

GNSS データの階層クラスタ解析に基づく台湾島のテクトニクスの研究
Investigation of Regional Tectonics in Taiwan using a Hierarchical Cluster Analysis of GNSS Data

○高橋 温志・橋本 学・胡 植慶

○Atsushi TAKAHASHI, Manabu HASHIMOTO, Jyr-Ching HU

Identification of active tectonic boundaries is important for understanding neotectonics in Taiwan. We analyzed Global Navigation Satellite System (GNSS) horizontal velocity data in Taiwan with a hierarchical cluster analysis method. We also developed a statistic scheme assess the fuzziness of the obtained cluster. The hierarchical representation, which is expressed by a dendrogram, suggests the relative importance of tectonic sources in this region. In addition, our statistical cluster assessment also shows fuzzy cluster boundaries along the Coastal Plain and the Western Foothills, reflecting continuum deformation in west Taiwan.

1. はじめに

台湾島は、ユーラシア大陸の大陸棚に、フィリピン海プレート上に載ったLuzon火山弧が衝突して形成された衝突帯である。台湾島東部の海岸山脈と中央山脈の境をなす台東縦谷がユーラシアプレートとフィリピン海プレートの境界に相当し、1951年には花蓮市で被害地震が発生している。台東縦谷の西側は東から順に、中央山脈・西部山麓帯・海岸平原と区分される。これらは、ユーラシア大陸の大陸棚に堆積した堆積物が起源であり、東側ほど大きく隆起している。これより下位の構造については、研究者によって見解が異なり、テクトニックな境界に関する認識は統一されていない。台湾島では、厚い堆積層の下に隠れている活断層が多いこともこの問題を難しくしている。

高密度のGNSS観測網と統計的手法を組み合わせる方法が、活断層の検出に成果を上げている。例えば、Simpson et al. [2012]は、GNSSデータのクラスタ解析から、地質情報とは独立に地殻ブロックの境界を推定し、活断層など地質情報と整合的な結果を得ることに成功している。本研究では、Simpson et al. [2012]の手法によって台湾島の高密度GNSS観測データを分析し、測地学的な観点から地殻ブロックを解析することを試みた。

2. データと解析手法

台湾には約300点のGNSS定常観測点が展開されている。本研究では、この定常観測点の速度ベクトルの水平成分を、階層型凝集クラスタリングアルゴリズムでクラスタ解析した(Simpson et al. 2012)。まず、 N 個の観測データを速度空間に射影し、各観測データを

を初期クラスタとする。次に、速度空間上で距離が最も近いクラスタをペアにして、ペアの重心に、新しいクラスタを挿入する一方で、元のクラスタを削除する。つまり、このときクラスタ数は N から $N-1$ に減少する。同様のプロセスをクラスタ数が1になるまで繰り返すことで、系統樹を構成する。

地殻変動データに現れる速度のコントラストは、変位速度の大きい断層を挟む領域で大きくなる。系統樹を上の方で切ると、速度空間上でのクラスタ間距離が大きい場合に対応する。このとき、多くの観測データからなる少数のクラスタが得られる。これが、運動学的な視点で見た場合の主要なブロック構造に対応すると考えられる。一方、その主要な各地殻ブロックの内部でも変形が生じており、系統樹を下の方で切ると、より細かく分割された地殻のブロック構造が得られる。この細かく分割されたブロック構造は比較的長さの短い活断層の活動に伴う変形等に対応していると考えられる。先行研究では、“最適なクラスタ数”という概念があるが、Gap統計法など、統計的な評価手法だけでは一意には有意な結果を得られないことに注意する必要がある。つまり、あるクラスタ数における地殻ブロックの分割は、クラスタ解析の結果の一部に過ぎず、系統樹で表される構造こそがクラスタ解析の結果である。

アメリカ西海岸等では、地殻ブロックが水平に相互作用しながら運動しているという描像が代表的であるが、台湾島は衝突に伴う連続的な変形も含まれるため、クラスタの同定イコール地殻ブロックの同定とはならない点に注意が必要である。

そこで、本研究ではエントロピーによる分割の有意度を評価する枠組みを投入した。

まずデータに観測ノイズを加え、これを100セット用意した。次にこれらをそれぞれ階層クラスタ解析し、100通りの解析結果を得た。得られた結果の共通性が高ければ分割は有意であり、クラスタの所属が変わるような境界は信頼が低い。

この考え方を定量的に示すために、まず次のような行列表示を導入する。観測点*i*番目と*j*番目が同じクラスタに入ったら、行列RのR_{ij}成分に+1する、所属クラスタが違ったら+0する、というルールで、クラスタ解析結果100セットを使って行列Rを作成する。この行列の要素を各クラスタごとに並べると、対角成分にブロック行列が並び、そのブロック行列がはっきりしているかぼやけているかで、クラスタの信頼度を直感的に読み取ることができる。

次に、*i*番目のデータがどの程度の信頼度を持つかを、Shannonのエントロピーで定量的に表す。ある点が2通りの選択肢を持ち、その確率がp,(1-p)で表される時、エントロピー(S)は

$$S = -p \log(p) - (1-p) \log(1-p)$$

で与えられる。Sはp=0.5のとき最大値を持つ。言い換えれば、割り当てが決まっていない場合は高いエントロピーを持つ。逆にp=0,1で最小値を持ち、割り当てが一意に決まれば低い値を持つ。このpへ、R_{ij}を百分率に直したものを入れ、各ペアについて和を取れば、各観測点がどの程度割り当てがはっきりしているか、地図上で評価する指標が得られる。

3. 結果・考察

GNSSデータは台湾海峡上にある観測点を基準とした際の分布である。速度空間上では、北西・南東方向に分布する系列と、東西方向に分布する系列が特徴的である。前者はルソン弧の衝突に伴う変形に対

応した分布を示し、後者は台湾島南部で起きている屏東平原の運動に対応していると考えられる。

台東縦谷東縁に推定されたクラスタ境界は、フィリピン海プレートとユーラシアプレートの運動学的な境界に対応し地質情報とも整合的である。海岸山脈を含むクラスタは、Luzon火山弧の衝突の系列から北東方向に系統的にずれており、海岸山脈の北進を示す。

台湾島南部ではピントン平原を取り囲む Chaochou 断層と Chishan 断層を境界とするクラスタが得られた。このクラスタは明確な内部構造を持ち、さらに細かく分割され、Fengshun 断層帯を境として海岸沿いにクラスタ境界が抽出された。Fengshun 断層帯は堆積層に埋もれており(Ching et al. 2011)、地表のトレースだけでは議論しにくかった。本手法は堆積層に埋もれた活断層を探す上でも有用であることがわかった。

一方、1999年のChi-Chi地震の震源断層(Chelungpu断層)はクラスタ境界としては推定されなかった。海岸平野と西部山麓帯の境界に現れたクラスタ境界は、高いエントロピーを持ち、本手法では検出しにくい境界であることが示された。この高いエントロピーの帯は、地質学的な観点見ると、デコルマ面から分岐した逆断層と対応する。これらの逆断層はクリープしておらず、ブロック的な変形と連続的な変形とを分けて考える方法を確立できたといえる。

4. 謝辞

本研究は防災研究所平成 30 年度萌芽研究の予算助成を受けた。本研究の出版には、平成 30 年度の所長裁量経費からの支援をいただいた。ここに記して感謝する。