那珂川の流出土砂量の減少に起因する 大洗磯浜海岸の侵食

野本 智快¹・大崎 康弘¹・宇多 高明²・大木 康弘³・
芹沢 真澄⁴・三波 俊郎⁵

¹茨城県水戸土木事務所（〒310-0802 茨城県水戸市柵町1丁目3番1号水戸合同庁舎）

²正会員 一般財団法人土木研究センター常務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（〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4タカラビル）
E-mail:uda@pwrc.or.jp

³正会員 一般財団法人土木研究センター河川・海岸研究部（〒110-0016 東京都台東区台東1-6-4）
E-mail:kenkyu1@pwrc.or.jp

⁴正会員 海岸研究室（有）（〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301）

⁵海岸研究室（有）（〒160-0011 東京都新宿区若葉1-22 ローヤル若葉301）

1961年以降の空中写真を基に大洗磯浜海岸の海浜変形を調べた。また、大洗港の沖防波堤背後の堆積土砂量の変化より、海浜形成に役立つ粒径0.1 mm程度以上の成分から見た那珂川の流出土砂量が、1979～1993年の $6.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ より、1993～2007年の $2.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ までほぼ半減したことが分かった。さらに2011年の大津波時には津波の流動により沖防波堤背後の堆積域が9 mまで掘られたことが見出された。

Key Words : Oharai-isohama coast, beach changes, shoreline changes, Naka River, fluvial sand supply

1. はじめに

茨城県大洗磯浜海岸は、大洗水族館に隣接し背後地が都市公園のため観光名所となっている。しかし近年侵食が著しく進み、背後地にある駐車場まで侵食が進む危険性が高まった。この海岸は、2006年10月6、7日に襲来した低気圧に伴う潮位の上昇と、高波の作用により激しく侵食された¹⁾。侵食対策として2007年には $11,200 \text{ m}^3$ の土砂による養浜が行われ海浜が復元されたが、その後再び侵食が進んだ。さらに2011年3月11日の大地震では約20 cmの地盤沈下が生じるとともに津波も襲来した結果、海浜変形がさらに進んだ。この海岸は海水浴場でもあるため、海水浴利用への配慮から大洗港の北側に隣接する平太郎浜に堆積した砂礫 $1 \times 10^4 \text{ m}^3$ と、大洗港内に堆積した細砂 $2,500 \text{ m}^3$ を用いた養浜が2012年4、5月に再度行われたが、投入土砂は再び流出し、養浜前の高い浜崖が再び形成された²⁾。このことから抜本的な侵食対策の立案が求められている。本研究は、その一環として磯浜海岸の侵食実態を整理するとともに、この海岸の変形に大きな影響を及ぼしたと考えられる那珂川の流出土砂量の変化を調べることを目的とした。

2. 那珂川河口部の概況

検討対象地域は、那珂川河口から大洗港に至る長さ4 kmの海岸線である。対象地域の北端には流域面積 $3,270 \text{ km}^2$ の一級河川那珂川が流入している。那珂川河口付近は、過去かなり大きな人為改変を受けてきた。宇多ら³⁾が示したように、1885年作成の地形図によれば、当時那珂川は北向きに大きく蛇行して太平洋へ注いでおり、河口には長さ720 mの河口砂州が北向きに伸びていた。一方、河口南側には汀線から南西方向へと広大な砂丘地が発達していた。この砂丘はこの地域で冬季に卓越する北東風時に飛砂が運ばれ堆積してできたものであることから、過去には那珂川から潤沢な砂の供給があったとされた⁴⁾。図-1は、那珂川～大洗間の1961、2013年撮影の空中写真を示す。1961年までに蛇行部に直線河道が掘られ、旧河道は那珂湊漁港となって1961年には既に南防波堤の一部が完成していた。一方、河口右岸には導流堤が伸ばされた。この時期、河口右岸から南向きに広い砂浜が広がっていた。その後2013年までには那珂川河口の南側に大洗水族館ができたが、その前面では砂浜が大きく狭ま

図-1 那珂川～大洗間の1961, 2013年撮影の空中写真

図-2 NOWPHAS 常陸那珂港による1991～2010年の波浪観測に基づくエネルギー平均波向

った。

那珂川河口部の波浪条件として、那珂川河口の北6.4 kmに位置する常陸那珂港での波浪観測(NOWPHAS常陸那珂港)を参照し、1991～2010年の波浪観測データを基に、エネルギー平均波向を5°ピッチで算出した結果を図-2に示す。図-1の1961年の空中写真と2013年の衛星画像に示したように、大洗ゴルフ場前面の岩礁帯と大洗水族館を結ぶ平均汀線への法線の方向はそれぞれN99°E, N97°Eであり、平均ではN98°Eとなる。図-2には、平均方向(N98°E)を併せて示す。各季のエネルギーピーク方向は、全年でN95°Eであるが、季節別には冬季のみN80°Eと北側に大きく傾いた方向から入射している。これに対し、春、夏、秋季はN90°E, N100°E, N95°Eからの入射であり、その方向は平均海岸線への法線方向とほぼ等しい。平均海岸線への法線方向となす角は、右回りを正とすると全年では-3°, 冬季は-18°, 春季は-8°, 秋季は-3°であり、夏季のみ+2°右回りの方向からとなる。表-1には各季のエネルギー平均波高、周期、エネルギーピーク方向をまとめて示す。

3. 那珂川の流出土砂に関する既往研究

磯浜海岸是那珂川河口に隣接していることから、那珂川の流出土砂量の変化の影響を強く受けると推察される。そこで那珂川の流出土砂に関する既往研究を整理した。まず、谷沢ら³⁾は、那珂川からの流出土砂は南向きの沿岸漂砂により運ばれ、大洗港の沖防波堤の背後にトラッ

表-1 NOWPHAS 常陸那珂港の波浪観測結果

	通年	春 (3～5月)	夏 (6～8月)	秋 (9～11月)	冬 (12～2月)
エネルギー平均波高(m)	1.2	1.4	1.0	1.3	1.2
平均周期(s)	7.9	7.7	7.5	7.9	8.2
ピーク波向(NX°E)	95	90	100	95	80
エネルギー強度(%)	100	27.1	20.6	26.5	25.7
平均年最大波高(m)	5.6	—	—	—	—

プされたことから、沖防波堤背後における堆積土砂量の経時変化を調べることににより那珂川の流出土砂量を推定した。この方法では、個々の洪水時の土砂供給量の推定はできないが、底質調査の結果と併せると粒径0.1 mm以上の砂分を対象とした平均的な土砂供給量の把握が可能で、1979～2004年の堆積土砂量の変化からほぼ $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ の土砂供給があったとした。さらに、海浜縦断形の変化比較より、波による地形変化の限界水深 h_c がほぼ-9 mにあるとした。

一方、高橋ら⁴⁾は、那珂川河口部においてADCPにより流速データを取得するとともに濁度計や採水により浮遊砂量を測定し、実測の土砂濃度と流量の積として一洪水時の土砂流出量を推定した。この手法は、洪水時などの短期間の観測データを取得し、それを長期間積分すれば河川流出土砂量の推定が可能という考え方に立っており、科学的にはより進んだ手法に基づいている。しかしながら、洪水の規模や発生頻度は経時的に変化することから、長期間、例えば20年以上にわたる河川供給土砂量の推定は容易ではなく、この点において河川流出土砂のうち海浜を構成する粒径がほぼ0.1 mm以上の砂の累加堆積量から平均的な流出土砂量を推定する谷沢ら³⁾の方法が実務的には優れていると推察される。そこで本研究では、谷沢らの観測結果にさらにデータを付け加える手法で検討を進めた。

4. 空中写真比較による大洗磯浜海岸の変遷調査

大洗磯浜海岸では1961年から2013年までの間、5時期に空中写真撮影が行われ、さらに2010, 2013年には衛星画像が取得された。宇多ら⁵⁾は、2002年までの汀線変化について調べ、磯浜海岸では大洗水族館や駐車場施設が前出しして造られたと同時に、汀線が後退して前浜が消失したとした。本研究では、その後2013年までの4時期

図-3 空中写真または衛星画像による磯浜海岸の1961～2013年の変遷

の空中写真または衛星画像を加えた上で、同一区域を切り出して海岸の変化を調べた。その際、磯浜海岸にある岩礁を北から順にa～fと区別した。

1961年では(図-3(a))、那珂川の右岸河口導流堤から岩礁aまでの間には、長さ1.2 kmの砂浜が広がっており、河口砂州部分を除けば砂浜の広さは河口近傍で130 mであり、岩礁aへと次第に浜幅が狭まっていた。一方、この時期までには大洗港の防波堤は建設されていなかった。1975年では(図-3(b))、那珂川河口南側の砂浜が狭まり始め、同時に砂浜上には大洗水族館が前出しして造られた。砂浜上に施設が造られたことから、以後それを防護する必要が生じた。また水族館の南側では県道の海側に沿って駐車場が造られた。さらにこの時期までに大洗港の防波堤が完成し、南向きの沿岸漂砂が防波堤により阻止されたため、岩礁fの背後で堆砂が起きた。1993年では汀線の後退が続き、大洗水族館前面の前浜がさらに狭まり護岸に波が作用し始めた(図-3(c))。しかし岩礁帯a～fの背後での汀線変化は大きくなかった。2010年では(図-3(d))、新水族館が完成し旧水族館のあった場所には規模の大きな駐車場が造られたが、汀線の後退がさらに進み、

この付近では前浜が消失した。この図には2010年1月測量による深浅図も示す。大洗ゴルフ場沖の等深線形状を調べると、汀線とほぼ平行に伸びた等深線は、DL-6 m(DL=TP-0.8 m)以浅であり、DL-7 m以深では等深線の沖向きの突出が見られることから、この付近での h_c はほぼDL-7 m(TP-8 m)にあると推定される。この値は、谷沢ら³⁾が大洗港の南側海浜で推定したTP-9 mにほぼ近い値である。その後、2011年3月11日には大地震が発生し、津波の作用も受けた。この地震では大洗周辺で約20 cmの地盤沈降が起きた(国土交通省国土地理院⁹⁾。地震後の3月12日の空中写真(図-3(e))によると、空中写真で見る限り2010年11月と比べて著しい変化は起きていない。しかしこの時期にあっても大洗水族館の付属駐車場のほぼ中央付近では従来と同様、護岸前面に全く砂浜がないという状況であった。これと同じ状況は2012年10月(図-3(f))も続き、最終的に2013年には図-3(g)に示すようにさらに侵食が進み、大洗水族館を守る護岸は海岸線と重なり、突出した護岸の南側にある駐車場前面の凹状の区域にのみ砂浜が残される状態となった。このように対象海岸の北半分では汀線が著しく後退したが、この時期でも

岩礁a以南での汀線変化は大きくなかった。

5. 汀線と海浜面積の変化

空中写真または衛星画像を基に汀線位置を読み取り、潮位補正を行った上で1961年を基準とした汀線変化を求めた。1961年基準での1975～2013年の汀線変化を図-4に示す。これによると、1961年以降現在に至るまで磯浜海岸の汀線は岩礁cの北側では後退、岩礁cの南側では前進傾向にある。これは宇多ら⁹⁾の結果と同一傾向である。また、岩礁c付近に汀線変化の中立点があり、岩礁cを境として北側の後退域と南側の前進域が明瞭に区分される。いずれの時期の汀線変化でも、最大汀線後退量は那珂川河口右岸に現れており、汀線後退量は南向きに減少し岩礁cで後退が止まっている。図-5は、那珂川河口から汀線の中立点である岩礁cまで($X=70\text{--}1800\text{ m}$)と、岩礁cから大洗港まで($X=1800\text{--}2880\text{ m}$)、および全域を対象に海浜面積変化量の経時変化を求めた結果を示す。那珂川河口から岩礁cまでの区域では、1961年以降海浜面積は単調に減少する一方、岩礁cから大洗港間では増加している。区間全体での1961～2013年の海浜面積の減少量は $4 \times 10^4\text{ m}^2$ (面積減少速度: $800\text{ m}^2/\text{yr}$)であった。また那珂川から岩礁cまでの区間での1961～2013年の海浜面積の減少量は $6 \times 10^4\text{ m}^2$ (面積減少速度: $1.2 \times 10^3\text{ m}^2/\text{yr}$)であった。

6. 海底地形変化と沿岸漂砂量の推定

茨城港湾事務所が取得した深浅測量データを基に海底地形変化について分析した。深浅測量は、大洗港の近傍では100 m間隔で、一方、本研究で主に対象とする大洗磯浜での深浅測量は200 m間隔で行われた。図-6には、深浅図とともに異なる2時期の深浅図から算出した水深変化量を示す。1996年9月5日～2000年8月30日の水深変化量の分布(図-6(a))によれば、ほぼ4年間に那珂川河口沖に突出した河口沖テラスが形成される一方、磯浜海岸の岩礁帯より北側は侵食傾向を示した。一方で大洗港の沖防波堤の西側は堆積傾向にあった。そこで、那珂川河口沖に矩形区域①を、大洗港の沖防波堤の西側に区域②を

設け、区域①②の土砂量変化を求めたところ、この期間中矩形区域①における堆積量は $3.9 \times 10^5\text{ m}^3$ であった。2007年12月18日までの地形変化では(図-6(b))、区域①での土砂量は $0.6 \times 10^5\text{ m}^3$ となり、したがって河口沖では2000～2007年に土砂量が $4.5 \times 10^5\text{ m}^3$ 減少したことになる。このような那珂川河口沖での土砂量の減少と対照的に、同じ期間中、区域②の堆砂量は $1.2 \times 10^5\text{ m}^3$ 増加した。区域②の範囲では浚渫は行われていないので、航路浚渫の影響は軽微であるとした場合、那珂川河口での堆積土砂がそのまま沖防波堤の背後へと運ばれるとするならば、両者はほぼ同じ値を取るはずであるが、実際には那珂川河口沖での土砂減少量のほうが大きい。この理由として、区域②の測線間隔100 mに対し、区域①のそれは200 mと間隔が広く、区域①の土砂量の計算が2測線のデータでのみなされたことから測定精度が低く、同一レベルでの比較が難しいこと、また、河口沖の堆積土砂には粒径が0.1 mm以下の細粒分も含まれていたが、その土砂は南向きの沿岸漂砂により運ばれる過程で広く拡散したことなどが考えられる。

2009年2月9日までの地形変化では(図-6(c))、那珂川河口沖での水深変化量は小さいが、沖防波堤背後での堆積域が広がり、2007年と比べ堆砂量は $1.7 \times 10^5\text{ m}^3$ 増加した。2009年以降も那珂川河口沖での水深変化量は小さく、ほぼ同じ状況が震災前の2011年1月まで続き、図-6(d)に示すように沖防波堤背後の堆積域は南へ広がり、沖防波堤背後の堆砂域と南側海浜の間に延びる航路も浅くなったことから、堆砂の一部が南側から運び込まれたと推察される。震災直後には、図-6(e)に示すように、沖防波堤と南防波堤の間に堆積していた舌状砂州が切れ、そこに深みが形成された。これは大津波時に開口部を通して岸向き流動が起こり、堆積していた砂が流出したためと推定される。南防波堤の端部に大きな局所洗掘が起きただけでなく、その海側隣接域まで侵食域が広がっていることから、主に押し波時に侵食が進んだと推定される。また、津波では大洗水族館の沖でも顕著な侵食が生じた。

前述のように区域①では、1996年から2000年に河口沖テラスを形成して $3.9 \times 10^5\text{ m}^3$ の堆砂が起きた。土砂量の増加は、表-2⁹⁾に示すように、那珂川の既往洪水のうち

図-4 1961年基準での1975～2013年の汀線変化

図-5 1961年を基準とした海浜面積変化量

図-6 深浅図と2時期の深浅図から算出した水深変化量の分布

表-2 那珂川の洪水記録⁶⁾

順位	洪水発生年月日	流域平均 2日間雨量(mm) (野口上流域)	流量(m ³ /s) (野口)
1	1947年9月16日 (カスリーン台風)	232	7620 注1
2	1986年8月3日 (台風10号)	248	6490 注2
3	1998年8月28日 (台風4号・停滞前線)	330	5930 注2
4	1961年6月27日 (台風6号)	207	4340 注2
5	1999年7月13日 (前線豪雨)	186	3960

注1: 推定値 注2: 氾濫後流量

流量規模でそれぞれ3, 5位となる1998年8月28日の台風4号と停滞前線に伴う $Q=5,930 \text{ m}^3/\text{s}$ の洪水と、1999年7月13日の前線豪雨による $3,960 \text{ m}^3/\text{s}$ の洪水が起き、これによって土砂流出が起きたことによる。図-7には区域①②の土砂量の長期的変化を示す。なお、区域②の堆砂量は谷沢ら³⁾の算出した2004年以前のデータに近年の堆砂量を加えて作成した。区域①の土砂量変化によれば、2000年8月30日までに河口沖に堆積していた土砂は、その量的評価には精度上の問題があるとしても、洪水時に形成された地形が漂砂により元の姿に戻るには2000~2007年の約

図-7 那珂川河口の区域①と大洗港の沖防波堤背後の区域②の土砂量変化

7年の応答時間が必要とされたことが分かる。一方、区域②の堆砂速度は、1979~1993年では平均で $7.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ ($r^2=0.94$)であったが、1993~2007年では $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ ($r^2=0.93$)と、約56%まで低減している。

7. 那珂川の流出土砂量の推定

谷沢ら³⁾によれば、沖防波堤背後の堆砂は海浜形成に役立つ粒径 0.1 mm 以上の成分からなっている。そこで、区域②で2011年まで見られた堆砂量の増加は那珂川の流

出土砂量のうち海浜に寄与できる成分によりもたらされたと考えられる。その場合、図-6によれば、沖防波堤背後の堆積域が航路を挟んで南側海浜と明らかに区分されていたのは2009年頃までであり、この時期までは那珂川の流出土砂が沖防波堤背後にトラップされたと考えられる。大洗港の沖防波堤背後での堆積土砂は、那珂川の流出土砂と河口から岩礁cの侵食土砂の和と考えられるので、これより那珂川の流出土砂量の推定を行うことができる。まず、1961年を基準とした汀線変化解析によれば、那珂川河口～岩礁cの区間での1961～2013年での海浜面積の減少速度は $1.2 \times 10^3 \text{ m}^2/\text{yr}$ であり、これに $h_c=8 \text{ m}$ をもとに宇多の方法⁷⁾により推定された漂砂の移動高 $h=9.2 \text{ m}$ を乗じると、侵食速度は $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ となる。次に、図-7によれば、1979～1993年での沖防波堤背後の堆砂速度は平均 $7.2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ であったが、この値より河口から岩礁cまでの区域の侵食によりもたらされた土砂量(土砂供給速度 $1.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$)を差し引くと、那珂川の流出土砂量は $6.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ となる。また、1993～2007年では堆積速度は $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ であったから、流出土砂量は $2.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ となり、近年那珂川の流出土砂量のうち海浜形成に役立つ成分(いわゆる wash load 成分を除く)はほぼ半減したと考えられる。なお、2007年には11,200 m^3 を用いた養浜が行われたが、その量は全堆積量と比較すれば無視することができる。

8. 結論

大洗港の沖防波堤の背後での堆積土砂は、那珂川の流出土砂と河口から岩礁cの侵食土砂からなると考えて那珂川の流出土砂量の推定したところ、1979～1993年では

$6.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ 、1993～2007年では $2.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ となり、近年はほぼ半減しており、これが主因となって大洗磯浜海岸の侵食が進んだことが明らかになった。また、2011年の大津波時には、沖防波堤背後に形成されていた舌状砂州が侵食され、ほぼ9 mの平坦面が形成されたことも明らかになった。

参考文献

- 1) 宇多高明, 住谷廸夫, 長山英樹, 大木康弘, 熊田貴之: 漂砂源の涸渇と護岸の前出しによって脆弱化した海浜の異常波浪による急激な侵食, 海洋開発論文集, 第23巻, pp.1201-1206, 2007.
- 2) 本島真也, 小林昭男, 宇多高明, 遠藤将利: 大洗磯浜海岸における花崗岩礫の追跡調査, 土木学会論文集B2(海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_721-I_725, 2013.
- 3) 谷沢 肇, 宇多高明, 松浦健郎, 菊池泉弥, 福本崇嗣, 熊田貴之: 大洗港による那珂川流出土砂のトラップと遮蔽域内堆砂の実態, 海岸工学論文集, 第56巻, pp. 566-570, 2009.
- 4) 高橋 誠, 戸屋裕亮, 山田 航, 荒木陽介, 堀口真弥, 田井 明, 松本健作, 鶴崎賢一, 清水義彦: 長期データを用いた那珂川からの土砂供給量の推定と河口域での土砂の挙動に関する研究, 土木学会論文集B1(水工学), Vol.70, No.4, pp.I_1021-I_1026, 2014.
- 5) 国土交通省国土地理院: 市町村ごとの地殻変動量(暫定), <http://www.gsi.go.jp/common/000059961.pdf>(2014年7月20日参照).
- 6) 那珂川水系河川整備基本方針那珂川水系流域および河川の概要, http://www.mlit.go.jp/river/basic_info/jigyo_keikaku/gaiyou/seibi/pdf/naka-5-4, (2014年7月20日参照).
- 7) 宇多高明: 日本の海岸侵食, 山海堂, p.442, 1997.

(2015.3.18 受付)

BEACH EROSION OF OHARAI-ISOHAMA COAST TRIGGERED BY DECREASE IN FLUVIAL SAND SUPPLY FROM NAKA RIVER

Chihaya NOMOTO, Yasuhiro OSAKI, Takaaki UDA, Yasuhiro OHKI,
Masumi SERIZAWA and Toshiro SAN-NAMI

Beach changes of the Oharai-isohama coast were investigated using aerial photographs taken since 1961. On the basis of the volume change behind the offshore breakwater of Oharai Port, the amount of fluvial sand supply from the Naka River was estimated to be $6.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ between 1979 and 1993, and $2.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{yr}$ between 1993 and 2007, which was reduced to be half since 1993. In addition, during the 2011 Great Tsunami the sand deposition zone behind the offshore breakwater was eroded to form a flat depth of -9 m due to tsunami currents.