

2013年12月17日
土木学会原子力土木委員会
断層変位評価小委員会資料

確率論的断層変位ハザード解析 手法について

発表者
東京電力(株) 高尾 誠

1 はじめに

検討の背景

広義の耐震設計

断層変位に対する設計

- ①避ける
- ②確率論で考慮

耐震設計

地震動に対して構造物や施設等が大きな被害を受けないようにすること

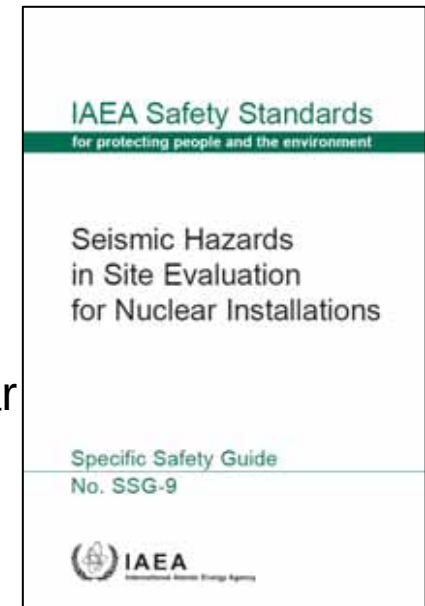
検討の背景

- Youngsほか(2003)は、確率論的断層変位ハザード解析 (PFDHA) を提案。ただし、米国の正断層のデータで定式化。
- その後、Robb(2011)やPetersen(2011) など、逆断層や横ずれ断層の研究もなされているが、適用にあたっては検証が必要。
- IAEAの安全指針(2010)は、既設発電所に対して、PFDHAを要求。ただし、指針にはPFDHAの具体的手法は述べられていない。
- 日本においては、PFDHAの研究はほとんどのなされておらず、高尾ほか(2013)が初めて日本のデータを用いた評価式を提案。

IAEA Safety Standard No.SSG-9

CAPABLE FAULT ISSUES FOR SITES WITH EXISTING NUCLEAR POWER PLANTS

8.9. In view of the extensive site investigation required for a nuclear power plant before construction, in general, the situation should not arise in which further consideration has to be given to the potential for fault displacement at the site of an existing nuclear power plant. However, it may be the case that information comes to light that requires a new assessment of fault displacement potential to be made.



8.10. In such circumstances, efforts should first be made to acquire further data relating to the fault of concern. It may be that, by using the definition and the deterministic methodology described in paras 8.3–8.7, no sufficient basis is provided to decide conclusively that the fault is not capable. In this case, with the totality of the available data, probabilistic methods analogous to and consistent with those used for the ground motion hazard assessment should be used to obtain an estimate of the annual frequency of exceedance of various amounts of displacement at or near the surface.

2 確率論的断層変位ハザード 解析の概要

用語の定義

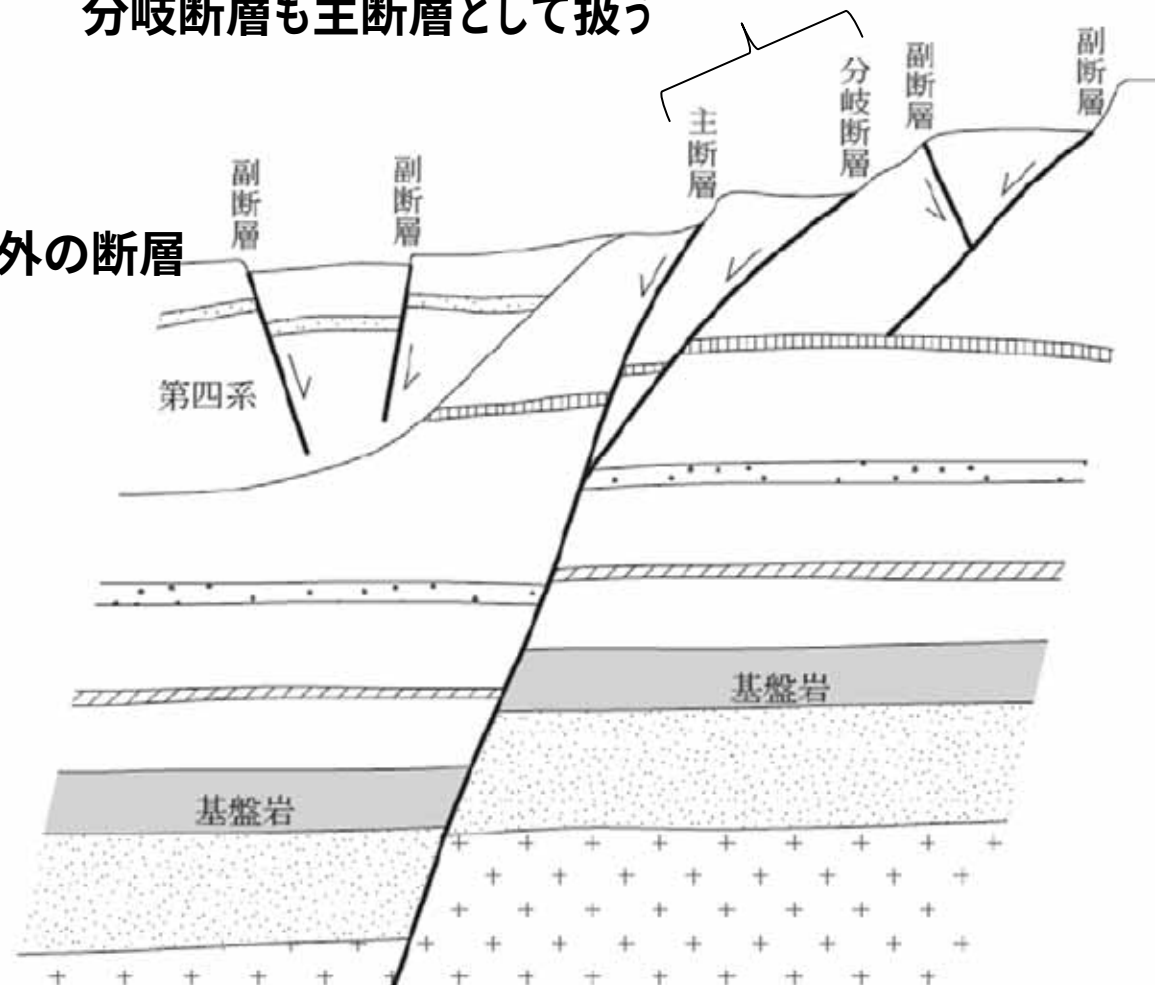
主断層

震源断層と密接に関係している断層

分岐断層も主断層として扱う

副断層

主断層以外の断層



主断層に関する確率

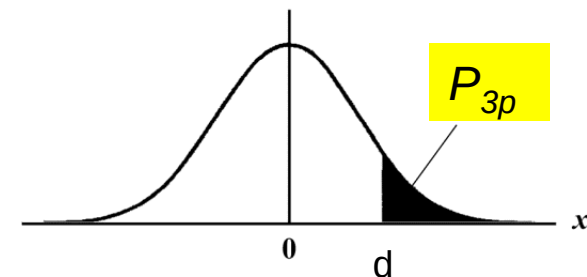
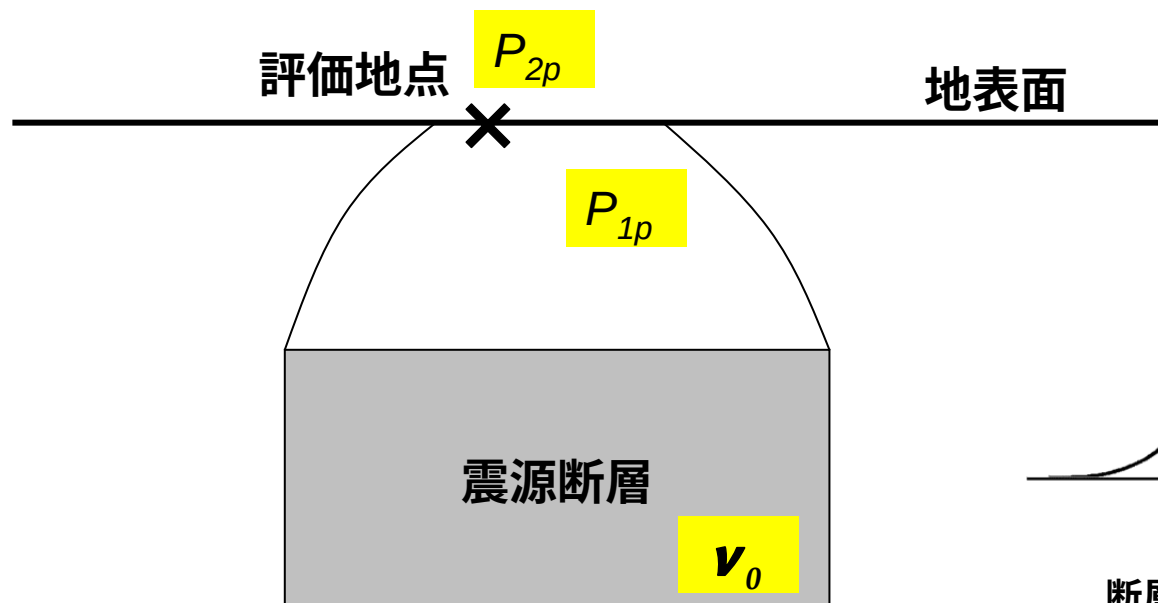
$$\nu(d)_p = \nu_0 \times P_{1p} \times P_{2p} \times P_{3p}$$

ν_0 : 活断層が活動する1年あたりの頻度

P_{1p} : 活断層が活動したときに主断層の断層変位が地表で発生する確率

P_{2p} : 主断層による断層変位が地表で発生した場合にその断層変位が評価地点で発生する確率

P_{3p} : 主断層による断層変位が評価地点で発生した場合にその断層変位がある値を超過する確率



断層変位の確率密度分布

副断層に関する確率

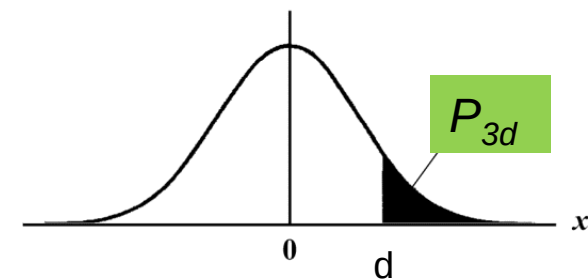
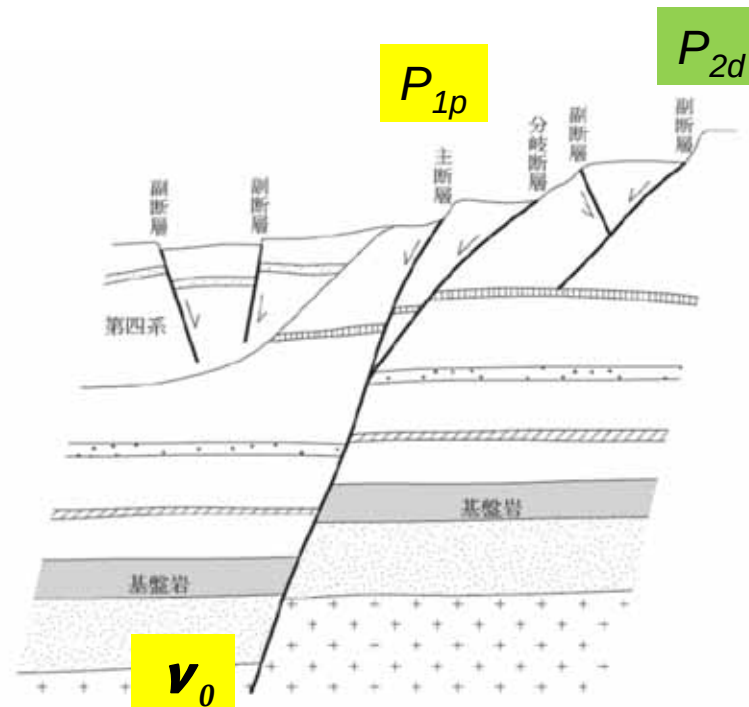
$$\nu(d)_d = \nu_0 \times P_{1p} \times P_{2d} \times P_{3d}$$

ν_0 : 活断層が活動する1年あたりの頻度

P_{1p} : 活断層が活動したときに主断層の断層変位が地表で発生する確率

P_{2d} : 主断層による断層変位が地表で発生した場合に活断層から離れた場所で副断層の断層変位が地表で発生する確率

P_{3d} : 副断層の断層変位が評価地点で発生した場合にその断層変位がある値を超過する確率



断層変位の確率密度分布

2つのアプローチ

地震アプローチ

$$v(d)_p = v_0 \times P_{1p} \times P_{2p} \times P_{3p}$$

$$v(d)_d = v_0 \times P_{1p} \times P_{2d} \times P_{3d}$$

本日の説明内容

変位アプローチ

$$v(d)_p = \lambda_p \times P_{3p}$$

$$v(d)_d = \lambda_d \times P_{3d}$$

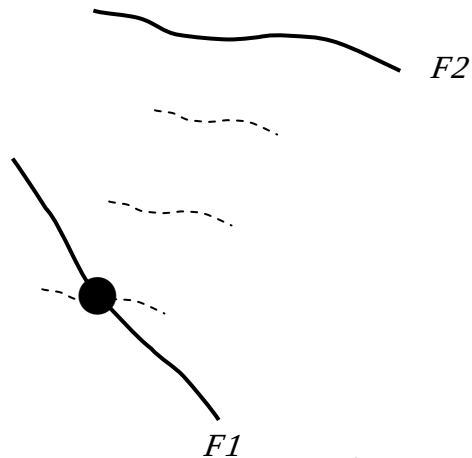
ここに、 λ_p 、 λ_d : 変位 (ズレ) が生じる頻度

λ_p 、 λ_d の推定方法

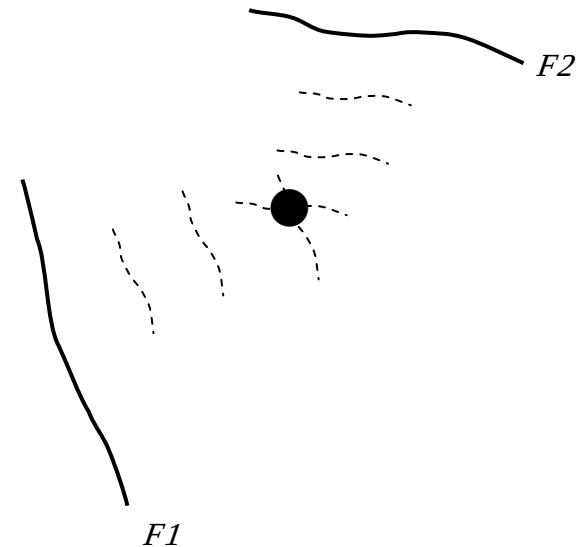
- ① 地質調査結果から得た再来期間の逆数
- ② 平均変位速度 ÷ 1回あたりの平均変位量
○m/年 ÷ △m/回 = ○/△ 回/年

PFDHAの評価概念

(a) 主断層が評価地点を通る場合



(b) 主断層が評価地点を通らない場合



● : 評価地点
 F1、F2 : 活断層
 — : 活断層の活動による主断層
 ---- : 活断層の活動による副断層

(a)の場合は、F1が活動したときの主断層の断層変位と、F2が活動したときの副断層の断層変位を評価する

評価地点における断層変位が d を超える年発生頻度 $v(d) = v(d)_{p1} + v(d)_{d2}$

(b)の場合は、F1およびF2が活動したときの副断層の断層変位を評価する

評価地点における断層変位が d を超える年発生頻度 $v(d) = v(d)_{d1} + v(d)_{d2}$

ここに、

$v(d)_{p1}$: 評価地点において、評価地点を通る主断層の断層変位が d を超える年発生頻度

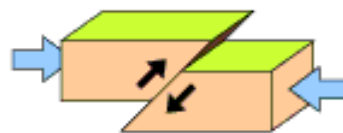
$v(d)_{di}$: 評価地点 i において、周辺の活断層 (F_i)の活動に伴う副断層の断層変位が d を超える年発生頻度

海外における研究事例

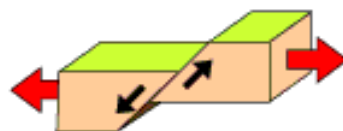
逆断層
Robb(2011)



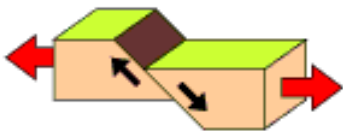
または



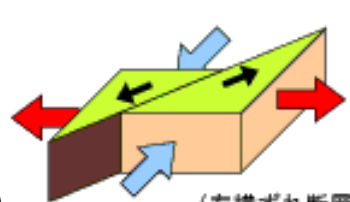
正断層
Youngs(2003)



または

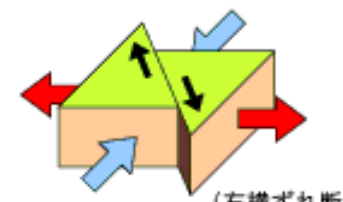


横ずれ断層
Petersen(2011)



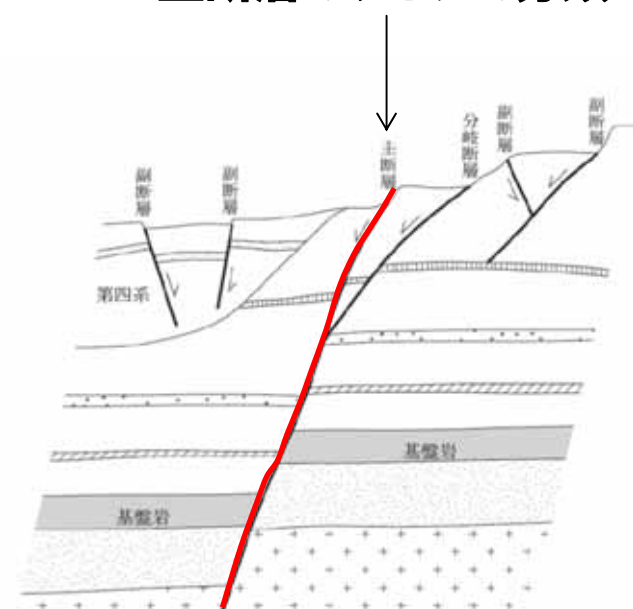
(左横ずれ断層)

または



(右横ずれ断層)

主断層のタイプで分類



日本におけるPFDHAの研究は見当たらない

Robb(2011): 逆断層

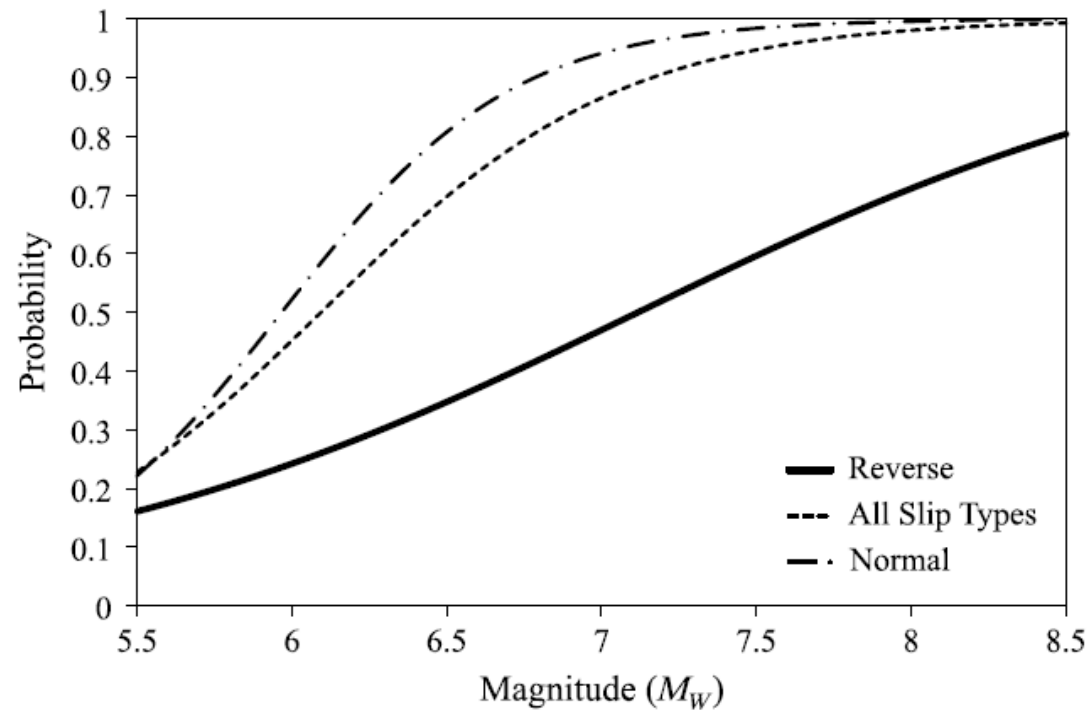
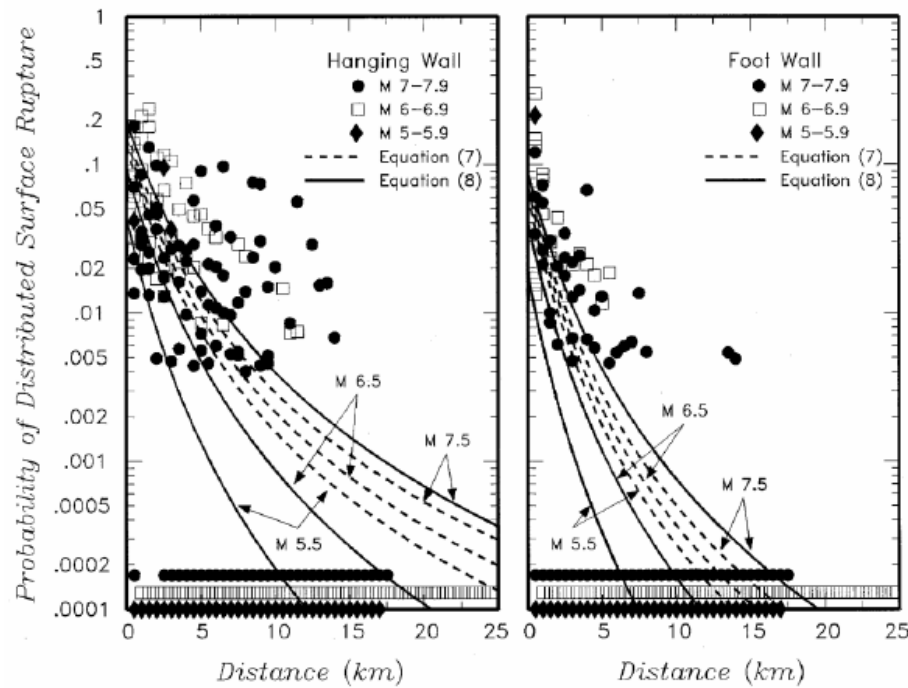


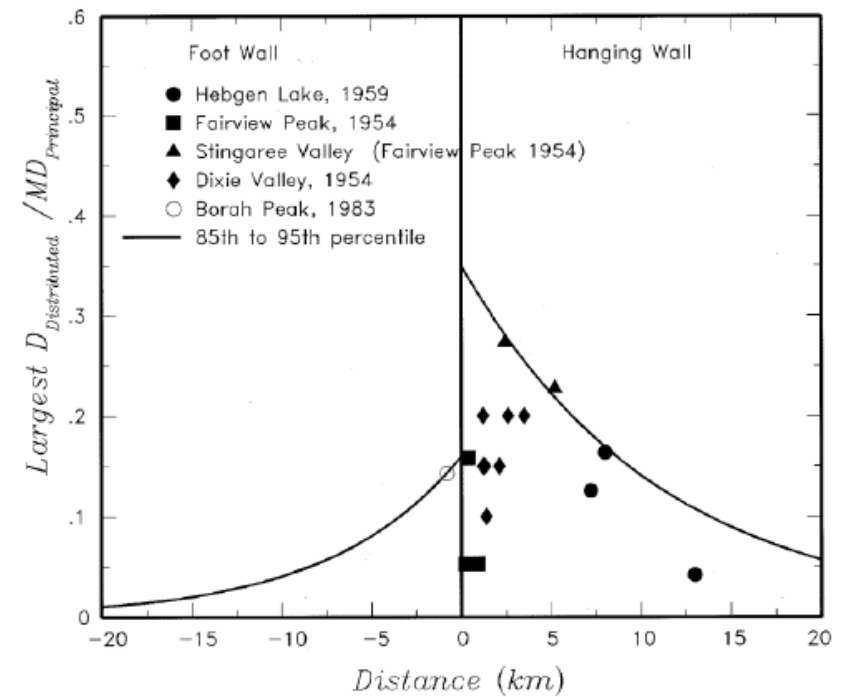
Figure 1. Probability of surface rupture for reverse, normal, and all slip types. The normal and all slip types are from [Youngs *et al.* \(2003\)](#). Empirical distributions are fit using logistic regression for a dichotomous outcome. The probability for reverse events is significantly lower than that of normal and all slip types. These distributions are only valid in the range of $5.5 \leq M_w \leq 8$.

- ・Robb(2011)は、逆断層の場合の主断層に係わる評価式を策定
- ・逆断層の場合、正断層や全タイプと比較して主断層の出現率は低い

Youngs(2003)：正断層



副断層の距離減衰式 (出現確率)

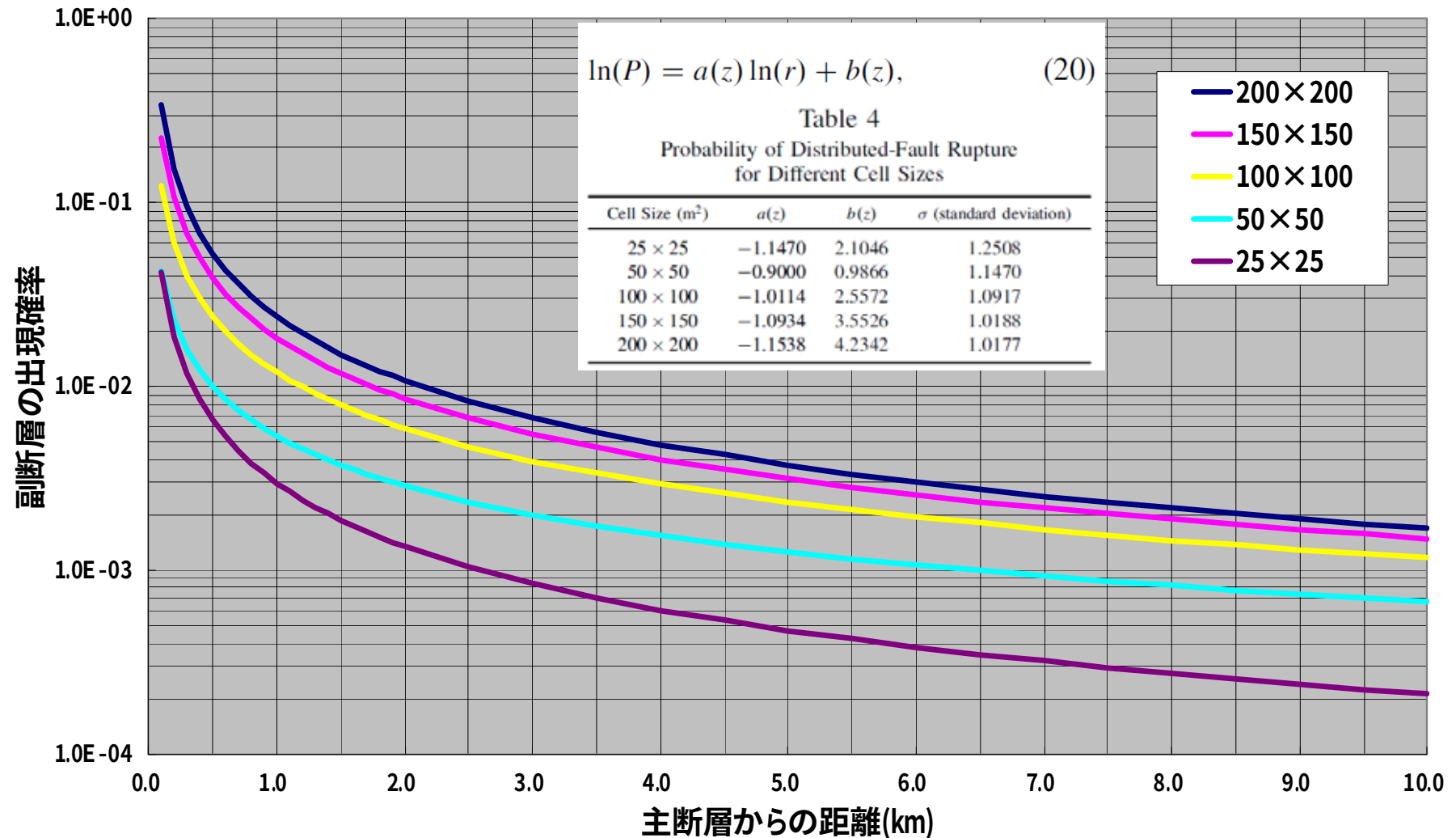


副断層の距離減衰式 (変位量)

- ・正断層のデータから、主断層及び副断層の評価式を策定
- ・副断層の出現確率の評価にあたって、500m×500m格子を採用

Petersen(2011): 横ずれ断層

Petersen (2011)による格子サイズ依存性の検討



- ・副断層の出現率は、格子サイズを変えて検討回帰式をグラフ化
- ・上図は論文記載の回帰式をグラフ化

海外における実務への適用事例(1/2)

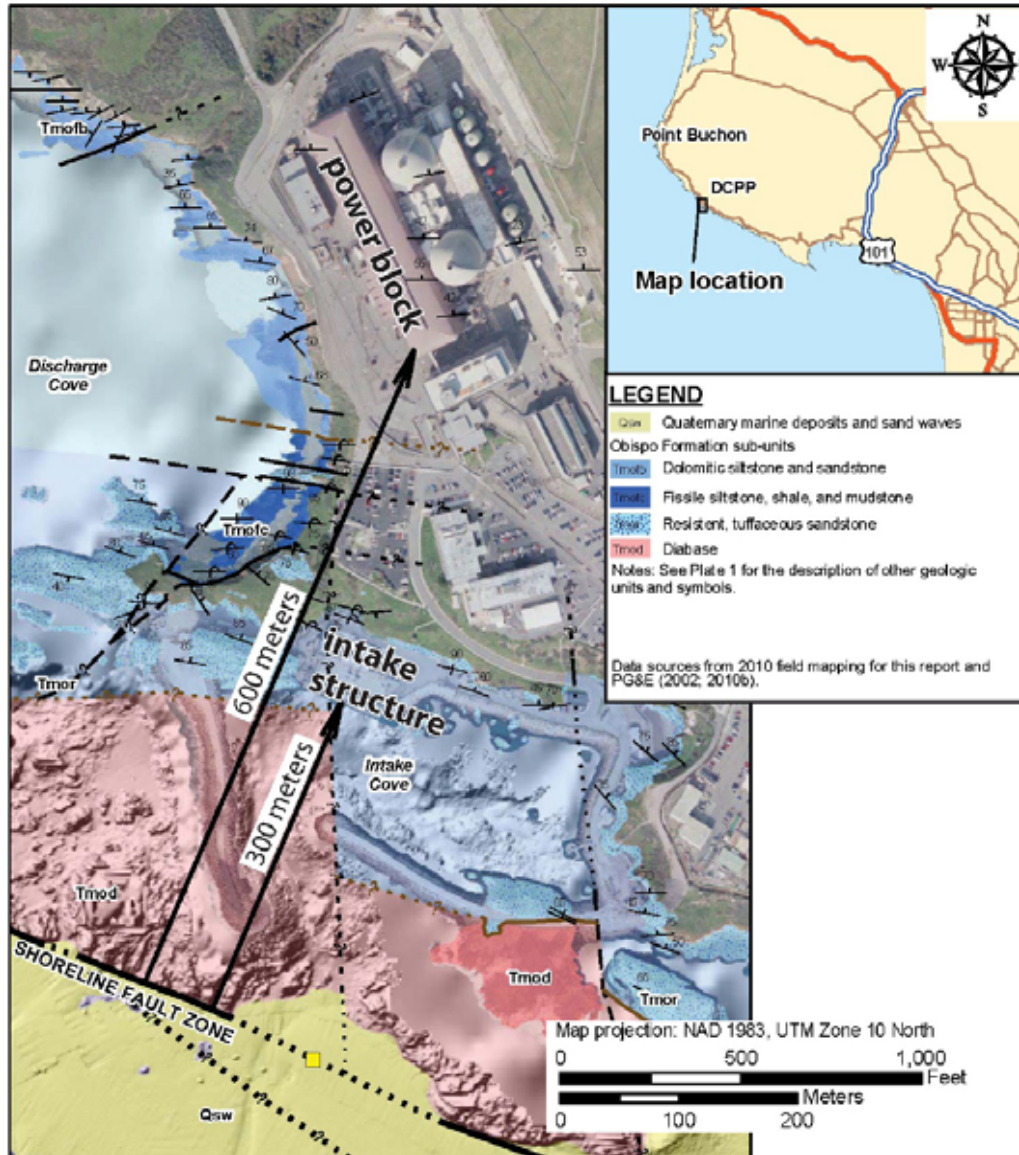


Figure C-9 Distance of Shoreline fault from intake structure and power block.

- 活断層 (Shoreline Fault) が分布から600m及び300mの位置に重要施設が設置
- 活断層から600mおよび300mの位置で副断層が発生し、1cmまたは2cmを超える確率を評価

海外における実務への適用事例(2/2)

Table 7-1 Hazard from secondary Shoreline Fault rupture at DCP

$\overline{m}_{char}$	Fault Dimensions		Slip Rate (mm/yr)	Annual Probability of Exceedance					
	Width (km)	Length (km)		PG&E Distance=600 m		NRC Distance=600 m		NRC Distance=300 m	
				1 cm	2 cm	1 cm	2 cm	1 cm	2 cm
PG&E Scenarios									
6.00	10	8	0.01	2.6×10^{-10}	1.4×10^{-10}	1.5×10^{-9}	7.9×10^{-10}	3.2×10^{-9}	1.7×10^{-9}
6.25	12	14	0.01	6.0×10^{-10}	3.5×10^{-10}	2.6×10^{-9}	1.6×10^{-9}	5.4×10^{-9}	3.3×10^{-9}
6.00	10	8	0.30	7.8×10^{-9}	4.1×10^{-9}	4.6×10^{-8}	2.4×10^{-8}	9.5×10^{-8}	5.1×10^{-8}
6.25	12	14	0.30	1.8×10^{-8}	1.1×10^{-8}	7.9×10^{-8}	4.7×10^{-8}	1.6×10^{-7}	9.8×10^{-8}
NRC Scenario									
6.70	15	33	0.30			9.9×10^{-8}	7.0×10^{-8}	2.0×10^{-7}	1.4×10^{-7}

NRCは、上記値は地震起因の炉心損傷頻度 (3.8×10^{-5}) と比較して小さく、無視しうると評価

3 現地調査結果に基づく断層 変位評価式の策定

P_{1p} の評価式

- 文献、研究機関のホームページ等の調査結果に基づき、2009 年12 月までの地震を対象
- プレート境界地震を除くため、深さ40km 以浅の陸域の地震を対象
- 地表地震断層発生の可能性のない地震を除くため、 $M_j5.8$ 以上の地震を対象
- その際、海岸線付近の地震で震源が海域に位置すると判断できる地震、地表地震断層が出現した地震の前震・余震を除外した
- その結果、107地震を選定

地震名	M _j	M _w	主断層出現の有無		副断層出現の有無	震源断層モデル		
			本研究	武村(1998)		有無	Ls/Lm	引用文献
2008 岩手・宮城内陸地震	7.2	6.9	○	—	○	有	41	引間ほか(2008)
2007 新潟県中越沖地震	6.8	6.6	×	—	—	有		
2007 能登半島地震	6.9	6.7	×	—	—	有		
2005 福岡県西方沖地震	7.0	6.6	×	—	—	有		
2004 新潟県中越地震	6.8	6.6	○	—	○	有	12	防災科研(2005)
2000 鳥取県西部地震	7.3	6.7	○	—	○	有	9	鷲谷ほか(2002)
1998 岩手県内陸北部地震	6.2	5.8	○	—	×	有	11	海野ほか(1998)
1995 兵庫県南部地震	7.3	6.9	○	H	○	有	29	Sekiguchi et al.(2000)
1984 長野県西部地震	6.8	6.2	×	*	○	有		
1978 伊豆大島近海地震	7.0	6.6	○	L	○	有	34	Inouchi&Sato(1979)
1974 伊豆半島沖地震	6.9	6.4	○	H	○	有	68	多田(1976)
1969 岐阜県中部地震	6.6	6.3	×	L	—	有		
1961 北奥地震	7.0	6.6	×	*	—	有		
1959 弟子屈地震	6.3	6.0	○	L	×	無	17	※1
1955 秋田北部地震	5.9	5.7	×	L	—	有		
1948 福井地震	7.1	6.9	×	H	—	有		
1948 田辺地震	6.7	6.3	×	*	—	有		
1945 三河地震	6.8	6.7	○	H	○	有	85	高野・木野(2009)
1943 鳥取地震	7.2	7.0	○	H	○	有	51	Kanamori(1972)
1939 男鹿地震	6.8	7.0	×	H	○	有		
1938 徳島地震	6.1	5.8	○	H	○	無	46	※1
1931 西埼玉地震	6.9	6.5	×	*	—	有		
1930 北伊豆地震	7.3	6.9	○	H	○	有	100	長谷川(1986)
1927 北丹後地震	7.1	7.1	○	H	○	有	72	Matsuura(1977)
1925 但馬地震	6.8	6.4	○	H	○	無	7	※1
1918 大町地震	6.5	6.4	○	H	×	有	10	多田・橋本(1998)
1914 羽後仙地震	6.6	6.2	×	L	—	無		
1914 桜島地震	7.1	6.6	×	*	—	無		
1909 姉川地震	6.8	6.4	×	L	—	無		
1900 宮城北部地震	6.4	6.1	×	*	—	無		
1896 陸羽地震	7.2	6.7	○	H	○	無	91	地震調査研究推進本部(2005)
1894 庄内地震	7.0	6.5	×	H	—	無		
1891 濃尾地震	8.0	7.4	○	H	○	有	96	Makumo&Ando(1976)

○：地震断層が出現した（主断層または副断層の出現率算定に使用）

×：地震断層が出現しなかった（主断層または副断層の出現率算定に使用）

H：地震断層が出現した（信頼度高）

L：地震断層が出現した（信頼度低）

*：地震断層が出現しなかったが近くに地震に関連した活断層がある（武村(1998)の記述のとおり）

Ls/Lm：震源断層長 Lm に対する主断層出現長 Ls の割合(%)

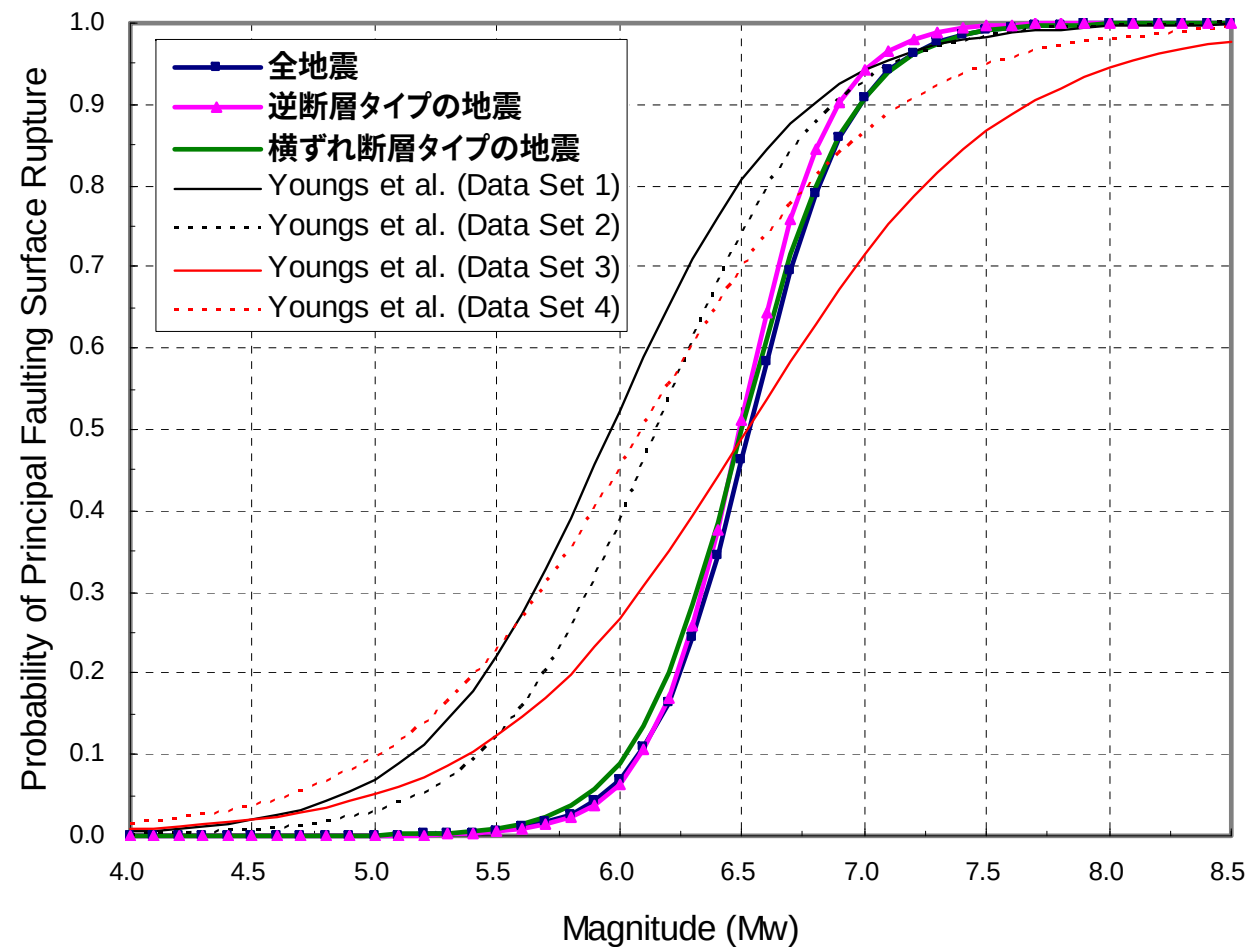
※1：震源断層モデルがないため震源断層長を武村(1998)により推定

引用文献：Lm を引用した文献

灰色のセル：断層変位量の評価式算定にあたってデータベース化したもの

P_{1p} の評価式

ロジスティック回帰 (Logistic Regression)

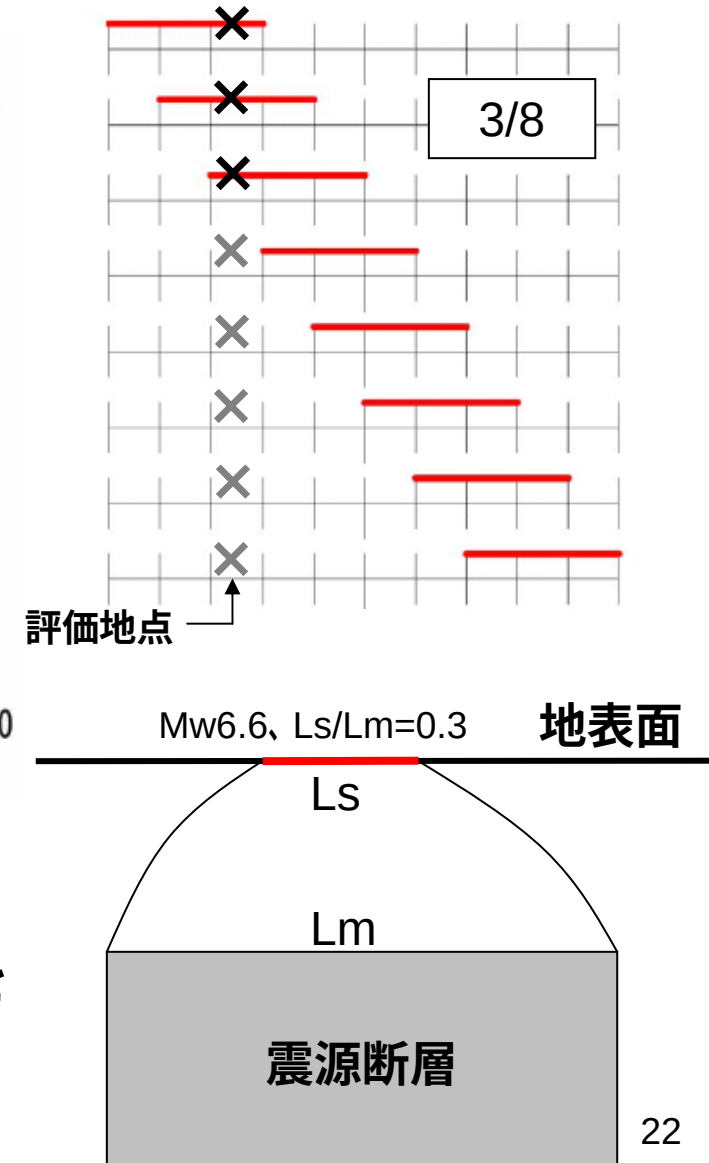
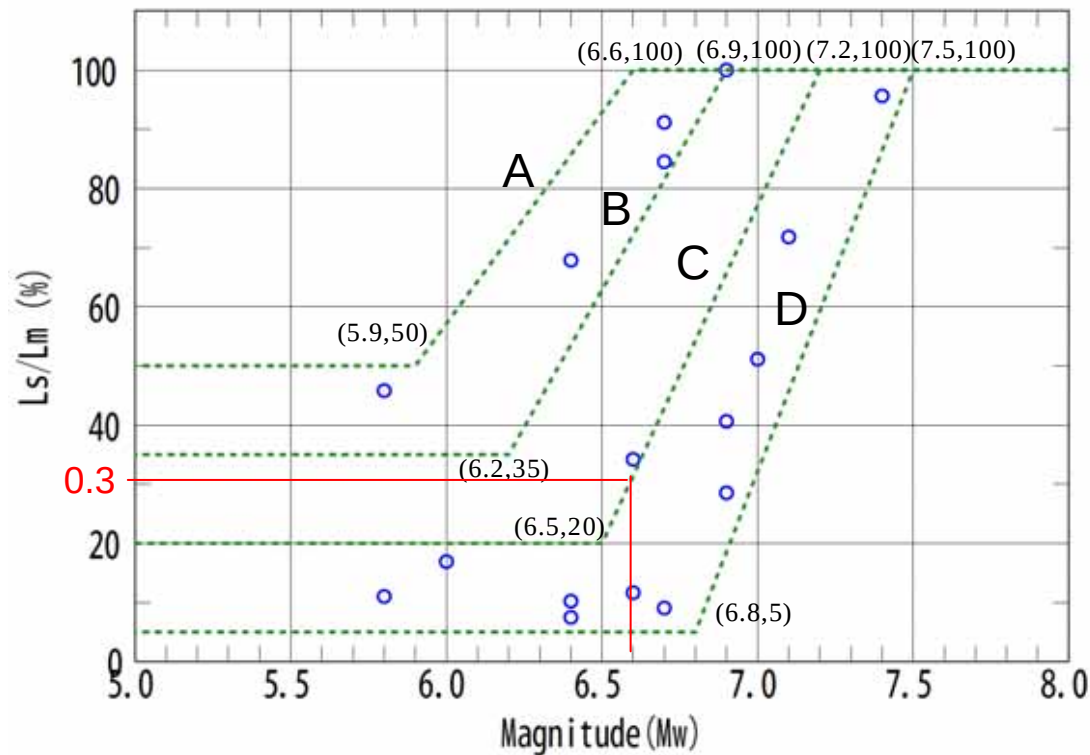


現象の生起確率を
説明するモデル

$$P_1 = \frac{e^z}{1 + e^z}$$

$$z = -32.03 + 4.90M_w$$

P_{2p} の評価式



- この例の場合は、 $P_{2p}(\text{Cの線}) = 0.3 \times 3/8$
- 4本の緑色の線(A～D)に関して同様な計算を実施し、合計(重み考慮)を求める

P_{3p} の評価式

主断層沿いの平均変位(AD)

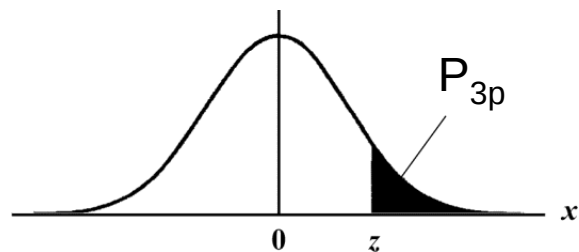
- 対数正規分布
- $\log(AD)$ とMwが比例関係にあるので、対数正規分布を仮定

主断層沿いの基準化した変位(D/AD)

- ガンマ分布
- 確率密度の台(D/AD)が $0 \sim \infty$ をとる汎用性の高い分布がガンマ分布

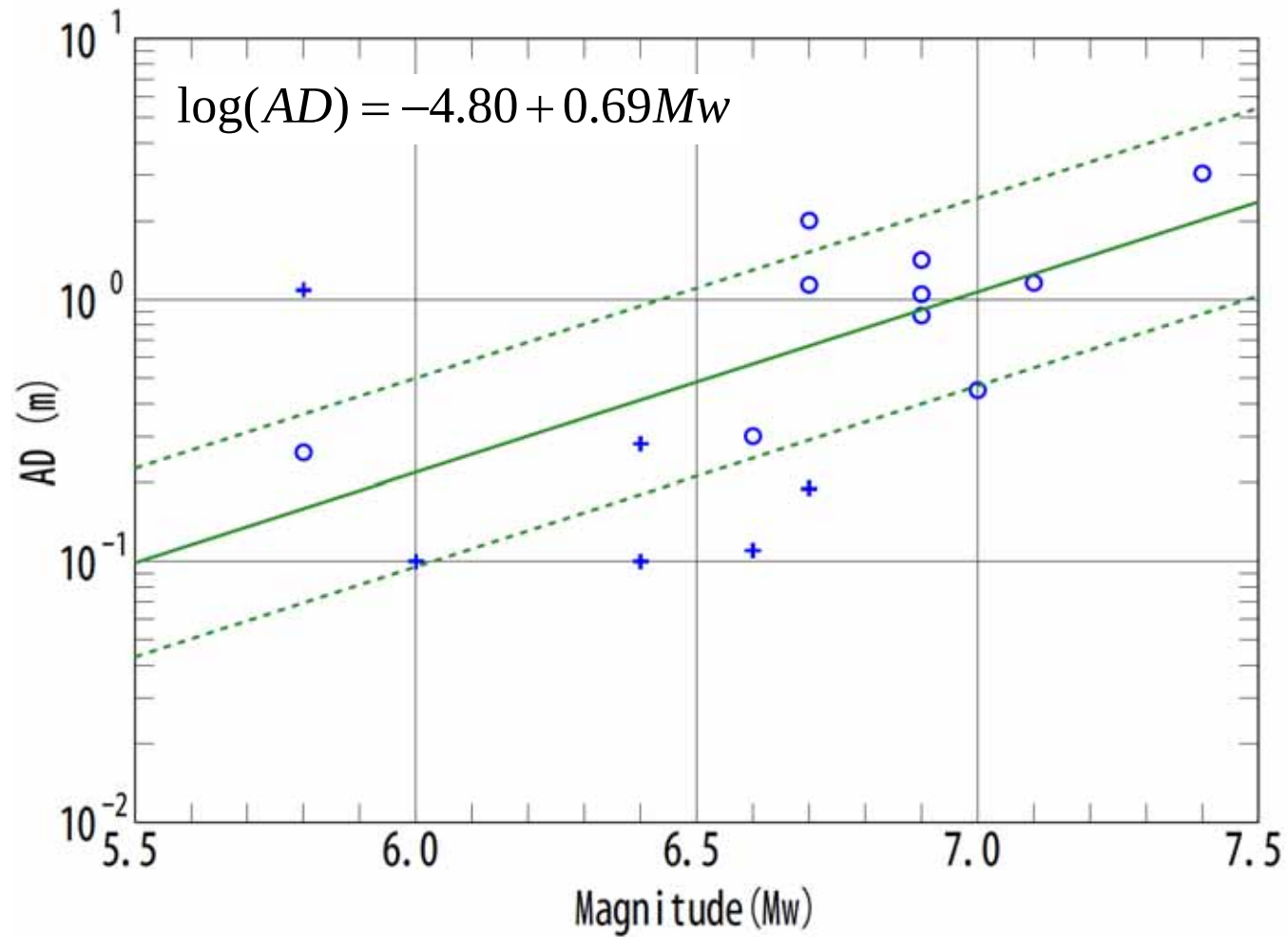
$$h(z) = \int_0^{\infty} g(x) f(z/x) dx \quad x = AD \quad z = D$$

変位量Dの確率密度関数 $h(z)$



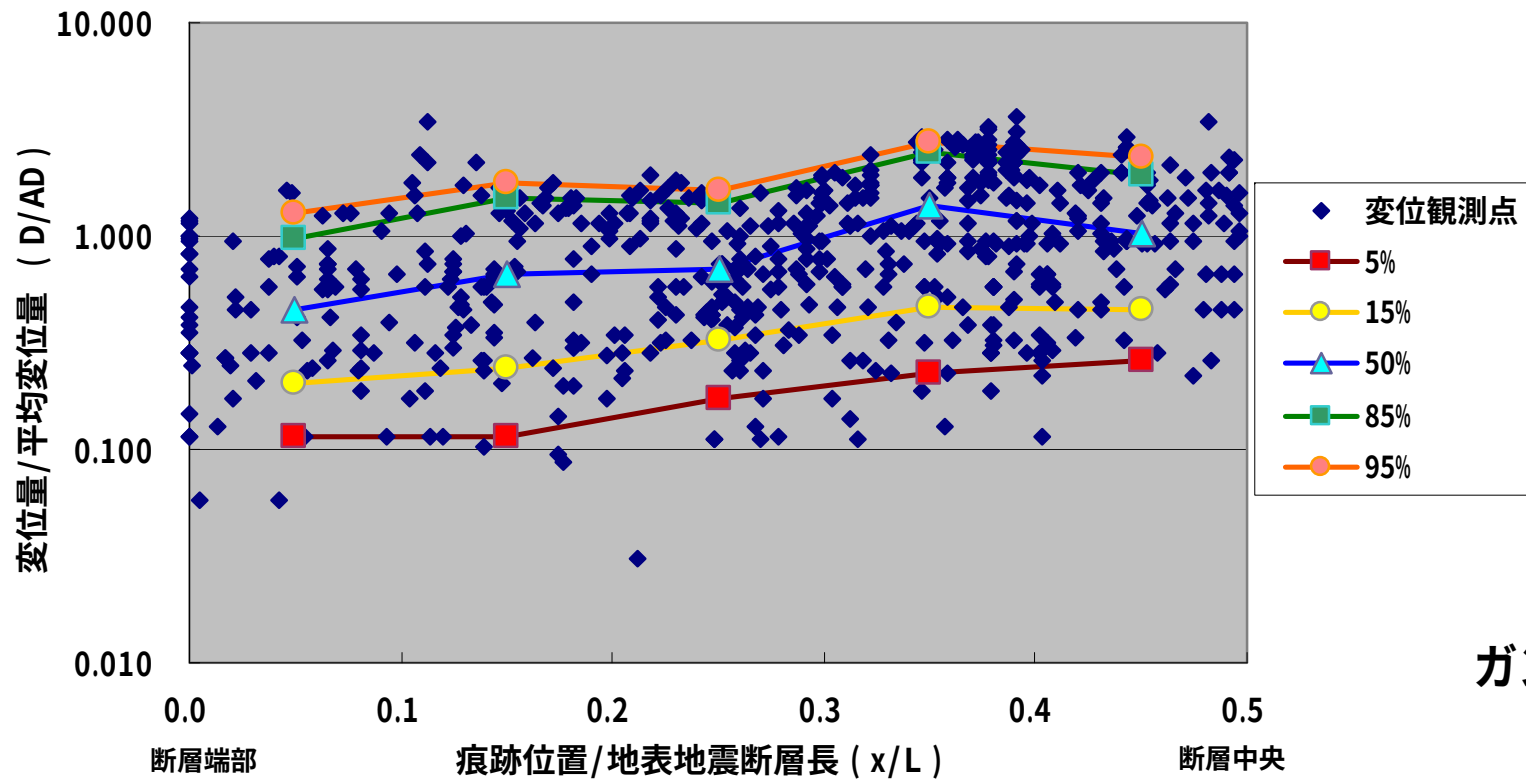
超過確率 P_{3p}

平均変位AD



回帰式まわりのバラツキは対数正規分布

D/ADの分布 (長さ10km以上)



ガンマ分布

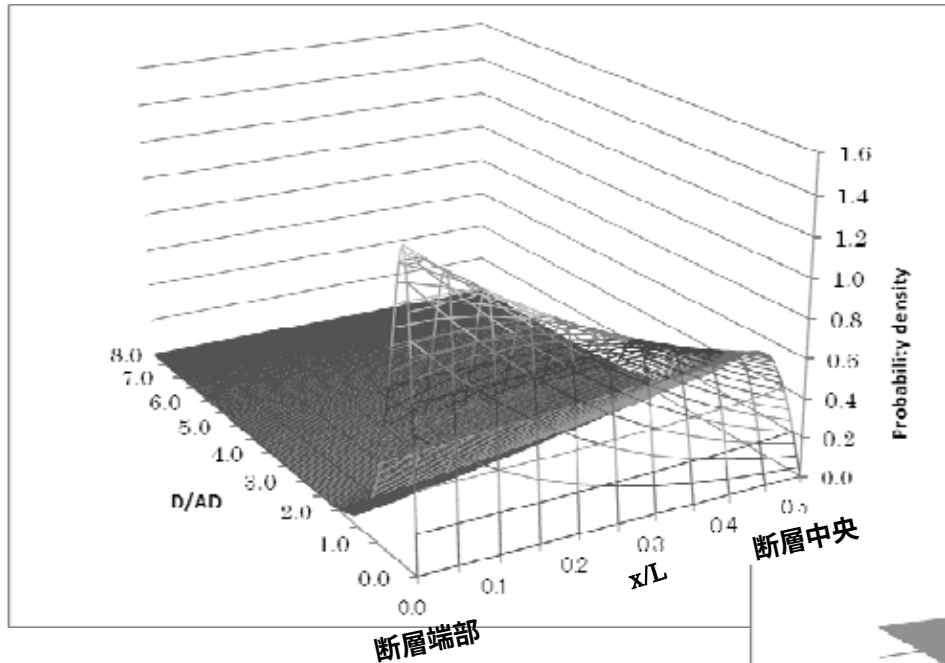
$$\frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^{y/b} e^{-t} t^{a-1} dt$$

$$a = \exp\left(0.70 - 0.34 \frac{x}{L}\right)$$

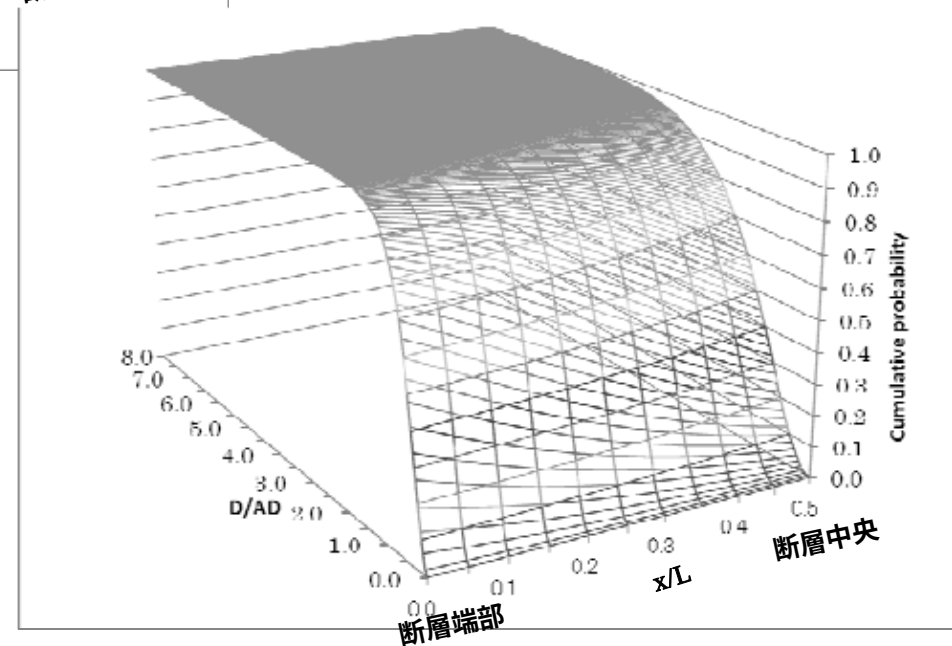
$$b = \exp\left(-1.40 + 1.82 \frac{x}{L}\right)$$

$$y = \frac{D}{AD}$$

D/ADの分布 (長さ10km以上)



ガンマ分布関数の
3次元表示



P_{2d} の評価式

表- 3.2 副断層出現確率 P_{2d} 策定に用いた地震

地震名	M_j	M_w	主断層のセンス
2008 岩手・宮城内陸地震	7.2	6.9	逆
2004 新潟県中越地震	6.8	6.6	逆
2000 鳥取県西部地震	7.3	6.7	横ずれ
1998 岩手県内陸北部地震	6.2	5.8	逆
1995 兵庫県南部地震	7.3	6.9	横ずれ
1984 長野県西部地震	6.8	6.2	横ずれ
1978 伊豆大島近海地震	7.0	6.6	横ずれ
1974 伊豆半島沖地震	6.9	6.4	横ずれ
1959 弟子屈地震	6.3	6.0	横ずれ
1945 三河地震	6.8	6.7	逆
1943 鳥取地震	7.2	7.0	横ずれ
1939 男鹿地震	6.8	7.0	逆
1938 屈斜路地震	6.1	5.8	横ずれ
1930 北伊豆地震	7.3	6.9	横ずれ
1927 北丹後地震	7.3	7.1	横ずれ
1925 但馬地震	6.8	6.4	横ずれ
1918 大町地震	6.5	6.4	逆
1896 陸羽地震	7.2	6.7	逆
1891 濃尾地震	8.0	7.4	横ずれ

- 107地震のうち、副断層が発生した19地震について分析
- 500m×500mの格子で副断層の発生の有無を分析

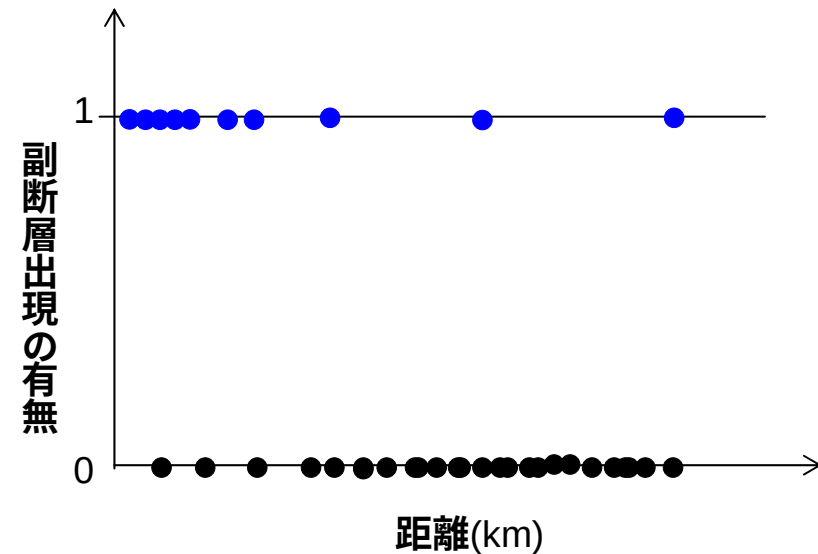
ロジスティック回帰分析



1995年兵庫県南部地震の例

500m×500m格子で分析

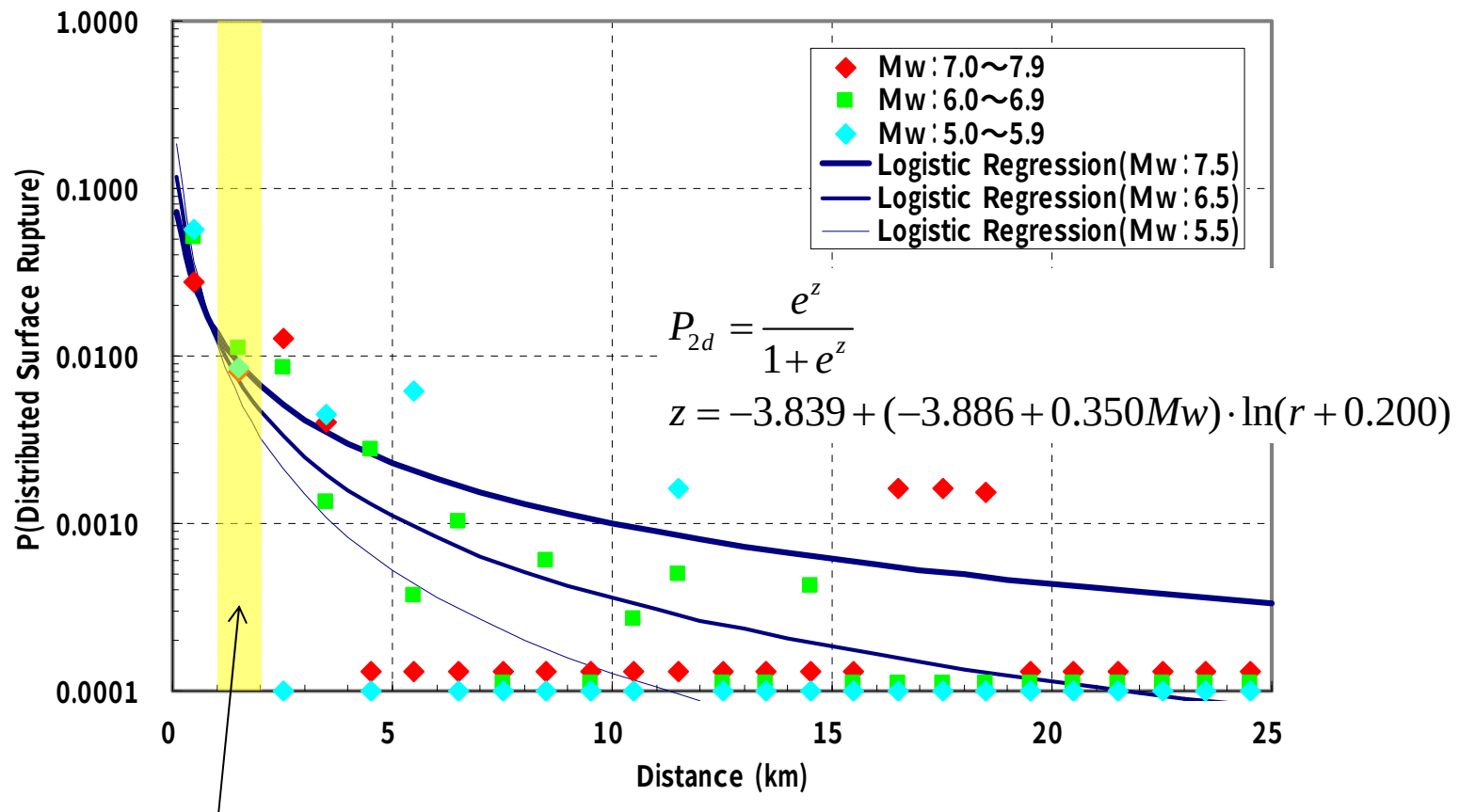
- 赤く着色した格子 (主断層) から、青 (副断層出現) 及び無着色 (副断層非出現) の各格子までの最短距離を説明変数とし、副断層出現の有無「1」または「0」を目的変数として分析を行った。



P_{2d} の評価式

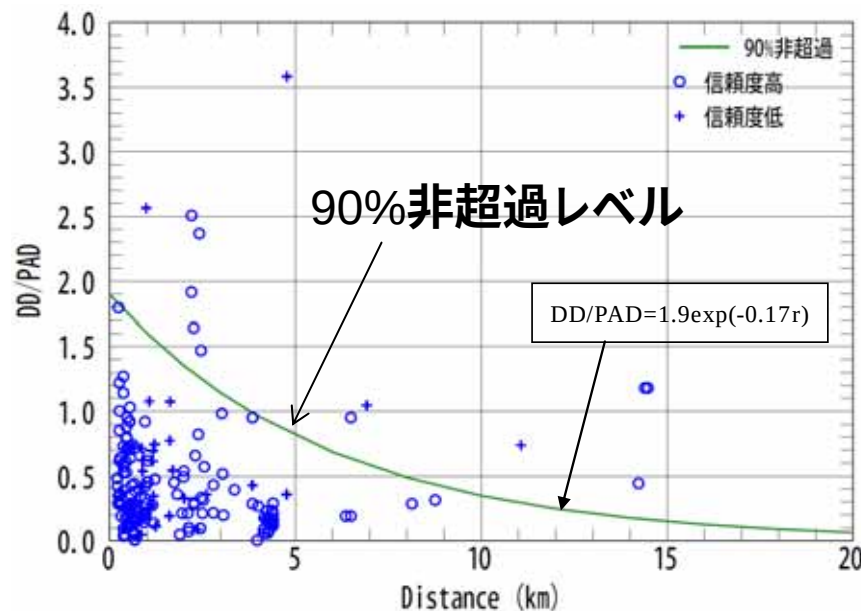
ロジスティック回帰 (Logistic Regression)

500m×500m格子で分析



- 生データは1か0であり、そのまま表示したのでは、適合具合が分からない
- 1kmごとに、「1の総数」÷「格子総数」＝「割合」を表示
- 「割合」を回帰したのではない

P_{3d} の評価式



➤ 距離減衰は指数関数
(90%非超過レベル)

➤ 各距離におけるバラツキ
はガンマ分布

$$F(y) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^{y/b} e^{-t} t^{a-1} dt$$

$$y = DD/PMD \text{ または } DD/PAD$$

$$a = 2.5$$

➤ P_{3d} は P_{3p} と同様に計算

4 確率論的断層変位ハザード 解析の実施例

解析条件

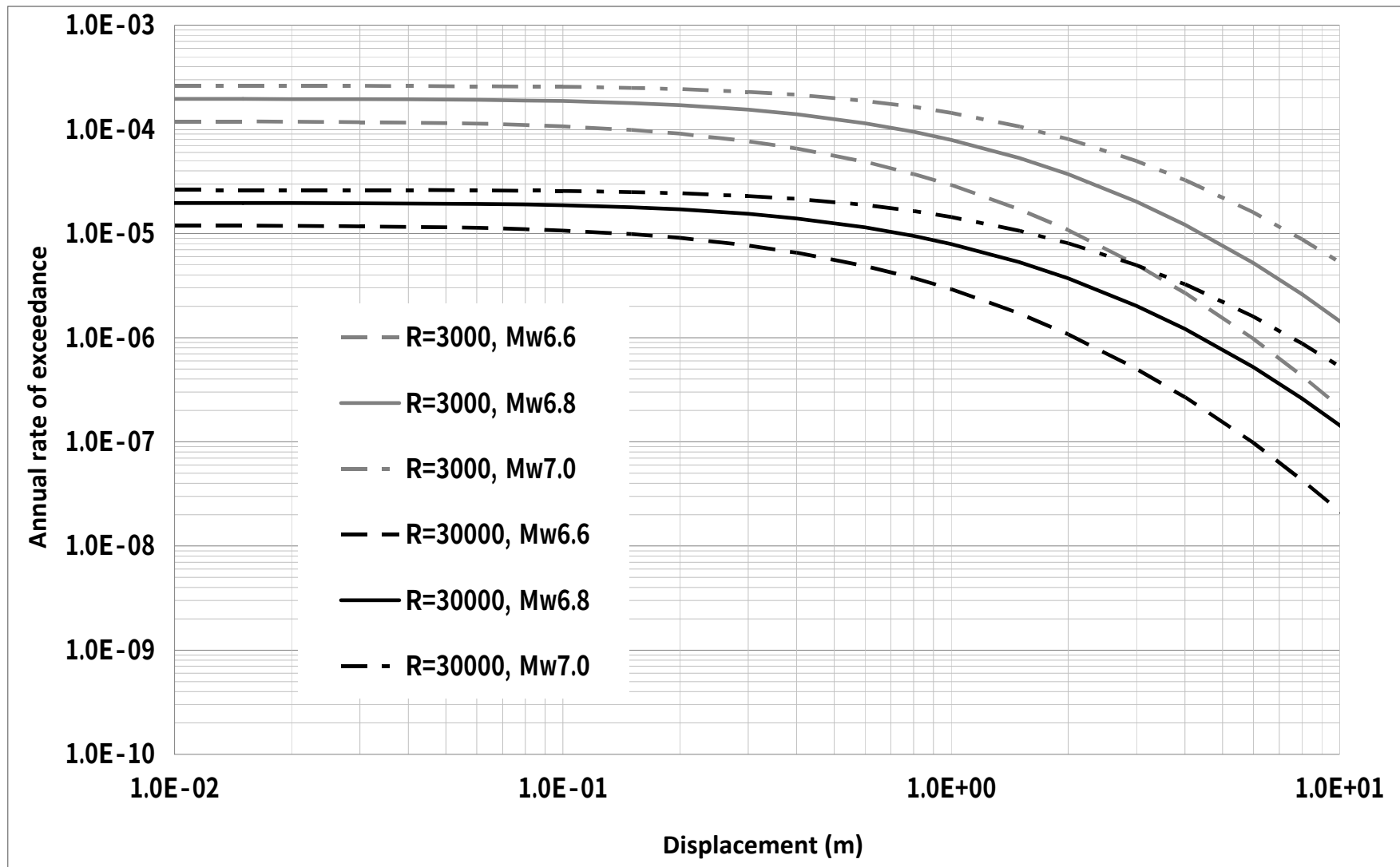
Case (a)

評価地点から活断層までの距離	0km
再来期間	3,000年、30,000年
発生する地震の規模	Mw6.6、Mw6.8、Mw7.0
震源断層域の長さ (活断層の長さ)	22km

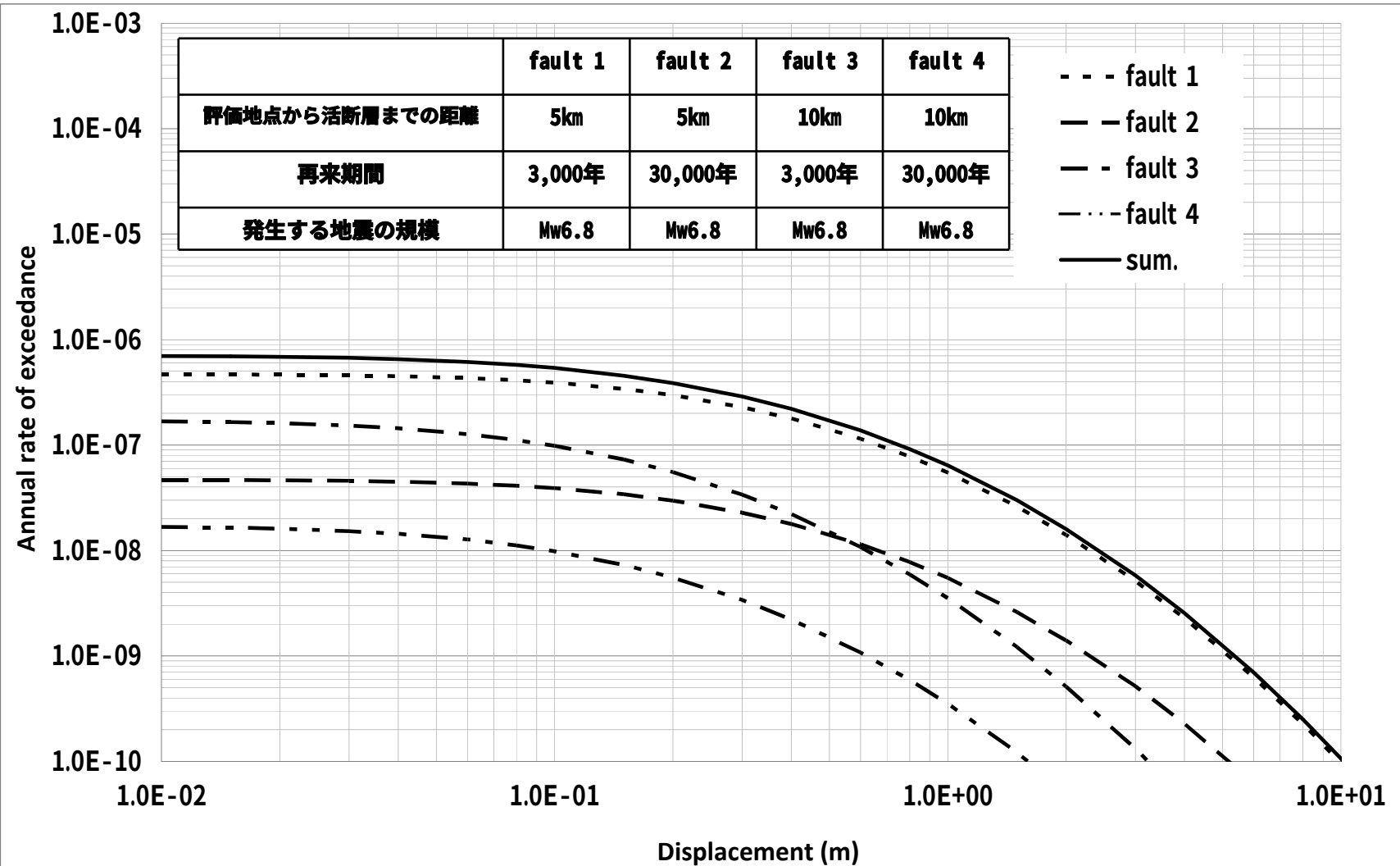
Case (b)

	fault 1	fault 2	fault 3	fault 4
評価地点から活断層までの距離	5km	5km	10km	10km
再来期間	3,000年	30,000年	3,000年	30,000年
発生する地震の規模	Mw6.8	Mw6.8	Mw6.8	Mw6.8

Case (a)



Case (b)



5 まとめと課題

まとめ

- ✓ 日本のデータを用いた我が国初のPFDHAの結果を示した。
- ✓ 主断層による影響は副断層に比べて大きく、評価地点が主断層（活断層）の直上に位置する場合は、主断層による影響だけ評価すればよいことを示した。
- ✓ 一方、評価地点が活断層の直上に位置しない場合で活断層が周辺に複数存在する場合は、地震の再来期間による影響と評価地点から活断層までの距離の影響はケースバイケースであり、個別地点ごとに適切に評価する必要があることを示した。

今後の課題

- ✓ 副断層の発生確率は、分析に用いる格子寸法に依存するため、構造物の大きさに応じた評価式の策定が必要。
- ✓ 模型実験や数値解析によってデータを充実することが必要。
- ✓ 今後、本研究の成果である断層変位ハザード曲線を用いて、「確率論的耐変位安全性評価」の研究を進めていくことが必要である。

参考文献

Youngs, R.R., et al. : A methodology for probabilistic fault displacement hazard analysis (PFDHA), *Earthquake Spectra*, Vol.19, No.1, 2003, pp.191-219

Robb, E., et al. : Probabilistic fault displacement hazard analysis for reverse faults, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101, 2011, pp.1542-1552

Petersen, M.D., et al. : Fault displacement hazard for strike-slip faults, *Bull. Seismol. Soc. Am.* 101, 2011, pp.805-825

IAEA : Seismic Hazards in Site Evaluation for Nuclear Installations, *Specic Safety Guide*, No. SSG-9 2010

高尾誠、土山滋郎、安中正、栗田哲史 : 確率論的断層変位ハザード解析手法の日本における適用、*日本地震工学会論文集*、第13 巻、2013、pp.17-36

U.S. Nuclear Regulatory Commission : Confirmatory Analysis of Seismic Hazard at the Diablo Canyon Power Plant from the Shoreline Fault Zone, Research Information Letter 12-01, <http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1212/ML121230035.pdf>