

漂砂の運動機構に関する基礎的研究 (第1報)

京都大学教授 工学博士 石 原 藤 次 郎
 同 大学院学生 樫 木 亨
 同 大学院学生 天 野 哲 男

1. 結 言

波浪による海岸浸食機構の解明は、海岸を保全し海岸構造物の設計を合理的に行なうために、きわめて重要な課題である。しかし、砕波やそれにともなう底質の移動は、機構の複雑さのために解析が非常に困難であつて、それに関する研究はあまり行なわれていない。

著者らは海浜の変形過程について、砂礫の移動性状と波の特性との関連性や砂礫の移動量の相違などに着目して実験的に研究を進め^{1),2)}、平衡勾配の意義やそれと汀線浸食との関係を明らかにしてきたが、平衡勾配に対する力学的解明や海岸砂礫の輸送機構については、その問題の複雑さのためにほとんど考察を行なっていない。しかし、海浜変形は漂砂の移動にもとづくものであつて、その運動機構を明らかにし、平衡勾配の力学的解析を行なつてこそ、はじめてこの問題を十分解明したものといえよう。

漂砂の運動機構については、従来ほとんど見るべき研究がなかつたが、最近に至つて Ippen および Eagleson などが底質の淘汰作用について研究し^{3),4)}、また Kalkanis は振動板上の砂の運動について研究を進めている⁵⁾。これらの研究においてはいずれも底質に働く力として、重力と浜の方に進行する波の力が最も重要であることを認め、また波による水中の水分子の速度変動がどの地点でも正弦変化を示すと仮定して、その変動によつて沈殿粒子の運動方向が決定されると考えている。この場合、海底の一定の位置において、岸に向う速度と沖に向う速度とが平衡を保つことがあり、その位置における砂粒子は運動するが、平均の位置は変化せず、往復運動をして一周周期後にもとの位置にもどつてくると考え、こうした平衡の位置が砂の粒径および波の特性によつて非常に変化する事実にもとづいて、淘汰作用の解析を進めている。

われわれはまず、砂礫の運動はその上にある流体の運動に基因するものであり、Ippen などが想定した上述の流体運動の実態を明らかにしなければ、漂砂の運動機構を力学的に解析することができないと考え、さきに試作した差圧式流速計⁶⁾を用いて、滑面傾斜海浜を有する模型海岸について、次に示す各地点の水粒子の運動を実測した。すなわち、1. 水平底部を有する海浜地区、2. 砕波点より少し沖側の地点、3. 砕波点付近、4. 洗掘点 (Plunging point) 付近、5. さらに岸側の地区を選んだが、これらの各地点において実測検討を行つた項目はつぎのとおりである。

(1) 水深方向における最大水粒子速度の変動 これは波の特性を把握するための資料に用いられ、従来波の形や波速から論じてきた波の特性をさらに明確にすることができよう。

(2) 位置の変化にともなう水粒子速度の変動 これによつて波の進行につれてその特性がいかに変化するかを確かめ、漂砂の淘汰作用におよぼす影響を考察する。

(3) 水粒子速度の時間的变化 これによつて従来仮定していた流速の時間的変動について再検討を加え、砂礫の運動機構の理論的解析に寄与せしめる。

なお、これらの測定結果を用いて、速水博士によつて提唱されてきた臨界波形勾配法⁷⁾による海浜変形の機構についても、若干の考察を進めるつもりである。

2. 実験の装置と方法

(1) 実験水槽

実験水槽としては、京大防災研究所のガラス張り水路を用いたが、その詳細は図-1 のとおりであつて、長さ 21.6 m、幅 0.75 m、高さ 1.02 m の鉄骨フレーム両側面ガラス張りの水路本体と気圧式波起し装置とからなつてゐる。水深は最大 0.50 m であつて、水路の末端に長さ 5.0 m、幅 0.73 m の勾配可変の鋼製床を設置して模型海浜を形成している。この実験では、3°06' の一定勾配の場合のみについて測定を行なつた。なお、気圧式波起し装置としては、図-1 に示すような十字管路を用い、回転弁によつて円滑に加圧減圧をきりかえて、0.7~4.5 sec の周期の波を発生することができる。回転弁の回転は 1/2 HP バイエル変速機付モーターで無段変速し、波高はバ

図-3 U ゲージ T3 型特性曲線

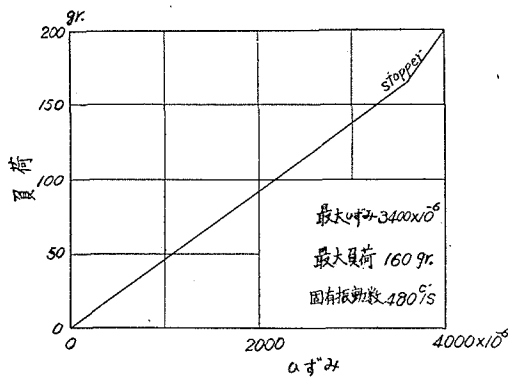
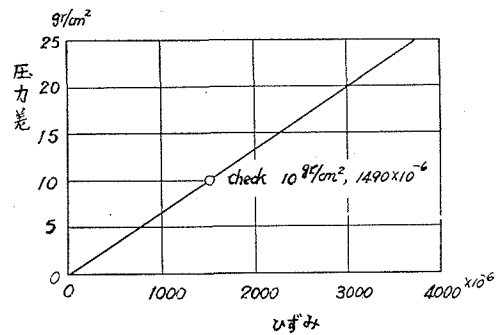


図-4 ヒズミと圧力差との関係



g/cm^2 の圧力差で 1490×10^{-6} のヒズミを与える。

(3) 記録装置と測定精度

京大防災研究所備付の増幅装置を用いて記録したが、この記録装置は前置増幅器、直流増幅器およびインク オッシログラフよりなり、前置増幅器には増幅器と 1.5 K.C. の発信器および復調回路が内臓されている。この記録装置によれば、前置増幅器で 2000 倍、直流増幅器で 400 倍の増幅が可能であり、両者あわせて増幅度は 80 000 倍、すなわち 118 db である。

測定精度はこの記録装置の感度と U ゲージの特性によつて決定されるが、後者は図-3 に示したように直線性であつて、低負荷の場合でもこの特性は失なわれず、その安定度は比較的良好である。したがつて、上述の増幅装置を用い、 $200 \mu\text{V}$ 、Full scale 20 mm のインク書きオッシログラフ記録させて、0.5 mm まで読みとれるものとする、1% の誤差範囲で 5 cm/sec の流速（圧力水頭差 0.125 mm）まで測定可能となる。なお、この流速計と記録装置における時間的な遅れ並びに静圧と動圧の変化のずれは、検定の結果ほとんど認められず、結果は非常に良好であつた。

(4) 波高計

従来から用いられている電気抵抗式水位計を用いた。

(5) 実験波

実験に用いた波は沖波に換算して、波長 L が 4.46, 2.84, 2.08 m、波高 H_0 が 4.62, 6.20, 6.81 cm の 3 種類であつて、沖波の波形勾配はそれぞれ 0.0103, 0.0218, 0.0328 となつている。

(6) 観測点

上述の 3 種類の波について、それぞれ図-1 に示す ①～⑦ の地点で流速を測定した。このうち①の地点は、 $h/L=1/10 \sim 1/2$ （ただし、 h は水深、 L は水深 h における波長）なるいわゆる浅水表面波の発達する領域であり、②の地点は $h/L=1/25 \sim 1/10$ なる遷移波の領域、③および④の地点は碎波点近傍、⑤、⑥ および⑦の地点は波が碎けてから流れの状態で海浜を遡上する領域である。

3. 実験結果の解析とその考察

(1) 最大水粒子速度の鉛直方向の変動

漂砂の運動に最も重要な関係をもっている浅海波および、いそ波帯の波について、その波特性の変動を論じる場合、従来は波高、波長および波速などの変動性のみについて理論的および実験的な研究が進められてきた。しかしながら、これらの諸量の変動にとともなつて生じると考えられる水粒子速度の変動については、流線および速度ポテンシャルの仮定や、水粒子の軌道運動の仮定にもとづいて理論的研究が行なわれてきただけであつて、それを確かめるための実験的研究はほとんど行なわれていない。ところが漂砂に作用する力は、重力と波によつて生ずる力だけであるから、波による水粒子速度の変動性を十分把握しておかないと、漂砂の運動を正しく論議できないであろう。こうした意味で、まず最大水粒子速度の鉛直方向の変動を調べて、従来から研究されてきた波の特性諸量の変化と比較し考察を進めることにしたのである。

浅水波の理論によると、波の水平方向の水粒子速度は、

$$u = A \sin 2\pi(x/L - t/T) \quad (2)$$

で表わされる。上式中 A の値は、Airy の微小振幅波およびトロコイド波の理論によると、次式で示される。

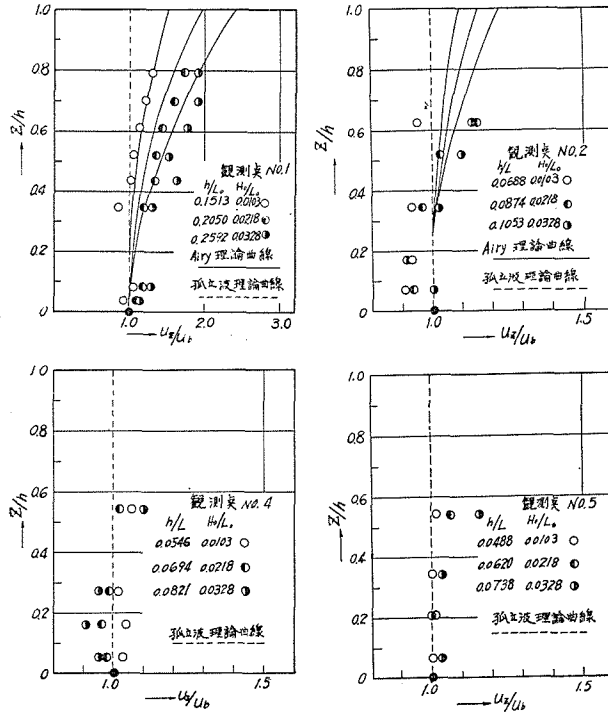
$$A = (\pi H/T) \cosh(2\pi z/L) / \sinh(2\pi h/L) \quad (3)$$

ここに, H, T, z, L はそれぞれ任意水深 h における波高, 周期, 底部からの高さおよび波長である。

さらに h/L が $1/25$ より小さい値をとる領域の波は, 長波あるいは孤立波となり, 孤立波の最大水粒子速度は次式で示される。

$$u_s = \sqrt{g(h+H)} \cdot H/(h+H) \quad (4)$$

図-5 u_z/u_b と z/h との関係 (岸向きの流れ)



以下これらの理論値とわれわれの実験値を比較して, 波の特性の変化を検討しよう。図-5 は 図-1 に示した各観測点について, 水平方向の最大水粒子速度 u_z の鉛直方向の変動を示したもので, 縦軸に z/h , 横軸に高さ z における速度 u_z と底部速度 u_b との比がとつてある。図中の実線は (2) 式から求められる微小振幅波およびトロコイド波の理論曲線であり, 点線は (4) 式から求められる孤立波の理論曲線であるが, 実測値はいずれも岸向きの速度である。

図-5 からわかるように, $h/L=1/10 \sim 1/2$ の範囲内にある観測点 No. 1 における波は, 波形勾配のいかんにかかわらず, 浅水波の理論曲線 (2) と比較的良好に一致している。このことは, この領域を通過する波が波長の長い波形勾配の小さい波で長波または孤立波のような形をしていても, 水粒子の運動が浅海波としての特性を示すことを意味している。ところが $h/L=1/25 \sim 1/10$ の範囲内にある観測点 No. 2 においては, 浅水波の理論曲線 (2) とは一致しなくなり, 次第に長波の性質を帯び上下両層における速度差がなくなつて

くるが, 孤立波の理論曲線 (4) とも十分には一致していない。したがつてこうした遷移領域における水粒子の運動は, (2) または (4) 式のような従来の波の理論による取扱いが妥当でないようである。なお, この領域よりも浅くなると, 水深にともなう水粒子速度の変化がなくなってくるが, 砕波後の非常に浅い水深地点にあたる観測点 No. 5 になると, 波形勾配の大きい波では上層部の速度が下層部の速度より大きくなるのに対し, 波形勾配の小さい波では上下両層部における速度差はあまり認められない。これは砕波の波形の相違によるものと考えられ, 波形勾配が大きいと崩れ波 (Spilling breaker) となつて上層部から白泡をたてて砕けるから, その後の岸向きの流れにおいて上層部の方が流速が大となり, また波形勾配が小さいと巻き波 (Plunging breaker) となつて砕けるから, 長波の性質を十分に維持しておつて, 上下両層部であまり速度差を生じないようである。写真-2, 3, 4 は実験に用いた 3 種類の波の砕波形を示したものである。

写真-2 巻き波の砕波形 ($H_0/L_0=0.0103$)

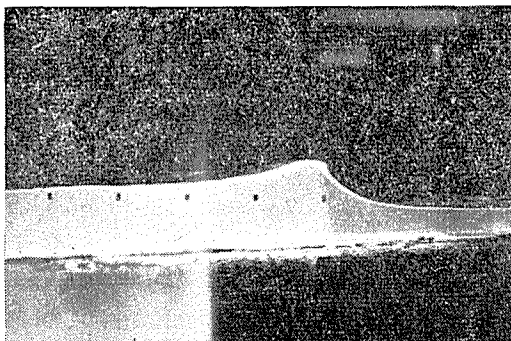


写真-3 巻き波の砕波形 ($H_0/L_0=0.0218$)

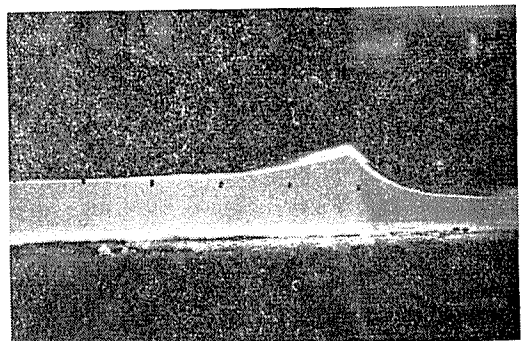


図-6 は u_z と (4) 式で求められる u_s との比を横軸にとり、 z/h を縦軸にとつて、各観測点における最大水分子速度の鉛直方向の分布を示したものである。この図によれば、図-5 について考察した事実が実測値を結ぶ曲線 (実線は向岸流、点線は離岸流) の勾配によつて一層よく理解されるはずである。

ここでは (2) および (3) 式によつて求められる微小振幅波の値と実測値との比較を省略したが、その結果はどの観測点でも実測値より小さい理論値がえられるようであり、とくに遷移領域より岸側から砕波点付近に至る範囲では、岸向きの速度が孤立波理論による値と一致している。この事実は、Beach Erosion Boars が行なつた水深 15'~5' の場合の現地観測の結果でも確認されている⁸⁾。

図-7 は底部における水粒子の実測速度 u_b と孤立波理論による水粒子速度 u_s との比を縦軸にとり、位置を示す無次元量 h/L_0 を横軸にとつた関係図であり、同時に砕波線の関係が示されている。この図から底部速度が孤立波速度に近づいていく傾向がわかり、とくに両者が一致するのは砕波線より少し岸側であることが認められる。

(2) 海浜断面に沿う最大水粒子速度の変動

波による砂礫の淘汰作用や海浜の平衡勾配に関する臨海波形勾配説の基礎的な考え方は、この海浜断面にそつた最大水粒子速度の変動性にもとづいている。こうした意味から、海浜断面に沿う各地点の位置を示す無次元量 h/L_0 を横軸にとりこれらの地点における向岸流および離岸流の最大速度 u_{1z} 、 u_{2z} と一定水深 $h=50$ cm における最大底部速度 u_{b0} との比を縦軸にとつた関係図を示すと、図-8 のとおりである。これらのうち左側の図は $z=0$ の位置、すなわち底部速度の変化を示し、右側の図は $z=2.2$ cm の位置の速度変化を示している。

一定水深における向岸流の u_{b0} と離岸流の u_{b0} とは、後に述べるようにその絶対値がほとんど相等しいから、向岸流の u_{1z}/u_{b0} と離岸流の u_{2z}/u_{b0} との差が大きいほど、その地点における波による淘汰作用が悪く、粒径の大きい砂礫が岸方向に集中していく傾向があるはずである。図-8 によると、波形勾配の大小にかかわらず、 u_{1z}/u_{b0} と u_{2z}/u_{b0} との差が砕波点付近で大きく、一定水深 (浅水波領域) に近づくとつれて両者の値が 1 に近づき、その差が小さくなっていく。一般に海岸底質の調査を行なうと、底質の平均粒径が砕波点付近で最も大きく、沖に行くにつれて小さくなっているが、この事実は図-8 に示す速度の変動性によるものと思われる。

つぎに波形勾配の大きい波 ($H_0/L_0=0.0328$) では、砕波点より岸側の部分において u_{1z}/u_{b0} と u_{2z}/u_{b0} の差は

写真-4 崩れ波の砕波形 ($H_0/L_0=0.0328$)

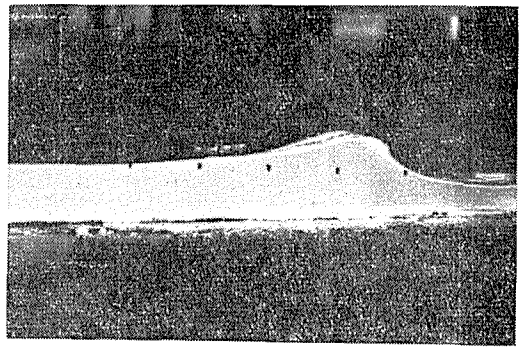


図-6 u_z/u_s と z/h との関係

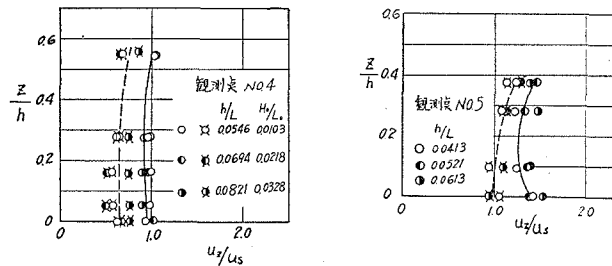
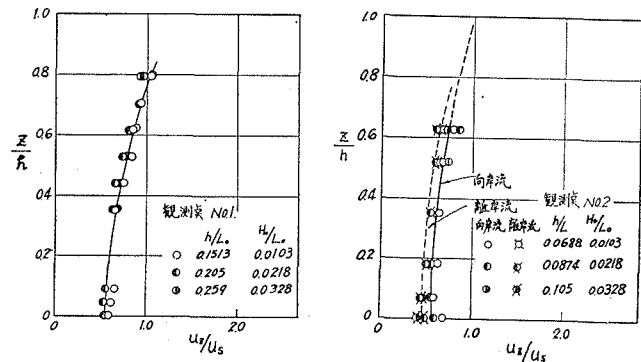


図-7 u_b/u_s と h/L_0 との関係

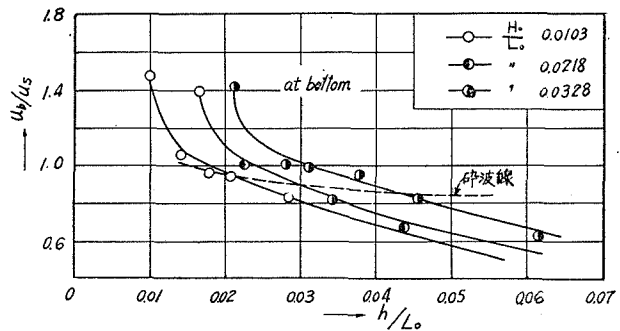
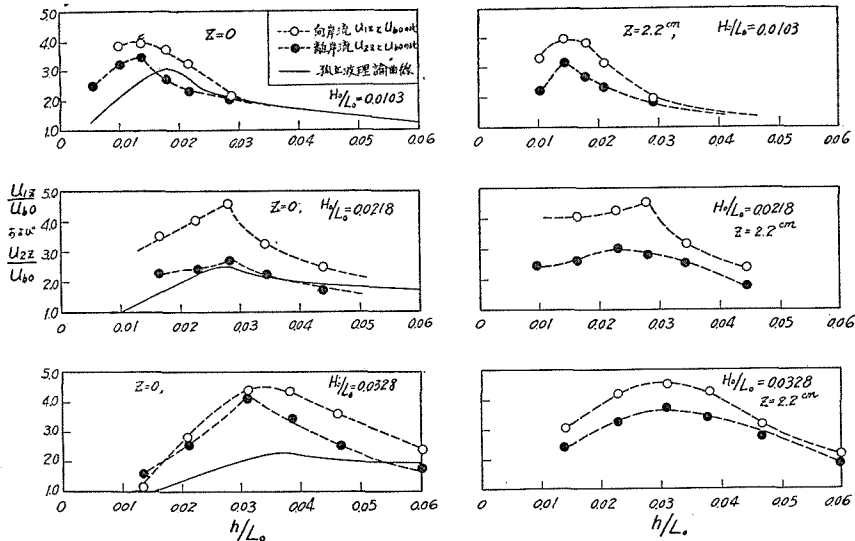
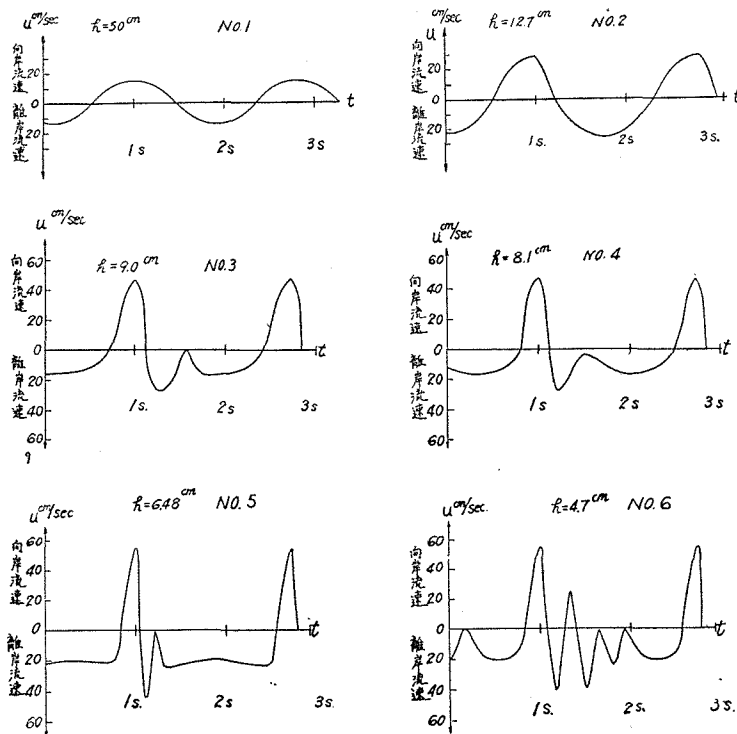


図-8 海浜断面に沿う最大水粒子速度の変動



底部より $z=2.2\text{ cm}$ の部分の方がはるかに大きい方が、波形勾配の小さい波 ($H_0/L_0=0.0218, 0.0103$) では、底部と $z=2.2\text{ cm}$ の部分とでこうした相違はあまり認められない。しかも底部における u_{1x} と u_{2z} とくらべると、波形勾配の大きい波ではほとんど差がないが、あるいは u_{2z} が u_{1x} より大きくなっているのに対して、波形勾配の小さい波では u_{1x} の値が u_{2z} の2倍も大きい値を示している。

以上の事実から、波形勾配の大きい波では、上層では海水を陸側へ輸送する力が非常に強いが、下層ではその力が弱く強いもどり流れがあり、それによつて汀線から岸側の砂が海中にひきこまれることになる。ところが波形勾配の小さい波では、上下層とも海水を陸側に輸送する力が強く、下層でももどり流れに打ち勝つて海水を

図-9 底部の水粒子速度の時間的変化 ($H_0/L_0=0.0103$)

前進せしめることができるから、砂を岸に打ち上げることになる。こうした速度変動の相違は、前項で述べたような碎波の波形の差によるものと考えられ、これが速水博士の平衡勾配に関する臨界波形勾配法の基礎になっている。

(3) 水粒子速度の時間的変化

前二項においては最大水粒子速度の鉛直方向および海浜断面に沿う変動性を明らかにし、その結果から漂砂の淘汰作用を考察してきたが、緒言にも述べたように、漂砂に作用する力、すなわち抗力、摩擦力などを解明するには、水粒子速度の時間的変化、すなわち加速度を確実に把握しなければならない。図-9 は各観測点における底部の水粒子速度の時間的変化を $H_0/L_0=0.0103$ の波の場合について

示したもので、横軸より上は向岸流、下は離岸流を表わしている。

図-9 からわかるように、浅水波領域にある観測点 No. 1 では、向岸流の最大速度 u_1 と離岸流の最大速度 u_2 との比 u_1/u_2 が 1.03 という値をもち、わずかに向岸流の方が大きい、波の峰で最大の向岸速度をもち、波の谷で最大の離岸速度をもつ正弦変化を示している。この $u_1/u_2=1.03$ というわずかなかたよりは、Stokes の有限振幅波理論における向岸流と離岸流との速度差

$$\Delta u = 3C \left(\frac{\pi H}{L} \right) \frac{\coth(2\pi h/L) \{ \coth^2(2\pi h/L) - 1 \}}{\sinh(2\pi h/L)} \quad (5)$$

に対応するものであろう。ここに、 C は波速をあらわす。

水深が浅くなつて波形が非対称となるにつれて、水粒子速度の時間的変化が正弦変化を示さなくなり、その非対称性が助長されてくる。したがって、(2)、(3) 式で与えられるような速度変化は、 $h/L=1/10 \sim 1/2$ の浅水波領域のみに適用されるものであつて、遷移領域より岸側における漂砂の運動機構について、Ippen らが速度の正弦変化を仮定して解析したことには、大きい疑問があるといえよう。さらに水深が浅くなると、向岸流の速度変化が急激となり、離岸流のそれはやや緩慢になつてくるが、こうした関係は漂砂の運動を支配する重要な因子と考えられるのであつて、今後の研究によつてその効果を確かめてゆくつもりである。

4. 結 言

われわれの試作した差圧式流速計を用いて、浅水波領域、遷移領域、砕波領域およびその岸側の領域の水粒子速度を測定し、その結果によつて海浜の浸食機構や漂砂の運動機構について考察を加え、従来の研究に対し種々の検討批判を行なうことができた。今後は漂砂運動の激しい遷移領域より岸側の部分について、複雑な速度変動と漂砂の運動の関連を究明して、汀線浸食の機構を具体的に解明していくつもりである。

最後にこの研究に御援助を賜つた石原安雄、岩佐義明および国司秀明の各氏に謝意を表するとともに、文部省の科学研究費による研究であることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 岩垣雄一・榎木 亨：海岸の平衡勾配と砕波による砂移動に関する実験，海岸工学講演会講演集，1955，pp. 99~105.
- 2) 岩垣雄一・榎木 亨：海岸の平衡勾配に関する二、三の問題について，京大防災研究所創立5周年記念論文集，1956，pp. 233~240.
- 3) Ippen, A.T., and Eagleson, P.S.: A study of sediment sorting by waves shoaling on a plane beach, M.I.T. Hydrodynamics Laboratory, 1955.
- 4) Eagleson, P.S., Dean, R.G., and Peralta, L.A.: The mechanics of the motion of discrete spherical bottom sediment particles due to shoaling waves, M.I.T. Hydrodynamics Laboratory, 1957.
- 5) Kalkanis, G.: Turbulent flow near an oscillating wall, Beach Erosion Board Tech. Memo., No. 97, 1957.
- 6) 岩佐義明・榎木 亨：差圧式流速計について，第3回水理研究会講演会前刷，1958，pp. 13~14.
- 7) 速水碩一郎：砕波の機構 (II)，海岸工学講演会講演集，1955，pp. 11~16.
- 8) Inman, D.L., and Nasu, N.: Orbital velocity associated with wave action near the breaker zone, Beach Erosion Board Tech. Memo., No. 79, 1956.