

電子基準点「山形新庄」において冬季に見られる地盤変動 Winter-time Ground Displacement Observed at GEONET Station “Yamagata Shinjo”

地理地殻活動研究センター 兒玉篤郎・飛田幹男・宗包浩志・山田晃子・高野和友

Geography and Crustal Dynamics Research Center

Tokuro KODAMA, Mikio TOBITA, Hiroshi MUNEKANE,

Akiko YAMADA and Kazutomo TAKANO

北海道地方測量部 吉川正幸

Hokkaido Regional Survey Department Masayuki YOSHIKAWA

東北地方測量部 阿部 馨

Tohoku Regional Survey Department Kaoru ABE

関東地方測量部 真野宏邦

Kanto Regional Survey Department Hirokuni SHINNO

要 旨

山形県新庄市に設置されている電子基準点「山形新庄 (940033)」は、冬季に西向き及び沈下方向に約 1～2 cm の局所的な変動を示すことが、以前から報告されている。その原因として、凍上、積雪荷重、レドームへの着雪によるアンテナ位相特性の変化、及び消雪のための地下水くみ上げなどが挙げられるものの、特定には至らなかった。

我々は、電子基準点「山形新庄 (940033)」における冬季の地盤変動と新庄市市街地における消雪のための地下水くみ上げとの関連を調べるため、2006 年 10 月 5 日から 2007 年 10 月 16 日まで GPS 連続観測点（以下、「GPS 固定点」という。）を新庄市の中心部に設置し観測を行った。また、GPS によるキャンペーン観測を 2007 年 2 月と 10 月に行った。

解析の結果、冬季の地盤変動は消雪のための地下水くみ上げに伴う帯水層の弾性的な収縮でよく説明できることが分かった。

1. はじめに

山形県新庄市に設置されている電子基準点「山形新庄 (940033)」については、以前より冬季に局所的な地盤変動を示すことがわかっている（図-1）（阿部・他、2002）。一方、市内に設置してある地下水位観測井の「新庄 6 号井」（図-2）の地下水位の変動を示したものが図-3である。グラフを見ると、冬季にかけて地下水位が大きく下がっており、地下水位の変化と地盤変動が同期しているように見える。また、雪が少なく地下水位の変動が少なかった 2007 年度には、例年に比べて観測される地盤変動も小さくなっており、地下水位と地盤変動は、量的にも相関があるように見える。

地下水位の変化と同期して、観測点変動する現象は、他にも新潟県小千谷市や茨城県つくば市などで見られ、そのメカニズムは帯水層の弾性的な収縮

によるものであると考えられている（Sato et al., 2002；飛田ほか、2004；Munekane et al., 2004）。本件も同様のメカニズムが考えられるが、従来のメカニズムでは上下変動のみ説明していたため、本件では大きな水平変動が説明できること及び変動源中心部でさらに大きな上下変動を確認することが課題である。

そこで、本研究では、GPS 固定点での観測とキャンペーン観測の結果を基に、新庄市市街地の地盤変動の空間分布を明らかにし、その結果と地下水のくみ上げによる地盤変動との整合性を検証する。

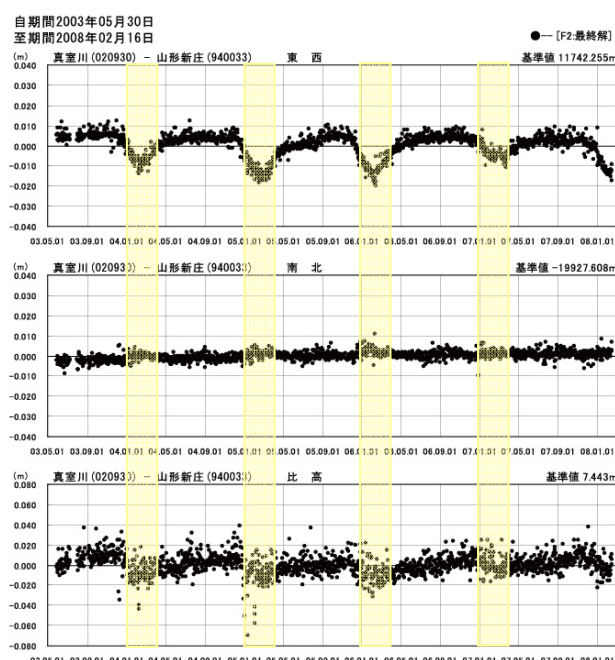


図-1 真室川-山形新庄の基線変化グラフ
(黄色帯の期間は各年の1月から3月にあたる。)

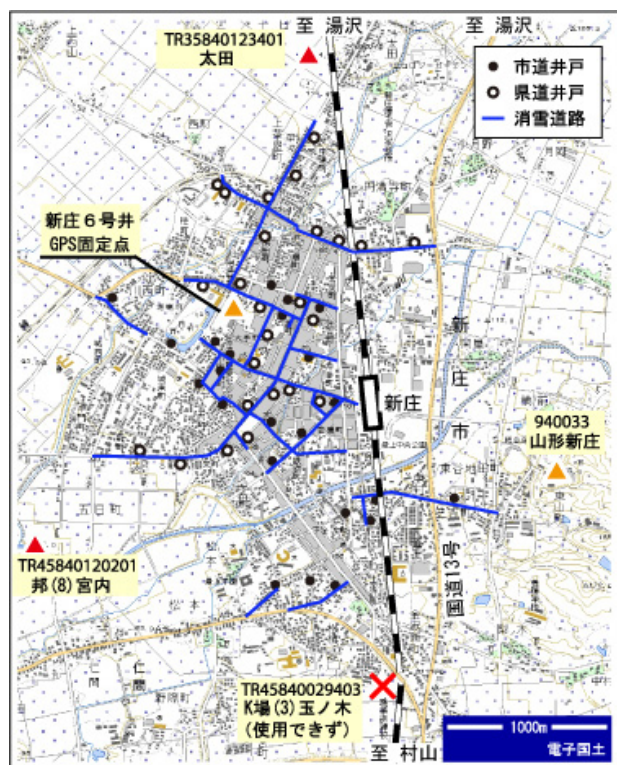


図-2 観測点及び汲み上げ井戸の配置図

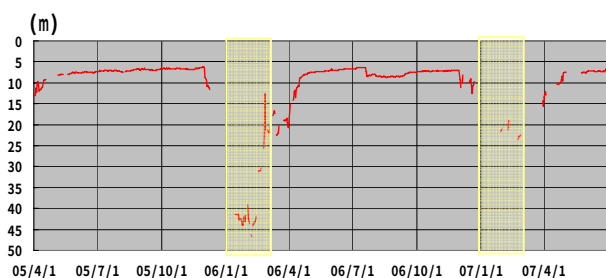


図-3 新庄6号井における地下水位変化グラフ
(黄色帯の期間は各年の1月から3月にあたる。
不連続は欠測による。)

2. 手法

まず、消雪による地下水くみ上げが原因である場合に変動が最も大きくなると考えられる新庄市の中心地で、且つ、周辺にくみ上げ井戸が多数ある図-2で示す観測井戸「新庄6号井」と同じ施設の屋上にGPS固定点を設置した(図-2)。

また、図-2に示す観測点のうち市街地周辺を囲む点として三等三角点「太田」と四等三角点「邦(8)宮内」を使用し、2007年2月と10月にキャンペーン観測を行った。なお、市街地を囲む点として南方に位置する四等三角点「K場(3)玉ノ木」も使用していたが、2007年10月に観測に行った際に観測点が傾斜しており改埋作業を行ったため、観測データは今回の調査研究では使用しなかった。

これらの観測点及び電子基準点「山形新庄

(940033)」の観測データを基に、変位ベクトル及び基線変化グラフの結果から新庄市街地の地盤の季節的な変動の空間分布を捉える。また、地下水くみ上げによる帯水層の収縮をモデル化し、そのモデルの妥当性を実際の地下水位の変動観測とあわせて定量的に検討した。

3. 得られた成果と考察

3.1 変位ベクトル図と基線変化グラフ

図-4に示すのは、GPS固定点での連続観測データを GAMIT10.31 (Herring et al., 2006a) で解析した成分変化ベクトルに加え、キャンペーン観測で得た2007年2月21-22日と10月17-18日のそれぞれの解析結果から10月を基準とした2月の変位ベクトルをプロットしたものである。キャンペーン観測の基線解析は、GAMIT10.31による精密暦の解析を行い、GLOBK5.12 (Herring et al., 2006b)により電子基準点「真室川(020930)」, 「最上(020931)」, 「大蔵(020933)」を固定点とする網平均の結果を使用した。図-5は図-4での点線部内の各観測点を新庄市街地と重ね合わせて表したもので、左図と右図がそれぞれ水平成分及び上下成分をプロットしている。図-5左図から新庄市の中心部に向かって冬季に観測点に変位しているのが分かる。また、図-5右図では、市街地中心部の観測点であるGPS固定点が最も沈降している。

基準期間：2007/10/10 - 2007/10/20
比較期間：2007/02/15 - 2007/02/25
(ただしGPS固定点は基準期間が2007/10/16まで、
太田・宮内はキャンペーン期間にて比較。)

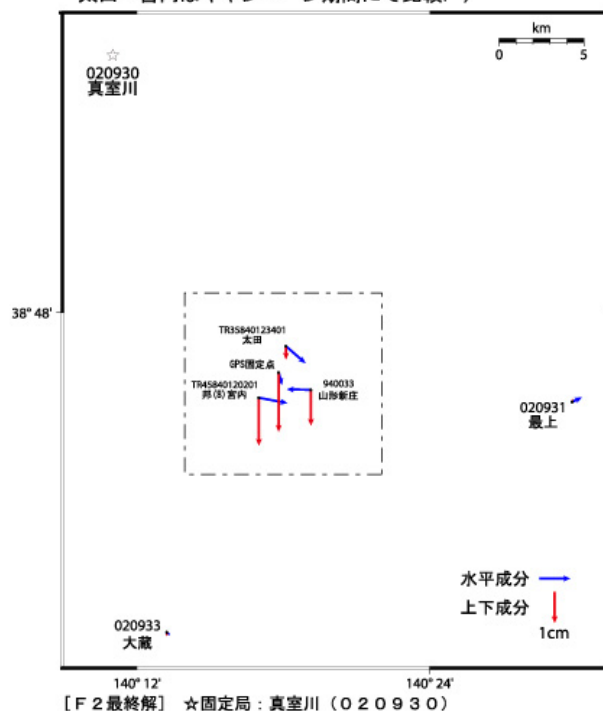


図-4 変位ベクトル図

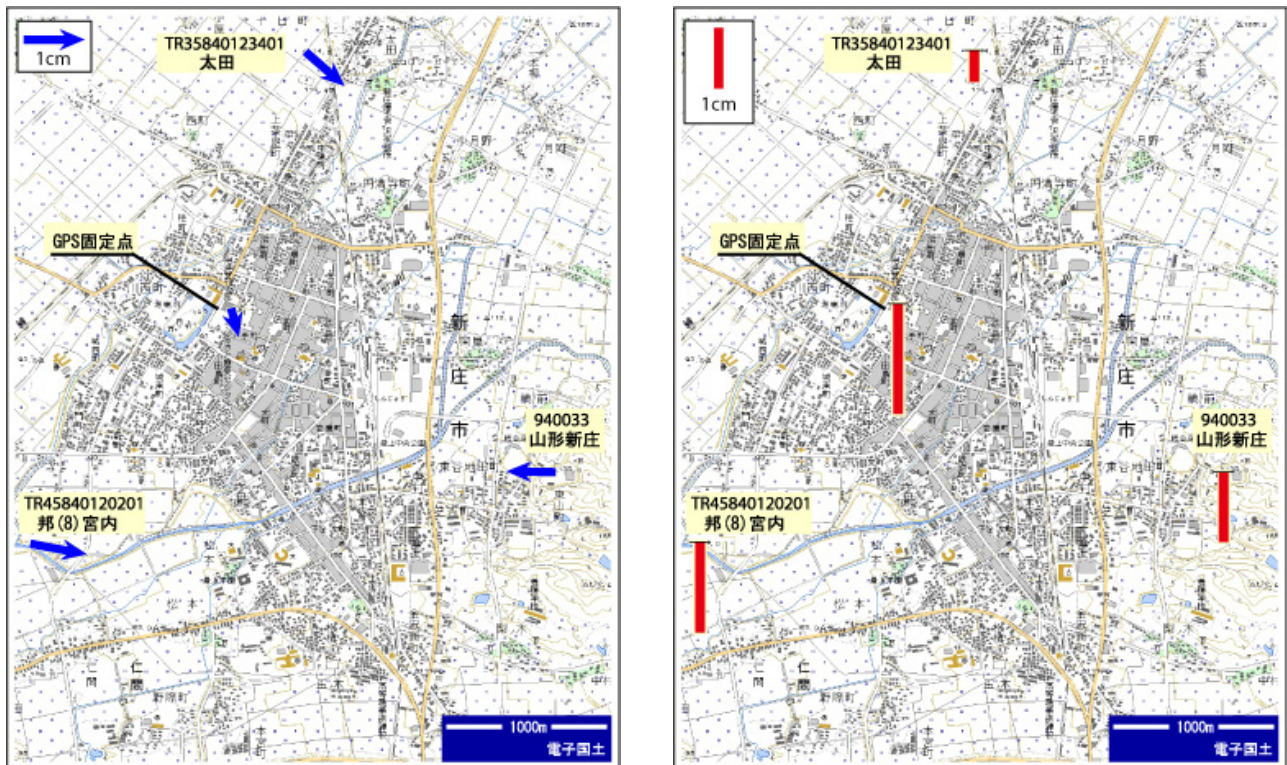


図-5 新庄市街地における変位ベクトル図（左：水平変位 右：上下変位）

自期間2006年10月01日
至期間2007年10月30日

成分変化グラフ

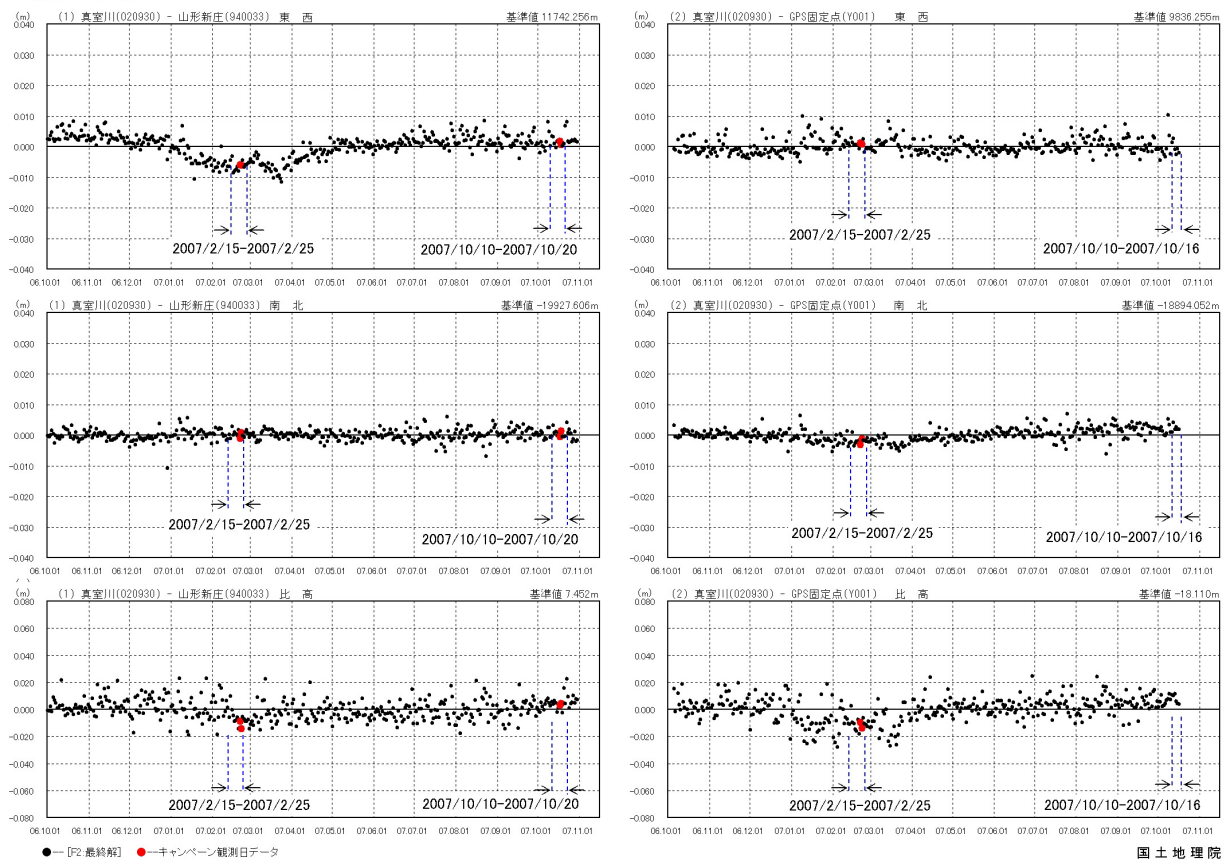


図-6 基線変化グラフ（左：真室川－山形新庄 右：真室川－GPS 固定点）

図－6は、GPS 固定点を設置していた期間における電子基準点「山形新庄（940033）」とGPS 固定点の基線変化グラフである。左右どちらのグラフも起点に電子基準点「真室川（020930）」を使用している。このグラフより、電子基準点「山形新庄（940033）」とGPS 固定点は冬季にのみ大きく変動しており、図－5でプロットした変位ベクトルが季節的なものであったことが分かる。

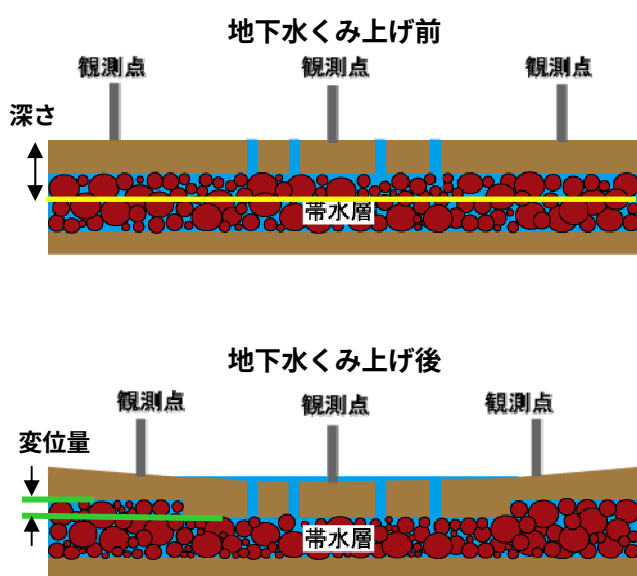
これらの特徴は、市の中心部に圧力の収縮源があるとする定性的に説明可能であり、地盤変動が地下水くみ上げによる帯水層の圧力減少によるものである可能性が高いと示唆される。

3. 2 収縮する帯水層のモデル化とその解析

3. 1 節では、変位ベクトルや基線変化グラフより定性的に地下水のくみ上げが原因であることが説明できた。では、実際に地下水の水位変化に対し新庄市街地の地盤はどのような変動を示すのか。

本節では、地下水の帯水層の位置とその変位量を推定することにより各観測点の地盤変動を捉え、実際の観測結果より地盤変動のメカニズムを定量的に検討する。

帯水層は層状に分布し、間隙水圧により膨張・収縮をすることから、火山のシルと同じようにモデル化できる。そこで今回は、帯水層を矩形のシル状と考え、その領域と変位量を求める（図－7）。これをシルモデルと言う。



図－7 シルモデル

解析には地殻活動観測データ総合解析システム（INCA）（鷺谷ほか，2003）を使い用いた。解析に使用した入力値は表－1の通りである。観測点の座標および変位量に関しては、図－4で使用した値と同じである。帯水層の深さに関しては、新庄市街地周辺の井戸深度（80～180m）（山形県，2007）より設定した。

表－1 INCA への入力値

観測点名	経度[deg]	緯度[deg]	東西変位[m]	南北変位[m]	上下変位[m]
山形新庄	140.31874	38.75860	-0.0077	0.0001	-0.0116
GPS固定点	140.29679	38.76791	0.0011	-0.0040	-0.0193
太田	140.30173	38.78207	0.0063	-0.0055	-0.0043
邦(8)宮内	140.28316	38.75446	0.0092	-0.0017	-0.0156
最上	140.49730	38.75220	0.0030	0.0015	0.0011
大蔵	140.22050	38.62840	0.0009	-0.0009	-0.0012
帯水層の深さ[m]		150			

（観測点座標と変位量は図－4と同じ。帯水層の深さは周辺の井戸深度より設定。）

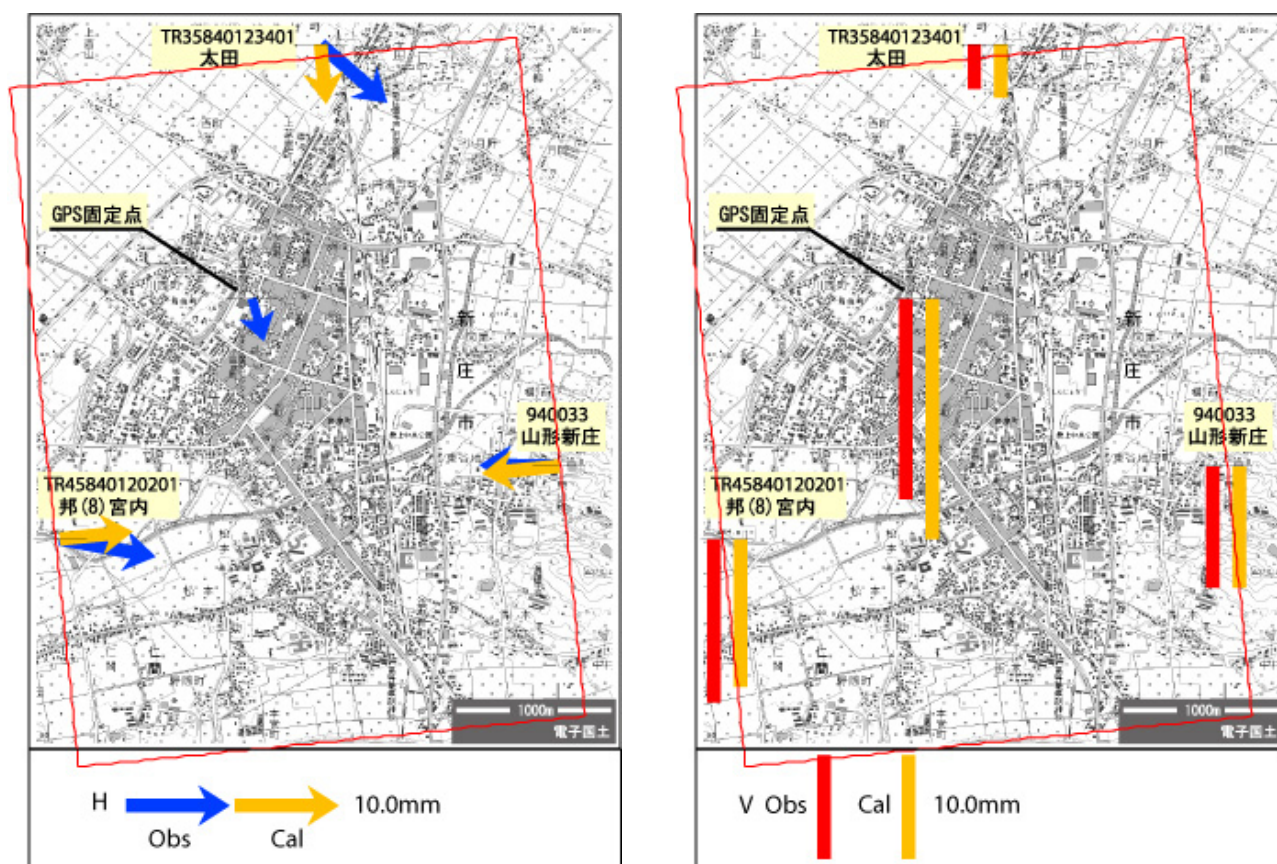
解析は帯水層の深さに強く拘束して行った。これにより計算された帯水層の変位量は下記に示す通りである。

帯水層の変位量：2.3cm

解析によって得られた沈下した帯水層領域と各観測点の変位ベクトル及び既に図－5でプロットした観測によって得られた変位ベクトルを重ね合わせてプロットしたものを図－8に示す。左図と右図は、それぞれ水平成分と上下成分をプロットしている。また表－2には、計算された変位ベクトルの値を示す。図－8より、変位ベクトルの計算値が実際の観測値を良く説明しており、数値結果と併せると赤い矩形で囲まれた区域の帯水層が2.3cm沈下したと考えることができる。

表－2 INCA による各観測点の変位ベクトル成分値

観測点名	東西変位[m]	南北変位[m]	上下変位[m]
山形新庄	-0.0073	-0.0007	-0.0116
GPS固定点	0	0	-0.0231
太田	0.0005	-0.0057	-0.0050
邦(8)宮内	0.0070	0.0007	-0.0142
最上	0	0	0
大蔵	0	0	0



図－8 沈下した帯水層領域と各観測点の変位ベクトル（左：水平変位 右：上下変位）

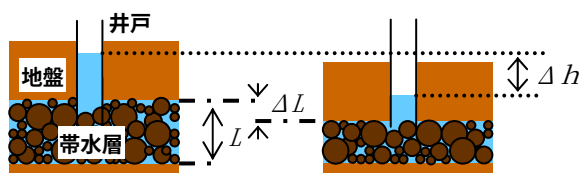
4. 検証 推定モデルの妥当性

3. 2節の解析によって得られた帯水層の変位量が地下水位の変位量から見て、あり得る値かどうかを検証する。検証方法は、歪み感度 S が実際にある値と比べて現実的なものかを検証する。歪み感度 S は図－9のように推定する。

$$S = \frac{\Delta h}{\varepsilon} \quad \text{ただし、} \varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

Δh : 地下水位変化量(m)、 S : 歪み感度($\text{mm}/10^{-8}$)

ΔL : 変位量(m)、 L : 帯水層の厚み(m)、 ε : 体積歪み

図－9 歪み感度 S の構成成分

歪み感度 S を求めるにあたり、今回使用した各成分の値は下記の通りである。

帯水層の厚み $L = 30 \sim 100\text{m}$

帯水層の変位量 $\Delta L = 0.023\text{m}$

地下水位の変化量 $\Delta h = 16\text{m}$

帯水層の厚みは、対象地区のボーリング調査等のデータがないため、周辺の観測井戸深度の深さや一般的な帯水層の厚みから推定した。また、帯水層の変位量は3. 2節の解析結果を用い、地下水位の変化量は図－3のグラフデータよりキャンペーン観測と似た時期のもの（地下水位データは2007年6月30日までであり欠測もあるため、2006年10月11～20日及び2007年2月23～27日の平均水位）から算出した。

上記の値から算出した歪み感度 S は下記の通りとなる。

$$0.21 < S < 0.69$$

例えば、東海地域での井戸での歪み感度 S は、

$$0.39 < S < 3.98$$

の範囲で得られている（松本・北川，2005）。この値

と比較しても、今回算出した歪み感度 S は現実的な値であるといえる。つまり、3. 2 節で算出した帯水層の変位量 (2.3cm) は十分にあり得る値であるということとなる。

5. まとめ

今回の結果より、電子基準点「山形新庄 (940033)」の冬季西向き変動の原因は消雪のための地下水くみ上げに伴う帯水層の収縮によって定性的にも定量的にも説明することができた。地下水くみ上げによる弾性変形が上下変動だけでなく水平変動を引き起こす事例とメカニズムを示した。

今回の観測では、市街地の南方に位置する観測点「K場 (3) 玉ノ木」(図-2) が傾斜していたため、観測データが使えなかった。今後、観測点を増加して観測を行えば、この地域の冬季地盤変動の要因である地下水くみ上げの影響をより詳細に知ることが

出来る。これは、その他の季節的変動のある GEONET 観測点での原因究明にも繋がると期待できる。

今回の調査研究が、そうした観測点にも活かされることを期待したい。

謝 辞

本研究を行うにあたり、山形県文化環境部環境企画課より地下水位等に関する資料及びデータを提供して頂きました。また、新庄市環境課より地下水の利用状況に関する情報提供をして頂きました。さらに、市民文化会館には GPS 固定点の設置に関して便宜を図って頂きました。

INCA の使用やモデルの作成に関しては、国土地理院地理地殻活動研究センター西村卓也主任研究官より多くの助言を頂きました。

ここに記して関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 阿部 馨, 池田尚應, 原 慎一郎 (2002) : 山形県内の電子基準点の冬季変位に関する調査結果, 国土地理院技術資料 A・4-No.1 平成 14 年度調査研究年報, 185-188.
- Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky (2006a) : GPS Analysis at MIT, GAMIT Reference Manual, Release 10.3, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- Herring, T. A., R. W. King, and S. C. McClusky (2006b) : Global Kalman filter VLBI and GPS Analysis program, GLOBK Reference Manual, Release 10.3, Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.
- 松本則夫, 北川有一 (2005) : 想定東海地震震源域付近の観測井における地下水位の歪感度とノイズレベル, 日本測地学会誌, 第 51 巻 第 3 号, 131-145.
- Munekane H., M. Tobita, and K. Takashima (2004) : Groundwater-induced vertical movements observed in Tsukuba, Japan, Geophysical Research Letters, 31, L12608, doi:10.1029/2004GL020158.
- 鷺谷 威, 西村卓也, 村上 亮, 今給黎哲郎, 赤坂 望 (2003) : 地殻活動観測データ総合解析システムの開発, 国土地理院時報, 101, 33-43.
- Sato, P. H., K. Abe, and O. Ootaki (2002) : GPS-measured land subsidence in Ojiya City, Niigata Prefecture, Japan, Engineering Geology, 67, 379-390.
- 飛田幹男, 宗包浩志, 海津 優, 松坂 茂, 黒石裕樹, 眞崎良光, 加藤 敏 (2004) : つくば市周辺の地下水位と地盤の季節変動, 日本測地学会誌, 第 50 巻 第 1 号, 27-37.
- 山形県 (2007) : H3. 水源調査委託報告書, 70-71.