

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月 7日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2009～2011

課題番号：21310113

研究課題名（和文）古津波調査に基づく環太平洋巨大地震の津波高確率予測

研究課題名（英文）Probabilistic estimates of tsunami heights from great earthquakes around the Pacific Ocean based on paleotsunami surveys

## 研究代表者

佐竹 健治 (SATAKE KENJI)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号：20178685

研究成果の概要（和文）：環太平洋で過去に発生した巨大地震による津波を系統的に調査した。1960, 2010年チリ地震, 2006, 2007年千島列島の地震, 2009, 2010年インドネシアの地震について, すべり量分布の特徴を明らかにした。2004年スマトラ島沖地震より古い地震を地質学的痕跡から調べた。2011年東北地方太平洋沖地震は869年の貞観地震型と1896年明治三陸津波地震型のほぼ同時発生であった。M9の巨大地震について, M8の海溝型地震の相似則が適用できる。

研究成果の概要（英文）：Tsunamis from great earthquakes around the Pacific Ocean have been systematically studied. Slip distributions for the 1960 and 2010 Chile earthquakes, the 2006 and 2007 Kuril earthquakes, the 2009 and 2010 Indonesian earthquakes were clarified. Paleotsunami evidence of earthquakes prior to the 2004 Sumatra-Andaman earthquake was studied. The 2011 Tohoku earthquake was a simultaneous occurrence of the 869 Jogan-type earthquake and the 1896 Sanriku-type tsunami earthquake. Scaling relations for M~8 subduction-zone earthquakes can be applied to the M~9 giant earthquakes.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2011年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
年度			
年度			
総計	15,200,000	4,560,000	19,760,000

研究分野：自然災害科学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学 自然災害科学

キーワード：津波, 巨大地震, 古地震, 環太平洋, インド洋, スケーリング

## 1. 研究開始当初の背景

本研究は2011年東日本大震災の前に開始された。研究開始当初は, 日本の津波防災に関して, ハザードマップが整備されてきた一方, 津波警報が発令されても避難行動に結び付かない問題が指摘されていた。その原因と

して, ハザードマップなどの津波予測に確率的な検討が取り入れられていないことも一因であると考えられていた。実際, 東日本大震災で大きな津波被害を受けた地域でも, 津波ハザードマップは作成されていたが, より頻繁(数十年程度の繰り返し)に発生する

M8クラスの地震を想定して作成されていたため、低頻度のM9クラスの津波には対応できなかった。

インド洋津波をもたらしたスマトラ島沖地震(M 9.1)は、過去200年以内の地震活動(最大でもM8未満の地震しか発生していなかった)からは想定不可能であったが、2004年以降にアンダマン諸島やタイなどで行われた津波堆積物の調査によると、2004年と同様な規模の津波が550-700年前にも発生していたことが明らかになっていた。

研究開始後に発生した東北地方太平洋沖地震(M 9.0)についても、過去に同様な地震・津波(869年貞観津波)が発生していたことが明らかとなり、低頻度で発生する巨大地震についての津波予測の重要性が、改めて明らかになった。

## 2. 研究の目的

### (1) 環太平洋・インド洋における巨大地震・津波の発生履歴

津波堆積物などの地質学的調査、歴史記録などに基づく調査、古い津波波形記録に基づく調査が行われている。環太平洋・インド洋における過去の地震・津波の発生履歴をコンパイルする。

### (2) 将来の発生確率

過去の発生履歴(上記)に基づき、各地域で想定される地震について、津波シミュレーションを行い、各種の津波データと比較する。また、最近の地震については、波形インバージョンを行い、断層モデルやアスペリティ分布を求める。

### (3) 日本沿岸における確率論的津波高の算定

各地域で想定される巨大地震について、太平洋を伝播する津波のシミュレーションを行い、日本沿岸での津波の高さとその頻度との関係を整理し、日本沿岸における遠地津波に関する確率論的津波高予測を行う。

### (4) 東北地方太平洋沖地震の波源の推定

当初の目的には入っていなかったが、研究開始後に発生した東北地方太平洋沖地震について、その波源を推定し、過去に発生した地震・津波のモデルと比較する。

## 3. 研究の方法

### (1) 古津波調査(津波堆積物・歴史記録)に関する文献及び現地調査

環太平洋の津波発生域において現地調査を行い、既存の調査結果・歴史資料・地形(海底・陸上)データ・津波波形データを収集し、整理する。

### (2) 津波波形のインバージョンによる断層パラメーター・アスペリティ分布の推定

上で集めた津波データに基づき、津波シミュレーションやインバージョンを行

う。他地域については、既存の研究をまとめ、必要に応じて補足的に解析を行う。

### (3) 環太平洋・インド洋における地震・津波の発生履歴と将来の発生確率

各地域・各規模毎に、発生履歴と将来の発生確率を推定する。

### (4) 津波シミュレーションによる日本沿岸での津波高さの計算

地域・規模毎に太平洋を伝播する津波シミュレーションを行い、日本での波高を計算する。

### (5) 日本沿岸の確率論的津波高図の作成

発生確率とシミュレーションとから、日本沿岸での津波高さ-発生確率(頻度)の関係を求める。

## 4. 研究成果

環太平洋で過去に発生した巨大地震による津波を、系統的に調査した(図1)。

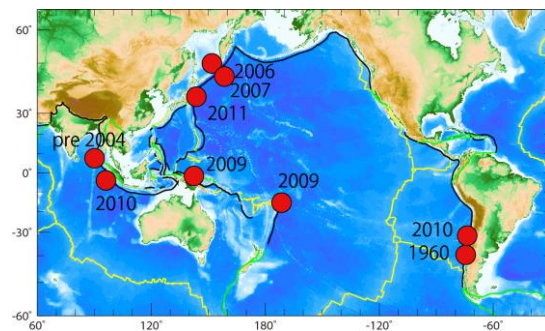


図1 本研究で調べた地震・津波の分布

2010年チリ地震について、日本沿岸で記録された津波波形は、シミュレーションに比べて到達時間が30分程度遅かった。この原因については、地球の弾性によるものであることが別の研究でほぼ解明されたが、断層モデル構築のためには、震源域に比較的近い南米の検潮所ならびに沖合での津波波形を用いて解析を行った。津波波形のみだと陸地の下に大きなすべりが推定されたが、海岸の上下変動データも併用すると、大きなすべりは沖合に推定された。1960年チリ地震についても、同様に南米の検潮所で記録された津波波形データ及び地殻変動データから断層モデルとすべり量分布のみから推定したものとほぼ同じ地震モーメントが得られ、地震波解析によるものよりも若干小さかった(論文3; 学会発表9, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 26)。

チリ海岸南部における現地調査を実施し、1960年より前の地震についての古地震学的データの調査を行った。1837年、1737年の地震については、現地の歴史記録には残されているが、津波堆積物は残

っておらず、津波堆積物が残るほど大きかったのは、1960年地震の前は1575年であったことを確認した。また、太平洋における津波警報システムの発展についてレビューした（学会発表 25, 27）。

千島列島で2006年と2007年に発生した2つの地震について、2006年のプレート間逆断層地震によるものが2007年のプレート内正断層によるものよりも規模が大きかったことが、遠地の津波記録から推定されていたが、波源に比較的近い深海の磁力計で得られた津波波形記録からもこれを確認した（論文7）。

2009年1月にインドネシア西パプア州で発生した津波は、震源域周辺で被害をもたらしたのみならず、日本に向けて伝播し、伊豆諸島や本州・四国南岸で津波注意報が発令された。この津波について、70か所で記録された津波波形を使って、断層面上のすべり量を推定した（論文5；学会発表 30, 33, 34）。

2010年10月にインドネシア・メンタワイ諸島で発生した地震について、地震のゆれの強さと津波の高さについて現地調査を行った。その結果、この地震は地震動が弱いにも関わらず大きな津波を発生した津波地震であることが明らかとなった。これまでジャワ島の南では津波地震が発生していたが、スマトラ島の南でも初めてその発生が確認された。さらに津波波形記録の解析から、海溝軸付近で大きなすべりが発生したことを明らかにした。このすべり分布は、世界各地でこれまでに発生した津波地震と同様であるが、2007年に発生したプレート間地震の深いすべり域とは重ならない浅部のすべりであることが他の津波地震とは異なっていることを明らかにした（論文2；学会発表 10, 14）。

インド洋のアンダマン諸島で行った古地震学的調査（津波堆積物・液状化痕跡を含む海岸付近の地質調査）から、2004年のスマトラ・アンダマン地震の前にも、過去400年に大きな地震が2回発生していたことを明らかにした。また、2004年以降にインド洋で行われた古地震調査結果をコンパイルし、レビューした（論文6；学会発表 28, 29）。

2009年9月にサモアで発生した地震は、正断層であったにもかかわらず海底水圧計の記録は上げ波から始まっているところが多かった。これについては、正断層地震の直前あるいは直後に逆断層の地震が発生したとされている。これらの研究についてレビューし、Nature誌のNews and Viewsで紹介・解説した（論文8；学会発表 31）。

2011年3月の東北地方太平洋沖地震について、東大地震研究所の海底ケーブル式水圧計や国土交通省のGPS波浪計に記録

された津波波形は地震直後に数分以上かけて2 m以上水面が上昇する第1段階の津波と、それに続いて3分間に2 m以上上昇する第2段階の津波波形を記録していた。これらに加えて数多くの津波波形記録を用いたインバージョン解析から、すべりの時空間分布を推定する方法を開発し、適用したところ、まず、震源付近のプレート境界の深い部分で20 m以上の大きなすべりが発生し、これが第1段階の津波に寄与していたこと、引き続き海溝付近で60 m以上の大きなすべりが発生し、これが第2段階の津波を説明することが明らかとなった。前者は、869年の貞観地震のモデルによく似ており、後者は1896年明治三陸津波地震のモデルとよく似ていることから、2011年の地震は、貞観型と明治三陸津波型の同時発生であることが明らかになった（論文1, 4；学会発表 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11, 12, 13；書籍1）。

2009年8月に駿河湾で発生した津波は、海底が隆起したにも関わらず引き波から始まっていたことから、検潮井戸の応答特性を現地で調査し、検潮記録に施した。その結果、記録された津波波形は検潮井戸の特性の影響をほとんど受けていないことが判明した（論文9；学会発表 21, 32）。

環太平洋・インド洋で過去に発生した巨大地震の震源域・すべり量についてコンパイルし、各地域における多様性を明らかにした（図2、学会発表 15, 16；書籍1）。

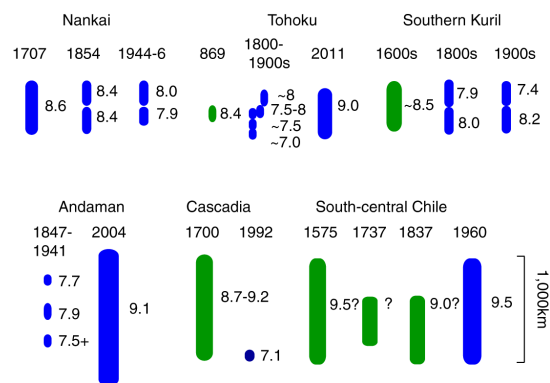


図2 環太平洋の巨大地震の震源域

20世紀以降に世界（環太平洋・インド洋）で発生したM9クラスの巨大地震の地震モーメント、断層面積、平均すべり量、大すべり域の面積の関係についてまとめた。その結果、これまで知られていたM8クラスの海溝型地震の相似則がほぼそのまま適用できることがわかり、M9クラスの地震からの津波高さの予測に用いることができることが明らかとなった（図3、論文投稿中；学会発表2）。

確率論的津波予測について、主に原子力発電所の津波評価のために日本で行われている手法についてとりまとめ、レビューした(学会発表1)。

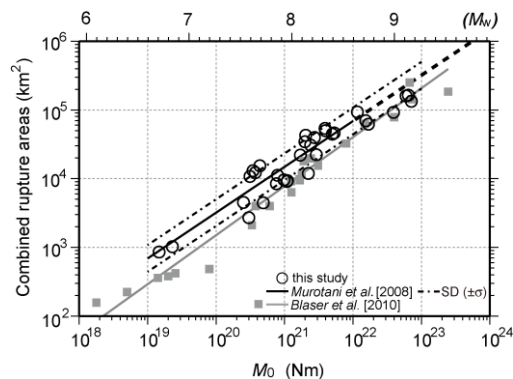


図3 地震モーメントと断層面積の関係(スケールリング則)

### 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9件)

- (1) Satake, K., Y. Fujii, T. Harada, and Y. Namegaya, Time and slip distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 査読有, 103, 1473-1492, doi: 10.1785/0120120122, 2013
- (2) Satake, K., Y. Nishimura, P.S. Putra, A.R. Gusman, H. Sunendar, Y. Fujii, Y. Tanioka, H. Latief, and E. Yulianto, Tsunami source of the 2010 Mentawai, Indonesia earthquake inferred from tsunami field survey and waveform modeling, *Pure. Appl. Geophys.* 査読有, 170, 印刷中 doi:10.1007/s00024-012-0536-y
- (3) Fujii, Y. and K. Satake, Slip distribution and seismic moment of the 2010 and 1960 Chilean earthquakes inferred from tsunami waveforms and coastal geodetic data, *Pure. Appl. Geophys.* 査読有, 170, 印刷中 doi:10.1007/s00024-012-0524-2.
- (4) Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa, Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Earth, Planets Space*, 査読有, 63, 815-820, 2011, 10.5047/eps.2011.06.010
- (5) Fujii, Y., K. Satake and Y. Nishimae, Observation and modeling of the January 2009 West Papua, Indonesia tsunami, *Pure and Applied Geophysics*, 査読有, 168, 1089-1100, 2011. DOI: 10.1007/s00024-010-0220-z
- (6) Malik, J.N., M. Shishikura T. Echigo, Y.

Ikeda, K. Satake, H. Kayanne, Y. Sawai, C. V. R. Murty, and O. Dikshit, Geologic evidence for two pre-2004 earthquakes during the last 400-2,000 years near Port Blair, South Andaman Island, India, *Geology*, 査読有, 39 (6), 559-562, 2011. DOI: 10.1130/G31707.1

- (7) Toh, H., K. Satake, Y. Hamano, Y. Fujii, and T. Goto, Tsunami signals from the 2006 and 2007 Kuril earthquakes detected at a seafloor geomagnetic observatory, *J. Geophys. Res.*, 査読有 116, B02104, doi: 10.1029/2010JB007873, 2011.
- (8) Satake, K., Earthquakes: Double Trouble at Tonga (News and Views), *Nature*, 査読無, 466, 931-932, 2010, DOI:10.1038/466931a.
- (9) 佐竹健治・行谷佑一・藤井雄士郎・岡田正実・阿部邦昭・今井健太郎・上野俊洋・山口和典・三和功喜・山本浩之. 駿河湾沿岸の検潮井戸応答特性調査と2009年駿河湾地震津波波形の補正. 東京大学地震研究所集報, 査読無, 85, 1-14, 2010. <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/BERI/pdf/IHO85101.pdf>

[学会発表](計34件, うち招待講演6件)

- (1) Satake, K., Probabilistic Tsunami Hazard Assessment for Nuclear Power Plants in Japan, AGU Fall meeting (招待講演), 2012年12月4日, Moscone Center, San Francisco, USA
- (2) 室谷智子, 佐竹健治, 藤井雄士郎, M9クラス巨大地震のすべり量分布とスケールリング, 日本地震学会2012年度秋季大会, 2012年10月18日, 函館市 函館市民会館
- (3) 藤井雄士郎, 佐竹健治, マルチタイムウィンドウ津波波形インバージョンによる2011年東北地方太平洋沖地震のすべり量分布, 日本地震学会2012年度秋季大会, 2012年10月18日, 函館市 函館市民会館
- (4) 佐竹健治, 藤井雄士郎, 原田智也, 行谷佑一, 津波波形からみた2011年東北地方太平洋沖地震のすべりの時空間分布ー貞観型プレート間地震が津波地震を誘発した可能性ー, 日本地震学会2012年度秋季大会, 2012年10月18日, 函館市 函館市民会館
- (5) 藤井雄士郎, 佐竹健治, 原田智也, 行谷佑一, 2011年東北地方太平洋沖地震のマルチタイムウィンドウ津波波形インバージョン, 日本地球惑星科学連合2012年大会, 2012年5月25日, 千葉市 幕張メッセ国際会議場
- (6) Satake, K. Unforecasted Earthquake, Forgotten Tsunamis, AAAS Annual Meeting, 2012年2月19日, Vancouver Convention

- Center, Vancouver, Canada
- (7) Satake, K., Y. Fujii and T. Harada, Tsunami source model the 2011 Tohoku earthquake inferred from tsunami waveforms and coastal inundation heights (招待講演), AGU Fall meeting, 2011年12月5日, Moscone Center, San Francisco, USA
  - (8) 藤井雄士郎, 佐竹健治, 酒井慎一, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 2011年東北地方太平洋沖地震の津波波形インバージョン, 日本地震学会2011年度秋季大会, 2011年10月14日, 静岡県コンベンションアーツセンター・グランシップ
  - (9) Fujii, Y. and K. Satake, Seismic moment and slip distribution of the 1960 and 2010 Chilean earthquakes as inferred from tsunami waveform and geodetic data, XXV IUGG General Assembly, 2011年7月4日, Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia
  - (10) Satake, K., Y. Nishimura, P. S. Putra, E. Yulianto, H. Sunendar, M. Sugimoto, A. Koresawa, M.H. Pradono, and Pariatmono, Tsunami Field Survey for the Mentawai, Indonesia, Earthquake of October 25, 2010, XXV IUGG General Assembly, 2011年7月4日, Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia
  - (11) Fujii, Y., K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, and T. Kanazawa, Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan earthquake, XXV IUGG General Assembly, 2011年7月3日, Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia
  - (12) Satake, K., The Great Off Tohoku Earthquake of 11 March 2011, XXV IUGG General Assembly (招待講演), 2011年7月2日, Melbourne Convention & Exhibition Centre, Melbourne, Australia
  - (13) 藤井雄士郎, 佐竹健治, 酒井慎一, 篠原雅尚, 金沢敏彦, 2011年東北地方太平洋沖地震の津波波源, 日本地球惑星科学連合2011年連合大会, 2011年5月27日, 千葉市幕張メッセ国際会議場
  - (14) 藤井雄士郎, 佐竹健治, 2010年インドネシア, メンタワイ地震の津波波形インバージョン, 日本地球惑星科学連合2011年連合大会, 2011年5月27日, 千葉市幕張メッセ国際会議場
  - (15) Satake, K. Variability of Great Earthquakes in the World's Subduction Zones Revealed from Paleoseismology, 日本地球惑星科学連合2011年連合大会 (招待講演), 2011年5月25日, 千葉市幕張メッセ国際会議場
  - (16) 佐竹健治, 巨大地震と津波, 海底地殻変動と津波に関するシンポジウム, 2011年1月18日, 東京都 東京大学山上会館
  - (17) Satake, K. and Y. Fujii, Seismic moment and slip distribution of the 1960 and 2010 Chilean earthquakes inferred from tsunami waveforms, AGU Fall meeting, 2010年12月15日, Moscone Center, San Francisco, USA
  - (18) 藤井雄士郎, 佐竹健治, 2010年2月チリ地震の津波波形インバージョン, 日本地震学会秋季大会, 2010年10月29日, 広島市広島国際会議場
  - (19) 藤井雄士郎, 佐竹健治, 津波・測地データのインバージョンによる1960年チリ地震の規模とすべり量分布, 日本地震学会秋季大会, 2010年10月29日, 広島市広島国際会議場
  - (20) Satake, K. Tsunami from the February 2010 Chilean earthquake on the Japanese coast, 6th APRU Research Symposium on multi-hazards around the Pacific Rim, 2010年8月28日, Peking University, China, Beijing
  - (21) 佐竹健治, 行谷佑一, 藤井雄士郎, 岡田正実, 阿部邦昭, 今井健太郎, 上野俊洋, 駿河湾沿岸の検潮井戸応答特性調査と2009年駿河湾地震による津波波形の補正, 日本地球惑星科学連合大会, 2010年5月28日, 千葉市幕張メッセ国際会議場
  - (22) 藤井雄士郎, 佐竹健治, 検潮記録に基づく1960年チリ地震の津波波源モデル, 日本地球惑星科学連合大会, 2010年5月24日, 千葉市幕張メッセ国際会議場
  - (23) 佐竹健治, 酒井慎一, 金沢敏彦, 藤井雄士郎, 齊藤竜彦, 尾崎友亮, 海底水圧計で記録された2010年2月チリ地震津波, 日本地球惑星科学連合大会, 2010年5月23日, 千葉市幕張メッセ国際会議場
  - (24) Fujii, Y. and K. Satake, Tsunami source of the 1960 Chilean earthquake inferred from tide gauge data, AGU Chapman conference, 2010年5月16日, Chile, Vina del Mar
  - (25) Satake, K. (招待講演), Tsunami warning systems: impacts of the 1960 and 2004 global tsunamis, AGU Chapman conference, 2010年5月16日, Chile, Vina del Mar
  - (26) Fujii, Y. and Satake, K. Tsunami source of the 1960 Chilean earthquake inferred from tide gauge data, The 3<sup>rd</sup> International Tsunami Field Symposium, 2010年4月10日, 仙台市東北大学さくらホール
  - (27) Satake, K. (招待講演) Tsunami forecast and warning: impacts of 1960 and 2004 tsunamis, 2010年4月10日, 仙台市東北大学さくらホール
  - (28) Satake, K. Review of coastal paleoseismology around the Indian Ocean since the 2004 tsunami, HOKUDAN International Symposium on Active Faulting, 2010年1月19日, 北淡市北淡震災記

- 念公園セミナーハウス
- (29) Satake, K., Progress of Paleotsunami Studies around the Indian Ocean, International Workshop on External Flooding Hazards at Nuclear Power Plant Sites, 2010年1月13日, インド Kalapakkam
- (30) Fujii, Y., K. Satake and Y. Nishimae, Observation and Modeling of the January 2009 Papua, Indonesia Tsunami, International Symposium on Tsunami Risk Assessment and Mitigation in South and Southeast Asia, 2009年12月1日, Manado, Indonesia
- (31) 藤井雄士郎, 佐竹健治, 検潮・海底水圧計記録からみたサモア諸島沖地震津波, 日本地震学会2009年度秋季大会, 2009年10月21日, 京都市, 京都大学吉田キャンパス
- (32) 藤井雄士郎, 佐竹健治, 2009年8月11日に駿河湾で発生した地震の津波モデリング, 日本地震学会2009年度秋季大会, 2009年10月21日, 京都市, 京都大学吉田キャンパス
- (33) Fujii, Y. and K. Satake, Tsunami sources of the Papua, Indonesia earthquakes in January 2009, AOGS 6th Annual Meeting 2009, 2009年8月13日, Suntec Singapore International Convention & Exhibition Centre, Singapore
- (34) 藤井雄士郎, 佐竹健治, 2009年バブア, インドネシア地震の津波波源モデル, 日本地球惑星科学連合2009年連合大会, 2009年5月20日, 千葉市 幕張メッセ国際会議場

[図書] (計1件)

- (1) 平田直・佐竹健治・目黒公郎・畑村洋太郎, 巨大地震・巨大津波 - 東日本大震災の検証-, 朝倉書店, 2012, 212 ページ

[その他]

ホームページ等

Recent Tsunamis

<http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/TsunamiTop.html>

Tsunami Models of 2011Tohoku Earthquake

[http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami\\_inv.html](http://iisee.kenken.go.jp/staff/fujii/OffTohokuPacific2011/tsunami_inv.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

佐竹 健治 (SATAKE KENJI)

東京大学・地震研究所・教授

研究者番号: 20178685

### (2) 研究分担者

藤井 雄士郎 (FUJII YUSHIRO)

建築研究所・国際地震工学センター・主

任研究員

研究者番号: 60442836

(3) 連携研究者 なし