

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：12601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2014

課題番号：24654144

研究課題名(和文) 気圧波解析が明かす巨大地震に伴う津波発生過程

研究課題名(英文) Tsunami generation process of mega-quakes revealed by atmospheric pressure wave analyses

研究代表者

綿田 辰吾 (Watada, Shingo)

東京大学・地震研究所・助教

研究者番号：30301112

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：2010年チリ地震と2011年東北沖地震による太平洋を横断する津波は、数値津波シミュレーションより、系統的に最大15分遅れ、遠地点では反転した津波初動が観測された。測定された津波の位相速度は逆分散性を示し、1000秒より長い周期帯では遅くなっていた。これらは重力・弾性結合した津波の津波の位相速度と一致しており、海水の疎密、弾性地球の加重変形、津波の伝播時の地球重力場の変動の影響であることが示された。新たな津波シミュレーション法を開発し、その波形は、遠地における初期反転位相を含む津波観測波形を正確に再現した。観測波形とシミュレーション波形の走時差は5分以下に縮小し、波形の差異は驚く程減少した。

研究成果の概要(英文)：Tsunami traveltime delays up to 15 min relative to the simulated long waves from the 2010 Chilean and 2011 Tohoku-Oki earthquakes were observed. Small negative phases before the main peak were found at distant locations. Measured tsunami phase velocities show reverse dispersions at periods beyond 1000 s and are consistent with a tsunami mode coupled with a self-gravitating elastic Earth, suggesting that the effects of compressible seawater, elastic sea-bottom deformation, and gravity variations during tsunami propagation are responsible for the traveltime delays and the initial negative phases. A new method to simulate tsunami waveforms on real ocean bathymetry that takes into account the three effects was developed. The simulated waveforms reproduce the observed waveforms, including a small negative phase at distant locations. The traveltime difference between the observed and simulated waveforms has decreased to less than 5 min and the waveform difference remarkably diminishes.

研究分野：固体地球物理学

キーワード：津波 2011年太平洋東北沖地震 2010年チリ地震 津波伝播速度低下伝播速度低下 初期反転位相 津波シミュレーションシミュレーション 遠地津波波形 DART

1. 研究開始当初の背景

2011年東北地方太平洋沖地震では、津波波形データから推定される地殻変動量分布に比べ、陸域の地震・測地データから推定する海溝沿い地殻変動域量分布は不確定性が大きく、これらデータのみから推定するのは困難である (Koketsu et al, 2011 など)。そのため、陸域の地震・測地観測のみから津波の位置と規模の信頼できる発生推定はできない。現在のところ確実な津波計測は海域の海底圧力計や GPS プイ、沿岸にある潮位計による直接的観測のみである。研究代表者はこれまで、大気下端にあたる海面や地面の変動が大気圧変動として伝搬する現象の研究を観測 (Watada et al. 2006) と理論 (Watada 2009) から実施した。さらには、音波・大気境界波・重力波の伝播と固体地球や海洋とのカップリングについて理論と観測・計算から総合的に研究を進めている (Watada and Kanamori 2010)。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、巨大地震震源域の急激な地殻変動により津波とともに発生し津波より高速に伝搬する気圧波に着目し、津波の発生領域と規模を大気圧力波データから明らかにする。2011年東北沖地震では海面の隆起・沈降により大気中に圧力擾乱が発生し大気圧力波として伝搬する現象が、日本国内内外の多数の観測点で気圧波が観測され (Arai, Iwakuni, Watada, Imanishi, Murayama, Nogami, 2011)。観測点方位により異なる気圧波形は巨大地震の震源域地殻変動量分布を反映していると考えられている。2011年東北沖地震に伴う国内外の気圧変動データを収集し、津波を用いた地殻変動量や震源断層の滑り分布の推定手法に匹敵する、大気圧力波形記録を解析する手法を開発し、海底地殻変動量分布推定や震源断層の滑りの空間分布を明らかにする。

(2) 本研究の特色は、これまでの震源過程研究に用いられてきた地震・測地・津波データとは独立した大気圧力波を用いる点にある。大気圧力は気圧計が安価のため、数多くの観測点で計測されており、まだ利用されていない潜在的圧力変動データも極めて多いと推定される。大気圧力計測は地震計とは異なり DC 成分まで振り切れずに計測できるため、巨大地震などの長周期帯域での震源過程解析に適している。気圧波はほぼ音速で伝搬するため、津波が沿岸に到達するよりも早く陸域で検知される。本研究により大気圧力データによる巨大地震発生域の海面変動の解析が可能になり、迅速かつ正確な津波警報発令につながる可能性がある。

3. 研究の方法

(1) 大気圧波動伝搬の計算

2011年東北沖地震発生時の大気構造を模し

た1次元大気構造を与え、地表変動・海面変動による大気下端での圧力場発生と (Watada 2009) と圧力波伝搬を計算する。計算手法には、音波・重力波・大気境界波を含み統一的に大気波動場を計算できる Haskell-matrix 法 (Press and Harkrider 1962, Harkrider 1964) を用いる。海底地滑りに伴う海面変動で発生する大気圧力波の場合の海底変動量と大気圧変動量の関係を注意深く考察する。

(2) 大気圧変動データ・断層モデル収集

2011年東北沖地震は日本の近傍で発生した M9 クラス巨大地震であるため、震源から発生した圧力波の振幅は 40Pa を超え (図 2)、通常の気圧計は 10Pa (=0.1hPa) の分解能を持つので、10秒サンプリングであれば十分観測可能である (図 3)。そのため、まだ存在が我々に知られていない埋もれた気圧データが相当数存在していると推定される。東北地方をはじめ気圧圧力記録に関する情報を収集し、残された圧力記録を発掘・収集する。また断層モデルも収集する。

(3) 大気圧変動データから初期海面変動量や断層滑り量推定手法の開発

海面変動や断層面滑りを励起源とする大気圧力変動量のグリーン関数を求め、地震学で培われた震源推定や津波波源域推定と同じインバージョン手法により海面変動量や断層滑り量分布を求めるインバージョン手法を開発する。滑り分布を求める際には、プレートの滑り方向を一定にするなどの拘束条件を与え、モデルパラメタ間の平滑化フィルタや最小二乗法推定の減衰項の影響を考慮可能な手法とする。また海底地滑りを大気波動励起源とするインバージョン手法も開発する。

(4) 他の津波波源推定手法との比較

既に大気波動圧力源を単純な点源仮定した場合の圧力源の位置が求められている。この予察の結果を参考にしながら、津波発生時刻、位置、初期津波変動量を推定する。さらに、得られた初期津波変動量を説明する断層モデルないし、海底地滑りモデルを構築する。Fujii et al. 2011, Yamazaki et al. 2011 など、これまで行われている、沿岸潮位計、海圧力計、GPS 波浪計による直接的な津波観測データ解析による津波波源としての断層モデルの推定手法と比較し、得られた断層モデルとの差異があれば海底地滑りの可能性を含めて検討する。

4. 研究成果

(1) 2011年東北沖地震では海面の隆起・沈降により大気中に圧力擾乱が発生し大気圧力波として伝搬する現象が、日本国内内外の多数の観測点で気圧波が観測され (Arai, Iwakuni, Watada, Imanishi, Murayama, Nogami, 2011)。観測点方位により異なる気

圧波形は巨大地震の震源域地殻変動量分布を反映していると考えられている。

(2) 気象庁、産業総合研究所、国立天文台などの機関の 2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う大気圧変動データを収集した。また、GPS 津波波浪計や GPS 津波計の記録を国土交通省港湾局から収集した。大気波動圧力源を単純な点源仮定と一様伝搬速度大気し、気圧力波の最大値到着時刻から波動圧力源の位置を求めた。東北沖地震の予察的推定位置は津波の震源最大滑りに近い海溝軸直上付近に求まった。収集された気圧データは津波波形データに類似する初期水面変動に関する情報をもつことが確認できた。

(3) 現実の大気構造を模した 1 次元大気構造を与え、地表変動・海面変動による大気下端での圧力場と (Watada 2009) と変位速度の応答を記載する応答関数を計算手法を開発した。計算手法には、音波・重力波・大気境界波を含み統一的に大気波動場を計算できる Haskell-matrix 法 (Press and Harkrider 1962, Harkrider 1964) を用いているが、見かけ上の過去の研究では見かけ上の応答関数の極 (応答関数無限大となる波長・周波数) が存在したが、消し去ることに成功した。

(4) 深海域での津波の伝播速度が海洋の密度成層により変化する様子を、水深に依存して音速と密度勾配が変動する海洋層に適用可能な伝播行列法を新たに開発し、調査した。水深 4 キロの海では、0.44% 津波速度が非圧縮一様密度の海洋層に比べて低下し、その低下量の 3 分の 2 は水の弾性エネルギー蓄積のため、3 分の 1 は主に静水圧による海水の密度成層に起因することがわかった。世界各地の様々な海洋モデルに対し津波速度を計算した。海底まで暖かい地中海を除き、世界中の津波速度の低減はほぼ水深に比例することがわかった。海水の鉛直構造変化による津波速度変動は 0.01% 以下であり、津波速度の時間変化を検出すること現実的に不可能であることも判明した。

(5) 深海で観測された 2010 年チリ地震と 2011 年東北沖地震から発生した津波は、線形長波の数値津波シミュレーションより、系統的に最大 15 分遅れることが広く太平洋域で観測された。また、発生域から遠く離れた地点では共通して最大波高到達前に奇妙な反転位相をもつ津波初動が観測された。測定された津波の位相速度は逆分散性を示し、1000 秒より長い周期帯では遅くなっていた。これらは重力・弾性結合した津波の位相速度と一致しており、海水の疎密、弾性地球への加重、津波の伝播時の物質移動に伴う地球重力場の変動の効果が津波伝播遅延と初期反転位相の原因であることを示している。簡単な 1 次元津波伝播実験で津波の逆分散が遠地で主

要波高の前に先行する反転位相を生成することを確認できた。長波津波シミュレーション波形に適切は位相補正を施すことにより、これら効果を考慮にいれた実際の水深を伝播する、新たな津波シミュレーション法を開発し、その波形は、遠地における初期反転位相を含む津波観測波形を正確に再現した。観測波形とシミュレーション波形の走時差は 5 分以下に縮小し、波形の差異は驚く程減少した。

(6) 2014 年 4 月に発生したチリ地震 (M8.2) により発生した津波を解析した。太平洋を横断する津波が深海底 20 観測点で記録された。長波津波シミュレーションに比べ、1 分 ~ 17 分の津波到達時刻の遅延が観測され、遅延は津波の伝播時間に比例していた。また遠地の観測点では津波初動が引きとなっていた。津波周波数解析では 21 分と 15 分に振幅ピークが現れ、それぞれが断層サイズ (縦 60-70km、横 40-45km) に対応していると考えられる。観測された太平洋域の最大波高の分布には有意な方位依存性や距離依存性は認められなかった。

(7) 近地と遠地の津波波形を使う断層滑り分布インバージョンに新たな津波グリーン関数計算手法を適用した。遠地の波形では、海面変動加重による固体地球の弾性変形と圧縮性海水の密度変化と津波伝播に伴う質量移動が引き起す重力場の変化の影響を考慮した。これら効果を考慮した津波グリーン関数を用いると長波シミュレーションより遅れる波形が再現され、遠地津波波形を使った波形インバージョンが可能になった。遠地地震波形解析から求めた地震モーメント関数に似た結果が求まるまで、多重時間窓インバージョン法を繰り返し津波波形に適用した。津波波形と沿岸の GPS 測量による地震時の変位量の同時解析も行った。主な断層滑り域は、仮定した断層滑り速度によらず、縦 100km、横 40km 深さ 28km と求められた。滑り分布から求められる地震モーメントは $1.24 \times 10^{21} \text{Nm}$ 、M8.0 となった。

< 引用文献 >

Arai, N., M. Iwakuni, S. Watada, Y. Imanishi, T. Murayama, and M. Nogami (2011), Atmospheric boundary waves excited by the tsunami generation related to the 2011 great Tohoku-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G18, doi:10.1029/2011GL049146.

Y. Fujii, K. Satake, S. Sakai, M. Shinohara, T. Kanazawa (2011), Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku, Japan earthquake, *Earth Planets Space*, 63, 815-820.

Harkrider, G. D. (1964), Theoretical and observed acoustic gravity waves from explosive sources in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 69, 5295–5321.

K. Koketsu, Y. Yokota, N. Nishimura, Y. Yagi, S. Miyazaki, K. Satake, Y. Fujii, H. Miyake, S. Sakai, Y. Yamanaka, T. Okada, (2011), A unified source model for the 2011 Tohoku earthquake, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 310, 480-487.

Press, F., and D. G. Harkrider (1962), Properties of acoustic gravity waves in the atmosphere, *J. Geophys. Res.*, 67, 3889–3908.

Yamazaki, Y., T. Lay, K. F. Cheung, H. Yue, and H. Kanamori (2011), Modeling near-field tsunami observations to improve finite-fault slip models for the 11 March 2011 Tohoku earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 38, L00G15, doi:10.1029/2011GL049130.

Watada, S., T. Kunugi, K. Hirata, H. Sugioka, K. Nishida, S. Sekiguchi, J. Oikawa, Y. Tsuji, and H. Kanamori (2006), Atmospheric pressure change associated with the 2003 Tokachi-Oki earthquake, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L24306, doi:10.1029/2006GL027967.

Watada, S. (2009), Radiation of acoustic and gravity waves and propagation of boundary waves in the stratified fluid from a time varying bottom boundary, *J. Fluid Mech.*, 627, 361–377, doi:10.1017/S0022112009005953.

Watada, S., and H. Kanamori (2010), Acoustic resonant oscillations between the atmosphere and the solid earth during the 1991 Mt. Pinatubo eruption, *J. Geophys. Res.*, 115, B12319, doi:10.1029/2010JB007747.

5 . 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計5件)

Gusman, A., S. Murotani, K. Satake, M. Heidarzadeh, E. Gunawan, S. Watada, and B. Schurr, Fault slip distribution of the 2014 Iquique, Chile earthquake estimated from ocean-wide tsunami waveforms and GPS data, *Geophys. Res. Lett.*, 42, doi:10.1002/2014GL062604, 1053-1060, 2015. 査読有り

Heidarzadeh M., K. Satake, S. Murotani, A. R. Gusman, S. Watada, Deep-water

characteristics of the trans-Pacific tsunami from the 1 April 2014 Iquique, Chile earthquake, *Pure Appl. Geophys.*, 172, doi 10.1007/s00024-014-0983-8, 719-730, 2015. 査読有り

Watada, S., S. Kusumoto, and K. Satake, Traveltime delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic Earth, *J. Geophys. Res.*, 119, doi:10.1002/2013JB010841, 4287-4310, 2014. 査読有り

Occhipinti, G., L. Rolland, P. Lognonne, S. Watada, From Sumatra 2004 to Tohoku-Oki 2011: the systematic GPS detection of the signature of tsunami related internal gravity waves in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 118, doi:10.1002/jgra.50322, 3626-3636, 2013. 査読有り

Watada, S., Tsunami speed variations in density-stratified compressible global oceans, *Geophys. Res. Lett.*, 40, doi:10.1002/grl.50785, 4001-4006, 2013. 査読有り

〔学会発表〕(計26件)

Watada, S. and S. Kusumoto and K. Satake, Simulation of tsunami waveforms propagating over the self-gravitating elastic Earth with real bathymetry, 2014 Ocean Science Meeting, Hawaii (USA), February 28, 2014.

Shingo Watada, Tsunami speed variations in density-stratified compressible global oceans, AOGS, (北海道, 札幌), 2014 July 28 - August 1, 2014.

Watada, S., S. Kusumoto, and K. Satake, Traveltime delay and initial phase reversal of distant tsunamis coupled with the self-gravitating elastic Earth, 米国地球物理学会秋期大会, モスコーン国際会議場, サンフランシスコ(米国), 12月16日, 2014.

Watada Shingo, Tsunami speed variations in density-stratified compressible global oceans, AGU fall meeting, San Francisco (USA), December 13, 2013.

Watada, S., S. Kusumoto, K. Satake, A new method of compute tsunami waveforms coupled with the elastic earth with arbitral bathymetry, AOGS, Brisbane,

Australia, June 28, 2013.

Watada, S., S. Kusumoto, K. Satake, Cause of traveltime difference between observed and synthetic tsunami waveforms at distant locations, IASPEI, Gothenburg, Sweden, July 24, 2013.

Shingo Watada, Tsunami speed variation in the density stratified compressible deep oceans, 26th International Tsunami Symposium, ダラマン (トルコ共和国), 9月25日, 2013.

Watada, S. and S. Kusumoto and K. Satake, Cause of travel-time difference between observed and synthetic waveforms of distant tsunami, 26th International Tsunami Symposium, ダラマン (トルコ共和国), 9月27日, 2013.

Shingo Watada, Re-analysis of the normal mode spectra of the 1960 Chile earthquake, AOGS-WPGM Joint Assembly, Resorts World Convention Centre, Singapore, August 15, 2012.

Watada, S., S. Kusumoto, K. Satake, Cause of Delayed First Peak and Reversed Initial Phase of Distant Tsunami, AGU fall meeting, San Francisco (USA), December 6, 2012.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

綿田 辰吾 (WATADA, Shingo)
東京大学・地震研究所・助教
研究者番号: 30301112

(3) 連携研究者

今西 祐一 (IMANISHI, Yuichi)
東京大学・地震研究所・准教授
研究者番号: 30260516

(4) 研究協力者

村山 貴彦 (MURAYAMA, Takahiko)
新井 伸夫 (ARAI, Nobuo)
岩国 真紀子 (IWAKUNI, Makiko)
野上 麻美 (NOGAMI, Maki)