

7. 宮城県山元海岸における東北地方太平洋沖地震 津波前後の砂浜変形特性と土砂収支

高村 まや^{1*}・有働 恵子²・武田 百合子²・真野 明²

¹東北大学大学院工学研究科（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6）

²東北大学災害科学国際研究所（〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6）

* E-mail: m-takamura@potential1.civil.tohoku.ac.jp

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波により、沿岸域では大規模な砂浜侵食、汀線の後退が生じた。本研究では、津波により甚大な砂浜侵食被害を受けた山元海岸を対象地域とし、海底地形変化特性を調べ、砂浜回復過程を明らかにすることを目的とする。震災が発生する10年前の2001年から震災の2年後の2013年までの海底地形データを用いて地盤高変化を調べたところ、震災前と震災後で変化特性が異なることが明らかになった。また、震災前後の地盤高変化から、津波時の山元海岸の海域における侵食量と堆積量の計算も行ったところ、押し波時に海域から陸域に少なくとも450万m³の土砂が輸送され、輸送された土砂のうち300万m³の土砂は引き波時に水深5m～10m付近に堆積したと推定された。

Key Words : tsunami, eroded coast, shore line, morphology change

1. はじめに

2011年3月11日14時46分に、三陸沖を震源として、日本観測史上最大であるマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。この地震に伴い、福島で最大津波高9.3m以上を記録する巨大津波が発生した¹⁾。本研究の対象地域は、この津波により甚大な砂浜侵食被害を受けた山元海岸である。山元海岸では、震災後から現在まで、津波によって破壊された堤防などの海岸保全施設の復旧工事が行われており、平成27年完了を目指している。また、養浜とヘッドランドによる、30年以上かけた長期的な砂浜回復計画が計画されている²⁾。

今後の海岸管理を考える上で、震災後の砂浜回復状況を定性的に把握することは重要である。本研究では、震災の10年前から震災2年後までの定期的な空中写真と深浅測量データ（国土交通省東北地方整備局提供）を用いて、震災前・震災前後・震災以降の地形変化特性を調べ、震災後の砂浜回復過程を明らかにすることを目的とする。すでに、有働ら³⁾により、2009年11月から2013年1月までの深浅測量データを用いて山元海岸における砂浜回復過程が調べられているが、本研究では2001年まで遡って調べ、回復過程を再解析する。

2. 研究対象地域

本研究の対象地域は、仙台湾南部海岸の山元海岸である。図-1に仙台湾沿岸における陸域の地形と本研究の対象地域である山元海岸の位置を、図-2に山元海岸沿岸の海域の地形を示す。本研究では、山元海岸の北部を領域1、南部を領域2とした（図-1、図-2に示す）。図-1に示した陸域の地形は2006年の航空レーザ測量データ（国土交通省東北地方整備局提供）を、図-2に示した海域の地形は2009年の深浅測量データを補間して得られた。また、図-1に破線で2011年津波の遡上範囲を示した⁴⁾。津波の遡上範囲は地盤高が2.0m以下の範囲とほぼ一致することがわかる。

(1) 仙台湾南部海岸

仙台湾南部海岸は、主に福島県の崖海岸侵食による北向きの沿岸漂砂により形成されたと推定される。1950年代後半から、福島県の崖海岸侵食対策や相馬港整備の開始にともない、沿岸漂砂の減少・連続性の遮断が生じた。その結果、1970年代から特に南部で激しい侵食が生じた。侵食が甚大であったため、1999年からは国土交通省の直轄事業として大規模な海岸整備が行われた⁵⁾。

(2) 海岸侵食対策

仙台湾南部海岸では、ヘッドランド12基と養浜400万 m^3 による海岸侵食対策が計画され、1990年代後半から工事が行われている。本研究の対象地域である山元海岸では、ヘッドランド11基（図-2に示す）と養浜が計画されており、震災時には、ヘッドランド2基（S2号・S4号）完成、1基（S5号）が150m、6基（1号、3号、5号、7号、9号、11号）が100m整備され、13万8千 m^3 の養浜が施された状態であった。山元海岸における海岸整備事業の概要については表-1にまとめた²⁾。

図-3に領域1、領域2における1963年、1989年、2006年の空中写真を示す。1963年は侵食が生じる前の海岸状態、1989年は侵食が進行した後の海岸状態、2006年は海岸侵食対策の一部が施された海岸状態を表す。領域1、領域2において、1963年から1989年の間に侵食が進行し、砂浜面積が小さくなっている。特に南側にある領域2においては、侵食が顕著であり、砂浜がほぼ消滅している。1963年～1989年に比べ、1989年～2006年の砂浜面積の減少は小さいため、海岸構造物により侵食が抑制されていることがわかる。1989年に砂浜がほぼ消滅していた領域2においては、S2号ヘッドランドの南側で砂浜が形成されている。

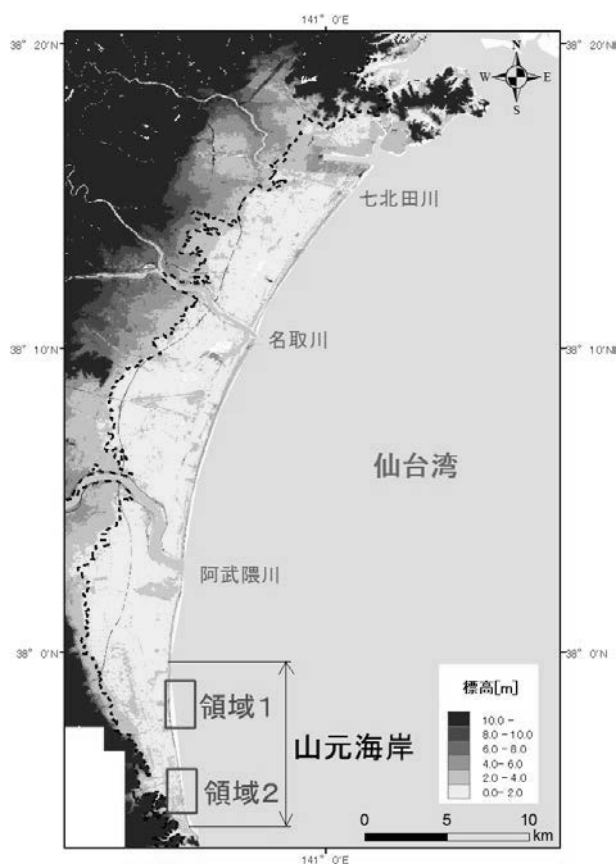


図-1 仙台湾海岸の標高（2006年航空レーザ測量データ）と研究対象領域

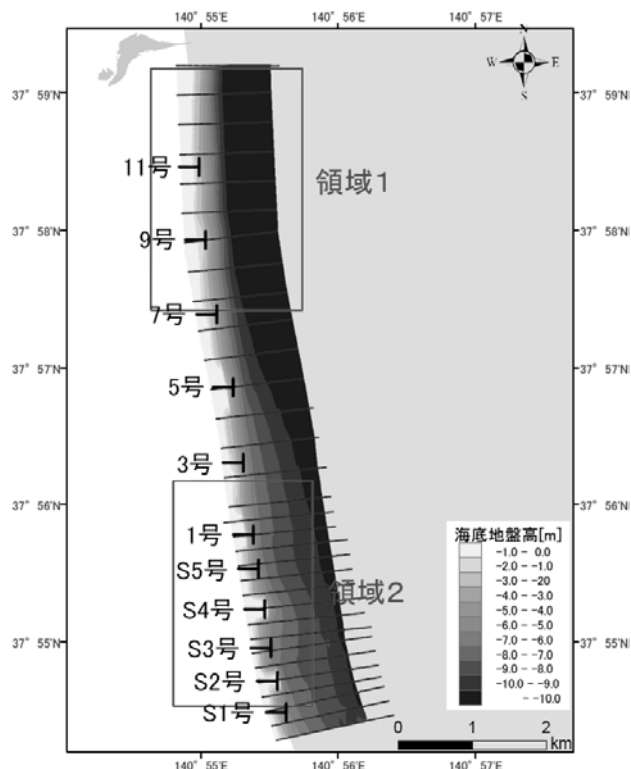


図-2 山元海岸の地形（2009年深浅測量データ）

表-1 山元海岸における海岸整備事業の概要

年代	事業内容
1995年	ヘッドランド整備着手
～2000年	1, 3, 7号ヘッドランド100m整備
～2003年3月末	5, 9, 11号ヘッドランド100m整備
(2006年10月 台風16号、17号により堤防一部破壊)	
2007年	S2号ヘッドランド完成
2007年9～11月	S2号で試験養浜
2009年3月	S4号ヘッドランド完成
2009年7月	S2号養浜工着手
2009年11月	S5号ヘッドランド着手
2010年10月	S4号養浜工着手
2011年1月	S5号ヘッドランド150m整備
2011年3月11日	東日本大震災により海岸堤防被災
2011年4月～8月	堤防応急復旧
2012年	堤防本復旧着工

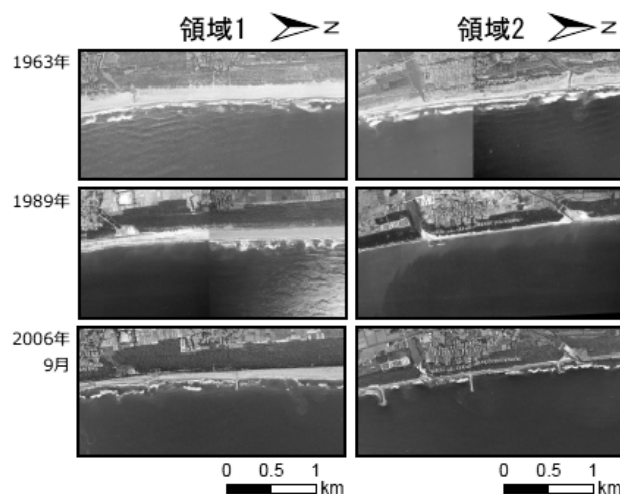


図-3 領域1、領域2における震災以前の空中写真

3. 研究方法

陸域の地形データとしては、震災前（2006年）と震災直後（2011年5-6月）の航空レーザ測量データが取得されているものの、それ以降のデータは得られていないことから、主に空中写真（東北地整提供）および衛星画像（GeoEye）を用いて、汀線変化・砂浜変化・侵食の様子を調べた。また、2006年と2011年5-6月の航空レーザ測量データ（5mメッシュ）から震災前後の地盤高変化の空間分布を調べた。

海域の地形変化については、2001年から2013年にかけての深浅測量データを補間して得られた5mメッシュの地盤高変化の空間分布から、空間的変化特性の違いを調べた。深浅測量データは、海岸線から20m程度内陸から1km程度沖まで岸沖方向測線（0.2km～1km間隔、図-3に示す）に沿って測定された2001年9月～2013年1月の18データ（3ヶ月～1年程度の間隔）を用いた。震災前後の地形変化については、陸海域のいずれにおいても、鉛直方向の地殻変動⁵を差し引くことにより土砂輸送による変化を求めた。

また、深浅測量データから得られた地盤高変化から、震災前後の山元海岸の海域（図-2に海域地形を示した汀線に沿って約7.5km、堤防から陸方向に200m、沖方向に1000mの範囲）における侵食量、堆積量を計算し、土砂収支を求めた。侵食量と堆積量は、海底地盤高変化から仮定された震災時の土砂移動に基づき、メッシュごとの侵食高さもしくは堆積高さにメッシュの面積（25m²）を乗じて積算することにより求めた。

4. 結果

(1) 空中写真

図-4に、領域1、領域2における震災前と震災以降の空中写真を示す。山元海岸では、2011年4月から8月までに海岸堤防の緊急復旧が施され、2012年3月から本復旧が開始された²⁾。

津波によって陸域は内陸まで大きく侵食され、堤防が破堤し一部の砂浜は消失した。震災前の時点で砂浜の多くがすでに消失していた領域2のほうが、砂浜があった領域1より内陸の侵食が甚大である。

震災後、数ヶ月で急速に回復が進み、領域1においては砂浜の連続性が回復し、領域2の破堤地点はポケットビーチ状に新たな地形を形成した。震災1年後以降は、回復は見られるものの震災後1年間に比べて変化が小さく、領域2に形成されたポケットビーチ状の地形は2012年11月時点で震災前の地形に回復していない。

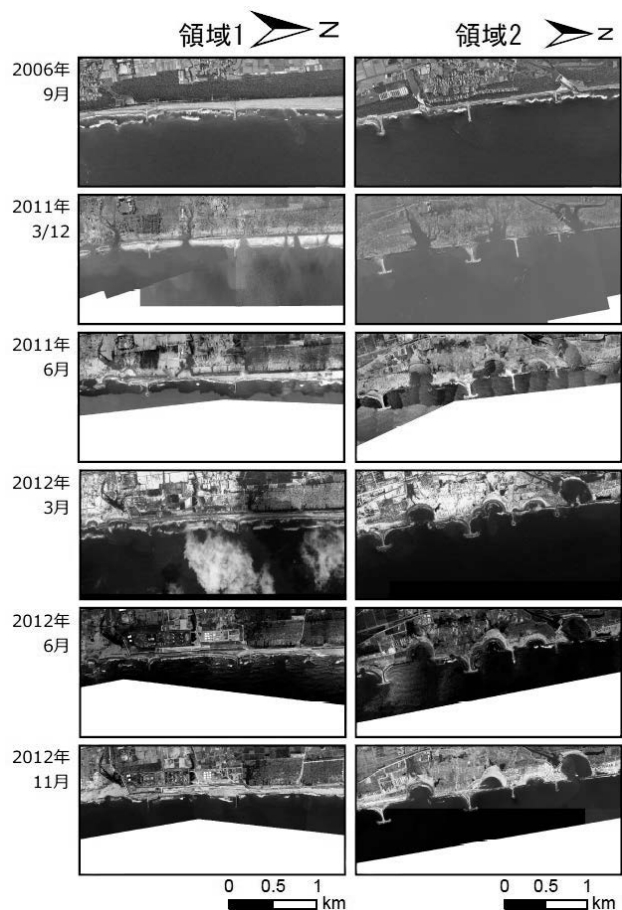


図-4 領域1、領域2における震災前と震災以降の空中写真

(2) 海底地盤高変化

図-5に、震災10年前（2001年）から震災2年後（2013年）までの領域1、領域2における海底地盤高変化図を示す。地盤高変化図には、汀線、各期間における変化前の地形の等深線[m]、ヘッドランドも合わせて載せた。色が濃い部分は侵食、薄い部分は堆積、白い部分は変化なしを表している。0.2m以内の変化は測定誤差を考慮し、変化なしとした。

震災以前（2001年9月～2010年9月）の地盤高変化は、水深8m以浅で大きく、侵食・堆積は海岸に沿って概ね一様に変化している。水深3m付近が侵食と堆積の境目になっており、断面図から水深3m付近にバー（沿岸砂州）があることが確認できた（図-6参照）。以上のことから、震災以前の土砂移動限界水深は8mで、水深3m付近にあるバーが沖方向もしくは岸方向に季節により移動していると考えられる。

2006年1月-11月の地盤高変化は比較的大きい（バーは沖方向に移動）が、2006年10月に宮城県において海岸堤防の被災や床下浸水などの被害を生じさせる規模の台風16号、17号が発生した²⁾ため、その影響であると考えられる。また、2008年2月-2009年11月と2009年11月-2010年9月の期間は、領域2において土砂移動限界水深と考えられる水深8m以深を含む広範囲で堆積が見られる。これ

は、2009年7月からS2号ヘッドランドで開始された養浜の影響であると考えられる（表-1参照）。

震災前後は、津波により全体的に侵食されており、特に旧河川や破堤地点付近で顕著な侵食が生じ、その沖の水深5m～10m付近で堆積が見られる。押し波により沖から一様に0.5m程度侵食された後、汀線から500m程度沖に進んだ地点で輸送してきた土砂が堆積したと考えられる。深浅測量の最深部の測点（堤防から2.8km、水深17m）においても侵食しており、移動限界がどの程度であるかは不明である（図-7参照）。

震災後は沖側（領域1においては水深5m～10m、領域2においては水深5m以浅）で侵食、陸側（領域1においては水深5m以浅と陸域、領域2においては陸域）で堆積が見られる。海底の土砂が震災後の砂浜の急速な回復に使われたと考えられる。

震災後1年間は地盤高変化が認められたものの、1年後以降は、特に領域2において、震災前と比較しても変化が顕著に小さくなっている。

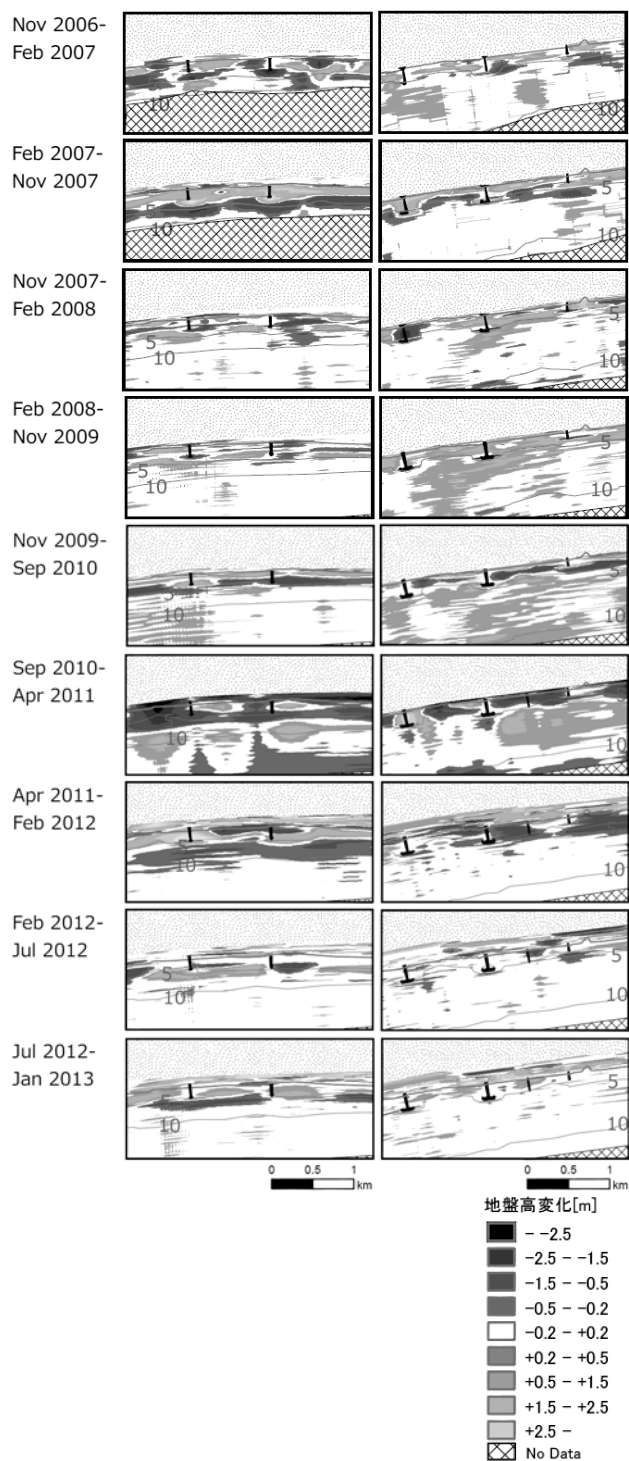
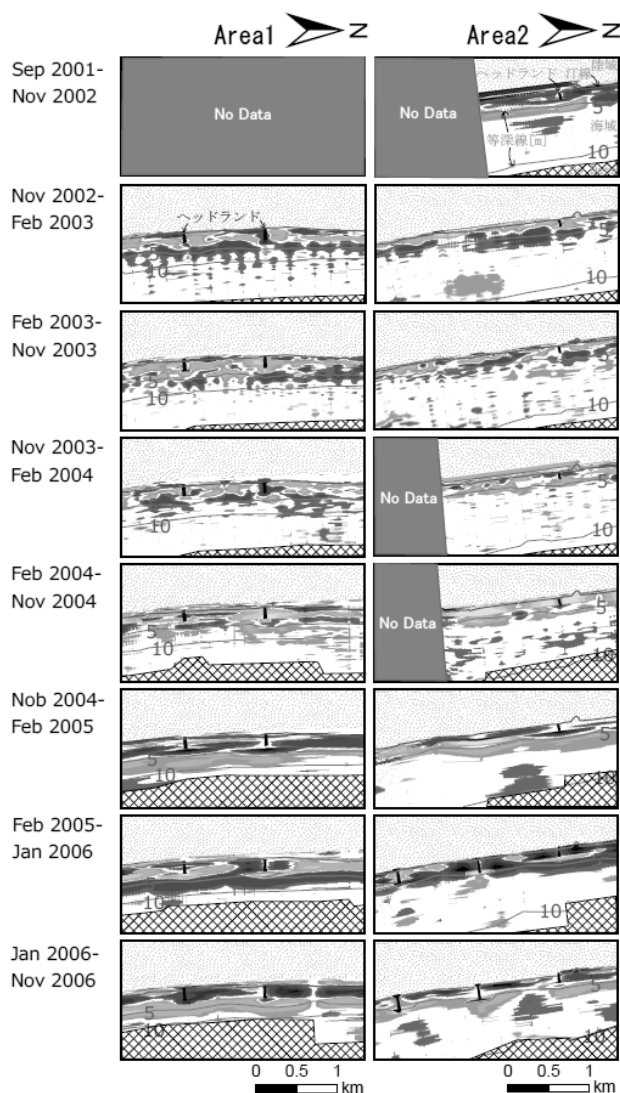


図-5 領域1，領域2における海底地盤高変化図

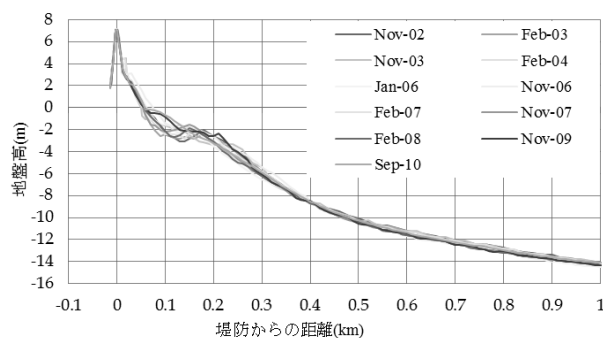


図-6 岸沖方向断面図（水深3m付近で上に凸）

3. 研究方法

陸域の地形データとしては、震災前（2006年）と震災直後（2011年5-6月）の航空レーザ測量データが取得されているものの、それ以降のデータは得られていないことから、主に空中写真（東北地整提供）および衛星画像（GeoEye）を用いて、汀線変化・砂浜変化・侵食の様子を調べた。また、2006年と2011年5-6月の航空レーザ測量データ（5mメッシュ）から震災前後の地盤高変化の空間分布を調べた。

海域の地形変化については、2001年から2013年にかけての深浅測量データを補間して得られた5mメッシュの地盤高変化の空間分布から、空間的変化特性の違いを調べた。深浅測量データは、海岸線から20m程度内陸から1km程度沖まで岸沖方向測線（0.2km～1km間隔、図-3に示す）に沿って測定された2001年9月～2013年1月の18データ（3ヶ月～1年程度の間隔）を用いた。震災前後の地形変化については、陸海域のいずれにおいても、鉛直方向の地殻変動⁵を差し引くことにより土砂輸送による変化を求めた。

また、深浅測量データから得られた地盤高変化から、震災前後の山元海岸の海域（図-2に海域地形を示した汀線に沿って約7.5km、堤防から陸方向に200m、沖方向に1000mの範囲）における侵食量、堆積量を計算し、土砂収支を求めた。侵食量と堆積量は、海底地盤高変化から仮定された震災時の土砂移動に基づき、メッシュごとの侵食高さもしくは堆積高さにメッシュの面積（25m²）を乗じて積算することにより求めた。

4. 結果

(1) 空中写真

図-4に、領域1、領域2における震災前と震災以降の空中写真を示す。山元海岸では、2011年4月から8月までに海岸堤防の緊急復旧が施され、2012年3月から本復旧が開始された²⁾。

津波によって陸域は内陸まで大きく侵食され、堤防が破堤し一部の砂浜は消失した。震災前の時点で砂浜の多くがすでに消失していた領域2のほうが、砂浜があった領域1より内陸の侵食が甚大である。

震災後、数ヶ月で急速に回復が進み、領域1においては砂浜の連続性が回復し、領域2の破堤地点はポケットビーチ状に新たな地形を形成した。震災1年後以降は、回復は見られるものの震災後1年間に比べて変化が小さく、領域2に形成されたポケットビーチ状の地形は2012年11月時点で震災前の地形に回復していない。

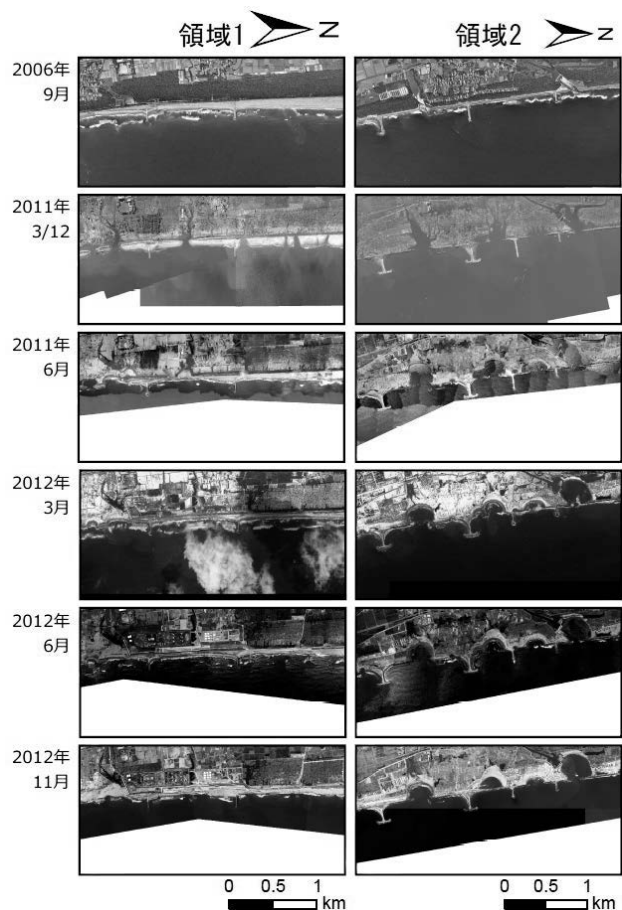


図-4 領域1、領域2における震災前と震災以降の空中写真

(2) 海底地盤高変化

図-5に、震災10年前（2001年）から震災2年後（2013年）までの領域1、領域2における海底地盤高変化図を示す。地盤高変化図には、汀線、各期間における変化前の地形の等深線[m]、ヘッドランドも合わせて載せた。色が濃い部分は侵食、薄い部分は堆積、白い部分は変化なしを表している。0.2m以内の変化は測定誤差を考慮し、変化なしとした。

震災以前（2001年9月～2010年9月）の地盤高変化は、水深8m以浅で大きく、侵食・堆積は海岸に沿って概ね一様に変化している。水深3m付近が侵食と堆積の境目になっており、断面図から水深3m付近にバー（沿岸砂州）があることが確認できた（図-6参照）。以上のことから、震災以前の土砂移動限界水深は8mで、水深3m付近にあるバーが沖方向もしくは岸方向に季節により移動していると考えられる。

2006年1月-11月の地盤高変化は比較的大きい（バーは沖方向に移動）が、2006年10月に宮城県において海岸堤防の被災や床下浸水などの被害を生じさせる規模の台風16号、17号が発生した²⁾ため、その影響であると考えられる。また、2008年2月-2009年11月と2009年11月-2010年9月の期間は、領域2において土砂移動限界水深と考えられる水深8m以深を含む広範囲で堆積が見られる。これ

は、2009年7月からS2号ヘッドランドで開始された養浜の影響であると考えられる（表-1参照）。

震災前後は、津波により全体的に侵食されており、特に旧河川や破堤地点付近で顕著な侵食が生じ、その沖の水深5m～10m付近で堆積が見られる。押し波により沖から一様に0.5m程度侵食された後、汀線から500m程度沖に進んだ地点で輸送してきた土砂が堆積したと考えられる。深浅測量の最深部の測点（堤防から2.8km、水深17m）においても侵食しており、移動限界がどの程度であるかは不明である（図-7参照）。

震災後は沖側（領域1においては水深5m～10m、領域2においては水深5m以浅）で侵食、陸側（領域1においては水深5m以浅と陸域、領域2においては陸域）で堆積が見られる。海底の土砂が震災後の砂浜の急速な回復に使われたと考えられる。

震災後1年間は地盤高変化が認められたものの、1年後以降は、特に領域2において、震災前と比較しても変化が顕著に小さくなっている。

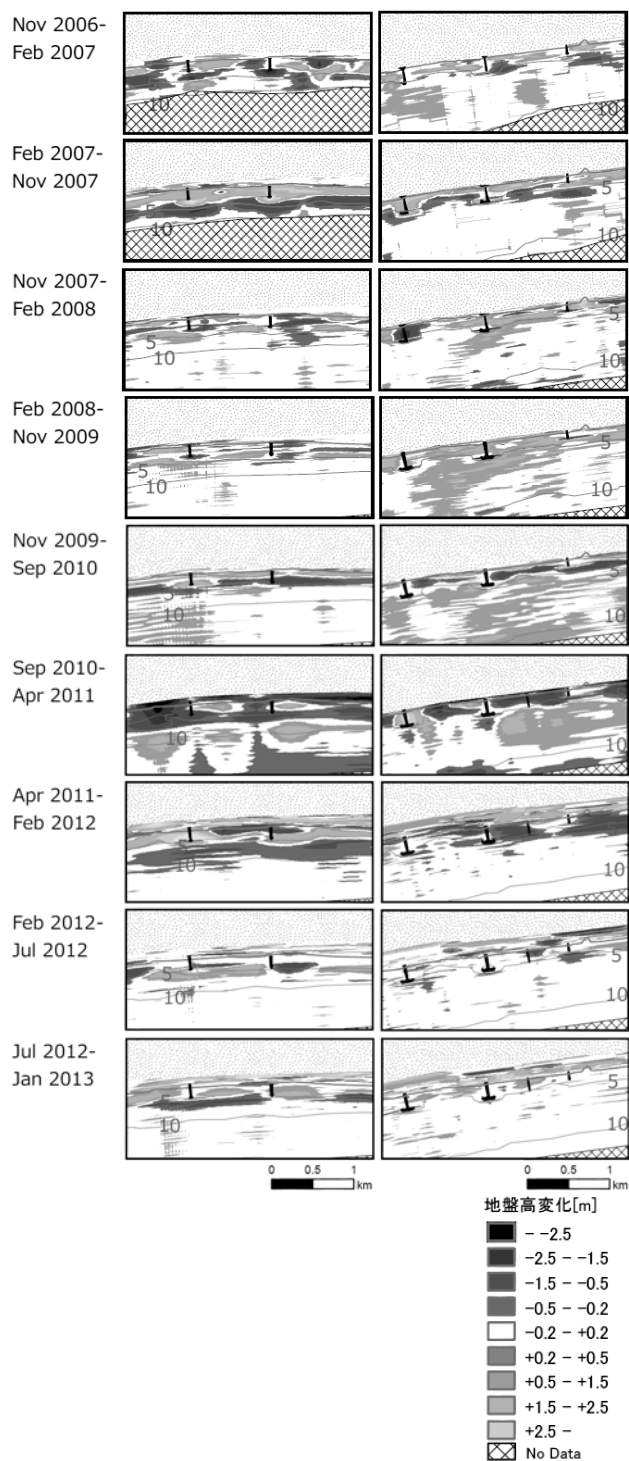
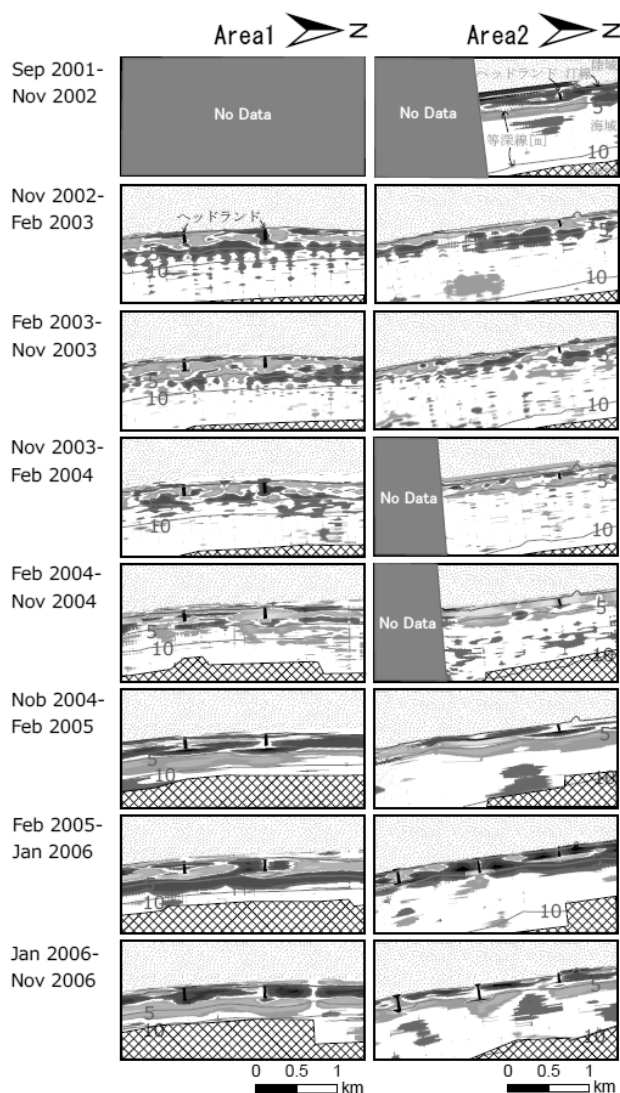


図-5 領域1，領域2における海底地盤高変化図

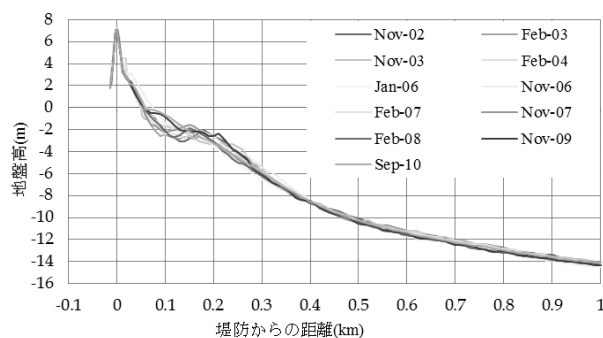


図-6 岸沖方向断面図（水深3m付近で上に凸）

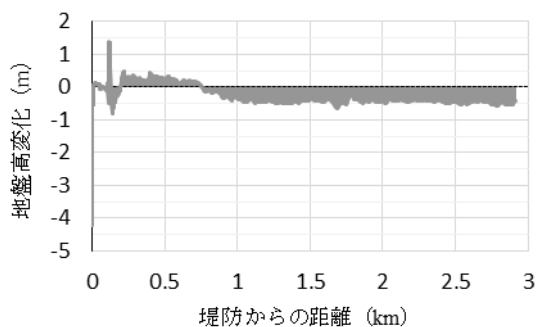


図-7 震災前後における岸沖方向断面地盤高変化図（データは堤防からの距離0km～2.8km，堤防からの距離1km～2.8kmにおいて0.5m程度の侵食）

(3) 海域における土砂収支

海底地盤高変化図から，震災時は押し波で一様に0.5m侵食された後，引き波により海域に土砂が堆積したと考えられた．この仮定に基づけば，震災時の山元海岸の海域（汀線に沿って約7.5km，堤防から陸方向に200m，沖方向に1000mの範囲）における侵食量は450万 m^3 ，堆積量は300万 m^3 であることから，土砂収支は-150万 m^3 であると算出された．震災時の土砂移動について，海底地盤高変化図から得られた仮定とそれに基づいた土砂移動量計算結果を図-8に示す．

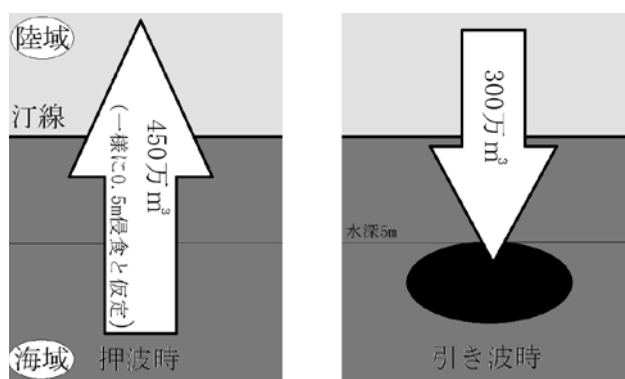


図-8 震災時の土砂移動

5. 結論

震災から1年程度で砂浜は急速に回復したが，1年後以降，回復速度が減少し，依然として砂浜が侵食された状態が続いている．また，震災から1年後以降は顕著な海底地盤高変化が認められず海域からの土砂の供給が少なくなっていると考えられるため，自然状態による砂浜回復は少なくとも短期的には難しいと考えられる．

本研究の対象領域である山元海岸においては，震災時の津波により深刻な侵食が生じると同時に海域への土砂輸送が認められ，押し波時に海域から陸域に少なくとも450万 m^3 の土砂が輸送され，輸送された土砂のうち300万 m^3 の土砂は引き波時に水深5m～10m付近に堆積したと推定された．

謝辞：「本研究で使用した地形データおよび空中写真は，国土交通省東北地方整備局仙台河川国道事務所より提供いただいた．また，本研究は，環境省の環境研究総合推進費(S-8-1(4))および東北大学災害科学国際研究所特定プロジェクト研究の援助を受けて行われた．ここに記して謝意を表する．

参考文献

- 1) 気象庁：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震に関する観測・解析データなど，国内の津波観測施設で観測された津波の観測地，2011.
- 2) 東北地方整備局，平成 24 年度事業評価監視委員会（第 5 回）資料，海岸事業再評価仙台湾南部海岸直轄海岸保全施設整備事業，2012.
- 3) 有働恵子，田中仁，真野明，武田百合子：東北地方太平洋沖地震津波による宮城県仙台湾南部海岸の海浜変形特性，土木学会論文集 B2，Vol.69, No.2, pp.1391-1395, 2013.
- 4) 東京大学生研地球環境工学研究グループ：航空写真より作成した広域オルソ画像と判読による津波到達（浸水域）ライン，2012.
- 5) 国土地理院：GPS 連続観測から得られた電子基準点の地殻変動，2011.