

火山基盤観測としての地殻変動観測

北海道大学 大学院理学研究院
附属地震火山研究観測センター

青山 裕



- 水平変位
 - ~~三角測量~~
 - GNSS観測
 - SAR観測
- 垂直変位
 - 水準測量
 - GNSS観測
 - SAR観測
- 変位の空間微分量
 - 傾斜観測
 - ひずみ観測

それぞれの観測・測量方法によって

- 観測精度
- 時間分解能

が大きく異なるほか、観測量の種類によって信号の距離依存性も異なるため、即応性が求められる場合もある火山活動評価のためには、適切に組み合わせて活用することが望ましい

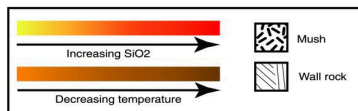
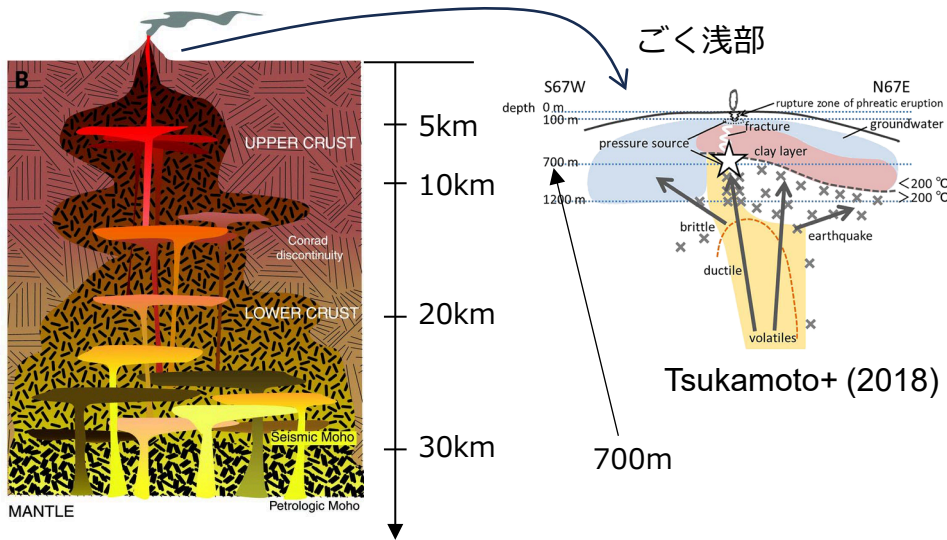
研究開発要素の強いもの

- 地上設置型SAR
- 地下水位によるひずみ観測
- . . .



火山現象と深度

深さ	火山現象	地殻変動の観測対象
深部 (10km~30km)	・ 地殻へのマグマ上昇	・ 深部地殻変動
マグマだまり (5km~10km)	・ マグマだまりへのマグマ供給/蓄積	・ マグマだまりを圧力源とする地殻変動
浅部 (~5km)	・ マグマだまりからのマグマ上昇/貫入 ・ マグマ噴火の前駆現象/噴火過程	・ 火道を圧力源とする地殻変動 ・ 噴火現象/表面現象
ごく浅部 (~1km)	・ 水蒸気噴火の前駆現象/噴火過程	・ 火口近傍やシーリング層直下を圧力源とする地殻変動 ・ 噴火現象/表面現象

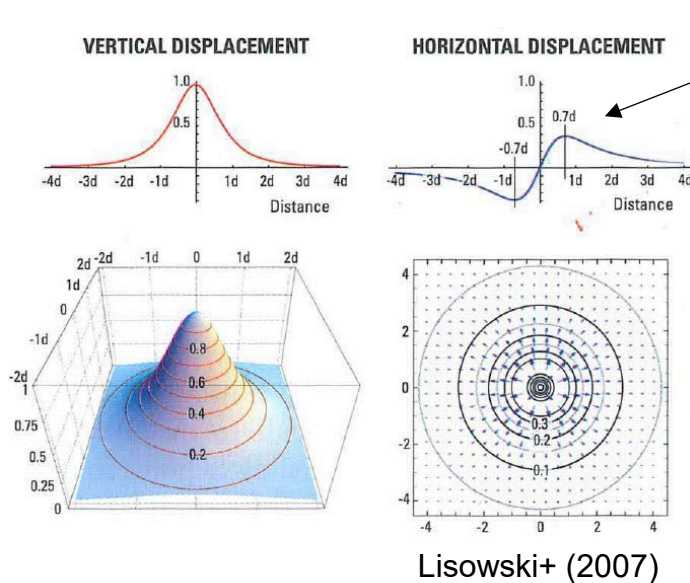


Cashman+ (2017)

評価・予測に必要な事項

- ・ 変動の検知
- ↓
- ・ 変動源の位置, 形状の把握
- ↓
- ・ 変動規模（体積変化量等）の把握
- ↓
- ・ 変動源の移動の追跡・・・

- GNSS測量で把握される変位（球状圧力源の例）



0.7d (d : 圧力源深度)

- 鉛直最大変位は圧力源直上
- ★ 水平最大変位は圧力源深さに対して0.7倍の距離

0.5d～2dの距離を変位の適切観測距離とした場合

圧力源深さ	適切観測距離
深部 (10km～30km)	5km～60km
マグマだまり (5km～10km)	2.5km～20km
浅部 (～5km)	～10km
ごく浅部 (～1km)	～2km

GEONET 平均観測点間距離 20～25km

V-net 主要火口－観測点間距離 3～12km

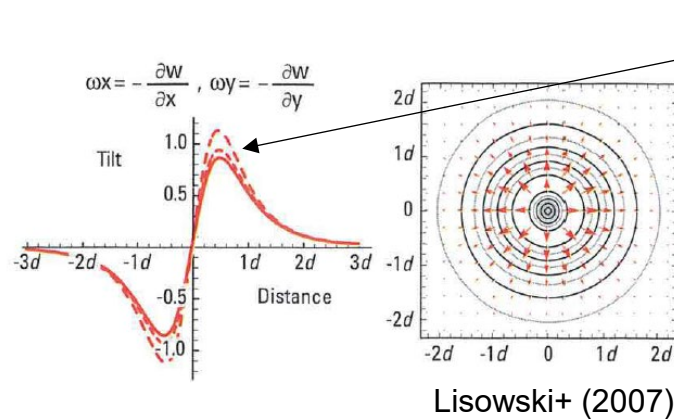
気象庁 主要火口－観測点間距離 0.2～7km
(十勝岳の場合)



浅部 (数km) ～深部 (30km) を変動源とする現象が、深さに応じた一定の規模以上 (ノイズレベルを超える信号となる規模) で発生すれば検出可能



- 傾斜計で把握される変位の空間微分量（球状圧力源の例）



- ・ 圧力源直上では0
- ★ 最大傾斜変化は圧力源深さに対して0.5倍の距離
- ・ 増圧変化では、どの距離でも山体隆起の極性

0.2d～2dの距離を傾斜の適切観測距離とした場合

圧力源深さ	適切観測距離
深部（10km～30km）	2km～60km
マグマだまり（5km～10km）	1km～20km
浅部（～5km）	～10km
ごく浅部（～1km）	～2km

V-net 主要火口－観測点間距離 3～12km

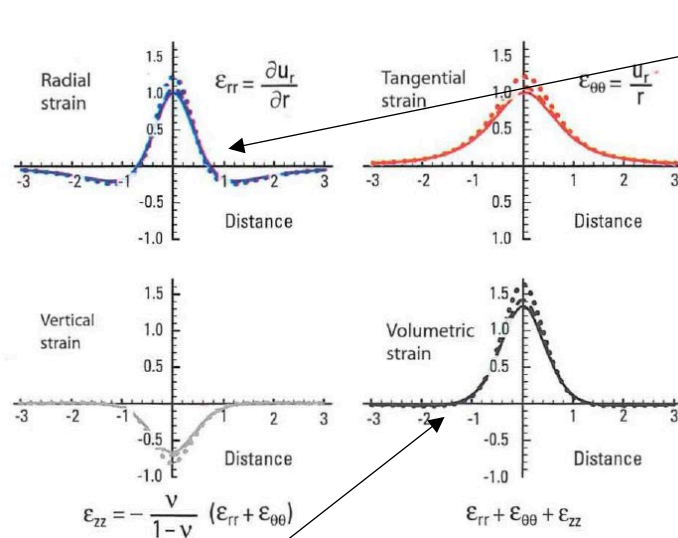
気象庁 主要火口－観測点間距離 1～3km
（十勝岳の場合）



火山基盤観測網は、マグマだまり程度の深さの現象までに対応。変動源に近すぎて、マグマだまりより深部の情報は得られない可能性も



- ひずみ計で把握される変位の空間微分量（球状圧力源の例）



$d/\sqrt{2}$ で極性反転 (d : 圧力源深度)

- ひずみは様々な測定成分がある
- 体積ひずみもその一つ

- 圧力源直上で最大

★体積ひずみは深さ d の $\sqrt{2}$ 倍の距離で極性反転



極性反転の情報から深さを制約できる
⇒ 傾斜変化にはない特徴

$d/\sqrt{2}$ で極性反転 (d : 圧力源深度)

Lisowski+ (2007)

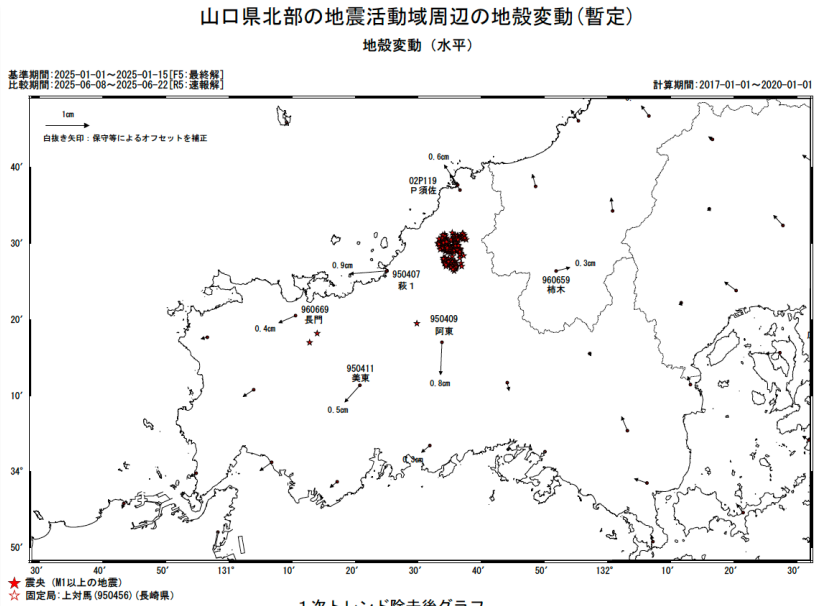
～ d の距離をひずみの適切観測距離とした場合

圧力源深さ	適切観測距離
深部 (10km～30km)	～30km
マグマだまり (5km～10km)	～10km
浅部 (～5km)	～5km
ごく浅部 (～1km)	～1km

気象庁の東海観測網ではひずみ計の地震業務監視を導入済。産総研も東南海に展開中。火山では、大学の横坑（樽前山、阿蘇山、桜島等）や縦坑（岩手山等）に限られる？

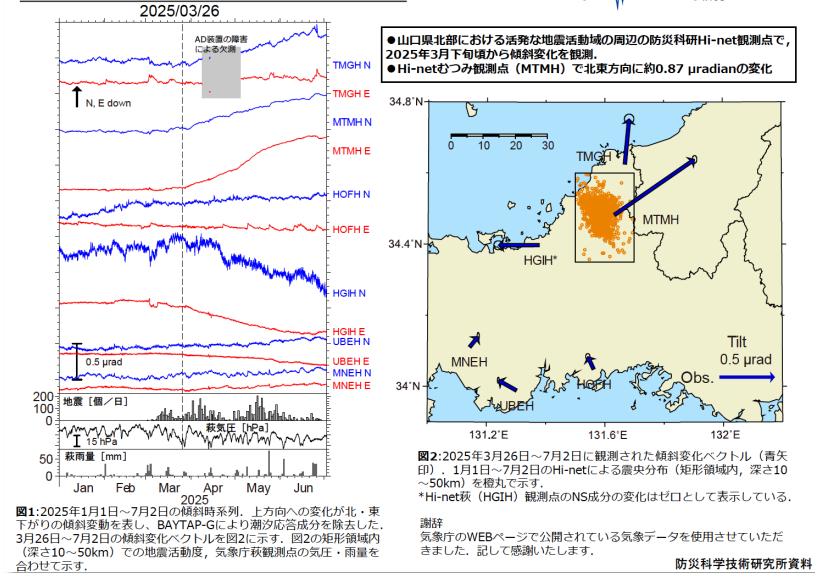


- 国内では火山の深部地殻変動を直接扱った事例は少ないが，2025年3月からの山口県北部における地震活動に際して，地殻深部が変動源と推察される変動が検出・解析されている



地震調査委員会資料（2025.6）

山口県北部の地震活動に伴う傾斜変動



地震調査委員会資料（2025.6）

- GEONET（左）により放射状の変位ベクトルが広範囲で確認されている
- Hi-net観測点の高感度加速度計（右）でも，この活動に対応した傾斜変動が検出されており，火山の深部活動を把握する上で有効なデータとなる可能性を示唆している



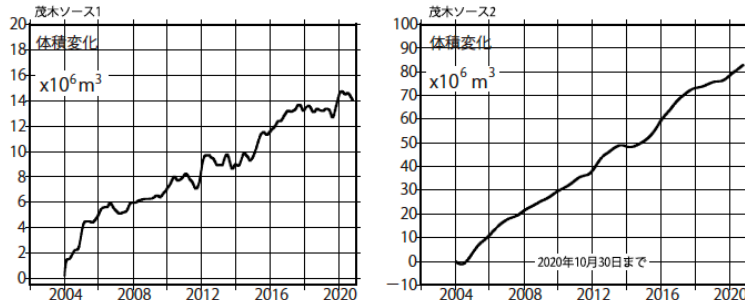
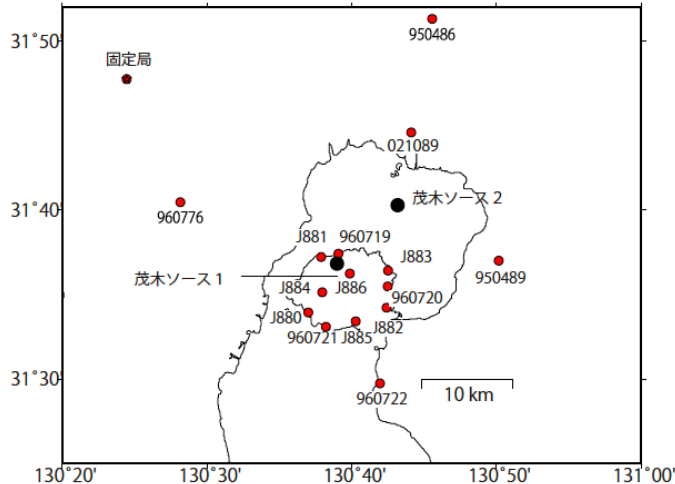
第147回火山噴火予知連絡会

国土地理院

桜島の茂木ソースの位置と体積変化

時間依存のインバージョン解析

2020年以降、始良カルデラの茂木ソースは膨張、桜島の茂木ソースはやや収縮



茂木ソース1: 緯度 31.614° 経度 130.650° 深さ 5km
茂木ソース2: 緯度 31.671° 経度 130.720° 深さ 10km
*電子基準点の保守等による変動は補正済

第5図 時間依存インバージョンの手法による桜島の変動源の体積変化推定・茂木ソース2つを仮定
(上段: 推定に用いた観測点(赤点)の配置と茂木ソースの位置(黒丸)、
下段左、推定された茂木ソース体積の時間変化・桜島直下、
下段右、推定された茂木ソース体積の時間変化・始良カルデラ深部)

桜島

- マグマだまりに相当すると考えられる圧力変動源の位置が推定されている火山では、基盤観測網のデータからマグマだまりの体積変化を時間的に追跡することが可能（国土地理院）
- 表面的な火山活動に直接の関連が示唆されるマグマだまり（膨張・収縮がとらえられる）の位置が分かっている火山は国内にどれだけあるか？

例) 桜島・浅間山・新燃岳...

事務局で網羅的に文献調査して欲しい

第147回噴火予知連絡資料（2020）



- 異常検出に留まらず、活動評価の内容や精度を向上させるには、観測点の距離と方位の均質性や、想定すべき現象を考慮した配置計画が重要

Q1. 対象とすべき変動源の位置や形状の情報があるか

- ある ⇒ 観測点数が限られても、変動源を仮定した解析で変化の追跡が可能
- ない ⇒ 変動源の位置・形状をとらえるのに適した観測網の構築が必要

Q2. 評価を想定すべき噴火様式はどちらか

- マグマ噴火 ⇒ マグマだまりや浅部に感度を持つ観測距離に基盤観測点が必要
- 水蒸気噴火 ⇒ 想定火口域の近傍（～2km程度）に基盤観測点が必要。傾斜やひずみでのみ検出できる微小規模の変動であることが一般的（例えば、御嶽山・雌阿寒岳）

Q3. どのレベルまでの活動評価を目指すか

- 異常検出 ⇒ 適切観測距離内に1～2点あれば可能
- 変動源位置の把握 ⇒ 方位に偏りがなく適切観測距離内に4点程度
- 変動源形状の把握 ⇒ 方位・距離に偏りが無い条件で適切観測距離内に4点以上
- 変動源移動の把握 ⇒ どこまで即時対応する？

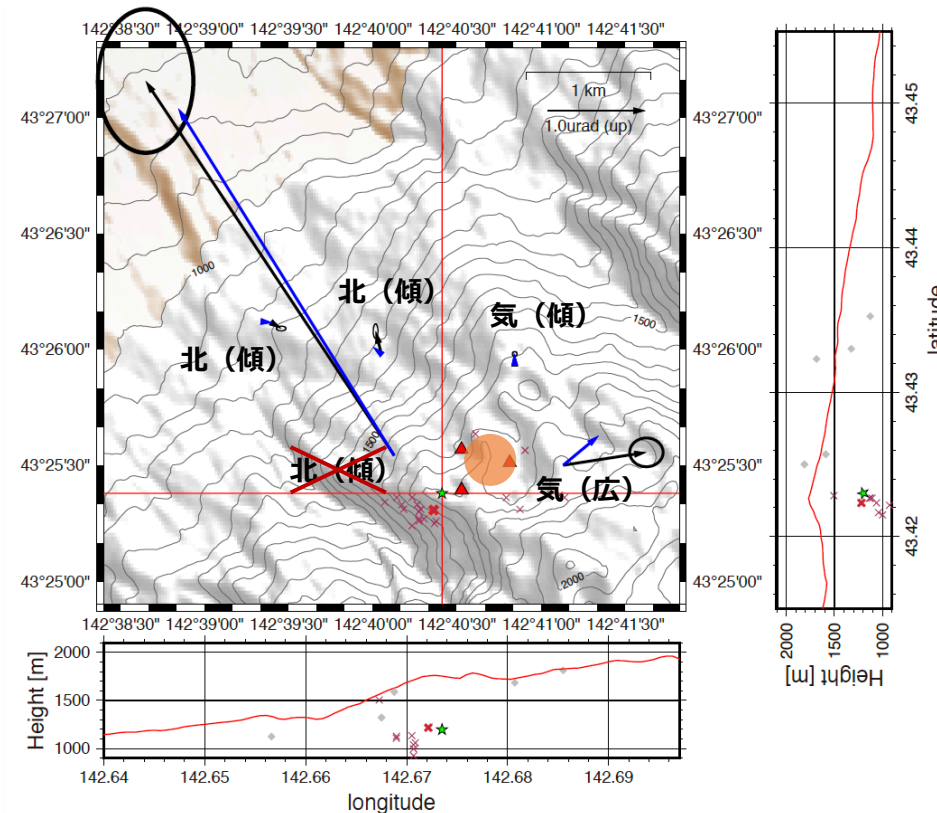
対象とする火山現象が浅く・小さくなるほど、活動評価に要求される観測点数/観測点配置の条件を適切観測距離内で満たすことが難しくなる

⇒ **水蒸気噴火規模の現象捕捉は、気象庁観測網に全面的に依存する状態**



- 気象庁および北大で観測体制強化を進めてきた十勝岳の傾斜変動解析の例

⇒ 突発的な水蒸気噴火等のごく浅部活動を評価する上で重要な現象という認識



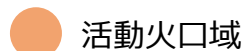
- 火口から距離2.7kmほどの**V-net観測点（十勝岳温泉）では信号検出不能**

- 5点の火口近傍傾斜観測点のうち
 - 北大傾斜 3点
 - 気象台傾斜 1点
 - 気象台広帯域 1点

観測点配置が北半分に偏っているため、**5点あっても圧力変動源の位置と形状を精度良く定めることは極めて困難**

最近接の北大傾斜観測点（前十勝西）は、地熱活動域の拡大で障害停止中

近内修士論文（2023.3）



活動火口域

← 観測傾斜ベクトル

← 理論傾斜ベクトル

気象庁の基盤観測点のみとなれば、

- 傾斜イベント検出 ⇒ ○
- 変動源位置/形状の把握 ⇒ ×



岩手山の活動評価のための資料（第4回火山調査委員会 気象庁作成）

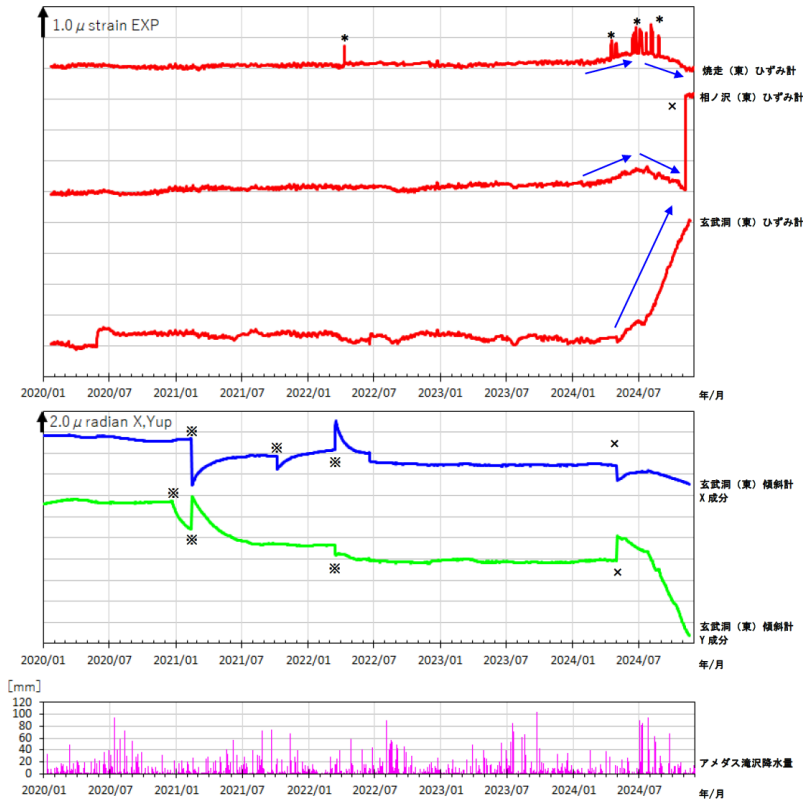


図7 岩手山 ひずみ計・傾斜計（日値・一次トレンド補正済み）による地殻変動の状況（2020年1月～2024年11月）

- ・空白部分は欠測を示す。
- ・（東）は東北大学の観測点を示す。
- ・玄武洞（東）傾斜計のX成分はN43° E方向、Y成分はN133° E方向を正の向きとする。
- ※：収録機器の不具合による変動。 ×：火山活動に起因しない変動
- ※：岩手山周辺で震度4以上の揺れを観測した地震の強震動による変動。2024年4月2日にも岩手山周辺で震度4以上の揺れを観測しており、（※）の傾斜変動は火山性の変動のみではなく、強震動の影響が重畳していると考えられる。

岩手山周辺のひずみ計では、2024年2月頃から山体膨張を示唆する変化（青矢印）が認められる。岩手山の火山活動が活発化した1998年にも同様の変化がみられていた。

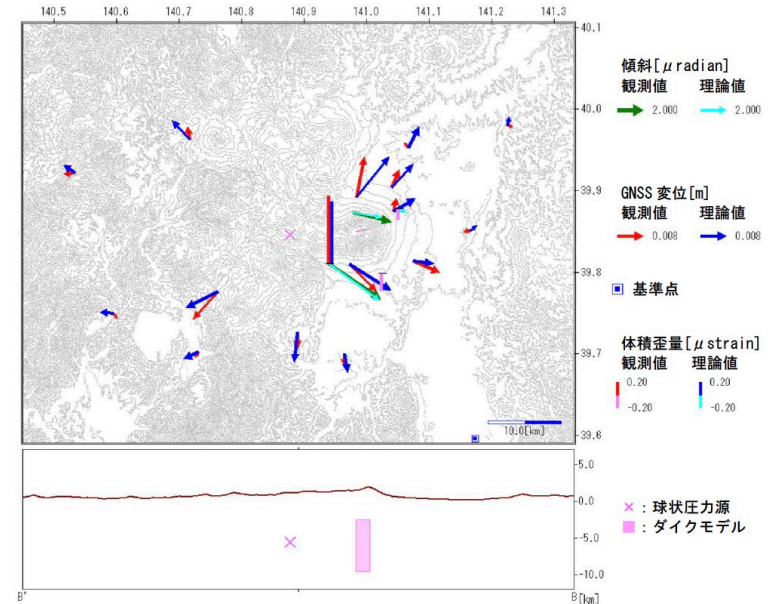


図13 岩手山 地殻変動観測から推定される変動源（期間③：2024年7月26日～10月4日）

- ・予備的解析により得られた山体直下のダイクモデルと山体西側の球状圧力源の位置と形状を仮定し、各変動源の体積変化量をグリッドサーチで推定した。
- ・各観測データの補正は、図10と同様である。

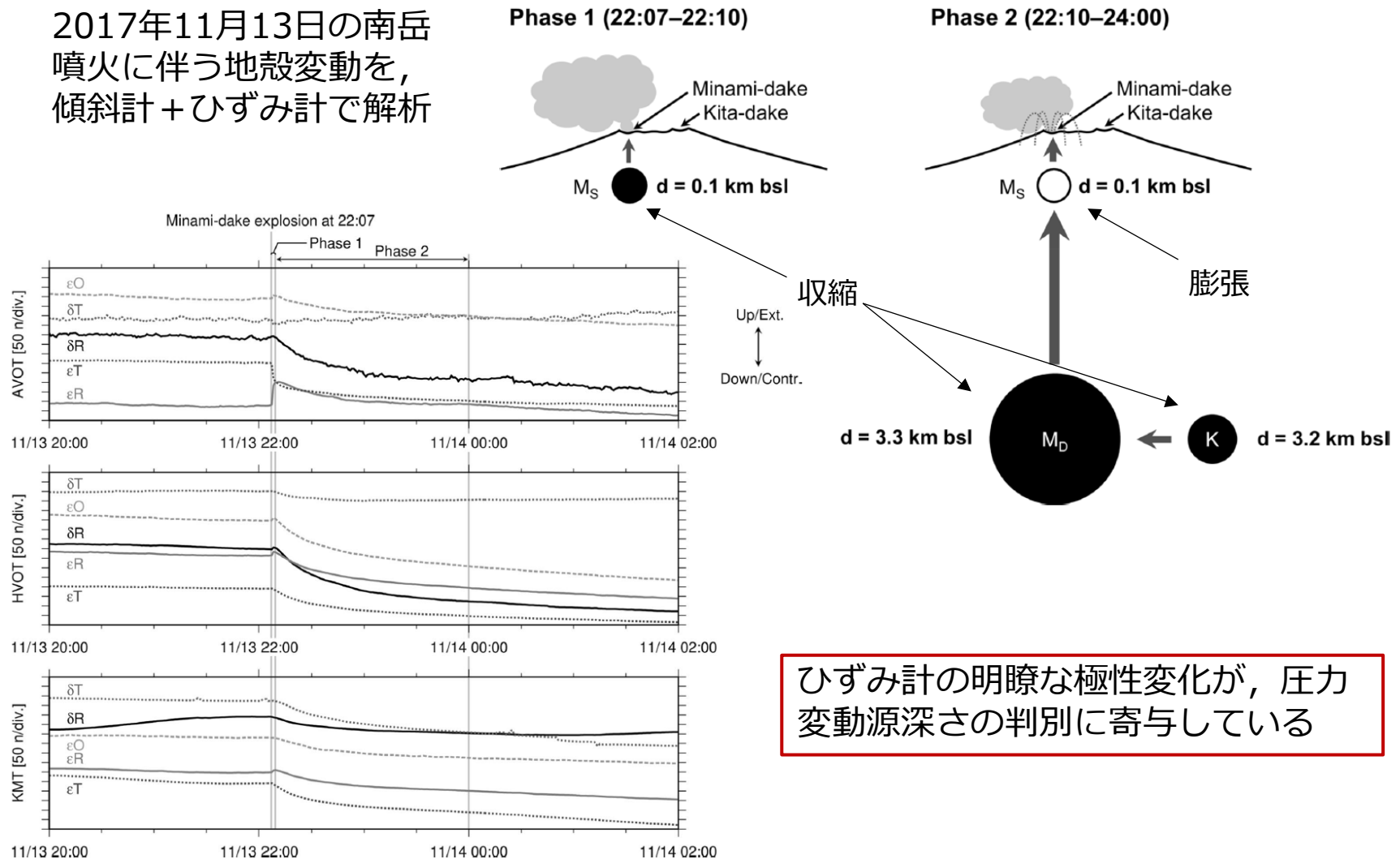
各変動源の体積変化量は次のように推定された。

球状圧力源：体積変化量 $10 \times 10^6 \text{ m}^3$ ダイクモデル：体積変化量 $1.4 \times 10^8 \text{ m}^3$

ひずみデータを加味した火山活動評価は、気象庁でもすでに実施している

- 桜島における複合マグマだまりの検出 (Hotta & Iguchi, 2021)

2017年11月13日の南岳
噴火に伴う地殻変動を、
傾斜計+ひずみ計で解析



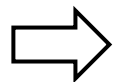
- 活動状況によっては、基盤観測を補うように火山体周辺で機動観測を実施することも想定される。

水準測量 機器の据え付けは不要。

GNSS観測 ピラー設置にこだわらず、アンカー打ち込みや三脚固定で実施可能な場合は、観測を即時に開始できる。

傾斜観測 地表設置型の傾斜計もあるが、温度変化の影響が大きいいため、地表型傾斜計の活用は場合を選ぶ。温度変化を避けるには埋設設置が必須で、機動観測が想定される地点には平時のうちに設置孔を準備しておくことが望ましい。

ひずみ観測 地殻との密着を必須とする観測項目であるため、強固な地殻までの掘削、ひずみ計の埋設固定と地上機器との接続という数ヶ月単位の作業が必要。機動的な対応は極めて困難。



傾斜観測・ひずみ観測は、基盤観測項目として予め整備されていることが望ましい。 ひずみ観測は精度の高い活動評価を行う上で有用であるため、**基盤観測網の現状を考えれば、大学を含む他機関とのデータ流通等を通じてひずみ観測データの活用が期待できる。**

