

ブロック断層モデルを用いた鹿児島—宮崎・熊本県境付近の ブロック境界の検討

Position of Block Boundary around Kagoshima and Miyazaki/Kumamoto Prefecture's border by Block-Fault Model

七條彰啓¹⁾・中尾 茂²⁾*・松島 健³⁾・大倉敬宏⁴⁾

Akihiro SHICHIJYO¹⁾, Shigeru NAKAO²⁾*, Takeshi MATSUSHIMA³⁾, Takahiro OHKURA⁴⁾

¹⁾ 鹿児島大学理学部地球環境科学科

¹⁾ Faculty of Science Engineering, Kagoshima University, Kagoshima 890-0065

²⁾ 鹿児島大学大学院理工学研究科地球環境科学専攻

²⁾ Graduate School of Science Engineering, Kagoshima University, Kagoshima 890-0065

³⁾ 九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター

³⁾ Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University, Nagasaki 855-0843

⁴⁾ 京都大学大学院理学研究科附属地球熱学研究施設火山研究センター

⁴⁾ Aso Volcanological Laboratory, Institute for Geothermal Sciences, Kyoto University, Kumamoto 869-2611

* 中尾 茂 nakao@sci.kagoshima-u.ac.jp

Abstract: Position of block boundary around Kagoshima – Miyazaki/Kumamoto prefecture's border is investigated by using Block-Fault Model. Displacement velocity at each continuous GNSS site are estimated by least squares method. 37 block-fault models are made. Block rotation and fault deficit's rate are estimated using displacement velocities and χ^2 are calculated. The boundary line from Akune, Kagoshima prefecture to Uchiumi of Miyazaki City, Miyazaki prefecture is the best model. The boundary plane is sloping to the south direction.

Keywords: Displacement velocity, South Kyushu, Position of block boundary

1. はじめに

1996 年より定常観測を開始した GNSS 観測網である GEONET により日本列島の地殻変動の様子が明らかになってきている。西南日本においてアムールプレートに対する動きは、フィリピン海プレートの斜め方向の沈み込みにより、四国で北西方向の動きが大きく、その影響で九州中東部も北西方向の動きを示している。しかし、九州南部へ行くにつれその方向は大きく変化し、反時計回りに回転しているように見えることが知られている。北緯 32 度付近を境に北側では西方向に動き、南側は南東方向に動く。この北緯 32 度付近を境とした南側の南東方向の動きはよく知られているがその原因は、沖縄トラフの拡大やプレートの浮力の変化[1]などいくつかの説がある。また、この変動は北緯 32 度付近で東西に沿って顕著な左横ずれせん断ひずみを生じさせる。そして、この地域に沿って 1997 年の鹿児島県北西部地震などのマグニチュード 5 以上の大きな地震が発生している[2]。しかし、この付近に活断層は知られておらず、この境界の位置は明らかにはなっていない。

このような地域によって異なる変動は、その地域をブロックに分けて考えることができる。観測された地殻変動をブロックの回転運動とブロック境界の断層の固着による弾性変形との重ね合わせで表すことができる。このようなモデルをブロック断層モデルと呼ぶ[3]。本研究では GNSS による変位速度場を使用して、北緯 32 度付近（鹿児島—熊本・宮崎県境付近）はブロック断層モデルとしての境界はあるのか、また、境界があるとするならばどのように設定するかを検討する。

2. GNSS 速度場の推定

鹿児島大学理学部では、11 点の GNSS 連続観測点のデータ、九州大学大学院理学研究院附属地震火山観測研究センター及び京都大学大学院理学研究科地球熱学研究施設火山研究センターと共同で観測している GNSS 連続観測点 13 点のデータと国土地理院が運営している GONET 観測点のデータを Bernese GNSS Software Version 5.2 [4]を用いて解析を行っている。解析では CODE 精密暦を用い、大気伝搬遅延は各観測点で 1 時間ごとに、大気伝搬遅延量の勾配は 1 日ごとに、観測点座標と同時に推定した。座標系は ITRF2014 を用いた。

2011 年 4 月 1 日から 2016 年 3 月 31 日までの座標データを用いて各観測点の変位速度を推定した。それぞれの観測点の座標データの時間変化を一定の速度で変動する成分に加えて、年周と半年周の変動やアンテナ交換や地震によるステップの変動によると考え、それぞれの振幅や係数を、最小二乗法を用いて推定した。式 1 に推定に用いた式を示す。

$$y = at + b + c \sin \frac{2\pi}{T}t + d \cos \frac{2\pi}{T}t + e \sin \frac{4\pi}{T}t + f \cos \frac{4\pi}{T}t + \sum_{i=1}^n g_i H(t - t_i) \quad (1)$$

第 1 項は変位速度、第 2 項は変位の定数、第 3, 4 項は年周の変動、第 5, 6 項は半年周の変動、第 7 項はアンテナ交換や地震によるステップの変動を表す。 t は時間、 T は 1 年の日数を示す。ここでは閏年を考慮して 365.25 日とした。 H は階段関数を表し、 n は観測期間中のアンテナ交換や考慮する地震時変動の回数を表す。

図 1 にアムールプレート基準の変位速度ベクトルを示す。ITRF2014 からの変換には NNR-MORVEL56 モデル[5]のアムールプレートの変動を使用した。四国地方では、フィリピン海プレートの斜め沈み込みによる影響が大きいことがわかる。同様に宮崎県や大分県でも北西方向の速度を示している。そして、九州南部ではやはり反時計回りの回転がみとめられる。北緯約 32 度付近を境に北側では、北西方向から西向きにベクトルの向きが変化し、南側では南から南東方向へのベクトルに変化する。

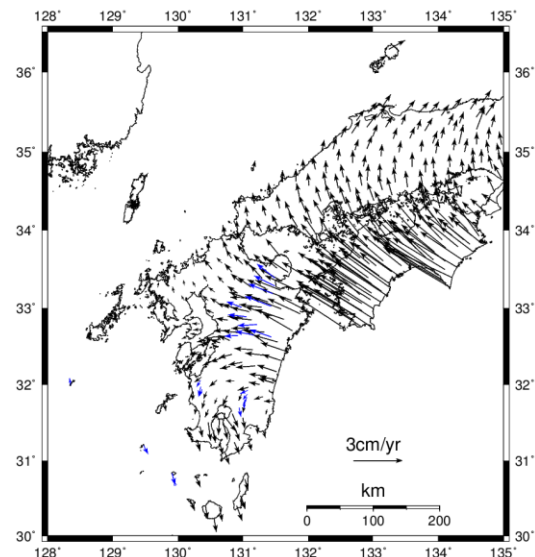


図 1 アムールプレートに対する変位速度ベクトル。青いベクトルは鹿児島大学及び九州大学、京都大学、鹿児島大学が運用している観測点を示す。

3. 西南日本のブロック境界モデル

得られた速度場をリソスフェアのブロックの回転や内部ひずみ、ブロック境界の断層の固着等で説明するために TDEFNODE プログラム[6]を用いて解析する。

アムールプレート上に位置する西南日本と沈み込むフィリピン海プレートを多角形で描かれる 7 つのブロックに分割した。図 2 にブロックモデル(modt)を示す。ブロック名はアルファベット 4 文字で表す。ブロックの境界は、活断層、地震活動、GNSS 変位速度場、過去の研究のブロック境界[7, 8]を参考にして設定した。それぞれのブロックは、推定される角速度 ω でアムールプレートブロック (AMUR) に対して回転する。フィリピン海プレートブロック (PHSP) のアムールプレートに対する角速度は、MORVEL のプレート運動モデルの値により固定している。

ブロック境界 SMTL-PHSP と S32L-PHSP はフィリピン海プレートとアムールプレートの沈み込み境界である。SMTL-NMTL と N32L-NMTL は地震調査研究推進本部の活断層評価における中央構造線断層帯[9]の位置を N32L-CKyu は布田川・日奈久断層帯[10]を、NMTL-CKyu は地震の分布および中央構造線断層帯

の堀田-朝見川断層，由布院断層[9]の位置を参考に設定した。SMTL-N32Lは大陸斜面を構成する付加体および前弧海盆堆積物の激しい褶曲・断層の位置に対応している。この原因は，前弧スリバーの西方移動に伴う衝突であるとされている。この断層・褶曲軸の方向は，四国の足摺岬沖より東では沈み込み帯の海溝軸に平行であるが，その西側では大きく方向を変え，ほぼ南北となる[11]。N32L-S32Lは本研究で位置を検討する境界である。地震の分布とGNSS変位速度場(図1)に，CKyu-AMURは主に地震の分布に基づいて決定した。NMTL-AMURではNishimura et al. [7]のブロック境界を参考にしている。西側境界で警固断層[12]を通り，島根県・鳥取県の地震帯に続くように設定した。

ブロック境界を固着していない(固着率0)境界と固着がある断層(固着率は0~1)にわけ，フィリピン海プレートの沈み込み帯，中央構造線，警固断層帯，本研究で位置について検討する鹿児島一宮崎・熊本県境付近のブロック境界を固着のある断層と考えた。断層と仮定したブロック境界面にはノードを設定し，それぞれのノードにおいて固着率を求めた。フィリピン海プレートの沈み込みのモデルはHayes et al. [13]のスラブモデルを用いた。断層境界面上でのすべり欠損速度がなめらかな分布となるように，ノード間を走行方向に10km，傾斜方向に5kmのパッチで分割する。そして，このパッチにおけるすべり欠損速度は，周囲のノードから線形補間で求める。このパッチを1つの断層とみなし，Okada[14]の解析解を用いて地表面の変位速度が計算される。これを全てのパッチに適用し，地表面の変位速度は各パッチによる変位速度の総和としてあらわす。図3に断層の仮定した境界の境界面とノ

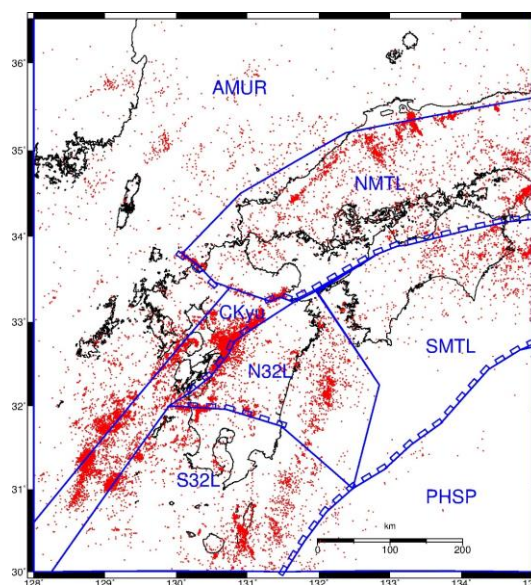


図2 ブロック境界を青線で示す。4文字のアルファベットはブロック名を示す。ブロック境界に長方形がつく場所は断層を示し，長方形を含むブロックが上盤である。赤点は，気象庁が決めた1987年~2016年における深さ20km以浅のマグニチュード2以上の地震の震央を示す。

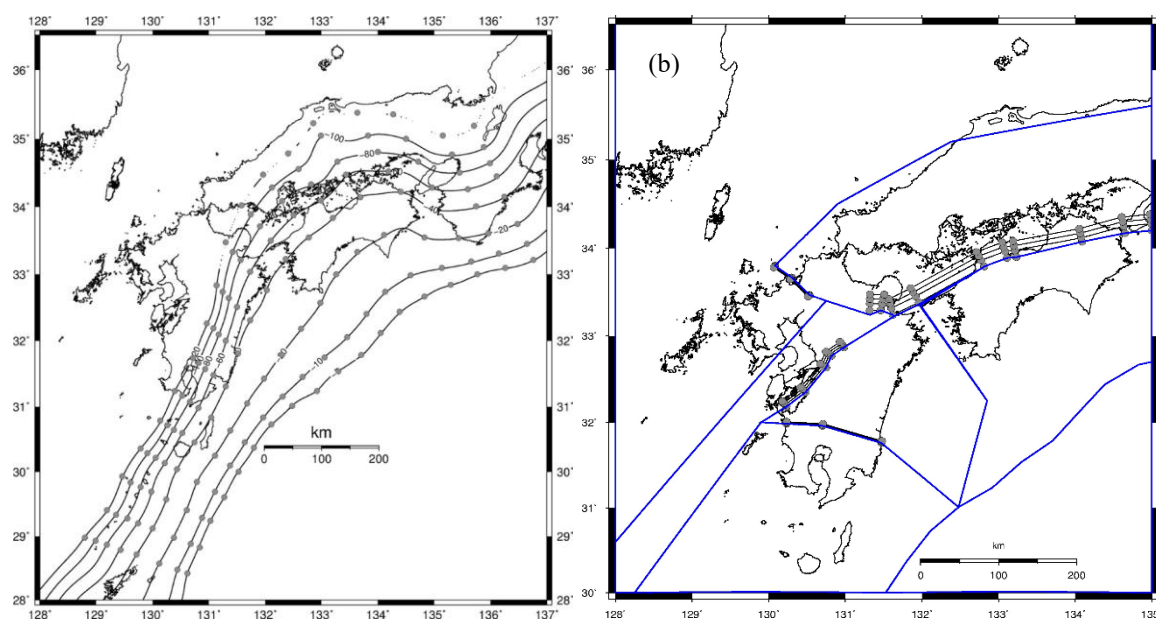


図3 (a) 白丸はフィリピン海プレート沈み込み境界のノードの位置を示す。コンターは境界の等深線を示し，深さは7km, 10km, 20km, 40km, 60km, 80km, 100km, 120kmである。(b) ブロック境界を断層とした境界のノードの位置を示す。すべての断層で深さ15kmまでノードを設定した。

ードの位置を示す。

図4はブロックモデル(modt)において得られたすべり欠損速度分布である。図4(a)はフィリピン海プレート沈み込み帯、図4(b)は本研究で設定した断層のすべり欠損速度分布を表す。フィリピン海プレート沈み込み帯の欠損速度分布を推定するときに、断層が完全に固着している状態から定常すべりの状態に移り変わる領域についてもモデル化を行い、欠損速度分布を推定する最深度を与えている。その深さは、先行研究[7, 8]を参考にし、試行錯誤の上、中国・四国地方や九州北東部では約40~80km, 九州南部では約7~30kmの間で決定した。約60mm/yrのすべり欠損速度が四国の太平洋沿岸部の下や豊後水道の下まで分布している。また、九州南部の日向灘沖では固着が弱くなっていることがわかる。図5は観測されたGNSS変位速度とこれらのモデルから計算された速度の比較を示す。観測値と理論値はよくあっているといえるが、桜島のマグマだまりをモデル化していないため桜島付近ではフィッティングが悪くなっている。

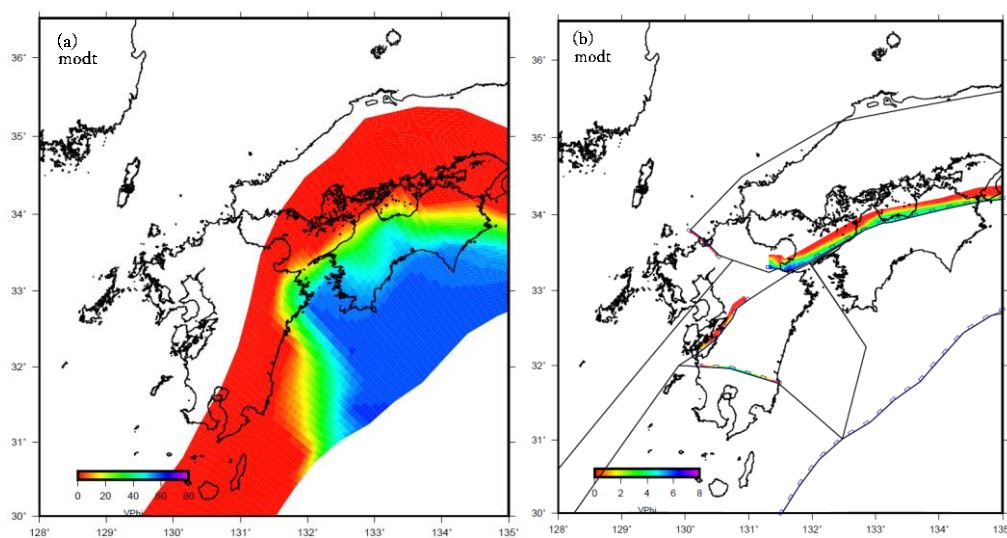


図4 (a) フィリピン海プレートの沈み込み帯のすべり欠損速度分布。(b) そのほかの断層のすべり欠損速度分布。

モデルにより計算された変位速度が観測されたGNSS変位速度にどれだけ良くフィットしているかは、式2で表される reduced- χ^2 (以下単に χ^2 という)を用いて評価する。

$$\chi_n^2 = (N - P)^{-1} \sum_{i=1}^N \frac{r_i^2}{\sigma_i^2} \quad (2)$$

N は観測データの数(1つの観測点につき東西・南北の2成分)、 P は推定するパラメータの数、 r_i は残差、 σ_i は標準偏差である。観測されたGNSS変位速度によくフィッティングしているモデルは $\chi^2 \approx 1$ をとる。テストモデル(modt)では、 $\chi^2 = 2.553$ であった。

4. 鹿児島—熊本・宮崎県境付近の境界の位置の検討

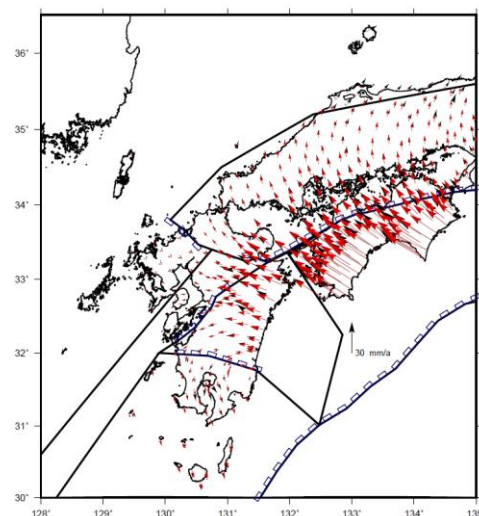


図5 観測されたGNSS変位速度とモデルから計算された変位速度の比較を示す。黒矢印が観測値、赤矢印が計算値を示す。

鹿児島ー熊本・宮崎県境付近のブロック境界の位置を調べるために鹿児島ー熊本・宮崎県境付近のブロック境界を設定しないモデルを含む25個のモデルを作成しブロック断層モデル(modt)と併せて比較する。鹿児島ー熊本県境付近は1997年3月26日に発生した鹿児島県北西部地震のほぼ東西に伸びる余震域を通るように設定し、鹿児島ー宮崎県境付近では都城市を中心として南北に密に並ぶGNSS観測点(約4km間隔、都城ラインと呼ぶ)の間を通り、更に東側のGEONET観測点950483(北郷)の北側と南側を通るモデルの12パターンを考える。図6に12通りのブロック境界の位置を示す。ブロック境界の傾斜は、1997年3月26日に発生した鹿児島県北西部地震の気象庁によるCMT解の傾斜角を参考にした北傾斜(80度)と、向吉ほか[15]により同じく1997年3月26日に発生した鹿児島県北西部地震の余震域内の地質調査で確認された断層露頭で計測された断層傾斜を参考にした南傾斜(85度)である。しかし、この断層が鹿児島県北西部地震に関連した地震断層であるかどうかは、まだ現段階では判定することはできない[15]。25個のブロック境界のモデル名とそれぞれの境界の位置を表1にまとめた。

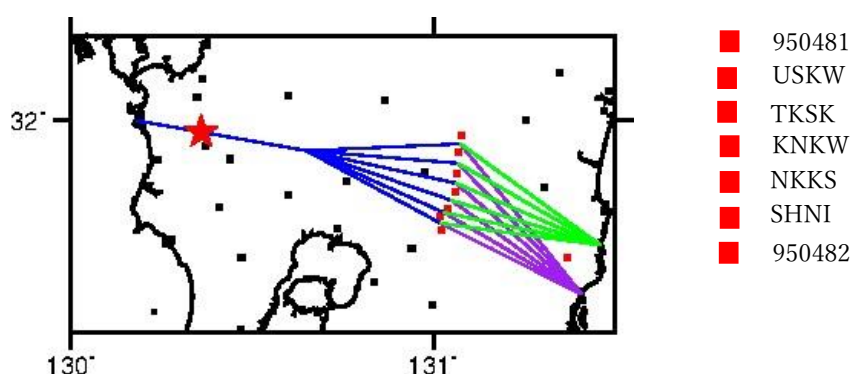


図6 鹿児島ー宮崎・熊本県境付近のブロック境界のモデル。右は東経131度付近のGNSSアレイ観測点(都城ライン)の観測点名を示す。

表1 モデル名と境界の位置、境界の傾斜。

モデル名	南北に並ぶ観測点	0483の北or南	傾斜	モデル名	南北に並ぶ観測点	0483の北or南	傾斜
modn	-	-	-				
mod1	0482-SHNI	0483の南	北傾斜(80度)	mod21	0482-SHNI	0483の南	南傾斜(85度)
mod2	SHNI-NKKS			mod22	SHNI-NKKS		
mod3	NKKS-KNKW			mod23	NKKS-KNKW		
mod4	KNKW-TSKK			mod24	KNKW-TSKK		
mod5	TSKK-USKW			mod25	TSKK-USKW		
mod6	USKW-0481			mod26	USKW-0481		
mod11	0482-SHNI	0483の北		mod31	0482-SHNI	0483の北	
mod12	SHNI-NKKS			mod32	SHNI-NKKS		
mod13	NKKS-KNKW			mod33	NKKS-KNKW		
mod14	KNKW-TSKK			mod34	KNKW-TSKK		
mod15	TSKK-USKW			mod35	TSKK-USKW		
mod16	USKW-0481			mod36	USKW-0481		

0481, 0482, 0483 は GEONET の 950481(野尻), 950482(都城), 950483(北郷) 観測点を示す。

観測値と計算値の一致度を示す χ^2 の値は鹿児島ー宮崎・熊本県境付近にブロック境界があるモデル modt では2.553, ブロック境界がないモデル modn では2.685 と modt の方がよい。図7(a), (b)に示した鹿児島ー宮崎・熊本県境付近の観測値と計算値の変位速度の比較では、境界のないモデル modn

では都城ラインの鹿児島県内の観測点では、観測値と計算値の一致度がわるいことがわかる。図 8 に modt におけるブロック N32L 及び S32L, modn におけるブロック N32L と S32L からなるブロック SKyu の回転極と回転速度を示した。modt におけるブロック S32L は、時計回りに回転しており、N32L とは全く異なるブロック運動を行っていることがわかる。modn におけるブロック SKyu は、S32L の分の回転を説明するために、N32L に比べて北東に回転極が位置している。したがって、鹿児島県—宮崎・熊本県境付近にはブロック境界を置き、南北で異なるブロックとすべきと考える。

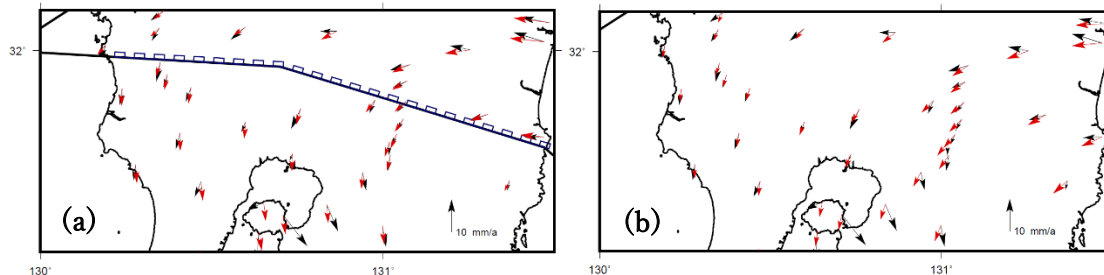


図 7 (a)鹿児島—宮崎・熊本県境付近にブロック境界をおいた時の観測された変位速度（黒いベクトル）とモデルから計算された変位速度（赤いベクトル）。(b)鹿児島—宮崎・熊本県境付近にブロック境界を置かなかった時の観測された変位速度（黒いベクトル）とモデルから計算された変位速度（赤いベクトル）。

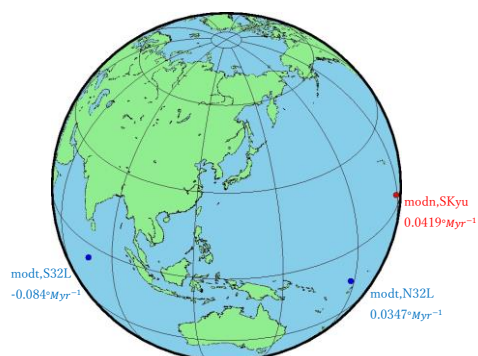


図 8 鹿児島—宮崎・熊本県境付近にブロック境界があるモデル modt のブロック N32L および S32L とブロック境界がないモデル modn のブロック SKyu の回転極の位置を示す。

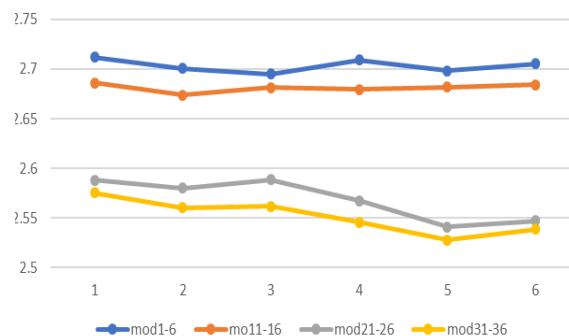


図 9 各モデルの χ^2 を示す。横軸はモデル番号の下一桁を示す。

図 9 にモデル番号 1 から 36 において観測値と計算値の一致度をあらわす χ^2 を示す。鹿児島—宮崎・熊本県境付近のブロック境界は北傾斜よりも南傾斜の方が χ^2 の値が小さい。南傾斜のモデルでは都城ラインの観測点の南よりも北の方に境界があったほうが χ^2 が小さい。ブロック境界が GEONET の 950483（北郷）観測点の北にあるか、南にあるかについては、ブロック境界の傾斜にかかわらず北にあったほうが χ^2 が小さい。 χ^2 が最小のモデルは鹿児島—宮崎・熊本県境付近のブロック境界が TSKS と USKW を通り、GEONET の 950483（北郷）観測点の北に位置し、境界は南傾斜である mod35 となった。

これらのモデルでは図 6 に示したようにブロック境界を 3 つの直線で近似し、東二つの区間でブロック境界がどこを通るかを決めた。3 つの区間の接合部は急に走向が変わり不連続となっている。そこで、都城ラインの TSKS と USKW を通り、950483（北郷）の北をとおり、急激な走向の変化はないようなブロック境界を作成した。図 10 に観測された変位速度とモデルから計算された変位速度との比較を示す。これを modf とした。 χ^2 は 2.522 となり、mod35 よりもよい。

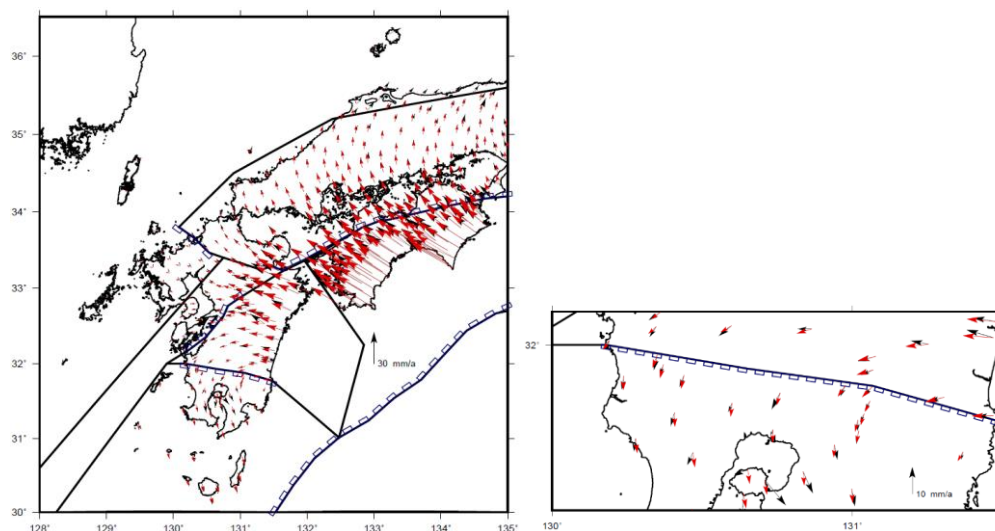


図10 ブロック断層モデル modf により計算された変位速度(赤ベクトル)と観測された変位速度(黒ベクトル)との比較。

5. 議論

本研究で決定した鹿児島・宮崎・熊本県境付近のブロック境界の位置は西方では阿久根市付近をとり先行研究[7, 8]とほぼ同じである。東端は宮崎市内海付近を通り, Nishimura et al. [7]とWallance et al. [8]の中間となっている。この二つの先行研究では, 都城ラインの観測点は両端のGEONETの観測点しか使っておらず, 都城ライン付近では本研究の位置は都城ラインの平均観測点間隔 4 km以内で決定できていると考えられる。

鹿児島・宮崎・熊本県境付近のブロック境界の傾斜は南傾斜の方が北傾斜よりも χ^2 が小さくなることから南傾斜であると結論されるが, この付近に活断層は知られておらず, 1997年鹿児島県北西部地震の断層露頭で測定された傾斜[15]は地上に非常に近い場所での測定であるため, 数km以深の深部での傾斜については不明である。武田他[16]は鹿児島県北西部地震の断層面について反射法探査を用いて調べたが, 発見できなかった。地表での断層変位も確認されていないことから, 断層の総変位量は大きくなく, 比較的新しく形成された断層だと結論している。このため, 本研究ではブロック境界が北傾斜ではなく, 南傾斜であるといえるが, 傾斜角についてはさらなる調査が必要であると考えられる。

6. 結論

鹿児島・熊本・宮崎県境付近のブロック境界の位置および傾斜について検討を行った。26個のブロック断層モデルを作成し比較すると, 1997年3月26日に発生した鹿児島県北西部地震の東西に伸びる余震域をほぼ直線状に延長させたモデル(modf)がGNSS変位速度場を最も良く説明することがわかった。また, 北傾斜(80°)と南傾斜(85°)でも比較を行った結果, 南傾斜(85°)の方がモデルの領域全体の速度場によくフィッティングしていることがわかった。最終的に得られた鹿児島・熊本・宮崎県境付近の境界は, 過去の研究[7, 8]とも整合している。更に本研究の都城市付近における境界はGNSS観測線である都城ラインによる変位速度データがあるため, 約4kmの範囲にあるとすることができる。

謝辞

鹿児島大学理学部地球環境科学科島弧火山講座の宮町宏樹教授, 小林励司准教授, 鹿児島大学地震火山地域防災センター附属南西島弧地震火山観測所の八木原寛准教授には有益なご助言をいただいた。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の武田哲也博士には, 鹿児島県北西部地震震源域での反射法探査に関する資料を提供していただいた。感謝します。

参考文献

- [1] L. Wallace, S. Ellis, K. Miyao, S. Miura, J. Beavan, J. Goto, Enigmatic, highly active left-lateral shear zone in southwest Japan explained by aseismic ridge collision, *Geology*, 37(2009) 143-146.
- [2] H. Takayama, A. Yoshida, Crustal deformation in Kyushu derived from GEONET dat, *J. Geophys. Res.* 112(2007), B06413, doi:10.1029/2006JB004690.
- [3] 西村卓也, 測地学的データに基づくプレート間相互作用の解明, *測地学会誌* 57(2011) 1-14.
- [4] R. Dach, S. Lutz, P. Walter, P. Fridez, Bernese GNSS Software Version, Bern University, 852pp, 2015.
- [5] D. F. Argus, R. G. Gordon, C. DeMets, Geologically current motion of 56 plates relative to the no-net rotation reference frame, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12(2011), Q11001, doi:10.1029/2011GC003751.
- [6] R. McCaffrey, Crustal block rotations and plate coupling, in *Plate Boundary Zones*, *Geodynamics Series* 30(2002), S. Stein and J. Freymueller, editors, 101-122, AGU.
- [7] T. Nishimura, Y. Yokota, K. Tadokoro, T. Ochi, Strain partitioning and interpolate coupling along the northern margin of the Philippine Sea plate, estimated from Global Navigation Satellite System and Global Positioning System-Acoustic data, *Geosphere*, 14(2018), 535-551, doi:10.1130/GEOS1529.1.
- [8] L. M. Wallace, S. Ellis, K. Miyao, S. Miura, J. Beavan, J. Goto, Enigmatic, highly active left-lateral shear zone in southwest Japan explained by aseismic ridge collision, *Geology*, 37(2009), 143-146, doi:10.1130/G25221A.1
- [9] 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 中央構造線断層帯(金剛山地東縁—湯布院)の長期評価(第二版), 166pp, 2017 (https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/20171219_mtl.pdf).
- [10] 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 布田川断層帯・日奈久断層帯の評価(一部改訂), 66pp, 2013 (https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/93_futagawa_hinagu_2.pdf).
- [11] 木村学, プレート収束帯のテクトニクス学, 東京大学出版, 271pp, 2002.
- [12] 地震調査研究推進本部地震調査委員会, 警固断層帯の長期評価について, 66pp, 2007 (https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/108_kego.pdf).
- [13] G. P. Hayes, D. J. Wald, R. L. Johnson, Slab 1.0: A three-dimensional model of global subduction zone geometries, *J. Geophys. Res.*, 117 (2012), B01302, doi:10.1029/2011JB008524.
- [14] Y. Okada, Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 75 (1985), 1135-1154.
- [15] 向吉秀樹, 林広樹, 内田嗣人, 吉崎那都, 武田哲也, 後藤和彦, 関根秀太郎, 笠原敬司, 2018, 1997 年鹿児島県北西部地震余震域内の基盤から土壌までを切る断層の露頭, *地質学雑誌*, 124(2018) 361-366.
- [16] 武田哲也, 阿部進, 林広樹, 後藤和彦, 笠原敬司, 北傾斜の四万十層群を断ち切る 1997 年鹿児島県北西部地震の断層面, *日本地球惑星科学連合 2016 年大会*, SSS26(2016) P04