

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 20 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25350492

研究課題名(和文) 津波痕跡高を用いた地震規模推定法の高度化研究

研究課題名(英文) Advancement of the Tsunami source presumption technique for the Historical tsunami using the Tsunami trace heights

研究代表者

今井 健太郎 (IMAI, Kentaro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・技術研究員

研究者番号：20554497

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：過去に発生した地震津波の発生履歴と規模の詳細な検討は津波被害軽減対策を行う上で極めて重要であるといえる。歴史時代の津波の波源規模を推定するために用いることのできる情報は地震観測機器の運用時期の前後で大きく異なる。その情報の中の一つに津波痕跡高とその分布が挙げられる。本研究では、津波痕跡高とその分布のみを用いた場合に、適切に波源を推定するための諸種の条件を明らかにした。さらに、現代観測網による地震規模と津波痕跡高のみを用いた場合の地震規模の偏差について検討を行った。これらの知見を踏まえ、歴史津波に向けた新たな波源推定手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：To reduce the damage of the tsunami, it is important to examine the scale of a tsunami generated in the past in detail. The tsunami trace heights that is the information to presumption historical tsunami source is limited. But, in a source presumption only using the amount of tsunami trace, there is not the knowledge about the influence to give for the tsunami trace heights and the divided subfaults to have a big effect on the amount of tsunami in the presumed tsunami source. In wave source presumption only using the tsunami trace heights, I examined each appropriate analysis condition using combination optimization technique. As a result, clarify each appropriate analysis condition, which enable I could to suggest new wave source presumption technique for the historical tsunami.

研究分野：津波工学

キーワード：津波 歴史時代 津波痕跡高 波源推定

1. 研究開始当初の背景

巨大地震の解明のために、地震波を始め津波、地殻変動など、様々な観測記録を用いたモデル評価が行われるようになって久しい。

1940年頃からは地震波観測や験潮施設などの観測体制の充実により、地震波形を利用した地震モデルの評価手法(Kanamori, 1970)や、地震に伴った津波による海面変動記録を用いた解析手法(Satake, 1987)が提案された。昨今では、これらに加えて、陸上、あるいは海底の地殻変動観測などの記録を同時に説明し得る解析手法も提案されている(例えば, Koketsu et al., 2011)。2011年東北地方太平洋沖地震のように、陸域から沖合にいたる各種観測記録を用いることにより、より明確な地震像を把握することが可能となった。しかし、この観測記録を用いた評価が行うことできるのは、各種観測体制が展開されてきたせいぜい100年前程度の地震事例だけである。

日本においては、古文書などに地震・津波災害の記録に残されている場合があり、それより年代の古い、例えば江戸時代に発生した巨大地震についても、それらの記録を解釈することで、地震・津波規模を評価できる場合もある。それより古い年代の地震は、もはや歴史記録には断片的に残っているのみであり、津波堆積物など、地質学的なアプローチに頼らざるを得ない。

100年前より古い巨大地震の評価手法としては、歴史資料や伝承などの歴史記録に残されている地震・津波に関する記録、例えば、震害記録をはじめ、津波を伴っていた場合には来襲時刻や遡上位置、家屋流出被害といった情報であり、史料の信頼性を吟味しながら、震害分布や、そこに記述されている津波の痕跡情報を頼りに津波痕跡高を評価する。これら津波痕跡高分布や、陸域の地殻変動パターンを説明するための断層面を仮定し、断層滑量などの断層パラメータを手探りに変化させながら、津波高痕跡分布と計算津波高が整合するように、試行錯誤的に断層モデルを評価してきた(例えば, 相田, 1981)。ゆえに、評価対象の地震モデルはあくまで、津波痕跡高を説明する地震像であり、その地震像や規模については、大きな幅を含んでおり、特に津波痕跡高やその痕跡点数の解釈次第で、その様相は大きく変化すると考えられる。

しかし、この評価は、歴史地震で行うことは難しく、現在の観測体制下で発生した地震・津波で行うことが必要である。これらを定量的に評価することで、2011年東北地方太平洋沖地震の際に直面したような、想定されていた地震と現実に発生した巨大地震との乖離を埋めることになり得るため、将来の地震予測を行う上で極めて重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、津波痕跡高から評価した地震像とその規模と、最新の観測記録から評

価した地震像やその規模とで、それらにどの程度の乖離が生じているのかを定量的に評価することにある。本研究の中心的な柱となるのは、それぞれの地震モデル像とその規模に関する偏差評価であるから、第一に津波痕跡データについて、歴史資料から得られる情報を客観的かつ、地震を合理的に解析可能なデータへの変換手法、それを用いた地震モデルの逆解析手法を開発し、観測データが充実している近年に発生した地震事例を参考に、津波痕跡高のみで評価を行った地震像とその規模の偏差について定量的な知見を与える。

本研究では、以下について検討を進める。歴史資料から読み取れる情報を最大限に利用することが必要になるため、原史料に立ち返り再解釈を試み、できるだけ多くの情報を抽出することである。次に、津波痕跡高を逆問題として取り扱える工夫である。

Satake (1987)は津波の流体力学的性質を利用して、その運動を線形問題に帰着させ、津波波形から地震像を一義的に解釈できる手法を開発した。一方で、津波痕跡は陸上に残される場合がほとんどであり、非線形を無視できず、津波痕跡高をそのまま線形問題に帰着させることは難しい。そこで、津波の水理学的性質を利用して、エネルギー保存則に基づいた津波堆積物情報を含む、陸上津波痕跡高から沿岸津波高への換算手法の開発を行う。

2011年東北地方太平洋沖地震における既往の解析結果を参考として、津波痕跡高とその分布を利用した新しい波源推定法の提案を行う。さらに、地震像を評価する場合における、最適な津波痕跡点数とその分布、さらには、最適となる断層の分割数について検討を行う。

史料から解釈できる信頼性の高い津波高評価には限界があるため、不確定要素を含んだ評価を行う必要がある。津波による家屋被害程度から確率論的にその浸水深の解釈を行うために、家屋被害関数を用いた津波痕跡高の推定法に関する検討を行う。これらの結果を有機的に融合させることにより、津波痕跡高のみで地震像を評価した場合の、推定規模の幅を評価する。

以上の検討結果を踏まえ、詳細な津波痕跡情報を含み、様々な観測記録が多く残されている2003年十勝沖地震の地震モデルの評価を行う。歴史時代の津波については、1611年慶長奥州地震津波の事例について検討を行う。

3. 研究の方法

本研究では、現代の地震観測網下で得られる観測情報に基づいた地震規模と、情報が限定的な津波痕跡高から得られる地震規模の偏差について、定量的な知見を与えるべく、エネルギー保存則に基づいた陸上津波痕跡高から沿岸津波高への換算手法の開発、家屋

の被害関数を用いた津波痕跡高の推定法に関する検討，津波痕跡高を用いた波源推定手法の開発を行う．これらの解析手法を近年に発生した地震に適用し，津波痕跡高を用いた場合の地震規模の偏差について検討を行う．

4. 研究成果

(1) エネルギー保存則に基づいた陸上津波痕跡高から沿岸津波高への換算手法の開発

2011年東北地方太平洋沖地震の津波は，東北沿岸の広域で激甚被害をもたらした．一方で，各地の沿岸における津波高や陸域の津波浸水境界など6000点に及ぶ津波痕跡点が収集されている（東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ，2012）．これらの津波痕跡情報を利用して，水理学に基づいたエネルギー保存則の観点から，沿岸津波高と遡上高の関係性を明らかにした．

陸域において，底面摩擦でのみエネルギーが減少するという仮定のもと，汀線に垂直に位置する遡上高と浸水高の間にベルヌーイの定理に基づいたエネルギー保存式を適用することにより，式(1)を得る．

$$h = z + (f l - D) Fr^2 / 2 \quad (1)$$

ここで， h は沿岸津波高， z は歴史記録として比較的残りやすい遡上高， f は底面摩擦による損失係数， l は汀線からの津波遡上距離， Fr は陸上遡上する津波のフルード数である．ここで， f の特性が明らかになれば，遡上高と沿岸津波高の関係が近似的に求まる．そこで，2011年東北地震津波の痕跡データのうち，建物が含まれない測線を選択し，その測線上における f を評価した（図-1）．この時の Fr は松富・飯塚(8)が水路実験で求めた津波氾濫流の Fr のとりうる値の中央値である1.35を選択した． f の回帰式として，式(2)を得る．

$$\ln f = -0.82 \ln(l/D) - 0.056 \quad (2)$$

決定係数は0.73となる． Fr の与え方次第で各係数は変わり得るが，本式により遡上高を沿岸の津波高におおよそ変換することが可能である．

(2) 津波痕跡高による波源推定手法の開発

潮位記録などが存在する近代以降の地震津波の規模評価には逆解析手法（Satake, 1989）による波源推定が有用である．一方で，歴史地震・津波の波源推定には津波痕跡や地殻変動などの限定的かつ断片的な情報を用いて推定せざるを得ない．相田（1977）は波源断層の断層パラメータを試行錯誤的に変更しながら，計算津波高と津波痕跡高によって規定される幾何平均 K ，幾何標準偏差によって最適波源を選択している．この方法だと K およびの最適指標を満足する波源を一義的に決定することになり，波源の不均質性の評価や波源規模に関する信頼性評価を行う事は難しい．

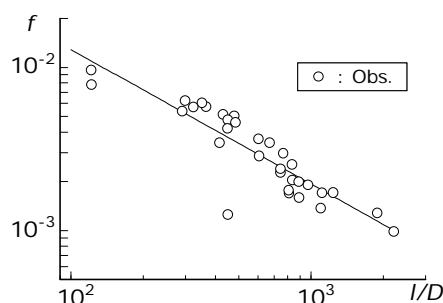


図-1 l/D と f の関係

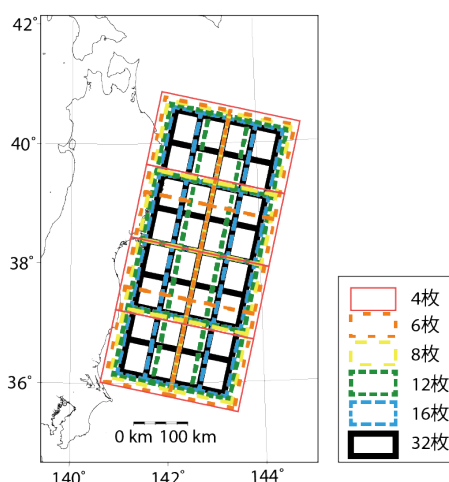


図-2 解析対象領域と6通りの断層分割パターン

ここでは，津波痕跡高のみを用いた波源推定に組み合わせ最適化手法を適用し，効率良く波源推定を行う手法を開発した．

組み合わせ最適化手法は，厳密解を求めることが難しい問題に対して，その問題の解空間を効率よく探索して高精度な近似解を求める手法である．グリッドサーチ法のように，すべての組み合わせを解く方法もあるが，解く問題によっては膨大な計算量となり，現在の計算機性能では現実的とはいえない．本研究では，組み合わせ最適化手法の一つであるSim E アルゴリズム（Kling and Banerjee, 1990）を適用した．Sim E アルゴリズムは，さまざまな組み合わせ最適化問題を解くための汎用的な探索手法であり，最適化評価指標を適切に選択することにより，近似的ではあるが精度の高い解を得ることができる．本研究では，津波痕跡高と計算津波高の誤差ノルムを最適化指標とした．

対象地震は2011年東北地震津波とし，6通りの分割を考慮し（図-2），津波痕跡点位置に関しては東北地方太平洋沖地震津波合同調査グループ(5)の調査結果のうち信頼度Aの遡上高を抽出し，南北にサンプリング間隔を3 km~100 kmにとった5パターンを考え，計30通りの解析を行い，適切な断層分割数の検討を行った．

断層分割パターンに関する検討
適切な断層分割を検討するために，本研究

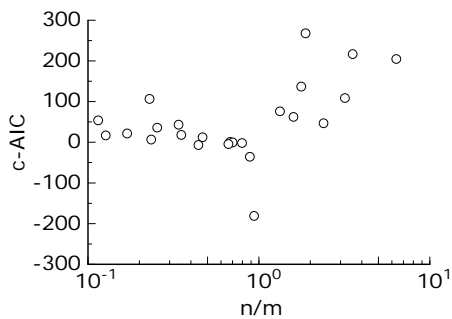
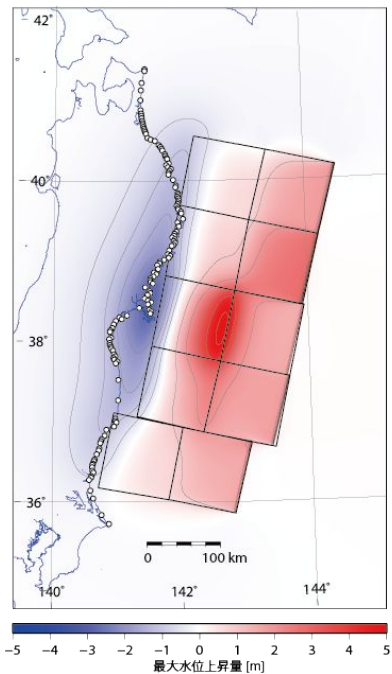
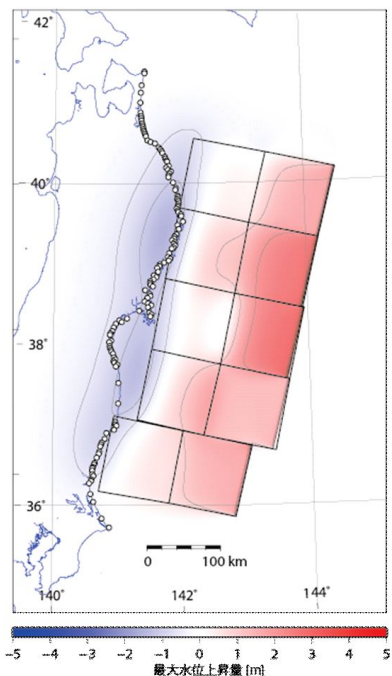


図-3 n/m とc-AICの関係



(a) 補正無しの推定波源



(b) 式(1)の補正を加えた推定波源

図-4 2011年東北津波の波源推定結果。は波源推定に用いた痕跡点(139点)を示す。

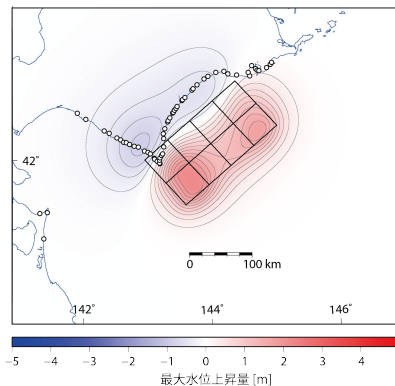


図-5 2003年十勝津波の波源推定結果

では初期の波源断層(以降,設定波源)のすべり量を一様乱数で設定し,その波源による計算津波高に一定の誤差($\pm 10\%$)を与えたものを真値として,組み合わせ最適化手法によりすべり量分布を推定した.初期すべり量分布と推定した津波波源のすべり量分布の残差について評価した.津波痕跡点数 m と断層分割数 n の最適指標を得るために,津波高との整合性と断層分割の複雑さを評価できるc-AIC(杉浦,1978)を用いた.

n/m とc-AICの関係を図-3に示す. $n/m < 1$ の時にc-AICは小さくなり, $n/m = 1$ で極小値となる.本結果は津波痕跡点数と小断層分割の指標となる.

津波痕跡高分布の密度に関する検討

推定波源の整合性をテストモデルと推定波源の断層すべり量分布の残差自乗和で評価した.波源推定には一定の痕跡点密度が必要であり,波源長さの5%の間隔で痕跡情報を得られる場合に M_w との偏差は抑制されることが判った.さらに痕跡高分布が波源長さに対して偏っている場合には,解を得ることはできるが,高い水位上昇部分が離散的に生じてしまうことがわかった.加えて,地殻変動の拘束条件を入れることでさらに M_w の偏差が抑制される.

各種条件が推定波源に与える影響

痕跡点数と断層分割については,これまでの必要条件を満足するように設定し,津波痕跡高の補正に与える影響を調べた.図-4に2011年東北津波の波源推定結果を示す.図中,式(1)による補正無しが(a),補正有りが(b)を示す.図から,海溝軸付近の大きなすべりを表現できているのは(b)であり,平野部の遡上高を波源推定に用いる場合には,式(1)による補正が重要であることを示している.

2003年十勝沖地震津波への適用

本研究で得られた結果を用いて,2003年十勝沖地震津波に適用した.図-5に2003年十勝津波の波源推定結果を示す.本解析による地震規模は $M_w 8.3$ となり,USGS(2003)による値と同程度となった.また,津波波形から求められた解(谷岡・他,2004)は $M_w 8.0$ であり大きな規模の乖離はないものの,すべり

分布については若干沖側に出現してしまっている。

(3) 家屋の被害関数を用いた津波痕跡高の推定法

これまでの歴史津波研究において、津波高の評価には、史料に明白な痕跡点の記載があることが前提となっていた。南海トラフ巨大地震を対象として、史料から津波の諸相と家屋の流出状況に関する再精査を行い、その結果から、家屋流出率を算出した。

1854年安政南海地震津波において、徳島県穴喰浦と和歌山県由良浦に残されている津波による家屋流出被害に関する絵図を利用して被害関数を構築した(図-6)。図中の横軸は津波浸水深、縦軸の P_D は家屋流出割合を示す。この被害関数を利用することにより、家屋の流出程度(全流出、半流出など)からおおよそ津波浸水深を推定することが可能となり、波源推定に利用することのできる歴史時代の津波痕跡情報を増やすことが可能になった。

(4) 1611年慶長奥州津波の波源推定

以上の検討を踏まえて、1611年慶長奥州地震津波の波源推定を行った(図-7)。三陸沖の海溝軸付近に非常に大きなすべりが生じており、加えて仙台湾沖の深部プレート境界においても広域なすべりが生じていた可能性が示された。従来(相田, 1977)のモデルは海溝軸付近の正断層地震と推定されていたが、本解析では2011年東北津波に近い波源モデルとなった。地震規模は M_w 8.4~8.7となり、従来の波源モデルによる M_w 8.1よりも大きい。これは、本解析で推定した波源域が三陸沖の海溝軸付近だけでなく仙台湾沖に至る広域となったことによる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7件)

今井健太郎・石橋正信・行谷佑一, 新たな史料に基づく和歌山県沿岸における安政東海・南海地震の津波痕跡調査, 津波工学研究報告, 33, 2016.(印刷中)[査読無し]

今井健太郎・前田拓人・飯沼卓史・蝦名裕一・菅原大助・今村文彦・平川新, 組み合わせ最適化手法を利用した歴史津波の波源推定法-1611年慶長奥州地震の事例-, 東北地域災害科学研究, 51, 139-144, 2015.[査読無し]

安田容子・蝦名裕一・今井健太郎, 歴史資料にみる延宝五年(1677)に発生した二つの津波の仙台藩を中心とした地域における被害, 歴史地震, 30, 129-138, 2015[査読有り].

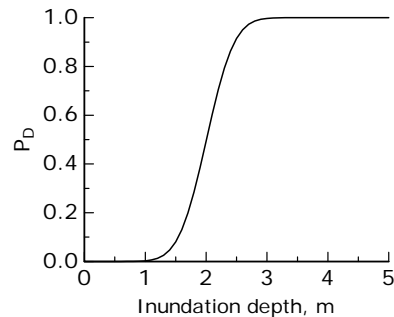


図-6 歴史時代の家屋流出被害関数

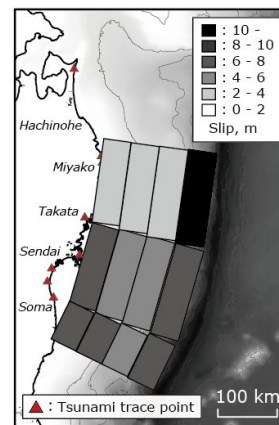


図-7 1611年慶長奥州津波の推定波源

行谷佑一・今井健太郎, 津波被害関数を利用した過去の津波高さの推定, 日本リスク研究学会誌, 25, (2), 1-7, 2015.[査読有り]

蝦名裕一・今井健太郎, 史料や伝承に基づく1611年慶長奥州地震の津波痕跡調査, 津波工学研究報告, 31, 139-148, 2014.[査読無し]

都司嘉宣・今井健太郎・今村文彦, 『谷陵記』の記載に基づく宝永地震津波(1707)の高知県における津波浸水標高, 津波工学研究報告, 30, 143-158, 2013.[査読無し]

今井健太郎・堀内滋人・今村文彦, 波源推定における津波痕跡高分布の依存性に関する検討, 土木学会論文集 B2(海岸工学), 69-2, 431-435, 2013.[査読有り]

[学会発表](計 11件)

今井健太郎・高橋成実・大林涼子・馬場俊孝, 1833年天保出羽沖地震の波源像に関する考察, 日本地震学会 2015年秋季大会, 2015.10.26, 神戸国際会議場(兵庫県神戸市)

今井健太郎・高橋成実・大林涼子, 最新の地下構造調査に基づく1833年天保出羽沖

地震の波源断層評価，第 32 回歴史地震研究会，2015.9.21，峰山総合福祉センター（京都府京丹後市）

石橋正信・高橋成実・馬場俊孝・今井健太郎・大林涼子，和歌山県における津波碑の空間分布に関する現地調査，2015.9.21，峰山総合福祉センター（京都府京丹後市）

行谷佑一・今井健太郎・村上仁士，安政南海地震津波による徳島県海陽町穴喰浦での津波高さとの被害分布，第 32 回歴史地震研究会，2015.9.21，峰山総合福祉センター（京都府京丹後市）

Namegaya Y. and Imai K., Relationships between heights and damage of the 1854 Ansei Nankai tsunami inferred from historical records along Tokushima coast, Japan, 26th IUGG General Assembly 2015, 2015.6.29.Prague Congress Centre (Prague, Czech Republic)

行谷佑一・今井健太郎，歴史記録に基づいた 1854 年安政南海地震による高知県西部沿岸の津波高さとの被害率との関係，日本地球惑星科学連合 2015 年大会，2015.5.27，幕張メッセ（千葉県千葉市）

今井健太郎・都司嘉宣・菅原大助，1833 年天保出羽沖地震の波源再評価，日本地震学会 2014 年秋季大会，2014.11.24，朱鷺メッセ：新潟コンベンションセンター（新潟県新潟市）

今井健太郎・都司嘉宣，津波痕跡高分布に基づく 1833 年天保出羽沖地震の波源再評価，第 31 回歴史地震研究会，2014.9.20，名古屋大学減災館（愛知県名古屋市）

堀内滋人・今井健太郎・今村文彦，津波痕跡高の取り扱いとその分布が波源推定に与える影響，土木学会東北支部技術発表会，2014.3.08，八戸工業大学（青森県八戸市）

今井健太郎・堀内滋人・今村文彦，波源推定における津波痕跡高分布の依存性に関する検討，土木学会海岸工学講演会，2013.11.15，九州大学医学部百年講堂（福岡県福岡市）

堀内滋人・今井健太郎・今村文彦，波源推定における津波痕跡高分布の依存性に関する研究，日本地震学会 2013 年秋季大会，2013.11.15，神奈川県民ホール（神奈川県横浜市）

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今井 健太郎 (IMAI, Kentaro)

国立研究開発法人海洋研究開発機構・地震津波海域観測研究開発センター・技術研究

員

研究者番号：20554497

(2) 研究分担者

都司 嘉宣 (TSUJI, Yoshinobu)

公益社団法人深田地質研究所・研究部・客員研究員

研究者番号：30183479

(3) 研究分担者

行谷 佑一 (NAMEGAYA, Yuichi)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・活断層火山研究部門・主任研究員

研究者番号：90466235