

波向の周期的変動場における 効果的なヘッドランド形状に関する検討

DETERMINATION OF LENGTH OF ARTIFICIAL HEADLANDS ON COAST WITH SEASONAL CHANGES IN WAVE DIRECTION AND MAGNITUDE

小松崎 誠¹・坂本一誠²・松浦健郎³・宇多高明⁴・熊田貴之⁵
Makoto KOMATSUZAKI, Issei SAKAMOTO, Takeo MATSU-URA, Takaaki UDA
and Takayuki KUMADA

¹茨城県銚田工事事務所道路河川整備課 技佐兼次長兼道路河川整備課長
(〒311-1504 茨城県銚田市安房1414)

²茨城県銚田工事事務所道路河川整備課 (同上)

³茨城県高萩工事事務所河川整備課主任 (〒318-0003 茨城県高萩市下手綱1405-2)

⁴正会員 工博 (財) 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)

⁵正会員 博 (工) (有) アイコムネット (〒135-0064 東京都江東区青海2-7-4-627)

On the Hokota coast facing the Pacific Ocean, beach has been eroded in recent years. This coast has a great potential for recreational use because of a natural sandy beach with a gentle slope. To protect this natural sandy beach, the artificial headlands are planned to be built. The effect and impact to the surrounding coast of the artificial headlands with the different lengths were investigated using the contour-line-change model under the wave conditions that the wave direction and magnitude seasonally change. The optimum length of the artificial headlands for controlling longshore sand transport was determined.

Key Words: Seasonal changes in wave direction, artificial headland, Hokota coast, contour-line-change model

1. はじめに

鹿島灘に面した大洗港から鹿島港に至る延長39kmの海岸においては、本来鹿島灘へと運ばれていた那珂川と利根川からの土砂供給が、それぞれ大洗港と鹿島港の防波堤によって阻止され、海岸へと供給されない状況となっている。同時に、大洗港と鹿島港による波の遮蔽域へと向いた沿岸漂砂も起きており、これらの結果鹿島灘全域が侵食傾向となっている。茨城県では対策として1984年よりヘッドランド(HL)の建設を進めてきているが、侵食はなお進んでいる。こうした鹿島灘全体での海浜変形予測について、勝山ら¹⁾は、侵食実態を明らかにした上で大洗港と鹿島港での堆砂に起因する土砂量を対象区間から差し引くことにより海浜変形予測を行った。この計算では、波高の場所的变化を与えたものの波高・波向は時間的に一定とした。しかしながら、鹿島灘海岸では波浪場が季節的に大きく変動し、冬季には反時計回りの方向から高波浪が入射するのに対し、夏季には時計回りの方向から相対的に低い波が

入射することにより、HL間では沿岸漂砂の方向が季節的に変動し、年平均で見れば漂砂循環系が形成されることが分かってきた²⁾。ところで、鹿島灘海岸のほぼ中央部に位置する銚田海岸では、大洗および鹿島港から十分離れているために、波の遮蔽域への沿岸漂砂の流出の影響が及びにくく、結果的に最近まで海浜は安定していたが、近年侵食が著しくなってきた。何らかの対策が必要になってきた。銚田海岸は鹿島灘海岸において最後まで残された緩勾配の砂浜海岸であることから、ただ単に保全を進めるのではなく海岸利用や環境にも十分な配慮が求められている。本研究では、宇多ら²⁾と同じ考え方の下で、銚田海岸に長さの異なるHLを建設した場合の漂砂制御効果について、粒径を考慮した等深線変化モデルを用いて検討した。

2. 計算方法

計算には、熊田ら^{3), 4)}の地形・粒径変化予測モデ

ルを用いた。侵食対策の必要区間は、鉾田海岸の23～29号堤間であるが、隣接海岸への影響も考慮し31号堤から21号堤まで10km区間を計算区間として選んだ。鹿島灘海岸では、鹿島港と大洗港における防波堤による波の遮蔽効果による防波堤近傍での堆積と、周辺海岸での侵食というマクロ的な変形とともに、波向変動に起因する沿岸漂砂の方向の反転現象も起きている。本計算でもこの現象を取り入れた。具体的には、冬季は波高が高いが継続時間が短く、夏季は相対的に波高が低いものの継続時間が長いという特性を反映させ、エネルギー平均波高を冬季では $H_w=1.85\text{m}$ 、夏季では $H_s=1.49\text{m}$ とするが、冬季エネルギー量(E_w)と夏季エネルギー量(E_s)が等しいという条件とした。2時期の波浪の作用時間は、冬季・夏季の総エネルギー量が等しいことから、冬季と夏季の波高の $5/2$ 乗比($H_w^{5/2}:H_s^{5/2}=63:37$)に逆比例して定めた($t_w:t_s=37:63$)。 $\Delta t=1\text{hr}$ なので1年間は8,760ステップであり、うち冬季が3,240ステップ、夏季が5,520ステップとなる。碎波波向は、鹿島港での冬季・夏季の卓越波向がそれぞれ $N44^\circ E$ 、 $N64^\circ E$ であることから、変動量を $\pm 10^\circ$ として屈折を考慮して $\pm 4.2^\circ$ とした。波高の季節変動に応じて海浜変形の起こる水深帯にも変化が現れる。このため波による地形変化の限界水深 h_c とバーム高 h_R も季節ごとに変える必要がある。そこで冬季には

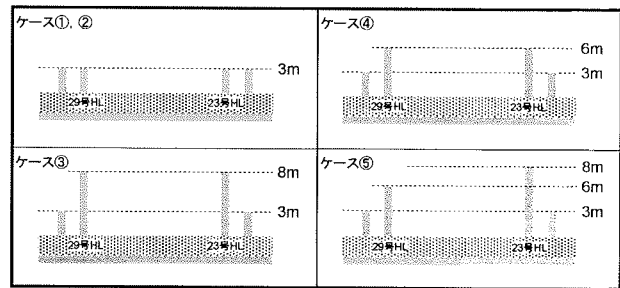


図-1 各ケースのヘッドランド (HL) の条件

$h_{cw}=8\text{m}$ 、 $h_{Rw}=3\text{m}$ (勝山ら)¹⁾とし、夏季には冬季夏季の波高比($H_w:H_s=1.24:1$)より、 $h_{cs}=6.4\div 6\text{m}$ 、 $h_{rs}=2.4\div 2\text{m}$ とした。計算では、季節に応じて波高、 h_c 、 h_R を周期的に変化させた。そのほか表-1には漂砂量係数、漂砂量の水深方向分布、土砂落ち込みの限界勾配、計算範囲、計算メッシュ、計算時間間隔、計算ステップ数、境界条件などを示す。

計算領域の両端を区切る側方境界 (21, 31号堤) は通過境界とするが、空中写真より求めた汀線変化に漂砂の移動高を乗じて算出した沿岸漂砂量分布によれば、1984～2006年における21～31号堤間での流出土砂量は $7\text{万m}^3/\text{yr}$ である。検討対象の鉾田海岸は、大洗と鹿島港の中央部に位置すること、また2方向波浪を想定していることから、計算領域の両端部から $3.5\text{万m}^3/\text{yr}$ の割合で砂の流出が起こるよう吸い込み境界を仮定した。

計算は全体で5ケースからなる。ケース①では、1984年地形を平行等深線に近似して初期地形とし、さらに両端に土砂の吸い込み境界を設定して2006年地形の再現を行った。これを基本として20年後の2026年地形の予測を行った。ケース②は無対策の場合である。ケース③～⑤では23, 29号堤の先端水深を様々変え、HLの長さの相違による漂砂制御効果の違いを調べた。ケース③④では、両HLの先端水深を冬季波浪時の $h_c(8\text{m})$ 、または夏季波浪時の $h_c(6\text{m})$ まで延ばした。ケース⑤では、23号堤の先端水深は冬季の $h_c(8\text{m})$ 、29号堤の先端水深は夏季の $h_c(6\text{m})$ まで延ばす非対称配置とした。図-1には上記HL条件をまとめて示す。

3. 現況再現

展開座標を用いるとともに、1984年の深淺測量データより縦断形を沿岸方向に平均化して定めた海浜形状を図-2に示す。この形状を初期地形として、2006年までの地形変化予測を行った。2006年夏季の漂砂フラックスと対応する海浜形状を図-3(a), (b)に示す。時計回りの方向から波が入射するため、23, 29号堤間において北向きの沿岸漂砂が発達する。結果的に23号堤側では等深線が後退し、北側の29号堤の南側では前進するという変化が起こる。同時に、各HLの先端水深は 3m と $h_{cw}=8\text{m}$ より浅いため、一部の沿岸漂砂が北向きに流出し、結果的にHL沖で等深線

表-1 計算条件

計算ケース	① 2006年現況再現 ② 放置 ③ 先端水深 8m (23, 29号堤) ④ 先端水深 6m (23号堤), 6m (29号堤) ⑤ 先端水深 8m (23号堤), 6m (29号堤)
初期地形	・ケース①: 5m～8m: 縦断勾配 1/65, 8m～15m: 縦断勾配 1/100 ・ケース②～⑤: 2006年の再現等深線
平衡勾配	1/65
入射波条件	夏季の波浪条件 ・碎波波高 $H_b=1.49\text{m}$ ・碎波波向 $\alpha_b=4.2^\circ$ ・作用時間 $t_s=230$ 日 (5,520 ステップ) ・潮位条件 M.S.L. 0.0m 冬季の波浪条件 ・碎波波高 $H_b=1.85\text{m}$ ・碎波波向 $\alpha_b=4.2^\circ$ ・作用時間 $t_w=135$ 日 (3,240 ステップ) ・潮位条件 M.S.L. 0.0m
地形変化の水深範囲	夏季 ・地形変化の限界水深 $h_c=6.0\text{m}$ ・バーム高 $h_R=2.0\text{m}$ 冬季 ・地形変化の限界水深 $h_c=8.0\text{m}$ ・バーム高 $h_R=3.0\text{m}$
境界条件	岸沖端境界: 通過漂砂量 0 側方境界: 通過漂砂量 $35000\text{m}^3/\text{yr}$ 構造物境界: 防波堤、護岸、突堤、ヘッドランド ²⁾
漂砂量係数	漂砂量係数内の $A=0.5$ 小笹ブランプトン項の係数 $\zeta=0.0$ 岸沖漂砂量係数 $K_z/K_x=0.7$
漂砂量の水深分布	宇多・河野 ³⁾ の3次式
土砂落ち込みの限界勾配	陸上: 1/2, 水中: 1/3
計算範囲	沿岸方向: 0～10000m 鉛直方向: $z=5\text{m} \sim 15\text{m}$
計算メッシュ	沿岸方向: $\Delta x=200\text{m}$, 鉛直方向: $\Delta z=1\text{m}$
計算時間間隔 Δt	$\Delta t=1\text{hr}$
計算ステップ数	1年間: 8,760 ステップ

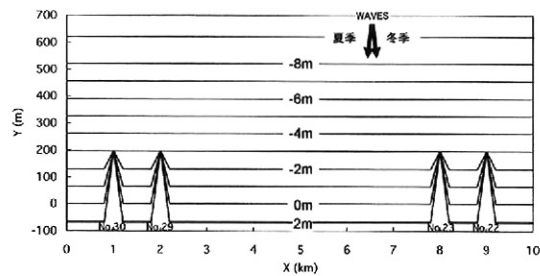
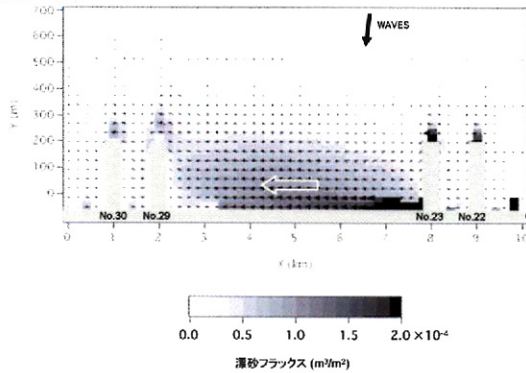


図-2 初期海浜

a) 漂砂フラックス



b) 海浜形状

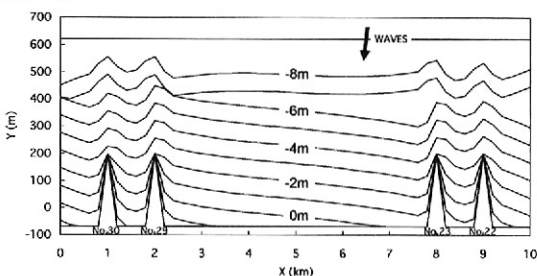
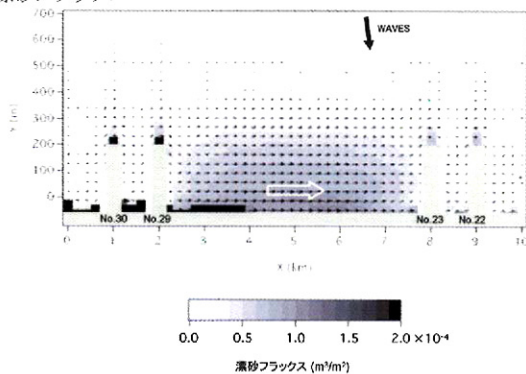


図-3 2006年夏季の漂砂フラックスと対応する海浜形状

a) 漂砂フラックス



b) 海浜形状

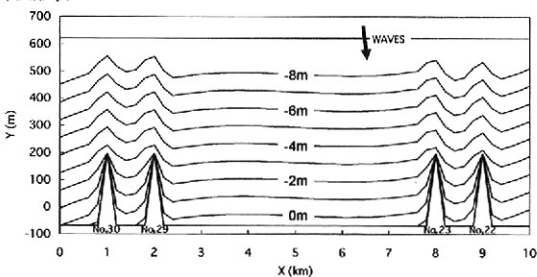
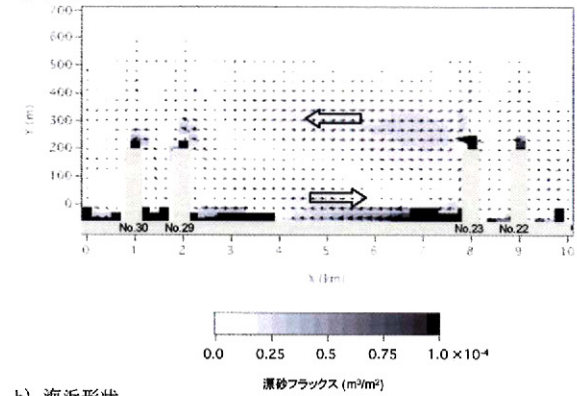


図-4 2006年冬季の漂砂フラックスと対応する海浜形状

a) 漂砂フラックス



b) 海浜形状

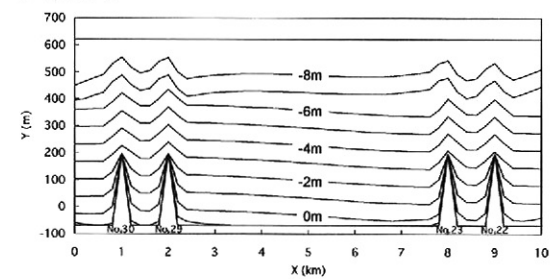


図-5 年間平均の漂砂フラックスと平均海浜形状
(2006年)

が蛇行する。2006年冬季についても夏季と同様な検討が可能であり、漂砂フラックスと対応する海浜形状は図-4(a), (b)に示すようになる。冬季の波高が高いことから、冬季には夏季の漂砂フラックスと比較して沖合まで明瞭な形で砂移動が起こる。この計算では、夏季は波高が低い、エネルギー総量は冬季と夏季で等しいとしているので、夏季には汀線付近で集中的な北向きの漂砂フラックスが生じる。海浜形状を見ても夏季には北側に偏った等深線が冬季には反転する。興味深いのは年間平均の漂砂フラックスと平均海浜形状である(図-5(a), (b)参照)。23, 29号堤沖を通過して両端方向へと移動し、境界を通して失われる漂砂フラックスとともに、23, 29号堤間で全体として時計回りの漂砂循環が発生する。また海浜形状を初期形状と比較すると、初期の平行等深線がHL沖で蛇行し、また23, 29号堤間では北側で等深線が前進、南側で後退し、南北で非対称形となる。

4. 各案の予測結果

初期地形として2006年の計算地形を与え、無対策のまま2026年までの地形変化予測を行ったケース②の夏季、冬季の平均漂砂量フラックスを図-6, 7に示す。図-3(a)に示す2006年夏季と、図-6に示す2026年夏季の漂砂フラックスを比較すると、全体的に漂砂フラックスの絶対値が減少している。これは、計算領域の両端から沿岸漂砂が流出したことによって海浜地盤高が低下し、漂砂が生じにくくなったためである。同様に、図-4(a)に示す2006年冬季と、

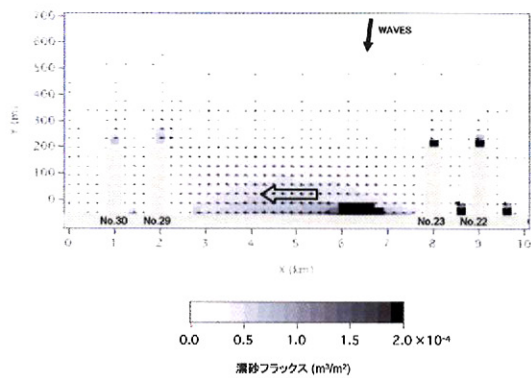


図-6 ケース②の夏季の平均漂砂量フラックス

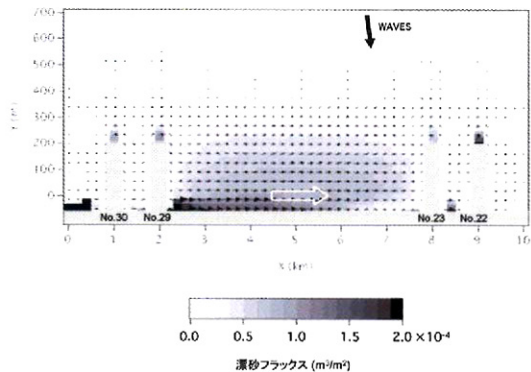


図-7 ケース②の冬季の平均漂砂量フラックス

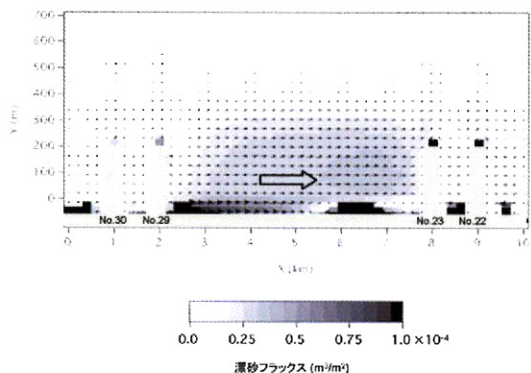


図-8 ケース②の平均漂砂量フラックス (2026年)

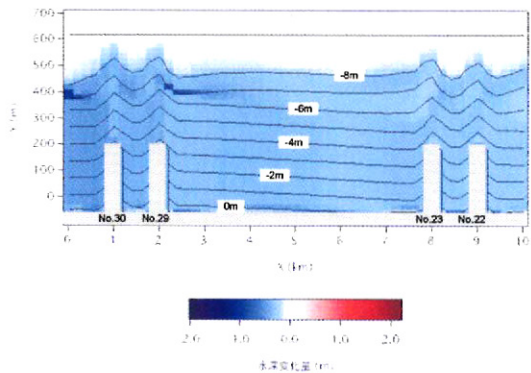


図-9 2026年の海浜形状と2006年からの水深変化量 (ケース②)

図-7に示す2026年冬季の漂砂フラックスを比較しても南向きの漂砂フラックスは全体的に絶対値が減少している。

漂砂の方向は季節的に変動するものの、年間の平均漂砂フラックスは2006年と2026年では大きな相違

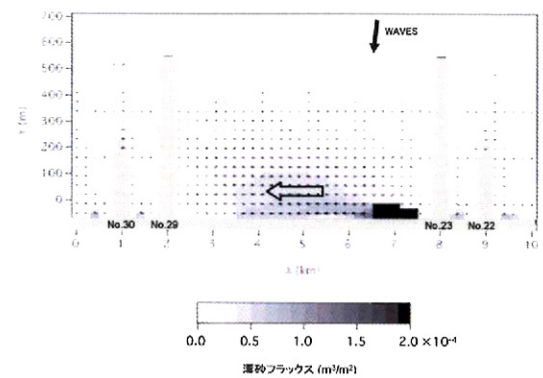


図-10 ケース③の夏季の平均漂砂量フラックス

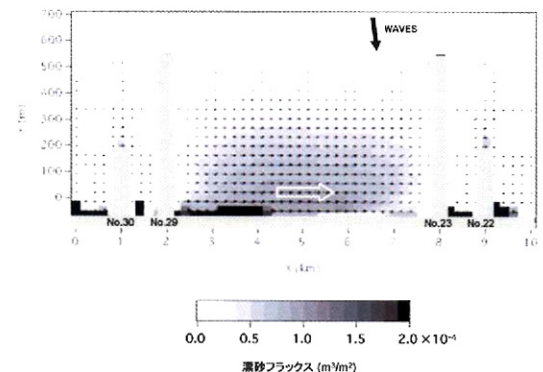


図-11 ケース③の冬季の平均漂砂量フラックス

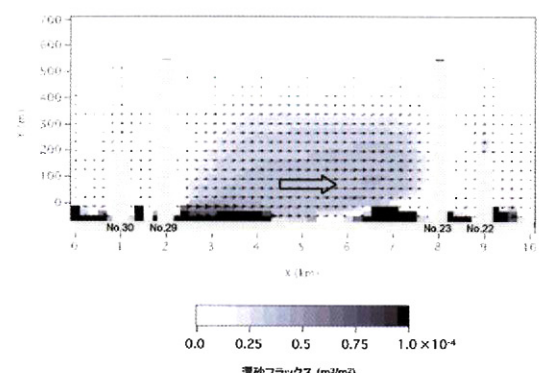


図-12 ケース③の平均漂砂量フラックス (2026年)

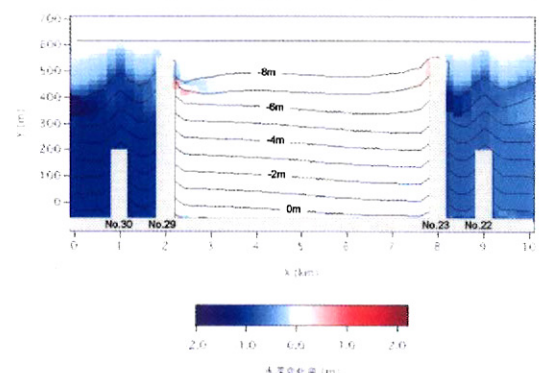


図-13 2026年の海浜形状と2006年からの水深変化量 (ケース③)

が生じる。図-5(a)の場合には、23, 29号堤の先端を通過して系外へと流出する漂砂とともに、23, 29号堤間では漂砂循環が生じていたのに対し、2026年の年平均漂砂フラックスでは図-8のように全体として南向きの漂砂フラックスが強まり、循環モード

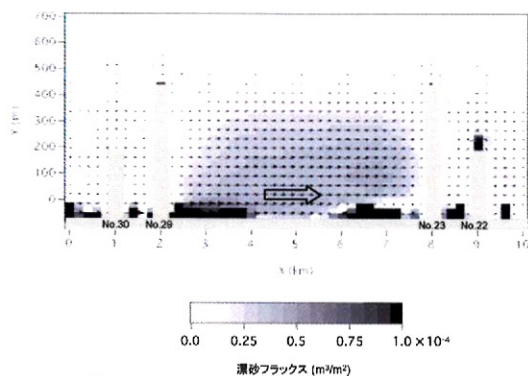


図-14 ケース④の平均漂砂量フラックス (2026年)

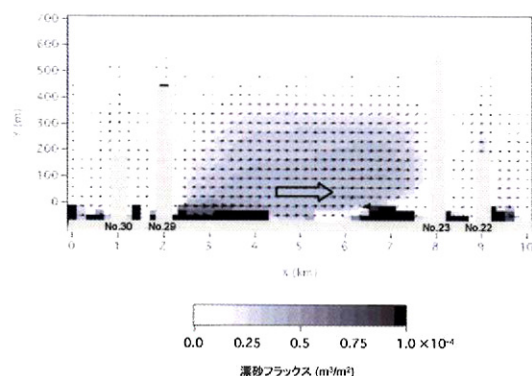


図-16 ケース⑤の平均漂砂量フラックス (2026年)

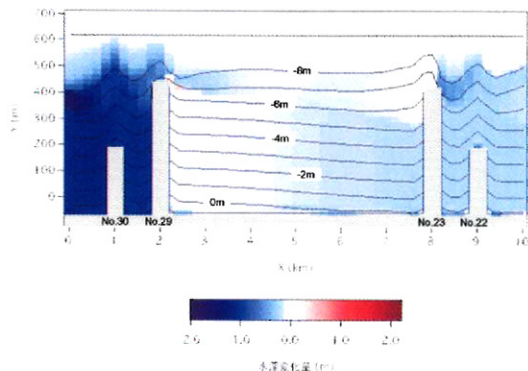


図-15 2026年の海浜形状と2006年からの水深変化量 (ケース④)

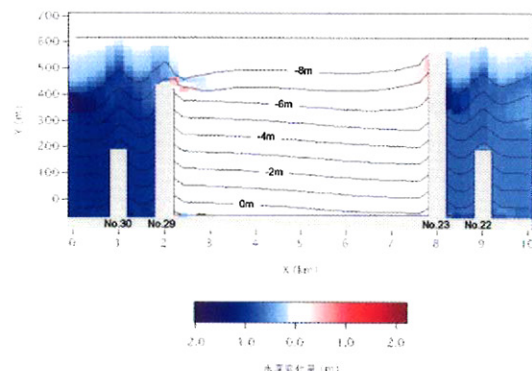


図-17 2026年の海浜形状と2006年からの水深変化量 (ケース⑤)

はほぼ消失している。2006年との比較での水深変化量は図-9のように全域で侵食となり、2006年と比較した海底地盤高の低下量は、計算領域全域でほぼ30cmとなる。全体として侵食が進む理由は、HL沖を通過した後両端境界から砂が流出しているためであるが、年間を通して見ると平均漂砂フラックスには冬季の反時計回りの方向から入射する高波浪の影響が強く出ている。

23, 29号堤の先端水深を8mまでとしたケース③における、2026年の夏季・冬季の平均漂砂量フラックスを図-10, 11に示す。ケース②の夏季の漂砂フラックス(図-6)と図-10を比較すると、北向きの弱い漂砂フラックスが生ずる点は同様であるが、29号堤を超える北向き漂砂がHLの延長によって阻止され、それに応じて漂砂フラックスの分布が南北対称形に近づいた。一方、冬季の漂砂フラックス(図-7)と図-11を比較すると、南向きの弱い漂砂フラックスが生ずる点は同様であるが、23号堤を超える南向き漂砂が阻止され、夏季と同様な漂砂フラックスの変化が生じた。しかしながら年間の平均漂砂量フラックスについては、図-12に示すように、ケース②の年間平均漂砂フラックス(図-8)と同様、ネットで南向きの漂砂フラックスが卓越するという結果となった。このことは、HLの先端水深を冬季の h_c に等しい長さまで伸ばしたとしても、長期的に見るとわずかず砂が南向きに流出してしまうことを意味する。

この原因は、当初HLの先端水深を h_c に等しい長さ

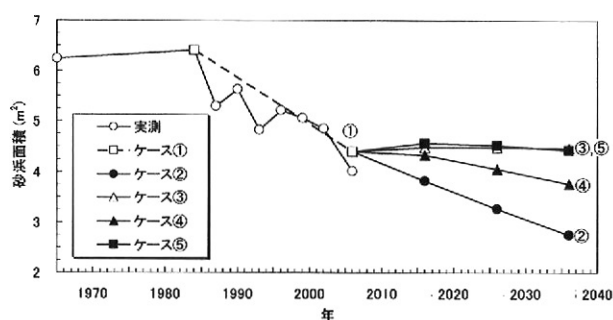


図-18 1965年から2006年までの実測海浜面積と各ケースの予測海浜面積の時間的変化

表-2 各ケースの平均汀線変化量

ケース	2	3	4	5
2016年	-9.8	1.4	-1.1	2.8
2026年	-19.0	1.4	-5.8	1.9
2036年	-27.5	1.4	-10.6	0.6

(m)

まで伸ばしたとしても冬季の高波浪の作用の履歴効果によって23号堤の先端部北側側面では水深が次第に増加し、幾分かの沿岸漂砂が南向きに回り込んで流出するためである。この点を確認するために、2026年の予測地形と2006年からの水深変化量の平面分布を図-13に示すが、23号堤の先端部北側側面では堆積が進み、8m等深線がHLの先端を回り込んでい

が抜けるため、結果として放置と同じような漂砂フラックスが得られたと考えられる。ただし、全体的にはHLの先端水深を8mまで延ばしたことにより、23, 29号堤間で沿岸漂砂は大きく制御され、地形変化量は小さくなっている。その分23号堤の南側と29号堤の北側では集中的に侵食が進む。

23, 29号堤の先端水深を6mまで延ばしたケース④の予測結果のうち、図-14には年間の平均漂砂量フラックスを示す。ケース③の同種の結果（図-12）と比較すると、ほぼ同様に南向きの漂砂フラックスが卓越するが、HLの先端水深が小さくなった分23号堤を超えた南向きの漂砂フラックスの増大が見られる。この結果、図-15に示すように2026年の予測地形と2006年からの水深変化量の平面分布によれば、23, 29号堤間は全体的に侵食傾向となり、海浜地盤高は平均で約10cm低下した。図-13に示すHLの先端水深が8mの場合には23, 29号堤間がほぼ平衡状態にあったのと比較して大きな違いが出ており、HLの長さが短くなった分漂砂制御効果が落ちていることが分かる。一方、23号堤を超えて沿岸漂砂が流出した結果として、23号堤よりも南側ではケース③よりも地盤高の低下量が少ない。

23, 29号堤の先端水深をそれぞれ8m, 6mとしたケース⑤についても、2026年の年間平均漂砂量フラックスを図-16に、2026年の予測地形と2006年からの水深変化量の平面分布を図-17に示す。年間漂砂フラックスについてはケース③の年間平均漂砂フラックス（図-12）と同様な結果である。23, 29号堤間ではケース③と同様ほぼ侵食は止まっている。すなわち、冬季の高波浪の入射に対しては対象区間の南側を区切るHLの長さを伸ばすことで十分であり、北側のHLの規模を大きくする意味はないことが明らかである。

5. 各案の比較

4. の予測計算結果より、23, 29号堤間の砂浜面積の経年変化図を求めた。図-18には、1965年から2006年までの実測海浜面積とともに、各ケースの予測海浜面積の時間的変化を併せて示す。実測海浜面積は、1965年から1984年まではほとんど変化がなかったが、1984年以降減少に転じ、1984年から2006年まででは多少の変動はあるものの、 $1.1\text{万m}^2/\text{yr}$ の割合で減少していた。再現計算では、実測の $1.1\text{万m}^2/\text{yr}$ の砂浜面積の減少傾向をほぼ再現できている。

各ケースの比較を行うと、ケース②（放置）では砂浜面積が単調に減少し、2036年には1984年当時の砂浜面積約 64万m^2 の半分以上の 27万m^2 まで減少する。23, 29号堤を水深8mまで延ばしたケース③と、23, 29号堤の先端水深をそれぞれ6, 8mまで伸ばした

ケース⑤ではほぼ等しい結果となり、2036年での海浜面積は 45万m^2 を保つことができる。これに対して23, 29号堤の先端水深を6mとしたケース④ではHLの長さが短くなった分、海浜面積の減少を防ぐ効果は低下する。表-2には、各ケースの平均汀線変化量をまとめて示す。放置のケース②では、2026年の汀線後退量が19mであるが、23, 29号堤の先端水深を8mまで伸ばす案（ケース③）、およびそれぞれを8m, 6m（ケース⑤）まで伸ばす案では汀線の後退量は小さく、侵食対策に有効である。

6. 結論

侵食の進む銚田海岸の23, 29号堤間の海岸を対象として、粒径を考慮した等深線変化モデルによりHLの長さを様々変えた場合の漂砂制御効果について検討した。この結果23, 29号堤を水深8mまで延ばせば銚田海岸の侵食を大きく抑制できるが、23, 29号堤それぞれを6, 8mまで伸ばした場合もほぼ同等な結果が得られた。これより北側の29号の先端水深は6mでよいことが分かった。なお、HLを8mまで伸ばしたとしても時間経過とともにHLの先端部には砂が堆積し、次第に砂の流出が起こるという現象も予測された。一方、長大なHLはチョウセンハマグリなどの魚介類を対象とする沿岸漁業に影響を及ぼすことも考えられるので、HLのみで海岸保全を行うのではなく、流出した砂をサンドリサイクルにより補う策を同時に進めることも必要と考えられる。

参考文献

- 1) 勝山 均・松浦健郎・宇多高明・熊田貴之・長山英樹・住谷迪夫：鹿島灘海岸の侵食の実態と変形予測，海岸工学論文集，第54巻，pp. 576-580，2007.
- 2) 宇多高明・熊田貴之・芹沢真澄・長山英樹：波向変動場で生じる漂砂大循環の発生メカニズム，海岸工学論文集，第55巻，pp. 506-510，2008.
- 3) 熊田貴之・小林昭男・宇多高明・芹沢真澄・野志保仁：粒度組成の三次元変化を考慮した等深線変化モデル，海岸工学論文集，第51巻，pp. 441-445，2004.
- 4) 熊田貴之・宇多高明・芹沢真澄：卓越粒径集団に応じた平衡勾配を考慮した等深線・粒径変化モデル，土木学会論文集B，Vol. 63，No. 2，pp. 154-167，2007.
- 5) 芹沢真澄・宇多高明・三波俊郎・古池 鋼・熊田貴之：海浜縦断形の安定化機構を組み込んだ等深線変化モデル，海岸工学論文集，第49巻，pp. 496-500，2002.
- 6) 宇多高明・河野茂樹：海浜変形予測のための等深線モデルの開発，土木学会論文集，No. 539/II-35，pp. 121-139，1996.