「金井 清先生追悼シンポジウム」-地震動研究の"これまでとこれから"-2009年4月21日 東京大学山上会館、東京



地震動予測研究の到達点と次世代型への脱皮

### 入倉孝次郎 愛知工業大学客員教授·京都大学名誉教授

#### PRESENT STAGE OF STRONG MOTION PREDICTION RESEARCH AND ITS BREAKTHROUGH FOR NEXT DENERATION

Kojiro Irikura Aichi Institute of Technology, Professor Emeritus of Kyoto University

### 今日の話

- 1.はじめに:金井 清先生に学ぶもの
- 2. 強震動予測レシピの考え方。
- 3.特性化震源モデルの検証:
  2007年中越沖地震の最適モデルと強震動のシミュレーション。
- 4. 強震動予測レシピの問題点
- 5.今後の進むべき道

## 金井 清 先生の学問的功績、

工学のための地震学 (Engineering Seismology)

弾性波動論

- Sezawa波(分散性表面波)
- 重複反射理論
- 強震動観測
- 距離減衰式

常時微動

- 地盤震動特性の評価
- ・地盤種別を考慮した耐震設計基準
  建築基準法、土木構造物の耐震基準、原子力
  発電所の耐震設計審査指針などへの貢献

# 金井 清 先生に学ぶ我々の進むべき道 社会のための地震学 (Seismology for Society) 強震動予測研究 地震災害軽減研究 リスクとともに生きるための都市づくり研究 文化としての地震防災学

- 2. 強震動予測レシピの考え方。
- (1) 強震動の性質: 観測記録から学んだこと。
- (2)断層破壊過程
- (3) 強震動予測のためのスケーリング則
- (4)特性化震源モデルとシミュレーション

### (1) 強震動の性質: 観測記録からわかったこと。

震源スペクトル特性

変位震源スペクトルは、長周期(低周波数)域で平坦、 すなわち、<sup>0</sup>

> 短周期(高周波数)域で -<sup>2</sup> に比例して減衰。

一方、
 加速度震源スペクトルは、長周期域(低周波数)域で
 <sup>2</sup> に比例して増大。

短周期(高周波数)域で平坦、 すなわち <sup>0</sup> (高周波限界、f<sub>max</sub>まで)

#### 1. 震源スペクトル特性ーその1-

巨大地震の変位スペクトル (Houston and Kanamori, 1986)



1. 震源スペクトル特性ーその2-



### (2) 断層破壊過程

ー強震動記録を用いた震源の波形インバージョンー

断層すべりは不均質 応力降下量が不均質

断層すべりが大きい領域を一定基準で抽出、すなわち 応力降下量が大きい領域を抽出 アスペリティ

ここでのアスペリティの定義は応力降下量の大きい領域に対応。 地震前に固着しているところが地震時に応力降下が大きい、 すなわち、アスペリティは固着域、地震前にカップリング の強いところ

### すべりの不均質と地震モーメントに関するスケーリング



Wald et al. (1991)





1989 Loma Prieta earthquake (M<sub>w</sub>6.9)



#### *effective source dimension* (*L*<sub>eff</sub>, *W*<sub>eff</sub> are derived by auto-correlation of slip distribution)



Mai and Beroza (2000)

| (3) 断層破壊の総面積およびアスペリティの総面積は<br>地震モーメントに関して一定のスケーリング則<br>で関係づけられる。      |
|---|
| 震源断層は断層パラメータに関する2つスケーリング則   |
| (1)巨視的断層パラメータに関するスケーリング則  |
| 震源の断層面積と地震モーメントの関係<br>結果として、平均すべり量、平均応力降下量が推定<br>される。                 |
| (2)微視的断層パラメータに関するスケーリング則  |
| アスペリティ総面積と地震モーメントの関係<br>結果として、アスペリティでの応力降下量、アスペ<br>リティでの平均すべり量が推定される。 |



Somerville et al. (1999) and Miyakoshi et al. (2001)

### (4)特性化震源モデルと強震動のシミュレーション

震源断層面内のアスペリティから強い揺れ、強震動、 が生成されている。

結果として、震源近傍域でアスペリティのサイズに 対応するディレクティビティ・パルス(キラー・パル ス)が生成される。

例.1995年兵庫県南部地震、
 2005年福岡県西方沖地震、
 2005年新潟県中越沖地震 など。

 $\omega^{0}$ 

### 特性化震源モデルおよびそれに基づく 強震動のシミュレーション

(Kamae and Irikura, 1998; Kamae et al., 1998)



2007年新潟県中越沖地震を例として特性化震源 モデルの検証:

この地震を引き起こした断層はどこか?

この地震の強震動は大きかったのか?

スケーリング則とこの地震の断層パラメータの関係

この地震の強震動は数値的に再現可能か?





## 中越沖地震のアスペリティ面積について

| モデル   | 著者                | 震源(深さ) | 走向   | 傾斜   | 断層長さ   | 断層幅    | 観測点数 |
|-------|-------------------|--------|------|------|--------|--------|------|
|       | 引間·纐纈(2008)       | 10km   | 38 ° | 34 ° | 30km   | 18km   | 11地点 |
|       | Aoi et al.,(2008) | 8km    | 49 ° | 42 ° | 30km   | 24km   | 14地点 |
| (北東側) | 堀川(2008)          | 8.6km  | 40 ° | 55 ° | 9km    | 17km   | 아빠는  |
| (南西側) | 邓田/11(2000)       |        | 40 ° | 35 ° | 17km   | 17km   | 9地点  |
|       | 宮腰・他(2008)        | 12km   | 30 ° | 40 ° | 28km   | 18km   | 6地点  |
|       | 芝(2008)           | 12km   | 35 ° | 35 ° | 29.4km | 16.8km | 18地点 |
|       | Nozu(2008)        | 12km   | 40 ° | 36 ° | 30km   | 24km   | 11地点 |



### 中越沖地震の全破壊面積



1.0E+24 1.0E+25 1.0E+26 1.0E+27 1.0E+28 1.0E+29 Seismic Moment(dyne-cm)

### 中越沖地震の平均すべり量



1.0E+29 Seismic Moment(dyne-cm)

### 中越沖地震のアスペリティ面積



1.0E+24 1.0E+25 1.0E+26 1.0E+27 1.0E+28 1.0E+29 Seismic Moment(dyne-cm)

### Characterized Source Model for Simulating Ground Motions



Rupture start from the center at Asp 3

| モデルの | str | dip | rake | 面積          | 地震モーメント                        |
|------|-----|-----|------|-------------|--------------------------------|
| Asp1 | 30  | 40  | 90   | 5.5×5.5km   | $1.69	imes10^{18}$ Nm          |
| Asp2 | 30  | 40  | 90   | 5.5×5.5km   | $1.69	imes10^{18}$ Nm          |
| Asp3 | 30  | 40  | 90   | 5.04×5.04km | $1.02 	imes 10^{18} \text{Nm}$ |

#### EGF: AFT1(07/07/16 21:08)

Model B



Rupture start from the center ot Asp 3

| モデル<br>② | str | dip | rake | 面積            | 地震モーメント               |
|----------|-----|-----|------|---------------|-----------------------|
| Asp1     | 40  | 40  | 90   | 5.6	imes5.6km | $1.33	imes10^{18}$ Nm |
| Asp2     | 40  | 40  | 90   | 5.6×5.6km     | $2.00	imes10^{18}$ Nm |
| Asp3     | 40  | 40  | 90   | 5.6×5.6km     | $2.00	imes10^{18}$ Nm |
| - N.27   |     |     |      |               |                       |

EGF: AFT1(07/07/16 21:08)

EGF: AFT(07/08/04 00:16)

Model Aは倉橋·入倉(2008)、Model Bは釜江·川辺(2008)に基づいて作成した。

#### Comparison of Observed Records with Simulated Motions



### Comparison between observed records and simulated motions using hybrid method (DWM + EGF)



#### Underground Structure from Source to Kashiwazaki-Kariwa Site





### 3次元地盤構造モデルを用いたray tracingによるS波走時 (Petukhin et al., 2009)



# Comparison between observed records and simulated motions using revised empirical Green's function method



### 4. 強震動予測レシピの問題点

- 海溝型巨大地震を支配するスケーリング則
  長周期地震動予測
- □ 内陸の長大断層のスケーリング則

解決への手掛かり

- □ 海溝型アスペリティモデルのマルチスケール 不均質化
- □ 動力学震源断層モデルの挿入









アスペリティサイズで規定される周期よりも短周期の 波も出すように震源モデルを改良する必要がある マルチスケール不均質化

## 不均質化による震源時間関数の変化



### 5.次世代型強震動予測

- C "The ShakeOut Earthquake Scenario-A Story THATSouthern Californians Are Writing"に学ぶ
- 動力学震源断層モデルの導入 複数の断層セグメントの連動 スーパーシェア破壊伝播 ディレクティビティ効果
- □ 確率論とシナリオ型を融合したハザード評価
- ロリアルタイム地震動予測システム
- □ 強震動予測からリスク評価までの統合システムの構築

## The ShakeOut Earthquake Scenario

USGS Open File Report 2008-1150

マグニチュード7.8の地震が南部サンアンドレアス断層沿いに2008年11月13日の 朝10時に起こったときの地震動生成およびそれによる災害発生のシナリオ。



- USGSのLucy Jones博士をリーダーとして、300人以上の科学者、技術者、および関連する専門家が参加して、シナリオを作成した。
- この地震は死者1800以上、負傷者50000人以上、被害および経済損出200
  billon US dollars (20兆円)を引き起こす。



MAP LOCATION



INSTRUMENTAL INTENSITY

11-111

н

IV

٧

VI

VII

VIII

IX

**USGS (2009)** 

X+

### シェークアウト シナリオ地震の地震動の伝播模様



Computer-generated snapshots of ground motions for the ShakeOut Scenario earthquake. USGS (2009)

#### **Directivity pulses of sub-shear rupture**

## Peak Ground Velocity in Los Angeles Basin



#### Pulses of super-shear rupture

Velocity pulses due to super-shear rupture transmit large amplitude motion. Because Shear Mach waves are



-Planar wavefronts emanate from the leading and trailing edges of the slip zone.

- The shear field carries an exact history of the slip velocity that appears in both the FP and FN velocity components

(Dunham and Archuleta (2005)

#### 想定南海トラフ地震(東海・東南海・南海地震)による被害の予測

|                       | 区分                                    | 東南海+南海        | (参考)<br>東 海 | (参考)<br>東海+東南海+南海 |
|-----------------------|---------------------------------------|---------------|-------------|-------------------|
| 死(<br>者人<br>数)        | 建物倒壊                                  | 6,600         | 6,700       | 12,200            |
|                       | 津波                                    | 8,600         | 1,400       | 9,100             |
|                       | 斜面炎害                                  | 2,100         | 700         | 2,600             |
|                       | 火災                                    | 500           | 600         | 900               |
|                       | 승 計                                   | 17,800        | 9,200       | 24,700            |
| 全<br>壊<br>建<br>物<br>数 | 揺れれ                                   | 170,200       | 170,000     | 308,500           |
|                       | 液状化                                   | 83,100        | 26,000      | 89,700            |
|                       | 津波                                    | 40,400        | 6,800       | 42,300            |
|                       | 斜面災害                                  | 21,700        | 7,700       | 27,200            |
|                       | 火災                                    | 313,200       | 250,000     | 472,500           |
|                       | ····································· | 628,700       | 460,000     | 940,200           |
| 経被<br>済<br>的害         | 直接被害                                  | 43兆           | 26兆         | 60兆               |
|                       | 間接被害                                  | 14 <u>)</u> Ľ | 1 1沙医       | 21兆               |
|                       | ····································· | 57兆           | 37兆         | 81兆               |

(注) 1 数字は概数。内訳と合計は必ずしも一致しない。

死者数は午前5時発生、全壊棟数は午後6時発生を想定。 2 東海;中央防災会議「東海地震対策専門調査会」平成15年3月18日公表 東南海王南海・中央防災会議「東海地震対策専門調査会」平成15年3月18日公表

- 東南海 + 南海 ; 中央防災会議「東南海、南海地震等に関する専門調査会」9月17日公表 - 東海 + 東南海 + 南海 ; 同上

# ご静聴ありがとうございました

