

高波浪と既往最大の潮位上昇による鹿島灘南部の 2006 年秋季海岸侵食

Analyses on Erosion of Kashima Coast due to 2006 Autumn Storm Event

武若 聡¹・El Sayed Galal²

Satoshi TAKEWAKA and El Sayed GALAL

A strong low-pressure system traveled along Japanese Main Island in October 2006. High waves and storm surge attacked Kashima Coast resulting huge erosion over the area. This study analyzes sand loss in sub-aerial zone of southern part of the coast, a stretch of 16 km from Kashima Port to Tone River, using airborne laser data measured in October 2005 and November 2006, and X-band radar images captured during the storm. Longshore distribution of cross sectional change has been estimated from the laser data. Eroded volume of sub-aerial zone was estimated as 600,000 m³. Pattern of erosion was controlled by headlands in the southern section, and by drainages in the northern section. Shoreline position during the storm has been digitized from radar images with locations of scarps read from aerial imagery.

1. はじめに

2006 年 10 月に大型の低気圧が太平洋沿岸を通過し、既往最大の潮位上昇を伴う高波浪が鹿島灘に來襲した。このイベントにより、鹿島灘南部（鹿島港～利根川河口）ではいわゆる後浜と考えていた領域に大規模な侵食が見られ、これまでに報告のなかった浜崖の発生が随所に見られた（柳嶋ら，2007）。この研究では、航空レーザ計測データと X バンドレーダ観測により取得された地形データを用い、前浜域の一部と後浜域から砂丘部にかけての侵食状況の把握とその特徴について考察する。

航空レーザ計測は広範囲の標高データを高精度かつ効率的に取得する手法で、国内外で実務、研究に活用されている（例えば、森田ら 2004；Robertson ら 2007；Stockdon ら 2007）。乾いた地形部の測定精度は高く、荒天前後の前浜から後浜にかけての地形変化を広範囲かつ機動的に調べるのに有効な手法である。

2. 2006 年 10 月の高波浪と潮位上昇の概要

本州南岸に停滞した前線の活動が、台風第 16 号の接近に伴い 2006 年 10 月 4 日頃から活発となった。また、5 日には、四国沖の前線上に発生した低気圧が急速に発達しながら本州の南岸を進んだ。この二つの低気圧により、関東から北海道地方の太平洋側で暴風と暴浪を記録した（気象庁，参照 2007-04-26）。

この低気圧に伴い、鹿島灘では高波浪と高潮を記録した。鹿島港では、北方からの入射波を観測し、2006 年 10 月 6 日に 6 m を超える有義波高を、銚子漁港（利根

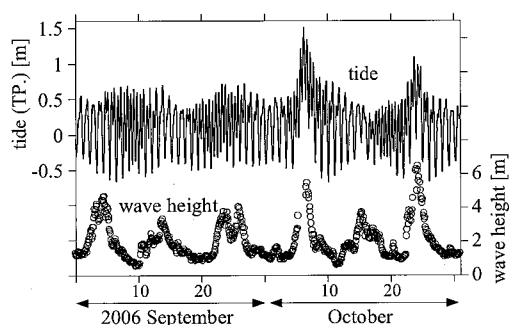


図-1 潮位（銚子漁港）と有義波高（鹿島港）の経時変化。

川右岸河口）ではこの間に既往最大の潮位偏差 0.94 m（2006 年 10 月 6 日 23 時，気象庁観測），最高潮位 1.51 m（東京湾平均海面 T.P. 上，2006 年 10 月 7 日 3 時）を記録した（図-1）。信岡ら（2007）は潮位上昇に関する数値計算を行い、気圧低下、吹き寄せ、wave-setup の効果に加え、北方からの強風によるエクマン輸送の効果が大きな潮位上昇をもたらしたと推定している。

この低気圧の通過に加え、2006 年 10 月 24 日、25 日に大型の低気圧が鹿島灘の沖合を通過し、再び高波と高潮位（銚子漁港潮位偏差：0.73 m）をもたらした。両低気圧通過の際に鹿島港とその周辺で貨物船の座礁があった。なお、2006 年 10 月 6 日、7 日には波高を欠測した時間帯があった。常陸那珂港の波浪観測結果を参考にすると、同日には 10 月 24 日、25 日の荒天時よりも大きな波高があったと推測される。

3. 解析対象領域と地形データ

本研究で解析の対象とした領域、使用した地形データの取得日、計測範囲などについて説明する。

1 正会員 工博 筑波大学准教授 システム情報工学研究科
2 学生会員 修(工) 筑波大学 システム情報工学研究科

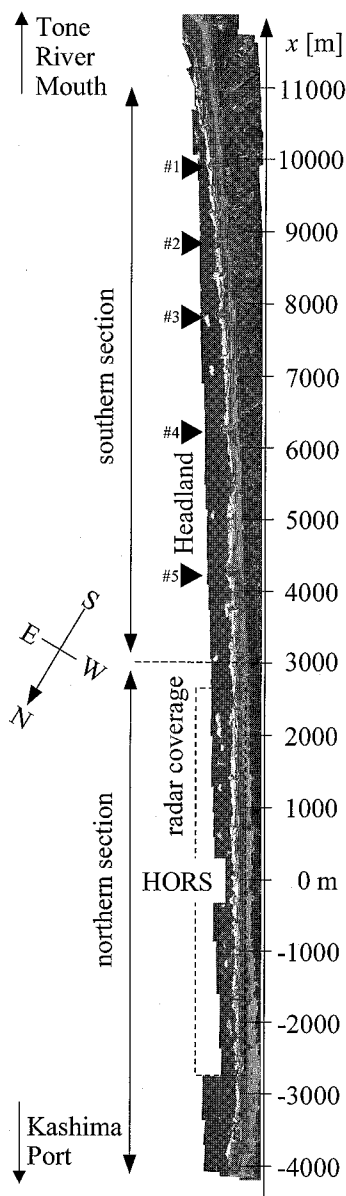


図-2 解析対象領域。北区間：構造物無し。南区間：ヘッドランド設置域。

(1) 解析対象領域

鹿島港南部の岸壁から利根川河口付近にかけての南北方向約 15 km の砂浜を研究対象領域とし、鹿島港から南方約 4 km の位置にある(独法)港湾空港技術研究所の観測桟橋(HORS)を原点とする座標系(沿岸方向： x 軸，岸沖方向： y 軸(冲向正))を設定した(図-2)。海岸砂丘がほぼ全域にあり，HORSの南方約 4 km 地点より利根川河口にかけて 5 基のヘッドランドがある。また，海岸には多数の排水口がある。海岸法線は，北区間($-4000 < x < 3000$ m)と南区間($3000 < x < 11000$ m)で

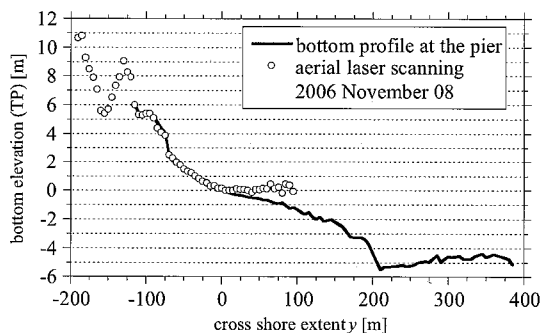


図-3 航空レーザ計測と測量結果の比較 ($x=0$ m, 2006 年 11 月 8 日)

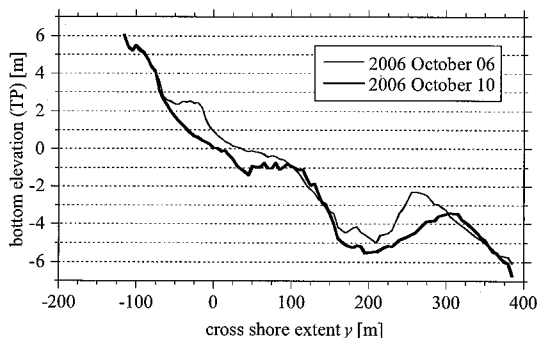


図-4 桟橋における断面変化 ($x=0$ m, 2006 年 10 月 6 日, 10 日)

約 4° 異なる。なお，区間設定の根拠は後に説明する。

(2) 航空レーザ計測データ

2005 年 10 月(国土地理院が実施)と 2006 年 11 月 8 に航空レーザ計測を行った。計測結果から，図-2 に示した座標系に沿い，沿岸方向 10 m，岸沖方向 5 m の間隔で標高データを取り出した。2006 年の桟橋沿いの航空レーザ計測結果と測量結果を図-3 に示す。航空レーザ計測により，計測時の水面(およそ T.P. 0 m)より高い位置の前浜の一部，後浜，砂丘部の標高データが取得される。航空レーザ計測と測量結果の差(標準偏差)は 2005 年が 0.20 m，2006 年が 0.29 m であり，航空レーザ計測は以降の大規模な侵食を議論するには十分な精度があると判断した。

航空レーザ計測を行う際には可視画像データが同時に取得される。このデータも HORS に沿った座標系に変換し(図-2 の画像)，ヘッドランド，海浜上の排水口沿岸位置，浜崖の発生位置などの判読に用いた。

(3) X バンドレーダデータ

図-2 に示す HORS を中心とする沿岸方向 $-2700 < x < 2800$ m の前浜地形を X バンドレーダにより収集した(松本・武若，2005)。レーダ画像を平均化し，1 時間毎の平均水際位置を求め，荒天イベント中の最大遡上位置の分布，荒天前後の汀線位置の変化を調べた。

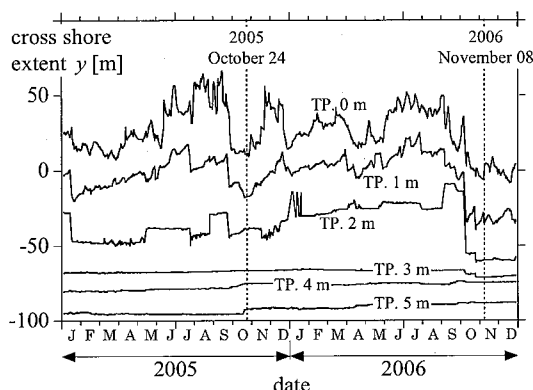


図-5 栈橋で観測された断面地形の各標高岸沖位置の変化 (2005年1月～2006年12月)

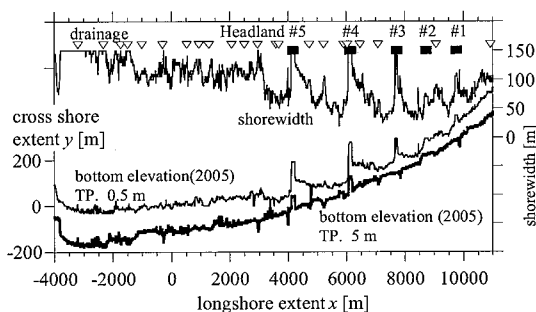


図-6 標高 T.P. 0.5 m, T.P. 5 m の岸沖方向位置と砂浜幅の沿岸分布。▽：排水口沿岸位置，■：ヘッドランド沿岸位置。

4. 侵食の解析

(1) HORS における侵食

図-4 に 2006 年 10 月 6 日, 10 日に HORS で観測された断面地形を示す。陸上部では, おおよそ T.P. 4 m の高さまで地形変化が及び, また, $y=260$ m 付近にあったバーは沖に移動した。荒天期間中に土砂が沖方向に大きく移動したことがうかがわれる。地形変動があった上限は, 銚子漁港で観測された最高水位 (T.P. 1.51 m) よりもはるかに高い。Wave setup, 個々波の遡上, 長周期波の遡上などがこの要因として考えられるが, 現時点ではこれらの寄与は不明である。

2005 年から 2006 年に HORS で観測された日々の断面地形データから, 標高 T.P. 0, 1, 2, 3, 4, 5 m の岸沖位置の変化を調べた (図-5)。2006 年 10 月以前は, T.P. 3 m 以高の領域には波の影響による地形変化が及んでおらず, ここはいわゆる後浜領域とみなせる。

なお, 銚子漁港で観測される毎時潮位の最頻値はおおよそ T.P. 0.1 m であり, 朔望平均満潮位はおおよそ T.P. 0.7 m である。

(2) 侵食量の沿岸分布

航空レーザ計測データを用い, 標高 T.P. 0.5 m から 5

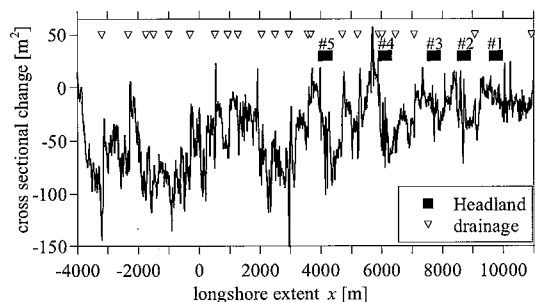


図-7 T.P. 0.5 m から T.P. 5 m の間の断面変化量 (負の値: 侵食) の沿岸分布。▽: 排水口沿岸位置, ■: ヘッドランド沿岸位置。

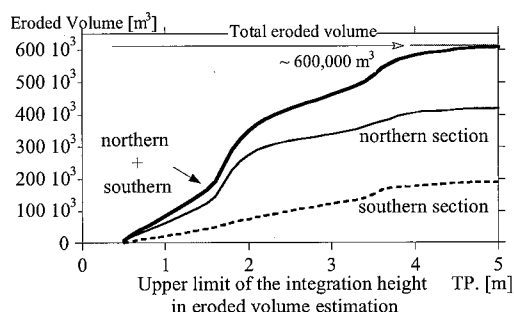
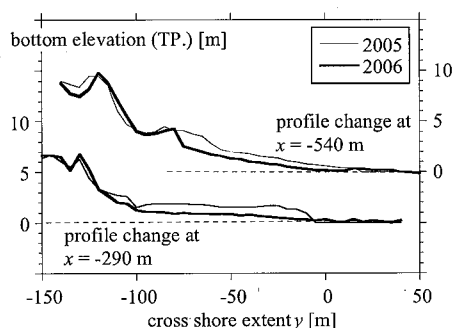
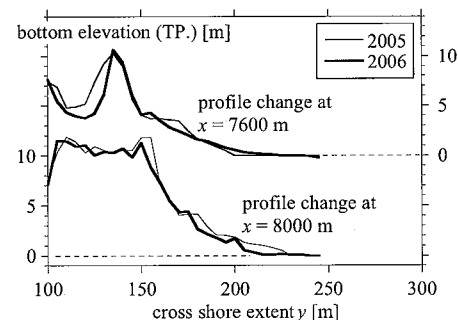


図-8 北区間と南区間の積分上限高さ別の侵食量



(a) $x = -540$ m, $x = -290$ m (排水口付近) における断面変化



(b) $x = 7600$ m (ヘッドランド#3 北側), $x = 8000$ m (同南側) における断面変化

図-9 北区間と南区間における断面変化の例

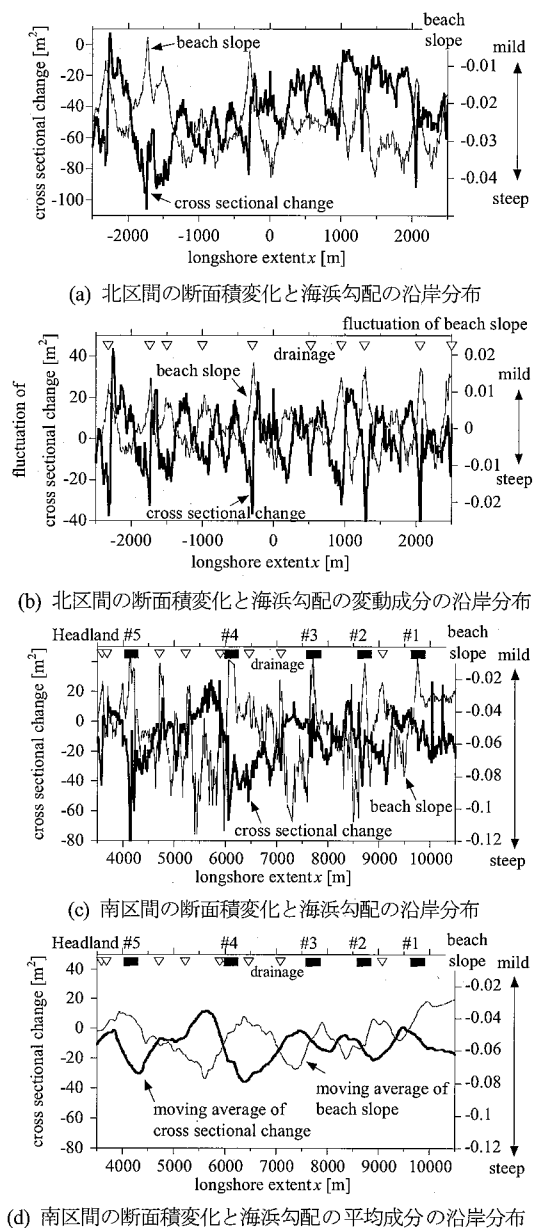


図-10 標高 T.P. 0.5 m から T.P. 2.5 m の間の断面積変化と海浜勾配の沿岸分布。▽：排水口沿岸位置，■：ヘッドランド沿岸位置。

m の範囲の地形変化を調べた。この範囲の下限はレーザ計測時の水位、上限は図-4、図-5 に示した結果から地形変化がおよんでいたと考えられる高さとして定めた。

図-6 に 2005 年の標高 T.P. 0.5 m と T.P. 5 m 地点の岸沖位置、両位置の差として定義した砂浜幅の沿岸分布、ヘッドランドと排水口の位置を示す。なお、データ処理の都合上、砂浜幅が 150 m 以上ある場合にもこれを 150 m として表示した。

砂浜幅は北部で大きく、南部で小さい。ヘッドランドが存在することにより、砂浜幅が規則的に変化している領域を南区間 ($3000 < x < 11000$ m)、その影響が及んでいないと判断された領域を北区間 ($-4000 < x < 3000$ m) とした。以上の構造は 2006 年 10 月の荒天以降も、砂浜幅が全体的に減じているものの、基本的に保たれている。

各沿岸位置の T.P. 0.5 m から 5 m の範囲の 2005 年から 2006 年にかけての断面積変化を求めた結果を図-7 に示す。断面積変化は、各沿岸位置において、2005 年の計測結果より標高 T.P. 0.5 m から 5 m の岸沖範囲を定め、この範囲における標高変化の積算値として求めた。

対象域の全侵食量は約 600,000 m^3 と見積られた。全般に北区間における断面積変化量 (負の値 = 侵食) が大きく、ヘッドランドが設置されている南区間で小さい。南区間の侵食量分布はヘッドランドの設置位置に支配された構造となっており、個々のヘッドランドの北側で侵食量が小さく、その南側で侵食量が多い。佐藤ら (2000) はヘッドランドが南区間の汀線を安定させるのに効果があったと評価しており、ここに示した結果はこれを支持するものと考えられる。

断面積変化を求める際の上限高さを変化させ、北区間と南区間でその積算値を求めた。具体的には、T.P. 0.5 m からある高さまでの断面積変化を先の方法と同じ手順で求め、それぞれの区間で積算した。図-8 にその結果を示す。北区間と南区間では高さ別の侵食パターンに顕著な違いがあった。北区間には T.P. 2 m 付近に顕著な堆積域があり (図-4 参照)、これが侵食されたことで、この高さ付近における侵食量が大きくなったと考えられる。一方、南区間は浜幅が狭く急勾配であり、各高さで一様に侵食が生じていたと考えられる。図-9 に北区間、南区間における代表的な断面変化を示す。

(3) 侵食量と海浜勾配の関係

図-7 に示した侵食量分布には規則的な変動が認められる。これを調べるために、2005 年の航空レーザ計測より、T.P. 0.5 m から T.P. 2.5 m の範囲の海浜勾配を求め、同じ範囲の侵食量と比較した (図-10 (a), (c))。また、沿岸方向に移動平均幅 500 m で平滑化した平均勾配と侵食量を求め、それぞれの移動平均と変動成分を求めた (図-10 (b), (d))。北区間と南区間では、侵食量と海浜勾配の関係に差異がある。

北区間では、図-10 (b) に示すように、局所的に勾配の緩い位置 (例えば、図-9 (a), $x = -290$ m) における侵食量が大きく、逆に急な位置 (図-9 (a), $x = -540$ m) における侵食量は小さい。これは、相対的に緩勾配の領域では砂丘根本付近まで遡上及び侵食量が大きかったのに対し、急勾配領域では砂丘海側のバーム発達領域に浜崖が形成されたものの侵食量は小さかったと説明

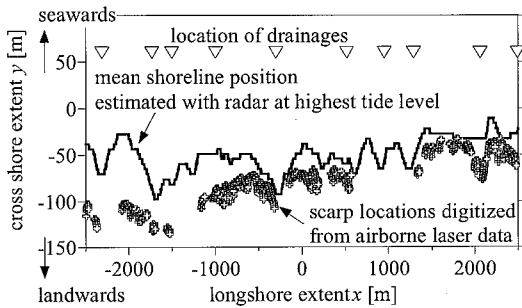


図-11 レーダ観測(2006年10月07日04時)により推定された最高水位時の平均的な水際位置の分布と排水口沿岸位置、浜崖形成位置

される。なお、HORSの周辺で、急勾配、緩勾配領域のそれぞれにて遡上痕跡の標高を調べたところ、全般的に急勾配領域で高くなっていた(柳嶋ら, 2007)。

局所勾配の緩い位置には、ほとんどの場合に砂丘陸側の集落からの排水口が存在していた。図-10(b)に示した規則的な関係は、波浪場の空間構造、地形変動の不安定性などに起因するものでなく、場を規定する境界条件(排水口の位置)によりもたらされたものと考えている。ただし、排水口の間隔が700mよりも大きい区間(例えば、 $-1000 < x < -290$ m)にも極値となる位置が現れ、海浜は排水口による拘束を受けずに変動していた可能性もある。

南区間では、ヘッドランド間に、勾配の緩い位置における侵食量が大きく、逆に急な位置における侵食量は小さいという大局的な構造が見られる(図-10(c))。ここでは、北区間で認められた変動成分間の相関関係は顕著でなく、むしろヘッドランドの位置に拘束された移動平均成分に明確な構造が現れた(図-10(d))。

(4) レーダ観測による最大遡上位置の推定

Xバンドレーダ観測で得られた平均画像より、潮位が最高となった時間の水際位置の沿岸分布を調べた(2006年10月07日4時、銚子漁港観測潮位 T.P. 1.4 m, 図-11)。その分布には複数の極値が見られ、遡上が大きかった陸向に凸の位置には海岸背後集落からの排水口があり、海向に凸の位置には浜崖の形成があった。以上の状況は、図-10(b)に示した海浜勾配と侵食量を説明した結果と整合する。なお、浜崖の形成位置は航空レーザ計測可視データから読み取った。周辺の状況から判断して浜崖の発生が予想されるにも関わらずその形成がなかった領域($x = -1300, 800, 1200$ m 付近)は、飛砂防止柵があった場所、発電風車海側に砂丘造成を行った場所であった。

5. 結 び

2006年10月に大型の低気圧が太平洋沿岸を通過し、既往最大の潮位上昇を伴う高波浪が鹿島灘に來襲した。

航空レーザ計測データとXバンドレーダの観測結果を用い、鹿島灘南部の前浜域の一部と後浜域から砂丘部における侵食の解析を行い、以下の結果を得た：(1) 鹿島灘南部の後浜領域に、約600,000 m³規模の全域的な侵食があった。(2) ヘッドランド設置区間の侵食パターンはヘッドランドの位置に依存していた。ヘッドランドの南側(波下域)で侵食が大きく、その北側で小さかった。(3) ヘッドランドが設置されていない区間では、局所的な侵食量は局所的な勾配が緩い位置で大きく、局所的な勾配が急な位置で小さかった。この構造は排水口の位置により支配された形で現れた。波の遡上量は排水口付近で大きく、浜崖が形成された位置では相対的に小さかった。

本研究では主に後浜域の地形変動を解析した。今後の検討課題は、後浜域で失われた土砂の移動先の特定、後浜域の回復過程の追跡、後浜地形変動と前浜から碎波帯における地形変動との関連性の解明などであり、これらを通じて鹿島灘南部の海浜地形変動の全体像が理解される。

謝辞：(独法)港湾空港技術研究所漂砂研究室にはレーダ観測、地形データの提供などで便宜を図って頂いた。特に、同研究室柳嶋慎一主任研究官との議論と情報交換が侵食状況を理解する上で有益であった。国土地理院には航空レーザ計測データの提供を頂いた。本研究は(財)港湾空港建設技術サービスセンター、(財)鹿島学術振興財団の研究助成金の補助を得て行われた。以上、ここに記して謝意を申し上げます。

参 考 文 献

- 気象庁：低気圧による10月4日から10月9日までの暴風と大雨(速報), http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/new/iyun_sokuji20061004-09.pdf, 参照2007-04-26.
- 佐藤慎司・前田亮・磯部雅彦・関本恒浩・笠井雅広・鳥居謙一・山本幸次(2000)：鹿島灘南部海岸の地形形成機構に関する現地調査, 土木学会論文集, No. 633/II-53, pp. 89-99.
- 信岡尚道・加藤史訓・武若聡・松浦健郎(2007)：2006年10月の茨城沿岸高潮の発生要因, 海岸工学論文集, 第54巻.
- 松本亮介・武若聡(2005)：前浜地形の沿岸分布の連続観測とその変動特性, 海岸工学論文集, 第52巻, pp. 506-510.
- 森田真一・野田敦夫・川村啓一・田中茂信・田中浩充・福濱方哉・山本幸次(2004)：航空機搭載型レーザ計測の海浜地形測定への適用性, 海岸工学論文集, 第51巻, pp. 1405-1409.
- 柳嶋慎一・友田尚貴・鈴木崇之・坂本光・武若聡(2007)：非常に発達した低気圧通過(2006年10月6日)にともなう波崎海岸の大規模な海岸侵食, 投稿準備中.
- Robertson W., K. Zhang and D. Whitman(2007)：Hurricane-induced beach change derived from airborne laser measurements near Panama City, Florida, Marine Geology, Vol. 237, pp. 191-205.
- Stockdon H. F., A. H. Sallenger, R. A. Holman and P. A. Howd(2007)：A simple model for the spatially-variable coastal response to hurricanes, Marine Geology, Vol. 238, pp. 1-20.