

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：82102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2022

課題番号：19K04044

研究課題名(和文) アナログ地震計記録を利用した東海地域におけるスロー地震活動の解明

研究課題名(英文) Activity of slow earthquakes in the Tokai region based on analog seismograms

研究代表者

松澤 孝紀 (Matsuzawa, Takanori)

国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波火山ネットワークセンター・主任研究員

研究者番号：90500744

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：防災科研に保管されていた、関東東海地殻活動観測網のアナログ地震計記録をスキャンし、画像ファイル化した。最初に、目視により1980年代の愛知県東部の微動活動の状況を確認した。次に、この画像ファイルを用いて微動の位置を推定するため、デジタルデータを抽出するためのプログラム開発を行った。デジタル化には概ね成功したものの、地震波形以外の情報、とくにペンレコーダーによって付加されるタイムマークが含まれていた。このタイムマークの影響を除去するための手法開発を行い、得られたデジタルデータを解析することで、活発な微動活動の震源位置を推定することに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

南海トラフの沈み込み深部で発生するスロー地震は、21世紀に入ってから発見された現象であるため、それ以前の活動状況について明らかでない。とくに2000年代以前の微動については、連続のデジタル地震計記録が残されていることが少なく、活動状況は全く知られていない状況であった。防災科研に残されているアナログ記録を利用し、微動活動の状況を把握するための手法を開発し、その道筋をつけたことは大きな意義がある。また、同アナログ記録を一部ではあるが、デジタル化することで複製を保管することが可能になったことは、記録紙の劣化や廃棄等により、貴重なデータが失われることを防ぐ意味でも重要な意義がある。

研究成果の概要(英文)：We scanned analog seismograms which are stored in National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience. At first, the activity of tectonic tremor in the eastern Aichi region was visually confirmed using the scanned images and the paper recordings. To analyze tremor locations, we developed a program to extract digital seismic data from the image files. We successfully digitized waveforms on the paper recordings, while non-seismic information, especially time marks, is contaminated. Then, we developed the method to remove the effect of time marks which were added by ink recorders. We analyzed the obtained digital data, and successfully located an epicenter of active tremor.

研究分野：地震学

キーワード：スロー地震 微動 アナログ地震計記録 記録紙

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 2000年代に入り、防災科学技術研究所(以下、防災科研)が全国約800点で高感度地震観測網の運用を開始し、連続データが常時蓄積されるようになった。これにより、ノイズとみなされデジタル記録が保存されていなかった地震時以外の期間も解析可能となり、南海トラフでスロー地震の一種である微動(テクトニック微動あるいは低周波微動とも呼ばれる)が繰り返し発生していることが明らかとなった。その後、世界各地で同様の現象が相次いで確認され、研究が急速に進展した。南海トラフのプレート沈み込み域の深さ30km付近のスロー地震としては、微動、超低周波地震、短期的スロースリップイベント(以下、短期的SSE)の3種類が観測されている。これらの活発化は時空間的にほぼ同期しており、同一現象の様々な側面と解釈され、プレート境界のすべり状況を反映すると考えられている(文献)。一方、これらのスロー地震よりもやや浅い側のプレート境界では、長期的スロースリップイベント(以下、長期的SSE)が発生しており、とくに東海地域や豊後水道において、繰り返し発生が報告されている。スロー地震はプレート間地震で大すべりが予想される領域を囲むように分布しており、大地震発生との関係が指摘されている。

(2) 短期的SSEについては、過去の歪計記録から1980年代半ばからの活動履歴が研究されているが(文献)、観測点数が限られるため東海地方で発生したこと以上の位置情報は得られていない。降雨等の影響による検出能力の安定性も課題である。微動は高感度の短周期地震計で検出可能であり、それぞれ歪計・傾斜計や広帯域地震計を必要とする短期的SSEや超低周波地震の検出に比べ、降雨や遠地地震等の影響を受けにくく、安定して高い時空間解像度でスロー地震活動の状況を把握することができる。しかしながら、20世紀においてはまだ微動の存在が知られていなかったため解析結果はそもそも存在せず、連続データの重要性も認識されていなかった。このため、連続した地震波形記録が残されていない限り、過去の活動状況を知ることは不可能である。防災科研は、1970年代より関東・東海地域で稠密な地震観測網を展開しており、現在の微動発生領域付近の地震計の連続波形記録は1980年頃より紙媒体に残されている。なお、この記録は、1980、90年代の東海地域における微動活動状況を知る上で、研究代表者の知る限り現存する唯一の貴重な資料である。

(2) 数値シミュレーション研究においては、例えば大地震の発生から次に大地震が発生するまでの間(南海トラフでは100~200年程度)に、大地震発生領域への応力集中過程を反映して、スロー地震の発生間隔が徐々に短縮する可能性が、研究代表者らの数値シミュレーション結果(文献)で示されている。また、他のグループの研究(文献)では、地震サイクル後半に振幅が大きくなる可能性も指摘されている。こうしたシミュレーションから予測される長期間のスロー地震の発生挙動との比較を可能とするような、十分長い期間の微動カタログは存在せず、シミュレーションモデルの検証は難しい状況であった。

(3) 各国の地震学会が加盟する唯一の国際会議である国際地震学連合(IASPEI)の2017年総会では、アナログ地震計記録の保存と活用に関するセッションが開催され、現在の危機的状況とその打開にむけた議論がなされた。また同会議では総会決議の第一項目として、アナログ記録の保存を強くすすめることが採択された。本研究所においてもアナログ記録の活用や保管は問題となっていたが、世界的にも共通した課題となっている。

### 2. 研究の目的

(1) 本研究は、アナログ波形記録を利用して微動の検出および震源の決定を実現し、現在の観測網が整備される以前のスロー地震活動の状況を明らかにすることを目指す。前述のとおり1980年代半ばからの短期的SSEについては研究されているが、位置情報や安定性の問題があった。しかし本課題ではより小さな活動も安定して捉えることのできる微動を解析するため、時空間的に高い分解能と安定した網羅性のあるカタログにより、活動の解明が期待される。

(2) 得られた結果を、数値シミュレーションによる予測の検証・モデルの議論に用いることも目的の一つであった。南海トラフにおけるスロー地震は、大地震発生領域を取り囲むように発生しており、スロー地震域のすべりは大地震発生領域への応力集中過程を反映していると考えられている。研究代表者の数値シミュレーションでは大地震発生サイクル中に長期的なスロー地震発生挙動の変化を予想するものとなっており、モデルやパラメータの設定に拘束を与えることを通じて、大地震発生を何が特徴づけるのかという謎に迫る鍵ともなりうる。

(3) 背景で述べたように、国際的にアナログ記録の保存の推進が課題となっている。本課題では、アナログ記録の有用性を示すことも目的としており、過去の記録について新たな学術的意義を与えることで、記録保存の取り組みの加速が期待される。また、本課題によって記録がデジタル

化されることで、バックアップとして保管されることにより、アナログ記録全体のごく一部ではあるが、記録紙の劣化や廃棄等による貴重なデータの逸失を防ぐことも目的としている。

### 3. 研究の方法

(1) アナログ地震計データの記録紙の一部についてスキャンを実施し、画像ファイル化した(図1(a)).この作業は、専門業者に依頼して実施した。試験的な読み取りを実施し、微動波形の周波数特性をとらえた解析が十分可能となるよう、解像度 400dpi のグレースケールの画像ファイルで統一的に画像化することとした。

(2) アナログ波形記録について目視で活動状況の長期把握を試みた。現在の地震計のデータをもとに紙記録を再現し、それがどのように見えるかを参考にし、同様な現象が継続していること、遠地地震が多発している状況でないなどの複数条件を満たす場合を、微動活動期間として検出した。この解析においては、上述のスキャン済みデータと紙記録自体の目視を併用した。

(3) 画像データとなった記録を、デジタル波形データとして解析可能なように、波形データのデジタイズ手法の開発を行った。記録紙の傾きの補正については、当初一枚の紙全体について1パラメータを想定した開発を行っていたが、その後改良を進め、左右のブロック(図1)で異なる角度をもつ補正に対応するとともに、1トレース単位での微修正も可能なようにデジタイズを行い波形データの抽出を行った(図1(b))。

ただし、このデータは時間の目印としてペンレコーダー側で付与されるタイムマークを含むとともに、インクの染みや日付のスタンプ、用紙の両脇の穴なども波形データの一部として含んでいる場合がある。タイムマークについては後述の手法開発により影響の除去を行った。その他の地震波形以外の情報の混入については、元の画像データと比較しながら手動でこれを除去する作業を行った。

(4) 1秒および1分毎に入るタイムマークは、微動の震源決定に対して強いバイアスを与えるため、これを除去する手法を開発した。具体的には、タイムマークの形状をガウス関数およびガウス関数の立ち上がりをもつボックスカー形状の関数形でモデル化・フィッティングし、影響を除去した(図2)。

(5) 得られた波形を用いた震源決定を行った。具体的には、微動のシグナルが卓越する帯域(2-8Hz)のバンドパスフィルターを適用したのち、エンベロープ波形を計算し、深さを30kmに固定したエンベロープ相関法により微動の震源を決定した(図3)。

### 4. 研究成果

(1) 画像ファイルおよび紙記録の目視により、1980年4月から1990年までの愛知県東部の微動活動の概要を明らかにした(文献)。この結果においては、数値シミュレーションによって予測されているような長期的な繰り返し間隔の顕著な変化はみられなかった。なお同時期の東海地方においては、長期的SSEが1980-1982年および1988-1990年に発生したことが報告されているが、後者の期間については微動活動が頻繁に発生していることが見られた一方、前者の活動については、微動活動の活発化はとくに認められなかった。同様の事象は、2000年代以降のSSEにもみられており、2000-2005年の長期的SSEは後者に、2013-2016年の長期的SSEは前者に類似している。微動活動が活発であることは、長期的SSEのすべり域がより微動発生域に近いことを示しており、2000年以前においても長期的SSEはイベントごとにすべり位置が異なっていたことを示唆する。なおここでは微動発生域の

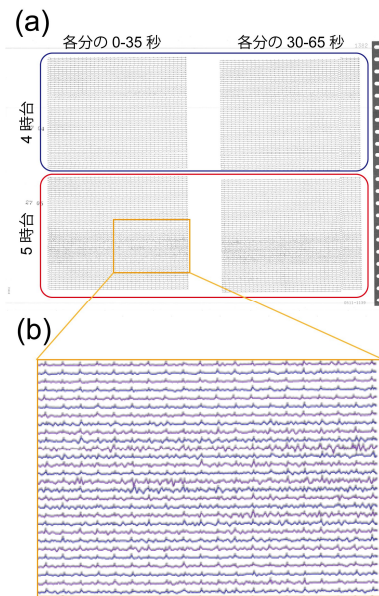


図1 (a)アナログ波形記録の例。左側および右側のブロックはそれぞれ各分の0秒~35秒、30秒~翌分5秒までの波形。1枚の記録紙には、1観測点の2時間分の地震計記録が収められている。(b)デジタイズ結果の例。スキャンした画像に(グレースケール)の上に、デジタイズして得た地震波形のデータを青線または紫線で重ね書きした。見やすさのため青と紫線を交互に使用している。松澤(2021,文献)に加筆。

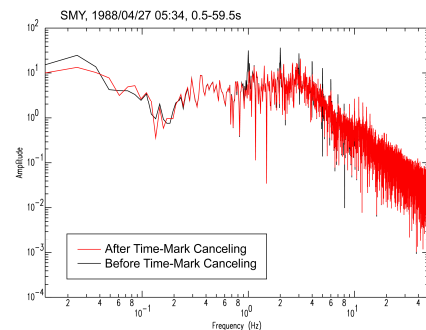


図2 得られた波形の周波数スペクトルの例。黒線および赤線は、それぞれタイムマークの補正前および補正後の波形に関して得られたスペクトル。

位置がほぼ変化していないことを前提として議論したが、この前提条件は以下(2)での震源決定結果と整合的なものとなっている。

この結果を数値モデルの観点から解釈すると、数値シミュレーションでみられていた、地震サイクル間における固着域の深部側の削剥は短期的 SSE や微動の発生にあまり影響を与えていない可能性が示唆される。一方で、短期的 SSE よりやや浅い側で発生する長期的 SSE は様々なすべり分布を示すことから、ある程度の複雑性をもつパラメータ分布をもち、かつこの領域が様々なすべりのパターンを許容できるほど十分大きい可能性も示唆する。

(2) 過去のアナログ地震計記録から微動の震源を推定することに成功した点(図3)は、独自性が極めて高い成果である(文献, )。現段階では、手法で述べた手動によるデジタイズ結果の修正が必要であることもあり、長期の結果が得られていない状況であるが、過去のスロー地震活動の時空間情報を高い解像度で推定することができた。得られたスロー地震の位置は現在の活動領域とほぼ同様であり、スペクトル波形についても特段差異はみられなかった。長期的な変化の特徴がやはり見られないことから、これは(1)で述べたすべり分布やパラメータ分布に関する推察を支持する結果といえる。また振幅についても現在の観測と同程度であり、とくに長期的な変化はみられなかった。

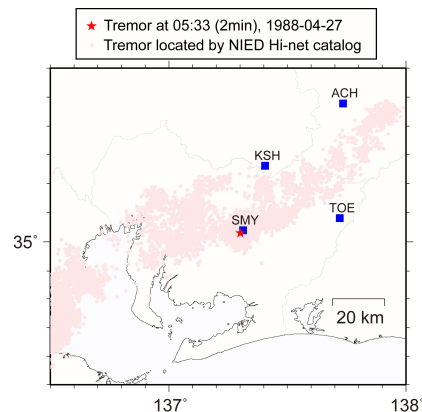


図3 アナログ地震波形記録を用いて推定された1988年4月27日5時33~34分台の微動源の位置の例(赤星印)。青四角は、震源決定に使用した観測点の位置を示す。薄赤色の丸は、防災科研 Hi-net によって推定された微動源の位置を示す。

(3) アナログ波形記録をほぼ自動でデジタイズする手法を開発できたことも、大きな成果である(文献, )。微動は数日以上にわたって継続するエピソード的な現象であるため、長期にわたるデータのデジタイズが重要となる。当初は、手動読み取りソフトウェアの利用も選択肢に入れていたものの、新型コロナウイルス感染症の流行により、紙記録自体へのアクセスや、手動のデジタイズを効率化するための作業環境が整った研究室の利用が流行前に比べて制約を受けるようになった。そのため、極力デジタイズを自動で処理できるようプログラム開発に取り組んだ。これによりスキャンしたすべての画像ファイルのデータに対し、基本的には自動処理を行うことができるようになり、労力が大幅に削減された。ただし、手法に述べたように、最終的には人間の目での修正など品質管理を行う必要性が残っている。これは今後の課題である。

(4) タイムマークの影響を除去する方法を開発したのも大きな成果(文献)である。当初は抽出されたトレースのエンベロープ波形を計算し十分なスムージングを行うことで、タイムマークを除去する予定であった。ただしこの手法では、震源決定においてタイムマークの影響を十分取り除くことができず、震源決定において大きなバイアスを生み出すため、十分な解析を行えなかった。そのため手法開発を行いタイムマークを除去することで、1-6Hz 帯域では1Hzの整数倍のピークが抑えられ、エンベロープ相関法による解析がうまく機能するようになった(図2)。加えて、タイムマークの除去が可能となったことで、微動以外の波形解析にもこのアナログデータを利用可能とする道が開けた点でも大きな意義がある。

ただし、この解析を通じて、記録紙上でのタイムマークの時間幅が一定でない場合があることも見つかった。これは紙送りの速度に揺らぎがあることに起因すると考えられる。さらに、タイムマークの形状の揺らぎについても検討の余地がある。こうした点は今後の課題である。

(5) アナログ記録の保存を推進するため、国内外の学会にて発表を行い、議論をする予定であったが、新型コロナウイルス感染症の流行によりオンライン発表が大半を占めたこともあり、十分な議論ができたとは言い難かった。しかしながら、2023年7月に開催される IUGG General Assembly での発表が口頭発表として採択され、本課題の成果を発表予定である(文献)。なお IUGG は前述の IASPEI を含む地球物理学分野の総合的な国際組織であり、地震以外の地球物理学分野の研究者への成果の波及も期待される。これにより、国際的な連携や情報交換、さらには共同研究への展開の端緒となることも期待される。一方、本課題の内容は、防災科研の統合レポートとしても取り上げられており(文献)、所内外でのアナログ記録の重要性も徐々に認識されつつある。加えて、防災科研成果報告会の一環として動画を公開するなど(文献)、研究者にとどまらない層にも本研究の取り組みを伝える努力も行った。

(6) 本課題の最終年度には ChatGPT が公開されるなど、現在、機械学習に代表される人工知能の性能向上が著しい状況である。本課題は機械学習を利用した研究に対しても大きな展開の可能性をもつ。

本課題の申請後に出版された論文(文献 )では、機械学習をアナログ記録に適用して通常の地震であるかを判別し、一定の成功を収めているものの、位置の決定を行うための地震波到達時刻の読み取りについては機械学習を利用しておらず、画像のピクセル情報に基づいた解析となっていた。また、課題最終年度に出版された論文(文献 )は、和歌山県のアナログ地震計記録について機械学習を適用し、微動の有無を判定するものであったが、やはり位置決定には至っていない。またペンの太さの問題など 課題が残る状況である。加えて両者に共通することとして、専門的な知識(いわゆる、ドメイン知識)が大量に必要となっている。

このように、アナログ地震計記録から震源とくに微動源を決定することにおいては、機械学習は未だ成功していない。これは教師あり学習においては教師データが不十分であること、教師なし学習を実施するにあたってはアナログ記録のデータが十分にデジタル化されていないことに起因すると考えられる。本課題はドメイン知識のみに基づいた画像解析から震源決定を成功させており、人間による解析結果として、今後機械学習を発展させていく上で、一種のベンチマークとなったともいえる。さらにこの研究を進めていくことで、教師データを蓄積していくことが可能となる。また、本課題ではアナログ記録利用の新たな学術的意義を提示しており、アナログ記録のデジタル画像化が加速していくならば、教師なし学習の面においても可能性が期待される。こうした点において、本課題は今後機械学習との関連によりさらに発展していく可能性をもっている。

一方で、本課題では画像データから地震波形をデジタイズする際に、インクの染み等の波形以外の情報が混入することが問題であった。長期のデータを効率的に解析するためには、こうした作業を自動化することが重要となる。将来的に、機械学習の導入によりこうした作業や品質管理を適切に行うことが可能となれば、容易に長期の微動カタログを得ることが可能になると期待される。

ここまで人工知能(機械学習)を用いた研究との連携の可能性について述べてきたが、人工知能を活用するにはデジタル化されたデータが必須である。また、過去の情報はアナログの形で未だ多く存在している。今後人工知能を交えた研究が発展し、研究活動の一部が技術により置き換えられる状況が到来するならば、本課題のようなアナログデータとデジタルをつなぐ取り組みは、人間の活動として一層意義をもつと考えられる。

#### <引用文献>

- Obara, K. & Kato, A. (2016), *Science*, **353**, 253-257, <https://doi.org/10.1126/science.aaf1512>.
- 小林昭夫ほか(2006), *地震* **2**, **59**, 19-27, <https://doi.org/10.4294/zisin.59.19>.
- Matsuzawa, T., et al. (2010), *J. Geophys. Res.*, **115**, B12301, <http://doi.org/10.1029/2010JB007566>.
- Ariyoshi, K. et al. (2009), *Gondwana Research*, **16**, 534-544, <https://doi.org/10.1016/j.gr.2009.03.006>.
- 松澤孝紀 (2021), *防災科研ニュース*, **214**, 12-13, <https://www.bosai.go.jp/information/news/index.html>.
- 松澤孝紀・武田哲也 (2019), *日本地震学会 2019 年度秋季大会*, S09-P05.
- Matsuzawa, T. & Takeda, T. (2019), *American Geophysical Union, 2019 Fall Meeting*, S53C-0515.
- Matsuzawa, T. & Takeda, T. (2020), *JpGU-AGU 2020 Joint Meeting*, SCG58-P23.
- 松澤孝紀・武田哲也 (2021), *日本地震学会 2021 年度秋季大会*, S09-P05.
- Matsuzawa, T. & Takeda, T. (2021), *American Geophysical Union, 2021 Fall Meeting*, S45E-0338.
- 松澤孝紀・武田哲也 (2023), *日本地球惑星科学連合 2023 年大会*, SCG45-20.
- Matsuzawa, T. & Takeda, T. (2023), *IUGG 2023 General Assembly*, IUGG23-2831. (発表予定)
- 防災科研 (2022), *総合レポート 2021*, <https://www.bosai.go.jp/introduction/report.html>
- 防災科研 (2023), *YouTube*, <https://www.youtube.com/watch?v=zTkTc3uDbmQ>.
- Wang et al. (2019), *Seismol. Res. Lett.*, **90**, 553-562, <https://doi.org/10.1785/0220180298>.
- Kaneko et al. (2023), *J. Geophys. Res.*, **128**, e2022JB024842, <https://doi.org/10.1029/2022JB024842>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 松澤孝紀・武田哲也
2. 発表標題 Trial tremor location using analog seismograms of the Kanto-Tokai Observation Network
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合 連合大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takanori MATSUZAWA, Tetsuya TAKEDA
2. 発表標題 Preliminary study of tectonic tremor location using analog seismograms on recording paper of the Kanto-Tokai Observation Network
3. 学会等名 IUGG 2023 General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 松澤孝紀・武田哲也
2. 発表標題 A trial automatic digitization of analog seismograms for the analysis of tectonic tremor in the Tokai region, Japan
3. 学会等名 American Geophysical Union, 2021 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松澤孝紀・武田哲也
2. 発表標題 微動解析に向けた関東東海地殻活動観測網アナログ地震計記録の自動デジタル化とスペクトル解析の試み
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 松澤孝紀・武田哲也
2. 発表標題 関東東海地殻活動観測網アナログ地震計記録の微動解析に向けた自動デジタル化の試み
3. 学会等名 日本地球惑星科学連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Takanori Matsuzawa, and Tetsuya Takeda
2. 発表標題 Trial detection of deep low frequency tremor using analog seismograms of Kanto-Tokai Observation Network in 1988-1990
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 松澤孝紀・武田哲也
2. 発表標題 関東東海地震観測網のアナログ波形記録による1980年代の愛知県東部の低周波微動活動検出の試み
3. 学会等名 日本地震学会秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Matsuzawa, T., and Takeda, T.
2. 発表標題 Slow earthquakes dating back to the era of recording paper -A trial detection of deep low frequency tremor in 1980s for a long-term catalog in the Tokai region, Japan-
3. 学会等名 American Geophysical Union, 2019 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	武田 哲也  (Takeda Tetsuya)  (80455253)	国立研究開発法人防災科学技術研究所・地震津波火山ネット ワークセンター・主任研究員   (82102)	画像ファイル化・解析への助言

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------