

画像解析による沿岸地形の簡易観測法と
汀線位置推定法の構築

黒 崎 弘 司

平成 25 年 9 月

博士論文

画像解析による沿岸地形の簡易観測法と 汀線位置推定法の構築

金沢大学大学院自然科学研究科

環境科学専攻

環境創成講座

学 籍 番 号 0923142408

氏 名 黒崎 弘司

主任指導教員名 由比 政年

目 次

第1章 序 論	1-1
第1節 研究の背景	1-1
第2節 海浜地形変動に関する従来の観測手法	1-2
第3節 研究の目的	1-7
第2章 観測対象域の概要	2-1
第1節 鉢ヶ崎海岸の概要	2-1
第2節 内灘海岸の概要	2-30
第3章 画像解析による海浜地形変動観測	3-1
第1節 ネットワークカメラを活用した観測システム	3-1
第2節 簡易空撮気球による観測システム	3-4
第4章 解析の手法	4-1
第1節 画像処理手順の概要	4-1
第2節 オルソ画像の作成	4-4
第5章 鉢ヶ崎海岸への適用	5-1
第1節 座標変換精度の検討	5-1
第2節 ハンディー型 GPS による測量誤差の検討	5-10
第3節 汀線変動解析への適用	5-13
第4節 沿岸砂州変動解析への適用	5-22
第6章 画像解析による汀線位置推定法	6-1
第1節 デジタル画像におけるデータ処理法	6-1
第2節 輝度値および RGB 値による汀線位置推定法	6-3

第7章 内灘海岸への適用	7-1
第1節 簡易空撮気球を活用した観測システム	7-1
第2節 画像解析による汀線位置推定法の内灘海岸へ適用	7-3
第8章 結 論	8-1
第1節 主要な成果	8-1
第2節 今後の課題	8-4
謝 辞	
参考文献	参考-1
参考資料	参考-4

第1章 序 論

第1節 研究の背景

海岸地帯は近年、漁港、貿易港としての利用だけでなく、工場用地、住宅用地、商業用地あるいは観光地としての利用が進められ、経済活動の中心としてその充実、発展が期待されている。たとえば、国土交通省（旧建設省）はコースタルコミュニティゾーン(CCZ)計画を立案し、石川県白山市の石川海岸や石川県珠洲市の宝立・正院海岸をはじめ全国41の地域で海岸地域の有効利用や海辺を中心としたまちづくりを進めている(図-1.1.1, 図-1.1.2)。この他にも、石川県では金沢港を多目的国際ターミナルとして整備するため、港湾機能の強化と同時に工場等の誘致も進められている(図-1.1.3)。さらに、石川県は総延長約584 kmの海岸線を有しており、千里浜海岸の渚ドライブウェイをはじめとして多くの海岸地域が貴重な観光資源であると同時に、海岸線に沿って高速自動車道路等、都市を結ぶ重要なインフラストラクチャーが位置する。このように海岸地域は非常に重要であり、波浪によって堤防の倒壊や砂浜の消失、港湾の埋没などの被害が発生すると、安全面、経済面、そして観光面で大きな損失を生じさせる。近年国内外の多くの海岸で海岸侵食、港湾埋没および波浪災害等の問題が生じているがその対策は決して十分とはいえない。海岸侵食、港湾埋没および波浪災害等の軽減・防止のためには、冬季風浪などの海象特性や漂砂のメカニズム解明に基づく効果的かつ適切な対策を実施することが必要である。しかしながら、広範囲に渡る波浪や海浜流の特性、さらには、漂砂に伴う海浜地形変動を現地の複雑な条件下で解明することは容易でなく、継続的なモニタリングに基づく関連物理過程への理解が不可欠である。すなわち、沿岸波浪や地形変動情報の収集・蓄積を長期・広域的かつ高頻度で実施していくこと、および、そのための技術開発を進めていくことが必要となる。



図-1.1.1 石川海岸（石川県）



図-1.1.2 徳光C C Z（国土交通省）



図-1.1.3 金沢港多目的国際ターミナル(左)と岸壁に建設された工場(右)（石川県）

第2節 海浜地形変動に関する従来の観測手法

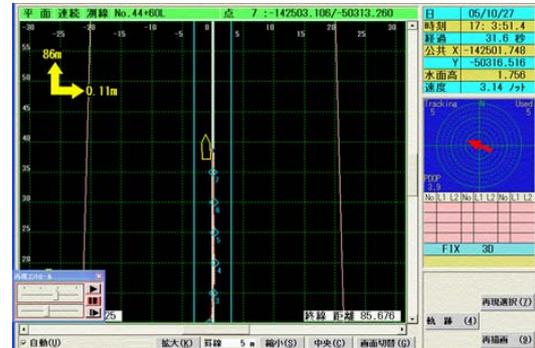
波浪・海浜地形変動に対する観測システムには様々なものが存在する。以下にその代表的なものを示す。

(1) 音響測深機による沿岸地形の観測法

(1-1) 深浅測量

深浅測量とは、水上において船の位置測量と水深測量を同時に行う測量作業である。現在、海上位置決定にはGPS測量が多く利用される。水深は、水中に音波を発射し、海底で反射して戻ってくるまでの所要時間を測定して得られる。海底地形に対する深浅測量はコスト面の制約から年に数回が限度であり、波浪や潮位の条件に対してどのように地形が変化しているかを捉えるには限界がある。また、測定範囲が測線直下のみであり、測線間

が未測定となる線的な計測である。広領域の詳細な地形を把握するためには多くの測線を設けなければならない、そのためには莫大なコストと時間が必要である。



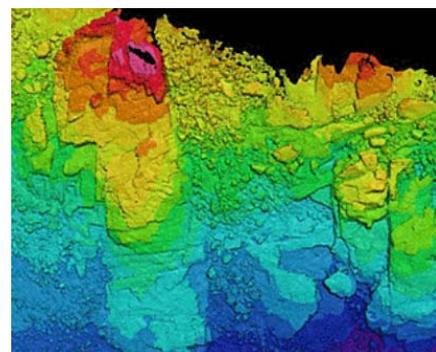
(ア) GPSを搭載した測量船

(イ) 測量船の船位情報

図-1.2.1.1 深浅測量（株式会社アカサカテック）

(1-2) マルチビーム測量

従来の深浅測量の欠点を克服するための手法の1つとして、マルチビーム測量が提案されている。マルチビーム測量では、指向角の鋭い多数の音響ビームを使用し、海底を帯状に細かく測量することが可能であり、平面的な水深データが得られる。このため広範囲の海底地形の詳細を効率的に捉えることができる。ただし、水深の浅い領域では測定効率が低下する。



(ア) マルチビーム測量概念図

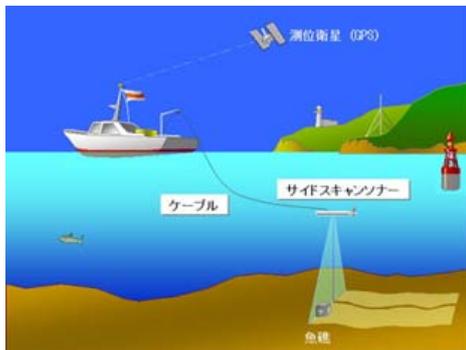
(イ) 鳥瞰図

図-1.2.1.2 マルチビーム測量（五洋建設株式会社）

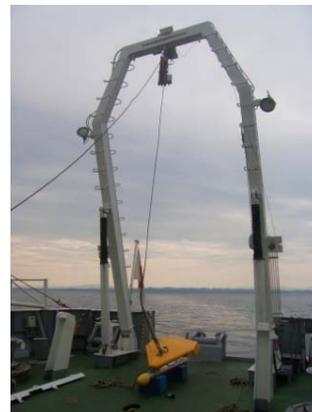
(1-3) サイドスキャンソナー

サイドスキャンソナーも近年提案されている新しい観測手法の1つである（浅田，2005）．これは音波を用いて海底全体を航空写真のように撮影するものである．サイドスキャンソナーでは10 kHz~500 kHzの周波数の扇形に広がる音波を発信し，海底で散乱し，返ってきた音波を受信する．非常に幅の広い区域を音響画像として捉えることに適している．

しかしながら，マルチビーム音響測深機やサイドスキャンソナーは高額であり，広い範囲の継続観測には適していない．現状では，これらの手法は，費用対効果の観点から十分に普及しているとは言い難い．



(ア) 概念図



(イ) 船の船尾から投入前の
サイドスキャンソナー

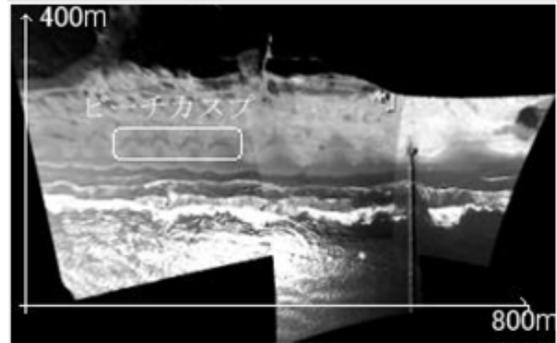
図-1.2.1.3 サイドスキャンソナー（海上保安庁）

(2) 画像解析による沿岸地形の観測法

(2-1) 係留ビデオシステムを用いた観測法

武若ら(1999, 2000)は広角レンズを装着した2台のビデオカメラ（録画継続時間：1時間）を高度150 mの位置に自由係留した気球に搭載し，砕波帯の撮影観測を行って，各種水理現象の時空間的構造をビデオ画像から解析する可能性について検討した．その結果，波峰線，砕波の位置，砕波によって発生した気泡，濁質を含む水塊などの移動状況を読み取ることで，砕波帯内外の波の進行状況，表層の流れの状況等を調べるのに必要なデータが取得可能であることを示した．ただし，この手法は荒天時の観測や年間を通じての観測

には適していない。



(ア) アルミ製枠組みと
広角デジタルビデオカメラ

(イ) 広角レンズの歪みを除去し、
垂直画像に変換した画像

図-1.2.2.1 係留ビデオシステムを用いた観測法（武若ら）

(2-2) ARGUSビデオモニタリングシステムによる観測法

ARGUSビデオモニタリングシステムとは、近年注目を集めているリモートセンシング手法の1つであり、高層ビルの屋上等に固定された、複数台のビデオカメラを用いてモニタリングを行い、砕波によって発生する気泡の量と画像の輝度の関係等を用いて海底地形等を推定する手法である(Lippman and Holman, 1989)。我が国では、鈴木ら(2002)が、5台のCCDカメラを用いたARGUSビデオモニタリングシステムにより、広域の海岸映像を長期にわたって撮影し、バーやトラフの波浪に対する応答や水深の算定について検討を行っている。現在、この観測システムは、米国、欧州、オーストラリアを始めとして世界各国で広く活用が進められている。



図-1.2.2.2 ARGUSビデオモニタリングシステムによる観測法
(http://www.coastalwiki.org/wiki/Argus_video_monitoring_system)

(2-3) ネットワークカメラを用いた観測法

鈴木ら(2008)は1台のネットワークカメラによって複数の箇所を(任意の角度・ズーム倍率で)定期的に観測する, 海岸連続観測システムを開発した. 河口フロントに設置されたネットワークカメラに定時刻にアクセスしてカメラを制御し, 映像を遠隔で取得した後, 平均画像作成等の画像処理を実施し, 連続的な河口フロントの位置や動きを調査した. その結果, この手法においても, 高波浪下の砂浜海岸の変化を捉えられることを示し, ビデオ観測の可能性の高さを示した.



図-1.2.2.3 ネットワークカメラを用いた観測法 (鈴木ら, 2008)

(2-4) デジタルビデオカメラを用いた観測法

ARGUSビデオモニタリングシステムは初期費用が高額であり, 常に画像を撮影し続けるためデータ量が莫大になるという問題がある. そこで, 木村ら(2006, 2007, 2008)は, 汎用のデジタルビデオカメラを撮影地点(鳥取海岸)に毎日持ち込む形で1日1回の

海岸観測を継続的に行った。その結果、カスプの存在と離岸流の間隔との関係、沿岸砂州の周期的変化、あるいは、波のエネルギーとバーの振幅との関係等、いくつかの興味深い現象を汎用ビデオカメラによる画像撮影により解析可能であることを示した。

第3節 研究の目的

以上、主な観測手法を紹介したが、従来の深淺測量に基づく手法は精度が高い半面、低価格ではなく測定頻度が低下するという問題がある。今後、広範囲の領域を継続的に観測していくためには、精度は若干低下するものの、コスト面で有利であり、かつ、高頻度の観測が可能な、画像解析に基づく観測手法(図-1.3.1)を発展させていくことも、今後の海浜地形観測の技術開発において重要と考えられる。

本研究では、従来の深淺測量に比べ低コスト・高頻度な海浜観測の技術開発を目指して、IT技術を活用したローカルリモートセンシングシステム、すなわち、ネットワークカメラを活用した画像観測システムを構築する。さらに、本システムを石川県珠洲市鉢ヶ崎海岸に適用して長期連続観測を実施し、現地測量との比較やメガカスプ地形の変動解析を通じてその適用性を検証する。また、鉢ヶ崎海岸におけるメガカスプ地形の発達特性の解明、沿岸砂州変形過程の追跡や汀線移動速度の定量化、および画像解析による汀線位置推定法の構築を試みる。最後に、機器の固定設置を必要としない、機動性に優れる画像観測システムの構築を指向し、石川県河北郡内灘海岸において簡易空撮気球による沿岸域画像解析法の構築を試み、本研究で構築した地形定量化手法を活用した画像解析、および汀線位置推定法の適用可能性を検証する。

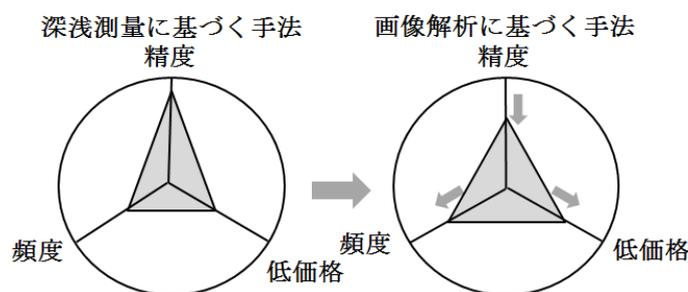


図-1.3.1 観測手法の比較

第2章 観測対象域の概要

第1節 鉢ヶ崎海岸の概要

(1) 地理的概要

ネットワークカメラシステムによる観測対象域は、能登半島先端に位置する珠洲市鉢ヶ崎海岸である(図-2.1.1.1)。珠洲市は三方向を海に囲まれ、外浦と内浦が存在する。外浦は、冬季の強い北西季節風により波は高く、その侵食作用により海に面した土地は急勾配の絶壁であり、火山岩類による奇観が見られ侵食地形となっている。一方、鉢ヶ崎海岸が位置する内浦は湾になっており、北側に位置する丘陵状の山地が北西季節風の障壁となり波は比較的穏やかである。

地誌によれば、かつて鉢ヶ崎海岸は広漠たる不毛の砂丘で、通称ドンケと呼ばれ、冬は寒風が吹き渡り、夏は炎熱が砂を焦がして通行が極めて困難であった。蛸島村では積極的にこの不毛の地の植林に取り組み、明治37年、魚附保安林に指定され、以来、村を上げての保護政策を進めた。しかし大正頃より珠洲市の海岸線は侵食が目立ち始め、特に内浦海岸はその被害が大きかった。沿岸潮流による海岸侵食が極めて激しくかつて存在した広い砂浜は消失し、鉢ヶ崎海岸南西部に位置する旧上戸村では波浪が人家を脅かすほどであった。鉢ヶ崎海岸東側に位置する雲津海岸では昭和32年1月の冬季暴風浪のため延長1515mが決壊した。鉢ヶ崎海岸では昭和37年に大きな災害が発生し災害復旧工事が行われ、砂浜と住宅地を分けるコンクリート製堤防が蛸島漁港から東にほぼ一直線上に建設された。この堤防前面には消波ブロックが設置され、現在は砂に埋もれた状態である。また突堤も多数建設され、今も砂に埋もれながら一部残存している。鉢ヶ崎海岸および隣接する海岸の復旧工事は昭和39年頃に終了した。当時の予算で県・市が投じた費用は、外浦も含めて約2億2000万円にのぼった。

現在、鉢ヶ崎海岸は、西は蛸島漁港、東は松林に囲まれた約2kmに及ぶ長い海岸線を有しており、珠洲ビーチホテルの東北東2.6kmに小泊漁港、北東3.5kmに紀の川河口が位置する(図-2.1.1.2)。魚附保安林が観測カメラを設置した珠洲ビーチホテル前付近から東方向に生育し見事な白砂青松の地となり、県内有数の透明度を誇る砂浜海岸として日本の渚百選にも選定され、奥能登随一のリゾート基地として様々な施設が整備されている。



図-2.1.1.1 観測対象域



図-2.1.1.2 観測対象域の航空写真
(1991.05.18, 国土地理院に加筆)

(2) 地層的概要

能登半島は、中世代（約 3000 万年前から 2000 万年前）に海底火山の噴火により噴出した溶岩や火山灰が厚く積もってその骨格が形成された。火山活動に伴って、沿岸や入江の海底に火山灰が厚く堆積し、後に隆起し段丘となり凝灰岩の地層として現在珠洲の山地部を広く覆っている。珠洲地方の珪藻土層は第三紀の中新世後期（約 1500 万年前）にできたと推定される。鉢ヶ崎海岸後方の平床台地全域が珪藻土層の埋蔵地帯であり、その堆積範囲は約 25.0 km²、厚さは 200~400 m と推定される。平床台地の珪藻土層の上部（海拔 20~30 m の段丘面）は 5~10 m の泥や砂等の海底堆積物が覆われている。さらにその上部に砂質粘土層が存在し、その厚さは 1~2 m であり、最上部 20~30 cm は表土化している。紀の川流域は珪藻泥岩層である。図-2.1.2.1 に珠洲市地質図を掲載する。

図-2.1.2.2 はそれぞれ紀の川の過去の航空写真である。撮影時期は、図(ア)は 1967 年 4 月 30 日、図(イ)は 1975 年 7 月 18 日、図(ウ)は 2006 年 6 月 25 日である。図中の楕円で囲まれた河口部分に注目すると、図(ア)は河道が大きく折れ曲がり堆砂が多い。図(イ)ではわずかに蛇行しているが堆砂状況は図(ア)と変わらない。さらに図(ウ)を観察するとほぼ直線となっており、堆砂量は減少している。著者らは 2009 年より数回、紀の川河口部の観察を実施したところ、毎回河口部の堆砂を確認した。珠洲市役所に紀の川における浚渫について問い合わせたところ、不定期に浚渫をしているという回答を得た。また、図中の矩形

で囲まれた部分に注目すると，図(ア)および図(イ)では下流から上流に向かって直角に北向きから西向きに曲がっている河道が，図(ウ)では円弧状となっている．以上より，紀の川からは細かな土砂排出があり，また過去に比べ河道が滑らかになった影響で，河口まで到達する土砂量が増加していると推測される．以上の考察と沿岸の海浜流が時計回りであることを考慮すると，紀の川は鉢ヶ崎海岸への土砂供給源であると考えられる．紀の川の近年の画像を図-2.1.2.3~図-2.1.2.5に示す．

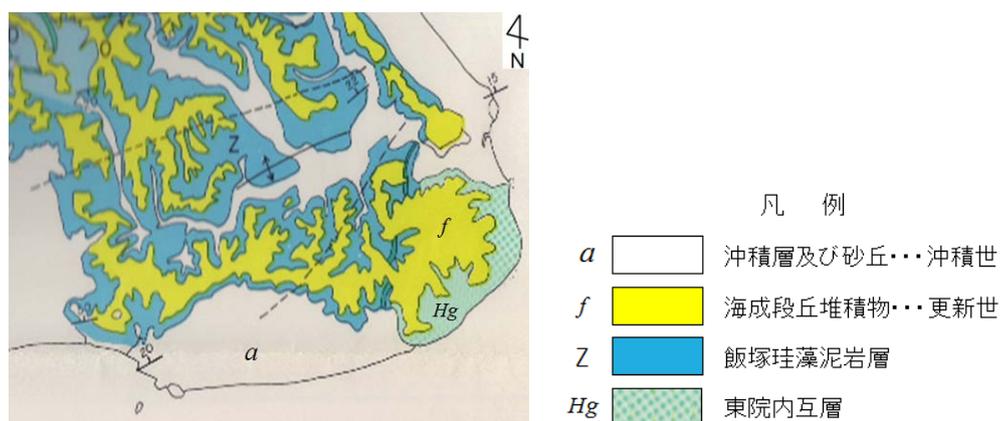


図-2.1.2.1 珠洲市地質図（珠洲市十年誌，石田志朗，1959）



(ア) 1967年4月30日 (イ) 1975年7月18日 (ウ) 2006年6月25日

図-2.1.2.2 紀の川の河口および河道変化（国土地理院に加筆）



(ア) 河口から上流側



(イ) 河口部分

図-2.1.2.3 紀の川河口 (2009.07.16)



(ア) 河口左岸背後



(イ) 河口右岸

図-2.1.2.4 紀の川河口 (2010.05.24)



(ア) 河口から上流側
(左岸護岸付近に堆砂)



(イ) 河口左岸から河口中央
(河口左岸突堤から中央に堆砂)



(ウ) 河口左岸の堆砂



(エ) 河口中央部の堆砂

図-2.1.2.5 紀の川河口 (2012.07.30)

(3) 鉢ヶ崎海岸に関する現地聞き取り調査

地元で民宿を経営されている奥野御夫妻と珠洲市農業協同組合専務理事 上野氏から鉢ヶ崎海岸の変遷について伺った内容を以下に掲載する（実施日：2010年10月4日・5日）。

- (a) 小泊から蛸島漁港間の砂浜は40~50年前に急激に狭くなった。
- (b) 鉢ヶ崎海岸は遠浅の砂浜である。
- (c) 昔から沖に一番瀬，二番瀬という浅瀬がある。
- (d) 蛸島漁港では砂が溜まり，雲津では侵食されている。
- (e) 小泊漁港周辺と少し外浦よりで岩場，西側は遠浅砂浜である。
- (f) 水深20m位は岩場である。
- (g) 三崎小学校前の砂浜は，昔は広がった（100m程度）。
- (h) 小泊漁港の防波堤は，昔は小さかった。大きくなったのは20年位前である。
漁港内は砂が溜まり，奥は陸地化している。防波堤先端でも砂が動いている。
- (i) ビーチホテル前の松林は昔からあったが，もっと広がった。
- (j) 山砂がかなり大量にたまっていたが，削って売っていた。隣に粘土層がある。
- (k) 小泊漁港は風向きにより，南からも北からも波が来る。
- (l) 鉢ヶ崎海岸では，西風の際は波が低く，南風の際は波が高くなる。
- (m) 漁船の海図は，魚探と比べると，10mラインは正確と思える。
- (n) 紀の川をまっすぐに改修したので，流量が多い時は泥水が出る。
- (o) 突堤は40~50年前にできた。

(p) 浜は昔広がったが、狭くなり、今また広がっている。

(q) 年によって、浜の高さや海岸の広さがかなり違う。

(雲津の堤防前の砂浜は、去年は高く積もっていたが、今年は低くなった。)

(r) この近辺は締め固まる地層である。これは土粒子表面の細かな粒子が洗い流され核となる粒子が残ったためと考えられる。

(4) 汀線付近から後浜の海浜調査

(4-1) 汀線と植生境界（実施日：2011年5月30日）

図-2.1.4.1は、ハンディー型GPSを用いて鉢ヶ崎海岸の汀線、植生境界、および堤防位置を測量した結果である。図より珠洲ビーチホテル前から蛸島漁港までの間は汀線からほぼ同じ距離を保って植生境界が位置することが読み取れる。

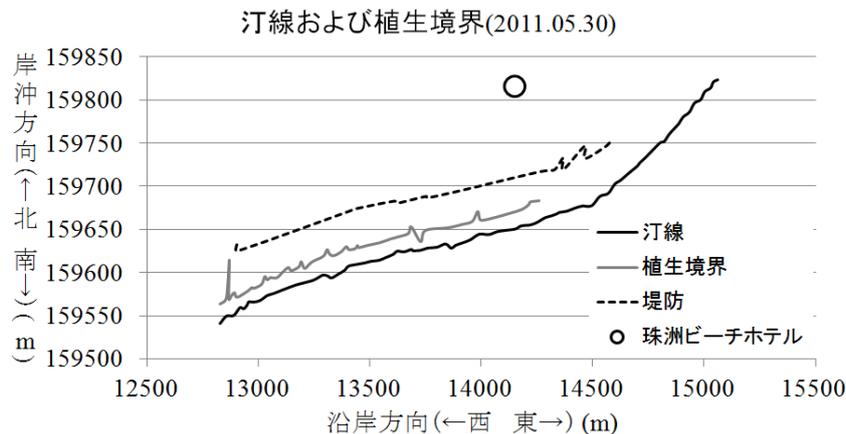


図-2.1.4.1 鉢ヶ崎海岸の汀線および植生境界

(4-2) 海浜勾配（汀線～後浜）（実施日：2010年10月5日）

図-2.1.4.2は、勾配計による、珠洲ビーチホテル前からホテル西側（蛸島漁港方面）まで約650mの区間（No.1(西側)~No.35(ホテル前)）の汀線付近と後浜域の海浜勾配変化図であり、表-2.1.4.1は勾配変化表である。また、図-2.1.4.3は勾配測定位置を示す。海浜勾配の平均値(Ave), 標準偏差(Std), 最大値(Max)を求めたところ、Ave(汀線)= 6.6° (1/9), Max(汀線)= 8.5° , Std(汀線)=1.4, Ave(後浜)= 4.4° (1/13), Max(後浜)= 10.0° , Std(後浜)=2.1であった。後浜域の海浜勾配は目視により汀線付近の海浜勾配が後浜方向で変化した地点での勾配である。海浜勾配は、汀線付近も後浜域も蛸島漁港側から珠洲ビーチホ

テル側に向かうに従って緩やかになっている。

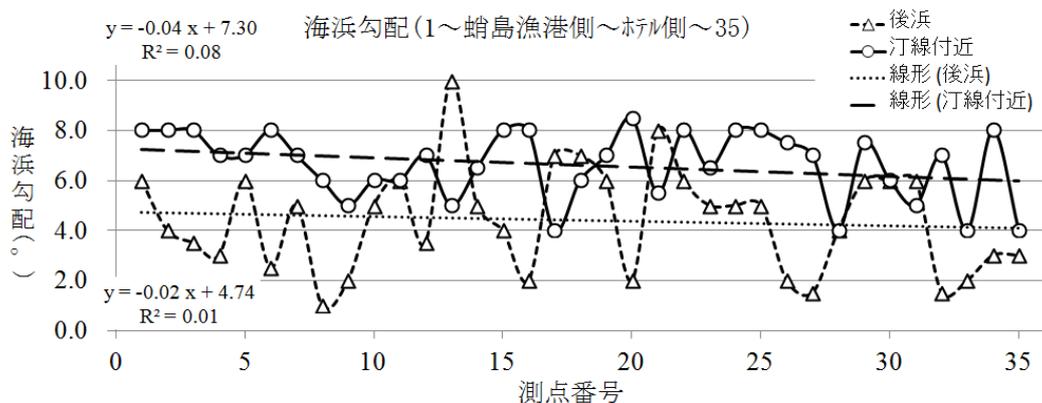


図-2.1.4.2 汀線付近と後浜の海浜勾配変化図

表-2.1.4.1 汀線付近と後浜の海浜勾配変化表

	陸地側(°)	汀線付近(°)	陸地側(1/)	汀線付近(1/)
Ave.	4.4	6.6	13.0	8.6
STDEV	2.1	1.4	11.2	2.3
Max	10.0	8.5	57.3	14.3
Min	1.0	4.0	5.7	6.7



図-2.1.4.3 海浜勾配観測地点 (No.1~No.35, Google マップに加筆)

(4-3) 海浜断面形 (汀線～後浜) (実施日：2010年10月4日)

図-2.1.4.4 に示す 3 地点において測量により汀線付近の海浜断面形を求めた。図中の測

点 A は前述(4-2)の測点 (No.34 と No.35 の間) のホテル前であり、測点 B はホテル西側 (蛸島漁港方面) 約 300 m の地点 (No.24 と No.25 の間) である。



図-2.1.4.4 海浜断面観測地点 (Google マップに加筆)

図-2.1.4.5 は、2010年10月4日に実施した図-2.1.4.4中の測点Aと測点Bでの汀線～後浜の海浜断面測量結果である。また、表-2.1.4.2、および表-2.1.4.3は海浜断面図の回帰直線より求めた海浜勾配であり、参考データとして、勾配計による計測勾配も示した。汀線付近から約5mまでの海浜勾配を比較すると、ホテル前では 3.5° (1/16)、西側では 6.3° (1/9)であった。後浜の海浜勾配は、ホテル前では 1.6° (1/37)、西側では 3.2° (1/18)であった。

汀線付近から後浜までの全体平均勾配は、ホテル前では 2.2° (1/27)、西側では 3.8° (1/15)であった。前述(4-2)での勾配計による測定結果と同様に、ホテル前の海浜勾配は汀線付近および後浜域どちらもホテル西側のそれより緩勾配であった。

次に、2012年7月29日に実施した、図-2.1.4.4中の測点Cにおける汀線付近の海浜断面測量結果を図-2.1.4.6に示す。測点Cは観測カメラから沿岸方向距離約350mに位置する。図中の原点は汀線位置である。回帰直線による海浜勾配は 4.6° (1/12.5)であり、表-2.1.4.2と表-2.1.4.3より得られる測量による汀線付近海浜勾配のほぼ平均値である。

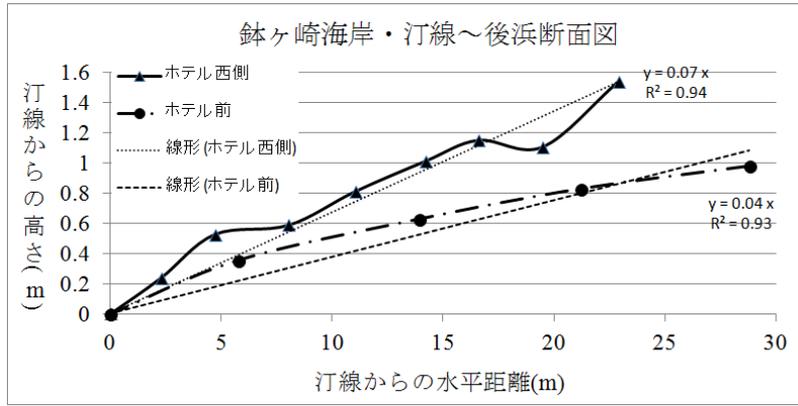


図-2.1.4.5 海浜断面図（汀線～後浜）

表-2.1.4.2 ホテル西側断面勾配

西側	勾配計	断面測量
汀線付近	8.0° (1/7)	6.3° (1/9) (0~4.7m)
後浜	5.5° (1/10)	3.2° (1/18) (4.7~16.6m)
全体		3.8° (1/15)

表-2.1.4.3 ホテル前断面勾配

ホテル前	勾配計	断面測量
汀線付近	6.0° (1/10)	3.5° (1/16) (0~5.8m)
後浜	3.0° (1/19)	1.6° (1/37) (5.8~28.8m)
全体		2.2° (1/27)

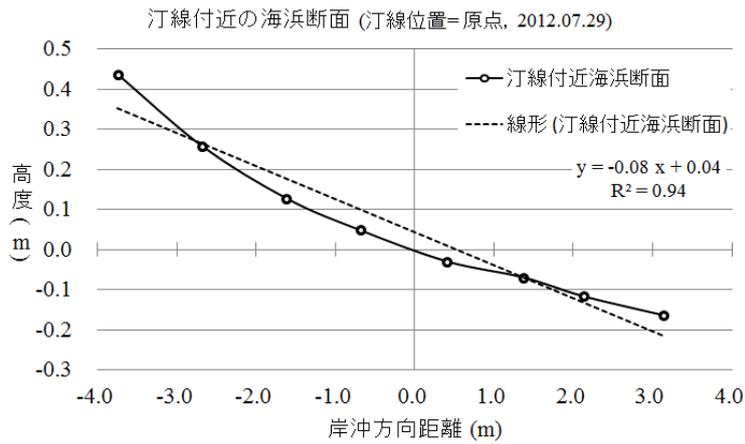


図-2.1.4.6 汀線付近の海浜断面図

(5) 汀線付近から水深 1.5 m の海浜断面形（実施日：2012 年 7 月 29 日）

図-2.1.5.1 に測点 C の汀線より岸側の海浜勾配変化点から水深 1.5 m 付近までの海浜断面測量結果を示す。図より岸沖方向距離 47 m 付近で沿岸砂州の発達を確認され、その諸数値を表-2.1.5.1 に示す。また海浜断面を 4 区間に分け、図-2.1.5.2 から図-2.1.5.5 にそれぞれの断面形の回帰直線を示す。また、断面勾配をそれぞれ θ_1 から θ_4 とし表-2.1.5.2 に示す。

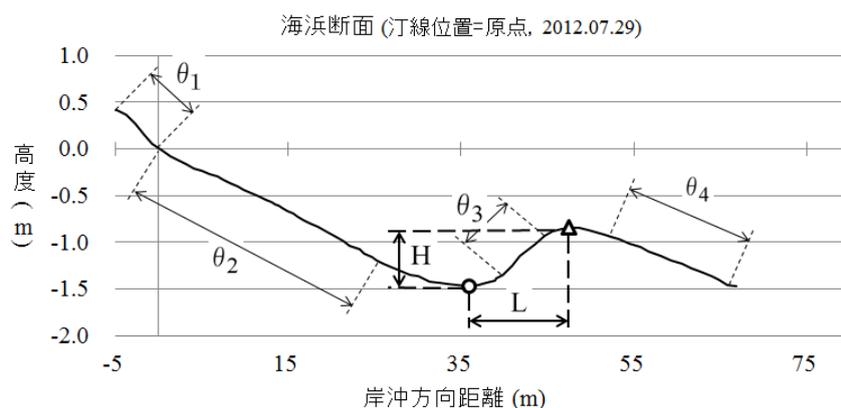


図-2.1.5.1 汀線岸側勾配変換点から沖向き海浜断面形

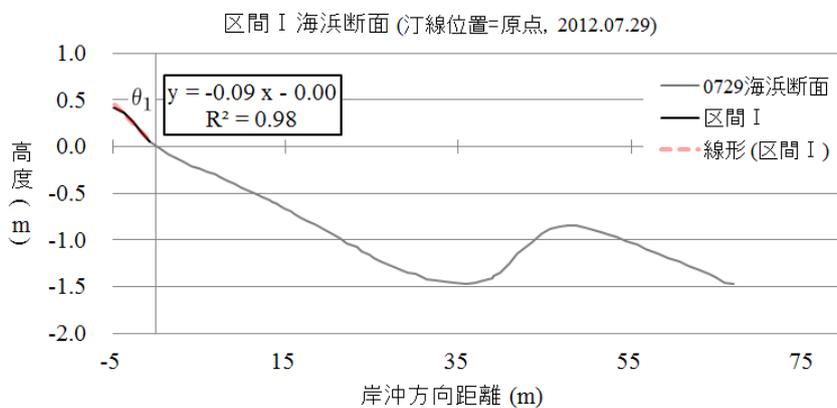


図-2.1.5.2 汀線岸側勾配変化点から汀線までの海浜断面形

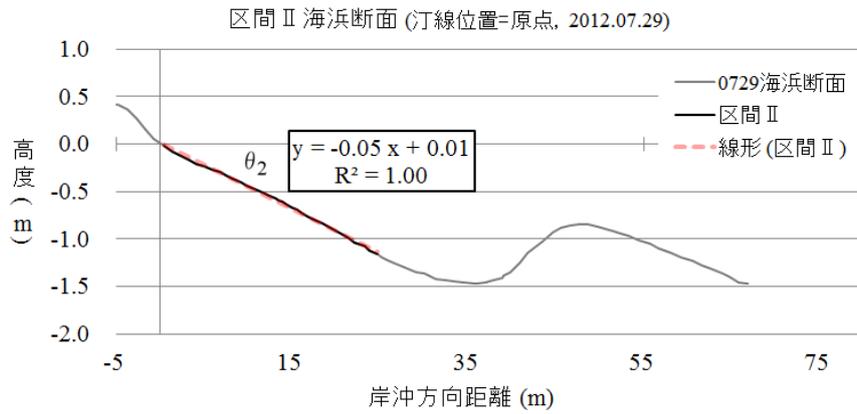


図-2.1.5.3 汀線から砂州トラフ方向海浜断面

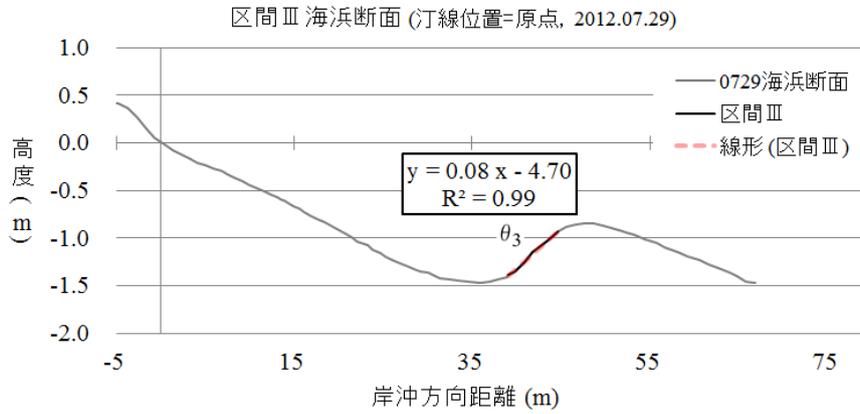


図-2.1.5.4 砂州トラフから砂州峰方向海浜断面

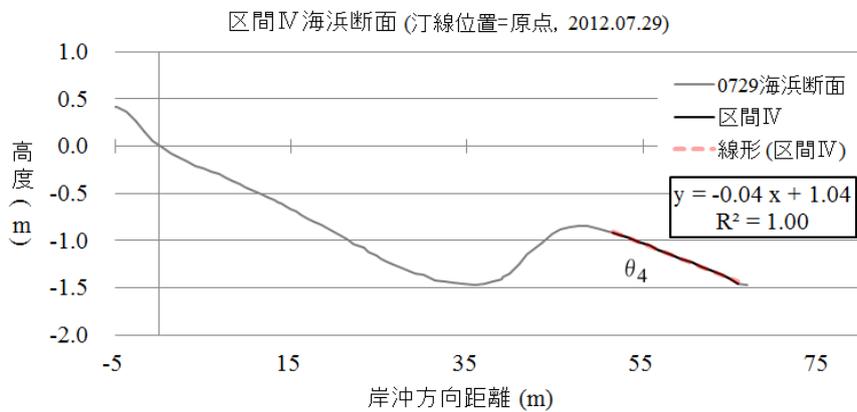


図-2.1.5.5 砂州峰から沖側の海浜断面

表-2.1.5.1 断面形状値

	岸沖方向 (m)	深さ (m)
トラフ	35.870	-1.462
峰	47.515	-0.840
L	11.645	H/L
H	0.623	0.053

表-2.1.5.2 各区間断面勾配

	勾配	
	(1 /)	(°)
θ_1	-10.6	-5.4
θ_2	-21.7	-2.6
θ_3	11.8	4.8
θ_4	-26.5	-2.2

図-2.1.5.2 は汀線より岸側勾配変化点から汀線までの海浜断面を示しており、勾配は -5.4°であり、海中の海浜勾配に比較し急勾配であることがわかる。図-2.1.5.3 は汀線から沿岸砂州トラフ方向を示しており、汀線から約 30 m 付近までは、海浜断面勾配はほとんど変化せず緩やかであり、勾配は-2.6°である。図-2.1.5.4 は砂州トラフから砂州峰までを示し、勾配は 4.8°であり、急勾配の地形が形成されていることがわかる。図-2.1.5.5 は砂州峰から測定終点までを示しており、勾配は-2.2°である。すなわち、砂州の形状は岸沖方向に非対称であり、背面は前面より急勾配となっている。図-2.1.5.3 と図-2.1.5.5 の勾配 θ_2 と θ_4 がほぼ同じ値となった。

(6) 海浜断面形の沿岸方向比較（実施日：2012年7月29日・30日）

図-2.1.6.1 は2012年7月29日に測量した前述の図-2.1.5.1 と、7月30日に測定した海浜断面測量結果を比較したものである。図中の原点は、汀線より約 3.7m 陸側の海浜勾配変化点である。7月30日の海浜断面測量位置は7月29日に測定した位置から東に 42.5 m 移動した位置である。7月30日は波が高く、測量を中断したが、データを取得できた区間を比較すると断面形状はほぼ一致しており、測量した水深 1.5 m までは海浜断面形は沿岸方向で等しいと推測される。

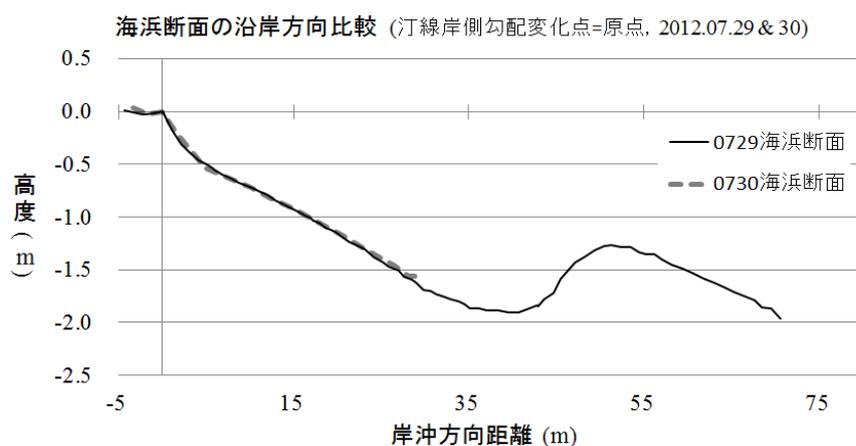


図-2.1.6.1 海浜断面形の沿岸方向比較

(7) 海底地形の深浅測量（実施日：2012年7月30日）

波浪や沿岸砂州の移動等の海浜変形特性をより一層把握するためには、前述までの水深よりさらに深い浅海域の海底断面形状が重要な要素となる。そこで漁船を用いて観測対象域において深浅測量を実施した。測量位置は図-2.1.7.1 に示す珠洲ビーチホテル前面の4測線である。以下、図-2.1.7.1 中の右端の測線から左側に向かって順に測線 No.1，測線 No.2，測線 No.3，測線 No.4 とする。



図-2.1.7.1 深浅測量の4測線位置（Google マップに加筆）

(7-1) 深浅測量の手順

漁船が海底に乗り上げない限界近くの汀線付近から沖向きに約 5~10 m 間隔毎に、釣り竿に取り付けたリールを用いて 0.1 m 単位で水深を計測した。リールには伸縮しない素材

の釣糸を使用し，その先端には海流の影響が少ない細長い形の 150 g のレッドを取り付けた．計測位置はハンディ型 GPS による位置情報を取得・記録した．この時，漁船搭載の魚群探知機による水深と GPS 位置情報も取得・記録した．



図-2.1.7.2 釣り竿，リール，レッド



図-2.1.7.3 使用した漁船

(7-2) 深浅測量結果

(7-2-1) 図-2.1.7.4 と表-2.1.7.1 は測線 No.1 において，釣糸による計測水深と漁船搭載魚群探知機による計測水深を比較したものである．図および表より，水深が 4 m 付近までは両計測値の差は 0.35 m となり一定であった．同様に図-2.1.7.5 と表-2.1.7.2 は測線 No.2 における比較である．測線 No.2 の場合は水深が 2 m 未満までは両計測値の差は 0.35 m 程度であった．この一定の差は，釣糸による計測水深は水面からの計測値であるが，魚群探知機による計測水深は魚群探知機が取り付けられている船底から海底までの距離であることによる．しかし水深が深くなるにつれて両計測値の誤差が大きくなっていった．これは水深が深くなると釣糸にたわみが発生し，またレッドが海浜流の影響を受け下手方向に流されるためであると推測される．そこで，今回は漁船搭載の魚群探知機による水深を用いる．

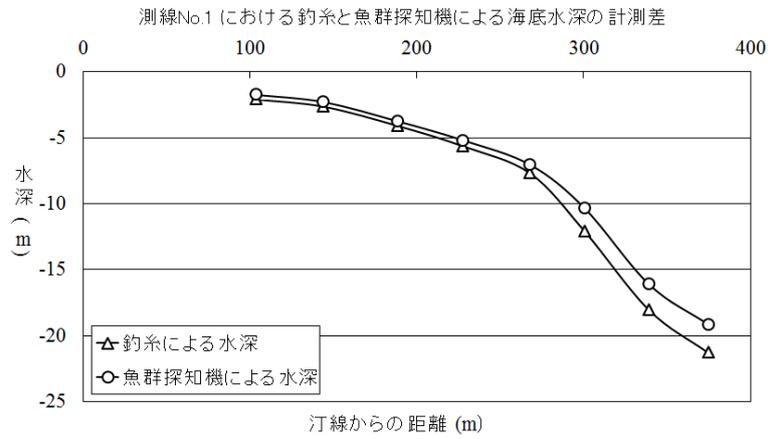


図-2.1.7.4 測線 No.1 における釣糸と魚群探知機による計測海底水深

表-2.1.7.1 測線 No.1 における釣糸と魚群探知機による計測海底水深の差

測線No.1				
No.	岸沖距離	釣糸	魚群探知機	差
1	103.91	-2.10	-1.75	-0.35
2	144.14	-2.65	-2.30	-0.35
3	188.54	-4.10	-3.75	-0.35
4	227.92	-5.65	-5.20	-0.45
5	268.01	-7.70	-7.05	-0.65
6	300.72	-12.10	-10.35	-1.75
7	339.20	-18.05	-16.10	-1.95
8	374.86	-21.30	-19.15	-2.15

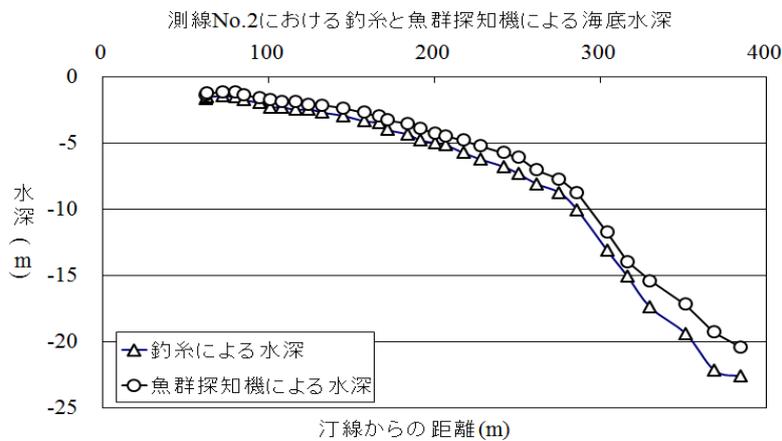


図-2.1.7.5 測線 No.2 における釣糸と魚群探知機による計測海底水深

表-2.1.7.2 測線 No.2 における釣糸と魚群探知機による計測海底水深の差

測線No.2					測線No.2				
No.	岸沖距離	釣糸	魚群探知機	差	No.	岸沖距離	釣糸	魚群探知機	差
1	62.29	-1.65	-1.40	-0.25	17	191.31	-4.80	-3.95	-0.85
2	62.94	-1.55	-1.25	-0.30	18	200.61	-5.00	-4.25	-0.75
3	72.44	-1.45	-1.15	-0.30	19	206.70	-5.15	-4.50	-0.65
4	80.39	-1.55	-1.20	-0.35	20	217.47	-5.75	-4.80	-0.95
5	85.33	-1.75	-1.40	-0.35	21	228.12	-6.25	-5.25	-1.00
6	94.96	-2.00	-1.60	-0.40	22	241.78	-6.80	-5.75	-1.05
7	101.37	-2.30	-1.75	-0.55	23	250.88	-7.35	-6.10	-1.25
8	108.24	-2.30	-1.90	-0.40	24	261.66	-8.10	-7.05	-1.05
9	116.33	-2.50	-1.90	-0.60	25	275.25	-8.75	-7.75	-1.00
10	124.22	-2.45	-2.10	-0.35	26	285.90	-10.05	-8.80	-1.25
11	132.43	-2.70	-2.15	-0.55	27	304.20	-13.15	-11.75	-1.40
12	144.94	-2.95	-2.40	-0.55	28	316.16	-15.05	-13.95	-1.10
13	157.51	-3.35	-2.70	-0.65	29	329.88	-17.40	-15.40	-2.00
14	166.88	-3.50	-3.00	-0.50	30	351.43	-19.40	-17.20	-2.20
15	171.56	-4.00	-3.30	-0.70	31	368.56	-22.15	-19.30	-2.85
16	183.74	-4.35	-3.55	-0.80	32	384.40	-22.60	-20.40	-2.20

(7-2-2) 深浅測量実施日の前日に測量した汀線の回帰直線を横軸として、深浅測量を実施した4測線位置を図-2.1.7.6に示す。また、図-2.1.7.7は深浅測量4測線による海底断面図である。図-2.1.7.7より、4測線による海底断面形はほぼ一致していることが分かる。そこで測線距離がほぼ等しい測線 No.2, No.3, および No.4 の線形補間による平均海底断面形を図-2.1.7.8に示す。さらに、図-2.1.7.8により得られた海底断面を3区間に分け、回帰直線(図-2.1.7.9)による海底断面勾配を求めた結果を表-2.1.7.3に示す。海底断面勾配は、沖に向かうに従って、急勾配に変化していくことが分かる。

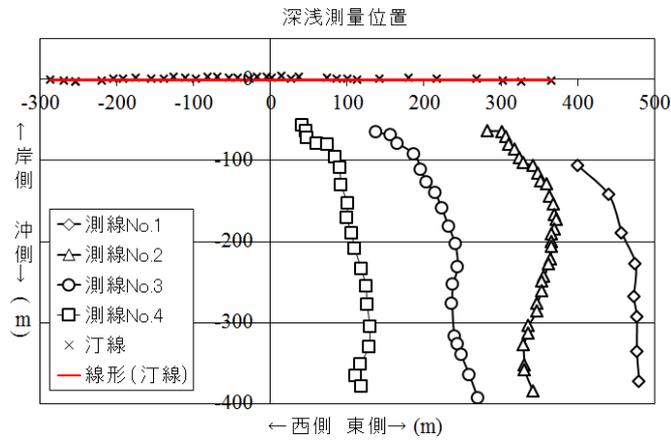


図-2.1.7.6 深浅測量測線位置図

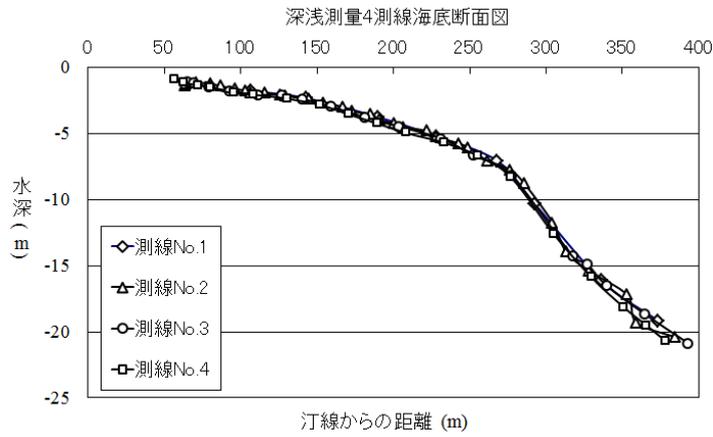


図-2.1.7.7 深浅測量4測線による海底断面図

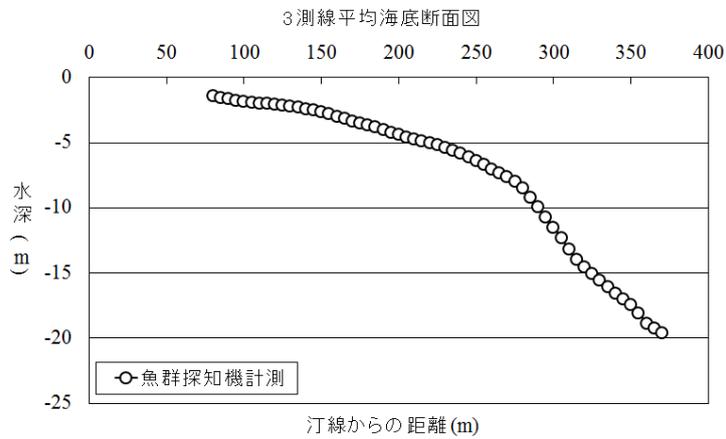


図-2.1.7.8 3測線平均海底断面図

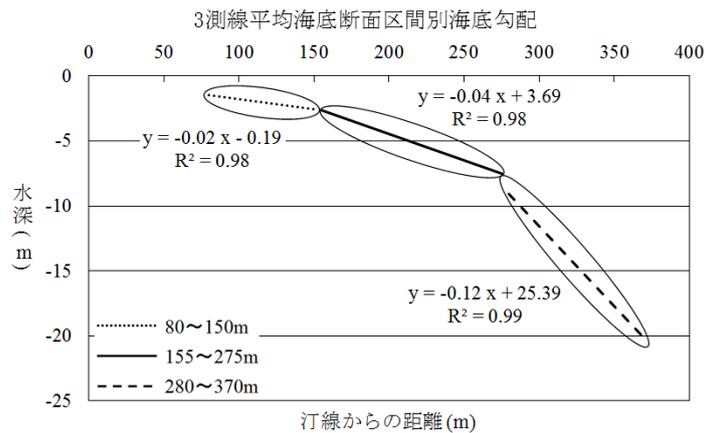


図-2.1.7.9 海底断面図（3 区間海底断面図）

表-2.1.7.3 3 区間海底断面勾配

汀線からの距離(m)	80~150	155~275	280~370
海底勾配	1.1	2.3	6.8
	1/50	1/25	1/8

ここで、図-2.1.4.4 の測点 B と測点 C における海浜断面図、および図-2.1.7.8 の海底断面図を合わせた海岸断面図を図-2.1.7.10 に示す。図中の原点は汀線位置である。

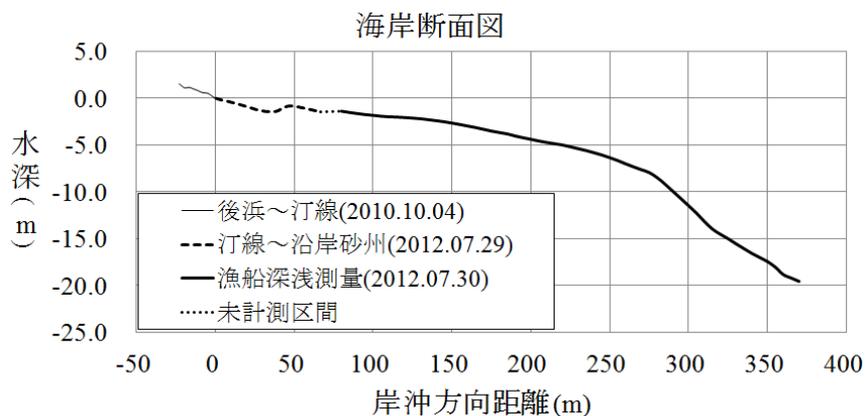


図-2.1.7.10 海岸断面図

(7-2-3) 図-2.1.7.11 は周辺海底地形図である。鉢ヶ崎海岸の沖合海底は緩勾配であるが、富山湾に向かうにしたがって急激に急勾配になることが読み取れる。

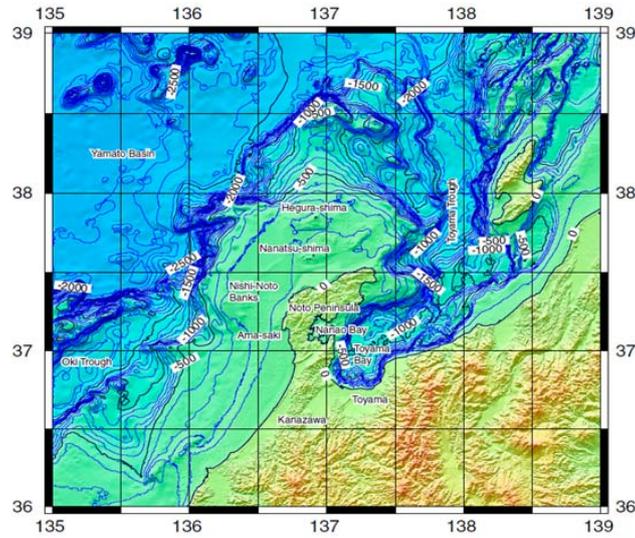


図-2.1.7.11 周辺海底地形図（産業技術総合研究所）

(8) 海象条件の概要

(8-1) 潮位差

図-2.1.8.1 は、鉢ヶ崎海岸の参考潮位としている長橋を含む、全国 5 地点での 1 日における最大潮位差の月平均比較（調査期間は 2011 年 4 月～2012 年 3 月）である。長橋は 1 年を通じて大きな変化はなく、年平均は 24.5 cm である。鉢ヶ崎海岸では、春から秋の波は穏やかであり、冬季は、南東方向から高い波浪が接近する。しかし、潮位差は小さく、鉢ヶ崎海岸における漂砂の移動は波の動きに支配されていると推測される。

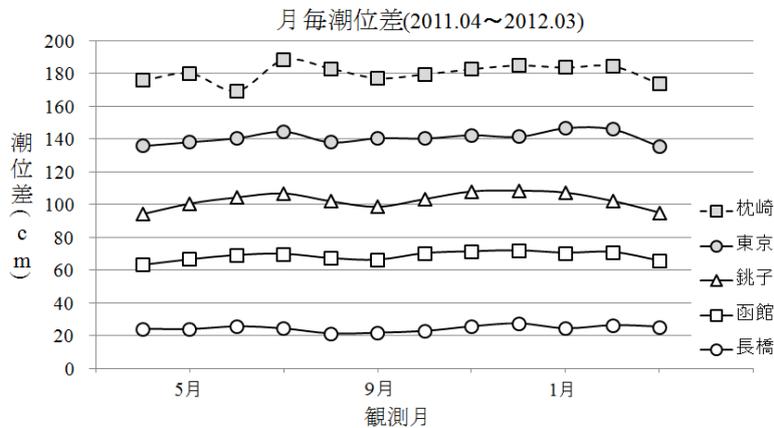


図-2.1.8.1 日潮位差月平均の比較（気象庁）

(8-2) 周辺海流

図-2.1.8.2 は海上保安庁による海流図の 1 例である。海流は年間を通じて能登半島の南西方向から北東方向に進み、能登半島先端部で内浦側に向かう。また、半島地形の影響をから鉢ヶ崎海岸での波向きは主に南東方向であり、年間の沿岸方向の漂砂運輸は東から西であると考えられる。漂砂輸送は蛸島漁港東側防波堤により、調査地域の西端で遮られる。

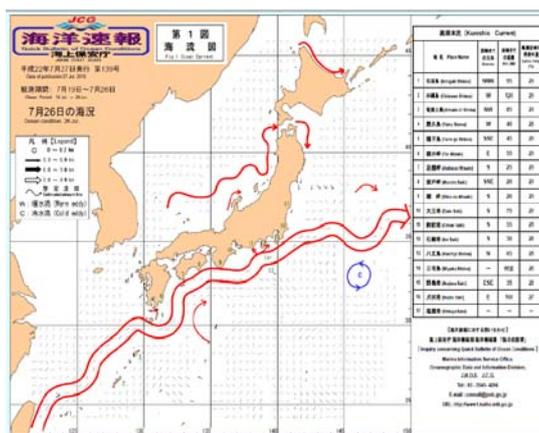


図-2.1.8.2 海流図 (海上保安庁)

(8-3) 潮位データの取得位置

鉢ヶ崎海岸において潮位データの観測は行われていない。そこで最も近い気象庁観測地点である長橋の潮汐観測資料を用いた。

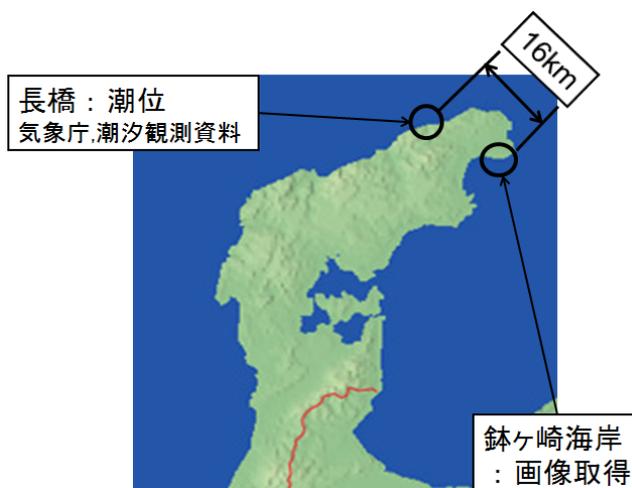


図-2.1.8.3 潮位データの取得位置 (長橋)

(8-4) 入射波データの取得位置

鉢ヶ崎海岸において波浪の観測は行われてはならず、観測地から約 38 km 離れた輪島港での国土交通省港湾局 全国港湾海洋波浪情報網ナウファスを利用した。地理的に離れた地点での波高および周期の観測値であり、参考値となる。



図-2.1.8.4 入射波データの取得位置（輪島港）

(9) 底質の粒度組成

図-2.1.9.1 は、蛸島漁港防波堤外東側から紀の川までの 7 観測地点における汀線付近と後方岸側地点、およびその中間地点で採取した海浜砂の画像解析による粒度分析結果である。それぞれの観測地点において、汀線付近、後方岸側地点、その中間地点の 3 点における平均粒径 D_{50} の平均値を観測地点の平均粒径とした。図-2.1.9.1 より D_{50} は沿岸方向ではほぼ一様であるが、紀の川河口右岸付近で著しく大きく、0.60 mm 程度となることが確認された。

図-2.1.9.2 は、図-2.1.9.1 における観測地点 No.2 における汀線付近と後方岸側地点、およびその中間地点で採取した海浜砂の篩を用いた粒度分析による粒径加積曲線である。汀線付近における海浜砂は $D_{50}=0.23$ mm の細砂であり、ふるい分け均等係数 $U_c=1.37$ である。中間地点では $D_{50}=0.24$ mm, $U_c=1.26$ であり、後方岸側地点では $D_{50}=0.25$ mm, $U_c=1.28$ となり、汀線から後方岸側に向かうにしたがって D_{50} が大きくなる結果となった。

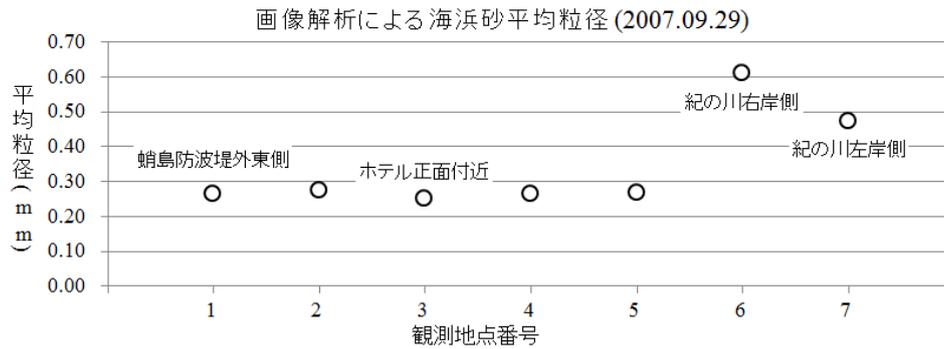


図-2.1.9.1 沿岸方向海浜砂平均粒径分布図

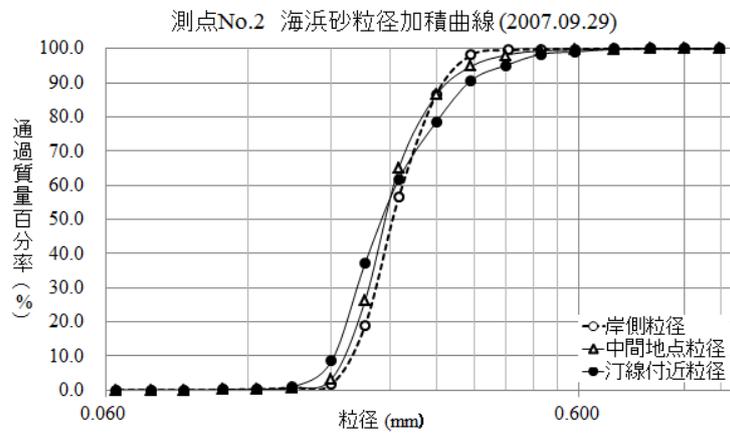


図-2.1.9.2 観測地点 No.2 海浜砂粒径加積曲線 (北緯 37° 26' 19" , 東経 137° 19' 16")

図-2.1.9.3は、鉢ヶ崎海岸から東北東方向の位置する小泊漁港内陸地部分の海浜砂の粒径加積曲線である。 $D_{50}=0.18$ mm, $U_c=1.39$ となり、図-2.1.9.2の測点No.2の汀線付近の数値と比較すると、 U_c はほぼ等しいが D_{50} は小さい結果となった。図-2.1.9.4は砂を採取した小泊漁港の画像である。漁港内は防波堤により静穏であり、土砂が広く堆積している。

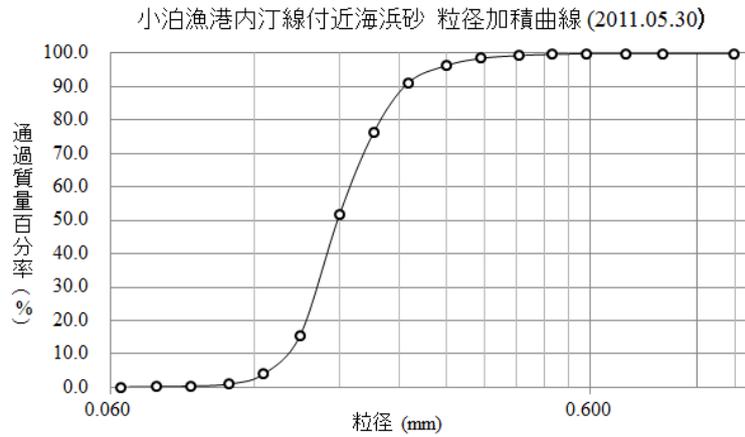


図-2.1.9.3 小泊漁港内汀線付近における海浜砂の粒径加積曲線
 (北緯 : 37° 26' 48" , 東経 : 137° 21' 18")



(ア) 小泊漁港
 (2000.09.19, 海上保安庁)

(イ) 小泊漁港内砂採取地点
 (2011.05.30)

図-2.1.9.4 小泊漁港

次に、沿岸砂州峰部（図-2.1.4.4 の測点 C の沖側）の底質粒度について検討する。調査実施日は 2012 年 7 月 29 日であり、沿岸砂州峰は汀線から 47.5 m、水深 0.84 m の位置にあり、海浜断面図は図-2.1.5.1 に示した。底質砂に対して篩による粒度分析を実施した結果、 $D_{50}=0.19$ mm、 $U_c=1.34$ となり、その粒径加積曲線を図-2.1.9.5 に示す。砂州峰の D_{50} は汀線付近に比べるとやや小さく、汀線から沖に向かって粒径が小さくなると推測される。

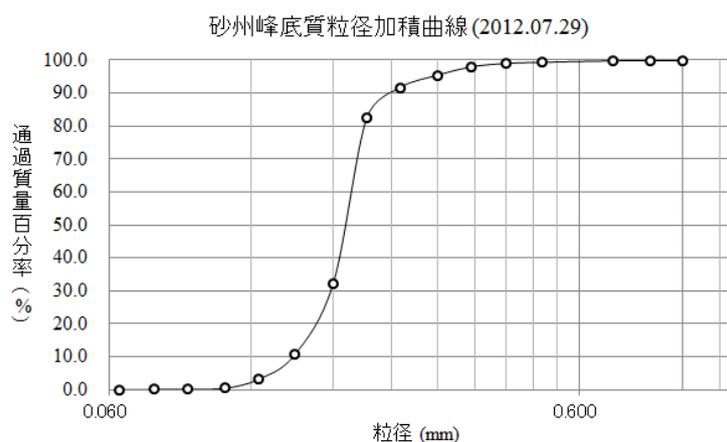


図-2.1.9.5 鉢ヶ崎海岸における砂州峰の粒径加積曲線
(図-2.1.4.4 における測点 C の沖側沿岸砂州峰)

ここで、前述した観測地点 No.2 の汀線付近、小泊漁港内、および砂州峰の底質粒度分析結果を示す。

表-2.1.9.1 底質粒度分析結果の詳細比較

	汀線付近	小泊漁港内	砂州峰
2mm篩通過 質量百分率(%)	100.00	100.00	100.00
0.355mm篩通過 百分率(%)	90.64	98.50	95.43
0.075mm篩 通過百分率(%)	0.05	0.24	0.05
60%粒径 D_{60} mm	0.25	0.19	0.20
50%粒径 D_{50} mm	0.23	0.18	0.19
30%粒径 D_{30} mm	0.20	0.16	0.18
10%粒径 D_{10} mm	0.18	0.14	0.15
均等係数 U_c	1.37	1.39	1.34
曲率係数 C_g	0.91	0.99	1.09
75%粒径 D_{75} mm	0.29	0.21	0.20
25%粒径 D_{25} mm	0.20	0.16	0.17
84%粒径 D_{84} mm	0.33	0.23	0.22
16%粒径 D_{16} mm	0.19	0.15	0.16
篩分け係数 S_o	1.22	1.16	1.08
標準偏差 σ_o	1.32	1.25	1.17

(10) 汀線付近の現在の概要と航空写真による汀線の長期的変化

鉢ヶ崎海岸汀線付近の画像を図-2.1.10.1 に示す。図(ア)は蛸島漁港から珠洲ビーチホテル方向を撮影したものであり、汀線付近にカस्प（波状汀線）の発達や浜涯の存在が確認される。図(イ)は逆方向に撮影を行ったものである。図-2.1.10.2 の(ア)から(ウ)は、蛸島漁港から珠洲ビーチホテル前面付近まで海岸線に沿ってほぼ一直線状に設置された堤防である。図-2.1.10.2 の(エ)は、その海側に埋没した消波ブロックである。図-2.1.10.3 の(ア)から(ウ)は、過去に珠洲ビーチホテルと小泊漁港間に設置された突堤群の画像であり、当時は海岸侵食がかなり懸念されていたことが推測される。図-2.1.10.4 に蛸島漁港と珠洲ビーチホテル、および突堤群の位置を示す。航空写真（2006年6月撮影）による解析では、堤防からの海浜幅は鉢ヶ崎海岸最西端で約60m、珠洲ビーチホテル前で約45m、突堤群最狭部で約6mである。



(ア) 蛸島漁港から珠洲ビーチホテル方面 (イ) 珠洲ビーチホテルから蛸島漁港方面

図-2.1.10.1 鉢ヶ崎海岸 (2009.07.16)



(ア) 海岸に沿って設置された堤防

(イ) 堤防の出入口



(ウ) 堤防の角落とし

(エ) 堤防の海側に埋まった消波ブロック

図-2.1.10.2 鉢ヶ崎海岸に設置された堤防と消波ブロック (2011.05.30)



(オ) 海岸に残る突堤群



(イ) 突堤ブロック

(ウ) 痛みが激しい突堤ブロック

図-2.1.10.3 鉢ヶ崎海岸に設置された突堤群 (2011.05.30)



図-2.1.10.4 鉢ヶ崎海岸に設置された突堤群 (Googleマップに加筆)

過去に遡って、航空写真 (図-2.1.10.5, 国土地理院) により長期汀線変動を解析すると、過去数十年の間に、汀線の位置が大きく変動している (図-2.1.10.6)。ただし、2011 年の汀線位置はハンディー型GPSによる測量結果を用いている。1975 年における海浜幅は非常に狭く、堤防との平均距離は12 mである。その後海浜幅は2006 年まで著しく増加し、堤防との平均距離は62 mに達している。



(7) 1975年



(イ) 1981年



(ウ) 1991年



(エ) 2006年

図-2.1.10.5 長期汀線変動解析に使用した航空写真（国土地理院）

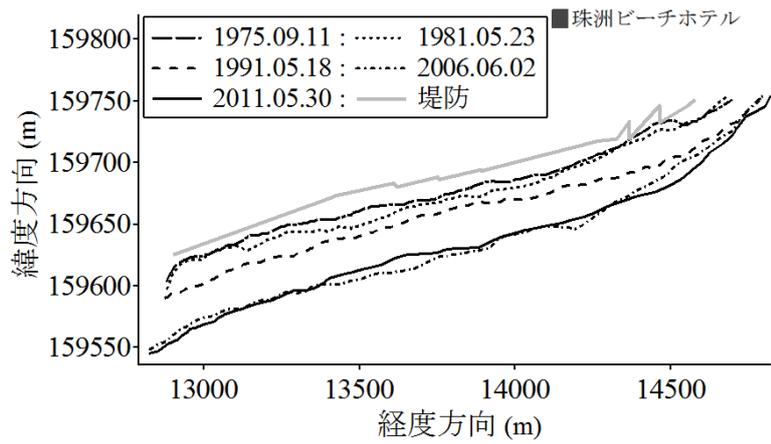


図-2.1.10.6 航空写真による汀線変化

図-2.1.10.7に、航空写真撮影期間毎の汀線前進量(m)を示す。対象とする範囲は蛸島漁

港東側防波堤付近から珠洲ビーチホテル東側間の1850 mである。年間汀線前進量は、1975~1981年は0.7 m/年、1981~1991年は1.6 m/年、1991~2006年は1.8 m/年、2006~2011年は0.0 m/年、1975~2011年までの平均汀線前進量は1.3 m/年である。1975年以降汀線は徐々に前進し、2006年以降、汀線の位置は安定期に入ったと推測される。1975年から2011年までの平均汀線前進量は47 mである。以上のような海浜幅の場所による違いおよび経年変化は、1975年から1981年の間に増設された蛸島漁港東側防波堤が、西向きに沿岸漂砂を遮断し、蛸島漁港東側で堆積を進行させたためと判断される(図-2.1.10.8)。

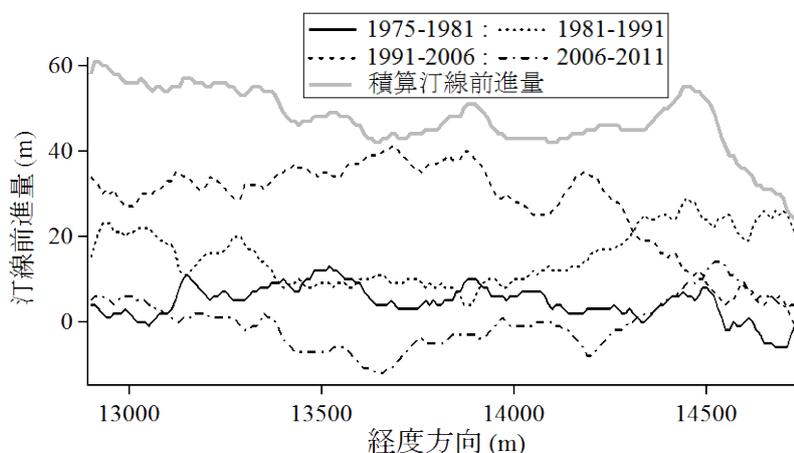


図-2.1.10.7 期間毎の汀線前進量



図-2.1.10.8 防波堤設置による汀線変動 (国土地理院に加筆)

図-2.1.10.9 は紀の川河口(撮影日:2012年7月30日)の様子である。紀の川河口には導流堤が両岸に設置されている。図(ア)は紀の川左岸より見た右岸導流堤方向の画像であり、図(イ)は右岸導流堤背後の様子であり少量の堆砂が見られる。図(ウ)は左岸導流堤

であり，図(エ)は左岸導流堤背後の様子であり大量の堆砂が観察される．珠洲市役所による紀の川浚渫土砂の処理の影響も考えられるが，図-2.1.2.2における紀の川河口周辺の堆砂状況を考慮すると，紀の川河口の導流堤により沿岸漂砂が遮断されることも一因と考えられ，紀の川河口沖では沿岸流の向きは南向きであると推測される．航空写真（2006年6月撮影）の解析により，紀の川河口における浜幅は右岸側で約28m，同左岸側で約65mであった．



(ア) 左岸より見た右岸導流堤



(イ) 右岸導流堤背後



(ウ) 左岸導流堤



(エ) 左岸導流堤背後

図-2.1.10.9 紀の川河口 (2012.07.30)

第2節 内灘海岸の概要

(1) 地理的概要

内灘海岸は，石川県のほぼ中央に位置する内灘町の西側，日本海に沿った海岸であり，

手取川からの流出土砂が日本海の海流によって運ばれ堆積した内灘砂丘を背後に擁している(図-2.2.1.1)。しかし、金沢港建設以前は比較的均衡していた沿岸漂砂の流出および流入量が、金沢港建設を境に、不均衡な状態に陥っている。内灘海岸では北東方向からの沿岸漂砂が金沢港東防砂堤によって遮断されるため砂が堆積する等、金沢港の開港後その影響を大きく受けている(図-2.2.1.2)。

近年、金沢港では大水深岸壁の整備が進み、国際物流拠点港としての発展が期待される。これに併せて建設機械工場も建設され、今後も経済的に発展する地域になると推測される。また内灘海岸は金沢市街地から最も近い海水浴場として長く金沢市民に親しまれてきており、大型ショッピングセンターが完成し充実したニュータウンが形成されつつある。内灘海岸背後には、北陸自動車道路から能登地方へ円滑なアクセスを可能とするのと里山海道が位置する。

本研究では、金沢港東防砂堤から、内灘高校前までの沿岸方向約1 kmを観測対象域とする。



図-2.2.1.1 内灘海岸 (Googleマップに加筆)

図-2.2.1.2 内灘海岸画像 (Yahoo)

(2) 海象特性

図-2.2.2.1 は内灘海岸の全景である。図中右端中央より下側に金沢港東防砂堤が見える。海岸幅は図中右から左上に向かうにしたがって狭くなっている様子が分かる。これは、岸近くを流れる沿岸流が図-2.2.2.1 において左側から右側に流れ、沿岸漂砂が金沢港東防砂堤でせき止められるためであると推測され、国土交通省によって示された金沢港周辺の広域漂砂イメージ(図-2.2.2.2)と合致する。

月別の波高変化は、観測位置が金沢市金石北2丁目地先で、観測期間は昭和45年1月から平成6年12月までのものを用いた。月平均有義波高が最も低い月は6月、7月で約0.5m、最も高い月は12月、1月で約2mであった。また、潮位に関しては、観測位置は金沢市大野町4丁目地先で、観測期間は昭和57年1月から平成14年12月までのものを用いた。潮位の表示は東京湾平均海面(T.P.)に基づいており、平均干潮位は+0.012mである。



図-2.2.2.1 内灘海岸全景（海上保安庁）

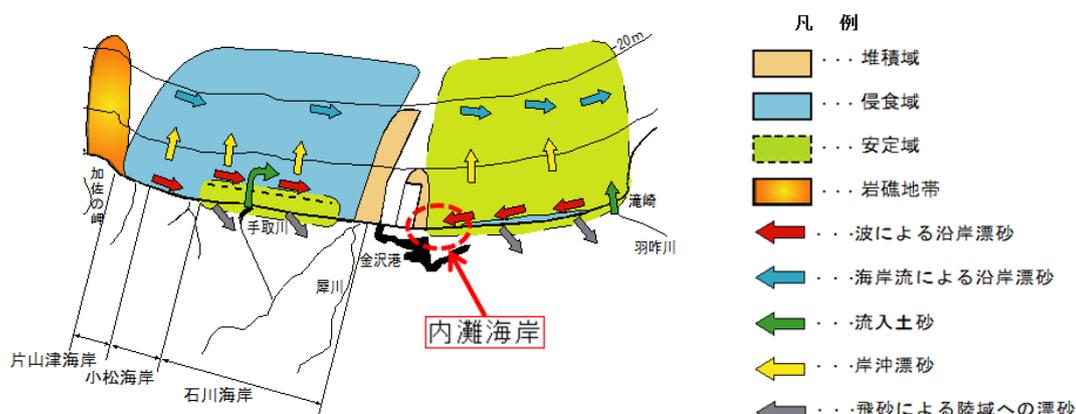


図-2.2.2.2 金沢港周辺の広域漂砂イメージ（国土交通省に加筆）

(3) 海浜砂の粒度組成

図-2.2.2.2 に示したように内灘海岸では、北東方向からの流入土砂（沿岸漂砂）が防砂堤によって遮られ、堆積している。解析領域における底質特性を表すデータとして、内灘海岸のカस्पベイとカस्पホーン付近で採取した砂を、篩を用いた粒度分析した結果を図

-2.2.3.1 および図-2.2.3.2 に示す。カस्पベイでは $D_{50}=0.22$ mm, $U_c=1.35$ の細砂である。カस्पホーンでは $D_{50}=0.30$ mm, $U_c=1.85$ の中砂であり、粒径加積曲線の勾配がカस्पベイに比べてかなり緩やかであり、 D_{10} は同程度であるが、粒径が大きいものまで含まれていることがわかる。粒度分析結果の詳細な比較表を表-2.2.3.1 に示す。

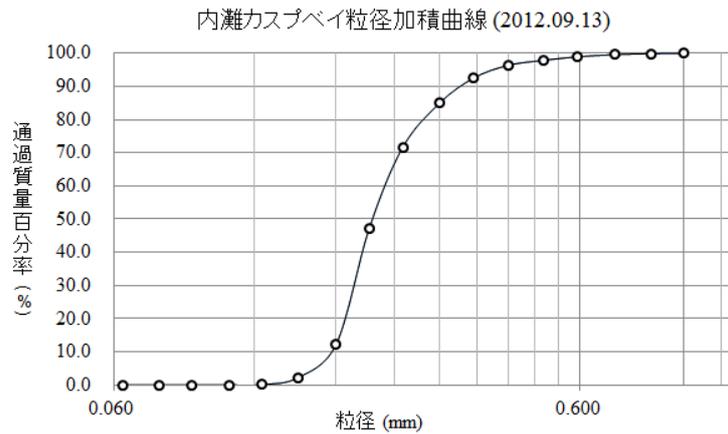


図-2.2.3.1 内灘海岸カस्पベイの粒径加積曲線

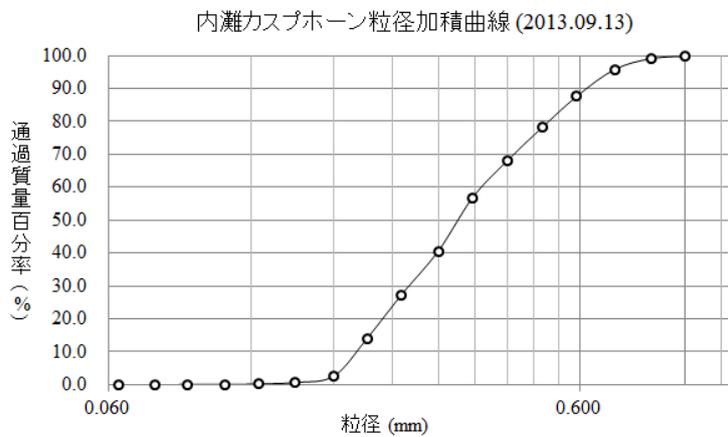


図-2.2.3.2 内灘海岸カस्पホーンの粒径加積曲線

表-2.2.3.1 底質粒度分析結果の詳細比較

	カस्पベイ	カस्पホーン
2mm篩通過 質量百分率(%)	100.00	100.00
0.355mm篩通過 百分率(%)	92.53	56.86
0.075mm篩 通過百分率(%)	0.01	0.02
60%粒径 D_{60} mm	0.23	0.37
50%粒径 D_{50} mm	0.22	0.30
30%粒径 D_{30} mm	0.19	0.25
10%粒径 D_{10} mm	0.17	0.20
均等係数 U_c	1.35	1.85
曲率係数 C_g	0.92	0.84
75%粒径 D_{75} mm	0.26	0.48
25%粒径 D_{25} mm	0.18	0.24
84%粒径 D_{84} mm	0.30	0.55
16%粒径 D_{16} mm	0.18	0.22
篩分け係数 S_o	1.20	1.41
標準偏差 σ_s	1.29	1.58

(4) 汀線付近の海浜勾配

内灘海岸の汀線付近約 2.5 km の区間において、約 50 m 毎に海浜勾配を計測し沿岸方向変化の解析を行った。図-2.2.4.1 に GPS 測量による勾配測定位置軌跡（実線）を示す。

測点 No.1 は図中左下の金沢港東防砂堤付近であり、右上の河北潟放水路付近が最終測点 No.54 である。勾配の測定結果を表-2.2.4.1 に、また、勾配変化図を図-2.2.4.2 に示す。

海浜勾配の平均値(Ave) = 5.6° (1/10.0)、標準偏差(Std) = 3.1、最大値(Max) = 12.2° (1/4.6)、最小値 0.8° (1/71.6)を得た。金沢港東防砂堤から河北潟放水路に向かうに従って海浜勾配は大きくなっていく傾向がある。

また、前浜は平坦な場所と急勾配の場所が混在しており、浜崖の形成も確認された(図-2.2.4.3)。



図-2.2.4.1 汀線付近海浜勾配測定位置の軌跡（国土地理院に加筆）

表-2.2.4.1 汀線付近海浜勾配

No.	勾配(°)	No.	勾配(°)	No.	勾配(°)	No.	勾配(°)
1	2.0	15	2.1	29	3.8	43	9.0
2	2.1	16	2.0	30	2.8	44	6.3
3	2.1	17	5.9	31	5.8	45	9.4
4	0.8	18	5.2	32	5.1	46	7.8
5	3.2	19	5.7	33	6.0	47	4.3
6	2.8	20	4.1	34	11.9	48	7.5
7	4.3	21	5.2	35	11.9	49	10.5
8	2.2	22	3.3	36	9.9	50	6.2
9	1.8	23	6.1	37	8.1	51	12.2
10	3.2	24	4.2	38	8.1	52	10.0
11	3.0	25	5.3	39	7.5	53	10.3
12	2.2	26	6.2	40	3.0	54	9.4
13	2.1	27	4.0	41	8.3		
14	2.8	28	3.6	42	8.2		
Ave.	5.6	STDEV	3.1	Max	12.2	Min	0.8

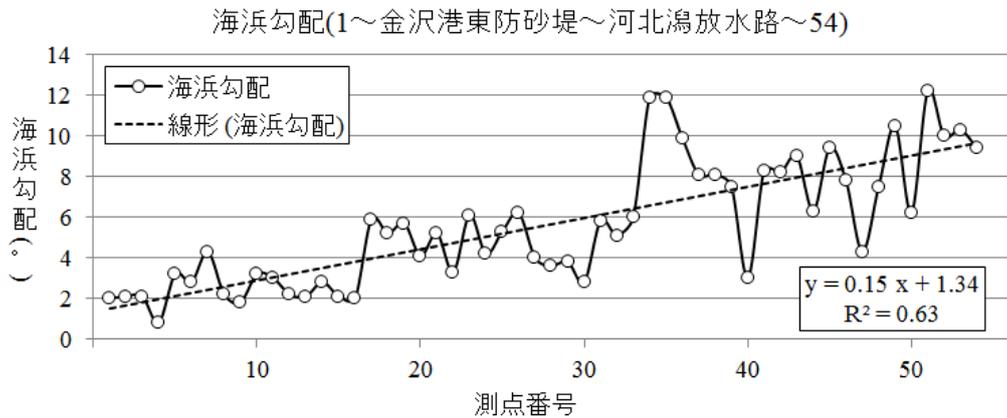


図-2.2.4.2 汀線付近海浜勾配変化図



(7) 平坦な汀線



(9) 浜崖のある汀線

図-2.2.4.3 汀線付近の様子

(5) 汀線位置の中期的変化

金沢港東防砂堤の内灘海岸側での汀線位置変化を図-2.2.5.1 に示す。縦軸に汀線位置，横軸に観測年を取り，汀線位置の岸沖変動を表示している。1998年から1999年にかけては安定，1999年から2001年にかけては前進，2001年から2002年にかけては後退し，それ以降2006年頃まで，1年周期で20~30 mオーダーの前進，後退を繰り返している。ただし，1999年から2010年を通しての変化としては顕著な前進傾向にある。特に2006年から2007年の汀線前進が顕著であり，これは2005年から2006年の土量変化が著しく大きいこととも関連している。なお，汀線位置の算出は東京湾平均海面(T.P.=0 m)前後での地盤高測定地点と岸沖方向距離との線形補間による。

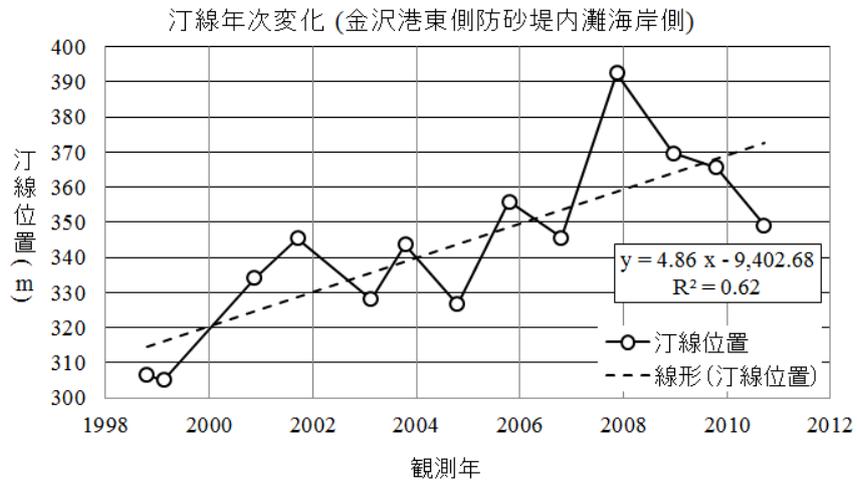


図-2.2.5.1 内灘海岸中期汀線変化

(6) 汀線形状の短期的変化

ハンディー型 GPS を用いて、7 月から 11 月までの 4 ヶ月間、計 13 回の汀線測量を実施した。測量範囲は、金沢港東防砂堤から石川県立内灘高等学校前までの内灘海岸沿岸方向約 1 km である。図-2.2.6.1 中の点線楕円で囲まれた部分が金沢港東防砂堤、実線四角で囲まれた部分が内灘高校、実線が測量により得られた汀線例である。表-2.2.6.1 に測量実施日時と潮位データを示す。また、東京湾平均海面(T.P.=0 m)を基準とし、気象庁から得た潮位データをもとに潮位補正をかけた汀線位置を図-2.2.6.2 に示す。

汀線位置は観測期間中比較的安定しているように見えるが、場所毎に見ると、沿岸方向 180 m, 400 m, 900 m 付近では汀線が陸方向に顕著に後退する様子が見られ、汀線の変動が激しいことが分かる。この汀線後退量は 180 m 付近は 47 m, 400 m 付近で 45 m, 900 m 付近で 36 m である。また、沿岸方向 220 m, 650 m 付近ではほかの場所に比べると比較的小さな変動を示しており、変動量は 220 m 付近で 17 m, 650 m 付近で 20 m である。



図-2.2.6.1 ハンディー型 GPS 測量による汀線測量（国土地理院に加筆）

表-2.2.6.1 観測日時と潮位

日時	潮位(m)	日時	潮位(m)
07/11 18:00-19:00	0.31(予測)	10/12 18:00-19:00	0.54
07/19 18:00-19:00	0.28(予測)	10/27 09:00-10:00	0.43
08/08 15:00-16:00	0.34(予測)	11/03 15:00-16:00	0.44
08/28 15:00-16:00	0.33(予測)	11/11 11:00-12:00	0.39
09/13 18:00-19:00	0.52	11/16 16:00-17:00	0.45
09/22 06:00-07:00	0.70	11/24 09:00-10:00	0.37
10/06 18:00-19:00	0.65		

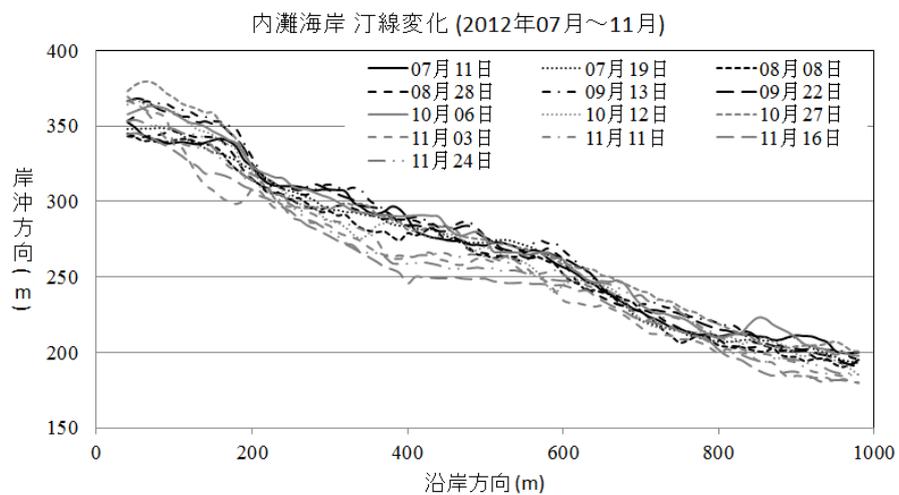


図-2.2.6.2 内灘海岸 短期汀線変化

(7) 離岸流の発生とカस्पベイおよびカस्पホーンの短期的位置変化

内灘海岸では毎夏、離岸流による海水浴客の事故が多発している。そこで平成 24 年 5 月 28 日および 29 日、海上保安庁による離岸流の実態調査が行われた。調査は「シーマーカー」と呼ばれる緑色の着色料を海に流し、その軌跡を上空よりヘリコプターで撮影するものである。図-2.2.7.1 は 5 月 28 日の調査結果であり、汀線より 4 本の離岸流が確認される。図-2.2.7.2 は 5 月 29 日の調査結果であり、汀線より 2 本の強い離岸流が確認される。

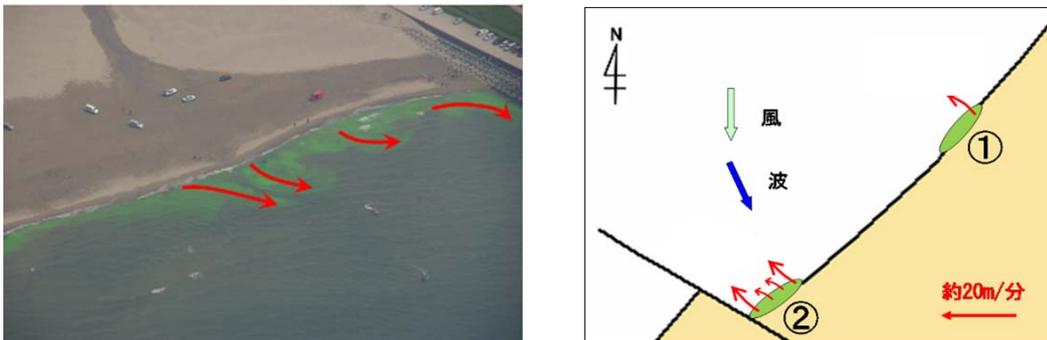


図-2.2.7.1 離岸流調査 1 (2012.05.28, 海上保安庁)

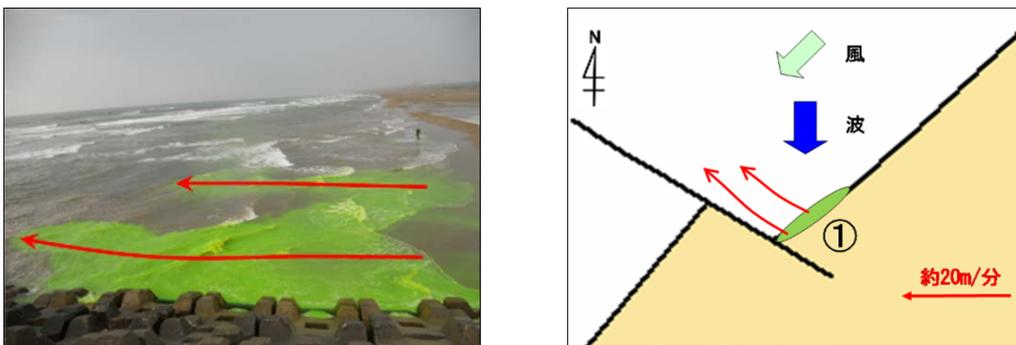


図-2.2.7.2 離岸流調査 2 (2012.05.29, 海上保安庁)

離岸流の発生位置は、リズムックな弓状のカस्प地形と相関があると推測される。そこで、2012 年 7 月と 8 月の計 5 日間、内灘海岸汀線付近を歩行しながら目視によるカस्पホーンとカस्पベイの位置観測を行った。位置情報はハンディー型 GPS によりその緯

度・経度データを保存し，世界測地系(7系)を用いて平面座標に変換する．図-2.2.7.3はカस्पホーンの確認位置図であり，図-2.2.7.4はカस्पベイの確認位置図である．図中左下が金沢港東防砂堤であり，右上が石川県立内灘高等学校である．図中の点線の楕円で囲まれた部分は，カस्पホーンあるいはカस्पベイが3回以上確認された位置である．今回は調査回数が少なく規則性等を見出すことはできないが，同年5月に実施された上記海上保安庁による調査における離岸流発生位置と考え合わせると，内灘海岸の金沢港東防砂堤付近汀線においてカस्प形状が発生し，夏季において同位置付近に離岸流が発生する可能性があると考えられる．

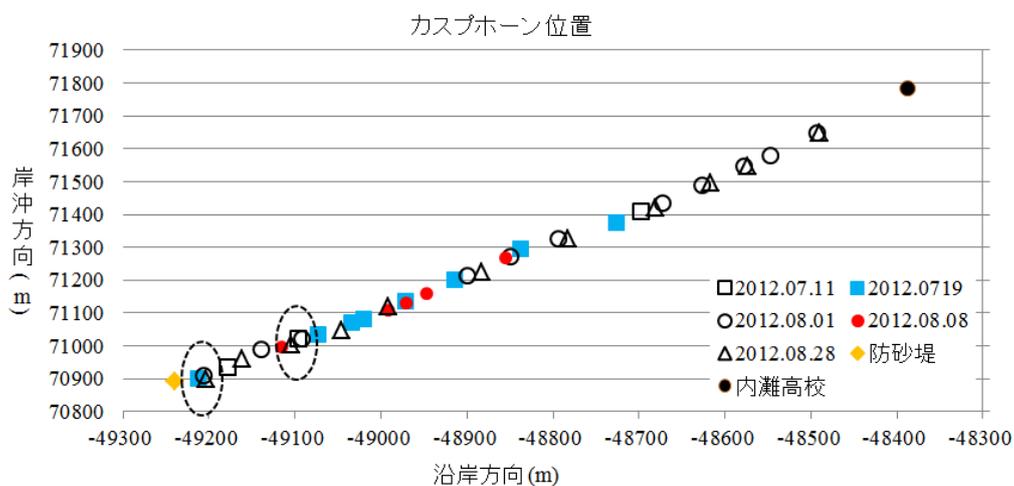


図-2.2.7.3 カस्पホーン確認位置 (2012.07.・08)

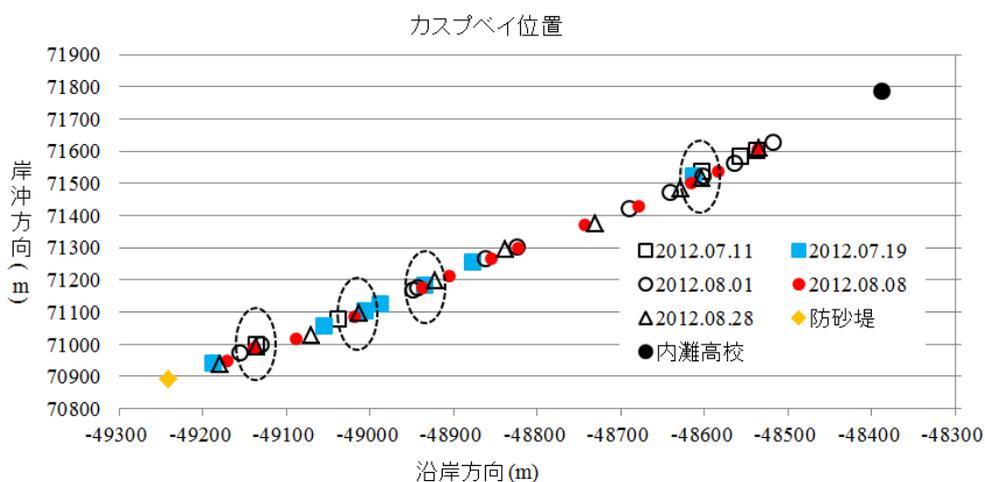


図-2.2.7.4 カस्पベイ確認位置 (2012.07.・08)

第3章 画像解析による海浜地形変動観測

第1節 ネットワークカメラを活用した観測システム

(1) 観測システムの概要

観測カメラとしてネットワークカメラ(Canon製VB-C50iR, 136×130×110 mm) 1台を観測対象域である珠洲市鉢ヶ崎海岸のほぼ中央部に位置する珠洲ビーチホテル屋上に設置した(設置作業は, 2007年9月28日および10月4日)。カメラの画像素子は1/4インチCCDであり, 画素数は640×480画素である。このカメラを用いてホテル西側の蛸島漁港から東側約2 kmの汀線付近の連続撮影を行い, 沿岸砂州および海浜地形変動に対する長期自動観測を実施した。カメラはホテル正面の汀線より水平距離約160 m, 高度約36 mの地点に設置されており, カメラと観測海浜間には高層構造物はなく画像観測に適している(図-3.1.1.1)。カメラはドームハウジング(Canon A-ODW5C5/3)に收容し, ポールに取りつけて設置した。ポールはコンクリート土台で支持され, 床面マット上にワイヤーで固定されている。現地観測毎にワイヤーの固定状況を確認するが, 風雨による緩みは発生していない(図-3.1.1.2)。

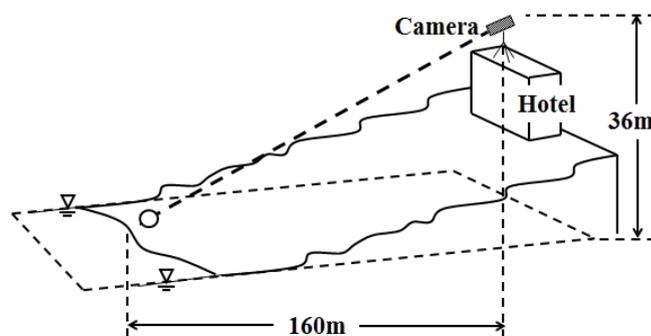


図-3.1.1.1 ネットワークカメラ設置図

観測カメラ制御用パソコンとしてノート型パーソナルコンピュータ (DELL Vostro1000), およびネットワーク利用に必要な周辺機器 (モデム, ルーター) と無停電装置をホテル屋上機械室内に設置した。PC 下部に周辺機器を設置している(図-3.1.1.3)。

この観測カメラ制御用 PC は, 金沢大学水工研究室 PC からリモートデスクトップを利用して操作可能となっており, 適宜設定の変更など実行できる。ルーターはネットワーク

セキュリティの確保ために設置されており，研究室以外の PC からの操作を禁止しており，不正なアクセスを防ぐ役割を担っている。

また，自動観測が行われていない夜間に MATLAB プログラムを用いて平均画像と分散画像の作成が行われている．撮影された画像は観測地に設置されている PC の外付けハードディスクに保存される．1 日に保存されるデータ量は約 1.3~2.2 GB である．当初はインターネットを通じて研究室 PC に取得データを転送することを予定していたが，ADSL 回線の速度が十分でなかったため，定期的（3~4 ヶ月に 1 度）観測地へ行き，このハードディスクの交換と回収を行っている．なお，この外付けハードディスクの交換・回収作業を除けば本観測システムはほぼメンテナンスフリーのシステムとなっている．観測は，2007 年 11 月より，現在まで継続して実施されている．図-3.1.1.4 に観測システムの概要を示す．



(ア) カメラ (e-TREND)



(イ)ハウジングに収められたカメラ



(ウ) カメラ設置状況（屋上から）



(エ) カメラ設置状況（観測海岸から）
（図中の○印で囲まれた部分がカメラ）



(オ) カメラから機械室内 PC への配線 (カ) ワイヤーで固定される土台部分

図-3.1.1.2 ネットワークカメラと設置状況



(ア) PC およびハードディスク

(イ) カメラ制御室内

図-3.1.1.3 PC および周辺機器の設置状況

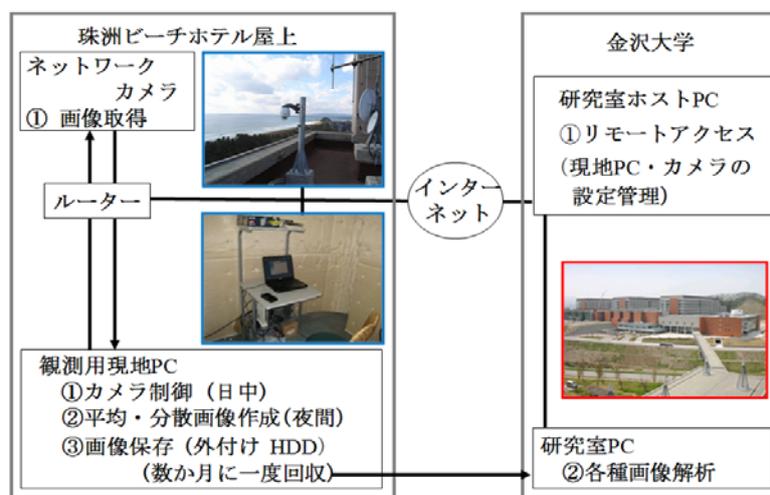


図-3.1.1.4 観測システムの概要

(2) カメラ制御および画像取得法

カメラは10分毎に撮影方向を変更し、1時間で6方向の画像を取得する。撮影域の概要を図-3.1.2.1に示す。実質的な画像取得時間は1方向につき8分間であり、毎秒1枚、合計480枚の画像が各方向で1時間ごとに取得される。撮影は日の出から日没まで行われる。カメラはVisual Basic および開発用のソフトウェア(Canon Web View Livescope SDK)を用いて自動制御される。画像はVGA規格(640×480画素)で保存される。カメラのパン機構の回転角度は340°(±170°)、最高動作速度は90°/秒である。チルト機構の回転角度は120°(+10° ~ -90°)、最高動作速度は70°/秒であり、また両回転角度はプログラミングにより0.01°単位の制御が可能である。なお、パンのプラス方向は右側、すなわち西側を、チルトのマイナス方向は下方向を表す。光学ズームは最大26倍まで可能である。

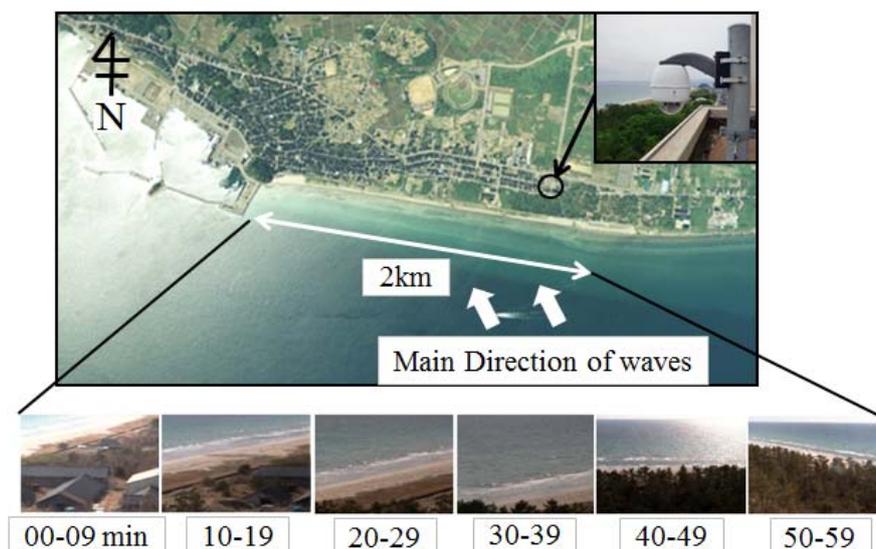


図-3.1.2.1 撮影域の概要

第2節 簡易空撮気球による観測システム

(1) 観測システムの概要

内灘海岸の短期的な地形変化、海浜流を解明するために簡易空撮気球を用いて汀線付近の地形および波浪の撮影を試みた。使用した気球はアイテック株式会社製「簡易空撮気球ひばりはみた」(図-3.2.1.1)である。気球サイズは300 cm×幅70 cm、充填気体はヘリウムガス(図-3.2.1.2)、ロッドとリールを用いて150 mまで掲揚可能である。リールは10

m 毎に色付けされており，気球係留高度が把握できる．気球にはカメラ搭載用ゴンドラが装備されており(図-3.2.1.3)，地上から撮影画像をモニタリングしながらラジコンを使用してカメラの撮影角度やシャッターを制御する(図-3.2.1.4，図-3.2.1.5)．観測時は気球掲揚用ロッドを持つ者とラジコンを操作する者の最少 2 人が必要であるが，気球はその前後をロッドで操作し掲揚する方が安定するため 3 人以上で行うことが望ましい．また，観測現地への移動時には気球から気体を抜き取り，折り畳むことにより乗用車座席シートに積むことができ，機動性に優れる．



図-3.2.1.1 簡易空撮気球「ひばりはみた」(アイテック株式会社)



図-3.2.1.2 充填用ヘリウムガス



図-3.2.1.3 気球に懸垂したカメラ



図-3.2.1.4 カメラ制御用ラジコン



図-3.2.1.5 受信機とモニタリング用 PC

以下に、簡易空撮気球掲揚の様子を示す。



図-3.2.1.6 キャンパスでの空撮試行



図 3.2.1.7 内灘海岸での観測 1



図-3.2.1.8 内灘海岸での観測 2



図-3.2.1.9 掲揚された気球

(2) 観測方法

海岸線の空撮は、図-3.2.2.1 に示すように、直前の空撮範囲における R.P.を現在の空撮範囲に含めながら進めていく。

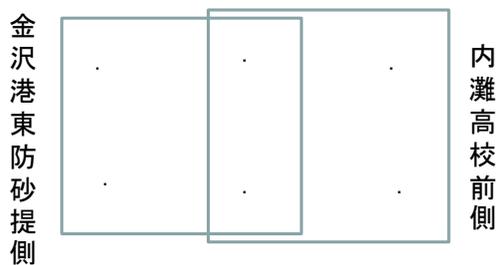


図-3.2.2.1 空撮時の R.P.の重ね合わせ

第4章 解析の手法

第1節 画像処理手順の概要

(1) 平均画像の作成

本研究では、ネットワークカメラにより毎秒1枚撮影される画像をスナップ画像、撮影方向毎8分間分、すなわち480枚を足し合わせて時間平均化した画像を平均画像と呼ぶ。スナップ画像では波の向きや砕波、および波が重なって岸に押し寄せる状況等を確認できるが、不規則な波の遡上により変化する汀線の平均位置や海面下の浅瀬、すなわち沿岸砂州の位置を特定することは難しい。しかし、多数の画像を時間平均することにより汀線の平均位置や沿岸砂州の位置の特定が可能となる。図-4.1.1.1は撮影方向00分台から30分台までの4枚の8分間平均画像をつなげたパノラマ画像である。画像右上に蛸島漁港防波堤が見える。



図-4.1.1.1 パノラマ画像 (2010.05.14)

(2) 画像取得時間と輝度値安定性の相関

図-4.1.2.1は、2010年5月14日13時の撮影方向20分台における撮影画像であり、平均化する時間を変化させて、比較を行ったものである。図(ア)から図(オ)の順に、スナップ画像、30秒間平均画像、1分間平均画像、5分間平均画像、8分間平均画像である。図を比較すると平均化する時間を長くするに従い、白い滲筋（砕波の発生しやすい浅瀬や汀線付近）が海面上により明瞭に現れてくることが分かる。



(ア) スナップ画像



(イ) 30 秒間平均画像



(ウ) 1 分間平均画像



(エ) 5 分間平均画像

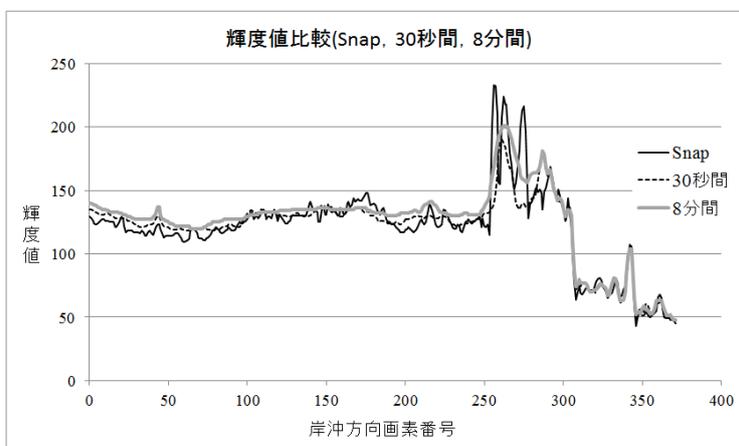


(オ) 8 分間平均画像

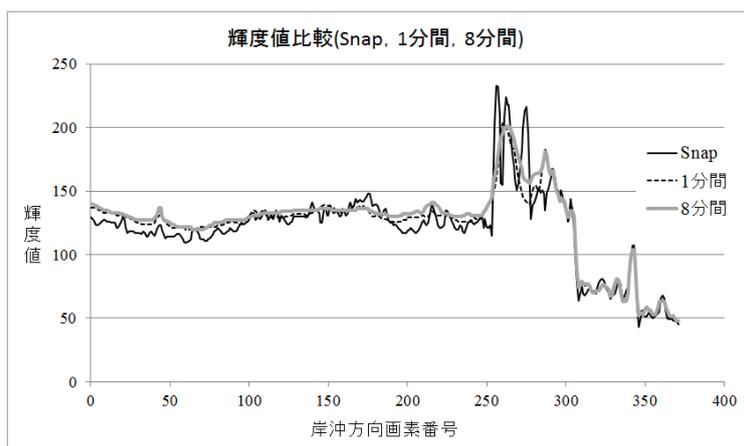
図-4.1.2.1 スナップ画像・平均画像 (2010.05.14.13:20)

図-4.1.2.2 は図-4.1.2.1 のそれぞれの画像上の同一横方向位置画素のライン上（横方向

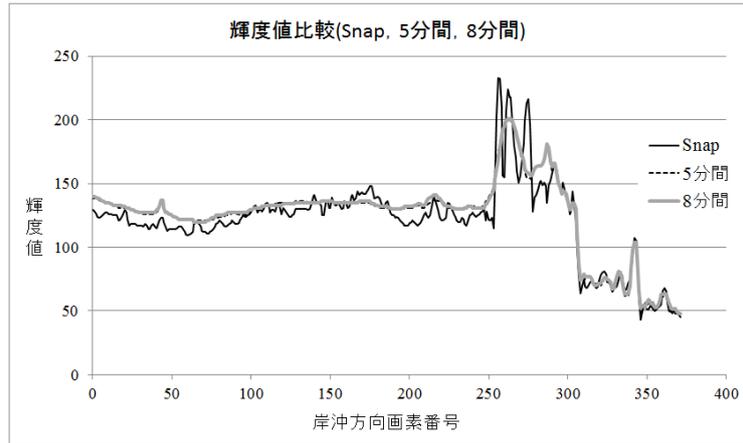
Pixel No.330, 画像横方向サイズは 640 Pixel) における輝度値変化を比較した一例である。スナップ画像では細かな変化が激しいが、時間平均画像ではそれらが平滑化されている。また、30 秒間平均画像輝度値、1 分間平均画像輝度値および 5 分間平均画像輝度値を、それぞれスナップ画像と 8 分間平均画像の輝度値と比較すると、5 分間平均画像輝度値は 8 分間平均画像輝度値とほぼ一致していることが読み取れる。1 分間平均画像輝度値は 8 分間平均画像輝度値とわずかに差異があり、1 分間平均画像による画像解析において精度が保てれば、観測画像取得・保存および解析がかなり効率化される。現在は、ARGUS システムの標準観測時間（10 分間）を参考に、8 分間の平均としているが、4~5 分程度で汀線や沿岸砂州の位置変動を十分に把握できると推測される。



(ア) 30 秒時間平均画像輝度値の比較



(イ) 1 分秒時間平均画像輝度値の比較



(ウ) 5分秒時間平均画像輝度値の比較

図-4.1.2.2 スナップ画像と時間平均画像の輝度値分布比較

第2節 オルソ画像の作成

(1) 座標変換行列の算定

一般に、カメラ画像では歪みが発生し、同じ大きさの物体があっても遠くにあるほど小さく写る。そのため、カメラ画像から直接地形変化等の定量化を行うことはできない。そこで、カメラ画像の座標変換を行い、歪みを取り除いた写真地図（オルソ画像）を作成することが必要となる。この座標変換は、写真上での画像平面座標系 $P'(x, y)$ とワールド座標系 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ とのキャリブレーションを取り、最小自乗法によって変換マトリックスを求めることにより実行される。しかし、画像平面座標系とワールド座標系を直接結びつけることは困難である。そのため中間的な座標系として、カメラ座標系 $P(X_C, Y_C, Z_C)$ を導入し、画像平面座標系とワールド座標系との関係を求める。

(1-1) 画像平面座標系 $P'(x, y)$ とカメラ座標系 $P(X_C, Y_C, Z_C)$ の対応

三次元空間から二次元の画像を作成するために、ピンホールカメラモデル(図-4.2.1.1)を用いる。ピンホールカメラモデルは、人間の目やカメラなど一般の撮影系の基本モデルであり、画像平面と焦点距離 f 、実空間座標系の関係を用いてカメラ座標系 $P(X_C, Y_C, Z_C)$ を画像平面座標系 $P'(x, y)$ に変換する。カメラ座標系とは投影中心を原点とし、カメラに固定された座標系のことである。

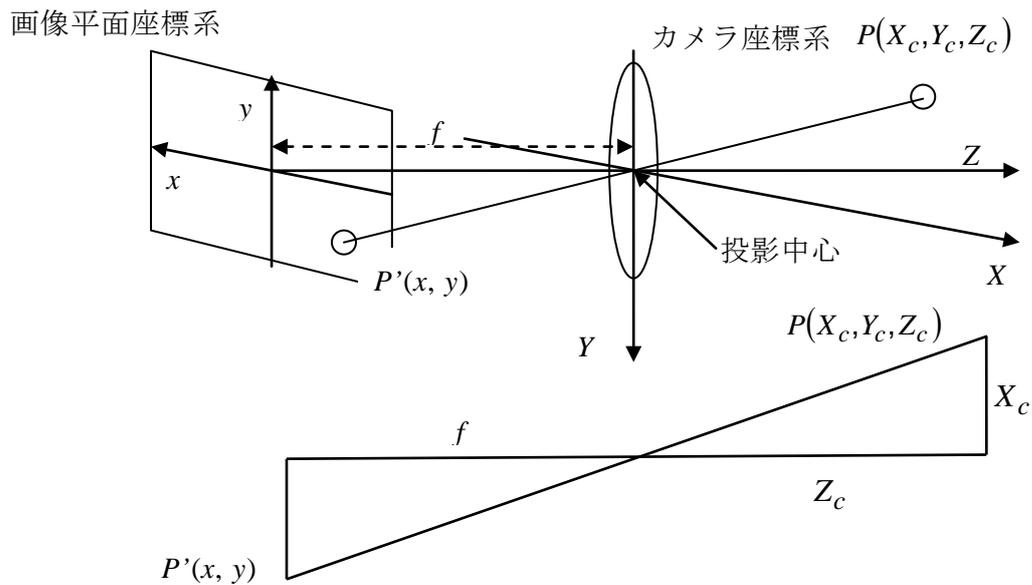


図-4.2.1.1 ピンホールカメラモデル

x, y : 画像平面座標

X_c, Y_c, Z_c : カメラ座標

f : 焦点距離

ピンホールカメラモデルを式で表すと以下のようなになる。

$$\begin{cases} x = f \frac{X_c}{Z_c} & (4.2.1.1) \\ y = f \frac{Y_c}{Z_c} & (4.2.1.2) \end{cases}$$

しかし、式(4.2.1.1)、式(4.2.1.2)は

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} \quad (4.2.1.3)$$

という型の線形変形では表すことが出来ない。すなわち、透視変換は非線形的な変換である。したがって、三次元の座標を媒介する変数を1つ加え、一次元高めた表現により線形化する。これを同次座標系という。

$$\text{カメラ座標系} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.1.4)$$

を用いて同次座標変換を行うと式(4.2.1.5)を得る.

$$\begin{bmatrix} hx \\ hy \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.1.5)$$

(1-2) カメラ座標系 $P(X_c, Y_c, Z_c)$ とワールド座標系 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ の対応

ワールド座標系は観測対象となる空間に固定された基準座標系，すなわち空間内での物体の位置を示すための座標系であり，物体の表示や移動を扱うために用いられる．カメラ座標系とワールド座標系との対応を以下に示す(図-4.2.1.2).

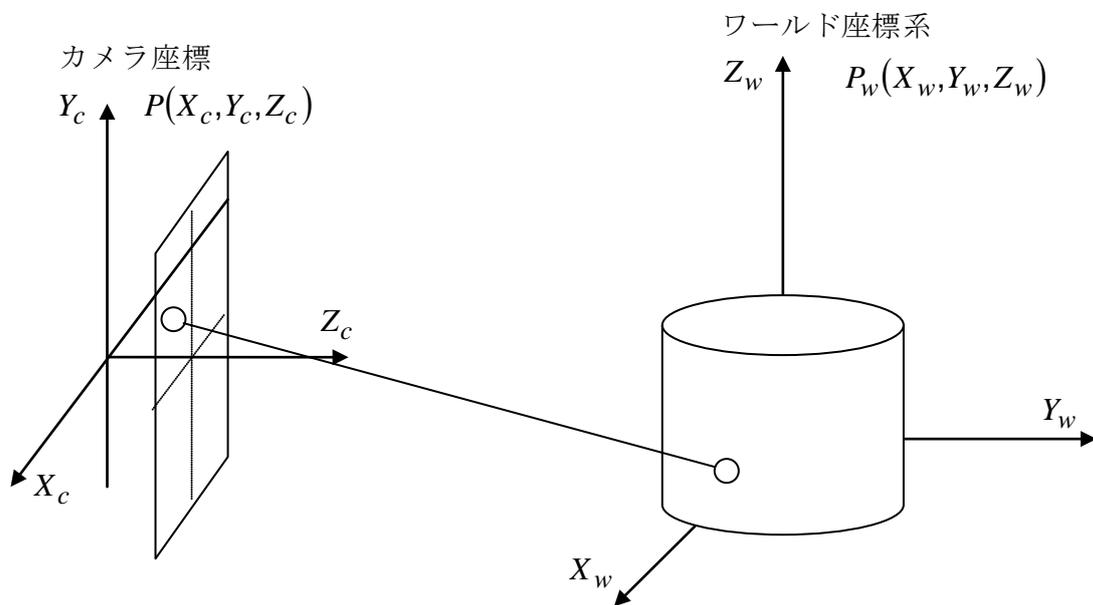


図-4.2.1.2 カメラ座標とワールド座標系

ここで

$$\text{並進ベクトル} \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (4.2.1.6)$$

および

$$\text{回転行列} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \quad (4.2.1.7)$$

を考慮する.

カメラ座標系とワールド座標系の関係は,

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} \quad (4.2.1.8)$$

と表すことができる.

これを1次増やして次のように表すことができる.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & x_t \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & y_t \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.1.9)$$

(1-3) 画像平面座標系 $P'(x, y)$ とワールド座標系 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ の対応

式(4.2.1.9)を式(4.2.1.5)に代入して画像平面座標系とワールド座標系の関係を求めると以下のようなになる.

$$\begin{bmatrix} hx \\ hy \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & x_t \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & y_t \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & z_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.1.10)$$

$$= \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & x_t \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & y_t \\ 1/f R_{31} & 1/f R_{32} & 1/f R_{33} & 1/f z_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.1.11)$$

マトリックス部分をカメラパラメータ C_{ij} に置き換えると以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} hx \\ hy \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.1.12)$$

しかし、画像位置と三次元位置が与えられても式(4.2.1.12)の解は無数に存在する。

すなわち、

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \end{bmatrix} \quad (4.2.1.13)$$

が解なら k 倍したのも解である。

そこで、 $C_{34} = 1$ となるように k を取ると式(4.2.1.12)は式(4.2.1.14)になる。

$$\begin{bmatrix} hx \\ hy \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4.2.1.14)$$

式(4.2.1.14)を展開すると式(4.2.1.15)となる。

$$\begin{cases} hx = C_{11}X_w + C_{12}Y_w + C_{13}Z_w + C_{14} \\ hy = C_{21}X_w + C_{22}Y_w + C_{23}Z_w + C_{24} \\ h = C_{31}X_w + C_{32}Y_w + C_{33}Z_w + 1 \end{cases} \quad (4.2.1.15)$$

これらより h を消去すると次式を得る.

$$\begin{cases} (C_{31}X_w + C_{32}Y_w + C_{33}Z_w + 1)x = C_{11}X_w + C_{12}Y_w + C_{13}Z_w + C_{14} \\ (C_{31}X_w + C_{32}Y_w + C_{33}Z_w + 1)y = C_{21}X_w + C_{22}Y_w + C_{23}Z_w + C_{24} \end{cases} \quad (4.2.1.16)$$

式(4.2.1.16)より, 画像平面座標系 $P'(x, y)$ は, ワールド座標系 $P_w(X_w, Y_w, Z_w)$ を用いて式(4.2.1.17)のように表される.

$$\begin{cases} x = \frac{C_{11}X_w + C_{12}Y_w + C_{13}Z_w + C_{14}}{C_{31}X_w + C_{32}Y_w + C_{33}Z_w + 1} \\ y = \frac{C_{21}X_w + C_{22}Y_w + C_{23}Z_w + C_{24}}{C_{31}X_w + C_{32}Y_w + C_{33}Z_w + 1} \end{cases} \quad (4.2.1.17)$$

さらにカメラパラメータ C_{ij} に着目し整理すると,

$$\begin{cases} C_{11}X_w + C_{12}Y_w + C_{13}Z_w + C_{14} - C_{31}X_w x - C_{32}Y_w x - C_{33}Z_w x = x \\ C_{21}X_w + C_{22}Y_w + C_{23}Z_w + C_{24} - C_{31}X_w y - C_{32}Y_w y - C_{33}Z_w y = y \end{cases} \quad (4.2.1.18)$$

マトリックスを用いれば以下のように表示される.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_w & Y_w & Z_w & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_w x & -Y_w x & -Z_w x \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_w & Y_w & Z_w & 1 & -X_w y & -Y_w y & -Z_w y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \vdots \\ C_{33} \end{bmatrix} \quad (4.2.1.19)$$

以降, X_w, Y_w, Z_w のワールド座標系を示す添え字 w を省略して X, Y, Z と表記する. これらの対応を取れる組が n 個存在するとすれば, 以下の式が得られる.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -Y_1y_1 & -Z_1x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & Z_1 & 1 & -X_1y_1 & -Y_1y_1 & -Z_1y_1 \\ \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -X_nx_n & -Y_ny_n & -Z_nx_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & Z_n & 1 & -X_ny_n & -Y_ny_n & -Z_ny_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ \vdots \\ C_{33} \end{bmatrix} \quad (4.2.1.20)$$

ここで地表面を $Z=0$ とし、キャリブレーション点をすべて $Z=0$ （地表面）上にとると、式(4.2.1.20)はさらに簡略化され式(4.2.1.21)のようになる。

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -Y_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & -X_1y_1 & -Y_1y_1 \\ \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_nx_n & -Y_ny_n \\ 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & 1 & -X_ny_n & -Y_ny_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{14} \\ C_{21} \\ C_{22} \\ C_{24} \\ C_{31} \\ C_{32} \end{bmatrix} \quad (4.2.1.21)$$

これをベクトル表示すると

$$\vec{x} = \vec{A}\vec{C} \quad (4.2.1.22)$$

ここで

$$\vec{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (4.2.1.23)$$

$$\vec{A} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_1x_1 & -Y_1y_1 \\ 0 & 0 & 0 & X_1 & Y_1 & 1 & -X_1y_1 & -Y_1x_1 \\ \vdots & \vdots \\ X_n & Y_n & 1 & 0 & 0 & 0 & -X_nx_n & -Y_ny_n \\ 0 & 0 & 0 & X_n & Y_n & 1 & -X_ny_n & -Y_nx_n \end{bmatrix} \quad (4.2.1.24)$$

$$\vec{C} = \begin{bmatrix} C_{11} \\ C_{12} \\ C_{14} \\ C_{21} \\ C_{22} \\ C_{24} \\ C_{31} \\ C_{32} \end{bmatrix} \quad (4.2.1.25)$$

である。

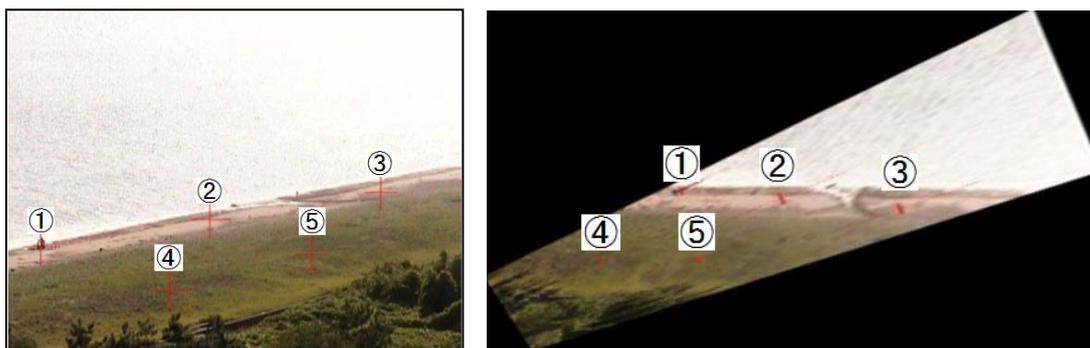
従って、カメラパラメータ C_{ij} は

$$\vec{C} = (\vec{A}^T \vec{A})^{-1} \vec{A}^T \vec{x} \quad (4.2.1.26)$$

より求めることができる。

式(4.2.1.25)中の 8 個のカメラパラメータ C_{ij} を決定するには、4 組のリファレンスポイント(R.P.)が必要である。これ以上の組数を利用する場合は、最小自乗近似により、カメラパラメータ C_{ij} が決定される。

図-4.2.1.3 はカメラ画像 (図-4.2.1.3(ア)) を座標変換し、歪みのないオルソ画像 (図-4.2.1.3(イ)) を作成した例である。図-4.2.1.3(イ)において、1 Pixel=0.5 m である。図中の番号は、それぞれ同じ R.P.であることを示す。



(ア) カメラ画像

(イ) オルソ画像

図-4.2.1.3 カメラ画像とオルソ画像（撮影方向 20 分台）

(2) みかけ上のリファレンスポイントの設定

オルソ画像作成に必要なカメラパラメータ C_{ij} を求めるため、撮影画像内の複数のリファレンスポイント(R.P.)の観測海浜上における位置をトータルステーション(T.S.)を用いた測量により求めた。また海浜上の観測R.P.の標高は0 mではないが、上述の式(4.2.1.20)から式(4.2.1.21)への展開の際、海浜上のすべての観測R.P.を標高0 mとして式展開を実行している。そこで観測R.P.を標高0 mに移動した見かけ上のR.P.を新たに設定した。

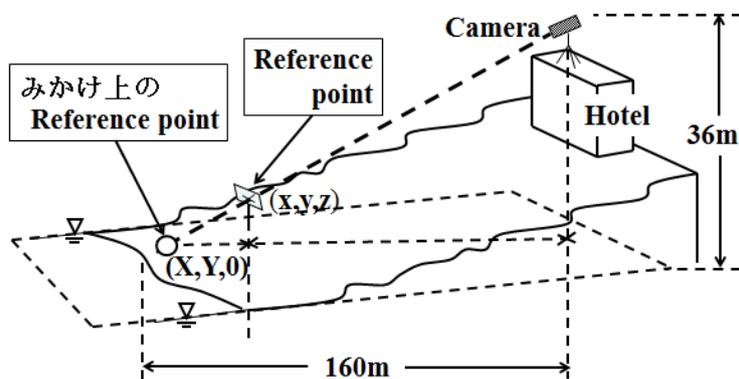


図-4.2.2.1 見かけ上のリファレンスポイント設定概略図

(3) R.P.の測量における偏心調整

T.S.によりR.P.の測量を行う際には、図-4.2.3.1および図-4.2.3.2に示すように、観測カメラとT.S.との間に水平方向および鉛直方向の位置差、およびプリズムと地表面との間に高

低差がある．この差が撮影画像からオルソ画像への座標変換においてその精度に影響するため，偏心調整が必要となる．本研究の解析手法では，海浜上の観測R.P.を標高0 mの見かけ上のR.P.へ移動後，座標変換しオルソ画像を作成するため，鉛直角の修正は特に重要となる．そこで以下の偏心計算により，水平角と鉛直角の修正角度を求める．

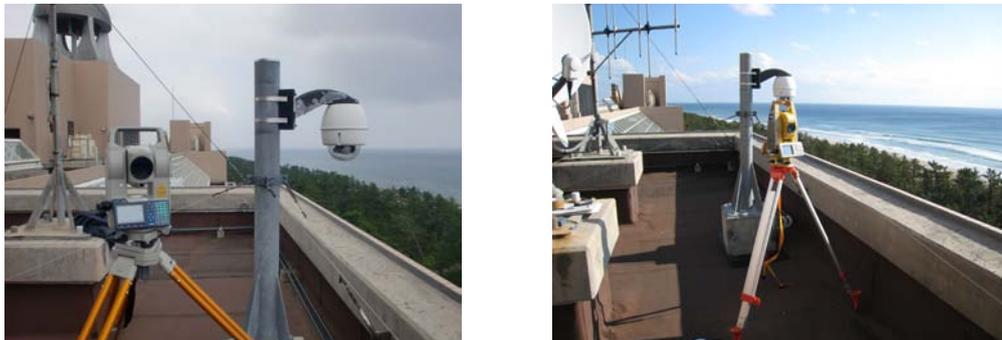


図-4.2.3.1 T.S.と観測カメラ

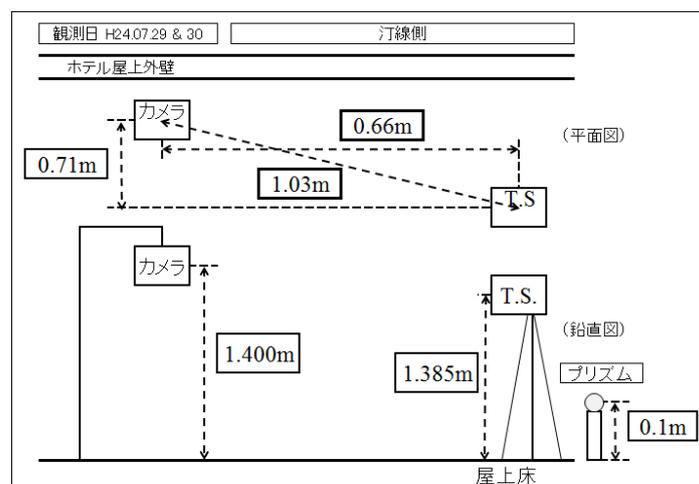


図-4.2.3.2 T.S.と観測カメラの位置関係例

(3-1) 観測カメラとT.S.設置位置の差（水平方向）に対するR.P.方位の偏心調整

図-4.2.3.3は観測カメラとT.S.およびR.P.の平面位置概略図である．T.S.からR.P.までの距離 L_1 と観測カメラからのR.P.までの距離 L には同値ではなく，また方位も異なる．そこで水平方向の位置差に対する偏心調整を行う．

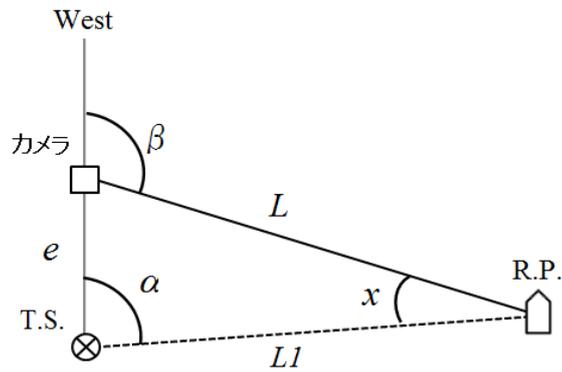


図-4.2.3.3 観測カメラ，T.S.およびR.P.の平面位置概略図

図-4.2.3.3において，正弦定理より式(4.2.3.1)が与えられる．

$$\frac{e}{\sin x} = \frac{L}{\sin \alpha} \quad (4.2.3.1)$$

式(4.2.3.1)を変形し，

$$\sin x = \frac{e}{L} \sin \alpha \quad (4.2.3.2)$$

ここで， x が小さい時，近似値として式(4.2.3.3)が成り立つ．

$$\sin x = x \quad (4.2.3.3)$$

式(4.2.3.3)を式(4.2.3.2)に代入し，

$$x = \frac{e}{L} \sin \alpha \quad (4.2.3.4)$$

x はRAD単位であり，秒単位に変換すると，

$$x = 206265'' \frac{e}{L} \sin \alpha \quad (4.2.3.5)$$

この式(4.2.3.5)を用いて、偏心調整を行う。ただし、式中の観測カメラとR.P.との距離 L は実測できないため、T.S.とR.P.との実測値 $L1$ を用いて余弦定理により求める。

(3-2) 観測カメラと T.S.設置位置の差（鉛直方向）に対する R.P.方位の偏心調整

図-4.2.3.4は観測カメラとT.S.およびプリズムの鉛直方向位置概略図である。前述の(3-1)と同様に式(4.2.3.5)を用いて鉛直方向の位置差に対する偏心調整を行う。

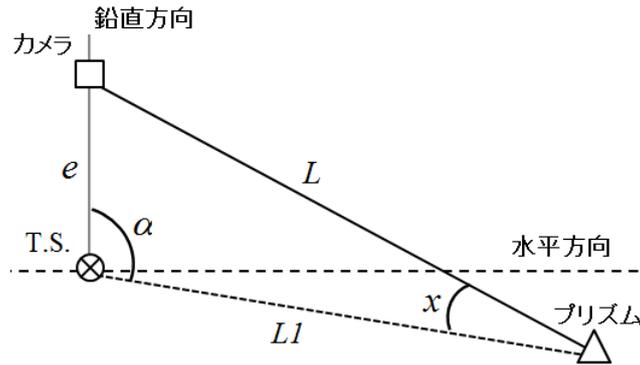


図-4.2.3.4 観測カメラ， T.S.およびプリズムの鉛直方向位置概略図

(3-3) プリズムと地表面の高低差による R.P.鉛直角の偏心調整

図-4.2.3.5はT.S.とプリズムおよび地表面の鉛直方向位置概略図である。プリズムは地表面上10 cmの位置に設置した。前述の(3-1)と同様に式(4.2.3.5)を用いてプリズムと地表面との高低差に対する偏心調整を行う。

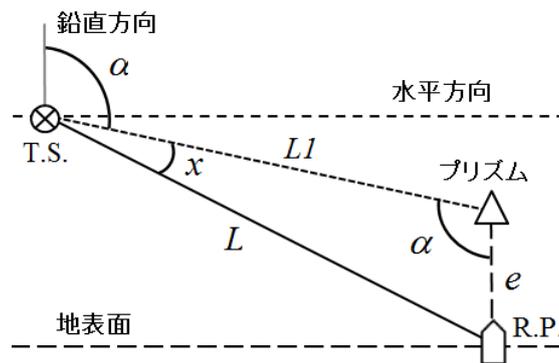


図-4.2.3.5 T.S.， プリズムおよび地表面の鉛直方向位置概略図

第5章 鉢ヶ崎海岸への適用

第1節 座標変換精度の検討

画像解析により汀線位置などを算定する際には、各種の要因による誤差が混入する。ここでは、その中でも影響が大きいと思われる、撮影画像をオルソ画像へ変換する際の座標変換誤差に着目し、00分台から40分台の各撮影範囲に設けられたR.P.における座標変換精度と観測カメラからの距離の相関を検討する。まず、各撮影範囲のR.P.の現地測量による位置とオルソ画像における位置を比較する。次に、観測カメラから撮影方向毎のR.P.の距離および観測鉛直角と座標変換精度について検討する。さらに、現地測量による汀線位置と画像解析による汀線位置を比較する。

(1) 撮影方向毎のR.P.の現地測量による位置とオルソ画像における位置の比較

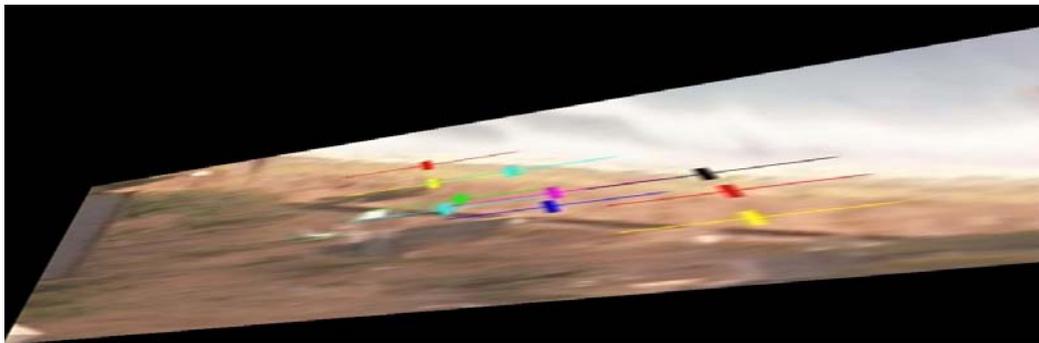
以下の図-5.1.1.1~図-5.1.1.5において、図(ア)は、鉢ヶ崎海岸における観測カメラの撮影範囲を示す。図(イ)中のマークは、撮影画像内に設定されたR.P.である。図(ウ)は、図(イ)を座標変換し作成されたオルソ画像であり、1 Pixel=0.5 m に設定されている。図(エ)中の□印は、観測現地におけるR.P.の位置であり、○印は、オルソ画像におけるR.P.の位置である。

(1-1) 00分台撮影方向

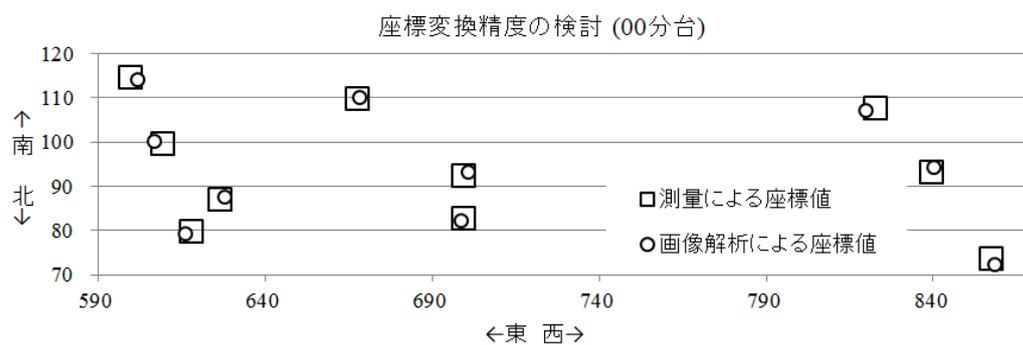


(ア) 00分台撮影範囲

(イ) 撮影画像内のR.P.



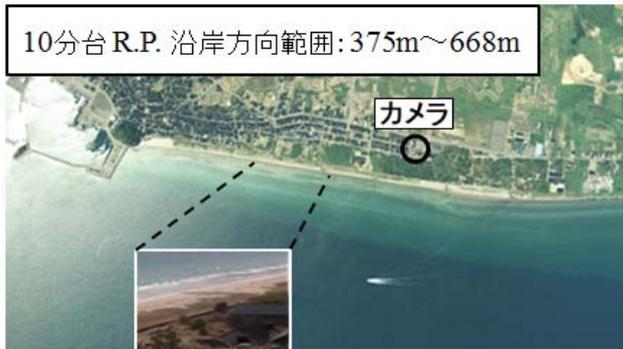
(ウ) オルソ画像内のR.P.



(エ) R.P.の測量による位置と座標変換後の位置

図-5.1.1.1 00分台撮影範囲のR.P.の座標変換位置比較

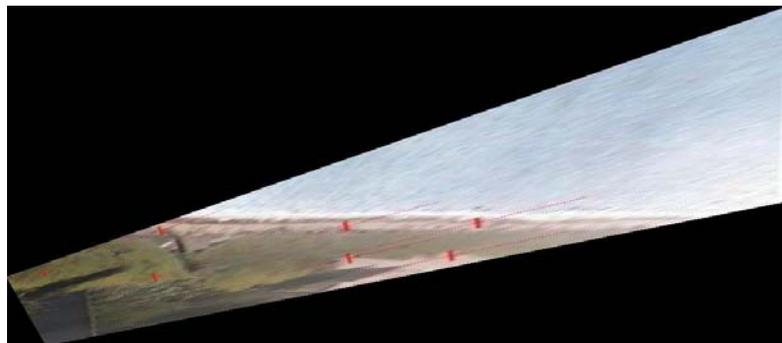
(1-2) 10分台撮影方向



(ア) 10分台撮影範囲



(イ) 撮影画像内のR.P.



(ウ) オルソ画像内のR.P.



(エ) R.P.の測量による位置と座標変換後の位置

図-5.1.1.2 10分台撮影範囲のR.P.の座標変換位置比較

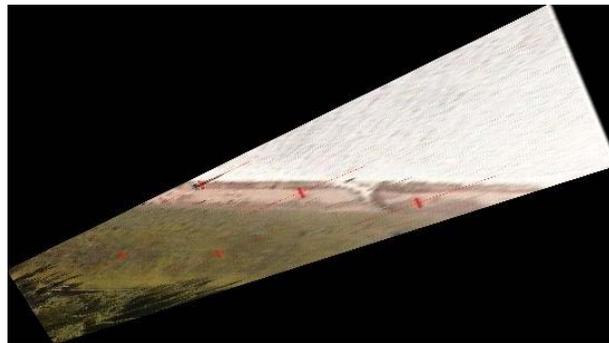
(1-3) 20分台撮影方向



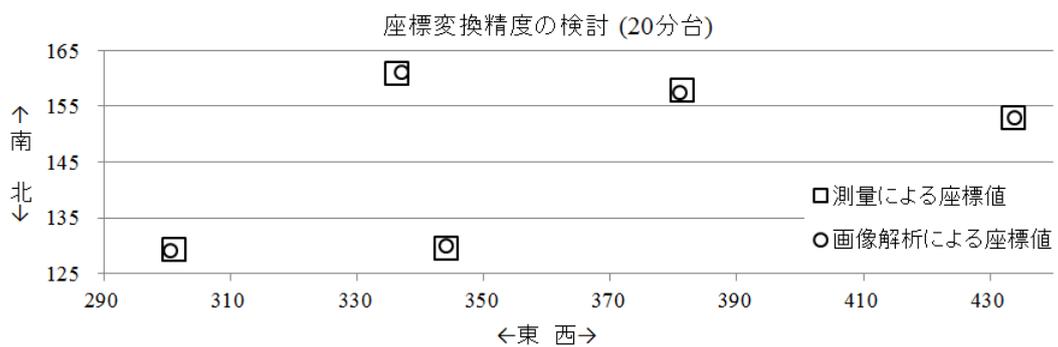
(ア) 20分台撮影範囲



(イ) 撮影画像内のR.P.



(ウ) オルソ画像内のR.P.



(エ) R.P.の測量による位置と座標変換後の位置

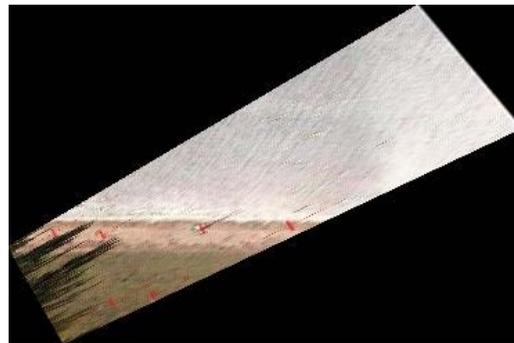
図-5.1.1.3 20分台撮影範囲のR.P.の座標変換位置比較

(1-4) 30分台撮影方向

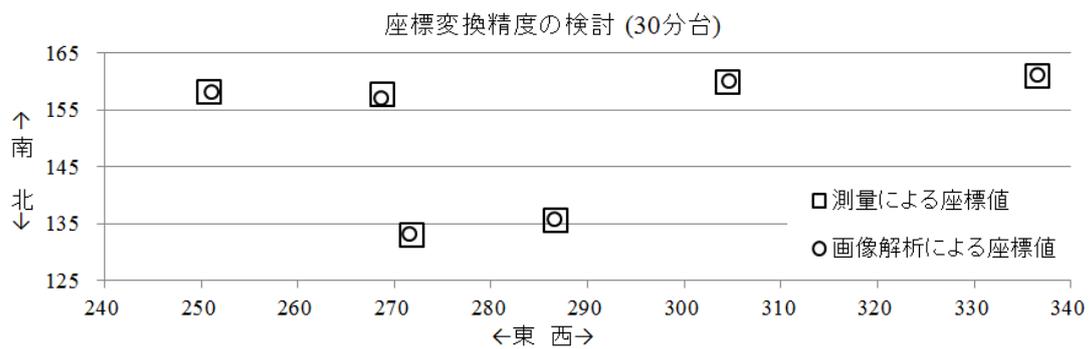


(ア) 30分台撮影範囲

(イ) 撮影画像内のR.P.



(ウ) オルソ画像内のR.P.



(エ) R.P.の測量による位置と座標変換後の位置

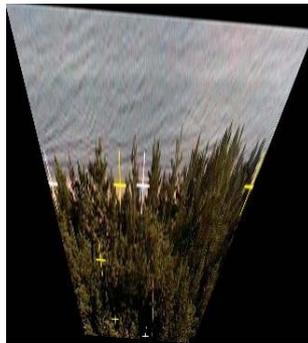
図-5.1.1.4 30分台撮影範囲のR.P.の座標変換位置比較

(1-5) 40分台撮影方向

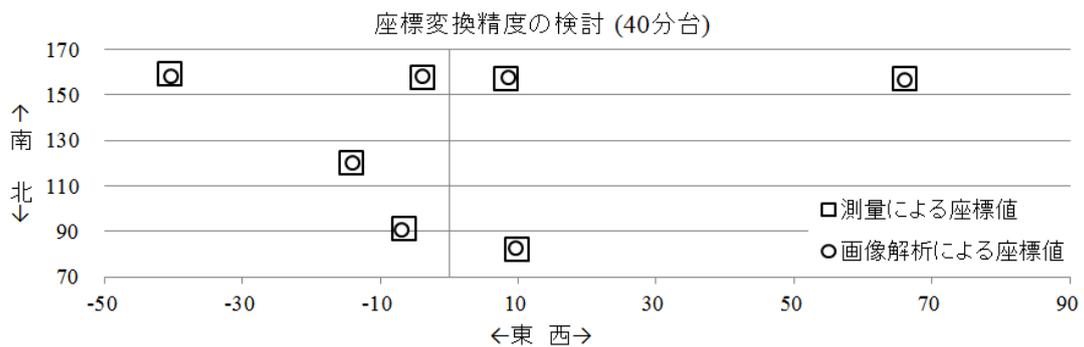


(ア) 40分台撮影範囲

(イ) 撮影画像内のR.P.



(ウ) オルソ画像内のR.P.



(エ) R.P.の測量による位置と座標変換後の位置

図-5.1.1.5 40分台撮影範囲のR.P.の座標変換位置比較

(2) R.P.の観測カメラからの距離と座標変換精度の相関

表-5.1.2.1は、00分台から40分台の各撮影範囲に設けられたR.P.の最東点および最西点の観測カメラ正面からの沿岸方向距離(m)と、R.P.の位置推定誤差を示したものである。表中のR.P.E.D.およびR.P.W.D.はそれぞれ観測カメラからR.P.の最東点および最西点までの沿岸方向距離を表す。図-5.1.2.1中の直線は、表-5.1.2.1に示したR.P.W.D.とR.P.E.D.で区分される沿岸方向観測範囲であり、マーカーは各撮影方向の座標変換時に生じるR.P.の位置推定誤差（自乗平均平方根RMS(m)）を表す。

表-5.1.2.1 撮影方向毎のR.P.位置と位置推定誤差

(単位:m)	00分台	10分台	20分台	30分台	40分台
R.P.E.D.	559.88	374.71	301.02	250.83	-40.49
R.P.W.D.	857.35	668.14	433.76	336.49	60.12
ERROR MAX	2.66	2.16	0.81	0.65	0.83
ERROR MIN	0.88	0.34	0.18	0.19	0.12
ERROR AVE	1.63	1.36	0.53	0.31	0.41
ERROR RMS	1.73	1.49	0.57	0.35	0.47

まず、観測カメラからR.P.までの距離とRMSが最大となる撮影方向00分台について考察する。10点のR.P.が設定されており、撮影カメラとの平均直線距離は710 m、RMSは1.73 mであり、その割合は0.24 %となる。次に、RMSが最小となる撮影方向30分台では、観測カメラとR.P.との平均距離は327 m、RMSは0.35 mであり、その割合は0.11 %となる。また、40分台の撮影範囲に松林が存在し、R.P.の設定に制限があったことが原因で精度が低下したと考えられる。そこで、40分台を除いた撮影範囲におけるR.P.の位置推定誤差RMSと撮影カメラとの平均直線距離の相関を図-5.1.2.2に示す。また、RMSと撮影カメラからR.P.への鉛直角との相関を図-5.1.2.3に示す。回帰直線の相関は非常によく、座標変換時に生じる誤差は、距離、あるいは鉛直角に起因すると推測される。測定に使用したトータルステーションT.S.の測距誤差 e は $\pm(2+2 \text{ ppm} \times D)$ mmであり、RMSが最大である00分台の平均距離710 mでは $e=3.4$ mmとなり、測距誤差は小さい。一方、観測カメラからR.P.までの距離が長くなる、あるいはR.P.への視準鉛直角が小さくなると、画像1画素に撮影される観測地面積が広くなり、このことが撮影画像からオルソ画像への座標変換に大きく影響すると推測される。本研究では画像1画素を0.5 mに換算しており、表-5.1.2.1

に示す誤差と比較すると、ネットワークカメラによる画像を用いたオルソ画像は十分な精度を有すると考えられる。

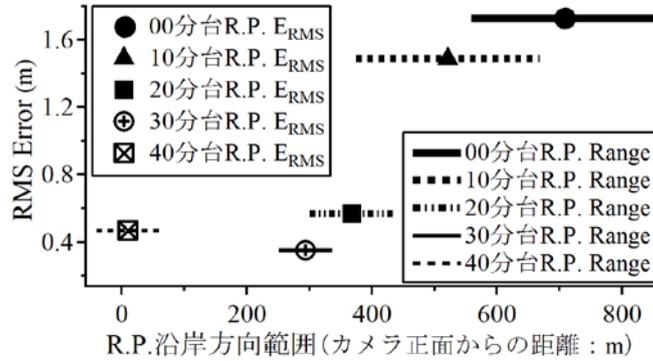


図-5.1.2.1 座標変換時の位置推定誤差RMSの評価

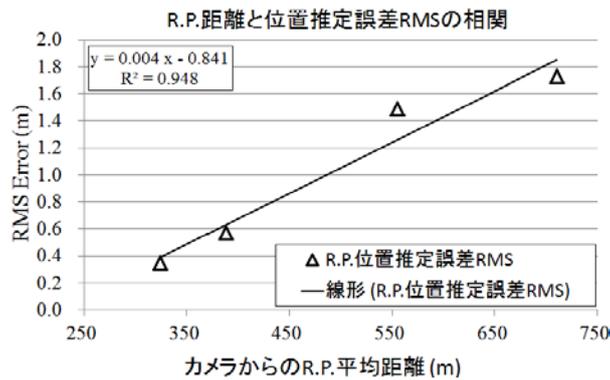


図-5.1.2.2 位置推定誤差RMSとR.P.平均距離の相関

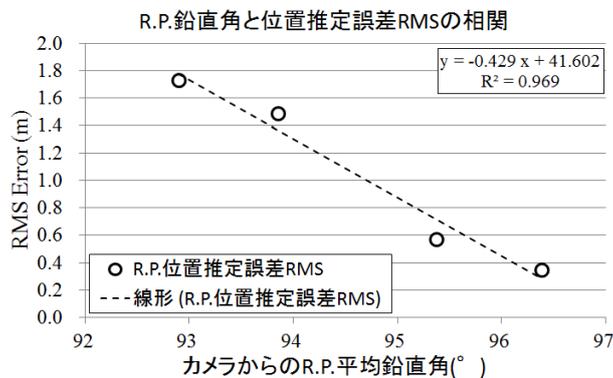


図-5.1.2.3 位置推定誤差RMSとR.P.平均鉛直角の相関

参考として、2012年7月29日にカメラからR.P.の沿岸方向距離が280 mから350 mの範囲（上述の30分台にほぼ相当する）で再測量・解析の結果、平均誤差は0.25 mであったことを追加データとして記する。

(3) 測量と画像解析の汀線位置の比較（観測日：2010年10月5日）

オルソ画像（20分台）において視認により汀線位置を判断し、デジタルソフトの援用によりその座標値を求め、トータルステーションを用いた測量による結果と比較して画像解析による汀線抽出精度を検証する(図-5.1.3.1)。図中の○印がT.S.による測量結果であり、実線が画像解析による汀線である。座標原点はカメラ位置に対応する。汀線位置岸沖方向の平均誤差は0.13 m、RMS誤差は0.56 mであり、画像解析により得られた汀線位置は十分な精度を有することが確認できた。

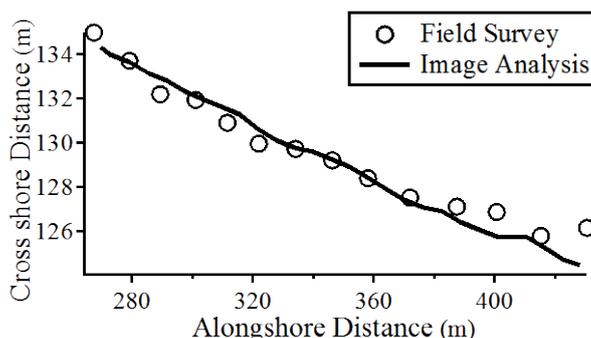


図-5.1.3.1 測量と画像解析による汀線位置の比較 (2010.10.05)

ここで現地汀線測量における所要時間での潮位変化の汀線移動への影響について補足する。汀線位置を読み取った画像は、2010年10月5日の13時、14時、15時、16時のそれぞれ20分台の4枚の8分間平均画像をさらに平均化した画像である。また、20分台撮影画像内のT.S.による汀線位置測量点は、図-2.1.4.3におけるNo.11~No.24であり、測量時間は14:47から15:04であった。この時間内での潮位変化量は-1.0 cmであり、海浜勾配=1/8.6を用いると、潮位変化量による汀線位置変化量は8.5 cmとなる。オルソ画像は1 Pixel=0.5 mに設定されていることを考慮すると、汀線測量時間による汀線位置変化はオルソ画像における汀線位置に影響ないと考えられる。

参考データとして、観測日時の「長橋」における潮位を用いた汀線測量時刻の推定潮

位を求める計算式を以下に示す.

14 時の潮位は182 cm 14:47 の潮位 = $182 + (179 - 182) \times 47 / 60 = 179.7$ cm

15 時の潮位は179 cm 15:04 の潮位 = $179 + (174 - 179) \times 4 / 60 = 178.7$ cm

16 時の潮位は174 cm

第2節 ハンディー型GPSによる測量誤差の検討

リファレンスポイントを設置する時, 観測カメラからの距離と角度をT.S.を用いて正確に求め, さらに偏心調整を行った. しかし, ハンディー型GPSによる測量データを用いることが可能であれば, この作業は大幅に効率化される. そこで, ハンディー型GPSとT.S.測量による汀線位置の比較によりその精度を検討する. 使用したハンディー型GPSはGARMIN社製のOregon 450TC (図-5.2.1 (ア)) である. サイズは幅5.8 cm×高さ11.4 cm×厚み3.6 cm, 本体重量は単3電池2本を含めて196 gである. 緯度・経度の表示形式は度分秒単位であり, 秒は小数第2位まで表示される. T.S.はSOKKIA社製SET3030RS (図-5.2.1 (イ)) であり, 測距部最小単位は1 mm, 測定精度は $\pm(2+2 \text{ ppm} \times D)$ mmである. また, 測角部最小表示は1" である.



(ア) GARMIN Oregon450TC



(イ) SOKKIA SET3030RS

図-5.2.1 ハンディー型GPSとトータルステーション

2010年10月5日, 観測カメラ設置ホテル前から蛸島漁港方向約650 mまでの35地点の汀線位置を, T.S.とハンディー型GPSを用いて測量し比較した. T.S.は図-5.2.2中央部の□印の位置に据え付け, その位置は観測カメラから岸沖方向距離約127 m, 沿岸方向距離約240 m, 水平直線距離約270 mの位置である. T.S.による測距・測角による汀線位置と,

ハンディー型GPS測量による観測汀線緯度・経度データを世界測地系(7系)に変換し求めた汀線位置を図-5.2.3に示す。この際、T.S.設置位置はハンディー型GPSによるデータを用いた。

表-5.2.1および表-5.2.2はそれぞれ観測カメラとT.S.設置位置のハンディー型GPSによる緯度・経度データと世界測地系(7系)座標値である。

表-5.2.1 カメラ設置位置座標

汀線測量 カメラ 設置位置		
座標	緯度(° ' ")	37 26 24.5
	経度(° ' ")	137 19 35.5
世界測地系	岸沖方向(m)	159811.714
	沿岸方向(m)	14145.657

表-5.2.2 T.S.設置位置座標

汀線測量 T.S. 設置位置		
座標	緯度(° ' ")	37 26 20.4
	経度(° ' ")	137 19 25.7
世界測地系	岸沖方向(m)	159684.921
	沿岸方向(m)	13904.986



図-5.2.2 T.S.とGPSによる汀線測量地点 (Googleマップに加筆)

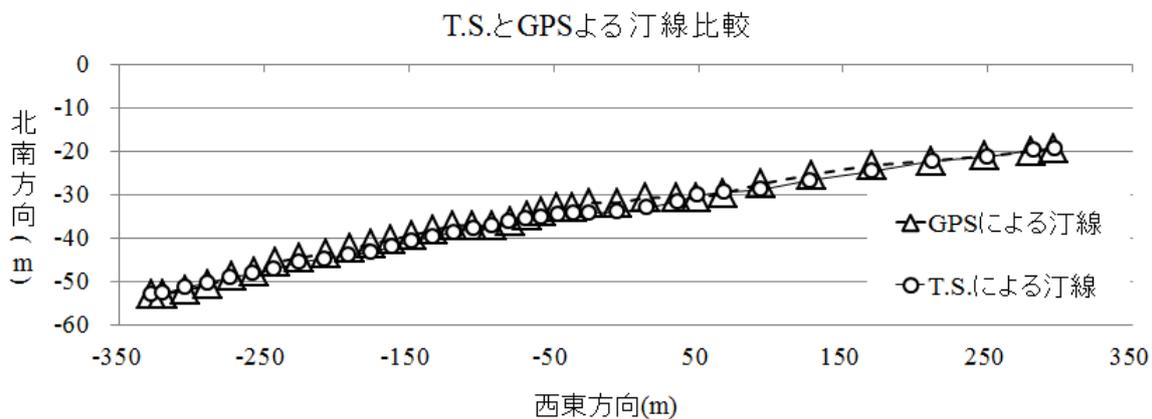


図-5.2.3 T.S.測量とGPS測量による汀線位置比較

図-5.2.4はT.S.測量とハンディー型GPS測量による汀線位置の誤差を図示したものである。また、表-5.2.3.は誤差をまとめたものである。両者による汀線位置の差は最大2.32 m, 最小0.10 m, 平均1.27 mであった。解析画像が1 Pixel=0.5 m であること、およびGPS測量による位置データに含まれる誤差は観測範囲にかかわらず一定の範囲内であることを考慮すると、GPSデータをリファレンスポイントの座標位置として利用すること、さらに汀線測量に利用することは可能であると考えられる。本研究では、観測カメラ、海岸に設置された堤防および海浜勾配計測地点の各座標としてGPSデータを用いている。

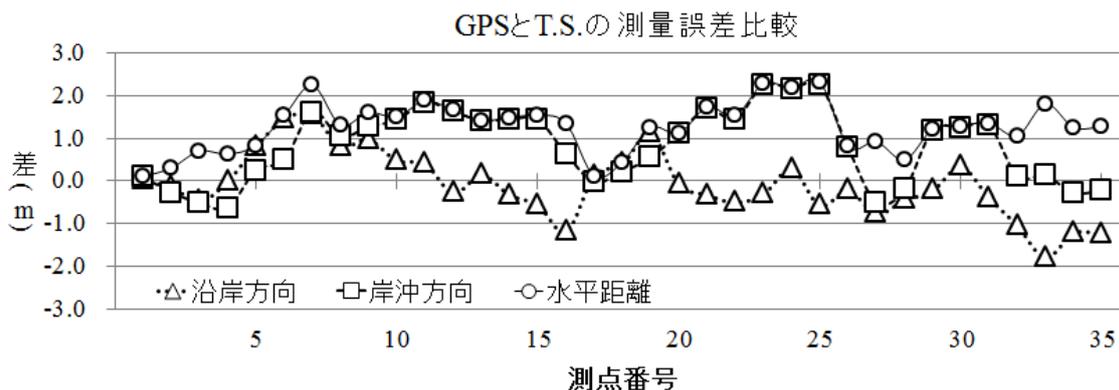


図-5.2.4 T.S.とGPSによる汀線測量位置の差の比較

表-5.2.3 T.S.とGPSの比較

T.S.とGPSの比較			
	$\Delta X(m)$	$\Delta Y(m)$	$\Delta L(m)$
AVE	-0.10	0.81	1.27
STDEV	0.76	0.86	0.58
Δ_{max}	1.55	2.26	2.32
Δ_{min}	-1.80	-0.63	0.10

第3節 汀線変動解析への適用

画像解析による汀線変動解析への適用としてカスプ解析例を以下に述べる。まず、隣接する撮影方向のオルソ画像の合成画像を示し、これを用いた視認によるカスプ抽出解析結果について述べる。次に、デジタイズ用ソフトの援用によるカスプの発生・成長・消失の解析結果を説明する。

(1) オルソ画像の合成

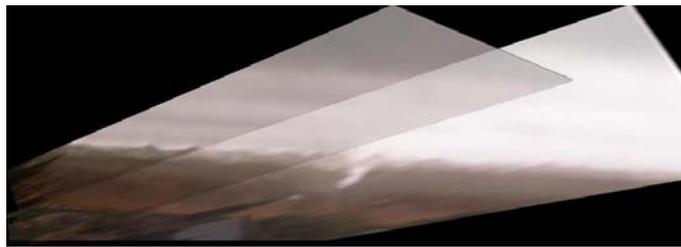
図-5.3.1.1に2010年1月28日11時10分台と20分台の8分間平均画像とその2枚の合成画像を示す。図-5.3.1.1(ア)は撮影方向20分台のオルソ画像であり、図-5.3.1.1(イ)は10分台のオルソ画像である。座標変換して作成されたオルソ画像では、1画素の対応距離が同一であるため異なる方向の画像であっても、図-5.3.1.1(ウ)のようにつなぎ合わせることが可能となる。



(ア) 20分台オルソ画像



(イ) 10分台オルソ画像



(ウ) 20分台オルソ画像と10分台オルソ画像の合成画像

図-5.3.1.1 オルソ画像合成例 (20分台+10分台)

(2) 視認によるカスプ抽出例

観測画像を用いて、汀線位置および形状の変動を抽出・解析することを試みた。多くの砂浜海岸では、アーチ状の汀線形状がリズムミックに連なるカスプ地形が観測される。図-5.3.2.1に鉢ヶ崎海岸におけるメガカスプ地形の観察例（オルソ画像）を示す。図中下半分が陸地であり、中央にカスプが観察される。また、図-5.3.2.2にカスプ諸元の定義を示す。



図-5.3.2.1 メガカスプ地形の観察例 (2010.05.11)

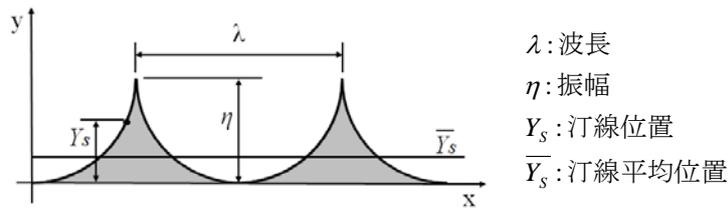


図-5.3.2.2 カस्प諸元の定義

図-5.3.2.3はオルソ画像からこのようなビーチカस्पの波長，振幅を読み取った例である．図中の画像は2009年11月11日から4日間を対象に，11時10分台と20分台のオルソ画像を合成したものである．11月11日よりカस्पの形成が見られる．11日に比べて有義波高が小さく，逆に有義周期が長くなる12日にかけて，カस्पの成長が観察される．13日は，カस्पは最も発達し，その波長は156.7 m，振幅7.1 mであった．有義波高が小さく，有義周期が短くなる14日には，カस्पが縮小に向かっている様子が観察される．また，海面の輝度値が高い（白い）部分に着目すると，三日月型沿岸砂州が汀線側に近づいている位置にカस्पホーン（突出部）が発達していることも確認できる．このように，本観測システムにより，汀線形状の時空間変化や，水面下の海底地形との対応を解析できることが確認された．

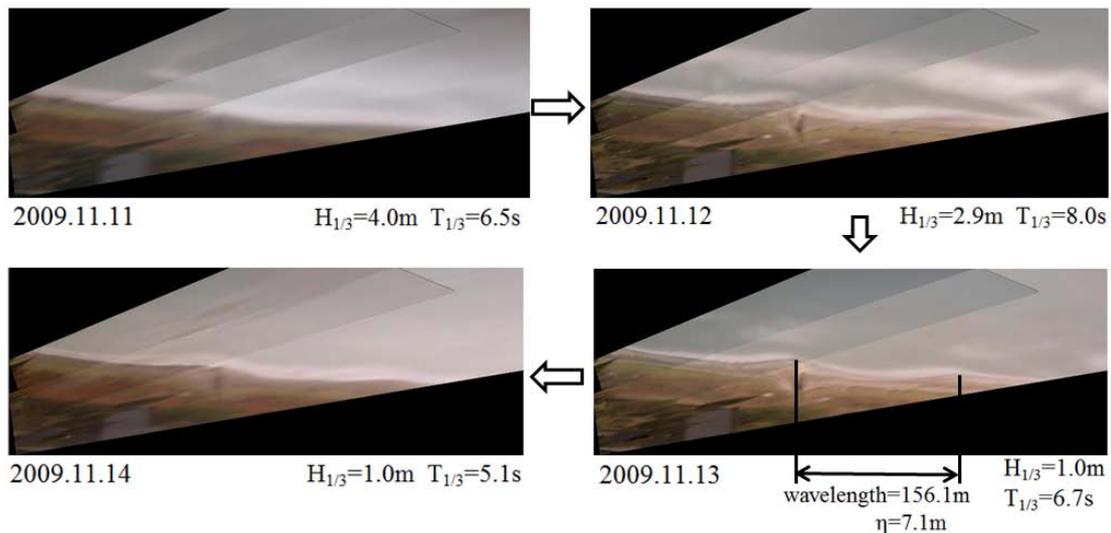


図-5.3.2.3 オルソ画像によるカस्पの抽出例 (2009.11.11~14)

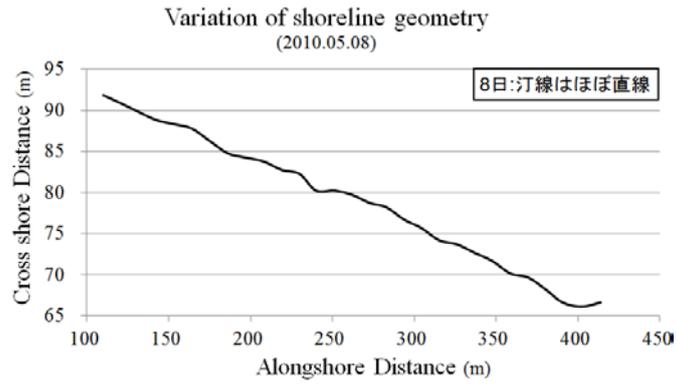
(3) デジタイズ用ソフトの援用によるカスプの発生・成長・消失の解析例

デジタイザーを援用して、視認により汀線位置の判読・解析を行った例を示す。デジタイザーは画像における任意の点の座標を数値化するものであり、図-5.3.3.1に示すように、コンピューターディスプレイ上で視認による汀線位置（図中の○印）をクリックすると、その座標値が記録される。この座標値を表計算ソフトを用いて解析する。

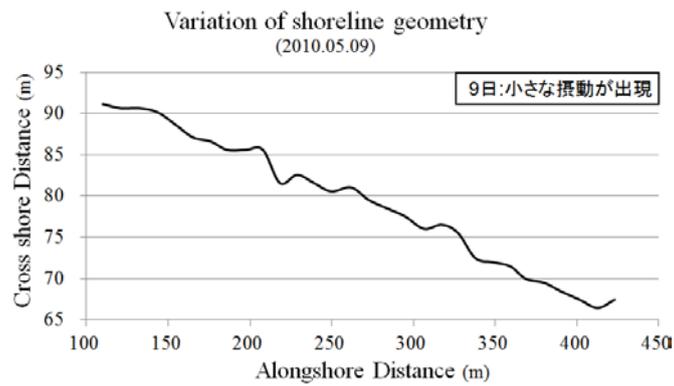


図-5.3.3.1 デジタイザーの援用による汀線判読例 (2010.05.11)

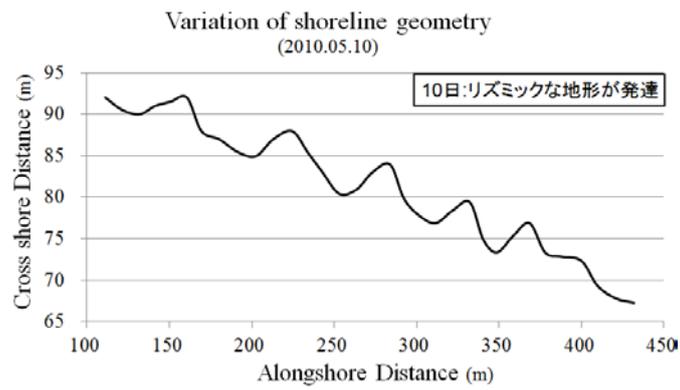
10分台日平均オルソ画像より汀線位置を読み取り、その変動を解析した結果を図-5.3.3.2に示す。解析期間（2010年5月3日～18日）の中で、カスプの成長が顕著な5月8日から13日までのものを掲載した。なお縦方向のスケールを拡大して表示している。また、ここでは、長橋における平均潮位および2010年5月の実測に基づく前浜勾配を用いて汀線位置の補正を行った。図では汀線形状が全体にゆるやかな右下がりとなる。5月8日での汀線形状はほぼ直線的であるが、9日には少し波打つ様子が見られる。10日、11日にかけてカスプ地形が発達し、12日には縮小に転じている。11日の図中左3つのカスプの平均波長は53.7 m、平均振幅は5.7 mであり、先の例と比べて、波長は短いが振幅は同程度である。有義波高 H と有義周期 T の変化を見ると、8日が $H_{(8)}=0.97$ m、 $T_{(8)}=7.2$ s、9日が $H_{(9)}=0.86$ m、 $T_{(9)}=7.3$ s、10日が $H_{(10)}=0.66$ m、 $T_{(10)}=5.1$ s、11日が $H_{(11)}=0.64$ m、 $T_{(11)}=5.6$ s、12日が $H_{(12)}=1.41$ m、 $T_{(12)}=5.9$ s、13日が $H_{(13)}=1.7$ m、 $T_{(13)}=6.9$ s、であった。カスプが発達する期間は有義周期の短い期間に対応しており、有義波高および有義周期が大きくなるとカスプは縮小に転じている。このようにオルソ画像をデジタイザーで読み取ることにより、汀線変動観測および解析が可能である。この読み取りを長期間に渡って実行することで、汀線の長期変動の解析も可能となる。



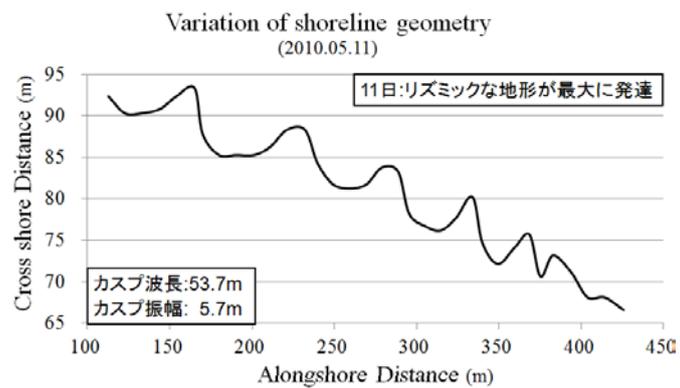
(7) 2010年5月8日 : $H_{1/3} = 0.97$ m, $T_{1/3} = 7.2$ s



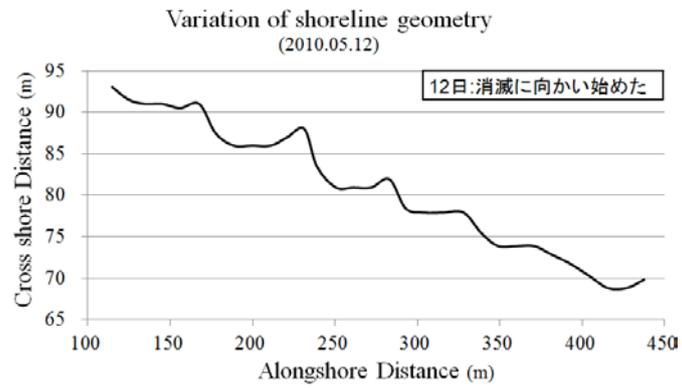
(i) 2010年5月9日 : $H_{1/3} = 0.86$ m, $T_{1/3} = 7.3$ s



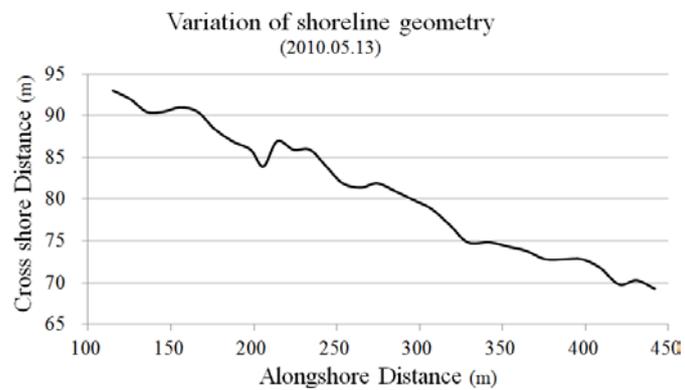
(ウ) 2010年5月10日 : $H_{1/3} = 0.66$ m, $T_{1/3} = 5.1$ s



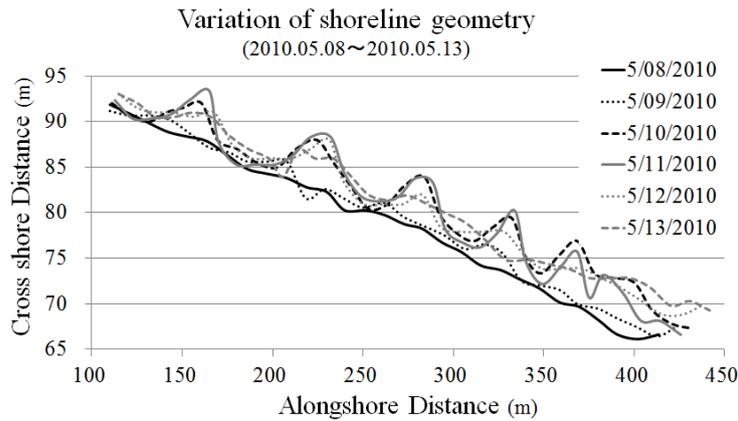
(エ) 2010年5月11日 : $H_{1/3} = 0.64$ m, $T_{1/3} = 5.6$ s



(オ) 2010年5月12日 : $H_{1/3} = 1.41$ m, $T_{1/3} = 5.9$ s



(カ) 2010年5月13日 : $H_{1/3} = 1.70$ m, $T_{1/3} = 6.9$ s



(キ) 2010年5月8日~13日

図-5.3.3.2 メガカスプの発達観察例

次に、カスプ形状変動と波浪諸元の相関を把握するためにカスプ振幅・汀線変動強度について検討する。汀線変動強度等の定義は武若ら(2006)に従い、汀線位置および汀線平均位置の定義は図-5.3.2.2に示す。

$$\text{汀線平均位置: } \bar{Y}_s(t) = \frac{1}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} Y_s(t, x) dx \quad (5.3.3.1)$$

$$\text{汀線変動強度: } Y_s' rms(t) = \sqrt{\frac{1}{x_1 - x_0} \int_{x_0}^{x_1} (Y_s(t, x) - \bar{Y}_s(t))^2 dx} \quad (5.3.3.2)$$

ここで、 $Y_s(t, x)$ は2時間毎の汀線位置、 t は時間、 x は沿岸方向座標、 x_0, x_1 は観測範囲の始点と終点である。メガカスプ振幅の値は、図-5.3.3.2における左3つのメガカスプを対象に2時間毎の平均値として算出した。図-5.3.3.3および図-5.3.3.4より、波高が低下あるいは周期が短くなるとメガカスプ振幅が増大し、波高が上昇あるいは周期が長くなるとメガカスプ振幅が縮小する傾向が観察される。汀線変動強度との相関も同様である。なお、観測データにおける入射波諸元は、観測地である鉢ヶ崎海岸から直線距離で約38 km離れた輪島港での観測データを用いていることに留意が必要である。

表-5.3.3.1 対象期間の有義波高と有義周期（輪島港）

	5/8	5/09	5/10	5/11	5/12	5/13
$H_{1/3}$ (m)	0.97	0.86	0.66	0.64	1.41	1.70
$T_{1/3}$ (s)	7.2	7.3	5.1	5.6	5.9	6.9

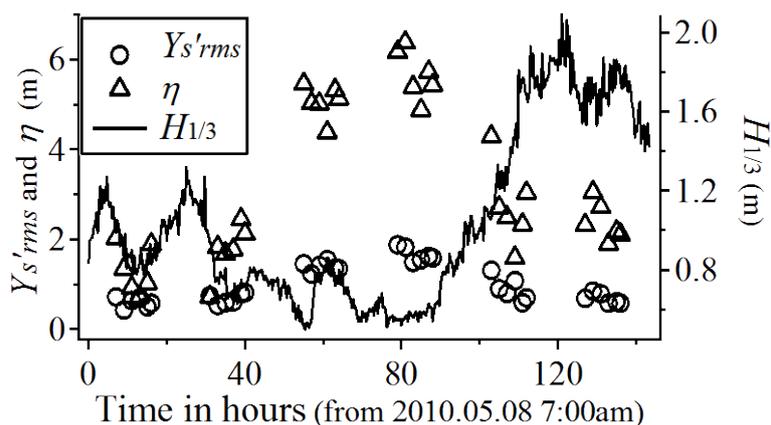


図-5.3.3.3 波高と汀線変動強度・カスプ振幅の相関

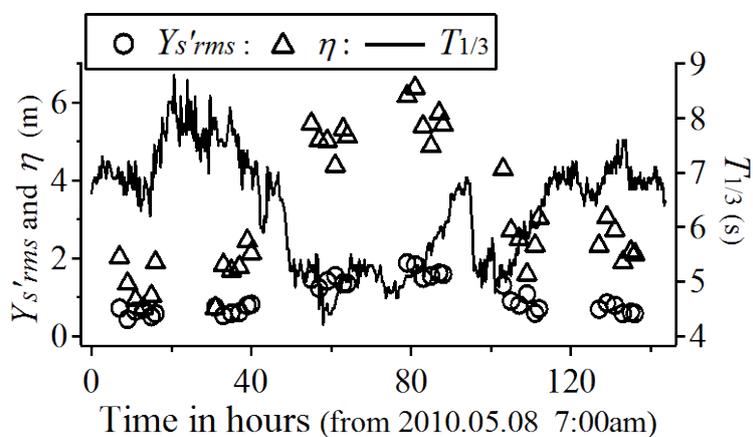


図-5.3.3.4 入射波周期と汀線変動強度・カスプ振幅の相関

次に入射波周期とカスプ波長の相関について検討を行った。従来の研究では、カスプ波長と周期の3乗に相関が認められると報告されてきた。図-5.3.3.5.中の破線は堀川ら(1974)による離岸流の発生間隔と周期の関係式であり、細実線は栗山ら(2006)によるカスプ波長と周期の関係式を示す。○印は今回の画像観測により得られたメガカスプ波長

(50 m以上)の観測データであり、観測画像中の代表的なカスプに対する値を用いている。最小自乗近似によりカスプ波長と入射波周期の相関を算出した結果を太実線で示す。今回の観測結果は、およそ既往の報告に従う形となっているが、周期5秒前後での観測値は両者から乖離している。これは、カスプ形成のメカニズムの違い、あるいは入射波周期として採用したデータが、カスプ観測地から直線距離で38 km離れた輪島港によるデータを用いたことに起因すると推測される。

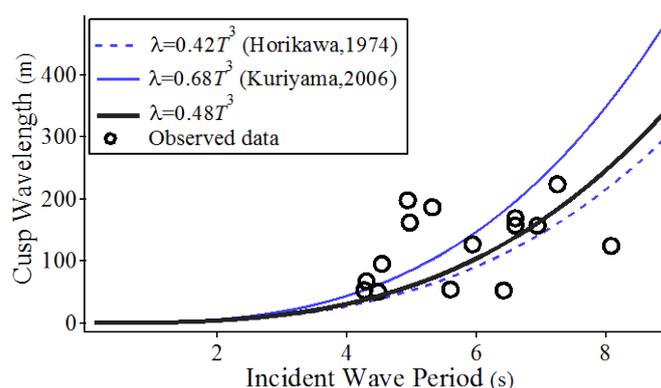


図-5.3.3.5 入射波周期とカスプ波長の相関

第4節 沿岸砂州変動解析への適用

(1) 沿岸砂州の概要

国内外に位置する砂浜海岸は多くの沿岸砂州を有しており、特に、日本海側の海岸において多段の沿岸砂州が存在することが知られている。沿岸砂州は水面下の浅瀬部分が汀線におよそ平行な形で発達したものであり、それ自体が自然の防波堤という役割を果たす。つまり、沿岸砂州の存在によって、砕波が発生し、波のエネルギーが減衰して、沿岸波浪災害の抑制につながる。また、砂州は流れの弱い平穏域を作り、稚魚などの生息域にもなる。こうした観点から、沿岸砂州の移動・変形の研究は、海岸環境保全の観点から重要である。

沿岸砂州は波浪条件に応じて沖向き、岸向きに移動する。その移動は砂州を構成している底質の移動によるものであり、汀線に接近してカスプホーンと接続する場合もある。波や流れによって浮遊した底質は戻り流れによって沖に運ばれる一方、底面近傍においては流速波形の上下・前後の非対称性や、底面勾配の影響も受ける。沿岸砂州が移動・変形

する過程で、二列に分裂するBar Splittingと呼ばれる現象も報告されている。

(2) 沿岸砂州の移動・変形特性

沖合いから浅海に進入した波は沿岸砂州で水深が波高に近づき砕波し、気泡が発生する可能性がある。この気泡に太陽光が反射し白く見え輝度値が上昇する。砕波後、沿岸砂州より岸側では波高が減少しているため砕波は停止し、画像において砂州の部分に帯状の白い部分（本研究では濡筋と呼ぶ）が残る。この輝度値変化を利用して砂州の位置と推定し、その形状および移動を抽出することが可能である。図-5.4.2.1 は鉢ヶ崎海岸西端に位置する蛸島漁港方面の 8 分間平均画像(2010.05.10.9:00)である。画像左端から中央位置までは、沿岸砂州が海岸線にほぼ平行に形成されているが、中央位置から防波堤までは沖方向に向きを転じている。図-5.4.2.2 は 2010 年 5 月 11 日 11 時 30 分台の 8 分間平均画像である。画像中に 3 本の白い濡筋が観察される。画像において下段の濡筋は汀線における砕波によるものであり、上段および中段の濡筋は沿岸砂州によるものである。



図-5.4.2.1 防波堤付近の沿岸砂州



図-5.4.2.2 2段の沿岸砂州

図-5.4.2.3 は 2010 年 5 月 1 日の 10 時 40 分台の 8 分間平均画像であり、汀線に沿って 3 本の濡筋が観察される。図-5.4.2.2 と同様に、汀線付近と 2 段の沿岸砂州に対応する部分が白い濡筋として現れている。図-5.4.2.4 は 2010 年 5 月 14 日の 15 時 50 分台の 8 分間平均画像であり、濡筋が汀線付近と少し沖側に観察されるが、後者の濡筋は画像右側で消失している。図-5.4.2.5 は、カスプ発生直後 (2010.05.07) のオルソ画像であり、図-5.4.2.6 はカスプ成長期 (2010.05.10) のオルソ画像である。汀線にカスプ地形が発生する時、リズムミクな弓形の沿岸砂州が先行して発達し、汀線側に接近した位置にカスプホーン（突出

部)が発達することが確認できる。この例のように、カस्प地形の形成は沿岸砂州の変動と深く相関があり、沿岸砂州の変動解析は汀線変化を解明するためにも必要である。



図-5.4.2.3 2段の沿岸砂州



図-5.4.2.4 途中で消失した沿岸砂州



図-5.4.2.5 カस्प発生直後の沿岸砂州



図-5.4.2.6 カस्प成長期の沿岸砂州

このような平均画像から作成されたオルソ画像を用いた沿岸砂州の解析例を以下に示す。ここでは、解析対象期間を2010年10月5日～2011年5月16日として、鉢ヶ崎海岸における沿岸砂州の存在および移動・変形特性に関して、観測カメラ正面の観測時間40分台の画像を解析する。

図-5.4.2.7は上段は左から2011年1月5日、1月11日、1月16日、1月31日、下段は左から2月16日、3月12日、3月27日、4月4日におけるオルソ画像である。これらは、観測期間中において沿岸砂州の形状が特に明瞭に確認できる画像の抜粋である。画像中の白く見える部分が沿岸砂州の位置および形状を示しており、2011年1月5日には、沿岸砂州が沖側と岸側に1つずつ確認できる。1月11日には沖側の沿岸砂州が、画像中

央辺りで2つに分裂している。1月16日には分裂していた沖側の沿岸砂州は1つに戻っていると同時に、やや岸側の沿岸砂州が沖側に移動し始めている。1月31日には、画像中央部で岸側の沿岸砂州が沖側に前進し、画像右側で沖側の沿岸砂州と合体している。2月16日には前の画像で合体していた沖側の沿岸砂州が再び2つに分裂している。3月12日には分裂した岸側の沿岸砂州が波打つような形で岸側に近づいていく様子が確認できる。そして3月27日～4月4日には、岸側の沿岸砂州が汀線に付着した。以上のようにオルソ画像の時系列観察により、沿岸砂州の形状や変化の特徴を読み取ることが出来る。

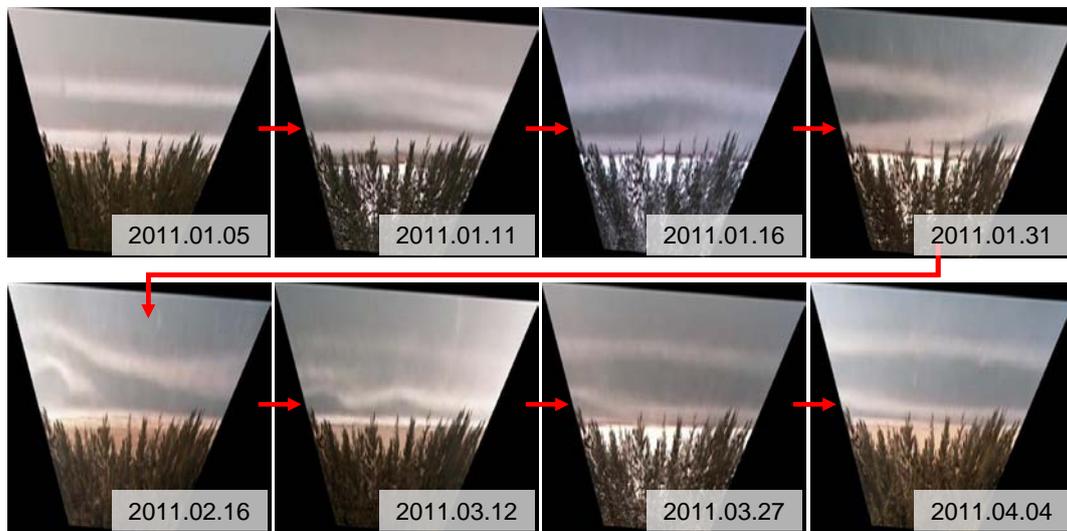


図-5.4.2.7 沿岸砂州の発生と移動

(3) 沿岸砂州の位置と形状の定量化

沿岸砂州の位置と形状の定量化について検討する。

図-5.4.3.1 は 2010 年 11 月 1 日 15 時 40 分台の画像である。図-5.4.3.1 (ア) は時間平均画像であり、図-5.4.3.1 (イ) はオルソ画像である。沿岸砂州の部分では輝度値が上昇することを利用し、図-5.4.3.1 (イ) を用いて沖側の沿岸砂州の角度、位置（汀線からの距離）を定量化することを試みる。そこで沿岸砂州だけを抽出するために、解析範囲を対象画像において岸沖方向で沿岸砂州が存在する範囲内（この画像では縦軸 Pixel No.80~160 の範囲内であり、図中 2 本の白い線で挟まれる範囲である）に限定して、輝度値が最大となる場所を求める。

図-5.4.3.1 (イ) において、岸沖方向における最大輝度値位置は右下がりとなっている。す

なわち、沿岸砂州は鉢ヶ崎海岸西方向に向かうにしたがって汀線方向に向かって形成されている。

図-5.4.3.2 は、図-5.4.3.1(イ)の画像縦軸方向 Pixel No.80~160 の範囲における輝度値の最大値位置を表したものであり、図中の点線楕円で囲まれた部分が沿岸砂州の位置であると考えられる。図-5.4.3.2 において、グラフ両端付近が 0 に近い値になっているのは、オルソ画像では画像周囲に画素値がない部分があり、最大輝度値解析範囲内にその部分が含まれているからである。また、図-5.5.3.2 では、最大輝度値の発生位置は右上がりとなっている。これは、図-5.4.3.1(イ)における画像縦軸方向の原点は、画像左上であり、図-5.4.3.2 の画像縦軸方向の原点は左下であるためである。



(ア) 時間平均画像

(イ) オルソ画像

図-5.4.3.1 時間平均画像とオルソ画像 (2010.11.01.15:40)

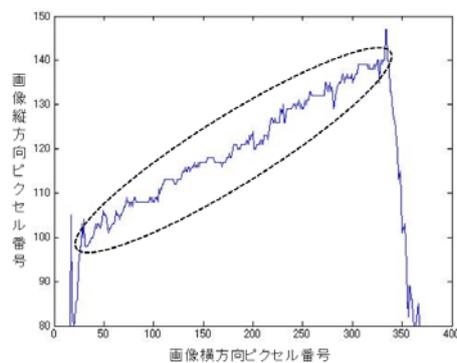


図-5.4.3.2 縦方向最大輝度値発生位置 (解析範囲：縦方向 Pixel No.80~160)

そこで、画像における沿岸砂州発生位置と最大輝度値発生位置グラフの相対位置関係

を一致させるために、図-5.4.3.3 のように画像を上下反転させ、沿岸砂州発生位置の形状と傾きを解析したものが図-5.4.3.4 および図-5.4.3.5 である。沿岸砂州発生位置の形状はほぼ直線状であり、縦横移動ピクセル数を読み取ると、縦ピクセルが 30 ピクセル、横ピクセルが 302 ピクセルであり、この沿岸砂州の傾きは $30/302=1/10.07$ 、 5.67° を得る。

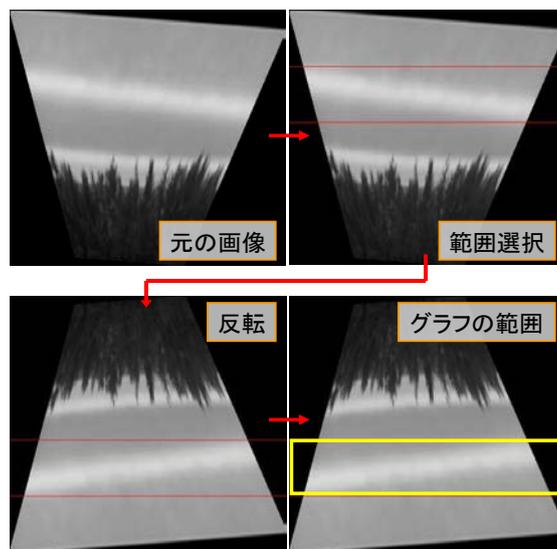
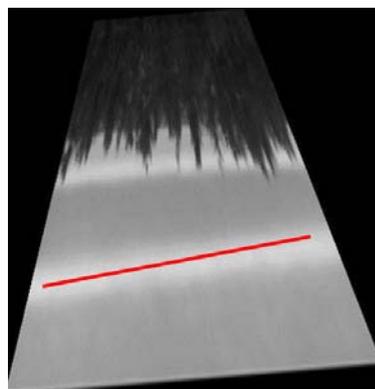
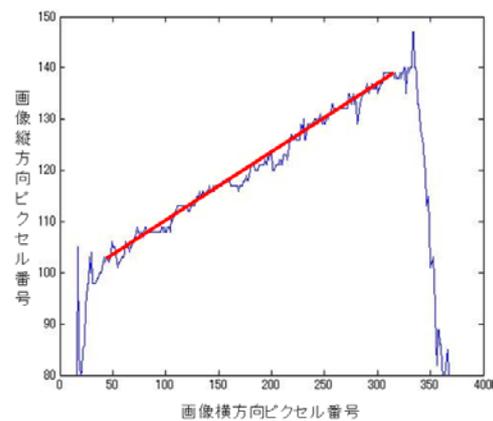


図-5.4.3.3 画像を上下反転する



(ア) オルソ画像



(イ) 輝度値変化図

図-5.4.3.4 輝度値最大値位置グラフから読み取る沿岸砂州の形状

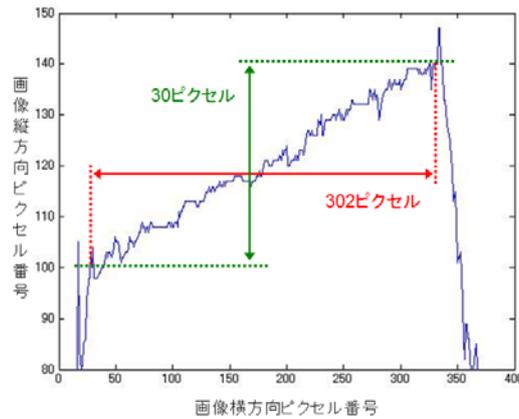
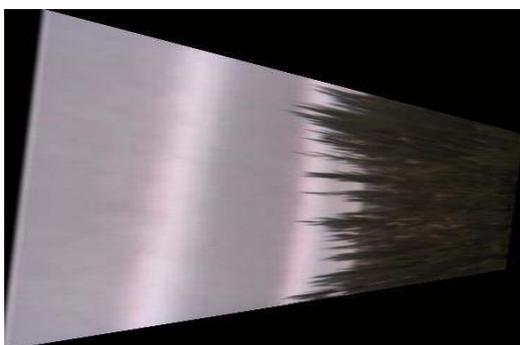
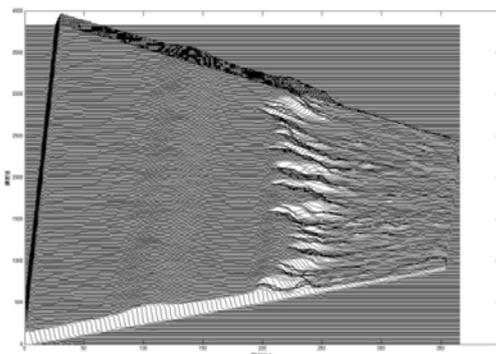


図-5.4.3.5 沿岸砂州の傾き

また、図-5.4.3.6(ア)は図-5.4.3.1(イ)を時計方向に 270° 回転した図であり、図-5.4.3.6(イ)は図-5.4.3.6(ア)の画像全体の輝度値分布図である。汀線位置は海と砂浜の境界になるため、沖方向から岸方向への輝度値変化は汀線付近で急激に変化することから、図-5.4.3.6(イ)より推定した汀線位置を黒破線で、沿岸砂州位置を白破線で図-5.4.3.7 に示した。また、その推定汀線位置は Pixel No.250 である。沖側沿岸砂州は図-5.4.3.4(イ)より Pixel No.100~140 であり、沿岸砂州と汀線位置のピクセル差は、最大距離 $250-100=150$ 、最小距離 $250-140=110$ 、平均距離 $250-(140+100)/2=130$ となる。オルソ画像における縮尺 (1 Pixel=0.5 m) で変換すると、最大距離 150 Pixel=約 75 m、最小距離 110 Pixel=約 55 m、平均距離 130 Pixel=約 65 m を得る。



(ア) オルソ画像



(イ) 輝度値分布図

図-5.4.3.6 画像全体の輝度値分布図

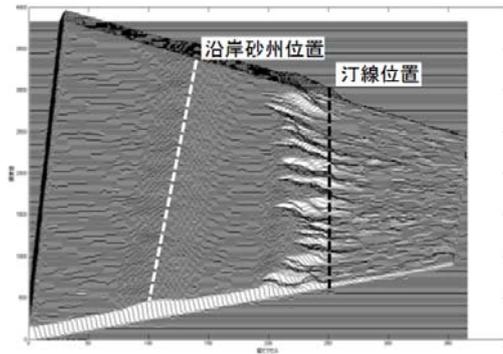
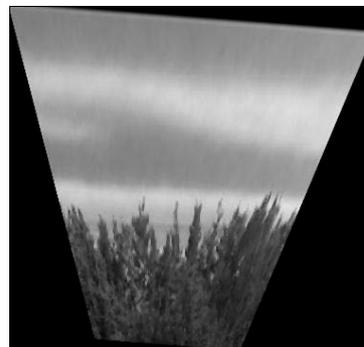


図-5.4.3.7 図-5.4.3.6(イ)における推定汀線位置と沿岸砂州位置

上記と同様の方法により、2011年4月24日16時40分台の画像について沿岸砂州形状の解析例を図-5.4.3.8 および図-5.3.3.9 示す。この例では、図-4.3.3.9(イ)に示すように岸沖方向輝度値最大値位置を表すラインは横軸方向 Pixel No.130, および Pixel No.310 付近でややカーブを描いていることが確認できるので、この沿岸砂州は図 4.3.3.9(ア)に示すような形状でこの海岸に存在していると判断できる。

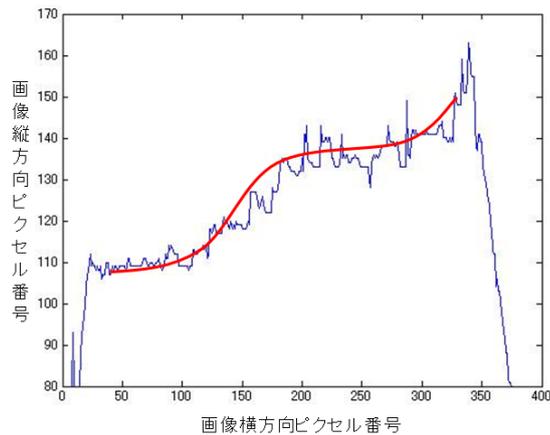
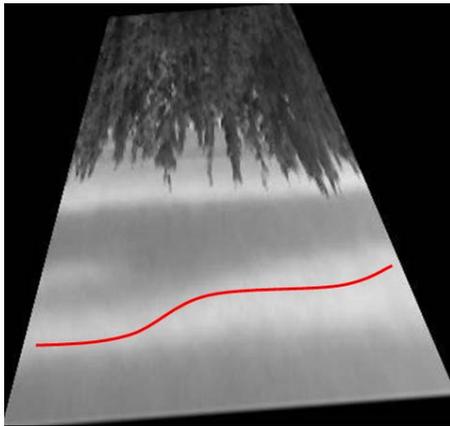


(ア) 平均画像



(イ) オルソ画像

図-5.4.3.8 平均画像とオルソ画像 (2011.04.24.6:40)



(ア) 上下反転したオルソ画像

(イ) 輝度値変化図

図-5.4.3.9 輝度値最大値位置グラフから読み取る沿岸砂州の形状

(4) 沿岸砂州と汀線変動に関する検討

(4-1) タイムスタック画像による沿岸砂州と汀線位置の変動解析

タイムスタック画像とは、画像画素 RGB 値を輝度値に変換した 8 分間平均オルソ画像をさらに一日に渡り平均化した 1 日平均オルソ画像において、沿岸方向ピクセル番号の同一画素列を抜き出し、時系列順に並べた画像である。横方向 1 ピクセルは 1 日、縦方向 1 ピクセルは 0.5 m に相当する。このタイムスタック画像の輝度値変化を利用した沿岸砂州の位置、形状、および汀線位置の変動解析を行う。ただし、天候や撮影時間帯により輝度値の絶対量が異なるため、画像全体の平均輝度値が等しくなるよう輝度値を補正した画像によるタイムスタック画像を用いた。

図-5.4.4.1 は 2010 年 10 月 5 日～2011 年 5 月 16 日の約 7 ヶ月間 (224 日間) におけるタイムスタック画像である。画像中の薄い白色部分が沿岸砂州であり、画像下端から 1/3 程度にある濃い黒色部分は保安林である。この保安林の上部に見える薄い黒色部分の上端が汀線である。また、画像中央の濃い白色部分は積雪である。この画像を用いて時間経過による沿岸砂州および汀線の変化を解析する。

図-5.4.4.2 は沿岸砂州の変化および移動に注目して特徴を記載したものである。沿岸砂州は、はじめは 1 本であったものが 2 本に分裂し、その後、沖側の沿岸砂州はそのまま沿岸に位置し、岸側の沿岸砂州は岸方向に移動して汀線に付着する様子が観察される。

図-5.4.4.3 は汀線位置の変化に注目したものである。汀線位置が徐々に沖側に前進し、

その後、岸側に後退している。その移動量は、横軸方向 99 Pixel で、縦軸方向 50 Pixel、すなわち、99 日間で 25 m であり、1 日あたりの移動量は約 0.25 m/day となる（図-5.4.4.4）。このように、タイムスタック画像を用いることにより汀線変動を定量化することが可能である。

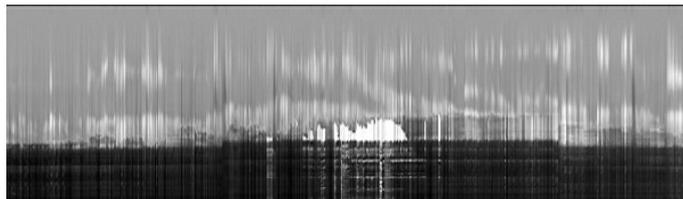


図-5.4.4.1 タイムスタック画像 (2010.10.05～2011.05.16)

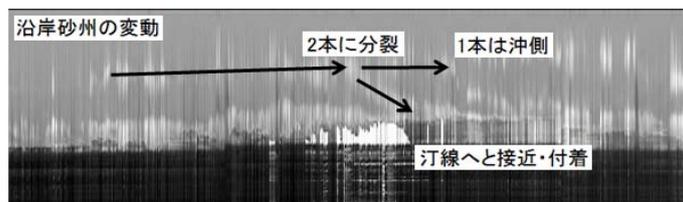


図-5.4.4.2 タイムスタック画像における沿岸砂州変動

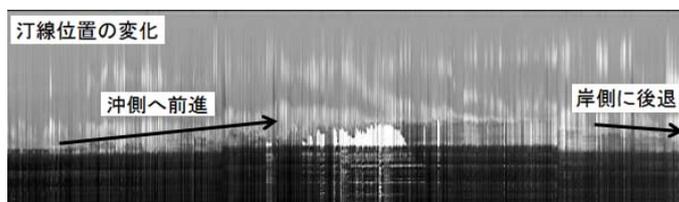


図-5.4.4.3 タイムスタック画像における汀線位置変化

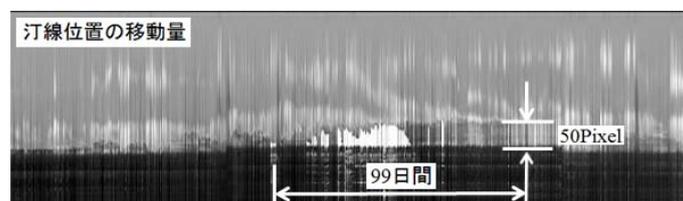


図-5.4.4.4 タイムスタック画像における汀線移動量

(4-2) 沿岸砂州と汀線の接近と付着

沿岸砂州と汀線の相関について検討する．図-5.4.4.5 は沿岸砂州と汀線位置の移動方向を示したタイムスタック画像である．図中の実線と破線の矢印はそれぞれ沿岸砂州と汀線位置の移動方向を示す．図より汀線の前進開始時期から少し遅れて沿岸砂州が岸向きに移動を始める．その後，沿岸砂州が汀線に付着し汀線位置が安定した様子が確認される．

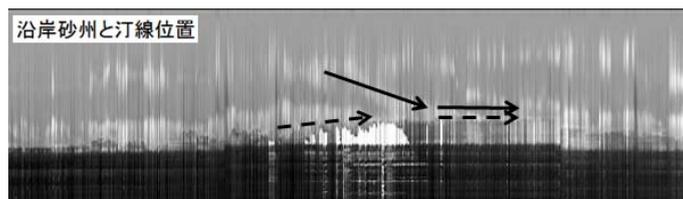


図-5.4.4.5 沿岸砂州と汀線の接近と付着

第6章 画像解析による汀線位置推定法

海浜地形変動メカニズムの解明や海浜の侵食あるいは堆積の短期的、中期的および長期的な傾向を究明するためには継続的な長期モニタリングが必要である。しかし、そのモニタリングデータは膨大な量となり、大量の海浜モニタリング画像から汀線位置を視認により推定する作業は多くの時間と労力を要するとともに、判別誤差も含まれる。そこで、解析作業効率の向上と判別誤差の縮小化が課題となり、コンピュータを用いた画像処理による汀線位置推定法の構築が求められる。

第1節 デジタル画像におけるデータ処理法

本研究における鉢ヶ崎海岸での海浜観測はCCDデジタルカメラ撮影により実施され、その海浜モニタリング画像はJPEG形式でカラー画像として保存される。その画像データは、図-6.1.1に示すような画素と呼ばれる離散的な点の集合であり、式(6.1.1)に示す行列で表現される。

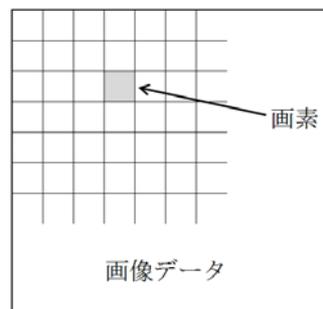


図-6.1.1 デジタル画像

$$X = \begin{bmatrix} x(1,1) & x(1,2) & \cdot & \cdot & x(1,n) \\ x(2,1) & x(2,2) & & & \\ \cdot & & & & \\ \cdot & & & & \\ x(m,1) & \cdot & \cdot & \cdot & x(m,n) \end{bmatrix} \quad (6.1.1)$$

本章の画像解析による汀線位置推定法の解析に先立ち以下の処理を行う。図-6.1.2は鉢ヶ崎海岸における観測撮影画像を8分間時間平均した画像である。この画像全域において、図-6.1.3に示す走査ウィンドウを想定し、任意の画素 $x_0=(m,n)$ に隣接する8近傍画素 $x_1\sim x_8$ を設定する。9個の行列要素の重みはすべて等しく、平滑化加重フィルタの行列要素は図-6.1.4に示すようにすべて1であり、自身を含む近傍9画素の平均画素値を画素 x_0 の新たな画素値とする平滑化フィルタ処理を実施する。図-6.1.2のオルソ画像に平滑化フィルタによる画像演算を実施し、画像周囲の黒色部分を白色に変換した平滑化オルソ画像が図-6.1.5である。各画素はその座標値と画像の明るさ(色)を表す輝度により構成され、連続的に変化する画像が画素により量子化されている。画像の明るさ(色)を担う輝度は、その画素においてRGB値と呼ばれる赤、緑、青の3種類の、それぞれ0~255の整数値で与えられ、行列(Red, Green, Blue)で与えられる。この輝度を利用した平滑化オルソ画像における汀線位置推定法について以下に述べる。



図-6.1.2 オルソ画像 (2010.04.21.08:20)

$(m-1,n-1)$ x_4	$(m-1,n)$ x_3	$(m-1,n+1)$ x_2
$(m,n-1)$ x_5	(m,n) x_0	$(m,n+1)$ x_1
$(m+1,n-1)$ x_6	$(m+1,n)$ x_7	$(m+1,n+1)$ x_8

図-6.1.3 走査ウィンドウ
(画素 $x_0 = (m,n)$ の8点近傍)

1	1	1
1	1	1
1	1	1

図-6.1.4 平滑化フィルタ

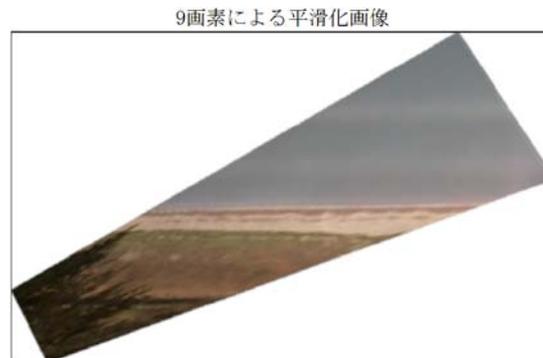


図-6.1.5 平滑化画像 (2010.04.21.08:20)

第2節 輝度値およびRGB値による汀線位置推定法

(1) 輝度値およびRGB値の回帰式による汀線位置推定法

カラー画像上での汀線位置を海面と砂浜の色の違いによりある程度視認することは可能である。しかし、汀線付近の海浜砂の乾湿状態や砕波状況、あるいは視認者の判断等により、汀線位置には視認判別幅があり明確にその位置を確定することは難しい。そこでRGB値とそれを用いて式(6.2.1.1)で表される輝度値 L を利用して汀線位置の推定を試みた。

$$L = 0.2989X_R + 0.5870X_G + 0.1140X_B \quad (6.2.1.1)$$

2010年4月21日から2010年9月11日までの118ケースの8分間平均オルソ画像において、視認による汀線推定位置の画素輝度値を $L2$ 、RGB値を $R2$ 、 $G2$ 、 $B2$ とする。1画素沖側の輝度値を $L1$ 、RGB値を $R1$ 、 $G1$ 、 $B1$ 、1画素岸側の輝度値を $L3$ 、RGB値を $R3$ 、 $G3$ 、 $B3$ とする(図-6.2.1.1)。また、各解析対象画像(画像サイズ=558×342画素)において、図-6.2.1.2に示すように海面部分の一部[(271,121)-(450,180)の範囲の矩形領域]の輝度値平均を海面平均輝度値とし、以下、図-6.2.1.3~図-6.2.1.10に推定汀線位置におけるRGB値および輝度値と海面平均輝度値との相関を示す。

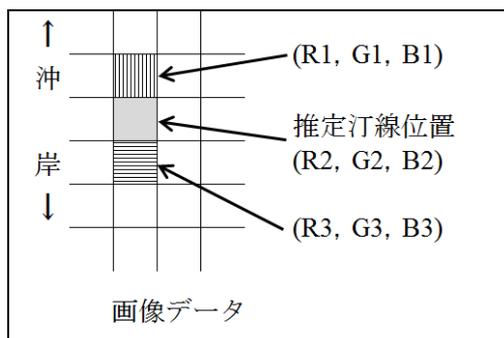


図-6.2.1.1 汀線周辺RGB値

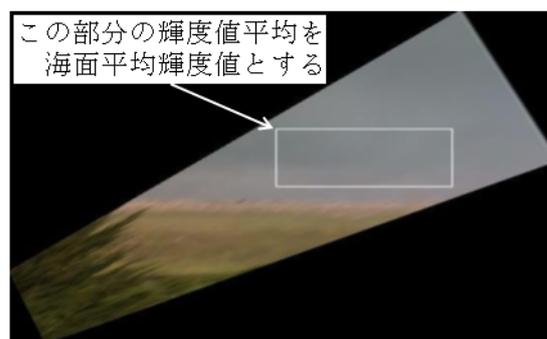


図-6.2.1.2 海面平均輝度値範囲

図中に回帰直線 y と相関係数 R^2 が記されている。すべての相関図において回帰式の相関は低く、特に図-6.2.1.3～図-6.2.1.5の汀線位置におけるRGB値に関する相関は低い。そこで、図-6.2.1.6～図-6.2.1.10に示した汀線位置上下のRGB値の差、輝度値および汀線位置上下輝度値の差の各回帰式を用いて汀線位置の推定を行う。以下に該当する回帰直線を示す。

$$\text{汀線位置上下R値の差の回帰式} \quad : \quad y_{R13} = 0.515x - 61.802 \quad (6.2.1.2)$$

$$\text{汀線位置上下G値の差の回帰式} \quad : \quad y_{G13} = 0.425x - 47.334 \quad (6.2.1.3)$$

$$\text{汀線位置上下B値の差の回帰式} \quad : \quad y_{B13} = 0.403x - 41.817 \quad (6.2.1.4)$$

$$\text{汀線位置の輝度値}L\text{の回帰式} \quad : \quad y_L = -0.446x + 205.024 \quad (6.2.1.5)$$

$$\text{汀線位置上下輝度値}L\text{の差の回帰式} \quad : \quad y_{L13} = 0.449x - 51.052 \quad (6.2.1.6)$$

図-6.2.1.11(ア)は平滑化オルソ画像であり、汀線位置上下のRGB値の差、同輝度値の差および輝度値の回帰式値を基準に一定の範囲内を推定条件とする汀線位置推定結果を図-6.2.1.11(イ)に示す。図中の黒い実線が推定汀線である。同様の例を図-6.2.1.12～図-6.2.1.18に示す。

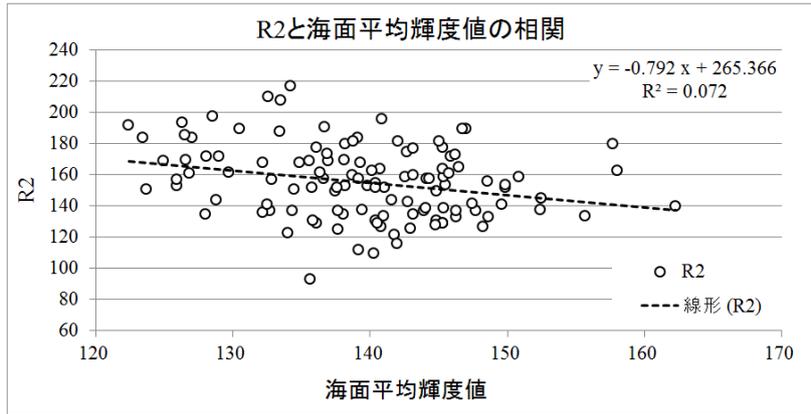


図-6.2.1.3 汀線位置R値と海面平均輝度値の相関

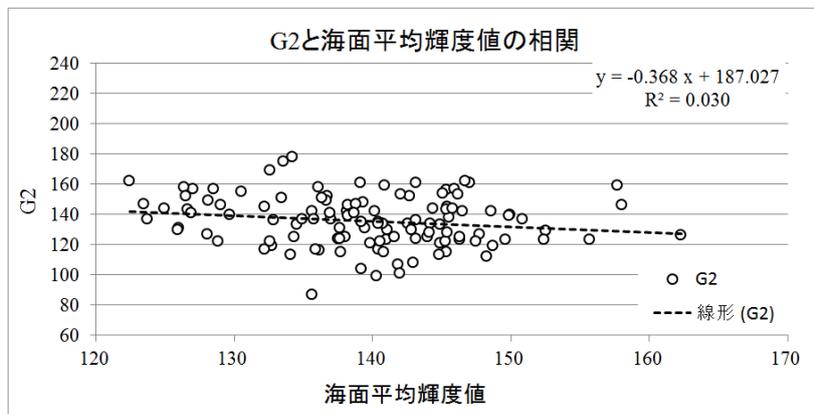


図-6.2.1.4 汀線位置G値と海面平均輝度値の相関

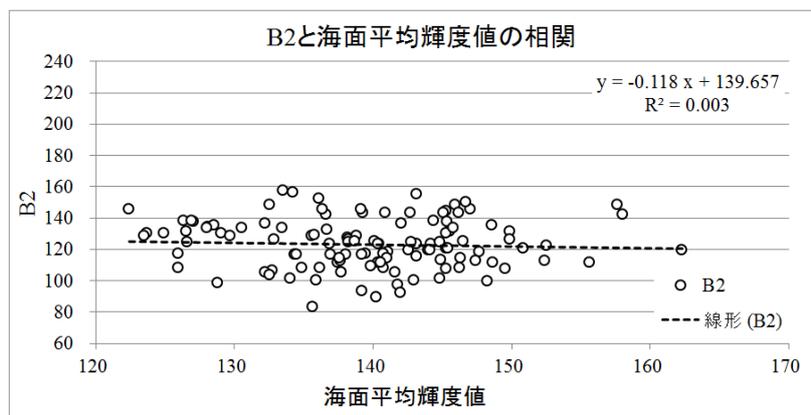


図-6.2.1.5 汀線位置B値と海面平均輝度値の相関

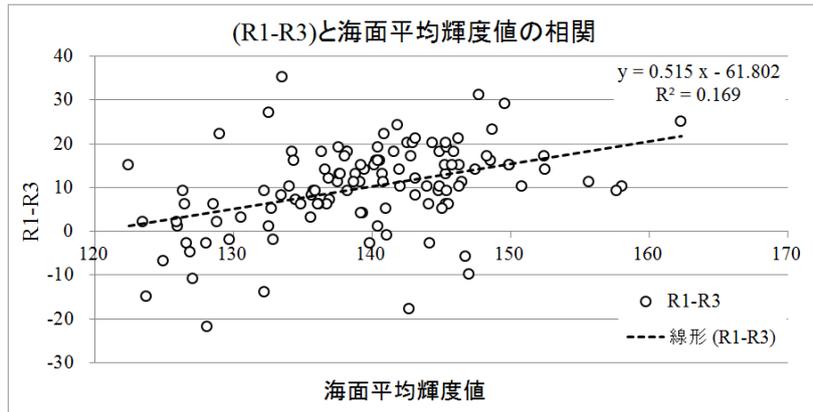


図-6.2.1.6 汀線位置上下R値差と海面平均輝度値の相関

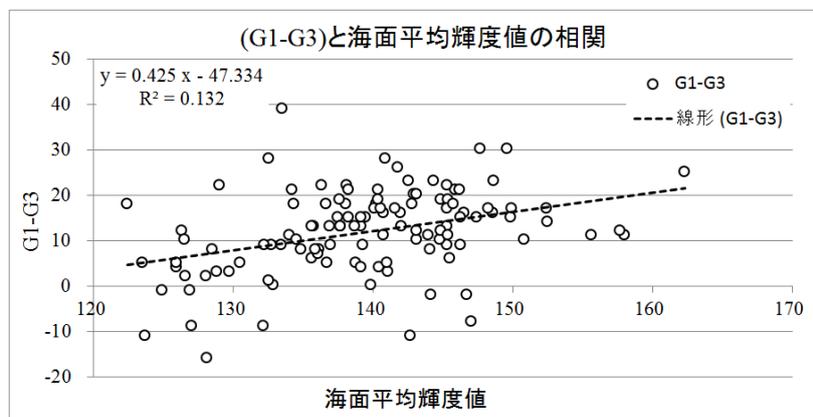


図-6.2.1.7 汀線位置上下G値差と海面平均輝度値の相関

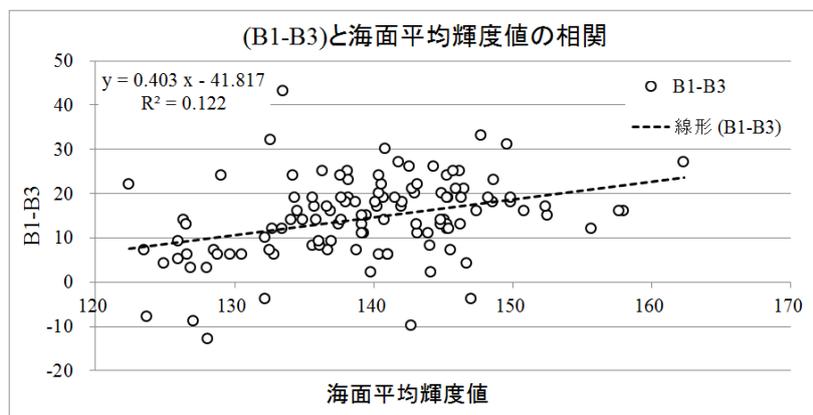


図-6.2.1.8 汀線位置上下B値差と海面平均輝度値の相関

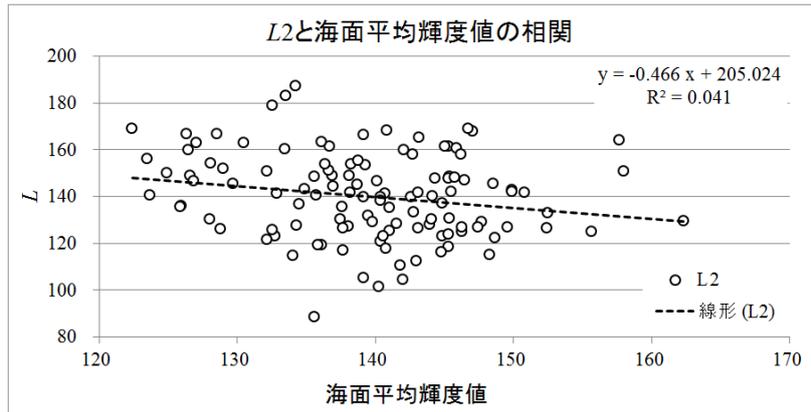


図-6.2.1.9 汀線位置輝度値と海面平均輝度値の相関

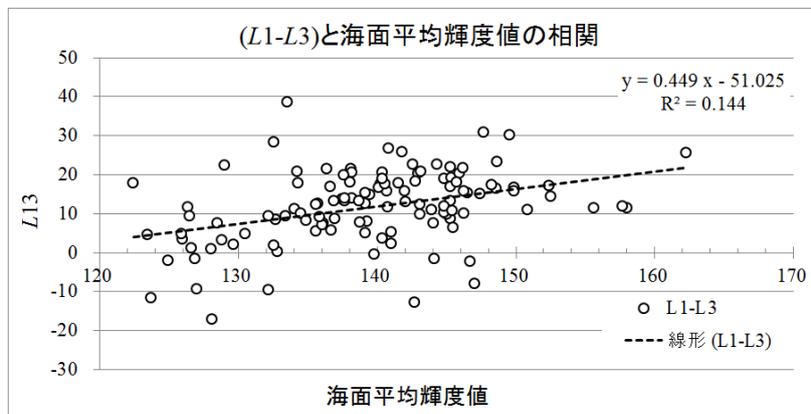
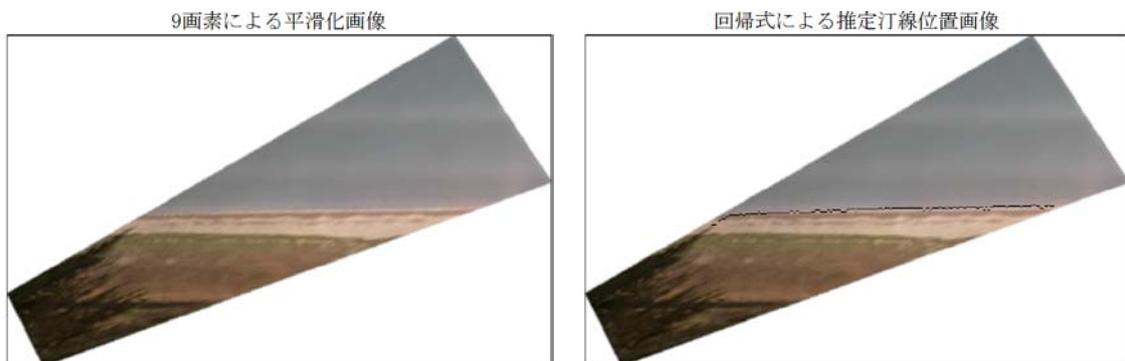


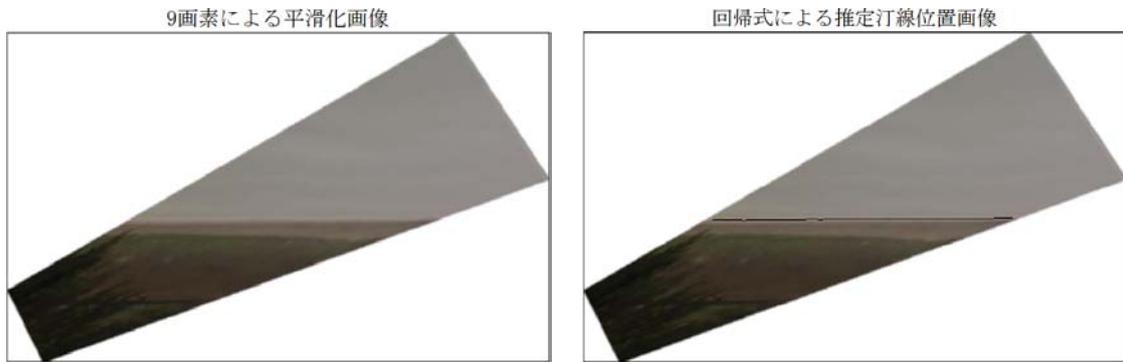
図-6.2.1.10 汀線位置上下輝度値差と海面平均輝度値の相関



(ア) 平滑化オルソ画像

(イ) 汀線推定画像

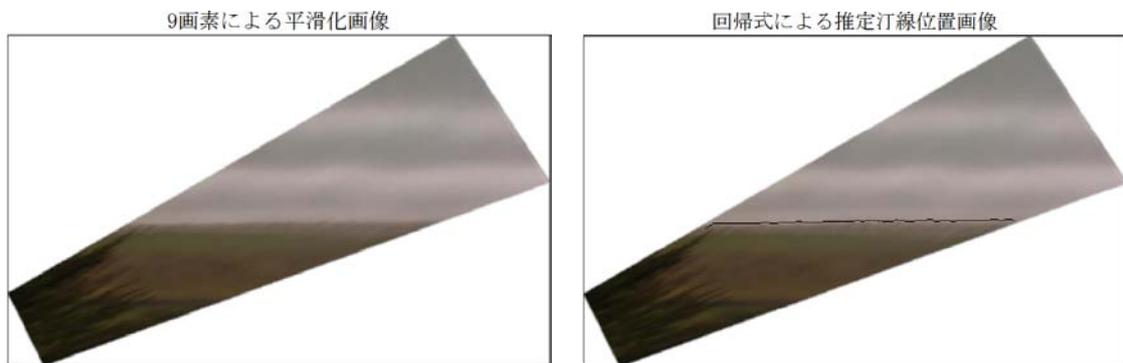
図-6.2.1.11 汀線推定画像 (2010.04.21.08:20)



(ア) 平滑化オルソ画像

(イ) 汀線推定画像

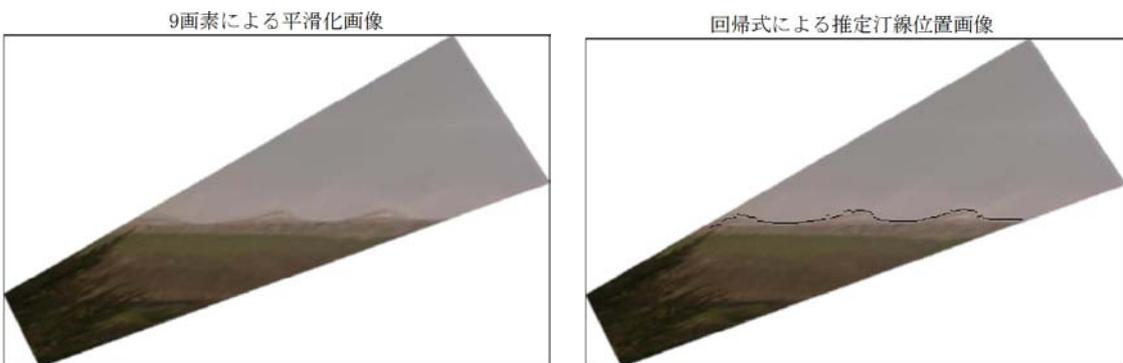
図-6.2.1.12 推定汀線 (2010.05.05.14:20)



(ア) 平滑化オルソ画像

(イ) 汀線推定画像

図-6.2.1.13 推定汀線 (2010.05.07.09:20)



(ア) 平滑化オルソ画像

(イ) 汀線推定画像

図-6.2.1.14 推定汀線 (2010.05.11.09:20)

9画素による平滑化画像



回帰式による推定汀線位置画像

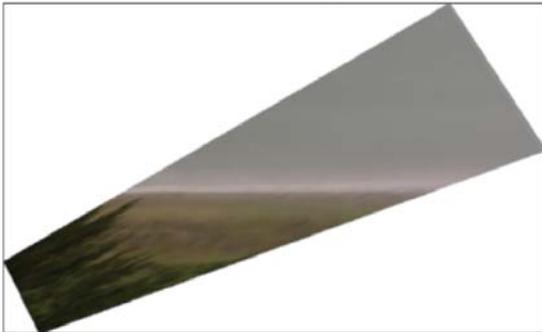


(7) 平滑化オルソ画像

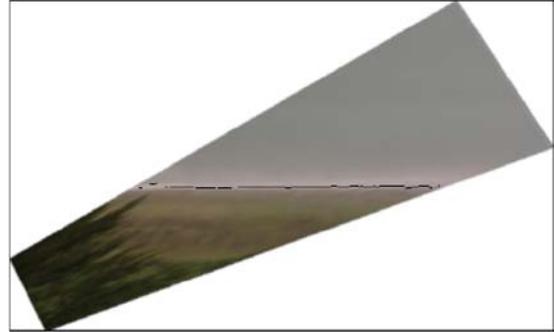
(4) 汀線推定画像

図-6.2.1.15 推定汀線 (2010.05.12.16:20)

9画素による平滑化画像



回帰式による推定汀線位置画像



(7) 平滑化オルソ画像

(4) 汀線推定画像

図-6.2.1.16 推定汀線 (2010.07.11.13:20)

9画素による平滑化画像



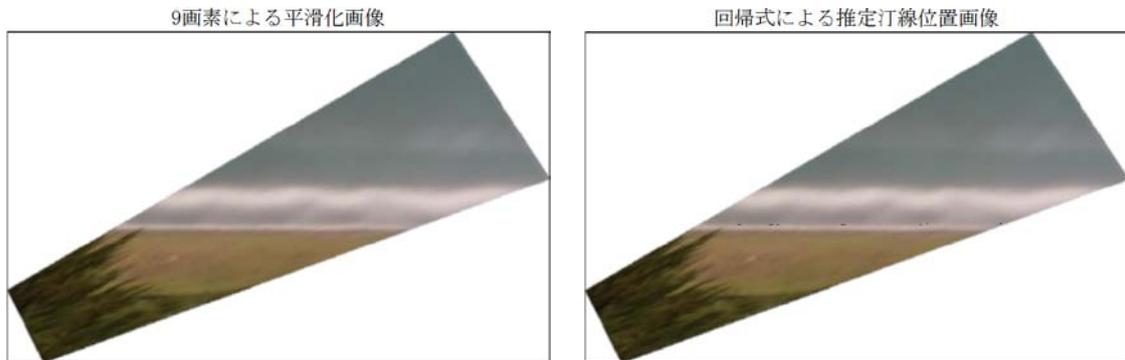
回帰式による推定汀線位置画像



(7) 平滑化オルソ画像

(4) 汀線推定画像

図-6.2.1.17 推定汀線 (2010.06.24.11:20)



(ア) 平滑化オルソ画像

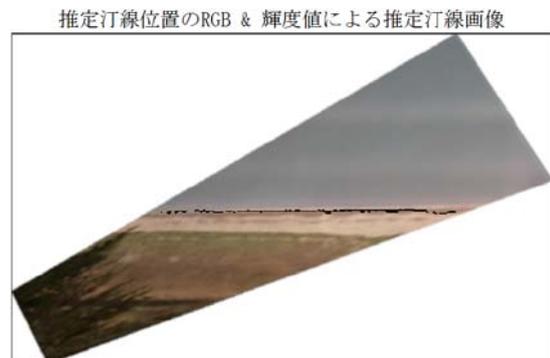
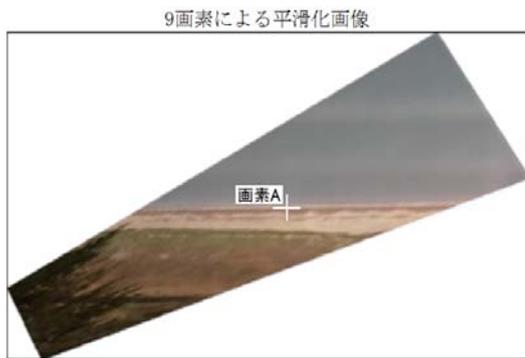
(イ) 汀線推定画像

図-6.2.1.18 推定汀線 (2010.07.30.09:20)

図-6.2.1.11～図-6.2.1.16は、汀線位置を良好に推定できたケースであるが、図-6.2.1.17および図-6.2.1.18は適切に推定できなかったケースである。この輝度値および画素RGB値の推定式による汀線位置推定法は、汀線であると判断するRGB値および輝度値に関する条件の範囲設定に支配され、すべてのケースに適用できないことが原因である。

(2) 視認汀線画素指定と輝度値およびRGB値による汀線位置推定法

汀線位置推定初期値として視認による汀線位置画素点を与え、輝度値およびRGB値により汀線位置を推定する方法について述べる。まず、図-6.2.2.1(ア)において、視認により汀線上の任意の画素Aを選び、その座標値を汀線推定プログラムに入力する。汀線推定プログラムは、この画素Aの輝度値とRGB値を基準値として記憶し、一定の範囲内の輝度値とRGB値を持つ画素を、画素Aを中心とする岸沖方向一定範囲内で探索する。この条件に合致する画素を汀線位置として判断する。この作業を沿岸方向に連続して行い、その画素の集合を推定汀線とする。図-6.2.2.2～図-6.2.2.9に、解析例を示す。



(7) 視認による汀線位置A

(イ) 推定汀線

図-6.2.2.1 推定汀線 (2010.04.21.08:20)

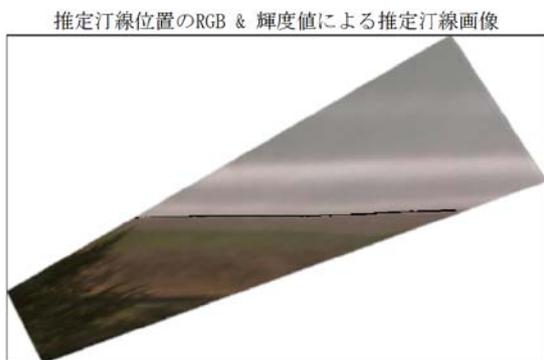


図-6.2.2.2 推定汀線 (2010.04.29.09:20)

図-6.2.2.3 推定汀線 (2010.05.05.14:20)

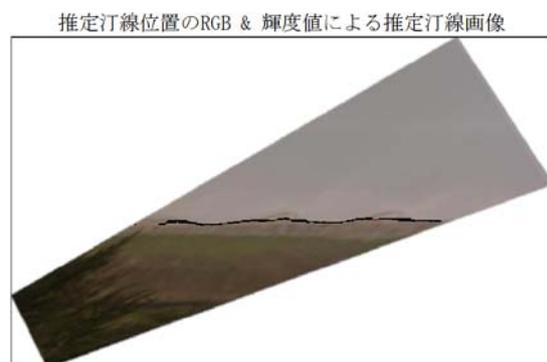
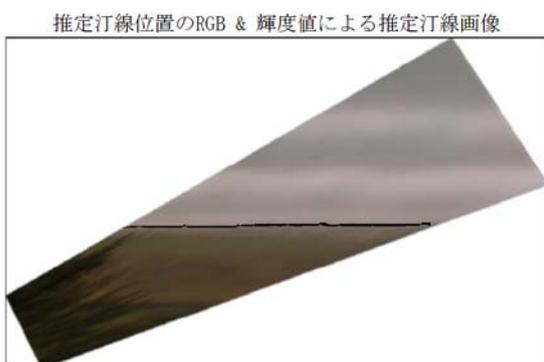


図-6.2.2.4 推定汀線 (2010.05.07.09:20)

図-6.2.2.5 推定汀線 (2010.05.11.09:20)

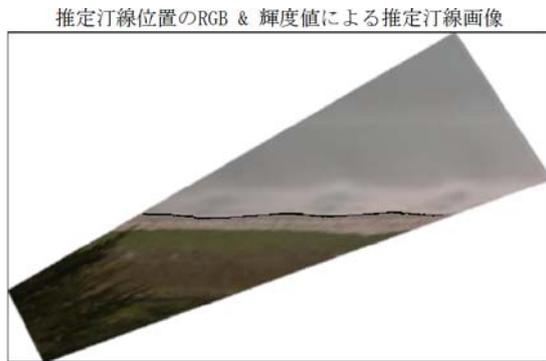


図-6.2.2.6 推定汀線 (2010.05.12.16:20)

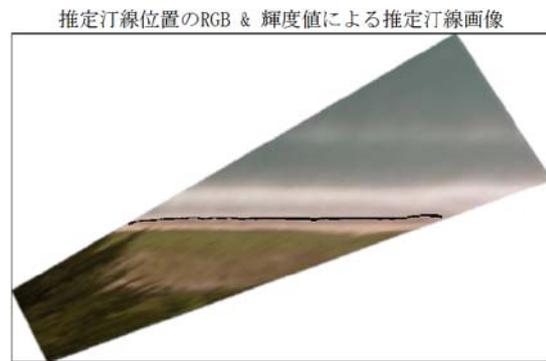


図-6.2.2.7 推定汀線 (2010.06.24.11:20)

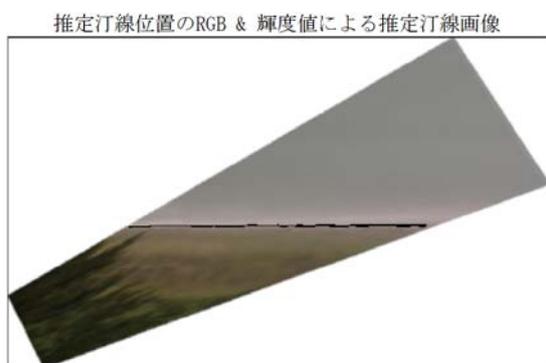


図-6.2.2.8 推定汀線 (2010.07.11.13:20)

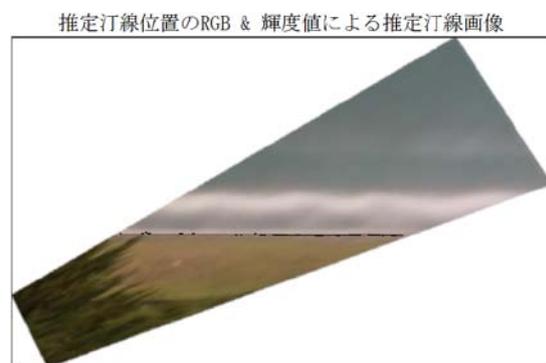


図-6.2.2.9 推定汀線 (2010.07.30.09:20)

図-6.2.2.1のように汀線形状が直線に近い場合は、汀線を推定することは可能であるが、図-6.2.2.5のようにカusp形状のホーンが突き出たケースでは、推定汀線プログラムは汀線形状を正確に捉えられなかった。この原因として、確認された推定汀線位置から沿岸方向にその探索範囲を移動する時、岸沖方向汀線探索範囲を狭く設定しすぎたことが考えられる。しかし、図-6.2.2.9のように汀線上に障害物がある場合でも、その障害物の輝度値およびRGB値が汀線における数値と異なれば場合、汀線推定プログラムは汀線を捉えることが可能である。

(3) 視認による汀線位置輝度値変化の特徴

式(6.2.1.1)で示した輝度値を求める式を式(6.2.3.1)として以下に示す。

$$L = 0.2989X_R + 0.5870X_G + 0.1140X_B \quad (6.2.3.1)$$

ここで、 L は輝度値、 X_R 、 X_G 、 X_B はカラー画像でのRGB値である。輝度値は0~255 の範囲で表され、0 が黒色、255 が白色に対応する（輝度値が大きいほど明るい）。

図-6.2.3.1は海中に沿岸砂州（白く映る滯筋）があるオルソ画像（画像サイズ=558×342画素）である。図中の白い直線が輝度値確認画素ライン(Pixel No.330)である。図中の上2つの点線円は海中の砂州により碎波している位置であり、一番下の点線円は砂浜である。図-6.2.3.2に輝度値確認画素ラインでの輝度値変化を示す。図-6.2.3.2の横軸は、図-6.2.3.1の左上を原点とする上下方向の画素座標である。図-6.2.3.2中の点線円は左から順に、図-6.2.3.1中の上からの点線円に対応する。両図から、水深が浅くなり碎波によって気泡が発生する位置、あるいは乾いた砂浜部分では輝度値が上昇することが確認できる。海上部における輝度値の極大点付近は浅瀬部分、すなわち沿岸砂州の位置であると推定される。

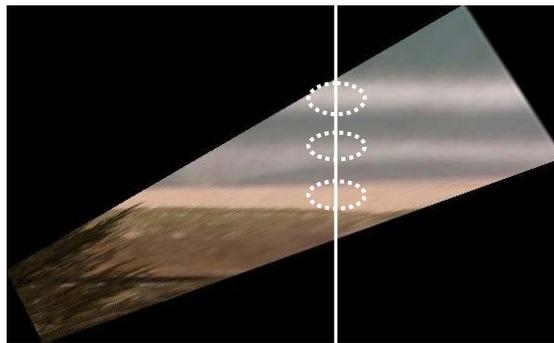


図-6.2.3.1 輝度値確認オルソ画像例1 (2010.04.25.11:20)

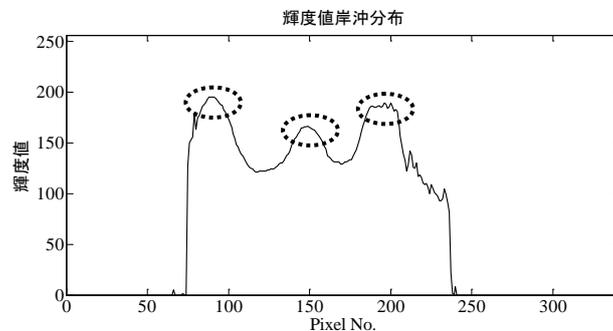


図-6.2.3.2 輝度値変化図 (2010.04.25.11:20)

図-6.2.3.3 に汀線付近で砕波している画像を示す。また、図-6.2.3.4にその輝度値変化図を示す。図-6.2.3.3中の上下2つの点線円部分は、図-6.2.3.4中の左右2つの点線円部分にそれぞれ対応する。汀線付近で水深が浅くなり砕波により海面が白くなるが、それは面的な広がりを持っており、輝度値の極大点位置が汀線位置ではない。

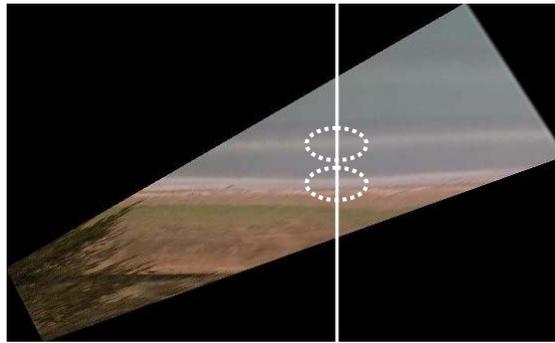


図-6.2.3.3 輝度値確認オルソ画像例2 (2010.04.28.09:20)

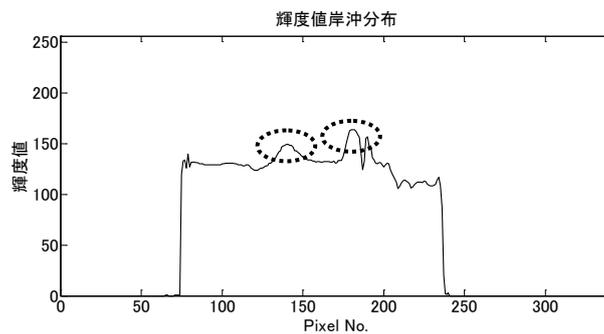


図-6.2.3.4 輝度値変化図 (2010.04.28.09:20)

以上のように、砕波が発生する砂州や海浜砂が乾燥し白系に近い色の場合、輝度値が上昇する。砂州の場合は輝度値が極大となる位置は砂州峰と推定できる。しかし、汀線付近では、輝度値が極大となる位置が汀線位置であるとは限らない。そこで、汀線位置はその沖側と岸側で色が変わっていることに着目し、微分演算が画像の変化を強調することを利用して、輝度値 L に関するラプラシアン演算（式(6.2.3.2)）を用いて汀線位置を推測する方法を以下に述べる。

$$\nabla^2 L(x,y) = \frac{\partial^2 L(x,y)}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 L(x,y)}{\partial^2 y} \quad (6.2.3.2)$$

汀線位置が輝度値の変曲点であるとする、式(6.2.3.2)より式(6.2.3.3)が成り立つ。

$$\frac{\partial^2 L(x,y)}{\partial^2 x} + \frac{\partial^2 L(x,y)}{\partial^2 y} = 0 \quad (6.2.3.3)$$

本研究の解析対象海岸である鉢ヶ崎海岸のオルソ画像では、横軸(x 軸)がほぼ沿岸方向であり、縦軸(y 軸)がほぼ岸沖方向である。そこで、汀線位置推測のための輝度値変化解析は式(6.2.3.3)のy 軸（岸沖）方向のみを対象とする。すなわち、

$$\frac{\partial^2 L(x,y)}{\partial^2 y} = 0 \quad (6.2.3.4)$$

が成り立つ位置が汀線位置となる。しかし、デジタル画像は離散的な画素の集合であるため、常に式(6.2.3.4)が成り立つ画素が存在するとは限らない。そこで、式(6.2.3.5)に示す輝度値の1階微分が極大値、あるいは極小値となる画素を汀線位置とする。

$$\frac{\partial L(x,y)}{\partial y} = \text{Max or Min} \quad (6.2.3.5)$$

ここで、本研究における解析例を用いて、汀線付近の輝度値変化特性について考察する。図-6.2.3.5は2010年4月21日、8時20分台の8分間平均画像であり、沿岸（横軸）方向Pixel No.300における視認による汀線位置（図中の点線円）は岸沖（縦軸）方向Pixel No.185である。この図-6.2.3.5において、沿岸（横軸）方向Pixel No.300の輝度値確認ライン（図中白線）の、画像周辺の黒色部分は含まない海浜部分のみの岸沖方向輝度値変化を図-6.2.3.6に示した。視認による汀線位置は、図-6.2.3.6における輝度値低下途中の点（図中点線円）である。図-6.2.3.7は図-6.2.3.6に示す岸沖方向輝度値変化の1階微分値である。図-6.2.3.7において、視認による汀線位置であるPixel No.185は輝度値1階微分値の極小位置（図中点線円）と一致する。従って、汀線位置は図-6.2.3.6における岸沖方向輝度値変化変曲点と一致する。

同様に、図-6.2.3.8は2010年7月6日、10時20分台の8分間平均画像である（図中白線

が輝度値確認画素ラインである)。図-6.2.3.8において視認による汀線位置は岸沖(縦軸)方向Pixel No.202であり、図中の点線円で示される。図-6.2.3.9は図-6.3.3.8の岸沖方向輝度値変化図である。図-6.2.3.9において、汀線位置であるPixel No.202は、輝度値が上昇途中の変曲点(図中点線円)である。図-6.2.3.10は図-6.2.3.9の岸沖方向輝度値の1階微分値の変化図であり、極大位置(図中点線円)が図-6.2.3.8における汀線位置であり、図-6.2.3.9における変曲点と一致する。

以上から、汀線位置は岸沖方向輝度値が上昇する変曲点と下降する変曲点の2ケースであることが確認された。

(4) 輝度値変曲点による推定汀線位置と視認による推定汀線位置の比較

表-6.2.4.1は69 ケースの画像における、岸沖方向輝度値変化変曲点による推定汀線位置Pixel No.と視認による推定汀線位置Pixel No.を比較したものがある。両者の差は最大2ピクセル、平均0.56ピクセルであり、輝度値変化変曲点を汀線であると推定することは妥当であると考えられる。



図-6.2.3.5 輝度値確認オルソ画像例1 (2010.04.21.08:20)

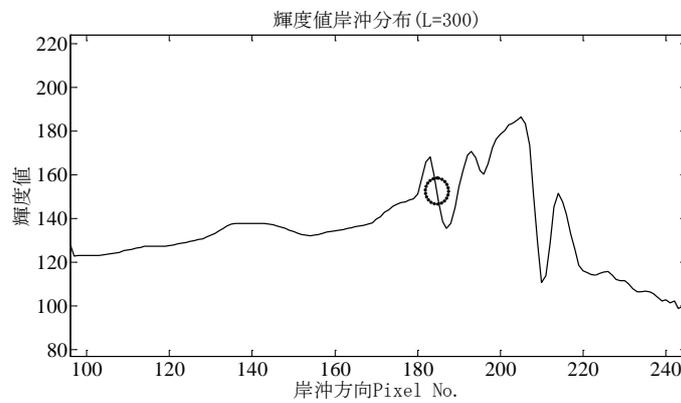


図-6.2.3.6 輝度値変化図1 (2010.04.21.08:20)

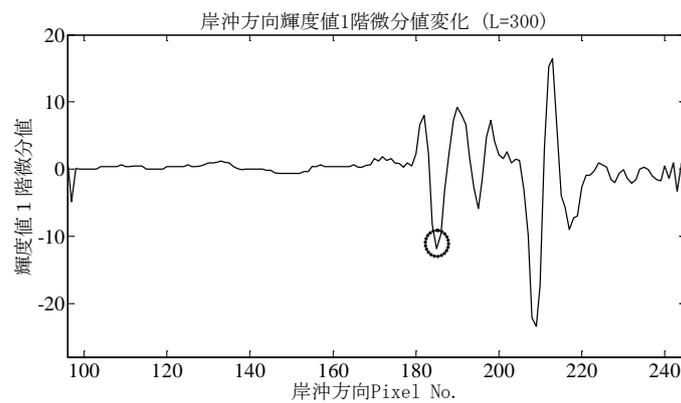


図-6.2.3.7 輝度値1階微分値変化図1 (2010.04.21.08:20)

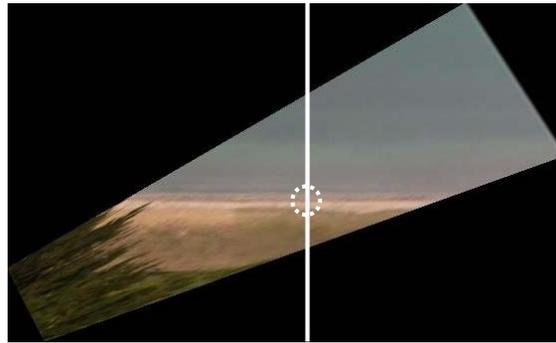


図-6.2.3.8 輝度値確認オルソ画像例2 (2010.07.06.10:20)

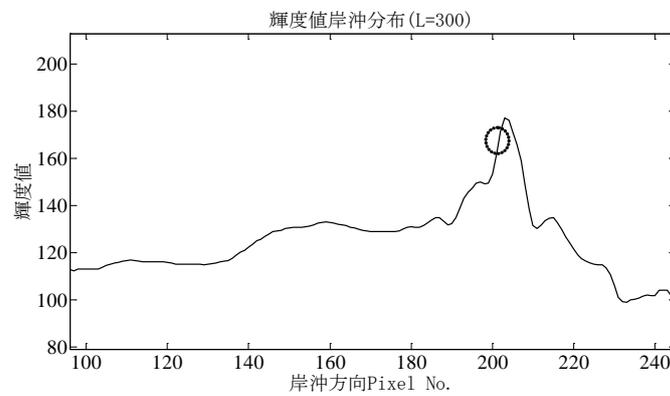


図-6.2.3.9 輝度値変化図2 (2010.07.06.10:20)

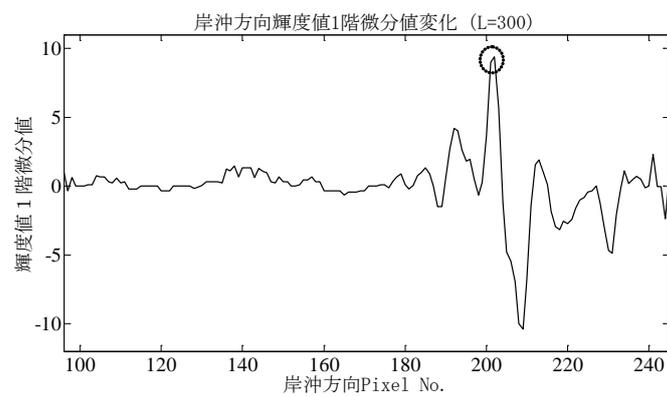


図-6.2.3.10 輝度値1階微分値変化図2 (2010.07.06.10:20)

表-6.2.4.1 輝度値変化変曲点による推定汀線位置と視認による推定汀線位置の比較

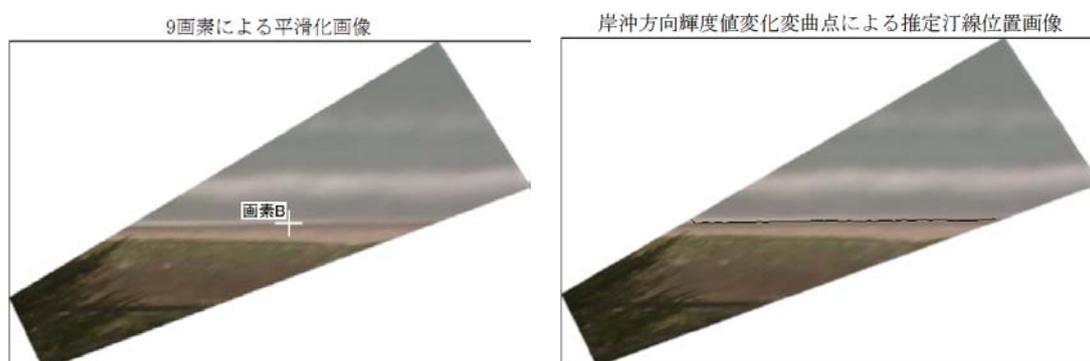
	解析画像	汀線位置		差
		輝度	視認	
1	201004210820	185	183	2
2	201004220820	180	180	0
3	201004230820	184	184	0
4	201004240820	186	185	1
5	201004251120	182	182	0
6	201004260920	184	183	1
7	201004271120	186	187	-1
8	201004280920	187	186	1
9	201004290920	189	189	0
10	201004300720	194	193	1
11	201005010820	191	191	0
12	201005021120	186	186	0
13	201005031020	189	188	1
14	201005041120	191	191	0
15	201005051420	197	195	2
16	201005061220	196	195	1
17	201005070920	195	194	1
18	201005080820	195	194	1
19	201005090920	195	195	0
20	201005100620	193	193	0
21	201005110920	191	191	0
22	201005121620	189	188	1
23	201005130820	187	187	0
24	201005141120	190	190	0
25	201005151120	190	189	1
26	201005161020	191	190	1
27	201005161520	195	194	1
28	201005170920	191	190	1
29	201005181120	192	192	0
30	201005190720	191	191	0
31	201005201120	190	189	1
32	201005210820	197	195	2
33	201005221220	194	194	0
34	201005230820	192	191	1
35	201005231520	195	194	1
36	201005241320	199	198	1
37	201005250720	198	198	0
38	201006011120	188	188	0
39	201006020820	187	186	1
40	201006030820	187	186	1
41	201006041120	189	188	1
42	201006051120	189	188	1
43	201006061120	190	189	1
44	201006071020	190	190	0
45	201006081120	191	190	1
46	201006091020	186	185	1
47	201006101020	186	186	0
48	201006111020	188	187	1
49	201006120820	190	190	0
50	201006131420	194	193	1
51	201006141120	194	194	0
52	201006151020	191	190	1
53	201006161120	189	189	0
54	201006171120	191	191	0
55	201006180820	191	190	1
56	201006191120	192	192	0
57	201006200920	191	191	0
58	201006211020	192	191	1
59	201006220920	192	191	1
60	201006231020	192	191	1
61	201006240820	190	191	-1
62	201006241120	193	193	0
63	201006241520	195	195	0
64	201006261020	193	193	0
65	201006261320	194	194	0
66	201006271420	194	194	0
67	201006281420	199	198	1
68	201006291220	198	197	1
69	201006301320	198	197	1

AVE.	0.55
STDEV.	0.63
MAX.	2
MIN.	-1

(5) 視認汀線画素指定と輝度値変曲点による汀線位置推定法

岸沖方向輝度値変化の変曲点を利用した汀線位置推定法を以下に述べる。

まず、図-6.2.5.1(ア)において視認による汀線上の任意の画素Bを選び、その座標値を汀線推定プログラムに入力する。汀線推定プログラムは、画素Bを始点として岸沖方向一定範囲内での輝度値変化変曲点を探索する。探索した変曲点の座標は沿岸方向で隣接する汀線探索に引き継がれ、沿岸方向に繰り返し実行し連結させて推定汀線とする。図-6.2.5.1(イ)中の黒線が推定汀線である。



(ア) 視認による汀線位置B

(イ) 推定汀線

図-6.2.5.1 輝度値変曲点による汀線推定 (2010.05.04.11:20)

以上の手法により汀線推定を行った例を以下に示す。カस्प形状を捉えているケースもあるが、図-6.2.5.9のように汀線上に障害物があると適切に推定ができない欠点もある。

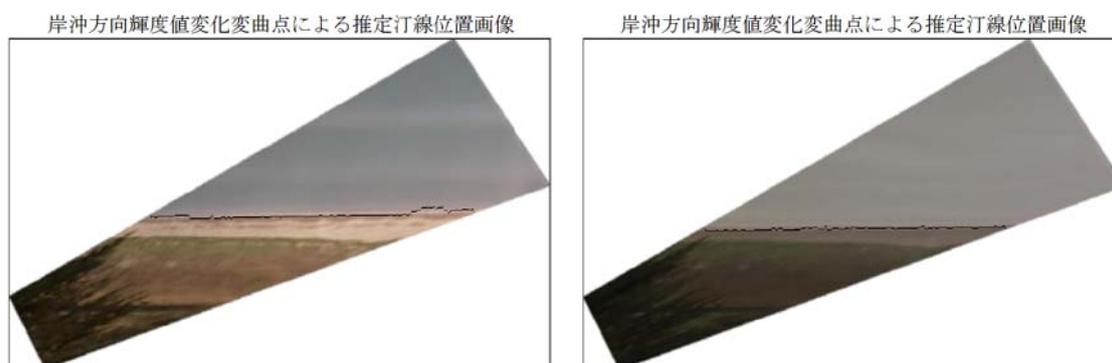
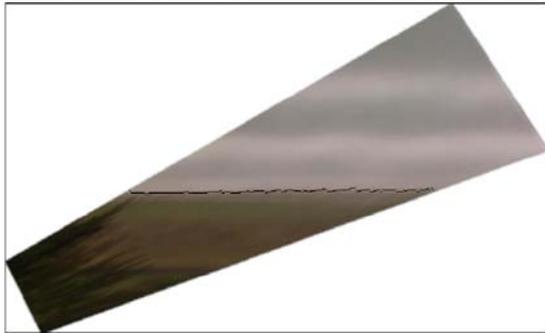


図-6.2.5.2 推定汀線 (2010.04.21.08:20)

図-6.2.5.3 推定汀線 (2010.05.05.14:20)

岸沖方向輝度値変化変曲点による推定汀線位置画像



岸沖方向輝度値変化変曲点による推定汀線位置画像

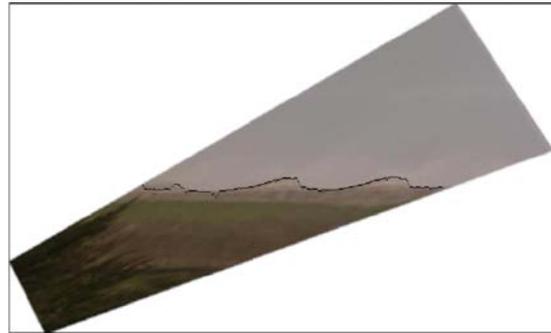


図-6.2.5.4 推定汀線 (2010.05.07.09:20)

図-6.2.5.5 推定汀線 (2010.05.11.09:20)

岸沖方向輝度値変化変曲点による推定汀線位置画像



岸沖方向輝度値変化変曲点による推定汀線位置画像



図-6.2.5.6 推定汀線 (2010.05.12.16:20)

図-6.2.5.7 推定汀線 (2010.05.13.08:20)

岸沖方向輝度値変化変曲点による推定汀線位置画像



岸沖方向輝度値変化変曲点による推定汀線位置画像

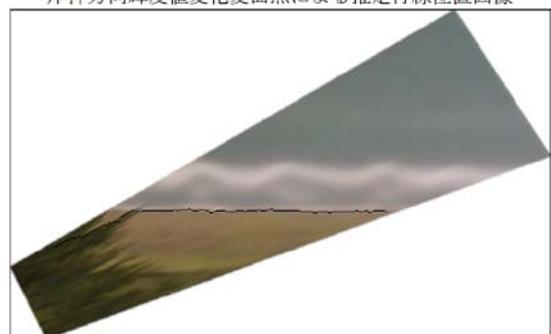


図-6.2.5.8 推定汀線 (2010.07.11.13:20)

図-6.2.5.9 推定汀線 (2010.08.14.09:20)

最後に、輝度値変化変曲点を利用した汀線位置推定法により求めたカस्प地形の振幅および波長を求める。図-6.2.5.10は、図-6.2.5.5により得られた推定汀線である。推定汀線の回帰直線は約 1.3° 反時計方向に傾いている。そこで、回帰直線の傾きを水平にし、移動平均処理を行った汀線上の点A、点B、および点Cを選び(図-6.2.5.11)、その座標値により求めたカस्पの振幅と波長を表-6.2.5.1に示す。表-6.2.5.1より、カस्प振幅=6.4 m、カस्प波長=54.0 mが得られた。これは、図-6.2.5.5と同日の観測方向10分台の解析画像(第5章 第3節 (3), 図-5.3.3.2(エ))のカस्प地形の振幅(=5.7 m)および波長(=53.7 m)と近い数値となっている。この輝度値変化変曲点を利用した汀線位置推定法による汀線位置解析は、デジタイザーの援用による汀線位置解析に比べ効率が良く、長期連続観測における大量のデータ解析に有効であると考えられる。

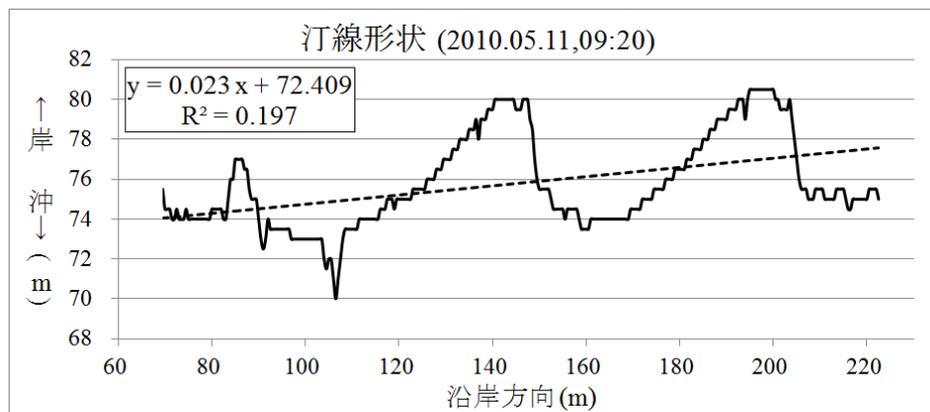


図-6.2.5.10 画像解析による汀線形状

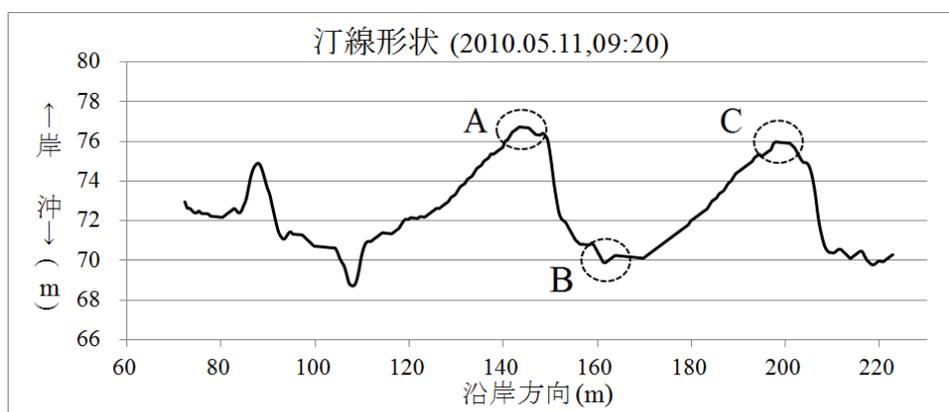


図-6.2.5.11 画像解析による汀線形状 (水平・移動平均処理済み)

表-6.2.5.1 カस्पホーン・ベイの座標値

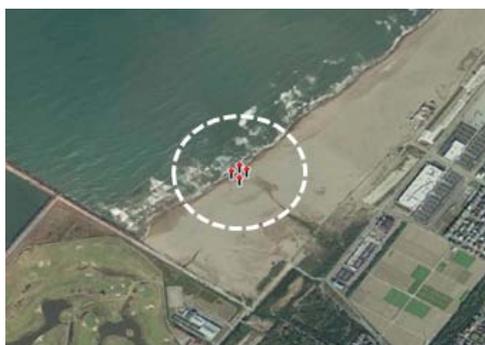
点	沿岸方向 (m)	岸沖方向 (m)
A	143.9	76.7
B	161.7	69.9
C	197.9	76.0
カस्प波長 (m)		54.0
カस्प振幅 (m)		6.4

第7章 内灘海岸への適用

第1節 簡易空撮気球を活用した観測システム

(1) 簡易空撮気球による沿岸撮影

空撮画像からオルソ画像を作成するためには、4点以上のリファレンスポイント(R.P.)が必要がある。そこで、図-7.1.1.1(ア)および(イ)に示すように1枚の空撮画像に対して4点のR.P.を設置する。R.P.の位置は、ハンディー型GPSを用いてその緯度・経度データを取得するとともに、R.P.間の距離をレーザー測距計により計測した(図-7.1.1.1(ウ)および(エ))。



(ア) GPSによるR.P.位置記録例



(イ) GPSによるR.P.位置記録例(拡大図)
(国土地理院に加筆)



(ウ) レーザー測距計によるR.P.間の測距



(エ) ブルーシートによるR.P.の設置

図-7.1.1.1 R.P.の設置

図-7.1.1.1 の R.P.の位置データおよび R.P.間の距離を表-7.1.1.1 に示す。

表-7.1.1.1 GPS による R.P.位置データと R.P.間距離

測点	緯度(°)	経度(°)	R.P.	距離(m)
149	36.639332	136.618985	149-150	31.385
150	36.639598	136.619203	150-151	26.827
151	36.639725	136.618973	151-152	39.399
152	36.639535	136.618719	152-149	22.474
			149-151	45.632
			150-152	40.086

図-7.1.1.2 に内灘海岸における空撮画像例とそのオルソ画像を示す。



図-7.1.1.2 空撮画像例

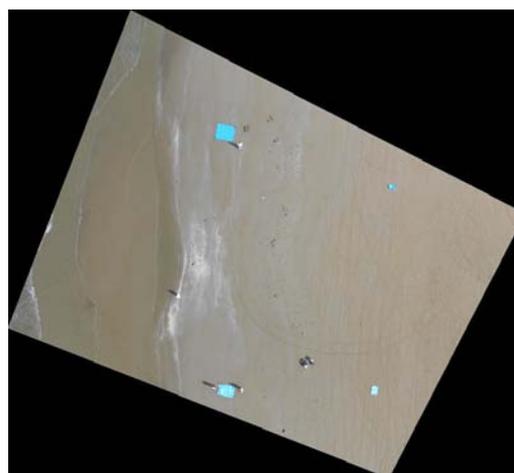


図-7.1.1.3 図-7.2.1.2 のオルソ画像

以上のような手順で、金沢港東防砂堤から内灘高校方面に向かって空撮を連続実施した。

(2) オルソ画像の重ね合わせ

全 7 箇所でのオルソ画像作成後、画像周辺部の黒色部分を削除する。その後、隣り合うオルソ画像内の重複 R.P.が重なるように接合した画像が図-7.1.2.1 である。ここでは画像の上方向が沖方向である。作成したオルソ画像は 1 Pixel=0.1 m に対応しており、座標変

換誤差は 0.1 m 程度であることを確認している。

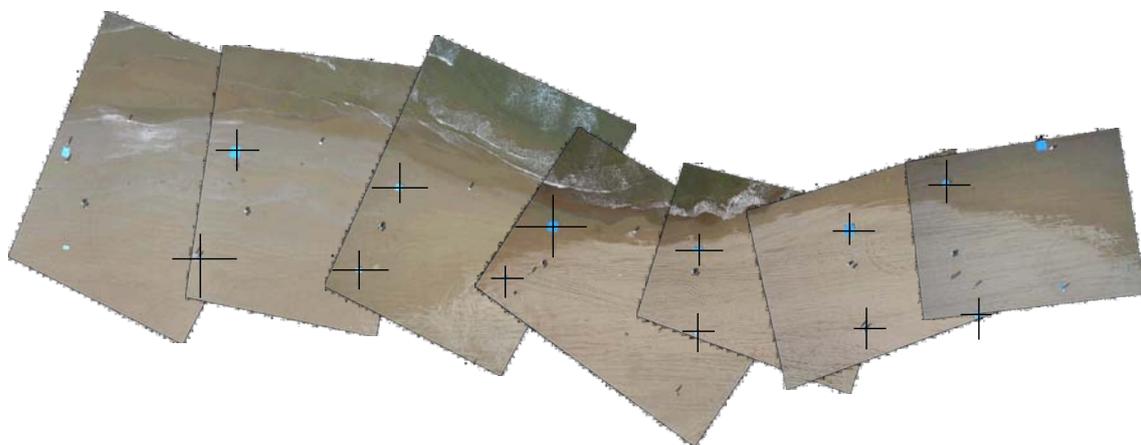


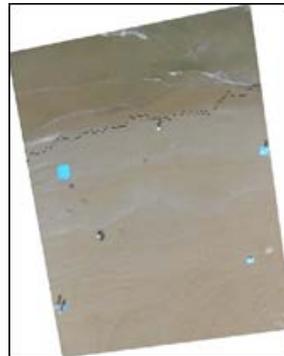
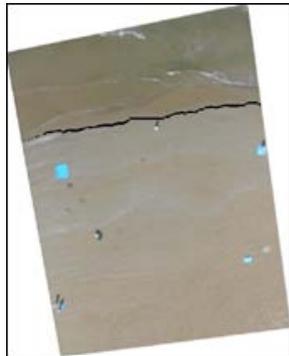
図-7.1.2.1 重ね合わせたオルソ画像

重ね合わせたオルソ画像を観察すると、汀線形状が高解像度の画像として捉えられていることが確認でき、カस्प地形が形成されていることも分かった。また、海浜砂の湿潤状態の違いも確認でき、左から 3 枚目と 4 枚目の写真からは砂の湿っている所が 2 箇所あることも分かる。これより、潮が満ちていた時は、陸側の湿潤地点まで水面が到達していたと考えられる。このように、今回の撮影において、海浜の湿潤線を鮮明に捉えることができたが、写真の大部分が陸地を占めており、海浜流など、波の動きを捉えることができなかった。汀線近傍の地形と離岸流の発達を同時に捉えるためには、気球の高度をより高くして広範囲の撮影を行うことが必要であると考えられる。

第 2 節 画像解析による汀線位置推定法の内灘海岸への適用

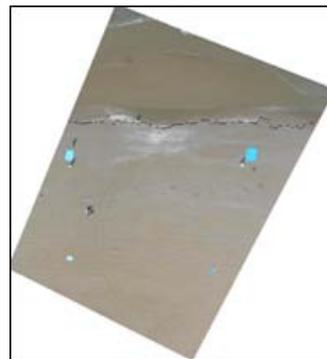
本研究により鉢ヶ崎海岸において構築した画像解析による汀線位置推定法を内灘海岸での空撮画像に適用した、砂浜における湿潤線の探索結果を図-7.2.1~図-7.2.4 に示す。ただし、ここで用いた解析画像はスナップ画像であり、解析法は「第 6 章 第 2 節 (2) 視認汀線画素指定と輝度値および RGB 値による汀線位置推定法」と「第 6 章 第 2 節 (5) 視認汀線画素指定と輝度値変曲点による汀線位置推定法」による 2 種類である。それぞれの湿潤線探索画像例において、左図(ア)は前者、右図(イ)は後者、図中の黒線が探索した湿潤

線である.



(ア) 輝度値・RGB 値による湿潤線 (イ) 変曲点による湿潤線

図-7.2.1 探索湿潤線画像例 1



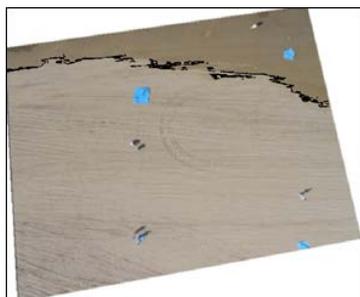
(ア) 輝度値・RGB 値による湿潤線 (イ) 変曲点による湿潤線

図-7.2.2 探索湿潤線画像例 2

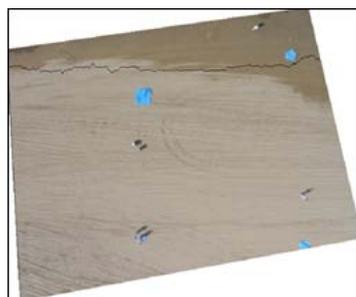


(ア) 輝度値・RGB 値による湿潤線 (イ) 変曲点による湿潤線

図-7.2.3 探索湿潤線画像例 3



(ア) 輝度値・RGB 値による湿潤線



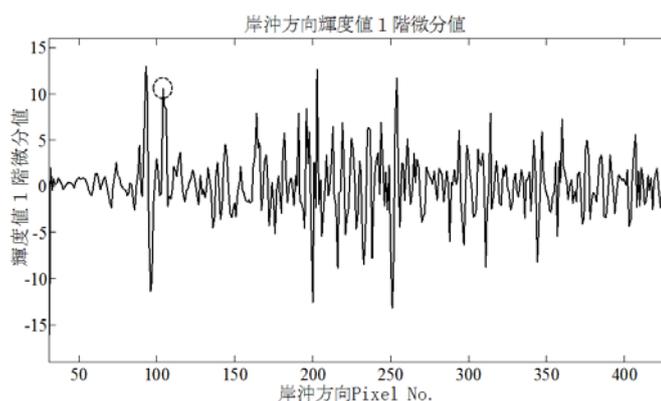
(イ) 変曲点による湿潤線

図-7.2.4 探索湿潤線画像例 4

以上の例では、全体的には良好な結果であるが、十分に捉えきれていない部分もある。図-7.2.5(ア)中の白十字線は、図-7.2.4における視認による湿潤線位置である。図-7.2.5(イ)は、この位置の含む岸沖方向輝度値の1階微分値変化図であり、図中の点線円は視認による湿潤線位置である。図-7.2.5(イ)より輝度値変化の1階微分値が細かく振動し、変曲点が狭い範囲に多数存在することが確認される。そのため湿潤線探索は不安定となり、輝度値が平滑化される時間平均画像を用いることにより精度の高い湿潤線探索が可能になると推測される。



(ア) 視認による湿潤線位置



(イ) 輝度値1階微分値変化図

図-7.2.5 湿潤線探索における輝度値変曲点

第8章 結 論

国内外において、近年多くの海岸で海岸侵食や波浪災害等の問題が生じている。今後ますます深刻になると予想される海岸侵食や波浪災害に対して、効果的かつ適切な対策を実施するための海象特性や漂砂メカニズムの解明には、広範囲にわたる沿岸波浪や地形変動の継続的モニタリングが不可欠である。しかしながら、現在、海底地形観測の目的で行われている深浅測量は、対象が広範囲の場合、コスト面の制約から、年1~2回程度しか行われないのが現状である。一方、IT関連の技術革新により、ローカルリモートセンシングと呼ばれる安価でメンテナンスフリーの観測システムの構築が可能となりつつある。こうした新規技術を用いることにより、深浅測量に比べて低コストで海岸侵食や汀線の変化、沿岸地形等を長期にわたって観測することが可能である。

このような観点から、本研究では、ローカルリモートセンシングシステム、すなわち、ネットワークカメラを活用した画像解析システムを構築し、その適用性を検証し鉢ヶ崎海岸におけるカस्प地形の発達特性を明らかにした。また、画像解析による汀線位置推定法についても考究した。さらに、機器の固定設置を必要としない、機動性に優れる画像観測システムの構築を指向した。

第1節 主要な成果

主要な成果を以下に要約する。

第1章では、本研究の背景および目的について整理した。

第2章では、まず観測対象域の1つである珠洲市鉢ヶ崎海岸の概要として、地理的概要、地層的概要、鉢ヶ崎海岸への土砂供給源と考えられる紀の川の概要、現在の海浜状況、底質の粒度特性について述べた。鉢ヶ崎海岸の深浅測量の結果、海底断面はその勾配により3区間に分けられ、沖に向かうに従って、急勾配に変化していくことが確認された。また、航空写真による長期汀線変動の解析により、1975年は堤防との平均距離が12 mであった海浜幅が、2006年には62 mに達していることを確認した。

次に、もう1つの観測対象域である内灘海岸の概要として、地理的概要、海象特性、底質の粒度組成、現在の海浜状況、汀線位置の中期的変化、および短期的変化について述べた。内灘海岸は、夏季には海水浴場として多くの海水浴客に利用されるが、毎年、離岸流

による事故が発生している。そこで離岸流の発生に関連するカस्पベイとカस्पホーンの短期的位置変化についても調査した。調査回数が少なく規則性等を見出すことはできないが、内灘海岸の金沢港東防砂堤付近汀線においてカस्प形状が短期的に同位置付近に発生する可能性もあると考えられる。

第3章では、画像解析による海浜地形変動観測として、ネットワークカメラを活用した観測システムと簡易空撮気球を活用した観測システムについて述べた。ネットワークカメラは、鉢ヶ崎海岸のほぼ中央に位置する高層ホテル屋上に設置され、約2 kmの汀線付近を6区間に分けて連続観測を続けている。ホテル屋上機械室内には観測カメラ制御用PCが設置され、金沢大学水工研究室PCからリモートデスクトップを利用して操作可能となっている。当初、インターネットを通じて研究室PCに取得データを転送することを予定していたが、ADSL回線の速度が十分でなかったため、定期的(3~4ヶ月に1度)観測地へ行き、このハードディスクの交換と回収を行っている。この外付けハードディスクの交換・回収作業を除けば、本観測システムはほぼメンテナンスフリーであり、ネットワークカメラを活用した画像観測システムを構築した。

簡易空撮気球は、内灘海岸の観測に用いた。気球サイズは300 cm×幅70 cmであり、折り畳めば乗用車座席シートに積むことが可能である。気球にはカメラが搭載され、ラジコン操作により海浜撮影が可能であり、3人で十分な観測ができることが確認できた。海浜観測において機器の固定設置を必要とせず、機動性に優れる簡易空撮気球を用いた画像観測システムの構築が可能であることを示した。

第4章では、海浜観測で取得した画像の解析手法について述べた。画像解析には、まず時間平均画像の作成を行う。これはスナップ画像では特定困難な汀線の平均位置や海面下の沿岸砂州の位置を、画像を時間平均することにより可能とする手法である。4~5分程度の時間平均画像により汀線や沿岸砂州の位置変動を十分に把握できることを確認した。

また、カメラ画像では被写体までの距離に起因する歪みが発生し、これを用いて海浜地形変化の定量化はできない。そこで、カメラ画像を射影変換処理し歪みを取り除き、海浜地形変化の定量化が可能となるオルソ画像の作成法について述べた。

第5章では、まず、鉢ヶ崎海岸で観測取得した海浜画像を用いて、オルソ画像作成時のリファレンスポイント(R.P.)に関する座標変換精度を検証した。6区間に分けた観測方向の中でカメラ設置地点正面から東側の5区間について解析を行った。その結果、観測カメラからR.P.までの平均距離に対するR.P.の位置推定誤差(自乗平均平方根RMS)の割合は

0.24%～0.11%となり、十分な座標変換精度を有することが確認された。また、鉢ヶ崎海岸における汀線位置に関して現地測量と画像解析結果の比較検討を行った。その結果、汀線位置岸沖方向の平均誤差は0.13 m、RMS誤差は0.56 mとなり、ネットワークカメラを活用した画像解析による汀線地形の定量化手法は実用的に十分な精度を有することが確認された。

次に、オルソ画像から視認によりカスプの抽出を行い、メガカスプの振幅・波長と有義波高・有義周期との相関、および沿岸砂州とカスプホーンの関連について考察した。その結果、有義波高が低下し、有義周期が長くなるとカスプが成長し、有義波高が低下し、有義周期が短くなるとカスプが縮小したことを確認した。また、沿岸砂州が汀線側に近づいている位置にカスプホーンが発達していることも確認された。デジタイザーの援用によりメガカスプの発生・成長・消失を解析し、カスプ振幅および汀線変動強度と有義波高および入射波周期の相関を求めた。その結果、有義波高が低下あるいは有義周期が短くなるとカスプ振幅は増大し、有義波高が上昇あるいは有義周期が長くなるとカスプ振幅は縮小する傾向が観察された。有義波高および入射波周期と汀線変動強度の相関も同様である。さらに、入射波周期とカスプ波長の相関を鉢ヶ崎海岸における観測結果と従来の研究結果と比較した結果、ほぼ既往の報告に従う形となったが、周期5秒前後での観測値は乖離していた。以上のように、汀線近傍におけるリズムックパターンの発生・成長・消滅と入射波特性との相関解析を行って、鉢ヶ崎海岸におけるメガカスプ地形の発達特性を明らかにした。また、オルソ画像によるタイムスタック画像を用いて、沿岸砂州の移動や汀線に対する傾き、汀線との距離、汀線移動の画像解析を行った。

第6章では、画像解析による汀線位置推定法について3種類の方法について検討した。観測画像はデジタルデータであり、画像画素値はRGB値で与えられる。このRGB値とこれにより求められる輝度値を用いて汀線位置の推定を試みた。汀線位置の画素値は天候、波浪および海浜砂の乾湿等により変化し、RGB値および輝度値の値によってすべての画像に適用できる汀線位置推定は困難であった。そこで、視認による汀線上の任意の1点の座標値を汀線位置推定プログラムに入力し、その位置のRGB値および輝度値を基準として海浜全体の汀線位置を推定する方法を検討した結果、おおむね良好な結果を得た。

次に、輝度値と汀線位置の相関を検討した結果、汀線位置では輝度値が上昇している場合と下降している場合があり、輝度値変化の変曲点が視認による汀線位置に一致することが確認された。そこで、輝度値変化の微分演算により汀線位置を推定する方法を検討し

た。その結果、画像において視認による汀線上の任意の1点の座標値を汀線位置推定プログラムに入力し、その位置を始点として輝度値変化の変曲点を探索することにより、海浜全体の汀線位置を推定することが可能となった。このように、汀線近傍における画素輝度値特性の解析により、画素輝度値の微分演算を用いた汀線位置推定法を構築した。

第7章では、機器の固定設置を必要としない、機動性に優れる画像観測システムの構築を指向し、簡易空撮気球による沿岸域画像解析を石川県河北郡内灘海岸で実施した。その結果、汀線近傍における高解像度の画像取得が可能であることを確認し、本研究で構築した地形定量化手法を活用した画像解析および汀線位置推定法が適用可能であることを示した。

第2節 今後の課題

本研究におけるネットワークカメラを活用した海浜観測システムでは、観測カメラは汀線から水平距離160 m、高度36 m、さらに観測カメラと汀線間にはおよそ障害物がない、という非常に恵まれた条件下に設置された。観測カメラの観測地撮影俯角が小さくなると、撮影画像のオルソ画像への変換において発生する座標変換誤差は大きくなる。そこで、今後の課題として、観測カメラが低高度に設置された場合の座標変換誤差を縮小する方法を考案することが挙げられる。

次に、砕波時に発生する気泡による画像輝度値の上昇を利用して、沿岸砂州変形、および移動を解析した。しかし、波が穏やかで砕波が発生しない場合は海面に滯筋が現れず、解析することはできない。砕波の無い静穏な海面状況でも海底地形を推定できる方法の構築が課題となる。

さらに、本研究により構築した画像解析による汀線位置推定法を、様々な海浜砂質および乾湿状態で適用可能かどうかを確認することも課題となる。

また、簡易空撮気球による沿岸観測を内灘海岸において実施した。本研究により構築した画像解析による汀線位置推定法を、内灘海岸での空撮画像における海浜湿潤線探索に適用した結果、全体的には良好な結果であるが十分に捉えきれていない部分もあった。その原因として、解析画像がスナップ画像の場合、汀線付近の画像輝度値1階微分値が細かく振動しているため、変曲点探索が不安定になることが考えられる。湿潤線探索には輝度値が平滑化される時間平均画像が必要であり、簡易空撮気球の上空での位置安定性を増す工

夫と，短時間平均画像の解析法の検討が課題である。

謝 辞

砂浜海岸域には3種類の場としての機能が考えられる。まず、海水浴や漁場、あるいは海辺を中心としたまちづくりや観光地としての利用の場としての機能、次に、魚介類や藻類等の生息域としての自然・生態系の場としての機能がある。そして、高潮や津波に対する自然の防波堤としての役割を果たす防災や減災の場としての機能である。2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震においては、砂浜による津波被害の軽減が報告されており、砂浜海岸域を侵食から守ることは社会の要求であり、様々な研究・対策がなされている。このような中、工業高校土木科教師として生徒に土木教科を教え四半世紀余り、勤務校の理解と協力の下、再び研究する機会を得た。大学は私が学生時代に学んだ金沢城内キャンパスと小立野工学部キャンパスから角間キャンパスに移転し、研究環境は一層充実し、そのアカデミックな環境で研究できることに心が躍った。

水工研究室のゼミでは研究熱心な学生の姿に刺激を受け、国内外の他大学の先生方による講義を受ける機会も数多く得て、広く深く学ぶことができた。土木学会や国際会議の研究発表会にも参加し、土木工学における最新の研究成果および技術、そして今後の進むべき方向性を学んだ。博士課程における自身の研究では、データの取得・処理・解析、および解析プログラムの作成等のほか、フィールドワークとして研究対象地における現地測量、周辺調査、および聞き取り調査等、広範囲の分野で多くのことを経験した。これらを自身の勤務校での授業に適宜、様々な形で取り入れることに努め、生徒が土木工学を学ぶことの楽しさを知り、さらに学ぼうとする意識が向上していることを実感している。

平成21年4月に入学して4年半、研究成果は未だ不十分な面も多いが、様々な方々からご指導・ご支援をいただき、まとめることができた。ここに感謝いたします。

まず、大学関係では、本論文審査の主査でもある金沢大学教授 由比政年先生には、最新の研究動向を踏まえた懇切丁寧なご指導をいただき、また、論文の作成や土木学会および国際会議での発表に関する貴重なご指導をいただきました。熊本大学教授 山田文彦先生には、珠洲市鉢ヶ崎海岸における現地観測へご同行いただき、観測援助とともに貴重なご助言をいただきました。また、金沢大学教授 齋藤武久先生、金沢大学准教授 榎田真也先生、金沢大学准教授 谷口健司先生には研究に関する貴重なご助言をいただきました。金沢大学名誉教授 石田 啓先生には、学士・修士の頃から温かくご指導をいただくとともに、海岸工学の面白さをお教えいただきました。

また、珠洲ビーチホテルの松家清吾総支配人および従業員の方々には現地観測および観測カメラのメンテナンス等にご協力をいただきました。珠洲市 しいたけ小屋 ひろ吉 ご主人奥野弘吉様，奥様 ふみえ様には，鉢ヶ崎海岸の変遷について貴重なお話をいただき，珠洲市農業協同組合 専務理事 上野登起男様には鉢ヶ崎海岸の深淺測量において多大なご協力をいただきました。

金沢大学水工研究室においては，院生 松山正之氏，小椋太智君，元院生 杉浦 匠君，脇田康介君，岡田磨香さん，元学生 犬伏章文君，大洞允志君，吉崎平太君には現地観測や解析等でご協力をいただきました。

一方，勤務先関係では金沢市立工業高等学校 元学校長 糸屋吉廣氏，前学校長 浦上光太郎氏，現学校長 内村博和氏には，学校に所属しながら研究の機会を与えていただくなど，業務上様々のご配慮をいただきました。そして常日頃生徒への教育を一緒に行っている土木科の先生方をはじめとする金沢市立工業高等学校の諸先生方には，良い職場環境の中で仕事をさせていただくとともに，力強いバックアップをいただきました。

本研究に欠くことのできない潮位データ，および入射波データは，それぞれ気象庁 潮汐観測資料，および国土交通省 全国港湾海洋波浪情報網（NOWPHAS）による波浪観測データを使用させていただきました。また，国土地理院による航空写真も使用させていただきました。

このように，本研究の実施およびまとめにあたっては，様々な方々からご協力をいただきました。重ねて感謝いたします。

最後に，この4年半，家族には生活上かなりの負担や制約をかけていたと思いますが，妻 裕美の理解と協力により私自身は充実した研究生生活を送ることができました。ここで心から感謝の言葉を贈ります。

参 考 文 献

- 1) 堀川清司・佐々木民雄・堀田新太郎・桜本 弘：海岸流に関する研究（第2報）－海浜流の現地観測－，海岸工学講演会論文集，21，pp.347-354，1974.
- 2) D. C. Patterson and R. J. Blair：Visually Determined Wave Parameters, Six Australian Conference on Coastal & Ocean Engineering, pp.151-155, 1983.
- 3) T. C. Lippman and R. A. Holman：Quantification of Sand Bar Morphology, A Video Technique Based on Wave Dissipation, *J. Geophysical Res.*, 94, pp.995-1011, 1989.
- 4) T. C. Lippman, R. A. Holman, and K. K. Hathaway：Episodic, Nonstationary Behavior of a Double Bar System at Duck, North Carolina, U.S.A., 1986-1991, *Journal of Coastal Research*, SI, 15, pp.49-75, Fort Lauderdale, Florida, 1993.
- 5) 藤田一郎・河村三郎：ビデオ画像解析による河川表面流計測の試み，水工学論文集，38，pp.733-738，1994.
- 6) K. T. Holland and R. A. Holman：Video Estimation of Foreshore Topography Using Tricolor Stereo, *Journal of Coastal Research*, 13, 1, pp.81-87, Fort Lauderdale, Florida, 1997.
- 7) 武若 聡・中村 崇：係留ビデオシステムによる砕波帯の水理現象観測の試み，海岸工学論文集，46，pp.151-155，1999.
- 8) 武若 聡・中村 崇・三崎尚一郎：係留ビデオシステムを用いた砕波帯現象の解析，海岸工学論文集，47，pp.126-130，2000.
- 9) 藤田一郎・中島丈晴：実河川流計測におけるLSPIVの汎用化と水制間流れへの適用，水工学論文集，44，pp.443-448，2000.
- 10) 鈴木高二朗・高橋重雄・近藤充隆・小林雅彦・岩上淳一：ビデオ画像処理の離岸流事故防止への適用性に関する予備的検討，海岸工学論文集，47，pp.1256-1260，2000.
- 11) 有川太郎・鈴木高二朗：PIV解析を用いた現地海浜流の計測システムの開発，海岸工学論文集，48，pp.101-105，2001.
- 12) 稲葉 徹・森本佳緒里・武若 聡・西村仁嗣：波浪場画像の解析による水深分布推定，海岸工学論文集，48，pp.1416-1420，2001.
- 13) 武若 聡・三崎尚一郎・岡本宴徳：画像計測による沿岸流速分布の推定，海岸工学論文集，48，pp.116-120，2001.

- 14) 黒澤辰昭・田中 仁：空中写真による海浜汀線形状の判読に関する研究，海岸工学論文集，48，pp.586-590，2001.
- 15) 鈴木高二朗・高橋重雄・山縣延文・堀田 治・栗山善昭，Aarninkho, S. , Ruessink, G. , Elshoff, I. : ARGUSビデオ解析による宮崎住吉海岸の長期地形観測，海岸工学論文集，49，pp.571-575，2002.
- 16) 小野正博・宇野喜之・片野明良：画像解析による荒天時遡上域での長周期水位変動挙動に関する研究，海岸工学論文集，51，pp.126-130，2004.
- 17) 鈴木高二朗・栗山善昭：住吉海岸におけるバーの長期変動について．海岸工学論文集，51，pp.521-525，2004.
- 18) 浅田 昭：水中のビジュアライゼーションを革新する音響ソナー，生研公開講演，57(5)，pp.455-465，2005.
- 19) 鈴木高二朗・小澤康彦・村上俊春・竹田 晃：ビデオ画像を用いた住吉海岸における沿岸流の長期連続観測，海岸工学論文集，52，pp.601-605，2005.
- 20) 栗山義昭，友田尚貴：汀線近傍地形の沿岸方向の変動特性．海岸工学論文集，53，pp.551-555，2006.
- 21) 木村 晃・大野賢一：鳥取海岸における海底地形の短期変化について．海岸工学論文集，53，pp.571-575，2006.
- 22) 武若 聡・松本亮介・笹倉慎也・El Sayed Galal：汀線とバーの変動と沿岸方向移動．海岸工学論文集，53，pp.576-580，2006.
- 23) 木村 晃・大野賢一：鳥取海岸における沿岸砂州の短期変化について，海岸工学論文集，54，pp.666-670，2007.
- 24) 藤原 要・的場孝文・熊谷隆則・藤田裕士・堀口敬洋・佐々木崇雄・高木利光：カメラ観測システムを用いた宮崎海岸の土砂移動機構調査，海岸工学論文集，54，pp.671-675，2007.
- 25) 岡部拓己・青木伸一・河村雅彦：シラス漁船を利用した広域・高頻度海底地形図の作成とその応用に関する研究，海岸工学論文集，55，pp.661-665，2008.
- 26) 木村 晃・大野賢一：鳥取海岸沿岸のouter barの短期変化特性について，海岸工学論文集，55，pp.716-720，2008.
- 27) 鈴木高二朗・有路隆一・諸星一信・柳島慎一・高橋重雄・松坂省一・鈴木伸昭：WEBカメラを用いた海岸の連続観測手法の開発について，海岸工学論文集，55，pp.1460-

- 1450, 2008.
- 28) 辻本剛三・山田文彦・柿木哲哉：砂粒子画像を用いた底質粒径の計測法の妥当性に関する研究．海洋開発論文集，24，pp.1207-1212，2008.
- 29) Rob Holman：Nearshore Remote Sensing, Coastal Dynamics, pp.1-12，2009.
- 30) 有働恵子：茨城県青塚海岸の後浜変形および底質粒径変化のに関する研究，土木学会論文集B2，65，No.1，pp.31-45，2009.
- 31) 西本英明・平川麻里子・増田龍哉・五十嵐 学・滝川 清・森本剣太郎：干潟の地形測量における実測横断測量とGPS測量における観測結果の比較検討，海洋開発論文集，25，pp.945-950，2009.
- 32) 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，25，pp.957-962，2009.
- 33) 伊藤政博・鈴木薫穂：海岸ライブカメラによるゴミの漂着と移動—富士海岸を対象にして—，海洋開発論文集，25，pp.969-974，2009.
- 34) 町田龍亮・武若 聡：ライフセーバの監視活動を支援する海況把握システムの試作，海洋開発論文集，25，pp.1323-1328，2009.
- 35) 武若 聡・エルサイド ガラル・趙 卓雄：汀線に現れる波上パターンの沿岸方向の動態，土木学会論文集B2（海岸工学），66，pp.431-435，2010.
- 36) 岡辺拓巳・青木伸一・宇多高明・芹沢真澄・加藤 茂：漁船の操業データを用いた沖合海底地形の変動解析について，土木学会論文集B2（海岸工学），66，pp.696-700，2010.
- 37) 珠洲市史編さん委員会：珠洲市十年誌，pp.3-5，pp.9-17，pp.1228-1235，1966.
- 38) 山口柏樹：土質力学，技報堂，pp.9-13，1980.
- 39) 粕野義男：北陸の丘陵と平野，アーバンクボタ，No.23，pp.36-39，1984.
- 40) 高井信勝：「信号処理」「画像処理」のためのMATLAB入門，工学社，pp.155-177，2002.
- 41) Stefan Aarninkhof, Nearshore Bathymetry Derived from Video Imagery, Delft Univ Pr, pp.1-25, 2003.

参 考 資 料

- 1) 株式会社アカサカテック(Oline) : <http://www.akasakatec.com/>
- 2) 五洋建設株式会社(Online) : <http://www.penta-ocean.co.jp/>
- 3) ARGUSビデオモニタリングシステム(Oline) : http://www.coastalwiki.org/wiki/Argus_video_monitoring_sysyem
- 4) e-TREND(Online) : <http://www.e-trend.co.jp/>
- 5) アイテック株式会社(Online) : <http://www.ay-tec.com/>
- 6) 地図検索 Google マップ(Online) : <https://maps.google.co.jp/>
- 7) 国土交通省(Online) : <http://www.mlit.go.jp/>
- 8) 海上保安庁(Online) : <http://www.kaiho.mlit.go.jp/>
- 9) 気象庁 潮汐観測資料(Online) : <http://www.data.kishou.go.jp/db/tide/sokuho/index.php>
- 10) 国土地理院(Online) : <http://www.gsi.go.jp/>
- 11) 石川県 (Online) : <http://www.pref.ishikawa.lg.jp/>