

戦略的国際科学技術協力推進事業（国際緊急共同研究・調査支援プログラム（J-RAPID））

1. 研究課題名：「東北地方太平洋沖地震による津波の陸地における挙動と水流による地形変化の研究」

2. 研究期間：平成23年9月～平成25年3月

3. 支援額： 総額 4,158,000 円

4. 主な参加研究者名：

日本側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	小口 高	東京大学、空間情報科学研究センター	教授
研究者	早川 裕一	東京大学、空間情報科学研究センター	助教
研究者	後藤 和久	千葉工業大学、惑星探査研究センター	上席研究員
研究者	斉藤 仁	東京大学、空間情報科学研究センター	学振 PD
研究者	小松 吾郎	千葉工業大学、惑星探査研究センター	客員研究員
参加研究者 のべ 5 名			

相手側（研究代表者を含め6名までを記載）

	氏名	所属	役職
研究代表者	V. R. Baker	アリゾナ大学、水文水資源学科	教授
研究者	J. D. Pelletier	アリゾナ大学、地球科学科	教授
研究者	L. McGuire	アリゾナ大学、地球科学科	大学院生
参加研究者 のべ 3 名			

5. 研究・調査の目的

2011年3月11日の東日本大震災では、東北地方の太平洋岸を襲った大規模な津波が多大な人的・物的被害をもたらした。この震災を語る際には、「想定外」の語がよく使われた。実際には大震災の前から、西暦869年（貞観11年）に仙台平野で同等の規模の津波が生じたことが、津波堆積物や歴史資料の調査を通じて指摘されていた。しかし、それが社会に広く認知されていなかったため、多くの人にとっては想定外の事態となり、避難が遅れるなどして被害が大きくなった。このことは、過去に生じた大規模な津波の実態を科学的方法によって知り、それを社会に広く伝えることが、津波災害の軽減に重要なことを示す。しかし、津波堆積物による過去の津波の復元は、掘削調査などに多大な労力を要する。また、津波に関する歴史資料は発見が難しいことも多い。そこで本研究では、最新の測量と地形解析手法を用いて地形の特徴を詳細に把握することにより、過去の大津波の規模を知る手法の開発と適用を行う。

本研究には、日本側からは東京大学と千葉工業大学の研究者が参加し、米国側からはアリゾナ大学の研究者が参加する。専門は地形学、地質学、地球物理学である。いずれも水流が作る地形の研究を行ってきたが、その対象の種類や地域は異なっており、用いる手法も野外観察、地形測量、地形の数値解析、水流や地形変化の数値シミュレーションと異なっている。このように関心は共通であるが、多様な背景と技術を持つ研究者が連携するこ

とにより、良い成果をあげることが交流の主な目的とする。

本研究では、地上型のレーザースキャナーを用いた精密な地形測量を行い、東日本大震災の津波による地形変化が大きかった場所で、数十 cm 単位の解像度で地形を三次元測量する（図 1）。さらに津波被災地のより広い範囲について、国土地理院が航空レーザ測量で取得した解像度数 m の地形データを用いた検討を行う。次に、それらのデータを地理情報システム（GIS）に入力して分析し、地形の特徴を定量的に明らかにする。

また、測量の対象地を中心に、野外において地形と表層地質の観察と記載を行う。さらに東日本大震災の際に沖合のブイで実際に観測された津波の波動と地形データを入力し、地形に制約された津波の挙動を数値シミュレーションにより再現する。

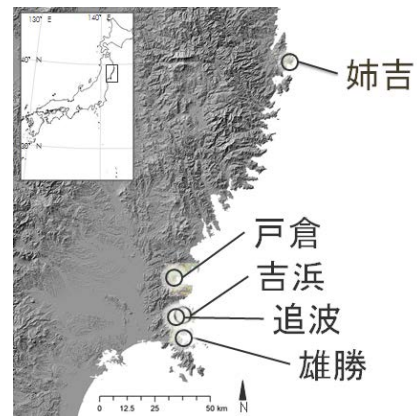


図 1. 三陸南部における地上型レーザースキャナーによる測量地点。姉吉で最も多くのデータを取得。

6. 研究・調査の成果

6-1 研究・調査の成果

本研究では、現在の地形を詳しく計測することにより、その地域に襲来する巨大津波の規模を推定できる可能性を指摘した。具体的には、海面がほぼ現在の高さに達した約 7 千年前以降に、三陸のリアス海岸のような場所に大津波が繰り返し襲来し、その際に生じる侵食の蓄積によって谷に独特の地形が形成されており、その地形の位置から津波の規模を推定できるという着想を得た。特徴的な地形は、i) 谷の側壁に見られる小段（図 2、3）、ii) 通常とは異なる谷の側壁の傾斜の非対称性（図 2、3）、iii) 下部が異様に広い谷（図 2）、iv) 河床勾配の顕著な不連続である。これらの特徴が、東日本大震災の際の津波の到達状況と対応することが示された。

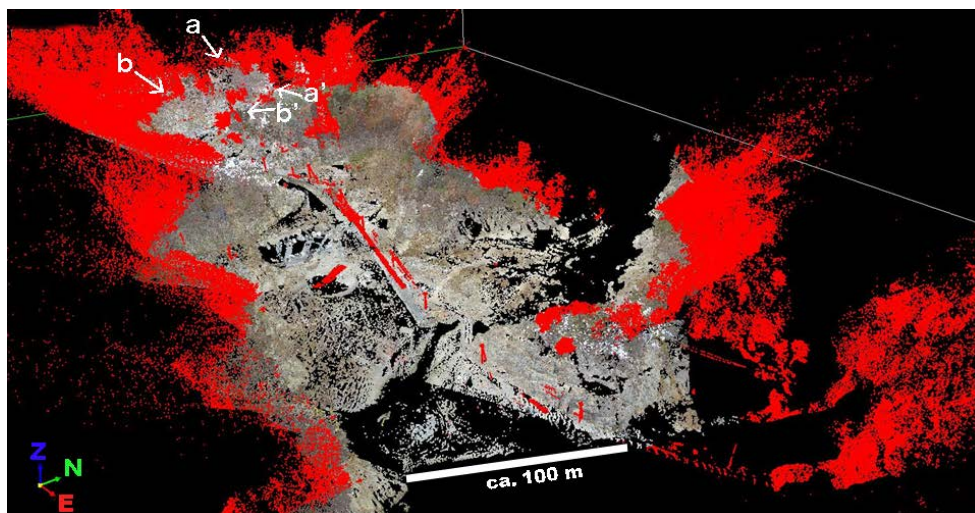


図 2 宮古市姉吉におけるレーザースキャンで取得された点群の 3 次元表示。赤色は植生や人工構造物等の解析対象外とした点群。他は現況の RGB カラーを示す。谷底と谷壁斜面の下部は裸地や露岩となっているため白い。スケールバーの位置が現在の海岸線に相当。a, a', b, b'は図 3 の地形断面の位置を示す。

従来、観測記録がない近世以前の津波災害に関しては、津波堆積物の調査により過去の津波の規模が推定されてきた。たとえば仙台平野では、地質学者が津波堆積物に基づき、西暦 869 年（貞観 11 年）に内陸まで津波が侵入したことを指摘していた。さらに歴史学者も、歴史記録や伝承に基づいて同様の指摘をしていた。しかし、このような研究の成果が広く共有されていなかった。東日本大震災を通じて津波堆積物の研究の重要性が痛感され、新たな取り組みが始まっているが、津波堆積物の大半は、地面を掘削して初めて認定できるため、調査に多大な労力と時間を要する。また、古い津波に関する歴史記録や伝承は、古代から人が多く住んでいた場所以外では存在しない場合が多い。

一方、地形は地球の表層に普遍的に存在し、掘削や断片的な試料の探索をしなくても特徴を把握できる。

この点で、本研究で提案した地形から津波の規模を推定する手法は、広域での迅速な調査に適する。

一方、地形から復元される内容は、反復して生じた大津波の総体であり、個々のイベントの詳しい規模や年代の推定は困難である。しかし、地域の防災という観点では、過去の大津波の典型的な規模を知ることは十分に意義がある。今回最も詳しい調査を行った姉吉地区は、明治・昭和の三陸津波で集落を失った教訓を踏まえて「此处より下に家を建てるな」という石碑があることで知られている。実際に今の集落は石碑よりも上にあるため、東日本大震災の際には被害を全く受けなかった。この石碑の位置は、東日本大震災の津波の到達点から約 50 m 内陸側にあり、その津波の到達点は、地形の特徴から推定される過去の大津波の典型的な到達地点と一致している。換言すれば、仮に石碑がなくても、地形から津波の規模を推定することにより、石碑と同様の防災上の判断材料を提供できたことになる。このような視点で津波の危険域を認定していくことは、岩石海岸の谷や入り江における基本的な防災対策の一つになる可能性がある。

本研究で提示した手法は、三陸以外の地域にも応用可能と考える。典型的なリアス海岸は若狭湾、紀伊半島などにも分布し、より平滑な海岸線を持つ岩石海岸においても、一部に谷地形が存在するのが普通である。本研究により示された手法の高速性を活かし、各地の岩石海岸における津波災害の可能性を早急に検討することは有用と思われる。もし地形から津波の影響が大きいと判断された場合には、津波堆積物や歴史資料の探索を行い、判断を検証しつつ理解を深めるという展開も考えられる。

本研究で提示した手法は岩石海岸が対象であり、砂浜海岸や平野には適用できない。しかし、砂浜海岸や平野の両端にある岩石海岸の地形を調査することにより、地域全体の津波の規模を評価することが考えられる。日本では砂浜海岸や平野だけが延々と続く場所は少なく、比較的近い場所に岩石海岸が存在する場合が多い。したがって本研究で示した手法は、岩石海岸以外の津波の評価にも貢献すると考えられる。

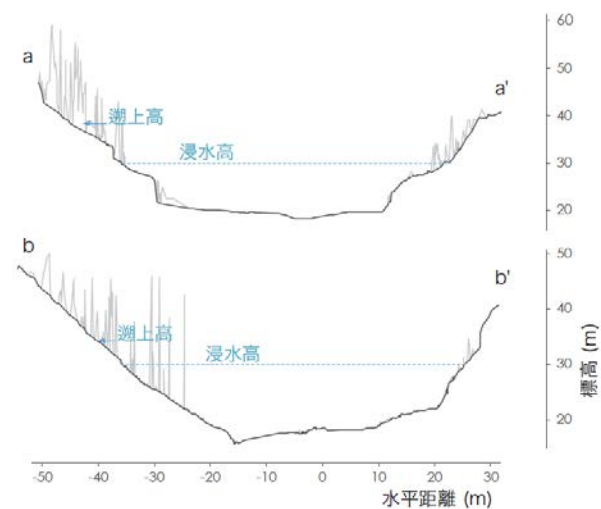


図3 宮古市姉吉の谷の奥部における狭窄部付近(上、a-a')と蛇行部(下、b-b')の地形横断面。スキャンの元データに基づく断面を灰色、植生等をフィルタリングした後の地表面を黒線で示す。青点線、青矢印はそれぞれ津波の浸水高と遡上高を示す。津波の浸水高付近に明瞭な小崖が形成されており(上)、また蛇行部(下)では蛇行の攻撃斜面(右岸=図の左側)が緩やかになる特異な非対称形となっている。

上記の検討は、地上型レーザースキャナーを用いて取得した高精度の地形データを活用して行った。一方、現地測量を行わずに得られる解像度がやや低いデータを用いて、同様の研究を行うことも試みた。航空機レーザー測量のデータを用いた検討によると、谷壁にみられる段のような地形の抽出は不可能だが、谷の横断面形や縦断面形の特徴を用いた津波による侵食の推定は、ある程度可能と判明した（図4）。

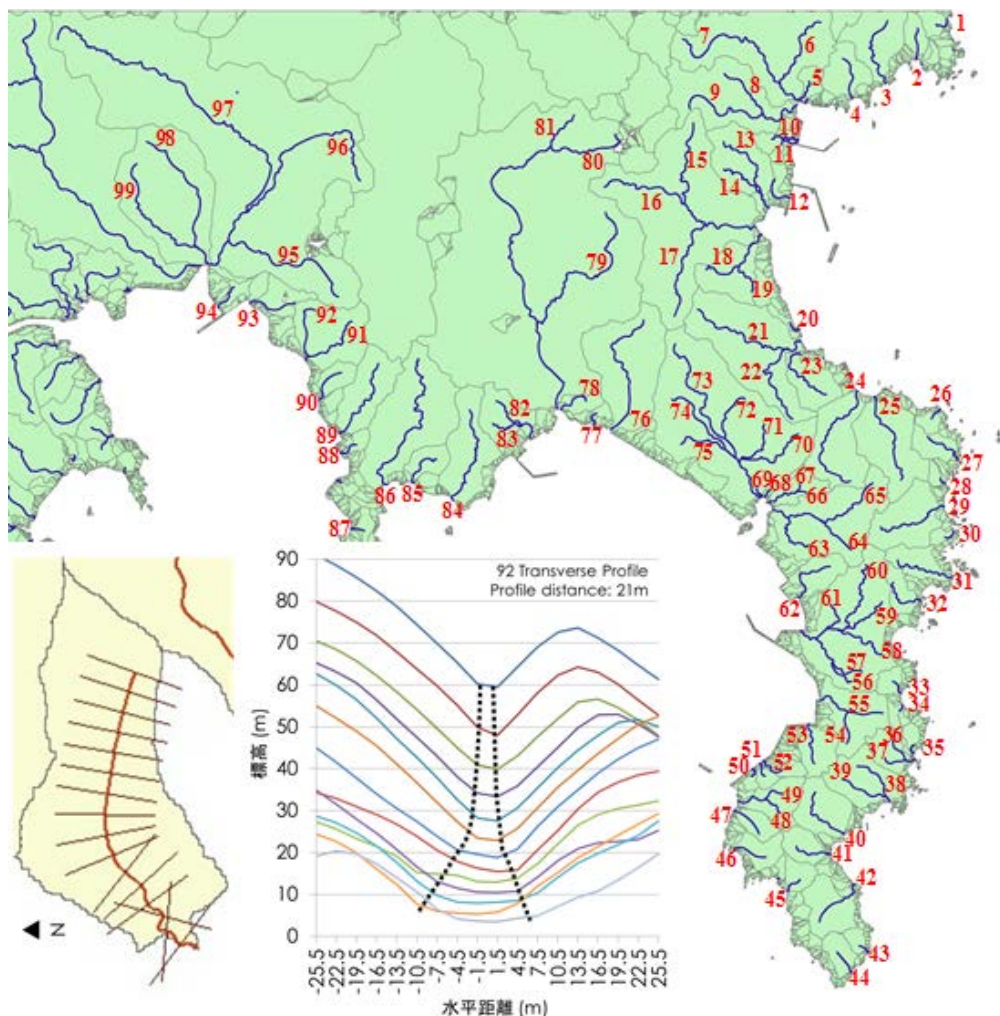


図4 南三陸町歌津崎周辺における航空レーザー測量データ（2 m 解像度）を用いた谷地形の分析。99本の谷において横断面を連続的に抽出。92番の流域の例を表示。

本研究では地形を用いた津波の復元の可能性を三陸以外の地域においても検討するために、紀伊半島の串本町と、石垣島の白浜の岩石海岸においても地形測量を行った。また、流水が形成する地形の研究に、レーザースキャン等のリモートセンシングや地理情報システムによる地形解析を適用した既存研究のレビューを行った。その成果は、英文書籍の複数の章に公表した。

6-2 人的交流の成果

米国側の研究代表者である Baker 教授は、地形学と古水文学、とくに様々な規模の洪水が地形に与える影響の研究を行ってきた。約 300 編の学術論文と 15 冊の書籍の編集もしくは執筆を担当し、アメリカ科学振興協会、アメリカ地球物理学会、アメリカ地質学会、欧

州地球科学連合の特別会員（フェロー）である。さらにアメリカ地質学会の元会長で、優れた研究によりアメリカ地質学会、英国地形学会などの学会賞を受賞している。このような世界の地球科学を代表する研究者と共同研究を進めたことは有益であり、実際、本研究の方向性を決める際や、研究を進める途上で重要なアドバイスをいただいた。

米国側の共同研究者である Pelletier 教授は、多数の重要な論文を発表し、重要な学術誌の編集にも関与している中堅の研究者である。Pelletier 教授の特徴は、地球科学の多様な分野を自由に渡り歩くことであり、論文が地球物理学、地質学、地形学、水文学、土壌学、惑星科学、生態学などの一流の雑誌に掲載されている。Pelletier 教授と、その指導学生である McGuire 氏は、主に津波のシミュレーションを通じて本研究に貢献した。水流モデル FLO-2D を用いたシミュレーションの結果に示される流速の相対的に大きな場所（図 5 の赤丸）と、流速の相対的に小さな場所（図 5 の青丸）では、谷壁の段状地形などの明瞭さが異なることが判明しており、前者で実際に侵食が激しかったと考えられる。

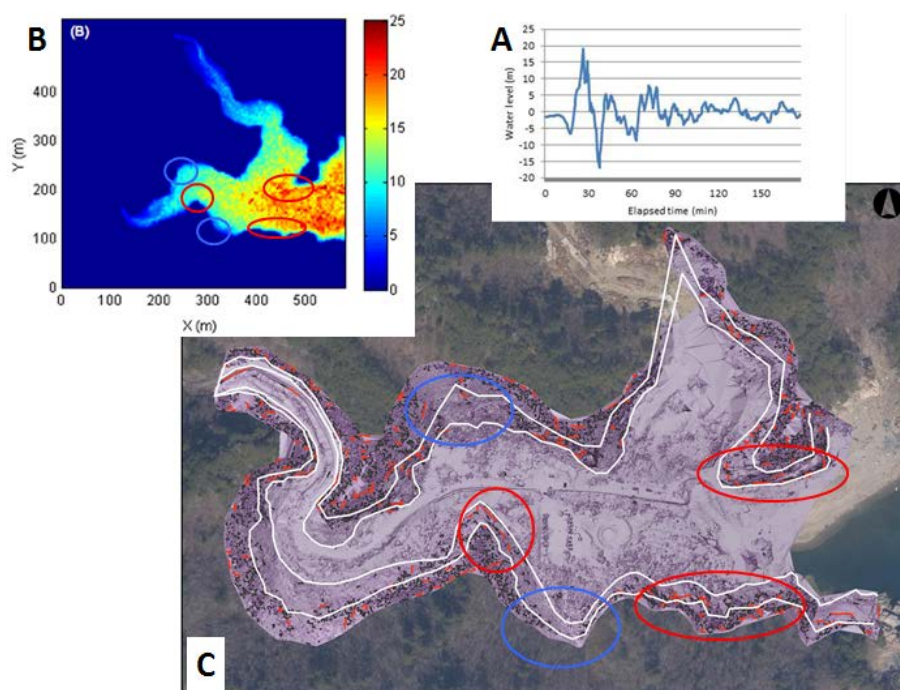


図 5 津波のシミュレーションと地形との比較。(A) 東日本大震災の際に外洋で記録された津波の波形、(B) FLO-2D モデルにより推定した姉吉の谷における津波の流速、(C) 地上レーザースキャンで得られた地形データとの対応。赤丸は流速が相対的に大きく谷壁の段状地形などの侵食の痕跡が明瞭な場所、青丸はその逆。白線は谷壁の上端と下端を示す。

上のような交流の成果は、研究期間中に連名の学会発表を通じて数回発表され、日米の参加者 8 名を全て著者に含む査読付きの学術書籍の論文として受理されている。この論文では、おもに研究の全体像を記述したが、姉吉地区における地形測量を中心とする論文も現在執筆中である。さらに、航空レーザ測量のデータに基づく広域的な研究や、水流シミュレーションの成果については、より議論を深めてから公表する予定である。このような作業を通じて、米国側研究者と今後も連携を続けていく。

7. 主な論文発表・特許等（5件以内）

相手側との共著論文については、その旨を備考欄にご記載ください。

論文 or 特許	・論文の場合： 著者名、タイトル、掲載誌名、巻、号、ページ、発行年 ・特許の場合： 知的財産権の種類、発明等の名称、出願国、出願日、 出願番号、出願人、発明者等	備考
論文	Komatsu, G., Goto, K., Baker, V.R., Oguchi, T., Hayakawa, Y.S., Saito, H., Pelletier, J.D., McGuire, L., Iijima, Y. (2013): Effects of tsunami wave erosion on natural landscapes: Examples from the 2011 Tohoku-oki Tsunami. In: Santiago-Fandino, V., Takahashi, T., Kontar, Y. (eds.), Tsunami Events and Lessons Learned: Ecological and Societal Significance, Springer (in press).	米国側との共著論文
論文	Hayakawa, Y.S. and Oguchi, T. (2013): Spatial correspondence of knickzones and stream confluences along bedrock rivers in Japan: Implications for hydraulic formation of knickzones. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography (in press).	
論文	Oguchi, T., Wasklewicz, T., and Hayakawa, Y.S. (2013): Remote data in fluvial geomorphology: Characteristics and applications. In: Shroder, J.F. (ed.) Treatise on Geomorphology, Volume 9, Academic Press, San Diego, pp. 711-729.	
論文	Plater, A.J., Daniels, M.D., Oguchi, T. (2013): Present research frontiers in Geomorphology. In: Shroder, J.F. (ed.) Treatise on Geomorphology, Volume 1, Academic Press, San Diego, pp. 349-376.	
論文	Oguchi, T., Hayakawa, Y.S. and Wasklewicz, T. (2011): Data sources. In: Smith, M., Paron, P., Griffiths, J. (Eds.) Geomorphological Mapping: Methods and Applications. Developments in Earth Surface Processes, Vol. 15. Elsevier, Amsterdam, pp. 189-224.	