

(1) 実施機関名：

名古屋大学

(2) 研究課題（または観測項目）名：

（和文）地震の発生における応力と間隙流体圧の役割

（英文）Roles of stress and pore-fluid pressure in earthquake generation

(3) 関連の深い建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

イ. 内陸地震

(4) その他関連する建議の項目：

1 地震・火山現象の解明のための研究

(3) 地震発生過程の解明とモデル化

(5) 地震発生及び火山活動を支配する場の解明とモデル化

ア. プレート境界地震と海洋プレート内部の地震

2 地震・火山噴火の予測のための研究

(1) 地震発生の新たな長期予測（重点研究）

ア. プレート境界巨大地震の長期予測

イ. 内陸地震の長期予測

(5) 本課題の5か年の到達目標：

本研究では、御嶽山のテクトニック環境と名古屋大学の地震観測成果を活かし、地震の発生における応力と流体の役割を理解することを目的とする。個々の地震の発生において、応力と流体の役割は多様性を示す可能性が高い。本研究では、クラスター解析により、地震活動を単独地震と前震・本震・余震型や群発地震型などのクラスター地震に分類し、応力の指標となる地震と間隙流体圧等の影響を受ける地震に分け、地震の発生における応力と間隙流体圧の役割を定量的に評価することを目指す。

また、過去に繰り返し巨大地震の震源域となってきた南海トラフ周辺域等の応力場についても、長期間の地震データから、安定的にテクトニック応力場とその時空間変化を推定することも検討する。

(6) 本課題の5か年計画の概要：

R6年度においては、CAMPスタンダードモデル（Hashimoto et al., 2004）による2つのプレート上面の情報を用いて、御嶽山周辺域の地震を（名大カタログ及び気象庁の一元化震源カタログ）、太平洋プレート内地震、フィリピン海プレート内地震、（それ以外の）陸のプレート内地震に分類する。特に陸のプレート内地震について、クラスター解析を用いて、単独地震とクラスター地震に分類する。

この結果を受けて、R7年度においては、単独地震と本震をデータとし、御嶽山周辺域の応力場の推定を行うとともに、2017年の中規模地震（M5クラス）前後の応力変化を評価する。

R8年度においては、R7の結果を直接的先験情報とし、余震のデータから応力場を推定する。この解析により、本震・単独地震と余震のメカニズム解の系統的な違いを調べる。

R9年度においては、R7年度の応力場の向きの情報から、実効摩擦係数をパラメータとして絶対応力場をモデル化し、弾性歪エネルギーに基づく地震破壊規準DEFSにより、余震活動の発生予測と実際の地震活動を比較し、地域の絶対応力レベルを考察する。

R10年度には、群発地震型のクラスターについて、発生場所、継続時間、規模等の情報を整理する。

また、群発地震型から本震・余震型へと発展したクラスターがあるかどうか調べる。更に、御嶽山周辺域の応力場や間隙流体圧場との比較を通じ、断層の強度低下と応力集中に着目しながら、群発地震の発生メカニズムを考察する。能登半島の群発地震活動との比較研究も行う予定である。

(7) 令和7年度の成果の概要：

・今年度の成果の概要

御嶽山周辺域の多様な地殻活動を理解するために、名古屋大学を含む諸機関の定常地震観測で得られた連続地震波形データに対し、WINシステムのイベント自動検出機能を利用した手動波形読み取り処理を行い、震源分布を把握すると共にデータを蓄積してきた。2024年7月からは、定常地震観測のデータに加え、独自の山頂連続地震観測網のデータを取り入れた準リアルタイム震源決定システムの運用を開始した。その約5か月後の2024年12月9日ごろより御嶽山の活動が活発化し、2025年1月16日には気象庁が火山噴火警戒レベルを1から2へと引き上げた。その後、1月21日には傾斜変動を伴う微動が発生し、火山活動の活発化は急速に収まり、2025年5月には気象庁により火山噴火警戒レベルを1に引き下げた。

この御嶽山のアンレストな活動や山麓での複数回のM3-4クラスの地震が発生した影響で、R7年度の震源決定処理は膨大なものとなった。2025年1月～2025年12月に発生した地震について、震源決定数は7582個に達した(図1)。御嶽山山麓では活発な群発地震活動があり、長期間のデータの蓄積や詳細なクラスター解析の成果として、これらの活動は御嶽山の北東麓、東麓および南東麓の3つのクラスターに分けられることが明瞭になってきた。南東麓のクラスターは1984年長野県西部地震の震源域の東端部にあたる。このほかに、R7年度には、御嶽山から数km離れたところで深さ30 kmを超える地震が例年より多く発生した(図1)。

震源決定された地震の中には、3122個の火山性地震が含まれている(図2の赤点線の枠の中)。1月の微動発生後に地震活動は急激に減少したが、5月から6月にかけては再び活動が活発化する傾向が見られた。その後は全体として活動は低調にあるものの、小幅な増減を繰り返しているようである。これらを踏まえて、R7年度は予定を変更し、アンレストに関連する火山性群発地震活動の分析を中心に研究を進めた。

2024年12月～2025年1月のアンレスト：地震活動と地震のメカニズム解

2024年12月から2025年1月に発生したアンレストに関連する地震のうち、名古屋大学で震源決定した地震は2771個にも及んだ。本研究では、火山性地震の震源分布の形状を調べるために、この期間に発生した地震群の重心と、震源の分散・共分散行列の3つの固有値と固有ベクトルについて、14日ごとのデータを7日間ずつずらしながら移動平均を計算した(図3)。この結果、地震群の重心の水平位置は、期間全体を通してほとんど変化しなかった。深さについては、活動が活発化した2024年12月ごろに、それまでの活動よりも1-2 km深い場所(海拔0.5 km)へと変化する様子が捉えられた。この深さは古期御嶽と基盤岩の境界付近に相当し(Maeda and Watanabe, 2023)、この領域での活動は2014年噴火前、2022年アンレストでも活発化していることがわかっている

(Maeda et al., under review)。今後、この深さでの活動が活発化したときには、噴火につながる可能性があるとして注視すべきである。また、期間全体を通じて、最大固有値(最大分散)に対応する固有ベクトルは鉛直方向であったが、中間及び最小固有値に対応する固有ベクトルは、それぞれ、2024年12月下旬ごろより横ずれ型広域応力場の最大主応力軸(S_{1R})及び最小主応力軸(S_{3R})の向きに平行になる傾向がみられた。このことは、一連の地震活動が流体の最も入りやすい最小主応力軸に直交する面(最小抵抗面)に沿うように分布することを示しており、地震活動が火山性流体の活動に関連する可能性があることを示唆する。

また、この期間に発生した地震のうち316個の地震については、P波初動の押し引きとS:P振幅比をデータとして、メカニズム解が推定された(Terakawa et al., under review)。このうち、2025年1月21日の傾斜変動を伴う微動の前の期間のものは196個、微動後のものは120個であった。この316個という推定数は、2014年噴火前後の2か月間(2014年8月31～10月31日)の推定数(47個)を大きく上回り、これは噴火後に整備された稠密地震観測網の効果である。これらの地震のメカニズム解について、この地域の広域応力場から予想されるすべりベクトルと実際のすべりベクトルの差(ミスフィット角 ϕ)を評価した。メカニズム解の誤差と応力場の誤差を考慮して、 $\phi \leq 65^\circ$ 及び $\phi > 65^\circ$ ならば、それぞれ応力場に調和的、非調和的であるとして地震を分類した(図4)。この結果、微動前には、123個(微動前の地震の63%)の地震が応力場に非調和的な地震であった。一方、微動後の期

間では、状況が一転し、89個（微動後の地震の74%）が応力場と調和的であった。このような地震のメカニズム解の変化のパターンは、2014年噴火前後にとらえられた傾向とよく似ていた

（Terakawa et al., 2016）。ミスフィット角は、地震による剪断歪エネルギーの解放率と深くかかわる物理量であり、90°を超えると、理論的には地震後に剪断歪エネルギーが上昇するという物理的矛盾が生じる。したがって、2014年の噴火前や今回のアンレスト時の微動前に広域応力場に非調和的な地震が顕著になることは、この期間に火山活動により応力場が広域応力場から有意にずれていた可能性を示す（Terakawa et al, 2025, under review）。

更に、メカニズム解のT軸の分布を調べると、微動前には二峰性を示すことがわかった（図5）。2つのピークのうち1つは最小主応力方向に、もう一つは最大主応力方向に一致し、それぞれ応力場に調和的及び非調和的地震に対応した。一方、微動後には、ほとんどのT軸は最小主応力方向に一致するように変化した。これに伴い、P軸の分布も、二峰性から単峰性へと変化した。このような微動前のT軸及びP軸の分布の二峰性は、2014年噴火前のデータにも認められる。しかし、当時はメカニズム解の数が少なく、二峰性として明確に認識されるには至っていなかった。

以上を踏まえると、微動前の時期に、この地域の水平最小主応力及び最大主応力方向が、微動前の期間には平常時のNNE-SSW及びWNW-SESから90°回転していた可能性を示唆する。有力なメカニズムとして、火山性流体の高まりによる周辺弾性領域への応力変動が考えられる。また、微動後にこのような応力場の乱れが減少したことは、今回のアンレストは噴火に至ってはいないものの、何らかの減圧プロセスが働いたことを示唆する。これは、微動後に急速に地震活動が減少することとも調和的である。

応力場の時間変化と熱水循環システムの発達

本研究では、前節でとらえられた地震のメカニズム解の特徴を境界条件とし、これを説明する熱水循環発達の概念モデルを提案した（Terakawa et al., under review）（図6）。このモデルでは、まず、横ずれ型広域応力場の下での（鉛直型の）最小抵抗面へ火山性流体が貫入し、そこで間隙流体圧が上昇することにより、そのクラック先端や面の側方の弾性体内に応力変動を引き起こす。この過程において、クラック側方での応力場が横ずれ型から逆断層型に変化し、そこでは最小抵抗面の向きが水平面へと変化する。この面の周辺でも流体の貫入や間隙流体圧の上昇により新たな応力変動が形成される。このモデルにより、御嶽山で観測される複雑なメカニズム解を統一的に説明できることを示した。

更に、このモデルを基に、流体活動の引き起こす応力変化による剪断歪エネルギーの増加が火山性群発地震の駆動力になっていることを説明した。また、間隙流体の上昇により体積ひずみエネルギーが増大するが、これはDC型の地震活動では解消されない。従って、体積ひずみエネルギーが限界になると火山噴火やVLP地震といった体積変化を伴うイベントが必然的に発生するという考え方を示した。応力は、地震の発生だけでなく、火山噴火の発生にも重要な役割を果たすと考えられる。

・「関連の深い建議の項目」の目的達成への貢献の状況と、「災害の軽減に貢献する」という目標に対する当該研究成果の位置づけと今後の展望

R7年度は、前年度に発生した御嶽山のアンレストのデータ分析を精力的に進めた。これまで準備してきた稠密地震観測網の効果により、ごく微小な火山性地震の震源及びメカニズム解を大量に推定することができるようになり、弾性歪エネルギーに基づいて火山性群発地震や火山噴火の発生メカニズムを解明する研究を進めることができた。本研究で捉えられたメカニズム解のT及びP軸の二峰性は、世界の多くの火山でも報告されており、火山地域に共通なメカニズムを反映した観測結果であることを示唆する。しかしながら、これまでに、微動前後・噴火前後に二峰性から単峰性へと時間変化するという報告はなく、本研究によるこの現象の指摘は大変重要である。これは、御嶽山での稠密観測でとらえられた良質なデータを活かし、大量のデータから広域応力場を基にした地震メカニズム解の分類を行ったことが新しい知見へとつながったものである。この結果を踏まえて、御嶽山地下の熱水循環システムの概念モデルを提示し、これが作り出す応力変動をモデル化し、御嶽山で観測される複雑な地震活動を説明するとともに、群発地震や火山噴火のメカニズム解明へとつなげる道を提示した。これは、今後、地震学・火山学において、新たな展開をもたらす可能性があり、将来的には、災害の軽減にも結び付けてゆきたい。

(8) 令和7年度の成果に関連の深いもので、令和7年度に公表された主な成果物（論文・報告書等）：

・論文・報告書等

・学会・シンポジウム等での発表

寺川寿子, 中小地震の活動度変化と ΔEFS に基づく絶対応力状態把握の試み, 日本地球惑星連合大会, 千葉, 2025.5.30

Terakawa, T., Understanding the stress state based on temporal changes in the activity of small to mid-sized earthquakes, IASPEI, Lisbon, 2025.9.2

村岡宏亮・寺川寿子, 豊後水道及び東海地域における長期的スロースリップとスラブ内間隙流体圧の関係, 日本地震学会秋季大会, 新潟, 2025.10.20

寺川寿子・前田裕太・堀川信一郎, 御嶽山の熱水循環システムにおける火山構造成地震の役割, 日本火山学会, 松本, 2025.10.3

寺川寿子・前田裕太・堀川信一郎, 御嶽山における火山性群発地震を駆動する物理メカニズムの考察, 日本地震学会秋季大会, 新潟, 2025.10.21

前田裕太・寺川寿子・山中佳子・堀川 一郎, 2025, 御嶽山の2024~2025年の地震活動, 日本地球惑星科学連合大会, SVC32-11

(9) 令和7年度に実施した調査・観測や開発したソフトウェア等のメタ情報:

(10) 令和8年度実施計画の概要:

名古屋大学を含む諸機関の定常地震観測で得られた連続地震波形データを活用し, 御嶽山周辺域の地震の震源決定とメカニズム解の推定解析を実施し, データの蓄積を進める. R6年度に実施した地震のクラスター解析の結果に基づき, 応力場の情報を持っていると考えられる単独イベントと本震のメカニズム解から, CMTデータインバージョン法(Terakawa and Matsu'ura, 2023)により御嶽山周辺域の応力場を推定する. また, 本年度実施したアンレストに関連する地震のメカニズム解を拘束条件に, 地下の流体圧場の時間発展を推定することも目指してゆきたい.

(11) 実施機関の参加者氏名または部署等名:

寺川寿子(名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター), 前田裕太(名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター), 山中佳子(名古屋大学減災連携研究センター), 堀川信一郎(名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター)
他機関との共同研究の有無: 無

(12) 公開時にホームページに掲載する問い合わせ先

部署名等: 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター
電話: 052-789-3046
e-mail: terakawa@seis.nagoya-u.ac.jp
URL:

(13) この研究課題(または観測項目)の連絡担当者

氏名: 寺川寿子
所属: 名古屋大学大学院環境学研究科附属地震火山研究センター

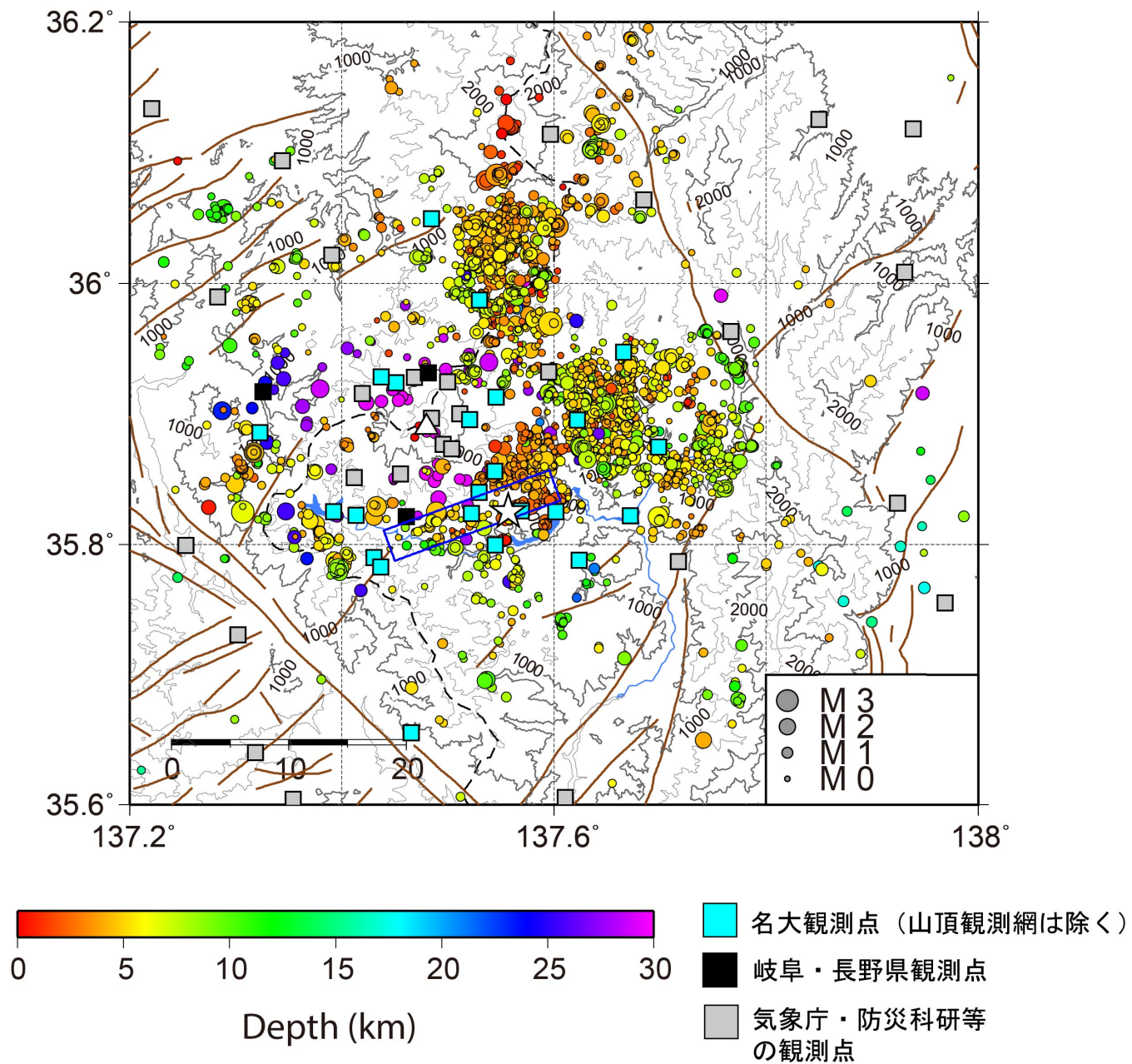


図1：御嶽山周辺域の地震活動（2025.1-2025.12）と観測点分布。
△は御嶽山，☆と青線の矩形は1984年長野県西部地震の震源と震源断層。

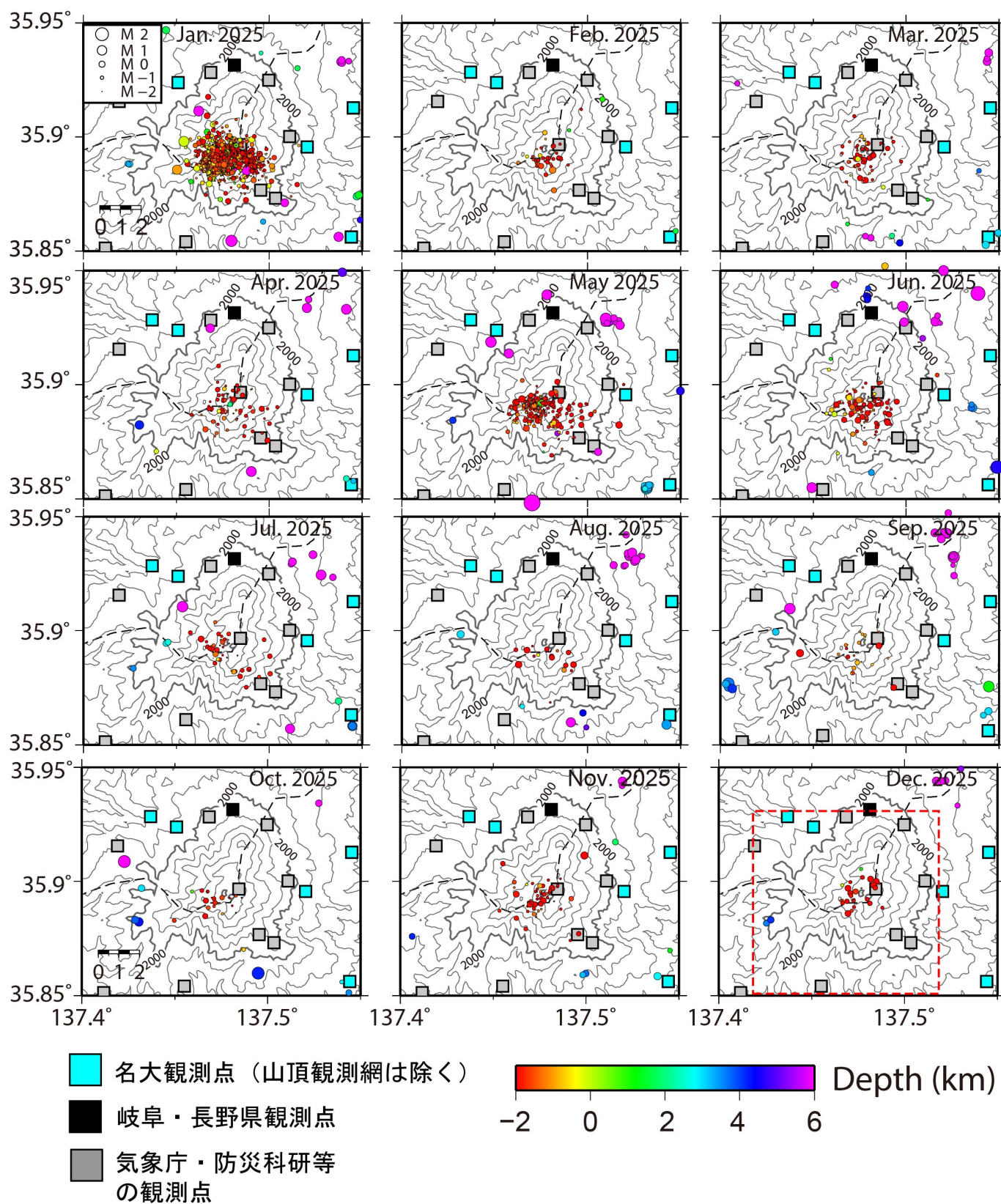


図2：御嶽山直下で発生した火山性地震の震源分布（2025年1月～12月）
観測点の記号は図1と同様。

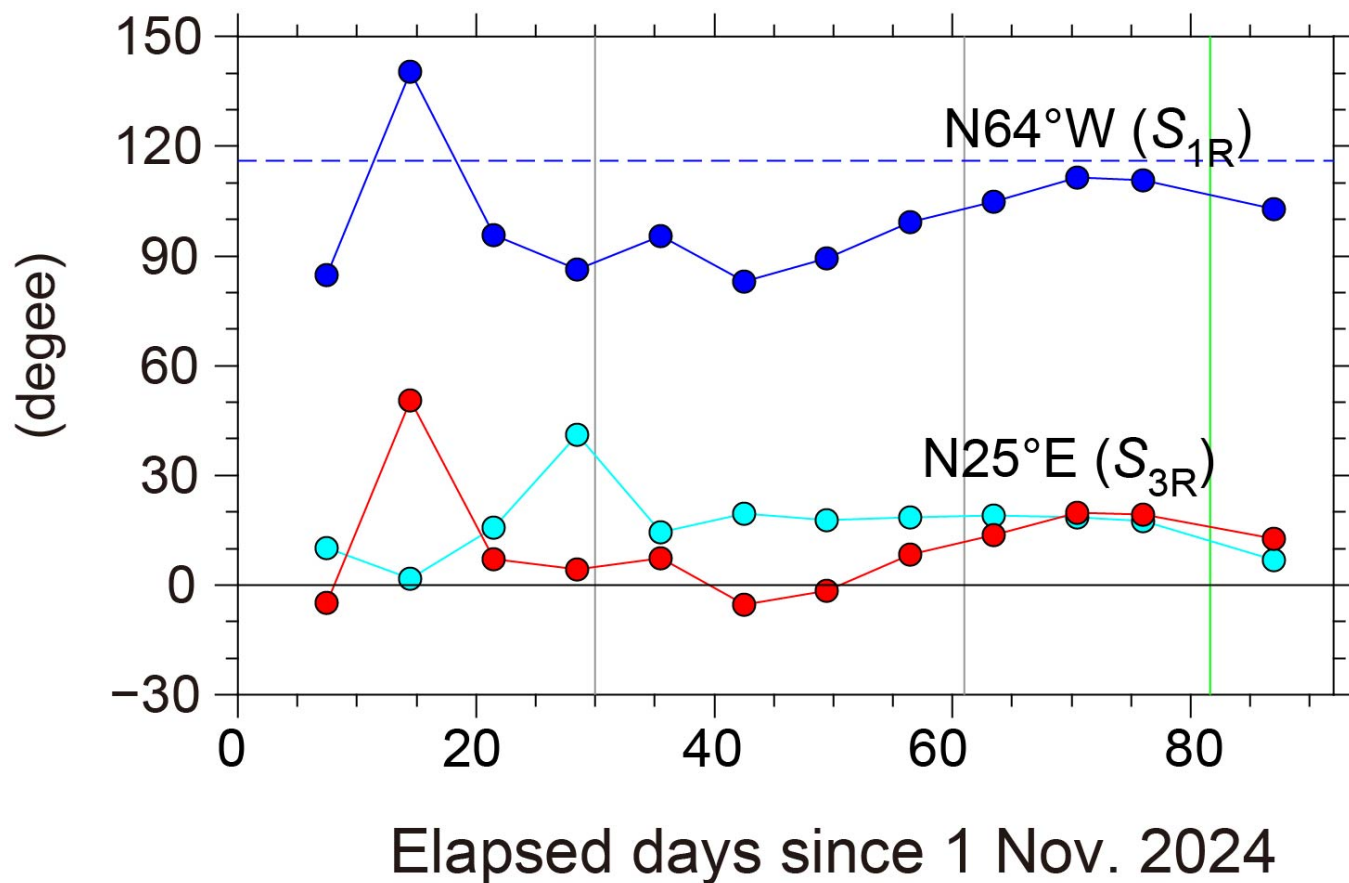


図3：火山性地震震源の分散共分散行列の固有ベクトルの向きの変時間変化。

水色，青，赤は，それぞれ最大，中間，最小固有値（分散の最大，中間，最小値）に属する固有ベクトルの方向を表す．最大固有値に対応する固有ベクトルの向きは，鉛直方向からのずれを，中間及び最小固有値に対応する固有ベクトルの向きは水平面内の方向を表す（Terakawa et al, under review）．

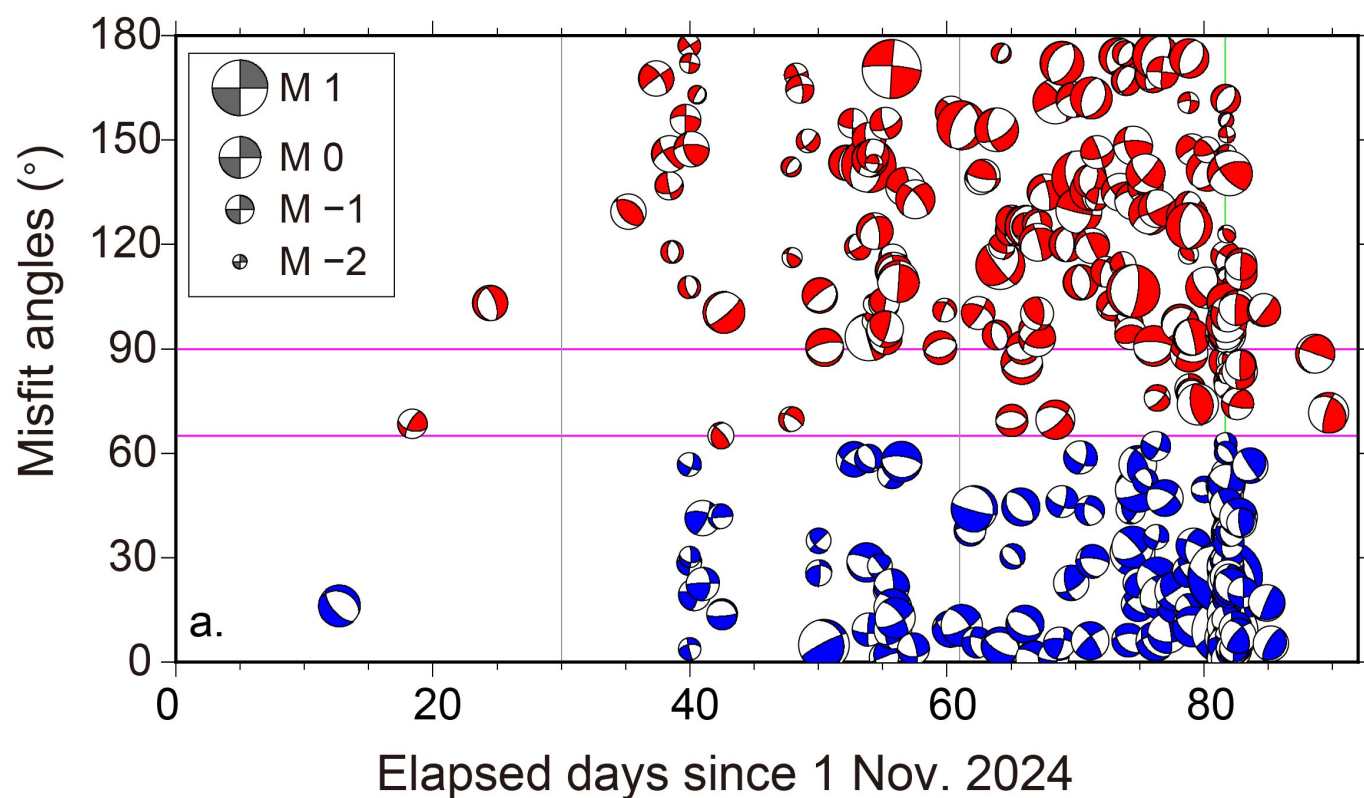


図4：火山性地震のメカニズム解とミスフィット角。

横軸は2024年11月1日からの経過日数，縦軸は広域応力場に基づくミスフィット角 ϕ を表す（Terakawa et al, under review）．青，赤の震源球は， $\phi \leq 65^\circ$ ， $\phi > 65^\circ$ のイベントを表し，それぞれ広域応力場に調和的，非調和的な地震であることを示している．緑の縦線は2025年1月21日の微動発生時を示す．

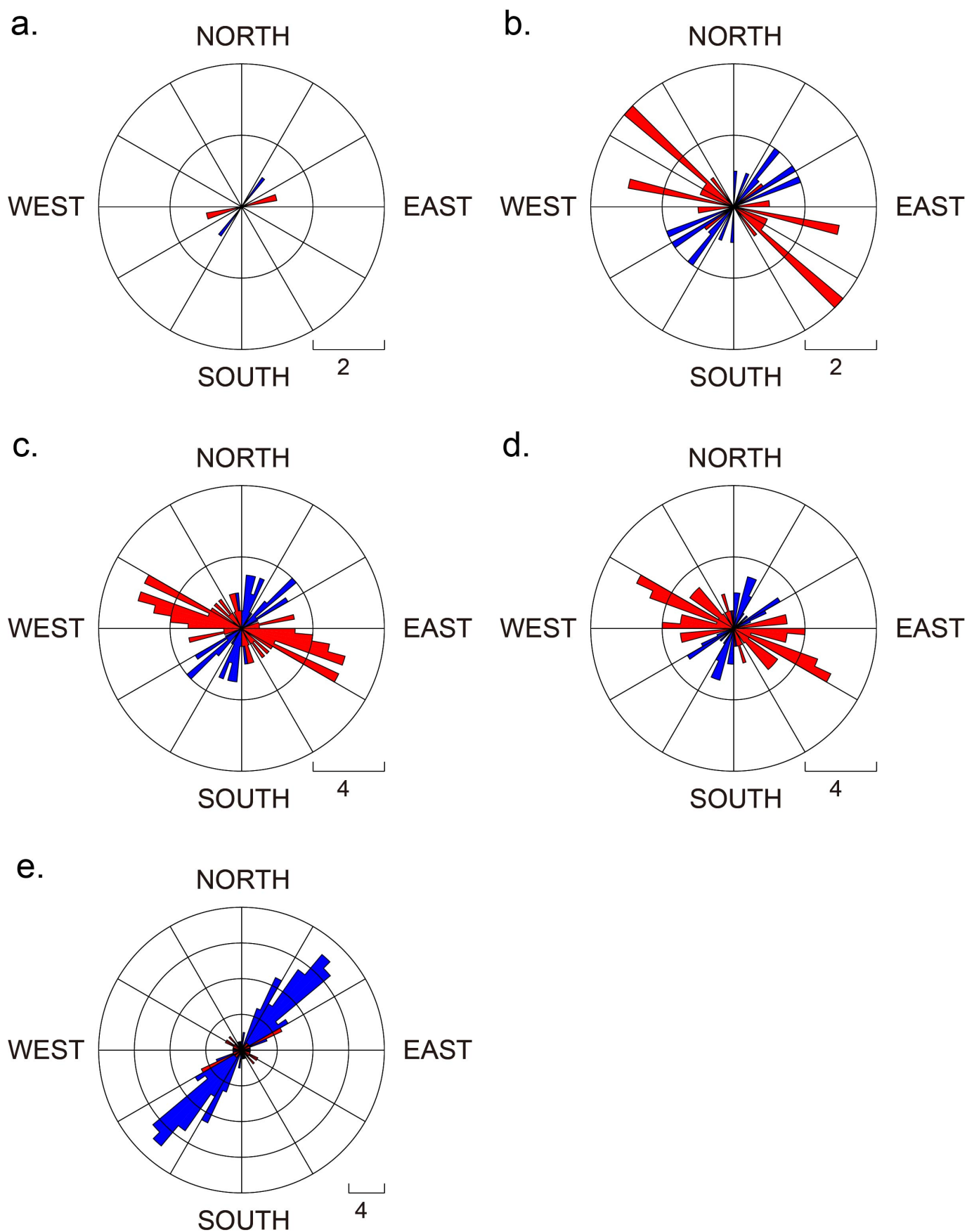


図5:地震メカニズム解のT軸の分布 (Terakawa et al, under review) .

a. 2024年11月1日～12月5日, b. 12月6日～19日, c. 12月20日～2025年1月9日, d. 1月10日～20日, e. 1月21日～31日.

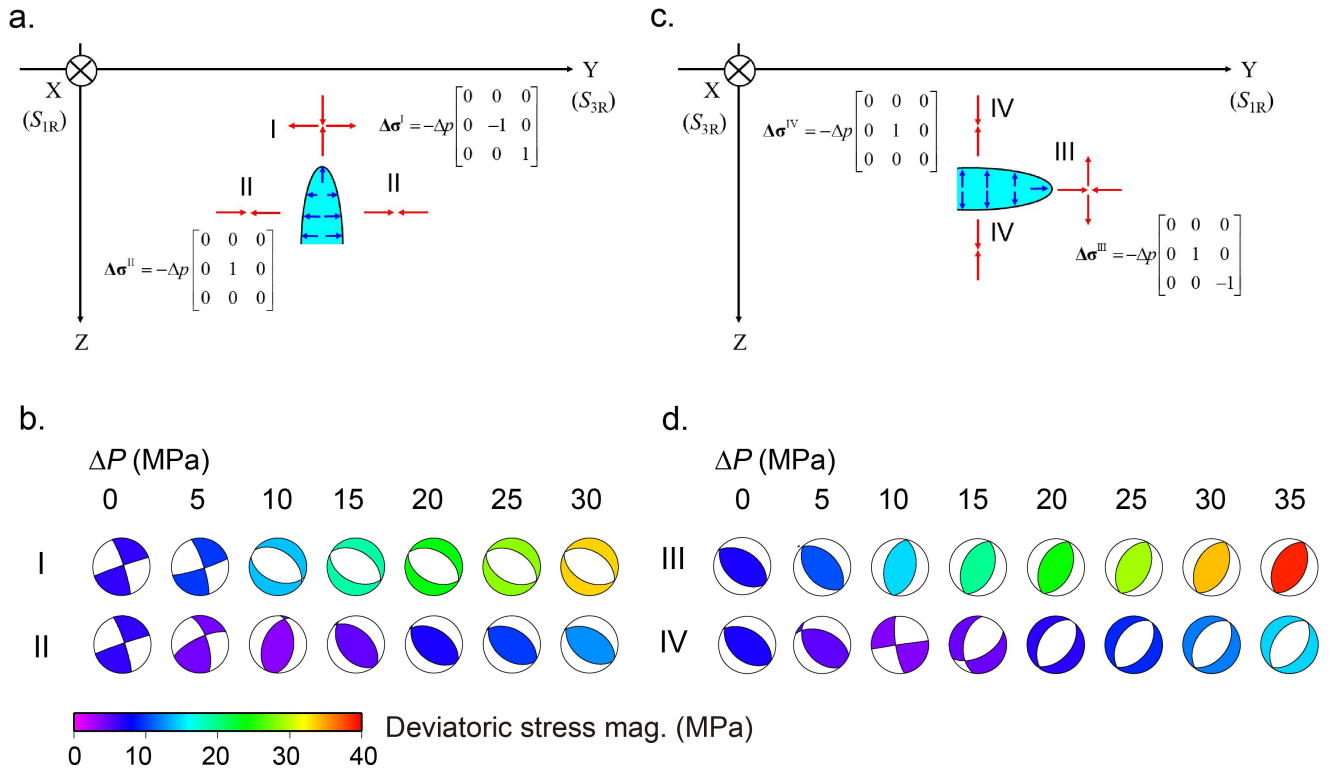


図6：流体活動による応力変動の概念モデル (Terakawa et al, under review) .

a. 広域応力場の鉛直型最小抵抗面への間隙流体の貫入と圧力上昇に伴う応力変動. Area I は下部からの間隙流体の貫入による応力変化 ($\Delta \sigma^I$), Area II は間隙流体圧の上昇による亀裂側面での応力変化 ($\Delta \sigma^{II}$) を受ける. b. aのモデルによる間隙流体圧の上昇に伴う応力変動. I及びIIは, それぞれaのArea I及びIIでの応力変動を表す. 間隙流体圧上昇に伴い, Area IIで応力場が逆断層型に変化し, ここでの最小抵抗面が水平面へと変化する. c. 水平型最小抵抗面への間隙流体の貫入と圧力上昇に伴う応力変動. Area III及びIVは, 水平方向の間隙流体の貫入による応力変化 ($\Delta \sigma^{III}$) と圧力上昇をによる亀裂側面での応力変化 ($\Delta \sigma^{IV}$) を受ける. d. cのモデルによる間隙流体圧の上昇に伴う応力変動. III及びIVは, それぞれcのArea III及びIVでの応力変動を表す.