

石川海岸における沿岸砂州の形成・移動・消失に関する長期変動解析

Characteristics of Inter-Annual Bar Migration on the Ishikawa Coast, Japan

由比政年¹

Masatoshi YUHI

This study analyzes a bathymetric dataset sampled annually for 51 years along the Ishikawa Coast, Japan, where the morphological variation is characterized by the cyclic cross-shore migration of bars with approximately 10-year return period. Five cycles have been identified from 1960 to 2010. The variability of spatial pattern during individual cycle is analyzed to quantify the characteristics of three-dimensional morphological evolutions. Considerable changes in plan shape were observed such as quasi-regular crescentic patterns, parallel alignment of oblique bars, disconnection and realignment of bars. This is in contrast to the quasi two-dimensional progress of net offshore migration (NOM) of sandbars reported in the Netherlands, New Zealand, Denmark, and Japan.

1. 序論

多くの砂浜海岸に発達する沿岸砂州は、多様な時間スケールに渡り、岸沖あるいは沿岸方向の移動を繰り返している (Wijnbergら, 2002; Greenwood, 2005など)。近年、世界数地点の多段砂州システムにおいて、数年程度の時間スケールを有する、砂州の組織的沖向き移動の存在が観察されてきた (Wijnbergら 1995; Ruessinkら 2000; Kuriyama 2002; Shandら, 1999等)。NOM (Net Offshore Migration) と称されるこの種の中長期変動は周期的であり、その再現周期は地域により異なるものの (1~20年程度)、砂州配置の変遷形態はおおよそ共通である。

NOMに関する従来の研究は、沿岸方向の一様性を仮定して、断面2次元的な変動を前提としたものが多い。これは、①砂州の形成、②発達と沖向き移動、③減衰・消失の3つのステージで構成されるサイクル (Ruessinkら, 1994) が基本的に岸沖方向の運動であることに加え、3次元 (平面2次元) 的な長期変動データの取得が困難であることも要因の一つである。広域深浅測量およびARGUS等の画像解析の結果からは、近接・連続した海岸においても、NOMの各種特性は変化し得ることが報告されている (Wijnberg, 1995; Grunettら, 2004など)。また、一連のサイクルの中で、リズムミックパターンの形成や、分岐、切断、再接続等の3次元的现象の発現も確認されている (Shandら, 1999など)。このような3次元性を考慮したNOMの特性については、未解明な点が多く残されるのが現状である。

著者らは、50年以上に渡る広域観測データを基に、石川海岸における沿岸砂州の長期変動特性を解析してきた (由比ら, 2012等)。本研究では、一連の研究を進展させ、

3次元動態のLagrange的追跡と類型化、周期的変遷過程の定量化及び国内外における観測例との比較実証を行う。

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。各測線における観測期間中の平均断面形状をさらに空間平均した結果を図-2に示す。図中では1969年の汀線位置を岸沖方向の基準位置としている。海浜勾配は前浜で約1/14、以下、沖方向に向けて、1/46, 1/71, 1/2500, 1/108と変化している。汀線近傍から沖合1000m (水深10m相当) 付近までの範囲で多段砂州が発達し、活発な移動を繰り返している (Yuhiら, 2011等)。多くの場合、砂州は二段配置であり、10年程度の時間スケールで周期的に変動する (由比ら, 2012等)。

対象領域における潮位変動は±0.25m程度と小さいため、汀線近傍の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、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以上の沖合では、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 (NE方向) 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や手取川からの土砂供給減少に伴って、石川海岸は、長期的な侵食傾向にある (田中ら, 1997; Yuhi, 2008)。急激な汀線後退を受けて、

1 正会員 博 (工) 金沢大学教授

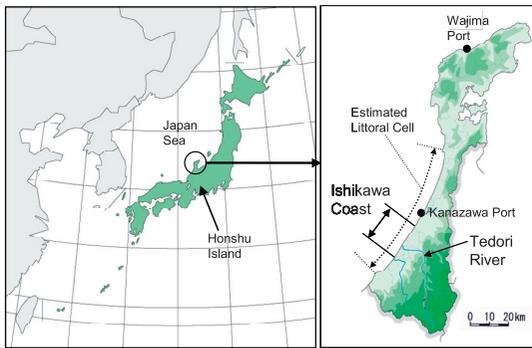


図-1 解析対象領域

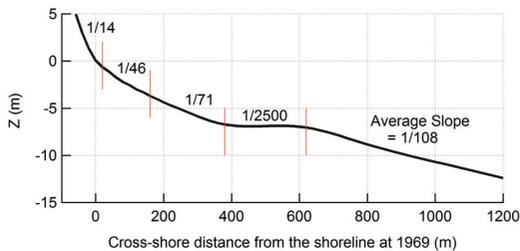


図-2 平均断面形状

1970年以降、多くの海岸構造物が侵食対策として建造されてきた。この結果、現在では、汀線近傍の侵食は緩和されている (Yuhiら, 2009)。

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 (測線数109本)、1990年以降は400m (55本) 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。

まず、測線ごとに断面形状を解析し、砂州峯およびトラフの位置と地盤高を抽出して、比高を算出した (図-3)。続いて、平面的な視点から、砂州形状と配置を検討し、同一の砂州に対応すると考えられるサンプルをグループ化した。NOMのサイクルにおいては、最も沖側の砂州が減衰・消失すると、1つ岸側に位置した次世代の砂州が発達・移動を開始し、前世代の砂州に取って代わる形となる。今回の解析では、個々の世代の砂州をLagrange的に追跡検討することを試みた。このため、観測初年度に最も沖側で発達していた砂州をBar-1とし、1つ岸側に位置したものをBar-2、その後形成された砂州をBar-3という形で連続的な番号付けを行った。期間内に識別さ

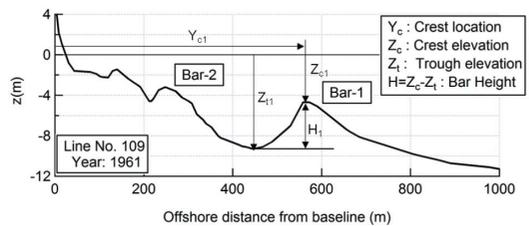


図-3 砂州語元の定義

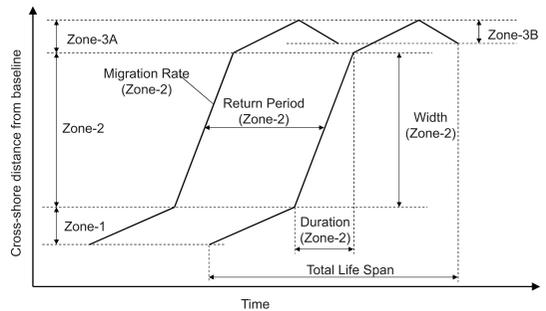


図-4 NOMパラメータの定義

れた砂州は計6世代であり、個々の砂州について、配置の3次元の特徴、周期的な変動特性やその時空間的の変遷について解析した。また、Ruecsinkら (1994) の概念モデルに従って、個々の砂州の変動サイクルを (1) 汀線近傍での形成期、(2) 沖向き移動・発達期、(3) 減衰・消失期の3つのステージに区分して、各ステージに対するNOMパラメータ、すなわち、砂州の移動速度 (migration rate) および岸沖移動範囲 (width)、存在期間 (duration)、再現周期 (return period) を算出した (図-4)。なお、石川海岸では、他のサイトと異なり、減衰期後半で岸向きの砂州移動が存在するため、第3ステージをさらに、(3A) 沖向きに移動しつつ減衰する段階、および、(3B) 岸向きに移動しつつ減衰消失する段階に細分して検討を行った。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、離岸距離の解析においては、測量のベースラインからの沖向き距離を採用した。

4. 沿岸砂州の長期変動特性

(1) 砂州平面形状の遷移

石川海岸に発達する二段砂州システムは10年程度のサイクルで周期的変動を繰り返す。その平面配置の変遷パターンは観測期間中基本的に共通である。図-5は、砂州峯位置および比高をそれぞれプロットの中心位置と大きさで表し、砂州平面形状と比高の経年変化を表示したものである。X=0が手取川河口 (土砂供給源) に対応し、砂州の世代ごとに色分けして表記している。左段が、第

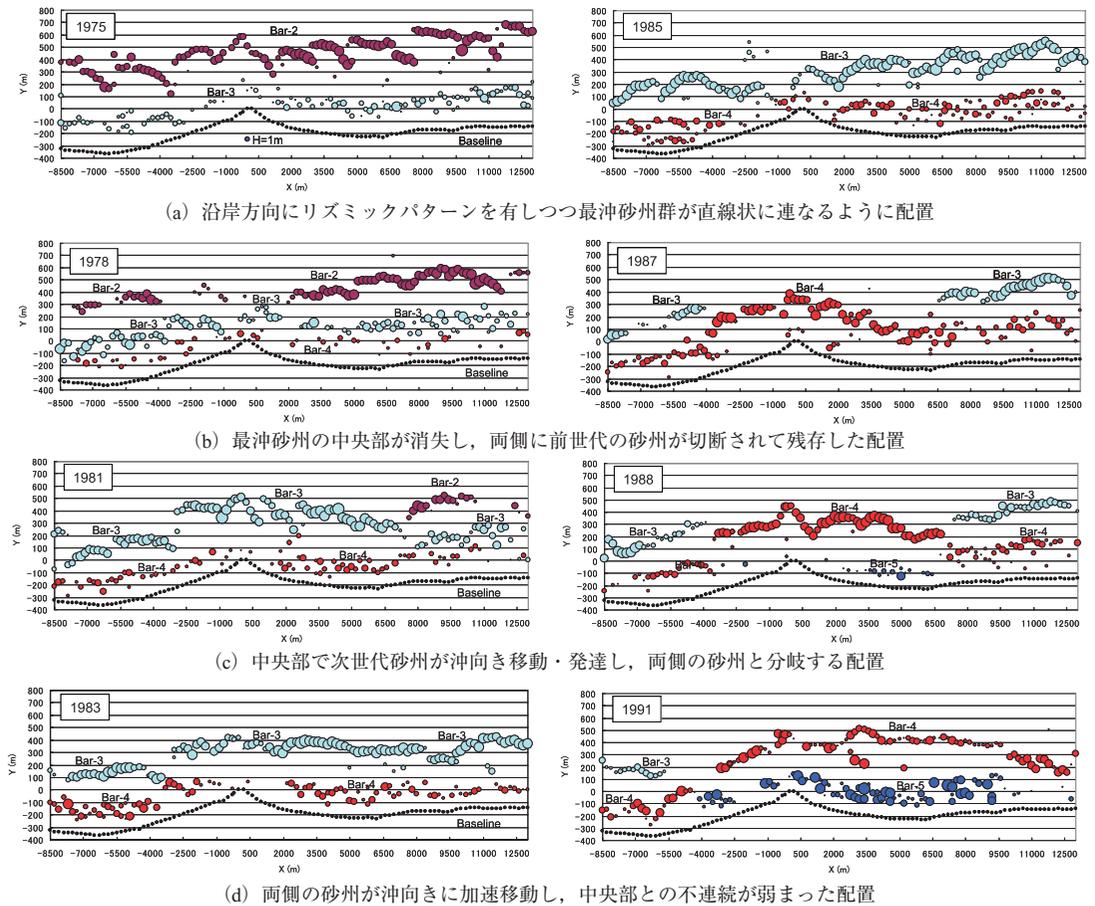


図-5 平面砂州形状の代表パターン (円の面積：砂州比高に比例；中心：砂州頂部位置)

2世代から第3世代への変遷過程に、右段が第3世代から第4世代への変遷過程に対応する。観測期間中に、計6世代に渡る砂州の発達を観察され、その平面配置の代表パターンとして図-5に示す4つの形態が繰り返し確認された。(a) 最沖砂州群が三日月状、雁行配置等のリズム的な変化を示しつつ全体としては直線状に連なる配置である。その後には次世代の砂州が離岸距離200m付近に位置している。後述するように、右段図における最沖砂州(第3世代砂州Bar-3)の発達位置は、左段図の第2世代(Bar-2)と比較して岸寄りである。(b) 中央部分で最沖砂州が消失した配置であり、この結果中央部分の次世代砂州が沖向き移動と発達を加速させる。なお、右段の例では、1986年における配置がより左段の例に近いと考えられるが、1986年は沖側観測範囲が十分でなかったため、1987年の配置を示している。(c) 最沖砂州の消失を受けて、中央部で次世代の砂州が発達・沖向き移動した配置である。この段階では両側に前世代の砂州が残存し、その背後に次世代の砂州が位置するため、平面形としては2世代の砂州が分岐して不連続的に配置され

る。(d) 両側に残存していた前世代砂州が消失したことを受けて、次世代の砂州が沖向きに移動して、中央部の不連続性が緩和された配置である。両側の砂州の消失は中央部側から外側に向けて順に進行していく。消失時の岸沖移動方向は岸向きである。この後、先の(a)の状態へ進行する。総体的には全世代で類似した変動パターンが確認されたが、第5世代砂州は全体に岸沖変動が弱まる傾向を示し、特に手取側左側側 $X < 0$ の領域でその傾向が顕著に見られた。

(2) 個々の砂州の移動・発達・消失特性

解析期間中に観察された6世代の砂州について、平均離岸距離(測量基点からの距離)と平均比高、および、離岸距離の変動強度(標準偏差)の変遷を解析した。その結果を図-6~8および表-1に示す。なお、第1世代の砂州は減衰期のみ、第6世代の砂州は形成期のみを観測となっているため、形成・発達・減衰の全段階が捉えられているのは第2~5世代の砂州に限定される。図-6を見ると、長期的な海岸侵食の影響下で、砂州の移動範囲は第3世代(1980年代)で岸寄りに縮小し、その後回復す

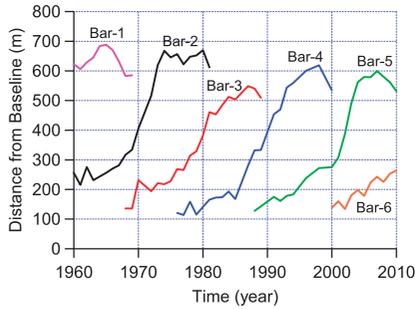


図-6 砂州頂部離岸距離の経年変動

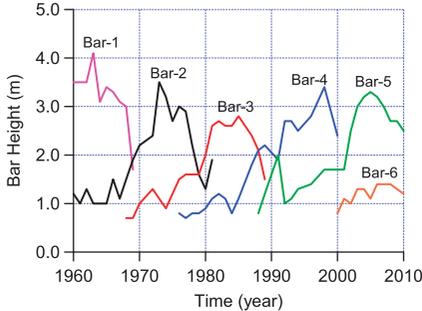


図-7 砂州比高の経年変動

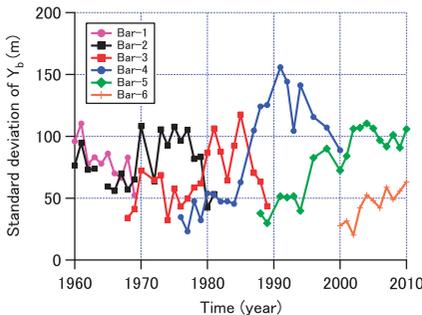


図-8 離岸距離の沿岸変動強度

表-1 サイクルにおける砂州移動特性

Stage		Bar-1	Bar-2	Bar-3	Bar-4	Bar-5	Bar-6	Average
1	Width (m)		119	133	79	179	129	127.8
	Duration (yr)		9	9	9	13	10	10.0
	Migration Rate (m/yr)		9.4	13.3	7.6	13.6	13	11.4
	Return Period (yr)		8	8	14	10.5		10.1
2	Width (m)		333	195	375	254		289.3
	Duration (yr)		5	4	8	3		5.0
	Migration Rate (m/yr)		67.4	45.9	44.3	86.5		61.0
	Return Period (yr)		7.5	10	13.5			10.3
3A	Width (m)	82		96	75	38		72.8
	Duration (yr)	5		6	5	3		4.8
	Migration Rate (m/yr)	16.5		15.6	15.6	11.1		14.7
	Return Period (yr)			11.5	10			10.8
3B	Width (m)	-105	-58	-40	-84	-68		-71.0
	Duration (yr)	4	7	2	2	3		3.6
	Migration Rate (m/yr)	-29.4	-3.1	-19.8	-42	-22.2		-23.3
	Return Period (yr)		10.5	11	9.5			10.3
Total Average	Total Life Span (yr)		21	21	24	22		22.0
	Return Period (yr)		8.7	10.1	11.8	10.5		10.4

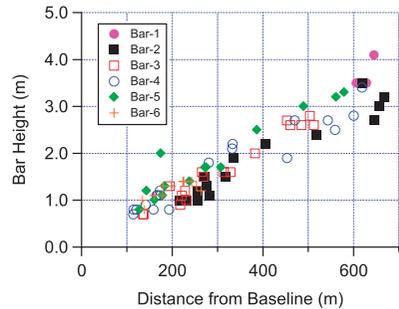


図-9 形成・発達段階の砂州離岸距離と比高の相関

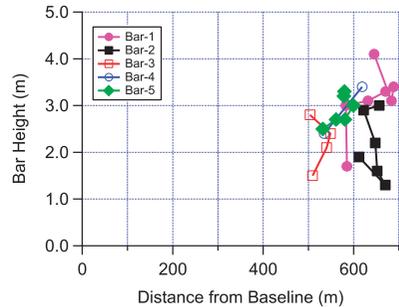


図-10 減衰・消失段階の砂州離岸距離と比高の相関

る傾向が見受けられる。それぞれの砂州の移動形態は4つのステージで特徴づけられる。(1) 形成：離岸距離150m付近で形成され、離岸距離200~300mの位置に向けて、約10m/年の速度で緩やかに沖向きに移動する。(2) 沖向き移動と発達：45~85 (平均約60) m/年の速度で、離岸距離500~600mの位置へ向けて急速に沖向き移動する。この段階で比高も大きく発達する。(3A) 沖向き減衰：15m/年に移動速度を減じつつ70m程度さらに沖向き移動する。比高は増加から減少に転じるか、あるいは、同程度で推移する形となるが、第4世代については引き続き増加する傾向が見られた。(3B) 岸向き減衰：沿岸方向に切断され、沿岸長及び比高を減じつつ、緩やかに岸向きに移動して消失する。このときの岸向き移動距離は世代により異なるが、平均するとステージ3Aでの沖向き移動距離と同程度である。砂州比高の変動パターン

も離岸距離と同様の変動を見せ、世代間の規模の変遷も移動範囲の増減と対応している。ただし、比高変動の方が、より前後対称に近い形となる。比高の大きさは形成期で1~1.5m程度、発達期で最大3~4m程度に達した後、1.5m程度まで減衰して消失する。離岸距離の沿岸変動強度は、発達期に急増する傾向があるが、年による短期変動も大きい。サイクルの再現周期は9-12年、個々の砂州のライフスパン (形成~消失) は21-24年に達する。図-9は形成・発達段階における離岸距離と比高の関係を示す。両者間には直線的相関が認められ、100m沖へ移動すると0.5m程度比高が増加する傾向にある。図-10は減衰・消失期における離岸距離と比高の関係である。離岸

表-2 砂州移動特性の比較

Location	Country	Total Life Span (yr)	Return Period (yr)	Migration Rate (m/yr)
Ishikawa	Japan	21-24	9-12	45-85
Hasaki		1	1	190
Egmond	Netherlands	15-20	15	30
Zandvoort		10	3-4	60-70
Katwijk		6-8	4-5	60
Terschelling		20	7-8	50
Duck	U.S.A.	4-5	3-7	60-70
Wanganui	New Zealand	2-5	1-2	100-200

距離が600mを超過すると、比高変動は、図-9の直線的变化から逸脱し、すみやかに減少する傾向にある。

(3) 他地域との比較

石川海岸で観察された組織的な多段砂州変動の特性は、従来世界数地点で報告されてきたNOM現象と基本的に共通である。ただし、減衰・消失段階において、岸向きの移動減衰ステージが存在し、ライフスパン中に占める減衰期間の割合が大きいことが特徴的である。砂州の沖向き移動速度や再現周期、存在期間についてShandら(1999)のレビュー結果等と比較した結果を表-2に示す。なお、移動速度として、沖向き移動が最も顕著に現れる第2ステージの値を示している。石川海岸におけるNOMパラメータの値は、存在期間や再現周期が長めであるが、移動速度は他の多くのサイトと同程度の値を示している。既往の報告の中では、Terschelling(オランダ)での観測例に比較的近い。再現期間や存在期間が長い地点では、観測データが十分に揃にくい点もあって、従来、断面2次元的な変動を前提とした解析が行われてきたが、石川海岸の組織的砂州移動では、3次元性の発現が大きな役割を占めることも特徴的である。

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淺測量データに基づいて、多段砂州システムの中長期変動を解析した。まず、沿岸方向21.5kmの範囲で観測期間中に発達した計6世代の沿岸砂州を対象に、その動態をLagrange的に追跡することで、NOMと総称される10年スケールの周期的変動特性を明らかにした。2段砂州システムの移動形態は、(1)形成、(2)沖向き発達、(3A)沖向き減衰、(3B)岸向き減衰の連続したステージで特徴づけられ、石川海岸に固有の3次元形状変化を伴う変遷パターンを有することを明らかにした。この組織的変遷過程において、領域中央部と両端側で同世代の砂州が時間差を有して沖向き移動するパターンが繰り返され、砂州の切断や分岐、再接続などの大規

模な変動も確認された。サイクルの再現周期は9-12年、個々の砂州のライフスパン(形成～消失)は21-24年に達している。国内外の諸地域における既往のNOM観測例との比較では、岸向きの移動減衰ステージが存在し、ライフスパン中に占める減衰期間の割合が大きいことが特徴的である。

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。また、データ解析にあたっては、元金沢大学大学院生・岡田磨香氏の助力を得た。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

- 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.
- 由比政年・岡田磨香(2012): 石川海岸における多段砂州の3次元周期変動特性, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.68, No.2, pp.1_641-1_645.
- Greenwood, B. (2005): Bars, In: Schwartz, M. (ed.), Encyclopedia of coastal science, Springer, pp.120-129.
- Grunnet, N. M. and P. Hoekstra (2004): Alongshore variability of the multiple barred coast of Terschelling, the Netherlands, Marine Geology, Vol.203, pp.23-41.
- 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, Vol.121, pp.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, Vol.163, pp.289-302.
- 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 Tedoru 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.