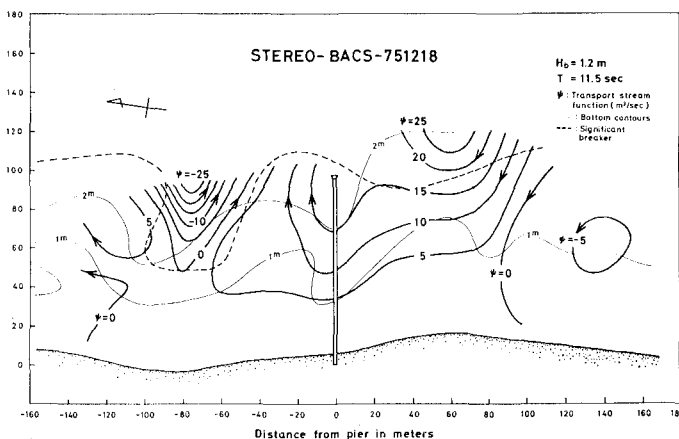
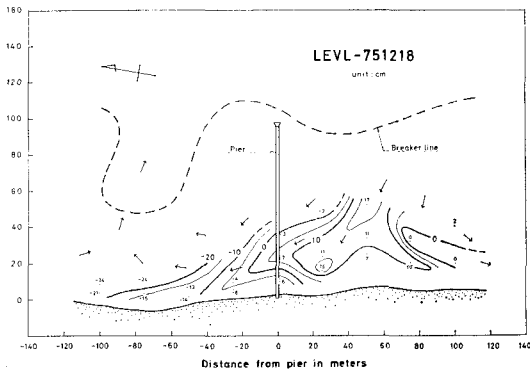


図-2 輸送流れ関数, Ψ

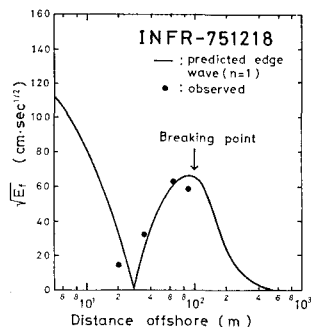


図—4 平均水位分布

り、観測方法は第3報と同じである。観測区域内の最高水位は棧橋南側の沖から水が流入する地点に生じ 17 cm であるのに対し、最低水位は -24 cm で離岸流の位置に相当している。その水位差は約 40 cm であり、その区間は約 140 m 離れているので水面勾配は約 1/350 である。

(5) 外重力波

流速場の観測と同時に棧橋の橋脚に標尺をとりつけ、16 mm カメラにより 1 sec ごとに標尺を撮影し、クロス・スペクトル解析を行った。標尺は 4 台用いたが、碎波点に近い棧橋先端付近の地点(岸から 87 m)の結果では、周期 50 sec と 130 sec 付近にピークを示す外重力波が観測され、その波高は同地点の重力波の波高の夫々約 40% および 50% であったので、重力波の波高から推定すれば、この2つの外重力波の波高は夫々約 50 cm および約 60 cm 以上と考えられる。周期 50 sec 付近の波は沿岸方向にも同時に配置した標尺との位相から岸に直角方向の節線をもつ edge wave と考えられる。offshore modal number は $n=1$ とすれば Eckart¹⁵⁾ の式の振幅比の相互関係を満足する(図—5)。

図—5 infragravity low mode edge wave ($n=1$)

3. 海浜流の数値計算

上述の現地観測データを用いて流速場と平均水位の計算を行った。

(1) 数値モデル

第3報で用いた NCSS (Nearshore Current Simulation System)¹⁶⁾ は Noda (1972) のモデルを任意の海底地形を許容できる様に拡張し、海底摩擦係数に Jonsson (1966)¹⁷⁾ の wave friction factor を応用した定常海浜流モデルである。波高場、波向場の計算は Munk and Arthur (1952)¹⁸⁾ の ray intensity equation を格子点法¹⁹⁾ で解いて与えている。

(2) 数値計算

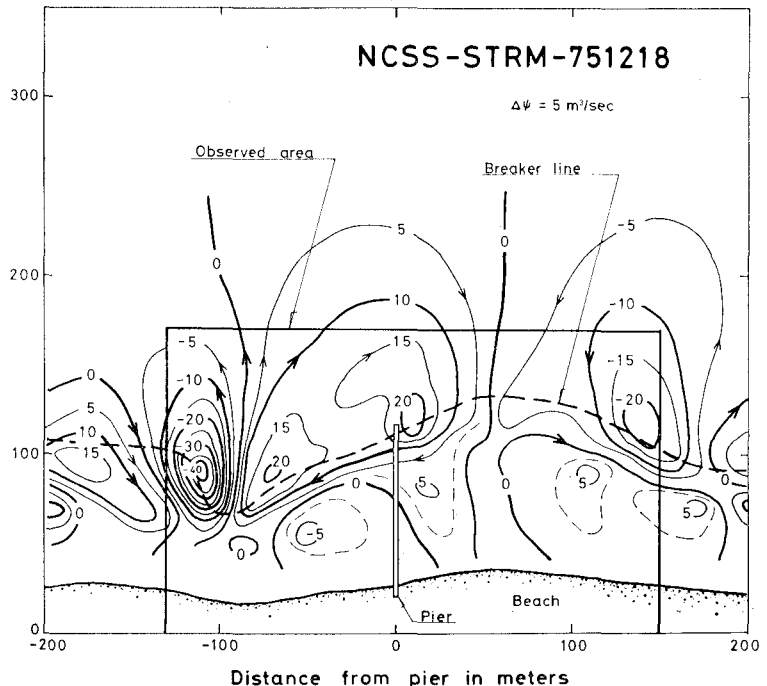
第3報と同じ沿岸方向 40 個×沖合方向 60 個の格子を用い $\Delta x=10$ m とした。岸より 170 m までは昭和 50 年 12 月 18 日前後の建設省土木研究所の深浅図を用い、それ以降は深浅図がないため一様斜面とした。

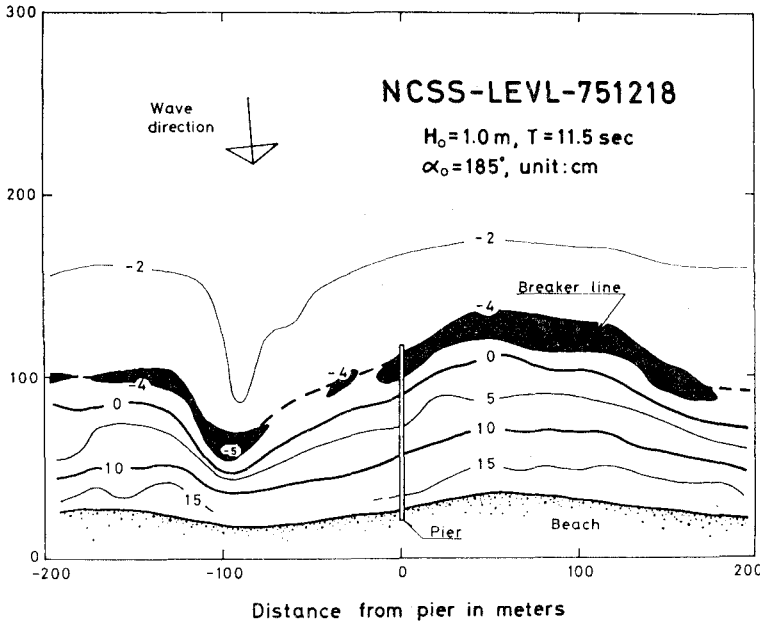
(3) 流速場

図—6 は海底のみかけの粗度長さを 15 cm とした時の Ψ の計算結果である。図—2 と比べると流れのパターンはよく合っているが、碎波帯内の流速の大きいところが観測では岸に近いのに対し、計算では碎波点に近い。これは計算で用いた水深に wave set-up が考慮されていないためではないかと思われる。

(4) 平均水位

図—7 は平均水位の計算結果である。 wave set-down

図—6 輸送流れ関数, Ψ (計算)



図—7 平均水位分布 (計算)

は 4~5 cm で最大の 5 cm のところに離岸流が位置している。また離岸流の位置は set-down 最大の地点が最も岸に近いところに対応し、ここでは沖向きの水面勾配が最も大きく、約 1/200 の値を示している。

沿岸方向の観測された最大水位差は約 40 cm であったが、計算では約 25 cm であり若干小さい。また、観測では岸からやや離れた位置で最大の set-up が生じていたが、計算では一様斜面の場合の様に岸に近いほど大きな値を示している。この相違の原因としては岸近くに岸に平行なトラフ状の狭い channel があったのに、それが深浅図に反映されていないこと、swash zone 付近の浸透の効果などを考えることができる。

今後の課題としては海底摩擦の取扱いを更に検討すると共に、wave set-up も考慮して計算を行う必要があらう。

4. 緩勾配海岸における海浜流の発生機構

第3報においては海浜流系の規模は Iribarren No. (I_r^*) によって3つの領域に分けられることを示した。すなわち、

- ① 外重力波領域 $0.23 \geq I_r$
- ② 不安定領域 $1 \geq I_r \geq 0.23$
- ③ Edge wave 領域 $I_r \geq 1$

である。ここで I_r は

$$I_r = \tan \beta / (H_0/L_0)^{1/2} \dots\dots\dots (1)$$

* Battjes (1974)¹⁰⁾ は式(1)のパラメーターを最初に見出した Iribarren の名にちなんで、surf similarity parameter ξ を Iribarren No. と名づけることを提案している。

ここで、 $\tan \beta$, H_0/L_0 は夫々海底勾配および沖波の波形勾配である。なお、①と②は Guza and Inman (1975)²⁰⁾ の dissipative system に対応し、③はほぼ reflective system に対応する。

(1) 外重力波領域

外重力波領域は砕波帯中の波の数が約3波以上の場合に相当し、 $\tan \beta$ にして 1/50~1/60 よりゆるい場合にはほぼ相当する。この領域では離岸流の発生間隔 Y_r の砕波帯の幅 X_b に対する比 Y_r^* は次式で示される。

$$Y_r^* = 157 I_r^2 \dots\dots\dots (2)$$

Y_r^* が I_r の2乗に比例することは、 Y_r^* を edge wave が支配していることを暗示している。すなわち、Eckart の式

$$L_e = \frac{gT_e^2}{2\pi} (2n+1) \tan \beta \dots\dots\dots (3)$$

を用いると、edge wave の波長 L_e が Y_r のオーダーの量、砕波水深が H_0 のオーダーの量とすれば、 $X_b \sim H_0 \cdot \tan \beta$ により、 $Y_r^* = Y_r/X_b$ の定義から

$$Y_r^* \sim \frac{L_e}{H_0 \tan \beta} \sim (2n+1) \frac{\tan^2 \beta}{H_0/L_0} = (2n+1) I_r^2 \dots\dots\dots (4)$$

ここで n は offshore modal number である。すなわち、edge wave によって Y_r が支配されると Y_r^* は I_r^2 に比例する。

(2) 外重力波の波高と周期

外重力波 (infragravity waves) は Munk (1951)²¹⁾ によれば周期 30 sec より 5 min の波と定義されている。これは従来 surf beat といわれていた周波数帯に対応する。合田 (1975)²²⁾ は茨城県大洗海岸、新潟港松浜海岸および宮崎県宮崎海岸において surf beat の観測を実施し、沖波の rms 振幅 ζ_{rms} と surf beat (ここでは周期 20 sec 以上の波と定義) の rms 振幅 ζ_{rms} との比を調べた。

現地観測時の沖波波高は 0.47~3.32 m、岸波 (砕波帯) の波高は 0.64~1.34 m であり、surf beat の波高は 13~83 cm、その周期は 45~76 sec でありすべて 1 min 前後の外重力波であった。岸波と surf beat の振幅比をみると 20~70% にもおよんでいる。すなわち、外重力波の波高は砕波帯内では平時でも数 10 cm あり、重力波 (岸波) の波高の 20~70% もの波高を有しているので充分離岸流の発生の原因となり得ることをこの観測は

示し、外重力波領域の仮説を裏づけるものと思われる。

(3) 外重力波の成因

surf beat は edge wave であろうという議論は Issacs et al. (1951)²³⁾ が 20 年以上前に指摘している。また、Yoshida (1950)²⁴⁾ は重力波の周波数スペクトルの構造から非線型干渉によって 1~3min の surf beat が生ずることを導いた。さらに、Gallagher (1971)²⁵⁾ は周波数スペクトルのみでなく方向スペクトルの非線型干渉からも surf beat 周波数帯の (infragravity) low mode edge wave が生ずることを示した。

著者らの外重力波の観測²⁴⁾は波高計の array の数が充分でないため、まだ edge wave の波形を完全にとらえるに至ってはいないが、常に周期 1min 前後で $n=1$ または 2 の infragravity low mode edge wave を見出している。

以上より緩勾配海岸においては外重力波が longshore wave perturbation を与え、これが bottom perturbation をつくり、この bottom perturbation が海浜流を支配するものと考えられる。2. で述べた数値計算は bottom perturbation (深淺図) が海浜流を生み出すことを示しているものである。極くまれな時化時には wave perturbation が bottom perturbation に卓越し海浜流を駆動するものと考えられる。

5. 結 語

本報においては、2. において 2 組の BACS を用いて流速場・波高分布・外重力波および平均水位の同時観測を試み、その結果循環の 1 つをとらえることができた。

3. においては数値モデルによる計算を行い、平均水位を観測値と比較した。4. においては「外重力波領域の仮説」を裏づける二、三の研究成果を示すと共に、この領域では周期 1min 前後の infragravity low mode edge wave が wave perturbation を与えている可能性が非常に強いことを示した。

今後の課題としては ① 逸散項の取扱い、② 急勾配海岸の現象、③ 非定常現象、④ 碎波帯の精密な測量、⑤ 構造物のまわりの流れ、および ⑥ 海浜流による移流拡散等を挙げるができる。

なお、現地観測は、建設省土木研究所より I.N.A. 新土木研究所に委託された、昭和50年度「阿字が浦海岸海浜流観測調査」、および文部省科学研究費総合研究 (A) 「海浜過程におけるダイナミック・システムに関する研究」(研究代表者 堀川清司) によって行った。現地観測に際しては建設省土木研究所海岸研究室橋本宏室長以下の諸氏、また写真の図化においては (財)リモート・センシング技術センター田中総太郎博士、京葉測量(株)高橋通部長、北川恵一係長、および (株)アジア空三センター山崎三郎代表取締役、小川信彦係長の諸氏より御

尽力を賜った。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。また数値計算は東京大学大型計算機センターの HITAC 8800/8700 および日本 IBM (株) 東京データ・センターの IBM 360/K195 を使用したことを付記する。

参 考 文 献

- 1) Bowen, A.J.: Rip currents, Ph. D. Thesis, University of California, San Diego, 1967.
- 2) Sonu, C.J.: Field observation of nearshore circulation and meandering currents, Jour. Geophys. Res., Vol. 77, No. 18, pp. 3232-3247, 1972.
- 3) Noda, E.K.: Rip-currents, Proc. 13th Conf. on Coastal Eng., pp. 653-668, 1972.
- 4) 橋本 宏・宇多高明: 海浜流の数値計算法とその応用, 第 21 回海岸工学講演会論文集, pp. 335~360, 1974.
- 5) Noda, E.K., C.J. Sonu, V.C. Rupert and J.I. Collins: Nearshore circulations under sea breeze conditions and wave-current interactions in the surf zone, Tetra Tech, Inc., Technical Rep., No. 4, Pasadena, California, 1974.
- 6) 佐々木民雄: 海浜流系の構造に関する野外的研究, 東京大学大学院工学系研究科学学位論文, 1974.
- 7) Liu, P. L-F. and C.C. Mei: Effects of a breakwater on nearshore currents due to breaking waves, Ralph M. Parsons Lab. Rep. No. 192, MIT, 1974.
- 8) Birkemeier, W.A. and R.A. Dalrymple: Nearshore water circulation induced by wind and waves, Proc. 2nd. Symposium on Modeling Techniques for Waterways, Harbors and Coastal Engineering, pp. 1062-1081, San Francisco, 1975.
- 9) 堀川清司・佐々木民雄・堀田新太郎・桜本 弘: 海浜流に関する研究 (第 3 報)—海浜流の規模—, 第22回海岸工学講演会論文集, pp. 127~134, 1975.
- 10) Battjes, J.A.: Surf similarity, Proc. 14th Conf. on Coastal Eng., pp. 466-480, 1974.
- 11) Bowen, A.J. and D.L. Inman: Rip currents, 2. Laboratory and field observations, Jour. Geophys. Res., Vol. 74, No. 23, pp. 5479-5490, 1969.
- 12) 日野幹雄: 海浜流系の発生理論 (3)—単純化された理論—, 第20回海岸工学講演会論文集, pp. 339-344, 1973.
- 13) Horikawa, K. and T. Sasaki: Field observations of nearshore current system, Proc. 13th Conf. on Coastal Eng., pp. 635-652, 1972.
- 14) Arthur, R.S.: A note on the dynamics of rip currents, Jour. Geophys. Res., Vol. 67, No. 7, pp. 2777-2779, 1962.
- 15) Eckart, C.: Surface waves in water of variable depth, Scripps Inst. Oceanogr. Wave Rep. 100, SIO Ref. 51-12, 1951.
- 16) Sasaki, T.: Simulation on shoreline and nearshore current, Proc. Civil Engineering in the Oceans/III, Newark, Delaware, 1975.
- 17) Jonsson, I.G.: Wave boundary layers and friction factors, Proc. 10th Conf. on Coastal Eng., pp. 127-148, 1966.
- 18) Munk, W.H. and R.S. Arthur: Wave intensity along a refracted ray, in Gravity Waves, Chap. 13, National Bureau of Standards, 1952.
- 19) 堀川清司・西村仁嗣・小沢保臣・宮本幸始: 別府湾における台風時の波浪推算について, 第 18 回海岸工学講演会論文集, 1971.
- 20) Guza, R.T. and D.L. Inman: Edge waves and

- beach cusps, Jour. Geophys. Res., Vol. 80, No. 21, pp. 2997-3012, 1975.
- 21) Munk, W.H.: Origin and generation of waves, Proc. 1st. Conf. on Coastal Eng., pp. 1-4, 1951.
- 22) 合田良実: 浅海域における波浪の碎波変形, 港湾技術研究所報告, Vol. 3, No. 3, pp. 59-106, 運輸省, 1975.
- 23) Isaacs, J.D., E.A. Williams and C. Eckart: Total reflection of surface waves by deep water, Trans. Amer. Geophys. Union, Vol. 32, No. 1, pp. 37-40, 1951.
- 24) Yoshida, K.: On the ocean wave spectrum with special reference to the beat phenomena and the "1-3 minute waves", Jour. Oceanogr. Soc. Japan, Vol. 6, No. 2, pp. 1-8, 1950.
- 25) Gallagher, B.: Generation of surf beat by non-linear wave interactions, Jour. Fluid Mech., Vol. 49, No. 1, pp. 1-20, 1971.
- 26) Sasaki, T. and K. Horikawa: Nearshore current system on a gently sloping bottom, Coastal Eng. in Japan, Vol. 18, pp. 123-142, 1975.
-