様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２８ 年　 ６ 月 ２１ 日現在

機関番号：８２１１３
研究種目：基盤研究(B)（一般）
研究期間：2012～2015
課題番号：２４３４０１０７

研究課題名（和文）沈み込み帯における巨大地震発生サイクルと津波生成の統合モデル構築

研究課題名（英文）Development of integrated model of cycles of large earthquakes and tsunami generation along subduction zones

研究代表者
芝崎　文一郎（Shibazaki, Bunichiro）

国立研究開発法人建築研究所・その他部局等・その他

研究者番号：２０３４４０１２

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　9,200,000円

研究成果の概要（和文）：本課題では、沈み込み帯における巨大地震発生と津波生成のメカニズムの統一的解明を目的とし、巨大地震発生サイクルモデル構築と津波を引き起こす断層モデルの解析を行った。先ず、摩擦発熱による間隙圧増大を考慮した千島海溝沈み込み帯における地震発生サイクルモデルを構築した。次に、浅部の摩擦特性を考慮した東北沖地震発生モデルを構築した。また、東北沖に関して、2011年東北沖地震と1896年明治三陸津波地震の津波の解析を行い、津波を生成したすべり過程を明らかにした。モデルにより得られたすべり分布は、津波の解析により得られたすべり分布と調和的で、浅部の摩擦特性が津波生成において重要であると言える。

研究成果の概要（英文）：This study developed a model of large earthquakes cycles and estimated a tsunami source model along subduction zones to understand the generation processes of large earthquakes and tsunamis. First, we modeled cycles of mega thrust earthquakes along the Kuril subduction zone considering the effect of thermal pressurization. We also modeled cycles of mega thrust earthquakes along the Tohoku subduction zone by considering the thermal pressurization and friction properties of the shallow fault zone. Subsequently, we estimated slip distributions of the 2011 Tohoku-oki earthquake and the 1896 Meiji Sanriku Tsunami earthquake by the inversion analysis of tsunami waveforms. The shallow slip distribution obtained by numerical modeling is roughly consistent with that of the Tohoku-oki earthquake obtained by tsunami analysis, indicating that the shallow friction property is important for the generation of tsunamis in this region.

研究分野：地震発生理論

キーワード：地震現象　津波　海溝型巨大地震　モデリング　地震予測

１．研究開始当初の背景

2011 年東北地方太平洋沖地震（Mw9.0）(以下では東北沖地震と記す)の発生により、巨大な津波が発生し、大災害が生じた。この地震では、津波波形の逆解析等から浅部で非常に大きなすべりが生じたことが明らかにされた。17 世紀にも十勝沖地震及び根室沖地震の震源域を含む M8.5 クラスの巨大地震が発生したことが津波堆積物の存在範囲から推定されている。沈み込み帯における超巨大地震の発生や津波生成のメカニズム解明は大変重要な課題である。

２．研究の目的

本課題では、断層のレオロジー特性を考慮した、巨大地震の発生サイクルモデルを構築する。また、巨大地震の津波波源モデル構築と津波シミュレーションを行い、巨大地震の発生モデルと津波生成の総合モデルを構築する。特に、東北地方太平洋沖、千島海溝や海外の沈み込み帯を対象にし、過去に発生した巨大地震の発生と津波生成のモデルを構築し、巨大地震の発生予測並びに津波危険度評価に資する。

３．研究の方法

(1) 地震発生サイクルモデル

千島海溝における沈み込みプレート境界では、十勝沖地震（M8 クラス）、根室沖地震（M7.5-8 クラス）の破壊域が存在する。また、十勝沖地震及び根室沖地震の震源域を含む巨大地震は約 500 年に一回の間隔で発生することが明らかにされている。この巨大地震を再現するために、根室沖地震の浅部破壊域を考慮した地震発生サイクルモデルを構築する。東北沖地震の震源域浅部断層掘削(JFAST)により採取されたスメクタイトが濃集する断層物質の摩擦特性を考慮した東北沖の巨大地震発生サイクルモデルを構築する。

(2) 津波生成モデル

プレート境界形状を考慮した 2011 年東北地方太平洋沖地震の津波波形インバージョン解析によるすべりの時空間分布の推定、1896 年明治三陸津波地震の津波波形モデリングを実施する。その他、海外で発生した巨大地震の津波生成モデルを構築する。

４．研究成果

(1) 地震発生サイクルモデル

千島海溝南部(北海道沖)で発生する超巨大地震の発生サイクルモデルを構築した。十勝沖地震と根室沖地震のアスペリティを設定した。さらに、最近の地殻変動解析により海溝付近にすべり欠損があることから、海溝付近に大きなアスペリティを設定した。アスペリティ内では速度弱化、それ以外の領域では速度強化の性質を与えた。また、摩擦発熱による間隙圧増大による強度弱化(Thermal pressurization)も考慮した。シミュレーション結果から、約 100 年間隔で発生する十勝沖地震と根室沖地震と、約 400 年間隔で発生する Mw8.8 の地震を再現することができた。

東北沖における断層浅部摩擦特性と Thermal Pressurization を考慮した地震発生サイクルモデルの詳細な検討を行った。東北沖断層浅部で採取された粘土鉱物を含む断層物質を用いた実験により得られた低速での速度弱化と中間速度での速度強化、さらに高速での Thermal Pressurization を考慮した準動的モデルを構築した。図１上にアスペリティの分布を示す。a-b が負の場合は速度弱化、a-b が正の場合は速度強化を示す。東北沖浅部断層物質の摩擦特性を浅部プレート境界に与える際に、観測事実を基に三陸沖では幅広く与えた。シミュレーション結果では、超巨大地震発生の際には、三陸沖まですべりが伝播することが示された（図 1 下）。

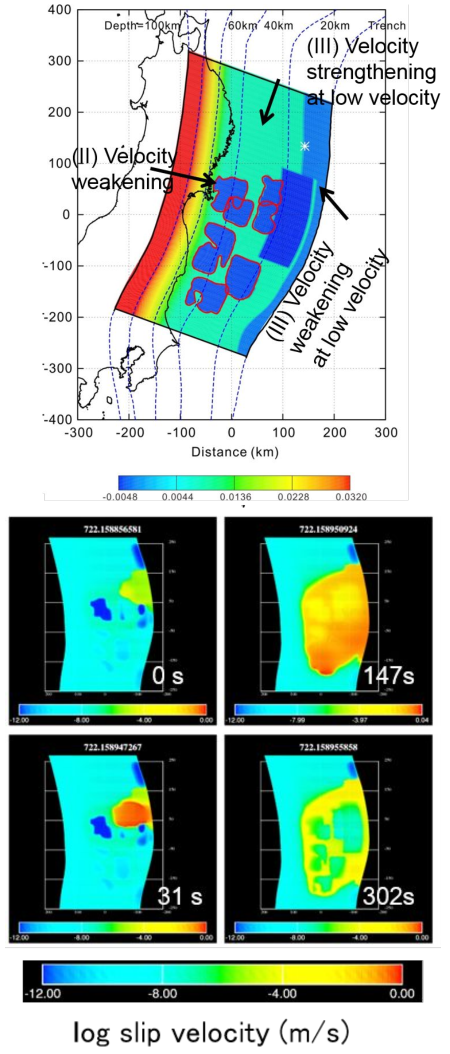

図 1　（上）東北沖地震発生モデルにおける a-b の分布。浅部では低速度で速度弱化、高速度で速度強化の領域が存在する。（下）シミュレーション結果。Mw9 のイベントにおけるすべり速度の時間変化。

(2) 津波生成モデル

2011 年東北地方太平洋沖地震について、沖合の海底圧力計と GPS 波浪計、沿岸の波浪計、検潮所で記録された津波波形のインバージョン解析により、プレート形状を考慮したすべりの時空間分布を明らかにした。その結果、プレート間深部のすべりに引き続き、海溝軸付近での大きなすべりが発生していたことを明らかにした。

1896 年明治三陸地震の津波波源を検潮記録と津波痕跡高から推定し、2011 年東北地震の津波波源モデルと比較・再検討した（図２、３）。その結果、1896 年の地震のすべり域は 2011 年と同様に海溝軸付近にあり、2011 年の最大すべり域の北側、主に長さ 100km、幅 25 km の領域に位置していることが分かった。

海外で発生した地震に関しては、2014 年 4 月のチリ北部（イキケ）沖地震（M8.2）による津波について、津波シミュレーションを行った。また、沖合の津波計や検潮所における津波波形データを用いたインバージョン解析を行い、震源から深い領域が最大で約 5m すべったことを明らかにした。2007 年ペルー（ピスコ）地震（M8.1）の津波波形インバージョンを実施し、津波波源モデルを構築した。本研究課題で開発し GPGPU による津波計算コードを上記の津波シミュレーションやインバージョンに用いるグリーン関数の計算に活用した。

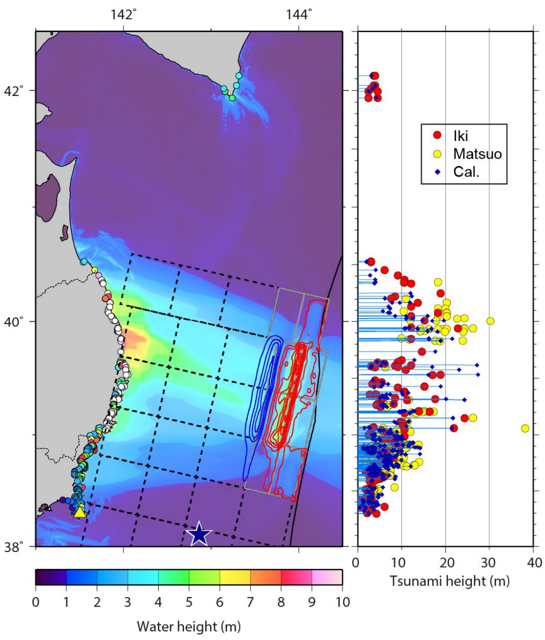

図２　明治三陸地震の津波波源モデルと三陸沿岸における遡上高との比較。

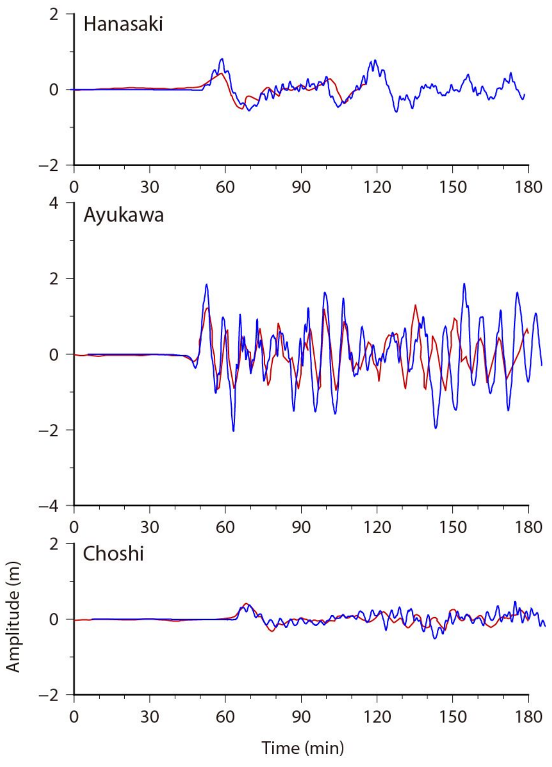

図３　花咲・鮎川・銚子における津波波形の比較。赤線：観測，青線：計算。

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）
以下は全て査読有

(1) Jimenez, C., Moggiano, N., Mas, E., Adriano, B., Fujii, Y., and Koshimura, S., 2014, Tsunami waveform inversion of the 2007 Peru (Mw8.1) earthquake, Journal of Disaster Research, 9, 954-960, doi: 10.20965/jdr.2014.p0954.
(2) Shibazaki, B., and Noda, H., 2014, What caused the 2011 Tohoku-Oki earthquake?: Effects of dynamic weakening (Special issue on challenges of earthquake forecast research illuminated by the 2011 Tohoku-oki earthquake), Journal of Disaster Research, 9, 252-263, doi: 10.20965/jdr.2014.p0252.
(3) Satake, K., and Fujii, Y., 2014, Source models of the 2011 Tohoku earthquake and long-term forecast of large earthquakes (Special issue on challenges of earthquake forecast research illuminated by the 2011 Tohoku-oki earthquake), Journal of Disaster Research, 9, 272-280, doi: 10.20965/jdr.2014.p0272.
(4) Satake, K., Fujii, Y., Harada, T., and Namegaya, Y., 2013, Time and space

distribution of coseismic slip of the 2011 Tohoku earthquake as inferred from tsunami waveform data, Bulletin of the Seismological Society of America, 103,1473-1492, doi:10.1785/0120120122.

(5) Adriano, B., Mas, E., Koshimura, S., Fujii, Y., Yauri, S., Jimenez, C., and Yanagisawa, H., 2013, Tsunami inundation mapping in Lima, for two tsunami source scenarios, Journal of Disaster Research, 8, 274-284, doi: 10.20965/jdr.2013.p0274.

(6) Jimenez, C., Moggiano, N., Mas, E., Adriano, B., Koshimura, S., Fujii, Y., and Yanagisawa, H., 2013, Seismic source of 1746 Callao earthquake from tsunami numerical modeling, Journal of Disaster Research, 8, 266-273, doi: 10.20965/jdr.2013.p0266.

(7) Murotani, S., Satake, K., and Fujii, Y., 2013, Scaling relations of seismic moment, rupture area, average slip, and asperity size for M~ 9 subduction-zone earthquakes, Geophysical Research Letters, 40, 5070–5074, doi:10.1002/grl.50976.

〔学会発表〕（計　１６件）

(1) Shibazaki, B., and Matsuzawa, T., Modeling slow slip events and their interaction with large earthquakes along Hikurangi and Mexican subduction zones, AGU Chapman Conference on the Slow Slip Phenomena, 2016 年 2 月 24 日, Ixtapa, Mexico.

(2) Shibazaki, B., and Matsuzawa, T., Modeling long- and short-term slow slip events and their interaction with large earthquakes along the Hikurangi subduction zone, 2015 AGU Fall Meeting, 2015 年 12 月 16 日 ,Moscone Center, San Francisco, USA.

(3) 藤井雄士郎、佐竹健治、山本滋、明治三陸地震の津波波源モデル再考、日本地震学会 2015 年度秋季大会、2015 年 10 月 28 日、神戸国際会議場、兵庫県.

(4) 芝崎文一郎、松澤孝紀、ヒクランギ沈み込み帯における多様なスロースリップイベントのモデル化、日本地球惑星科学連合 2015 年大会、2015 年 5 月 27 日、幕張メッセ、千葉県.

(5) 藤井雄士郎、佐竹健治、山本滋、1896 年明治三陸地震の検潮記録と津波痕跡高による津波波源推定(2)、日本地震学会 2014 年度秋季大会、2014 年 11 月 24 日、朱鷺メッセ、新潟県.

(6) Fujii, Y., and Shibazaki, B., Tsunami simulations of recent earthquakes and predicted tsunami heights from scenario earthquakes, The 10th ASC General Assembly (ASC 2014), 2014 年 11 月 20 日, Dusit Thani Manila Hotel, Makati city, Philippines.

(7) Fujii, Y., Satake, K., and Yamaki, S., Tsunami source model of the 1896 Sanriku earthquake inferred from tide gauge records and coastal tsunami heights, AOGS 11th Annual Meeting 2014, 2014 年 7 月 31 日, Royton Sapporo Hotel, Hokkaido.

(8) Shibazaki, B., Ikari, M., and Noda, H., Modeling slow slips and mega-thrust seismic slips off Tohoku considering low to high speed friction behavior of shallow plate boundary, AOGS 11th Annual Meeting, 2014 年 7 月 31 日, Royton Sapporo Hotel, Hokkaido.

(9) 芝崎文一郎、Ikari Matt、野田博之、東北沖浅部断層の低～高速摩擦特性を考慮したスロースリップと地震性すべりのモデル化、日本地球惑星科学連合 2014 年大会、2014 年 4 月 29 日、パシフィコ横浜、神奈川県.

(10) 藤井雄士郎、佐竹健治、山本滋、1896 年明治三陸地震の検潮記録と津波痕跡高による津波波源推定、日本地震学会 2013 年度秋季大会、2013 年 10 月 7 日、神奈川県民ホール、神奈川県.

(11) 芝崎文一郎、野田博之、高速摩擦を考慮した千島海溝南部で発生する超巨大地震の発生サイクルモデル、日本地球惑星科学連合 2013 年大会（招待講演）、2013 年 5 月 22 日、幕張メッセ、千葉県.

(12) 藤井雄士郎、原田智也、佐竹健治、2011 年東北地方太平洋沖地震と 1896 年明治三陸地震の津波波源モデル、日本地球惑星科学連合 2013 年大会、2013 年 5 月 21 日、幕張メッセ、千葉県.

(13) Shibazaki, B., 3D modeling of the cycle of a great Tohoku-oki earthquake, considering frictional behavior at low to high slip velocities, APEC Cooperation for Earthquake Simulation (ACES) 8th International Workshop, 2012 年 10 月 23 日, Maui, Hawaii, USA.

(14) 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分布、日本地震学会 2012 年度秋季大会、2012 年 10 月 18 日、函館市民会館、北海道.

(15) Shibazaki, B., 3D quasi-dynamic modeling of cycles of megathrust earthquakes along the Japan trench subduction zone considering high-speed friction, 9th U.S.-Japan

Natural Resources Panel on Earthquake Research, 2012 年 10 月 11 日, Lakewood, Colorado, USA

(16) <u>藤井雄士郎</u>、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、 幕張メッセ、千葉県.

〔図書〕（計　１件）

東日本大震災合同調査報告書編集委員会（藤井雄士郎）、丸善出版、東日本大震災合同調査報告　共通編２　津波の特性と被害（第 3 章 2.1 節　マルチタイムウィンドウ津波波形インバージョン解析、第 6 章 1 節　津波伝播状況の再現）、2014.

〔産業財産権〕
○出願状況（計　０件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計　０件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織
(1)研究代表者
　芝崎　文一郎（SHIBAZAKI Bunichiro）
　国立研究開発法人建築研究所・国際地震工学センター・上席研究員
　研究者番号：２０３４４０１２

(2)研究分担者
　藤井　雄士郎（FUJII Yushiro）
　国立研究開発法人建築研究所・国際地震工学センター・主任研究員
　研究者番号：６０４４２８３６