

手取川河口域周辺の海底地形変化に対する 河川土砂供給の影響に関する研究

由比政年* ・中谷 健** ・石田 啓***
山内正彦**** ・二俣 秀***** ・高橋 至*****

手取川河口域周辺の海底地形変動を経験的固有関数法に基づいて解析し、扇状地区間での砂利採取や上流部でのダム建設に伴う河川からの土砂供給変化の影響を検討した。長期的には、沿岸域の大部分で侵食傾向が確認され、手取川扇状地区間で過去に実施された砂利採取がほぼ全域に渡って非常に大きな影響を及ぼしてきたことが推定された。砂利採取禁止以後は、沖合 1 km 程度までの領域で地形が安定化する傾向が見られた。上流部でのダム建設以前には、侵食からの短期的な回復が、出水により比較的頻繁に繰り返されたが、ダム建設以降は出水頻度および規模の減少に伴って、海岸侵食の回復の機会が減少していることが確認された。

1. はじめに

海岸・河川および砂防域を含む広域流砂系における土砂動態を把握することは、沿岸域の土砂環境を長期的に維持・管理する上で本質的に重要である。しかしながら、土砂移動に伴う広域地形変化に対しては、相互に関連を持つ多数の要因が複雑な形で関与しており、不明な点も数多く残されている。こうした状況を打開し、今後、適切な土砂管理のあり方を確立するためには、流砂系内における土砂動態に関する検討を行い、適切な評価・予測モデルを構築して、不明部分の実態を一步步つて解明するための研究を継続的に実施することが必要である。

こうした観点から、本研究では、石川県手取川河口域周辺の沿岸域を対象にして、現地測量データの解析を行い、砂利採取およびダム建設に伴う河川からの土砂供給の変化が海底地形に及ぼす影響を解析して、その特徴を明らかにする。

2. 対象領域の概要

(1) 手取川流砂系の土砂移動に寄与する特徴的要素

手取川は、白山を源とし、扇状地を形成して日本海へ注ぐ一級河川であり、流路延長 72 km、流域面積約 800 km²、平均河床勾配 1/27 の急流河川である。手取川流砂系の土砂収支には、種々の要因が複雑に関与しており、その代表的要素として、以下のものを挙げることができる。

- ・山地河川部における砂防ダムの建設、
- ・上流部における貯水ダムの建設と堆砂、洪水調節、
- ・扇状地区間における砂利採取、
- ・日本海冬季季節風による高波浪、
- ・河口閉塞と導流堤建設、

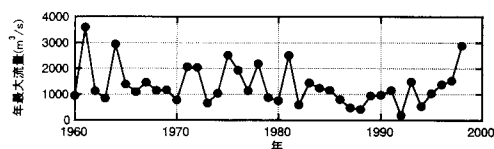
・周辺海岸の長期的侵食と離岸堤群の整備、

この他にも海岸部での砂利採取や飛砂の影響が宇多ら (2001, 2002) により指摘されている。

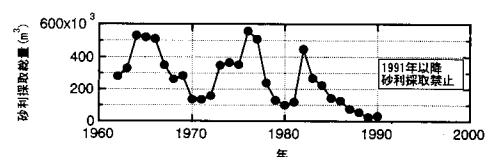
本研究では、この中でも、特に、扇状地区間における砂利採取および手取川ダムの建設に伴う河川土砂供給変化の影響に着目した。解析対象期間 (1960 年～2001 年) 中の手取川年最大流量の変化を図一 1 に示す。1980 年の手取川ダム供用開始以前は、2, 3 年に 1 回程度の割合で 2000 m³/s を越える規模の出水が確認されるが、ダム完成後は、海底地形にインパクトを与えるような規模の出水頻度は確実に減少している。図一 2 は、公称砂利採取量の経年変化を示している。1960 年代の高度成長期から 80 年代前半にかけて活発な砂利採取が実施されていたことがわかる。なお、河床低下の著しい進行により、1991 年以降、砂利採取は禁止されている。

(2) 河床・汀線・海岸土砂量の変動

予備検討として、次章での解析対象領域を包含する広領域における長期的地形変化特性を把握するために、1960 年～2001 年の間の手取川河床変動および石川海岸 (松任～根上) における汀線変動を深淺測量結果に基づいて解析した。期間全体にわたる手取川の河床変動は、全体に 1 m から 2 m 程度の低下傾向を示しており、全体で



図一 1 手取川年間最大流量の変化 (鶴来観測所)



図一 2 公称砂利採取量の変化

* 正会員 博(工) 金沢大学助教授 大学院自然科学研究科
** 正会員 石川県土木部
*** 正会員 工 博 金沢大学教授 大学院自然科学研究科
**** 正会員 国土交通省金沢河川国道事務所所長
***** 国土交通省金沢河川国道事務所調査一課長
***** 国土交通省金沢河川国道事務所調査一課

は 691 万 m^3 の河床低下となった。特に、砂利採取区間での河床低下が顕著に見られた。この期間の公称砂利採取総量は 761 万 m^3 、手取ダムへの堆砂量は 617 万 m^3 となっている。一方、この間の海岸土砂量の変動は、松任から根上にかけての区間で、1355 万 m^3 の減少を示している。この値は、およそ砂利採取量とダム堆砂量の和に相当する。1969 年以降の離岸堤群の設置により、離岸堤背後の汀線付近は回復し、汀線から沖側 1 km 程度までの領域は海底地形が安定化する傾向にある。しかしながら、さらに沖合の領域では、依然として侵食が進行していることが確認された。

3. 経験的固有関数法に基づく海底地形変化の解析

(1) 解析の手法

金沢河川国道事務所により 1960 年以降年 1 回秋季に実施されてきた深淺測量のデータを経験的固有関数法 (EOF: Empirical Orthogonal Eigen-Function Method) に基づいて解析し、海底地形の変遷を検討した。経験的固有関数法は、当初、気象学の分野で Winant ら (1975) らや Horel (1984) によって導入され、近年では、海岸工学分野での海底地形解析に多く適用されている (例えば、加藤・吉松, 1984; 横木ら, 1998; 北野ら, 1999; Dean・Dalrymple, 2002; 栗山ら, 2003; 内山・栗山, 2003 等)。

経験的固有関数法では、測量結果の地盤高を複数の固有モードの重ねあわせで表現する。ここで、変動に対する寄与率の大きい順に第 1 モード、第 2 モードと順位付けを行う。個々の固有モードは、時間の関数である時間係数と、空間の関数である固有関数の積の形に変数分離され、海底地形の時空間変動は以下のように表現される。

$$h_{ik} \approx \sum_{n=1}^N C_{nk}(t) e_{ni}(x) \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 h_{ik} は、 i 番目の測点における k 回目の深淺測量時の地盤高を表している。また、 e_{ni} は測点 i の位置における第 n モードの固有空間関数、 C_{nk} は k 回目の調査における第 n モードの時間係数である。なお、経験的固有関数法においては、固有関数の形をあらかじめ仮定することなく、場所ごと、時刻ごとに経験的にその形が決定される。これまでに、実数型および複素数型の解析手法が提案・活用されているが、ここでは、従来からよく用いられてきた実数型の手法を用いた。

(2) 断面地形変化の解析

まず、各測線上における深淺測量のデータを個別に取り扱って、断面地形変化の特性を検討した。今回解析の対象とした領域は、手取川河口部を中心として、沿岸方向約 5.5 km の範囲に含まれる計 27 本の測線である。解析にあたっては、各測線上で、岸沖方向 1 km に渡る対象

断面内を 50 等分し、地盤高の評価位置が解析対象期間を通じて一致するように原データを線形補間して、期間平均地形との差を取った後に EOF 解析を行った。ここでは、一例として、手取川河口中導流堤付け根から約 200 m 左岸側に位置する測線 20 (図-3) に対する解析結果を提示する。この測線上には海岸構造物が建設されておらず、現在も汀線の後退が進行して、北陸自動車道手取川橋脚付近の侵食が顕在化している地点である。

この測線上における海底地形の変遷を示す測量結果の例を図-5 に示す。また、解析期間 (1960 年～2001 年) 中の期間平均地盤高の分布を図-4 に示す。期間平均地形を見ると、汀線付近で 1/40 程度である海底勾配は沖に向けて徐々に緩やかとなっている。その後、水深 7 m 付近で平均地形が平坦となり、さらに沖側で再び緩やかな斜面へと変化する。図-4 の測量結果では、平均勾配が緩やかな区間で、バーやトラフの移動が活発に見られる。

次に、経験的固有関数法による解析結果の妥当性を検証するために、測量結果と比較してその再現性を検証した。ここで、各固有モードの寄与率は、第 1 モードから順に 49.5, 19.8, 11.4 (%) であり、上位 3 モードで全体の変動の約 80% 程度を占める。これより、第 3 モードまでを考慮することとした。平均地形に対して、EOF による解析結果を第 3 モードまで重ね合わせた海底地盤高の時空間変化を図-6(a) に、対応する元データを図-6(b) に示す。EOF 解析結果は、元データの特徴をよく抽出しており、沖合の侵食の進行や出水による一時的な堆積、バーやトラフの発達・移動等をよく再現している。なお、この測線は河口部付近に位置することもあり、図-1 および図-2 に示した出水や砂利採取量の増大に対する応答が、すみやかに現れていることも確認できる。

第 3 モードまでの固有関数の空間分布を図-7 に、時間係数の変動を図-8 に示す。 $e_1(x)$ の空間分布は、別途実施した線形トレンド解析 (最小自乗近似による地盤高変化の進行速度) の結果と非常によく一致し、解析期間の長期的トレンドと対応していることが確認された。ここで、 $e_1(x)$ が大部分の領域で負となることから、時間係数 $C_1(t)$ の増加は、大部分の領域で侵食が進行することを意味する。 $C_1(t)$ の変動に関する全体的傾向としては、活発な砂利採取が実施されていた 1980 年代中頃まで侵食が急速に進展し、その後の砂利採取量の減少、禁止と



図-3 例示した測線 (No. 20) の位置

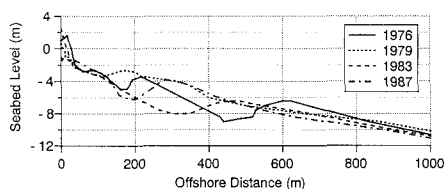


図-4 測線 20 における海底地形の変遷例

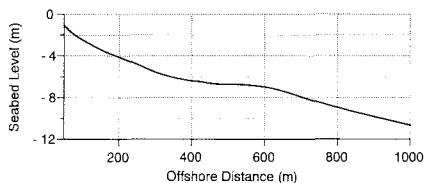
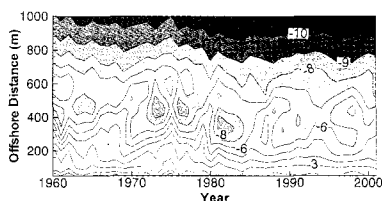
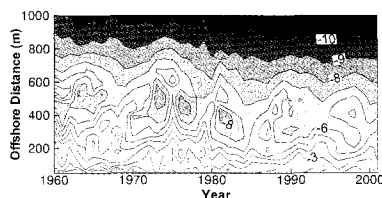


図-5 測線 20 における期間平均地形



(a) 海底地盤高の EOF 解析結果 (単位: m)



(b) 海底地盤高の元データ (単位: m)

図-6 EOF 解析結果の再現性検討

ともに地形が安定化する傾向が見られる。なお、1962 年、1975 年等で一時的に堆積 ($C_1(t)$ の減少) が見られるのは、出水の影響である。1980 年の手取川ダム供用開始以前は、このような出水の影響が 2, 3 年に一度程度の割合で見られるが、それ以降は、比較的安定した形状となっている。これより、ダム建設による出水頻度および規模の減少が、海岸侵食を助長していることが伺える。

期間平均地形と第 1 モード変動 ($C_1(t)$ と $e_1(x)$ の積) を重ね合わせた海底地盤高の時空間変化を図-9 に示す。1980 年代前半にかけての砂利採取期間中に等深線が岸側に移動し、侵食が進んでいること、また、手取川ダムの供用開始 (1980 年) 前後で、等深線位置が大きく変化していることがわかる。ここでも、1962 年、1975 年等で一時的に等深線が沖側に出ているのは、出水の影響である。

一方、 $e_2(x)$, $e_3(x)$ は、バーやトラフの発達位置におい

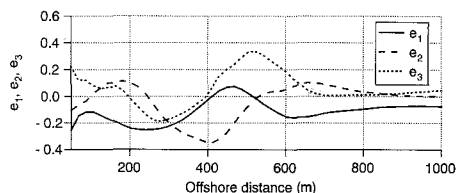


図-7 固有関数の空間分布

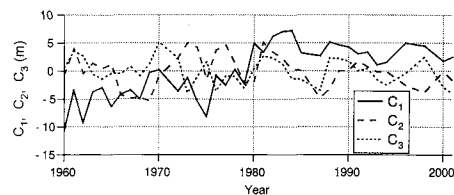


図-8 時間係数の変動

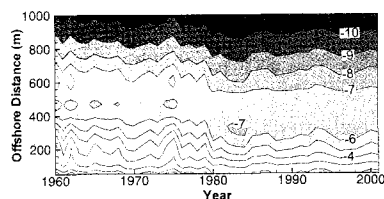


図-9 平均地盤高と第 1 モードの重ね合わせ (単位: m)

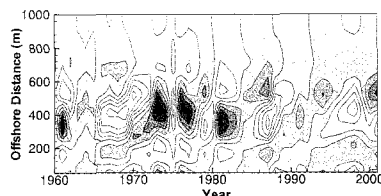


図-10 第 2 モードと第 3 モードの重ね合わせ (単位: m)

て大きな値を有している。 $C_2(t)$, $C_3(t)$ は、数年程度のサイクルで変動しており、統一的な傾向は見られない。ただし、モードの寄与が大きくなる (C の値が大きくなる) 時期や、モードの変動が大きい (C の時間変化が大きい) 時期は、砂利採取量の増加時期や河口部導流堤の延伸時期と密接に関係している。したがって、第 2, 第 3 モードは砂利採取や導流堤建造による数年単位の変動と対応すると考えられる。

今回使用した実数型の EOF 解析においては、個々のモードは重複波モードを表し、進行波的な現象は、複数の重複波モードの重ね合わせとして表現される。このため、進行性の変動を見るには、第 2 モード以降の個々のモードを単独で見るより、複数の高次モードを重ね合わせて考えた方が直観的に理解しやすい。そこで、地盤高の時空間変化について、第 2 モードと第 3 モードを重ね合わせて表示してみた。その結果を図-10 に示す。この図では、出水後のバーの発達と沖への移動・消失、1970



図-11 平面的地形変化の解析対象領域

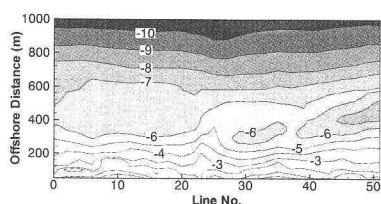


図-12 期間平均地盤高の空間分布 (単位: m)

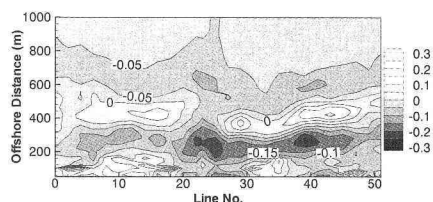


図-13 地盤高変化の線形トレンド (m/年)

年代中頃および1980年代前半の活発な砂利採取期間に特徴的なトラフの発達と岸向きの移動が確認できる。なお、1975年に見られる一時的な堆積は出水によるものであり、1985年前後の堆積は、河口部の導流堤延伸による影響を表すものと考えられる。

(3) 平面的地形変化の解析

次いで、領域全体(図-11参照)の平面的地形変化を経験的固有関数法に基づいて解析した。なお、岸沖方向に関しては、図-11の航空写真より沖側も解析領域に含まれている。また、断面地形変化の解析と同様に、期間平均地形(図-12)との差を取った地盤高データを対象にEOFを適用している。図-12の横軸は測線番号を表しており、手取川河口は、No. 23付近に位置している。また、測線の基点は、現実には必ずしも一直線上に位置していないが、便宜上、測線の基点表示位置を揃える形で作図を行っている。解析にあたっては、加藤・吉松(1984)に従い、全27測線のデータを連結して形式的に一本の測線上のデータとみなし、擬似的な3次元解析を行った。なお、ここでは、測線の間隔が現在より密(200m間隔)であった1968年～1988年のデータを対象とした。

図-12に示される期間平均地形では、地盤高の等高線

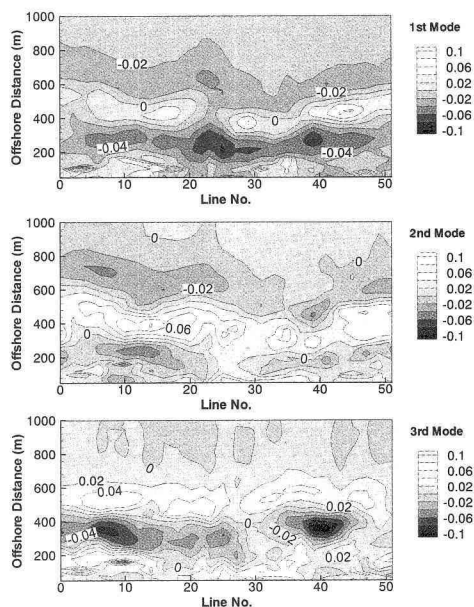


図-14 空間関数の分布

形状は、河口部に関して左右非対称となっている。これは、河口が汀線に対して右に傾く形を持つこともその一因と考えられる。また、測線20での期間平均断面地形でも見られたように、基点から400m程度の沖合を中心に平均地形が平坦となる領域が存在する。各測量地点における地盤高の時系列変化のトレンド(最小自乗近似直線の傾き)を計算した結果を図-13に示す。これより、大部分の領域で、0.1m/年程度の長期的な侵食傾向が確認できる。

次に、EOF解析結果の変動再現性について検討した。その結果、第3モードまででおよその傾向は再現できるものの、断面地形解析の場合と比較して地形変動の再現性は低下し、詳細な変動を再現するためには第5モード程度まで含めた検討が望ましいことがわかった。各モードの寄与率は、第1モードから順に、28.3、16.0、10.9、6.7、5.9%であり、第3および第5モードまでで、それぞれ、全変動の約55%、約67%を表している。

第1固有関数の空間分布(図-14)は、線形トレンド解析の結果、すなわち、大部分の領域で長期的な侵食傾向

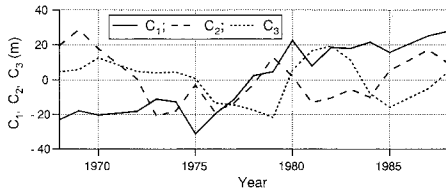


図-15 時間係数の変化

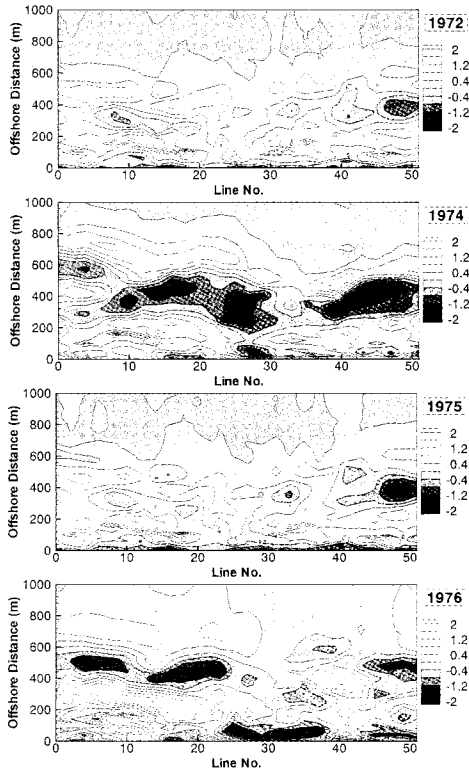


図-16 第2～第5モードの重ね合わせ (単位: m)

が見られることと良く対応している。第1モードの時間係数変化(図-15)も特徴的であり、砂利採取が活発なこの期間、出水直後を除いてほぼ一様に侵食が進行する傾向($C_1(t)$)が一様に増加することに対応を示した。なお、1991年の砂利採取禁止以降は、この領域の地形変動傾向は変化し、比較的安定となることを別途確認している。一方、第2、第3モードの時間係数の変化と空間関数の分布を考慮すると、これらは、3年程度の時間スケールでのバー・トラフの変遷と対応していると考えられる。

最後に、第2～第5モードを加え合わせて、数年程度の時間スケールにおけるバー・トラフの変遷を抽出することを試みた。その結果の一例を図-16に示す。砂利採取の増加に伴ってトラフが発達し、出水による一時的回復の後、再びトラフが発達する様子が良く確認できる。

4. おわりに

本研究では、手取川河口域周辺の海底地形変動を経験的固有関数法に基づいて解析し、河川からの土砂供給変化の影響を検討した。その主要な結論は以下のようにまとめられる。

- (1) 長期的には、沿岸域の大部分で侵食傾向が確認され、特に砂利採取が全域に渡って非常に大きな影響を及ぼしていることが推定された。なお、砂利採取禁止以後は、全体に落ち着いた傾向が見られた。
- (2) ダム建設以前は、出水により、侵食からの短期的回復が繰り返されたが、ダム建設以降はそうした回復の機会は減少していることが確認された。

謝辞：本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金(課題番号：15560442)および土木学会水工学委員会河川懇談会共同研究による奨学寄付金の補助を受けた。また、本稿を準備するにあたり、稲垣雄介君、堀内賢一君、山根大史君(当時金沢大学大学院および学部学生)に協力していただいた。ここに記して厚く謝意を表する。

参考文献

- 宇多高明・弘田英人・三波俊郎(2001): 郷土史に基づく南部石川海岸の侵食原因調査, 海洋開発論文集, 第17巻, pp. 571-576.
- 宇多高明・芹沢真澄・古池 鋼・三波俊郎(2002): 石川海岸の地形学的変化と手取川河口デルタの変形, 海洋開発論文集, 第18巻, pp. 485-490.
- 内山雄介・栗山善昭(2003): 仙台湾蒲生干潟前面海浜の中期地形変動に対する複素主成分解析, 土木学会論文集, No. 747/II-65, pp. 135-153.
- 加藤一正・吉松 晃(1984): 三次元の経験的固有関数法による深淺図解析法, 港湾技術研究所報告, Vol. 23, No. 2, 47 p.
- 北野利一・中野 晋・岡 彰紀・間瀬 肇(1999): 主成分解析による新たな地形変動分析法に関する理論的検討, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 626-630.
- 栗山善昭・内山雄介・中村聡志・永江友和(2003): 導流堤を有する浜名湖今切口周辺海岸の地形変化, 土木学会論文集, No. 726/II-62, pp. 109-120.
- 田中茂信・佐藤慎司・川岸真一・石川俊之・山本吉道(1996): 石川海岸の沖合における漂砂機構, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 551-555.
- 田中茂信・佐藤慎司・川岸真一・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.
- 横木裕宗・三村信男・佐藤主輔(1998): 主成分分析を用いた大洗港周辺の海浜地形解析, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 571-575.
- Dean, R. G., and R. A. Dalrymple. (2002): Coastal Processes with Engineering Applications, Cambridge Univ. Press, 475 p.
- Horel, J. D. (1984): Complex principal component analysis: Theory and examples, J. Climate Appl. Meteor., Vol. 23, pp. 1660-1673.
- Winant, C. D., D. L. Inman, and C. E. Nordstrom (1975): Description of seasonal beach changes using empirical eigenfunctions, J. Geophysical Res., Vol. 80, No. 15, pp. 1979-1986.