

新しい地震活動等総合監視システム (EPOS) における地殻変動監視手法の改善

Improvements of Crustal Movement Monitoring Methods in the New Earthquake Phenomena Observation System (EPOS)

露木貴裕¹, 長谷川浩², 近澤 心³, 木村久夫⁴, 棚田理絵⁴, 沼野あかね⁵
 Takahiro TSUYUKI¹, Hiroshi HASEGAWA², Shin CHIKASAWA³, Hisao KIMURA⁴, Rie TANADA⁴
 and Akane NUMANO⁵

(Received December 28, 2016: Accepted June 30, 2017)

1 はじめに

気象庁では、東海地震予知のため、東海及びその周辺地域に設置されているひずみ計等の地殻変動データをリアルタイムで収集し、地震活動等総合監視システム (以下、EPOS という) で処理・監視を行っている。2015 年度には EPOS の更新整備が図られ、第五世代のシステム (以下、世代を明記する場合には EPOS1~EPOS5 と記す) へと更新された。

木村・他 (2012) は、EPOS4 における異常監視処理の改良について報告するとともに、EPOS における地殻変動データ処理の流れについて説明しているが、EPOS5 ではこうした EPOS4 以前のシステムに実装された処理を基本的には踏襲しつつも、タンクモデルによる降水補正 (木村・他, 2015) や地殻変動データのスタッキング (宮岡・横田, 2012) などの新しい手法を取り入れている。また、すべり位置推定の手法についても、中村 (2005) の方法に加えて新たな推定の手法を導入した。さらに、地理情報を含む監視情報の出力フォーマットに GeoJSON フォーマット (Butler et al., 2008) を採用することにより、統一的な監視画面で、監視者が現在の地殻変動の状況を一見して分かるようにすることを目指した。

本報文では、EPOS5 の地殻変動データ処理・監視について、新しく導入した地殻変動監視手法を中心に報告する。

2 システムの概要

EPOS は正副 2 台の冗長構成となっているサーバ群において地震や地殻変動のデータが 24 時間リアルタイムで処理されており、BCP (業務継続計画) の観点から気象庁本庁と大阪管区气象台において、同一の処理がなされている。地殻変動データの処理・監視は主として地殻サーバで行われる。

各観測点からの地殻変動データは、観測機関と観測種目に応じて、リアルタイムに伝送されるデータと非リアルタイムに伝送されるデータに大別される (図 1)。リアルタイムデータは、各観測点のテレメータ装置から WIN フォーマット (卜部, 1991) により気象庁本庁及び大阪管区气象台の中枢局装置へデータが伝送され、EPOS は中枢局装置の配信装置からデータ通信によりデータを取得している。一方、非リアルタイムデータは、ファイル転送により、仮想化基盤サーバ (気象庁本庁) あるいは他機関接続サーバ (大阪管区气象台) で取得され、地殻サーバへ転送される。また、地殻変動データへの降水の影

¹ 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismology and Volcanology Department
 (現所属: 東京管区气象台, Tokyo Regional Meteorological Headquarters)

² 甲府地方气象台, Kofu Meteorological Office

³ 地震火山部火山課, Volcanology Division, Seismology and Volcanology Department

⁴ 地震火山部地震予知情報課, Earthquake Prediction Information Division, Seismology and Volcanology Department

⁵ 静岡地方气象台, Shizuoka Meteorological Office

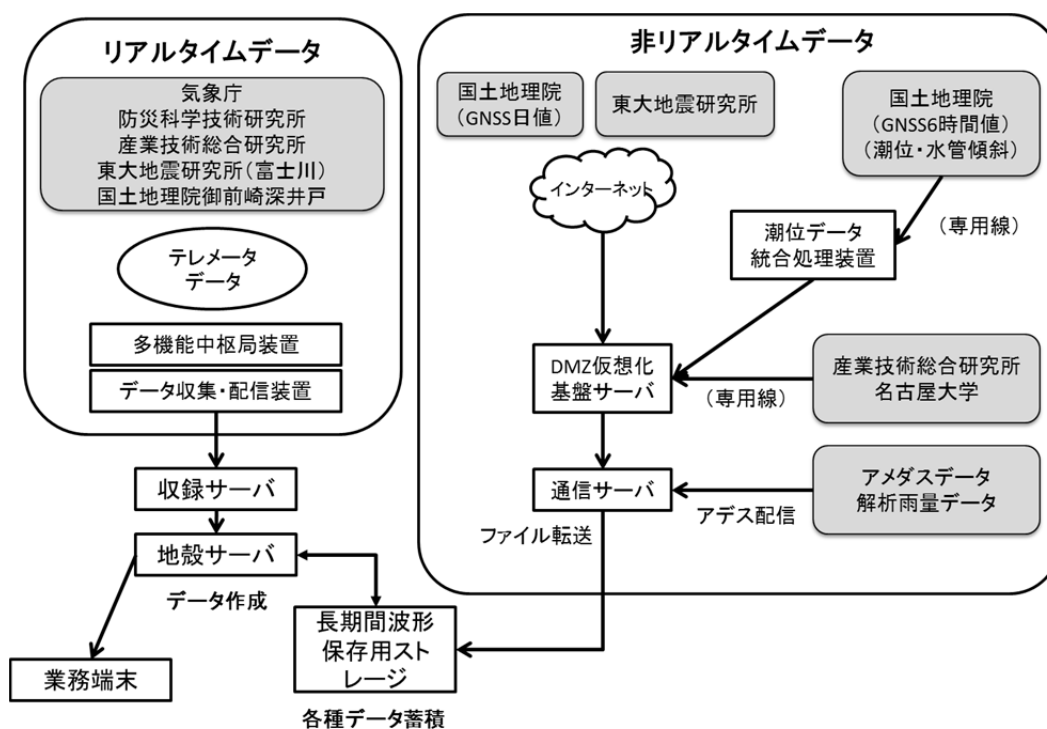


図 1 EPOS5 における地殻変動データの流れ。

響を把握し、これを補正するために、アメダスのデータ及び解析雨量のデータをアデスから通信サーバへのファイル転送により受信している。

システム内にはネットワーク接続された端末が何台もあり、X-Window システム上のアプリケーションや Web ブラウザなどのマンマシンインターフェースを通じて、サーバでの処理結果や監視情報を確認することができ、さらにその処理結果をもとに作業者が解析を行うことができる。

3 データ作成処理

3.1 データ取得処理

テレメータ系データの取得について、EPOS4 では配信装置から転送されるデータを地殻サーバで直接受信し処理する方式であったが、EPOS5 では地殻サーバの負荷軽減の観点から、収録サーバで受信・保存したデータを地殻サーバから定期的に取得する方式に変更した。取得の間隔はパラメータで設定可能であるが、現行は 10 秒ごととしており、地殻サーバの両系でそれぞれ別の収録サーバからデータ取得を行っている。収録サーバからデータを取得する方式に変更したことにより、リアルタイムからのデータ

取得の遅延は約 2 分となっている。

EPOS5 では配信装置から EPOS へのデータ流通のフォーマットとして WIN32 フォーマットが採用されたことから、地殻サーバにおけるデータ保存も、従来から用いられているフォーマット(表 1)から

表 1 従来のオンラインファイルフォーマット。

項番	項目名	型
1	論理チャンネル番号	ushort
2	物理チャンネル番号	short
3	ファイル識別子	char
4	レコード識別子	char
5	チャンネル名称	uchar[20]
6	年	short
7	月	short
8	日	short
9	時	short
10	分	short
11	有効データ数	short
12	カウント値	short[120]
13	SV データ	uchar[120]

表 2 WIN32 フォーマット.

項番	項目	サイズ	説明
ヘッダ項目			
1	フォーマット ID	8bit	0x00 固定
2	フォーマットバージョン	8bit	0x00 固定
3	予備	16bit	0x0000 固定
上記に続いて以下のレコードが 1 分間連続する			
ヘッダ項目			
4	サンプリング開始年月日	64bit	YYYYMMDDhhmmssxxx の形式で BCD
5	フレーム時間長	32bit	当該フレームのカバーする計測時間 (0.1 秒単位)
6	データブロック長	32bit	以下に続くチャンネル 1 ブロックの先頭から、フレーム時間長に含まれるチャンネル数分のブロック群の最後までまでのサイズ
チャンネル 1 ブロック項目			
7	組織 ID	8bit	気象庁の場合 0x03
8	組織内網 ID	8bit	地殻変動データは 0x20 または 0x2F
9	網内チャンネル番号	16bit	
10	サンプルサイズ	4bit	チャンネルブロック内で第 2 サンプル値以降のデータの差分表現に用いられる各データのビット幅： 0： 4 ビット長 1： 8 ビット長 2： 16 ビット長 3： 24 ビット長 4： 32 ビット長
11	サンプル数	12bit	チャンネルブロック内のデータ数
12	最初のサンプル値	32bit	
13	第 2 サンプル値～最後のサンプル値	可変長	第 2 サンプル以降は、直前のデータに対する差分
チャンネル 2 ブロック項目以降			
(以下、チャンネル 1 ブロックと同じ構成でチャンネル数分繰り返される.)			
・ ・ ・			
上記 4 項以降を秒ブロックとして、複数ブロックのデータが格納される.			

表 2 に示す WIN32 フォーマット(防災科学技術研究所)へ変更した。EPOS4 ではそれ以前のシステムの演算処理を踏襲した(木村・他, 2012) ことから、データは 16 ビットの整数値でしか扱うことができなかったが、EPOS5 では WIN32 フォーマットに続

一することにより、処理システム内でのデータを 32bit の整数値で扱うことができるようになった。

また、EPOS4 では各データ処理チャンネルを 2 バイトの整数(論理チャンネル番号)で一意化していたが、WIN32 フォーマットでは、各チャンネルを組織 ID

(8bit : 気象庁は 0x03), 組織内網 ID (8bit : 気象庁内での地殻変動データは 0x20 または 0x2f) 及び網内チャンネル番号 (16bit) により一意化する. この網内チャンネル番号に EPOS4 まで用いられてきた論理チャンネル番号 (無符号の 16bit) をそのまま使うことも検討したが, 最終的に EPOS5 では新たにすべてのチャンネルに新しい網内チャンネル番号を割り振ることにした. 網内チャンネル番号の割り振りはおおむね表 3 のとおりとなっている.

表 3 EPOS5 でのチャンネル番号の割り振り.

組織 ID	網 ID	網内チャンネル番号			
		Data /SV	種別	DATA/SV	種別
8bit	8bit	1bit	2bit		
0x03	0x20	0	00	データ	観測データ
			01		監視データ
			10		補正データ
			11		加工等データ
		1	00	SV	観測データ
			01		監視データ
			10		補正データ
			11		加工等データ
	0x2f	0	00	データ	アメダス
			01		解析雨量
			10		他機関等データ
			11		予備
		1	00	SV	アメダス
			01		解析雨量
			10		他機関等データ
			11		予備

テレメータ系の地殻変動データはいったん収録サーバに地震観測データと同様に保存される. 地殻サーバでは, まず収録サーバに保存されたデータを取得し, メモリ上のバッファに展開する. 次に, 各観測点から受信した, 観測点ごとの機器の状態などを表すデータである SV 情報 (監視 SV, 保安 SV, 収集 SV など) をもとにして, ひずみ計・気圧計などのチャンネルのデータにどのような SV (秒値 SV) を付加するかを決定する (SV 編集処理). たとえば,

体積ひずみ計観測点でバルブオープンの操作が行われた場合には, 観測点からは 0x0001 の監視 SV のデータが送信されるが, その場合に同観測点のひずみ計データのチャンネルの秒値 SV としては 0x0020 (バルブオープン) が付加されることになる.

ここまでのデータ処理では, データのサンプリングは 1Hz とは限らない. EPOS5 では最大 50Hz までのサンプリングデータを処理できるようになっており, これら高サンプリングのデータは 1Hz のデータとは別領域にバッファリングされるようになっている.

3.2 秒値作成処理

EPOS4 では 1Hz のデータしか受信していなかったため, その値がそのまま秒値として処理されていた. EPOS5 では, 50Hz までのサンプリングデータを扱うことが可能になったので, 秒値の作成方法として, 1 秒間のサンプリング値の平均値とする機能, EPOS4 では主として検潮データの処理に使われていた移動平均処理などの機能を有する.

3.3 分値・補正分値作成処理

分値・補正分値の作成機能は基本的に EPOS4 を踏襲している. 詳細については木村・他 (2012) を参照されたい. 変更点として, 地磁気補正についても気圧補正と同様, 補正に使う地磁気データのチャンネル (補正局) に欠測が生じた場合に, 自動的に予備の補正局に変更する機能を用意した.

3.4 時間値・補正時間値作成処理

時間値・補正時間値についても, 基本的には EPOS4 を踏襲している.

補正時間値作成処理の従来からの変更点は, 降水補正について, EPOS3 で導入された AR モデルによる降水補正 (石垣, 1995) に加えて, タンクモデルによる降水補正 (木村・他, 2015) を選択することができるようにしたことである. 現時点では全ての降水補正時間値はタンクモデルによる降水補正により作成されている. 木村・他 (2015) では三段のタンクモデル (図 2) を採用しており, 各段のタンクの水位とその補正係数から補正値を計算するようになっている. 降水補正処理では, 雨量データをもと

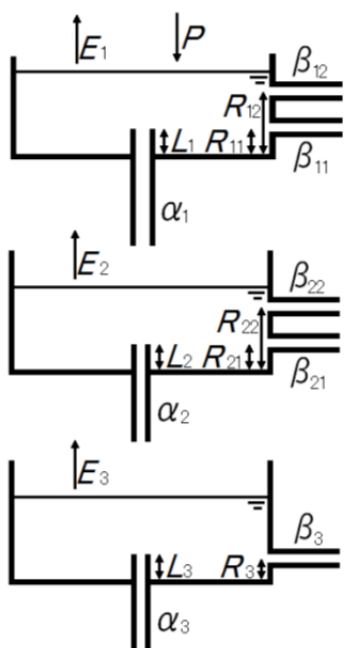


図2 EPOS5において降水補正に用いられているタンクモデルの形状 (木村・他, 2015).

に毎時間ごとの各段のタンクの水位データを計算し、そのデータから補正値が算出される。降水補正データは降水補正を行っていない補正時間値から作成されるが、出力するチャンネルは元の補正時間値とは別チャンネルに出力するようにしている。

また、多成分ひずみ計には磁気センサーが用いられているため、地磁気擾乱の影響を受けることが知られており、そのような影響は宮岡 (2011) の方法によって補正している。EPOS4までは、多成分ひずみ計について、磁気補正を行ったチャンネルと、行わないチャンネルを別々のチャンネルに出力していたが、EPOS5では地磁気補正しないデータは出力せず、補正時間値は必ず地磁気補正まで行う設定とした。

3.5 スタッキングデータの作成

観測データをスタッキング手法(宮岡・横田, 2012)により処理したデータ (以下、スタッキングデータという) の作成については、EPOS4でもオフライン処理として取り入れていたが、EPOS5ではオンライン的に毎時間スタッキングデータを作成するようにした。

あらかじめ設定した緯経線のグリッドの位置 (図3) ごとに、矩形断面を仮定し、その断層のすべり

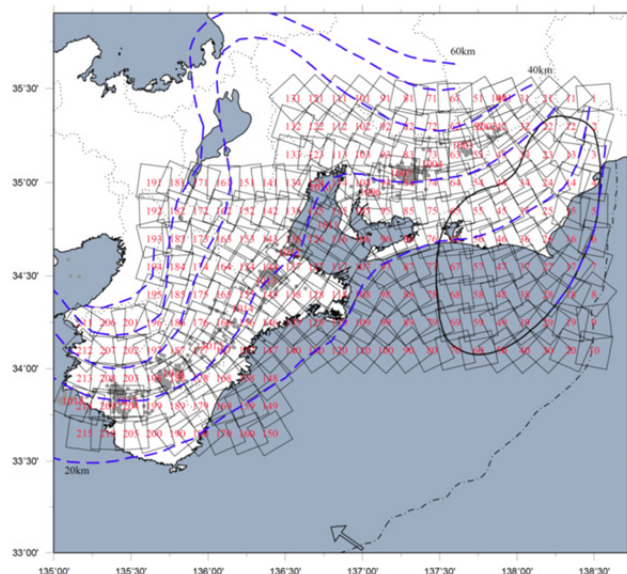


図3 東海周辺に設定されているスタッキングのグリッドポイント。地図上の番号は設定したグリッドの番号、各グリッドの矩形は、グリッド位置のプレート境界面上に仮定した矩形断層の投影面を示す。黒実線で囲んだ領域は東海地震の想定震源域 (中央防災会議, 2001)、黒点線は海溝軸、青点線は弘瀬・他 (2008) によるフィリピン海プレートの等深線 (10km ごと)、矢印はフィリピン海プレートの進行方向 (Heki and Miyazaki, 2001) を表す。深部低周波地震の震央を灰色丸で合わせて示す。

による半無限弾性体での理論変化量 (Okada, 1992) をもとにスタッキングデータを作成するようにした。仮定する断層は、おおむねフィリピン海プレート境界面上の、フィリピン海プレートの進行方向とは逆向きにすべる断層パラメータを設定しており、断層の大きさは固定サイズ (現在の設定値は、長さ 20km 幅 20km) である。

スタッキングデータは、補正時間値のうち、気象庁の体積ひずみ計と多成分ひずみ計、静岡県、産業技術総合研究所の多成分ひずみ計のデータから作成している。体積ひずみ計については降水の影響が大きいため、タンクモデルによる降水補正を行ったデータを使用している。また、多成分ひずみ計について、同一方向のひずみを2成分で測定し冗長化している場合、ばらつきの小さい成分を用いている。スタッキングデータ作成に用いるチャンネルはオンラインチャンネルパラメータで設定することができるが、保守点検時や障害時には一時的にスタッキングの使用から除外する機能ももたせている。

スタッキングデータの作成にあたっては、まずグリッド毎に、各チャンネルの設定階差時間の標準偏差（ノイズレベル）及びそのグリッドに仮定した断層すべりによる各チャンネルの理論変化量の絶対値をノイズレベルで規格化した値（シグナルレベル）を算出する。また、各チャンネルの変化量をノイズレベルで規格化し、理論変化極性に合わせるための係数（スタッキング係数）を算出する。そして、シグナルレベルの高い順に足し合わせていったときに、スタッキングしたデータに含まれるシグナルのノイズに対する比として定義される総合 SN 比（宮岡・横田, 2012）

$$SN_j = \frac{\sum_{i=1}^m S_i c_{ij}}{\sum_{i=1}^m N_i c_{ij}} \quad (1)$$

がもっとも良くなるように、足し合わせるチャンネル数を決定する。ここで、 SN_j はグリッド j のスタッキング波形の総合 SN 比、 S_i はスタッキング波形に含まれるチャンネル i のシグナルレベル、 N_i はスタッキング波形に含まれるチャンネル i のノイズレベル、 C_{ij} はチャンネル i のグリッド j におけるスタッキング係数である。現在の設定では、12 チャンネル以上 30 チャンネル以下で最適なチャンネル数を決定するようになっている。各チャンネルのノイズレベルは日々変化しているため、これらのパラメータ算出処理は毎日自動的に行う。

スタッキングデータは、スタッキングのパラメータに従って、各チャンネルのデータを足し合わせて作成する。スタッキングデータの SV は、足し合わせるチャンネルの SV の論理和である。スタッキングのパラメータが一日一回算出されるので、このパラメータが更新される前後でスタッキングデータが不連続な値になる場合がある。このため、スタッキングデータは毎時間、その日のパラメータを使って、1 ヶ月分のデータを作成するようにしている。

4 トレンド自動計算

地殻変動データは一般に定常的な変化傾向（トレンド）を持っている。地殻変動データの異常変化を検知しようとする場合にはこうした定常的な変化であるトレンドは除去する必要がある。どのような期

間でトレンド量を算出するかは、解析しようとする地殻変動の時間スケールに依存するが、短期的な変化をリアルタイムにデータ監視することを考えると、トレンド量は、見ようとする直近のデータ変化期間の前までの 1 ヶ月程度のデータから計算されていることがのぞましい。これまで、自動的な監視にあたっては、こうしたトレンド量は時刻に対する一次式で表現し、あらかじめ調査した固定値（1 日あたりの変化量）を設定して除去していた。

EPOS5 では、設定した任意の期間でのトレンドを自動で計算する方法を導入したので概要を説明する。ひずみの階差の分布は、主な擾乱の要因である降水に対する応答の補正残差が時間的に対称でないことから、一般的に正規分布ではない。監視の基準となるトレンドは、擾乱の少ない安定した時期の階差から求める必要があり、全体の平均値でトレンドを算出するのは適当でないことから、その目的に適合する実用的な手法として、中央値を中心に利用可能なサンプルの範囲を抽出してその平均値をトレンドとした。

まず、トレンドを計算しようとする期間について、24 時間あたりの変化量を計算して、これらのサンプルから異常値の除去を行う。異常値の除去はハンペルの判定法（Pearson, 2002；伊藤・藤井, 2003）を用い、

$$|X_i - M| > k * MAD \quad (2)$$

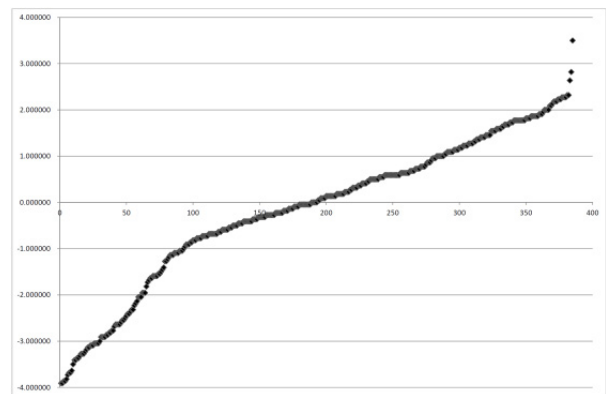


図 4 富士鵜無ヶ淵の 24 時間あたりの変化量の分布。富士鵜無ヶ淵観測点の 2016 年 11 月 2 日～11 月 20 日の時間平均値について、24 時間階差の異常値除去サンプルについて中央値からの残差を中央絶対偏差で規格化したものをプロットした。

を満たす X_i を異常値とした。ここで M は中央値, MAD は中央絶対偏差, k はしきい値を決定するパラメータであり, $k=3$ としている。

次に, 異常値を除去したサンプルについて, 中央値からの偏差を中央絶対偏差で規格化したものを小さい順に並べる。このようなサンプルについて, 横軸に順番, 縦軸にその値をプロットする。仮にこのサンプルが正規分布に従っていれば, このグラフはほぼ直線状になると期待されるが, 上記のような理由で一般には図 4 に示す例のように両端付近では直線から外れている。そこで, 中央値から両端に向かってそれぞれ直線にフィッティングし, 回帰値の標準推定誤差が小さくなる方向に直線を伸ばしていき, この回帰直線の標準推定誤差の 2 倍を超える値を異常値として除去していくと, 定常的な変化傾向とは大きく離れた異常値を除去できることになる。このサンプルの平均値をトレンド量とする。図 5 にこの手法で推定したトレンド量を除去した結果を示す。

トレンドの自動推定は, 毎時間行われており, 時間階差データの異常監視処理ではその結果を利用す

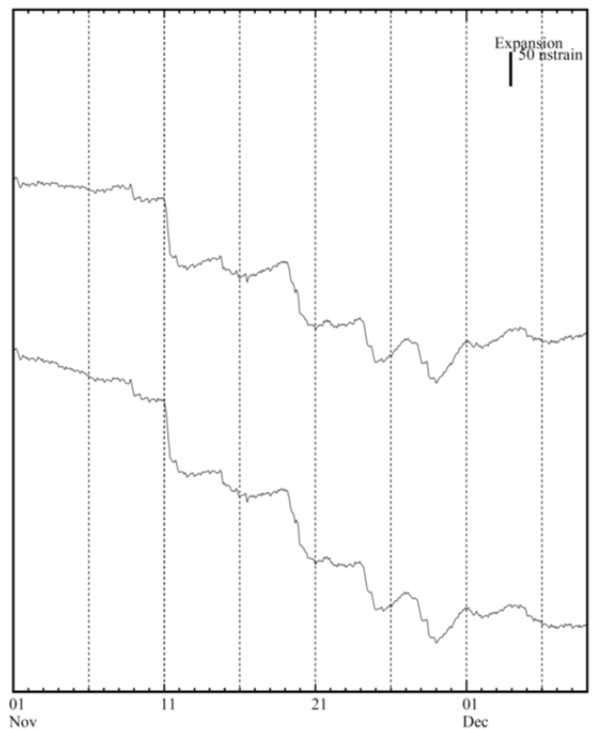


図 5 富士鶴無ヶ淵の 2016 年 11 月 1 日～12 月 9 日の変化 (補正時間値)。2016 年 11 月 1 日～11 月 20 日の補正時間値から求めたトレンドを除去したもの (上) とトレンドを除去していないもの (下) との比較を示す。

ることができるようになってきているほか, スタッキングデータの監視やすべり位置推定のための観測値の検測においてもトレンドの自動計算の手法が用いられている。

5 異常監視処理

EPOS4 までは, 地殻変動データの異常監視処理は特定の時間階差のデータを監視 (小林・松森, 1999) することに特化していた。EPOS5 では, 時間階差データの監視だけではなく, 様々な手法によりデータの監視を行うプロセス (以下, 監視プロセスという) と監視プロセスから監視情報の通知を受け, これらの情報の管理・報知を行うプロセス (以下, 監視マネージャーという) に分割した (図 6)。これにより, 新しい監視手法を導入しようとする場合には, その手法に基づく監視プログラムを作成し, 地殻データ監視マネージャーへあらかじめ定められたプロトコルに従って監視結果を出力すれば, その監視情報の管理や報知については, 地殻データ監視マネージャーが行うので, 開発のコストが大きく削減されるものと考えている。

監視プロセスとして EPOS5 では, 従来からの時間階差データを監視するプロセスと 3.5 に記したスタッキングデータを監視するプロセスを導入した。今後は, このほかに GNSS データの監視 (小林・木村, 2016) などを導入していくことも検討の余地がある。

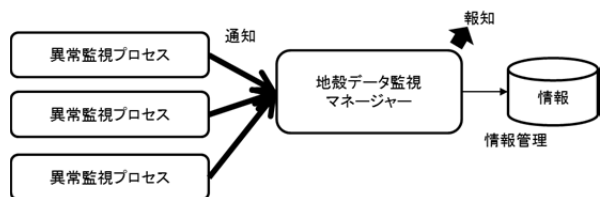


図 6 監視マネージャーと監視プロセス。

5.1 時間階差データの監視

地殻変動データの時間階差データの監視については, EPOS4 で改良された方式 (木村・他, 2012) を基本的には継承しているが, 降水補正データを監視するにあたって, 積算降水量に応じたノイズレベルの変更などの手法を取り入れた。

木村・他 (2015) では, 降水期間のノイズレベルの定義の見直しの必要性を論じ, 単独観測点の降水

期間のノイズレベルの定義について

- ・ 降水期間を積算降水量に応じて複数の段階に区分すること。
- ・ 降水期間については、それぞれの段階における時間階差の最大・最小値を越えない値とすること。

を提案している。EPOS5 では、監視成分ごとに非降水期間、降水ステージ 1~6 の各段階を区分する積算雨量を定義できるようにし、さらにそれぞれの段階についてレベル 1~3 の値を設定できるようにした (図 7)。

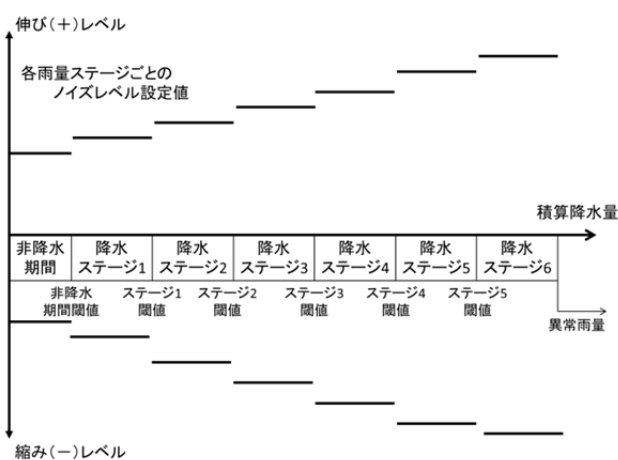


図 7 降水量に応じたノイズレベル設定の考え方。積算雨量 (積算時間は観測点ごとに異なる) に応じた段階 (降水ステージ) ごとに伸び方向と縮み方向のノイズレベルを設定する。

複数観測点の同時異常のノイズレベルについては、通常のノイズレベルとは異なる値を設定したい場合もあることから、観測点ごとに同時異常監視用の仮想観測点を設定した。この仮想観測点のノイズレベルとしてその観測点の平均的ノイズレベル (木村・他, 2015) を設定している。さらに 2 点間の同時異常監視だけでなく、4 点までの観測点グループについて、設定点数以上がレベル 1 を越えた場合に同時異常とするように改修した。

5.2 スタッキングデータの監視

5.2.1 検知手法

EPOS5 では、3.5 で述べたスタッキングデータについて、その異常を監視するプロセスを新たに導入した。このプロセスは、図 3 で示したグリッドにつ

いて作成されたスタッキングデータを監視し、その異常を検知して、異常が現れたグリッドでのプレート境界のすべりを早期に検知しようとするものである。

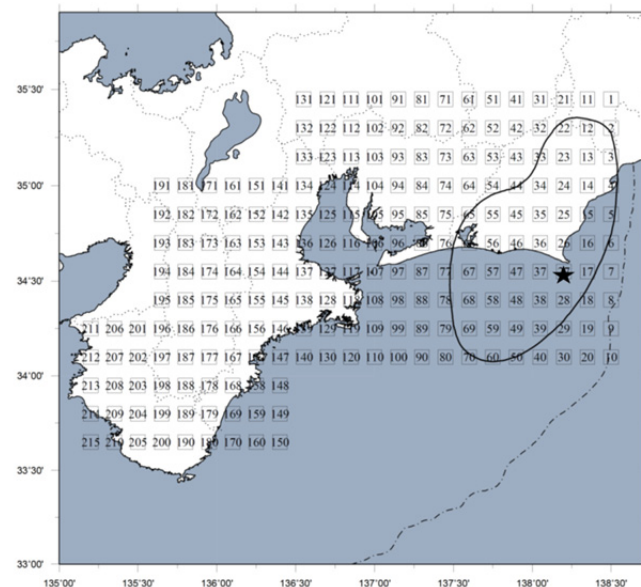
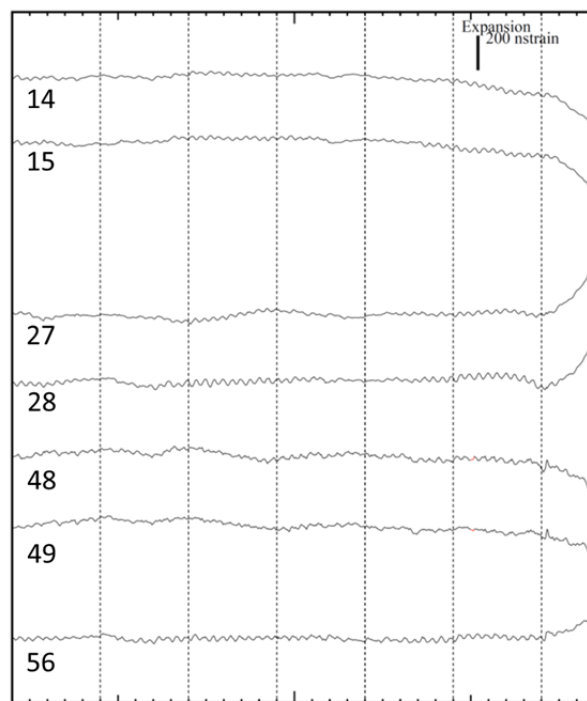


図 8 スタッキングデータに現れる偽の伸び変化。★印の位置に断層すべりを与えた場合の各グリッドの理論スタッキングデータを示す。想定したグリッド位置 (27, 28) とは異なるグリッド (56) のスタッキングデータにも伸びの変化が現れる。

仮に、あるグリッドで想定した断層すべりによりひずみ計のデータが変化したとすると、作成したスタッキングデータには伸び（正）の変化が出るというのがスタッキング手法の基本である。したがって、監視にあたってはまず、あらかじめ設定した時間階差 ΔT 時間のスタッキングデータの変化量が、通常の変動範囲の k 倍を越えた場合を異常と判定する。

ここで、通常の変動範囲を、現在時刻から $T1$ 時間前～現在時刻から $T2$ 時間前の期間の ΔT 時間階差データの標準偏差と定義する。また、スタッキングデータからは、現在時刻から $T3$ 時間前～現在時刻から $T4$ 時間前のデータで推定したトレンド量を除去した上で変化量を算出する。 ΔT はどの程度の時間スケールの変化を監視するかを規定するパラメータである。現在は 48 時間に設定している。 k はしきい値を決定する整数値であり 3 としている。すなわち、48 時間階差のスタッキング変化量が標準偏差の 3 倍となった場合に異常と判定する。 $T1 \sim T4$ もパラメータであり、現在は $T1=T3=720$ 時間、 $T2=T4=168$ 時間としている。

ところで、スタッキングデータは気象庁が設置した体積ひずみ計及び気象庁・静岡県・産業技術総合研究所が設置した多成分ひずみ計のデータから作成しているが、グリッドに想定した断層すべりに対するひずみの極性変化の分布とひずみ計の設置位置の分布によっては、実際にはすべりの生じていないグリッドのスタッキングデータにも、伸び（正）の変化が現れる場合がありうる（図 8）。こうした偽の変化を示すグリッドをなるべく異常と判別しないために、グリッドの絞り込みを行う手法について検討した。

あるグリッドに変動源があるとした場合の理論値と観測値を比較してその様相が異なれば、実際にそのグリッドには変動源があるわけではないと推測することができる。図 9 は、真の変動源（すべり想定位置）近くのグリッドと離れたグリッド（偽の変動源）における各観測点のひずみ量を示す。真の変動源近くのグリッドでは理論値と観測値が良く似ているのに対し、偽の変動源では様相が全く異なることが分かる。そこで、スタッキングのグリッドごとに個々の観測成分とその理論変化量の一致度を尺度として、真の変動源の絞り込みを行うこととした。

二量間の一致度をはかる指標としては決定係数・

残差二乗和・順位相関係数などを用いることが考えられる。以下にそれぞれの指標を用いた場合について考察する。なお、理論値と観測値の一致度を調べるのであって、これらの相関をみるわけではないから、相関係数を指標として用いることは不適當である。

(1) 決定係数

仮定した断層すべりモデルによる理論値と回帰推定した観測値についての切片を 0 とする決定係数は一致度の指標の一つとして考えられる。切片を 0 とする決定係数には複数の定義があるが (Kvalseth, 1985)、次式に示す R_7^2 の場合、取り得る値の範囲は 0~1 であり、1 に近いほど一致度は高い。

$$R_7^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i y_i^2} = \frac{\sum_i \hat{y}_i^2}{\sum_i y_i^2} \quad (3)$$

\hat{y}_i : 回帰値

図 9 の例に示すように、スタッキング波形に何らかの変化が現れるグリッドのうち、決定係数が高いグリッドに絞り込むことで、真の変動源を絞り込むことが可能であると考えられる。

なお、切片を 0 とする決定係数として (4) 式で定義される R_1^2 を使うことも考えられるが、モデルの適用範囲は R_7^2 よりも広いものの、少しの観測値の違いによる決定係数の変化が大きく、しきい値をどの程度の値にすべきかの調査が十分に行えなかった。今後、決定係数の定義として R_1^2 を用いることが有効かどうかの調査を行う必要がある。

$$R_1^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (4)$$

\bar{y} : 平均値

(2) 残差二乗和

理論値と観測値との差（残差）の二乗和も両者の一致度の指標として考えられる。たとえば、1 つの

観測値系列があり、それに複数のモデルを当てはめて、どのモデルが最も良く合っているかを評価する場合には、それを残差二乗和の大小比較で行うことは妥当である。

しかし、スタッキングデータの監視の場合には、①スタッキングのグリッドによって足し合わせる観測成分が異なる②スタッキングのグリッドごとに異なる振幅をもつ観測値系列に対してそれぞれモデルを当てはめる、という点で条件が異なるため、残差二乗和をそのまま用いて大小比較することはできない。①については、分散を用いることで回避しうが、②の問題は、全体的な大きさを表す量で規格化してから比較する必要がある。これは結果的に、決定係数で比較していることと同じになる。

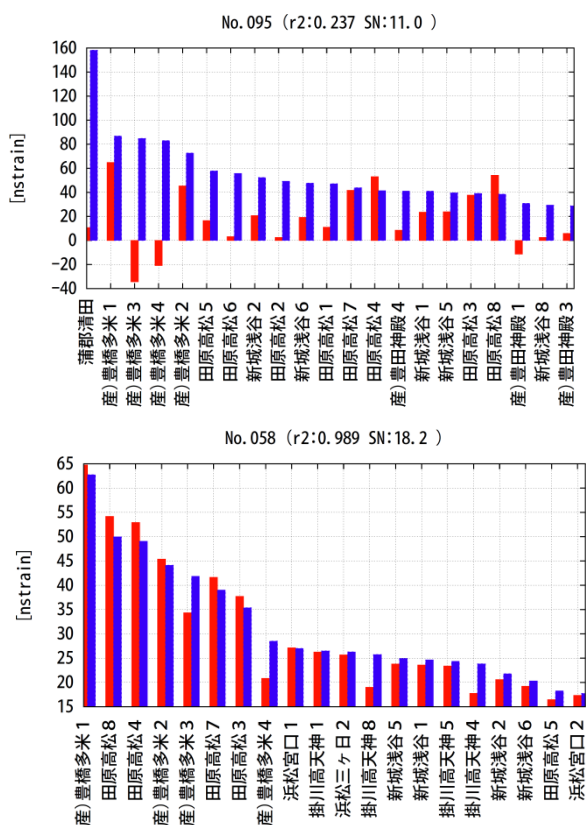


図 9 スタッキングチャンネルの理論変化量(青)と観測値(赤)の比較。

(上) すべりを想定していないグリッドでの比較 (下) すべりを想定したグリッドでの比較。理論変化量とノイズレベルの比の高い順に並べている。変化量は規格化してあり、伸びの変化が正となるよう極性を合わせている。すべりを想定したグリッドでは決定係数(図中の r2) が 0.989 と高いのに比べ、そうでないグリッドでは 0.237 と低い。

(3) 順位相関係数

図 10 では、理論値と観測値の差は左の方が大きいですが、観測値について観測成分の順位に違いはない。このように、順位相関係数では真の変動源の場合と偽の変動源の場合の差が出なくなる場合が考えられる。したがって、順位相関係数を用いても真の変動源の有効な絞り込みはできないものと考えられる。

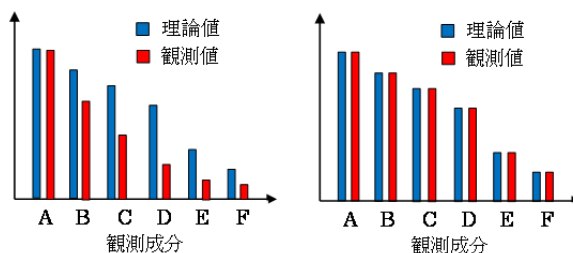


図 10 順位相関係数による比較。

これら (1) ~ (3) の考察から、EPOS5 では理論値と観測値の一致度の指標として決定係数 R^2 を用いることにした。理論値と観測値が「似ている」と判断する決定係数のしきい値はグリッドごとにパラメータとして与えることができるようになっている。現在は、過去の短期的スロースリップイベント(以下、短期的 SSE という)での調査結果から、全グリッド一律に 0.7 に設定している。理論値と観測値の一致度から、あるグリッドが変動源であると推定される場合、理論値と観測値の回帰直線の傾きから、仮定した断層モデルのすべり量を基にそのグリッドでのすべりモーメントを算出することができる。

なお、ボアホール式ひずみ計は、岩盤に固着させた管体の変形を介して周囲の岩盤のひずみを計測するものであるため、観測されるひずみ量と岩盤のひずみ量は異なるので、観測結果を用いて地殻変動源を推定するためには、観測された「管体のひずみ」から「広域のひずみ」を算出するためのキャリブレーションを行っておく必要がある(上垣内・他, 1999)。スタッキングに用いる体積ひずみ計および多成分ひずみ計の観測値は、それぞれ遠地地震波形(Matsumoto & Kamigaichi, 2017)・理論潮汐応答(Hirose et al., 2016)によりキャリブレーションした数値を用いている。

以上の手法により EPOS5 ではスタッキングデー

タの異常を検知しており，異常検知結果は異常監視マネージャーに通知が行われるとともに，後述する総合監視画面上で異常が分かるようになっている(図 14)．本手法による自動処理により，客観的なすべり領域の検知が期待される．

5.2.2 スタッキングデータ監視による検知能力

スタッキングデータは，ここまで述べてのように，ノイズレベルの 3 倍以上伸び方向に変化した場合にまず異常の可能性があると判断するが，その後の決定係数による一致度の判定を考慮せずに，ノイズレベルから総合 SN 比が 3 倍となるシグナルレベルを計算すると，おおまかな検知能力を計算することができる．図 11 に $\Delta T=48$ 時間とした場合の各スタッキンググリッドの検知能力の計算例を示す．図 11 から，想定される東海地震の想定震源域の陸域では $Mw4.6\sim 5.2$ 程度，海域では $Mw4.7\sim 5.5$ 程度の検知能力があることが分かる．

一方，図 12 には，愛知県直下のプレート境界面で短期的 SSE が発生した期間をノイズレベル算出期間に含めて計算した検知能力の例を示す．図 11 と比べると，愛知県中部では Mw に換算して 0.5 程度の検知能力の低下が見られる．これは，ゆっくりすべりの発生期間がノイズレベルの算出期間に含まれているために，ノイズレベルを過大評価することが原因である．こうしたノイズレベルの過大評価を防ぐために，EPOS5 には短期的 SSE のようなイベントが発生した特定期間を手動で登録し，ノイズレベル算出の期間から除去する機能を有するが，今後はこれを自動化する等の改善が必要であると考えている．

5.2.3 今後の課題

新たに導入したスタッキングデータの監視の最終的な目的は，東海地震想定震源域でのプレスリップを早期に検知することであるが，これまでにそのような事例のデータはなく，短期的 SSE の過去事例などから試行錯誤で経験的な値を設定している．これらの設定値については，今後データを蓄積しながら，より適切な値になるよう見直す必要がある．たとえば，現在スタッキングデータは長さ 20km，幅 20km の断層を仮定して作成しているが，仮にこれよりも大きいサイズの断層すべりを与えると，本手法によりすべりを検知できない場合があった．より広域が

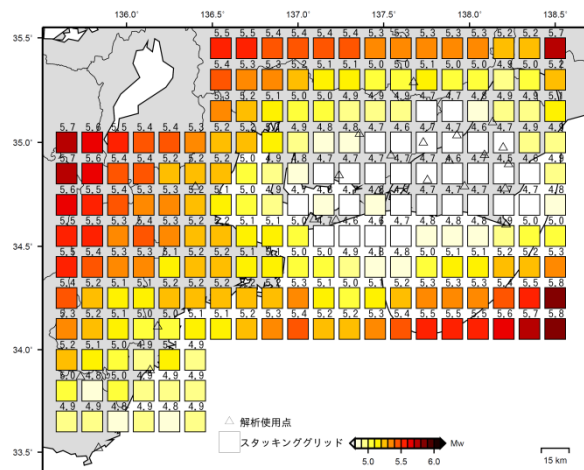


図 11 スタッキングデータ監視による検知能力．2014 年 3 月 17 日の事例．□はスタッキンググリッドを表し数字は検知限界値の Mw を表す．

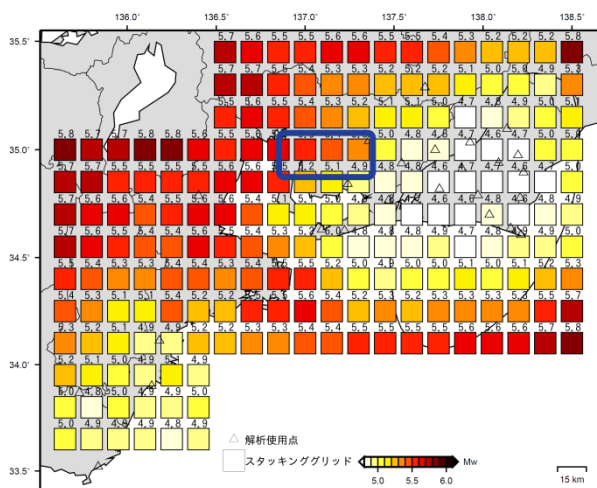


図 12 スタッキングデータ監視による検知能力．2014 年 2 月 28 日の事例．□はスタッキンググリッドを表し数字は検知限界値の Mw を表す．青枠は 2014 年 1 月下旬に短期的ゆっくりすべりが発生した領域を示す．

すべっていると考えられる現象の検知に適用する場合には今後の検討が必要である．

6 変動源の推定

地殻変動データに異常変化が現れた場合に，そのような変化をもたらす変動源を推定することは地殻変動データ監視の目的の一つである．これまで気象庁では，中村・竹中 (2004)，中村 (2005) に基づき，プレート境界面上の矩形断層によるすべりの位置を

グリッドサーチにより求める手法を用いてきた。

変動源の推定は、与えられた観測値からその観測値を与える断層パラメータを推定する逆問題である。そのための手法として大域的最適化手法の一つである SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method developed at the University of Arizona) 法 (Duan et al., 1992; 田齋・他, 2006) を用いることはこれまでも試行されており、地殻変動解析支援プログラム MICAP-G (内藤・吉川, 1999) にも実装されているが、EPOS5 ではこの SCE-UA 法を用いた手法を新たに導入した。

EPOS5 で導入したすべり位置推定の手法は、産業技術総合研究所の手法 (大谷・板場, 2013) と同様に、二段階の推定から構成される。第一段階の推定で、断層位置とすべり量をグリッドサーチにより求める。この場合、断層の大きさは一定 (幅・長さともに 15km) とし、深さはプレート境界に固定している。すべり方向はフィリピン海プレートの進行方向と逆向きとする。グリッドサーチでは、グリッドごと、すべり量ごとに仮定した断層すべりによる各観測成分の理論変化量と与えられた観測値がどれだけ一致しているかを、決定係数を用いて比較し、もっとも決定係数の高いグリッドを第一候補とする方法とした。理論変化量の計算にあたっては、5.2 のスタッキングデータの監視と同様、ひずみデータのキャリブレーションを考慮している。

次に、第二段階の推定として、第一段階で求めたグリッド位置から、あらかじめ設定した緯度・経度の幅、深さの幅の範囲で断層位置を動かすとともに、断層パラメータ (走向・傾斜・すべり角・断層幅・長さ・すべり量) も一定範囲で動かし、理論変化量と観測値の決定係数を評価関数とし、最適なパラメータを推定する。このパラメータの推定に SCE-UA 法を用いる。この第二段階の推定によって得られた断層位置・断層パラメータを最終的な推定結果とする (図 13)。

すべり位置の推定には、推定された断層パラメータが大域的に最適かどうかという問題を常に含んでいる。従来の手法は、推定された断層面は与えられた観測値を (倍半分の誤差を含むとして) 満たすということが分かるが、候補点以外にはすべりの可能性はないのかという点が明確でない。EPOS5 で導入した手法においては、使用した観測点のセットに対

して選択されたすべり位置が大域的に最適であることを決定係数で評価できる利点がある。しかし、観測値の選択には任意性が高いから、ある観測値のセットで得られた解があるとして、別の観測値を使えば別の候補点の可能性がないのかという問題がある。

また、一枚の断層面が一様に一定量すべっているという仮定のもとに断層面を推定しているが、実際にはすべりの不均質性があり、推定される断層面は、全体としてはすべりのモーメントはさほど変わらないとしても、実際のすべり領域よりも、小さな断層面で、実際よりも大きなすべり量が推定されることがある (大谷・板場, 2013)。

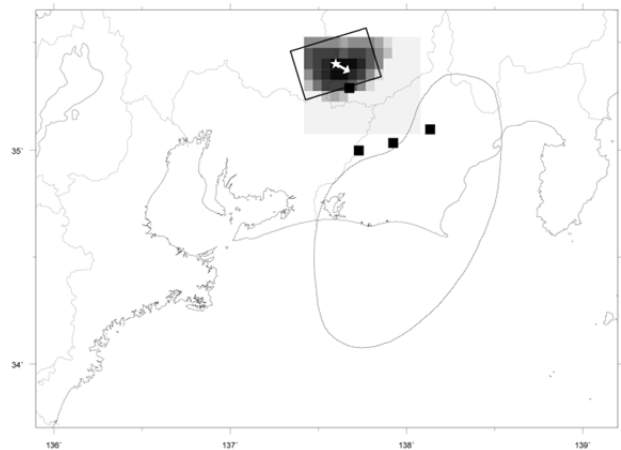


図 13 EPOS5 で新たに導入したすべり位置推定結果。長野県南部の短期的 SSE を推定した例。図中の黒白の濃淡は第一段階の推定における各グリッドの決定係数の値に応じて色分けしている (色が濃いほど決定係数が高い)。図作成において、すべり量は最終的に求められた値を用いている。また、矩形及び白矢印は第二段階の推定で得られた断層面及びすべり方向の地表面への投影を示す。

7 総合的な監視画面

以上のような監視手法の改善を EPOS5 では導入してきたが、こうしたいろいろな監視情報を作業者にどのように伝えるかという観点から、監視の画面を組み立てることを検討した。

そこで目指したのは、監視情報を一枚の地図画面で把握できるようにするということである。いろいろな監視の方法があると、その結果を伝える画面は得てして複数に分かれてしまうことになる。それを監視する作業者は、それらの画面から情報を組み立て実際に起こっている一つの現象 (一つとも限らない) を頭の中で組み立てる必要がある。監視結果を

一枚の地図画面で表現することにより、その画面から、どこで、どのような変化が現れていて、その原因は何であるのかが一目で分かることを目指した。

具体的には、各観測点の階差データの変化が現在どのようなレベルとなっているか、スタッキングデータの監視でグリッドごとに異常がないか、異常がある場合にどの程度のすべり量となっているか、変化の原因として、降水量等の環境要素データはどのようになっているか、異常がある場合に実際のデータや解析結果はどうなっているか、こうした変化を説明しうる変動源の位置や大きさはどうなっているか、などを一枚の地図画面に表示することである。

この場合に有効な手法として、インタラクティブな地図を Web 上に表示するライブラリが公開されている。EPOS5 ではそのようなライブラリとして leaflet.js (Agafonkin) という JavaScript のライブラリを用いることにした。

また、位置情報を表現するのに、GeoJSON フォーマット (Butler et al., 2008) を用いた。GeoJSON フォーマットは、地図上の点・直線・ポリゴンあるいはそれらを組み合わせた地理的情報と追加属性を与えられるとともに、JavaScript のオブジェクトの構造 (JSON) を持っているため、プログラムからの利用が容易である。監視情報を GeoJSON フォーマットで出力することにより、ブラウザ側ではそのデータを非同期通信で取得し、端末側に表示することが可能である。



図 14 EPOS5 の地殻活動総合監視画面。画面は監視プログラムが出力した GeoJSON ファイルを JavaScript ライブラリで描画して構成している。



図 15 スタッキングデータによる短期的 SSE の検知例。(上段) 2016/12/09 18:00 (中段) 2016/12/16 12:00 (下段) 2016/12/17 15:00 気象庁により決定された低周波地震の震央 (青丸) の移動に伴い、短期的 SSE の発生領域が移動し、スタッキングデータにより検知される異常グリッド (赤四角) も移動している様子が見られる。

こうした Web アプリケーションの技術を導入し、EPOS5 では GeoJSON フォーマットで出力された監視情報を端末のブラウザ側で JavaScript のライブラリによって表現することにより監視の画面を構成した (図 14)。一定間隔ごとに監視情報を出力した GeoJSON ファイルを保存しているため、この画面では監視情報の時間変化を追うことができるようになった。これにより、たとえば実際に起こっている地殻変動現象として、短期的スロースリップイベントの時間経過に伴う移動をほぼリアルタイムに追うことが可能である (図 15)。

このように、監視情報の出力を GeoJSON フォーマットで統一することにより、監視情報をブラウザで表現することが容易になり、監視情報を統合的に把握することができるようになった。一方で、異常監視については監視プロセスと監視マネージャーに機能を分割し、情報の受け渡しのプロトコルを共通化したが、ここでのプロトコルは GeoJSON フォーマットではない。結果として、監視情報を表示するために個々の監視プロセスで監視情報を GeoJSON フォーマットで出力する必要が生じている。異常監視のプロトコルも GeoJSON フォーマットで統一することの検討が必要ではないかと考える。

8 まとめ

EPOS5 の地殻変動データ処理の概要について報告するとともに、そこに導入した地殻変動監視技術の手法改善について紹介した。

EPOS5 では、新たなデータ処理手法としてタンクモデルによる降水補正処理、スタッキングデータの作成などを導入した。また、監視手法として、トレンドの自動算出、スタッキングデータの監視などを新たに導入し、階差データの監視の改良、すべり位置推定方法の改良などを図った。さらに、こうした監視結果を、Web を利用して一枚の総合監視画面上で把握できるようにすることを目指し、そのために GeoJSON フォーマットを導入した。

ここでの報告が、今後新たな監視技術をシステムに導入しようとする場合の参考資料となることを期待したい。

謝辞

EPOS5 及びその土台となった EPOS1~EPOS4 の

システム開発に関わる各位には感謝の意を表す。EPOS5 のシステム整備作業班各位には仕様の策定等にあたり協力いただいた。トレンドの自動算出プログラムは、地震火山部管理課菅沼一成氏のプログラムを利用している。愛知工業大学の横田崇氏、福井地方気象台の内藤宏人氏、気象研究所の小林昭夫氏、山本剛靖氏、宮岡一樹氏にはスタッキングデータの監視手法の検討にあたって有益な助言をいただいた。タンクモデルによる降水補正のシステム導入にあたっては、地震火山部火山課の木村一洋氏からプログラム及びパラメータの提供をいただいた。査読者小久保一哉氏及び編集長の鎌谷紀子氏、編集委員の武藤大介氏・榊原良介氏には本稿を改善するために助言を頂いた。記して感謝致します。本文中の図の作成には GMT (Wessel and Smith, 1991) を使用した。

文献

- 石垣祐三 (1995): 埋込式体積歪データの精密補正及び異常識別について, 験震時報, **59**, 7-29.
- 伊藤信和・藤井郁子 (2003): 地磁気絶対観測における基準値の異常値判定基準の定量化に向けて, 地磁気観測所テクニカルレポート, **1**, 1, 1-9.
- ト部 卓 (1991): 地震波データの伝送法—テレメータ方式, 地震, **44**, 15-26.
- 大谷 竜・板場智史 (2013): 産総研地下水等総合観測網の歪計を使ったゆっくり地震の断層モデルの推定手法, 地質調査研究報告, **64**, 11/12, 331-340.
- 上垣内 修・内藤宏人・山本剛靖・吉川澄夫・小久保一哉・宮岡一樹 (1999): 気象庁石井式歪計の応答特性解析, 日本地震学会予稿集, B72.
- 木村一洋・近澤 心・菅沼一成・草野利夫 (2012): EPOS4 における地殻変動の異常監視処理の高度化, 験震時報, **76**, 45-62.
- 木村一洋・露木貴裕・菅沼一成・長谷川浩・見須裕美・藤田健一 (2015): タンクモデルによる体積ひずみ計データの降水補正について, 験震時報, **78**, 93-158.
- 小林昭夫・松森敏幸 (1999): 埋込式体積歪計のノイズレベル調査及び異常監視処理, 験震時報, **62**, 17-41.
- 小林昭夫・木村一洋 (2016): 南海トラフ沿い長期的スロースリップの客観的検知, 日本地震学会予稿集, S03-P09.
- 田齋秀章・平松和昭・森 牧人・原田昌佳 (2006): SCE-UA

- 法を用いたTOPMODELパラメータの特性評価, 九大農学芸誌, **61**, 261-272.
- 中央防災会議 (2001): 東海地震に関する専門調査会資料.
- 内藤宏人・吉川澄夫 (1999): 地殻変動解析支援プログラム MICAP-Gの開発, 地震, **52**, 101-103.
- 中村浩二・竹中潤 (2004): 東海地方のプレート間すべり推定ツール, 験震時報, **68**, 25-35.
- 中村浩二 (2005): EPOSのプレート間すべり推定処理, 験震時報, **68**, 121-126.
- Pearson, R. (2002): 非線形フィルタでデータを洗浄する, EDN Japan.
- 弘瀬冬樹・中島淳一・長谷川昭 (2008): Double-Difference Tomography 法による関東地方の3次元地震波速度構造およびフィリピン海プレートの形状の推定, 地震, **60**, 123-138.
- 防災科学技術研究所: Hi-net 高感度地震観測網 <http://www.hinet.bosai.go.jp/>, (参照 2012-12-01).
- 宮岡一樹 (2011): 多成分歪計の地磁気補正, 験震時報, **74**, 29-34.
- 宮岡一樹・横田 崇 (2012): 地殻変動検出のためのスタッキング手法の開発—東海地域のひずみ計データによるプレート境界すべり早期検知への適用—, 地震, **65**, 205-218.
- Butler, H., M. Daly, A. Doyle, S. Gillies, T. Schaub, C. Schmidt (2008): The GeoJSON format specification, <http://geojson.org/geojson-spec.html>, (参照 2015-02-01).
- Duan, Q., S. Sorooshian and V. Gupta (1992): Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models, Water Resource Research, **28**, 1015-1031.
- Heki, K. and S. Miyazaki (2001): Plate convergence and long-term crustal deformation in central Japan, Geophys. Res. Lett., **28**, 2313-2316.
- Hirose, F., K. Maeda, and O. Kamigaichi (2016): No significant precursory correlations between Earth tides and moderate ($M_w \geq 5.5$) earthquakes before large interplate earthquakes ($M_w \geq 7$) along the Tonga - Kermadec trench, Geophys. J. Int., submitted.
- Kvalseth T. O. (1985): Cautionary note about R^2 , American Statistician, **39**, 279-285.
- Matsumoto, N. and O. Kamigaichi (2017): Tidal calibration of multicomponent borehole strainmeters and validation of the method using surface waves, in preparation.
- Okada, Y (1992): Internal deformation due to shear and tensile faults in a half-space, Bull. Seism. Soc. Am., **82**, 2, 1018-1040.
- Agafonkin, V: Leaflet, <http://leafletjs.com/>, (参照 2015-04-01).
- Wessel, P. and W. H. F. Smith (1998): New, improved version of the generic mapping tools released, EOS trans. AGU, **79**, 579.

(編集担当 武藤大介・榊原 良介)