

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K14384

研究課題名（和文）理論誤差を考慮した新たな震源過程解析手法による大地震震源像の解明

研究課題名（英文）Elucidation of source images of large earthquakes with a new source inversion method considering theoretical errors

研究代表者

久保 久彦（Kubo, Hisahiko）

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波火山ネットワークセンター・主任研究員

研究者番号：00795221

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：既存の震源過程解析では看過されてきた解析の際の断層面の離散化およびすべりの平滑化拘束条件に起因する理論誤差に注目し、モデルパラメータの値だけでなくその最適な次元数も推定するトランスディメンショナルインバージョンを、地殻変動記録もしくは地震波形記録を用いた震源過程解析に導入した。2015年ネパールGorkha地震などの実記録への適用や理論テストを通して、同手法によって単純かつデータの再現性が高い妥当な解が得られることを示した。また日本海溝における通常の大地震の破壊域とスロー地震の活動域との空間的な関係を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は震源過程解析の従来手法が抱えていた課題を明らかにするとともに、トランスディメンショナルインバージョンを震源過程解析に用いることの有用性を明らかにしたものであり、この新たな震源過程解析のアプローチは今後も継続的な研究発展および新たな知見の獲得が望まれる。また地球物理学分野における他の逆問題への波及効果も期待される。本研究で得られたプレート境界で起きる大地震および諸現象の関係についての知見は、将来発生しうる大地震を今後考えていく上で有用な情報であると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Focusing on theoretical errors caused by the discretization of earthquake fault and the slip smoothing constraint in source inversion, which have been overlooked in previous studies, we introduced trans-dimensional inversion, which estimates the dimensions of the model parameters as well as the values of the model parameters, to the source inversion using geodetic data or seismic waveforms. The application to actual records including the 2015 Nepal Gorkha earthquake and synthetic tests demonstrated that the trans-dimensional source inversion can provide reasonable solutions composed only of meaningful slips, which were required to explain the data. The spatial relationship between the coseismic rupture extents of normal large earthquakes and the active areas of slow earthquakes along the Japan trench was also clarified.

研究分野：地震学

キーワード：トランスディメンショナルインバージョン 震源過程解 大地震の断層破壊過程 地殻変動記録 地震波形記録

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

地震の震源過程(地震時における断層面上の時空間すべり分布)を地震波形記録や地殻変動記録などから推定する試みは1980年代以降、多くの大地震に対して行われてきた。それらの成果は、大地震の詳細な断層破壊過程を明らかにするとともに、地震の発生・成長メカニズムの理解に大きく貢献してきた。他方で、解の唯一性や理論誤差に関しては未解明な部分が多く、これらの課題の解決を目的として、フルベジアンアプローチを導入することで解の唯一性を調べようとした研究(例えばKubo et al. 2016)や理論誤差のひとつであるグリーン関数の誤差を考慮した研究(例えばYagi et al. 2011)などが行われ始めてきていた。本研究では断層面の離散化およびすべりの平滑化(スムージング)拘束条件といった規格化に起因する理論誤差に注目した。どのように断層面を離散化するかは推定されるすべり分布に大きく影響する。本来ならば記録の分解能に基づいて離散化の程度を決めるべきであるが、これまでは解析者の経験および主観に基づいて離散化のやり方が決められており、それが震源過程解析の結果に与える影響は見過ごされてきた。またスムージングの使用は安定して逆問題を解くことを可能とし、一見もっともらしいすべり分布を得ることができる。一方で、スムージングの使用は記録の分解能以上に解の分解能を低下させる。そのため解の信頼性を知るためにはスムージングの影響の評価が必須であるが、これまでの研究ではこの視点が欠けていた。同様のことはプレート間固着の空間分布の推定にも言える。地殻変動観測網の整備とともに、南海トラフなどにおいて詳細なプレート間固着分布が推定されてきている。しかし観測網の不均質な分布および地殻変動記録の限定された分解能のために、従来の解析手法による結果は離散化・規格化による理論誤差に強く影響されており、我々は歪められた結果を得てきた可能性がある。

近年、逆問題の解法のひとつとしてトランスディメンショナルインバージョンが注目されている。同手法ではフルベジアンアプローチに基づいて、リバーサルジャンプマルコフ連鎖モンテカルロ(MCMC)法と呼ばれるフォワードモデリングを用いることで、モデルパラメータの値だけでなくその最適な次元数も含めた解の分布を求めることを可能としている。モデルパラメータ配置つまり時空間の離散化を記録の分解能から直接決めることができ、またスムージングなどの規則化を用いなくてもよいために、これまでの解析手法につきものであった離散化・規格化による理論誤差を取り除いた形で、解を推定することができる。研究開始当初は、地下構造の推定においては適用例がいくつかあったが、震源過程解析においてはDettmer et al. (2014)が長周期(周期数百秒)の地震波を用いた解析を行ったのみであった。そのため、より短周期の成分も含んだ地震波形を用いた震源過程解析や地殻変動記録を用いた震源過程解析へのトランスディメンショナルインバージョンの導入が大きなテーマであった。

2. 研究の目的

本研究では、これまでの研究では看過されてきた解析の際の断層面の離散化およびすべりの平滑化拘束条件による規格化に起因する理論誤差に注目し、これらの理論誤差を取り除いた解を得ることを目的として、モデルパラメータの次元数さえも変数とするトランスディメンショナルインバージョンを導入した新たな震源過程解析手法を開発する。そして、開発した新手法を地殻変動記録や強震動波形記録などの実記録に適用することにより、解の不確定性を評価ながら大地震の震源過程およびプレート間固着分布の真の姿を明らかにし、大地震の発生・成長・収束・準備メカニズムに関する理解を深める。加えて従来の解析手法において離散化・規格化による理論誤差が解に与えてきた影響を明らかにする。

3. 研究の方法

地殻変動記録を用いた静的すべり分布推定および地震波形記録を用いた時空間すべり分布推定へのトランスディメンショナルインバージョンの導入を図る。それぞれにおいて解析プログラムを開発した上で、理論テストを通じて新手法および従来手法を評価する。そして、実際の地震における観測記録への適用を行うとともに、プレート間固着の空間分布の推定にも適用する。

4. 研究成果

4 - 1.

地殻変動記録を用いた静的すべり分布推定に対してトランスディメンショナルインバージョンを適用した新たな解析プログラムを開発した。そして2015年ネパールGorkha地震で観測された地殻変動記録に対して同手法を適用するとともに、同地震を模擬した理論テストも行った。また既往手法を用いた解析も行い、それぞれの結果を比較することを行った。なお同地震の地殻変動記録の分布は疎なものであった。実記録における解析結果を図1に示す。従来手法では過剰なすべりの平滑化やデータへの過剰適合など解に看過しがたいバイアスが生じ得ることが分かった。それに対して新手法を用いることで単純かつデータの再現性が高い妥当な解が得られる

ことを示した。また各手法で推定された解の不確定性に関する情報からは、手法に起因して解に生じるバイアスを評価することは困難であることも示した。当該研究に関しては学会発表を行うとともに（久保ほか，2017，JpGU；Kubo et al.，2019，AGU）、国際誌 Geophysical Journal International へ投稿し、受理・掲載された（Kubo et al.，2022，GJI）。

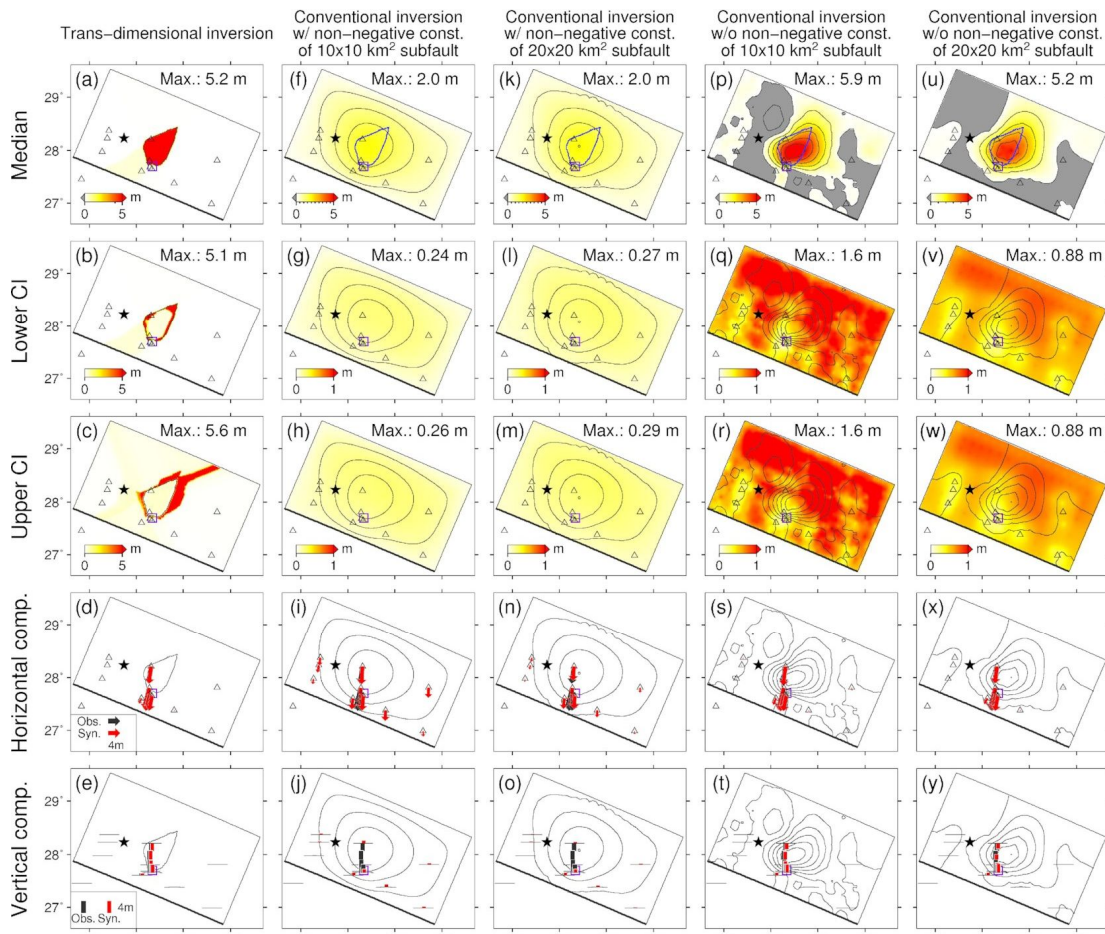


図 1：2015 年ネパール Gorkha 地震における地殻変動記録に、新たに開発したトランスディメンジョナルインバージョンに基づく静的すべり分布推定手法および既往手法を適用した結果。左からトランスディメンジョナルインバージョン、10km 四方のサブフォルトを用いた非負の拘束条件付きの既往手法、20km 四方のサブフォルトを用いた非負の拘束条件付きの既往手法、10km 四方のサブフォルトを用いた非負の拘束条件無しの既往手法、20km 四方のサブフォルトを用いた非負の拘束条件無しの既往手法による解析結果を示す。上から、すべりの中央値の空間分布、すべりの lower credible interval の空間分布、すべりの upper credible interval の空間分布、水平地殻変動の合い具合、鉛直地殻変動の合い具合を示す。星は 2015 年 Gorkha 地震の震央位置を表す。紫四角はネパールの首都カトマンズを示す。

4 - 2 .

4 - 1 で開発した解析プログラムを基に、プレート間固着分布推定にトランスディメンジョナルインバージョンを適用した新たな解析プログラムを開発した。その上で、南海トラフ沿いのプレート間固着分布の推定を目的に、南海トラフ沿いの陸域および海域で観測された地殻変動記録に対し、同手法を適用した。新手法の有用性を検証するとともに、従来の研究と比較することで断層面の離散化および規格化に起因する理論誤差が解へ与える影響を調べた。当該研究に関しては学会発表を行った（久保ほか，2018，JpGU）。

4 - 3 .

強震波形などの地震波形記録を用いた時空間すべり分布推定へのトランスディメンジョナルインバージョンの適用を行った。そして開発したアルゴリズムを 2016 年鳥取県中部地震における実記録の実データに適用し、その解析結果を国際会議にて発表した。当該研究に関しては学会発表を行った（Kubo et al. 2020，AGU）。

4 - 4 .

2011 年東北地震直後に発生した 2 大プレート境界型余震である 2011 年岩手県沖地震と 2011

年茨城県沖地震に関してフルベジアンアプローチによる震源過程解析を行い、それらを含めて岩手県沖・茨城県沖で発生している通常の地震の破壊域とスロー地震の活動域を空間的に比較した研究を行った(図2)。その結果、岩手県沖および茨城県沖で発生したプレート境界型大地震の地震時の破壊領域はスロー地震の活動域とは重なっていないことが分かった。また大地震の前震や余震の多くがスロー地震の活動域で発生していることから、地震時に破壊される領域と隣接するスロー地震の活動域で、前震や余震を伴った非地震性すべりが生じているケースがよくあることが示唆された。さらに2011年岩手沖地震と周辺で過去に発生した二つのM7級地震(1960年・1989年)は、同じアスペリティで地震時の断層破壊が生じていた、多くの余震を伴った余効すべりがスロー地震の活動域で起きていた、という共通の断層破壊特性を持つことが分かった。茨城県沖のプレート境界には海山が沈み込んでいることが分かっているが、その領域と微動の活動域が重なっていることから、この海山が「ソフト」バリアとして働くことで2011年茨城県沖地震の地震時破壊が止まったと考えられる。通常のプレート境界型地震とスロー地震の空間的な関係が岩手沖・茨城県沖で共通するという本研究の結果は、日本海溝沿いで将来発生しうる大地震を今後考えていく上で有用な情報であると考えられる。当該研究に関しては学会発表を行うとともに(久保・西川, 2019, 地震学会; Kubo and Nishikawa, 2021, IASPEI)研究成果をまとめた上で国際誌へ投稿し、受理・掲載された(Kubo et al., 2020, Sci. Rep.)。

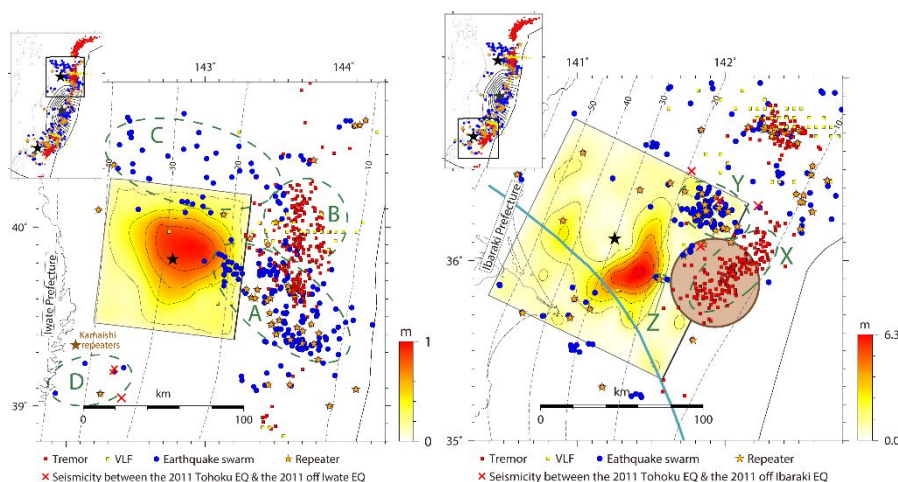


図2:(左)2011年岩手県沖地震および(右)2011年茨城県沖地震の地震時破壊領域とスロー地震活動の活動域との比較。赤い色の場所ほど地震時に大きなすべりが生じた(地震波エネルギーを強く放出した)ことを意味する。黒色の星は各地震の破壊開始点を示す。またスロー地震およびそれに関連する地震現象として、赤色の丸で微動を、黄色の四角で超低周波地震を、青色の丸で群発地震を、オレンジの星で繰り返し地震を表す。それぞれの領域において特徴的なスロー地震の活動を緑破線の丸で示している。赤色のバツ印は2011年東北地震とそれぞれの地震までの間に発生した地震を表す。灰色の破線はプレート境界の深さ(10 kmごと)を表す。右図の茶色の領域は沈み込む海山が推定されている場所を示す。

4 5 .

地殻変動記録を用いた静的すべり分布推定において規格化がどのように解に影響を与えるかを調べるために、スパースモデリングの考え方にに基づき、L2 ノルムではなくL1 ノルムを規格化に用いた新たな震源過程解析手法を開発した。そして同手法を2015年Gorkha地震の実記録に適用することにより、規格化におけるノルムの種類および規格化対象の違いが解に与える影響を調べた。当該研究に関しては学会発表を行った(久保ほか, 2017, 地震学会)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kubo Hisahiko, Nishikawa Tomoaki	4. 巻 10
2. 論文標題 Relationship of preseismic, coseismic, and postseismic fault ruptures of two large interplate aftershocks of the 2011 Tohoku earthquake with slow-earthquake activity	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 12044
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-020-68692-x	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kubo Hisahiko, Asano Kimiyuki, Iwata Tomotaka, Aoi Shin	4. 巻 125
2. 論文標題 Along Dip Variation in Seismic Radiation of the 2011 Ibaraki Oki, Japan, Earthquake (M _w 7.9) Inferred Using a Multiple Period Band Source Inversion Approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Geophysical Research: Solid Earth	6. 最初と最後の頁 e2020JB019936
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1029/2020JB019936	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Kubo, H. and W. Suzuki
2. 発表標題 Development of the spatiotemporal trans-dimensional source inversion
3. 学会等名 アメリカ地球物理学連合2020年大会（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kubo, H.
2. 発表標題 Application of trans-dimensional inversion to source-process estimation using geodetic data
3. 学会等名 アメリカ地球物理学連合2019年大会（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保久彦, 西川友章
2. 発表標題 日本海溝沿いにおけるプレート境界型大地震の破壊領域とスロー地震活動の空間的な関係: 2011年東北地震の二大余震を例として
3. 学会等名 日本地震学会2019年度秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久保久彦・野田朱美
2. 発表標題 南海トラフ沿いのすべり欠損推定へのトランスディメンジョナルインバージョンの適用
3. 学会等名 日本地球惑星連合2018年度連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 久保久彦, 鈴木亘, 野田朱美, 青井真
2. 発表標題 地殻変動記録を用いたトランスディメンジョナル震源インバージョンの開発
3. 学会等名 日本地球惑星連合2017年度連合大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 久保久彦, 鈴木亘, 野田朱美, 青井真
2. 発表標題 Bayesian Lasso震源インバージョンの開発
3. 学会等名 日本地震学会2017年度秋季大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

2011年東北地震の二大プレート境界型余震における断層破壊とスロー地震活動の関係に関する研究
https://quaketm.bosai.go.jp/~hkubo/publications/Kubo_and_Nishikawa_2020_SR/

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------