

防災研究所における海岸工学の研究

速水頌一郎・石原藤次郎・岩垣雄一

COASTAL ENGINEERING RESEARCHES AT THE DISASTER PREVENTION RESEARCH INSTITUTE, KYOTO UNIVERSITY

*by Dr. Sci. Shōtiro HAYAMI, Dr. Eng. Tojiro ISHIHARA
and Dr. Eng. Yuichi IWAGAKI*

Synopsis

In the event of the tenth anniversary of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, the history and the present status of coastal engineering researches at the Institute are summarized with the following items :

- (1) Wind waves and surface waves of permanent type
- (2) Deformation and breaking of waves
- (3) Storm surges, tsunamis, tidal currents and mixing of sea water
- (4) Wave forces acting on structures and sea dykes
- (5) Laboratory studies of beach erosion and sand drift
- (6) Field observations of beach erosion and sand drift

1. は し が き

京都大学が海岸災害防止の研究に着手したのは、昭和22年7月、鳥取県に漂砂対策協議会（その後昭和23年11月に漂砂対策委員会と改められた）が構成され、工学部より石原(藤)が、理学部より速水、豊原および竹上が委員として参加し、鳥取県海岸の漂砂問題について調査研究を始めたときであろう。このとき、石原(藤)および岩垣は網代港の埋没防止に関して研究し、速水は泊港湾の漂砂と弓ヶ浜の波高分布について調査研究を行なった。丁度その頃より、第二次世界大戦を契機として新しく生れ体系化された海岸工学 (Coastal engineering) や、海洋学に関する文献が続々とわが国に入ってくるにしたがつて、わが国のこの方面の研究も漸次活潑となってきた。京都大学でも、鳥取県の海岸に引き続いて、昭和24年より設置された大阪府泉南海岸浸食調査会のメンバーとして、泉南海岸の浸食調査に着手した。この調査には石原(藤)、速水、岩垣および堀が参加し、ついで昭和26年防災研究所の発足とともに足立および土屋(昭)がこれに加わり、さらに国司および石原(安)の協力をえて、この調査研究は昭和28年に終った。米国においては Council on Wave Research が1950年に初めて第1回の Coastal Engineering の会議をもち、国際的な会議へと発展していく第一歩をふみ出したが、わが国でもこうした海岸工学に関するシンポジウムをもとうとする機運が高まり、石原(藤)の大きな努力によつて、昭和29年11月に第1回の研究発表会を土木学会関西支部主催で神戸においてもつことになった。

一方、昭和25年9月のジェーン台風によつて大阪市内が高潮による大被害をこうむつたことと相まつて、昭和26年に発足した防災研究所では、昭和27年8月より速水、矢野、足立、国司を中心とし、石原(藤)、岩垣、石原(安)、大同の協力をえて、大阪市内河川を溯上する高潮の模型実験を宇治川水理実験所において開始した。さらに、第1回の海岸工学研究発表会が開催された前年、昭和28年9月には、13号台風によつて愛

知・三重海岸が高潮による大きな被害をうけ、海岸災害防止研究促進の必要性を世人に痛感せしめた。こうした時代の要請にしたがつて、石原(藤)、岩垣および鈴木は、昭和29年より海岸堤防の有効高を合理的に定めるための研究に着手し、三井も加わつて、越波量を考慮した堤防の越波防止効果の研究に発展させた。それと時を同じくして、岩垣および榎木は、海岸の平衡勾配と碎波による砂の移動の問題をとりあげ、石原(藤)、岩垣、村上、喜多、小合および榎木は、明石海峡北岸の浸食調査と宮津海岸の漂砂調査を始め、また速水は福尾、依田とともに明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について調査し、それと時を同じくして碎波の研究を開始した。また宇治川水理実験所に屋内風洞水槽が建設されるとともに、国司はこれを用いて風波の発生に関する研究を始め、その後この水槽によつて樋口は円柱に及ぼす波力の実験を行なつた。

大阪市内河川の高潮潮上への実験に続いて、高潮による大阪港内の流れの模様を調べた海洋河口実験水槽は、その後速水を中心として実施した広島湾の潮流変化の模型実験に用いられ、さらに榎木の inlet における漂砂の研究や樋口の境水道の水位変動に関する模型実験に利用された。昭和32年には、榎木および村上が扇形水漂を用いて沿岸漂砂量の実験を行ない、またその翌年には、足立、榎木および小合が離岸堤によつてトンボロが発生する実験的研究を始めた。一方、その頃より石原(藤)および榎木は天野の協力をえて、漂砂の運動機構に関する基礎的研究に着手し、それは昭和35年まで続いた。また昭和34年には、石原(藤)、岩垣、石原(安)および吉田によつて、堺港の波浪遮蔽に関する大模型実験が始められ、岩垣および野田は養浜の研究と関連して、長水路を用い、海浜変形における scale effect の実験的研究に着手した。また石原(藤)、岩垣および野田は昭和34年夏より福井県茅渚漁港の漂砂調査を始めた。

こうした状態のとき、昭和34年9月26日、伊勢湾台風が襲いかかり名古屋を中心とする伊勢湾沿岸に再度惨憺たる大災害をひきおこしたのである。当研究所としては、早速その調査班を組織し、水害関係では矢野が中心となり、全員が参加して海岸災害の実態調査と現象の学問的な解析に努力した。そのうちに翌年の5月24日、遠く南アメリカ西岸でおこつたチリ地震による津波の来襲によつて、わが国の太平洋沿岸各地が大きな被害をうけた。伊勢湾台風被害につづくこのような海岸災害の頻発にかんがみて、昭和26年度より海岸災害防止の研究部門が新設され、従来、第二部門あるいは災害水文学部門、宇治川水理実験所部門で行なっていたこの方面の研究を、この新部門によつて実施することになり、岩垣がこの部門の担当者となつた。

昭和26年当研究所が創立されて以来、昭和36年で丁度10年を経過したが、この機会にこれまで実施してきた海岸工学研究の道程をふりかえり、今後の研究のあり方を考える礎としたと思う。

2. 風波と表面波に関する研究

(1) 風波に関する研究

風浪やうねりの近代的研究が第二次大戦中 Sverdrup-Munk によつてはじめられたことはよく知られている。その後20年、理論的には、風浪の統計的性質の Longuet-Higgins による基礎づけ、Pierson による雑音理論に関連した風浪場の数学的表現、Neumann, Darbyshire, Roll-Fischer および Bretschneider によるエネルギースペクトルの提案、Phillips によるスペクトル高周波側における非線型平衡領域の発見など、実用的には、Bretschneider による風浪やうねりの予報法の改良—S.M.B.法—、Pierson-Neumann-James によつて示されたエネルギースペクトルに基礎をおく新しい予報法の登場—P.N.J. 法—、Wilson による移動性風域に対する予報法の提案など、その進展は目覚ましいものがある¹⁾。

しかし、今日なお理論は多かれ少なかれ仮設的で、風波の発生と発達物理機構には疑問の点が多いし、観測や実験も決して十分でなく、風浪やうねりの実態にはまだまだ不明確な点が少ない。風波が海洋・海岸災害の最大の原因の一つであることを考えると、それらの実態と特性とを組織的な研究によつて明らかにすることは非常に重要である。速水および国司²⁾⁻⁴⁾はその第一歩として、主に風波発生の問題を中心とした風洞水槽による実験的研究を行ない、多くの新しい事実を見出した。すなわち、i) まだ風波の起こつていない低風速では、水面は一つの滑面とみなせることを、風速分布と水面のごく近くに起こる層流吹送流と

の観測から実証し、ii) この水面がもはや滑面とはみなされず、粗面と考えなければならなくなることに、はつきりした風波——初期波 (initial wavelets)——の発生とが全く同時に起こることを示し、 w_* を摩擦速度、 H を平均波高、 ν_a を空気の動粘性係数とすると $w_*H/\nu_a \approx 0.3$ を境として、初期波は初期動揺 (initial tremors) から水面の粗度要素 (roughness elements) として発生し、発達していくことを明らかにした。しかし、iii) この初期波はいわゆる風浪とはその性格が異なり、さらに発達して $w_*H/\nu_a \approx 200$ に達したとき初めていわゆる風浪——風浪波 (sea wave)——としての性格を持つにいたることを見出し、さらに iv) 初期波を支配している経験的な法則を見出すとともに、v) エネルギーの考察などから、初期波の発達および風浪波への遷移の物理機構に関するいくつかの証拠と示唆とを与えた。また一方、vi) 初期波の吹送距離への依存性をもつばら gz_0/w_*^2 (z_0 : roughness parameter) なる量にあらわれることや、vii) 水面上 10 m の高さの風速に関する摩擦係数は、風速 10 m/sec では最近の洋上での観測結果と一致してはば 1.6×10^{-3} であり、風速の増大とともにその値は大きくなることなどを示した。

風波の本質は、この研究によつて、ようやく明らかになってきたが、なお、实际的に最も重要な風浪波の段階の風波の特性は、吹送距離も風速もそう大きくはとれない水槽実験という制約のために、十分解明されるまでにはいたっていないし、そのほかにも二、三解決を要する問題が残されている。現在、これらの問題の解決のために、一方で水面近くの空気の乱れの状態や水面下の吹送流の構造などの水槽実験を進めるとともに、新しく設けられた高速風洞水槽や、白浜に新設した海洋観測塔による風波の実験ならびに観測計画が進められている。

一方、岩垣および柿沼⁵⁾は台風時の風浪予知の問題について、Wilson の移動性風域に対する図式解法やその他種々の方法によつて、伊勢湾台風時における沖波の波高および周期を追算し、それらの比較検討を行なうとともに、風速の不連続的变化に対して波高 H と周期 T ——したがつてエネルギー E と群速度 C_g ——とがそれぞれ独立に連続的に変化するとする Wilson の方法の論理的矛盾性を指摘し、むしろエネルギーフラックス $C_g \cdot E$ ——したがつて量 $H^2 \cdot T$ ——が連続であるとするべきことを提案した。

もちろん、実際に重要な海岸近くの波浪を予知するためには、単に沖波の状態が知れるだけでは不十分で、浅海における波浪特性の変化が大きな問題となる。この問題についてもすでにいくつかの研究がなされているが、必らずしも十分ではなく、とくに海底摩擦の効果については問題が多い。この問題を解決して正確な海岸波浪の予知を可能とするために、現在特別事業として、全国各地の沿岸における海底摩擦係数の測定計画を実行にうつしている。一方海洋観測塔では、これと平行して、種々の状況下における海底摩擦の効果を明らかにする計画をたてている。

(2) 表面波に関する研究

表面波に関する理論は古くより種々の方法による考察が進められてきたが、最近海岸工学上における波としては有限波高の波が研究の対象としてとりあげられ、質量輸送の問題が重要視されてきた。有限波高のポテンシャル波の研究における Lévi-Civita の理論は従来の波動論を数理的に整えたものであつて、波動理論においては最も進んだ理論といえよう。

非常勤講師であつた山田は前述した Lévi-Civita の波動理論を用い、水面に対する非線型な境界条件を級数展開により試算の手法を用いて深海波における最高波の理論的考察を行なつた。数値計算の結果は水面条件を数%の誤差で満足させた^{6),7)}。

また同様な方法を用いて Stokes 波に対する近似解を展開し、その場合ある特定な波形勾配に対しては厳密解が得られることを示した⁸⁾。さらに Darries による近似方法を展開してすべての波形勾配に対して適用しうる近似解を求め、前述した厳密解と比較してその適合性の十分であることを確かめるとともに、以上述べた Stokes 波に対する厳密解と近似解とを用いて、波動運動にともなう水粒子の運動、とくにその質量輸送を数値的に検討した⁹⁾。

一方海岸工学の実際問題においては、とくに砕波帯付近における波の様相は孤立波あるいはクノイド波の

特性に近似することが知られ、最近こうした実際問題への孤立波理論の適用が試みられるようになってきた。岩佐¹⁰⁾は運動量およびエネルギーの関係から開水路水流に関する第二次近似の基礎方程式を導き、これをもとにして permanent 型の移動波を理論的に研究し、Lamb が指摘しているように孤立波はクノイド波の特殊の場合であること、および Airy の微小振巾波理論による結果とも十分関係づけられることを明らかにした。また山田^{11),12)}は前述した Lévi-Civita の方法が孤立波の場合に対しても極めて都合よく適用しうることに着目して、孤立波に関する研究を行なった。

3. 波の変形と碎波に関する研究

(1) 波の変形に関する研究

波が海岸に近づくにしたがつて、海底地形や海岸構造物による屈折、反射、回折あるいは海底摩擦および滲透効果によつて複雑な変形を余儀なくされる。こうしたことから、海岸構造物の設計に対する設計波の決定にあつては、極めて多くの問題点があるわけである。

海岸構造物とくに潜堤による波高減衰の研究は比較的 古く、Jeffreys, Dan, John および Johnson-Fuchs らの解析的な研究につづき、Beach Erosion Board や Morison らが実験的研究を行ない、またわが国においても堀川らが実験を進めてきた。しかしながらこれらの研究は水平な海岸に潜堤を設置した場合を主として取り扱っており、また碎波点およびその岸側に設けた場合の効果については十分な研究が行なわれていない。こうした現状にかんがみ、石原(藤)、樫木^{13),14)}は碎波現象をともなつた傾斜海岸に設置した潜堤による波高減衰について、須磨—明石海岸を対象とした模型実験を行ない、微小振巾波理論を適用して潜堤前面において碎波する場合としない場合との両者に対してエネルギー保存則を適用して波高減衰を考察し、実験結果と詳細な比較検討を行なつて、こうした場合の複雑な波高減衰の機構をある程度明確にすることができた¹⁴⁾。

石原(藤)、岩垣、鈴木¹⁵⁾は海岸堤防の設計に対する基礎的研究を実施して、とくにその有効高さを決定するために堤防前面における波の変形や越波に関する詳細な実験を試みたが、そのうち波の変形に関する研究成果の概要はつぎのようである。i) 堤防前面における波高分布を測定して Healy の方法により反射率を求め、壁面傾斜角をパラメーターとして反射率と波形勾配および法先水深に対する shallowness との関係を明らかにした。また、ii) 水深の変化による波高の変化について微小振巾波理論に基づくエネルギー保存則を適用して得られる関係と実験結果を比較した。とくに、碎波した波が岸に近づくにつれて、波高がどのように変化するかを主として実験的に調べ、breaker index による碎波点を過ぎてもしばらくは増大していく波高も、やがて急激に減少することがわかつた。

岩垣、石原(安)、吉田¹⁶⁾は大阪府堺港における波浪の遮蔽に関する模型実験を縮尺 1/100 の模型について実施した。この実験の目的は波浪の遮蔽効果から新堺港の最良の形状を決定するために行なわれたものである。計画波に対する港内各地点の波高を測定し、波高比の分布を求めた結果によれば、港口付近の波の反射や泊地内外に発生するビート現象が大きな問題になることがわかつたので、種々の防波堤の効果や捨石工の効果を比較検討することによつて、泊地内の静穏化を計るための適切な指針を与えた。なお、岩垣¹⁷⁾は海岸および港湾の模型実験を実施するに際してとくに重要な相似律について述べ、さらに実験施設や計測法についても解説を行なつた。

一方、最近海岸構造物の設計において、前述したような構造物付近における波の変形に関する研究とともに、波が海岸に來襲する過程における波高減衰の問題をとりあげた。すでにそうした研究の基礎的な考察として海底摩擦および滲透による効果を取りあげた Putnam および Johnson の研究があり、また実際海岸への適用を試みた岸あるいは永井、久保らの研究があるが、海底付近における流れの状態が明らかにされていないことから適確なものとはいえない。摩擦による波の変形に関する考察を行なうにあたり、Keulegan らは孤立波の減衰に関する詳細な研究を行なつたが、一方、岩佐¹⁸⁾は孤立波の進行にともなつて発達する層流

境界層に対して運動量方程式から数学的に詳細な吟味を行なつて孤立波の減衰を理論的に考察し、さらに Ippen らの実験結果と比較してその妥当性と問題点を明らかにした。

最近、土屋、井上¹⁹⁾は海底摩擦による波高減衰の基礎的な研究をはじめた。その第1報として、波動運動にともなう海底におけるせん断力の分布に対して、近似的に静水中における振動板上の境界層に対する Lamb の解を用い、滲透効果も含め、Putnam らと同様な手法のもとに、なるべく一般的な関係であらわすことを試み、また Savage の実験結果や Bretschneider の現地観測結果と比較してその問題点を明らかにした。現在波浪実験長水槽を新設して実験を行なっている。

また一方波の変形に対しては、現地観測が極めて重要であることから、2.で述べたように、昭和36年度より特別事業として現地の波浪観測を実施しているので、そうした結果を用いて現地における波高の減衰を明らかにして、室内実験の結果との関連を究明していくつもりである。

(2) 碎波に関する研究

碎波に関する理論的研究としては、風波の碎波を除いては若干の研究があるが、これらの理論から導かれるものは、碎波高、碎波水深、初期波高、初期波形勾配などの間の関係であつて、碎波の推移過程ではない。碎波の推移過程をさらに一歩進んで理解するためには、実験、観測にまたねばならないが、碎波に関する組織的な実験研究は非常に少ない。こうした問題の解明に対して、当研究所において二、三の研究成果を得ているので、それらの概要を述べる。

速水、石原(藤)、岩垣²⁰⁾は昭和28年泉佐野の砂浜海岸で、碎波点付近の水分子の運動と波形を実測し、水平速度の最大が波の前斜面に起こる場合と、流速の最大が波の峯と一致する場合とがあり、両者の限界の波形勾配が0.03付近であることを示した。さらに碎波後の打上げ波および引き波による砂の移動量を測定した結果、前者によつて堆積が起こり、後者によつて浸食が起こることを見出した。

さらに速水²¹⁾は巾 2 m、長さ 4 m、深さ 30 cm の造波水槽を使用し、傾斜面上を海岸に向つて進行する自由波浪の碎波過程を研究した。実験の水底勾配は 2° (約1/25) であり、使用した波の周期は 0.3~1.0 sec、波高は 0.2~3.0 cm で、これらを組み合わせて波形勾配を 0.002~0.1 の範囲に変化させた。そして Suquet のいう二重碎波の存在を確認した。さらに、碎波の型と水底勾配、碎波点と水底勾配、碎波の反射、波速、碎波時における水分子の運動、碎波による波の分裂について諸外国における論文を参考にし、問題点を提示した。

海岸の碎波には崩れ波と巻き波との二つの型がある。それらを決定するのは主として初期波形勾配と海底勾配の二つである。横軸に海底勾配、縦軸に初期波形勾配をとると、一つの曲線によつて巻き波領域と崩れ波領域とにわけられる。崩れ波によつて砂浜が浸食され、巻き波によつて砂浜に堆積が起こるようであるから、二つの碎波領域の境界は浸食も堆積も起こらない状態、すなわち平衡勾配を表わすものと考えられる。この境界の形を決めることは碎波の機構にとつても重要な意義をもつものである。こうした思想のもとに速水^{22), 23)}は水底勾配が 0° から 3° までの長さ 22 m、高さ 1 m、巾 75 cm の造波水槽を使用し、上述の境界の形を求めた。さらに、Sverdrup-Munk による波形勾配と波令との関係において、波令が 1 よりも大きくなると、波形勾配が 0.02~0.03 の間にあつてほとんど一定であることに着目し、砂質底質の外浜勾配が通常 $1^\circ \sim 2^\circ$ の間にあることは、外浜勾配がうねりに対して平衡状態にあることを示唆し、砂堆の発達、減衰を、上述の結果を用いて説明できることを示した。また、崩れ波領域と巻き波領域との境界の形を理論的に導くことの準備として、二つの碎波型について、水分子の運動を実験的にしらべた。水分子の軌道は崩れ波で円または楕円に近く、速度の垂直成分が大きくて、碎波時には下方の水分子が波の前面に衝き上るように見える。これに反して巻き波の場合には、水分子の運動は川の流れのようにほぼ底面に平行であり、碎波後もその運動を継続することを明らかにした。

4. 高潮、津波、潮流および海水の交流と混合に関する研究

(1) 高潮に関する研究

今日高潮発生の原因は定性的にはほぼ明らかであるが、種々の境界条件の不明確さのために、定量的予測には程遠く、その意味では高潮は今日なおまだ全くわかっていないとさえいうことができる。その第一は海面における風の接線応力の大きさがよくわからないことであり、第二は海底摩擦がどのように作用しているかがよくわからないこと、第三は湾口からの高潮浸入の様相が何によつてきまるのかが、ほとんど全くわかっていないということである。

防災研究所では、その水理模型実験が困難であるという理由もあつて、高潮それ自体の研究よりも、たとえば高潮の河川遡上などそれに関連する諸問題が主として研究されていたが、昭和34年多数の人命を含む未曾有の災害をともつた伊勢湾台風高潮の襲来を機として、高潮それ自体に関する新しい研究が始められた。国司、吉田²⁴⁾は現地調査の結果に基づいて、さきに述べた高潮の今日の問題点を示すとともに、いくらかの事実を明らかにした。すなわち、新しく導入した積分法ともいうべき方法による資料解析の結果、第一の接線応力の係数——摩擦係数——は風速 40 m/sec という高風速時では、通常考えられているよりはかなり大きく、 4×10^{-3} の程度であり、第二の問題点である海底摩擦は通常とは逆に海面摩擦と逆向きに作用すると考える方が自然であることを指摘するとともに、風の効果、気圧の効果、それに第三の問題点である高潮浸入の湾口効果の大きさは2:1:1の割合であり、海底摩擦の効果は、それが最も大きくなる湾奥(名古屋)で—1の割合であることを示した。

これらの問題をさらに追求するために、現在新しく水理実験所内に設けられた高速風洞水槽と白浜に新しく建設された海洋観測塔とによる高風速時あるいは台風時の海面や海底の摩擦力に関する研究や、海洋河口実験水槽による湾口条件の実験的解明などの研究を進める一方、今次第二室戸台風に関する調査研究を進めている。

また、近年 Hansen や Fischer らによつて電子計算機による高潮の研究が発展してきたが、わが国でも気象庁でこの種の研究がとりあげられ、I.B.M. を用い伊勢湾や東京湾について計算がなされている。防災研究所でも現在山田を中心として、K.D.C. を用い主として大阪湾を対象とする同種の研究を進めている。

(2) 津波に関する研究

津波は一般に深い所では波高は小さいが浅い海域に入ると急に波高が増大し、とくにリアス式海岸に多いV字型、U字型の湾奥では10mを越えることも稀ではない。

これらの津波が浅海において示す状態を研究することは、防災の見地からきわめて重要な意義をもっている。こうした意味から、まず実際に津波というものがこれらの海域においてどのような挙動を示すものであるかを知る必要がある。

速水²⁵⁾は昭和35年5月に起こつたチリ津波について、全国的な調査の一環として西日本中部以西、とくに近畿、中国、四国の各地方の調査をおこない、また樋口²⁶⁾は境水道におけるチリ津波の変化について研究を実施した。その結果、太平洋側で観測された20~40分周期の振動のかわりに、この海域では60, 75, 130分などの周期の振動が卓越しており、これはこの海域に固有の振動がチリ津波によつて誘発されたものであることを指摘し、以前からおこなわれてきた境水道の水位変動に関する水理模型実験と現地におけるチリ津波の水位記録とを比較して、現在計画されている中海の干拓が完成した場合と同じ津波がくれば、現在とはかなり様子が異なり、振巾はかなり大きくなることを示した。

(3) 潮流に関する研究

生産力に関する主要な物理量は、海水に含まれる物質質量と海水の運動量である。前者の一部は生体の構成物となり、また生体活動のエネルギー源となるものであるが、浅海においては主として陸地または沿岸海域から供給される。後者は物質の運搬者であつて浅海において重要なのは潮流である。海岸工事によつて直接

に影響をうけるのは海水の流動であり物質の分布に対する影響は流れを通じて2次的に起こる。この意味において海岸工事による海岸統制の主要な対象は流れであるといえる。

このような流れは上述の生産力に対する影響以外にも、大規模な海岸工事により、船舶の航行におよぼす影響、あるいは港内汚染による衛生上の問題など、各方面に対して影響を与えるであろう。

このような流れの重要なものは潮流およびこれに付随した振動によるものであるが、これらが海岸工事によつていかに変化するかを知ることは決して容易ではない。その方法の一つは運動方程式の数値積分によるものであり、ある程度までは理論的に可能であるが、現在の段階では大ざっぱな計算しか可能ではない。他の一つは、水理模型実験によるものであり、これは前者の方法には見られない数々の利点をもっている。当研究所においてはもつぱら後者による系統的な研究がおこなわれている。

速水^{27),28)}は、わが国における各地の沿岸の利用状況を調べ、臨海工事においても沿岸水産業の開発を要素の一つとする総合的企画性をもたせることの重要性を指摘し、このためには現象をよく把握する必要がある、水理模型実験が有用な手段であることを示した。水理模型実験において最も重要な問題は、原型と模型との間に力学的相似性を保たせることであり、この点に間して速水、樋口、吉田^{29),30)}は、模型における流れが層流の場合の相似律に関する研究をおこなった。すなわち、相似が成り立つ模型においては、その歪（水平縮尺と鉛直縮尺との比）が原型と模型の摩擦係数の比に等しくなければならないことに着目し、模型の水平縮尺を一定（1/500）にして鉛直縮尺を変えることにより、いろいろな歪をあたえて実験をおこない、原型と比較して適切な歪を見出し、これに基づいて相似律を確立した。また最近では、樋口、吉田³¹⁾は、この相似則にしたがい、水平縮尺1/2000という小さい模型を製作し、この考え方の正しいことを再確認している。模型における流れが層流と乱流との遷移領域にある場合の相似律については、樋口が一連の研究^{32)~36)}をおこなった。すなわち、模型の摩擦係数は Reynolds 数により変化するが、理論的に要請される値を考える場合を特性 Reynolds 数と考え、このような Reynolds 数が実現する場合に相似が成立つものと考えている。この研究は中海干拓にともなう境水道の水位変動の変化を取り扱つたものであり、数種の地形的条件の下における振動特性を調べ、遊水地が水道によつて外海と連結されている場合に、遊水地の大きさがどのように振動特性に影響を及ぼすかを研究した。

（4）海水の交流と混合に関する研究

沿岸海域の海水中には大洋では見られない物質が多く含まれているが、これらは河川水あるいは工場廃水などよりもたらされるものであり、沿岸の生産力にいろいろの意味で影響を与える。これらが海面上にどのように拡がり、また海水とどのように混合するかという問題を解決することは重要な意味をもっている。このような現象は、地域的に河口付近におけるものと、もつと広い海域とに分けることができる。

河口付近の問題としては、速水^{37),38)}は密度を異にする二層流の境界面における内部波、および内部波の不安定化による混合の水理を実験的に研究をおこなった。その主なる結果はつぎのようである。i) この種の実験を信頼できる精度において実施しうる特殊の水理実験施設を完成した。ii) 二層の境界面における内部波、混合を測定するための特殊の計測器を完成した。iii) 境界面における内部波の発生および混合発生の限界条件を確立した。iv) 内部波の波形勾配と波令との関係を明らかにし、内部波発達理論的考察に基礎を提供した。v) 多くの観測に基づいて内部波の波型を分類した。

また、広い地域における混合に関しては、速水ら^{39),40)}は、明石海峡において観測をおこない、採取した多数の海水を分析した結果、播磨灘の水と、大阪湾の水とは平均して潮流の半周期ごとに約10%の海水が混合しているとの結果を得ている。さらに速水ら²⁹⁾は広い海域におけるこの種の問題を実験的に取り扱い、海岸工事をおこない潮流を規制したために、混合係数がいちじるしく低下する場合があることを示した。

5. 構造物に及ぼす波力および海岸堤防に関する研究

(1) 構造物に及ぼす波力に関する研究

最近とみに盛んになつてきた海岸工事において、海面上に頭を出している海中構造物の需要が多いが、これを合理的に設計、施工するためには、これらの構造物が波によつてどのような力をうけるかを熟知する必要がある。

一般に波浪中においては、いわゆる drag force の他に inertia force が働き、とくに短周期の場合には後者が大きく作用する。樋口⁴¹⁾は最も単純化された構造物として円柱をとりあげ、これについて実験的研究をおこなった。これは、水理実験所の風洞水槽においておこなわれたもので、気圧式起波機により、周期約 0.73 sec、波長約 80 cm、波高 0.6~3.7 cm の波を与え、直径 1.58 cm、長さ 13.0 cm の円柱を水中に鉛直に立て、その高さをいろいろに変化させた場合に、これのうける力をモーメントの形で測つた。その結果、このような波の範囲では inertia force によるモーメントの方がどの場合にも大きくなつており、この力の重要性が示された。また、それぞれの力による係数として $C_D=1.05$, $C_M=2.08$ を得ており、この二つの係数を使つて、この範囲の波によつて円柱がうける力を理論式によつて計算できることを確かめた。

(2) 海岸堤防に関する研究

海岸堤防の設計に必要な項目は、堤防高、堤防の形状と構造および堤防の構築位置などであろう。これらは当然そこに襲来する波浪の特性と構築地点の性状に依存することはいうまでもなく、したがつてそうした目的に応ずるための基礎資料を研究し明確にしておく必要があるわけである。

石原(藤)、岩垣、鈴木¹⁵⁾は従来建設省土木研究所または Kaplan らによる堤防の有効高の決定法について批判検討し、そうした決定に必要な基礎的考察を行なうために、堤防の越波に関する実験を実施した。実験は室内水槽と扇形水槽の両者を用いて、堤防を波そのものあるいは飛沫が越えなくなる限界を明らかにするために実施した。そして、実験結果にもとづいてその力学的機構を考察し、ある程度その力学的意義を明らかにするとともに、実際の堤防の設計においては、波そのものも飛沫もともに越えないような基準をとれば、ほとんどの場合堤防高が経済的に実行できないほど高いものとなり、どうしても構造の問題や背後地の経済価値および人命などの問題と関連させて、多少の波や飛沫が堤防を越えることを許す方針で設計すべきであることを述べた。

以上の研究からも明かなように、海岸堤防の設計においては多少の越波を許すことを余儀なくされるので、背後地の危険度の推定や堤内の排水設備、潮遊びなどの設計に際して、越波量が極めて重要な問題となつてくることは明らかである。この問題に対しては米国の Beach Erosion Board などにおいてすでにかんがりの実験がなされてきたが、その現象に対する理論的な考察はほとんど行なわれていない。こうした現状において、石原(藤)、岩垣、三井^{42),43)}は前述した場合と同様に室内水槽および扇形水槽を用いて海岸堤防の越し波防止効果について検討したが、その結果はつぎのようである。まず鉛直壁の越波現象について従来用いられてきた越波量に関する無次元量とは相違して、波の進行にともなつて岸方向に通過する単位巾当りの水量を微小振巾波理論に基づいて計算し、これを越波量を無次元表示する場合の基準にとつた新しい無次元量を提案して実験結果を整理し、さらに Beach Erosion Board の結果をも参照して、こうした無次元量に基づく整理法が極めてよく適合することを示した。また、この無次元量に基づいて、波が鉛直壁に斜めに入射する場合および傾斜壁の越波現象に対しても、検討した結果はいずれもよく整理されることを示した。さらに、堤防の断面型式や壁面粗度などの越波量におよぼす影響については、Beach Erosion Board の結果を用いて同じ無次元表示法で考察し、さらに天端巾およびパラペットあるいは越波量におよぼす風の影響などについても言及した。

一方、越波はその堤防前面に潜堤を設置することによつてかなり防止できるようであり、石原(藤)、榎木^{13),14)}は扇形水槽を用いて須磨~明石海岸を対象とした模型実験を行なつた。まず波のはね上り高さと潜堤

の位置および高さとの関係を考察するために、Stoker の衝撃波理論に基づき次元解析法を適用して、波のはねり高さに関係すると考えられる無次元量を提案し、これに基づいて実験結果を整理検討したが、とくに養浜をした場合は極めてその効果が明確に現われることを示した。また同様な方法で潜堤の設置位置について検討し、実際上かなり重要な結果と多くの指針とをうることができた。

以上の諸研究は、主として風のない様な波による堤防前面における諸現象の考察を行なった結果であつて、実際の設計上における基礎的な多くの指針を与えることはいうまでもないが、実際には台風時における高速の風が以上の現象に大きく影響をおよぼすわけであるから、そうした点を十分検討しなければならないであろう。Beach Erosion Board あるいは永井らはすでに波の遡上および越波におよぼす風的作用について若干の実験を行なったが、実験設備の関係上適確な結論はほとんど得られていないといつてよい。当研究所ではこうした現状に留意し、新設の高速風洞水槽を用いて波の遡上や越波におよぼす風的作用を適確に把握するために、現在大阪湾の海岸堤防および防潮堤を対象として模型実験を進めている。

6. 海岸浸食および漂砂に関する基礎的研究

海岸を防護し、海浜の浸食を防ぐには、海岸浸食および漂砂に関する研究を行なつてその機構を十分理解しているのでなければ、合理的な対策を樹てることはできない。しかしながら、この方面の研究には現象の複雑さと観測の困難のため、いまだ未解決な問題が多く、十分には体系化される段階には至っていないといつてよいであろう。

こうした問題の解明に対しては、京都大学では極めて多くの研究成果を挙げ、この分野の体系化に寄与してきたので、それらの概要を述べよう。なおこのような問題についての研究は、現地における調査観測が極めて重要であるので、当然これらとの関連において考察を進めるべきである。当研究所で行なつた多くの調査や観測に関しては、7. でとりまとめることにしたい。

昭和29年岩垣⁴⁴⁾はこれまでに行なつた実測結果と外国における若干の実験結果をもとにして汀線浸食の機構をつぎのように詳細に論じた。まず海岸の平衡勾配の存在を仮定し、底質との関係を California 大学の実験結果や泉南海岸の実測形状と比較して問題点を明らかにするとともに、前浜勾配と砂粒径あるいは粒径と水深などの関係やその分布などを考察した。さらに砕波による砂礫の移動について考察し、Saville の漂砂量の分布に関する実験結果をもとにし波形勾配との関連において海浜の変形を論じ、正常海浜と暴風海浜との存在とその特徴を明らかにしようとした。さらに汀線浸食の機構について砂礫の移動限界点に立脚した平衡勾配法と、実際の海浜には平衡勾配が存在せず、ただある波形勾配以上では浸食が、また以下では堆積がおき、かつそれぞれ波のエネルギーの大きいほどその度合が大きいという経験的事実に基づく限界波形勾配法を提案して実測結果の説明を試み、それぞれの方法の特質と問題点を考察した。またわが国の海岸における汀線浸食の現況について述べ、前述した諸考察にもとづいてそれぞれの海岸の変形機構について言及した。石原(藤)⁴⁵⁾は海岸災害と海岸工学との関連について論じ、相次ぐ海岸災害の防止軽減のためにこうした方面の系統的な研究の必要性について述べ、さらにこれまでに大きく進めてきた泉南海岸における海岸浸食に関する調査研究の成果を述べて、具体的にそうした研究の進め方とその問題点を明らかにした。

以上のような実測結果を力学的に解明する端緒をうるには、現象を単純化して詳細な実験を行なうことが最良である。こうした目的に対する第一歩として、昭和30年岩垣、榎木⁴⁶⁾は California 大学の実験と同様に造波小水槽を用いて、海浜の平衡勾配と砕波による砂移動に関する実験を行なつてつぎのような結果を得た。まず、平均粒径 0.3 mm の砂を用い、造波機によつて最大波高 5.5 cm の波を起こして California 大学における実験と比較すべき多くの実験結果を得た。そしてこうした結果を波の屈折や回折の現象が行なわれる実際の海岸に適用するには、沖波の代りに砕波の特性を用いて実験結果を無次元表示しなければならないことを示した。さらに実験結果と泉南および網野両海岸における実測の結果とを比較し、両者の相似性を検討し、このような方法によつて研究を進める意義を述べた。さらに岩垣、榎木⁴⁷⁾は上記の実験に引続き

0.52 mm および 1.00 mm の平均粒径をもつ2種の砂を用いて実験を行なつて、こうした現象におよぼす底質の大きさと波の特性の効果について検討し、つぎのような結果を得た。すなわち、海浜の勾配や砂の移動量分布を支配する最も重要な要素の一つは波の特性とくに波形勾配であること、また底質の大きさは沿岸砂州の位置やその規模に関係すること、砂移動限界水深は 0.30 mm の粒径の砂の場合と 2~3 mm 前後の底質の泉南海岸における実測結果とがほぼ一致すること、およびこのときの限界水深は砕波水深に大体等しいことなどの興味ある結論を得た^{47),48)}。また足立⁴⁹⁾は海浜の形状を特徴づける砂堆について考察し、泉南海岸における実測結果をもとにして汀線に直角方向の底質の粒度分布から砕波による浮遊砂の動向が、砂堆発生機構を決定づけるであろうことを推論した。

以上のような実験的事実を力学的に解明するためには、まず波の作用による砂礫の移動機構を明らかにする必要がある。こうしたことから Ippen および Eagleson らは波による底質の淘汰作用について研究し、また Kalkanis は振動板上の砂の運動について研究を行なつた。この現状にかんがみ、石原(藤)、榎木、天野^{50),52)}は漂砂の運動機構を根本的に解明するため、砂礫の運動に最も関連する波動運動にともなう水粒子の運動について詳細な実験を行なつた。こうした現象を把握するための流速測定は現象が非定常であることから、とくに流速計について考察し差圧式流速計を試作して、水平底部の海浜地区、砕波点より少し沖側の地点、砕波点付近、最終砕波点(plunging point)付近、さらに岸側の地区を選び、各地点において流速測定を行ない、つぎのような結果を得た。まず最大水粒子速度の鉛直分布についての実験結果を、浅水波理論における Airy の理論結果および孤立波の最大粒子速度に関する理論結果と比較し、波の特性と各測定位置別にその適合の状態を明らかにした。さらに海浜断面に沿う最大粒子速度の分布について考察し、また孤立波に関する理論結果と比較しながら、向岸流および離岸流の特性、とくにその分布に対して極めて興味深い結果をうるとともに、波形勾配の大小によつてそうした特性が明確に相違することを示した。またそうした水粒子速度の時間的変化についても考察を加え、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いようになり、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、したがつてこれに対して離岸流のそれは緩慢になることなど、従来ほとんど知られていなかった現象を明らかにした。以上の研究に引き続き、石原(藤)、榎木、山口^{51),52)}は漂砂の移動量と密接な関係のある水の質量輸送速度の変化を実験的に解明して、つぎのような結果を得た。まず離岸流の流速分布を一様であると仮定し、質量輸送に関する理論解にそれを付加して流速を求め、これに基づいて底部に沿う質量輸送速度を検討した。つぎに砂礫の移動に対して有効な質量輸送速度として、水粒子速度からそれと同時刻の砂礫の運動に必要な限界流速を差引いたものの一周期間の平均として定義される有効質量輸送を提案した。そして、さらにこの有効質量輸送速度と漂砂量とが比例関係にあるものとして、砂礫の堆積、浸食および砂州の発生地点などの考察を進め、前述した海岸の平衡勾配の実験結果と比較してつぎの結論を得た。すなわち、このようにして有効質量輸送速度の分布を求めると、各波形勾配に応じて浸食および堆積あるいは砂州発生点などが指摘できること、またこれは平衡勾配に関する実験結果とよく一致すること、従来沖波の波形勾配のみによつて考察されてきたこうした問題に、有効質量輸送速度の概念を導入することにより説明されることを示した。また以上の研究に引き続き、石原(藤)、榎木⁵³⁾は波による砂の移動限界の問題を基礎的に研究するために、閉管路を用いて非定常な流れによる限界掃流力の詳細な実験を行ない。非定常流における砂移動限界の相違を明らかにすることができた。それらの結果を用いて波による砂の移動量を算定する方式を考察し、また砂の移動限界水深に対する実験式を提案して従来のものと比較検討した。

砕波の峯線が汀線と平行のときは、砂礫は汀線と直角方向にのみ移動するが、砕波の峯線が汀線とある角をなしているときは沿岸漂砂が生じ、これは長期間にわたる海浜の浸食堆積に大きい影響をおよぼすものである。榎木、村上⁵⁴⁾は扇形水槽を用いて、沿岸流速、漂砂量などについて実験を行ない、エネルギーとの関係を見出し、現地海岸への適用を試みた。また沿岸漂砂におよぼす海岸構造物の影響を検討するために、例として宮津海岸をとりあげ、波の海岸構造物による変形を考慮し、沿岸流速分布にもとづく地形変化につい

て考察するとともに、トンボロの形成と発達について述べた⁵⁵⁾。また、足立、小合⁵⁶⁾は港湾の埋没に直接関係する漂砂の問題をとりあげて実験的な研究を進めた。この場合速水ら⁵⁷⁾は港内に静振が卓越する場合の港内埋没過程を考察したのに対し、足立らは波向に直角に設置される離岸堤をとりあげ、そこに発達するトンボロについて考察し、つぎの結果を得た⁵⁸⁾。トンボロの発生、発達に関する最も重要な因子は沖波の波長と相対的な離岸堤の位置であり、またトンボロの形状は離岸堤による波の回折図から推定できるなどの興味深い事実を明らかにした。

沿岸漂砂量の算定に対する考察も、波による底質の運動機構が解明されるにしたがい明確になるわけであるが、岩垣、樫木⁵⁹⁾は沿岸流の流速と流砂量公式とをむすびつけて、沿岸漂砂量をあらわす関係を導いた。そして漂砂量におよぼす沖波の入射角、波高および周期、あるいは波形勾配などの影響を論じ、さらに明石海峡北岸の漂砂量分布を推定して、その海岸の浸食堆積の傾向について述べた。

一方以上のような海岸浸食の問題においては、前述したように実験結果と現地海岸における実測の結果との間に、満足な相似性が必要であることはいうまでもなく、とくに海岸変形の問題においては底質の大きさが重要な要素となってくるようである。岩垣、野田⁶⁰⁾、⁶¹⁾はこうした意味から海岸変形の実験における縮尺効果の研究をとりあげた。そして長水路実験施設を用いて波高の大きい場合の実験を行なうとともに、従来発表された諸実験結果を用いてつぎのような考察を行なつた。まず海岸変形を次元解析的に取り扱うこととし、いくつかの諸要素のうち底質の効果をあらわすものとして粒径と沖波の波高との比を導入し、汀線付近の海浜変形を検討した。その結果、粒径と波高との比のある値を境として、汀線の変動におよぼす粒径の効果が著しく相違することがわかったが、これはたとえ波形勾配が一定でも、この比の値がある限界値より大きい小さいかによって、いそ波帯における底質の移動機構が異なるためであろうと推定され、このことは今後の発展に注目すべき手掛りを与えるものである。つぎに、海浜の平衡断面形について考察し、同一の波形勾配の波による実験結果においても、上記の比の値によって形状が著しく相違することを示し、また沿岸砂州の発生限界に対してもこの無次元量が極めて重要なものであることを明らかにし、実験結果に基づいてその限界をあらわした。また樫木⁶²⁾、⁶³⁾は漂砂に関する最近の研究をとりまとめるとともに、前述した漂砂の運動機構に関する研究成果を用い、海岸浸食を対象とした模型実験の相似律について、漂砂量公式と限界流速を示す関係に基づいて考察を進め、ついで現地海岸におけるある平衡勾配から他の平衡勾配へ変形する場合の変形過程を、平衡勾配に関する実験結果を適用して推定する方法を説明した。以上述べたように、海岸変形に関する研究はとくに現地海岸への適用における相似律の問題が極めて重要であり、したがって実験的研究においても縮尺効果などの研究が要請されるわけである。こうしたことから現在長水路を用いて規模の大きな実験を進めるとともに、現象の解明に寄与する基礎的な実験資料をとつて、その機構の水理学的な解明に努めている。

7. 海岸浸食および漂砂の調査研究

海岸浸食や漂砂に関する研究を進め、そうした分野における学問の体系化をはかるためには、まず現実にとどのような現象が、またどのような機構によつて問題が生じているかなどを調査しなければならない。そしてその機構を解明するためには、どういう問題について現象を単純化し、それについて詳しい実験的あるいは理論的研究をいかに進めるべきかを考えなければならない。

京都大学で実施してきた調査研究はかなりの数にのぼっており、それぞれ貴重な調査結果を得ているので、ほぼ年代順にその概要を述べてみよう。

(1) 鳥取県海岸の浸食および漂砂に関する調査

前述したように昭和22年鳥取県において網代港、泊港、由良川河口、赤碕港および皆生海岸一帯を対象として調査研究を行なうべく漂砂対策協議会が発足し、京都大学からも石原(藤)および速水がその調査に加わつて全面的な調査を進めてきたのであるが、その概要はつぎのようである。

まず石原(藤), 岩垣⁶⁴⁾⁻⁶⁶⁾は網代港の埋没に大きく関係していると考えられる飛砂の影響について調査し, つぎの結果をえた。網代港の飛砂地において風の頻度および風速分布について検討するために, プロペラ型風速計を用いて実測し, また飛砂採集器を用いて飛砂量とその分布を測定した。飛砂に関する実測結果を検討するために, 従来の研究を総括してその問題点を明らかにし, 理論的結果と実測値との比較検討を行ない, さらに年間の飛砂量を推定して港内の埋没量とその防止対策について考察した。さらに港内の波浪について調査し, 当時としてはじめてこの網代港における波浪屈折図を画き, 漂砂に関する考察の重要な資料とすることができた。また港内の底質を採取して, その平均粒径の分布図をつくり, さらに海水の採取から塩素量の分布を明らかにする一方, 流速を測定して底質の移動機構の解明に供した。こうした結果とともに, 汀線浸食に関する実測値について考察し, 以上を総合して港内の埋没防止対策について述べた。一方, 速水^{67), 68)}は泊港湾の漂砂について調査し, つぎの結果を得た。まず漂砂の研究に対して一般的な考察を行ない, 泊港付近の海底地形および底質を詳細に実測し, また港内の静振を観測して, 砂堆の発生と静振との関係について野満博士の理論を適用し, さらに渦動粘性係数を算定してその機構を考察した。一方, 泊港付近の波高分布について検討し, それが特殊性をもっていることを明らかにしたが, これは砂堆の形成や防波堤の築造によるものであることを述べた。さらに港内埋没の過程と浚渫後の経過について, 以上述べた調査結果をもとにして考察し, 埋没防止に関する多くの資料を得ることができた。また, 速水^{69), 70)}は弓ヶ浜の波高分布を実測し, 屈折図を画いて求めた屈折係数の分布と比較してほぼその傾向が一致していることを示し, この海岸における漂砂の原因を明らかにした。

(2) 泉南海岸の浸食に関する調査

大阪府では泉南海岸の浸食がはげしく, 毎年汀線が後退して民有地に被害がおよび重大な問題となつてきたために, 昭和24年9月大阪府泉南海岸浸食調査会を設け, 各方面に依頼して調査に着手したのである。京都大学でも石原(藤)および速水が参加して全面的調査を行なつてきたが, その概要はつぎのようである。

まず石原(藤), 岩垣, 堀⁷¹⁾は泉南海岸を踏査してその浸食の現状を認識し, また同時に浜砂を採集してその分析を行なつた。大阪における風の資料から月別または風速別に分布図を作り, この海岸における風の特性を調べた。また浜砂の粒度分析の結果から海岸に沿う平均粒径の分布を明らかにし, その粒度分布の型についても各地点ごとに分類検討して海岸線の各地点の特徴を見出そうと試みた。一方, 浜砂の成分を分析して, 漂砂の供給源と経路に関する基礎資料を得ようと試み, とくに磨耗という点から石英および長石との分布について考察したが明確な結論はえられなかつた。

つぎに皆生海岸と同様に, 泉南海岸における詳細な波の屈折図を風向および周期別に作り, 海岸浸食の機構を説明するための基礎資料を得た。そしてこれらの屈折図を用いて海岸沿いの波高分布を求め, 浜砂に関する資料との関連から海浜の特性を考察した。また速水⁷²⁾は泉南海岸の浸食について, とくに地形上の観点から概説し, 地盤沈下, 漂砂, 海浜, 浸食などについて一般的に論じ, この調査にあつていかなる点に留意すべきかについて問題点を述べ, 調査にあつての参考に供した。

石原(藤), 岩垣, 土屋(昭)⁷³⁾は前記の調査に引き続き, 防砂堤の効果を検討するために, 泉南海岸下荘村箱作り貝塚市間において, 主として防砂堤群の周辺において深淺測量を行なつた。その結果から防砂堤の効果を検討して, この海岸の南部では一般に防砂堤への砂付きが悪いが, 北部に向うにしたがつてその効果があらわれていることがわかつた。また速水, 足立および土屋(昭)⁷⁴⁾は防砂堤の北および南側において底質を採集し, その分析を行なつて防砂堤の効果とともに粒度の分布特性について検討したが, いずれの底質をみても淘汰がよく行なわれていないことを明らかにした。さらに以上の諸結果を考察するためには, 碎波にともなう沿岸流を究明する必要があるわけであり, こうしたことから Putnam, Munk 及び Traylor の沿岸流速公式を紹介して, 砂礫の移動機構を考察した。さらに石原(藤), 岩垣, 土屋(昭)⁷⁵⁾は Sverdrup-Munk の fetch graph によつて, この海岸に襲来する波の波形勾配を求め, また碎波水深を推定して浸食機構の解明にあつての資料をつくつた。そして, 海底形状を実測した結果と平衡勾配に関する California 大学

での実験結果を比較して、その特性を考察した。また砕波高の分布と砕波によつて生ずる沿岸流とを組合せて海岸浸食の機構を説明した。

以上の調査研究に引き続いて、速水、石原(藤)、岩垣⁷⁶⁾は汀線砕波とこれによる砂礫の移動について考察するために、泉佐野海岸における砕波を観測したが、その際、波高と流速とを同時に自記させた。これについては、3.において述べた²⁰⁾。さらに泉佐野における海底の日変化および月変化を明らかにするために、浸食堆積量と波形勾配との関係を風向別に求め、海岸浸食の量的な取扱い方の一つの試みとしたが、これらは防砂堤の設計あるいは有効な海浜浸食の防禦対策の確立に対して多くの示唆を与えた。

(3) 富山および三重海岸における波浪観測調査

速水および石原(藤)は海浜変形の直接的原因となる波浪の観測を富山および三重の両海岸について行ない、つぎのような成果を得た²⁰⁾。まず富山海岸における波浪観測を行なつて、砕波水深、波の周期、はい上り距離などの海岸に沿う分布を求め、また屈折図を描いて屈折係数を求め、この海岸の特性を明らかにした。また三重海岸とくに津港を中心とし多地点の波浪観測を行ない、富山海岸と同様、砕波高、波の周期などの海岸に沿う分布と屈折図による屈折係数を求め、この海岸における海岸災害の防止軽減に役立つ基礎資料を得た。

(4) 菊川河口の飛砂に関する調査

菊川河口には飛砂地が発達しており、飛砂が河川上流に悪影響を及ぼす河口閉塞の原因の一つと考えられることから、飛砂に関する調査が重要視され、石原(藤)は建設省の依頼によりその調査を行なつて、つぎのような成果を得た。

石原(藤)、岩垣^{77),78)}はまず飛砂に関する基礎的な研究を行なう必要から、風の作用によつて砂が移動を開始するときの関係、および飛砂量に関する従来の研究をとりまとめて批判し考察するとともに、飛砂が浮遊して運ばれるものとして理論的に飛砂量をあらわす関係を求めた。また現地における風の特性に関する資料を得て解析するとともに、飛砂器を用いて飛砂量やその分布を詳細に測定し、前述した理論的考察の結果と比較検討した。そして以上の結果を用いて年間の飛砂量を推定し、菊川河口閉塞に及ぼす飛砂の効果を論じた。

(5) 宮津海岸の漂砂に関する調査

昭和30年石原(藤)および岩垣は京都府より依頼をうけて、宮津海岸の漂砂に関する調査を行ない、つぎのような成果を得た。

石原(藤)、岩垣、樫木、喜多、小合⁷⁹⁾はまず宮津海岸における漂砂量の測定と波の観測および沿岸流速の分布を測定して、海岸構造物が漂砂に及ぼす影響を論ずるとともに、漂砂量に及ぼす波の諸特性の影響について、Saville らと同様にエネルギーの関係を利用し、漂砂量をあらわす関係を導いた。

(6) 明石海峡北岸の浸食に関する調査

昭和30年神戸市は明石海峡調査会を設けて海峡の実態究明のための調査を始め、京都大学でも石原(藤)および速水らが参加したが、とくに明石海峡北岸の浸食問題を石原(藤)が担当し、つぎのような成果をあげた。

石原(藤)、岩垣、村上⁸⁰⁾はまずこうした調査を最も経済的にそして適確に行なうべきことに主眼をおき、その基本方針について検討したのち、つぎのような調査を行なつた。海岸の海底勾配、地質に関する実測を海岸線延長 15 km にわたつて詳細に行ない、また神戸および明石における風の特性を検討し、沖波の特性を fetch graph によつて明らかにするとともに、詳細な波の屈折図を描いた。また砕波水深と砕波高あるいは沿岸流速などについて検討した。さらにこれを用いて、この海岸の漂砂と浸食機構について、とくに海岸に沿う漂砂量分布、汀線と直角方向の漂砂分布および漂砂の一般的性状などを明らかにして、解明に努めた。

さらに前報告に引き続き石原(藤)、岩垣、樫木、村上是⁸¹⁾沿岸漂砂量の定量的な把握につとめ、仮設防砂

堤における砂礫の堆積量および浸食量を測定して漂砂量を求め、また一方採砂器を用いて漂砂量を実測した。沿岸漂砂の特性について、とくに漂砂量の分布、漂砂移動帯、漂砂強度最大点および漂砂移動限界水深などについて考察し、さらにこれらの実測結果に実験による沿岸漂砂の運動機構に関する成果を適用して、沿岸漂砂量と沿岸方向の波のエネルギーとの関係を求めた。そして風に関する資料をもとにして、西垂水海岸における年間の漂砂量を推定し、この海岸における漂砂の実態を明らかにした。なお、この年間の漂砂量の推定は、後に新しい沿岸漂砂量公式を導き訂正が行われた⁵⁹⁾。

(7) 渥美湾大洲海岸における海浜砂の調査

この調査の対象とした大洲崎砂洲は、漂砂の堆積によって、東部にのびており、またその一部には防砂堤が設けられているので、その両側で海浜地形が変化していることから、こうした漂砂の局所的問題の解明上極めて興味のある地域と考えられる。柿沼⁸²⁾はこの海岸における砂礫の粒度分布の特性をしらべ、つぎのような調査結果を得た。主として海底面砂礫の特性を知ること主眼をおいて底質を採集し、そのフルイ分け分析を行ない、中央粒径および標準偏差の二つをとりあげて考察した。この海岸における海浜砂の粒度分布は、砂群と礫群に分れることを見出し、それぞれについてその分布状況および淘汰度などについて検討し、こうした砂礫の輸送機構を定性的に明らかにしようとした。

(8) 茶崎漁港の漂砂の調査

日本海に面した福井県の一漁港、茶崎港は毎年泊地が漂砂により埋没するため、福井県の委託で石原(藤)および岩垣はその埋没防止対策を検討するために昭和34年および35年の2年間にわたって調査を実施した。

石原(藤)、岩垣、野田ら⁸³⁾は深淺測量、波浪観測、流れの観測、底質および漂砂の採集、および静振の観測などを行なつてつぎのような成果をえた。風、波浪および流れの特性を明らかにし、とくに泊地内に流送される漂砂の直接原因について究明し、泊地内の砂の堆積位置が一応静振によつて説明される場所に近いくことを明らかにするとともに、また底質粒径と水深との関係を求めて、漂砂の運搬機構の解明につとめ、埋没原因を明らかにしようとした。

以上かなり多くの海岸における調査観測の成果は、海岸工学のこうした分野における体系化のための極めて重要な資料であることはいふまでもないが、一方今後も多くの海岸において同様な問題が生じ、調査を要する場合がしばしば起こるであろうことを考えると、できる限り経済的にまた効果的に調査し、その目的を達成するためには、こうした方面の調査方法について系統的に考察しておく必要がある。岩垣⁸⁴⁾は以上の調査の経験と形来の諸調査の成果や研究成果を参考にして、海岸漂砂の調査について考察を行ないその指針を明らかにした。

8. あ と が き

わが国の海岸の総延長は 25,600 km といわれ、その約 2/3 にあたる 16,500 km が海岸保全区域に指定されている。これだけの長い海岸を災害から護ることは、なかなか容易ではない。とくに最近、経済の飛躍的な発展に伴つて、産業の中核をなす重化学工業地帯が海岸へ移り、いわゆる臨海工業地帯の造成が進められているが、こうした海岸の開発やそれに付随する港湾規模の増大は見方をかえれば、海岸海洋災害の発生する場や機会を増すことになり、また工業廃水や都市廃水などによる海水汚染も大きな問題となつてくる。重要都市は海岸に発達し、しかも湾の奥に位しているので、台風時には高潮の危険にさらされ、これを防ぐために莫大な費用を投じて海岸堤防や防潮堤を建設している。また地理的地形的関係から三陸海岸その他の太平洋に面する小湾は、地震津波の恐威をしばしば経験している。

こうした海岸を台風による高潮、波浪あるいは地震津波から護るには、多くの費用と年月が必要であるが、海岸防災事業は海岸および海洋の理工学的研究の裏付けによつて、はじめて十分な効果を発揮するものである。

海岸、海洋の防災研究のあり方には、いろいろ議論すべき点が多いが、とにかく災害の原因である自然力

の本質を究明すること、自然力によつて引き起こされる各種の水理現象を解明すること、災害を防ぐための海岸構造物の防災機能を明らかにすること、が主要な項目であろう⁸⁵⁾。海岸工学は戦後に生れ⁸⁶⁾、急速に発展してきたが、当研究所においてもそれに即応し、以上述べたように理学分野、工学分野が相協力して研究を進め、広汎な研究課題と取り組み、この方面に多大の貢献をしてきた。今後さらにこれを礎として大きく進展させたいと考えている。

なお、本文をとりまとめるに当つて、国司、樋口、土屋の各助教授に多大の労をわずらわした。またここに述べた研究の多くは文部省科学研究費と委託研究によるものであることを記し、関係方面に深謝の意を表する次第である。

参 考 論 文

- 1) 国司秀明：風波に関する最近の研究，海岸工学の最近の進歩，土木学会関西支部，昭36.3，pp. 198-217.
- 2) 国司秀明：風洞水槽による風波の研究(Ⅰ)―表面境界層流について―，京大防災研究所年報，第1号，昭32.12，pp. 119-127.
- 3) Hayami, S. and Kunishi, H. : A Wind Flume Study on the Generation of Wind Waves, Proc. Intern. Oceanog. Congr. (Preprints), 1959, pp. 753-755.
- 4) Kunishi, H. : An Experimental Study on the Generation and Growth of Wind Waves, Disas. Prev. Res. Inst., Kyoto Univ., Bull. に発表予定.
- 5) 岩垣雄一，柿沼忠男：海岸波浪の予知に関する研究(第1報)，京大防災研究所年報，第5号A(創立10周年記念号)，昭37.3，pp. 284-295.
- 6) Yamada, H. : Permanent Gravity Waves on Water of Uniform Depth, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ., Vol. VI, No. 23, 1958, pp. 127-139.
- 7) Yamada, H. : Highest Waves of Permanent Type on the Surface of Deep Water, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ., Vol. V, No. 18, 1957, pp. 37-52.
- 8) Yamada, H. : On the Approximate Expression of Stokes Waves, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ., Vol. V, No. 20, 1957, pp. 143-155.
- 9) 山田彦児：Stokes 波の質量輸送，九州大学応用力学研究所所報，第15号，昭35.5，pp. 35-49.
- 10) 岩佐義朗：クノイダル波と孤立波に関する解析的研究，土木学会論文集，第32号，昭31.3，pp. 43-49.
- 11) Yamada, H. : On the Highest Solitary Wave, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ., Vol. V, No. 18, 1957, pp. 53-67.
- 12) Yamada, H. : On Approximate Expressions of Solitary Wave, Reports of Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu Univ., Vol. VI, No. 21, 1958, pp. 35-47.
- 13) 石原藤次郎，樺木亨：山陽本線須磨～塩屋間潮害対策報告書，昭33.4，pp. 1-54.
- 14) 石原藤次郎，樺木亨：潜堤の効果について，京大防災研究所年報，第2号，昭33.12，pp. 70-82.
- 15) 石原藤次郎，岩垣雄一，鈴木雄太：海岸堤防の設計，特にその有効高について，海岸工学講演会講演集，昭30.11，pp. 57-70.
- 16) 岩垣雄一，石原安雄，吉田幸三：新堺港の波浪遮蔽実験，京都大学防災研究所年報，第5号(創立10周年記念号)，昭37.3，pp. 306-322.
- 17) 岩垣雄一：海岸および港湾の模型実験について，海岸工学の最近の進歩，土木学会関西支部，昭36.3，pp. 21-42.
- 18) Iwasa, Y. : Attenuation of Solitary Waves on a Smooth Bed, Trans. A.S.C.E., Vol. 124, 1959,

- pp. 193-206.
- 19) 土屋義人, 井上雅夫: 海底摩擦による波高減衰の基礎的研究(1), 第8回海岸工学講演会講演集, 昭36.9, pp. 19-24.
 - 20) Hayami, S., Ishihara, T. and Iwagaki, Y.: Some Studies on Beach Erosions, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Bulletin No. 5, Aug. 1953, pp. 1-20.
 - 21) 速水頌一郎: 破波の機構, 第1回海岸工学研究発表会論文集, 昭29.11, pp. 35-44.
 - 22) 速水頌一郎: 破波の機構(II), 第2回海岸工学講演会講演集, 昭30.11, pp. 13-15.
 - 23) Hayami, S.: Type of Breakers, Wave Steepness and Beach Slope, Coastal Engineering in Japan, Vol. 1, 1958.
 - 24) 国司秀明, 吉田幸三: 伊勢湾台風にともなつた高潮の解析, 第7回海岸工学講演会講演集, 昭35.11, pp. 225-229.
 - 25) 速水頌一郎: 西日本におけるチリ津波の調査について, 1960年5月24日チリ地震津波に関する論文及び報告, チリ津波合同調査班, 昭36.12.
 - 26) Higuchi, H.: On the Change of Amplitude of Chile Tsunami in Sakai Channel, 同上.
 - 27) 速水頌一郎: 臨海工事による沿岸海域の生産力向上に関する研究(1), 京大防災研究所, 昭31.3, pp. 1-8.
 - 28) 速水頌一郎: 臨海工事による沿岸海域の生産力向上に関する研究(2), 京大防災研究所, 昭32.3, pp. 1-4.
 - 29) 速水頌一郎, 樋口明生, 吉田幸三: 潮流を含む水理模型実験の相似性について, 京大防災研究所年報, 第2号, 昭33.12, pp. 83-95.
 - 30) Hayami, S., Higuchi, H. and Yoshida, K.H.: On the Similitude of Hydraulic Models Involving Tidal Motion, Coastal Engineering in Japan, Vol. 3, Dec. 1960, pp. 9-20.
 - 31) 樋口明生, 吉田幸三: 名古屋港付近の潮流に関する水理模型実験(1), 第8回海岸工学講演会講演集, 昭36.9, pp. 114-118.
 - 32) 樋口明生: 境水道の水位変動に関する模型実験について, 第6回海岸工学講演会講演集, 昭34.11, pp. 29-35.
 - 33) 樋口明生: 境水道の水位変動に関する水理模型実験, 京大防災研究所年報, 第3号, 昭34.12, pp. 54-64.
 - 34) Higuchi, H.: Hydraulic Model Experiment on the Oscillation of Water Level in Sakai Channel, Coastal Engineering in Japan, Vol. 4, Dec. 1961, pp. 35-45.
 - 35) 樋口明生: 境水道の水位変動に関する模型実験について(2), 第8回海岸工学講演会講演集, 昭36.9, pp. 119-125.
 - 36) 樋口明生: 境水道の水位変動に関する水理模型実験(II), 京大防災研究所年報, 第4号, 昭36.3, pp. 237-249.
 - 37) 速水頌一郎: 工場廃水の海面における分散過程に関する水理学的研究(1), 昭和34年度農漁業試験研究費補助金による研究報告書, 昭35, pp. 1-33.
 - 38) 速水頌一郎: 工場廃水の海面における分散過程に関する水理学的研究(2), 昭和35年度農漁業試験研究費補助金による研究報告書, 昭36, pp. 1-26.
 - 39) 速水頌一郎, 福尾義昭, 依田大介: 明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について, 第3回海岸工学講演会講演集, 昭31.11, pp. 49-54.
 - 40) 速水頌一郎, 福尾義昭, 依田大介: 明石海峡による播磨灘と大阪湾との海水交流について, 明石海峡調査報告書, 昭34.3.
 - 41) 樋口明生: 円柱に及ぼす波力の実験的研究, 京大防災研究所年報, 第1号, 昭32.12, pp. 128

-137.

- 42) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 三井宏: 海岸堤防の越し波防止効果について, 第4回海岸工学講演会講演集, 昭32.11, pp. 99-109.
- 43) Ishihara, T., Iwagaki, Y. and Mitsui, H.: Wave Overtopping on Seawalls, Coastal Engineering in Japan, Vol. 3, Dec. 1960, pp. 53-62.
- 44) 岩垣雄一: 汀線浸食, 第1回海岸工学研究発表会論文集, 昭29.11, pp. 69-80.
- 45) 石原藤次郎: 海岸災害, 土木学会中部支部防災工学テキスト, 昭30.3, pp. 6.1-6.49.
- 46) 岩垣雄一, 榎木亨: 海浜の平衡勾配と砕波による砂移動に関する実験, 第2回海岸工学講演会講演集, 昭30.11, pp. 99-106.
- 47) 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, 昭31.11, pp. 233-240.
- 48) Iwagaki, Y. and Sawaragi, T.: Experimental Study on the Equilibrium Slopes of Beaches and Sand Movement by Breaker, Coastal Eng. in Japan, Vol. 1, 1958, pp. 75-84.
- 49) 足立昭平: 砂堆について, 第3回海岸工学講演会講演集, 昭31.11, pp. 159-162.
- 50) 石原藤次郎, 榎木亨, 天野哲夫: 漂砂の運動機構に関する基礎的研究, 第5回海岸工学講演会講演集, 昭33.11, pp. 65-72.
- 51) 石原藤次郎, 榎木亨, 山口甚郎: 海浜平衡勾配と波の質量輸送速度との関係について, 漂砂の運動機構に関する研究(第2報), 土木学会第14回年次学術講演会講演概要, 昭34, p. 117.
- 52) Ishihara, T., Sawaragi, T. and Amano, T.: Fundamental Studies on the Dynamics of Sand Drifts (Report 1 and 2), Coastal Eng. in Japan, Vol. 2, Nov. 1959, pp. 35-52.
- 53) 石原藤次郎, 榎木亨: 漂砂の移動限界流速, 限界水深及び移動量について, 漂砂の運動機構に関する基礎的研究(第3報), 第7回海岸工学講演会講演集, 昭35.11, pp. 47-58.
- 54) 榎木亨, 村上正: 沿岸漂砂量の推定について, 第4回海岸工学講演会講演集, 昭32.11, pp. 41-50.
- 55) 榎木亨: 沿岸漂砂に及ぼす海岸構造物の影響(第1報), 第4回海岸工学講演会講演集, 昭32. 11, pp. 51-58.
- 56) 足立昭平, 小合彬生: 港湾の埋没に関する実験的研究, 第5回海岸工学講演会講演集, 昭33. 11, pp. 81-86.
- 57) 速水頌一郎, 堀俊之, 足立昭平: 泊港の埋没について, 土木学会誌, 第35巻, 第4号, 昭25.4, pp. 19-22.
- 58) Adachi, S., Sawaragi, T. and Ogo, A.: The Effect of Coastal Structures on the Littoral Sand Drifts, Coastal Eng. in Japan, Vol. 2, Nov. 1959, pp. 85-98.
- 59) 岩垣雄一, 榎木亨: 沿岸漂砂量の新算定法について, 第7回海岸工学講演会講演集, 昭35. 11, pp. 59-67.
- 60) 岩垣雄一, 野田英明: 海浜変形に及ぼす scale effect の研究, 京大防災研究所年報, 第4号, 昭36.3, pp. 210-220.
- 61) 岩垣雄一, 野田英明: 海岸変形の実験における縮尺効果の研究, 第8回海岸工学講演会講演集, 昭36.11, pp. 139-143.
- 62) 榎木亨: 海岸漂砂に関する最近の諸問題, 海岸工学の最近の進歩, 土木学会関西支部, 昭36.3, pp. 43-55.
- 63) 榎木亨: 移動床実験の現地海岸への適用に関する一考察, 第8回海岸工学講演会講演集, 昭36. 9, pp. 134-138.
- 64) 石原藤次郎, 岩垣雄一: 網代港の埋没防止に関する研究, 鳥取県漂砂対策調査報告書, 昭25.4, pp.

- 5-34.
- 65) 石原藤次郎, 岩垣雄一: 鳥取県網代港の埋没防止に関する研究, 防災研究所研究報告, 第2号, 昭24.9, pp. 76-81; 第3号, 昭25.10, pp. 57-68.
- 66) 岩垣雄一: 網代港埋没に関する飛砂の影響について, 土木学会誌, 第35巻, 第6号, 昭25.6, pp. 19-25.
- 67) 速水頌一郎: 泊港湾の漂砂に関する研究, 鳥取県漂砂対策調査報告書, 昭25.4, pp. 35-50.
- 68) 速水頌一郎: 泊港の漂砂について, 防災研究所研究報告, 第2号, 昭24.9, pp. 82-87.
- 69) 速水頌一郎: 弓ヶ浜の波高分布について, 鳥取県漂砂対策調査報告書, 昭25.4, pp. 61-71.
- 70) 速水頌一郎: 弓ヶ浜の波高分布について, 防災研究所研究報告, 第3号, 昭25.10, pp. 47-56.
- 71) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 堀俊之: 泉南海岸の浸蝕に関する基礎的研究(第1報及び第2報), 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第1報, 昭26.4, pp. 78-99; 100-110.
- 72) 速水頌一郎: 泉南海岸の浸蝕について(予察), 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第1報, 昭26.4, pp. 143-146.
- 73) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 土屋昭: 泉南海岸の浸蝕に関する基礎的研究(第3報), 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第2報, 昭27.10, pp. 1-2.
- 74) 速水頌一郎, 足立昭平, 土屋昭: 泉南海岸の浸蝕に関する基礎的研究(第4報), 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第2報, 昭27.10, pp. 3-26.
- 75) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 土屋昭: 泉南海岸の浸蝕に関する基礎的研究(第5報), 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第2報, 昭27.10, pp. 27-40.
- 76) 速水頌一郎, 石原藤次郎, 岩垣雄一: 泉南海岸の浸蝕に関する基礎的研究(第6報), 泉南海岸浸蝕調査報告書, 第3報, 昭29.1, pp. 1-21.
- 77) Ishihara, T. and Iwagaki, Y.: On the Effect of Sand Storm in Controlling the Mouth of the Kiku River, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Bulletin No. 2, 1952, pp. 1-32.
- 78) 岩垣雄一: 海岸における飛砂について, 防災研究所研究報告, 第3号, 昭25.10, pp. 31-35.
- 79) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 榎木亨, 喜多樹, 小合彬生: 宮津海岸の漂砂に関する調査報告書, 昭32.3, pp. 1-75.
- 80) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 村上正: 明石海峡北岸の浸食調査について, 第3回海岸工学講演会講演集, 昭31.11, pp. 185-193. または明石海峡調査報告書, 昭34.3.
- 81) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 榎木亨, 村上正: 明石海峡北岸の浸蝕調査について(第2報), 明石海峡調査報告書, 昭34.3.
- 82) 柿沼忠男: 渥美湾大洲海岸における海浜砂の粒度分布について, 第8回海岸工学講演会講演集, 昭36.9, pp. 156-160.
- 83) 石原藤次郎, 岩垣雄一, 野田英明: 茅崎漁港の埋没原因について, 京大防災研究所年報, 第4号, 昭36.3, pp. 221-236.
- 84) 岩垣雄一: 海岸漂砂の調査について, 第6回海岸工学講演会講演集, 昭34.11, pp. 145-150.
- 85) 岩垣雄一: 海岸の防災研究における諸問題, 第8回海岸工学講演会講演集, 昭36.9, pp. 176-182.
- 86) 石原藤次郎: 海岸工学の現況, 第1回海岸工学研究発表会論文集, 昭29.11, pp. 1-7.