神戸大学CPSセミナー 2019年4月4日

# 断層岩、室内実験、深海掘削から紐解く沈 み込み帯地震発生過程

# 氏家恒太郎(筑波大学)







1/50

#### 沈み込み帯地震発生過程を理解するための3つのアプローチ

1. 隆起して地表に現れたプレート境界断層の調査

2. プレート境界断層物質を用いた高速摩擦実験

3. 地球深部探査船「ちきゅう」による震源域掘削



1. 地表に現れたプレート境界断層の調査











研究スタンス:「現象定量化」 プレート沈み込み帯で起こる断層 すべり現象の地質学的描像を詳 細に導き出し、その根底となる物 理過程を明らかにする。



τ: せん断応力 d: すべり距離 *ρ*:密度 *c*:比熱 *w*:スリップゾーンの幅

 $\Delta \sigma_{\rm \, static}$ 

Frictional strength

Ida, 1972

<u>幅(w)の狭いスリップゾーンから熱異常を見出す</u>

4/50

#### 断層における摩擦発熱指標の構築



1. 隆起して地表に現れたプレート境界断層を調べる



#### メランジュ:プレート境界に沿ったせん断変形により地層の連続性が失われた地質体 「沈み込みプレート境界断層岩」





#### 地震の化石「シュードタキライト」:

地震時の高速(~1 m/s)断層運動により岩石が摩擦熔融した後、急冷されて破砕岩片ととも に固化することにより形成されたガラス質または極細粒の緻密な断層岩



 $\Delta T \propto \frac{\tau \nu}{w}$ 

ΔT:断層における温度上昇量 τ□せん断応力 ν:すべり速度 w:スリップゾーンの幅 岩石が摩擦熔融するにはΔT~1000°C ↓ 断層が高速 (v ≥ 0.1 m/s)ですべる必要がある ↓ 地震時の断層すべり速度は0.1 m/s-数m/s ↓ 摩擦熔融物が固化して出来たシュードタキライトは地震 性すべりの最も明確な地質学的証拠

## シュードタキライトの産状



摩擦熔融層の幅は数mm以下→地震時のスリップゾーンの幅は数mm以下

#### シュードタキライトの微細構造

#### Ujiie and Kimura, PEPS, 2014



- 均質なガラス質マトリックス
- 曹長石(Ab)、カリ長石(Kf)粒子に発達する融食縁
- 気泡の発達
- ムライト、白雲母マイクロライトの生成

摩擦熔融と急冷を反映 摩擦熔融時の到達温度 ≥1100°C

		Mugi area		Okitsu area			
	Mg-1	Mg-2	Mg-3	Mg-4	Ok-1	Ok-2	Ok-3
ø	0.09	0.26	0.26	0.26	0.13	0.18	0.12
r	1.58	1.56	1.55	1.54	1.39	1.5	1.41
n	11	6	13	5	13	8	10
SiO <sub>2</sub>	52.55±0.85	51.80±1.50	52.79±0.31	51.65±1.24	53.40±0.92	53.05±0.66	52.46±1.13
TiO <sub>2</sub>	0.27±0.08	0.16±0.11	0.08±0.01	0.13±0.03	0.14±0.07	0.29±0.05	0.21±0.02
$Al_2O_3$	30.22±0.65	27.88±1.15	27.97±0.00	27.03±0.58	29.25±0.80	29.03±0.37	28.92±0.36
FeO	2.55±0.48	4.68±1.88	3.72±0.12	5.35±0.39	2.40±0.49	2.32±0.09	2.28±0.11
MnO	0.21±0.29	0.16±0.04	0.13±0.01	0.19±0.02	0.03±0.02	0.05±0.02	0.02±0.01
MgO	1.63±0.08	1.96±0.29	1.60±0.08	2.15±0.15	2.51±0.14	2.52±0.14	2.51±0.05
CaO	0.55±0.08	0.66±0.10	0.94±0.49	0.57±0.02	0.45±0.40	0.33±0.04	0.42±0.33
Na <sub>2</sub> O	0.13±0.02	0.13±0.01	0.11±0.03	0.15±0.01	0.06±0.02	0.06±0.01	0.06±0.01
K <sub>2</sub> O	7.82±0.35	6.92±0.51	6.97±0.08	6.88±0.14	6.90±0.81	8.38±0.52	8.23±0.19
Total	95.93	94.34	94.30	94.11	95.15	96.04	95.12
Missing mass	4.07	5.66	5.7	5.89	4.85	3.96	4.88

シュードタキライトマトリックスの化学組成

 $\phi$ , volume fraction of unmelted grains

r, average aspect ratio of unmelted grains

n, numbers of analyses

イライトの化学組成を示す
 未熔融固体粒子の割合(*φ*)が変化しても、

マトリックスの化学組成は変化しない

Ujiie et al., JSG, 2007



#### 熔融マトリックスの粘性率( $\eta_m$ )

 $\eta_m$ がアレニウス(Arrhenius)の関係(粘性率の対数が絶対温度の逆数に対して直線的に増加)にある場合



 $\eta_m$ が非アレニウス(non-Arrhenius)の関係 にある場合

Vogel-Fulcher-Tammann (VFT) equation

$$log\eta = A + \frac{B}{T - C}$$
  
A:定数  
B, C:調整パラメータ  
T:絶対温度

- シュードタキライトマトリックスの 化学組成データをもとに計算
- アレニウス、非アレニウスによらず
   熔融マトリックスの粘性率は低く、
   同じオーダーにある

#### 摩擦熔融層の粘性率(η)



#### 摩擦熔融時のせん断強度(τ)

1. 摩擦熔融層がニュートン流体として挙動した場合

$$\tau = \eta \, \frac{d\gamma}{dt}$$

η: 摩擦熔融層の粘性率, 79–290 Pa s

*d*γ/*dt*: せん断歪み速度, 10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (幅1 mmの摩擦熔融層沿いに1 m/sのすべり速度を想定)

*τ* = 0.1–0.3 MPa



 $\tau$  = 0.7–30.3 MPa

2. プレート境界断層物質を用いた高速摩擦実験
 +
 3. 地球深部探査船「ちきゅう」による震源域掘削

# 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震(M<sub>w</sub>9.0)

# 犠牲者の95%以上が巨大津波によるものであった・・・





## 地震のすべり分布

#### 遠地実体波





140° 142°

138°

144°

146

測地

強震動



いずれのモデルも海溝寄りで 大きな地震性すべりが起こった ことを示す



18/50

# 東北地方太平洋沖地震前後での海底地形差分



巨大津波発生の原因は、プレート境界断層浅部での大きな(約50 m)すべり



20/50

#### これまでの理解:

- プレート間の固着域が歪を溜め、地震時にすべる
- ・プレート境界浅部は固着が弱く、歪を蓄えず、地震性すべりが起こりにくい。





JFAST科学目標

- 残留摩擦熱を計測して、地震時の摩擦強度を求める
- プレート境界物質を採取して、地震性すべりメカニズム・摩擦特性を明らかにする
  - プレート境界浅部巨大地震性すべりの原因を明らかにする

# 掘削地点



### プレー ト境界断層の特徴



24/50

#### プレート境界断層物質を用いた高速摩擦実験 (地震性すべりの再現実験)



実験試料	すべり速度	すべり距離	垂直応力	含水状態
日本海溝プレー H境界断層物質 0.5 g	1.3 m/s	<b>~</b> 15–60 m	0.6–2.0 MPa	蒸留水 約0.7 ml

透水条件:供試体は多孔質岩石(ベレア砂岩:透水率1.5×10<sup>-13</sup> m<sup>2</sup>) 不透水条件:供試体は結晶質岩石(斑レイ岩:透水率8.4×10<sup>-20</sup> m<sup>2</sup>)



- 透水条件より不透水条件の方が、せん断応力・断層物質内部の温度上昇量が低い
- 不透水条件より透水条件の方が圧密が進行
- 透水条件では圧密の進行後、石英のα-β転移温度(573°C)付近で膨張を示す

せん断応力の垂直応力依存性



透水条件では定常状態せん断応力は垂直応力依存性を持つが、不透水条件では持たない

不透水条件では摩擦則が成り立たず、高速せん断時に断層物質が流体挙動したことを反映 27/50



- 注入構造やミキシングなどガウジの流動化(fluidization)を反映した構造
- ・ 定常状態せん断応力が垂直応力依存性を持たないこと(断層物質が流体挙動したこと)と調和的

東北地方太平洋沖地震時の浅部巨大地震性すべりメカニズム





IODP Expedition 316 南海トラフ地震発生帯掘削プロジェクト (NanTroSEIZE)において南海トラフプレート境界断層浅部を掘削

#### プレート境界浅部地震性すべり:日本海溝 vs. 南海トラフ







- 日本海溝・南海トラフとも不透水条件の方がせん断応 カ( $\tau$ )は低い→Thermal pressurizationが効果的に起こ り有効垂直応力( $\sigma_n - P$ )が減少したことを反映
- 同一条件下では、日本海溝の方が南海トラフよりせん
   断応力(む)は低い→日本海溝の方が摩擦係数(μ)の低い
   スメクタイトの割合が多いことを反映

$$\tau = \mu(\sigma_n - P)$$

プレート境界浅部地震性すべりは、南海トラフより日本海溝の方が容易に起こり得る 31/50 <u>深海掘削とプレート境界断層物質を用いた高速摩擦実験で得られた新知見</u> プレート境界浅部のような固着が弱い領域でも、地震時に断層強度が低下することで、 震源域と成り得る。



# スロー地震の地質学的研究

スロー地震とは?

普通の地震



# これまでの地震像とスロー地震







スロー地震の地質学的研究を行う上で鍵となる地球物理学観測結果



Shelly et al., 2006

- 低角逆断層メカニズム解を示す
- 間隙水圧が高い
- 断層強度が非常に低い
- 発生間隔が数ヶ月~数年と短い



#### スロー地震発生域陸域アナログ研究



#### 石英充填せん断脈:

# せん断破壊時にシリカを含む流体が存在した地質学的証拠



せん断脈はメランジュ面構造に対して非常に低角度で発達

#### せん断脈の方位解析:低角逆断層メカニズム解と調和的

せん断脈上に発達する繊維状線構造 メランジュ中に発達する伸長線構造





せん断脈





メランジュ面構造

伸長線構造=沈み込み方向



# せん断脈の内部構造: クラックシール組織の発達



逆断層破壊時に流体流入と石英の析出が何度も繰り返し起こったことを反映

0.1 mm





#### せん断脈は最大圧縮主応力(σ<sub>1</sub>)に対して非常に低角度(5.5°)で発達

## せん断脈に記録されたプレート境界における低角逆断層破壊



#### 石英析出反応速度に基づいた低角逆断層破壊発生間隔の算出



反応速度式 Rimstidt and Barnes, 1980  

$$\frac{\partial C_{SiO2}}{\partial t} = k \frac{A_{SiO2}}{M_{H2O}} (C_{SiO2,eq} - C_{SiO2})$$

$$logk = -0.0886 - 2638 / T$$

Okamoto et al., 2010

 $C_{SiO2,eq}$ :割れ目における石英の溶解度 [mg/kg(H2O)]

  $C_{SiO2}$ :流体におけるシリカ濃度 [mg/kg(H2O)]

 t:割れ目における流体の貯留時間 [s]

 k:石英の析出速度 [kg/m2s]

  $A_{SiO2}$ :反応表面積 [m2]

  $M_{H2O}$ :割れ目における流体の重量 [kg]

 T:温度 [K]

低角逆断層破壊時の温度・間隙水圧変化の見積もり

炭質物ラマン地質温度計

流体包有物



条件	値
深度	15 km
温度	330°C
静岩圧	382 MPa
静水圧	147 MPa
密度	2600 kg m <sup>-3</sup>
走向方向せん断脈長さ	1 m
傾斜方向せん断脈長さ	1 m
石英析出幅	20, 34, 38 μm

包有物バンドの数と間隔から求めた低角逆断層破壊イベント回数と石英析出幅 約100-150回のイベントと数十ミクロンの析出幅

石英析出反応速度計算に

用いた条件と値





# クラックシール石英充填せん断脈=低周波微動の痕跡?



Ujiie et al., GRL, 2018

地球物理観測結果を 満たす地質学的痕跡

- 低角逆断層メカニズム解を示す: Yes
- ・間隙水圧が高い:静岩圧に近い
- 断層強度が非常に低い:0.38 < τ < 0.54 MPa</li>
- 発生間隔が数ヶ月~数年と短い:≤0.8-1.6 年

・約100-150回の低角逆断層破壊を記録

・1回の破壊あたりのせん断変位量は0.1-0.2 mm

まとめ

地質学的研究によって明らかになった沈み込み帯地震発生過程

 断層から摩擦発熱指標を発見・構築し、それに基づき地震時の断 層強度などのソースパラメータを定量

断層が固着していなくても地震時に断層強度が低下することで、
 地震破壊伝播が促進されることを実証

■ Slip-to-the trenchによる巨大津波発生の理解に貢献

• スロー地震の地球物理観測結果を満たす地質学的証拠を提示

■ スロー地震の発生に果たす流体の役割解明に貢献