

4-4

L band 干渉 SAR の発展の軌跡と今後への展望

- みえる世界を拓けることの威力 -

Achievements of L-band InSAR Surface Change Detection and Its Future Horizons

村上 亮: 北大地震火山研究観測センター

Makoto MURAKAMI (ISV Hokkaido Univ.)

要旨:

JERS-1とALOSは、世界でも他に類例の稀なL-bandを用いたSAR搭載衛星で、2世代にわたって日本が打ち上げて運用してきた。L-bandを採用することで、地殻変動や地形情報に対する観測感度をある程度保持しながら、干渉性への植生の影響を効果的に軽減しているため、地表の全域にわたって対応力が高い。2つの衛星が地表を長期間にわたって繰り返し観測して蓄積した貴重なデータは、地震、火山活動、氷河移動、地すべりなど広い範囲の変動現象の数々を明らかにして、我々の理解を拓げてきた。2011・3・11の東日本の巨大地震の直後にALOSが運用を停止してから、データの空白期間が続いてきたが、更なる総合的性能の向上が図られた後継衛星のALOS-2の打ち上げが来年に予定され、それを利用した科学の進展への期待が高まっている。これまでのInSAR応用研究の歴史を振り返ると、我々が新たな視座を獲得する毎に、地球の営みに対する理解が深まってきたことがわかる。著者が最近関心を抱いている火山の山体崩壊予測への干渉SAR応用の試みを紹介しながら、現在のInSARの抱える課題と、それが克服された場合に拓がる新たな地平について考察する。取り上げる予定の課題は、①航空機SARとの併用による時間分解能の向上、並びに三次元変動場への拡張、②衛星系のS/Nの向上による干渉性の向上、③積雪時による干渉性劣化の克服、④複雑な変動場に対する我々のモデル構築力の向上などである。

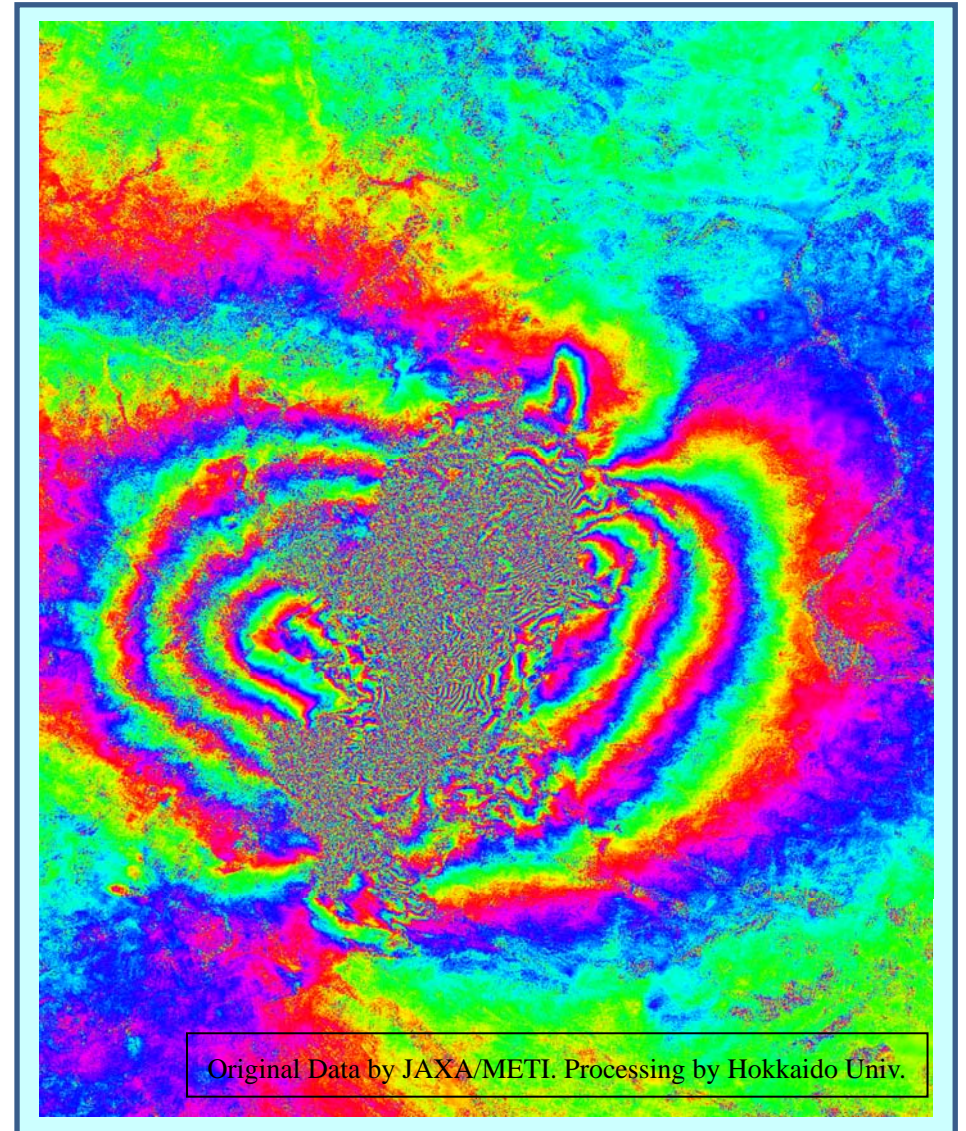


Figure: Close-up view of ALOS PALSAR interferogram depicting surface displacements associated with 2008/06/14 Iwate-Miyagi Inland EQ (Mj 7.2). Near the center an active volcano (Mt. Kurikoma) is located. Besides displacements caused by major seismic faulting, also included in the central area are accompanying surface deformations like landslides which may lead to edifice collapse. To retrieve those fringes crucial to disaster mitigation, further improvements of analysis and modeling are necessary.

干渉SARの発展の軌跡と今後への展望 -- みえる世界を広げることの威力 --

村上 亮
北海道大学理学研究院

京都大学防災研究所一般研究集会「SAR研究の新時代に向けて」
2012/09/13

奥山 哲・古屋 正人・阿部 隆博との共同研究成果

謝辞： 解析に用いたPALSARデータは地震ワーキンググループ等の枠組みによりJAXAから提供されたものである。PALSARデータの所有権は経済産業省およびJAXAにある。解析には、国土地理院による10mメッシュ数値標高データを用いた。

概要

- Introduction: 火山の山体崩壊現象
- メカニズム解明に必要な情報とSARの果たす役割
- 現時点における限界
- 将来への課題と期待
- まとめ



崩壊後のセントヘレンズ山 after 荒牧重雄

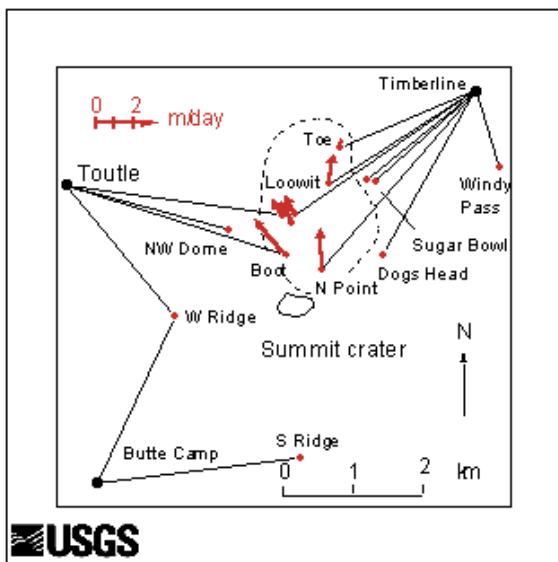
我が国の山体崩壊災害の例

| | | |
|--------|-------|---------|
| 北海道駒ヶ岳 | 1640年 | 700余名 |
| 雲仙眉山 | 1792年 | 15,000人 |
| 磐梯山 | 1888年 | 461名 |



崩壊方向からみる磐梯山

セントヘレンズ山の崩壊前の膨張 USGS



爆発前の斜面の膨張 USGS

わが国で歴史時代に発生した巨大山体崩壊の一覧

表 3-3 有史時代に生じた巨大山体崩壊比較表

| | 発生年 | 幅 (m) | 奥行き | 体積 (m ³) | 素 因 | 誘 因 |
|------|------|-------|------|-----------------------|-------|---------|
| 磐梯山 | 1888 | 1500 | 2000 | 1.5×10^9 | 火山灰層 | 水蒸気爆発 |
| 眉山 | 1792 | 1000 | 1300 | $4.8-1.1 \times 10^8$ | 溶岩円頂丘 | 火山活動+地震 |
| 渡島大島 | 1741 | 1500 | 1000 | 4.0×10^8 | | 火山噴火? |
| 駒ヶ岳 | 1640 | 2500 | 2500 | 4.1×10^8 | | 火山噴火 |
| 八ヶ岳 | 888 | 3000 | 1000 | 3.5×10^8 | | ? |

(井口, 2004)

山体崩壊について

- 火山災害要因の中でも、典型的な低頻度大規模災害
- セントヘレンズ(1981)級の規模の崩壊が世界で過去100年に少なくとも6回発生.
- ①マグマ噴火に伴って発生,
②水蒸気爆発に伴って発生,
③(少なくとも表面上は)噴火に無関係に発生
した事例がそれぞれある(Siebelt 1984, Siebelt et al., 1987).
- 地質学的情報は、それなりにあるが、発生時に近代的観測が実施された例は乏しく、メカニズムがよくわかっていない.
- 2000年有珠山噴火時には、山頂が大きく北方向へ変位するなど、顕著な地殻変動が観測されたため、北方向へ崩壊. 及び洞爺湖での津波発生が懸念された.
- 近年では、将来の富士山の山体崩壊の可能性が社会の関心を集めている.

より深い滑り面： 火山の山体崩壊

セントヘレンズ



磐梯山



比較的浅い滑り面の例

2008荒砥沢



口絵-3 荒砥沢ダム上流の大規模地すべりの全景(移動方向に直行する2列のリッジが見える、右奥が荒砥沢ダム貯水池)(第I章参照)

船形山北麓



写真 3-14 船形山北麓の大規模地すべり地形

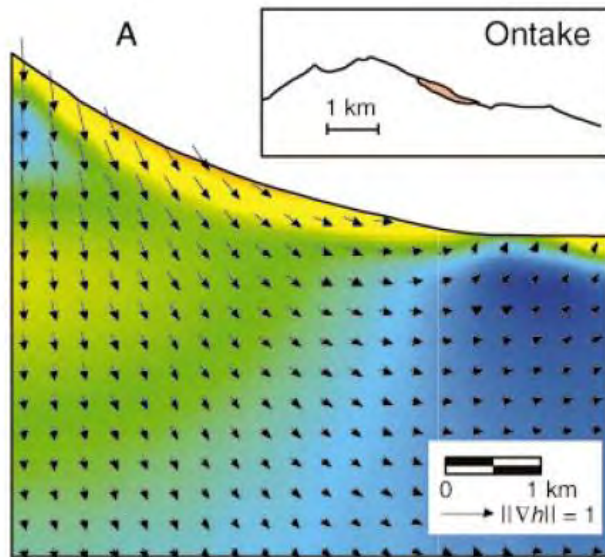
火山の山体崩壊の予測可能性について

1. 地震による強震動 → 予知・避難ともにほぼ不可能
2. マグマによる突き上げと山体の変形 → 予知と避難が可能
3. 山頂付近での大規模水蒸気爆発 → 予知できる場合があるかもしれないが困難 (静岡大 小山真人氏)

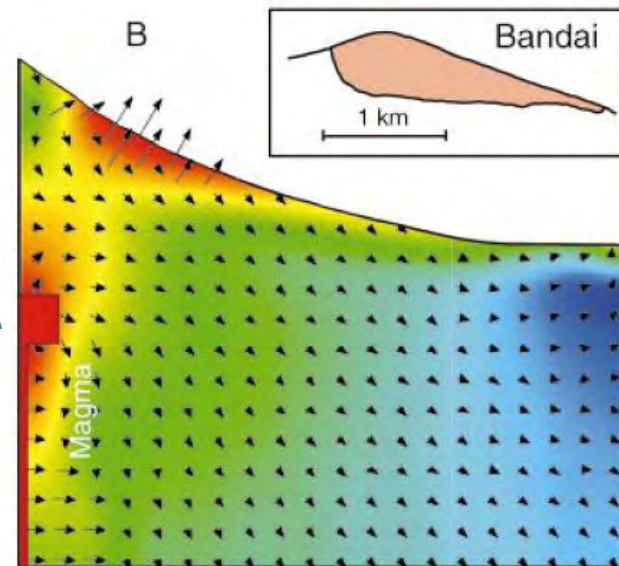
http://sk01.ed.shizuoka.ac.jp/koyama/public_html/Fuji/120821koyama.pdf

T_{max} (最大せん断応力)/ σ_m (平均実効垂直応力)

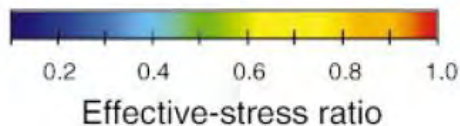
1984御嶽山



1886磐梯山



マグマ貫入は無く天水のみ



山体深部へのマグマ貫入 (Reid 2004)

どう取り組めばよいか？

- 深層崩壊など類似現象も含めて、観測事例を増やす.
- 地滑り分野などとの学際的連携の強化.
- 深部構造などKey Factorに係る新規観測や調査の提案・実施.
- 以上を総合して発生メカニズムの考察の深化を目指す.

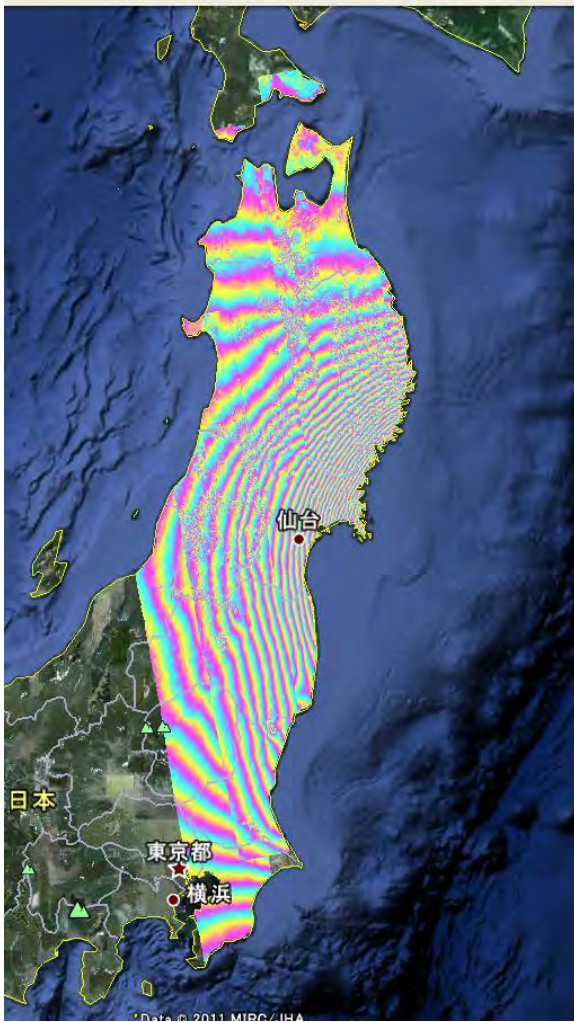
とりあえず，2011/03/11地震時に火山で何か起きていなかったか見てみる

使用PALSARデータ一覧

| PATH | Acquisition 1 | Acquisition 2 | Bperp |
|------|---------------|---------------|------------|
| 401 | 2010/10/28 | 2011/03/15 | 1465.1 [m] |
| 402 | 2010/09/29 | 2011/04/01 | 1203.7 [m] |
| 403 | 2011/03/03 | 2011/04/18 | 360.5 [m] |
| 404 | 2011/02/02 | 2011/03/20 | 831.3 [m] |
| 405 | 2011/02/19 | 2011/04/06 | 405.0 [m] |

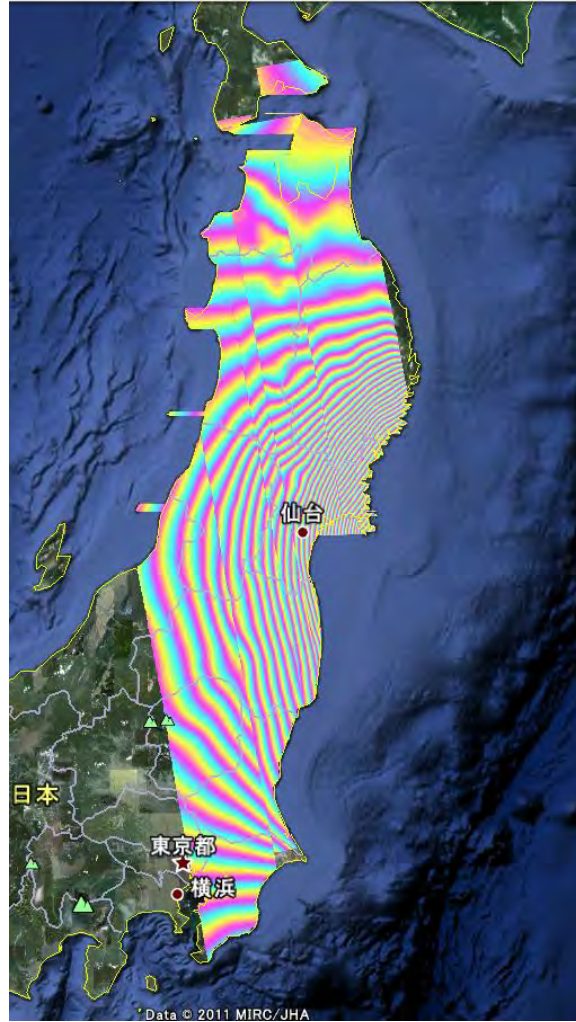
生干涉図

一

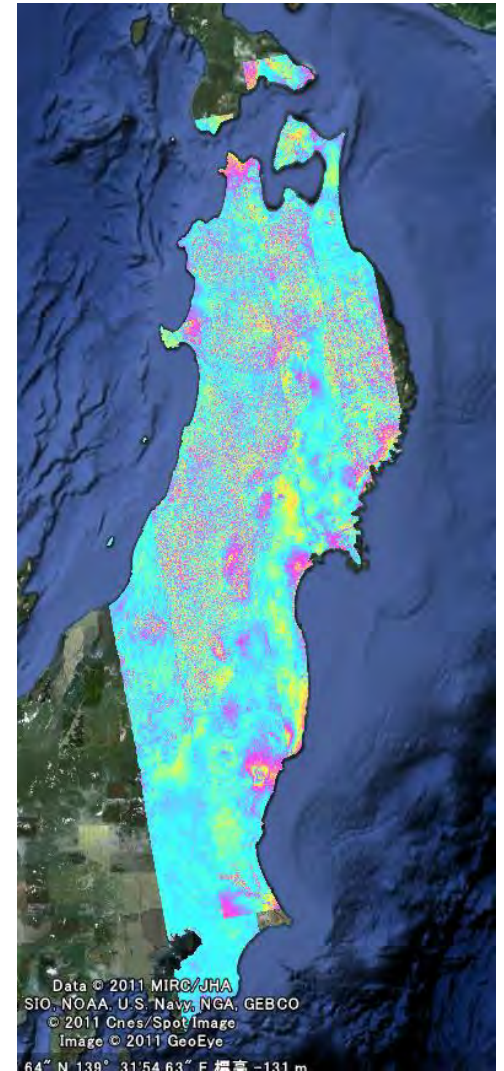


長波長成分

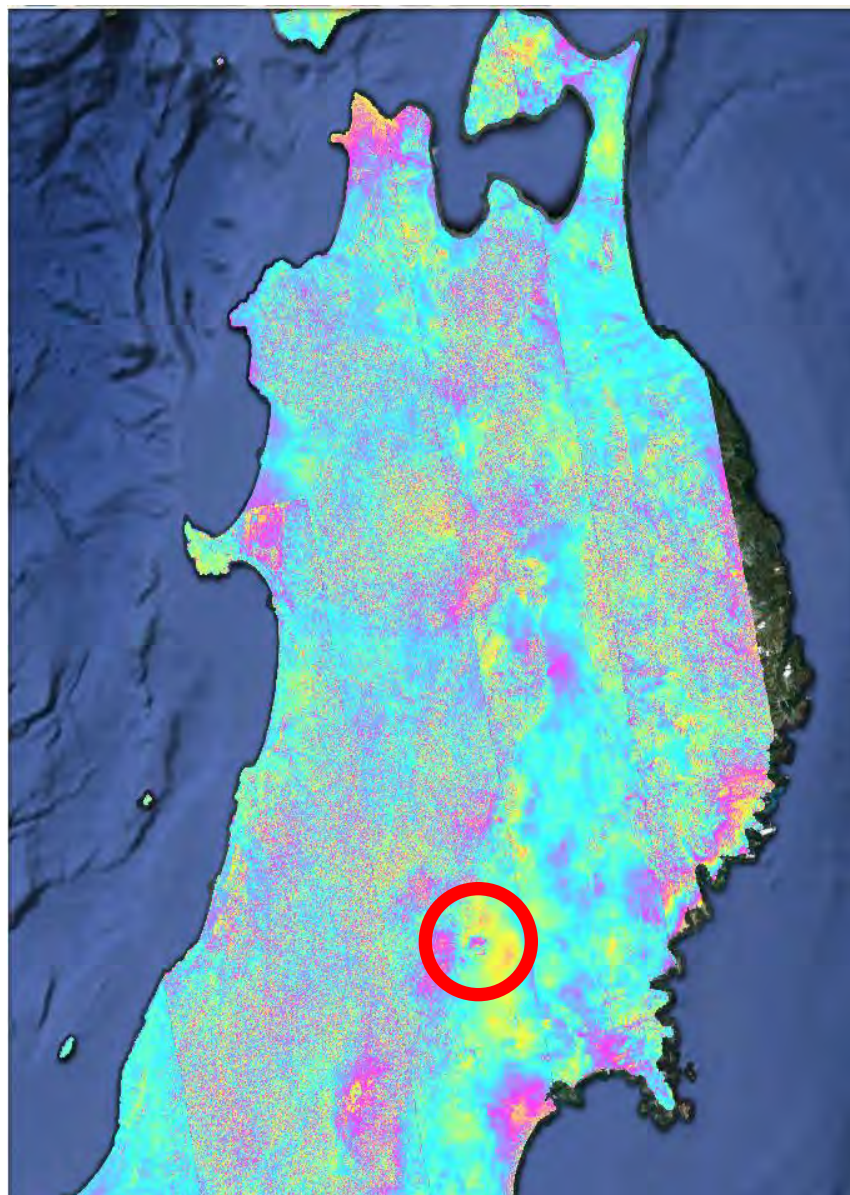
二



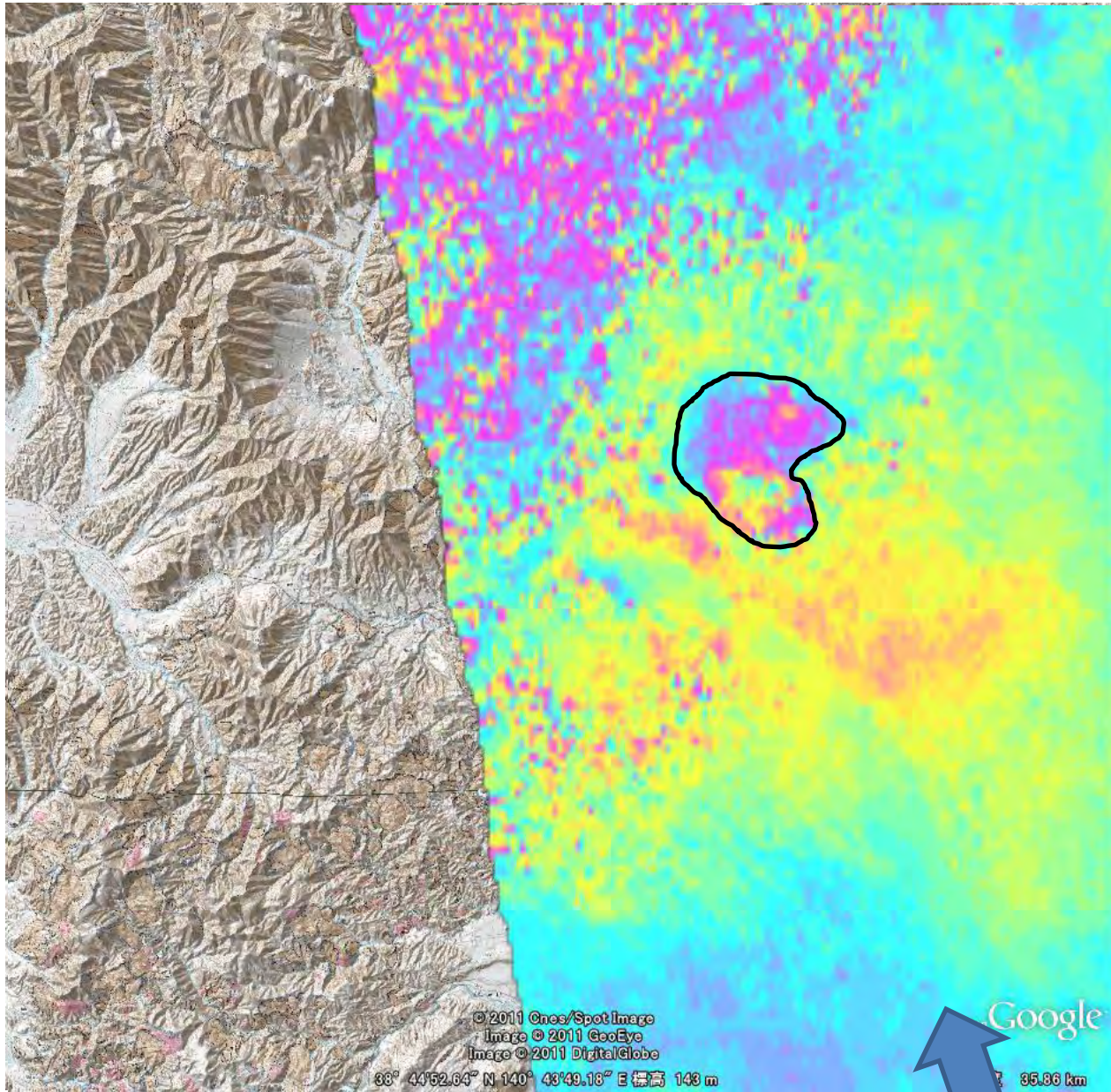
短波長成分



鳴子温泉近傍 花山ダム周辺

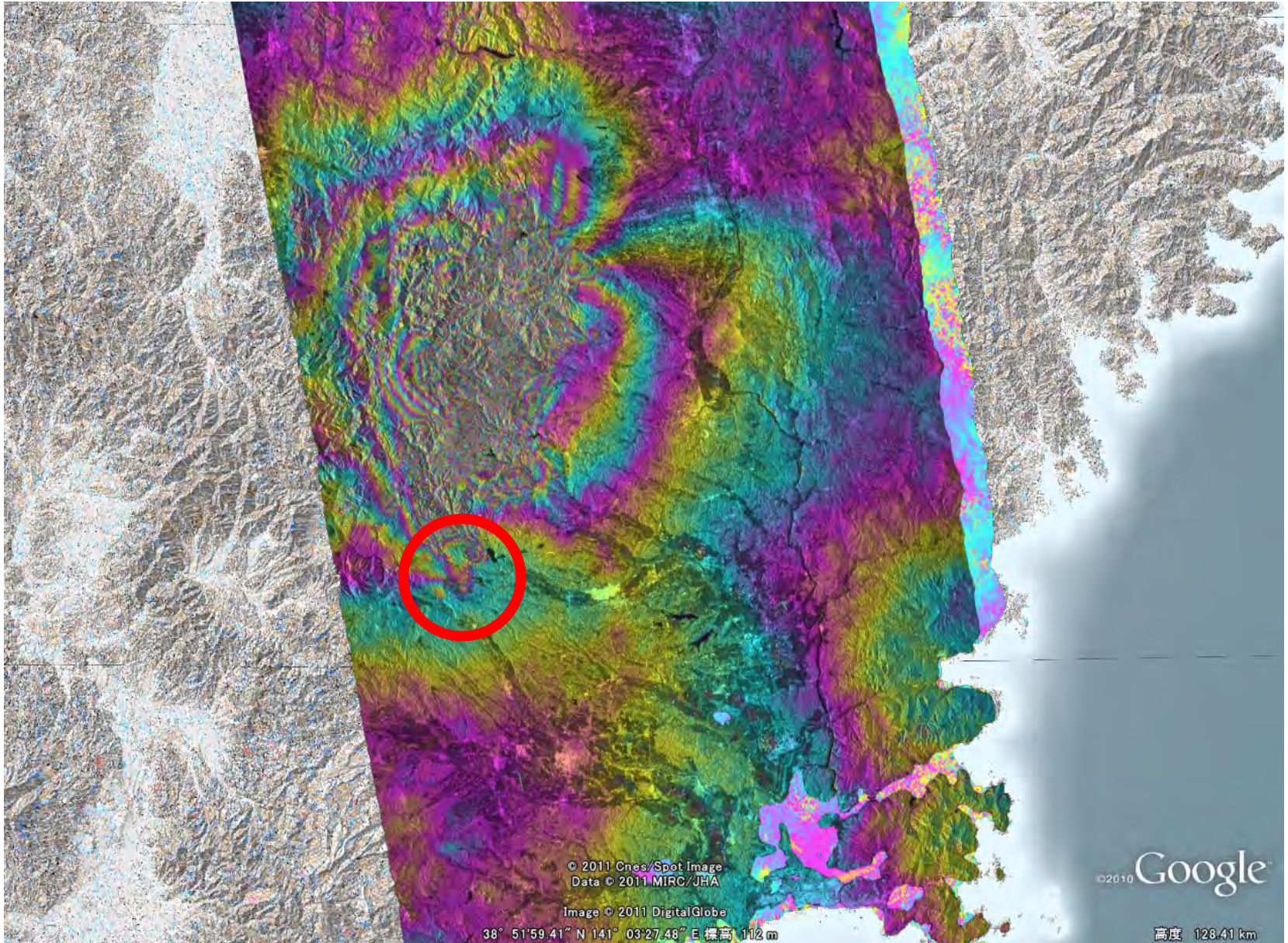


鳴子温泉近傍 花山ダム周辺

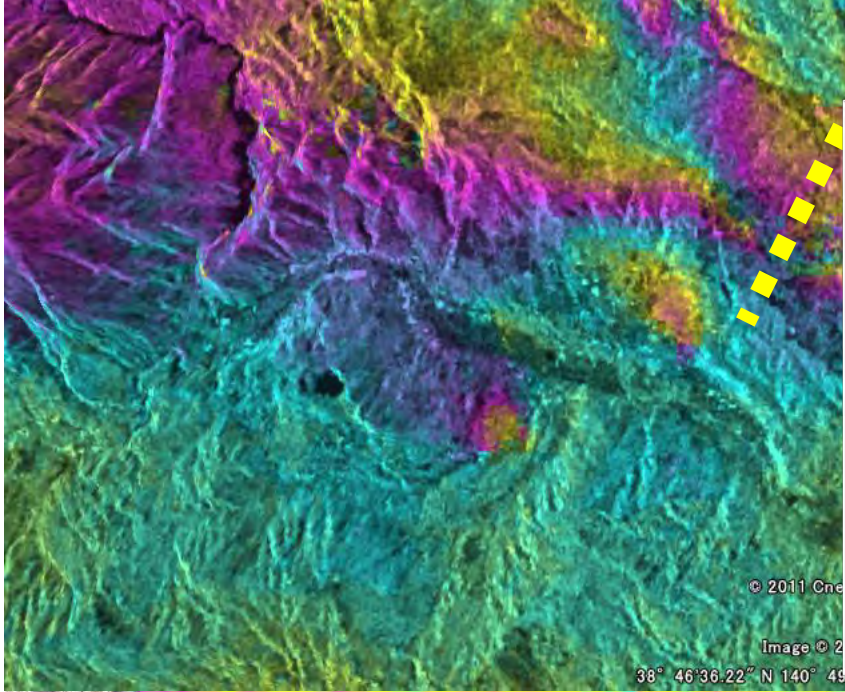
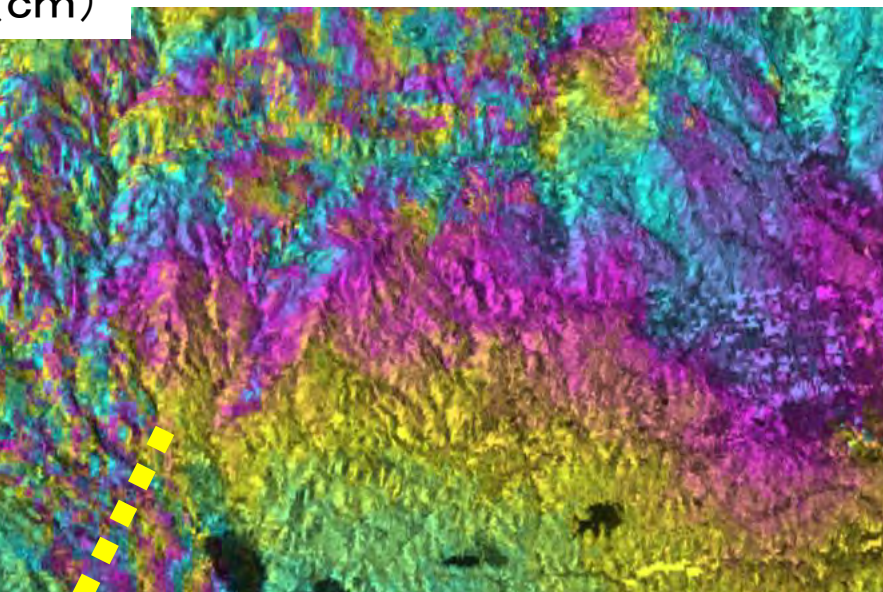
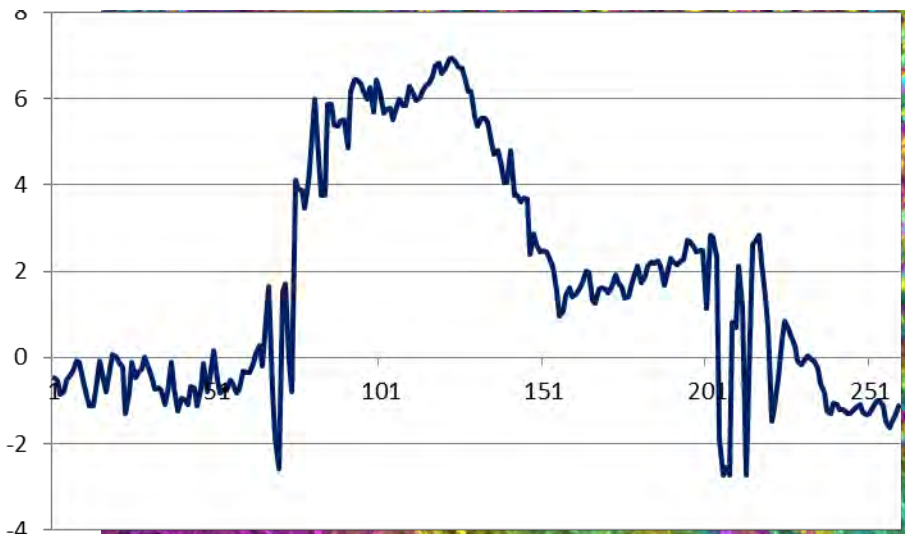


| | | | |
|-----|---------------|---------------|----------------|
| 402 | 2010/ 9/29 | 2011/ 4/1 | 1203. 7 [m] |
| 403 | 2011/ 3/3 | 2011/ 4/18 | 360.5 [m] |

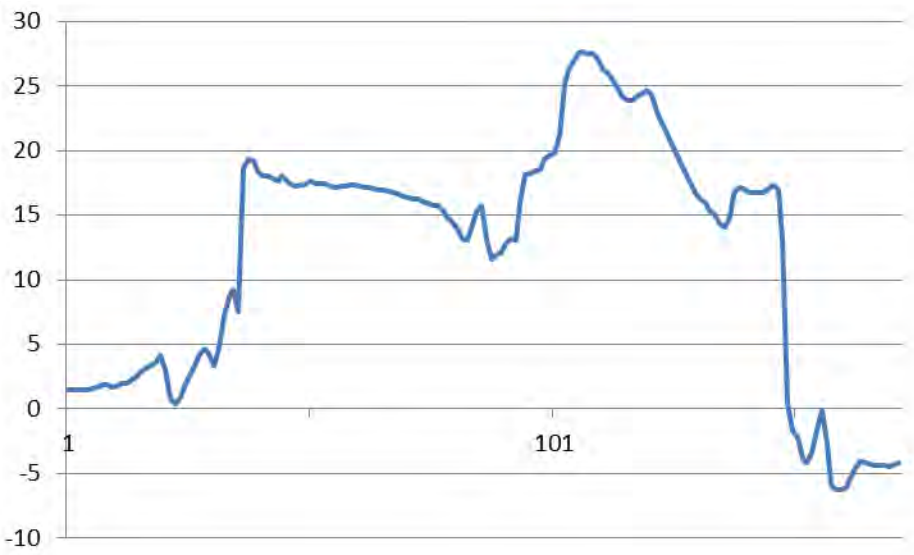
実は2008岩手宮城内陸地震時にも動いていた



黄色の側線に沿ったLOCプロファイル
 東北地方太平洋沖地震(2011)による変動(cm)



岩手宮城内陸地震(2008)による変動(cm)



上空から見た花山地区周辺

鬼首カルデラ

栗駒山

荒砥沢ダム

土塊移動発生地

花山ダム

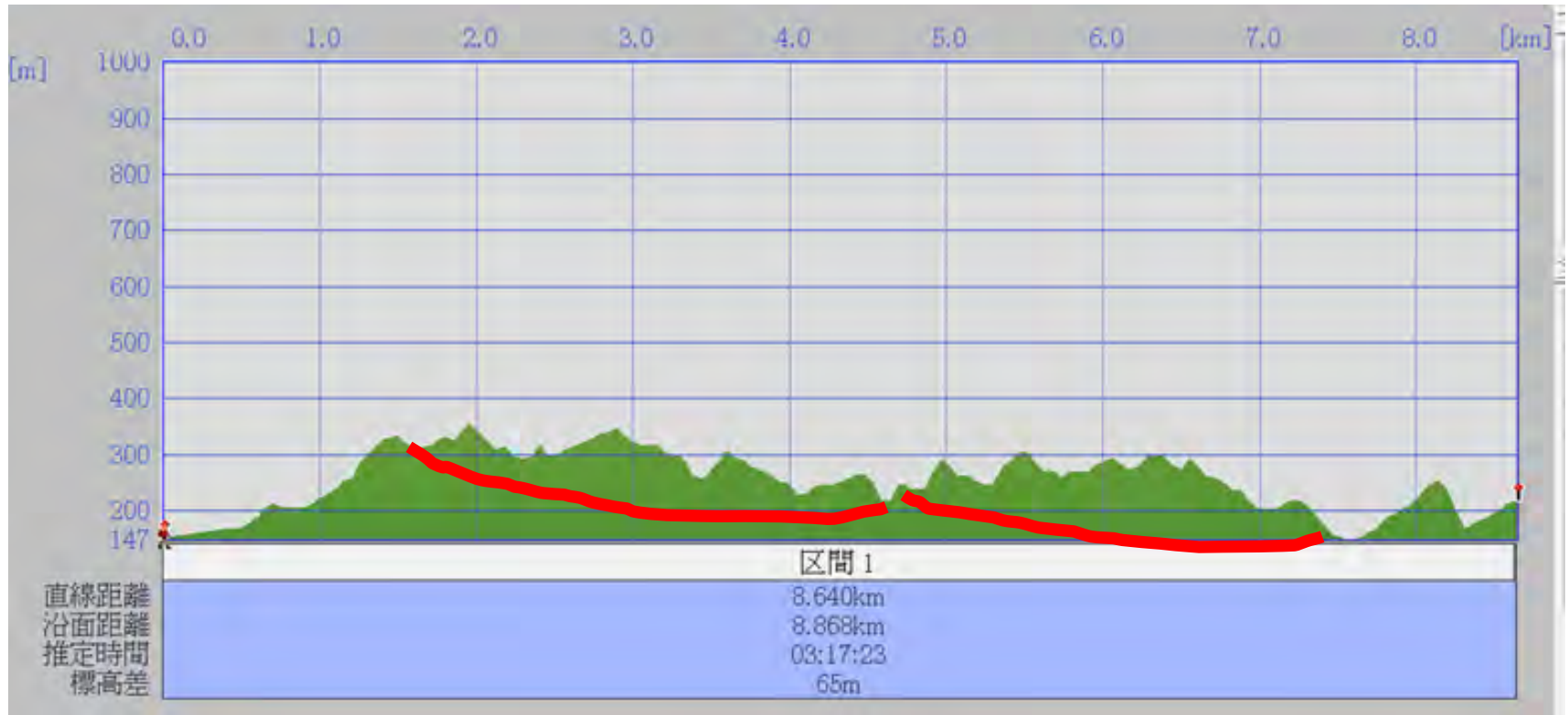
栗原市

東方向から見た土塊移動地区 平地と丘陵の境界が土塊移動の境界線

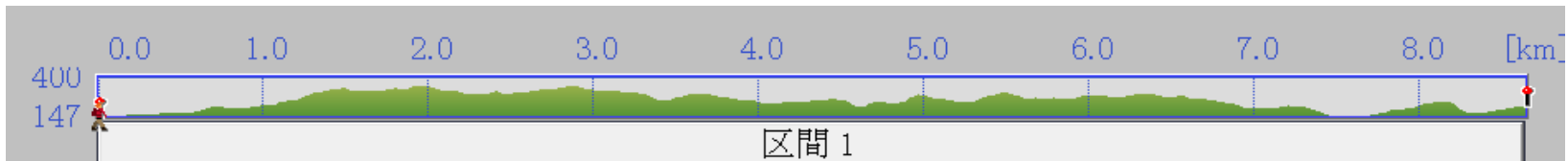


地盤変動のメカニズムの候補(想像図)

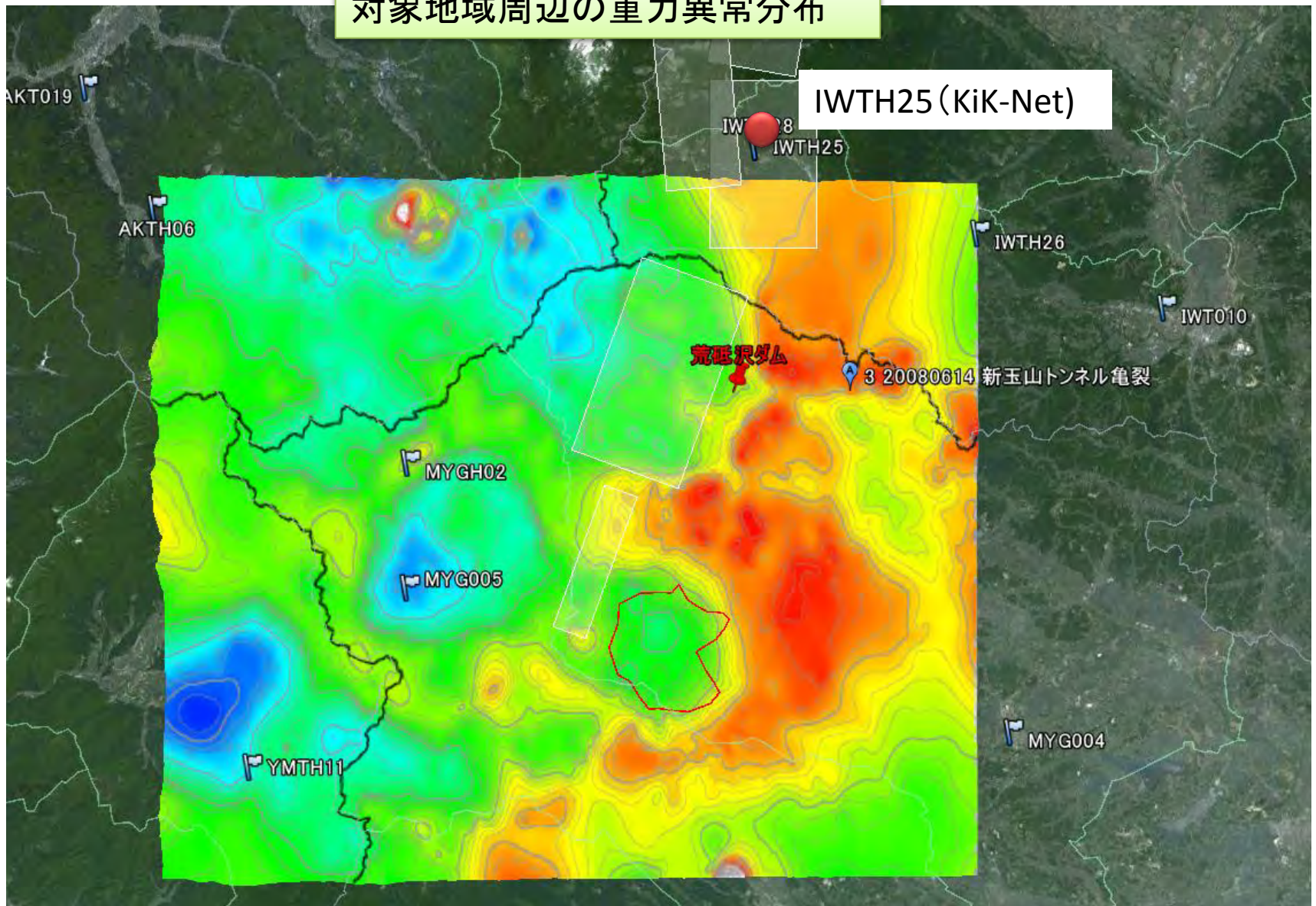
縦横比 約3:1



縦横比 1:1

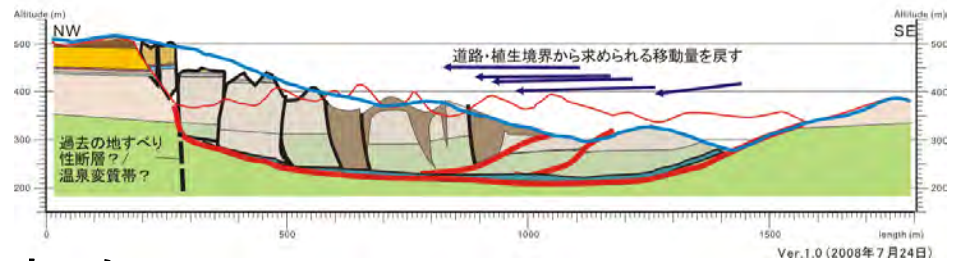
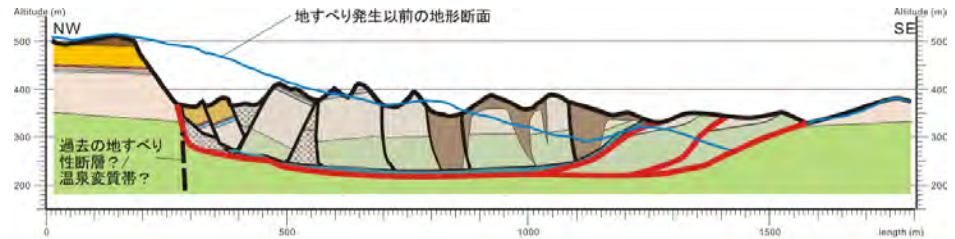


対象地域周辺の重力異常分布



ブーゲー異常図は本多による

2008年岩手・宮城内陸地震(2008/6/14:M7.2)に伴う荒砥沢ダム上流部の大規模な地すべり



2008年岩手・宮城内陸地震によって発生した
荒砥沢ダム上流部の地すべり調査報告

山形大学地域教育文化学部生活総合学科生活環境科学コース 川辺孝幸

千葉県環境地質センター 風岡 修・香川 淳・楠田 隆・酒井 豊・古野邦雄・吉田 剛

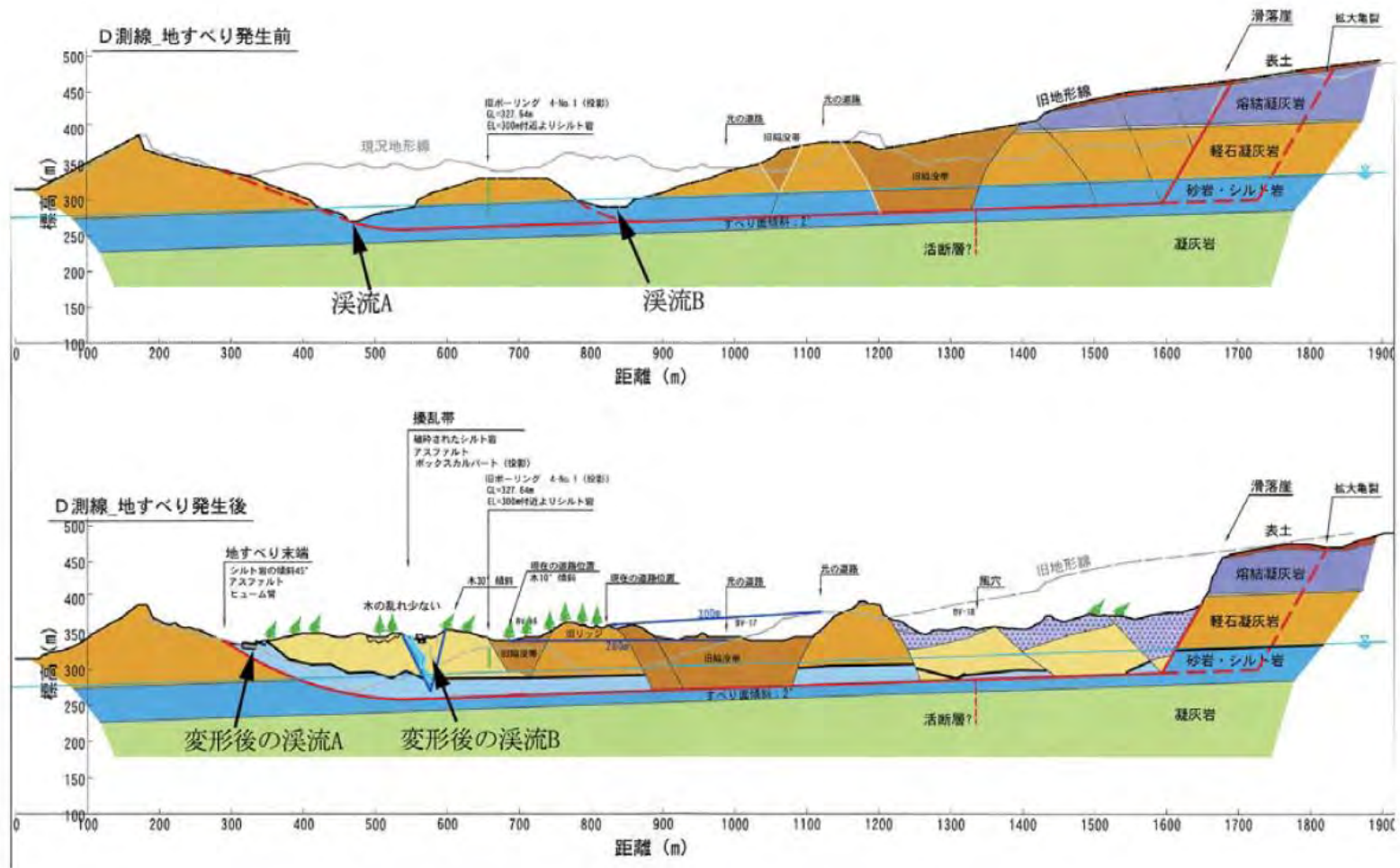
荒砥沢地すべりの全景

図1 (第1章参照)



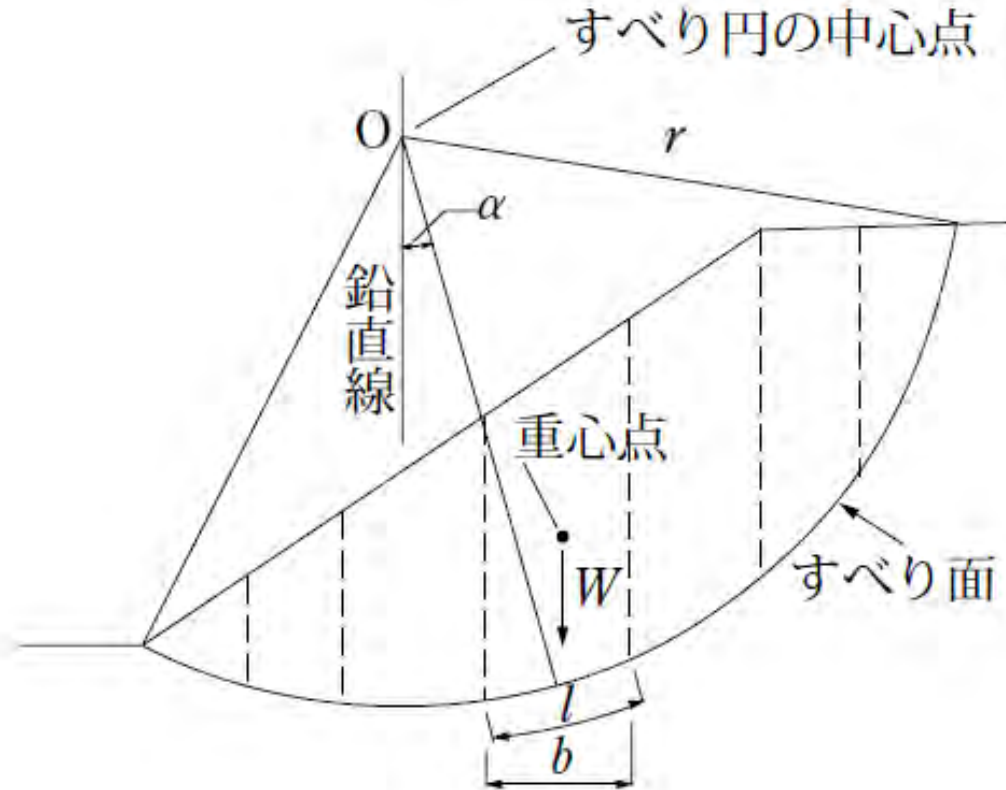
口絵-3 荒砥沢ダム上流の大規模地すべりの全景（移動方向に直行する2列のリッジが見える、右奥が荒砥沢ダム貯水池）（第I章参照）

荒砥沢地すべりの発生メカニズム概念図



宮城豊彦(2009): 強震動を契機に発生した巨大岩盤層スベリ-脊梁山脈東麓の大規模地すべり地形と荒砥沢地すべり-, 森林科学, No. 56, p11-15.

法面の安定解析の例



安全率 $F_s = \text{抵抗モーメント} / \text{すべりモーメント}$

$$F_s = \frac{\sum \{c \cdot l + (W - u \cdot b) \cos \alpha \cdot \tan \phi\}}{\sum W \cdot \sin \alpha}$$

能登半島沖地震による円弧滑りの例

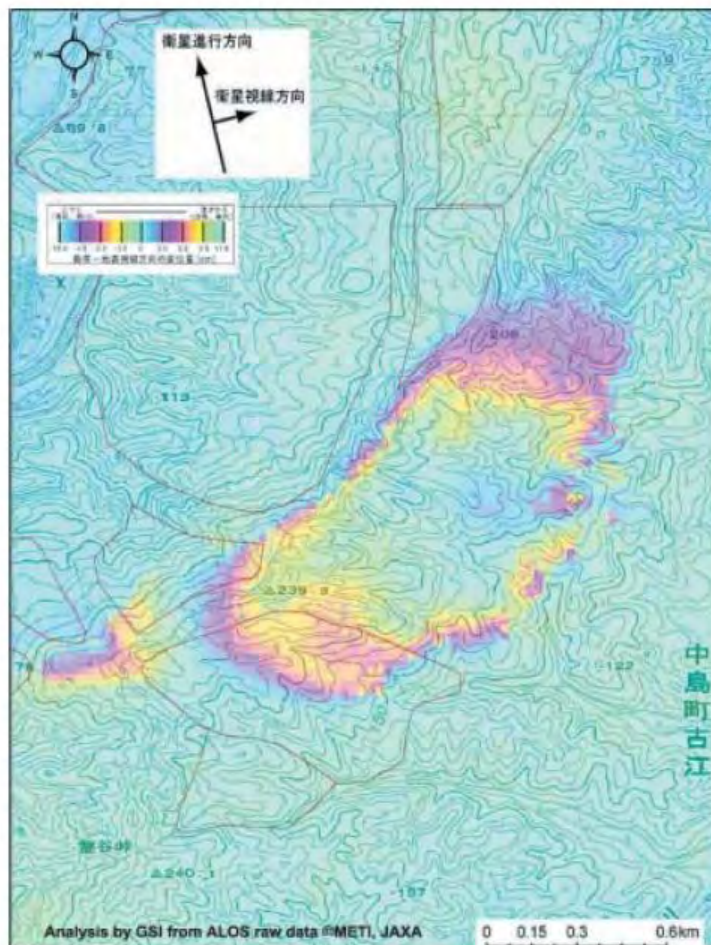


図-7-1 七尾市中島町古江の変動パターン
Fig. 7-1 Deformation Pattern in Furue

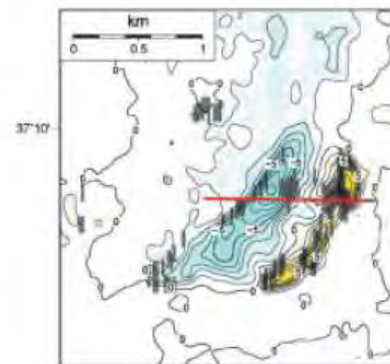


図-7-2 上下方向の変動量 (水色：低下, 黄色：隆起)。赤線は図-7-4の断面位置。

Fig. 7-2 Vertical component of deformation

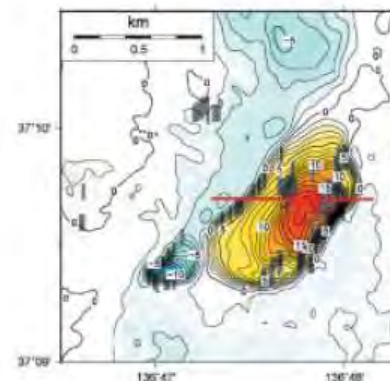


図-7-3 東西方向の変動量 (水色：西方向, 黄～赤：東方向)。赤線は図-7-4の断面位置。

Fig. 7-3 East - west component of deformation

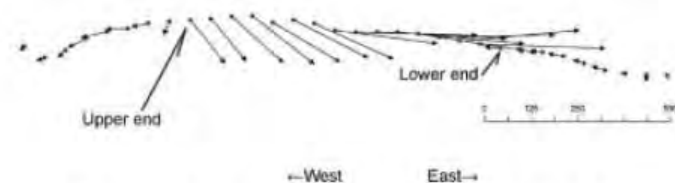
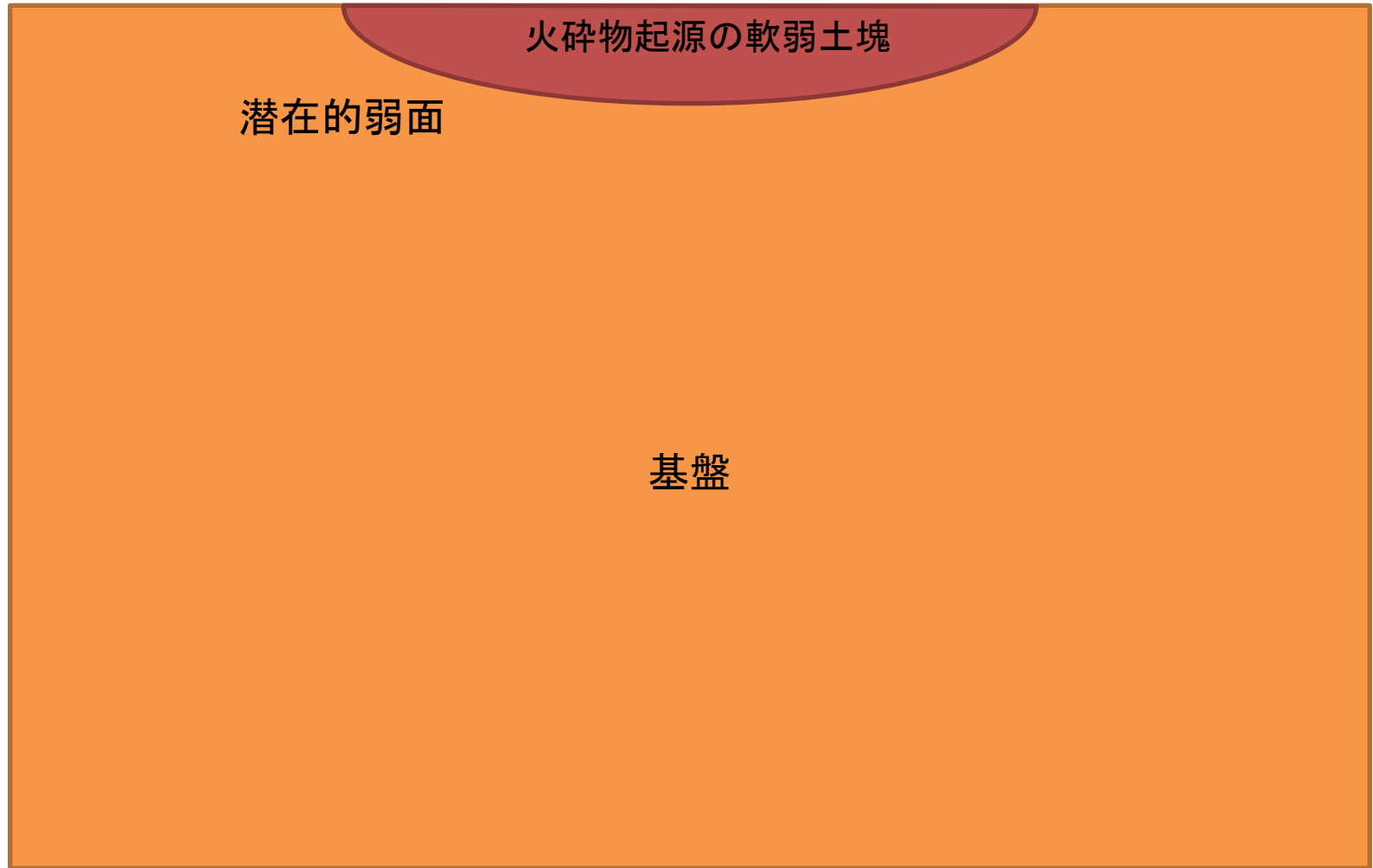
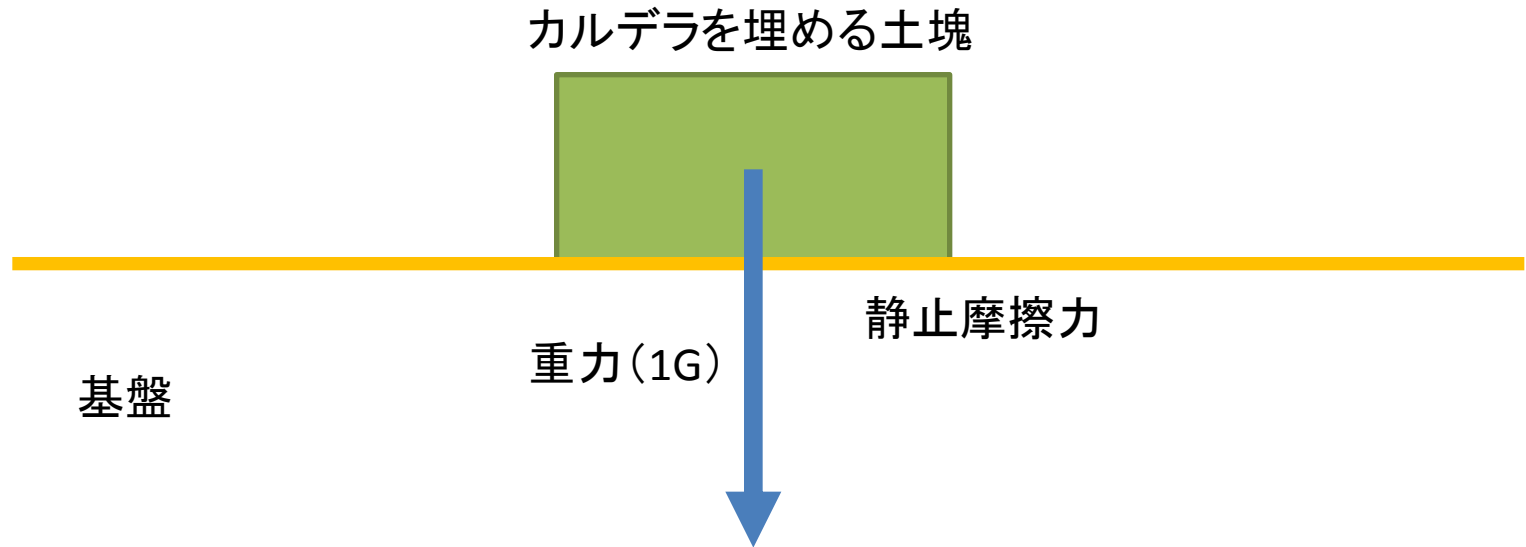


図-7-4 東西断面の地表変動ベクトル
Fig. 7-4 Surface Deformation Vectors

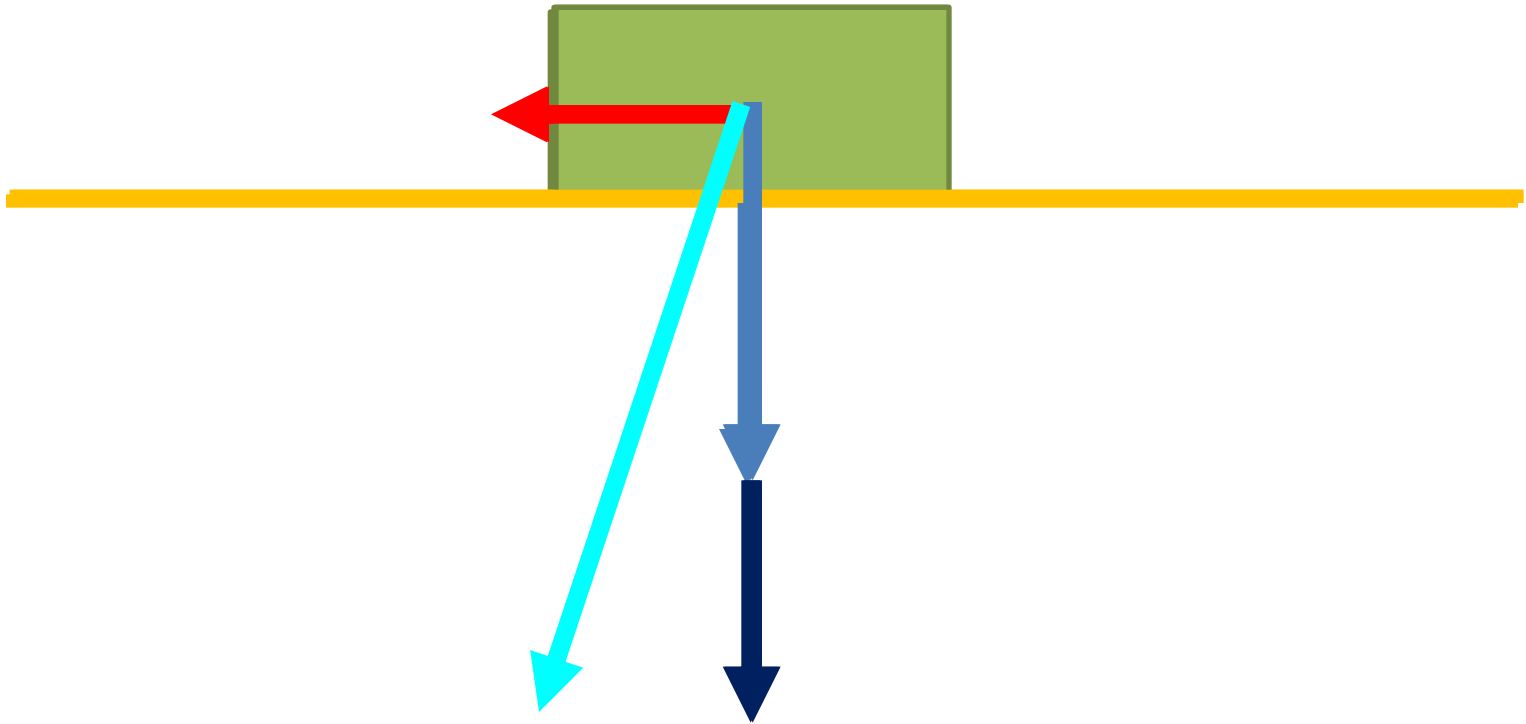
花山カルデラの模式構造図



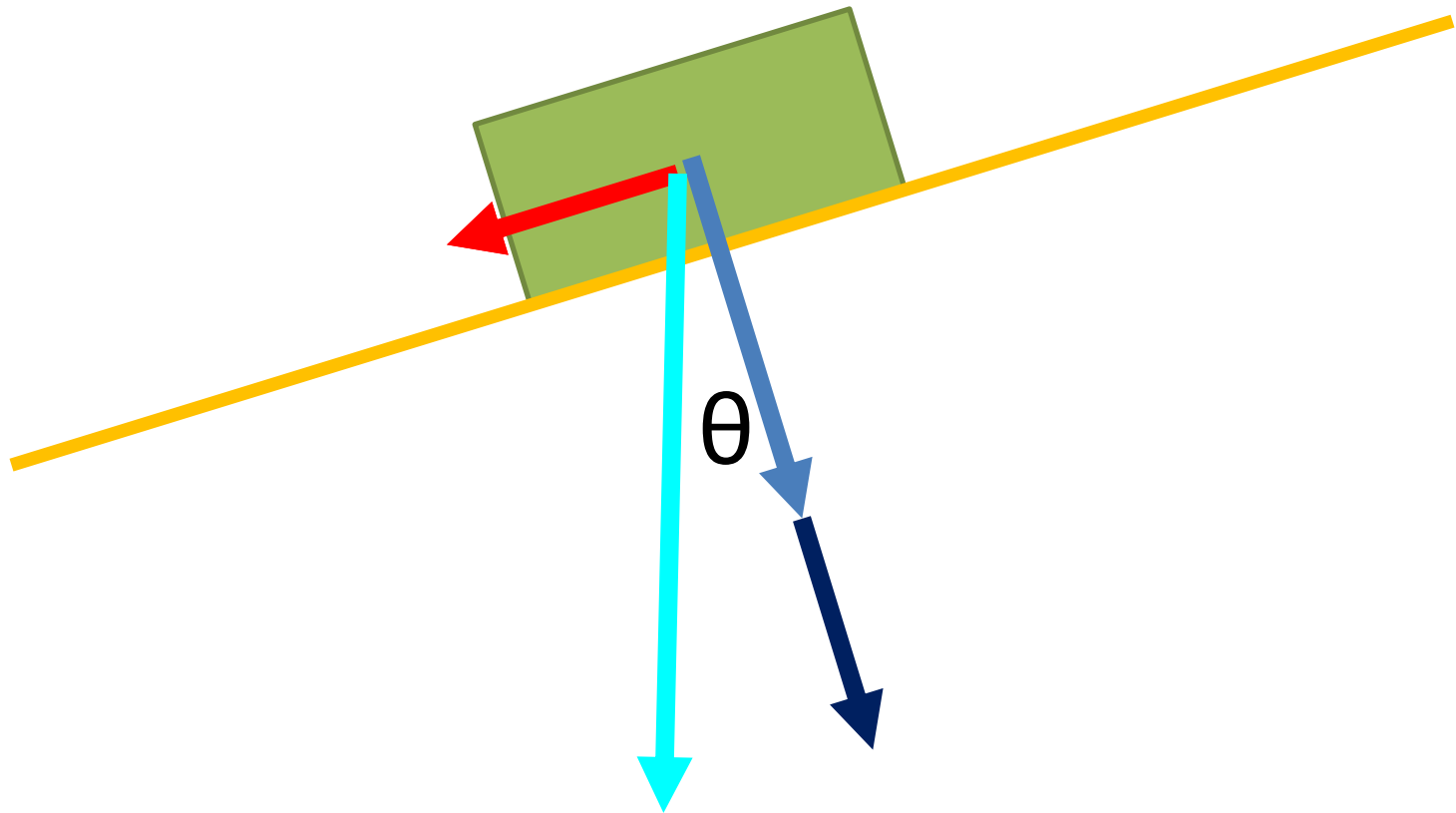
簡素化した土塊の力学モデル



地震時



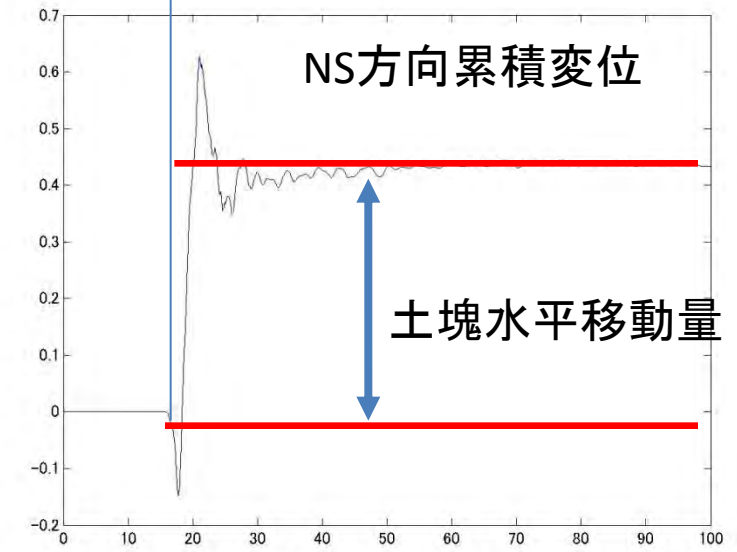
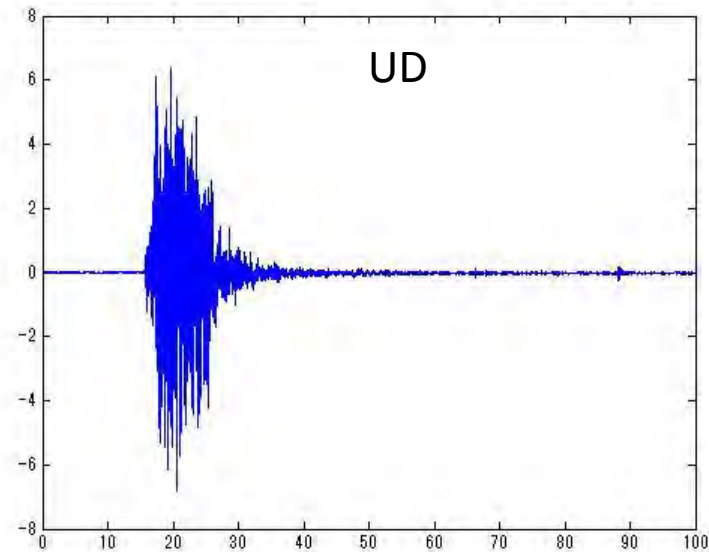
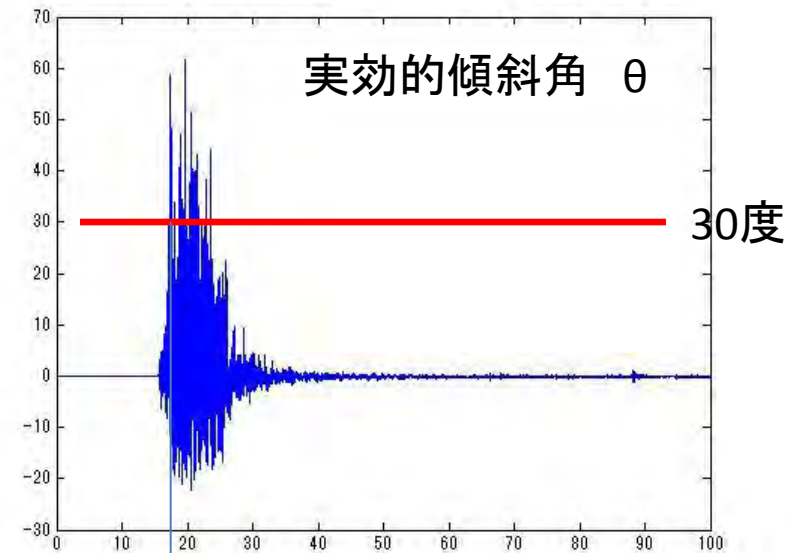
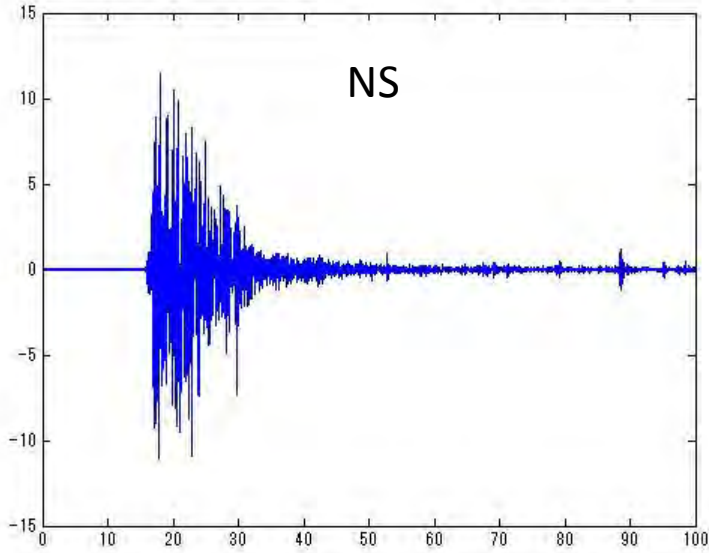
地震時 : 斜面を θ 傾けた状態と力学的に等価



粘着力 c を0とすると, θ が内部摩擦角を超えると静止摩擦から動摩擦状態へ

$$\tau = c + N * \tan(\theta)$$

岩手宮城内陸地震時に最大加速度(4G)を記録した一関西(KiK-net)点の加速度及び累積変位



ヒントは掴めたが、しかし・・・

まだ説明できていないこと① 2012/03/11の花山地すべりの移動方向.

基盤の動きに、上盤が追い付いていけなかったとすると、地震のテクトニック変位と逆になるはずだが、実際は、同じ方向に動いた.

重力性の滑りに移行したのか？

もしそうだとしたら、なぜ、止まったのか？

まだ説明できていないこと② 2008年岩手宮城内陸地震時の土塊移動

栗駒山や焼石岳周辺では、2008年岩手宮城内陸地震のほうが、むしろ2011/3/11より大きな強震動が発生していた.

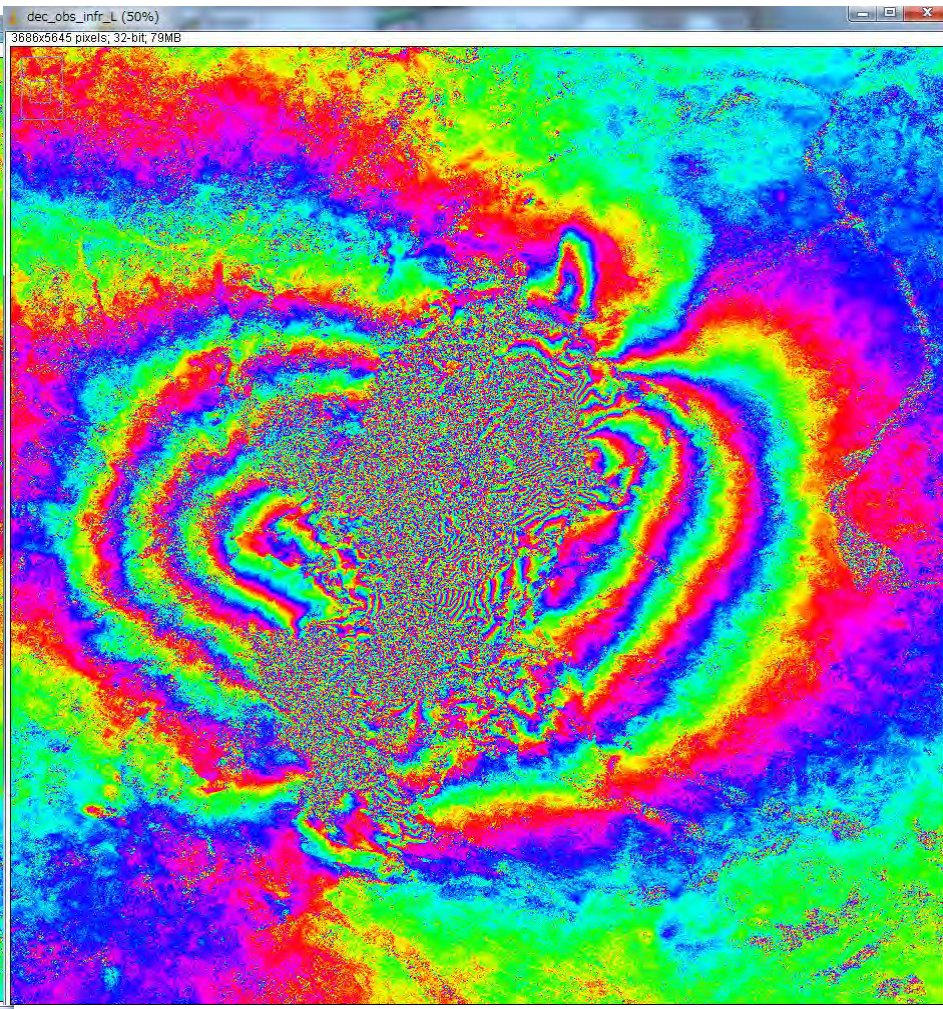
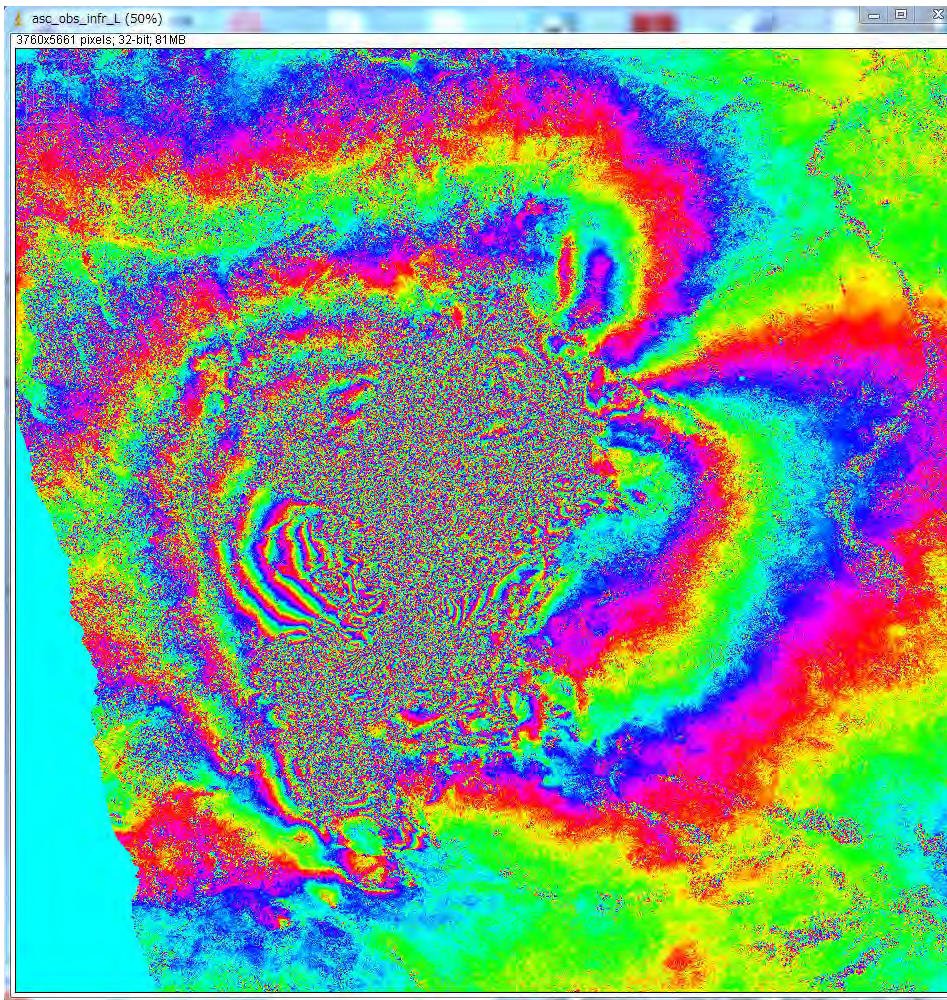
栗駒山や焼石岳が山体崩壊しなかったのはなぜか？

いったい、山体でどのような土塊移動が発生していたのか？

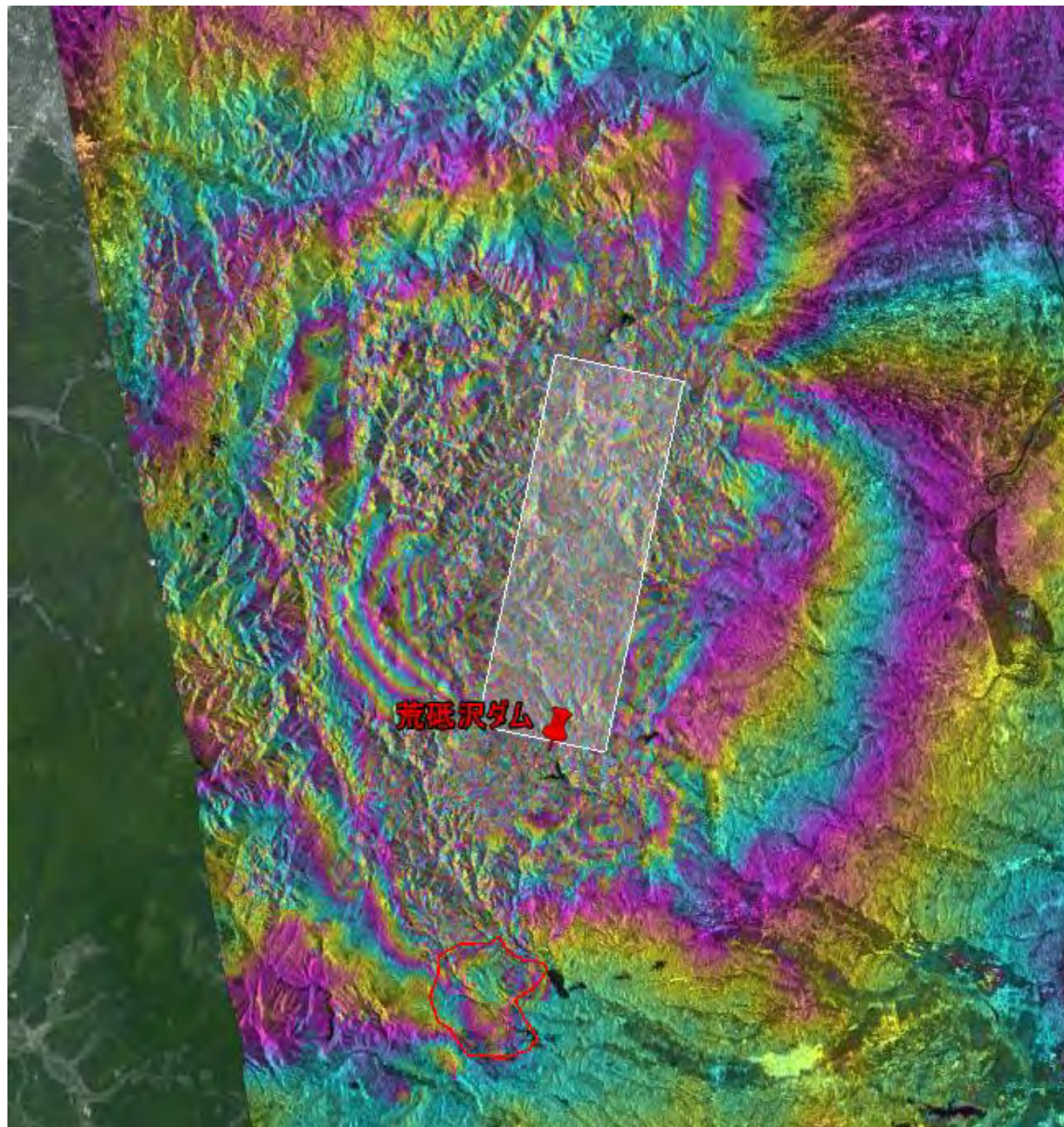
2008岩手宮城内陸地震では、同様のブロック移動が頻発していた可能性が高い

Ascending Path 402 2007/08/06 2008/06/23

Descending Path 57 2007/08/29 2008/07/16



まずは、1枚の矩形断層で近似

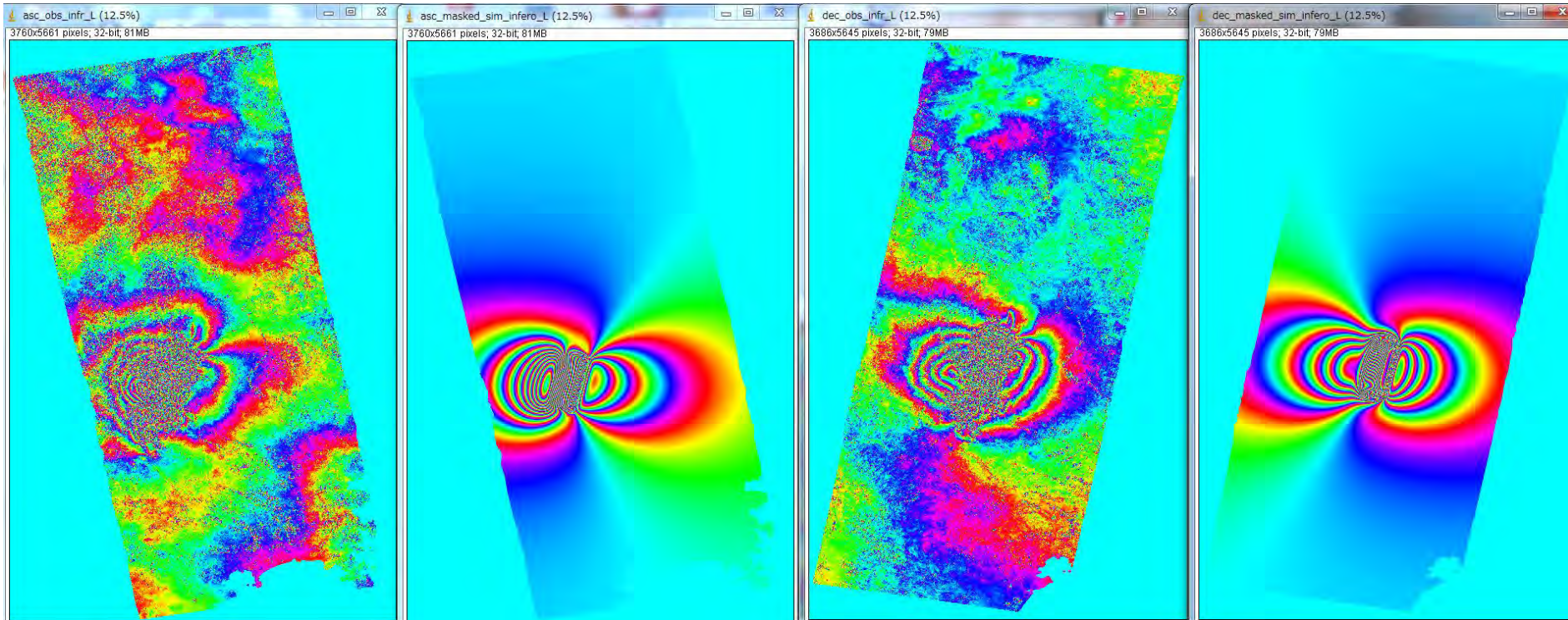


Lat:39.0769 Lng:140.935 Dpth:0.4km W:8.0km L:20.0km Str:192deg Dip:30deg Rake:100deg
Slip:5.2m

1枚の矩形断層による合成変動

Ascending

Descending



Observed

Synthesized

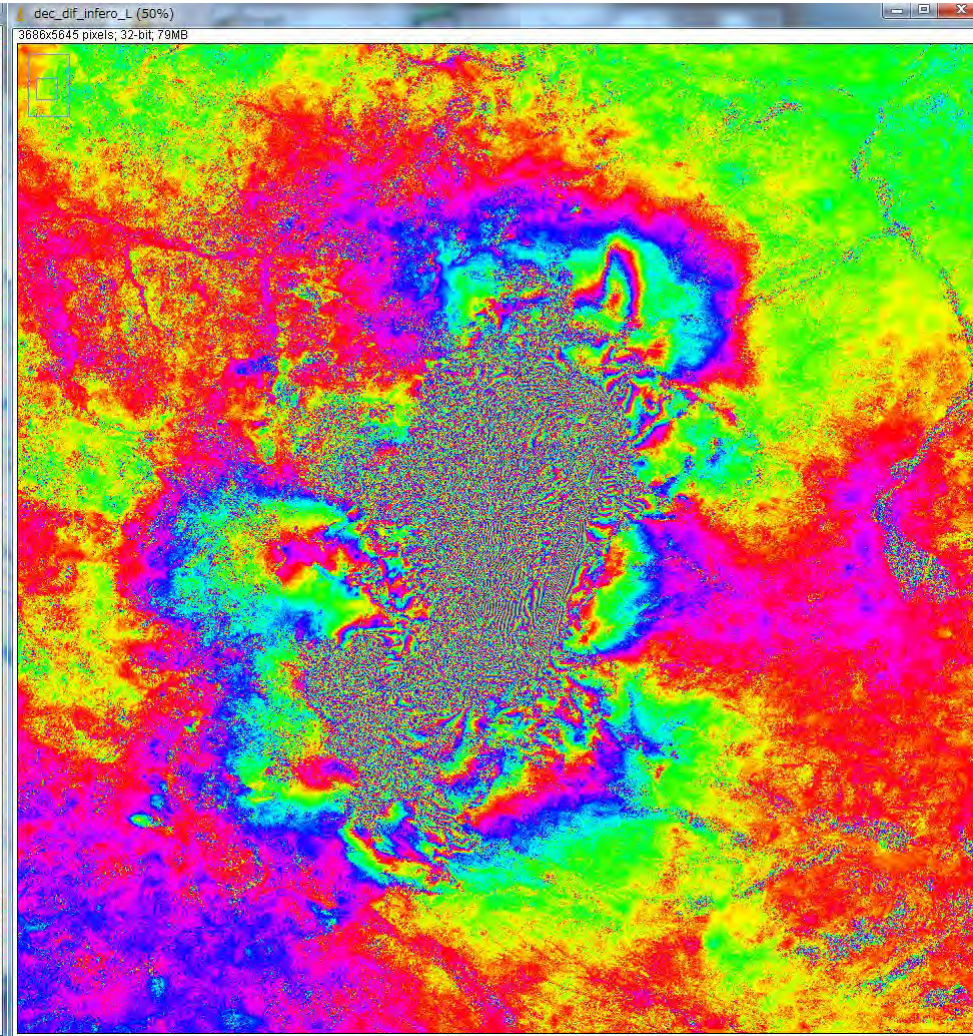
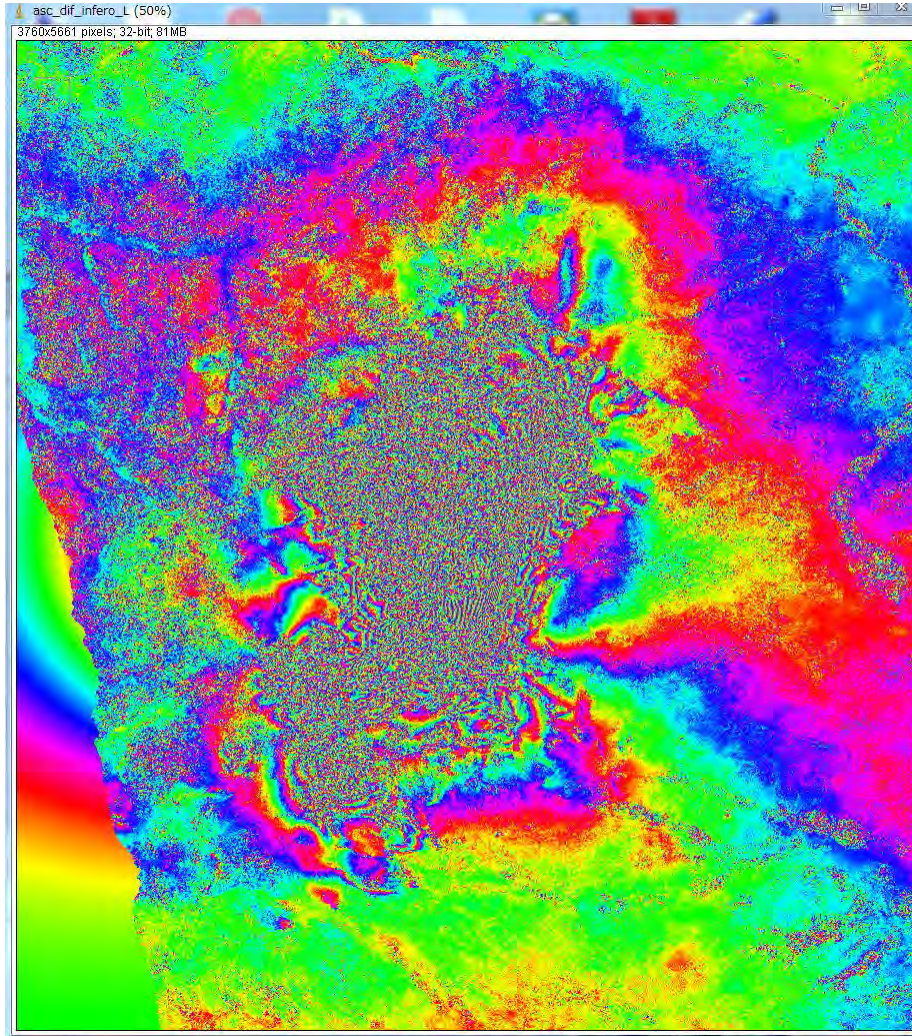
Observed

Synthesized

Residual Interferogram

Ascending

Descending



結局, 震源域付近の様子はよくわからない

今後の課題

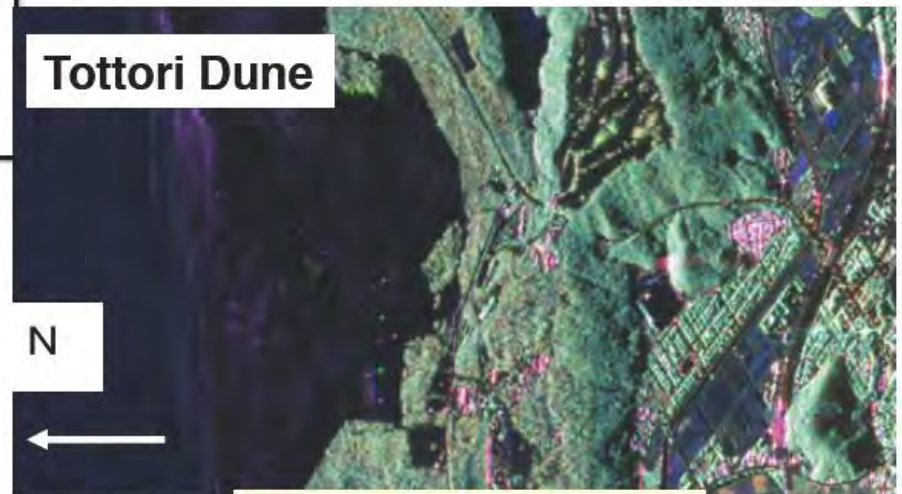
- ①航空機SARとの併用による時間分解能の向上，並びに三次元変動場への拡張，
- ②S/Nの向上による干渉性の向上（ALOS2の実力は？），スポットライトモードの利用？
- ③積雪時による干渉性劣化の克服，
- ④複雑な変動場に対する我々のモデル構築力の向上（火山活動時は，多くの場合，地震発生を伴う．火山性変動をどう抽出するか？）
- ⑤地下構造など，Key Informationの取得にむけての他分野との連携

Pi-SAR-L2

| | | |
|----------------------|--------------|-----|
| Carrier Freq. | 1.275 | GHz |
| Band width | 50 MHz-85MHz | |
| Sampling freq. (MHz) | 61.275, 100 | |
| Height | 6~12Km | |
| Image swath | <=15Km | |
| AD bits (I/Q) | 8 bits | |
| r (R) slant | 3 m(1.8m) | |
| r (A) 4look | 3.2 m | |
| Sigma-0 accuracy | 1.1 dB | |
| NESZ | -45 dB | |
| Inci. Angle | 10~60 deg. | |
| Polarimetry | HH-HV-VH-VV | |
| Pulse width | 10micros | |
| Pt | 3.5KW | |
| Beam width(A) | 8.4 degrees | |

JAXA's L-band Airborne Polarimetric SAR
 1st version: 1996~2012, 3
 2nd version : April 2012

All weather and High resolution sensor
 adequate for disaster and
 environmental monitoring.



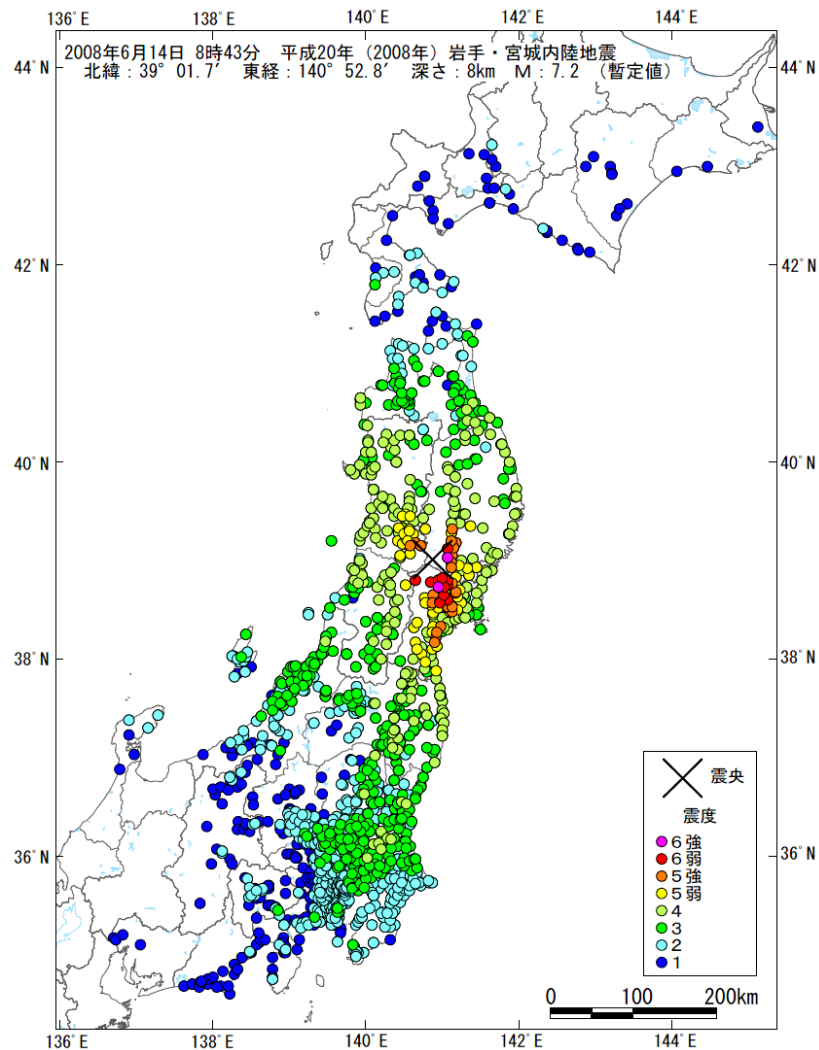
R:HH,G:HV,B:VV

まとめ

- ・ 花山地区の地塊水平移動は、構造的弱面(恐らくカルデラ底面)に沿って、強震動によって静止摩擦状態が破壊され、動摩擦状態へ移行して生じた。
- ・ 荒砥沢の地すべりも同様なメカニズムが発端になったが、励起された、地震性地滑りは大きくても1m程度であり、元々潜在的に準備が整えられていた重力性滑りに移行して、大規模な崩壊につながった。
- ・ 花山と荒砥沢を分けた要因は、現時点では不明である。
- ・ 潜在的弱面が多数存在し、傾斜もより急な栗駒火山や焼石岳で山体崩壊が発生しなかった要因も不明。
- ・ 1G(=1000gal)に達するような強震動が到達すると、潜在的な弱面がある場所なら、どこでも同様の事象は、発生するはずである。
- ・ 潜在的弱面が伏在している場所では、活断層の直上でなくても、数100galの強震動に襲われると、1m以上の永久変位が地震によって発生する可能性がある。

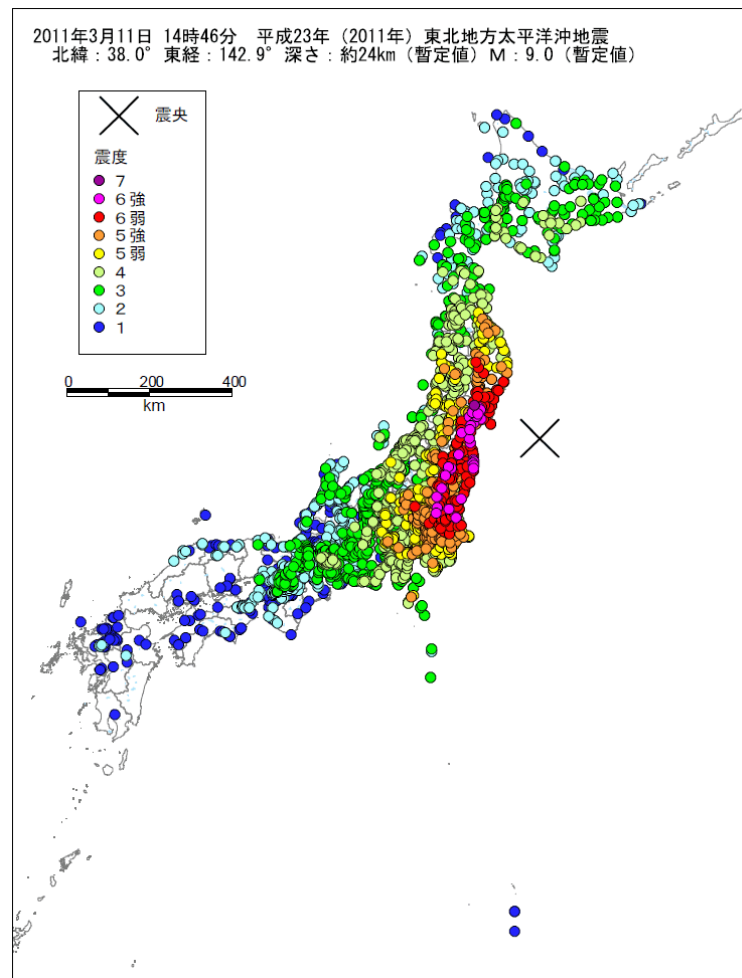
震度分布図

2008年岩手宮城内陸地震



花山ダム周辺6弱 栗原市HP

2011年東北地方太平洋沖地震



花山ダム周辺5強 栗原市HP

地震調査委員会・気象庁

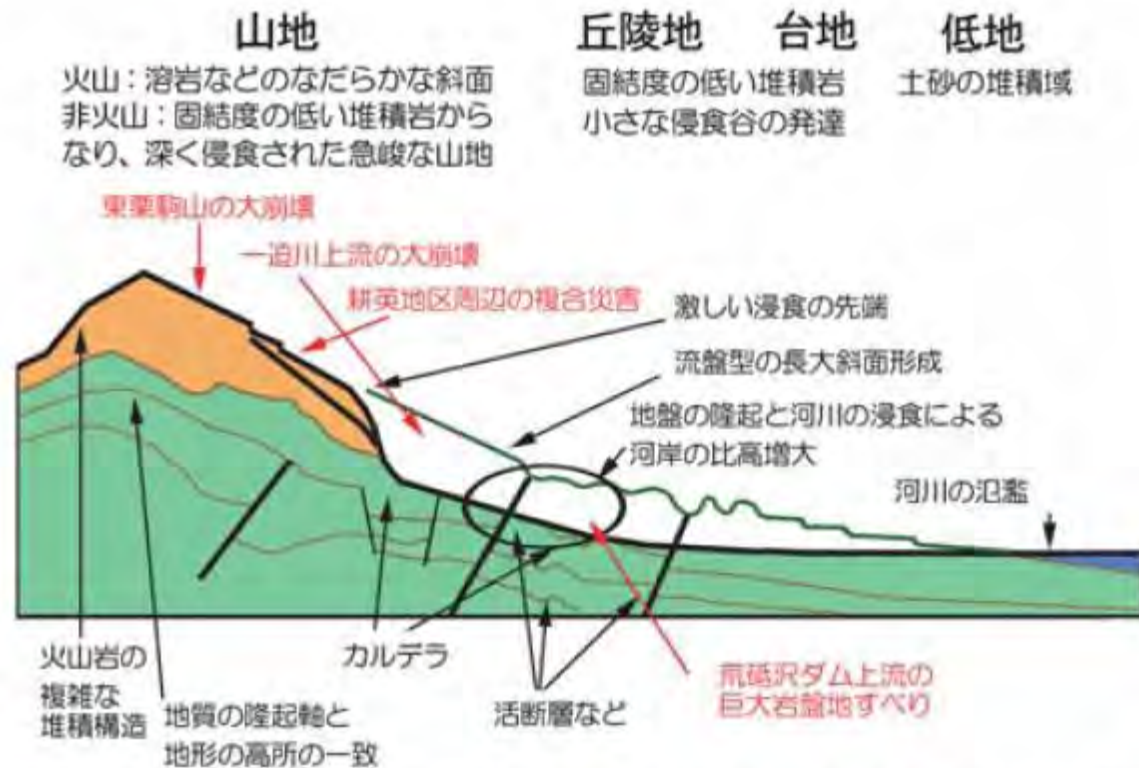


図-1 奥羽脊梁山脈東麓部の地形地質構成の概要と今回の斜面災害発生位置の傾向

宮城豊彦(2009)：強震動を契機に発生した巨大岩盤層スベリ-脊梁山脈東麓の大規模地すべり地形と荒砥沢地すべり-, 森林科学, No. 56, p11-15.