

令和 6 年 5 月 20 日現在

機関番号：32601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03771

研究課題名（和文）多孔質媒質中の乱流・自己沈殿・平均流の物理の数理的理解

研究課題名（英文）Mathematical Understanding of physics of turbulence, self-precipitation, and averaged flow in porous media

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） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：多孔質媒質中の乱流、そして多孔質媒質中の空隙が時間をかけて塞がっていく効果は、例えば地震滑りに強い影響を与えることが明らかになってきた。これの統一モデル化として、バネ・ブロックモデルにおいて、ブロックと基盤との接触領域に熱・流体・空隙相互作用、そして自己沈殿の効果を導入した。これらの仮定の下、高速とゆっくりという定性的に異なった地震が一次相転移とみなされることが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

地震という現象から非線形力学的成果を得たことが重要である。非線形力学はあらゆる現象を対象にするが、地震現象はその中に入っていないことが多い。しかし本研究によりそこに一石を投じることができた。日本は地震国であるから、そういった数理物理的分野をリードする可能性を示した。地震の予測というよりも数理的成果に重きを置いたことを強調したい。

研究成果の概要（英文）：The turbulent flow within porous media and the pore healing due to the self-precipitation have been found to affect dynamic earthquake slip processes. For the unified understanding with these effects, I have constructed the framework with the spring-block model, the interaction among heat, fluid pressure, and porosity, and the self-precipitation. With this framework, I found that the difference between the fast and slow earthquakes, which are qualitatively different phenomena, can be understood as the first-order phase change.

研究分野：摩擦物理、非線形力学

キーワード：非線形力学 熱 流体 自己沈殿 一次相転移

## 1. 研究開始当初の背景

地震現象を手掛かりとした数理物理的研究の重要性をまずは強調したい。非線形動力学をはじめとする数理物理は森羅万象を対象とするはずであるが、地震現象はそこに入ってこないことが多い。地震活動と幕則の観点から自己組織化臨界性を議論するなど、例がないとまでは言えないものの、地震滑り現象そのものを扱うことはほぼ見られなかった。しかし地震滑りは多様な物理的素過程が関係する現象であり、それらの非線形な相互作用は数理物理に対して有効な題材を提供するはずである。地震国である我が国としては、主導権を持ってこの分野を開拓すべきだという考えが本研究の背景にはある。

加えて、そういった数理物理が重要になる現象が近年の観測技術の発展により見出されてきているということも重要である。地震というものは大きく二種類に分かれることが見出されてきた。我々が感じる「高速地震」と、感じないほどゆっくり滑る「ゆっくり地震」である。人間社会に災害をもたらすのは高速地震であるが、ゆっくり地震と高速地震の間の相互作用はまだ不明な点が多く、ゆっくり地震も見逃してはならない現象である。例えばゆっくり地震を繰り返した後に高速地震が起こる、という遷移が考えられるのである。このように両地震を統一的に理解する必要があるが、その理論的枠組みについてはいまだ発展途上であり、かつこういった分類に数理物理の力が発揮されるのである。

## 2. 研究の目的

地震現象において非線形動力学的に興味深い現象を見出すこと、特に高速とゆっくりという2つの定性的に異なった滑りを再現することである。

## 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

バネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙相互作用を組み合わせ、ゆっくり地震から高速地震への遷移を取り扱う。バネ・ブロックモデルは、基板上に置いた1個のブロックをばねで引くという簡単なものを仮定する。このモデルに関しては stick-slip 現象という振る舞いが良く知られている。バネを一定速度で引っばると、最初は加重されていくもののブロックは停止 (stick) しており、弾性エネルギーがバネに蓄えられる。しかしバネによる力が最大静摩擦力を越えるとブロックは滑り出す (slip)。滑り出した後は、滑り摩擦力が働くこと、またバネが緩んで弾性エネルギーが解放されることによりブロックはいずれ減速し、最終的には停止する。そしてまたバネを引っ張ると加重され、というように停止 - 滑り - 停止 - 滑り - ... という運動が現れる。これが stick-slip 現象である。これは地震サイクルの最も簡単なモデルとみなすことができる。

次に熱・流体・空隙相互作用について簡単に述べる。断層岩は空隙を多数含んだ多孔質媒質であるとし、空隙は液相 (水) で満たされているとする。断層滑りの際に摩擦発熱が支配的だと媒質は膨張するが、固相と液相の膨張率の違いにより断層面上での流体圧  $p_f$  が上昇する。一方滑り時に滑り面近傍で空隙が生成する効果が支配的だと  $p_f$  は減少する。 $p_f$  が高い (低い) と有効法線応力の減少 (増加) と滑り摩擦応力の減少 (増加) を導く。滑り摩擦係数は、法線応力と滑り摩擦係数をかけたものであることに注意する。

加えて、自己沈殿の効果が重要である。滑りに伴って空隙が生成するが、それによって生じた粒子が沈殿して空隙率の回復 (空隙率で言えば減少) に関わるからである。この自己沈殿は stick 期間中に生じると考える。

ブロックと基板の間に熱・流体・空隙相互作用を取り入れ、このモデルを解析的・数値的に取り扱う。特に、エネルギーバランスを表す、一回の地震の滑り量 $u_f$ の関数 $F(u_f)$ を見出したことが重要であるためその過程を示す。まず、滑り時の流体圧 $p$ 、温度 $T$ 、空隙率 $\phi$ の支配方程式は

$$\frac{dp}{dt} = C_1 \frac{dT}{dt} - M_0 \frac{d\phi}{dt} \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = -C_2(\sigma_n^0 + p) \frac{du}{dt} \quad (2)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = \alpha_0 \frac{du}{dt} \left(1 - \frac{\phi}{\phi_\infty}\right) \quad (3)$$

である（文字については表1を参照。以下同様である）。この式から、 $\phi$ の $u$ 依存性は

$$\phi = \phi_\infty - (\phi_\infty - \phi_0)e^{-\alpha_0 u / \phi} \quad (4)$$

と書ける。この結果と式(1)から

$$\frac{dp}{dt} = \left(-\gamma(\sigma_n^0 + p) - M_0 \left(1 - \frac{\phi_0}{\phi_\infty}\right) \alpha_0 e^{-\frac{\alpha_0 u}{\phi_\infty}}\right) \frac{du}{dt} \quad (5)$$

となり、これから $p$ の $u$ 依存性は

$$p = (\sigma_n^0 + p_0 - A)e^{-\gamma u} + Ae^{-\gamma' u} - \sigma_n^0 \quad (6)$$

となる。次に、滑り出す直前のバネの伸び $L$ は、バネからブロックにかかる力がブロックに働く最大静摩擦力に等しいことから

$$k_p L = -\mu_{\text{stat}}(\sigma_n^0 + p_0)S \quad (7)$$

を満たす。式(7)から、滑り出す時刻にバネが蓄えているエネルギー $E_1$ は

$$E_1 = \frac{1}{2} k_p L^2 = \frac{1}{2} \frac{\mu_{\text{stat}}^2}{k_p} (\sigma_n^0 + p_0)^2 S^2 \quad (8)$$

と得られる。一方滑り直後のバネに蓄えられているエネルギー $E_2$ は

$$E_2 = \frac{1}{2} k_p (L - u_f)^2 = \frac{1}{2} k_p \left(-\frac{\mu_{\text{stat}}}{k_p} (\sigma_n^0 + p_0)S - u_f\right)^2 \quad (9)$$

となる。加えて、ブロックが滑っている間に摩擦力がした仕事は

$$\begin{aligned} E_{\text{fric}} &= \int_0^{u_f} (-\mu_{\text{slid}}(\sigma_n^0 + p))S du = -\mu_{\text{slid}}S \int_0^{u_f} [(\sigma_n^0 + p_0 - A)e^{-\gamma u} + Ae^{-\gamma' u}] du \\ &= -\mu_{\text{slid}}S \left[ \frac{1}{\gamma} (\sigma_n^0 + p_0 - A)(1 - e^{-\gamma u_f}) + \frac{1}{\gamma'} A(1 - e^{-\gamma' u_f}) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

で与えられる。ここで式(5)も用いた。

式(8) - (10)より、滑りの前後でのエネルギー変化を $F(u_f)$ と書くと、その表式は

$$\begin{aligned} F(u_f) &= E_2 + E_{\text{fric}} - E_1 \\ &= \frac{1}{2} k_p u_f^2 + \mu_{\text{stat}}(\sigma_n^0 + p_0)S u_f - \mu_{\text{slid}} \left[ \frac{1}{\gamma} (\sigma_n^0 + p_0 - A)(1 - e^{-\gamma u_f}) + \frac{1}{\gamma'} A(1 - e^{-\gamma' u_f}) \right] S \end{aligned} \quad (11)$$

となる。これは二重井戸型の形となりかつ原点を通る。またその極値はすべて $u_f > 0$ の領域にあるため、極大値が正(負)の時、エネルギーバランスを示す方程式 $F(u_f) = 0$ は正の解が3つ(1つ)存在する。それらのうち物理的に実現されるのは最小のもののみであり、3つの時が小さい滑りすなわちゆっくり地震、1つの時が大きい滑りすなわち高速地震に対応する。両者の違いは極大値が正か負かによって決まるという一次相転移的に考えられることが明らかになった。非線形動力学の観点からも興味深い結果を得られたと言える。なお、極大値は空隙生成効果が有効なほど上昇する傾向にある。これは上述の加速・減速の機構と調和的である。

この振る舞いは一回の動的滑り(slip)時の支配方程式系のみから導出され、自己沈殿が起こる静止(stick)時の支配方程式系は用いられていない。しかし滑りの繰り返しに際してはその効果は重要である。実際、図1では地震の多数回の繰り返しの中で両地震がともに現れているが、これは $\phi$ がslip時に上昇しstick時に減少しているからこそ起こり得ることである。

表1 各文字の意味

文字	意味(添え字sは固相、fは液相)
$k_p$	バネ定数
$\mu_{\text{stat}}$	静摩擦係数

$\mu_{\text{slid}}$	動摩擦係数
$\sigma_n^0$	断層面にかかる外部法線応力
$p_0$	$p_f$ の初期値
$\phi_0$	空隙率の初期値
$\phi_\infty$	空隙率の上限値
$\phi_{\text{ref}}$	バックグラウンドの空隙率
$S$	ブロックの底面積
$w_h$	滑り帯の幅
$\gamma$	$\frac{\mu_{\text{slid}} M_0 \left( (b - \phi_{\text{ref}}) \alpha_s + \phi_{\text{ref}} \alpha_f \right)}{w_h \left( (1 - \phi_{\text{ref}}) \rho_s C_s + \phi_{\text{ref}} \rho_f C_f \right)}$
$\gamma'$	$\alpha_0 / \phi_\infty$
$A$	$\frac{M_0 (1 - \phi_0 / \phi_\infty) \alpha_0}{\gamma' - \gamma}$
$\alpha$	熱膨張率
$\rho$	密度
$C$	比熱
$K$	bulk modulus
$K_v$	媒質の bulk modulus
$M_0$	$\left( \frac{b - \phi - \phi_{\text{ref}}}{K_s} + \frac{\phi + \phi_{\text{ref}}}{K_f} \right)^{-1}$
$b$	$1 - K_v / K_s$
$\alpha_0$	空隙の生成し易さを特徴付ける量

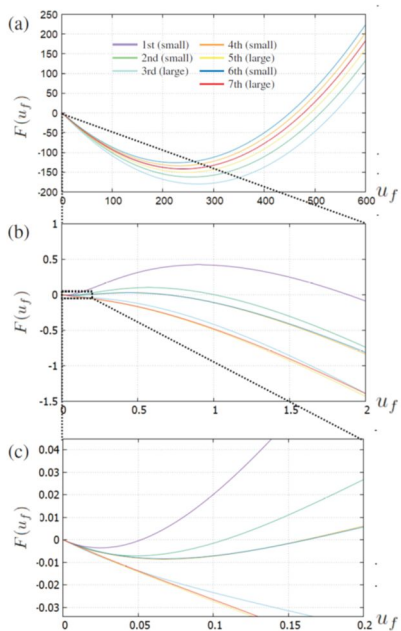


図1 あるパラメータの下で地震を7回繰り返した際の $F(u_f)$ の振る舞い。small, fast はそれぞれゆっくり地震、高速地震に対応する。極大値がゆっくり地震の際は正、高速地震の際は負になっているのが分かる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Suzuki Takehito	4. 巻 106
2. 論文標題 Deriving the slip-front propagation velocity with slip-dependent and slip-velocity-dependent friction laws via the use of the linear marginal stability hypothesis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review E	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevE.106.015002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Suzuki Takehito	4. 巻 90
2. 論文標題 Characteristic Sensitivity of Turbulent Flow within a Porous Medium under Initial Conditions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of the Physical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 024401 ~ 024401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.7566/JPSJ.90.024401	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計39件（うち招待講演 1件/うち国際学会 10件）

1. 発表者名 水口毅・鈴木岳人
2. 発表標題 語長による多言語テキストの構造解析
3. 学会等名 日本物理学会2024年春季大会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 水口毅・鈴木岳人
2. 発表標題 語長によるテキストの構造解析
3. 学会等名 MIMS現象数理学研究拠点共同研究集会「社会物理学とその周辺」
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 ゆっくり・高速地震遷移条件の解析的取り扱いとその妥当性
3. 学会等名 日本地震学会2023年度秋季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 バネ・ブロックモデルにおけるエネルギー保存則に基づくゆっくり・高速地震遷移条件の導出
3. 学会等名 日本物理学会第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Suzuki, T., and H. Matsukawa
2. 発表標題 Condition of transition between slow and fast earthquakes in terms of fluid pressure and porosity
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Mizuguchi, T., and T. Suzuki
2. 発表標題 Structural analysis of written texts in terms of word sequence
3. 学会等名 Statphys28 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Suzuki, T., and H. Matsukawa
2. 発表標題 Systematic understanding of slow and fast earthquakes in terms of the porosity evolution law
3. 学会等名 IUGG Berlin 2023, the 28th General Assembly (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Suzuki, T., and H. Matsukawa
2. 発表標題 Effect of the upper limit of the porosity on variation of behavior of slow and fast earthquakes
3. 学会等名 JpGU Meeting 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 パネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙効果による微動の成因の理解
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水柊汰・鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 付加体の圧縮場を模した粉粒体の力学的挙動の粒子間摩擦依存性
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 バネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙相互作用に基づく微動の振る舞いの多様性の解析
3. 学会等名 日本応用数理学会第19回研究部会連合発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 バネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙効果による微動の成因の理解
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 清水柊太・鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 付加体の圧縮場を模した粉粒体の力学的挙動の粒子間摩擦依存性
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 バネ・ブロックモデルと熱・流体・空隙相互作用に基づく微動の振る舞いの多様性の解析
3. 学会等名 日本応用数理学会第19回研究部会連合発表会
4. 発表年 2023年



1. 発表者名 Suzuki, T., and Matsukawa, H.
2. 発表標題 Investigating the mechanism of the transition from slow to fast earthquakes using the BK model and interaction among heat, fluid pressure and porosity
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水口毅・鈴木岳人
2. 発表標題 品詞分類による英文テキストの構造解析
3. 学会等名 MIMS共同研究集会「社会物理学とその周辺」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 BKモデルと熱・流体・空隙相互作用に基づくゆっくり - 高速地震遷移の多様性の理解
3. 学会等名 日本地震学会2022年度秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Suzuki, T., and Matsukawa, H.
2. 発表標題 Analytical understanding of condition of slow and fast earthquakes based on the BK model and the interaction among heat, fluid pressure and porosity
3. 学会等名 International Joint Workshop on Slow-to-Fast Earthquakes 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水口毅・鈴木岳人
2. 発表標題 機能語内容語分類による英文テキストの構造解析
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 前震-本震系列の繰り返し周期の透水係数への依存性
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 清水柊汰・鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 粉粒体の力学的挙動の粒子間摩擦依存性
3. 学会等名 日本物理学会2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Suzuki, T., and Matsukawa, H.
2. 発表標題 Condition for the transition from slow to fast earthquakes analyzed by the BK model with the interaction among heat, fluid pressure, and porosity
3. 学会等名 JpGU Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水口毅・山本卓也・鈴木岳人
2. 発表標題 文章中の単語の出現頻度ランク列における負の相関
3. 学会等名 MIMS共同研究集会「社会物理学とその周辺」
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 熱・流体・空隙率相互作用によるゆっくり地震から高速地震への遷移とその機構 - パネ・ブロックモデルによる解析 -
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木岳人・松川宏
2. 発表標題 BKモデルと熱・流体・空隙相互作用によるゆっくり・高速地震遷移条件の数理的解析
3. 学会等名 日本応用数理学会第18回研究部会連合発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Suzuki, T.
2. 発表標題 Conditions for ordinary and slow earthquakes in terms of the analytical forms of the intruding and extruding slip-front-propagation velocities
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木岳人
2. 発表標題 2種類の滑り伝播端形状に対する伝播速度の存在条件とその物理的解釈
3. 学会等名 日本地震学会2021年度秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木岳人
2. 発表標題 1次元モデルでの2種類の滑り分布における滑り端伝播速度の存在条件
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Suzuki, T.
2. 発表標題 Systematic treatment for the slip-front-propagation velocity with general friction laws and its implications for ordinary and slow earthquakes
3. 学会等名 Int. Joint Workshop on Slow Earthquakes 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Suzuki, T.
2. 発表標題 Systematic understanding of the slip-front-propagation velocity in terms of Linear Marginal Stability Hypothesis
3. 学会等名 JpGU Meeting 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Suzuki, T. and H. Matsukawa
2. 発表標題 Slip-front-propagation velocity with non-vanishing friction stress at infinitely large slip velocity
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 矢部優・鈴木岳人
2. 発表標題 スロー地震と巨大地震が共存する浅部デコルマの断層破壊メカニズム：掘削資料を用いた断層破壊数値計算による検討
3. 学会等名 JpGU-AGU Joint Meeting 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木岳人
2. 発表標題 多孔質媒質中の乱流に見られる渦粘性の初期値鋭敏性の解析的分類
3. 学会等名 日本物理学会2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木岳人
2. 発表標題 2種類の滑り端伝播と線形臨界定性解析によるその伝播速度の解析
3. 学会等名 日本地震学会2020年度秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yabe, S., Y. Hamada, and T. Suzuki
2. 発表標題 Competing thermal pressurization and dilatancy hardening realizes coexistence of fast and slow slip on the shallow plate boundary fault
3. 学会等名 AGU20 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Suzuki, T.
2. 発表標題 Introducing Linear Marginal Stability Hypothesis for Obtaining Slip-Front-Propagation Velocity with the Slip- and Slip-Velocity-Dependent Friction Law,
3. 学会等名 AGU20 Fall Meeting (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木岳人
2. 発表標題 多孔質媒質におけるk-epsilonモデルに現れる初期条件鋭敏性とその数理的応用
3. 学会等名 日本応用数理学会第17回研究部会連合発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 遠藤峻平、西尾泉、鈴木岳人、松川宏
2. 発表標題 回転型実験装置による粉体の摩擦実験
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木岳人
2. 発表標題 1次元モデルにおける滑り伝播端の2つの形状と多様な伝播速度
3. 学会等名 日本物理学会第76回年次大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 鈴木岳人	4. 発行年 2023年
2. 出版社 コロナ社	5. 総ページ数 192
3. 書名 問題を解くことで学ぶベクトル解析 - 楽しみながら解くことを意識して -	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------