

三重県井田海岸における季節的な 海浜変形特性に関する一考察

SEASONAL BEACH PROCESS AND WAVE DEFORMATION AT IDA COAST IN SHICHIRI-MIHAMA

和田 清¹・水谷法美²・村上宗隆³

Kiyoshi WADA, Norimi MIZUTANI and Noritaka MURAKAMI

¹正会員 工博 岐阜工業高等専門学校助教授 環境都市工学科 (〒501-0495 岐阜県本巣郡真正町上真桑)

²正会員 工博 名古屋大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)

³正会員 工博 玉野総合コンサルタント(株)設計第1部 (〒464-0076 名古屋市千種区豊年町9-20)

This paper is intended to estimate seasonal beach process and wave deformations at the Ida coast in the Shichiri-Mihama coast in Mie Prefecture. Field investigation by using an aerial photography technique is conducted along the Shichiri-Mihama coast from the Kumano river mouth to the Onigajo cape. It is clear that almost regions occurred beach erosion, especially Udono port region located on the left bank of the Kumano river, as the coastal line faced to sea, the beach protection works were struck by strong storms. Based on bottom sounding survey, maximum shoreline retreat was about one hundred meter for five years immediately after extend construction of breakwater around Udono harbor. It is necessary to predict wave deformation for erosion control around coastal protection facilities. It is presented a time-depend mild slope equation for estimating wave deformation. Some simple calculations were conducted for modeling artificial reefs at the severe beach erosion area where located northern Udono port. The numerical model has well explanations for generation of partial standing waves, drop of mean sea level behind artificial reefs.

Key Words : beach process, sediment transport, erosion control, artificial reef, wave deformation, time-depend mild slope equation

1. はじめに

近年, わが国の海岸では, ダムの堆砂や砂利採取による供給土砂量の減少, 大型港湾構造物の沿岸漂砂の遮断などによって海岸侵食が深刻化している¹⁾. 三重県南端に位置する七里御浜海岸は, 熊野灘に面した延長約20kmの砂礫海岸であり, ここでも海岸侵食が進行している^{2) 3) 4) 5)}. 特に, 七里御浜海岸南端部の井田海岸では, 前浜はほとんど消失し, 護岸基部に直接波浪が作用する状況にまでなっている. 現在, 人工リーフの設置や養浜工などの対策が行われつつあり, 今後の総合的な海岸保全を有効に行うためには, 漂砂の実態把握を含めた海浜地形変化の機構を解明するとともに, その予測手法を構築する必要がある^{6) 7)}.

そこで本研究は, 七里御浜の井田海岸周辺を対象にして年数回現地調査を行い, 汀線や平均海面より陸側の海浜地形の季節的な変動特性を波浪特性と関連づけて考察し, 海浜変形の推移と主因を把握しようとするものである. さらに, 海岸構造物周辺の海

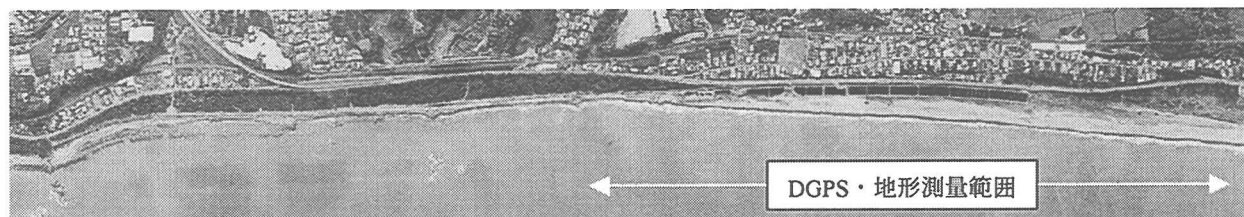
浜変形過程を精度よく予測するために, 非定常緩勾配方程式を用いた数値シミュレーションを人工リーフ周辺に適用して, 波浪・海浜流と漂砂について若干の検討を加えたのでその結果を報告する⁸⁾.

2. 現地調査の概要

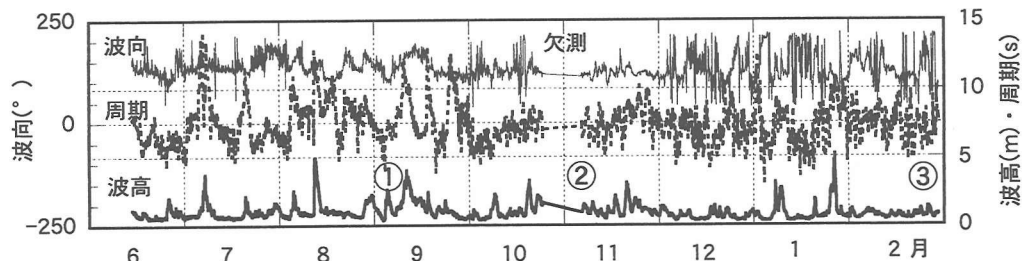
図-1のような海岸侵食が進行中の井田海岸を対象に, 海浜変形特性の概略を調べるための調査を実施した. 具体的には, 以下のようなものである.

(1) DGPS・トータルステーションによる地形測量

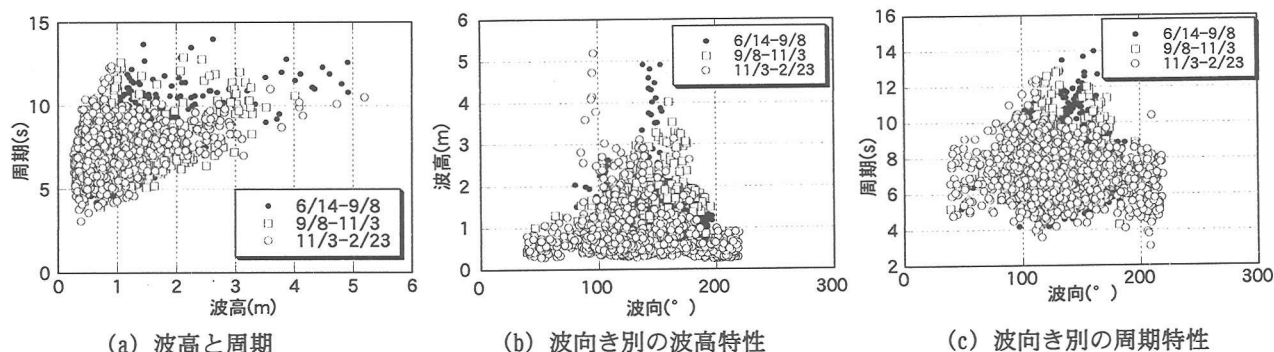
2000年9月7~9日, 11月3~4日, 12月4~5日および2001年2月22~23日に, 汀線測量をハンディタイプのDGPSを用いて行った. DGPSは通常のGPSに地上波による補正を加えて位置精度を向上させたものであり, 本調査では中波ビーコン(基地局: 大王崎)によるDGPS受信機(株)アムテック製, GBX-PRO)を用いた. ここで, 井田海岸の汀線際は波が非常に強く打ち上げており, 汀線を直接計測するのは危険と判断し, 高潮線と汀線の境目の勾配急変点



図－1 調査対象海岸（井田海岸：三重県七里御浜）



図－2 調査期間における来襲波浪の時系列（超音波式波高計）



図－3 波浪特性（波高・周期・波向）

を汀線の代わりとして観測を行った。この位置は実際の汀線の約5m程度陸側に相当する。さらに、平均海面より陸側の3次元的な海浜地形特性を把握するために、トータルステーションによる地形測量を行なった。沖側の地形情報については、三重県の深淺測量結果などを参考にした。なお、調査期間中、根固め工や人工リーフの設置工事が継続して進められている。

(2) 砂礫の粒度分布と蛍光砂による漂砂方向の推定

井田海岸を含む七里御浜海岸全領域（25地点）の砂礫採取と粒度分布の把握を2月に行なった。さらに、蛍光塗料で着色した礫（表層付近の約1m²）を汀線近傍に投入し、半日～1日程度の短期的な礫の移動状況を観測して、その座標をDGPSなどで把握した。無風状態が確認された12月の調査ではカラーボールを投入し、表層の流況をビデオ撮影した。

(3) 来襲波浪・流れ場の観測網

対象海岸では、鵜殿港の沖合い2.1km、水深25mの地点（北緯33° 44'13", 東経136° 2'53"）に超音波式波高計と流向流速計が設置されている。さらに、わが国初の本格的なHFレーダー（汀線方向約12km、ビーム間隔7.5°）を用いた波浪観測システムも2000年度から実施されており、点情報だけでなく面的な波浪・流れ場の情報が得られている。今回は超音波式波高計の時系列データを中心に、波高・周期

などの波浪の基本特性に着目して解析を行った。

3. 来襲波浪の基本特性

図－2は、超音波式波高計によって得られた観測期間中の波浪特性（有義波高、周期、波向き）の時系列を示したものである。図中の①～③は地形測量を行なった時期であり、10月25日～11月5日は波高計の交換による欠測期間である。同図から、有義波高が5mを超える大きな波浪が、8月（最大波高8.2m）と1月（最大波高7.7m）に来襲している。調査①の直後には、東海豪雨に影響をもたらした台風14号による高波浪（最大波高6.2m）がみられる。また、周期は5～10sが卓越しているが、7～9月の夏季の波高の大きい時には、12～14sのうねり性の波浪となっている。一方、波向は6～11月にかけて100°以上の値が卓越している。対象海岸の汀線の方位角は約14°であり、その法線の角度104°を境にして、沿岸漂砂の卓越方向が異なることになる。12～2月ではその値周辺を境にして変動が著しい。

図－3は、観測期間ごとの波浪特性の相関関係を示したものである。ただし、(a)有義波高と周期、(b)有義波高の波向き特性、(c)周期の波向き特性である。同図(a),(c)から、6～9月の夏季には周期10sを超えるうねり性の波浪が多いこと、冬期（11～2

月)の波高の大きい波浪は周期10s以下の短周期となることなどがうかがえる。また、波向き別の波高特性(同図(b))では、有義波高3m以上の波浪について、6~10月は方位角150°前後、11~2月では100°以下が卓越し、沿岸漂砂の卓越方向が逆転していると推定される。

これらのことから、波浪の入射方向は季節的に大きく変動し、沿岸漂砂の卓越方向が反転することもありうるが、平均的には北向きの沿岸漂砂が卓越し、上手側の漂砂供給源の減少とともに井田海岸の侵食が顕在化したものと推察される。

4. 汀線および海浜地形の変動特性

(1) DGPSを用いた汀線の季節的変動

中波ピーコンを用いたDGPSの測定精度を明らかにするために、現地海岸で行なったDGPSとトータルステーションの測量結果を示せば図-4のようである。同図から、両者の差は+0.10~-0.86mであり、1m程度の誤差を許容できる測定には十分適用できるものと考えられる。

図-5は、9~12月の実測したDGPSによる汀線形状を重ね合わせたものである。同図から、特に根固めブロックの北側で汀線が後退していることが確認できる。詳細に見ると、9月から11月にかけての後退量は6.4~12.3m程度であり、南側よりも北側で大きい。波浪特性でも述べたように、この期間では9月に汀線の法線に対して南からの波浪が入射していることなどから、沿岸漂砂の卓越方向は北向きであり、その影響によって全体的に汀線が後退したものと推察される。11~12月では高波浪も来襲せず波向きの変動も大きいことなどから顕著な汀線変動は見られない。

図中の中央部では観測値の無い箇所があり、これは消波ブロックに直接波浪が打ち寄せているために観測できなかった場所である。この地点を挟んで南北両側には人工リーフが設置されているものの、この前面海域には人工リーフがなく、そのために汀線が消波ブロックにまで達するほど大きく後退し、この影響が周辺に拡大する傾向にあるものと推察される。また、図-1の航空写真(1998.4撮影)と図-5を

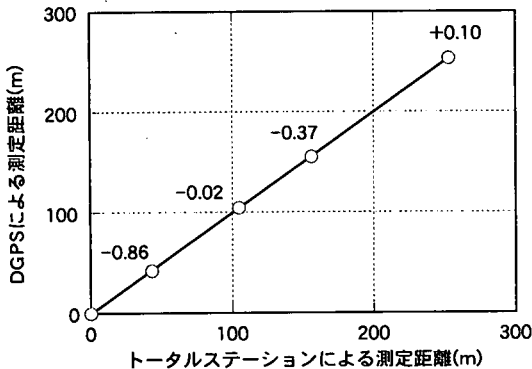


図-4 DGPSの測定精度

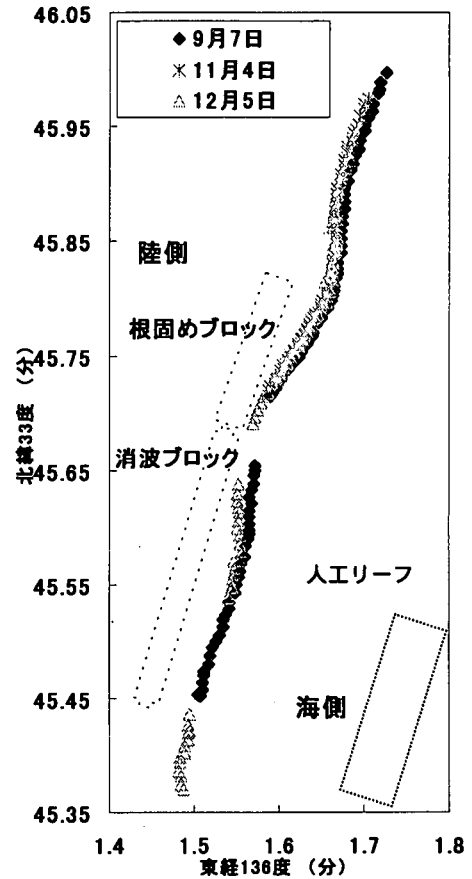


図-5 対象海岸の汀線変動量 (DGPS)

比較すればわかるように、写真中央から右側の汀線形状がほぼ直線なのに比べて、図-5の根固めブロックより北側の汀線は海側に凸状のトンボロ地形が見られる。この沖合いには人工リーフが1999年に設置されている。

(2) 砂礫の分布特性と分級

図-6は、井田海岸の汀線表層付近における粒度分布の一例を示したものである。図中には養浜工の砂礫が併記されている。同図からわかるように、表層では粒径2mm以下の砂成分はほとんど無く、礫(中央粒径12mm程度)で占められている。また、10mm以下の礫が無い場所も半数近く見られた。一方、沖側の砂礫の中央粒径は、水深4~7m以浅では2~40mmと粗礫成分が多くみられるが、それより以深では0.2mm以下の細粒分のみが分布する。さらに、縦断勾配については、概ね水深6~8m付近までは勾配1/10程度、それよりも深くなると約1/100であって、前浜付近の勾配が急で沖浜勾配が緩く、勾配急変点が存在することが大きな特徴である。これらのことから、底質中央粒径の粗粒から細粒成分へと変化する変曲点の水深と、海浜勾配の急変点の水深はほぼ対応しており、これは砂礫の移動限界水深を考える上で留意すべき点である。

さらに、根固めブロック(図-5参照)のほぼ中央部から沖側の縦断方向において、表層の礫の粒度分布を示したものが図-7である。ここで、1m×

1m格子内の礫をデジタルカメラで撮影し、30個の礫をランダムに抽出して、その画像処理から粒径の最大・最小値、平均値、標準偏差を算出した。同図から、汀線付近および根固めブロック前面を除いて、その間では5cm前後の礫が広く分布していることがわかる。また、汀線付近では、粒径の異なる砂礫層が波浪によって攪乱されやすいことなどから、比較的広い粒度分布となっている。一方、根固めブロック前面の縦断形状は凹地を形成しており、台風などの高波浪時にはこの範囲にまで波が遡上すると考えられるので、様々な粒径から構成される砂礫混合状態の地形では、粒径の小さな砂礫から掃流される。すなわち、分級によって大きな礫の淘汰が起り、その自重によって沈下して窪地が形成されたものと推察される。

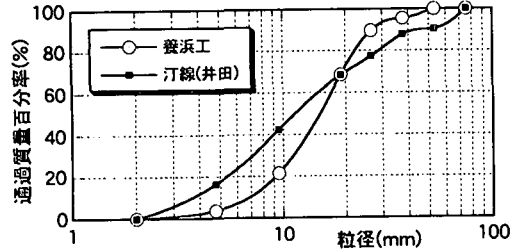


図-6 砂礫の粒度分布の一例

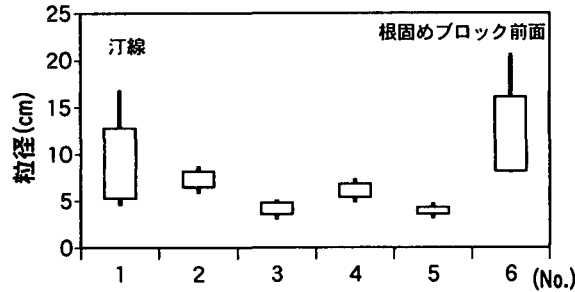


図-7 縦断方向の粒度分布(根固めブロック前面)

(3) 着色礫による短期的な漂砂方向の推定

図-8は12月4日に投入した着色礫の移動状況を示した一例である。礫の粒径は30~70mm程度である。なお、最初の投入点の座標は、E136° 1.6002'、N33° 45.7566'であり、移動座標はDGPSと巻尺を併用して計測した。同図のように、礫は約20時間で最大30m程度南方へ移動したことが確認できる。同時に行なった他の3地点でもほぼ同様の傾向となった。波浪の時系列(図-2参照)によれば、調査日前後の波高は小さいものの波向きが12月上旬を境にして大きく変動していることがわかる。すなわち、波浪の入射条件が汀線の垂直方向に対して上下に変動するので、沿岸漂砂の卓越方向が北向きから反転して南向きとなること、さらに人工リーフ背後では回折などの複雑な影響が考えられる。また、カラーボールによる水面付近の流れは逆に北側に流されるなど、短期的には、卓越風の影響に加えて、人工リーフ背後の海浜流に大きく支配される複雑な流動場であることを示唆している。

(投入位置の座標) E136° 1.6002'、N33° 45.7566'

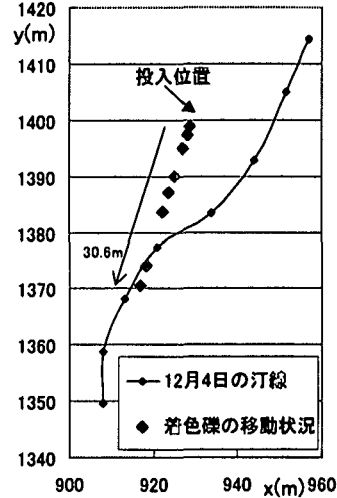


図-8 着色礫の移動状況の一例(2000年12月)

(4) 汀線付近のバーム地形の形成

2月に行なった地形測量結果について、その代表的な縦断面の鳥瞰図を示せば図-9のようである。図中○印は、前浜上に土砂が堆積する凸型のバーム地形が生じていること示している。同図からバーム高さを求めると、 $1.5 \pm 0.5\text{m}$ 程度となる。このバーム高さの約3倍程度が、波による地形変化の限界水深といわれているので、3~6m程度となる。沖側の砂礫の粒度分布でも述べたように、底質の中央粒径が粗粒状態から細粒へと変化する変曲点の水深(4~7m)と、海浜勾配の急変点の水深(6~8m)はほぼ対応しており、バームの高さから推定した粒径変化の限界水深もほぼ妥当な値を示しているものと考えられる。高波浪がかなり長時間作用した場合には、汀線付近の砂礫は沖側に運搬されて汀線の後退が生じる。前浜勾配は緩くなり、波の反射率は小さくなる。沖側へ運搬された土砂のほとんどは碎波帯内に沿岸砂州の形態を保って一時貯蔵される。静穏時になると、この沿岸砂州は岸側へと移動を開始するといわれている⁹⁾。

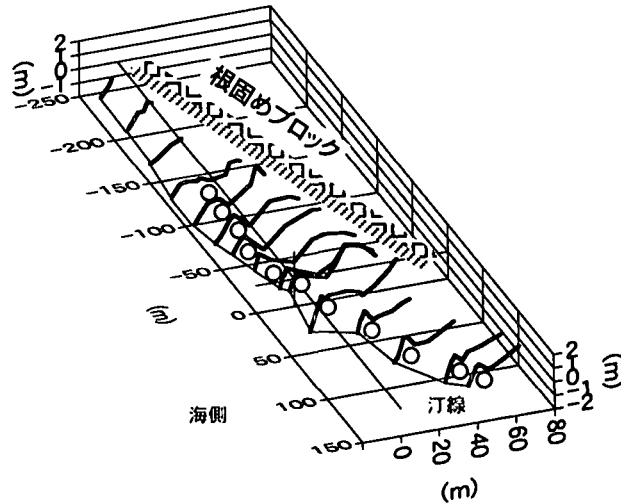


図-9 汀線付近のバーム地形の形成(2001年2月)

一般の砂浜海岸における海浜変形を説明する指標として、無次元パラメータ K^* が用いられている⁹⁾。

$$K^* = \frac{H_B^2}{gT^2d} \quad (1)$$

ここで、 H_B : 碎波波高、 T : 碎波周期、 d : 底質粒径、 g : 重力加速度である。砂浜海岸では K^* が3.5~10の条件下で沿岸砂州が陸上に乗上げてバームを形成し、 K^* が10を超えると汀線から離れて再び沿岸砂州へと変化すると考えられている⁹⁾。式(1)が対象海岸のような砂礫浜にも準用できるものと仮定すると、碎波波高が周期に比べて減少すれば、 K^* の値は小さくなるので、バーム地形が形成されやすい条件を与えるものと考えられる。波浪の時系列(図-2参照)によれば、調査日の約1ヶ月前に有義波高5mを超える高波浪が来襲し、その後、有義波高1m前後、周期5~10sの範囲の穏やかな波浪が継続している。このことから、バームが形成されやすい波浪条件と考えられる。さらに、バームが形成される段階では、前浜勾配は最も急となり、反射率の高い海浜断面となっている。汀線位置は高波浪が作用する前の状態に近く、波浪条件が変化しない限り海浜地形は動的な平衡状態に推移するものと考えられる。

さらに、 K^* が9以下の条件では、ビーチカスプも発達しやすくなるといわれている⁹⁾。バーム地形は根固めブロック前面の汀線際を含めて、北側の広い範囲で形成されていた。ビーチカスプ地形は、人工リーフ前面のトンボロ地形を除いて、汀線が直線的な北側の領域で顕在化していた。このカスプの波長を計測すると 18 ± 5 m程度である。

5. 人工リーフ周辺の波浪・海浜流モデル

(1) 波浪・海浜流の数値モデルの概要

井田海岸では、5基の人工リーフが設置されており、現在6基目が建設されている。人工リーフによる波動場、海浜流場の変化特性を定量的に議論するために、数値モデルによる波動場と海浜流場の数値解析を行った。波動場の計算の基礎式は式(2)と(3)に示す非定常緩勾配方程式である。

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \nabla Q = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{n} C^2(\eta) = 0 \quad (3)$$

ここに、 η は水面変動、 Q は線流量ベクトル、 C は波速ベクトル、 n は浅水度係数である。海浜流場は式(4)と(5)を基礎式として計算した。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \nabla \cdot [(h + \zeta)U] = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (U \cdot \nabla)U + g\nabla \zeta + R + F + M = 0 \quad (5)$$

ここに、 U は海浜流ベクトル、 ζ は平均水位の上昇量、 R はラディエーション応力による外力、 F は底面摩擦力、 M は水平拡散による外力である。

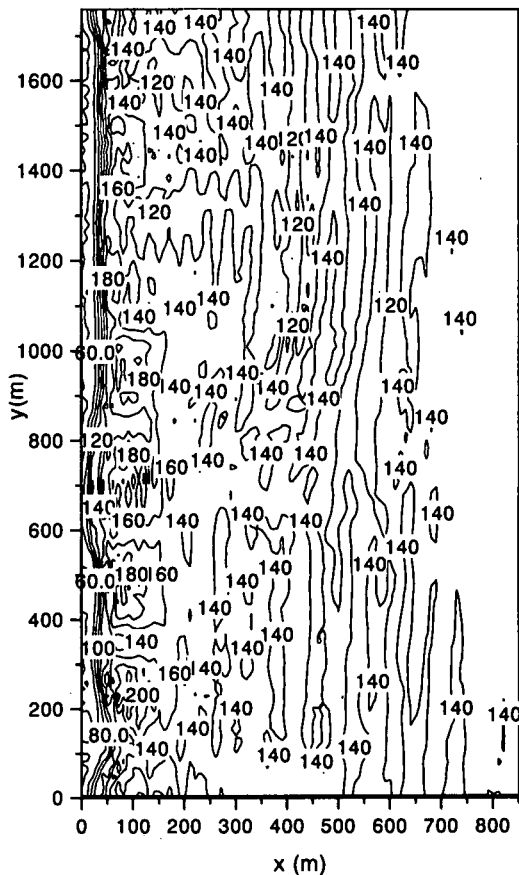


図-10 波高分布の計算結果の一例 (数値: 波高cm)

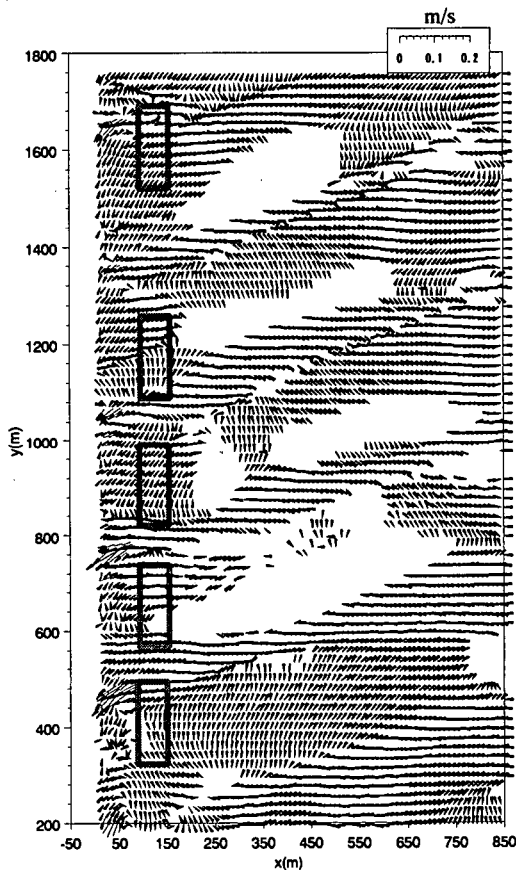


図-11 海浜流の計算結果の一例

計算条件として、入射波は年エネルギー平均波 ($H_0=1.5\text{m}$, $T=8.5\text{s}$, EからSに 3° の波向)とした。また、海底地形は海図から読みとったものを使用し、さらに当地区海岸の人工リーフを水深の変化として計算に考慮した。

(2) 解析結果

図-10は、年エネルギー平均波を入射させた場合における波高分布の計算結果の一例を示したものである。なお、図中の数値は波高(単位:cm)である。人工リーフは $x=90\sim 160\text{m}$ に設置されており、人工リーフ上では波高が急激に大きくなり、背後では急速に減衰する。人工リーフが設置されていない $y=1200\sim 1300\text{m}$ 付近の海域では、汀線のごく近傍まで波高が大きく、汀線直前で砕波のために波高は急激に減衰することがわかる。

図-11は、この波浪場による海浜流の計算結果である。波向きはほぼ汀線に直角であるが、人工リーフの間の汀線近傍に南に向かう流れが認められる。この結果は現地調査における着色礫の移動方向と定性的には一致する。一方、汀線より少し離れた沖側では、小さいながらも北向きの流れが生じており、これが七里御浜海岸の全体的な沿岸漂砂に寄与していることが考えられる。

6. おわりに

以上、三重県七里御浜の南端に位置する井田海岸を対象に、汀線や海浜地形の季節的な変動特性を波浪特性と関連づけて考察した。全体的には北向きの沿岸漂砂が卓越するものの、季節によっては沿岸漂砂の方向が大きく変動すること、堆積過程で見られるバーム地形やビーチカスプ地形も顕在化することなどが確認された。さらに、非定常緩勾配方程式を用いた数値シミュレーションを人工リーフ周辺に適用し、波浪・海浜流の特性を吟味した。今後、養浜工の追跡調査結果から漂砂量の境界条件を明らかにして、漂砂量公式についても検討を加えながら、海浜変形モデルの精度を高める予定である。

最後に、本研究は土木学会中部支部平成12年度研究調査委員会の研究助成(水系一環の土砂マネジメントを理念とする熊野川・七里御浜海岸の土砂移動の実態とその予測・対策に関する調査研究委員会RG:リサーチグループ代表 和田 清)の一環として行われたことを付記する。

謝辞:本研究の遂行に際して、現地調査資料については、三重県県土整備部のご協力を賜った。さらに、「七里御浜海岸侵食対策検討会(座長:名古屋大学大学院工学研究科 岩田好一朗教授)」の適切なご助言を頂いた。末尾ながらここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1)宇多高明:日本の海岸侵食,山海堂,pp.265-275,1997.
- 2)宇多高明・後藤康長・山本幸次: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.351-355,1992.
- 3)山本幸次・佐藤慎司・野口賢二・宮野正実: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.351-355,1999.
- 4)三重県熊野土木事務所:七里御浜海岸設計業務委託報告書,94p.,1991.
- 5)三重県熊野土木事務所:平成9年度井田地区海岸国補海岸高潮対策工事(汀線および底質地層の調査解析)報告書,89p.,1998.
- 6)和田 清・中澤真紀・水谷法美・鷺見浩一:熊野灘七里御浜におけるマクロ的な海浜変形と海岸侵食の実態,土木学会中部支部研究発表会講演概要集,PS-2,pp.3-4,2000.
- 7)和田 清・水谷法美・村上宗隆:七里御浜海岸の鵜殿港周辺における海浜変形の素過程,海洋開発論文集,第16巻,pp.291-296,2000.
- 8)和田 清・森岡睦門・伊藤育雄:七里御浜海岸における汀線および後浜の地形変動と波浪特性,土木学会中部支部研究発表会講演概要集,pp.5-6,2001.
- 9)本間 仁監修・堀川清司編:海岸環境工学,海岸過程の理論・観測・予測方法,東京大学出版会,582p.,1985.