地殻活動観測データ総合解析システムの開発
Development of Crustal Activity Data Integrated Analysis System

地理地殻活動研究センター　鷺谷　威・西村卓也・村上　亮・今給黎哲郎
Geography and Crustal Dynamics Research Center
Takeshi SAGIYA, Takuya NISHIMURA,
Makoto MURAKAMI, Tetsuro IMAKIIRE

（株）富士総合研究所　赤坂　望
Fuji Research Institute Corporation　Nozomu AKASAKA

要　旨

地理地殻活動研究センター地殻変動研究室では，総合技術開発プロジェクト「地殻活動観測データの総合解析技術の開発」の一環として，地殻活動観測データ総合解析システムを開発した。このシステムは三角測量，水準測量，GPS 等の様々な地殻変動データを，統一したユーザインターフェースを介して検索･抽出し，データ解析や作図を行うことができる。本システムによって地殻活動解析における地殻変動データの活用が促進されるものと期待される。今後は観測データを常に最新のものに更新するとともにユーザからの意見を反映させてシステムの改良を図っていく必要がある。

１．はじめに

近年，日本列島には地震・地殻活動の把握を目的とする様々な観測機器が高密度で設置され，大量かつ高精度の観測データが毎日，しかもリアルタイムで取得されるようになった。観測機器の設置場所が地表付近に限られているという制約はあるものの，地球の表面に聴診器を押し当てて内部の鼓動に24時間耳をすませるような常時モニタリングが現実のものになったのである。こうした観測網の高度化により，沈み込み帯における低周波微動の発見（Obara, 2002）など新たな知見が得られつつある。次なる課題は，大量のデータを効率的に処理し，地球内部で起きている現象を正しく解釈・モデル化することである。このような方向性を追求することで我々の地震・火山等の地殻活動現象に対する理解が一層進み，こうした現象の実用的な予測に道が開けると期待される。最近では物理法則に基づく数値シミュレーションを行って地球内部で進行する物理過程を再現する試みも行われるようになっているが，こうしたモデルの妥当性を検証するために観測データは必要不可欠なものである。

建設省総合技術開発プロジェクト（省庁再編に伴い現在は国土交通省の総合技術開発プロジェクト）「地殻活動観測データの総合解析技術の開発」は，こうした観測網の充実を踏まえ，様々な地殻活動観測データをユーザが使い易いような形で整理するとともに，観測データから必要な情報を効率よく取り出すための解析手法開発，また解析結果を利用した観測網の最適配置検討などを有機的に行えるようにすることを目的として平成10年度から実施された。本稿で紹介する地殻活動観測データ総合解析システムは本プロジェクトの一環として開発されたものである。

国土地理院においては，明治時代以来約120年の長きにわたって三角測量，水準測量，験潮などの観測データが蓄積されてきた。こうしたデータは1891年濃尾地震や1914年桜島噴火を始めとして，過去に発生した大地震や火山噴火などの非常に稀な自然現象に関連する情報を含んでいる。こうした現象の繰り返し周期は長いものでは数千年～数万年にも及ぶと考えられ，また，そもそも全く同じ現象が繰り返すことが有り得ない。従って，高精度の観測データが蓄積されつつある現在においても，過去の観測データの価値が失われることはない。むしろ，新たなデータを利用した再検討によって過去の事象に関する重要な情報を抽出できる可能性があるという点において，過去の観測データの重要性は次第に高まっているとさえ言える。

こうした歴史的価値を持つ観測データに加え，1990年代以降には日本全国にGPS連続観測点（電子基準点）が導入され，測定精度や取得頻度が桁違いに高い観測データが得られるようになった。GPSデータによって日本列島の地殻活動に関する我々の知識は飛躍的に増加しつつある。例を挙げればきりが無いが，大地震の余効変動の検出（Heki et al., 1997），ユーラシア大陸との相対運動の決定（Heki et al., 1999），日本列島の地殻変動速度場と歪み集中帯の発見（Sagiya et al., 2000），サイレント地震の検出（Hirose et al., 1999, Ozawa et al., 2002）など，僅か数年の間にGPS観測がもたらした新しい知見は

枚挙に暇が無い。GPS連続観測網の出現は固体地球科学にとってまさに一大ブレークスルーであり，今日の地震・地殻活動研究はGPS抜きでは成立し得ない。

このように大変重要な国土地理院の観測データであるが，これまで，三角測量，水準測量，GPS等のデータベースがそれぞれ個別に用意され，データ形式や使用法もばらばらであった。そのため，必要なデータを取得するためには個別のデータベースの操作方法を習得することから始めなければならず，かなりの労力を要した。また，研究を目的とする外部からのデータ利用申請に対しては申請があるたびに対処しており，必ずしも効率的とは言えない状況も存在する。

本総合解析システムが目指したものは，観測データを様々な目的で利用するユーザの立場に立った環境整備である。地震・地殻活動の研究者が地殻変動に関する観測データが必要になった場合に，本地殻活動観測データ総合解析システムを利用すれば，簡単な手順・操作により必要なデータをすべて入手することができるようにすることを目指した。

以下では，本システムの設計思想から具体的な使用方法まで，実例を交えながら紹介する。

２．システムの概要

２．１　本システムの特長

本総合解析システムの特長として，以下のような点を挙げることができる。

1）三角測量，三辺測量，水準測量，験潮，GPSなど異なる種類のデータを同一のデータベースシステムに収録し，統一されたユーザインターフェースを通して利用できる。

2）ネットワークを経由したサーバ・クライアント型のシステムであり，データベースサーバを１台設置すれば,ローカルエリア内で誰でも利用可能になる。

3)Webブラウザをユーザインターフェースとして用いるため，クライアントの機種を選ばず，特別なソフトウェアを用意する必要がない。また特別な訓練なしで利用できる。

4）対話式の操作により観測データの簡単な解析，データおよび結果の図示が可能である。

5）作成したデータ，図を画面表示するとともに画像ファイルとして取得することができる。図はJPEG形式およびPostscript形式で出力される。

6）有償のソフトウェアを利用せずに構築したシステムであり，配布に関する制限が少ない。

２．２　動作環境

地殻活動観測データ総合解析システムの動作環境は以下の通りである。

サーバ
- メモリ：256MB以上
- ディスク：5.0GByte以上
  その他システム運用時のスワップ領域が必要
- ＯＳ：Linux（仕様・バージョンによっては動作しない場合がある。）
- プログラミング言語：Fortran77, C, CGI(perl)
- データベース：PostgreSQL（v6.5 以上）
- WWWサーバ：Apache
- 作図：Generic Mapping Tools（version3.3.3以上）
- ユーティリティ：gzip, convert等
- ライブラリ：コンパイル時にlibpng.a, libz.aを参照

クライアント
- ＯＳ：Windows, Macintosh, Linux等特に問わない.
- Webブラウザ：Internet Explorer, Netscape等（仕様・バージョンによって正しく表示されない場合がある。）
- その他：Postscriptファイルのビューアーないし Illustrator等のドロー系ソフトウェア（必須ではない）

本システムを利用するユーザ（クライアント）はネットワークを経由してデータベースサーバにアクセスする（サーバ単独での使用も可能である)。クライアント側はWWWブラウザ以外の特別なソフトウェアを用意する必要がなく，サーバと同じローカルエリアネットワークに接続していれば良い。本システムの動作速度はサーバの計算性能およびネットワークの通信速度に依存する。

サーバについては,オープンソースのＯＳであるLinuxでの使用を想定している。システムの中核となるリレーショナルデータベースにはPosgreSQL（http://www.jp.postgresql.org/）を，WWWサーバにはApache(http://www.apache.jp)を,また作図にはGeneric Mapping Tools（Wessel and Smith, 1998）を使用している。データの内部処理にはFortran77またはCによるプログラムを使用し,ユーザインターフェイスはCGIで作成した。これらのソフトウェアは，いずれも無料で入手可能なものである。

２．３　インストール

本総合解析システムをインストールするには，まずLinuxをインストールしたワークステーションを用意し，Fortran77, Cのコンパイル環境を整える。次にリレーショナルデータベースPostgreSQL，WWWサーバーであるApache，作図ソフトであるGeneric Mapping Toolsをそれぞれインストールする。以上の環境が出来上がった後に，本総合解析システムの配布CD-ROMからデータおよびソフトウェアを導入すればインストールは終了する。

３．観測データ

本システムが扱うことのできるデータの一覧を表－１に示す。

表－１　地殻活動観測データ総合解析システムで扱うデータの概要

データ種別	概要
三角測量	三角点情報および水平角，方位角，天頂角，辺長の観測データ
水準測量	水準点情報，水準路線情報，観測比高データ
GPS連続観測	GPS観測点情報，日座標値データ
潮位観測	国土地理院の験潮場および海岸昇降検知センターに登録された験潮場の潮位データ
地殻構造データ	地殻構造探査結果に関する論文の文献情報，論文要旨および構造図

これらのデータを効率良く処理するために，表－２に示すようなデータベースを作成した。以下，各観測データの概要について説明する。

３．１　三角測量データ

三角測量データは，明治時代以降に繰り返し行われた三角測量（三等以上）および精密測地網一次基準点測量で得られた水平角，方位角，天頂角，辺長の観測データから成り，さらに三角点の位置情報を含む。各観測データは，一度の測量について複数回行われた測定の平均値のみを収録しており，角度，辺長などは楕円体上の値に補正されている。三角点の座標値を得るためには網平均計算が必要となるが，同じ三角点間の角度や辺長が異なる時期に複数回測定されていれば，その変化分から地殻変動に関する情報が得られる。

３．２　水準測量データ

水準測量データは，各水準点の情報，水準路線に関する情報，水準点間の観測比高，水準点の履歴情報から成る。水準測量においては往復の観測が実施されるが，本システムでは往復の平均値のみを収録している。

３．３　GPS連続観測データ

国土地理院では各GPS観測点で取得された位相データを世界標準のデータ形式であるRINEX形式で保存･データベース化している。しかし，本総合解析システムでは，このRINEX形式の位相データではなく，日本全国の位相データをルーチン処理して得られた各観測点の日座標値を収録した。RINEX形式の観測データは，専門的なGPS解析ソフトを使用した解析を行わないと位置情報を得ることができないうえ，１点１日あたり圧縮しても200-300KB程度のディスク容量を必要とする。1000点のRINEXデータを１年分格納するために必要なディスク容量は100GB程度になってしまい，CD，DVD等を使っても大量の媒体が必要となる。こうした物理的制約を抜きにしても，RINEXデータから解析を行うユーザ数と比べて，国土地理院のルーチン解析による日座標値のデータに対する需要の方がはるかに多いと考えられる。そこで，本総合解析システムではGPSの日座標値のみを収録した。

また，各GPS観測点の履歴情報（受信機，アンテナの種類，アンテナ交換時期等）もデータベースに収めている。

３．４　潮位観測データ

潮位観測データとして，国土地理院および海岸昇降検知センターに登録された験潮場の潮位データを収録した。ただし，国土地理院の験潮場については時間値を，海岸昇降検知センターについては月平均値を基本データとしており，基本データよりも長い期間の平均値（例えば月平均値に対する年平均値）は基本データから算出されるが，短い期間のものは当然のことながら利用できない。

各験潮場について，位置や験潮儀の種類，観測期間等の情報もデータベース化している。

３．５　地殻構造データ

本システムでは，日本列島周辺の地殻構造に関する論文の文献情報，論文要旨，主要な図を収録し，地図上で検索を行うことができる。システム管理者が指定されたフォーマットで情報を用意することにより，情報の追加，削除も可能である。

４．データ解析機能

地殻活動総合解析システムは以下に説明するようなデータ解析機能を持つ。データ解析手法には様々なものがあるが，今回システムに組み込む解析機能としては，観測データの一次処理に類するもの，または解析手法に対する結果の依存度が低く，誰が解析してもほぼ同じ結果が得られるものに限った。

４．１　三角網平均

三角網平均のプログラムとしてはKomaki(1993a,1993b)による網平均プログラムを組み込んだ。本システムでは，三角測量データを検索した後，抽出されたデータから三角網平均の入力データを自動的に生成し，網平均計算を行うことができる。また，ユーザが予め作成した網平均用のデータをサーバに送信して計算を行うことも可能である。

４．２　水準網平均

水準網平均計算は環を含む複数の水準路線の比高データについて，環閉合差を網全体に分配させるような計算である。本システムにおける水準網平均計算では，各観測比高データは水準点間の観測距離の逆数に比例する重みを与えられ，最小二乗法によって観測比高に対する補正量が計算される。広い地域にわたる水準測量データを同時に処理して上下変動の分布を求める際には有効な解析手法である。

４．３　GPSデータの解析手法

４．３．１　変位速度場の推定

表－２　地殻活動観測データ総合解析システムのデータベース一覧

データベース名	概要	システムが参照するデータベース名	参照する sql テンプレートファイル名
三角点データベース	約 40,000 点におよぶ三角点の位置情報等を格納する.	sankaku	bench-obs.sql
一等三角測量データベース	一等三角測量に関するデータ（1882-1973 年）を格納する.	sankaku1	bench-std.sql
一等補点三角測量データベース	一等補点三角測量に関するデータ（1928-1950 年）を格納する.	sankaku1d	bench-std.sql
二等三角測量データベース	二等三角測量に関するデータ（1883-1931 年）を格納する.	sankaku2	bench-std.sql
三等三角測量データベース	三等三角測量に関するデータ（1884-1971 年）を格納する.	sankaku3	bench-std.sql
三辺測量データベース	三辺測量に関するデータ（1973-1993 年）を格納する	sanpen	bench-std.sql
天頂角測量データベース	天頂角の測量に関するデータ（1882-1973 年）を格納する	choten	bench-choten.sql
水準測量データベース	約 26,000 点におよぶ水準点のデータおよび水準測量による比高データ（1883 年以降）を格納する	suijun	level.sql
GPS 連続観測データベース	GPS の日座標値データ（1994 年以降）を格納する.	gps_coord	gps-coord.sql
ステップデータベース	GPS 観測点の移転，アンテナ交換等により座標の跳びが生じた期間に関するデータを格納する.	gps_step	gps-step.sql
国土地理院験潮場データベース	国土地理院の 26 験潮場に関する情報を格納する.	tide	tide-obs.sql
国土地理院潮位観測データベース	国土地理院験潮場の潮位観測データを格納する．時間潮位は 1930 年以降，日平均潮位は 1880 年代以降	tidexxx（xxx は験潮場番号）	-
海岸昇降検知センター潮位観測データベース	海岸昇降検知センターに登録された約 130 験潮場の月平均潮位観測データを格納する.	tide_coast	tide-coast.sql
地殻構造文献データベース	地殻構造に関する文献情報を格納する.	chiken_cstr	study.sql
三角測量用画像データベース	三角測量関係の画像情報を格納する.	map_bench	mat-std.sql
水準測量用画像データベース	水準測量関係の画像情報を格納する.	map_level	map-level.sql
GPS 連続観測用画像データベース	GPS 連続観測関係の画像情報を格納する.	map_gps	map-std.sql
地殻構造文献用画像データベース	地殻構造文献関係の画像関係情報を格納する.	map_cstr	map-std.sql

本システムでは，GPS連続観測で得られた日座標値に対して次の近似式による当てはめを行い，直線部分の傾き（b_i）から変位速度を推定している。

$$x_i(t) = a_i + b_i t + c_i \sin(2\pi t) + d_i \cos(2\pi t) + \sum_{k=1}^{K} e_i^k H(t - t_k) \quad (i = 1,2,3) \qquad (1)$$

（1）式において右辺の第３，第４項は年周変化を，第５項は地震，アンテナ交換等により生じたステップを表す。最小二乗法により各観測点の座標成分毎にモデルパラメータの推定が行われる。

４．３．２　連続的な変位・歪み場の推定

本総合解析システムには各 GPS 観測点における変位（ないし変位速度）ベクトルをデータとして歪み（ないし歪み速度）の連続的な分布を推定する解析プログラムを導入した。連続的な歪み分布の計算方法は Shen et al. (1996)によるものである。以下では変位ベクトルを入力として歪み分布を計算する方法について述べるが，変位の代わりに変位速度をデータとして用いれば歪み速度の分布が得られる。

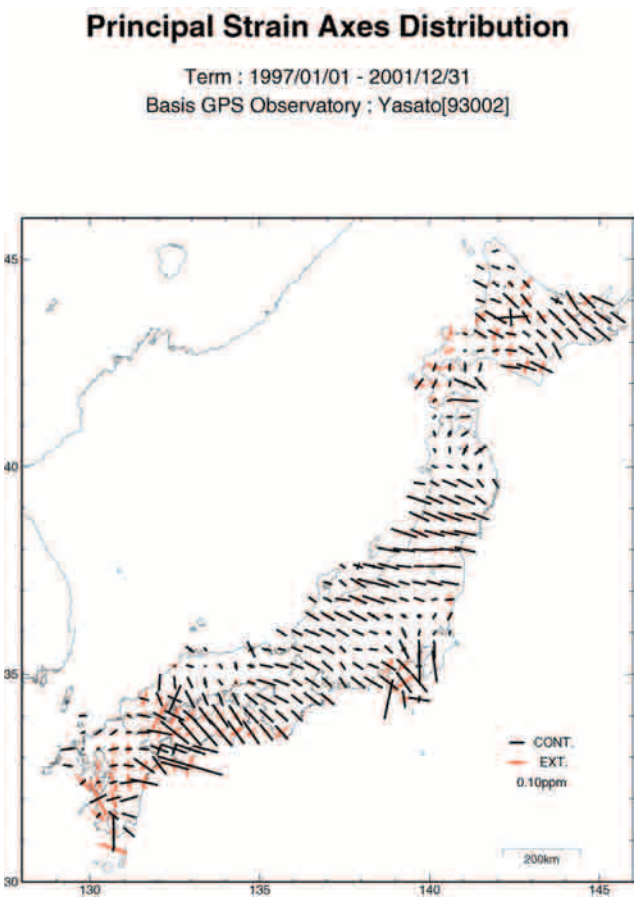
$$\begin{pmatrix} U_x^i \\ U_y^i \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \Delta x_i & \Delta y_i & 0 & \Delta y_i \\ 0 & 1 & 0 & \Delta x_i & \Delta y_i & -\Delta x_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ e_{xx} \\ e_{xy} \\ e_{yy} \\ \omega \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \varepsilon_x^i \\ \varepsilon_y^i \end{pmatrix} \qquad (2)$$

（2）式は GPS 観測点における水平変位成分（U^i_x，U^i_y）と格子点（計算点）における変位成分（u_x，u_y）および歪成分 e_{ij}，剛体回転 ω の間の観測方程式である。（Δx_i，Δy_i）は観測点と格子点の座標差である。各格子点につき３点以上の GPS 観測点に関する観測方程式を連立させて解けば，格子点における変位，歪の各成分を推定することができる。また，ε^i_x と ε^i_y は観測誤差およびモデル誤差の両方を含む量であり，

$$\varepsilon^i_{x,y} = \sigma^i_{x,y} \exp\left(\Delta R_i^2 / 2D^2\right) \qquad (3)$$

という形で元々の観測誤差に観測点と格子点間の距離に応じたガウス型の重みを乗じている。ここで $\Delta R_i = \sqrt{\Delta x_i^2 + \Delta y_i^2}$，$\sigma^i_{x,y}$ は変位推定の誤差（観測誤差），D は距離に関する重みを規定するパラメータで，ユーザが指定することができる。計算の際には格子点からの距離が $2D$ 以内の観測点の変位ベクトルが用いられ，それより遠方の観測点は計算から省かれるように設定されている。また，計算は５点以上の観測データが利用可能な格子点についてのみ行われる。

こうした解析により GPS 観測データから得られた歪み分布を歪み主軸で表現した例を図－１に示す。



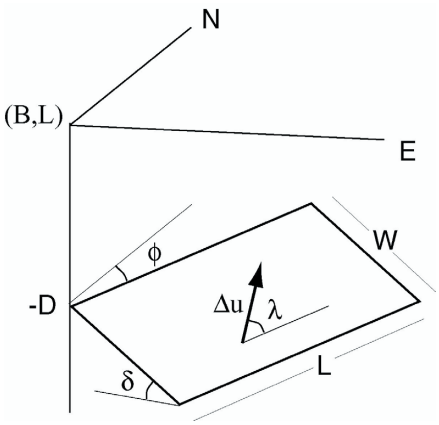
図－１　GPS データから推定した日本列島の歪み主軸分布

４．４　断層モデル解析

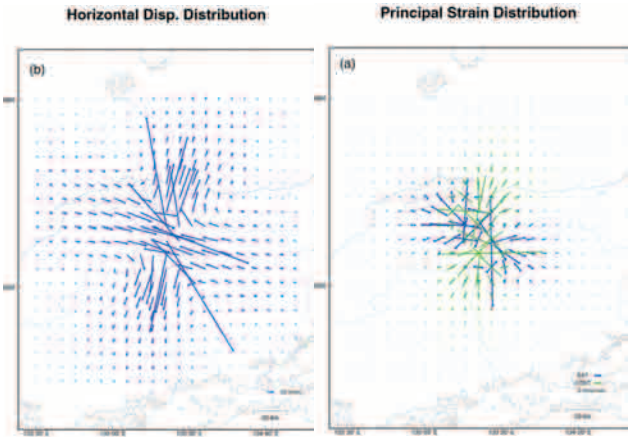
本システムには矩形断層モデルを用いた地殻変動データの順解析および逆解析機能を組み込んだ。

４．４．１　順解析

本システムのモデル解析機能では，震源の種類として等方性点震源（いわゆる茂木モデル）または有限サイズの矩形断層における断層すべりまたは開口変位を仮定し（両者の組み合わせも可），それに伴う地表の地殻変動や歪みの分布を計算，図示することができる。入力する断層パラメータのフォーマットは佐藤・他(1989)に従い，図－２のように定義されている。入力する点震源や矩形断層の数は初期状態で最大各３個ずつであるが，「追加」と書かれたボタンをクリックすることにより数を増やすことが可能である。また，定められた書式に従って予め用意した断層パラメータファイルを，Web 上の操作でサ



図－２　断層パラメータの定義．緯度(B)，経度(L)，深さ(D)，長さ(L)，幅(W)，走向(φ)，傾斜(δ)，すべり角(λ)，すべり量(Δu)．



図－３　2000 年鳥取県西部地震の断層モデルに基づく地殻変動分布の計算結果．（左）水平変動，（右）主歪み軸

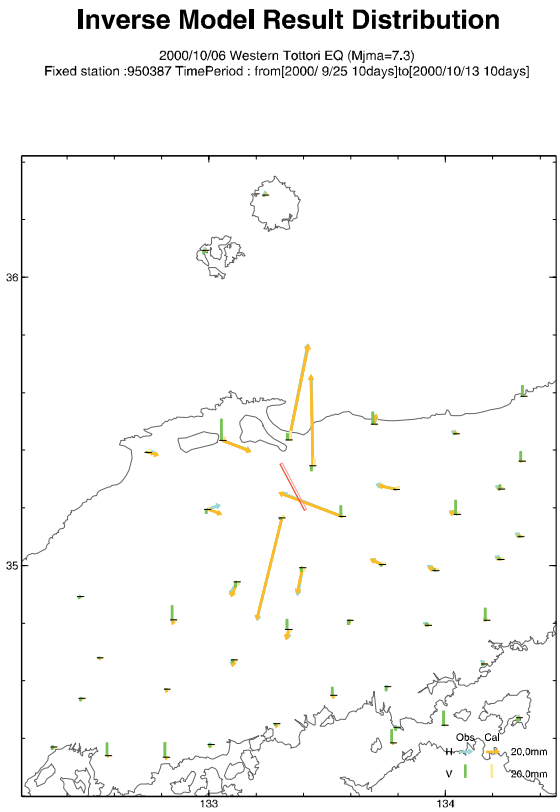
ーバに送信して入力することもできる。

地殻変動を計算する点については，実際の観測点等の座標を Web 上で直接またはファイル入力することができるほか，緯度・経度で範囲を指定して規則的な格子点で計算を行うことも可能である。計算結果については，数値がテキストファイルで出力されるのに加え，変位，歪み等の分布を作図することもできる。その際，変位や歪みの大きさに合わせてカラースケールの値を自分で調節することも可能である。図－３は鷺谷・他（2002）による 2000 年鳥取県西部地震の断層モデルパラメータを与えて，震源域周辺の水平歪みおよび主歪み軸を計算した結果である。この他に，上下変動，面積歪み，最大剪断歪み，傾斜などの分布図を作成することが可能である。

４．４．２　逆解析

本システムの逆解析機能では，入力された地殻変動データを説明するような断層モデルのパラメータを推定する。

入力可能な地殻変動データは，現状では変位ベクトルのデータのみである。推定されるモデルパラメータは矩形断層については（緯度，経度，深さ，長さ，幅，走向，傾斜，すべり角，すべり量，開口量）の 10 個であり，等方性点震源に対しては（緯度，経度，深さ，体積増加量）の４つである。モデルパラメータと観測データとの関係が非線形であるため，パラメータ推定は非線形最小二乗法によって行われ，各モデルパラメータには初期値および先験的誤差の設定が必要である。あるモデルパラメータの先験的誤差を小さくすれば，そのパラメータを初期値に対して強く拘束することになり，逆に先験的誤差を大きくすれば広いパラメータ範囲で最適解を探すことが可能になる。非線形最小二乗法においては，収束した結果が最適解であることが保証されないため，初期値を変えながら解析を繰り返し，初期値に依存せず似たような結果が得られることを確認する必要がある。

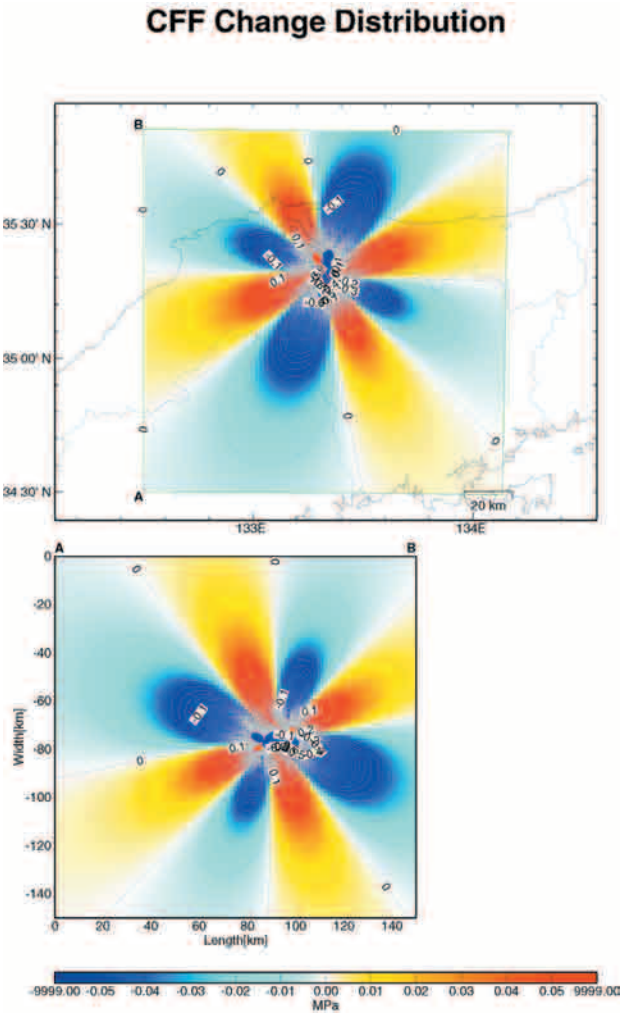


図－４　2000 年鳥取県西部地震に伴う断層モデル（赤で表示）の推定結果と観測された変位データの比較

図－４は本システムを用いて2000年鳥取県西部地震に伴う地殻変動から断層モデルを推定した結果を示す。推定された断層モデルによって観測データが殆ど完璧に再現されているが，この断層は余震分布等から推定される断層位置や地震波形データから推定された震源モデルとも良く一致している。

４．４．３　クーロン応力変化解析

地球内部で大地震が発生すると震源域の周辺では断層運動によって顕著な応力変化が生じる。地球内部に仮想的な断層面を考えると，この断層面では周囲で発生した大地震によって，断層面に垂直な方向の法線応力および断層面上の剪断応力が変化する。法線応力の増加は断層面の摩擦抵抗を大きくするので（摩擦係数が一定とした場合）この断層面の破壊を抑制するような効果を持ち，剪断応力の増加は断層面の破壊を促進する効果を持つ。こうした法線応力と剪断応力の効果を総合的に評価する指標としてクーロン破壊関数（クーロン応力変化，ΔCFF）がある。



図－５　2000年鳥取県西部地震によるクーロン応力変化の計算例

クーロン破壊関数は以下の式で定義される．

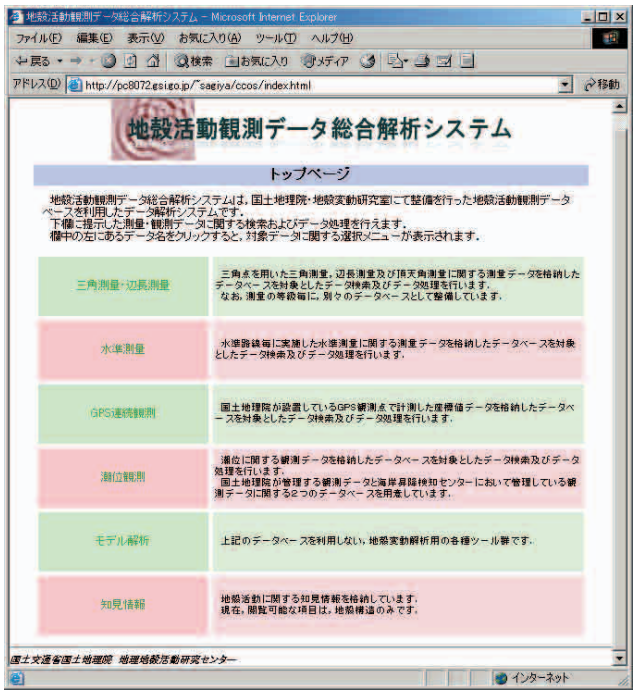
$$\Delta CFF = \Delta\tau - \mu\Delta\sigma_n \qquad (4)$$

ここで，$\Delta\tau$は剪断応力の変化を，$\Delta\sigma_n$は法線応力の変化を表す．ΔCFFが正であれば，その断層面は破壊により近づき，負であれば破壊から遠のいたことになる。大地震に伴う応力変化は，断層面の向きが異なると，たとえ同じ場所でもΔCFFが全く逆センスになる場合もあるので注意が必要である。また，法線応力の変化分との積の形で表れる摩擦係数μは0.2-0.6程度の値が用いられる場合が多いが，不確定性の大きい物理量である。

Nishimura et al.(2001)はクーロン破壊関数を用いた計算により，1998年9月に発生した岩手県内陸部の地震(M6.1)が岩手山のマグマ貫入に伴う応力変化で誘発されたこと，また地震に伴う応力変化でマグマ活動が衰えたことに対する説明を与えた。本システムを用いてこうした計算を行うことが可能である。

本システムでは，震源要素として複数の矩形断層ならびに等方性点震源を仮定することができ，クーロン応力変化は地球内部の任意の走向，傾斜を持つ平面上で，任意の断層メカニズムについて計算，図示することができる。

図－５は，本システムを持ちいて，2000年鳥取県西部地震の断層モデルに基づき，深さ5kmで震源と同じメカニズムを持つ断層すべりに対するクーロン応力変化の分布を図示した結果である。クーロン応力変化の正負は複雑な分布をするが，震源から北北西方向に伸びた赤い（すなわち正のクーロン応力変化を持つ）領域では，本震後に多数の余震が発生しており，これらの余震が本震によって誘発された可能性が高いことを伺わせる。このように，クーロン応力変化の計算は，大地震等に伴う周囲への影響を見積もる際に有効な手法である。



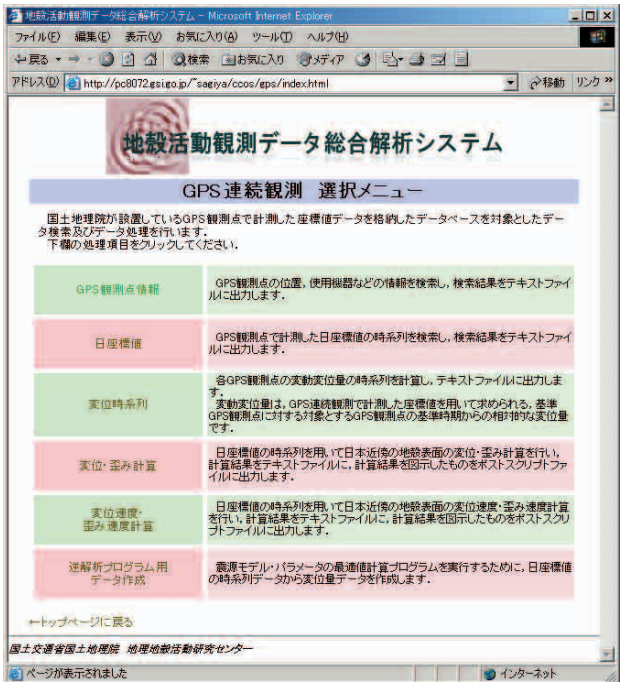
図－６　地殻活動観測データ総合解析システムのトップページ

５．操作方法

以下では,本システムの具体的な操作方法を解説する。

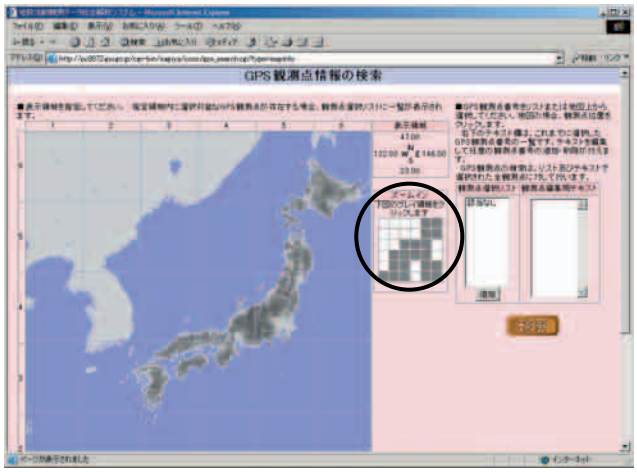
クライアントからWWWブラウザを用いて本システムを導入したサーバにアクセスすると，図－６のような画面が表示される。これが，本システムのトップページである。

ここでは,GPS連続観測データの処理を例として解説する。トップページから「GPS連続観測」を選択すると図－７のようなページが表示される。このページに表示されているように，「GPS観測点情報」「日座標値」「変位時系列」「変位・歪み計算」「変位速度・歪み速度計算」「逆解析プログラム用データ作成」から処理を選ぶことができる。

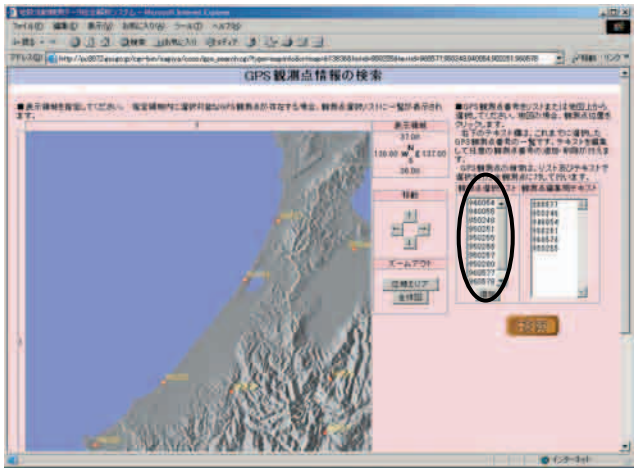


図－７　GPS連続観測の選択メニュー

図－７から「GPS観測点情報」を選択すると，GPS観測点を「矩形領域選択」するか「地図選択」するかを訊かれる。矩形領域選択では，南西端と北東端の緯度経度を入力すると，その範囲内の観測点がすべて選択される。一方，地図選択では，図－８の画面が表示される。画面左側に経線，緯線で区分された日本地図が表示される，画面中央付近に表示された矩形領域（図中の丸で囲った部分．灰色は選択可能，白は選択不可）をマウスでクリックすると，該当個所の地図が拡大表示される。この操作を繰り返すと,最終的には図－９のようにGPS観測点を含む地図が表示される。この地図上で観測点を示す赤い丸印をクリックするか，右側に表示されている地図範囲中の観測点一覧（図中の丸で囲った部分）から情報を調べたい観測点を選択し,「検索」ボタンを押すと，図－10のように該当するGPS観測点に関する情報が表示される。図－10に表示された情報はテキストファイルとしてダウンロードすることも可能である。



図－８　地図選択画面

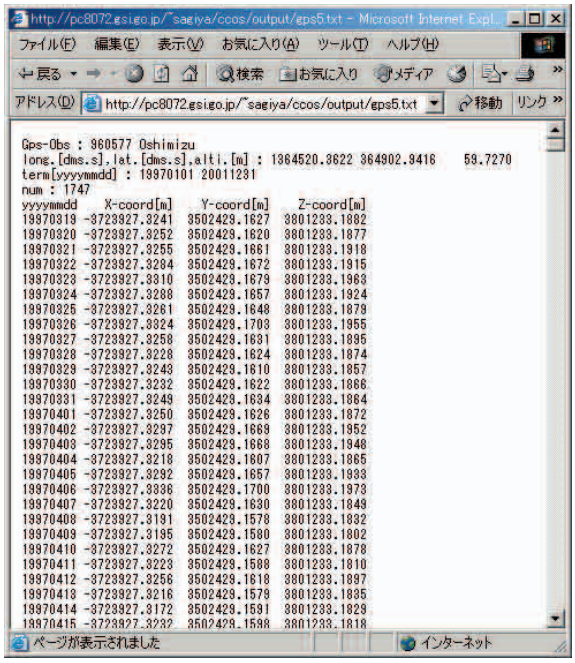


図－９　GPS観測点の選択画面

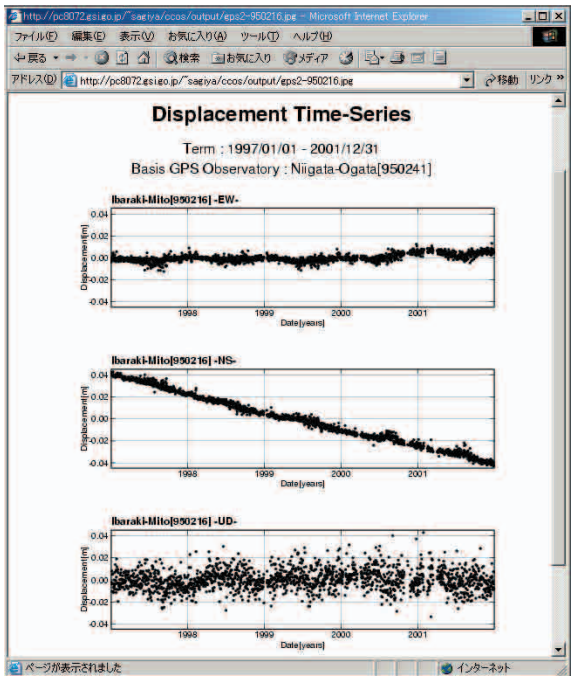
図－10　GPS観測点情報の表示結果

なお，ここで説明した地図検索の方法は，三角測量，水準測量等のデータを検索する際にも同様である。

次に，GPS連続観測メニューから「日座標値」を選択すると，上で述べたのと同様な観測点選択の手順を経て，該当する観測点の日座標値データをダウンロードすることができる。図－11は日座標値の検索結果を示す。ユーザはこうして観測点の日座標値を入手し，独自の解析に用いることができる。

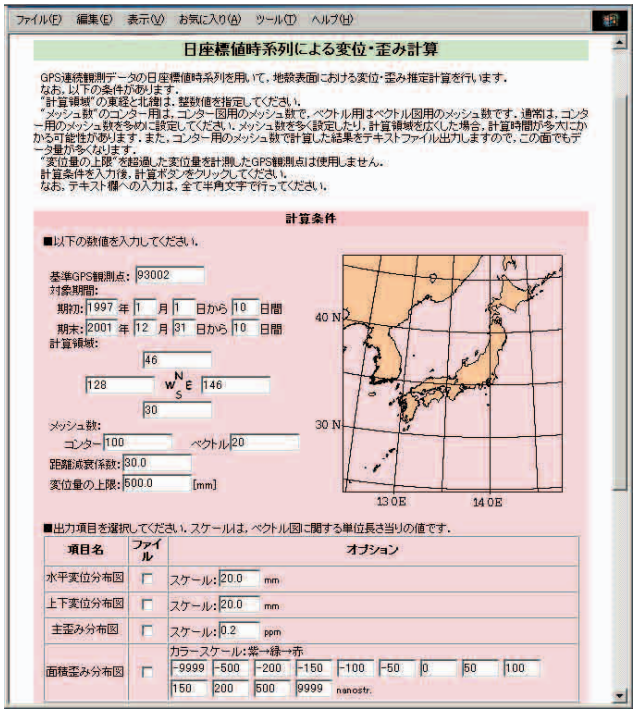


図－11　GPS日座標値の検索結果

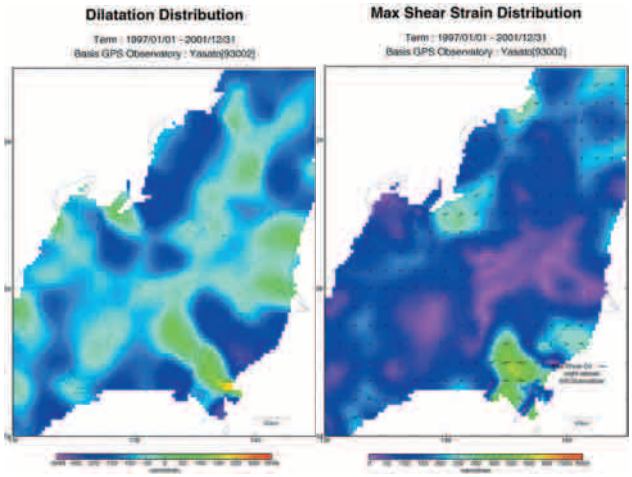


図－12　GPSの変位時系列の表示例

次に，「変位時系列」メニューからは観測点の座標値変化を図示することができる。観測点の選択方法は上で述べたものと同様であるが，変位を計算するために固定点を指定する必要がある。こうして変位時系列を表示した例を図－12に示す。



図－13　変位・歪み計算のメニュー画面



図－14　GPSの変位データに基づいて計算した面積歪み（左）および最大剪断歪み（右）の分布図

「GPS連続観測」メニューから「変位・歪み計算」を選択すると，4.3.2.で述べた変位場および歪み場の計算を行うことができる。図－13に示すメニュー画面において，変位を計算する対象期間の定義，計算範囲，計算範囲の分割数，距離減衰定数，異常値として取り除かれる観測

データの下限値などを入力するとともに,水平変位分布,上下変位分布，主歪み分布，面積歪み分布，最大剪断歪み分布，回転分布，数値データから出力形式を選択（複数選択可能）して，計算を開始する。

本システムで計算・作図された歪み分布の計算結果を図－14に示す。こうした結果から,変形の大小や地域による変形様式の違いが明白となることが分かるだろう。本システムの開発により.このような解析を簡単な操作で行うことが可能になり,GPSを始めとする地殻変動データの利用が大いに促進されるものと期待される。

「GPS 連続観測」メニューの最後は「逆解析プログラム用データ作成」である。この機能を利用すると，指定された期間，領域のGPS日座標データから変位ベクトルデータを生成し，そのまま逆解析プログラム（4.4.2.で説明したもの）による解析に進むことができる。

６．システム管理

本システムの配布用 CD-ROM にはソフトウェアおよび観測データ，地図データなどの必要な情報がすべて収められているが，特に水準測量，GPS，潮位などの観測データは年々増えていくため，本システムの利用価値を高めるためにも観測データの逐次追加・更新が必要不可欠である。

そこで，本システムでは，PosgreSQL のデータベース管理ツール psql を利用して,本システムするためのコマンドを作成した。例えば，GPS 連続観測データに関しては以下のような処理を行うことができる。

・GPS 観測点情報の新規登録
・GPS 観測点情報の更新登録
・GPS 観測点情報の削除
・コメントデータの新規登録
・日座標値のインポート
・地図画像の更新

国土地理院が用意した追加用のデータファイルおよびコマンドを適宜利用先に配布し,各システム管理者がコマンドを実行することで，データベースを最新の状態に維持することができる。

また，GPS 観測については，上述の機能を利用すると国土地理院以外の観測点をユーザが定義し，データを登録して，国土地理院のデータと合わせて利用することも可能である。ただし，その場合，国土地理院のGPS日座標値は全ての観測点について観測点間の相対的な位置関係が正しく保たれているのに対し，ユーザが新規に定義した観測点のデータはそうした関係が保たれていない場合が多い。従って，独自の観測点を定義して本システムを利用する場合には十分な注意が必要である。

本システムで作図をする際の配色，地図投影方法など様々な描画特性は初期値ファイルを用いて設定している。従って，この初期値ファイルを修正することにより，システム管理者は本システムをカスタマイズすることが可能である。Generic Mapping Tools で指定可能なパラメータの殆どが初期値ファイルで定義されているため，その自由度は大変高い。初期値ファイルの場所や各パラメータの内容等については，本システムのマニュアルを参照されたい。

７．終わりに

本システムでは，収録するデータの範囲を実際の測定の際に取られた生の値ではなく，様々な処理を施された後の座標値のような最終成果物でもなく，比高や角度，辺長などの値とした（GPS 連続観測については処理された後の日座標値である)。これは,必ずしも測量作業に詳しくないユーザが，できる限り原データに近い情報を利用可能にすることを目指した結果である。測量における真の意味での原データは測量手簿ということになるが，一般論として言えば，手簿に記載された各数値は地殻活動解析を行うユーザが理解するには複雑過ぎる。また，そのような情報を取り込もうとすれば，観測手簿のイメージを電子化する作業も必要となる。このような事情から本システムでは測量手簿を収録するデータの対象として考えなかった。しかし，これは本システムが地殻活動解析を行うユーザを想定したためであり，原データの管理者である国土地理院として行うべきデータ管理は事情が異なる。鷺谷(2003)は 1918 年大町地震に伴う上下変動データの再検討を行ったが，その際には今回システムに取り込んだ比高データそのものに誤りがあり，事の真相を探るには水準測量の観測手簿まで遡ることが必要であった。こうした例が端的に示すように，観測手簿は 100 年以上かけて蓄積された人類共有の財産である。判読が可能な今のうちに全ての観測手簿を画像として電子化しておくことが大変重要だと思われる。

データベースシステムは，いわば人類の営みをまとめて記録して後世に伝えるためのものであり，使い易く役に立つデータベースを構築することは大変重要な仕事である。これまで，国土地理院で構築されてきた様々なデータベースに（少なくともユーザの目から見た場合）不十分なところがあったとすれば，その原因はユーザの数が少なかったということに尽きるであろう。データベースシステムは，より多くのユーザに触れられ，より多くの批判を浴びることにより，より良いものへと進化し，長期間にわたって使われ社会に貢献するようになるはずである。

本システムはようやく最初の版を世に送り出すとことまでたどりついた段階であり，まだまだ修正すべき点が多い。また，収められたデータそのものにも，転記や入力の際に生じた間違いが散見されるはずである。そのた

め，できるだけ多くの方に本システムを使って頂き，修正点やデータの誤りを洗い出すと同時に，システムそのものを改良していくための意見を頂ければ幸いである。

本システムの試用を希望する場合は，国土地理院地理地殻活動センター地殻変動研究室までご連絡頂きたい。データおよびソフトウェアの利用条件に関する同意書を提出頂いた上で本システムのCD-ROMを提供する。

参考文献

Heki, K., S. Miyazaki and H. Tsuji, Silent fault slip following an interplate thrust earthquake at the Japan trench, *Nature*, **386**, 595-598, 1997.

Heki, K., S. Miyazaki, H. Takahashi, M. Kasahara, F. Kimata, S. Miura, N. Vasilenco, A. Ivashchenco and K. An, The Amurian plate motion and current plate kinematics in Eastern Asia, *J. Geophys. Res.*, **104**, 29147-29155, 1999.

Hirose, H., Hirahara, K., Kimata, F., Fujii, N., and Miyazaki, S., A slow thrust slip event following the 1996 Hyuga-nada earthquakes beneath the Bungo Channel, southwest Japan, *Geophys. Res. Lett.*, **26**, 3237-3240, 1999.

Komaki, K., Horizontal crustal movements revealed by geodetic measurements -On the methods for estimating horizontal crustal movements-, *Bull. Geogr. Surv. Inst.*, 39, 1-43, 1993a.

Komaki, K., Horizontal crustal movements revealed by geodetic measurements –applications of a new method for Estimating displacement vectors-, *J.Geod.Soc.of Japan*, 39, 387-410, 1993b.

Nisihmura, T., S. Fujiwara, M. Murakami, M. Tobita, H. Nakagawa, T. Sagiya, and T. Tada, The M6.1 earthquake triggered by volcanic inflation of Iwate volcano, northern Japan, observed by satellite radar interferometry, *Geophys. Res. Lett.*, **28**, 635-638, 2001.

Obara, K., Nonvolcanic Deep Tremor Associated with Subduction in Southwest Japan, *Science*, **296**, 1679-1681, 2002.

Ozawa, S., Murakami, M., Kaidzu, M., Tada, T., Sagiya, T., Hatanaka, Y., Yarai, H., and Nishimura, T., Detection and Monitoring of Ongoing Aseismic Slip in the Tokai Region, Central Japan, *Science*, **298**, 1009-1012, 2002.

鷺谷威，1918年大町地震の震源断層モデル－水準測量データの再検討と関連データの総合的解釈に基づく新たなモデル－，地震，投稿中，2003.

Sagiya, T., S. Miyazaki, and T. Tada, Continuous GPS Array and Present-day Crustal Deformation of Japan, *PAGEOPH*, **157**, 2303-2322, 2000.

鷺谷威，西村卓也，畑中雄樹，福山英一，W. L. Ellsworth，2000年鳥取県西部地震に伴う地殻変動と断層モデル，地震，54，523-534，2002.

Shen, Z., Jackson, D. D., and Ge, B. X., Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements, *J. Geophys. Res.*, 101, 27957-27980, 1996.

佐藤良輔，岡田義光，鈴木保典，阿部勝征，島崎邦彦，日本の地震断層パラメター・ハンドブック，鹿島出版会，390pp.，1989.

Wessel, P. and W. H. F. Smith, New, improved version of the Generic Mapping Tools released, *EOS Trans. AGU*, **79**, 579, 1998.