

プレート境界地震に伴う余効すべりと岩石の粘弾性挙動

Afterslip associated with interplate earthquakes and the viscoelastic behavior of rocks

Abstract

川田祐介^{*†} 長濱裕幸^{*} 内田直希^{**}
松澤 暢^{**}

Yusuke Kawada^{*†}, Hiroyuki Nagahama^{*},
Naoki Uchida^{**} and Toru Matsuzawa^{**}

2008年3月7日受付.

2009年3月4日受理.

^{*} 東北大学大学院理学研究科地学専攻地圏進化
学講座

Department of Geoenvironmental Sciences,
Graduate School of Science, Tohoku Univer-
sity, 6-3 Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai
980-8578, Japan

^{**} 東北大学大学院理学研究科附属地震・噴火予
知研究観測センター

Research Center for Prediction of Earth-
quakes and Volcanic Eruptions, Graduate
School of Science, Tohoku University, 6-6
Aramaki-Aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai 980-
8578, Japan

[†] 現所属; エディンバラ大学理工学部地球科学
科

present address; School of GeoSciences, Uni-
versity of Edinburgh, Grant Institute, West
Mains Road, Edinburgh EH9 3JW, UK

Corresponding author; Y. Kawada,
yusuke.kawada@ed.ac.uk

Temporal changes in afterslip displacement rate associated with interplate earthquakes are investigated using a constitutive law for the viscoelastic behavior of rocks. The law is based on irreversible thermodynamics with internal state variables and is derived as the relaxation modulus following a temporal power law that emerges as the collective dynamics of internal states with respective relaxation times at various time-scales. The constitutive law can represent the transient behavior in response to sudden changes in stress and strain rate, as well as the steady-state behavior of rocks. Analysis of afterslip (cumulative displacement) time series estimated from the seismic moments of small repeating earthquakes in the northeastern Japan subduction zone shows that the temporal change in afterslip follows a temporal power law. This finding suggests that afterslip comprises many transient responses associated with seismic events of various sizes.

Keywords: viscoelastic behavior, damage mechanics, irreversible thermodynamics, time-scale invariance, afterslip, interplate earthquake, small repeating earthquake

はじめに

地殻から上部マントルにかけての領域では、規模の大きい地震に伴う余効変動が発生すると推定されている。近年では全地球測位システム (GPS) による観測や小繰り返し地震解析に基づいて、より詳細な余効変動の時系列変化が捉えられるようになった (例えば, Savage et al., 1994; Ellsworth, 1995; Heki et al., 1997; Nishimura et al., 2000; Igarashi et al., 2003; Uchida et al., 2004)。一般に余効変動は粘性緩和と余効すべりに分けて扱うことが多いが、これらは共に地震時の急激な変形速度や応力変化に伴って地殻・マントルの岩石が示す力学的緩和 (粘弾性緩和・遷移応答) と見なせる (例えば, Ueda et al., 2001, 2003; Scholz, 2002; 里・皆川, 2005)。特に余効すべりの場合、その時系列パターンの性質を明らかにすることは、余効すべりの機構の解明のみならず、余効すべりと地震性すべり (プレート固着域の地震破壊) の時空間的な相補性 (例えば, 八木・菊地, 2003; Matsuzawa et al., 2004) など、プレート境界における力学的挙動を理解する上で重要である。

余効すべりの解析は、プレート境界の接触面の摩擦現象と捉えた解析 (例えば, Miyazaki et al., 2004; Ariyoshi et al., 2007) と、厚みを持った破砕帯やその周辺の岩石が示す粘弾性遷移応答 (クリープ現象) と捉えた解析 (例えば, Wesson, 1987; Teisseyre, 1995; Perfettini and Avouac, 2004; Savage et al., 2005) の大きく2つに分けられる。本論文では後者、岩石の粘弾性応答という観点から余効すべりについて検討する。

岩石の流動則は一般に次の構成式、

$$\dot{\epsilon} = A\sigma^m \exp\left(-\frac{U}{RT}\right) \quad (1)$$

で表現される。ここで、 $\dot{\epsilon}$ は歪速度、 σ は応力、 m は応力指数 (変形機構を反映したパラメータ)、 U は活性化エネルギー、 R は気体定数、 T は絶対温度、 A は定数である。この構成則は、岩石・鉱物中の微視的変形機構に関する理論・実験データに基づいて得られたもので、主に高温下での定常クリープ挙動を表現するものである (例えば, Poirier, 1985)。これに対し近年では、現象論的立場から $\dot{\epsilon} \propto \sigma^m$ のべき乗構成則の理解が進んでいる。例えば、岩石内部にダメージ発展

(クラック成長や局所的塑性歪など) を伴う非線形粘弾性挙動も $\dot{\epsilon} \propto \sigma^m$ のべき乗則で表現できる (例えば, Lankford, 1981; Hemphill et al, 1993; Main, 2000; Ngwenya et al., 2001; Nanjo and Turcotte, 2005; Kawada and Nagahama, 2006; 楠城, 2007). 嶋本 (1987) は一般粘弾性理論に基づいて, $\dot{\epsilon} \propto \sigma^m$ の関係は緩和弾性率 $E(t)$ (応力と歪の比) が変形時間 t のべき乗に従って減衰する関係 $E(t) \propto t^{-\beta}$ に置換できることを指摘し, これらのべき乗則を用いて岩石の定常挙動だけでなく応力・歪速度の急激な変化に伴う遷移挙動も表現できることを示した. また $E(t) \propto t^{-\beta}$ のべき乗則は, 岩石の粘弾性挙動が時間スケール不変性 (time-scale invariance, 特徴的な時間スケールを持たない性質) を示すことを示唆しており, 非平衡熱力学に基づいて同構成則を導出できる (Nagahama, 1994; Kawada and Nagahama, 2004, 2006; Kawada et al., 2006). このように実験・理論の両観点から理解が拡張された岩石の現象論的構成則であるが, この構成則を用いて余効すべりの時系列パターンを解析する研究は行われていない.

本論文では, 岩石の粘弾性構成則に基づき, プレート境界地震に伴う余効すべりの時系列変化について議論する. はじめに, 解析に用いる岩石の粘弾性構成則について紹介する. 余効すべりの解析は, 東北日本の沈み込み帯で観測された小繰り返し地震のモーメントから見積もられた変位量データ (Uchida et al., 2004) を用いて行う. 最後に, 非平衡熱力学の立場から, 構成則と余効すべりの時系列パターンについて議論する.

岩石の粘弾性構成則

本論文では次の粘弾性構成則 (嶋本, 1987; Nagahama, 1994; Kawada and Nagahama, 2004) を用いる.

$$\sigma = \int_0^{\zeta} E(\zeta - \zeta') \frac{d\zeta'}{d\zeta} d\zeta', \quad (2)$$

$$E(\zeta) = \frac{E'(1-\beta)}{g(\epsilon)} \zeta^{-\beta}. \quad (3)$$

ここで, ϵ は歪, E' は緩和弾性率 (応力と歪の比, $d\sigma/d\epsilon$), $g(\epsilon)$ は歪非線形関数, ζ' は積分変数, β , E' は定数である. ζ は温度換算時間 (様々な温度下での挙動を規格化した時間) であり, 次のように定義される.

$$\zeta = \frac{t}{a_T} = \frac{t}{C} \exp\left(\frac{U}{RT}\right). \quad (4)$$

ここで, a_T は温度換算因子 (一種のスケーリング因子), C は定数である. 実際の変形実験データの解析には, 緩和弾性率の代わりにその時間平均に相当する割線弾性率 (secant modulus, $E_s(t) \equiv \sigma/\epsilon$, 嶋本, 1987) を用いる. 割線弾性率 $E_s(t)$ は緩和弾性率 $E(t)$ との間に $E_s(t) = \frac{1}{t} \int_0^t E(t') dt'$ (t' : 積分変数) の関係があり, 式 (3) は

$$\left(\frac{\sigma}{\epsilon} \equiv\right) E_s(\zeta) = \frac{E'}{g(\epsilon)} \zeta^{-\beta} \quad (5)$$

と変形できる. 嶋本 (1987), Nagahama (1994) は岩塩について, Kawada and Nagahama (2006) は大理石・レルゾライトについてそれぞれ本構成則 (特に式 (5)) に基づく解

析を行い, 遷移領域から定常領域にわたる挙動を式 (2)~(4) で表した. さらに Schapery and Riggins (1982) は式 (5) を変形した一定温度下における構成式 $E(t) \propto t^{-\beta}$ を用いて, 粘土 (モンモリロナイト) の粘弾性挙動を記述している.

ここで $\dot{\epsilon} = \epsilon/t$ とすると, 式 (4) と (5) より

$$\dot{\epsilon} = \left[\left(\frac{g(\epsilon)}{\epsilon E'} \right)^{\frac{1}{\beta}} \left(\frac{\epsilon}{C} \right) \right] \sigma^{\frac{1}{\beta}} \exp\left(-\frac{U}{RT}\right) \quad (6)$$

という関係を導出できる. このことは, 岩石の遷移領域から定常領域にわたる挙動が式 (3) の構成則で (もしくは $\dot{\epsilon} \propto \sigma^{1/\beta}$ のべき乗則で) 記述できることを示している. ここで, 式 (6) の指数 $1/\beta$ と式 (1) の指数 m には $m = 1/\beta$ の関係が成り立ち, β は転位クリープなどの変形機構を反映する変数になっている (Nagahama, 1994; Nakamura and Nagahama, 1999).

式 (3) の緩和弾性率 $E(t)$ は式 (2) の非線形応答関数であるが, 非線形部分 ($= 1/g(\epsilon)$) と線形部分 ($= E'\zeta^{-\beta}$) に分離して理解できる. 非線形部分は, 内部状態変数を用いた非平衡熱力学やダメージ力学に基づいて, 岩石内部に発展するダメージ (クラック・局所的塑性歪など) に起因する関数である (Kawada and Nagahama, 2006; Kawada et al., 2007a). 一方線形部分は, 内部の粘弾性応答やダメージ発展を含めた岩石全体の力学的挙動がべき乗緩和することを示しており, 時間スケール不変性 (時間に関するフラクタル特性・ロングタイムテール, 高安, 1986) を持つことを示唆している (Nagahama, 1994; Kawada and Nagahama, 2004). 緩和弾性率は様々な緩和時間 λ を持つ指数緩和則の重ねあわせであり (例えば, 林, 1973; Findley et al., 1976), 次のように表現できる,

$$E(t) = \int_0^{\infty} H(\lambda) \exp\left(-\frac{t}{\lambda}\right) d\lambda. \quad (7)$$

ここで, $H(\lambda)$ は分布関数である. 式 (7) において $E(t) \propto t^{-\beta}$ の関係が成り立つには $H(\lambda) \propto \lambda^{-\beta-1}$ の関係が必要十分条件である (Nagahama, 1994). このことは, 岩石内部に存在するダメージや転位・粒界の挙動による粘弾性応答など, 様々な時間スケールの緩和挙動の総和が時間のべき乗則として現れていることを示唆している (Kawada et al., 2006). なお, この時間スケール不変性は, 粘弾性 (非弾性) 減衰・地震の時間統計則・地殻内流体の輸送特性・岩石破壊や地震前兆期のエネルギー解放パターンなどに見られる力学的・化学的・電磁気学的べき乗緩和の原因となっている (Nanjo and Nagahama, 2004; Kawada and Nagahama, 2006; Kawada et al., 2006, 2007a, 2007b).

以上のように, 内部にダメージ発展を伴う岩石の粘弾性挙動も, 式 (2) の構成式もしくは $\dot{\epsilon} \propto \sigma^{1/\beta}$ のべき乗則で表現できる. このことは実験でも確かめられており, 室温下における含水砂岩や泥のクリープ挙動は $\dot{\epsilon} \propto \sigma^{1/\beta}$ に従い (例えば, Hemphill et al., 1993; Ngwenya et al., 2001), クラック成長速度が応力拡大係数のべき乗則で進行する応力腐食過程についても岩石全体の挙動は $\dot{\epsilon} \propto \sigma^{1/\beta}$ のべき乗則に従う (例えば,

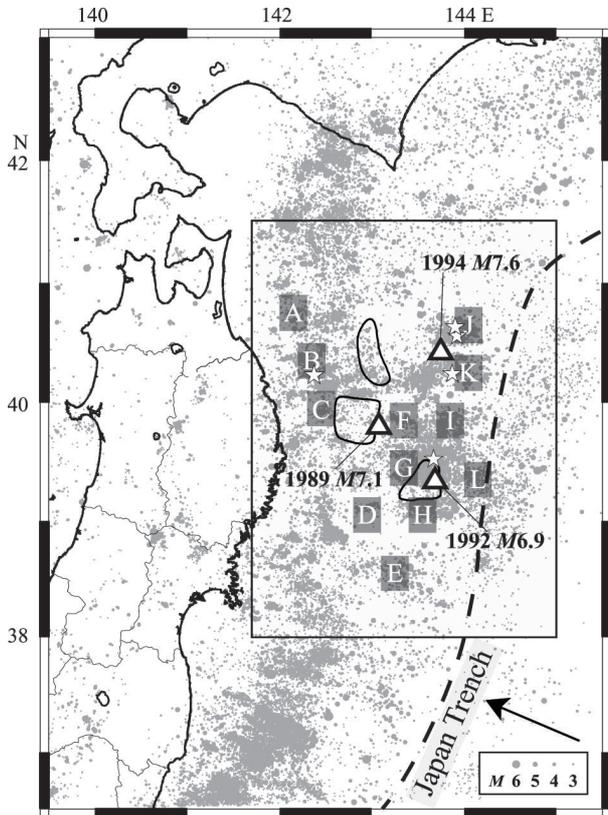


Fig. 1. Spatial distribution of seismic events (depth ≤ 70 km, July 1984–July 2001) and rectangular windows A–L for calculating the averaged cumulative slip using small repeating earthquakes in the northeastern Japan subduction zone. Triangles denote the epicenters of three major events in this period. Stars represent large earthquakes with $M \geq 6.5$. Contours represent the main source areas or asperities for the three major events (Nagai et al., 2001; Yamanaka and Kikuchi, 2001, 2004). This figure is modified from Uchida et al. (2004).

Lankford, 1981; Main, 2000). Nanjo and Turcotte (2005) や楠城 (2007) は、ダメージ力学でよく用いられるファイバー束モデルを用いて同様の結論を得ている。なおこの理論背景は、マイクロブーディンを用いた古応力解析 (例えば、Masuda et al., 2003; Kimura et al., 2006b) に用いられる理論とも関係している。

このように $E(t) \propto t^{-\beta} \Leftrightarrow \dot{\epsilon} \propto \sigma^{1/\beta}$ という数理構造を用いて、従来のような岩石・鉱物の高温クリープ挙動だけでなく、内部にダメージを伴う粘弾性挙動や遷移応答も表現できる。

小繰り返し地震解析に基づく積算すべり量

プレート境界では、相似地震と呼ばれる極めて波形の類似した小地震群がかつてより観測されていた (例えば、浜口・長谷川, 1975)。近年では、プレート境界地震のアスぺリティモデルに基づいてこのことが理解されている (Ellsworth, 1995; Nadeau and McEvilly, 1999; Igarashi et al., 2003)。孤立する小さなアスぺリティ (地震破壊の発生原因となるプレート境界の固着域) に、その周囲の非地震性の準静的すべり域に引きずられるかたちで応力が蓄積され、同じ場所で繰り返

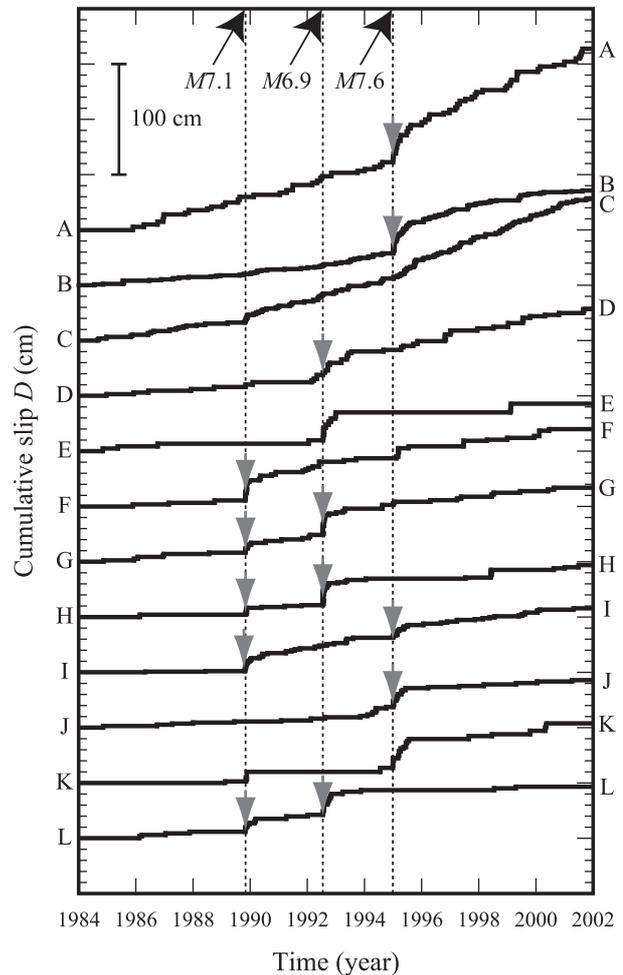


Fig. 2. Time-series of averaged cumulative slip from 1984 to 2001 in the 12 areas A–L shown in Fig. 1. Broken lines represent the occurrence times of three major events (M 7.1 on November 2, 1989, M 6.9 on July 18, 1992, and M 7.6 Sanriku Haruka-oki earthquake on December 28, 1994). Short gray arrows indicate the beginning times of afterslip we analyze in Fig. 3. This figure is modified from Uchida et al. (2004).

返し地震破壊を起こすことにより、相似な波形の地震が発生するものと考えられている。この同一地点で準周期的に繰り返す相似地震は特に小繰り返し地震 (small repeating earthquake) と呼ばれ、カリフォルニア・パークフィールドのサンアンドレアス断層系 (Ellsworth, 1995; Nadeau and Johnson, 1998; Nadeau and McEvilly, 1999) や日本の沈み込み帯 (Igarashi et al., 2003; Uchida et al., 2003, 2004, 2005, 2006; Matsubara et al., 2004; Matsuzawa et al., 2004; Kimura et al., 2006a; 内田ほか, 2006, 2007a, b) などで確認されている。

このアスぺリティモデルの概念に基づいて、一回の小繰り返し地震が解放するモーメント M_0 (dyne·cm) とその地震の引き金となったアスぺリティ周囲の準静的すべり量 d (cm) との間に次のスケーリング則 (Nadeau and Johnson, 1998)

$$\log d = 0.17 \log M_0 - 2.36 \quad (8)$$

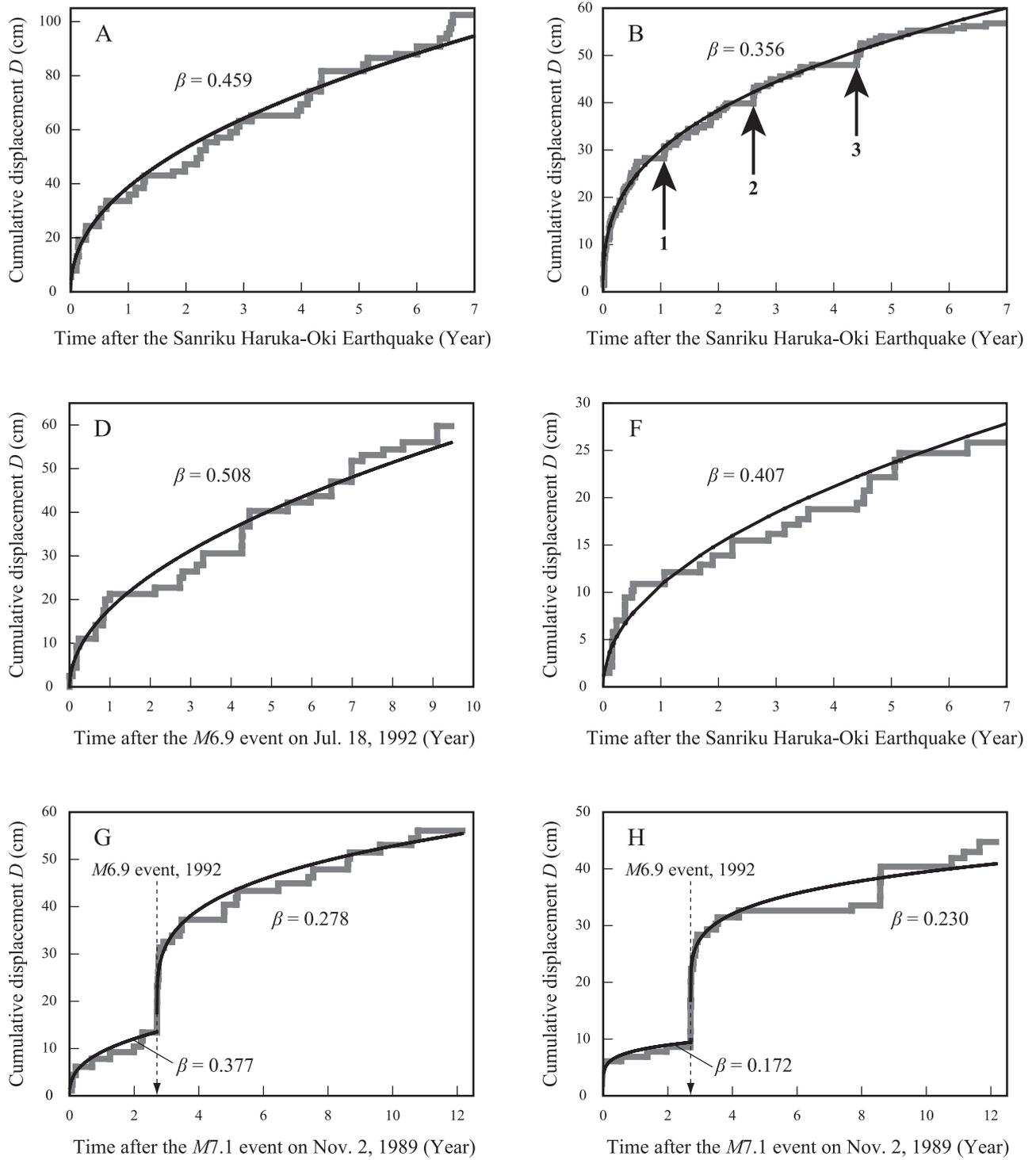


Fig. 3. Analyses of the afterslip using Eq. (10). Three arrows in B represent the beginning times of minor accelerations (afterslip) we analyze in Fig. 4. In the area I, afterslip for the $M 6.2$ event on October 27, 1989 (a nearby earthquake 6 days preceding the 1989 $M 7.1$ event) was analyzed.

が確立されている。これはカリフォルニア・パークフィールドのサンアンドレアス断層系で確認された小繰り返し地震群に対する経験則であったが、東北日本の小繰り返し地震についても式 (8) が成り立つことが確認されている (Igarashi et al., 2003)。地震のマグニチュード M と地震モーメント

M_0 に関するスケール則 (Hanks and Kanamori, 1979)

$$\log M_0 = 1.5 M + 16.1 \quad (9)$$

と式 (8) のスケール則から準静的すべり量 d を求め、その積算すべり量 (沈み込み方向の積算変位量, $D = \Sigma d$)

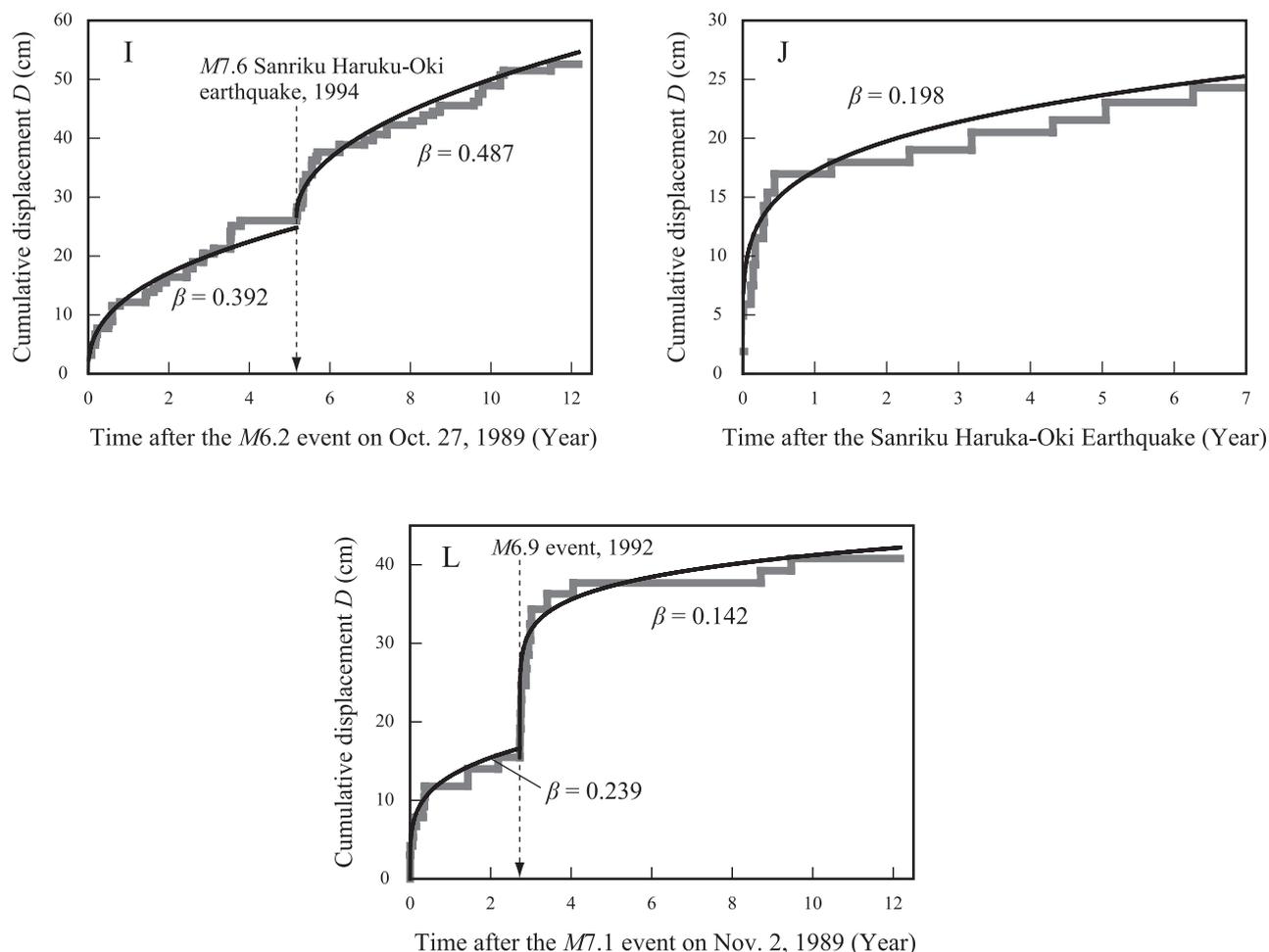


Fig. 3. (continued)

をとると、プレート境界におけるすべり量の時系列変化を与える。東北日本（特に三陸沖）の Fig. 1 に示す A から L までの領域について、その領域内で小繰り返し地震を起こすアスペリティを特定し、各アスペリティについて 1984 年 1 月 1 日からの積算すべり量 D を求めた。各矩形領域内で D を平均して得られた時系列変化が Fig. 2 である（詳しくは Uchida et al., 2004 を参照）。

ほとんどの矩形領域に 1989 年 11 月 ($M7.1$)、1992 年 7 月 ($M6.9$)、1994 年 12 月 ($M7.6$, 三陸はるか沖地震) に発生した地震のいずれかに伴う余効すべりが確認できる。しかしながら、矩形領域 C については明瞭な余効すべりは確認できなかった。また、矩形領域 E と K についてはこの領域内で確認された小繰り返し地震が少なかったために、積算すべり量の見積もりが荒くなっている。以上を踏まえ、次章では C, E, K を除く矩形領域の積算すべり量曲線について余効すべりの解析を行う。

余効すべりの時系列パターン

本論文では余効すべりを、接触面の摩擦現象としてではなく、厚みを持った領域の粘弾性的な移行応答（クリープ現象）

という観点から解析を進める。今回解析で考えるプレート間地震（本震）は大きいアスペリティの単独または複合破壊と見なし、余震および余効すべりの大部分は本震時に破壊されなかった周囲の領域でのすべりと見なす。余効すべりの解析には次の関係式

$$\log D = \beta \log t + \delta \quad (10)$$

を用いる。歪 ε を変位量 D と断層帯の厚さ L の比で表すとき、式 (10) は式 (4) および (5) の粘弾性構成則から導出できる。ここで、

$$\delta \equiv \log \left[\left(\frac{g(\varepsilon) \sigma L C^\beta}{E'} \right) \exp \left(-\frac{\beta U}{RT} \right) \right]$$

である。解析は、Fig. 2 の灰色矢印以降のデータを両対数座標上に示し、特に式 (10) を用いて最小二乗法による回帰解析を行った。各矩形領域における積算すべり量変化の解析結果を Fig. 3 に示す。Fig. 2 で確認された数年間にわたる余効すべり曲線は、それぞれ時間のべき乗則で説明できる。

さらに、1994 年 12 月の三陸はるか沖地震に伴う余効すべりが明瞭に捉えられている矩形領域 B の積算すべり曲線に注

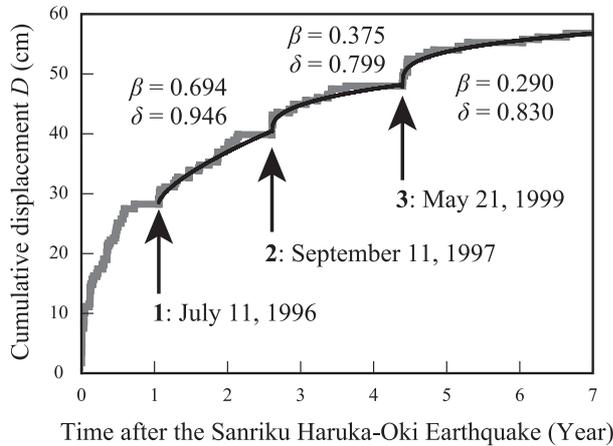


Fig. 4. Analyses for the afterslips in the area B from 1: July 11, 1996, 2: September 11, 1997, and 3: May 21, 1999.

目する。Fig. 3 の B に示す通り、1994 年の三陸はるか沖地震以降 3 回ほどすべりの加速が確認できる。領域 B の周辺 (40.0 N-40.4 N, 141.9 E-142.9 E) では 1995 年 1 月 7 日以降 2001 年 12 月まで $M 5.5$ 以上の地震は発生していない。したがって、指摘した 3 回のすべり加速は、三陸はるか沖地震による一連の余効すべりの一部と考えられる。しかしながら、この 3 回のすべり加速に対する緩和曲線もそれぞれ式 (10) で表現できる (Fig. 4)。このことは、観測されている余効すべりが、大地震と直接関係する緩和挙動のみならず、それが引き起こした規模の小さい地震に伴う応答も含めた緩和挙動の重ね合わせであるということを示している。

また、余効すべり (変位) の時系列パターンを解析するにあたり、数年程度の回帰可能な時間スケールでは δ -値がほぼ一定と見なせた。ただし、Fig. 4 のより短期間での解析では δ はそれぞれ異なる値を示しており、余効すべり域での応力 σ ・温度 T ・歪履歴 $g(\epsilon)$ に関する条件はそれぞれの期間で異なっていたと考えられる。

議 論

余効すべりやプレート間の非地震性すべりなどを説明するにあたり、摩擦構成則を用いて解析する立場も一般的である。この場合、速度・状態依存の構成則から $D = \alpha \log [\gamma t + 1]$ (α, γ : 定数) という形で導出される (例えば、Marone et al., 1991)。この式は $\gamma t \gg 1$ のとき $D = \alpha (\log \gamma + \log t) = \alpha \log t + \phi$ と近似できる (ϕ : 定数)。この近似式を用いた解析と式 (10) を用いた解析とを Fig. 5 で比較した。残差の二乗平均平方根 (RMS) から判断すると、べき乗則のほうが変位データをよりよく説明していると言える。Shimamoto (1986) や Nakamura and Nagahama (1999) は摩擦挙動に関する変位-時間関係は、信頼精度の範囲で指数則、べき乗則ともに解析可能であることを指摘している。また、Perfettini and Avouac (2004) や Savage et al. (2005) は摩擦則・クリープ則どちらを用いた解析も余効すべりをうまく記述できることを指摘している。以上の点も踏まえ、本論文で

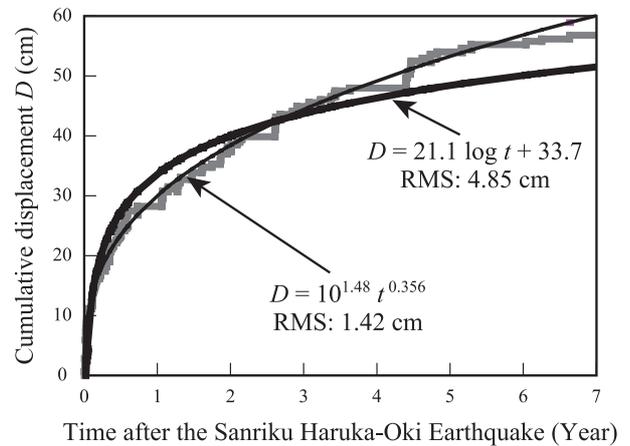


Fig. 5. Analyses for the afterslip in the area B using the logarithmic law ($D = \alpha \log t + \phi$) and power-law ($\log D = \beta \log t + \delta$, i.e., $D = 10^\delta t^\beta$, Eq. 10) [D : (cm); t (year)]. RMS stands for the root mean square of residual values between the regression curve and observed data points.

はべき乗則である、式 (10) もしくは (3) の立場から検討を行ってきた。

今回解析に用いた岩石の粘弾性構成則について、内部状態変数を用いた非平衡熱力学 (Biot, 1954; Schapery, 1964; Fung, 1965) の観点から再考を試みる。内部状態変数とは、マイクロクラック、局所歪、結晶中の欠陥といった岩石・鉱物内部の微形構造 (ダメージ) に関する状態変数である。まず、非平衡熱力学系を規定するヘルムホルツ自由エネルギー (単位体積あたり) を $f = f(T, q_1, q_2, \dots, q_n)$ と定義する。ここで、 q_i ($i = 1, 2, \dots, n$) は i 番目の状態変数 (一般化座標)、 n は状態変数の個数である。 q_i にはそれぞれ対応する一般化力 Q_i も定義する。状態変数は次の 2 つに分類して扱う。一方は、1 から k 番目までの k 成分でこれを (巨視的) 歪とし、対応する一般化力を (巨視的) 応力とする。もう一方、残りの $(n-k)$ 成分を内部状態変数とし、対応する一般化力を 0 とする。このように定義された系において、変形過程を次のラグランジュ方程式 (例えば、Biot, 1954; Schapery, 1964),

$$\sum_{i=1}^n e_{ij} q_i + \sum_{j=1}^n \eta_{ij} \frac{d}{dt} q_j = Q_i, \tag{11}$$

で記述できる。ここで、 e_{ij} は弾性係数、 η_{ij} を粘性係数とする。なお、式 (11) は一般化 Kelvin-Voigt 模型の応力-歪関係式と一致し、線形粘弾性の範疇では一般化 Maxwell 模型の構成式にも変形できる (例えば、Schapery, 1964; Kawada et al., 2006)。 $Q_i = 0$ の場合の一般解は、それぞれ緩和時間 $\lambda_i^{(p)}$ を持った緩和モード $q_i^{(p)}$ の和で表せる、

$$q_i = \sum_{p=1}^s q_i^{(p)} = \sum_{k=1}^s \psi_i^{(p)} \exp\left(-\frac{t}{\lambda_i^{(p)}}\right). \tag{12}$$

ここで、 ψ は各緩和モードに対する係数、 s は内部状態変数の個数 ($s = n - k$) である。式 (12) を用いて得られる式 (11) の解、特に一軸変形時の非線形粘弾性構成則は

$$\sigma = \int_0^t \left[\sum_s G^{(s)} \exp[-\psi_s(t-t')] \right] \varepsilon dt \quad (13)$$

となる (G は定数). 式 (12), (13) において $q_i^{(\psi+1)} = b\psi_i^{(\psi)} \exp(-at/\lambda_i^{(\psi)})$ のスケーリング則 (a, b はそれぞれスケーリング因子) が成り立ち, かつ $s \rightarrow \infty$ となる (連続体を仮定する) とき, 式 (13) の応答関数は時間のべき乗則となり, 式 (2) かつ (3) の構成則が導出できる (Kawada et al., 2006). このスケーリング則は式 (7) において $H(\lambda) \propto \lambda^{-\beta-1}$ となることに対応しており, 岩石中の各内部状態が様々な長さの緩和時間を持つとき, その集団的性質として岩石の粘弾性挙動に時間スケール不変性が現れることを示している.

以上の観点から前章の解析を考察する. 我々が解析したのは, ある矩形領域 (2次元領域) での積算変位量の時系列変化であった. この矩形領域もしくはその周辺では, 大アスペリティでの地震や, その地震に伴う様々な規模の余震が発生している. 余効すべりの時系列変化は, これらの地震に対する岩石の遷移応答 ($q_i^{(0)}$) の重ね合わせとして時間のべき乗則に従うものと説明できる.

我々は式 (6) において β の逆数が応力指数 m に対応することを確認した. この指数値は物質に依らず, 変形機構を反映するパラメータである. Fig. 3 の解析で得られた β の値から m を求めるとおよそ 2.0 ~ 7.0 の値をとる. この値は, 転位クリープが支配的な場合の岩石の高温粘弾性挙動が示す応力指数 ($m = 3.0 \sim 5.0$) よりも大きな値を含んでいる. この比較的大きな m -値は, 余効すべりが, 岩石の変形実験や上部地殻の変形モデルで知られているような, 摩擦や脆性破壊といったダメージ発展を伴う挙動であることを示唆している (例えば, Houseman and England, 1986; Ngwenya et al., 2001; Nanjo and Turcotte, 2005; 楠城, 2007). また, 同じ領域の余効すべりでも異なる指数値を示す場合があるが, これは同じ物質でも変形機構が異なっていることを示唆している.

小繰り返し地震解析に基づいて得られる時系列パターンはプレート境界付近における余効すべりの効果を直接反映したパターンであると考えられるのに対し, GPSなどで観測される時系列変化は地表付近の変位量変化である. この時系列パターンを式 (1) の応力のべき乗則で解析して下部地殻・上部マントルの粘弾性・粘性応答を説明した研究もいくつか知られている (例えば, Teisseyre, 1995; Freed and Bürgmann, 2004). しかしながら既述の通り, 本震に伴う粘弾性・粘性応答だけではなく, 岩石内部に脆性ダメージ発展を伴う粘弾性挙動も $\dot{\varepsilon} \propto \sigma^m$ のべき乗則で表現できるので, 地表で観測される変位量の時系列パターンには, 下部地殻・上部マントルの効果だけでなく脆性領域である GPS 観測点直下の遷移応答の効果も反映されうるという点に注意が必要である (Kawada and Nagahama, 2006).

余効すべり (余効変動) の時間変化は, 地震の時系列パターンの一種と見なせる. 指数関数の緩和則とは異なり, 時間のべき乗則に従う緩和則は特徴的な時間を持たず, 余効変動の進展状況や収束時期を推定できないことになる. しかしな

がら, 変形機構が変化し, べき乗指数 β も変化する場合 (例えば, Scher et al., 1991; Kawada and Nagahama, 2004) や, Fig. 4 で見たように地震が発生して新たに余効変動が開始する場合には, 違った意味での特徴的時間が出現する. 一方, 余効すべりが大・中規模の地震を誘発した事例も発表されており (例えば, Yagi et al., 2001, 2003), 周囲のアスペリティ破壊へと連鎖する可能性も指摘されている (例えば, Matsuzawa et al., 2004). 今後, 余効すべりの時系列パターンを特徴的時間や地震誘発の観点から解析し, 余効すべりが次に起こり得る大規模地震の発生時刻にどう影響するかについて, より長期間の積算すべり量データを基に検討していく必要がある.

結 論

内部状態変数を用いた非平衡熱力学に基づいて導出された岩石の粘弾性構成則を用いて, プレート境界地震に伴う余効すべりの時系列変化を解析した. 本粘弾性構成則は, 地震時の急激な応力・歪速度変化に伴う岩石の力学的遷移挙動も表現でき, 緩和弾性率が時間のべき乗に従って減衰する関係式で表現される. 解析の結果, 余効すべり量 (変位量) は時間のべき乗則に従って増加することを確認した. このことは, 規模の大きい地震に伴う狭義の余効すべりの効果だけではなく, 規模の小さい地震も含めた数々の地震に伴う応答の重ね合わせが「余効すべり」として観測されていることを示唆している.

謝 辞

本研究の遂行に際し, Ian Main 教授 (University of Edinburgh), 楠城一嘉博士 (ETH Zürich, 東京大学) より本論文の内容に関する有益な助言をいただきました. 平原和朗教授 (京都大学) と匿名の査読者, および増田幸治編集委員 (産業技術総合研究所) には本稿を精緻に査読していただき, かつ貴重な助言を賜りました. 以上の方々に深く感謝申し上げます. 第一著者は, 日本学術振興会特別研究員-PD, 海外特別研究員として支援を受けました. また本研究は, 東北大学 21 世紀 COE プログラム「先端地球科学技術による地球の未来像創出」, グローバル COE プログラム「変動地球惑星学の統合教育研究拠点」の一環として行われました.

引 用 文 献

- Ariyoshi, K., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A., 2007, The key frictional parameters controlling spatial variations in the speed of postseismic-slip propagation on a subduction plate boundary. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **256**, 136-146.
- Biot, M.A., 1954, Theory of stress-strain relations in anisotropic viscoelasticity and relaxation phenomena. *Jour. Appl. Phys.*, **25**, 1385-1391.
- Ellsworth, W.L., 1995, Characteristic earthquake and long-term earthquake forecasts: implications of central California seismicity. In Cheng, F.Y. and Sheu, M.S. eds., *Urban Disaster Mitigation: the Role of Science and Technology*, Elsevier, 1-14.
- Findley, W.N., Lay, J.S. and Onaran, K., 1976, *Creep and Relaxation of Nonlinear Viscoelastic Materials with an Introduction to Linear Viscoelasticity*. North-Holland, Amsterdam, 367p.

- Freed, A.M. and Bürgmann, R., 2004, Evidence of power-law flow in the Mojave desert mantle. *Nature*, **430**, 548-551.
- Fung, Y.C., 1965, *Foundations of Solid Mechanics*. Prentice-Hall, London, 525p.
- 浜口博之・長谷川昭 (Hamaguchi, H. and Hasegawa, A.), 1975, 波形の相似な地震の発生と二, 三の問題*. 地震2 (*Jour. Seismol. Soc. Japan. (Zisin)II*), **28**, 152-170.
- Hanks, T.C. and Kanamori, H., 1979, A moment magnitude scale. *Jour. Geophys. Res.*, **84**, 2348-2350.
- 林 静男 (Hayashi, S.), 1973, レオロジー [*Rheology*]. 講談社 (Kodansha), 251p.
- Heki, K, Miyazaki, S. and Tsuji, H., 1997, Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan Trench. *Nature*, **386**, 595-598.
- Hemphill, T., Campos, W. and Pilehvari, A., 1993, Yield-power law model more accurately predicts mud rheology. *Oil Gas Jour.*, **91**, 45-50.
- Houseman, G. and England, P., 1986, Finite strain calculations of continental deformation I. method and general results for convergent zones. *Jour. Geophys. Res. B*, **91**, 3651-3663.
- Igarashi, T., Matsuzawa, T. and Hasegawa, A., 2003, Repeating earthquakes and interplate aseismic slip in the northeastern Japan subduction zone. *Jour. Geophys. Res.* **108**, 2249, doi: 10.1029/2002JB001920.
- Kawada, Y. and Nagahama, H., 2004, Viscoelastic behaviour and temporal fractal properties of lherzolite and marble: possible extrapolation from experimental results to the geological time-scale. *Terra Nova*, **16**, 128-132.
- Kawada, Y. and Nagahama, H., 2006, Cumulative Benioff strain-release, modified Omori's law and transient behaviour of rocks. *Tectonophysics*, **424**, 157-166.
- Kawada, Y., Nagahama, H. and Hara, H., 2006, Irreversible thermodynamic and viscoelastic model for power-law relaxation and attenuation of rocks. *Tectonophysics*, **427**, 255-263.
- Kawada, Y., Nagahama, H. and Nakamura, N., 2007a, Time-scale invariances in preseismic electromagnetic radiation, magnetization and damage evolution of rocks. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, **7**, 599-606.
- Kawada, Y., Nagahama, H., Omori, Y., Yasuoka, Y., Ishikawa, T., Tokonami, S. and Shinogi, M., 2007b, Time-scale invariant changes in atmospheric radon concentration and crustal strain prior to a large earthquake. *Nonlin. Processes Geophys.*, **14**, 123-130.
- Kimura, H., Kasahara, K., Igarashi, T. and Hirata, N., 2006a, Repeating earthquake activities associated with the Philippine Sea plate subduction in the Kanto district, central Japan: A new plate configuration revealed by interplate aseismic slips. *Tectonophysics*, **417**, 101-118.
- Kimura, N., Awaji, H., Okamoto, M., Matsumura, Y. and Masuda, T., 2006b, Fracture strength of tourmaline and epidote by three-point bending test: application to microboudin method for estimating absolute magnitude of palaeodifferential stress. *Jour. Struct. Geol.*, **28**, 1093-1102.
- Lankford, J., 1981, The role of tensile microfracture in the strain rate dependence of compressive strength of fine-grained limestone-analogy with strong ceramics. *Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **18**, 173-175.
- Main, I.G., 2000, A damage mechanics model for power-law creep and earthquake aftershock and foreshock sequences. *Geophys. Jour. Int.*, **142**, 151-161.
- Marone, C.J., Scholtz, C.H. and Bilham, R., 1991, On the mechanics of earthquake afterslip. *Jour. Geophys. Res. B*, **96**, 8441-8452.
- Masuda, T., Kimura, N. and Hara, Y., 2003, Progress in microboudin method for palaeo-stress analysis of metamorphic tectonites: application of mathematically refined expression. *Tectonophysics*, **364**, 1-8.
- Matsubara, M., Yagi, Y. and Obara, K., 2004, Plate boundary slip associated with the 2003 off-Tokachi earthquake based on small repeating earthquake data. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L08316, doi: 10.1029/2004GL022310.
- Matsuzawa, T., Uchida, N., Igarashi, T., Okada, T. and Hasegawa, A., 2004, Repeating earthquakes and quasi-static slip on the plate boundary east off northern Honshu, Japan. *Earth Planets Space*, **56**, 803-811.
- Miyazaki, S., Segall, P., Fukuda, J. and Kato, N., 2004, Space time distribution of afterslip following the 2003 Tokachi-oki earthquake: Implications for variations in fault zone frictional properties. *Geophys. Res. Lett.*, **31**, L06623, doi: 10.1029/2003GL019410.
- Nadeau, R.M. and Johnson, L.R., 1998, Seismological studies at Parkfield VI: moment release rates and estimates of source parameters for small repeating earthquakes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **88**, 790-814.
- Nadeau, R.M. and McEvilly, T.V., 1999, Fault slip rates at depth from recurrence intervals of repeating microearthquakes. *Science*, **285**, 718-721.
- Nagahama, H., 1994, High-temperature viscoelastic behaviour and long time tail of rocks. In Kruhl, J.H. ed., *Fractal and Dynamical Systems in Geosciences*, Springer-Verlag, 121-129.
- 永井理子・菊地正幸・山中佳子 (Nagai, R., Kikuchi, M. and Yamanaka, Y.), 2001, 三陸沖における再来大地震の震源過程の比較研究—1968年十勝沖地震と1994年三陸はるか沖地震の比較—*, 地震2 (*Jour. Seismol. Soc. Japan. (Zisin)II*), **54**, 267-280.
- Nakamura, N. and Nagahama, H., 1999, Geomagnetic field perturbation and fault creep motion: a new tectonomagnetic model. In Hayakawa, M. ed., *Atmospheric and Ionospheric Electromagnetic Phenomena Associated with Earthquakes*, TERRAPUB, 307-323.
- 楠城一嘉 (Nanjo, K.Z.), 2007, ダメージ力学にもとづくレオロジー: 上部地殻の変形のモデル化に向けて*. 地震2 (*Jour. Seismol. Soc. Japan. (Zisin)II*), **59**, 223-235.
- Nanjo, K. and Nagahama, H., 2004, Fractal properties of spatial distributions of aftershocks and active faults. *Chaos, Solitons & Fractals*, **19**, 387-397.
- Nanjo, K.Z. and Turcotte, D.L., 2005, Damage and rheology in a fiber-bundle model. *Geophys. Jour. Int.*, **162**, 859-866.
- Ngwenya, B.T., Main, I.G., Elphick, S.C., Crawford, B.R. and Smart, B.G.D., 2001, A constitutive law for low-temperature creep of water-saturated sandstones. *Jour. Geophys. Res. B*, **106**, 21811-21826.
- Nishimura, T., Miura, S., Tachibana, K., Hashimoto, K., Sato, T., Hori, S., Murakami, E., Kono, T., Nida, K., Mishina, M., Hirasawa, T. and Miyazaki, S., 2000, Distribution of seismic coupling on the subducting plate boundary in northeastern Japan inferred from GPS observations. *Tectonophysics*, **323**, 217-238.
- Perfettini, H. and Avouac, J.-P., 2004, Postseismic relaxation driven by brittle creep: A possible mechanism to reconcile geodetic measurements and the decay rate of aftershocks, application to the Chi-Chi earthquake, Taiwan. *Jour. Geophys. Res.* **109**, B02304, doi: 10.1029/2003JB002488.
- Poirier, J.P., 1985, *Creep of Crystals*. Cambridge Univ. Press, 260p.
- 里嘉千茂・皆川直哉 (Sato, K. and Minakawa, N.), 2005, 2次元モデル計算に基づく地震の余効すべりに関する考察—1994年三陸はるか沖地震の場合を例として—*. 東京学芸大学紀要自然科学系 (*Tokyo Gakugei Univ. Natur. Sci.*), **57**, 129-139.
- Savage, J.C., Lisowski, M. and Svarc, J.L., 1994, Postseismic deformation following the 1989 ($M = 7.1$) Loma Prieta, California, earthquake. *Jour. Geophys. Res. B*, **99**, 13757-13765.
- Savage, J.C., Svarc, J.L. and Yu, S-B, 2005, Postseismic relaxation and transient creep. *Jour. Geophys. Res.* **110**, B11402, doi: 10.1029/2005JB003687.
- Scher, H., Shlesinger, M.F. and Bendler, J.T., 1991, Time-scale invariance in transport and relaxation. *Phys. Today*, **44**, 26-34.
- Schaperly, R.A., 1964, Application of thermodynamics to thermomechanical, fracture, and birefringent phenomena in viscoelastic media. *Jour. Appl. Phys.*, **35**, 1451-1465.
- Schaperly, R.A. and Riggins, M., 1982, Development of cyclic non-linear viscoelastic constitutive equations for marine sediment. In Dungar, R., Pande, G.N. and Studer, J.A. eds., *Numerical Models in Geomechanics/International Symposium on Numerical Models in Geomechanics*, Zürich, Switzerland, 13-17 September 1982, Balkema, 172-182.
- Scholz, C.H., 2002, *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*, 2nd Ed. Cambridge Univ. Press, Cambridge, 496p.
- Shimamoto, T., 1986, Transition between frictional slip and ductile flow for halite shear zone at room temperature. *Science*, **231**, 711-714.
- 嶋本利彦 (Shimamoto, T.), 1987, 岩石の高温粘弾性挙動*. 第7回岩の力学国内シンポジウム講演論文集 [*Proceedings of the 7th*

- Japan Symposium on Rock Mechanics], 岩の力学連合会 (Japanese Committee for Rock Mechanics), 467-472.
- 高安秀樹 (Takayasu, H.), 1986, フラクタル [Fractal]. 朝倉書店 (Asakura Publ.), 186p (Translated into English: Takayasu, H., 1990, *Fractals in the Physical Sciences*. Manchester Univ. Press, Manchester, 170p).
- Teisseyre, R., 1995, Introduction (Part III. Earthquake premonitory and rebound processes). In Teisseyre, R. ed. *Theory of Earthquake Premonitory and Fracture Processes*, Polish Scientific Publisher, 305-323.
- Uchida, N., Hasegawa, A., Matsuzawa, T. and Igarashi, T., 2004, Pre- and post-seismic slow slip on the plate boundary off Sanriku, NE Japan associated with three interplate earthquakes as estimated from small repeating earthquake data. *Tectonophysics*, **385**, 1-15.
- Uchida, N., Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Igarashi, T., 2003, Interplate quasi-static slip off Sanriku, NE Japan, estimated from repeating earthquakes. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1801, doi: 10.1029/2003GL017452.
- Uchida, N., Matsuzawa, T., Hasegawa, A. and Igarashi, T., 2005, Recurrence intervals of characteristic M4.8 ± 0.1 earthquakes off-Kamaishi, NE Japan-Comparison with creep rate estimated from small repeating earthquake data. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **233**, 155-165.
- Uchida, N., Matsuzawa, T., Hirahara, S. and Hasegawa, A., 2006, Small repeating earthquakes and interplate creep around the 2005 Miyagi-oki earthquake (M=7.2). *Earth Planets Space*, **58**, 1577-1580.
- 内田直希・松澤 暢・平原 聡・長谷川昭・笠原 稔 (Uchida, N., Matsuzawa, T., Hirahara, S., Hasegawa, A. and Kasahara, M.), 2006, 小繰り返し地震による千島・日本海溝沿いプレート境界の準静的すべりモニタリング*. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **28**, 463-469.
- 内田直希・松澤 暢・平原 聡・長谷川昭・笠原 稔 (Uchida, N., Matsuzawa, T., Hirahara, S., Hasegawa, A. and Kasahara, M.), 2007a, 小繰り返し地震による東北日本沈み込みプレート境界での準静的すべりの推定*. 月刊地球 (*Chikyu Monthly*), **29**, 383-391.
- 内田直希・松澤 暢・三浦 哲・平原 聡・長谷川昭 (Uchida, N., Matsuzawa, T., Miura, S., Hirahara, S. and Hasegawa, A.), 2007b, 小繰り返し地震解析による宮城・福島県沖プレート境界の準静的すべり*. 地震2 (*Jour. Seismol. Soc. Jpn. (Zisin)II*), **59**, 287-295.
- Ueda, H., Ohtake, M. and Sato, H., 2001, Afterslip of the plate interface following the 1978 Miyagi-Oki, Japan, earthquake, as revealed from geodetic measurement data. *Tectonophysics*, **338**, 45-57.
- Ueda, H., Ohtake, M. and Sato, H., 2003, Postseismic crustal deformation following the 1993 Hokkaido Nansei-oki earthquake, northern Japan: Evidence for a low-viscosity zone in the uppermost mantle. *Jour. Geophys. Res.* **108**, 2151, doi: 10.1029/2002JB002067.
- Wesson, R.L., 1987, Modelling aftershock migration and afterslip of the San Juan Bautista, California, earthquake of October 3, 1972. *Tectonophysics*, **144**, 215-229.
- 八木勇治・菊地正幸 (Yagi, Y. and Kikuchi, M.), 2003, 地震時滑りと非地震性滑りの相補関係*. 地学雑 (*Jour. Geogr., Japan*), **112**, 828-836.
- Yagi, Y., Kikuchi, M. and Nishimura, T., 2003, Co-seismic slip, post-seismic slip, and largest aftershock associated with the 1994 Sanriku-harukao-oki, Japan, earthquake. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 2177, doi: 10.1029/2003GL018189.
- Yagi, Y., Kikuchi, M. and Sagiya, T., 2001, Co-seismic slip, post-seismic slip, and aftershocks associated with two large earthquakes in 1996 in Hyuga-nada, Japan. *Earth Planets Space*, **53**, 793-803.
- 山中佳子・菊地正幸 (Yamanaka, Y. and Kikuchi, M.), 2001, 日本付近のアスペリティマップ東北編*. 地球惑星科学関連学会合同大会講演予稿集 (*Abst. 2001 Japan Earth and Planetary Sci. Joint Meeting*), sy-005.
- Yamanaka, Y. and Kikuchi, M., 2004, Asperity map along the subduction zone in northeastern Japan inferred from regional seismic area. *Jour. Geophys. Res.* **109**, B07307, doi: 10.1029/2003JB002683.

*: in Japanese with English abstract.

(要 旨)

川田祐介・長濱裕幸・内田直希・松澤 暢, 2009, プレート境界地震に伴う余効すべりと岩石の粘弾性挙動. 地質雑, **115**, 448-456. (Kawada, Y., Nagahama, H., Uchida, N. and Matsuzawa, T., 2009, Afterslip associated with interplate earthquakes and the viscoelastic behavior of rocks. *Jour. Geol. Soc. Japan*, **115**, 448-456.)

プレート境界地震に伴う余効すべりの時間変化を岩石の粘弾性構成則に基づいて検討した。本構成則は内部状態変数を用いた非平衡熱力学から導出され、緩和弾性率（応力と歪の比）が時間のべき乗に従って減衰する構成式で表される。この時間のべき乗則は、岩石中の各内部状態が様々なスケールの緩和時間を持つときに、各内部状態の集団的なダイナミクスとして現れるものである。この構成則を用いて、岩石の定常クリープ挙動のみならず、急激な歪速度変化に対する遷移応答も表現できる。東北日本沈み込み帯のプレート境界における小繰り返し地震のモーメントから見積もられた余効すべり変化は時間のべき乗則に従う。粘弾性構成則に基づいて解釈すると、このことは、様々な規模の地震に伴って岩石が示す遷移挙動の重ねあわせが「余効すべり」として観測されているということを示唆している。