鹿島灘沿岸の大規模侵食の回復過程

Recovery Process of Back and Foreshore of Kashima Coast Historical Erosion

武若 聡¹・柳嶋慎一²

Satoshi TAKEWAKA and Shinichi YANAGISHIMA

Strong low-pressure systems traveled along Japanese Main Island in October 2006. High waves and storm surge attacked Kashima Coast resulting huge and historical erosion. This study analyzes sand loss and gain in sub-aerial zone of northern part, a stretch of approximately 38 km from Ooarai Port to Kashima Port, and of southern part, a stretch of approximately 15 km from Kashima Port to Tone River, using airborne laser data measured in October 2005, November 2006 and May 2011. Eroded volumes of sub-aerial zone from year 2005 to 2006 were estimated 620,000 m³ for the northern part, and 600,000 m³ for the southern part. Recovery from year 2006 to 2011 was prominent for the southern part which was 1,000,000 m³, whereas it was small for the northern part.

1. はじめに

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に襲った。このイベントにより、鹿島灘の沿岸（北部：大洗港～鹿島港の北端、延長約38 km；南部：鹿島港の南端～利根川河口、延長約15 km、図-1）で、全域的な汀線の後退と前浜から後浜、砂丘部基部にかけての領域で大規模な侵食があった。ここでは2005年10月、2006年11月、2011年5月に取得された航空レーザ測量データを解析し、2006年以降にこの侵食が回復した状況を分析する。また、2011年3月の東北地方太平洋沖地震の影響によりもたらされた海岸域における変化についても報告する。

2006年10月にあった鹿島灘沿岸の大規模侵食の報告は武若ら（2009）が、侵食の沿岸分布の成因に関する検討はElsayed・Takewaka（2011）が行っている。北部の侵食量はおおよそ620,000 m³、南部の侵食量はおおよそ600,000 m³であり、海岸の延長を考慮すると、侵食の規模は南部で大きかった。北部、南部のそれぞれにおいて侵食量の分布は、北から南に向かって減少する大局的な分布に局所的に変動する侵食が重なるものであった。

2. 解析対象域と航空レーザ計測データ

図-1に示すように、鹿島灘沿岸の北部には、一部延長約6 kmの区間（Region 2）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。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）（X=-17,233 m, Y=83,863 m）があり、これの南方約4 km地点から波崎漁港の区間（Region 5）

図-1 鹿島灘沿岸、ヘッドランドの位置と沿岸座標

に5基のヘッドランドがある。北部の海岸には鹿島台地が海辺に迫っており、平地は限られている。これに対して、南部の海岸は低平な土地が利根川と鹿島灘の間に広がっており、豊かな砂浜と砂丘の発達が見られる。

航空レーザ計測は、2005年10月、2006年11月、2011年5月に行われており、この内2005年と2011年の計測は国土地理院により実施されている。2011年の計測は2011年3月にあった東北地方太平洋沖地震を受けて実施され

1 正会員 工博 筑波大学教授システム情報系
2 正会員 港湾空港技術研究所主任研究官沿岸土砂管理研究チーム

図-2 (a) 鹿島港、常陸那珂港で観測された有義波高, (b) 銚子漁港潮位, (c) 観測栈橋HORSで観測された断面地形の各標高位置の変化 (2005年～2011年)。

たものである

本報告では沿岸位置を、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とは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北部と南部のそれぞれにて基準線を設け、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。航空レーザ計測結果から、海岸線に沿って沿岸方向10 m、岸沖方向5 mの間隔で、観測時の水際付近から後浜と砂丘部にかけての海浜の標高データを取り出した。

3. 観測栈橋で観測された前浜と後浜の地形変化

鹿島港と常陸那珂港で観測された有義波高 (港湾空港技術研究所海象情報研究室, NOWPHAS)、銚子漁港で観測された潮位 (T.P. 表示, 気象庁)、観測栈橋HORSで観測された海浜断面における各標高の岸沖位置の変化を

図-3 観測栈橋HORSで観測された断面地形。(a) 2005-2006年, (b) 2006-2011年。

図-4 断面地形変化の例。(a) 鹿島灘北部 (X=16,500 m), 断面積変化量 (T.P.0.5 mから5 m): 2005→2006年=-44.6 m², 2006→2011年=+23.5 m²。(b) 鹿島灘南部 (X=-19,000 m), 断面積変化量 (T.P.0.5 mから5 m): 2005→2006年=-43.4 m², 2006→2011年=+58.9 m²。

図-2に示す。また、図-3に栈橋沿いの海浜断面の代表的な観測結果を示す。

図-2 (c) に示したように、全般に、後浜 (およそ T.P.3 m 以上) は、着目した標高の岸沖位置がほとんど変

表-1 鹿島灘沿岸の北部と南部の侵食と回復状況の特徴

時期	北部 (延長 約38 km)		南部 (延長 約15 km)	
	断面積変化量の分布	土砂量変化	断面積変化量の分布	土砂量変化
2005 - 2006	a) 侵食量分布は大局的には北から南に向かって小さくなる. b) ヘッドランド設置区間 (10,000>X>0 m) の侵食量が未設置区間の侵食量に比較して小さい.	侵食は標高T.P.4.0 mより低い領域で生じた総量: 約-620,000 m ³ .	e) 侵食量分布は大局的には北から南に向かって小さくなる. f) ヘッドランド設置区間の侵食量が、概して未設置区間の侵食量に比較して小さい.	侵食は標高T.P.5.0 mより低い領域で生じた. 総量: 約-600,000 m ³ .
2006 - 2011	c) 侵食発生後の海浜断面積の変化は総じて少なく, 回復規模は小さい. d) ヘッドランド設置区間の一部では海浜断面積が増加している. ヘッドランド未設置区間の回復は少ない.	回復は標高T.P.4.0 mまであった. 総量: 約100,000 m ³ . 標高T.P.4 m以上の土砂量減少は広域地盤沈下によるものと推定される.	g) ほぼ全域で海浜断面積が増加した. h) 相対的に、ヘッドランド未設置区間の回復が大きい.	回復は標高T.P.5.0 mまであった. 総量: 約+1,000,000 m ³

説明は地盤沈下の影響を考慮していないことに注意が必要

図-5 標高T.P.0.5 mから5 mの断面積変化の沿岸分布 (a) 2005-2006年, (b) 2006-2011年. (c) 標高T.P.1 mから3 mの平均海浜勾配

化せず、地形変化が緩慢である。これに対して、前浜 (T.P.2 m以下) は変動が大きい。高波浪が来襲する度に水際位置が陸側に後退し、その後の静穏期に海側に前進する。2006年10月の潮位上昇と高波浪の作用時、2011年3月の津波来襲時などには後浜のT.P.4 mの位置まで侵食が及んでおり、その位置が陸側に後退している。2007年以降、T.P.2 mとT.P.0 mの位置の間隔が狭くなる傾向にあり、前浜勾配は大きく、後浜が広がっている。

4. 侵食の回復

航空レーザ計測データを解析し、2006年にあった鹿島灘沿岸の全域的な大規模侵食の回復状況を調べた。

図-4に北部と南部のヘッドランドが設置されていない領域の断面変化を例示する。北部の断面 (X=16,500 m) は、2006年の暴浪によりT.P.6 m付近まで侵食が及んでいる。その後、2011年までにT.P.3 m付近まで堆積があり後浜の回復があった。なお、北部では後に説明するよ

図-6 鹿島灘沿岸の (a) 北部と (b) 南部の土砂量変化. 断面積変化を求める上限高さ (横軸) を変化させて求めた沿岸方向積算値.

図-7 鹿島灘沿岸南部の断面積変化量の (a) 移動平均 (平均幅 1000 m) と (b) 偏差成分

うに、東北地方太平洋沖地震の影響による広域的な地盤沈下の影響が現れていたが、個々の断面地形からこれを知ることは難しい。南部の断面 ($X=-19,000$ m) は、2006年の暴浪により T.P.5 m 付近まで侵食があり、その後、2011 年までに砂丘の頂部付近まで堆積があった。この例で示すように、北部と南部では侵食後の回復に差異があった。

各沿岸位置の T.P.0.5 m から 5.0 m の範囲の海浜断面積

の変化を、2005 年から 2006 年、2006 年から 2011 年の期間別に求めた結果を図-5 (a), (b) に示す。断面積の変化は、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。図-5 (c) は平均海浜勾配として、標高 T.P.1 m から 3 m の海浜勾配の 3 回の計測結果の平均値を示したものである。

図-6 には北部と南部の海岸の 2005 年から 2006 年、2006 年から 2011 年の期間別に求めた土砂量変化の結果を示す。具体的には、上に説明した断面積変化を求める上限高さを変化させてその沿岸方向積算値 (体積) を求め、前浜と後浜領域における侵食あるいは堆積量とした。

表-1 に図-5 と図-6 に現れた侵食とその後の回復状況をまとめた結果を示す。総じて、北部の海岸は急勾配で、土砂の移動が限られているのに対して、南部の海岸は緩勾配で浜幅が広く、砂が豊富にあり土砂がダイナミックに動くといえる。結果と成因を含む説明となるが、北部の海岸は急勾配で砂浜幅が狭く、後浜の回復をもたらす波の遡上、飛砂供給の機会が少なく、大規模侵食からの回復は相対的に顕著でなかったと考えられる。なお、ここでの説明は、地盤沈下の影響を考慮しておらず、これについては次章で検討する。

南部の海岸の断面積変化量の沿岸分布の移動平均 (平均幅 1000 m) とこれからの差として求めた偏差成分を図-7 に示す。移動平均の結果には、ヘッドランドに拘束された侵食と堆積の分布に加え、より大きいスケールの構造が重なっていることが読み取れる。現時点で、この大きいスケールの変動があった要因は不明である。偏差成分は、大規模侵食過程とその後の回復過程ではほぼ逆位相となる沿岸分布を示している。これは、侵食が周辺よりも相対的に大きかった箇所における回復が大きかったことを意味するが、これについてもその成因は不明である。

5. 東北地方太平洋沖地震による海岸域の変化

(1) ヘッドランドの沈下

鹿島灘沿岸には図-1 に示すように多数のヘッドランドが設置されている。東北地方太平洋沖地震では広域的な地盤沈下が生じており、これのヘッドランド群への影響を調べた。ヘッドランドの海側頂部つけ根の地震前後の高さを調べ、沈下量を求めた結果を図-8 に示す。ほとんどのヘッドランドが沈下しており、北部の平均沈下量は 0.40 m、南部の平均沈下量は 0.28 m であった。沈下量は北部で相対的に大きく、これは国土地理院が電子基準点の観測結果から推定した沿岸域の沈下量分布の傾向 (国土地理院、本震に伴う地殻変動等変動量線図) と一致しており、ヘッドランドの沈下は主に広域の地盤沈下によりもたらされたものと考えられる。沈下によるヘッドラ

図-8 ヘッドランド天端高さ (■2005, □2011) と沈下量 (○2005年→2011年) の沿岸分布. 平均沈下量: -0.40 m (北部), -0.28 m (南部).

図-9 大洗サンビーチ (X=33,500 m付近) の津波による浸食痕. ALOS近赤外データを表示. 突堤, 防波堤沿いに浸食痕が発達している. 日付の次の括弧内数値は銚子漁港観測潮位 (10時).

ンドの漂砂制御機能の低下が懸念され, 今後の経過を見守る必要がある.

(2) 地盤沈下による見かけの土砂量減少

先に示した図-6 (a) の鹿島灘北部の土砂量変化の評価には地震による地盤沈下の影響が現れている. 2005年から2011年にかけての土砂量変化, 2006年から2011年にかけての土砂量変化を合わせて考えると次のように説明される: 高さ4 mまでは大規模侵食後の回復による堆積は地盤沈下量を上回ったものの, 4 m以上の領域にあった堆積は僅かである. 積算高さが増加するにつれて土砂変化量が線形的に減少しており, 地盤沈下の影響が卓越する推定結果となった. これは, この領域にあった土砂が実質的に失われたのではなく, 広域的な地盤沈下により, 海面高さから測った見かけの土砂量が減少したことに対応するものである.

土砂量変化を見積もった北部の海岸の延長 $L=38,000$ m, 地盤高0.5 mから4 mまでの浜幅 $B=35$ m, 地盤沈下量 $dz=0.4$ mとして地盤沈下により失う見かけの土砂量を粗く見積ると $L \times B \times dz=532,000$ m^3 となる. この量と図-6 (a) に示した高さ4 mまでの2期間 (2005年から2011年) の土砂量変化 ($-604,000$ m^3) との差が大規模侵食 (土砂損失) とその後の回復 (堆積) による土砂量変化 (約-

70,000 m^3) に相当する. これより, 北部における大規模侵食による土砂変化量 (約-620,000 m^3) とその後の回復による土砂変化量は同程度 (約+550,000 m^3) であったと推定される. 今後, 前浜から後浜領域にかけての地形変動を追跡し, 海面が相対的に上昇した影響を監視する必要がある.

(3) 津波の遡上による砂浜の変形

柳嶋ら (2011) は観測栈橋HORS周辺の開放的な砂浜における津波遡上による侵食は少なかったことを報告している. 2011年3月14日に取得された衛星画像 (ALOS, 宇宙航空研究開発機構, 図-9) を判読したところ, 海域の隅部にある構造物に接した砂浜部 (大洗サンビーチ, 平井, 日川浜, 波崎, 利根川河口砂州) に顕著な侵食痕が見られた. 護岸, 防波堤, 導流堤などにより流れが収束し, 局所洗掘があったと考えられる. 津波来襲から約2ヶ月後に計測された航空レーザデータより見積もった浸食痕の深さ (比高) は1 mを超える箇所が散見された.

6. 結び

航空レーザ計測データを解析し, 2006年にあった鹿島灘沿岸の全域的な大規模侵食の回復状況を調べた. その結果, 南部では侵食量を上回る大きな回復が見られたのに対し, 北部における回復は侵食と同程度であった. これは, 南部の砂浜幅が大きく, 砂が豊富にあることによると考えられる. 東北地方太平洋沖地震の影響によりあったヘッドランドの沈下, 地盤沈下による見かけの土砂量減少などを示した.

謝辞: 国土地理院に航空レーザ計測データの提供を頂いた. この研究の一部は筑波大学の研究助成金 (復興支援プログラム) の補助を受けて行われた.

参考文献

- 宇宙航空研究開発機構, 陸域観測技術衛星ALOS, http://www.jaxa.jp/projects/sat/alos/index_j.html, 参照2012-05-10.
- 港湾空港技術研究所 海象情報研究室, 全国港湾海洋波浪情報網 (NOWPHAS), <http://www.pari.go.jp/unit/kaisy/nwphas/>, 参照2012-04-27.
- 国土地理院, 本震 (M9.0) に伴う地殻変動等変動量線図 (上下変動量), www.gsi.go.jp/common/000059956.pdf, 参照2012-05-01.
- 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B, Vol. 65, pp. 277-287, 2009.
- 柳嶋慎一・中村聡志・伴野雅之・山田雅仁 (2011): 東北地方太平洋沖地震による波崎海岸における津波の遡上と地形変化, 土木学会論文集B2 (海岸工学), Vol. 67, pp. I_236-I_240.
- Elsayed M. Galal and S. Takewaka (2011): The influence of alongshore and cross-shore wave energy flux on large and small scale coastal erosion patterns, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. 36, doi: 10.1002/esp.2125.