

鹿島灘海岸地形の形成と長期汀線変化の予測

都丸 徳治* ・ 斉藤 光司** ・ 柴田 正和***
田子 洋一**** ・ 土屋 義人*****

1. ま え が き

鹿島灘海岸は、両端に岬を有する南北 70 km に及ぶわが国を代表する大規模な砂浜海岸で、その北側の境界には那珂川、南側の境界には利根川が流入している。この海岸には大規模な海岸構造物として大洗港、鹿島港及び波崎漁港が建設され、また、河川流域に大規模なダムが建設され始めた昭和 40 年代以降、海岸線の後退が著しくなった。これは海岸線に築造された防波堤などの港湾施設や埋立地の建設によって、沿岸漂砂の連続性が遮断され、また、利根川流域に建設された 10 数個に及ぶ大規模ダムによって流送土砂の供給量が著しく減少し、漂砂源が大きく変化した結果と思われる。とくに、昭和 40 年代以降、自然の砂浜海岸が消失する危機に瀕したため各種の侵食対策工法が施工されてきたが、恒久的な砂浜の回復は難しく、最近になってヘッドランド工法によって侵食対策が講じられてきている。

本研究では、鹿島灘海岸における既存の資料を収集して、その変遷をたどり、形成過程を考察するとともに、大規模海浜過程として 100 年の時間スケールにおける長期の汀線変化を予測できる数値シミュレーションモデルを構築し、自然な状態における海浜形成過程の再現とその追算を行い、大規模な海浜過程としての長期汀線変化の予測を行う。

2. 鹿島灘海岸の形成とその変遷

2.1 海岸地形の形成とその変遷

鹿島灘海岸は北側の境界に当たる那珂川から南側境界の利根川まで、大洗岬付近の岩石海岸を除いて、全般的に砂浜海岸である。北端の大洗町から南端の波崎町までの沿岸地域は、砂丘化した幅 200~300 m の地形を呈しており、複数列の砂堤が海岸に平行している。

海の基本図（海上保安庁水路部，1971）によれば、海岸地形は図-1 のように、鹿島灘海岸のほぼ全域にわた

って典型的なバーとトラフが形成されていることが分かる。また、海底地形の特徴は水深 50 m 付近を境に大きく 2 つに分かれ、50 m 以浅では、主として 20 m 以浅の緩やかな海底と 20~50 m の範囲における広い平坦面とがあり、この平坦部には比高 10 m 未満の多数のリッジが形成されている。リッジの方向は海岸線の方向と斜交する NNE 方向であり、鹿島港付近で密になっている。

等深線は、図-2 に示すように、鹿島灘の中央部（鹿島港のやや北側）でやや陸側には入り込んでいて、その両端は平坦部を有している中央部で凹型の特徴的な 2 ピークの形状をしている。一方、50 m 以深の海底地形は、50~100 m 付近まで緩やかに沖の方向に傾いた斜面であるが、水深 110 m 付近になるとやや平坦となり、陸棚外縁に接する平坦部へと移行している。

現在の鹿島灘海岸の大部分を占める沖積層は、主に縄文中期から弥生時代までの約 2,000 年間の海面低下（弥生海退）による汀線前進と常陸川水系（現在の鬼怒川、小貝川、霞ヶ浦水系の総称）による堆積物の運搬によって形成されたものと思われる。鹿島灘海岸の南側に流入する利根川は、17 世紀中頃の江戸時代中期まで乱流し、多くの派川に分かれながら東京湾に流入していたが、江戸時代の利根川東遷事業により現在の位置に付け替えられた。したがって、地質年代の時間スケールでは、海岸地形を形成するには利根川はそれほど寄与していないが、その河川の規模から、漂砂源の観点からすれば現在

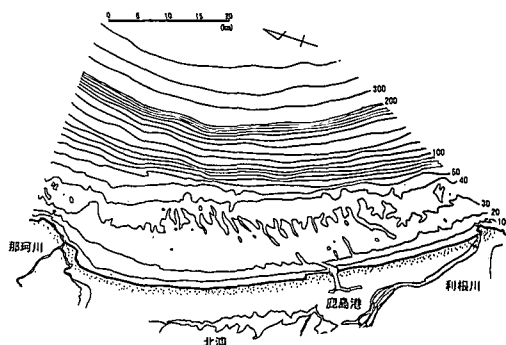


図-1 鹿島灘海岸の海底地形

* 正会員 工博 (財)日本建設情報総合センター
** 正会員 茨城県土木部河川課
*** 正会員 工博 (有)応用水理解析
**** 正会員 (株)建設技術研究所
***** 正会員 工博 名城大学都市情報学部教授

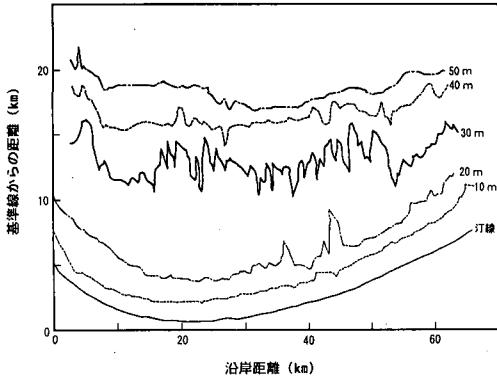


図-2 鹿島灘海岸の等深線の分布

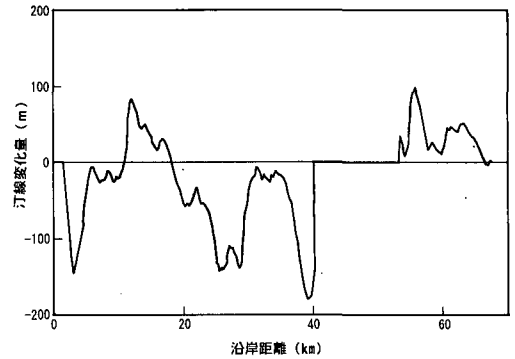
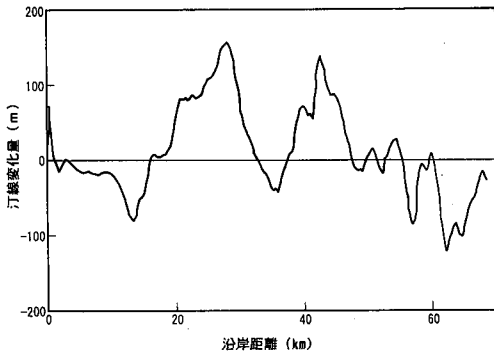
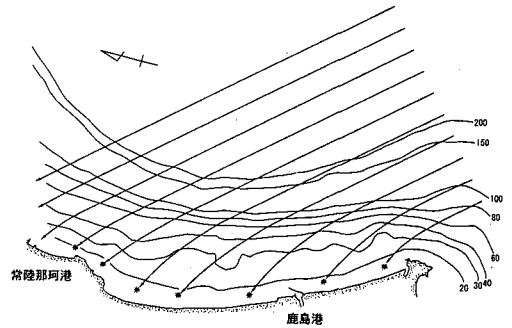
図-4 鹿島港建設以降における汀線変化
(昭和36年～平成2年)図-3 鹿島港建設以前における汀線変化
(明治36年～昭和36年)

図-5 観測波浪の逆屈折図

の海岸地形に大きな影響を与えてきたと考えられる。

鹿島灘海岸の長期的な汀線変化量の算定には、既存の航空写真や旧版地形図を用いることとし、人為的な構造物が設置される以前の対象期間においては明治36年、昭和4年および36年を、構造物設置後は昭和59年および平成2年のものを用いる。汀線位置の読みとりについては、地形図の場合は平均満潮時の汀線、航空写真の場合は波打ち際の線として潮位補正を行った。明治36年から鹿島港建設以前の昭和36年までの汀線変化を求め、結果を図-3に示す。汀線変化量の沿岸方向分布は、中央が凹状で両側に2つのピークを持つ特徴ある波状をしているのがわかる。

鹿島港の建設以降における汀線変化は図-4に示すとおりで、大洗港の南側では著しい汀線の後退がみられるが、これは昭和56年から59年にかけて建設された沖合防波堤の影響と考えられ、宇多(1987)および三村(1991)らが詳細な原因の分析を行っている。また、鹿島港の北側では侵食傾向、南側では堆積傾向を示している。これらは佐藤ら(1974)および宇多(1987)が指摘しているように、鹿島港の南防波堤をはじめとする海岸構造物の

影響と考えられる。

2.2 海象および漂砂特性

風については、概ね春および秋にはN～NWとSWまたはWWSの風が卓越し強風が多く、夏は四季を通じて最も風が弱く卓越風向はNNEおよびWSW～SWである。冬は風向NNW～NNEが主で強風は少なく、高波浪は春と夏から秋の台風期に生じることが多い。茨城県鹿島港湾事務所(1984)の資料によれば、鹿島灘海岸における最多頻度の風向はENEであり、大洗ではNE、鹿島ではEとなっている。

茨城県沿岸の波浪観測所で、波高、波向、周期の経時データが存在している観測データを対象として、観測波浪のエネルギーフラックスの分布特性を調べると、主方向は常陸那珂港でE～ESE、鹿島港でENE～Eである。つぎに、鹿島灘海岸における沖波の特性を検討するために、常陸那珂港および鹿島港の波浪観測資料の中から平成元年から3年までの3年間ににおける有義波高2.0 m以上のストームを選び出し、ストーム時の波浪特性に基づく、周期7～16 secの観測波の卓越波向を対象に、両港における観測波と沖波の関係を把握するために図-5に示すような逆屈折計算を行った。これと観測波浪を沖波

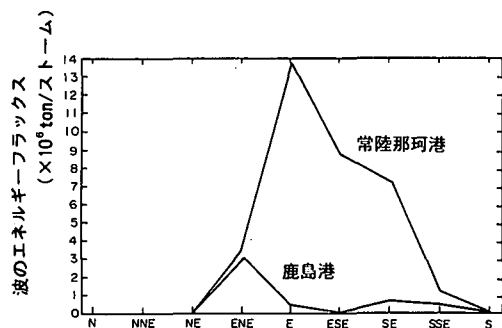


図-6 観測波から換算した沖波の波エネルギーフラックス分布

波浪に変換する場合の変換特性に基づき求めた、沖波波浪のエネルギーフラックスを示す図-6とを比べると、常陸那珂港では観測波と沖波における波向の差はあまりなく、鹿島港では沖波にSE近辺の入射波が認められるが、観測波ではそれほど卓越していない。これは図からもわかるように利根川河口の海底地形により屈折変形して鹿島港沿岸に到達するためと考えられる。

鹿島灘海岸の底質の分布状況は、ふるい分け係数や中央粒径の大きいものが那珂川及び利根川の河口に近いところに多く、中央付近に近づくにつれて少なくなっている(茨城県土木部河川課, 1991)。また、重鉱物含有率の分布では、軽量重鉱物は両河川の河口付近で少なく中央部で多くなっているが、重量重鉱物はその逆の傾向が認められている(鈴木ら, 1987)。すなわち粒径が大きく質量の大きいものあるいは比重の大きいものは漂砂の供給源である河口の近辺にとどまり、小さいものや軽量のもののは沿岸流によってそれぞれ中央に向かって運搬されている。このことは漂砂の卓越方向が那珂川から南へ、利根川から北へ向かっていることを示している。

3. 大規模海浜過程としての長期汀線変化の予測

海浜変形予測モデルとしては1ラインモデルを使用した。代表波浪の推定方法と汀線変化の計算法につぎのような工夫を試みた。

3.1 代表波浪

代表波浪を推定するための従来よりよく使われている手法は、沿岸域、とくに既存の港湾で観測された波浪観測資料を用いることである。この沿岸での波浪観測資料は、逆屈折計算で、屈折による波形の変形のみを考慮してSnellの法則に従い沖合の波浪場に変換される。この方法は、波浪が沿岸域に到達するまでにはすでに海底地形の影響により屈折し変形しているので、波浪の進入方向はほとんど汀線に垂直であり、沖合における波浪の波

向がかなり違っていても、沿岸域においてはごく小さな波浪の伝播方向の違いとしてしか現れない。それにもかかわらず、通常の波浪観測資料における伝播方向は16方位以上に分類されていることは少ないので、逆屈折計算により算出された沖合の波浪場、言い換えれば沖波としての波向は、沿岸波浪観測資料の誤差を増幅していることになる。また、1つの大規模な海浜において波浪観測を実施しているところは、せいぜい1または2カ所であり、そのうえ波浪は浅い海域に到達すると、その付近の局所的な海底地形に応じて屈折だけでなく回折し、さらに海底摩擦による減衰などを経て複雑な変形を受ける。すなわち、沿岸波浪観測資料には、1つの大規模な海浜の一般的な波浪の特徴だけでなく、その観測地点の局所的な海底地形に基づく波浪変形の結果が反映されている。

本研究では、WMO(世界気象機構)による外洋における長期の観測結果をまとめた外洋波浪統計(社団法人日本造船研究協会, 1980)に基づく新しい代表波浪の選定方法を提案する。

鹿島灘海岸沖における通年波高波向の出現頻度は、表-1のようである。

鹿島港および常陸那珂港における限られた波浪統計に基づいて逆屈折計算により求めた沖波の統計によれば、沿岸に到達する波浪の沖合での波向は、汀線の法線方向を中心にして比較的狭い範囲で代表させることができると考えられる。鹿島灘海岸の中央部で汀線の法線方向はEから測ってNへ約20°であるので、沖波方向は10°, 20°および30°の3方向とする。また、汀線変化の沿岸方向分布を調べた結果に見られる侵食および堆積域の定性的な特徴は、北よりの周期10 sec程度以上の周期をもつ波浪によりもたらされているので、周期10 secの波浪のみを考えることとする。波高に関しては、Rayleigh分布に従うとしてこれを2種類で代表することにし、外洋波浪統

表-1 鹿島灘海岸沖における通年波高波向の出現頻度

波高(WH)	波向(WD)	90°(N)	60°	30°	0°(E)	-30°-60°	合計
CALM							3.8
-0.75 m		1.5	2.0	1.0	1.0	1.0	7.5
0.75-1.75		4.0	5.0	5.0	3.3	2.3	21.9
1.75-2.75(2.21)		2.5	2.5	2.8	2.2	1.3	12.9
2.75-(3.37)		1.9	1.9	1.6	1.3	1.1	8.9

表-2 代表沖波の成分

入射角(E基準)	周期	沖波波高	生起確率	継続時間
30°	10秒	2.75 m	2%	7.3日/年
20°	10秒	2.75 m	2%	7.3日/年
10°	10秒	2.75 m	2%	7.3日/年

計に基づく2.21 mの波高の合計12.9%と3.37 mの波高の合計8.9%をエネルギー平均した値2.75 mを用いて、代表波浪の波高とする。

沖波3方向成分の代表波浪の生起確率は、この統計によれば波高2.21 mおよび3.37 mで代表される波向30°および0°の波浪の生起確率の合計は7.9%であるので、沖波3方向成分の生起確率を一様に2%ずつとする。これを1年間あたりの継続時間に直すと、 $365 \text{ 日} \times 0.02 = 7.3 \text{ 日}$ である。このようにして求めた代表沖波の3成分の諸元を一覧表に示せば表-2のようになる。

3.2 長期汀線変化予測モデル

a) 波浪の伝播変形計算

波浪の推定、変形計算の基礎方程式としては、次式で与えられる緩勾配方程式 (Berkhoff, 1972) を用いる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(c c_g \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(c c_g \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \omega^2 \frac{c_g}{c} \phi = 0 \quad \cdots (1)$$

ここに、 x 軸はほぼ汀線に平行な座標軸、 y 軸はそれに垂直な沖へ向かう座標軸、 c は波の位相速度、 c_g は群速度および ω は角速度である。その解法はEbersoleら (1986)に概ね準拠するが、若干の工夫を加えた。すなわち、1ラインモデルを用いる海浜変形シミュレーションのために必要な波浪伝播変形計算の出力は、砕波時の波高と波向のみであるので、砕波後の波浪変形を考慮する必要はないと速断して、砕波帯内の波浪変形を全く考慮していない方法が数多く見受けられるが、一般にすべての自然海岸は湾曲しており、より厳密に汀線位置を求めるため、ここでは砕波による減衰も考慮して、砕波帯内での波浪場の解も正確に求めることにする。

b) 汀線変化の計算

海浜変形の連続方程式としての基礎方程式は、沿岸漂砂量の不等流性と汀線変化との連続性から次式で与えられる。

$$\frac{\partial y_s}{\partial t} + \frac{1}{D_c} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \quad \cdots (2)$$

ここに、 t は時間、 x は沿岸方向座標、 y_s は汀線の岸沖方向座標、 Q は沿岸漂砂量、 q は沿岸方向座標 x 地点における漂砂量(流入を正とする)、 D_c は漂砂移動限界水深であるが、実際には海浜変形の限界水深である。沿岸漂砂量 Q に対しては、小笹・Brampton (1979)の式を用いる。

沿岸漂砂量により変化した後の移動限界水深までの海底の水深(プロファイル)はDean (1977)による平衡海浜断面形状に従うものとする。汀線変化を計算する式(2)の中の沿岸漂砂量 Q は、波浪伝播計算から求まる砕波点におけるパラメータから決定されるので、計算対象海岸の全区間において、沿岸方向座標 x の地点における漂砂量 Q が正確に与えられれば、汀線変化量が求められ

る。

3.3 長期汀線変化の予測

大洗港及び鹿島港建設以前(昭和36年以前)のほぼ自然な状態で、100年間にわたる汀線変化を追算した結果を図-7に示す。この図によれば汀線変化(堆積及び侵食)量は、既存の航空写真や旧版地形図より求められた図-3と同じように、波状的に変化する沿岸方向分布を示す特徴をよく表していることがわかる。

また、鹿島港と大洗港が存在する状態での鹿島灘海岸の長期汀線変化の予測計算結果は図-8に示すとおりである。北端では自然海浜の状態では南向きの沿岸漂砂が卓越しているが、大洗港の南側ではそれが完全に阻止されたために著しい汀線の後退を起こしている。鹿島港付近では、これとは反対に自然海浜の状態では北向きの沿岸漂砂が卓越しているため、その南側でそれが阻止されて著しい汀線の前進が起こり、北側ではその結果として著しい後退が進行していることがわかる。これらの状況は図-4と比較しても同じような傾向を持った特徴として明確に表れている。

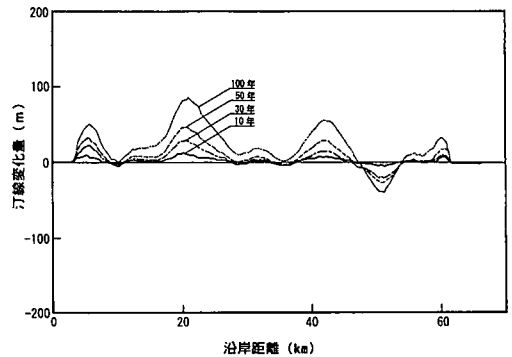


図-7 自然海浜の状況を仮定した場合の長期の汀線変化の予測結果

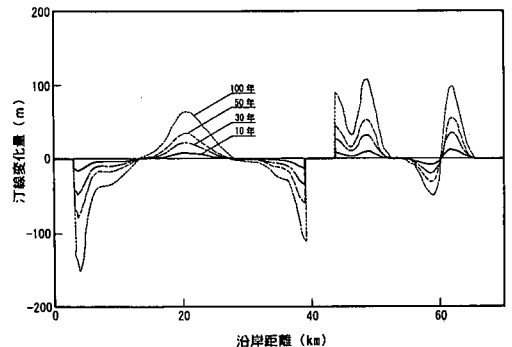


図-8 漂砂源の変化後における長期の汀線変化の予測結果

4. 結 語

以上、本研究では、大規模海浜過程としての鹿島灘海岸の形成過程を究明するとともに、長期の汀線変化を予測する方法を提案した。とくにその中で、代表波浪の選定に新しい方法を提案し、また、波浪の伝播変形計算においても、砕波帯内での波浪場の解を正確に求める方法を試みた。その予測法を鹿島灘海岸に適用して、100年のオーダーの時間スケールで長期の汀線変化の予測を行った結果、鹿島灘海岸の長期にわたる海浜変形をよく再現できることがわかった。

このように両端に岬をもち、それらが海浜変形の境界条件となっている海岸においては、海岸全体を一つの漂砂系として取り扱い、大規模海浜過程としての長期の汀線変化を予測することにより、恒久的な海岸保全のための対応策を考えていく必要があろう。

参 考 文 献

茨城県鹿島港湾事務所 (1984): 鹿島港。
茨城県土木部河川課 (1991): 昭和63年度海岸整備基本調査報告

書。

- 宇多高明 (1987): 茨城県沿岸侵食対策計画調査報告書, 土研資料, Vol. 2452.
小笹博昭, Brampton, A. H. (1979): 護岸のある海浜の汀線変化数値計算, 港研報告, Vol. 18, No. 4, pp. 77-104.
海上保安庁水路部 (1971): 沿岸の海の基本図/海底地形図 (1/5万), 「那珂湊」, 「鹿島」。
佐藤昭二, 田中則男, 佐々木克博 (1974): 鹿島港建設に伴う周辺海底地形の変化について, 第21回海岸工学講演会論文集, pp. 147-153.
社団法人日本造船研究協会 (1980): 北太平洋の風と波の統計図表。
鈴木泰輔, 齊藤文紀 (1987): 霞ヶ浦湖底堆積物の重鉱物組成と供給源, 地質調査書月報, vol. 38, No. 3, pp. 139-164.
三村信男, 加藤 始, 角田義紀, 宮本英明, 伊佐治進 (1991): 大洗における港湾構造物の建設に対する海岸地形の応答, 海岸工学論文集, 第38巻, pp. 401-405.
Berkhoff, J. C. W. (1972): Computation of Combined Refraction Diffraction, Proc. 13th. ICCE, ASCE, Vol. 1, pp. 471-490.
Dean, R. G. (1977): Equilibrium Beach Profile, U.S. Atlantic and Gulf Coast, Ocean Eng. Tech. Rep., No. 12.
Ebersole, B. A., Cialone, M. A. and Prater, M. D. (1986): Regional Coastal Processes Numerical Modeling System, Report 1A Linear Wave.