2010年チリ中部地震津波および2011年東北地方太平洋沖地震津波 による気仙沼湾での地形変化に関する現地調査

A Field Survey of Geomorphic Change on Kesennuma Bay caused by the 2010 Chilean Tsunami
and the 2011 Tohoku Tsunami.

原口 強¹・高橋智幸²・久松力人³・森下 祐⁴・佐々木いたる⁵

Tsuyoshi HARAGUCHI, Tomoyuki TAKAHASHI, Rikito HISAMATSU
Yu MORISHITA and Itaru SASAKI

We conducted a bathymetric survey at Kesennuma Bay in Miyagi-prefecture before and after the 2010 Chilean Tsunami and the 2011 Tohoku Tsunami, and measured detailed 3D bathymetric data. Based on the survey data, we confirmed geomorphic characteristic on Kesennuma Bay and geomorphic changes due to recent two tsunamis in 2010 and 2011. And we provide quantitative analysis of these geomorphic changes, analyzed the relation to the character of each tsunamis, and studied the sediment transport characteristic.

1. はじめに

津波によって海底は、どのように変化するのであろうか。津波による海底地形変化は、海岸構造物の損壊や航路埋没、生態系への変化など、甚大な産業被害をもたらす可能性があり、津波による土砂移動を定量的に評価しえる土砂移動モデル（例えば、高橋ら、1999）の高度化が求められている。こうした土砂移動モデルの高度化には、モデルの再現性や適用性を評価するため、津波来襲前後の詳細な海底地形データの蓄積が不可欠であり、津浪来襲時の土砂移動特性の実態を把握する上でも重要なデータといえる。しかし、津波に関する現地記録は、浸水域や検潮所の水位に関するものが多く、海底地形データに関する記録は少ないのが現状である。

このため、1960年のチリ津波によって海底地形が大きく変化したことが知られている気仙沼湾において、深浅測量を2008年に実施し、平常時の定常的な地形変化を捉える試みを開始した。ところが、その後二度の津波〔2010年2月27日の2010年チリ中部地震津波（以下、2010年チリ津波）、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震津波（以下、2011年東北津波）〕に見舞われたため、それぞれ津波発生後に同一の機器を用いて深浅測量を実施し、二度の津波来襲直後における海底地形データを取得した。こうした同一海域を対象に、規模の異なる実津波の来襲前後において詳細な海底地形データを取得している事例

は極めて稀であり、貴重なデータであるといえる。

このため、本研究では、三時点で取得した詳細な海底地形データに基づき、気仙沼湾に来襲した二度の実津波に対する地形変化の特徴を明らかにし、各津波における土砂輸送特性や津波の性質との関係性を考察することを目的とした。なお、図-1(a)が示す2011年東北津波のように津波が陸域に広範囲に亘り溯上した場合、陸域に堆積した海砂も土砂輸送特性を考察する重要な指標となるが、本研究では主に海域内の地形変化に着目して考察した。

2. 2010年チリ津波と2011年東北津波による地形変化の調査概要

(1) 調査時期および調査方法

気仙沼湾での最初の深浅測量は、2010年チリ津波が来襲する約1年3カ月前の2008年11月23日に実施しており、その後の測量は、2010年チリ津波および2011年東北津波の津波来襲後約20日前後で実施している（表-1）。

海底地形の計測は、小型船を使用し、図-1(b)に示す調査範囲を対象に実施する。調査機器は、図-1(c)に示す水深の約10倍程度のスワ幅（音響ビームの受波角度）

表-1 津波発生時期と深浅測量実施時期

調査時期	
1回目調査	2008年11月23日
チリ中部沖地震 2010年2月28日気仙沼湾に津波来襲	
2回目調査	2010年3月22日 ・津波来襲後22日目、1回目計測から1年4カ月後
東日本大震災 2011年3月11日気仙沼湾に来襲	
3回目調査	2011年3月29日 ・津波来襲後18日目、2回目計測から約1年後

1 正会員 博(工) 大阪市立大学准教授大学院理学研究科
2 正会員 博(工) 関西大学教授社会安全学部安全マネジメント学科
3 パシフィックコンサルタンツ株式会社
4 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社
5 株式会社アーク・ジオ・サポート

図-1 2011年東北津波発生後の気仙沼湾の状況および深浅測量の調査範囲と調査機器

を持つ3次元サイドスキャンソナー（以下、C3D）を採用しており、図-1 (d) に示す収録システムによりデータを記録している。これにより、最初の計測時（2010年チリ津波発生以前）においては計測が困難とされるワカメの養殖域など航行可能な水域が限定される場においても詳細な地形データを取得できた。

C3Dによる海底地形の計測結果は、音速度補正を行ったのち、COG社製水路測量解析ソフトウェア「Hypack-Max」を使用し、エラーデータ（水中のゴミ、気泡、魚群等によるスパイク状のエラー、機械的ノイズ等）を除去した上で、2m格子間隔のXYZデータとして整理した。なお、C3Dの計測精度は、水平方向5cm、鉛直方向10cmである。

(2) 地殻変動量に伴う計測結果の補正

2度目にあたる2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、大規模な地殻変動が生じ、東北地方は大きく東側に移動し沈降した。このため、2011年東北津波後の計測結果は、地殻変動量を考慮した上で整理する必要がある。ここでは、2011年東北津波来襲後の約10カ月後に国土地理院より公表された三等三角点「気仙沼」の座標点を用いて、地殻変動量を確認した。

国土地理院「web版PatchJGD」による計算によれば、水平位置は、南に1.9846m、東に4.0147m、鉛直方向は、0.616m沈下しており、この結果、2mメッシュの補正では、南に2.0m、東に4.0m、鉛直方向に0.62mの沈下を考慮して整理した。

3. 2010年チリ津波と2011年東北津波による地形変化の調査結果

(1) 津波発生以前の気仙沼湾海底地形

図-2 (a) に示す2010年チリ津波来襲以前の計測結果よ

り、蜂ヶ崎と潮見町間の狭窄部の侵食地形や湾奥の堆積地形などが示された。これは大規模な海底地形変化が生じた1960年のチリ津波後の基本的な地形（高橋ら、1991）と同様の傾向を示している。

(2) 2010年チリ津波による海底地形変化

2010年チリ津波来襲前後の地形変化を図-2 (b) に示す。図-2 (b) より、地形変化の特徴として、①狭窄部より湾奥では海底土砂移動は殆ど認められないこと、②狭窄部南の小々汐地区の西北西沖の一部、朝日町終末処理場南方沖の一部、大島瀬戸入口の一部に50cm以上の堆積が見られるが、これらは局所的で限定的なこと、③大川河口沖から大島瀬戸入口にややまとまった50cm以上の侵食域が複数地点で認められること、などが示される。

一方で、後述する2011年東北津波来襲前後の地形変化と比べて、地形変動量は非常に小さく、津波来襲前の海底地形を概ね維持している。

(3) 2011年東北津波による海底地形変化

2011年東北津波来襲前後の地形変化を図-2 (c) に示す。図-2 (c) より、地形変化の特徴として、①侵食部は蜂ヶ崎と潮見町間の狭窄部で最も深く抉るように生じており、図-2 (d) No.2よりその最大侵食量は約7mに達しV字型の形状となっていること、②湾内を滞筋が連続して発達しており、湾奥から南南東方向に蜂ヶ崎に達し、東に向きを変えたのち、ほぼ直線的に南方向に向かい、最後は南東方向へ連続していること、③堆積部は、湾奥では主に侵食域の両側に見られるのに対し、それ以外は侵食域の東側や大川河口部に幅広く分布し、図-2 (d) No.1より最も堆積している部分は約2.8mであったこと、④湾口においては、図-2 (d) No.3より堆積域や侵食域が見られるが、狭窄部や湾奥部の地形変化に比べると相対的に小さいこと、などが示される。

図-2 初期地形と各津波前後の海底地形変動量コンターおよび代表横断の比較

このように2011年東北津波では、大規模な地形変化が生じているものの、その地形形態は従前の海底地形と調和的であり、さらに強調されたとみることができる。

4. 津波による土砂移動特性の定量評価および津波外力との関係性

(1) 津波による土砂移動特性の定性評価

高橋ら(1991)による1960年チリ津波の気仙沼湾内の流況測定結果によると、気仙沼湾の狭窄部では流れが強く湾奥では渦状の流れが発生していたことが示されている。津波の性質は異なるものの、大規模な海底地形変化をもたらした2011年東北津波においても、こうした流況の傾向に大きな違いはないと考えられる。このため、狭窄部における局所的な侵食や湾奥東側の堆積は、狭窄部の強い流れにより挟まれた土砂が、湾奥での渦状の流れにより湾奥を周回して東側に幅広く堆積した様相が伺える。

(2) 津波による土砂移動特性の定量評価

図-2(b)、図-2(c)に示す津波来襲前後の海底地形変動コンターを用いて、対象範囲内(図-3)の堆積量および侵食量を算出し図-3に示す。なお、堆積は湾内の幅広い範囲で示されることから、気仙沼湾の狭窄部を境界に湾奥および湾口に分割して算出した。

この結果、2011年東北津波による土砂移動量は、堆積・侵食とも2010年チリ津波のそれと比べて極めて大きく、また、堆積量が侵食量の約1.4倍多くなっている。加えて、後述するように2011年東北津波では、陸域の広い範囲で浸水し、各所で土砂が堆積していたことが確認されていることから、実態としては湾内の侵食量をはるかに上回る相当量の土砂が湾外から運ばれてきたことが推測される。ここで、湾奥と湾口の堆積量を比較すると、

湾奥の方が大きく、押し波時に湾外から大量に運ばれてきた土砂や狭窄部で巻き上げられた土砂が、引き波時に狭窄部より沖合へ十分戻りきらずに堆積したものと推測される。

一方で、2010年チリ津波では、全体的に土砂移動が少ないものの、その傾向は堆積量に比べ侵食量が約1.2倍程度多くなっている。加えて、陸域への浸水実績も後述に示すように小範囲であり堆積土砂も少ないと推測されるため、2011年東北津波とは逆に湾外へ土砂が運ばれたと考えられる。これは、かつての大規模な地形変化をもたらした1960年チリ津波と同様の傾向を示しており(高橋ら, 1999)、津波の性質により、湾内の土砂移動特性が異なることを示唆している。

いずれにせよ、津波によっては、対象範囲内の土砂移動量の収支に大きな差異が示されることから、津波による土砂輸送モデルの高度化には、津波の土砂輸送特性に応じたモデル化だけでなく、モデル対象範囲外から運ばれる土砂供給量の設定も重要な検討事項といえる。

(3) 津波外力の特性

前述の土砂移動特性の違いは、津波の性質の違いに因るものと推測されることから、2010年チリ津波と2011年東北津波の津波波形を比較する。ここで、2011年東北津波では、三陸海岸に位置する主要な検潮所等が軒並み破壊され、波形データが殆ど残されていないことから、気仙沼湾に近い沖合のGPS波浪計(宮城県北部沖、岩手県南部沖)による波形データにより比較して図-4に示す。

図-4によると、2010年チリ津波では、同程度の津波が連続して来襲し、第3波(宮城県北部沖)、第6波(岩手県南部沖)で最大波高を観測したのに対し、2011年東北津波では、第1波が最も大きく、その後は減衰した波が

図-3 津波ごとの地形変動量の比較

図-4 各津波波形の比較

連続して来襲している。津波の規模は、2010年チリ津波の最大波高が0.25m程度だったのに対し、2011年東北津波では、6.0m程度と非常に大きく、決定的な違いが見られる。また、津波の周期は、最大波来襲時において前者が1時間程度であるのに対し、後者は20分～30分程度である。後者に関しては、近地津波ではあるものの波源域が広く比較的長い周期を示しているが、遠地津波である前者に比べて周期が短く、非定常性の大きい先鋭な波が押し寄せたといえる。

以上から、2011年東北津波では、堆積卓越の傾向を示しているが、これは、周期の短い近地津波の場合、平面的な振動幅が小さいため、押し波により狭窄部で巻き上げられた土砂が引き波時に沖合まで運ばれることなく沿岸部に沈降したためと推察される。加えて、2011年東北津波では、第1波の押し波が極めて大きい反面、これに対する引き波が小さく、沖合へと土砂を運ぶ輸送力が弱かったことも起因していると考えられる。

(4) 陸域の浸水状況

津波の規模を評価する指標として、各津波における陸域の浸水状況を比較する。2010年チリ津波では、浸水範囲を示す明確な文献等はないものの、橋本ら(2010)の現地調査報告によると、現地ヒアリングにより沿岸部の

魚市場で50～60cm、気仙沼商工会で5～10cm程度の浸水が確認されている。これらのヒアリング結果よりレベル湛水を想定(魚市場の標高+0.5m)し、浸水範囲を推定すると図-5に示すとおりであり、大川左岸背後地や浜町などで浸水していたものと推測される。

一方、東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループによると、2011年東北津波では、湾内の津波高が、東岸の二ノ浜で8～9m、蜂ヶ崎で6～10m、西岸の朝日町で4～6m、幸町で4～6m、魚町で4～5m、湾奥部の浜町で4～9mに達し、図-5に示すとおり気仙沼湾と同程度の面積にあたる広い範囲で浸水した(原口ら, 2011)。

ここで、各津波の浸水面積および浸水量を、レベル湛水を想定して定量的に評価した(表-2)。なお、レベル湛水位の仮定は表-2を参考にされたい。この結果、2011年東北津波では、2010年チリ津波に比べて浸水面積が2.6倍程度増加したのに対し、浸水量は9倍近く増加しており、リアス式海岸地形の特徴をよく示している。また、急峻な山地が接近している東岸に比べて平野が開けた西岸で浸水量が大きく増加しており、特に大川の右岸背後地では25倍以上と著しい。このことから、2011年東北津波では、押し波時に津波が大川を伝ってかなり内陸まで遡上したことが推察できるとともに大川河口部の堆積土

図-5 2010年チリ津波と2011年東北津波の浸水範囲の比較

表-2 2010年チリ津波と2011年東北津波の浸水量の比較

気仙沼 BK 分割	BK	浸水面積(km ²)		浸水量(万m ³)	
		2010年 チリ津波	2011年 東北津波	2010年 チリ津波	2011年 東北津波
	BK1	0.40	1.03	15.37	164.47
	BK2	0.08	0.23	4.11	34.64
	BK3	0.85	1.32	34.88	106.76
	BK4	0.18	1.32	8.99	243.28
	BK5	0.05	0.17	2.68	26.19
	BK6	0.05	0.13	2.25	19.17
	合計	1.62	4.19	68.27	594.52

【レベル湛水位の想定】

・2010年チリ津波:魚市場の標高+0.5m

・2011年東北津波:湾内の平均的な津波浸水高5.0m

【地盤高情報】

基盤地図情報(国土地理院)をもとに作成した10mメッシュ

砂は、湾外からだけでなく、引き波時に大川から輸送されてきた土砂により形成された可能性も示唆される。

5. 結論

本研究では、気仙沼湾において近年来襲した2010年チリ津波、2011年東北津波前後で深浅測量を実施し、詳細な3次元海底地形データを取得した。この結果をもとに、1960年チリ津波後からの地形変動状況を確認するとともに、近年来襲した二度の津波における地形変動状況を明らかにした。また、津波による土砂輸送特性と津波の性質との関係を考察した。本研究により得られた主要な成果を以下に示す。

1) 同一海域を対象に、C3Dを用いて規模の異なる実津波の発生前後における詳細な3次元海底地形データを取得した。

2) 2010年チリ津波による地形変化は、最大50cm程度で範囲も限定的である。一方で、2011年東北津波による地形変化は、最大侵食深7m、最大堆積厚2.8mもの大きな地形変化を記録した。ただし、津波発生後の地形形態は、従前の海底地形と調和的で、さらに強調されたとみることができる。

3) 気仙沼湾内の土砂収支は、2010年チリ津波では、侵食傾向が比較的優勢である一方、2011年東北津波では、堆積卓越の傾向にあり、土砂収支に大きな差異が見られる。この要因として、津波の規模が大きく異なることに加え、遠地・近地津波による周期の違いや押し波・引き波の大小の違いが挙げられる。

4) 陸域の津波浸水面積および浸水量は、2010年チリ津波と2011年東北津波で大きく異なり、特に浸水量が大幅に増加するなどリアス式海岸地形の特徴をよく示している。また、2011年東北津波では、大川右岸背後地で浸水量が著しく増加しており、大川河口部の堆積土砂は、引き波時に大川から輸送されてきた土砂により形成された可能性も示唆される。

本研究では、津波来襲前後の詳細な海底地形データから津波による海底地形変化の実態を明らかにするといった点では有益であるが、土砂移動特性と津波の性質との関係性を明らかにする上では、傾向分析に留まり推測の域を脱しないといえる。このため、今後は本研究で得られた実測データや地形変動状況の知見を活用して、土砂輸送モデルの高度化を図るとともに、模型実験や数値実験等と組み合わせて、津波の性質と土砂移動特性との関係性を明確化していくことが重要である。

謝辞: 現地調査においては海上自衛隊および気仙沼市危機管理課に協力していただいた。ここに記して謝意を表します。また、本研究は(独)原子力安全基盤機構からの委託業務「平成22～23年度 土砂移動解析手法の高度化(代表:関西大学 高橋智幸)」の成果の一部を取りまとめたものである。

参考文献

- 国土地理院:被災地域の空中写真(電子国土Webシステム版), http://portal.cyberjapan.jp/site/mapuse2/index3_tohoku.html, 参照2012-05-10.
- 高橋智幸・今村文彦・首藤伸夫(1991):津波による流れと海底変動に関する研究, 海岸工学論文集, 第38巻, pp.161-165.
- 高橋智幸・首藤伸夫・今村文彦・浅井大輔(1999):掃流砂層・浮遊砂層間の交換砂量を考慮した津波移動床モデルの開発, 海岸工学論文集, 第46巻, pp.606-610.
- 橋本貴之・今村文彦(2011):2010年チリ津波による被害に関する気仙沼での現地調査報告, 津波工学研究報告, 第27号, pp.91-95.
- 原口 強・岩松 暉(2011):東日本大震災津波詳細地図 上巻 青森・岩手・宮城, 古今書院, p.46.