

(続紙 1)

京都大学	博士 (理学)	氏名	加藤慎也
論文題目	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		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、深層学習を用いて高性能の地震波自動処理プログラムを開発するとともに、開発したプログラムを活用して、有馬高槻断層帯深部の地震波反射体の実体を高精度・高分解能で明らかにしたものである。</p> <p>近年、深層学習の地震波自動処理への適用が盛んに行われ、開発されたプログラムには人間と同程度の処理能力を持つものがあることが報告されている。しかしながら、深層学習を用いたモデルは一般的にブラックボックスであり、モデルが地震波形のどのような特徴に着目して処理を行っているかはこれまで不明だった。また、公開されているプログラムには、P波到着時刻と極性を同時に決定するものは無かった。本研究では、既存のニューラルネットワークに、地震波形の特徴を抽出可能なblockを追加することにより、モデルが地震波形の特徴をどのようにとらえているかを可視化した。さらに、これらのblockにより抽出された地震波形の特徴を活用した処理を行うことにより、これまで開発されたプログラムの中でも特に高性能であると評価されているPhaseNetやEQ transformerよりも、人間の読み取り結果との走時の残差が小さく、正しく読み取ることが出来ている割合が高いなど、性能の高いプログラムを開発することに成功した。</p> <p>有馬高槻断層帯の北方の下部地殻内に、地震波反射体が存在することが知られている。これまでも、満点計画による稠密な地震観測網の波形データを活用して、反射体のイメージングが行われ、深部低周波地震の震源域を下端とするような北落ちの反射体が推定されていた。しかしながら、既存研究では、単純な速度構造や一定傾斜の反射体を仮定していること、浅部のイメージングにおいて直達S波の影響を除き切れていないことなどの問題があった。そこで、本研究では、新たに開発した深層学習のプログラムを用いることで、満点計画の地震データの中で、未処理で震源決定も行われていなかったデータを解析に利用することを可能にした。さらに、開発した走時読み取りプログラムをFine TuningしてS波の反射波を読み取るモデルを作成することにより、約14万個という大量の反射波を解析に用いることを可能とした。また、深部低周波地震の震源決定に用いられている速度構造を解析に用いること、および、マイグレーション処理により反射体の傾斜を補正することで、反射体の上面の位置を精度よく推定することに成功した。加えて、高周波帯域までのレシーバー関数解析を行うことにより、これまで不明だった反射体の鉛直方向の構造を推定し、反射体が厚さ5km以下の地震波低速度の薄い層であることを明らかにした。これらにより、反射体は深部低周波地震の震源域で最も深く、そこから浅部へ広がっていることが明確となった。さらに、反射体の南北の端の水平位置を押さえることにより、主たる反射体が、深部低周波地震の震源域から有馬高槻断層帯へ向かって、南上がりの扇形に広がるように分布していることが分かった。日本の下部地殻の温度圧力下では水は浸透では移動できないと考えられること、有馬型塩水がマントル起源であることなどから、反射体は、有馬高槻断層帯の深部の延性せん断帯の低速度異常域をイメージングしたものであると推定された。</p>			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、深層学習を用いて高性能の地震波の自動処理プログラムを開発するとともに、開発したプログラムを活用して、有馬高槻断層帯深部の地震波反射体の実体を高精度・高分解能で明らかにしたものである。深層学習を用いたプログラム開発においては、現在世界中で広く用いられ特に高性能であると評価されているPhase NetやEQ transformerよりも、処理性能が高いと考えられるものを開発したことは高く評価できる。また、これまで、深層学習は、一般的にはブラックボックスであり、その中でどのような判断や処理が行われているかはほとんど不明だった。本論文では、地震波形の特徴を抽出可能なblockを効果的に配置することにより、モデルが地震波形のどのような特徴に着目して処理を行っているかを可視化することに成功した。また、この地震波形の特徴を抽出する機能は、既存のニューラルネットワークに追加されて、上記の地震波形の処理性能の高性能化にも寄与している。反射波読み取りに深層学習を応用する試みは現時点では先行研究がほとんど見られず、その新規性とイメージング改善への大きな貢献が、高く評価できる。

開発した地震波自動処理プログラムを、データ量が膨大なためにこれまで未処理だった満点計画の地震データに適用することにより、解析に利用できる地震数を倍増させた。さらに、開発した走時読み取りプログラムを反射波の読み取りに活用して、人間の手動の処理では全く不可能な、約14万個もの反射波の走時を読み取ることに成功し、それらをもとに反射体の高精度かつ高分解能のイメージングを実現した。深層学習に関するこれらの成果は、地震波の解析の高度化へ貢献するとともに、深層学習の手法開発などにも関係する重要な成果であると評価できる。

地震波反射体の実体の解明においては、適切な速度構造と反射体の傾斜を考慮した解析により、これまで明確ではなかった、反射体の下端が深部低周波地震の震源域に対応することを確認した。さらに、レシーバー関数解析を行うことにより、これまで不明だった反射体の鉛直方向の構造を推定することに成功し、反射体が厚さ5 km以下の地震波低速度の薄い層であることを明らかにした。これまでの解析では、反射体が高速度異常体の上面である可能性も否定出来ず、本研究により、反射体の実体を明らかに出来た意義は大きい。また、深部低周波地震の震源域付近および有馬高槻断層帯付近においては、反射体の水平方向の端を限定することが出来たため、主たる反射体が、深部低周波地震の震源域から有馬高槻断層帯の北側まで広がっていることが明確となった。これらの得られた知見と既存の研究の結果と組み合わせることにより、反射体は有馬高槻断層帯の深部延長そのものである可能性が高いことも推定された。これらの成果は、内陸の断層帯の深部延長の実体や、それと深部から上昇してくる流体の関係についての重要な知見を提供するものである。内陸地震の発生過程の解明に資する確かな知見を提供しており、価値があるものと評価できる。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和4年12月5日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

なお本論文は京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

要旨公表可能日： 年 月 日以降