



東京大学地震研究所 ニュースレター

2005年10月号

目次

今月の話題

- ・ 市原恵美助手 火山学会研究奨励賞受賞
- ・ 留学生のための地震防災セミナー開講

第831回地震研究所談話会

今月の話題

市原恵美助手

2005年度日本火山学会賞研究奨励賞を受賞

海半球研究センター 市原美恵 助手は火山活動を特徴付けるマグマの性質がその中に含まれる気泡の挙動にあることを実験・理論両面から解明するなど、今後の火山学に大きく貢献することが期待されることから、2005年度日本火山学会賞研究奨励賞を受賞しました。

授賞式は平成17年10月6日に、北海道大学（札幌市）で開催された日本火山学会総会に引き続いて学会会場において行われました。

留学生のための地震防災セミナー開講

日本は世界でも有数の地震国であり、なかでも首都圏は過去に大きな地震災害に見舞われてきました。一方、多くの大学が集中する首都圏には多くの海外からの留学生が学んでいます。しかしながら、このような留学生の方々は必ずしも地震や地震災害について詳しいとはかぎりません。地震や津波に対する知識が重要であることは、2004年12月に発生したスマトラ沖巨大地震津波でも明らかになりました。そこで東京大学地震研究所では東京大学留学生センターと協力して、首都圏に学ぶ留学生を対象として、地震と地震防災についてその仕組みから学ぶ機会を試行的に設けました。

10月22日および29日に開催したセミナーでは、壁谷澤寿海（地震研究所）、今村文彦（東北大学）、木村宏恒（名古屋大学）、岡田義光（防災科学技術研究所）の各講師から地震や津波の発生の仕組み、耐震設計・工法、地震時の備えなどについて英語で講義を行いました。このセミナーには東京大学だけでなく首都圏の他大学の留学生の参加があり、延べ53名が受講しました。

11月には同様のセミナーを日本語により開講する予定です。



なお、このセミナーは科学技術振興調整費「スマトラ型巨大地震・津波被害の軽減策」（代表：東京大学地震研究所・加藤照之）により実施されています。

第831回地震研究所談話会

話題一覧

受賞記念講演

☆摩擦滑りの物理化学に関する実験的・理論的研究
(H17年文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞講演)
中谷 正生

通常講演

噴火後地殻変動の解析的モデルとしての準静的熱弾性変形と干渉 SAR データ
古屋正人

干渉 SAR による西グリーンランドの氷河堰き止め湖の発見と水位変化の推定
古屋正人、John Wahr (コロラド大学)

超高速ネットワーク JGNII による大学間リアルタイム地震観測データ流通システムの構築実験
ト部卓・鷹野澄・鶴岡弘・中川茂樹、三浦哲・松澤暢・岡田知己・中島淳一・
中山貴史・平原聡(東北大)、大見士朗(京大)、植平賢司・松島健(九大)、
伊藤武男(名大)

浅層地下水の突然昇温
佃 為成

2005年宮城県沖地震の震源過程（速報）
山中佳子

博多湾警固断層の地震履歴（H17年度所長裁量経費報告）
島崎邦彦、岡村眞・松岡裕美（高知大）、千田昇（大分大）、中田高（広島工大）、
平田和彦（西日本技術開発）

☆は次ページ以降に内容を紹介しています。

摩擦滑りの物理化学に関する実験的・理論的研究

平成 17 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞受賞

中谷正生

今日は、「平成 17 年度科学技術分野の文部科学大臣表彰若手科学者賞」の受賞記念講演ということで、そういう具合にお話させていただきます。摩擦の話です。

Introduction

これが分かっていると今日の話が見えると思いますので、まず摩擦の描像についてお話します (図 1)。平らな面の上に物質が垂直応力 σ で押し付けられています。ここに横から力 (剪断応力; τ) を加えると横に滑っていき、それに抵抗する摩擦力が働きます。物質の表面は粗くて凹凸があるので、実際に物質同士がくっついている所は少しだけです。ここを real contact area (実接触面積; A_r) といいます。摩擦強度 (Φ) は A_r に比例します。

この描像は、「Real contact theory」とか「Adhesive theory of friction (摩擦の凝着説)」といわれるもので、偉大な Bowden と Tabor が 1964 年に発見して、よく知られていることです。実は、私の研究はそこから一歩も出ないのですが、受賞記念講演ですから、それでも、私の研究の何が素晴らしいか、私のどこが賢いか、という話をします。

What I've found

私が何を見いだしたか? 「摩擦滑りとは何か」が分かったというのが、まず一つです。摩擦滑りは、brittle (脆性、パキッと壊れる感じ) な現象の代表のようにいわれていますが、そうではありません。物質同士がくっついている所は、real contact area だけです。ここに、何か剪断応力に対して抵抗できるものがある。これを frictional junction (摩擦接合) といいます。突き詰めれば原子の結合力ということになりますが、この frictional junction が剪断応力 (に指

数関数的に依存する Pierls-type の熱活性化過程) でクリープ (ぬるぬると変形すること) によって変形している。それが摩擦が滑っていることの本質だ、ということを見いだしたわけです。

もっと具体的にいうと、今、real contact area がこれだけだと分かっている場合、それにどれだけの力をかけたら、その瞬間の速度がどれだけになるか。つまり、かけた力と、それで生じる変形のバランスですね。そういうものを「構成則」といいます。私は、摩擦がそういう構成則でとらえられるものなのということに気が付いた。これが、何より偉大なことです。構成則的なものの見方は、破壊とか摩擦とか brittle な雰囲気のものには使われないのですが、そのせいで、摩擦法則の本質がみんなに誤解されていた。その所を私が……と、これ以上やると大演説になってしまいますからやめておきます。

それからもう一つ。これは、構成則とはまったく独立なことですが、同時に出てきたので一緒に話します。静摩擦強度が動摩擦強度よりも高いということは、みんな知っています。それは、静的にくっついている時間のうちに、だんだん面が強くなっていくのです。実は、real contact area がだんだん広がっていくのですが、そういうことは以前から知られています。いったん低下した摩擦強度が大きくなっていくことをヒーリング (healing) といいます。ヒーリングは時間の log で増加していくと観察的にいわれていたのですが、その動作原理のようなものが見つかったのです。その動作原理の本質は何か。瞬時瞬時のヒーリングレートは、今どれだけ面が強いか、今どれだけ real contact area があるかによって決まる。そういう動作原理によってヒーリングが働いていることが、分かりました。

How could I figure them out ?

では、どのようにしてそれらを見つけたかをお話します。本当は、「見つけた」というのも、おこがましいのです。全部、式に書いてあったのです。図 2 上の (1) 式と (2) 式は 1980 年代からある、地震学の基礎でもよく使う式です。地震は断層の摩擦滑りですからね。この経験式は岩石の摩擦実験で地震業界が発見したのですが、実は鉄、プラスチック、紙といろいろなものの摩擦にこの式は通用します。

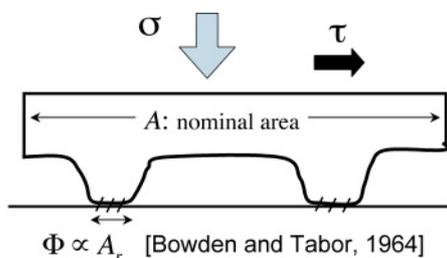


図 1 : 摩擦強度と real contact area (実接触面積; A_r)

さて、今日の話しのポイントは、ものの見方です。今まで良くないノーテーション（表記法）で書いてあったものを、良いノーテーションで書き換えたら図2下の(3)式と(4)式になって全部分かってしまったよ、という話なのです。

悪いノーテーションでは、瞬時瞬時に出ている速度(V)が速いと摩擦強度(μ)は強くなり、面の接触時間(effective contact time ; θ)が長くなると摩擦強度は強くなります、という言い方をしていました。面の接触時間は、(2)式を見て分かるように、接触時間が1秒たったら1増えていきます。 $b \ln \theta$ は(1)式の方に入っていますが、これはヒーリングの結果で、logは本来、ヒーリングはどうやって起きるかを記述している(2)式の方で面倒をみるべきことです。

そこで、 $b \ln \theta$ をまとめて Θ と考えてしまい、(1)式を図2下の(3)式のように書き換えてみました。(1)式では μ を摩擦強度と呼んでいましたが、 μ の定義は、剪断応力(τ)を垂直応力(σ)で割ったもので、 μ は本当は強度ではなくて、面に外部からかけられている力です。このへんで、皆さんの頭の中で混乱していたのです。私 [Nakatani, 2001] が出てくるまでは。

さて、以上のコンセプトに従って書き換えた式 [(3)と(4)]を見ると、(3)式が Constitutive Law (構成則)であることが分かります。 $\mu_* + \Theta$ が本来の意味での摩擦強度です。 μ_* と Θ に分かれています、ここを分けることに特に意味はないので、まとめて摩擦強度 Φ で結構です。(3)式は、ある摩擦強度(Φ)の物質にこういう力(τ)をかけたならこういう速度(V)で動きますよ、という力と変形のバランスを表す構成則なのです。今までは、本来が強度則である摩擦則のつもりで(1)式を見ていて、しかも、本当は強度ではなく、かかっている力である μ を摩擦強度と思っていたから、わけが分からなくなってしまっていたのです。恩師の Scholz 先生の言葉を借りると、very opaque (不透明) だったのです。

(2)式についても $b \ln \theta$ をまとめて Θ として書き換えると、(4)式になります。見た目はややこしくなりますが、がぜん意味がよく分かってくる。そっちの話はあとにして、まず構成則(3)式の方を解説します。

Frictional Constitutive Law (摩擦構成則)

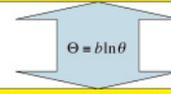
今日、私が何をやりたいかということ、式の解説です(笑)。まず、Constitutive Lawの方からいきます。図3の(3')式は、図2の(3)式を摩擦滑りイコールという形に書き直したものです。かける力(τ)が大きくなったら摩擦滑りは速くなる、ということが書

All were written in the existing equations.

$$(\tau/\sigma =) \quad \mu = \mu_* + a \ln(V/V_*) + b \ln \theta \quad (1)$$

$$d\theta = 1 dt - \frac{\theta}{L} dx \quad (2)$$

in bad notation: θ is effective contact time.



in good notation: $(\mu_* + \Theta)$ is frictional strength.

$$(\mu =) \quad \tau/\sigma = (\mu_* + \Theta) + a \ln(V/V_*) \quad (3) \text{ constitutive law.}$$

$$d\Theta = \frac{b}{t_c} \exp(-\frac{\Theta}{b}) dt - \frac{b}{L} dx \quad (4) \text{ strength evolution.}$$

図2：正しいコンセプトで式を見る

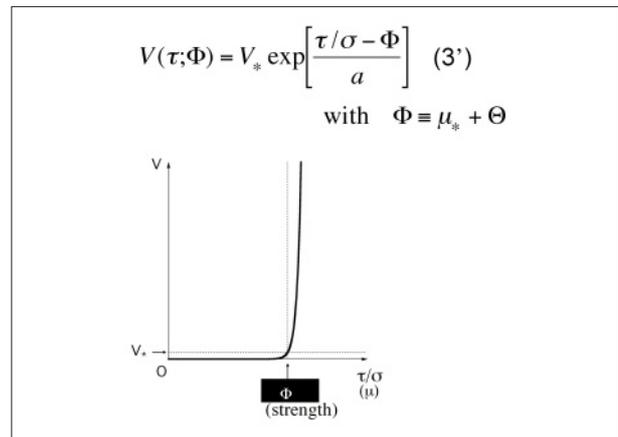


図3：摩擦の構成則

いてあります。

グラフにすると図3下のようにになります。横軸が面にかかる力、縦軸が滑り速度です。リニアスケールでとってあります。(3')式の a はとても小さい数字で、摩擦強度 Φ 辺りでグニュと曲がっています。 μ_* と Θ は分ける必要がないので、 $\mu_* + \Theta$ を摩擦強度 Φ とします。[Dieterich, 1979]以前は、有史以来、直角に折れ曲がって垂直になっているというのが摩擦の構成則でした。これならまさに brittle ですが、現実には少し切れが悪くて、図3のように連続的なカーブで(面の状態：強度と1対1対応する：が同じなら)あって、より早く滑らせるには大きな力がある。

(3')式には、摩擦強度 Φ が入っています。摩擦強度が強くなると、力のわりに滑り速度が出ない、ということです。図4は私の実験のデータです。図4上は、縦軸が摩擦強度、横軸が時間です。一定速度で滑ってきた物体を、ある時点で止めようとする。つまり、かけている力を下げ、一定のレベルでホールドする。そのまま、しばらく待ちます。図4下の縦軸は滑り量です。一定の速度で滑ってきて、かける力を下げると、ぱっと滑りは遅くなって、それでもずるずる滑

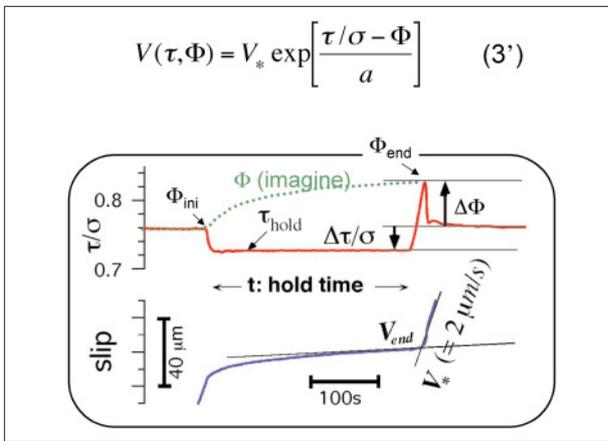


図4：摩擦強度が上がると滑りは遅くなる

るけれども、注目すべきはホールド中に滑りがだんだん遅くなっているところです。かけている力は一定です。かけている力は一定なのに、だんだん遅くなってきている。

この実験を見たとき、だんだん遅くなっていくのは、面の状態が変わっているからだ、私は気が付いた。ここがすべての出発点でした。ヒーリングが起きるといことは以前から知っていましたが、面が強くなるから、同じだけ力をかけているにもかかわらずだんだん遅くなっていくんだな、と。そうかそうか、こういうことかと。時間がたつから遅くなるのだと思ったら、何も見えない。面が強くなることに応じて、遅くなっているのです。どれだけ強くなったかは、実験で調べることができます。調べてみたら、(3')式の通りになっていました。

熱活性化クリーブによる変形

では、なぜ面が強くなると滑り速度が落ちるのか？

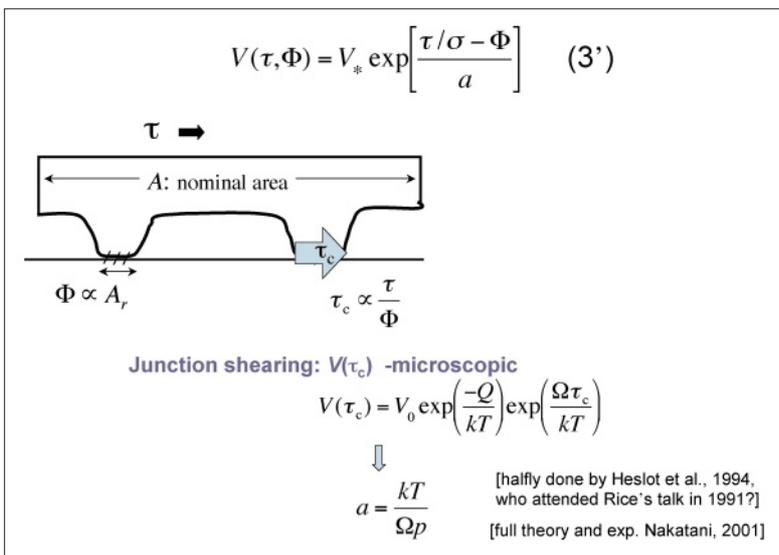


図5：摩擦構成則の物理メカニズム junctionの熱活性化剪断クリーブ

最初に real contact theory を説明したので、わりと簡単です。誰でもできる。図5は、図1と同じです。面が強くなるというのは、real contact area が広がっているということです。外からかかっている力が一定の場合、real contact area が広がると、junction 一本あたりにかかる力 (τ) は減りますね。だから滑り、すなわち junction のクリープ変形が遅くなる。junction はとっても高応力下ですから、指数関数的に応力に依存するというメカニズム (Pierls Mechanism) でクリープするだろうと考えれば、一本道で図5の式が出てきます。さらに Pierls Mechanism が熱活性化過程だということから、 a という定数は絶対温度に正比例にすることが分かります。実験してみると、本当にそうになっていました。

私は知らなかったのですが、摩擦滑りはこういうもの (junction の熱活性化剪断クリーブ) だろうという理論は、実は Heslot らによって 1994 年に出ていました。もっと本当の始祖は Rice で、これは本人に言っておいてくださいと言われてたから触れ回っているのですが、1991 年ごろに Rice がフェルミ夏の学校か何かで講演して、Heslot はそこにいたそうです。私は 1998 年に Rice からアブストラクトをもらいましたが、ここまでは確かに書いてありました。

では、私は何をしましたか。実は、Rice や Heslot がやったときには、real contact area や強度が変化するということの影響はまったく入っていませんでした。それが入って完全な理論となったのが [Nakatani, 2001] です。強度の影響があるから摩擦の摩擦らしい性質 (一見 brittle ぽかったりするような) が出てくるので、大事といえば大事。それから、 a というパラメータが温度に正比例することを実験で確かめたのも

[Nakatani, 2001] です。論文を書いている途中に Heslot らの論文を見たときにはガクッときました、気を取り直して書き進めました。論文を書き始めたのは 1998 年です。『Nature』に落ち (惜しかったんですよ)、『Science』に落ち、結局『JGR』。

摩擦強度の回復

time depending healing

次は、摩擦強度がどう変わってくるかという、ややこしい式 (4) をやりましょう (図6)。この式は2項に分かれています。1項 (網かけ部分) は1秒につきこういうレートで強くなる、2項は1mm 滑るごとにこういうレートで弱く

なる、ということが記述されています。time-dependent healing と slip weakening の2項で書かれています。

time dependent healing の方から説明します。(4) 式の網かけ部分を見てください。この式の特徴は、ヒーリングレートの現在の強度の関数として書かれています。摩擦強度は初期強度 Φ_0 からの差 $\Delta\Phi$ で書いてありますが、摩擦強度が強いほどヒーリングレートは小さくなるということが記述されています。これを積分すると、log のヒーリングカーブが出てきます。log のヒーリングカーブをリニアタイムで書くと、図6下のような形になります。だんだん緩くなっていく。これも、時間がたったから緩くなっているのではありません。私は、(4) 式を見て気が付いたのです。おお、摩擦強度が増えていくからヒーリングがだんだん鈍くなっていくのかと。式に教えてもらったわけです。いいノーテーションで書き直しておきましたから。

このことを real contact area の図で考えると、実に当たり前です。real contact area が広がっていくのは、垂直応力 (σ) で押し付けられているため、アスペリティが垂直方向にクリープして横に広がっていくからです(図7)。real contact area が広がると、接触部分にかかる垂直応力 (σ_c) は小さくなります。アスペリティが垂直クリープする速度を支配するのは σ_c だから、面が強くなる、すなわち A_r が広がるにつれてだんだん遅くなっていきます。 σ_c は非常に高い応力ですから、exponential はリーズナブルです。これで、ヒーリングの物理モデルができました。

ちなみに、物理的に書いているということの証拠に、 b や t_c といったヒーリングの現象論的パラメータが全部物性で書かれています。 b は絶対温度に正比例する。

t_c は、 $\log t$ のヒーリングを時間の対数でプロットすると、 t_c あたりから先が log リニアになりますという特性時間ですが、プロセスの基本速度に反比例して、温度に対してアレニウスの関係にのります。

ヒーリングの物理モデルも実は、Brechet と Estrin によって1994年に論文が出ていました。私は、やはり論文を書いているときにそれを知ったのですが(これも Rice に教えられた)、やはりがっかりしました。ただし、実験で証明したのは [Nakatani and Scholz, 2004] が最初です。それから、Brechet & Estrin の理論は少し特殊な初期条件を仮定してやってい

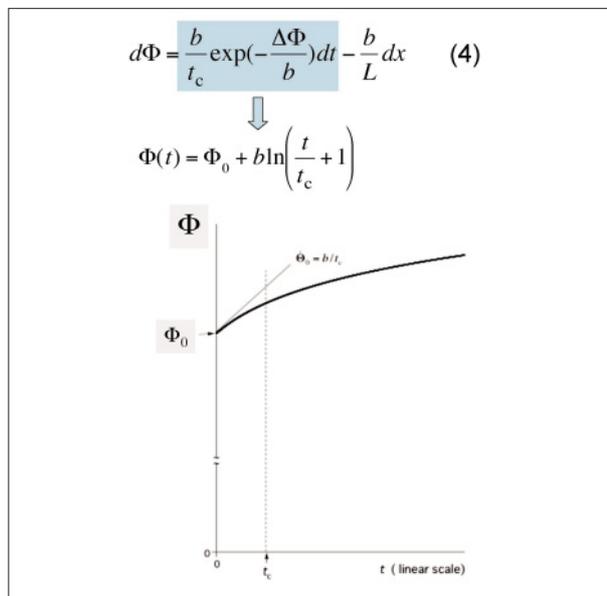


図6：摩擦強度の発展の式、特に時間依存ヒーリング

て、実際はもう少しあるんだよ、ということは今、僕が論文に書いています。一般化した理論ですね。

あ、そうそう、最近では Interdisciplinary (学際的) でないといけならしいですから言うておくだけです。Brechet と Estrin は金属学者、物理学者です。金属学の雑誌に載っていました。1994年に摩擦の Constitutive Law を出していた Heslot もやはり物理学者で、掲載誌は Physical Review です。

摩擦強度の回復——slip weakening

次に slip weakening についてお話しします。図8(4) 式の網かけの部分が slip weakening の式です。1mm 滑ったら、 b/L というレートで落ちる。下の図は、その様子を示したもので、適当な Φ から始めて滑らせた

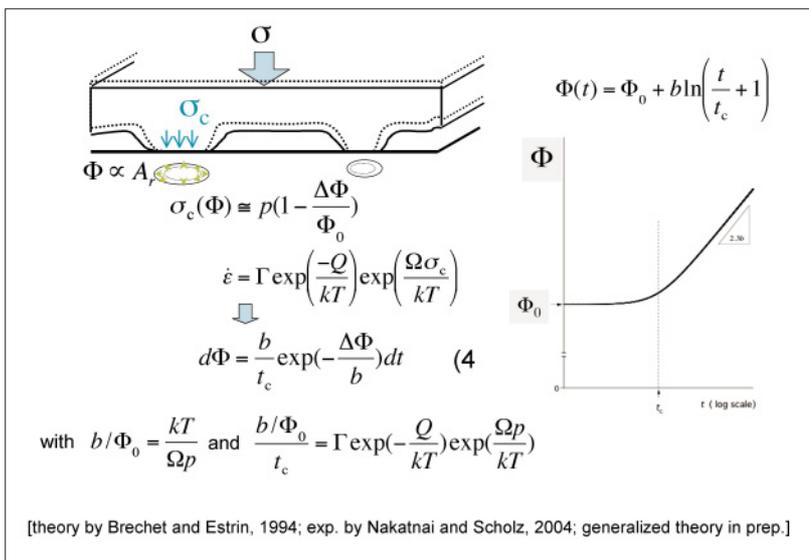


図7：時間依存強度回復（ヒーリング）の物理メカニズム

$$d\Phi = \frac{b}{t_c} \exp\left(-\frac{\Delta\Phi}{b}\right) dt - \frac{b}{L} dx \quad (4)$$

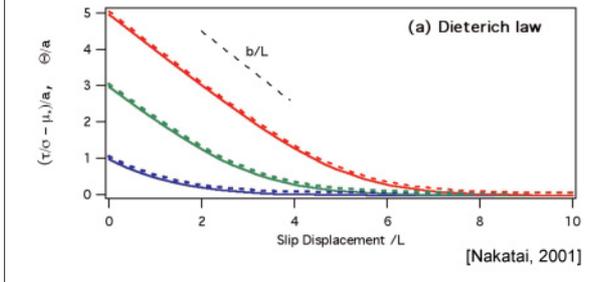


図8：摩擦強度の発展の式、特に滑り弱化

ときのΦの落ち方です。横軸は滑り量。Φは直線的に、 b/L の傾きで落ちてくる。Φ = 3 から始めても、5 から始めても同じような傾きで落ちていきます。

ただし、Φがだんだん小さくなっていくと、slip weakening がだんだん鈍くなっていく。(4) 式からすると slip weakening は鈍くなりようがないのですが、ヒーリング（第右辺1項）が効いてくるのです。Φが小さくなると、ヒーリングのスピードがだんだん上がってきます。ヒーリングのスピードと、slip weakening のスピードがバランスするところで一定になる、と。これは、本当に式に書いてある通りしゃべっているだけです。

残念ながら、このslip weakeningの仕方は、実験の結果とは合いません。しかし最近は、この式の事実と反する部分を利用して発見をしたという論文が出たりしています。ちょくちょく引用される [Guattei, 2002] はその例です。それは、(4) 式が実験事実をきちんと表し切っていないのが悪いので、その人のせいではないのですが。大切なことは、[Nakatani, 2001] に、この式でやったらこういうslip weakening になりますよと書いてあるので、こっちを引用してくださいということです。

ものの見方を変える

さて結論ですが、何が言いたかったかということ、「ものの見方を変えたのだ」ということです。1979 以来、人々は、摩擦強度は現在の速度に少し依存して、それから前の滑りの履歴にも少し依存して……などと言っていた。みんな opaque だとは感じていたけれど、何で opaque なのか分からなかった。それを私は、強度と力は別のものだという当たり前のことをきちんと考えて、Constitutive Law にとらえ直した。この Constitutive Law に書かれているのは、力をかけた

ら速く滑る、同じ力だったら摩擦強度が上がってくれば滑りは遅い、ということです。そう考えると、物理もはっきり見える。

それからヒーリングの方ですが、強度が時間の log で増えるというのは、そうなのですが、もう少し考え直してみましょ。摩擦面がストップウォッチを持っていて何秒と計り、その秒の形でデータを保存して、それに log をとって強度を出す、ということをしているわけではありません。摩擦面が知っているのは、今現在の物理的な状態、原子がどう並んでいるかというだけです。だから、その状態がどう変わるかということも、現在の状態だけの関数として書かなければならない。「強い面はヒーリングが遅い」と言うてみるのがものの見方を変えたことになるというのは、こういうわけ。Constitutive Law と比べるとスケールが小さいですが。

なぜ、ものの見方にこだわるのか

最後に、なぜ受賞記念講演で「ものの見方」ということをお話したのかについて。私は、サイエンスで一番価値があることは、重要な事実を発見することだと思います。地震の業界でいえば、大きい地震は継続時間が長い、とかいうのがこの範疇に入りますね。今回の私の発見は、現象は前からあって、式まで書いてあったわけですから、違います。二番目に価値があるのは、それがどのように起きているのかという、動作原因（メカニズム）を明らかにすることです。私のは、当てはまるといえなくもないですが、何しろ、式をにらんだだけで分かるようなことですから、褒めるには難易度が低過ぎる。

では、「摩擦を構成則で見る」ということを、なぜとうとうと語るのか。サイエンスとしては大した価値はないかもしれませんが。しかし、学者とかインテリがやりたい究極のことは、人のものの考え方や見方（コンセプト）を変えることではないでしょうか？ 少なくとも、私はそれが最高の価値だと感じるのです。それは、マスターベーションといえそうなのですが、少しぐらいは現実的なお釣りもあります。

私の見方の方が、今までの摩擦則の見方よりもはるかに正しいというか、はるかにいいです。この見方をすると、いろいろな研究課題が続々と浮かんできます。

自分でやってしまったもの、やってもまだうまくいかないものなども含まれていますが、いくつもパッと出てきます。だいたい博士論文のテーマになるくらいの単位で考えています。現実的なお釣りといいつつ、こんなものを数えること自体がサイエンスのためのサイエンスといわれてしまうかもしれませんが、図9に

- measuring strength without breaking [Nagata *et al.*, 2005]
- workings of different versions of evolution laws [Nakatani, 2001, Appendix]
- quest for correct evolution law [not successful yet]
- general theory of cutoff time [Nakatani, in preparation]
- logical necessity of two independent length parameters for evolution law [Nakatani, 2001, Appendix]
- extrapolation to untested conditions
- application limit for the framework
- common checkpoints for new phenomena yet to discovered [Nakatani and Scholz, 2004]
- logically correct handling of friction data [Nakatani, 2001]
- pinpointing how the fault simulation generates that result of yours [e.g., to Marone 1998]
- imagining atomic-scale picture of frictional junctions

表 1 : With my good conceptual framework, many subjects come in sight, such as

挙げたのは、単に引用されるというのではなく、自分のコンセプトがあったからそういう仕事が生まれてきたという、そういうテーマです。

ガセネタかもしれませんが、このようなテーマが 100 本出たらノーベル賞の候補になるらしいです。それでリストアップしてみたのですが、10 個くらいでネタが尽きてしまいました。この仕事は、ここ止まりで、ノーベル賞までいかないようです。残念。

まあしかし、ものの見方を変えるとか、そんな scholarly value (学者的価値) にこだわるような時代ではありません。中期目標とか、論文の数とか、外部評価とか、そういう、もっと大事なことがたくさんあります。私は別に、人のものの見方を変えるような研究がしたいとか思ってこの研究をしたわけではなく、たまたまそういうことにぶつかったから、やってしまっただけなのです。まあ、しかし、そういうことにぶつかったときには、本当に大事なことを差し置いて自堕落にやってしまうのも、学者というものではないですかね。これが、講演の結論です。

東京大学地震研究所ニュースレター

発行: 東京大学地震研究所広報委員会

〒113-0032 東京都文京区弥生1-1-1

電話・FAX: 03-5841-5643

電子メール: outreach@eri.u-tokyo.ac.jp

ホームページ: <http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>

著作権所有: 東京大学地震研究所 2005

Copyright 2005 Earthquake Research Institute, University of
Tokyo, All rights reserved