様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９－１、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ３０ 年　 ５ 月 １１ 日現在

機関番号：３２６０１
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2016～2017
課題番号：１６Ｋ１７７９５

研究課題名（和文）滑りの相転移の観点による地震の多様性の統一的理解

研究課題名（英文）Systematic Understanding of Diversity of Earthquakes from the Viewpoint of Phase Transition of Slip

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）　　2,200,000円

研究成果の概要（和文）：基板上にブロックを置き、左から加重するという単純なモデルを扱う。キーワードは、滑り速度に二次関数で依存する摩擦則、ブロックの粘性、そして線形臨界安定性解析（Linear Marginal Stability Hypothesis, LMSH）である。特に滑り端が伝播する速度を考え、解析的にこの値が得られることを示す。そして境界条件として与える歪みをパラメータとした相転移的振る舞いの存在も明らかにしていく。結果の地震学的考察も行う。

研究成果の概要（英文）：We use the simple model with a block on a rigid substrate. The keywords are the local friction law depending on the slip velocity in the quadratic form, viscosity of the block, and Linear Marginal Stability Hypothesis (LMSH). In particular, the analytical solution of the slip front propagation velocity is obtained. Additionally, emergence of the phase transition is also shown by regarding the boundary value of the strain as the controlling parameter. Seismological implications will be finally given.

研究分野：地震物理学

キーワード：解析解　摩擦則　粘性　線形臨界安定性解析　地震

１．研究開始当初の背景

地震研究は長らく「地震の特殊性」というものに目を向けてきた。地震ならではの特徴を観測から見出し、それを説明する模型を構築する、というプロセスで進められてきたのである。もちろんそれで問題があるわけではないのだが、自然科学として対象が狭まってしまった傾向も同時に否めない。そこで、地震滑りは断層の「摩擦滑り」である、ということに着目してみる。すなわち、そこには身の回りの物を滑らせた時と同様に現れる普遍性が隠されているはずなのである。本研究ではそこに焦点を当て、摩擦滑り現象一般に適用可能な模型を構築し、地震学的示唆を考察する足掛かりとする。特に滑り端が伝播する速度を考え、解析的にこの値が得られることを示す。加えて、境界条件として与える歪みをパラメータとした相転移的振る舞いの存在も明らかにしていく。

２．研究の目的

上述のように、本研究では一般の摩擦物理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。キーワードは摩擦則、粘性、そして線形臨界安定性解析（Linear Marginal Stability Hypothesis, LMSH）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

ブロックを基板上に置き、左端から加重した系を考える。ブロック・基盤は無限に長いとし、１次元（1D）系を仮定する。$x \to -\infty$ において境界条件として歪み $p_{-\infty}$ を与える。摩擦則を

$$\tau = a\dot{u}(2b-\dot{u})[H(\dot{u})-H(\dot{u}-2b)] \quad (1)$$

とする。ここで a, b は正のパラメータ、$\dot{u}$ は滑り速度、$H(\cdot)$ は Heaviside の階段関数である。また無次元化された運動方程式は

$$\ddot{u} = u'' + \eta\dot{u}'' - \tau \quad (2)$$

である。ここで η はブロックの粘性率である。まず、この系の自発的な滑り端の伝播速度の解析解として $v_{c\pm} = \sqrt{1+2ab\eta} \pm \sqrt{2ab\eta}$ を得、この中で上記の境界条件を満たすのは $v_{c-} = \sqrt{1+2ab\eta} - \sqrt{2ab\eta}$ であった。そして、$p_{-\infty} \geq 2b/(\sqrt{1+2ab\eta} - \sqrt{2ab\eta})$ の時のみ定常状態が存在することも明らかになった。これは相転移的な振る舞いである。

これまでの結果を任意の摩擦則へと拡張するために、線形臨界安定性仮説（LMSH）を用いる。これを滑り端の伝播に適用し、”extruding front”と”intruding front”を導入して、特に前者の伝播速度 v^{ex} が v_{c-} に等しいことを示す。

LMSH の考え方を簡単に説明する。まず系の状態を特徴づける変数として s を導入する。これは無次元化された滑りや滑り速度に相当する。この s の自発的伝播を考えよう。系は 1D であると仮定する。ここでは安定領域から不安定領域に侵入する解を扱う。２つの場合が考えられることになる：$s=0$ が安定でこの領域が $s \neq 0$ の不安定領域に侵入する場合、そして $s=0$ が不安定でこの領域に $s \neq 0$ の不安定領域が侵入してくる場合である。ここでは前者と後者の解のフロントをそれぞれ extruding front 及び intruding front と呼ぶ。数学的には、支配方程式において $O(|s|)$ の項のみが重要な役割を果たし $O(|s|^2)$ の項が無視できる点がフロントである、と定義される。

s のフロントとして、平面波 $s \sim \exp(\mp i(kx-\omega t))$ を考える。ここで周波数 ω と波数 k は複素数である。この仮定より $|s| \sim \exp(\pm(k_i x - \omega_i t))$ を得る。ここで k_i と ω_i はそれぞれ k と ω の虚部であり、非負であると仮定する。定義より、フロント $\exp(k_i x - \omega_i t)$ と $\exp[-(k_i x - \omega_i t)]$ はそれぞれ extruding front 及び intruding front を指すことに注意する（図１）。この枠組みでは４つの未知のパラメータ、k_i, ω_i, k の実部 k_r 及び ω の実部 ω_r が存在する。なお、k_r と ω_r も非負であると仮定する。これら４つのパラメータが LMSH の視点に基づく４本の方程式から決定される。それは分散関係の実部と虚部、そして成長安定性と伝播安定性である。特にそれらの安定性は具体的に

$$\frac{\partial \omega_i}{\partial k_r} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\omega_i}{k_i} = \frac{\partial \omega_i}{\partial k_i} = c, \quad (4)$$

$$\frac{\partial \omega_r}{\partial k_i} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \omega_r}{\partial k_r} = \frac{\omega_r}{k_r} = c, \quad (6)$$

と書くことができる。ここでcは自発的なフロントの伝播速度である。式(3)と(4)がそれぞれ成長安定性と伝播安定性を記述する。式(5)と(6)は、式(3), (4)及び Cauchy-Riemann の関係式から導かれる。また定常状態ではフロントと擾乱は同じ位相速度で伝播しなければならない（$\partial \omega_r / \partial k_r = \omega_r / k_r$ でなければならない）ということも用いている。

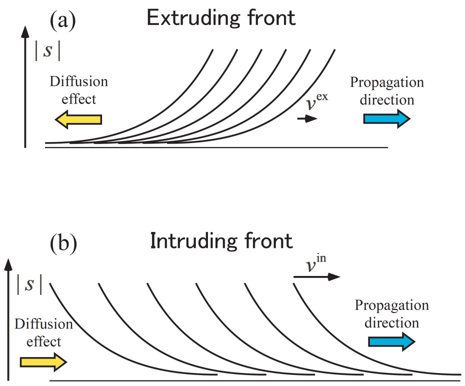

図１　Extruding front と Intruding front. Diffusion effect については本文で触れていないが、粘性がフロントを拡散させる役割を担っていると考えて良い。

ここまでの準備を基に式(1)と(2)から取り扱いを始める。これらの式に $u = \exp[-(kx - \omega t)]$ を代入すると、分散関係は容易に

$$-\omega^2 = -k^2 - i\eta\omega k^2 + 2iab\omega, \quad (7)$$

であることが分かる。これの実部と虚部はそれぞれ

$$\begin{aligned}(\eta\omega_i - 1)(k_r^2 - k_i^2) + 2\eta\omega_r k_r k_i \\ + (\omega_r^2 - \omega_i^2) - 2ab\omega_i = 0\end{aligned}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned}2k_r k_i(\eta\omega_i - 1) - \eta\omega_r(k_r^2 - k_i^2) \\ + 2\omega_r\omega_i + 2ab\omega_r = 0\end{aligned} \quad (9)$$

である。式(8)と(9)をk_rで微分し成長・伝播安定性（式(5)及び(6)）を用いると

$$\begin{aligned}2(\eta\omega_i - 1)k_r + 2\eta k_i(ck_r + \omega_r) \\ + 2\omega_r c = 0\end{aligned}, \quad (10)$$

$$\begin{aligned}2(\eta\omega_i - 1)k_i - \eta c(k_r^2 - k_i^2) \\ - 2\eta\omega_r k_r + 2\omega_i c + 2abc = 0\end{aligned}, \quad (11)$$

を得る。加えて、式(8)と(9)をk_iで微分し成長・伝播安定性（式(3)及び(4)）を用いると

$$\begin{aligned}\eta c(k_r^2 - k_i^2) - 2(\eta\omega_i - 1)k_i \\ + 2\eta\omega_r k_r - 2\omega_i c - 2abc = 0\end{aligned}, \quad (12)$$

$$\begin{aligned}2\eta\omega_i k_r + 2(\eta\omega_i - 1)k_r \\ + 2\eta\omega_r k_i + 2\omega_r c = 0\end{aligned}, \quad (13)$$

を得る。ここではk_r, k_i, ω_r 及びω_iという４つの未知変数があるが、方程式は６本ある（式(8)－(13))。しかし式(10)と(13)、また式(11)と(12)はそれぞれ全く同じであるため、独立な方程式は式(8)－(11)である。加えて、式(9)と(11)は$2\eta\omega_r k_r^2 = 0$を導き、$k_r = 0$ または$\omega_r = 0$を示す。この時いずれの場合にも伝播安定性(6)より$k_r = \omega_r = 0$が結論付けられる。

$k_r = \omega_r = 0$を用いると、式(9)と(10)の左辺は恒等的にゼロである。加えて式(8)と(11)より

$$(-\eta\omega_i + 1)k_i^2 - \omega_i^2 - 2ab\omega_i = 0, \quad (14)$$

$$\begin{aligned}2(\eta\omega_i - 1)k_i + \eta c k_i^2 + 2\omega_i c \\ + 2abc = 0\end{aligned}, \quad (15)$$

を得る。更に式(14)の両辺をk_iで割り、$\omega_i / k_i = c$の関係を使うと

$$(-\eta\omega_i + 1)k_i - \omega_i c - 2abc = 0, \quad (16)$$

を得る。式(14), (15)及び(16)からk_i, ω_i, cを得ることになる。まず式(15)と(16)から

$$k_i^2 = \frac{2ab}{\eta}, \quad (17)$$

となり、k_iは非負と仮定しているため$k_i = \sqrt{2ab/\eta}$を得る。これと式(14)から、ω_iが二次方程式

$$\omega_i^2 + 4ab\omega_i - \frac{2ab}{\eta} = 0, \quad (18)$$

を満たすことが分かる。この解は

$$\omega_i = \sqrt{4a^2b^2 + \frac{2ab}{\eta}} - 2ab, \quad (19)$$

で与えられる。ここでω_iも非負であることを用いた。これと式(17)から、SFP の伝播速度cが

$$\begin{aligned}c = \frac{\omega_i}{k_i} &= \left(\sqrt{4a^2b^2 + \frac{2ab}{\eta}} - 2ab\right)\sqrt{\frac{\eta}{2ab}} \\ &= \sqrt{1 + 2ab\eta} - \sqrt{2ab\eta}\end{aligned} \quad (20)$$

と得られる。すなわち$v^{ex} = \sqrt{1 + 2ab\eta} - \sqrt{2ab\eta}$であり、これは弾性波速度（ここでは 1）より小さく、厳密解v_{c-}と一致する。滑り端の伝播は摩擦則の線形化された部分のみによって支配されていることが明らかになったのである。加えて、この結果は、線形化して同じ形になる摩擦則であれ

ば相転移現象も一般的に発現するものであると示唆する。特に定常状態が存在しない場合は、例えばゆっくり地震のモデルになっている可能性もある。

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 Tanaka, Y., T. Suzuki, Y. Imanishi, S. Okubo, X. L. Zhang, M. Ando, A. Watanabe, M. Saka, C. Kato, S. Oomori, and Y. Hiraoka (2018), Temporal gravity anomalies observed in the Tokai area and a possible relationship with slow slips, Earth, Planets and Space, 査読有, 70:25, https://doi.org/10.1186/s40623-018-0797-5

② Suzuki, T. (2017), Emergence and seismological implications of phase transition and universality in a system with interaction between thermal pressurization and dilatancy, Phys. Rev. E, 査読有, 96, 023005, doi:10.1103/PhysRevE.96.023005

〔学会発表〕（計１６件）

① Suzuki, T. (2018), Generation of the Universal Law Observed in the Governing Equation System with Common Nullclines, *New Zealand-Japan Joint Workshop on Slow Slip*, Wellington, New Zealand, 26-27 February

② Suzuki, T. (2017), Phase Transition Emerging in the System with Common Nullclines Associated with Dynamic Earthquake Slip Process, *2017 AGU Fall Meeting*, S41C-0733, New Orleans, USA, 11-15 December

③ Suzuki, T. (2017), Phase transition and universality in the system including common nullclines associated with dynamic earthquake slip, *Joint Workshop on Slow Earthquake 2017*, O1-16, Matsuyama, Japan, 19-21 September

④ Suzuki, T. (2017), Geometrically Different Attractors With Heat, Fluid Pressure and Dilatancy and its Seismological Implications, *14th Annual Meeting of AOGS*, SE21-D2-AM1-327-006, Singapore, 6-11 August

⑤ Suzuki, T. (2017), Point and Line Attractors Emerging in the System Including Interaction among Heat, Fluid Pressure and Dilatancy, *JpGU-AGU Joint Meeting 2017*, SSS04-P65, Chiba, Japan, 20-25 May

⑥ Suzuki, T. and H. Matsukawa (2016), Analytical Treatments of Static Friction Force and Propagation Velocity of Slip Front with Viscosity and Friction Nonlinearly Depending on the Slip Velocity, *2016 AGU Fall Meeting*, S21B-2707, San Francisco, USA, 12-16 December

⑦ Suzuki, T. and H. Matsukawa (2016), Mathematical Treatment of the Propagation Velocity of Slip Front with Friction Law Nonlinearly depending on the Slip Velocity, *Gordon Research Conferences (tribology)*, 33, Lewiston, USA, 26 June – 1 July

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：１０４５１８７４