

国土強靱化に向けた 地形・地質情報と物理探査の活用方法



長谷川修一（香川大学創造工学部）

講演内容

1. 日本人は世界的な災害列島で暮らしている
2. これから日本は国難に襲われる
3. 地形情報から溪流別土石流危険度を評価する
4. 南海トラフ巨大地震による斜面崩壊を予測する
5. 大地の成り立ちへの関心を防災・減災文化にまで高める

1. 日本人は世界的な災害列島で暮らしている

1 災害を受けやすい国土

日本は、地震、火山活動が活発な環太平洋変動帯に位置し、世界の0.25%という国土面積に比較して、地震の発生回数や活火山の分布数の割合は極めて高いものとなっています。

また、地理的、地形的、気象的諸条件から、地震や津波に加え、台風、豪雨、雪害等の自然災害が発生しやすい国土となっています。

災害種類別死者・行方不明者の比率

(過去20年：1994～2013年)

The Number of Deaths and Missing Persons by Type of Disaster (Past 20 years: 1994-2013)



http://www.bousai.go.jp/1info/pdf/saigaipamphlet_je.pdf

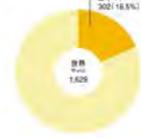
A Disaster-prone Country

Japan is located in the Circum-Pacific Mobile Belt where seismic and volcanic activities occur constantly. Although the country covers only 0.25% of the land area on the planet, the number of earthquakes and active volcanoes is quite high.

In addition, because of geographical, topographical and meteorological conditions, the country is subject to frequent natural disasters such as typhoons, torrential rains and heavy snowfalls, as well as earthquakes and tsunamis.

マグニチュード6.0以上の地震回数 (2004年～2013年)

Number of earthquakes with magnitude of 6.0 or greater (2004-2013)



活火山数 (2014年現在)

Number of active volcanoes (2014)



3

日本列島の特徴

- ①国土のゆがみと複雑さ
 - ②四島に分かれていること
 - ③脊梁山地が縦貫し、河川が急流であること
 - ④地質が複雑で不安定であること
 - ⑤全体として少なく狭い平野
 - ⑥軟弱地盤上の都市
 - ⑦いつ起こっても不思議でない地震と津波
 - ⑧短期間に集中する豪雨
 - ⑨台風による豪雨と強風
 - ⑩日本海を苦しめる豪雪
 - ⑪緑に覆われた国土
 - ⑫歴史をも動かす自然災害
- 大石久和(2012): 国土と日本人 災害列島の生き方, 中公新書.



<https://www.zenchiren.or.jp/tikei/plate.html>



<http://www.skr.mlit.go.jp/sabo/disaster/disaster.html>

災害は何を教えてくれるのか？



高知自動車道立川橋上部工の崩落
(2018年7月7日3:20発見)

堤防、砂防ダム等も破壊されることがある



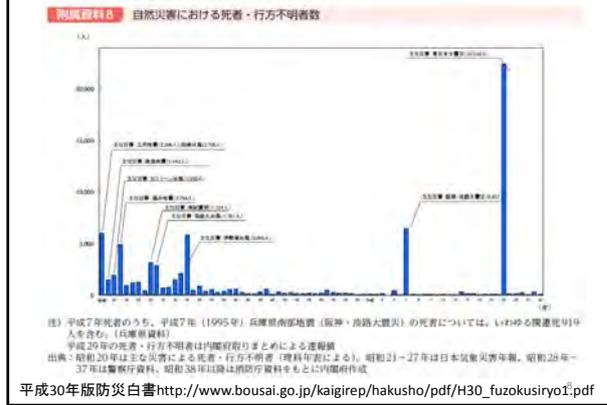
西予市宇和町明間の西
(2018年7月7日早朝発生)

災害は土砂災害と洪水によってできた
土地に暮らしていたことを教えてくれる



2017年九州北部豪雨災害
(朝倉市杷木地区)

日本社会は低頻度の巨大災害にはいまだ脆弱

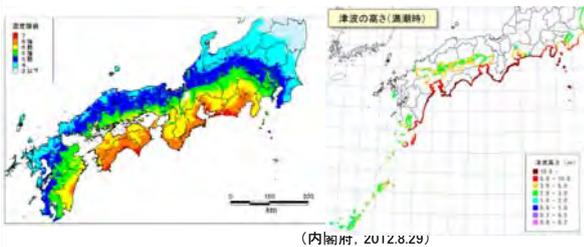


2. これから日本は国難に襲われる

南海トラフ地震は今後20年以内に50%程度の確率で発生

震度分布(最大クラス)

津波の高さ(最大クラス)



20年後は災後の覚悟を!

なぜ国土強靱化か?

大災害から国民を守るために

~ 国土強靱化、それは大災害から人命・財産を守ること ~

大規模自然災害による被害(推計)

	東日本大震災 (2011年)	南海トラフ 巨大地震	首都直下 地震
人的被害 (死者)	約1.6万人	最大 約32.3万人	最大 約2.3万人
資産等の 直接被害	約17億円	約170億円	約47億円
生産・サービス低下 による被害を含めた場合	約214億円	約95億円	

南海トラフ大地震震度分布
首都直下地震震度分布

出典: 国土強靱化計画(国土強靱化計画)作成

https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/kokudo_kyujinjka/pdf/seikaihehasshin.pdf

土木学会レジリエンス委員会報告(2018)

表1 巨大災害の被害推計

	経済被害	資産被害	財政的被害
地震・津波	(20年累計)		(20年累計)
南海トラフ地震	1,240兆円	170兆円	131兆円
首都直下地震	731兆円	47兆円	77兆円
高潮	(14か月累計)		(14か月累計)
東京湾巨大高潮	46兆円	64兆円	5兆円
大阪湾巨大高潮	65兆円	56兆円	7兆円
伊勢湾巨大高潮	9兆円	10兆円	1兆円
洪水	(14か月累計)		(14か月累計)
東京荒川巨大洪水	26兆円	36兆円	2.8兆円
大阪淀川巨大洪水	7兆円	6兆円	0.7兆円
名古屋庄内川等巨大洪水	12兆円	13兆円	1.3兆円

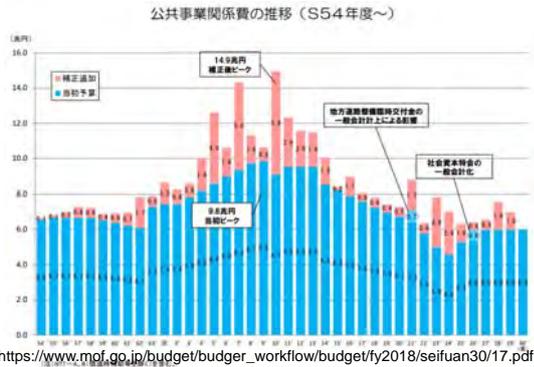
http://committees.jsce.or.jp/chair/system/files_1.pdf

何もしなければ日本は世界の最貧国となる可能性

しかし防災・減災の予算は減っている



1997年から国の目標になった緊縮財政は グローバリズムによる小さな政府政策

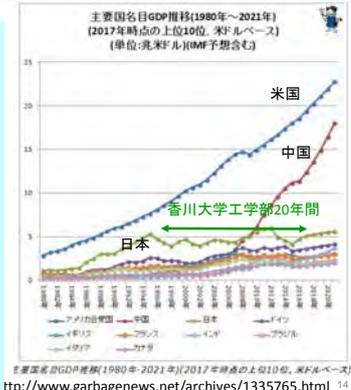


緊縮財政による国力の低下・国民の活力の低下

$$Y = C + I$$

総生産 消費 投資
コスト インベーション

- 国の公共投資の削減
- ⇒民間の国内投資の削減
- ⇒国際金融投機の資金に
- ⇒バブルの崩壊
- ⇒国民の負担(増税)
- 国民の貧困化
- ⇒東京一極集中の加速
- ⇒地方の衰退
- ⇒人口減少の加速
- 社会基盤の危機
- ⇒自然災害への脆弱性



国立大学を法人化し、運営費交付金を削減

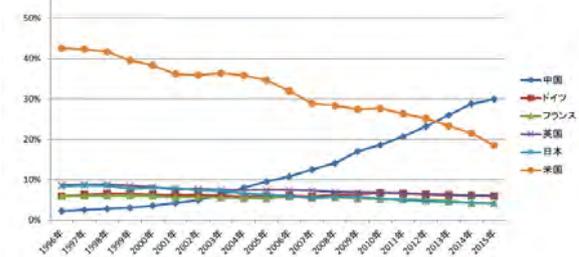
予算削減のなかでの改革競争⇒次は連携の推進⇒統廃合⇒???

競争的資金獲得競争、大学改革競争に、勝ち組も負け組も、大学の教職員は疲弊している。



TOP10%論文数の国際シェア推移(工学分野)

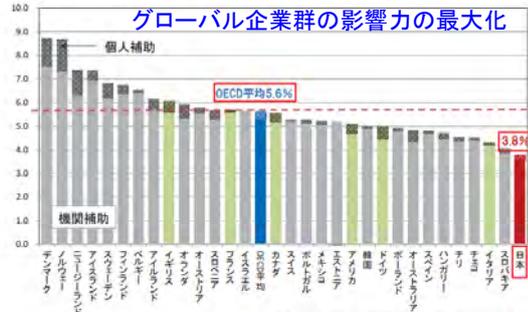
・各年のTOP10%論文数の国際シェアを米・英・独・仏・中・日の6カ国について分野別に抽出した。整数カウントである。
・Scopus databaseの27分野分類のChemical Engineering; Engineeringの2分野のデータを合わせたものである。



諸外国と比較した我が国の教育投資

日本は教育後進国

我が国の公財政教育支出の対GDP比は、機関補助と個人補助を合わせて3.8%であり、データの存在するOECD加盟国の中で最下位である



東京一極集中が人口減少を加速し、破局を招く



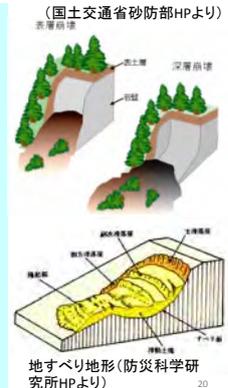
国難に備えるには均衡ある国土形成 選択と集中は破局を招く

- 社会資本の整備
国土強靱化への公共投資
- 地方の人材育成・産業の振興
⇒ 国立大学への教育投資
- 企業のリスク分散(本社機能などの地方移転)
⇒ 企業の民間投資

そのための研究開発が地方大学の使命

地方で暮らすには土砂災害との共生が必要

- 斜面崩壊: 斜面が崩れる
表層崩壊: 表土層のみ、小規模
深層崩壊: 岩盤から、大規模
(2004年台風21号大生院など)
- 土石流
土石と流木が谷の出口を襲う
- 地すべり
斜面が大規模で、ゆっくり移動する
地すべりによってできた緩斜面は棚田・棚畑として利用されている。建設工事によって再滑動する地すべりも



3. 地形情報から溪流別土石流危険度を評価する

谷密度と崩壊密度

- 大きさの異なるメッシュごとに谷密度を計算し、谷密度を計算する際の適切な流域面積を決定
- 2015年広島土砂災害等のデータに基づき谷密度と崩壊密度の関係を検討

谷密度と雨量指標R

- 中国・四国と紀伊半島の土砂災害データに基づき、降雨による土石流発生基準を検討

谷密度と崩壊規模

- 長谷川ほか(2009)の結果を本研究で用いた手法で谷密度を再計算し、谷密度と崩壊規模の関係式を設定

谷密度を指標とした溪流別かつ簡易的な土石流危険度評価手法の開発

降雨による土砂災害の予測

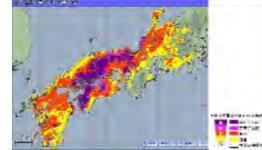
- 土砂災害防止法(2000年)以降、土砂災害対策の比重がハード対策からソフト対策へと移ってきている。
- 現在の土砂災害ハザードマップは危険な場所のみが示されており、どの程度の降雨で危険度が高くなるのか分からない。
- 土砂災害警戒情報も個別の災害発生箇所を特定するものではない。



流域単位で降雨による土砂災害の発生場所と発生時間を連動して予測する手法の開発が求められている



宇和島市防災マップ
(<https://www.city.uwajima.ehime.jp/uploaded/attachment/909.pdf>)



土砂災害警戒判定メッシュ情報
<https://www.jma.go.jp/jp/doshamesh/>

既往の溪流別土砂災害危険度評価

表層崩壊危険度評価

- ◆ 表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル(案)(2009)
- H-SLIDER法, C-SLIDER法

必要なデータ

- ✓ DEMデータ(10mメッシュ)
- ✓ 土層厚
- ✓ 粘着力、内部摩擦角
- ✓ 飽和透水係数
- ✓ 単位体積重量



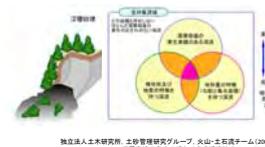
独立法人土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム(2009)
流域単位に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル(案)

深層崩壊危険度評価

- ◆ 深層崩壊の発生のある恐れのある溪流抽出マニュアル(案)(2008)

必要なデータ

- ✓ 深層崩壊の発生実績に関する資料
- ✓ 空中写真
- ✓ DEMデータ(50mメッシュ)
- ✓ 地質図、活断層地質図
- ✓ 微地形分類図



独立法人土木研究所 土砂管理研究グループ 火山・土石流チーム(2008)
流域単位に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル(案)

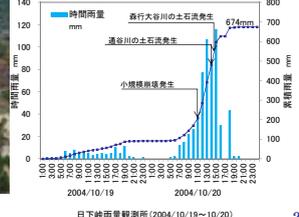
膨大な資料収集・現地調査・解析が必要

-瀬戸内の丘陵地の斜面崩壊特性-

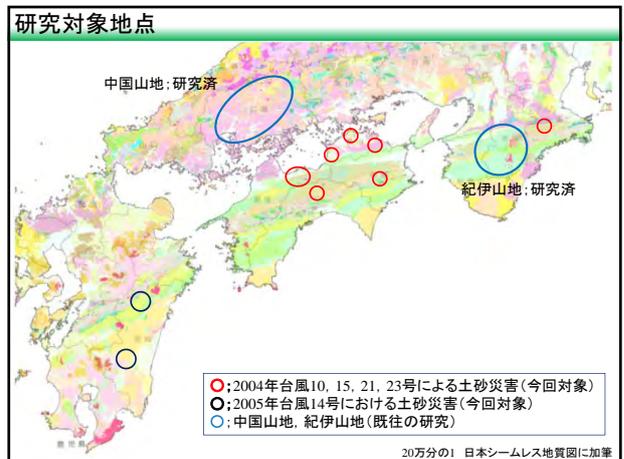
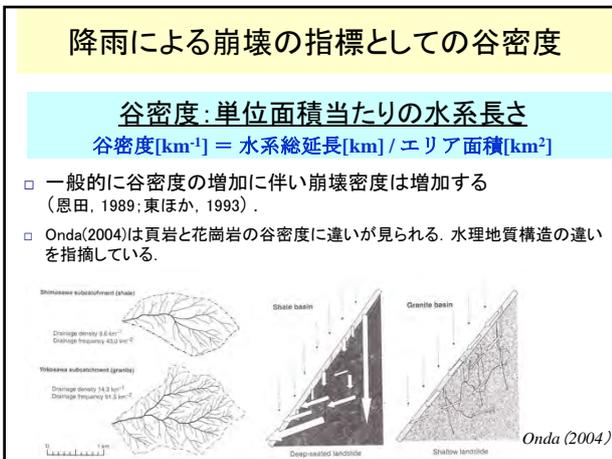
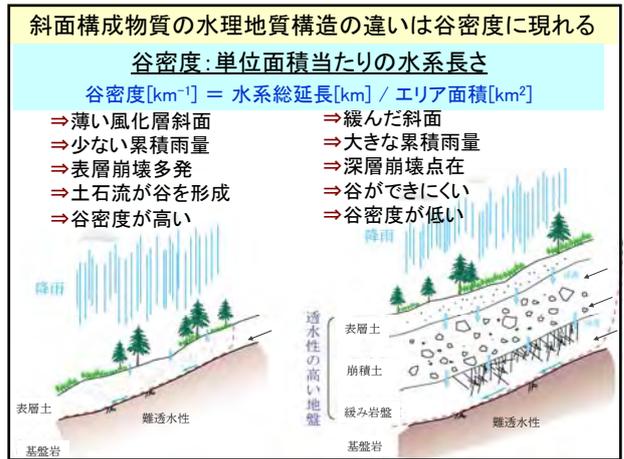
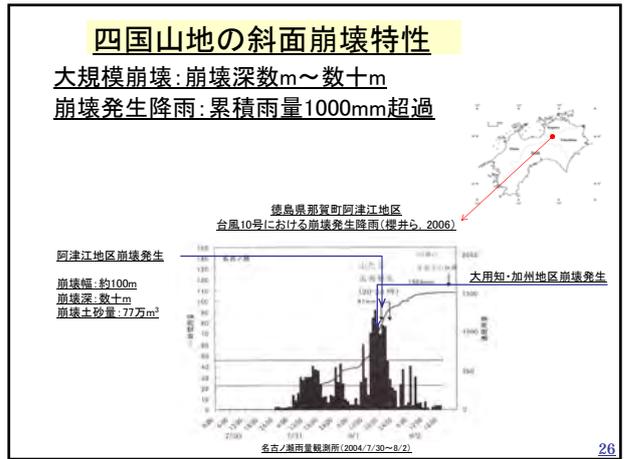
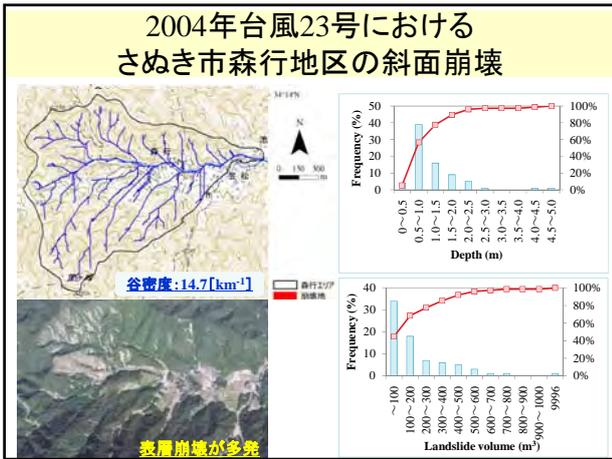
表層崩壊: 崩壊深1~2m
崩壊発生降雨: 累積雨量150~200mm
崩壊密度: 高い



香川県東讃地域森林地区
台風23号における崩壊発生降雨(西野ら, 2006)



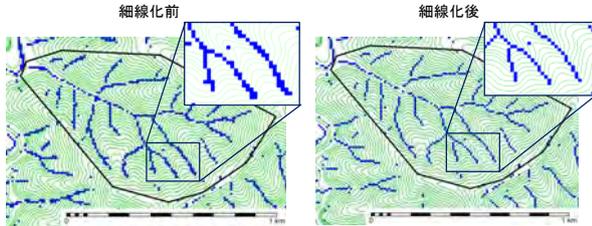
日下神田雨量観測所(2004/10/19~10/20)



谷密度の計算方法

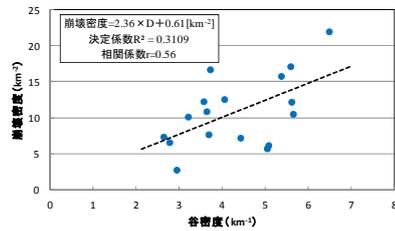
谷密度の計算方法

- ◆GISソフトILWISを用いて計算を行う
- ✓使用データ: 国土地理院の10mメッシュDEM
- ✓谷: 平均曲率より定義する(閾値は0.10), 細線化を行う
- ✓計算式: 谷線の総延長/流域の面積
谷密度 (km⁻¹) = 100 × 谷線のピクセル数 / 流域のピクセル数



細線化: 直線や曲線をドットの細線に修正

谷密度と崩壊密度の関係(流域選定)



- ✓谷密度が高くなるに従って, 崩壊密度が高くなる
- ✓崩壊密度は面積当たりの崩壊個数を表すため, 谷密度が高い溪流は崩壊が発生しやすいことを表している

谷密度を計算する際の流域の面積は1km²(0.5km²~1.5km²)程度が適当

雨量指標R'の計算方法

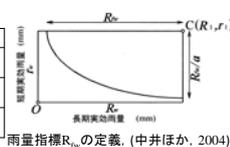
雨量指標と地形・地質等の関係を検討するため, 短期・長期の雨量指標を1つに集約した雨量指標R'(中井ほか, 2004)を用いる

$$R' = \frac{R_{Lw} - R_{Sw}}{R_{Lw} - R_{Sw} + a^2(r_1 - r_w)^2}$$

R_{Lw}: 長期実効降雨 (mm), r_w: 短期実効降雨 (mm)
R_L: 座標上の長期実効降雨軸基準点
r₁: 座標上の短期実効降雨軸基準点
a: 重み係数
R_{tw0}: 短期・長期実効降雨が共に0 mmの時のR_{tw}値

過去の災害時の最大実効雨量

	R _L (半減期72時間)	r _w (半減期1.5時間)
1994年 台風26号 風屋観測所 (気象庁)	599.8mm (9/29 22:00)	141.8mm (9/29 21:00)
2004年 台風21号 上北山観測所 (気象庁)	403.5mm (9/29 21:00)	96.2mm (9/29 11:00)
2011年 台風12号 上北山観測所 (気象庁)	1314.6mm (9/4 8:00)	104.8mm (9/3 3:00)

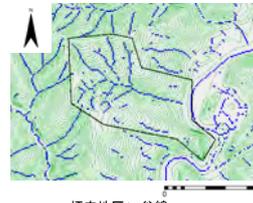


大江ほか(2013)のものと同じ図上にプロットするため,
R_L=1400, r₁=350, a=3を用いた

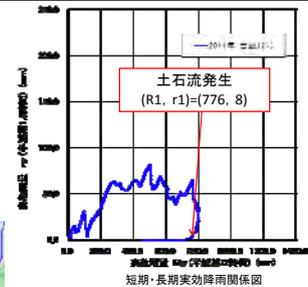
坪内地区1

崩壊斜面の地質は四万十帯花崗層の泥質混在岩主体であり, 流れ盤を呈している。滑り崖には多くの亀裂で緩んだ泥岩とともに旧崩積土が厚く分布しており, 過去に変動があったとみられる。

(地盤工学会 関西支部)



坪内地区1 谷線



短期・長期実効降雨関係図



崩壊箇所図

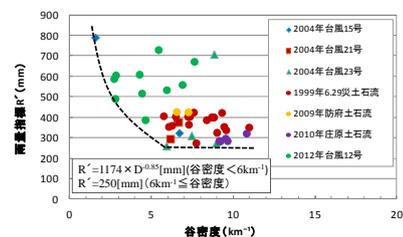
計算結果

災害発生年	番号	雨量観測点	距離(km)	面積(km ²)	谷密度(km ⁻¹)	R'(mm)	R'(mm)/ArcGIS使用)
2011	1	奈良県 北殿	1.6	0.55	6.92	558.7	557.2
2011	2	奈良県 宇井	0.7	0.50	2.82	476.2	489.0
2011	3	国土交通省 九尾	0.6	0.53	5.96	549.5	531.8
2011	4	国土交通省 九尾	1.3	0.51	2.88	612.1	604.0
2011	5	国土交通省 九尾	1.0	0.50	2.75	598.4	585.9
2011	7	奈良県 迫	0.8	0.65	4.66	414.6	385.1
2011	10	気象庁 風屋	2.0	0.95	5.43	746.6	727.6
2011	11	国土交通省 猿谷	2.2	0.60	4.45	530.6	515.3
2011	12	和歌山県 熊野	1.6	0.97	4.30	612.0	607.7
2011	13	和歌山県 串崎	2.0	0.56	7.65	679.2	670.5

(雨量観測点は現地より2.5km以内)

35

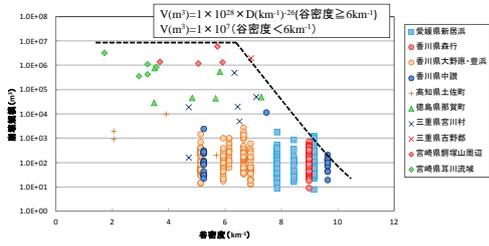
谷密度と雨量指標R'の関係



- ✓谷密度が高くなるに従って, 小さい雨量指標R'値で土石流が発生
- ✓谷密度が6km⁻¹程度以上になると雨量指標R'値が250mm程度で頭打ち

↓
 $\begin{cases} > 6\text{km}^{-1}; R' = 1174 \times D + 0.85 [\text{mm}] \\ \geq 6\text{km}^{-1} \leq \text{谷密度}; R' = 250 [\text{mm}] \end{cases}$

谷密度と崩壊規模の関係



✓谷密度が低くなるに従って崩壊規模の最大値が大きくなる
 ✓降雨による自然斜面の崩壊は、 1×10^7 [m³]程度で頭打ち

$> 6 \text{ km}^{-1} \leq \text{谷密度}; V = 1 \times 10^{28} \times D^{-26} [\text{m}^3]$
 $> \text{谷密度} < 6 \text{ km}^{-1}; V = 1 \times 10^7 [\text{m}^3]$

成果のまとめ

谷密度と崩壊密度

- 谷密度を計算する際の流域の面積は 1 km^2 ($0.5 \text{ km}^2 \sim 1.5 \text{ km}^2$)程度が適当
- 谷密度が高くなるに従って、崩壊密度が高くなる

谷密度と雨量指標R'

- 谷密度が高くなるに従って、小さい雨量指標R'で崩壊が発生
- $R' = 1174 \times D^{-0.85} [\text{mm}]$ (谷密度 $< 6 \text{ km}^{-1}$)
- $R' = 250 [\text{mm}]$ ($6 \text{ km}^{-1} \leq \text{谷密度}$)

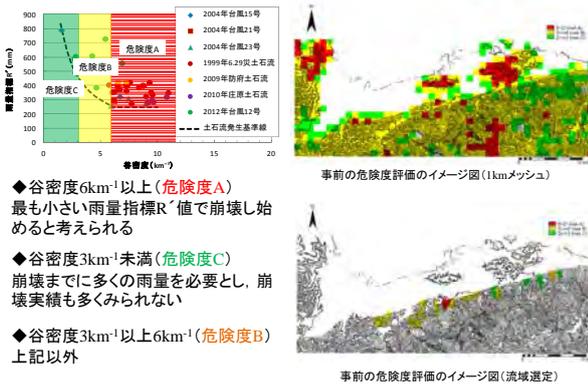
谷密度と崩壊規模

- 谷密度が低くなるに従って崩壊規模の最大値が大きくなる
- $V = 1 \times 10^{28} \times D^{-26} [\text{m}^3]$ ($6 \text{ km}^{-1} \leq \text{谷密度}$)
- $V = 1 \times 10^7 [\text{m}^3]$ (谷密度 $< 6 \text{ km}^{-1}$)

土石流危険度評価

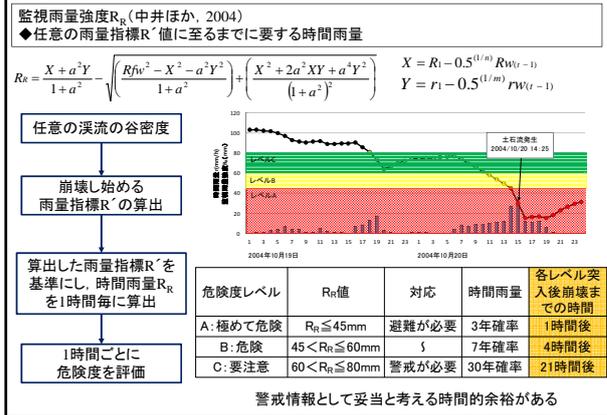
- 谷密度と雨量指標R'を用いることで広域・狭域の土石流危険度評価が可能になる

溪流別土石流危険度評価手法(事前の危険度評価)

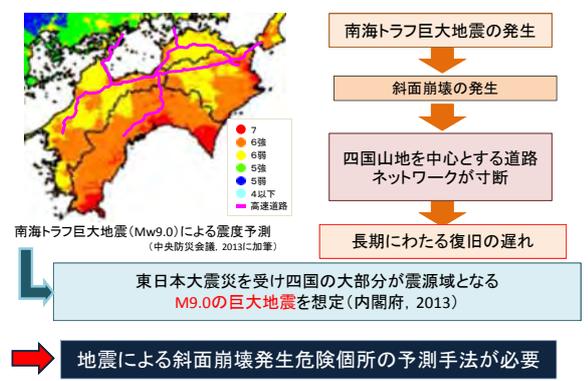


- ◆谷密度 6 km^{-1} 以上(危険度A) 最も小さい雨量指標R'値で崩壊し始めると考えられる
- ◆谷密度 3 km^{-1} 未満(危険度C) 崩壊までに多くの雨量を必要とし、崩壊実績も多くみられない
- ◆谷密度 3 km^{-1} 以上 6 km^{-1} (危険度B) 上記以外

溪流別土石流危険度評価手法(時々刻々の危険度評価)



4. 南海トラフ巨大地震による斜面崩壊を予測する



地震による斜面崩壊発生危険個所の予測手法が必要

加奈木の崩(つ)え



F値による表層崩壊危険箇所の予測

斜面崩壊危険度 (F) 判別式

$$F = 0.075 \times [\text{斜面勾配} (^{\circ})] - 8.9 \times [\text{平均曲率}] + 0.0056 \times [\text{最大加速度} (\text{cm/s}^2)] - 3.2$$

(内田ら, 2004.)

Fは判別得点であり、
 $F \leq 0$ 崩壊の危険性はほぼなし。
 $F > 0$ 崩壊の危険性あり。

問題点

・変数として地形量しか用いていないため、表層崩壊については適用できるが、大規模な崩壊は捉えられない。

素因となるトップリングしている斜面を捉える必要がある



加奈木の崩え周辺の斜面崩壊危険度評価図

地震による斜面崩壊危険度の指標

地震が増幅しやすい斜面
 解像度10mの数値標高モデル(DEM)データから、平均曲率や斜面勾配などをを使って**表層崩壊危険度(F値)**を算出する

斜面の重力変形による岩盤の緩み
 空中電磁探査で比抵抗を測り、周りよりも比抵抗が高くなる地点を**比抵抗凹凸度**を使ってあり出す。不飽和帯を対象

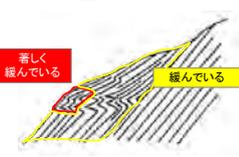
地表面の崩壊や落石の評価が行えない

地震による深層崩壊危険度 = F値 × 比抵抗凹凸度

電磁波によって地下の岩盤状態を評価

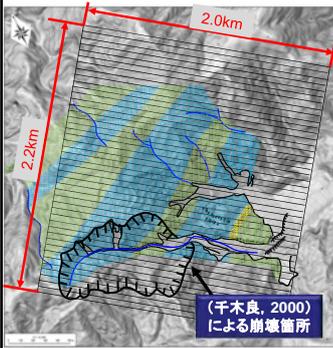


受け盤のトップリング (出納, 1999に加筆)



流れ盤における岩盤の緩み(千木良ら,1995.に加筆)

空中電磁法の探査方法



調査範囲 4.4km² (2.2km × 2.0km)
 飛行測線 90km (2km × 45測線)
 測線間隔 50m
 サンプルング 0.2秒間隔 (1.7m毎)
 飛行速度 30km/h
 航跡確認 GPSとビデオ画像観察
 比抵抗平面図 (周波数140,000Hz)
 概略探査深度 5m~30m
 比抵抗断面図
 (周波数140,000Hz, 31,000Hz, 6,900Hz, 1,500Hz, 340Hz)
 概略探査深度 200m

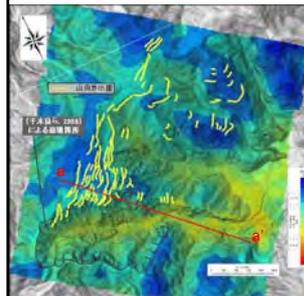


(千木良, 2000) による崩壊箇所

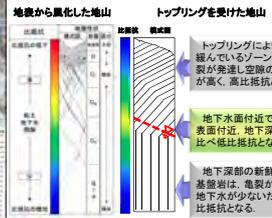
空中電磁法の探査概要図

加奈木地区 空中電磁調査範囲: 4.4km²

加奈木の崩え周辺斜面の比抵抗分布



加奈木の崩え周辺の比抵抗平面図 (周波数140kHz) 概略探査深度 5m~30m



地表面から風化した地山 **トップリングを受けた地山**

トップリングにより著しく緩んでいるゾーンは、亀裂が発達し空隙の割合が高く、高比抵抗となる。

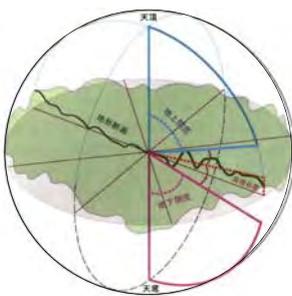
地下水面付近では、地表面付近、地下深部に比べ低比抵抗となる。

地下深部の新鮮で硬い基盤岩は、亀裂が少なく地下水が少ないため、高比抵抗となる。

比抵抗値の解析方法

標高を用いる⇒**尾根谷度** = (地上開度 - 地下開度) / 2 (千葉ら, 2007)

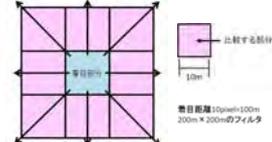
比抵抗を用いる⇒**比抵抗凹凸度** = (上方開度 - 下方開度) / 2



尾根部、凸部で+ → 赤色で表示
 尾根谷度 = (75° - 10°) / 2 = 32.5°
 比抵抗凹凸度 = (75° - 10°) / 2 = 32.5°

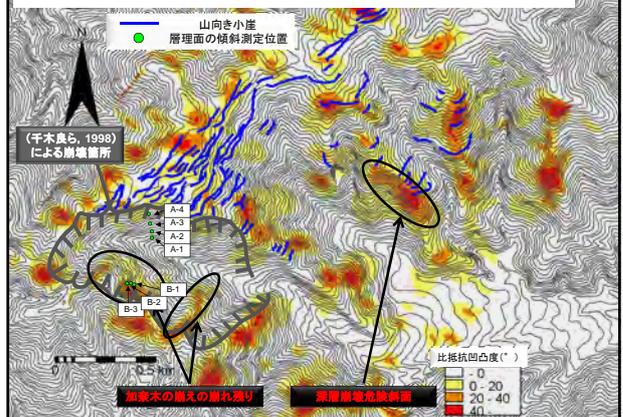
谷部、凹部で- → 白色で表示
 尾根谷度 = (45° - 55°) / 2 = -5°
 比抵抗凹凸度 = (45° - 55°) / 2 = -5°

平坦面で0°に近い値 → 白色で表示



(千葉ら, 2007)

トップリングによる岩盤の緩み斜面の抽出 (比抵抗凹凸度)



山向き小崖 層理面の傾斜測定位置

(千木良ら, 1998) による崩壊箇所

A-4, A-3, A-2, A-1, B-1, B-2, B-3

加奈木の崩えの崖れ張り

深層崩壊危険斜面

比抵抗凹凸度(°)
 0
 0-20
 20-40
 40

地震による深層崩壊危険斜面の抽出

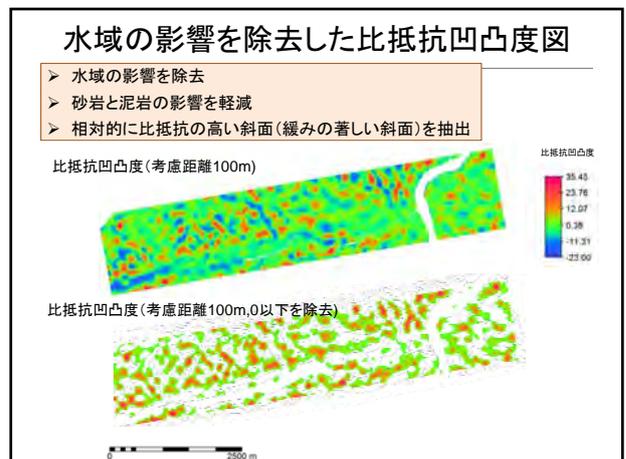
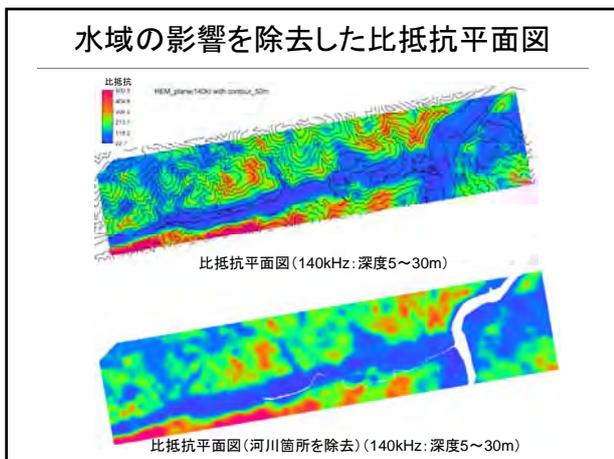
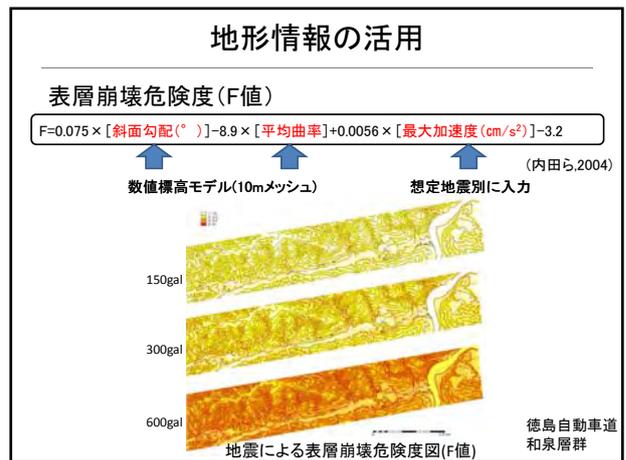
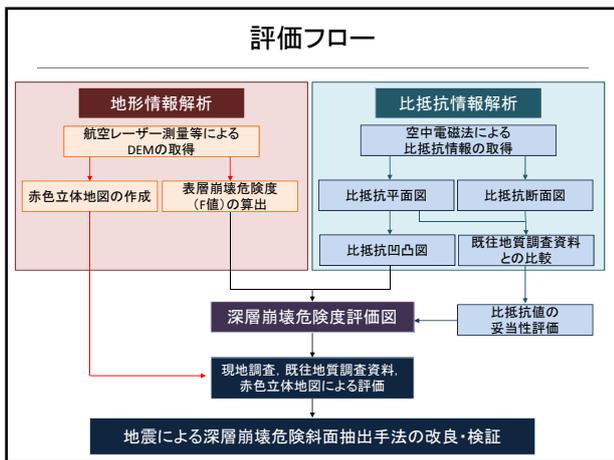
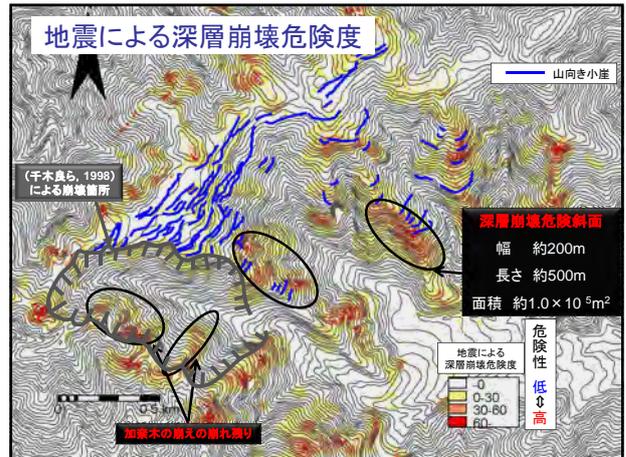
地震による深層崩壊危険度

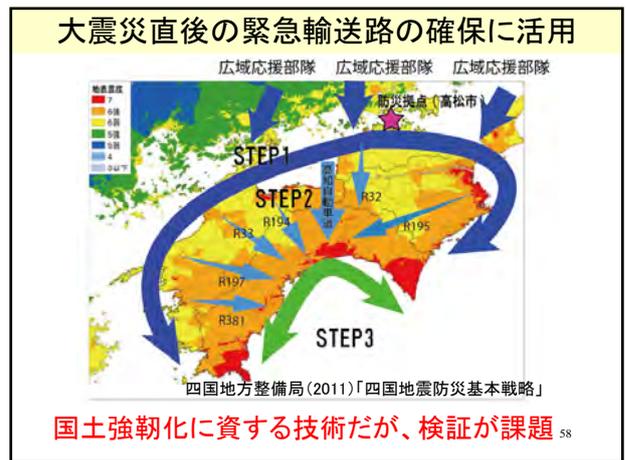
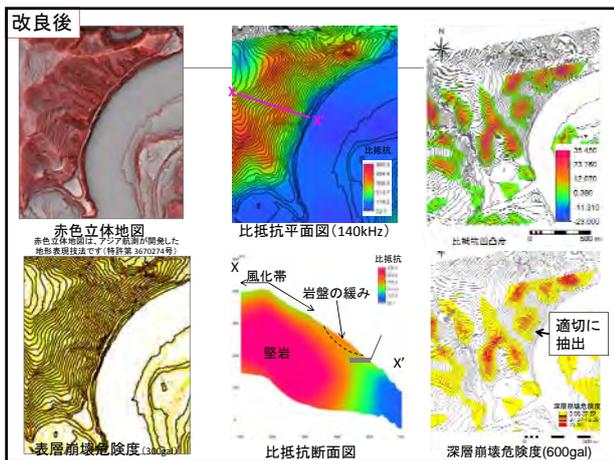
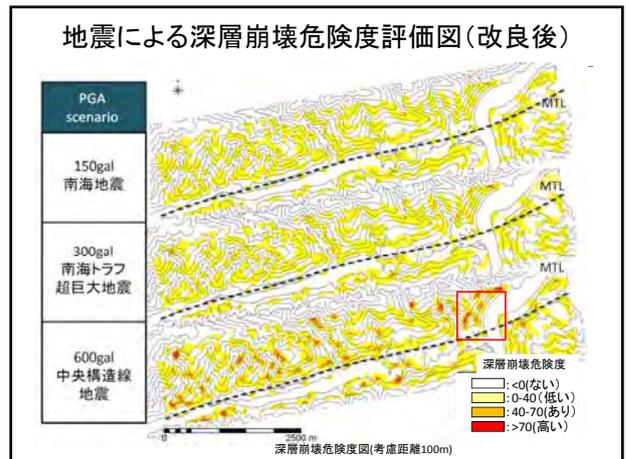
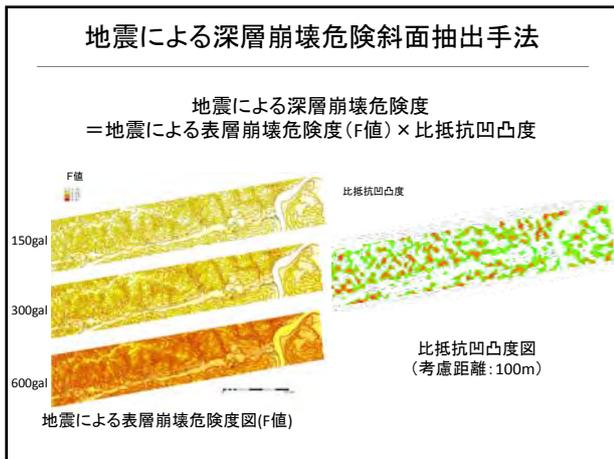
$$= (\text{比抵抗凹凸度}) \times (\text{表層崩壊危険度F値})$$

右辺の各値は0以下の場合、0として扱う。

トッピングが進行し高比抵抗かつ地震動が増幅する箇所抽出

比抵抗凹凸度 表層崩壊危険度





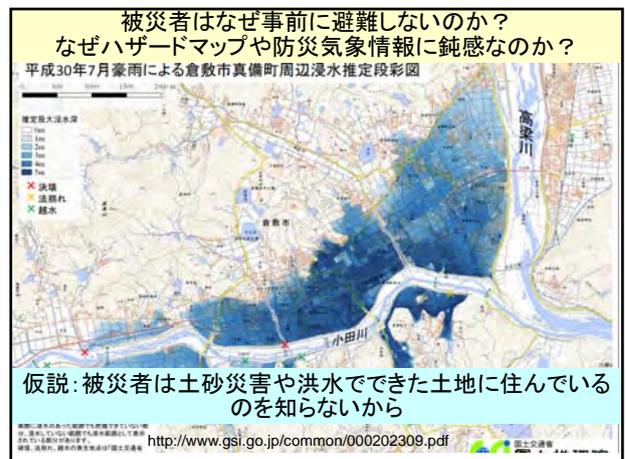
国土強靱化に資する技術だが、検証が課題 58

日本学術会議主催学術フォーラム
防災学術連携体の設立と東日本大震災の総合対応の継承」2016.1.9

5. 大地の成り立ちへの関心を防災・減災文化にまで高める

日本応用地質学会 会長 長谷川修一

- 住まう土地の成り立ちに関する無自覚(無知)が被災を大きくする。
- 土地の成り立ちに関する無自覚(無知)は、大地に関する無関心に起因する。
- 大地の成り立ちに関する関心を高め、土地の成り立ちに関する無知へ減らすアウトリーチが必要。
- 防災リテラシーを高めるのは、単なる地学教育ではなく応用地質学の視点から防災・減災術のアウトリーチを進めたい。
- ジオパークは、大地の成り立ちから地域の強みと弱みを知り、災害列島日本で暮らすための究極の防災教育
- 想定外を少なくするには、過去の災害履歴だけでなく、時間軸を長くとり、地形・地質から得られる低頻度の破局的巨大災害の知見を減災ソフト対策・危機管理に反映させる必要がある。



洪水・土砂災害ハザードマップを水害後に見る



倉敷市洪水・土砂災害ハザードマップ(平成29年作成)真備船穂地区
http://www.city.kurashiki.okayama.jp/secure/100849/06mabihunao.pdf?iref=pc_rellink

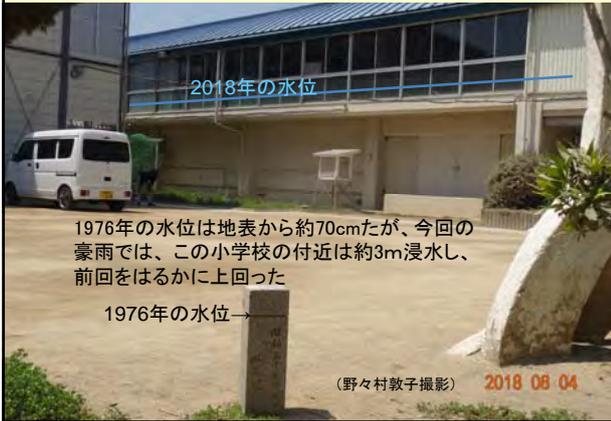
真備町は典型的な水害地形



倉敷市真備町は高梁川による閉塞谷

(国土地理院色自分のできる別標高図)

倉敷市真備小学校の水害の石碑



真備町は水害常習地区



真備地区の土地価格の相場は
 東隣の総社市よりも半値に近いほど安かった



小豆島はなぜオリーブの島になったのか？



オリーブが植られた土地はどのようにしてできたのか



1976年台風17号による土石流災害



小豆島のオリーブ公園は土石流扇状地の跡地利用



香川大学創造工学部防災・危機管理コース新入生合宿研修
「小豆島はなぜオリーブの島になったのか？」

【合宿終了後の新入生の声】

・記事や資料などで読むよりも、実際に自分の足を動かしてその土地に立ってみると**本当に起こった出来事**なんと深く感じました。

・今見える地形特徴からその土地がどのようにできたのか考えることは、その土地を訪れる人間、住んでいる人間、どちらも気がすべきことなのだと思う。また地名や古い神社など被害跡など以外にもその土地の過去を知る手がかりになることにも納得することができた。**災害に対して被害を小さくするためには、その土地をよく知ること、理系的な分析以外にも、歴史や地理などの文系的な分析も重要**になると感じ、私の今後の学習・活動などにも活かしていきたいと思う。



https://www.kagawa-u.ac.jp/kagawa-u_ead/topics/student/21656/