

地震波自動処理への深層学習の適用と
それによる有馬高槻断層帯深部の地震波反射体の研究

加藤 慎也

1. 序論

内陸地震発生と流体の関係について、これまで多くの議論が行われてきた。脆性領域の断層帯に流体が存在すると、有効法線応力が低下し、断層強度が低下すると考えられている。一方、下部地殻の延性せん断帯に存在する流体も地震発生に影響を与えると考えられている。日本の内陸において、新潟から神戸にかけて、新潟神戸歪集中帯と呼ばれる周囲よりも歪速度が速い領域があることが知られている。新潟神戸歪集中帯の成因を説明するモデルとしてプレート内の Weak zone における内部変形であるという考え方がある。このモデルにおいては、脆性領域の断層の深部延長である延性せん断帯に流体が存在すると、その部分が低粘性になり、非地震性すべりを起こすことで脆性領域の断層帯に変形が集中し、その変形が弾性変形の場合には応力集中が生じると考えられている。沈み込み帯の近傍に存在するひずみ集中帯のモデルにおいては、下部地殻における延性せん断帯に流体が存在していることが重要であると考えられている。

新潟神戸歪集中帯の一部を構成する近畿地方中北部には有馬型熱水と呼ばれる深部由来の流体が地表で湧出している。有馬型熱水は、化学分析よりフィリピン海プレートから脱水した流体であり、マグマを生じさせずマントルと下部地殻を通過し、地表まで到達していると考えられている。しかし、日本の内陸では intact な下部地殻は不透水層であり、有馬型熱水が intact な下部地殻を移動するためには断層帯の延性せん断帯のような割れ目を含んだ構造が必要であると考えられる。また、有馬型熱水は有馬高槻断層帯の地表トレースに沿って湧出することから、有馬高槻断層帯の延性せん断帯を通路として下部地殻を移動している可能性がある。しかし、これまで延性せん断帯を地震学的な手法でイメージングした例はなく、延性せん断帯に流体が存在しているかどうかは地震学的には明らかになっていない。

有馬型熱水が湧出する近畿地方中北部の下部地殻には顕著な reflector の存在が先行研究によって推定されている。先行研究では、reflector の最深端が発生に流体の関与が考えられている深部低周波地震の震源域と対応していることから、reflector と流体の関係が考えられていた。しかし、先行研究では、reflector の鉛直方向の構造や実体が明らかになっておらず、reflector の分布自体も明らかになっていない可能性があった。

本研究では、稠密地震観測網(満点観測網)と定常観測網によって得られた大量のデータを使用して、S波反射法解析を行い、reflector の水平方向の分布を推定した。鉛直方向の構造は、reflector に対して深部から入射する遠地地震の地震波を用いたレーザ関数イメージング解析を行い推定した。それらの推定結果から、reflector と深部低周波地震や有馬高槻断層帯との関係を検討し、近畿

地方中北部の地表で湧出する深部由来の流体である有馬型熱水が、不透水層と考えられる近畿地方中北部の下部地殻をなぜ移動できるのかと近畿地方中北部の大きな歪速度の成因についての考察を行った。

2. 深層学習を用いた地震カタログの作成

先行研究では、近畿地方中北部の下部地殻に存在する reflector の真の最浅端と西端が、地震発生頻度が低くなる領域に対応しており推定できていない可能性があった。先行研究が用いたデータセットよりも長期間のデータを使用することで reflector の最浅端と西端を押さえることができる可能性があると考え、3成分 250 Hz サンプリングの満点観測網と 3成分 100 Hz サンプリングの定常観測網によって得られた 2009 年から 2013 年のデータに、同じ観測網によって得られた 2015 年から 2019 年のデータを追加した。2009 年から 2013 年のデータは人間が走時を読み取っているのに対して、2015 年から 2019 年の満点観測網と定常観測網によって得られたデータ量は膨大であり、人間による走時読み取り作業がほとんど行われていなかったため、深層学習を用いた地震波自動処理パッケージを開発した。開発した地震波自動処理パッケージは、観測された波形から走時読み取り、地震検出(Phase association)、P 波初動の極性判定、震源決定を自動で行い地震カタログを作成する。地震波自動処理パッケージにおける走時読み取りと極性判定は、深層学習を用いて決定される。

深層学習モデルには、どのようにデータが解釈され結果が出力されるかがわからないというブラックボックス問題がある。そこで、本研究で開発した 3 成分走時読み取りモデルに Attention 構造を導入し、モデルがデータのどこを重要視しているかが人間にもわかるようにした。

また、本研究で開発した極性判定モデルは P 波初動の走時と極性を同時に決定するマルチタスクモデルとなっている。先行研究における極性判定モデルは、P 波走時を別の手法で決定し、極性を深層学習モデルによって決定するというアプローチを採用していた。しかし、人間が極性を決定するときには走時と極性を独立して決定しているわけではなく、走時と極性を関連させて両者を決定している。そこで、本研究で開発した極性判定モデルは、走時と極性を同時に決定するアプローチを採用し、人間と同じ決定プロセスになるようにした。

作成した走時読み取りモデルや極性判定モデルは、人間と同等の精度で走時と極性を決定できることが確認できた。走時読み取りモデルにおいては先行研究によって高性能とされているモデル(EQtransformer)よりも人間と近い走時決定が行えていることが確認できた。

作成した走時読み取り用モデルにサンプリング周波数依存性がある可能性や成分依存性の確認も行った。その結果、時間分解能の差や地震計の固有周波数に由来すると考えられるサンプリング周波数依存性がある可能性が示唆された。そのため、サンプリング周波数ごとにモデルを作成することによって読み取り性能が向上する可能性がある。成分依存性については、3 成分波形を学習に使用したモデルにおいて確認された。その原因としては、モデルは、P 波の決定に UD 波形だけではな

く NS,EW 波形からも、S 波の決定には NS,EW 波形だけではなく UD 波形からも特徴を得ていることが考えられる。このことから、0.1 満点観測網で得られた 1 成分(UD 成分)波形を精度よく走時読み取りを行うためには、UD 成分だけで P 波走時の特徴を学習したモデルを用意する必要があることがわかった。

深層学習モデルを用いた走時読み取りや極性判定では、モデルの出力確率値の閾値を設定し閾値を超えた波形だけを震源決定や初動解の推定に使用するのが一般的であるが、本研究では出力確率の閾値を変えた場合に地震検出数、震源決定誤差や極性判定の精度の比較を行なった。走時読み取りモデルの出力確率の閾値については、低い方が地震の検出数が向上し、規模が小さい地震の検知能力が向上することが明らかになった。これは、閾値を低くすると、走時の読み取り数は増加する一方で読み誤りも増えるが、Phase association により、多くの走時の候補から地震として説明できる走時のみを選び出し、震源決定に使用できるためと考えられる。また、極性判定モデルでは、極性と走時の出力確率に対する変化を同時に見ることにより、走時の閾値が 1.0 近くの場合は、極性の閾値が小さい場合にも極性判定精度が高いことなどがわかった。

開発した地震波自動処理パッケージで地震カタログを作成した結果、従来の STA/LTA や AR-AIC などを用いた従来の自動処理パッケージ(Horiuchi program)よりも規模が小さい地震に対する検出能力が向上し、地震検出数が増加することも明らかになった。また、作成したモデルによる 47 観測点で得られた 10 日間の連続波形データの走時読み取りは、CPU に Intel(R) Core i9-10980XE を使用し 35 スレッドで並列計算を行うことで、24 時間程度で完了でき、人間よりもはるかに高速に読み取りができることが確認された。

3. 近畿地方中北部における下部地殻の地震学的な構造

Reflector の空間分布や実体を明らかにする上で、先行研究の問題点を以下のアプローチで解決した S 波反射法解析を行なった。reflector と深部低周波地震との関係を議論する上で両者の位置関係が重要であるが、先行研究では、reflector の推定に使用した地震波速度構造と深部低周波地震の震源決定に使用した地震波速度構造が異なり、また、reflector の傾斜を考慮しておらず、見かけ上の位置に reflector をイメージングしている問題があった。そこで本研究では、S 波反射法解析に深部低周波地震の震源決定に使用された一次元速度構造である JMA2001 を使用した。そして、傾斜した reflector による見かけ上に位置にイメージングされてしまう問題に対して、Diffraction summation migration を行った。これらにより、reflector と深部低周波地震の位置関係の議論をする上での問題が解決された。

先行研究が行なった S 波反射法解析では反射波ではない振幅や低振幅の反射波もグリッドに割り当てて平均値を求めることで、最終的にグリッドの値が小さくなり、reflector として識別されない可能性があった。そこで、本研究では異常度を用いた統計手法による反射波の選別や深層学習を用

いた反射波の走時読み取りにより、反射波だけを S 波反射法解析に使用した。観測された波形 1633916 個から、異常度を用いた統計手法の選別により反射波が含まれていると選別された波形は 182264 個であった。そこからさらに、反射波走時読み取りモデルによって反射波の走時が読み取れた波形は 146396 個となった。異常度を用いた統計手法と深層学習モデルによって、大量のデータから反射波が含まれる波形の選別が行え、反射波走時の決定が自動で行えた。

S 波反射法解析で推定できることは、主に、地震波速度構造が周囲と異なる reflector の水平方向の分布であり、reflector の鉛直方向の構造の推定は困難であった。さらに、先行研究では、reflector は流体の存在を表していると考えたが、反射波の発生要因が高速度異常によるものなのか低速度異常によるものなのかは不明であった。そこで、S 波反射法解析に加え、reflector に対して深部から入射する遠地地震の地震波を用いたレーザ関数イメージング解析を行い、reflector の鉛直方向の構造とレーザ関数の振幅から reflector が高速度異常によるものなのか低速度異常によるものなのかを推定した。

深層学習を用いた地震波自動処理パッケージを活用することで、解析に用いることができる地震波数が 2 倍以上に増えた S 波反射法解析から reflector は有馬高槻断層帯の傾斜方向にのみ存在しており、その最深端は深部低周波地震の震源域と対応していると推定された。さらに、レーザ関数イメージング解析から、深さ方向の幅が約 5 km 以下の地震波低速度の薄い層であることが推定された。Reflector の最深端で深部低周波地震が発生していること、reflector が地震波低速度の薄い層であり深部低周波地震の震源域から拡がるように分布し、有馬高槻断層帯の傾斜方向にのみ分布するという推定結果と、有馬高槻断層帯付近の地表において地球深部由来の流体が湧出していることから、有馬高槻断層帯の下部地殻への深部延長部である延性せん断帯がモホ面まで到達しており、沈み込んだフィリピン海プレートから脱水した流体が、上部マントルから下部地殻へ流入するときに深部低周波地震が生じ、延性せん断帯を移動経路として地表まで到達していると考えた。つまり、reflector は延性せん断帯内の流体分布を示していると結論づけた。これより、reflector は地表で湧出する深部由来の流体である有馬型熱水の移動経路を示している可能性がある。

4. 結論と今後の展望

本研究では、開発した深層学習を用いた地震波自動処理パッケージによって作成した 2015 年から 2019 年の近畿地方中北部の地震カタログと、人間によって走時読み取りが行われた 2009 年から 2013 年の地震カタログを用いて S 波反射法解析を行い、近畿地方中北部の下部地殻に存在する reflector の詳細な水平方向の分布を推定した。さらに、レーザ関数イメージング解析を行い、reflector の鉛直方向の構造の推定を行なった。

解析結果から、延性せん断帯内の流体分布が reflector としてイメージングされていると結論づけた。これより、有馬型熱水が、通常では不透水層と考えられる近畿地方中北部の下部地殻をなぜ移

動できるのかという問題への答えとして、有馬高槻断層帯の延性せん断帯が移動経路となっている可能性を示すことができた。

本研究の結論である reflector は延性せん断帯内に分布する流体によるという考えは、新潟神戸歪集中帯の成因を説明する下部地殻における延性せん断帯が流体によって低粘性になり非地震性滑りを起こすというモデルと整合的である。そのため、有馬高槻断層帯の延性せん断帯内に流体が存在することで、そこが低粘性になり非地震性滑りを起こすことで、上部地殻の有馬高槻断層帯に沿って最大せん断歪が大きくなっている可能性が考えられる。しかし、本研究で推定された reflector が有馬高槻断層帯の延性せん断帯の形状を反映しているとする、推定されている形状で東西圧縮ひずみを生み出せるかどうかは自明ではない。そのため、今後、本研究で推定された有馬高槻断層帯の深部の延性せん断帯に、流体によると考えられる低粘性領域を設定したシミュレーションを行うことで定量的に検証する必要がある。

近畿地方中北部の満点観測網は 2009 年から 2022 年まで設置されており、観測点間隔約 5 km の稠密地震観測網である。本研究で作成した自動処理パッケージを用いて、観測された全ての地震データを解析に使用できるようになれば、観測点間隔約 20 km の定常観測網を用いた地震波トモグラフィ解析よりも高分解能な地震波トモグラフィ解析が可能になると考えられる。これにより、レーバ関数イメージング解析では地震波低速度であるという結果しか得られなかった reflector の物性に関して、 V_p/V_s などからより定量的な検証が可能になるかもしれない。