

石川海岸における多段砂州の3次元周期変動特性

Three-Dimensional Cyclic Behaviors of Multiple Sandbars on the Ishikawa Coast, Japan

由比政年¹・岡田磨香²

Masatoshi YUHI and Makou OKADA

The characteristics of spatiotemporal variation of the multiple bar system on the Ishikawa Coast, Japan, have been investigated using a set of field surveys collected over 51 years. For the time variation, the behavior of sandbars is characterized by the presence of cyclic cross-shore migration of outer bars with approximately 10-year return period. Five cycles have been recognized from 1960 to 2010. The evolution of outermost bar strongly exhibits three-dimensional features. On the contrary to the bar migration patterns observed at many of other sites, the bar position are observed to move landward during the decaying phase.

1. 序論

沿岸砂州は、多くの砂浜海岸において汀線に平行に発達する浅瀬地形であり、海浜地形システムの時空間変動を特徴付ける基幹要素の1つである。砂州頂部では碎波が促進されて天然の防波堤として機能し、トラフでは稚魚・稚貝の生息域となるなど、沿岸砂州は自然と共生した海岸防災や生態環境再生を考える上で中核的役割を担ってくる。従来、多くの研究により砂州基本特性の解明が進められてきたが (Wijnberg・Kroon, 2002)、多様な時間スケールを有するその動態には未解明な点も多い。

沿岸砂州の動態に関して、近年、世界数地点で組織的な沖向き移動 (Net Offshore Migration: NOM) の存在が報告されてきた (Ruessink・Kroon, 1994; Kuriyama, 2002 など)。NOMは、砂州の形成・沖向き移動・消失という一連のサイクルが、地域特有の再現周期 (数年~20年程度) で繰り返される現象である。従来の研究の多くは、断面2次元的、あるいはそれに準じる変動を対象としてNOMの特性を論じており、沿岸方向を含めた3次元的挙動に関しては、未解明な点が多い。

NOMは数年~10年スケールで繰り返される現象であるため、その特性の検討に際しては、長期間に渡る現地観測データの蓄積が必須である。また、3次元特性を論じるためには、多数の測線を含む広域のデータが必要である。この点に関し、本研究で対象とする石川海岸においては、大規模な多段砂州が発達する (Yuhi・Okada, 2011) ことに加え、過去50年以上の長期間、沿岸方向21.5km (初期の9年は15.7km) の広範囲に渡って深淺測量が実施されている。こうしたアドバンテージを有効活用することにより、従来報告例の少ない、沿岸砂州の長

期3次元変動について詳細な特性を解析することが可能となる。

本研究では、長期・広域の現地観測データをもとに、石川海岸における沿岸砂州の3次元動態を解析し、その周期変動特性を明らかにすることを試みる。合わせて、比較海浜地形学的視点から、国内外諸地域で観測されたNOM事例との比較検討を行ってその特徴を抽出する。

2. 対象領域の概要

石川海岸は、日本海に面し、NE-SW方向の海岸線を有する (図-1)。主要な土砂供給源は手取川であり、日本海に沿って加佐の岬から滝崎に広がる広域流砂系の一部となる。解析対象領域は、沿岸方向21.5kmの範囲で、汀線付近の代表的な粒径は0.2~0.5mm程度である。

対象領域における潮位変動は±0.2m程度と小さいため、汀線近傍における地形変動は主に波浪の影響を受ける。国土交通省徳光海象観測所での観測によると (石川県, 2012)、夏季波浪の多くは有義波高1m以下であり、波向はNNWにやや卓越する。冬季の波向はNW~NNWに卓越し、高波浪が頻繁に来襲する。年最大有義波高は5~8m程度に達する。汀線近傍における沿岸漂砂の卓越方向は南西向きで、波による移動限界水深は、9~10m程度と推定される。一方、水深10m以深の沖合では、NE方向に向かう吹送流および海流により、底質は能登半島向きに輸送されると考えられている (田中ら, 1997)。

冬季高波浪の厳しい自然条件に加え、手取川流域からの土砂供給の減少に伴って、近年、石川海岸は、長期的な侵食傾向にある (田中ら, 1997; Yuhi, 2008)。急激な汀線の後退を受けて、1970年以降、侵食対策として、離岸堤や人工リーフなど多くの海岸構造物が建造された (図-2)。この結果、現在では、汀線近傍の侵食は緩和されている (Yuhi et al., 2009)。

1 正会員 博(工) 金沢大学教授
2 修(工) 首都高速道路株式会社

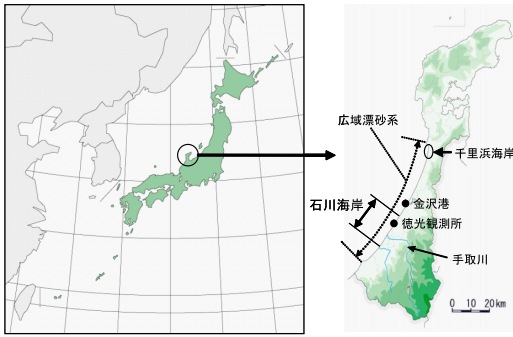


図-1 対象領域の位置

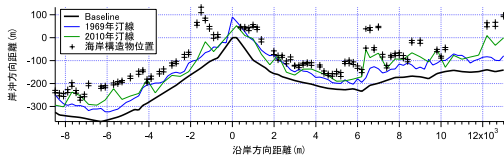


図-2 測量基準線 (Baseline) ・汀線・海岸構造物の位置

3. 観測データおよび解析手法

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21.5km (1968年までは根上工区を除く約15.7km) である。測量は年1回、主に秋季 (9~11月初旬) に実施されている。沿岸方向の測量間隔は、1989年までが200mであり (測線数109本)、1990年以降は400m (測線数55本) となっている。岸沖方向の測量範囲は年度により異なり、基点から1~3.5km程度の範囲である。本研究では、51年間 (1960~2010年) の深淺測量結果に基づいて海底地形変化の解析を行った。この際、初期の測量結果には、空間解像度が十分でないものが一部含まれることを考慮し、地盤高データ (T.P.) をスプライン補間により等間隔 (20m) に再配置した。まず、測線ごとに断面形状を解析し、期間平均地盤高と偏差、最高・最低地盤高、地盤高の変動トレンド等を解析した。続いて、平面的な視点から、砂州形状および位置の3次元の特徴、周期的な変動特性やその時空間的変遷について解析した。なお、以下では、バーは沖側から1段目、2段目と呼ぶこととする。平面形状の解析にあたっては、測線方向 (N307°) をY軸、その直交方向をX軸とし、手取川河口部に位置する測線No.25の測量基準点を原点とした。一方、断面形状の解析においては、1969年の汀線位置からの岸沖距離を離岸距離として表示した。

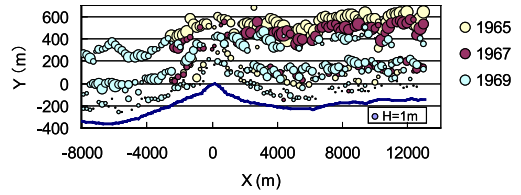


図-3 砂州平面形状と比高の変遷例
円の面積：砂州比高に比例；中心：砂州頂部位置 (1969年以前は $X < -2.7$ kmは未測定)

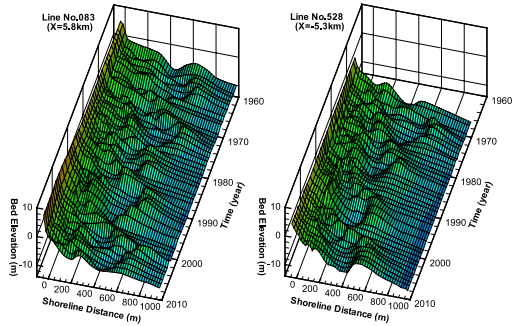


図-4 断面形状の経年変動例

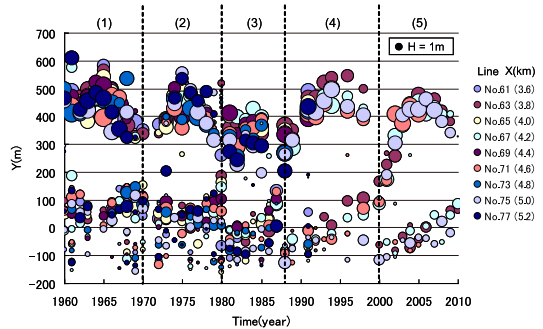


図-5 砂州頂部位置・比高の経年変動例 (3.6 km <math>X < 5.2km) (表記は図-3に准じる)

4. 沿岸砂州の三次元周期変動特性

石川海岸では、比高が5mに達するような大規模な沿岸砂州が発達する (Yuhi・Okada, 2011)。多くの場合砂州は2段であり、様々な時間スケールの変動を示す。図-3は、横軸に沿岸距離、縦軸に岸沖距離を取り、砂州比高をプロットの大きさに相対的に表現して、砂州頂部位置および比高の経年変化を例示したものである。図中の $X=0$ が土砂供給源である手取川河口に、Baselineは測量の基点 (巨視的な海岸線) に対応する。右岸側 ($X > 0$) に着目すると、この例では、 $Y=400\sim 600$ m程度の沖合に発達した1段目 (沖側) の沿岸砂州が比高を減じつつ岸向きに移動し、対応する形で2段目 (岸側) 砂州が沖向きに移動・発達する様子が見て取れる。図-4には、対象領

域内で手取川河口両岸側に位置する2測線を抜き出して、断面地形の経年変化を例示した。この図からも、多段砂州の岸沖移動が全期間を通じて周期的に繰り返される様子が確認できる。図-5には、 $3.6 < X < 5.2 \text{ km}$ に位置する測線を対象に、砂州頂部位置（円の中心）と比高（円の面積）の経年変化を解析した例を示す。組織的な岸沖移動が観察されるが、この領域では1段目砂州と2段目砂州の頂部位置移動が逆位相となる点が特徴的である。

(1) 期間平均特性

石川海岸で見られる砂州の周期的移動も、他のサイトで報告されているNOM現象と同様に、①発生、②移動・成長、③滞留・消失の3段階（Ruessink・Terwindt,2000）に区分できる。このうち、移動・成長段階では、沿岸砂州は広い範囲を速やかに沖向きに移動するが、滞留・消失段階での移動は緩やかな岸向きでその領域も限定的である。このため、長期間にわたる時間平均地形を取ることで、成長した砂州が滞留・消失する位置を特定することができる。図-6および図-7は、観測期間中（1960-2010年： $-2.7 < X < 13.0 \text{ km}$ ；1969年-2010年： $-8.5 < X < -2.7 \text{ km}$ ）における平均地形および代表的な平均断面地形を例示したものである。手取川河口から左岸側では、平均プロファイルは比較的単調な降下を示すことが多い。一方、右岸側で河口からの距離が離れるにつれて、離岸距離400～600m（図-6では $Y=200 \sim 400 \text{ m}$ ）の領域に砂州・トラフ状の凹凸が明確に現れるようになり（ $X=2 \sim 8 \text{ km}$ ）、その後再び単調な形状に近づいていく。このような違いの1つの要因として、河口付近および左岸側では侵食の影響を受けて、砂州の岸沖移動範囲の縮小が顕著に見られることに対して、右岸側で河口から離れた領域では、期間中比較的安定した岸沖範囲で砂州移動が繰り返されていることが考えられる（Yuhi・Okada, 2011）。この検討結果からも確認できるように、石川海岸における砂州移動の特性は沿岸方向に一様とならず、領域により異なった特性を示す。

(2) 三次元砂州変動の形態

石川海岸における沿岸砂州の形状は、緩やかな長弧状、左右対称な三日月状、左右非対称な雁行配置状など、時間的・空間的にさまざまな変動を見せるが、全体システムとしては、10年程度（8～12年）の再現周期（Return Period）で共通な変動パターンを示す。観測期間中におよそ5サイクルの変動が認められた（図-5、表-1など）。この周期変動と石川海岸における外力変動（来襲波のエネルギー）との相関を解析したところ、来襲波浪が大きい年に砂州の沖向き移動速度が大きくなる場合も見られたものの、外力変動の周期性は小さく、両者の相関も明確ではない。この点は、世界各地で報告されているNOMと同様であり、一連のプロセスは自己組織的に

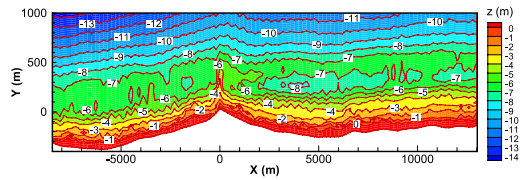


図-6 期間平均地盤高の空間分布

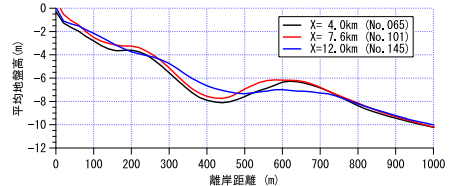
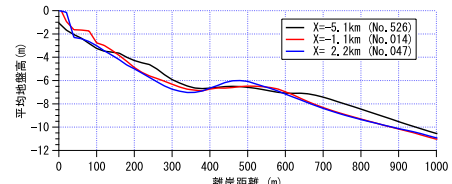


図-7 期間平均断面の沿岸方向変化

表-1 変動サイクル期間

サイクルNo.	開始年	終了年	周期(年)
1	(1960)	1970	10
2	1970	1980	10
3	1980	1988	8
4	1988	2000	12
5	2000	(2010)	10

進行していると推定される。観測期間中の第3周期は、他の周期と比較して、砂州の発達規模や移動範囲が小さく、変動周期も短い。これは、河川からの供給土砂の減少や海岸構造物の設置に代表される人為的な影響による、土砂量の不足や岸沖バランスの変化に起因する乱れであると考えられる。一方、2000年代以降は全体で回復の傾向にある。以上総括すると、砂州の形成・移動・消失という一連のプロセスは、自己組織的に進行しているものであり、外力変動や人為的インパクトが重畳することでサイクルごとの違いが生じてくるものと推定される。

手取川右岸側で河口から離れた領域における変動を主体に考えると、観察された形状変化は5つのステージに分けて特徴をまとめることができる。例として、表-1に示す第2サイクルを対象に、砂州形状の経年変化を概説する（図-8）。なお、手取川河口両岸で特性が異なるため、左岸側・右岸側に分けて特徴を記述する。まず、Stage1は、1つ前のサイクルの沖側砂州が消失した段階であり、手取川河口部で砂州が突出したような形状を取り、両岸

側の砂州は比較的3次元性の強い形状を示す。この後、Stage2では、1段目の砂州が発達しながら沖向きに移動し、2段目砂州の形状も明確に現れてくる。この段階では、沿岸方向に比較的一様な形を取る。Stage3では、1段目砂州が最も沖側に移動・到達し、2段目砂州は逆に岸向きに移動する。この段階で、右岸側の砂州は比較的一様、左岸側の砂州配置は3次元的となり、2~3km程度の波長で、汀線から時計回り方向に傾いた砂州列の雁行配置を示す。Stage4では、右岸側の砂州も切れ切れになる形で3次元性が強まる。また、河口付近の最沖砂州が、2段目の砂州と繋がる形となる。この後、Stage5では、1段目砂州は岸側に向けて緩やかに移動しながら、頂部高を減少させ、河口部に近いものから消失していく。この際、2段目砂州は沖向き移動する。砂州形状の3次元性が強まることが岸向き移動・消失のトリガーとなることが示唆される。3次元性が発現した際の循環流の構造と岸向き移動の関係など、砂州変動の内部構造に関する検討を今後進めていく予定である。ここで見たように、あるサイクルで2段目砂州として存在していたものが、1段目砂州の消失を受けて、次のサイクルで新たな1段目砂州として変動を繰り返すことから、個々の砂州に着目して存在年数(Duration)を考えると再現周期の約2倍程度となる。

(3) 国内外諸地域との比較

石川海岸から北東方向約30kmに位置する千里浜海岸(図-1)においても、大規模な多段砂州が発達し、周期的な運動を繰り返すことが報告されている(Hayakawaら, 2009)。砂州配置としては、千里浜海岸では3段、石川海岸は2段が代表的である。両海岸ともに手取川を起源とする広域流砂系の一部であり、波浪・潮汐に代表される自然外力特性もおおよそ同様である。ただし、千里浜海岸の底質はより細かく緩勾配であり、海岸線方向も若干異なる。石川海岸ではほぼ全域に渡って人工構造物が設置されているのに対し、千里浜海岸前面には離岸堤などは設置されていない。石川海岸と千里浜海岸における砂州移動形態の相違は消失段階に現れ、石川海岸においては砂州が岸向きに移動して減衰するのに対し、千里浜海岸では砂州は沖向きに移動・消失していく(Hayakawaら, 2009)。また、千里浜海岸で観察されるNOMでは、沿岸方向の砂州形状は一様に近く、砂州移動は準2次元的に進行する。この点で、3次元変動が特徴的な石川海岸と異なっている。また、周期変動の再現期間についてみると、千里浜海岸は4.5年程度なのに対し、砂州の滞留・消失期間の長い石川海岸では10年程度と2倍程度の差が見られる。石川海岸では、1段目砂州と2段目砂州の岸沖移動が逆位相となることが多いのに対し、千里浜海岸では同位相となることも一因と考えられる。

続いて、オランダ(Ruessink・Kroon, 1994; Winberg・

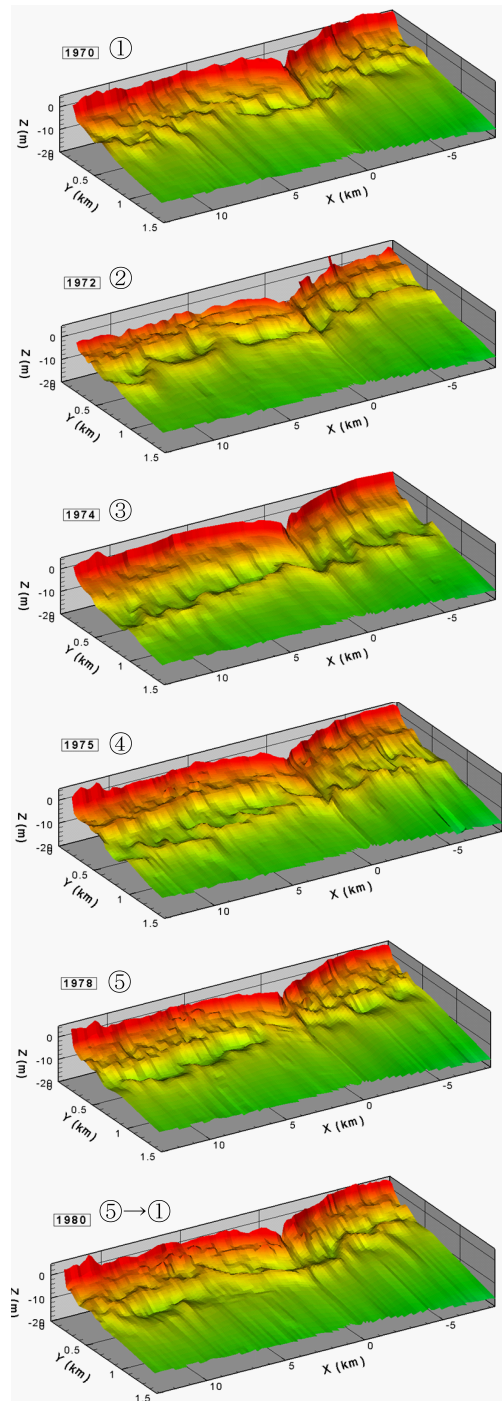


図-8 三次元砂州形状の変遷例(第2サイクル)

Terwindt, 1995), ニュージーランド(Shandら, 1999), 日本(Kuriyama, 2002), 米国など, 世界各地(Shandら, 1999; Ruessinkら, 2003など)で報告されている移動形態と比較検討を行った(表-2)。石川海岸における外浜勾

表-2 他地域との特性比較 (Ruessinkら (2003) および Shandら (1999) に基づいて作成)

Site	Mean Slope in Bar Zone	d ₅₀ (mm)	Return Period (year)
Zuid (Holland)	1:170	0.17	3.9
Noord (Holland)	1:120	0.21	15.1
Terschelling (Holland)	1:205	0.18	11.4
Ameland (Holland)	1:225	0.18	6.1
Duck (U.S.A.)	1:80	0.18	5.9
Wanganui (New Zealand)	1:90	0.18	2
Hasaki (Japan)	1:75	0.175	1
Chirihama (Japan)	1:190	0.15	4~5
Ishikawa (Japan)	1:140	0.17	8~12

配や来襲波浪の波形勾配は、オランダでの報告例と類似しており、継続期間や再現周期も同程度のものとなっている。砂州移動の活発な水深範囲と砂州移動の再現期間の関係をプロットし、Ruessinkら (2003) の検討結果と比較したものを図-9に示す。石川海岸の砂州も他地域と同様の関係に従うことが確認できる。しかしながら、先の千里浜海岸との比較でも述べたように、消失段階の移動形態において、石川海岸の砂州動態は特徴的な形態を示している。すなわち、国内外の大部分の報告例では砂州は沖向きに移動・消失していくのに対し、石川海岸においては砂州が岸向きに移動して減衰する。なお、米国東海岸 (Duck) では減衰段階で岸向き移動の報告例も見られる (Shandら, 1999)。また、多くの報告事例では、砂州移動は準2次元的に進行するのに対し、石川海岸では消失段階で3次元変動が特徴的となる。

5. 結論

本研究では、石川海岸において50年以上に渡って取得されてきた、広域深浅測量データに基づき、沿岸砂州の3次元形状変化を解析して、10年前後で繰り返される周期的変動特性を明らかにするとともに、国内外の諸地域における観測例との比較検討を行った。

解析の結果、観測期間中に約5サイクルの周期的岸沖移動が確認され、砂州位置および形状の変化は沿岸方向を含めた3次元性的性質を有すること、土砂供給源である手取川の両岸で移動変形特性は異なることが特徴として示された。他地域との比較では、石川海岸において、砂州消失の過程で岸向き移動が見られることが特徴的であり、砂州形状の3次元性が強まるのが岸向き移動・消失過程のトリガーとなることが推定された。

謝辞：本研究で使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。ま

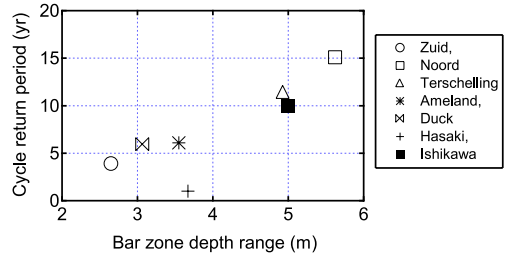


図-9 砂州移動の再現周期と移動範囲の関係 (Ruessinkら (2003) に基づいて作成)

た、本研究の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 石川県：千里浜再生プロジェクト委員会 (オンライン), <http://www.pref.ishikawa.lg.jp/kasen/chirihama-saisei/index.html>, 参照2012-03-22.
- 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.
- Hayakawa, K., M.Yuhi and H.Ishida (2009)：Migration of multiple sandbars on the Chirihama Beach, JAPAN, Proceedings of Coastal Dynamics 2009, in CD-ROM, Paper No.140, pp.1-11.
- Kuriyama, Y. (2002)：Medium-term bar behavior and associated sediment transport at Hasaki, Japan. Journal of Geophysical Research, 107(C9), 3132, doi:10.1029/2001JC000899.
- Ruessink, B.G. and A. Kroon (1994)：The behavior of a multiple bar system in the nearshore zone of Terschelling, the Netherlands: 1965-1993, Marine Geology, 121, 187-197.
- Ruessink, B.G. and J. H. J. Terwindt (2000)：The behavior of nearshore bars on the time scale of years: a conceptual model, Marine Geology, 163, 289-302.
- Ruessink, B. G., K. M. Wijnberg, R. A. Holman, Y. Kuriyama and I. M. J. van Enckevort (2003)：Intersite comparison of interannual nearshore bar behavior, Journal of Geophysical Research, Vol.108(C8), 3249, doi:10.1029/2002JC001505.
- Shand, R. D., D. G. Bailey and M. J. Shepherd (1999)：An Inter-site comparison of net offshore bar migration characteristics and environmental conditions, Journal of Coastal Research, Vol.15, No.3, pp. 750-765.
- Wijnberg, K.M. and J. H. J. Terwindt (1995)：Extracting decadal morphological behavior from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis, Marine Geology, Vol.26, pp.301-350.
- Wijnberg, K.M. and A. Kroon (2002)：Barred beaches, Geomorphology, Vol.48, pp.103-120.
- Yuhi, M. (2008)：Impacts of anthropogenic modifications of river basin on surrounding coasts: A Case Study, Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, ASCE, Vol.134, No.6, pp.336-344.
- Yuhi, M., S.Umeda and K.Hayakawa (2009)：Regional analysis on the decadal variation of sediment volume in an integrated watershed composed of the Tedori River and the Ishikawa Coast, JAPAN, Journal of Coastal Research, SI56(2), pp.1701-1705.
- Yuhi, M. and M.Okada (2011)：Long-term field observations of multiple bar properties on an eroding coast, Journal of Coastal Research, SI64, pp.860-864.