

Spatio-Temporal Shoreline Changes on the Kaetsu Coast in the Central Part of Japan, and a Factors-Quantitative Analysis using a Geographical Information System

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2021-04-13 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: YAMANAKA, Rei, AOKI, Tatsuto メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.24517/00061699

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



加越海岸における汀線の時空間変動とその要因 —GISを用いた汀線変化の定量的解析—

山中 玲^{1*}・青木賢人²

2020年9月29日受付, Received 29 September 2020
2021年1月28日受理, Accepted 28 January 2021

Spatio-Temporal Shoreline Changes on the Kaetsu Coast in the Central Part of Japan, and a Factors-Quantitative Analysis using a Geographical Information System

Rei YAMANAKA^{1*} and Tatsuto AOKI²

Abstract

In recent years, coastal erosion has become a significant problem in Japan. To date, a great deal of research has been conducted on the issue. Although studies have been carried out on the secular change of coastal erosion, a number of problems have been identified. These include the following: 1) a short and fragmented survey period, and 2) the difficulty in identifying the locations of changed shorelines. In this study, spatio-temporal changes in the coastline along the entire area of the Kaetsu Coast which is located on the Sea of Japan side of central Japan were analyzed from the early 20th century to the present day. The purpose of this study is to grasp the changes in the coastline quantitatively and to examine the effects of human factors such as the installation of artificial structures and gravel exploitation on erosion. For the analysis, suspended topographic maps and aerial photographs were used as data materials and geometrically processed via a Geographical Information System. Furthermore, the coastline was traced manually, and the amount of change in the coastline was calculated. As a result, inland retreats of more than 70 meters of the coastline in some places on the Kaetsu Coast were detected. Coastline retreat was clearly observed around the mouth of the Tedor River before the Tedorigawa Dam was built in 1969. This retreat of the coastline could not be explained by the effect of the dam on sediment transportation. The authors concluded that the reason for the coastal retreat before the 1960s was gravel that had collected downstream of the Tedor River.

Key Words: aerophotograph, beach erosion, Geographical Information System (GIS), Kaetsu coast, shoreline, suspended map

キーワード: 加越海岸, 汀線, 海岸侵食, 空中写真, 旧版地形図, 地理情報システム

¹金沢大学大学院自然科学研究科 〒920-1192 石川県金沢市角間町 (Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192 Japan)

²金沢大学人間社会研究域人間科学系 〒920-1192 石川県金沢市角間町 (Faculty of Human Sciences, Institute of Human and Social Sciences, Kanazawa University, Kakuma-machi, Kanazawa, 920-1192 Japan)

*連絡著者 (Author for correspondence)

I. はじめに

海岸は、砂浜からなる砂浜海岸と岩石からなる岩石海岸の2つに大別される。そして、前者では定着流入する土砂量が流出する土砂量を下回ると、海岸から土砂が減少し汀線が後退する海岸侵食が発生する。

海岸侵食は全国的に顕在化しており、これまでも侵食の深刻化を懸念して理学、工学、社会科学のさまざまな分野で調査や研究がなされ、過去の海岸の形態やメカニズムの把握、保全活動事業が行われてきた。岸田（2011）は、河川の砂利採取、放水路の建設、河川中流部での治水対策の実践事例を踏まえ、海岸を取り巻く自然環境の変化に対応していくためには、広域的な海岸保全や河川と海岸とのつながりに重点的に取り組むことが必要であることを確認している。しかしながら、これらの対策は一定の効果はあるものの、依然として侵食を食い止めることはできず、汀線は後退している。

宇多（2004）は、この海岸侵食の要因について、①卓越沿岸漂砂の阻止に起因する海岸侵食、②波の遮蔽域形成に伴って周辺海岸で起こる海岸侵食、③河川供給土砂量の減少に伴う海岸侵食、④海砂利採取に伴う海岸侵食、⑤侵食対策のための離岸堤建設に起因する周辺海岸の侵食、⑥保安林の過剰な前進に伴う海浜地の喪失、⑦護岸の過剰な前出しに起因する砂浜の喪失の7点を挙げている。

これまでの海岸侵食の実態把握を目的とした研究としては以下のようなものが挙げられる。田中ほか（1973）は1940年代の米軍撮影の空中写真と1961年以降に撮影された国土地理院の空中写真を用いて、等間隔の基線から汀線変化量を求めた。また、小池（1974）は5万分の1地形図を用いて、図幅ごとに発行年の最も古いものと最新のものを重ね合わせ、1870年から約70年間の日本の砂浜汀線の変化延長を計測し、前進延長と後退延長の比から全国的な汀線の後退傾向を明らかにした。

石川県から福井県にかけての加越海岸においては、石田・高瀬（1984）が、汀線の後退が深刻化している千里浜海岸（押水羽咋海岸）を調査した上で、侵食対策工法について考察した。その後、石田（1991）が千里浜海岸での養浜効果についても検証している。これらの研究は、海岸侵食の経年変化を取り扱っているものはあるが、空間的に千里浜海岸に限定され

ていることに加え、調査期間が短いことや問題解決のための侵食対策工法について比重を置いていること、また、汀線変化を示しているが場所を把握しづらいという問題点がある。

砂浜海岸の消長の原因としては、沿岸域における砂の移動（漂砂）と堆積場の状況変化に加え、砂の供給量の変化とそれをもたらす砂の供給域の変化がある。宇多（1997）は、石川海岸の汀線の形状の特徴と前浜構成材料の中央粒径と淘汰度の沿岸方向の分布について調べ、手取川河口の汀線や中央粒径の特徴を掴み、さらに南向きの沿岸漂砂が発生していることを明らかにした。さらに石田ほか（1984）は、加越海岸において、漂流容器を用いて手取川からの浮遊砂の移動を把握し、粒度の特性を明らかにした。

海岸侵食の原因究明には、これらを一体として時系列的に整理・検討することが必要となるが、従前の研究では沿岸域に比重が置かれ、砂の供給源との関係性については十分な検討がなされていない。著者らは石川海岸への土砂供給を担う手取川の河床構成物質の挙動に注目して一連の研究を行ってきた（山中・青木、2008；図門烏力吉・青木、2010；小倉・青木、2017；小倉ほか、2017など）。その中で、山中・青木（2008）では、第二次世界大戦後に行われた手取川における砂利採取事業が石川海岸の汀線変化に影響を与えた可能性を指摘している。手取川の河床構成物や河口付近の堆積土砂の量的変化を分析したYuhi（2008）も、石川海岸における汀線後退について、冬季高波浪の厳しい自然条件に加え、土砂供給源である手取川流域のダム建設、砂利採取などの人為的要因が関係すると指摘している。さらにYuhi *et al.*（2009）は、1970年以降、海岸構造物の効果により汀線近傍の侵食は緩和されていると指摘している。由比らによる一連の研究は堆積土砂の量的評価による指摘であるのに対し、山中・青木（2008）は汀線の時空間変化に基づく指摘であった。量的検討に時空間的検討を加えることにより、相互補完的に汀線変化の要因について考察できると考える。

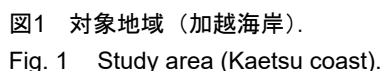
本稿は山中・青木（2008）の断片的な報告の元となった詳細なデータと分析結果を示すととともに、大幅な加筆修正を行ったものであり、①加越沿岸全域について明治時代から現在までを調査期間とし、海岸に構造物が建つ前、つまり人為的な要因があまり無い時代から汀線の変化を経年的に把握すること、

れる。その漂砂は、海流により南から北へ運ばれる沿岸漂砂、波により北から南へ運ばれる沿岸漂砂、波の往来による岸沖漂砂がある。それに加えて河川（主に手取川）からの土砂流入がある。砂の移動について考察するには漂砂系全体を把握する必要があるが、先行研究では加越海岸の一部しか対象地域になされておらず、分析に適した場所であると判断した。

海岸保全基本計画（石川県，2002）による加越海岸の区域は，石川県羽咋郡志賀町の高岩岬から福井県丹生郡越前町の越前岬までの約223 kmであるが，本研究では，砂浜海岸の連続性が良い羽咋市滝崎から坂井市福井新港までを対象とした。なお，高岩岬と滝崎の間は原資料が一部発行されておらず分析が困難であったこと，福井新港と越前岬の間は人工海岸と岩石海岸が続くため，漂砂の運搬・堆積に着目する本研究においては，対象から除外しても大きな影響はないと考える。

以上のことから、本研究における海岸侵食解析の対象区間は、加越海岸の主要区間の全域を含んでいると判断して良いと考える。

また加越海岸は、北側は能登半島外浦、南側は越前海岸という連続する岩石海岸に挟まれていることから、加越海岸全域が閉じた漂砂系であると考えら



Ⅲ. 解析方法

本研究は、加越海岸における汀線の時空間的变化を定量的に把握することを目的の一つとしている。これを実現するために、地理情報システムを用いた解析を行った。原資料としてこれまでに刊行されている既存の地形図および空中写真を用いた。これらの資料を画像データとして地理情報システム上にインポートし、簡易的な幾何補正を行って重ね合わせを行い、システム上で目視によって汀線を判別し、手動でトレースを行ってラインオブジェクトとして抽出した。複数年次の地形図および空中写真に対して一連の作業を実施し、汀線位置の時系列データを作成した。次に、汀線に沿って基線を設定し、基線に対する各時期の汀線の相対的位置を計測し、その期間の差分から汀線変化量を算出し、データベースとして整理し分析に用いた。以下に具体的内容及び手順について説明する（図2）。

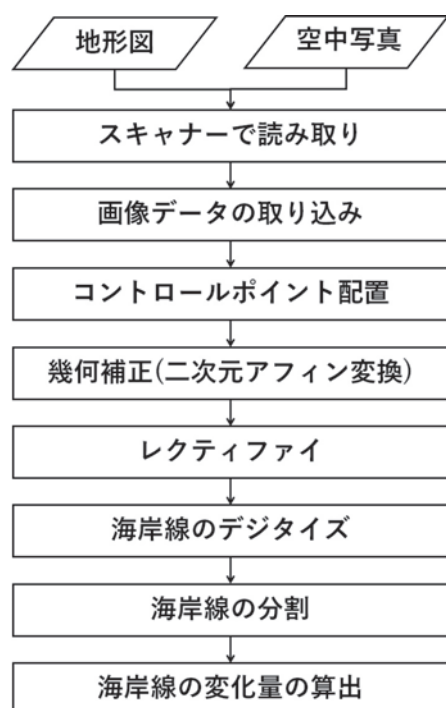


図2 処理フロー図.

Fig. 2 Process flow chart.

1) 原資料

使用した地形図の一覧を表1に、空中写真の一覧を表2に示した。

過去にさかのぼって自然環境や土地利用に関する地理データを取得し分析に供する場合、既存の空中写真や地形図が用いられる（木村ほか，2000など）。本研究でもこれを踏まえ、刊行済みの地形図と空中写真を原資料として用いている。地形図と空中写真について原資料としての適性を考えると、空中写真が一次データであるのに対し、地形図は測量成果をもとにして作成された編纂図（二次データ）である。特に、地形図が三角測量による作成から空中三角測量による作成に移行した第二次世界大戦後は空中写真が一次データ、地形図が二次データという位置付けが明確になる。一方、地形図は正射影であるのに対し、空中写真は中心投影である。画像データを取り込み重ね合わせてデータ化する過程に際して、地形図はスキャンに伴う画像の歪みだけを考慮すればよいのに対し、空中写真は中心投影から正射影に幾何補正する必要がある、大量に処理をすることは時間的・費用的・設備的に負荷が大きいが指摘されている（乾，2000など）。特に、この幾何補正に際して投影変換の結果に大きな誤差を与えるものとして標高データの影響が指摘されている（長谷川，2007a, b）。ただし、本研究における解析対象は汀線であり、標高はほぼ0 mで一定とみなすことができるため、標高差のある地域での幾何補正で不可欠となるオルソ補正ではなく、より簡易的に二次元で処理をする二次元アフィン変換を適用することが可能

表1 使用地形図一覧.

Table 1 List of used topographic maps.

測量年	縮尺	図幅名
1909年測量	2万分の1	白尾
1909年測量	2万分の1	津幡
1909年測量	2万分の1	上金石
1909年測量	2万分の1	大野
1909年測量	2万分の1	松任
1909年測量	2万分の1	美川
1909年測量	2万分の1	小松北部
1909年測量	5万分の1	津幡
1909年測量	5万分の1	金沢
1909年測量	5万分の1	小松北部
1909年測量	5万分の1	大聖寺
1909年測量	5万分の1	三国
1910年測量	5万分の1	邑知湯

表2 使用空中写真一覧.

Table 2 List of used aerial photographs.

1947年	1968年	1975年	1989年	2002年
M644 48	CB-68-3X C12-1	CB-74-4 C1-1 ※4	CB-87-1X C3-1 ※5	CB-2002-1X C7-2
M644 50	CB-68-3X C13-1	CB-74-4 C2-1 ※4	CB-87-1X C4-1 ※5	CB-2002-1X C8-2
M224 2	CB-68-3X C14-2	CB-74-4 C3-1 ※4	CB-87-1X C5-1 ※5	CB-2002-1X C9-2
M644 96	CB-68-3X C15-2	CB-74-4 C4-1 ※4	CB-87-1X C6-1 ※5	CB-2002-1X C10-2
M644 99	CB-68-4X C1-1	CB-74-4 C5-1 ※4	CB-87-1X C7-2 ※5	CB-2002-1X C11-3
M196 291 ※1	CB-68-4X C2-1	CB-74-4 C6-1 ※4	CB-87-1X C8-1 ※5	CB-2002-1X C12-3
M196 293 ※1	CB-68-4X C3-1	CB-74-4 C7A-1 ※4	CB-87-1X C9-1 ※5	CB-2002-1X C13-2
M196 295 ※1	CB-68-4X C4-1	CB-74-4 C8-2 ※4	CB-87-1X C10A-2 ※5	CB-2002-1X C14-3
M196 297 ※1	CB-68-4X C5-1	CB-74-4 C9A-1 ※4	CB-87-1X C11A-1 ※5	CB-2002-1X C15-3
M196 299 ※1	CB-68-4X C6-1	CB-74-4 C10-1 ※4	CB-87-1X C12A-1 ※5	CB-2002-1X C16-2
M196 301 ※1	CB-67-9Y C7B-2 ※3	CB-74-4 C10-2 ※4	CB-87-1X C13-2 ※5	CB-2002-1X C17-3
M196 303 ※1	CB-67-9Y C8B-2 ※3	CB-74-4 C10-4 ※4	CB-87-1X C14-2 ※5	CB-2002-1X C18-2
M196 305 ※1	CB-68-8Y C1A-2	CB-74-4X C1-2 ※4	CB-87-1X C15-2 ※5	CB-2002-1X C19-1
M196 307 ※1	CB-68-8Y C2A-2	CB-74-4X C2-1 ※4	CB-87-1X C16-1 ※5	CB-2002-1X C20-2
M196 309 ※1	CB-68-8Y C3A-2	CB-74-4X C3-1 ※4	CB-87-1X C17A-2 ※5	CB-2002-1X C21-2
M196 311 ※1	CB-68-8Y C4A-2	CB-74-4X C4-1 ※4	CB-87-1X C18A-1 ※5	CB-2002-1X C22-1
M196 313 ※1	CB-68-8Y C4A-3	CB-74-4X C5-1 ※4	CB-89-3X C1-2	CB-2002-1X C23-2
M196 315 ※1	CB-68-8Y C5A-1	CB-74-4X C6-2 ※4	CB-89-3X C2-2	CB-2002-1X C24-1
M196 317 ※1	CB-68-8Y C6A-2	CB-74-4X C7A-1 ※4	CB-89-3X C3-2	CB-2002-4X C1-1
M196 319 ※1	CB-68-8Y C6A-3	CB-74-4X C8-2 ※4	CB-89-3X C4-2	CB-2002-4X C2-2
M196 321 ※1	CB-68-8Y C7A-2	CB-74-4X C9A-1 ※4	CB-89-3X C5-2	
M196 323 ※1	CB-68-8Y C7A-3	CB-74-4X C10-1 ※4	CB-89-3X C6-2	
M196 325 ※1		CB-74-4X C10-2 ※4	CB-89-3X C7-1	
M196 327 ※1		CB-74-4X C10-4 ※4	CB-89-3X C8-2	
M196 329 ※1		CB-75-19 C7-1	CB-89-3X C9-3	
M196 331 ※1		CB-75-19 C8-2	CB-89-3X C9-5	
M196 333 ※1		CB-75-19 C9-1	CB-89-3X C10-1	
M196 335 ※1		CB-75-19 C10A-2	CB-89-3X C11-2	
M196 337 ※1		CB-75-19 C11A-2		
M196 339 ※1		CB-75-19 C12A-2		
M185-F-29-6 1 ※2		CB-75-19 C13-2		
M185-F-29-6 3 ※2		CB-75-19 C14-2		
M185-F-29-6 5 ※2		CB-75-19 C15-1		
M185-F-29-6 6 ※2		CB-75-19 C16-1		
M185-F-29-6 15 ※2		CB-75-19 C17-1		
M185-F-29-6 16 ※2		CB-75-19 C18A-1		
M185-F-29-6 20 ※2		CB-75-19 C18A-2		
M185-F-29-6 21 ※2		CB-75-19 C20-1		
M185-F-29-6 35 ※2		CB-75-19 C21A-2		
M185-F-29-6 37 ※2		CB-75-19 C22-2		
M185-F-29-6 39 ※2		CB-75-19 C23A-1		
M185-F-29-6 41 ※2		CB-75-19 C24-1		
M185-F-29-6 43 ※2		CB-75-19 C25-1		
M185-F-29-6 45 ※2		CB-75-19 C26-1		
M185-F-29-6 51 ※2		CB-75-19 C27-1		
M185-F-29-6 53 ※2		CB-75-19 C28-2		
		CB-75-19 C29-1		

※1 1952年撮影

※2 1948年撮影

※3 1967年撮影

※4 1974年撮影

※5 1987年撮影

となる。

これを踏まえ、本研究でも一次データである空中写真の入手が可能となる1947年以降については、原則空中写真を原資料として用い、空中写真が未刊行である1946年以前については、地形図を原資料として用いた。空中写真は1947年～1952年の米軍撮影の縮尺4万分の1のものを33枚、1967年～2002年の国土地理院撮影の縮尺2万分の1または2万5千分の1のものを104枚、合計137枚使用した。地形図は、対象地域で最も古い時期に刊行された地形図である1909

(明治42)年測量の地形図は2万分の1および5万分の1地形図のみであるため、これを用いている。なお、対象地域の空中写真において、単一の撮影年次で全域をカバーできなかった場合は、できるだけ近い年次の写真を用いて全域をカバーしている。このため、本研究では、1909～1910年測量の地形図は1909年、1947～1952年撮影の空中写真は1947年、1967年-1968年の空中写真は1968年、1973～1975年の空中写真は1975年、1987～1989年の空中写真は1987年としている。

2) 原資料の読み込みと重ね合わせ（レクティブアイ）

空中写真、地形図とも、スキャナーで読み取りを行いデジタル画像として保存した。スキャナーは、空中写真はEPSON社製ES-8500、地形図はGRAPHTEC社製CS300-10eNをそれぞれ使用し、空中写真は、8ビットグレースケール、解像度800dpi、TIFF形式、地形図は、8ビットカラー、解像度400dpi、TIFF形式により保存した。

保存した画像はESRI社ArcGIS 8.3に読み込み、アフィン変換による幾何補正と重ね合わせ（レクティ

ファイ）を行った。2万5千分の1地形図は、画像の四隅にコントロールポイントを設置し、座標値を与えてジオリファレンスしている。この2万5千分の1地形図に対して、空中写真と2万分の1地形図、5万分の1地形図を幾何補正して重ね合わせを行っている。幾何補正のためのタイポイントとして、古くからある神社や寺院、交差点や橋などを設定した。タイポイントは各ペアで最低4つ以上設定し、イメージデータの周辺部から中心へ、ジグザグに追加することにより、誤差を軽減させた（図3、4、5）。

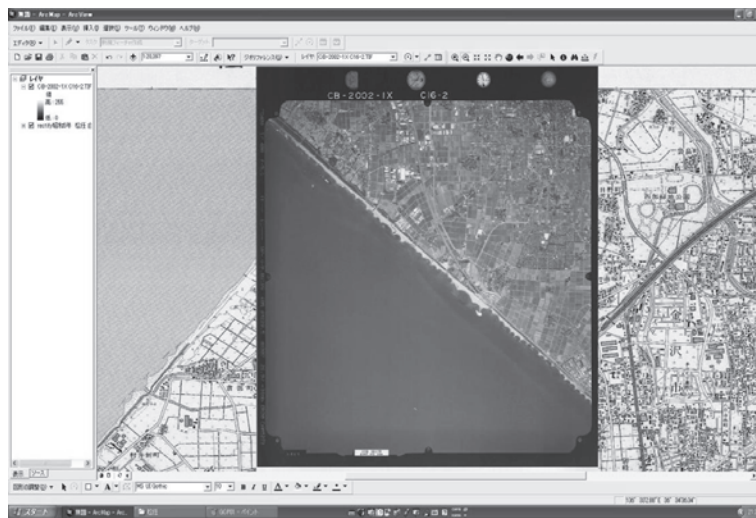


図3 イメージデータの追加.
Fig. 3 Addition of image data.



図4 幾何補正とジオコーディング.
Fig. 4 Geometric correction and geocoding.

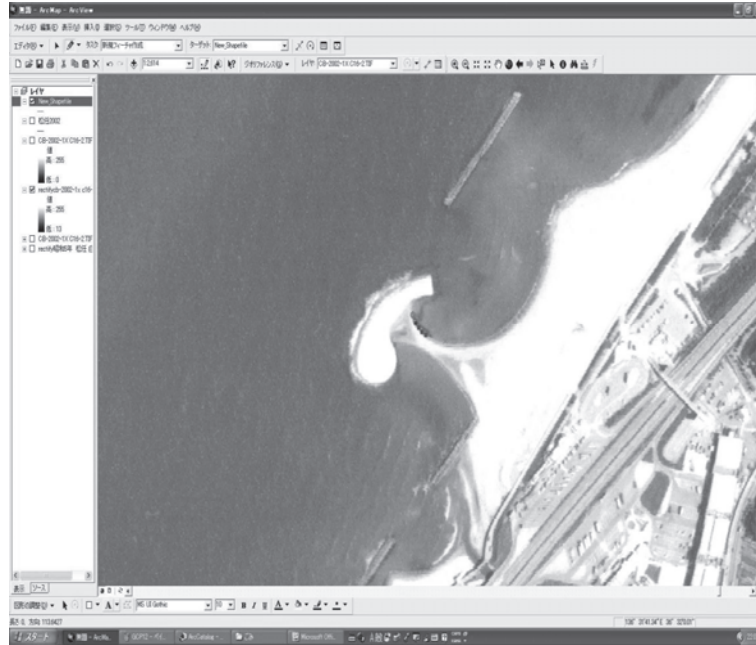


図5 汀線のトレース.

Fig. 5 Trace of the shoreline.

3) 汀線のデジタイズと変化量の計測

幾何補正をした地形図・空中写真から目視で読み取ることができる汀線をArcGISの画面上でデジタイズした。その汀線を1,000m区間に分割し、各年代間の変化量を求めた。その際、羽咋市滝崎を始点の0mとし、三国町福井新港を終点の99,335mとした。トレースした汀線を1,000m区間に分割する方法としては、まず、始点と終点までを一直線に結び、その直線から直角になるように1,000m間隔で区切った。ただし、1,000mに区切る際、その間に河川がある場合には、その始点から1,000mに満たなくても河口右岸までで区切り、1,000mの変化量に変換して示した。同作業を各年代の汀線で行い、前進・後退量を求めた。なお、汀線の前進・後退量は、年代別の汀線と基線をとることにより算出した1,000m間隔のポリゴンに分割し、区間ごとに前観測年との差分を取ることで求めた。ポリゴン面積の増加は汀線の後退を、ポリゴン面積の減少は汀線の前進を意味する。更にポリゴンの間隔（1,000m）で除した値を、当該区間の汀線の変化量（m）として算出している。

4) 汀線位置の計測誤差

計測誤差については、地形図に関しては、佐藤

（2000）に基づき、機械誤差（0.1mm）と描画誤差（0.2mm）と標定誤差（0.5mm）について考慮した。本研究における使用地図の縮尺を考慮し、誤差については、2万分の1地形図では10m、5万分の1地形図では25mを誤差範囲とし、これ以上の前進、後退を有意な変動として分析対象とした。

空中写真については、田中ら（1973）によると、誤差には大きく分けて7点挙げられるが、カメラ軸が鉛直軸から傾いていることによる誤差と潮位差にもとづく誤差の2点が支配的とされる。このうち前者はGIS上で幾何補正を実行し、地形図と重ね合わせているため、考慮する必要はない。また、後者については、満潮位（High Water Level : H.W.L）と干潮位（Low Water Level : L.W.L）の差と前浜勾配の逆数を乗じた値となる。各海岸のH.W.LとL.W.Lとの差と現地調査によって計測した前浜勾配については以下に示す（表3, 4）。前浜勾配については、本研究で必要とする観測地点全てを先行研究より引用することができなかったことから、全てを現地調査とし、前浜の上端と干潮位の汀線位置の高度差および水平距離を計測し、この間の平均的な前浜勾配を算出している。この結果、誤差の最大値は14mとなり、本研究では14m以上前進・後退した区間を分析対象とした。

表3 H.W.L と L.W.L との差.

Table 3 Difference between H.W.L and L.W.L.

潮位観測地点	潮位差(m)
滝崎	0.61
金沢港	0.58
三国	0.50

田中ら (1974) より引用.
Quoted from Tanaka *et al.* (1974).

表4 各海岸の前浜勾配.

Table 4 Foreshore slope of each coast.

計測地点	前浜勾配
滝崎	1/10
千里浜	1/15
内灘	1/25
松任	1/25
安宅	1/20
片山津	1/15
波松	1/9
三国	1/60

現地調査により作成.
Created by field survey.

IV. 結果と考察

以上の作業により, 研究対象地域全域の汀線の変化を地形図上で表し (図6), 各年代間の面積変化量 (m^2) を計測した上で, 汀線の変化量 (m) を算出した (図7~11)。さらに汀線の変化量をメッシュ図として時空間変化を表した (図12)。

また, 作業により変化量を算出したところ, 対象地域全域における1年間当たりの汀線変化量は, 1909~1947年は 0.10m/year の後退, 1947~1968年では 0.09m/year の後退, 1968~1974年はさらに後退が進み, 0.39m/year の後退となった。しかし, 1974~1989年には前進に転じ, 0.23m/year の前進, 1984~2002年には 0.02m/year 前進した。ここで重要な点は, 加越海岸に対する主要な土砂供給源である手取川において手取川ダムの建設が始まった1969年に先行した時期に, 既に加越海岸の全体としては汀線が後退傾向にあったことである。海岸侵食の要因として, ダム建設に伴う土砂供給量の減少が挙げられることが多いが (宇多, 1997; 由比ほか, 2004), ダム以外の要因についても検討が必要であることを示している。

また, 個々の区間においても汀線の変化は顕著に表れており, 千里浜海岸では1909~1947年の間に約70m後退した (図7)。年代別による空中写真の比較においても汀線の変化が顕著に現れており, 後述す

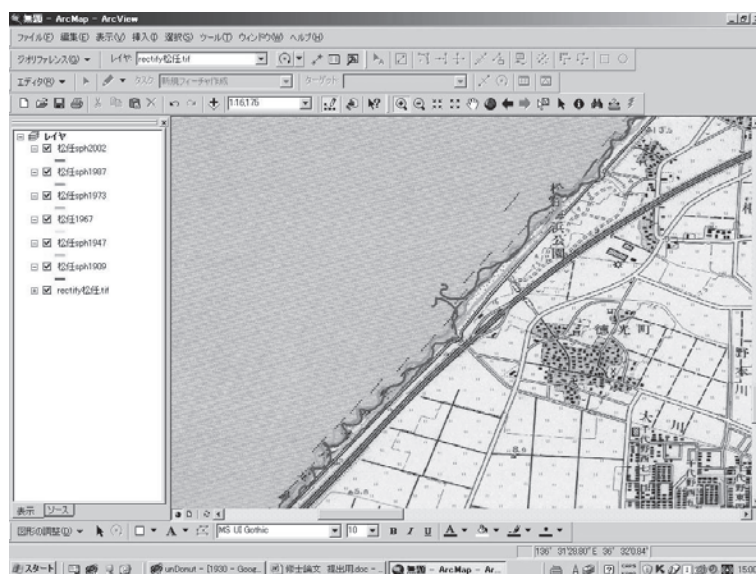


図6 徳光海岸における汀線の変化.

Fig. 6 Shoreline change of Tokumitsu coast.

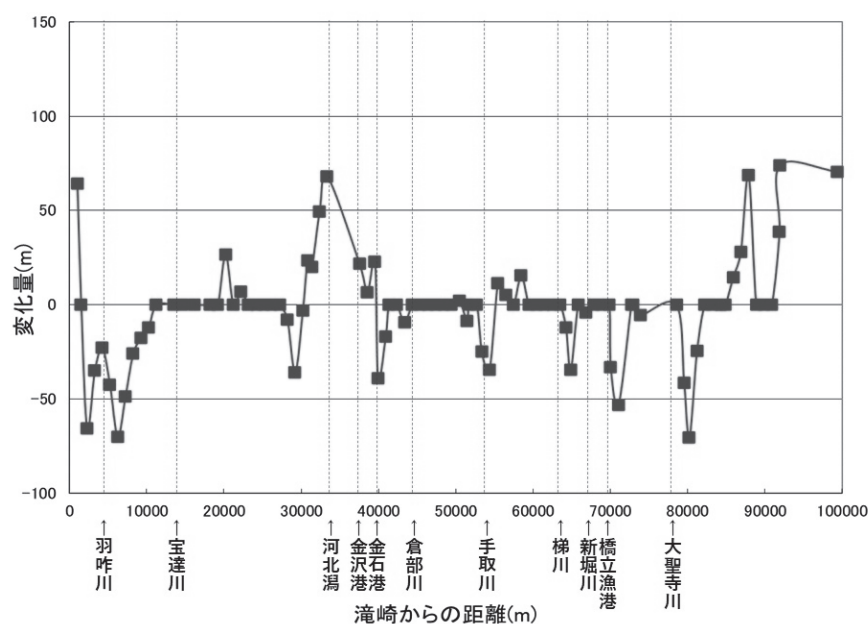


図7 1909年から1947年までの汀線変化量.

Fig. 7 Amount of shoreline change from 1909 to 1947.

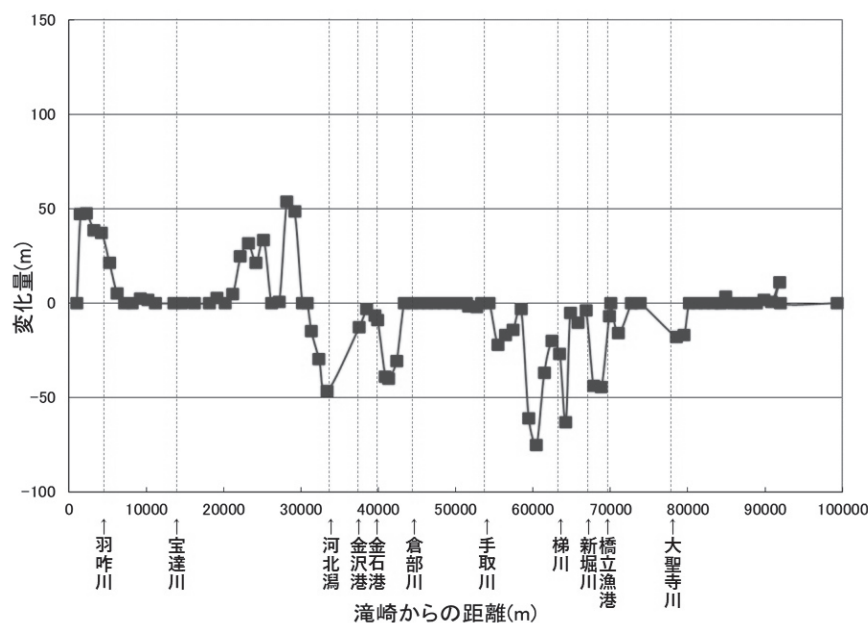


図8 1947年から1968年までの汀線変化量.

Fig. 8 Amount of shoreline change from 1947 to 1968.

る梯川河口においても、河口左岸が後退していることが分かる。これは他の海岸河口においても同じような変化が見られた。

以下に、対象地域を滝崎～宝達川、宝達川～河北潟、河北潟～倉部川、倉部川～手取川北部、手取川

南部～加賀市片野町、加賀市片野町～福井新港の6区間に分け、各区間における汀線の時空間的变化を詳細に検討した上で、各海岸における構造物の設置（表5）を含む、周辺環境の変遷に関する文献調査に基づいて、汀線変化の要因を考察する。

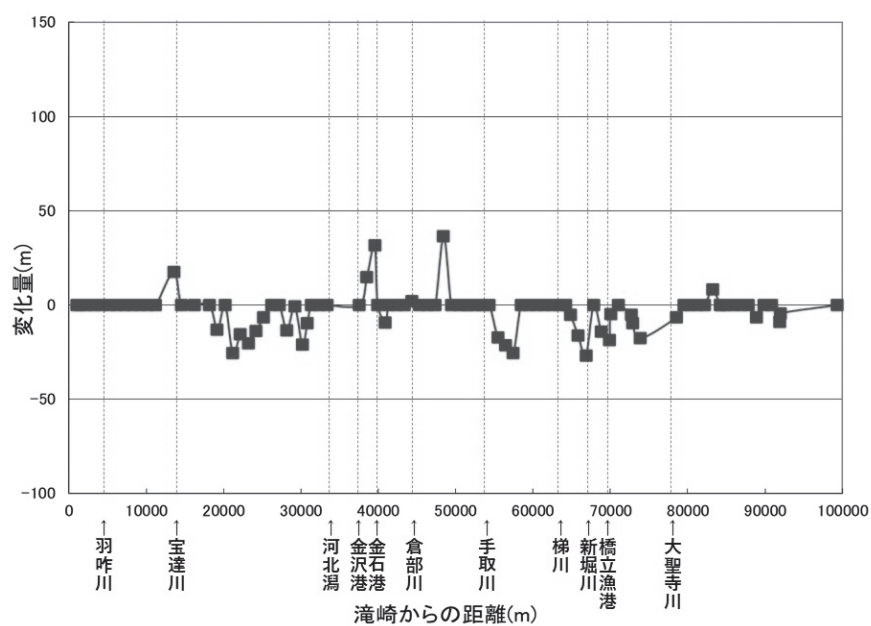


図9 1968年から1975年までの汀線変化量.

Fig. 9 Amount of shoreline change from 1968 to 1975.

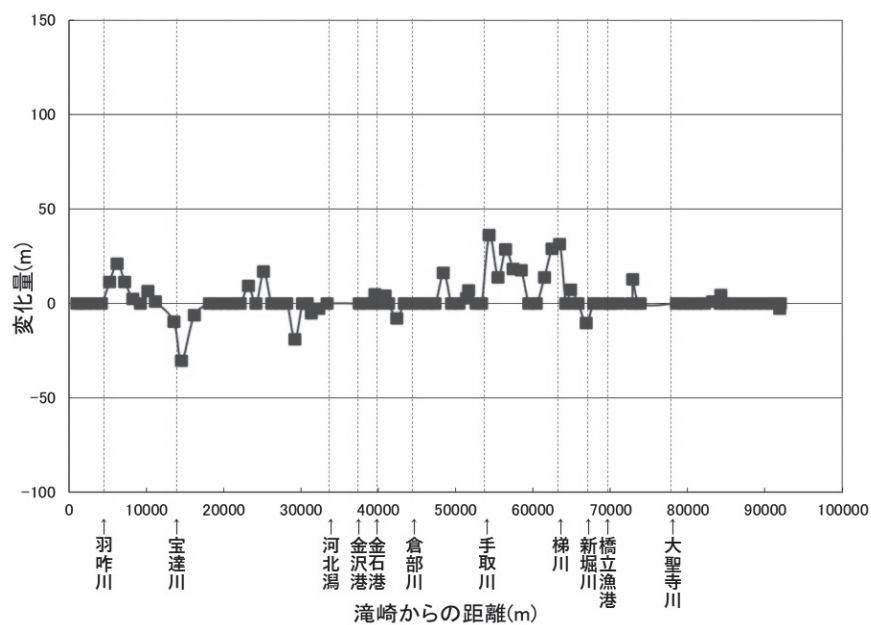


図10 1975年から1987年までの汀線変化量.

Fig. 10 Amount of shoreline change from 1975 to 1987.

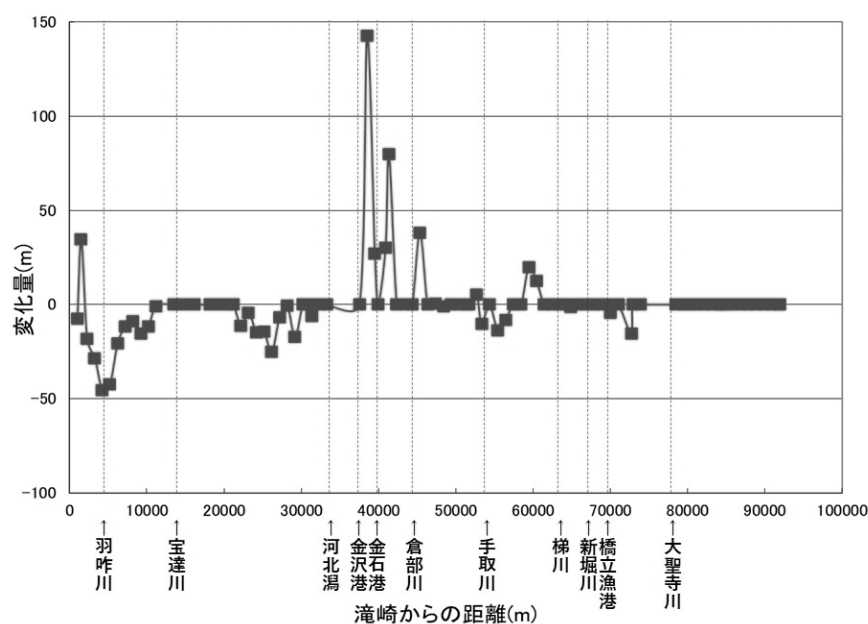


図11 1987年から2002年までの汀線変化量.

Fig. 11 Amount of shoreline change from 1987 to 2002.

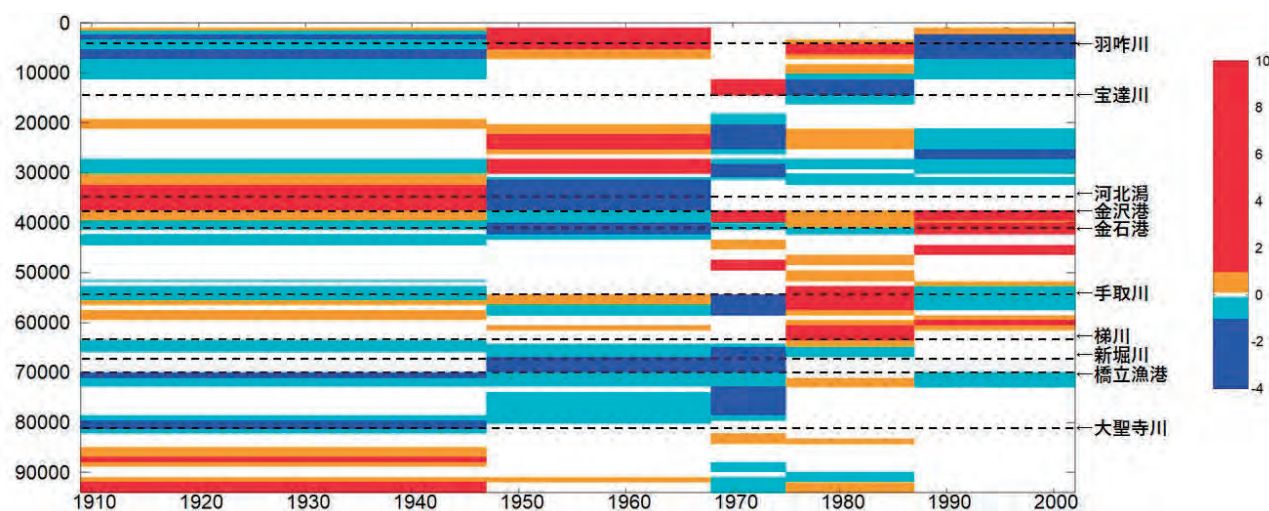


図12 1909年から2002年までの汀線変化量 (縦軸に時間変化を示しており、地形図の発行年と写真の撮影年で区分し、横軸は滝崎を0mとした距離を示し、原資料の作成年によって汀線変化量の算出期間が規定されている。海岸線の変化量を各年代間の年数で除した値を5色に分け、赤系統は海岸線の前進、青系統は海岸線の後退を示し、白抜きは誤差を考慮すると有意な汀線変化が認められない時空間としている。なお、千里浜は3,500mから10,500m、金沢港は38,500m、手取川河口は54,000m、梯川河口は63,500m、大聖寺川河口は78,500mの付近にそれぞれ位置する)。

Fig. 12 Amount of shoreline change from 1909 to 2002 (The horizontal axis shows the time series of the period for shoreline change calculation. This period is determined by the year of publication of source materials. And the vertical axis shows the distance from Cape of Takizaki as 0 m. The value obtained by dividing the amount of change in the shoreline by the number of years in each period is divided into five colors. The reddish indicates the advance of the shoreline, the blueish does the receding. And the white shows no significant change in the shoreline when the error is taken into consideration. On the horizontal axis, Chirihama beach is located near 3,500m to 10,500m, Port of Kanazawa is 38,500m, mouth of the Totori River is 54,000m, Mouth of the Kakehashi River is 63,500m, and mouth of the Daishoji River is 78,500m).

表5 各地域における構造物の歴史.

Table 5 Installation history of the structures.

地名	実施年	実施内容
柴垣	1909-1930	滝港開港
羽咋	1984-1988	千里浜海岸養浜
栗崎	1964-1966	河北潟放水路建設
金石	1955	金沢港開港
美川	1974	手取川ダム着工
片山津海岸	1930-1968	新堀川完成

文献・資料により作成.

Created by literature and documents.

1) 区間別の汀線変化に関する考察

1-1) 滝崎～宝達川 (0m～13,000m)

1909～1947年に汀線が大きく後退しており、その理由として現在の羽咋川北部に位置する邑知潟に流入する河川の影響が考えられる。羽咋市編纂委員会(1972)によると、「流入する主な河川は長曾川と飯山川であるが、いずれも古来はしばしば氾濫して土砂を押し出し、邑知潟の自然的埋積作用において大きな役割を果たしてきた」と書かれており、また、1925～1929年にかけて「大正の大改修」と呼ばれる、羽咋川の改修と逆水門の建設がなされており、この結果、海岸の砂浜の堆積が抑えられたと考えられる。また、この区間は千里浜海岸があり、後述する手取川ダム建設前からの手取川周辺での汀線後退が確認されることから、手取川からの土砂運搬量の減少が、千里浜海岸周辺での後退に大きく影響を及ぼしていると考えられる。

その後1947～1968年の間にはほとんどの地域で前進し、中には26m以上も前進する地域があった。この背景として、1925年から1929年にかけて羽咋川が改修され逆水門が建設されたが、1944年と1946年の集中豪雨で水門が決壊したこと、また、干拓堤防も壊れ元の潟に戻ってしまったという歴史(羽咋市編纂委員会, 1972)があることから、羽咋川の河口に大量の土砂が堆積したことが考えられる。

1968年以降になると、汀線の前進は確認できなかった。これは、手取川ダムの建設に伴う土砂供給量の減少により、海流によって北へ運ばれる漂砂の減少が影響した可能性がある。1987～2002年には後退する地域が見られた。これは1984～1988年まで千

里浜海岸沖において約24,000m³の砂が投入される養浜が実施され(石田, 1991)、その効果により汀線は前進したものの、養浜終了後にはふたたび後退したと考えられる(図13)。

1-2) 宝達川～河北潟 (13,000m～33,000m)

1909～1947年では、全体的に大きな変化はないが(図7)、1947～1968年に前進する場所が目立ち、26m以上前進する地域が見られた(図8)。この間、河北潟において1963年から農林水産省による干拓事業が始まり、1964～1966年にかけて河北潟放水路が建設され、河口には導流堤も建設された。このため、南向きの沿岸漂砂が右岸導流堤で阻止され、放水路右岸側で砂が堆積し、左岸では減少するという結果になったと考える(図14)。

1968年以降は全体的に後退しているが、この背景には後述する金沢港の整備や1947～1991年の間に行われた手取川の砂利採取が影響している。また、この辺りでは1964年から侵食対策構造物を設置しているが砂浜を前進させるほどに至っていない。

1-3) 河北潟～倉部川 (33,000m～43,000m)

1909～1947年の間には大野川で河口近くの流路が整備され、更に1947年には河口導流堤も見られる。同様に金石港を流れる犀川においても河口導流堤が見られる。また、この河川間では突堤も見られる。このため、南向きの漂砂と海流による沿岸漂砂により土砂が堆積し、前進している(図7, 図15)。

しかし1947～1968年の間では後退し、これは前述した河北潟放水路における導流堤により南向きの沿岸漂砂が阻止され、更に1955年に開港された金沢港における防波堤により、南向きの沿岸漂砂が阻止、

かつ、1962年から行われている手取川の砂利採取により、土砂流入が減少していることが要因として考えられる（図8）。

なお、金沢港は、1964年から重要港湾の指定を受け、近代港湾の建設が進められた。特に、大野西防波堤においては、1965年から設置が開始され、延長3,074mの非常に長い防波堤が整備されており、1975年頃をピークに、現在も延伸中である。汀線変化量と港湾付近の整備について検討したところ、非常に長い大野西防波堤による影響は顕著であり、1968年以降の汀線変化量から、防波堤の南側に土砂が堆積していることが確認できた。手取川から流出土砂が北向きの沿岸漂砂によって運ばれ、大野西防波堤南側では土砂が堆積するものの、前述のとおり、手取川からの土砂流入の減少および、南向きの沿岸漂砂による土砂が防波堤により阻止され、結果的には1968年以降の金石港付近の汀線が後退したと考えられる（図9）。

なお、1968年以降は侵食対策構造物の効果があり、汀線は比較的安定しているが、前述の大野西防波堤は1975年以降大幅に延伸しており、手取川から放出される土砂がせき止められ、以北の汀線後退に大きく影響を及ぼしていると考えられる。また、2002年に金沢港付近で大きく汀線が前進している理由は、1996～2019年に行われた金沢港浚渫土砂埋立護岸整備事業による浚渫によって発生した土砂の埋立場所を設置した際に、大野川右岸に土砂が堆積したものである。さらに大野川右岸については、1987年には汀線が後退していたが、消波ブロックの設置により土砂が堆積し、前進したと考えられる。

1－4）倉部川～手取川北部（43,000m～53,000m）

この地域では、1975年までは最大で35mの後退が確認された。また、1975年以降の汀線変化は横ばいまたは前進傾向にあり、2002年以降は若干の後退が確認された（図9～11）。

上記の理由としては、1975年以前については、手取川において大量に砂利採取がされている（表6）ことから、汀線が後退したと考えられる。また、1975年以降は手取川ダム建設による砂利の特定採取も行われているが、汀線は後退していない。これは、本区間が手取川河口に近いことから、ある程度の土砂量が確保されている可能性が指摘でき、また、1960年代から侵食対策構造物を積極的に設置しているため、汀線はやや前進または停滞していると考えられ

る。その後2002年以降は、侵食対策構造物による対策や手取川の土砂流入、漂砂のバランスが崩れてきたことから、後退傾向にあると考えられる。

1－5）手取川南部～加賀市片野町（53,000m～80,000m）

1909年～1947年においては手取川河口付近を除き全体的に後退している。これは、後述の手取川における砂利採取に伴うものであると考えられる。また、1909年時点では手取川河口における砂の堆積が著しく、現美川大橋付近の河道内まで砂の堆積が見られるが、1947年には河口浚渫がなされている（図16）。

また、梯川では河口導流堤が作られ、手取川と同様、河口が塞がれる傾向にあったものが改善されており、右岸においては、その導流堤による砂の堆積が見られるが、左岸においては後退しており、右岸と左岸の砂の堆積変化が著しい（図17、18）。

さらに1967年には梯川の南に位置する柴山潟から注がれる新堀川ができており、ここでも河口導流堤が建設されているが、南向きの沿岸漂砂の影響により右岸では堆積、左岸では減少という結果になっている（図19）。

橋立漁港においては、1947年には漁港北側に新たに防波堤が設置されている。このため、南向きの漂砂がせき止められ、防波堤北側では堆積されている（図20）。よって、ここでは手取川での土砂採取やちの手取川ダム建設の影響により、南向きに移動する漂砂は減少し、また、手取川より南に位置する河川の河口では導流堤が建設され、右岸では堆積、左岸では後退した。これらの結果、全体的に汀線が後退したと考えられる。

本区間では1947～1967年においても全体的に汀線が後退しており、その背景には、まず手取川において、少なくとも1962年以前から砂利採取が行われていることが挙げられる。川北町大洪水誌編纂委員会（1984）によると、1955年以降は50cm～200cmの河床低下が起こっているとされ、また、ピークでは1964年に532,000m³の砂利採取が行われていた（表6、図21）。ここで1962年以前の砂利採取量のデータは入手困難であった。また、1952年と1967年の空中写真を比較すると、手取川河口においてはそれほど変化ないが、手取川南部に位置する梯川においては、右岸側の河口導流堤が1967年には延長されており、河口右岸では堆積、左岸では以前に比べ更に減少している。



図13 千里浜海岸における汀線の変化.

Fig. 13 Shoreline change of the Chirihama Beach.



図14 河北潟放水路における汀線の変化.

Fig. 14 Shoreline change of the Kahokugata Floodway.



図15 大野川河口部における汀線の変化.

Fig. 15 Shoreline change of the Ohno River estuary.



図16 手取川河口部における汀線の変化.

Fig. 16 Shoreline change of the Tedor River estuary.



図17 梯川河口部における汀線の変化.

Fig. 17 Shoreline change of the Kakehashi River estuary.



図18 梯川河口部における汀線の変化の拡大図.

Fig. 18 Enlarged view of shoreline change in the Kakehashi River estuary.



図19 新堀川河口部における汀線の変化.

Fig. 19 Shoreline change of the Shinbori River estuary.



図20 橋立漁港周辺における汀線の変化.

Fig. 20 Shoreline change of around Hashidate Fishing Port.

表6 手取川管轄河川区間砂利採取量.

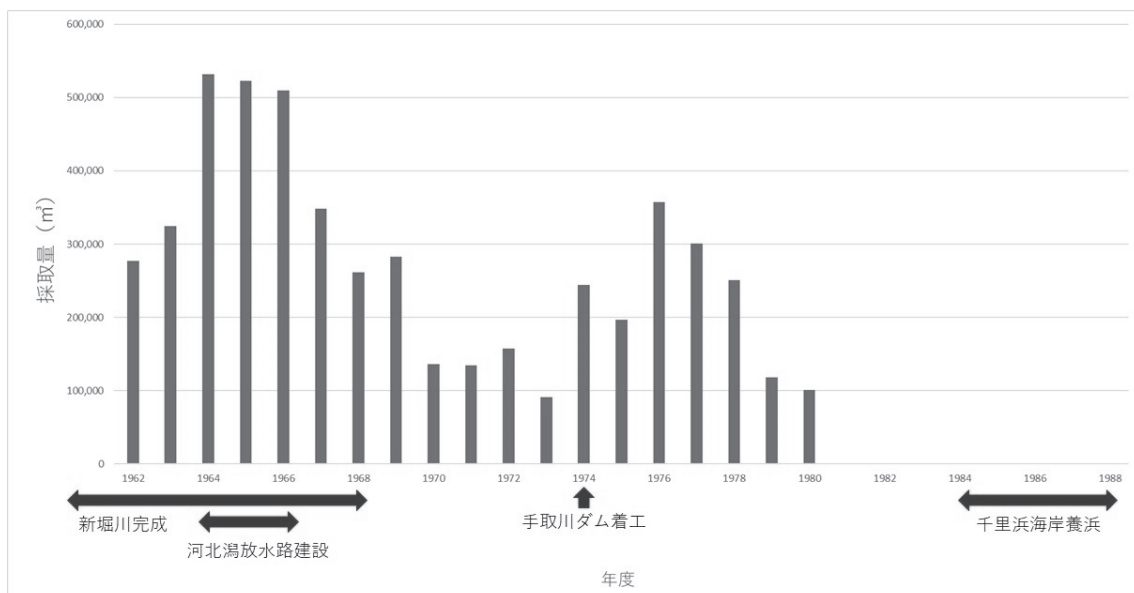
Table 6 Amounts of gravel mining in the Tedor River.

年度 (西暦)	年度 (和暦)	採取量 (m ³)	備考
1962	昭和37	277,000	
1963	38	325,000	
1964	39	532,000	
1965	40	523,000	
1966	41	509,628	
1967	42	348,550	規制計画による採取
1968	43	261,570	規制計画による採取
1969	44	283,000	規制計画による採取 208000m ³ 県移管量含む
1970	45	136,000	規制計画による採取
1971	46	134,500	規制計画による採取
1972	47	157,700	規制計画による採取 手取川ダム区間採取量含む
1973	48	91,300	特定採取 手取川ダム区間採取量含む
1974	49	244,500	特定採取 手取川ダム区間採取量含む
1975	50	196,800	特定採取 手取川ダム区間採取量含む
1976	51	357,000	特定採取 手取川ダム区間採取量含む
1977	52	301,000	特定採取 手取川ダム区間採取量含む
1978	53	250,700	特定採取 手取川ダム区間採取量含む
1979	54	118,500	特定採取 手取川ダム区間採取量含む
1980	55	101,400	特定採取 手取川ダム区間採取量含む

『手取川大水害復興五十年誌』による。
Quoted from the 50th Anniversary of the Tedor River Flood Reconstruction.

図21 手取川管轄河川区間砂利採取量および主要構造物設置年.

Fig. 21 Amount of gravel mining in the Tedorgawai River and year when the main structure was installed.



さらに南に位置する橋立漁港では防波堤が建設されるが、漁港北部では砂の堆積、南部では土砂の堆積は見られない。

以上のことから、海岸線の後退量については、手取川における砂利採取により、河川に流れる砂が減少し、それにより南向きの沿岸漂砂は減少したと考えられる。

1967～1974年になると後退量は減少し、安定する地域も出てくる。これは、1963年頃から行われた侵食対策構造物の効果が出ているということや、手取川の砂利採取についても1964年の532,000m³をピークに減少し、1980年には101,400m³まで減少したという理由が考えられる。

1974年以降は全体的に安定し、前進する地域も見られる。これは、前述した侵食対策構造物の効果、また、1974年には手取川ダムが着工され、土砂はせき止められるが、河川砂利採取量が大きく減ったことも汀線の前進に繋がったと考えられる。なお、1973年にはピークの1964年の5分の1まで採取量が減っている。

なお、先行研究（石川県、2002）において、空中写真判読の結果として1947年以降で最大100mの汀線の後退があったとの記載があるが、本研究ではこの区間における後退の最大量は、1930年以降で75mとなった。先行研究における具体的な計測方法や誤差の処理方法についての詳細が不明であるため直接比較はできないが、大幅な汀線の後退が認められる点では整合的な結果となった。

1-6) 加賀市片野町～福井新港（80,000m～98,000m）

1909～1947年には前進している地域が目立つ（図7）。これは、大聖寺川の影響が考えられる。大聖寺川では頻繁に水害があり、加賀市（1979）には「大正時代に入ると半日ほど大雨が降れば忽ち出水するという状況であり、その都度大聖寺町のほぼ3分の1が水びたしとなった」という記録があることから、それにより砂が堆積し、砂浜が前進したと考えられる。

その後、1933年には大聖寺川の河川改修が着工され、洪水を防ぐことができるようになったことから、それ以降は砂浜が前進することなく、安定した状態を保っていると考えられる。そのため1947年以降は汀線の変化はあまりないと考えられる（図8）。また、

片野では岩石が突出しており、それより南部では手取川からの土砂流入が抑えられるため、手取川の流入土砂量の影響があまりないことも、砂浜が安定している理由であると考えられる。

2) 加越海岸全体の汀線変化に関する考察

加越海岸全体としての変化は、1909～1947年は前進、後退の区間が入り混じっていたが、1947～1968年になると後退区間が大きく広がる。その後1968～1974年には更に後退する。1974～1987年になると前進傾向に変化するが、1987～2002年に入ると後退傾向になる。

かつては手取川から土砂が供給されることにより、それが海流による沿岸漂砂により南から北へ運ばれ、また波により北から南へ運ばれ、更に波の往来による岸沖漂砂によっても移動し、これらのバランスが保たれることにより、加越海岸の漂砂系は安定していたが、1960年代から大量に採取された砂利採取により、手取川からの土砂供給が減少し、その結果、手取川河口周辺域では堆積する土砂はあるものの、手取川から離れた所までは土砂があまり供給されず汀線が後退したと考えられる。これは手取川ダムの建設に先行する1960年代前半～1970年代前半までの汀線の後退に大きく影響しているものと考えられる。

また、1960年代前半からは離岸堤、消波堤などの侵食対策構造物の設置や養浜により、汀線の後退を防ぐ対策を行っており、その効果は1974年以降の図でわかるように、はっきりと表れている。しかしその一方、侵食対策構造物がない場所では、構造物がある部分に砂が移動するため、汀線が後退し、結果的に海岸全体では、図のように汀線が前進する所と後退する所が入り混じり、また、河口導流堤がある場所では南向きの沿岸漂砂が右岸導流堤で阻止され、河口右岸で前進、左岸で後退するという結果となり、本来のようななめらかな汀線を取り戻すのは難しい。

V. おわりに

本研究では、1909～2002年の長期間にわたって、加越海岸のほぼ全域における汀線の変化を定量的に把握した。

変化の概要としては、1909年から1947年にかけては、千里浜海岸付近において最大70mの後退が起

こっていた。また、橋立漁港以南においても最大70mの後退が確認された。その後、1930年から1968年においては、手取川付近において最大75mの後退が見られ、その周囲においても10～60mの後退が見られ、広範囲での後退が確認できた。1962年より砂利採取の記録はあるが、手取川ダム建設前からの手取川周辺での後退を確認できていることは、資料で確認される前から砂利採取が行われており、徐々に採取量を増やしたことによる後退であることが推測される。

また、1975年から1987年には、後退が進んでいた千里浜海岸において後退がなかったことから、1984年から1988年に実施された養浜の効果があらわれていると考えられる。しかし、養浜が終了したあとは、最大45mの後退に転じ、広範囲で確認された。かつては、汀線の後退の要因は、ダム建設や河川改修などの影響により河川からの土砂流入量が減り、その結果、海岸への土砂の供給がなくなり海岸侵食が起これと考えられていた。しかし、本研究で構造物などの歴史的背景を踏まえた結果、汀線を後退させる原因として、手取川におけるダム建設に加え、砂利採取も大きく影響していると結論付けた。

従来は加越海岸の一部の汀線変化や、トレーサー調査・捕砂器調査しか行われなかったが、本研究で加越海岸全域の汀線の変化を把握することができた。また、GISを用いることにより、誤差を軽減してより高精度な解析を行うことができた。

本研究では区間ごとの変化量とその原因について述べたが、漂砂の移動量については考察を行っていない。また、手取川の土砂の生産・運搬を規定する要素について、土砂の運搬量から明らかにすることはできなかった。しかし、日本に限らず世界で海岸侵食は深刻化しており、様々な角度からの調査・研究、侵食対策が行われている。先に述べた千里浜海岸においても、人工リーフの整備や、緊急養浜も行われており、試行錯誤しながらの侵食対策が行われている。このため、今後は手取川からの土砂供給の変遷の実態調査をし、手取川流域の環境特性と土砂生産の特性を明らかにし、今後の研究に繋げたい。

謝 辞：本研究の実施にあたり、国土交通省北陸地方整備局金沢河川国道事務所および石川県土木部河川課の皆様には加越海岸における汀線変化の現状、人工構造物の設置年や設置箇所等の資料をご提供い

ただきました。また、金沢大学名誉教授の石田啓先生には先行研究や侵食対策工法の実情についてご教示いただき、金沢大学地理学教室の先生方やメンバーの皆様には、常日頃から演習を通してご指導、ご意見をいただきました。そして、匿名査読者におかれましては、原稿を入念にお読みいただき、ご指摘および改善のご助言をいただきました。以上の皆様に御礼申し上げます。なお、本研究の一部には、JSPS科研費 JP18K01118「地域レジリアンスの構築のための流域地生態系システムの研究（代表・青木賢人）」を使用している。

文 献

- 羽咋市編集委員会, 1972: 羽咋市史現代編. 羽咋市, 967p.
- 長谷川裕之, 2000a: 旧版地形図・古空中写真の座標精度. 日本地理学会発表要旨集, 2007s, 222-222.
- 長谷川裕之, 2000b: 米軍写真を用いた終戦直後の自然景観の定量的再現. システム農学, **23**, 21-31.
- 北陸地方建設局金沢工事事務所, 1985: 金沢工事事務所治水のあゆみ. 北陸建設弘済会金沢支所, 石川, 716p.
- 乾 雅晴, 2000: 50mメッシュDEMを用いた空中写真の幾何補正. 森林応用研究, **9**, 149-151.
- 石田 啓, 1991: 車が通れる千里浜海岸. 土と基礎, **39**, 78-80.
- 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. 金沢大学教育開放センター紀要, **4**, 77-83.
- 石田 啓・梅下浩樹・長原久克・浦 良一, 1985: 石川県千里浜の侵食状況と養浜. 金沢大学日本海域研究所報告, **17**, 73-97.
- 石田 啓・高瀬信忠・長原久克・浦 良一, 1984: 渚ドライブウェーを有する千里浜海岸の現況と侵食対策. 海岸工学講義論文集, **31**, 355-359.
- 石川県, 1972: 石川県史現代編 (4). 石川県図書館協会, 1267p.
- 石川県, 1984: 石川県史現代編 (5). 石川県図書館協会, 1425p.
- 石川県, 2002: 加越沿岸海岸保全基本計画. 石川県, 120p.
- 加賀市, 1979: 加賀市史通史下巻. 加賀市, 981p.
- 川北町水害誌編集委員会, 1984: 手取川大水害復興50年誌. 川北町, 451p.
- 木村圭司・青木賢人・野村哲朗・中島 勝・佐野滋樹・鈴

- 木康弘・半田暢彦, 2000: 里山における過去50年間の植生変化—愛知県瀬戸市東南部を例として—. GIS-理論と応用, **8**, 9-16.
- 岸田弘之, 2011: 海岸管理の変遷から捉えた新しい海岸制度の実践と方向性. 国土技術政策総合研究所資料, **619**, 304p.
- 小池一之, 1974: 砂浜海岸線の変化について (予報). 地理学評論, **47**, 719-725.
- 日本地図センター, 1997: 地図で見る金沢の変遷. 日本地図センター, 東京, 21p.
- 小倉拓郎・青木賢人, 2017: 高解像度地形情報を用いた手取川扇状地における礫の運搬・堆積状況のモニタリング. 地形, **38**, p.65.
- 小倉拓郎・馬場真悟・山田大稀・森 遼平・青木賢人, 2017: 手取川流域の百万貫岩付近における堆積構造の再検討. 地形, **38**, 66-67.
- 佐土原聡・吉田 聡・川崎昭如・古屋貴司, 2005: 図解 ArcGIS身近な事例で学ぼう. 古今書院, 東京, 176p.
- 佐藤 浩, 2000: 伊能図と帝国図との比較による富山海岸と豊前豊後海岸における江戸～明治の海岸線変化. 地形, **21**, 451-467.
- 田中則男・小笹博昭・小笠原昭, 1973: 海浜変形調査資料 (第1報) —航空写真による汀線変化の解析 (東日本編) —. 運輸省港湾技術研究所, **163**, 1-95.
- 田中則男・小笹博昭, 1974: 海浜変形調査資料 (第2報) —航空写真による汀線変化の解析—. 運輸省港湾技術研究所, **192**, 1-106.
- 図門烏力吉・青木賢人, 2010: 手取川扇状地における河畔林の時系列変化. 日本地球惑星科学連合2010年大会, HTT032-P01.
- 宇多高明, 1997: 日本の海岸侵食. 山海堂, 東京, 442p.
- 宇多高明, 2004: 海岸侵食の実態と解決策. 山海堂, 東京, 304p.
- 山中 玲・青木賢人, 2008: 加越海岸における海岸線の変化について. 日本地理学会発表要旨集 2008f, p.126.
- Yuhi, M., 2008: Impact of anthropogenic modifications of a river basin on neighboring coasts: a case study. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, American Society of Civil Engineering*, **134**, 336-344.
- Yuhi, M., Umeda, S. and Hayakawa, K., 2009: Regional analysis on the decadal variation of sediment volume in an integrated watershed composed of the Tedoru River and the Ishikawa Coast, Japan. *Journal of Coastal Research*, **SI56**, 1701-1705.
- 由比政年・中谷 健・石田 啓・山内正彦・二俣 秀・高橋 至, 2004: 手取川河口域周辺の海底地形変化に対する河川土砂供給の影響に関する研究. 海岸工学論文集, **51**, 576 - 580.