

地震断層と土木施設

地形変形が物語るもの

小長井 一男

1

思いがけない場所に変形

軌道のバックリング

2

2016年北カンタベリー地震



発生日	2016年11月14日
発生時刻	00:02:56 NZDT
座標	N42.69° E173.02°
震源深さ	15km
規模	M7.5-7.8 M_w ^[1]

Earthquake buckled railway tracks. In background, the strike slip Kekerengu Fault has moved 9 metres left and pushed up a hill, on a dead straight and flat railway line. Kaikoura M7.8 earthquake, Tirohanga, Kekerengu, Kaikoura District, Canterbury Region, New Zealand (NZ)

<https://www.naturespic.com/newzealand/image.asp?id=55561>

3

1978年伊豆大島近海地震 伊豆急行線 稲取トンネル

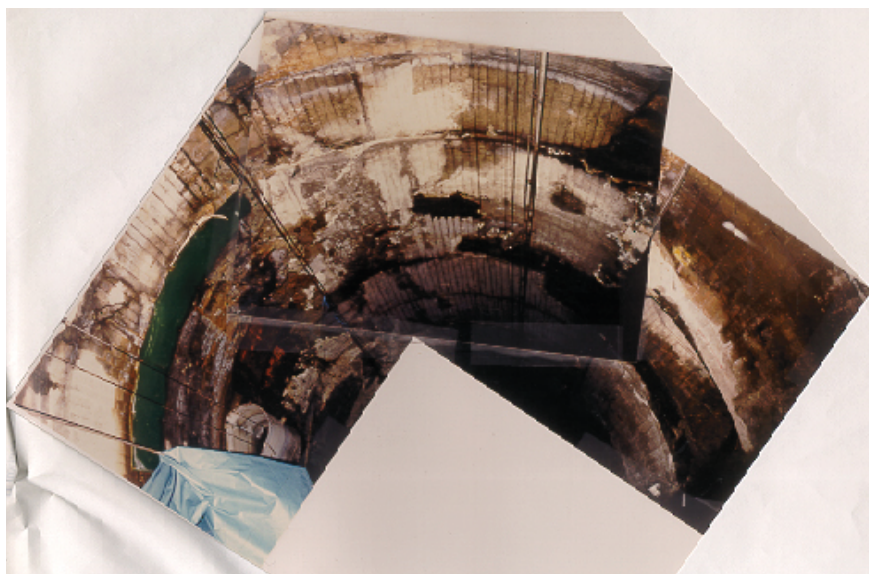
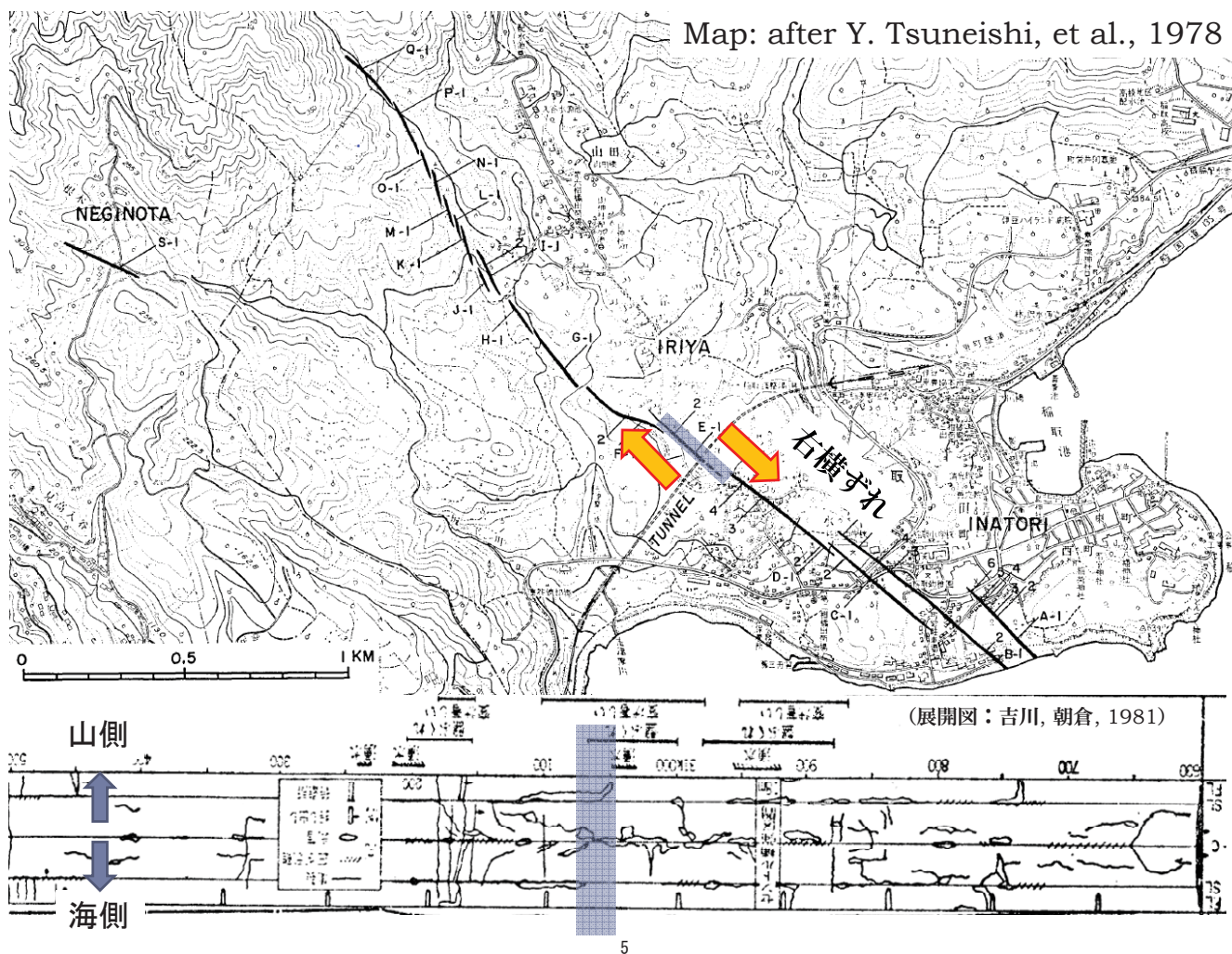
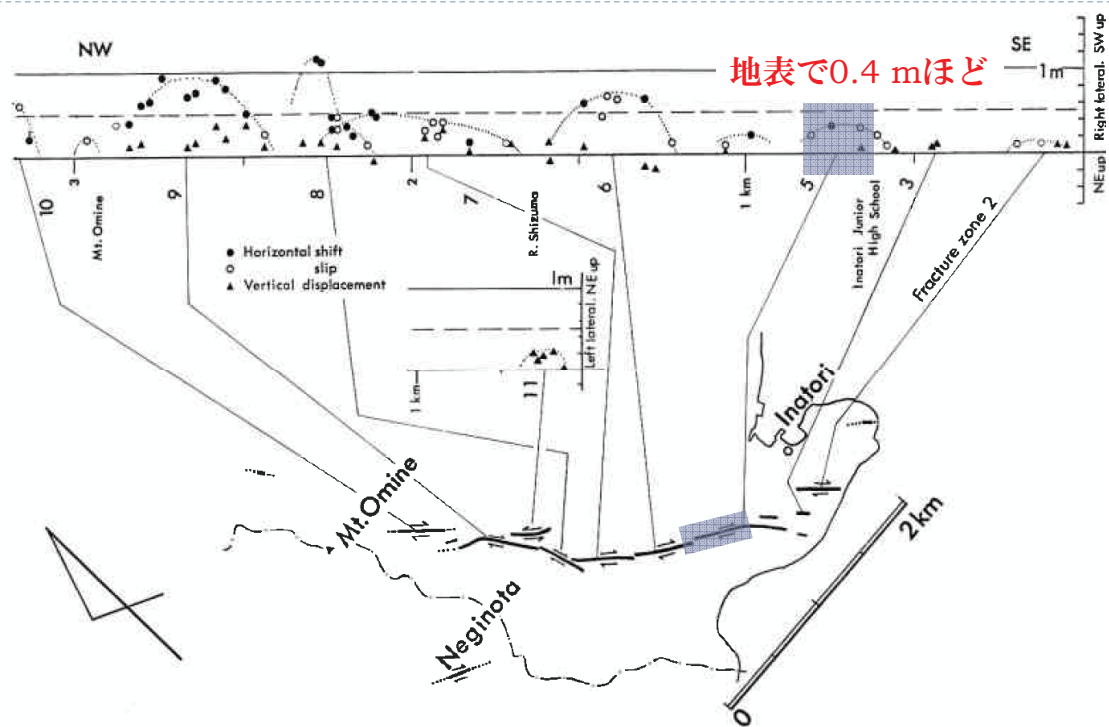


写真: 東京大学生産技術研究所 田村研究室

4

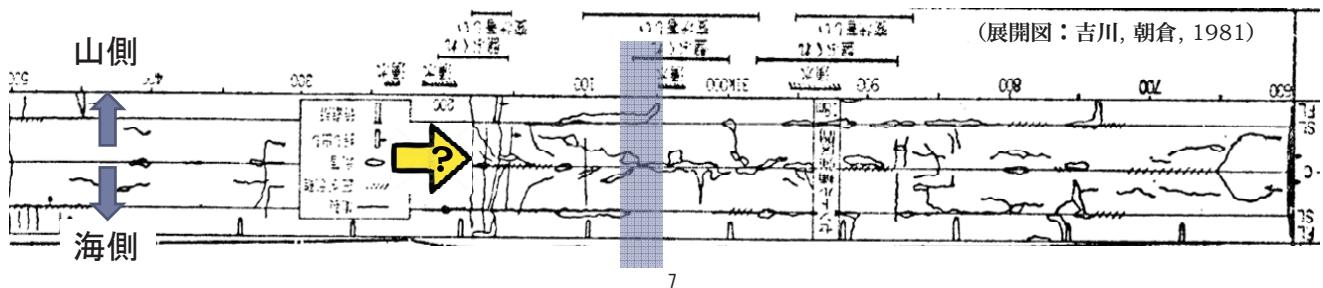


地表での横ずれ量の変化



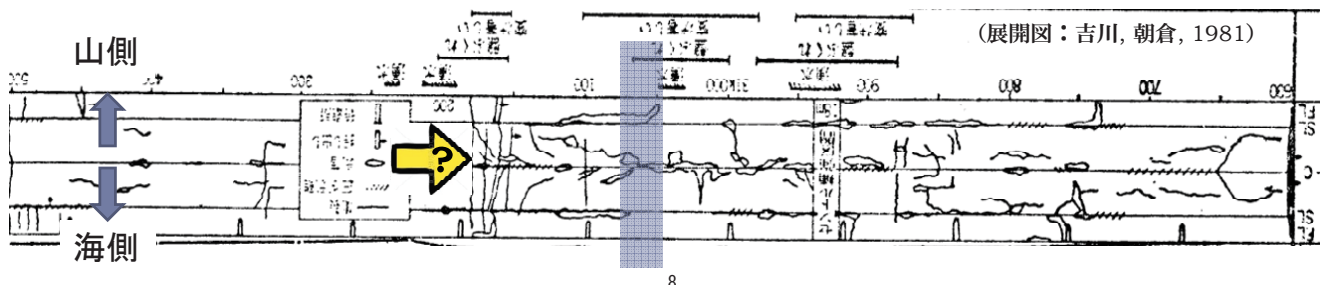
山崎, 小出, 佃, 1978

1978年伊豆大島近海地震 トンネルの被害状況



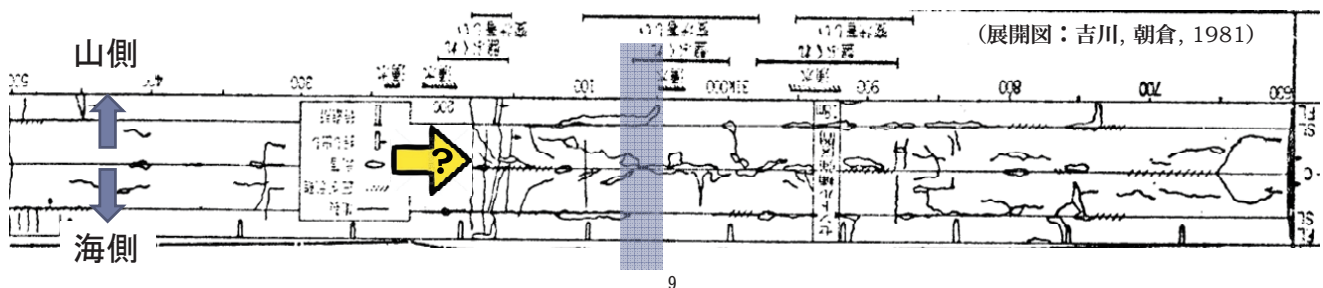
1978年伊豆大島近海地震 伊豆急行線 稲取トンネル

トンネル掘削時のボーリング調査の記録では「断層は暗青色ないし暗赤褐色の安山岩角礫（1～5 mm）であるが、原石の組織はない。断層粘土は暗赤褐色を呈し、水分を含んでいて指が突き刺さる程に軟弱である」とある。（吉川, 朝倉, 1981）



1978年伊豆大島近海地震
伊豆急行線 稲取トンネル

「温泉地でのトンネル掘削工事：温泉脈に当たると熱い温泉水とともに泥が噴出してくる。この泥土は“温泉余土”といい、地表に現れて空気に触れると膨張する厄介な性質があった。伊東線の宇佐美トンネルと同じであった。そのため内側から頑固な土止めをしても一晩すぎると圧力で壊されてしまい、再び掘り直しをしなければならなかった」
(伊豆急研究会, 伊豆急50年のあゆみ, 1981)

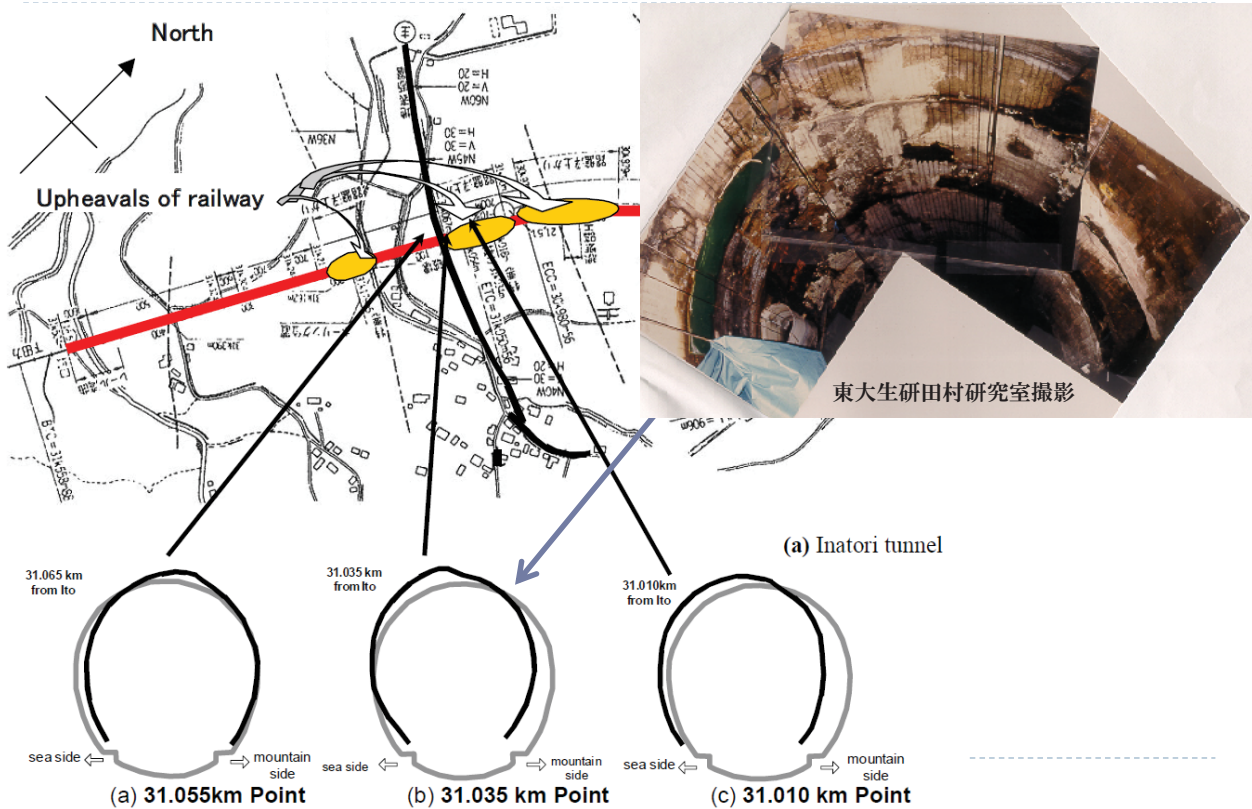


伊豆急建設譜より抜粋
(企画：東急電鉄／伊豆急、製作：東映)



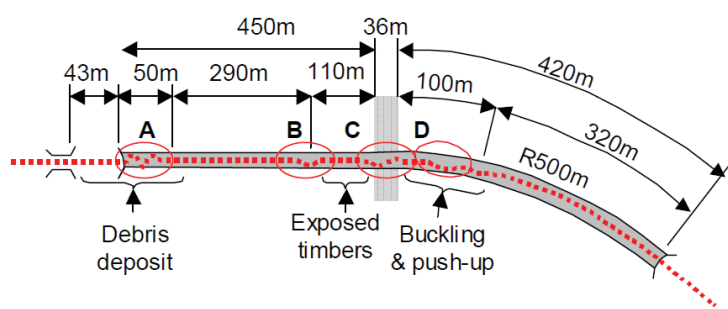
昭和36年4月16日、落盤で13人生き埋め11人死亡

稲取トンネルの変形



11

盤膨れ箇所とレール座屈



(a) Locations of bucked rails



写真: 伯野 元彦氏

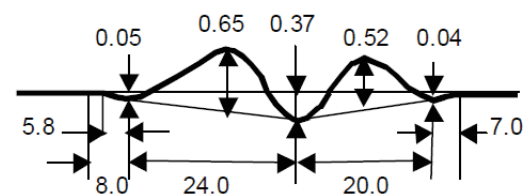
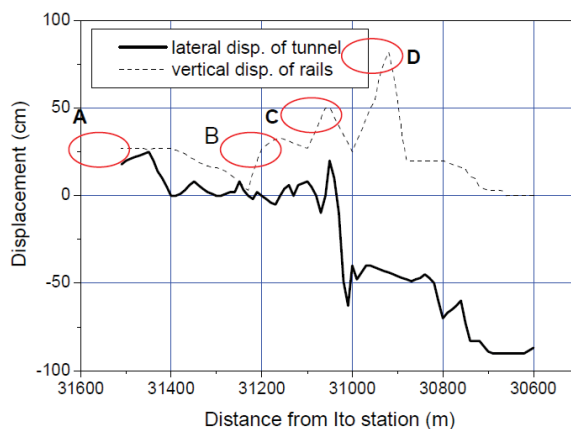


Fig. 3.6. Rail buckling at Point A in Fig. 3.4.

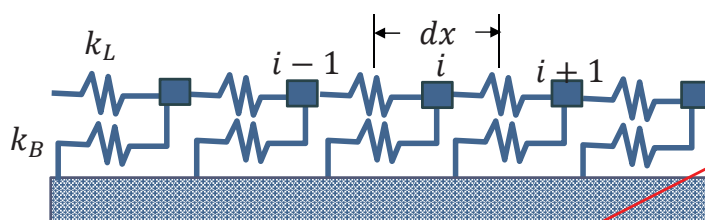
12

座屈の周期は何で決まる？

Helmholtz equation



バラストが乱れ横方向抵抗 (k_B) が低下した
場所で固有値が長くなって座屈荷重が下がる



この比率が
周期を決める

$$\frac{(u_{i-1} + u_{i+1} - 2u_i)}{dx^2} + \frac{k_B}{k_L} u_i = 0$$

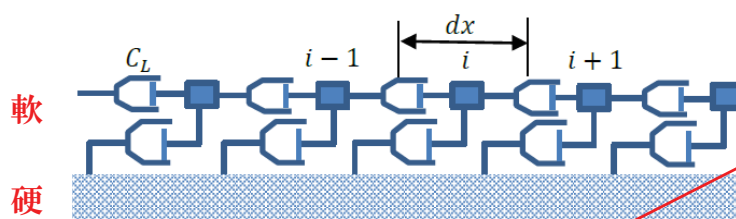
13

座屈の周期は何で決まる？

Helmholtz equation



硬いものと柔らかいものが
接する固有値問題
Helmholtz equation



この比率が
周期を決める

$$\frac{(v_{i-1} + v_{i+1} - 2v_i)}{dx^2} + \frac{C_B}{C_L} v_i = 0$$

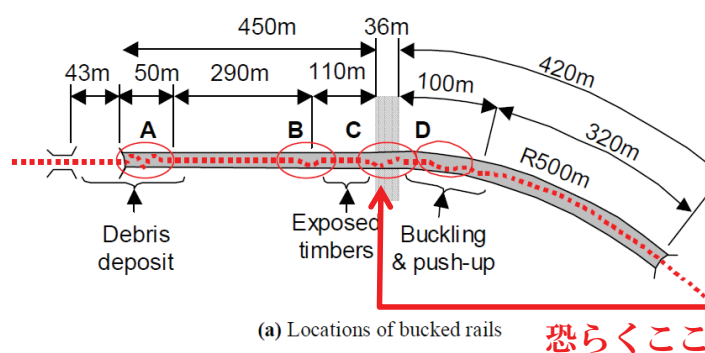
14

ずれの大小だけが問題か？

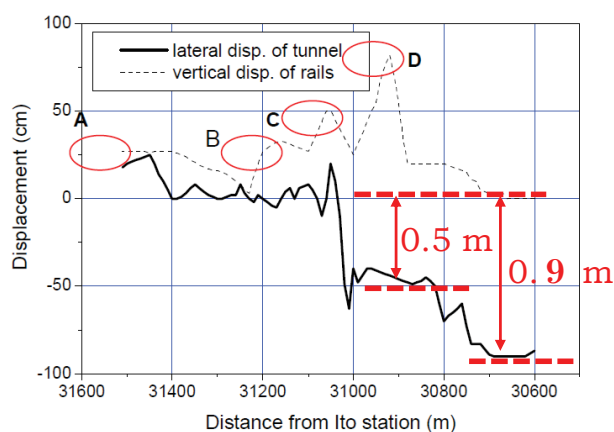
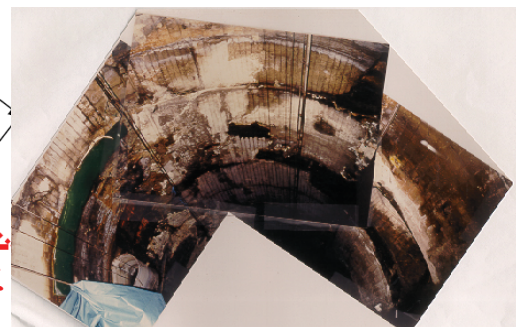
周辺地盤の影響

15

0.5～0.9 m(?)程の断層変位 稲取トンネル



東大生研田村研究室撮影

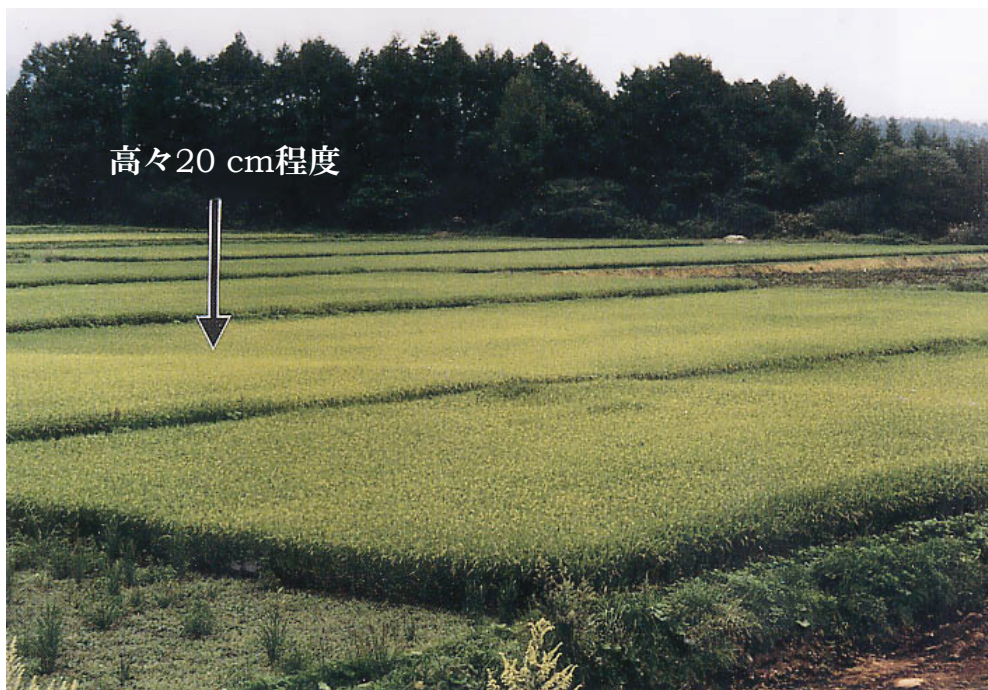


温泉余土に囲まれた
トンネル

16

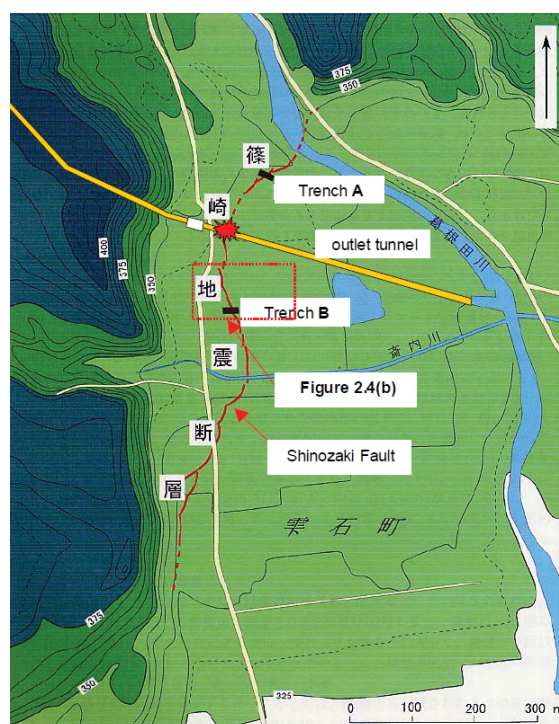
稲穂群に現れた僅かな段差

1998年岩手県内陸北部地震



(写真撮影：小長井)

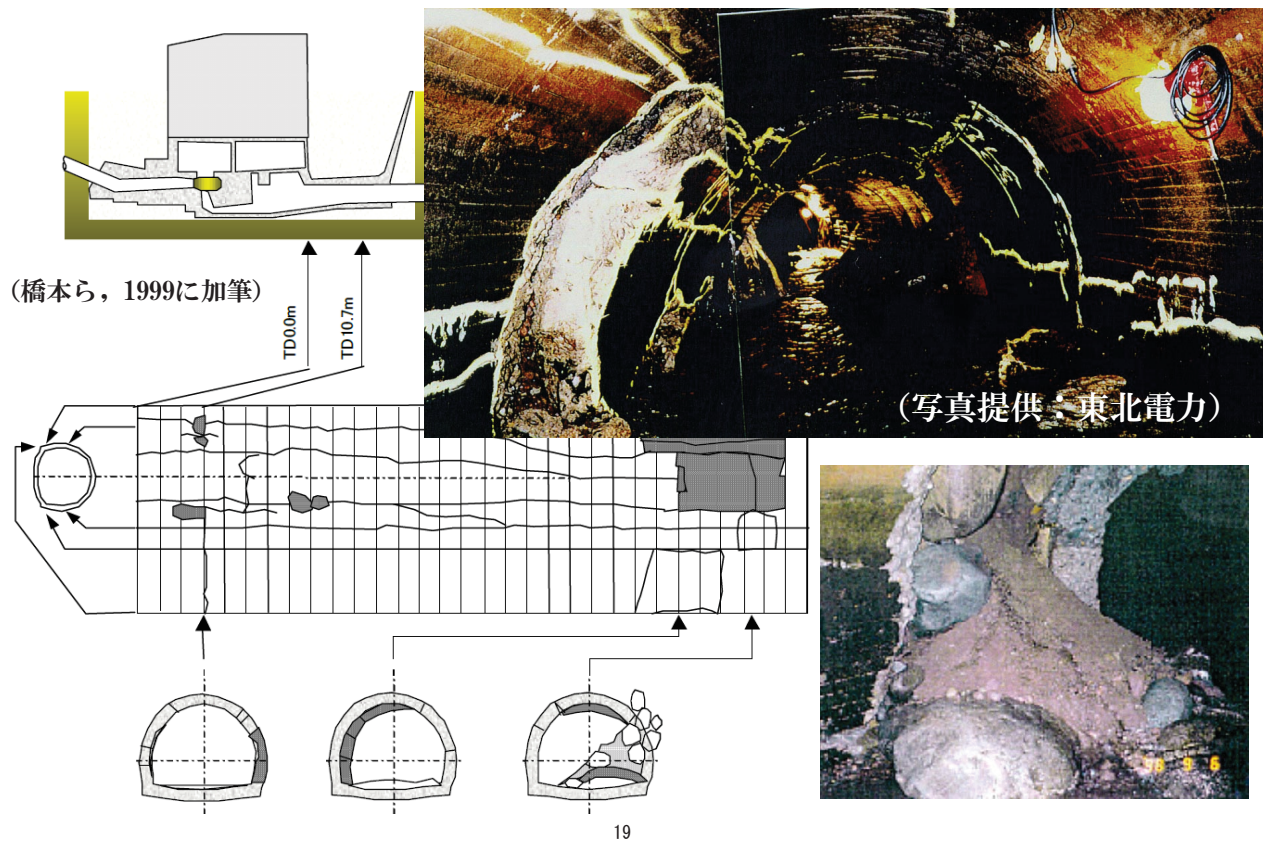
篠崎断層と葛根田第2発電所の位置



(吾妻 他に加筆)

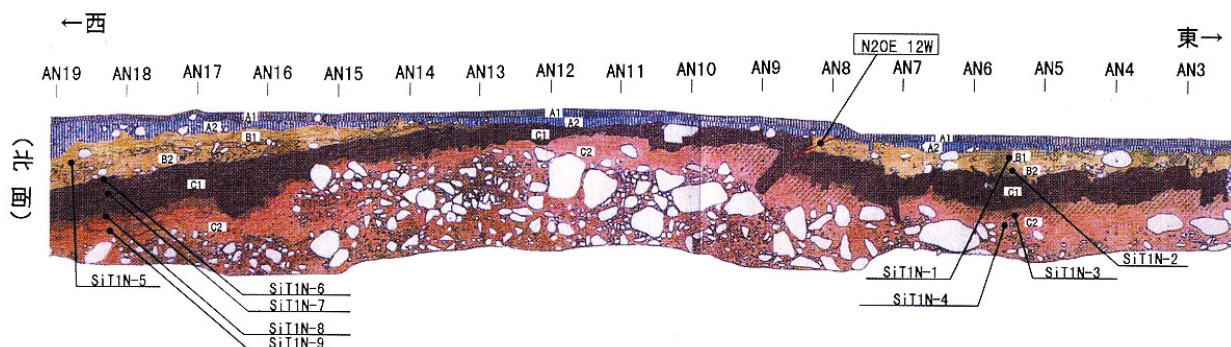
葛根田第2発電所放水路トンネル

The fault rupture plane is not quite as simple as the design suggests



葛根田第2発電所放水路トンネル

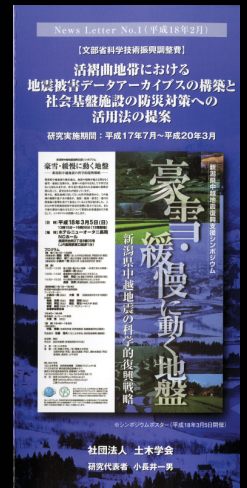
The fault rupture plane is not quite as simple as the design suggests



篠崎断層のトレンチ断面 (吾妻 他)

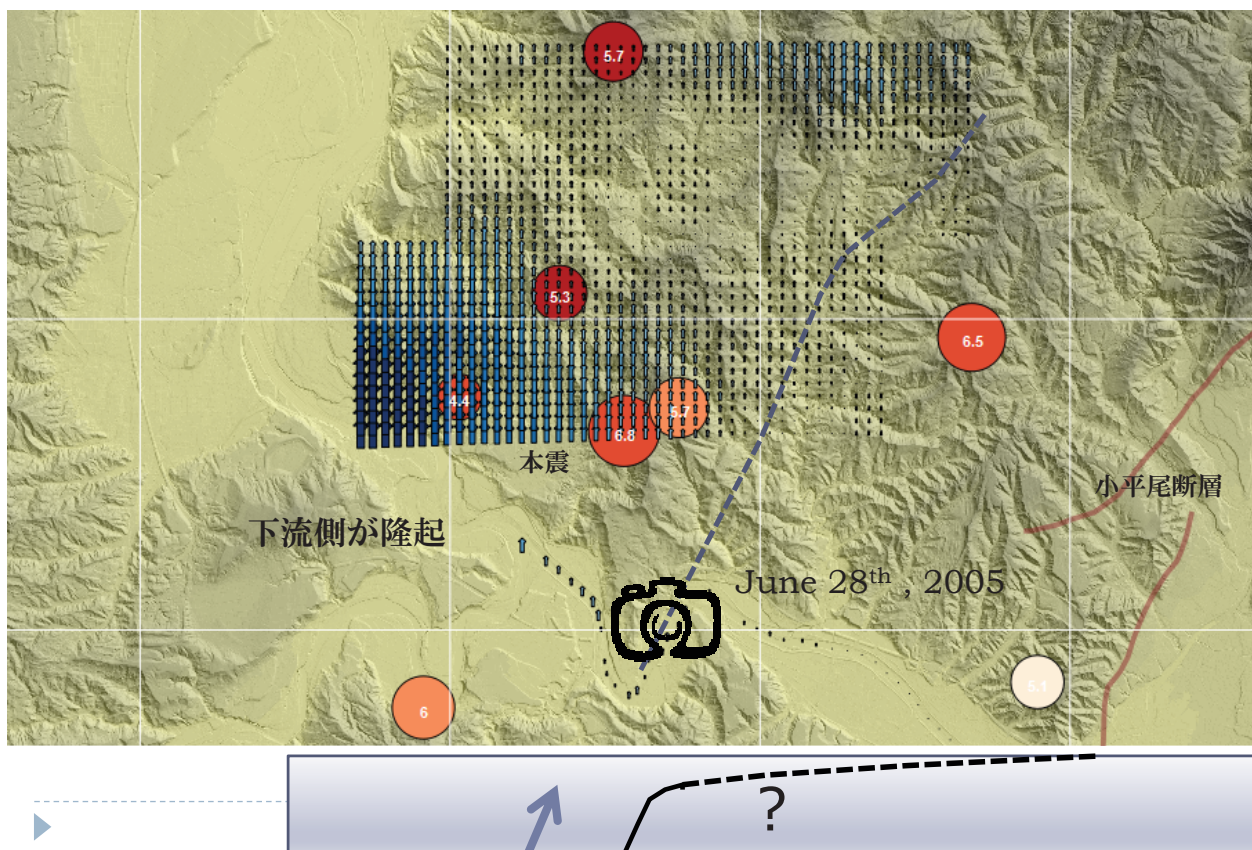
差し渡し1 mにも達する巨礫も含まれる。
大きなダイラタンシー (体積膨張) ?

断層から離れた場所に？ (2004 中越地震)



21

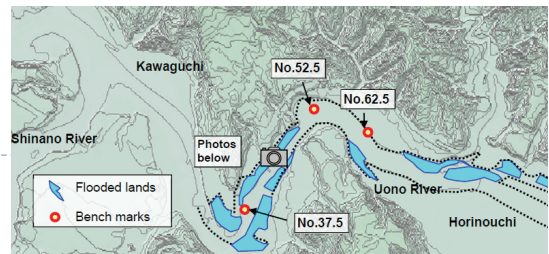
検出されたやや深い地盤の変位



22



地震後に2度の冠水



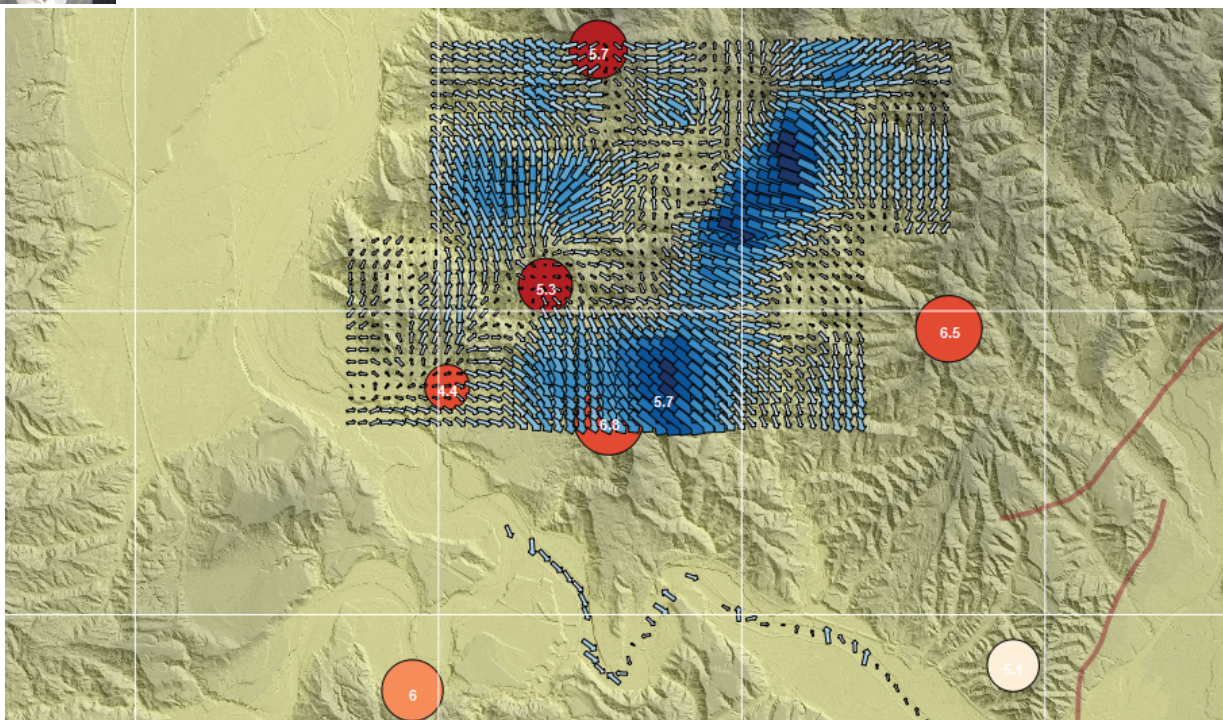
下流部隆起と洪水の因果関係を
を解明

Aug. 4th, 2011 Photo by Konagai

23



断層面上のすべりを逆解析

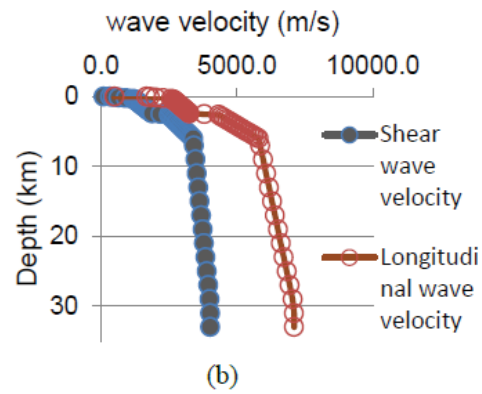
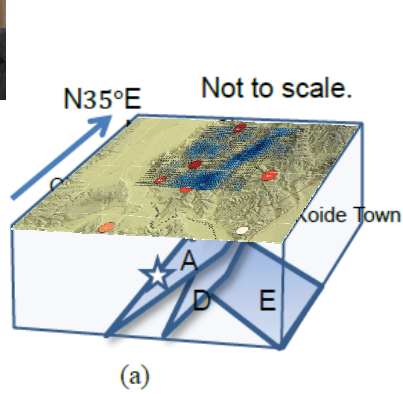


Zaheer Abbas KAZMI, Kazuo KONAGAI, *Canadian Geotechnical Journal*, **55**(5), 736-748, 2018,

24



断層面上のすべりを逆解析

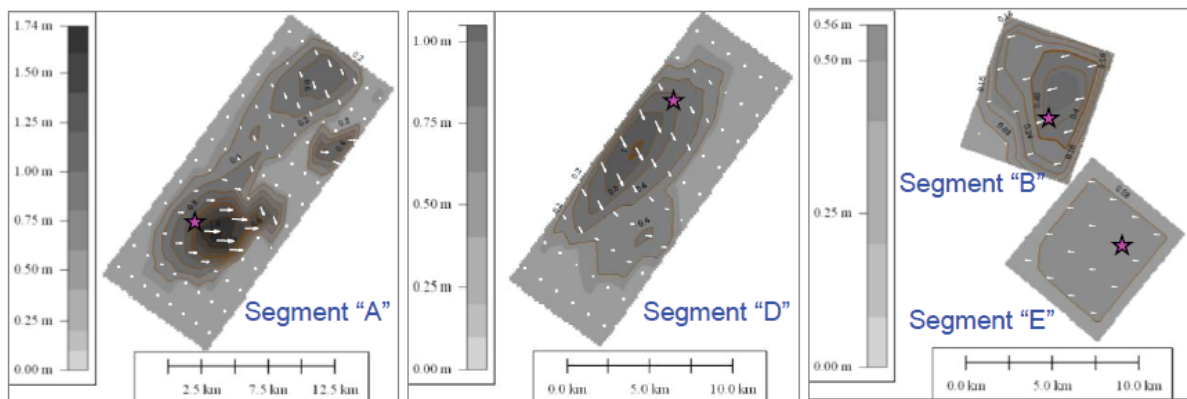
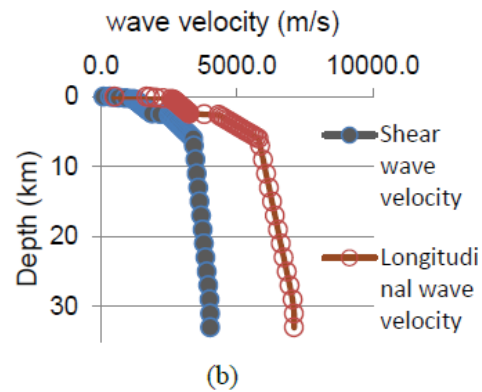
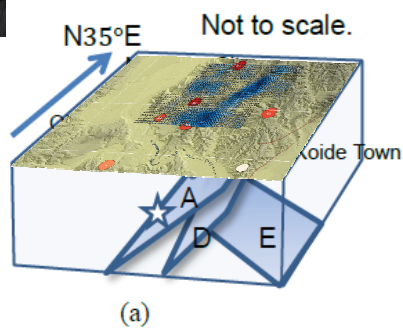


Zaheer Abbas KAZMI, Kazuo KONAGAI, *Canadian Geotechnical Journal*, **55(5)**, 736-748, 2018,

25



地中の応力を求めるには地震前の応力状態も必要

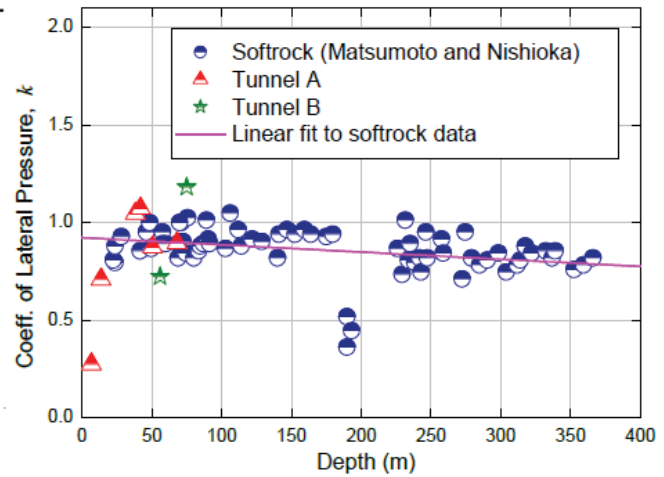
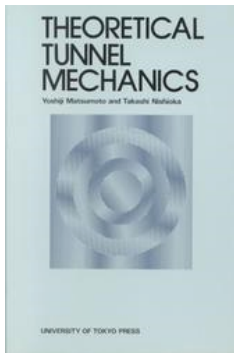
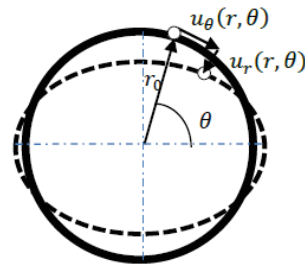
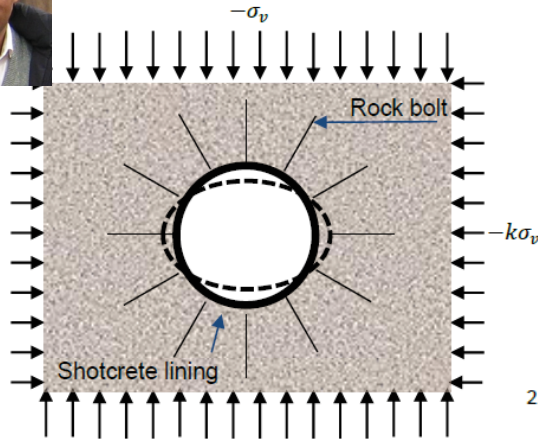


Zaheer Abbas KAZMI, Kazuo KONAGAI, *Canadian Geotechnical Journal*, **55(5)**, 736-748, 2018,

26

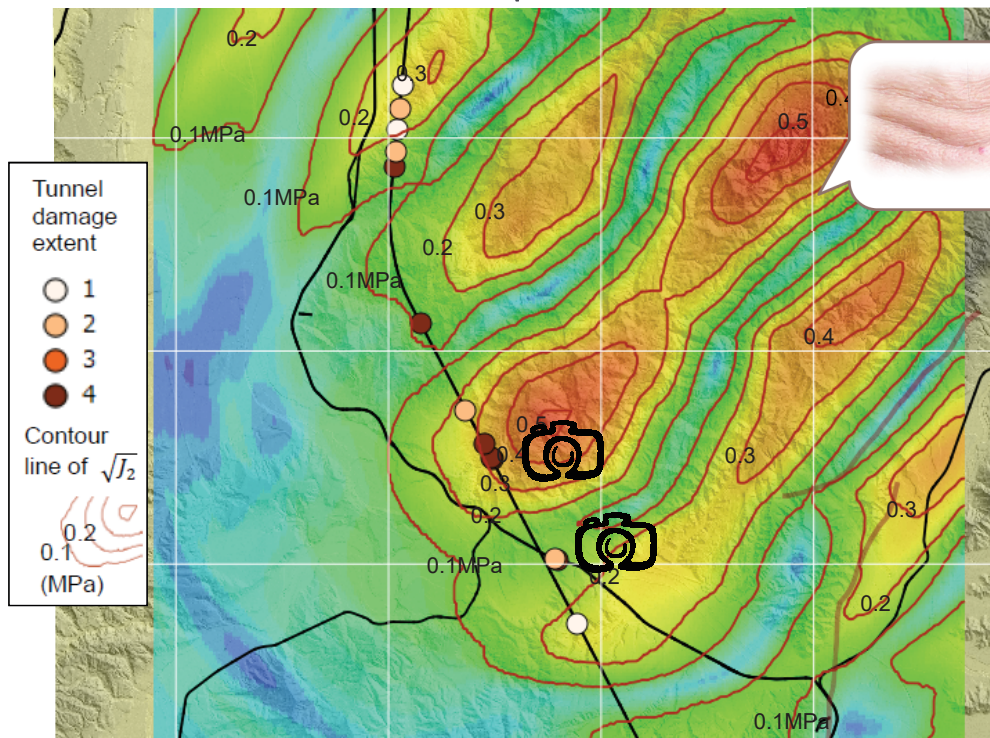


地中の応力を求めるには地震前の応力状態も必要



27

$$\sqrt{J_2}$$



地表から75mの深さで



JR上越新幹線 魚沼トンネル



Nov. 4, 2004, Photo by Konagai K.

29



JR上越線 和南津トンネル



Nov. 14, 2004, Photo by Numada M.



Nov. 14, 2004, Photo by Konagai K.

30

$$\sqrt{J_2} \quad \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right) \quad \text{と} \quad I_1 \quad \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right)$$

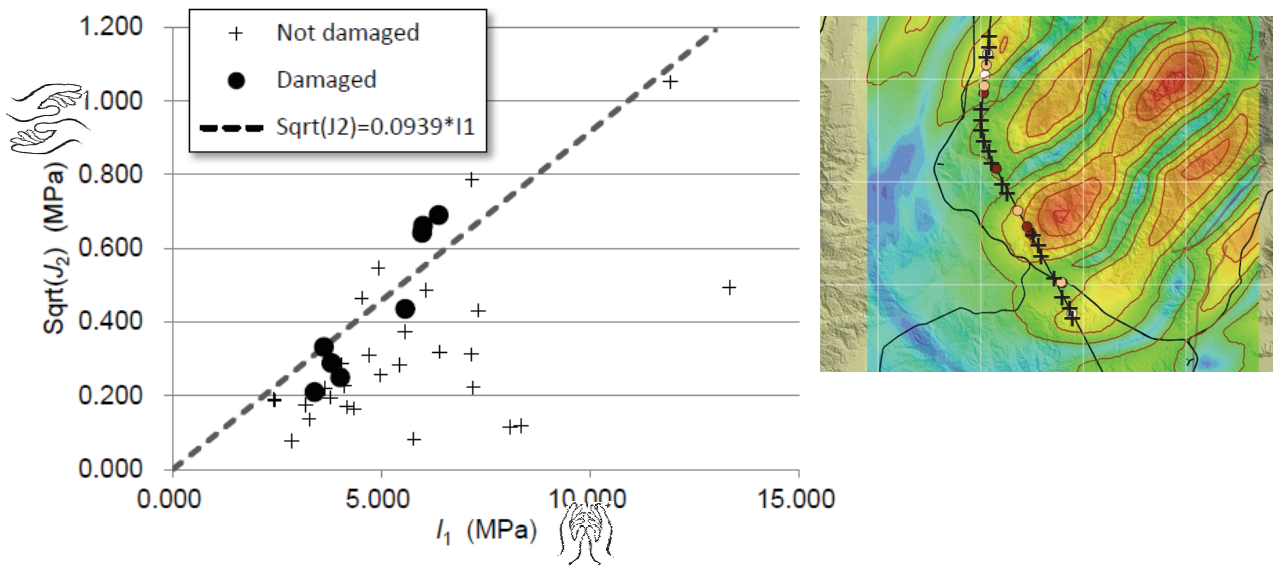
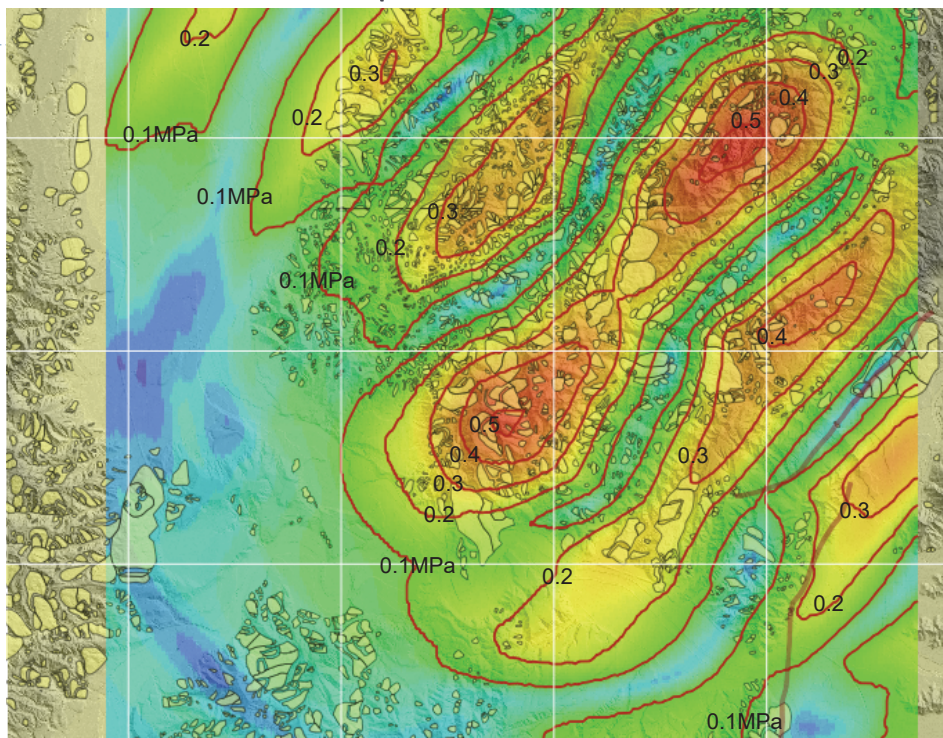


Figure 13 Scatter diagram of I_1 and $\sqrt{J_2}$ along tunnels

Zaheer Abbas KAZMI, Kazuo KONAGAI, *Canadian Geotechnical Journal*, **55(5)**, 736-748, 2018,

31

$$\sqrt{J_2} \quad \left(\begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \end{array} \right)$$



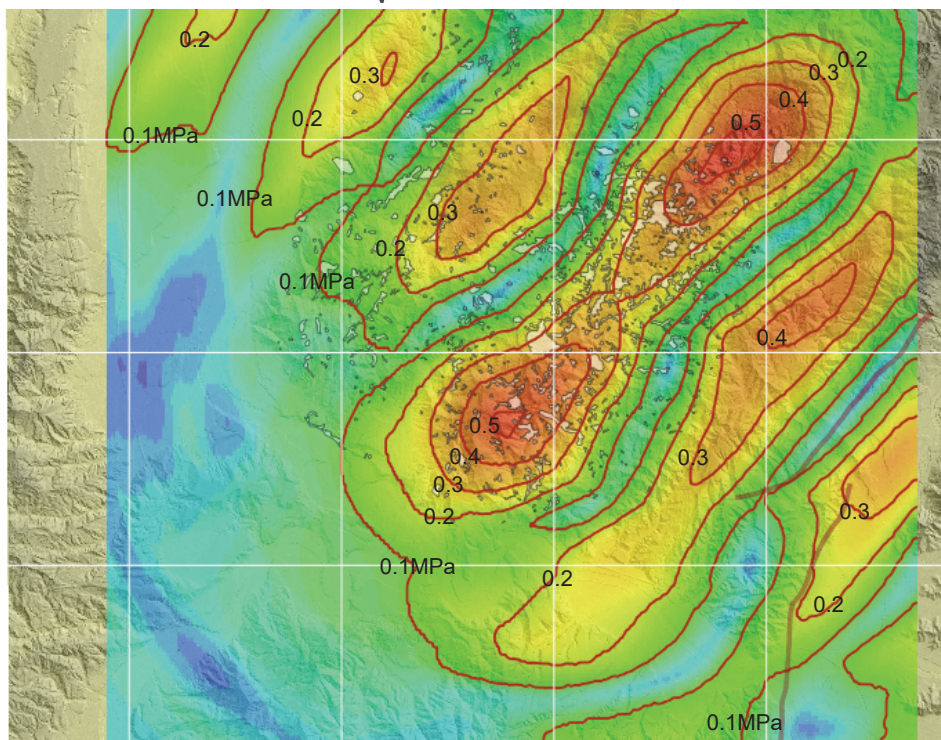
防災科学技術研究所判読による斜面崩壊地分布（2001年）

2004年中越地震の前から同じことが繰り返し起こっていたのでは？

Zaheer Abbas KAZMI, Kazuo KONAGAI, *Canadian Geotechnical Journal*, **55(5)**, 736-748, 2018,

32

$$\sqrt{J_2} \quad (\text{⊕})$$

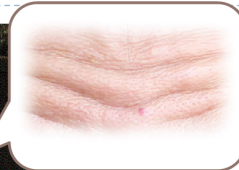


ちなみに2004年中越地震による斜面崩壊地を重ねると・・・

Zaheer Abbas KAZMI, Kazuo KONAGAI, *Canadian Geotechnical Journal*, **55(5)**, 736-748, 2018,

33

長島忠美衆議院議員（旧山古志村村長）との 会話の中で...

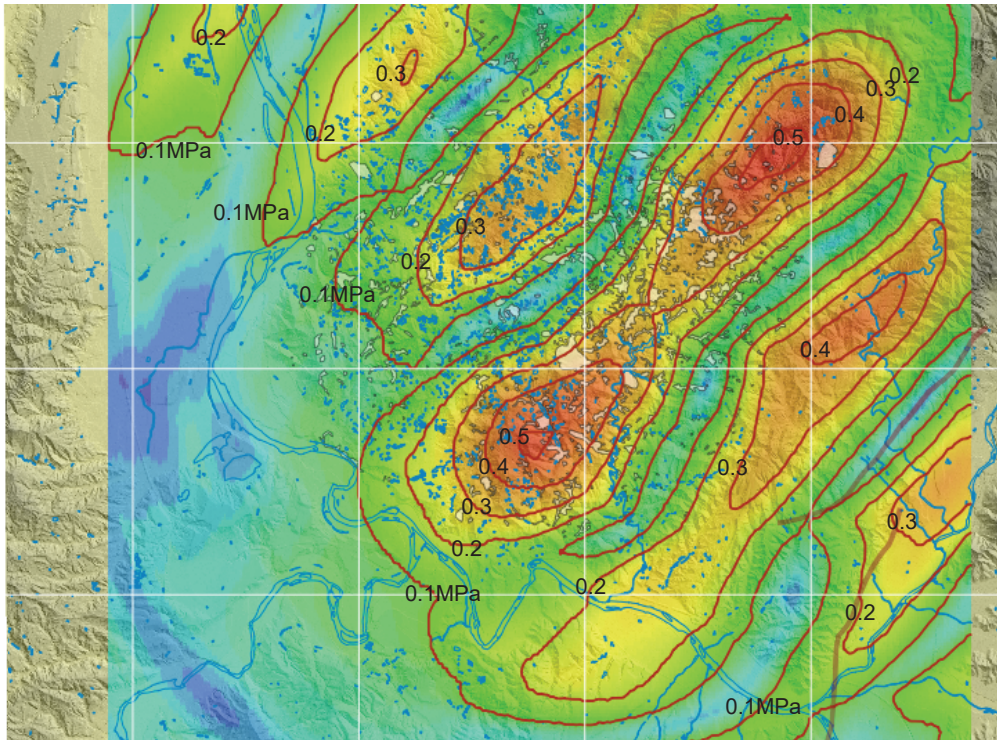


小長井さん、山古志の人たちは地盤が緩慢に動いていることはみんな知ってる。
その恩恵で肥沃な耕地を造り続けてきた。

ここが危険だ！というON/OFFな言い方でなく、どうしたら上手に生活していけるのか、というメッセージがほしい。

34

ため池・養鯉池の分布



生活の場の帯： $\sqrt{J_2}$ の帯

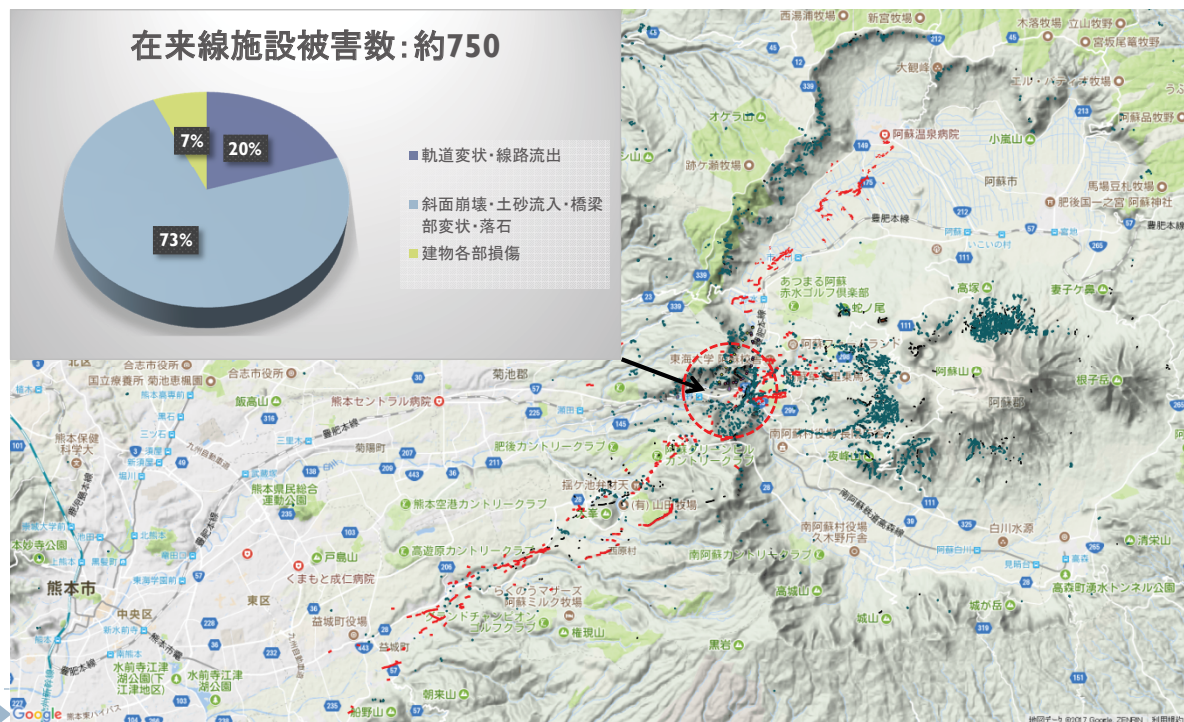
Zaheer Abbas KAZMI, Kazuo KONAGAI, *Canadian Geotechnical Journal*, **55(5)**, 736-748, 2018,

35

断層と地震後の降雨 (2016 熊本地震)

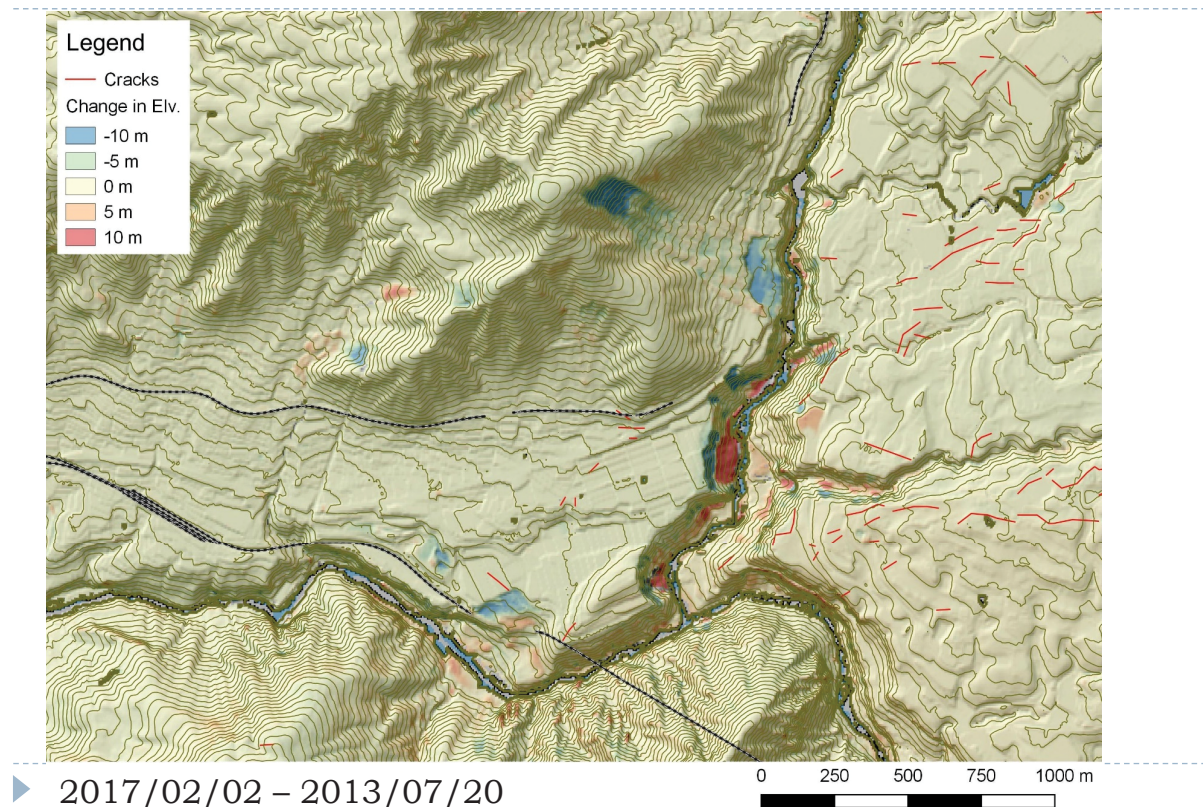
鉄道施設被害

その多くが立野火口瀬に集中



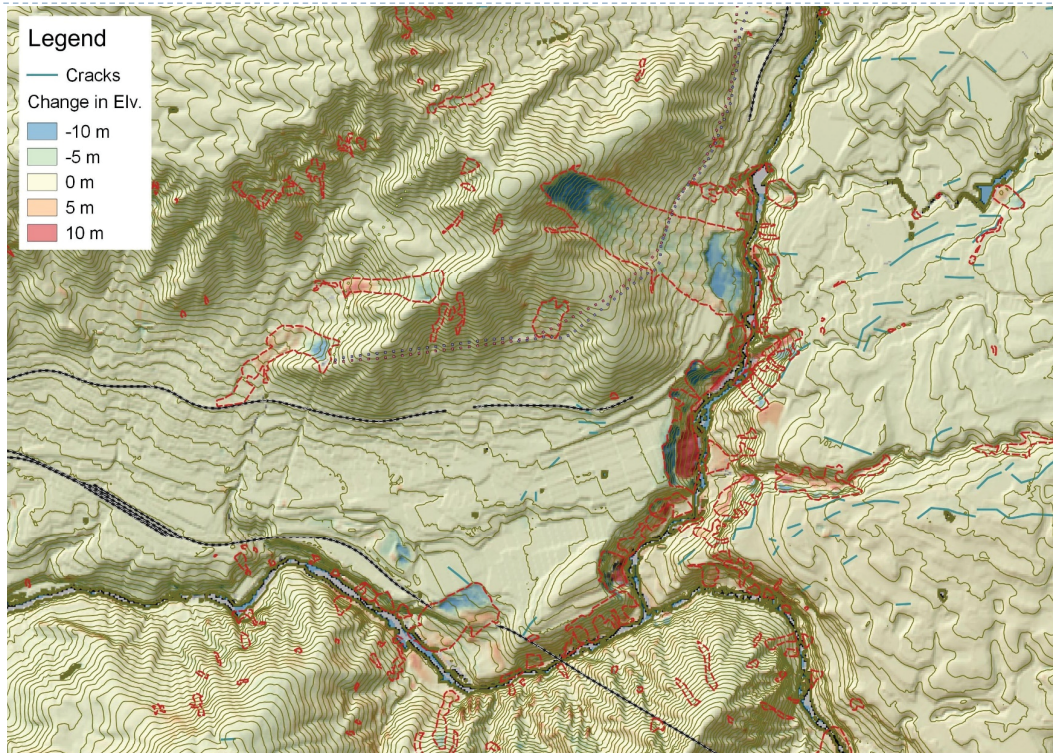
37

阿蘇大橋付近の標高変化



38

阿蘇大橋付近の標高変化

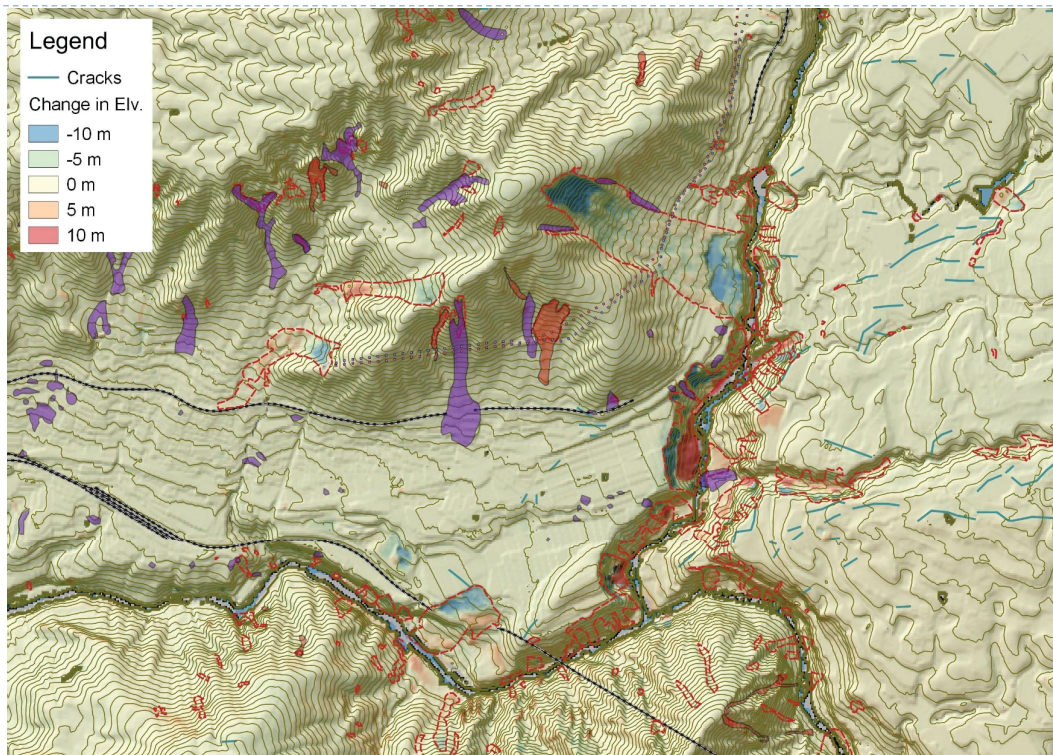


航空写真判読

土砂異動分布航空写真判読，防災科学技術研究所
<http://www.bosai.go.jp/mizu/dosha.html>

39

阿蘇大橋付近の標高変化



航空写真判読

地震後-
2016/05/20

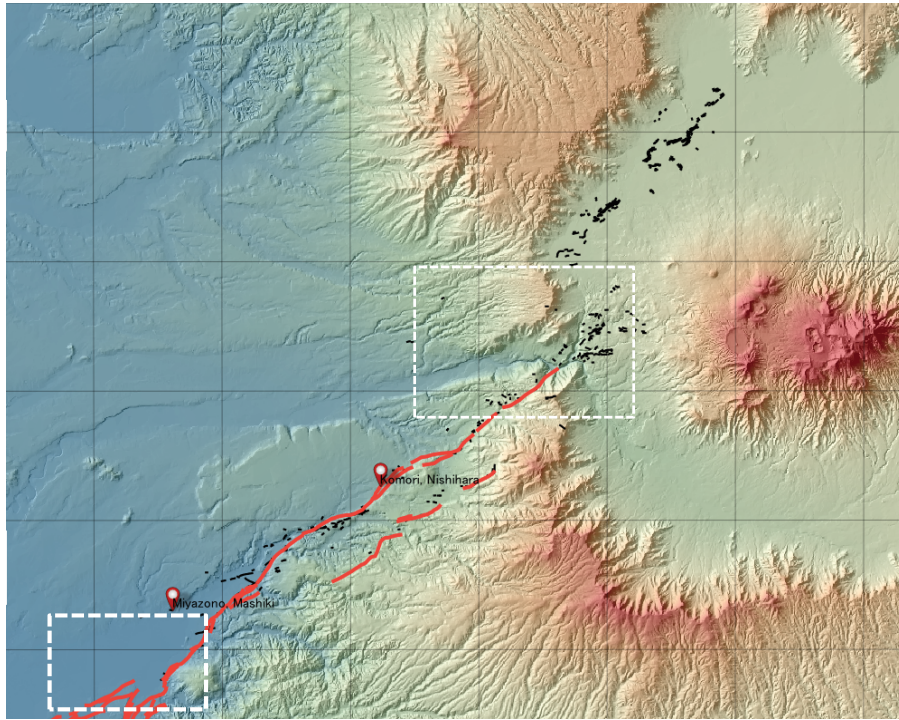
地震後-
2016/06/20

土砂異動分布航空写真判読，防災科学技術研究所
<http://www.bosai.go.jp/mizu/dosha.html>

40

傾斜した井戸ポンプ建屋の集中した場所

The area of the inclined well pump housings

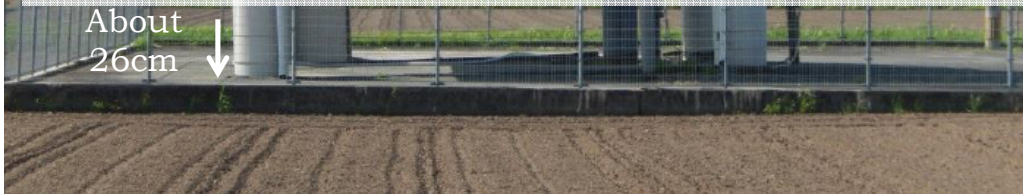


41

井戸ポンプ建屋の傾斜 Inclined well pump housing

- 熊本市の水道は100%井戸水頼り、96か所の井戸が稼働中だった。
Kumamoto and outlying towns' water supply comes from 113 wells. When the earthquake hit, 96 wells were in operation.
- 熊本市の水道管総延長は4,470 km
Water from wells is distributed to the customers through a network of 4,470 km of pipelines
- 46万戸が本震で断水
The main shock was the most damaging, resulting in nearly 460,000 customers outages.
- 濁度の上昇で井戸のポンプが自動停止
The primary reason for the outages was that the pumps were automatically stopped due to the sudden increase in turbidity; plus outages due to broken water pipelines.

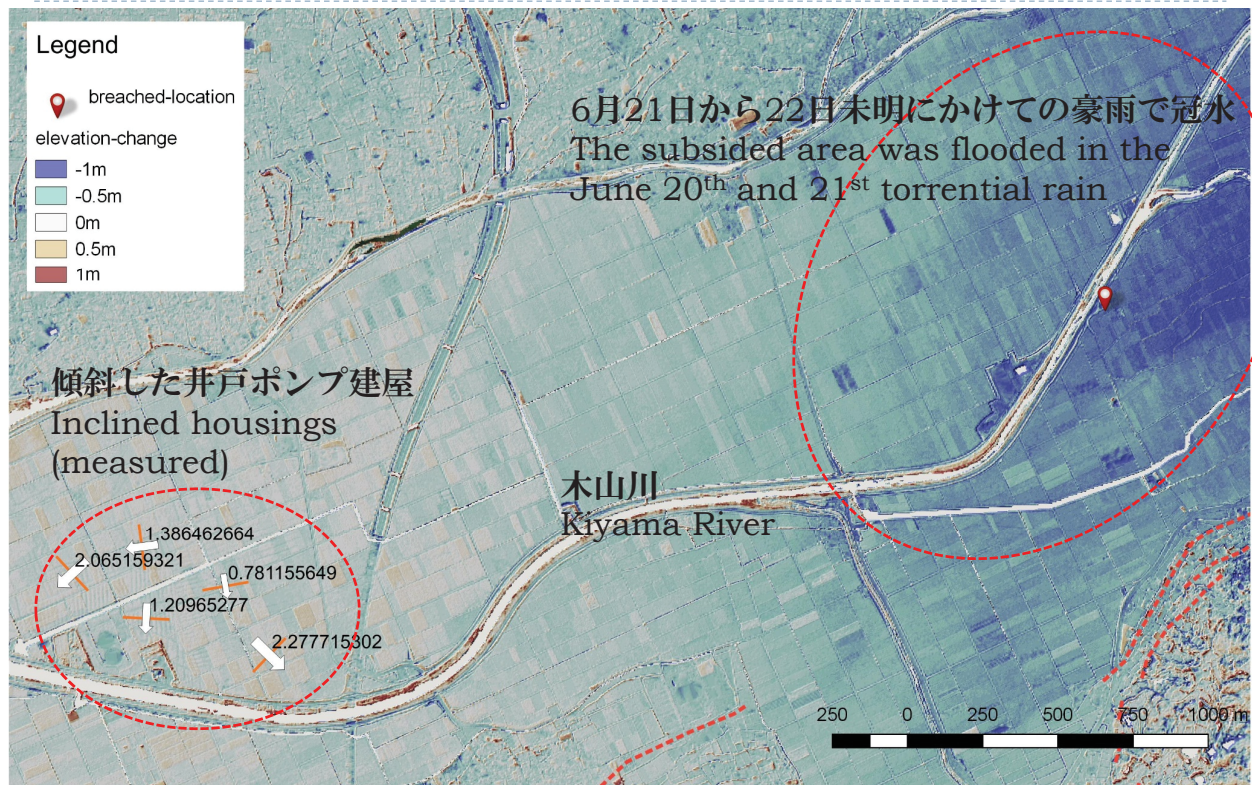
About
26cm ↓



42

益城南西部の平野部の沈下と井戸建屋傾斜

Inclined well housings and ground subsidence near the fault

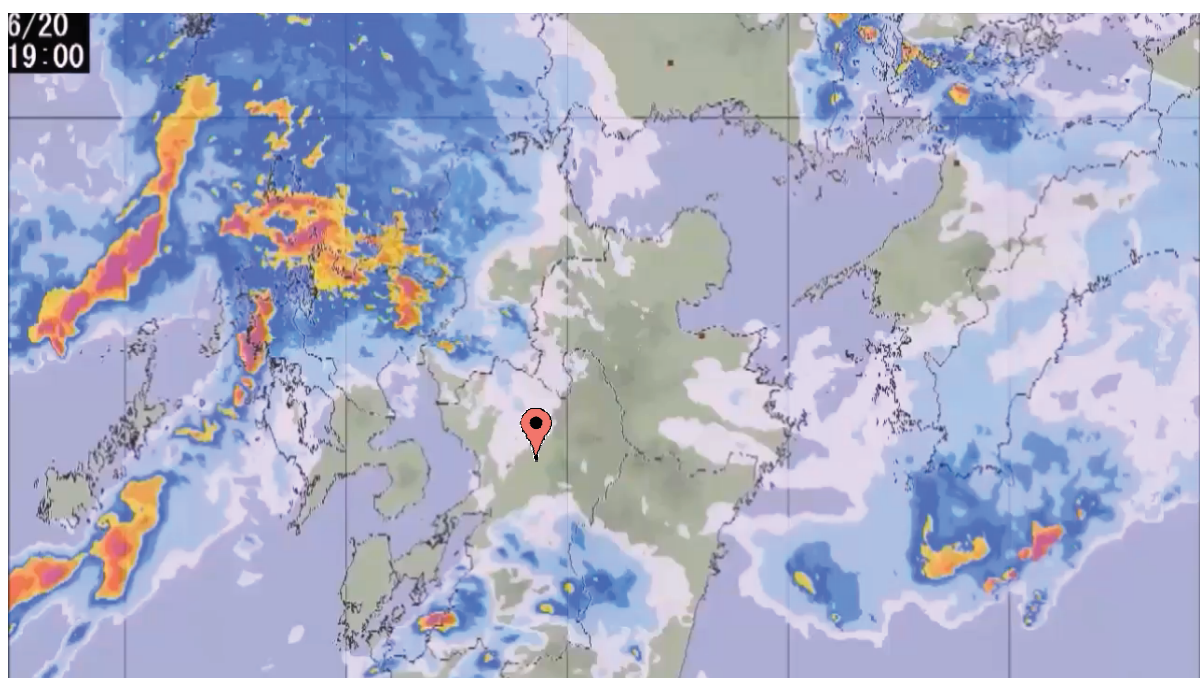


Measured by Konagai Lab., 2016/9/6

43

豪雨時の雨雲レーダの記録

Weather radar



日本気象協会

44

水没した益城南西部平野

Flood plain flooded in a torrential rain of June 20 to 21, 2016



Photo from Asahi Shinbun Digital

<http://www.asahi.com/articles/photo/AS20160621004033.html>

Kazuo KONAGAI, et al.: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A, Vol. 73, No. 4, I_208-I_215, 2017, https://doi.org/10.2208/jscejsee.73.I_208

45

井戸建屋の傾斜方向が一見バラバラ

Inclined well housings near Akita water distribution field



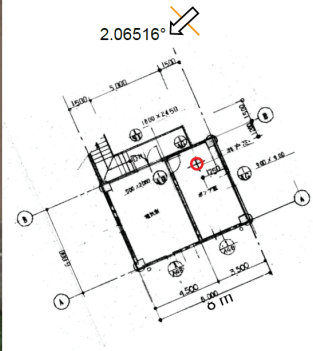
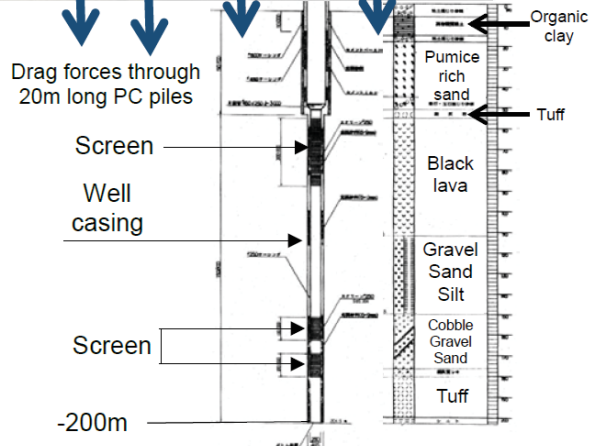
Kazuo KONAGAI, Masataka SHIGA, Takashi KIYOTA and Takaaki IKEDA: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A1 (Structural Engineering & Earthquake Engineering (SE/EE)), Vol. 73, No. 4, I_208-I_215, 2017,

https://doi.org/10.2208/jscejsee.73.I_208

46

井戸の鋼製シャフトが突っ張り棒？

Well shaft acted as a strut?

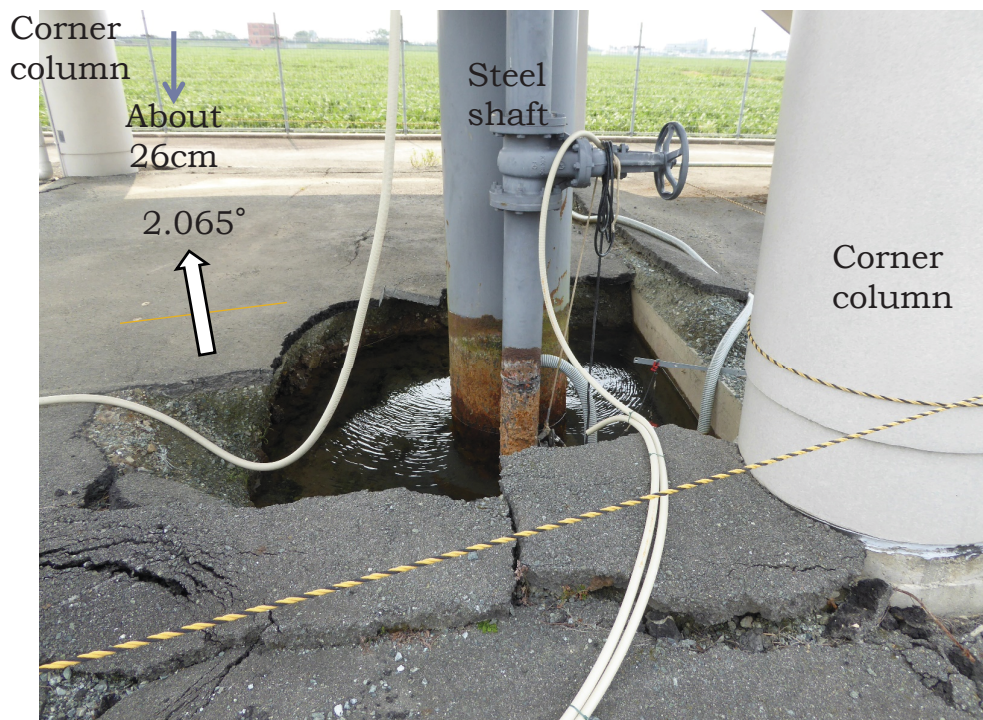


Kazuo KONAGAI, et al.: Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A, Vol. 73, No. 4, I_208-I_215, 2017, https://doi.org/10.2208/jscjsece.73.I_208

47

井戸の鋼製シャフトが突っ張り棒？

Well shaft acted as a strut?

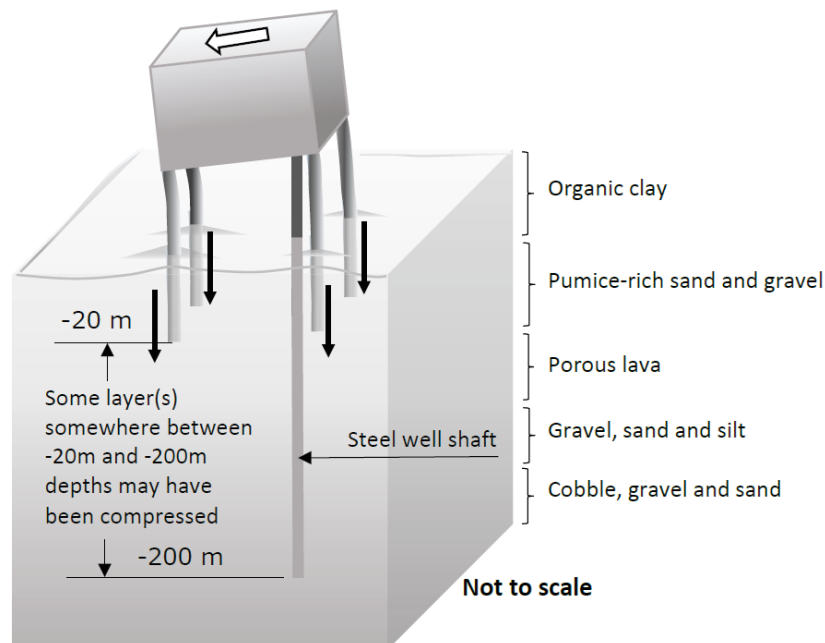


48

井戸の鋼製シャフトが突っ張り棒？

Well shaft acted as a strut?

Well pump housing tilts towards the
farthest corner from its steel shaft



49

地上に到達しない断層上での 斜面災害

類似の事例

51

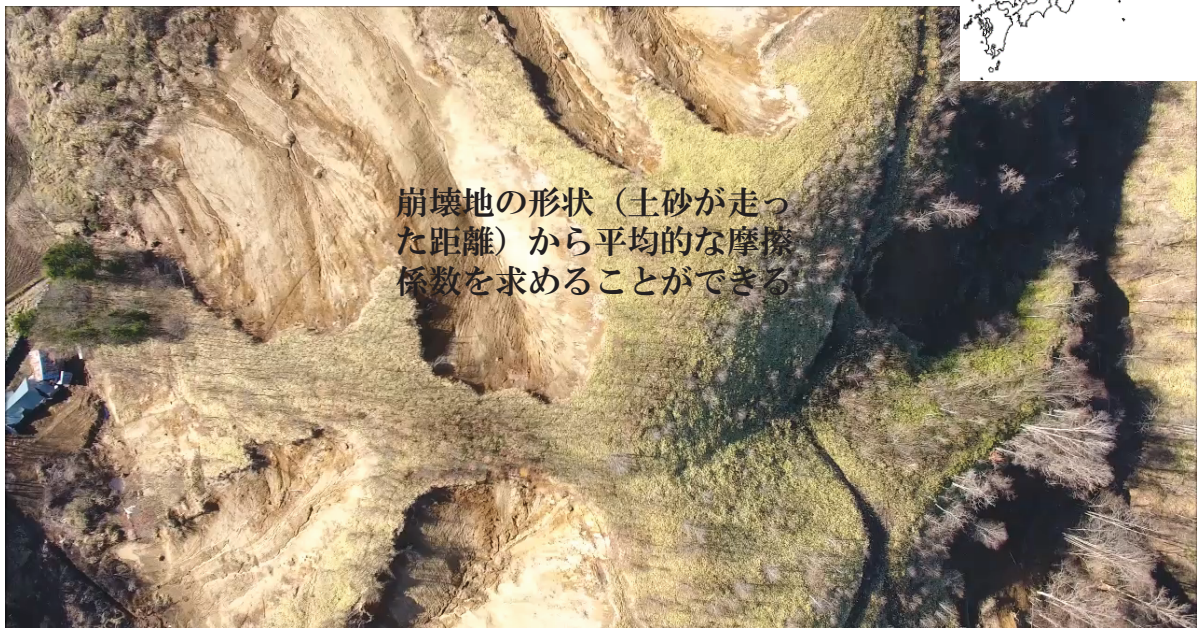


写真：朝日航洋 (<https://www.aeroasahi.co.jp/news/detail.php?id=201>)

火山灰や軽石の堆積する場所の災害 同時多発・長距離を走る

52

2018年北海道胆振東部地震



崩壊地の形状（土砂が走った距離）から平均的な摩擦係数を求めることができる

撮影：2018年11月14日 Konagai, Shiga, Nakata

53

30の地すべりから得られた平均値

$$\mu_1 = 0.165, \mu_2 = 0.36$$

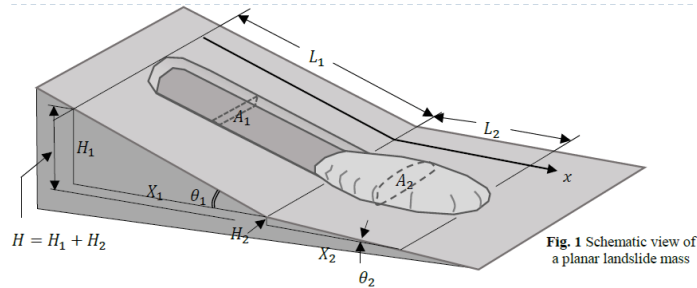


Fig. 1 Schematic view of a planar landslide mass

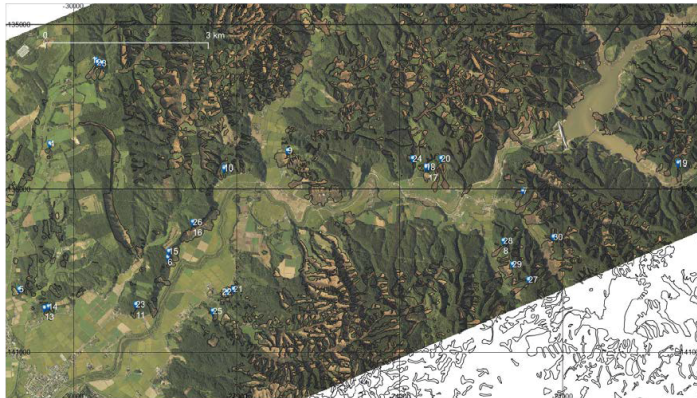
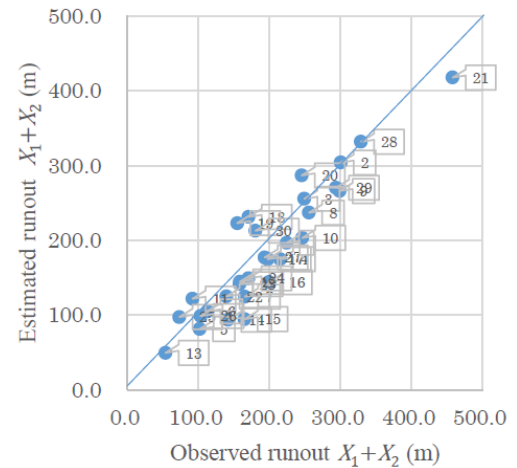


Fig. 2 Near Atsuma Town, 30 landslides dimensions were measured.

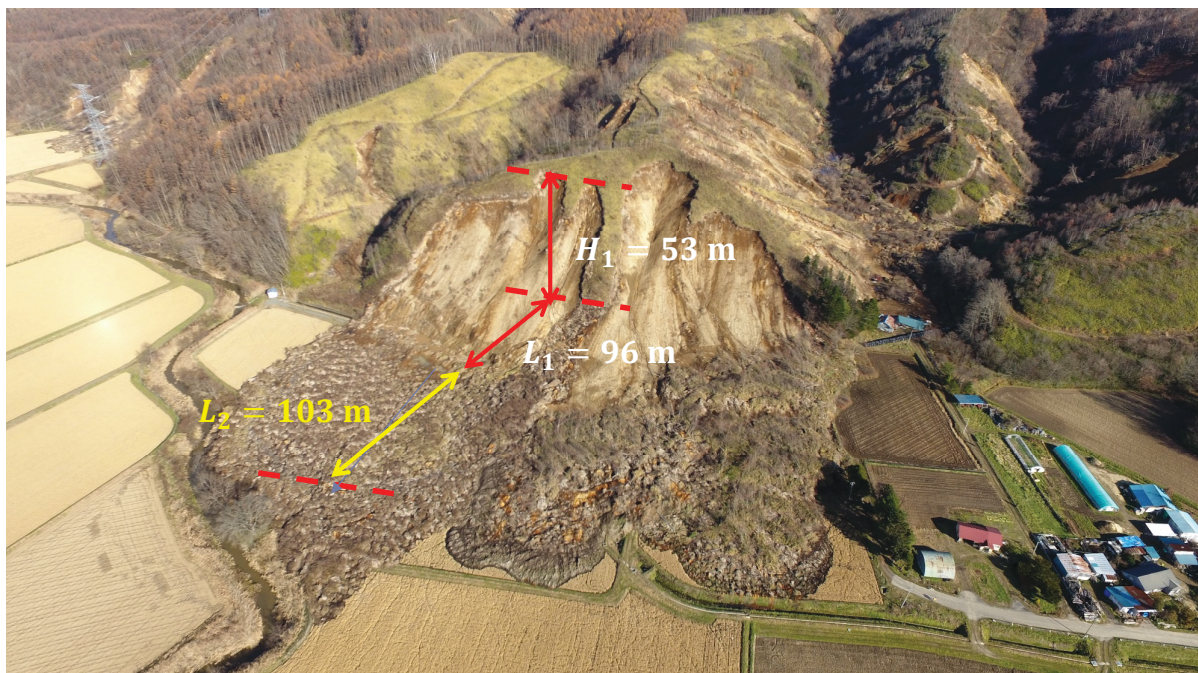


Kazuo KONAGAI, Alessandra Mayumi NAKATA: Runouts of landslide masses detached in the 2018 Hokkaido Eastern Ibur Earthquake, JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2019-E-0001, 1-6, 2019, <http://committees.jsce.or.jp/disaster/FS2019-E-0001>.

54

30の地すべりから得られた平均値

$$\mu_1 = 0.165, \mu_2 = 0.36$$

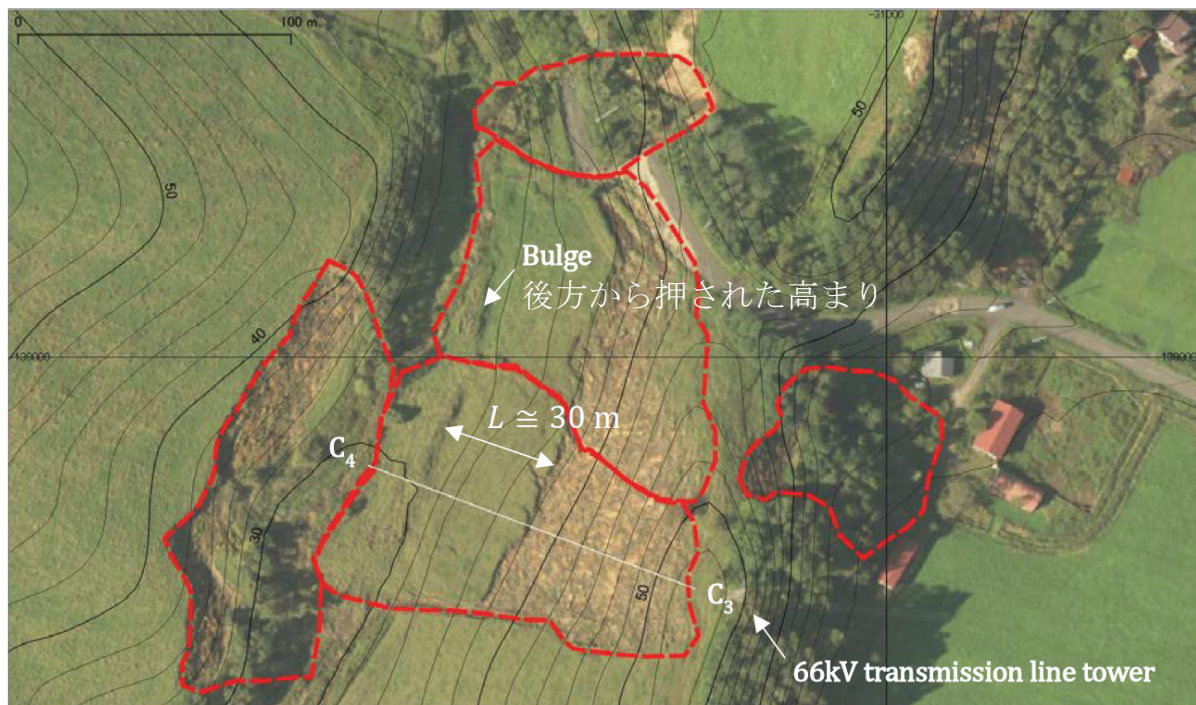


撮影：2018年11月14日 Konagai, Shiga, Nakata

Kazuo KONAGAI, Alessandra Mayumi NAKATA: Runouts of landslide masses detached in the 2018 Hokkaido Eastern Ibur Earthquake, JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2019-E-0001, 1-6, 2019, <http://committees.jsce.or.jp/disaster/FS2019-E-0001>.

55

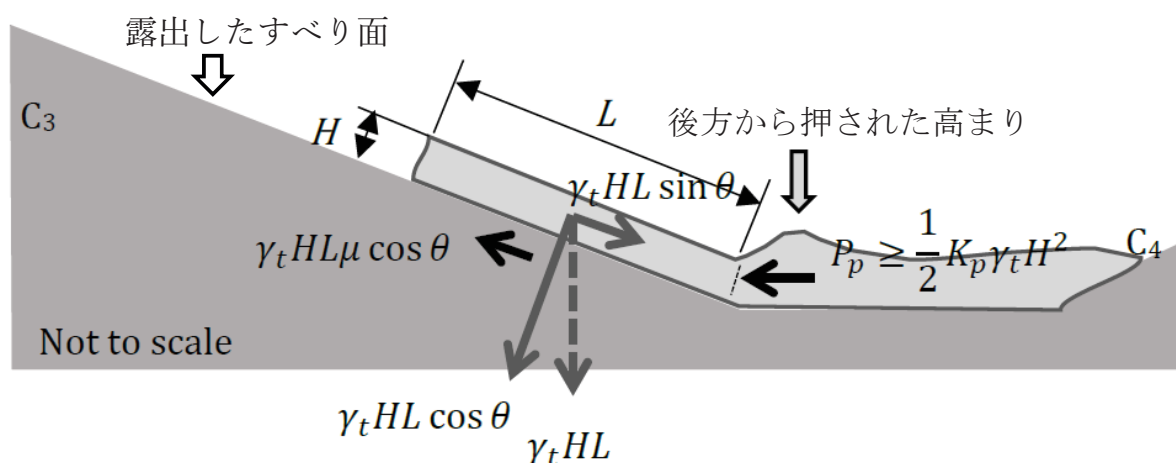
ところが低くなだらかな斜面では...



Kazuo KONAGAI, Alessandra Mayumi NAKATA: Runouts of landslide masses detached in the 2018 Hokkaido Eastern Iburi Earthquake, JSCE Journal of Disaster FactSheets, FS2019-E-0001, 1-6, 2019, <http://committees.jsce.or.jp/disaster/FS2019-E-0001>.

56

止まる寸前の土塊



$$(\gamma_t H L \sin \theta - \gamma_t H L \mu \cos \theta) \cos \theta \geq \frac{1}{2} K_p \gamma_t H^2$$

$$\begin{aligned} \mu &\leq \theta - \frac{1}{2} K_p \frac{H}{L} \\ &= 0.2 - \frac{5.83 \times 1.5}{2 \times 30} \cong 0.054 \end{aligned}$$



<http://clipart-library.com/banana-peel-cliparts.html>

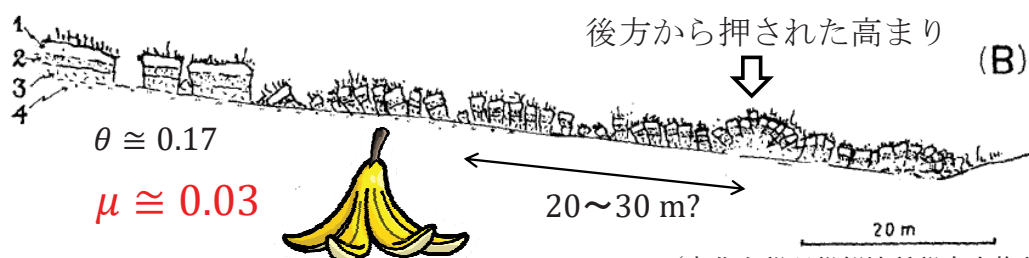
低くならかな斜面



58

古い報告に瓜二つの地すべり

1968 十勝沖地震 (Mw8.2)



59

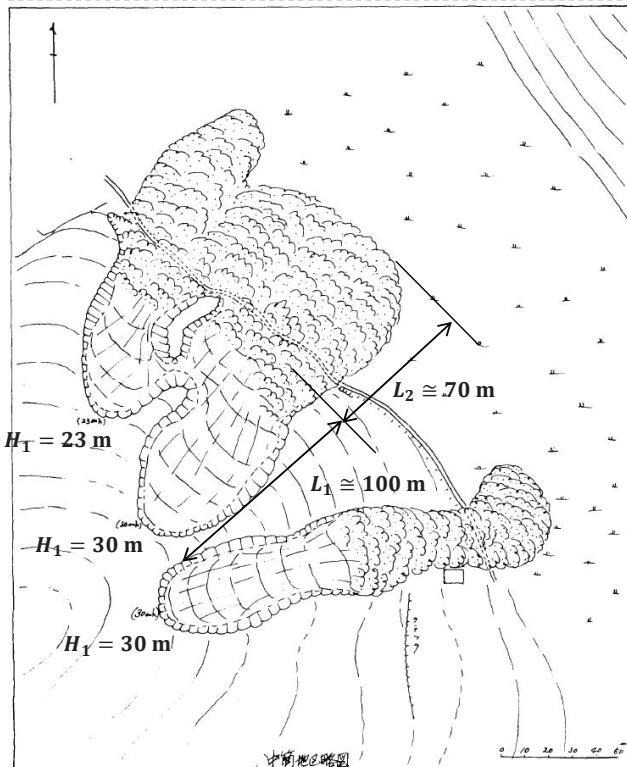
<http://clipart-library.com/banana-peel-cliparts.html>

(東北大学理学部地質学古生物学教室研究邦文報告45ページ)

59

古い報告にも瓜二つの地すべり

1968年十勝沖地震 五戸町中筒



国土地理院航空写真 T06810Y
1968年10月5日撮影



60
(東北大学理学部地質学古生物学教室災害調査グループ報告より)

N40.5439°, E141.4115°付近

60

神奈川で軽石の厚く堆積する場所？



<http://www.optronics-media.com/publication/publication03/20170921/48330/>

(はがき) 昨日は、朝、急に思い立ち、秦野の南方に、関東地震の際の山崩れのために生じた池、「震生湖」というのを見物および撮影に行った。……

山裂けて成しける池や水すまし
穂芒（ほすすき）や地震（ない）に
裂けたる山の腹

(昭和五年十月、渋柿)

神奈川で軽石の厚く堆積する場所？



62

まとめ

- ▶ トンネルの断層のずれによる被害は周辺の地盤の硬軟にも大きく支配される。
- ▶ 覆工が軽微な被害で済んでも、レールの座屈など思いがけない変形の局所化が、思いがけない場所で発生する。 → 工夫が必要
- ▶ 断層から離れても変形が起こる可能性がある。
- ▶ 過去の事例や地形に残る痕跡から多くを学ばなければならない。

63