

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 13 日現在

機関番号：32601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800245

研究課題名(和文) 反応拡散系との対比で考える新しい地震サイクル理論

研究課題名(英文) New Theory for Earthquake Cycle Based on Diffusion-Reaction System

研究代表者

鈴木 岳人 (Suzuki, Takehito)

青山学院大学・理工学部・助教

研究者番号：10451874

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,900,000円

研究成果の概要(和文)：熱・流体・空隙生成相互作用を仮定して得られる単一のモデルで動的な地震破壊の多様性の説明ができた。二つの無次元数だけで多くの現象が説明できたのである。特に加速と自発的停止が記述され、それらが無次元数空間上で明確な境界を持つことが示された意義は大きい。加えて、本解析的成果はある種の化学反応の振る舞いの理解にも有効であることが示された。地震学にとどまらず広く物理学的成果を得るという当初の目的は十分達成されたとと言える。

研究成果の概要(英文)：We successfully explained the diversity of dynamic earthquake rupture process by the single framework with heat, fluid pressure and dilatancy. We employed only two nondimensional parameters to understand such diversity. In particular, it is significantly important that both the acceleration and the spontaneous slip cessation can be modeled by the single framework and we found the boundary between these behaviors analytically on the nondimensional parameter space. In addition, our analysis is also shown to be applicable to behavior of some kinds of chemical reaction systems. Our initial aim that we should obtain the analytical solutions applicable not only to seismological problem, but also to that of another field of physics or chemistry is clearly achieved.

研究分野：地震物理学

キーワード：解析解 非線形 熱 流体 非弾性

### 1. 研究開始当初の背景

地震現象の理解に向けたアプローチは理論・観測・実験と多様であるが、特に理論分野から貢献できる一歩として、地震の動的滑り過程の多様性を簡単な単一のモデルで説明するということが挙げられる。実は一口に「地震」といってもあまりにも多様な側面を見せる。例えば人間に感じる通常地震があれば、地震波を殆ど放出しないゆっくりとした地震もある。そのため、地震学はどうしてもそういった個別の現象の説明に目が行き、統一的な説明がなされない傾向があった。しかし地震は簡単に言うと断層滑りであり、そもそも一般的な材料に見られる亀裂と同じ現象であると言える。すなわち亀裂現象の普遍性に着目して理解を進めなければならない。こういった普遍性に着目するのは物理学としてみれば当然のことで強調するまでもないが、地球科学では意外と盲点になっていることであった。

### 2. 研究の目的

本研究では一般の亀裂の問題、あるいは表面の問題にも適用可能であるような、極力普遍的な内容にしつつも、地震現象の簡単な説明に迫っていく。キーワードは「熱・流体・空隙生成相互作用系から導かれる滑り過程の多様性」である。ここでは少数の無次元数のみを考え、地震現象に見られる多様性というのはこれらの違いしか持たないのだ、という枠組みを構築することにする。

### 3. 研究の方法

解析的手法と数値的手法を用いた。特に解析的成果が重要であり、本報告書でもそこを重点的に記述する。

### 4. 研究成果

最初に本報告書内で重要な役割を演じる熱・流体・空隙生成相互作用について簡単に述べておく。地殻中では十分に流体(水)が含まれているとする。そこでの地震滑りは摩擦発熱を生じ、それが流体の高圧化を導く(thermal pressurization, 以下 TP)。一方地震滑りは空隙も生じ、それは流体の減圧を導く。高圧化は滑りの加速、減圧化は減速を生じると考えて頂きたい。そのどちらが効くのかを定量的に明らかにすることがここでの目的である、とイメージして頂くと幸いである。

次に一次元亀裂を仮定し、滑り過程を記述

する支配方程式系を示す。導出は文献に譲るとして、流体圧  $\bar{p}_f$ , 温度  $\bar{T}$ , 非弾性空隙率  $\phi^{\text{in}}$  の時間発展方程式及び固相の変位  $\bar{\mathbf{u}}_s$  に関する運動方程式はそれぞれ以下ようになる。

$$\frac{1}{M} \frac{\partial \bar{p}_f}{\partial t} = ((b - \phi_t) \alpha_s + \phi_t \alpha_f) \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \frac{k}{\eta} \nabla^2 \bar{p}_f - \frac{\partial \phi^{\text{in}}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\left[ (1 - \phi_t) \rho_s C_s + \phi_t \rho_f C_f \right] \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} =$$

$$\sigma_{\text{res}} \frac{v}{w_h} \left[ H(y + \frac{w_h}{2}) - H(y - \frac{w_h}{2}) \right],$$

$$\frac{\partial \phi^{\text{in}}}{\partial t} =$$

$$\alpha_0 v \left( 1 - \frac{\phi^{\text{in}}}{\phi_\infty} \right) \left[ H(y + \frac{w_h}{2}) - H(y - \frac{w_h}{2}) \right],$$

$$\rho_B \frac{\partial^2}{\partial t^2} (\bar{\mathbf{u}}_s)_z = \mu_v \nabla^2 (\bar{\mathbf{u}}_s)_z. \quad (4)$$

パラメータについては Suzuki and Yamashita (2014)を参照されたい。

方程式系が明らかになったので、ここから系の振る舞いを支配する無次元数を導出する。式(1)-(4)を無次元化し、 $\phi^{\text{in}} \ll \phi^{\text{el}}$  とすると

$$\frac{\partial P^*}{\partial t^*} = -(1 + P^*) (S_u (1 - \phi^*) + P^*)$$

$$\times \left[ H(y^* + \frac{1}{2}) - H(y^* - \frac{1}{2}) \right] + S'_u \frac{\partial^2 P^*}{\partial y^{*2}}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \phi^*}{\partial t^*} = T_a (1 - \phi^*) (1 + P^*)$$

$$\times \left[ H(y^* + \frac{1}{2}) - H(y^* - \frac{1}{2}) \right], \quad (6)$$

ここで流体拡散を無視すると、式(5)と(6)から

$$\dot{v}^* = v^* (1 - v^*) - S_u (1 - \phi^*) v^*, \quad (7)$$

$$\dot{\phi}^* = T_a (1 - \phi^*) v^*, \quad (8)$$

を得る。パラメータについてはやはり Suzuki and Yamashita (2014)を参照されたいが、特に  $S_u$  と  $T_a$  という2つの無次元数についてここで言及しておきたい。 $S_u$  は発熱の強さを基準にした空隙生成の強さ、また  $T_a$  は空隙上限を基準にした典型的空隙生成量である。 $S_u$  が大きいほど流体圧が減少し易く、滑り辛くなるというイメージである。また  $T_a$  は、空隙生成量が上限に達してそれ以上増加しなくなるまでの滑り量に関わっており、 $S_u$  とともに系の時間発展を定性的に決めている。

式(7)と(8)を解析的に解く前に、そこから得られる系の振る舞いを簡単に理解しておきたい。特に定性的に異なる2通りの解が出てくることを示しておく。パラメータ範囲として  $S_u > 1 - v_0^*$  ( $v_0^*$  は初期滑り速度) を今後仮定する。この場合時刻  $t^* = 0$  で  $\dot{v}^* < 0$  となり、滑りの初期段階でまず減速が起こる。これはすなわち、 $S_u > 1 - v_0^*$  では初期段階で空隙生成の効果が TP の効果よりも相対的に強いということを意味している。そしてその後の振る舞いとして2通りのものが考えられる。一つは、十分な時間が経った後、空隙率が上限に近付き、その効果が相対的に弱まって TP が強くなり始め、流体圧が上昇して加速が起こる場合である。これを今後加速の場合と呼ぶ。もう一方は、空隙生成の効果が TP よりも相対的に強いままであり、加速が起こらず  $\dot{v}^* \rightarrow 0$  へと漸近する場合である。これは自発的停止の場合と呼ぶことにする。

このように、式(7)と(8)は定性的に全く異なる2通りの滑りの振る舞いを生じることになる。以下では、その2通りのうちのどちらがどのようなパラメータ範囲で選択されるのか、両式を厳密に解くことによって明らかにしていく。まず  $u^*$  を正規化された滑り量とし、 $\ddot{u}^* = \dot{u}^* du^* / du^*$  の関係を用いると、式(7)と(8)から

$$\frac{d\dot{u}^*}{du^*} = 1 - \dot{u}^* - S_u e^{-T_a u^*} \quad (9)$$

を得る。すなわち  $\dot{u}^*$  に関する非線形性を消せるのが大きな特徴である。この方程式は定数変化法で解くことができ、滑り速度を滑りの関数として書ける：

$$\dot{u}^* = 1 - \frac{S_u}{1 - T_a} e^{-T_a u^*} + \left( v_0^* - 1 + \frac{S_u}{1 - T_a} \right) e^{-u^*}. \quad (10)$$

この式(10)を基に次の関数を考える：

$$F(r) = 1 - \frac{S_u}{1 - T_a} r^{T_a} + \left( v_0^* - 1 + \frac{S_u}{1 - T_a} \right) r, \quad (11)$$

ここで  $r = \exp(-u^*)$  である。すなわち  $r = 1$  から滑り過程が始まり、滑りに伴って  $r$  が減少する。もし  $r = 0$  まで減少すれば  $u^* \rightarrow \infty$  すなわち加速が起こったということになる。ここで、関数(11)は簡単な考察によって  $0 \leq r \leq 1$  で極小値を一つだけ持つことが示され (Suzuki and Yamashita, 2014)、その極小値を取る時の  $r$  の値を  $r_m$  として

$$F(r_m) = 1 - \left( \frac{1}{S_u T_a} ((1 - v_0^*) T_a + S_u - 1 + v_0^*) \right)^{\frac{T_a}{T_a - 1}} S_u \quad (12)$$

を得る (図1)。

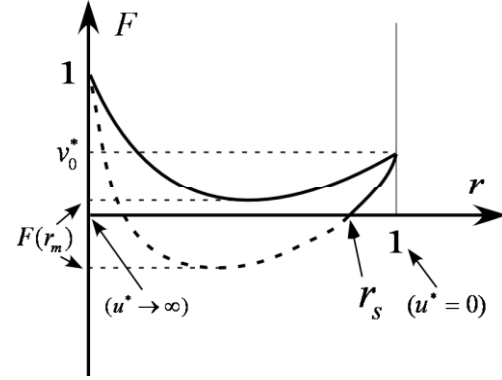


図1

すなわち式(12)の右辺を関数  $G(S_u, T_a, v_0^*)$  と定義すれば、 $G$  によって系の振る舞いが完全に分類されることになる。 $G > 0$  ならば  $r$  は1から0まで減少することができ、 $u^* \rightarrow \infty$  すなわち加速が現れる。一方  $G < 0$  ならば  $r$  は1から  $r_s$  (ここで  $F(r_s) = 0$ ) までしか減少できず、自発的停止が現れるのである。このように、定性的に全く異なる滑り過程が単一の関数によって分類されることが明らかになったのは重要である。

ここでは極力一般的な亀裂の問題に対して適用できるよう意識したが、加速の場合と自発的停止の場合がそれぞれどのような地震に相当するか、簡単な地震学的考察も加えておく。前者は滑りの初期段階の減速フェーズが、前駆的破壊に見えたり、あるいは十分な解像度がなければ全体的にゆっくりとした立ち上がりが見えたりするであろう。一方自発的停止の場合は、(二次元・三次元系で考えれば) 多くのケースで見られるパルス型の地震滑り伝播に相当すると解釈できる。

このようにして、熱・流体・空隙生成相互作用を仮定して得られる単一のモデルで動的地震破壊の多様性の説明ができた。二つの無次元数だけで多くの現象が説明できたのである。特に加速と自発的停止が記述され、それらが無次元数空間上で明確な境界を持つことが示された意義は大きい。

加えて、本解析的成果はある種の化学反応の振る舞いの理解にも有効であることが示された (Suzuki and Yamashita, 2014)。地震学にとどまらず広く物理学的成果を得るという当初の目的は十分達成されたと言える。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

- ① 鈴木岳人(2015), 熱・流体・空隙生成相互作用系に現れる動的地震滑り過程の多様性 (研究紹介)、表面科学、査読有、36、230-235
- ② Suzuki, T., and T. Yamashita (2014), Effects of shear heating, slip-induced dilatancy and fluid flow on diversity of 1-D dynamic earthquake slip, *J. Geophys. Res.*, 査読有, 119, doi:10.1002/2013JB010871

[学会発表] (計 1 7 件)

- ① Suzuki, T. and T. Yamashita (2014), Limiting Behavior of the Function Governing the Dynamic Earthquake Slip Process with the Interaction among Heat, Fluid Pressure and Dilatancy, *2014 AGU Fall Meeting*, T11D-4592, San Francisco, USA, 15-19 December
- ② Suzuki, T. and T. Yamashita (2014), Systematic Understanding of Spontaneous Acceleration and Slip Cessation and its Seismological Interpretation, *2<sup>nd</sup> European Conference on Earthquake Engineering and Seismology*, 2436, Istanbul, Turkey, 24-29 Aug
- ③ Suzuki, T. and T. Yamashita (2014), Apparent Stable Behavior of Solutions of a System Among Heat, Fluid Pressure and Dilatancy and its Seismological Implications, *11<sup>th</sup> Annual Meeting of AOGS*, SE20-D5-AM1-HH-036, Sapporo, Japan, 28 July – 1 Aug
- ④ Suzuki, T. and T. Yamashita (2013), Analytical Treatment for Deriving the Constitutive Relationship and the Function Governing the System Behavior in the Framework associated with Heat, Fluid Pressure and Inelastic Porosity, *2013 AGU Fall Meeting*, S11A-2279, San Francisco, USA, 9-13 December
- ⑤ Suzuki, T. and T. Yamashita (2013), Two Different Fault Slip Behaviors Generated by Modified Porosity Evolution Law, *IAHS-IASPO-IASPEI Joint Assembly*, S701PS.02, Gothenburg, Sweden, 22-26 July
- ⑥ Suzuki, T. and T. Yamashita (2013), Slip Acceleration and Spontaneous Slip

Cessation Generated by Interaction Among Heat, Fluid Pressure and Inelastic Pore Creation, *10<sup>th</sup> Annual Meeting of AOGS*, SE04-D5-AM2-P6-012, Brisbane, Australia, 24-28 June

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 岳人 (Suzuki, Takehito)  
青山学院大学・理工学部・助教  
研究者番号：1 0 4 5 1 8 7 4