

北部加越海岸における海浜地形変動に関する研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 松山, 正之, Matsuyama, Masayuki メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/42371

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.



北部加越海岸における海浜地形変動に関する研究

松 山 正 之

平成 27 年 3 月

博 士 論 文

北部加越海岸における海浜地形変動に関する研究

金沢大学大学院自然科学研究科

環境科学専攻

学 籍 番 号 0923142418

氏 名 松山 正之

主任指導教員名 由比 政年

提 出 年 月 平成 27 年 3 月

目 次

第1章	序論	1
第1節	研究の背景	1
第2節	従来の研究	3
第3節	研究の目的	5
第2章	対象領域の概要	7
第1節	内灘・七塚・高松・羽咋海岸の概要	7
第2節	柴垣・甘田海岸の概要	9
第3節	海象条件の特性	11
第4節	人為的影響	16
第3章	解析手法	17
第1節	航空写真による平面地形変動の解析法	17
第2節	深浅測量データによる断面地形変動の解析法	19
第3節	後浜地形の観測および波浪遡上の解析法	24
第4章	汀線および土砂量の時間変動特性と沿岸方向変動	29
第1節	航空写真による変動解析	29
第2節	深浅測量データによる変動解析	38
第3節	経験的固有関数（EOF）法による変動解析	47
第4節	汀線位置および海浜土砂量の時間変動特性と沿岸方向変動	54
第5章	砂州の周期移動特性とその沿岸方向変動	59
第1節	対象領域における砂州の平面配置特性	59
第2節	砂州の岸沖移動の概要	62
第3節	砂州移動の基本特性とその沿岸方向変動	65
第4節	他地域との比較	69
第6章	海象・後浜地形変動とイカリモンハンミョウの生態環境の関係	71
第1節	石川県に生息するイカリモンハンミョウの現状	71
第2節	イカリモンハンミョウの生態	73

第3節	柴垣・甘田海岸の地形変動	75
第4節	柴垣・甘田海岸の漂流物分布	80
第5節	潮位および波浪遡上高の推定	82
第6節	イカリモンハンミョウの生息と波浪遡上高の関係	85
第7章	結論	89
第1節	主要な成果	89
第2節	今後の課題	90
謝辞		93
参考文献		95
Appendix		99

第1章 序論

第1節 研究の背景

日本人は古来より海と親しみ、沿岸漁業をはじめ海から多くの恩恵を受け、港湾や護岸堤防建設等の海岸・港湾事業の歴史に多くの人々が関わってきた。また、日本人は、海を地域の人たちの交流を深める場であると考え、海の持つ自然の大きな力に畏怖の念を感じてきた。しかし、近年は国内の多くの海岸において砂浜が失われ、海は人々の生活と遠く離れていく存在になりつつある。

石川県は、福井県境から能登半島の外浦・内浦を経て富山県境に至る総延長 582km の海岸線を有する。この海岸線は地理的な位置により加越海岸、能登外浦海岸および能登内浦海岸の三海岸に区分される。加越海岸は、福井県境から能登半島の付け根にある羽咋市滝崎までの海岸、能登外浦海岸は滝崎から能登半島突端の緑剛崎までの日本海に面した海岸、そして、能登内浦海岸は、緑剛崎から富山県境までの海岸をいう。

本研究の主対象である北部加越海岸は加越海岸の北部に位置し、その背後に砂丘を有する美しい砂浜海岸である。対象領域北部に位置する押水羽咋海岸は、「なぎさドライブウェイ」を有することで有名な「千里浜海岸」を含んでいる。石川県の重要観光資源であるこの砂浜の侵食が近年問題となり、過去 20 数年間で最大 50m もの汀線後退が発生し、このまま放置すれば、将来、自動車走行が不可能になるのではないかと危惧されている。石川県や羽咋市といった地元自治体にとっては、重要な観光資源を持続的に発達させていくためにも、汀線変動を含めた海岸地形変動の基本特性を把握し、適切な対策を立てることが重要な課題となっている。

一般に、海岸侵食は、その海岸への土砂供給量が、波浪や海流によって運び去られる流出量に追いつかないために発生する現象であり、自然外力の変化や人為的インパクトなど複雑な要因の影響を受ける。この内、地球温暖化に伴う気候変動や海面上昇の影響は長い時間スケールで緩やかに進行する。一方、人為的影響は比較的短時間で発現し、港湾開発や護岸堤防整備などの海岸・港湾事業、あるいは、河川流域の治水事業が関与する海岸侵食の問題が国内外の多くの地域で顕在化している。

本研究で対象とする北部加越海岸においても、手取川流域開発や金沢港建設に代表される広域流砂系内の人為的改変が直接的・間接的に影響し、海浜地形に大きな変化が生じている。対象領域の海浜は、古来より手取川を起源とする広域流砂系の一部として発達してきた。しかし、近年は金沢港建設の影響を受けて、金沢港以南の海浜と部分的に分断された状況にある。その結果、対象領域南部の内灘海岸南端部では、金沢港西防波堤による遮蔽効果に加え、南西向きに卓越する沿岸漂砂が金沢港東防砂堤により遮断され、急速な堆積が局所的に進行している。一方、中央部領域から北部領域にかけては、手取川起源の供給土砂の減少および金沢港の建設による沖合の流送土砂の遮蔽等により、汀線後退が進行し、安定な浜幅を確保することが困難な地域も点在する。

現在, 侵食対策の一環として, 金沢港内に堆積した土砂を浚渫し海上投入することで, 千里浜海岸の汀線後退を軽減するための方策が石川県により検討・実施されている。長期的に健全な形で海浜の維持管理を継続するためにも, 現時点での海浜地形の基本変動特性を把握することが必要である。

水面下における海底地形についてまず考えてみる。北部加越海岸では沿岸砂州(海浜の外浜に汀線に平行に形成された砂堆)が発達し, 特に, 羽咋市千里浜海岸では, 大規模な多段砂州が発達することが知られている(石田ら, 1984; 加藤ら, 1984 など)。これらの砂州は, 高波浪時の碎波を促進することで, 自然の防波堤として機能し, 外浜の地形変動を特徴づけることに加え, 前浜の広大な砂浜を維持する上でも重要な役割を担っていると考えられている。このため, 沿岸砂州の発達規模や配置, 砂州変動の基本特性を解明することは, 海浜変動過程を的確に理解する上で重要である。

続いて, 陸域と海域の接点となる前浜・後浜部分における地形変動について考える。これら前浜・後浜は, 海岸侵食・堆砂の地形変動や海流・潮汐・波浪・風等の海象・気象変動, さらに漂着ごみ等の影響を激しく受けているところである。この砂浜に生息する小型動物は, 打ち上げられた海藻や小型動物およびその遺体を餌として生息営巣していることも多い。その一例として, 石川県の能登半島には, かつては内灘町から羽咋市の海岸, さらに北側の柴垣・甘田・大島海岸などの起伏がゆるやかな広大な砂浜に, イカリモンハンミョウというコウチュウ目ハンミョウ科の昆虫が広く生息していた。この昆虫は, 次第に絶滅し, 千里浜海岸でも 1975 年には絶滅したと考えられていたが, 1994 年に千里浜よりやや北方の大島町海岸で再発見されてから個体数調査が実施され, 羽咋市柴垣から志賀町大島にかけて約 3km の海岸に限定されて生息が確認されている。イカリモンハンミョウは石川県指定希少野生動物種, 環境省レッドリスト及び石川県レッドデータブックともに絶滅危惧 I 類に指定されて保護が図られている昆虫である。減少の原因としては砂浜海岸の縮小, 海岸への車両の進入, 漂着ごみの堆積, ごみの投棄・野焼きなどの生息環境の悪化などが推定されている。さらに, 海岸地形の変動と波浪による影響もイカリモンハンミョウの生育に大きな被害を与えていると考えられる。中でも, 海岸を自由に移動できる成虫とは異なり, 地面に縦穴を掘りその穴をすみかに行っているイカリモンハンミョウ幼虫の生態と海岸の海象・地形特性との関係性は高いと考えられ, その関係性を解明していくことは昆虫生態学と海浜地形学の融合的観点から重要な課題となる。

第2節 従来の研究

(1) 対象領域における汀線及び土砂量の時間変動特性と沿岸方向変化に関する従来の研究

本研究で対象とする北部加越海岸においては、手取川流域開発や金沢港建設に代表される広域流砂系内の人為的改変の直接的・間接的影響と海浜地形変動等について、いくつかの研究が実施されている（石田ら，1984，1985；由比ら，2005，2006，2010；早川ら，2007，2009）。その結果，対象領域の中央部から北部にかけては，汀線後退が進行し，安定的な浜幅を確保することが困難な地域も点在することが明らかになっている。この侵食対策の一環として，現在，金沢港内に堆積した土砂を海上投入することで，当該地域北部（羽咋市千里浜海岸）の汀線後退を軽減するための方策が石川県により検討・実施されている。

千里浜海岸における海浜地形変動に関する基礎的研究の一環として，過去20年間以上に渡る汀線測量結果および過去10年間以上に渡る深浅測量結果をもとに，汀線および等深線位置の変動，沿岸砂州の形成・移動・消失過程と汀線・土砂量移動との関連，平面的な変動特性に着目した統計的解析が行われてきた。千里浜海岸で観察される砂州配置と汀線の関係は，早川ら（2009），Hayakawaら（2009）により次の様に報告されている。「砂州の変動と汀線の関係として，汀線岸沖方向位置の周期的変化に着目した場合，汀線位置が最も後退するのは，最も沖側に位置していた砂州が沖側に抜けるように消失し，それまで沖側から2番目に位置していた砂州が成長して比高を増大させる時期とおおよそ符合する結果となっている」。今後，長期的に健全な形で海浜の維持管理を継続するためにも，海浜地形の基本特性を把握する必要がある。

(2) 対象領域における砂州の周期移動特性とその沿岸方向変動に関する従来の研究

沿岸砂州は，汀線近傍の地形変化や生態系に影響を与えられている。海岸管理上，砂州の変動特性の把握は重要である（武田，2003；栗山ら，2006；栗山，2010）。そのため，超音波探査機を用いて国土交通省金沢河川国道事務所により長期にわたり収集された深浅測量データや石川県土木部による航空写真データを基にした砂州の変動特性の研究が行われている。千里浜海岸で観察される砂州配置は早川ら（2009）によると次の様に報告されている。

- ・砂州の発達形態・規模として，領域全体で砂州は一般に多段であり，沖側砂州は最大で4.6m程度の比高を持つ大規模な形へと発達する。
 - ・砂州の変動特性として，対象領域内の沿岸砂州は，形成・沖向き移動・消失といった一連の過程を繰り返している。これらのサイクルの繰り返し間隔は4年前後であり，1998年～2010年中に2～3サイクルの変動が確認された。
- 一連のサイクルにおいて，砂州は汀線近傍で形成され，沖向きに移動しながら最大規模

に発達した後に、さらに沖向きに移動して減衰・消失する。最も沖側に位置する砂州が消失すると、1つ岸寄りに位置していた次の世代の砂州が引き続き沖向き移動・発達を開始する（図-1.2.1）。このような砂州の移動形態は、NOM（Net Offshore Migration）と称され、オランダ・米国・ニュージーランド・デンマーク等の世界諸地域（Ruessink ら，2003），及び、国内（Kuriyama, 2002；Yuhi ら，2011）で観察された現象と共通の特徴を示している（早川ら，2009；松山ら，2013）。

NOM メカニズムに関する従来の研究（たとえば，Ruessink ら，1994）によると，NOM のサイクルでは，多段砂州システムが，数年～20 年程度の時間スケールで，以下のような 3 ステージの組織的沖向き移動を繰り返す。まず，①砂州は汀線近傍で形成され，②沖向きに移動しながら発達し，③さらに沖向きに移動して減衰・消失する。沖側砂州が消失すると，次世代砂州が沖向き移動・発達を開始して，再び①から③のステージが繰り返される。一般に，砂州の生成は，波の非対称性，戻り流れ，砕波，長周期波等の影響を受ける。NOM はこれらの中でも砕波の影響を強く受け，最沖砂州の頂部水深が，砂州生成・移動をコントロールするキーパラメーターとなると考えられている。沖側砂州は，その頂部で波を砕波させることで岸側砂州を守る効果を持つ。この沖側砂州が沖側に移動し，頂部水深が大きくなりすぎると，波は沖側砂州上で砕けなくなる。その結果，沖側砂州は，その規模を維持できなくなって次第に減衰・消失する。これまで最沖にあった砂州が消失すると，岸側砂州への波当たりが強まり，岸側砂州が沖向移動・発達を開始して，1つ前の砂州に取って代わる。この繰り返しにより，砂州の周期的な沖向き移動が発生する。

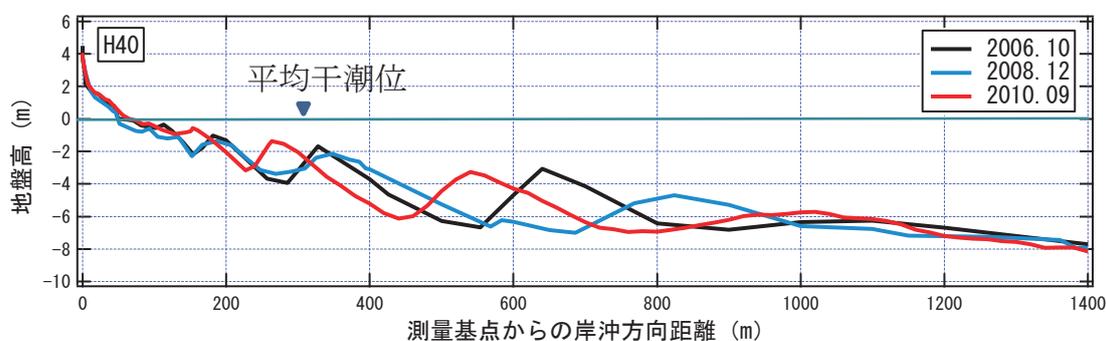


図-1.2.1 多段砂州の沖向き移動例（千里浜海岸）

従来の NOM の解析では，岸沖方向の移動特性に重点を置いたものが多い。一方，その特性は近接した海岸においても沿岸方向に変化し得ることも指摘されている（Weinberg, 1995；Grunett and Hoekstra, 2004）が，まだ詳細な検討はされていない。こうした観点から，千里浜海岸および隣接海岸における沿岸砂州の周期変動特性と沿岸方向変動の解析を行い，海浜変動過程を的確に理解する必要がある。

(3) 対象領域における海浜・地形変動とハンミョウ生態環境に関する従来の研究

ハンミョウの生態環境に関する研究は比較的少なく、ハンミョウと海象・海岸地形変動の関連性に関してはあまり研究されていない。中村ら(2004)の研究では、ルイスハン妙の生息域である徳島県沖州海岸を対象として、地形形状によって生じる底質中の含水比・含有塩分濃度の分布が検討され、その結果、含水比6~8%で淡水を適度に保持する底質条件が幼虫巣穴の維持と生息に適することが土質力学的な観点から明らかにされている。また、ルイスハンミョウの幼虫巣穴は塑望平均満潮位を越える、浜幅が広い場所に限られ、満潮位汀線に沿って帯状に分布していることが確認されている。

佐藤ら(2005)は、打ち上げ海藻を中心とした砂浜の生物群集構造の解明を大きな目的とし、石川県羽咋郡志賀町甘田海岸で現地調査を実施して、打ち上げ海藻を利用する小型動物相を明らかにしている。また、海浜の代表的な捕食者昆虫としてイカリモンハンミョウが挙げられることから、打ち上げ海藻を中心とした捕食-被食の相互作用を解明するため、イカリモンハンミョウを取り上げてイカリモンハンミョウの成虫が捕食する餌動物の調査を行なって、捕食-被食の相互関係を示している。

近年、石川県立大学により柴垣・甘田・大島海岸の砂浜変動調査が行われている。調査方法として、大島から柴垣海岸にかけて9測線を設定し、汀線方向に直角に5~6本のボルトをほぼ4m間隔で設置し、水準測量とボルト・リング法により海岸の砂動態観測を行っている。2011年の研究結果から、イカリモンハンミョウの減少原因については、羽咋海岸において砂の堆積により植生帯が海側へ拡大して後浜勾配が増大し、幼虫の生息適地が海側に移動したことにより、冬期高波浪による幼虫の巣への影響が増大し、生息適地が減少したことが推定されている。また、2011、2012年の調査の結果から、幼虫の巣穴は海岸の中央部より内陸側の湿砂帯から乾砂帯の中間に多く分布が見られるということが明らかにされている。こうした観点から、柴垣・甘田海岸における海浜環境の変化に関して、現地観測データに基づいて解析を行い、海浜環境変化を的確に把握する必要がある。

第3節 研究の目的

本研究の目的は、北部加越海岸における、①汀線および土砂量の時間変動特性および沿岸方向変動の解明、②砂州の周期移動特性とその沿岸方向変動の解明、③柴垣・甘田海岸の海象・地形変動がハンミョウ生態環境に及ぼす影響の解明を行うことである。その目的と論文構成の関係は以下のようにまとめられる。

(1) 汀線および土砂量の時間変動特性および沿岸方向変動の解明

本研究で対象とする北部加越海岸においては、手取川流域開発や金沢港建設における広流域流砂系内の人為的改変が直接・間接的に影響し、海岸地形に大きな変動が見られる。第4章では、北部加越海岸の海浜変動特性解明の一環として、対象領域における航空写真および国土交通省金沢河川国道事務所により実施されている超音波測探機による深淺測量データを基にして、海浜平均断面形状、長期変動トレンド、汀線（等深線）位置と海浜土砂量の変化、および、沿岸砂州に代表される地形変動の沿岸方向変動に着目して基本変動特性の解析を行い、その特性を明らかにする。

(2) 砂州の周期移動特性とその沿岸方向変動の解明

沿岸砂州の周期移動特性とその沿岸方向変化特性については、不明な点も多く残されているのが現状である。早川ら（2009）は千里浜海岸における沿岸砂州の岸沖方向の断面形状、多段砂州の発達規模、および、離岸距離の経年変動等の解析を行い、多段砂州の変動特性について考究している。本研究では、第5章において、過去60年以上に渡る航空写真、国土交通省金沢河川国道事務所により実施されている過去13年間の深淺観測データに基づいて、北部加越海岸における沿岸砂州の周期変動特性とその沿岸方向変動の解明を行う。さらに、対象領域におけるNOM（Net Offshore Migration）の基本特性を国内外の観測事例と比較して、砂州移動の再現周期と存在水深範囲の関係について検討を行う。

(3) 柴垣・甘田海岸の海象・地形変動がイカリモンハンミョウ生態環境に及ぼす影響の解明

海浜生物であるハンミョウ生態環境に影響を与える重要要因として、柴垣・甘田海岸における、①成虫と幼虫の生息域である前浜・後浜地形変動、②餌となる漂着堆積物の分布状況、③潮位と波浪遡上高（海象変動）が考えられる。最後に、第6章において、これらの要因を把握することによって、イカリモンハンミョウの個体数変化要因の推定と生息環境に及ぼす影響の解明を行う。

第2章 対象領域の概要

石川県は、福井県・富山県との両県境に囲まれた、総延長 582 kmの海岸線を有している。今回の研究の主対象領域である北部加越海岸は、金沢港から能登半島付け根の滝崎までの海岸の総称であり、その大半は背後に砂丘を有する砂浜海岸となっている。

さらに、第6章で対象とする柴垣・甘田海岸は、能登半島滝崎の北側に位置し、北部加越海岸に隣接する延長約 2.5km の砂浜海岸である。

第1節 内灘・七塚・高松・羽咋海岸の概要

第4章、第5章では、加越海岸の北部領域、すなわち、金沢港の北北東に位置する延長約 32 kmの領域（図-2.1.1(a)）を対象とする。

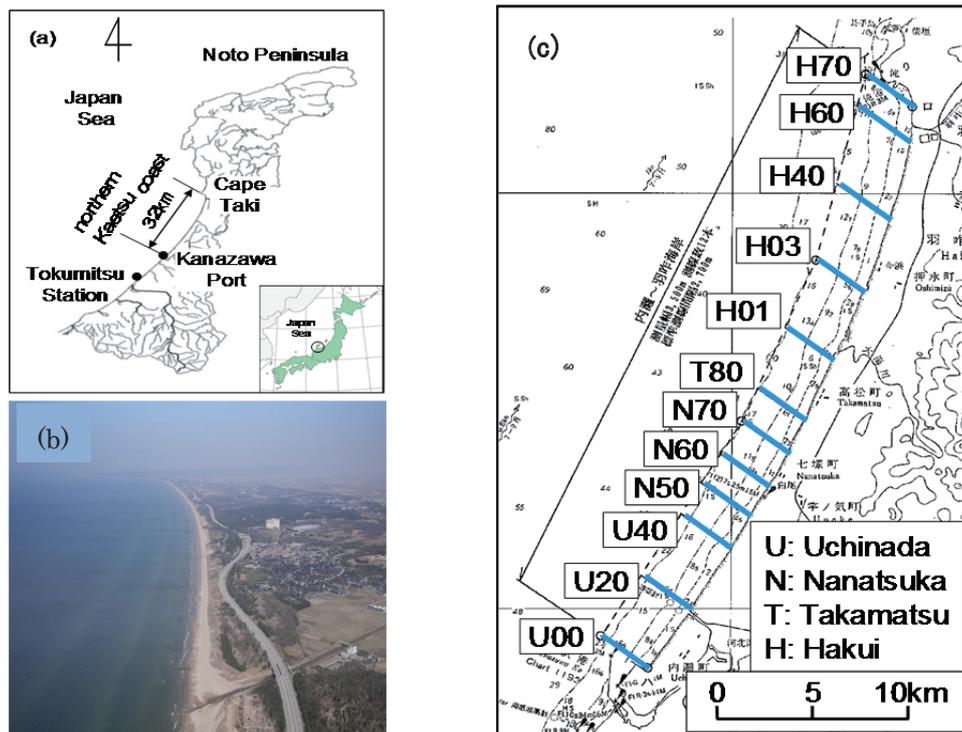


図-2.1.1 対象領域 (a)北部加越海岸の位置 (b)航空写真 (c)測線位置

(1) 観測地点

対象領域は内灘海岸（内灘町）、七塚・高松海岸（かほく市）、および押水・羽咋海岸（羽咋市）に区分される。海岸線形状は金沢港から北北東に伸びる形で緩やかに湾曲している。対象領域の北部には、砂浜での一般車両走行が可能な「なぎさドライブウェイ」

を有することで知られた千里浜海岸（押水・羽咋海岸の一部）が位置する。

対象領域の図-2.1.1 (b) の航空写真は、羽咋市今浜から羽咋（千里浜）海岸を通して、北側の滝崎方面を望む写真である。この海岸において、1998年から毎年、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所により設定された12測線に対して、測量基準点から岸沖方向に約3.5kmの深浅測量が行われている（図-2.1.1 (c)）。図中で測線番号に付したH, T, N, Uは、それぞれ羽咋, 高松, 七塚, 内灘海岸に対応する。

(2) 海底地形と底質粒度分布

海底地形を見ると、領域の多くの部分で大規模な多段砂州が発達している。2010年における断面地形の沿岸方向変化を図-2.1.2に示す。横軸に離岸距離-100~1500mを取り、右軸は測線番号で、頭文字は図に示すようになっている。また、観測期間中の平均汀線位置（地盤高 T.P.+0m 位置）を岸沖方向の基準点として離岸距離を表示している。

測線位置が北側から南側に向かうにつれて海底勾配が急に成り、平均1/200から平均1/80に変化している。沿岸砂州は北側で3段に発達し、南側で2段になり、次第に消失していることが分かる（由比ら, 2005, 2014 ; 由比, 2010 ; 松山ら, 2012）。

次に、断面地形と底質粒度分布の対応を見る。2010年において、南部の測線U40, および、北部の測線H60で観測された中央粒径の岸沖分布状況を図-2.1.3に示す。横軸に離岸距離-100~1400mを取り、左縦軸に地盤高, 右縦軸に中央粒径 d_{50} を示す。中央粒径のデータは1995, 1999年度調査結果（国土交通省金沢河川国道事務所）から引用した。これによると、北部の測線H60では砂州が3段で、底質粒度は0.15~0.17mmとなっている。汀線近傍における代表的な粒径は0.15mm前後であり、砂州のトラフ部分で若干大きくなる傾向にある。南部の測線U40では砂州は2段で底質粒度分布は0.20~0.60mmであり、南部ほど粒径が粗く、北へ向かうほど細くなるという石田ら（1984）の観測と整合する。北部領域ほど粒度が細かく、均一となる理由の1つとして、手取川からの輸送距離の違いによるふるい分け効果が考えられる（石田ら, 1984）。

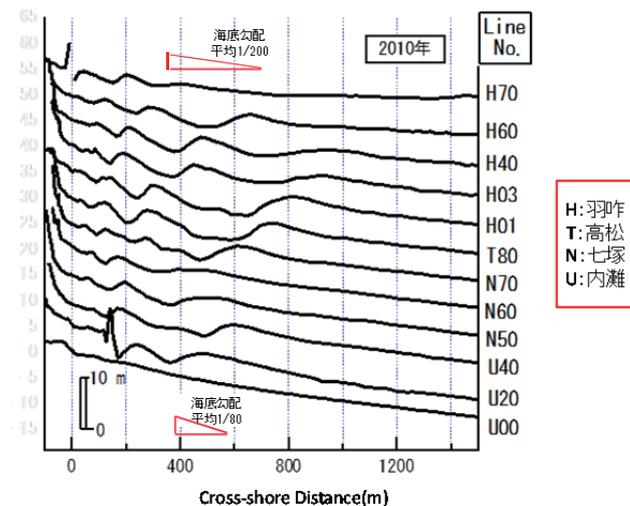


図-2.1.2 断面地形の沿岸方向変動（2010年）

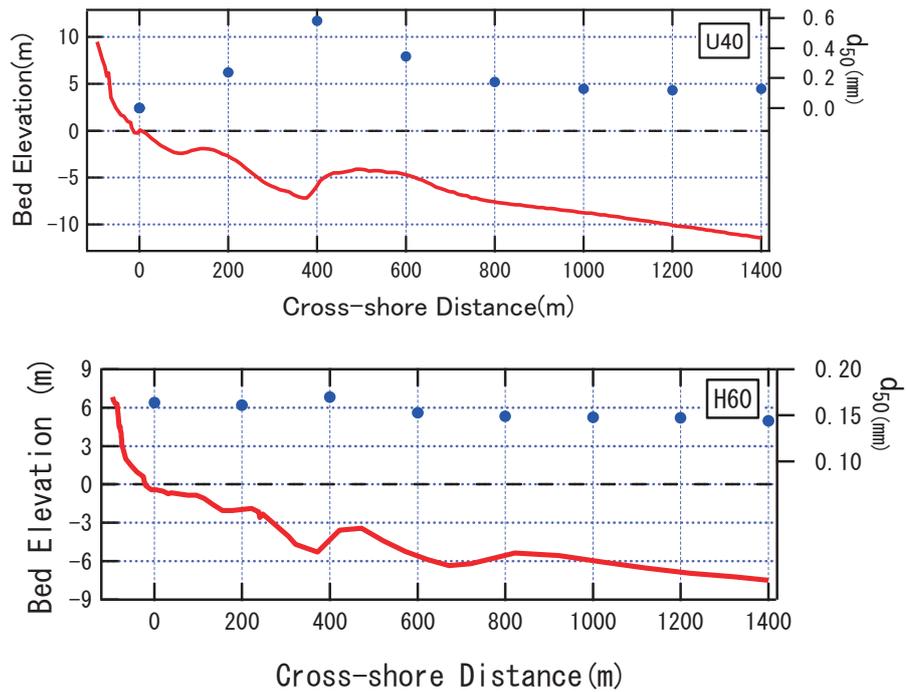


図-2.1.3 断面地形と底質粒度分布の対応 (2010年)

第2節 柴垣・甘田海岸の概要

第6章で対象とする柴垣・甘田海岸は、能登半島外浦の滝崎の北側に位置する。その概形は延長約2.5kmのポケットビーチ状を呈し、砂の粒径が細かい緩勾配の海岸である。

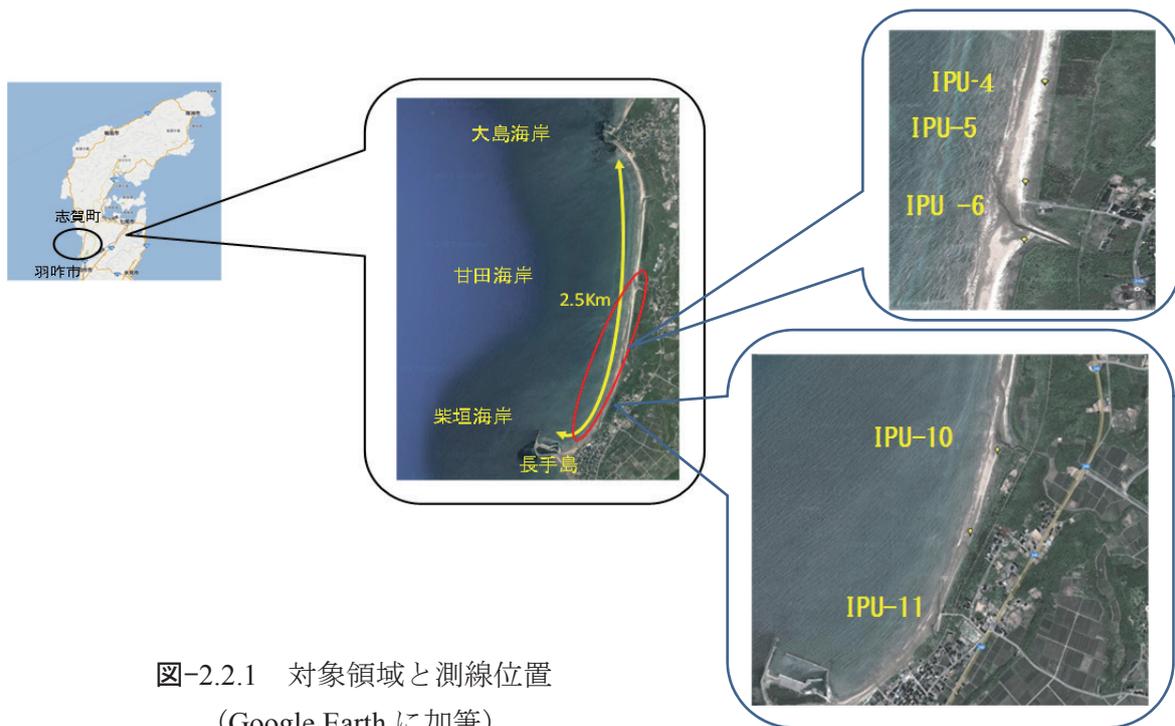


図-2.2.1 対象領域と測線位置
(Google Earth に加筆)

(1) 観測地点

対象領域には、石川県立大学により 2011 年より基準測線が設定され現地観測が行われている。本研究ではこの基準測線を活用して、柴垣海岸の 2 測線 (IPU-10,11) および甘田海岸の 3 測線 (IPU-4,5,6) を対象に観測を行った。

(2) 海岸の底質粒度分布

柴垣・甘田海岸で採取した砂について篩分け粒度試験を行った (図-2.2.1)。その結果、中央粒径 d_{50} は柴垣海岸 0.19mm, 甘田海岸 0.18mm とほぼ同様の値を示した。均等係数 C_0 は柴垣海岸 1.10, 甘田海岸 1.17 であり、柴垣海岸の方が、より粒度が均一であることを示している。

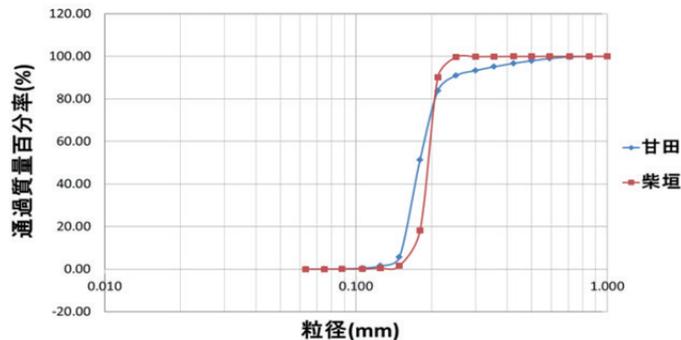


図-2.2.1 柴垣・甘田海岸の粒度分布

(3) イカリモンハンミョウの生息

この一帯はかつて多数のイカリモンハンミョウが生息したが、現在ほとんど見られなくなるなどイカリモンハンミョウの生息適地の消失が急速に進んでいる。イカリモンハンミョウはコウチュウ目ハンミョウ科に属する肉食系の昆虫である。日本では九州南部 (鹿児島県・大分県・宮崎県) のほか、本州では石川県のみが生息している。4月から11月にかけて波打際の海水でぬれた砂の上で活動し、冬になると海岸線を遠のいて砂丘上に移動する。幼虫は砂浜の穴に潜み、近くを通る小さな虫などを捕食する。6月頃にさなぎから成虫になり、秋頃まで姿が見られる。

同海岸には、形態のよく似たハラビロハンミョウの生息も確認されているが、その個体数はイカリモンハンミョウと比較して減少していない。この2種のハンミョウの間には、生息領域に若干の違いがあることから、波浪や地形変化の影響 (生育における安全性や食糧となる虫のエサである藻など漂着ごみの分布) の仕方が営巣位置により異なる可能性が示唆されている。生活環境の破壊に敏感な非常に繊細な生物だけに、狭くなった海岸線に適応して彼らが生息することは、今まで以上に予断を許さない状況にあると考えられている (上田ら, 2014)。

第3節 海象条件の特性

(1) 概況

国土交通省徳光海象観測所（図-2.1.1 参照）の沖合 1500m 地点（水深 15m）に設置された海象計により，波高および波向きが観測されている．1995 年から 2010 年にかけての観測結果によると，夏期の波向は N～W と広範囲であり，NNW にやや卓越する．夏期波浪の多くは有義波高 1m 以下であるが，冬期は有義波高 1m 以上の高波浪が頻繁に来襲し，波向は NW～NNW に卓越する．年最大有義波高は，5～8m 程度に達する．

汀線近傍においては，このような波の作用により南西向きの沿岸流が卓越する．一方，加越海岸沖合では，北東向きの海岸流（吹送流・海流）が存在している．既往の現地観測によると，冬期の季節風発達時は北東向きの流速が卓越する傾向がある．水深 10～15m の沖合においても 10cm/s 以上の流速が存在し，細かい底質の移動や有意な地形変動が認められている．

(2) 潮位の特性

国土交通省により，金沢港大野地区において，潮位の観測が実施されている．観測は 1 日 24 観測，1 時間毎に行われている．観測データに基づいて算出した月平均潮位（2003 年度～2010 年度）を図-2.3.1 に示す．平均潮位（O.D.L.基準を T.P.基準に換算）には年間で約 50cm の変動が見られ，8 月が約 60cm で最も高く，2 月と 3 月が約 16cm と最も低くなっている．2003～2010 年度までの平均潮位から，それぞれの年の潮位偏差を求めたものを図-2.3.2 に示す．2010 年度の偏差は年間を通して 0～14cm であり，潮位が平年に比べて高かった年だといえる．

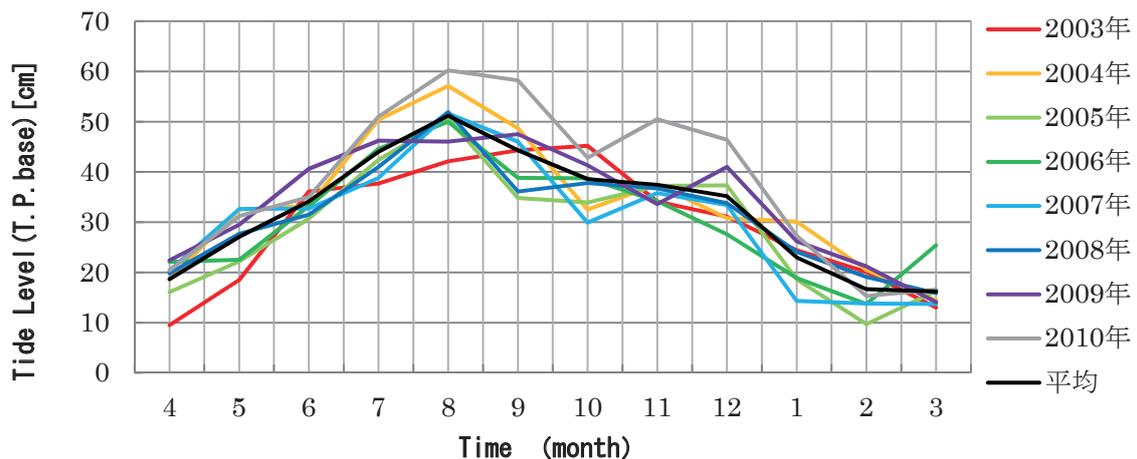


図-2.3.1 金沢港における潮位の月変動とその経年変化

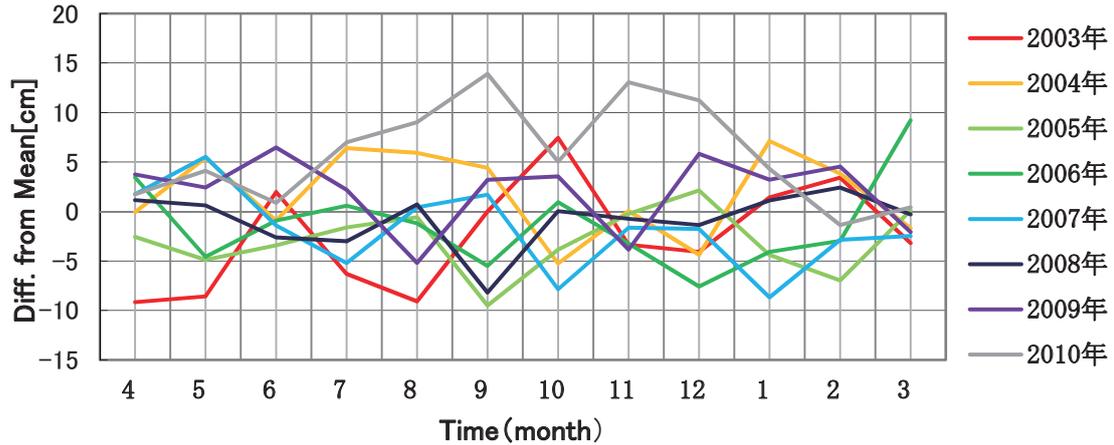


図-2.3.2 平均潮位からの偏差の月変動とその経年変化

金沢港の年度間平均潮位を 1997 年度～2010 年度までプロットしたものを図-2.3.3 に示す。これより長期トレンドでは約 4.6mm/年の割合で金沢港の潮位は上昇していることがわかる。また、年平均潮位に比べて急激に上昇する年（1999, 2004, 2010 年）が 5～6 年周期で繰り返す特性が見られる（図-2.3.3 中の赤丸印）。

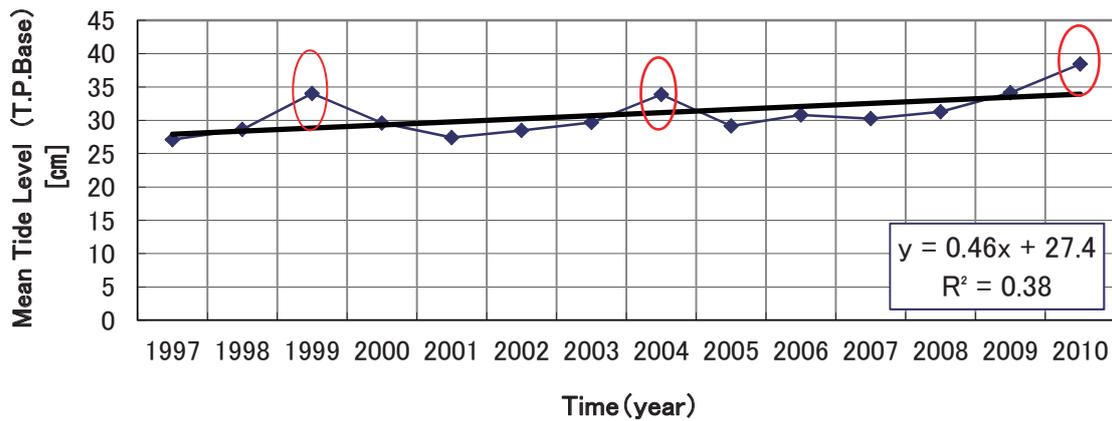


図-2.3.3 年平均潮位の経年変化

(3) 風の特徴（風速・風向）

羽咋地域における風の観測データ（統計期間：1979 年～2003 年）を図-2.3.4 に示す。これによると、通年では、E～ENE の陸風が卓越するが、10m/s 以上の強風については、NW～WSW の海風が卓越する。また、季節別に見ると、この西側からの強風は、春夏期よりも秋冬期の季節風によるものが多いことが分かる（早川ら，2009）。

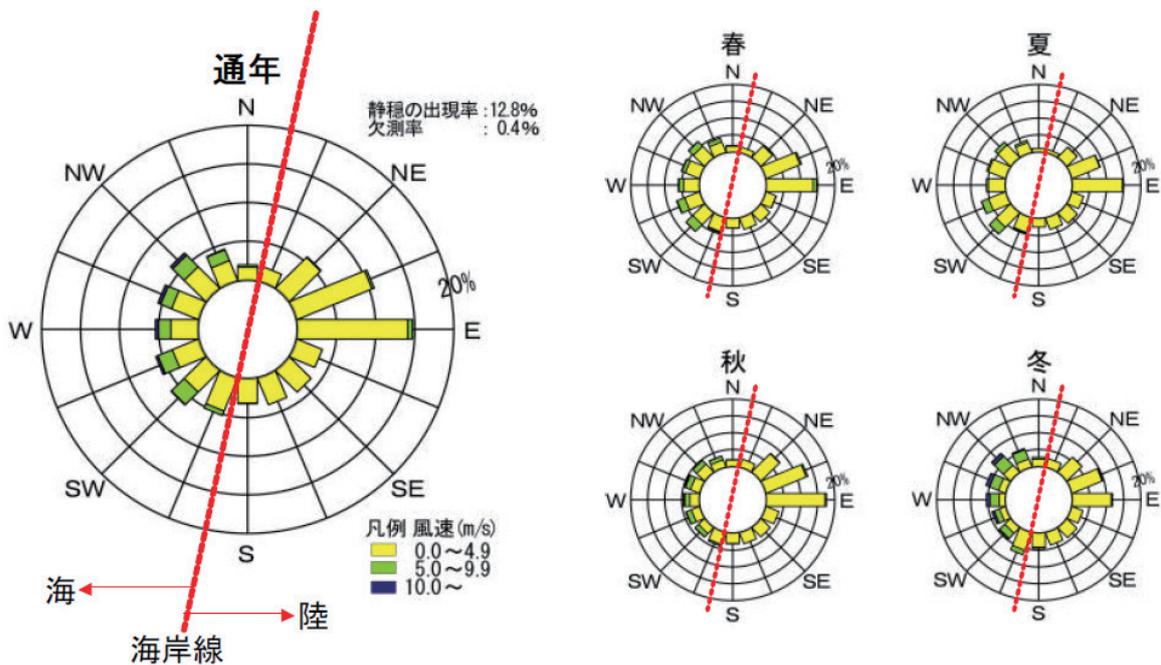


図-2.3.4 羽咋における風向・風速出現頻度（千里浜海岸保全対策委員会資料（2005）より転載）

(4) 波の特性（波向・波高）

通期の波向・波高の出現頻度を図-2.3.5 に示す．図中には，金沢河川国道事務所徳光観測所のデータ及びバナウファス（全国港湾海洋波浪情報網：NOWPHAS）の金沢港・輪島港でのデータ解析結果を含んでいる．なお，徳光地先では，沖合 1.5km，水深約 15m 地点において，超音波式波高計による波浪観測が行われ，金沢港では水深 20m 地点，輪島港では水深約 50m 地点において観測が行われている．通期で見ると，徳光地先，金沢港の 2 地点では，波向は主に NNW～W の広範囲に存在している．徳光地先では，南向きの沿岸漂砂が生じると考えられる NNW～NW の頻度が若干ではあるが高くなっている．金沢港では，NNW の頻度が約 30%であり，他方向の波高の頻度は約 10～18% で，明らかに NNW 方向の波が卓越している．一方，輪島港では，NNE～NW と他の 2 地点に比べてさらに広い範囲での波向の存在が確認できる．この違いは，金沢港・徳光が北寄りの波に対して能登半島による遮蔽域に位置することによると考えられる（早川ら，2009）．

徳光地先における季節ごとの波向・波高出現頻度を図-2.3.6 に示す．これを見ると，夏期には，NNW が若干卓越しているが，全体的に N～W と広範囲に分布している．また，夏期の波高は有義波高 1m 以下が多く，平穏な様相を呈していることが分かる．冬期は主に季節風の発達を原因とする西からの波が卓越し，NW～W の有義波高 1m 以上の高波浪が頻繁に来襲する．春期および秋期は，夏と冬の遷移期間となっており，卓越する波向は NNW～W である．高波浪の出現頻度は秋期の方が高く，年最大有義波高は 5～8m 程度に達する（早川ら，2009）．

石田ら(1985)は、羽咋(千里浜)および金沢港で冬期に観測された波高を比較して、両者の相関を解析した。羽咋と金沢の有義波波高と周期の相関を図-2.3.7、図-2.3.8に示す。有義波高・有義波周期とも高い相関関係($R^2=0.81\sim0.90$)があることを示している。また、羽咋(千里浜)における波高は金沢港と比較して20~30%程度小さく、周期は10~20%程度大きくなっている。

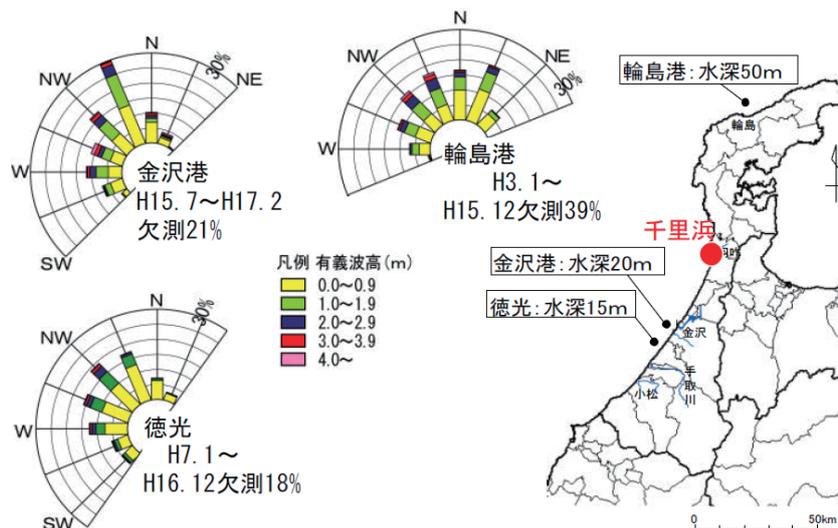


図-2.3.5 通期の波向・波高出現頻度
(千里浜海岸保全対策委員会資料(2005)より転載)

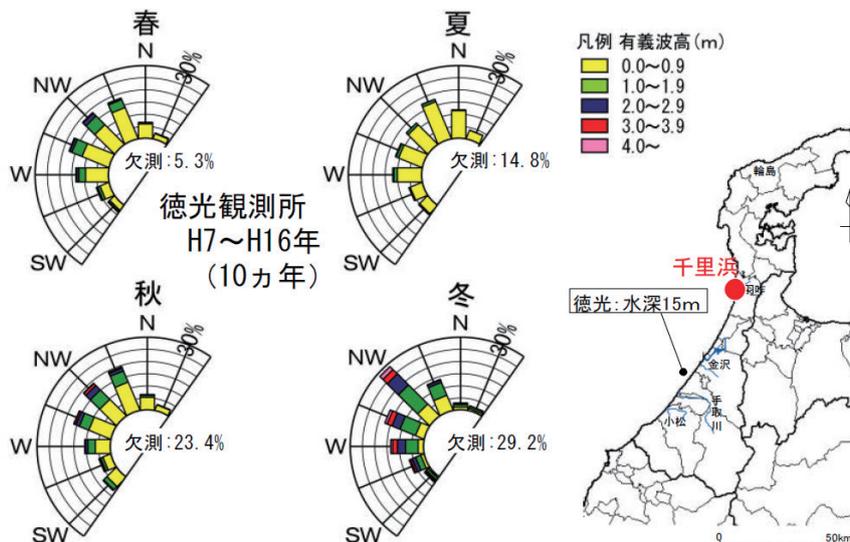
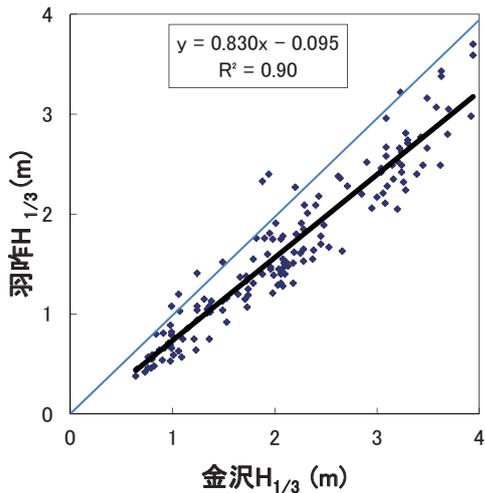
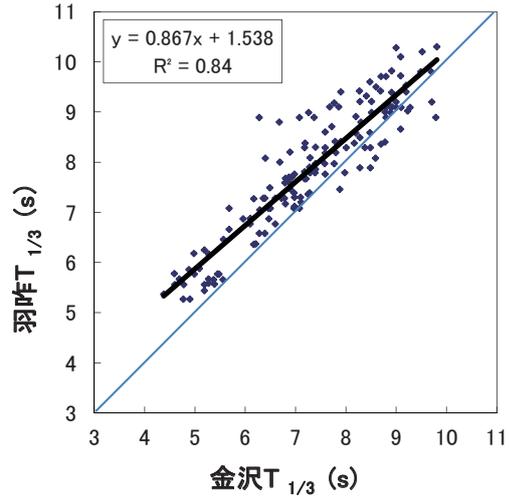


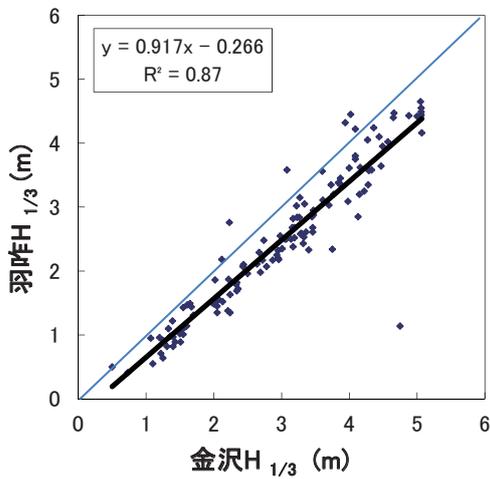
図-2.3.6 徳光地先の季別波向・波高出現頻度
(千里浜海岸保全対策委員会資料(2005)より転載)



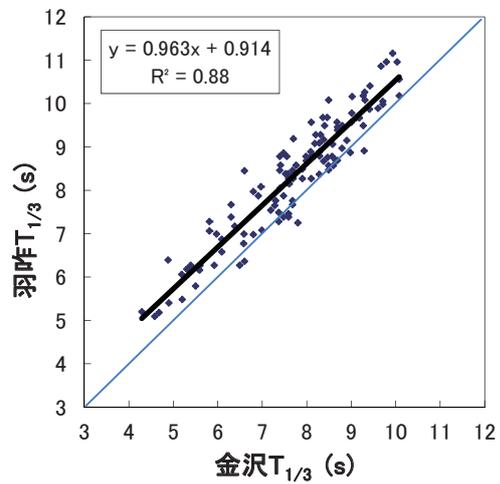
(a) 1月



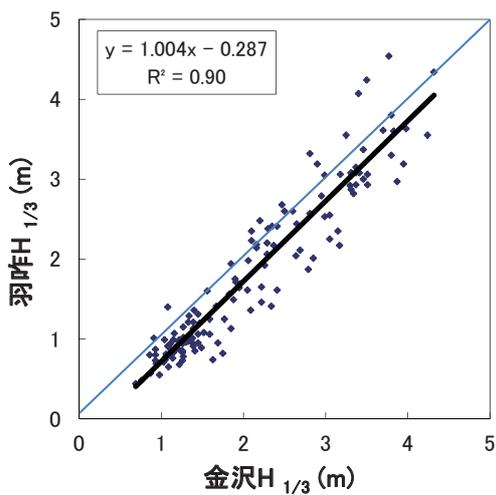
(a) 1月



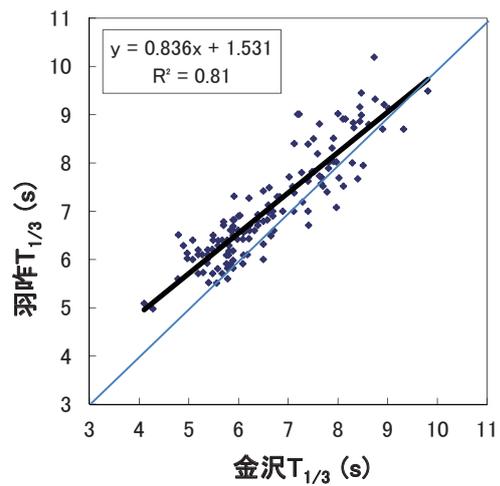
(b) 2月



(b) 2月



(c) 3月



(c) 3月

図-2.3.7 有義波高の相関
(石田ら, 1985 に加筆)

図-2.3.8 有義波周期の相関
(石田ら, 1985 に加筆)

第4節 人為的影響

本研究の対象領域は、手取川を主要な土砂供給源として、日本海に沿って加佐の岬から滝崎に広がる広域流砂系の北端に位置している。

1960年以降に手取川の扇状地区間で大量の砂利採取が行われ、著しい河床低下が発生した。また、手取川流域のダム建設により、河川から海岸への供給土砂が減少した。そのため、1991年以降の砂利採取は禁止されているが、こうした人為的インパクトが河川・海岸の双方に大きな影響を与えた（由比ら、2005）。さらに、1960年代末より、金沢港建設の影響を受けて、金沢港以南の海浜と（完全ではないにせよ）分断された状況にある。その結果、対象領域の南部では、金沢港西防波堤の遮蔽効果に加え、南西向きに卓越する沿岸漂砂が金沢港東防砂堤により遮断されたことで、急速な堆積と汀線の前進が局所的に進行している（Mizumuraら、1997；由比ら、2010, 2014；田中ら、2010；松山ら、2012）。

海底地形を見ると、領域の多くの部分で大規模な多段砂州が発達している。2010年における測線毎の断面地形の沿岸方向変動（2010年）を図-2.1.2に示した。この図で、測線U20の離岸距離150m付近および測線H70の汀線付近に突起状の地形変動があらわれているが、これは離岸堤の存在を示したものである。北部領域の測線H70も滝港に隣接しており、こちらも港湾建設や離岸堤設置等の影響を受けている。北部加越海岸には、離岸堤（2基）や人工リーフ（8基）の海岸構造物が内灘・七塚・高松・羽咋地区に点在するが、全体として少なく、領域内に設置された構造物による直接的な影響は局所的であると考えられる。

羽咋（千里浜）海岸を中心に、1984年から現在まで、平均約5,000 m³/年の養浜が実施されている。養浜砂は近接した羽咋川河口付近に堆積した砂を採取したものである。

第3章 解析手法

対象領域における地形変化解析にあたっては、過去 60 年以上に渡る航空写真と過去 13 年間の深浅測量データを用いて、汀線位置や土砂量、砂州形状の変動解析を行う。さらに、経験的固有関数 (EOF) 法に依り、時系列の深浅測量データを用いて海浜変形を空間と時間の固有関数の積で表される固有モードに分解し、その特性の解析を行う。

後浜地形測量は、測量目的によって測量方法を使い分け、断面地形測量はトータルステーション (TS) と GNSS (Global Navigation Satellite System : 全地球航法衛星システム) の略) 測量の組み合わせで行い、平面地形測量は 3D レーザースキャナーと GNSS 測量の組み合わせにより行う。波の遡上高の解析では、全遡上高 (Runup) を海面の平均水位上昇 (Wavesetup) と遡上 (Swash) の組み合わせによって表す。

波浪観測データとして、全国港湾海洋波浪情報網 (ナウファス) により提供される観測データ (<http://nowphas.mlit.go.jp/nowphasdata/sub300.htm>) を使用した。今回、主として用いるデータは対象領域に最も近い金沢港の波浪データである。波浪観測は 1971 年以降、1 日 12 観測、2 時間毎に行われている (現在は連続観測が実施されている)。波浪諸元として有義波の波高・周期を用いる。

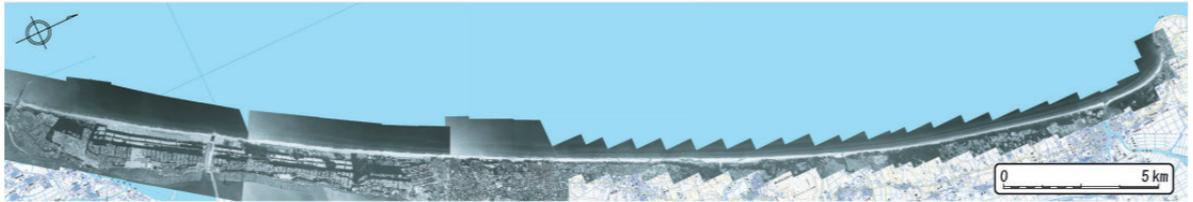
第1節 航空写真による平面地形変動の解析法

石川県土木部より提供された 1947~2010 年撮影の航空写真 (1947, 1967, 1975, 1987, 1992, 1998, 2002, 2003, 2010 年の計 9 回) を基に、金沢港東防砂堤から北東方向の滝崎に向かって、沿岸方向約 32km 区間の汀線および多段砂州の位置を抽出し、汀線後退や砂州の平面形状・規模・段数等について定性的・定量的検討を行う。この際、2 種類のデータを用いる。1 つは、石川県による汀線変動解析データであり (第 4 章第 1 節 (2) で主に使用)、もう 1 つは、本研究において画像から読み取りを行ったものである (第 4 章第 1 節 (2) (3) で主に使用)。後者に関して、画像からの読み取りは目視により沿岸方向に数 m ピッチで行い、特に急激な変化点を押える。一部画像で撮影時の潮位が不明なため潮位補正は実施しない。また、汀線位置は波浪の遡上による湿潤域の上限とする。

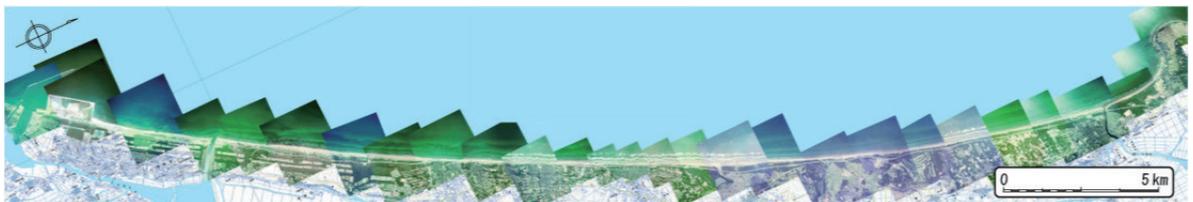
航空写真解析にあたっては、現在の金沢港の東防波堤付け根部分を平面座標の原点に設定し、また、磁北から時計回りに 25° および 295° 回転した方向を沿岸方向および岸沖方向とする。この座標系に基づいて、その後の写真の汀線および砂州の変動特性の解析を実施する。また、航空写真解析では、撮影日以前の海象条件に応じた短期変動の影響が不可避となるが、大規模な地形変動については短期変動の影響が比較的小さいと仮定して大規模なスケールのもを解析対象にする。



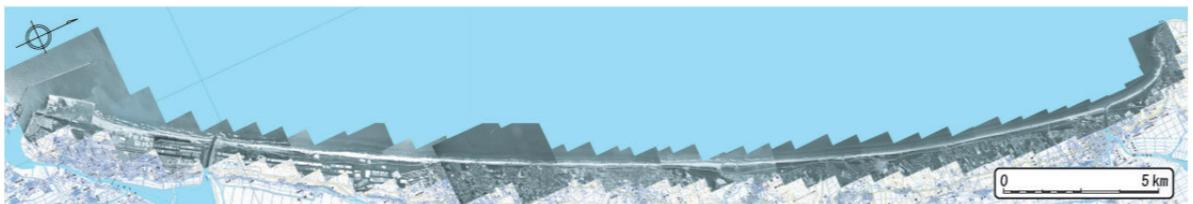
(a) 1947 年



(b) 1967 年



(c) 1975 年



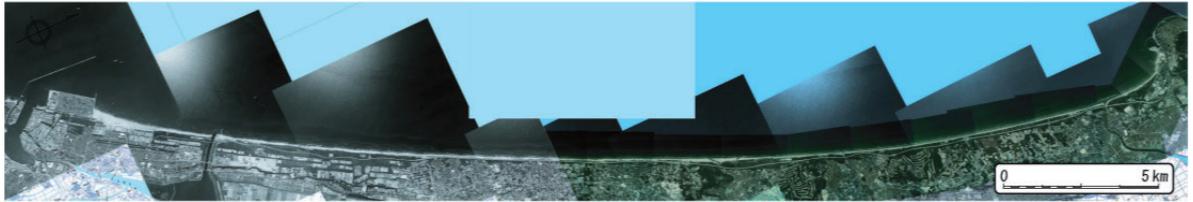
(d) 1987 年



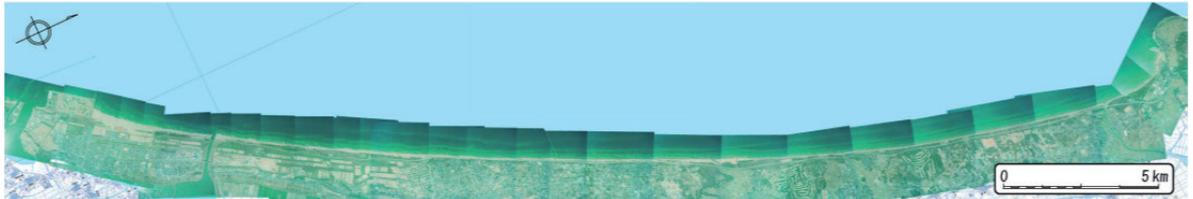
(e) 1992 年



(f) 1998 年



(g) 2002 年



(h) 2003 年



(i) 2010 年

図-3.1.1 1947～2010 年撮影の航空写真

第 2 節 深浅測量データによる断面地形変動の解析法

対象領域においては、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所により、超音波測深機による深浅測量が年一回、主に秋期（9 月～11 月初旬）に実施されている。測量の範囲は沿岸方向に約 32km であり、図-2.1.1(c)に示したように、測線は北側から羽咋地区（H70, 60, 40, 03, 01）5 本、高松地区（T80）1 本、七塚地区（N70, 60, 50）3 本、および内灘地区（U40, 20, 00）3 本の合計 12 本である。沿岸方向の測量間隔は平均 3km であり、岸沖方向の測量範囲は測量起点から 1～3.5km である。なお、測線の方角は N307°であり、汀線直角方向とわずかに異なっている。

本研究では、13 年分（1998～2010 年）の深浅測量データに基づいて海底地形変動の解析を行う。なお、測線の岸沖位置は年によって異なるため、深浅測量の地盤高データ（T.P.）を線形補間により等間隔（20m）に再配置して解析を行う。また、経験的固有関数法を用いて調査対象領域の地形データの解析を行う。

(1) 砂州位置形状の解析と砂州諸元の定義

砂州諸元の定義を図-3.2.1 に示す。砂州比高 H (m) はトラフ高 Z_t (m) とクレスト高

$Z_c(m)$ の差で表している。測量基点を基準とする表示（図-3.2.1）および、観測期間中の平均汀線位置（地盤高 T.P.+0m 位置）を岸沖方向の基準点と離岸距離を表示する 2 つの場合を使い分けている。解析は対象領域の 12 測線を北部・中央部・南部領域に分けて行い、対象項目は、各領域における代表断面の、①海底地形変動、②最高・最低・平均地盤高と変動の標準偏差、③地盤高変化率（最小自乗近似による線形トレンド）とする。

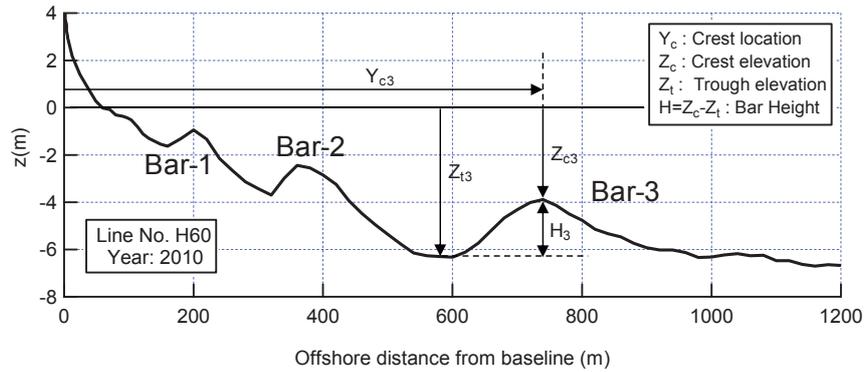


図-3.2.1 砂州諸元の定義

(2) 汀線および土砂量の時間変動特性と沿岸方向変動解析

測線ごとに、等深線位置、海浜土砂量（単位幅当たり）変動等を解析する。この時、基点から1.3kmまでのデータを使用する。また、汀線位置および海浜土砂量の変化速度を求めるために最小自乗近似法を用いる。

(3) 経験的固有関数（EOF）法による解析

経験的固有関数法を用いて対象領域である北部加越海岸の地形データの解析を行う。経験的固有関数法(Empirical Orthogonal eigenFunction Method: EOF 法)は Winant ら(1975)によって海岸工学分野に導入された統計的手法で、時系列の深浅測量データを用いて海浜変形の主要モードを空間と時間の固有関数の積で表現する主成分分析の一種である。

EOF 解析の特徴として、不規則な変動から独立したいくつかの変動パターンを見いだすことができるため、複雑な変動を少数のいくつかの変動パターンで表現する際に有利な手法といえる。地形変化に対する経験的固有関数法は、取り扱う対象が時系列の地形データのみであることから、これまでに独自の発達を遂げその有効性が認められてきた。また、この手法は海岸形状の分析に用いられているだけでなく、波のスペクトルデータの解析、波の遡上データの解析にも適用されている。本節では、由比ら(2010)による EOF 解析法を参考にしてデータ解析を行う。

次に、経験的固有関数法の解析手法の概略(Dean & Dalrymple, 2002)を示す。

ある測線に沿った海底断面の測点を順番に 1, 2, 3, …, i と番号付けする。各測

点において K 回測量が繰り返されているとする。なお、 i は測点番号、 k は測量年月を表す整数値とする。また、 i 番目の測点における k 回目の深淺測量時の地盤高を h_{ik} で表す。ここで、 h_{ik} を以下のように N 個の固有モードの線形重ね合わせの形で近似する。

$$h_{ik} \approx \sum_{n=1}^N C_{nk} e_{ni} \quad (3.2.1)$$

また、 e_{ni} は測点 i の位置における第 n モードの固有関数（空間関数）、 C_{nk} は k 回目の測量における n 番目の固有関数の係数（時間係数）である。すなわち、個々のモードは時間 t と空間 x に変数分離されている。

また、各々の固有関数は互いに直交するということから、

$$\sum_{i=1}^I e_{ni} e_{mi} = \delta_{nm} \quad (\delta_{nm} = 1(n = m), \delta_{nm} = 0(\text{otherwise})) \quad (3.2.2)$$

が成立しなくてはならない。

未知数 C_{nk} を求めるにあたって、固有関数を用いて近似的に表現された地盤高と実測値 h_{ik} との間の二乗誤差の総和が最小化されるように C_{nk} を決定する。すなわち局所誤差を

$$\varepsilon_{ik} = h_{ik} - \sum_{n=1}^N C_{nk} e_{ni} \quad (3.2.3)$$

としたときの二乗和、つまり、

$$\sum_{i=1}^I \varepsilon_{ik}^2$$

を最小化するように C_{nk} を決める。上記の局所誤差を C_{mk} に関して書き直すと、

$$\varepsilon_{ik} = h_{ik} - \sum_{m=1}^N C_{mk} e_{mi} \quad (3.2.4)$$

となる。ここで式(3.2.3)の両辺に ε_{ik} を乗じると次のようになる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{ik}^2 &= (h_{ik} - \sum_{m=1}^N C_{mk} e_{mi}) \times \varepsilon_{ik} \\ &= h_{ik} (h_{ik} - \sum_{m=1}^N C_{mk} e_{mi}) - (h_{ik} - \sum_{n=1}^N C_{nk} e_{ni}) \cdot (\sum_{m=1}^N C_{mk} e_{mi}) \\ &= \sum_{m=1}^N C_{mk} \left\{ -2(h_{ik} e_{mi} - \sum_{n=1}^N C_{nk} e_{ni} e_{mi}) \right\} + h_{ik}^2 \end{aligned}$$

従って、

$$\sum_{i=1}^I \varepsilon_{ik}^2 = \sum_{m=1}^N \left[C_{mk} \left\{ -2 \sum_{i=1}^I (h_{ik} - \sum_{n=1}^N C_{nk} e_{ni}) \cdot e_{mi} \right\} + h_{ik}^2 \right]$$

これを最小にするためには、次式が成立しなくてはならない。

$$\frac{\partial}{\partial C_{mk}} \sum_{i=1}^I \varepsilon_{ik}^2 = 0 \quad (3.2.5)$$

従って、

$$2 \sum_{i=1}^I (h_{ik} - \sum_{n=1}^N C_{nk} e_{ni}) e_{mi} = 0 \quad (3.2.6)$$

式(3.2.6)を展開し、直交性の条件を用いることで、

$$\sum_{i=1}^I h_{ik} e_{mi} - C_{mk} \sum_{i=1}^I e_{mi} e_{mi} = 0$$

となり、 $\sum_{i=1}^I e_{mi} e_{mi} = 1$ だから、

$$C_{mk} = \sum_{i=1}^I h_{ik} e_{mi} \quad (3.2.7)$$

を得ることができる。これより、固有空間関数 e_{mi} が分かれば時間係数 C_{mk} を決定することができる。

ここで、固有関数を求める前に地盤高 h_{ik} の分散 σ^2 について考える。

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \frac{1}{IK} \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I h_{ik}^2 \\ &\approx \frac{1}{IK} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \left\{ \sum_{i=1}^I e_{ni} e_{mi} \sum_{m=1}^N C_{nk} C_{mk} \right\} \end{aligned}$$

ここで $m = n$ とし、直交条件を用いると、 σ^2 は(3.2.8)のように表される。

$$\sigma^2 = \frac{1}{IK} \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N C_{nk}^2 \quad (3.2.8)$$

これをパーセバルの定理と言う。この分散に対する寄与が最大となるように固有関数を決定する。このために、ラグランジェの未定乗数法を用いることとし、ラグランジェ乗数 λ として、 e_{nm} に対して以下の関数が最大となるように固有関数を決定する。

$$\frac{1}{IK} \sum_{k=1}^K C_{nk}^2 - \lambda \left(\sum_{i=1}^I e_{ni}^2 - 1 \right) \quad (3.2.9)$$

上式を e_{nm} で微分すると、次式を得る。

$$\sum_{i=1}^I e_{ni} \left(\frac{1}{IK} \sum_{k=1}^K h_{ik} h_{mk} \right) = \lambda e_{nm} \quad (3.2.10)$$

ここで、

$$a_{im} = \frac{1}{IK} \sum_{k=1}^K h_{ik} h_{mk}$$

とすると、以下に示す対称マトリックス方程式が得られる。

$$\sum_{i=1}^I a_{im} e_{ni} = \lambda e_{nm} \quad (3.2.11)$$

これより、式(3.2.1)の e_{ni} 、すなわち空間の固有関数は、対称マトリックスの固有ベクトルとして、 λ は固有値としてそれぞれ求まる。また、 $N=I$ とすると各々の固有関数は異なる固有値 λ_n と関係し、

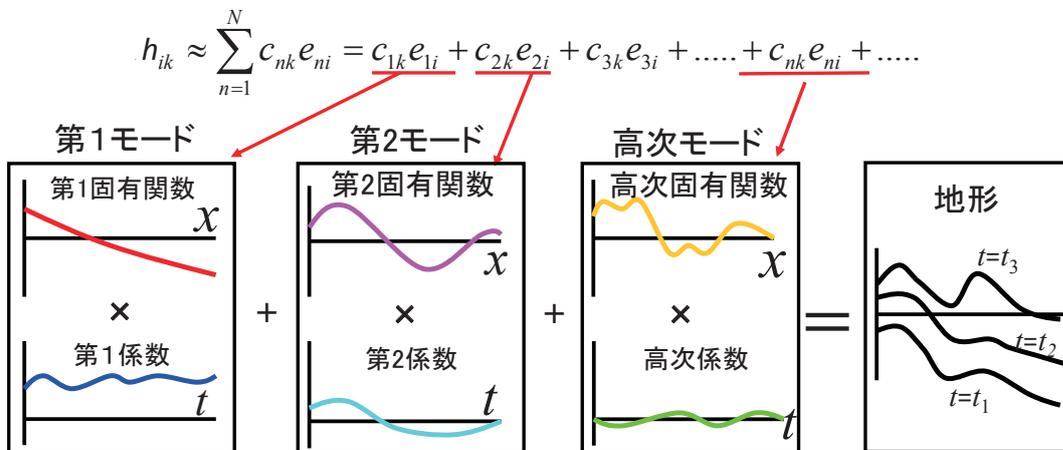
$$\sigma^2 = \sum_{n=1}^I \lambda_n \quad (3.2.12)$$

と表される。通常、固有値が大きい(寄与率が大きい)順に第1, 第2, 第3...とモード番号の設定を行う。以上が経験的固有関数法の解析理論である。

ここで基本式である (3.2.1) についてもう一度まとめておく。固有関数を $h_n(x,t)$ とすると、これは重みを含んだ係数 $C_n(t)$ と関数 $e_n(x)$ をかけ合わせたものの重ね合わせで海底地形が表されるという意味である。波ならば、 \sin, \cos 関数で表現することが可能だが、海底地形を \sin, \cos 関数で表す必然性はない。つまり、海底地形は

$$h(x) = h_1(x,t) + h_2(x,t) + \dots = C_1(t)e_1(x) + C_2(t)e_2(x) + \dots \quad (3.2.13)$$

と表され、 $C_1, C_2 \dots$ 及び $e_1, e_2 \dots$ は経験的に求められる。図 3.2.2 に経験的固有関数法の考え方を示した模式図を示す。



h_{ik} : i の位置における k 回目の深浅測量時の地盤高
 e_{ni} : i の位置における n 番目の固有関数(空間関数)
 C_{nk} : k 回目の調査における n 番目の固有関数の係数(時間係数)

図-3.2.2 経験的固有関数法の考え方

第3節 後浜地形の観測および波浪遡上の解析法

(1) 地形測量

後浜地形の測量は、測量目的によってトータルステーション、GNSS、3D レーザースキャナーの3種類を使い分けて実施した（藤原，2014）。観測日は2013年8月1日、9月21日、10月2日、11月17日の4回で、測線位置は甘田海岸が3測線、柴垣海岸が2測線の合計5測線である。3D レーザースキャナーによる観測は甘田・柴垣海岸でそれぞれ3回実施した。対象測線と観測項目を図-3.3.1 および表-3.3.1 に示す。

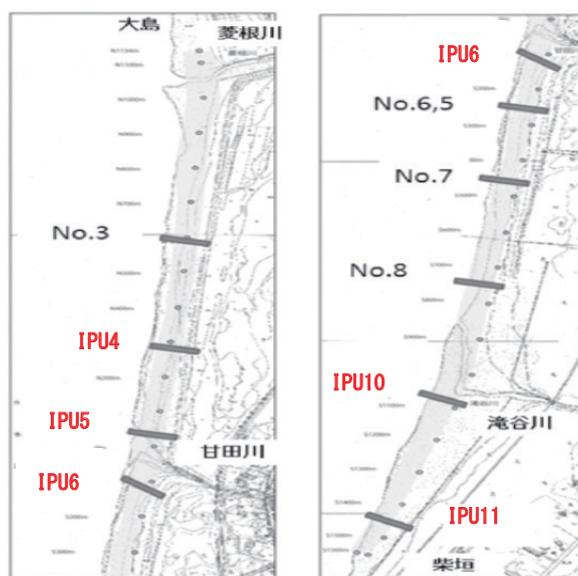


図-3.3.1 測線位置（上田ら，2013 に加筆）

表-3.3.1 観測日・観測位置・観測測線一覧表（●：観測実施項目）

観測日	甘田海岸						柴垣海岸					
	TS	GNSS	3D	TS	GNSS	3D	TS	GNSS	3D			
2013年	IPU4	IPU5	IPU6	IPU4	IPU5	IPU6	IPU10	IPU11	IPU10	IPU11		
8月1日	●			●				●		●		
9月21日	●			●		●		●		● ●		
10月12日	●	●	●	●	●	●	●	●	●	● ● ●		
12月17日		●			●	●		●		● ●		
測量回数	1	4	1	1	4	1	4	1	4	1	4	3

(1-1) トータルステーション（TS）による後浜地形の測量法

トータルステーションを用いて、柴垣・甘田海岸における後浜の断面地形測量を行う。トータルステーションの測量によって得られた結果は、GNSS（Global Navigation Satellite System：全地球航法衛星システムの略称）測量より得られた断面図との比較を通じて、GNSS 測量の精度評価を行うために利用した。

(1-2) GNSSによる後浜地形の測量法

全観測においてGNSS地形測量を実施した。海岸の侵食状況の把握およびGNSS測量データの補正を目的として、石川県立大学が設置しているボルトの高さ測定をGNSS測量と併せて実施する。

(1-3) 3Dレーザースキャナーによる後浜地形と漂流堆積物の平面測量法

3Dレーザースキャナー（西嶋ら，2011）を用いて，平面的な後浜地形測量および漂流堆積物の分布の調査を行い，TS測量と組み合わせることにより高い分解能の標高データを作成し解析を行う。詳細は，第6章第4節に延べる。

(2) 波の遡上高の解析法

海岸に波が作用すると海岸付近の平均水位は上昇（Wavesetup）し，更に，一波ごとの遡上（Swash）が加わって全遡上高（Runup）が決められる。

(2-1) 砕波による平均水位上昇（Wavesetup）量の推定法

海岸に波が作用すると海岸付近の平均水位は上昇する。これは，ラディエーション応力（波の運動に伴う過剰運動量流束）の変化に伴って，汀線付近の平均水位が静水位よりも高くなる Wavesetup という現象である。Wavesetup を質量輸送の観点から説明すると直観的で理解しやすい。図-3.3.2 は有限振幅波の峰と谷での流速分布を示した模式図である。有限振幅波では，峰下で波の進行方向側に輸送される流量と谷下で進行方向と反対側に輸送される流量が異なり，進行方向側へ輸送される流量の方が大きい。よって，図-3.3.3 に示すように沖から海水が少しずつ輸送されてくる。この量は波高の自乗に比例する。したがって，砕波点より岸側で波高が減衰する領域では沖から輸送されてくる海水が貯まり平均水位が上昇する。

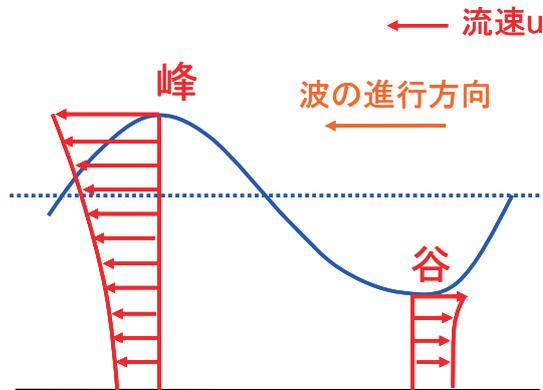


図-3.3.2 有限振幅波の波動場

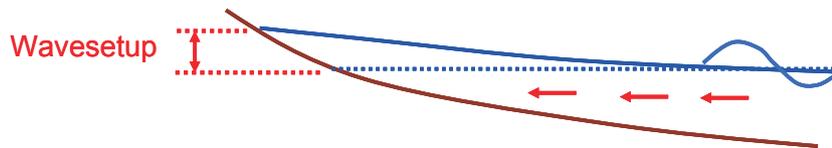


図-3.3.3 沖から岸への質量輸送による Wave Setup

(2-2) 波の遡上高の推定手法

① 経験式による推定

Wavesetup 量を推定するための経験式は数多く存在する。その多くの経験式はパラメータとして来襲波の波高、波長と海底勾配を含んだものである。経験式で与えられる Wavesetup 量 ΔW の範囲は、おおよそ $0.1H_{1/3} < \Delta W < 0.2H_{1/3}$ であるといわれている(砂村, 1980)。ここで $H_{1/3}$ は沖波の有義波高である。Wavesetup 量 ΔW の簡易的推定法として、経験式による方法としては、 $\Delta W = 0.15H_{1/3}$ を用いることが多い。

② H. F. Stockdon ら (2006) の経験式による推定

H. F. Stockdon ら (2006) は、外洋に面した 5 か所の海岸で波浪遡上の観測を行った結果に基づいて、上位 2% の遡上高を定式化した。Runup データの定式化にあたって、オレゴン州立大学の海岸映像研究室の映像解析法が用いられた。対象海岸と観測データの取得年は以下の通りである。

- ・ダック : USA (1982, 1990, 1994, 1997)
- ・スクリプスビーチ : USA (1989)
- ・サンオノフェ : USA (1993)
- ・テルシェリング : ND (1994)
- ・アゲーテビーチ : USA (1996)

これらの観測結果の解析にあたり、Stockdon らは、Runup (波の最大遡上高) を Wavesetup (時間平均水面の上昇高) と Swash (波の遡上高) の和として定義した。Wavesetup 部は前浜勾配、沖波波高、深水波長を含んだイリバレン数を用いて表した。Swash 部は入射波 (Incident Wave) と長周期波 (Infragravity Wave) の影響にさらに分けられる。入射波の影響による Swash はイリバレン数で表されるが、長周期波の影響による Swash は沖波波高と波長を使って表され、前浜領域の影響を受けないとして定式化された。また、イリバレン数 (ξ_0) を用いて次の様に海岸を分類した。

- ・ $\xi_0 < 0.3$ (逸散海岸) : 長周期波の影響が卓越する。
- ・ $0.3 < \xi_0 < 1.25$ (中間海岸) : 入射波と長周期波がともに影響している。
- ・ $\xi_0 > 1.25$ (反射海岸) : 入射波が影響するが長周期波の影響は無視してよい。

Stockdon ら (2006) の検討では、平均水位上昇量 (有次元表示) は、前浜勾配と沖波波高および波長を用いた表示形式で最も精度よく定式化される。遡上高の有義値は、入射波および長周期波の周波数帯に分解でき、それらに対して個別にモデル化が行われた。さらに、砕波帯の海底勾配を定式化に用いたとしても、顕著な改善はもたらされないと結論付けた。また、広範囲の環境条件に対する実験式から、極端な Runup は Setup ($\Delta W1$) と Swash 可動域の半分 ($\Delta W2$) の合計に依存している、すなわち、 $R_2 = \Delta W1 + \Delta W2$ の形を取るとした。

Stockdon ら (2006) の提案した Setup と Swash の式を用いることで、全ての自然海岸における Runup の上位 2% の遡上高に対して次の様な評価が可能である。

・ 中間海岸 :

$$R_2 = 1.1 \times [(0.35 \times \beta_f (H_0 L_0)^{1/2} + (1/2) \times \{H_0 L_0 \times (0.563 \times \beta_f^2 + 0.004)\}^{1/2}] \quad (3.3.7)$$

但し $0.3 < \xi_0 < 1.25$

・ 反射海岸 :

$$R_2 = 0.73 \times \beta_f (H_0 L_0)^{1/2} \quad (3.3.8)$$

但し $\xi_0 > 1.25$ の範囲

・ 逸散海岸 :

$$R_2 = 0.043 (H_0 L_0)^{1/2} \quad (3.3.9)$$

但し $\xi_0 < 0.3$ の範囲

R_2 : Runup (上位 2% の遡上高) H_0 : 沖波波高 L_0 : 同波長 β_f : 斜面勾配

ξ_0 : イリバレン数

本論文では、この Stockdon ら (2006) の経験式に基づいて解析を行う。

第4章 汀線および土砂量の時間変動特性と沿岸方向変動

対象領域の北部加越海岸は、内灘海岸（内灘町）、七塚・高松海岸（かほく市）、および、押水・羽咋海岸（羽咋市）に区分される。海岸線形状は、金沢港から北北東に伸びる形で緩やかに湾曲して、全長は約 32km である。

本章では、石川県土木部より提供された、1947～2010 年の航空写真（1947, 1967, 1975, 1987, 1992, 1998, 2002, 2003, 2010 年の計 9 回）を基に、汀線や多段砂州の位置を抽出し、砂州の平面形状、規模、段数等について定性的解析を行う。合わせて、国土交通省金沢河川国道事務所が実施している超音波測探機による深淺測量（年 1 回、9 月～11 月初旬に実施。1998～2010 年の計 13 回）に基づいて、断面地形の岸沖方向変動、海浜地形の平面変動、平均地盤高・地盤高変動幅・地盤高変化率の解析を行う。また、経験的固有関数法による海底地形の変動解析を併せて実施する。さらに、汀線位置および海浜土砂量の時間変動特性と沿岸方向変動の解析を行う。

第1節 航空写真による変動解析

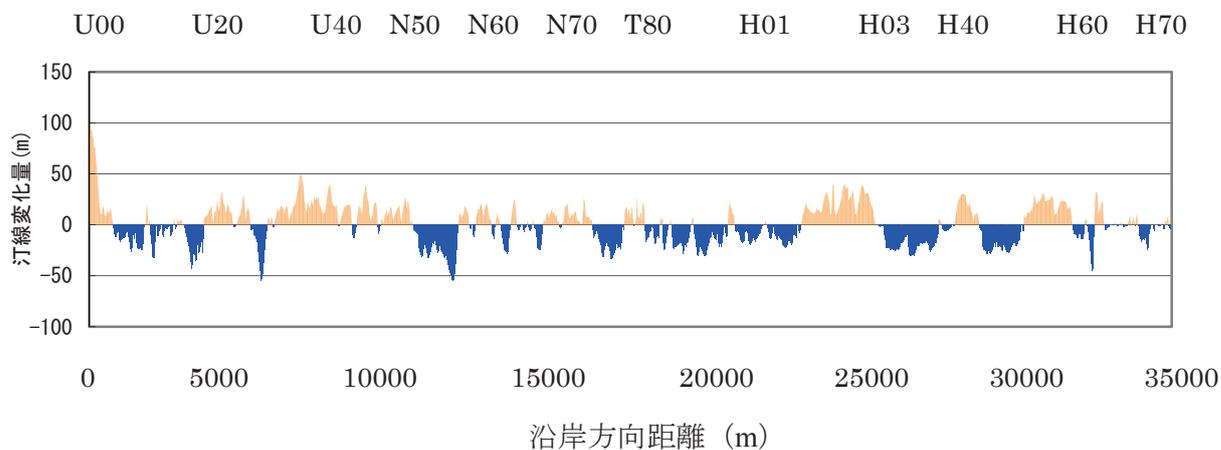
(1) 汀線変動の解析

1967 年の航空写真を基準にした汀線位置の岸沖変動を石川県によるデータに基づいて図化した結果を図-4.1.1 に示す。1975 年までの汀線変動を見ると、全対象領域では前進（堆積）と後退（侵食）が交互に分布している。南部領域では U00 付近（金沢港東防砂堤付近）で 100m 程度の前進が見られる。また、U20～N50 区間の広い範囲に前進が目立ち、一部では 50m 程度の前進区間が存在する。中央部領域では大きなところでは 50m 程度の後退区間が存在するが、N60～H01 区間では 10m 程度の前進と後退を繰り返している。北部領域では、H01～H03 区間は 40m 程度の前進区間が存在するが、その他の区間は 25m 程度の前進と後退区間が交互に存在している（図-4.1.1(a)を参照）。

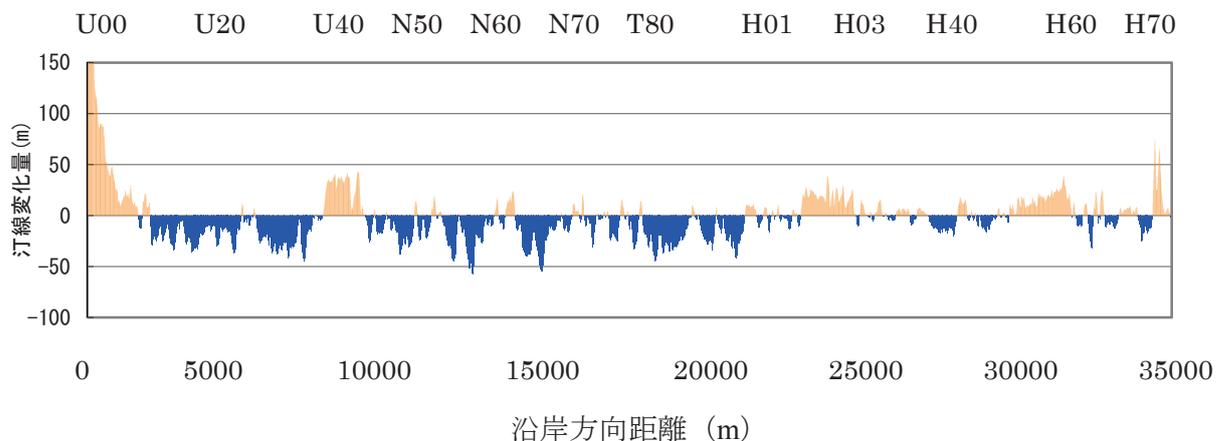
1987 年までの汀線変動を見ると、U00 付近で 150m 程度の前進が現れている。南部領域では U40 付近に 40m 程度の前進区間が存在するが、他の区間では 40m 程度の後退が見られる。中央部領域の N50～H01 は最大 50m 程度の後退が見られる。北部領域では、後退が弱まり、前進に転じている部分もある（図-4.1.1(b)を参照）。

1998 年までの汀線変動を見ると、南部領域の U00 に 150m を超える顕著な前進区間が 1.5km 程度に渡って存在するが、その他の南部・中央部・北部領域の全域に渡って 50m 程度、一部では 60m 程度の大きな後退区間が見られる。北部領域の滝港に隣接している H70 は、150m 程度の顕著な前進が見られるが、これも、U00 付近と同様に構造物の影響を受けていると考えられる（図-4.1.1(c)を参照）。

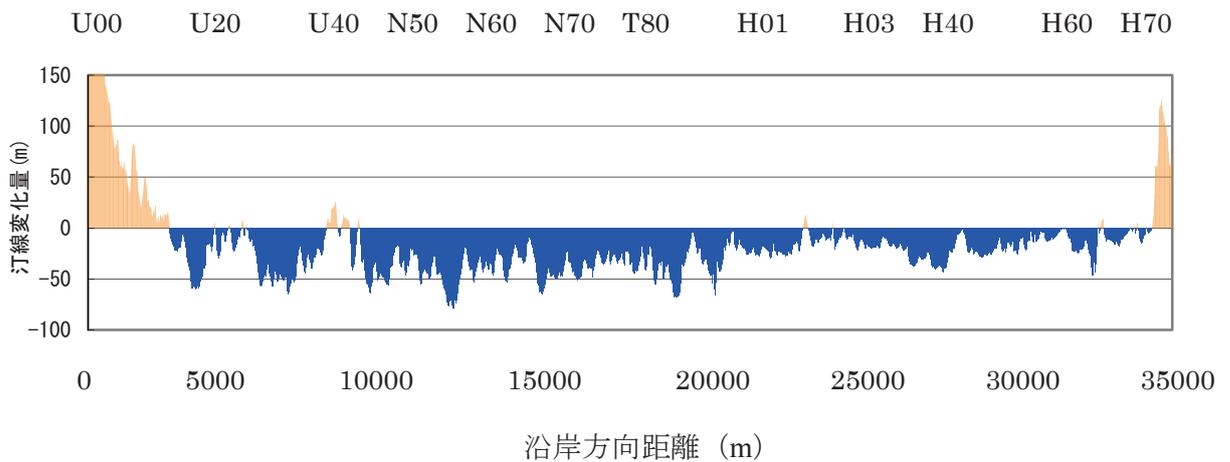
1967年を基準にして2010年の汀線変動を見ると、金沢港隣接 U00 と滝港隣接 H70 は大きく前進しているが、その他の対象領域は大きく後退し、50m を越える後退箇所が見える。しかし、反対に小さな前進箇所が所々に見える。これは導流堤・消波堤・人工リーフ・離岸堤の影響を受けていると考えられる（図-4.1.1(d)を参照）。



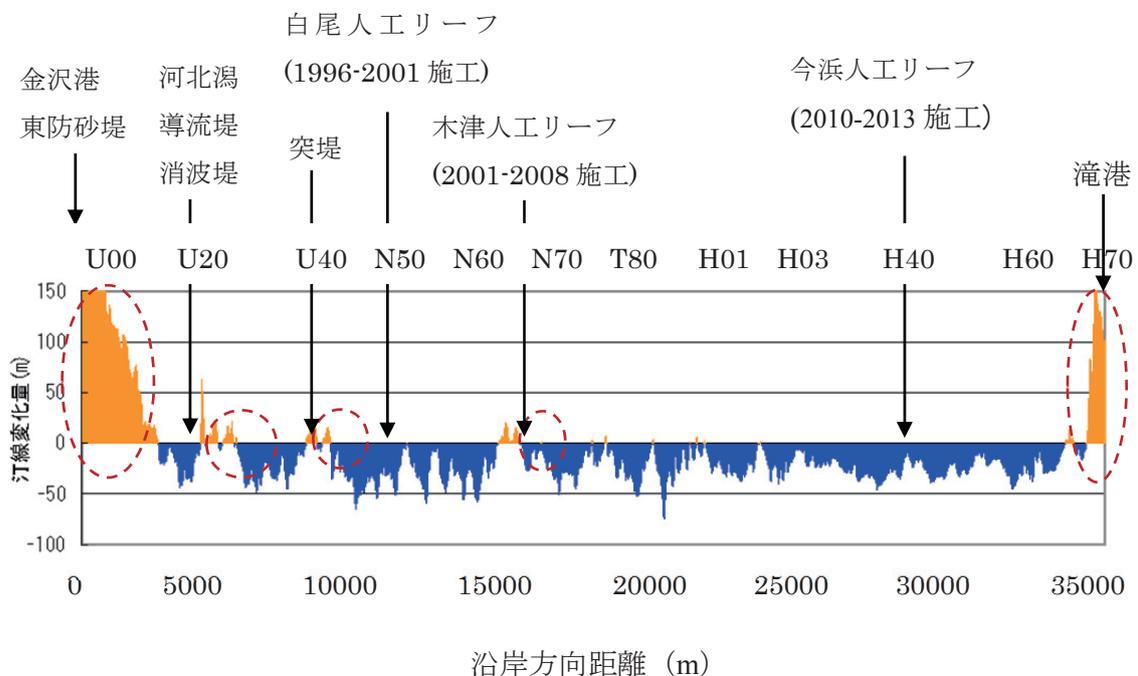
(a) 1967年と1975年の比較



(b) 1967年と1987年の比較



(c) 1967年と1998年の比較



(d) 1967年と2010年の比較

図-4.1.1 汀線位置の経年変動(石川県千里浜海岸保全対策検討委員会, 2007年に加筆)

(2) 汀線位置の変化状況の解析

先に示した石川県による汀線変動量(1967~2010年:1967年基準)の解析結果を基にして、1975~1987年、1987~1999年、1999~2010年毎の約12年間隔で汀線位置の変化状況について解析を行う(図-4.1.2~図-4.1.4)。

1975~1987年の12年間の汀線変動は、金沢港隣接のU00付近で約150m、滝港隣接のH70付近は約100mと著しい前進が見られるが、その他の領域は沿岸方向に前進と後退を交互に繰り返しながら、汀線後退傾向が強まっている。その汀線後退量は南部・中

中央部・北部領域では最大 50m 程度、汀線前進は最大 40m 程度となっている。すなわち、汀線後退が卓越して、その範囲も南部領域の北側から中央部領域に広く見られる。

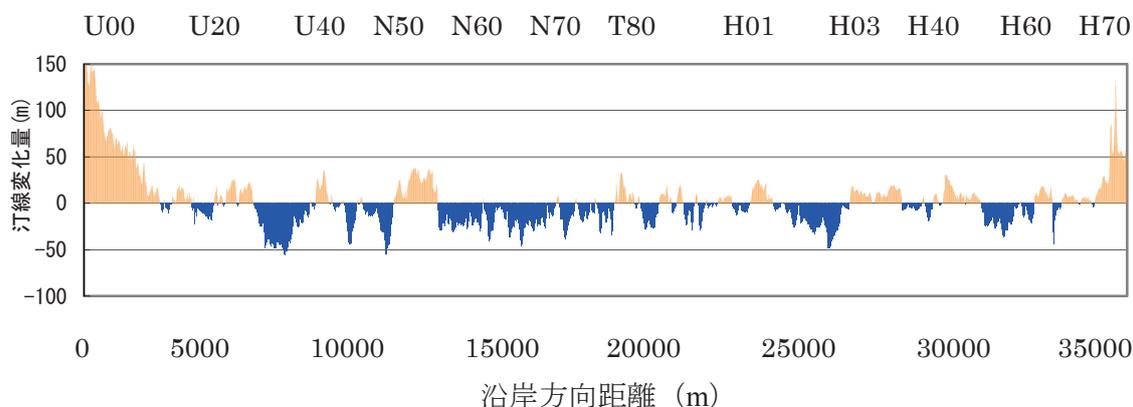


図-4.1.2 汀線位置の変化状況（1975～1987年）

1987～1999年の12年間の汀線変動は、金沢港隣接のU00付近の前進が100m程度となり、前の12年間に比べると前進量が50m程度減少している。その他の南部領域(U20～N50)は大部分が汀線後退で、最大50m程度となっている。中央部領域は一部に侵食域が見られるが、ほぼ全域で最大50m程度の堆積域となっている。北部領域は全域に渡って侵食され、最大30m程度の汀線後退となっているが、滝港隣接のH70付近は、前の12年に比べると、堆積が加速して150m程度の前進となっている。

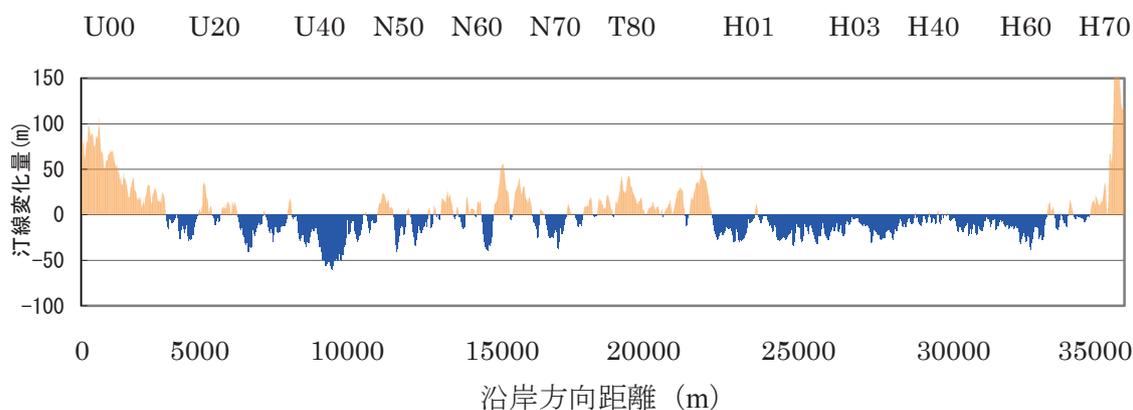


図-4.1.3 汀線位置の変化状況（1987～1999年）

1999～2010年の11年間の汀線変動は、金沢港隣接のU00付近の汀線前進は50m程度となり、前の12年間に比べると変動量は50m程度に減少している。南部・中央部領域は全域に渡り堆積傾向が強まり、60m程度を超える区間も見られる。北部領域は全域に渡って侵食傾向が見られるが、前の12年間に比べると、侵食は弱まり、最大で25m程度の汀線後退となっている。滝港隣接のH70付近の前進は40m程度で、前の12年間に比べると大幅に減少している。

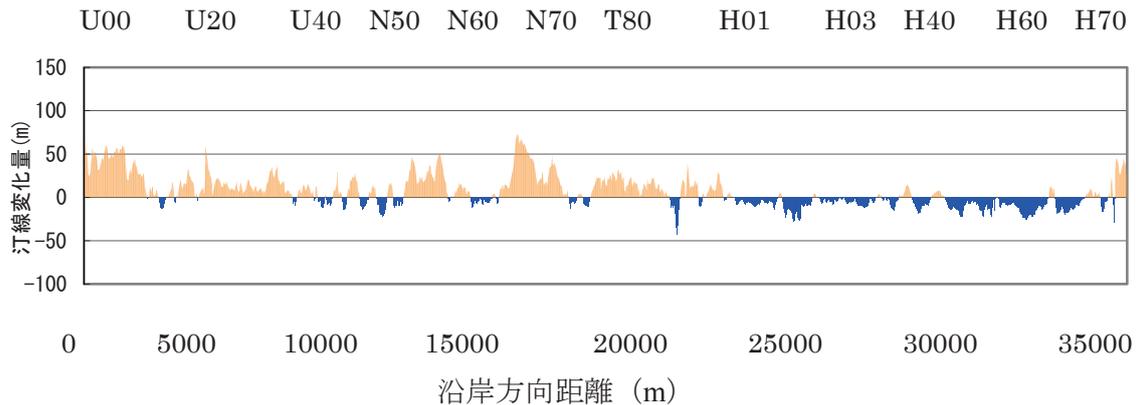


図-4.1.4 汀線位置の変化状況（1999～2010年）

(3) 砂州変動の解析

図-3.1.1 に示した 9 枚の航空写真から読み取り，変換を行って抽出した砂州位置・形状の変動を図-4.1.5 に示す．1947 年の砂州および汀線形状は，金沢港建設以前の砂州および汀線形状を示している．砂州は金沢港から北北東に伸び，大きな変動もなく，全体が緩やかに湾曲して存在している状況が見られる．中央部領域の沿岸距離 17～25km 区間には，この砂州の沖側にもう一本の砂州が 400m 程度離れて存在している．北部領域の沿岸距離 25～32km には，この砂州の汀線側にもう一本の砂州が 200m 程度離れて存在している状況が見られる．

1967 年の砂州および汀線形状には，金沢港に隣接した南部領域に大きな変動が現れ始める．沿岸距離 4～23km 間には，沖側にもう一本の砂州が現れ，中央部領域の沿岸距離 9～14km 付近には，さらに沖側に砂州が存在し 3 段に発達している状況が見られる．この年の砂州および汀線形状には，沿岸距離 0～5km 区間に，2 段目以降の砂州が観察されない．このことは，金沢港東防砂堤の影響で沿岸漂砂が遮断され，土砂が堆積していることも一因と推定される．この状況は，2010 年まで継続して観察されている．

1975 年の砂州および汀線形状は，南部から中央部領域までの広い範囲に，砂州位置・形状に大きな変動が現れ，砂州は 2～3 段に発達している状況が見られる．この頃から，北部領域にも，砂州が 3 段に発達している状況が見られる．この年の観測では，沿岸距離 12km と 25km 付近で 1 段目と 2 段目の砂州に屈曲や他の砂州との接続が見られる．一般に，沿岸砂州は同時期に形成されたものが沿岸方向に連続し，形成時期の古いものほど沖側に位置する．しかしながら，このような地域の境界部では，砂州 Switching 現象による異世代砂州との接続が生じていることも推定される．1967 年以降の砂州および汀線形状の図に，砂州 Switching 現象，および，それに繋がる変動が現れていると推定される箇所を○印で示している．

1987 年の砂州および汀線形状は，砂州状況に大きな沿岸変動も見られず，対象領域全体に 1～3 段に発達している状況が確認できる．中央部の沿岸距離 14～17km 区間で

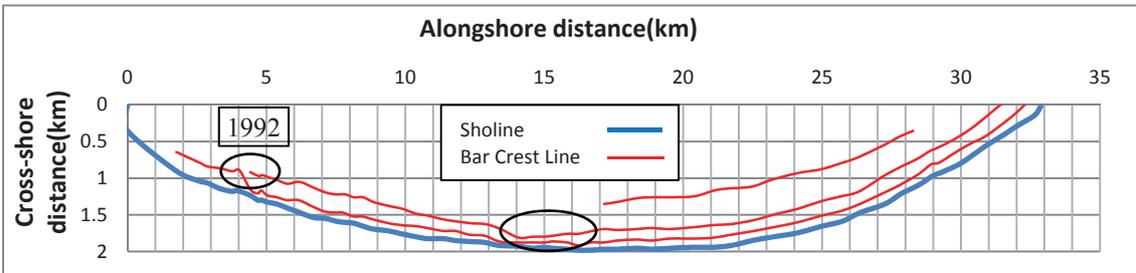
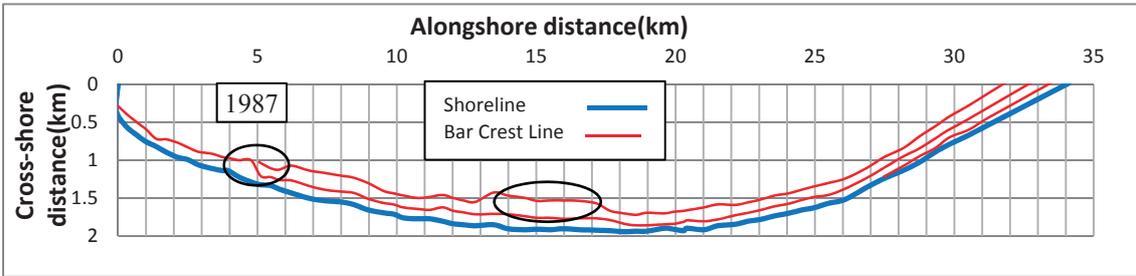
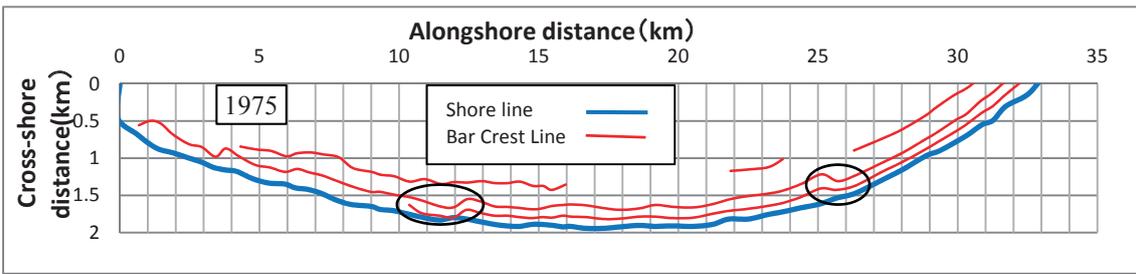
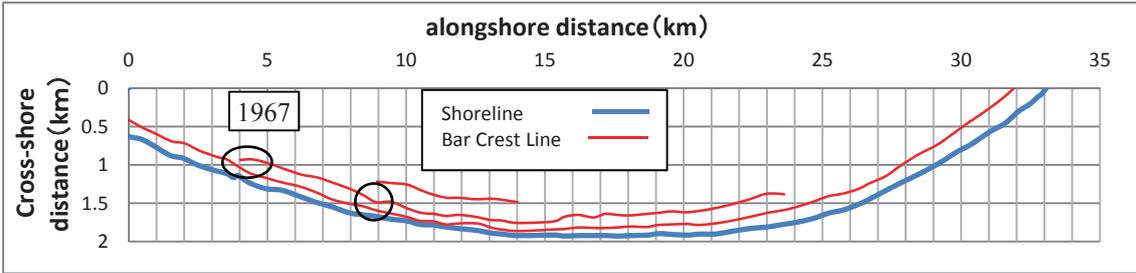
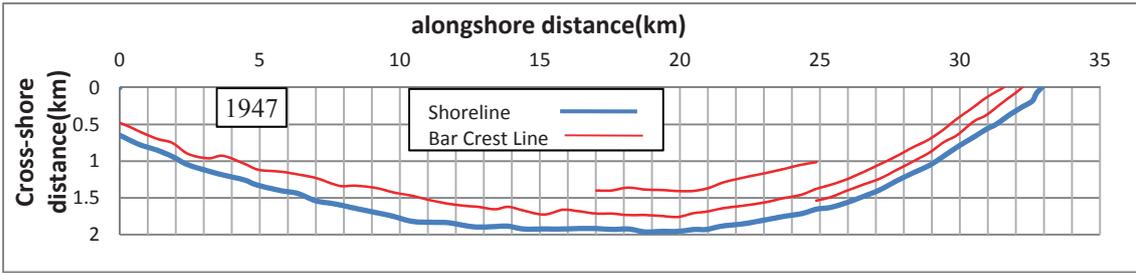
は1段目と2段目の砂州間隔が、その前後の砂州間隔に比べると倍近くに広がっている。この沖側砂州は、次第に沖側へ移動・減衰し、1992年頃にこの付近の汀線側に誕生する新たな砂州発達につながっていくと推定される。

1992年には、再び、砂州配置に大きな沿岸変動が現れ、中央部から北部領域にかけて3段の砂州の発達状況が見られる。この年の沿岸距離5km付近に砂州 Switching 等の異世代砂州の接続が生じていると推定される。中央部の沿岸距離14~17km付近にも、1段目と2段目の異世代砂州の接近が見られる。これは、1998年に現れる砂州の Switching へ繋がっていくと考えられる。

2002年の砂州および汀線形状は、南部領域北側から中央部領域に掛けては、砂州位置・形状に活発な変動が見られ、3段の砂州の発達状況が見られる。翌年2003年の砂州および汀線形状は、南部領域の沿岸距離0~5km間に、1967年の観察以来となる明瞭な2段砂州の発達が見られる。2002年の沿岸距離15km付近、2003年の沿岸距離20km付近、および30km付近に砂州の屈曲と Switching による異世代砂州との接続が生じていると推定される。

2010年の砂州および汀線形状は、南部領域の沿岸距離1~3km間に1段の砂州が観察できるが、それより沖側の砂州は観察できない。沿岸距離5~32km間は、2~3段に発達している状況が見える。沿岸距離15km付近の1段目と2段目の砂州が接続している様子が確認できる。これは、Switching による異世代砂州との接続と推定される。この年には、沿岸距離20km付近の汀線近辺に、新たな砂州の誕生と思われる状況が観察される。沿岸距離4km付近の汀線の突起は河北潟導流堤である。

これらの砂州間隔を見ると、1段と2段目の砂州間隔は平均200~300m、2段と3段目は平均400~500mである。沖に行くほど砂州間隔が広がっている様子が見える。



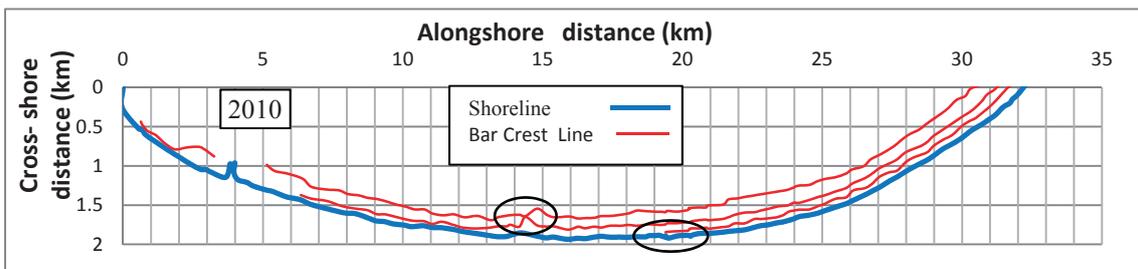
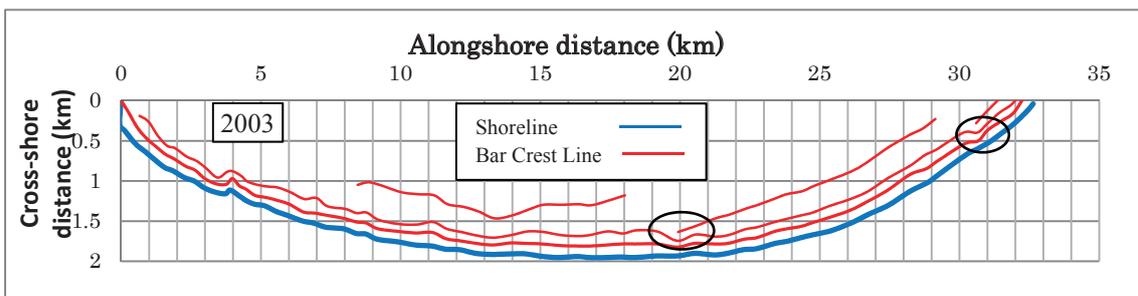
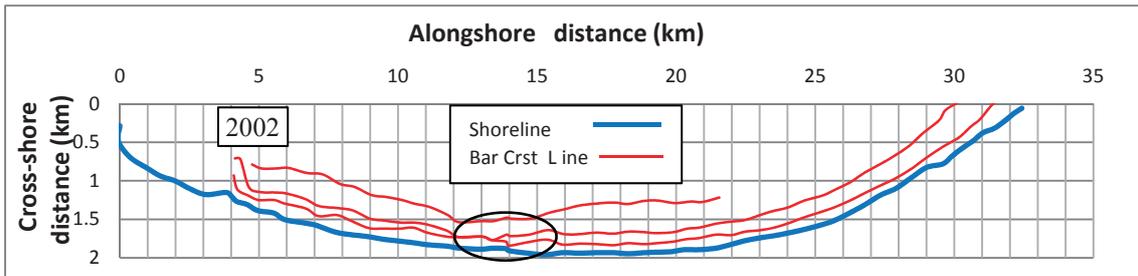
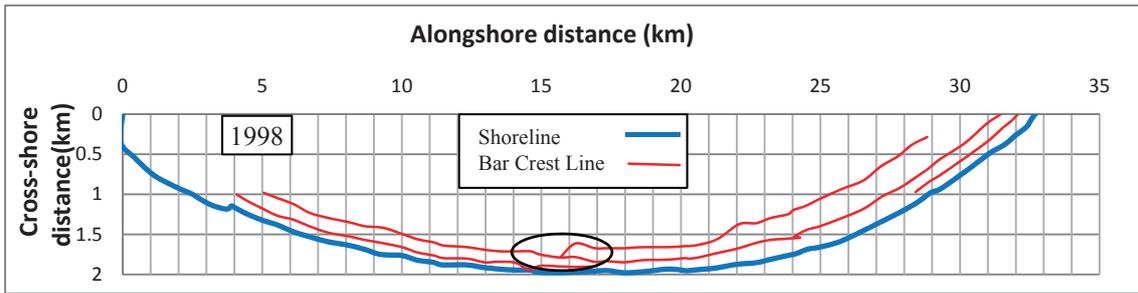


図-4.1.3 砂州および汀線形状 (1947年～2010年分を表示)

(4) 多段砂州間変動の解析

航空写真から読み取った砂州頂部位置の相関関係を図-4.1.4 と図-4.1.5 に示す. この図は砂州1段目, 2段目, 3段目 (ここでは, 岸から1段, 2段, 3段目と番号付けする) の離岸距離 (平均汀線位置からの沖向き距離) を L_1, L_2, L_3 とし, それらの相関を求めた図である. これによると, 砂州離岸距離 $Y(L_2)$ と $X(L_1)$ の近似関係は $Y \approx 2.11X$

の関係にある。岸から2および3段目に位置する砂州離岸距離 $Y(L_3)$ と $X(L_2)$ の近似関係は $Y \approx 2.20X$ の関係にある。 L_2 と L_3 の相関は、 L_1 と L_2 の相関よりも高い。第5章第3節において、深浅測量を基にした解析と EOF 空間関数を基にした解析を行って、さらなる比較検討を実施する。

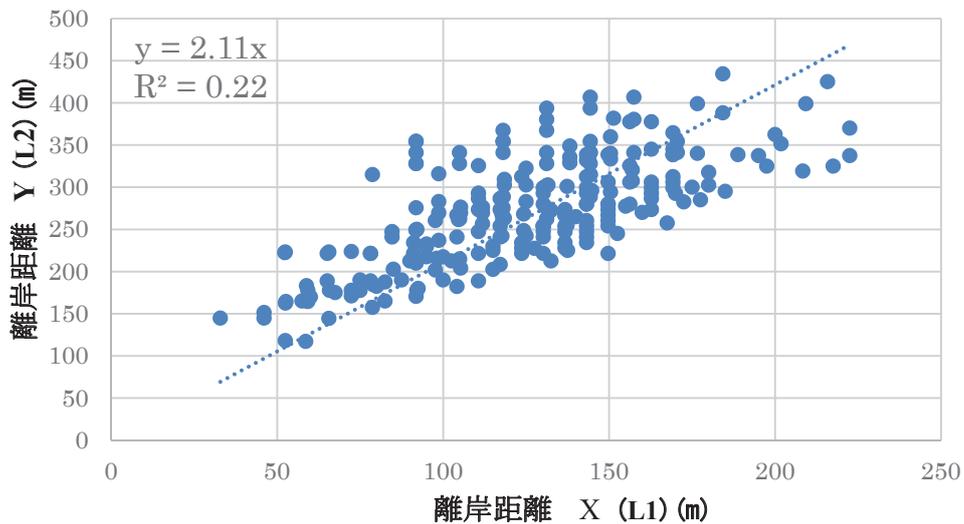


図-4.1.4 航空写真による多段砂州間変動の解析

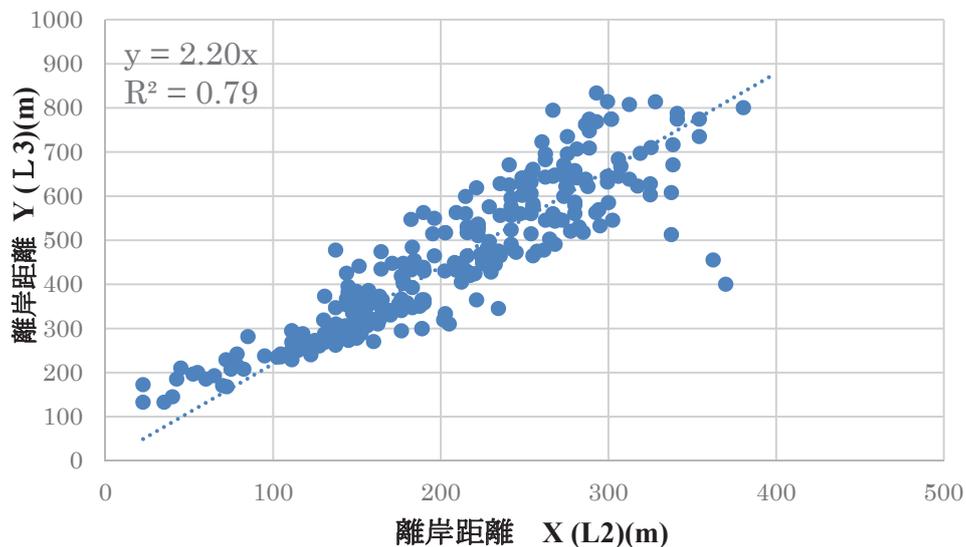


図-4.1.5 航空写真による多段砂州変動相関の解析

第2節 深浅測量データによる変動解析

対象領域の12測線を北部・中央部・南部領域の3領域に分け、各領域の代表測線 H60, T80, U20 に対する解析を行う。各領域における代表測線に対して、①海底地形変動、②最高・最低・平均地盤高と変動の標準偏差、③地盤高変化率の解析を行う。

(1) 断面地形の岸沖方向変動

岸沖方向の海底地盤高の経年変動例として、1998年～2010年間の2年毎の海底地盤高の経年変動（測量基点からの離岸距離で表示）および、同期間中の最高・最低・平均地盤高と標準偏差、地盤高変化率（観測期間中の平均汀線位置（地盤高 T.P.+0m）基準で離岸距離を表示）を図-4.2.1～図-4.2.9に示す。これらの代表測線では、いずれにおいても、大規模な多段砂州の形成とその組織的な沖向き移動が確認できる。一方、水深約8m（平均汀線からの離岸距離約700～1400m付近）以深では変動の標準偏差がゼロ（測量誤差約0.2mと同程度）に漸近している。このことから波浪による移動限界水深は約8mと考えられる。

(1-1) 北部領域（測線 H70, H60, H40, H03）

① 海底地盤高変動

北部領域の断面地形変動を代表測線H60で見ると、海底勾配は平均1/200で全対象領域内では緩勾配である。砂州は3～4段、比高最大値は3.5～4.5m程度で、岸沖存在範囲は測量基点から1000m付近まで達している。砂州移動の再現周期は4～5年となっている。

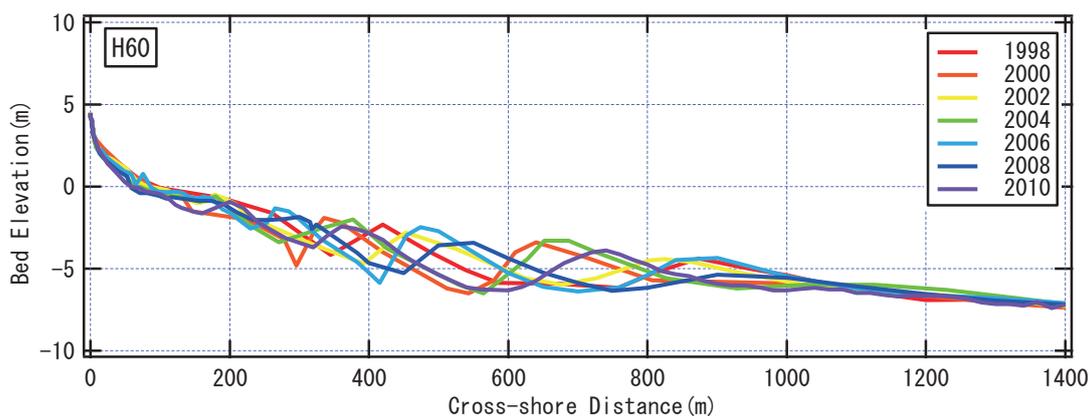


図-4.2.1 海底地盤高変動（代表断面 H60）

② 最高・最低・平均地盤高と変動の標準偏差

観測期間中の最高・最低・平均地盤高を縦軸に、離岸距離（m）を横軸に取り、標準

偏差 (m) と対比して図-4.2.2 に示す。最高および最低地盤高は、沿岸砂州の頂部およびトラフ底部の軌跡に対応しており、両者の差（地盤高変動幅）が砂州比高の目安となる。変動幅は離岸距離 200m～800m で最大 4.0m 程度となっている。対応する形で、地形変動の標準偏差も砂州変動が顕著な領域で約 1.8m の値を示している。

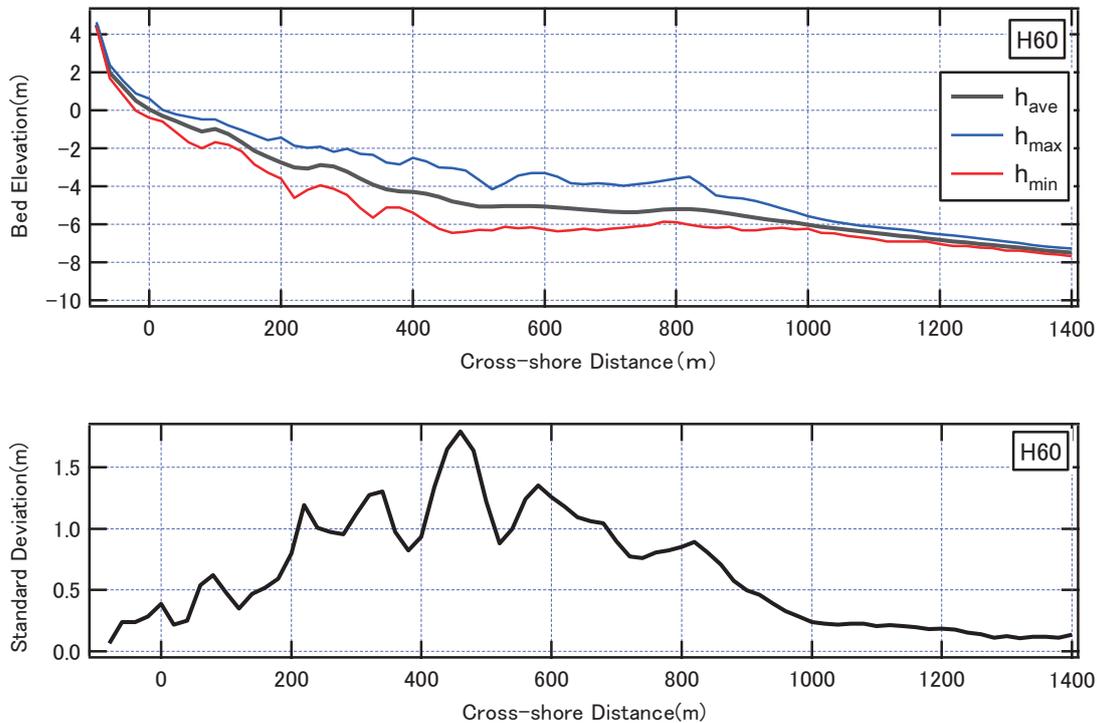


図-4.2.2 最高・最低・平均地盤高と変動の標準偏差（代表断面 H60）

③ 地盤高変化率

観測期間中の地盤高変化率 a (m/year) を縦軸に、離岸距離 (m) を横軸に取って表したものを図-4.2.3に示す。地盤高変化率のトレンドを見ると、地盤高変化率は $-6 \times 10^{-2} \sim 4 \times 10^{-2}$ (m/year) の範囲で推移している。汀線近傍から1000m付近にかけて一部に堆積傾向が見られるが、全体として侵食 ($a < 0$) 傾向が確認される。一方、それより沖側の領域では微小ではあるが、正の変動（堆積傾向）を示している。

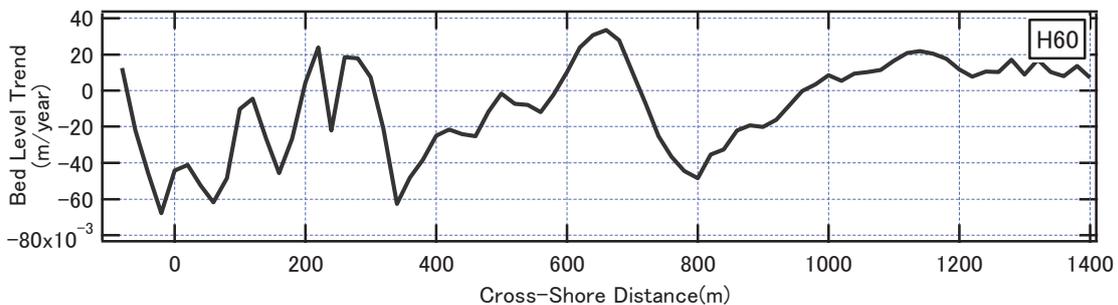


図-4.2.3 地盤高変化率（代表断面 H60）

(1-2) 中央部領域（測線 H01, T80, N70, N60）

① 海底地盤高変動

中央部領域の断面地形変動を代表測線 T80 で見ると、海底勾配は平均 1/150 で、北部領域に比べると少し急勾配になっているが、対象領域内では平均的な勾配である。砂州は 2～3 段に発達し、比高最大値は 4～4.2m 程度である。岸沖存在範囲は、測量基点から 900m 付近まで達している。北部領域に比べると岸寄りに位置している。砂州移動の再現周期は北部領域では 4～5 年程度であるが、この測線では少し長めの 6～7 年前後となっている。

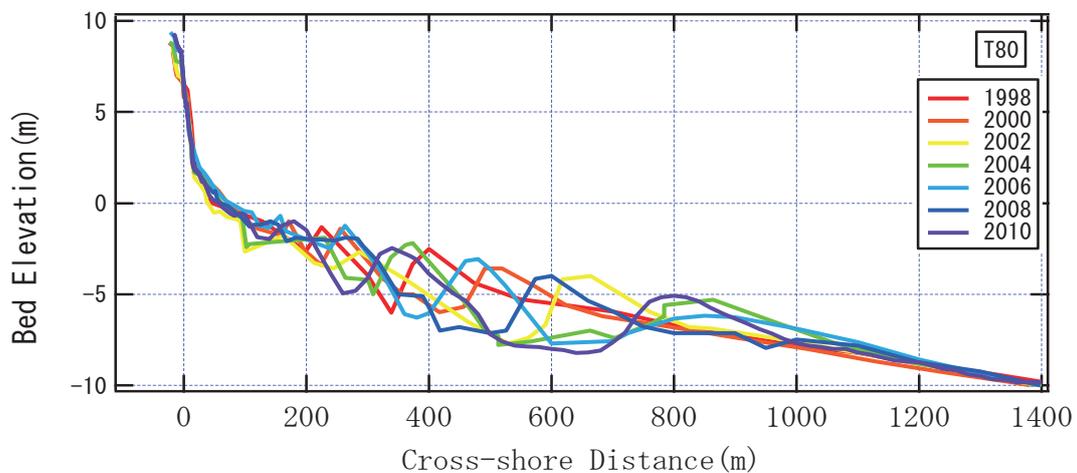


図-4.2.4 海底地盤高変動（代表断面 T80）

② 最高・最低・平均地盤高と変動の標準偏差

観測期間中の最高・最低・平均地盤高を縦軸に、離岸距離（m）を横軸に取り、標準偏差（m）と対比して図-4.2.5 に示す。変動幅は離岸距離 200m～700m において最大 4.0m 程度となり、対応する形で地形変動の標準偏差も砂州変動が顕著な領域で約 1.8m の値を示している。北部領域と比較すると、分布の形や値は似ているが、変動が顕著な領域の沖端が 100m 程度岸側に移動している。

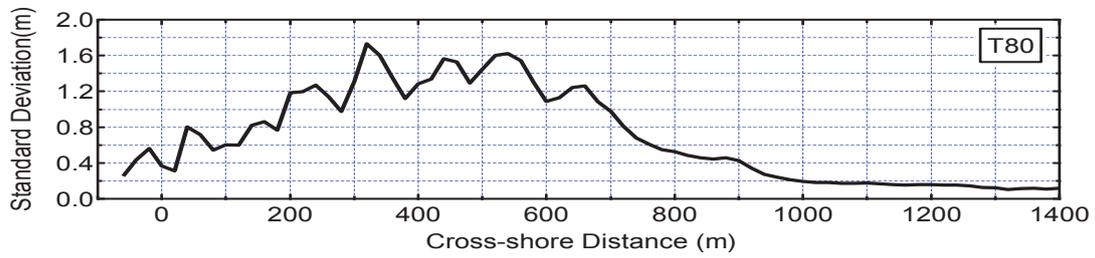
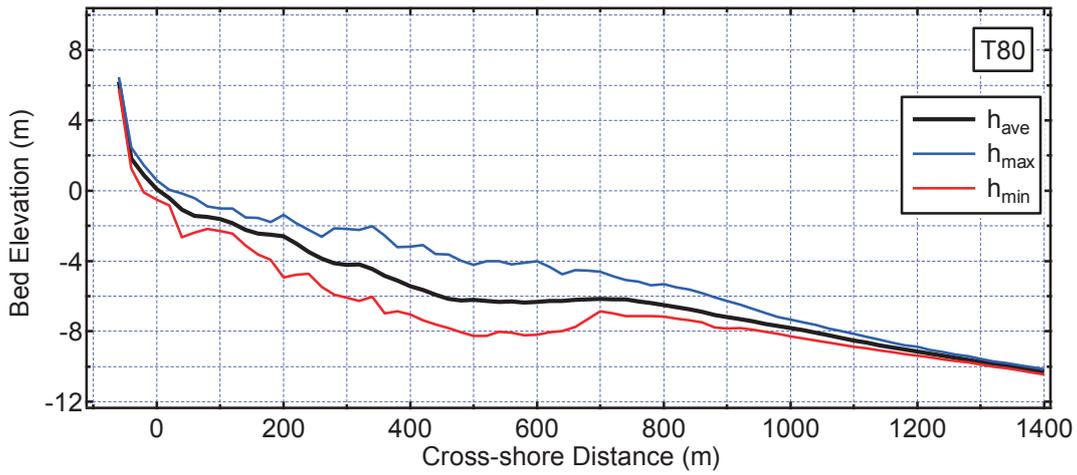


図-4.2.5 最高・最低・平均地盤高と変動の標準偏差（代表断面 T80）

③ 地盤高変化率

地盤高変化率のトレンドを見ると、汀線近傍では、ほぼ0に近い値をとり、離岸距離300~700mにかけて侵食（ $a < 0$ ）傾向が確認される。一方、700m付近より沖側では微小ではあるが、正の変動（堆積傾向）を示している。この離岸距離は北部領域に比べると汀線に近く、変化率は大きな値となっている。

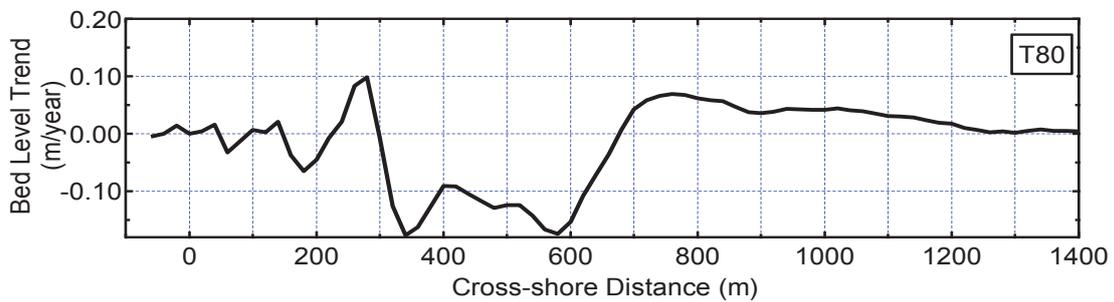


図-4.2.6 地盤高変化率（代表断面 T80）

(1-3) 南部領域 (測線 N50, U40, U20, U00)

① 海底地盤高変動

南部領域の地形変動を代表断面 U20 で見ると、海底勾配は平均 1/80 で対象領域内では最急勾配を示している。この代表測線では、砂州は 2 段に発達しているが、南端の金沢港東防砂堤付近 (U00) では消失している。比高最大値は 4~4.7m 程度であり、北部・中央部に比べると少し高い値を示している。岸沖存在範囲は 600m 付近まで達しているが、北部・中央部に比べると、岸側に近づいている。離岸距離 250m 付近の突起状の変化は消波堤 (2006 年に設置) である。

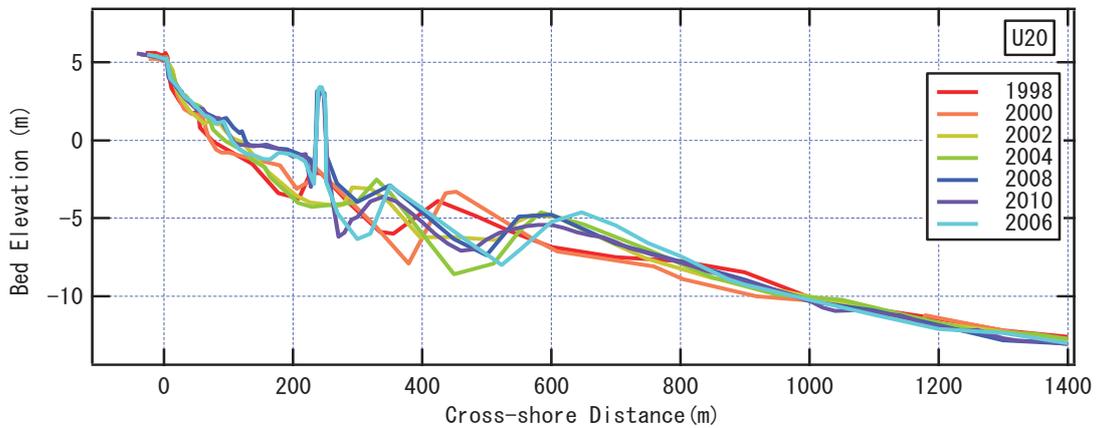
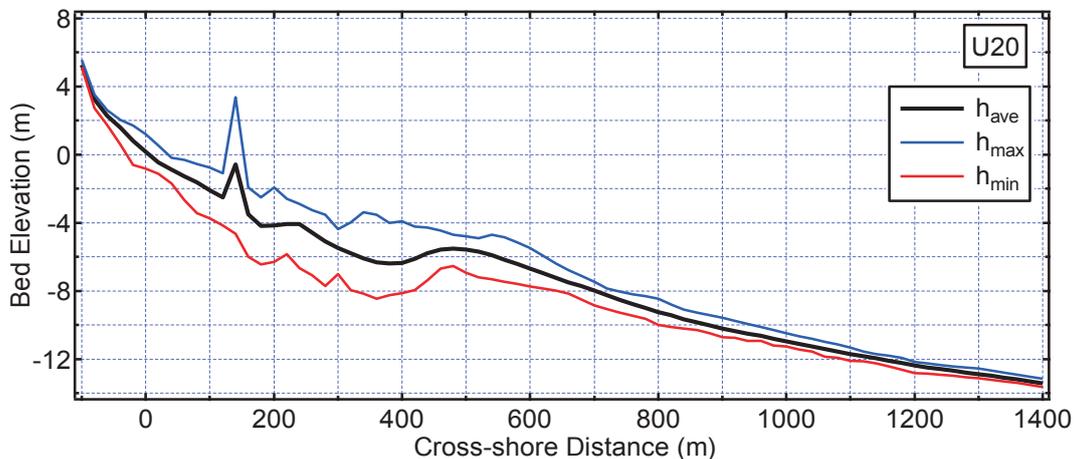


図-4.2.7 海底地盤高変動 (代表断面 U20)

② 最高・最低・平均地盤高と変動の標準偏差

観測期間中の最高・最低・平均地盤高を縦軸に、離岸距離(m)を横軸に取り、標準偏差 (m) と対比して図 4.2.8 に示す。離岸距離 150m~400m にかけて最大 5m 程度の変動幅が見られる。標準偏差も砂州変動が大きな領域で 2.0m 程度の値を示している。この値は北部・南部領域に比べると変動幅で 0.5m 程度大きく、それに対応する形で標準偏差も 2.0m とやや大きな値になっている。



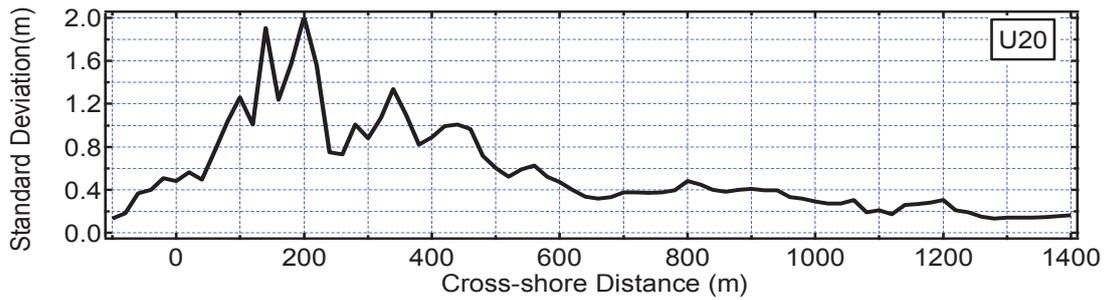


図-4.2.8 最高・最低・平均地盤高と変動の標準偏差（代表断面 U20）

③ 地盤高変化率

南部領域では、砂州位置が大きく変動している状況が、離岸距離 100m～600m 間の地盤高変化率に見られる。この領域の地盤高変化率のトレンドを見ると、離岸距離 150m と 350m 付近で a が大きな正と負の値を取っている。これは、消波堤の影響と考えられる。すなわち、200m 付近のトラフと 250m 付近の砂州は、より沖側のトラフ・砂州とは違って、消波堤設置の影響を強く受けているものと考えられる。

離岸距離 400～800m にかけて侵食 ($a < 0$) と堆積 ($a > 0$) の傾向が表れているが、それより沖側の領域では微小ではあるが侵食傾向を示している。この地盤高変化率を中央部領域と比較すると、 $a = +0.5 \sim -0.2$ (m/year) となる範囲が岸寄りに近づいていることが分かる。

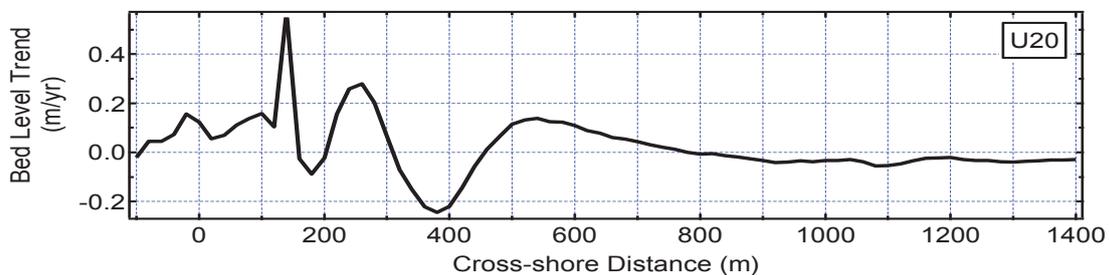


図-4.2.9 地盤高変化率（代表断面 U20）

(2) 海浜地形の平面変動

対象領域における断面地形の変動特性は測線位置により異なるため、ここでは、平面的地形変動について検討する。対象領域における平面的地形変動を図-4.2.10～図-4.2.13 に示す。この図は、2006年～2009年の4年間の海浜地形の平面変化を示したものである。これらの図は、縦軸に岸沖方向距離（測量基点を基準）、横軸の下部に沿岸方向距離を表し、横軸の上部には測線位置を表している。沿岸方向は約 32×10^3 m に渡って表示しているが、岸沖方向は約 1200m と拡大して表示している。各図の右側に示すように、地盤高を赤色の 2m から紺色の -12m まで色別に表示している。

この期間を通して、南部領域ほど海底勾配が急になり、測線 U20 の位置で等深線が最

も入り込んでいる。水深4mの等深線位置までは、沿岸方向に大きな変動はなく、水深8m以深の等深線も平行に近い形で推移している。それより浅い部分の水深5~7mの等深線間は沿岸方向変化が明確で、砂州移動に伴う等深線変動が顕著に表れている。

平均汀線位置を基準とした砂州の離岸距離は、領域全体で見ると、北側ほど大きく変動している。領域内を比較すると、北側の羽咋地区で砂州の発達・移動が明瞭に現れ、砂州峰の離岸距離は、北側になるほど大きくなり、砂州は組織的かつ比較的一様な移動を繰り返している。沿岸方向位置が南になると、砂州移動範囲や移動速度は減少してくる。また、沿岸距離15~19×10³m付近で砂州位置・形状が屈曲あるいは不連続に変化し、岸寄りに位置するようになることが見られる。

次に、2006、2007、2008、2009年について海浜地形の平面変化の解析を行う。

2006年は砂州の発達が明瞭に現れている。砂州峯の離岸距離は、測線位置が北側になるほど大きくなり、砂州は1000m程度まで広がっている。沿岸距離15~19×10³m付近で砂州位置・形状が屈曲し、これより北側では、汀線に平行か、やや岸寄りに位置する様子が見られる。

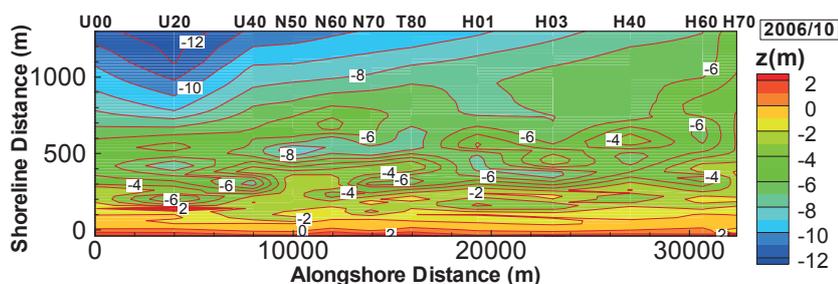


図-4.2.10 海浜地形の平面変動 (2006年)

2007年は前年同様に、砂州の発達が明瞭に現れている。沿岸距離15~19×10³m付近で砂州位置・形状が屈曲し、砂州峯の離岸距離は、測線位置が北側になるほど大きくなり、前年と同様に、砂州は1000m程度まで沖方向へ広がっている。

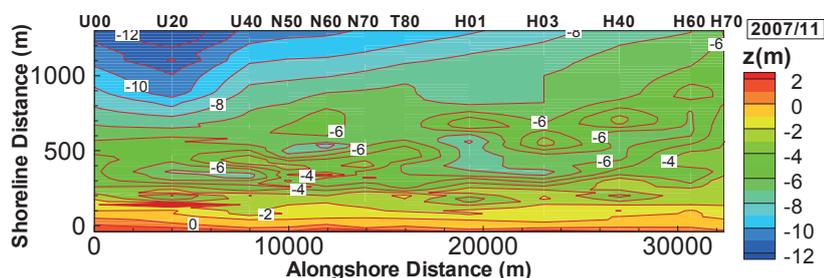


図-4.2.11 海浜地形の平面変動 (2007年)

2008年においても前の2年と同様に、砂州の発達が明瞭に現れている。沿岸距離12~15×10³m付近で砂州位置・形状が屈曲し、砂州峯の離岸距離は、測線位置が北側になるほど大きくなり、1000m程度まで沖方向に広がっている。

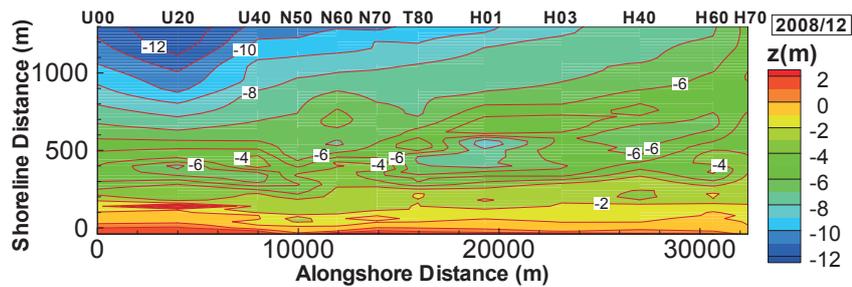


図-4.2.12 海浜地形の平面変動 (2008年)

2009年は前の3年に比べると、沖側砂州の発達が不明瞭になっている。これは、砂州が減衰・消失しているためと推定される。さらに、沿岸距離 $15\sim 19\times 10^3\text{m}$ 付近で砂州位置・形状の屈曲がなくなり、連続して沖寄りに位置する様子が見られる。砂州峯の離岸距離は、測線位置が北側になるほど大きくなり、1000m程度まで沖方向に広がっている。

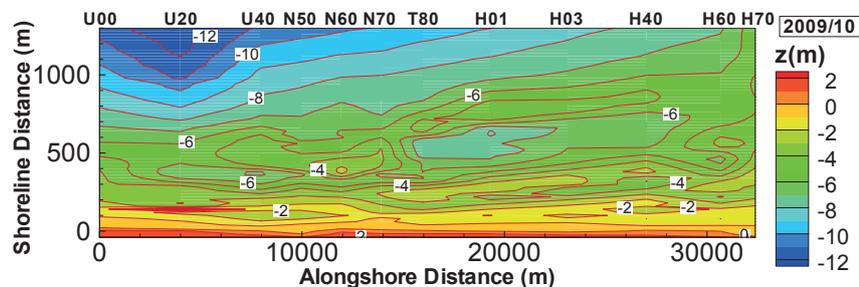


図-4.2.13 海浜地形の平面変動 (2009年)

(3) 平均地盤高、地盤高変動幅及び地盤高変化率の変動

平均地盤高 (図-4.2.14(a)) を見ると、南側ほど海底勾配が急になっている。ただし、領域南端の測線 U00 付近は、金沢港東防砂堤付近の堆積による影響を強く受けるため、隣接する測線 U20 で等深線が最も入り込んだ形になっている。平均的な断面勾配は北部で 1/180、南部で 1/80 と約 2 倍程度の違いがある。平均地盤高は、水深 4m の等深線位置までは、沿岸方向に大きな違いはないが、水深 6~7m の等深線間では沿岸方向変化が明確に現れている。水深 7m 以深の等深線は平行に近い形で推移している。

地盤高変動幅 (図-4.2.14(b)) では、砂州移動の活発な領域を色別に表している。この図より、南部領域の南端 (U00) および北部領域の北端 (H70) の測線では砂州の発達は弱く、変動幅も小さくなっている。変動幅が 3~4m 程度に達するのは、領域南側では離岸距離 200~400m 付近、中央部領域から北部領域では 300~600m 付近であり、活発な砂州移動が見られることと対応している。離岸距離がこれより大きくなると砂州の減衰域に入り、地盤高変動幅は減少している。

地盤高変化率 (図-4.2.14(c)) は、地盤高の年変化率を色別に表したもので、岸沖分布の違いが特徴的である。U20 付近での $0.5\sim 0.3\text{m/year}$ の変化 (赤から黄色) は消波堤設置の影響である。U00 付近は、ほぼ全域にわたって堆積傾向であり、金沢港東防砂堤の

影響が顕著に現れている。隣接する U20, U40 においては、汀線から 600m 付近までは堆積傾向、それより沖側で侵食傾向となっている。

沿岸距離 20×10^3 m 付近では、離岸距離 500m 付近に侵食域がある。T80 の地盤高変化率（図-4.2.6）を見ると、ちょうど、離岸距離 350~600m 間に最沖砂州のトラフ域があり、この侵食域は、トラフ部分の拡大と対応していると推定される。さらに北側に移動すると、汀線近傍で侵食、沖側で堆積という傾向が強まってくる。沖側の堆積は値としては微小であり、オーダー的には測量誤差と同程度となるが、10 年以上のトレンドとして継続的に現れており、かつ、北側の領域に特有であること等から、偶発的な誤差とは考えにくい。全体として、海底断面は南部領域（U00 を除く）では急勾配化、中央部より北部領域では緩勾配化していることになる。

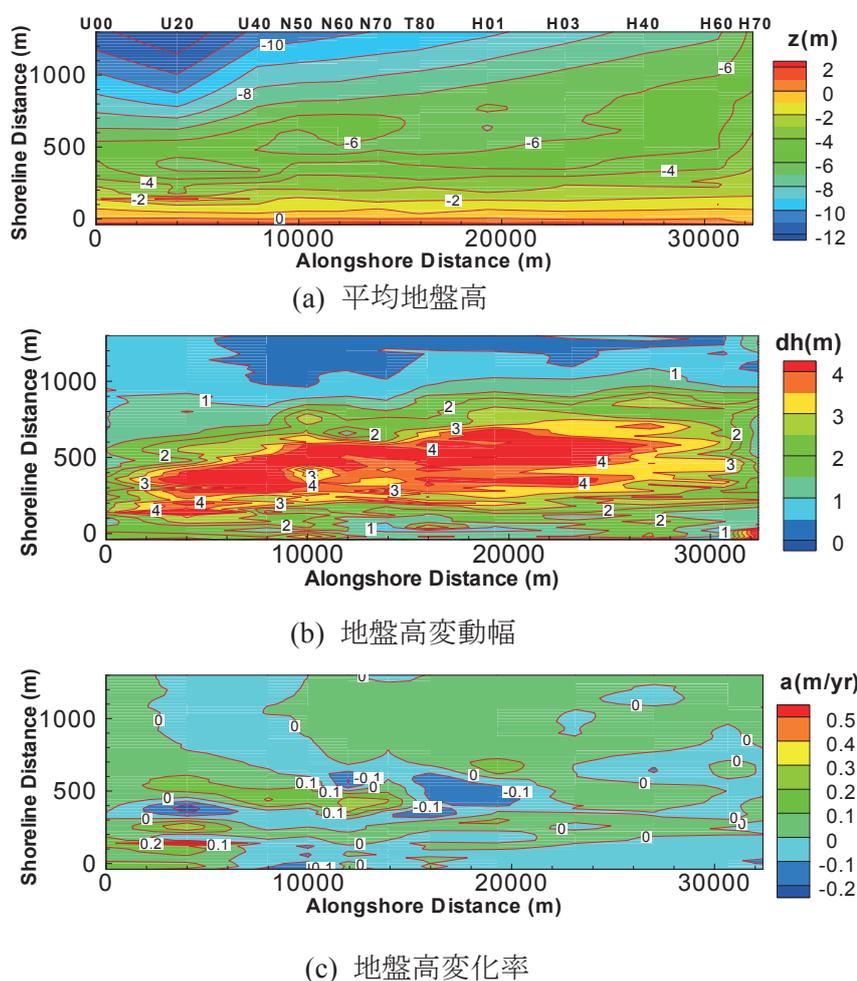


図-4.2.14 観測期間中の平均地盤高・地盤高変動幅および地盤高変化率

第3節 経験的固有関数 (EOF) 法による変動解析

本節では、対象領域を北部・中央部・南部に分けて、対象とする全12測線の中から、各領域の代表測線を選び、EOF法により海底地形の変動解析を行う。本研究ではこの海底地形データ自身に対してEOF法を適用する。以下では、朔望平均干潮位 (T.P.+0.01m) を基準とした期間平均汀線位置を基準として離岸距離を表している。EOF解析の対象区間は、離岸距離-60m地点から、水深変化が比較的明瞭に現れる1500m地点までの範囲とする。全測線に対して空間関数の第1モードはX方向の期間平均海底地形に対応している。また、全体に、第2・第3モードが砂州の岸沖移動に関係している。

(1) 北部領域 (代表測線 H40) の EOF 解析

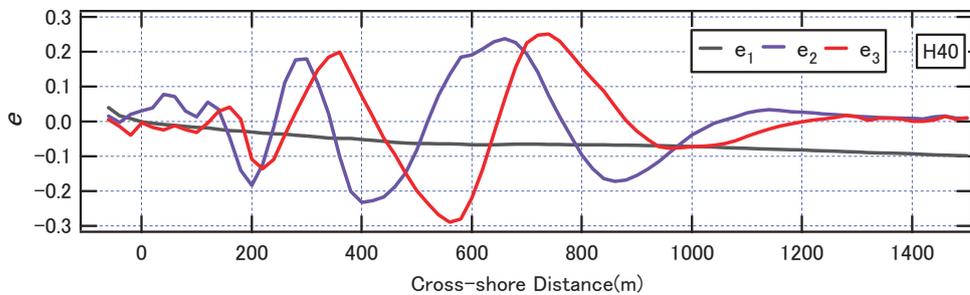
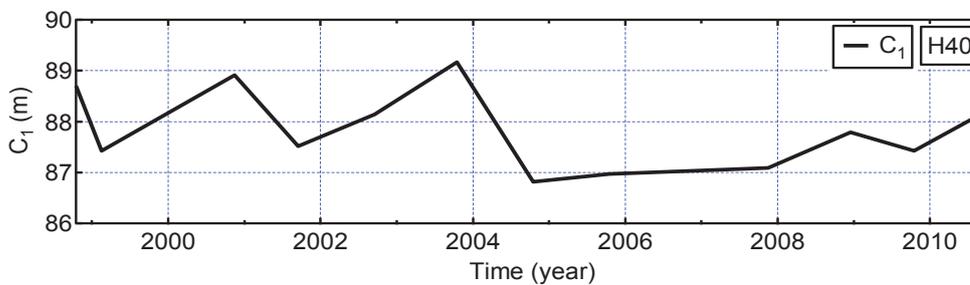
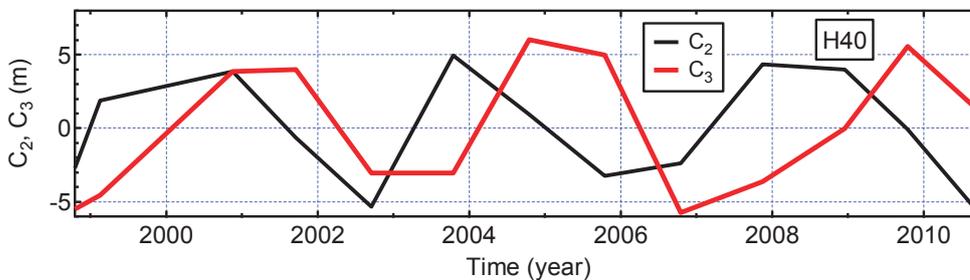


図-4.3.1 空間関数 $e(x)$



(a) C_1



(b) C_2, C_3

図-4.3.2 時間関数 $C(t)$

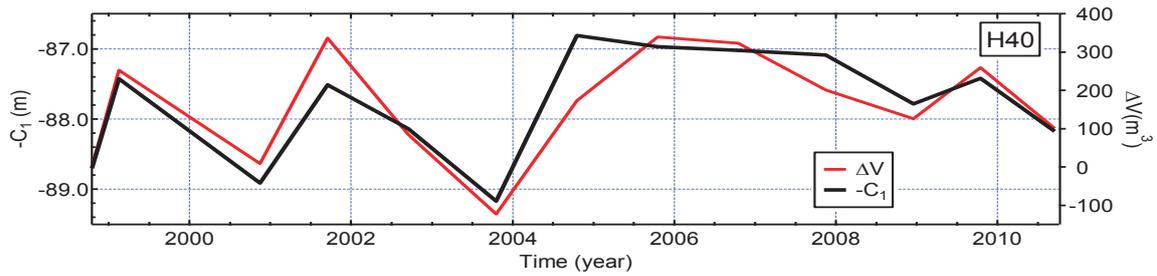


図-4.3.3 第1モード時間関数と海浜断面積

測線 H40 における EOF 解析による寄与率は第1モードから第3モードまでは, 99.53, 0.24, 0.16%となっている. ここでは, 地盤高データに対して直接 EOF 解析を行うため, 第1モードは海底の平均的な地形 (基準となる断面地形) に対応している. このため, 第1モード (e_1 , C_1) の寄与率は他と比べて極端に高く, 他のモードの寄与率は1%未満となっている. 第1モードを除く寄与率は第2, 第3モードでそれぞれ, 50.84, 34.51%となっている. 従って, 第2モード, 第3モードにおける値が主に, 砂州の移動に代表される海底地形の変化を表していると考えられる.

第1モードの時間関数 C_1 (比較のために-1倍して表示) は, 沿岸漂砂の不均衡等に起因する海浜断面積の変動 ΔV (1998年基準, 単位幅あたりの土砂量変化に相当) と良く対応している (図-4.3.3). この測線においては, 等深線が汀線位置付近で後退, 沖側で前進傾向にあり, 断面内土砂量としては僅かな増加傾向にある. C_1 は振動的に変化しつつ全体に減少 (図中では符号反転表示のため右肩上がり) しており, 空間関数 e_1 (観測期間中の平均地形に対応する. 図-4.3.1) との積で考えると, この傾向と符合する.

次に, 第2モードと第3モードを基にして解析を行う. 第2モード, 第3モードの時間関数は, 位相が互いに約1/4周期ずれた形になっている (図-4.3.2(b)). 空間関数についても同様 (図-4.3.1) であり, この組み合わせで砂州の周期的冲向き移動に対応していると考えられる. 第2モードにおける空間関数は, 300m, 650m付近において極大値, 200m, 400m, 850m付近で極小値を持つ形となっている. 時間関数においては, 1999年~2002年では正の値であり, 2002年~2003年では負, 2003年以降は約2年間隔で正と負に変動している.

第3モードにおける空間関数は, 150m, 350m, 700m付近で極大値, 200m, 600m付近では極小値を有している. 時間関数においては, 1999年~2000年は負の値, 2000年~2002年までは正, 2002年~2004年までは負, 2004年~2006年は正, 2006年~2009年は負, それ以降では正の値で推移している.

第2モードと第3モードの重ね合わせで表される地形変動を図-4.3.4に示す. 砂州の冲向き移動が約4年の再現周期で繰り返されること, 個々の砂州の形成・移動・消失の過程は約8年の期間に渡ることなどが良く再現されている.

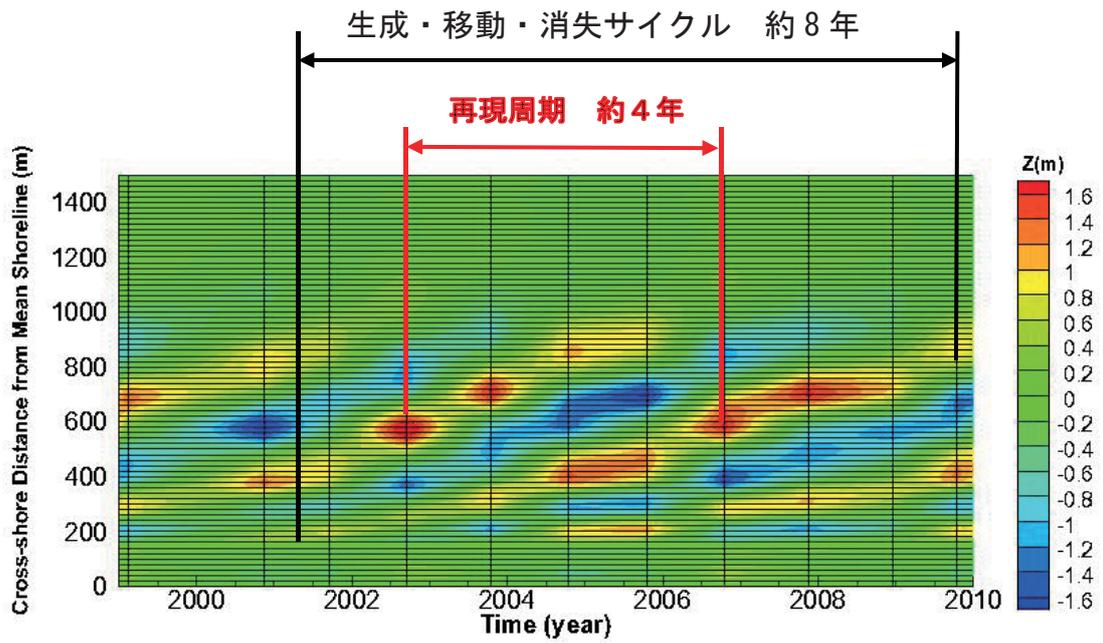


図-4.3.4 北部領域（代表測線 H40）における第2モード+第3モードの変動

(2) 中央部領域（代表測線 N70）の解析

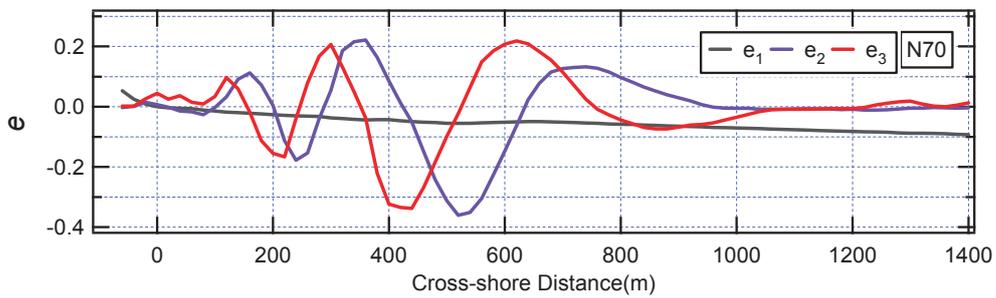
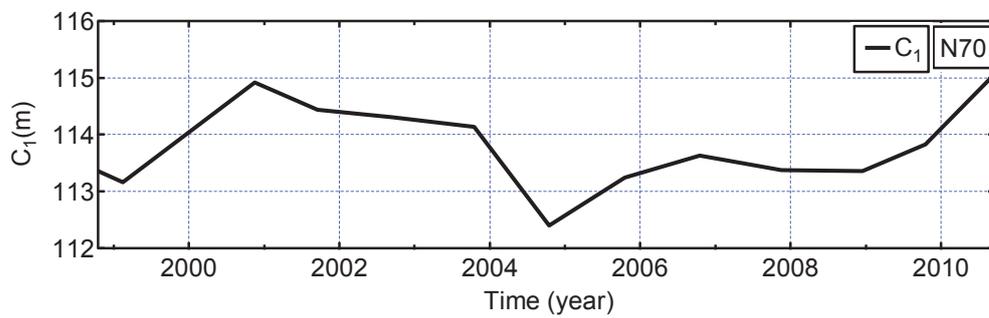
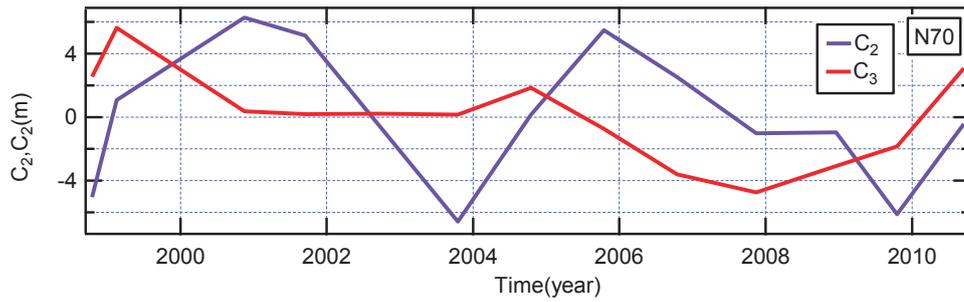


図-4.3.5 空間関数 $e(x)$



(a) C_1



(b) C_2, C_3

図-4.3.6 時間関数 $C(t)$

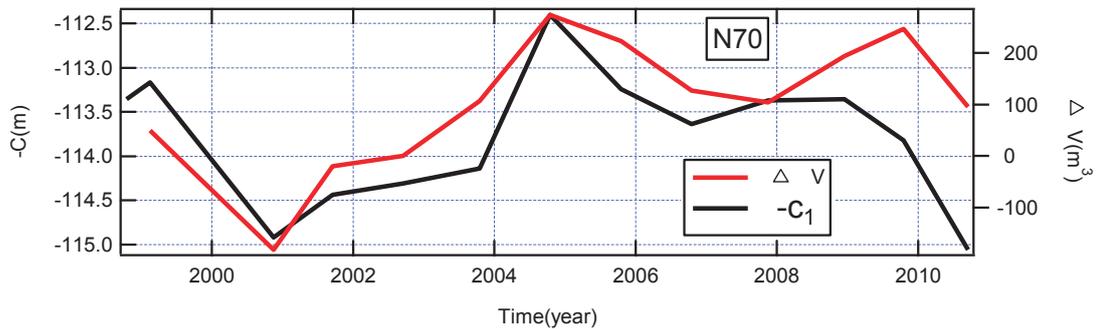


図 4.3.7 第 1 モード時間関数と海浜断面積

測線 N70 における EOF 解析モードの寄与率は第 1 モードから第 3 モードまでは、99.78, 0.13, 0.06% となっている。測線 H40 と同様に、地盤高データに対して直接 EOF 解析を行うため、第 1 モードは海底の平均的な地形（基準となる断面地形）に対応している。このため、第 1 モード (e_1, C_1) の寄与率は他と比べて極端に高く、他のモードの寄与率は 1% 未満となっている。第 1 モードを除く寄与率は第 2 モードから順に 56.71, 26.76% となり、測線 H40 と比較すると第 2 モードによる寄与率がやや高くなっている。ここでも、第 2 モード、第 3 モードにおける値が主に、砂州の移動に代表される海底地形の変化を表していると考えられる。

第 1 モードの時間関数 C_1 （比較のために -1 倍して表示）は、沿岸漂砂の不均衡等起因する海浜断面積の変動 ΔV （1998 年基準、単位幅あたりの土砂量変化に相当）と良く対応している（図-4.3.7）。この測線においては、等深線が汀線位置で後退、沖側で前進傾向にあり、断面内土砂量としては僅かな増加傾向にある。 C_1 は、振動的に変化し全体に減少（図中では符号反転表示のため右肩上がり）しており、空間関数 e_1 （観測期間中の平均地形に対応する。図-4.3.5）との積で考えると、2008 年頃までこの傾向と符合する。次に、測線 H40 と同様に、第 2 モードと第 3 モードを基にして解析を行う。第 2 モード、第 3 モードの空間関数は、位相が約 1/4 周期ずれた形になっている（図-4.3.5）。しかし、時間関数は、第 3 モードの周期性が弱く、空間関数のように、位相が明確にずれた形になっていない（図-4.3.6(b)）。この組み合わせで周期移動に対応していると考えられるが、測線 H40 に比べると、砂州の沖向き移動の再現周期と個々の砂州の形成・

移動・消失の過程が不明確になっている。

第2モードにおける空間関数は、150m、350m、700m付近において極大値、250m、550m付近で極小値を持つ形となっている。時間関数においては、1999年～2002年では正の値、2002年～2005年では負、2005年～2008年は再び正、2008年～2010年では負に変動している。第3モードにおける空間関数においては、100m、300m、600m付近で極大値、200m、400m、900m付近では極小値を有している。時間関数においては、1999年～2001年までは正の値、2006年以降では負の値で推移している。

図-4.3.8は、第2モードと第3モードの重ね合わせを示したものである。砂州の沖向き移動が約6年の周期で繰り返されていることが再現されているが、測線H40に比べるとやや不明確になっている。

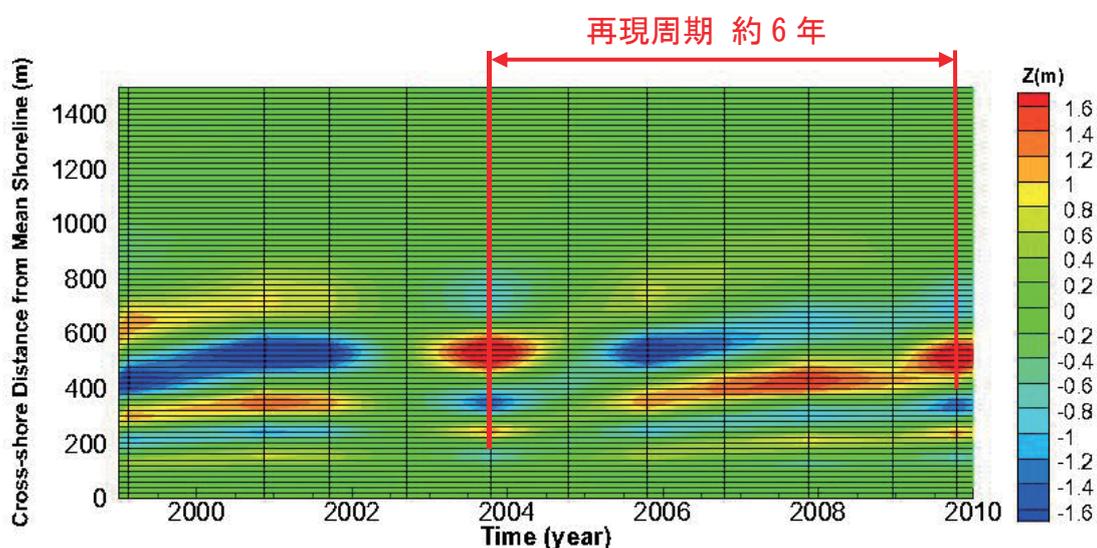


図-4.3.8 中央部領域（代表測線 N70）における第2モード+第3モードの変動

(3) 南部領域(代表測線 U20)の解析

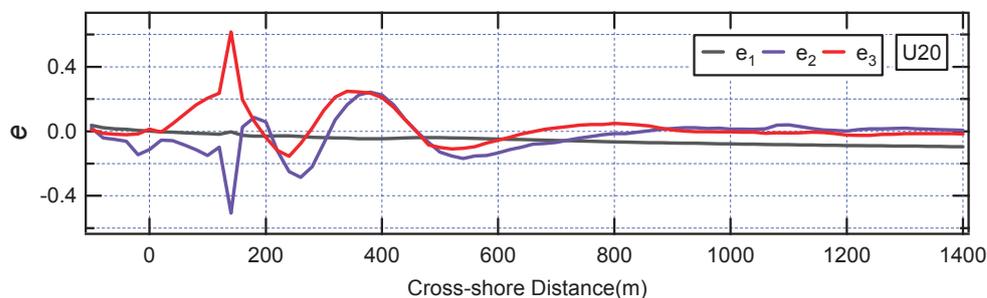
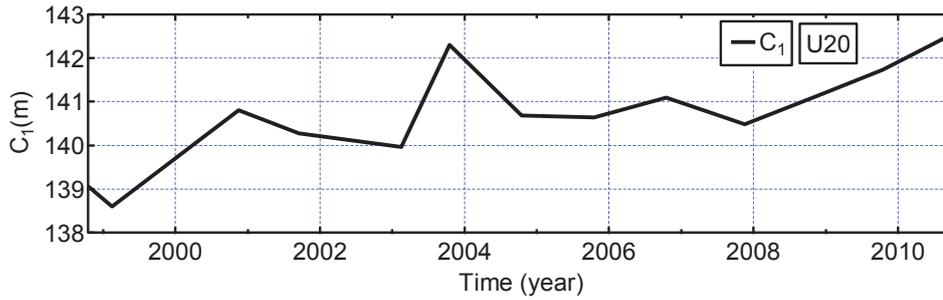
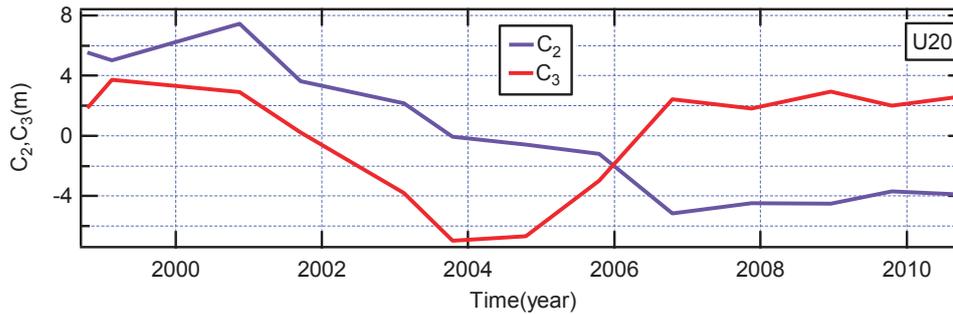


図-4.3.9 空間関数 $e(x)$



(a) C_1



(b) C_2, C_3

図-4.3.10 時間関数 $C(t)$

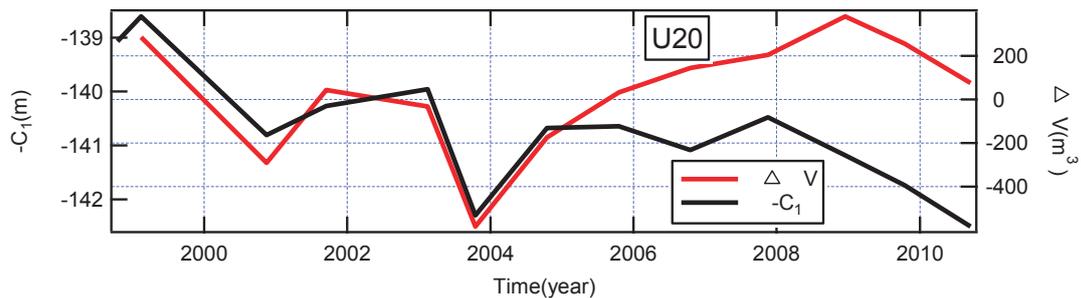


図-4.3.11 第1モード時間関数と海浜断面積

測線 U 20 における EOF 解析モードの寄与率は、第1モードから第3モードまでで、99.81、0.09、0.07%である。ここでは、地盤高データに対して直接 EOF 解析を行うため、第1モードは海底の平均的な地形（基準となる断面地形）に対応している。このため、第1モード (e_1 , C_1) の寄与率は他と比べて極端に高く、他のモードの寄与率は1%未満となっている。従って、第2モード、第3モードにおける値が主に、砂州の形成に代表される海底地形の変化を表していると考えられる。第1モードを除く寄与率は第2モードから順に47.10、35.44%であり、測線 N70 及び H40 と比較すると第2モードの寄与率がやや低くなっている。

第1モードの時間関数 C_1 （比較のために-1倍して表示）は、沿岸漂砂の不均衡等に起因する海浜断面積の変動 ΔV （1998年基準、単位幅あたりの土砂量変化に相当）と2005年頃まで良く対応しているが、2005年以降は乖離が目立つ。この原因は、U20において、2006年に消波堤が設置された影響を受けて、断面内土砂量が大きく増加して

いるためと考えられる。C₁は、振動的に変化しつつ全体に増加（図中では符号反転表示のため右肩下がり）しており、空間関数 e₁（観測期間中の平均地形に対応する。図-4.3.9）との積で考えると、この傾向と符合する。

次に、第2モードと第3モードを基に解析を行う。第2モード、第3モードの空間関数は、位相が互いに少しずれた形になっている（図-4.3.9）。離岸距離150m付近において極大値+0.6、極小値-0.5を持つ形となっているが、これは、消波堤を捉えていると考えられる。しかし、時間関数は、空間関数のように、位相は周期的移動が見られない（図-4.3.10(b)）。そのために、測線H40に比べると、砂州の沖向き移動再現周期と個々の砂州の形成・移動・消失の過程が不明確となっている。

次に、第2モードにおける空間関数は200m、400m付近で極大値、250m、500m付近で極小値を有している。時間関数においては、1999年～2004年では正の領域に変動し、2004年以降は負の値へと変動している。

第3モードにおける空間関数は、150m、350m付近で極大値、250m、500m付近では極小値を有している。時間関数においては、1998年～2002年は正の領域、2001年～2006年までは負の領域、2000年以降は正の領域で推移している。

図-4.3.12は、第2モードと第3モードの重ね合わせを示したものである。砂州は1998年から2006年頃までは、離岸距離250mと400m付近に安定した形で存在しているが、2007年頃より、離岸距離200mと300m付近に安定した形で存在している。これは、2006年に建設された消波堤の影響によるものと考えられる。砂州の沖向き移動と個々の砂州の形成・移動・消失の過程は、北部・中央部領域に比べると不明確になっているが、安定した形で存在している。

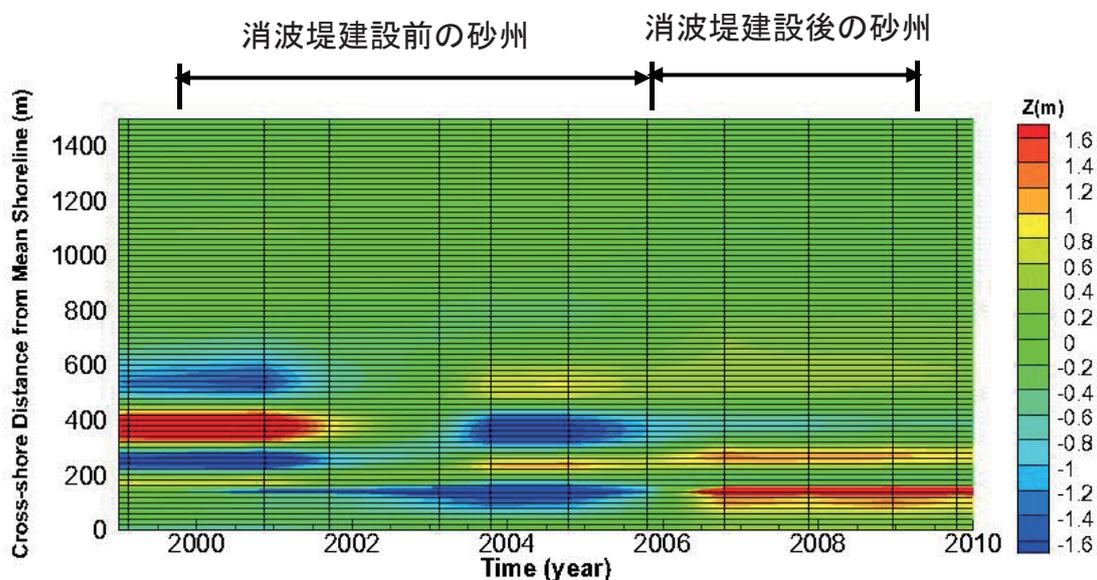


図-4.3.12 南部領域（代表測線 U20）における第2モード+第3モードの変動

第4節 汀線位置および海浜土砂量の時間変動特性と沿岸方向変動

(1) 汀線位置の変動特性

各測線における汀線位置（地盤高 T.P.+0.01m 位置）の変動トレンドを把握するために、深浅測量結果に基づいて、①南部領域で金沢港に隣接して汀線の顕著な前進が見られる U00 とその影響を受けている隣接測線 U20 群、②南部領域北側で最も大きな汀線後退が見られる U40, U50 群、③中央部領域で比較的短期的な変動を繰り返している N60, N70, T80 群、④北部領域の一般的な汀線後退を示している H01, H03, H40, H60, H70 群の四つに区分して、汀線位置の変動トレンドの検討を行う。なお、年単位の短期汀線変動に関しては、外力変動（波高・波向）の影響を多少なりとも受けていると思われるが、今回は中期変動に焦点をあてることにする。

(1-1) 南部領域で金沢港に隣接した測線（U00, U20）

この領域の汀線位置は、観測期間中、一様に前進（堆積）傾向を示している。その値は1998年には平均-30mであったが、2010年には平均+10mに変化し、約40mの前進（堆積）を示し、前進速度は平均3.6m/年となっている。この領域では、測線U20の離岸距離250mに、2006年に消波堤が建設されている。この領域の汀線が2006年頃より前進傾向にあるのは、この影響を受けていると推定される。また、金沢港西防波堤の遮蔽効果に加えて南西向きに卓越する沿岸漂砂が、金沢港東防砂堤により遮断されたことで、急速な堆積と汀線の前進が局所的に進行している。

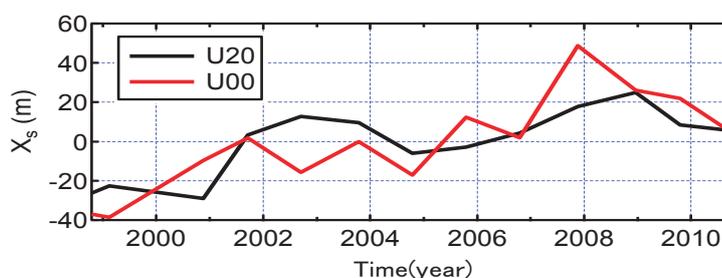


図-4.4.1 汀線位置の変動（南部領域）

(1-2) 南部領域北側の測線（U40, N50）

この領域の汀線位置は、観測期間中一様に後退（侵食）傾向を示している。その値は1998年は平均+28mであったが、2010年には平均-15mに変化し、約43mの後退（侵食）を示し、この間の後退速度は平均3.9m/年となっている。この値は、前述の金沢港に隣接した領域と符号を反転させた形で同程度の大きさであり、平均汀線位置を挟んで回転的変動が見られることになる。すなわち、金沢港側に土砂が引き寄せられる形で汀

線変化が進行していることになる。

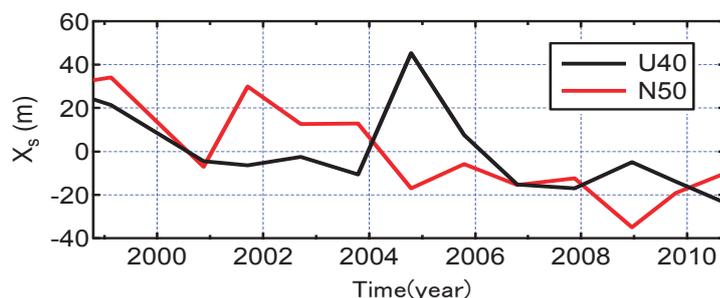


図-4.4.2 汀線位置の変動（南部に隣接する領域）

(1-3) 中央部領域の測線（N60, N70, T80）

この領域の汀線位置は、観測期間中、微小な短期的な前進（堆積）・後退（侵食）を繰り返している。その値は 1998 年には平均-4m であったが、2010 年には微増に変化し、やや前進（堆積）傾向を示しているが、汀線位置変動に明確なトレンドは認められず、短期的な変動を繰り返している。この領域は全対象区間のほぼ中央に位置し、構造物等の人為的インパクトもなく安定している領域であると推定される。

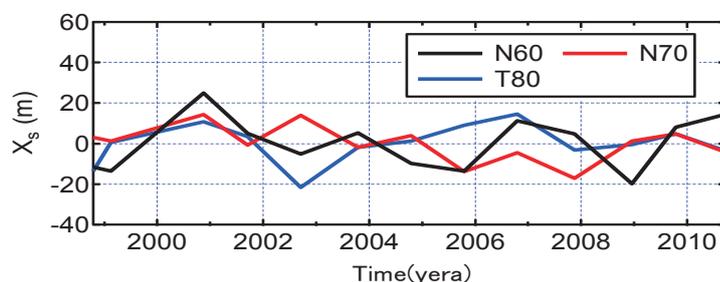


図-4.4.3 汀線位置の変動（中央部領域）

(1-4) 北部領域の測線（H01, H03, H40, H60）

この領域の汀線位置は、観測期間中、一様な後退（侵食）傾向を示している。その値は 1998 年には平均+7.3m であったが、2010 年には平均-2.0m に変化し、後退速度は平均 2.3m/年となっている。なお、この値は、より長い期間（1983 年以降）を対象とした石川県の汀線測量に基づく後退速度（0.5～0.7m/年）よりも大きくなっている。このことは、近年、汀線後退が加速気味にあることを示している。

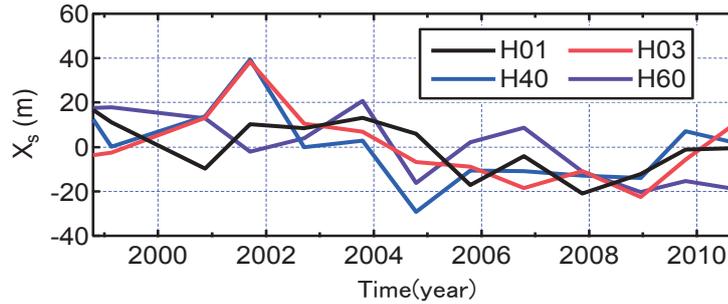


図-4.4.4 汀線位置の変動（北部領域）

(2) 汀線位置および海浜土砂量の変動特性

汀線位置および海浜断面積の変動特性を把握するために、汀線位置の変化速度 (m/year) と沿岸方向単位幅あたり海浜土砂量の変化速度 (m³/year) を求めて解析を行う。汀線位置の変化速度 (m/year) を縦軸にとり、沿岸方向距離 (km) を横軸に取って、測線ごとの変化速度をまとめたものを図-4.4.5 に示す。

次に、海浜断面積の変動特性として、岸沖方向 0~1200m を対象にして、1998 年から 2010 年における海浜断面積（単位幅あたりの土砂量）を算出し、1998 年からの土砂量変化を対象に、最小自乗近似によりその変化速度を算出した。土砂量変化速度 (m³/year) を縦軸にとり、沿岸方向距離 (km) を横軸に取って、測点ごとの変化速度をまとめたものを図-4.4.6 に示す。

(3) 汀線位置変動速度と土砂量変動速度の関係

図-4.4.5 および図 4.4.6 を検討すると、分布形状が対応する部分が多いことが分かる。そこで、沿岸方向の全領域で両者を比較すると、海浜土砂量の変化速度は汀線位置の変化速度と変化傾向が良く対応している (図-4.4.7)。しかし、北部領域 (H01, H03, H40) においては、汀線が後退しているにもかかわらず、土砂量は微増し安定傾向を示している。ここで、横軸に汀線変動速度 (m/y)、縦軸に土砂量変動速度 (m³/y) を取り相関関係を見ると、図-4.4.8 に示す様に直線的相関を示している。勾配は約 8 で、相関係数 $R^2=0.6$ となり高い値を示している。この関係式を用いると、汀線変化から土砂量変化を推定することができる。

このことに関連して、深浅測量データによる変動解析において、観測期間中の地盤高変化率 (図-4.2.14(c)) の箇所で次のように解析している。「北部領域では汀線近傍では侵食（後退）、沖側で堆積（増加）の地盤高変動の傾向が強まっている。沖側の堆積は値として微小であり、オーダー的には測量誤差と同程度となるが、10 年以上のトレンドとして継続的に現れており、かつ、北側の領域に特有であること等から偶発的な誤差とは考えにくい」。ここでの結果は上記の解析と整合している。

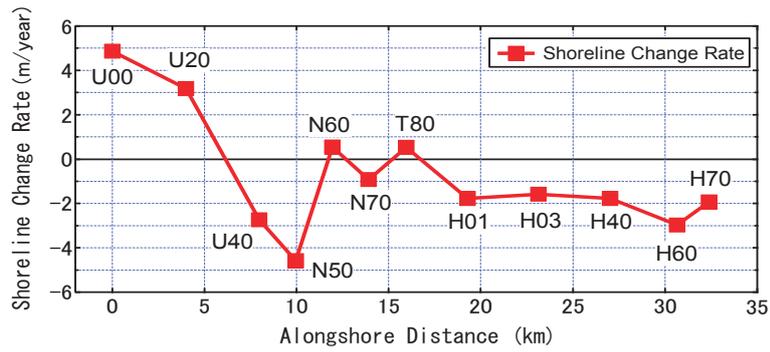


図-4.4.5 汀線位置の変化速度

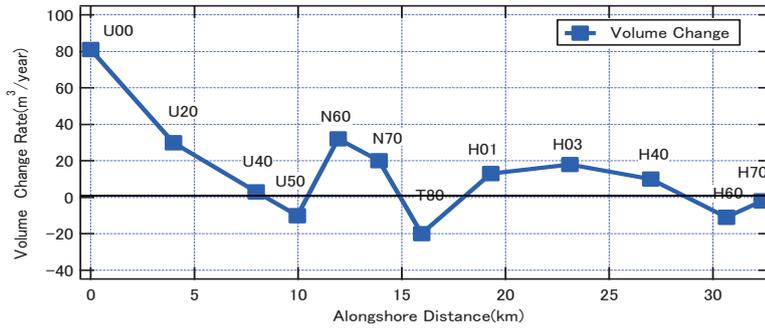


図-4.4.6 沿岸方向単位幅あたり海浜土砂量の変化速度

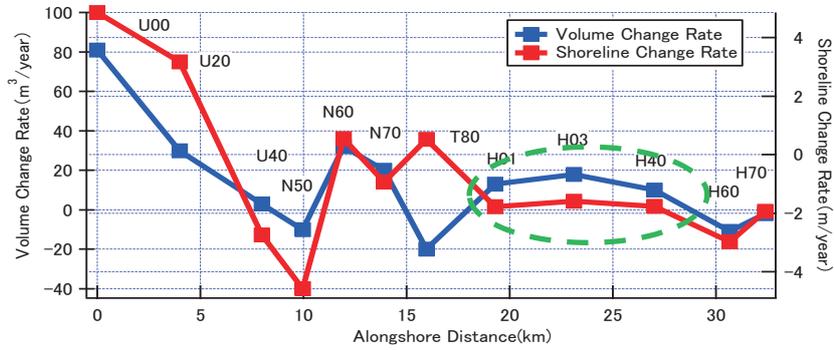


図-4.4.7 汀線位置と海浜土砂量の変動速度比較

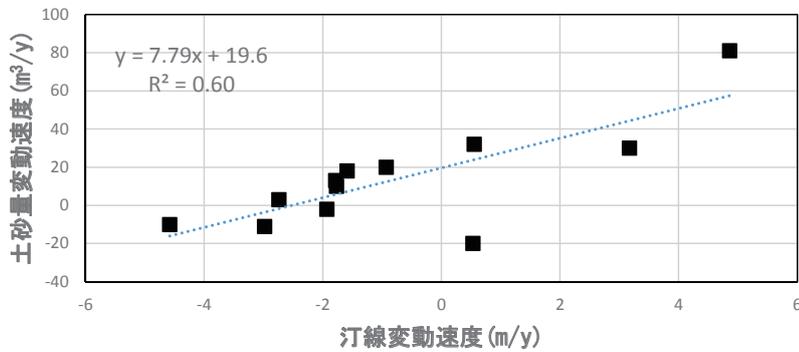


図-4.4.8 汀線変動速度と土砂量変動速度の相関

第5章 砂州の周期移動特性とその沿岸方向変動

前章で観察された多段砂州の連続的な沖向き移動形態は、NOM (Net Offshore Migration) と称され、オランダ・ニュージーランド・米国等の世界諸地域 (Ruessink ら, 2003), および, 国内 (Kuriyama, 2002; 栗山ら, 2006; 由比ら, 2006; 早川ら, 2007; 栗山, 2010; Yuhi et al., 2011; 由比, 2013) で観察された現象と共通の特徴を示している. こうした従来の NOM の解析では岸沖方向移動特性に重点を置いたものが多いが, その特性は沿岸方向に変化しうることも指摘されている (Wijnberg et al., 1995; Shand et al., 1999; Grunett et al., 2004). しかしながら, 詳細については未解明の点も多く残されており, 今後の事例研究が必要とされている. そこで, 本章では, 対象領域における NOM の特性とその沿岸方向変化について解析を行う.

前章では, 石川県土木部より提供を受けた, 1947~2010 年の航空写真を基にして, 汀線や多段砂州の位置を抽出し, 砂州の平面形状・規模・段数等について定性的解析を行い, 砂州配置に関する特性の把握を行った. 本章では, さらに, 国土交通省金沢河川国道事務所が実施している超音波測探機による深淺測量 (年一回, 9月~11月初旬) を基にして, 汀線や多段砂州の位置を抽出し, 砂州の平面形状・規模・段数等について定性的・定量的解析を行う.

第1節 対象領域における砂州の平面配置特性

第4章では, 過去60年程度に渡る9つの年代の航空写真を基に, 汀線および砂州変動の定性的解析を行った. その変動特性の概要の内, 砂州に関するものをまとめると次のようになる. 砂州の平面形状や配置は撮影年次により大きく変動するが, いずれの場合においても, 金沢港から滝崎港までの約32kmの全体に渡って, 緩やかに屈曲した弧状の汀線とおおよそ平行な形で, 2段あるいは3段の多段砂州が発達している. 沿岸方向に空間的変動を見ると, 一般に, 砂州形状は領域北部では滑らかな弧状であり, 準2次元的な様相を呈しているが, 中央部から南部にかけてはリズムミクな変動が強まり, 砂州の屈曲・切断・分岐等の3次元 (平面2次元) 的な変動も確認される.

深淺測量データに基づいて, 岸沖方向の海底地盤高の経年変動を解析するために, 北部・中央部・南部領域における1998年から2010年間の2年毎の海底地盤高の経年変動を図-4.2.1, 図-4.2.4, 図-4.2.7に示した. これらの図からも, 大規模な多段砂州の形成とその組織的な岸沖方向の移動が確認できる. この解析を基にして, 各測線に対する深淺測量解析の結果を統合して, 2003年から2010年間の砂州峯の空間配置を解析した例を図-5.1.1に示す (観測年は各図の右上に示す). この図の横軸は測線U00からH70までの沿岸方向距離をとり, 縦軸は離岸距離0から1200m (測量基点からの沖向き距離) を表している. なお砂州の移動・発達が見えなかった南北両端の測線 (U00

と H70) は除外して表記している。図の円の中心が砂州峯の岸沖位置を表し、円の面積は砂州の比高に比例している (基準比高 1m 相当の円を各図の左上に示す)。砂州は周期的に生成・移動・消失を繰り返すため、航空写真および前後の履歴から同じ世代の (同時期に形成された) 砂州に対応すると推定されるものを同色で示している。以下では、形成時期の古いものから順に Bar-1 (赤), Bar-2 (青), Bar-3 (緑), Bar-4 (黄), Bar-5 (茶) として表記する。

2003 年時点では、中央部 (N70, T80, H01) から南部 (U20, U40, N50, N60) にかけて Bar-1 (赤) が最沖に位置し、中央部から南部領域で沖から 2 番目に位置する Bar-2 (青) が延伸する形で北部領域 (H01, 40, H60) の最沖砂州として発達している。北部領域ではこの砂州の背後に、さらに Bar-3 (緑) が形成されている。中央部領域から南部領域にかけて、Bar-1 (赤) で表示した最沖砂州は 2006 年頃まで安定した位置で存在しているが、その後、次第に消滅している。

2004 年時点では、北部領域最沖の Bar-2 (青) の背後に、Bar-3 (緑) が形成し発達して、その背後に、新たに Bar-4 (黄) が誕生している状況がうかがえる。その後、2006 年時点では、中央部領域から南部領域に掛けて、最沖の Bar-1 (赤) は引き続き安定して存在しているが、北部領域の最沖 Bar-2 (青) は減衰している。2007 年には、中央部領域において、Bar-1 (赤) が消失し、交替する形で、Bar-2 (青) が最沖砂州となっている。一方、北部領域は次第に最沖の Bar-2 (青) が沖向きに移動し完全に消失している。2008 年時点では、Bar-3 (緑) が中央部付近で分断している状況が推定できる。そして、この Bar-3 (緑) が一世代前の Bar-2 (青) と再接続しつつある状況がうかがえる。

2010 年時点では、最沖の Bar-3 (緑) が中央部付近で分断し、一世代前の最沖 Bar-2 (青) と一体化した状況が見える。さらに、一世代新しい Bar-3 (緑) と Bar-4 (黄) も接続していると推定される。このような砂州の Switching 現象 (砂州が切断し別の砂州と繋がって再接続する現象) は国外の NOM サイトでも報告されている。

以上の解析において、この中で Bar-2 (青) と Bar-3 (緑) の動きに注目してみると、北部領域では年次が進むにつれて、当初の最沖 Bar-2 (青) が沖向きに移動し、北寄りの測線から順次消失している。2007 年前後の最沖砂州の消失を受けて、より岸側に位置していた Bar-3 (緑) が沖向き移動を加速させた。その結果、測線 H01 と H03 の間で砂州が分断される形となり、2008 年から 2009 年にかけて、新しい最沖 Bar-3 (緑) が 1 世代前の Bar-2 (青) と接続する様子が示されている。この時、もう 1 世代ずつ新しい Bar-3 (緑) と Bar-4 (黄) も再接続を行っているかと推定される。この砂州の Switching 現象の要因については、詳細は不明であり、今後の検討が必要であるが、その一因として、各領域の海底勾配等の諸状況の違いにより、沿岸方向に再現周期の相違が生じて、領域の境界付近で、砂州に不連続な変化をもたらしていることが考えられる。

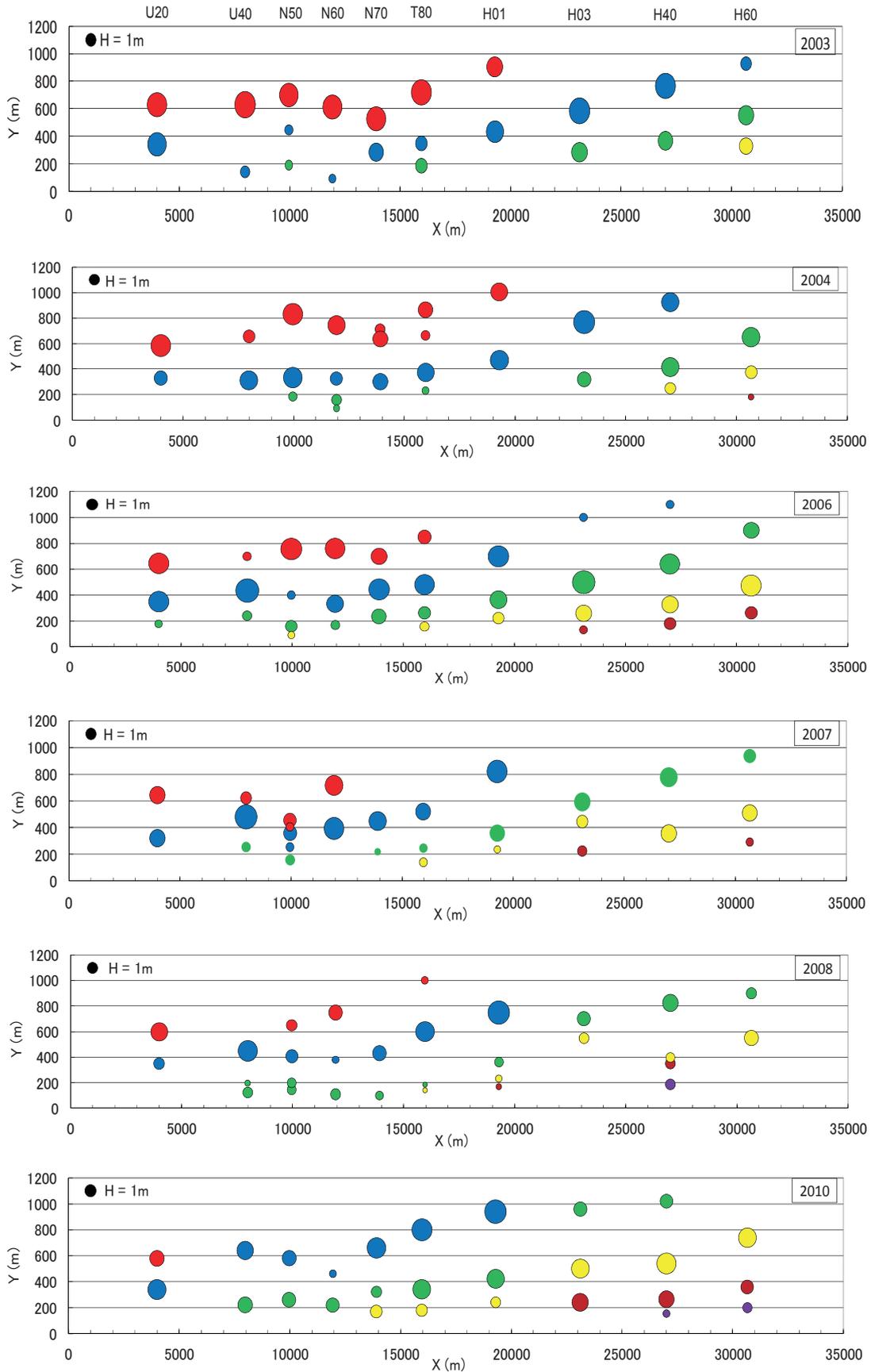


図-5.1.1 砂州平面形状の解析例（2003～2010年）

前述の航空写真解析において、砂州の Switching 現象と推測される箇所を図-5.1.2 に○印を付けて示す。これらの砂州の移動・形成・消滅の動きの中で、特に北部領域に形成された砂州は、他の領域砂州の動きと比べると、滑らかな孤状で汀線に平行な動きが見られる。このことは、図-5.1.2 の北部領域（沿岸距離約 23～32km 間）の状況と対比させても、その様子を見ることができる。

砂州平面形状の解析例について 2003 年～2010 年分を図-5.1.1 に示したが、観測全体の 1998～2010 年分は「全観測年の砂州平面形状の変動」として Appendix-5 に示した。

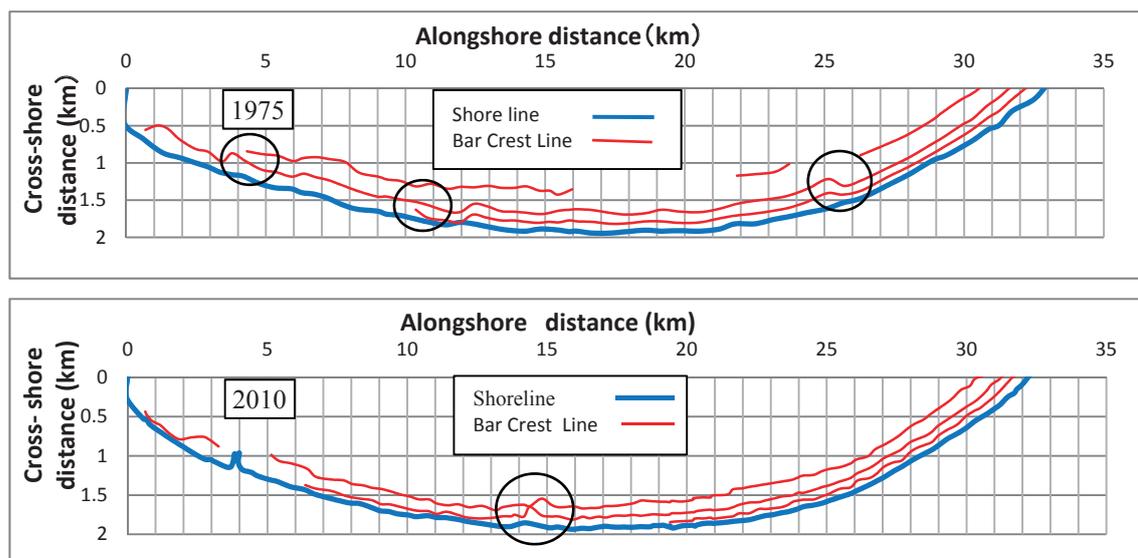


図-5.1.2 砂州の Switching 状況

第 2 節 砂州の岸沖移動の概要

(1) 砂州峯の岸沖位置の関係

航空写真の観察では、岸沖方向の砂州間隔は沖側ほど広がっている。第 4 章第 1 節で多段砂州間変動解析を行った結果では、汀線から砂州 1 段目、2 段目、3 段目の位置を $L_1 (=Y_{C1})$, $L_2 (=Y_{C2})$, $L_3 (=Y_{C3})$ とすると、 $L_2/L_1 \cong 2.11$, $L_3/L_2 \cong 2.20$ となっている。

こうした砂州の発達間隔について、さらに、深浅測量結果と対応する EOF の空間関数に基づいて解析を行う。まず、深浅測量結果に基づいて解析すると、岸側から数えて 1, 2, 3 番目に位置する砂州峯間の離岸距離（各年次における平均汀線を基準）の関係を図-5.2.1 に示す。岸から 2 番目に位置する砂州峯の離岸距離 (Y_2) は、最も岸寄りの砂州峯の値 (Y_{C1}) と比較して約 2 倍となっている。同様に、岸から 3 番目の砂州の離岸距離 (Y_3) も 2 番目の砂州の 2 倍程度となるものが見られるが、離岸距離が増加し、 Y_2 が 500m を超えるあたりから Y_3 の増加傾向が弱まっている。

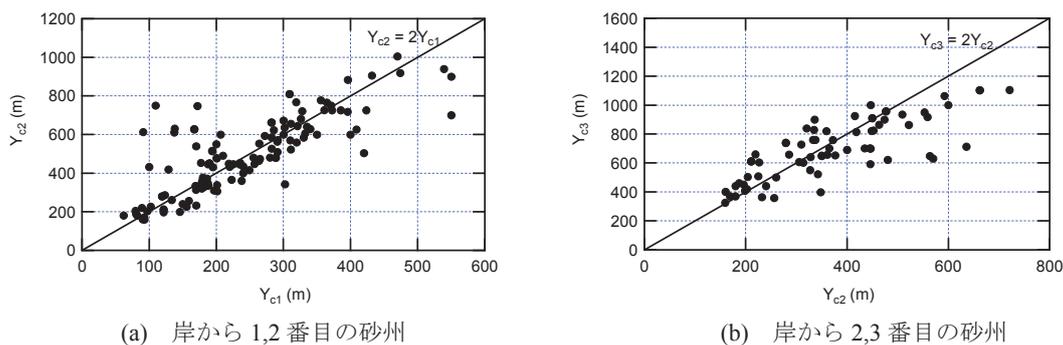


図-5.2.1 深浅測量より算出した砂州峯の岸沖位置の関係

次に、EOF の空間関数 e_2 と e_3 の形状（極大値）より、砂州相互間の相関比を解析してみると、次の様な結果が示される。 X_i は汀線側からの順番に、砂州頂部位置の離岸距離（平均汀線を基準） X_1 、 X_2 、 X_3 を表している。

- ・ 北部領域における砂州峯の相互位置関係（図-4.3.1 より）

$$X_1 \doteq 140\text{m} \quad X_2 \doteq 300\text{m} \quad X_3 \doteq 700\text{m} \quad X_2/X_1 = 2.1 \quad X_3/X_2 = 2.3$$

- ・ 中央部領域における砂州峯の相互位置関係（図-4.3.6 より）

$$X_1 \doteq 140\text{m} \quad X_2 \doteq 310\text{m} \quad X_3 \doteq 670\text{m} \quad X_2/X_1 = 2.2 \quad X_3/X_2 = 2.1$$

- ・ 南部領域における砂州峯の位置関係（図-4.3.11 より）

$$X_1 \doteq 180\text{m} \quad X_2 \doteq 360\text{m} \quad X_3 \doteq 800\text{m} \quad X_2/X_1 = 2.0 \quad X_3/X_2 = 2.2$$

以上より、岸から 2 番目に位置する砂州峯の離岸距離 X_2 ($=Y_{C2}$) は、最も岸寄りの砂州の離岸距離 X_1 ($=Y_{C1}$) と比較すると約 2.0~2.2 倍となる。さらに、岸から 3 番目の砂州の離岸距離 X_3 ($=Y_{C3}$) も 2 番目の砂州の離岸距離 X_2 ($=Y_{C2}$) の 2.1~2.3 倍となる。この結果は深浅測量結果と EOF 空間関数の形状結果が、良く整合していることを示すとともに、砂州峯間の間隔に一定の関係があるものと考えられる。

(2) 砂州頂部高と比高の関係

砂州頂部水深と比高の関係を検討するために、対象領域全体と、北部・中央部・南部の各領域毎について解析を行った結果を図-5.2.2~図-5.2.5 に示す。南部領域 (U20, U40, N50, N60) の測線群を Δ で、中央部領域 (N70, T80, H01) の測線群を \square で、北部領域 (H03, H40, H60) の測線群を \circ でそれぞれ表した。

全領域では、頂部高 $Z_e = -3\text{m} \sim -4\text{m}$ 付近で比高 $H = +4 \sim +4.7\text{m}$ と最大となっている。比高が増加から減少に転じる頂部高は中央部で $Z_e = -4\text{m} \sim -5\text{m}$ となっているが、北部では北側に位置する測線ほど、頂部高の値はやや小さく $Z_e = -3\text{m} \sim -4\text{m}$ となる。また、各領域ともに、砂州発達期（砂州頂部高範囲 $\doteq -4\text{m}$ 以内）と砂州減少期（砂州頂部高範囲 $\doteq -4\text{m} \sim -7\text{m}$ 間）を比較すると、前者の範囲に多くサンプルが分布していることが分かる。

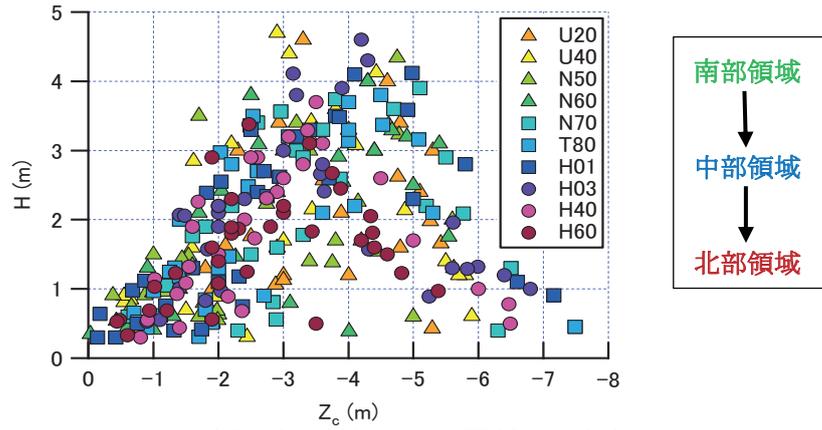


図-5.2.2 砂州頂部高と比高の関係（全領域）

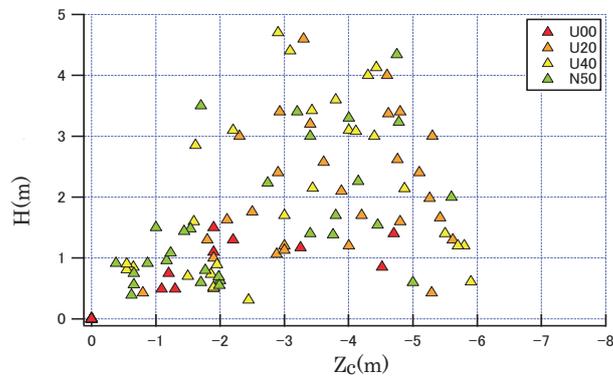


図-5.2.3 砂州頂部高と比高の関係（南部領域）

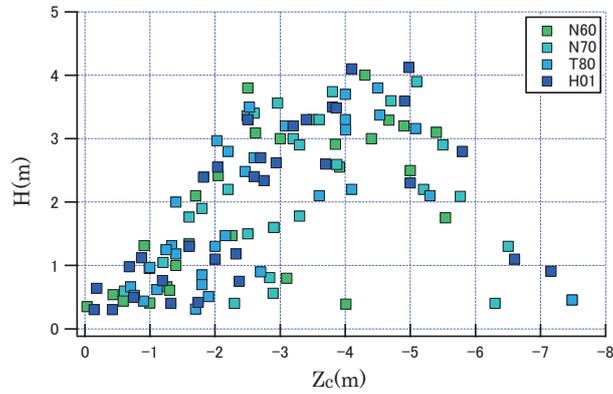


図-5.2.4 砂州頂部高と比高の関係（中央部領域）

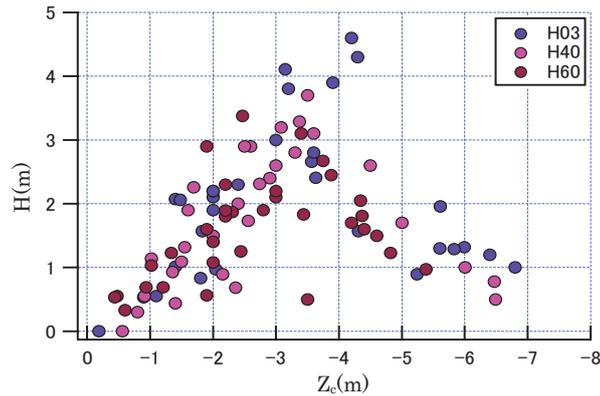


図-5.2.5 砂州頂部高と比高の関係（北部領域）

(3) 北部領域における砂州峯の経年変動の特性

砂州の組織的沖向き移動が最も明瞭に現れるのは北部領域である。そこで、この領域に着目して、同一砂州の変動を把握するために、砂州の峯線位置（測量基点からの離岸距離で縦軸を表示）をラグランジュ的に追跡して、その結果を図-5.2.6 に示す。北部領域の3測線 H60、H40、H03 で沖向き移動が顕著であるが、中央部領域の測線 H01、T80 にかけては移動範囲が縮小するなど、沿岸方向の変動が明瞭に見られる。こうした沿岸方向の急激な変動が砂州の Switching の一因となるものと考えられる。

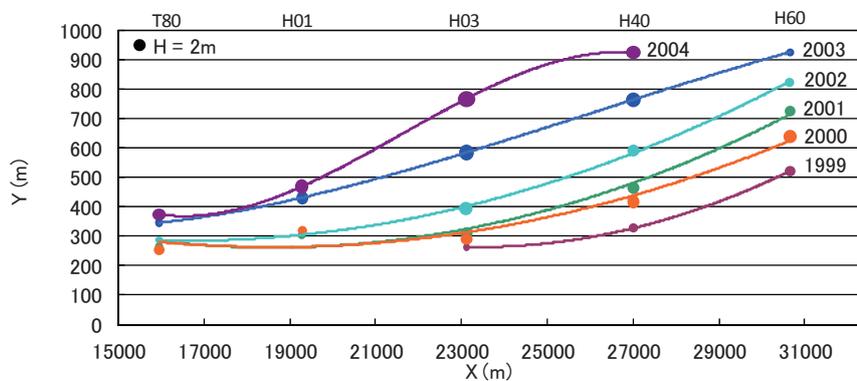


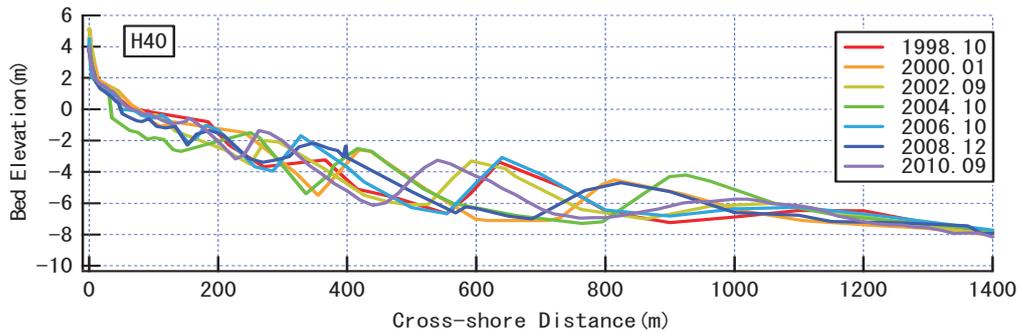
図-5.2.6 北部領域における砂州峯線の経年変動

第3節 砂州移動の基本特性とその沿岸方向変動

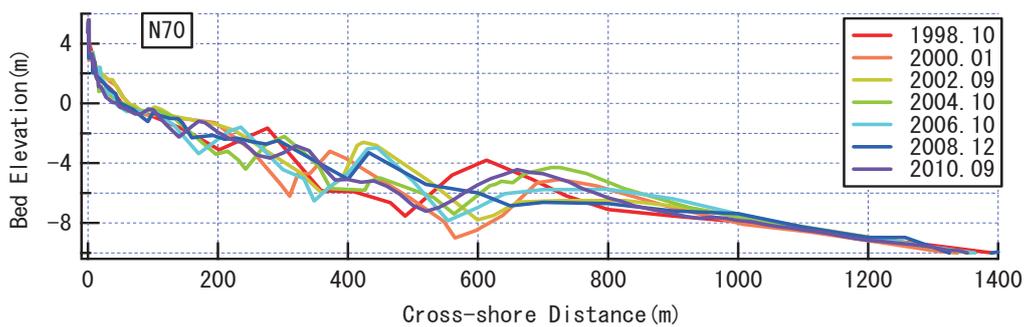
本節では砂州移動の基本特性とその沿岸方向変動の解析を行う。環境状況の違いで、対象領域を北部・中央部・南部の3領域に分けて比較検討を行う。1998年～2010年の経年変動解析を行って得られた地形変動特性を図-5.3.1に、砂州の各種変動（頂部位置・比高・離岸距離等）を図5.3.2にそれぞれ示す。

(1) 領域（北部・中央部・南部）別の地形変動

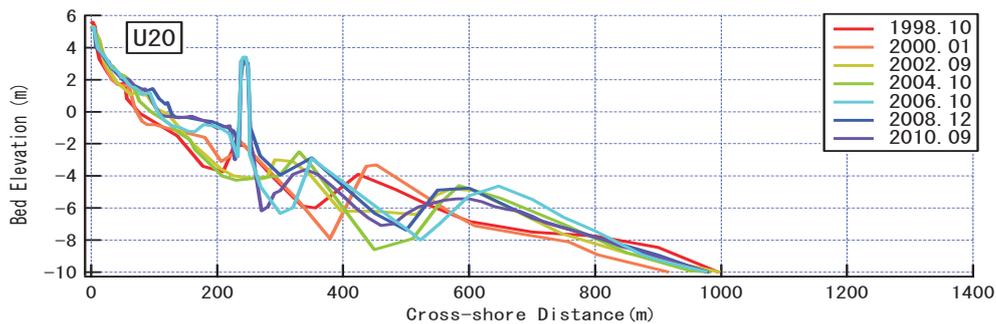
各領域の代表測線（H40, N70, U20）を対象に、1998年～2010年における断面地形の岸沖方向変動を、図-5.4.1の(a), (b), (c)に示す。各図の横軸は測量基点からの離岸距離0～1400m、縦軸は地盤高を示す。なお、全測線の断面地形変化をAppendix-2に示す。砂州移動の海底地形変動を見ると、領域の多くの部分で大規模な多段砂州が発達していることが明確に見てとれるが、その存在範囲は南側ほど狭くなっている。



(a) 測線 H40（北部）



(b) 測線 N70（中央部）



(c) 測線 U20（南部）

図-5.3.1 領域（北部・中央部・南部）別の代表測線地形変動

(2) 砂州移動の領域別比較

解析領域の北部・中央部・南部に位置する代表測線の砂州頂部位置・比高・離岸距離の経年変化を図-5.3.2の(a), (b), (c)に示す。各図の円の中心は砂州頂部位置を示し、円の面積は砂州比高に比例する。基準円として比高 $H=2\text{m}$ の場合の円の大きさを各図の左下に示す。なお、全測線の砂州経年変化図を Appendix-4 に示した。

(2-1) 測線 H40 (北部領域)

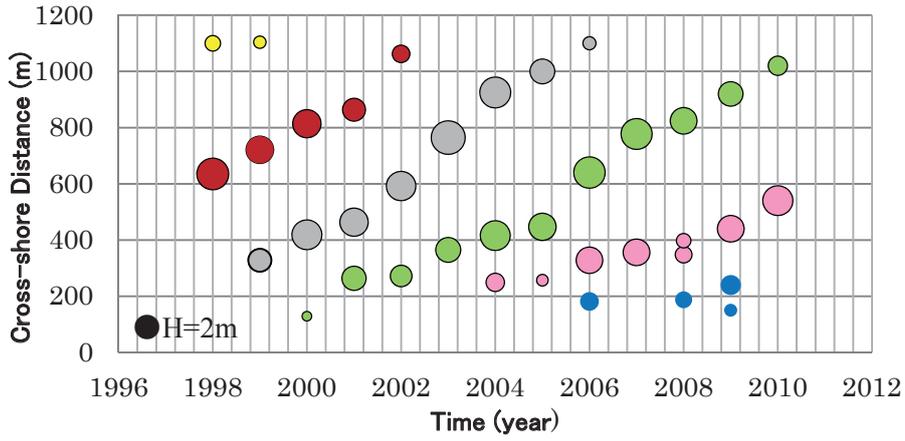
図-5.3.2 (a) は、北部領域に位置する測線群 (H03, H40, H60) の代表断面 H40 における砂州頂部位置・比高・離岸距離 (測量基点を基準) を示したものである。この領域の海底勾配は平均 $1/200$ である。ここでは、砂州の沖向き移動が明瞭に現れている。この領域では、沿岸方向に連続な砂州として移動を行い、岸沖方向の移動範囲は 1000m 程度となっている。砂州は3段~4段に発達し、砂州比高の最大値は 4.5m 程度に達し、砂州の活発な岸沖移動が観察される。

(2-2) 測線 N70 (中央部領域)

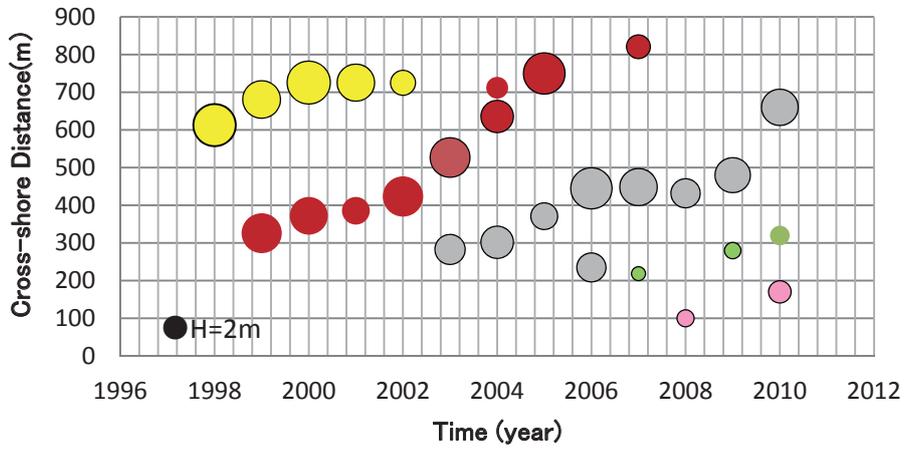
図-5.3.2 (b) は、中央部領域に位置する測線群 (H01, T80, N70) の代表断面 N70 における砂州頂部位置・比高・離岸距離を示したものである。この領域の海底勾配は平均 $1/150$ で、北部領域に比べると急勾配になっている。この領域でも、砂州の沖向き移動が明瞭に現れている。この領域でも、一般に沿岸方向に連続な砂州として移動を行うと考えられるが、岸沖方向の移動範囲が 700m 程度と北部領域に比べると狭くなっている。砂州は2段~3段に発達する。砂州比高の最大値は 4.2m 程度に達し、北部領域に比べるとやや低くなっているが、ここでも、砂州の活発な岸沖移動が観察される。

(2-3) 測線 U20 (南部領域)

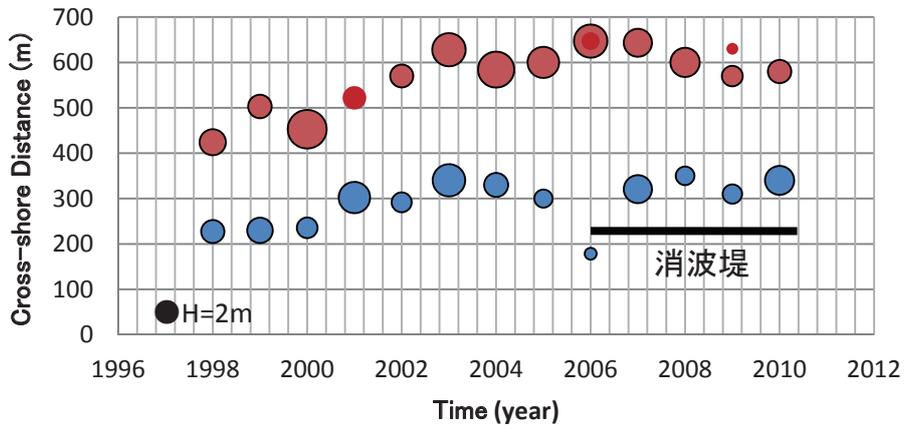
図-5.3.2 (c) は、南部領域に位置する測線群 (N60, N50, U40, U20) の代表断面 U20 における砂州頂部位置・比高・離岸距離を示したものである。この領域の海底勾配は平均 $1/80$ で、北部・南部領域に比べると、最急勾配になっている。岸沖方向の移動範囲が 600m 程度で、対象領域の中で一番狭くなっている。この測線は、砂州は2段に発達し、砂州比高の最大は 4.7m 程度に達している。離岸距離 250m 付近に消波堤を有している測線で、砂州形態が安定しているのは、この構造物の設置も一因と考えられる。



(a) 測線 H40 (北部領域)



(b) 測線 N70 (中央部領域)



(c) 測線 U20 (南部領域)

図-5.3.2 領域別砂州変動・頂部位置・比高・離岸距離の経年変化

(3) 領域別環境条件の違いと NOM の特性

対象領域の北部・中央部・南部に分けて、環境条件および、NOM 特性の違いについて比較検討を行う。比較項目としての環境条件は、①海底勾配 ②底質粒度分布 ③波向 ④有義波高 ⑤構造物の有無を考え、NOM 特性として、①比高変動範囲 ②砂州段数 ③岸沖存在範囲（測量基点の離岸距離） ④発達時移動速度 ⑤存在水深 ⑥再現周期 を検討した。その結果を表-5.3.1 と表-5.3.2 に示す。

表-5.3.1 環境条件の違い

領域（測線位置） 環境条件	北部領域 (H60,H40,H03)	中央部領域 (H01,T80,N70)	南部領域 (N60,N50,U40)
海底勾配 (%)	1/200	1/150	1/80
底質粒度分布 (mm)	0.14~0.17	0.15~0.2	0.1~0.6
波向（徳光観測所）	NNW~W	NNW~W	NNW~W
海岸線法線方向	285°	294°	301°
構造物の有無	人工リーフ	人工リーフ	消波堤

(施工 2010~2013)

表 5.3.2 NOM の特性

領域（測線位置） NOM 特性	北部領域 (H60,H40,H03)	中央部領域 (H01,T80,N70)	南部領域 (N60,N50,U40)
比高変動 max. 範囲 (m)	3.5~4.5	4.0~4.2	4.0~4.7
砂州段数 (段)	4~3	3~2	2
岸沖存在範囲 (m)	1000	700	600
発達時移動速度 (m/year)	170	100	不明瞭
存在水深 max. (m)	4.6	4.1	4.7
再現周期 (year)	4~5	5~6	不明瞭

第 4 節 他地域との比較

オランダ・ニュージーランド・日本・米国における NOM の観測地点を図-5.4.1 に示す。Ruessink ら（2003）の分類に基づいて、オランダ、ニュージーランド、米国、日本等の NOM との比較を実施する。これらの観測地点の環境状況および再現周期の比較を表-5.4.1 に示し、砂州の移動再現周期と存在水深範囲の関係を図-5.4.2 に示す。全体に、砂州の形成・移動・消失に対応するサイクル構成は既往の報告と一致している。しかし、千里浜における外浜勾配や来襲波浪の波形勾配は、オランダの報告例と類似するが、海底勾配が緩やかで、砂州の移動距離が長くなる北部領域（千里浜）で、（中央部領域と比較して）再現周期が短くなる点は、他地域での報告と異なっている。

Ruessinkら(2003), Shandら(1999)

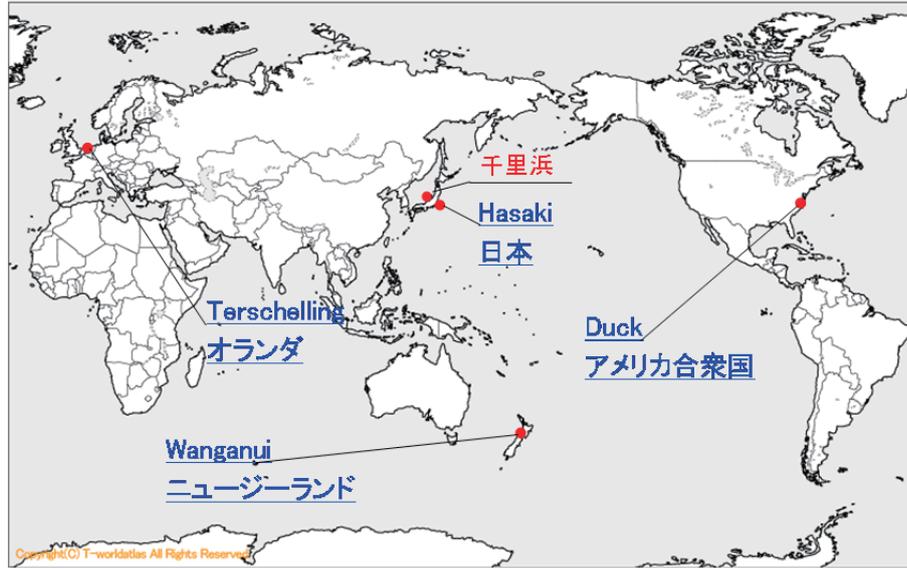


図-5.4.1 NOMの観測地点

表-5.4.1 環境状況および再現周期の比較

Site	外浜勾配	波形勾配	再現周期(年)
Zuid(Holland)	1/170	0.024	3.9
Noord(Holland)	1/120	0.024	15.1
Terschelling(Holland)	1/205	0.024	11.4
Ameland(Holland)	1/225	0.024	6.1
Duck(U.S.A.)	1/80	0.017	5.9
Wanganui(Newzealand)	1/90	0.013	2
Hasaki(Japan)	1/75	0.014	1
Chirihama(Japan)	1/190	0.022	4~5
Ishikawa(Japan)	1/140	0.022	8~12

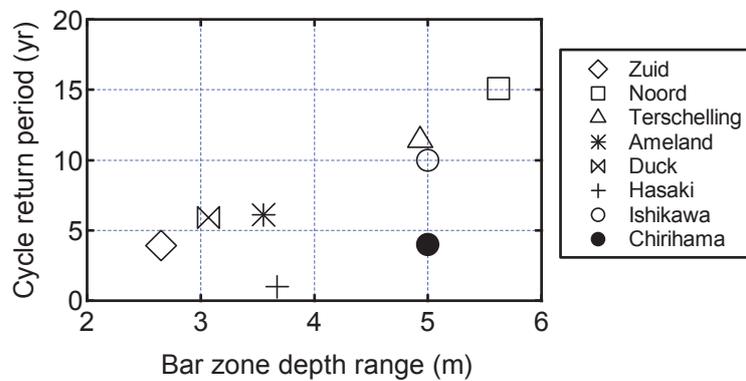


図-5.4.2 砂州の移動再現周期と存在水深範囲の関係

第 6 章 海象・後浜地形変動とイカリモンハンミョウの生態環境の 関係

本章では、九州の鹿児島県、宮崎県、大分県、本州では石川県のみで生息している肉食系昆虫のイカリモンハンミョウについて取り上げ、海象・地形変動との関係について論じる。本種は、石川県指定希少野生動物種、環境省レッドリスト及び石川県レッドデータブックともに絶滅危惧 I 種に指定されて保護が図られている。

柴垣・甘田海岸一帯には、かつて多数のイカリモンハンミョウが生息していた。しかしながら、近年、その数が急激に減少し、イカリモンハンミョウの生息適地が急速に縮小している。同海岸には、形態の良く似たハラビロハンミョウの生息も確認されているが、その個体数はイカリモンハンミョウと比較して減少していないことが調査により明らかにされている（上田ら、2013；上田ら、2014）。

第1節 石川県に生息するイカリモンハンミョウの現状

石川県におけるイカリモンハンミョウの個体数の変化をまとめると次のようになる。1935年に石川県で初めて確認され、内灘から羽咋にかけて広く分布していることが報告されている。その後の環境の変化により、1975年には石川県から絶滅したと考えられていた。しかし、1994年に大島町において再発見され、その後、次の様な推移が報告されている（図-6.1.1）。

- ・ 1994年：465匹発見
- ・ 1995年：1098年発見
- ・ 1997年：1081匹発見
- ・ 1998～2008年：調査なし
- ・ 2009年：調査再開され、甘田・柴垣海岸において230匹発見
- ・ 2010年：64匹発見
- ・ 2011年：114匹発見
- ・ 2012年：約400匹発見

石川県立大学により、2011年と2012年に成虫・幼虫の分布調査が行われた。その調査により得られた成虫分布を図-6.1.2および図-6.1.3に、幼虫の巣穴分布を図-6.1.4および図-6.1.5にそれぞれ示す（上田ら、2013；上田ら、2014）。この調査によると、測線 IPU-6 付近に巣穴が発見され、成虫の分布も多く見られるが、大島から甘田海岸にかけては（測線 IPU-4 および測線 IPU-5）幼虫の巣穴の発見はなく、成虫の数も非常に少ないと報告されている。

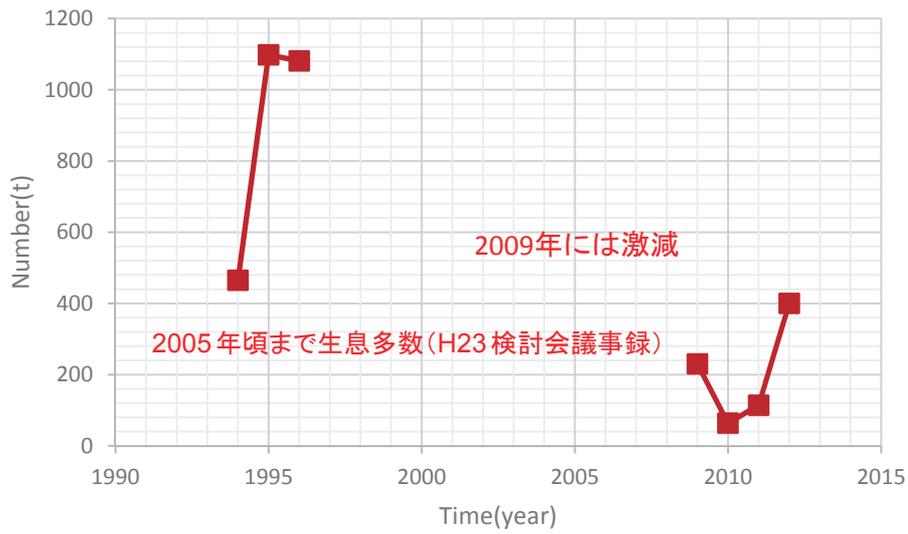


図-6.1.1 柴垣・甘田・大島海岸における生息数の時間変化
(平成 23 年度羽咋海岸自然再生支援事業検討会 (第 1 回) より)

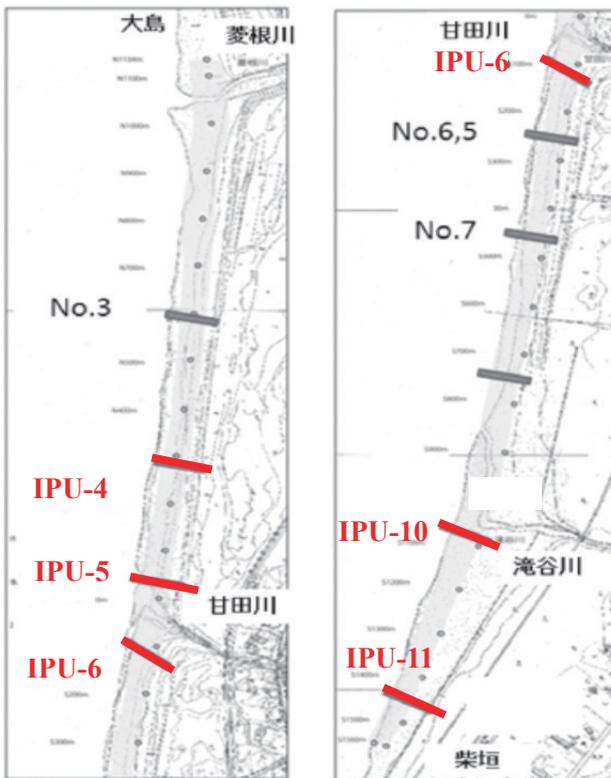


図-6.1.2 測線位置
(上田ら, 2013に加筆)

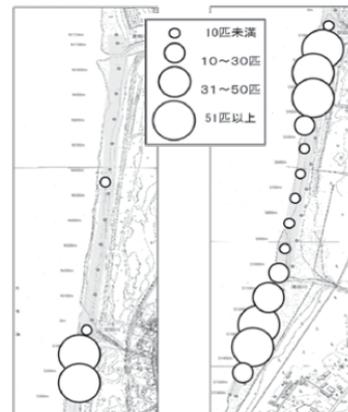


図-6.1.3 2012年成虫分布
(上田ら, 2013より転載)

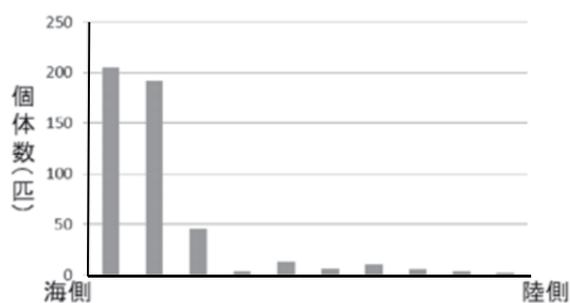


図-6.1.4 汀線から陸側にかけての成虫の分布位置
(上田ら, 2013 より転載)

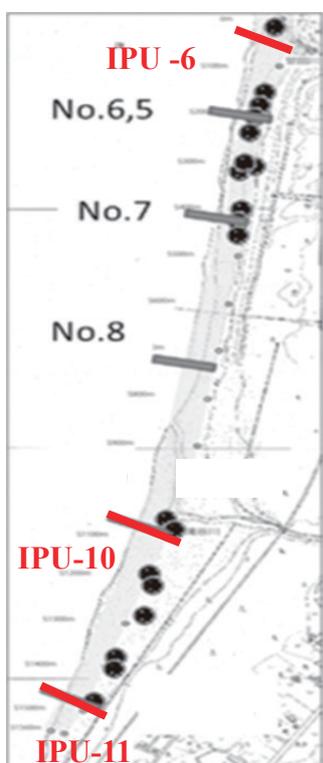


図-6.1.5 2011年観測幼虫巣穴分布
(上田ら, 2013に加筆)

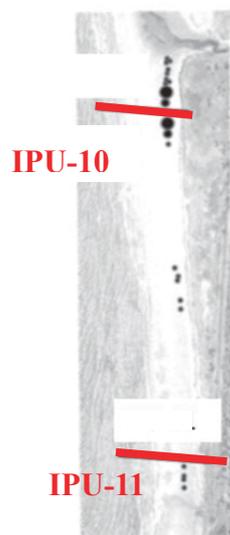


図-6.1.6 2012年観測幼虫巣穴分布
(上田ら, 2013に加筆)

第2節 イカリモンハンミョウの生態

砂浜の代表的な捕食者昆虫としてハンミョウ類が挙げられる。日本の海域には全部で6種類のハンミョウ類が見られ、それぞれの海岸にはそのうちの2~4種類が混在して生息している。これら海浜性ハンミョウの種間での微生息環境の違いとして、イカリモンハンミョウは主に砂浜、ルイスハンミョウは干潟の影響を受ける砂浜部分、カワラハンミョウは海岸砂丘、ハラビロハンミョウは河口周辺の砂浜、ヨドシロヘリハンミ

ヨウは河口の葦原, シロヘリハンミョウは岩場といった違いがあることが示されている (佐藤, 2008). また, 海浜性ハンミョウの種間関係として, 顎の大きさが共存に関わる大きな要因として紹介されている. 成虫は大顎のサイズが異なることで, 餌の大きさを分け合っており, 成虫の大顎サイズと関連した餌をめぐる種間競争が, 共存できる種の組合せの決定に大きく影響していることが述べられている (佐藤ら, 2004).

(1) イカリモンハンミョウの生態環境

イカリモンハンミョウの成虫は, 海水でぬれた砂の上で活動し, 冬になると海岸線から離れて砂丘上に移動する. 幼虫は砂浜の穴に潜み, 近くを通るハマトビムシ等の小型動物を捕食している. 産卵は砂の浅い場所 (1cm 程度) で行い, 幼虫で2回越冬する. 巣穴の深さは 30 cm程度である.



図-6.2.1 イカリモンハンミョウのライフサイクル
(環境省中部地方環境事務所 2010年より)

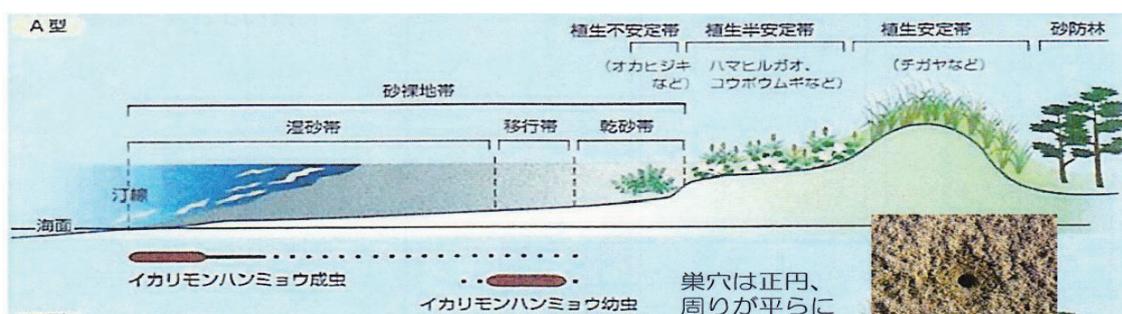


図-6.2.2 イカリモンハンミョウ成虫・幼虫生息帯周辺の海岸断面
(羽咋市海岸自然再生支援事業検討会資料, 2011年より)

(2) 最適営巣地の条件

イカリモンハンミョウの営巣適地条件には, 波浪や地形変化の影響により変化する安全性, および, 食糧となる餌である藻などの漂着ゴミの分布の仕方が強く影響する.

(2-1) 安全性

荒天時に海岸砂丘地帯奥の砂丘の根本部分まで波が打ち寄せる場所では、波浪の遡上により、幼虫の生息に対する大きな危険要因となり得る（渡辺ら，2012，2013）。

(2-2) 餌供給

イカリモンハンミョウの成虫と幼虫の餌となるものはハマトビムシである。このハマトビムシの餌である藻などを含んだ漂着ゴミが減少している。このことが、イカリモンハンミョウ生息に対して強い影響を及ぼしている（佐藤ら，2005）。

(2-3) 安全性と餌供給のトレードオフの関係

海岸線の侵食と陸上からの植生帯の延伸により、幼虫の営巣に適した適度な湿り気のある移行帯が狭小となり、生息に対して大きな危険要因となり、巣の安定性と餌供給はトレードオフの関係にある。この関係をバランス図で示すと次のようになる。

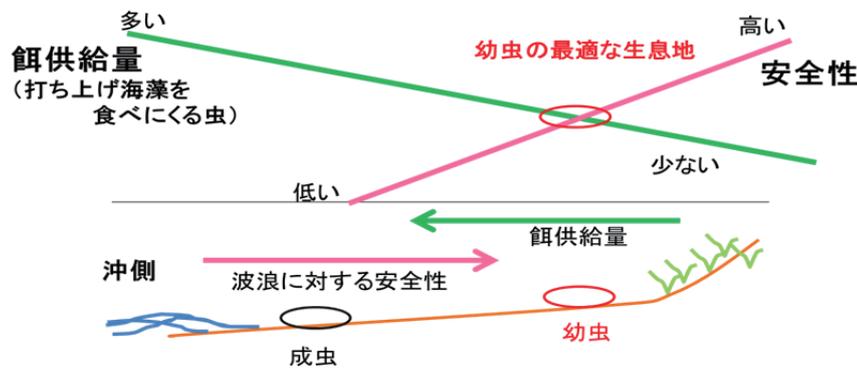


図-6.2.3 安全性と餌供給のトレードオフ
(羽咋海岸自然再生支援事業検討会資料，2011 をもとに作成)

第3節 柴垣・甘田海岸の地形変動

本節では、柴垣・甘田海岸の後浜地形の変動を把握するため、5測線について測量を行った結果を示す。各図の縦軸は標高、横軸は標高1.5mを基点にして岸沖方向距離を示す。

(1) 甘田海岸の断面比較

甘田海岸における3か所の平均断面を3次曲線で近似した結果を図-6.3.1に示す。これを見ると、甘田海岸に位置する測線IPU-4の断面勾配が、これより南側に位置する測線IPU-5、測線IPU-6に比べて大きいことが確認できる。これは、測線IPU-4の海浜頂部における砂の堆積が顕著であることが原因であるためと考えられる。断面は南から北

へ向かうにつれて、勾配が急になり、測線 IPU-6≒7%、測線 IPU-5≒8%、測線 IPU-4≒11%と変化している。

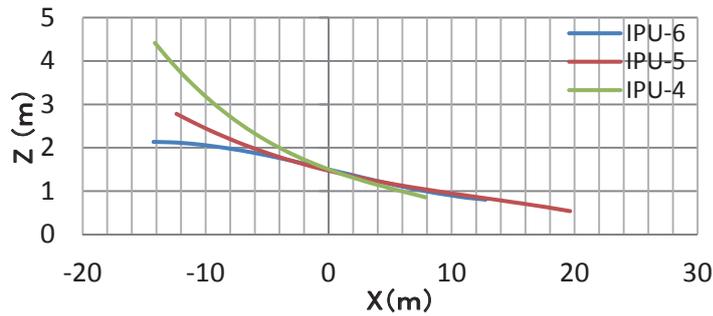


図-6.3.1 甘田海岸における測線毎の平均断面地形

(2) 柴垣海岸の断面比較

柴垣海岸における2か所の平均断面図を図-6.3.2に示す。この図からは、測線 IPU-10の方が海岸頂部における勾配は大きいですが、標高1.5m 辺りからは測線 IPU-11との断面勾配に違いは見られず、どちらも緩やかな勾配で、測線 IPU-11≒2%、測線 IPU-10≒3%と変化している。

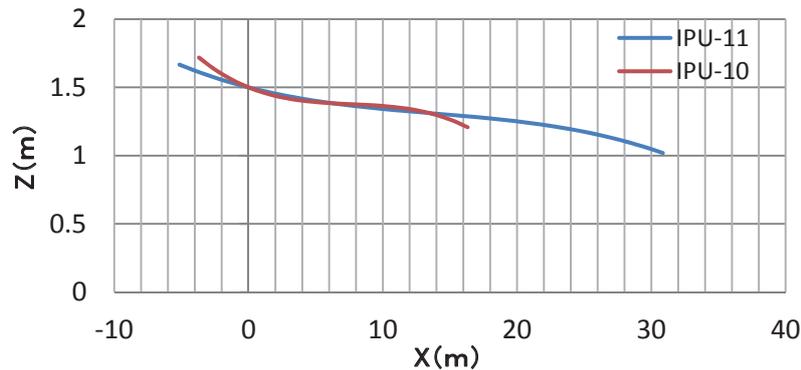


図-6.3.2 柴垣海岸における測線毎の平均断面地形

(3) 両海岸の全測線の断面比較

次に、図-6.3.3に全観測箇所における平均断面の比較を示す。このグラフは標高1.5mを基準として柴垣・甘田海岸の断面地形を重ねたものである。この図を見ると、柴垣海岸と甘田海岸では海岸の勾配が大きく異なることが分かる。特に甘田海岸の測線 IPU-4の断面は他の地点と比較して平坦な範囲が狭いのに対し、柴垣海岸の測線 IPU-10と測線 IPU-11は広い範囲で平坦な場所が確保できていることが分かる。

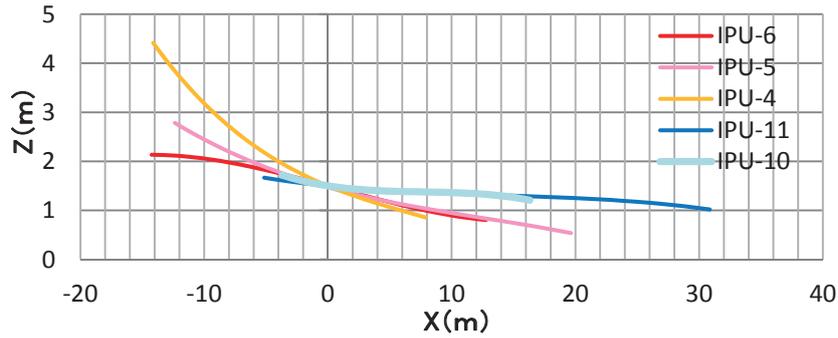


図-6.3.3 両海岸における全測線の平均断面比較

(4) 両海岸の代表断面の比較検討

両海岸における代表断面の地形変動を見るため、観測回数の多い測線 IPU-5（甘田川北側）および測線 IPU-11（柴垣海岸南側）におけるデータを用いて比較を行った。図-6.3.4 に測線 IPU-5 と測線 IPU-11 の断面変動を比較する。これより、8 月には、どちらも沖側で 40cm 程度の断面変動が起こっていることが分かる。柴垣海岸は甘田海岸に比べ急な変化ではないが、両海岸とも侵食を受けていることから、この時期に高波浪の影響が強かったと推測される。これに対し、9 月の甘田海岸の断面に 40cm 程度の侵食が見られるが、柴垣海岸では 20cm 程度の侵食となっている。この侵食状況の違いから甘田海岸は柴垣海岸よりも侵食・堆積の短期地形変動を受けやすい環境にあると考える。

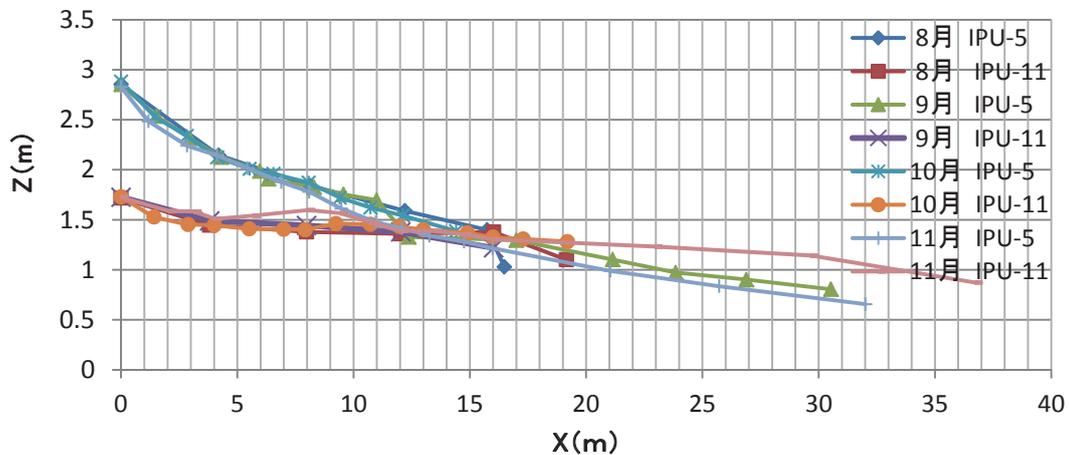


図-6.3.4 甘田海岸（測線 IPU-5）および柴垣海岸（測線 IPU-11）における断面変動

(4-1) 測線 IPU-5 の断面形状と変動

図 6.3.5(a)より、測線 IPU-5 における平均断面形状をみると、断面形は 2 次曲線で良く表現され、海岸に向かって緩勾配化している。図-6.3.5(b)の標準偏差から 0m~18m の範囲で地盤高が大きく変動していることが分かる。図-6.3.5(c)に示すトレンドにより、甘田海岸の断面は観測を行った 4 ヶ月間において侵食状況にある。

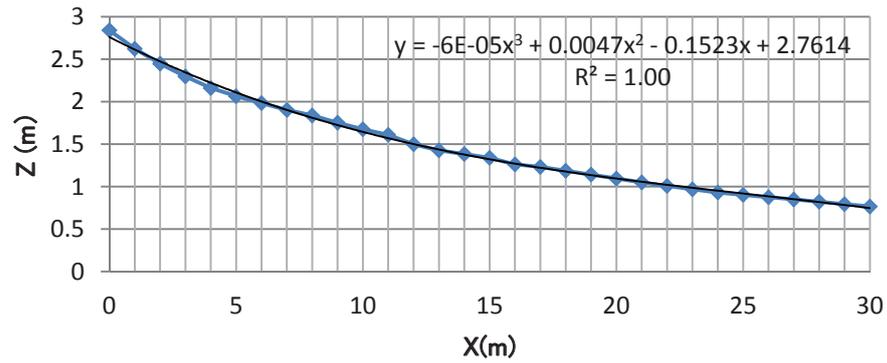


図-6.3.5(a) 測線IPU-5 の平均断面

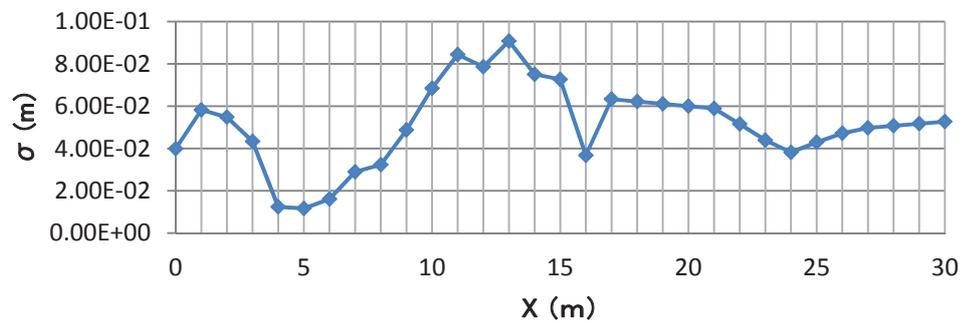


図-6.3.5(b) 測線IPU-5 に対する 4回の観測における地盤高変動の標準偏差

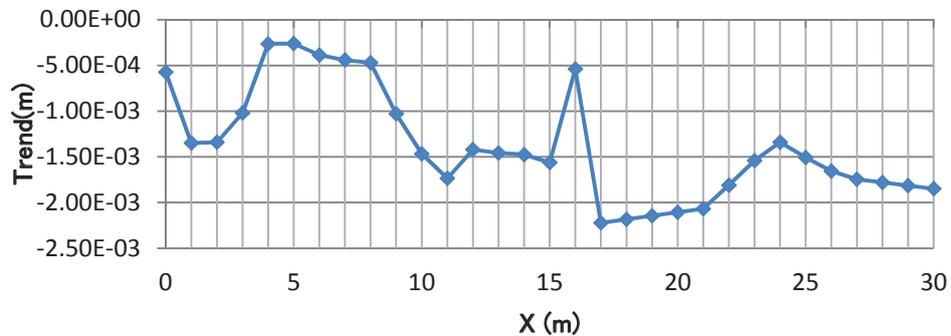


図-6.3.5(c) 測線IPU-5における4回の観測における地盤変動のトレンド

(4-2) 測線 IPU-11 の断面形状と変動

測線 IPU-11 の平均断面を図-6.3.6(a)に、地盤高変動の標準偏差を図-6.3.6(b)に示す。これより、IPU11 は IPU5 と比較して緩勾配であること。また、測線 IPU-5 では海側での断面変動があまり見られないのに対し、測線 IPU-11 では砂浜全体で変動が起きていることが分かる。また、図-6.3.6(c)のトレンドにより柴垣海岸は堆積傾向にあることが分かる。図-6.3.6(d)に測線 IPU-11 および測線 IPU-5 の標準偏差を比較した結果を示す。これより、測線 IPU-5 では海側での断面変動があまり見られないのに対し、測線 IPU-11 では砂浜全体で変動が起きていることが分かる。

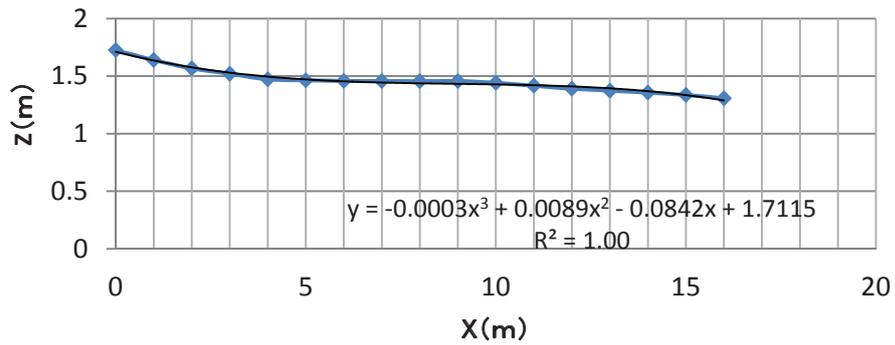


図-6.3.6(a) 測線IPU-11の平均断面

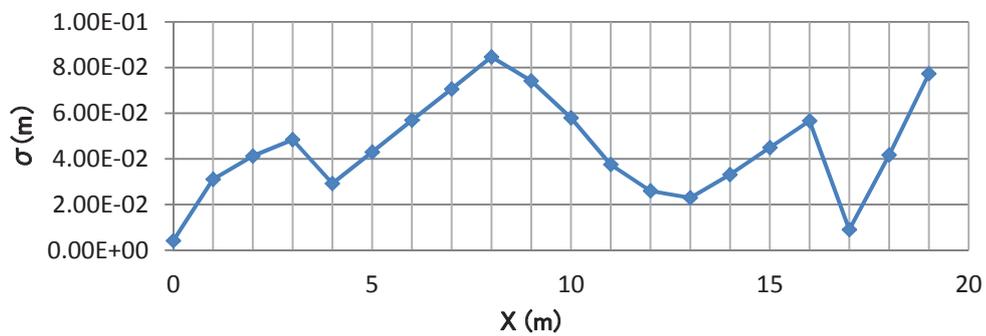


図-6.3.6(b) 測線 IPU-11に対する4回の観測における地盤高変動の標準偏差

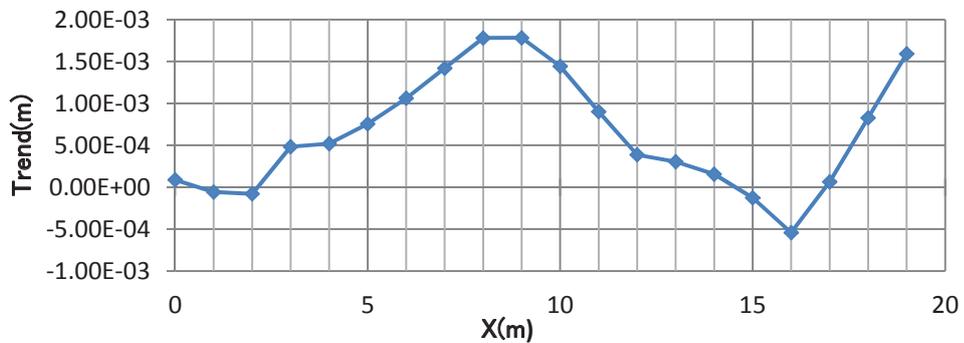


図-6.3.6(c) 測線IPU-11における4回の観測における地盤高変動のトレンド

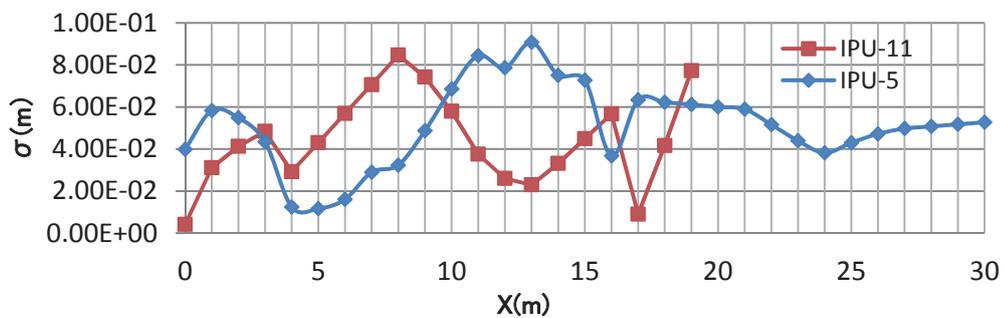


図-6.3.6(d) 測線IPU-5および測線IPU-11における地盤高変動の標準偏差の比較

(5) イカリモンハンミョウの生息分布と地形特性のまとめ

本節では、イカリモンハンミョウの生息域分布と地形の関連性について検討を行う。甘田海岸の生息域と地形特性をみるために、測線 IPU-4、測線 IPU-5、測線 IPU-6 の 3 か所の断面を図-6.3.1 に示した。これによると測線 IPU-4、測線 IPU-5 の海岸断面は測線 IPU-6 と比較して勾配が急峻である。一方、石川県立大学の調査によると、測線 IPU-6 付近に本種の巣穴が発見され、成虫の分布も多く見られるが、大島から測線 IPU-4 および測線 IPU-5 の甘田海岸にかけては幼虫の巣穴の発見はなく、成虫の数も非常に少ないと報告されている（上田ら、2013）。砂浜頂部から汀線付近にかけての勾配が急であることは、本種の生息域である乾砂帯と湿砂帯の中間帯のような緩勾配の砂浜区間が狭くなっていることを意味する。つまり、甘田以北の海岸においては幼虫が生息しづらく、成虫個体数もそれに伴って減少していると考えられる。

次に、柴垣海岸の生息域と地形特性について見ると、図-6.3.3 で示したように、甘田海岸に比べ、柴垣海岸の勾配が平坦で、幼虫が巣を作りやすい砂浜が広く分布している。こうした柴垣海岸の地形特性が、幼虫巣穴および成虫生息数の確保（上田ら、2013）につながっていると考えられる。

第 4 節 柴垣・甘田海岸の漂流物分布

3D レーザースキャナーを用いて漂流物分布状況の観測および、後浜地形測量を行い幼虫営巣地との関係を検討した。今回の観測では、漂流物は甘田海岸では標高 1.8m～0.8m、柴垣海岸では標高 1.7m～1.3m に分布していた。その結果、甘田海岸は幼虫営巣地と漂流物分布が一部重なり、柴垣海岸では幼虫営巣地が漂流物分布範囲に存在している形となった。

柴垣海岸の後浜勾配は約 2～3%と緩やかである。これに対して、甘田海岸の後浜勾配は約 7～11%と柴垣海岸に比べると 3 倍近くの急勾配になっている。この結果、甘田海岸における漂流物の分布は、基準点から汀線方向に 9～19m 付近に堆積しているが、柴垣海岸においては、甘田海岸よりも堆積物の分布範囲が広く、基準点から汀線方向に 20m 付近まで一帯に漂流物が堆積していることが分かった。

2013 年 11 月 17 日の観測写真（図-6.4.1(a)および図-6.4.1(b)）を見ると、両海岸とも漂流物は流木とプラスチックごみが主なものである。現地観測時の調査では、イカリモンハンミョウが獲物とする虫が食する海藻類が少ない状況である。このことは、本種の生息環境の悪化につながっていると考えられる。



(a) 柴垣海岸



(b) 甘田海岸

図-6.4.1 漂流物堆積状況 (2013年11月17日撮影)

ここで、後浜地形及び漂流堆積物分布と幼虫営巣地との関係を把握するために、3Dレーザースキャナーを用いた測量で得られる画像を基に、平面地形の把握を行い幼虫営巣地と漂流堆積物の位置関係の比較検討を行った例を示す。下の左側の図-6.4.2は2013年10月12日に撮影された柴垣海岸の海岸平面図である。これを合成して、平均化により得られた平面地形図に漂流物分布域と幼虫営巣分布域をプロットしたものが図-6.4.3である。この図から、柴垣海岸の漂流物分布域は、幼虫営巣分布域にオーバーラップする状況であることが分かる。同じく、甘田海岸の漂流物分布域と幼虫営巣分布域の関係を確認すると、漂流物分布域は幼虫営巣分布域の近くまで広がっているが、幼虫営巣分布域とのオーバーラップは比較的小さいことが確認された。

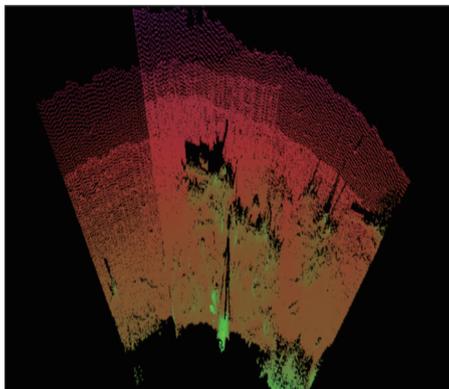


図-6.4.2 画像化された海岸平面地形と漂流物分布

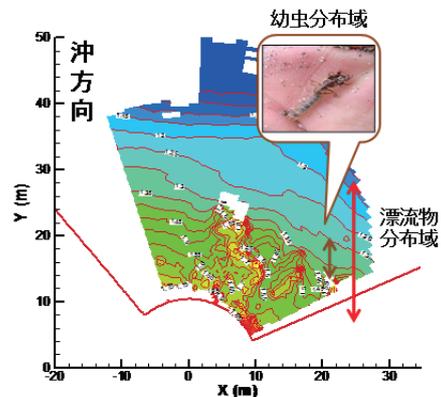


図-6.4.3 平均化により得られた平面地形と漂流物分布

第5節 潮位及び波浪遡上高の推定

この節では、イカリモンハンミョウの生息環境に大きな影響を与える要因と考えられる潮位変動および波浪遡上高についての解析を行う。潮位データは国土交通省により、金沢港大野地区において毎日観測されている潮位データを使い、波浪データはナウファス（全国港湾海洋波浪情報網）により得られたものを使用する。

(1) 潮位の特性

国土交通省により、金沢港大野地区において潮位の観測が行われている。平均潮位は、年間で約30cm程度の変動があり、8月が約93cm（ODL値=約50cm+42.5cm）と最も潮位が高く、2月と3月が約59cm（ODL値=16cm+42.5cm）と一年の中で最も低くなる傾向が見られる（第2章、第3節、潮位の特性）。

2003年度から2010年度の金沢港における潮位の月変動とその経年変化を図-2.3.1に、その平均潮位から、それぞれの年の潮位の偏差を求めプロットしたものを図-2.3.2に示した。2009年度は年間を通じて10か月間、2010年度は年間を通じて11か月間の偏差が正であり、2年続いて、潮位が平年に比べてかなり高い年であったことが分かる。

さらに、図-6.6.1は金沢港の年度間平均潮位を1997年度～2010年度までプロットしたものである。これによると、金沢港の潮位は長期トレンドで約4.6mm/年の割合で上昇し、潮位が平年に比べて急激に上昇する年が1999年、2004年、2010年度と5～6年毎に周期的に現れていることが分かる（図-6.6.1の赤丸印を参照）。

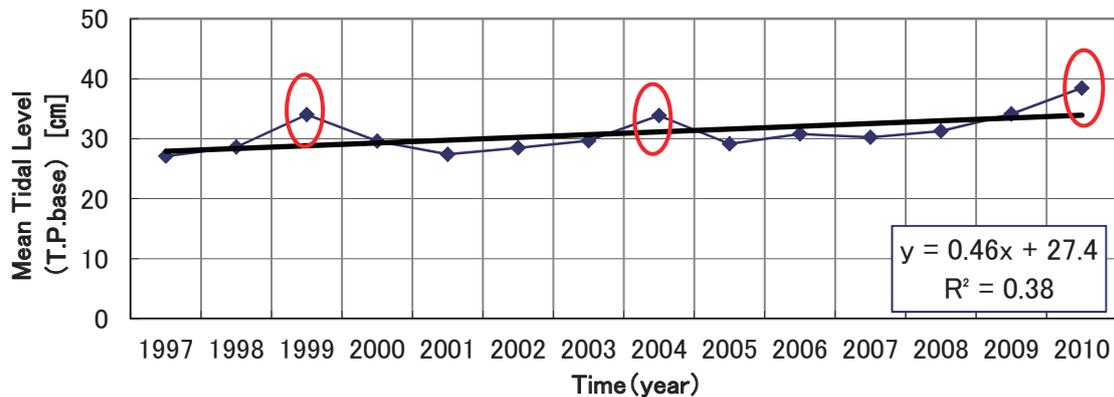


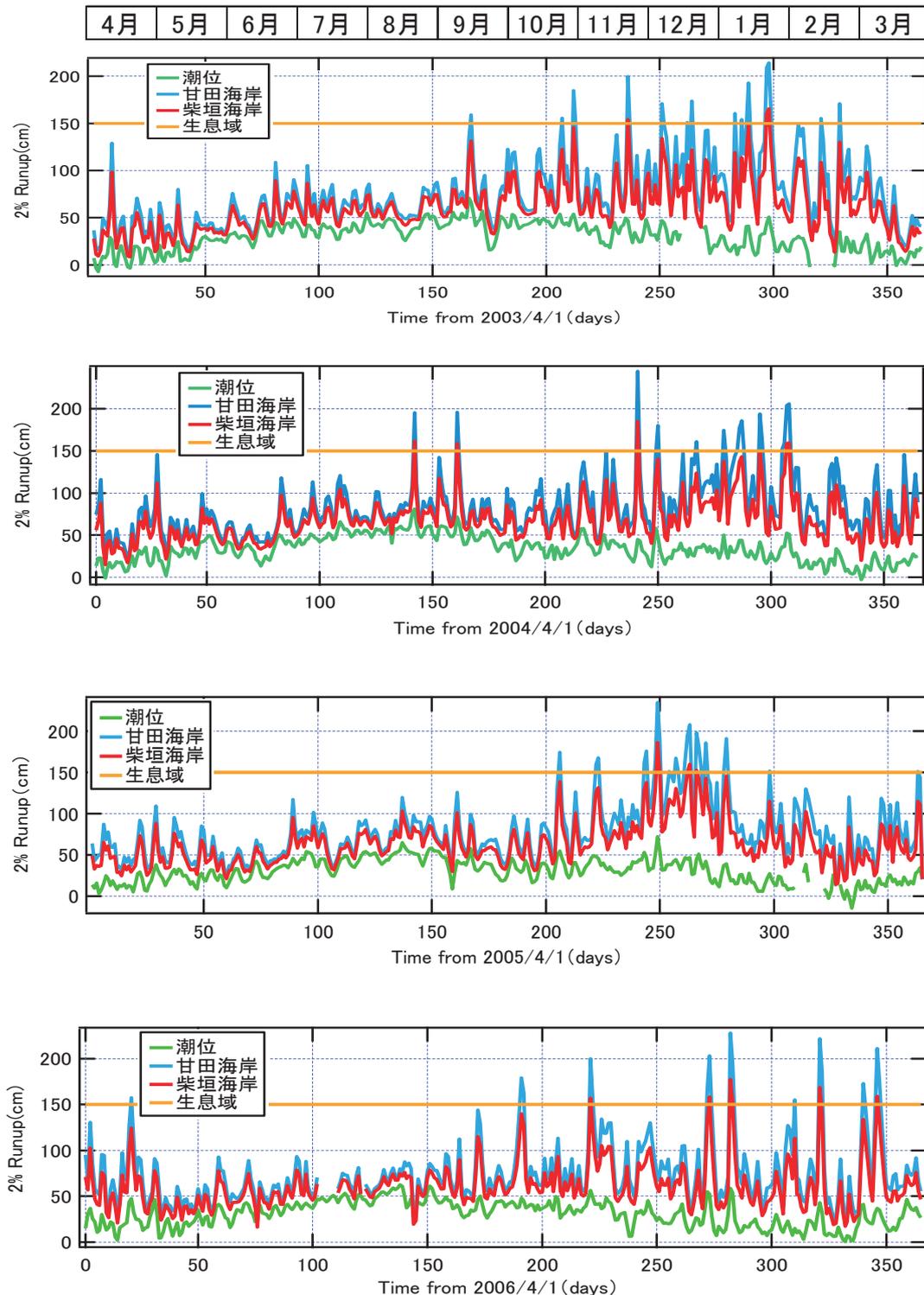
図-6.5.1 金沢港における年平均潮位の経年変化

(2) 波浪遡上高の推定

波浪遡上高の推定を行った結果を図-6.5.2に示す。縦軸は波浪遡上高（2%遡上高）を表し、横軸下部は4月1日からの累計日数を、横軸上部は4月から翌年の3月までの月数を示している。図中で、潮位変動を緑色線で、甘田海岸の波浪遡上高を青色線で、柴

垣海岸の波浪遡上高を赤色線でそれぞれ示している。さらに、イカリモンハンミョウの幼虫生息域高さの目安である T.P.+150cm を黄色線で示す。

2003年～2010年の波浪遡上高と遡上回数を見ると、甘田海岸の遡上高は、柴垣海岸の遡上高を常に上回っている。これは、両海岸における後浜勾配の違い（甘田海岸の方が急）によるものである。年間を通して見ると、潮位より波浪の影響が顕著であり、秋期から冬期にかけて暴浪が頻繁に発生し大きな影響を及ぼしていることが推定される。



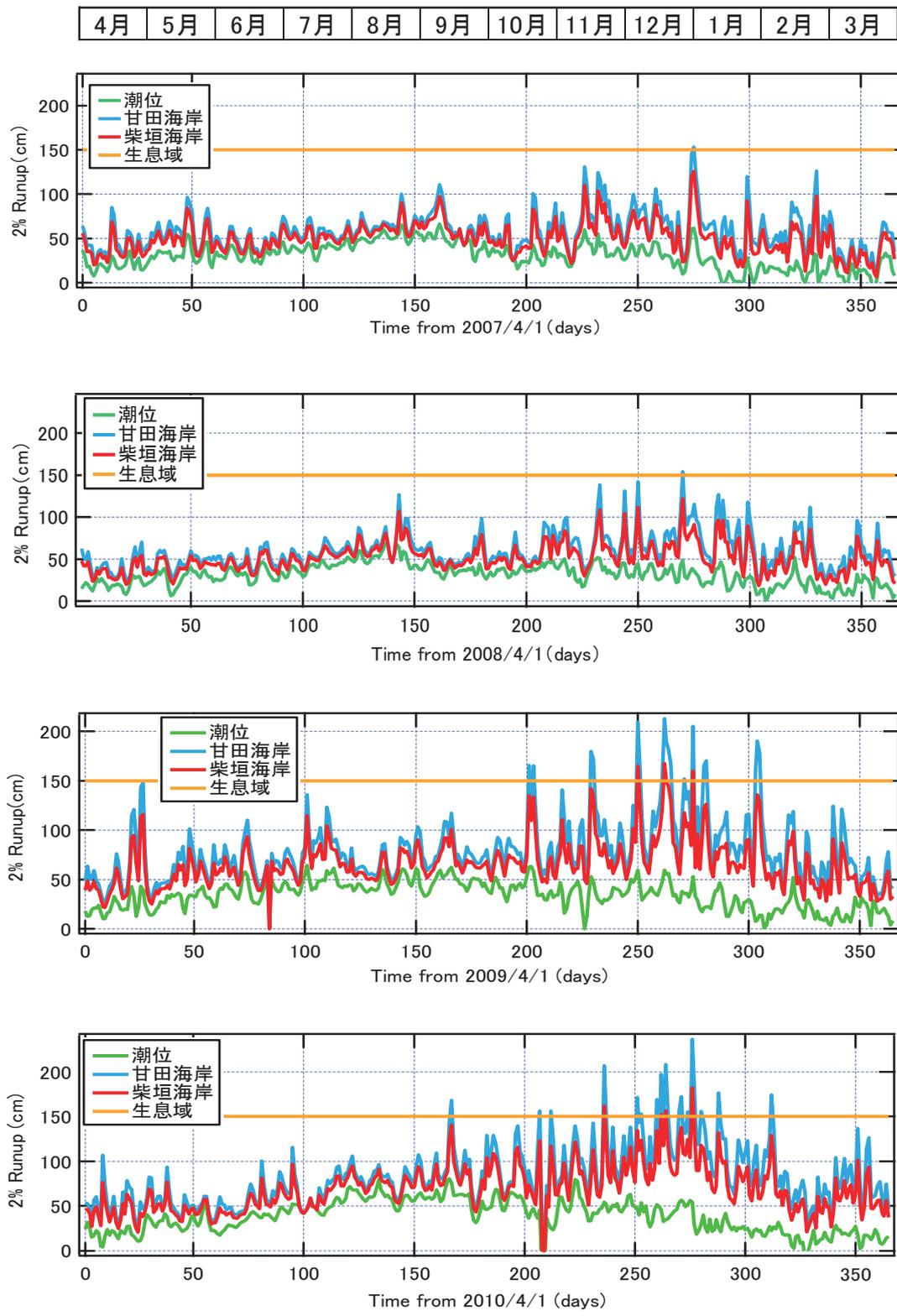


図-6.5.2 潮位と波浪遡上高およびイカリモンハンミョウ幼虫生息域の関係

第6節 イカリモンハンミョウの生息と波浪遡上高の関係

(1) 甘田・柴垣海岸におけるイカリモンハンミョウの幼虫営巣地の関係

甘田・柴垣海岸の平均断面とイカリモンハンミョウの幼虫営巣地の関係を把握するために、幼虫の営巣位置(図-6.1.5)を、甘田・柴垣海岸の平均断面(図-6.3.3)にプロットして、その位置関係を図-6.6.1に示す。これより、甘田海岸の営巣地の方が若干高い場所に位置していることが分かる。

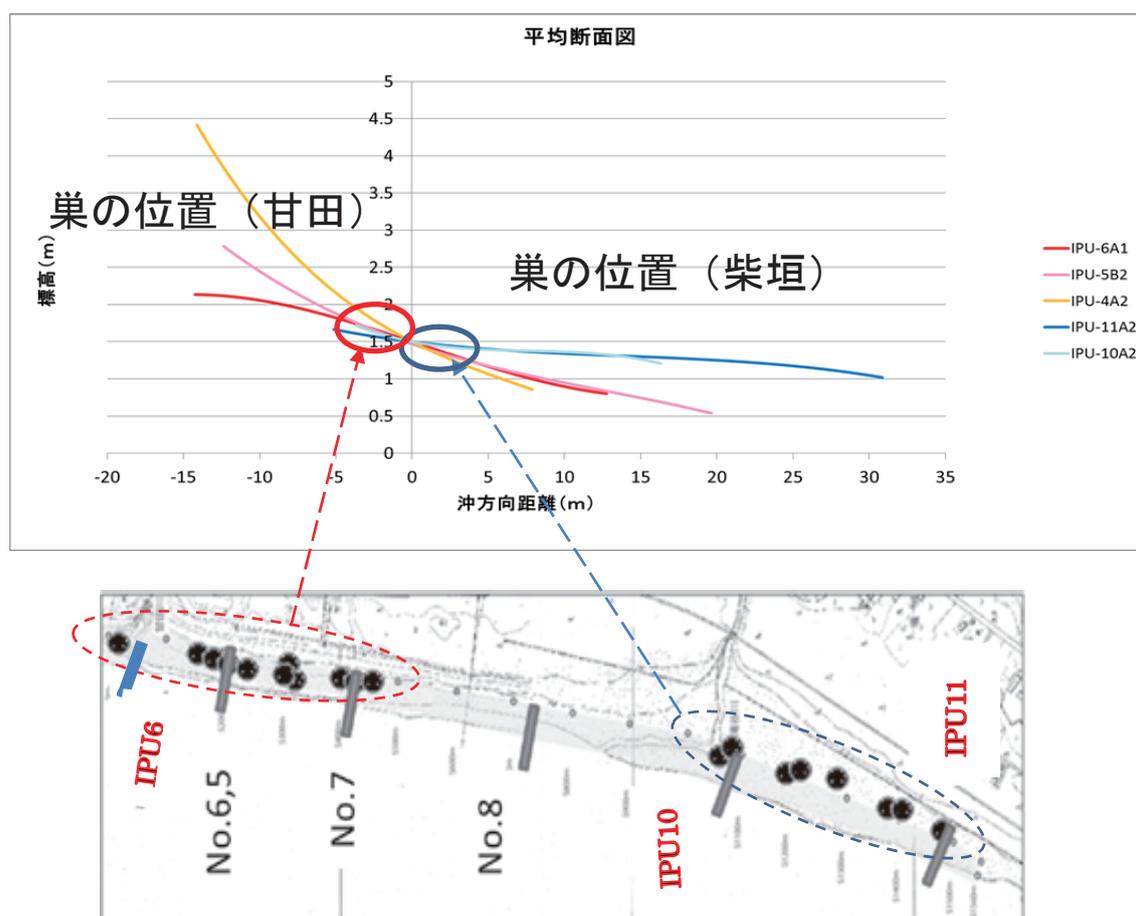


図-6.6.1 甘田・柴垣海岸の平均断面と幼虫営巣地の関係

(2) イカリモンハンミョウの生息と波浪遡上高の関係

波浪遡上高およびイカリモンハンミョウの生息数の関係を、図-6.5.2から解析すると、波浪遡上と遡上回数がイカリモンハンミョウ幼虫の生息に大きな影響を与えていると推定される。

2003年は甘田・柴垣海岸の幼虫生息域への波浪遡上は、10月・11月から数回繰り返され、12月・1月には大規模な遡上が頻りに繰り返して発生している。さらに、翌年の

2004 年は 8 月・9 月から単発的な遡上が見られ、11 月・12 月・1 月に大規模な遡上が頻繁に繰り返して発生している。2005 年は 10 月・11 月から数回の遡上が繰り返され、12 月・1 月と大規模な遡上が頻繁に繰り返して発生している。2006 年は 10 月から 11 月に単発的な遡上が見られるが、12 月、1 月、2 月、3 月の長期間に渡って大規模な遡上が繰り返されている。これらの頻繁に発生する波浪遡上は、幼虫の生息に影響を与えていると推定される。

2007 年および 2008 年は暴浪の無い年である。この 2 年間は幼虫にとっては安定した年で、個体数の回復に寄与していると推定できる。しかし、2009 年は 11 月・12 月に頻繁には大規模な遡上が繰り返され、2010 年も 11 月・12 月にも、大規模な遡上が繰り返して発生している。これらの頻繁に発生する大規模な波浪遡上は、幼虫の生息に大きな影響を与えていると推定される。

(3) イカリモンハンミョウの生息と暴浪イベントのまとめ

イカリモンハンミョウの成虫は、4 月から 11 月にかけて波打際の砂の上で活動し、冬になると海岸線を遠のいて砂丘上に移動する。しかし、幼虫にとっては、営巣地への波浪遡上の繰り返しの影響により、生活環境が破壊され絶滅につながっていく。この繊細な生物にとっては、このような波浪遡上の影響を受ける海岸には、彼らが適応する生息地はごく一部しか無いのではないかと考えられる。

暴浪イベントの寄与について考察すると、特に大きな影響を与えた年と月を拾い上げると次のようになる。

2003 年の 11 月

2004 年の 1 月、8 月、9 月、11 月（最大）

2005 年の 1 月、12 月（期間が長い）

2007 年の 1 月、2 月、3 月

2004 年、2005 年に孵化した幼虫（それぞれ、2006 年、2007 年に成虫になる）にとっては、厳しい状況であり、大幅な個体数減少をもたらしたのではないかと推定される。イカリモンハンミョウの個体数は 2006 年、2007 年が底となり、2007 年、2008 年は波浪が比較的静穏で個体数の回復に寄与しているのではないかと推定される。

(4) 遡上高算定法の適用性の検証

隣接する千里浜海岸（なぎさドライブウエー）の通行規制日数（月単位で集計）の年度間変動（図-6.6.2）を柴垣海岸の波浪遡上高推定の対比（2005年，2007年）させることにより，遡上高算定法の適用性を検証してみた．柴垣海岸の暴浪年（2005年）ではドライブウエーの通行規制日数も多い（図-6.6.3）．静穏年（2007年）は通行規制日数が比較的少ない年である（図-6.6.4）．こうした年度間の変動および季節変動について本研究で用いた推定式による波浪遡上高と，なぎさドライブウエー通行規制日数との間には良好な相関関係が窺える．これより，本研究で用いた遡上モデルは季節変動，年変動を十分に再現できると判断した．

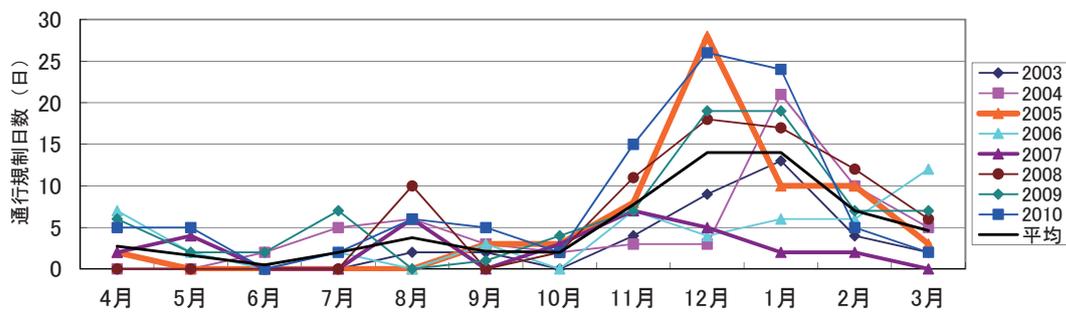


図-6.6.2 なぎさドライブウエーの通行規制日数の年度間変動

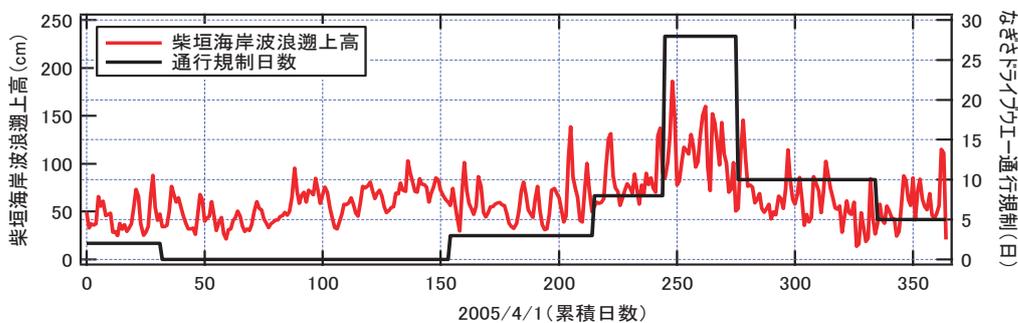


図-6.6.3 2005年度の柴垣海岸遡上高とドライブウエー通行規制日数の関係

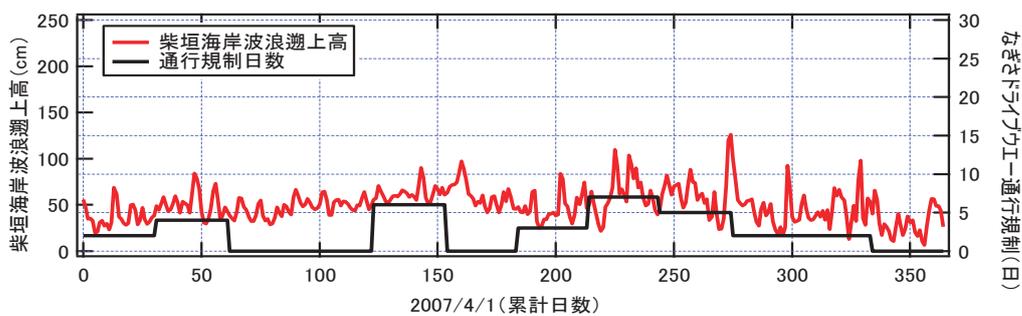


図-6.6.4 2007年度の柴垣海岸遡上高とドライブウエー通行規制日数の関係

第7章 結論

第1節 主要な成果

北部加越海岸の沿岸・岸沖方向の海岸地形変動の解析と、隣接海岸に生息する昆虫の生態系への影響に関する調査・研究を行い以下の結論を得た。

(1) 北部加越海岸における汀線および土砂量の時間変動特性と沿岸方向変動

北部加越海岸の海浜変動特性解明の一環として、深淺測量データを基にして、平均断面形状、長期変動トレンド、汀線・等深線位置、海浜土砂量の変化、および、沿岸砂州に代表される地形変動の沿岸方向変化に着目して基本変動特性の解析を行った。その主要な解析結果は以下のようにまとめられる。

- (1-1) 対象領域の南側では汀線が回転する形で変動しており、金沢港隣接地域で局所的な堆積、その北側では顕著な汀線後退が確認された。合わせて、対象領域の北部（羽咋地区）においても加速的な汀線後退が見られた。
- (1-2) 海浜土砂量変化の分布は全体に汀線位置変化と対応するが、領域北側にかけては、汀線が後退しているにもかかわらず、土砂量は微増・安定傾向を示すなど、汀線近傍と沖側で地盤高変動の傾向に相違が見られた。

(2) 千里浜海岸および隣接海岸における砂州の周期移動特性とその沿岸方向変動

千里浜海岸および隣接海岸における沿岸砂州の周期変動特性とその沿岸方向変動解明の一環として、国土交通省金沢河川国道事務所より提供された深淺測量データと石川県土木部より提供された航空写真を基にして、砂州の平面形状・発達規模、移動速度・沿岸方向の変動特性に着目して基本変動特性の解析を行った。併せて、対象領域の砂州移動形態とオランダ・ニュージーランド・米国など世界各地で報告されている NOM 移動形態と比較検討を行った。その主要な結果は以下のようにまとめられる。

- (2-1) 対象の北部領域では沿岸砂州が 3～4 段に発達し、周期的沖向き移動を 4～5 年前後で繰り返し、岸沖存在範囲が 1000m 程度に達している。中央部領域では沿岸砂州が 2～3 段に発達し、周期的沖向き移動を 5～6 年前後で繰り返し、岸沖存在範囲が 700m 程度に達している。南部領域では沿岸砂州が 1～2 段に発達し、周期的沖向き移動は不明瞭であるが、その形態は安定し、岸沖存在範囲は 600m 程度に限定される。

(2-2) 対象領域の北部ほど砂州の周期移動が組織的かつ2次元的となる傾向を示した。砂州の周期移動に関する再現周期は領域により異なるが、中央部領域では再現周期が長くなる傾向にある。

(2-3) 国内外諸地域における観測例との比較では、形成・移動・消失のサイクル構成は既往の報告と一致するが、海底勾配が緩やかで砂州の移動距離が長くなる北部領域で再現周期が短くなる点で既往報告と異なる結果となった。領域境界では砂州の分断および異世代砂州との再接続等の3次元的な砂州の Switching と考えられる現象が観察された。

(3) 柴垣・甘田海岸の海象・地形変動とイカリモンハンミョウの生態環境の関係

本研究では、イカリモンハンミョウの生息に大きな影響を及ぼす海岸地形変動、潮位変動と波浪遡上、および、漂流堆積物について調査・検討を行った。その主要な結果は以下の通りである。

(3-1) 甘田海岸は傾斜が平均 7.8%と急峻で平坦地形が少なく、断面地形の変動も変動幅が大きく、侵食傾向にあることが分かった。柴垣海岸は傾斜が平均 2.5%と緩やかで平坦地形が多く、断面地形の変動も変動幅は小さく、堆積傾向にあることが分かった。このことが、両海岸での本種の生息数の違いに影響を及ぼしていると考えられる。さらに、急峻な勾配を持つ大島・甘田海岸では本種の幼虫の営巣に適する砂浜が狭小で、同時に成虫の分布も減少していると推定される。

(3-2) 本種の生息は、波浪遡上と営巣適地の微妙なバランスの中に成りたっていることが推定される。特に、2005年の暴浪は、2004年、2005年に孵化した幼虫(2006年、2007年に成虫になる)にとっては生息に厳しい状況をもたらし、大幅な個体数の減少をもたらしたと推定される。

第2節 今後の課題

今回の研究対象領域の北部加越海岸は、自然外力の変化や人為的インパクト等の影響により、海岸侵食が多くの地点で顕在化している。長期的に健全な形で海浜の維持管理を行っていくために、今後の課題として以下の研究調査を継続していくことを提案する。

(1) 汀線および土砂量の時間変動特性と沿岸方向変化に関する研究

海浜土砂量変化の分布は全体に汀線位置変化と対応するが、領域北部にかけては、汀

線が後退しているにもかかわらず、土砂量は微増・安定傾向を示すなど、汀線近傍と沖側で地盤高変動の傾向に相違が見られた。

さらに、侵食対策の一環として、金沢港内に堆積した土砂を浚渫して海上投入し、北部加越海岸の当該地区の汀線後退を軽減するための方策が石川県により開始された。長期的に健全な形で海浜の維持管理を継続するための最善策として、海上投入する場所・時期の選定と早期の実施、およびその効果の確認を行うことが必要となる。

(2) 砂州の周期移動特性とその沿岸方向変化に関する研究

砂州移動の活発な水深範囲と砂州移動の再現周期の関係をプロットし、Ruessinkら(2003)の検討結果と比較した。その結果は、他地域と比較して短めの再現周期を示している。また、海底勾配が緩やかで砂州の移動距離が長くなる北部領域で再現周期が短くなる点は既往の報告と異なっている。引き続き長期間の調査研究を継続して、他地域との環境条件の違いを比較検討することによって、北部加越海岸の海浜地形変動の特性とそのメカニズムを明らかにしていく必要がある。

(3) 柴垣・甘田海岸の海象・地形変動とハンミョウの生態環境に関する研究

本研究では、イカリモンハンミョウの生息と海象・地形変動との関係について論じた。イカリモンハンミョウの生息は、波浪による地形変動および、波浪遡上との微妙なバランスの中に存在していると推定される。

その生態環境を調査研究するための今回の観測は4か月の短い期間であった。海象・地形変動と本種の生態環境に関する調査を長期間継続していくことに依って、生態環境に関する知見を深めていく必要がある。

謝 辞

砂浜海岸域の機能に付いて考えてみる。まず海水浴等の観光資源，魚介類の生息地としての生態系の場，漁場としての生活の場，防災・減災への自然の防波堤等の役割を持っている。さらに，鳥類を含む数多くの種の生息域になり，絶滅危惧種 of 海浜性イカリモンハンミョウの生息場所でもある。

私が 65 才から海岸工学を目指したいきさつについて述べる。大学時代の恩師である久田安夫先生（元運輸省港湾技術研究所所長）が「海ロマン 21」という NPO 法人を立ち上げた際にその会員となった。そこで多くの研究者の海岸・海洋工学の講演を拝聴するにしがって海の魅力にひかれ，海岸・海洋工学の勉強をめざした。このような時に，御縁のあった金沢大学の石田啓教授（現名誉教授）のお勧めで，金沢大学大学院の社会人枠で学ぶ機会を与えて頂き，海岸工学の領域への第一歩を踏み出した。

ここで，石田教授からの御指導に加えて，数値解析学の講義と論文作成の御指導を由比政年教授から 6 年間にわたって受けた。由比教授の御著書である「工学基礎技術としての物理数学」を通して，自然現象の説明と数学の繋がりを知り，思索することの楽しさを知ることができた。その思索はものごとの真実の姿をみてとる活動であること，さらに，それが多くの人と共有できるものでなければならぬと教えられた。

かつて，数学者のフーリエは，数学の目的は「公に役立つこと」「自然現象の説明にある」「数学は自然現象の解明や応用の有効な手段」と語った。

由比先生の教育者としての寛容と責任感，科学者としての思索する姿に引き付けられ 6 年に渡る御指導を受けた。そして，その御指導を受ける研究室で出会った多くの若者が熱心に学ぶ姿に心を打たれた。この由比学が若者達の思索を育み，やがては科学から哲学へと昇華されていくことを願う者である。

このような時に，2011 年の 3.11 東北大震災と原子力発電所の大災害に遭遇し，自然科学を学ぶ者はその知識を防災・減災に役立てていかなければならぬことを再認識した。由比教授の教えは次の言葉である「自然災害を最小限に留めることが，地球環境に関わる技術者の基本的なミッションの一つと言える」。

平成 21 年 4 月に入学して 6 年，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。金沢大学の齋藤武久教授，榎田真也准教授，谷口健司准教授には研究に関する貴重なご意見をいただいたことへの感謝の意を述べる。

学会に参加して国内外の研究者の発表を聞き，この分野の深さと広さを学ぶこともできた。水工研究室の合同ゼミで他大学の先生の講義を受ける機会が多くあり，広く学ぶことができた。熊本大学の故山田文彦教授（2014 年 10 月 17 日御逝去），神戸高専の辻本剛三教授，港湾空港技術研究所の栗山善昭特別研究官，名古屋工業大学の北野利一准教授らの講義を拝聴することができ，自然現象の理解に寄与するとともに，その応用への道を開く姿勢に感銘を受けた。

博士課程における研究では、データの取得・処理・解析の件で研究室の学生の御協力を受け、同じ大学院生であった金沢市立工業高校の土木工学の先生である黒崎弘司博士、金沢大学大学院生小椋太智君、元金沢大学学生脇田康介君、上畑達也君、柳原健太君、宮野庄太郎君、渡部雅也君、藤原理江さん、和田拓磨君、学部学生辻浩希君、十川亮介君、大学院学生上野卓也君、山腰司君の協力を得た。現地観測で手分けしてお互いの研究活動を協力しあったことの思い出がある。

本研究に欠くことのできないデータは国交省北陸地方整備局金沢河川国道事務所、石川県土木部のデータを使用させて頂いたことに改めて謝意を表す。

在学中に友人の案内で台湾旅行の機会を得た。日本統治時代(1895年-1945年)の台湾と日本の関わりを訪ねる旅行であった。その中で印象に残ったものは環境に配慮した「二峰圳地下ダム」と灌漑用の「烏山頭ダム」であった。この二つのダムは今もその機能を果たし続け、台湾の人々の役に立っている。この建設の責任者は金沢大学の前身である旧制第四高等学校の卒業生である鳥居信平氏(1883年生、1903年卒)と八田與一氏(1886年生、1907年卒)であることを知った。金沢大学の先輩の業績は「台湾を愛した日本人」(古川勝三著：平成2年度土木学会著作賞受賞)と「水の奇跡を呼んだ男」(平野久美子著)に紹介されている。後輩の学生達に一読を勧めたい。

私の研究活動を知り、応援してくれたゴルフの愛好家である地平寛治氏・昌子氏御夫妻と石黒公氏、大学時代柔道部の先輩井戸康夫氏(元大同メタル(株))と大場直之氏(元オムロン)、大学時代柔道部の友人鯉谷信夫君(元鹿島建設)、杉山倫一郎君(元日本車両)、建設現場で出会った友人富松義晴君(元飛島建設)、中学・高校時代柔道部の友人川畑英雄君(川畑塾)、前田建設工業(株)の村尾哲男君、税所陽一君、赤坂幸雄君と島村亜紀子さん、韓国の李權植君の励ましに感謝を述べる。

最後に、妻と二人の娘の声援を受け研究活動を送ることが出来た。ここで心から感謝の言葉を贈る。そして、この論文を2013年8月13日96才で他界した母上の霊に捧ぐ。

私が座右の銘としている教えが二つある。以下にご紹介する。

一つは佐藤一斎の教え。

少くして学べば、則ち壮にして為すことあり
壮にして学べば、則ち老いて衰えず
老いて学べば、則ち死して朽ちず

二つ目はサミエル・ウルマンの「青春」である。

人は信念と共に若く
人は自信と共に若く
希望ある限り若く
疑惑と共に老ゆる
恐怖と共に老ゆる
失望と共に老い朽ちる

参 考 文 献

- 1) R. G. Dean, and R. A. Dalrymple (2002) : *Coastal Processes with Engineering Applications*, Cambridge University Press, 475p.
- 2) N. M. Grunnet, and P. Hoekstra (2004) : Alongshore variability of the multiple barred coast of Terschelling, The Netherlands , *Marine Geology*, Vol.203, pp.23-41.
- 3) K. Hayakawa, M. Yuhi, and H. Ishida (2009): Migration of multiple sandbars on the Chirihama Beach, JAPAN, *Proceedings of Coastal Dynamics 2009*, in CD-ROM, Paper No.140, pp.1-11.
- 4) Y. Kuriyama. (2002): Medium-term bar behavior and associated sediment transport at Hasaki, Japan, *Journal of Geophysical Research*,107(C9),3132,doi:10.1029/2001JC000899.
- 5) K. Mizumura, T. Yamamoto, and T. Fujikawa (1997): Prediction of sand movement near port of Kanazawa, *Journa of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, ASCE*, Vol.123, No.5, pp.215-222.
- 6) M. Matsuyama and M. Yuhi (2012) : Characteristics of coastal erosion on the northern Kaetsu coast, Ishikawa, Japan, *Proceedings of the Disaster Management 2012, The 8th Annual Conference of IIRR, Kumamoto*, pp.195-204.
- 7) B. G. Ruessink and A. Kroon (1994) : The behavior of a multiple bar system in the nearshore zone of Terschelling, the Netherlands : 1965-1993, *Marine Geology*, Vol.121, pp.187-197.
- 8) B. G. Ruessink, K. M. Wijnberg, R. A. Holman, Y. Kuriyama and I. M. J. van Enckevort (2003) : Intersite comparison of interannual nearshore bar behavior, *Journal of Geophysical Research*, Vol.108(C8), 3249, doi:10.1029/2002 JC001505.
- 9) R. D. Shand, D. G. Bailey and M. J. Shepherd (1999): An Inter-site comparison of net offshore bar migration characteristics and environmental conditions, *Journal of Coastal Research*, Vol.15, No.3, pp.750-765.
- 10) H. F. Stockdon, R. A. Holman, P. A. Howd, A. H. Sallenger Jr.(2006) : Empirical parameterization of setup, swash, and runup, *Coastal Engineering* No.53, pp.573-588.
- 11) C. D. Winant, D. L. Inman, and C. E. Nordstrom(1975):Description of seasonal beach change using empirical eigenfunctions, *Journal of Geophysical Research*, Vol.80, No.15, pp.1979-1986.
- 12) K. M. Wijnberg, and J. H. J. Terwindt (1995) : Extracting decadal morphological behavior from high-resolution, long-term bathymetric surveys along the Holland coast using eigenfunction analysis, *Marine Geology*, Vol.26, pp.301-350.
- 13) M. Yuhi (2008): Impacts of anthropogenic modifications of river basin on surrounding coasts: A Case Study, *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering,ASCE*, Vol.134, No.6, pp.336-344.
- 14) M. Yuhi, and M. Okada (2011) : Long-term field observations of multiple bar properties on

n eroding coast, *Journal of Coastal Research*, SI64, pp.860-864.

- 15) 石川県 (2005) : 第 1 回千里浜海岸保全対策検討委員会資料, 50p.
- 16) 石川県土木部河川課・港湾課 (2011) : 第 1 回千里浜再生プロジェクト委員会資料, 33p.
- 17) イカリモンハンミョウ保護対策協議会 (2014) : 平成 25 年度生物多様性保全推進支援事業イカリモンハンミョウ保護対策事業報告書, 55p.
- 18) 石田 啓・高瀬信忠 (1984) : 加越海岸の現況とその侵食対策について, 日本海域研究報告, 第 16 号, pp.77-83.
- 19) 石田 啓・高瀬信忠・長原久克・浦良一 (1984) : 渚ドライブウェイを有する千里浜海岸の現況と侵食対策, 第 31 回海岸工学講演会論文集, pp.355-359.
- 20) 石田 啓・梅下浩樹・長原久克・浦良一 (1985) : 石川県千里浜海浜の侵食状況調査と養浜, 日本海域研究報告, 第 17 号, pp.73-97.
- 21) 上田哲行・宮川泰平・倉知 茜 (2013) : 希少種イカリモンハンミョウの生態解明と保護対策提案, 地域課題研究ゼミナール支援事業成果報告書, pp.1-4.
- 22) 上田哲行・宮川泰平(2014) : 羽咋海岸におけるイカリモンハンミョウの個体数と分布の変動, 平成 25 年度イカリモンハンミョウ保護対策事業報告書, イカリモンハンミョウ保護対策協議会, pp.15-20.
- 23) 上田哲行・宮川泰平・鷺津順平・柳井清治 (2014) : イカリモンハンミョウ生息地の地形変化と個体数の減少, 平成 25 年度イカリモンハンミョウ保護対策事業報告書, イカリモンハンミョウ保護対策協議会, pp.25-39.
- 24) 加藤一正・吉松 晃 (1984) : 三次元の経験的固有関数による深淺図解析法, 港湾技術研究所報告第 23 卷, 第 2 号, pp.27-47.
- 25) 環境省・石川県 (2011) : 平成 23 年度事業実施状況報告.
- 26) 環境省中部地方環境事務所・株式会社環境アセスメントセンター (2011) : 平成 22 年度羽咋海岸自然再生支援追加業務報告書.
- 27) 栗山善昭・伊東啓勝・柳嶋慎一 (2006) : 沿岸砂州の中・長期変動特性及びその影響要因, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.3, pp.294-302.
- 28) 栗山善昭, 友田尚貴 (2006) : 汀線近傍地形の沿岸方向の変動特性, 海岸工学論文集, 第 53 卷, pp.551-555.
- 29) 栗山善昭 (2010) : 沿岸砂州の周期的冲向き移動に関する断面変化モデル, 土木学会論文集 B, Vol.66, No.3, pp.302-320.
- 30) 佐藤 綾・榎戸良裕・堀 道雄 (2004) : 海浜性ハンミョウ類の共存機構と日本列島における歴史, 昆虫と自然 Vol.39, No.14, pp.38-44.
- 31) 佐藤 綾・上田哲行・堀 道雄 (2005) : 打ち上げ海藻を利用する砂浜の小型動物相 : ハンミョウとハマトビムシの関係, 日本生態学会誌 (*Japanese Journal of Ecology*), Vol.55, pp.21-27.
- 32) 佐藤 綾 (2008) : 海辺のハンミョウ(コウチュウ目 : ハンミョウ科) の現状と保全, 保全生態学研究 (*Japanese Journal of Conservation Ecology*), Vol.13,

pp.103-110.

- 33) 砂村継夫 (1980) : 自然海岸における汀線位置の時間的変化に関する予測モデル, 第 27 回海岸工学講演会論文集, pp.255-259.
- 34) 武田一郎 (2003) : バーの段数と後浜上限高度との関係, 地形, 第 24 巻, 第 4 号, pp.407-417.
- 35) 田中知足・由比政年・高山知司・栗山善昭・山田貴裕・石田 啓 (2010) : 金沢港の埋没実態とそのメカニズム, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.66, No.1. pp.451-455.
- 36) 中村聡志・中川康之・桑江朝比呂 (2004) : 沖州海岸におけるルイスハンミョウ幼虫の生息物理条件調査, 海洋開発論文集, 第 20 巻, pp.323-328.
- 37) 西嶋宏介・高川智博・佐藤慎治 (2011) : ポータブルレーザースキャナを用いた高頻度地形計測に基づく海浜土砂移動機構の解明, 土木学会論文集 B2 (海岸工学) Vol.67, No.2, pp. I_666-I_670.
- 38) 早川和宏・由比政年 (2007) : 石川海岸美川地区における沿岸砂州の変動, 日本海域研究, 第 38 号, pp.11-19.
- 39) 早川和宏・由比政年・石田啓 (2009) : 石川県千里浜海岸における沿岸砂州の変動に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第 25 巻, pp.1197-1201.
- 40) 早川和宏, 由比政年, 石田啓 (2009) : 石川県千里浜海岸における海浜地形変化に関する基礎的研究, 海洋開発論文集, 第 55 巻, pp.596-600.
- 41) 藤原理江 (2014) : 柴垣・甘田海岸における波浪・地形変動とハンミョウ生態環境の関連についての基礎的研究, 平成 25 年度金沢大学学士学位論文, 63p.
- 42) 堀 道雄 (2014) : 石川県羽咋海岸のイカリモンハンミョウ個体群の有効集団サイズ, 平成 25 年度イカリモンハンミョウ保護対策事業報告書, イカリモンハンミョウ保護対策協議会, pp.21-23.
- 43) 松山正之・由比政年・石田啓 (2012) : 北部加越海岸における海浜変動の沿岸方向変化に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.68, No.4, pp.I_600-I_605.
- 44) 柳井清二・鷺津順平 (2014) : 石川県外浦地方における海岸侵食の実態解明, 平成 25 年度イカリモンハンミョウ保護対策事業報告書, pp.41-55.
- 45) 由比政年・石田 啓・山田文雄 (2005) : 手取川河口周辺における海底地形の長期変動に対する河川土砂管理の影響, 海岸工学論文集, 第 52 巻, pp.616-620.
- 46) 由比政年・山田文彦・榎田真也・石田 啓 (2006) : 石川海岸松任地区における沿岸砂州の長期変動特性, 海岸工学論文集, 第 53 巻, pp.566-570.
- 47) 由比政年・榎田真也・早川和宏・川島弘靖・浦貴暁・石田啓 (2010) : 千里浜海岸における海浜変動の基本特性に関する研究, 海岸工学論文集, 第 57 巻, pp.561-565.
- 48) 由比政年 (2013) : 石川海岸における沿岸砂州の形成・移動・消失に関する長期変動解析, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_641-I_645.
- 49) 由比政年・松山正之 (2013) : 千里浜海岸周辺における砂州の周期移動特性とそ

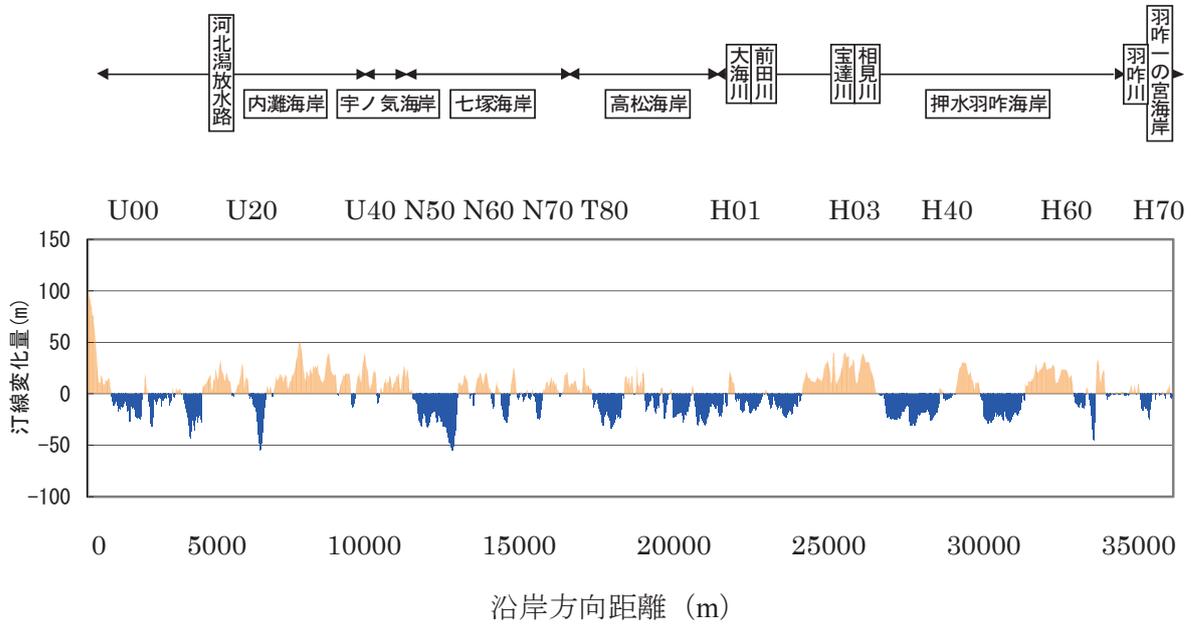
- の沿岸方向変化, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_656-I_660.
- 50) 由比政年・渡部雅也・吉崎平太・松山正之・黒崎弘司 (2014): 石川県内灘海岸における汀線変動とリズムック地形の形状特性に関する基礎的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol.70, No.2, pp.I_672-I_677.
- 51) 渡辺雅子・大塚弘之・上月康則・大田直友・河井 崇・萬宮竜典・岡田直也・中野晋 (2012): 希少種ルイスハンミョウを対象とした海浜ミチゲーションと官学民協働による維持管理の重要性, 土木学会論文集 B2 (海洋開発), Vol.68, No.2, pp.I_1233-I_1237.
- 52) 渡辺雅子・上月康則・野上文子・河井 崇・披田 毅・大塚弘之 (2013): 人工海浜におけるルイスハンミョウの分布に対する植生と標高の影響, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol.69, No.2, pp.I_1246-I_1250.

Appendix

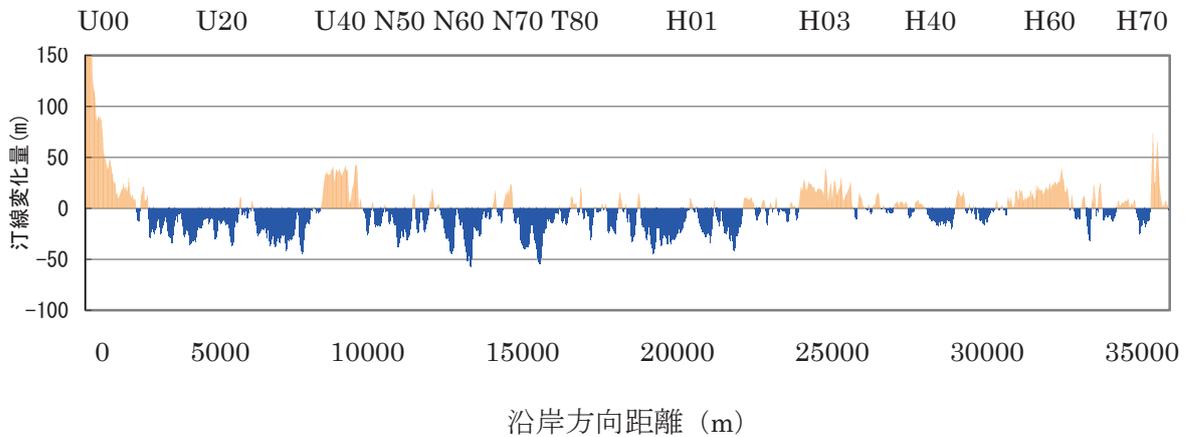
Appendix-1	全年代の 1967 年基準の汀線変動	100
	(石川県千里浜海岸保全対策検討委員会, 2007 年データを基に作成)	
Appendix-2	全測線の深浅測量データを基にした断面地形変動	103
	(a) 地形変動	
	(b) 最高・最低・平均地盤高	
	(c) 変動標準偏差	
	(d) 地盤高変化率	
Appendix-3	全測線の EOF 解析結果	114
	(a) 空間関数 e	
	(b) 時間関数 C_1	
	(c) 時間関数 C_2, C_3	
Appendix-4	全測線の砂州経年変動	125
Appendix-5	全観測年の砂州平面形状変動	129

Appendix-1 全年代の1967年基準の汀線変動

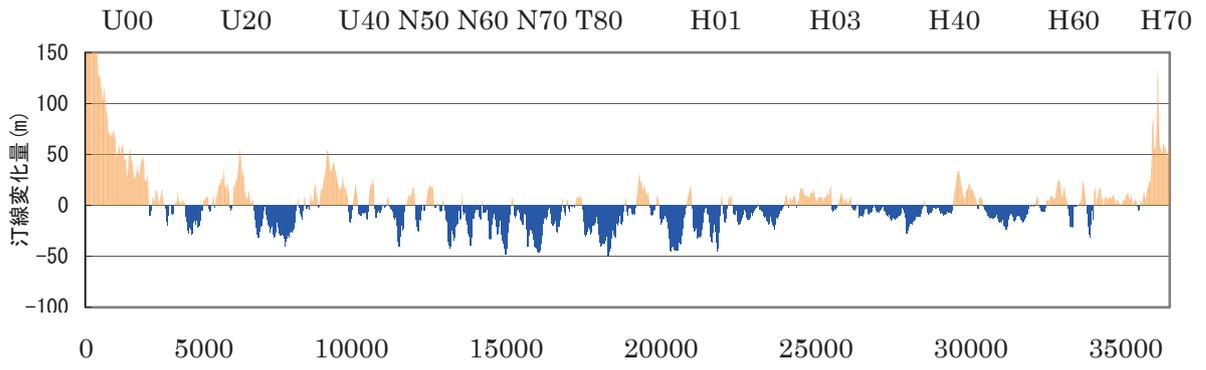
(石川県千里浜海岸保全対策検討委員会, 2007年データを基に作成)



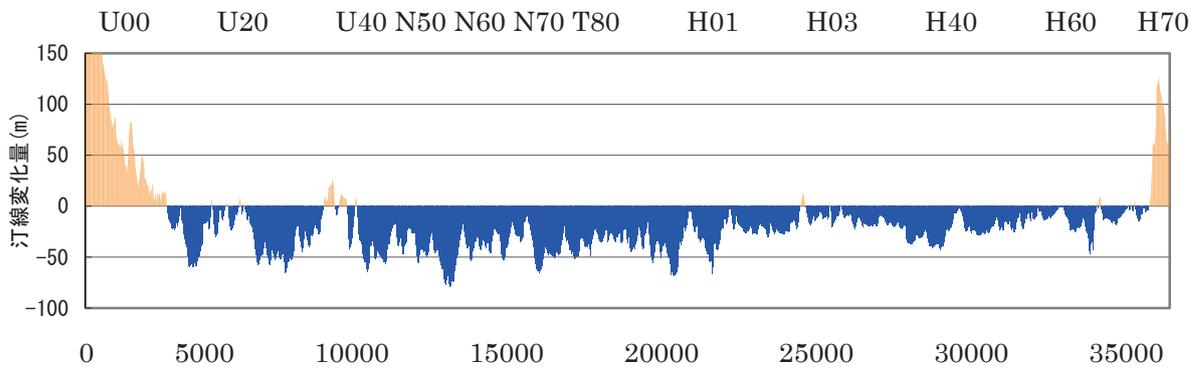
(a) 1975年



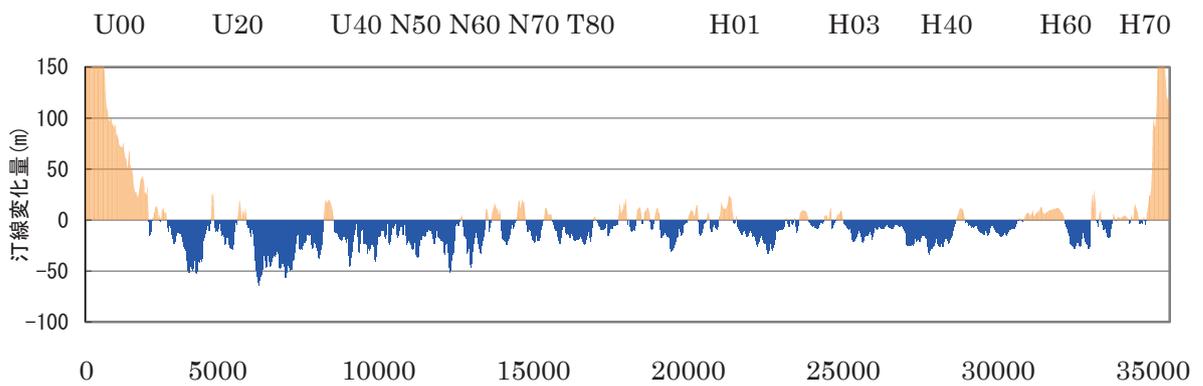
(b) 1987年



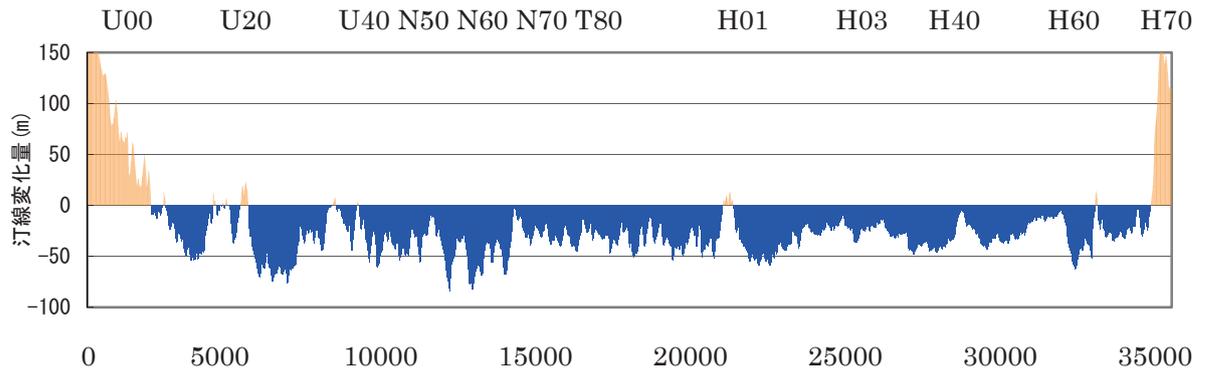
沿岸方向距離 (m)
(c) 1992 年



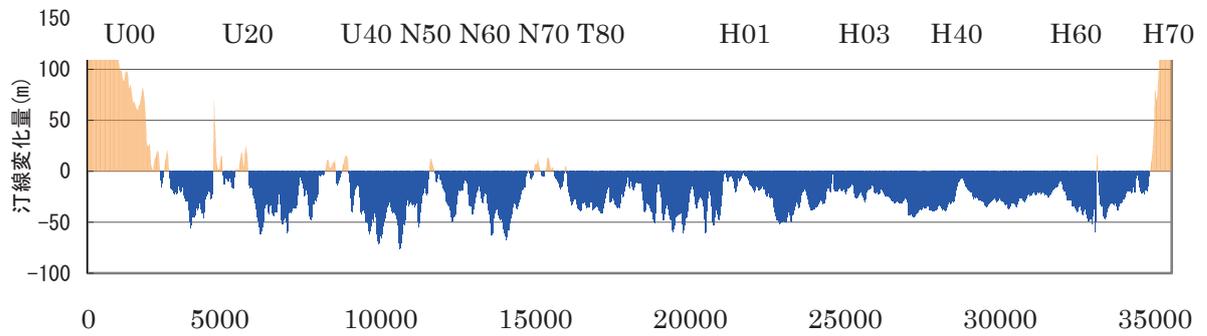
沿岸方向距離 (m)
(d) 1998 年



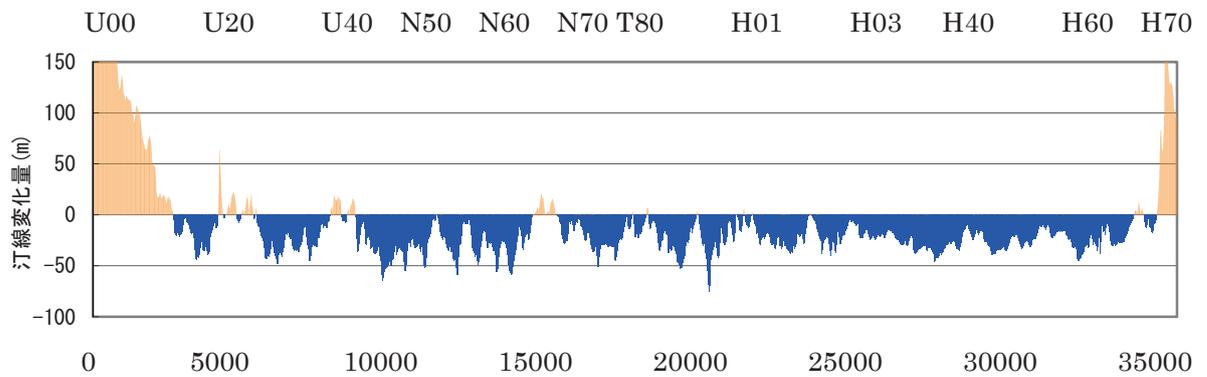
沿岸方向距離 (m)
(e) 2002 年



沿岸方向距離 (m)
(f)2003 年



沿岸方向距離 (m)
(g)2009 年



沿岸方向距離 (m)
(h)2010 年

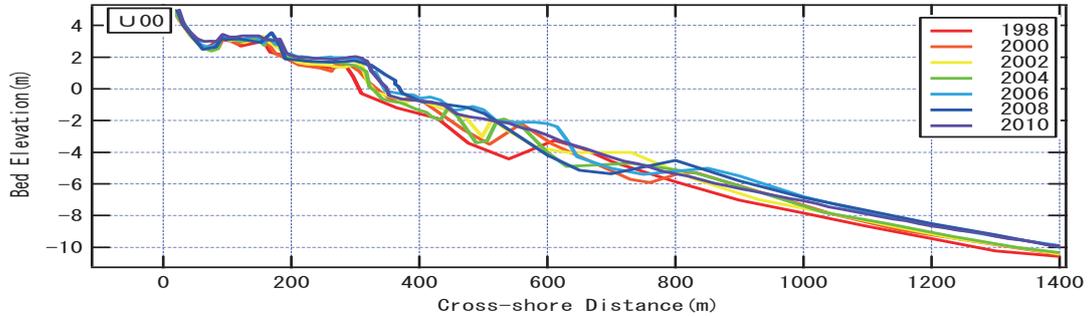
図 A1 全年代の 1967 年基準の汀線経年変動

Appendix-2 全測線の深浅測量データを基にした断面地形変動

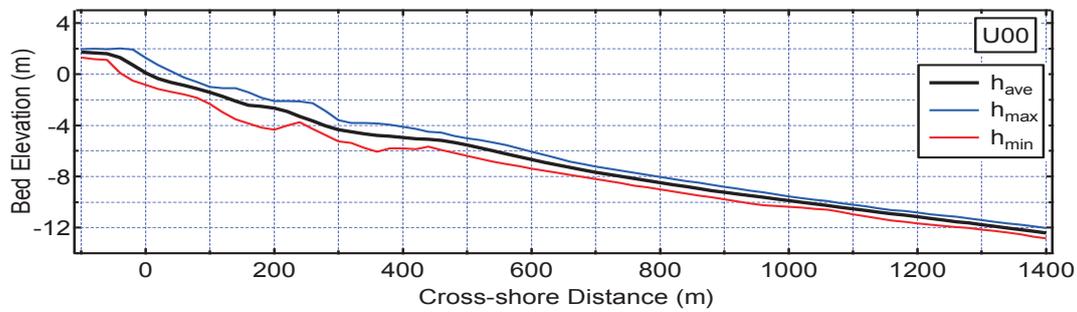
(a) 地形変動 (b)最高・最低・平均地盤高 (c)変動標準偏差 (d)地盤高変化率

(a)は測量基点 (b)-(c)は平均汀線位置を基準として離岸距離を表示している

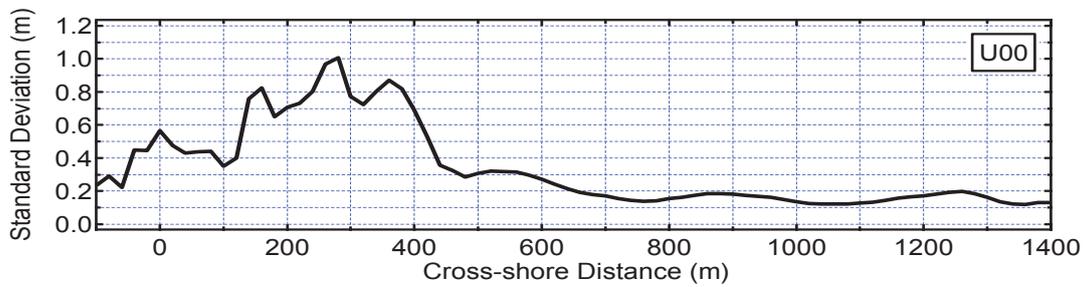
(1) 測線 U00



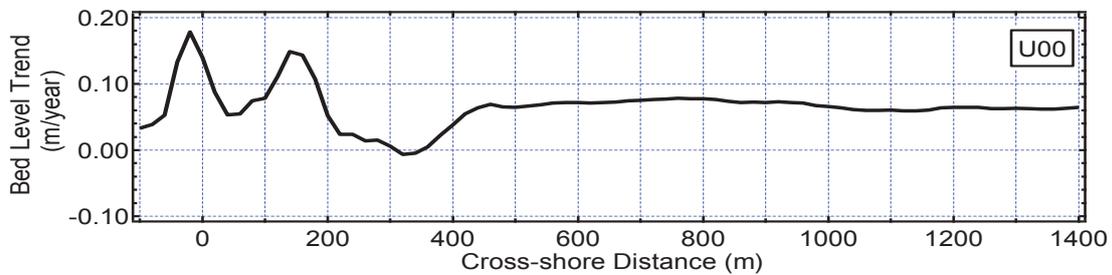
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



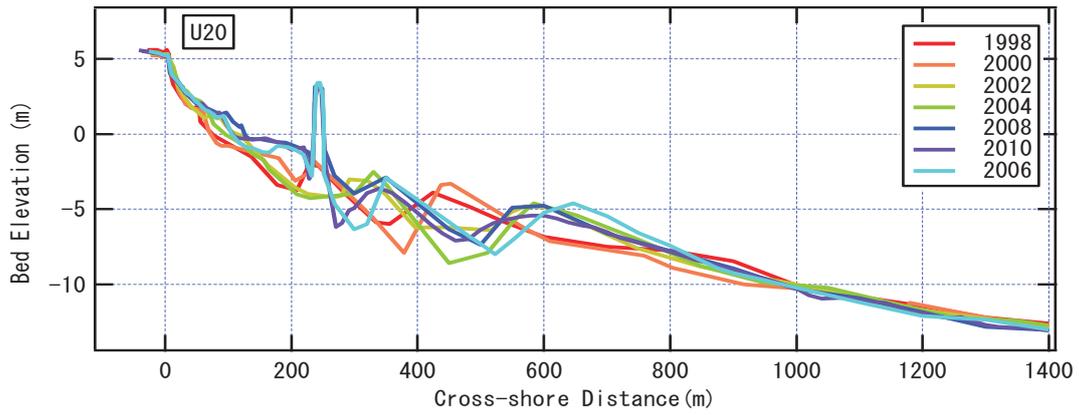
(c) 変動標準偏差



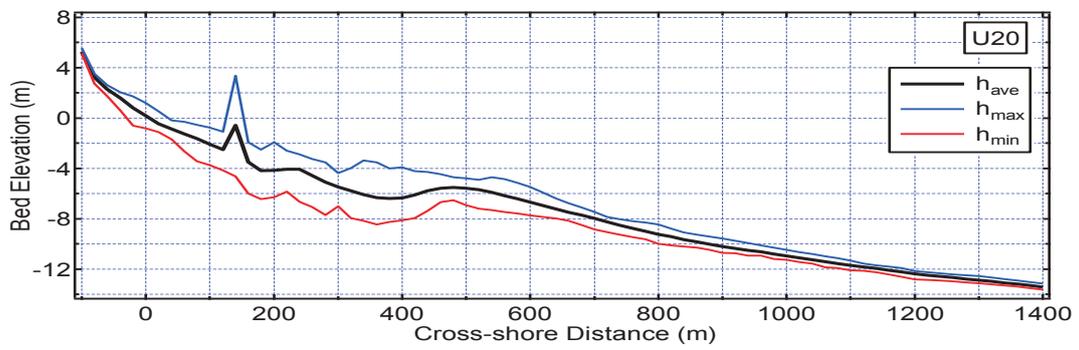
(d) 地盤高変化率

図 A2-1 深浅測量データを基にした断面地形変動 (測線 U00)

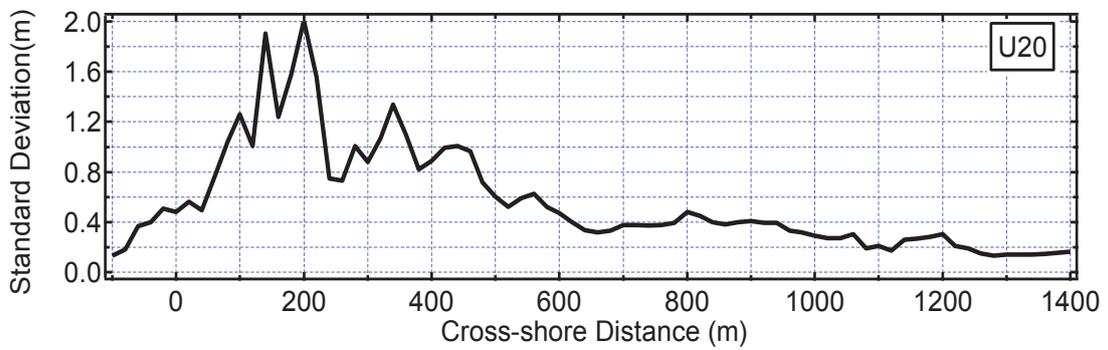
(2) 測線 U20



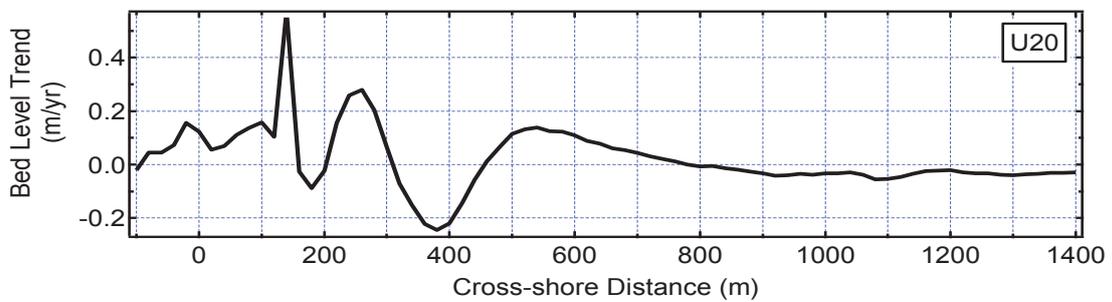
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



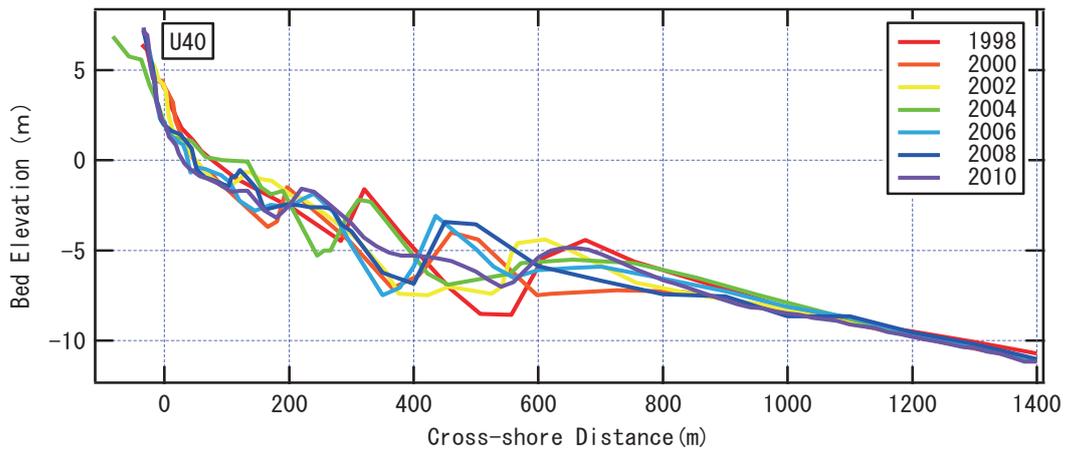
(c) 変動標準偏差



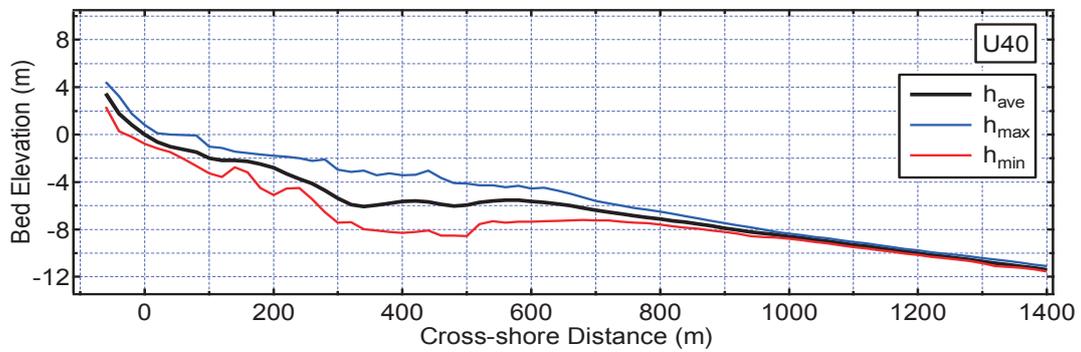
(d) 地盤高変化率

図 A2-2 深浅測量データを基にした断面地形変動 (測線 U20)

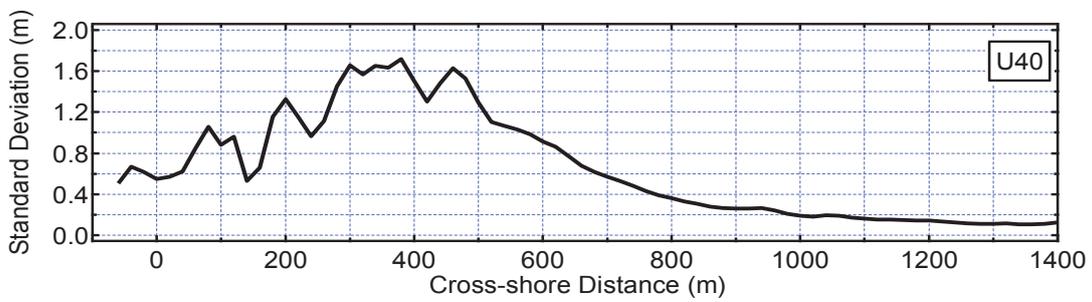
(3) 測線 U40



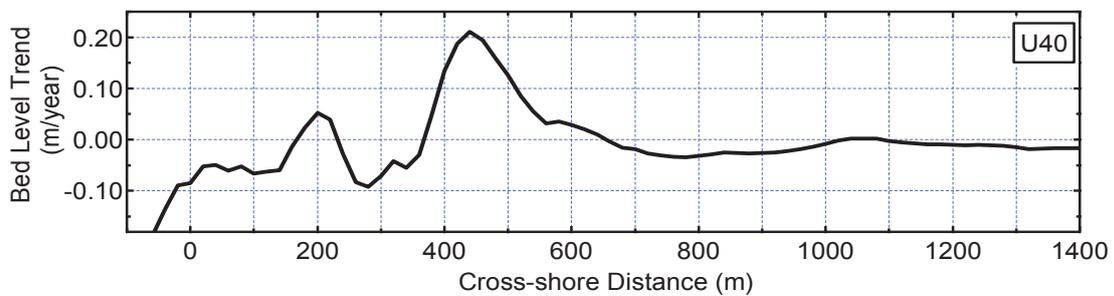
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



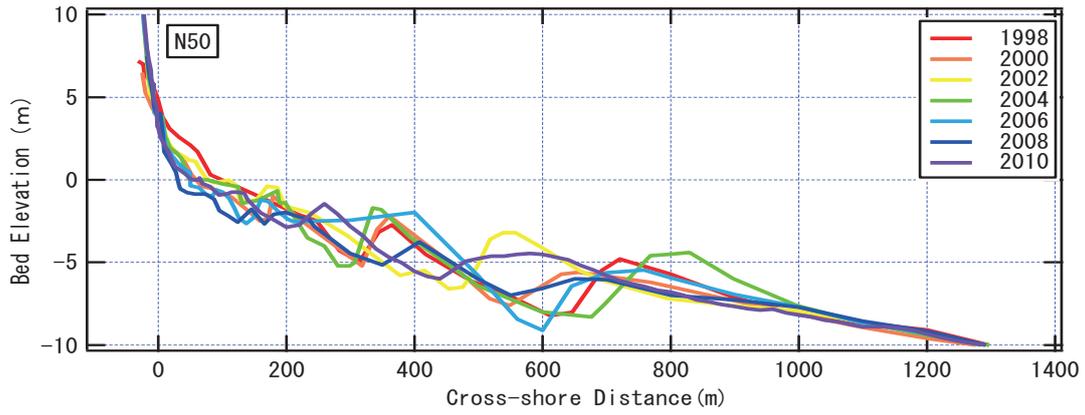
(c) 変動標準偏差



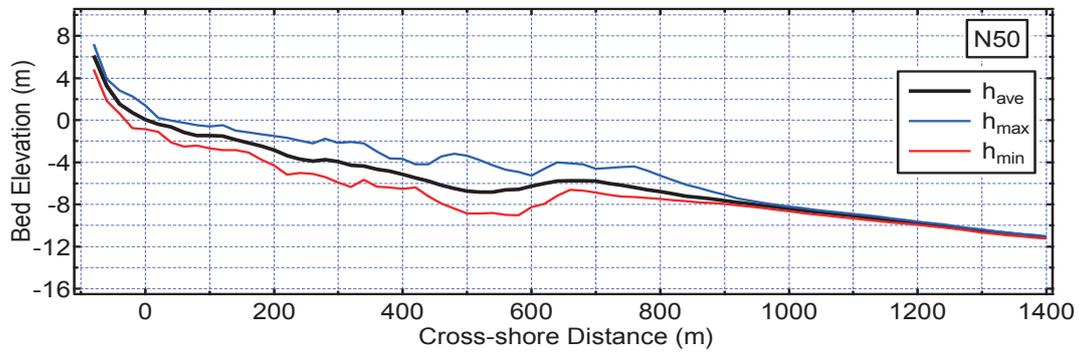
(d) 地盤高変化率

図 A2-3 深浅測量データを基にした断面地形変動 (測線 U40)

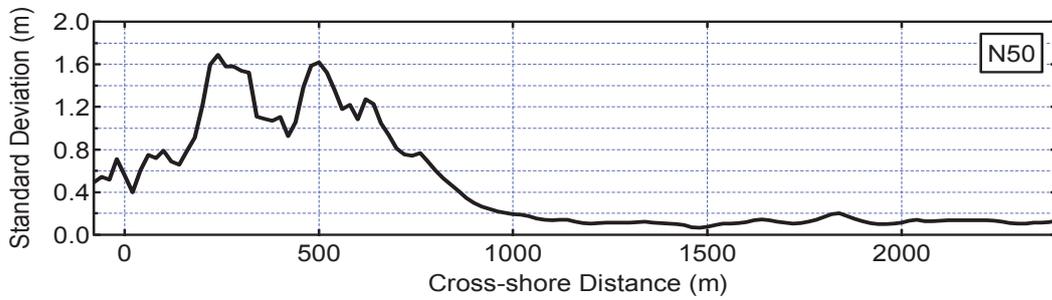
(4) 測線 N50



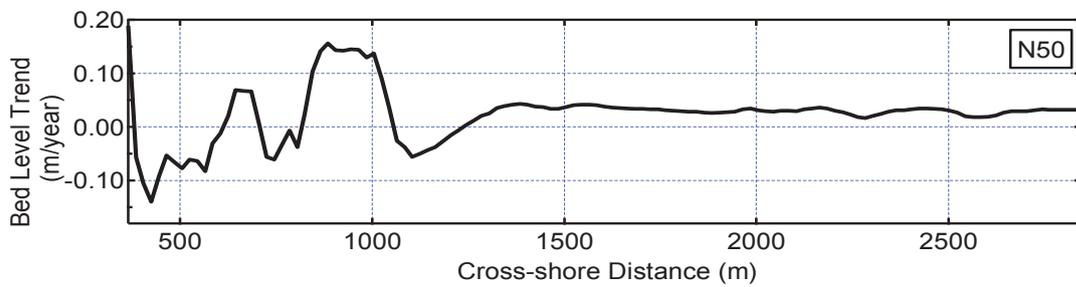
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



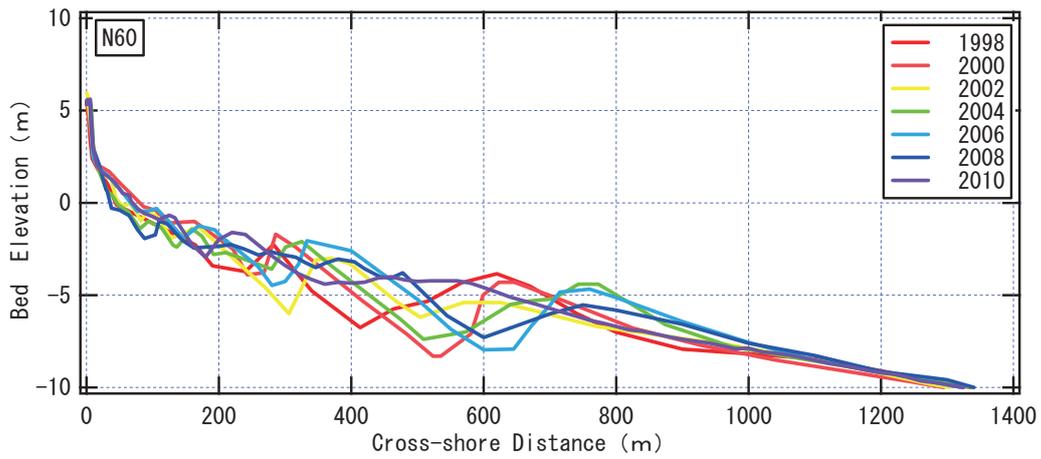
(c) 変動標準偏差



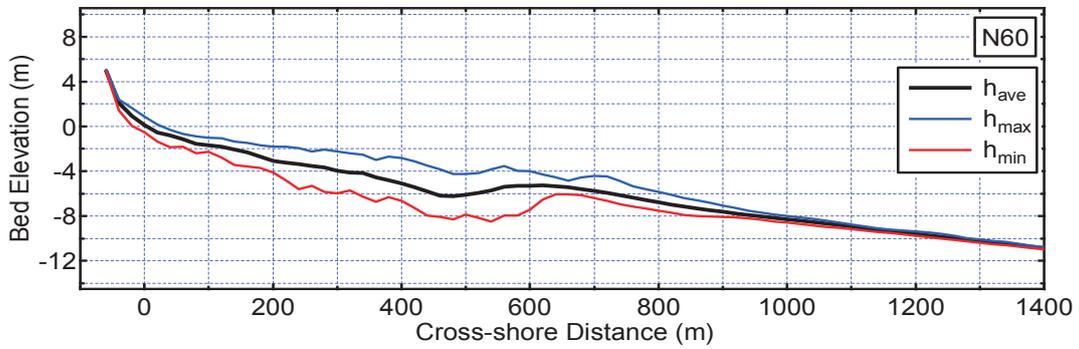
(d) 変動標準偏差率

図 A2-4 深浅測量データを基にした断面地形変動 (測線 N50)

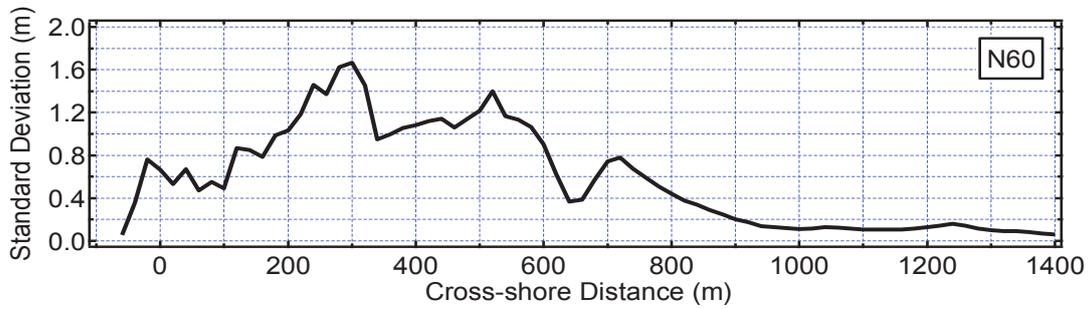
(5) 測線 N60



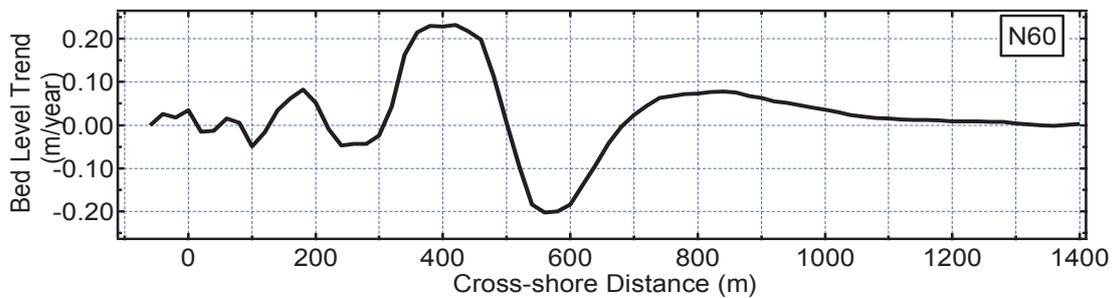
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



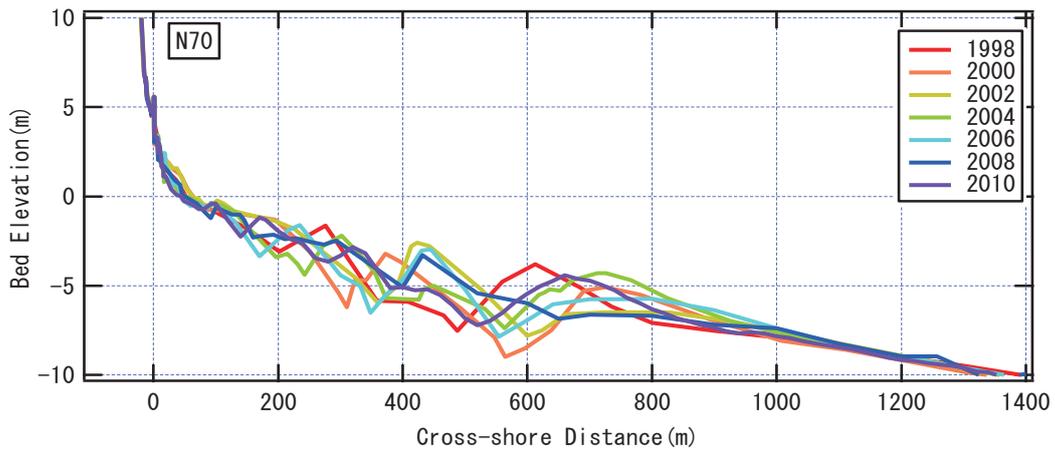
(c) 変動標準偏差



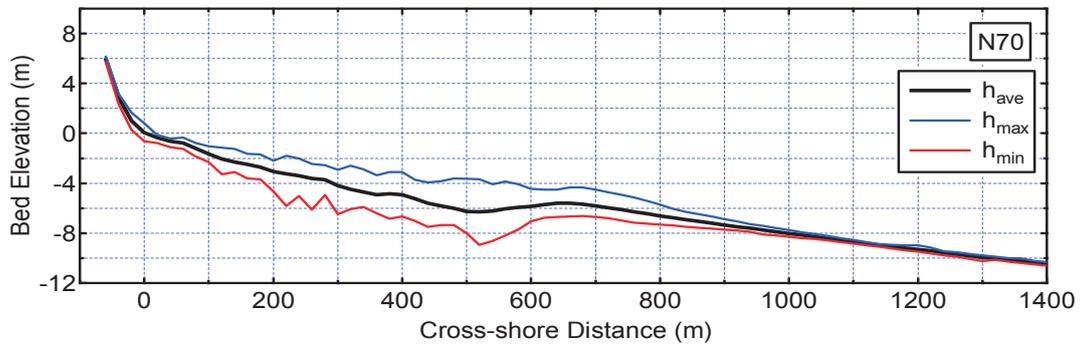
(d) 地盤高変化率

図 A2-5 深浅測量データを基にした断面地形変動 (測線 N60)

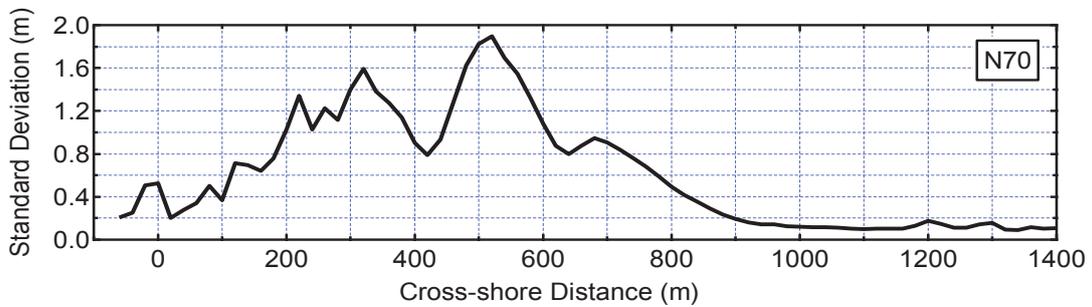
(6) 測線 N70



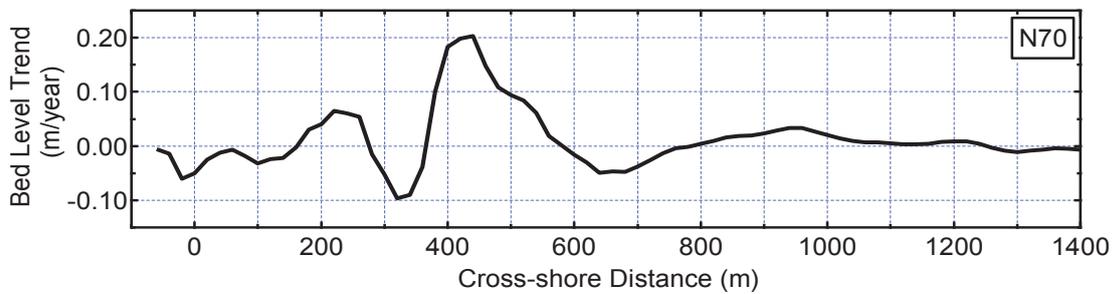
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



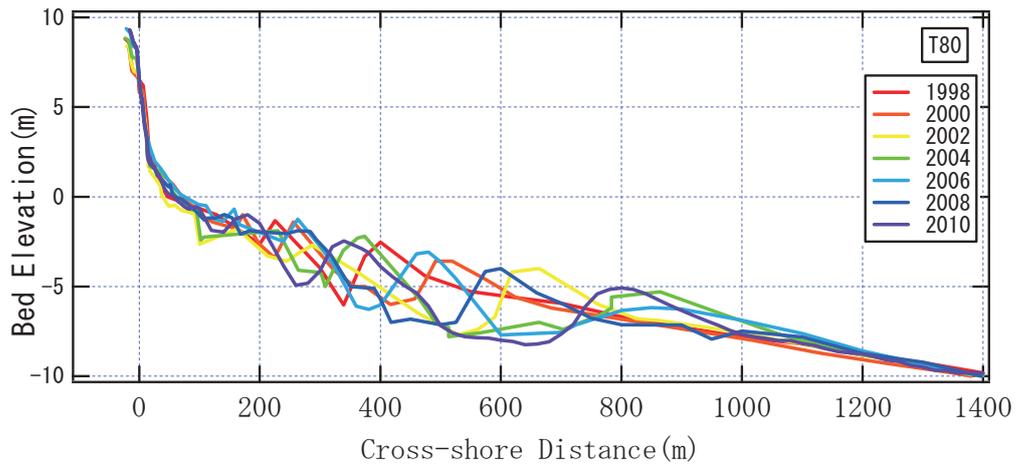
(c) 変動標準偏差



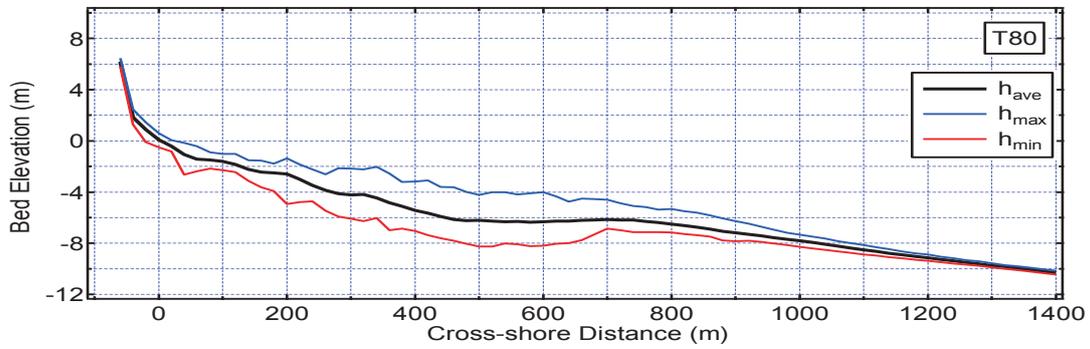
(d) 地盤高変化率

図 A2-6 深浅測量データを基にした断面地形変動 (測線 N70)

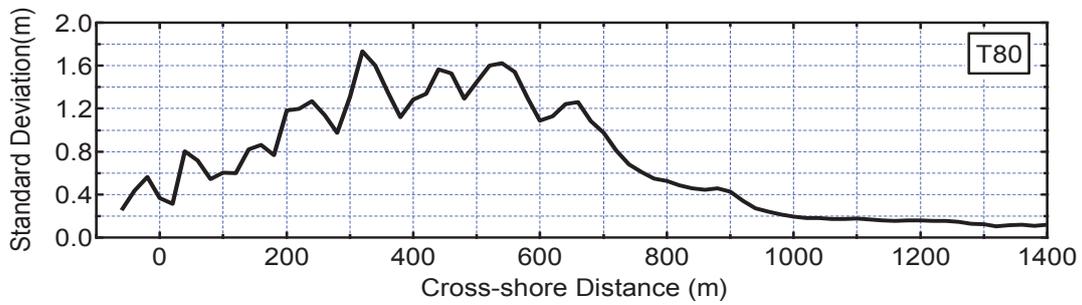
(7) 測線 T80



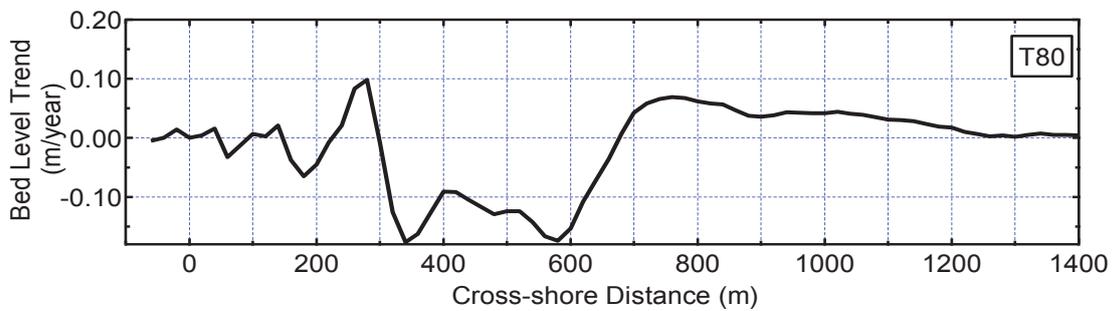
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



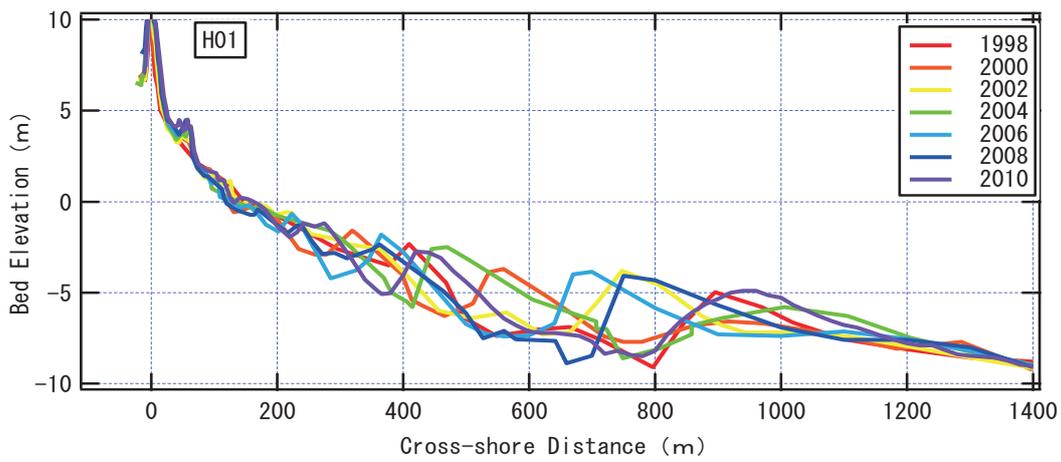
(c) 変動標準偏差



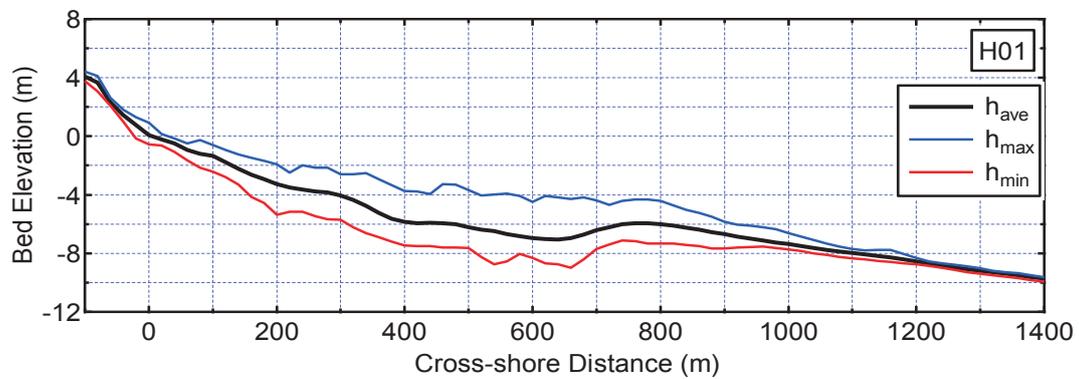
(d) 地盤高変化率

図 A2-7 深浅測量データを基にした断面地形変動 (測線 T80)

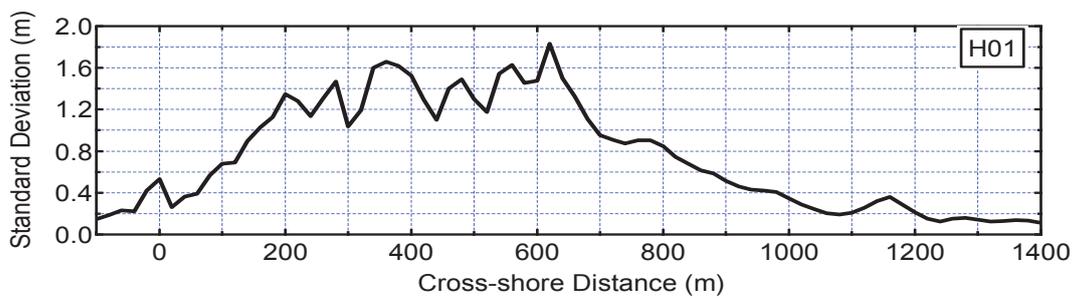
(8) 測線 H01



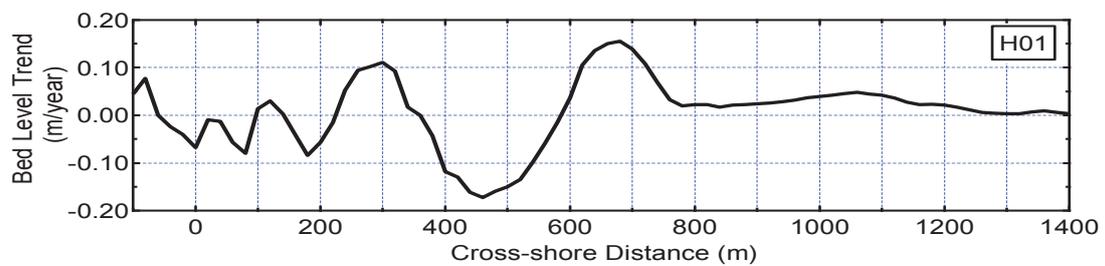
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



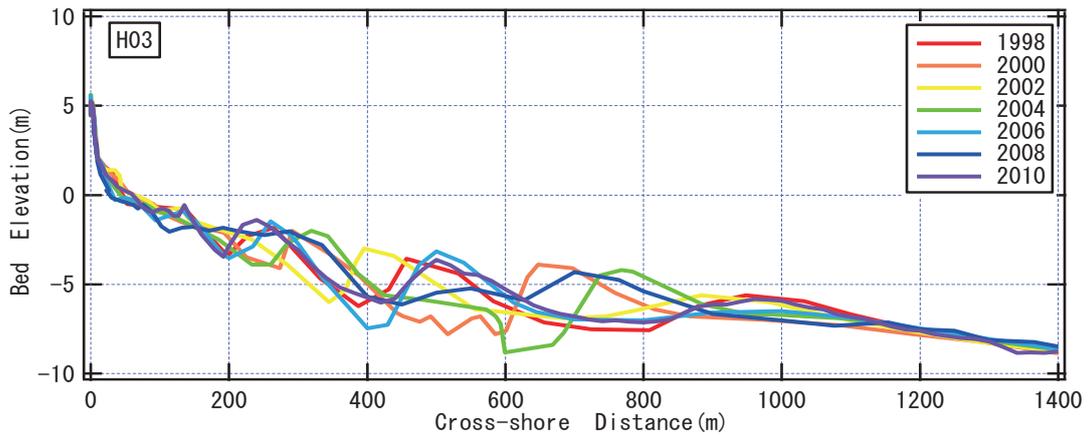
(c) 変動標準偏差



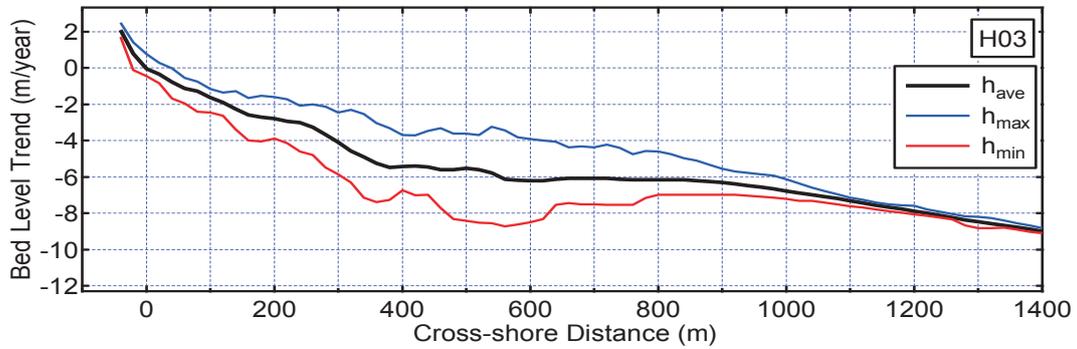
(d) 地盤高変化率

図 A2-8 深浅測量データを基にした断面地形変動 (測線 H01)

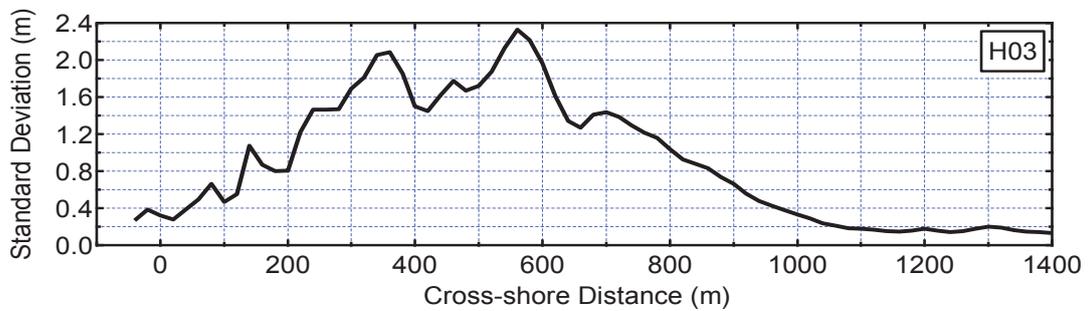
(9) 測線 H03



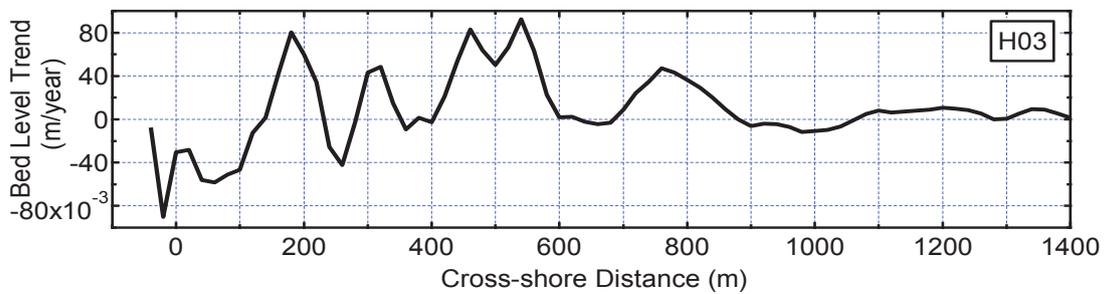
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



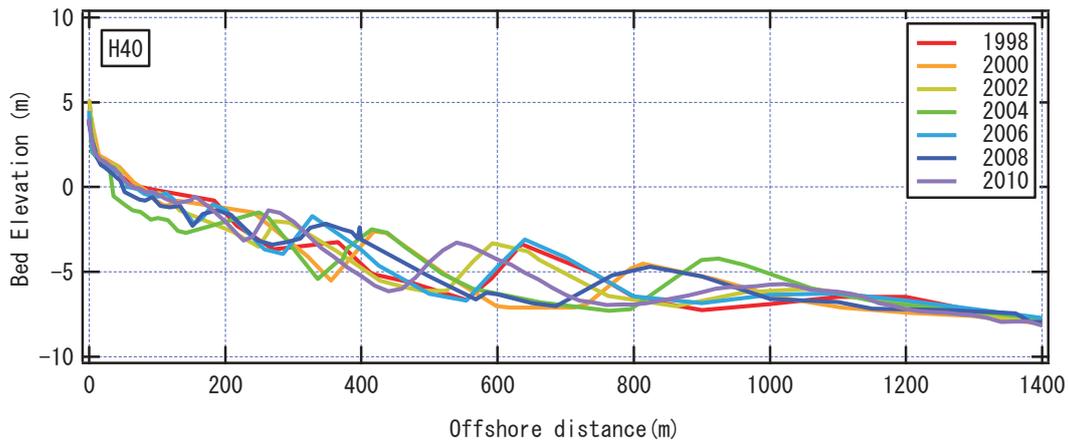
(c) 変動標準偏差



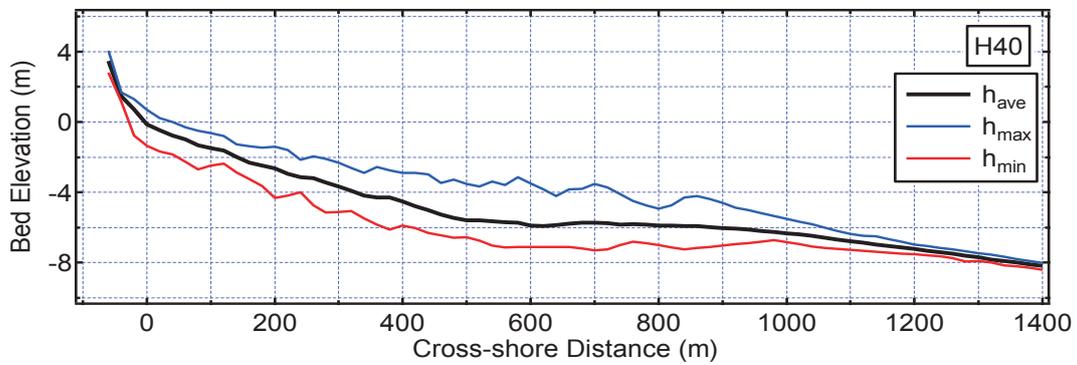
(d) 地盤高変化率

図 A2-9 深浅測量データを基にした断面地形変動 (測線 H03)

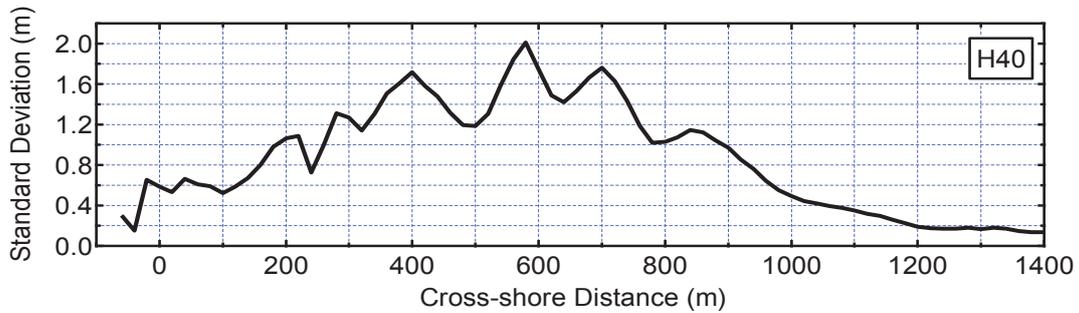
(10) 測線 H40



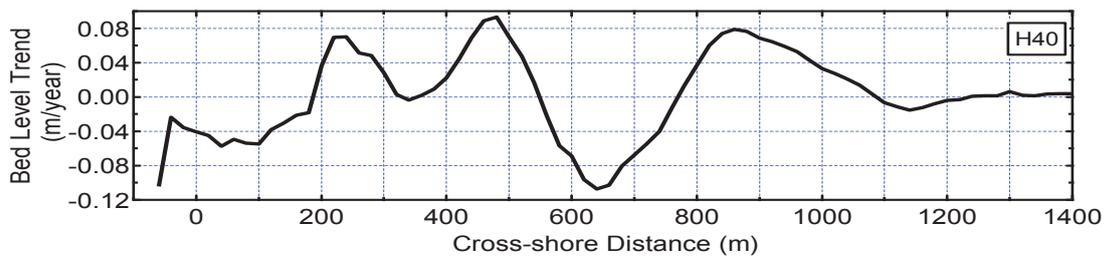
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



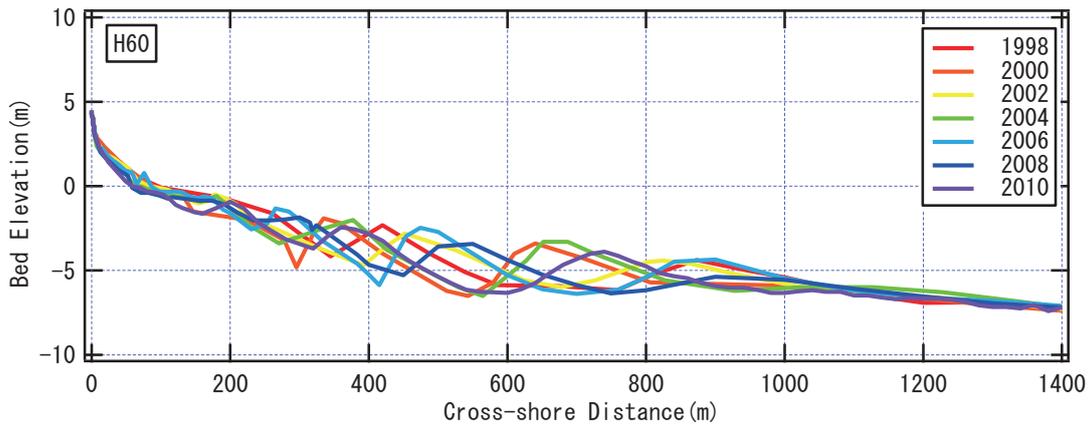
(c) 変動標準偏差



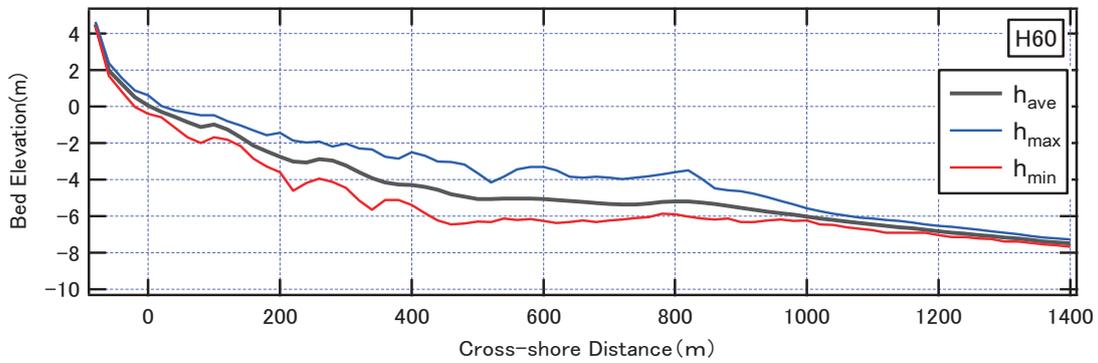
(d) 地盤高変化率

図 A2-10 深浅測量データに基づいた断面地形変動 (測線 H40)

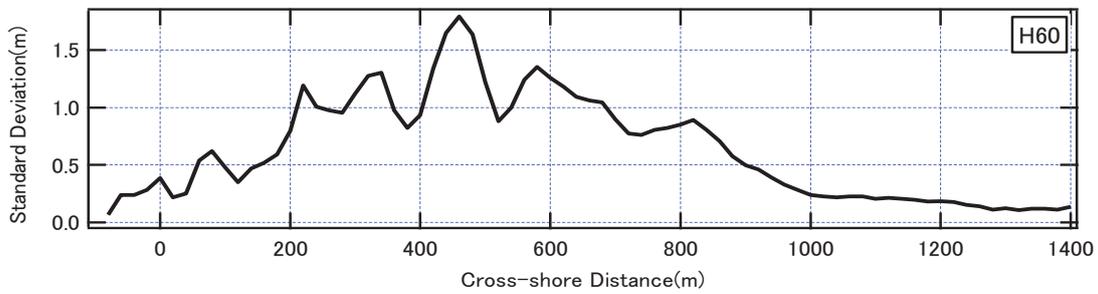
(11) 測線 H60



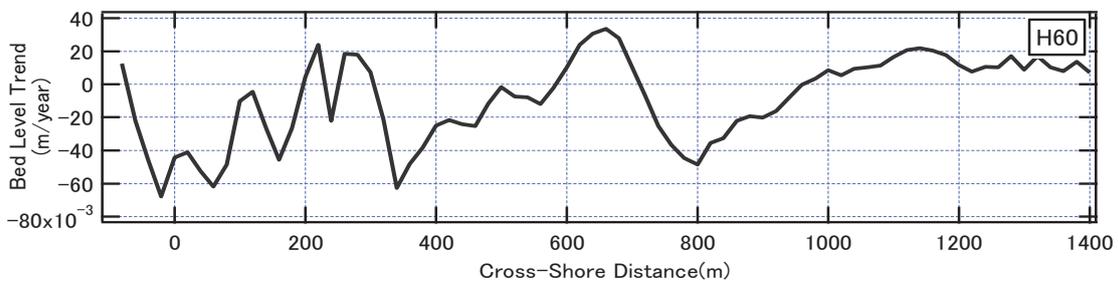
(a) 地形変動



(b) 最高・最低・平均地盤高



(c) 変動標準偏差

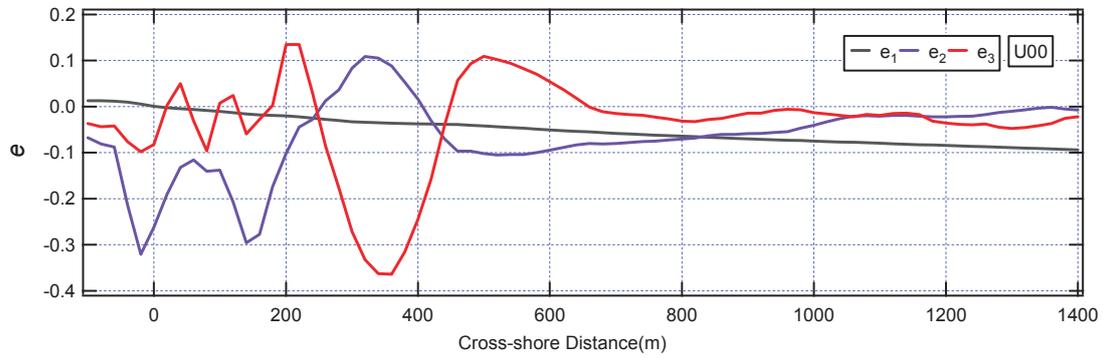


(d) 地盤高変化率

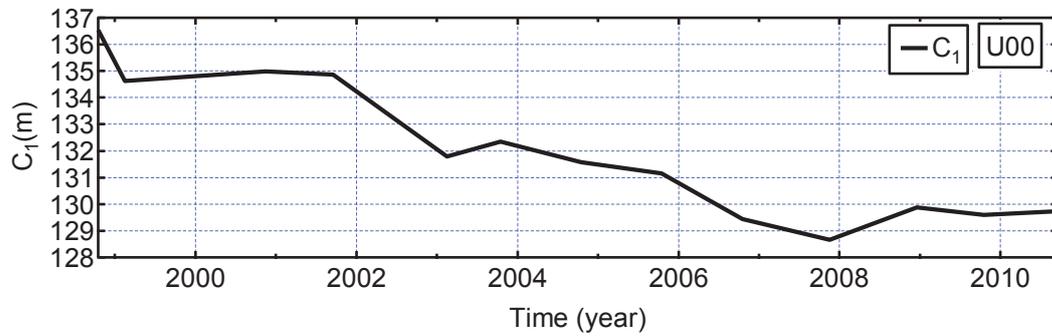
図 A2-11 深浅測量データを基にした断面地形変動 (測線 H60)

Appendix-3 全測線の EOF 解析結果

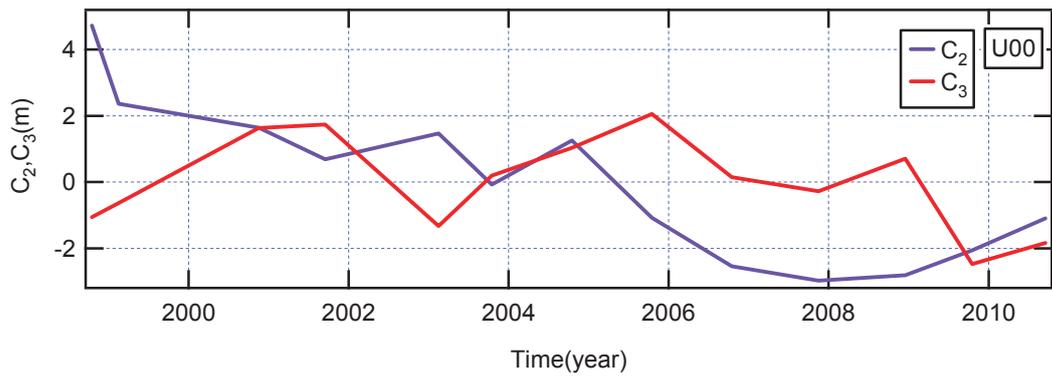
(1) 測線 U00



(a) 空間関数 e



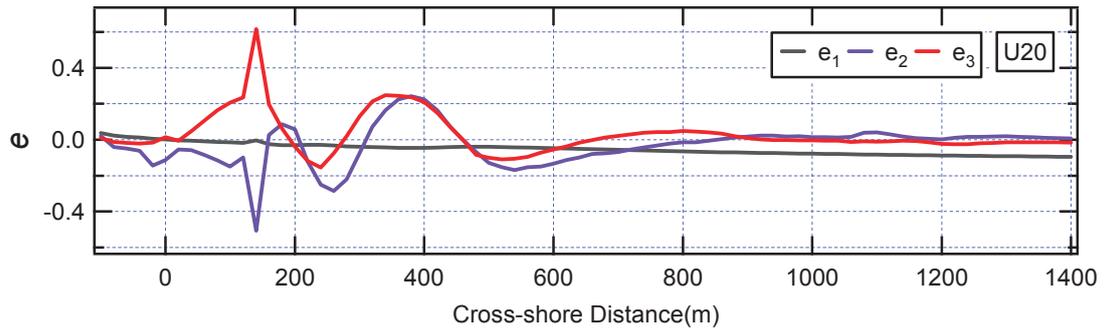
(b) 時間関数 C_1



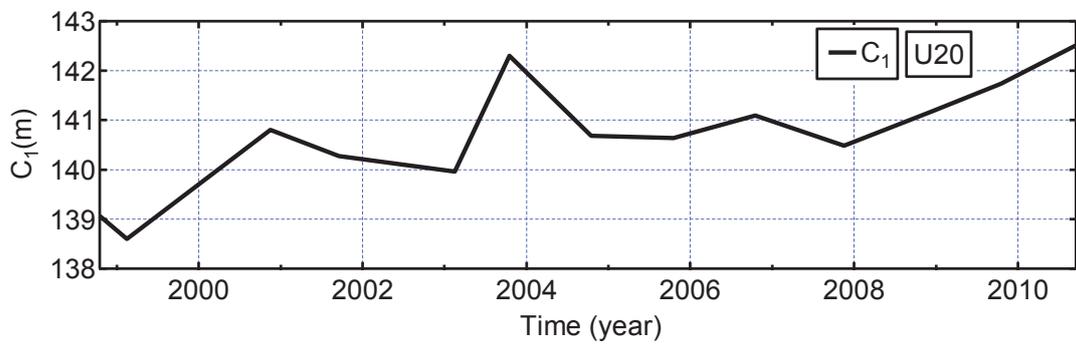
(c) 時間関数 C_2, C_3

図 A3-1 EOF 解析結果 (測線 U00)

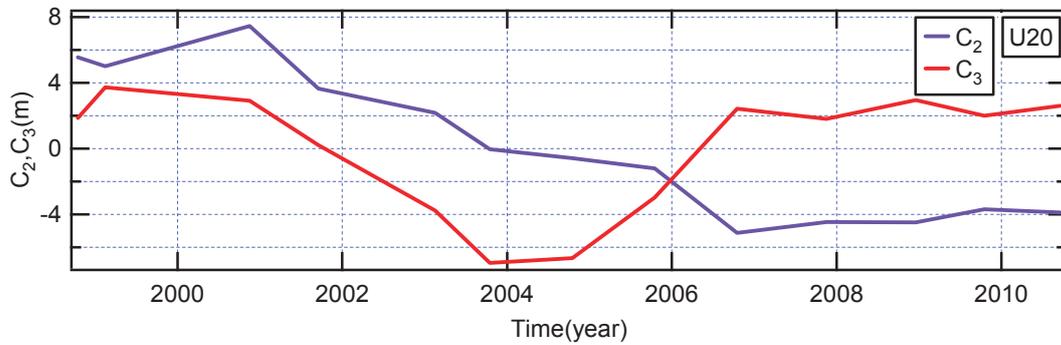
(2) 測線 U20



(a) 空間関数 e



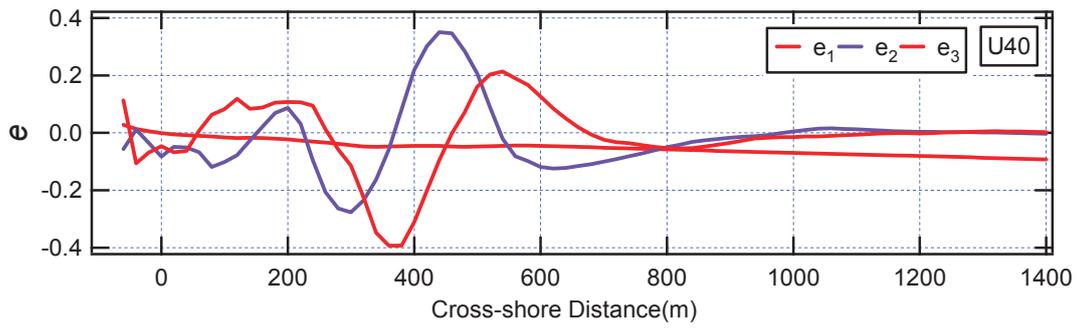
(b) 時間関数 C_1



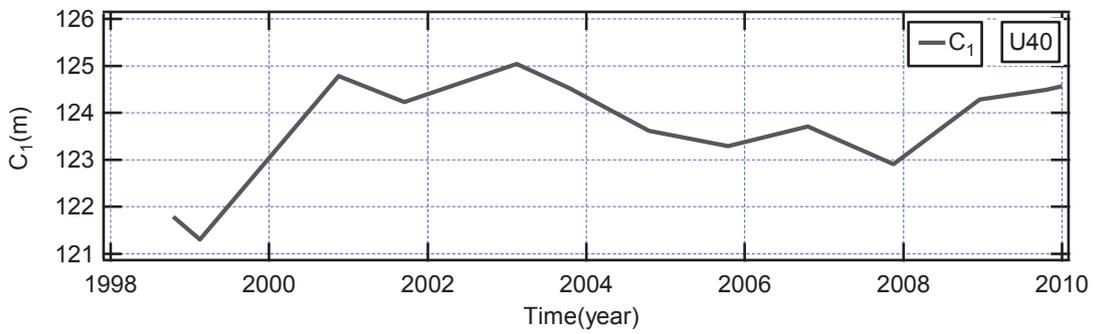
(c) 時間関数 C_2, C_3

図 A3-2 EOF 解析結果 (測線 U20)

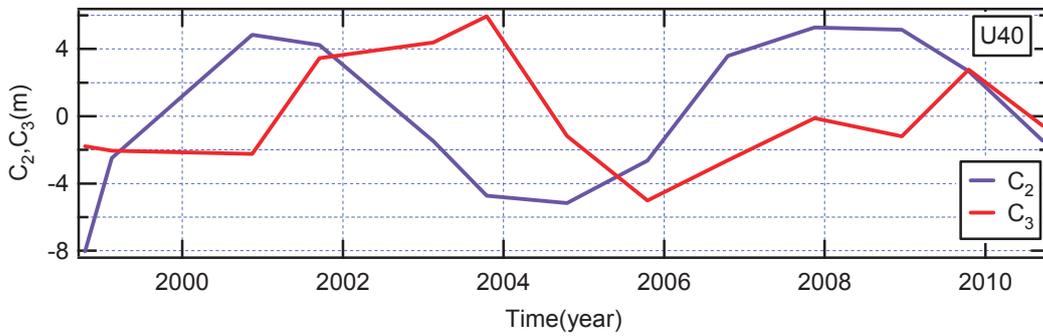
(3) 測線 U40



(a) 空間関数 e



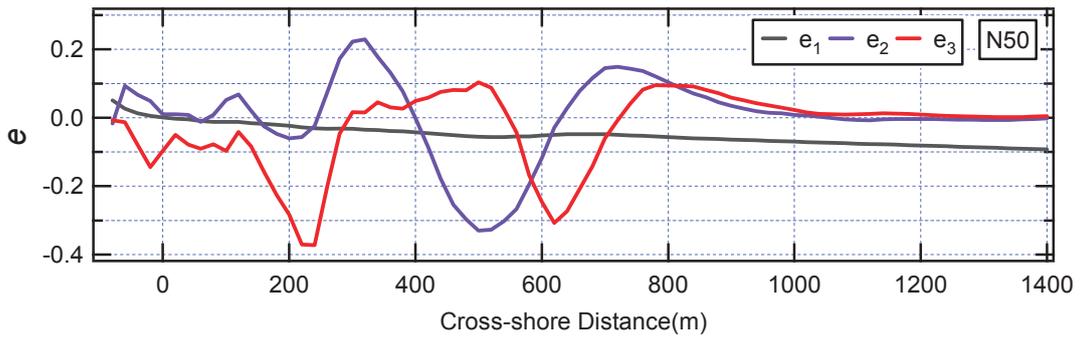
(b) 時間関数 C_1



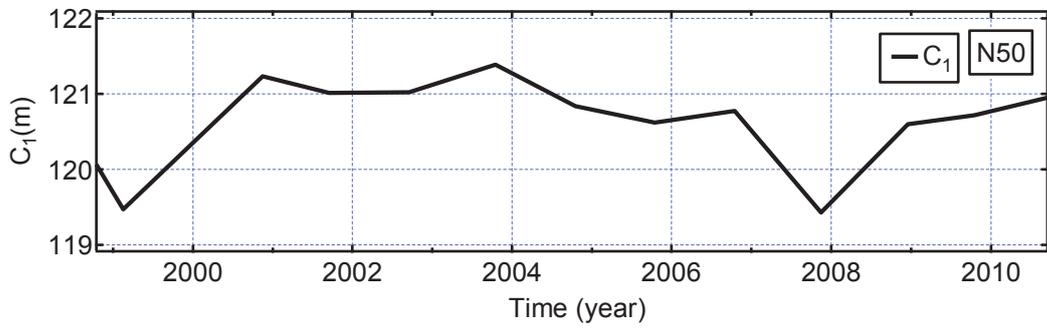
(c) 時間関数 C_2, C_3

図 A3-3 EOF 解析結果 (測線 U40)

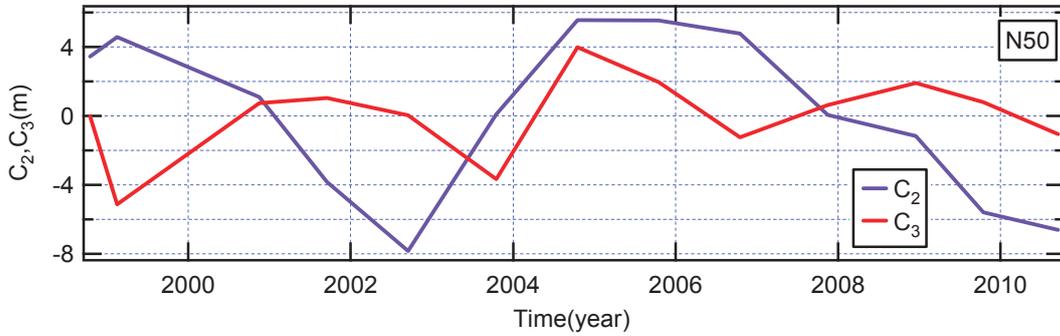
(4) 測線 N50



(a) 空間関数 e



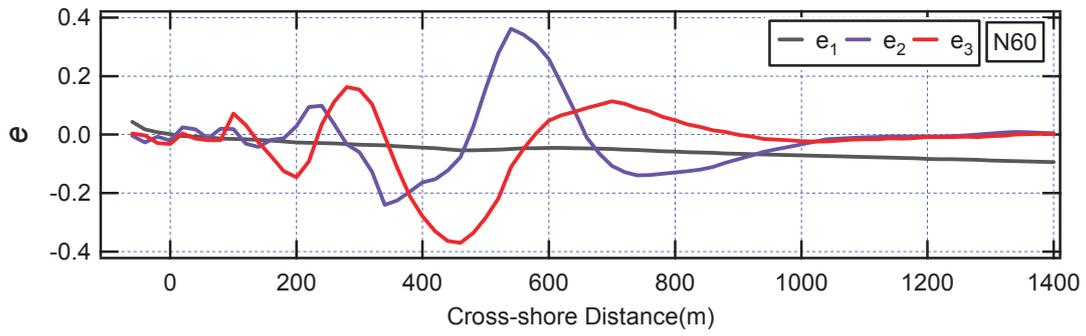
(b) 時間関数 C_1



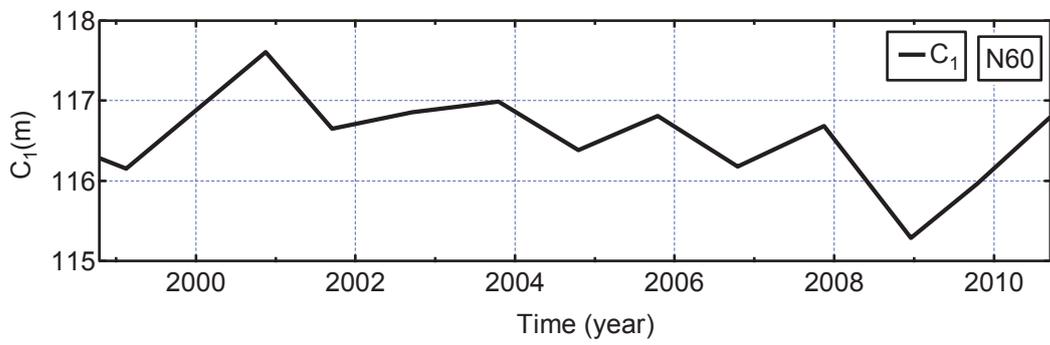
(c) 時間関数 C_2, C_3

図 A3-4 EOF 解析結果 (測線 N50)

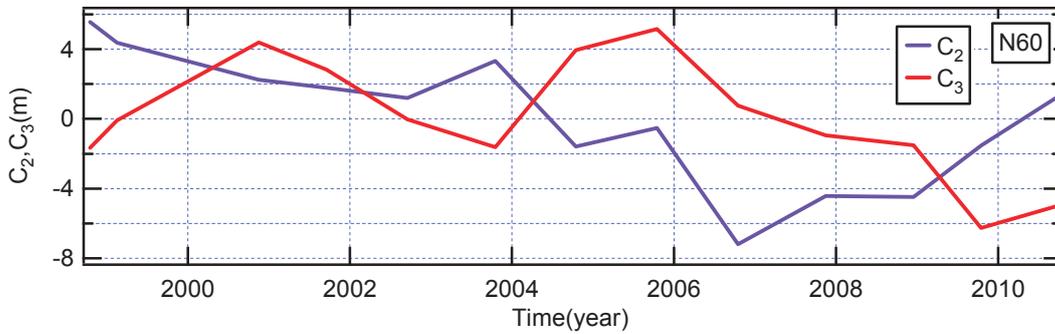
(5) 測線 N60



(a) 空間関数 e



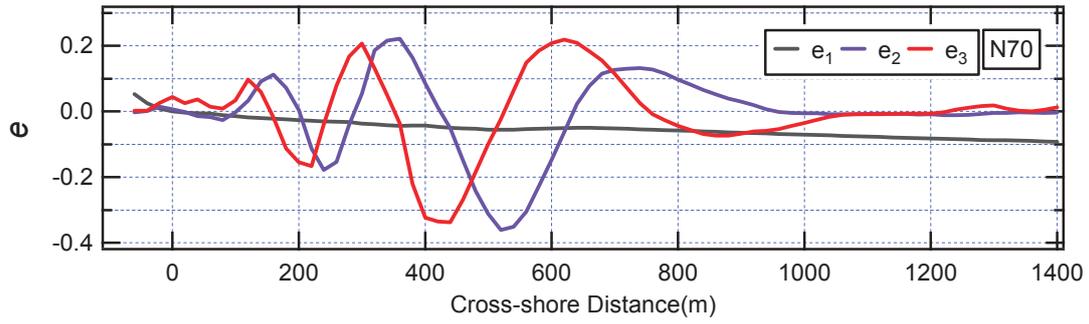
(b) 時間関数 C_1



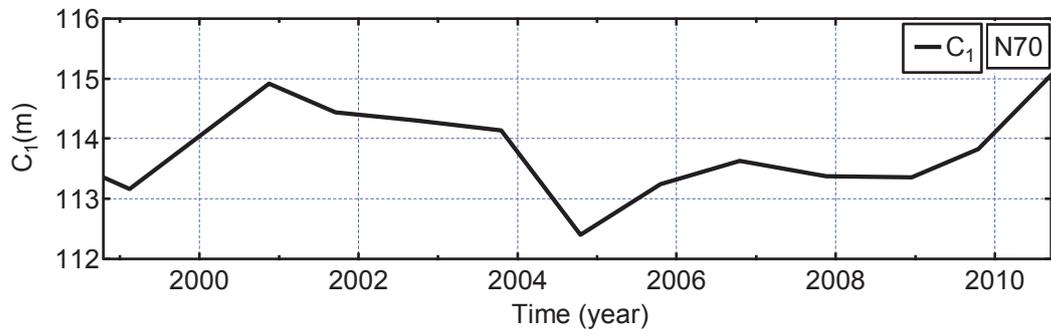
(c) 時間関数 C_2, C_3

図 A3-5 EOF 解析結果 (測線 N60)

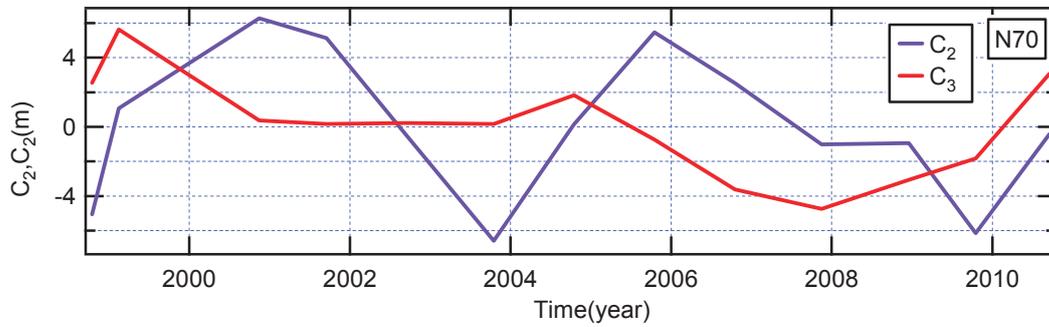
(6) 測線 N70



(a) 空間関数 e



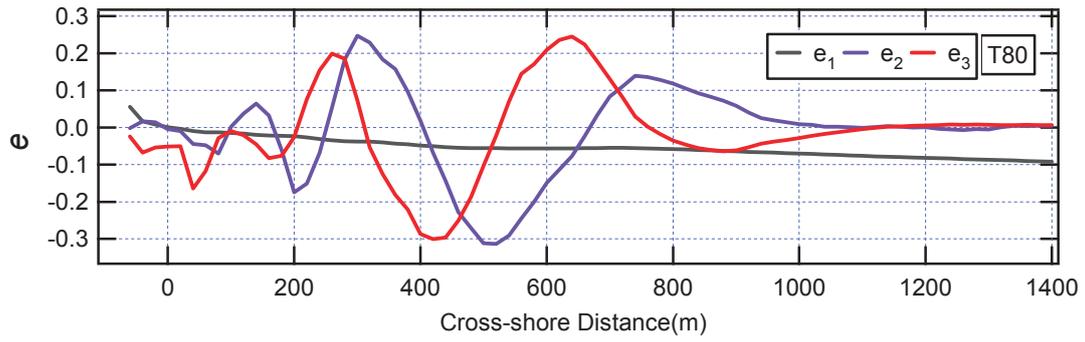
(b) 時間関数 C_1



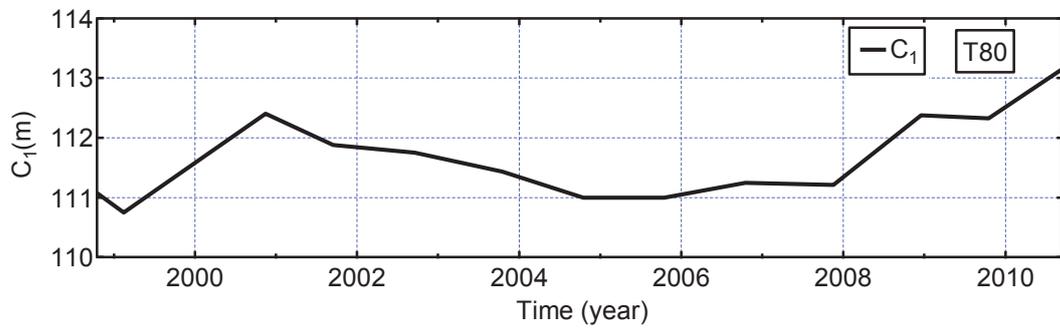
(c) 時間関数 C_2, C_3

図 A3-6 EOF 解析結果 (測線 N70)

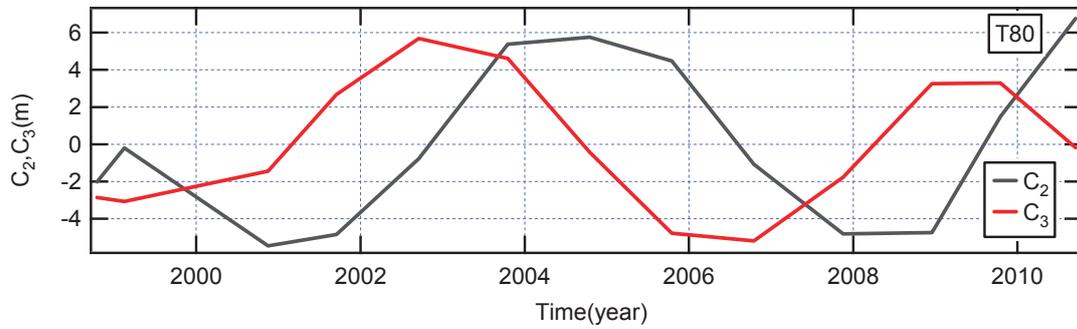
(7) 測線 T80



(a) 空間関数 e



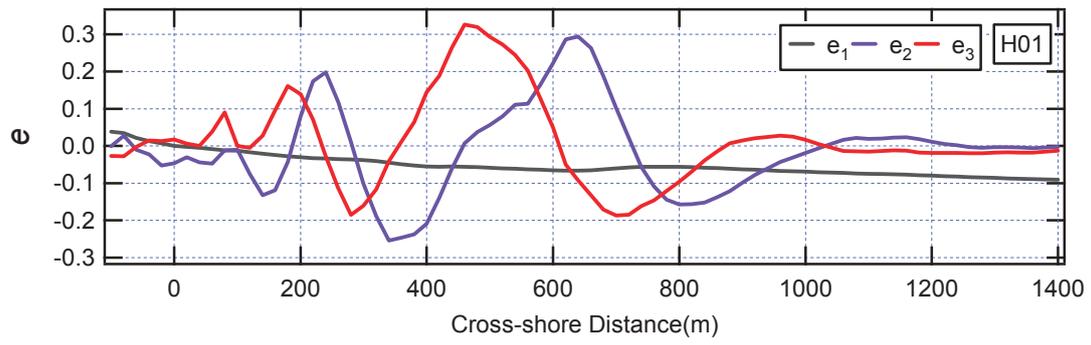
(b) 時間関数 C_1



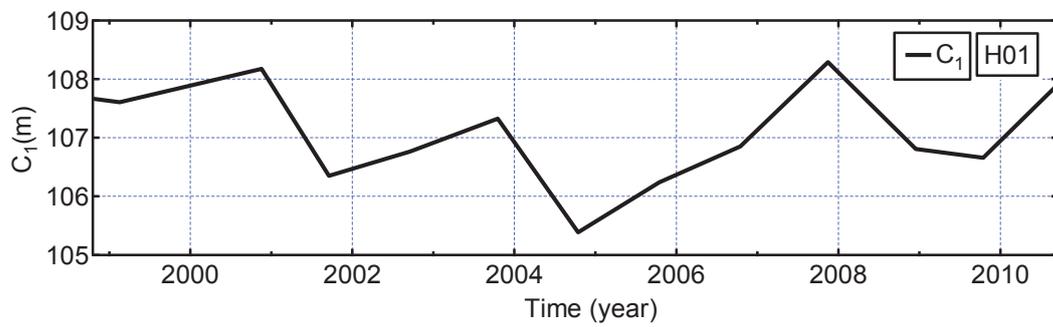
(c) 時間関数 C_2, C_3

図 A3-7 EOF 解析結果 (測線 T80)

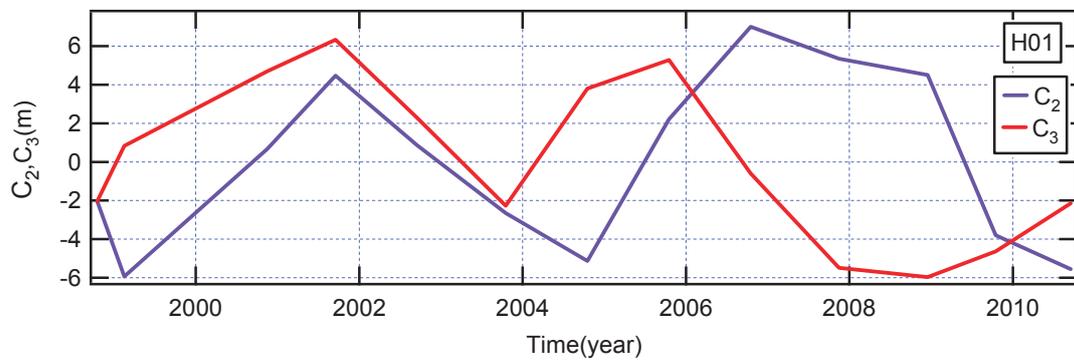
(8) 測線 H01



(a) 空間関数 e



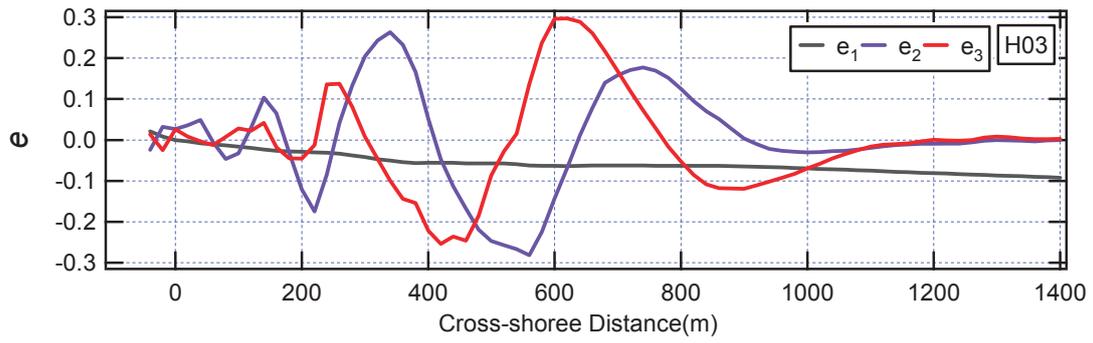
(b) 時間関数 C_1



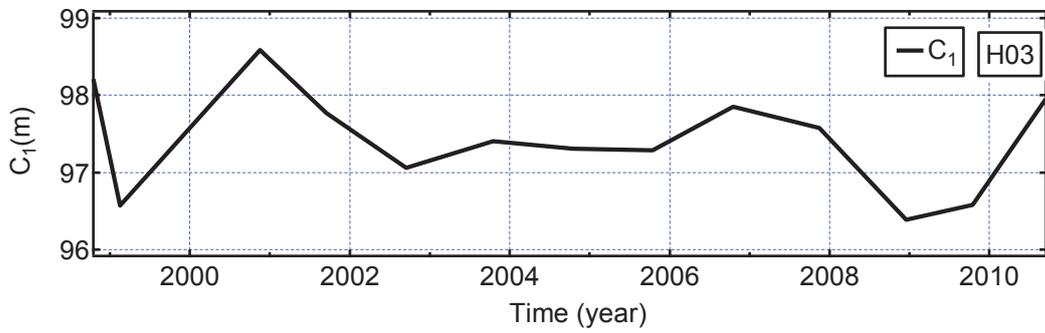
(c) 時間関数 C_2, C_3

図 A3-8 EOF 解析結果 (測線 H01)

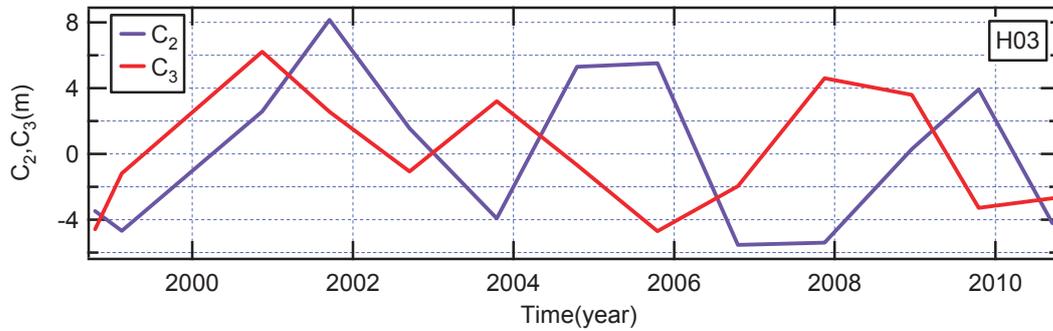
(9) 測線 H03



(a) 空間関数 e



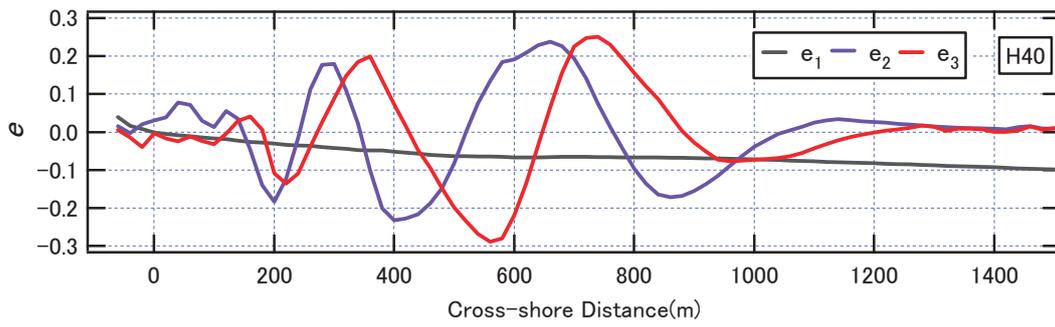
(b) 時間関数 C_1



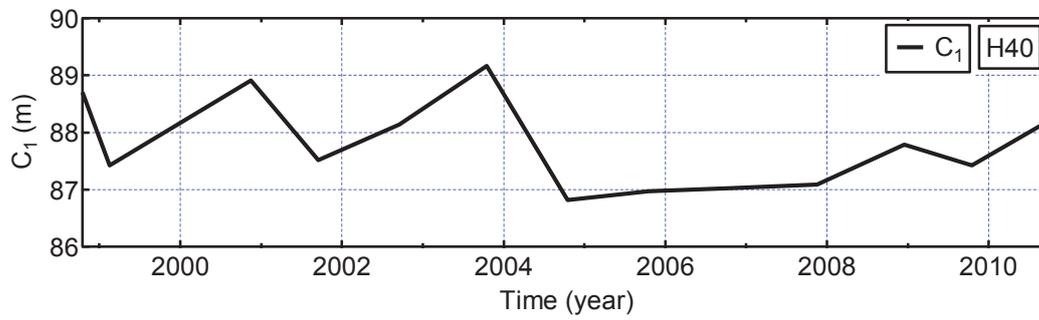
(c) 時間関数 C_2, C_3

図 A3-9 EOF 解析結果 (測線 H03)

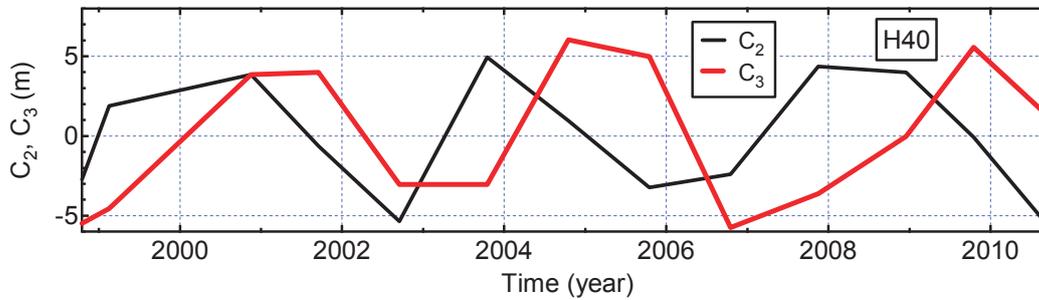
(10) 測線 H40



(a) 空間関数 e



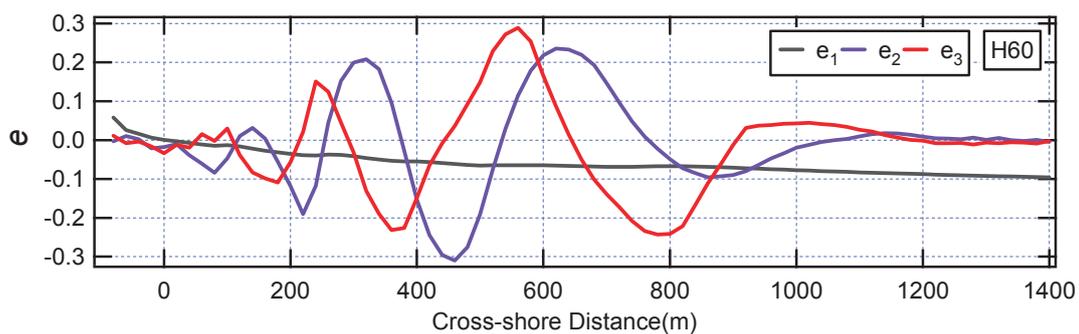
(b) 時間関数 C_1



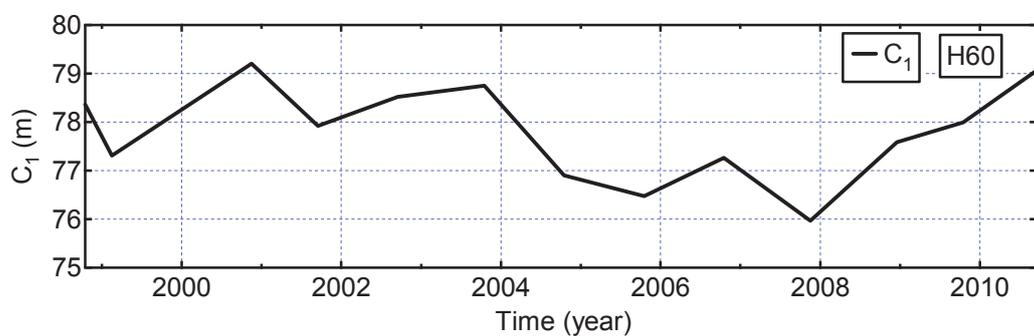
(c) 時間関数 C_2, C_3

図 A3-10 EOF 解析結果 (測線 H40)

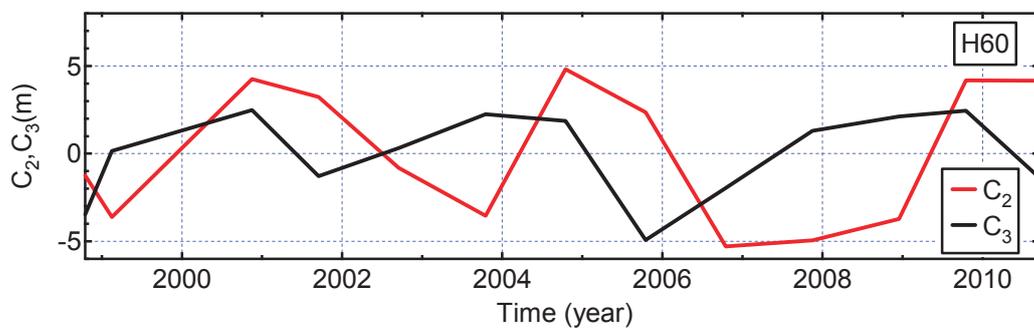
(11) 測線 H60



(a) 空間関数 e



(b) 時間関数 C_1

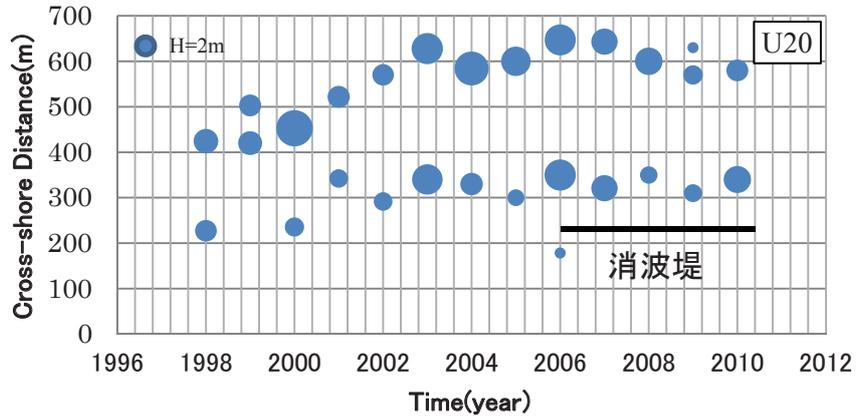


(c) 時間関数 C_2, C_3

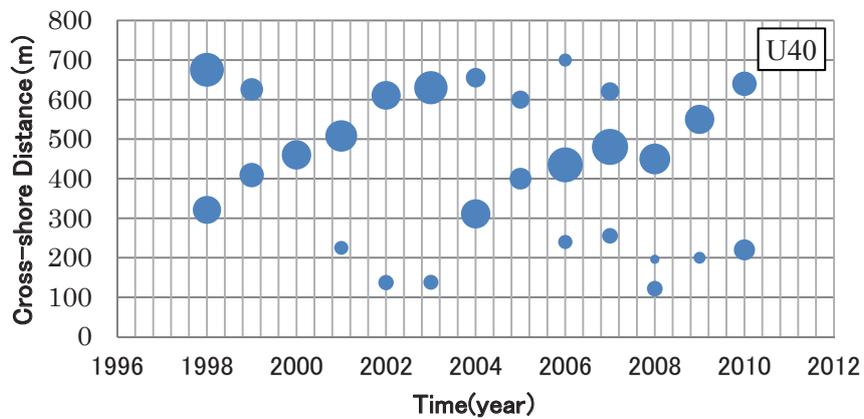
図 A3-11 EOF 解析結果 (測線 H60)

Appendix-4 全測線の砂州経年変動

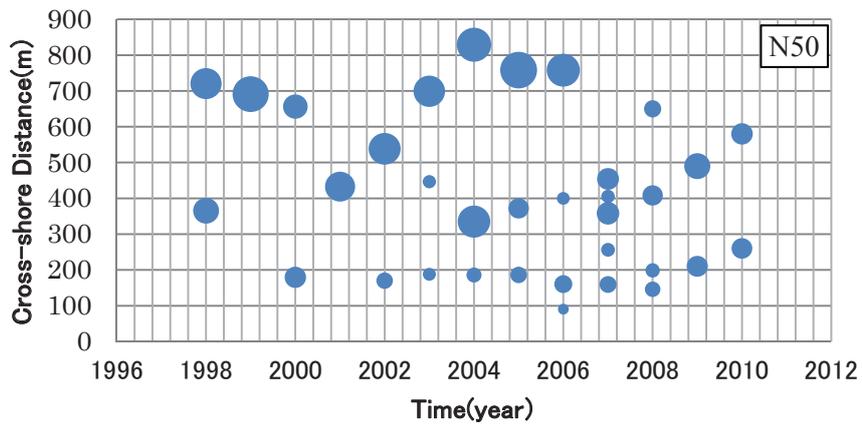
全 12 測線の砂州頂部位置、離岸距離（平均汀線位置(地盤高 T.P.+0m 基準)）、比高の経年変化を示す。図の右肩に測線位置を示す。円の面積は砂州比高に比例し、円の中心は砂州頂部位置を示している。（図の左上の●は基準比高 H=2m を表す）



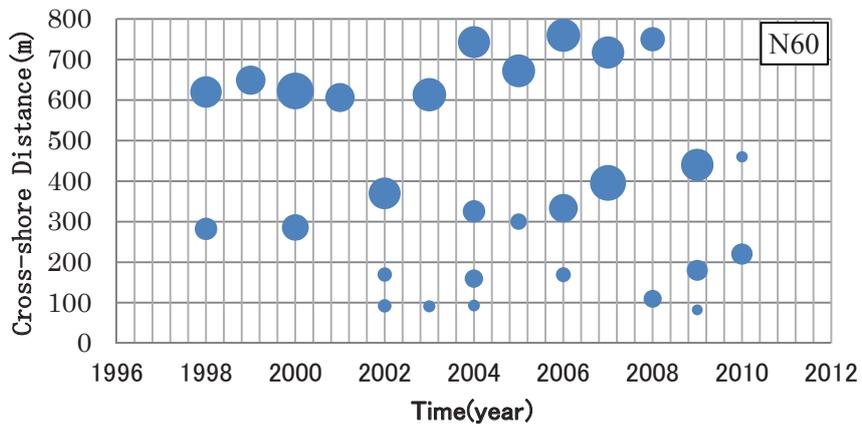
(a) 測線 U20 における砂州比高・離岸距離の経年変動



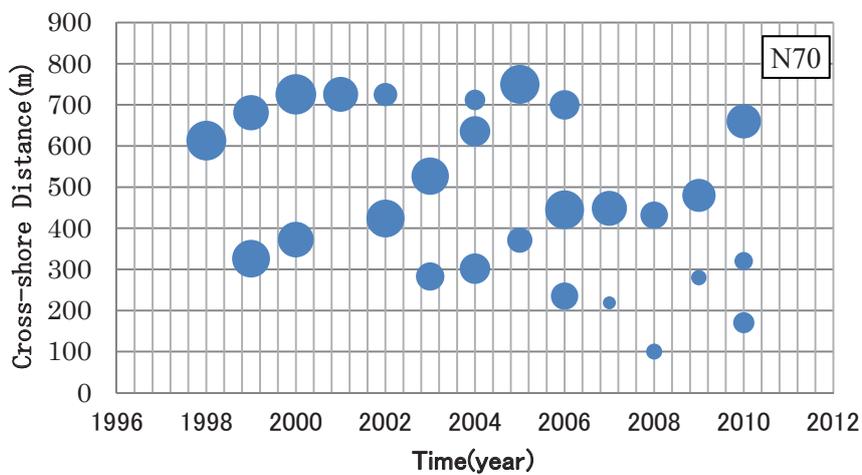
(b) 測線 U40 における砂州比高・離岸距離の経年変動



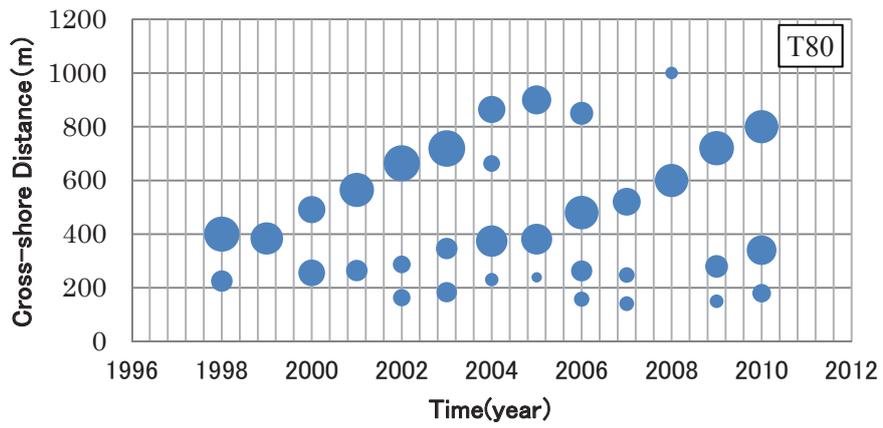
(c) 測線 N50 における砂州比高・離岸距離の経年変動



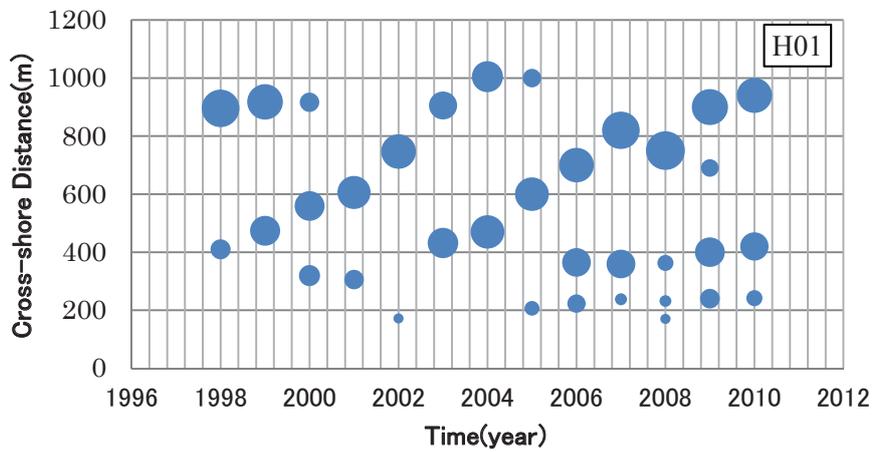
(d) 測線 N60 における砂州比高・離岸距離の経年変動



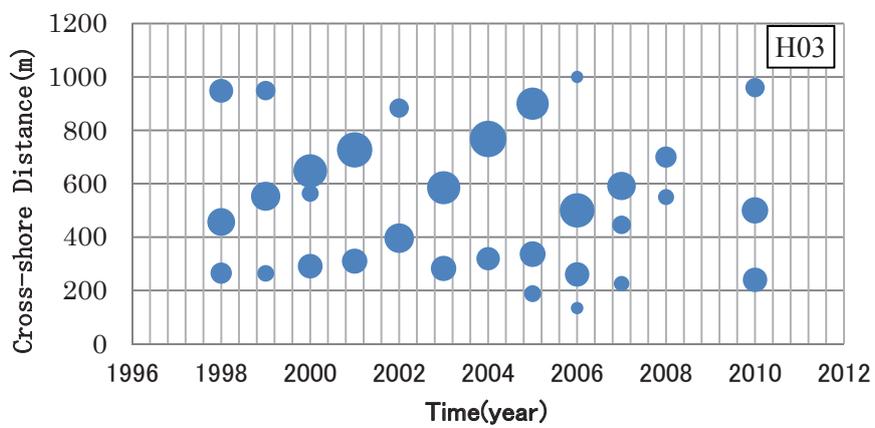
(e) 測線 N70 における砂州比高・離岸距離の経年変動



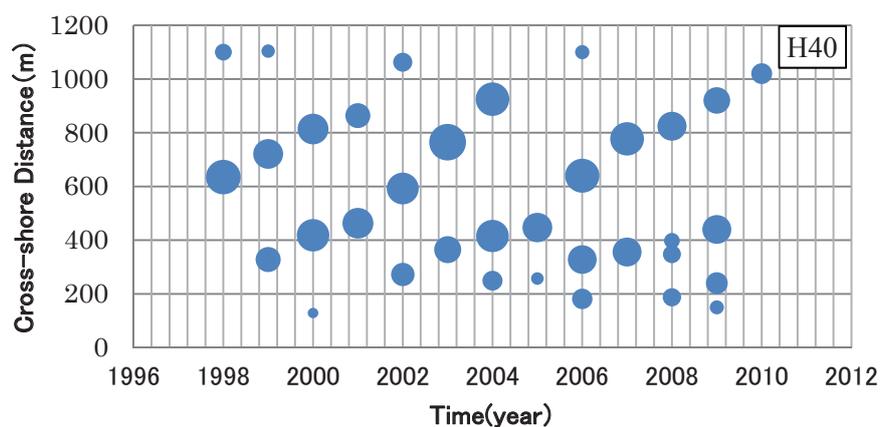
(f) 測線 T80 における砂州比高・離岸距離の経年変動



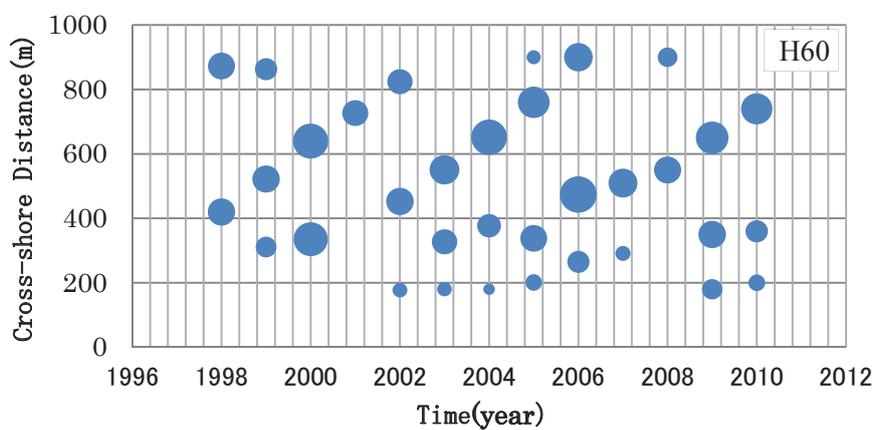
(g) 測線 H01 における砂州比高・離岸距離の経年変動



(h) 測線 H03 における砂州比高・離岸距離の経年変動



(i) 測線 H40 における砂州比高・離岸距離の経年変動

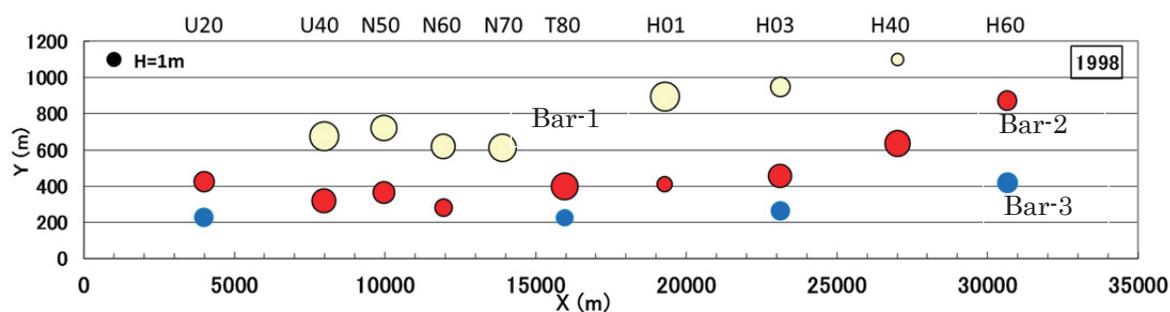


(j) 測線 H60 における砂州比高・離岸距離の経年変動

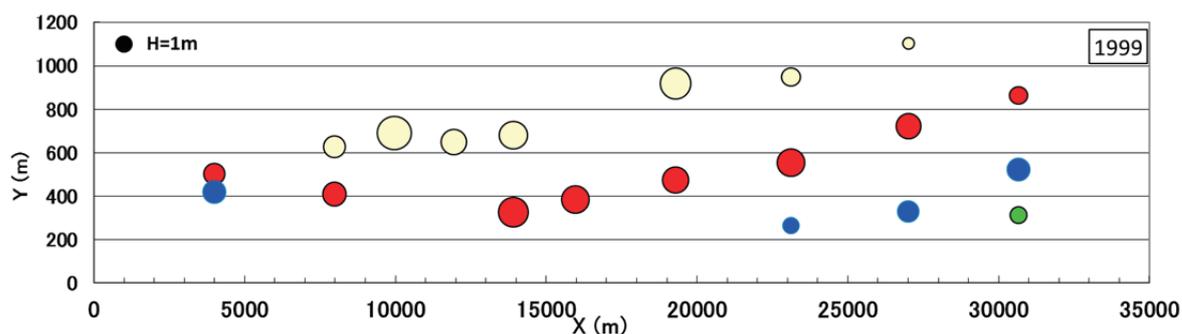
図 A4 全測線の砂州経年変動（測線 U20～測線 H60）

Appendix-5 全観測年の砂州平面形状変動

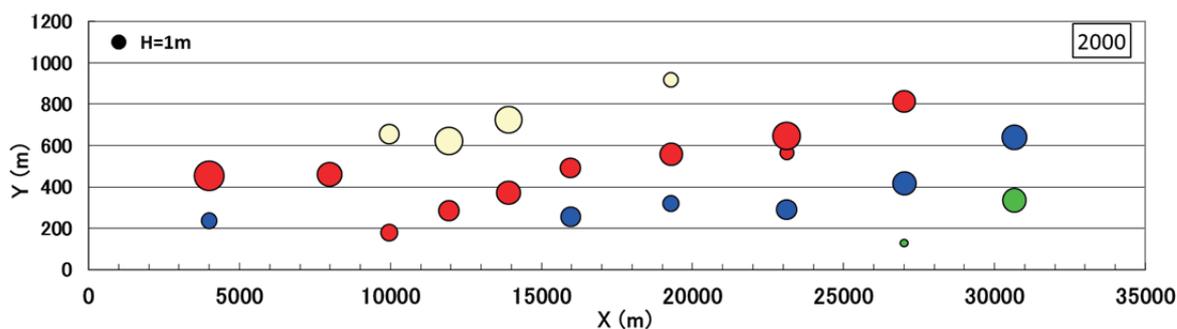
同時期に形成された砂州に対応するものを同色で示す。1998年の図で説明すると、Bar-1：中央部から北部に掛けて最沖に位置する砂州（薄黄色）、Bar-2：沖から2番目に位置し全領域に発達している砂州（赤色）、Bar-3：北部領域に誕生し次第に発達している砂州（青色）を表している。



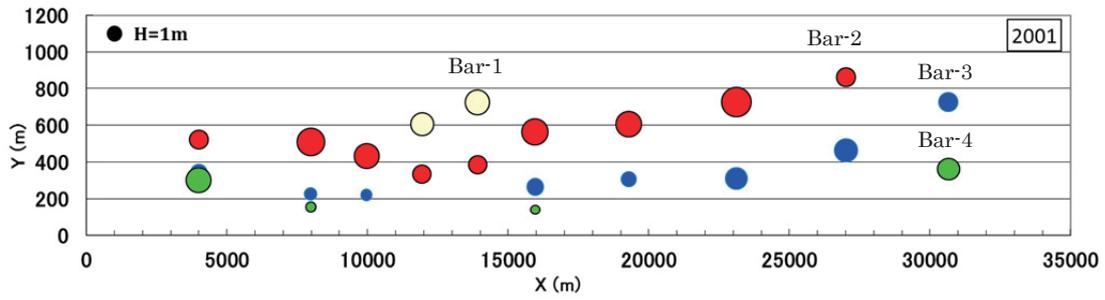
(a) 1998年



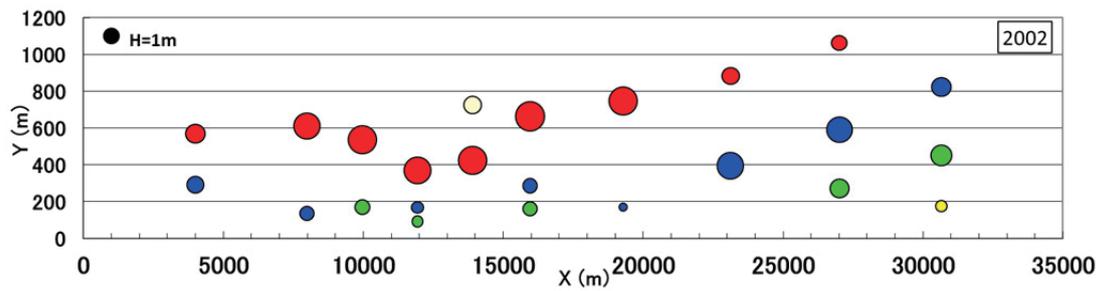
(b) 1999年



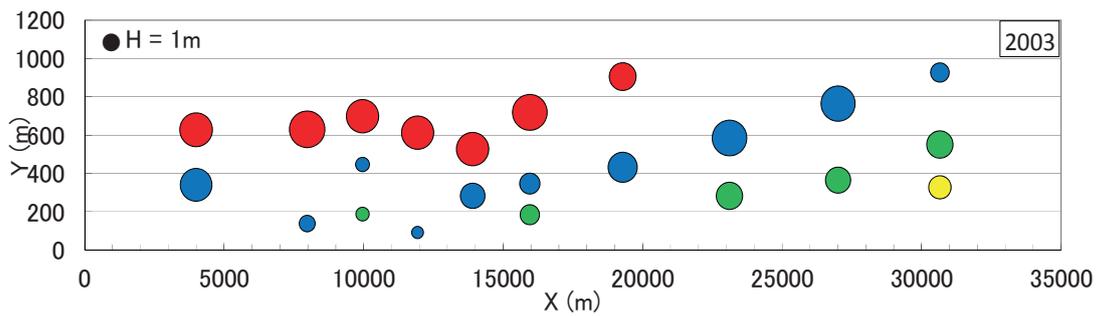
(c) 2000年



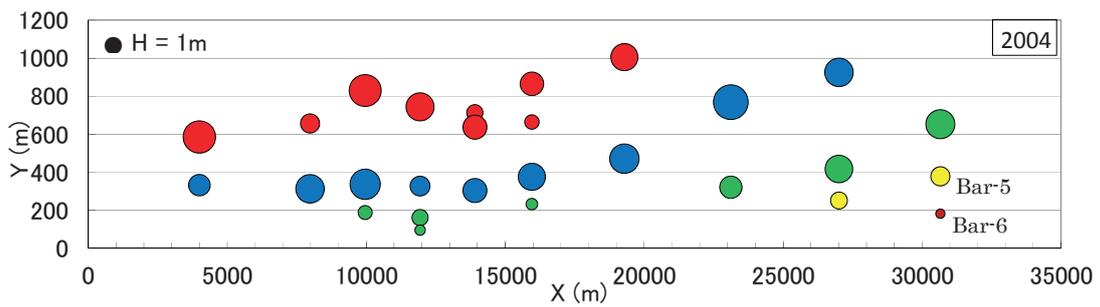
(d) 2001 年



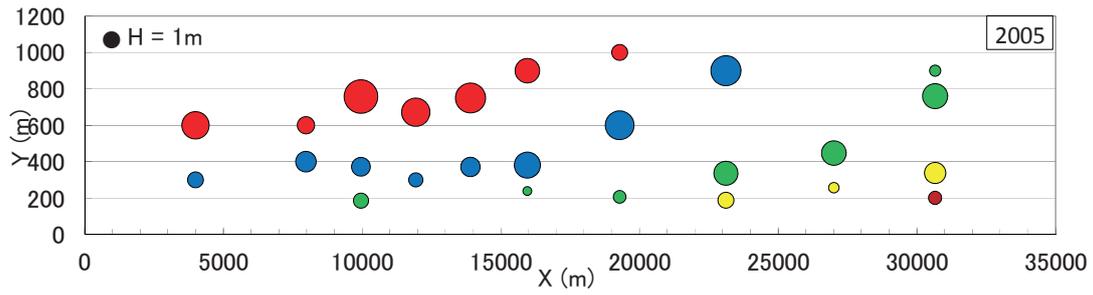
(e) 2002 年



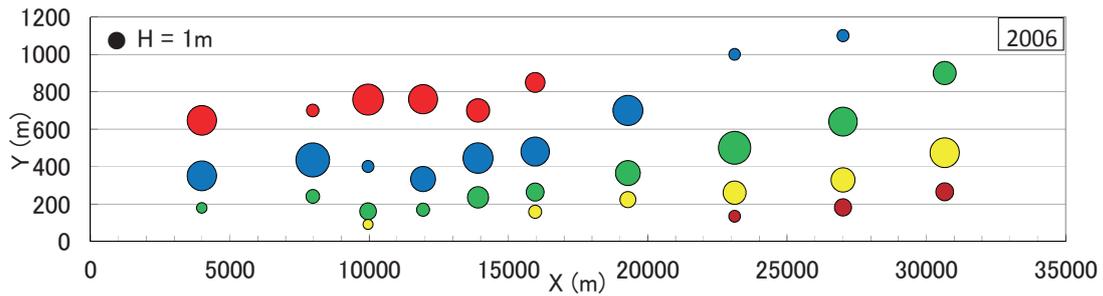
(f) 2003 年



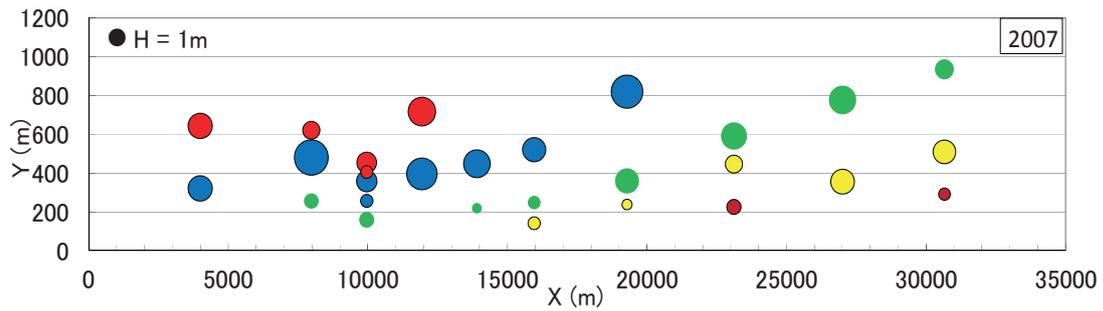
(g) 2004 年



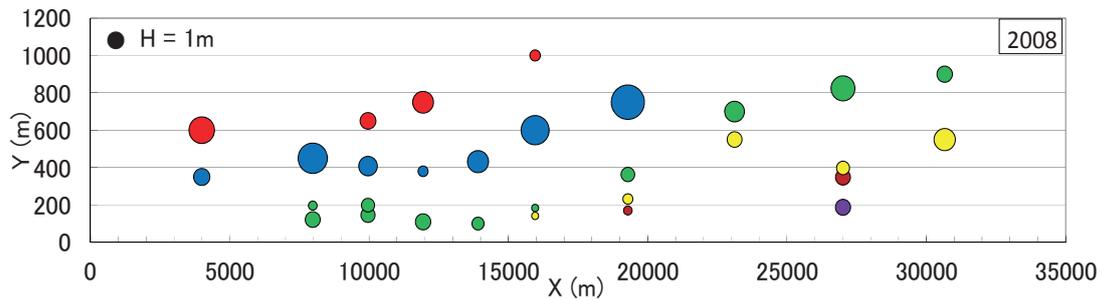
(h) 2005 年



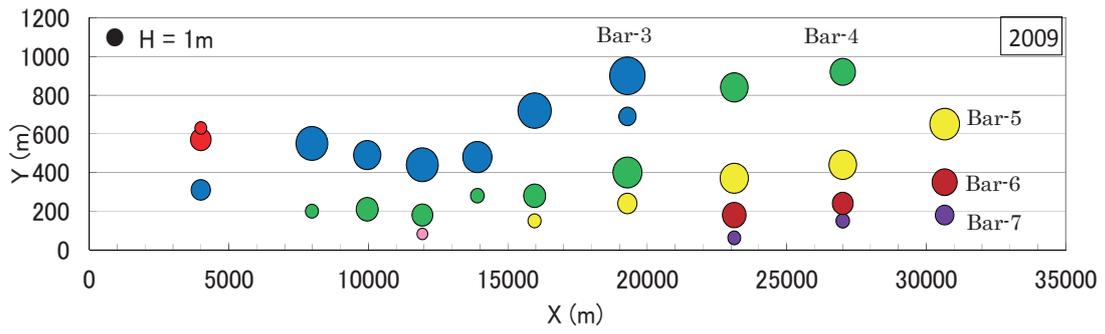
(i) 2006 年



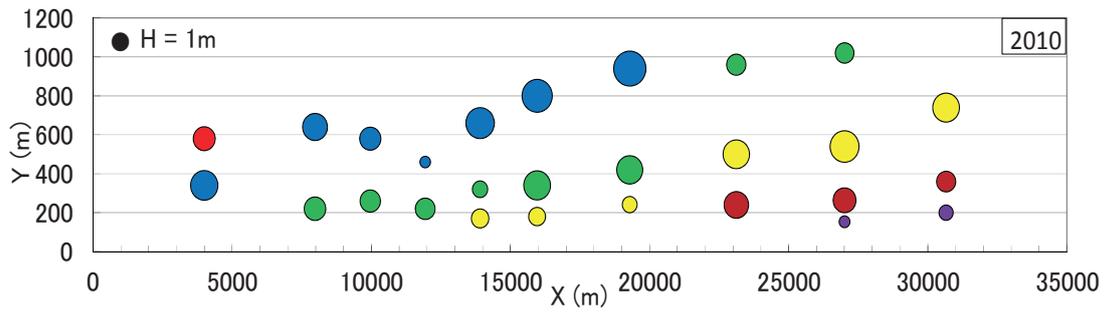
(j) 2007 年



(k) 2008 年



(l) 2009 年



(m) 2010 年

図 A5 全観測年の砂州平面形状変動 (1998 年~2010 年)