

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

Sediment Movement Mechanisms in the Fluvial System Inferred from Analyses of Coastal Sediments

佐藤 慎司

Shinji Sato

1. はじめに

海岸工学は理論解析、実験、現地観測のそれぞれの手法における進歩に支えられて発展してきた。漂砂の分野では、造波水槽や振動流装置における移動床実験により、移動機構の解明と漂砂量公式の改良が重ねられ、数値モデルにより現地海岸における海浜変形が予測できるまでになっている。一方、現地海岸の漂砂機構や海浜過程に関する調査も精力的に実施され、縮尺効果の影響を大きく受ける漂砂現象の解明と数値モデルの改良や汎用化に貢献してきた。現地観測で対象とする時間スケールは、一回の高波浪に対応する数時間から環境が大きく変化する数十年にわたり、空間スケールも構造物周辺の局所的な地形変化から時には数十 km に及ぶ範囲を対象とする場合がある。観測手法もさまざまで、前者の場合は波・流れや濁度・地形・底質変化などを観測する短期集中観測が実施され、後者では空中写真の比較や長期にわたる深淺測量データから中長期的な海浜過程を推定する分析が主体となる。しかし、近年広い領域で海岸侵食が慢性的に進行している状況を考えれば、短期的局所的な観測といえどもその結果をもとに広範な長期間の海浜変形過程との関わりを考察することが重要であることは言うまでもない。

海岸侵食はさまざまな原因で生じるが、長期的な海浜変形機構を考えるうえでは、流域や沿岸域の人為的な改変とそれに伴う土砂移動特性の変化を把握することが大切である。しかしながら、河川から海岸へ供給される土砂量と海岸地形形成への寄与率については不明部分が多く残されている。例えば、土砂供給量の多い天竜川、大井川などの流出土砂量は $10^6 \text{ m}^3/\text{yr}$ 以上のオーダーと見積もられているが(芦田ら, 1983; 斎藤・池原, 1992)、河口周辺の海岸での沿岸漂砂量は、多い所でも $10^5 \text{ m}^3/\text{yr}$ のオーダーであり(宇多, 1997)、両者の間にはほぼ 1 オーダーの開きがある。また、土砂供給量の変化と海岸での侵食・堆積との因果関係は一般的には必ずしも明らかではない。例えば河川流域にダムが建設された後に海岸で汀線後退が見られたとしても、その間に定量的かつ明確な関係付けを行うことが困難ことが多い。その原因の一つは、従来の解析のほとんどが土砂量のみをベースとしたものであるため、海浜変形を引き起こす要因がいくつか複合している時には、支配的な要因を特定する決め手に欠けるためである。このような場合には、土砂の量と質の両方を検討することが重要となる。河川流域と漂砂系を含む流砂系の土砂を適正に管理するためにも、それぞれの土砂管理計画を合理的に接続することが重要となり、その実現には土砂の量と質の双方を対象とする総合的な観測と分析が必要である。

堆積物の調査を通じて土砂の質に関する情報を分析する手法としては、比重、粒度、形状などの物理的な特性の検討や、鉱物分析、堆積物中に含まれる自然放射能や生物化石などから堆積年代を推定する手法などが挙げられる(日本第四紀学会編, 1993)。このような堆積物の分析は、河川と海岸との関わりだけではなく、漂砂系内での土砂移動実態を推定するにあたって有効な手段となるうえ、流砂系の水質・生態系の保全を考えるうえでも基本的かつ重要な情報を提供する。本稿では、流砂系の土砂移動に関する総合的な分析を効率的に推進する観点から、海岸堆積物の分析から得られる情報を整理し、これらが地質・地理学的な見地からみると短いものの海岸工学的見地では長い 100 年程度の時間スケールの現象の理解を深めるのに極めて有効であることを示す。

2. 堆積物の分析と海浜過程

沿岸域の表層底質の特性は、海岸過程を検討する際の基本的な指標の一つである。なかでも粒径は最も代表的な物理指標である。海岸では波の淘汰作用により粒径は比較的揃っていることが多く、中央粒径でその特性を代表できる場合が多いが、砕波点や前浜ではやや粗い底質が多く見られるうえ、河口周辺などでは広い粒度分布を持つ底質が見られることも多い。このように底質の粒度は波浪・海浜特性と相互に影響し合うため、その空間分布や時間変化を比較することによりさらに多くの情報を引き出すことができる。例えば、粒径は漂砂の卓越方向に向けて小さくなると言われており、粒径の大小から沿岸漂砂の卓越方向を推定することができる。実際石川海岸や九十九里海岸、富山海岸などでは粒径と卓越方向の相関が高い(藤, 1970; Sunamura・Horikawa, 1971; 佐藤ら, 1970)。また、磯浜海岸でも、岩石種ごとの礫の大きさと形状から、漂砂の卓越方向を推定することができる。(荒巻・鈴木, 1962; 中山, 1962)。しかし、例えば富士海岸や後で詳しく述べる鹿島灘南部海岸などでは粒径の大小のみでは漂砂の卓越方向を推定できない場合もある(山本ら, 1995, 1998; Guillén・Jiménez, 1995; 佐藤ら, 2000a)。これは、沿岸漂砂の輸送過程で細粒分が波の作用によって選択的に流出するためと考えられ、このような場合には、粒径と淘汰度の両方を指標にすれば卓越方向を推定できるとされている(Sunamura・Horikawa, 1972)。粒径は卓越方向の推定だけでなく、侵食の進行度を推定するのににも有用で、例えば侵食が進んだ海岸では、前浜の急勾配化とともに粗粒化が進むことが多い(宇多ら, 1986; Guillén・Palanques; 1996)。さらに粒径が広い範囲に分布する河口周辺では、粒度分布の時空間変化を追跡することにより、河口部の複雑な土砂移動機構を推定する手がかりを得ることができる(山下ら, 2000; 佐藤ら, 1998; Liu et al., 2000; 佐藤ら, 2001)。

海岸堆積物の鉱物組成も、漂砂源や漂砂の卓越方向などを推定する有効な指標となる。岬を回ると海岸の砂の色が変わることはよく経験するが、これは多くの場合漂砂源の変化を反映している。底質の色は、現地踏査では有用な情報となるが、定量的な分析指標としては使いにくい。ただし、今後画像解析技術などが進展すれば、色の違いに基づく定量分析も有効な手段として利用できる可能性もある。鉱物組成の変化は比重の違いにも現れ、前浜勾配などの海浜地形の特性や侵食に伴う地形変化(や色の変化)を決定する重要な要因になっている。鉱物分析によれば、河川や海岸、海域など流砂系内のさまざまな場所における土砂の成分を把握することが可能であり、これらの組成を領域ごとに比較することにより、海浜過程と河川からの土砂供給との関わりを推定できる。例えば、ある河川から供給される土砂に特徴的な鉱物が含まれているとすれば、その鉱物の含有率を追跡することにより、河川からの土砂供給の影響が及ぶ流砂系の範囲を推定することができる(井島ら, 1964; 佐藤ら, 1967; 佐藤ら, 1970; Rice et al., 1976; Fan, 1976; 新潟古砂丘グループ, 1979; Critelli et al., 1997; Sanderson・Eliot, 1999)。また、鉱物ごとに比重や粒度は一般に異なるので、沿岸域では波・流れの作用によってふるいわけがおこり、場所により鉱物組成は異なる分布を示す。そこで、鉱物同定をおこない、各鉱物の比重・粒度などの物理的性質と組成の空間的分布との関係を検討することにより漂砂系内での土砂移動実態も推定できる場合がある(大嶋・横田, 1978; 鈴木, 1985; 熊谷ら, 1997; 李ら, 1999; 梶村ら, 2001)。

表層底質の分析に加えて、堆積土砂層の分析も行えば、上に述べたような空間的な土砂輸送機構に加えて、時間的な堆積過程の推定も可能となる。堆積土砂層のサンプルは、パイプロハンマーなどを用いれば砂質地盤でも比較的簡便に採取することができる(山本ら, 2000)。これらの柱状コア試料を分析することにより、堆積層を形成する土砂の供給源や移動方向を推定できるうえ、火山テフラの同定や ^{14}C や ^{210}Pb などの放射性同位体の同定を行えば、堆積層の年代推定ができる。地質学的な時間スケールにおいて堆積土砂層の分析をした研究は多く、例えば、深海での土砂移動、海面の相対位置や波浪・潮汐特性の変化などの推定に用いられている(茅根ら, 1987; 西畑ら, 1988; 増田・横川, 1988; 鈴木・斉藤, 1987; 平, 1990; 長岡ら, 1991; 田中ら, 1996; 大平・海津, 1999)。波浪による海底地盤の攪乱が小さいと考えられる場合には、堆積土砂層の分析から100年程度やそれより短い時間スケールの現象を推定することも可能で、堆積過程の推定(Oldfield et al., 1989;

井内, 1993; Almagor・Schilman, 1995; Hagadorn et al., 1995; Wheeler et al., 1999), 津波や暴浪の履歴推定 (Dawson et al., 1996; Minoura et al., 1996; 今村ら, 1997a, b; Bondevik et al., 1997; 西村・宮地, 1998; 増田・横川, 1988; 七山・重野, 1999; 重野ら, 1999; Rossetti et al., 2000; Dominey-Howes et al., 2000; Nakayama et al., 2000) や, 人為的改変に伴う土砂移動機構変化の推定 (Palanques et al., 1990; 斎藤ら, 1994; 貞方, 1996; Liu et al., 1998; Almagor et al., 2000; Chagué-Goff et al., 2000) などにも応用されている。また, 直接コアの採取ができない場合でも, スーパーカーなどの音波探査により堆積層の厚さや分布を計測することも試みられており, これらも長期間の堆積過程を推定するのに役立つ (田中ら, 1997; 山本ら, 1999; 佐藤ら, 1999; Almagor et al., 2000)。このように堆積物の分析からは, 長期的な海岸過程に関してさまざまな情報を得ることができるが, 本稿では利根川と波崎海岸, 鮫川と勿来海岸を対象とした総合現地観測から海岸堆積物の分析の具体例を紹介し, 堆積物調査の意義と役割を検討する。

3. 鹿島灘南部海岸の地形形成機構

利根川河口から鹿島港に至る鹿島灘南部海岸は, その南部領域を中心に近年侵食が進み, 1984 年からはヘッドランドによる対策が実施されている。侵食の原因は, 河口堰の建設 (1971 年), 波崎漁港防波堤の建設 (1974-1985 年) などによる土砂供給量の減少であると考えられるが, 利根川はいわゆる東遷事業により江戸時代から流路が東へと変更されてきたため, 河口周辺海岸の土砂環境は近世において大きく変化し, 河口周辺の海岸地形は現在も非平衡状態が継続している可能性がある (大熊, 1981)。一方海岸では, 1975 年までの鹿島港防波堤の建設や先に述べた波崎漁港防波堤ヘッドランドの建設により, 漂砂特性にもさまざまな変化が生じている。ここでは, 同海岸で実施された底質調査, 沿岸域の柱状コアの分析, 河口周辺における波・流れ・濁度の観測, などの総合的な観測例 (佐藤ら, 2000a, b, 2001; 山本ら, 2000) を紹介し, さまざまな要因が複合する海岸の漂砂機構の変遷と海岸地形形成過程を解明するうえでの堆積物調査の役割を考察する。

3.1 海浜変形の変遷と底質の粒度分布

図-1 は, 1947 年から 1996 年までの空中写真から汀線位置を読み取ったデータを, 1947 年を基準として比較したものである。潮位の影響は撮影時刻をもとに補正されている。同海岸には, 約 1km 間隔で 5 基のヘッドランドが建設されているが, 上段の図はヘッドランドの建設が始まる前のデータであり, 下段の図は建設開始後のものである。上段の図をみると, 鹿島港建設前には, 河口から北へ約 10km の範囲で汀線が前進しており, 同領域は, 利根川からの供給土砂でゆるやかな堆積傾向にあったと考えられる。鹿島港の完成とともに北端部で局所的な堆積が生じ, その後, 河口堰と波崎漁港の建設を経てヘッドランド建設が開始された 1984 年には南側領域で 100m に及ぶ汀線後退がみられる。北端部の局所的な堆積は, 佐藤ら (1974) に報告されているように, 鹿島港建設に伴う南海岸への約 3,900 万 m^3 の土砂投入によるものと考えられ, 堆積域は鹿島港南端部から約 5km の領域にまで広がっていることがわかる。ヘッドランド建設開始後の下段の図をみると, 波崎漁港近傍での堆積がさらに進むとともに, 侵食が進んだ区域でも徐々に汀線が回復する傾向にあり, ヘッドランドによる汀線の安定化が実現されていると判断できる。また, ヘッドランド間の汀線形状をみると, 図上で右下がりになる傾向が認められ, 平均的には北向きの沿岸漂砂が卓越していることがわかる。

沿岸漂砂による分級過程を把握するには, 汀線部の表層底質を採取し, 粒度を分析するのが最も簡便な調査手法である。粒度分析には, ふるいわけ試験やレーザ回折式粒度分布測定器を用いれば良い。図-2 は, 汀線部満潮位付近の底質の中央粒径 D_{50} の沿岸分布を示したものである。佐藤ら (2000a) のデータに加えて, 過去に同じ領域で取得されたデータも合わせて示してある。また, 図-3 は, 汀線部干潮位付近の底質粒径を示したものである。加藤ら (1987) のデータについては, 満潮位と平均潮位の中間で取得されているため, 両方の図にプロットしてある。両図より, 1990 年頃まではその頃までに侵食が進んだヘッドランド施工区間で粒径が大きいことがわかる。同様の傾向は, 鹿島港北側の大野鹿島海岸などでもみられており, 侵食により細粒分が流出し

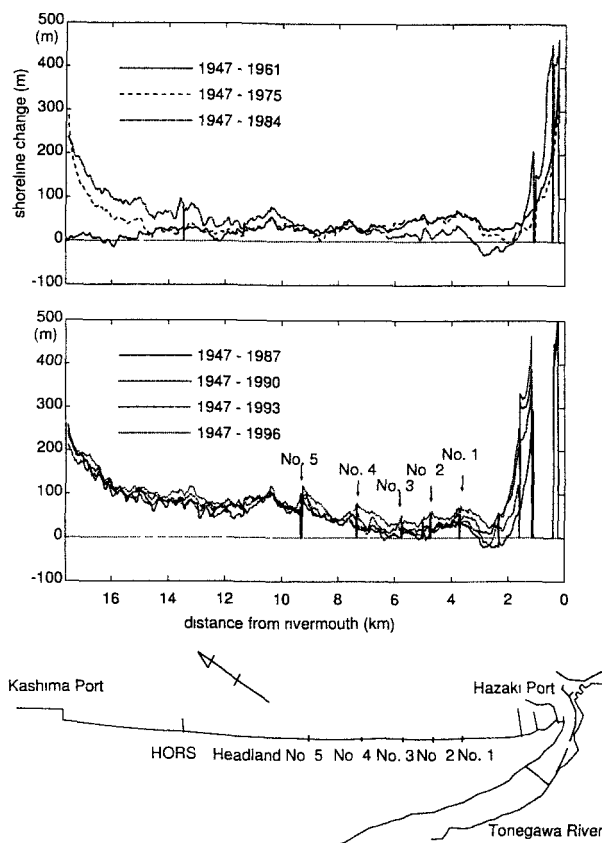


図-1 空中写真から読み取った汀線変化(上段：ヘッドランド建設前，下段：建設開始後)

て粗粒化が進んだ結果であると判断できる。ヘッドランドの施工が進んだ1990年頃からは、以前粗粒化が進んだ領域でも細粒化しており、ヘッドランドにより海浜の安定化が図られるとともに細砂成分が捕捉されるようになったものと考えられる。図-2と図-3を比較すると、干潮位付近の底質粒径の方が大きい傾向があるが、1990年以後の細粒化はどちらの図でも同様に認められる。両図を比較するとわかるように、細粒成分と粗粒成分が混在する条件では特に、潮位によって汀線付近の粒径は大きく変化する場合があるので、底質の採取位置に注意する必要がある。

粒径分布をさらに詳しく検討するために、採取サンプル数の多い加藤ら(1987)と佐藤ら(2000a)のデータに対して中央粒径 D_{50} とふるいわけ係数 $\sqrt{D_{75}/D_{25}}$ を示したのが図-4である。侵食のため粗粒化が進んだ海岸中央部付近を除くと、底質粒径は、河口から離れるにつれてわずかに増加する傾向にあり、ふるいわけ係数はほぼ一定とみなせることがわかる。海岸の底質は一般に、沿岸漂砂の下手に向かうにつれて粒径が小さくなり、淘汰が進むといわれているが、同図の中央粒径の分布からは、空中写真の分析から判断された北向きの沿岸漂砂は確認できない。これは、利根川河口から供給された土砂のうち、粒径が0.15mmより細かい微細砂成分は北向きへの輸送過程で徐々に沖合いへと流出しているためと考えられ、粒度分析のみでは漂砂の卓越方向を判断できないことを示している。このような場合には、他の分析と合わせた総合的な判断が必要である。

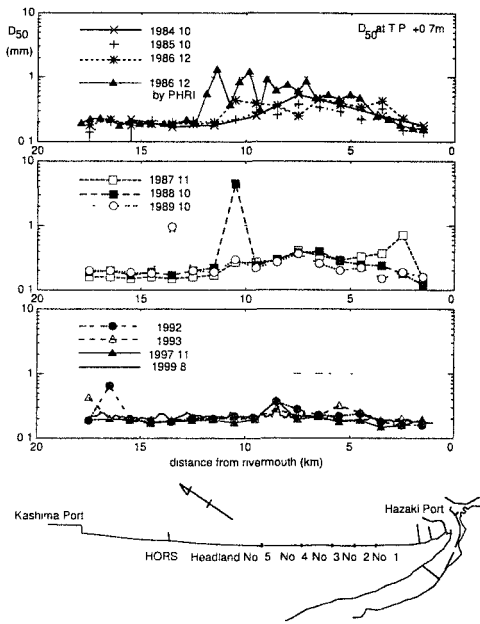


図-2 汀線部満潮位付近の底質の中央粒径

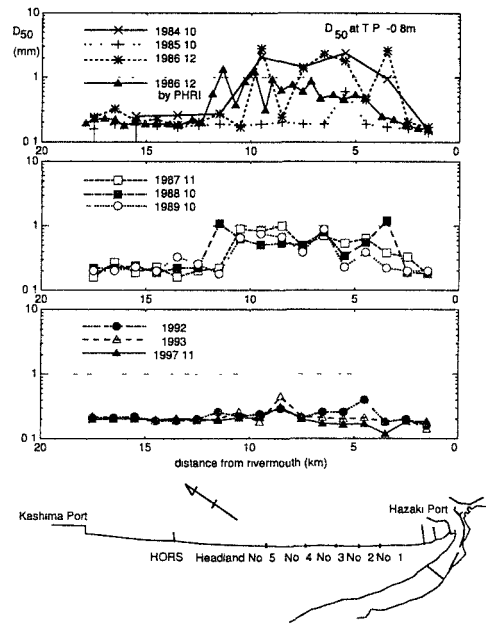


図-3 汀線部干潮位付近の底質の中央粒径

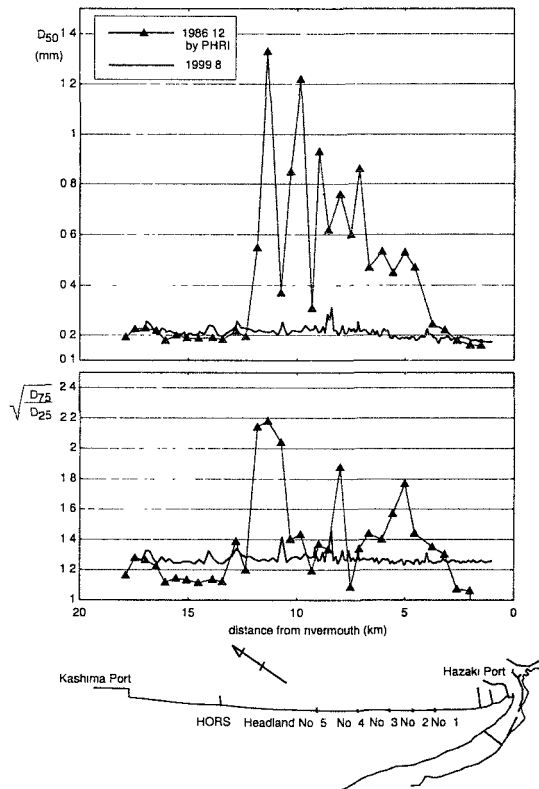


図-4 底質の中央粒径とふるいわけ係数

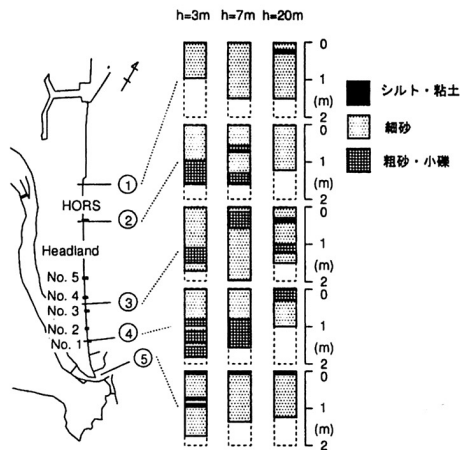


図-5 柱状コアの構成成分

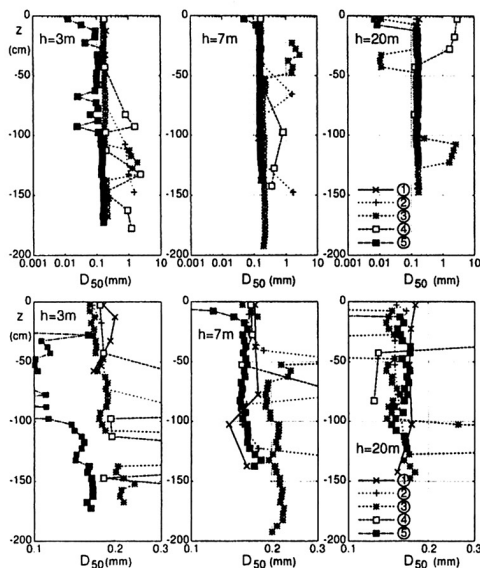


図-6 柱状コアの中央粒径の分布 (下段は 0.1~0.3mm の部分の拡大図)

3.2 堆積過程の推定

海底における土砂の堆積過程を調査するには、スパーカーなどの音波探査による方法と柱状コアを採取して分析する方法がある。鹿島灘南部海岸では、約5km間隔で7本の測線が設置され音波探査が実施されるとともに、各測線の水深3m, 7m, 20mの地点において最大長さ2m, 直径10cmの柱状コアがパイプロハンマー方式で採取された(山本ら, 2000)。採取したコアは、写真撮影などを行った後、表面から5cmごとにスライスして分析用の試料とされた。取得したコアは、汀線部のものを含めて、合計28本であるが、佐藤ら(2000a)により、図-5に示した利根川流軸より北側の15本分の試料が分析されている。本稿では、①から⑤の5本の測線のコアに対し、例えば測線③の水深7mのコアを③-7と表記することにする。コア採取期間中の1999年8月15日には利根川で流量 $5,000\text{m}^3/\text{s}$ を超える大規模な出水が生じたが、①から④の4本の測線のコアは、出水前に採取されたものである。測線⑤のコアは、出水後の8月25日に採取されている。コアの分析から海浜堆積層の形成機構を推

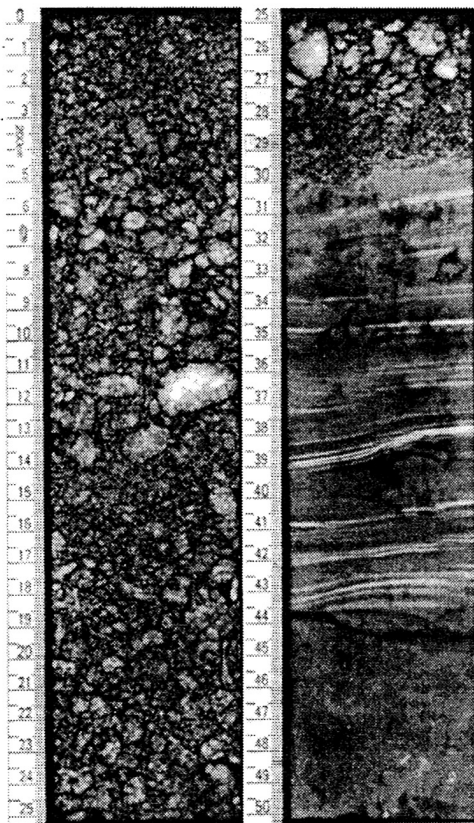


図-7 柱状コア④-20の軟X線写真(左側:海底面を基準に0-25cm, 右側: 25-50cm)

定するためには、粒度分析と年代推定が有力な手段となる。以下にこれらの具体的な分析例を述べる。

a) 粒度分析と最大粒径

図-5は、①から⑤で採取した柱状コアの構成成分を、目視観察と粒度分析結果をもとに図示したものである。コアを構成する底質は、ほとんどが細砂であるが、ところどころに粗砂や小礫を含む層が見られる。粗砂層の存在は、水深が浅くなるほど多くなり、また、過去に侵食を受けた区域である③や④のコアほど多くなる傾向がある。シルト・粘土質成分は、河口前面の③を中心に存在するが、層の厚さはきわめて薄く、物理的な海岸形成の主体とはなっていない。図-6は、①から⑤の各測線のコア試料の中央粒径の分布を示したものである。測線①と⑤のコア試料については、5cmごとにスライスした全試料の粒度を分析したが、その他の測線については、コアの目視観察結果を参考にして特徴的な層を抽出して分析を行った。コア試料の中央粒径は、そのほとんどが0.14~0.22mmの領域に集中するため、0.1~0.3mmの部分を拡大して図-6の下段に示してある。同図から、海岸を構成する主要な成分は粒径0.14~0.22mmの細砂と判断されるが、それに中央粒径1~3mmの粗砂が層状に挟まれていることがある。主要な構成成分である細砂の中央粒径は、水深が深くなる程均一化する傾向にあるが、⑤-3の粒径が著しく小さいことを除いて、場所や水深による系統的な違いは見られない。また、特に従来の調査で粘土質が多いとされる河口前面においても、水深7mや20m地点では、粘土成分は表層の10cm程度の薄い領域にのみ存在し、その下は細砂で構成されていることは注目に値する。すなわち、利根川から供給される粘土質成分粒子は、河口前面に一時的には堆積するものの、波や流れの作用により容易に再浮遊させられるため、安定した地形構成要素とはならない。

コア中の底質の主成分は細砂であるが、その中に粗砂層が挟まれており、粒径1cmを超える堆積岩由来の小礫が含まれていることもあった。図-7は、④-20のコアに対して、海底から50cmの深さまでのサンプルの軟X線写真を示したものである。表層から30cmまでは粗砂に小礫が混じった層がみられ、中には粒径が1cmを超えるものも見られる。深さ30cm以上の部分は細砂で構成されているが、写真には1~5mm間隔の縞模様が見られ、これは細砂のゆるやかな堆積過程を示しているものと考えられる。深さ44cmより深い領域では縞模様がみられなくなるが、これはこの部分には粘土・シルト質の微細粒径成分が多く含まれており、堆積過程が砂のみの場合とは異なっていたものと考えられるためである。このように、海底の土砂はいくつもの堆積層から構成されており、軟X線写真撮影によれば目視では観察できない微細な堆積構造まで分析することができる。同写真は水深20m地点のものであるが、波によって移動する底質の粒径には、波高、水深に応じて限界値があるため、ある地点の底質の粒径から逆にその場所に作用した波浪の規模を推定することができる。このような検討により、大粒径底質が含まれる層が、数年に一度の高波浪で形成されるものか、数千年スケールの海水面の変動まで考慮しなければ形成され得ないものか判定することができる。

図-8は、粒径1cm以上の小礫が含まれたコア試料に対して、底質の最大粒径 D_{max} とコア採取水深 h の関係を示したものである。コア中の底質の最大粒径は水深が大きくなるほど小さくなり、水深20mでは、10~15mmである。鹿島港の波浪記録から推定した100年確率波高は9~9.7mであることから、図-8には、これに対応する波浪として、波高10m、周期15sの条件に対して、佐藤・田中(1962)の表層移動限界に対応する粒径を示してある。同図から、水深20m地点におけるコア中の底質の最大粒径は、100年確率波による表層移動限界に対応

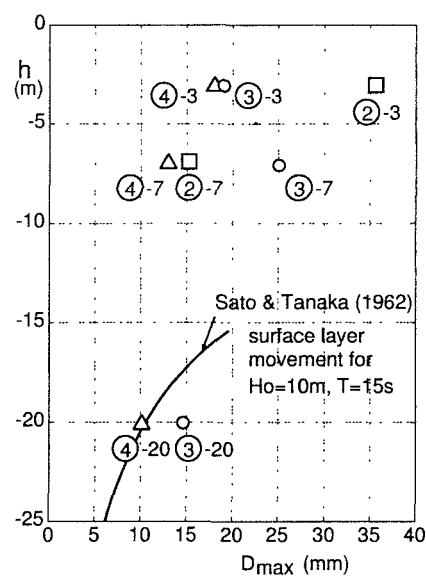


図-8 柱状コアの最大粒径

する粒径とほぼ同程度と判断できることから、これらの大粒径底質は100年オーダーの時間スケールで移動可能であり、したがって比較的新しい年代の堆積物である可能性が高い。

b) 自然放射能の測定

数十年の期間における堆積物の堆積年代を自然放射能の測定により推定する手法としては、Pb-210(半減期22.3年)に注目する方法とCs-137(半減期30.2年)による方法が有効である(Sharma et al., 1987; Oldfield et al., 1989; 金井ら, 1995; Dominey-Howes et al., 2000)。前者は、図-9に示すように、ウランの崩壊系列中で発生する気体であるRn-222が大気中に拡散後崩壊して金属のPb-210が発生し、これが地表に降り積もることにより生じる放射非平衡を利用するものであり、後者は、核実験が頻繁に行われた1963年頃に大気中で高濃度となったCs-137を示準物質として利用するものである。

佐藤ら(2000a)は、柱状コアを5cmごとにスライスした試料を低温乾燥し、直径8cmの亚克力製容器に厚さ4mmに均一に成形した上で密封して約30日間放置し、半減期3.8日のRn-222の崩壊過程が十分放射平衡に達する状態にした。これを、遮蔽体内にセットし、ベリリウムウインドウ付きのγ線スペクトロメータでγ線放出量を計測した。試量から放出されるγ線の量は極めて微量であり、計測カウンタで捕捉されるものはさらにわずかで計測効率は低いため、高精度の測定を行うためには計測時間を長くする必要がある。佐藤ら(2000a)の測定では、一つの試量に最低24時間の計測時間が確保されている。

γ線スペクトロメータの出力は、放出エネルギーごとの放出数がエネルギースペクトルの形で得られる。ここで注目しているPb-210とCs-137は崩壊に際しそれぞれ46.5keV、661.6keVのエネルギーを放出するので、この2つのエネルギー帯に注目して放射線強度を評価すれば良い。測定用の試料の作成から測定まで多くの日数を要するため、測定対象を厳選して測定を実施した。対象としたのは、③-3、③-20のコアおよび④-20のコアである。いずれの試料からもCs-137に対応するエネルギー帯に明確なピークは現れなかったため、Pb-210のみについて以後の解析を行った。

図-11は、3つのコア試料に対するPb-210のγ線強度 r を示したものである。縦軸は、海底面($z=0$)からの深さであり、横軸は1秒あたりのγ線検出数である。Pb-210の含有量は、海底表層ほど多く、深部では一定値に漸近していくように見える。深部における漸近値は、地盤に元々含まれるPb-210成分と考えられ、この値との差分が新たに降り積もったPb-210の過剰成分と考えられる。水深20mの領域では過剰成分は③では海底面下60~80cm、④では海底面下40cmの範囲に存在するのに対し、河口前面の水深3mでは表層20cmの薄い領域のみにしか見られない。すなわち、水深20mの沖合いでは数十年スケールの新しい堆積物が40~80cmの深さにまで存在しているのに対し、水深3mではあまり厚くは堆積していないことになる。これは、図-10に示すように、沖合いでは堆積と波浪による混合過程が緩やかに進行しているのに対し、水深3m地点では、波浪と出水による侵食と堆積が繰り返され底質の混合が激しいためと考えられる。汀線部底質の粒度分析結果によると、微細砂成分は汀線付近から沖合いへと流出しているものと考えられるが、沖合いでは同成分がゆるやかに堆積するとともに波浪による混合を受けており、数十年の時間スケールにおいては、その厚さは表面から40~80cm程度の深さにまで及んでいると言える。

3.3 河口周辺の漂砂機構

図-12は、利根川河口周辺で採取した表層底質を据置型レーザー回折式粒度分析器で分析したものである。図では、岸沖方向の測点を縦、沿岸方向を横方向に配置し、それぞれの地点で8月31日に採取した粒度分布を上段、9月28日のものを下段に示してある。図中の矢印は中央粒径の位置を示している。S5地点の底質は、中央粒径 $D_{50}=2\sim3\text{mm}$ と極めて粗く、粒度分析器の測定可能範囲($D<0.5\text{mm}$)外であったため図には示していない。また、分析に際しては、試料の粒度特性に応じて適宜測定レンジを使い分けたが、レンジ外の粒径部分については範囲外に一樣に分布するものとして図示してある。2回の測定結果を比較すると、沖合のS1、S2地点や、河口部前面のS4地点では、粒度分布に変化が見られないのに対し、水深10m付近の地点では顕著な変化がみ

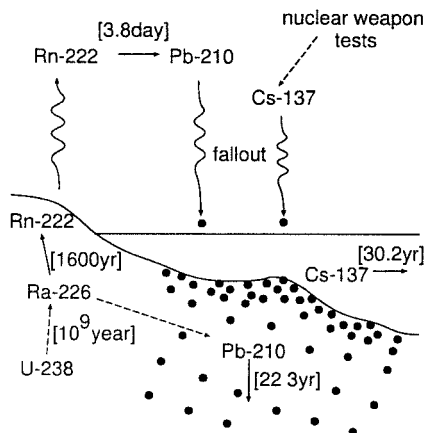


図-9 放射性降下物による堆積年代推定

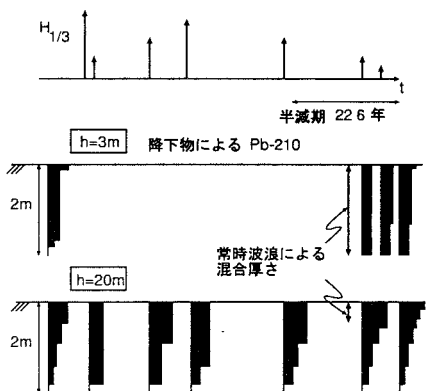


図-10 堆積と混合による放射性降下物含有量の変化

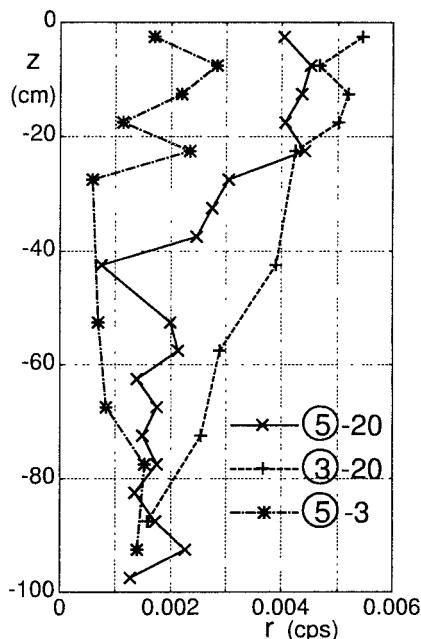


図-11 柱状コアの Pb-210 の放射線強度

られる．特に，S7，S3，S8の各点では粗粒化が顕著である．また，底質の採取と同時に実施された深浅測量によれば，河口周辺の断面地形は，ほとんど変化していないが，水深5m以深の領域ではわずかに侵食傾向にあった．8月31日の沖合いの表層底質は微細粒径成分であるため，これが広い範囲で薄く侵食されたことになる．

図-13は，8月31日に現地用レーザ回折式粒度分布測定器により計測された粒径別懸濁物濃度の鉛直構造を示したものである．高濃度の領域は海面から水深3～4m程度までの領域に見られ，その中でさらに高濃度の部分が層状に分布している．河口部における水深が約5mであることを考慮すると，海水の上を土砂や懸濁物を多く含む河川淡水が覆うことにより，塩分差に基づく成層構造が発達し，高濃度の領域が表面付近に閉じ込められているものと考えられる．濃度の絶対値は，岸沖方向には河口に近づくほど高くなり，S4やS5地点では3000～5000 $\mu l/l$ に達することがわかる．また，沿岸方向にみると，S6からS8地点へと南へ向かうほど高くなる傾向にある．これは，同時に実施された底層での流れの観測で，南へ向かう流れが卓越していたことと整合する．高濃度の領域における懸濁物質は細砂がほとんどであるが，河口前面のS4付近の底質には細砂が卓越して見られることや，同日の河川流量は小さく，細砂成分を輸送するには十分でないことから，これらの浮遊細砂は，河口前面領域で波や流れの作用により巻き上げられたものと推定される．S3，S2，S1，S8地点の濃度分布を詳細に見ると，高濃度領域の濃度が低下するとともに，その位置が徐々に下降しており，浮遊細砂の拡散沈降過程をとらえている．また，S2，S6，S7，S8の各地点の下層では，底面からの再浮遊と考えられる高濃度領域が見られる．この領域における粒径は0.005mm～0.06mm程度であり，粘土・シルト質成分に分類されるもの

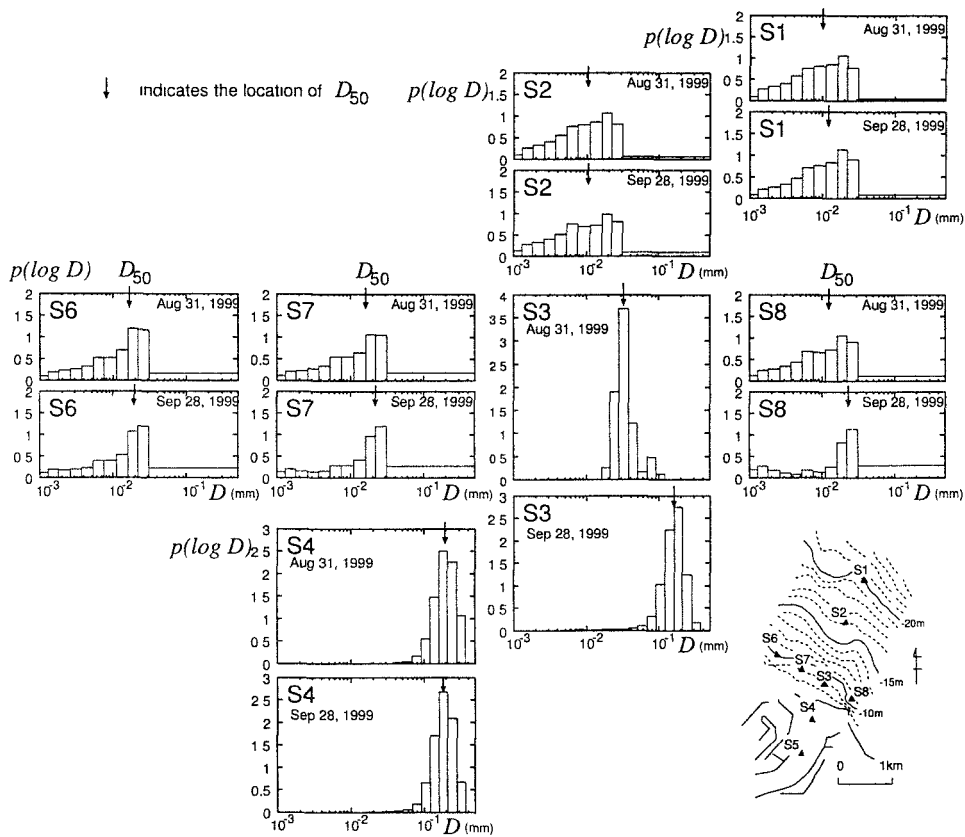


図-12 表層底質の粒度分布 (各地点で上段が出水2週間後, 下段が上段図の1か月後)

である。これらは、波により形成された底面境界層で局所的に巻き上げられた成分と考えるのが妥当である。

3.4 鹿島灘南部海岸における漂砂の実態

これまでにしてきたように、空中写真の分析や深浅測量、底質粒径の分析に加えて、粒度分布や堆積過程に関して詳細な分析を実施することにより、漂砂機構の推定精度を高めることができる。これまでの分析を総合すると鹿島灘南部海岸の漂砂実態は、図-14に示すような変遷をたどってきたと考えられる。海岸を構成する主成分は、粒径0.14~0.22mmの細砂であり、部分的に挟まれている粗砂層は最近20年間に侵食を経験した区域に多くみられることや汀線変化の変遷などから考えて、1960年頃までは、利根川から流出した細砂と少量の粗砂・小礫が平均的にはやや南からの波が卓越する沿岸漂砂により北へ輸送され、河口周辺の北側海岸は徐々に堆積する傾向にあったと考えられる。利根川から粗砂・小礫が供給されていたことは、河道内の測点S5の底質に粗砂や小礫が観察されたことから裏づけられた。沿岸漂砂による北への輸送過程で、細砂のなかでも微細砂成分は沖合いへと輸送されるため、汀線部の粒径はわずかに増加することになる。沖合いへ輸送される微細砂成分は浮遊状態で輸送されるため、その輸送機構は沖合いの流れの特性に支配される。今回の分析で対象とした観測期間では、南向きの流れが卓越したため、この場合には平均的には南向きへ輸送されていたことになる。海岸での沖合い流れの卓越方向については、さらに長期間のデータによる検討が必要である。

河口堰と波崎漁港の建設が進んだ1980年頃には、利根川からの流出土砂は細砂以下の成分が主体となり、水深8m地点まで延伸された防波堤の影響などにより北側海岸への土砂供給量は激減したと考えられる。平均的

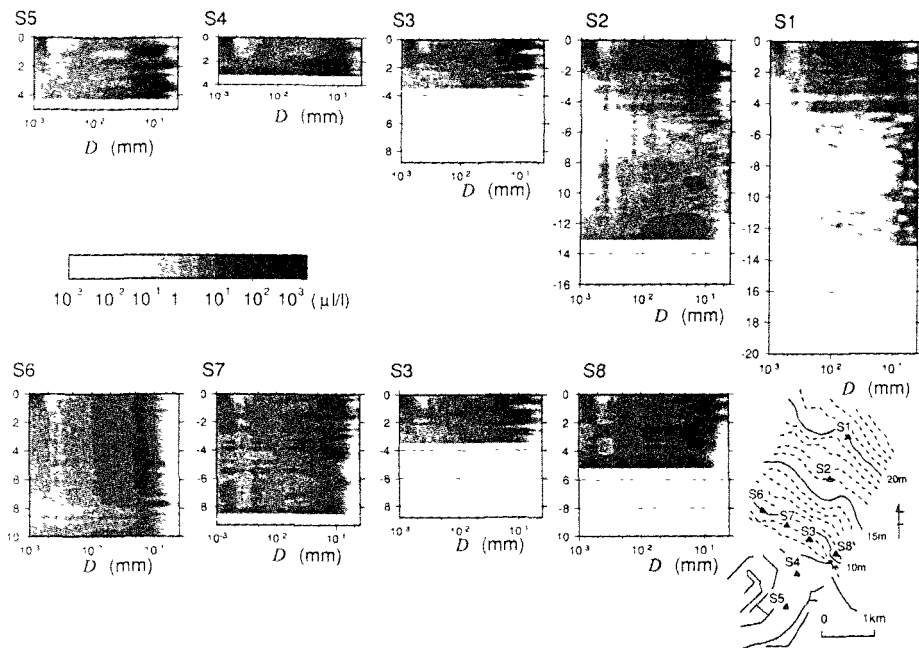


図-13 粒径別懸濁物濃度の鉛直構造

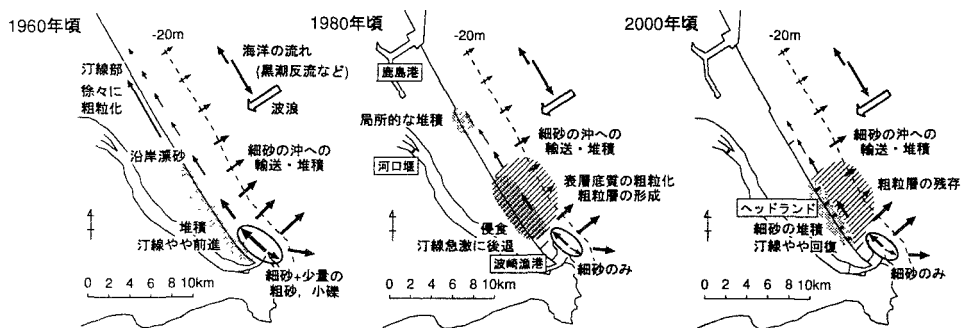


図-14 鹿島灘南部海岸の漂砂の実態

な波の作用はほとんど変化していないと考えられるので、南部の海岸の沿岸漂砂や微細砂成分の輸送量に大きな変化はなく、土砂供給が不足する区域では侵食と粗粒化が進み、残された粗砂は粗粒層を形成することになる。粗粒層の形成は、汀線付近のみでなく、水深20m程度の沖合いにまで及んでいる所があり、このような場所では、前述した沖合いへの微細砂の輸送量も不足し、場所によっては、表層に粗粒層が露出している所もある。これは、柱状コアの分析から、③や④の測線では、全ての水深で粗粒層の存在が確認されていることから裏づけられる。

5基のヘッドランド縦堤部の建設がほぼ完了した2000年頃には、利根川からの流出土砂の特性は1980年頃と大きな違いはないが、一時侵食が激しかったヘッドランドの施工区間で、汀線がやや回復し、微細砂の堆積が進んだ。これは、ヘッドランドにより、沿岸流が弱められ、碎波帯で発達する浮遊砂が堆積する傾向になったためと考えられる。ただし、細砂の堆積は表層のみで、海底部では場所によっては粗粒層が露出している所もある。

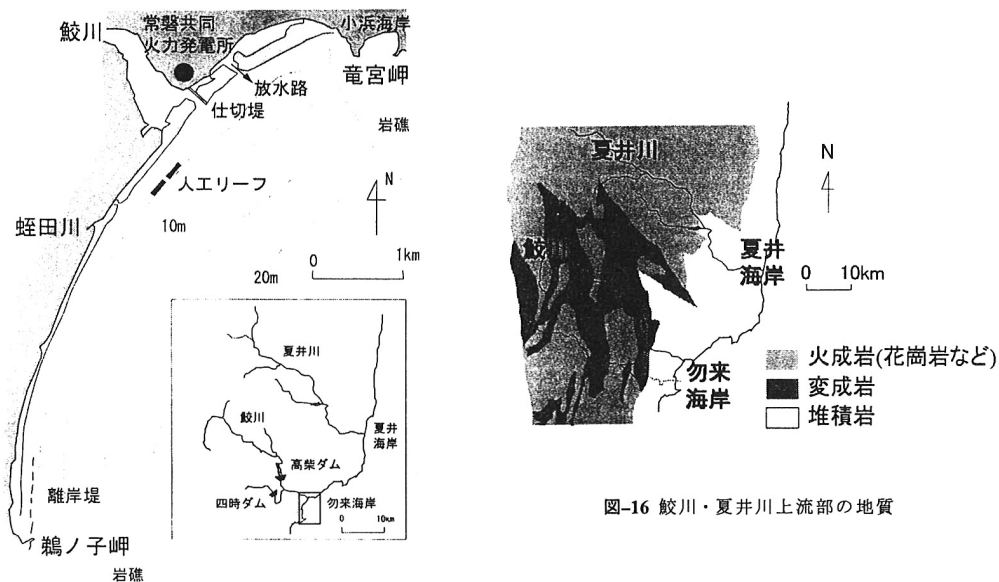


図-15 鮫川・勿来海岸流砂系の概要

る。汀線付近の細砂の堆積が、沖合いの海浜の回復を含めた海浜過程にどのような影響を及ぼすのか、今後の調査で監視を継続する必要がある。

4. 鮫川・勿来海岸流砂系の土砂動態

4.1 流砂系の地勢および構造物建設の経緯

勿来海岸は、福島県いわき市の南部に位置する約6kmにおよぶ砂浜海岸である。同海岸は北東端の竜宮岬、南端の鶴ノ子岬を含む岩礁に挟まれた緩勾配のポケットビーチであり、隣接海岸として竜宮岬の北東に小浜海岸が、鶴ノ子岬の南に五浦海岸が存在する。また、海岸北部には中規模河川の鮫川が流れこんでおり、一連の流砂系を構成している。図-15に流砂系の概要を示す。鮫川は阿武隈山系に源を発し、福島県南部を流下して勿来海岸に達する流域面積600km²、流路延長58kmの二級河川である。上流には1962年に建設された高柴ダム、1984年に建設された四時ダムが存在する。

鮫川・夏井川流域の地質の概略を、図-16に示す(加納ら, 1973)。鮫川の上流一帯の地質の最大の特徴として、竹貫変成岩類、御斎所変成岩類という変成岩類の範囲が非常に広いという点があげられる。変成岩帯は南北120km、東西80kmに達しており、このように幅広い変成岩帯はひだ変成帯を除いて日本にはみられない。上流での主要な鉱物は石英・長石・角閃石・黒雲母である。夏井川流域の地質をみると、上流の古期および新期の花崗岩はいずれも角閃石をあまり含んでいない(岩生・松井, 1961)。

鮫川河口左岸には常磐共同火力株式会社勿来発電所(以後発電所と略称)があり、発電所からの温排水と河川水の分離を目的に1982年に河口仕切堤、1983年に発電所排水の放水路が建設された。南端部の鶴ノ子岬周辺には勿来漁港、平潟漁港があり、1980年代前半から沖合い防波堤を含む外郭施設の整備が進められている。また、汀線後退を防ぐために、1970年代から海岸最南部に順次離岸堤群が、1998年には蛭田川河口と鮫川河口の中間に人工リーフが設置されている。

勿来海岸への入射波と相関性が高いとみられる小名浜港水深 20m 地点での 1998 年の年間波浪データをみる

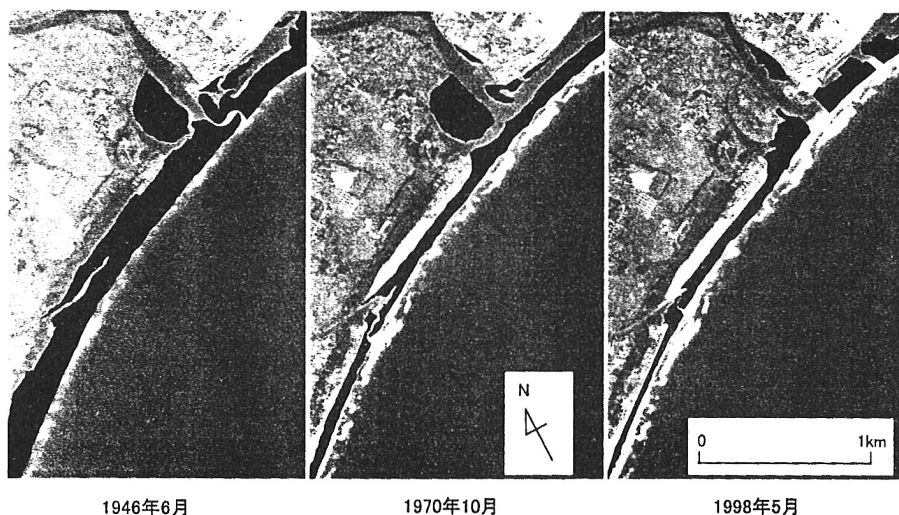


図-17 砂浜領域の変遷(黒く塗りつぶした部分が砂浜領域、背景はいずれも1970年10月のもの)

と、入射波の波向は季節により変動し、秋季の高波浪はやや南よりから、冬季の高波浪はやや東よりから入射する頻度が高い。海岸の等深線の法線は南部ではほぼ東向き、北部では南東向きであるため、秋季には北向きの沿岸漂砂が卓越すると考えられる。一方、冬季には北部で若干南向きの沿岸漂砂が生じる可能性が考えられる。本節では、ポケットビーチの形成に果たす中小河川の役割を解明することを目指して2000年8月～9月に実施された総合現地観測の分析例(梶村ら, 2001; 藤田ら, 2001; 山本ら, 2001)から、海岸堆積物の分析を中心に紹介する。

4.2 長期的な地形変化の分析

図-17に、1946年、1970年、1998年のそれぞれの写真から鮫川河口付近の砂浜領域を抽出し、それを1970年10月撮影の写真上に黒色の領域として転写したものを示す。各写真のゆがみは、いくつかの不動点をもとにして、伸縮・回転に対して最小二乗法により補正してある。また、砂浜領域の抽出にあたっては、写真上の碎波線位置から写真撮影時の波高を推定し、波浪による平均水位上昇および潮汐の影響による汀線移動を考慮して汀線位置を補正している。

空中写真から抽出した砂浜領域をもとに、各年の汀線位置を50m間隔で読みとって1970年の汀線位置からの変化量として図化した結果を図-18に示す。この結果より、勿来海岸においては、全域で侵食傾向が続いていることが確認できる。特に戦後まもなくの汀線後退が激しく、戦後の治山・治水事業による鮫川からの土砂供給量の減少などが原因であると考えられる。1970年、1976年には南端部の汀線後退が顕著となっているが、離岸堤群の建設により1991年には汀線が回復している。しかし、1991年、1998年には、離岸堤群と蛭田川の間の領域で侵食が進むとともに鮫川河口部でも急激な汀線後退が見られる。1998年の汀線変化で鮫川河口右岸で汀線が回復しているのは、人工リーフの効果によるものと考えられる。また、図-17の1970年10月と1998年5月の砂浜領域を比較すると、河口右岸の中州が消失している。詳細な記録は現存しないが、これは1970年代前半まで実施されていた建設骨材用の土砂採取によるものと考えられ、図-18の河口周辺で1970年以後も大きな汀線後退が見られることから、これによって鮫川から海岸への土砂供給が大きく減少した可能性が指摘できる。

次に深浅測量データを用いて土砂量の変化を分析した。測量範囲を図-19の区切り線にしたがって、沿岸方向に北部、中部、南部の3つ、岸沖方向に0-4m、4-8m、8-20mの3つ、全部で9つの領域に分割し、それぞれの領

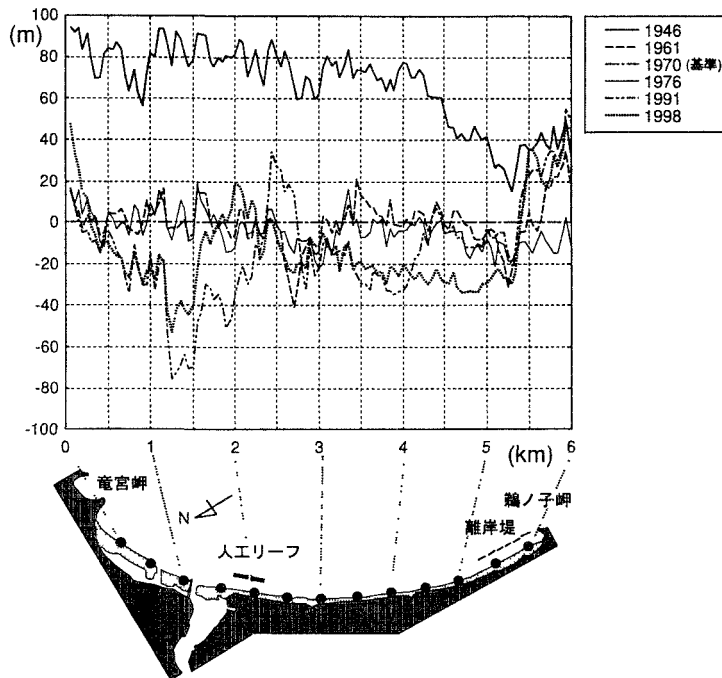


図-18 空中写真から読み取った打線変化の変遷

域および測量範囲全体での土砂量の経年変化を調べた。図-20に、北部・中部・南部および系全体の総土砂量を1984年6月を基準に計算したものを示す。これによると、各期ごとの変動量はかなり大きいものの、過去20年間で総土砂量は減少傾向にあり、系全体での土砂総減少量は1年あたり $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3$ 程度であることがわかる。特に南部においての土砂減少量が大きい。これらの長期的な土砂減少傾向の機構を推定するために、図-20において、総土砂量が大きく変化している期間を選び、それらの土砂量変化が高波浪や大規模河川出水とどのような関係があるかを調べた。その結果、大規模土砂減少は、主として夏から秋にかけて生じ、その原因は、高波浪の来襲に伴う南から北への土砂移動により沖合いおよび北側の海岸へ土砂が流出することであり、大規模土砂増加の原因は河川出水による沿岸域への土砂供給であることが確かめられた。すなわち、勿来海岸における長期海浜過程は、高波浪による隣接海岸および沖合いへの土砂流出と大規模出水による河川からの土砂流入のバランスによって成り立っている。近年はそのバランスが崩れ、長期的な土砂減少傾向にある。

4.3 河川からの土砂供給量の減少

長期土砂量減少の機構を解明するには河川からの土砂供給量の評価が重要である。そこでまず、鮫川の上流の2つのダムの堆砂量の経年データを入手し、鮫川の土砂供給能力の推定を試みた。図-21には高柴ダム、四時ダムにおける建設以降の累積堆砂量が示されている。これによると2つのダムを合わせ、平均で $1.3 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{年}$ 程度の堆砂が生じていることが分かる。この量は、前節で示した海岸漂砂系全体での土砂減少量 $10 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{年}$ とオーダーが一致しており、ダムによる供給土砂の遮断が海浜過程に大きな影響を及ぼしている可能性が指摘できる。

さらに、ダムより下流での河床が変動することによって生じる土砂供給量の変化を推算するために、1977年と1990年に実施された河床測量データを分析した。図-22は、最深河床高の縦断形状を示したものである。河口から4km地点より上流では河床変動は小さいが、下流部の1km～4kmの区間では河床低下、河口から1km区

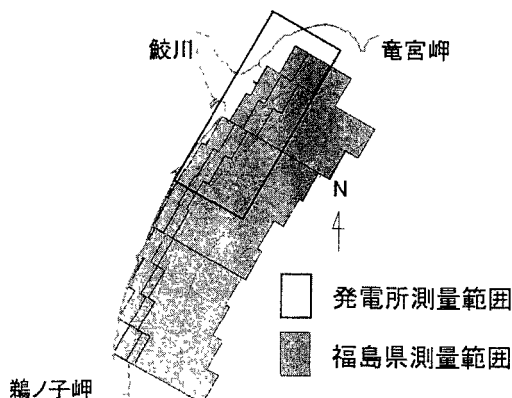


図-19 収集データの測量範囲

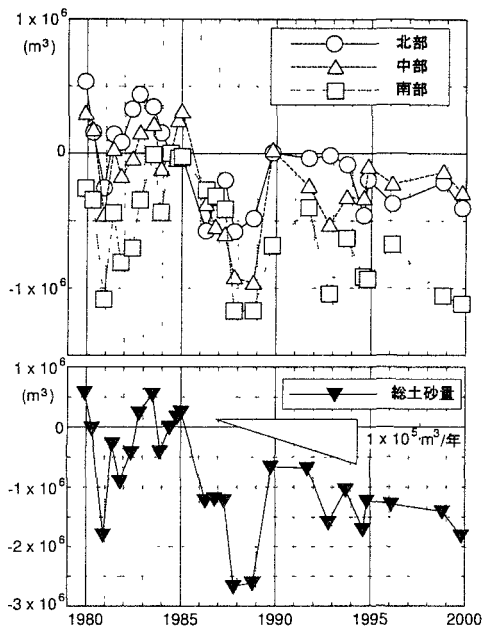


図-20 領域別土砂量変化(1984年6月を基準)

間では河床上昇が見られる。空中写真により砂浜領域の変化を追跡した図-17の結果からも1970年代前半に河口中州部で大規模な土砂採取が実施されたことが明らかになっていることから、河口近傍のこれらの河床変動は、土砂採取の影響によるものと考えられる。実際1977年における河口近傍での最深河床高は計画河床高より5m程度低い。図-23は、1977年と1987年の河口周辺河床の横断面を比較したものである。主として右岸側で河床上昇が見られ、これは、土砂採取跡が埋め戻されたことによると考えられる。これらの横断測量結果から、1977年から1987年の10年間に河口から1kmの区間で堆積した土砂量を試算すると $4 \times 10^5 \text{ m}^3$ となった。これが全て海岸への土砂供給量の減少につながっていると考えると、土砂供給減少量は $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{年}$ 程度となる。定量的には土砂採取の影響はダム堆砂の影響より小さいが、河口周辺海岸への土砂供給量の減少という点では直接的な影響を与えていると推定される。

4.4 鉱物分析に基づく長期土砂移動実態の解明

a) 鉱物同定の手法および結果

次に、海岸、海底部において採取された土砂の鉱物組成を同定し、供給源である河川上流の地質との比較を交えながら長期的土砂移動の実態を推定する。分析用の試料としては、北茨城海岸から夏井海岸までの海岸域、駿川・夏井川流域および勿来海岸海域の100か所を超える地点の表層底質を採取した。海岸部では満潮時の汀線付近の表層底質をスコップで採取し、海域では船からスミス・マッキンタイヤ式採泥器を用いて採取した。採取した底質のうち鉱物同定の対象としたサンプルの採取地点を図-24に示す。

鉱物分析には、偏光顕微鏡で各鉱物の屈折率の違いなどを利用して一粒ごとに同定する手法、試料をすりつぶしてX線回折法や走査型電子顕微鏡により構成成分の割合を同定する手法(熊谷ら, 1997)などがある。ここでは、サンプルを偏光顕微鏡で直接観察し、光学的・構造的性質からひとつひとつの鉱物を決定する方法を採用した。まず、採取した底質を均一性が保たれるように二分法で小分けし、代表性のある少量をスライドガラス上に載せ、カバーガラスとの間に紫外線で硬化する樹脂を注入する方法で観察用簡易試料を作成した。そして、試料上の粒子を、偏光顕微鏡に接続した自動ポイントカウンタにより300~500個程度カウントし、鉱物含

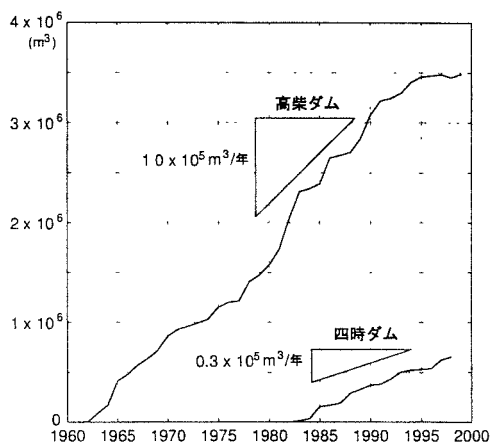


図-21 ダムの累積堆砂量

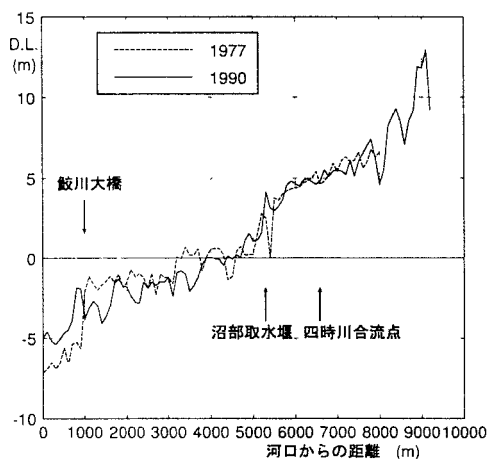


図-22 河床変動

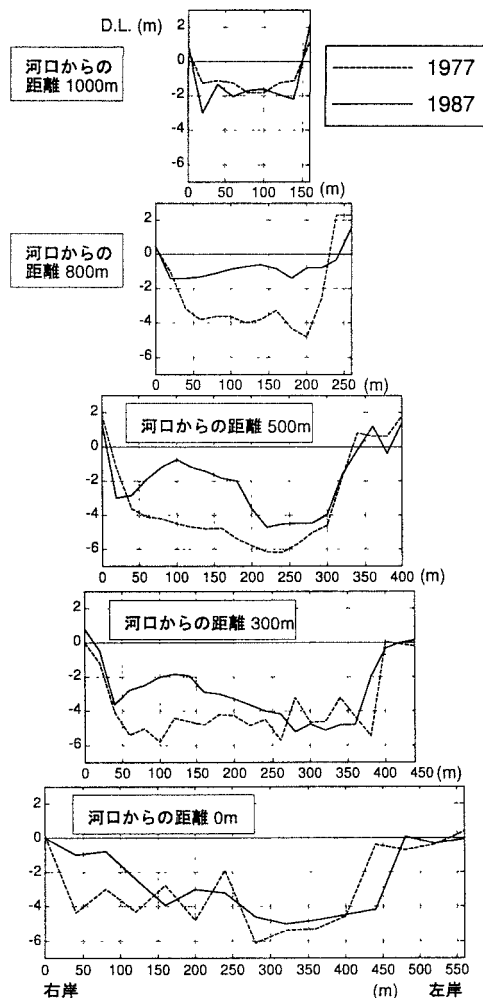


図-23 河口周辺河床の横断面

有率を測定した 計数分析に先立ち、予備観察をおこなうとともにX線回折法による成分分析を実施することにより、試料に含まれる代表的な鉱物種を10種類リストアップし、これらを計数の対象とした

このような簡易試料の分析では、薄片を作成する場合と異なり粒子の厚さが粒子ごとに異なるため、光学的性質による同定の精度は低下する。ただし、対象とするサンプルが300 μ m程度までの微細粒径のものであれば大部分の粒子の鉱物を同定することができるので、簡便に多くのサンプルを分析することができる利点がある。図-25は、偏光顕微鏡による簡易試料の観察例である。二枚の偏光板の相対角度を調整することにより、長石では縞状の双晶構造が明瞭に現れ、さらに屈折率の違いなどを利用して鉱物の同定が可能であることがわかる(都城・久城, 1972)。各地点の鉱物同定結果を個数比として図-26に示す。角閃石の含有率は後述の議論で特に重要な指標となるため、各地点の含有率をそれぞれ線で結んで見やすくしてある。なお、S-10地点のサンプルについては、薄片と簡易試料の両方を作成し、それぞれの同定結果と比較したところ、図-26中に示すように、両手法はほぼ一致した同定結果を与えることを確認した。

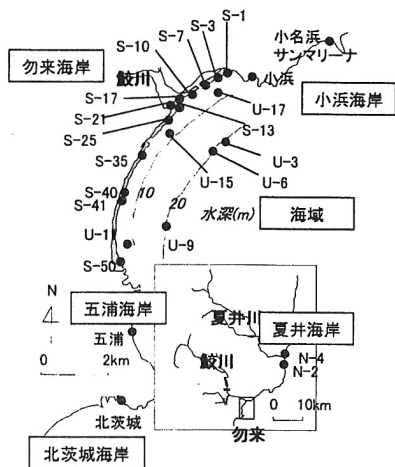


図-24 鉱物同定試料採取地点



0 200μm

図-25 偏光顕微鏡鉱物画像例(上:単偏光板,下:直交偏光板)

b) 周辺海岸との鉱物組成比較

鮫川・勿来海岸流砂系の比較対象として、夏井川・夏井海岸流砂系を取り上げる。夏井海岸は、勿来海岸の約40km北東に位置する南北方向10km余りの海岸であり、海岸中央部には流域面積750km²、幹線延長83kmの二級河川である夏井川が流入している。流砂系が中規模河川とポケットビーチとの組み合わせで構成されている

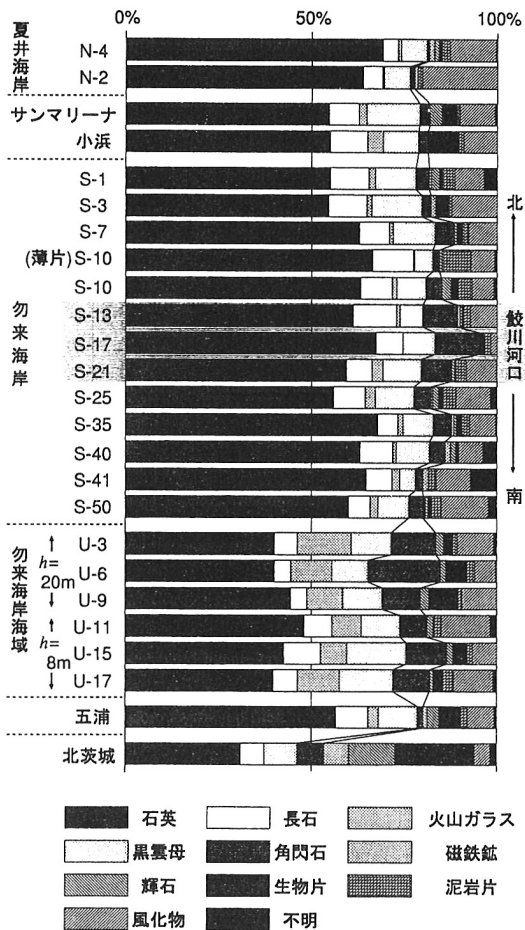


図-26 鉱物同定結果

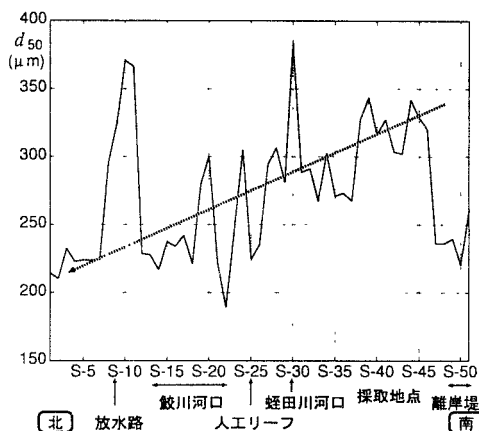


図-27 勿来海岸の底質中央粒径の分布

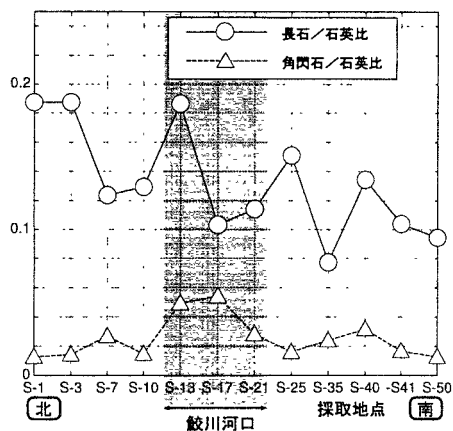


図-28 長石・角閃石の石英に対する含有率

点で、鮫川・勿来海岸流砂系と夏井川・夏井海岸流砂系とは類似しており、双方の系とも河川の土砂供給が海浜過程に影響を与えていると推測される。

図-26 に示した分析結果においては、鮫川河口部の砂州で長石や角閃石の含有率が高くなっており、これは鮫川から供給される長石や角閃石を多く含む土砂の影響であると推定される。一方、夏井海岸における底質の鉱物同定結果によると、角閃石の含有率はわずか1%程度であり、勿来海岸に比べて非常に少ない。夏井川上流と夏井海岸ではともに角閃石が非常に少ないのが共通していることから、夏井海岸を構成する土砂のかかなりの部分が夏井川起源である可能性が示唆される。このように、河川上流域の地質を代表する鉱物種に注目すれば、海岸土砂の供給源を推定できることがわかる。

次に、勿来海岸に隣接する小浜海岸、五浦海岸の2つの海岸と勿来海岸について、土砂の鉱物組成の比較を行う。小浜海岸、五浦海岸は、勿来海岸のそれぞれ北側と南側にある小規模な海岸であり、土砂供給を伴う大きな流入河川は存在しない。小浜海岸のさらに北東には、約2kmにわたる海食崖に続いて小名浜港サンマリーナがあり、そのわきに小さな砂浜がある。図-26によれば、小浜海岸やサンマリーナわきの砂浜底質の鉱物組成は勿来海岸北端のS-1、S-3のものと類似している。ただし、角閃石の含有率は夏井海岸より高いものの勿来海岸よりは少なく、生物片の含有率が高い。また、サンマリーナでは黒雲母の含有率が高いことが特徴的である。先に述べたように角閃石は鮫川から供給される特徴的な鉱物であるため、その含有率が一定量見られることは、小浜海岸やさらに北東の海岸に堆積する土砂の一部が鮫川由来であることを示していると考えられる。したがって、鮫川・勿来海岸流砂系からの沿岸漂砂の一部は竜宮岬を周りこんで北東の海岸に達していると考えるのが自然である。このような岬を越える沿岸漂砂は、小浜海岸への土砂供給の重要な要素となっているものと考えられる。

五浦海岸の底質の鉱物組成は、勿来海岸南端のS-40、41、50と類似している。ただし、五浦海岸では角閃石が少なく、生物片が多いのは小浜海岸の場合と同様である。したがって、小浜海岸の場合と同様、五浦海岸に堆積する土砂も一部は鮫川起源のものである可能性が高い。また、五浦海岸においては、輝石の含有率が勿来海岸南端のS-40、41、50に比べて高いことが特徴的である。五浦のさらに南にある北茨城海岸では輝石の含有率が非常に高いため、五浦海岸の土砂は北茨城海岸と部分的に同じ起源を有している可能性も高いと考えられる。このように、勿来海岸の隣接海岸においては、それ以外の供給源の影響も考えられるものの、鮫川・勿来海岸流砂系の土砂が部分的に供給されていることがわかった。

4.5 沿岸漂砂の卓越方向

図-27は、勿来海岸汀線部における底質中央粒径の分布を示したものである。河口部や放水路近傍では粒径が粗く、離岸堤や人工リーフの背後では粒径が細くなる傾向があり変動が激しいが、全般的には南から北へ向かうほど粒径が細くなる傾向がある。河川からの土砂供給が減少する中で、平均的には北向きの沿岸漂砂により南部の侵食と粗粒化が進んだためと推定される。沿岸漂砂の下手側にあたる北部では、流れの影響が強い放水路近傍を除いて、細粒底質の堆積が進んでいる。なお、両端の岬の崖は泥岩質の脆い岩で構成されているため、岬の侵食による海岸への供給土砂は海岸を構成する主成分とはなり得ない。

図-28は、勿来海岸汀線部で採取した底質に対して長石と角閃石の割合を石英に対する比として示したものである。長石は鉱物の中で風化しやすいものであることから(Siever, 1995)、長石の含有率が高い土砂は新しい堆積土砂、長石の含有率が低い土砂は古い堆積土砂であることになる。勿来海岸においては平均的な沿岸漂砂は北向きであると考えられるが、北向き沿岸漂砂によって北側に河川から供給された新しい土砂が堆積し、南側に古い土砂が残るとすれば、北側の長石の含有率の方が相対的に高くなると考えられる。図-28の長石／石英比は北部で高く、南部で低くなる傾向が見られることから、長石を多く含む河川からの供給土砂が北向きの沿岸漂砂によって輸送されている土砂移動機構との関連が確認できた。一方、角閃石／石英比を見ると、河口周辺で高いものの、河口の北側と南側では明確な含有率比の差が認められない。これは、角閃石は長石に比べて風化しにくいためであると考えられる。

さらに、海岸と海域における鉱物組成を比較することにより、河川から供給される土砂は粒径や比重の違いにより選択的に輸送され、海域の底質は水深に応じて特徴的な組成を示すことがわかった(梶村ら、2001)。したがってこれまでに述べた表層底質の分析に加えて柱状コアの分析などにより鉱物組成の鉛直構造を検討すれば、海岸の形成機構に関する重要な履歴情報を得ることができる。

5. おわりに

海岸の変形は変動を伴いながら長期にわたって進行するため、その機構の解明は長期データの分析に基づく必要がある。しかし海岸では深浅測量データでも高々30年程度の蓄積があるのみで、場合によっては、波浪外力や地形測量データが全く無く、地形図や空中写真のみに頼らざるを得ない場合も多い。海岸の底質には過去の侵食・堆積の履歴が残されている場合があり、これらの情報を効率良く抽出すればこれまでは得られなかった貴重な手がかりをつかむことができると考えられる。海岸堆積物調査に関しては、測量技術、分析技術、試料採取技術の進歩により、土砂の量のみでなく質の議論ができるようになった。底質の採取は波浪データの取得や地形測量に比べると比較的少ない労力で実施できることから、効率的に情報を抽出できる標準的かつ簡便な調査法を確立できれば、長期的な海岸過程に関する理解が飛躍的に進むと期待される。流砂系の環境保全の第一歩は、環境の基盤要素であり栄養塩などの輸送媒体となる土砂の移動を、量と質の両面において流域と沿岸域で一貫させることである。本稿で述べたように、海岸堆積物の調査は流域と沿岸域を接続する貴重な情報を提供するものであるため、その情報は広い領域で一貫した計画を立てるうえでも重要であり、さらに長い時間スケールを対象とする地質学・地形学の知識と海岸工学の分析を結びつける上でも重要な役割を果たす。標準的な分析手法や標本の保存システムを確立することなどに戦略的に取り組む必要がある。

参考文献

- Almagor, G. and B. Schilman(1995) Sedimentary structures and sediment transport across the continental slope of Israel from piston core studies, *Sedimentology*, Vol. 42, pp. 575-592.
- Almagor, G., D. Gill and I. Perath(2000). Marine sand resources offshore Israel, *Marine Geosources and Geotechnology*, Vol. 18, pp. 1-42.
- Bondevik, S., J.I. Svendsen and J. Mangerud(1997) Tsunami sedimentary facies deposited by the Storegga tsunami in shallow marine basins

- and coastal lakes, western Norway, *Sedimentology*, Vol. 44, pp. 1115-1131.
- Chagué-Goff, C., S.L. Nichol, A.V. Jenkinson and H. Heijnis(2000): Signatures of natural catastrophic events and anthropogenic impact in an estuarine environment, New Zealand, *Marine Geology*, 167, pp. 285-301.
- Critelli, S., E.L. Pera and R.V. Ingersoll(1997): The effects of source lithology, transport, deposition and sampling scale on the composition of southern California sand, *Sedimentology*, Vol. 44, pp. 653-671.
- Dawson, A.G., S. Shi, S. Dawson, T. Takahashi and N. Shuto (1996). Coastal sedimentation associated with the June 2nd and 3rd, 1994 tsunami in Rajegwesi, Java, *Quaternary Science Reviews*, Vol. 15, pp. 901-912.
- Dominey-Howes, D., A. Cundy and I. Croudace(2000): High energy marine flood deposits on Astypalaea Island, Greece. possible evidence for the AD 1556 southern Aegean tsunami, *Marine Geology*, 163, pp. 303-315.
- Fan, P-F(1976): Recent silts in the Santa Clara River drainage basin, Southern California: A mineralogical investigation of their origin and evolution, *J Sedimentary Petrology*, Vol. 46, No. 4, pp. 802-812.
- Guillén, J. and J.A. Jiménez(1995): Processes behind the longshore variation of the sediment grain size in the Ebro Delta coast, *J Coastal Research*, Vol. 11, No. 1, pp. 205-218.
- Guillén, J. and A. Palanques(1996). Short- and medium-term grain size changes in deltaic beaches (Ebro Delta, NW Mediterranean), *Sedimentary Geology*, 101, pp. 55-67.
- Hagadorn, J.W., L.D. Stott, A. Sinha and M. Rincon(1995): Geographical and sedimentologic variations in inter-annually laminated sediments from Santa Monica Basin, *Marine Geology*, 125, pp. 111-131.
- Liu, J.T., P.B. Yuan and J.-J. Hung(1998): The coastal transition at the mouth of a small mountainous river in Taiwan, *Sedimentology*, Vol. 45, pp. 803-816.
- Liu, J.T., J.-S. Huang, R.T. Hsu and J.-M. Chyan(2000). The coastal depositional system of a small mountainous river: a perspective from grain-size distributions, *Marine Geology*, 165, pp. 63-86.
- Minoura, K., V.G. Gusiakov, A. Kurbatov, S. Takeuti, J.I. Svendsen, S. Bondevik and T. Oda (1996): Tsunami sedimentation associated with the 1923 Kamchatka earthquake, *Sedimentary Geology*, 106, pp. 145-154.
- Nakayama, F., K. Shigeno, K. Satake, K. Shimokawa, S. Kotabashi, S. Miyasaka and M. Ishii(2000): Sedimentary differences between the 1993 Hokkaido-nansei-oki tsunami and the 1959 Miyakojima typhoon at Taisei, southwestern Hokkaido, northern Japan, *Sedimentary Geology*, Vol. 135, Nos. 1-4, pp. 255-264, in *Special Issue, "Seismoturbidities, Seismites and Tsunamites"*, edited by Shiki, T., M.B. Cita and D.S. Gorsline.
- Oldfield, F., B.A. Maher and P.G. Appleby(1989) Sediment source variations and lead-210 inventories in recent Potomac Estuary sediment cores, *J Quaternary Science*, Vol. 4, No. 3, pp. 189-200.
- Palanques, A., F. Plana and A. Maldonado(1990) Recent influence of man on the Ebro margin sedimentation system, northwestern Mediterranean Sea, *Marine Geology*, 95, pp. 247-263.
- Rice, R.M., D.S. Gorsline and R.H. Osborne(1976): Relationships between sand input from rivers and the composition of sands from the beaches of Southern California, *Sedimentology*, 23, pp. 689-703.
- Rossetti, D.D.F., A.M. Góes, W. Truckenbrodt and J. Anaisse Jr.(2000) Tsunami-induced large-scale scour-and-fill structures in Late Albian to Cenomanian deposits of the Grajaú Basin, northern Brazil, *Sedimentology*, Vol. 47, pp. 309-323.
- Sanderson, P.G. and I. Elhot(1999): Compartmentalisation of beachface sediments along the southwestern coast of Australia, *Marine Geology*, 162, pp. 145-164.
- Sharma, P., L.R. Gardner, W.S. Moore and M.S. Bollinger(1987) Sedimentation and bioturbation in a salt marsh as revealed by ^{210}Pb , ^{137}Cs , and ^7Be studies, *Limnology and Oceanography*, 32(2), pp. 313-326.
- Siever, R. 著, 立石雅昭訳 (1995). 砂の科学, SAライブラリー 15, 東京化学同人, 240p.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1971) Predominant direction of littoral transport along Kujukuri beach, Japan, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 14, pp. 107-117.
- Sunamura, T. and K. Horikawa (1972) Improved method for inferring the direction of littoral drift from grain size properties of beach sands — A study on the prevailing direction of littoral drift along the Kashiwazaki coast, Japan (Report No. 2) —, *Annual Report of the Engineering Research Institute, Univ. of Tokyo*, Vol. 31, pp. 61-67.
- Wheeler, A.J., F. Oldfield and J.D. Orford(1999): Depositional and post-depositional controls on magnetic signals from saltmarshes on the north-west coast of Ireland, *Sedimentology*, Vol. 46, pp. 545-558.
- 芦田和男・高橋保・道上正規 (1983) : 河川の土砂災害と対策—流砂・土石流・ダム堆砂・河床変動—, 森北出版, 防災シリーズ 5, 260p.
- 荒巻 孚・鈴木隆介 (1962) : 海浜堆積物の分布傾向からみた相模湾の漂砂について, 地理学評論, 第35巻, 第1号, pp. 17-34.
- 井内美郎 (1993)・湖底・湖底堆積物の新しい調査法, アーバンクボタ, 32, pp. 30-37.
- 井島武士・佐藤昭二・田中則男 (1964) : 鹿島港海岸の漂砂について, 第11回海岸工学講演会講演集, pp. 175-180.
- 今村文彦・箕浦幸治・高橋智幸・首藤伸夫 (1997a)・最近の津波による土砂移動に関する現地調査, 津波工学研究報告, 14, pp. 89-100.

- 今村文彦・箕浦幸治・高橋智幸・首藤伸夫(1997b): エーグ海における歴史津波堆積物に関する現地調査, 津波工学研究報告, 14, pp. 33-49.
- 岩生周一・松井寛(1961): 5 萬分の 1 地質図幅説明書, 平・川前(付井出), 地質調査所, 103p.
- 宇多高明・住谷迪夫・小林洋三(1986): 茨城県における海浜変形の実態, 地形, 第 7 巻第 3 号, pp. 141-163.
- 宇多高明(1997): 日本の海岸侵食, 山海堂, 442p
- 大熊孝(1981): 近世初頭の河川改修と浅間山噴火の影響, アーバンクボタ, 19, pp. 18-31.
- 大嶋和雄・横田節哉(1978): 北海道石狩湾の堆積物, 地質調査所月報, 第 29 巻第 8 号, pp. 501-529.
- 大平明夫・海津正倫(1999): 北海道北部, 大沼周辺低地における完新世の相対的海水準変動と地形発達, 地理学評論, 72A-8, pp. 536-555.
- 梶村徹・佐藤慎司・中村匡伸・磯部雅彦・藤田龍(2001): 鮫川・勿来海岸流砂系の土砂動態と長期海浜過程, 土木学会論文集(投稿中).
- 加藤一正・柳嶋慎一・栗山善昭・浅倉弘敏・村上裕幸・藤田誠(1987): 波崎漁港から日川浜海岸にかけての前浜地形と底質粒径, 港湾技術研究所漂砂研究室リポート, 41p.
- 金井豊・井内美郎・片山肇・斎藤文紀(1995): ^{210}Pb , ^{137}Cs 法による長野県諏訪湖底質の堆積速度の見積り, 地質調査所月報, 第 46 巻第 5 号, pp. 225-238.
- 加納博・黒田吉益・宇留野勝敏・瀧木輝一・蟹沢聡史・丸山孝彦・梅村隼夫・光川寛・瀬戸延男・大平芳久・佐藤茂・一色直記(1973): 竹貫地域の地質, 地域地質研究報告, 地質調査所, 109p.
- 茅根創・山室真澄・松本英二(1987): 房総半島南東岸における旧江線の指標としてのヤッコカンザシ, 第四紀研究, 26(1), pp. 47-57
- 熊谷幸博・水村和正・館崇暁(1997): 地球化学元素を用いた砂移動方向調査法に関する研究, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 1266-1270.
- 斎藤文紀・池原研(1992): 河川から日本周辺海域への堆積物供給量と海域での堆積速度, 地質ニュース, 452 号, pp. 59-64.
- 斎藤文紀・池原研・片山肇・松本英二・揚作升(1994): 東シナ海陸棚堆積物に記録された黄河の河道変遷と人為的影響, 地質ニュース, 476 号, pp. 8-16.
- 貞方昇(1996): 歴史時代における人類活動と海岸平野の形成, —鉄穴流しを中心に—, 小池一之・太田陽子編「変化する日本の海岸」, 古今書院, pp. 121-136.
- 佐藤昭二・田中則男(1962): 水平床における波による砂移動について, 第 9 回海岸工学講演会講演集, pp. 95-100.
- 佐藤昭二・入江功・杉山茂信(1967): 天然放射能による漂砂の供給源および卓越方向の推定について, 第 14 回海岸工学講演会講演集, pp. 300-305
- 佐藤昭二・入江功・堀江毅(1970): 富山海岸における漂砂源と卓越方向について—海岸踏査と底質分析とによる検討—, 第 17 回海岸工学講演会論文集, pp. 297-303.
- 佐藤昭二・田中則男・佐々木克博(1974): 鹿島港建設に伴う海底地形の変化について—事例研究—, 港湾技術研究所報告, 第 13 巻, 第 4 号(2), pp. 3-78.
- 佐藤慎司・笠井雅広・河野龍男・諸田勇・加藤俊夫・桜庭雅明(1999): 駿河海岸和田鼻地先における砂礫の粒径別移動特性, 海岸工学論文集, 第 46 巻, pp. 526-530.
- 佐藤慎司・前田亮・磯部雅彦・関本恒浩・鳥居謙一・山本幸次(2000a): 鹿島灘南部海岸の地形形成機構に関する現地調査, 土木学会論文集, No. 663/II-53, pp. 89-99.
- 佐藤慎司・前田亮・磯部雅彦・関本恒浩・笠井雅広・山本幸次(2000b): 利根川河口部の漂砂機構と波崎海岸への土砂供給の実態, 海岸工学論文集, 第 47 巻, pp. 656-660.
- 佐藤慎司・Harry Yeh・加藤史訓(2001): 利根川河口周辺沿岸域における浮遊懸濁物質の挙動に関する現地観測, 海岸工学論文集, 第 48 巻(印刷中).
- 佐藤芳信・真野明・沢本正樹(1998): 阿武隈川河口沖合における土砂堆積特性, 海岸工学論文集, 第 45 巻, pp. 611-615.
- 重野聖之・七山太・廣田勲(1999): 塩ビパイプと速乾性ポンドを用いた未固結砂礫の定方位柱状試料採取法, 地質ニュース, 第 542 号, 39-45.
- 鈴木泰輔(1985): 石狩湾堆積物の重鉱物組成, 地質調査所月報, 第 36 巻第 7 号, pp. 395-413.
- 鈴木泰輔・斎藤文紀(1987): 霞ヶ浦湖底堆積物の重鉱物組成と供給源, 地質調査所月報, 第 38 巻第 3 号, pp. 139-164.
- 平朝彦(1990): 日本列島の誕生, 岩波新書, 226p.
- 田中茂信・佐藤慎司・川岸眞一・石川俊之・山本吉道・浅野剛(1997): 石川海岸における漂砂機構, 海岸工学論文集, 第 44 巻, pp. 661-665.
- 田中久夫・長谷川正・木村澄枝・岡本郁栄・坂井陽一(1996): 新潟砂丘の形成史, 第四紀研究, 35(3), pp. 207-218.
- 長岡信治・前杵英明・松島義章(1991): 宮崎平野の完新世地形発達史, 第四紀研究, 第 30 巻, 第 2 号, pp. 59-78.
- 中山正民(1962): 熊野浦海岸における海浜堆積物について, 地理学評論, 第 30 巻, 第 12 号, pp. 605-617.

- 七山 太・重野聖之(1999)・千島海溝沿岸，霧多布湿原において確認された先史・歴史津波?堆積物，地質ニュース，第 542 号，pp 1-4.
- 新潟古砂丘グループ(1979)：砂丘と平野，アーバンクボタ，17，pp. 12-15.
- 西畑正文・山室真澄・茅根 創(1988)：三浦半島西岸および南岸における旧汀線の指標としてのヤッコカンザシとベンチ，第四紀研究，27(1)，pp. 31-38.
- 西村裕一・宮地直道(1998)：駒ヶ岳噴火津波(1640 年)の堆積物中の痕跡，月刊海洋，号外 No. 15，pp. 172-176.
- 日本第四紀学会編(1993)．第四紀試料分析法，東京大学出版会，556p.
- 藤 則雄(1970) 能登・加賀海岸の海浜堆積物の供給と漂移，金沢大学日本海域研究報告，第 2 号，pp. 1-27
- 藤田 龍・熊谷隆宏・佐藤慎司・磯部雅彦・梶村 徹(2001)・勿来海岸における波・流れと土砂移動機構に関する現地観測，海岸工学論文集，第 48 卷(印刷中).
- 増田富士雄・横川美和(1988)：地層の海浜堆積物から読み取れるもの，月刊地球，110 号，pp 523-530
- 都城秋穂・久城育夫(1972)・岩石学 I，共立全書，219p.
- 李在炯・入江 功・小野信幸・村上啓介(1999)．底質分析による広域の漂砂特性調査法について，海岸工学論文集，第 46 卷，pp 656-660.
- 山下俊彦・新山雅紀・菅沼 剛・早川哲也(2000)．石狩川から供給された粒径別土砂の河口沿岸域での堆積特性と土砂収支の試み，海岸工学論文集，第 47 卷，pp 676-680.
- 山本幸次・張達平・田中茂信(1995)．富士海岸における底質の分布特性について，土木学会第 50 回年次学術講演会，II-434，pp 868-869
- 山本幸次・張達平・佐藤慎司・田中茂信(1998)：海岸における底質の分級に関する研究，土木研究所資料，第 3592 号，78p
- 山本幸次・佐藤慎司・野口賢二・宮野正実(1999)：熊野川を土砂供給源とする海岸の海浜変形と砂礫層厚，海岸工学論文集，第 46 卷，pp 666-670.
- 山本幸次・鳥居謙一・笠井雅広・佐藤慎司(2000)・柱状コア採取と音波探査に基づく鹿島灘沿岸の堆積物特性の把握，海岸工学論文集，第 47 卷，pp 651-655.
- 山本幸次・鳥居謙一・佐藤慎司・田中 晋・宮野正実(2001)・流砂系における堆積物調査手法に関する研究，海岸工学論文集，第 48 卷(印刷中)