

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	AN Like
論文題目	An Integrated Relocation Workflow for Offshore Earthquake Sequences, with Applications to Italy and Japan (海域で発生する地震の高精度震源決定の手法の開発と適用ーイタリアと日本の海域地震への適用ー)		
(論文内容の要旨)			
The imaging of off-shore seismicity helps understand the corresponding seismogenic structures and develop better seismic hazard models. However, in many cases, the off-shore seismicity has poorly constrained location, due to an insufficient coverage with seismic stations. Despite progress made in the deployment of Ocean Bottom Seismometers (OBS), there are many off-shore areas in which OBS have not been installed yet; moreover, the OBS recordings are often noisier than the inland seismic recordings. Therefore, it is highly needed to develop earthquake location approaches that are able to characterize the off-shore seismicity using fewer seismic stations, with an unfavorable coverage of the off-shore seismogenic structures. The current study proposes a new location workflow to characterize the off-shore seismicity and applies it to two seismic sequences occurred recently in Italy and Japan. The workflow brings together three location methods that have been already developed in previous research. The first workflow step uses the travel-time stacking method to locate a few relatively large reference earthquakes that have been recorded at as many as possible seismic stations. The second step uses a depth-phase technique to improve the depth locations of the reference events, while the third step consists in the reconstruction of the whole earthquake cluster geometry using a differential travel-time method that employs only two seismic stations and uses the reference events previously located. The workflow includes a final step to validate the location results of each of the previous steps using various approaches, including data resampling and bootstrapping. The location workflow has been first applied to an offshore earthquake sequence occurred in 2022 in the northern Adriatic Sea region, Italy, located around 20 km away from the shoreline. Depth-phases have been used only to confirm the depth of the mainshock ($M_w5.5$). The workflow revealed an earthquake cluster geometry that is in general compatible with the data from an existing seismic reflection profile and focal mechanism solutions, although significant variations of the cluster geometry are noticed when different sets of reference events are used. Compared with the routine event locations, the location results obtained in this study show a sharper, well-defined earthquake cluster. The location workflow has been applied next to the far-offshore earthquake sequence occurred in 2023, in Hachijojima, Japan, around 150 km away from shoreline, following a $M_w5.7$ mainshock. The depth of the reference events has been improved using sP depth phases. The results revealed a northeast dipping earthquake cluster, consistent with one of the nodal planes of the focal mechanisms available for some of the larger events in the sequence. The selection of the reference events may sometimes introduce an artificial planar structure, so further future research is needed to address this issue. The study further discusses the space-time characteristics of the earthquake sequence, the aseismic processes that may have contributed to its occurrence, as well as possible triggering relationships in the region. The study includes procedures to estimate the errors of reference event locations, the identity of the depth-phases and the uncertainties of the reconstructed earthquake cluster. Overall, the proposed workflow is able to provide a reasonable first order approximation of the earthquake cluster geometry and information on the uncertainties associated with each of the location steps. The study also proposes possible future improvements of the location workflow.			

(続紙 2)

(論文審査の結果の要旨)

地震の震源の位置情報は、地震学における基礎的かつ最も重要なパラメータの一つであり、特に地震活動のモニタリングにおいて不可欠である。震源の位置決定の方法論は、現在も多く研究者が取り組む重要な課題である。特に地震観測点が震源の直上に存在せず、その配置が偏るケース、具体的には海域下で発生する地震では、震源位置の不確定性は陸域下の地震と比べて格段に大きい。本論文ではこのような海域下で発生する地震群に対して、適用可能な震源決定のワークフローが提案された。

本論文で提案されたワークフローは、震源決定を4つのステップに分けて進める。最初の3つのステップでは既存の手法を応用した震源決定を行う。3番目のステップでは、内陸の2つの観測所のみを使用して地震クラスターの幾何学的な特徴を決定する。最後のステップでは再サンプリング手法やブートストラップなどを使用してその結果について検証を行う。開発されたワークフローをイタリアと日本の近海で発生した2つの地震群に適用して、各ステップとワークフロー全体の有効性と限界が本論文で検証された。

1つ目のケーススタディとして、2022年にイタリア半島の東方約20km沖合、アドリア海北部で発生した地震活動が調査された。まず、比較的規模の大きな6つの地震を基準イベントとして選び出し、絶対位置を推定した。ワークフローの第3ステップでは、6つの基準イベントに対する個々の地震の相対位置を、わずか2つの地震観測点で得られた走時情報から求めた。推定された地震クラスターの全体的な形状は、多点の観測点で得られた走時記録から従来の手法により推定された結果と整合的な結果が得られた。さらに、depth phaseを用いて決定された本震の深さと本手法で得られたものと整合的であることが示された。本手法による震源決定の不確定性は数キロメートル程度と推定されたが、本論文の誤差評価手法を考慮すると、この値はやや過小評価である可能性がある。

2つ目のケーススタディとして、2023年に八丈島周辺で発生した地震活動を取り扱った。活動域は直近の地震観測点から約150kmの遠方に位置するため、通常の震源決定法では正確に活動域の広がり把握することが難しい。まず比較的規模の大きな5つ地震を基準イベントとして選び出し、sP depth phaseを用いてその深さ精度の向上に取り組んだ。いくつか想定されるdepth phaseのうち、sP波であることの検証として、モーメントテンソル解に基づく地震波の放射パターン解析も行なった。結果として1つ目のケーススタディと同様にわずか2つの観測点の走時情報から地震活動域の震源分布の幾何学的な特徴を捉えることができた。得られた震源分布は、気象庁の一元化震源と比べて有意に浅いことが示された。また、ETASモデルに基づく時空間解析により、この地震活動が群発型の特徴を持つことが示された。伊豆－小笠原弧における火山活動を考慮して、今回の群発地震活動を流体が関与したものと考察した。さらに静的応力変化の解析に基づき、本震が前震により誘発された可能性も示しており、同地域の地震発生メカニズムの理解に貢献する成果が得られており、学術的意義も大きい。

結論として、本論文で提案された震源決定ワークフローは、観測点が直上に存在せず、また観測点の分布が大きく偏るような厳しい条件下、例えば海底下で発生する地震群の震源分布を高精度で推定する有効な手法と言える。今後、本研究で提案された改良を進めることで、海底下に限らず、地震観測点が十分でない地域や時代の観測記録に対しても、本ワークフローの適用が期待できる。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7年3月31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。

要旨公表可能日： 年 月 日以降