

東京大学地震研究所研究集会

2010年12月 6日-7日

揺れる直前の地震動予測：さらなる迅速化と  
精度の向上

直下地震や巨大地震に対応した  
緊急時地震速報システムの高度化

入倉孝次郎・倉橋 奨・正木和明

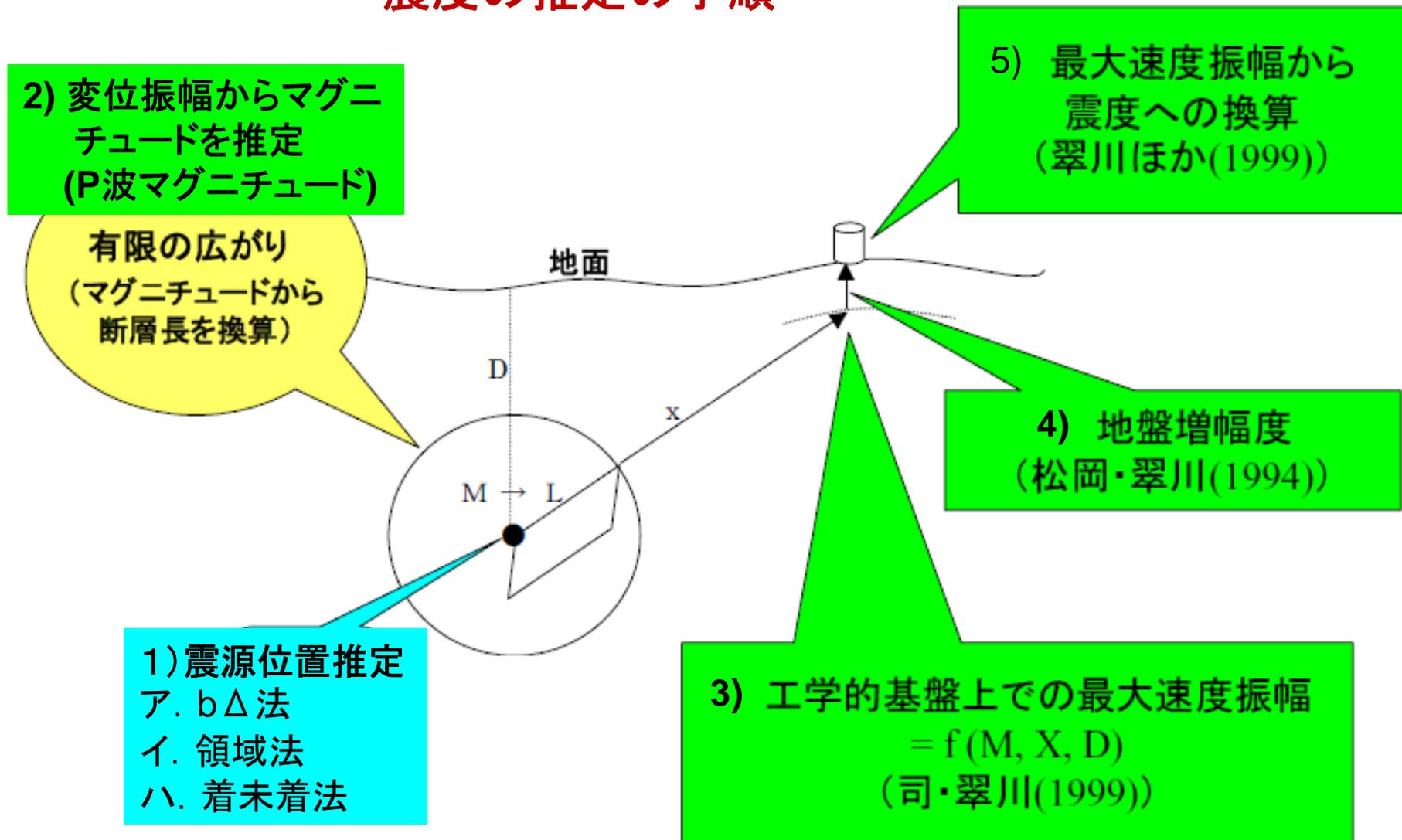
愛知工業大学地域防災センター

## 今日のお話

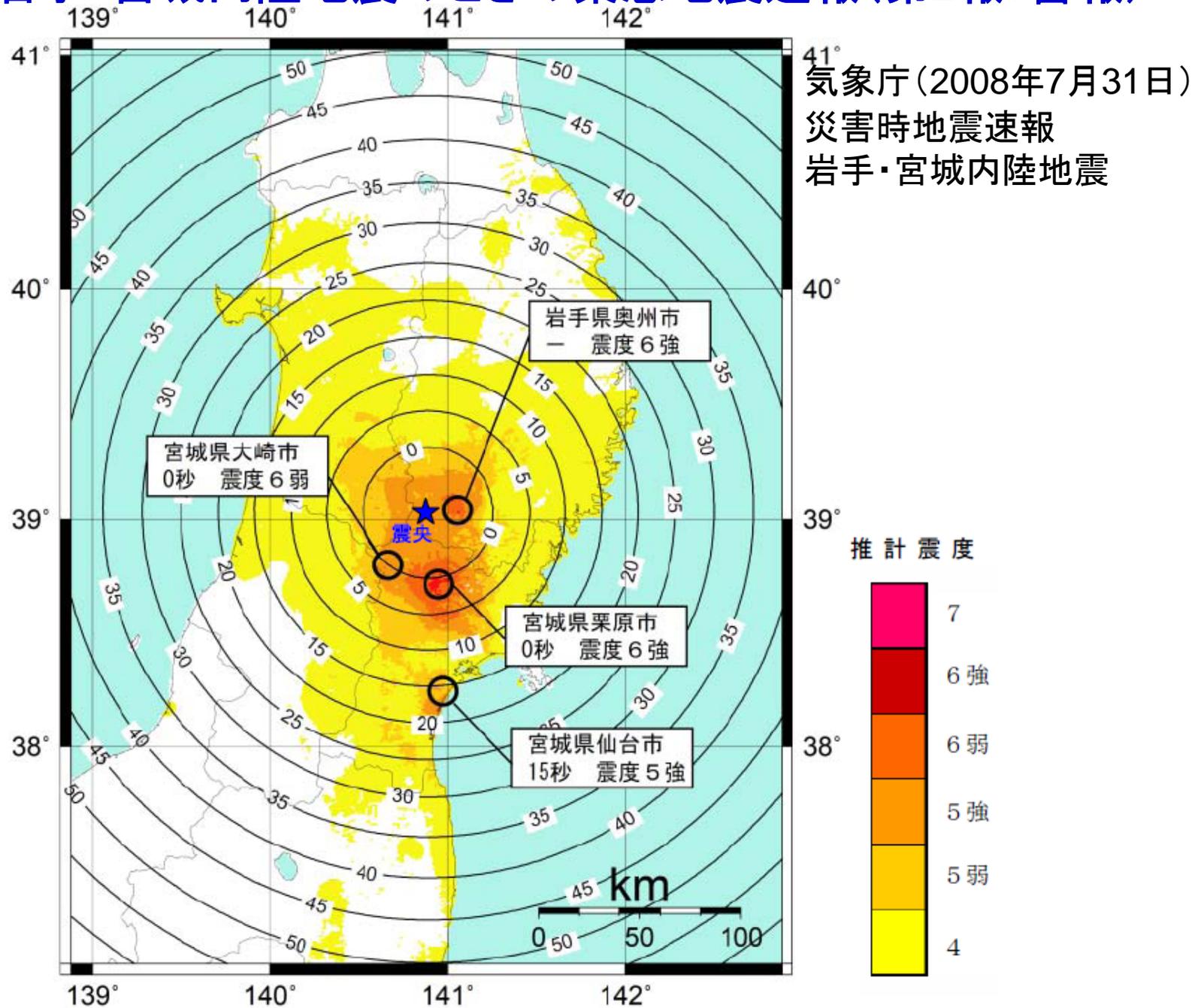
- 1 . 緊急地震速報の仕組みとその問題点
- 2 . より早くかつ精度よい緊急地震速報の開発
- 3 . 巨大地震のときにも効果的緊急地震速報を提供するために
- 4 . 新たな技術開発の必要性
- 5 . まとめ

# 1-1 緊急地震速報システムの仕組み

## 震度の推定の手順



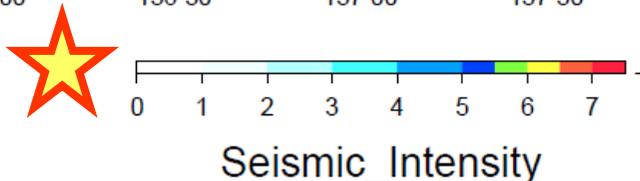
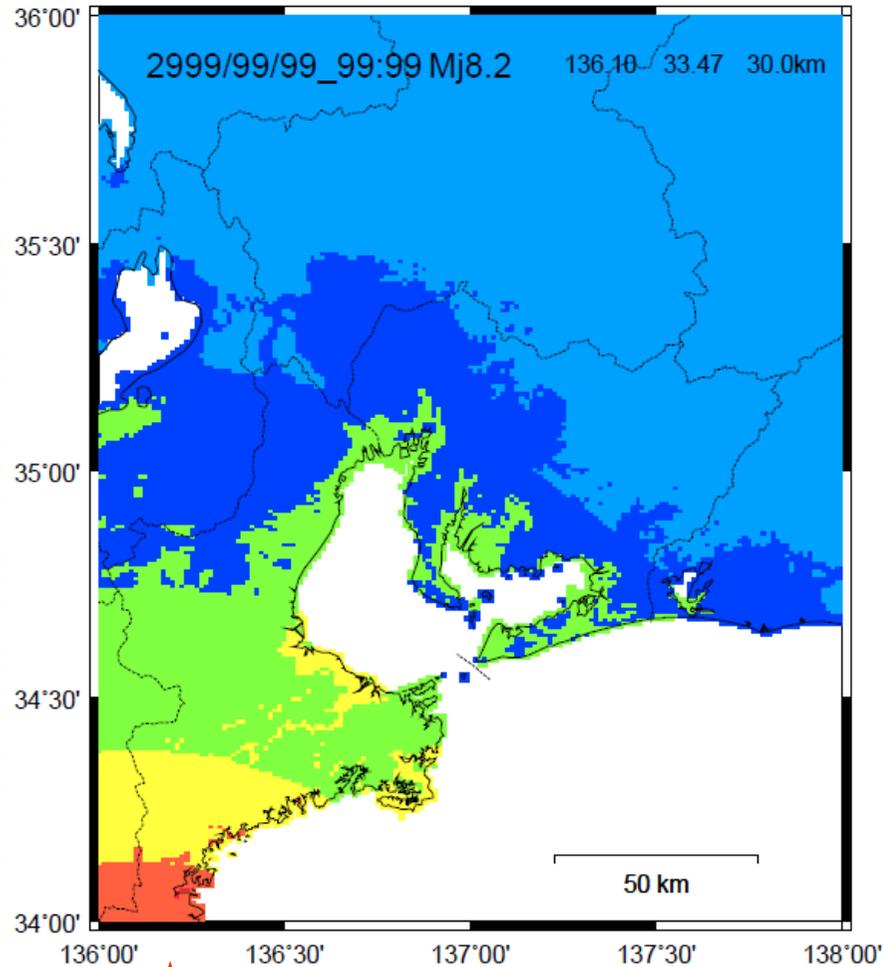
# 2008年岩手・宮城内陸地震のときの緊急地震速報(第2報:警報)



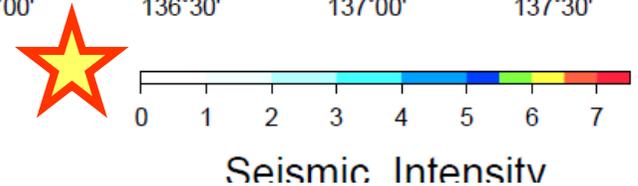
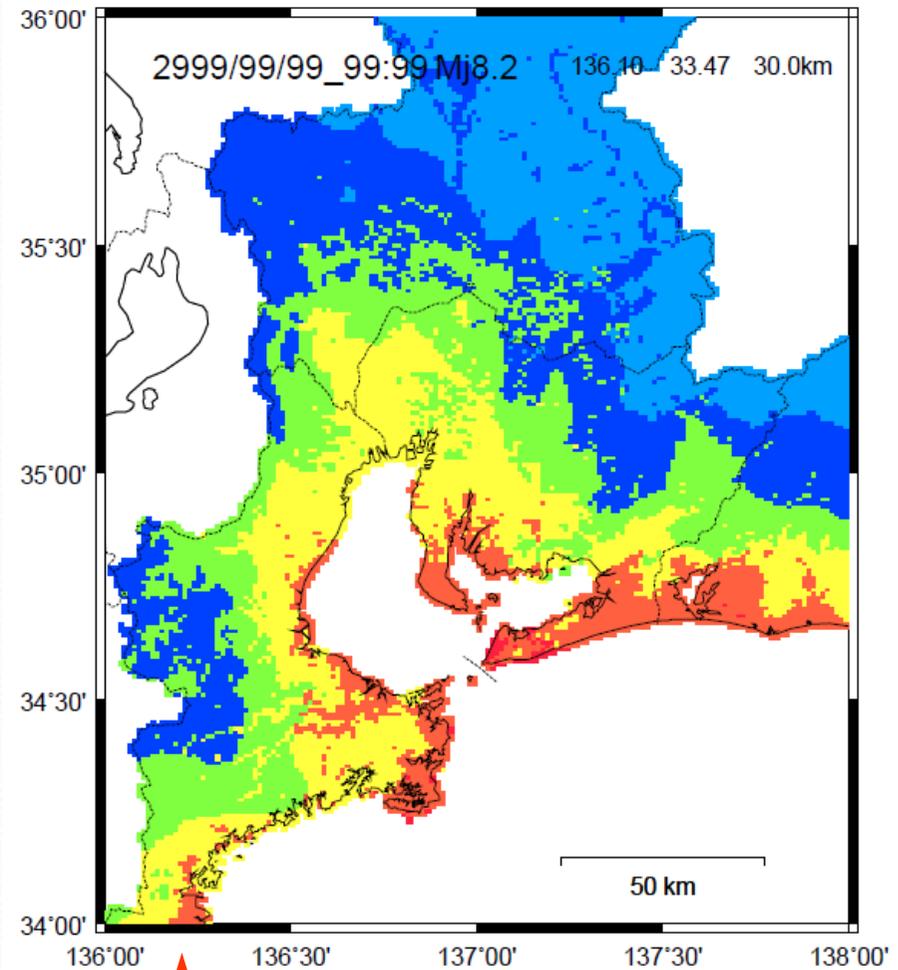
## 2.2 緊急地震速報システムの問題点

想定東南海地震に対する緊急地震速報システムに従って予測された震度と  
中防の震度予測の比較

緊急地震速報の震度シミュレーション



中央防災会議の震度予測(2001)



## 緊急地震速報の問題点

- ✓ 断層の近傍地点で配信が間に合わない  
→被害の大きな場所により早く情報を提供することが必要。
- ✓ M8クラスの巨大地震では予測震度が過小評価となる地点が生じる可能性がある  
→震源の情報として、**点震源に基づくマグニチュード**ではなく、**面的震源に基づく破壊域の広がり**の情報を提供することが必要。

## 2 . より早くかつ精度よい緊急地震速報 の開発

より早く → P波(上下動成分)の加速度の最大値から地震規模(あるいは破壊域)情報と最大動の大きさの予測情報を引き出す。

よりロバスト → 上下動成分の最大加速度は短周期成分が卓越するため、震源のメカニズムによる放射特性の影響が比較的少ない。しかし、地盤条件によるサイト特性の影響が大きい可能性がある。

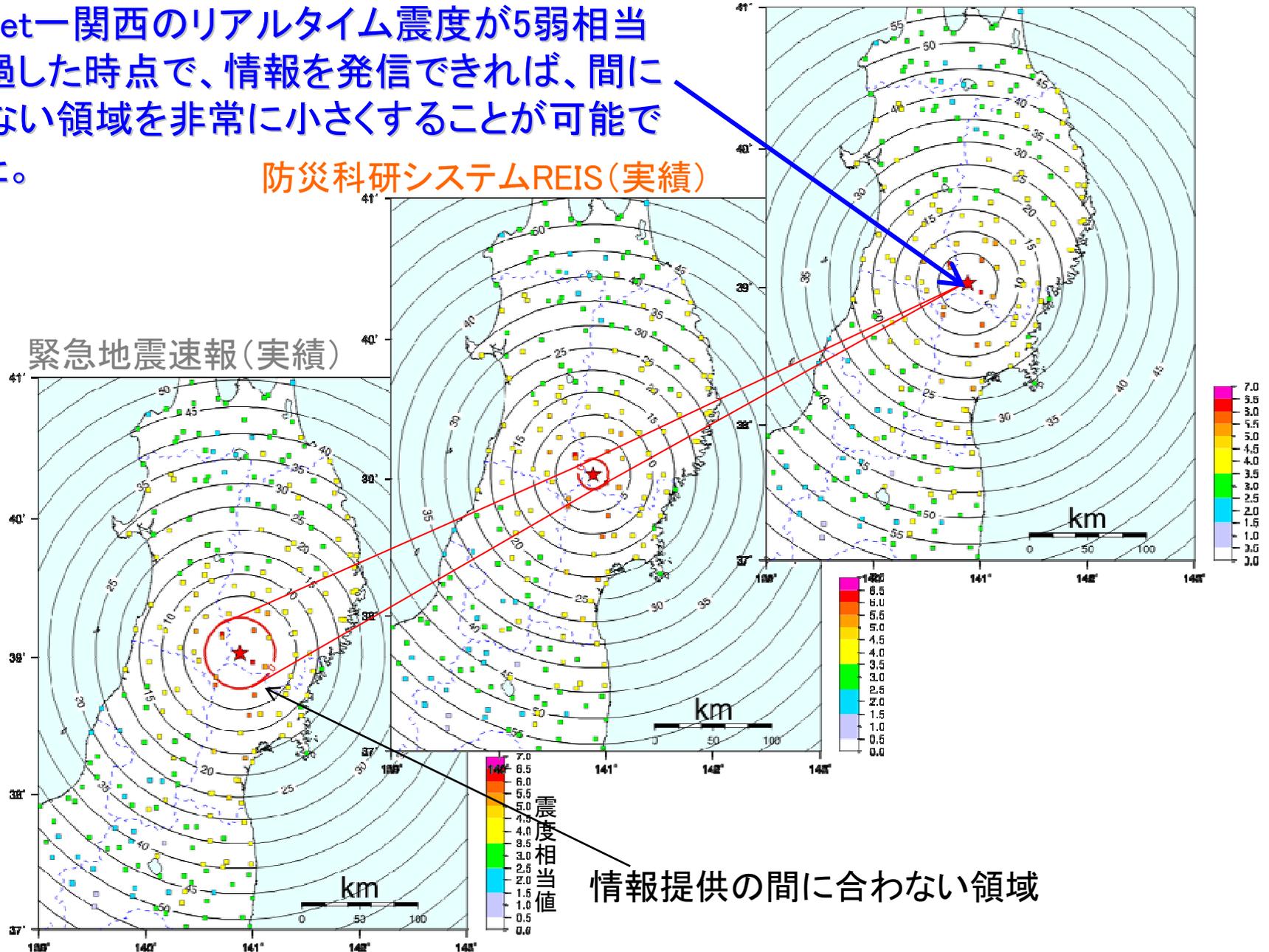
# 主要動到達までの猶予時間

KiK-net一関西におけるリアルタイム震度が5弱相当を超過したタイミング

KiK-net一関西のリアルタイム震度が5弱相当を超過した時点で、情報を発信できれば、間に合わない領域を非常に小さくすることが可能であった。

防災科研システムREIS(実績)

緊急地震速報(実績)

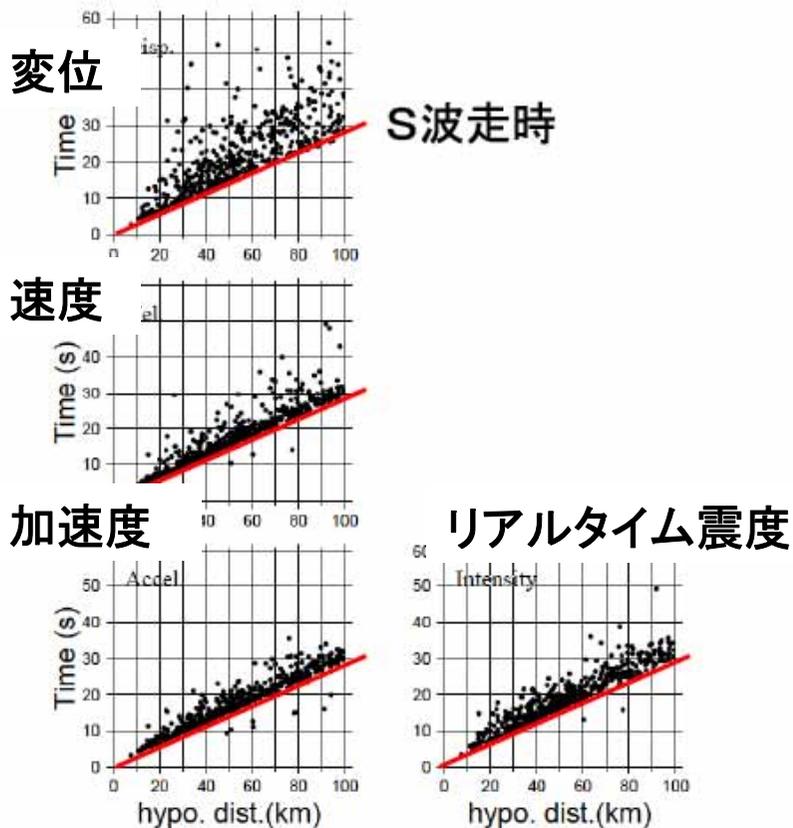


情報提供の間に合わない領域

# 最大動の出現時間

## 波形全体

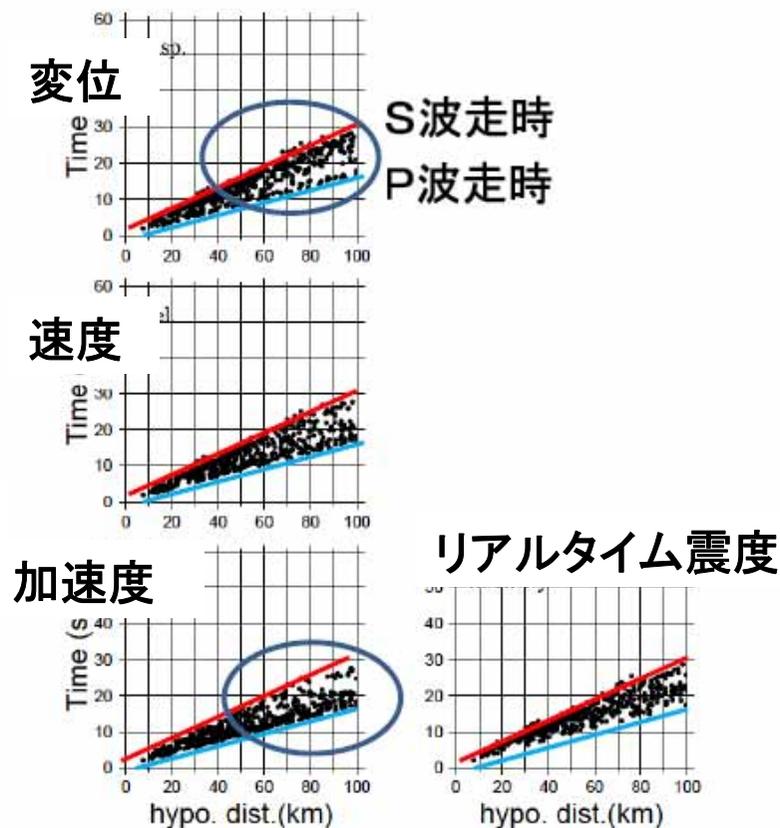
Whole Waveform:KiK-net  
mag.:5.0-9.9\_depth:0.0-30.0km  
n=484



- 波形全体でみると、
- ・加速度が最も早い
  - ・次いで、加速度、震度相当値
  - ・変位は遅いものがある

## P波部分(P波のS波の間)

P\_Wave:KiK-net  
mag.:5.0-9.9\_depth:0.0-30.0km  
n=484

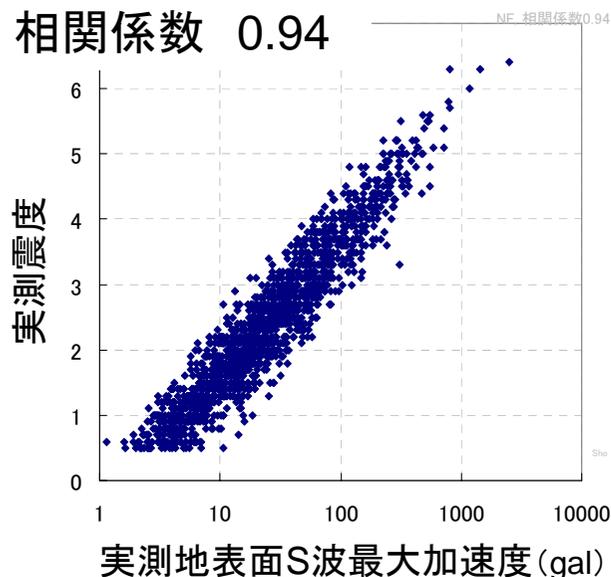


- P波部分では、
- ・加速度では、比較的P波着信の直後に最大値になるものが多い
  - ・変位では、S波着信の直前になるものが多い

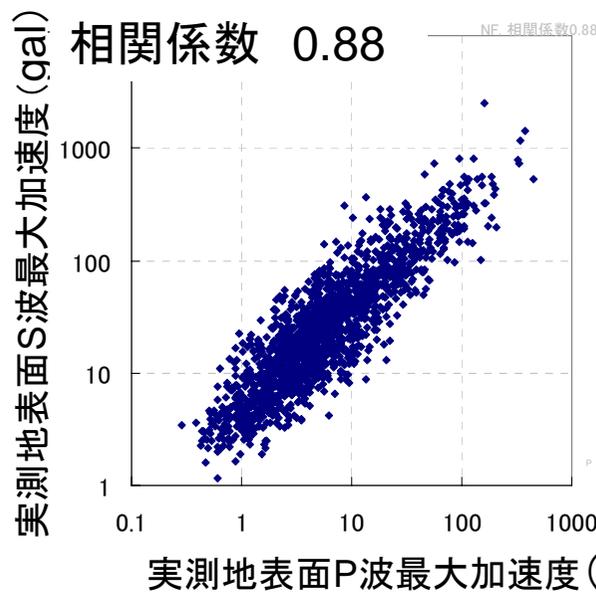
干場 ほか(2009) 加筆

# P波最大加速度と震度の関係式

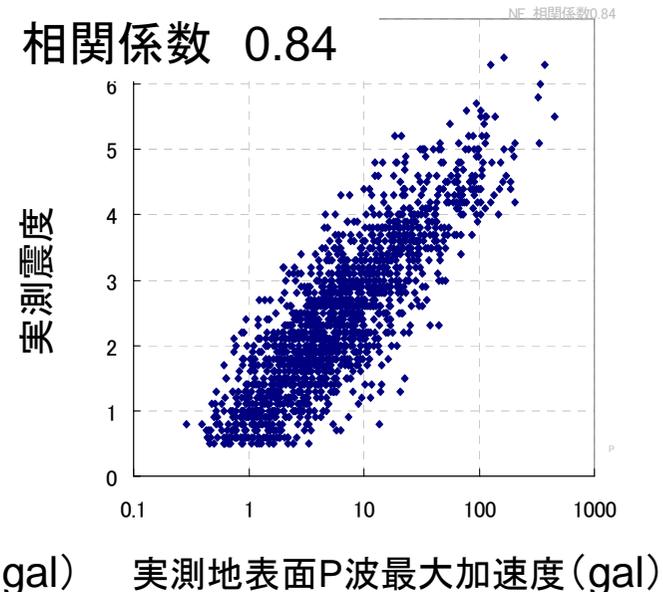
S波最大加速度と震度の関係



P波とS波の最大加速度の関係



P波最大加速度と震度の関係



既往の研究では最大速度と震度が相関がよいと言われている。  
P波最大加速度からの震度の予測も可能である。

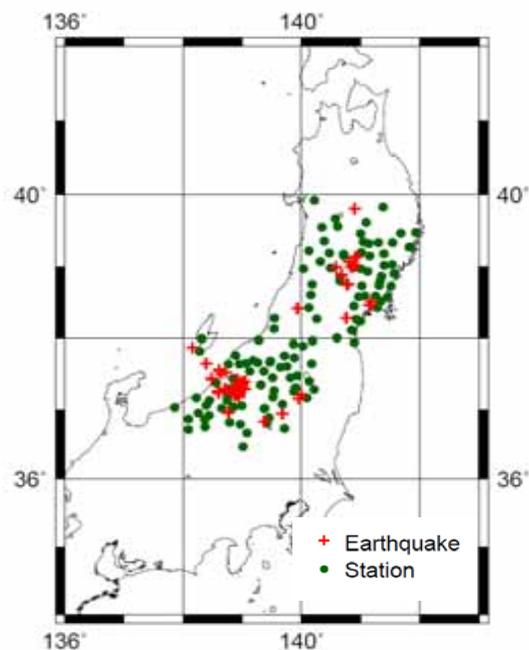
$$I = 2.18 \cdot \log P_{\max} + 0.77$$

ここに、

$I$  : 震度

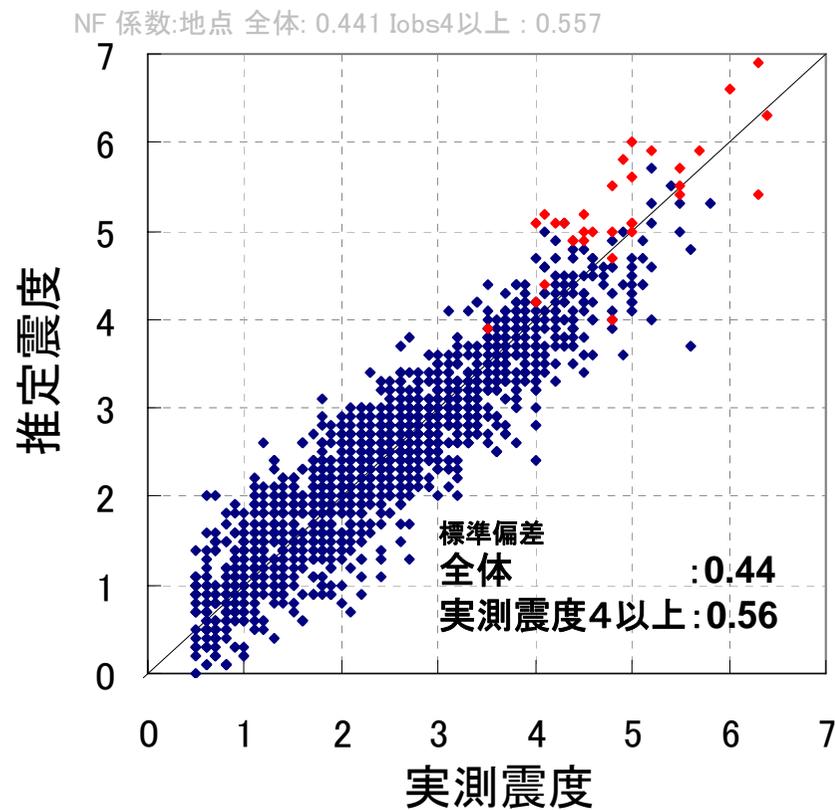
$P_{\max}$  : P波地表面最大加速度, 上下成分( $\text{cm/s}^2$ )

# 予測震度と実測震度の精度比較



データ数 : 1570  
地点数 : 124  
地震数 : 55

## 提案手法による震度予測



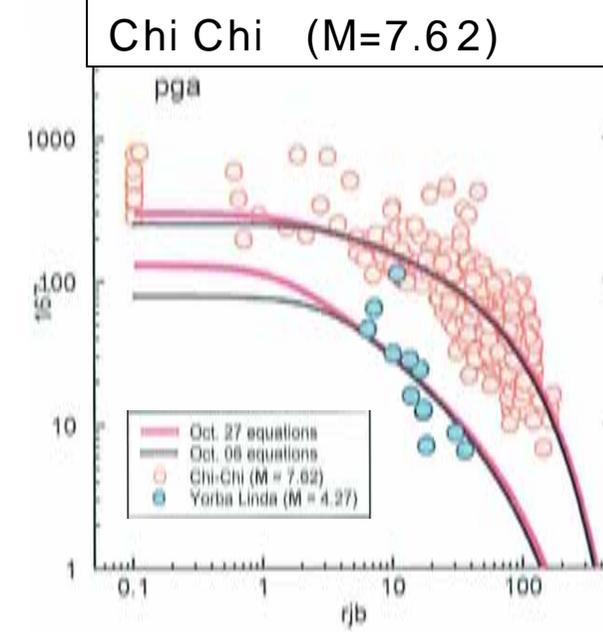
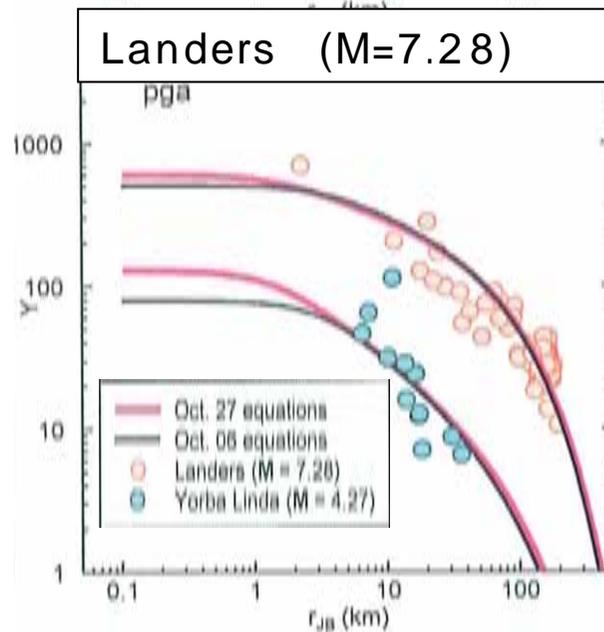
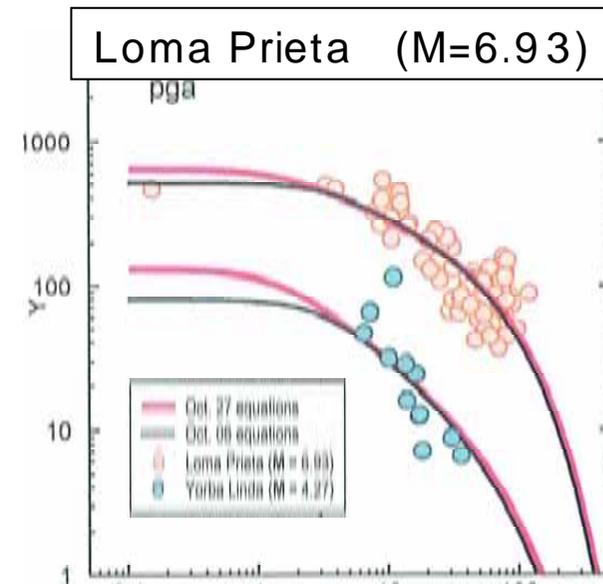
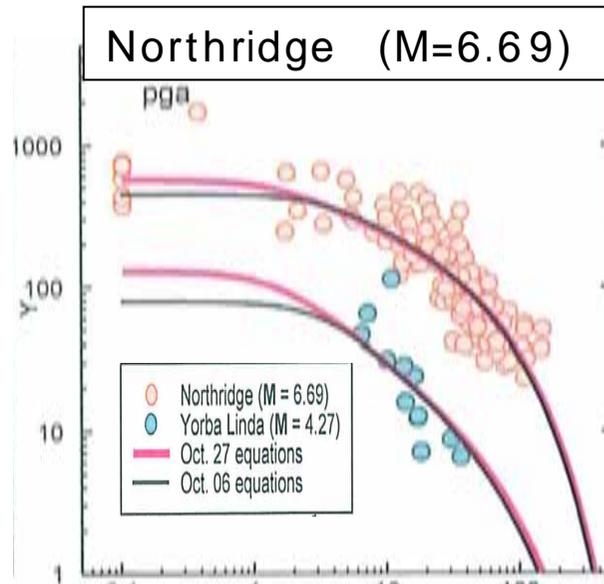
### 3 . 巨大地震のときにも効果的緊急地震速報を提供するために

PGA(加速度最大値)は、一定規模(~Mw 6.5)以上の地震では断層近傍域で飽和する(Magnitude Saturation)。

→ これは水平動の最大加速度(S波)について米国のNGAの距離減衰式で得られている。水平成分の最大動が来る前の上下動の加速度最大値は断層近傍域で飽和するか確認が必要。

# S波PGAの距離減衰

Compiled by "PEER NGA" Project



# NGA Attenuation Relations for PGA

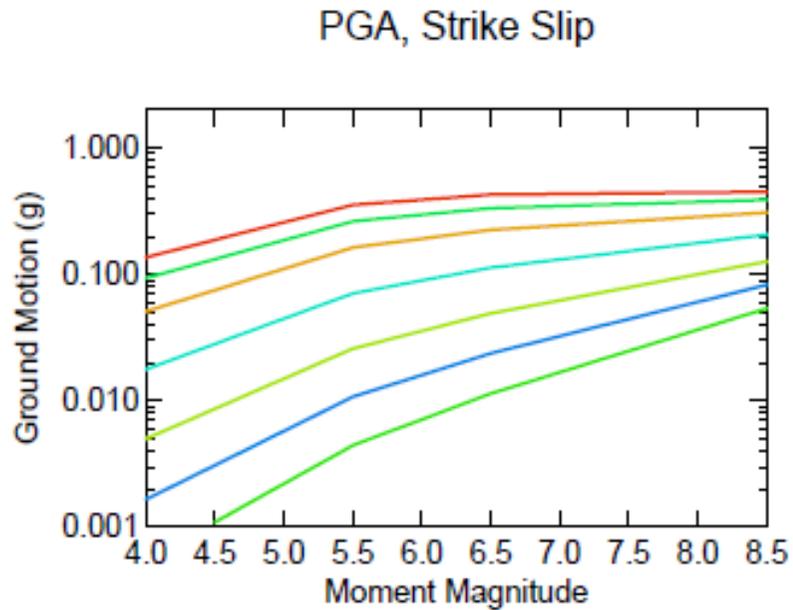


Figure 1. PGA versus  $M$  for  $r_{rup} = 0-200$  km.

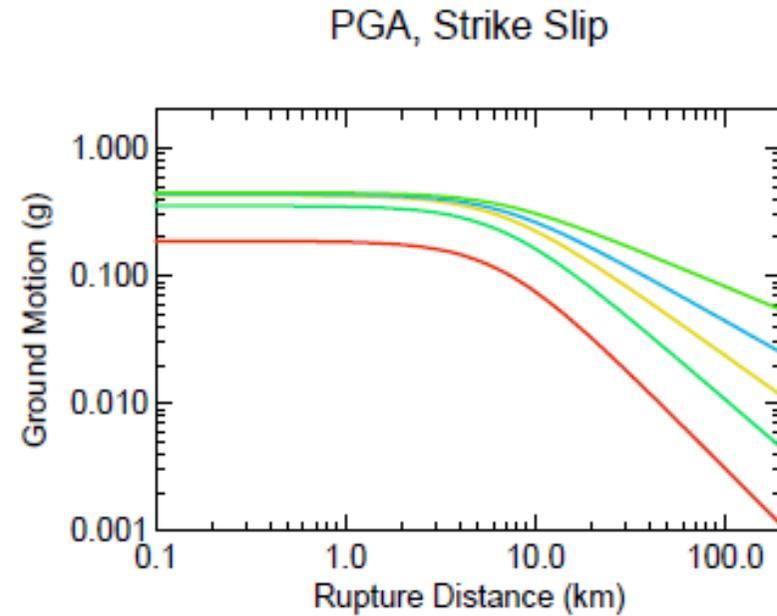
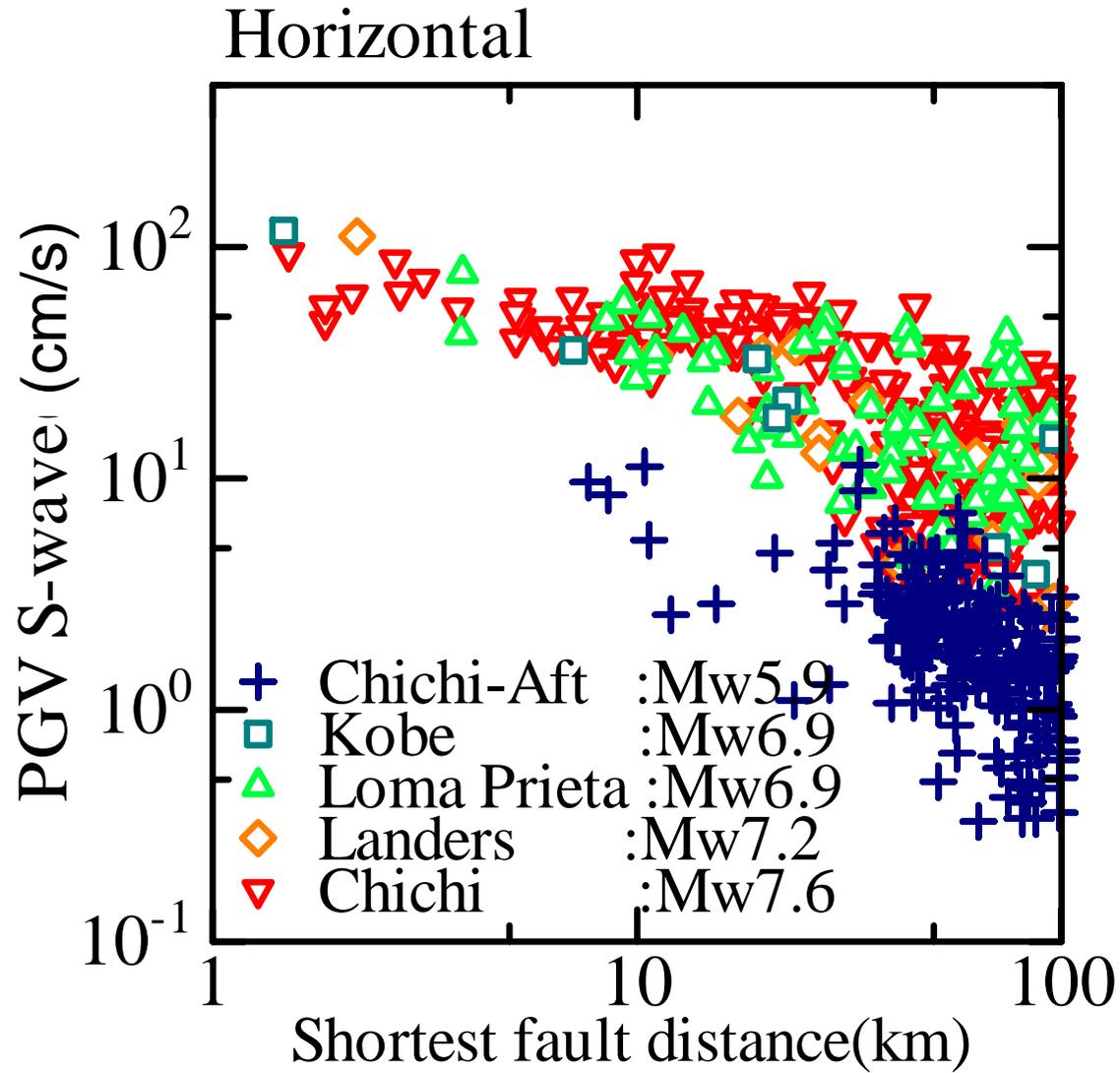


Figure 2. PGA versus  $r_{rup}$  for  $M = 4.5-8.5$ .

Cambell and Bozorgnia (2006)

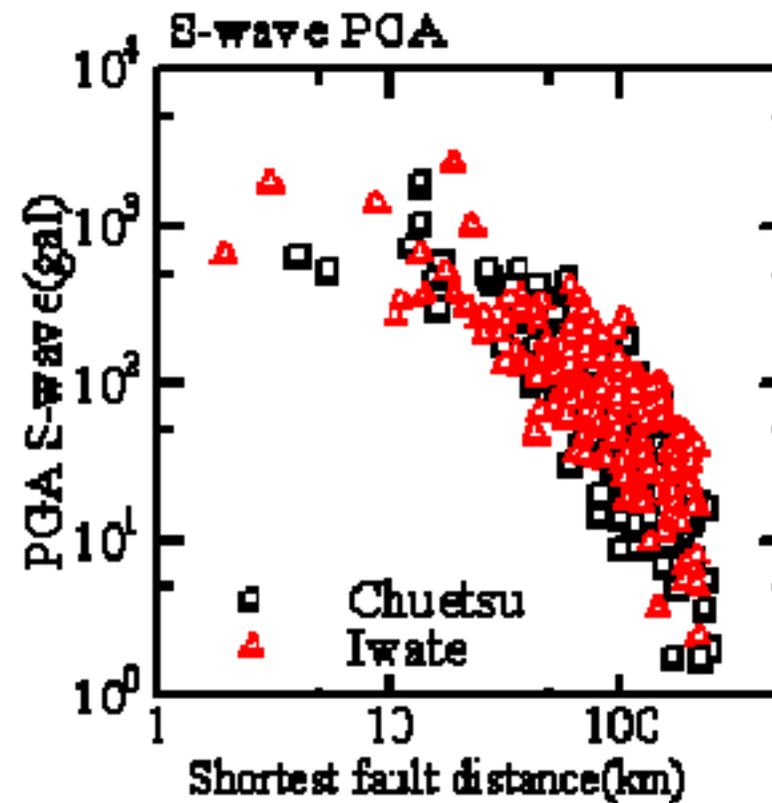
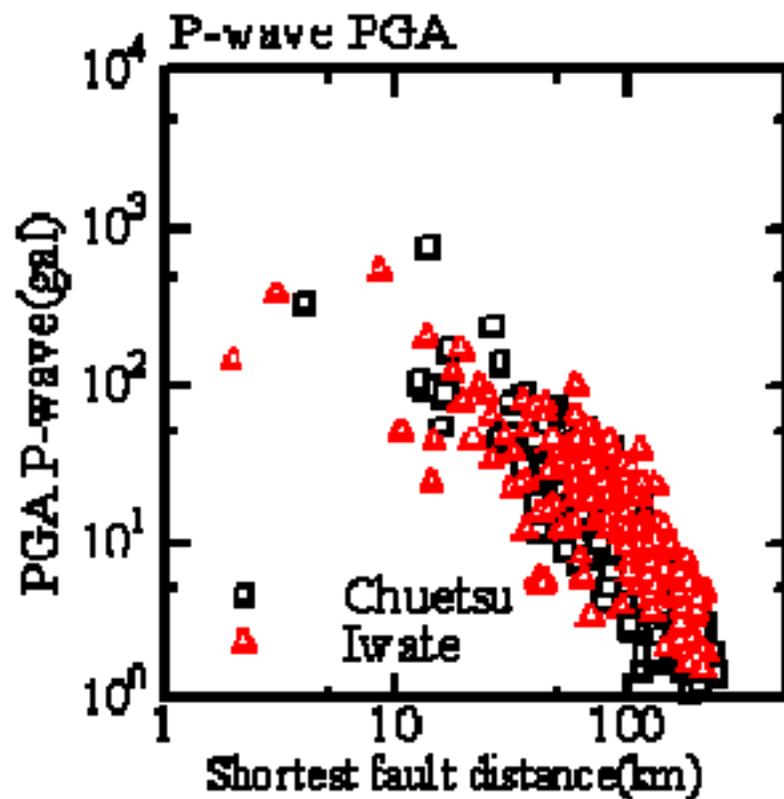
米国の次世代型距離減衰式によると、PGAは、断層近傍域において、マグニチュードによらず一定値(magnitude saturation)となる。

# 水平動(S波)のPGVの距離減衰



# P波PGAの飽和域と断層域との関係から、断層域の広がり を推定する方法の試み 倉橋ほか(2009)

中越地震と岩手宮城内陸地震のP波およびS波の距離減衰

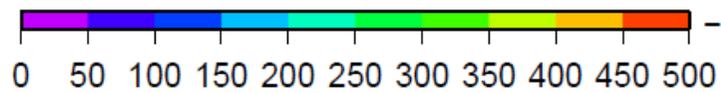
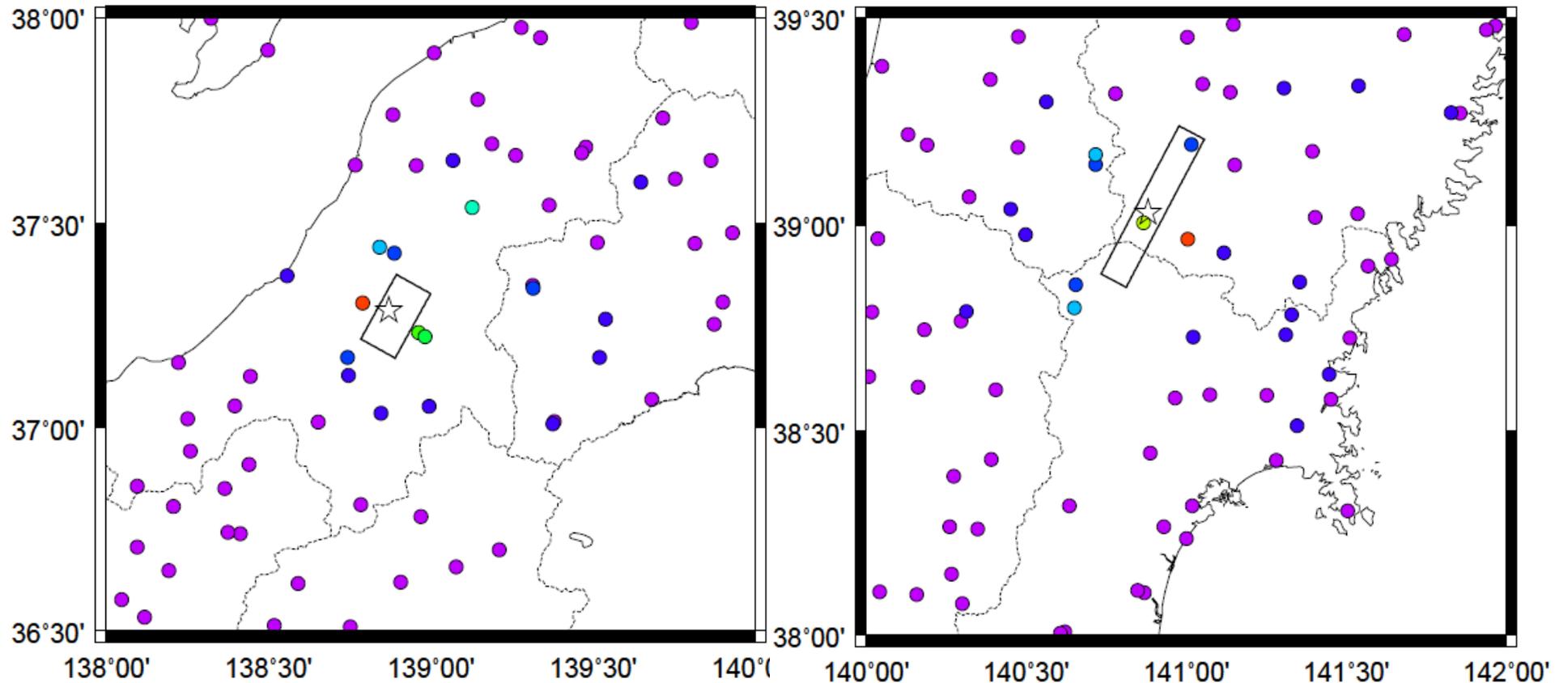


ここでは、破壊開始点から発生したS波到達までのP波部分を使用

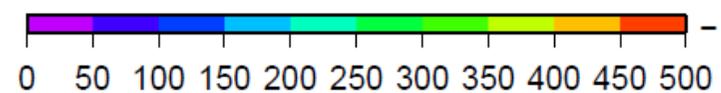
# P波の最大加速度分布

2004 中越地震 Mj 6.8

2008 岩手宮城内陸地震 Mj 7.2

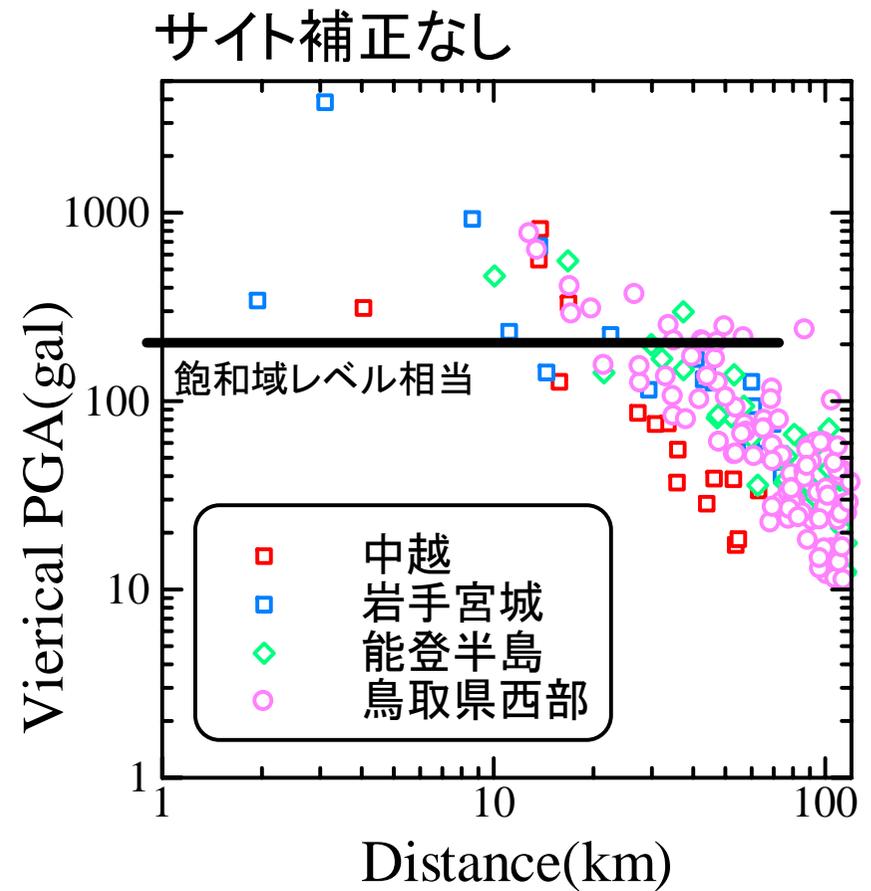
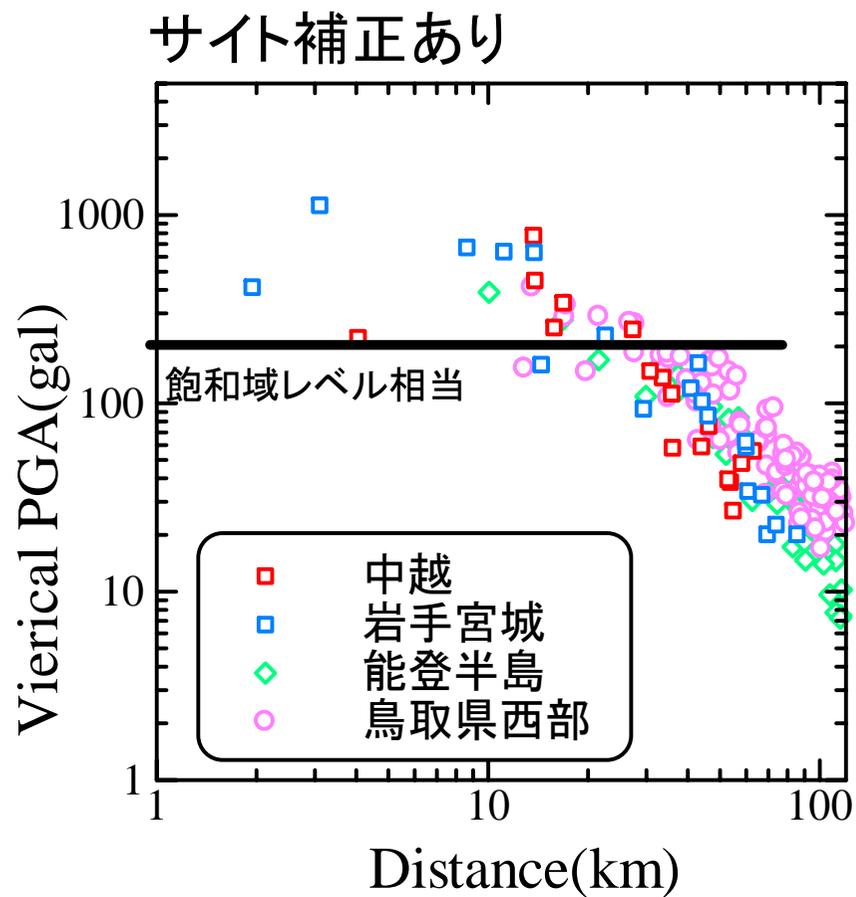


P-wave\_PGA\_gal

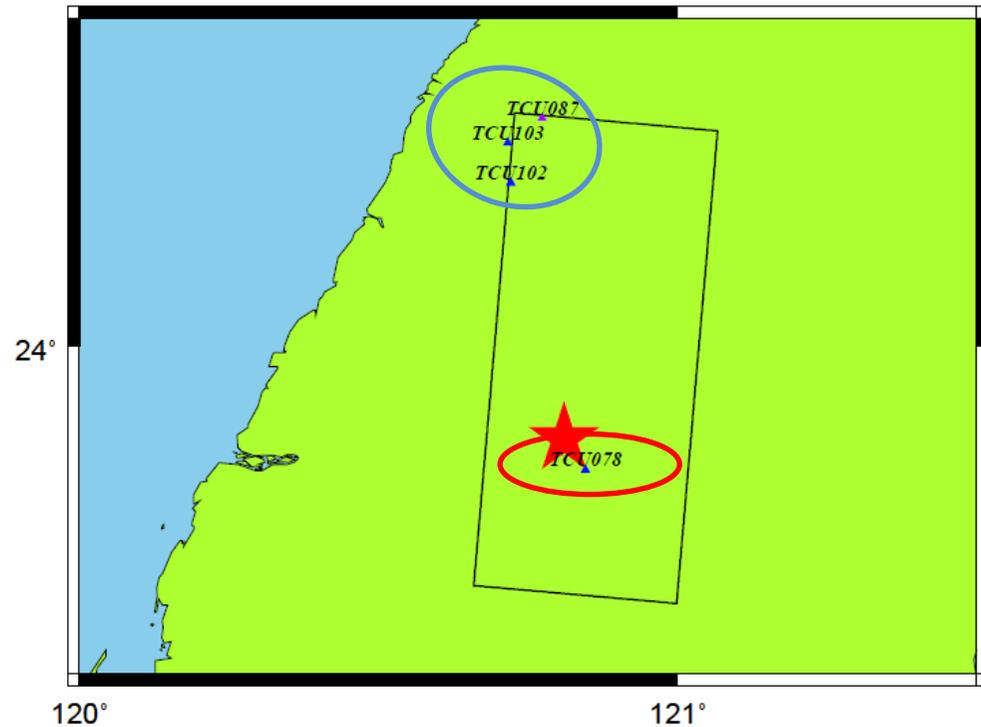
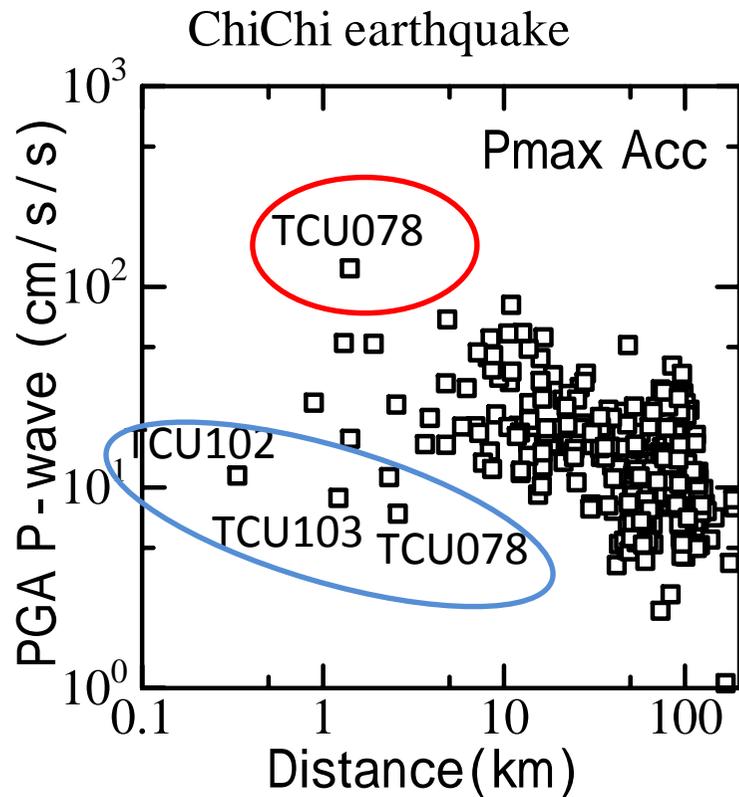


P-wave\_PGA\_gal

# サイト特性を補正した上下動値 飽和域のレベルの推定



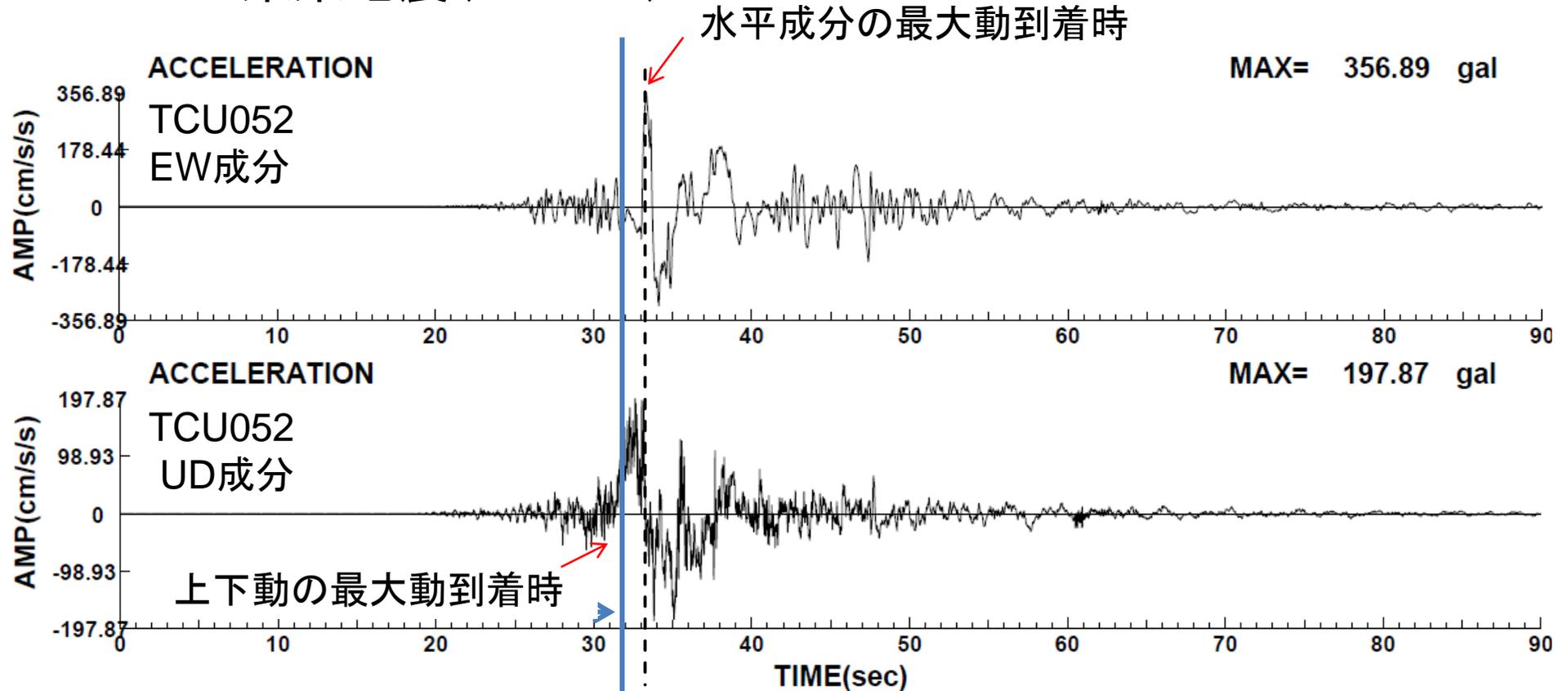
# Chichi地震の場合



破壊域が大きい場合は、破壊開始点からのS波初動までのP波加速度(点震源の仮定)は適用できない。

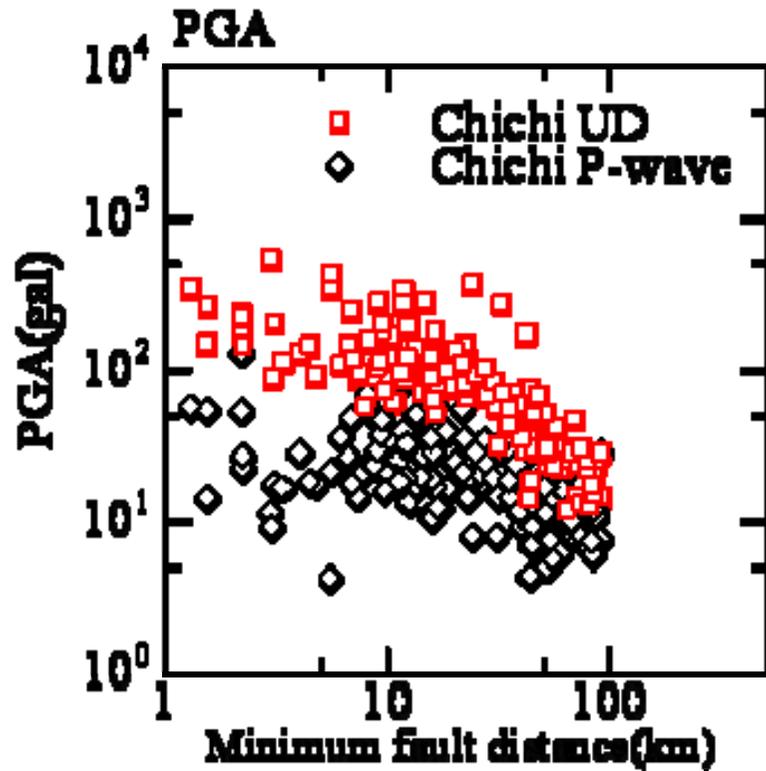
# 水平成分(S波)の最大動到達前のUD成分の最大値 (破壊域の端部からのP波の最大値)

1999集集地震(Mw 7.6)

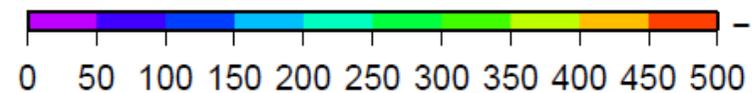
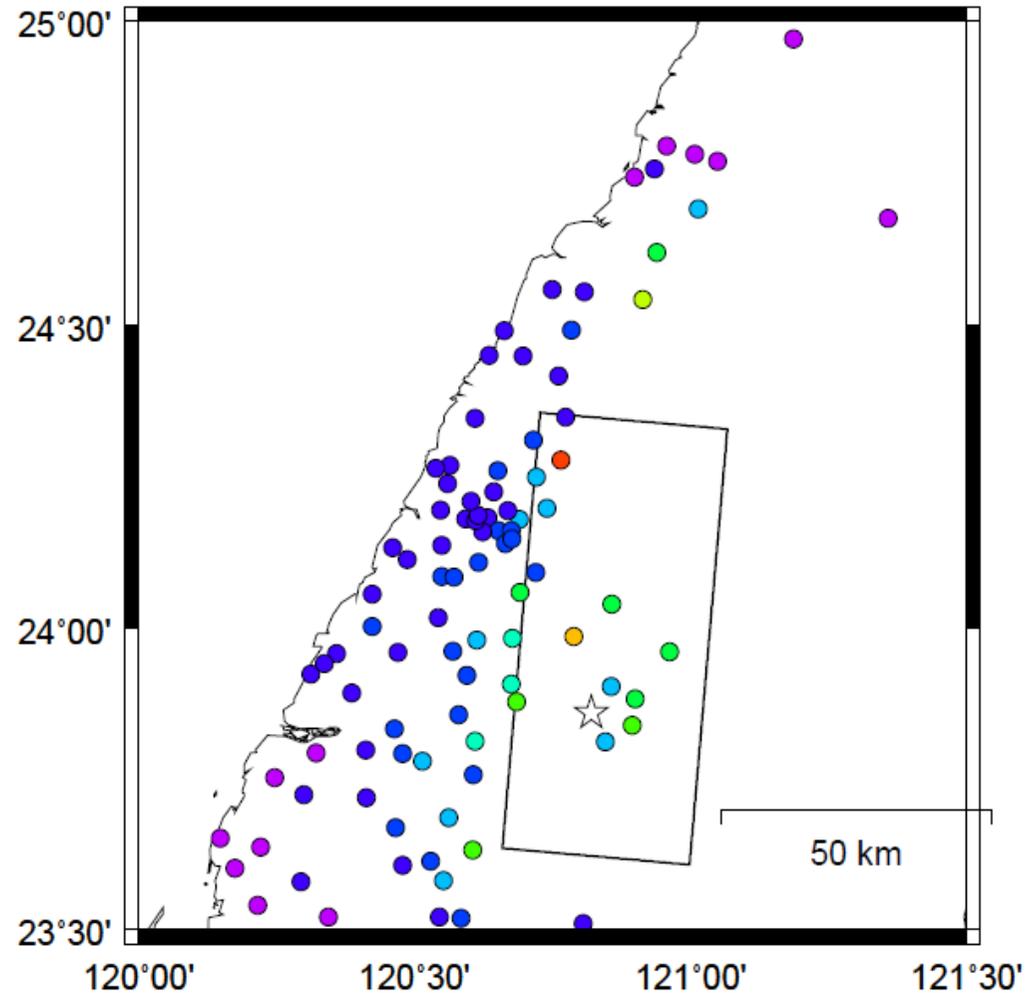


観測点から最も近い破壊域からのP波を捉え、最大動を予測することが必要。

主要動のS波の最大動までのUD成分を用いた場合、飽和域がみられ、150gal程度を閾値とすれば、断層の広がりが推定できそう。



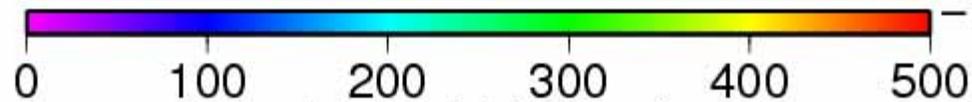
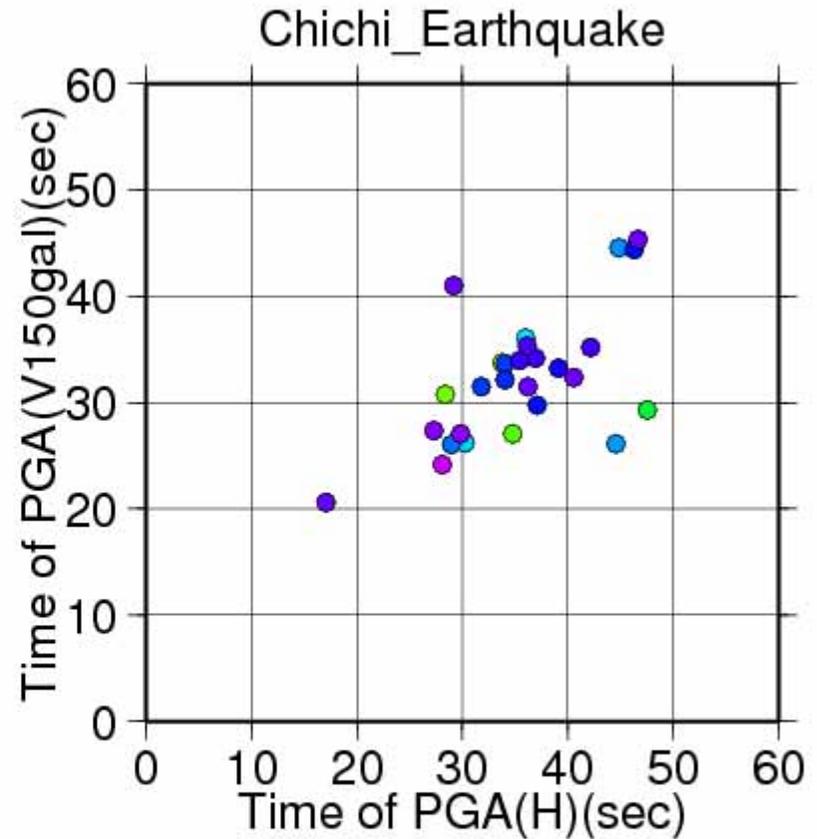
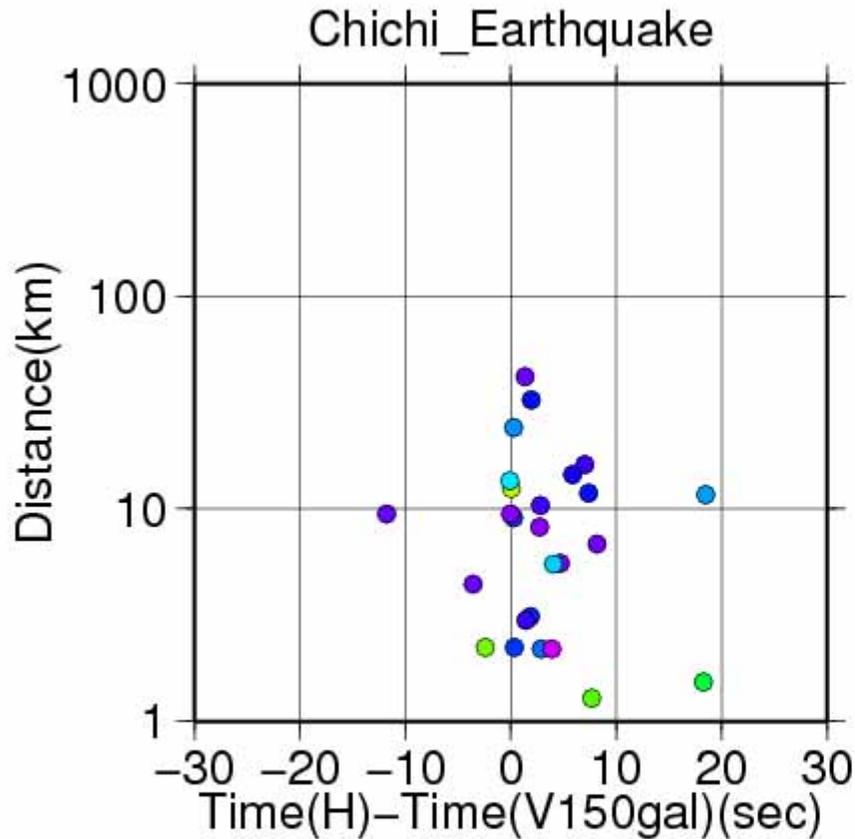
The saturation level is about 150 gals.



UD\_P-wave\_gal

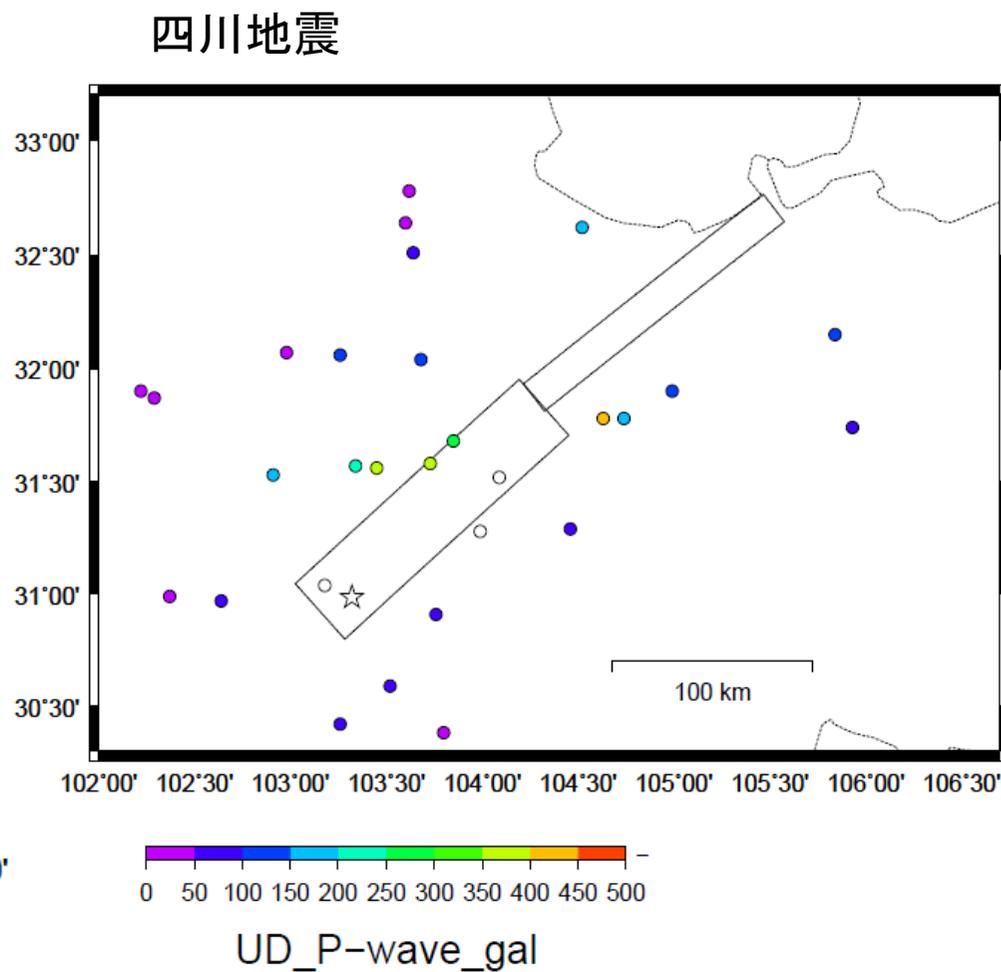
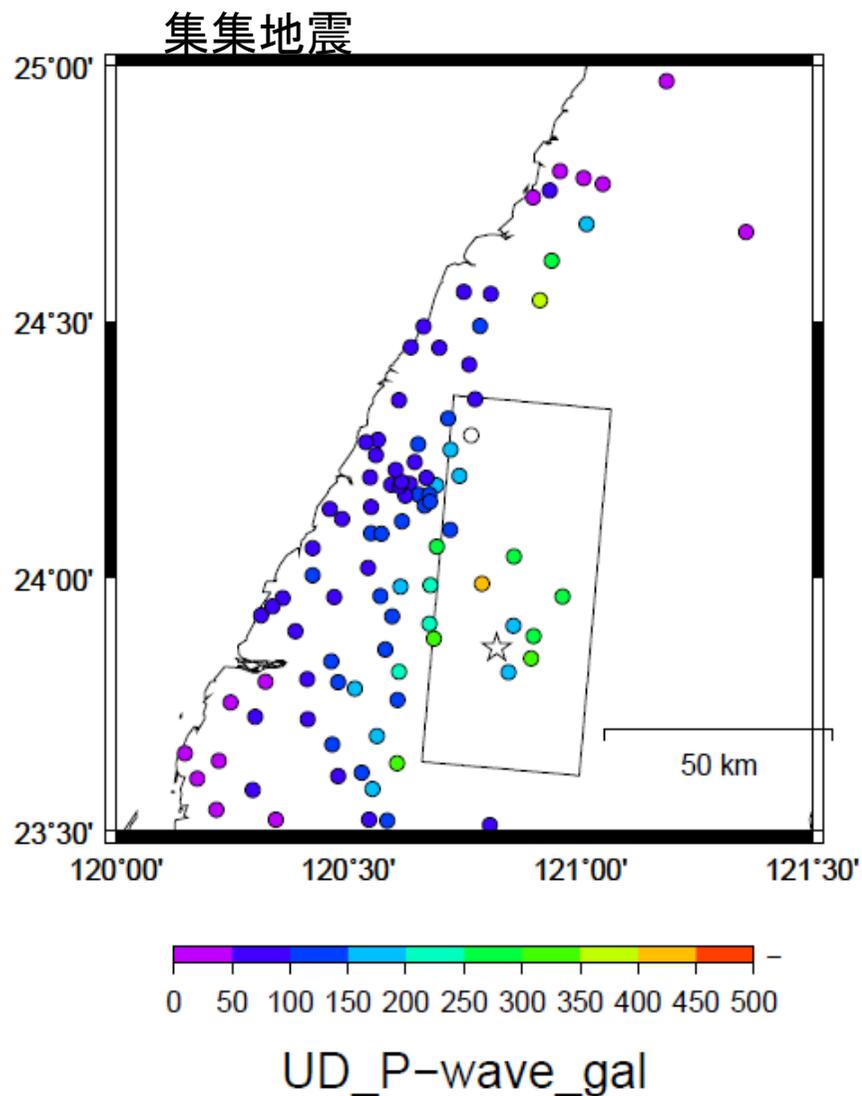
# 水平最大動の到着までの猶予時間

水平最大動の時刻と上下動150gal到達時刻の差



上下動150gal到達時の水平動加速度 (gal)

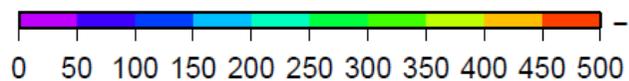
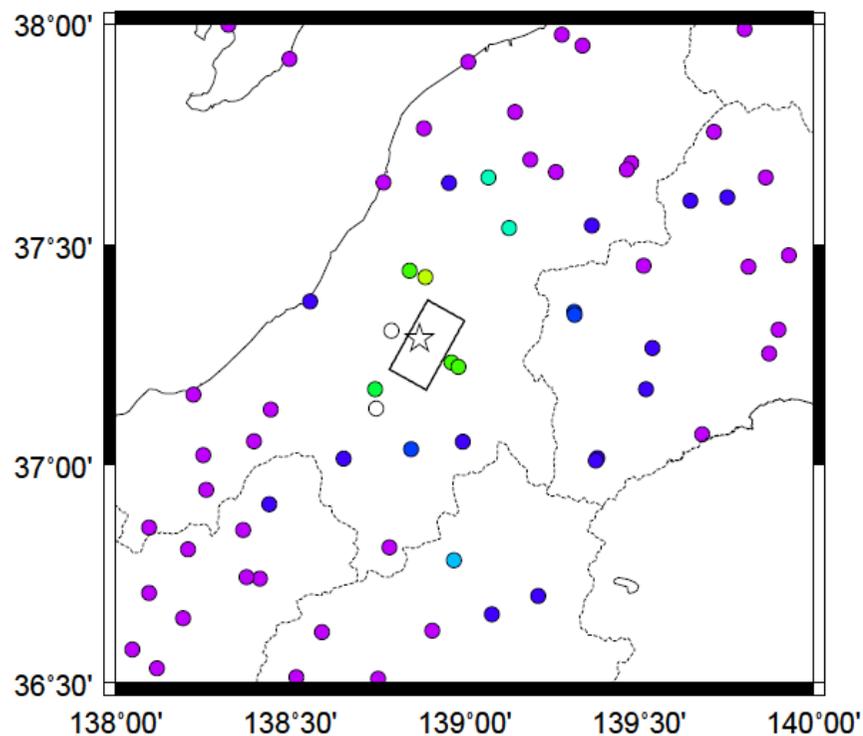
# 最大動到達までの上下動成分の最大加速度分布



○印は観測点で、その色は、加速度値を示す。  
ただし、白色は500gal以上の値を示す

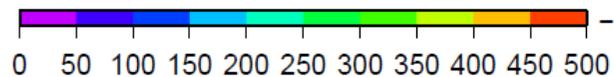
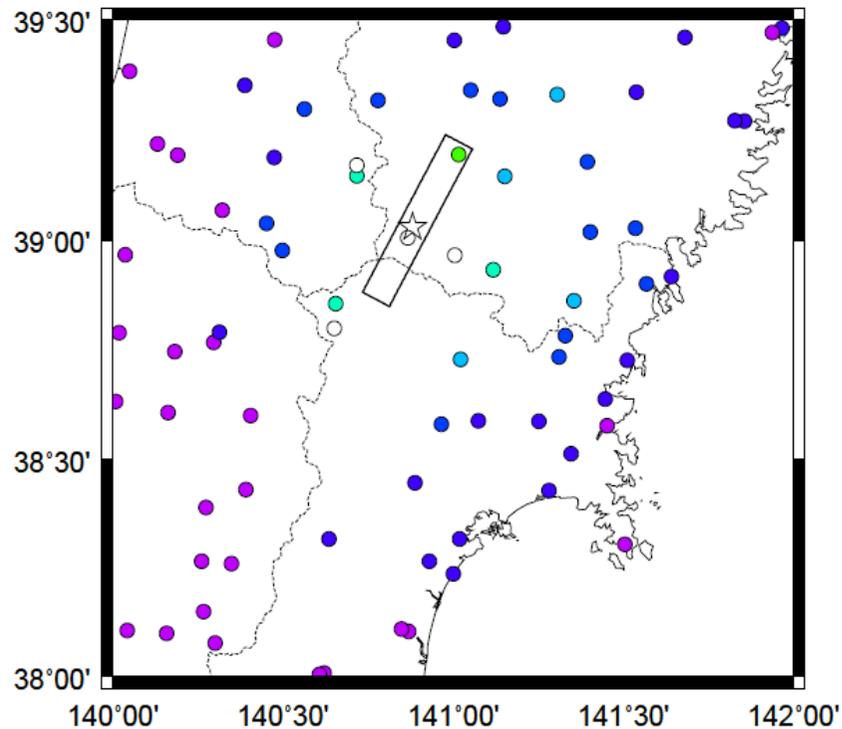
# 最大動到達までの上下動成分の最大加速度分布

## 中越地震



UD\_P-wave\_gal

## 岩手宮城内陸地震



UD\_P-wave\_gal

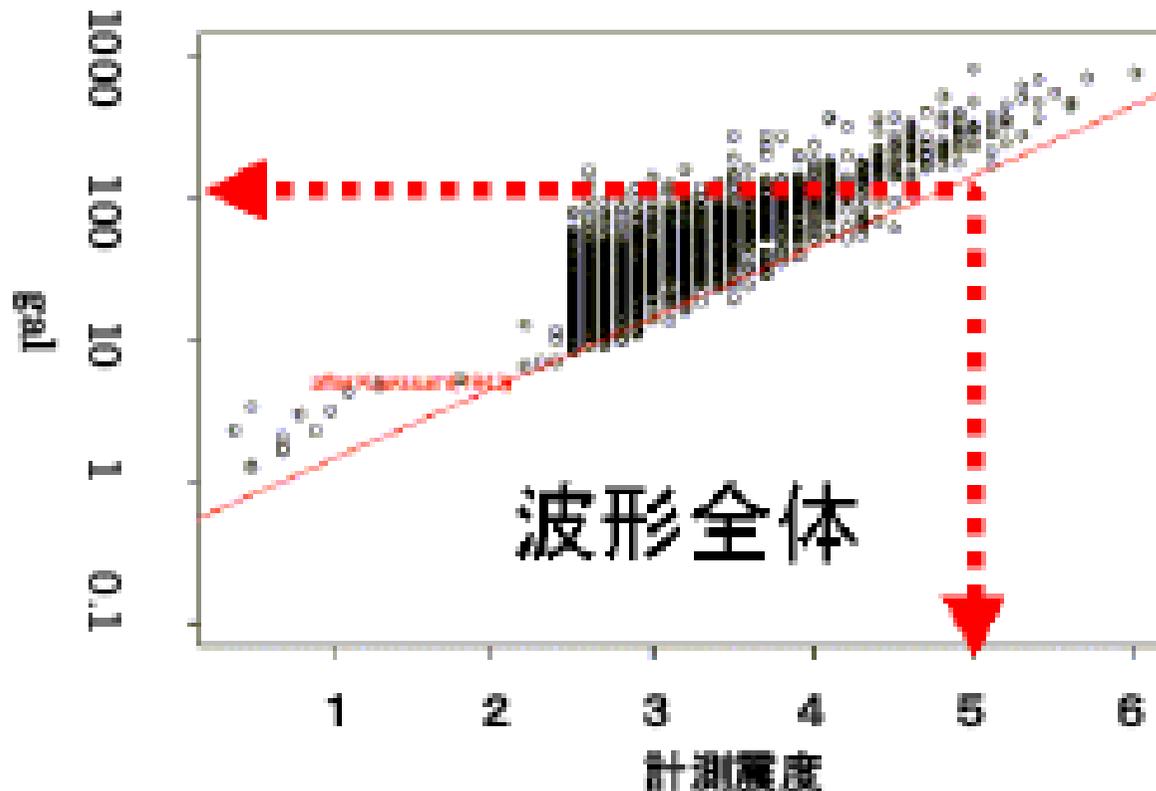
○印は観測点で、その色は、加速度値を示す。  
ただし、白色は500gal以上の値を示す

# 本研究で提案する緊急地震速報のための 震度予測方法

1. P波の最大加速度 (PGA) の距離減衰は、ある一定以上の規模の地震 (Mw 6.5程度) になると、同じような特性をもつ。  
→ Mw 6.5以上の地震に対して最大加速度は頭打ちになるので、最大加速度からはマグニチュードは決まらなくなる。
2. UD成分のPGAが一定以上 (例えば、 $>150$ ガル) の領域を破壊域と考えて、そこから距離減衰式により対象地点の震度を評価する。

## レベル法

レベル法は観測点直下付近で地震が発生する場合を考慮したものである。現在はパルスノイズを除去するために高周波をカットした上下動加速度波形、あるいは加速度水平動2成分合成波形が100galを超え、かつ品質管理センサが基準以上の振幅を観測した場合、処理中枢に観測データを発信する(下図参照)。



60秒間の加速度3成分合成波形の最大振幅と計測震度の関係

気象庁(2008): 緊急地震速報の概要や処理手法に関する技術的参考資料

## 4 . 新たな技術開発の必要性

より早く → P波(上下動成分)の加速度の最大値から地震規模(あるいは破壊域)情報と最大動の大きさの予測情報を引き出す。実用化のためには、オンサイト・システムと緊急地震速報システムの有機的結合が必要。

そのための技術開発:

- DONETシステムによるリアルタイム地震観測  
→ 南海トラフに発生する巨大地震に緊急地震速報を有効活用するためには不可欠。
- 深層ボーリングでの地震観測データのリアルタイム伝送(強震時に飽和しない計器を用いる必要)  
→ 産業機器の制御システムに活用(例:半導体工場のライン制御、原子力施設のシャット・ダウン)
- 高密度なリアルタイム地震観測  
→ 小中高における防災教育の一環として強震計を配置。  
→ 民間ベースのリアルタイム強震観測システムの活用。

# 地震瞬時速報システムの開発

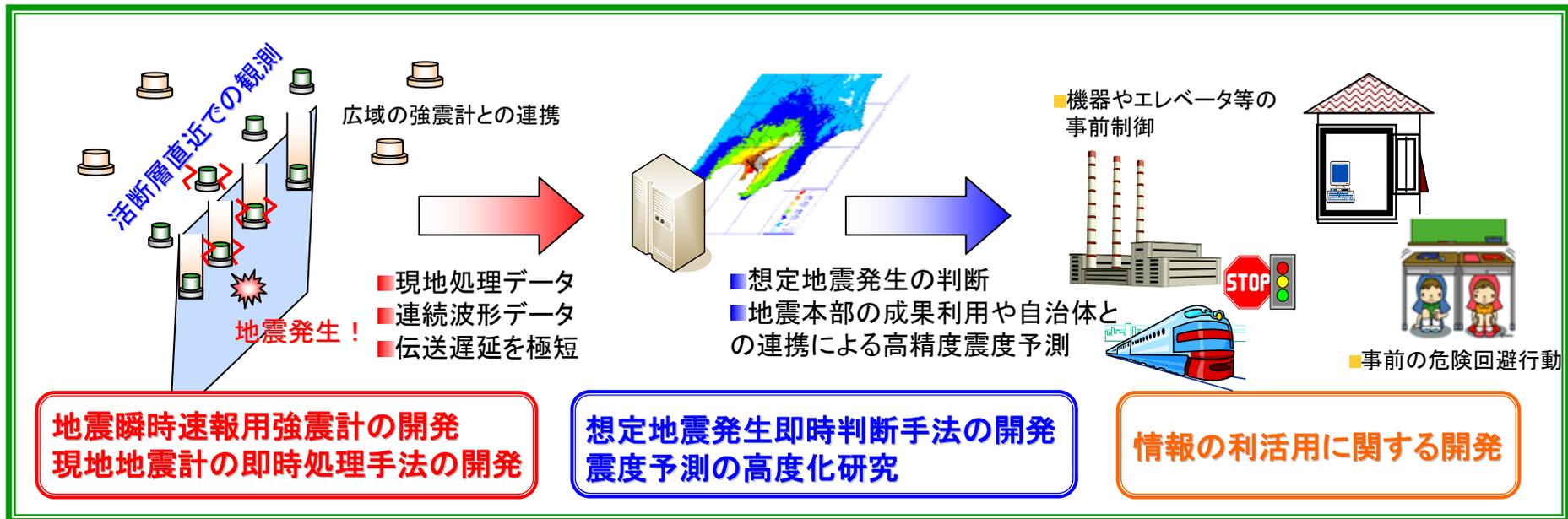
(開発期間:平成21年度~24年度)

## 【目的】

震源近傍でいち早く大地震の発生を検知・伝達することで、情報の「間に合わない」領域を可能な限り小さくする。

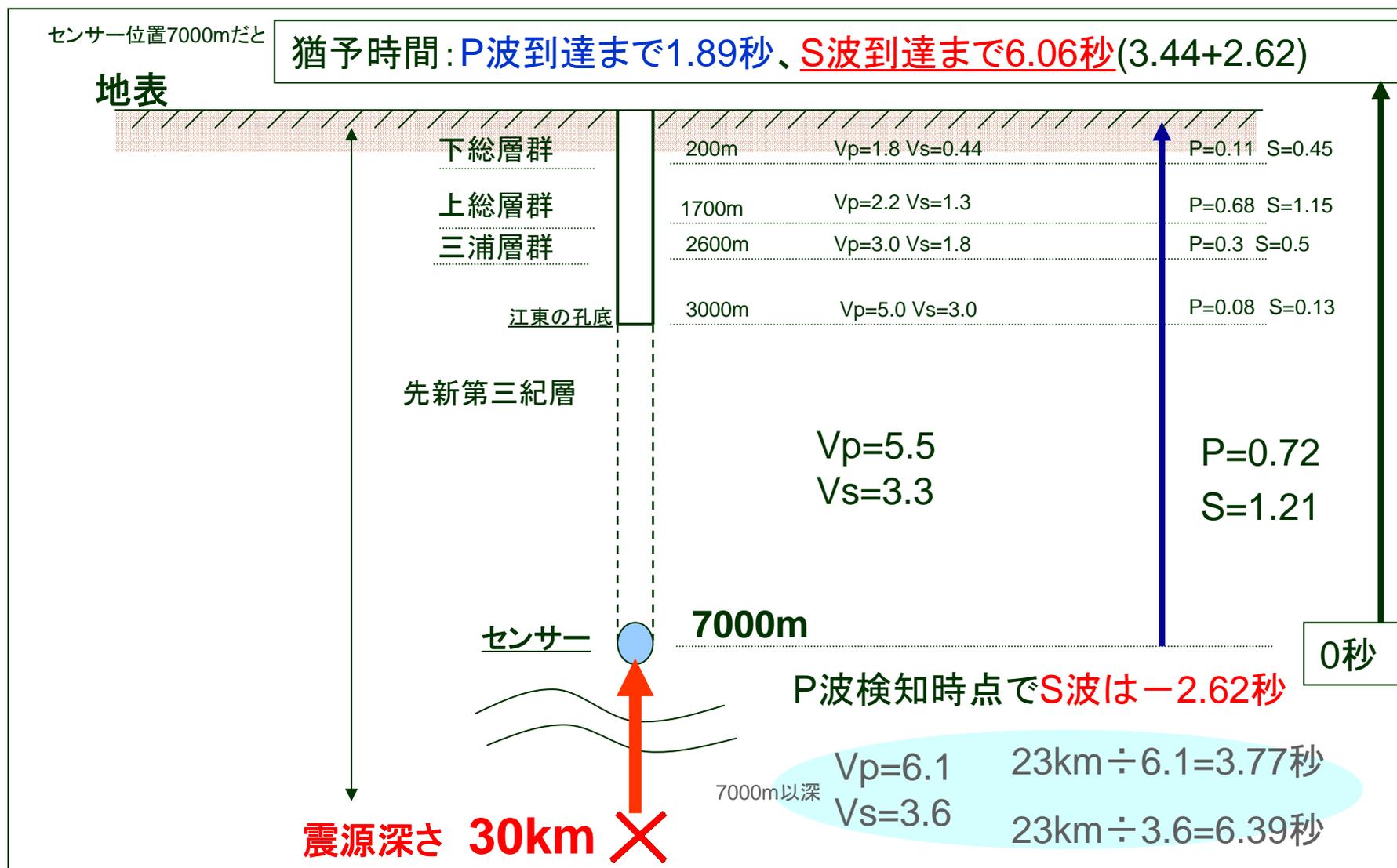
## 【システムの特徴】

- 特定の活断層の直近でのリアルタイム強震観測(高サンプリング連続観測等)
- 単独観測点による現地処理
- 諸元の推定を行わず、予め想定した揺れや被害の情報を利用



<震災対策技術展・防災科研のブースにて展示>

# 深層ボーリング江東(掘削深度3000m)のPS到達時間「震源深さ30km」



## 猶予時間一覧表③(センサー位置3000m)

	震源深度30km		震源深度50km	
	P波地上到達猶予時間	S波地上到達猶予時間	P波地上到達猶予時間	S波地上到達猶予時間
「深度0~200m」 が一律Vs=0.44	1.17	5.34	1.17	7.61
「深度0~80m」 Vs=0.20、「深度 30~200m」 Vs=0.44	1.17	5.56	1.17	7.83
地表近くの低速度層が厚い場合、猶予時間はさらに増加する				

※ ただしセンサー判断に1秒未満時間が必要

# 半導体工場の事例(案)

宮城沖電気の機械制御

(社員数800名)

この半導体工場では、製造ライン停止のため3秒の猶予時間が必要とされている

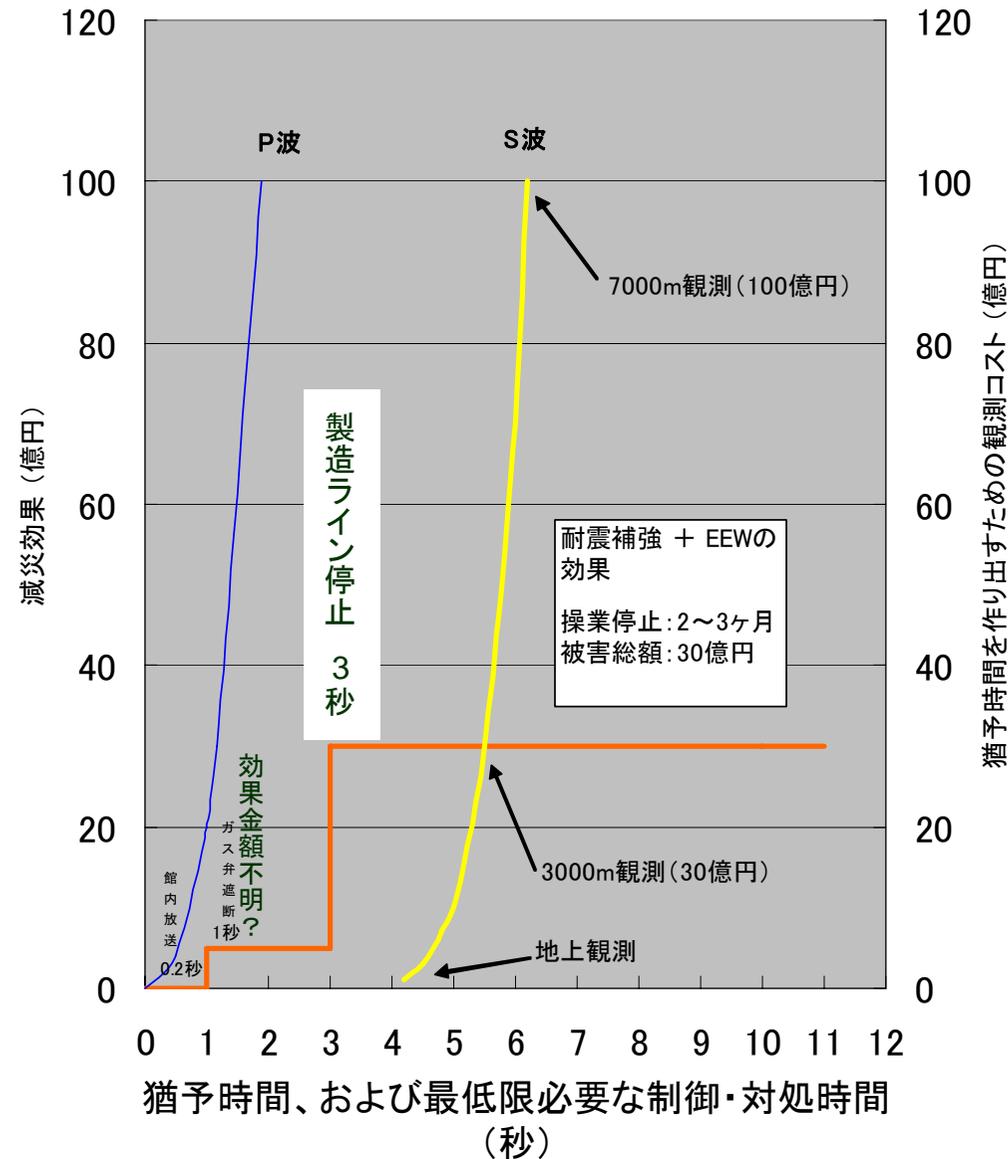
<条件>

- ・東京の江東(深層ボーリング)位置に工場があると想定
- ・震源は江東(深層ボーリング)位置の真下深度30km

※ ガス遮断弁の減災効果金額は不明

検知・判断に1秒程度必要?

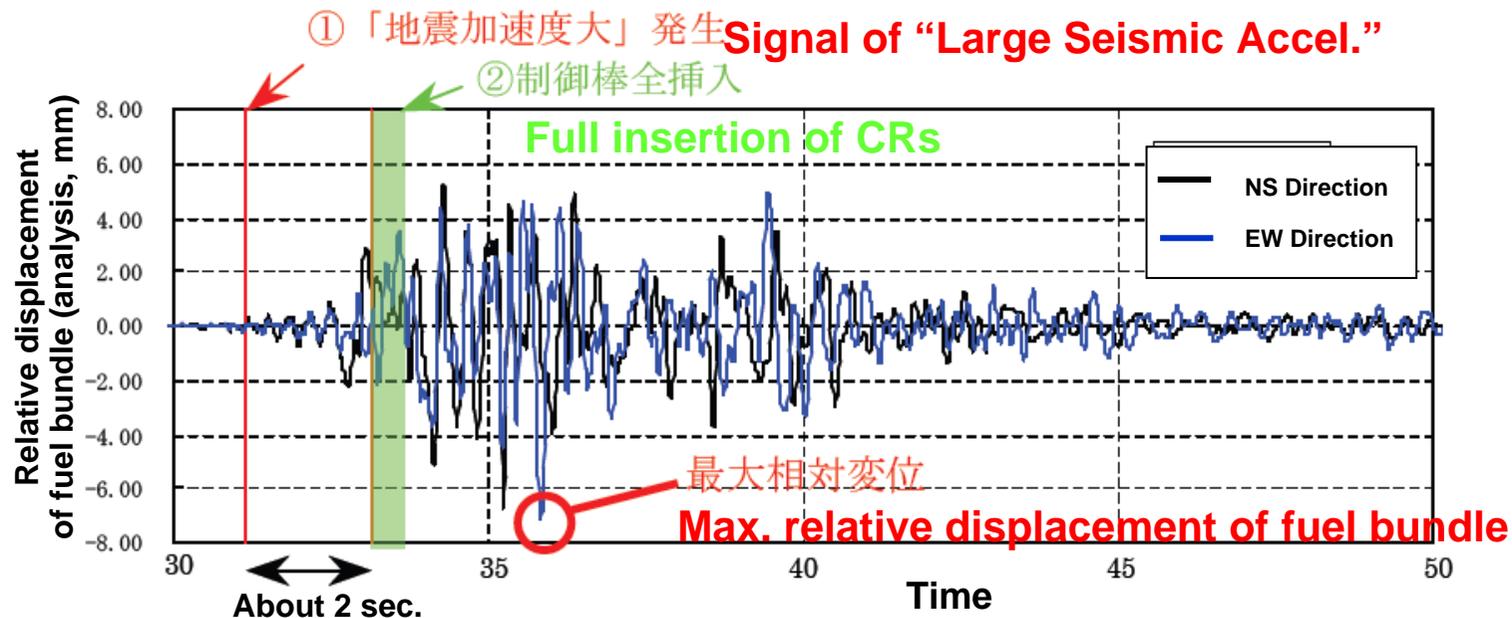
半導体工場 事例1



## Evaluation of Operation/Management of Facilities at/after NCO Earthquake

Working Group on the Operational Management and Evaluation of the Facilities Integrity

- (1) Evaluation of three fundamental safety functions : They were maintained because four plants which were in operation or start-up condition were shut down by seismic triggers and maintained cold shut down condition and there was no abnormality of fuel bundles.



### Insertion time evaluation of control rods for K-7

- (2) Although there was no EDG start-up at NCO earthquake (because external power lines were secured), there was no abnormality on EDGs in start-up/operation tests after earthquake. Therefore emergency power source was evaluated to be secured.

## 2007年中越沖地震のときの柏崎刈羽原子力発電所の原子炉のスクラム要する時間

スクラム時の制御棒挿入速度(実測値)

- 2号機:0.905~0.955 s (75%挿入時) <1.62 s (設計値)
- 7号機:0.714 0.807 s (60%挿入時) < 1.44 s (設計値)

原子力安全委員会資料(2007)  
耐PT4-5号 東京電力報告

原子力施設の耐震安全性は、強震時に原子炉が、「止める」、「冷やす」、「閉じ込める」の3つの機能が有効に働くことで、確保される。制御棒挿入はその第1段階の「止める」ために不可欠で、主要動到着前に制御棒の挿入が完了することが望ましい。

# Introduction of the Earthquake Early Warning System to Shut-down Systems of Nuclear Reactors

→ Gain time of more than 2 seconds putting borehole sensors of 3 km deep.

Example:

For an earthquake with hypocentral distance of 10 km, P wave travel time is about 1.4 seconds ( $10 \text{ km}/6 \text{ km/s} + 3 \text{ km}/4 \text{ km/s}$ ) and S wave arrival time is about 4.8 seconds ( $10 \text{ km}/3 \text{ km/s} + 3 \text{ km}/2 \text{ km/s}$ ), then S-P time is about 1.4 seconds.

## 5 . まとめ

1. 上下動成分の加速度最大値の距離減衰は、破壊域近傍で飽和する。この最大動は、破壊域から生成されたP波に対応している。その飽和域のレベルは、地質によるサイト特性の影響に依存する。
2. 上下動成分の加速度最大値が一定値以上（Chichi地震の場合約150gal、地域により若干変化）の領域はおおよそ破壊域の範囲に対応する。
3. 対象地点の震度は、地震マグニチュードにかかわらず、破壊域に近い地点からの断層最短距離で計算すると、過小評価を防ぐことが可能となる。
4. 地震発生確率の高い活断層の近くに、高密度に強震動の設置は、将来の地震のため地震の災害を減少させる最も効果的な対策の一つである。

→ 防災科学技術研究所の地震瞬時速報システム

## 謝辞

本研究は、独立行政法人防災科学技術研究所による強震観測網(K-NETおよびKiK-net)の記録および中国地震工程力学研究所より提供されたものを使用した。