

人工リーフと養浜による礫浜海岸の汀線変化の現地調査とその予測

水谷法美*・許 東秀**・上運天陽次***・神谷篤史****

七里御浜井田海岸において、2年半にわたって汀線観測を行うと同時に、波浪観測記録と関連づけて汀線の変化の実態を検討した。また、観測期間中に施工された人工リーフの汀線変化に及ぼす影響や養浜が汀線変化に及ぼす影響について、1-lineモデルに基づく数値解析結果とも関連づけて考究した。その結果、人工リーフの建設が背後の汀線の後退の対策工法として効果があることが判明した。また、養浜は養浜区間の汀線の前進に寄与するものさらに漂砂下手側に対しては明確な効果が認められず、継続的な養浜を行う必要のあることが明らかとなった。

1. はじめに

港湾や離岸堤などの海岸構造物の建設による漂砂環境の変化は、海岸侵食の主要因として挙げられる。三重県南端に位置する七里御浜は熊野灘に面した延長約 20 km の砂礫海岸であるが、この海岸でも海岸侵食が著しく、特に熊野川河口に隣接する鵜殿港の北側の井田海岸では、熊野川における土砂採取が規制された現在でも深刻な海岸侵食が進行しつつあり、人工リーフや養浜などの対策が行われているが、海岸の回復には至っていない。

本研究では、この七里御浜井田海岸を対象に、人工リーフの増設や養浜の実施を含む 2 年半にわたって行った GPS による汀線の観測結果に基づいて、その変動特性の実態を考究するとともに、波動場と汀線変化に関する数値計算を行って、汀線変化に及ぼす人工リーフの設置効果や養浜の影響について検討する。また、これまで主に砂浜に対して検討されてきた汀線変化モデルの礫浜への適用性についても検討を加えながら、現在も進行しつつある侵食対策としての人工リーフの増設の効果についても検討を加える。

2. 七里御浜井田海岸の地形特性

七里御浜は、熊野川河口に隣接する鵜殿港から鬼ヶ城に隣接する木本港の間に広がる延長約 20 km の礫浜海岸である(図-1 参照)。七里御浜の特徴として、勾配急変点が存在し、前浜付近の勾配が急で沖浜勾配が緩く、また、勾配急変点の水深が河口より離れるほど深くなっていることなどが挙げられる(宇多ら, 1992)。

井田海岸は七里御浜南端部の海岸で、鵜殿港の北側約 1.5 km にある梶ヶ鼻岩礁から井田川までの約 3.6 km の海岸を指す。この海岸は七里御浜の中でも最も侵食が著しく、その侵食は熊野川における土砂採取や鵜殿港の防波堤の建設に強く影響されてきたと考えられるが、土

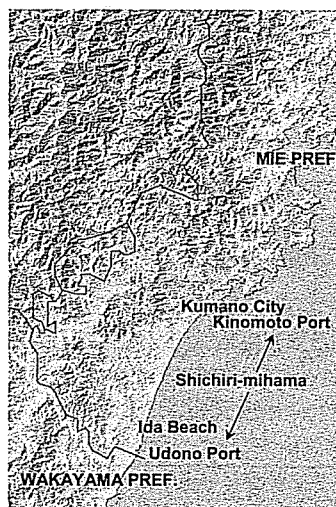


図-1 井田海岸の位置と地形

砂採取とその制限や鵜殿港の防波堤建設の経緯(山本ら, 1999)と熊野川河口南部の王子ヶ浜の変化より、現在でも鵜殿港南防波堤が沿岸漂砂に影響を及ぼしていることが考えられる。

この井田海岸に建設されている主な侵食対策構造物は、人工リーフであり、井田海岸全体に 14 基の建設が予定されている。現状ではそのうち南端からの 10 基が設置されており、後述の 9 号人工リーフが観測期間中の 2001 年と 2002 年春に現況まで建設され、また、2001 年 3 月に 30,000 m³の養浜が行われている。

3. 現地観測

(1) 井田海岸前面海域での波浪特性

三重県によって観測された鵜殿港の沖での波浪記録(2000 年 9 月から 2001 年 5 月, 超音波式波高計による)と七里御浜南部沖海域での波浪記録(2001 年 7 月以降, HF レーダーによる)から井田海岸前面における観測結果を解析した。図-2 は、2001 年 11 月までの波高の変化と汀線観測実施時(図中矢印)を示したものである。これらの観測記録より、2 m 以上の高波高の波は、平均して

* 正会員 工博 名古屋大学教授 大学院工学研究科地圏環境工学専攻
** 正会員 工博 名古屋大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻
*** 正会員 工修 西松建設九州支店
**** 学生会員 名古屋大学大学院工学研究科土木工学専攻

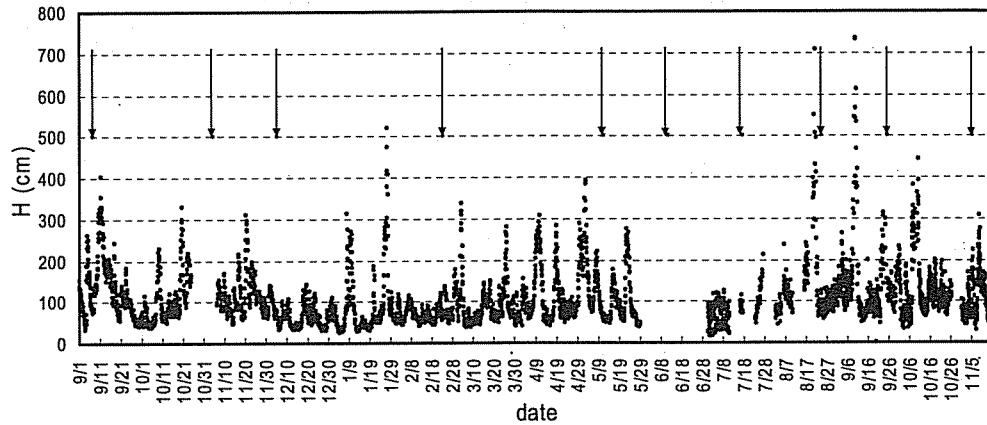
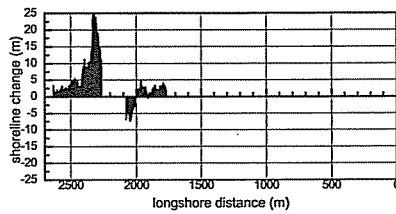
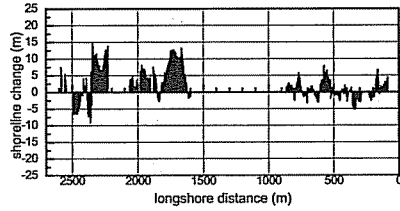


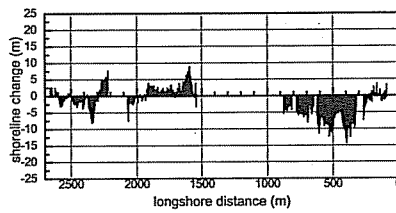
図-2 波高の経時変化と汀線観測実施日 (2000年9月~2001年11月)



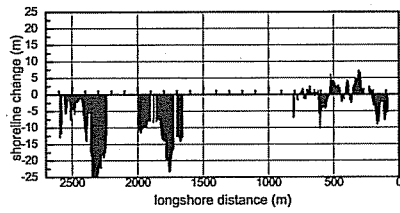
(a) 2001年2月から5月



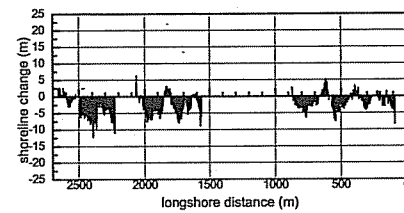
(d) 2001年7月から8月



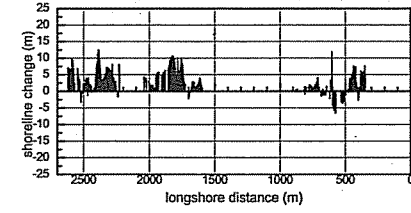
(b) 2001年5月から6月



(e) 2001年8月から9月



(c) 2001年6月から7月



(f) 2001年9月から11月

図-3 汀線変化量の時間変化

月に2回程度の頻度で来襲しており、2001年秋には台風により5mを超える波が来襲していることが確認できる。また、冬季でもまれに5mを超えるような波が観測されている。図示していないが、井田海岸前面海域では、SE及びESE、SSE方向からの入射波が卓越しており、七里御浜海岸の平均汀線の法線方向であるESE方向より南側から波が入射していることも明かとなった。これよ

り、対象海域では北向きの流れが卓越することが考えられる。

(2) 汀線変化

井田海岸における汀線変化を2000年9月から2003年1月の間に19回にわたってDGPSを使って計測した。なお、観測では安全性の面から前浜の最上点(勾配急変点)を汀線の代わりとして測定した。このうち2001年2

月～同年11月までの連続2回の観測から求めた汀線位置の変化量を図-3(a)～(f)に示す。汀線観測を行った2年間の全般的な傾向として、1月から7月の冬季から初夏にかけては汀線の変化は比較的穏やかであるが、7月から9月にかけての夏季には強い侵食傾向、10月から12月にかけての秋季には堆積傾向となることが判明した。これらを入射波の状況と比較すると、比較的汀線の移動の少ない期間(2001年5月～6月、および6月～7月)の波は、欠測があるものの観測された期間では、2度ほど2m程度の波が来襲しているがほとんどは入射波高が1m以下であり、穏やかな状況である。

侵食傾向の最も強いのは台風期にあたる2001年8月～9月の期間であり、このときには図-2に示したように7mを超えるような暴浪が来襲しており、これにより大きく侵食されたものと考えられる。これに対して、2001年2月～5月の期間は堆積傾向であるが、この間の入射波は多くが1.5m以下の波であるが、間欠的に2～3m程度の波が入射している。上述のように1m程度の波が卓越する期間では汀線変化が小さいことから、堆積傾向になるにはある程度の掃流力をもつ3m程度の波の入射が影響している可能性がある。2001年7月～8月においても汀線の前進傾向が卓越しているが、この期間では欠測もあり明確ではないものの2m前後の波が期間の前半に来襲しており、これらの波が汀線の前進に影響している可能性がある。期間の最後に7m程度の大きな波が来襲しているが、この波が無ければもう少し前進していたところ、この来襲波で汀線が戻されている可能性も考えられる。

この詳細については、さらに汀線観測を継続し、波浪観測結果と関連づけて解析することにより明確になるものと考えられる。

なお、2001年春に9号人工リーフ(図-4参照)の一部が設置されているが、その背後の $y=2200$ m付近では継続して消波ブロック前面まで汀線が後退した状態が続いており、その後の変化も波浪条件による汀線変化の方が卓越しているようである。また、 $y<1000$ mの区間の侵食は養浜の区間であり、養浜材の侵食に伴うものである。

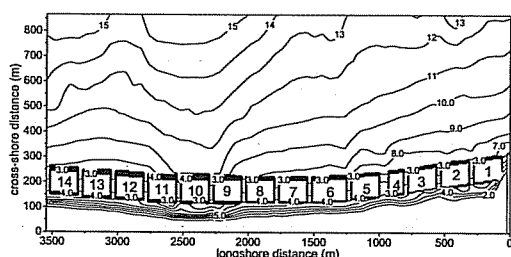


図-4 計算対象海域の地形

しかし、波により侵食された養浜材が下手側の汀線に及ぼす効果は認められなかった。

4. 数値解析

井田海岸の汀線変化を式(1)に示す1-lineモデルによって計算した。

$$\frac{\partial y_s}{\partial x} + \frac{1}{D_s} \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - q \right) = 0 \dots \dots \dots (1)$$

ここで y_s は汀線位置の岸沖変化量、 Q は空隙を含む沿岸漂砂量、 D_s は漂砂移動高さ、 q は岸沖方向の土砂移動量である。式中の沿岸漂砂量 Q は次式で与えた(小笹・Brampton, 1979)。

$$Q = \frac{(EC_\sigma)_b \left(K_1 \sin \alpha_{bs} \cos \alpha_{bs} - K_2 \cot \beta \cos \alpha_{bs} \frac{\partial H_b}{\partial x} \right)}{(\rho_s - \rho)g(1 - \lambda)} \dots \dots \dots (2)$$

ここで $(EC_\sigma)_b$ は碎波点における波浪エネルギーフラックス、 H_b は碎波波高、 α_{bs} は碎波点における汀線と波向のなす角度、 K_1 、 K_2 は漂砂量係数、 $\tan \beta$ は海底勾配、 ρ は海水の密度(=1030 kg/m³)、 ρ_s は底質の密度(=2650 kg/m³)、 λ は底質の空隙率(=0.4)である。漂砂移動高さ D_s としては、七里御浜の海浜断面が水深6～7mまでは急勾配で、その後緩勾配になることを考慮し、 $D_s=6$ mとした。また、岸沖方向の土砂移動量 q を0としたが、養浜実施区間からの供給土砂の効果を検討する際、この q の値を変化させて計算を行った。

漂砂量式に必要な波浪場の値は、ブシネスクモデルとして港湾空港技術研究所で開発された非線形波浪モデルNOWT-PARI Ver.4.6(港湾空港技術研究所・沿岸開発技術研究センター, 2001)を使用して求めた。計算は図-4に示す地形を対象とし、ここに人工リーフを9基設置した場合(図中1～8, 10)、10基設置した場合(図中1～10)、および将来の計画案として14基設置した場合(図中1～14)と人工リーフの設置されていない場合の4通りに対して実施した。

5. 計算結果

(1) 波浪場

図-5に2001年までの井田海岸を対象とした人工リーフが9基設置された場合の波浪場の計算結果を例示する。岸に近づくにしたがって浅水変形のため波高が徐々に増大するが、人工リーフ上に入射してくると碎波のため波高は急激に減少し、人工リーフ背後域では波高は低減している。9号人工リーフ設置予定場所の背後では、井田海岸の海浜断面の特性により、碎波点が比較的汀線に近く、そのため、汀線近くまで大きな波高のまま入射している。

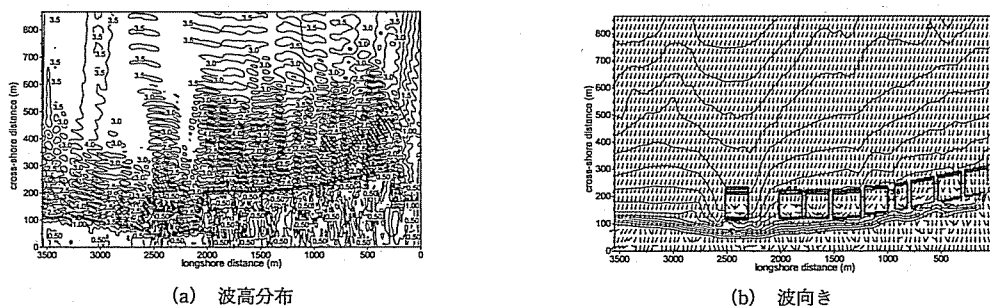


図-5 波浪場の計算結果の例 (高波浪時: $H_0=3.7$ m, $T_{1/3}=8.9$ s, $\theta=22^\circ$)



写真-1 9号人工リーフ背後の海浜

図-5(b) は波向きの計算結果を例示したものである。一般に、人工リーフ上では、人工リーフ法面上で屈折により天端上へ波向きが変化する傾向のあること、また、人工リーフ背後では開口部から人工リーフ背後へと波向きが変化する傾向が確認できた。この結果は、波高分の結果と併せると人工リーフ背後では碎波による波の低減以外に、開口部からの透過エネルギーも屈折により分散されることを示唆するもので、連続して人工リーフが設置されると背後域で効果的に波浪の低減が可能であることを示唆するものである。しかし、9号人工リーフ設置予定地では、波向きの変化はほとんどなく、汀線にほぼ直角に波が入射している。このため、この背後域で汀線の後退が激しく、写真-1に示すように前浜上のブロック前面まで後退していたものと考えられる(水谷ら, 2002)。

(2) 汀線変化の予測と人工リーフの効果

図-6に9号人工リーフ設置後の状態に対して行った汀線変化の計算から求めた汀線変化量の計算結果を示す。計算の初期汀線は2001年6月の観測結果を与えており、計算結果の比較を翌年6月までの1年間における汀線の移動量で比較を行うこととした。図-7はこの1年間における汀線の変化量の観測結果である。計算対象期間には養浜実施直後で比較的底質移動の活発な時期が含まれているため、計算の比較はその影響が大きくないと考えられる $y=1800\sim 2700$ m の範囲で行うこととした。図-6と図-7を比較すると、前浜に設置された消波ブ

ロックの影響と思われる $y=2300$ m 前後で汀線の前進を過大評価していること、また、人工リーフ設置領域の北端に相当する $y=2500$ m で後退を過大評価していることなどの差はあるものの、それ以外では全般的には再現性は良好と見なせる。なお、計算では、漂砂量式に含まれる係数 K_1 と K_2 を変化させながら実施したが、最も良好に一致した図-7に対して使用した値は、 $K_1=0.001$, $K_2=0.0$ であり、七里御浜における過去の汀線変化の追算から同定された $K_1=0.045$, $K_2=0.0$ (七里御浜侵食対策検討会, 2002) に比べてかなり小さいことが明らかとなった。これは、0.045の係数は人工リーフなどの構造物の無い過去の状態の汀線変化も含めて同定された係数であり、時間平均的な値であると見なせるのに対し、今回の同定値は短期的で、しかも人工リーフの背後域に限定された範囲で評価された値である。したがって、今回同定された値は人工リーフ背後の礫浜の漂砂の程度を定量化した値と解釈することも可能であり、人工リーフによる漂砂量軽減効果をここから評価可能と考えることができる。なお、図-7には1年間の計算に基づく結果を

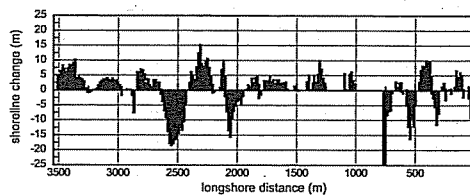


図-6 2001年6月～2002年6月の汀線変化(計算)

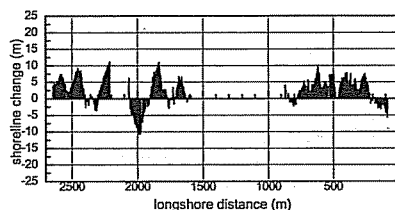


図-7 2001年6月～2002年6月の汀線変化(実測)

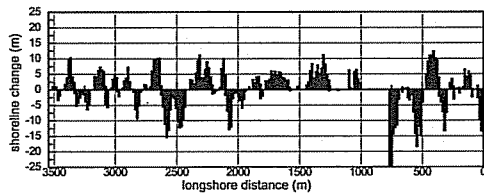


図-8 人工リーフ 14 基設置時の汀線変化の計算結果

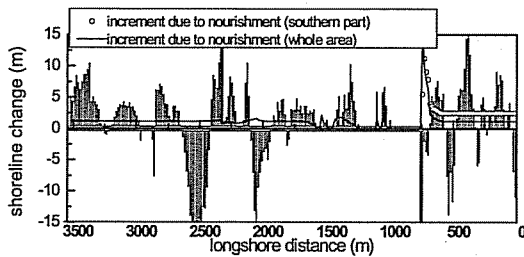


図-9 養浜の及ぼす効果の計算結果

示しているが、3年間の計算を行った結果、汀線の前進箇所と後退箇所はほぼ同じであり、3年経過後は1年後の汀線の変動を拡大させた形状となった。

井田海岸に新たに4基の人工リーフを設置した場合の汀線変化の計算結果と汀線変化量を図-8に示す。人工リーフが10基の場合と比べ、全域で汀線の変動幅が10m以内となっており、侵食傾向が強かった $y=2500$ mでも5m程侵食傾向が改善されている。また、新たに11~14号人工リーフが設置された区域($y=3000\sim 3600$ m)は、侵食と堆積が交互に表れており、舌状砂州の形成が予測される。これらの結果より、新たに人工リーフを設置した場合、井田海岸の汀線は舌状砂州を形成するため、局所的な変化は大きくなるが、全体的にその経年的な変化量は小さくなっていくものと考えられる。

つぎに養浜の汀線変化に及ぼす効果を検討する。2001年に井田海岸の南端で $30,000\text{ m}^3$ の養浜が行われており、この養浜材の投入を考慮した1年間の汀線変化量とそれに及ぼす養浜の効果の計算結果を図-9に示す。ここで、養浜は $y=0\sim 1000$ mの区域に対して投入された養浜材 $30,000\text{ m}^3$ が1年間に均等に漂砂として供給されたと考え、その値を q に与えた。図より、養浜を行った区域は1年間で汀線が2mほど前進し、 $y=700$ m付近では養浜を行っていない場合に比べて汀線位置の差は約10mとなる。しかし、 $y=1000$ m以降では汀線の変動量は養浜の有無による差が認められなかった。そこで、比

較検討のため井田海岸全体に $50,000\text{ m}^3$ の養浜材を投入した場合の計算も実施した。図-9にはこの場合の養浜の有無による汀線位置の差のみを併せて示した。全体的に汀線の位置は前進しているものの、既に汀線が護岸まで達している $y=800\sim 1500$ mでは全く養浜の効果は認められなかった。これらの結果より、このような汀線の後退が著しい場所では、局所的に大量の養浜を行わないと汀線の前進は生じないと推察される。逆に、効果的な侵食対策を行うには早期の実施が必要であることを示唆しているものと考えられる。

6. 結 論

本研究で得られた結論を以下に要約する。

- 1) 汀線変化の現地観測結果から、冬季から初夏にかけて汀線変化は比較的穏やかで、夏季には台風をともない強い侵食が、秋季から冬季は前進傾向にあることが確認された。
- 2) 数値計算によって汀線変化の計算を行った結果、現地での汀線変動とよい一致が得られた。また、人工リーフ背後の区間で同定した漂砂量係数は非常に小さい値となることが判明した。
- 3) 数値計算による汀線計算から、汀線が護岸まで達している箇所では、局所的に大量の養浜を実施しなければ汀線回復の可能性が小さいことが示唆された。

謝辞：本研究を行うにあたり三重県県土整備部より多大な資料の提供を賜った。ここに記して関係各位に感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 宇多高明・後藤康長・山本幸次 (1992): 三重県七里御浜海岸の海浜変形機構に関する一考察, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 351-355.
- 小笹博昭・Brampton, A. H. (1979): 護岸のある海浜の汀線変化数値計算, 港湾技術研究所報告, 第18巻, 第4号, pp. 77-103.
- 港湾空港技術研究所・沿岸開発技術研究センター (2001): 平成13年度現地観測データ整理と結果の比較検討業務報告書, 203 p.
- 三重県 (2002): 七里御浜海岸侵食に係わる提言書, 七里御浜海岸侵食対策検討会.
- 水谷法美・許 東秀・上運天陽次・神谷篤史・和田 清 (2002): 七里御浜井田海岸の汀線変化に関する現地調査とその考察, 第57回年次学術講演会講演概要集 CD-ROM.
- 山本幸次・佐藤慎司・野口賢二・宮野正実 (1999): 熊野川を土砂供給源とする海岸の海浜変形と砂礫層厚, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 666-670.