

傾斜した横ずれ断層の動力学的解析

Dynamic rupture simulations of strike-slip fault on dip angle

2017年03月24日

株式会社構造計画研究所

高浜 勉

1. 傾斜断層が横ずれ運動する応力場の条件
2. 断層傾斜角と地震規模の関係
3. 断層不連続が破壊過程に与える影響

1. 傾斜断層が横ずれ運動する応力場の条件
2. 断層傾斜角と地震規模の関係
3. 断層不連続が破壊過程に与える影響

地震調査研究推進本部 (2003)¹⁾

『中央構造線断層帯(金剛山地東縁ー伊予灘)の長期評価について』

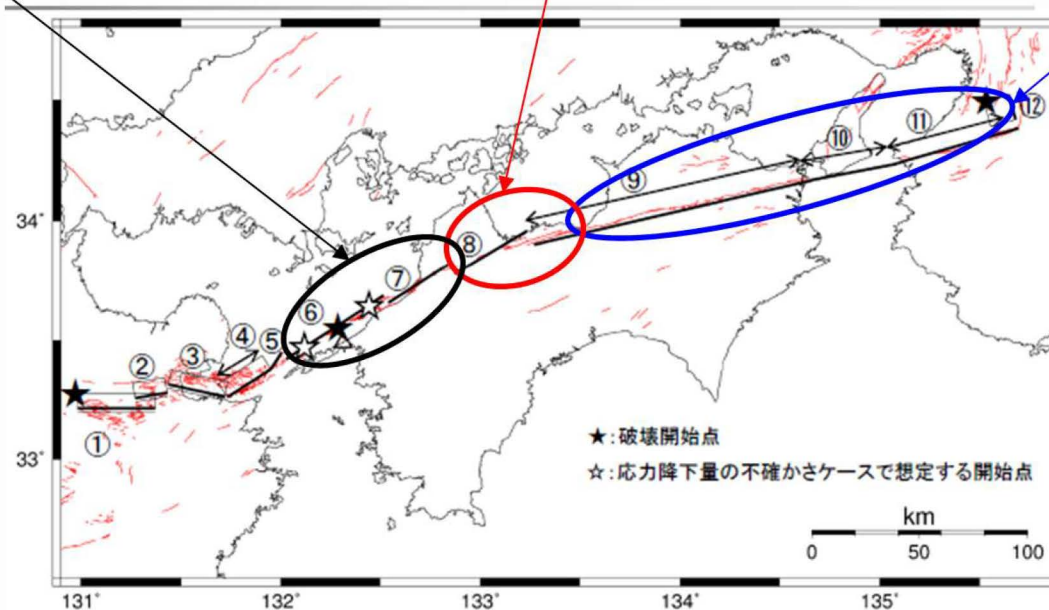
中央構造線断層帯:「右横ずれを主体とし、上下方向のずれを伴う」

上下方向に関する記述:

愛媛県北西部では
隆起の方向が一定しない

石鎚山脈北縁では
南側が相対的に隆起
→断層が北傾斜の場合
正断層成分を含んでいる

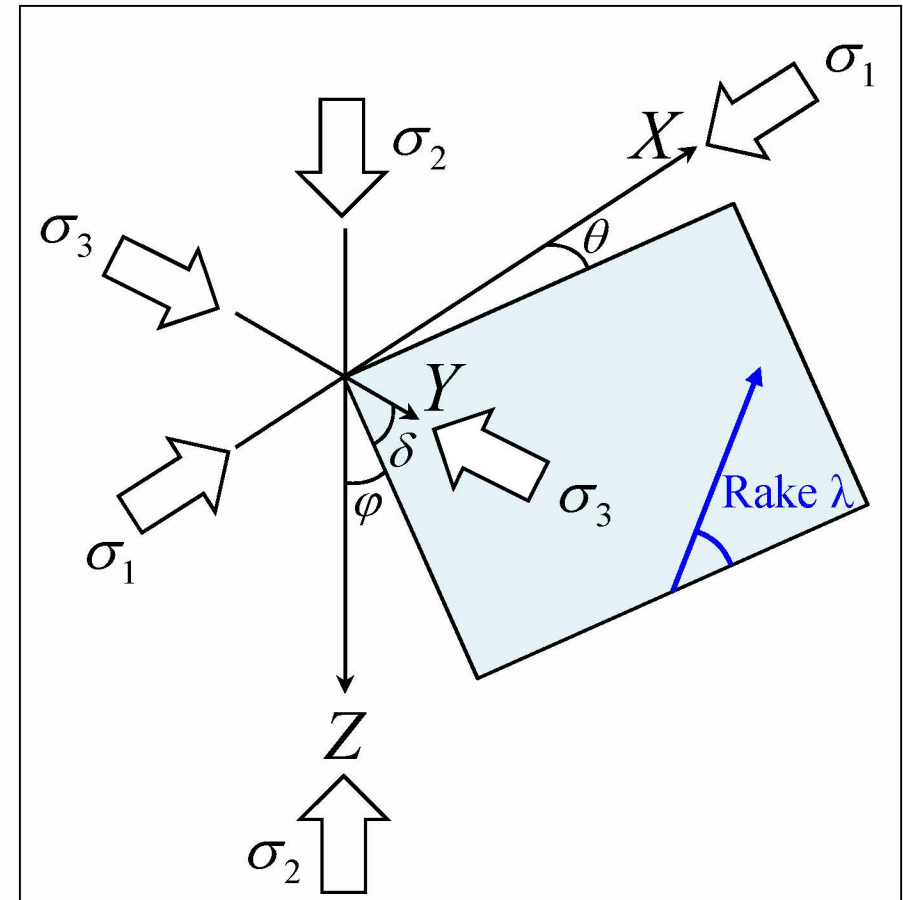
和泉山脈南縁、紀淡海峡及び
讃岐山脈南縁は北側が相対的に隆起
→断層が北傾斜の場合
逆断層成分を含んでいる



全体の傾向として東側が逆断層成分、西側が正断層成分を含んだ
右横ずれと考えられる

前提条件

- X, Y軸を水平方向、Z軸を鉛直方向とする座標系を考える
- X, Y, Z軸を3つの主応力軸とする
- MTL周辺は横ずれ型応力場であることから、主応力軸を以下のように割り当てる
 - X軸: 最大主応力軸 σ_1
 - Y軸: 最小主応力軸 σ_3
 - Z軸: 中間主応力軸 σ_2
- 走向 θ , 傾斜 φ の断層を置いたとき、断層に働かせん断応力の方向を断層のすべり方向とする



$$\text{応力比 } R = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\sigma_3 - \sigma_1} \text{ とすべり角 } \lambda \text{ の関係}$$

$$\lambda = \arctan \left(\left\{ R - \cos^2 \theta \right\} \frac{\sin \varphi}{\sin \theta \cos \theta} \right) \quad \text{但し} \quad \begin{cases} 0 \leq \lambda \leq \pi, & \text{if } (R - \cos^2 \theta) \geq 0 \\ -\pi \leq \lambda \leq 0, & \text{if } (R - \cos^2 \theta) < 0 \end{cases}$$

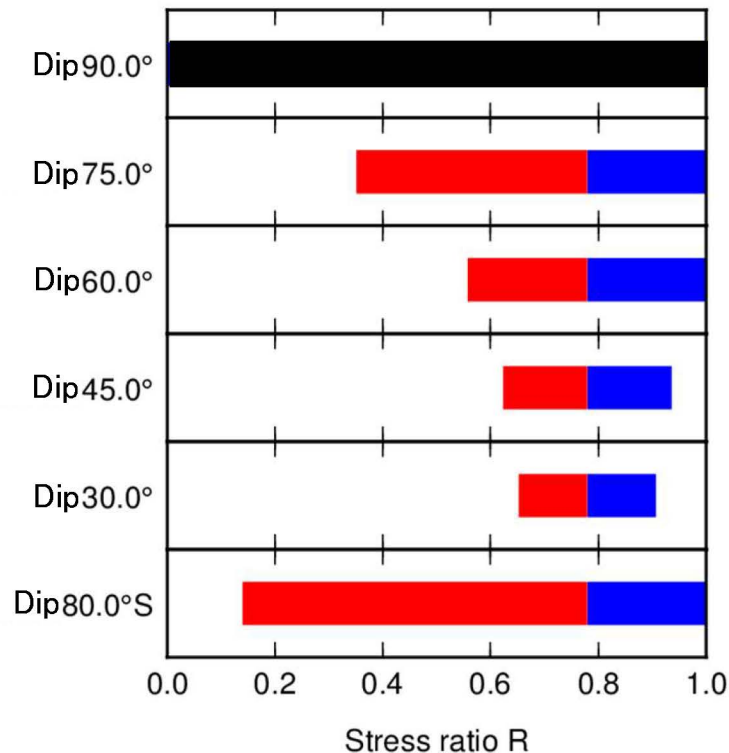
すべり角 $\lambda = 180 \pm 15^\circ$ の範囲 ($165^\circ < \lambda \leq 180^\circ$, $-180^\circ < \lambda < -165^\circ$) を横ずれすべりとして判定する。

A condition of stress ratio for strike slip

Western Shikoku

Maximum principal stress: N85°E
(Ikata borehole breakout²⁾)

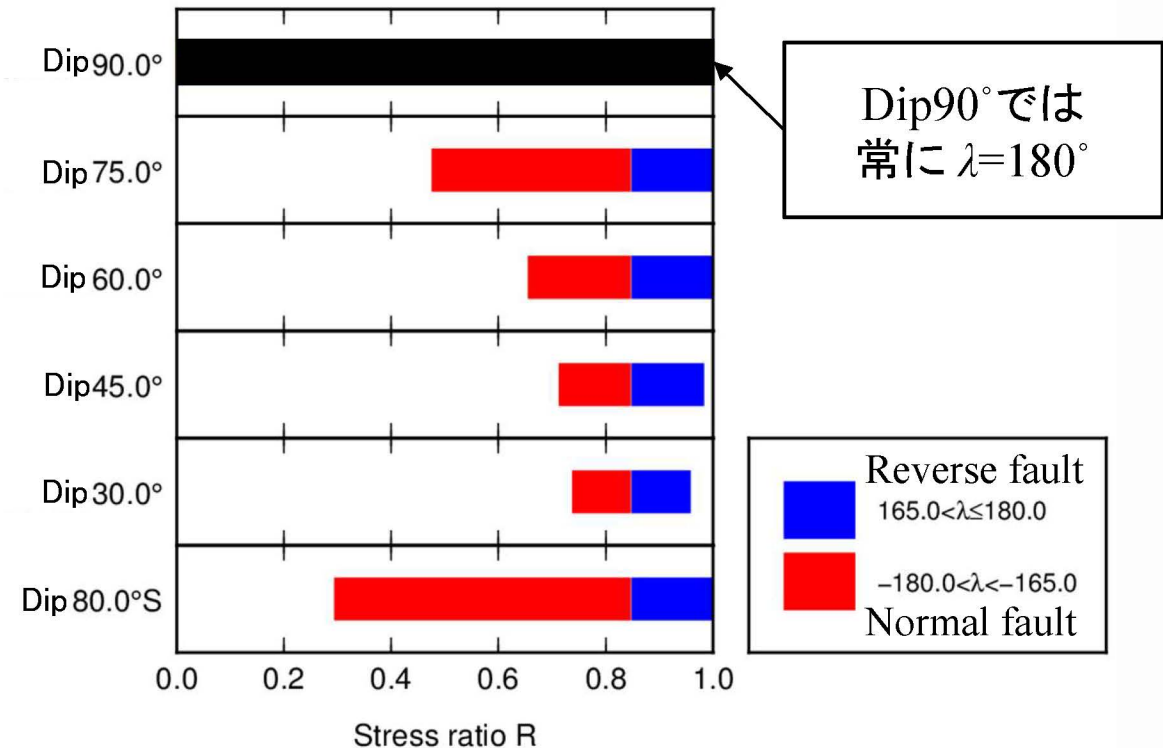
Strike: N237°E (MTL 伊予灘)



Eastern Shikoku

Maximum principal stress: N100°E
(佐々連鉱山³⁾)

Strike: N257°E (MTL 四国東部)



Dip 90°では
常に $\lambda = 180^\circ$

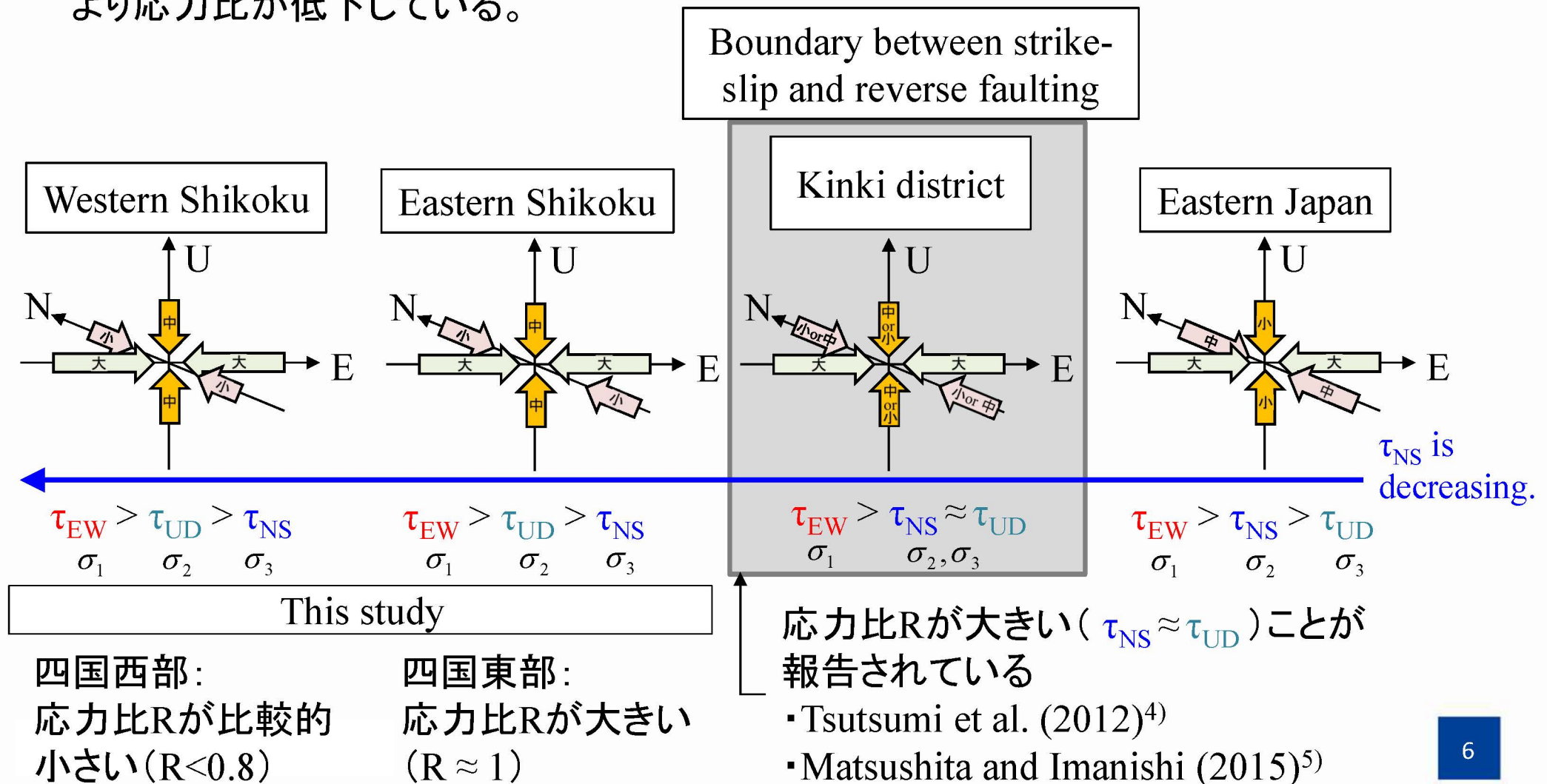
Reverse fault
 $165.0 < \lambda \leq 180.0$
Normal fault
 $-180.0 < \lambda < -165.0$

- 実際のMTLは、全体の傾向として四国東部は逆断層成分、四国西部は正断層成分を含んでいる。
- MTLの断層変位の向きと上記の解析結果より、四国東部では応力比が大きな値(1に近い)、四国西部では応力比が比較的小さい値(0.8以下)と考えられる。

Interpretation of the variation in stress ratio

解析結果を理解するため、下図のような応力場のモデルを考える：

- 四国東部は逆断層型と横ずれ断層型応力場との境界に近い状態にある。
- 逆断層型と横ずれ断層型応力場との境界から離れた四国西部では、 τ_{NS} や τ_{EW} の減少により応力比が低下している。



1. 傾斜断層が横ずれ運動する応力場の条件
2. 断層傾斜角と地震規模の関係
3. 断層不連続が破壊過程に与える影響

壇・他 (2011)⁶⁾

長大横ずれ断層に適用可能な関係式

$$\Delta\sigma = c \frac{M_0}{SW_{\max}}$$

$$c = 0.5 + 2 \exp[-L/W_{\max}]$$

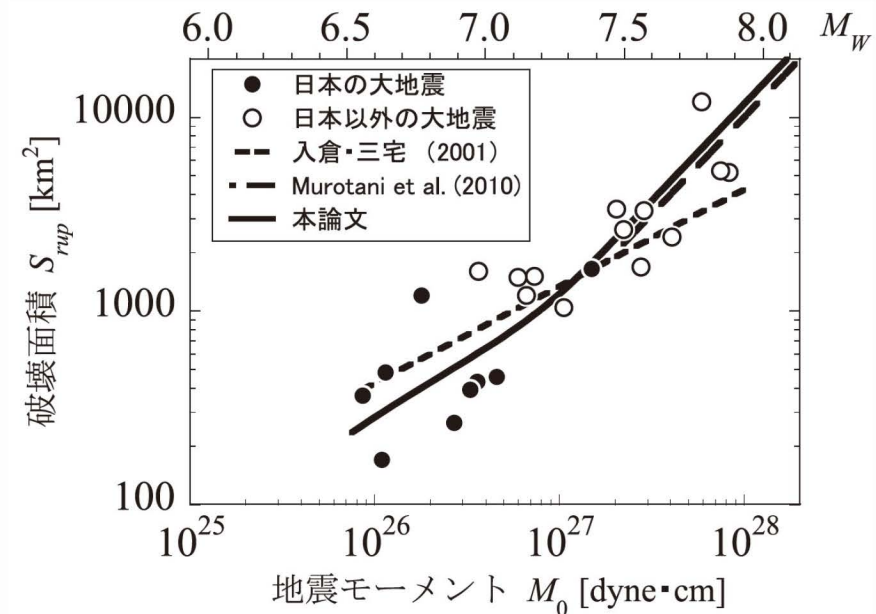
M_0 : Seismic moment

$\Delta\sigma$: Average of stress drop

L : Fault length

$W_{\max}$: Fault width (seismogenic zone)

- **鉛直横ずれ断層**の動力的シミュレーションの結果に基づき構築された。
- 最終的に、この関係式を実地震記録(断層形状と地震モーメント)に適用し、平均応力降下量 3.4 MPa が得られた。(他の関係式からアスペリティの応力降下量 12.2 MPa も推定)



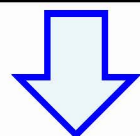
Dan et al. (2011)

本検討

傾斜した横ずれ断層の動力的シミュレーションを実施することにより、傾斜した横ずれ断層の上記関係式への適用可能性を調査した。

① 入力

- 地盤構造、物性(弾性定数)
- 断層形状(断層面積、アスペリティ面積)
- 広域応力場(初期せん断応力、初期法線応力)
- 摩擦特性(応力降下量・強度超過＝静摩擦係数、動摩擦係数)



② 動力的シミュレーション

③ 出力

- 破壊伝播速度
- 断層すべりの時間変化
- **地震モーメント**(最終すべり量から)

自発的に広がる破壊過程を
計算できる

壇・他(2011)の関係式から
求まる地震モーメント M_0

$$M_0 = SW_{\max} \Delta \sigma / c$$
$$c = 0.5 + 2 \exp[-L/W_{\max}]$$

と比較

シミュレーション手法

Kase and Kuge (2001)⁷⁾ に基づいた3次元差分法の計算コードを使用した。
なお、傾斜断層のシミュレーションのアルゴリズムはKase (2010)⁸⁾ に従った。

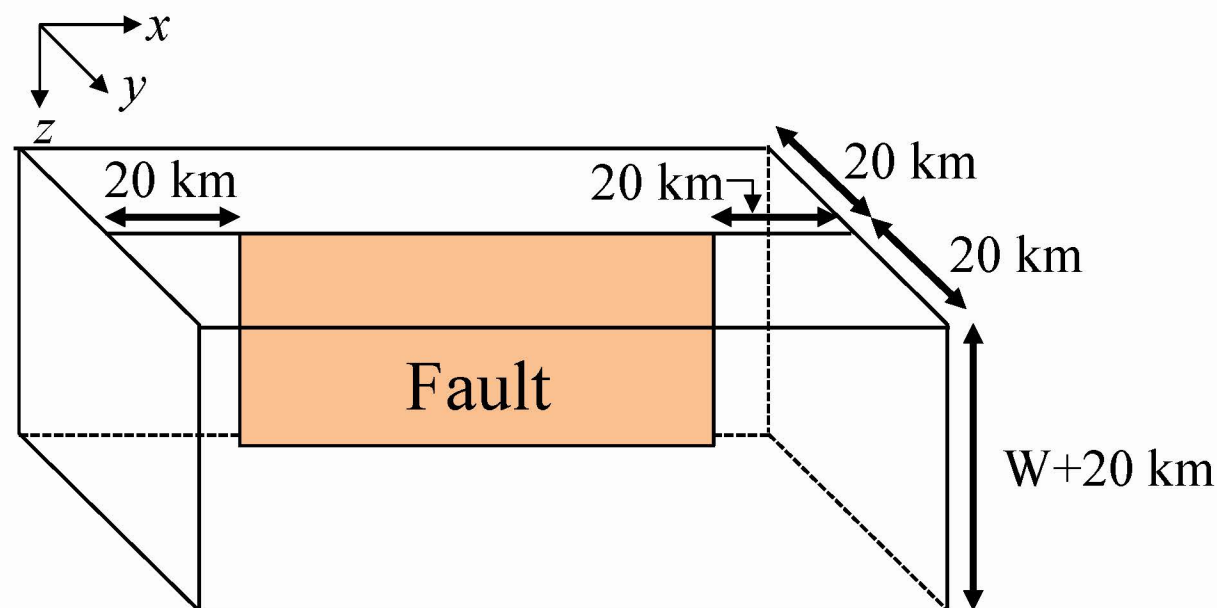
モデル領域

断層からモデル領域端部までの距離が20kmとなるよう設定した。

- ・ x 方向: 断層長+40km
- ・ y 方向: 40km
- ・ z 方向: 断層幅+20km

※ 断層上端は地表に接する

※ z 方向は断層傾斜方向



- ・ グリッド間隔: 0.1km
- ・ 時間間隔: 0.004sec

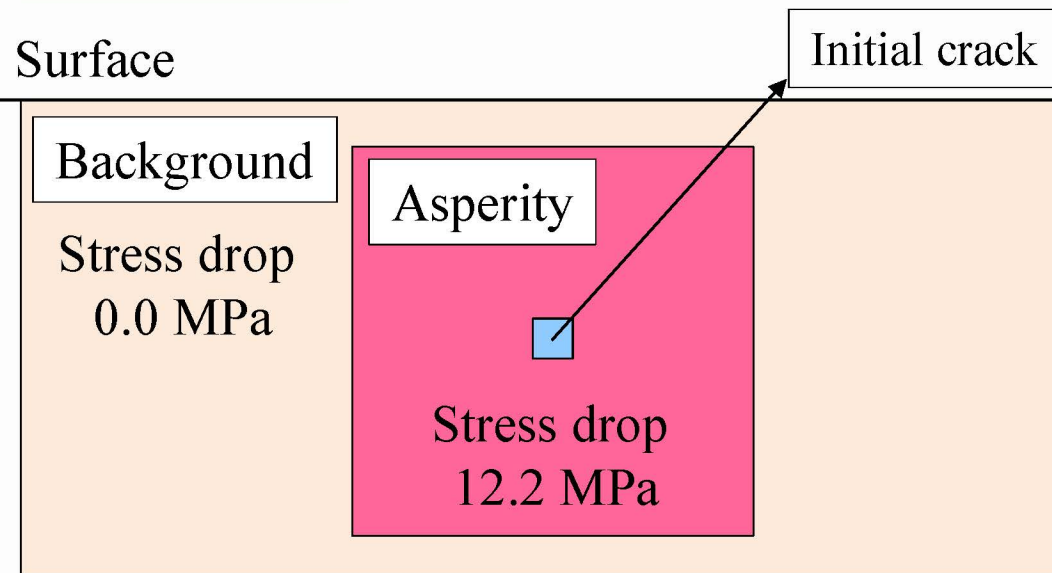
地盤モデル

一様地盤を仮定し、Ishikawa et al. (2013)⁹⁾ を参考に物性値を設定した。

Parameter	Value
Density	2.7 g/cm ³
P-wave velocity	6.1 km/s
S-wave velocity	3.5 km/s

断層モデル

壇・他 (2011) の関係式の基となったIrie et al. (2010)¹⁰⁾ を参考に設定



☆背景領域の中央にアスペリティが1つ存在する断層モデル

- 断層走向: N237°E (N57°E)
↑ 伊予灘セグメントの走向
- 断層長: 54, 126, 258km の3ケース
- 傾斜角: 北傾斜 90°, 45°, 30° の3ケースを検討する。

断層上端深さを0km, 断層下端深さを13km (地震発生層の厚さ)とする。

⇒ 断層幅は地震発生層の幅から算出。

- 13.0 km (傾斜90°)
- 18.4 km (傾斜45°)
- 26.0 km (傾斜30°)

アスペリティ面積

壇・他(2011)の長大横ずれ断層モデルに基づき、平均応力降下量を $\Delta\sigma=3.4$ (MPa)、アスペリティの応力降下量を $\Delta\sigma_{asp}=12.2$ (MPa)と仮定する。

次の関係式を満たすように、断層面積 S からアスペリティ面積 S_{asp} を決定:

$$S_{asp} = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\sigma_{asp}} S = \frac{3.4[\text{MPa}]}{12.2[\text{MPa}]} S$$

広域応力場

四国西部の検討に用いることを考慮して、広域応力場を次のようにモデル化した。

※本検討では、応力の深さ依存性を考慮しない。地震発生層を 2~15km と考え、下記の深さ依存式に平均深さ ($z=8.5\text{km}$) を与えて主応力を算出した。

	Direction	Magnitude (z : depth [km])
Maximum principal stress	N85°E	$34.00z$ (MPa) $\Rightarrow 34.00 \times 8.5\text{km} = 289.00$ MPa
	伊方サイトのボアホール・ブレイクアウト ²⁾ より	兵庫県南部地震の震源近傍の水圧破碎実験に基づいて推定した地震前の最大主応力 (Yamashita et al., 2004 ¹⁾)
Intermediate principal stress	Vertical	$26.46z$ (MPa) $\Rightarrow 26.46 \times 8.5\text{km} = 224.91$ MPa 被り圧 ρgz , $\rho = 2.7\text{g/cm}^3$, $g = 9.8\text{m/s}^2$
Minimum principal stress	N175°E	$24.33z$ (MPa) $\Rightarrow 24.33 \times 8.5\text{km} = 206.79$ MPa
	水平方向かつ 最大主応力に直交する方向	3つの主応力方向と最大・中間主応力、断層走向を固定したときに断層すべりが 完全右横ずれ となる大きさ

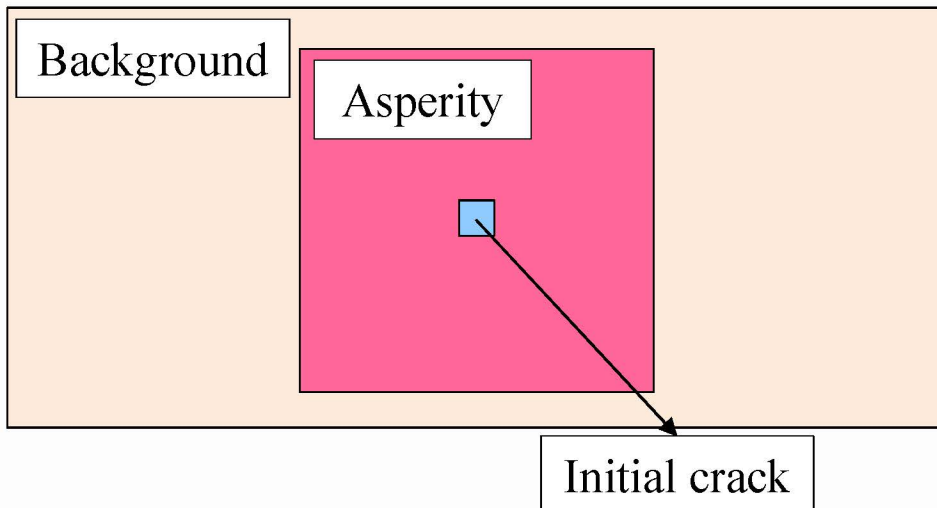
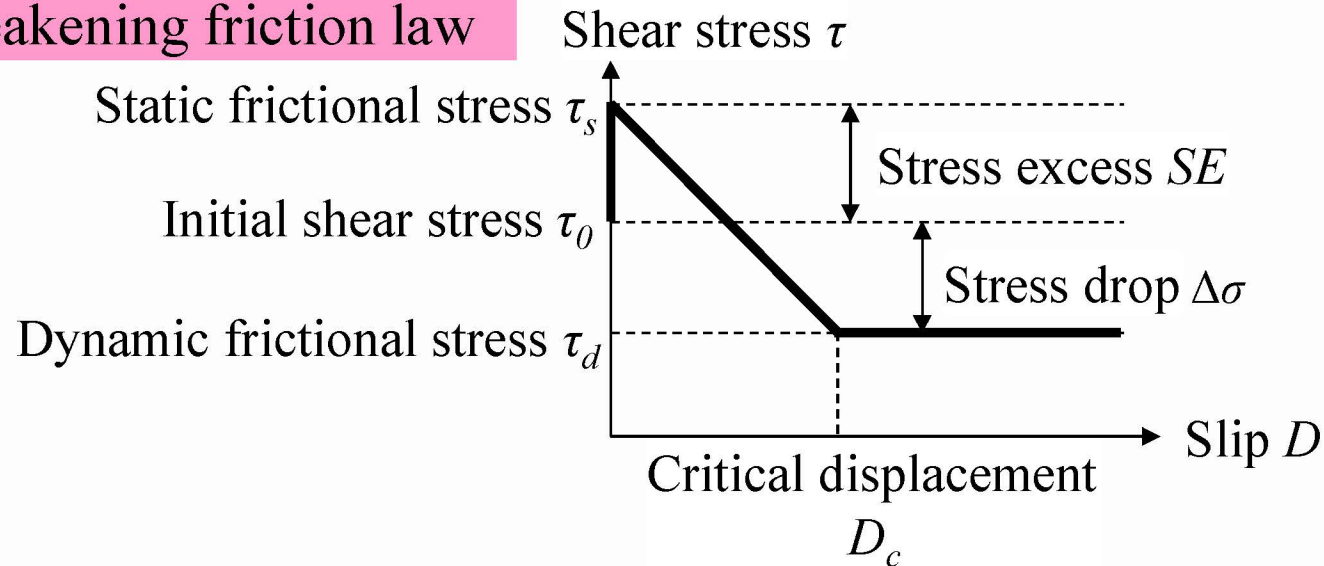
断層面に働く応力

	Background	Asperity
Shear stress	広域応力場と断層の向き(走向、傾斜)から求まるせん断応力	背景領域のせん断応力 + 12.2MPa
Normal stress	広域応力場と断層の向き(走向、傾斜)から求まる法線応力	背景領域と同じ

摩擦構成則

Irie et al. (2010)¹⁰⁾ に従って設定

Slip-weakening friction law

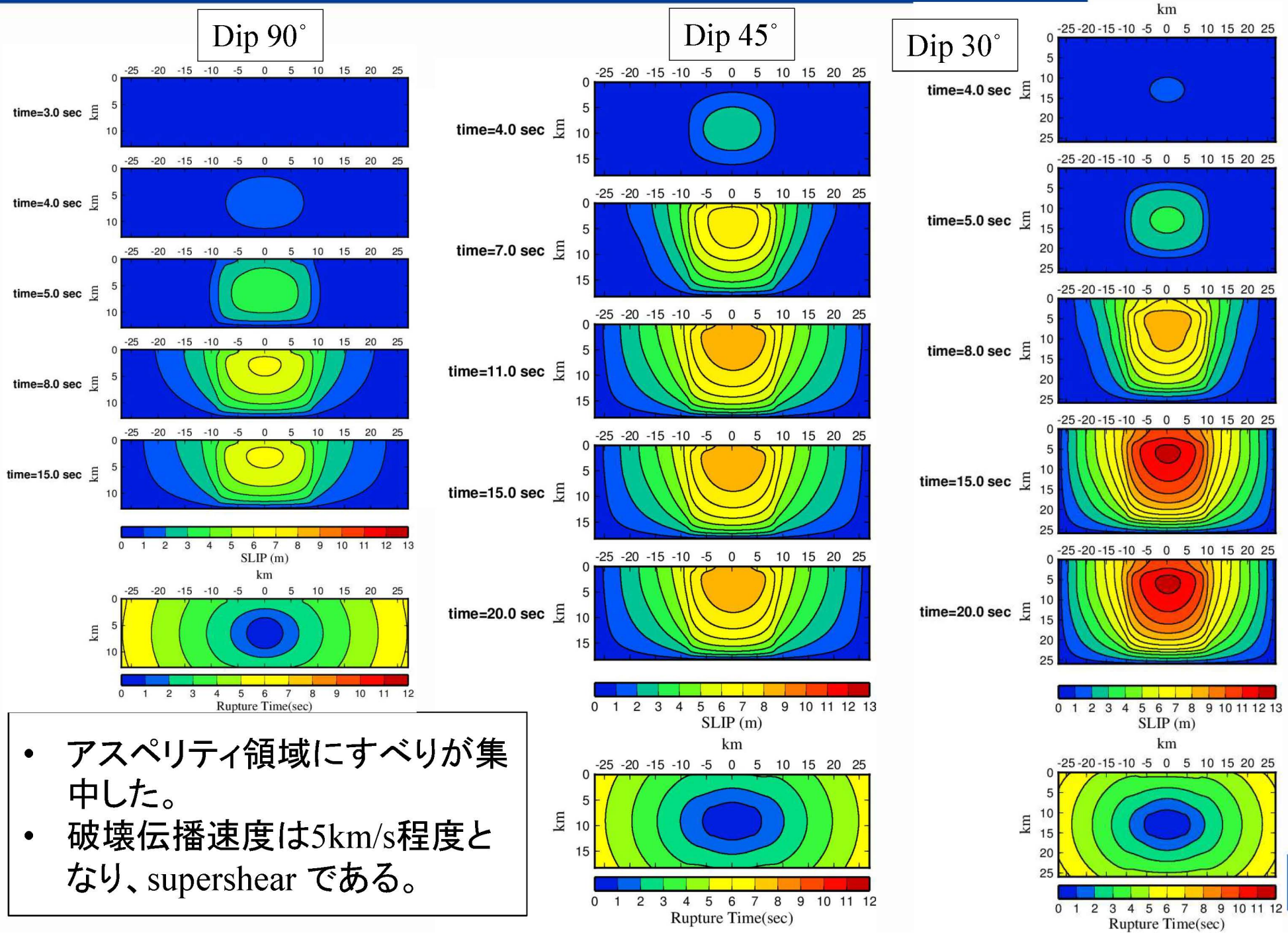


	Stress drop	Strength excess
Background	0.0 MPa	0.01 MPa
Asperity	12.2 MPa	0.01 MPa
Initial crack	12.2 MPa	-0.1 MPa

破壊を開始させるため

- ・ アスぺリティに大きな応力降下量を設定
- ・ 非常に小さな強度超過を設定

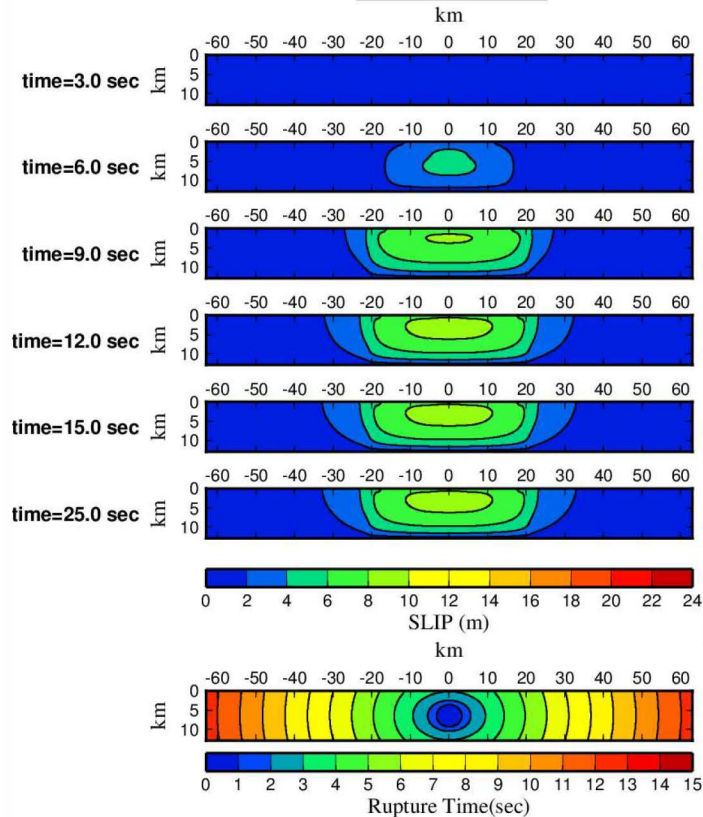
Results: Case1 (fault length=54km)



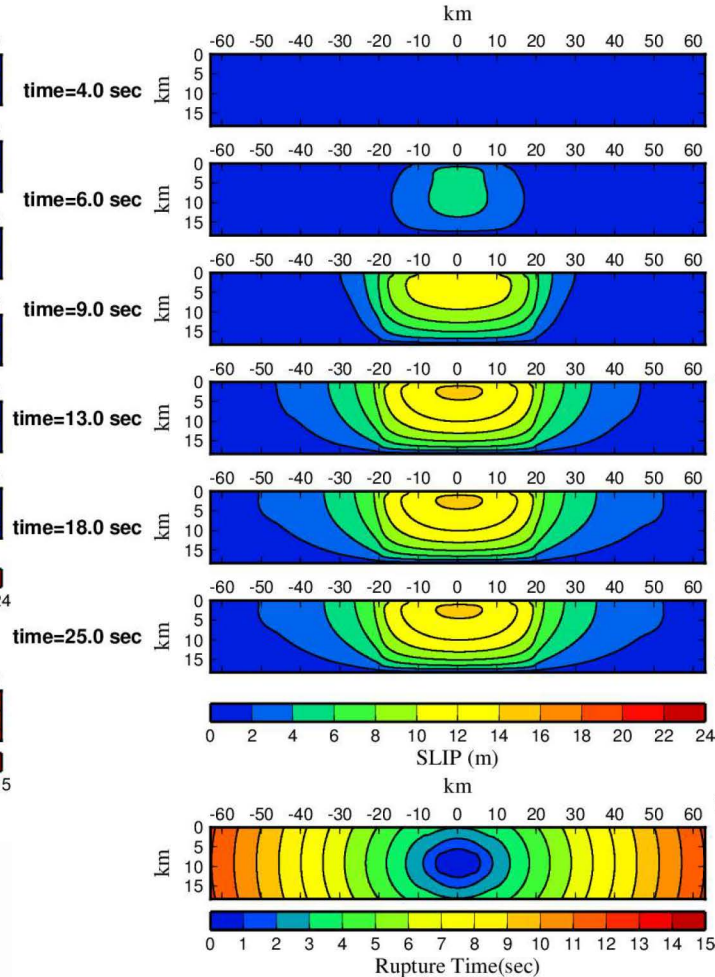
- アスぺリティ領域にすべりが集中した。
- 破壊伝播速度は5km/s程度となり、supershear である。

Results: Case2 (fault length=126km)

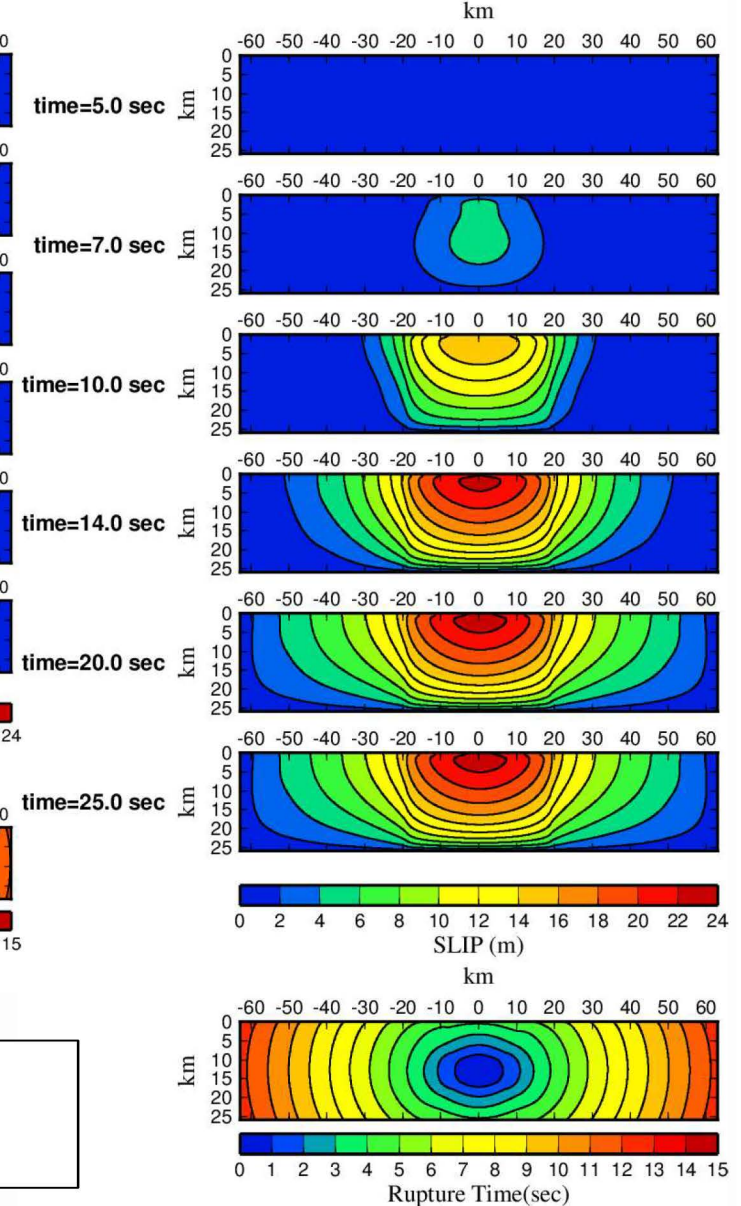
Dip 90°



Dip 45°



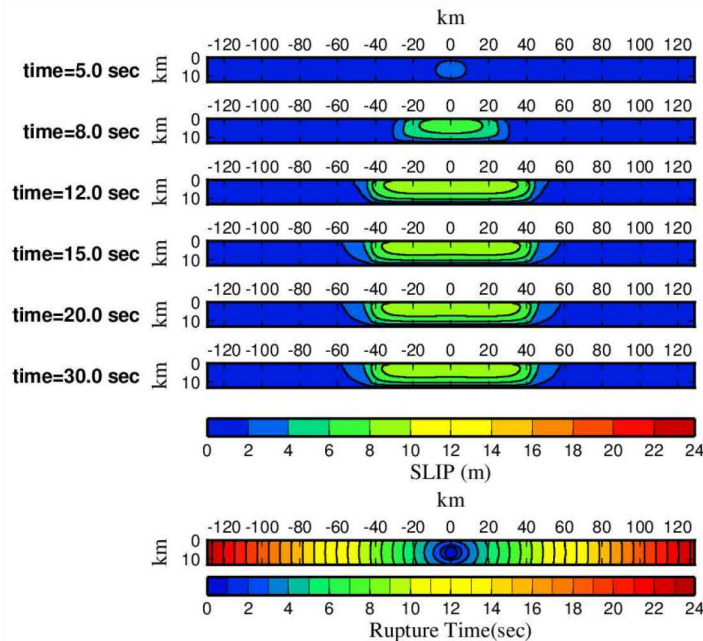
Dip 30°



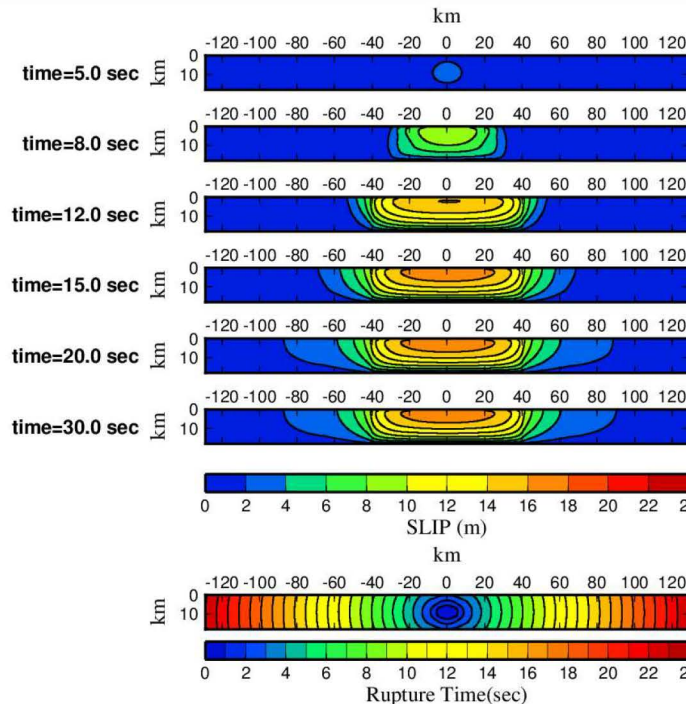
- アスぺリティ領域にすべりが集中した。
- 破壊伝播速度は6 km/s程度となり、supershear である。

Results: Case3 (fault length=258km)

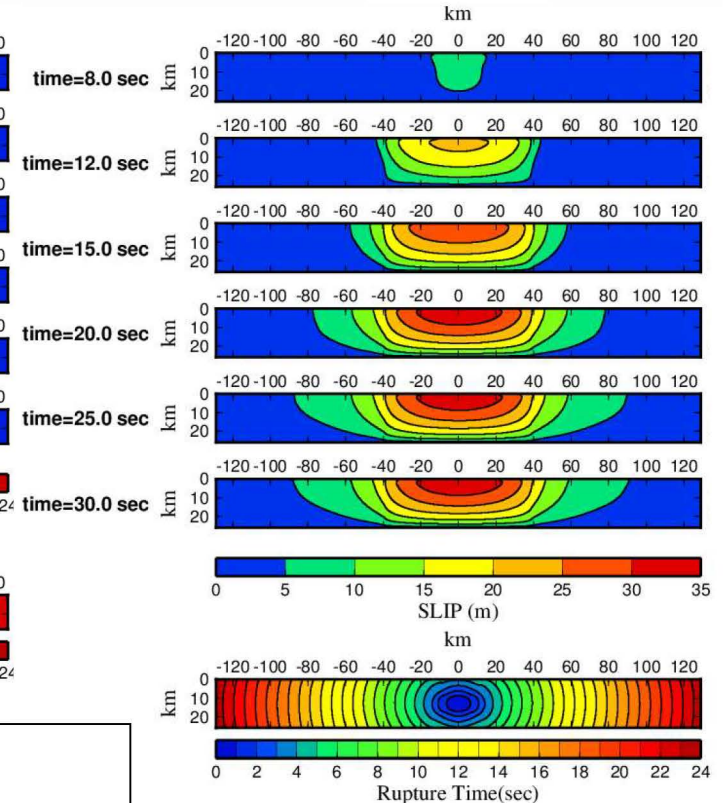
Dip 90°



Dip 45°



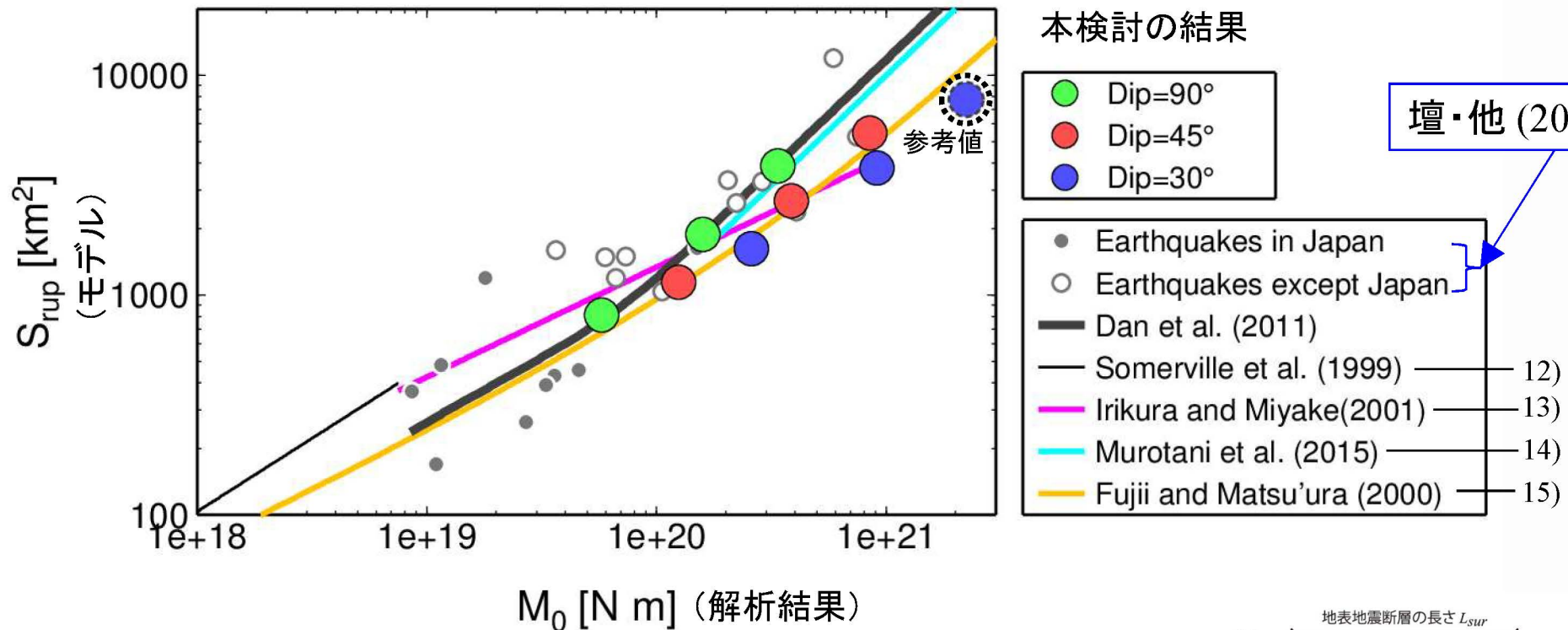
Dip 30°



- アスぺリティ領域にすべりが集中した。
- 破壊伝播速度は6 km/s程度となり、supershear である。
- Dip 90°, 45° のケースは安定的に破壊が終了する。
- Dip 30° のケースは30秒後頃から不安定な挙動を示す
⇒ 以降では、計算の不安定化が生じる前に平均すべり量が一旦落ち着いた時点を見逃し値として示す。

Comparison with relationships between seismic moment and rupture area

本検討の結果の地震モーメント M_0 と断層面積 S の関係を実地震記録と比較する。



壇・他 (2011) より

傾斜45°, 30°の結果は太線の壇・他 (2011) の関係式から外れるものの、概ね実地震記録のばらつきの範囲内。

※注)

破壊面積 S_{rup} は表層を含めた面積であるため、震源断層の幅 $W_{max}=13$ km, 破壊領域の幅 $W_{rup}=15$ km を仮定して、次のように S_{rup} を求めた。

$$S_{rup} = (15/13) \cdot S$$

動力学シミュレーションの断層面積

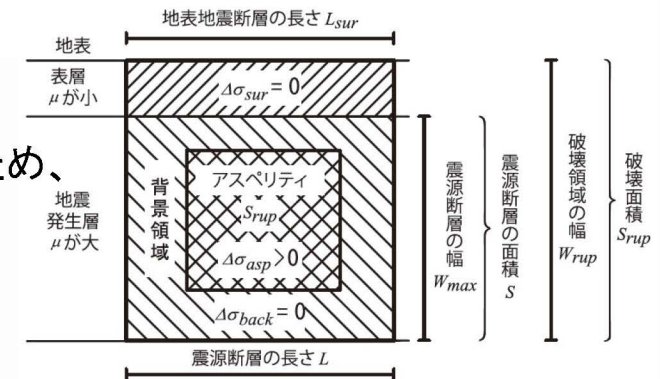


図1 破壊領域と震源断層のイメージ

壇・他(2011)より

Seismic moments obtained from the simulations

壇・他 (2011) の関係式 $M_0 = \frac{SW_{\max} \Delta \sigma}{c}$, $c = 0.5 + 2 \exp[-L/W_{\max}]$ による M_0 と

本検討の動力学的シミュレーション結果から求めた M_0 の比

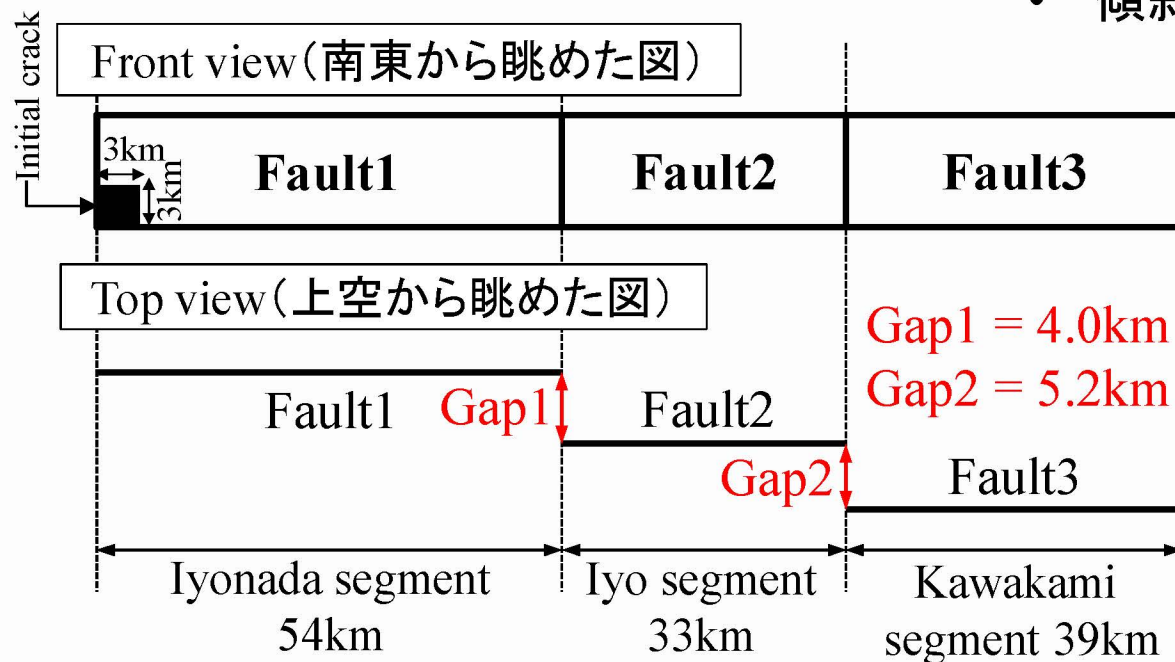
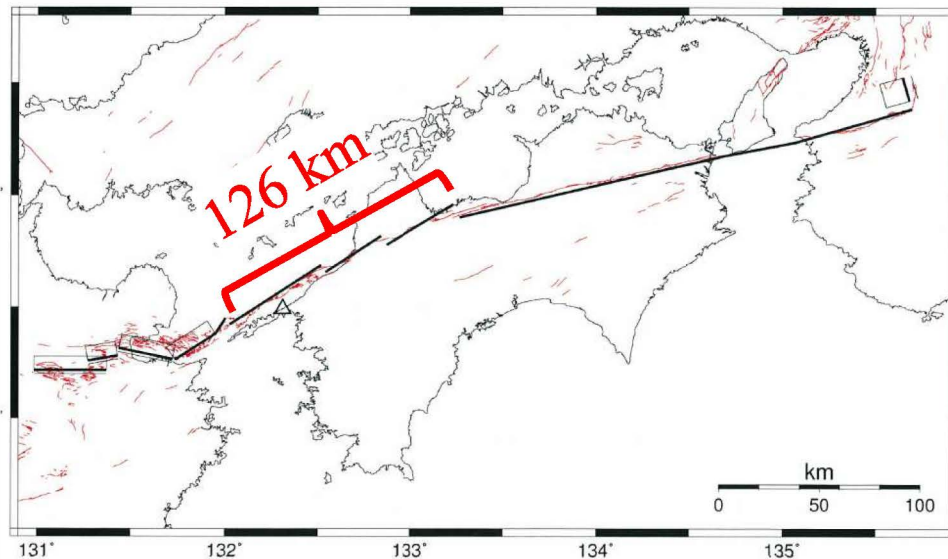
ケース	Dip (°)	Fault length (km)	Seismic moment obtained from the simulations M_0 [N m]	Seismic moment predicted from Dan et al. (2011) m_0 [N m]	M_0/m_0
Case 1	90	54	5.75E+19	5.84E+19	0.98
	45	54	1.25E+20	1.03E+20	1.22
	30	54	2.60E+20	1.65E+20	1.57
Case 2	90	126	1.59E+20	1.45E+20	1.10
	45	126	3.85E+20	2.89E+20	1.33
	30	126	9.09E+20	5.62E+20	1.62
Case 3	90	258	3.36E+20	2.96E+20	1.13
	45	258	8.48E+20	5.94E+20	1.43
	30	258	2.23E+21 (参考値)	1.19E+21	1.88 (参考値)

傾斜が低角になるほど M_0 が大きくなる傾向が確認された。
(但し、倍半分の範囲内には入っている。)

1. 傾斜断層が横ずれ運動する応力場の条件
2. 断層傾斜角と地震規模の関係
3. 断層不連続が破壊過程に与える影響

☆伊予灘・伊予・川上セグメント(総断層長 126km)をモデル化

- 断層の地表トレースに基づいて断層形状を設定
 - Fault1-2間に4.0 km, Fault2-3間に5.2 kmのギャップ
 - セグメント間のオーバーラップなし
- 一様断層を仮定(アスペリティ考慮せず)
- 断層走向:N237°E (N57°E)
- 傾斜角:90°, 45°, 30°の3通り



断層幅は地震発生層(深さ2-15km)の部分のみをモデル化
(地表から深さ2kmまでの表層部分を取りさったイメージ)

モデル領域

地盤モデル

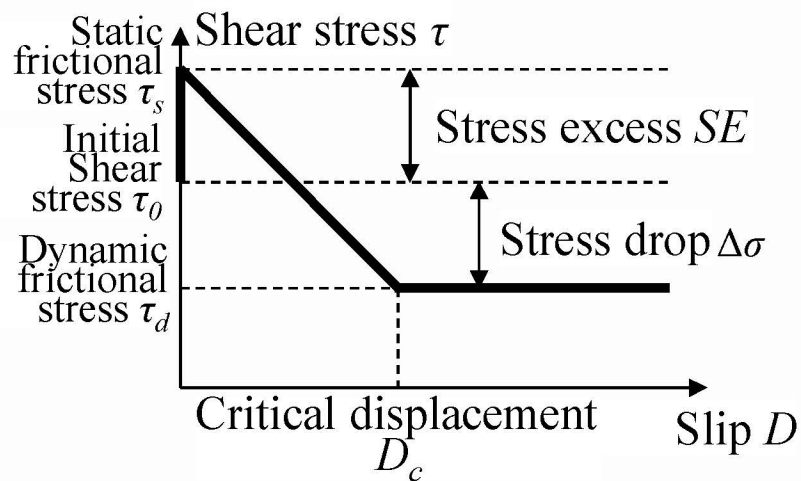
広域応力場

は、地震規模の検討と同じ。

※但し、時間ステップには 0.004~0.001sec の範囲で発散が生じない値を採用した。

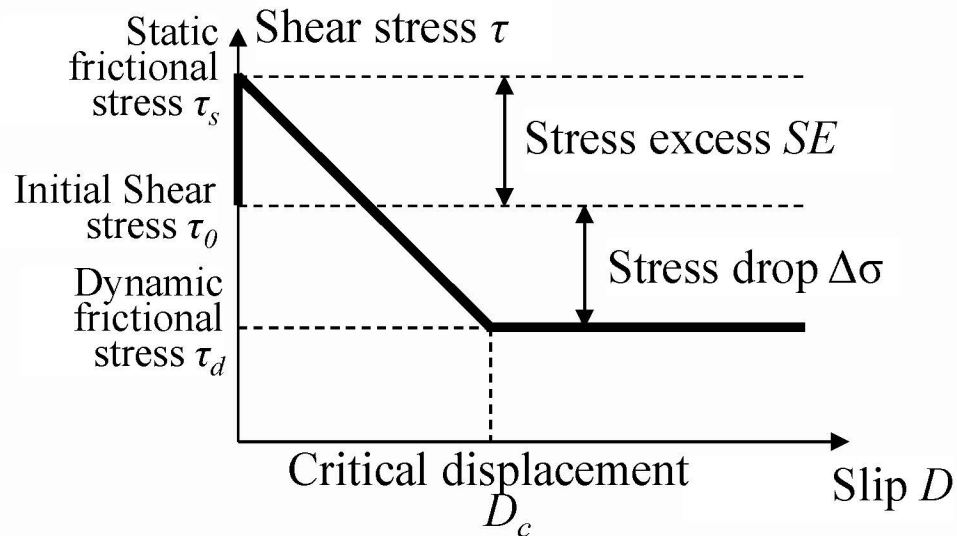
摩擦構成則

Slip-weakening friction law



Stress drop	4.4MPa Irie et al. (2010) の一様断層の検討結果に従う
Strength excess	7.04 MPa 壇・他(2007) ¹⁶⁾ で「破壊伝播速度がS波を超えずに安定的に破壊が進展する」として採用されている関係式より (強度超過) = 1.6 × (応力降下量)
Critical displacement	0.2 m 破壊フロントを適正に計算できる範囲内で、破壊が広がる大きさ

Slip-weakening friction law



Static frictional stress

$$\text{Static coefficient: } \mu_s = \frac{\tau_s}{\sigma_n} = \frac{\tau_0 + SE}{\sigma_n}$$
 Normal stress

Dynamic frictional stress

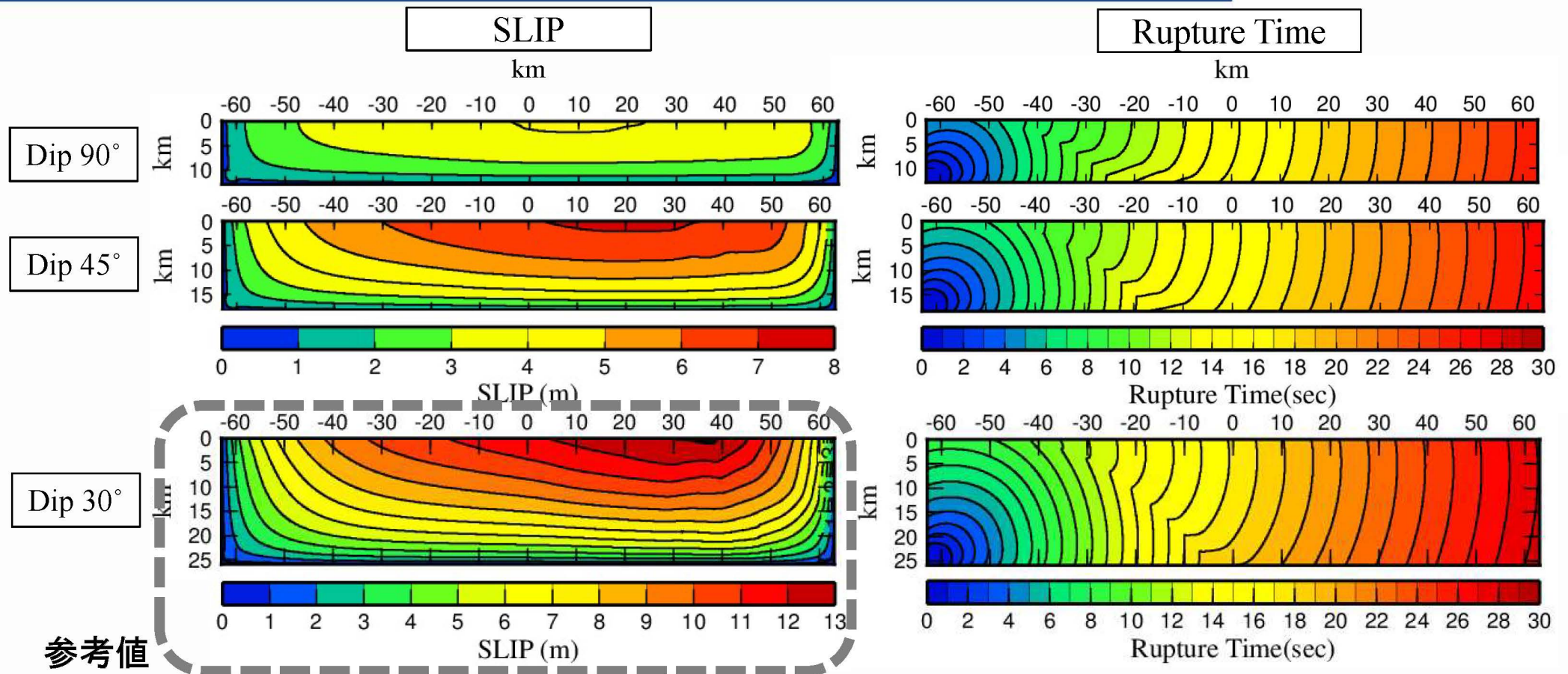
$$\text{Dynamic coefficient: } \mu_d = \frac{\tau_d}{\sigma_n} = \frac{\tau_0 - \Delta\sigma}{\sigma_n}$$

Dip [°]	Strike [°]	Initial shear stress [MPa]	Initial normal stress [MPa]	Stress drop [MPa]	Strength excess [MPa]	Static coefficient	Dynamic coefficient
90.0	57.0	34.08	224.91	4.40	7.04	0.1828	0.1320
45.0	57.0	24.10	224.91	4.40	7.04	0.1384	0.0876
30.0	57.0	17.04	224.91	4.40	7.04	0.1071	0.0562

最大・最小主応力軸が水平面上にあり、横ずれすべりが支配的となる条件下(p.4参照)では、傾斜が低角であるほどせん断応力は小さくなる。仮定した応力場では法線応力が一定となるため、せん断応力の低下に伴い、摩擦係数は傾斜が低角であるほど小さな値となる。

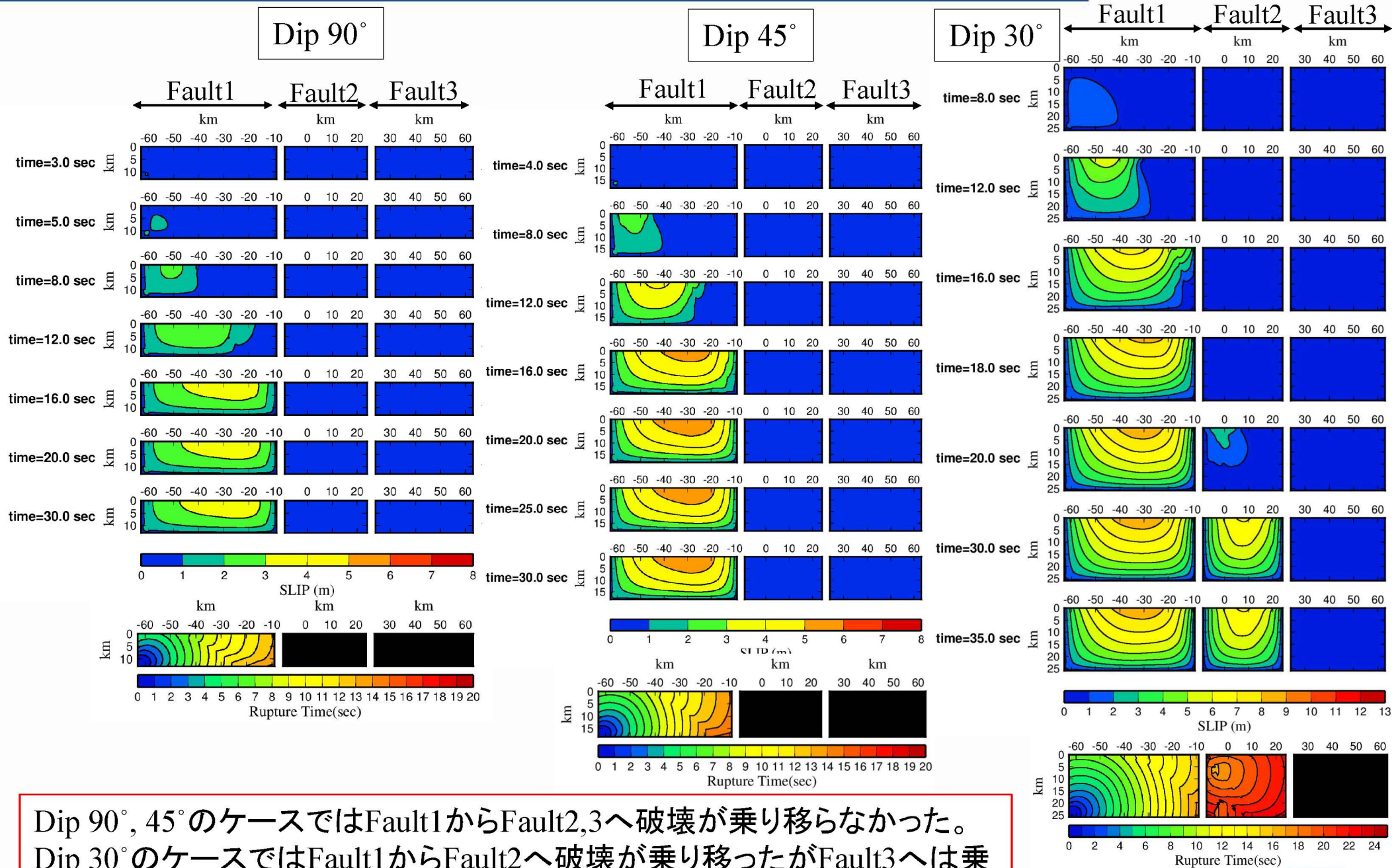
強度が同じ傾斜90°と30°の断層が同時に存在する場合には傾斜90°の断層が先に活動する。←現実には低角の傾斜断層で横ずれすべり運動が生じるか否かは議論しない。

Results: Continuous models



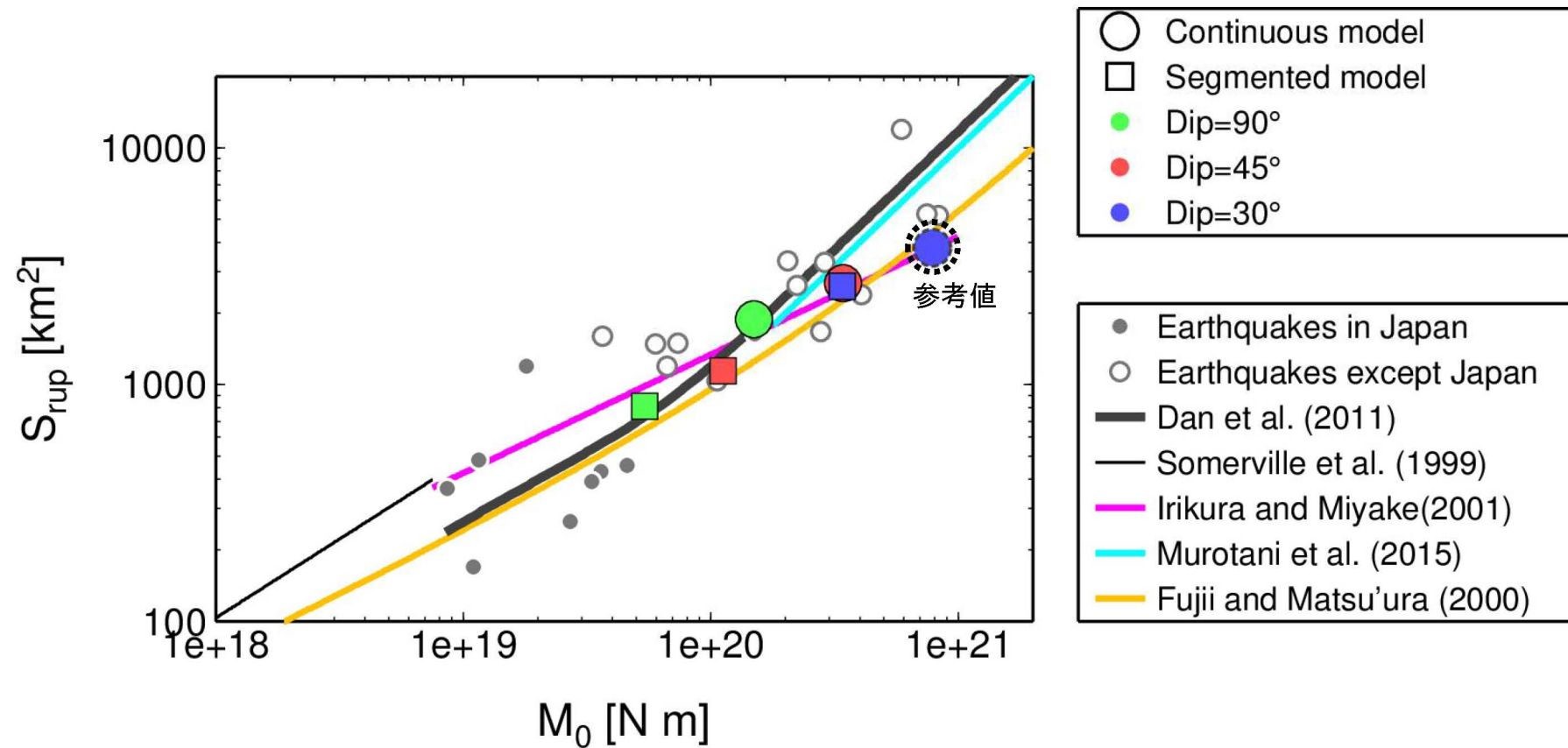
- 傾斜が低角なケースほど最終すべり量が大きくなる
- 破壊開始直後は subshear だが、破壊が地表に達した後に supershear となる。
⇒ 傾斜が低角なケースほど supershear が励起される時間が遅くなる
- Dip 30° のケースは 35 秒以降不安定な挙動を示す。
⇒ 以降では、計算の不安定化が生じる前に平均すべり量が一旦落ち着いた時点
を参考値として示す。

Results: Segmented models



Dip 90°, 45° のケースではFault1からFault2,3へ破壊が乗り移らなかった。
Dip 30° のケースではFault1からFault2へ破壊が乗り移ったがFault3へは乗り移らなかった(ギャップ部ですべり量が低減する)。

Comparison with relationships between seismic moment and rupture area



- Dip90°のケースは壇・他(2011)の関係式と調和的。
- 傾斜45°, 30°の結果は壇・他 (2011) の関係式より地震モーメントが大きい傾向があるものの、概ね実地震記録のばらつきの範囲内。

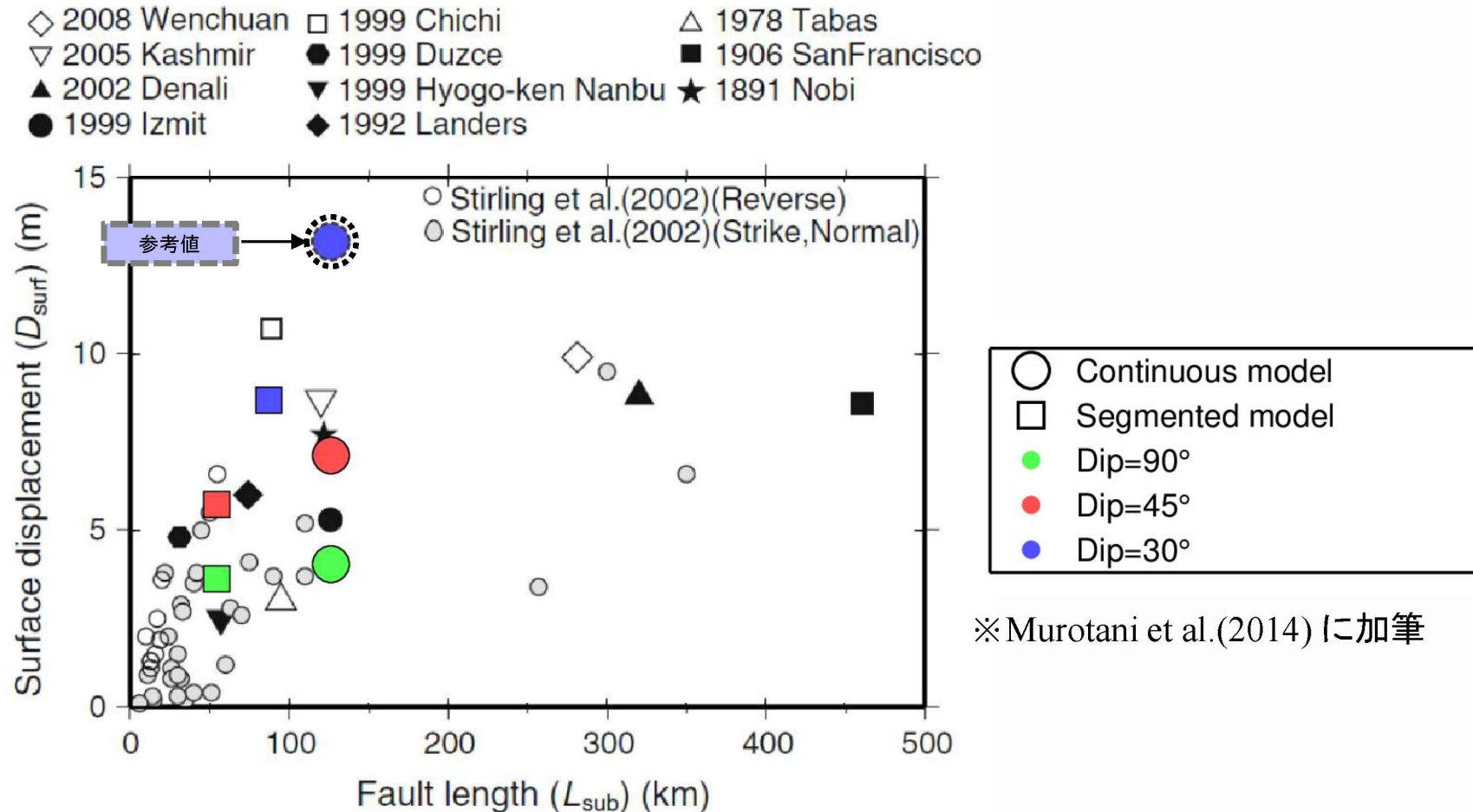
Parameters obtained from the simulations

Case	Dip [°]	Fault length [km]	Maximum surface displacement (m)	Seismic moment obtained from the simulations M_0 [N m]	Seismic moment predicted from Dan et al. (2011) m_0 [N m]	M_0/m_0
Continuous model	90	126	4.06	1.50E+20	1.45E+20	1.03
	45	126	7.15	3.42E+20	2.89E+20	1.18
	30	126	13.19 (参考値)	7.84E+20 (参考値)	5.62E+20	1.40
Segmented model	90	54	3.63	5.40E+19	5.84E+19	0.93
	45	54	5.75	1.12+E20	1.03E+20	1.09
	30	87	8.70	3.41+E20	3.51E+20	0.97

- ✓ 傾斜が低角になるほど M_0 が大きくなる傾向が確認された。
(但し、倍半分の範囲内には入っている。)
- ✓ Segmented model のDip 30°の M_0/m_0 は、傾斜が低角になりすべり量が大きくなる効果と、ギャップですべり量が抑制される効果の相反する効果により、偶然壇・他(2011)と同程度になったと考えられる。

Relationship between fault length and maximum surface displacement

断層長さー最大地表すべり量の関係を、Murotani et al. (2014) に示された実地震のデータと比較した。



- 動力学的シミュレーションの結果から求めた最大地表すべり量は、参考値 (continuous model, Dip 30° のケース) 以外は10m以下となった。
- Dip 90° の場合、最大地表変位量は5m以下で頭打ちした。しかし、傾斜が低角になるほど大きくなる傾向が見られた。

- 応力比とすべり角の関係式を用いて、MTLが傾斜断層であった場合に横ずれ断層活動が生じる応力比の範囲を調査した。
 - MTLのずれ方向の観測事実と本検討の結果との比較から、四国東部の応力比は1に近い大きな値、四国西部の応力比は0.8以下の比較的小さい値と推測される。
- 壇・他(2011)による関係式の傾斜横ずれ断層への適用可能性を評価するため、鉛直断層および傾斜断層の動力学的シミュレーションを試みた。
 - 傾斜90°のケースは壇・他(2011)と良く整合するのに対し、低角になるほど壇・他(2011)の関係式から外れていき、同じ破壊面積でも地震モーメントが大きくなる傾向を示した。
 - ただし、傾斜断層の解析結果と壇・他(2011)の関係式とのずれは、概ね実地震記録のばらつきの範囲内であった。
- 断層不連続が破壊過程に及ぼす影響を評価するため、MTLの四国西部をモデル化して鉛直・傾斜断層の動力学的シミュレーションを行った。
 - 現実に低角の傾斜断層で横ずれすべり運動が生じるか否かは議論せず、低角の傾斜でも動的破壊が生じるようにパラメータを設定してシミュレーションを行った。
 - 傾斜90°、45°のケースでは伊予灘セグメントのみで破壊が停止したが、傾斜30°のケースでは伊予灘・伊予セグメントが連動破壊した。
 - ギャップ部ではすべり量が低減することを確認した。
 - 入力パラメータの不確定性が大きい⇒ 今回の結果はある応力場・摩擦係数を仮定した上でのものであることに注意する必要がある。

- 1) 地震調査研究推進本部 (2011) 中央構造線断層帯 (金剛山地東縁-伊予灘) の長期評価 (一部改訂) について, 平成23年2月18日, http://www.jishin.go.jp/main/chousa/11feb_chuokozo/index.htm (最終確認: 2017年3月5日)
- 2) Onishi, K., N. Nishizaka, Y. Ishikawa, T. Nayuki, T. Tanaka, K. Ando, T. Oouchi and T. Ito (2016) Estimate of the initial rock stress by performing a comprehensive evaluation using the results of several techniques, the 7th CECAR, Hawaii.
- 3) 西日本地殻応力調査班 (1980) 応力解放法による地殻応力測定-(1)四国、佐々連鉱山-, 地震予知連絡会会報, 23, 155-159.
- 4) Tsutsumi, H., K. Sato, and A. Yamaji (2012) Stability of the regional stress field in central Japan during the late Quaternary inferred from the stress inversion of the active fault data, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L23303, doi:10.1029/2012GL054094.
- 5) Matsushita, R. and K. Imanishi (2015) Stress fields in and around metropolitan Osaka, Japan, deduced from microearthquake focal mechanisms, *Tectonophysics*, 642, 46-57.
- 6) 壇一男, 具典淑, 入江紀嘉, アルズペイマサマン, 石井やよい (2011) 長大横ずれ断層による内陸地震の平均動的応力降下量の推定と強震動予測のためのアスペリティモデルの設定方法への応用, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第670号, 2041-2050, 2011年12月.
- 7) Kase, Y. and K. Kuge (2001) Rupture propagation beyond fault discontinuities: significance of fault strike and location, *Geophys. J. Int.* 147, 330-342.
- 8) Kase, Y. (2010) Slip-length scaling law for strike-slip multiple segment earthquakes based on dynamic rupture simulations, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 100(2), 473-481, doi: 10.1785/0120090090.
- 9) Ishikawa, Y., N. Nishizaka, Y. Simoguchi, Y. Ohno, D. Kanbara, E. Tamura, K. Ando, C. Nagai, K. Kimura, S. Kawasaki (2013) Evaluation of seismic wave amplification in the site where very hard crystalline schist forms the bedrock, the 11th SEGJ international symposium.
- 10) Irie, K., K. Dan, S. Ikutama and K. Irikura (2010) Improvement of kinematic fault models for predicting strong motions by dynamic rupturing simulation - Evaluation of proportionality constant between stress drop and seismic moment in strike-slip inland earthquakes-, First Kashiwazaki International Symposium on Seismic Safety of Nuclear Installations.
- 11) Yamashita, F., E. Fukuyama and K. Omura (2004) Estimation of fault strength: reconstruction of stress before the 1995 Kobe earthquake, *Science*, 306, 261-263.
- 12) Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith, and A. Kowada (1999) Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, *Seism. Res. Lett.*, 70, 59-80.
- 13) 入倉孝次郎, 三宅弘恵 (2001) シナリオ地震の強震動予測, *地学雑誌*, 110, 849-875.
- 14) Murotani, S., S. Matsushima, T. Azuma, K. Irikura, and S. Kitagawa (2015) Scaling relations of source parameters of earthquakes occurring on inland crustal mega-fault systems. *Pure Appl. Geophys.*, 172:1371-1381. doi:10.1007/s00024-014-1010-9.
- 15) Fujii, Y. and M. Matsu'ura (2000) Regional difference in scaling laws for large earthquakes and its tectonic implication, *Pure and Applied Geophysics*, 157, 2283-2302.
- 16) 壇一男, 武藤真菜美, 鳥田晴彦, 大橋泰裕, 加瀬祐子 (2007) 動力学的破壊シミュレーションによる断層の連動破壊に関する基礎的研究, 活断層・古地震研究報告, 7, 259-271.
- 17) Kaneko, L., and N. Lapusta (2010) Supershear transition due to a free surface in 3-D simulations of spontaneous dynamic rupture on vertical strike-slip faults, *Tectonophysics*, 493, 272-284.

参考資料： 近畿における応力場調査の既往研究

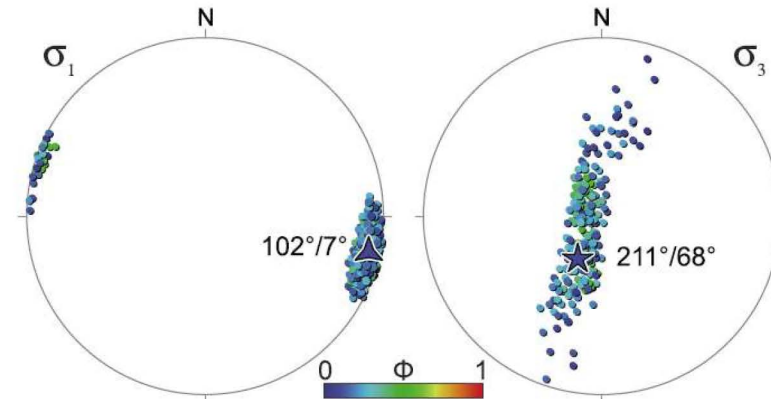
Tsutsumi et al. (2012)

- 近畿三角地帯を全体を対象にした応力インバージョン。
 - 応力場推定のためのデータとして、活断層の運動様式、すべり方向を利用。
- 推定された応力場は、逆断層型の応力場であった。
- 応力比は0.09 (P.4の $R=0.91$ に対応)であり、 σ_2 と σ_3 は非常に近い。よって、逆断層型と横ずれが混在していると考えられる。

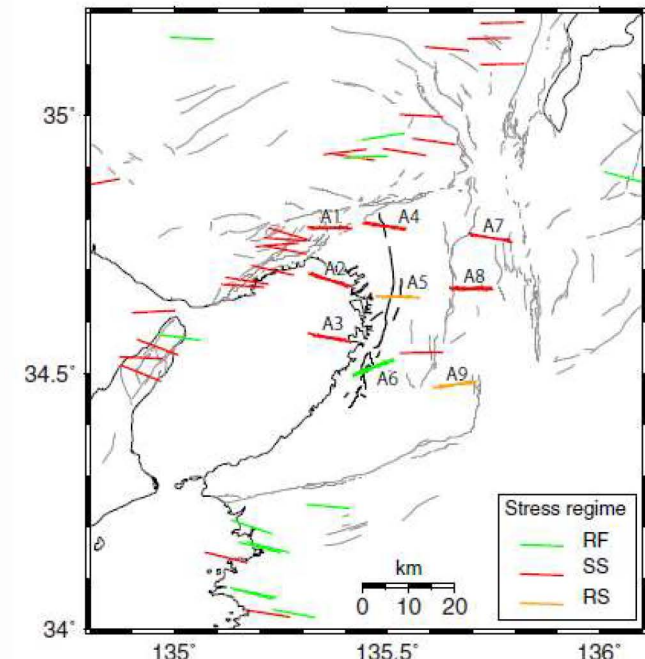
Matsushita and Imanishi (2015)

- 大阪における応力インバージョン(10kmスケール)。
 - 応力場推定のためのデータは震源メカニズム解。
 - 検討地域は地震活動度が低いため、M2.0以下の震源メカニズム解も推定した。
- 推定結果の基本的傾向は横ずれであるが、大阪南部で逆断層型も見られる。
- 応力比は基本的に0.5以下 (P.4の $R=0.5$ 以上に対応)。従って σ_2 と σ_3 の大きさは近い

近畿三角地帯の応力インバージョン結果



大阪周辺の応力インバージョン結果



RF: 逆断層
SS: 横ずれ
RS: 横ずれ成分を含む逆断層

	ケース1-1	ケース1-3	ケース1-4	ケース2-1	ケース2-3	ケース2-4	ケース3-1	ケース3-3	ケース3-4	Irie et al. (2010)
傾斜角 (°)	90	45	30	90	45	30	90	45	30	90
断層長 (km)	54.0	54.0	54.0	126.0	126.0	126.0	258.0	258.0	258.0	※
断層幅 (km)	13.0	18.4	26.0	13.0	18.4	26.0	13.0	18.4	26.0	15.0
面積 (km ²)	702.0	993.6	1404.0	1638.0	2318.4	3276.0	3354.0	4747.2	6708.0	※
アスペリティ面積 (km ²)	195.80	277.16	392.04	456.50	646.16	912.00	935.00	1323.48	1869.60	※
応力降下量 (MPa)	断層平均	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4	※
	背景領域	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	アスペリティ	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	12.2	※
強度超過 (MPa)	初期クラック以外	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	初期クラック	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
初期せん断応力 (MPa)	背景領域	34.08	24.10	17.04	34.08	24.10	17.04	34.08	24.10	17.04
	アスペリティ	46.28	36.30	29.24	46.28	36.30	29.24	46.28	36.30	29.24
初期法線応力 (MPa)		224.91	224.91	224.91	224.91	224.91	224.91	224.91	224.91	120.00
静摩擦係数	背景領域	0.151560	0.107182	0.075802	0.151560	0.107182	0.075802	0.151560	0.107182	0.075802
	アスペリティ	0.205803	0.161426	0.130046	0.205803	0.161426	0.130046	0.205803	0.161426	0.130046
	初期クラック	0.205314	0.160937	0.129557	0.205314	0.160937	0.129557	0.205314	0.160937	0.129557
動摩擦係数		0.151515	0.107137	0.075758	0.151515	0.107137	0.075758	0.151515	0.107137	0.075758
臨界すべり量 (m)		0.75	0.94	1.07	0.80	1.13	1.55	0.80	1.13	1.60
初期クラックサイズ		1km × 1km	2km × 2km	2km × 2km	1km × 1km	2km × 2km	3km × 3km	1km × 1km	2km × 2km	3km × 3km

- 臨界すべり量＝Irie et al. (2010) の関係式から求まる平均すべり量 × 0.3とした。
⇒ (注) 本検討では、シミュレーション結果の平均すべり量 × 0.3 と臨界すべり量が合わない場合がある。
- 初期クラックの大きさは1km × 1kmを初期設定として、破壊が進展しない場合は大きくした。
- 傾斜30° のケースのみ、動摩擦係数が0.1未満となる。

参考資料： 地表から励起されるsupershear

今回のシミュレーション結果のように、破壊開始直後はS波速度より遅い速度で破壊が伝播した後、地表付近でsupershearが励起される現象は、Kaneko and Lapusta (2010)¹⁷⁾により詳細に調査されている。

Kaneko and Lapusta (2010) は、地表でsupershearが励起されて伝播する現象の原因は、以下の2つの影響の複合効果であると述べている。

- (1) 地表で生じた高速なすべりが自由境界の効果により増幅する
- (2) SV-P回折波がsupershearの励起と伝播をさらに促進する

この現象は S値などの初期応力状態に依存せず発生する。これは、低い応力レベルでもsupershearが発生することを意味する。

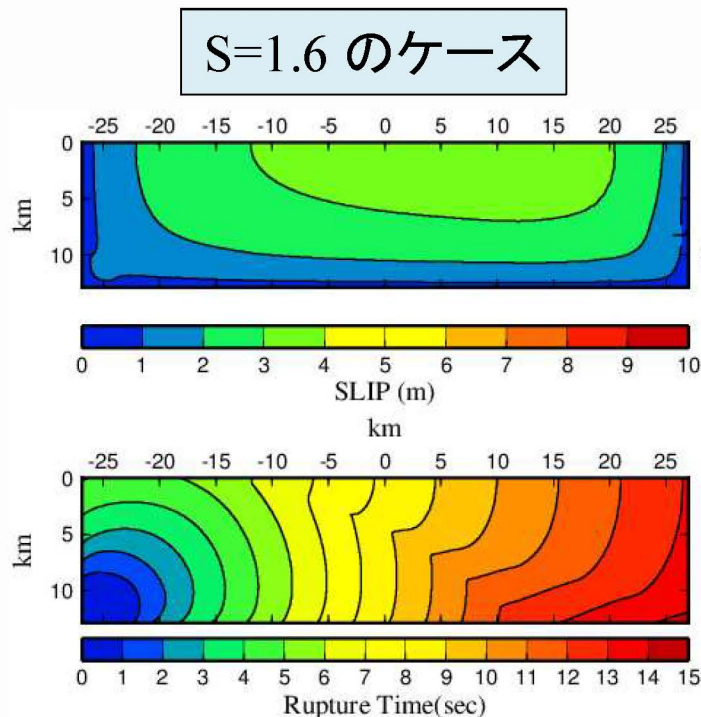
但し、以下の自然界の条件は、supershear の発生に影響を与えられられる。

- 地表で生じた supershear が地表付近に留まるか、断層下端まで伝播するか、については、初期応力場に依存する。背景応力が大きいほど、断層下端まで達する傾向がある。
- 浅部地盤に低Vs層が乗っている場合、入射角が小さくなりSV-P回折波が発生しにくくなることにより、supershearが発生しにくくなる。
- 地表付近の摩擦特性が「速度強化」の場合、supershearの伝播は減退する。
- 断層周辺の媒質の非弾性的な効果は、supershearの伝播を抑制すると考えられる。

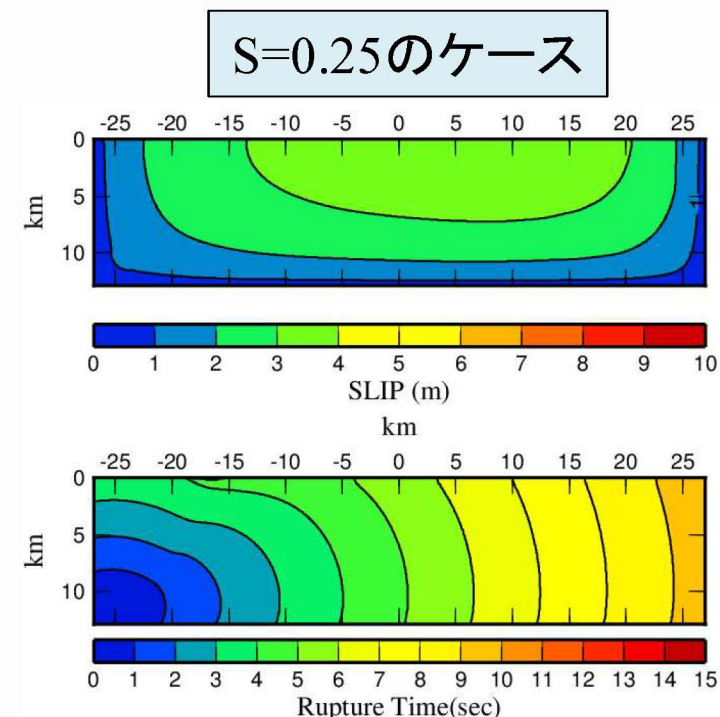
特にこれら3項目はsupershearを抑制する方向に働くため、実際には必ずしもsupershearが生じるわけではない。

断層の破壊過程でsupershearが生じることにより、最終的なすべり量が影響を受けるかを調査した。
⇒ 断層長54km, 傾斜90° のケースについて、S値※を0.25に変更して断層全体がsupershearとなる設定でシミュレーションを行い、最終的なすべり量を調べた。

※強度超過: $SE = S \times \text{応力降下量} : \Delta\sigma$ (p.21参照)



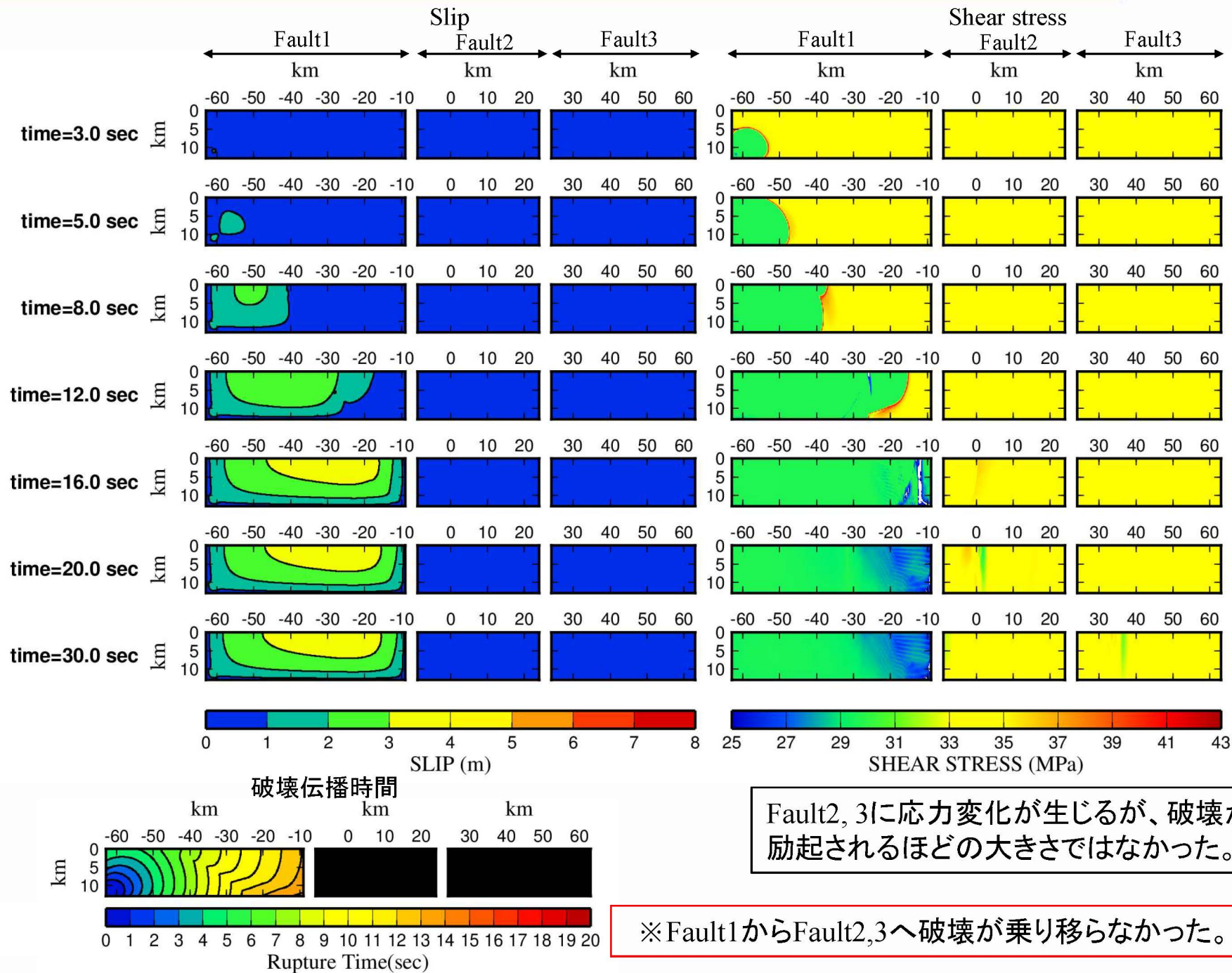
地表からsupershearが伝播する前までは、
破壊伝播速度: 3km/s程度

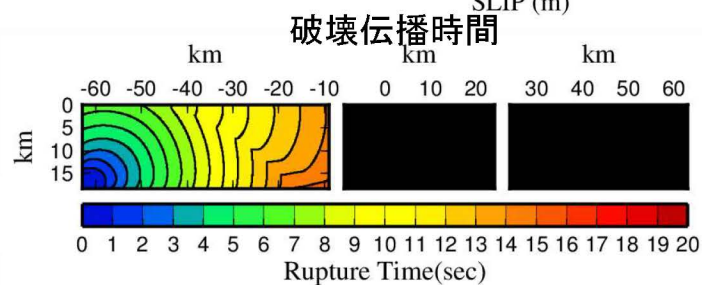
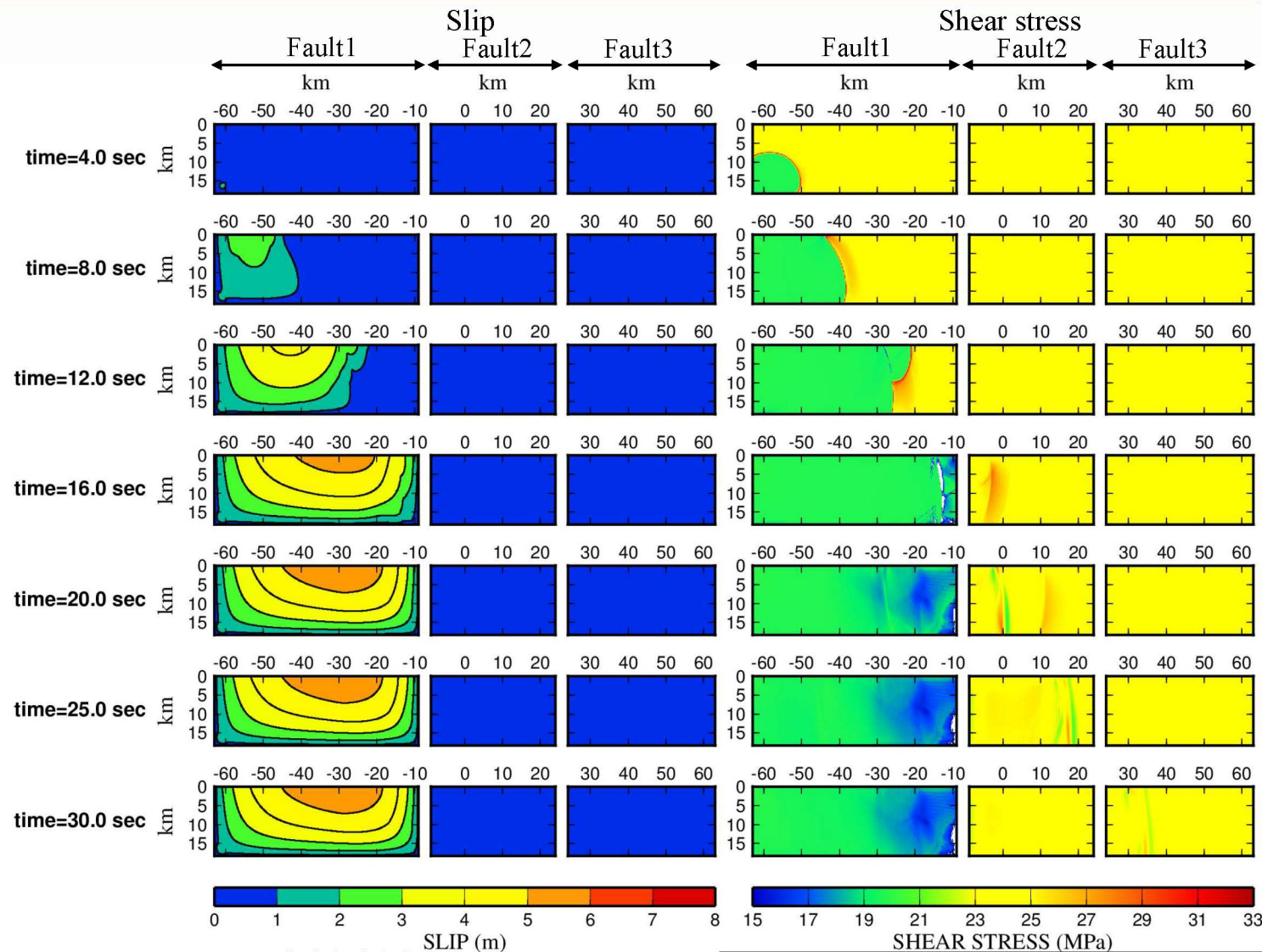


断層全体の破壊伝播速度: 約6km/s

	平均すべり量
S=1.6	2.33 m
S=0.25	2.35 m

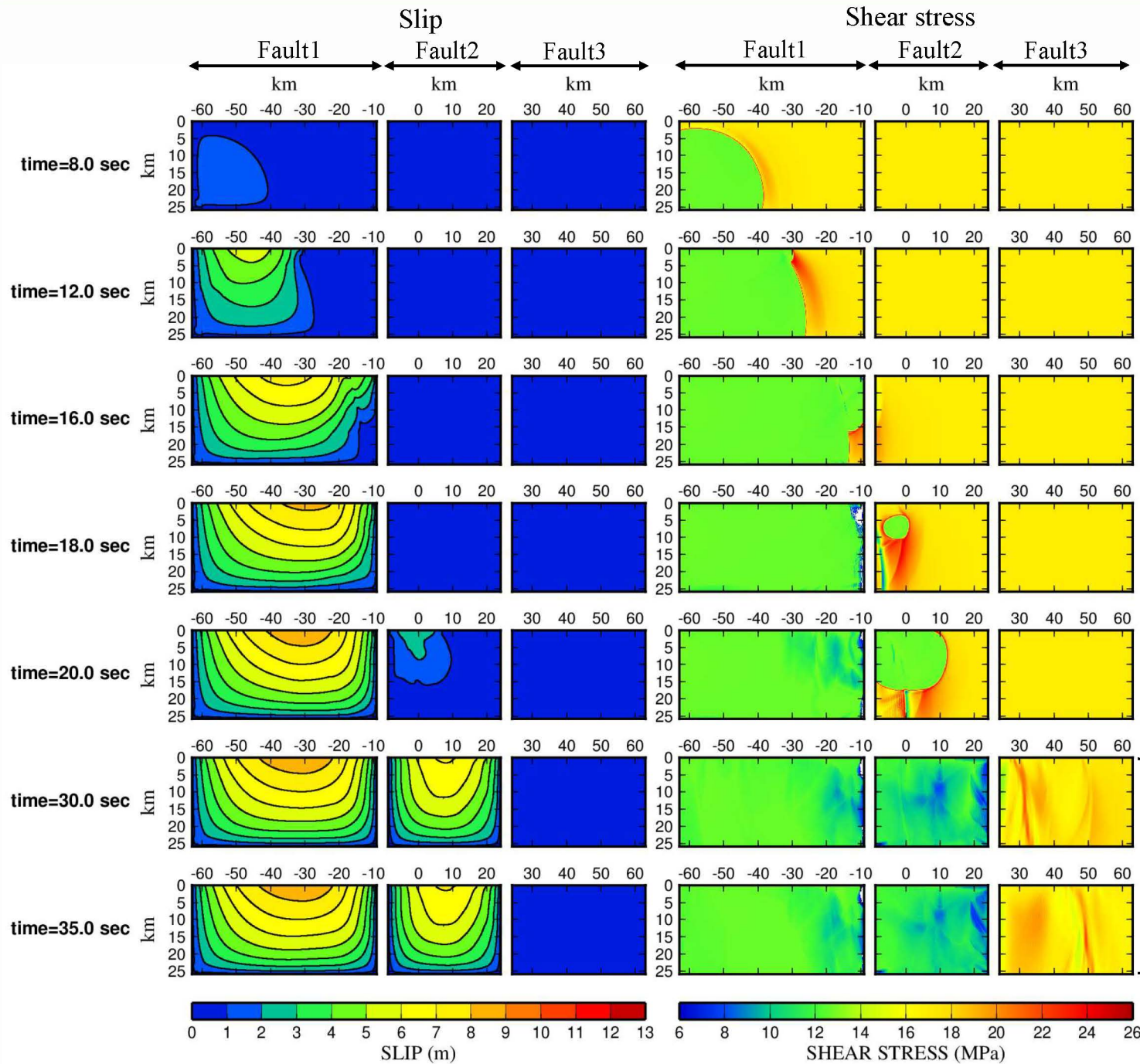
⇒ 1%程度の違いしかないため、
supershearが最終的なすべり量に及ぼす
影響は小さいと考えられる。



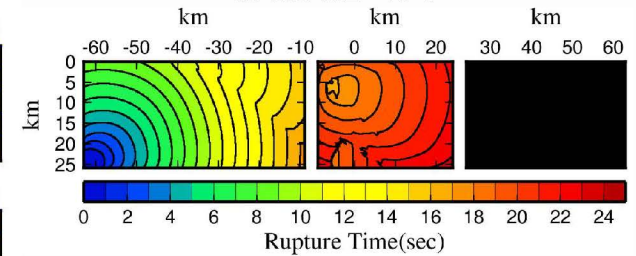


Fault2, 3に生じる応力変化は傾斜90°の場合よりも大きいですが、破壊が励起されるほどの大きさではなかった。

※Fault1からFault2,3へ破壊が乗り移らなかった。



破壊伝播時間



Fault1からFault2へ破壊が乗り移ったが、Fault2からFault3へは乗り移らなかった。

Fault2は断層長さが短いため、Fault2で励起された破壊が十分な距離を伝播する前に断層端に達してしまった。また、断層間距離も5.2kmに増加しているという要因も重なり、連動しなかったと考えられる。

Fault3に応力変化が生じるが、破壊が励起されるほどの大きさではなかった。