

最近の海岸漂砂の研究の動向について

(第九回海岸工学会議より)

榎 木 亨

CURRENT RESEARCH PROJECTS OF THE STUDY ON COASTAL SAND DRIFT

(From the 9th Conference on Coastal Engineering)

Dr. Toru SAWARAGI

Synopsis

This description is mainly based on the papers presented in the 9th Conference on Coastal Engineering which the author has attended.

The study on the coastal sand drift contains the following items: (1) The coastal current near the shoreline, (2) the behaviors on the sediment movement and the stability problem of shoreline, (3) the variation of beach profile and the distribution of sediment material, etc.

1. 緒 言

著者は昭和39年6月21日より29日までリスボンで開かれた第9回国際海岸工学会に出席する機会がえられた。本論文は、主としてこの会議における海岸変形過程の部門で報告された論文より、最近の海岸漂砂、海岸浸食の問題がいかに取扱われているかを明らかにするとともに、帰途訪れた欧米の諸大学、諸研究所における漂砂の研究動向を報告するものである。

学会は15ヶ国から130人の参加者をえて、リスボンにおけるポルトガル国立土木研究所で行なわれたが、提出された論文数は73でそれぞれの論文はつぎの5つのグループに別けて報告された。

1. 波の特性に関する研究：(論文数 13)
2. 海岸線の変形過程に関する研究：(論文数 27)
3. 潮汐と高潮に関する研究：(論文数 8)
4. 波力に関する研究：(論文数 14)
5. 海岸構造物の設計、構築に関する研究：(論文数 11)

ここで報告しようとする海岸漂砂に関する研究は上記グループの2に属するものであって、いまこの2のグループを細分してみるとつぎのような結果がえられる。

- (a) 海岸線近傍の流れに関する問題：(論文数 4)
- (b) 沿岸漂砂の性状とその移動にともなう海岸地形の安定に関する問題：(論文数 11)
- (c) 海岸の断面変化と底質に関する問題：(論文数 6)
- (d) その他：(論文数 7)

この細分類による論文数からもわかるように、このグループにおける論文の過半数が沿岸漂砂の移動とその結果として生じる地形変動及びその原因となる沿岸流の算定に関するものである。この事実は、沿岸漂砂移動に関する研究が、海岸施設の設計に対しても基礎となるべき研究として、各国においてさらに研究検討を加えねばならない分野としての再認識の証查であろう。またこのグループの各国別の論文数をみても

と、米国10, オランダ3, ポルトガル4, 日本3, フランス2, その他各1となっており, 各国の海岸変形過程に関する研究態度をするのに興味のある数字を示しているようである。このような世界の漂砂の研究に対する関心の度合に対して, 最近のわが国の海岸工学分野における漂砂の研究成果の占める割合は, 海岸工学講演会の発表論文数では3~5編(発表全論文数40~35)と極めて関心の薄いものになっている現状であるが, 今後さらにこの種の漂砂に関する研究の進歩発展が望まれる次第である。

以上は海岸工学の分野における漂砂に関する研究の動向を論じたのであるが, つぎに各国の研究の問題点を, 論文を通じてみていくこととしよう。

2. 海岸線近傍の流れに関する研究

漂砂の移動の殆んどが砕波点と海岸線との間に集中するため, その漂砂の移動に密接な関係をもつ海岸線近傍の流れの研究は従来より研究が進められ, 沿岸流の算定には Putum-Munk-Traylor, Inman-Quinn の孤立波理論を用いた運動量, エネルギー理論より導かれたものがある。今度の学会でカナダの Brebner と Kamphuis の研究は, これら従来の研究成果が砕波の特性であらわされているのを, 使用の便宜上深海波の特性であらわすことに努め, 実験結果を用いて, 相関解析 (Regression Analysis) と Fourier 解析より波の入射角 α_0 の要素を次式で求めている。すなわち,

エネルギー理論:

$$V = 2.5 \left(\frac{gi H_0^2}{T} \right)^{1/3} [\sin(1.65\alpha_0) + 0.1\sin(3.30\alpha_0)]$$

運動量理論:

$$V = 6 \left(\frac{gi^2 H_0^3}{T} \right)^{1/4} [\sin(1.65\alpha_0) + 0.1\sin(3.30\alpha_0)]$$

ここに i は平均勾配, H_0 は沖波波高, T は周期, g は重力加速度, α_0 は沖波の入射角をあらわす。

Brebner らは, この式から求められる沿岸流速は直線海岸で均一な勾配をもたない海岸では最大の沿岸流速を与えるものと述べているが, 海岸地形の複雑な場合, このような深海波の表示で沿岸流速を表わすことができるかどうかは極めて疑問がある。

またポルトガルの Castanho は砕波線と海岸線の区間えの供給される水の運動量の変化から平均沿岸流速を算出し, その沿岸流速を用いて沿岸流が砕波線と海岸線の区間で摩擦によって損失するエネルギーと波による海岸線に平行な方向のエネルギー量との比 s を求め, また沿岸流の保存する運動エネルギーと波の海岸線と平行方向のエネルギー成分との比 t を求めて, 砕波によって失なわれるエネルギーの割合を

$$r = 100 - (s - t) \%$$

で求めている。その結果 r は入射角 α と $A = i\delta/h$ ($\delta = H/L$) の関数で求められることを示し, Fig. 1 のような関係図をえている。その平均流速に関する計算過程や s 及び t の導き方にも疑問点が多いが, しかし Fig. 1 においては i 及び水深 h を一定とすると H/L の小さい波ほど砕波によって失なわれるエネルギーは大きく, この事実と砕波型と考えあわせると, plunging 型が Spilling 型に比してエネルギーの消失度が大きいことを示している。また同じ海岸地形, 同じ波形勾配をもつ波でも水深の深い地点で砕波した波が大きいエネルギーの損失を示していることは, 従来の水深のみで規定していた砕波のエネルギーの考え方では説明することのできない事実を示すものと思われる。

Per Brunn の沿岸流に関する発表は, 彼が先年発表した沿岸砂洲のある海岸における沿岸流速の算定式²⁾に基づく計算法と計算図表を示したが, これはすでに Florida 大学の Technical Report²⁾ として発表されているもので, Brunn の計算は海岸線に沿岸砂洲が一つあるいは数個存在するとき, 深海波に於ける Longuet-Higgins³⁾ によって求められた波高の統計分布が浅海においても適用することができ, 砕波は孤立波理論でもってあらわされるとして砂洲を越えて岸側に流入する水量を算定し, その流入水量の沿岸方向の量が水面勾配を形成してその水面勾配に応じて, 河川の流れと同じように Chézy 公式にもとずいて流れる

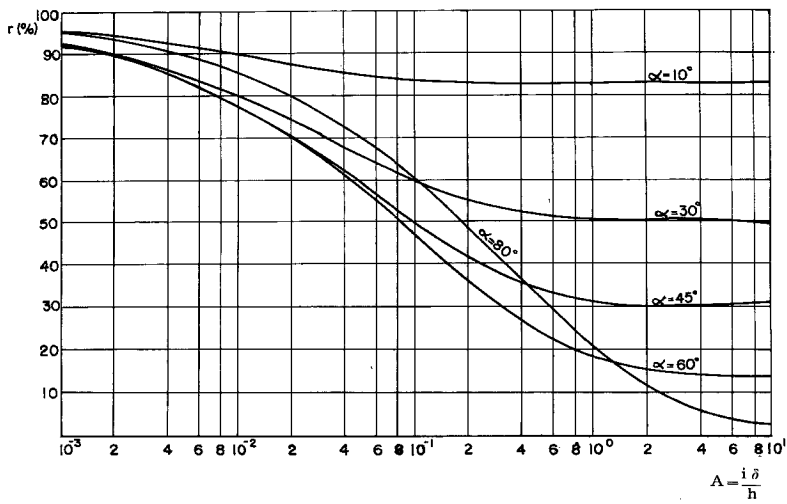


Fig. 1. Energy fraction dissipated by breaking.

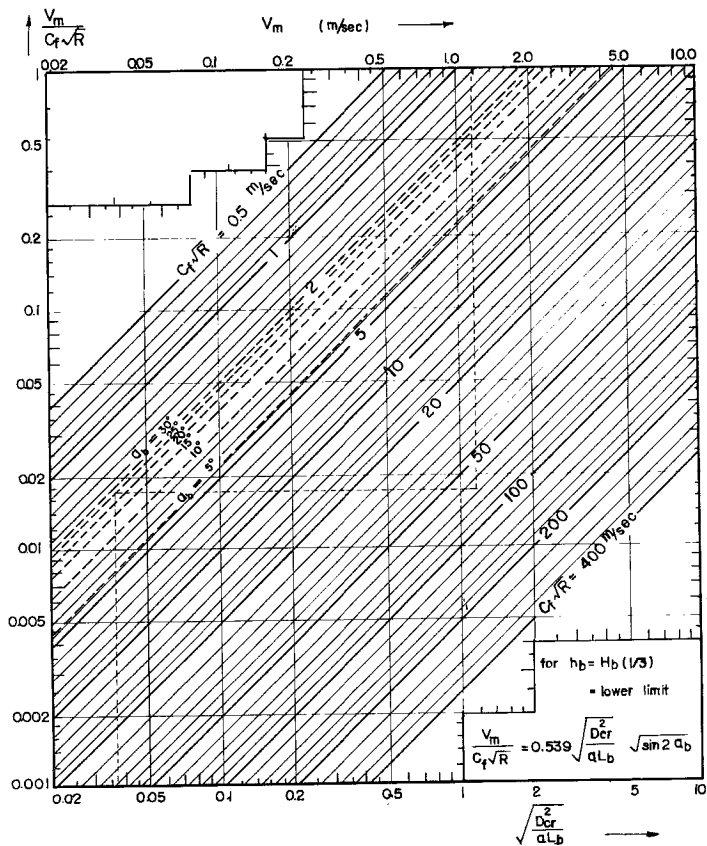


Fig. 2. Longshore current along a one-bar beach with inflow of water.

という考え方である。**Fig. 2** は一つの砂洲が存在するような場合の計算グラフで、図中 V_m は平均沿岸流速、 a は砂洲内側から汀線までの距離、 L_b は砕波点の波長、 R は波の谷における径深、 C_f は Chézy 常数、 D_{cr} は砂洲頂の水深、 α_b は砕波角を示している。この研究において、砂洲の数によって流れの相違が生じることが明らかにされているが、沿岸流速によって左右される沿岸漂砂量の算定においても、このように沿岸砂洲の発達している海岸線の形状をただ単に海浜の平均勾配であらわすことは困難であり、従来の漂砂量公式に関してさらに地形の特性を考慮しなければならないことを示唆するものといえよう。

後の一つの報告は帰還流(Rip Current)に関する発生と間隔の問題をとりあげた Inman の報告であって、帰還流の強さ及び間隔は波の入射角とは独立したものであることを結論づけている。

上述の沿岸流速の算定に関する論文はいずれも砕波に孤立波理論を適用し、流速分布はいずれの地点も平均流速で流れているとの仮定に基いており、その点ではなんら従来の沿岸流速の算定方法とは大きな進歩が認められず、砕波の特性も Miller⁴⁾らの野外観測の報告によれば、孤立波の特性とことなることが明らかにされているので、さらに検討を要するものと思われる。

3. 沿岸漂砂の性状とその移動にともなう海岸の安定に関する問題

今回の発表論文において、沿岸漂砂の性状を論議したものは、Brunn の流れと波が共存する場合の漂砂の移動を取り扱った一編を除いて、すべて螢光材料、ラジオアイソトープなどのトレーサーを用いた野外観測結果の報告である。

その一つの Per Brunn の論文は波による砂の輸送形態のうち移動の速い sheet-layer movement (他の砂の波動で移動する動きの遅いものを bulk movement と呼ぶ) を螢光材料をトレーサーとして用いて、どの地点の砂が最も移動が激しく、またどの地点に移動し堆積するかを研究した。すなわち、フロリダ Fernandia 海岸のピアを利用してその漂砂上手側に投入したトレーサーを採取した野外実験の報告であるが、この螢光材料を数える電気写真装置(Scanning Machine)の未完成のため、十分な解析結果は報告されていない。しかしこの調査法を利用すれば、海岸線近傍の養浜を行なうに当って沖浜の砂をスクレーパーによってかき集めるのに、いかなる水深の地点の砂が最も効率よく海岸線にもちきたることができるかという問題に対して、この方法を用いての野外調査結果は重要な資料を与えることになる。

なおこの研究で用いられた掃流漂砂採砂器は従来の採砂器(3 ft×2 ft×8 in)に噴流装置を附加せしめたもので、採砂を陸上にとり出すのにその装置を陸上に運び出すことなく、入口の戸扉を密閉して陸上より噴流水を採砂器の中に送りこんで攪拌し、外部に吸出すように工夫されたもので、興味あるものといえよう。

その他この種の研究としては、インド、カルカッタ近傍の Hooghly におけるラジオアイソトープによる調査結果及びポーランドにおける螢光材料を用いた調査報告があげられるが、定量的な漂砂の移動性状については解析されていない。

Brunn の他の 1 編は波と流れの共存下における漂砂の特性を明らかにしようとしたものであるが、これは前回の海岸工学会において Scripps 海洋研究所の Inman が発表した論文⁵⁾と同種のもので、感潮河口部の漂砂の性状を明らかにしようとした基礎研究である。この問題は著者にとっても興味のある問題であったが、これもまた現在進行中の研究でその研究方針を述べたにとどまっている。すなわち、流れにともなう波浪特性の変化、水路の二断面間の水頭損失を計測することによってえられる摩擦係数の算出と波浪減衰係数の算定及び螢光材料を用いての掃流漂砂の移動状況などである。

つぎにこれら沿岸漂砂の移動の結果生じる海岸線の安定形状を論じた論文としては、オランダの Bakker 及び Edelman、と Grijm の川のデルタ地帯を含む海岸の安定形状を、沿岸漂砂量を仮定して数学的モデルとして取扱い、その一般解を求めた二つの論文がある。

その結果 Bakker 及び Edelman は海岸線の安定、不安定領域が波の入射角(α)及び川からの流砂量と漂砂量の比(ϵ)によって左右されることを証明し、安定領域は双曲線の海岸線を示し、不安定領域は拋物

線状の海岸線を示すことを述べている。さらに川の流砂量が大きいときは海岸線は不安定でデルタが防砂堤の役割をはたすが、川の流砂量が少ないときは海岸線は安定でデルタは防砂堤の役割を示さないことを述べているが、川の流砂量と海岸漂砂量は同時に考えあわせた研究は比較的少なく、河口安定問題を論議する研究としては興味ある結果を示している。一方 Grijm の論文は彼の第7回海岸工学会の継続研究で沿岸漂砂以外に風の影響を考慮して取扱ったものである。

この両者の研究ともその基礎となるべき沿岸漂砂量公式には沿岸漂砂量が $\sin 2\alpha$ に比例するという仮定のみであらわし、海浜の断面形状、底質などの諸要素の効果を全く無視して取扱っており、十分な論議がなされていないようである。また Bakker 及び Edelman は沿岸漂砂量公式が不十分であるという理由のもとに、 α の範囲によって、その漂砂量公式を変えていたが、この点にも疑問が残されている。

この他構造物を用いた海岸線の安定に関しては、防砂堤に海岸線の安定を論じた石原、榎木の論文及び離岸防波堤設置にともなうトムボロの発生と沿岸漂砂の阻止機能を論じた尾崎の論文が提出されていた。

以上、沿岸漂砂の問題に関してはその多くが実測結果の報告であり、基礎的な実験は殆んど報告されていなかったが、著者が帰途訪れた SOGREAH 研究所においては、三次元の風洞水槽を用いた、西独シルト地区の不規則波による沿岸漂砂の移動状況の解明と海岸浸食状況の研究を目的とした模型実験が行なわれていた。従来漂砂の実験的研究に風洞水槽を使用した例はなく、その研究成果が期待される次第である。またその他漂砂実験において奇異に感じたのは、オランダの De Voorst の野外実験所において行なわれていた防砂堤による海岸線変形の移動床実験である。その実験において、海岸部に底部粗度を与える目的で箸状の棒をさしこんでいた。その相似条件は沿岸流の流速を Chézy 公式によって相似せしめているようであるが、非定常な沿岸流を Chézy 公式でもってあらわそうとするのに疑問があり、その適用されない流れの相似を固執するあまり、入射波の波の性格を変えてしまわないかという懸念も出てくる。一般にフランス、オランダでの海岸実験をみても、実際にできるだけ近い状態での実験を試みようとする努力をしているのであるが、その基礎となるべき研究に対する検討が十分行なわれていないようである。

4. 海岸の断面変化と底質分布に関する問題

海岸の断面形状の変化に関する論文は水位変動にともなう海岸地形の変化と季節的な変化を論じたものである。

Fairbridge の論文は水面が上昇すれば Fig. 3 に示すように海岸線近傍は著しい浸食を受け、汀線は後退し、沖浜の部分が堆積を示すという Brunn の水位上昇と海岸浸食の考え方⁹⁾を実験により確めた報告で、平均水位の変動が海岸地形に著しい影響を与えることを述べたものである。

一方 Thompson らは野外観測において、海岸断面変化に及ぼす潮汐変化（水位変動）の影響を求めた場合、その断面測定の間隔によって潮汐の影響があらわれる場合とあらわれない場合とがあるという事実（彼は観測を一週間隔観測と定日観測の二種類について行なっている。）を指摘し、潮汐の影響は定日観測の場合においてのみ見出されることを述べている。以上の2編は来襲波の特性があまり変化しない場合の水

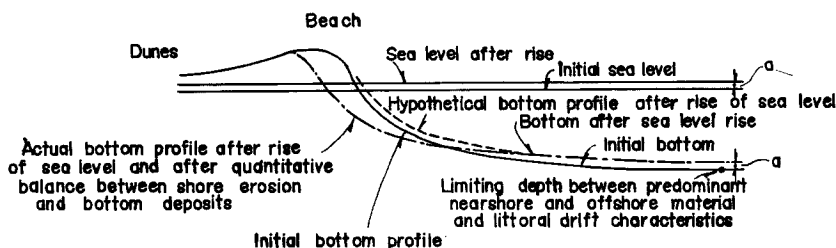


Fig. 3. Influence of sea-level rise on the development of beach and offshore profile.

位変化の影響についてであるが、Darling は波浪特性が変化する海浜断面の季節的变化を New Jersey の野外観測結果から報告しているもので、海岸断面の変形過程に関しては前二者の論文の方が興味深い。これらの論文においてはその結果のみの報告にとどまっており、水位変化にともなう海岸変形過程の考察は何ら行なわれていないが、いまこの水位上昇にともなう汀線の後退に関して、著者が先に発表した洋岸の平衡勾配を用いた海岸断面の変形過程の考え方⁷⁾を適用して若干考察しておくこととする。

著者は水位一定の場合の波の特性の変化にともなう海岸地形の変形機構について海岸の平衡勾配と砂の移動限界水深を用いて考察したが、それと同じことが波浪特性一定の場合の水位変化による海岸地形変化についてもいえる。いま Fig. 4 のようにある与えられた波浪特性に対応した海岸地形において漂砂の限界水深 h_c/L_0 を示す位置を A とすると水位変化 Δh によって限界水深の $\overline{AB}$ が x'/L_0 座標では $\overline{A'B'}$ に変化する。 Δh だけ増加した水面においては A' を起点として海岸の地形変化が生じるのであるから、 H_0/L_0 が変化しないものとする、Fig. 4 で実線で示した元の海岸地形は点線で示すような新しい平衡勾配地形に近づこうとし、汀線が後退する。実際の海岸においては水位の変化とともにさらに波浪の変化が生じるからその近づこうとする新しい平衡勾配によって Fig. 4 のような簡単な海岸地形にはならないが、汀線の変化は求められるであろう。

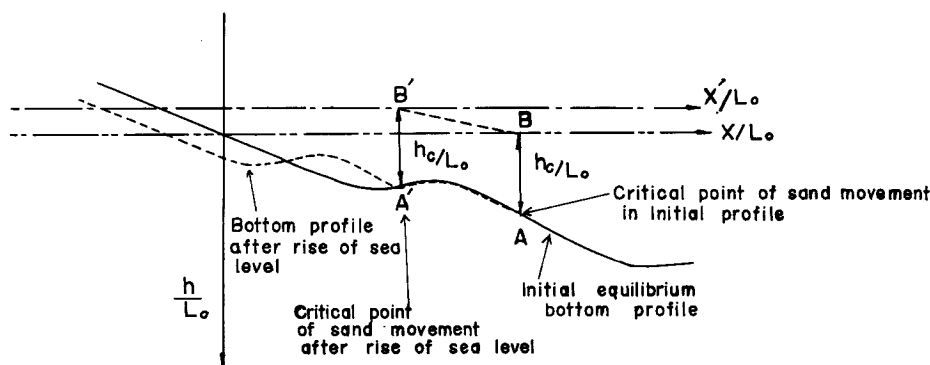


Fig. 4. Variation of beach profile with rise of sea-level.

つぎに海岸底質に関しては、Zeigler らの底質の前浜、砂洲上における居留時間の問題をとりあつかった論文がある。これは Krumbein⁸⁾ らの底質と海岸勾配、入射波浪特性、風の影響及びその浜に対応する底質の関係を求めようとする考え方と共通するものであり、現在アメリカにおける地質学者の海岸地形変化をする方法の一つの流れを示すものといえよう。

Zeigler の研究は長期間の海岸断面にその底質の粒径分布を調べて、その粒径のとどまっている時間を大きい時間尺度から判定しその地形変化を推定しようとする試みである。

また Krumbein の研究は本学会では発表されていなかったが、その考え方を紹介しておくこととしよう。彼の考え方は従来の海岸地形の変動に影響する諸要素の影響度を知るための一手法で、漂砂の運動機構からこれら諸要素の影響を明らかにしていくことができないため、その生じる結果と影響する諸要素との間に線型関係が成立するものとして、連続相関解析 (Sequential Regression Analysis) によって求めようとするものである。Krumbein はバージニアの海岸調査の記録から海浜勾配に及ぼす諸要素の影響を検討した結果、平均粒径 63.1%、波高 11.0%、波の周期 1.8%、静水位 2.2%、波の角度 0.6% という値をえている。

以上、Zeigler 及び Krumbein らの方法は漂砂の力学的な運動機構の解明が不十分な現在においては注目すべき考え方と思われる。

5. そ の 他

1. で述べた細目のうち、以上の述べた論文以外に風による飛砂の年間損失量を求めた、Johnson の報告及び養浜砂の選定における材料砂の摩擦による損失度に関する英国の Duvivier の論文などがあるが、Johnson は単位時間飛砂量を表わすのに Bagnolds の公式を用い、その各風速、風向別の単位時間飛砂量に、年間の風向風速別の頻度を乗じて求めたもので、岩垣及び著者が以前に明石海岸において求めた年間沿岸漂砂量の算定方法と全く同様の方法をとっていたことは興味深いものがあった。

6. 結 語

以上、第九回海岸工学会の漂砂の移動に関連した研究及び現在の欧米の研究所の研究状況を通じて、漂砂の移動機構、浮遊砂の運動機構、沿岸漂砂量の検討など基礎的な研究が行なわれていなかったのは残念であった。しかし M.I.T. において Ippen の発案によるといわれている加速度流中の砂の移動の研究装置は、従来の開水路及び波浪水槽、閉管路のみを用いて砂の移動機構を研究しているものにとって目新しい装置といえよう。これは同心円柱の回転によって生じる遠心力の相違を利用して、その同心円柱間の円環水路中の砂の運動を鏡及び電気記録装置で明らかにしようとしたものである。

このように現在なお漂砂研究は基礎的な研究及び解析が極めて少ないが、その解明への努力は各大学研究所においてもなされているようである。最後に今回の学会出席に御援助賜った石原藤次郎教授に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) Brunn, P. : Longshore Currents and Longshore Troughs, Jour. Geophys. Res., Vol. 68, No. 4 Feb. 15, 1963, pp. 1065-1078.
- 2) Chiu, T.Y. and Brunn, P. : Computation of Longshore Currents by Breaking Waves, Tech. paper of University of Florida, No. 279, Mar. 1964, pp. 1-40.
- 3) Longuet-Higgins, M.S. : On the Statistical Distribution of the Heights of Sea Waves, Jour. Marine Res., Vol. 11, No. 3, 1952, pp. 245-266.
- 4) Miller, R.L. and Zeigler M.J. : The Internal Velocity Field in the Vicinity of Breaking Waves, Proc. of 9th Conf. on Coastal Eng., June, 1964, pp. 103-122.
- 5) Inman, D.L. and Bowen, A.J. : Flume Experiments on Sand Transport by Waves and Currents, Proc. of 8th Conf. on Coastal Eng. pp. 137-150.
- 6) Brunn, P. : Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion, Jour. of the Waterways and Harbors Division, Proc. of A.S.C.E. Vol. 88, No. WW1, 1962.
- 7) Sawaragi, T. : Consideration on the Applicability of Experimental Results to Analysis of Prototype Beaches, Coastal Eng. in Japan, Vol. 6, Dec. 1963, pp. 21-27.