

# 位相的データ解析による地震の特徴抽出

直鳥 翔<sup>1</sup> 佐藤 好久<sup>2</sup>

**概要:** データ収集の方法が新たに開発され発展していくにつれて、データの収集量は急激に増加している。それによって日々収集される膨大なデータに対し、有用な解析の手法が求められている。位相的データ解析 (TDA) とは、データの「形」に着目したデータ解析の手法である。その最大の特徴は分布モデルを仮定しないことにあり、分布が分からないデータや、既存の分布に適切に当てはめることができないデータに対して、TDA は特に有用である。本研究では、4次元海溝型地震データを作成し、まずデータを時間ごとに分割して TDA を行い、その位相的特徴量に対応する元データを逆解析により探し求めることで、地震活動の規則性や変化の傾向が抽出可能かを検討した。次に、データを地域ごとに分割して同様の解析を行い、地域間および全体データとの Betti 数・Betti Curve の比較を通じて、地域特有の特徴が捉えられるかを検証した。

**キーワード:** 情報数学, データ構造

## Extraction of earthquake characteristics using topological data analysis

SHO NAOTORI<sup>1</sup> YOSHIHISA SATO<sup>2</sup>

**Abstract:** As new data collection methods are developed and refined, the volume of collected data is increasing dramatically. Consequently, there is a growing need for useful analytical techniques to handle the vast amounts of data collected daily. Topological Data Analysis (TDA) is a data analysis method that focuses on the “shape” of data. Its most significant feature is that it does not assume a distribution model. TDA is particularly useful for data where the distribution is unknown or cannot be appropriately fitted to existing distributions. In this study, we created four-dimensional trench-type earthquake data. First, we divided the data by time and performed TDA. By using inverse analysis to identify the original data corresponding to the topological features, we investigated whether patterns and trends in seismic activity could be extracted. Next, we divided the data by region and performed similar analyses. We verified whether region-specific characteristics could be captured by comparing the Betti number and Betti Curve between regions and with the overall data.

**Keywords:** Information Mathematics, Data Structures

### 1. はじめに

データ収集の方法が新たに開発され発展していくにつれて、データの収集量は急激に増加している。それによって日々収集される膨大なデータに対し、有用な解析の手法が求められている。位相的データ解析 (Topological Data Analysis) とは、データの「形」に着目したデータ解析の手法である。その最大の特徴は、分布モデルを仮定しないこ

とにあり、分布が分からないデータや、既存の分布に適切に当てはめることができないデータに対して、位相的データ解析 (以下 TDA) は特に有用である。本研究では、気象庁の「震度データベース」サイト [2] から取得した緯度、経度、深さ、マグニチュードの 4次元地震データに、地震学者である弘瀬冬樹氏の「プレート境界数値データ」[3] を適用し、4次元海溝型地震データを作成した。このデータに対して、まずデータを 10年ごとに分割して位相的データ解析 (TDA) を行い、その位相的特徴量に対応する元デー

<sup>1</sup> 九州工業大学 情報工学府 情報創成工学専攻

<sup>2</sup> 九州工業大学 情報工学研究院 知能情報工学研究系

データを逆解析により探し求めることで、地震活動の規則性や変化の傾向が抽出可能かを検討した。次に、データを地域ごとに分割して同様の解析を行い、地域間および全体データとの Betti 数・Betti Curve の比較を通じて、地域特有の特徴が捉えられるかを検証した。

地震は、特に日本に住んでいる私たちにとって非常に身近な災害である。日本付近での最大震度 5 弱を超える地震は、2024 年で 28 回、2025 年で 15 回も発生している。しかし、地震について分かっていることはさほど多くない。マグニチュード 8~9 が予測される南海トラフ地震においても、「今後 30 年以内に 60~90 % ほどの確率で起こる」と曖昧な予測しかできていないのが現状である。本研究が地震についての新たな知見に繋がり、地震予測や災害対策の一助となることを期待する。

## 2. パーシステンスダイアグラム

図 1 の左上のようなデータがあったとき、これらの点を中心とする球を考える。この球を徐々に大きくしていくと、球が重なり真ん中に穴ができる。このとき、これらの頂点をつないだ多角形をサイクルといい、このときの時刻  $t_1$  がサイクルの発生時刻 (Birth) を表す。さらに球を大きくしていくと、真ん中の穴が消滅する。穴が消滅する時刻  $t_2$  がサイクルの消滅時刻 (Death) を表す。

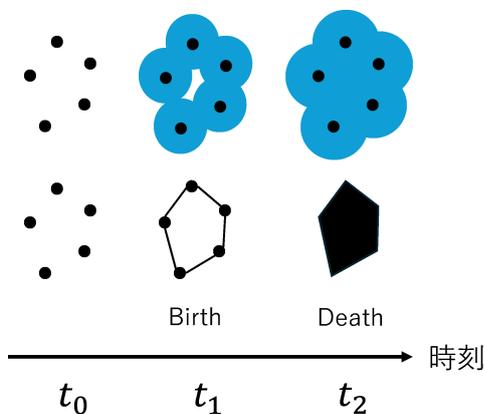


図 1 サイクルの発生と消滅

これらの (Birth, Death) についての集まりがパーシステンスダイアグラムである。このパーシステンスダイアグラムを基に Birth を横軸、Death を縦軸として、図 2 のように平面図にプロットしたものを、パーシステンス図という。また、消滅時刻から (Death) 発生時刻 (Birth) を引いたものを、サイクルの生存時間という。生存時間が長いほど、サイクル重要度の高いものになる。図 2 では、緑色の長さにあたる。

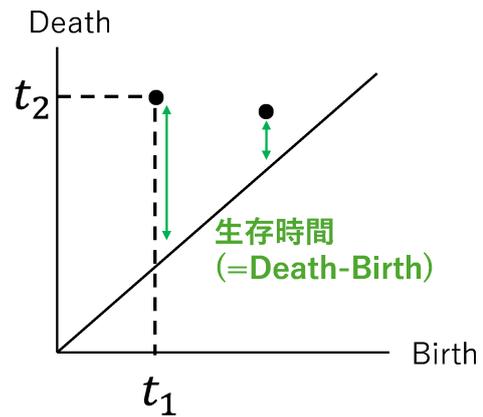


図 2 パーシステンス図

ある時刻におけるサイクルの数を Betti 数といい、この Betti 数の変化をグラフにしたものを Betti Curve という。図 3 のように、Betti Curve は横軸が時刻、縦軸が Betti 数を表す。図 3 は関東周辺の 1949 年~1958 年の海溝型地震から得られた 1 次元 Betti Curve である。

図 3 を見ると、時刻 0 のとき 1 次元 Betti 数が 0 であるが、時刻が進むにつれて、Betti 数が増えていき、その後 Betti 数が減っていくのが分かる。これは、初めはサイクルが存在しない状態であったが、時間が経過するにつれて、どんどん 1 次元サイクルが出来上がり、さらに時間が経つと 1 次元サイクルが消滅していくことを表している。

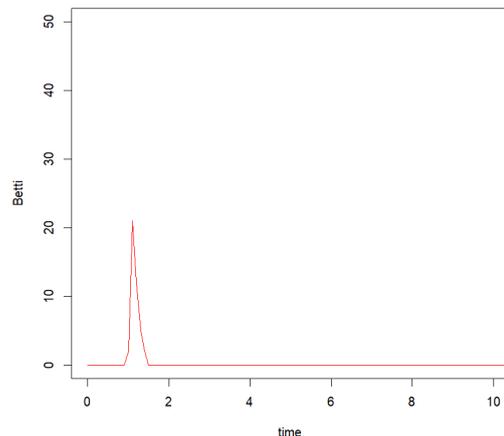


図 3 Betti Curve

## 3. 逆解析

逆解析 [4][5] とは、位相的データ解析によって得られた Birth と Death の時間対に対応する、ホモロジカルサイクルを求める手法である。本研究では、逆解析により得られたサイクルを可視化できるようにした。逆解析の例として、1 次元パーシステンスダイアグラムから 1 次元サイクルを

可視化する。下の図 4 は、1919 年～1928 年の海溝型地震データに対して逆解析を行った例である。左図が TDA を行って得られたパーシステンス図であり、右図が生存時間が大きいものから 10 個取り出し可視化した結果である。例えば、左図の赤い丸で囲まれた青点に対して逆解析を行い、得られた 1 次元サイクルが右下図の赤い多角形である。今回、3 次元図に地震点をプロットし、マグニチュードによって点の色を変化させることで、疑似的に 4 次元データの可視化を試みた。

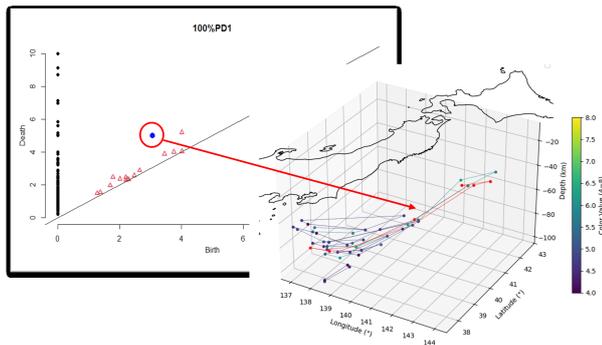


図 4 逆解析の例

## 4. 実験方法

本研究では、作成した 4 次元海溝型地震データに対して、2 通りの方法で特徴抽出が行えるか検証した。

1 つ目の方法では、データを 10 年ごと 11 個に分割してそれぞれ TDA を行い、それぞれの 1 次元パーシステンスホモロジーの中から、重要度の高いと思われる 1 次元サイクルを 10 個抽出し逆解析を行った。時間ごとの結果を見比べることで、地震活動の規則性や変化の傾向が抽出可能かを検討した。

2 つ目の方法では、データを地域ごとに分割した。地域の分割は、プレート境界数値データ [3] で用いられていた分け方をそのまま反映しており、南海トラフ周辺、西南日本周辺、伊豆諸島周辺、関東周辺、フィリピン海スラブ周辺、これらを合わせたフィリピン海プレート境界周辺、太平洋プレート境界周辺となっている。分割したデータと全体のデータそれぞれで TDA を行い、得られたパーシステンスダイアグラムから Betti Curve を作成し、地域間および全体データとの Betti 数・Betti Curve の比較を通じて、地域特有の特徴が捉えられるかを検証した。また地域ごとのデータをそれぞれ 10 年ごと 11 個に分割して、時間ごとの Betti 数・Betti Curve の比較を行うことで、その地域の地震の規則性などの特徴が抽出可能かを検証した。

### 4.1 データ作成

本研究では、まず気象庁の「震度データベース」サイト [2] を基に、1919 年から 2024 年までのマグニチュード 4 以上

の地震についてのデータを作成した。パラメータとして緯度、経度、深さ、マグニチュードを持った 4 次元地震データとなっている。この 4 次元地震データに対し、地震学者である弘瀬冬樹氏の「プレート境界数値データ」[3] を適用することで、海溝型地震のデータを作成した。ここでいう海溝型地震とは広義の海溝型地震を指し、プレート間地震と海のプレート内の地震の両方を含む。データ作成にあたって、名古屋大学で地震について研究されている田所啓一氏にご助言をいただき、プレート付近の地震のうち、プレートの下側にあるものを取り出した。具体的にはプレート形状数値データの各点を中心とした球の下半球を考え、その範囲内にある地震点を取り出した。

### 4.2 密度推定によるノイズ除去

本研究では、TDA を行う際に密度推定によるノイズ除去を行っている。図 5 の左上と左下は異なるデータに対して、TDA を行っている途中の図である。下データは上データの真ん中の点を削除したものとなっている。2 つの図の青い球の半径は同じである、つまりこの 2 つは同じ時刻の図を示しているが、上の図ではサイクルが消滅してしまっているのに対して、下の図ではまだサイクルが存在している。このことから、密度の低い真ん中の点を削除した下データで TDA を行うことで、生存時間が長い重要なサイクルを得ることができると分かる。今回は、4 次元カーネル密度推定を用いて密度を計算し、値の高いものから、100%、90%、80%、60%、60% の点を集めたデータを作成した。それぞれのデータに TDA を行い、得られたパーシステンスダイアグラムを比べて、生存時間が一番大きいサイクルが存在するデータを採用した。

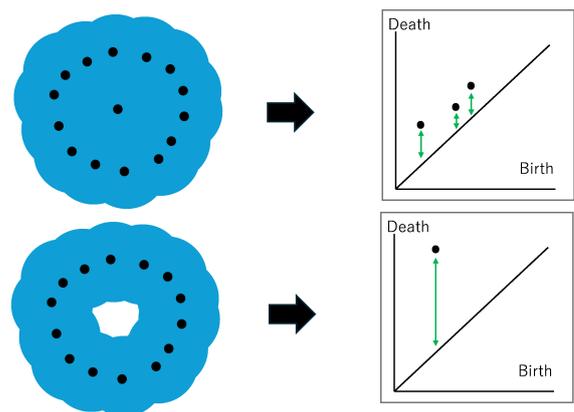


図 5 データの違いによるサイクルの違い

## 5. 実験結果

4 次元海溝型地震データ全体を 10 年ごと 11 個に分割して逆解析を行った結果について、4 つの年代のものを抜き出して、図 6 に示す。

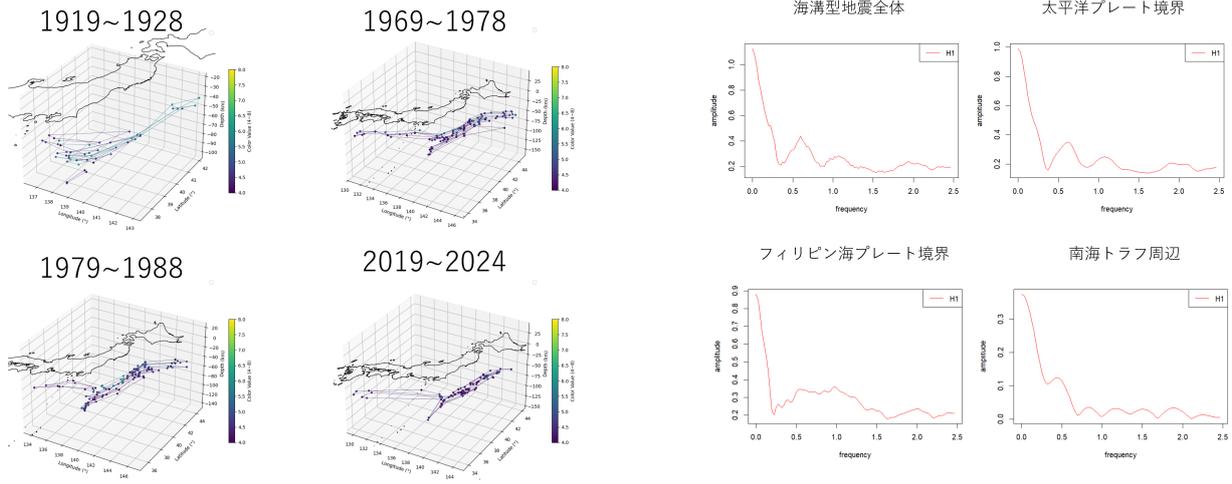


図 6 海溝型地震全体の逆解析

次に、海溝型地震データ全体から得られた Betti Curve と、地域ごとに分割して得られた Betti Curve を比較した結果を図 7 に示す。また、これらの Betti Curve に対して、フーリエ解析を行った結果を図 8 に示す。

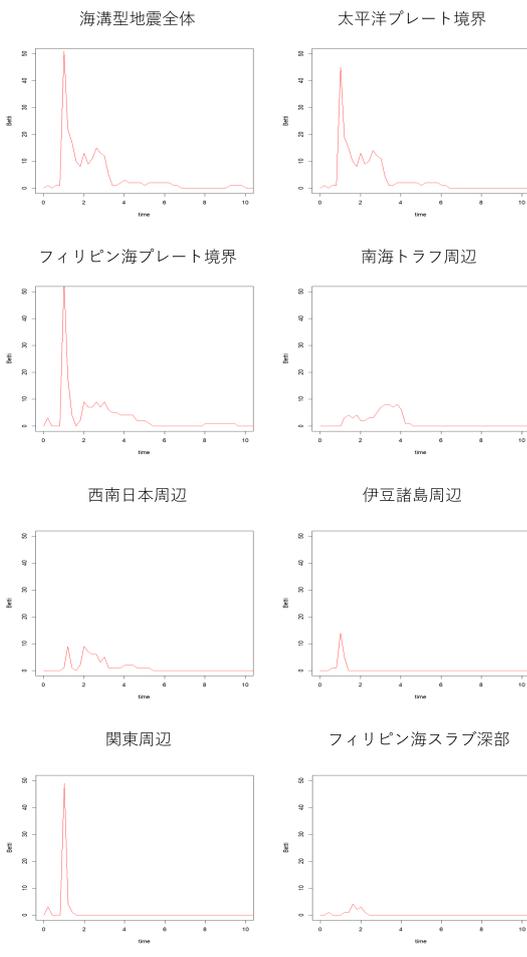


図 7 全体と地域ごとの Betti Curve

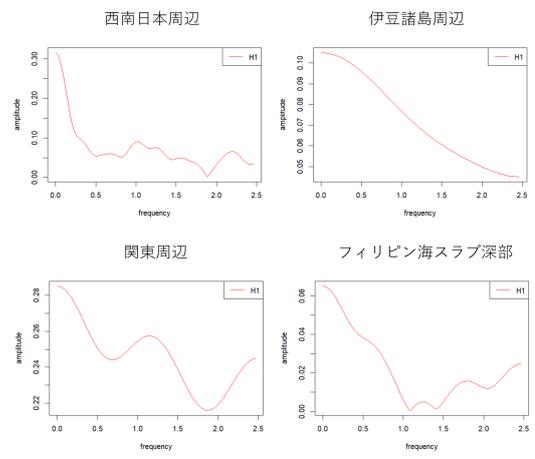


図 8 全体と地域ごとのフーリエ解析

次に、地域ごとのデータを 10 年ごと 11 個に分割して得られた Betti Curve の中から、変化のあった地域について、抜粋して図 9~図 12 に示す。また、これらの Betti Curve に対して、フーリエ解析を行った結果を図 13~図 16 に示す。

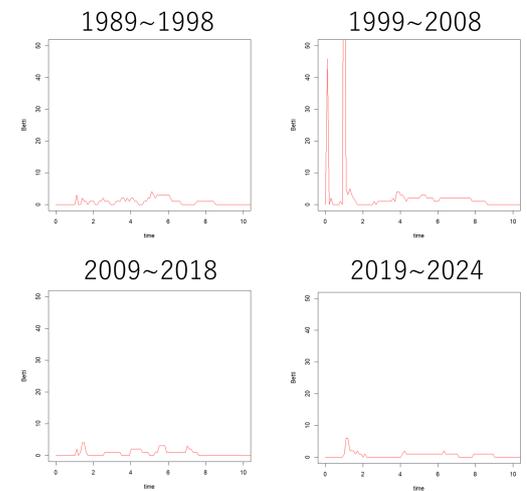


図 9 南海トラフ周辺の時間ごとの Betti Curve

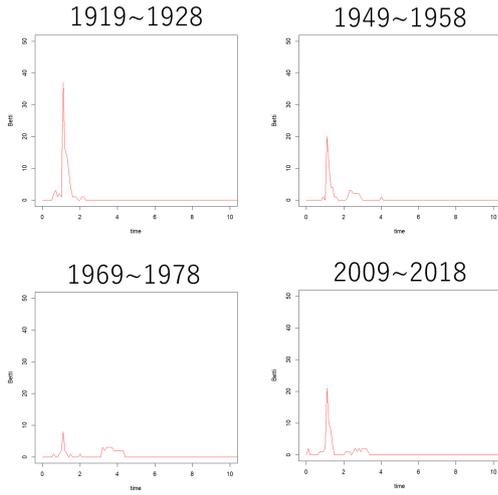


図 10 伊豆諸島周辺の時間ごとの Betti Curve

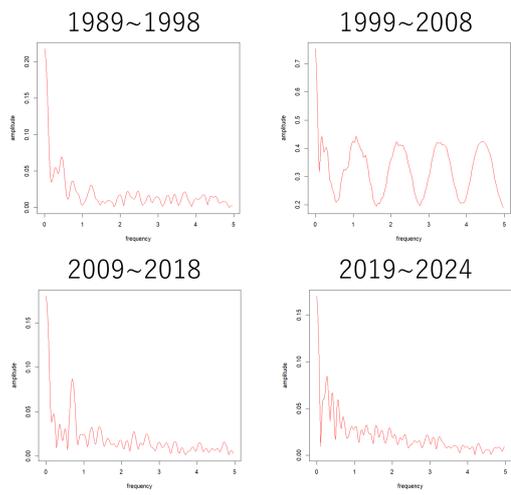


図 13 南海トラフ周辺の時間ごとのフーリエ解析

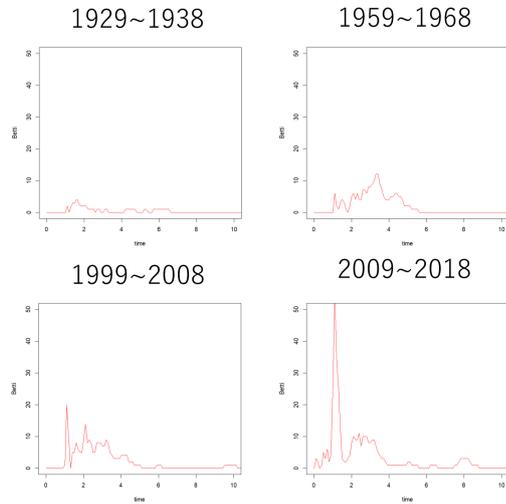


図 11 太平洋プレート境界周辺の時間ごとの Betti Curve

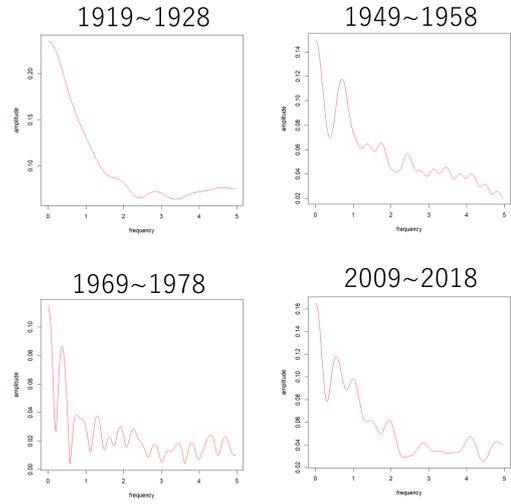


図 14 伊豆諸島周辺の時間ごとのフーリエ解析

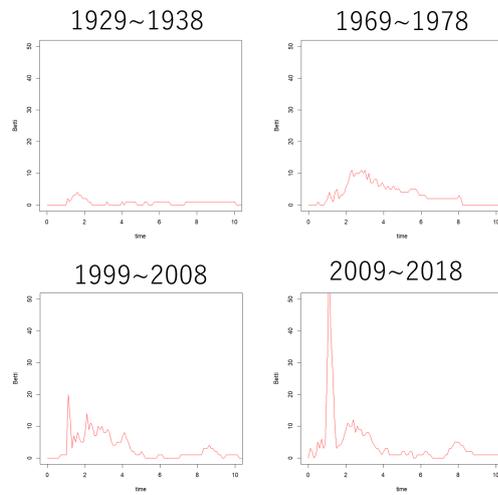


図 12 海溝型地震全体の時間ごとの Betti Curve

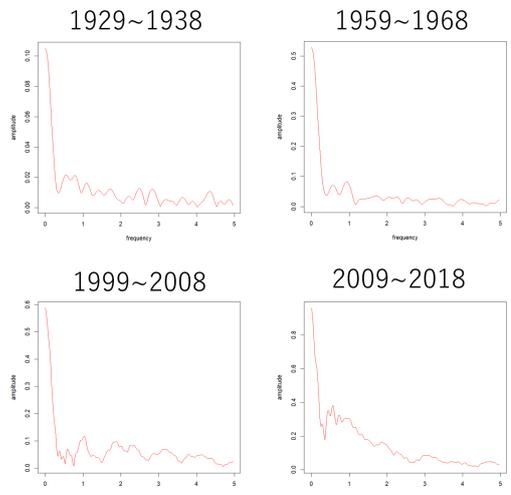


図 15 太平洋プレート境界周辺の時間ごとのフーリエ解析

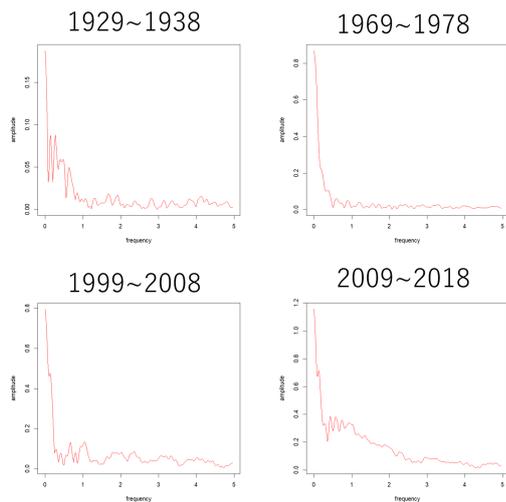


図 16 海溝型地震全体の時間ごとのフーリエ解析

## 6. 考察

図 6 を見ると、1919~1928 の年代は、太平洋プレート付近にサイクルが固まっているが、それ以外の年代では、プレートに沿う形で全体に広がっていた。深さについても、全ての年代で 20~100m ほどの範囲に収まっていて、特にサイクルが一部分に固まっていたりすることはなかった。1919~1928 に関しては、現代と比べて観測技術が乏しかったという面もあるため、その年代だけで特徴があるとは捉えにくい。総じて、規則性や変化の傾向などは見受けられなかった。マグニチュードに関しては、抽出されたサイクルが比較的低い値の地震点のみで形成されていたり、反対に高い値の地震点のみでサイクルが形成されていたことから、緯度、経度、深さに比べて、位相的な特徴量として現れることが少なかった。しかしこれは緯度、経度、深さとマグニチュードを同じように扱ったことで、マグニチュードの影響が比較的小さいデータになっていたことによるものと考えられる。これを踏まえて、反対にマグニチュードの影響が大きいデータで同じように逆解析することで、新たな結果につながると期待できる。

図 7 を見ると、地震全体、太平洋プレート周辺、フィリピン海プレート周辺の Betti Curve はほとんど同じ形が表れたが、南海トラフ周辺、西南日本周辺、伊豆諸島周辺、関東周辺、フィリピン海スラブ周辺といった各地域では、それぞれ違いが見受けられた。図 8 より、フーリエ変換の結果を見ると、特に伊豆諸島周辺、関東周辺、フィリピン海スラブ周辺で差異が見受けられた。振幅で見ると、伊豆諸島周辺とフィリピン海スラブ周辺は他の地域に比べて全体的に小さくなっていて、また周波数で見ると、伊豆諸島周辺のグラフは 0.5~1 の範囲の周波数成分が比較的多く存在し、関東周辺、フィリピン海スラブ周辺は高周波数成分が多く存在するなどの違いが表れた。

次に、地域ごとの変化のあった Betti Curve と、フーリエ変換を行った結果を見ていく。図 10 より、伊豆諸島周辺の Betti Curve は、初期の方では 1 つの大きな山のような形であったのが、年代が進むにつれて複数の小さな山のような形に変化したのが見て取れる。これに伴って図 14 が示すように、フーリエ変換の結果も全体的に振幅は小さくなり、高周波成分が増えた。図 9 は、南海トラフ周辺の 1999~2008 年の Betti Curve が他の年代と比べて大きく異なることを示している。これは、伊豆諸島近海群発地震、紀伊半島南東沖地震などの影響で、この年代のデータ数が非常に大きかったことによるものと考えられる。フーリエ変換の結果にもこの違いが表れていて、図 13 では他の年代と比べ、高周波成分が増えている。図 11 図 12 より、太平洋プレート周辺、海溝型地震全体の Betti Curve は、年代が進むにつれて山が大きくなっていった。これは地震活動が活発になってきていることを示唆している。図 15 図 16 より、フーリエ変換の結果を見ても、どちらも全体的に振幅が大きくなっていて、確実に変化が起きている。関東周辺、西南日本周辺、フィリピン海スラブ周辺、フィリピン海プレート周辺では、Betti Curve、フーリエ変換ともに全年代を通して大きな変化は見受けられなかった。

## 7. 参考文献

### 参考文献

- [1] 平岡裕章：タンパク質構造とトポロジー パーシステンスホモロジー群入門、共立出版 (2013).
- [2] 気象庁：震度データベース検索、<https://www.data.jma.go.jp/eqdb/data/shindo/>.
- [3] 弘瀬冬樹：プレート形状の数値データ、<https://www.mri-jma.go.jp/Dep/sei/fhirose/plate/PlateData.html>
- [4] E. G. Escolar and Y. Hiraoka: Optimal Cycles for Persistent Homology Via Linear Programming, *Optimization in the Real World* 79-96 (2016).
- [5] I. Obayashi: Volume-optimal cycle, *SIAM Journal on Applied Algebra and Geometry* 2 508-534 (2018).
- [6] Baba, T., Y. Tanioka, P. R. Cummins, and K. Uhira: The slip distribution of the 1946 Nankai earthquake estimated from tsunami inversion using a new plate model, *Phys. Earth Planet. Inter.*, 132, 59-73 (2002).
- [7] 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川昭：Double-Difference Tomography 法による西南日本の 3 次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, *地震* 2, 60, 1-20 (2007).
- [8] Hirose, F., J. Nakajima, and A. Hasegawa: Three-dimensional seismic velocity structure and configuration of the Philippine Sea slab in southwestern Japan estimated by double-difference tomography, *J. Geophys. Res.*, 113, B09315, doi:10.1029/2007JB005274 (2008).
- [9] 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川昭：Double-Difference Tomography 法による関東地方の 3 次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, *地震* 2, 60, 123-138 (2008).
- [10] Kita, S., T. Okada, A. Hasegawa, J. Nakajima, and T. Matsuzawa: Anomalous deepening of a seismic belt in the upper-plane of the double seismic zone in the Pacific slab beneath the Hokkaido corner: Possible evidence for thermal shielding caused by subducted forearc crust materials,

Earth Planet. Science Lett., 290, 415-426 (2010).

- [11] Nakajima, J., and A. Hasegawa: Anomalous low-velocity zone and linear alignment of seismicity along it in the subducted Pacific slab beneath Kanto, Japan: Reactivation of subducted fracture zone?, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L17309, doi: 10.1029/2006GL026773 (2006).
- [12] Nakajima, J., and A. Hasegawa: Subduction of the Philippine Sea plate beneath southwestern Japan: Slab geometry and its relationship to arc magmatism, *J. Geophys. Res.*, 112, B08306, doi:10.1029/2006JB004760 (2007).
- [13] Nakajima, J., F. Hirose, and A. Hasegawa: Seismotectonics beneath the Tokyo metropolitan area, Japan: Effect of slab-slab contact and overlap on seismicity, *J. Geophys. Res.*, 114, B08309, doi:10.1029/2008JB006101 (2009).