

(2-3) スマトラ-アンダマン地震の断層モデル

橋本 学 (京都大学防災研究所)

hasimoto@rcep.dpri.kyoto-u.ac.jp

(a) 業務の要約

震央から 600km 離れたタイ・プーケットでの約 26cm の西南西方向への変位など、東南アジアの GPS 連続観測により観測された地殻変動から、断層モデルを推定した。震源域の南半分で大きなすべりが生じたと推定され、断層運動全体の Mw は 9.12 と見積もられる。引き続き余効変動も大きく、Mw8 を超えるモーメントが余効すべりにより解放されたと推定される。

(b) 業務の実施方法

Hashimoto et al.(2006)¹⁾はチュラロンコン大学がタイ国内に設置しているGPS観測点 6 点、情報通信研究機構が設置している 3 点、静岡大学がタイに設置している 1 点、静岡大学と海洋開発研究機構がミャンマーに設置している 1 点、名古屋大学太陽環境研究所がスマトラに設置している 1 点とSOPACにより公開されているIGS観測点 20 点以上およびインドネシア測量局の 1 点のGPS連続観測データを用いて、2004 年スマトラ-アンダマン地震および 2005 年 3 月 28 日のニアス地震に伴う地震時および余効地殻変動を推定している。図 2.3.1 に 2004 年 12 月 26 日および 2005 年 3 月 28 日の地震時の変位を、図 2.3.2 に 2 つの異なる期間の余効変動を示す。これらの変位分布に断層モデルを当てはめ、すべり分布の推定を行った。震源断層の総延長が 1000km を超えるため、地球の曲率を考慮する必要があるが、ここではOkada (1985)²⁾の半無限弾性体の定式化を利用して、断層パラメータを推定した。なお、Banerjee et al. (2005)³⁾による球体におけるディスロケーションのモデル化では、同じ断層パラメータを仮定しても遠地の観測点の変位が大きくなること示されている (Banerjee et al., 2005³⁾:Supporting Material)。このため、ここで得られるすべりやモーメントなどのパラメータは上限を与えるものと考えられる。断層モデルは水藤・他 (2005)⁴⁾の 5 セグメントのモデルから幅・傾斜角を変えて、最適な断層モデルを求めた。なお、断層モデルの推定に当たっては、Earnest et al.(2005)⁵⁾によるアンダマン=ニコバル諸島の変位を、重みを小さくしてデータに加えている。また、セグメント間のすべりの滑らかさを先験的情報として用いた。

$$D_{i+1} - 2D_i + D_{i-1} = \delta \quad (1)、$$

D_i はすべりの横ずれあるいは縦ずれ成分、 δ は誤差 (正規分布を仮定)。 δ は、スマトラ-アンダマン地震については 5.0m、余効変動については、1.0mとした。

さらに、余効変動の断層モデルの推定では、観測点数が少なくなるため、すべり角を地震時変位のモデルから大きくずれないとする下記のような拘束条件も加えた。

$$-D_s \sin \lambda + D_d \cos \lambda = \varepsilon \quad (2)、$$

D_s および D_d は、それぞれすべりの横ずれおよび縦ずれ成分。 λ は仮定する地震時のすべり角。 ε は誤差 (正規分布を仮定)。ここでは、 ε を 0.1mで計算した。

(c) 業務の成果

図 2.3.1(a)に、スマトラーアンダマン地震時の変位に対して推定した断層モデルと計算変位もあわせて示す。推定されたすべりはニコバル諸島より南のセグメントで大きく、9~14m程度と推定される。北半分のアンダマン諸島下では、5~7mのすべりと推定される(表 1(a))。ただし、このモデルはアンダマン=ニコバル諸島の変位を定性的には説明できるが、定量的には最大で2 m程度の食い違いがある。断層の形状や不均一すべり分布などを考慮したモデル化も必要であるのは間違いない。ただし、アンダマン=ニコバル諸島での観測は、地震後は1月末に行われており、これまでの余効変動も含まれるため、これをどの程度評価するかによかなり任意性が残る。なお、傾斜については10°、12°で試したが残差の大きな減少は見られなかった。結論的には、主としてニコバル諸島より南側で大きなモーメント解放があったことが確認された。モーメントは $6.08 \times 10^{22} \text{Nm}$ 、Mwは 9.12 と推定される。

2005年3月28日に発生したニアス地震時の変位に対して、スマトラーアンダマン地震と同様に、水藤・他(2005)⁴⁾の断層モデルを用いてフィッティングした(図 2.3.1(b))。

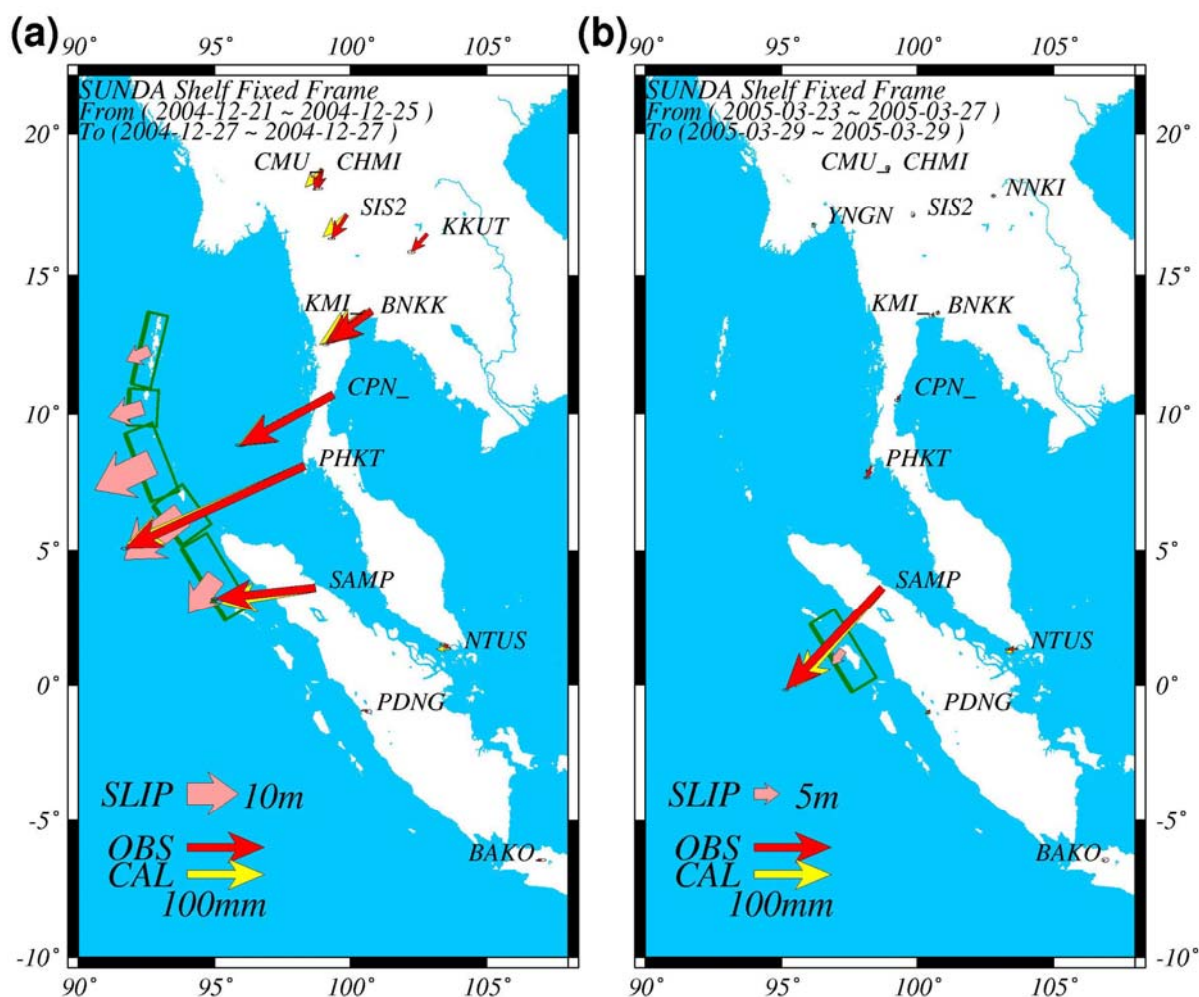


図1 2つの巨大地震の地震時変位の断層モデル:(a)スマトラーアンダマン地震、(b)ニアス地震。赤および黄色矢印は観測および計算変位。緑の矩形が用いた断層セグメントで、ピンクの太い矢印が推定されたすべりを示す。

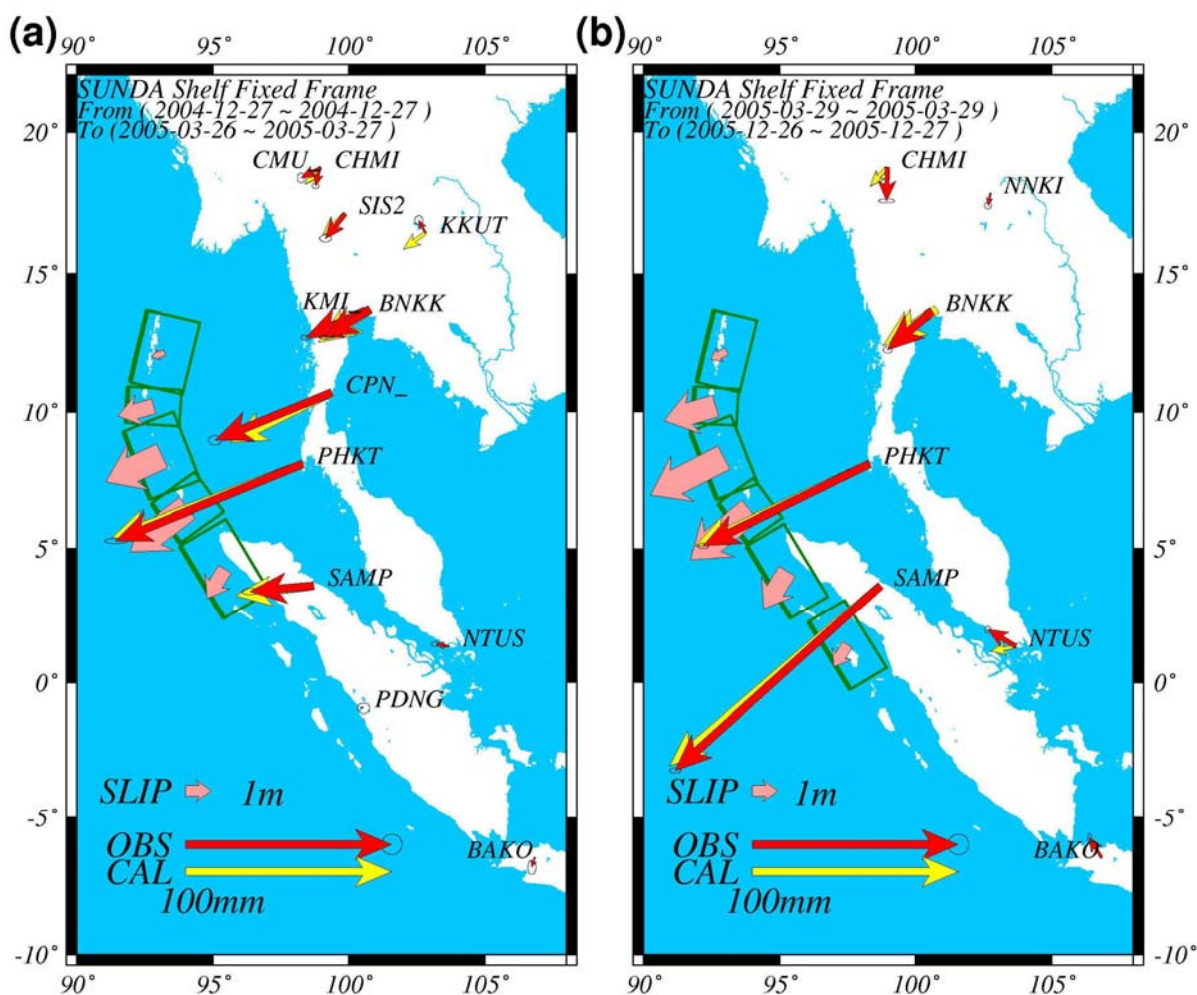


図2 2つの期間の余効変動の断層モデル：(a)スマトラ-アンダマン地震直後からニアス地震前日までの期間、(b)ニアス地震直後から2005年末までの期間。

サンパリの変位が20cm程度であるため、すべりは3.5m程度にしかならない(表1(b))。そのため、モーメントは 5.61×10^{21} Nm、 M_w は8.43と、CMT解などと比較してかなり小さいものとなる。周辺の臨時観測データなどと総合して解析し、再検討する必要がある。

図2.3.2(a)は、本震直後からニアス地震直前までの水平余効変動と、これに対する断層モデルである。180kmから220kmまでの幅を試したところ、220kmが最適と推定された。また、アンダマン諸島南部のセグメントまで顕著な逆断層のすべりが得られており、余効すべりが深部と北方へ伝播していった可能性がある。最も北のアンダマン諸島北部のセグメントのすべりは他と異なる方向となっているが、観測データが少ないため拘束されていないものと考えられる。なお、このモデルは均一すべりを仮定しているため、上限を与えるにとどまるが、参考にモーメント及び M_w を求めると、 1.88×10^{22} Nm、8.78と推定される(表1c)。

ニアス地震後2005年12月31日まで期間の余効変動は、本震とニアス地震両方の余効変動が重なって、サンパリの南西方向の変位が顕著である(図2.3.2(b))。この余効変動の断層モデルも合わせて示している。約9ヶ月間に1.0~3.2mのすべりが推定される。幅は

200kmが最適と推定され、3月以降余効すべりのさらに深部への伝播は起きていないと考えられる。なお、北部のセグメントについては、データがないため拘束できていないことに注意する必要がある。参考までにモーメントとMwを推定すると、 2.20×10^{22} Nm、8.83となる(表1d)。ニアス地震前の変動と合わせて、2005年9月中旬まで、余効変動により 4.08×10^{22} Nm、Mw9.01に相当するモーメントが解放されたと推定される。ただし、この値は均一すべりを仮定した断層モデルを用いているため、上限を与えるにすぎない。しかし、プーケットの地震時変位と余効変動の大きさを単純に比較しても、Mw8を超えるエネルギー解放が震源域付近で生じたと考えるのが妥当であろう。

表1 スマトラ-アンダマン地震およびニアス地震の地震時および余効変動の断層パラメータ。Lat.およびLon.: 断層セグメントの北西端の緯度・経度。L、W、Hは、それぞれセグメントの長さ、幅および上端の深さ(km)。 ϕ 、 δ はセグメントの走向と傾斜角(°)。Uはすべり量(m)で、UsおよびUdは、それぞれ横ずれおよび縦ずれ成分(m)。Moは地震モーメント(Nm)。剛性率は40GPaを仮定。Mwはモーメント・マグニチュード。

(a)2004年12月26日スマトラ-アンダマン地震の地震時変位に対する断層モデル

Lat.	Lon.	L	W	H	ϕ	δ	Us	Ud	λ	U	Mo	Mw
2.40	95.40	350	120	10	330	8	-3.53 ± 1.38	8.26 ± 0.80	113.12	8.98	1.51×10^{22}	8.72
5.20	93.80	200	150	10	325	8	-0.62 ± 2.34	14.32 ± 1.88	92.47	14.34	1.72×10^{22}	8.76
6.80	92.70	300	120	10	340	8	-1.17 ± 2.16	12.40 ± 1.83	95.40	12.46	1.79×10^{22}	8.77
9.60	91.80	150	120	10	5	8	-2.51 ± 2.51	6.50 ± 2.35	111.09	6.97	5.02×10^{21}	8.40
11.10	91.95	300	80	10	15	8	-3.18 ± 2.02	3.89 ± 2.08	129.24	5.03	4.83×10^{21}	8.39
Total											6.08×10^{22}	9.12

(b)2005年3月28日ニアス地震の地震時変位に対する断層モデル

Lat.	Lon.	L	W	H	ϕ	δ	Us	Ud	λ	U	Mo	Mw
-0.25	97.60	330	120	10	329	14	-1.32 ± 0.11	3.29 ± 0.07	111.84	3.54	5.61×10^{21}	8.43

(c)2004年12月27日から2005年3月27日までの余効変動に対する断層モデル

Lat.	Lon.	L	W	H	ϕ	δ	Us	Ud	λ	U	Mo	Mw
2.40	95.40	350	220	10	330	8	-0.65 ± 0.19	1.17 ± 0.21	118.85	1.34	4.13×10^{21}	8.34
5.20	93.80	200	220	10	325	8	-0.12 ± 0.19	2.81 ± 0.57	92.40	2.82	4.96×10^{21}	8.40
6.80	92.70	300	220	10	340	8	-0.21 ± 0.19	2.41 ± 0.55	94.87	2.42	6.40×10^{21}	8.47
9.60	91.80	150	220	10	5	8	-0.50 ± 0.32	1.37 ± 0.68	110.08	1.46	1.92×10^{21}	8.12
11.10	91.95	300	220	10	15	8	-0.29 ± 0.40	0.43 ± 0.47	124.62	0.52	1.37×10^{21}	8.02
Total											1.88×10^{22}	8.78

(d) 2005年3月29日から12月27日までの余効変動に対する断層モデル

Lat.	Lon.	L	W	H	ϕ	δ	Us	Ud	λ	U	Mo	Mw
-0.25	97.60	330	200	10	329	14	-0.48 ± 0.47	0.92 ± 0.30	117.32	1.04	2.47×10^{21}	8.20
2.40	95.40	350	200	10	330	8	-0.82 ± 0.84	1.53 ± 1.04	118.04	1.74	4.38×10^{21}	8.36
5.20	93.80	200	200	10	325	8	-0.23 ± 0.72	3.01 ± 2.16	94.40	3.02	4.35×10^{21}	8.36
6.80	92.70	300	200	10	340	8	-0.39 ± 0.78	3.21 ± 2.43	97.01	3.23	6.98×10^{21}	8.50
9.60	91.80	150	200	10	5	8	-0.75 ± 1.27	1.96 ± 2.75	111.01	2.10	2.27×10^{21}	8.17
11.10	91.95	300	200	10	15	8	-0.47 ± 2.16	0.52 ± 2.60	131.78	0.70	1.52×10^{21}	8.05
Total											2.20×10^{22}	8.83

(d) 結論ならびに今後の課題

東南アジアのGPS観測から得られた2004年12月26日に発生したスマトラ-アンダマン地震に伴う地殻変動から断層モデルを推定した。その結果、スマトラ北西からニコバル島に至る地域に大きなすべりが求められ、そのMwは9.12と推定される。アンダマン諸島下にもすべりは求められるが、南部よりかなり小さい。2005年3月28日のニアス地震に伴ってスマトラ北部を中心に変位が観測された。しかし、この変位から推定されるMwは8.44となり、地震波から見積もられるMwより小さくなる。余効変動はプーケットなどで大きく、余効すべりの断層モデルを推定すると、震源断層深部と北方へ余効すべりが伝播している可能性が示唆される。ニアス地震による余効変動とあわせて、2005年12月末までにMw8を超えるモーメントが解放されたと考えられる。

謝辞

本研究に当たっては、東南アジア各国の研究者の協力が不可欠である。以下の方々のご協力を頂いている。タイチュラロンコン大学橋爪道郎教授、ニティワトウーン・チューサクン氏、京都大学大学院理学研究科竹本修三教授、福田洋一助教授、藤森邦夫講師、瀧口博士氏、静岡大学理学部里村幹夫教授、JAMSTEC 伍培明氏、名古屋大学太陽環境研究所大塚雄一氏、情報通信研究機構齊藤亨氏、丸山隆氏、川村眞文氏、ミャンマー気象・水理局アウン・キー氏、コンケン大学スヌンタ・キンパイブーン教授、キング・モンクート工科大学ナロン・ヘマコーン教授、チェンマイ大学タラドル・コモルミス教授。また、京大グループと静岡大・JAMSTEC グループのタイおよびミャンマーにおける観測の一部は、平成16年度科学技術振興調整費「2004年スマトラ沖大地震及びインド洋津波被害に関する緊急調査研究」により実施された。IGSデータとインドネシア測量局のサンパリのデータについては、国土地理院およびSOPACのサイトから取得した。これらの機関にも謝意を表す。

(e) 引用文献

1) Hashimoto, M., Choosakul, N., Hashizume, M., Takemoto, S., Takiguchi, H., Fukuda, Y., and Fujimori, K.: Crustal deformations associated with the great Sumatra-Andaman earthquake deduced from continuous GPS observation, Earth

Planets Space, Vol.58, pp.127-139, 2006.

- 2) Okada, Y.: Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seismol. Soc. Amer., Vol.75, pp.1135-1154, 1985.
- 3) Banerjee, P. F.F. Pollitz, and Bürgmann, R.: The size and duration of the Sumatra-Andaman earthquake from far-field static offsets, Scienceexpress, /www.scienceexpress.org/19 May 2005/Page 1/10.1126/science.1113746, 2005.
- 4) 水藤尚, 飛田幹男, 今給黎哲郎, 海津優: 衛星画像に基づく 2004 年スマトラ沖地震の断層モデル, 地球惑星科学関連学会 2005 年合同大会予稿集, J113-010, 2005.
- 5) Earnest, A., Rajendran, C.P., Rajendran, K., Anu, R., Arun, G.M., and Mohan, P.M.: Near-field observations on the coseismic deformation associated with the 26 December 2004 Andaman-Sumatra earthquake, Current Science, Vol.89, pp.1237-1243, 2005.

(f) 成果の論文発表・口頭発表等

著者	題名	発表先	発表年月日
Hashimoto, M., M. Hashizume, N. Choosakul, S. Takemoto, Y. Fukuda and K. Fujimori	Crustal deformations associated with the Sumatra earthquake on December 26, 2004 derived From continuous GPS measurements	Asia Oceania Geoscience Society 2nd Annual Meeting, Singapore ,SE32/3A-01-6/2 02	2005 年 6 月 22 日
Hashimoto, M., N. Choosakul, M. Hashizume, S. Takemoto, H. Takiguchi, Y. Fukuda and K. Fujimori	Crustal Deformations Associated With the Great Sumatra-Andaman Earthquake Deduced From Continuous GPS Observations	APRU/AEARU Research Symposium on “Earthquake Hazards around the Pacific Rim”, Kyoto	2005 年 8 月 31 日
橋本学, N. Choosakul, 橋爪道郎, 竹本修三, 瀧口博士, 福田洋一, 藤森邦夫	GPS 連続観測で得られたスマトラ地震に伴う地殻変動	日本地震学会 2005 年度秋季大会 (札幌市)	2005 年 10 月 21 日
Hashimoto, M., N. Choosakul, M.	A geodetic fault model for the 2004 Sumatra-Andaman	2 nd International Workshop Strong Ground Motion Prediction and	2005 年 10 月 25 日

Hashizume, S. Takemoto, H. Takiguchi, Y. Fukuda, K. Fujimori	earthquake derived from CGPS data	Earthquake Tectonics in Urban Areas (東京都)	
橋本学, N. Choosakul, 橋爪 道郎, 竹本修 三, 瀧口博士, 福田洋一, 藤森 邦夫	GPS 連続観測で得られたスマ トラ地震に伴う地殻変動	日本測地学会第 104 講演会 (京都市)	2005 年 10 月 27 日
Hashimoto, M., N. Choosakul, M. Hashizume, S. Takemoto, H. Takiguchi, Y. Fukuda, K. Fujimori	Crustal Deformations Associated With the Great Sumatra-Andaman Earthquake Deduced From Continuous GPS Observation	Eos Trans. AGU, 86(52), Fall Meet. Suppl., Abstract, U21C-02	2005 年 12 月 6 日
橋本学, 橋爪道 郎, N. Choosakul, 竹本 修三, 瀧口博 士, 福田洋一, 藤森邦夫	東南アジアにおけるスマト ラ地震の余効変動	平成 17 年度京都大学防災研 究所研究発表講演会 (京都 市)	2006 年 2 月 22 日
Hashimoto, M., N. Choosakul, M. Hashizume, S. Takemoto, H. Takiguchi, Y. Fukuda, and K. Fujimori	Crustal deformations associated with the great Sumatra-Andaman earthquake deduced from continuous GPS observation	Earth, Planets and Space, Vol.58, 127-139, 2006	2006 年 2 月

(g) 特許出願, ソフトウェア開発, 仕様・標準等の策定
なし

(3) 平成18年度業務計画案

GPS 連続観測，稠密観測および三角・水準測量等西南日本の測地測量データをインバーションすることにより，南海トラフ沿いのプレート境界地震，主要活断層で発生する内陸地震の震源断層のマクロなパラメータを提供する．特に，近畿圏構造探査の結果に基づく新しい構造モデルを採用して，断層面上の固着領域の推定する．