

2006年秋季暴浪による鹿島灘の侵食とその沿岸分布に関する考察

Analyses on the Longshore Structure of the Erosion of the Kashima Coast due to 2006 Autumn Storm

武若 聡¹・エルサイド ガラル²

Satoshi TAKEWAKA and Elsayed GALAL

Strong low-pressure systems traveled along Japanese Main Island in October 2006. High waves and storm surge attacked Kashima Coast resulting huge erosion over the area. Airborne laser data measured in October 2005 and November 2006 have been analyzed to estimate cross-sectional changes within the subaerial zone. The results indicate that the amount of the erosion of the northern and southern parts decreased toward the south which may be raised due to the activation of longshore sediments. The SWAN wave model was applied to estimate wave condition along the coast during the storm event hours. The longshore component of wave power and run-ups are estimated and showed a correlation with the survey results, especially for the areas without coastal works.

1. 緒言

2006年10月に複数の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（延長約68 km）に来襲し、汀線の後退と前浜・後浜域から砂丘部にかけての領域に大規模な侵食が見られた。航空レーザ計測データを解析し前浜・後浜・砂丘部にかけての侵食状況を調べ、また、波浪の再現計算を行い侵食量の沿岸分布の成因について考察する。鹿島灘の侵食状況については、武若ら（2007, 2009）が報告しており、ここではその結果を示し、侵食量の沿岸分布と計算により求めた波浪エネルギー、遡上高の沿岸分布を比較し、対象域に発生した侵食状況に関する考察を行う。

2. 解析対象領域と海象

鹿島灘の大洗港から利根川河口にかけての鹿島港湾域を除く領域の地形変動を調べた。図-1に示す大洗港南部の防波堤から鹿島港北部岸壁までの延長約38 kmの海岸（以降、鹿島灘北部と呼ぶ）、鹿島港南部岸壁から波崎漁港までの延長約15 kmの砂浜（以降、鹿島灘南部と呼ぶ）のそれぞれを調査対象領域とする。図-1の座標系は平面直角座標系IX系であり、X軸が南北方向を、Y軸が東西方向の位置を表す。鹿島灘北部には、一部延長約6 kmの区間を除き、ほぼ1 kmの間隔でヘッドランドが設置されている。鹿島灘南部には、鹿島港から南方約4 kmの位置に独立行政法人港湾空港技術研究所の観測栈橋（HORS）があり、HORSの南方約4 km地点から波崎漁港にかけての区間に5基のヘッドランドがある。

本州南岸に停滞した前線の活動が、台風第16号の接近

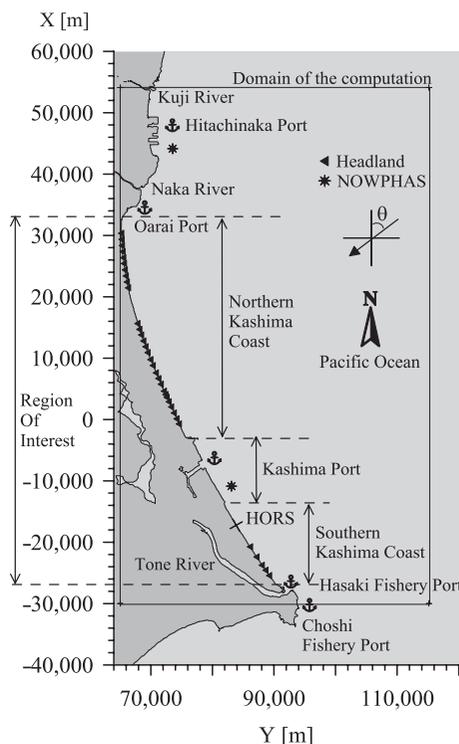


図-1 鹿島灘. 平面直角座標系IX系で表示。ヘッドランドは2006年11月時点での設置状況を示す。

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2009-05-02）。

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高波浪を観測し（港湾空港技術研究所、NOWPHAS全国港湾海洋波浪情報網、参照

1 正会員 工博 筑波大学准教授 大学院システム情報工学研究科
2 学生員 工修 筑波大学大学院システム情報工学研究科

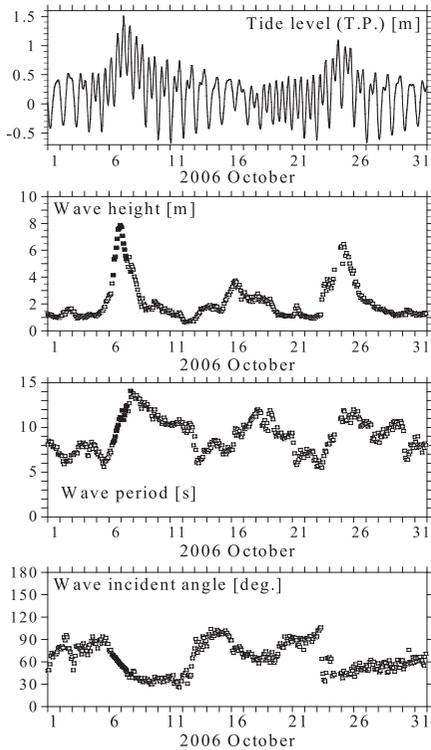
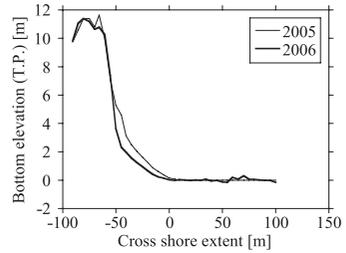


図-2 2006年10月の潮位（銚子漁港）、波浪（鹿島港：有義波高，周期，波向）．■ 鹿島港の欠測値を常陸那珂港観測値から補間．

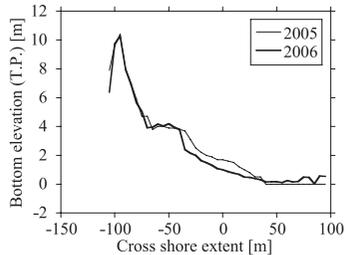
2009-05-12), 2006年10月6日に7mを超える有義波高を, 銚子漁港(気象庁潮位観測地点)ではこの間に最高潮位1.51m(東京湾平均海面T.P.上, 2006年10月7日3時), 既往最大の潮位偏差0.94m(2006年10月6日23時)を記録した(図-2). なお, 銚子漁港で観測される毎時潮位の最頻値はおおよそT.P. 0.1mであり, 朔望平均満潮位はおおよそT.P. 0.7mである. 信岡ら(2007, 2008), 橋本ら(2007)は潮位上昇に関する数値計算を行い, 気圧低下, 吹き寄せ, wave-setupの効果に加え, 北方からの強風によるエクマン輸送の効果が大きな潮位上昇をもたらしたと推定している. 以上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(潮位偏差: 0.73m)をもたらした.

3. 侵食量の沿岸分布

2005年10月(国土地理院が実施)と2006年11月8日に対象域の航空レーザ計測を行った. 計測結果から, 海岸線に沿って沿岸方向10m, 岸沖方向5mの間隔で, 計測時の水際付近から後浜と砂丘部にかけての地形標高データを取り出した. 解析の詳細は武若ら(2009)にあり, ここでは主要な結果を示し, 後の波浪場の解析結果との比較に備える.

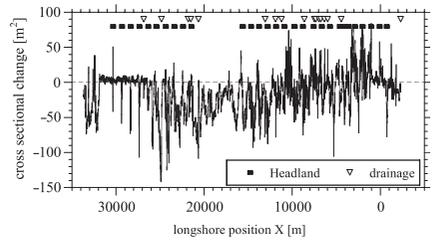


(a) 鹿島灘北部, $X = 16,500$ m, 断面変化量 -44.6 m^2

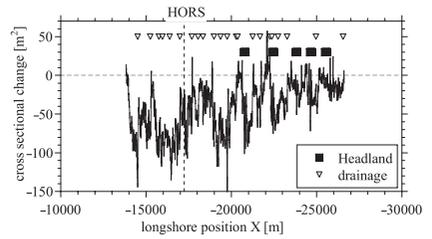


(b) 鹿島灘南部, $X = -19,000$ m, 断面変化量 -45.5 m^2

図-3 断面変化の例



(a) 鹿島灘北部



(b) 鹿島灘南部

図-4 断面変化量 dA (負の値: 侵食) の沿岸分布

本研究では沿岸位置を, 図-1に示す座標系(平面直角座標系IX系)のX軸(南北方向軸)を用い表示する. 海岸線はX軸に対して傾きを持っており, 実際の海岸線の長さX軸に沿って測る長さは一致しないことに注意が必要である.

各沿岸位置における海岸法線を定めるために鹿島灘北部と鹿島灘南部のそれぞれに基準線を設け, これに直交する方向に岸沖方向の測線を設け地形変化を調べた. 以降の説明で用いる岸沖位置は, 基準線に直交する方向に測った距離である.

航空レーザ計測データを用い, 標高T.P. 0.5mより高い地形の変化を調べた. この解析範囲の下限の高さは計測

表-1 鹿島灘の2005年から2006年にかけてのT.P. 0.5 m以上の領域における侵食量

領域	侵食量 [m ³]	侵食が主に生じた範囲(高さ)
鹿島灘北部	620,000	T.P. 4.0 mまで
鹿島灘南部	600,000	T.P. 5.0 mまで

時の水位を上回る高さとして定めた。鹿島灘北部と南部の、構造物が設置されていない区間の断面地形変化の一例を図-3示す。

各沿岸位置のT.P. 0.5 mから5.0 mの範囲の2005年から2006年にかけての断面積変化量 dA を求めた結果を図-4に示す。 dA は、各沿岸位置において、まず、2005年の計測結果より標高T.P. 0.5 mから5.0 mの岸沖範囲を定め、次に、この範囲における標高変化の積算値として求めた。侵食があった位置では $dA < 0$ となる。

以下が dA の分布に関する特徴である：

- i) 北部、南部共に、侵食量 ($dA < 0$ の領域) の分布は大局的には北から南に向かって小さくなっている。
- ii) ヘッドランドが設置されている区間の侵食量が、概して未設置の区間の侵食量に比較して小さい。
- iii) ヘッドランドが設置されている区間の侵食量の分布パターンはヘッドランドの位置に拘束されている。個々のヘッドランドの南側(波下側)で侵食量が大きく、北側で小さい場合が多い。

荒天時に主に北方からの高波浪が継続したことが、侵食量分布の北から南に向かっての大局的な減少をもたらした一因と考えられる。佐藤ら(2000)はヘッドランドが汀線を安定させるのに効果があると評価しているが、ここに示した結果はこれを支持するものと考えられる。

断面積変化量 dA の沿岸方向積算値を求めた結果を表-1に示す。鹿島灘北部の荒天による侵食は主に標高T.P. 4.0 mより低い領域で生じており、その総量はおおよそ620,000 m³であった。鹿島灘南部の侵食は主に標高T.P. 5.0 mより低い領域で生じ、その総量はおおよそ600,000 m³であった。海岸延長単位長さあたりの侵食量は鹿島灘北部が相対的に小さかった。北部には護岸が水際まで設置されている区間が多く、ここでは平均水面上より高い領域の侵食が少なかった。

4. 波浪計算モデルによる波浪場の再現計算

先に示した侵食量には大局的な沿岸分布に加えて局所的な変動があった。ここでは、波浪計算モデルSWAN(デルフト工科大学, 参照2009-05-02)による波浪場の再現計算を行い、侵食量の沿岸分布の成因について検討した。なお、ここで対象とする低気圧の通過に伴う広域の流動を再現した計算(信岡ら, 2007, 2008)では、対象域の気圧低減と吹き寄せ効果による水位上昇はほぼ一

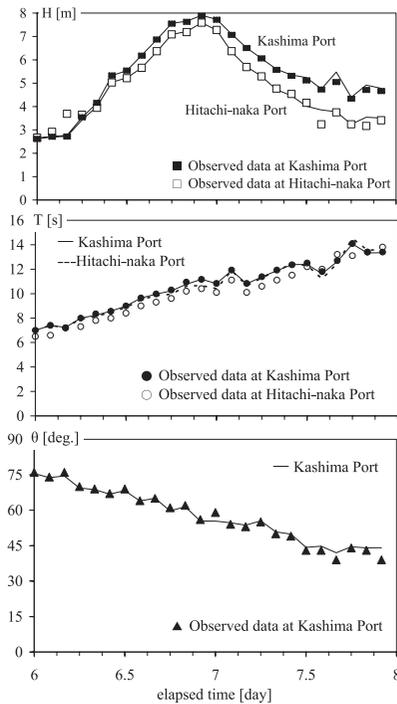


図-5 計算結果と観測結果の比較(2006年10月6日-8日)
上段:有義波高,中段:有義周期,下段:有義波向

様、吹送流分布の沿岸方向勾配は小さかったと評価されているので、ここでは波浪による効果を見積もる。また、2006年10月には2回(5日~8日, 23日~27日, 図-2参照)の潮位上昇を伴う高波浪があったが、波高の経時変化、主たる入射方向は類似しているので、ここでは1回目の高波浪について検討する。

(1) 計算手順

ここでは図-1に示す狭い領域(84 km × 50 km, 計算格子サイズ192 m)を計算の対象とし、2006年10月6日から8日の間の48時間の波浪場を、2時間毎の定常過程の遷移として表せるとして、次の手順で再現計算を行った。なお、ヘッドランドの効果は考慮していない。

まず、鹿島港で観測された波浪記録を基に計算領域の沖側波浪条件を定める。観測された有義周期と波向を用い、沖方向に逆屈折計算を行い、沖側境界(図-1, Y=115,152 m)における暫定値(波高, 波向)を求める。次に、この暫定値を用い、側方境界上(図-1, X=-30,000 m, 54,096 m)の暫定値をSWANの1次元計算により求める。最後に、沖側と側方境界の暫定値を用いSWANによる2次元計算を行う。この計算結果の妥当性を、鹿島港と常陸那珂港の波浪観測結果から検証した。計算値と観測値に差があった場合には、沖側の暫定値を修正し計算を再度行い、波高の差の絶対値が0.05 m以下、波向の差の絶対値が3°以下になることを目標に繰り返した。

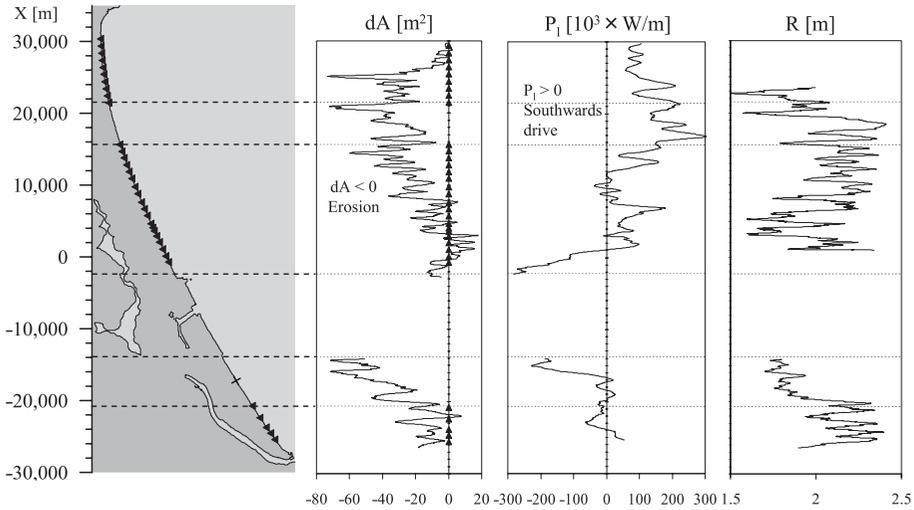


図-6 侵食量 dA の沿岸分布とWave power P_i , 遡上高 R の計算結果

この手順で求めた対象期間の有義波高, 周期, 波向と鹿島港, 常陸那珂港の波浪観測結果を図-5に示す. 一部の時間帯では上記の目標を達成できなかったが, 荒天の経過はほぼ再現されている. 荒天前半は海岸線に対して南方からの入射があり, 後半に北方からの入射に転じた.

本研究の計算手順では, 計算領域内の風による波の発達と減衰を考慮していない, 沖側境界における入射波浪を一様としている等, 現実の波浪場の状況と整合しないと考えられる点がある. 波浪の再現計算では, 風場の効果を考慮した広領域の計算を行い, これに検討対象の小領域を接合させて詳細計算を行うことが多い. しかしながら, 観測資料が十分にあり, 検討の対象となる領域が狭い場合には, ここで説明した手順でも対応可能であると判断している.

(2) Wave Power P_i の沿岸分布

計算結果より, 沿岸流公式, 沿岸漂砂量公式などの主要部と同形式となるWave Power P_i の2時間毎の沿岸分布を, 各沿岸位置の汀線方向を考慮して求めた.

$$P_i = \frac{1}{8} \rho g H_b^2 C_{gb} \sin \alpha_b \cos \alpha_b \dots\dots\dots (1)$$

ここで, ρ は水の密度, g は重力加速度, H_b , C_{gb} , α_b は, それぞれ, 沿岸位置 X の砕波位置における波高, 群速度, 汀線に対する波進行方向である. α_b の定義は, $\alpha_b > 0$ が北方からの入射, $\alpha_b = 0$ は直角入射, $\alpha_b < 0$ は南方からの入射とした. 従って, $P_i > 0$ の領域では南向き ($P_i < 0$ の領域では北向き)の沿岸流, 沿岸漂砂が駆動されていたと考えられる.

P_i の各沿岸位置における荒天中の時間平均値 (48時間) P_i を求めた結果を侵食量 dA の分布と共に図-6に示す. こ

ここで, P_i と dA には移動平均 (平均幅500 m) を施して表示した.

鹿島灘北部ではほとんどの領域で南向きの沿岸漂砂が発生していたと推定され, P_i と dA の大局的な分布には相似の関係が認められる. また, 沖合海底地形の影響を受けて P_i の分布は波状 (波長2,000 mのオーダー)となり, dA の分布にも類似の波状構造が見られる.

鹿島灘南部では鹿島港南側で北向きの沿岸漂砂があったと推定される. ここでは侵食が発生しており, 沿岸漂砂が鹿島港南部の護岸域を越えていた可能性がある.

dA と P_i の移動平均 (平均幅: 3,000 m) からの変動成分 dA' と P_i' を求めた結果をヘッドランド未設置区間について示す (図-7 (a), (b)). $dA' > 0$ の位置は, 周辺域と比較して相対的に侵食が少なかった領域である. dA' と P_i' はほぼ同じ波長で逆位相の関係にある. P_i' が極値 (勾配 ~ 0)になる付近で dA' が小さくなっていることは, 沿岸漂砂フラックスの発散・収束で侵食・堆積を予測する1-line model的な考え方で局所的な侵食分布の成因を説明し得ることを示唆する.

(3) 波の遡上高の沿岸分布

各時間帯の各沿岸位置における波の遡上高さ R_i を推定した.

$$R_i = a\xi + b \dots\dots\dots (2)$$

ここで a, b は経験的に定める定数 (Hasan and Takewaka, 2009. $a = 1.025, b = 0.03$), ξ はsurf similarity parameter

$$\xi = \frac{\tan \beta}{\sqrt{H/L}} \dots\dots\dots (3)$$

であり, $\tan \beta$ は海浜勾配, H, L は入射波の波高と波長である. 本研究では, $\tan \beta$ に2005年の航空レーザ計測デ

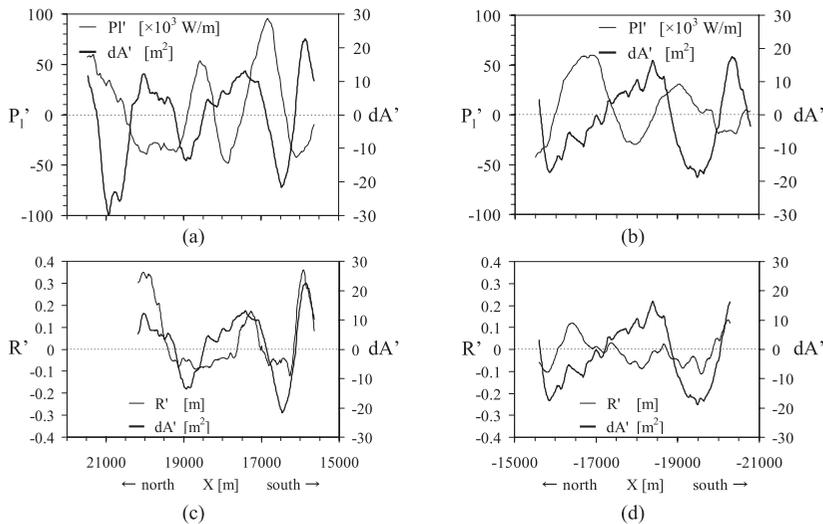


図-7 構造物未設置区間の計算結果 (a) 北部の dA' と P_1' , (b) 南部の dA' と P_1' , (c) 北部の dA' と R' , (d) 南部の dA' と R'

ータから求めた前浜勾配, H と L に水深12 mにおける波高と波長の計算値を与えた。

R_L の各沿岸位置における荒天中の時間平均値(48時間) R を求めた結果を図-6に示す。ここで, R には移動平均(平均幅500 m)を施して表示した。

R の大小は,基本的には前浜勾配に依存している。ヘッドランドが設置されている区間は相対的に前浜勾配が急であり, R もこれに伴い大きくなった。 P_1 の分布に比較して R の波状構造の波長は全般的に短い。

dA と R の移動平均(平均幅:3,000 m)からの変動成分 dA' と R' を求めた結果をヘッドランド未設置区間について示す(図-7(c),(d))。鹿島灘南部では,遡上高が周辺域と比較して相対的に大きかった領域($dA' < 0, R' > 0$)の侵食が大きくなっているのに対して,鹿島灘北部では逆の関係が見られた。現時点で,この差異を合理的に説明することはできていない。

5. 結び

(1) 航空レーザ計測データを解析し,前浜から砂丘部にかけての侵食量を調べた。北部(延長約38 km)の侵食量はおおよそ620,000 m^3 ,南部(同15 km)の侵食量はおおよそ600,000 m^3 であった。侵食量は北から南に向かって減少する分布となっていた。

(2) 波浪場の再現計算を行い,侵食量分布の成因を検討した。Wave Power P_1 が大局的な,波遡上高 R が局所的な侵食量分布の特徴をそれぞれ説明し得ることを示した。

侵食量の分布の成因について P_1 と R の分布から独立に考察を行ったが,両者を合わせて,また,水面高さ以下の岸沖漂砂を検討することが今後の課題に挙げられる。

謝辞:(独法)港湾空港技術研究所漂砂研究室には海浜地形・海象データの提供を頂きました。国土院に航空レーザ計測データの提供を頂きました。茨城大学信岡尚道准教授には広域流動計算の結果についてご教示頂きました。以上,ここに記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 気象庁:平成18年低気圧による暴風と大雨, <http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2006/20061004/20061004.html>, 参照2009-05-02.
- 港湾空港技術研究所 海象情報研究チーム, 全国港湾海洋波浪情報網(ナウファス)波浪データ, <http://www.pari.go.jp/bsh/ky-skb/ks-jyo/kaisy/index.htm>, 参照2009-05-12.
- 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. 663/II-53, pp. 89-99.
- 武若 聡・El Sayed Galal: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(2007), 海岸工学論文集, Vol. 54, pp. 581-585.
- 武若 聡・笹倉慎也・Elsayed Galal・柳嶋慎一(2009):2006年秋季低気圧による鹿島灘の侵食, 土木学会論文集(印刷中).
- デルフト工科大学:SWAN Home Page, www.swan.tudelft.nl, 参照2009-05-02.
- 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, Vol. 54, pp. 306-310.
- 信岡尚道・三村信男・藤巻英明・永田拓也(2008):猛烈な風を伴う低気圧による茨城沿岸の高潮被害の調査, 海岸工学論文集, Vol. 55, pp. 1391-1395.
- 橋本孝治・吉野 純・村上智一・安田孝志(2007):エクマン輸送に起因する新たな外洋型の高潮発生機構, 海岸工学論文集, Vol. 54, pp. 271-275.
- Hasan, G. M. J and S. Takewaka (2009): Wave run-up analysis under dissipative condition using X-band radar, Coastal Engineering Journal, Vol. 51, pp. 1-28.