

地形・地下構造を考慮した 地殻変動の分析に関する研究

【研究期間】

平成28年4月～令和2年3月（4年間）

【予算】

特別研究経費 54,062 千円（4年間の総額）

国土地理院 地理地殻活動研究センター
地殻変動研究室

小林 知勝

国土地理院はSARやGNSS等により火山の地殻変動を計測し、
その原因となる力源の位置や形状の推定を実施している

観測

地表の動きを計測
異常を検知

SAR

GNSS

地殻変動

地殻変動の
力源

マグマ溜まり等の
変形により地殻変動が生じる

解析

地殻変動力源の推定

位置, 形状, 変化量は?



$$u_r = \frac{(1 - \nu)\Delta V}{\pi} \frac{r}{R^3}$$

火山噴火予知連絡会等の専門機関へ情報提供

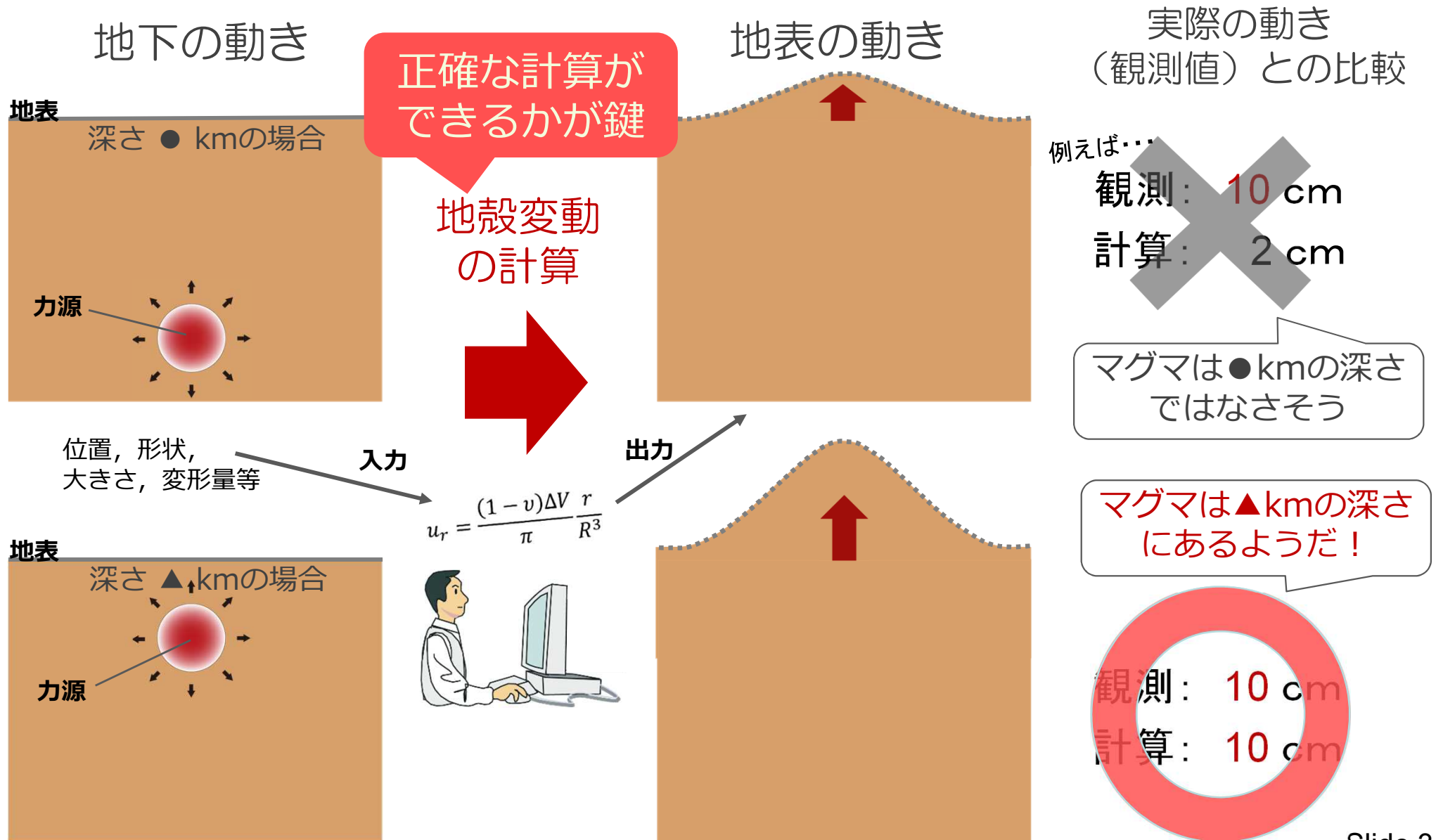
評価

活動度の把握
活動の危険度の評価
(火山情報, 噴火警戒レベル等)



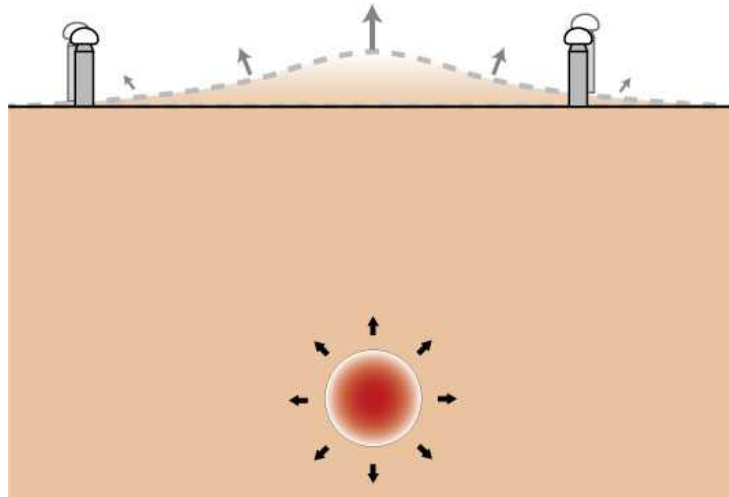
力源の正確な推定には地殻変動を適切に計算するツールが必要

力源推定：地表の動きを最もよく説明する変数（位置・形状等）を探索する作業



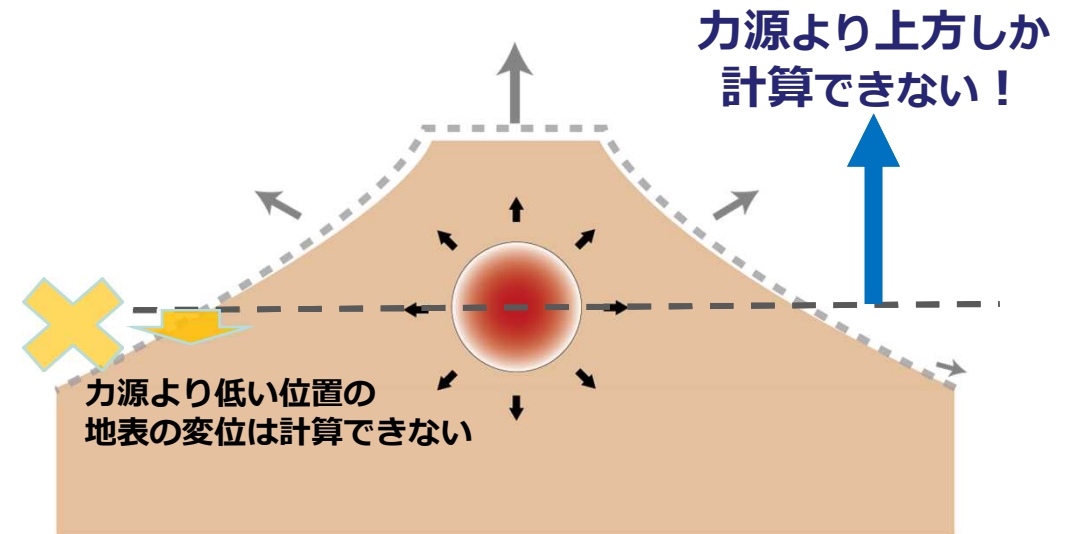
問題点1： 実地形を反映させた計算ができない

従来の方法 平坦な地形を仮定



力源が深い場合は地形の影響は小さく
従来法でも対応可能

実際は… 複雑な地形上で変形が起きている



▼力源が浅くなるほど、地形の影響が大きい

✓観測点から力源までの距離等の影響により、正確に地表変位を計算できない。

問題点

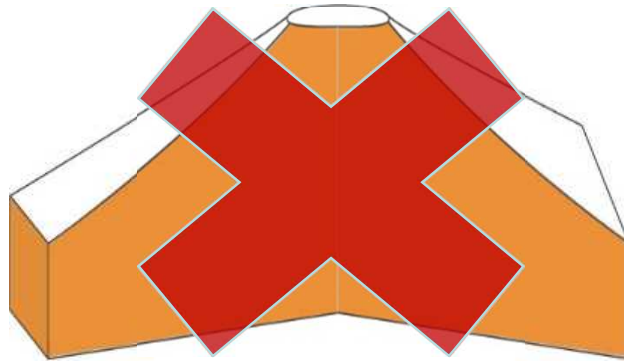
力源より低い位置の地表変位を計算できない

➡ マグマがごく浅部に貫入した場合に位置等の推定が困難になる

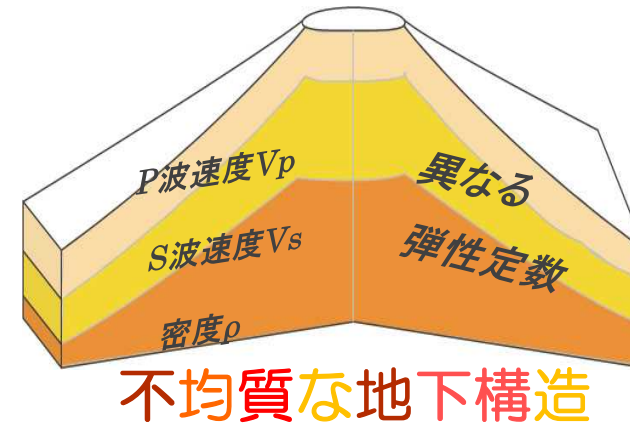
実地形が及ぼす影響を適切に考慮できるツールが必要

問題点2： 不均質な地下構造を反映させた計算ができない

従来の方法
均質な構造を仮定



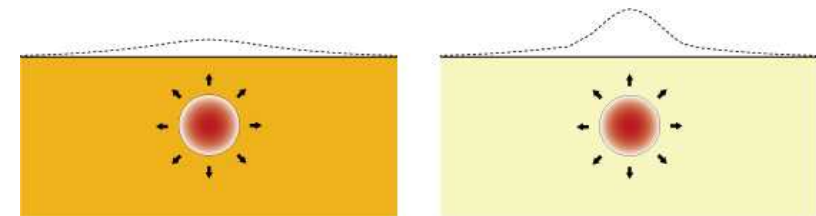
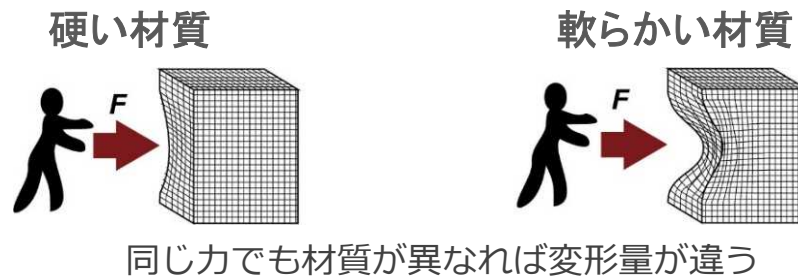
実際は… 火山体やその地下には
不均質な地下構造が広がる



問題点

地殻の性質が異なれば、同じ位置・同じ変形量の力源でも地表の変形量に違い

➡ 力源推定に誤差を生む可能性

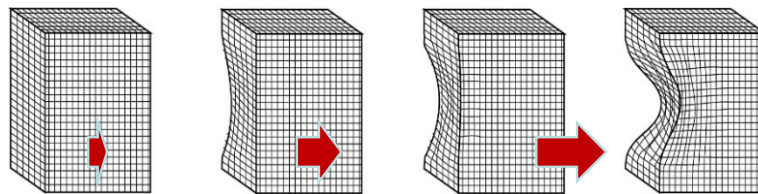


地下構造の不均質が及ぼす影響を適切に考慮できるツールが必要

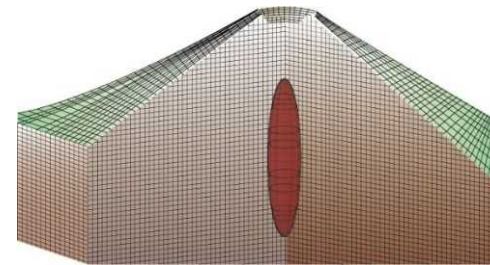
有限要素法の火山性地殻変動解析への適用

多数の要素に分割して火山を数値モデル化

複雑な形状を容易に表現可能 → 実地形の取り込み可能
 材質(弾性定数)を自由に設定可能 → 不均質な地下構造の取り込み可能



連続体の変形に適した手法



複雑な地形・地下構造の情報を組み込んだ地殻変動計算が可能

手法の比較

	従来法	有限要素法
地形	×	○
地下構造	×	○
迅速性・操作性	○	×

さらに検討すべき課題

- ▼計算に時間がかかる
→ 力源の解探索が困難
- ▼複雑な処理・操作が多数



計算速度向上のための技術開発が必要
 解析・分析作業を効率化する環境構築が必要

■ 目標：

地形及び地下構造を組み込んだ地殻変動計算及びそれを基にした力源推定を可能とする。

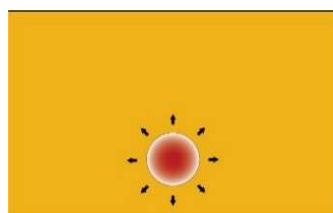
■ 概要：

(1) 有限要素法による火山性地殻変動計算とそれを基にした力源推定のための技術開発

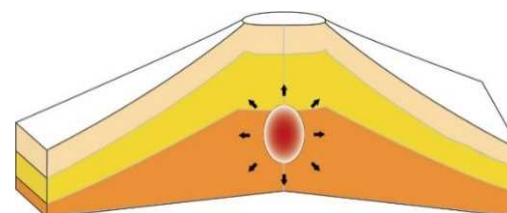
(2) 迅速性・操作性の向上のための開発

2-1) 変動計算の高速化のための技術開発

2-2) 解析・分析作業の効率化のための解析システムの開発



「平坦地形」「均質媒質」
からの脱却



■ 地形・地下構造

【開発】 3次元有限要素法による火山性地殻変動計算機能

【効果】 実地形・不均質な地下構造を考慮した力源の推定が可能に

従来法の限界を打破

✓ 山体内部の力源推定が可能に

✓ 物理探査による地下構造データを組み込んだ力源推定が可能に

(参照：Slide10, 11)

■ 迅速性

【開発】 要素数を効果的に削減する技術等

無限要素, 要素細密化等の要素数削減技術の実装

加えて, 圧力変化量の線形推定機能, 並列化処理, データベース法による力源推定機能も実装

【効果】 計算精度を維持しつつ速度を向上
→ 力源推定の高度化

計算速度が約17倍向上

※無限要素と要素細密化処理を適用した場合

(参照：Slide13-14)

■ 操作性

【開発】 GUI操作による統合解析システム

【効果】 要素分割, 変動計算, 力源推定を簡便な操作により
一括で処理可能に

(参照：Slide15, 16)

有限要素法を用いた 地殻変動計算の効果

従来困難だった山体内部の力源推定が可能に

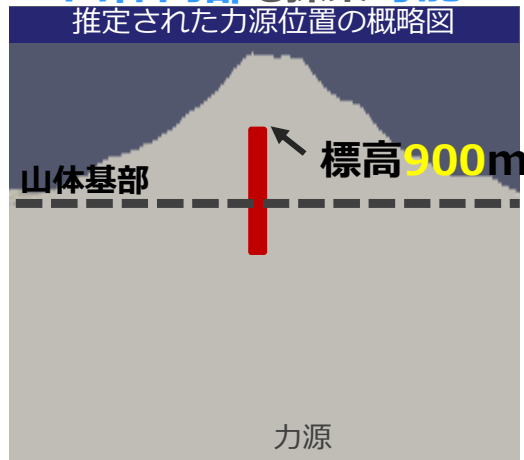
雄阿寒岳で検出された火山性地殻変動（2016-2017年）における力源推定の事例

※実際に観測された変動はSlide1 4

有限要素法

山体内部も探索可能

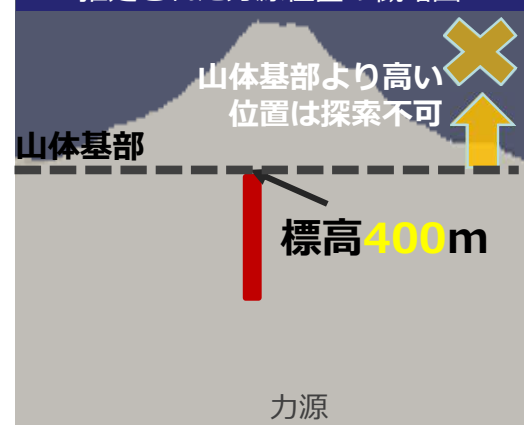
推定された力源位置の概略図



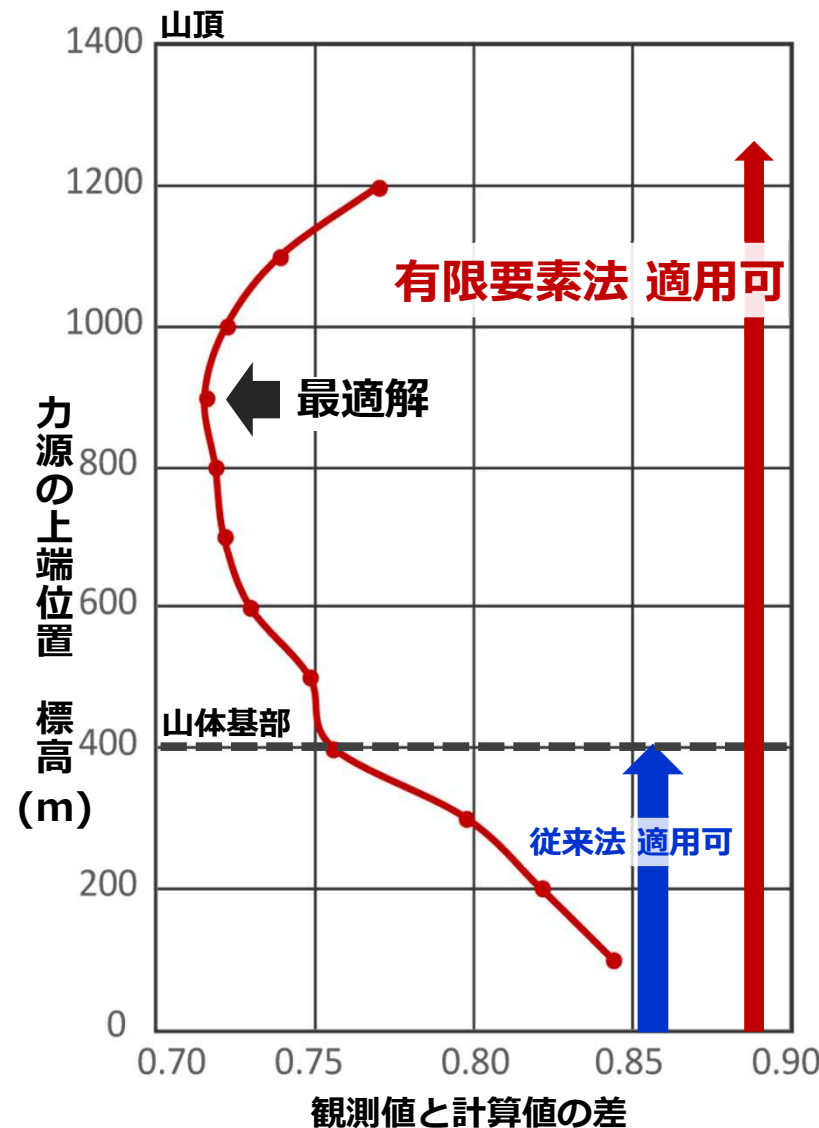
従来法

山体内部の探索不可能

推定された力源位置の概略図



※力源形状: クラック(板状亀裂)



推定された力源位置

有限要素法 標高900m

従来法 標高400m

山体内の力源が観測値を最も良く説明する最適解

山体の比高の約50%の深さの違いを生む

従来法による推定の誤差を解消

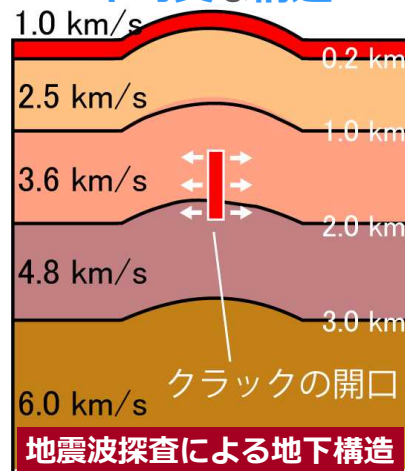
地下構造の不均質性を考慮した力源推定が可能に

2015年桜島マグマ貫入イベントの干渉SAR解析結果における事例

※干渉SARによる観測変位はSlide24

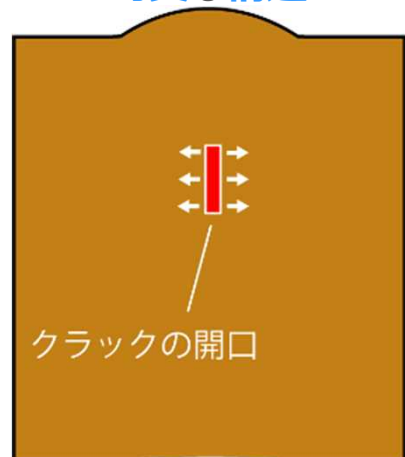
有限要素法

不均質な構造



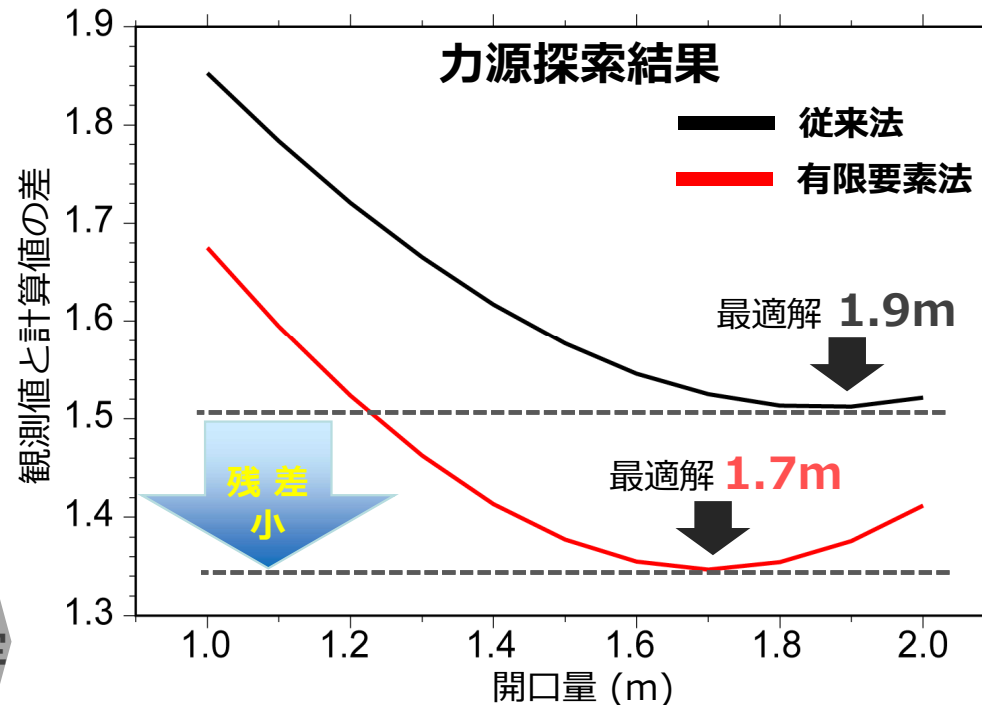
従来法

均質な構造

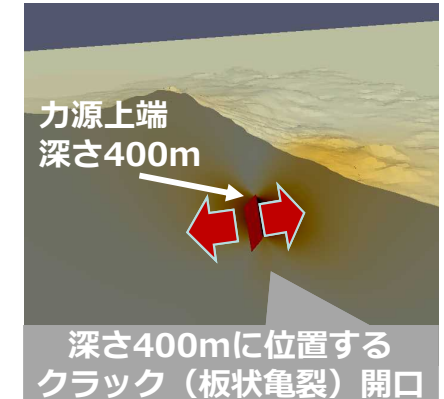


力源推定

力源探索結果



推定された力源の位置と形状



- ✓開口量の推定値に違い
- ✓位置・形状の推定値に
- 両手法間で大きな差はなし

構造の不均質が
力源推定値に影響

力源の開口量に
約10%の違いを生む

従来の開口量の推定値が過大
に評価されている可能性

地下構造の考慮で
力源推定が改善

有限要素法による計算結果が
より良く観測値を説明

地下構造の組み込みにより
より適切な力源推定が可能に

迅速性・操作性の向上を 目指した研究開発

有限要素解析の弱点は
計 算 時 間

	1回の変位計算 にかかる時間
従来法	1秒未満
有限要素法	数時間

問題の背景

要素分割	計算精度	計算速度
細かい (要素数 多)	良	遅
粗い (要素数 少)	悪	速

解探索数が減少し、力源推定の精度悪化

計算精度を保ちつつも要素数を抑えた効率の良い計算アプローチが必要

計算速度向上のための機能開発・実装

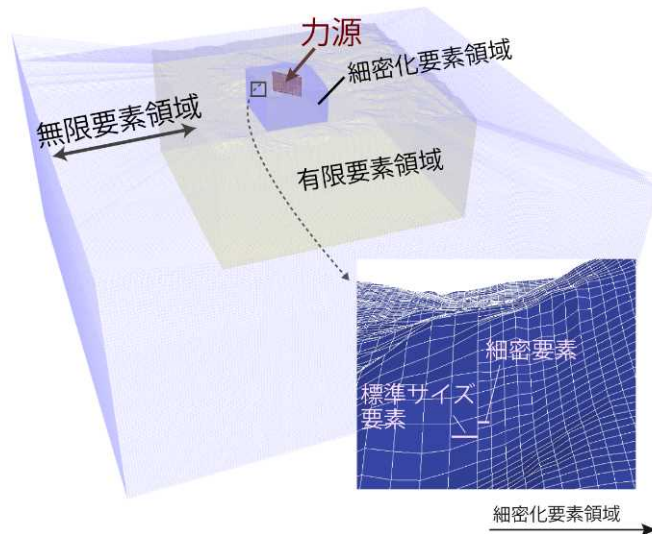
要素数を減らす工夫

1. 無限要素 計算領域の端(側面/底面)が原因で発生する人工的な変形を減衰させる
2. 要素細密化 力源近傍の要素を細密化
3. 重合メッシュ法

その他の工夫

4. 開口量/圧力変化量の線形推定 (力源推定用)
5. 並列化処理

少ない要素数で効率の良い力源推定が実施可能に



要素数を減らす機能（無限要素・要素細密化）を

適用しない場合： 255分/1探索

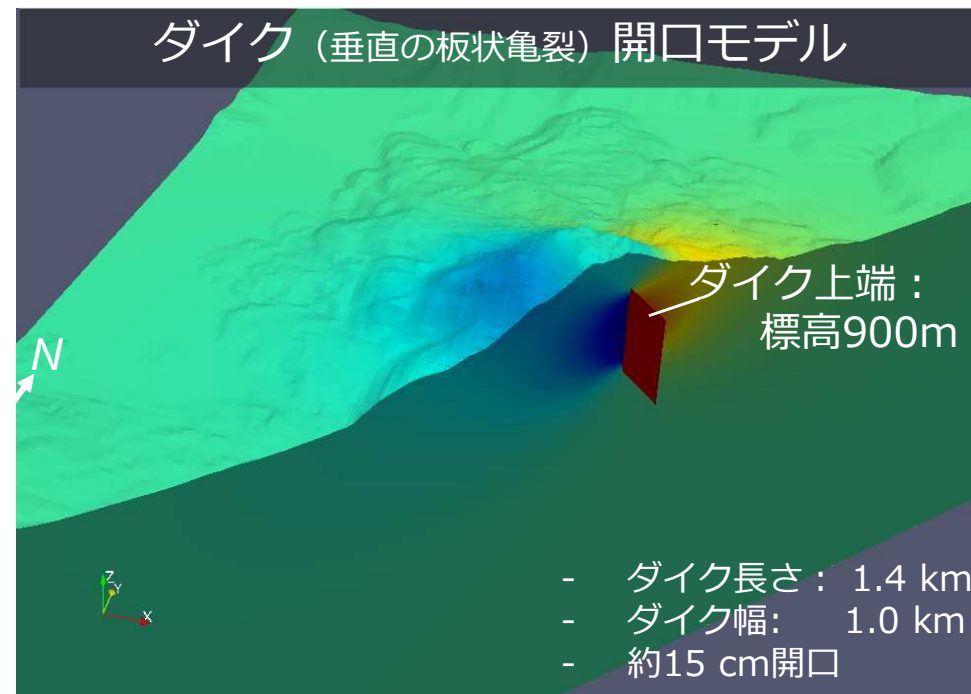
適用する場合： 15分/1探索

約17倍
高速化

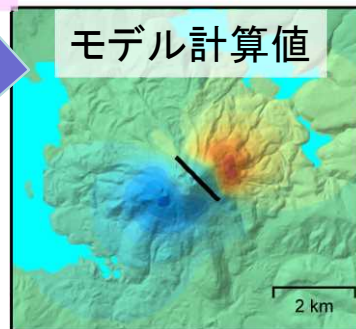
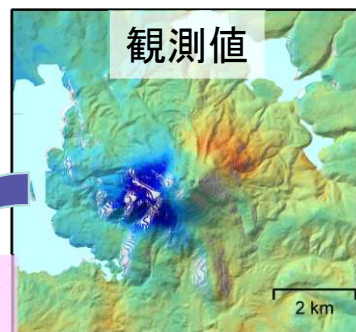
2週間以上かかる計算が1日に短縮

2016年末に、干渉SAR解析により雄阿寒岳で初めて検出された火山性地殻変動の力源を推定

ダイク（垂直の板状亀裂）開口モデル



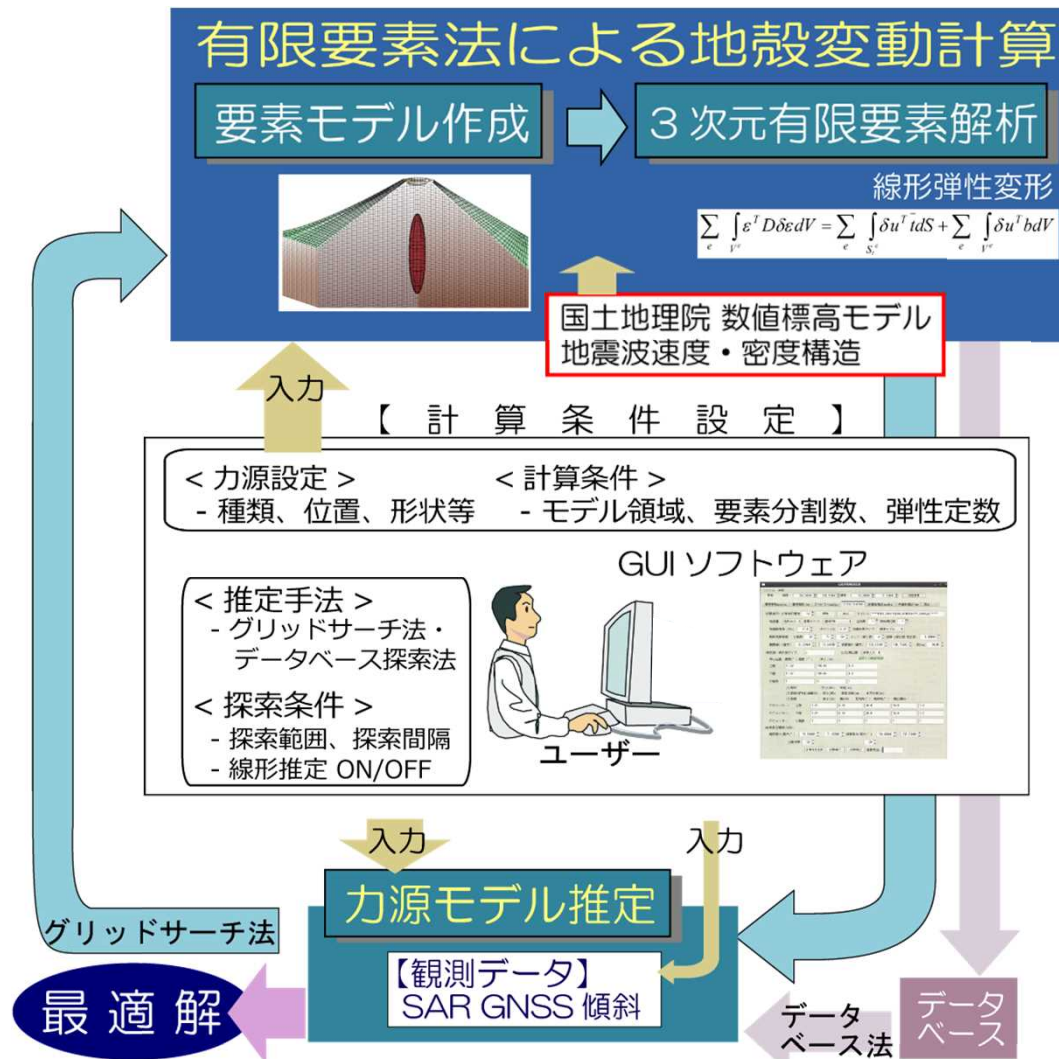
グリッドサーチで
力源探索



「有限要素法による変動計算」から「力源推定」までの一連の作業を統括的に処理

【システム構成】

- [1] 変動計算 要素分割 + 3次元有限要素解析
- [2] 力源推定



地形

実利用性の高いシステムを実現

✓ 全国の数値標高モデルを標準装備

特定の火山に限定せず、
任意の場所を解析可能

地下構造

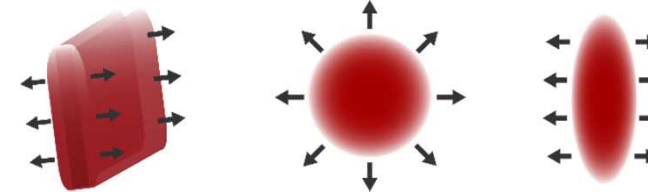
✓ 全国の速度・密度構造を標準装備
(防災科研のデータベースを使用)

✓ 任意の速度・密度層構造を設定可

力源

数個のパラメータで
簡便に力源を設定可能

✓ クラック (板状亀裂), 球, 楕円体



力源モデル推定

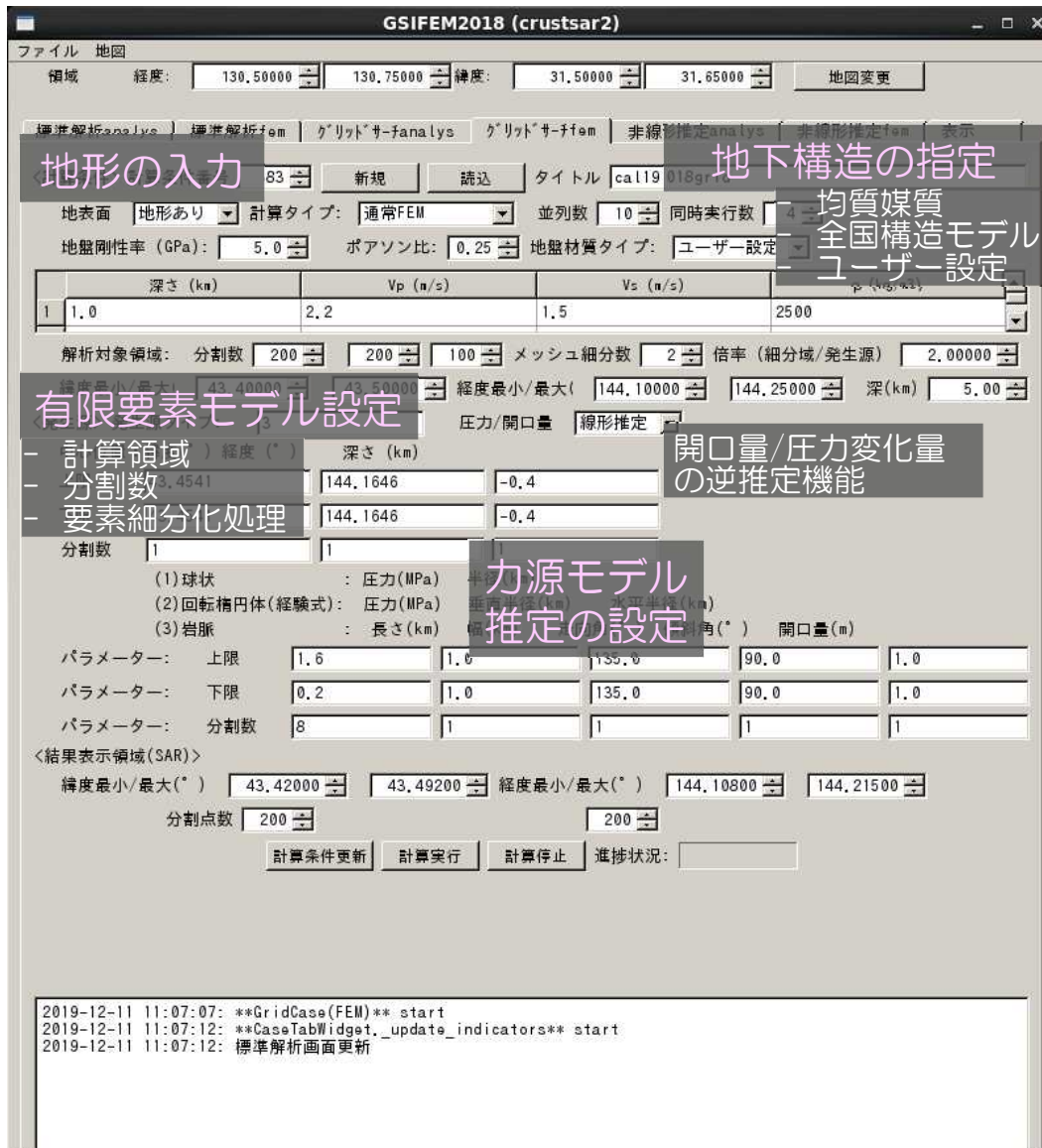
✓ グリッドサーチ法・データベース法による探索機能

計算速度向上のための技術の実装

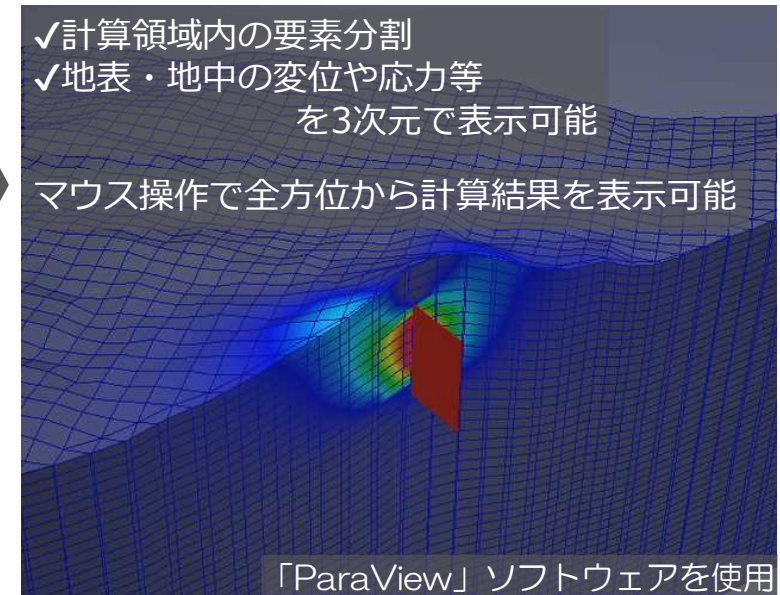
✓ 無限要素機能の実装
✓ 要素細密化機能の実装

各処理を簡便なGUI操作で制御し
解析作業の効率性の向上を実現

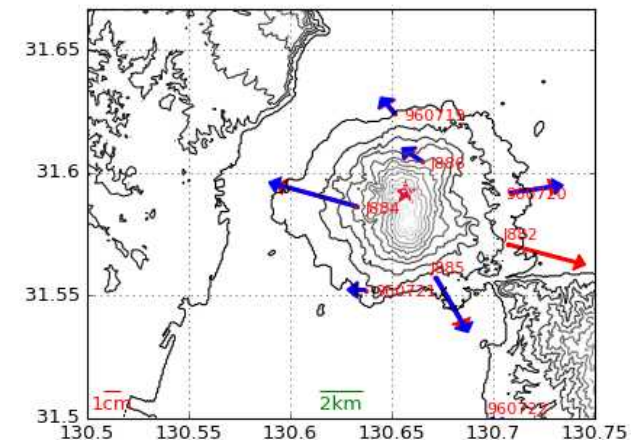
3次元による解析結果表示・操作で
分析作業の効率性を向上



vtk
形式



観測値とモデル推定値の比較表示



■ 国土地理院が実施する火山の地殻変動観測・データ解析業務での利活用

- 地殻変動解析，地殻変動力源の推定作業
- 各専門機関（火山噴火予知連絡会等）への情報提供
- 観測点設置や再配置の際の事前評価（REGMOS等）

➡ 災害時の対応力向上
効果的な観測網の構築・整備に貢献

■ 火山活動評価への活用

- 火山噴火予知連絡会等の各専門機関での火山活動の評価や
気象庁による情報発信の際の検討に活用

➡ 噴火の発生危険度の評価や
立入禁止区域の判断等に貢献

■ 国土地理院が実施する火山研究での利用

- 噴火準備/発生過程のメカニズムの解明

➡ 火山学の発展に貢献

1. 有限要素法による火山性地殻変動計算機能を開発

- 1) 3次元有限要素法による地殻変動計算機能を開発
 - ✓浅部力源による地形の影響を受けた複雑な変形の計算が可能に
 - ✓地下構造の不均質を考慮した地殻変動の計算が可能に
- 2) 力源推定機能を実装・推定の効率化のための機能を開発
 - ✓計算精度を維持しつつ要素数を減らす機能の実装で計算速度を向上

➡ 全国の実地形・地下構造を組み込んだ
火山性地殻変動計算及び力源推定が可能に

既存の解析技術では対応困難な場合にも
変動の定量的評価が可能に

2. 地殻変動解析のための専用システムを開発

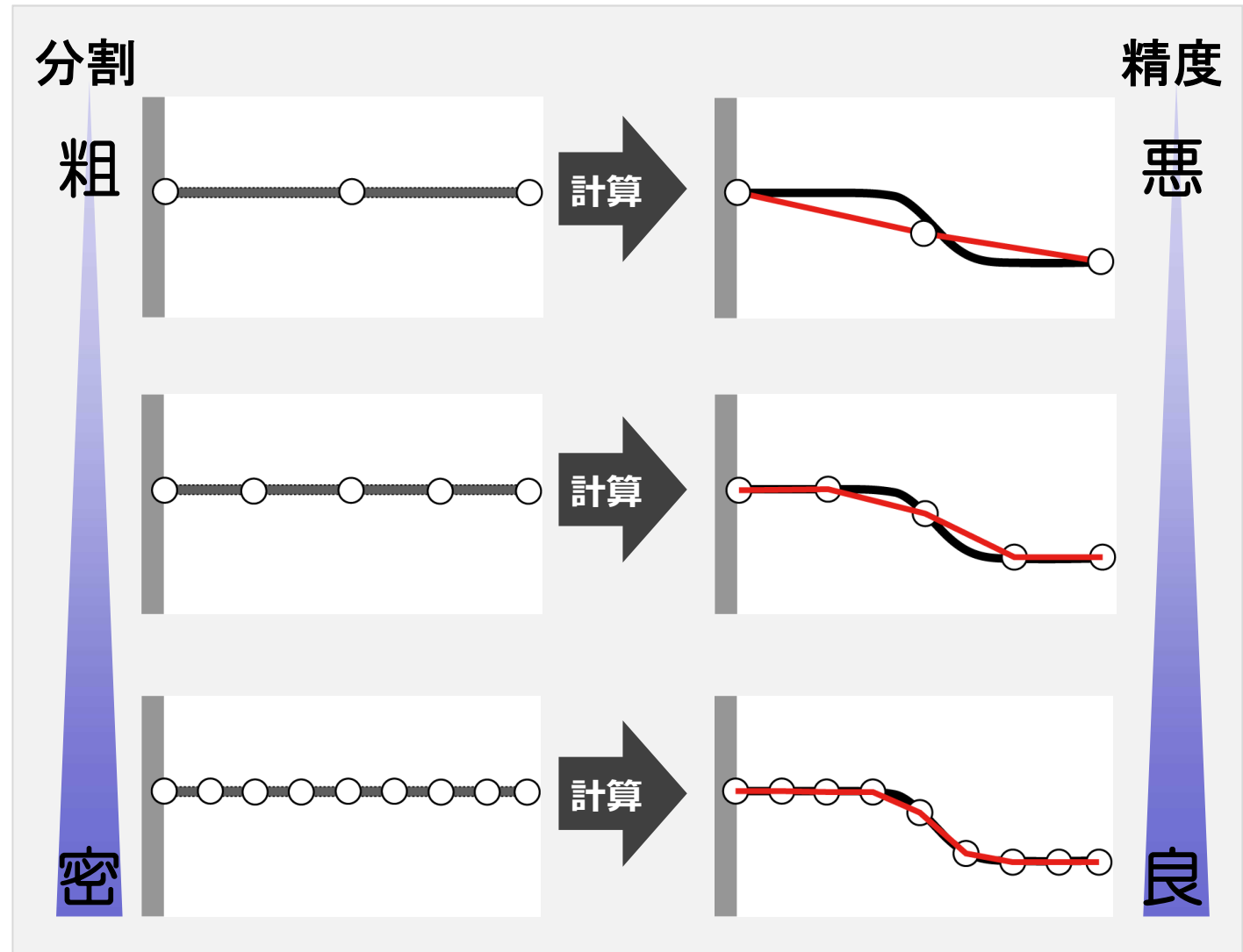
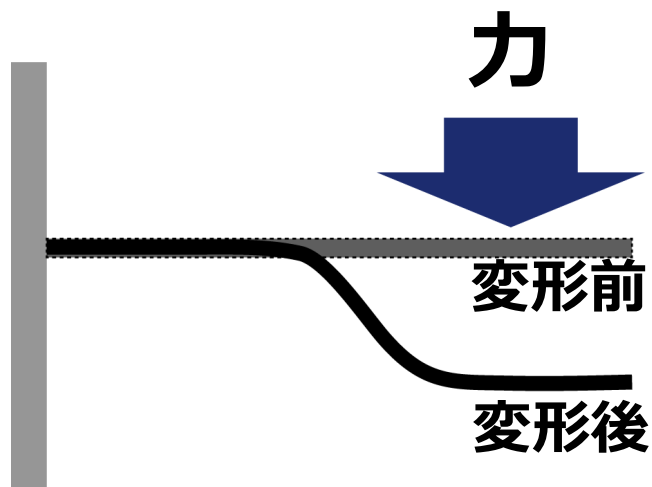
GUI操作による統合処理システム、画像表示・操作機能を開発

- ✓各処理を簡便な操作で制御し、解析作業の効率性の向上を実現
- ✓3次元表示・操作等による解析結果の分析作業の効率性の向上を実現

以下，参考

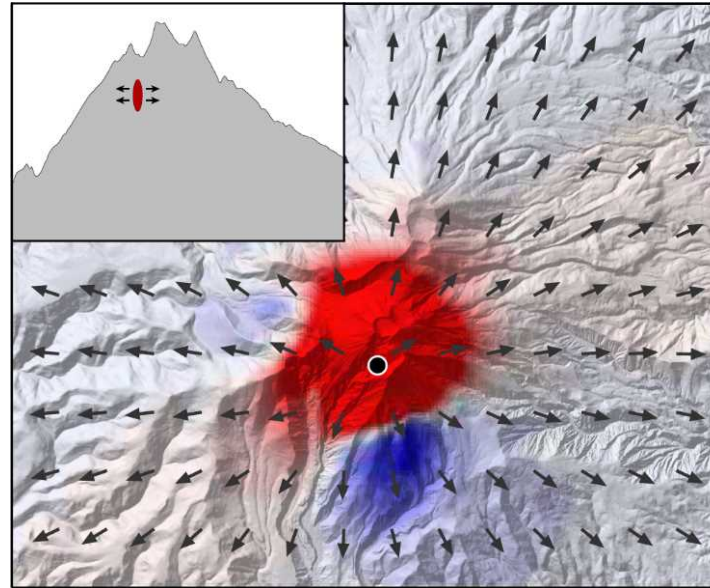
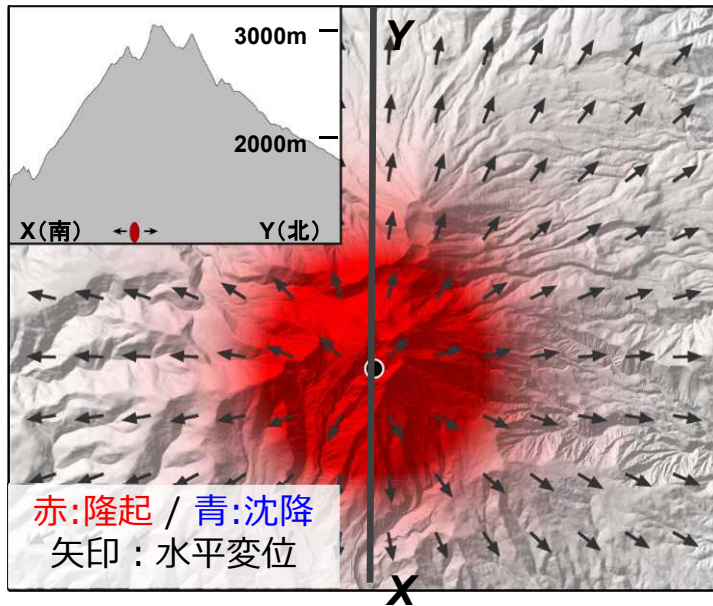
計算対象を微小な要素に分割してモデル化し，要素ごとの変形等を計算することで，全体の挙動の近似値を求める手法

例えば，次のような1次元
の変形問題の場合



地形・地下構造の影響を 考慮した地殻変動計算の効果

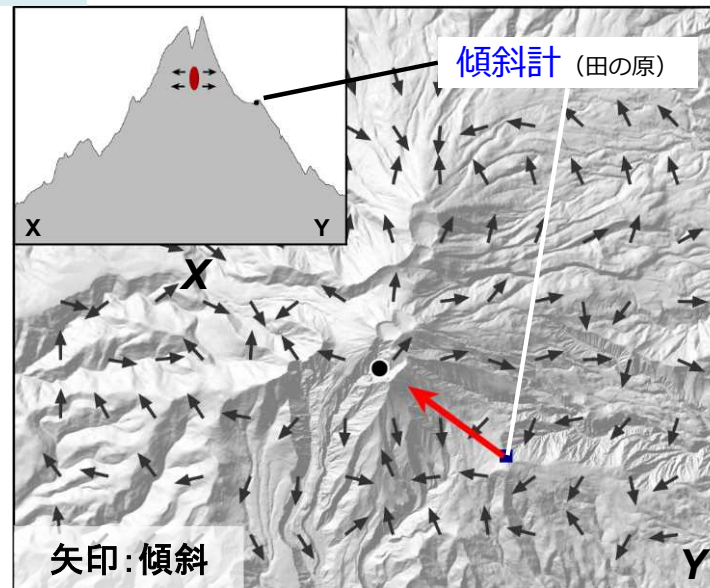
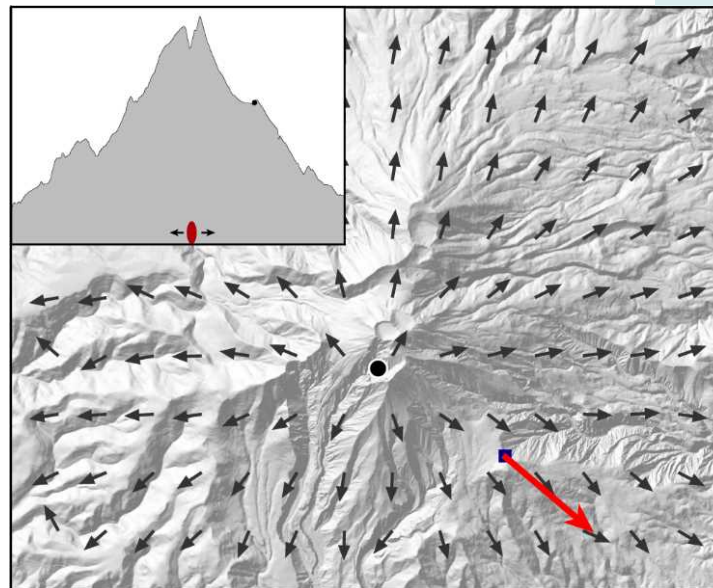
変位



圧力源の位置変化に伴う
変位・傾斜の変化の様子

力源が浅部に位置する場合
上下変位や傾斜の向きが
地形の影響を受けて逆転

傾斜



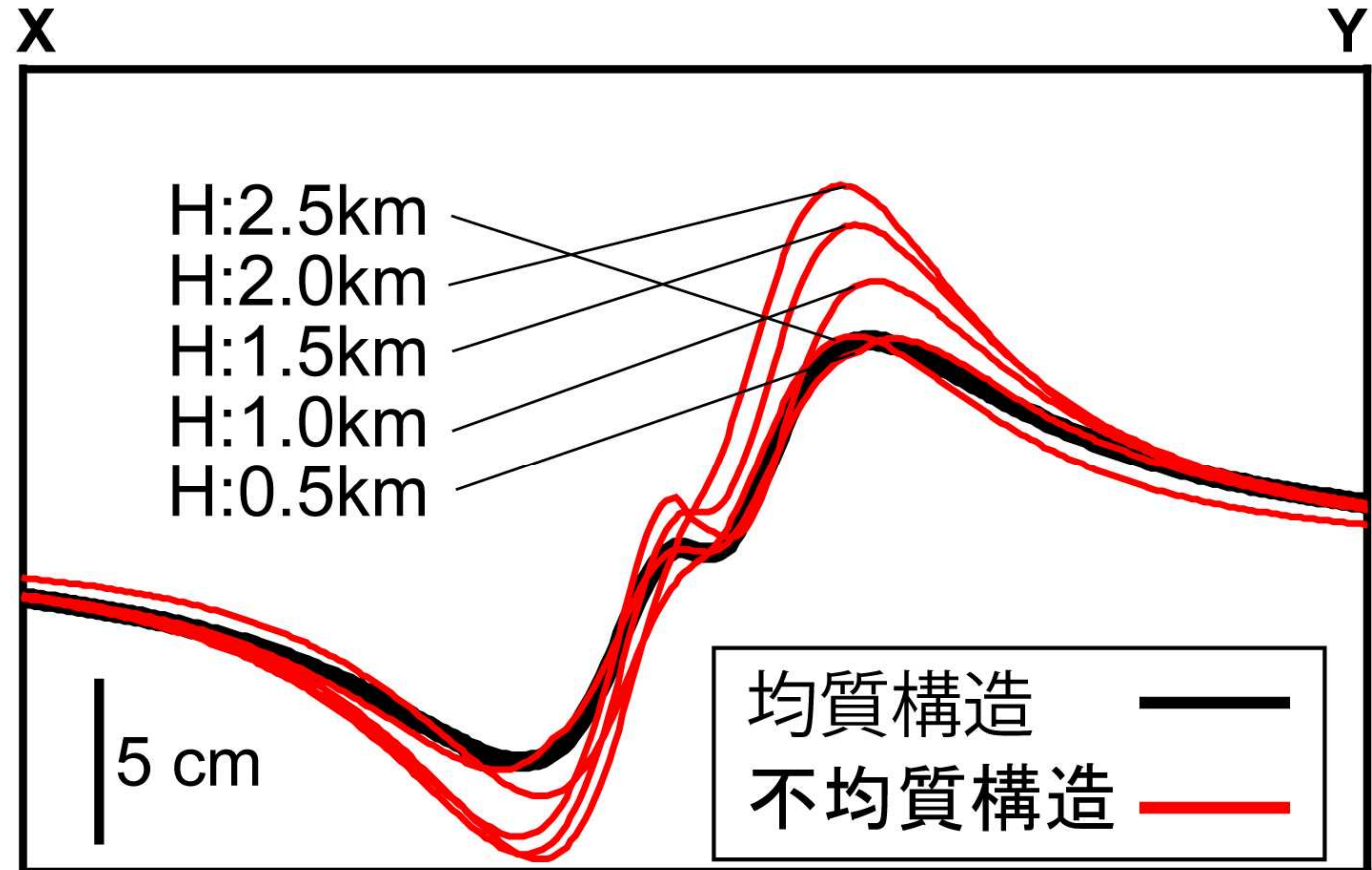
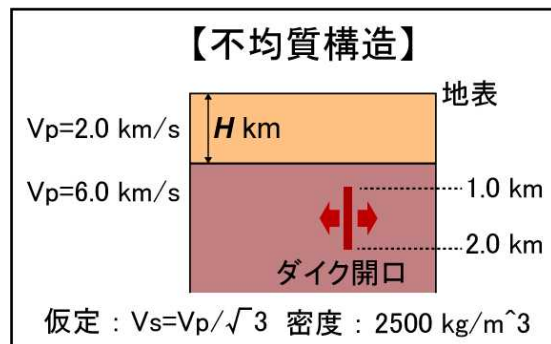
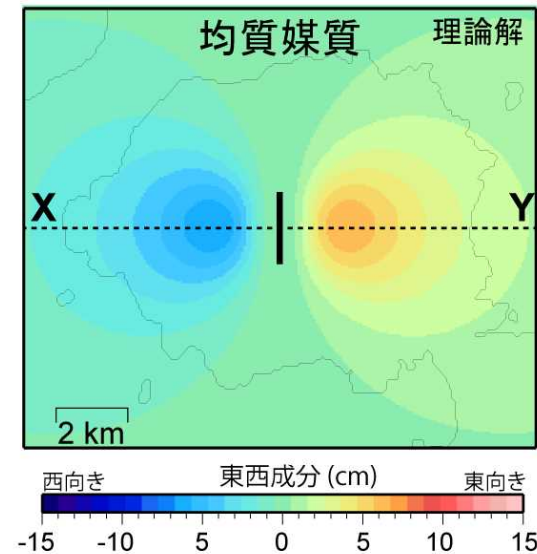
山体に貫入した力源による
複雑な変形の計算に有効

- ・御嶽山を想定
- ・火口直下に力源
- ・回転楕円体の膨張

●力源の水平位置

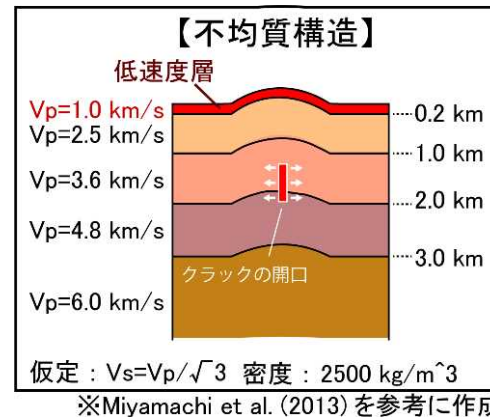
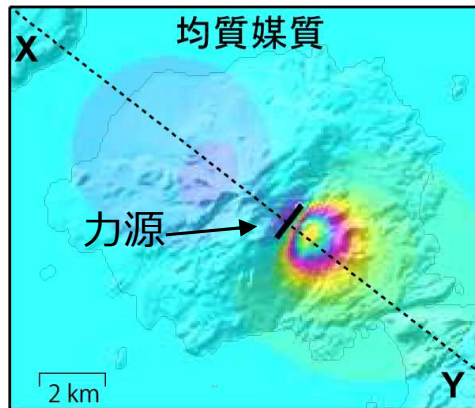
※水平変位・傾斜の大きさは規格化している

低速度層の厚みに変形が影響される

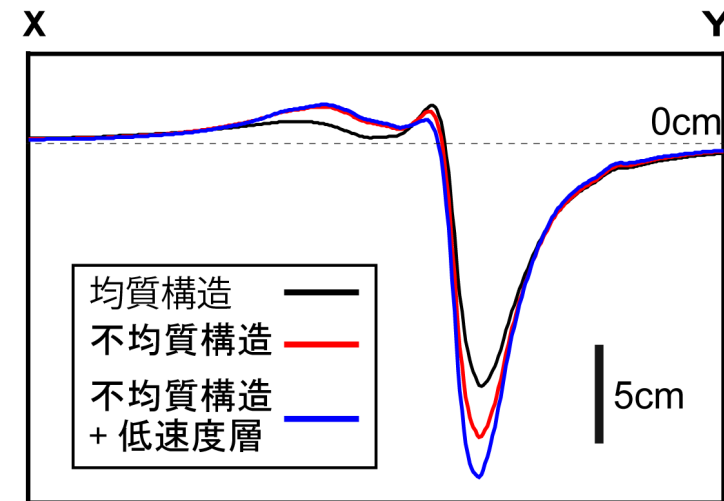


- ✓ 低速度層の厚みが増すほど、均質媒質より変形が大きくなる
- ✓ 均質媒質との乖離は力源の近傍で大きく、遠方ではその影響は小さい

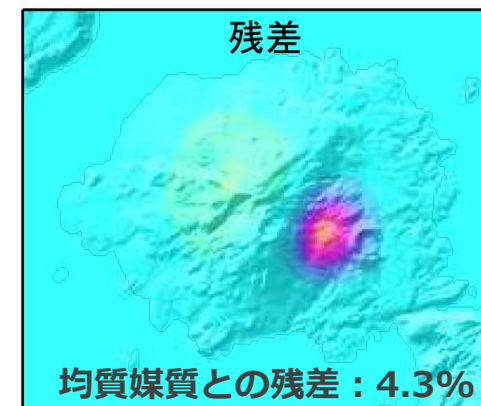
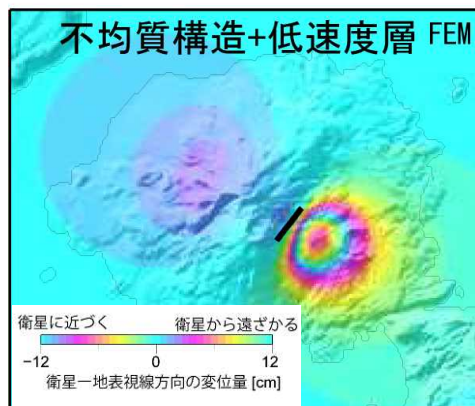
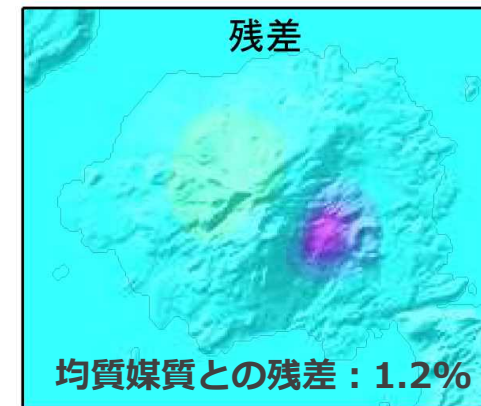
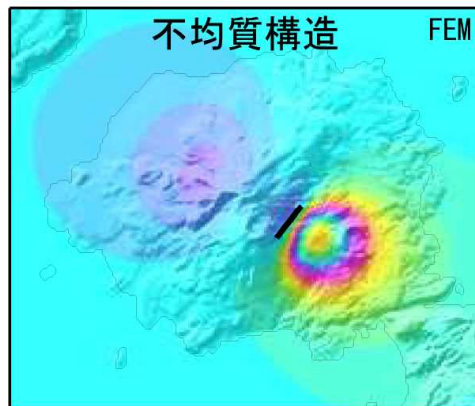
地下構造の不均質性の影響評価が可能に



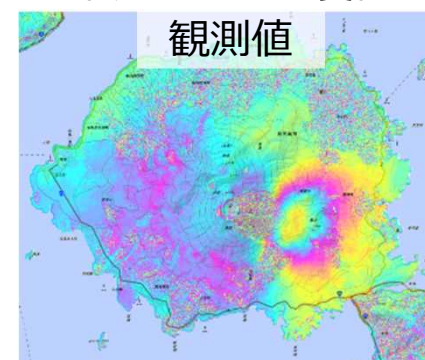
2015年桜島マグマ貫入イベントの干渉SAR解析結果を例に



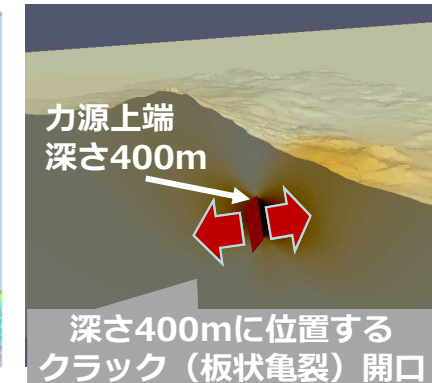
- ・ 構造の不均質が力源近傍の変形に強く影響
- ・ 浅部の薄い低速度層がさらに変形に寄与



干渉SARによる変位



推定された力源の位置と形状



※変位計算には既発表論文で提案した開口クラックモデルを使用

計算速度向上を 目指した研究開発

■ 力源モデル推定の課題

非線形な問題となるため、力源の位置・サイズ等の多数の組み合わせパターンでそれぞれ地殻変動を計算し、そこから最適な解を探索する必要性。しかし・・・

	1つの力源の変位計算時間	試行回数	全体の計算時間
理論解	1秒未満	数十万回～数百万回	数十分～数時間
有限要素解析	数時間	仮に100回としても	1か月以上・・・

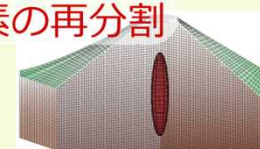
有限要素解析の弱点

- 解探索には領域内の要素の再分割が逐次必要
- 計算精度の確保には細かい要素分割が必要

計算時間を増大させる要因

要素モデル作成

要素の再分割



力源パラメータ更新

力源モデル推定

有限要素解析

$$\sum_e \int_{V^e} D \delta \varepsilon dV = \sum_e \int_{S^e} \delta u^T t dS + \sum_e \int_{V^e} \delta u^T b dV$$

要素数を可能な限り抑えた効率の良い計算アプローチが必要

細かい要素で分割

計算精度 良

トレードオフ

計算速度 遅

解探索数減少

力源推定精度 悪

計算速度向上のための技術開発

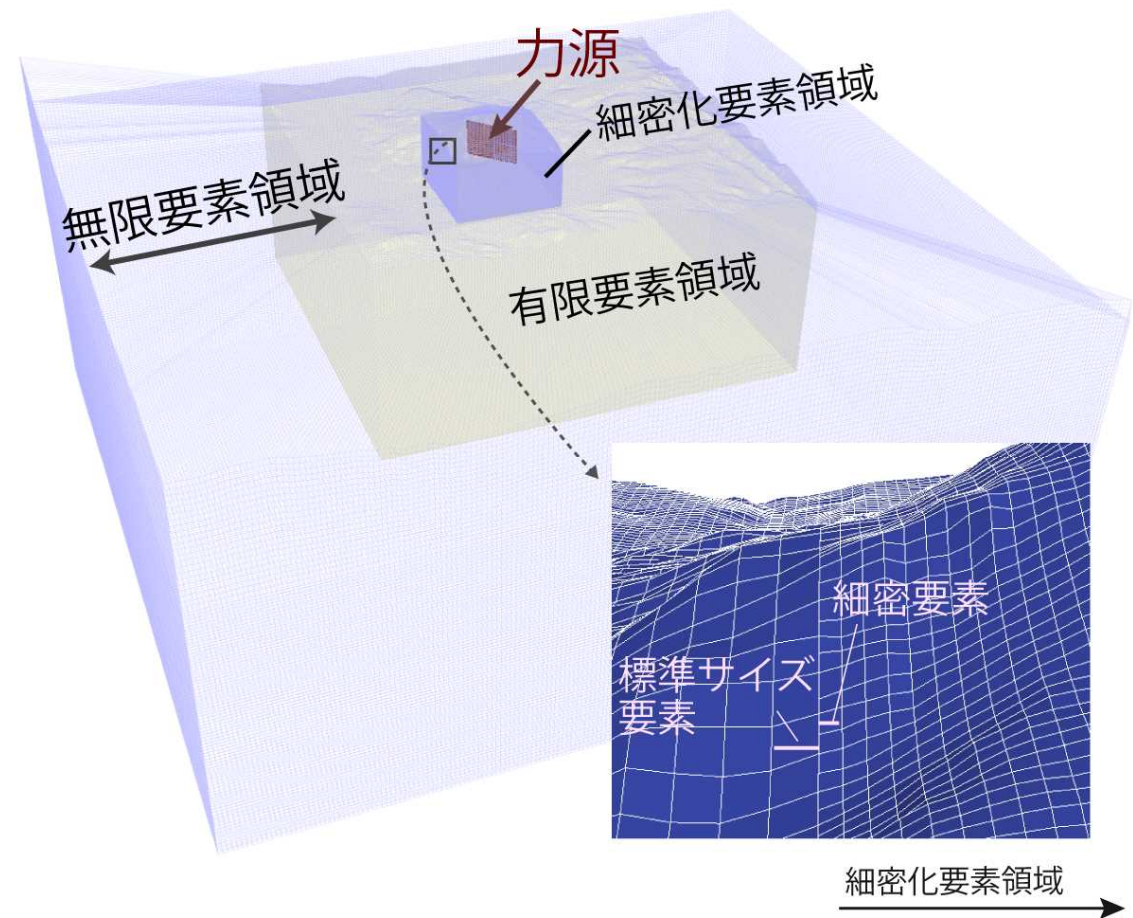
1. 無限要素

計算領域の端(側面/底面)が原因で発生する人工的な変形を減衰させる

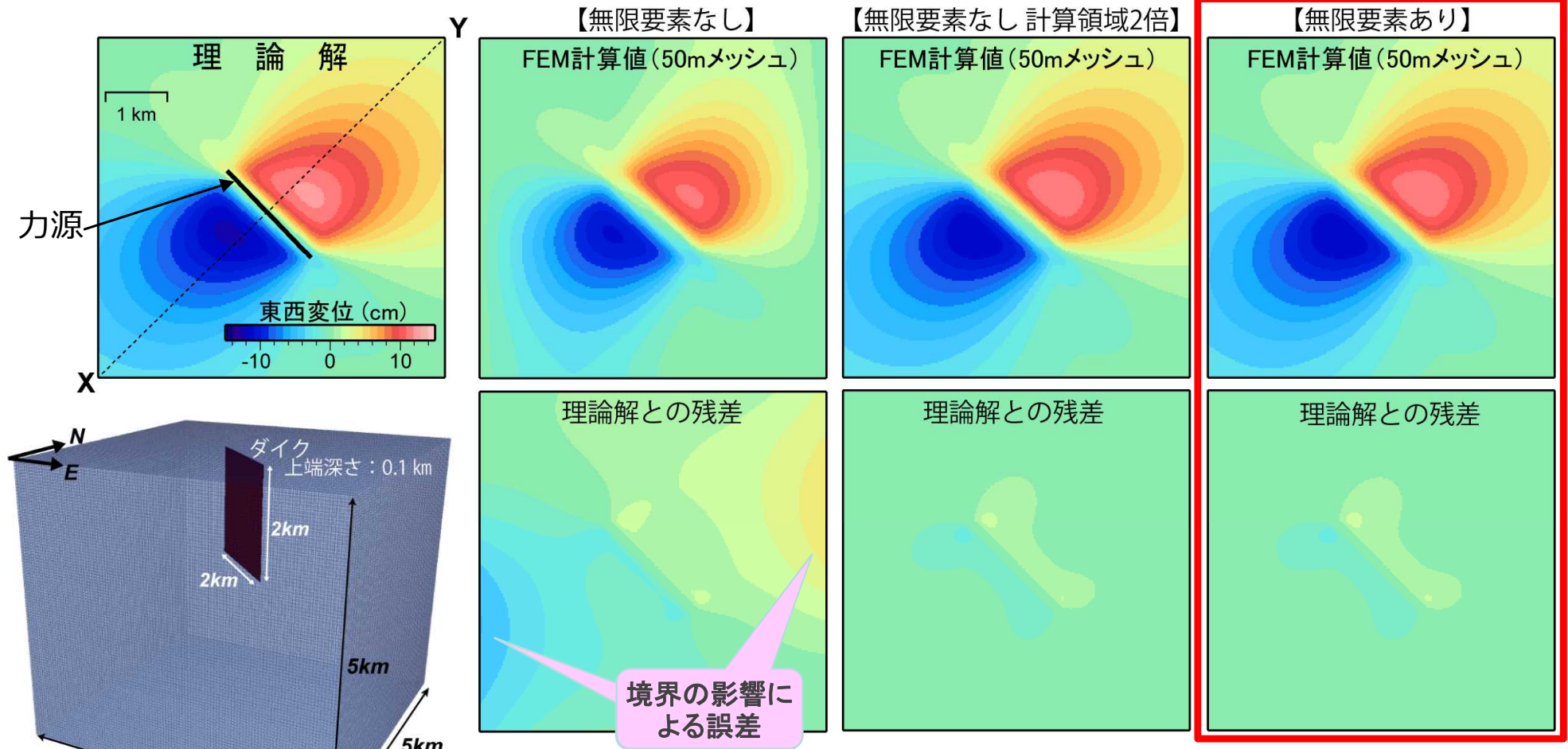
2. 要素細密化

力源近傍の要素を細密化

要素数を減らす効果



少ない要素数で精度の高い計算を実施可能に

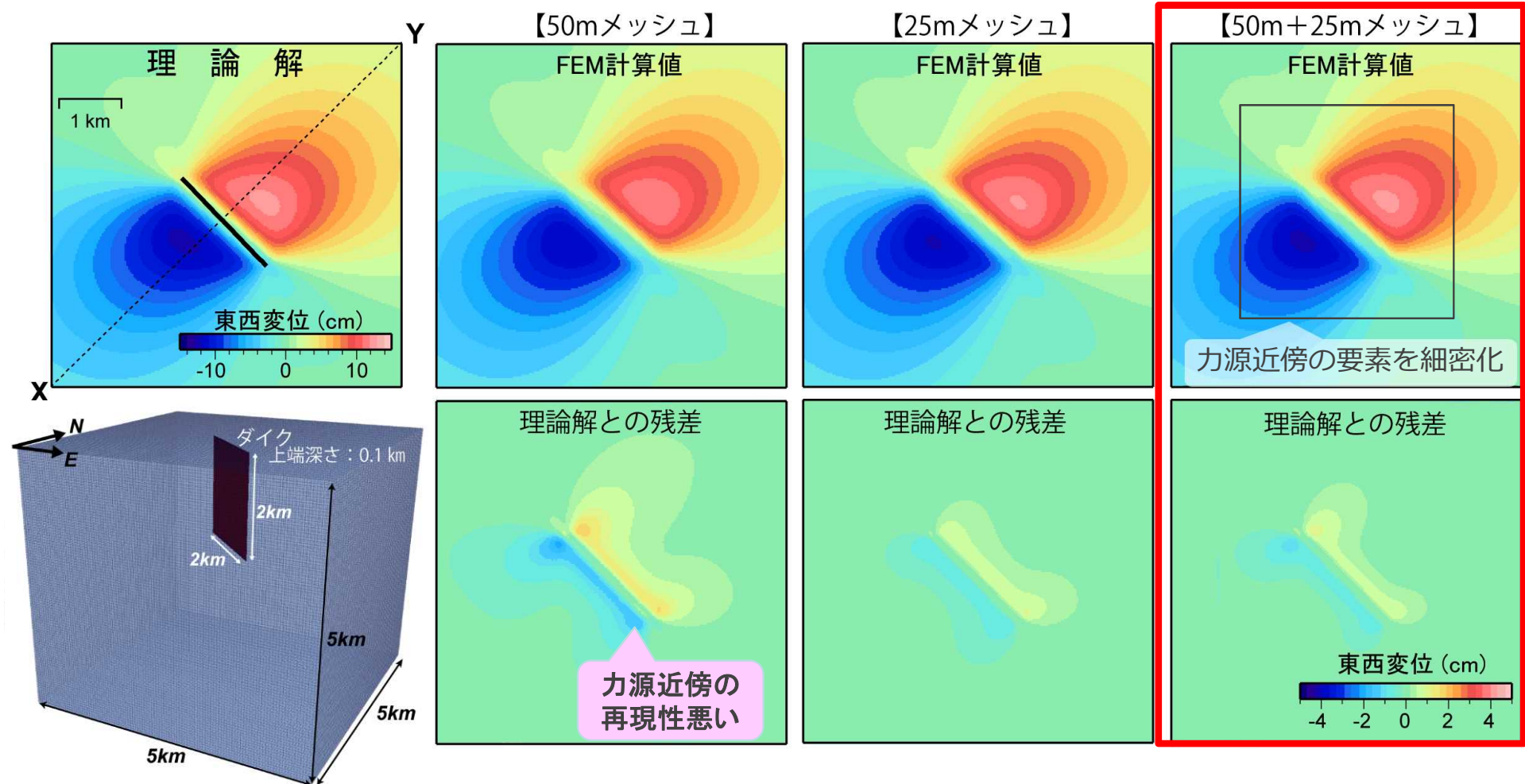


地表100mに位置するダイク
開口に伴う変動を仮定

無限要素	なし	なし(領域2倍)	あり
計算時間	基準(1倍)	5.8倍	1.2倍
残差	11.7 %	0.5 %	0.5 %
要素数	1,241,947	4,948,947 (4倍)	1,241,947 (1倍)

残差：理論解との残差によるRMS(二乗平均平方根)。ここでは理論値で規格化している。

少ない要素数で力源近傍の変動も精度高く計算可能に

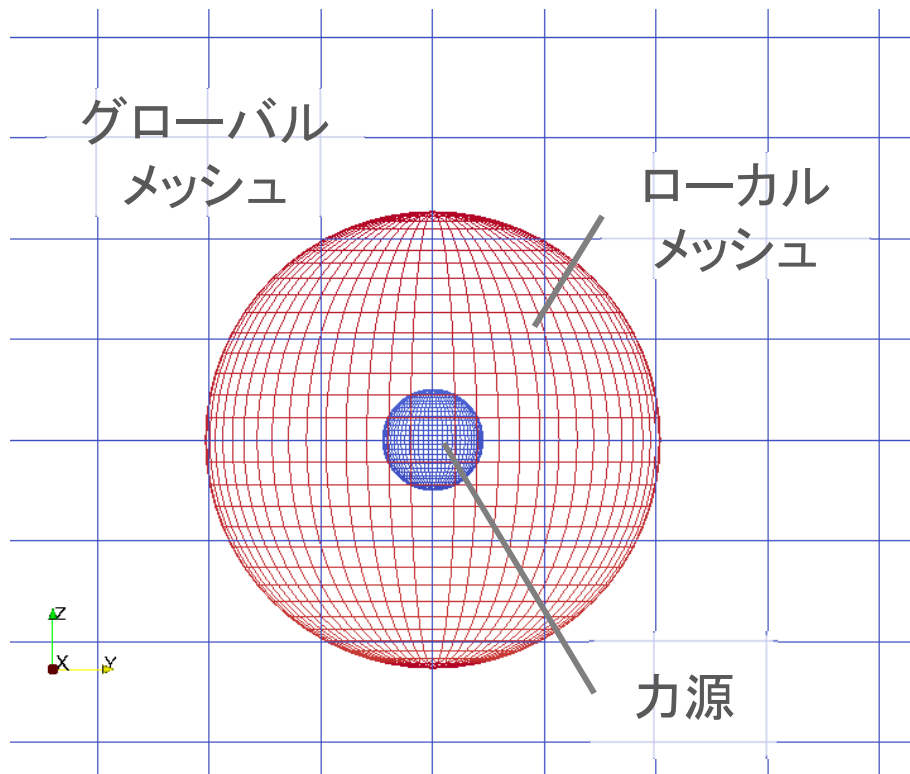


細密化	なし 50mメッシュ	なし 25mメッシュ	あり 50m+25m
計算時間	基準(1倍)	22.6倍	6.6倍
残差	0.5 %	0.1 %	0.1 %
要素数	1,241,947	9,895,655 (8倍)	4,084,472 (3倍)

浅部に位置する力源による変動計算に有効

■ 重合メッシュ法

解析対象全体のメッシュモデル（「グローバルメッシュ」）と力源周辺域のみのメッシュモデル（「ローカルメッシュ」）を個別に定義し、それらを重ね合わせて解く方法



重合メッシュ法におけるグローバルメッシュとローカルメッシュの様子

要素数を減らす効果

高い応力の発生する圧力源近傍を密に分割したローカルモデルと、それ以外の地盤を粗く分割したグローバルモデルでモデル化

- 変位はグローバルなメッシュの変位とローカルなメッシュの変位を重ね合わせる
- 境界は必ずしも一致しない。

【力源推定への適用】

要素分割処理を大幅に減らす効果

一度作ったグローバルモデルを再利用しながら、ローカルモデルのみを移動させて計算が可能

解探索の度に領域全体を分割し直す必要がない

計算時間

通常

探索N

探索(N-1)

...

探索3

探索2

探索1

1探索の計算量

計算時間短縮

重合メッシュ

ローカルメッシュ+有限要素計算 探索N

ローカルメッシュ+有限要素計算 探索(N-1)

...

ローカルメッシュ+有限要素計算 探索3

ローカルメッシュ+有限要素計算 探索2

ローカルメッシュ+有限要素計算 探索1

グローバルメッシュ

	1探索当たりの計算時間	全計算時間
通常(無限要素+要素細密化)	150分	25時間 
重合メッシュ	20分	2時間50分 
	グローバルメッシュ作成: 5分(25%)	

約9倍
向上

変位量/圧力変化量を最小二乗で逆推定する機能を実装

➡ 探索するパラメータ数を1つ削減

変位・応力と力源の動きとの関係式において、力源を表現するパラメータのほとんどは非線形だが、変位量/圧力変化量のパラメータは変位・応力と線形の関係になることを利用

【クラック（板状亀裂）】

位置（緯度，経度，深さ），長さ，幅，走向，傾斜，**変位量**

【球状圧力源】

位置（緯度，経度，深さ），半径，**圧力変化量**

線形推定

【回転楕円体】

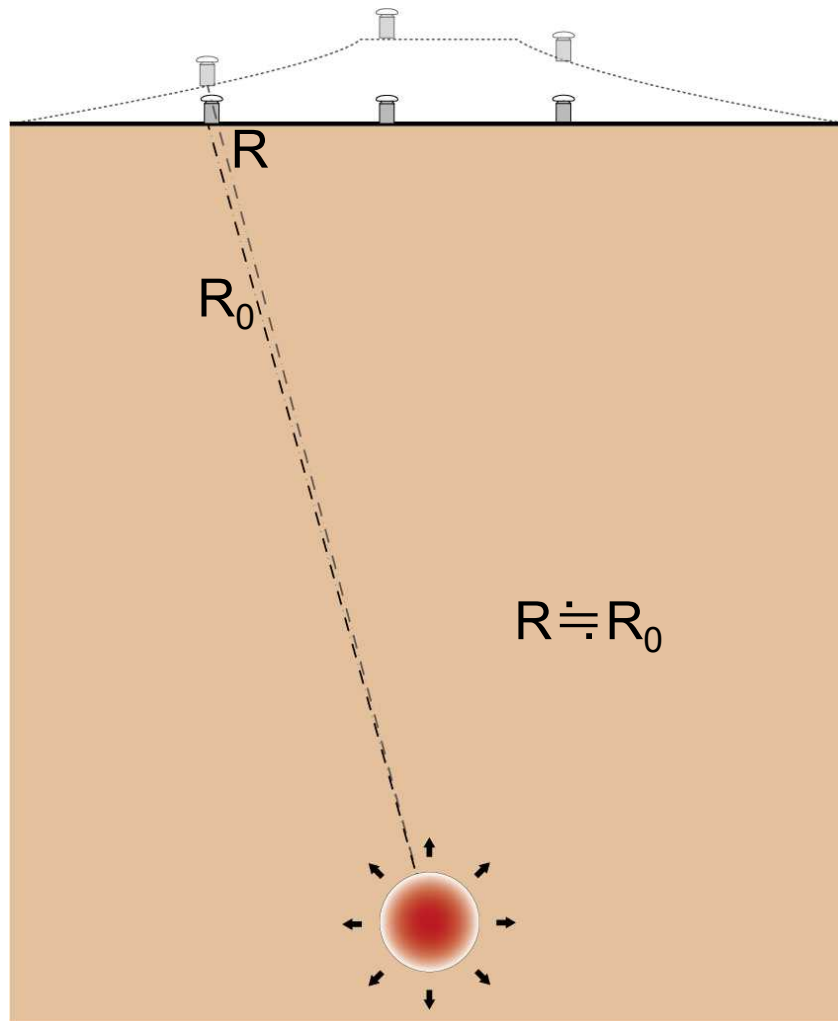
位置（緯度，経度，深さ），長径，短径，走向，傾斜，**圧力変化量**



開口量/圧力変化量の
逆推定機能のON/OFF

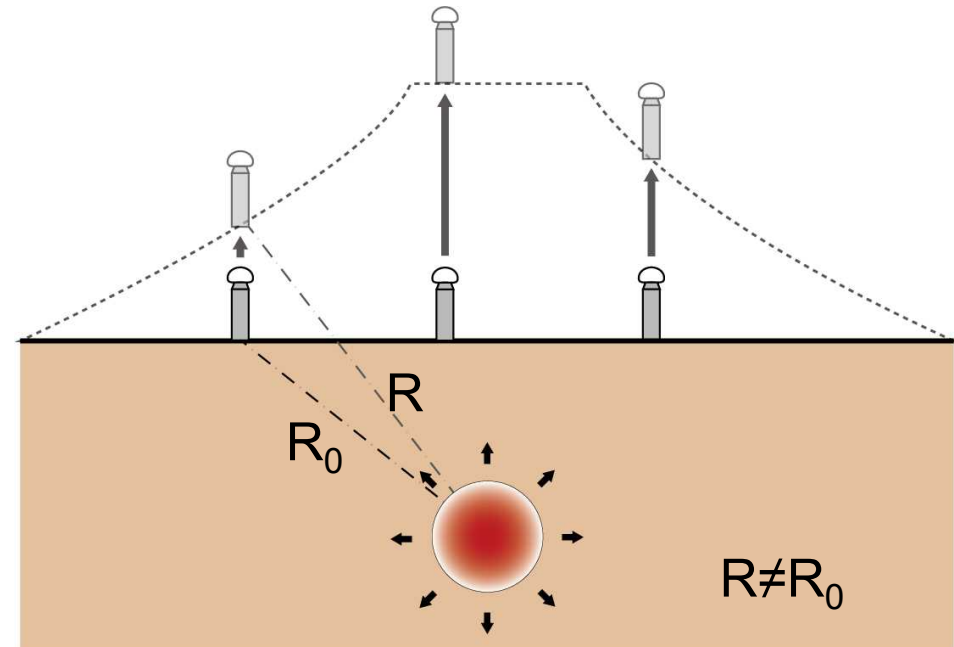
理論解での地形の 影響対策とその適用限界

力源が深い場合



力源が深い場合は、地形の影響が小さい
(力源と観測点との距離が、標高を考慮した場合としない場合でほぼ同じ)

力源が浅い場合

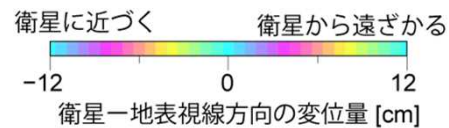
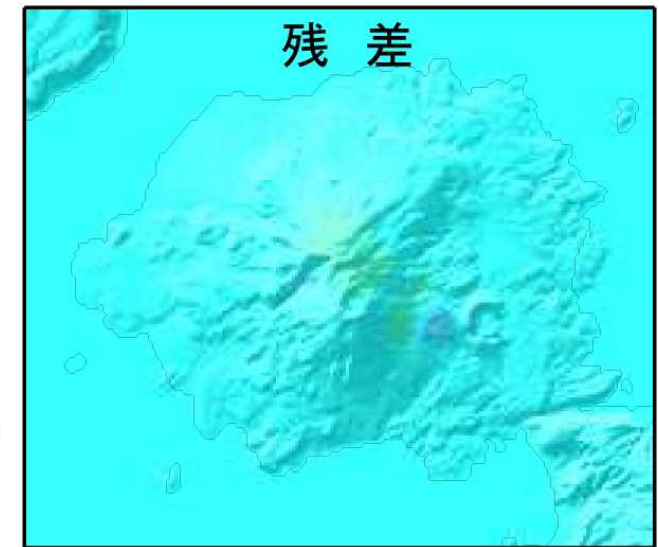
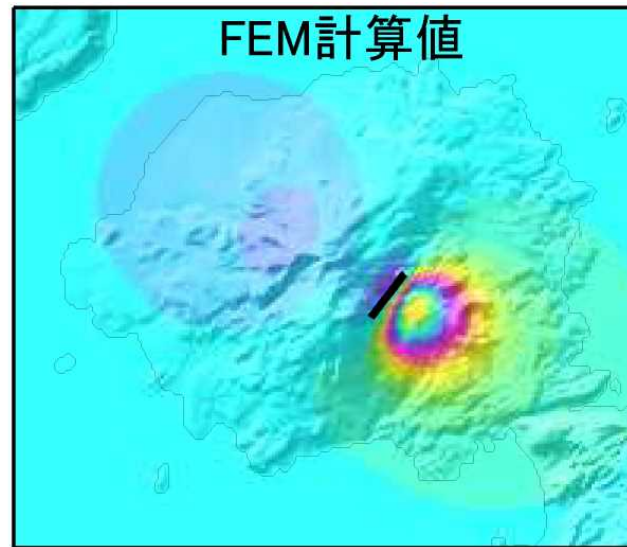
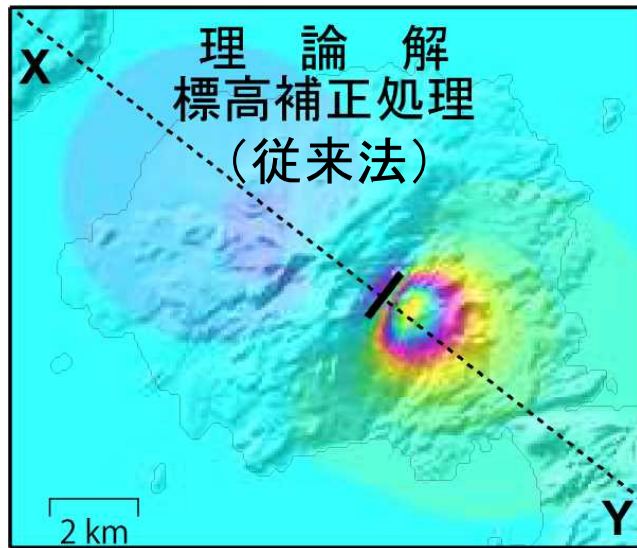


力源が浅い場合は、地形の影響が大きくなる
(力源と観測点との距離が、標高を考慮した場合としない場合に差が出る)

対処法の1つ 「標高補正処理」

各観測点(各画素)においてそれぞれ、
観測点の標高を加味して、観測点と力
源の距離を補正.

※ 「varying-depth model」 という呼称でも
知られる (Williams and Wadge, 2000)



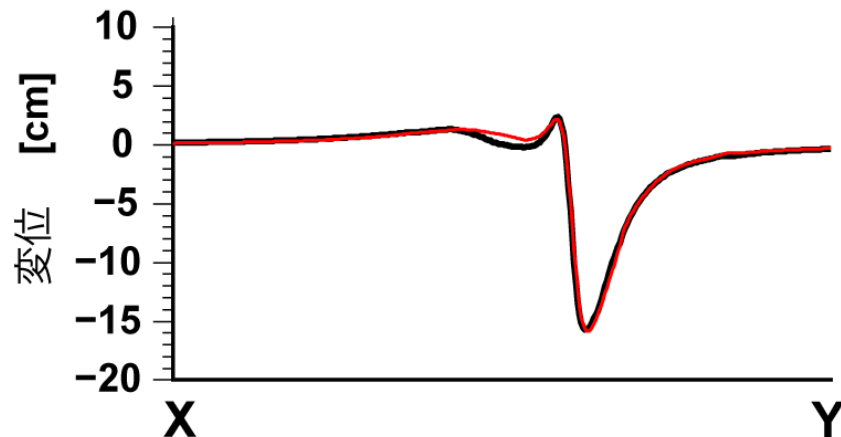
※2015年桜島マグマ貫入イベントの干渉画像
(ペア2015.01.01-2015.09.07)を例に

計算条件

- ✓既発表論文*で提案した開口クラックモデルを使用
- ✓ただし、クラックの上端を海拔0mに設定

従来法とFEM解に大きな差は見られない

力源が海拔下にある場合は、
従来法の適用が概ね可能



* Y. Morishita, T. Kobayashi, H. Yari, Three-dimensional deformation mapping of a dike intrusion event in Sakurajima in 2015 by exploiting the rightand left-looking ALOS-2 InSAR, Geophys. Res. Lett., 43, 4197–4204, doi:10.1002/2016GL068293. 2016