

手取川河口周辺における海底地形の長期変動に対する河川土砂管理の影響

由比政年*・石田 啓**・山田文彦***

手取川・石川海岸の広域流砂系に対して、過去に与えられた人為的なインパクトが、沿岸地形変化に与えてきた影響は複雑である。本研究では、こうした広域土砂移動特性を解明するための検討の一環として、手取川河口部における海底地形の長期変動特性を、40年以上に渡る長期測量データに基づいて解析して、砂利採取やダム建設に代表される河川土砂管理との関連を検討した。まず、河口部における長期的、中期的、短期的地形変動の特性を抽出し、それぞれに対して、河川土砂供給変化の影響を検討した。次に、海岸の長期的侵食傾向に主に着目し、ダム建設や砂利採取が直接的、間接的に及ぼしてきた影響について考察した。

1. はじめに

沿岸域における土砂移動形態とその収支は、時間的・空間的にきわめて複雑であり、海岸侵食問題への対処には、海岸・河川・砂防といった従来の学問体系を越えた検討が必要となる。近年における河川流出土砂の変動を特徴付けるのは、ダム等の水理構造物の建造や河川における砂利採取、あるいは、気候変動による出水形態の変化等である。これらの要因が、周辺の海岸侵食過程にどのような影響を及ぼしてきたかを解明し、将来変動に関する事前影響予測へと発展させていくことは、沿岸環境の持続的発展を実現する上できわめて重要である。

こうした観点から、本研究では、石川県手取川の広域流砂系に関する研究の一環として、河口周辺沿岸域の現地測量データの解析を行い、河川からの土砂供給形態の変化が海岸侵食過程に及ぼす影響を検討する。

2. 石川海岸手取川河口部の概要

手取川河口部は、日本海に面した石川海岸の中央部に位置している(図-1)。石川海岸における波の主方向はNNWからWであり、沖合における年最大有義波高は、5～8m程度である。冬季高波浪の厳しい自然条件の下で、石川海岸は長期に渡る侵食傾向にある。さらに、高度成長期以降のダム建設や砂利採取等による河川土砂供給の変化(由比ら, 2004)や、海浜部における砂利採取の影響(宇多ら, 2001)等、人為的影響も相まって、沿岸部の侵食はより深刻なものとなった。このような自然的・人為的な複合的要因により、石川海岸の汀線は、1892年から1970年の約100年間で200m程度後退した(田中ら, 1997)。このため、1970年以降、侵食対策として、離岸堤や人口リーフなど多くの海岸構造物が建造さ

れ、汀線近傍の侵食は緩和されている。しかしながら、沖合では依然として侵食が進行している。

手取川は、幹川流路延長72km、流域面積809km²の一級河川であり、その平均河床勾配は1/27、下流域(0～16.74km区間)でも平均勾配1/145の急流河川である。上流部では、1980年に手取川ダムが完成している。扇状地区間では、過去において(1991年まで)、活発な砂利採取が実施されてきた。河口部においては、透過および不透過型の導流堤が建造されている。

石川海岸では、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所により、1960年以降、超音波測深機による深淺測量が実施されている。測量の範囲は、沿岸方向に約20km、岸沖方向に1～3km程度である。測量は、年1回、主に秋季(10月初旬)に実施されている。本研究では、まず、予備検討として、手取川河口部を中心として、沿岸方向約5.5kmの範囲に約200m間隔で設置された27測線のデータ(岸沖方向約1km)を用いて、地形変動特性の概要を検討した。次に、この領域全体の特性を良く代表し、かつ、河川土砂供給変化の影響が顕著に現れる測線として、手取川河口中導流堤から左岸側約200mの所に位置する測線20に着目して検討を実施することとした。この測線上には海岸構造物は存在していない。代表的な粒径は0.2～0.5mm程度であり、汀線近傍ではレキが多く含まれる。通年の沿岸漂砂の卓越方向は西向き(図-1で右から左)である(田中ら, 1997)。

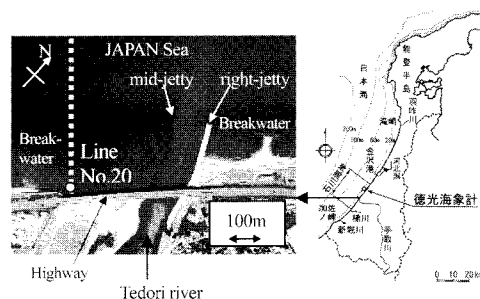


図-1 石川海岸手取川河口部 (1997年8月21日撮影)

* 正 会 員 博(工) 金沢大学助教授大学院自然科学研究科
** フェロー 工博 金沢大学教授大学院自然科学研究科
*** 正 会 員 博(工) 熊本大学助教授大学院自然科学研究科

3. 時間スケールの異なる断面地形変化の特徴

対象測線における、観測期間中（1960～2003年）の断面地形の経年変動（図-2）は、①長期的侵食傾向（期間全体）、②砂州の周期的変動（9年程度の周期）、③出水による一時的堆積（1964, 1975, 1978年等）という三点により特徴付けられる。なお、岸沖方向における測量の実施間隔は不均一であるため、線形補間を用いて、地盤高データ（T.P.）を等間隔（20 m）に再配置し、基点から沖合1000 m（水深約10 m）の区間を対象に解析を行っている。

（1）長期侵食傾向と出水による一時的堆積

図-3 は、観測期間中の平均地形および海底地盤高の最大・最小値を表す。基点近傍での海底勾配は1/25程度であり、沖に向けて徐々に緩勾配となる。基点から400～600 m 付近では、最も勾配が緩やか（約1/130）となり、この領域で砂州の岸沖移動が活発に見られる。さらに沖合では、海底勾配はわずかに増加し、約1/100となっている。

図-4 は、1960年を基準として、海浜断面積（ ΔS ）の長期変動を計算した結果である。1980年代半ばまで顕著な侵食傾向が続いた後、比較的安定な状態へと推移している。この変化は、1980年代後半から、手取川での砂利採取量が大きく減少したことと関連すると考えられる。海浜断面積すなわち土砂量が一時的に増加しているのは、出水の影響によるものである。砂利採取量およびダム建設前後における出水特性の変化とその影響に関しては、次章で論じる。

図-5 は、1985年を境にした2つの期間における、各地点での地盤高変化の線形トレンドを表す。線形トレンドの値は、地盤高の経年変化に対する最小自乗近似直線の傾きとして算出した。図-4 の結果から予想されるように、観測期間の前半および後半で、トレンドの分布特性は大きく異なっている。まず、期間前半（1960～1984）では、ほぼ全域で侵食傾向が確認される。汀線近傍において、地盤高は約0.2 m/年のペースで低下し、基点から100～400 m の領域での侵食速度は、0.1 m/年程度である。一方、観測期間後半（1985～2003）では、侵食速度は軽減され、一部区間（基点から180～450 m）で堆積傾向へと転じている。また、沖合での侵食速度も緩和されている。

（2）中程度の時間スケールを持つ砂州の周期的移動

次に、図-2 中に見られる沿岸砂州の周期的変動について検討する。図-2 では、複数の砂州の存在が確認できる。これらの砂州の時間変動は顕著であり、岸沖方向に周期的な変動を示している。なお、この砂州変動は、断面2次元的なものばかりでなく、三日月状の平面形状を有する砂州が沿岸方向に移動する影響も含んでいる。

図-6 の丸印は、砂州峯位置の経年変化を示す。この図から、2つの特徴が読み取れる。まず、①砂州峯位置は、

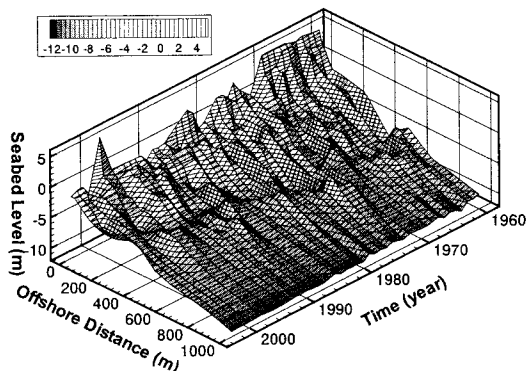


図-2 断面地形の経年変化（測線20）

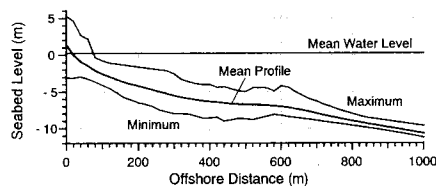


図-3 期間平均地形および地盤高の最大・最小値（測線20）

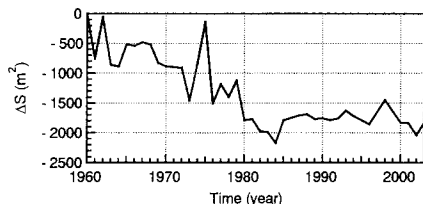


図-4 測線上海浜断面積の累積変化（測線20）

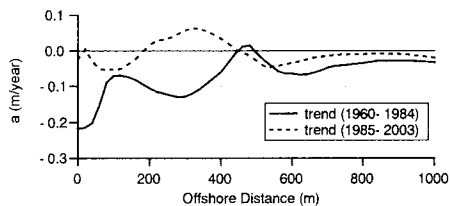


図-5 地盤高変化の線形トレンド（測線20）

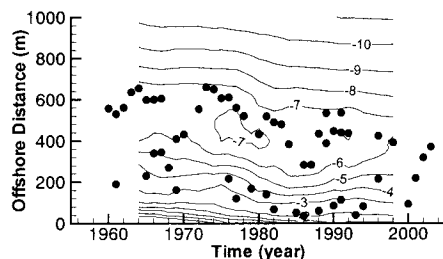


図-6 砂州峯位置の経年変化

約9年周期で岸沖方向に移動し、観測期間中に4周期程度の変動が確認できる。次に、②長期的には、砂州峯位置は、岸側に移動する傾向を持つ。

(3) 長期変動と中期・短期変動の分離

砂州の周期的変動を分離して、海底地形の長期的変化の特徴を抽出するために、元データの9年移動平均を取って変動特性を解析した。その結果を図-7に示す。1970年代半ばまでは、侵食域は主に基点の近傍であり、沖合の等高線位置は比較的安定している。1970年代後半から1980年代の前半にかけては、解析対象領域の全体に渡って顕著な侵食傾向が確認できる。1980年代後半以降では、岸側の一部の領域で堆積傾向へ転じる一方、沖合では依然として侵食傾向が続いている。

9年移動平均の結果で、等高線の本数を減じたものを図-6に合わせて示す。前述したように、砂州の移動は、期間平均的な断面勾配が緩やかになる領域、すなわち、水深6~7mの領域で顕著である。長期的な侵食傾向により、7mの等深線は長期的に大きく岸側へ移動しており、沖側砂州の位置変動で見られた2番目の特徴、すなわち砂州移動範囲の縮小は、この等深線の後退と符合している。今後、この領域でさらに侵食が進展すると、砂州の沖側移動範囲はさらに後退し、岸側に近づくと予想できる。以上述べたような砂州の変動特性について、詳細な検討を行うことは興味深いが、本論文の範疇を越えるため、別の機会に譲ることとしたい。

次に、元データと9年移動平均値との差を取り、より

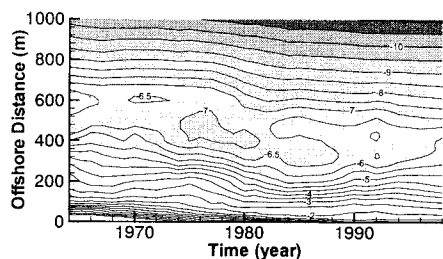


図-7 9年移動平均された海底地盤高の変化 (単位: m)

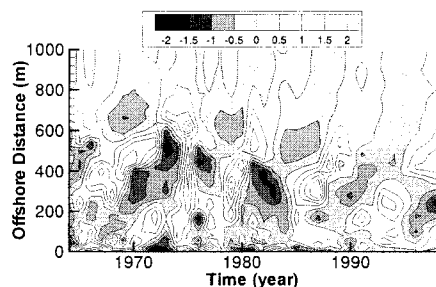


図-8 抽出された中期・短期変動 (単位: m)
(元データと9年移動平均との差)

短い時間スケールでの変動を抽出することを試みた(図-8)。ここでは、砂州の周期的な岸沖移動が明確に捉えられている。1975、1978年等の一時的な堆積は出水の影響を示すものである。

(4) 長期変動に対する EOF 解析

9年移動平均の結果は、より短いスケールでの地形変化をフィルタリングした形で、海底地形の長期変動特性に関する有益な情報を含んでいる。ここでは、移動平均データに対して、実数型の経験的固有関数法を適用し、長期変動の特徴的モードを抽出してみた。

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(例えば、Winant ら、1975; 加藤・吉松、1984; 内山・栗山、2003等)。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 回目の深浅測量時の地盤高を表す。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。

経験的固有関数法による解析結果を図-9に示す。第1モードの寄与率は、99.4%である。第1モードを除く変動に対する寄与率は、第2、3、4モードで、それぞれ、80.5、11.4、6.2%であり、図中には、上位4モードまでを表示している。第1モード空間関数は、期間平均的な地形形状に対応している。対応する時間係数は、1980年代半ば頃まではほぼ一様に増加し、その後一定した値となる。時間係数と空間関数の積で考えると、第1モードは、1980年代半ばにかけて海底勾配が急峻化したことを示している。第2、第3モードも、期間前半における変動を表すモードであり、その時間関数は、期間前半で特徴的な変動を示している。第2モードの時間係数は期間前半で一様に増加した後一定となり、対応する空間関数は、対象期間前半における線形トレンド(図-5)と類似した分布を呈している。これより、第2モードは、解析期間前半における地形変動のトレンドを表すと考えられる。第3モードの時間係数は、期間前半で増減を繰り返した後、後半ではほぼ一定値を取る。対応する空間関数は、基点から200、400m付近で極値を持つ。空間関数と時間関数の積から考えると、このモードは、70年代後半から80年代初頭にかけて、400-500m位置で見られた深みの発達と関連が深いことが推定される。一方、第4モードの時間関数は、期間前半のゼロに近い値から

期間後半で変化する傾向が見られる。対応する空間関数は、期間後半のトレンドに比較的近いことから、第4モードは期間後半における地形変化トレンドに対応すると考えられる。

一般に経験的固有関数法による解析結果から各モードの物理的意味を解釈することは困難な場合が多い。これに対し、今回の9年移動平均に対する解析結果では、個々の特徴が明確に分離される形で各モードが抽出されており、その物理的解釈を容易にしている。また、図-8に示した中期・短期変動に対して同様の検討を行った所、砂州の約9年周期の変動と良く対応するモードが抽出された。言い換えれば、前処理として、時間スケールの異なる変動を移動平均操作により分離することにより、経験的固有関数法によるモード分解を効果的な形で実施することができた。これは、今回の解析法が、長期侵食性傾向を有する海岸での地形変化にEOF解析を適用する際の手法として有望であることを示唆しており、今後更なる検討を進めていく予定である。

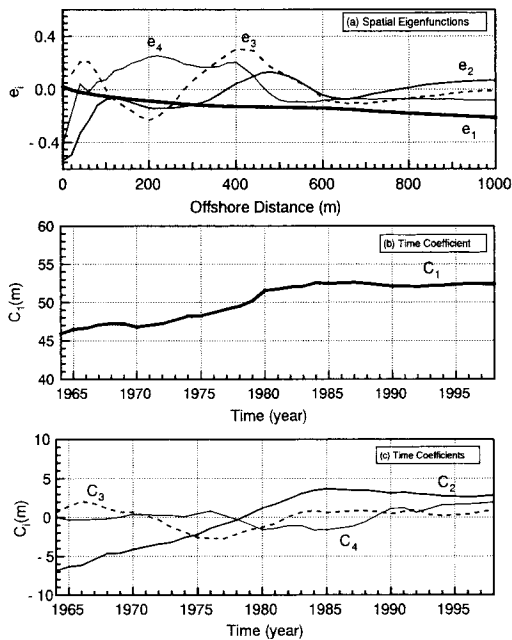


図-9 9年移動平均データに対する EOF 解析結果

4. 河川土砂管理の影響に関する考察

図-10は、1960年を基準とした河床および海岸土砂の変動量の累計値を示したものである。なお、これらの値は、金沢河川国道事務所資料（ニュージェック、2000）に基づく。海岸土砂量は、金沢港海岸から根上1工区までの平面的範囲に対するものである。また、図中には、扇状地区間での砂利採取や手取川ダムへの堆砂量の累計

値を合わせて示した。

(1) 砂利採取の影響に関する検討

手取川の扇状地区間では、高度成長期を中心に活発な砂利採取が実施された。1960年以降の砂利採取量の累計は、公称値で761万 m^3 となっている。図中の実線で示されたものは、砂利採取の公称値であり、実際の採取量は、この2～3倍程度であったと推定されている（河川環境管理財団、1993）。このため、図中には、公称値を2.5倍したものを合わせて表示した（破線）。砂利採取やダム建設等の影響により、1960年以降著しい河床低下が発生したため、1991年以降砂利採取は禁止されている。

扇状地区間での砂利採取は、1960年代半ばおよび70年代半ばに活発に実施されている。こうした人為的インパクトが、河川・海岸の双方に影響を与えたと考えられるが、その影響の現れ方は、二つの年代により異なっている。まず、1960年代では河床低下が大幅に進行している。砂利採取が河床変動に与える影響は直接的であり、この結果は理解しやすい。同時期の海底地形の侵食は主に汀線付近に限定される。一方、70年代の河床変動は60年代と比較して小さい。逆に、海岸域での侵食は顕著となり、沖合1 km まで全域に渡って急激な侵食が見られる。

砂利採取の対象となる河床材は、海岸の構成土砂より大き目の粒径集団に属している。このため、砂利採取が海岸土砂量の変動に与える影響は間接的なものとなる。図-11は、各年代における区間ごとの河床高の変動を示している。1960年代には、河口から15 km 区間のほぼ全域で1～1.5 m 程度の河床低下が見られる。一方、70年代においては、下流区域で河床高が回復する様子が伺える。60年代にいったん低下した河床が70年代に量的に回復する際、河床を構成する土砂の質は、以前と異なるものに変化し得る。過去に実施された河床構成材料の粒径変化調査（ニュージェック、2000）によると、全体として、下流域での粒径は、経年的に細粒化する傾向が見られる。特に、河口0 km 地点での変化は顕著であり、河口河道奥の粒度組成は、海浜と類似した組成へと変化している（ただし、この調査時期は1980年以降であり、ま

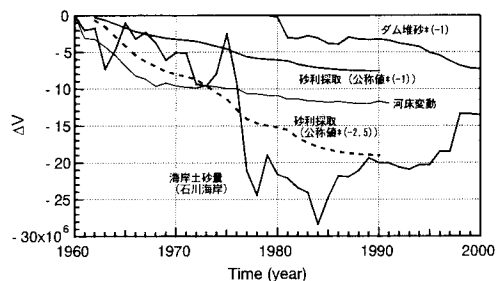


図-10 河床低下量、海岸土砂量、砂利採取量およびダム堆砂量の累計値

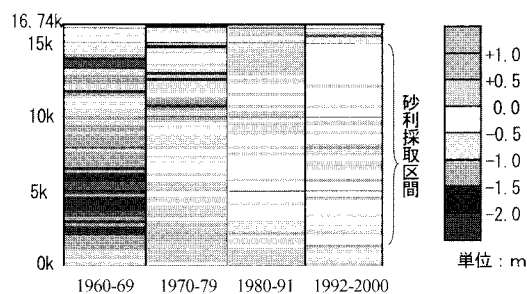


図-11 手取川河床高の変化

た、採取年度によりその採取位置が異なるため直接的な比較は困難である)。こうして、上流部からの供給土砂の内、海岸域で重要となる粒径成分が、河床の回復に充てられた場合、海岸への供給土砂が減少し、間接的な形で、砂利採取が、海岸への土砂供給不足を助長した可能性が考えられる。

(2) ダム建設の影響に関する検討

手取川上流域は、牛首川流域と尾添川流域に大別される。いずれの流域においても、積極的な砂防ダムの建設が行われ、生産および流出土砂量の抑制が図られてきた。さらに、手取川中流域においては、手取川ダムを始め、手取川第2ダム、手取川第3ダムおよび大日川ダムの4つのダムが建設されている。この内、下流への河川土砂供給に最も大きな影響を与えているのが、手取川ダムの建設であり、1980年の供用開始以降、牛首川流域での生産土砂の大部分がダム貯水湖に捕獲される状況にある。ダム湖への堆積は、1981年に280万 m^3 と大きき値を記録した後に、およそ年平均20万 m^3 の速度で進行しており、累積堆砂量は、2001年までに約617万 m^3 に達している。堆砂面の表層はシルト分で、表層から1.5m程度下層では、砂分が多く含まれている。

海岸土砂量の経年変動を見ると、手取川から石川海岸へ輸送される土砂は、大規模な出水時に一度に(間欠的に)供給されていることが伺える。これに関連して、手取川下流における流量特性の経年変化は、以下のような特徴を持つ。まず、1980年の手取川ダムの建設前後で、年間の総流量に大きな変動はない。一方、出水時に記録される最大流量の特性には顕著な変化が見られる。すなわち、ダム建設以前は、2000 m^3/s を超過するような大規模な出水が2、3年に一度の頻度で観測されているのに対し、ダム建設以降は出水の規模および頻度が減少している(由比ら, 2004)。なお、これらの出水の発生時期は主に夏季(7月から9月)である。図-2, 4, 8, 10等から、ダム建設以後、出水による短期的回復(堆積)の機会が減少していることが確認できる。

図-10では、出水によるダム堆砂量の増加と海岸土砂量の減少は直結していない。これは、ダム建設以降、牛

首川流域からの供給土砂は遮断されるが、尾添川流域からの供給土砂は、ダム建設の影響を受けないからである。すなわち、出水時には、牛首川流域からの土砂が遮断されることでダム堆砂量が急増すると同時に、尾添川流域から多くの土砂が下流に供給される。ただし、同程度の出水規模となった1975年と1981年における海岸土砂量の変動を見るとダム建設の影響は明確に見て取れる。図-10において、1975年の出水は海岸に大量の土砂を供給し、海岸土砂量は一時的に急増している。対照的に、1981年の出水前後で海岸の土砂量に大きな変化はなく、一方で、手取川ダムの堆砂が急増した。

5. おわりに

手取川・石川海岸の広域流砂系に対して、過去に与えられた人為的なインパクトが、沿岸地形変化に直接的・間接的に与えてきた影響は複雑である。本研究では、こうした広域土砂移動特性を解明するための検討の一環として、手取川河口部における海底地形の長期変動特性を解析し、砂利採取やダム建設に代表される河川土砂管理との関連を検討した。その結果、河口部における特徴的な地形変動と河川土砂管理の関連に関して、いくつかの有益な知見を得た。今後、さらに多角的・包括的な検討を実施し、広域土砂動態の解明を進めていく必要がある。

謝辞: 本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金および土木学会の補助を受けた。また、本研究で利用した測量データは、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所より提供いただいた。ここに記して謝意を表する。

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.
- 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.
- 河川環境管理財団(1993): 平成4年度手取川上流域総合環境管理計画調査業務委託報告書, 203p.
- 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, 47p.
- 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.
- ニュージエック(2000): 平成11年度手取川総合土砂管理計画検討業務委託報告書, 205p.
- 由比政年・中谷 健・石田 啓・山内正彦・二俣 秀・高橋 至(2004): 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, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 576-580.
- 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.