

ポスター会場（2日目） | 一般セッション：S01. 地震の理論・解析法

2020年10月30日(金) 16:00 ~ 17:30 | 全P会場

S01P

16:00 ~ 17:30

[S01P-01] 地震波干渉法と局所外れ値確率を用いた火山における地震波速度変化および散乱特性変化の異常検知

○廣瀬 郁¹、上田 英樹¹、藤田 英輔¹ (1.防災科学技術研究所)

16:00 ~ 17:30

[S01P-02] 地震波干渉法を用いたマントル不連続面での反射P波の検出に向けて

○加藤 翔太¹、西田 究¹ (1.東京大学地震研究所)

16:00 ~ 17:30

[S01P-03] 速度変化のスペクトル解析に基づく地殻浅部における地震波速度変化の潮汐応答推定の試み

○高野 智也¹、西田 究¹ (1.東京大学地震研究所)

16:00 ~ 17:30

[S01P-04] 指数関数型スペクトルを持つランダム媒質におけるP波走時の揺らぎ
- 3次元地震波伝播シミュレーションによる評価 -

○吉本 和生¹、武村 俊介² (1.横浜市立大学、2.東京大学地震研究所)

16:00 ~ 17:30

[S01P-05] 変位成分と歪み成分での合成波形記録の比較：震源放射特性と地表面での入射角依存性

○蓬田 清¹、伊藤 俊哉² (1.北海道大学大学院理学研究院地球惑星科学部門・地球惑星ダイナミクス分野、2.北海道大学理学部地球惑星科学科)

16:00 ~ 17:30

[S01P-06] 最短経路法を用いた異方性トモグラフィ手法の開発

○関口 渉次¹ (1.防災科学技術研究所)

地震波干渉法と局所外れ値確率を用いた火山における地震波速度変化および散乱特性変化の異常検知

Anomaly detection of seismic velocity and scattering property changes at volcanoes using seismic interferometry and local outlier probability

*廣瀬 郁¹、上田 英樹¹、藤田 英輔¹

*Takashi Hirose¹, Hideki Ueda¹, Eisuke Fujita¹

1. 防災科学技術研究所

1. NIED

はじめに

近年、地震波干渉法に基づき、雑微動の相互相関関数（CCF）の位相変化や波形変化から大地震や火山活動に伴う地下の地震波速度変化や地震波散乱特性変化を検出する研究が多く行われている。いくつかの火山では、噴火や活動の活発化に10日から数日先行する地震波速度変化や散乱特性変化が検出されており[例えば、Obermann et al., 2013a; Olivier et al., 2018; Machacca-Puma et al., 2019], 地震波干渉法が火山モニタリングにおいて有効な手法であることを示す事例が蓄積されつつある。地震波干渉法による解析結果を火山噴火の切迫度評価に活用するにあたっては、地下構造の変化自体を検出することに加え、検出された変化がどの程度異常な値であるかを評価することが必要である。そこで本研究では、地震波干渉法に基づき推定した地震波速度変化と散乱特性変化の異常度を定量的に評価する方法を提案する。

データ・解析方法

地震波干渉法を阿蘇山、霧島山において適用する。まず、気象庁および防災科研の短周期地震計で記録された雑微動の上下動成分に0.2-8 Hzでスペクトルホワイトニングを適用したうえでone-bit normalizationを行う。次に、10分ごとに雑微動のCCFを計算し、それらを1日分スタックすることでDaily CCFを得る。そして、Daily CCFとReference CCF（Daily CCFを数ヶ月～1年間スタックしたもの）に0.5-1 Hzの周波数帯でバンドパスフィルターをかけ、速度変化率とデコリレーション（1-相関係数）をストレッチング法[Lobkis and Weaver, 2003]により測定する。雑微動のCCFにおいてレイリー波が卓越しているとする、得られる速度変化とデコリレーションは、概ね深さ1 km以浅での構造変化を反映している。最後に、Krieger et al. [2009]により提案された局所外れ値確率（Local Outlier Probability, LoOP）を用い、1日ごとの地震波速度変化率とデコリレーションの測定値に対して、それらが異常データである確率を計算する。

結果

1. 阿蘇山におけるLoOPの時間変化

2015年から2016年の2年間にわたり、速度変化率とデコリレーションを測定し、LoOPを計算した。まず、2016年4月に発生した熊本地震に伴う数%の速度低下と顕著なデコリレーションを反映したLoOPの増加を検出した。地震発生後のLoOPはほとんどの観測点で90%を超えており、地震の影響で阿蘇山直下の地下構造が大きく変化したことを示唆している。また、2016年10月8日に発生した爆発的噴火に伴う0.5%程度の速度低下と顕著なデコリレーションを反映したLoOPの増加を検出した。すべての観測点において、噴火の2-3日前にLoOPが70%を超えるまで急激に増加していることから、噴火に先行して地下構造が大きく変化していた可能性がある。

2. 霧島山におけるLoOPの時間変化

2017年から2019年の3年間にわたり、速度変化率とデコリレーションのLoOPを計算した。解析期間中の2017年10月11日には、新燃岳において6年ぶりの噴火が発生した。また、2018年3月6日には2011年以来の爆発的噴火が発生した。これら2つの噴火に伴い、最大2%程度の速度低下と顕著なデコリレーションが検出さ

れた。この変化を反映し、噴火に先行するLoOPの急激な増加が検出されたが、2つの噴火でLoOPが増加するタイミングが異なった。2017年噴火ではLoOPが70%を超えたのは噴火の1日前であったが、2018年噴火では4-5日前にLoOPが70%を超えていた。2018年爆発的噴火の場合、噴火の5日ほど前から、小規模な噴火の発生や火山ガス放出量の急増が観測されており[気象庁, 2018], 爆発的噴火に先行するLoOPの急増も噴火前の活動の活発化と関連している可能性がある。

まとめ

本研究では、地震波干渉法に基づき測定した速度変化率とデコリレーションの局所外れ値確率（LoOP）を計算し、阿蘇山と霧島山において、地震や噴火に伴うLoOPの増加を検出した。LoOPは常に0-100%の範囲の値をとるため異常の程度を把握しやすく、噴火の切迫度評価において使いやすい指標であると考えられる。今後は、草津白根山や御嶽山といった近年噴火が発生した火山を中心に他の火山でも同様の解析を行い、事例の蓄積を進めていく予定である。

謝辞：本研究では気象庁短周期地震計のデータを使用させていただきました。記して感謝いたします。

地震波干渉法を用いたマントル不連続面での反射P波の検出に向けて Towards the detection of the mantle-reflected P wave using seismic interferometry

*加藤 翔太¹、西田 究¹

*Shota Kato¹, Kiwamu Nishida¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, the university of Tokyo

地震波干渉法は2観測点で観測されたランダムな波動場の相互相関関数を計算することにより、片方を仮想的な震源とし、もう片方を観測点とした場合の観測波形(グリーン関数)を推定する手法である(e.g. Snieder et al., 2013)。地震波干渉法では、地震波動場がランダムかつその強度分布が等方・均質であることを仮定する。ランダムな波動場として海洋波浪起源の脈動を解析に用いる場合には、周期5-20 sの帯域で表面波が卓越することが知られている。そのため、脈動を利用した地震波干渉法による地震波速度構造推定の研究では、地殻・上部マントルの3次元構造の推定が主であった(e.g., Shapiro et al., 2005)。しかし、近年では、実体波を抽出することによってより深部の構造を推定することが試みられている。その一例として、マントルの410/660 km不連続面からの反射P波(P410P/P660P)の抽出が報告されている(Poli et al., 2012; Feng et al., 2017)。しかし、これらの反射P波を抽出した先行研究の対象地域は大陸に限られていた。本研究の目的は、防災科学技術研究所Hi-netの上下動記録に地震波干渉法を適用することによりP410P/P660Pを抽出し、反射P波の抽出における波源の空間分布の影響を調べることである。

本研究では以下の手順で各観測点ペアに対する相互相関関数を計算した。用いた波形記録は防災科学技術研究所Hi-net観測点のうち西南日本に存在する240点の上下動記録(2007年-2018年)である。まず、Hi-netの上下動記録を2 Hzにダウンサンプリングした。その上で各観測点について翌日の観測波形との差を計算して元の観測波形の代わりに用いた(Takagi et al., 2020)。これは、Hi-netの機器ノイズ(Takagi et al., 2015)の相互相関関数への影響を抑えるためである。次に、得られた1日長の波形を1024 sの時間窓に分割し、周期5-10 sおよび10-20 sの平均2乗振幅によって時間窓を選択した。選択した時間窓について周波数領域で白色化を行い、周期1-10 sの成分について全観測点ペアの相互相関関数を計算した。

脈動源分布のグリーン関数抽出への影響を調べるため、4-th root vespagramを全観測点ペアに対する相互相関関数について計算した(Rost and Thomas 2002)。その結果、P410Pがオフセット距離0-300 kmで見られ、P660Pはオフセット距離50-100 kmで見られた。また、P660PはP410Pに比べて弱いことがわかった。次にvespagramの方位角依存性を調べるため、観測点ペアを方位角により6グループに分けて各グループのvespagramを計算した。観測点ペアの方位角が0-30°、90-120°、150-180°のグループではvespagram上でP410Pが確認された。

この結果を遠地の脈動P波のスローネス分布(Nishida and Takagi, IASPEI, 2017)と比較した。観測点ペアの方位角が0-30°と150-180°のグループのP410Pはそれぞれ北大西洋や南極海の脈動源によると考えられる。しかし、観測点ペアの方位角が90-120°のグループのP410Pには対応する脈動源がなく、深部での散乱の可能性を示唆している。

地震による影響を評価するために、地震活動が活発な日のみに注目して、相互相関関数の計算を行った。手法は地震($M_w > 6.5$)の起きた461日を用いる点を除き、脈動の相互相関関数の計算手法と同一である。得られた相互相関関数は脈動の相互相関関数と類似しており、この手法では地震の寄与は脈動の寄与に比べて小さい事がわかった。今後はコーダ波部分の相互相関関数を計算し、脈動の相互相関関数との比較を行う予定である。

最後に、得られた反射P波を不連続面の深度に変換するため、Common Middle Point (CMP)重合を行った (e.g., Stein and Wysession, 2003)。具体的には、オフセット距離が500 km以内の各観測点ペアについて反射点の位置でグループ分けを行い、各グループに対して不連続面が水平と仮定しCMP重合を行った。速度構造はJMA2001(上野ほか、2002)を用いた。CMP重合の結果は水平方向に連続的な410 km不連続面と断片的な660 km不連続面を示した。しかし、太平洋プレートに起因する明確な反射波は検出できなかった。

謝辞：本研究では防災科学技術研究所のHi-netの上下動記録を用いました。記して感謝いたします。

速度変化のスペクトル解析に基づく地殻浅部における地震波速度変化の潮汐応答推定の試み

An attempt to estimate tidal response of seismic velocity variations in shallow crust based on spectral analysis

*高野 智也¹、西田 究¹

*Tomoya Takano¹, Kiwamu Nishida¹

1. 東京大学地震研究所

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

地震波速度の時間変化を調べることで、地殻構造における応力状態をモニタリングできる可能性がある。観測された地震波速度変化から媒質の応力変化を推定するためには、応力変化に対してどのくらい速度変化が生じるのか求める必要がある。これまで、応力変化のみによる速度変化を調べるために、人工震源 [e.g. Yamamura et al., 2003] や地震波干渉法 [e.g. Takano et al., 2014] を用いて、既知の入力である地球潮汐に伴う地震波速度変化の検出が行われてきた。特に、雑微動の相関解析に基づく地震波干渉法を利用することで、場所や時間によらずに地震波速度変化の応力感度を推定できるようになった。しかしながら、先行研究では限られた場所と期間における観測結果しか報告されておらず、速度変化の応力感度の地域性や時間変化等の議論はまだ行われていない。そこで、本研究ではHi-net観測データを利用して、速度変化のスペクトル解析に基づき潮汐に伴う地震波速度変化の検出を試みる。

防災科学技術研究所のHi-net観測網において、東北地方に位置する180観測点で2010年から2011年までに記録された連続記録を解析する。日周・半日周変動をする地球潮汐に伴う地震波速度変化を推定するためには、半日以下の時間分解能で速度変化を推定する必要がある。そこで本研究では、同一観測点において雑微動の自己相関関数（ZZ, EE, NN成分）と異なる成分間の相関関数（ZE, ZN, EN, EZ, NZ, NE成分）を利用して1時間ごとに速度変化を推定する。それぞれの成分でリファレンス波形との時間差を経過時間ごとに計算し、経過時間に対する9成分で求めた時間差の平均値から速度変化を求めた。ここで、速度変化の推定には相関関数の経過時間2から12秒までを用いた。地殻浅部における速度変化の潮汐応答を調べるために、本研究では周波数帯域1-4Hzと3-7Hzを解析した。1時間ごとに得られた地震波速度変化を用いて速度変化のパワースペクトルを計算した。

全観測点でスタックした地震波速度変化のパワースペクトルには、1/7 cycles per dayとその倍数にピーク、また整数のcycles per dayに顕著なピークが見られた。これらは、ノイズ源の週変化や日変化による見かけの速度変化と考えられる。また、振幅の大きい分潮に対応した速度変化のピークが僅かながら見られた。日変化や週変化の影響を受けないN2分潮とM2分潮の周期での速度変化と、GOTIC2 [Matsumoto et al., 2001] により計算した各観測点での潮汐応力を用いて速度変化の応力感度を推定した。応力感度の上限値は $(8.7 \pm 0.3) \times 10^{-7} \text{ Pa}^{-1}$ と求められ、地表の観測で推定された応力感度値 [Yamamura et al., 2003, DeFazio et al., 1973] と調和的であった。この結果は、Hi-net地震観測網の連続記録から、速度変化の応力感度の時空間変化をモニタリングできる可能性を示唆している。

本研究では、防災科学技術研究所のHi-netのデータを使用させていただきました。記して感謝いたします。

指数関数型スペクトルを持つランダム媒質におけるP波走時の揺らぎ-3次元地震波伝播シミュレーションによる評価-

Travel time fluctuation of P waves in exponential-type random media: A study based on 3-D finite-difference simulations

*吉本 和生¹、武村 俊介²

*Kazuo Yoshimoto¹, Shunsuke Takemura²

1. 横浜市立大学、2. 東京大学地震研究所

1. Yokohama City University, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo

1. はじめに

近地地震の高周波数（約1 Hz以上）の地震波には、地殻構造の短波長不均質性（地震波速度の数%程度の揺らぎ）によって走時揺らぎが発生すると考えられている。この現象については、波形エンベロープの拡大に関する研究〔例えば、Sato and Emoto (2017)〕において、マルコフ近似理論に基づいて統計的にその特徴が評価されている。マルコフ近似理論の予測では、波形エンベロープの拡大を引き起こす走時揺らぎ効果

（wandering effect）の特徴的時間 t_w は、ランダム媒質の地震波速度の揺らぎの相関距離 a と揺らぎの大きさ ε 、および波動伝播距離 r の関数として求められる。本研究では、指数関数型スペクトルを持つランダム媒質を用いた3次元地震波伝播シミュレーションにより、P波走時の揺らぎの a 、 ε 、および r による変化を調べ、マルコフ近似理論から予測される特徴的時間の特徴 $t_w \propto a^{1/2} \varepsilon r^{1/2}$ と比較した。

2. 計算・解析手法

Takemura *et al.* (2017)と同様の空間4次・時間2次の3次元差分法によって、 $204.8 \times 204.8 \times 204.8 \text{ km}^3$ の計算領域を0.05 km間隔で離散化し、2.5 msのタイムステップで地震波伝播シミュレーションを実施した。同シミュレーションでは、計算領域の中心部に横ずれ断層を模擬したダブルカップル型点震源を配置した。震源時間関数には非対称cos型関数〔Ji *et al.* (2003); $t_s=0.1 \text{ s}$, $t_e=0.4 \text{ s}$ 〕を用いた。観測点は震源と同じ深さのx-y平面に格子状に2.5 km間隔で配置した。指数関数型スペクトルを持つランダム媒質として、1, 3, 5 kmと0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05の設定値を組み合わせた15種類のモデルをそれぞれ5つ合成した。Birch則を仮定し、背景のP波速度とS波速度をそれぞれ6.0 km/sと3.5 km/sとして、ランダム不均質を重畳することで不均質な地殻構造を模擬した。

解析では、震源距離60 km以内の約3000個の観測点の計算波形を対象として、P波の初動走時（以下、走時）を自動処理〔前田 (1985)〕により読み取った。このとき、走時の正確な読み取りを期するため、P波の震源輻射係数が0.5以上の方位角に位置する観測点の計算波形のみ使用した。また、四分位偏差をもとに数%程度の外れ値を除外して、走時揺らぎの標準偏差を求めた。

3. 結果・議論

いずれのランダム媒質についても、走時揺らぎは震源距離すなわち波動伝播距離とともに大きくなる特徴が確認された。具体的に、走時揺らぎの標準偏差は、震源距離50 kmの場合、西南日本の地殻のランダム不均質モデル〔Kobayashi *et al.* (2015); 相関距離1 km, 揺らぎの大きさ0.03〕では0.04 s程度であった。また、一定の震源距離における走時には、その平均値のまわりにほぼ対称的に分布する特徴が見られた。走時揺らぎの標準偏差を震源距離の1/2乗（ $r^{1/2}$ ）に対してプロットするとグラフ上で直線的に変化することが確認された。走時揺らぎとランダム媒質の関係には、走時揺らぎと a および ε との間に正の相関関係があることが確認された。すなわち、一定の震源距離における走時揺らぎは、相関距離や揺らぎの大きさが大きいランダム媒質ほど大きくなる。また、走時揺らぎの標準偏差については、 $a^{1/2}$ および ε に比例して増大する特徴が見られた。以上の解析結果は、本研究の3次元地震波伝播シミュレーションから求めたP波走時の揺らぎ（標準偏差）がマルコフ近似理論の予測 $t_w \propto a^{1/2} \varepsilon r^{1/2}$ に整合することを示すものであった。このことは、これまで波形エンベ

ロープの研究において注目されてきた特徴的時間 t_w が、地震波走時を解析対象とする地震学の他の研究分野においても有用であることを示唆している。

謝辞

地震波伝播シミュレーションには海洋研究開発機構の地球シミュレータを使用しました。本研究はJSPS科研費18K03786の助成を受けています。

変位成分と歪み成分での合成波形記録の比較：震源放射特性と地表面での入射角依存性

Comparison between strain and displacement seismograms for the radiation pattern of a double-couple source and the incident-angle dependency of plane waves on the surface

*蓬田 清¹、伊藤 俊哉²

*Kiyoshi Yomogida¹, Shunya Ito²

1. 北海道大学大学院理学研究院地球惑星科学部門・地球惑星ダイナミクス分野、2. 北海道大学理学部地球惑星科学科

1. Hokkaido University, Graduate School of Science, Earth and Planetary Dynamics, 2. Hokkaido University, Faculty of Science, Department of Earth and Planetary Sciences

光ファイバの不純物による散乱光を利用したDistributed Acoustic Sensing (DAS)は、従来の機械式地震計とは全く異なる観測原理・システムである。物理探査では既にこの革命が始まり（Hartog, 2017; Zhang, 2019）、地震学でも試験運用が急速に普及しつつある。従来の3成分の速度記録などと異なり、DASは光ファイバに沿っての歪み速度テンソル成分を計測する（螺旋状のファイバで、歪みの全成分を計測する技術も開発されつつある）。これまでの研究ではDASの歪み記録を従来の速度波形記録などへ変換する前処理を行ってきたが、大容量データの蓄積が今後見込まれる状況では非効率である。記録される歪み波形そのものの特徴を生かした解析により、震源や構造の研究を進めていく方が適当であろう。そこで本研究では、歪み成分での波形記録を合成し、従来の変位などの地震記録の特徴と比較することで、DASで得られる波形記録の特徴を考察する。ここでは、標準的な教科書で必ず取り上げられる断層運動（ダブルカップル点震源）の放射特性と、平面波の地表面入射における反射係数と地表面観測点での振幅を取り上げる。このような基本的な歪み成分での考察は、全く行われてこなかった。

ダブルカップル点震源のP波の変位の放射特性は全方位球を直交する2つの平面（節）で分ける4象限型である。歪みの対角成分（ e_{rr} などの伸縮成分）はこれと同じだが、歪み成分（非対角成分）は変位の放射特性の方位による変動が大きな節面で最大となるため、変位や対角成分の特性の節面と最大領域が入れ替わった形となる。一方、S波の変位はある点のみでゼロとなるが、歪みの場合にはP波のように節面が現れるので、震源過程の推定に有効となる可能性がある。

次に、2つのラメ定数が同じ半無限一様媒質において、平面波が入射した際の地表面での変位と歪み成分が入射角(θ)によってどう変化するかを考える（鉛直方向をz軸、進行する水平方向をx軸とする）。SH波の場合、変位は地表面で入射波の振幅の2倍と一定に対して、ゼロでない歪み成分である e_{xy} は $\sin(\theta)$ に比例、つまり鉛直入射ではゼロとなる。P波とSV波入射の結果については、図1と2に示す。変位では鉛直入射ではSH波と同じく2倍となり、入射角の増加とともに減少し、水平入射でゼロとなる。P波入射ではどの歪み成分でも、鉛直と水平入射のどちらもゼロで、斜め入射で最大値を取る。一方、SV波入射ではP波が水平方向に反射する臨界角で変位は鋭いピークを持つことは知られていたが、伸縮歪みは鉛直・水平の両成分でも類似の特徴を示す。歪みの水平成分は鉛直成分よりも卓越しているが、変位ほど大きな比ではない。また、臨界角より大きな角度では表面波的な伝搬となり、歪みの振幅はいったん小さくなるが、さらに入射角が大きくなると別の極大を取り、変位の特徴とは大きく異なる。地面に水平に設置したDASは水平伸縮の歪みを記録するので、入射角が小さい遠地地震ではP波もS波も小さく、ローカルの地震の方が強調されることが予想される。また、柔らかい堆積層がある場合、入射角が小さくなるので記録される振幅は小さくなる。また、臨界角より大きなSV波入射のように、表面波成分は強調されることも示唆される。

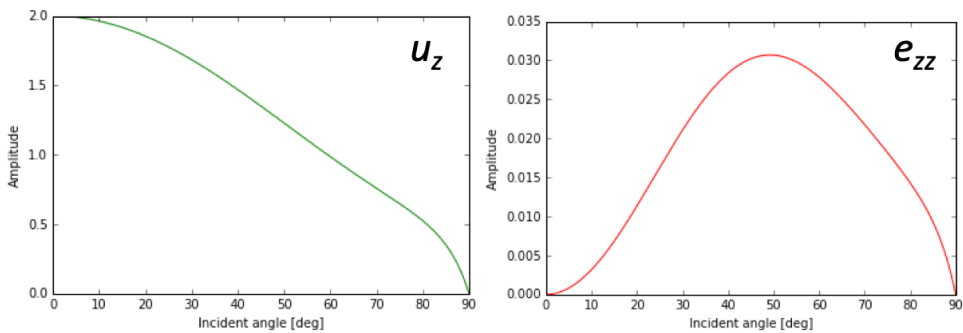


図 1 半無限均質媒質におけるP波入射による地表面での鉛直成分変位と鉛直伸縮歪み成分の入射角依存性

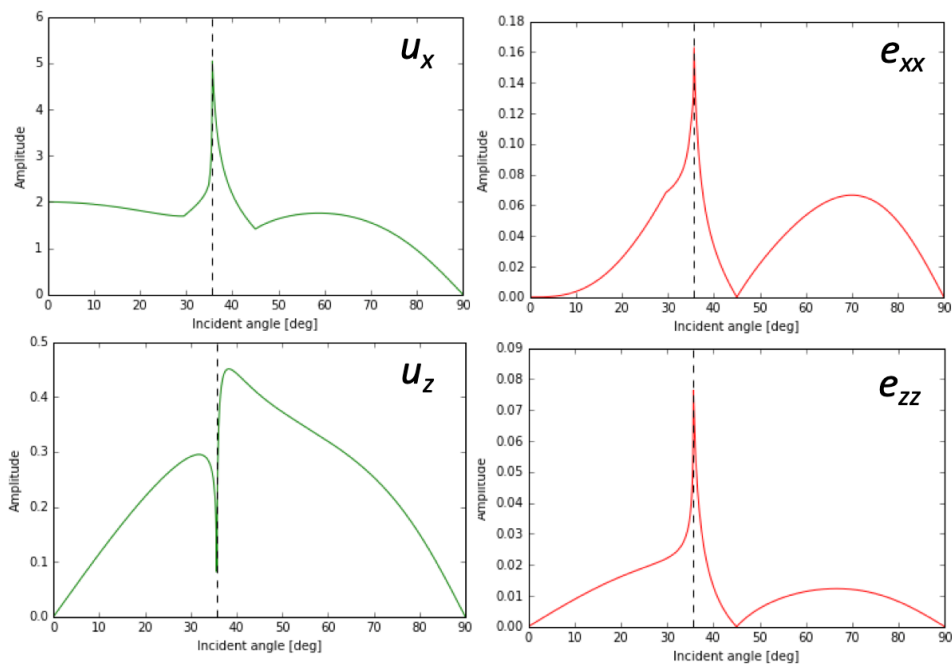


図 2 半無限均質媒質におけるSV波入射による地表面での変位 2 成分と歪み 2 成分の入射角依存性

最短経路法を用いた異方性トモグラフィ手法の開発

Development of anisotropic tomography method based on the shortest path method

*関口 渉次¹

*Shoji Sekiguchi¹

1. 防災科学技術研究所

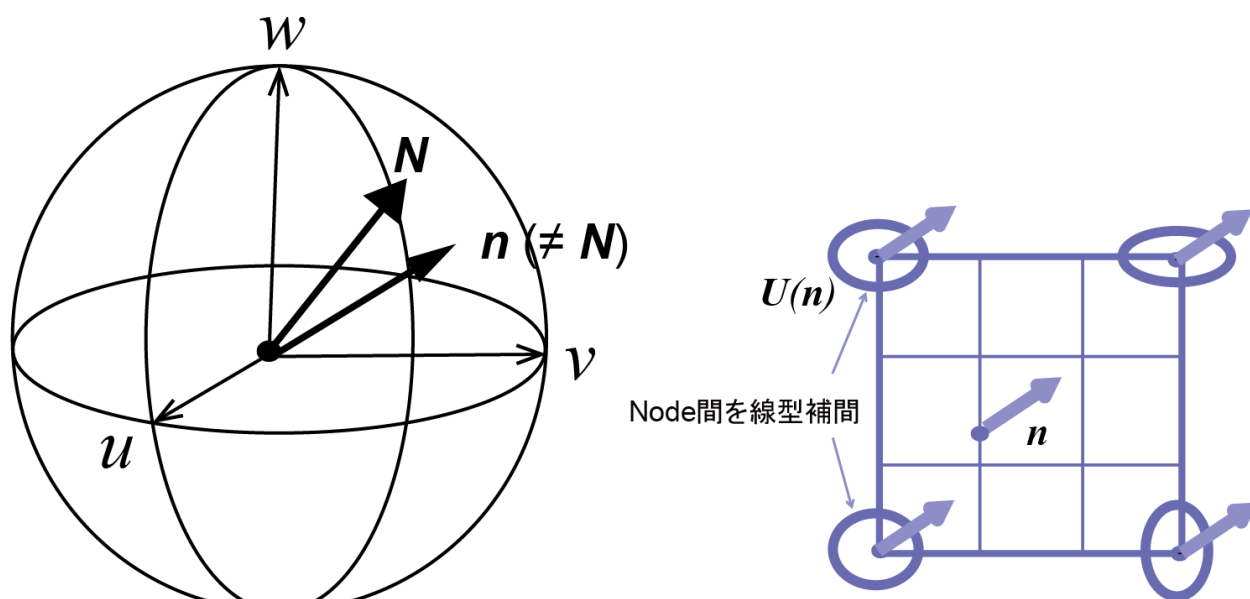
1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

走時トモグラフィにはまず波線の計算が必要となる。最短経路法を用いた異方性媒質での波線の計算は、各ノードにおいて群速度がわかれば容易に計算できる。ここでは、効率よく計算するために、各ノードで射出角を極座標としたグリッド上で群速度をあらかじめ計算しその内挿によって任意の射出角での群速度を求めることとした(図参照)。波線計算が可能なことは、PREMを異方性媒質として用い、すでに連合大会(2011)S-SS027-P01において示している。等方媒質との波線経路の差が非常に小さいことが報告されている。

異方性媒質での走時時間の変化量と弾性定数の変化量との関係式はZhou & Greenhalgh (2008) によってすでに求められている。したがって、理論的には、万遍なくいろいろな進行方向を持った波線が十分な数各ノード周辺を通過すれば走時データからトモグラフィによって異方性を求めることができる。

一般的には異方性は21個の独立した弾性定数によって表されるが、実際には、クラックや鉱物の結晶構造を反映したより少ない弾性定数をもった異方性媒質に関心が持たれ、その弾性定数と対称軸の方向を求めることが多い。本研究では、その場合での定式化を行った。すなわち、基準の対称軸をZ軸方向としそこから対称軸回りの回転 ϕ 、対称軸を緯度方向 θ 、経度方向 ϕ と回転させて異方性媒質を表現することにした。群速度を U とすると $\partial U / \partial m$ (m は弾性定数) はすでにZhou & Greenhalgh (2008)によって求められているので、 $\partial U / \partial \theta$ 、 $\partial U / \partial \phi$ 、 $\partial U / \partial \psi$ を導出すれば良い。煩雑になるのでここには示さないが、座標回転をするだけなので単純な計算で容易に求められる。azimuthal isotropyのような軸対称の場合は ϕ について変化がないのでこれを無視することが出来る。さらに対称軸が水平でその面内の方位だけが未知数の場合は、はじめの基準の対称軸をX軸方向として ϕ のみを未知数として残せば良い。

このように表現した異方性媒質がトモグラフィによって復元できるか、いくつか単純な場合を設定して計算してみた。たとえば対象軸方向 $\theta=30^\circ$ $\phi=0^\circ$ を持ったazimuthal isotropyで最短経路法によって得た計算値を観測値として使い、初期対称軸方向を $\theta=0^\circ$ $\phi=0^\circ$ とし軸方向が元に戻るか、などである。個々の未知数についてはまだばらつきがあるが、何回か繰り返すにしたがって全体としては収束する方向に変化していることが確認できた。今後はさらに複雑な条件で確認し、また各種パラメータの調整を進めてゆく予定である。



1. $U(N) \rightarrow U(n)$ at each node,

2. linear interpolation between nodes.

where U : group velocity vector, N : phase velocity direction

and n : ray (group velocity) direction ($= U \wedge U$).