

波峰線分布を用いた単一静止画像による 海浜地形推定システムの構築

ESTIMATION OF NEARSHORE BATHYMETRY BASED ON WAVE CREST LINES CAPTURED IN A SINGLE IMAGE

舟竹祥太郎¹・田島芳満²
Shotaro FUNATAKE and Yoshimitsu TAJIMA

¹学生会員 東京大学大学院修士課程 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 文京区本郷7-3-1)

²正会員 Ph.D. 東京大学大学院准教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (同上)

This study newly develops a model for estimation of nearshore bathymetry based on spatial distributions of the wave crest lines extracted from single snap-shot image. The model directly estimates the spatial distributions of wave angles and, based on wave ray theory and linear wave dispersion relationship, determines the spatial distributions of wave phase velocity, which inversely yields the estimation of the local water depth. The model is tested against both numerical experiments and actual field data with a single aerial photograph. While several conditional constraints were found and discussed, the model showed reasonable predictive skills of the bathymetry if appropriate information of wave crest lines and boundary conditions are provided.

Key Words : Wave ray theory, wave crest lines, image-analysis, nearshore bathymetry

1. はじめに

持続可能な沿岸環境を実現するためには、その基盤となる沿岸域地形やそれを形成する漂砂移動特性を正しく把握する必要がある。現在、そうした沿岸域の情報の把握には深淺測量が用いられているが、広範囲の領域を定期的に測量するには莫大なコストと手間がかかる。本研究では、リモートセンシング技術に基づく海浜地形推定システムの構築を最終目的とし、数値実験や現地画像への適用を通じてその妥当性・適用性を検証する。

これまでもリモートセンシング技術を用いた海浜地形の推定手法はいくつか研究されてきており、その代表的なものとしてArgus法¹⁾が挙げられる。Argus法では沿岸域の時間平均画像が記録され、たとえば平均画像で白く帯状に写る砕波帯の分布をモニタリングすることによって、バーの季節変動などの追跡が可能である。しかしながら、この方法は定性的な浅瀬分布の推定に限定され、海浜地形の定量的推定システムとしては適用が難しい。

また、固定カメラで撮影した連続静止画像から波速を直接推定し、波速から水深を逆推定するモデルも提案されている。たとえば稲葉ら²⁾は、岸沖測線上に抽出したレーダエコー画像を単位時間毎に比較し、線上画素情報の相関から波速を推定し、岸沖方

向の断面地形が概ね良好に推定できることを示している。Stockdon and Holman³⁾はビデオで撮影した連続静止画像における輝度情報の時間変動場にスペクトル解析を加えることにより、水面変動場の位相速度および対応する水深を推定している。また田島・有井⁴⁾は、波峰線を直接追跡して波速を算定する手法を構築し、現地での適用性を検証している。

これらの連続リモートデータに基づく水深推定手法に対し、本研究ではその究極形とも言える単一静止画像からの海浜地形推定システムに着目する。単一静止画像での海浜地形の推定が可能になれば、航空写真・衛星画像などへの適用が可能になり、容易に定期的な観測を行うことができるようになる。また過去の画像への適用が可能となり、地形変化の長期間追跡による海岸過程の解明にも大きく寄与すると考えられる。

単一静止画像データに基づく地形推定手法の既往研究例として、画像上の輝度値から水深推定を試みるモデルが提案されている(たとえば神野ら⁵⁾)。しかしながら、これらのモデルの適用例は透明度の高い沿岸域に限られており、砂質海浜のような海浜沿岸域への適用性については十分な検討がなされていない。これに対して、Splinter and Holman⁶⁾は、水面を撮影した単一画像における各画素の輝度分布を、Hilbert変換に基づき振幅および位相の空間分布に分

解し、波数ベクトルを推定する手法を提案している。さらに提案した手法を数値実験および実画像へ適用し、水面の輝度情報が正弦波形として与えられる数値実験では、非常に良い精度で水深勾配が逆推定可能であることを示している。しかしながら、実画像では輝度情報が正弦波形とはならないこと、砕波による気泡の連行や、さざ波上の反射などの影響を受け、波数の推定に大きな誤差が含まれることを指摘している。

そこで本研究では、単一静止画像に映った波峰線位置を直接利用することによって波向きの平面分布を推定し、得られた波向情報のみから、波速および対応する水深の逆推定を試みる。

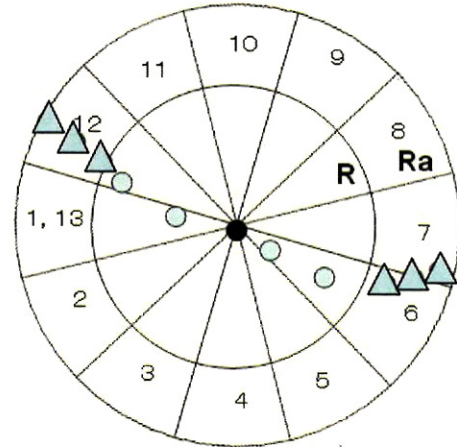


図-1 波向算出方法の説明図
(三角の点は波峰線として見なした点)

2. システムの構築

本研究で構築したシステムは、①波向抽出モデル、および②水深推定モデルの2つのステップで構成される。波向抽出モデルでは、まず原画像に座標変換を施して平面直角座標系に基づく平面波形画像に変換し、個々の波峰線の法線ベクトルとして波峰線上の波向を算定する。さらに得られた波向ベクトルと次の波峰線との交点での波向から、波向線に沿った波向分布を内挿する。水深推定モデルでは、波向線法に基づき波向と波速の空間勾配の関係から波速を推定する。以下に波向抽出モデルおよび水深推定モデルの内容を整理する。

(1) 波向抽出モデル

a) 座標変換

波向を精度良く抽出するため、まず原画像を平面直角座標へと座標変換する。座標変換にはHolland, et al.⁷⁾と同様に以下の座標変換式を用いた。

$$u_{ij} = \lambda_i(u_i - u_{0i}) = -f \frac{m_{ij}(x_j - x_{0j})}{m_{3j}(x_j - x_{0j})} \quad (1)$$

ここで、 u_i ($i=1,2$)は画像座標、 x_j ($j=1,2,3$)は平面直角座標上の実座標、 λ_i は u_i 方向へのレンズ歪み、 u_{0i} は画像中心座標、 f は焦点距離、係数 m_{ij} やおよび m_{3j} はカメラの撮影方向を表す角度 ϕ_k ($k=1,2,3$)の関数、 x_{0j} はカメラ設置位置の座標である。本研究では田島ら⁸⁾に従い画素間隔と実座標間隔の場所による違いを考慮した重み関数を導入し、画像内の基準点における座標情報を最もよく再現する λ_i 、 ϕ_k 、 x_{0j} を最小二乗法により決定した。

b) 波峰線上における波向の算出

次に座標変換後の実座標に基づく画像上で波峰線位置を抽出し、その位置情報に基づき波向を算出する。波峰線上における波向はその地点における波峰線の法線方向であるとして算定する。ただし、画像

上の波峰線位置は必ずしも滑らかではないので、直接的に法線方向を求めることが出来ない。そこで、波峰線上のある点での波向きは次のように定めた。図-1に示した黒点近傍での波向を算定する際には、その周り半径 ($R-Ra$) 以上、半径 R 以下に位置する波峰線上の点 (図-1の三角で示される点) が存在し、かつ黒点から見てほぼ正反対にそれぞれ一点以上が位置することを条件とし、その条件が満たされた場合にのみ、それと接する領域に入る点と合わせて重心をとり、得られた2つの重心を結ぶ線を黒点の近傍での波峰線とみなし、その法線方向を波向とした。半径に関しては、 R が小さいほど波峰線接線算定時の解像度が増すが、小さすぎると逆に、波峰線抽出点の局所的な乱れによる影響が発生し、不安定となることや、 $R-Ra$ が小さいと候補となる点が見つからないことなどを考慮した結果、 $R=10$ 、 $Ra=5$ と定めた。

c) 任意地点における波向の算出

次に得られた波峰線上の波向情報から、任意地点における波向を内挿して求める。ある波峰線上の点から波向ベクトルを中心とした30度の範囲内で次の波峰線を見つける。次に見つけた波峰線上の点と元の波峰線上の点における波向を直線でつなぎ、その間の波向を線形補間した。次節で示す波向線法によれば、ここでの線形補間による近似は「波峰線間における波峰線方向の波速勾配が波向線方向に一樣である」という仮定と符合する。以上により得られた波峰線上、および波峰線間における波向分布をさらに空間内挿し、対象領域の任意の地点における波向分布を推定する。後述する3.(1)の平行等深線海岸に対する数値波動モデルの適用によって得られた水面波形から波峰線を抽出し、本手法を適用した際の波向算出例を図-2に、最終的に得られた波向分布の算定例を図-3にそれぞれ示す。

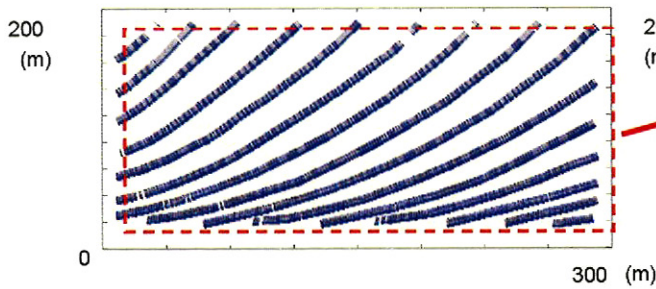


図-2 抽出した波峰線と波向ベクトル(モデル海岸)

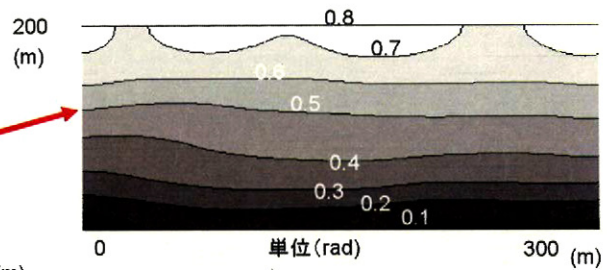


図-3 最終的に求まる波向分布

(2) 水深推定モデル

a) 概要

沖から海岸に向かって伝播する波は、水深の変化に伴い波速が変化し、波速の変化に伴い屈折して波向を変える。本研究では、波浪場の変形機構を逆にたどる事によって波向から波速、波速から水深、海浜地形への逆推定を試みる。

波速と波向の関係を表す基礎方程式としては、任意地形上を伝播する規則波の屈折変形を表す波向線法を用いる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial s} = -\frac{1}{c} \frac{\partial c}{\partial n} \quad (2)$$

ここで、 θ は波向、 s は波の進行方向、 c は波速、 n は波の法線方向であり、上の式をx-y座標系に基づき変形すると次式で表される。

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin \theta = \frac{1}{c} \left[\frac{\partial c}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial c}{\partial y} \cos \theta \right] \quad (3)$$

以下に式(3)に基づく波速の推定手順を整理する。

b) 既知情報の入力

まずモデルに既知情報を入力する。一つは画像から得られる波向情報であり、もう一つは、水深推定領域境界上の波速情報である。波向線法に基づき推定できるのは波速の空間勾配のみであり、波速値の空間分布を推定するには、境界での波速情報が必要となる。たとえば汀線での波速($C = 0$)や沿岸方向の境界上での波速や波速勾配などである。境界条件が少ない場合、誤差が大きくなると考えられるので、対象領域の数点で既知の水深(波速)が得られていることが望ましい。

c) 沿岸方向と岸沖方向の繰り返し計算

式(3)に見られるように、左辺の波向勾配はx軸およびy軸両方向への波速勾配によって表される。そのため、式(3)に基づく波速の推定では、xおよびy方向の波速勾配を同時に考慮しながら連立方程式を解く必要がある。Splinter and Holman⁶⁾は水面波形の画像パターンにHilbert変換を適用し、位相の空間分布を直接推定することによって、最終的に波数ベク

トルの空間分布を同時に算定した。この手法は、波数(波速)の空間分布を一度に推定するという点で優れているものの、実画像への適用性という点では画素データの前処理段階での課題が残されている。そこで本研究では、既に求められた波向の分布から、波向線法(式(3))と境界条件を直接用いて波速の分布を推定する。

ここで、対象領域を正方格子に分割し、各格子点上での波向と境界条件(たとえば汀線上の波速ゼロ)を与えれば、全ての格子点を対象に式(3)を離散化した連立方程式を解くことにより、波速の空間分布の推定が可能である。しかしながら、この手法では連立方程式の数が膨大となり、広領域への適用が難しい。そこで本研究では、次に示す手順で繰り返し計算を行うことにより、x軸方向およびy軸方向の波速分布の計算を分割した。

まず、式(3)を正方格子データに基づき離散化し、x軸方向の隣り合う波速 c_i および c_{i+1} を未知とする方程式を導く。

$$\begin{aligned} & \frac{c_{i+1} - c_i}{\Delta x} \sin \theta_{i+1/2} - \left(\frac{\partial c}{\partial y} \cos \theta \right)_{i+1/2} \\ &= \frac{c_i + c_{i+1}}{2} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \cos \theta + \frac{\partial \theta}{\partial y} \sin \theta \right)_{i+1/2} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで i は格子番号を表し、波速のy方向勾配は、繰り返し計算の初期条件ではゼロ、繰り返し計算中では、1ステップ前の計算で推定した値に基づき、既知の値を与える。ここで岸沖方向の格子点数が N 個とすれば、上記の連立方程式が $N-1$ 本得られるため、境界条件がひとつ与えられれば波速分布が推定可能である。ただし、上述した様に、他にも波速(水深)の既知点があれば、その値を与え、 $N-1$ 本の連立方程式に基づき最小自乗法を用いて最適な波速の分布を推定する。

次に、沿岸方向において同様の操作を行う。この際、波速の岸沖方向勾配については、1ステップ前の計算結果を用いて既知として与える。これによりまた新たな波速分布が算出される。

この岸沖方向、沿岸方向の計算は値をフィードバックしながら行われるので、繰り返し計算によって、推定値が収束する。計算では式(3)の左辺と右辺の誤差が十分に小さくなったところで繰り返し計

算を終了することとした。

d) 分散関係式による水深推定

最後に得られた波速から水深を推定する。水深の推定には以下の分散関係式を用いた。この際、周期の情報が必要となるが、単一画像のみの情報では周期の推定が問題となる。例えば水深が既知である場所があれば、その地点における波長と水深から周期を推定することが可能である。

$$\omega^2 = gk \tanh kh \quad (5)$$

一方、相対水深が大きいと水深の変化に対する波速の変化量が相対的に小さくなり、結果として波速から水深を推定する本手法の推定誤差が大きくなる。このことを勘案し、本手法の適用範囲を浅海域のみに限定すれば、分散関係式が周期に依存しなくなるため、周期の推定誤差は問題とならない。図-4は相対水深の変化に対する、正規化した水深と波速の変化率と、浅水近似に基づく水深推定値 h_{sw} の実水深との誤差を比較している。図に見られるように、両者共に相対水深が1/10を超えたところで値が大きくなっているが、その傾向は浅水近似による水深誤差の方が水深と波速の変化率比よりもやや早く増加していることがわかる。仮にモデルの適用範囲を $h/L_0 < 0.05$ （周期10秒の波に対して水深15.6m）とすると、波速・水深変化率比はほぼ一定値であり、また浅水近似による波速の推定誤差も10%未満であることが分かる。

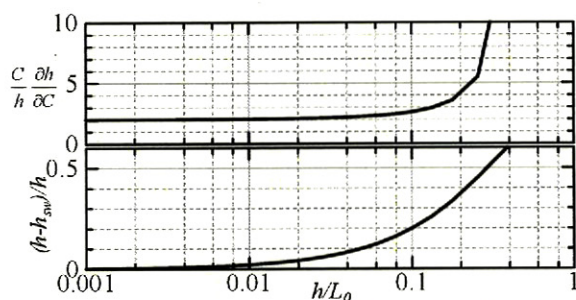


図-4 相対水深に対する波速・水深の変化率の比(上)および線形長波近似による水深推定誤差(下)

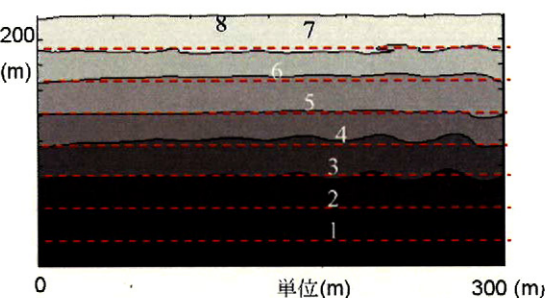
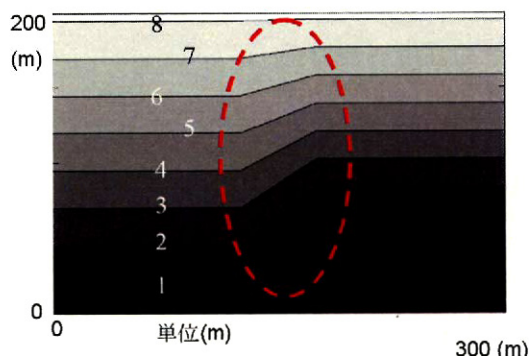


図-5 モデルにより推定した平行等深線地形
赤破線は仮想地形

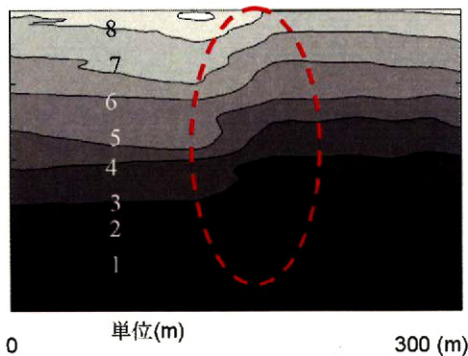


図-6 地形急変部の存在する海岸(左)とモデルによる推定結果(右)

3. システムの検証

ここでは構築した海浜地形推定システムの妥当性を、数値実験および、天竜川河口域における実際の単一静止画像に適用して検証する。

(1) 数値実験による検証

システムの中でも最もコアとなる部分は、水深推定モデルであり、この部分の精度がシステム全体の精度へと大きく影響を及ぼすと考えられる。そこでまず、数値実験を用いて水深推定モデル単体の精度を検証することにした。

数値実験は以下のような手順で行った。まず、仮想の海浜地形を作成し、そこに対して渡辺・丸山⁹⁾の非定常緩勾配方程式を用いて時間発展型の平面波浪場の計算を行う。そこで得られた波向分布に対して水深推定モデルを適用し、推定された水深と最初に作った仮想の海浜地形とを比較することで、モデルの精度を検証した。また数値実験は平行等深線海岸と地形急変部の存在する海岸の2つの地形条件に対して行うことにした。

a) 平行等深線海岸

最もシンプルな海岸におけるモデルの適用を考えた。水深最大値が8m、勾配0.04m、沿岸方向幅300mの平行等深線海岸に対して、周期10s、波の入射角0.78radで波を入射させた。なお、境界条件は4辺を既知として与えた。計算すると、図-5のような結果が得られ、水深の二乗平均誤差は14cm程度という高い精度が得られた。

b) 地形急変部の存在する海岸

数値実験の二つ目としては、モデルが苦手とするであろう地形急変部を含む地形においてモデルの適用を検証した。図-6に非定常緩勾配方程式による波浪場の計算に用いた水深図および、波浪場の計算結果から本モデルを用いて推定した水深図を比較する。図のように点線で囲まれた部分で地形が急変する地形を想定し、ここに先ほどと同じ周期10s、波の入射角 0.78rad で波を入射させた。ここで、波浪場の計算には図-6よりもさらに広い領域で計算を行い、側方境界周辺には吸収層を設置することによって境界からの反射波による影響を除去した。

その結果、水深の二乗平均誤差が28cm程度と概ね良く推定できてはいるのだが、破線で囲まれた部分のように $\pm 1\text{m}$ 程度の誤差が生じている部分も見られた。これは地形の急変により波の反射が起こったこと、斜め地形の部分で回折が生じたことなどが原因となっていると考えられる。

c) モデルの適用性に関する検証

数値実験への適用を通じて、波向分布から海浜地形を推定するモデルに制約条件があることがわかった。本モデルの基礎式である式(3)において、左辺は波向の空間分布に基づき既知の値として与えられる。これに対して、本モデルで提案したアルゴリズムでは、岸沖方向および沿岸方向の繰り返し計算に応じて、右辺の第一項および第二項のいずれか一方を未知の項、他方を既知の項として波速の分布を計算する。すなわち、繰り返し計算では右辺の第一項および第二項の和が、既知の値として与えられる左辺と等しくなるようにそれぞれの項の値が算定される。この際、第一項と第二項の組み合わせには、両者の正負の関係により、値が収束する「相乗」パターンと値が発散する「相殺」パターンが必ず存在する。

例えば、沿岸方向 y 軸に対してある角度をもつ平行等深線海岸に規則波が入射角 $\theta \geq 0$ で入射する場合を考える。また x 軸は岸向きを正とする。このとき、 x 軸方向に向かって波速は減少するため、右辺第一項は負となる。一方、右辺第二項は y 軸と平行等深線とのなす角が正および負のいずれかによって符合を変える。たとえば y 軸の正方向に水深が減少するとき、波速の y 軸方向の勾配は負となり、これに $-\cos\theta$ を乗じた右辺第二項は正となる。一方、 y 軸の正方向に水深が増加する場合には、右辺第二項が負となる。

右辺第一項と第二項の符合が同一であれば、 x 軸および y 軸方向の波速の勾配は、一方の項の絶対値の増加は、他方の項の絶対値の増加を制限するため、繰り返し計算を通じて徐々に一定値に漸近して収束する。これが「相乗」パターンである。しかしながら、両者の符合が異なる場合には、一方の項の絶対値が大きくなると、それを相殺するように他方の項の絶対値も増大する。そのため、繰り返し計算にお

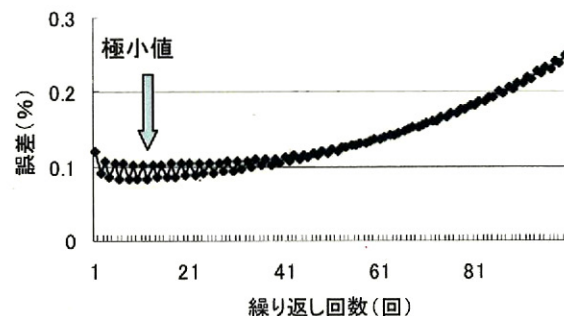


図-7 数値実験b)における波速推定誤差の推移

ける両項の変動は、互いの上限値・下限値を規定しない。したがって、波向分布の微妙なエラー値などの影響で波速の x 方向変化分が急激に変化するところなどが出てきた場合、それに合わせて y 方向変化分も急激に変化することになる。この影響は繰り返し計算の中で徐々に増幅し、波速は発散することになる。そして、この影響は付近の計算領域へと伝播し、波速分布全体の誤差の増幅へとつながる。これが「相殺」パターンである。

このように、計算領域の中で「相乗」パターンの部分は波速が適切な値に収束する一方、「相殺」パターンの部分は波速が一意に定まらず、解が不安定となる。実際、図-7のグラフで示すように、数値実験b)の場合、繰り返し回数10回ほどまでは「相乗」パターンの収束が「相殺」パターンの発散を上回るため、波速誤差が少なくなる方向へと推移しているが、10回を超えると波速誤差が大きくなる方向へとシフトするのがわかる。これについては、周辺の波速の分布との関係に基づき、波速の制約条件を追加することにより、解の安定性が向上すると考えられるが、解の安定性と効率性を兼ね備えた具体的な手法の構築については今後の課題としたい。

(2) 実画像への適用による検証

最後にシステム全体としての精度検証を行うために、実際の画像に対してシステムを適用し、深淺測量であらかじめ測量された実測値との比較を行った。適用地点として、海浜変形の著しい天竜川河口周辺を選定し、図-8に示した河口砂州前面における海浜地形の超音波測深および空中撮影を実施した。

図-8は実際に水深推定に用いた単一画像であり、図-9には座標変換を施して、平面直角座標系に基づき画素情報を再配置した画像を示す。この画像に基づき、田島・有井⁴⁾と同様の手法で波峰線を抽出し、得られた波峰線の位置情報に基づき本手法を適用した。ただし、海浜地形推定に必要な陸側の情報は取り除いた。赤枠で囲まれた部分に対して海浜地形推定モデルを適用して得られた水深推定結果と、実測値を図-10に比較した。

図に見られるように、水深分布は実測値を妥当に



図-8 適用する原画像（天竜川砂州部分）

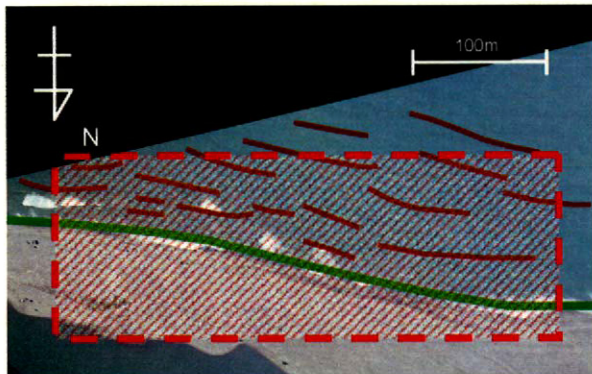


図-9 座標変換後の画像

再現できた。また、水深のrms誤差は、領域の平均水深1.69mに対して約18%の30cmであった。

数値実験のような理想的な条件とは異なり、カメラの撮影条件に依存する波峰線の抽出精度、座標変換に用いる基準点座標の計測精度など、様々な誤差要因が加わったものの、ここで提案した手法は妥当な推定精度を有していると考えられる。また、波峰線位置から直接波向分布を推定しているため、Splinter and Holman⁶⁾に見られた水深推定値の局所的な不連続点が出現しにくいことも本システムの利点のひとつであるといえる。

4. おわりに

単一静止画像から海浜地形を推定するシステムを構築した。システムは波向抽出モデルと水深推定モデルの二つから構成され、数値実験により水深推定モデルの妥当性を、実画像への適用を通じてシステム全体の妥当性を示した。

本研究で構築した海浜地形推定システムは、マクロな海浜地形を捉えるという意味では、概ね良い結果が得られた。しかし、数値実験・実画像を用いた検証により、回折域が大きい場合や、バー地形などの地形急変部が存在する場合などは精度が落ちることがわかった。これは本手法の基礎式である波向線

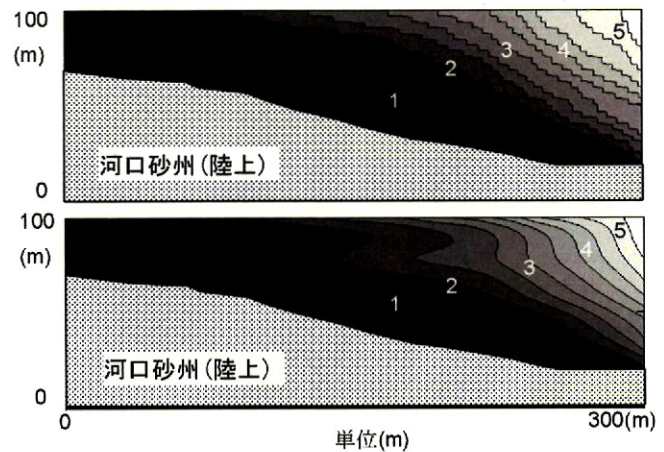


図-10 水深の実測値(上)と推定値(下)の比較

法では波の屈折しか考慮に入っていないことが原因であると考えられる。また、本手法では岸沖方向および沿岸方向のそれぞれに対して、繰り返し計算を行うことによって波形勾配を計算する手法を採用した。これにより、計算効率や汎用性といった観点では効果が見られたものの、条件によっては解の発散を助長する可能性があることも数値実験に基づき確認できた。今後は、安定性、効率性、推定精度を勘案したシステムの精緻化が課題である。なお、本研究の一部は(財)河川環境管理財団の平成21年度河川整備基金助成によるものです。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) Holman & Stanley : The history and technical capabilities of Argus, Coastal Engineering, 54, 477-491, 2007.
- 2) 稲葉徹, 森本佳織里, 武若聡, 西村仁嗣 : 波浪場画像の解析による水深分布推定, 海工論文集, 第 48 巻, pp. 1416-1420, 2001.
- 3) Stockton, H.F. and R.A. Holman : Estimation of wave phase speed and nearshore bathymetry from video imagery, Journal of geophysical Research, 105, 22015-22033, 2000.
- 4) 田島芳満, 有井誠 : 連続静止画像を用いた沿岸域地形モニタリング手法の構築, 海洋開発論文集, vol.25, pp.957-962, 2009.
- 5) 神野有生, 鯉渕幸生, 寺田一美, 竹内渉, 磯部雅彦 : 底質の不均一性を考慮した衛星画像による汎用水深分布予測法, 水工学論文集, vol. 52, pp. 895-900, 2008.
- 6) Splinter & Holman : Bathymetric estimation based on wave refraction patterns, Coastal Engineering, 53, 451-463, 2006.
- 7) Holland, K.T., Holman, R.A., Lippmann, T.C., and J. Stanley: Practical use of video imagery in nearshore oceanographic field studies, IEEE J. of Ocean. Eng., 22(1), pp.81-92, 1997.
- 8) 田島芳満, 高川智博, 浅野泰史, 佐藤慎司, 武若聡 : 特性の異なる二つの台風による天竜川河口砂州の大規模変形, 海工論文集, 第 55 巻, pp. 646-650, 2008.
- 9) 渡辺晃, 丸山康樹 : 屈折・回折・碎波減衰を含む波浪場の数値解析法, 第 31 回海工論文集, pp. 103-170, 1984