

鮫川・勿来海岸流砂系の土砂動態と 長期海浜過程

梶村 徹¹・佐藤慎司²・中村 匡伸³・磯部雅彦⁴・藤田 龍⁵

¹学生会員 東京大学大学院修士課程 工学系研究科社会基盤工学専攻 (現 (株) みずほファイナンシャルグループ)

²正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒 113-8656 文京区本郷 7-3-1)

³東京大学 工学部土木工学科 (現 同大学院修士課程)

⁴フェロー会員 工博 東京大学教授 新領域創成科学研究科環境学専攻 (〒 113-8656 文京区本郷 7-3-1)

⁵正会員 工修 五洋建設 (株) 技術研究所 (〒 329-2746 那須郡西那須野町四区町 1534-1)

近年海岸侵食が進んでいる福島県いわき市の勿来海岸と同海岸に流入する鮫川で構成される流砂系において、流砂系の土砂動態と長期的な海浜変形機構を解明することを目的として現地調査を実施した。流砂系の土砂量変化を解析した結果、海岸侵食量とダム堆砂量が同程度であり、さらに河口付近での土砂採取が河口周辺の汀線後退に影響していることが示された。さらに海岸堆積物の鉱物組成分析から、漂砂系内および隣接流砂系における土砂移動実態が推定された。

Key Words : long-term beach evolution, sand budget, alluvial deposits, mineral composition

1. 序論

戦後から現在にいたるまで、日本の多くの海岸において大規模な海岸侵食がみられる。しかし、土砂減少機構の定量的解明は必ずしも充分でない。その理由のひとつとして、広域かつ長期の連続的な水理現象および土砂動態を調査することが非常に困難であることがあげられる。そのため高波浪の来襲等による短期土砂移動現象と長期海浜過程との関連が明らかにされていない。またもうひとつの理由として、土砂動態の分析にあたって河川と海岸の接続を考慮した議論が不十分な点があげられる。主要な土砂供給源である河川土砂の移動実態の解明は海浜過程の推定に不可欠である。しかしながら、大規模な出水等に伴う河川からの土砂供給量や、その際の河口部における水理現象が明らかでないことから、河川供給土砂の海浜過程への影響は定量的な評価が確立していないのが現状である。

そこで本研究では、河川と砂浜海岸を一連の流砂系としてとらえ、系全体での土砂動態の解明を通じて長期海浜過程の推定を目指した。研究対象としては福島県南部に位置する鮫川・勿来海岸流砂系を選んだ。鮫川および勿来海岸では、河口周辺の水理現象と短期的な土砂移動に関する調査事例はあるものの^{1), 2), 3)}、河川上流域から海岸を含む広域を対象とする調査は例がない。本研究では、大きく分けて2つのアプローチを試みた。第一に、土砂量評価に基づく長期海浜過程の推定である。具体的には、過去の空中写真、海岸・河川の測量データやダム堆砂量データを用い、土砂供給量や

土砂移動量を評価するとともに、それをもとに長期海浜過程の推定を行った。第二に、底質特性分析に基づく長期海浜過程の推定である。すなわち海岸および海底の底質を採取し、その鉱物種や粒度等の特性から土砂移動機構の推定を試みた。底質特性分析により長期海浜過程を検討した研究には、粒度分布と漂砂の卓越方向の関連を議論した研究^{4), 5)}、河口部の複雑な土砂移動機構を推定した研究^{6), 7), 8)}、鉱物組成などから漂砂系内での土砂移動実態を推定した研究^{9), 10)}など多くの実績があるが、多点のサンプル分析と河道やダムを含む測量データや空中写真、波浪データなどを組み合わせる総合的に長期海浜過程を分析するのが本研究の特色である。

2. 鮫川・勿来海岸流砂系の概要

(1) 流砂系の地勢および構造物建設の経緯

本研究で研究対象とした勿来海岸は、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。勿来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状の砂浜海岸であり、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-1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

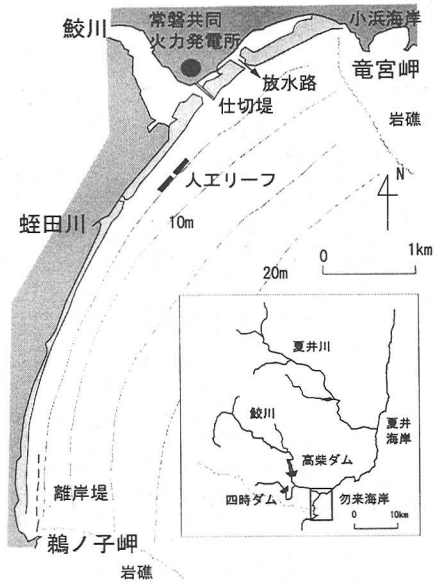


図-1 鮫川・勿来海岸流砂系の概要

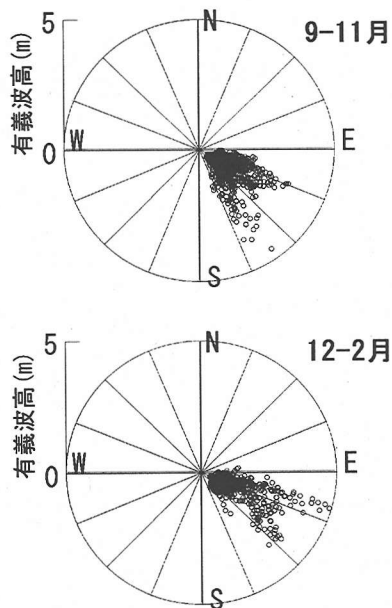


図-2 入射波の季節特性 (1998年)

年に建設された四時ダムが存在する。

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。南端部の鵜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。

(2) 入射波の年間特性

勿来海岸漂砂系における漂砂外力の傾向を把握するために、勿来海岸への入射波と相関性が高いとみられる、勿来海岸の北東約9kmに位置する小名浜港水深20m地点での1998年の年間波浪データを解析した。図-2に、高波浪の出現頻度の高い秋季(9月から11月)および冬季(12月から2月)における有義波高・平均波向分布を示す。この結果から、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可能性が高いことが読み取られる。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、秋季には特に南部で北向きの沿岸漂砂が卓越すると考えられる。実際2000年8月～9月に著者らが実施した波・流れ・濁度の集中観測¹¹⁾でも、南よりの高波浪の入射により北向きの土砂移動

が生じていることが確認されている。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。なお、小名浜港の観測データから底層の平均流速についても解析したが、特徴的な強い流れは観察されなかったことから、当海岸では入射波の波高および波向の変動が土砂移動を支配する主要因であると結論された。

3. 長期汀線変化の分析

過去数十年間での長期の海浜過程を明らかにするために、現地海岸の空中写真を戦後まもなくより約5年から10年間隔で収集し、その汀線変化を分析した。図-3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。写真ごとのゆがみは、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た。また、砂浜領域の抽出にあたっては、写真上の砕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-4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

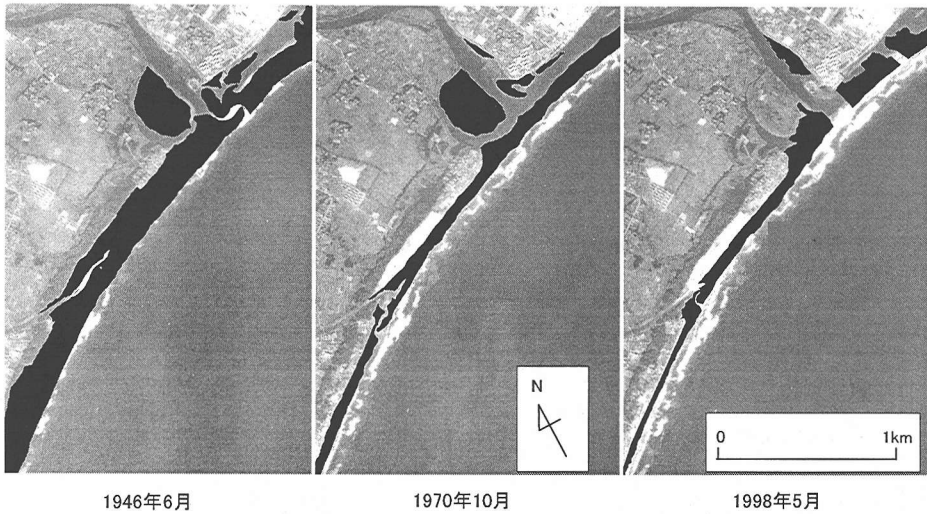


図-3 砂浜領域の変遷

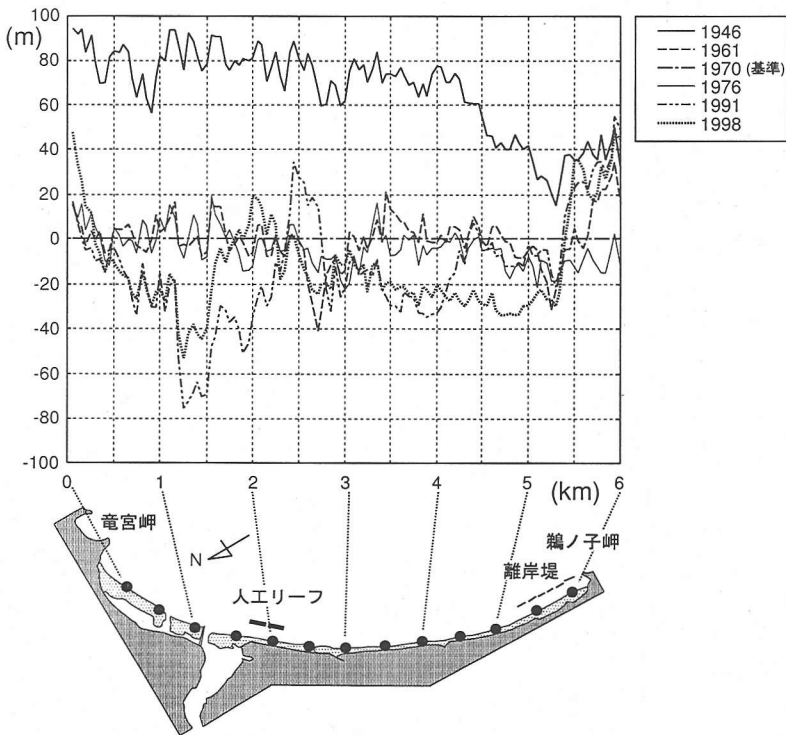


図-4 汀線変化の変遷

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

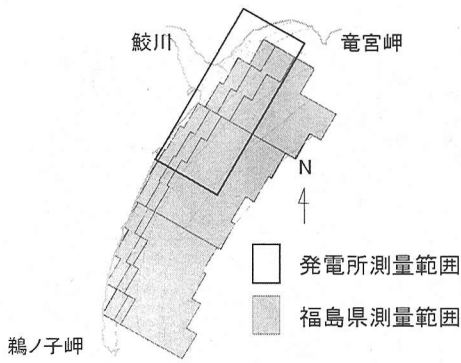


図-5 収集データの測量範囲

口右岸で汀線が前進しているのは、人工リーフの効果によるものと考えられる。南部の汀線後退は、前節で示した南からの波浪の入射による北向き沿岸漂砂の卓越が原因であると推測できる。河口部の汀線後退の原因としては、河川からの土砂供給量が減少している可能性を指摘できる。また、図-3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。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-4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、これによって駿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。

4. 測量データに基づく中長期土砂移動実態の解明

(1) 深浅測量データの概要

本節では、土砂量ベースでの議論を通じて長期海浜過程の機構推定を行う。流砂系における土砂移動量を評価するために、海岸・河川における各種の測量データを収集した。海岸の測量データとしては、福島県による勿来海岸全域測量データ、および発電所による駿川河口付近測量データ¹²⁾を収集した。図-5にそれぞれの測量範囲を示す。福島県のデータは500mピッチの深浅測量データで、水深20m付近までの範囲の水深が測定されている。一方発電所のデータは50m四方間隔でのグリッドデータであり、水深10m程度までの範囲の水深が測定されている。これらの測量データはともに過去約20年間のものを収集した。測量間隔は福島県データがおおむね半年から2年おき、発電所データがおおむね3ヶ月から6ヶ月おきである。

データの一例として、図-6に1991年9月から1992年11月の間の差分深浅図および1992年11月の等深線

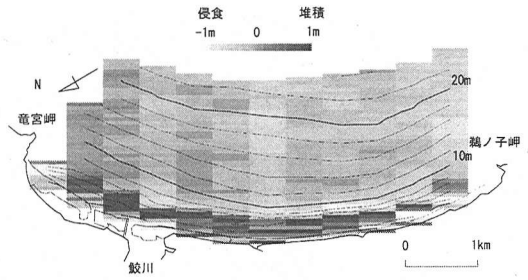


図-6 深浅測量データ解析の一例(高波浪来襲前後)

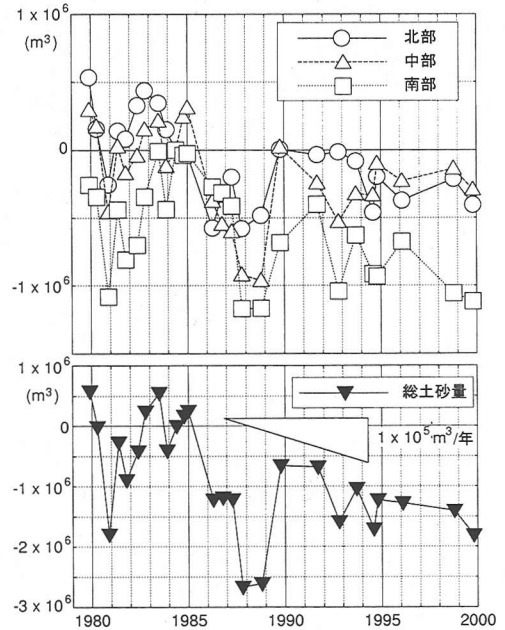


図-7 領域別土砂量変化

を重ねて示す。1992年10月には小名浜港における観測値で有義波高4.2mの高波浪が来襲している¹³⁾、それに伴う沖合および南部の侵食傾向が図に現れている。このように過去の測量データの連続的解析と波浪および出水記録を相互に解析することにより、高波浪や河川出水に伴う大規模な土砂移動現象を把握した。

(2) 漂砂系内土砂量の経年変化

福島県の測量範囲を図-5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-7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

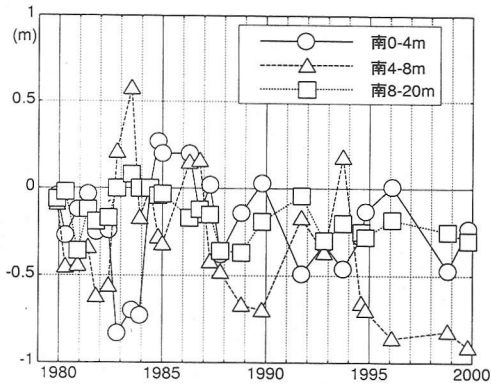


図-8 南部領域の平均地盤高変化

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。そこで図-8のように南部の平均地盤高変化を岸沖方向に3分割して調べると、沿岸部よりやや沖合での侵食が顕著であり、水深4~8mの領域の平均地盤高は累計で1m近く減少している。今回の対象領域のような単調な緩勾配砂浜海岸では、深浅測量の精度は高く、誤差は10cm程度と考えられることから、図-8の地盤高変化は有意なものと判断できる。このように、系全体での土砂減少は主として南部領域での侵食が主要因であることがわかる。

(3) 大規模土砂量変化機構の推定

前節で明らかになった長期的な土砂減少傾向の機構を推定するために、図-7において、総土砂量が大きく変化している大規模土砂減少・土砂増加期間を選び、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。土砂量変化の目安は、図-7の変動幅から考えて $4 \times 10^5 \text{m}^3$ とし、分析対象期間は、鮫川での仕切堤建設の影響が収束したと考えられる1984年6月以降とした。

まず大規模土砂減少の原因を検討する。大規模な土砂減少は1984年6月以降計5回生じたが、そのうち3回、すなわち1987年5月から1987年11月、1991年9月から1992年11月、1993年9月から1994年8月の各期間において、いずれの場合も期間中、南~南東からの有義波高4~5mの波が来襲している¹³⁾。それに伴って図-6と同様に南側および沖合の侵食が進み、一方で、北側と中央部はむしろ堆積傾向にあることが確認された。これは高波浪に伴う南から北への土砂移動が大規模土砂減少の原因であることを示している。なお、領域全体での総土砂量は減少していることから、北

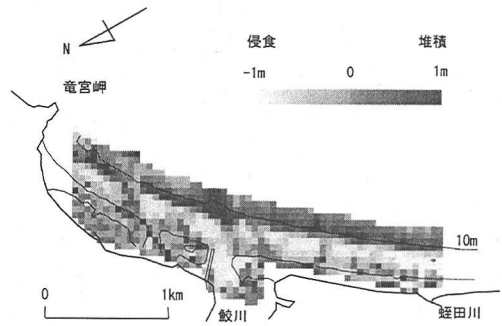


図-9 深浅測量データ解析の一例(河川大出水前後)

へ移動した土砂は、深浅測量の範囲外へ流出していることになる。図-6に示した侵食・堆積図では北端境界付近にかなりの量の堆積が見られることから、北へ輸送された土砂は測量範囲外である竜宮岬前面に堆積しているものと推定される。20年間の深浅測量結果から、同領域は常に露岩域であることから、これらの土砂の堆積は高波浪後の一時的なものと考えられ、その後の波や流れにより岬を周りこんだ小浜海岸側や沖合いへと輸送されているものと推定される。勿来海岸から隣接する小浜海岸への土砂輸送の存在については次節で再び議論する。

次に、大規模土砂増加の原因を推定する。大規模な土砂増加が起こった1988年11月から1989年11月、1992年11月から1993年9月の2回ともに、期間中に鮫川からの日平均流量 $170 \sim 340 \text{m}^3/\text{s}$ 程度の大規模出水がみられる¹²⁾。1980年から1985年までの調査によれば¹⁾、鮫川の河川固有流量の年平均値は約 $10 \text{m}^3/\text{s}$ であり、日平均流量 $100 \text{m}^3/\text{s}$ を超える洪水はその5年間に9回記録されている。これらの大規模出水時には、砂州のフラッシュや河川からの土砂供給によって測量範囲内の土砂総量が増えていると考えられる。実際、図-9に示した1989年5月と1989年8月の出水前後の差分深浅図によると、河川出水に伴い河口砂州の部分が侵食される一方でその周辺と水深約10mの沖合いに土砂が堆積している状況が読み取れる。1993年の出水時にも同様の土砂移動が見られたことから、河川出水が深浅測量範囲の総土砂量を増加させる要因であると推察される。

以上から、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ことが推論できる。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。なお、河口仕切堤周辺では、夏から秋にかけては南側でやや堆積傾

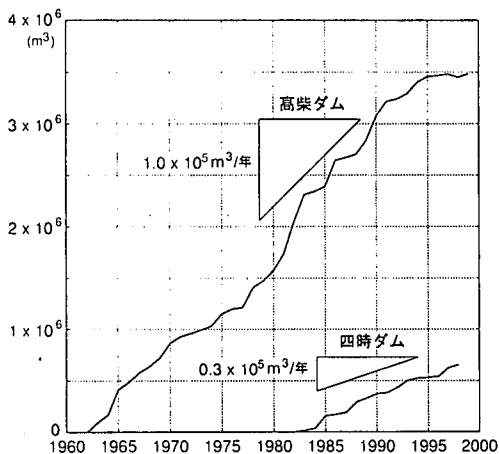


図-10 ダムの累積堆砂量

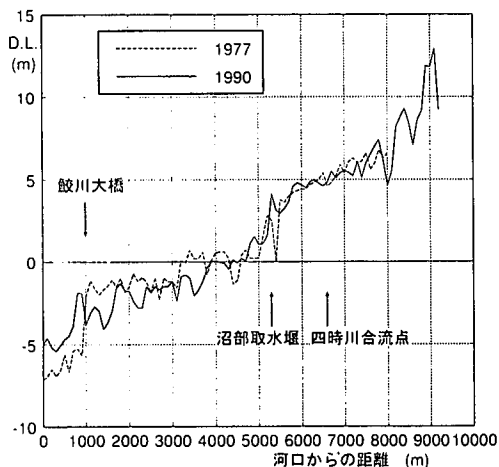


図-11 河床変動

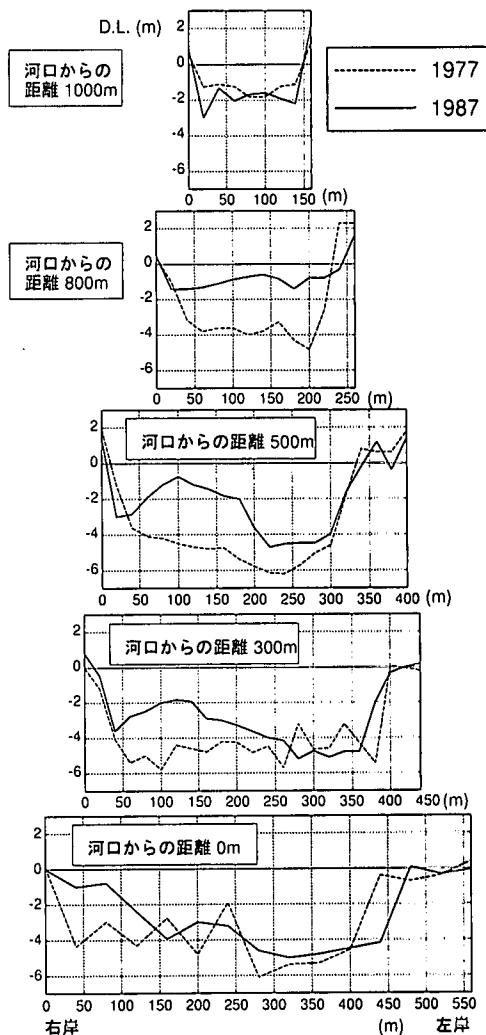


図-12 河口周辺河床の横断面

向、冬から春にかけては北側でやや堆積傾向となることが認められたが、いずれも局所的なものであり、大規模な地形変化は生じていないことが確認された。

(4) 河川からの土砂供給量の減少

前節でも述べたように、長期土砂量減少の機構を解明するにあたって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 upstream の2つのダムの堆砂量の経年データを入力し、鮫川の土砂供給能力の推定を試みた。図-10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 $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{年}$ 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ことが推論できる。

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、福島県により1977年と1990年に実施された河床測量データを入力した。図-11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-3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-12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。土砂採取量に関する詳細な記録は残存しないが、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 $4 \times 10^4 \text{m}^3$ /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¹⁴⁾。

5. 底質分析に基づく長期土砂移動実態の解明

(1) 海浜過程推定における底質分析の意義

流砂系における長期的土砂移動を考えるにあたって、河川から海岸へ供給される土砂の影響は極めて大きい。鮫川・勿来海岸流砂系においても、ダムの建設や河道土砂採取後に海岸の汀線後退がみられたことは既に指摘したとおりである。しかしながら、土砂供給源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。例えば河川でのダムの建設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なのが現状である。その原因の一つとしては、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ことが考えられる。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。

土砂の質に関する情報を追加する手法としては、比重、粒度、形状などの物理的な特性を検討すること^{15), 16)}に加えて、流砂系を構成する土砂の組成を分析し、各地点での組成を比較する鉱物分析の手法¹⁷⁾が有望である。この手法では、土砂の構成要素である鉱物を直接同定するため、河川や海岸、海底など流砂系内の各点における土砂の成分を把握することが可能であり、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可能性がある。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各地点で測定することにより、河川からの土砂供給の影響が及ぶ範囲を推定することができる。

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は鉱物組成分析が有効な手段となる。鉱物ごとに比重や粒度は一般に異なるので、海浜では波・流れの作用によってふるいわけがおり、場所により鉱物ごとに異なる分布を示す。

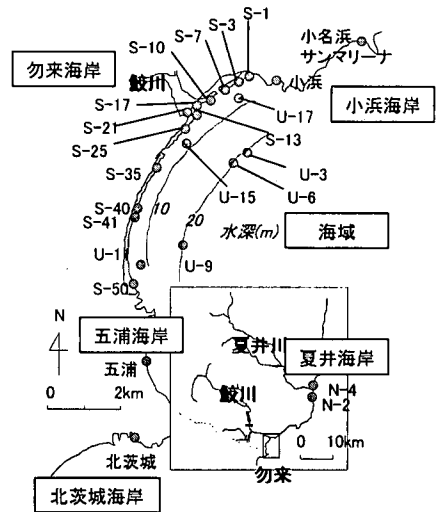


図-13 鉱物同定試料採取地点

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を推定することができる。

(2) 鉱物同定の手法および結果

鮫川・勿来海岸流砂系を主たる対象とし、海岸、海底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した。底質の採取は2000年8月24日と25日に実施し、北茨城海岸から夏井海岸までの海岸域、鮫川・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。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-13に示す。分析対象地点の選定にあたっては、近傍海岸との比較ができること、勿来海岸漂砂系内での沿岸方向および岸沖方向の土砂移動実態を推定できること、および土砂移動実態に与える河川の影響を考察できることに留意した。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。

同定手法としては、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。この手法の利点として、鉱物を破碎しないため粒子の粒度、円磨度のような物理的特徴も調べることができる点が挙げられる。サンプルの鉱物含有率の同定は、次のような手順で行った。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、代表性のある少量の試料から観察用試料を

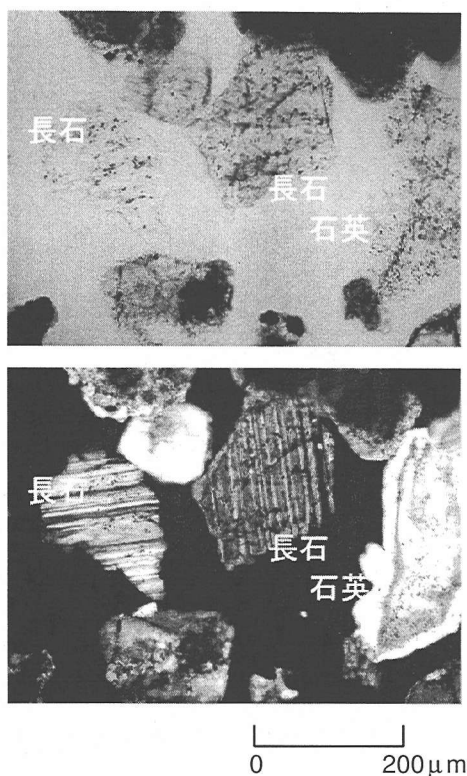


図-14 偏光顕微鏡鉱物画像例(上: 偏光板なし, 下: 偏光板あり)

作成した。岩石片などの鉱物同定では通常、厚さ 0.02～0.03mm の薄片を作成して観察用試料とする¹⁸⁾が、今回は数十点で採取した大量の試料を短期間で同定するため、厚みの調整を省いた簡易試料を観察対象とすることにした。すなわち、スライドガラス上に底質粒子を載せ、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作成した簡易試料をそのまま観察に用いた。そして各地点のサンプルについて試料上の粒子を、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、薄片の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可能であるので、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-14 は、偏光顕微鏡による簡易試料の観察例である。偏光板を

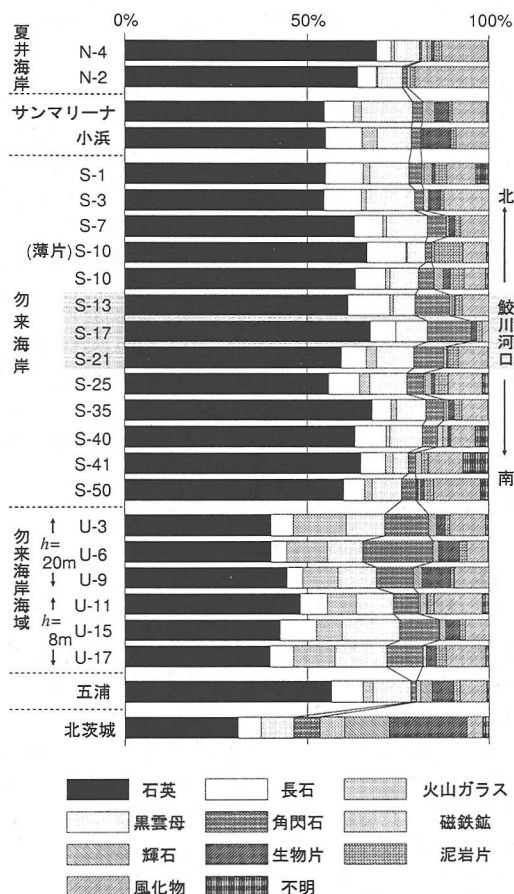


図-15 鉱物同定結果

使用することにより、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。各地点の鉱物同定結果を个数比として図-15 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-15 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。

(3) 隣接流砂系との鉱物組成比較

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

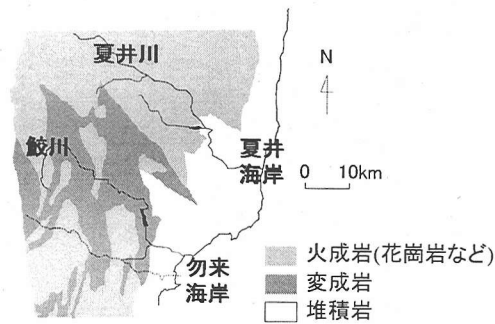


図-16 鮫川・夏井川上流部の地質¹⁹⁾

ている点で、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いる。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。

鮫川・夏井川流域の地質の概略を、図-16に示す¹⁹⁾。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²⁰⁾。

図-15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。

(4) 隣接海岸との鉱物組成比較

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、勿来海岸にお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ナがあり、そのわきに小さな砂浜がある。

図-15によれば、小浜海岸やサンマリ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のものと同

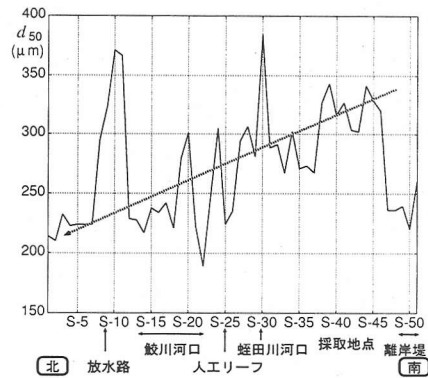


図-17 勿来海岸の底質中央粒径の分布

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。ただし、南端の鶴ノ子岬周辺には現在勿来漁港および平瀧漁港の防波堤が整備されているため、岬を周り込む土砂量は大幅に制限されていると考えられる。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が高いと考えられる。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。

(5) 沿岸方向土砂移動実態の推定

海岸部における沿岸漂砂の特性を、底質の中央粒径分布や鉱物組成から分析する。図-17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

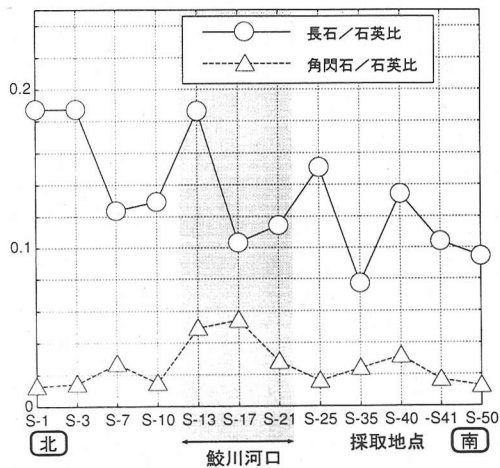


図-18 長石・角閃石の石英に対する含有率比

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、崖の侵食が海岸への土砂供給となっている可能性も考えられる。そこで、崖基部の表層の一部を採取して粒度分析を行ったところ、中央粒径は10-20 μm であり、海岸を構成する主成分とはなり得ないことが確認された。

図-18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²¹⁾、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新しい土砂が堆積し、南側に古い土砂が残ることによって北側の長石の含有率が相対的に高くなると考えられる。図-18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。

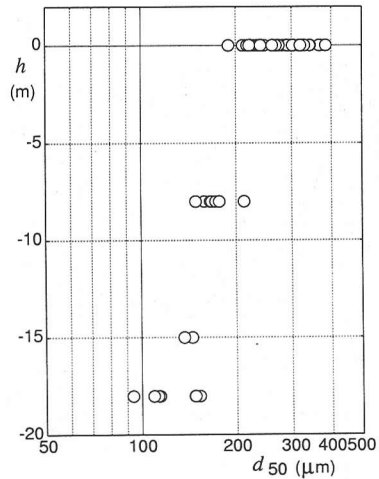


図-19 中央粒径の水深方向分布

(6) 岸沖方向土砂移動実態の推定

図-19は底質中央粒径 d_{50} の水深方向分布を示したものである。海岸部の底質は満潮時汀線付近で採取したものであるが、便宜上 $h=0\text{m}$ にプロットしてある。中央粒径は水深の増加ともないほぼ単調に減少し、水深15~20m付近では100~150 μm となる。このような底質の細粒化は、波による淘汰の結果であり、砂浜海岸で一般に見られる現象である²²⁾が、本研究ではさらに鉱物組成の変化と岸沖漂砂の関連を検討する。図-15によれば、海岸と海域で含有率に最も差がある鉱物が火山ガラスである。海岸部にはほとんど含まれていない火山ガラスが、海域では水深8m付近、水深20m付近双方のサンプルについて10%程度含まれている。火山ガラスは軽石および火山灰の成分であり、比重が1.0程度と非常に小さいのが特徴である。火山ガラスは磐梯山など近傍の火山の噴火に由来すると考えられるが、海域に達した火山ガラスは比重が小さいため波の作用によって沖に運搬されやすく、波浪の作用を強く受ける汀線部にはほとんど残らないと考えられる。

図-20および図-21はそれぞれ、海岸および海域における有色鉱物(黒雲母、角閃石、輝石)の割合を示したものである。両図を比較すると、海岸部では有色鉱物の割合が10~20%であるのに対し、海域では20~30%と高くなっている。特に角閃石の比率は海岸から沖側に向かって単調に増加している。これらの有色鉱物はいずれも石英に比べて比重の大きい重鉱物であることから、石英より粒径の小さな成分が選択的に沖合いに堆積しているものと考えられる。そこで、鉱物種ごとの粒度の違いを検討するために、U-15のサンプルを対象に、計500個の粒子について鉱物種を同定すると同時に、顕微鏡につけられたスケールで各鉱物の短径・

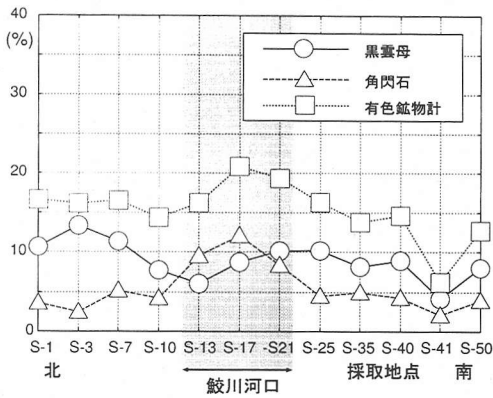


図-20 有色鉱物の含有率(海岸部)

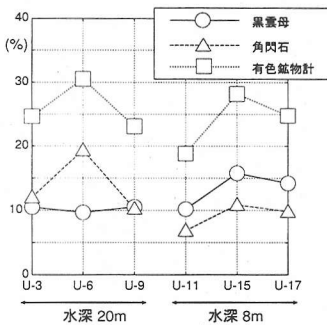


図-21 有色鉱物の含有率(海域)

表-1 鉱物の平均粒径(U-15地点)

鉱物	石英	長石	火山ガラス	黒雲母	角閃石
平均粒径(μm)	180	184	140	165	176

長径を読み取った。その結果、表-1に示すように、黒雲母や角閃石は、石英や長石に比べて平均粒径が若干小さめであることが確認された。

これらの分析から岸沖方向の土砂移動機構を考えると、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、水深に応じて特徴的な組成を示すものと考えられる。したがって柱状コアの分析²³⁾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情報を得ることができる。

6. 結論

本研究では、河川と海岸を一連の流砂系としてとらえ、河川からの土砂供給実態や供給土砂の河口部にお

ける移動実態の解明を交えて流砂系の長期土砂移動の実態解明を目指した。ポケットビーチ状の砂浜海岸と河川で構成される一連の流砂系として、鮫川・勿来海岸を主な研究対象領域とした。まず最初に、海岸における過去約50年の汀線変化を調べ、非平衡な海浜変形が進行していることを確認するとともに、その原因が波浪外力と河川からの土砂供給量の変化の両方に求められることを示した。そして河川流域と海岸における土砂変動量を解析するとともに偏光顕微鏡による海岸土砂の鉱物組成の同定などの底質特性分析を実施した。これらの解析から得られた主要な結論は以下の通りである。

- (1) 勿来海岸の土砂移動機構は、高波浪時の北向きの沿岸漂砂による系外への土砂流出と河川出水による土砂供給の両者のバランスで決定される。漂砂系内の土砂総量は近年減少傾向であり、その量は鮫川上流のダムにおける堆砂量と同程度である。河口周辺で実施された大規模な土砂採取も土砂供給量減少の一因である。
- (2) 河川上流域の地質と海岸土砂の鉱物組成との関連から、海岸への土砂供給源をある程度推定できる。鉱物の組成比は、河川上流域、河口、海岸、海域でそれぞれ異なる。これは、比重、粒度や化学的風化作用などの底質特性の違いにより、鉱物種ごとに土砂移動機構と堆積過程がかなり異なるためである。これらの特性を考慮して鉱物組成の分布を分析することにより、海岸における土砂輸送の特性を推定することができる。

本研究で用いた偏光顕微鏡による鉱物分析は、比較的簡便な調査と分析で多くの情報を得ることができるため、流砂系の土砂動態を解明する上で極めて有効な分析手法である。コアサンプリングによる堆積物中の鉱物組成の鉛直分布の調査などにも応用できると考えられ、さらにX線分析や年代推定などと組合せるなど、流砂系の土砂移動実態を解明するための手がかりはまだ相当に多く残されている。他の流砂系への適用とともに堆積土砂の質に関する調査手法の一般化が今後の課題である。

謝辞： 本論文は、土木研究所、茨城大学、五洋建設、東京大学が協同で実施した合同現地観測の結果の一部をとりまとめたものである。データの収集に際しては、福島県河川課、港湾技術研究所永井紀彦氏、福島県いわき建設事務所高久 博氏、鮫川水系ダム管理事務所、常盤共同火力(株)勿来発電所富岡一則氏、東日本測量(株)富岡徹雄氏の協力を得た。鉱物分析に際しては、東京大学新領域創成科学研究科正路徹也教授、理学系研究科永原裕子助教授、多田隆治教授、谷 健一郎氏の協

力を得た。現地観測に参加した多くの方々およびご協力いただいた関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 清水琢三, 横山博実, 近藤浩右, 鎌木 宏, 松原良夫: 仕切堤建設に伴う鮫川河口周辺の地形変化, 第 32 回海岸工学講演会論文集, pp. 395-399, 1985.
- 2) 清水琢三, 横山博実, 野谷 斎, 近藤浩右, 鎌木 宏: 鮫川河口部の短期的な地形変化に関する現地調査, 第 34 回海岸工学講演会論文集, pp. 332-336, 1987.
- 3) 田中 仁, 首藤伸夫: 鮫川河口部の水理現象に関する現地観測, 第 28 回海岸工学講演会論文集, pp. 535-539, 1981.
- 4) 藤 則雄: 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, 1970.
- 5) Sunamura, T. and Horikawa, K.: Predominant direction of littoral transport along Kujukuri beach, Japan, *Coastal Engineering in Japan*, Vol. 14, pp. 107-117, 1971.
- 6) 山下俊彦, 新山雅紀, 菅沼 剛, 早川哲也: 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 巻, pp. 676-680, 2000.
- 7) 佐藤芳信, 真野 明, 沢本正樹: 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, 1998.
- 8) Liu, J.T., Huang, J.-S., Hsu, R.T. and Chyan, J.-M.: The coastal depositional system of a small mountainous river: a perspective from grain-size distributions, *Marine Geology*, Vol. 165, pp. 63-86, 2000.
- 9) 大嶋和雄, 横田節哉: 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, 1978.
- 10) 熊谷幸博, 水村和正, 館 崇暁: 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, 1997.
- 11) 藤田 龍, 熊谷隆宏, 佐藤慎司, 磯部雅彦, 梶村 徹: 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 巻, 2001. (印刷中)
- 12) 常盤共同火力株式会社: 平成 11 年度勿来発電所周辺海浜調査報告書, 60p., 2000.
- 13) 港湾技術研究所: 全国港湾海洋波浪観測年報, 港湾技術研究所資料, 1983~1998.
- 14) 藤田光一: 流砂系における土砂動態のとらえ方と広域土砂動態制御への展望, 2000 年度 (第 36 回) 水工学に関する夏期研修会講義集, B-4-1~B-4-15, 2000.
- 15) 中山正民: 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, 1962.
- 16) 荒巻 宇, 鈴木隆介: 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, 1962.
- 17) 李 在炯, 入江 功, 小野信幸, 村上啓介: 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 巻, pp. 656-660, 1999.
- 18) 都城秋穂, 久城育夫: 岩石学 I, 共立全書, 219p., 1972.
- 19) 加納 博, 黒田吉益, 宇留野勝敏, 瀧木輝一, 蟹沢聡史, 丸山孝彦, 梅村集夫, 光川 寛, 瀬戸延男, 大平芳久, 佐藤 茂, 一色直記: 竹貫地域の地質, 地域地質研究報告, 地質調査所, 109p., 1973.
- 20) 岩生周一, 松井 寛: 5 萬分の 1 地質図幅説明書, 平・川前 (付 井出), 地質調査所, 103p., 1961.
- 21) Siever, R. 著, 立石雅昭訳: 砂の科学, SA ライブラリー 15, 東京化学同人, 240p., 1995.
- 22) 宇多高明: 日本の海岸侵食, 山海堂, 442p., 1997.
- 23) 山本幸次, 鳥居謙一, 笠井雅広, 佐藤慎司: 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 巻, pp. 651-655, 2000.

(2001. 3. 23 受付)

SAND MOVEMENT AND LONG-TERM BEACH EVOLUTION IN AN ALLUVIAL SYSTEM COMPOSED OF THE SAME RIVER AND THE NAKOSO COAST

Toru KAJIMURA, Shinji SATO, Masanobu NAKAMURA, Masahiko ISOBE
and Ryu FUJITA

A field investigation on sediment movement and beach evolution was performed in an alluvial system composed of the Same river and the Nakoso coast, Fukushima prefecture, which experienced significant beach erosion recently. Analyses on sand volume in the system revealed that the rate of decrease in sand on the beach is of the same order of the rate of accretion of sand in dam reservoirs and that the dredging of river bed near the rivermouth influenced nearby shoreline retreat. Sand movement processes were estimated from the distribution of mineral composition included in the sediment samples collected from the beach.