

セミ・ダイナミック補正の測量作業への適用について（地殻変動パラメータの作成と検証）

五十嵐 祐一¹

1. はじめに

国土地理院では、2002年の測地成果2000公表に続き、2003年5月の基準点体系分科会（Ⅲ）報告において、「地殻変動の激しい我が国において、いつでも、どこでも、誰でも、必要な精度で位置情報が得られる社会の実現」を目指すとして、基準点体系の精度維持のためのセミ・ダイナミック補正の調査研究が進められてきた。この結果、2007年3月に「セミ・ダイナミック補正要領（案）及び同運用基準」が作成され、地殻変動モデルによる観測結果等の補正方法が定められた。この要領（案）では、電子基準点の連続観測及び高度地域基準点測量等の繰り返し観測によって検出された地殻変動量を、地殻変動モデルのパラメータ化や作成したパラメータの精度検証に使用することとしているが、高度地域基準点測量は平成16年に事業化され、現在、データの整備が進められている段階である。

その一方で、位置情報基準の安定化のため、セミ・ダイナミック補正適用への要請は高まっている。このため、本研究では、測地成果2000以降、国土地理院によって高度地域基準点測量作業に相当する観測が繰り返し行われている地区をモデル地区として抽出し、繰り返し観測データを利用した地殻変動量検出による地殻変動パラメータの外部評価と地殻変動モデルへの組み込みについて検証する。

なお、本研究は、平成19年度国土地理院部

外研究（課題名：プレート運動によって生じた地殻変動が測地成果に及ぼす誤差をモデル化し、改定するための手法研究Ⅱ）として実施された。

2. セミ・ダイナミック補正

2.1 測量作業への適用

測量作業におけるセミ・ダイナミック補正の適用とは、基準となる測量成果に対し、基準日（元期；測地成果2000では1997年1月1日）以降の地殻変動による成果変動量をパラメータ化し、観測日（今期）の測量結果を補正することで、元期における測量結果を得ることである。本研究に先駆け、平成17年度に行われた（社）日本測量協会 谷河氏の国土地理院部外研究¹⁾によって、

- ・地殻変動に対し、地殻変動補正データによるセミ・ダイナミック補正は有効である。
- ・補正方法は、観測値を補正する方法と、座標を補正する方法があり、どちらの方法でも同じ結果が得られる。

との結論が得られている。ここでは、基本測量において、セミ・ダイナミック補正の適用が必要となる時期について、推測する。

基本測量における基準点（三角点）の位置精度は10cmとされる²⁾。最も単純な例として、精度 $5\text{mm}+1\text{ppm}\cdot D$ （ D ：観測距離）の一般的なGPS測量機によって、20km離れた2つの電子基準点A、Bから、等距離付近に新点1点を設置する場合を考える。元期では、電子基準点位置に誤差が無いと仮定すると、観測距離10kmのGPS観測誤差15mmの単純平均から、新点

¹ 株式会社ニコン・トリンブル

は標準偏差15mmで設置できる。これを地殻変動の影響を受けた今期で設置する場合、図1から分かるように、電子基準点A固定で、電子基準点Bの元期からの水平距離変動が14cmを超えると、今期と元期の座標差が10cmを越える場合が出てくる。

2007年1月1日の実際の電子基準点間では、元期に比べて、どれくらいの変動が加わっているのでしょうか？ 図2の主歪図で大きな歪が認められる館山～鋸南間（点間距離で約21km）で計算すると、測地成果2000の元期に対して、水平距離変動量=6.8cmであった（高低差変動量は1.0cm）。点間距離や観測精度に偏りがある測量観測網の場合には、既に影響

が出ている地域があってもおかしくない。日本は、今後も地殻変動の影響を受け続けるため、近い将来、基準点の精度が確保できなくなった場合には成果改定が必要であるが、頻繁な成果改定による社会への影響を考えると、基準点にセミ・ダイナミック補正を適用することにより、それらを避けることが現実的であると言える。

2.2 「セミ・ダイナミック補正要領（案）及び同運用基準」の地殻変動モデル

要領（案）では、セミ・ダイナミック補正に用いる地殻変動データとして、

・1997年1月1日を元期とし、以降毎年1月1

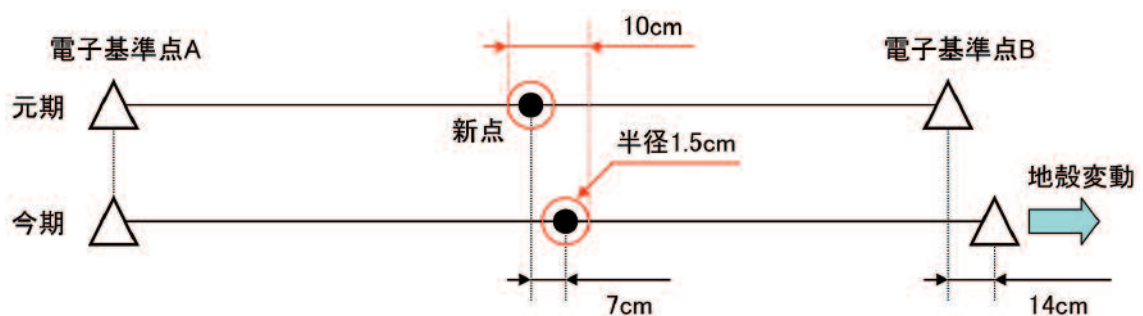


図1 地殻変動による新点設置誤差

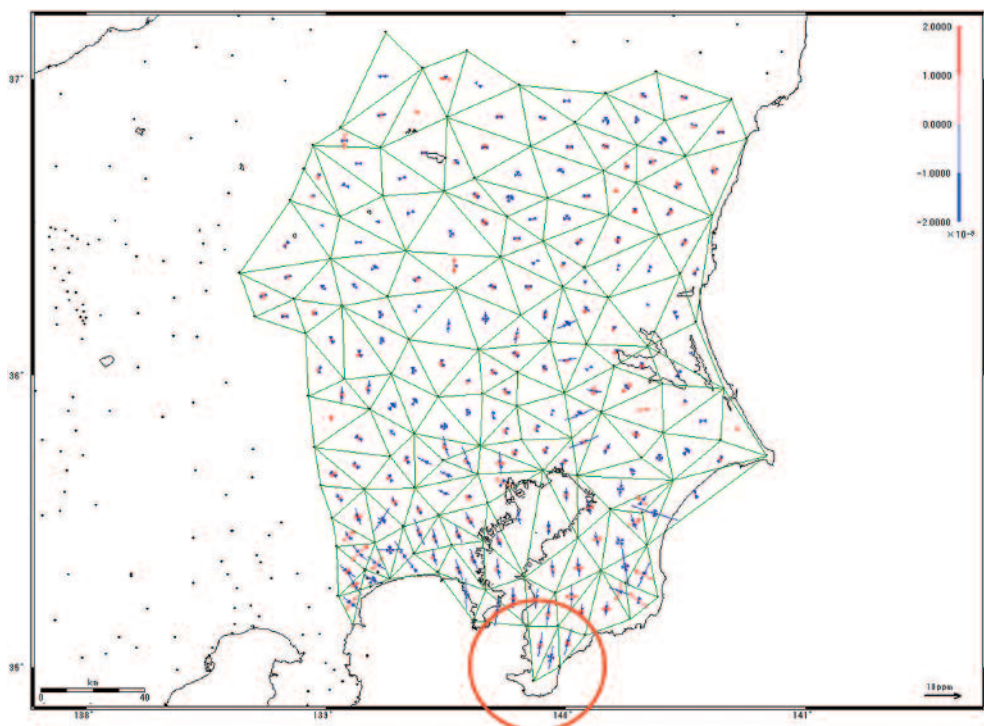


図2 電子基準点間主歪図³⁾（1997年1月～2006年7月、赤丸付近の歪が大きい）

日～14日の電子基準点座標の平均値と元期座標値の差から得られる地殻変動量と、高度地域基準点測量等の繰り返し観測によって検出された地殻変動量から、Kriging（クリギング）法によりグリッド化された地殻変動パラメータを作成し、翌年度（当年4月1日～翌年3月31日）の基準点測量作業に適用する。

という、毎年4月1日に更新される、時間軸に対して1年ごとに階段状となる地殻変動モデルが採用されている。地殻変動パラメータは、毎年4月1日以外にも、電子基準点の測量成果が改定された場合や、以下に規定される精度を満たさなくなった場合も、更新が行われる。

- (1) 地殻変動パラメータの作成に用いた地殻変動量と、地殻変動モデルから再現した地殻変動量との較差が、水平成分（南北、東西）、上下成分とも20mm以内であること（内部評価）。
- (2) 隣接する電子基準点間の地殻変動量の差と、地殻変動モデルから再現した地殻変動量との較差が、面積歪および最大せん断歪において2ppm以内であること。
- (3) 高度地域基準点測量等により検出された地殻変動量と、地殻変動モデルにより再現した地殻変動量との較差が30mm以内であること（外部評価）。ただし、高度地域基準点測量等を行った時点において外部評価を行う。
- (4) 電子基準点の故障等で地殻変動パラメータの作成に用いなかったものと、地殻変動モデルにより再現した地殻変動量との較差が30mm以内であること（外部評価）。

なお、要領（案）では、基準点の異常による個別変動や地震・火山活動による地域的な変動は対象としていない。

3. Kriging法について

地殻変動パラメータ作成に先立ち、Kriging法のアルゴリズム等を確認する⁴⁾。

3.1 概要

本研究では、「通常Kriging（＝Ordinary Kriging）」法によるグリッド化を行う。通常Krigingとは、対象とする領域が有界、かつ二次定常性の確保された確率場である時に、実際の複数観測値と空間パターンから、領域内未知点（例えばグリッドの交点）での各観測値の重み係数を推定し、未知点の値（確率変数）を求める方法である。ここで、二次定常性とは、

- ・一次モーメントが定常：領域内の各点の期待値は一定である

かつ、

- ・二次モーメントが定常：領域内二点間の分散の差は二点間の距離と方向にのみ依存する

であることを言う。

3.2 バリオグラム

領域の空間パターンを知る方法として、領域内、全ての観測値二点間の組み合わせについて、横軸に点間（離間）距離、縦軸に非類似度をプロットする。非類似度 $\gamma(\bar{h})$ は、

$$\gamma(\bar{h}) = \frac{1}{2} (z(\bar{x}_\alpha + \bar{h}) - z(\bar{x}_\alpha))^2$$

と定義され、ある位置 $\bar{x}_\alpha$ における確率変数としての観測値 $Z(\bar{x}_\alpha)$ と、 $\bar{x}_\alpha$ からベクトル $\bar{h}$ 離れた位置の観測値との類似性を表す尺度である。 $|\bar{h}|$ に対して $\gamma(|\bar{h}|)$ をプロットした結果は、バリオグラム雲（Variogram Cloud）と呼ばれるが、多くの場合、低い非類似度（即ち高い類似度）で占められ、そのままの利用は困難である。そのため、 $|\bar{h}|$ を区間分けし、区間内、全ての非類似度の平均をプロットす

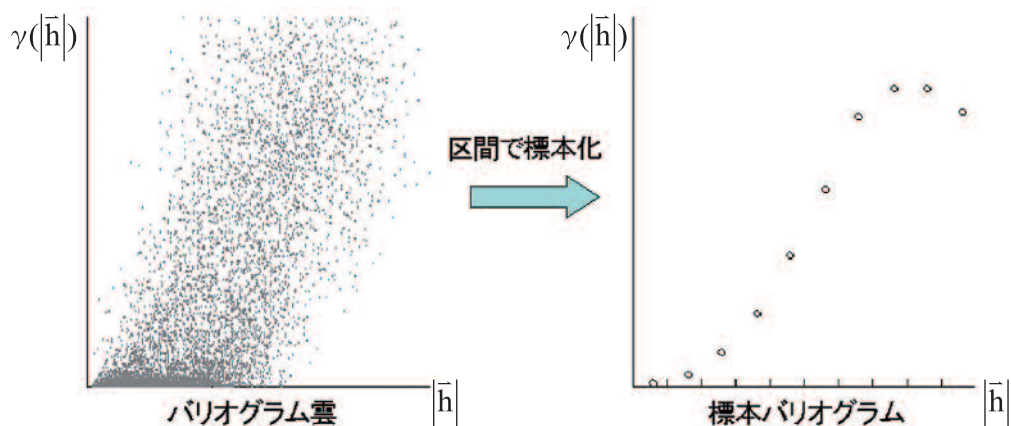


図3 バリオグラム雲と標本バリオグラム

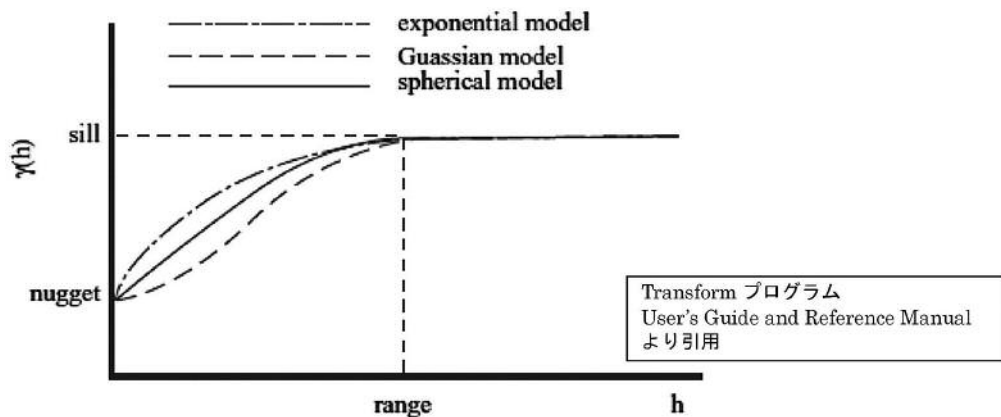


図4 代表的な共分散関数パターン

る。このように標本化したものを標本バリオグラムと呼ぶ。

続性（信号処理における白色ノイズと等価）

3.3 共分散関数

二次定常性が確保された有界な領域では、共分散関数を用いてバリオグラムを表すことができる（理論バリオグラム）。これにより、空間パターンを関数化できたことになる。図4に代表的な共分散関数として、指数型、ガウス型、球型のパターンを示す。

実際に共分散関数をバリオグラムに適合させる場合は、図中にある次の3つの特性的な値を決める必要がある。

- ・ Sill：バリオグラムの上限値（実処理時、非類似度はSillの値を「1」として正規化する）
- ・ Range：Sillに達する点間距離
- ・ Nugget：バリオグラムの原点付近の不連

3.4 通常Kriging法

ある点 $\bar{x}_0$ の値を、その近傍に存在する n 個の標本点 $\bar{x}_\alpha$ におけるデータ値 $Z(\bar{x}_\alpha)$ と重み係数 ω_α を用いた線形結合による推定値として表すと、

$$Z^*(\bar{x}_0) = \sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha Z(\bar{x}_\alpha)$$

と書くことができる。ここで、データ値がすべて一定値をとるような特殊な場合を考えると、推定値もその値と一致すべきであることから、

$$\sum_{\alpha=1}^n \omega_\alpha = 1$$

となるような制約条件が必要となる。理論バリオグラムによって関数化された非類似度を用いると、推定分散は、

$$\sigma_E^2 = E[(Z^*(\bar{x}_0) - Z(\bar{x}_0))^2] = -\gamma(\bar{x}_0 - \bar{x}_0) - \sum_{\alpha=1}^n \sum_{\beta=1}^n \omega_{\alpha} \omega_{\beta} \gamma(\bar{x}_{\alpha} - \bar{x}_{\beta}) + 2 \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} \gamma(\bar{x}_{\alpha} - \bar{x}_0)$$

となる（第二項はNugget効果）。重み係数に関する制約条件のもとに推定分散を最小化すると、次の通常Kriging法基本式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \gamma(\bar{x}_1 - \bar{x}_1) & \cdots & \gamma(\bar{x}_1 - \bar{x}_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(\bar{x}_n - \bar{x}_1) & \cdots & \gamma(\bar{x}_n - \bar{x}_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(\bar{x}_1 - \bar{x}_0) \\ \vdots \\ \gamma(\bar{x}_n - \bar{x}_0) \\ 1 \end{bmatrix}$$

ここで、 μ はラグランジュ乗数である。また、この時、 $\bar{x}_0$ 点における分散値は、

$$\sigma^2 = \mu - \gamma(\bar{x}_0 - \bar{x}_0) + \sum_{\alpha=1}^n \omega_{\alpha} \gamma(\bar{x}_{\alpha} - \bar{x}_0)$$

となる。なお、通常Kriging法は、共分散関数が定義できた場合の最小二乗コロケーションによる補間アプローチと等価である。

本研究では、通常Kriging法による推定を行うソフトウェアとして、TKY2JGDやPatchJGDのパラメータ作成で実績のあるビジュアルデータ解析ツール「Transform」プログラム（米国Fortner Software社）を使用する。

3.5 通常Kriging法のメリット、デメリット

通常Kriging法による領域の補間推定は、ポ

リゴン化、（例えば球関数などによる）曲面近似、（距離による）重み付け平均など、その他の推定方法に対して、以下のメリットがある。

- ・推定位置上に観測値があった場合、推定値が観測値に完全に一致する
- ・（一般的に）推定結果は連続で平滑となる
- ・推定後の分散により一次的な検証が可能

一方、デメリットは、事前に、領域のバリオグラムによる空間パターンの認知が必要となることである。

4. 電子基準点変動量による地殻変動パラメータの作成

本研究のモデル地区として、図5の三地区

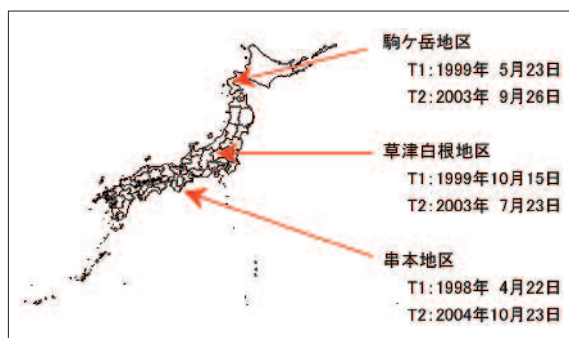


図5 モデル地区

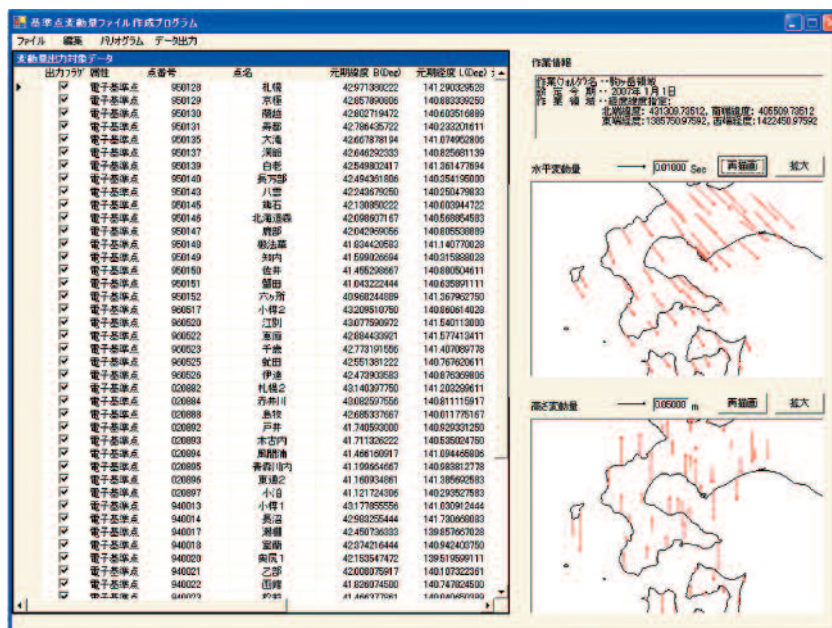


図6 基準点変動量ファイル作成プログラム

において、各々の1回目観測日T1および2回目観測日T2を選定した。

なお、「Transform」プログラムには、バリオグラム作成機能が無いため、成果データ読み込み～変動量計算～バリオグラム作成まで、一連の処理を行う基準点変動量ファイル作成プログラムを自作した。

このプログラムには、その他にも、電子基準点の元期～今期間の経年変動表示、ある点の観測日T1、T2の繰り返し観測結果から変動速度を求め元期と今期の座標と変動量を算出する機能、変動量をTransformプログラム用ファイルに出力する機能など、Kriging法を実行するための前処理機能を付加した。

4.1 電子基準点変動量による標本バリオグラムの作成と共分散関数の適用

電子基準点の変動量は、「セミ・ダイナミック補正要領（案）及び同運用基準」に従い、今期（2007年1月1日に設定）から14日間の電子基準点f2解平均値（人為的なオフセットの補正とITRF2000 → ITRF94変換済み）と、電子基準点成果値、即ち、元期（1997年1月1日）座標との差を取り、 ΔB （緯度変動）、 ΔL （経度

変動）、 Δh （高さ変動）とした。なお、高さ方向については、計算の有効桁数をできるだけ確保するため、標高差ではなく、三次元直交座標 → BLh変換された楕円体高差を用いた。

各モデル地区の領域は、まず、10区間程度の標本バリオグラムをプロットするため、繰り返し観測されたデータ地域を中心とした、経度範囲：緯度範囲 = 60" : 40"（20万分1図、一次メッシュと同じ比率）で、50程度の電子基準点（1225サンプル）を含む範囲とした。

図7は駒ヶ岳地区のプロットである。バリオグラム雲を背景に、描画Rangeを分割した区間の非類似度平均値を「○」で示した。標本高さ方向（右下図）は、経緯度差約1°を越えた所でSillに到達し、その後、実際には相関があるとは思えないRangeとなっている。しかし、緯度変動（左上図）、経度変動（中央図）では、Sillが見えない。このため、領域を広げプロットした結果（図8）以下の共分散関数モデルが適当とした（SillはRangeでの非類似度を「1」とするよう正規化）。

共分散関数： 緯度変動、経度変動、高さ変動ともガウスモデル

Range（経緯度差）： 緯度変動 = 3.9° 緯

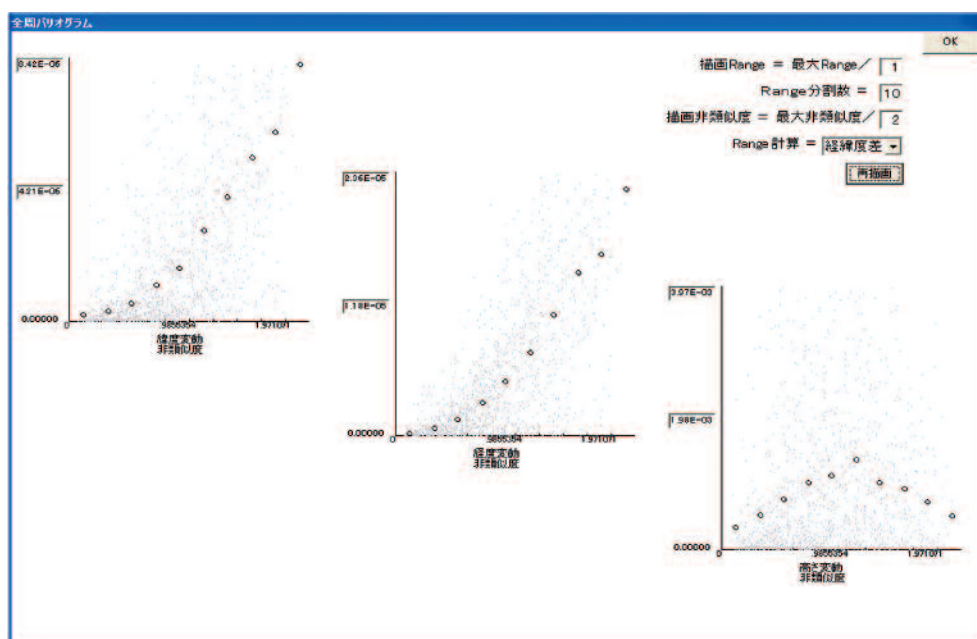


図7 駒ヶ岳地区（領域未調整）：左から ΔB 、 ΔL 、 Δh の標本バリオグラムを表示

度変動 = 3.1° 高さ変動 = 1.3°

Nugget : なし

なお、Rangeを経緯度差で表した時、北緯が高い、あるいは経緯度差が大きくなった場合に、実際の距離とのズレが懸念される。このため、別途、Rangeを球面距離で表した場合の標本バリオグラムもプロットし、両者が、ほぼ同じ形状であることを確認している。

同様に、他の2地区においても標本バリオグラムを作成し、以下のモデルを得た。

草津白根地区 共分散関数： 緯度変動、
経度変動、高さ変動ともガウスモデル
Range（経緯度差）： 緯度変動 = 0.8° 緯
度変動 = 5.0° 高さ変動 = 0.8°

Nugget : なし

串本地区 共分散関数： 緯度変動、経度
変動、高さ変動ともガウスモデル

Range（経緯度差）： 緯度変動 = 2.6° 緯
度変動 = 1.5° 高さ変動 = 1.9°

Nugget : なし

4.2 バリオグラムの異方性とグリッド化領域の決定

早速、求めたガウスモデルを用いて地殻変

動パラメータの作成を試みたが、変動量が一不連続になったり、解が求まらない場合が生じたりと、正常な計算ができなかった。これは、標本バリオグラムが $\bar{h}$ ではなく、 $|\bar{h}|$ に対して描かれているためと考え、二点間の方向ごとにプロットを行った。

図9は、駒ヶ岳地区の二点間の経緯度差から求めた方向角について、 0° から 15° おきの区間ごとに標本バリオグラムを描いたものである（方向角区間の違いをカラーコードで表現した）。これによると、バリオグラムは明らかに異方性（Anisotropy）を持っており、そのままKriging法を適用することには問題がある。異方性は、方向によってRangeが異なるケースと、RangeとSillが異なるケースがあるが、変化が一不連続でなければ、二点間の方向角によって回転とスケールの線形変換を施すことにより補正できる（パラメータを作る時には逆変換を掛ける）。現在では、異方性を考慮したKriging法が可能な研究用フリーソフトが複数存在する。ただし、残念ながら、Transformプログラムでは、任意方向の異方性を考慮することはできない。

ところで、図9からも、異方性はRangeの

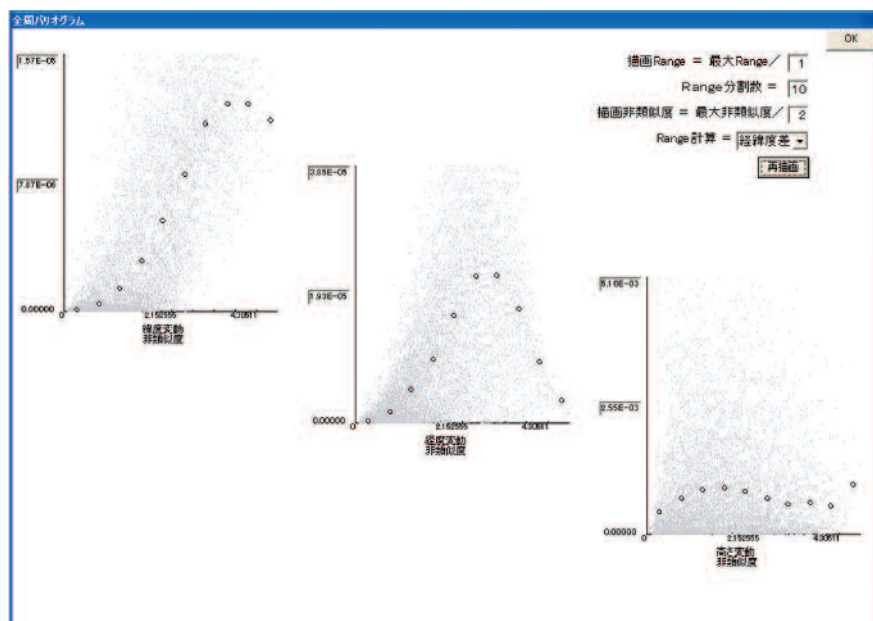


図8 駒ヶ岳地区

近いところでは影響が小さく見える。そこで、求める精度に対して異方性の影響がなくなるまで、対象となる領域を狭くすることにした（図10）。

領域を狭くすると、対象となる電子基準点の組み合わせが少なくなるため、標本バリオグラムでの確認が困難になるが、経緯度差0.5°未満（約50km）であれば、異方性の影響は少ないように見える。そこで、各モデル地区において、グリッド化を考える領域を以下

のように定めた。これにより、繰り返し観測の行われた地域付近では、経緯度差で約0.5°以内にある電子基準点の変動量を使用して、グリッド化を行うことができる。

駒ヶ岳地区 北緯41°40′00″～42°25′00″

東経140°07′30″～141°15′00″

草津白根地区 北緯 36°20′00″～36°55′00″

東経138°07′30″～139°00′00″

串本地区 北緯 33°20′00″～33°45′00″

東経135°22′30″～136°00′00″

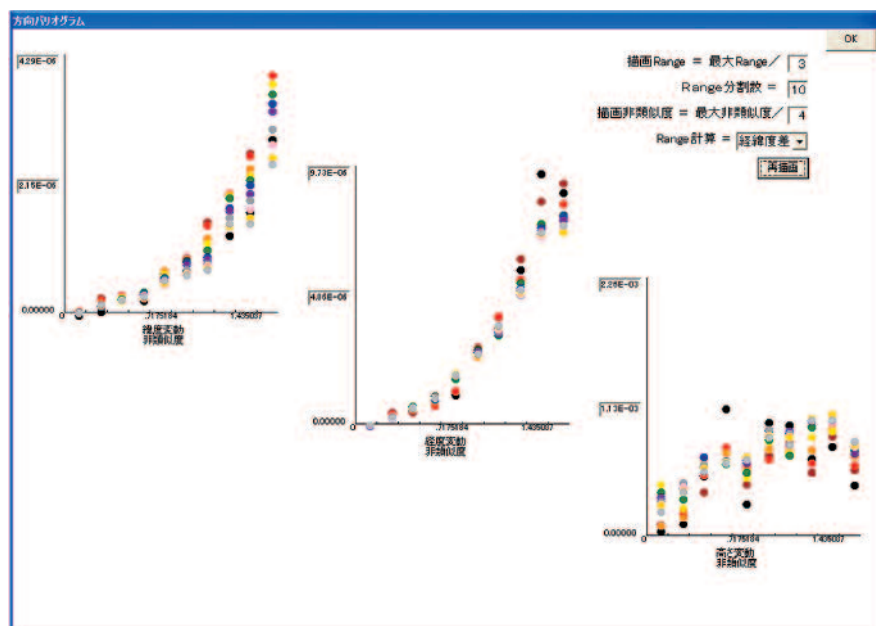


図9 方向バリオグラム（駒ヶ岳地区）

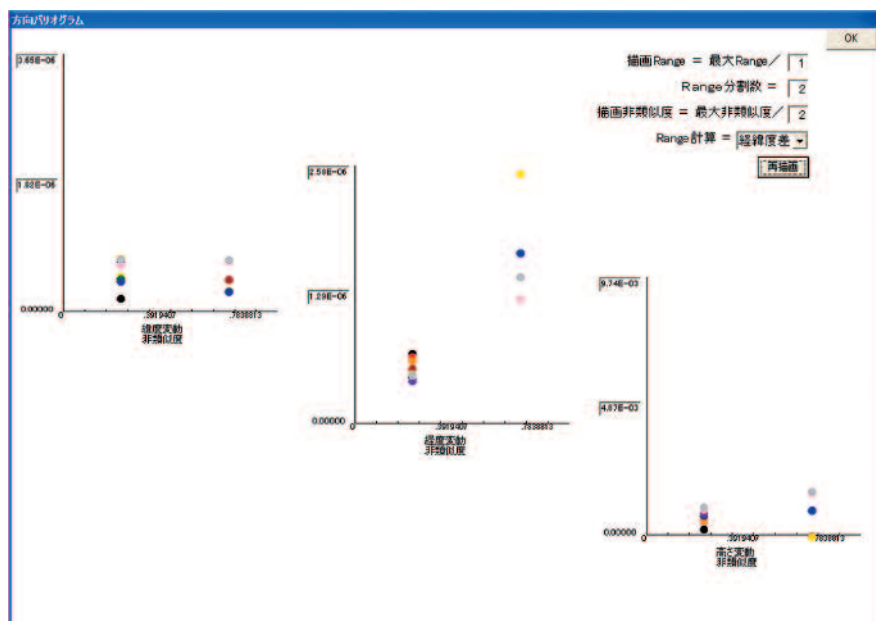


図10 駒ヶ岳地区方向バリオグラム（狭い領域）

4.3 地殻変動パラメータの作成

前項で得られた条件（ガウス型の共分散関数モデルとRange、使用する電子基準点の領域）を用い、通常Kriging法により地殻変動パラメータを算出する。求めるグリッドは元期座標に対する三次メッシュとし、TKY2JGDやPatchJGDと同様、補正値は、未知点を含むグリッドの交点の値からバイ-リニア補間計算で求める。

4.3.1 推定結果

結果の一例として、2007年1月1日を今期とした、駒ヶ岳地区緯度方向の変動量図、および地殻変動パラメータ推定結果としてカラー・チャートで示した変動量と分散の分布図を図11に示す。

4.3.2 交差検証

通常Kriging法の特徴として、観測データ自身をパラメータに入力して検証をしようとしても、グリッド化誤差しか検出できない。そこで、パラメータの検証として「交差検証」と呼ばれる方法が取られる。これは、観測データの一点を外し、その他の条件は同じ状態でパラメータを作成、外した観測点のデータで検証を行う方法である。今回作成したパラメータに対して、なるべく中央付近（領域が狭いため）にある電子基準点で交差検証した結果は以下の通りとなり、データ数が少ないながら、「セミ・ダイナミック補正要領（案）及び同運用基準」で定める外部評価制限値の較差30mmを満たす、良好なグリッドパラメータが得られた。

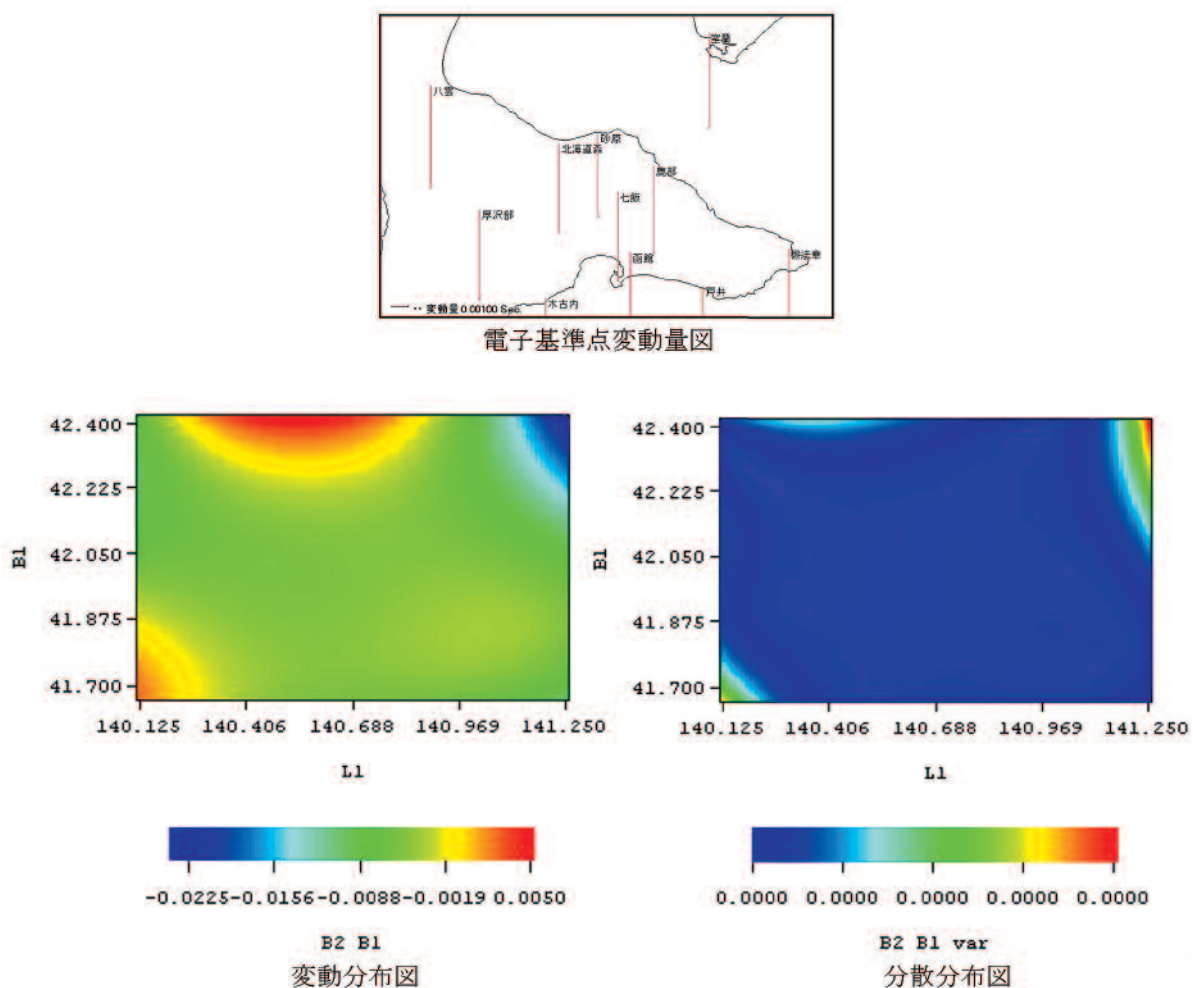


図11 駒ヶ岳地区緯度方向地殻変動パラメータ推定結果

表 1 各モデル地区の交差検証結果

駒ヶ岳地区 七飯

	緯度変動量 (Sec.)	経度変動量 (Sec.)	高さ変動量 (m)
電子基準点変動量	-0.0051	0.0048	0.046
地殻変動パラメータ	-0.0048	0.0048	0.032
較 差	-0.0003	0.0000	0.014
距離換算	-0.001m	0.000m	

草津白根地区 草津

	緯度変動量 (Sec.)	経度変動量 (Sec.)	高さ変動量 (m)
電子基準点変動量	-0.0049	-0.0018	-0.017
地殻変動パラメータ	-0.0051	-0.0016	-0.037
較 差	0.0002	-0.0002	0.020
距離換算	0.006m	-0.005m	

串本地区 古座川

	緯度変動量 (Sec.)	経度変動量 (Sec.)	高さ変動量 (m)
電子基準点変動量	-0.0035	-0.0024	-0.035
地殻変動パラメータ	-0.0043	-0.0032	-0.033
較 差	0.0008	-0.0008	-0.002
距離換算	0.024m	-0.021m	

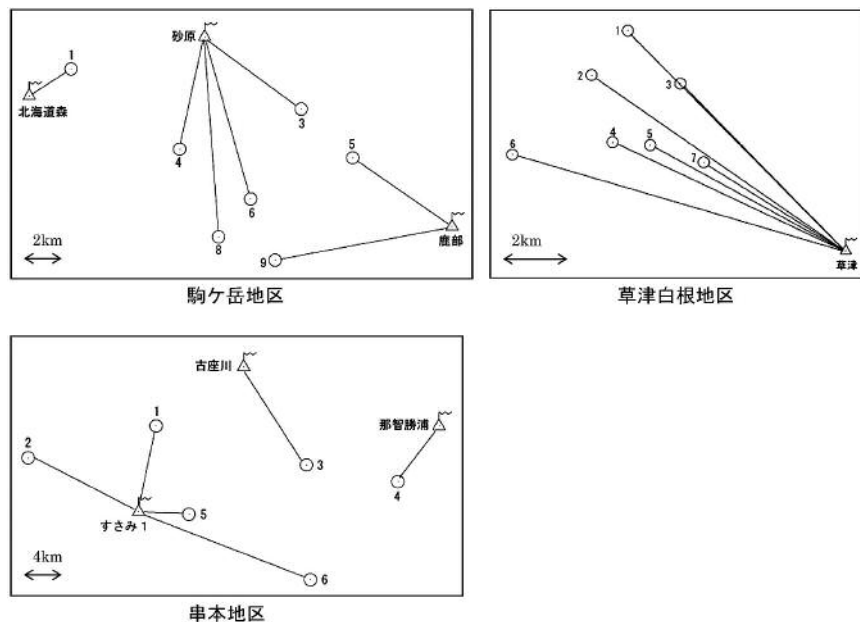


図12 各地区解析図

5. 繰り返し観測データの利用

各モデル地区の繰り返し観測データから地殻変動量検出を試みる。

5-1. 繰り返し観測からの今期地殻変動量の検出

まず、観測日T1、T2で繰り返し観測されたデータを、以下の条件で基線解析する。

- ・基線解析ソフトウェア：Trimble Total Contorl (=TTC) Ver2.73
- ・基線解析時固定点：観測点から最も近い電子基準点
- ・既知点座標：観測日を中心とした14日間の電子基準点f2解平均値から人為的なオフセットの補正とITRF2000 → ITRF94変換を行ったGRS80座標

・IGS精密暦（Final）を使用

・（中）日本測量機器工業会が提供するアンテナ位相特性データによりPCV補正を行う

解析によって得られた最適な線形結合による基線解（基本的にはL1Fix解）で、観測点の座標を決定する。放射法による座標決定となるが、網平均を掛けないのは、網を形成するために長距離基線解（Iono-Free解）を入れた結果、観測点の標準偏差が不要に大きくなることを避けるためである（図12）。このようにして得られた観測日T1、T2の座標差から観測点における変動速度を求め、元期、今期の座標値を推定し、地殻変動量を求めた。

5-2. 地殻変動パラメータとの比較（外部評価）

得られた地殻変動量と、地殻変動パラメータから求めた値を比較すると、結果は表2の

ようになった。なお、パラメータ計算の入力座標としては、前項の元期推定座標を用いた。

各地区とも、地殻変動パラメータから求めた値に対して、較差の小さい点も見えるが、全体としてバラツキが大きく、緯度・経度変動量較差の距離換算及び高さ方向の較差で30mmを超える点も見られる。この較差が、実際の局所的な地殻変動の現れであるかどうかの判定は慎重に行われる必要があり、結果として、今回のモデル地区においては、繰り返し観測から得られた変動量のみを用いたパラメータ良否判定や地殻変動モデルへの組み込みは、安易に行うことはできない。この原因として、

①今回、4、5年の観測間隔に対し、元期～今期の間隔を10年と設定したため、観測誤差が拡大され、大きく影響した。

②実際の地殻変動は単純な一次関数ではな

駒ヶ岳地区

表2 各地区における外部評価結果

ID		緯度変動量 (Sec.)	経度変動量 (Sec.)	高さ変動量 (m)
1	繰り返し観測	-0.0040	0.0040	0.074
	地殻変動パラメータ	-0.0050	0.0047	0.032
	較 差	0.0010	-0.0007	0.042
3	繰り返し観測	-0.0043	0.0055	0.025
	地殻変動パラメータ	-0.0050	0.0055	0.031
	較 差	0.0007	0.0000	-0.006
4	繰り返し観測	-0.0045	0.0037	0.009
	地殻変動パラメータ	-0.0052	0.0050	0.040
	較 差	0.0007	-0.0013	-0.031
5	繰り返し観測	-0.0037	0.0043	0.014
	地殻変動パラメータ	-0.0051	0.0057	0.003
	較 差	0.0014	-0.0014	0.011
6	繰り返し観測	-0.0076	0.0036	0.044
	地殻変動パラメータ	-0.0052	0.0052	0.042
	較 差	-0.0024	-0.0016	0.002
8	繰り返し観測	-0.0058	0.0044	0.039
	地殻変動パラメータ	-0.0053	0.0050	0.046
	較 差	-0.0005	-0.0006	-0.007
9	繰り返し観測	-0.0044	0.0029	0.143
	地殻変動パラメータ	-0.0052	0.0052	0.044
	較 差	0.0008	-0.0023	0.099
較差の平均		0.0002	-0.0011	0.016
較差の標準偏差		0.0013	0.0008	0.043

表2 各地区における外部評価結果（続き）

草津白根地区

ID		緯度変動量 (Sec.)	経度変動量 (Sec.)	高さ変動量 (m)
1	繰り返し観測	-0.0047	0.0007	-0.085
	地殻変動パラメータ	-0.0052	-0.0014	-0.015
	較 差	0.0005	0.0021	-0.070
2	繰り返し観測	-0.0064	-0.0013	-0.064
	地殻変動パラメータ	-0.0053	-0.0014	-0.018
	較 差	-0.0011	0.0001	-0.046
3	繰り返し観測	-0.0042	-0.0013	-0.040
	地殻変動パラメータ	-0.0051	-0.0016	-0.016
	較 差	0.0009	0.0003	-0.024
4	繰り返し観測	-0.0049	-0.0007	-0.064
	地殻変動パラメータ	-0.0052	-0.0014	-0.020
	較 差	0.0003	0.0007	-0.044
5	繰り返し観測	-0.0042	-0.0022	0.032
	地殻変動パラメータ	-0.0052	-0.0015	-0.019
	較 差	0.0010	-0.0007	0.051
6	繰り返し観測	-0.0053	0.0009	-0.042
	地殻変動パラメータ	-0.0054	-0.0012	-0.024
	較 差	0.0001	0.0021	-0.018
7	繰り返し観測	0.0040	-0.0015	-0.032
	地殻変動パラメータ	-0.0051	-0.0016	-0.018
	較 差	0.0091	0.0001	-0.014
	較差の平均	0.0015	0.0007	-0.024
	較差の標準偏差	0.0034	0.0011	0.038

串本地区（注記：ID6の基線解析結果は、Iono-Free解となった）

ID		緯度変動量 (Sec.)	経度変動量 (Sec.)	高さ変動量 (m)
1	繰り返し観測	-0.0012	-0.0028	-0.003
	地殻変動パラメータ	-0.0034	-0.0034	-0.025
	較 差	0.0022	0.0006	0.022
2	繰り返し観測	-0.0019	-0.0037	-0.005
	地殻変動パラメータ	-0.0023	-0.0034	-0.011
	較 差	0.0004	-0.0003	0.006
3	繰り返し観測	-0.0025	-0.0038	0.023
	地殻変動パラメータ	-0.0038	-0.0035	-0.046
	較 差	0.0013	-0.0003	0.069
4	繰り返し観測	-0.0024	-0.0046	-0.054
	地殻変動パラメータ	-0.0034	-0.0038	-0.065
	較 差	0.0010	-0.0008	0.011
5	繰り返し観測	-0.0021	-0.0042	0.009
	地殻変動パラメータ	-0.0032	-0.0047	-0.023
	較 差	0.0011	0.0005	0.014
6	繰り返し観測	-0.0016	-0.0058	0.057
	地殻変動パラメータ	-0.0015	-0.0047	-0.012
	較 差	-0.0001	-0.0011	0.069
	較差の平均	0.0010	-0.0002	0.032
	較差の標準偏差	0.0008	0.0007	0.029

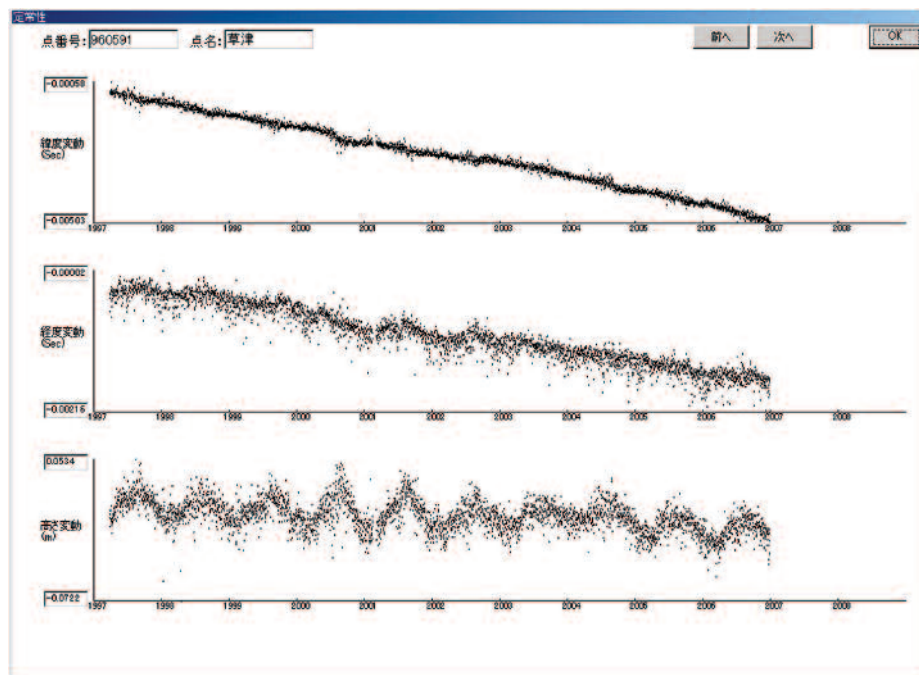


図13 電子基準点の変動時系列

く、変動速度だけでは元期、今期の算出ができない可能性がある。

③T1、T2の観測季節が異なるため、年周期変動の影響を受けた。

などが考えられる。参考までに、図13に草津白根地区近傍の電子基準点の変動時系列をプロットした。

なお、実際の高度地域基準点測量については、元期の成果が得られているため、繰り返しとなる次の観測が行われれば、電子基準点と同様、直接、元期からの変動量を得ることができ、上記①、②の問題が回避され、利用の有効性が期待できる。

6. まとめ

- ・標本バリオグラムを作成し、空間パターンを捉えることによって、良好なグリッドパラメータを作成することができた。また、作成したパラメータの評価には、交差検証が有効である。
- ・実際に標本バリオグラムを描くと、Rangeや異方性が地域ごとに大きく異なっている

ことが分かった。全国を同じRangeで画一的にグリッド化するためには、異方性対応のKriging推定プログラムを開発することが望ましい。

- ・2回の繰り返し観測による変動速度のみから得られた元期～今期の変動量は、観測誤差が拡大されている可能性があり、外部評価への利用や地殻変動モデルへの取り込みは、慎重に判断される必要がある。元期成果が精度良く求まっている高度地域基準点での繰り返し観測が待たれる。

7. 今後の課題（公共測量における基準点測量作業へのセミ・ダイナミック補正の適用）

公共測量においても、基本測量と同様、地殻変動の影響により使用する既知点間の水平距離変動および高低差変動が大きくなった場合は、位置精度確保のため、セミ・ダイナミック補正を適用することが望ましい。ただし、公共基準点は、点間の距離と方向角精度を確保するために階層構造を取らなければなら

ず、既知点間距離が短い。1級基準点の既知点間標準距離4kmで10cm (=25ppm) 以上も差が出るのは、かなり先になる。

しかし、電子基準点のみを既知点とする1級基準点測量では既知点間距離が長くなるため、作業地域の周辺の変動量確認が必要と思われる。たとえば、セミ・ダイナミック補正が適用されるまで、国土地理院HP上から、事前に、作業に使用する電子基準点間の変動量差が確認できる機能が提供されるだけでも、設計変更などに効果的である。

また、ネットワーク型RTK-GPSも長距離網を利用するため、地殻変動の影響を受けやすいと想像できる。基準点測量では、決められた点間距離内の基線ベクトルを観測量としているため問題無いが、単点観測法的に座標決定に用いる場合は注意が必要であり、公共測量に限らず、このような利用を行っている作業員に対しても、注意喚起すべきである。

さらに、先に作業前に「電子基準点間の変動量差が確認できる機能」を要望したが、むしろ公共測量等の基準点測量において、網平均計算結果に対するカイ二乗検定等の統計的検定手法を導入しても良いのではないか？ 従来、日本の基準点測量では、フリーネットワーク的なアプローチを除いて、決められた既知点、測量手法、測量機、観測精度を維持することで網平均後の測量成果品質を確保していた。セミ・ダイナミック補正によって「既知点も動く」となることをきっかけに、網平均そのものの確からしさを検証することを条件に、地域に応じた、従来の方法だけにとらわれない、最適な測量手法による測量成果が認められるようにならないだろうか？ 例えば、異なる観測間の重量調整の問題が起きた時、両者に仮のスケールを与え、それが妥当であるかどうかの検討が可能になる。測距・測角観測とGPS測量観測を混合して網平

均を掛けることもできるのではないか？ 今後の研究課題としたい。

■謝辞

平成19年度部外研究にご指導をいただいた国土地理院測地部測地基準課の皆様、および本紙内容のご確認をいただいた、越智測地基準課長補佐様、檜山基準管理係長様に、厚く御礼申し上げます。

■参考文献

- 1) 谷河 寿朗：国土地理院部外研究「地殻変動補正の有効性の確認及び補正データ作成方法の検討」（2005年）
- 2) 西田 文雄：国土地理院測地部技術報告書「公共測量の精度の設定についての一考察」（1994年）
- 3) 千先 治樹：「NewGEONETで測地成果2000を基準とした歪図を描く手法」（2006年）
- 4) Hans Wackernagel原著、地球統計学研究委員会訳編：「地球統計学」森北出版株式会社（2004年）

■執筆者

五十嵐 祐一

所属：(株)ニコン・トリンブル

ソリューション・システム部

GNSSグループ

e-mail：igarashi.yuichi@nikon-trimble.net