

機関番号：13901

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740254

研究課題名(和文)

地殻応力臨界状態トモグラフィー手法の開発

研究課題名(英文)

Development of tomography method for the critical point of stress-strain state

研究代表者：

伊藤 武男 (ITO TAKEO)

名古屋大学・環境学研究科・助教

研究者番号：40377982

研究成果の概要(和文)：

海洋潮汐応答は太陽と月の引力によって海水が移動する現象である。この海洋潮汐応答は地球内部の弾性率構造と密度構造と密接な関係にあり、原理的には海洋潮汐応答から地球の内部構造を推定する事ができる。この海洋潮汐応答をGPS観測によって測定し、地下構造を推定するという新しい手法を開発した。

従来の地震波を用いた手法では、波動の伝搬時間を観測量とするため、P波速度、S波速度を未知数とするが、本手法では、2つの弾性定数と密度構造を未知数とする。また、海洋潮汐応答は12時間あるいは24時間周期の波動であるため、Qを推定することに対しても有効な手法となり得るなど、多くの利点がある。この手法をアメリカ西海岸に設置されている約700点のGPS観測点のデータに適用した結果、深さ220kmの地震波の不連続面が無くなり、アセノスフェアにおいて、地震波速度の低速度層と低密度異常をGPS観測から推定することに成功した。また、低密度異常は約 50kg/m^3 程度であり、これから推定される、温度異常は 300°C 程度である。この温度異常が地震波速度の低速度層を形成している可能性があることを定量的に示した。

研究成果の概要(英文)：

Ocean tides are a well-known phenomena resulting from periodic variations in the gravitational attraction of the Sun and the Moon. The Earth's response to ocean tidal loads (OTL) is controlled by internal variations of density and elastic parameters. In principle, observations of the Earth's OTL response can be used to constrain our models of Earth's internal structure.

The OTL response has a richer spatial structure including power at regional length scales (a few hundred kilometers) with typical amplitudes on the centimeter scale. We present the first depth-dependent model for the crust and upper-most mantle that constrains independently density and elastic moduli below the western United States and nearby off shore regions. We find that at least regionally, there is a low-density anomaly in the asthenosphere of about 50 kg/m^3 , corresponding to a temperature anomaly of about 300°C . Such a temperature anomaly can also explain differences in inferred elastic structure relative to globally averaged radial seismic models.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	600,000	180,000	780,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	2,200,000	660,000	2,860,000

研究分野：測地地震学

科研費の分科・細目：地球惑星科学・固体地球惑星物理学

キーワード：固体地球潮汐・海洋潮汐・GPS・地下構造・密度構造・モンテカルロ法

1. 研究開始当初の背景

地殻内の絶対応力は、テクトニックな応力の蓄積により上昇する。それにより、地殻内の弱面である断層近傍の応力が岩石の破壊強度に達すると地震が発生する。一般に、岩石は破壊強度の約半分の応力に達すると、弾性体から期待される線形変形からはずれ、非線形的変形に変化する。このことから、地殻岩石は地震の発生という脆性破壊に至る直前の応力臨界状態では、岩石は非弾性的な性質に遷移してゆき、その変化も限界に達して地震に至ると考えられている。つまり、地震の予測にはこのような臨界応力状態であるかどうかを如何にして検出するかが極めて重要になるが、そもそも地殻内の絶対応力を知る事は難しく、臨界応力状態であることを検出することは容易ではない。

近年、GPSの解析技術の改良に伴い、固体地球潮汐や海洋潮汐応答などの24時間よりも短い周期の変動の現象を高精度にとらえる事が可能になっている。これらの潮汐現象は極めて正確な周期的なシグナルとなっており、潮汐に対する地球の応答の時間変化を捉えることができれば、地下の応力の状態をとらえる事が可能になると予想される。つまり、地震発生前の臨界応力状態であれば、定常的な応答に変化が非弾性的な時間変化が現れると予想される。その時間的な応答変化により、臨界応力状態をモニターする試みである。

2. 研究の目的

地殻応力が岩石の破壊強度に達すると地震が発生する。この地震を予測するためには地殻の絶対応力を知ることが重要であるため、多くの研究がなされている(佐野, 2005など)。しかしながら、地震の発生予測の視点に限って言えば、必ずしも絶対応力を知る必要はなく、むしろ、絶対応力がどの程度、破壊強度に達しているかを知ることが重要である。つまり、地殻の岩石が臨界応力状態になっているかどうかを検出することができれば、地震の発生予測は可能になり、絶対応力を知る必要はない。一方、地震発生の直前の応力臨界状態では岩石は降伏状態になるため、地殻の応力応答は弾性的な応答から塑性的な応答に変化する。このことは、同じ力を与えた時に通常の状態の岩石よりも応力臨界状態の岩石のほうが固体地球潮汐の振幅が大きくなることを意味する。上記

の「同じ力」に相当する力として潮汐力をもちいることで、地殻の弾性的な応答から塑性的な応答への変化を検出することが可能になる。この潮汐力の大きさは地震の応力降下量の約1000分の1に相当するが、応力の変化率で見ると1000年周期の地震の約1年分の増加量に相当する応力を与えていることになる。また、地震直前における、潮汐応答の変化の事例は多数存在するが、観測点密度が低いため信頼性が低い(廣瀬他, 2003, Yamauchi, 1989など)。本研究では、これらの本質的な問題を解決するために、GPSを用いた潮汐観測手法を確立し、断層近傍での潮汐応答を定量的に解析することで、非弾性的な応答をとらえ、地下の情報を引き出す手法の開発を行う。

3. 研究の方法

日本列島に設置されているGPS観測網(GEONET)の観測データを取得して、キネマティック解析(KPPP解析)を実施した。解析にはGEONETの4ヶ月にわたる、約1200観測点の30秒サンプリングにてKPPPGPS解析を実施した。この解析によって得られた、地殻変動時系列から地球潮汐の情報を抽出するアルゴリズムを新たに開発した。潮汐解析アルゴリズムの検証の結果、GPSではM2分潮と上下動が最も精度良く検出できる事をあきらかにした。その理由として、その他の分潮ではGPSの周回周期やGPS衛星の軌道情報の生成周期などと重なるため、エラーが大きくなる。また、一般に上下動の観測エラーは水平動に比べて大きい、潮汐応答は上下動が最も大きいため、相対的にS/Nは上下動が良くなる事が分かった。次に、事例解析として2004年新潟県中越地震と2008年岩手宮城内陸地震の近傍の約30点で上記の開発した手法にて検証した結果、有意な変化をとらえる事ができた。しかしながら、解析手法の安定性の問題が今後の研究課題であることも明らかになった。特に、海洋潮汐荷重の評価と地下構造の不均質性の問題を切り離した、新たな解析手法の開発が必要であることが分かった。その一方で、海洋潮汐荷重による空間的な応答係数変化を利用して地下構造の不均質性を推定することができる可能性も明らかになった。

そのため、アメリカのカリフォルニア州に設置されている約700点GPSデータのKPPPGPS解析を行った。使用したデータは1

年間で5分サンプリングの解析を行った。これは、より高いサンプリングであると、GPS衛星の軌道歴の補間を行って解析することになり、それぞれのサンプリングで共分散の項が大きくなるため、GPS衛星の軌道歴のサンプリングと同じ5分に設定した。これらの解析手法は今後、GPS衛星の軌道歴のサンプリングによって変更されるであろう。これらの解析から得られた、地殻変動時系列から海洋潮汐荷重による地球の応答成分を解析による分離する。地殻変動時系列から固体地球潮汐と海洋潮汐応答を分離するためのアルゴリズムを構築した。地下構造の不均質による各成分への影響は先行研究によって調べられている。その結果、構造に起因する固体地球潮汐はGPSの観測限界以下であることがLatychev et al. 2009によって指摘されていた。本研究では固体地球潮汐については理論的に予測可能として、海洋潮汐荷重応答を用いて解析手法を確立する事にした。固体地球潮汐応答については3次元な固体地球潮汐モデルは存在するが、しかしながら、まだ、限られた分潮であるため、実際の解析にはまだ使えない状態であった。よって、本研究では500分潮程度の固体地球潮汐の理論値を求める計算プログラムを新たに作成し、海洋潮汐応答から地下構造を推定する一連の解析プログラムを作成した。この解析により、観測点分布にも依存するが、下部マントル付近の構造も推定する事が可能であることがわかった。最も解像度が良いのは、上部マントル付近であり、本研究課題の地震発生領域である20kmより浅い部分には余り解像度が無いことも分かって来た。一方、地震波を使わないので、連続的に地下構造をモニターすることができ、常時モニタリングすることで、構造の変化を取り出せる可能性があると思われ。また、新たに作成した解析手法はモンテカルロ手法とデータ同化手法を組み合わせた手法を開発した。モンテカルロ手法は膨大な計算時間が必要なため、これらの計算を加速させるために、データ同化手法を組み合わせた、モンテカルロ手法を開発した。この手法は非ガウス分布を考慮した非線形解析を可能にした。

4. 研究成果

GEONET で得られた日本列島の空間的なKPPP GPS解析のデータを図1に示す。この図は、12時間の地殻変動時系列の空間変化を示している。通常GPS解析には潮汐の補正を行うが、本解析では、これらの地球潮汐応答の補正を行わない解析を行った。

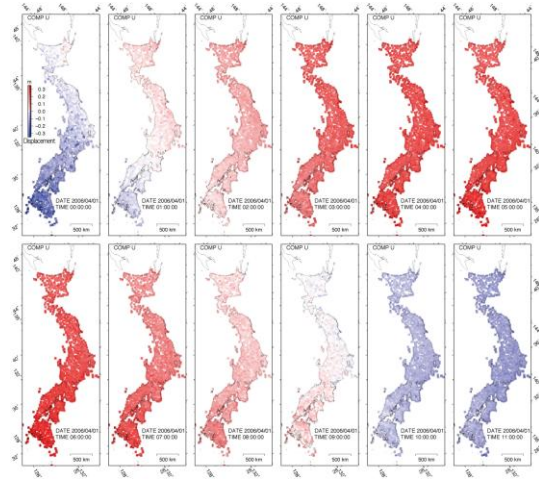


図1：潮汐応答の補正を行わない1時間毎のKPPP GPS解析の地殻変動分布

これらのKPPP GPS解析から、M2分潮の潮汐応答を推定しその空間分布を図2に示した。

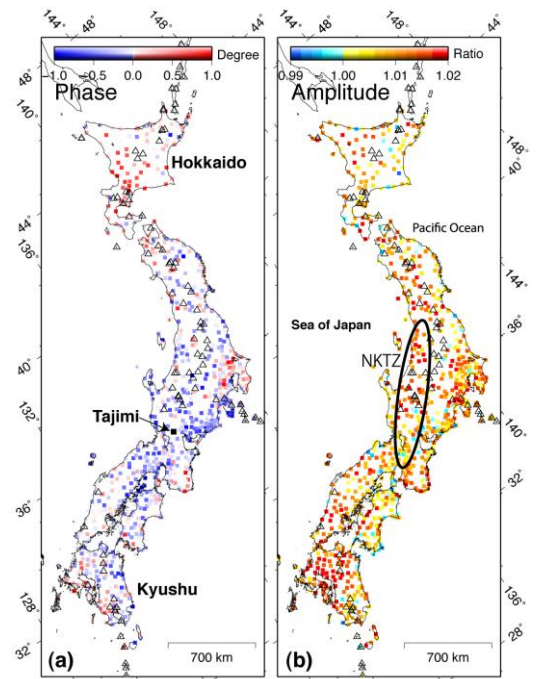
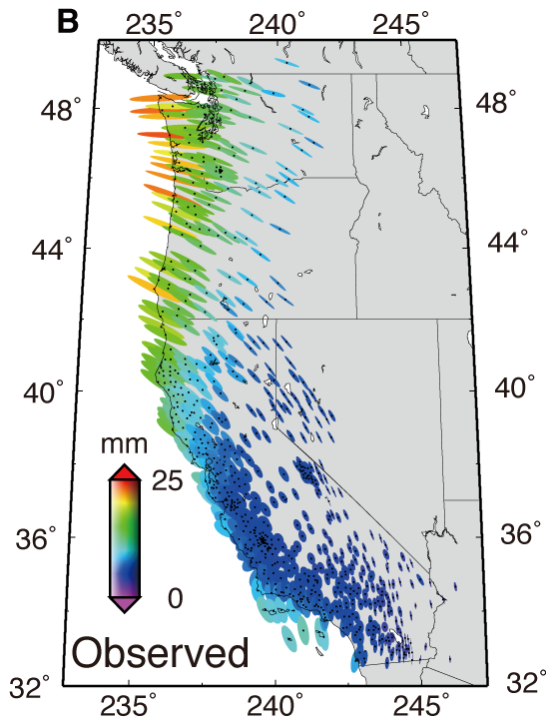


図2：M2分潮の空間変動パターン。左図が位相、右図が振幅

図2より、日本列島におけるM2分潮の潮汐応答の空間分布が地域の地下構造の特性を示している。しかしながら、これらの解析のみでは定性的な議論しかできないため、より詳細なモデル化が必要となる。

一方、アメリカ西海岸における GPS 観測点約 700 点の約 1 年間の解析を行った結果を図 3 に示す。図 3 は M2 分潮の位相と振幅情報を楕円プロットとして示している。つまり、楕円の伸びている方向が、最大変位方向である。図 3：アメリカ西海岸における M2 分潮の海



洋潮汐応答の空間分布

これらの海洋潮汐応答分布から、地下構造の推定を行った。これらの情報は通常の地震波では得られない、弾性定数および、密度構造を推定することができる。図 4 は得られた構造を示している。

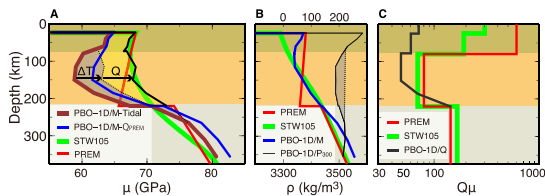


図 4：海洋潮汐応答の空間分布から推定した地下構造モデル。

海洋潮汐応答の情報を用いることで、弾性定数と密度構造を分離することができた。密度構造は熱に起因して変化するため、密度異常を温度異常と見なすことで、アセノスフェアの熱構造と地震波の低速度層の関係を明らかにした。これらの成果は、国際学会にて 2 件発表し、国際シンポジウムにて招待講演を行った。また、この研究の成果については、Science 誌に掲載された。

本来の目的である、応力の臨界状態のトモグラフィは感度の不足から推定は極めて難しく、解析の安定性の問題も依然と解決で

きなかった。しかしながら、地下構造の新たな推定方法の確立ができたことは、今後の研究に大きな影響を及ぼす可能性を秘めている。

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 2 件)

① T. Ito, and M. Simons, Probing asthenospheric density, temperature and elastic moduli below the Western United States, Science, Doi:10.1126/science.1202584, 2011.

② T. Ito, M. Okubo, and T. Sagiya, High resolution mapping of Earth tide response based on GPS data in Japan, Journal of Geodynamics, Doi:10.1016/j.jog.2009.09.012, 2009.

[学会発表] (計 7 件)

① T. Ito, and M. Simons, A one dimensional model of earth structure in the western US from GPS observation of ocean tidal load response, 2010 Workshop on Crustal Deformation Modeling, Denver, 2010 年 6 月

② J. Yamamoto, T. Sagiya, and T. Ito, Temporal variation of the Earth tide response using kinematic GPS, Hokudan 2010 International Symposium on Active Faulting, 淡路市, 2010 年 1 月.

③ T. Ito, and Mark Simons, The elastic response to ocean tidal loading estimated from GPS observations in the western United States, AGU 2009 Fall Meeting, San Francisco, USA, 2009 年 12 月.

④ 山本淳平, 鷺谷威, 伊藤武男, 「GPS 地球潮汐計」の開発に向けて(1):キネマティック精密単独測位 GPS 解析における潮汐モデルの評価, 日本測地学会第 112 回講演会, つくば市, 2009 年 11 月.

⑤ 山本淳平, 伊藤武男, 地震発生前に見られる固体地球潮汐応答の時間変化, 日本測地学会第 110 回講演会, 函館, 2008 年 11 月.

⑥ 伊藤武男, 潮汐応答による応力臨界状態の検出, 「地震発生前」の物理～先行現象に迫る～, 京都大学防災研究所, 2008 年 10 月.

⑦ T. Ito, The high resolution mapping of earth tide responses from GPS network in Japan, ETS 2008, Jena, Germany, 2008年9月.

[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
特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 武男 (TAKEO ITO)

名古屋大学・環境学研究科・助教

研究者番号: 40377982

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし