

財団法人国土地理協会 平成24年度学術研究助成

地震時の地殻変動情報に基づく地盤沈下・海面上昇に

起因する海岸侵食量予測技術の向上

研究成果報告書

研究代表者: 小花和 宏之

(千葉大学 環境リモートセンシング研究センター)

目次

1. 研究の背景および概要	2
2. 地盤沈下による海岸侵食量の既存の評価手法	4
3. 本研究の着眼点・独創的な点	5
4. 調査地域	6
5. 調査方法および結果	6
5-1. 調査対象地の選定	6
5-2. 予測式に必要な海浜地形パラメータの収集	9
5-3. 実際の汀線後退距離 (Δy_k)	17
5-4. 既存の予測式を用いた汀線後退距離 (Δy_k)	18
6. 考察	18
6-1. 汀線後退量の実測値と計算値の比較	18
6-2. 海浜地形パラメータの感度分析	21
7. まとめと今後の課題	21
Appendix A	22
A1. 新たな測量手法 (UAV-SfM) の開発	22
A2. システム概要	22
A3. 測量結果	23
A4. まとめ	23

1. 研究の背景および概要

地盤沈下と海面上昇は、海面に対する陸域の標高が低下するという点で、等価の現象とみなすことができる。それらの現象による絶対的あるいは相対的な陸域の低下により、沿岸部では様々な問題が発生する。たとえば、地下水への海水侵入(井戸水の塩水化、沿岸植生の枯死)、水害危険性の増大(津波・高波に対する脆弱性、高潮による浸水危険性、低所における排水不良)、侵食基準面の変化に伴う河川流況の変化(土砂堆積による河床上昇、水深減少による航行障害)などが挙げられる。さらに大きな問題として、海岸侵食が発生する(図 1)。相対的な海面上昇により、海面上昇量と海浜勾配に応じた(いわば幾何学的な)陸域の水没すなわち汀線後退に加え、海底地形が波の侵食力に応じた平衡地形に遷移するために、さらに海岸が侵食される。



<http://www.linux.bideford.devon.sch.uk/blogs/seaforlife/?p=40>

図 1 海岸侵食による人工構造物の被害例

地盤沈下が発生する原因は、軟弱地盤の自然圧密、テクトニックな地殻変動などが挙げられる。しかし、沈下速度の速さおよび居住地への近さという点で、沿岸平野部における工業/生活用水としての地下水の過剰揚水に伴う地盤沈下は、人間活動にとってもっとも深刻な問題である。たとえば日本の場合、現在地盤沈下速度の最大値は約 20 mm/年である。一方、地球温暖化に伴う海面水位上昇は 3.1 ± 0.7 mm/年(1993~2003 年の世界平均: 文部科学省ほか、2007)である。日本沿岸の海面水位変化も同様に、1980 年代後半より上昇を続けている(図 2)。IPCC でもこの海面水位上昇による陸域の水没、海岸侵食の危険性が重要視されているが、相対的な陸域の低下速度を見ると地盤沈下の方が約 6 倍も速く、軽視できない問題であることを示している。

地盤沈下による海岸侵食に関しては、新潟海岸(堀川、1991; 三村ほか、1994)や九十九里海岸(星上ほか、2005)を対象とした研究例がある。しかし、海岸侵食に影響する要因は地盤沈下だけではなく、他にも海岸構造物の影響や、人工的な土砂移動(浚渫・養浜)、海食崖の保護やダム建設による供給土砂の減少などが挙げられ、それらの影響を要因ごとに分離することは極めて難しく、地盤沈下による海岸侵食量の評価はまだまだ不明な点が多い。

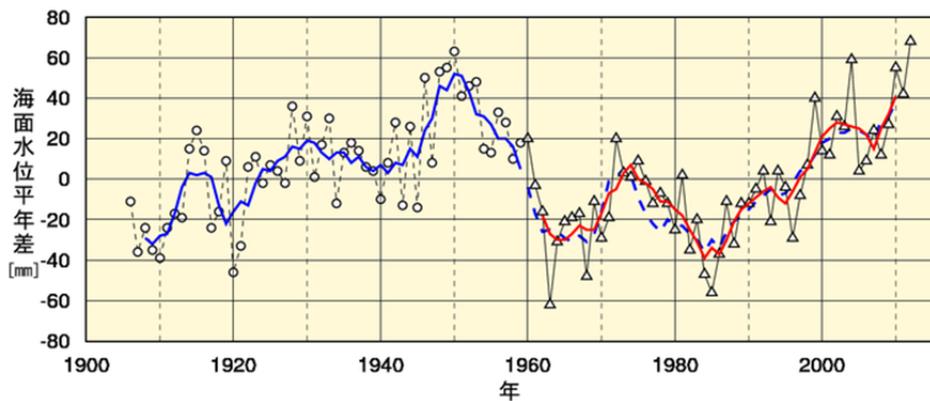


図 2 日本沿岸の海面水位変化 (1906-2013 年)

(http://www.data.kishou.go.jp/kaiyou/shindan/a_1/sl_trend/sl_trend.html)

地盤沈下現象は不可逆的であり、一度沈下すると再び地下水位が回復しても地表面標高は元の状態に戻らない(隆起しない)ので、その初期段階において適切な抑止策を講じないと手遅れになる(図 3)。防止策を講じるためには、地盤沈下により発生しうる問題を正確に予測・評価し、国民および為政者がある影響をよく理解し、対策の必要性を実感する必要がある。そのためには、地盤沈下による主要な被害の一つである海岸侵食の正確な評価方法が必要だが、上記のようにまだ十分には解明されていない。

以上の背景に基づき、本研究では 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震により地盤変動が発生した地域を対象として、地盤沈下により発生する海岸侵食の評価方法に関する研究を行う。すなわち、大地震により急激かつ広範囲に発生した地盤沈下を対象とすることで海岸侵食に影響する他の要因を排除し、既存の地盤沈下量と海岸侵食量の関係式を検証・修正してその精度向上を図り、従来より信頼性の高い予測手法の確立を目指す(図 4)。

本研究の研究代表者は 2006～2010 の 4 年間、京葉天然ガス協議会と東京大学の産学共同研究“地圏開発における持続可能性の考え方の構築と地域環境問題への対応技術の開発”に共同研究者として参加し、サブテーマである“天然ガス生産活動が地表環境変化に与えた影響の正確

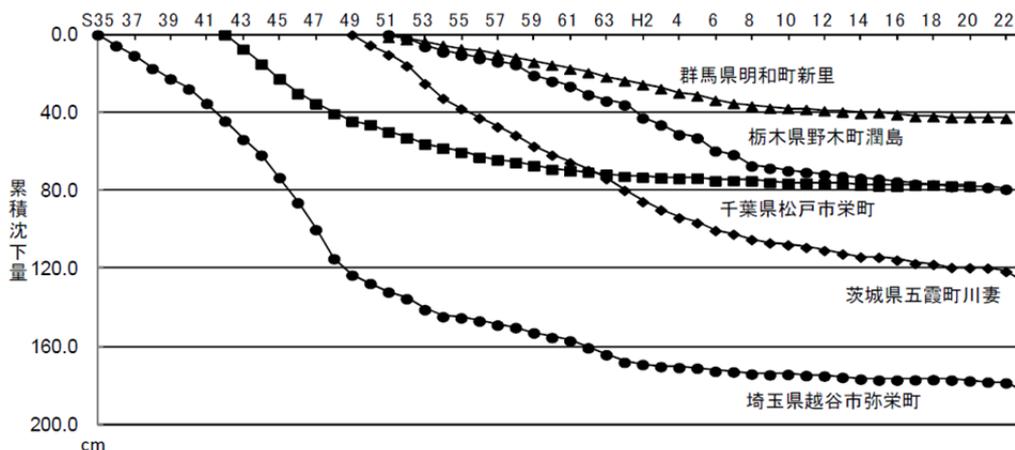


図 3 地盤沈下の経年変化 (環境省水・大気環境局)

な評価と将来予測”の研究に従事した。対象地域である千葉県九十九里平野では、水溶性天然ガスを含む化石海水(天然ガスかん水)の採取により地盤沈下が発生している(環境省水・大気環境局、2009)。当地域はその大部分が標高 10 m 以下の低平な海岸平野であり、これまでの累積 1 m 近い地盤沈下による環境への影響が懸念されているが、その影響は不明な点が多い。そこで、地盤沈下がこれまで地表環境に与えてきた影響を評価し、その一環として海岸侵食への影響を調べた。1975～2005 年における当地域全体の海浜土砂収支から判断すると、土砂損失を発生させる要因として地盤沈下の影響は、海食崖の護岸(供給土砂量の減少)や浚渫といった他要因よりも相対的に大きいという考察結果を得た(小花和・徳永、2013)。しかし、既存研究と同じく地盤沈下を引き起こす要因ごとにその影響を分離することは極めて難しく、さらなる検討が必要であった。そんな折、東北地方太平洋沖地震により広範囲で大規模な地盤沈下および海岸侵食が発生し、当地域を対象とする本研究の着想に至った。

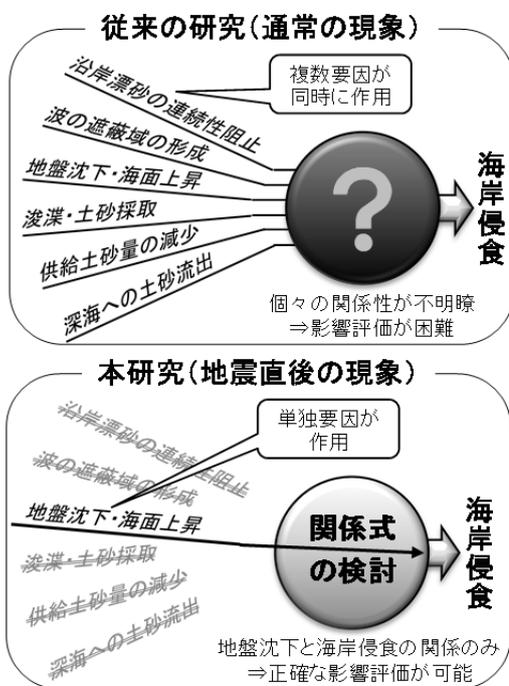


図 4 研究の概念および着眼点

2. 地盤沈下による海岸侵食量の既存の評価手法

地盤沈下による海岸侵食量を求める手法として、三村ほか(1993)により以下のような汀線後退量を求める式が提案されている。

$$\frac{3}{5}AW_*^{5/3} - \frac{3}{5}A(W_* - \Delta y_k)^{5/3} - SW_* + B\Delta y_k + \frac{0.5S^2 - SB}{\tan \beta} = 0 \quad \text{式(1)}$$

ここで、 A は海浜断面係数(各海岸に固有の定数)、 W_* は汀線から h_* (断面変化が生じる限界水深、

すなわち波による地形変化の限界水深)までの岸沖方向距離、 Δy_k は汀線の後退距離、 S は海面上昇量、 B はバームの高さ、 $\tan \beta$ は海浜の平均勾配である(図 5)。この式は、海浜の平衡地形が Bruun (1962、1988) によって示された以下の式(2)で表わされると仮定し、2次元断面で考えた時に侵食土砂量と堆積土砂量が等しくなる、という条件下で求められる式である。ここで、 h は水深、 y は汀線からの沖方向距離を示す。本研究では、海面上昇量を地盤沈下量とみなして式(1)をもとに岸沖方向の2次元的な汀線後退量を算出する。

$$h = Ay^{2/3} \quad \text{式(2)}$$

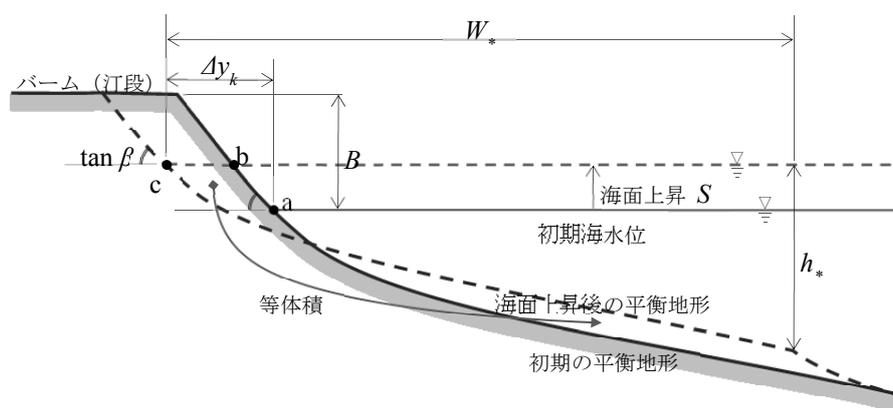


図 5 海面上昇による海岸侵食

(三村ほか、1993 および磯部、2008 をもとに作成)

3. 本研究の着眼点・独創的な点

本研究の特色は、海岸侵食に影響する多くの要因のうち、地盤沈下だけを分離して評価することである(図 4 下図)。通常、地盤沈下は長期間発生するために、同じ時期に建設された海岸構造物(堤防、離岸堤など)や人工的な土砂供給(養浜)など多くの影響を受けてしまい、個々の影響を分離することが難しい。しかし、地震による急激な地殻変動を対象とすれば、他の条件が大きく変化することなく、純粹に地盤沈下による海岸侵食の影響だけを評価することができる。また、東北地方太平洋沖地震は極めて広範囲に地盤沈下を発生させたため、多くの地域でデータを取得し、検討することができる。すなわち、数少ない調査地の地域性に惑わされることなく、一般性・普遍性を持つ適用性の高い成果を得ることが期待される。

地盤沈下およびそれを取り巻く社会情勢は以下の特徴を持つ:①地盤沈下は経済発展・人口増加およびそれに伴う地下水利用量の増加によって発生する;②被害を実感しにくい地盤沈下よりも、経済成長の方が優先される傾向にある;③世界中の大都市は初生的に水害リスクの高い大河川デルタ上に位置し、地盤沈下はそのリスクをさらに高める。すなわち、地盤沈下およびそれに伴う海岸侵食問題は、今後も発展途上国を中心に発生し続ける問題であり、本研究成果はその被害を未然に防ぐことに世界中で貢献することができる。

東北地方太平洋沖地震は死者および行方不明者合わせて約 1 万 9 千人の犠牲者を出し、また地震・津波の被害に加えて原子力発電所の事故も引き起こし、後世に残る甚大な被害をもたらした。

た。しかし、その大地震は数百年あるいは 1,000 年に一度という稀有な事象であり、今後の健全な社会発展のために学術的に貴重なデータを取得し研究成果を残すことは我々研究者の責務である。

4. 調査地域

東北地方太平洋沖地震は、2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分に発生し、太平洋三陸沖約 130 km、深さ約 24 km を震源として、マグニチュードは 9.0 であった。東北地方を中心として最大震度 7 を記録し、地震による津波の高さは 8-9 m に達し、最大遡上高は 40 m を超えた。また広範囲に渡って地盤沈下が発生し、津波による遡上波と相まって浸水被害が発生した(図 6)。

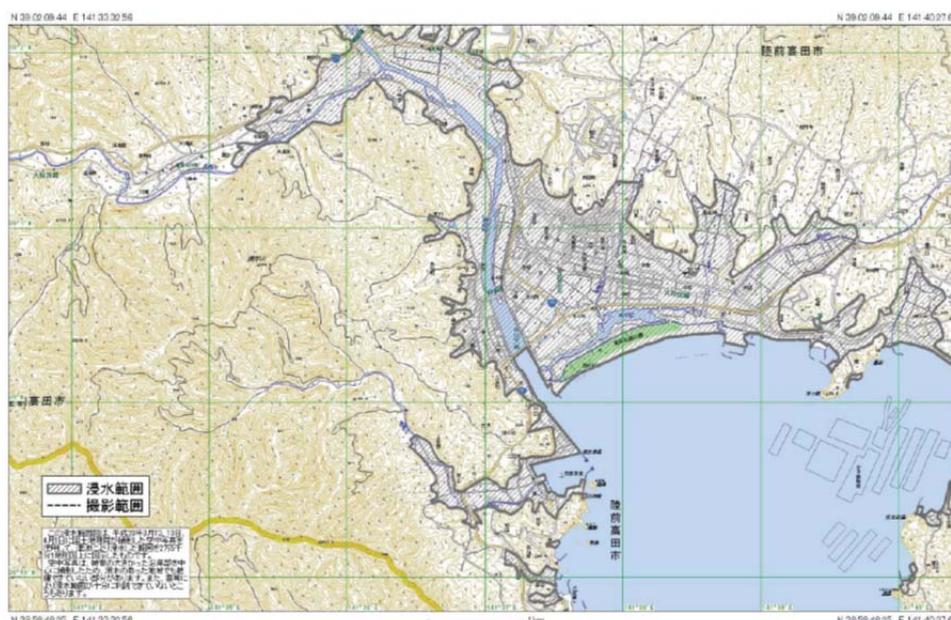


図 6 浸水範囲概況図の一例 (国土地理院)

地震に伴う地殻変動量、すなわち地盤沈下量に関しては、国土地理院により解析が行われている(図 7, 8)。これは、東日本の電子基準点に関して、地震前(2011/3/1-2011/3/8)と地震後(2011/3/12)の変動量を求め、長崎県五島列島の電子基準点「福江」を固定局として算出したものである。地盤沈下は青森県八戸から東京都に至る東日本の広範囲で認められ、最大値は宮城県石巻市の電子基準点「牡鹿」で -107.6 cm が記録された。本研究では、以上の地盤沈下量の分布をもとに、調査対象範囲を青森県八戸市から千葉県銚子市の太平洋沿岸とした。

5. 調査方法および結果

5-1. 調査対象地の選定

式(1)および(2)は砂浜海岸を対象とした関係式であるため、最初に調査対象範囲(八戸～銚子間の太平洋沿岸)内の砂浜海岸を抽出した。まず、平成 21 年度に作成された国土数値情報土地

基準期間：2011/03/01 -- 2011/03/08 [F 3：最終解]
 比較期間：2011/03/12 -- 2011/03/12 [F 3：最終解]

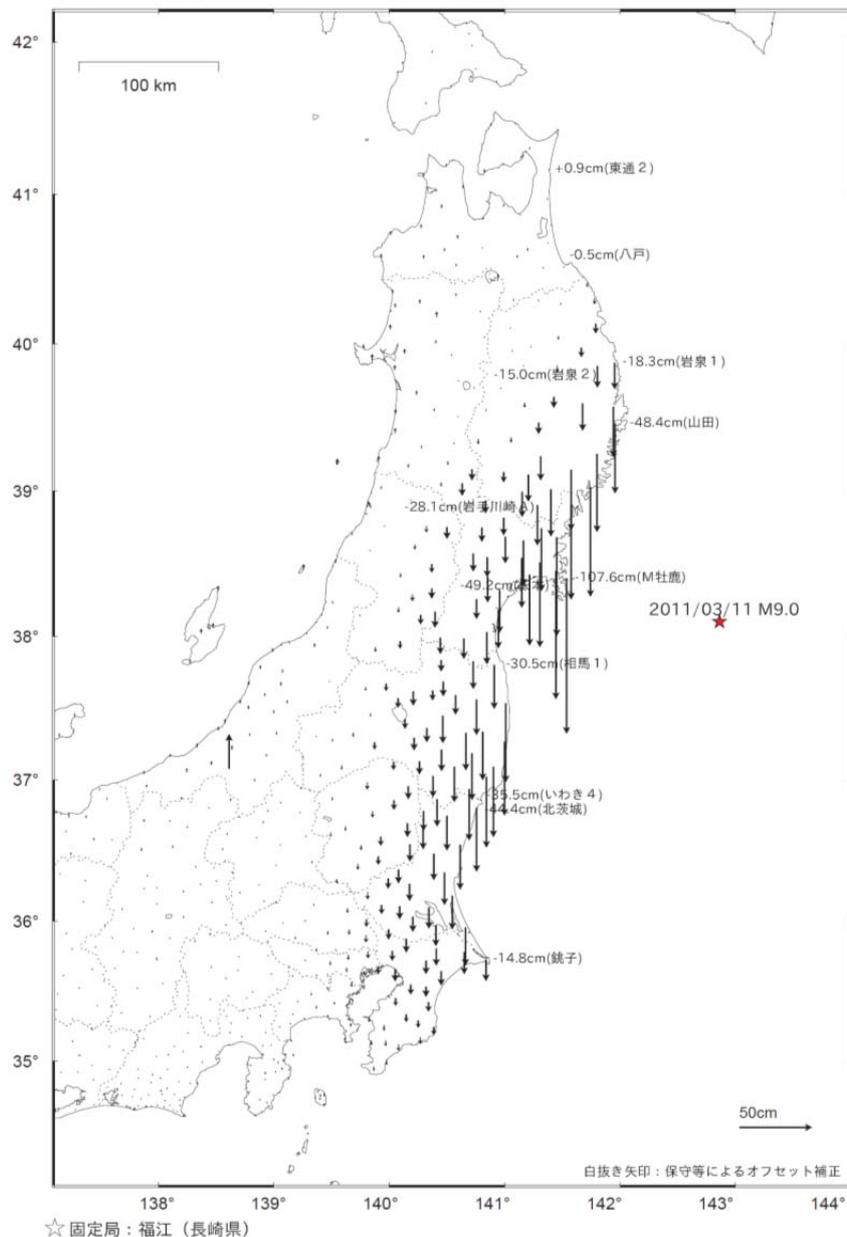


図 7 東北地方太平洋沖地震 (M9.0) による地殻変動 (上下) (国土地理院)

利用細分メッシュデータ(国土交通省)を用いて抽出を試みた。このデータは、全国の土地利用の状況について、3次メッシュ 1/10 細分区画(100 m)毎に各利用区分(田、その他の農用地、森林、荒地、建物用地、幹線交通用地、湖沼、河川等)を整備したものである。昭和 51 年度以降、これまでに 6 度ほど整備されており、平成 21 年度版は人工衛星 (ALOS) および 2 万 5 千分の 1 地形図を用いて作成されたものである。しかし、①空間解像度 100 m では沿岸方向の海岸長および岸沖方向の海岸幅、共におおよそ 200 m 以上のものしか抽出することはできないが、本研究ではより小規模な海岸も対象としたい、②データの凡例の一つに「海浜」があるが、その中で砂浜、礫浜、岩

基準期間：2011/03/01 -- 2011/03/08 [F 3：最終解]
 比較期間：2011/03/12 -- 2011/03/12 [F 3：最終解]

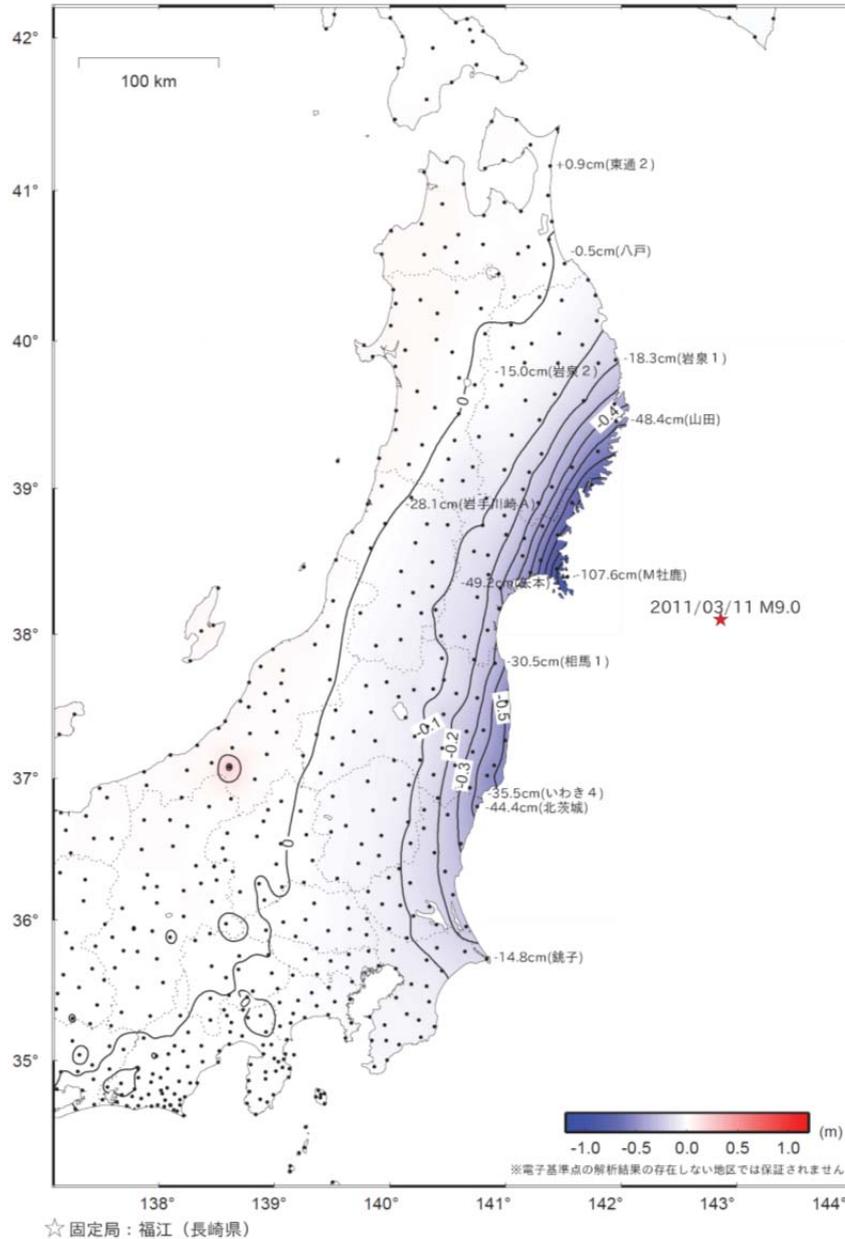


図 8 東北地方太平洋沖地震（M9.0）による地殻変動（上下）（国土地理院）

石海岸の分類は無く、砂浜のみを抽出することが出来ない、という 2 点の理由により、本データの利用は断念した。

次に、基盤地図情報(国土地理院)および数値地図 25000(空間データ基盤)(国土地理院)による砂浜海岸抽出を試みたが、両データは海岸線の位置情報は持つが、砂浜や岩石海岸といった土地被覆情報を持たないため、これらの使用も断念した。

そこで次に、数値地図 25000(地図画像)(国土地理院)による分類を試みた。これは 2 万 5 千分 1 地形図を数値化した画像データ(ラスターデータ)である。これらのデータは、カラーパレットのビット

数で画像情報を「道路、鉄道、建物、境界等」「水涯線、水田等」など大まかに6つのグループに分類しているものの、例えば「砂浜海岸」といった個別の数値分類はされていないので、GISソフトウェア等を用いた砂浜海岸の自動抽出は出来ず、調査者の目視判断による個別の砂浜海岸抽出作業が必要という欠点がある。しかし上記のデータと異なり、比較的小規模(おおよそ100 m程度)な砂浜海岸も判別可能であるため、このデータを用いることとした。当データは近年オンライン提供も開始されており、20万分1地勢図1面分の範囲(2万5千分1地形図64面相当)のデータが最小単位として販売されている。そこで、対象範囲をカバーする93面分のデータを購入し、その後の空間情報解析の利便性を考え、ESRI社のArcGISに格納できるように幾何補正およびファイル形式の変換を行った。

ArcGIS上で数値地図25000(地図画像)を目視し、沿岸方向の海岸長がおおよそ100 m以上の砂浜を抽出した。岬や岩礁、河川等で分離された海岸は個別のものとして判別した。その結果、合計292ヶ所の砂浜が抽出された(図9A)。しかし、海岸長が長い場合、沿岸漂砂により沿岸流上流から下流に向けて砂が移動してしまい、同じ海岸でも計測する場所により海岸侵食量が異なる懸念があったため、あまり沿岸漂砂の影響を考慮しなくても良いと考えられる、比較的小規模な砂浜を対象とすることにした。海岸長のヒストグラム(図10)を作成したところ、200 m以下が全体の36%、104ヶ所を占めており、調査対象数としては適当と判断し、海岸長200 m以下の砂浜を調査対象とした。ただし、そのうち2ヶ所については数値地図25000(地図画像)作成後すぐに埋立てにより砂浜が消失していたので対象から外し、調査対象は102ヶ所とした(図9B)。

5-2. 予測式に必要な海浜地形パラメータの収集

式(1)の計算に必要な以下のデータを収集する。

A: 海浜断面係数(各海岸に固有の定数)

h_* : 断面変化が生じる限界水深、すなわち波による地形変化の限界水深

W_* : 汀線から h_* までの岸沖方向距離

S: 海面上昇量

$\tan\beta$: 海浜の平均勾配

B: バームの高さ

(1)海浜断面係数(A)、移動限界水深(h_*)、汀線から h_* までの岸沖方向距離(W_*)

A(海浜断面係数)は、まず対象とする海岸において岸沖方向に測線を設定し、汀線から沖方向の海底縦断形を求め、その縦断形を式(2)で近似して推定する。したがって、まず海底の地形情報が必要となる。可能であれば実際に岸沖方向の水準測量あるいは音響測探機を用いた測量を各調査地で実施して詳細なデータを得ることが望ましいが、本研究の全ての対象地において実測するのは難しいため、既存のデータである「海底地形デジタルデータ(日本水路協会)」を用いた。これは日本沿岸全域にわたって整備された海底地形の等深線データであり(図11)、海域により等深線間隔は異なるが、取得水深データで求められる最大限の高密度等深線が収録されている。フエ

A: 砂浜海岸(全て)

B: 砂浜海岸(海岸長200m以下)

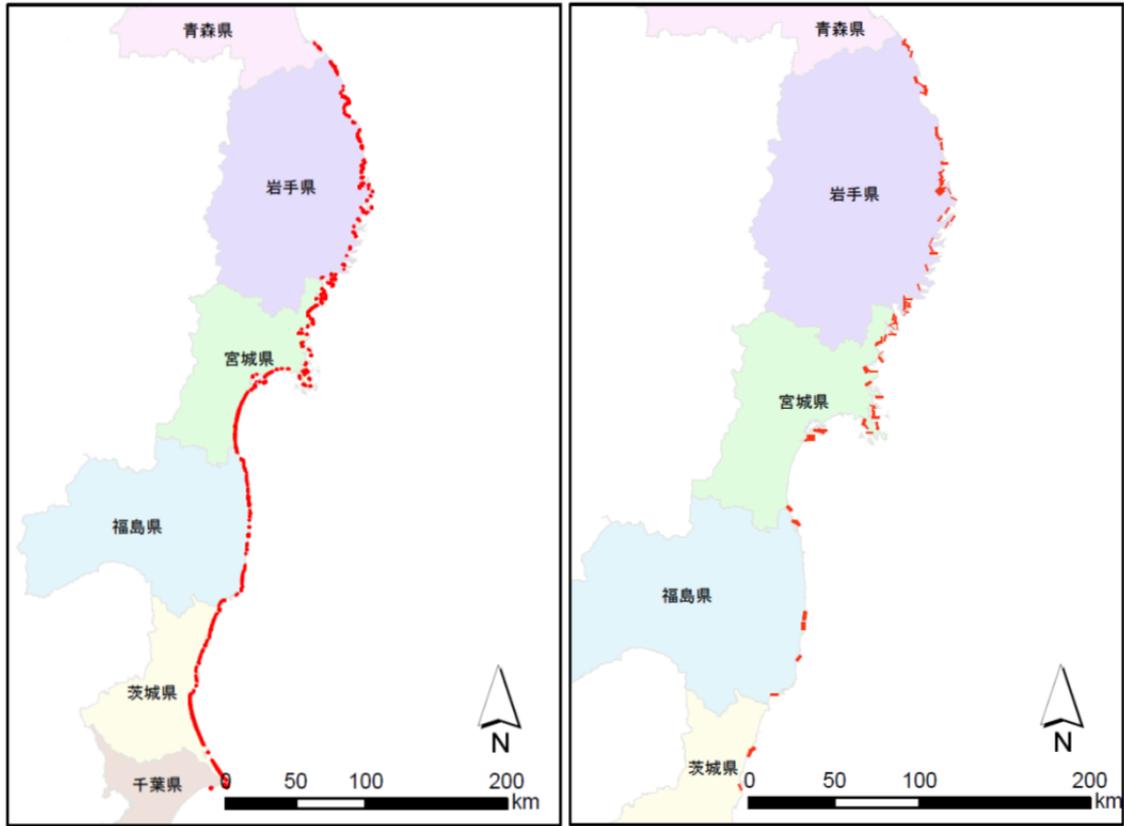


図9 砂浜海岸の分布

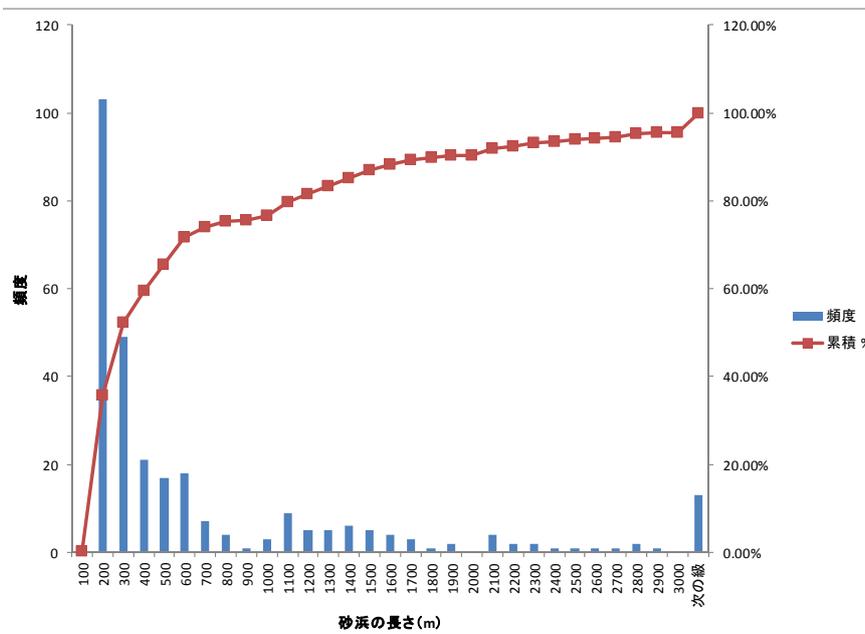


図10 海岸長のヒストグラム

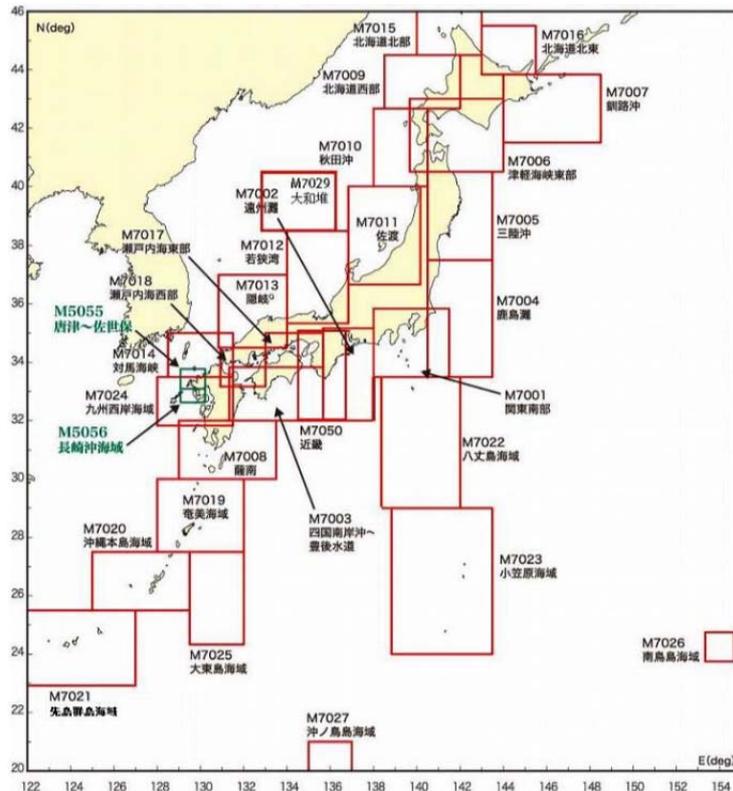


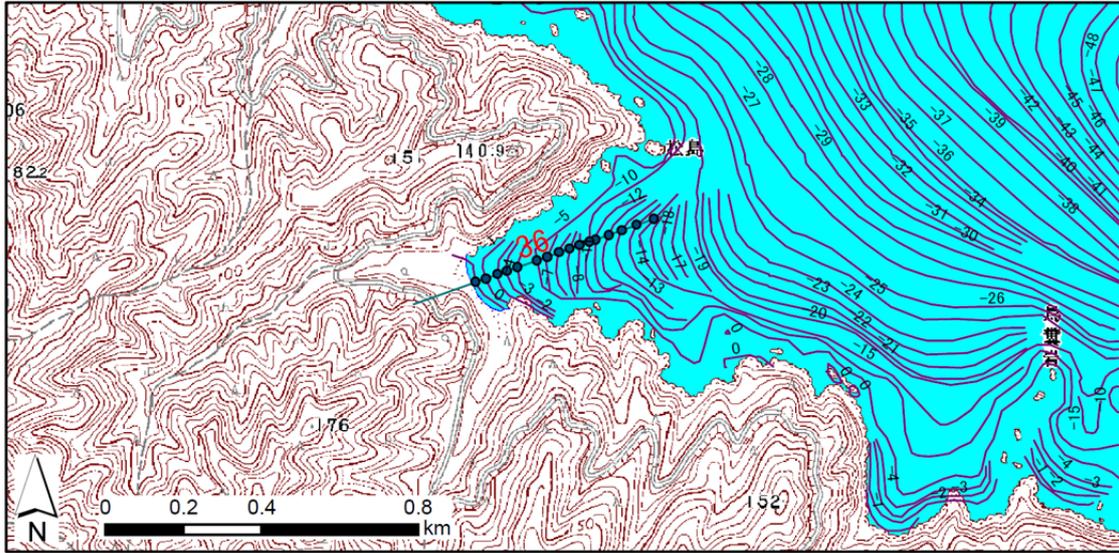
図 11 海底地形デジタルデータの海域（海図ネットショップ）

イル形式は、アスキーファイルとシェープフィルの 2 種類があり、本研究では ArcGIS を用いて他データと統合するためにシェープファイル形式のデータを用いた。対象範囲をカバーする「M7005 三陸沖」および「M7004 鹿島灘」の 2 範囲のデータを使用した。対象とする海岸沿岸部の等深線を確認したところ、間隔は 1 m～10 m であった。

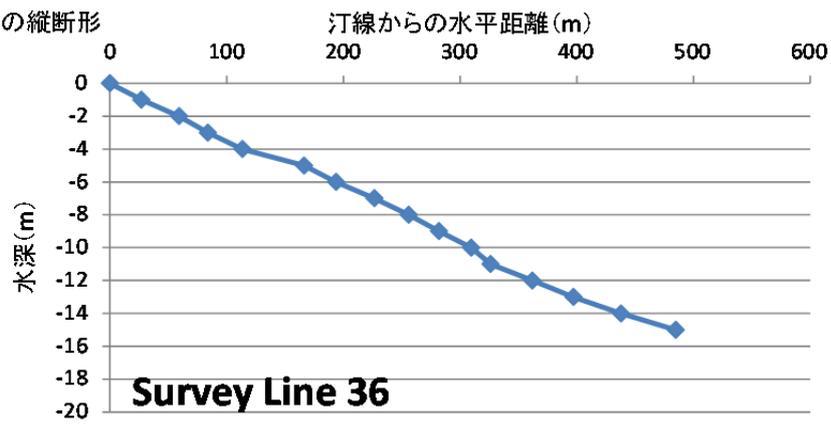
次に、対象とする砂浜海岸に測線を設定した。測線は海岸の中心を通り、海岸線に直交する方向に引いた。次に、ArcGIS のアドイン機能であるジオメトリ変換ツールを用いて、測線と海底地形等深線の交点にポイントが発生させ、各ポイントに等深線データ(水深)および x、y 座標値を付加させた。さらに x、y 座標値を用いて汀線から各ポイント(水深)までの測線上の水平距離を求め、縦断面を作成した。その一例を図 12、13 に示す。水深 1 m 間隔の詳細な海底地形データが得られた場所(図 12)もあるが、5 m 間隔のラフな地形情報しか得られない場所(図 13)も存在した。

次に、各断面図に式(2)を当てはめて A の値を求めるが、断面図のどの範囲すなわち水深何 m の範囲までを近似するか検討する必要がある。岸沖方向の波による土砂移動を考える場合、考慮すべき範囲は波による地形変化の限界水深すなわち h^* までとなる。 h^* の値には各調査地における波の強さや海底の構成物質の特性が影響するが、全ての調査地について個別に調査することは難しいので、宇多 (1997) による「外海・外洋に面した海岸では 10 m 程度、内湾や内海に面した海岸では 2-4 m 程度」という既存の知見を参考に、本研究では 10 m と設定した。そこで、汀線から水深 10 m までの海底断面図に対して式(2)をフィッティングした。近似は、断面図上の各ポイントにつ

A: 測線および海底地形図



B: 岸沖方向の縦断形

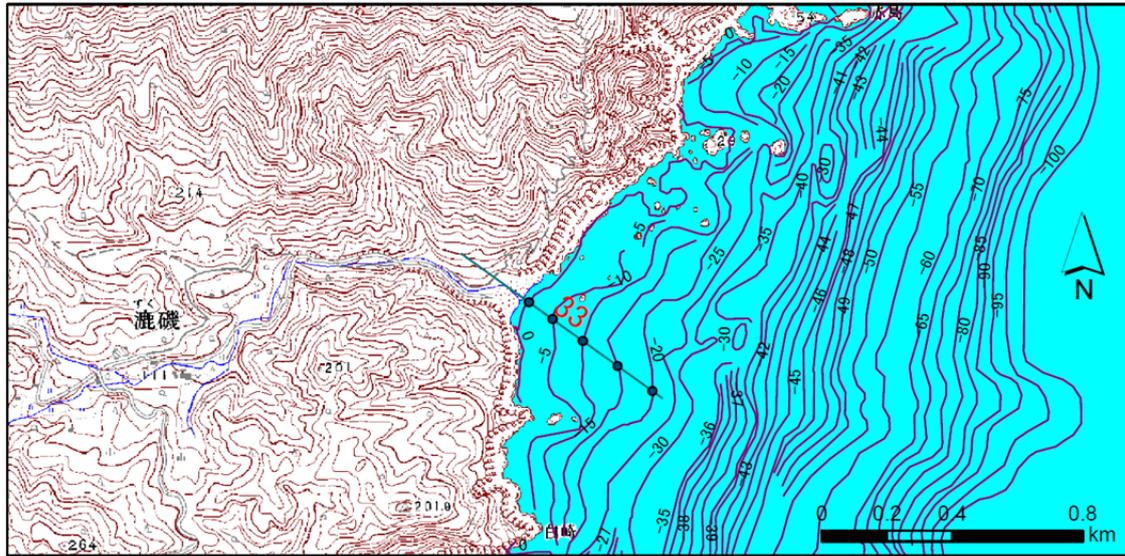


C: 空中写真 (GoogleMap)

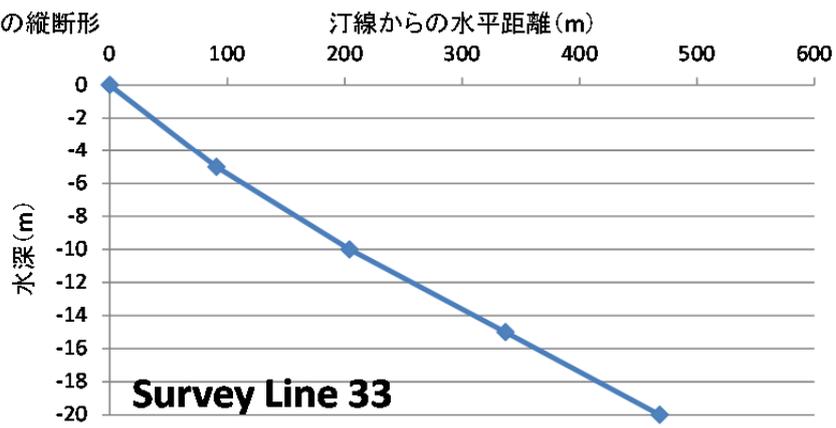


図 12 調査対象砂浜海岸の一例 (岩手県釜石市両石町第 5 地割 58)

A: 測線および海底地形図



B: 岸沖方向の縦断形



C: 現地写真(2013年12月11日撮影)



図 13 調査対象砂浜海岸の一例 (岩手県下閉伊郡山田町船越第 23 地割 93)

いて、鉛直方向の実測値(各ポイントの水深)と計算値(式(2)で求められる水深)の残差の絶対値の和を最小にする方法を用いた。以上の計算により求めた各対象地の A の値を表 1、図 14A に示す(後述する実際の汀線後退距離(Δy_k)を求めることが出来た 42ヶ所(図 15)のデータのみ示す)。最小値は 0.06、最大値は 0.80、平均値は 0.24 である。測線 no.28($A=0.71$)、49($A=0.80$)、100($A=0.61$)等は他の測線に比べて値が極めて大きい、すなわち海底の勾配が急であり、特殊な地形場である可能性が高い。それら他と異なる特徴を持つポイントの扱いについては後ほど検証する。また、上記測線上の縦断形を求める過程において W^* (汀線から h^* までの岸沖方向距離)、すなわち汀線から水深 10 m のポイントまでの水平距離も得られる(表 1、図 14B)。最小値は 44 m、最大値は 2539 m、平均値は 440 m である。 A の値が大きい、すなわち海底の勾配が急である場所ではやはり W^* の値も小さく、測線 no.28($W^*=54$ m)、49($W^*=44$ m)、100($W^*=66$ m)等は他の測線に比べて値が小さい。一方、 A の値が最も小さい、すなわち海底の勾配が緩い測線 no.26($A=0.06$)では、 W^* の値が 2539 m と、他の場所に比べて飛び抜けて大きい値になっている。

(2)地盤沈下量(S)

次に、 S (海面上昇量、すなわち地盤沈下量)を求める。これは、4 章で説明した地震に伴う地殻変動量(図 8)の等値線を ArcGIS 上でデジタル化し、各等値線の間を内挿してラスタライズし、測線の汀線ポイントにおける地盤沈下量を調べることで求めた(表 1、図 14C)。最小値は 0.03 m、最大値は 1.00 m、平均値は 0.53 m である。

(3)海浜の平均勾配($\tan\beta$)

海浜の平均勾配を表す $\tan\beta$ に関しては、測線と海底地形等深線の交点のうち、汀線側から数えて 1 番目(汀線上)と 2 番目(等深線上)のポイント間の勾配を用いた(表 1、図 14D)。最小値は 0.01、最大値は 0.47、平均値は 0.06 である。他に比べて特に値が大きい 3 点では A の値が大きい場所に対応しており、測線 no.28($A=0.71$)では $\tan\beta=0.468$ 、測線 no.49($A=0.80$)では $\tan\beta=0.225$ 、測線 no.100($A=0.61$)では $\tan\beta=0.152$ である。

(4)バームの高さ(B)

次に、 B (バームの高さ)を求める。バームとは、砂浜海岸において高潮時または暴浪時の波の働きによって打ち上げられた砂がたまり、その表面が陸側へわずかに傾いた微地形のことを指す。バームは汀線位置の変化に伴って侵食あるいは堆積作用を受けるため、海浜侵食量を求めるためにその高さを決める必要がある。

研究代表者がかつて、千葉県九十九里浜南部を対象として航空レーザ測量により得られた詳細な地形データを用いて調べたところ、バームの上部に局所的な砂丘が堆積していることが多く、沿岸方向に数 m 規模の細かい起伏が認められた。すなわち、砂丘堆積物も含めた一見するとバームに見える堆積物の高さは、ある砂浜において一定の値を取るとは限らない。

バーム上部の砂丘堆積物も汀線変化に伴いバームと共に侵食されることが想定されるため、 B の値には砂丘堆積物の厚さも含めた方が適切と考えられる。しかし、本研究の対象地域において測線上の砂丘堆積物も含めたバームの高さを正確に求めることは困難であり、また比較的近い距

表 1 海浜地形パラメータおよび汀線変化量

Survey Line	2	5	6	7	8	9	10	11	23	24	25	26	28	29	31	32	33	34	35	36		
海浜断面係数: A	0.21	0.11	0.11	0.23	0.23	0.17	0.20	0.08	0.23	0.23	0.18	0.06	0.71	0.23	0.23	0.21	0.29	0.34	0.21	0.19		
移動限界水深: h_* (m)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10		
汀線から h_* までの水平距離: W_* (m)	323	733	801	282	279	452	354	585	282	285	248	2539	54	402	295	332	204	160	266	310		
地盤沈下量: S (m)	0.03	0.04	0.07	0.08	0.08	0.09	0.09	0.09	0.31	0.31	0.31	0.34	0.34	0.37	0.45	0.46	0.49	0.51	0.54	0.55		
海浜の平均勾配: $\tan \beta$	0.051	0.012	0.035	0.021	0.036	0.015	0.016	0.006	0.028	0.038	0.033	0.006	0.468	0.068	0.120	0.040	0.055	0.061	0.028	0.037		
汀線の後退距離 (実測値): Δy_k (m)	11.87	7.06	0.60	0.55	12.69	-0.70	8.41	9.04	3.61	0.42	9.01	-87.04	14.74	19.38	3.63	15.20	0.85	7.50	-43.42	11.87		
汀線の後退距離 (計算値、 $B=1$): Δy_k (m)	1.15	3.95	5.74	2.54	2.51	4.48	3.67	12.14	9.88	9.58	12.14	82.09	1.86	12.20	13.19	16.44	10.90	9.05	18.94	21.36		
汀線の後退距離 (計算値、 $B=3$): Δy_k (m)	1.28	4.77	6.14	3.27	2.96	5.64	4.77	17.21	12.07	11.15	14.69	91.63	2.00	13.05	13.90	18.67	12.62	10.66	23.11	24.63		
Survey Line	37	38	49	53	60	63	65	66	67	68	69	70	71	72	74	75	80	81	89	90	97	100
A	0.18	0.15	0.80	0.37	0.09	0.06	0.20	0.25	0.25	0.27	0.20	0.30	0.36	0.32	0.42	0.24	0.09	0.09	0.10	0.10	0.14	0.61
h_* (m)	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
W_* (m)	314	497	44	141	1036	948	350	243	250	227	360	195	145	170	114	267	595	1119	914	837	483	66
S (m)	0.57	0.62	0.71	0.70	0.68	0.77	0.93	0.94	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99	0.88	0.87	0.37	0.31	0.52	0.46	0.52	0.73
$\tan \beta$	0.031	0.026	0.225	0.075	0.007	0.015	0.036	0.037	0.061	0.056	0.075	0.079	0.073	0.054	0.086	0.050	0.011	0.025	0.014	0.010	0.027	0.152
実測値 Δy_k (m)	-30.20	-4.64	24.94	7.67	58.24	16.58	0.16	12.20	26.98	-0.62	26.79	19.25	-1.62	-8.17	33.53	-15.77	-2.96	24.87	28.58	-9.26	25.92	8.13
計算値、 $B=1$ Δy_k (m)	23.82	34.95	3.47	10.82	88.70	131.77	35.42	26.18	26.72	24.35	36.20	20.48	16.04	19.28	11.25	25.17	39.99	36.30	54.22	48.85	31.34	5.35
計算値、 $B=3$ Δy_k (m)	28.06	39.72	4.06	12.58	109.15	148.23	40.27	30.95	29.83	27.64	38.67	22.82	18.59	22.73	13.19	28.44	49.96	38.78	61.61	59.26	35.68	6.27

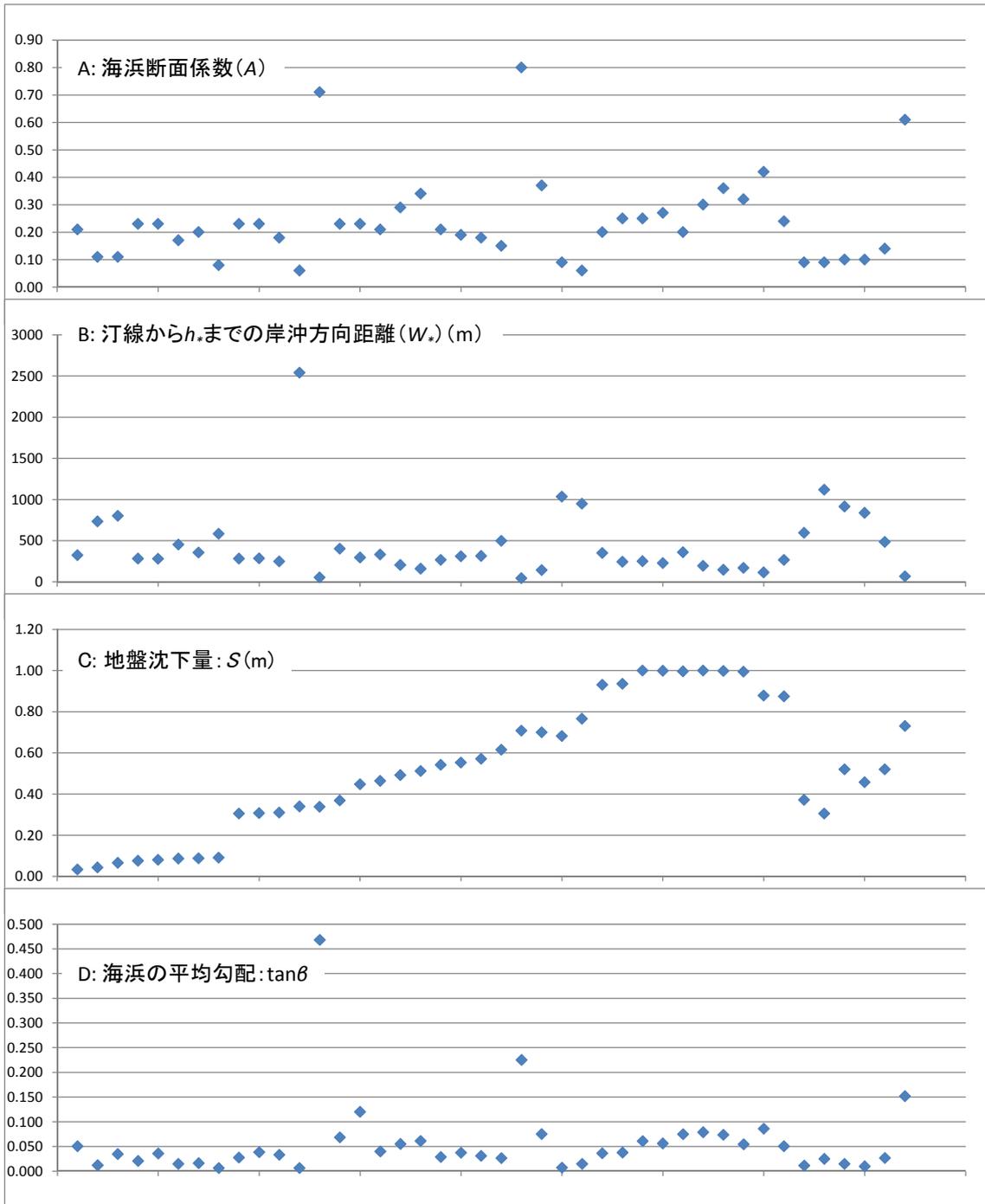


図 14 海浜地形パラメータ

(横軸は測線番号に対応するが、番号配置に規則性は無いので意味は無い)

離(数 m)で変化するその高さを測線上の一点の値のみで決めてしまうことは、むしろ結果に対して悪影響を与えかねない。そこで本研究では、九十九里浜南部における経験をもとに、 B の値を 1 m および 3 m と幅を持って設定し、それぞれの値に対して計算を行うこととした。

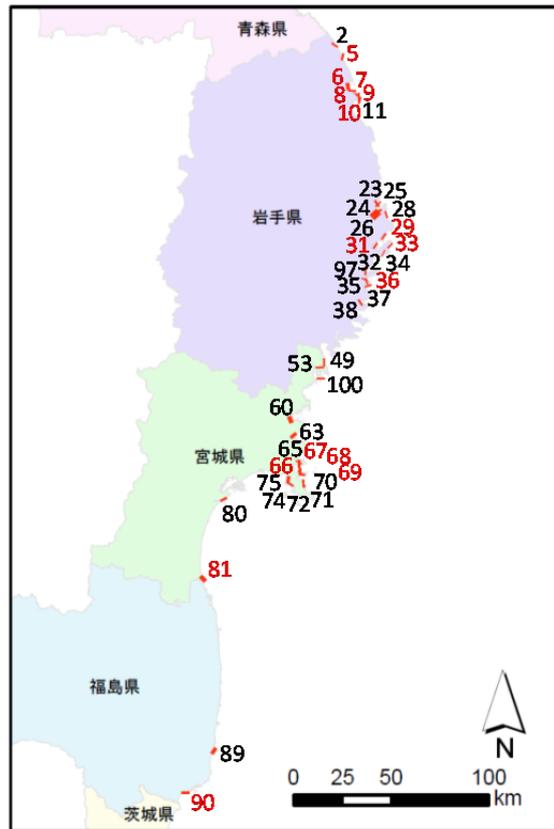


図 15 調査対象海岸（数字は測線番号、赤字は図 17 の比較に用いた場所）

5-3. 実際の汀線後退距離(Δy_k)

次に、 Δy_k (汀線の後退距離) を求める。そのためには、地震発生前後の海岸線のデータが必要となる。地震発生以前の海岸線のデータとして、まず①「国土数値情報 海岸線データ(国土交通省)」に注目した。①は、全国の海岸線について、位置(線)、所管官庁、海岸保全区域(海岸法に基づき指定された一定の海岸の区域)の海岸名及び海岸管理者、河口有無等を整備したものであり、平成 18 年度に作成されたものである。ただし、原典資料は②「国土数値情報 行政区域(国土交通省)」とのことなので、次にそのデータを調べた。②は全国の行政界について、都道府県名、支庁名、郡・政令都市名、市区町村名、行政コード等を整備したものである。地震発生前で最新の平成 22 年度作成版においては、海岸線データは③「数値地図 25000(空間データ基盤)(国土地理院)」を原典資料としている。そこで次に③を調べると、これは道路中心線、鉄道中心線、河川中心線、水涯線、海岸線、行政界、基準点、地名、公共施設、標高の 10 項目のデータで構成されており、全国で整備され、最新版は 2002 年あるいは 2003 年作成であった。また原典資料は「2 万 5 千分 1 地形図」である。すなわち、以上の①～③の海岸線データは全て、④「2002 年～2003 年より前で最新の 2 万 5 千分 1 地形図」から作成されたことになる。一方、⑤「基盤地図情報(縮尺レベル 2500)(国土地理院)」に関しては他のデータ(①～④)に比べて解像度が高いという利点があるが、

原典資料である都市計画図の作成年がバラバラであり、自治体によってはかなり古いものも存在するため、使用を断念した。次に、⑥「基盤地図情報(縮尺レベル 25000)(国土地理院)」を調べた。これは2万5千分1地形図の平成19年7月時点でのデータを基に全国を対象に整備したものである。すなわち、原典資料は⑦「2007年以前で最新の2万5千分1地形図」となる。以上の情報に基づき、地震発生(2011年)にもっとも近い時期に作成されたデジタルデータである⑥を、地震前の海岸線データとして採用した。

次に地震後の海岸線データを調べた。その結果、⑧「災害復興計画基図(国土地理院)」という1/2,500地形図が(福島県沿岸部の一部は縮尺1/5,000)、青森県八戸市から福島県いわき市にかけての沿岸部で作成されており、原典資料は2011年の5月から9月にかけて撮影された空中写真であることが判明した。当初の調査対象範囲は八戸市から銚子市までとしており、⑧のデータは茨城県沿岸を含まないが、茨城県沿岸の砂浜海岸は数100mを超える長大なものが多く、調査対象の砂浜とした海岸長200m以下のもの(5-1を参照)はほとんど無く問題は無いと判断し、このデータを地震後の海岸線データとして使用した。

次に、ArcGISのアドイン機能であるジオメトリ変換ツールを用いて、測線と地震前後の海岸線の交点にポイントを発生させ、各ポイントにx、y座標値を付加させた。さらにx、y座標値を用いて測線上の水平距離、すなわち Δy_k (汀線の後退距離(実測値))を求めた(表1)。 Δy_k (実測値)の最大値は58.24m(海岸侵食)であった。一方、最小値は-87.04mであり、すなわち汀線が海側に前進している場所も存在した。

5-4. 既存の予測式を用いた汀線後退距離(Δy_k)

各種海岸地形パラメータを式(1)に代入し、調査対象海岸それぞれにおける汀線後退量の計算値を求めた(表1)。バームの高さ(B)を1mとした時の最小値は1.15m、最大値は131.77m、平均値は23.92mである。バームの高さ(B)を3mとした時の最小値は1.28m、最大値は148.23m、平均値は27.64mである。 $B=1$ mの時より $B=3$ mの時の方が、汀線後退量は約12~16%程度大きい。また、海浜断面係数(A)が小さいすなわち海底の勾配が緩い場所は汀線後退量の値も大きくなっており、測線 no.26($A=0.06$)では汀線後退距離の計算値=82.09m($B=1$ mの場合)、測線 no.60($A=0.09$)では88.70m、測線 no.63($A=0.06$)では131.77mとなっている。

6. 考察

6-1. 汀線後退量の実測値と計算値の比較

汀線後退量の実測値を横軸、計算値を縦軸に取った散布図を図16に示す。もし実測値と計算値の値が近ければ、 $x=y$ を示す直線の近傍に分布するが、直線から大きく外れる点が多数認められる。すなわち、海岸の立地や砂浜および海底の条件に関わらず、全ての砂浜海岸について、単純に既存の予測式を用いて地盤沈下による汀線後退量を予測することは出来ない。

そこで、今回の予測式の適用に不相当と考えられる以下の条件を持つデータを除去した。

・海岸が湾内の奥に位置する場所: 外海に面した海岸に比べて定常的に作用する波が弱いと考え

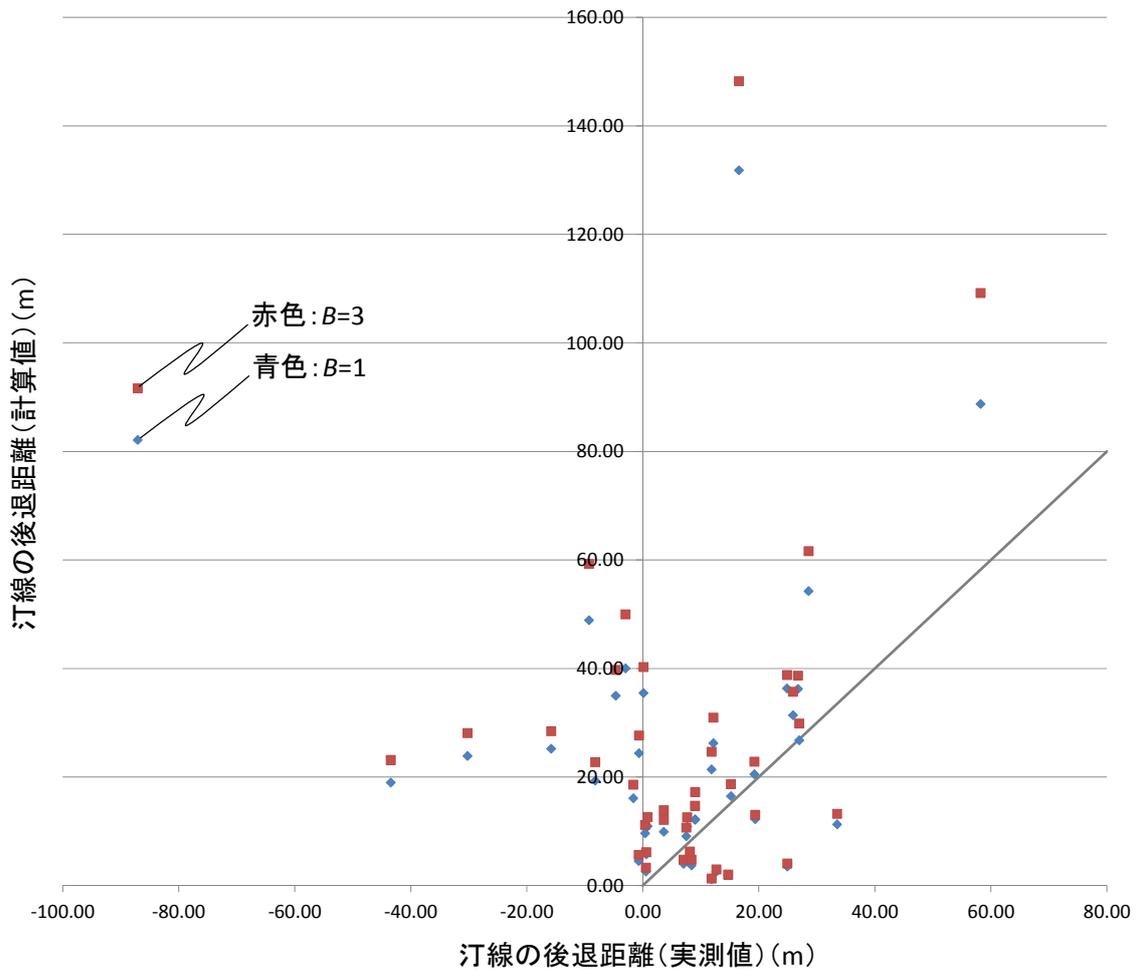


図 16 汀線後退量の比較（実測値 vs 計算値、全データ）

られる。本研究では地形変化の限界水深(h^*)を 10 m と設定する際に、「外海・外洋に面した海岸」と仮定しており、湾内という条件は不適當である。

- ・砂浜の幅が狭い場所:もともと砂浜の幅(岸沖方向の長さ)が狭い海岸で地盤沈下による海岸侵食が発生しても、その汀線後退量は元の砂浜の幅に制限されてしまう。そのような場所における汀線後退量(実測値)は過小評価される恐れがあるため、汀線変化量(計算値)と比較するのは不適當である。

- ・海底の形状が複雑な場所:一般的に底質が砂の場合、海岸線は緩やかな曲線あるいは直線となり、海底地形も汀線とほぼ平行な曲線あるいは直線の等深線で表現されると考えられる。しかし、調査対象地のいくつかの場所では海底の等高線が複雑な凹凸を示しており、岩礁あるいは海底谷等の影響が予想された。それらの場所は、波の強さと砂の組成のバランスによる平衡地形を前提とした式(1)の使用に不適當である。

以上の条件を持つ海岸のデータを除外した、汀線後退量の実測値と計算値の散布図を図 17 に示す。図 16 において $x=y$ の直線から大きく外れていたデータは大幅に減少し、実測値と計算値の整合性がかなり高くなっている。 $B=1$ m および $B=3$ m それぞれの条件に対して原点を通る近似直

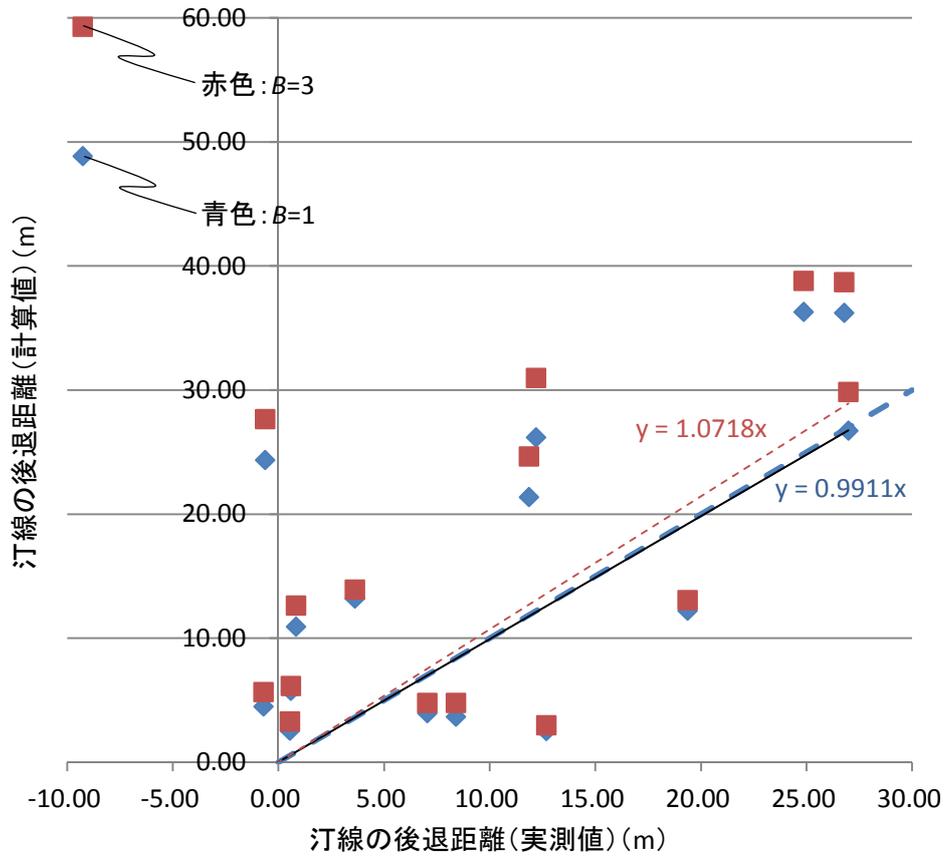


図 17 汀線後退量の比較（実測値 vs 計算値、数式適用条件を満たすデータ）

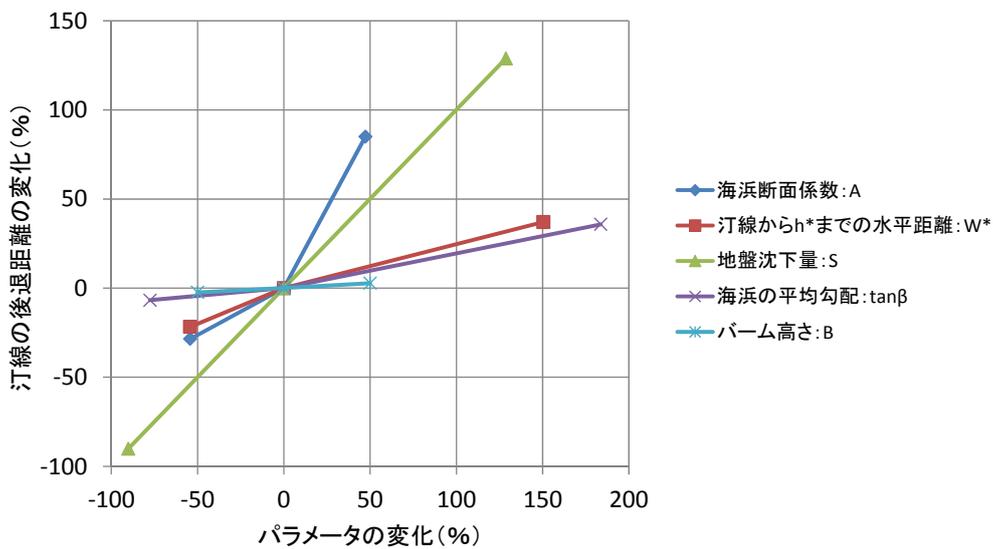


図 18 パラメータの感度分析

線を求めると、図 17 に示す通り、 $B=1$ m に関しては傾きがほぼ 1、 $B=3$ m に関しても傾きは約 1.1

と、両値の整合性は高い。以上より、海岸の立地や砂浜および海底の条件が適切な砂浜海岸に限れば、ばらつきは見られるものの既存の汀線後退量の予測式は実測値と整合関係にあることが判明した。

6-2. 海浜地形パラメータの感度分析

前節において予測式の有用性を示したが、本研究で用いた海浜地形パラメータ(表 1)はいくつかの仮定に基づくため、その精度には疑問が残る。既存の予測式をより正確に精度評価するためには、まず各パラメータの精度を向上させる必要があるが、各海岸において正確な値を全て求めることは難しい。そこで、各パラメータの変動が計算結果である汀線後退量にどの程度影響するかを、以下の手順で検討した。まず、各パラメータの変化幅は、図 17 で使用した 16ヶ所の海岸データにおける最小値と最大値、すなわち調査対象範囲内における各値のばらつきとした。次に、調査範囲における平均的な形状(A , W^* , S , $\tan\beta$, B の平均値)の海浜縦断形を基準として、各パラメータを一つずつ変化させ、汀線の後退距離(Δy_k)を計算した。結果を図 18 に示す。各パラメータの変化割合は、平均値に比べて最小値は $-50\sim-90\%$ 、最大値は $+50\sim+180\%$ とばらつきが大きい。それらパラメータの変化が汀線後退量の計算値に及ぼす影響は、バームの高さ(B)に関しては $\pm 2\sim 3\%$ と非常に小さい。汀線から h^* までの水平距離(W^*)と海浜の平均勾配($\tan\beta$)の影響に関しては、一側と+側で値は異なるが、おおよそ $20\sim 35\%$ 程度である。海浜断面係数(A)の影響は、おおよそ $-30\sim +85\%$ と比較的大きい。また、最も影響が大きいのは地盤沈下量(S)であり、汀線後退量は $-90\sim +130\%$ の幅で変化する。ただし、地盤沈下量に関しては、図 7 の電子基準点ごとの地殻変動量の空間分布を見る限り、その値は空間的に連続的に緩やかに変化するものと考えられ、またそれら観測点群の値から内挿した図 8 も精度は高いと考えられる。したがって、図 8 から求めた調査対象海岸の沈下量の値の精度も高いと考えら、本研究においては地盤沈下量(S)の誤差がもたらす結果への影響は小さいと推定される。

7. まとめと今後の課題

東北地方太平洋沖地震により広範囲に発生した地盤変動と海岸侵食に着目し、既存の地盤沈下量と海岸侵食量の関係式の有効性を検証した。その結果、海岸の立地(外洋に面している、湾内に位置する)、砂浜の状況(もともとの岸沖方向の砂浜幅)、海底の状況(岩礁や海底谷の有無など)といった条件が適切な砂浜海岸に限れば、ばらつきは見られるものの既存の汀線後退量の予測式は実測値と整合関係にあることが判明した。しかし、計算に用いる各種海浜地形パラメータは計算結果である汀線後退量の値に±数 10%以上の影響を与える可能性があり、地盤沈下量だけでなく検討対象とする個々の海浜の形状もより正確に把握する必要がある。

Appendix A

A1. 新たな測量手法(UAV-SfM)の開発

本研究で考察したように、地盤沈下あるいは海面上昇による海岸侵食量を予測する際に、海浜地形の形状を正確に把握することは、その精度をさらに向上させる上で重要である。地形情報を得る手法としてこれまでは一般に地形図が用いられてきたが、残念ながら数 10 cm オーダーの汀線付近の詳細な地形情報を得るには地形図の縮尺は大き過ぎ、また更新頻度も早くても 5 年程度であるため、最新の情報を得ることは難しい。一方、近年、高密度かつ高精度な標高データの取得方法として、航空レーザ測量や地上レーザ測量(TLS: Terrestrial Laser Scanning)が用いられている。それらの手法により、従来の計測手法であるトランシット測量や GPS 測量に比べて得られるデータの点群密度がはるかに高くなり、広範囲に渡って地形や植生を詳細に調査することが可能になった。しかしそれらレーザ測量は機材購入にかかる初期コスト、および有人機フライトや膨大なデータの後処理など運用コストが高く、個人の研究者が複数回実施することは現実的に難しい状況である。

そこで研究代表者は、小型 UAV(Unmanned Aerial Vehicle: 無人航空機)および小型カメラを用いた空撮、および SfM(Structure from Motion: 複視点の画像から撮影場所および対象物の 3 次元位置を再現する手法)ソフトウェアを用いた、新たな航空測量手法(以下、UAV-SfM と呼称)の開発を試みた。

※以下、小花和ほか (2014a, in press)および小花和ほか (2014b, in press)からの一部引用を含む。

A2. システム概要

本システムは、GPS 内蔵小型 UAV、高画質小型軽量カメラ、3D モデル作成ソフトウェアを組み合わせ構成される(図 A1)。カメラを搭載した UAV を観測対象地形の上空(対象物が水平の場合)あるいは側面(対象物が垂直な場合)に飛行させ、カメラのインターバル撮影機能(一定間隔で自動的にシャッターを切る機能)を用いて、隣接する画像同士を重複させた写真を複数枚撮影す

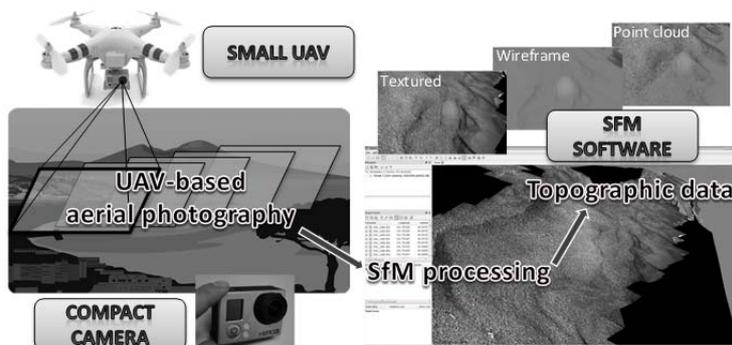


図 A1 UAV-SfM システムの概要

る。その後、撮影した画像を SfM ソフトウェアを用いて解析し、カメラの位置関係および対象物の 3 次元構造を再現する。機材の諸元を表 A1 に示す。

表 A1 機材諸元

A. UAV諸元	
機材名	DJI PHANTOM [®]
航空機種別	クアッドコプター(4個の回転翼)
寸法	横350 mm×奥行350 mm×高さ190 mm
重量	1000 g
最大飛行速度	10 m/s
最大上昇・下降速度	6 m/s
操縦可能距離(電波が届く範囲)	300 m
最大飛行可能時間	15分(搭載重量に応じて短縮)
可搬重量(ペイロード)	約400 g
B. カメラ諸元	
機材名	NIKON COOLPIX A [®]
画素数(静止画)	1616万画素
センサーサイズ	23.6 mm×15.6 mm
寸法	幅111.0 mm×高さ64.3 mm×奥行40.3 mm
重量	約299 g
インターバル撮影	最短1秒
撮影可能枚数	6000枚以上(SDXC64GBの場合)
バッテリー持続時間	約1時間10分(使用条件により変動)

A3. 測量結果

2013年12月8日～12月15日にかけて本研究の対象地域である東北沿岸の砂浜海岸の視察を行った。その際、いくつかの海岸において本システムを用いた航空測量を実施した。図 A2A, C に砂浜海岸の例、図 A2B に岩石海岸の例を示す。各海岸において UAV を用いた空撮を行い、SfM ソフトウェアの一つである Agisoft PhotoscanPro を用いて 3D モデルの作成を行った。各海岸で撮影した写真の枚数は約 100 枚であり、撮影時間は機材の準備・撤収も含めて 30 分程度であった。

図 A2 の測量成果が示すように、砂浜海岸のビーチカスプやバームといった微地形、あるいは岩石海岸の節理や岩盤上の個々の礫まで詳細に再現されており、解像度は非常に高い。上記 SfM ソフトウェアには、GNSS 測量結果を GCP (Ground Control Point) として読み込み、3D モデル全体に絶対座標を付加する機能もある。残念ながら今回の調査においては GNSS 測量を実施しなかったため、現在のところ図 A2 の測量成果は 3 次元的な起伏情報を持つのみであり、正確な座標値を持つ DSM (Digital Surface Model) はまだ作成できていない。しかし、国土地理院が公開している 5 m メッシュの DEM (Digital Elevation Model) を援用して GCP を設定する、といった方法で絶対座標を付加することも可能だと考えられ、今後も本 UAV-SfM 手法の改良を続ける予定である。

A4. まとめ

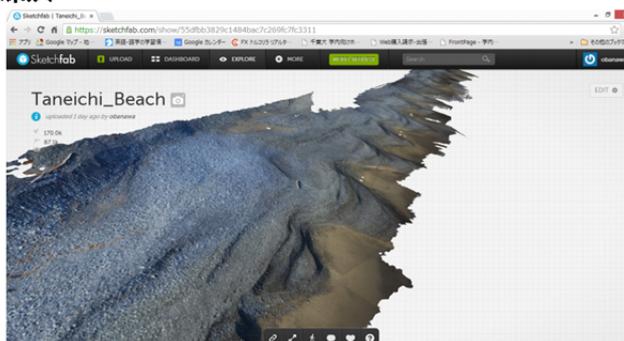
以下に、従来の航空測量手法と比べた本手法の特徴をまとめる。

- ・低コスト: 市販の安価な機材群で構成されており、初期導入コストが安い。本研究で用いた機材の場合、トータルで 20 万円程度である。また、フライト・撮影・データ処理はすべて研究者自身が

A: 岩手県九戸郡洋野町種市第4地割の礫浜

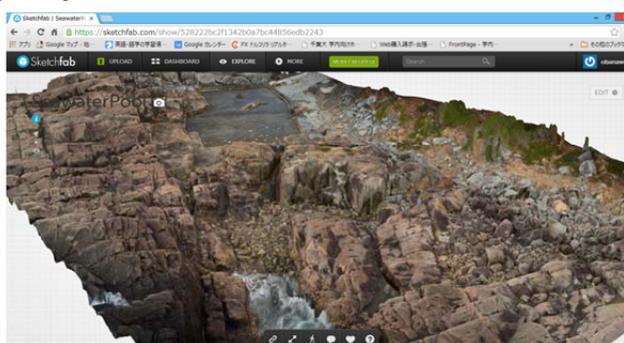


現地写真



測量成果

B: 岩手県久慈市侍浜町向町第7地割の岩石海岸



C: 宮城県石巻市雄勝町船越荒の荒浜海岸

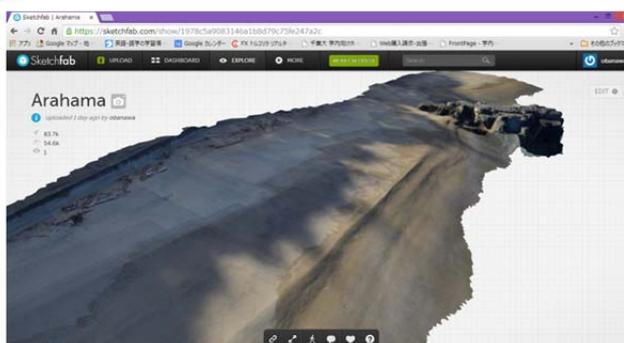
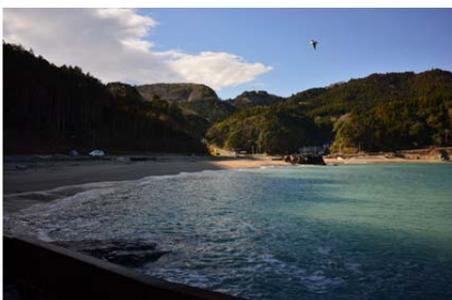


図 A2 測量成果例

一人で運用可能であり、専門業者に外注する必要も無く、ランニングコストは UAV のバッテリー充電と計算に使用する PC の電気代程度であり、運用コストも非常に安い。

- ・高解像度かつ高密度データ: 気象条件にも依存するが、マルチコプターの安定性により数 m の近接撮影が可能であり、高解像度の画像取得および高密度データの作成が可能。
- ・高頻度観測が可能: 上記の様に外注作業が発生しないために作業時間が短く、また運用コストも安いいため、高頻度の観測が可能である。これにより、時間分解能の高い地形変化の把握が可能となる。
- ・汎用性が高い: システムが小型軽量であり、機材運搬・現地機動性に優れる。さらに、回転翼機ゆ

えに滑走路も不要である(手に持った状態から離陸、手で掴んで着陸も可能)。また、機材が空中を移動するため急傾斜地や被災地などアクセスが困難な場所の観測が可能であり、踏査の省力化や調査者の危険作業の回避が可能となる。以上の特性により、様々な条件のフィールドにおける適用性・汎用性が高い。

- 安全性が高い:マルチコプターは安定性が高く操縦も容易であり、墜落の可能性が低い。また液体燃料不使用のため排ガスが無く、低騒音であり、かつ燃料の取扱いも容易であり、火災の危険性も低い。さらに機体が軽量であり、墜落時のリスクも低い。

GCP データの取得や測量精度の検証などいくつかの課題は残されているものの、UAV-SfM 手法はその機材の安さとコンパクトさ故にフィールド適応性が高く、また高頻度観測も可能である。本研究が対象とする海岸侵食に関しても、海岸地形の詳細な把握(正確なパラメータの取得)および台風や津波と言ったイベント時の地形変化を迅速に計測することが可能となるため、強力なツールとなることが期待される。