

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 13 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420493

研究課題名(和文) GPS地殻変位データの時間発展を考慮した津波波源のリアルタイム予測

研究課題名(英文) QUASI REAL-TIME TSUNAMI SOURCE INVERSION USING A BAYESIAN INFORMATION CRITERION FOR STRIKE, DIP AND SPATIAL SLIP DISTRIBUTION OF A FAULT

研究代表者

泉宮 尊司 (IZUMIYA, Takashi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号：60151429

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、地殻変位データを用いた津波波源域のインバージョンの精度を定量的に評価するために、断層位置から断層幅 W を基準として何倍の位置の地殻変位データがあれば、精度良く逆解析が行えるかを数値シミュレーションにより検証を行った。また、地殻変位データとABIC規準を用いて、従来の断層のすべり量とハイパーパラメタだけでなく、断層の走向および傾斜角の点推定を同時に行っている。その結果、誤差ノイズが5%程度であれば、断層パラメタである走向および傾斜角を十分精度よく推定できることが分かった。

研究成果の概要(英文)：The numerical simulation was carried out to evaluate the accuracy of a source inversion with crustal displacement data, and to reveal that the accuracy depends on the distances between the locations of the fault and the observation point. We developed a new inversion method to estimate a fault model of seismic sources from geodetic data, using Akaike's Bayesian Information Criterion. The inversion method provides not only the distributions of fault slip, optimal hyper-parameters, but also strike and dip of a fault by minimizing ABIC. The estimated strike and dip agree well with the true values of them through the numerical experiments. The estimated distributions of fault slip were compared with the target distributions and show generally good agreement with them even if noise is contaminated.

研究分野：水工学

キーワード：津波波源 インバージョン 地殻変位 ベイズ情報量基準 GNSS 断層モデル 精度評価

1. 研究開始当初の背景

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震津波は、モーメントマグニチュード $M_w=9.0$ で、これまでの津波予報の想定を超えるものであり、発生する津波が過小に評価されたために、避難の遅れや避難中止が生じたとも言われている。この地震津波により、津波予報のあり方や情報伝達の最善な方法が検討されるようになった。津波の予報は、避難のことも考えると、5分から10分程度以内に精度の高いものが求められる。これまでの気象庁の予報は、地震マグニチュードや震源深さ等を基に、あらかじめ計算された結果を呼び出す形式で行われていたが、地震マグニチュードや震源深さが誤っていたり、精度が低い場合には誤差の大きい予測結果となる欠点があった。現実的に精度の高い津波予報を行うためには、地震波の情報や地殻変位等のデータを直接用いた方法が有効であると考えられる。

これまで提案されている津波波源域のインバージョンには、(1)地震波形を用いて断層すべり量を逆推定する方法、(2)沖合等で観測された津波波形を用いて逆推定する方法、および(3)GPSによる地殻変動を用いて断層すべり量を逆推定する方法がある。(1)の手法は、理論的にも明確であるが、巨大地震の場合には特に100sから300sを超える長周期波の地震波の振幅波形が重要であるため、それをローパスフィルタにより抽出するためには、15分から30分程度必要となり、やや時間を有するという欠点がある。また、(1)および(3)の方法では、非地震性の地すべりや分岐断層等が存在する場合には、誤差を伴う可能性があり、それを検証する付加的な手法も必要となる。一方、(2)の津波波形を用いる方法は、直接的であり、津波地震の場合にも使用できる利点があるが、沖合での津波観測は地点数が限られていることや有効な津波波形を得るためには、巨大地震の破壊時間も考慮すると5分から10分では不足する場合があります。避難情報として間に合わないことも考えられる。これら3つの手法の中で、将来的にも有望な方法は、(2)のGPSの地殻変位データを用いる方法であり、長周期の地震波形や永久的な地殻変位データを用いることができるので、(1)の方法も兼ね備えることができる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、GPSの地殻変位データを用いて、精度の高い津波予報を確立することを研究の目的とする。これまでに行われてきた地震断層の逆解析法は、地震発生後の後解析として行われてきたが、これは精度高く予測するためには地震や津波波形の数多くのデータが、必要であったことに由来する。しかしながら、GPSの地殻変位データを1s毎にリアルタイムで得られるようになれば、波

源域の断層変位を逆推定することができる。ここで問題となるのが、観測地点数およびそれらの位置・配置により、波源域でどれくらいの誤差が生じるかである。このことについて詳しく検討した事例は、著者の知る限りではほとんどなく、著者らが東北地方太平洋沖地震津波の際に、陸地側のGPSデータを用いた結果とそれに海上保安庁による海底変位データを加味した結果の比較がなされているのみである。震源から観測地点までの距離と震源断層の大きさおよびすべり量に関して詳細な検討がなされなければならない。

津波波源域の断層のすべり量を逆推定する際に、如何ほどの断層の大きさに設定すればよいか問題となる。地震後の解析では、余震域の広がりから求められる場合が多いが、リアルタイムで波源域を逆推定する場合には、そのような手法は用いることはできない。地震がプレート境界で発生した地震であれば、プレート境界面に断層を想定することにより、解決すると考えられる。また、断層の長さ等は強震動の継続時間と破壊速度により、最大値を設定することも可能である。断層の大きさに関しては、著者らは既に検討しており、大きめに断層を設定することにより、ほぼ同様な鉛直地殻変位が得られることを確認している。このことが本研究の独創的な一面である。プレート境界型以外の地震の場合には、断層の走行・傾斜角に関しては、地震データを用いて推定することになる。

津波予測において一番問題となるのが、津波地震であり、地すべり等の非地震性の海底地盤変位である。GPSデータは、低周波変位に対して強く、永久変位も検出可能であるので、津波地震の震源が陸地に近ければ検知ができる利点を有している。しかしながら、津波地震の震源がGPS観測地点から十分に離れている場合や分岐断層の発生が生じた場合には、やや大きな誤差が生じることになる。そのため本研究では、距離が離れている場合や分岐断層が発生する場合についても、海底津波計(圧力計)のデータを用いた検討を加えることも独創的な点である。

3. 研究の方法

本研究は、GPS変位データを用いて、動的および静的な変位から最適な断層面を想定し、断層のすべり量を逆推定する研究、および津波のリアルタイム予報を行う研究から成っている。前者の断層面の想定に関しては、海洋プレート型地震とそれ以外の地震に分けて考える必要がある。またGPS変位データの取得に関しては、その精度を検証するために動的な変位に関する現地実験を行う。断層のすべり量の逆推定に関しては、解の安定性および信頼度を高める工夫を行い、精度の検証を行うために、過去の代表的な地震津波の計算を行い比較検討する。平成26年度は、以下の研究計画に従って研究を進める。

<平成26年度>

- (1)GPS による 1s 毎の地殻変位の精度を検証するために、GPS アンテナを振動台に載せて観測を行い、得られたデータと厳密な位置との比較を行う。地震波形の大きさおよび周期の影響を調べるために、振動台の振幅および周期を変化させて現地実験を行う。
- (2) 海洋プレート型地震を対象に、GPS 地殻変位データを用いて断層面の大きさによる各小断層のすべり量の変化を調べ、過小評価されることのない、断層面の大きさを見出す。数値シミュレーションでは、東北地方太平洋沖地震津波、および南海地震等を想定し、仮想的な震源断層を仮定して、精度の検証を行う。
- (3)日本海側の地震津波を対象に、過去の地殻変位データを収集し、断層モデルによる地殻変位と比較し誤差の評価を行う。さらに、地殻変位データを基に断層すべり量を推定し、津波波形を推定し、過去に起きた津波の実測波形と比較し、最適な断層モデルを選定する。
- (4)GPS の動的地殻変位波形を用いて、断層の幾何形状を推定する方法を開発する。具体的には、変位波形の比較により、断層パラメータの同定を行う。
- (5)上述の手法により算定された断層すべり量を用いて、津波のリアルタイム予測を行い、東北地方太平洋沖地震津波を例に、精度の検証を行う。これらの成果を取りまとめて、学会にて発表する。この学会に出張するために旅費を使用する。

これまでの研究により、5~6割程度実施されているので、この計画通りに実施できないことは、確率的に小さいと考えられる。もし、計画通りに実施できない場合には、国土地理院のGPS データ等を用いたリアルタイム津波予報とその精度の検証は行う予定である。

<平成27年度以降>

平成27年度・28年度の研究は、前年度の研究成果を受けて、GPS 観測の精度を上げるために、現地観測を観測期間も長くして実施すると共に、ソフト的な対策により精度の向上を図る。また、断層の位置およびすべり量の推定精度向上のために、海底津波計(圧力計)のデータを用いる場合や過去の地震津波の適用例を増やし、数値シミュレーションのケース数を増やして、本逆推定法の改善を図る。平成27年度以降の研究計画は以下の通りである。

- (1)前年と同様に、GPS による 1s 毎の地殻変位の精度を検証するために、GPS アンテナを振動台に載せてやや長期の観測を行い、得られたデータと厳密な位置との比較を行う。地震波形の大きさおよび周期の影響を調べるために、振動台の振幅および周期を変化させて現地実験を行う。
- (2) 断層の位置やすべり量の推定精度向上の

ために、海底津波計(圧力計)のデータを用いた逆解析法を検討する。また、断層諸層を与えた順問題を解析した結果を用いて、本研究の精度を検証する。

- (3)日本海側の地震津波を対象に、地殻探査結果を収集し、断層の走行、傾斜角等を整理する。それらのデータを用いて、津波のシミュレーションにより津波波形を推定し、過去の実測の津波波形と比較し、最適な断層モデルを選定する。
- (4)GPS の動的地殻変位波形を用いて、断層の幾何形状を推定する方法を開発する。具体的には、変位波形の比較により、断層パラメータの同定を行い、永久変位により得られた結果と比較する。
- (5)本研究により得られた成果を取りまとめ、学会で発表すると共に、実用に用いられるように積極的に広報活動を行う。

4. 研究成果

本研究では、地殻変位データを用いた断層変位の逆推定を行い、仮想断層を用いて、地震断層と観測地点との位置関係が逆推定の精度に与える影響について検討した。その結果、以下の事項が明らかとなった。

- (1) 仮想断層を用いた津波波源のインバージョンでは、陸上の観測地点のみを観測データとして用いた場合では、観測誤差が小さい場合でも逆推定の精度は低かった。同時に、観測誤差の増加により誤差も飛躍的に増加することが明らかになった。
- (2) 断層変位の逆推定に際し、断層幅 W を基準とした $\Delta x/W$ の値が小さい観測地点を観測データとして用いるほど、推定精度が向上することが明らかとなった。
- (3) $\Delta x/W$ の値が小さい観測地点を観測データとして用いることで、すべり量分布と地殻変位量の両方で、観測誤差が増加しても誤差を小さく留める効果があることが分かった。

本研究では、地殻変位データを用いた津波波源域インバージョンにおいて、従来のベイズ推定だけでなく、ABIC と断層の走向および傾斜角の関係から、それらの同時点推定とその推定精度について検討した。その結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) ハイパーパラメータ ε を十分小さい値に設定すれば、走向および傾斜角が未知の場合でも、ABIC の最小値から真の走向および傾斜角を比較的精度よく推定できることが分かった。
- (2) ε を最適値よりも小さい0.01に仮設定して、すべり量の逆推定を行い、それを用いて地殻変位量を推定したところ、変位量および変位方向共によく一致していた。このことは、 ε の決定においてABIC の厳密な最小値でなくても、十分小さい

値に仮設定すれば、十分精度よく断層のすべり量を推定できることを意味している。

- (3) 地殻変位時系列データを用いて、破壊伝播速度および地震波の伝播速度を考慮した準静的インバージョンを行ったところ、変位量に若干の誤差が見られたが、変位のパターンはよく再現できていることが分かった。
- (4) 津波波形の計算を行ったところ、全ての観測地点で津波の第一波の到達時刻を、ほぼ正確に予測することが出来た。また、津波波形は、Central Miyagi および Central Miyagi では、概ねよく一致していた。

謝辞：本研究では、国土地理院、日本 GPS データサービス、日立造船(株)および GPS Solutions Inc.による電子基準点 1 秒データの東北地方太平洋沖地震の地殻変動データおよび国土交通省港湾局の GPS 波浪計の観測データを用いたことを付記し感謝します。

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 13 件)

- ① 黒田耕平, 泉宮尊司：地殻変位データを用いた地震断層の走向、傾斜角およびすべり量の推定精度に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, Vol.72, No.2, pp. I 139-I 144, 2016 年。
- ② 泉宮尊司, 菊池優太, 石橋邦彦：海岸護岸周辺の常時微動特性と波浪諸元との関連性に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol.72, No.2, pp. I 121-I 126, 2016 年。
- ③ 太田睦基, 泉宮尊司：歴史データを用いた地震津波規模の再現確率値の推定法とその精度に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol. 72, No. 2, p. I 295-I 300, 2016 年。
- ④ 佐藤知嗣, 泉宮尊司：海洋レーダによる流速データを用いた潮汐・吹送流および津波成分の分離法に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, Vol.72, No.2, pp. I 742-747, 2016 年。
- ⑤ 今成順一・泉宮尊司：地殻変位データを用いた津波波源インバージョンの精度評価に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, Vol.71, No.2, pp. I 444-449, 2015 年。
- ⑥ 泉宮尊司・斎藤太一・加藤弘明：非定常・準周期的な気象・水文極値データの検定並びに再現確率値の経年変化の推定, 水工学論文集, 査読有, 第 59 巻, 2015。
- ⑦ 北井芳典, 泉宮尊司, 石橋邦彦：気象お

よび津波による大気重力波の発生・伝搬特性に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, Vol.71, No.2, pp. I 259-I 264, 2015 年。

- ⑧ 泉宮尊司, 山森隼人：津波波力および建物耐力の確率分布を考慮した建物被害確率予測法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol.71, No.2, pp. I 931-I 936, 2015 年。
- ⑨ 泉宮尊司, 上野航太郎, 石橋邦彦：消波護岸上の全海水飛沫量と風速および風波の飽和度指標との関係について, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol.71, No.2, pp. I 1435-I 1440, 2015 年。
- ⑩ 泉宮尊司, 吉田裕一, 石橋 邦彦：津波波力および建物耐力の確率分布を考慮した被害確率分布の評価法に関する研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, Vol.70, No.2, pp. I 444-449, 2014 年。
- ⑪ 松本和記, 泉宮尊司, 石橋邦彦：波および流れによる捨石堤および消波ブロック堤の安定性に関する実験的研究, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), 査読有, Vol.70, No.2, pp. I 259-I 264, 2014 年。
- ⑫ 泉宮尊司, 加藤弘明：非定常・準周期的な極値外力の検定ならびに確率分布の推定法に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol.70, No.2, pp. I 106-I 110, 2014 年。
- ⑬ 泉宮尊司, 高橋龍之介, 石橋邦彦：反射波を伴う非線形性不規則波の水位・水面勾配の結合確率分布に関する研究, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), 査読有, Vol.70, No.2, pp. I 086-I 090, 2014 年。

[学会発表] (計 11 件)

- ① 泉宮尊司：非線形海洋波浪の確率統計的特性および風波と気流の相互作用 一波浪計測, 方向スペクトル, 風波の碎波と飽和度指標 招待講演, 名古屋大学宇宙地球環境研究所研究集会, 海洋波および大気海洋相互作用に関するワークショップ, 2017 年 3 月 6 日, 名古屋大学宇宙地球環境研究所(愛知県名古屋市)。
- ② 泉宮尊司：海洋波浪起源の microseisms と津波による大気重力波の発生シミュレーション, 東京大学地震研究所特定共同研究 B, 地震波・微気圧波計測を融合した地殻・大気中現象の波源・規模推定, 代表, 山本真行, 2017 年 1 月 25 日, 東京大学地震研究所(東京都文京区)。
- ③ 中山朋大, 泉宮尊司：津波漂流物対策施設に働く漂流物の衝突力波形の推定法に関する研究, 第 34 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 120 - 123, 2016 年 11 月 2 日, ハイブ長岡(新潟県長岡市)。
- ④ 山森隼人, 泉宮尊司：ADCP の後方散乱強

度データを用いた底質の粒度分布の推定法に関する研究, 第 34 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 124 - 127, 2016 年 11 月 2 日, ハイブ長岡(新潟県長岡市).

- ⑤ 泉宮尊司, 今成順一, 北井芳典: 地殻変位データを用いた津波波源インバージョンと精度評価 - 新潟地震断層モデルの再検討と大気重力波の利用 -, 第 5 回巨大津波災害に関する合同研究集会, 12 月, 2015 年 12 月 4 日, 東京大学地震研究所(東京都文京区)
- ⑥ 黒田耕平, 泉宮尊司: 地殻変位データを用いた地震断層の走向および傾斜角の推定精度に関する研究, 第 33 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 122 - 123, 2015 年 11 月 12 日, 新潟市朱鷺メッセ(新潟県新潟市).
- ⑦ 佐藤知嗣, 泉宮尊司: 海洋レーダによる流速データから潮汐・吹送流成分の分離法の開発, 第 33 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 124 - 127, 2015 年 11 月 12 日, 新潟市朱鷺メッセ(新潟県新潟市).
- ⑧ 泉宮尊司: 日本海東縁部の地震津波発生確率の評価法, 日本地震学会予稿集 2015 年度秋季大会, S14 - 03, 2015 年 10 月 27 日, 神戸市国際会議場(兵庫県神戸市).
- ⑨ 今成順一, 泉宮尊司: 日本海沿岸部における地震断層モデルの再評価, 第 32 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 120 - 123, 2014 年 11 月 5 日, ハイブ長岡(新潟県長岡市).
- ⑩ 泉宮尊司・山下裕之・石橋邦彦: 風波の飽和度と気流・風波の非線形パラメタおよび海面抵抗係数との関係について, 理論応用力学講演会 2014, pp. 1 - 2, CD-ROM, 2014 年 9 月 27 日, 東京工業大学大岡山キャンパス(東京都目黒区).
- ⑪ 北井芳典, 泉宮尊司, 石橋邦彦: 気象条件及び海水位変動によって励起される微気圧変動に関する研究, 第 32 回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集, pp. 124 - 127, 2014 年 11 月 5 日, ハイブ長岡(新潟県長岡市).

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

泉宮 尊司 (IZUMIYA Takashi)

新潟大学・自然科学系・教授

研究者番号: 10765432

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

今成 順一 (IMANARI Junichi)

黒田 耕平 (KURODA Kohei)

石橋 邦彦 (ISHIBASHI Kunihiko)