



新興地質調查技術經驗分享會

114年10月31日(五) 09:00-16:30

集思北科大會議中心 艾爾法廳

以活動斷層參數評估 地震誘發崩塌之潛在分布

台灣大學地質科學系

陳麒文

2025年10月31日

地震誘發崩塌的嚴重性

- 全球多起強震引發大量崩塌與土石流，時常造成嚴重人命與財產損失。
 - 1999年台灣集集地震 > 20,000起崩塌 (Lin et al., 2004)
 - 2018年北海道地震 ~ 8,000起崩塌 (Wang et al., 2019)

 - 雖然地震誘發崩塌事件的發生頻率低於降雨誘發之事件，但其能量集中、破壞力極強，是山區最具代表性的次生災害之一 (Jibson et al., 2000; Gorum et al., 2011)。
- 預先掌握地震可能引發的崩塌範圍，對防災與風險管理至關重要。

震後資料為主的分析

- 多數研究在地震發生後，利用地動參數(PGA、PGV)與實際崩塌位置進行統計分析 (Nowicki et al., 2014)。
- 反映崩塌與地動強度的關係，但必須等地震發生後才能進行，且受限於地動模型與地質資料解析度 (Wald et al., 2008)。
- 主要限制：
 - 需依賴震後觀測資料，無法事前預測
 - 難以反映不同斷層構造（走滑、逆衝等）的崩塌分布差異。

→傳統方法多屬事後分析，缺乏事前評估能力。

震前可預測的評估方法

- 若能在地震發生前，根據潛在震源的性質預估崩塌分布，將可大幅提升防災應變效率。
 - 過去研究多著重於震央距離或規模與崩塌關係 (Keefer, 1984; Rodríguez et al., 1999)。
 - 更多研究指出斷層型態與震波衰減特性會影響崩塌範圍 (Valagussa et al., 2019; Massey et al., 2018)。
- 不依賴地震後的觀測資料。
- 根據潛在活動斷層的幾何與能量條件預先估算崩塌範圍。

研究目的與防災應用願景

□ 研究目的：

- 建立可於地震發生前預估崩塌範圍的方法
- 提供防災單位作為潛在高風險區域判釋

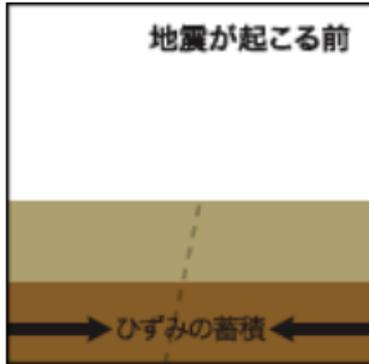
□ 防災應用願景：

- 發展地震前潛勢分析模型，用於國土規劃與防災決策支援。將「地震後分析」轉化為「地震前預測」，實現主動式減災

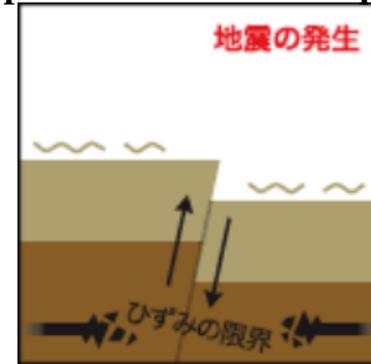
活動断層地震

地震で地表に現れる活断層 (タイプ2)

Plate movement and strain accumulated



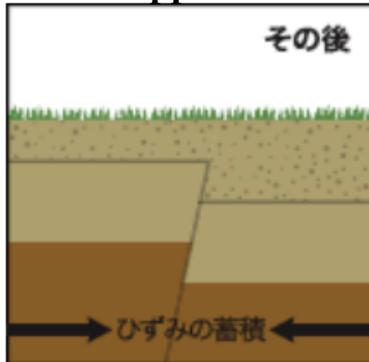
Displace and cause earthquakes



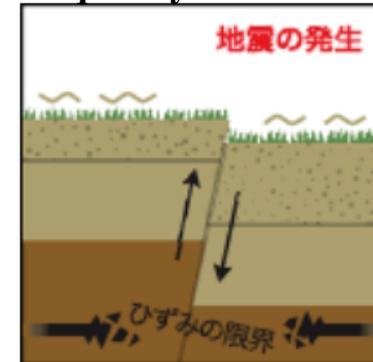
プレートの動きによる圧力がかかり、岩盤の弱い所にひずみが蓄積

ひずみが限界に達すると弱い所がずれて、地震が発生

Active faults appear near the surface



Frequently reactivated



長い年月をかけて別の地層が堆積し、断層のずれが分からなくなる

再びひずみが限界に達して断層がずれ、地震が発生する

研究發展脈絡

- 現象觀察：不同斷層型態對地震誘發深層崩塌分布之影響 (Chen et al., 2017)

- 模式建立：建立以活動斷層參數為核心的崩塌潛勢分布模型 (Chen et al., 2022)

- 應用測試：模型驗證與跨區域應用
 - 2022年台東地震 (Chen et al., 2025)
 - 2024年日本能登地震 (Chen et al., 2024)

不同斷層型態對地震誘發深層崩塌分布之影響

地震地すべり

Earthquake-induced Landslides

—地震地すべりプロジェクト特別委員会の総括編—



2012年2月出版

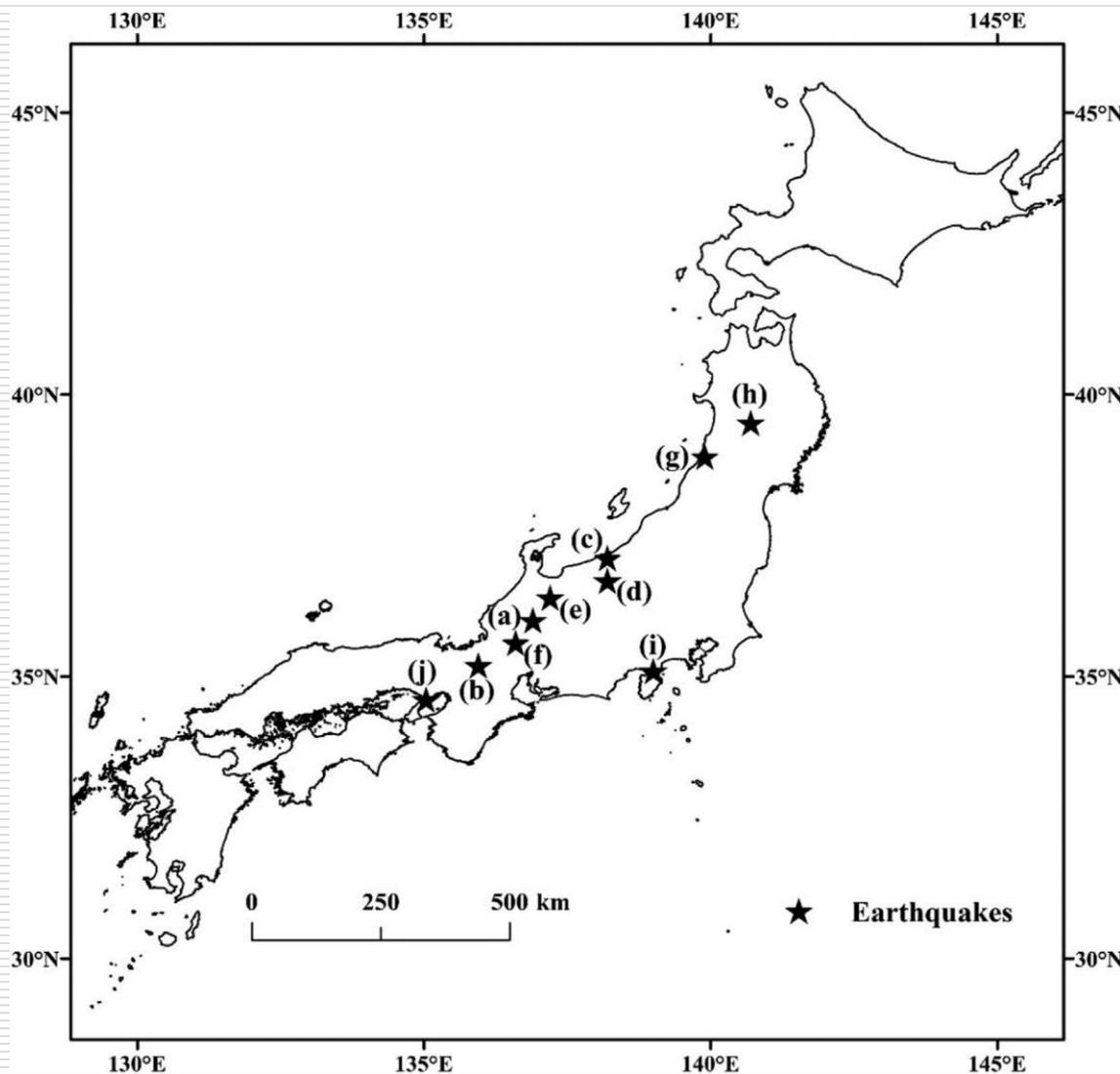


社団法人日本地すべり学会
The Japan Landslide Society

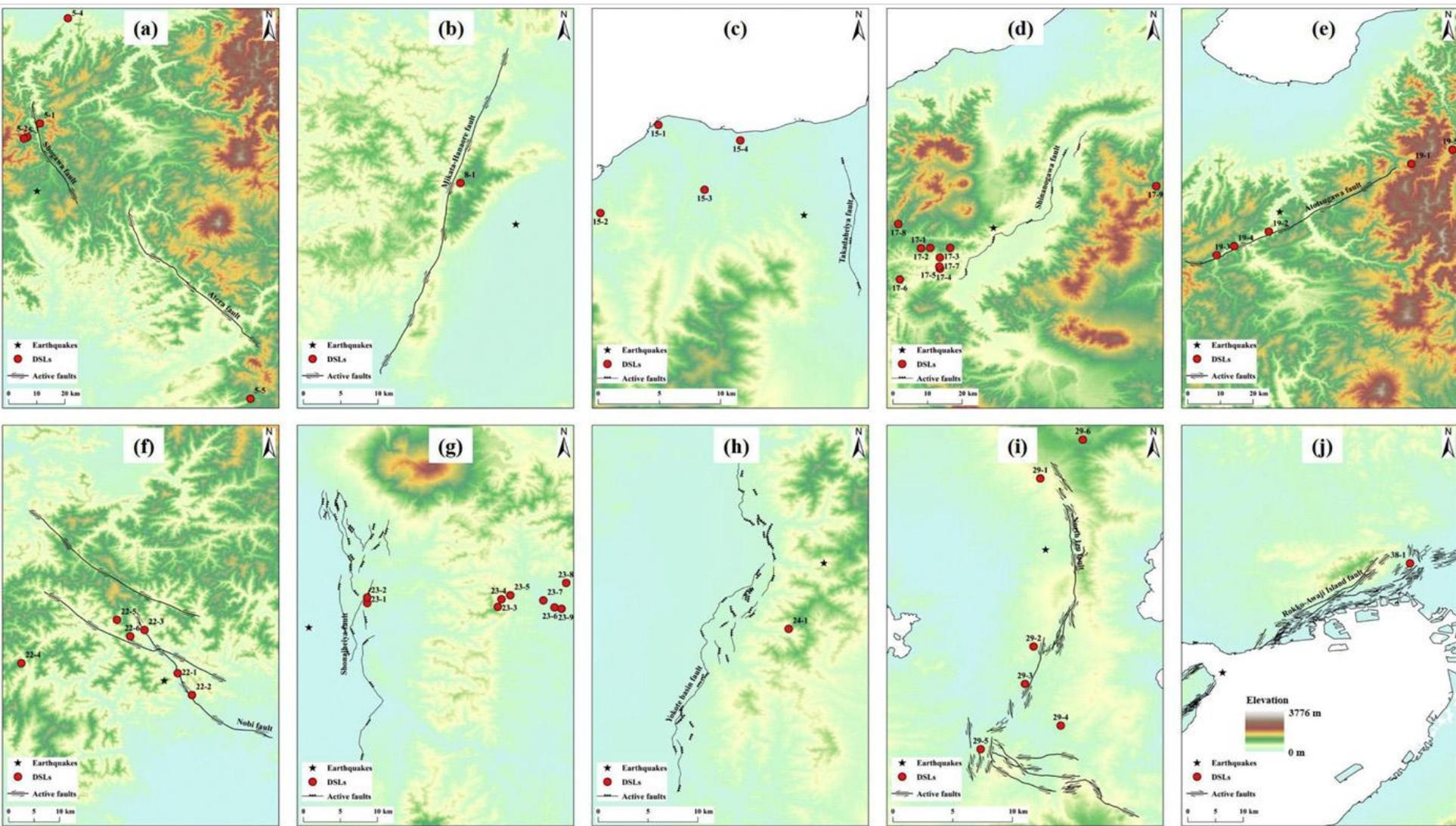
表 2.1.1 地震に起因した大規模土砂移動一覧表

カテ番号	地震の特性			大規模土砂移動と地震との関係										大規模土砂移動の特性						天然ダムの形成		作成者													
	地震名	地震発生日年		M	震源深度 H1 (km)	発生タイプ	最大震度 S1	土砂移動個所名	信頼度	緯度	経度	位置精度	崩壊発生 H	誘因	地震点 S2	震央距離 D1 (km)	断層距離 D2 (km)	面積 A1 (m ²)	土砂量 V1 (m ³)	長さ L (m)	幅 W (m)		斜面角	傾斜 J (度)	比高 D (m)	地質	形成の有無	淡水高 H2 (m)	淡水量 V3 (m ³)	決壊時期					
0-1		(先史時代)																																	
0-2	(先史時代)																	6.5E+06	2.0E+08	3600	1000	凹型谷	5	320	新第三紀正常堆積物	無					中里裕臣				
0-3	(先史時代)																	1.4E+06	7.7E+07	2200	700	凹形谷	24	1000	付加複合体(石灰岩など)	有					小嶋 智				
0-4	(先史時代)																	9.4E+05	1.3E+07	1000	1000		15	200	新第三紀火山岩類	有					水田秀尚				
0-5	(先史時代)	8090±60BP																3.3E+05	3.7E+07	900	700		7	170	新第三紀火山岩類	有		規模は不明			水田秀尚				
0-6	(先史時代)																	8.8E+05	3.0E+07	1100	800	凸型直線	23	450	新第三紀火山岩類	有	60	2.1E+06	不明		神原規也				
0-7	(先史時代)																			9000	11km		1		新第三紀正常堆積物	不明					井口 隆				
1-1	和歌山	715.7.4	和歌八年五月二十五日	6.5~7.5		直下型														820	730	凸型谷			付加複合体	有			数10日後		今村隆正				
2-1	関東諸国	818.8.	弘仁九年七月	≥7.5		直下型												4.9E+05	6.3E+06	750	1300	直線尾根	40	300	第四紀火山噴出物	無					井上公夫				
2-2																																櫻井正明			
3-1	五畿七道	887.8.22	仁和三年七月三十日	≥7.5		海溝型												6.0E+06	3.5E+08	3500	2250	凸型	30	350	第四紀火山噴出物	有	130	1.3E+09	303日後		井上公夫				
4-1	越後西部	1502.1.28	文龜元年十二月十日	6.5~7.0		直下型												1.4E+06	5.0E+07	1200	1200	凸型	31	820	付加複合体	有	150	1.2E+08	不明		井上公夫				
5-1	天正	1586.1.18	天正三年十一月二十九日	7.8±0.1		直下型	VI											5.0E+05	2.5E+07	750	500	凸形尾根	35	900	中古生代火山岩類	有	90	1.5E+08	20日後		井上公夫				
5-2																		3.6E+05	2.4E+06	700	600	直線谷	35	700	古第三紀火山岩類	有	70	6.0E+06	不明		井上公夫				
5-3																		4.4E+05	3.0E+06	1000	800	直線谷	35	700	古第三紀火山岩類	有	90	6.4E+06	不明		井上公夫				
5-4																		7.0E+04	3.0E+07	1000	1000	凸形谷	14	250	新第三紀火山岩類	有	50	2.0E+07	20日後		野崎 保				
5-5																		2.6E+05	1.7E+07	550	650	凸形尾根	25	260	深成岩類	有	50	6.7E+06	数10年後		水田秀尚				
6-1	慶長豊後	1596.09.01	慶長元年閏七月九日	7.0±1.4		直下型												1.0E+05	4.5E+06	400	300		27	210	第四紀火山噴出物						井口 隆				
7-1	慶長会津	1611.12.02	慶長十六年九月二十七日	6.9		直下型												37.5294	139.6806																
7-2																		37.5483	139.6851																
7-3																		37.5685	139.6944																
7-4																		37.6265	139.7106																
7-5																		37.7539	139.8542																
8-1	寛文近江若狭	1662.6.16	寛文二年五月一日	7.14~7.5		直下型	VI											6.0E+05	2.4E+07	1000	800	直線尾根	43	650	付加複合体	有	110	5.9E+06	14日後		井上公夫				
9-1	天和日光	1683.6.18	天和三年五月二十四日	6.0~6.5		直下型																													
9-2		1683.6.18																	7.0E+05	2.8E+07	2500	400	凸形尾根	30	1400	第四紀火山噴出物	不明					櫻井正明			
9-3		1683.10.20	天和三年九月一日	7.0±1.4		直下型	VI											1.3E+05	3.8E+06	450	400	凸形直線	40	220	新第三紀火山噴出物	有	70	6.4E+07	40年後		櫻井正明				
10-1	宝永羽後津軽	1704.5.27	宝永元年四月二十四日	7.0±1.4		沿岸直下	VI											3.6E+06	1.1E+08	800	2800	直線直線	35	620	新第三紀火山岩類	有	-	-	現存		古谷尊彦				
11-1	宝永	1707.10.28	宝永四年十月四日	8.6		海溝型	VI											1.2E+06	1.2E+08	1000	1800	凹型谷型	30	1100	付加複合体	有	30	4.7E+06	除々に埋砂		井上公夫				
11-2																		1.0E+05	5.0E+06	950	350	直線直線	25	450	新第三紀正常堆積物	有	30	1.4E+07	3日後		長谷川陽一				
11-3																		3.3E+05	8.5E+06	1000	500	凸型	31	470	付加複合体	有					藤原 彰				
11-4																																			
11-5																																			
12-1	正徳信濃小谷	1714.4.28	正徳四年三月十五日	6.5		直下型	VI											1.3E+05	4.4E+06	450	250	凸形尾根	35	270	付加複合体	有	18	2.9E+07	4日後		井上公夫				
13-1	三河伊那	1718.8.22	享保三年七月二十六日	7.0±1.4		直下型																													
14-1	渡島大島	1741.8.17	寛保元年七月十八日	6.9		直下型	不明												4.0E+04	8.0E+05	285	310	凸型直線	230	1850	付加複合体	有	20	9.3E+05	約1週間後		今村隆正			
15-1	宝暦高田	1751.5.21	宝暦元年四月二十六日	7.0~7.4		直下型	VI												1.7E+07	2.4E+09	5000	7000	直線-凹型尾根	23	1850	第四紀火山噴出物	無					田近 淳			
15-2																																			
15-3																																			
15-4																																			
16-1	寛政島原	1792.5.21	寛政四年四月一日	6.4		直下型	VI																												

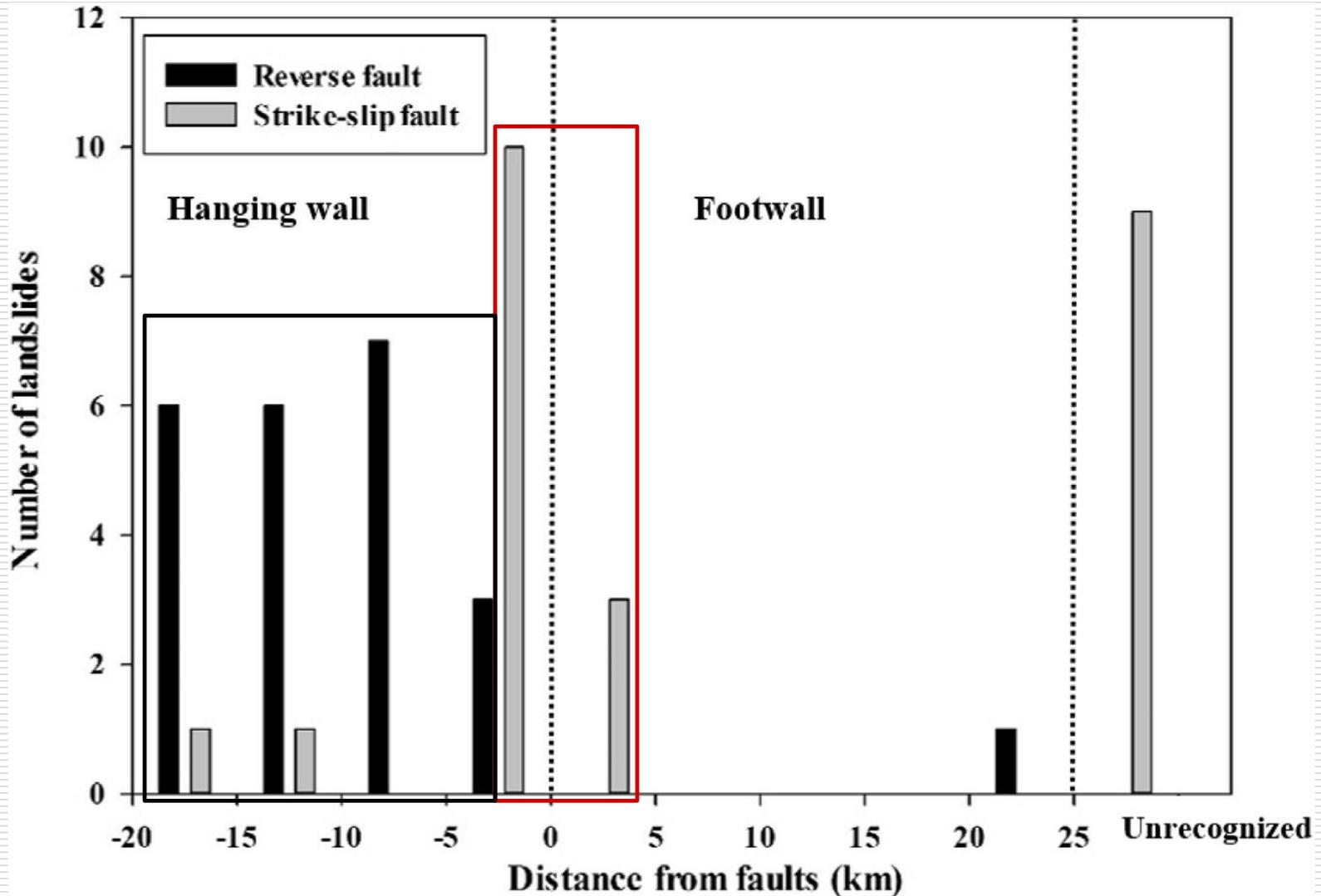
1586~1995年間日本の地震與深層崩塌分布



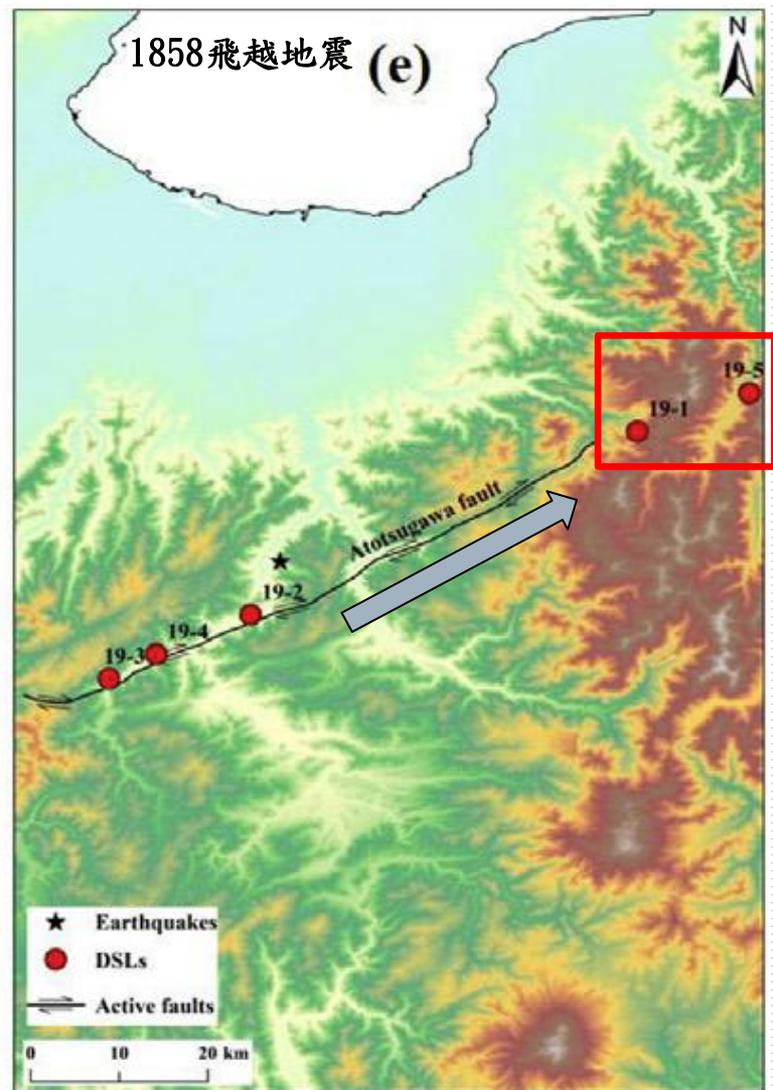
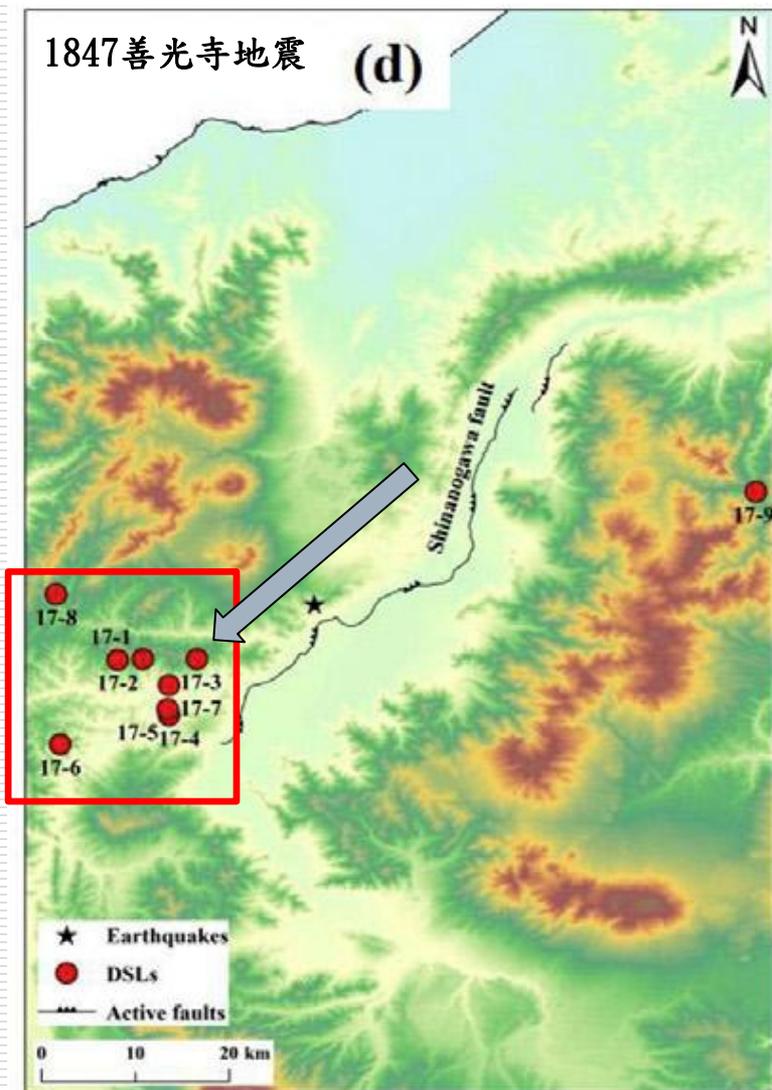
- (a) 1586 天正地震
- (b) 1662 近江若狭地震
- (c) 1751 高田地震
- (d) 1874 善光寺地震
- (e) 1858 飛越地震
- (f) 1891 濃尾地震
- (g) 1894 庄内地震
- (h) 1896 陸羽地震
- (i) 1930 北伊豆地震
- (j) 1995 兵庫縣南部地震



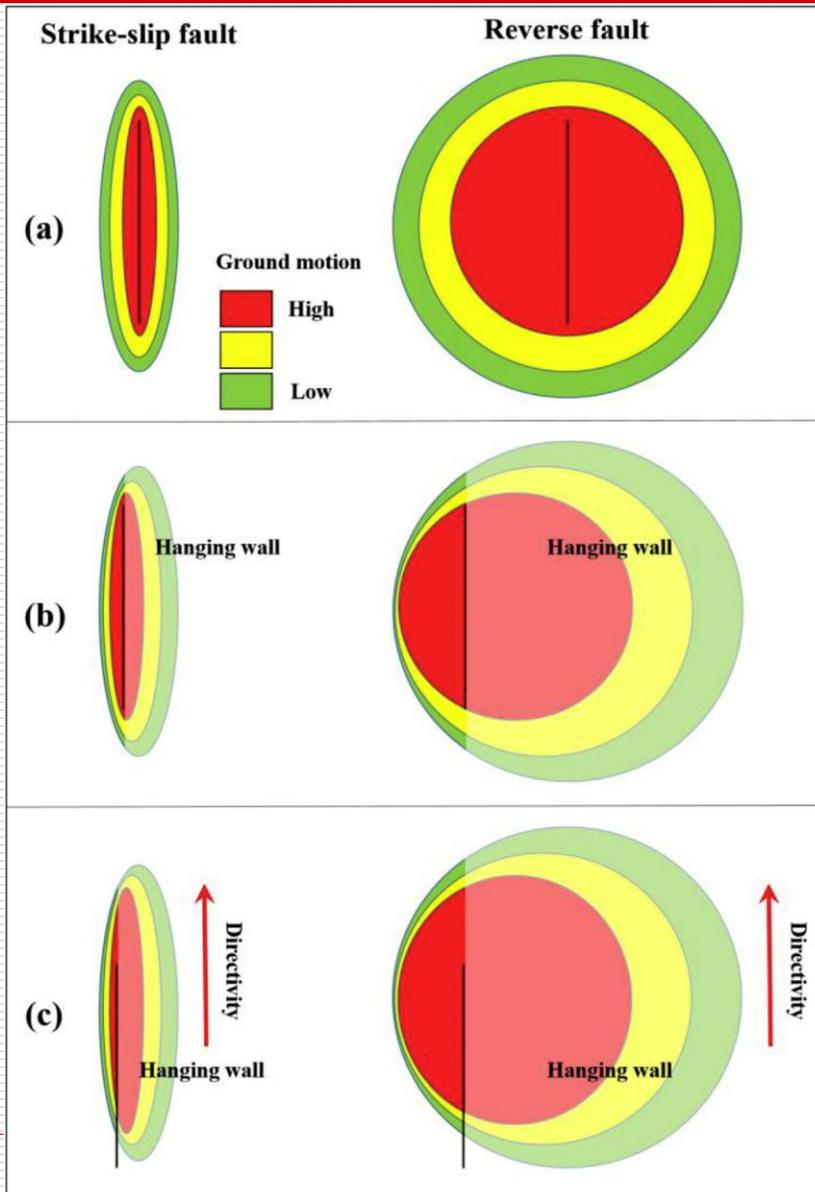
不同斷層型態與上盤/下盤對崩塌分布的影響



地震破裂方向(seismic directivity)對崩塌分布的影響



地震誘發崩塌的分布特徵

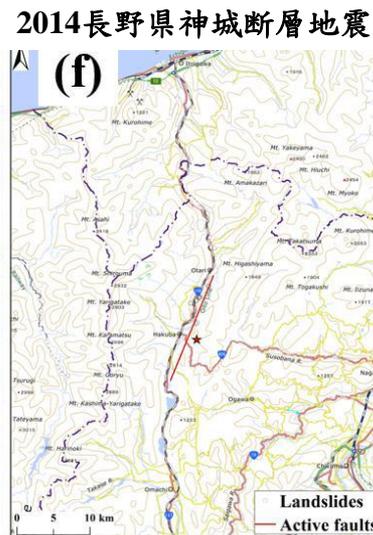
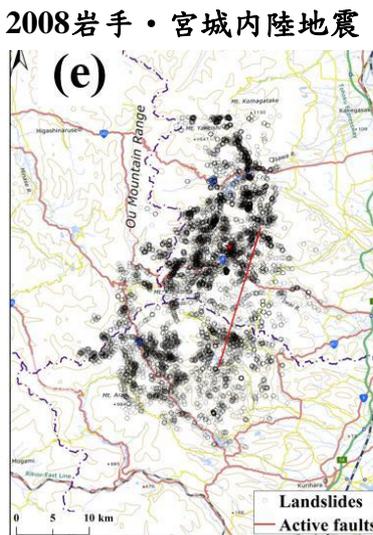
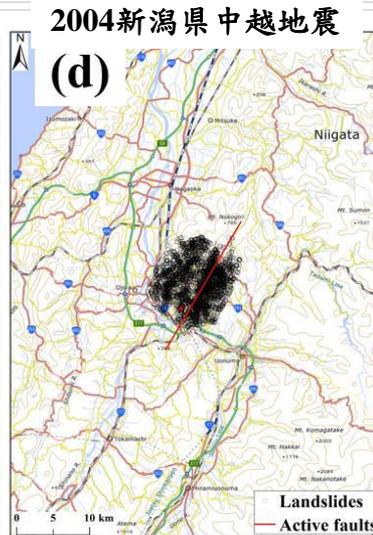
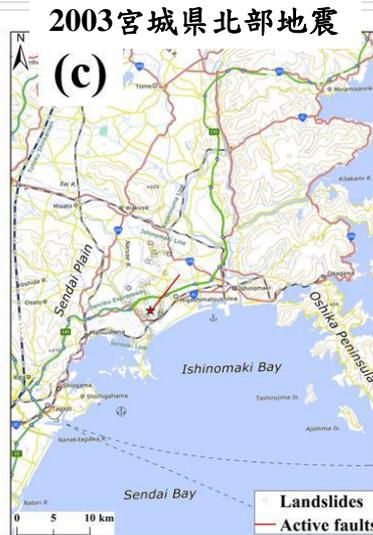
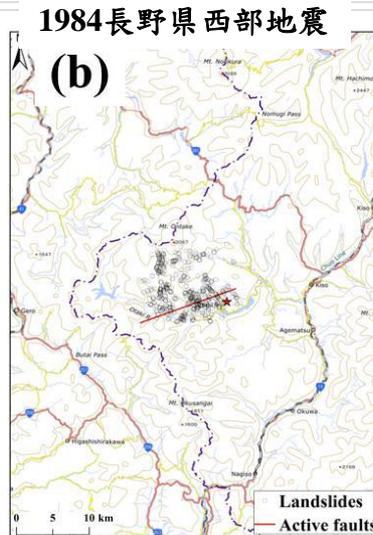


□ 活動斷層型態

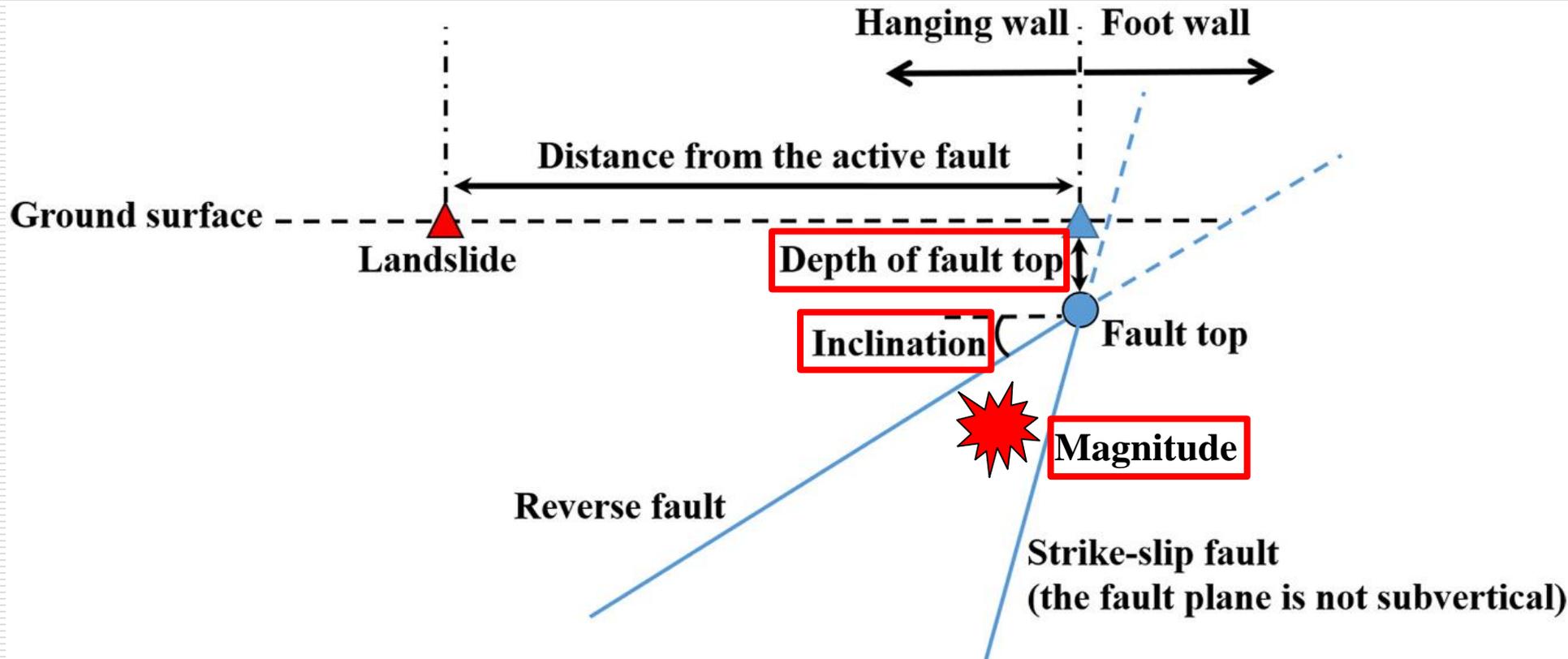
□ 上盤與下盤

□ 地震破裂方向

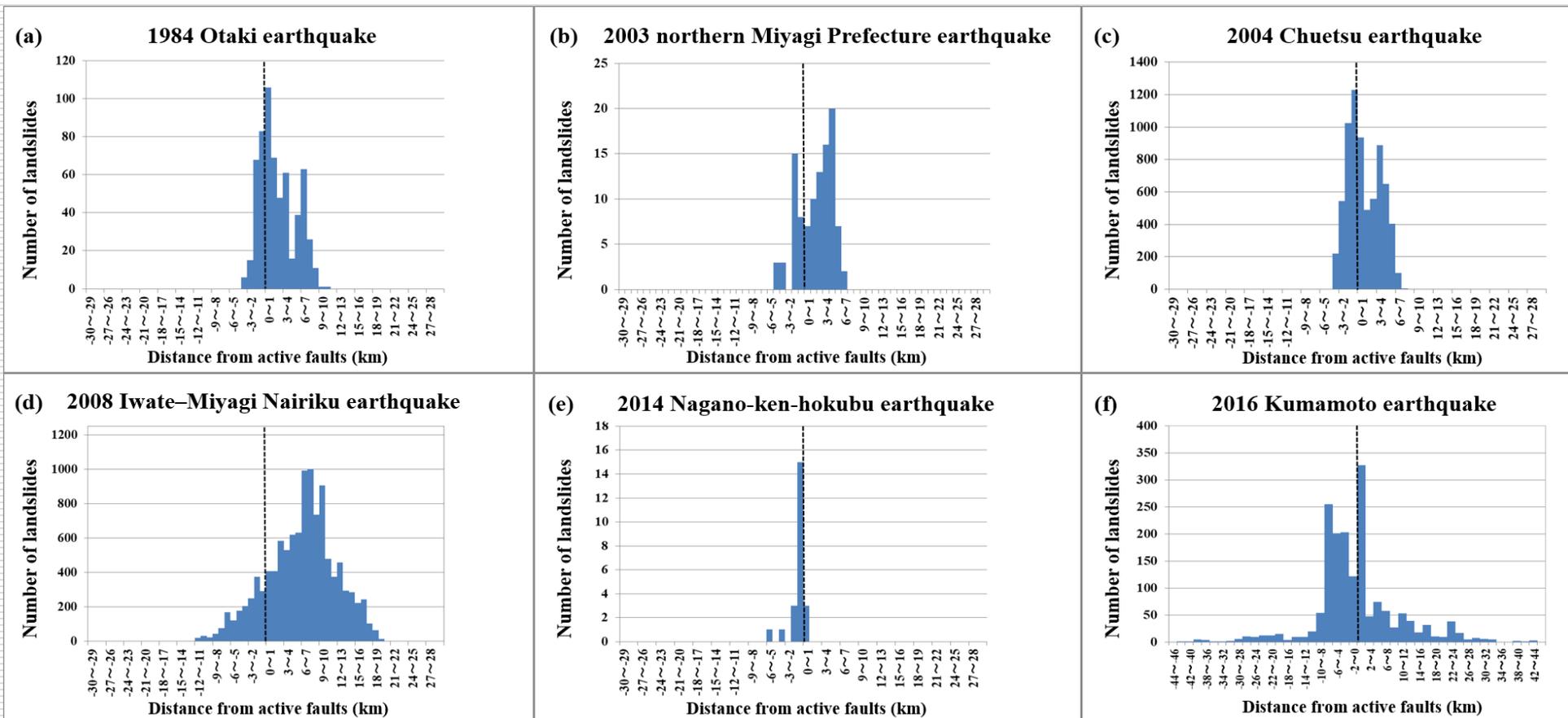
建立以活動斷層參數為核心的崩塌潛勢分布模型



活動斷層特徵參數示意圖

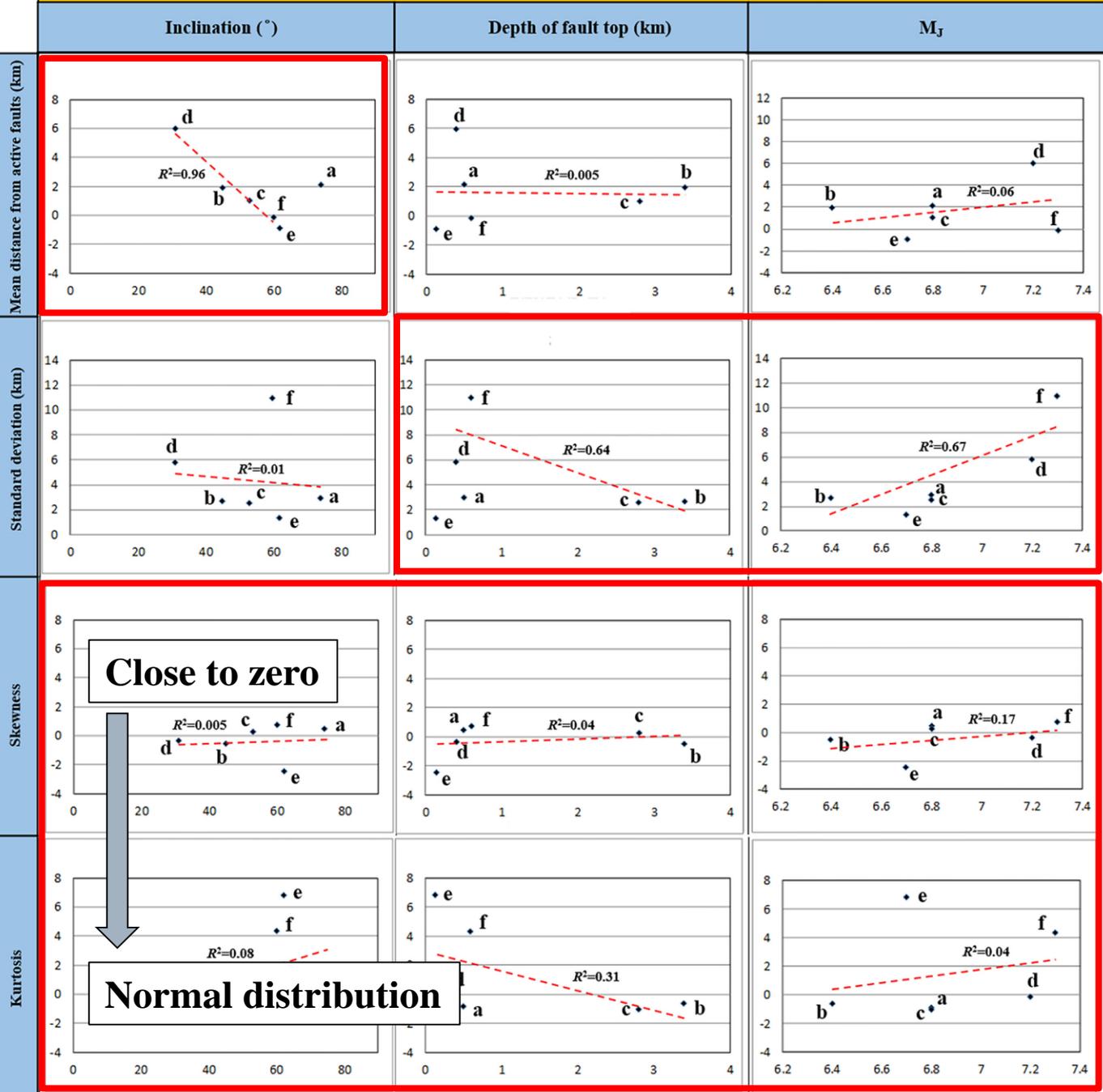


崩塌距離活動斷層的分布統計



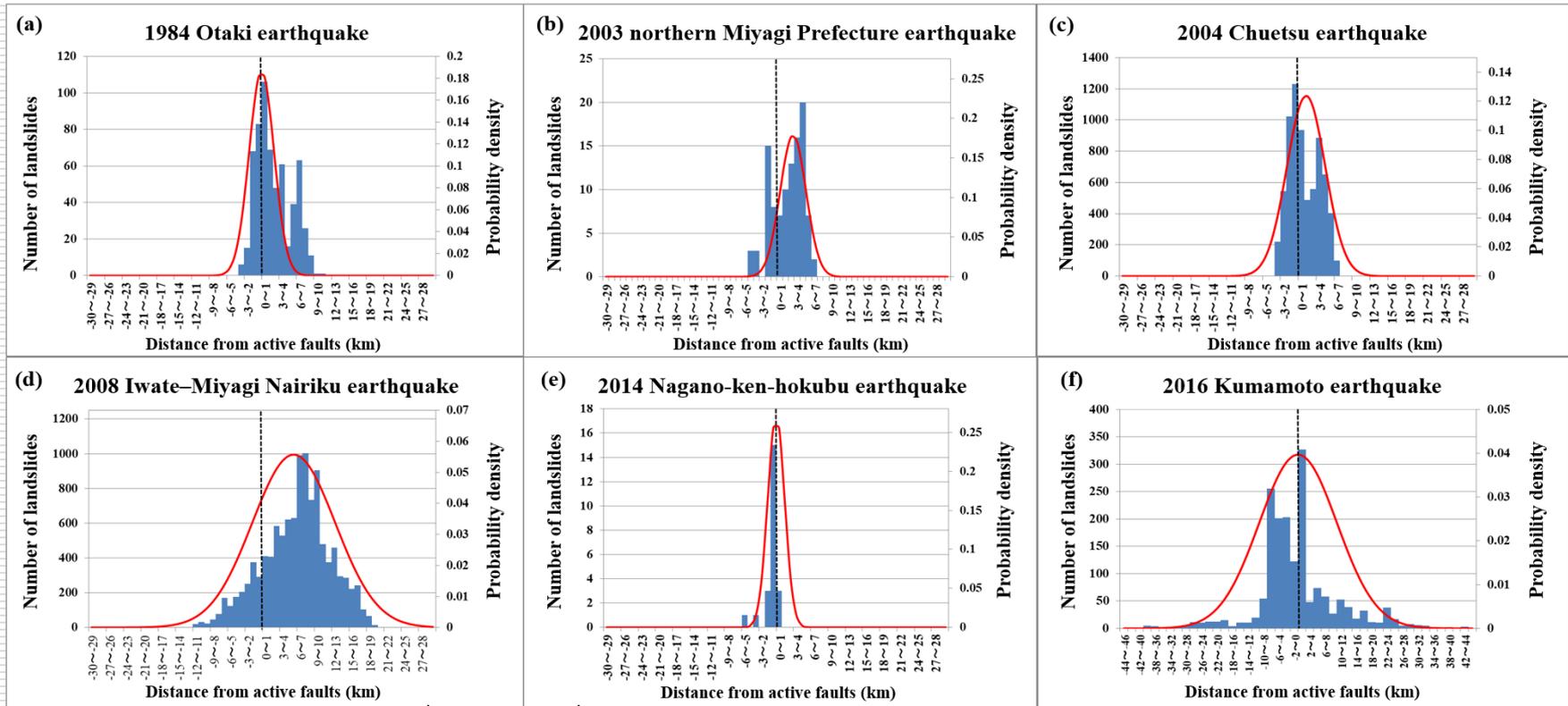
Characteristics of the active fault (x-axis)

Landslide distribution (y-axis)



Normal distribution

常態分佈



$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$\begin{cases} \mu = -0.188 \times I + 11.280 & (I \leq 60^\circ) \\ \mu = 0 & (I > 60^\circ) \end{cases}$$

$$\sigma = 0.472 \times D + 1.701 \times 10^{-15} \times E + 0.202$$

$$\log E = 4.8 + 1.5M_J$$

σ : 標準差 (km)

μ : 平均距離 (km)

I : 斷層傾角($^\circ$)

D : 斷層上緣深度(km)

E : 地震能量(J)

M_J : 日本氣象廳地震規模

兩個主要問題

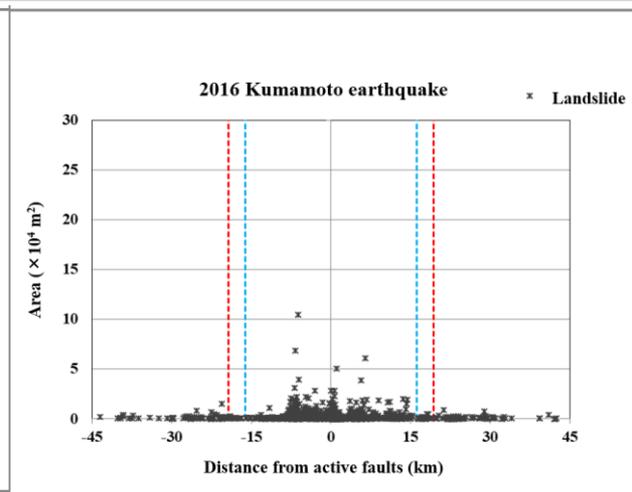
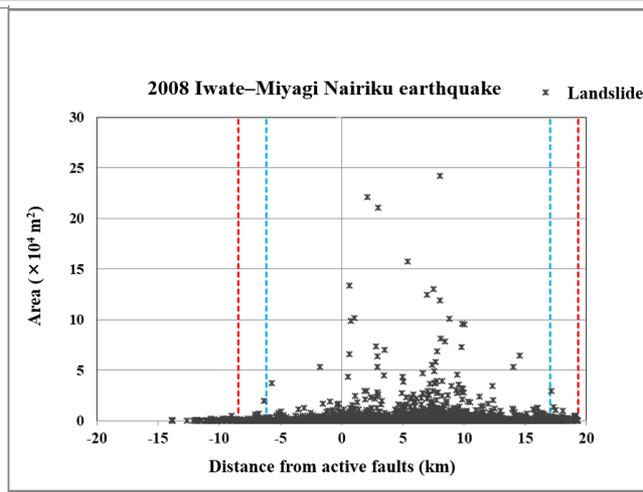
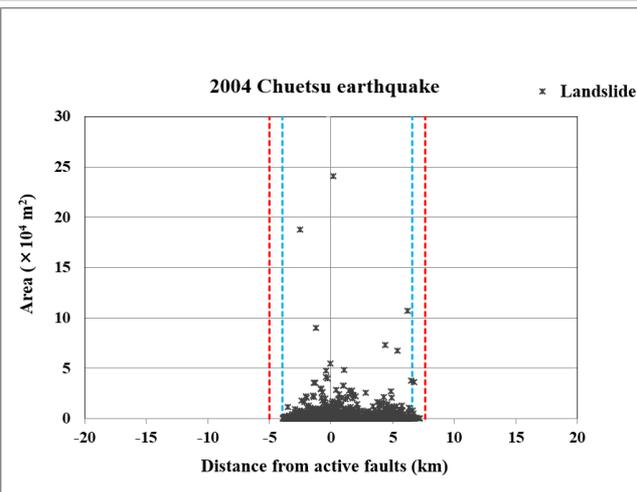
□ 如何推定未來地震的規模？

✓ 根據「活動斷層長度與地震規模的經驗關係」進行推估：

$$\log L = 0.6M_j - 2.9 \quad (\text{Matsuda, 1975})$$

□ 如何決定距離活動斷層的適當範圍？

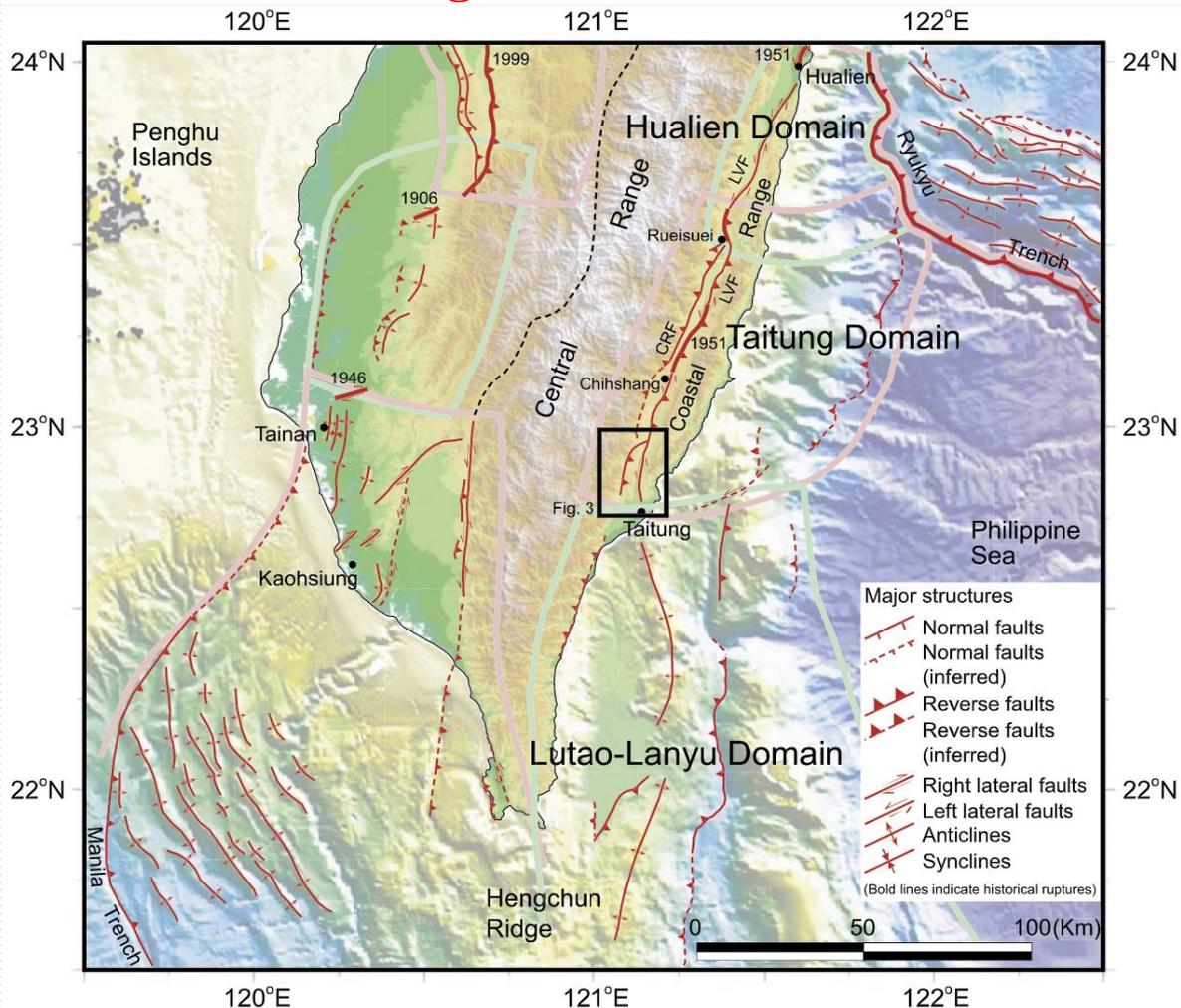
$$H_A = \mu \pm 1.96\sigma$$



2022年台東地震

LVF: Longitudinal Valley fault

CRF: Central Range fault



□ 2022年台東地震的前震與餘震主要沿NNE-SSW方向分布

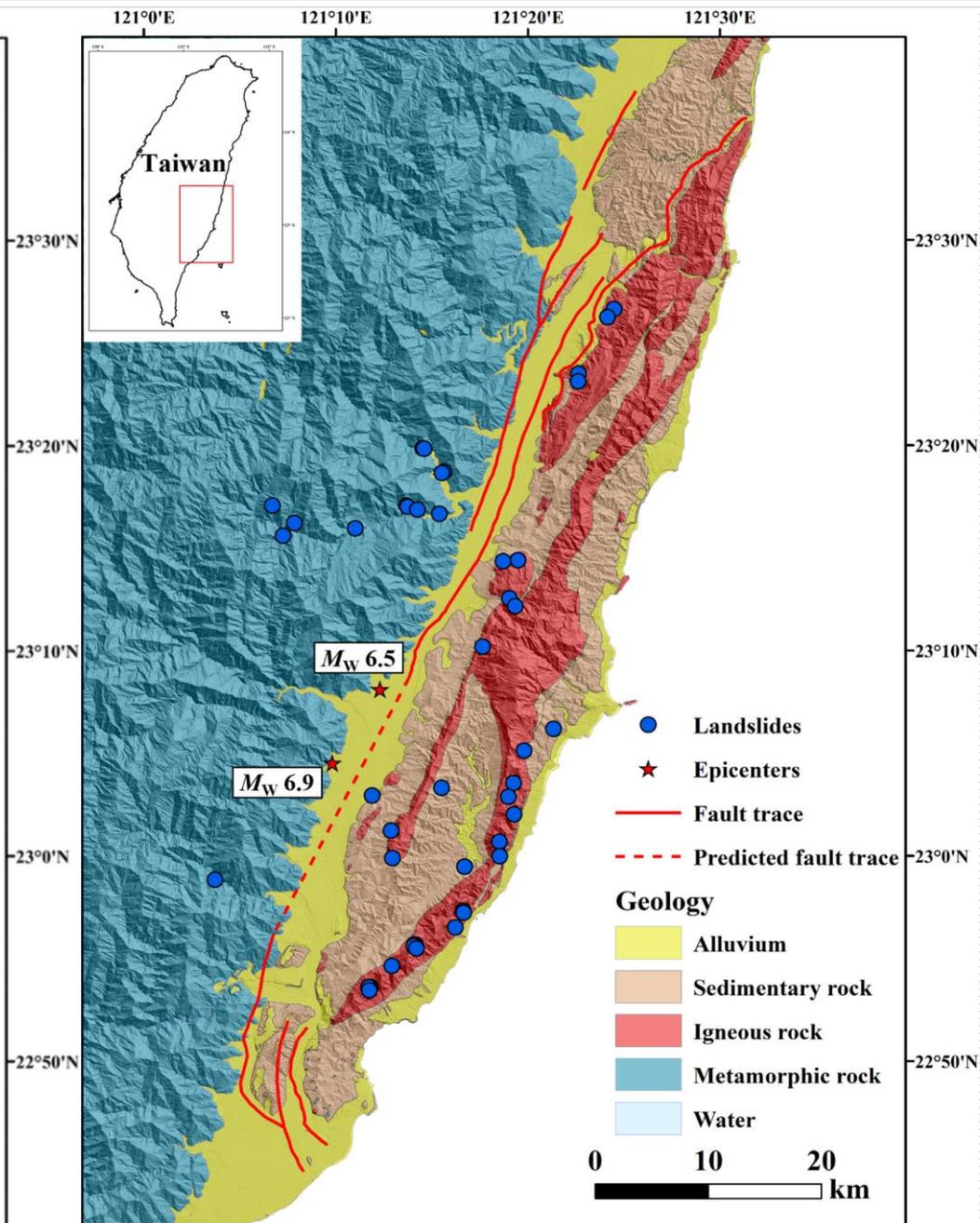
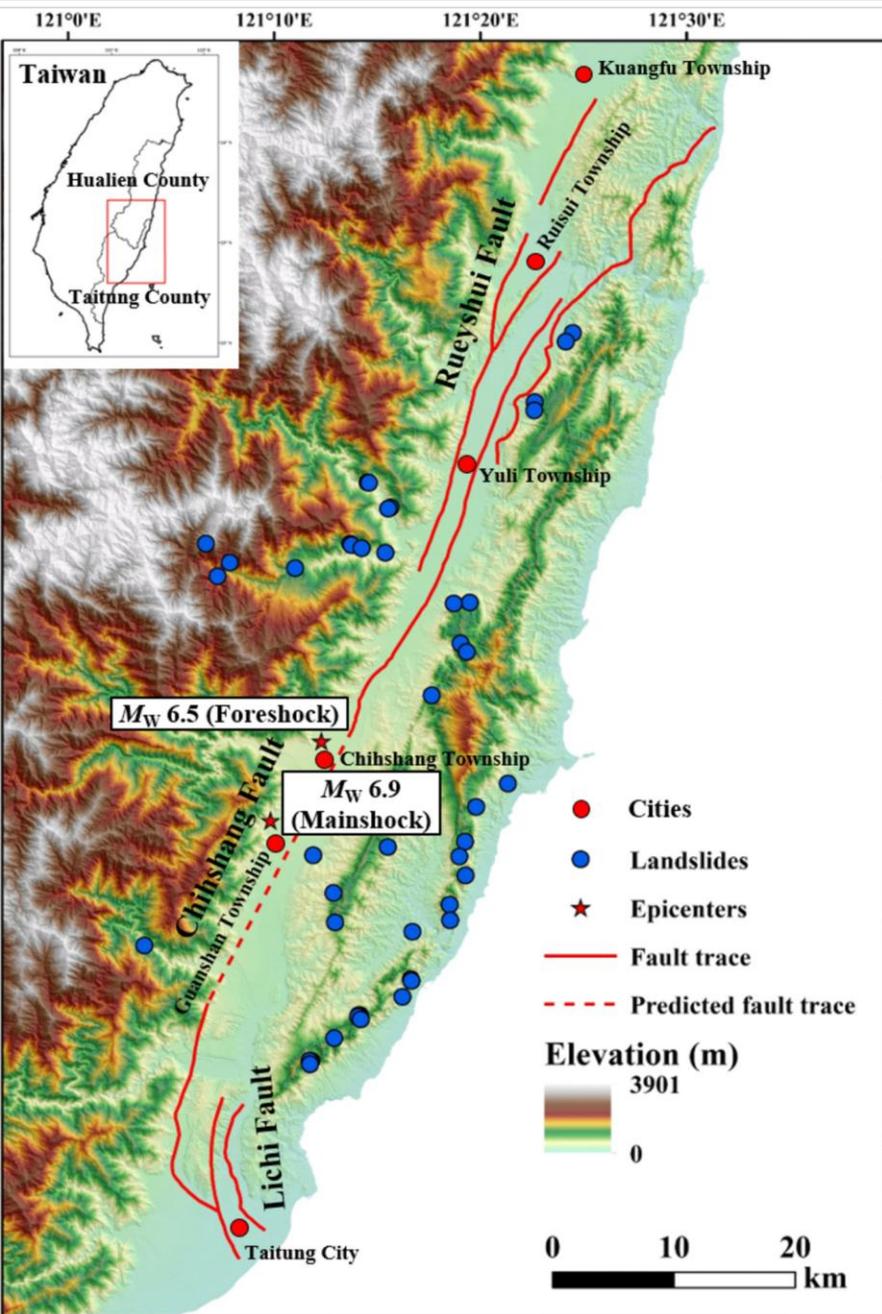
□ 最大前震與主震皆屬走滑斷層型，並帶有逆衝分量

□ 斷層面向西傾

崩塌資料

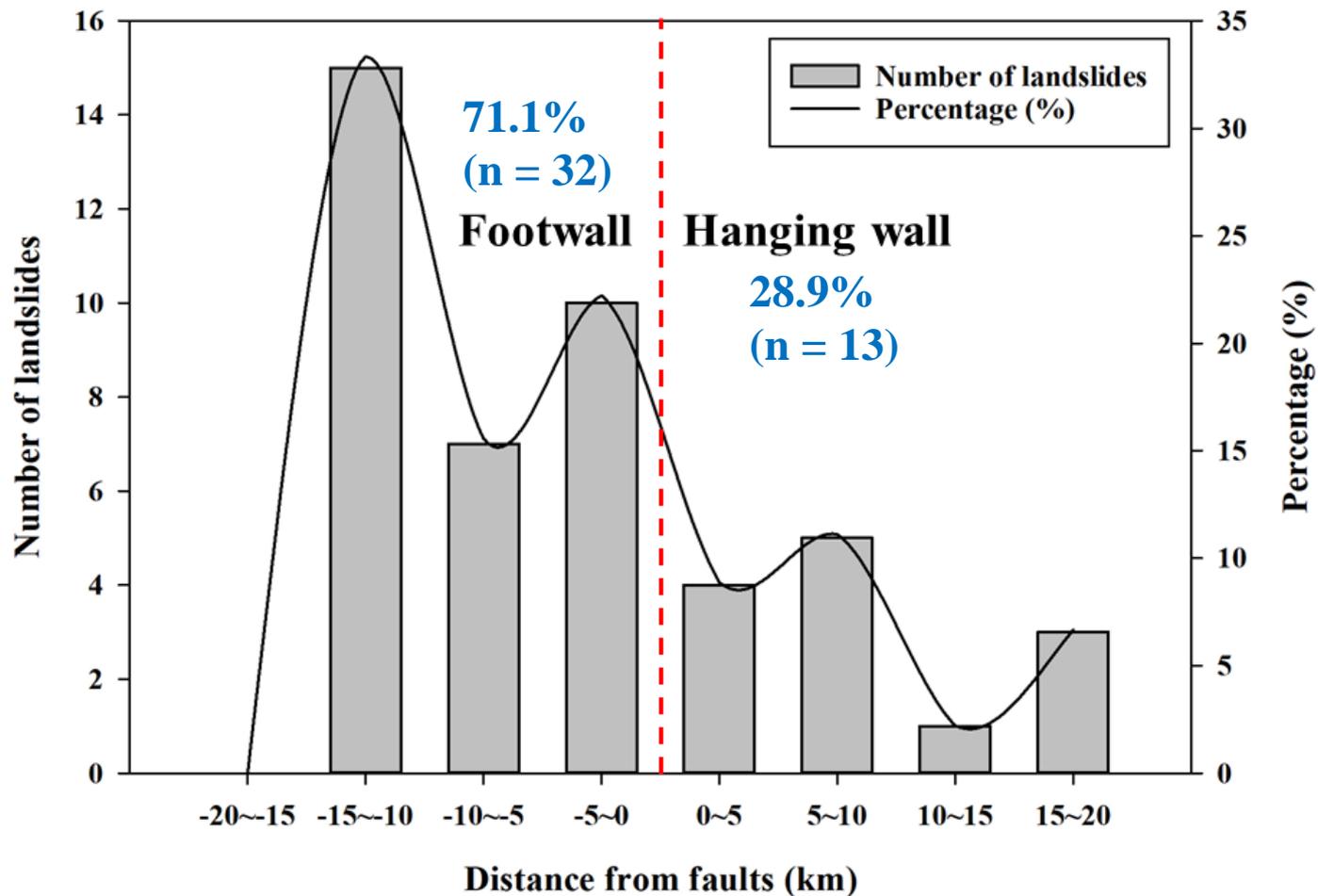
- 由農業部農村發展及水土保持署利用多時期衛星影像判釋本次地震所誘發的崩塌。使用的影像資料包括 Sentinel-2、SPOT-6/7及Pleiades，比對震前與震後的影像變化以辨識崩塌區域
- 共判釋出45處崩塌地，面積介於 $1.16 \times 10^3 \sim 2.74 \times 10^4 \text{ m}^2$ 。總崩塌面積約為 $1.97 \times 10^5 \text{ m}^2$





崩塌與活動斷層的關係

□ 崩塌距離分布介於0.82–17.65 km，平均距離為–3.55 km



崩塌與活動斷層的關係

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)$$

σ : 標準差 (km)

μ : 平均距離 (km)

I : 斷層傾角($^{\circ}$)

D : 斷層上緣深度(km)

E : 地震能量(J)

M_J : 日本氣象廳地震規模

$$\begin{cases} \mu = -0.188 \times I + 11.280 & (I \leq 60^{\circ}) \\ \mu = 0 & (I > 60^{\circ}) \end{cases}$$

$$\sigma = 0.472 \times D + 1.701 \times 10^{-15} \times E + 0.202$$

$$\log E = 4.8 + 1.5 M_J$$

$$\mu = -3.55 \text{ km}$$

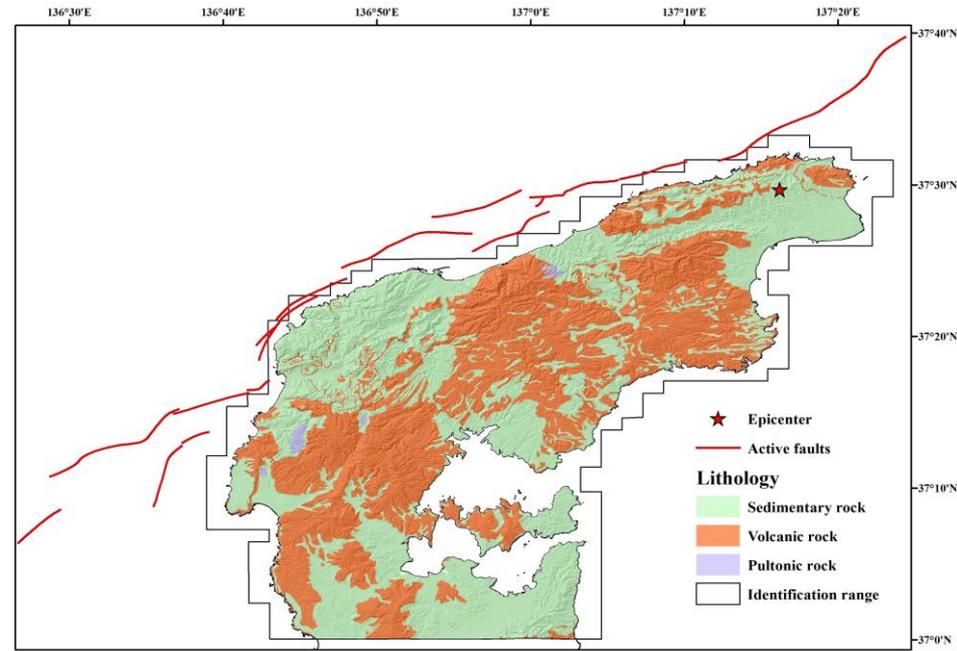
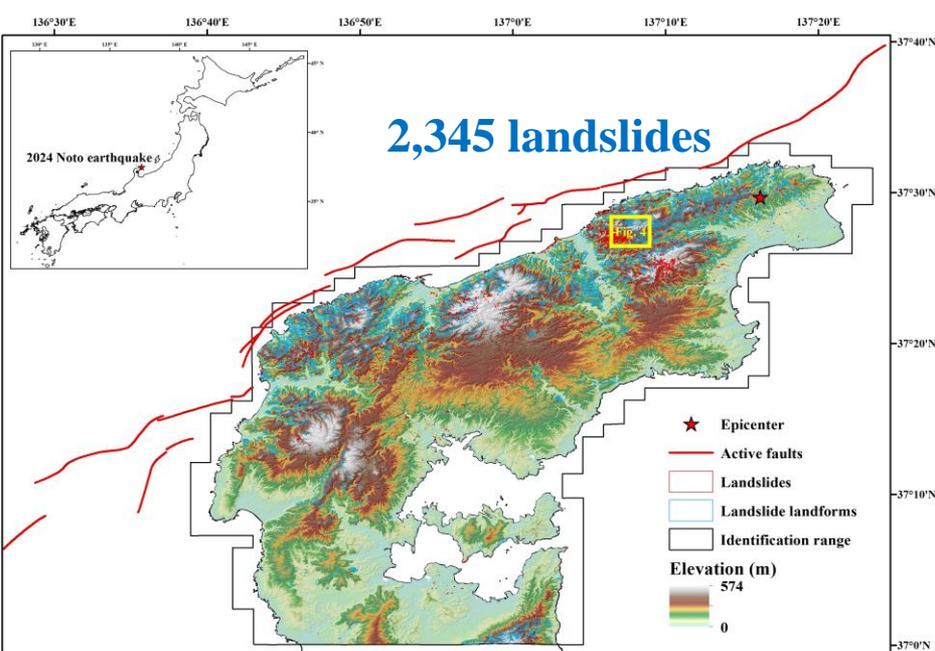
$$\sigma = 8.91 \text{ km}$$

$$D = 0 \text{ (assume)}$$

$$\rightarrow I = > 60^{\circ} \text{ and } M_J = 7.3$$

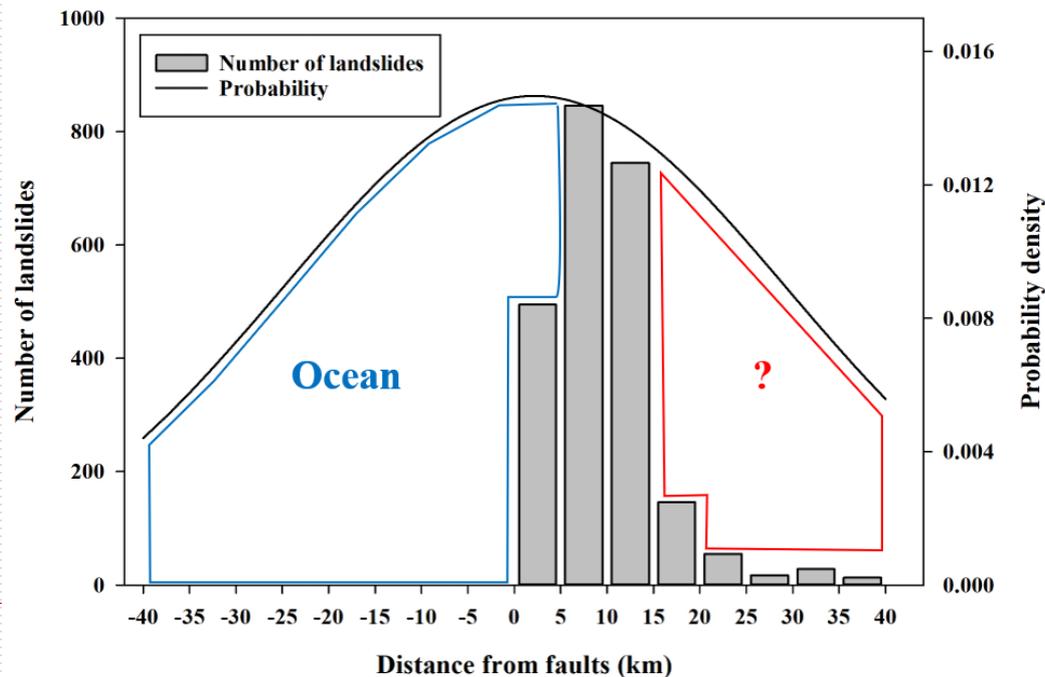
2024年日本能登地震

- ❑ 崩塌資料：日本國土地理院(GSI)利用空照影像判釋震後崩塌分布
- ❑ 活動斷層資料日本產業技術綜合研究所(AIST)之活動斷層資料庫
- ❑ 地震斷層模型：GSI依據GPS基準站觀測與SAR影像分析結果建立震源斷層模型
- ❑ DEM：GSI提供之10公尺DEM
- ❑ 地質圖：AIST製作之1:200,000地質圖



活動斷層與崩塌分布特性

Faults	Length (km)	Width (km)	Inclination (°)	Fault-top depth (km)
Northern	66.8	11.5	49.7	0.1
Central	16.2	20.4	54.9	0.0
Southern	22.0	12.2	40.6	0.1
Average	35.0	14.7	48.4	0.067



崩塌分布與地形特性之關係

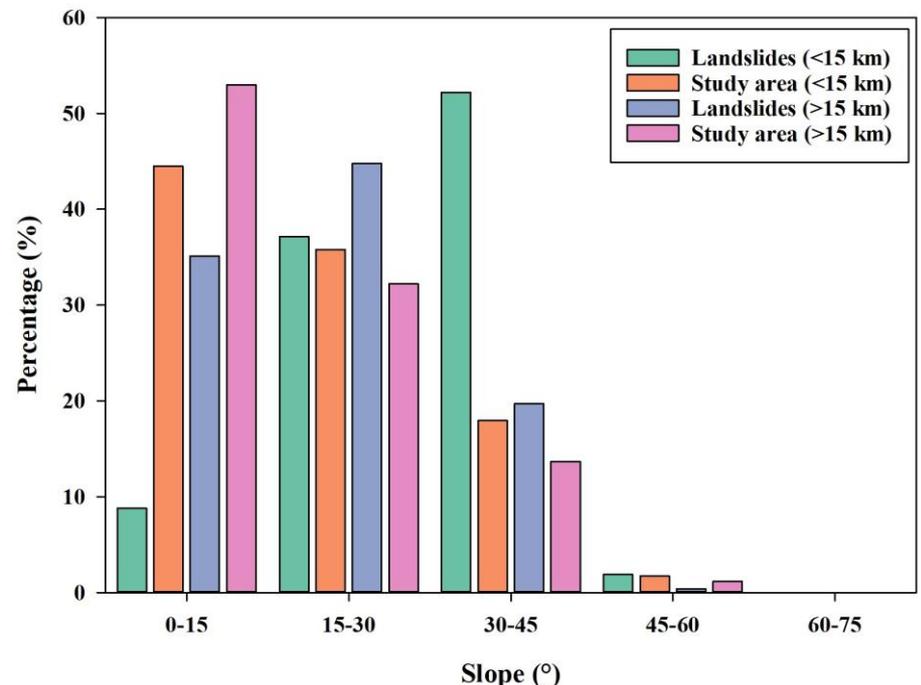
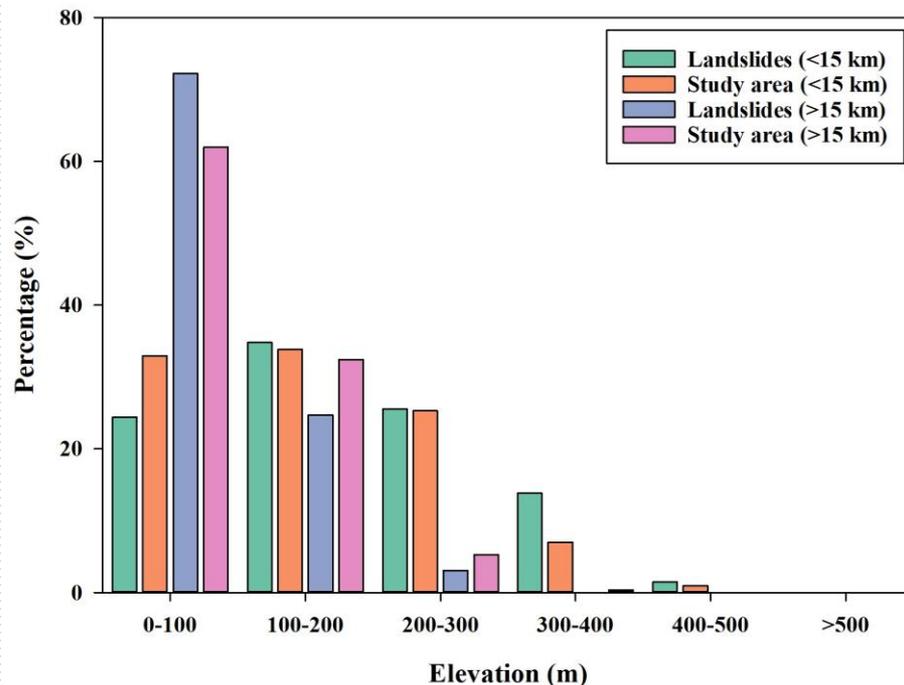
☐ 距離斷層15公里以內

崩塌主要分布於高程100–300公尺、坡度15–45°的地區

☐ 距離斷層15公里以外

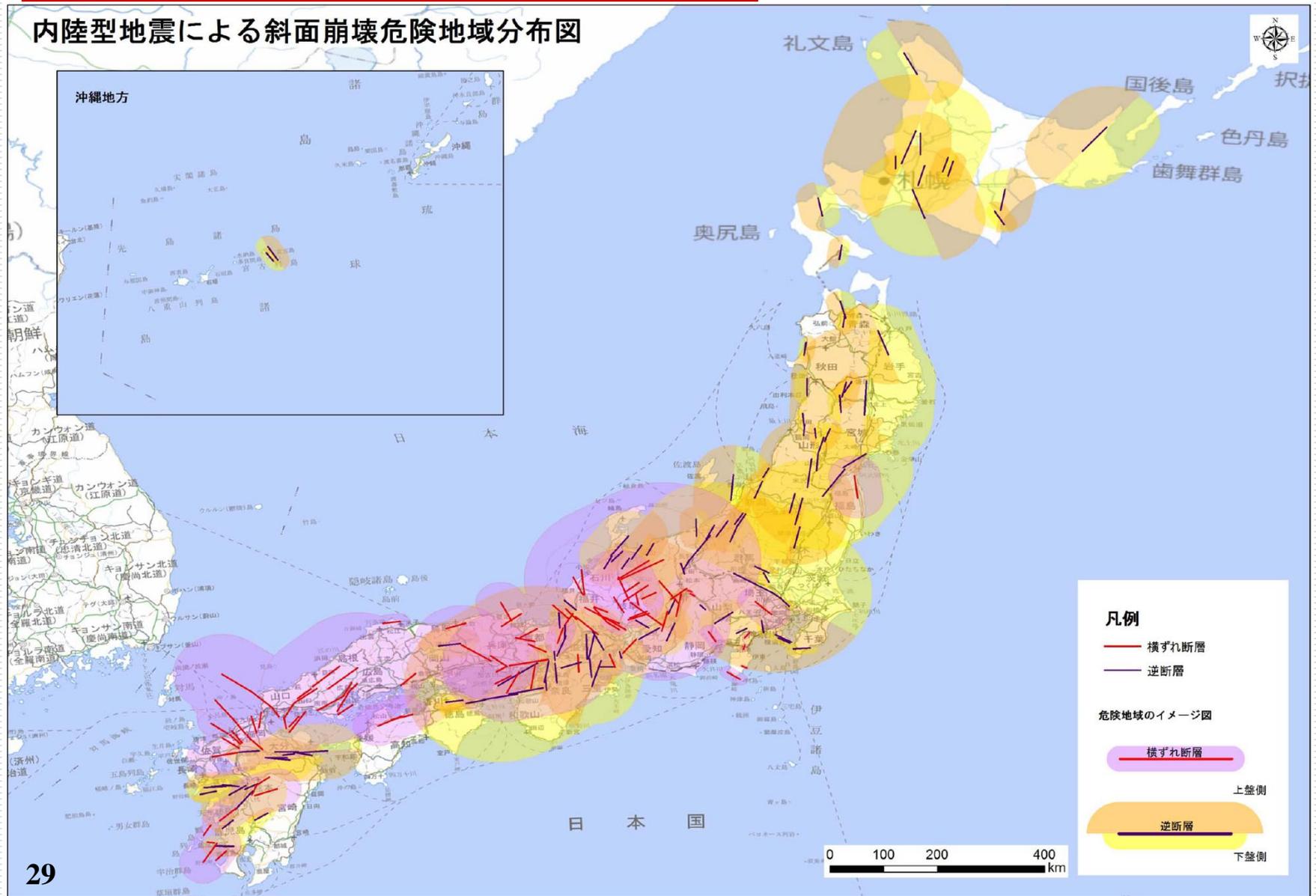
崩塌多集中於高程0–100公尺、坡度0–30°的區域

☐ 距離斷層較遠的區域，其地形高程較低、坡度較緩，崩塌數量明顯減少

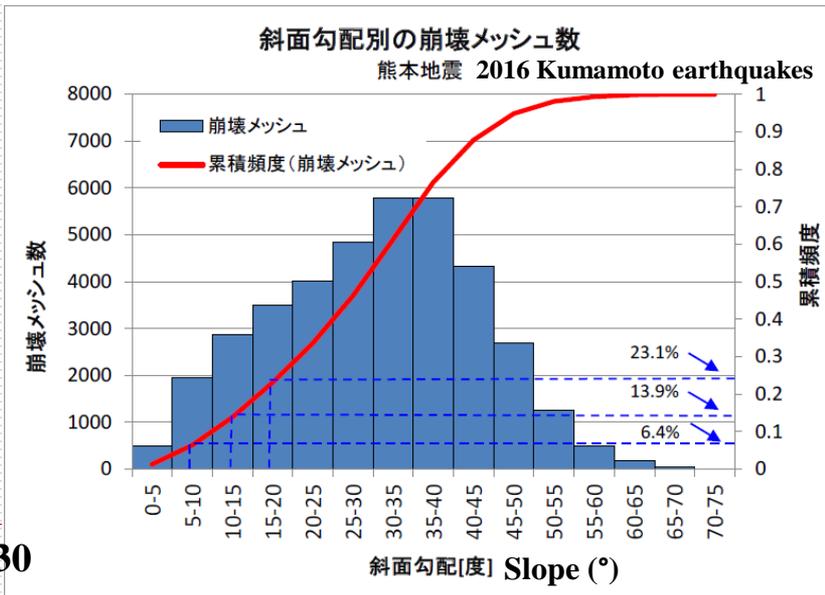
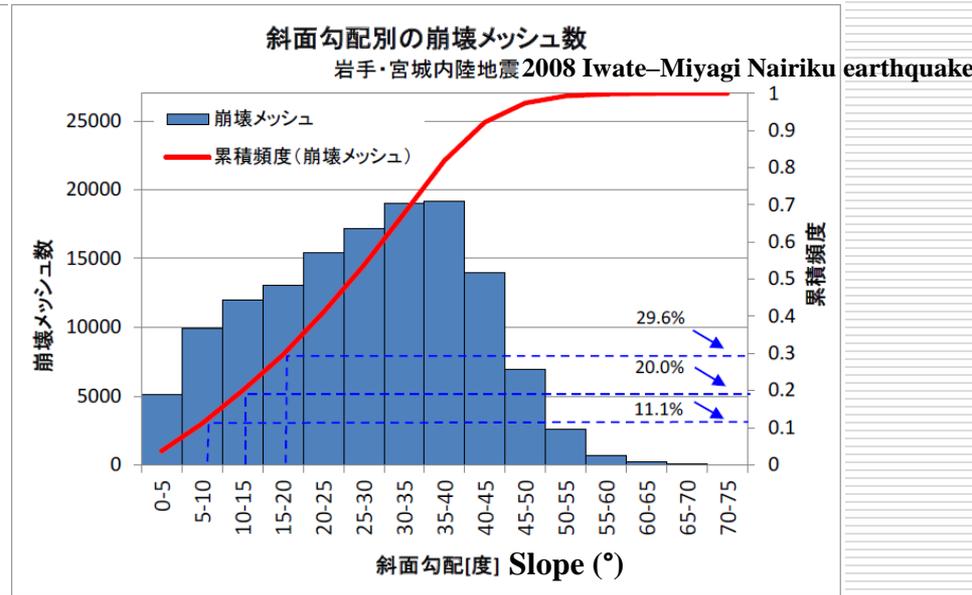
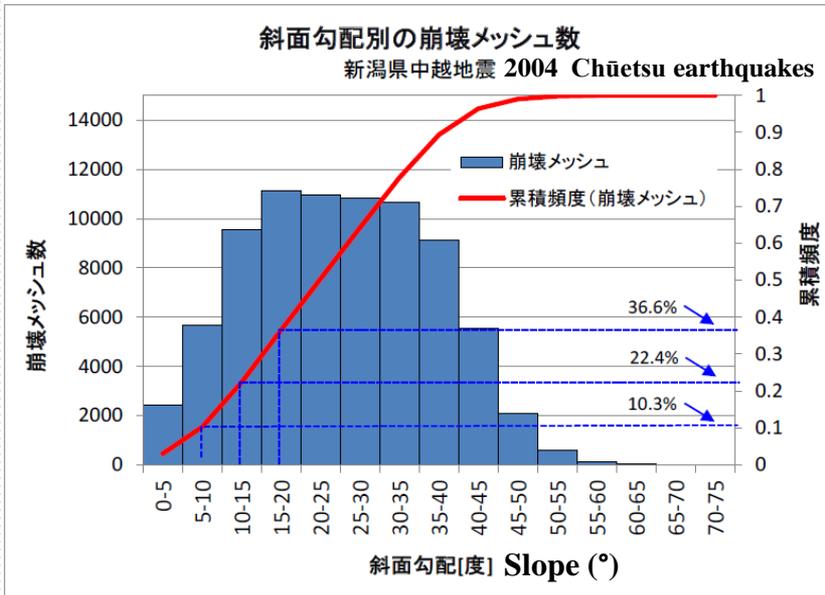


考慮地形條件修正崩塌潛勢模型

内陸型地震による斜面崩壊危険地域分布図



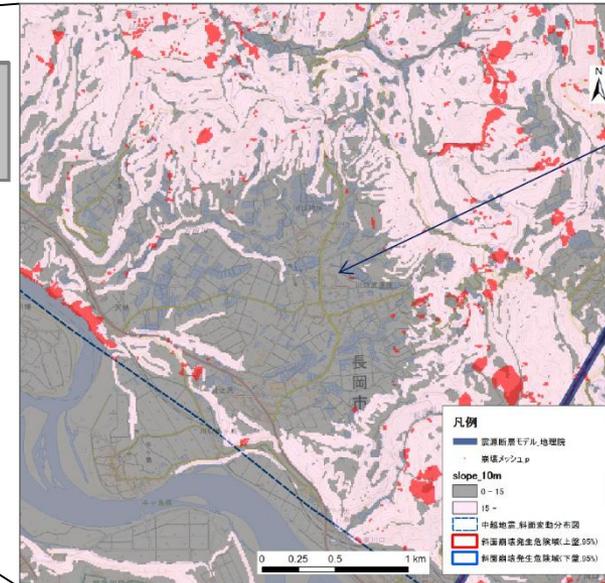
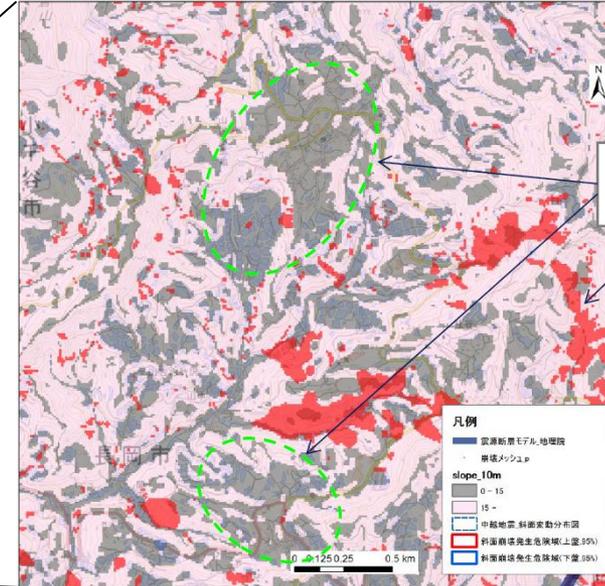
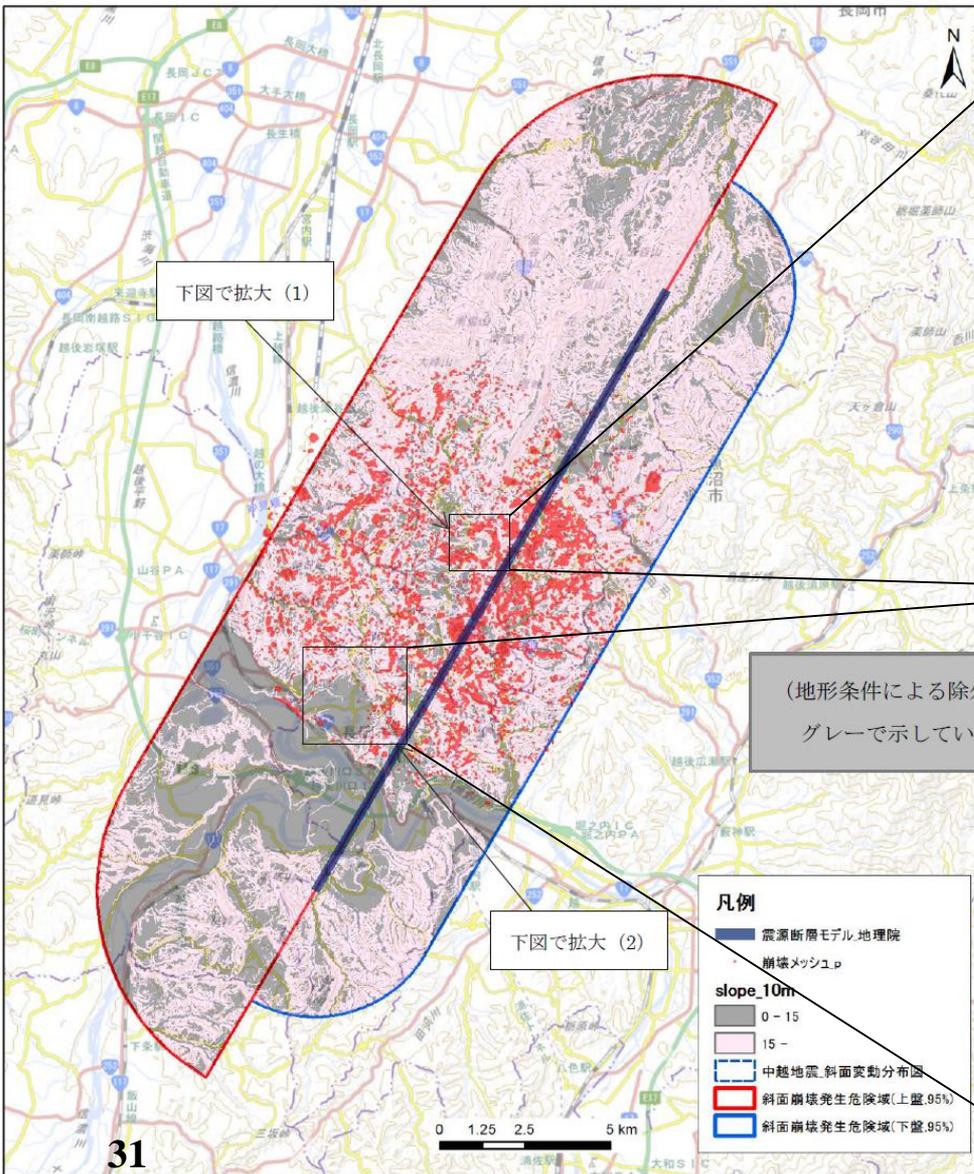
依地形條件設定模型修正閾値



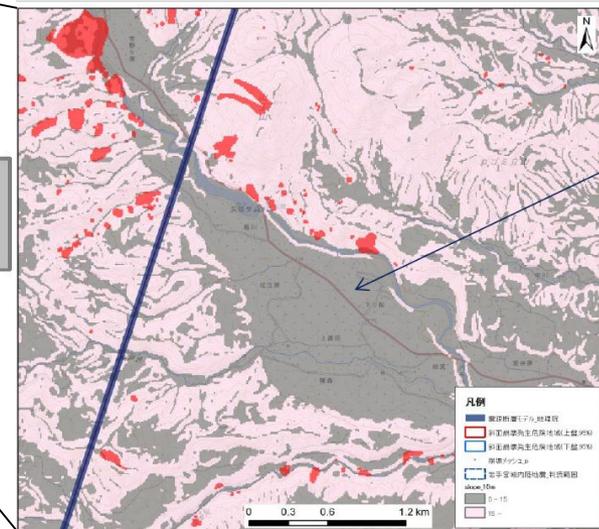
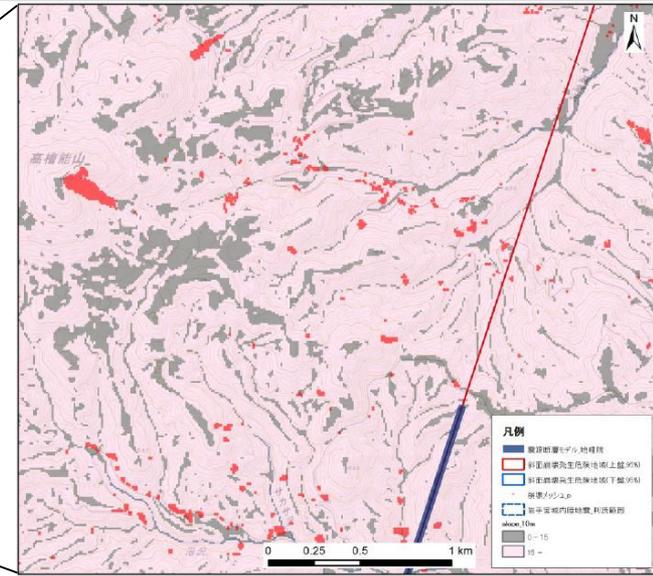
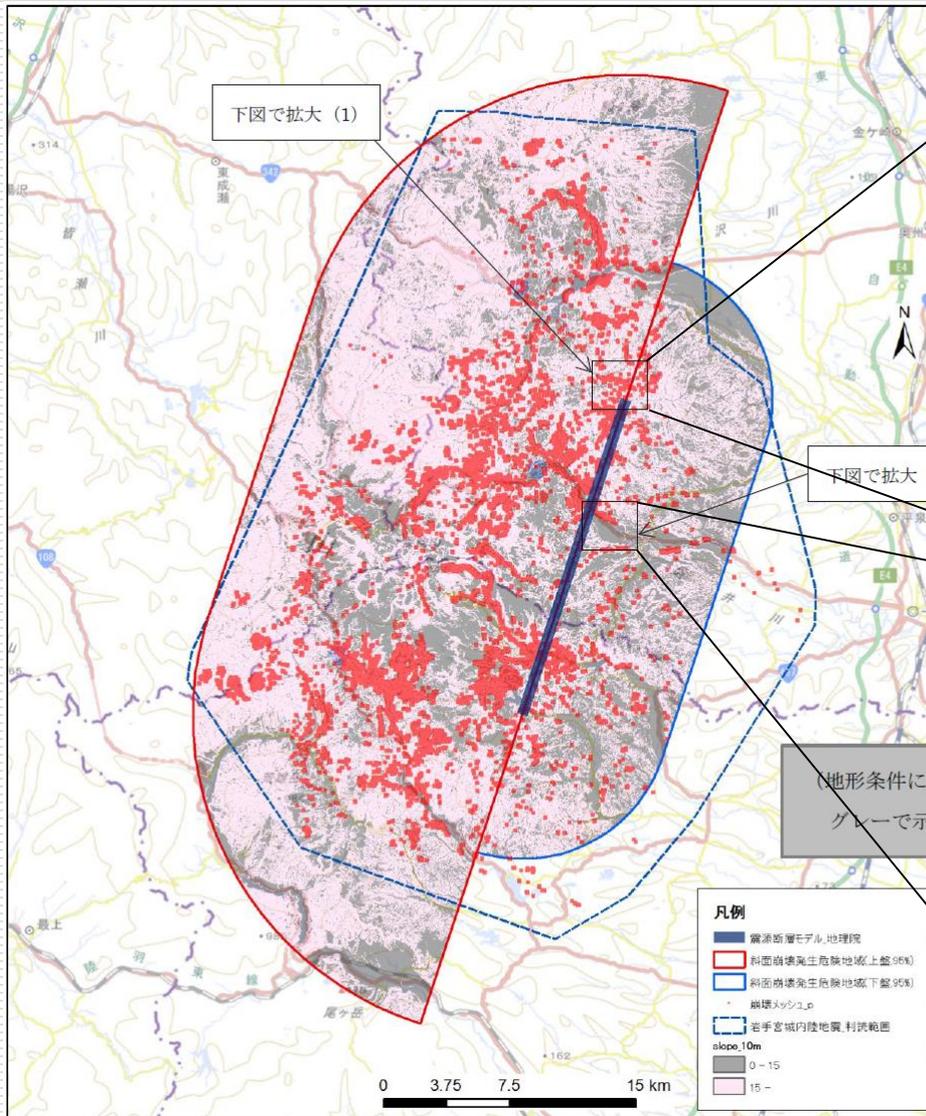
依地形條件設定閾値

例如設定閾値為坡度 <math>< 15^\circ</math>

2004年中越地震

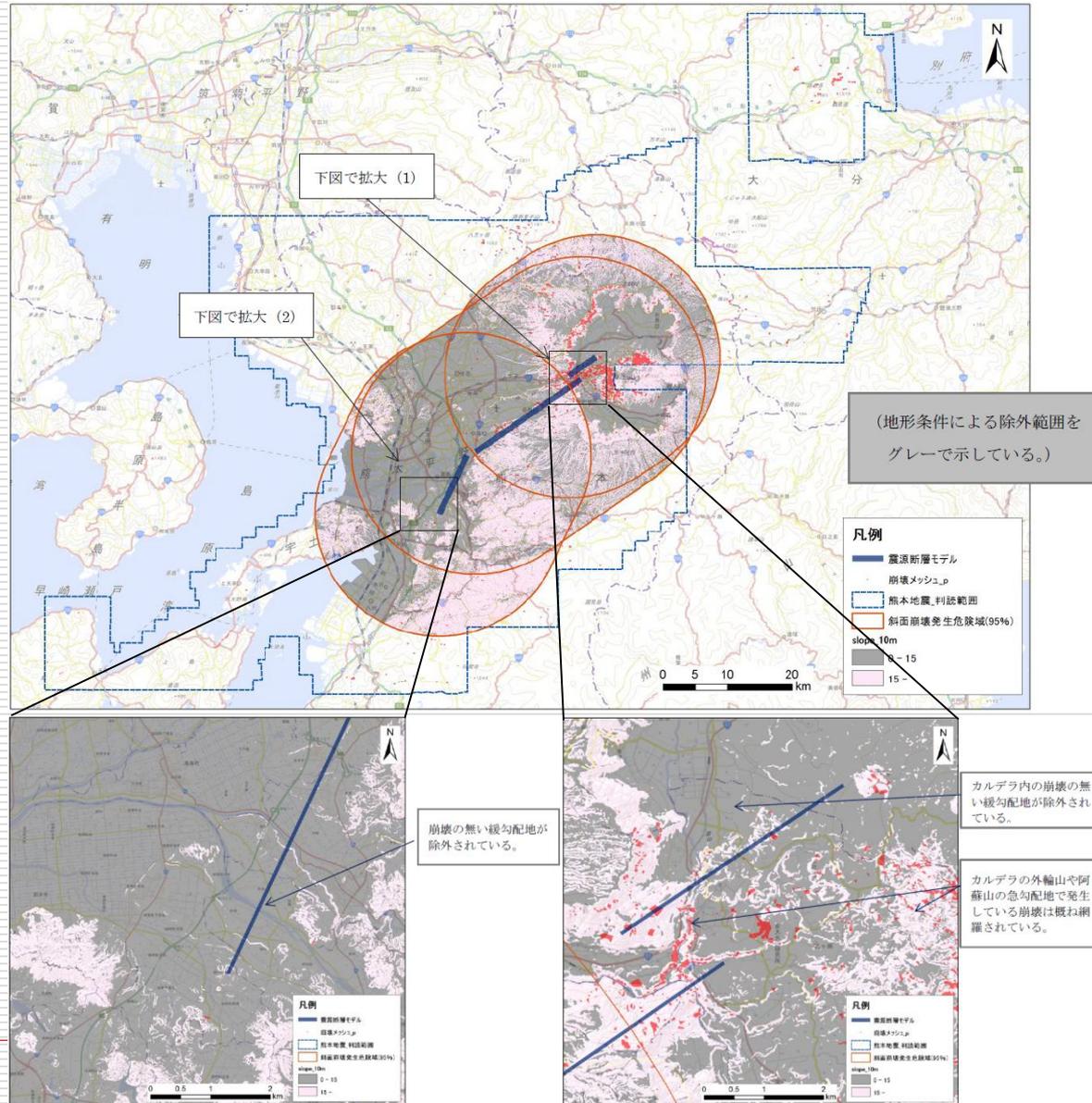


2008年岩手・宮城内陸地震



崩壊の無い緩勾配地が除外されている。

2016年熊本地震



結合活動斷層地震發生機率以評估崩塌潛勢



結論與建議

- 本研究整合歷史地震與崩塌資料，建立以活動斷層幾何參數為基礎的地震誘發崩塌潛勢模型。
- 模型可透過斷層傾角、上緣深度、及地震規模推估崩塌距離分布，並以95%信賴區間定義潛在危害範圍。
- 此地震崩塌潛勢預測框架，可於地震發生前進行初步評估，作為地震崩塌防災與風險分析的基礎工具。
- 納入地形條件（坡度、高程、坡向）修正模型。
- 結合活動斷層地震發生機率，進行機率化崩塌風險評估。

L
an
o's
L
D

謝謝聆聽

