

2014 年度（第 50 回）水工学に関する夏期研修会講義集

水工学シリーズ 14-B-5

漂砂・海浜変形の調査と解析について

鳥取大学 教授

黒岩正光

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2014 年 8 月

漂砂・海浜変形の調査と解析について

Field Investigation and Analysis of Sediment Transport and Morphodynamics

黒 岩 正 光

Masamitsu KUROIWA

1. はじめに

我が国における海岸工学発祥の地は鳥取県であると言われている（石原ら，1975）．終戦後の食糧難から鳥取県沿岸にある豊富な水産資源が注目されていたが，多くの港湾は砂浜近くにあったため漂砂による航路埋没に悩まされていた．また，当時は海岸侵食，河口閉塞の問題も多くあり，このような問題を解決するために，鳥取県では，昭和22年に漂砂対策協議会，昭和24年に漂砂対策調査委員会を設置し，京都大学を中心として，海洋学，気象学，地質学，河海工学の研究者や技術者が，海岸侵食，航路埋没，河口閉塞などの漂砂・海浜変形問題に関する調査研究に着手した．これが我が国における海岸工学に関する調査研究のスタートであり，鳥取県が海岸工学発祥の地と言われている所以である．この委員会では，港湾埋没防止（泊漁港，網代港），河口閉塞防止（由良川），海岸侵食防止（皆生海岸），飛砂防止（網代港）等の4つの部会が設置された（図-1.1）．当時，深淺測量，底質調査，波浪観測，浮標追跡による流況調査などが実施され，同時に，模型実験，数理的な解析等も実施された．例えば，泊漁港では港内の静振観測，皆生海岸の侵食対策として防砂突堤に関する模型実験などが実施された．これら調査研究を経た後，皆生海岸では侵食対策として14基の突堤が設置された．詳細な調査研究の内容は，野田（2006）の「漂砂対策調査報告書」の復刻版に説明されている．石原ら（1975）によれば，昭和25年頃にも，新潟，富山各県において調査研究の成果が公表された．一方，米国において昭和26年第1回海岸工学会議が開催されている．その3年後の昭和29年11月に神戸市において海岸工学研究発表会が開催された．

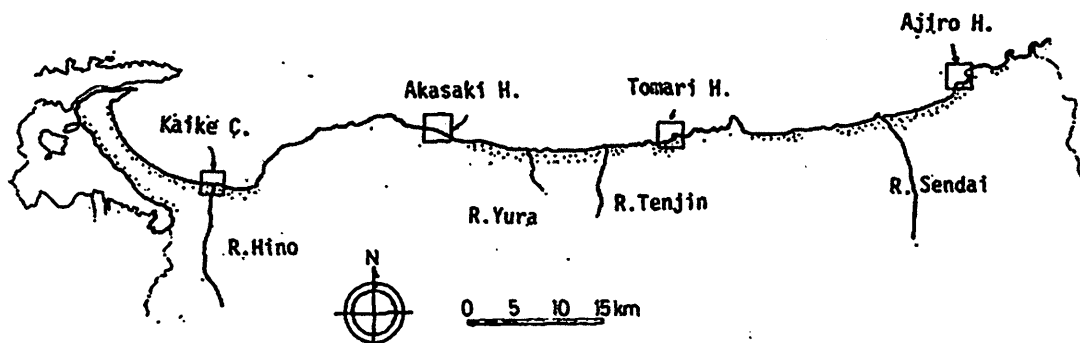


図-1.1 鳥取県海岸の概要（石原ら，1975）

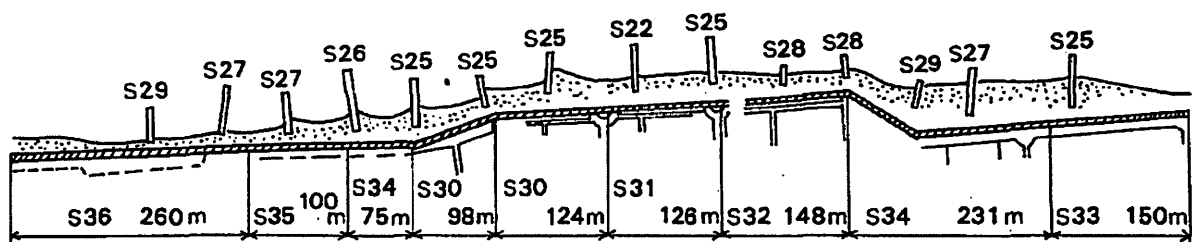


図-1.2 皆生海岸の構造物築造の経過（石原ら，1975）

漂砂・海浜変形問題は鳥取，新潟および富山から始まり，昭和30年～40年頃から全国的に海岸侵食が激化していったと言われている．このようなことから，漂砂・海浜変形のみならず漂砂の外力となる波，流れの基礎的研究も精力的に実施されてきた．

昭和53年～58年度の6年間にわたり実施された「海浜変形予測手法の開発に関する研究プロジェクト」の一環として，茨城県大洗海岸において波浪，流れ，漂砂，海浜変形などの総合現地観測が大々的に実施され，その成果が「海岸環境工学」（堀川，1985）にまとめられた．さらに，「漂砂環境の創造に向けて」（1994）では，漂砂の外力，漂砂機構，海浜変形モデルなどがまとめられ，2000年には土木学会より「海岸施設設計便覧」が出版され一連の漂砂・海浜過程の調査方法がまとめられている．これまでの水工学夏期研修会においては，「漂砂観測」（橋本，1977），「最近の現地観測とその成果について」（服部，1981），「深淺測量データを利用した海浜地形変化の解析法」（宇多，1984），「漂砂調査の実施例」（水野，1988）「海岸堆積物の分析に基づく流砂系における土砂動態実態の推定」（佐藤，2001），「広域土砂収支図作成の試み」（栗山，2001）「Xバンドレーダを用いた海浜地形の連続観測」（武若，2010）など，漂砂・海浜過程に関する調査，解析例などが紹介されている．しかしながら，沿岸域の開境界空間でなおかつ不規則性の強い相手（自然現象）は手強く，未だ海浜変形の数値モデルで的確に表わせない部分は多く，我々が目指す海浜変形予測はまだ確立されていないのが現状である．

著者はこれまで3次元の海浜変形数値モデルの開発研究を行ってきた．3次元モデルに含まれる各種係数を実験室規模での波，流れ，地形変化のデータから同定することは比較的容易であるが，それらの係数を用いて現地での海浜変形の予測は，スケール効果，境界条件や波浪条件の設定などの理由から定量的に的確に予測評価するのは難しい．とは言え，実務において3次元海浜変形予測モデルは使用されている．ただし，必ず，対象地域の現地データを用いて，再現計算により漂砂量係数の同定を行い，将来予測，対策案の検討などを行う．したがって，出来るだけ多くの現地データの収集が必要である．

本講義集では，海浜変形数値解析と関連づけて，これまでの漂砂・海浜変形調査研究を概括し，さらに最新の観測および測量技術を紹介し，最後に今後の課題について述べる．

2. 漂砂・海浜過程調査の概要

海岸の土砂移動形態は岸沖漂砂と沿岸漂砂に大別される．岸沖漂砂による地形変化は短期におこる現象で可逆的である．高波浪時には汀線が後退し，沖合に沿岸砂州が形成され，静穏時には砂州の消滅とともに，前浜にバームが形成される．構造物周辺の局所洗掘，河口閉塞，港湾内の堆砂などは，1時化から1シーズンで比較的短期に発生する場合があります．波による土砂の打ち込み，長周期波による浮遊砂輸送など，波運動そのものによる場合があります．一方，沿岸漂砂は，波向きによってその向きが変化するが，卓越する波向きに

対して正味の移動方向が決まり不可逆的な地形変化が発生する。長期的な海浜変形を把握し、広域の海岸保存を考えるためにはこの沿岸漂砂の取扱いが重要である。

このような岸沖と沿岸漂砂の取り扱いと、時間スケールおよび空間スケールに基づき、渡辺（1989）、清水（1996）は海浜変形数値モデルの分類を行っている。現地調査結果を用いて数値モデルを検証する場合、現地における調査において、対象とする領域の広さ、解明したい現象の時間スケールなどによって調査項目、調査手法を検討し、関連する資料を収集する必要がある。

一般的に、漂砂に関する調査項目は目的によって異なるが、例えば、水野（1988）によれば、①海岸踏査、②外力観測（波浪観測、流況観測、潮位観測、風観測）、③地形調査（深浅測量、汀線測量、地形調査、荒天時地形変化測量）、④底質調査（広域調査、構造物周辺調査）、⑤補砂調査、⑥トレーサ調査、⑦飛砂調査、⑧付帯調査（漂砂に関する既往資料整理の収集、河川の流出土砂量調査、工事記録）などが挙げられている。

海岸保全を考える上で漂砂・海浜過程に関する調査では、まず対象とする海岸が含まれる漂砂系の土砂の移動特性を把握し、土砂収支を明らかにすることが基本的な目標であるが、図-2.1 に示すように、漂砂・海浜変形に関する調査を整理してみると、①学術的、工学的観点から漂砂そのものの移動機構や漂砂量、海浜変形機構、高頻度な地形測量、波浪、流れの連続観測調査、②災害発生時の状況把握のための調査、資料収集、③その対策案を検討するため対象海岸の詳細な調査、さらに、④海岸保全対策、将来計画を立案するために行う資料収集（既往の深浅測量データ、航空写真、波浪、気象データ）と解析（対象とする流砂、漂砂系の海浜変形特性、土砂収支）に分類されるであろう。特に、中長期的な海岸保全を考えていくためには、

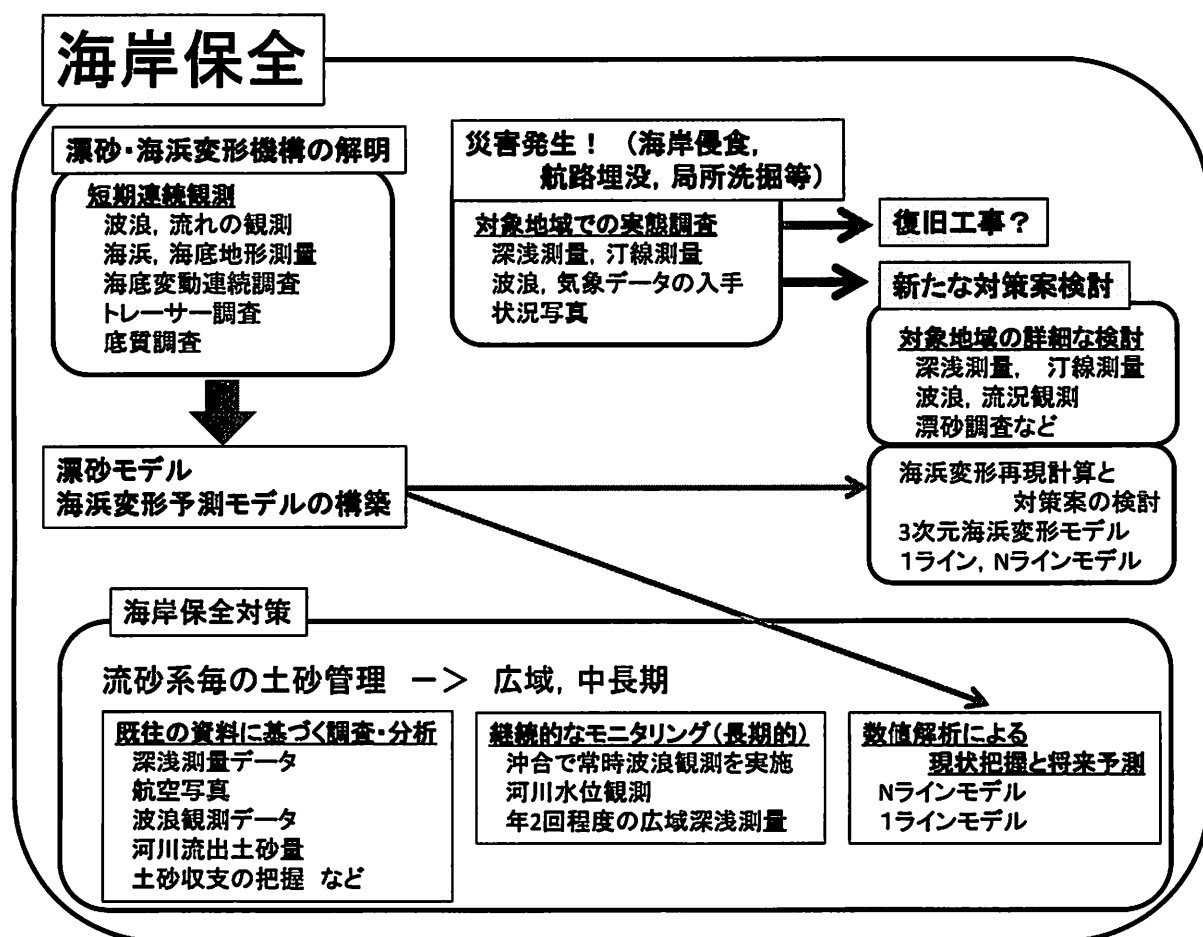


図-2.1 漂砂・海浜変形調査の概要

モニタリングとして広域深淺測量を年2回程度実施することが望ましい。また、それぞれ調査だけではなく、新たな海岸構造物を新設する、あるいは将来の海岸保全計画を立案する場合などのとき、3次元海浜変形モデルあるいは等深線（Nライン）変化モデルを用いた数値解析が必要不可欠である。

次章では、いくつかの現地調査とそれに関連する数値解析事例を示す。

3. 漂砂・海浜変形に関する調査事例

3.1 波と流れによる局所的砂面変動の調査

波と流れによる海底地形の変動特性などを把握する目的で、山下ら（1998）は、京都大学防災研究所大渦波浪観測所の漂砂・波浪観測栈橋（図-3.1）を用いて海浜流場と海底地形の変動の観測を行っている。現地観測は1997年12月26日から翌年3月9日まで実施され、海浜流場はADCPを用い、波浪は超音波波高計、海底変動は光学式砂面計を用いて観測している。図-3.2に示すADCPによる海浜流と砂面計による海底変動の観測結果によると、沖向きの強い流れ（沖向きを正とした流れ：RIP）が発生しているとき、海底面は低下（侵食）しているのが明らかである。ただし、一旦侵食された海底面が回復し上昇しているケースが9回観測され、いずれも20cm/s以上の沖向き流れが発生している（R：復元性侵食と呼ぶ）。観測期間中1ケースだけ観測された現象があり、大きく侵食されすぐには回復を見ない海底面の低下である（NR：弱可逆性侵食と呼ぶ）。このときは、連続的な沖向きの流れと東向きの沿岸流の発生がみられ、そのときのADCPから得られたエコー強度、また、図-3.1に示す栈橋沖側で測量された沿岸方向の水深分布と併せてみると、強い沖向き流れと連続的な沿岸流によって底質は巻き上げられ浮遊砂となって東方向へ運ばれていることが推察できる。

つぎに、漁港の航路埋没現象を把握する目的で実施された海浜流と海底地盤変動に関する観測事例

（黒岩ら、1990）を示す。図-3.3は鳥取県中部にある泊漁港で1986年12月17日から1987年2月28日まで光学式砂面計を用いて観測された海底地盤高の時間的変化を示したものである。航路部（No.1）および港口部（No.2）における観測結果であることから、両地点では、2~3ヶ月間において土砂の堆砂がおり、No.1では水深6m~4m程度まで海底地盤高が上昇して

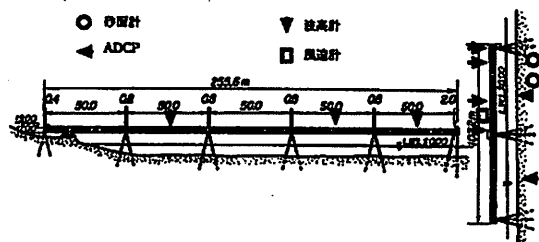


図-3.1 大渦波浪観測所（T型栈橋）

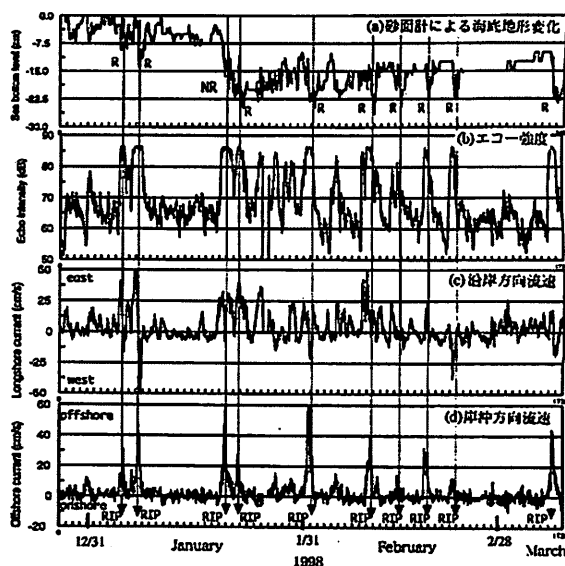


図-3.2 光学式砂面計およびADCPの観測結果（山下ら、1998）

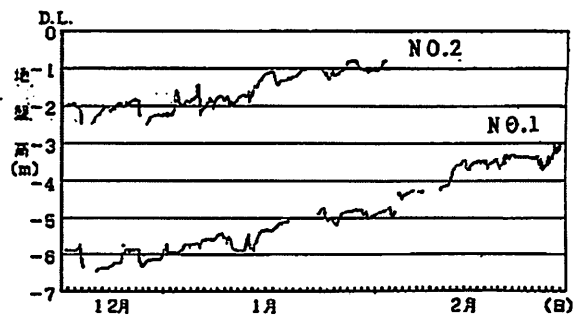


図-3.3 光学式砂面計から得られた海底地盤高の時間的変化（黒岩ら、1990）

いる。観測期間中増加傾向であるが、海底が急激に低下している現象が見られ、これは山下らが示した復元性侵食型とできるものではない。この短期的に発生する海底面の低下について、海浜流との関係を示した結果の一例を図-3.4 に示す。海浜流速は航路部において電磁流速計より得られた定常流成分である。海底面の低下（侵食）発生は、高波浪によって強い海浜流が発生するとともに、流向が急激に変化しているときであった。

以上のように、局所的ではあるが、定点観測において、連続的なデータは、波と流れによる地形変動機構を知るために有効な方法である。

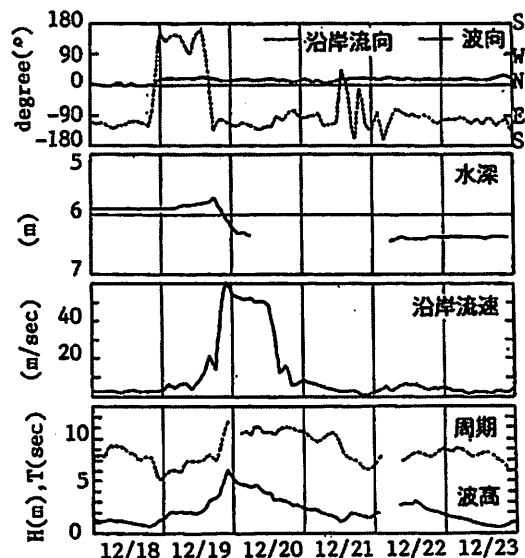


図-3.4 水深、沿岸流速、波高および周期の変動
(黒岩ら, 1990)

3.2 海岸堆積物調査による漂砂動態

漂砂・海浜変形に関する調査において底質調査は必要不可欠である。海浜砂礫の分布や粒度特性、ま

た重鉱物組成の分布を調べることによって漂砂源や沿岸漂砂の卓越方向を推定する場合がある。また、岸沖方向の縦断地形の特性も粒度の細粒分、粗粒分の割合によって関係づけることができる。一般に、漂砂の移動方向に沿って粒径が小さくなる傾向があることが知られているが、必ずしもそうでない場合があり(佐藤, 2001)、他の手法による分析が必要とされる。

最近では、蛍光 X 線分析 (X-ray Fluorescence Analysis : XRF) の手法が検討されはじめており、例えば、加藤ら (2012) は、太平洋に面した愛知県伊良湖岬から静岡県浜名湖口の今切口までの約 50km の範囲を対象として、採取した底質の XRF を行い、その化学元素含有量と浜幅の関係を調べている (図-3.5)。この図から、浜幅分布と XRF によって得られた 8 元素との分布を比較すると、元素含有率の沿岸方向の増減傾向と浜幅の増減傾向に対応しており、浜幅分布、堆積域と侵食域との関係がこの調査方法で概ね説明できることを示している。加藤ら (2013) は底質中の化学元素含有量による土砂移動追跡調査と着色砂を用いた調査と併用し、XRR を用いた土砂移動方向推定法の有用性を検討している。石井ら (2009) も湘南海岸と九十九里浜における土砂移動動態の推定に XRF を用いている。最近では、辻本ら (2013) によって、粒径の分散、歪度、円形度によって漂砂の卓越方向を推定する方法が検討されている。

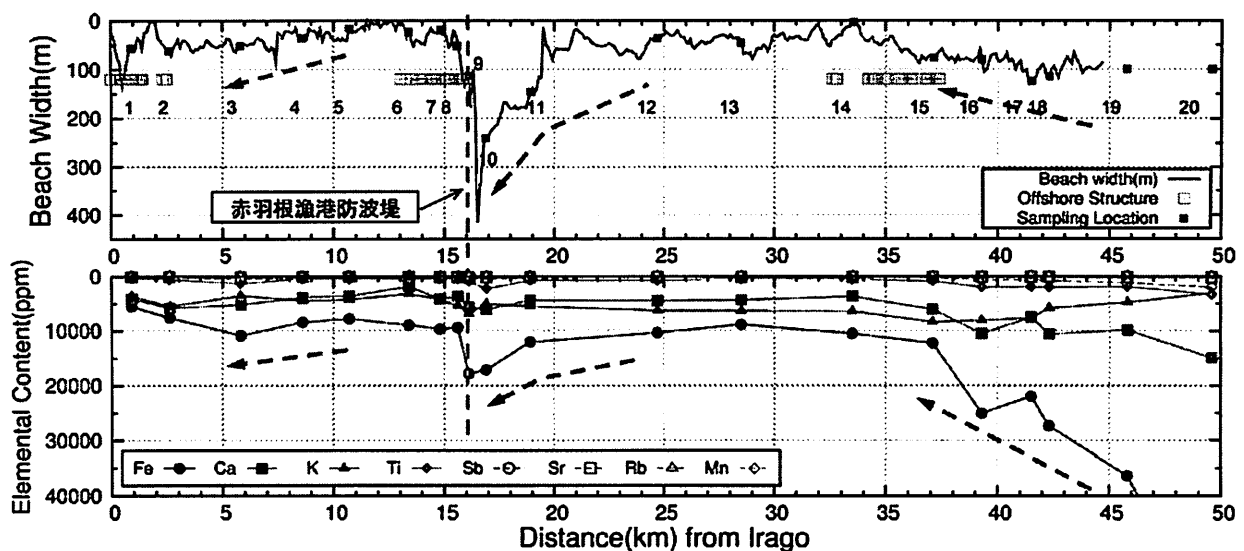


図-3.5 浜幅（上段）と化学元素含有量(下段)の沿岸方向変化（加藤ら，2012）

3.3 トレーサーを用いた漂砂調査

トレーサーによる漂砂調査は、従来、着色砂あるいはガラスビーズなど一定量海底に投入し、その移動状況を一定期間毎に底質を採取して調査する方法である。古くは、波や流れによる漂砂の移動経路、移動速度や移動層厚などを直接的に解明し、沿岸漂砂量、海浜変形予測のために必要な局所漂砂量などを評価する目的で実施されてきた。漂砂に関する基礎的知見を得るために、模型実験や現地調査が盛んに実施されていた1960年代～1980年代にかけて、国内外において精力的に蛍光砂を用いた調査研究が実施されていた。以下にいくつかの調査事例を示す。

例えば、Ingle (1966) は、 $3 \times 3 \text{ in}^2$ のサンプルカードにワセリンを塗り、棒にクリップでそのカードを取り付け海底面に押し当てて蛍光砂を採砂する方法を試みている。当時の蛍光砂調査法とそれに基づく解析結果を集大成している。その他、Kommar・Inman (1970) は沿岸漂砂量を算出し、Gaughan (1978) は混合深さ（底質はある程度の層をもって移動し、その層厚をいう）などを求めている。我が国では、橋本・宇多 (1975) は、碎波帯内において20kg、40kgずつ同時に13点、合計420kgの蛍光砂を投入し、30分後と1時間後に採取を行っている。サンプルは、250cc入りの瓶を用いて採砂し、蛍光砂の平面的な移動状況を調べている。また、直径30mの塩化ビニールパイプを2つに割って合わせたものを海底に埋め込み、深さ10cm程度のサンプルを採取する方法で、蛍光砂の深さ方向の移動状況を調べている。その結果から、砂の移動速度は流速が数10cm/secの場合には、数cm/secであると示すとともに、また、砂の混合深さは10cm程度であると報告している。また、構造物（例えば堤防など）の背後に堆砂する砂の量を1年毎に測量し、その漂砂量を蛍光砂の平均移動速度と沖浜から、岸までの平均距離で除して混合層厚をもとめている。その混合層厚は、底質の中央粒径が大きくなるにつれて増大することを示している。灘岡ら (1981) は、3色の蛍光砂をトレーサーとして用い、その投入点から半径が10m程度の領域における局所的な砂移動を観測している。彼らは、内径34mm、肉厚3mm、長さ130cmの亚克力パイプを砂中に20～30cm程度押し込む方法によって蛍光砂を15分毎に5時間後までサンプリングし、その結果から混合深さと、砂の移動速度を求め、これらを用いて沿岸漂砂量を算定している。またその混合層厚は、有義波高の8%前後の値をとり移動速度は平均流速の1～2%であったと報告している。野田ら (1986) は、Ingle が実施した表面採砂法を応用し、海底面の蛍光砂を紫外線ランプで照射し、写真撮影する方法を開発し（写真-3.1）、鳥取砂丘海岸およ

び鳥取港周辺で蛍光砂調査を実施している。鳥取港では3色の蛍光砂を各2ton投入し、投入後20日目と33日目観測を行っている。砂丘海岸では、2色で各1ton投入し、投入後1日、2日、9日目に観測を行っている。図-3.6は鳥取港での観測結果の一例で、写真撮影法による方法によっても採砂法と同様な結果が得られることが確認され、採砂法に比較して写真撮影法は、観測および後の蛍光砂のカウントが簡便でかつ時間と労力が削減できることを示している。野田ら(1986)、Kuroiwaら(1994)は蛍光砂の移動速度、拡散係数、蛍光砂が砂層へ潜り込む量などを定義し、平面2次元の移流拡散理論を示している。

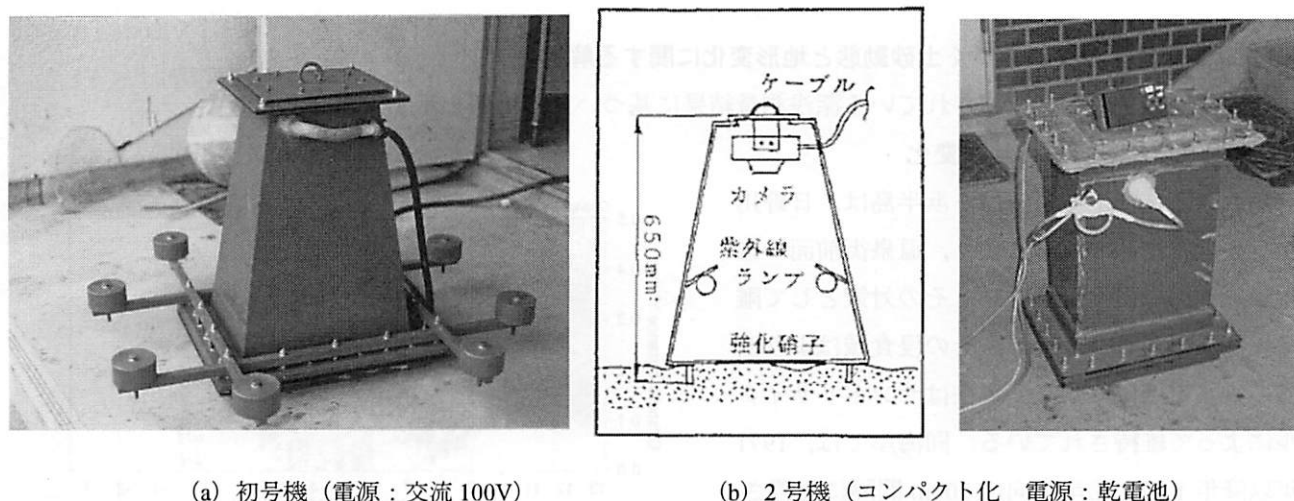


写真-3.1 蛍光砂写真撮影装置

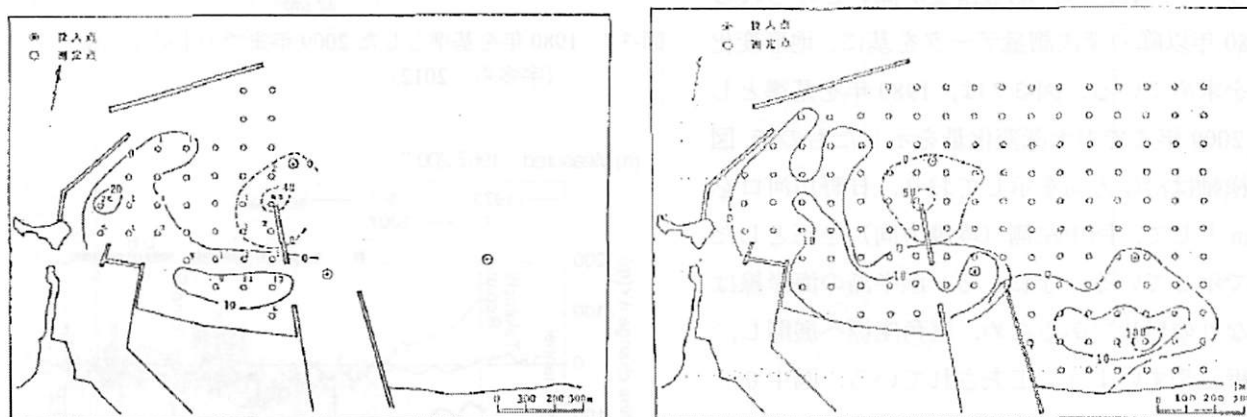


図-3.6 観測結果 (20日後、左図：写真撮影法、右図：マッキンタイヤ採泥器による採砂法)

近年、新たなトレーサー法も検討されている。田中ら(1997)は、広範囲で深海部までの土砂移動機構を把握するために新型トレーサーを開発している。魚類等の追跡に用いられている小型超音波発信器に硬化プラスチック樹脂で作成した人工砂礫に埋め込んだトレーサーで、その大きさは50mm, 100mm, 200mmの3種類である。このトレーサーを用いて富士海岸海底谷への土砂移動機構、急斜面上の砂礫の移動機構について検討された。このトレーサー追跡調査結果から、同海岸の水深16m付近の底質は台風時の高波浪時において海底谷から深海への急速に移動することが確認され、小型超音波発信器を内蔵したトレーサーは十分漂砂トレーサーとして機能することが確認されている。

蛍光砂や着色砂のようなトレーサーを用いた調査は、以前は、砂の移動速度や拡散係数、移動層厚など、漂砂機構を明確にする目的で実施されていたが、現在でも実務において対象とする海域での砂礫の卓越移動方向を知る手段として用いられている(例えば、上山ら, 2009, 杉山ら, 2009)。実際のところ、蛍光砂調査

は労力とコストが非常にかかり、後のサンプルの分析等にも労力がかかるが、斎藤ら（2010）は、着色砂分析システムを開発しており、サンプリングと並行して分析を行え、分析結果を次のサンプリング計画に生かせるとして、従来の手作業肉眼判定に代わる手法として期待されている。永井ら（2004）は、駿河湾に面した富士海岸において養浜材そのものをトレーサーとして、蛍光 X 線分析法を用いた移動追跡をおこなっている。予め現地元来の土砂と養浜材の元素を蛍光 X 線分析法によって特定しておき、養浜材投入後、採取したサンプルを分析し、養浜材の移動範囲を推定するもので、今後の養浜計画に資することが期待される。

3.3 深浅測量データに基づく土砂動態と地形変化に関する解析

ここでは、一般的に実施されている深浅測量結果に基づいた解析例を示す。

(1) 弓ヶ浜半島全域の地形変化

鳥取県西部に位置する弓ヶ浜半島は、日野川からの供給土砂の減少により、温泉街前面の皆生海岸の海岸侵食が始まり、その対策として離岸堤が設置された。近年、その侵食域はより西側の富益工区に移動し、現在はサンドリサイクルによって維持されている。同海岸では、1971 年以降年 1 回、沿岸方向に 200m 間隔に配置された測線にそった深浅測量が実施されている。宇多ら（2012）は、測量精度が高いとみられる 1980 年以降の深浅測量データを基に、地形変化量を求めている。図-3.7 は、1980 年を基準とした 2009 年までの水深変化量を示したもので、図の横軸は沿岸方向を示しており、日野川河口を 0km として、図中左側（境港方向）を正とした値で示している。なお、弓ヶ浜半島の海岸線は弓なりの形状であるため、直角座標へ展開し、解析しやすいように工夫されている。図中 0～3.5km を皆生工区、3.5km～約 6km を両三柳工区、そこから 9km 付近までの夜見・富益工区、それより西側を境港工区と呼んでいる。皆生工区では最初に侵食が始まったが、1971 年から 1982 年にかけて 12 基の離岸堤が施工され、安定したトンボロが形成され海岸工学の表紙にも紹介されるほどの成功例である。それ以降、侵食域は西側へ移り、両三柳工区には離岸堤、夜見・富益工区には防砂突堤などが施工され、現在は、8km 付近に設置された防砂突堤西側で侵食が顕在している。一方、境港工区側では常に堆積傾向にあり、1980 年から $1.9 \times 10^6 \text{ m}^3$ の土砂が堆積している。境港側で沿岸漂砂が阻止される条件

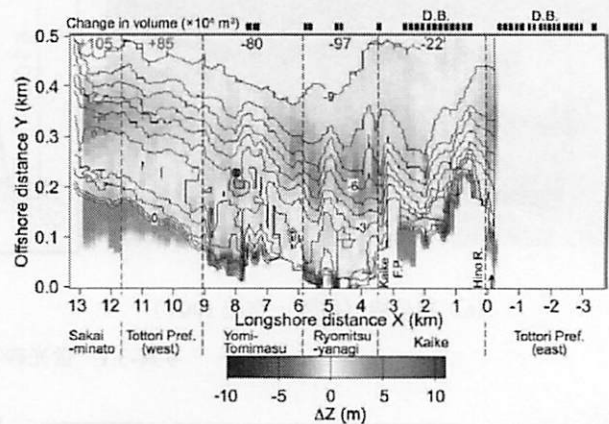


図-3.7 1980 年を基準とした 2009 年までの土砂変化量（宇多ら，2012）

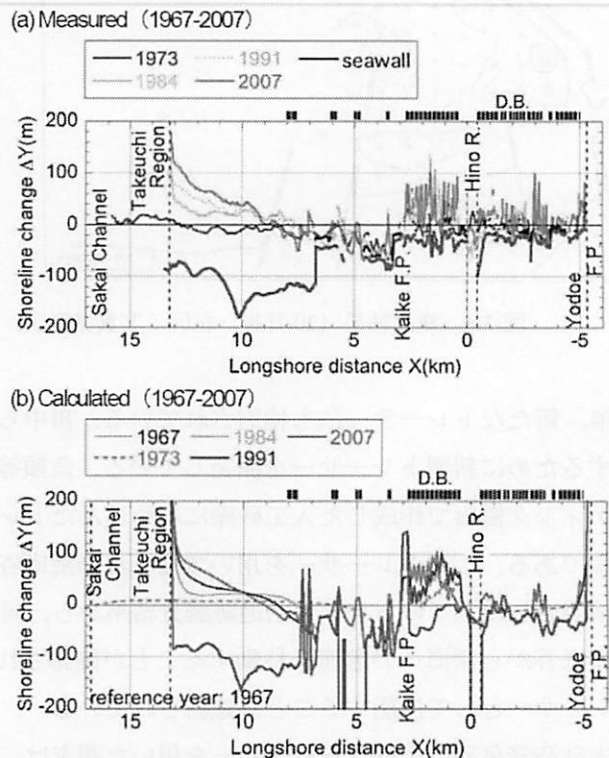


図-3.8 1967 年から 2007 年までの汀線変化の測量結果（上段）と計算結果（下段）（宇多ら，2012）

で考えると、夜見・富益工区を年間 $6.6 \times 10^4 \text{m}^3/\text{year}$ の土砂が通過していたと推定される。図をみると 9km を境に東側で侵食、西側で堆積という明らかに沿岸漂砂が西向きであることが容易に推定されるが、また、同時にこの区域では、沖合での侵食も進行していたことが推察できる。なお、富益工区と境港工区の間において、年間約 30000m^3 の程度の土砂のサンドリサイクルが実施され、土砂の循環を行っている。宇多ら (2012) は、さらに、粒度の変化を考慮した等深線変化モデル (BG モデル) を構築し、同海岸における長期的広域地形変化の再現計算を行い (図-3.8)、現況と同じ条件 (ケース 1)、サンドリサイクルが実施されない場合 (ケース 2)、日野川からの供給土砂が激減した場合 (ケース 3) の 50 年間の将来予測を行っている。ケース 1 では、再現計算結果と佐藤ら (2001) と同じ傾向を示し、ケース 2 では、サンドリサイクルを中止した場合、8km 付近の侵食はさらに進行し、一方、境港工区の顕著な等深線の前進が起こる。ケース 3 では、日野川河口から 2km の間で顕著な侵食が発生する。

以上、200m と比較的粗い測線間隔の測量結果であったが、広域で長期の漂砂・海浜過程を解明でき、数値解析によって、サンドリサイクルの効果、日野川河口からの土砂供給の重要度などが示された。将来の海岸保全を講じるためには、広域で長期間の測量データが非常に重要であることが、この研究からも示唆される。

(2) 鳥取海岸における地形変化

鳥取海岸は、鳥取県東部に位置し、千代川流砂系に属する海岸である。同海岸では、1970 年以降、千代川を中心に東西約 14km の範囲を 100m 間隔の測線に沿って年 2 回深浅測量が実施されている。千代川東側には鳥取砂丘があり、西側には白兔海岸がある。1976 年頃から千代川河口の付け替え工事が開始され、その後鳥取港の整備も開始された。宇多ら (1988) によれば、河口の付け替えと鳥取港の第一防波堤の建設により、鳥取港東側の水深 5m~10m の等深線の後退が見られるようになった (例えば、図-3.9)。また、図-3-10 に示すように、1974 年と 2003 年の航空写真から鳥取港東側の汀線を比較すると、鳥取砂丘前面の汀線は大きく後退している。沖

合の等深線の後退について宇多ら (1986) は、

鳥取海岸沖合には東向きの恒流が存在し、鳥取港東側では、沖防波堤による剥離によって西向きになり、それが、沖合の地形変化に影響を及ぼしていると報告されている。一方、汀線の後退については、鳥取港沖防波堤によって造られた波の遮蔽域の形成によるものと考えられている (安本ら, 2006a)。

このように、千代川河口と鳥取港の整備に伴って昭和 58 年以降、千代川河口域周辺の海浜および海底地形は大きく変化してきており、鳥取砂丘海岸の侵食が激化し、一方で、鳥取港と千代川河口付近に堆砂が発生している状況にある。こういった状況の下、鳥取県は土砂管理ガイドラインを策定し (安本ら, 2006b)、鳥取砂丘海岸において、鳥取港の浚渫土砂を鳥取砂丘前面の海域に投入するサンドリサイクルを開始した。

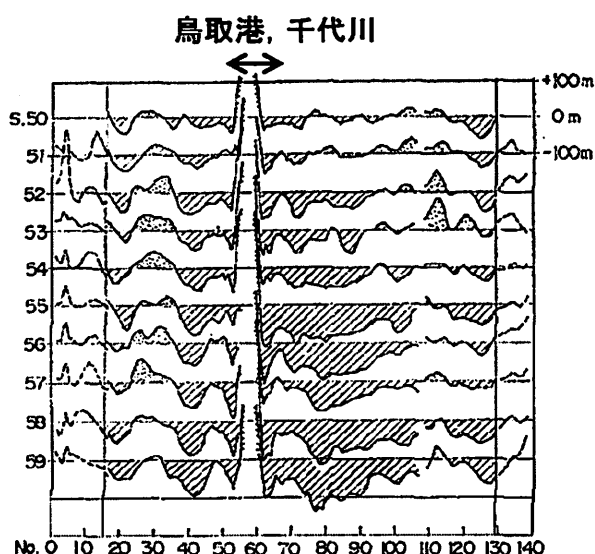


図-3.9 昭和 49 年を基準とした水深 7m の等深線変化量
(宇多ら, 1986)

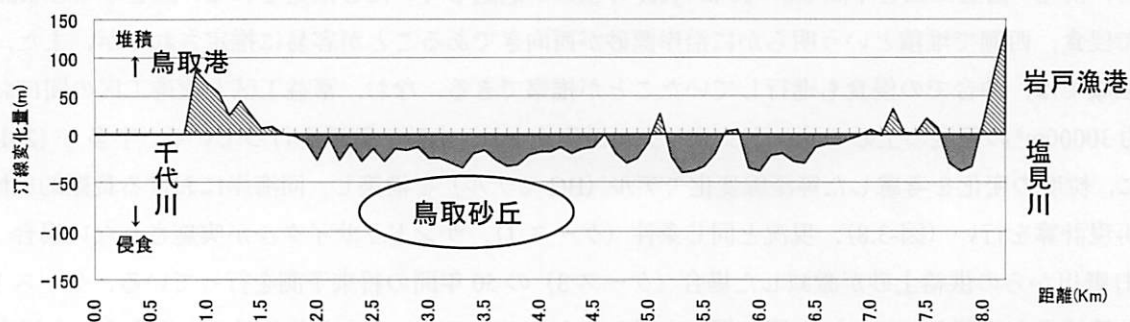


図-3.10 千代川右岸流砂系の訂線変化(1947～2003 年) (安本ら, 2006a)

(3) 千代川河口域の地形変化

千代川は鳥取県東部を流れる一級河川で、鳥取海岸の流砂系の源である。前述したように、鳥取港の第一防波堤の完成、港湾整備が完了の昭和 58 年以降、千代川河口域周辺の海浜および海底地形は大きく変化し、鳥取砂丘海岸の侵食が激化し、その対策として、鳥取県は、鳥取砂丘海岸の侵食防止の一対策として、港口部の浚渫土砂を鳥取砂丘前面に投入するサンドリサイクルを開始した。しかしながら千代川河口にも冬季風波浪による土砂の打ち込みによる堆砂が発生し、河口域の堆積土砂も有効に利用すべきと考えられる。適切なサンドリサイクルを行うためには、土砂移動特性、堆砂土砂量の把握が

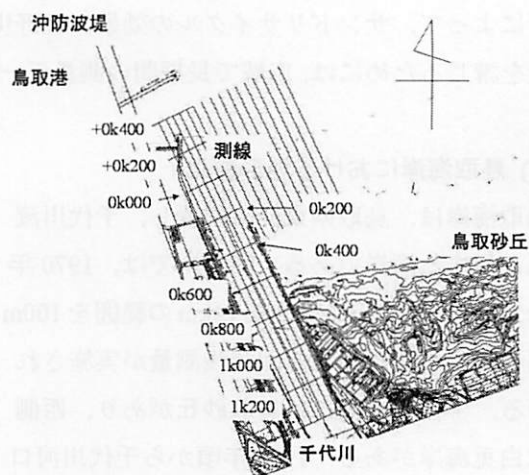


図-3.11 深浅測量測線

必要不可欠である。黒岩ら（2008）は、適切なサンドリサイクル手法確立の第一段階として、千代川河口付近の土砂動態を明らかにするために、独自で詳細な深浅測量を実施している。調査期間は 2004 年 9 月～2006 年 10 月で、深浅測量は表-3.1 に示すように 8 回実施した。測量は著者の研究室有する深浅測量システムを用いて実施した。なお、2004 年 9 月の調査は、天候急変のため、右岸側 2 測線のみ 0k80 から上流側 0k400 までの範囲である。波浪データについては、鳥取港沖 30m の水深で観測されているものを、河川流量は、河口から上流 5.1km 地点（行徳）において常時観測されているデータを用いた。

図-3.12 は台風通過後大きく河床が低下した 2004 年 10 月から 2006 年 8 月までの河口付近の測量結果を示したものである。図-3.13 は、8 回すべての深浅測量結果から地形変動が激しい箇所の縦断面図を示したものである。2004 年 9 月 28 日～10 月 16 日では、0k000～0k400 間において水深 1.5m 程度であったのが、9 月 29 日から 30 日かけて来襲した台風 21 号の影響で発生した出水によって、水深 4.5m 程度まで河床が大きく低下した。2004 年

表-3.1 深浅測量実施日と測量範囲

実施日		測量範囲	横断側線	縦断側線
2004 年	9 月 28 日	600m ×210m	16 測線	10 測線
	10 月 16 日			
2005 年	5 月 31 日	1800m ×630m	10 測線	10 測線
	8 月 4 日			
	10 月 27 日			
2006 年	6 月 16 日	1800m ×630m	10 測線	10 測線
	8 月 29 日			
	10 月 28 日			

10 月 16 日～2005 年 5 月 31 日までの台風通過後から翌年の 5 月の間には、0k400 付近まで砂州状の地形が見られ、土砂が堆積しているのがわかる。特に、右岸側に堆積しているようである。c) 2005 年 5 月 31 日～2005

年10月27日（雨期）：この間に、大きな出水はなかったため、河床が大きく低下することはなかったが、右岸側導流堤付近の浅瀬の範囲が広がっている。2005年10月27日～2006年6月16日では、0k000から0k400の範囲において、水深2m以下の浅瀬の範囲が拡大し、ミオ筋が左岸側から右岸側に変化している。2006年6月16日～2006年8月29日では、7月18日に梅雨前線が山陰地方から本州南部に停滞し活動が活発化したため、7月19日に日平均900m³/sを超える出水が発生し、河口の砂堆がフラッシュされた。それによって、導流堤外の等深線の前進が見られ、テラス状の地形が形成されているのがわかる。

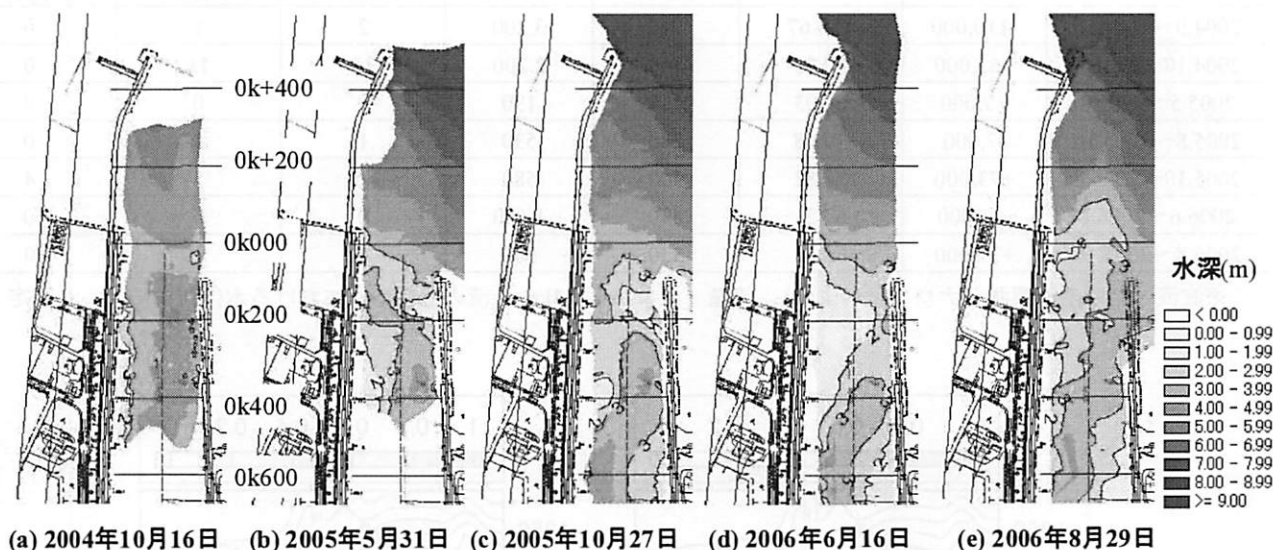


図-3.12 深浅測量結果(2004年9月～2006年6月)

つぎに、最も地形変化が激しい河口付近（0k000～0k400）における堆積あるいは侵食土砂量の算定を試みた結果を表-3.2に示す。2004年9月には天候の急変によって全域の測量が困難であったが、台風21号（2004年9月末）の通過によって河床が大きく低下し、土砂減少量は11万m³と推定された。2004年10月から翌年5月の冬季の間には約65,000m³と、2005年10月から翌年6月の冬季には約73,000m³の土砂が堆積している。冬季における日平均波高2m以上のものが、明らかに出水時より発生回数が多く、波浪が河口域における土砂堆砂に寄与していると考えられる。2006年6月から8月にかけて、梅雨前線の影響による出水によって河口部では約41,000m³の土砂が減少していることが確認された。2005年5月から8月の期間においては、静穏であったが、約9,000m³の堆積、また、2006年8月から10月までの期間において、日平均で2m～3m程度の波が4日、3m以上の波が1日程度来襲であったが、17,000m³の堆積量であった。宇多ら(1988)の深浅測量結果（図面）を用いて、0k000から0k400までの範囲において冬季（1985年11月から1986年3月まで）における土砂変化量を計算すると、約20,000m³であり、今回の調査結果より少ないが、冬季には数万のオーダーで土砂が堆積することがわかる。

さらに、黒岩ら（2008）は、3次元海浜変形モデルを用いて、波浪および流出条件と地形変動との関係を検討しており、その結果、出水後には河道内の土砂がフラッシュさ

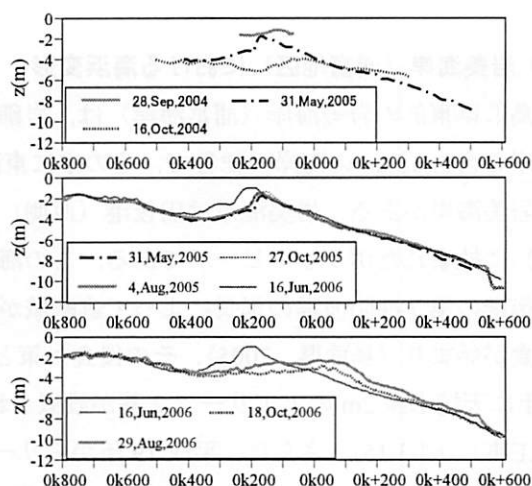


図-3.13 千代川河口における測量結果（縦断面図）

れ（図-3.14 左図），その土砂量は約 36,000m³であること，その後冬季波浪により，河口付近に堆砂している様子が再現されている（図 3-14 右図）．冬季波浪による堆砂量は約 80,000m³となり，やや過大評価した結果となっているが，冬季には波高 2～3m 以上の波により堆砂が発生することが数値計算からも確認できた．

表-3.2 河川流量・波浪と土砂変化量

期間	土砂変化量 (m ³)	日平均流量 (m ³ /s)	最大日平均流量 (m ³ /s)	ピーク流量 (m ³ /s)	日平均 2m～ 3m 来襲日数 (有義波高)	日平均 3m～ 4m 来襲日数 (有義波高)	日平均 4m 以 上来襲日数 (有義波高)
2004.9～2004.10	-110,000	188.67	940	3,200	2	1	0
2004.10～2005.5	+63,000	60.25	760	2,200	33	11	0
2005.5～2005.8	+9,000	29.93	160	190	0	0	0
2005.8～2005.10	-7,000	36.08	280	530	1	1	0
2005.10～2006.6	+73,000	77.82	300	580	45	5	4
2006.6～2006.8	-41,000	67.21	890	1,600	0	0	0
2006.8～2006.10	+17,000	62.15	330	600	4	1	0

※波浪：鳥取港沖観測（ナウファスより），流量：河口から 5.1km 上流の行徳地点における水位観測結果より算定

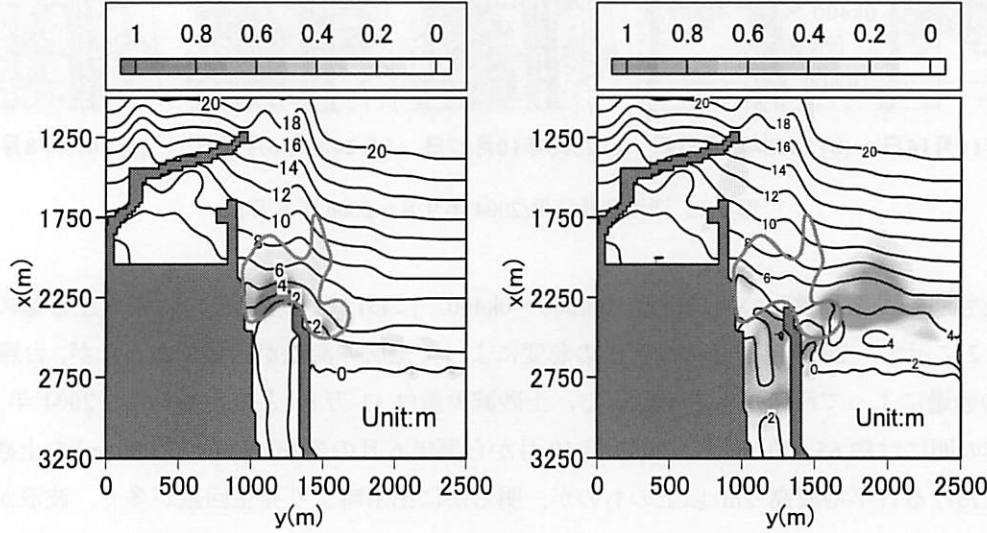


図-3.14 出水時および冬季波浪による計算結果（左図：出水時，右図：冬季波浪）

（4）岩美海岸（浦富地区）における海浜変形

鳥取県東部の岩美海岸（浦富海岸）は，岩礁帯と砂浜海岸を含む 15km の海岸の総称で，その中に東西約 2 km の岩美海岸がある．岩美海岸は田後港（西側）と岬（東側）に挟まれたポケットビーチである．この海岸では，田後港の第 7 沖防波堤の延長によって遮蔽域が形成され侵食が始まり（鳥取県，2005），その侵食対策として平成 7 年に天端水深 2m の人工リーフ 2 基が設置された（第一期工事）（図-3.15）．さらに，平成 19 年からリーフの沖側に天端幅を拡張し天端水深 0.5m とする第二期工事が始められた．しかしながら，近年，開口部周辺において非常に深い洗掘が発生し問題となっている．一方で，

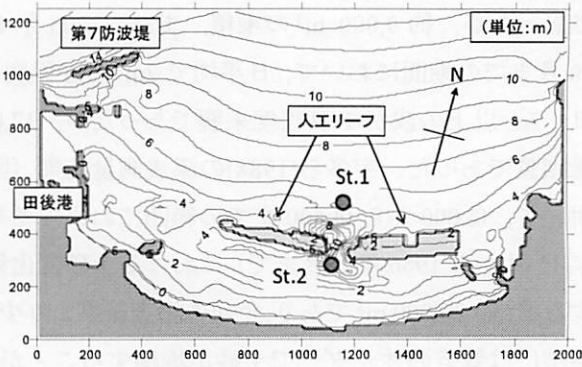


図-3.15 岩美海岸の概要と深浅図（2003 年）

毎年冬季波浪によって田後港向きの沿岸流によって港口部の堆砂が発生しており、毎年約2万～3万 m^3 の浚渫が実施されサンドリサイクルとして、リーフ開口部前面へ投入されている。同海岸では、平成16年度から年2回（秋季と春季）深浅測量が実施された。

図-3.16は平成19年9月（二期工事開始前）～平成23年9月までの第二期工事開始後の深浅測量結果の一部を図化したものである。図-3.17は開口部における断面地形を比較したものである。第二期工事開始直後、H19年9月からH20年3月にかけて、西側リーフ前面から開口部とその岸側にかけて洗掘が発生している。H20年以降、洗掘域はリーフ開口部岸側において東西方向に広がり、特に西側リーフ背後で顕著である。その後、平成23年9月まで、埋戻しは発生せず、侵食された状態が継続していることがわかる。前述したように、平成19年9月まで、海底地形は変動しているが顕著な洗掘は発生していない。平成19年9月以降に洗掘が始まり、平成21年3月にその最大洗掘深は約8mで、さらにH22年3月に洗掘は拡大し13m以上であることがわかる。以上のことから、リーフ天端の改良が始められた平成19年9月から翌年の3月までの間に、開口部前面が急激に洗掘され、さらに、開口部付近の嵩上げ工事が進行するにつれ平成23年9月までに、その洗掘はさらに深くなり10m以上になっている。同海岸では、この開口部の洗掘と田後港の堆砂の対策を同時に検討する必要がある、黒岩ら(2012)は、3次元海浜変形モデルを用いて、平成19年9月から約半年後の平成20年3月の海底地形変化の再現計算を行った。図-3.18は、天端改良（嵩上げ）無しと、有りの場合の地形変化と海浜流の計算結果より、開口部における岸沖方向の計算値を示したものである。この結果より、嵩上げ後、冲向き定常流速の値が大きくなるとともに、開口部の洗掘深さが増大することが明らかとなった。この3次元モデルと検証結果を参考に、洗掘防止工と田後港の堆砂対策工を数値実験的に検討している（黒岩ら、2013）。

さらに、平成22年12月14日～平成23年2月1日まで、人工リーフ開口部周辺2地点において波浪と海浜流の観測が行われた（安本ら、2014）。図-3.19(a)～(e)は平成23年度における観測結果で、有義波高、有義波周期、波向き、St.1およびSt.2における定常流速の北方成分と東方成分の時間的変化を示したものである。同図(d)および(e)の北方成分は、北向きを正としたもので表示している。図(d)および(e)より、高波浪時には北方成分の流速が大きくなること、すなわち、冲向きの流れが発生していることがわかる。

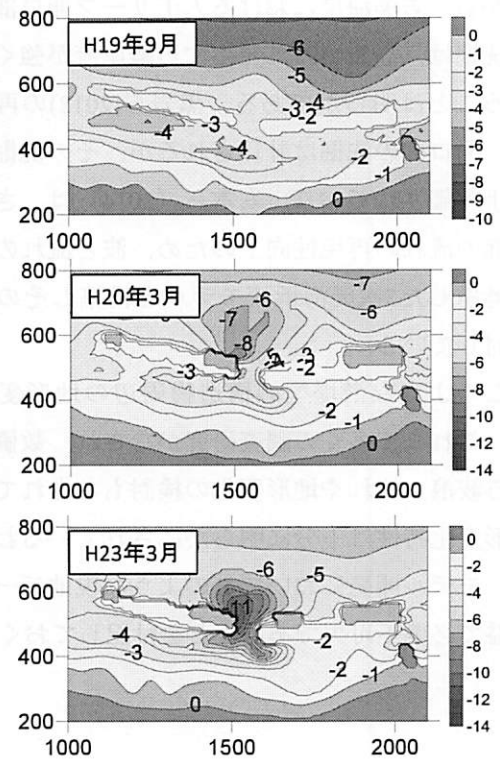


図-3.16 人工リーフ周辺の海底地形
(平成19年9月～23年3月)

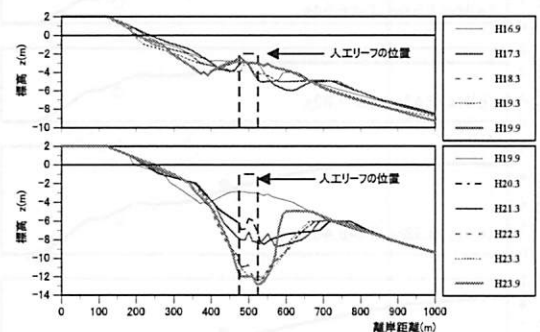


図-3.17 開口部における岸沖方向の
海底断面地形の比較

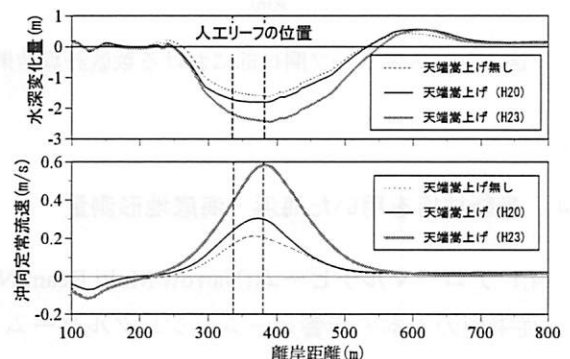


図-3.18 リーフ開口部における定常流速と断面地形
計算結果の比較

St.1 では、鳥取港での有義波高が2.5m以上、St.2では、1m以上のときに、冲向きの流れが発生していることがわかる。岩美海岸における人工リーフ開口部の局所的な洗掘は、高波浪時に発生する離岸流が強く影響していることは明らかである。黒岩ら(2012)の再現計算では、開口部の洗掘は計算されるが、その洗掘深は浅く過小評価されており、安本ら(2014)は、さらに、開口部の流れの再現性向上のため、波と流れの相互干渉を考慮した3次元海浜流モデルを構築しその適用性を検討している。

このような潜堤型の構造物周辺の地形変化は複雑で、これまで多くの調査研究がなされ、数値モデルによる波浪、流れや地形変化の検討もなされているが、地形変化特性は十分に明らかにされているわけではない。モデル開発においてこのような現地データは大変有益で必要不可欠であることを付記しておく。

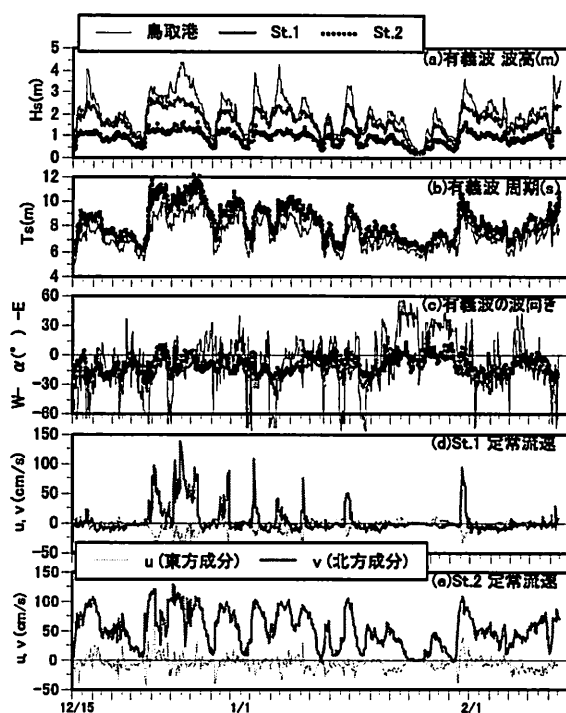


図-3.19 浦富海岸における現地観測結果

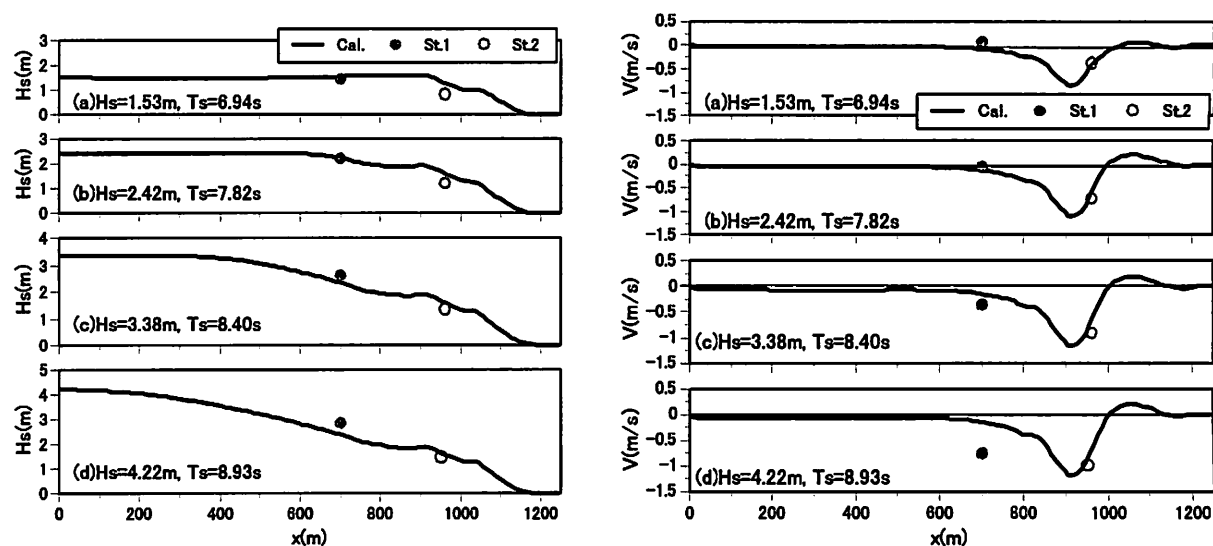


図-3.20 人工リーフ開口部における数値計算結果と観測値の比較（左図：有義波高分布，右図：底面定常流速）

4. 最新技術を用いた海浜・海底地形測量

4.1 ナローマルチビーム(Narrow Multi Beam:NMB)を用いた海底地形測量と解析

従来型の1本の音響ビーム（シングルビーム：SB）による深淺測量と比較し、海底地形を面的に捉えることができ、さらに、砂堆、岩礁帯、あるいは海底構造物状況を詳細に観測できるNMB測深方法が開発され、多くの深淺測量に使用され始めている（図4.1）。宇多ら（2008）は、水深6m付近沖合に投入された養浜砂の移動状況を把握するためNMB測量を実施した。土砂投入前、投入後4ヶ月間の内3回観測を実施、その結果、養浜土砂は沿岸方向に拡散しつつ岸向きに移動することが確認され、これまでのSB測量に比べNMB

測定の有用性が示された。青島ら（2009）は、1999 年～2008 年まで神奈川県湘南海岸で延長 5km の範囲を年 1 回合計 9 回実施された NMB 測量結果を用いて土砂量の長期的変化を調べている。NMB 測深器は、水深が浅くなるとビーム照射幅が狭くなるため、浅い領域では多くの測線を設定する必要があった。最近では、比較的浅い領域でも広範囲に測深できるものも開発され、東ら（2009）はマルチアングル広帯域測深サイドスキャンソナーを用いて高分解能な海底地形測量を行っている。従来のマルチビーム測深器と比較して、測深幅が大きく浅海域でも対応可能とされている。この他、機器自体も小型化され小型ボートでも艀装が簡単に出来るマルチビーム測深器などもあり、今後の高精度、高分解能の深浅測量結果が期待できる。

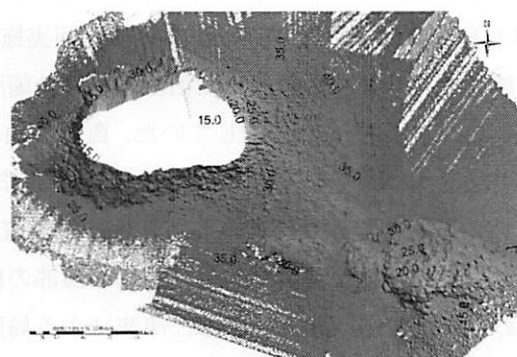


図-4.1 マルチビーム測量の例
（日本ミクニヤ株式会社提供）

4.2 魚群探知機を用いた海底地形測量

最近、比較的安価で、船体への艀装、操作、解析等が簡単な魚群探知機を用いた簡易海底地形測量手法が検討されている。著者の研究室では、サイド・ダウンスキャンソナー付魚群探知機を用いた調査を行っている（松原ら、2013）。このシステムは本体、魚探振動子、サイドスキャンソナーとストラクチャスキャンで構成され、12V バッテリー2 個で稼働する。水深 30m 以浅と限定されるが、小型のゴムボートでの測量も可能である。船位測定は、DGPS が本体に内蔵されており最小誤差 1.5m である。このシステムは、海底画像と測位データを共に本体のみで記録することができ、通常必要となるような記録用等に用いるパソコンは必要としない。データは本体に備えつけたメモリーカードに一定の間隔で取り込み、比較的簡単に海底地形図を作成することが可能である。その活用事例は、市村ら（2007）、水産工学研究所（2011）によって報告されている。図-4.2 はサイドスキャンソナーから得られた海底の様子である。岩礁と砂堆、防波堤マウンドのエクステンション被覆ブロックが明瞭に写しだされており、その精度の高さが伺える。

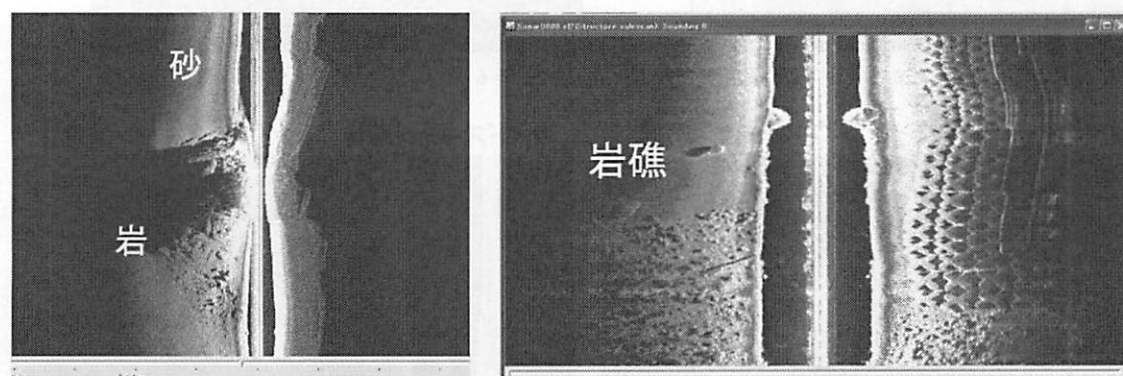


図-4.2 サイドスキャン画像（左図：鳥取市多稔ケ池、右図：鳥取市酒津漁港）

魚群探知機を用いた調査例として、東日本大震災後の宮城県名取市閑上漁港の海底調査結果を示す（松原ら、2013）。2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震は宮城と岩手両県を中心に甚大な被害を及ぼした。震災後しばらくは、港湾や漁港では津波による建物等の破損物などの廃棄物が堆積しており、港内利用に対して制限がある状態であった。また、津波による土砂移動もあったことから、航路維持のための深浅測量も必要であった。著者の研究室では、サイドスキャンソナー搭載の魚群探知機を用いて宮城県名取市

関上漁港内の深浅測量を行った。名取市関上地区は甚大な被害を受けた地域のひとつである。調査は、平成23年6月25日および翌年9月28日に2回実施した。図-4.3に震災発生後同年6月に実施した測深結果を示す。被災を受けた通水部と西側泊地の境目の箇所は、護岸の崩壊とともに、急激に深く、窪地のようになっており最大水深12mにも達していた。西側泊地は、3m程度の水深であった。港口や通水部などの狭窄部は、強い流れをうけ深くなったものと考えられる。また、港口部においても水深12m以上の深掘れが生じている。図-4.4は平成23年6月に実施したときの護岸被災部および港口部の洗掘された海底のサイドスキャン画像およびダウンスキャン画像である。護岸崩壊部の様子、洗掘の様子が確認される。また、港口部においても落下物の存在が詳細に確認できる。津波による局所的洗掘の要因を検討するために、浅水方程式を用いて数値計算を試みた結果を図-4.5に示す。なお、計算は、津波波形として孤立波を与え、簡単のため遡上は考慮せずに行った。図-4.5より、押し波時には、孤立波が新港口部に侵入するとき時計回りの大きな循環流が発生し、その後旧港奥に流れが到達している様子がわかる。引き波時には、護岸崩壊部に突っ込むような速い流れが発生し、旧港から新港への流れは滞筋を通り、新港内で2つの循環流となっていることがわかる。今回地形変化の計算は行っていないが、引き波時に海底が洗掘を受け護岸が崩壊したものと考えられる。

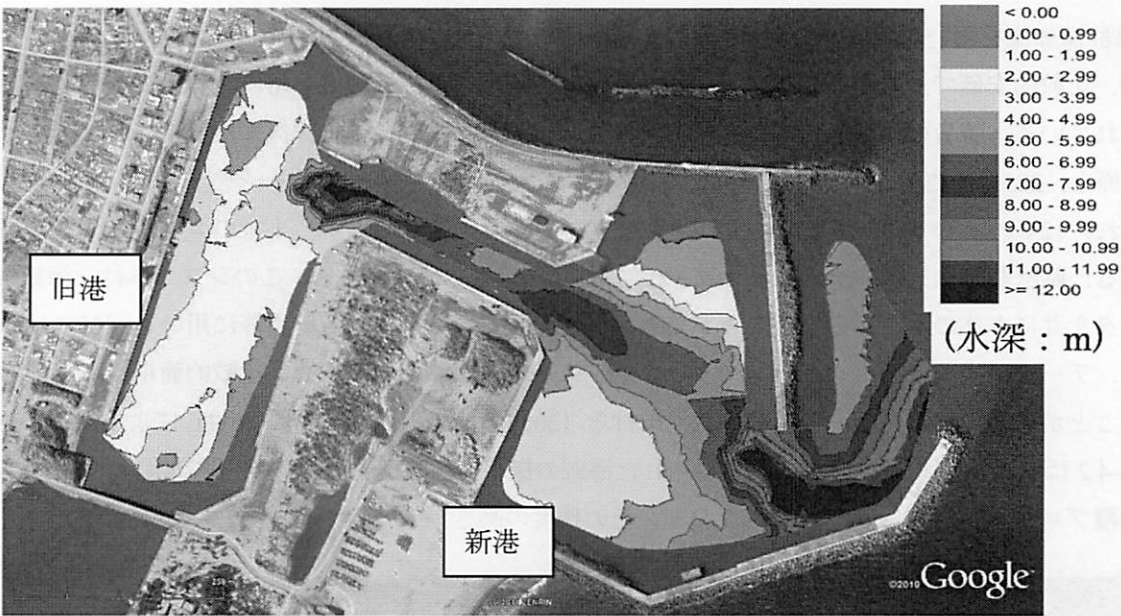


図-4.3 魚群探知機を用いた深浅測量結果（平成23年6月25日 宮城県名取市関上漁港）

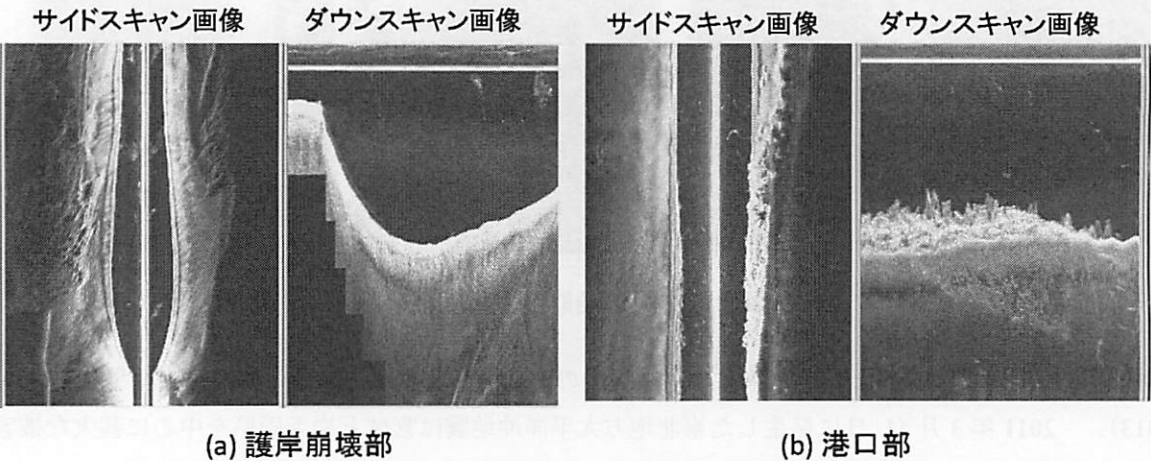


図-4.4 洗掘域のサイドスキャン画像とダウンスキャン画像

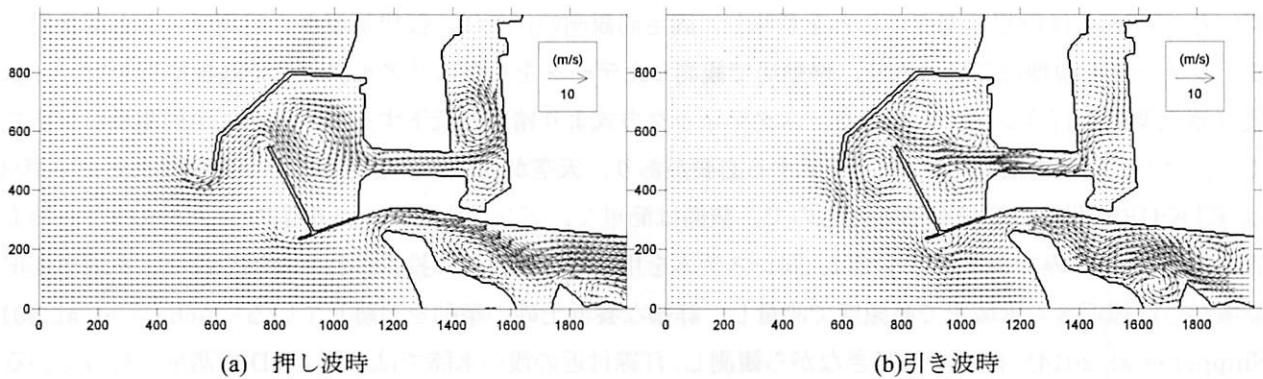


図-4.5 浅水方程式を用いた孤立波による流動計算結果

以上の調査の他、岡辺ら（2010）は遠州灘を操業するシラス漁船に登載された魚群探知機に着目し、操業時に得られる測深情報から広範囲の海底地形データを収集解析している。シラス漁は冬期3か月程度の休漁期や高波浪時などを除きほぼ毎日出漁する。また操業範囲は遠州灘沿岸を50kmであり、広範囲で高頻度の測量データを取得可能である。岡辺ら（2010）は2007年4月～2009年12月までのデータを用いた。解析結果から、数か月から年間隔で実施される深浅測量結果では得られない、広範囲で短期的な海底地形変動を把握すること、また、移動限界水深と言われている水深11m付近でも明確な海底地形変動が発生していることなどを確認している。ただし、水深4m～5m以浅でのデータ取得は難しいこと、データの精度チェックなどのことから、他の計測手法との組み合わせが不可欠であることを示している。さらに、岡辺ら（2013）は、同じくシラス漁船のデータを用いて、浜名湖今切口に形成されている退潮流によって形成されたデルタ地形の台風で発生する短期的な地形変化、デルタの侵食とその回復過程などを追跡し、沿岸漂砂量を推定している。

4.3 汀線を含む陸域地形測量

シングルビーム、マルチビームあるいは魚群探知機を用いた深浅測量は、荒天時の実施や、汀線際の極めて浅い水域の測量は困難であるが、広領域における土砂移動方向とその領域における長期にわたる海浜変形過程を把握する上では、汀線の変化を解析する方法で対応できる場合がある。その伝統的な方法として、航空写真上の汀線の位置を読み取り、撮影時の潮位と海浜勾配から訂潮位補正を行って汀線の変動を解析する方法がある。

近年では、航空レーザー計測（森田ら、2004）や、Xバンドレーダ、ARGUS画像を用いた地形測量技術（鈴木ら、2002、木村ら、2007）などいくつか紹介されている。Xバンドレーダについては武若（2010）に詳しく、地形測量だけでなく、遡上波の観測、離岸流の発生などを捉えることに成功しており、連続的に現象の時間的変化を捉えることができる。航空レーザーについては、高精度で地形測量が可能であるが、荒天時の実施が難しい。XバンドレーダやARGUS法などについては、データ取得後画像処理が必要とされる。

陸域の直接的な測量として、固定局を設けないVRS(Virtual Reference Station)方式によるネットワーク型RTK-GPS(Real Time Kinematic-Global Positioning System)あるいはRTK-GLONAS(Global Navigation Satellite System)を用いた地形測量も導入され

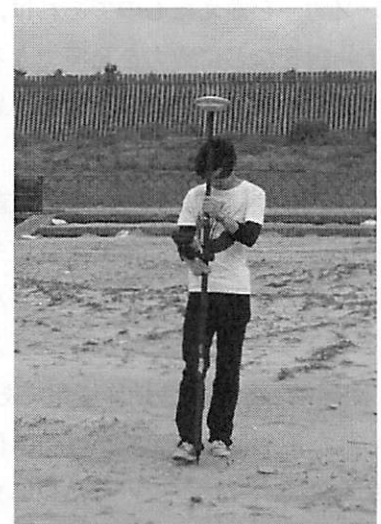


写真-4.1 RTK-GPS 測量の様子
(鳥取市賀露海岸にて)

ている。VRSとは仮想基準点のことを意味し、固定局観測の代りに、仮想基準点の観測データと基準局の補正パラメータを現地にて受け取り、移動局で観測したデータをもとにリアルタイムで基線解析を行い、高精度3次元測位を行うシステムである。スタティック方式より精度は低下するが、迅速に地形測量が可能である。ただし、衛星を最低5つキャッチする必要があるが、天空がオープンであることが必要である。写真-4.1はRTK-GPS測量の様子を示したもので、装備は簡単で、アンテナポール、小型のコントローラーおよびWiFiルーターのみである。海外では、同システムを用いて汀線付近に投入された養浜土砂による地形変化を陸域から汀線近傍の水域まで高頻度で測量し、詳細な養浜土砂の挙動を追跡している(Achete et al., 2012, Shipper et al, 2014)。陸域では歩きながら観測し、汀線付近の浅い水陸では小型4WDで測量を行っている。この方法は潮位補正を不要とし直接的に標高を求めることが可能であるため汀線位置と養浜土砂の地形を迅速に把握することが可能である。現在、実施されている養浜事業において、土砂養浜後の断面地形、その後の前浜の変化、浜崖の形成、土砂変化量などを、迅速かつ高頻度で観測が可能であり、今後の養浜計画などに資することが可能であると考えられる。

以上、NMB測量やRTK-GPS測量は、初期投資にコストがかかるが、高精度であり陸域から海域まで含めた詳細な測量とより正確な土砂収支が見積れるようになると考えられ、海岸保全対策や計画を立案するための測量機器として今後非常に期待される。

5. まとめ

本報では、これまでの漂砂・海浜変形に関する調査研究の事例と最新技術を用いた調査方法を紹介した。紙面の都合上すべて網羅できたわけではないが、現地調査の目的に対応した調査項目について、主観的ではあるが整理を試みた(図-2.1)。基本的には、以前から調査する目的と項目に大きな違いはないが、数値解析モデルとも関連づけて整理した。

観測技術については、科学技術の発展にともない、広域、高頻度、高精度の観測が可能となり、特に、Xバンドレーダー、AUGUS法などの画像データを用いた新たな観測方法、また、海底を面的に捉えることのできるNMB測量は、今後の海岸保全を考えるうえで重要度の高いでないもので測量技術であろうと考えられる。これらをうまく使い分けあるいは統合して利用できるようにすればより有益なデータとなり得るであろう。一方、安価な魚群探知機は、通常の超音波SB測量やNMB測量に比較して精度は劣るが取扱いが簡単で、イベント発生後に迅速に状況把握が可能である。また、著者の研究室で保有しているようなサイドスキャンソナーを備えたものであれば、東日本大震災後のような震災後にいち早く港湾復旧のための海底測量と落下物調査などに威力を発揮できるものと考えられる。また、ゴムボートのような小型ボートでの測量も可能であり、浅海域の藻場、砂帯、岩礁帯の区別が容易で、沿岸域の管理にも威力を発揮するであると考えられる。

図-2.1に示したように、海岸調査の前提には、海岸侵食対策や航路埋没対策、将来の海岸保全計画を立案することが目的としてあり、数値モデルによる環境影響評価や将来予測が必要であると考えられる。そのためにはモデル構築が必要で、モデル構築のための現地データが必要不可欠である。計算の入力条件となる波浪についてはナウファスのデータとエネルギー平衡方程式などの波浪モデルを用いて容易に設定可能であるが、問題は対象地域の地形情報でありすべての地域で詳細な地形測量が実施されているわけではなく、また、得られた地形情報がデータベース化されていないので利用し易い状況ではないのが現状である。今後の海岸保全を効率よく行っていくためにも、地形情報のデータベース化を踏まえた統一的なデータ取得方法と整理の仕方など、統一的なデータベースの構築を今後望むものである。

謝辞：本研修会において講師の機会を与えていただいた土木学会海岸工学委員会に感謝致します。また、鳥取大学名誉教授野田英明先生には貴重な資料をご提供いただきここに感謝の意を表します。現地調査に際し、深淺測量から解析までご指導をしていただいた日本ミクニヤ株式会社の諸氏に深謝の意を表します。最後に、本報で紹介した千代川河口および浦富海岸のデータ解析は、国土交通省中国地方整備局鳥取河川国道事務所、鳥取県土整備部との共同研究による成果の一部であることを付記しておく。

参 考 文 献

- 青島元次・鮫島 強・吉岡 敦・宇多高明・三波俊郎・石川仁憲 (2009)：Narrow multi beam 測量データを用いた湘南海岸の土砂量の長期的変化，土木学会論文集 B2, Vol.B2-65, No.1, pp.656～660.
- 東 良慶・関口秀雄・蔡 曙伍・渡邊康司 (2009)：漂砂系土砂収支把握のに向けた浅海域高解像度海底地形計測の試み，土木学会論文集 B2, Vol.B2-65, No.1, pp.1431～1435.
- 石井敦子・萩谷 宏・渡辺国広 (2009)：海岸砂の鉱物組成および全岩組成に基づく土砂移動動態の推定—湘南海岸・九十九里浜を例として，海洋開発論文集，第 25 巻，pp.1107～1111.
- 石原藤次郎・岩垣雄一・野田英明 (1975)：海岸工学の発展と鳥取県，第 22 回 海岸工学講演会論文集，pp.1～7.
- 市村康・波崎良平・吉津憲・山本克則 (2007)：サイドイメージング魚探による海草の分布調査，平成19年度日本水産工学会学術講演論文集，pp.103～104.
- 上山 聡・牛 小静・和田麻美・劉 海江・高川智博・田島芳満・佐藤慎司 (2009)：波浪の侵入が卓越する河口エスチャリーにおける波・流れ場と土砂移動，土木学会論文集 B2, Vol.B2-65, No.1, pp.456～460.
- 宇多高明 (1984)：深淺測量データを利用した海浜地形変化の解析法，水工学に関する夏期研修会講義集 B コース，pp.B-8-1～B-8-17.
- 宇多高明・岡村 真・西村洋人 (1986)：鳥取海岸の沖合部における地形変化，第 33 回 海岸工学講演会論文集，pp.282～286.
- 宇多高明・福井次郎・笠原章之 (1988)：千代川河口における波と流れによるダイナミックな地形変化の観測，第 35 回 海岸工学講演会論文集，pp.452～456.
- 宇多高明・田代洋一・長山英樹 (2008)：ナローマルチビーム測量による沖合養浜時の土砂移動観測，海岸工学論文集，第 55 巻，pp.776～780.
- 宇多高明・藤原博昭・宮原志帆・三波俊郎・芹沢真澄 (2012)：日野川河口デルタを含む弓ヶ浜半島全域の海浜地形変化の再現と予測，土木学会論文集 B2, Vol.68, No.1, pp.35～53.
- 岡辺拓巳・青木伸一・宇多高明・芹沢真澄・加藤 茂 (2010)：漁船の操業データを用いた沖合海底地形の変動解析について，土木学会論文集 B2, Vol.66, No.1, pp.696～700.
- 岡辺拓巳・加藤 茂 (2013)：高頻度海底地形モニタリングによる ebb-tidal delta での沿岸漂砂量の推定，土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, pp.I_651～I_655.
- 加藤 茂・光山英典・岡辺拓巳・青木伸一 (2012)：沿岸域での土砂堆積・侵食域調査における蛍光 X 線分析の適用に関する検討，土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, pp.I_651～I_655.
- 加藤 茂・岡辺拓巳・光山英典・中垣 聡 (2013)：着色砂調査と蛍光 X 線分析を併用した河口干潟での土砂移動調査，土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, pp.I_576～I_580.
- 木村 晃・大野賢一 (2007)：鳥取海岸における沿岸砂州の短期変化について，海岸工学論文集，第 54 巻，pp.666～670.
- 栗山善昭 (2001)：広域土砂収支図作成の試み，水工学に関する夏期研修会講義集，B-5-1～B-5-12.
- 黒岩正光・林 浩志・野田英明 (1990)：中小漁港の埋没調査，海岸工学論文集，第 37 巻，pp.419～423.
- 黒岩正光・松原雄平・市村 康・丸毛裕治・中野伸太郎・津留秀臣 (2012)：人工リーフ開口部における地形変化に関する研究，土木学会論文集 B2, Vol.68, No.2, pp.I_566～I_570.
- 黒岩正光・松原雄平・丸毛裕治・中野伸太郎・市村康・間瀬肇 (2013)：鳥取県浦富海岸における人工リーフ改変による開口部の洗掘と港口部堆砂の対策について，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.69, No.2, pp.I_850～I_855.
- 齋藤晴久・坂本 繁・鈴木 誠・尼崎貴大・加藤 茂・青木伸一・上山 聡・佐藤慎司 (2010)：土砂動態の高頻度モニタリングのための着色砂分析システムの開発，土木学会論文集 B2, Vol.66, No.1, pp.1391～1395.
- 佐藤慎司 (2001)：海岸堆積物の分析に基づく流砂系における土砂移動実態の推定，水工学に関する夏期研修会講義集 B コース，B-3-1～B-3-22.
- 水産工学研究所 (2011)：簡単に行える音響測器を用いた漁場調査に関する手引き，
http://nrife.fra.affrc.go.jp/topics/onkkyoukiki_tebiki/onkkyou_tebiki.pdf.
- 杉山光徳・門田 仁・堀口敬洋・八木裕子・永田千広・高木利光 (2009)：宮崎海岸の土砂移動の実態，土木学会論文集

B2, Vol.B2-65, No.1, pp.676~680.

- 鈴木高二朗・高橋重雄・山縣延文・堀田 治・栗山善昭・S.Aarninkhof・G.Ruessink・I. Elshoff (2002) : ARGUS ビデオによる宮崎住吉海岸の長期地形観測, 海岸工学論文集, 第 49 巻, pp.571~575.
- 清水琢三 (1996) : 海浜変形シミュレーション, 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, B-5-1~B-5-26.
- 武若 聡 (2010) : X バンドレーダによる海岸地形の連続観測, 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, B-6-1~B-6-20.
- 田中茂信・小荒井衛・深沢 満 (1993) : 地形図の比較による全国の海岸線変化, 海岸工学論文集, 第 40 巻, pp.416~420.
- 田中茂信・山本幸次・伊藤仁志・有澤俊治・高木利光 (1997) : 新型トレーサーを用いた富士海岸海底谷への土砂移動機構調査, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp.611~615.
- 辻本剛三・玉井昌宏・中條壮太 (2013) : 画像より得た砂浜底質の特性値による漂砂の移動方向に関する研究, 土木学会論文集 B2, Vol.69, No.2, pp.I_696~I_700.
- 土木学会・海岸工学委員会・研究現況レビュー委員会 (1998) : 漂砂環境の創造に向けて, 土木学会, 359p.
- 土木学会・海岸工学委員会 (2000) : 海岸施設設計便覧, 土木学会.
- 土木学会・海岸工学委員会・数値波動水槽小委員会 (2013) : 数値波動水槽一砕波波浪計算の深化と耐波設計の革新を目指して一, 土木学会.
- 永井健二・星 典行・浅野 剛・高木利光 (2004) : 蛍光 X 線分析法を用いた養浜材の移動追跡, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.506~510.
- 灘岡和夫・田中則男・加藤一正 (1981) : 蛍光砂を用いた局所的砂移動と移動量の観測, 第 28 回 海岸工学講演会論文集, pp.178~182.
- 野田英明・的場善博・小林幹和 (1986) : 写真撮影方式による蛍光砂調査法の研究, 第 33 回海岸工学講演会論文集, pp.248~251.
- 野田英明 (2006) : 昭和 25 年 鳥取県漂砂対策調査委員会 「漂砂対策調査報告書」復刻版, 142p.
- 橋本 宏・宇多高明 (1975) : 蛍光砂を用いた漂砂の現地観測, 第 22 回 海岸工学講演会論文集, pp.335~338.
- 橋本 宏 (1977) : 漂砂観測, 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, pp.B-6-1~B-6-13.
- 服部昌太郎 (1981) : 最近の現地観測とその成果について, 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, pp.B-6-1~B-6-17.
- 堀川清司 (1985) : 海岸環境工学, 東京大学出版会, 582p.
- 松原雄平・黒岩正光・澁谷容子・市村 康・米花正三 (2013) : 小型サイドスキャンソナーを用いた宮城県名取市閑上漁港の東方地方太平洋沖地震による津波被害調査, 土木学会第 68 回年次学術講演会, II-185~II-186.
- 水野雄三 (1988) : 漂砂調査の実施例, 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, pp.B-3-1~B-3-16.
- 森田真一・野田敦夫・川村啓一・田中茂信・田中浩充・福濱方哉・山本幸次 (2004) : 航空機搭載型レーザ計測の海浜地形測定への適用性, 海岸工学論文集, 第 51 巻, pp.1405~1409.
- 安本善征・宇多高明・松原雄平 (2006a) : 鳥取沿岸の侵食実態と総合的な土砂管理の検討—千代川右岸流砂系の例—, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.641~645.
- 安本善征・宇多高明・松原雄平・佐藤慎司 (2006b) : 鳥取沿岸の総合的な土砂管理ガイドラインの策定と実施, 海洋開発論文集, 第 22 巻, pp.415~420.
- 安本善征・黒岩正光・松原雄平・津留秀臣・間瀬 肇・市村 康 (2014) : 人工リーフ開口部における流況に関する実験と準 3 次元海浜流モデル適用性の検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 第 70 巻, 印刷中.
- 山下隆男・黒岩正光・野田英明 (1998) : 現地観測データからみた海浜流場と海底地形の変動特性との関係, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp.576~580.
- 渡辺 晃 (1989) : 沿岸過程の数値モデルの将来, 水工学に関する夏期研修会講義集 B コース, B-5-1~B-5-10.
- Achete, F. and A. Luijendijk (2012) : Applying an analogue for a conceptual model for the development of a mega nourishment, Proceeding of the International Conference on Coastal Engineering.
- Ingle, J.C. (1966) : The movement of beach sand, Elsevier Publishing Co., 222p.
- Kuroiwa, M. and H. Noda (1994) : Field investigation of sand drift using fluorescent tracer, International Symposium: Wave Physical and Numerical Modelling, pp.1483-1492.
- De Schipper, M. A., S. de Vries, R.C. de Zeeuw, J. Rutten, S. Aarninkhof and C. van Gelder-Mass (2014) : Morphological development of a mega nourishment, observations at the sand engine, ICCE2014