

中津干潟三百間地区における砂州の大変形の機構

Mechanism of Deformation of Sand Bar Formed in Sanbyakken Region in Nakatsu Tidal Flat

清野聡子¹・宇多高明²・足利由紀子³・神田康嗣⁴・城野博之⁴

Satoquo SEINO, Takaaki UDA, Yukiko ASHIKAGA, Yasutsugu KANDA and Hironobu JONO

Long-term changes in sand bar in Sanbyakken region in Nakatsu tidal flat were investigated through the comparison of the aerial photographs. Great changes have occurred in this sand bar in recent years, as a result of increase in eastward longshore sand transport since 1998. The reason was studied in terms of change in wave field. Waves with the direction of N70deg E, which was determined from the shape of the sand bars on the tidal flat, were significantly sheltered due to the offshore breakwater of Nakatsu Port. Taking the refraction effect of these diffracted waves into account, the tip of the sand bar was also sheltered by the waves. It was found that this caused increase in longshore sand transport.

1. はじめに

干潟は、河川や海蝕崖からの流入土砂が静穏な波浪条件を有する海域に堆積して形成されるものであり、海岸線沖に非常に広い平坦面を有することで特徴付けられる。一方、多くの干潟にあっては、陸岸に粗砂からなる海浜が存在し、両者が明瞭な遷急点を持って互いに接している。熊田ら(2004)は、岡山県の高島の浜における干潟と海浜の組み合わせに着目し、遷急点を境とした両者の区分は、主に砂と泥質材料の持つ平衡勾配の相違によってもたらされることを数値モデルにより説明した。こうした機構で形成された陸岸付近の砂浜の多くは入射波条件に対応して安定状態にあるが、このような砂浜が急変形を遂げる場合もある。しかも平坦な干潟面上での土砂移動のため、砂嘴を形成しつつ変形が進む例が多く見られる。類似の現象には、同じく平坦面を形成するリーフ上における砂州や砂嘴の発達がある。例えば、宇多ら(2003)はリーフの掘削によって掘削穴の急斜面から打ち上げられた砂が砂州を形成し、先端に砂嘴を有しつつバリアーを形成したことを明らかにした。このように陸岸沖に平坦な極浅海域を持つリーフと干潟では、互いに類似の海浜変形が起こるが、これらは固定床と見なし得る平坦面上で sand body が移動する点において、一般の海浜における変形とは特性的に大きく異なる。干潟縁辺部の砂浜は、干潟の水質浄化や環境維持から見ても非常に重要であるが、このような砂浜を健全に維持する上でもこの種の現象の解明が必要とされる。本研究では、大分県の中津干潟における砂州の大変形の実例をもとに

砂州の変形機構について考察する。

2. 大分県中津干潟の概況

中津干潟は、図-1に示すように国東半島から北九州へと連続する広大な豊前海の干潟の一部をなし、岸沖方向の幅は約3km、広さは1347haを有している。中津港の港湾施設以外には地形改変が小さく干潟地形の典型的な姿をとどめている。中津干潟に流入する中津川と蜷瀬川に挟まれた三百間地区には、延長約600mの砂州が伸びており、その背後には塩性湿地が形成され多様な生物の住処となっている。しかしこの砂州は急速にその形を変えつつあることから、近隣住民から砂州の安定化や除去の要望が行政に寄せられており、その変化機構の解明や対策検討が急務となっている。

アメダス(中津)の1990～2006年の観測データによれば、日最大風速に対応する風向は図-2のようである。陸風となる南寄りの風を除けば、年間を通じた卓越風向はNNWであるが、冬季にはWNWも卓越している。これらと比較して頻度は下がるもののNE、ENE方向も高頻度である。とくにこれらの風向はフェッチが長いため無視できない。また中津の潮位条件としては、HWLがDL+3.45m、LWLがDL+0.8m、MSLがDL+1.95mにある。

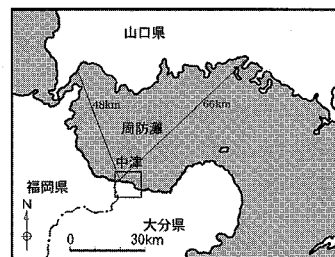


図-1 中津干潟の位置

1 正会員 工博 東京大学大学院総合文化研究科
2 正会員 工博 (財)土木研究センター理事なごさ総合研究室長
兼日本大学客員教授理工学部海洋建築工学科
3 NPO法人 水辺に遊ぶ会理事長
4 正会員 (株)水域ネットワーク

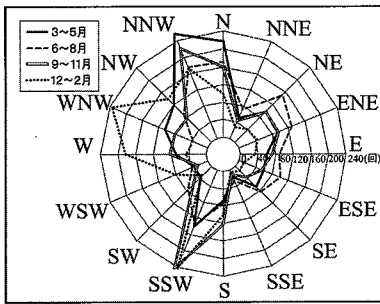


図-2 アメダスによる風配図

3. 三百間地区における砂州の大変形

1947～2005年に撮影された空中写真をもとに三百間地区の砂州の長期的変遷について調べた。まず1947年3月撮影の空中写真を図-3に示す。三百間地区には、その内側に広い干潟を有する半径約300mの砂州が伸びていた。砂州内側の干潟と外海との海水流動は蛸瀬川左岸堤防沖にある長さ約70mの開口部を経由して行われていた。砂州内側の汀線に着目すると、当時砂嘴として突出していた砂州先端部とは別に、砂州内側の汀線と鋭角状に交差する細長い砂州が少なくとも4箇所で見られ、分枝状砂嘴の形状を有していた。当時の汀線と鋭い角度をなして交差するこれらの細長い砂州は、砂嘴先端部の汀線が砂州本体と分かれて伸びた際残された旧砂嘴の一部と考えられる。

一方、図-3に破線で示すように干潟面上には数多くの縞模様が見える。これらは干潟面に発達した砂堆に対応すると考えられるが、それらの中央に位置する縞模様上に点Aを定めて接線を引き、その方向角を測るとN55°Eとなる。さらにこれらの縞模様が当時の砂州と交差する付近では、汀線が沖向きにわずかに突出している。これらは河口砂州においてしばしば観察されるように、岸向き漂砂によって砂が移動し、砂州と合体する場合に見られるものと同様な特徴を有している。

図-4には1962年10月撮影の空中写真を示す。1947年と比較すると汀線が全体に大きく陸側へと移動している。三百間地区は干拓地として造成されたが、この干拓地が最も沖向きに突出する地点をBとすると、1947年にはBを通して東西方向に汀線が連続していたことから、沿岸漂砂はBを横切って自由に通過できる条件にあった。したがって1947年から1962年までに砂州が全体的に後退した理由の一つに、Bを越えて西側へと砂が運び去られたことが考えられる。また、図-4は干潮時に撮影されたため干潟面上の微地形が顕著に写されている。1947年と同様、砂州のすぐ沖合には数多くの縞模様が見える。図-3と同様点Aを定め、その方向角を測定するとN60°Eとなる。図-3の場合、干潟面上の縞模

様は砂州に接近すると右回りに回転して砂州の汀線と直交方向へと向きが変わるという特徴があったが、図-4でも同様な特徴が見られる。そこでそれらのうちの一本のPQを抽出すると、この縞模様は点P付近から始まり、岸側ほど姿が明瞭となった後、点Qで唐突に終わっている。そして少なくとも写真撮影時には水面上に現れた細長い砂州として伸びていたことが分かる。

一方、砂州の先端部は陸岸に接続するまで伸びており、その内側には図-3と同様干潟を有している。この干潟面には、砂州裏側の汀線と鋭角状に交差した細長い砂州が確認できるが、これらは1947年当時も存在したものである。このことから分枝状砂嘴として伸びたこれらの細長い砂州は、少なくとも1947年以前に形成された砂嘴の名残であることが分かる。さらに、1962年には三百間地区の最突出点Bを境に東西の汀線は不連続となった。このことから、この時期以降砂州を構成する砂が西側へと流出する可能性が大きく低下したことが分かる。

図-5は1974年12月撮影の空中写真である。砂州の規模が小さくなり、とくにB付近では護岸が露出し、砂州はこの露出した護岸の東側に閉じ込められた。Bを境界として汀線が不連続となったことから、干拓地の最突出地点Bは漂砂の出入りのない、西側の固定境界になった。著しい地形変化は砂州の先端部で起きている。1962年までは比較的安定していた分枝状砂嘴の細長い砂州群に急激な変化が起これ、砂州aとその内側に狭い干潟を抱えた砂州b

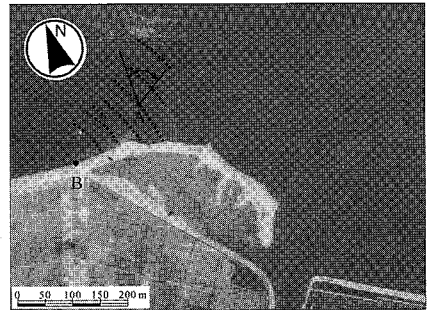


図-3 三百間地区の砂洲の空中写真(1947年3月)

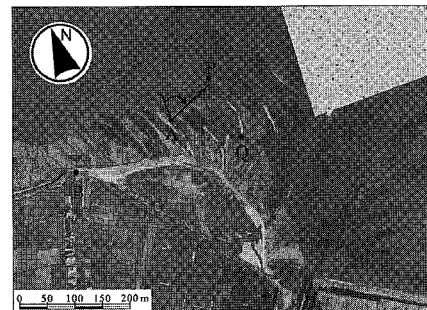


図-4 三百間地区の砂洲の空中写真(1962年10月)

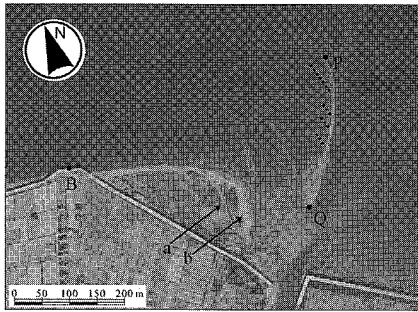


図-5 三百間地区の砂洲の空中写真 (1974 年 12 月)

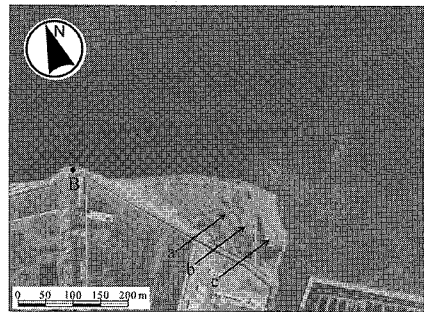


図-6 三百間地区の砂洲の空中写真 (1985 年 4 月)

が成長し、とくに砂州 b は堤防直前にまで伸びた。

図-6 は 1985 年 4 月撮影の空中写真である。1974 年当時の砂州と比較すると、砂州は全体に東向きに大きく発達し、蛸瀬川河口左岸堤防の延長線状まで達している。砂州の東向きの発達と同時に、B の東側隣接部では汀線が後退していることから、砂州の西部が侵食され、侵食土砂が沿岸漂砂によって東向きに運ばれた結果砂州の発達が起きたと推定できる。砂州の内側で分枝した細長い砂州については a, b, c が確認できるが、これらのうち a, b は図-5 にも示したように 1974 年までに形成されていた分枝砂嘴であるが、これらの外側に新たに砂嘴 c が伸びた。

図-7 は 1998 年 12 月撮影の空中写真である。1985 年当時と比較すると、砂州北面の汀線の曲率が小さくなりほぼ直線状となった。同時に、B と砂州と護岸の接点との距離が長くなり、東向きの砂移動があったことが分かる。砂州沖には間隔約 70 m を有する多数の縞模様が認められる。図-3 と同様にして砂州沖の点 A で縞模様への接線を引き、その方向角を求めると $N55^{\circ}E$ となる。砂州の内側では分枝砂嘴 a, b, c が見られるが、a, b では砂州上に植生が侵入し表面が植生で覆われた。一方、砂州 c は 1985 年当時の形状より面積が大きく増大したが、砂州 b, c の間には 1985 年当時にあった細長い干潟がそのまま残されている。

図-8 は、2005 年 12 月撮影の空中写真である。図には 1947 年の砂州形状も比較のため示す。1947 年から 2005 年までの変化は非常に大きく、砂州北面の汀線は最大で 150 m も後退し、逆に東端部では砂嘴が東方向へ 180 m も伸びて蛸瀬川河口を大きく取り囲むようになった。この写真でも沖合には縞模様が見えるが、他と同様に点 A を定めて縞模様への接線方向角を調べると $N70^{\circ}E$ となる。また縞模様への接線方向角を全て挙げると、 $N55^{\circ}E$ (1947 年)、 $N60^{\circ}E$ (1962 年)、 $N55^{\circ}E$ (1998 年)、 $N70^{\circ}E$ (2005 年) となる。そのレンジは $N55^{\circ}-70^{\circ}E$ 、平均では $N60^{\circ}E$ となる。これらの縞模様は汀線近傍まで顕著な発達を示し、前浜の地形変化と連動した動きが見られることから、満潮時に波浪作用が最も顕著となる時期に形成されたと推定される。

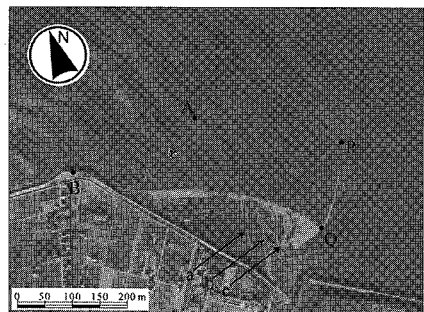


図-7 三百間地区の砂洲の空中写真 (1998 年 12 月)

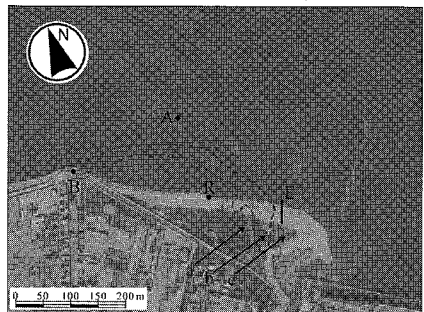


図-8 三百間地区の砂洲の空中写真 (2005 年 12 月)

そして縞模様の方向角はこの干潟に東側から入射する波の入射方向を与えると推定される。

4. 海岸線の長期的変化と沿岸漂砂量の推定

空中写真より三百間地区の砂州形状を読み取り、それらの重ね合わせを行ったのが図-9 である。図には以後の解析に便利のように三百間地区のほぼ直線状の海岸堤防の中心に点 O を定め、この点から直交座標 (x , y) を定めている。これによれば、砂州の外縁線は 1947 年には点 O を中心とする半径ほぼ 300 m の半円形であったが、 y 軸方向につぶれるようにして汀線が後退し、それと同時に x 軸方向に伸びたことがわかる。砂州がつぶれるような変形が起き、突出した汀線が扁平となったのは、渡辺ら (2001) が明らかにしたように、作用波に対する海岸線の角度が小さく

なり、いわば位置ポテンシャルが低下することに起因する。

1947年の汀線と x , y 軸との交点に点 G, H を定め、これらの点から原点 O を望む方向に Δx , Δy を取り、それらの時間的変化を調べたのが図-10 である。 Δy は時間的に単調に減少し、その減少速度は 2 m/yr であった。一方、 Δx は 1975 年までは Δy と同期して後退していたが 1975 年以降急速に増大した。1975 ~ 2005 年の平均伸長速度は 6.5 m/yr であった。

図-11 は 1947 年の汀線を基準とした砂洲の侵食面積 (ΔA_e) と増加面積 (ΔA_a) である。侵食面積と堆積面積は釣り合っておらず、常に侵食面積のほうが大きい。1960 年以降は侵食面積と堆積面積の差は $2.8 \times 10^4 \text{ m}^2$ と一定値を保っている。これは 1960 年当時砂州において砂利採取が行われたことによる。したがって近年では侵食・堆積がほぼバランスしつつ変形が続いていることが分かる。

砂州の平面的変化に対応する海浜縦断形を調べるために図-8 に太い実線で示す E 測線を干潟の平坦面から陸側に向かって 2006 年 7 月に測量した。結果を図-12 に示す。砂州は、平坦な干潟面 (標高ほぼ D.L.2 m) から 4.78 m まで 1/9 の勾配で急激に立ち上がっている。この場合砂浜は 2.8 m 厚で移動していることが分かる。一方、清野ら (2003) は、同じ中津干潟の蛸瀬川河口の東 1.2 km に位置する大新田地区の海浜変形を調べており、海浜断面は D.L.+2.0 ~ 2.5 m 付近を境に勾配が大きく変化し、沖側は約 1/1,000 勾配、岸側は 1/7 ~ 1/10 勾配となっており、沖の緩斜面は粒径が細かい泥質からなり、岸側の急斜面は粗砂からなっているとした。この結果は本研究の結果と同じ特性である。

ここで表-1 に示すように、1962 年以降の侵食・堆積面積の変化量を経過時間で割るとともにそれらの平均値を求め、さらに砂州の縦断測量の結果より干潟面上の砂州は干潟の平坦面 (D.L.2 m) からバーム高 4.78 m まで、2.8 m の厚さ (移動高) で移動しているの、侵食・堆積面積の増加率の平均値に 2.8 m を乗ずると、砂州の侵食域から堆積域へと変わる点における沿岸漂砂量が推定できる。結果を表-1 に示すが、沿岸漂砂量は近年増加傾向にあり、1998 年以降では約 $2,400 \text{ m}^3/\text{yr}$ の沿岸漂砂が蛸瀬川河口沖へと移動している。これは海浜変形が進むにつれて漂

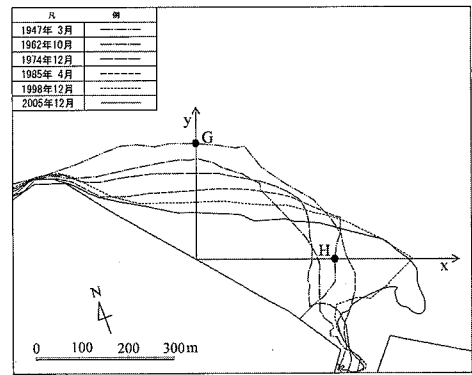


図-9 砂洲形状の変化

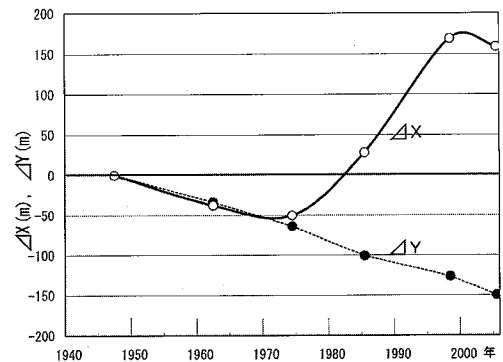


図-10 ΔX , ΔY 時間的変化

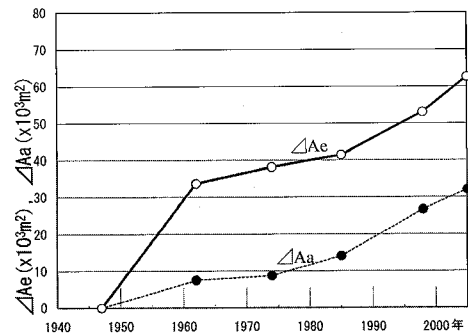


図-11 1947年の汀線を基準とした砂洲の侵食面積 (ΔA_e) と増加面積 (ΔA_a)

表-1 各年の侵食・堆積土砂量と沿岸漂砂量

比較年	侵食面積 の増加量 (m^2)	堆積面積 の増加量 (m^2)	侵食・堆積 面積の増加 量の平均値 (m^2)	沿 岸 漂砂量 (m^3/yr)
1962 ~ 1974	4,450	1,225	2,838	589
1974 ~ 1985	3,275	5,425	4,350	979
1985 ~ 1998	11,625	12,550	12,088	2,331
1998 ~ 2005	9,550	5,375	7,463	2,518

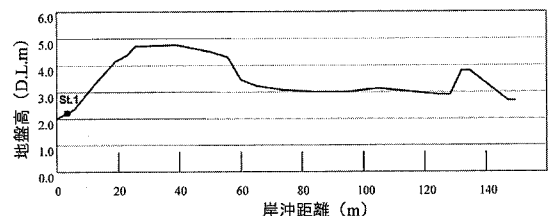


図-12 海浜縦断形測量の結果

砂量が小さくなるという一般特性と逆である。

5. 砂州の大変形の機構

砂州の変形は主に沿岸漂砂によって東向きに砂が運ばれることによって引き起こされたと考えられる。しかしながら、近年では、砂州西端は堤防が露出し、大礫で覆われていることから沿岸漂砂の流入のない固定境界と判断されるため、東向きの沿岸漂砂が卓越する条件では、沿岸漂砂が流出する区間では砂州幅が次第に狭くなり、最終的に砂州背後の干潟が露出しなければならない。表-2は、図-9に示す y 軸と各時期の砂州との交点における砂州幅である。砂州幅は平均約28mでほぼ一定である。このことは、砂州が侵食され砂州幅が狭まると岸向き漂砂が起り、砂州幅を一定に保とうとする復元力(古池ら, 2006)も働いていることを意味する。

三百間地区の砂州の変形では、それを引き起こす東向きの沿岸漂砂量が砂州の変形とともに時間的に終息するのではなく、1985～1998年以降増大した。海浜変形の原理から考えれば沿岸漂砂量は次第に減少しなければならない。しかし観測結果はこれと逆である。その理由について波の場の変化から考察した。まず中津干潟への入射波のうち、卓越波浪であるNNWや冬季のWNW方向では何も変更が行われていないので、西側から入射波浪は基本的に変化がないと見做される。一方、東寄りの入射波について、三百間地区の砂州沖での干潟面上に形成された縞模様から推定された入射方向は $N55-70^{\circ}E$ であった。そこで干潟の外縁線付近での波の屈折を考え、干潟面上の平均水深を1.5m、干潟外縁線の外の水深を約6mとし、図-13に示すように、砂州沖での入射角の変域 $N55^{\circ}E \sim N70^{\circ}E$ をもとに、屈折計算を行った。入射波向 θ_1 、 θ_2 を求め、沖合よりこの方向角を持つ波が入射したとして中津港の沖防波堤の両端から波向線を延ばし、干潟外縁線で再び屈折計算を行うと、図-13のように $N55^{\circ}E$ の波向では中津港の西隣に遮蔽域が形成されるのに対し、 $N70^{\circ}E$ の方向では蛸瀬川河口沖で波が遮蔽される。このことは東寄りの波の入射では従来逆方向の沿岸漂砂を生じさせたが、沖防波堤が建設された1998年以降河口沖が静穏となったと考えられる。この場合西寄りの入射波による東向きの沿岸漂砂は変わらない。

表-2 各時期の砂州幅の変化

時期 (年砂州幅 (m))	砂州幅 (m)
1947	34
1962	30
1974	28
1985	23
1998	23
2005	29

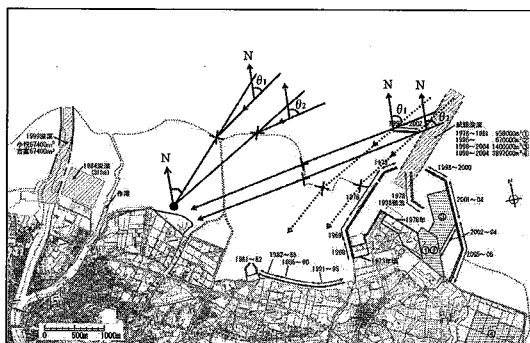


図-13 屈折計算の結果

いのに対し、東寄りの入射波では西向きの沿岸漂砂を生じにくくなってバランスが崩れ、ネットで東向きの沿岸漂砂を著しく発達させたことが1998年以降の沿岸漂砂量の急増を招いた原因と推定される。

6. ま と め

空中写真をもとに中津干潟の三百間地区の砂州の長期的変遷を調べた結果、この砂州は近年大変形を遂げたことが明らかにされた。砂州形状の変化分析によれば、変化を引き起こす東向きの沿岸漂砂量が1995～1998年以降急激な増大を示した。この理由を波の場の変化から考察したところ、西側からの入射波には変化がなかったが、東寄りの入射波に変化が見られた。東寄りの入射波について砂州沖の干潟面上の縞模様から推定した入射方向は $N55-70^{\circ}E$ であり、干潟外縁線付近での波の屈折を考えると $N70^{\circ}E$ 方向の波では砂州先端部が遮蔽された。これより東西の沿岸漂砂バランスが崩れたことが東向きの沿岸漂砂量の急増の原因と推定された。砂州と中津港の沖防波堤は3.4kmも離れているが、砂州が干潟面上に発達していたことがこのような顕著な特性をもたらしたと考えられる。

参 考 文 献

- 古池 鋼・宇多高明・芹沢真澄・三波俊郎・星上幸良・高橋功(2006): 河口砂州の変動予測モデル, 海洋開発論文集, 第22巻, pp. 899-904.
- 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・野志保仁(2004): 粒度組成の3次元変化を考慮した等深線変化モデル, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 441.
- 清野聡子・宇多高明・佐保哲康・安田英一・平野芳弘・足利由起子(2003): 中津干潟大新田海岸の保全施設計画時における護岸端部の侵食と河口砂州変動モニタリング, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1156-1160.
- 宇多高明・大須賀 豊・大中 晋・石見和久・芹沢真澄・三波俊郎・古池 鋼(2003): リーフの大規模掘削に起因するバリアーの形成と海岸侵食, 海岸工学論文集, 第50巻, pp. 1356-1360.
- 渡辺宗介・宇多高明・芹沢真澄(2001): 砂嘴の伸張予測モデル, 海岸工学論文集, 第48巻, pp. 541-545.