



東京大学地震研究所 ニュースレター

2006年7月号

目次

第840回地震研究所談話会

- ・ 話題一覧 p. 1
- ・ 今月のピックアップ：
「GPS観測データを用いた長基線キネマティック測位の
高度化と震源過程の研究に対する新たな展開」 p. 2

今月の話題

- ・ 人事異動のお知らせ p. 7

第840回地震研究所談話会

話題一覧（★は以下に詳しい内容を掲載、☆は概要をホームページに掲載）

- 1 ★. GPS観測データを用いた長基線キネマティック測位の高度化と震源過程の研究に対する新たな展開（日本測地学会賞坪井賞受賞講演）
宮崎真一
2. マリアナでの長期海底地震観測：二重深発面の確認と深部構造のイメージング
塩原 肇・望月公廣・金沢敏彦、
杉岡裕子・大木聖子・深尾良夫・末広 潔（海洋研究開発機構）
3. Fault slip in a bimaterial poroelastic medium
山下輝夫
- 4 ☆. 沈み込むプレートから地殻が引き剥がされる条件
瀬野徹三
- 5 ☆. 衝突の2類型（ヒマラヤ型とアルプス型）と伊豆の衝突
瀬野徹三
- 6 ☆. 八ヶ岳地磁気観測所内磁気異常の時間変化：雷誘導磁化の影響
清水久芳・小山崇夫・小山茂・歌田久司
- 7 ☆. 核-マントル電磁結合と数十年スケールコア流体運動
浅利晴紀・清水久芳・歌田久司
- 8 ☆. IT強震計でみた地震研建物の震度1の揺れ
鷹野澄、伊藤貴盛（応用地震計測）
9. 新館免震建屋と旧館建屋の揺れモニタリング計画
鷹野澄、伊藤貴盛（応用地震計測）、壁谷澤寿海・坂上実・瀬野一起・古村孝志

GPS 観測データを用いた長基線キネマティック測位の高度化と震源過程の研究に対する新たな展開

宮崎真一

日本測地学会賞坪井賞とは

今日の講演タイトルは、「GPS 観測データを用いた長基線キネマティック測位の高度化と震源過程の研究に対する新たな展開」としました。これは、日本測地学会賞坪井賞の受賞対象となった研究テーマです。私自身が見ても大げさなテーマで、特に、私の研究が震源過程の研究に対する新たな展開を拓いたと本当に言えるのだろうかと思ひながら、賞をいただきました。1秒ごとのGPSデータを地震計として使ったという点が、主な受賞理由です。この研究については、これまでも何度かお話ししておりますが、今日は改めてご紹介したいと思います。

まず、測地学会や坪井賞というのはあまり馴染みがないと思いますので、簡単にご紹介します。国際測地学・地球物理学連合の略称 IUGG の一つの G は Geodesy、もう一つの G は Geophysics ですから、本当は地球物理学と並列されているとても大きな分野ですが、測地学会はわりと小さなコミュニティで、アットホームな感じです。

日本測地学会賞坪井賞とは、測地学の発展に大きな寄与をされた故 坪井忠二先生の業績を記念し、測地学の分野で特に顕著な業績を上げた若手研究者を奨励するために設けられた賞です。今年で 14 回目になります。第 1 回が大久保修平先生（地震および火山噴火によって生じる重力とポテンシャルの変化—ディスロケーション理論に基づく定式化）、第 8 回が古屋正人先生（地球システム科学的手法による極運動の励起源の解明）と、これまでに地震研から 2 名受賞されております。

若い方はお名前をご存知ないかもしれませんが、坪井先生は地球物理学者であり随筆家、そして寺田寅彦先生の弟子として知られています。私が坪井先生のお

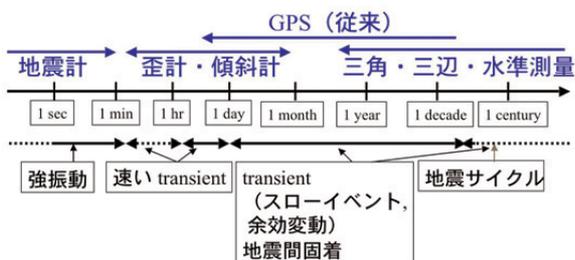


図 1：さまざまなタイムスケールの現象と観測手法

名前をどこで初めて知ったかという、二十歳のころに読んだ『ファインマン物理学』（岩波書店）です。第 1 巻『力学』の翻訳をされていたのが、坪井先生でした。

従来の GPS が得意としてきた時間スケール

私はこの分野に入って以来、ずっと GPS しか使っていません。GPS で従来得意だったのは何か。GPS では、観測点の位置が 1 日に 1 回出てきます。ですから、1 日より長い時間スケールの現象をとらえることができます（図 1）。数世紀にわたってデータを蓄積すれば、地震サイクルもきれいに記録できるでしょう。

GPS が従来得意だったのは、1 ヶ月、1 年、10 年といった時間スケールの現象ですが、もっと短い時間スケールにも面白い現象がいろいろあります。しかし、時間スケールの短い方は、地震計という立派な手法がすでにある。GPS が立ち入る必要はないのかなと思いつつも、震源過程の解析は地震計のデータと測地データでされることが、実は多いのです。従来の震源解析で使われてきた GPS データは、1 日ごとのデータです。しかし、そのデータを細かく見ていけば、例えば、地震の後に起きる余効変動の初期過程が混ざっていたりするはず。余効変動の初期過程は小さいと思いますが、どの程度影響しているのかなと思ひながら、震源解析の結果を横から眺めておりました。

GPS は何を見ているのかを、非常に簡単にご紹介します。GPS では、衛星と観測点の距離を波の波数で測っています（図 2）。衛星の位置が分かっているならば、観測点の位置を未知数とし、観測点の位置を推定しようということです。詳細を説明する時間はありませ

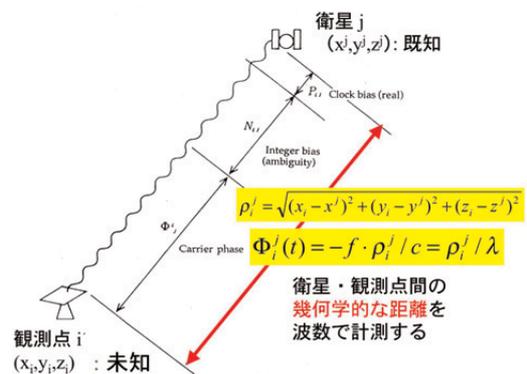


図 2：GPS の観測量

$$\Phi_i^j(t) = -f \cdot \rho_i^j / c + N_i^j + P_i^j(t) - \Delta_{ion,i}^j + \Delta_{trop,i}^j + \Delta_{ant,i}^j + \varepsilon$$

但し、

$$\rho_i^j = \sqrt{(x_i - x^j)^2 + (y_i - y^j)^2 + (z_i - z^j)^2}$$

$P_i^j(t) = f \cdot (\delta_i(t) - \delta^j(t))$: clock offset

N_i^j : phase ambiguity ← 長時間のデータが必要

Δ_{ion} : 電離層遅延項
 Δ_{trop} : 大気遅延項 ← 長基線だと点ごとに違う振舞い
 Δ_{ant} : 多重伝播項 ← 解析結果から Empirical に除去
 ε : 白色雑音

Δ_{ion} (電離層遅延項) は 2 周波を使って除去。
 Δ_{trop} (対流圏遅延) は未知パラメータとして扱う。

$P_i^j(t)$ (時計の誤差) は、2 衛星 & 2 観測点を使って除去。

→
$$\Phi_i^j(t) = -f \cdot \rho_i^j(t) / c + N_i^j + \Delta_{trop,i}^j(t) + \varepsilon(t) \quad (1)$$

$$\rho_i^j(t) = \sqrt{(x_i(t) - x^j(t))^2 + (y_i(t) - y^j(t))^2 + (z_i(t) - z^j(t))^2}$$

$(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ 時間的に一定 : static GPS
 時間変化を許す : kinematic GPS

図 3 : 位相の観測方程式

んが、衛星・観測点間が幾何学的な距離です。それから、ある瞬間突然衛星が出てくるので、波数の整数部分がいくつあるか分からないという不確実性があります。さらに、大気遅延項、受信機や衛星の時計の誤差など、いくつか誤差源があります。通常は、30 秒なり 5 分ごとにサンプリングし、それを 1 日分ためて最小二乗法を用いて観測点の位置 X、Y、Z を一つの値として出すという操作をします (図 3)。

なぜそうするかというと、データがある程度の時間にわたって蓄積しないと整数値の不確実性が決まらないという問題があるからです。ただし、この不確実性さえ決まってしまうと、受信したサンプリングごとに観測点の位置 X、Y、Z を出すことは可能です。このようにしてサンプリングごとに位置を決める方法を「キネマティック測位」「キネマティック GPS」と呼んでいます。観測点の座標を時間的に一定と見るのが従来の GPS、観測点座標が時間的に変わってもよいとするのがキネマティック GPS です。

では、観測点座標は時間とともにどのように変わるのでしょうか。どういった時間的な拘束を与えるかで、解の見かけが変わります。前の時刻の座標位置が次の時刻の座標位置とぴったり等しくて誤差がありませんというのが、時間的に変化がないということです。平均が常にゼロで、分散 Σ 、あるいは標準偏差が時間的に一定、従って前の時刻の値とまったく相関がないのがホワイトノイズです。ほかにも、前の時刻での位置を平均とし、分散が前時刻からの経過時間に比例するようなランダムウォークなど、いろいろなモデルがあります。地震の場合は、前の時刻との相関がないほど大きな運動をしますから、ホワイトモデルを使います。

たくさんのサンプリング時刻において
 観測方程式 (1) 式を立てる
 → 最小二乗法またはカルマンフィルター
 を用いて $(x_i(t), y_i(t), z_i(t))$ を推定

※ 座標値の時間発展

$X_i(t_{k+1}) = X_i(t_k) + 0$: 定数
 $X_i(t_{k+1}) = 0 + \sigma$: white noise
 $X_i(t_{k+1}) = X_i(t_k) + \tau \sqrt{t_{k+1} - t_k}$: randomwalk

図 4 : GPS のデータ処理

余効変動のような一時的な滑らかな運動の場合には、前の時刻とそれほど大きな変化がないので、ランダムウォークを使います。これは、データ解析をするときの解析者のオプションです (図 4)。

GPS を 1Hz の変位地震計として使えるか

なぜ、GPS を震源過程の解析に使用しようと考え始めたかということですが、先行研究があります。1994 年から 1995 年にかけて、北海道東方沖地震など三つほど大きな地震が起きました。それらの地震に対して、30 秒ごとの GPS サンプリングデータを使って、キネマティック解析によって 30 秒ごとの観測点の位置変化を出すという研究を、国土地理院の先輩である畑中雄樹さんが行いました。その延長で、1 秒ごとの GPS サンプリングのデータがあれば、1Hz の変位地震計として使える可能性があるだろうと単純に考えたわけです。

1996 年に日向灘で地震がありました。1 秒の GPS サンプリングデータもあるし、同じような解析を試してみようと、わりと気楽に始めました。そのときの結果が図 5 左です。地震が起きて、しばらくしてから波動が伝わり、南北、東西の変動パターンが出ました。振幅が 3 ~ 4cm くらいです。しかし、これは本物ののだろうか、という不安があります。ぐにやぐにやとしているのは GPS の典型的なノイズです。本物の地殻変動なのか、ノイズなのか。それは、GPS のデータだけでは分かりません。

そこで、近くに設置されていた強震計のデータを 2 回積分した結果と比べてみました (図 5 中央)。すると、南北、東西の変動ともに、わりと似たようなパターンが出ています。それでもまだ本物かどうか不安があるので、地震研の菊地正幸先生にお願いして、理論波形を出していただきました (図 5 右)。大きなパターンとしては似ています。これを見て、もしかしたら GPS を 1Hz の変位地震計として使えるかもしれないと思いました。しかし、当時はまだ GPS の 1 秒観測はそれほどやっていませんでしたので、地震計や理論波形と比較するだけで終わってしまい、国土地理院の報告に書いただけで、きちんとした学術論文にはでき

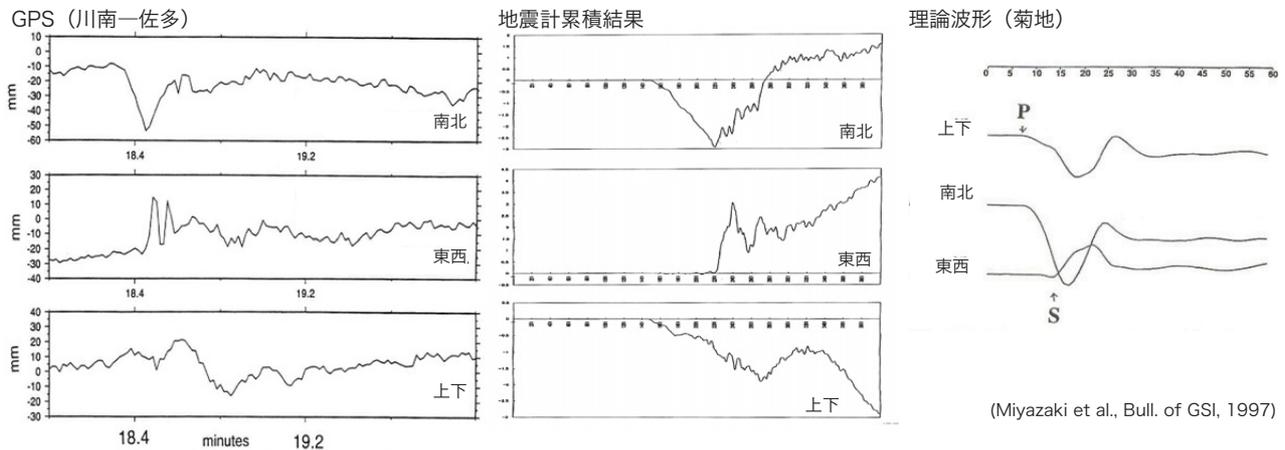


図5：1996年日向灘地震

ませんでした。

その時に思ったのは、GPSを地震計として使えば、非常に大きな地震が来た場合でも振り切れないから、永久変位が記録されるという長所があるということです。単一のデータでインバージョンも可能です。単一のデータと言ったのは、地震の破壊過程のインバージョンと、その後の余効変動のインバージョンを同じ観測量で行うことができるということです。長い時間スケールの解析まで続けて見ることができるというメリットがあります。

逆に、変位地震計としてのGPSの短所もいくつかあります。地震計よりもノイズが多く、観測も今のところ1Hz以下の周波数のみです。GPSデータの受信には高さ5mのピラー（柱）を使っているため、これが固有振動しないのかという問題もあります。また、波形を得るまでに時間がかかる上に処理が面倒であること、そして、しょせんは間接計測であるというのが、変位地震計としてのGPSの短所です。

一長一短がありますが、うまく使えば、GPSは地震計をサポートするようなデータに成り得るのではないかと考えています。

2003年十勝沖地震への適用

2003年、十勝沖で大きな地震がありました。このとき、国土地理院はほぼ全点で1秒のGPSデータをブロードキャストしていましたので、国土地理院との共同研究として、これを地震計として使ってみようということになりました。2003年十勝沖地震の変位波形の例が、図6です。例えば、襟裳岬にあるGPS観測点0019番では、地震発生時刻から20秒ほどして波動が到着して、約1m東へ、約50cm南へ変動したことが分かります。0144番でも、だいたい同じようなパターンを描いています。1996年日向灘地震の例と比べて、スケールが大きいので変位波形がきれいに見えます。

1Hz GPSによる変位波形を強震計の積分結果と比

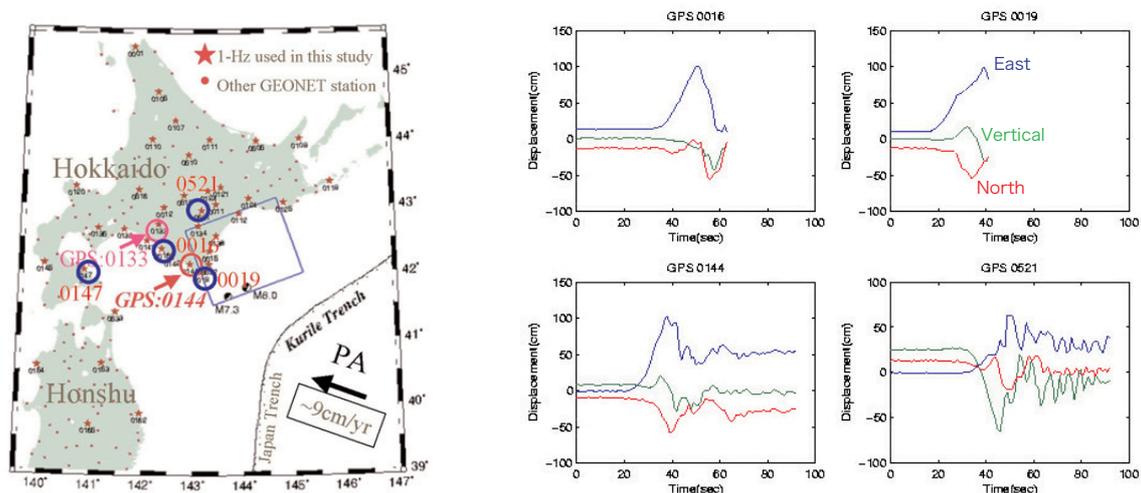


図6：2003年十勝沖地震1Hz GPSによる変位波形の例

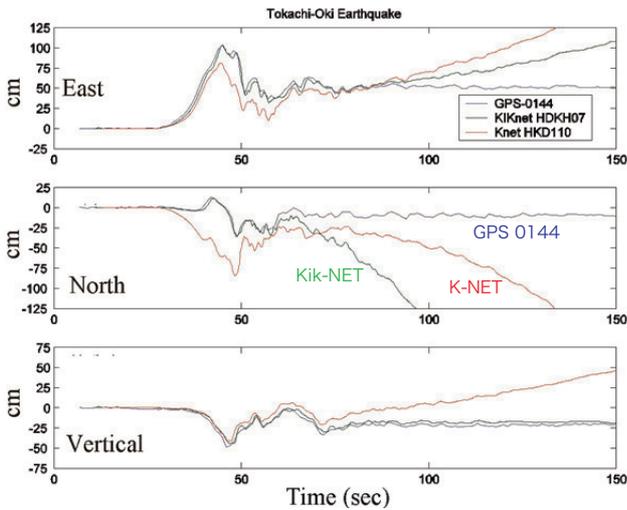


図 7 : 2003 年十勝沖地震 強震計の積分結果との比較

較した結果が図 7 です。GPS 観測点の 0144 番と Kik-net と K-NET を比較しています。K-NET は多分、真北が合っていないかと思いますが、Kik-net は波動の部分が非常に合っています。

瀬戸先生がアメリカから来られているときに、「これは、インバージョンに使えるんですか？」とたずねると、「使えるんじゃない、やってみたら」という返事をいただきました。「じゃあやってみよう」ということで、やりました。スタンダードなマルチタイムウィンドウインバージョンという震源過程の解析に使われる手法で、変えたのはグリーン関数です。グリーン関数は、Zhu and Rivera という二人が開発したコードで、永久変位も計算できるものです。

得られた結果が、図 8 です。大きなすべりが見えて、すべりが深い方へと伝搬していくイメージが、GPS だけで出ました。総すべり量は、図 9 左のようになっています。強震計の積分結果と比較した GPS 観測点の 0144 番でデータに対するフィットを見てみると、1Hz の GPS データ (黒) とインバージョンによる計算値 (赤) が、おおよそ合っています (図 9 右)。ほかの GPS 観測点もおおよそ合っています。地震計として GPS が使えるだろうと、言えるようになりました。ただし、大きな地震であれば、です。

2005 年福岡県西方沖地震への適用

では、中規模の地震はどうでしょうか。2005 年に福岡県西方沖地震が起きました。実は、震源に一番近い観測点 GPS でしたので、ややモチベーションもあります。それが 1062 番ですが、2003 年十勝沖地震と比べてスケールが小さいので、波動が到達する前からデータがばたばたしているのが見えてしまいます (図 10 下)。こんなデータで本当にうまく使える

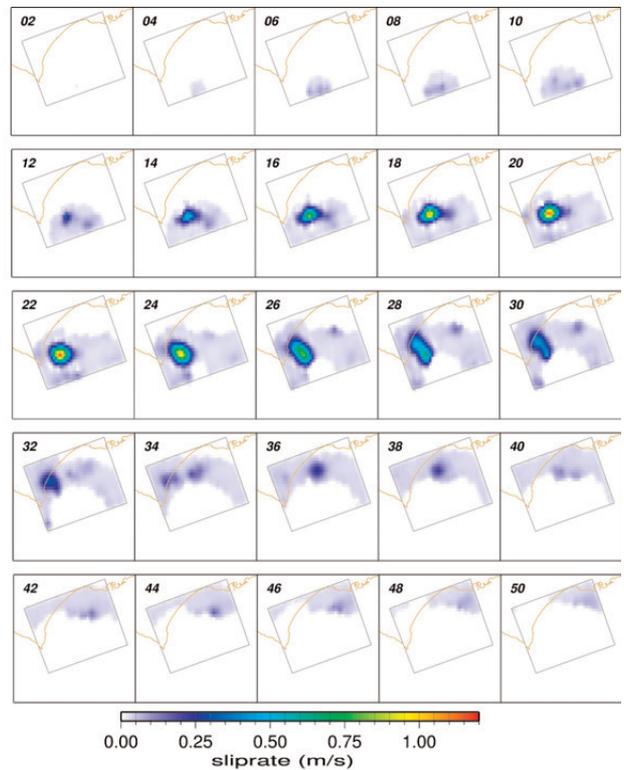


図 8 : 2003 年十勝沖地震 インバージョン結果

のかと思いますが、インバージョンをやると、強震計から出したすべり分布と大きくは変わりませんが (図 10 上)。中規模の地震の場合、GPS 単独では苦しくなってきましたが、地震計と両方を使うことで、地震計から速い変化を、そして GPS からキネマティックなすべり量をインバージョンができる、ということが言えるようになりました。

私は、さまざまな時間スケールに使えるという点が、GPS の非常にいいところだと思っています。もともと余効すべりは GPS が得意なところで、余効のイメージングの結果を使って応力の変化を調べると摩擦特性に関して少しだけ物を言うことができるようになった

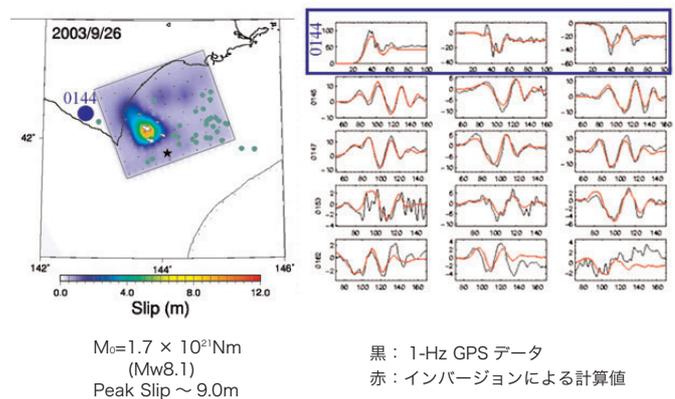
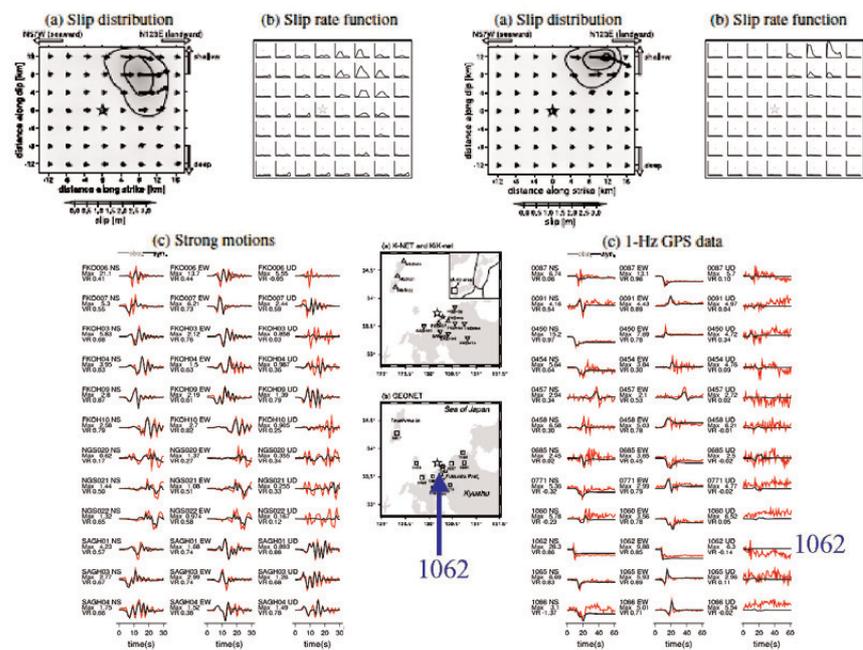


図 9 : 2003 年十勝沖地震 累積すべり量 (左) とデータに対するフィットの例

と思っています。スローイベントも得意なところですよ。

余効すべりやスローイベントといった時間スケールは、当然GPSが使えるでしょう(図1参照)。そして今回、GPSが1Hzの地震計として使えることが分かりました。同一の観測手法で破壊領域から余効変動までイメージできる可能性が出てきたわけです。そこで、残ったところをうまくつなげないかと思っています。従来は歪み計、傾斜計が得意だと言われていた時間スケールの現象に、GPSの出番があるかどうか、少し解析を始めています。実際には、米国パークフィールドにおける地震後1~2時間のデータを使って

解析しています。今日はお見せできませんが、もしかすると余効変動の始まりがうまく見えるかもしれません。そうなれば、一つでタイムスケールの短い方から長い方まで見ることができる観測手法として、GPSが非常に強力であると言えるようになります。



今月の話題

人事異動のお知らせ

■ 平成18年6月30日付

【退職】

事務長 鳴村 政義

■ 平成18年7月1日付

【採用】

助手（火山噴火予知研究推進センター） 前野 深

【配置換（転入）】

事務長 中塚 数夫
副事務長（総務担当） 青木 稔
（兼）庶務係長
経理係長 劔持 保行

【配置換（転出）】

主査（総務担当） 小宮 昌信
（兼）庶務係長
経理係長 鈴木 貴博

■ 平成18年7月16日付

【採用】

助手（地球流動破壊部門） 平賀 岳彦

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/>

著作権所有：東京大学地震研究所 2006

Copyright 2006 Earthquake Research Institute,
University of Tokyo, All rights reserved