

別紙 4

報告番号	※	第	号
------	---	---	---

主 論 文 の 要 旨

論文題目 遠地実体波を用いた巨大地震震源過程解析におけるフルウェーブフォームグリーン関数の重要性

(Importance of full-waveform Green's functions for great earthquake source process analysis using teleseismic body waves)

氏 名 吉本 昌弘

論 文 内 容 の 要 旨

地震発生メカニズムを理解する上で、地震時の断層すべりの時空間分布（震源過程）を明らかにすることは重要である。1990年代から米国地震学連合(Incorporated Research Institutions for Seismology: IRIS)によってインターネットを介して世界の主要な広帯域地震観測記録が公開されたことによって、遠地実体波を用いた震源過程解析は準リアルタイムで行われるようになり、発災時の災害対応に情報提供ができるようになってきた。遠地実体波解析では、波線理論によって計算されたグリーン関数を用いることが一般的である。震央距離が 30° から 100° の観測記録は、理論的に扱いにくい複雑な反射波（triplicated P 波）や外核からの反射波・回折波などが到達せず、解析に用いる観測波形はシンプルになる。そのため、直達 P 波と震源近傍の反射波（pP 波や sP 波など）について、幾何学的な減衰とマンツルの非弾性減衰を考慮するだけで理論波形を計算することができる。少ない計算量で良い近似解が得られるので非常に良く用いられている。しかしながら、波線理論によるグリーン関数は超巨大地震の解析に対しては2つの大きな問題がある。1つは波線理論では PP 波を正確に計算することができないという点である。超巨大地震は断層破壊継続時間が長いため、解析に用いるデータ内に直達 P 波、pP、sP 波だけでなく PP 波などの振幅の大きい後続波が含まれることがあるためそれらを考慮したグリーン関数が必要である。もう1つは波線理論では超巨大地震などで明瞭に観測される超長周期の W phase を全く計算できないという点である。W phase とは P 波と S 波の間に現れる周期 100 から 1,000 秒の長周期の波を指す。従ってグリーン関数で計算できない後続波や W phase を断層すべりに押しつけて説明しようとするため、震源過程を正確に求めることができない可能性がある。

そこで本研究では、波線理論のような近似を行わず、運動方程式を厳密に解くことにより解となる波動場を計算する Direct Solution Method (DSM)を用いてグリーン関数を計

算し波形インバージョンを行う新たな超巨大地震解析手法を提案した。DSM は無限小波長近似などを用いずに、弱形式化された運動方程式を直接解くことで理論波形を高精度かつ効率的に計算する手法である(Geller and Ohminato, 1994)。球対称構造ならば 2Hz 程度まで広帯域地震波形記録を正確に計算できるが、これを短周期成分も含む震源過程解析に活用した研究はまだない。

そこでまず DSM と波線理論によって計算されたグリーン関数を用いて 2007 年ソロモン諸島の地震(Mw8.1)と 2011 年東北沖の地震(Mw7.3)の震源過程解析を行い、震源過程解析における DSM で計算されたグリーン関数の有用性とデメリットの影響の検証を行った。その結果、DSM は 1 Hz より長い波を用いた震源過程解析に適用可能であること、2007 年ソロモン諸島の地震 (Mw8.1)のように W phase の振幅が大きい地震の場合は、波線理論によるグリーン関数を用いると W phase の影響により地震モーメントが過小評価され誤ったすべり分布を推定してしまうこと、DSM は波線理論に比べ海の多重反射が計算できないというデメリットがあるが、海の多重反射は解析結果にほとんど影響しないことがわかった。

次にこの手法を用いて、超巨大地震である 2004 年スマトラ島沖地震(Mw9.1)と 2010 年チリ地震(Mw8.8)の震源過程解析を行った。

2004 年スマトラ島沖地震は破壊継続時間が約 500 秒と長いため、従来の波線理論によるグリーン関数を用いた遠地実体波解析からは破壊の全体像が明らかにされていなかった。本研究では従来と同様に短周期成分も含む遠地実体波観測波形を用いて、沈み込むプレート境界に沿った現実的な断層モデルを仮定し、DSM で計算したグリーン関数を用いて震源過程解析を行った。その結果、スマトラ北西沖浅部では最大 29 m 程度の大すべり域が推定された。これまで、地震波形解析から求められたすべり量が津波解析から求められたすべり量より小さいことから、二次的なすべりによる津波増幅などの議論がなされていたが、本研究の結果は津波解析結果と量的にも位置的にもほぼ一致する。このことから通常の地震すべりが海溝付近まですべることで地震と津波の両者を統一的に説明できることがわかった。また、この領域で行われた海底地震観測によって得られた詳細な余震分布によるとプレート境界の余震はこのすべり域深部側で発生しており、余震は大すべり域周辺で発生するというこれまでに指摘されている余震の発生パターンと整合的なすべり分布であった。一方スマトラの北側のニコバルでは浅部と深部の両方がすべるという結果が得られた。本震後にニコバル諸島沖で発生した沈み込むプレートの断裂帯で発生した巨大な横ずれ断層型の地震(Mw7.2, Mw7.5)が本震すべりによって引き起こされる正のクーロン応力変化によるものだとすると、本研究のようにニコバルで浅部がすべらなくては説明できない。ニコバルの北側のアンダマンでは最大 6 m とやや大きくすべるが、その破壊はニコバルでのすべりから 80 秒ほど後れて開始したこともわかった。また各すべりセグメントの境界はトモグラフィーで得られた沈み込むスラブ物性の不均質とおおよそ対応する。本研究で得られたすべり分布から地殻変動を計算すると、スマトラ北西沖やアンダマン諸島付近は GPS 観測記録の水平変動や上下変動を大きさや方向とも概ね説明するが、ニコバルでは GPS 観測記録よりも明らかに変動量が小さくなっていることから、ニコバルでは余効すべりが大きかったことが示唆される。

2010 年チリ地震では、2004 年スマトラ島沖地震ほど破壊継続時間が長くはなかったため従来の波線理論を用いる震源過程解析がなされている。2010 年チリ地震についても DSM で計算されたグリーン関数を用いた波形インバージョンを行った。解析から、

震源の北側と南側で海溝付近まですべるという結果が得られた。この結果は先行研究の結果とおおよそは一致するが、震源より南側のすべりは先行研究よりも南に求められている。一方で地殻変動データや津波データを用いた先行研究のすべり分布がやや陸寄りに求められており、本研究のすべり分布とは傾斜方向の位置に食い違いがある。この海溝付近のすべりを検証するために、海溝付近のすべりに最も解像度があると考えられる津波波形データを用いたインバージョンを行った。津波グリーン関数は固体地球の弾性と海水の圧縮性、地球の自己重力の効果を考慮し、解析には太平洋全域の海底水圧記録を使用した。得られた結果は DSM で計算されたグリーン関数を用いた地震波の解析結果とほぼ調和的であることから、震源の北側と南側で海溝付近まですべったことが明らかになった。

次に、波線理論によるグリーン関数が 2010 年チリ地震の震源過程解析においてどの程度妥当かを調べるために、同一の断層モデル、速度構造モデルを仮定して波線理論で計算されたグリーン関数を用いたインバージョンを行った。その結果、震源時間関数後半部でモーメント解放が小さくなってしまおうという結果が得られた。そこで地震波を用いた先行研究が行っている PP 波への様々な対処方法や W phase が解析結果へもたらす影響を調べるために、DSM によって計算されたグリーン関数を用いて解析した結果のすべり分布をすべりモデル、計算された理論波形を観測波形として与えて、波線理論で計算されたグリーン関数を用いて PP 波の処理の違いでどの程度与えたすべりモデルを復元するかという検証を行った。その結果、PP 波が到達したところで観測波形をカットして解析を行った場合が他の処理に比べて復元にやや改善が見られたが、PP 波の処理の違いよりも波線理論のグリーン関数計算で W phase の計算ができないことが解析結果に大きな違いを生じていることがわかった。このことは波線理論で計算されたグリーン関数では W phase を含むこの地震の正確な解析結果を得ることができないことを示している。

DSM は厳密に波動場を計算できる一方で計算時間がかかってしまうため、地震発生後の一次的な震源過程の情報供給のために地震発生後即座に解析結果を出すことは現在ではまだ現実的ではない。そこでどういう条件であれば波線理論によるグリーン関数でも巨大地震の解析である程度正確な情報が出せるか定性的な考察をした。巨大地震の震源過程解析に影響する可能性があるものは PP 波と W phase である。PP 波については観測点がどの方位にも存在する場合には、なるべく遠方の PP 波の影響がない観測点の観測波形を用いるようにし、破壊伝播方向も加味した上で解析に必要なデータ長に PP 波が到達するようであればそこで観測波形をカットして解析に用いることにより影響を軽減することができることがわかった。一方 W phase については、波線理論では計算することができないので、観測波形で W phase の振幅が目立つ観測点は避けるべきである。ただしどうしても解析に用いる観測点分布の関係からそのような観測点を使用しなければならない場合には、長周

期成分の影響が少ない速度波形を用いた波形インバージョンを検討することが必要であろう。以上本研究によって、W phase が遠地実体波を用いた震源過程解析の結果に大きな影響を与えることがわかった。そのため M9 クラスの超巨大地震だけでなく M8 クラスの巨大地震程度でも W phase が顕著に観測される地震に対しては、従来行われていた波線理論に基づいて計算されたグリーン関数を用いた解析では正しく震源過程を求めることができず、本研究で示したような PP 波や W phase などの後続波も含むグリーン関数を用いることが必要であることが明らかになった。