

平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震に伴う緊急の電子基準点復旧及び現地調査作業
Emergency Survey and Restoration of Environment and Instrument
at GPS-Based Control Stations for the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008

測地観測センター

豊福隆史・野口優子・古屋智秋・渡邊和夫・河和 宏・木村有希子

Geodetic Observation Center

Takashi TOYOFUKU, Yuko NOGUCHI, Tomoaki FURUYA,

Kazuo WATANABE, Hiroshi KAWAWA and Yukiko KIMURA

東北地方測量部 小林勝博・東海林靖・阿部 聡

Tohoku Regional Survey Department

Katsuhiko KOBAYASHI, Yasushi SHOJI and Satoshi ABE

要 旨

平成 20 年（2008 年）6 月 14 日（土）午前 8 時 43 分（JST）頃に発生した岩手・宮城内陸地震では宮城県栗原市や岩手県奥州市で道路ががけ崩れなどで寸断されるなど大きな被害が発生した。また、電子基準点でも数十～百数十 km の範囲で地殻変動が捉えられ、図-1 に示す 21 点で測量成果の公表を停止した。

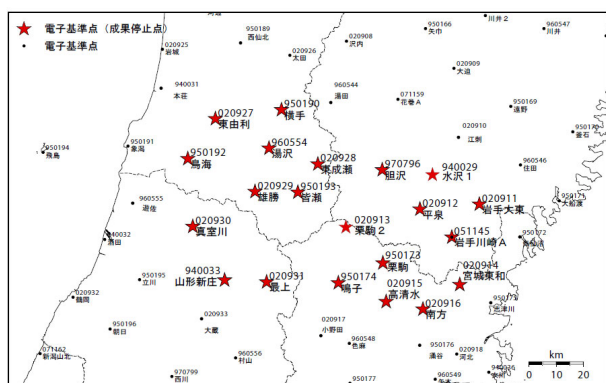


図-1 成果を停止した電子基準点

この地震に伴い緊急に実施した、①通信、電力が途絶した電子基準点「栗駒 2（020913）」のデータ回収、②成果停止地域での VRS 観測、③地震後データ品質が低下した電子基準点「水沢 1（940029）」の原因推定作業と復旧作業、④東北地方測量部が実施した傾斜測定結果と傾斜計データの比較による傾斜計データの信頼性の評価、についてそれぞれ報告する。

1. 電子基準点「栗駒 2」のデータ回収

「栗駒 2」は地震発生直後より通信回線が途絶し、地震後のデータを取得できなくなっていた。この電子基準点は無停電電源装置が装備されており、仕様上は地震に伴う停電後約 6 時間以上のデータが取得されていることが期待された。また、この点は地震を引き起こした断層面の直上にあり、その変動情報

は震源断層モデルの傾斜方向を推定する上で重要な情報であった。このため、早急なデータ回収が望まれていたが、道路が寸断されており、ヘリコプター以外では現地に入ることが出来ない状況であった。

このような状況の中、発生後 2 日目の 6 月 16 日に東北大学理学研究科地震・噴火予知研究観測センターのグループが 17 日にヘリコプターをチャーターし、臨時の GPS 観測点と地震計を設置するという情報を得た。このため、電子基準点データの回収について協力を依頼したところ、快諾が得られたので急遽職員 1 名を派遣することになった。

1. 1 データの回収

「栗駒 2」の受信機は Trimble Navigation 社製 5700 である。この受信機は交換可能なコンパクトフラッシュ (CF) カードに最新の約 21 日間分のデータを記録している。データの回収方法は、①CF カードの交換、②受信機にパソコンを接続しダウンロード、の 2 通りの方法がある。方法①は交換用の CF カードを持って行き、交換するだけの最も簡易な方法である。方法②はパソコンと受信機の接続作業と、2 日分のデータのダウンロードに約 10 分と時間がかかるが、観測を継続したままデータの取得が行えるメリットがある。今回、データ回収時点で無停電電源装置の動作時間を超過していることは明白であったため方法①によりデータの回収を行った。

1. 2 一時的な観測再開の方法について

余震や余効変動を短時間でも捉えることを目的とし、バッテリーによる一時的な観測再開を行う場合、以下の 2 通りの方法が考えられる。無停電電源装置につながるバッテリーを交換する方法、及び受信機内蔵型小型バッテリーを利用する方法である。ただし、後者は受信機の種類により行えない場合がある。なお、7 月 2 日に実施した「栗駒 2」のソーラパネル、衛星携帯電話を備えた観測設備 (REGMOS) によ

る復旧については、本小特集「平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震に伴う機動観測（路線調査・水準測量・GPS 間接水準測量・REGMOS による電子基準点データの転送）」に詳しく記述している。

1. 2. 1 無停電電源用バッテリーの交換

停電後の観測で放電した無停電電源装置につながるバッテリーを交換することで、一時的に観測を再開させることができる。この場合、必要な器材は、交換用バッテリーとバッテリー端子の形状にあった接続ケーブルである。無停電電源装置は 21V 以上の電圧がないと動作しないため、一般的な 12V バッテリーの場合は 2 個を直列に接続する必要がある。

1. 2. 2 受信機用バッテリーの利用

5700 受信機はリチウムイオン小型バッテリーを 2 個挿入することができるが、電子基準点では使用していない。その理由は、商用電源を利用した場合でも、小型バッテリーを先に利用し放電した後、商用電源へ切り換えるため、停電時にはバッテリー残量がなく意味がないためである。

この小型バッテリーのみを利用して観測を再開させるには、受信機周辺の接続を図-2 から図-3 のように変更し、ピラー上部のチョークリングアンテナへ受信機の Port 1 から電力を供給できるようにする必要がある。また、通常 Port 1 はリアルタイムデータを出力しているため、Trimble Navigation 社が提供している受信機コントロール用のフリーソフト GPS Configurator 等を利用し Port1 のリアルタイムデータ出力を停止し、Power output をオンにするよう設定を変更する必要がある。この方法で必要な器材は、5700 受信機用小型バッテリー、設定変更用パソコンと接続ケーブルである。

この方法は無停電電源用バッテリーを交換する方法に比べて複雑な上、電源、通信回線の回復後には接続と設定の変更を現地で行わなければならない。しかし、この小型バッテリーは各地方測量部でも所有しているため、災害時に地方測量部の器材を活用して一時的にでも観測を復旧させる必要がある場合には有効である。

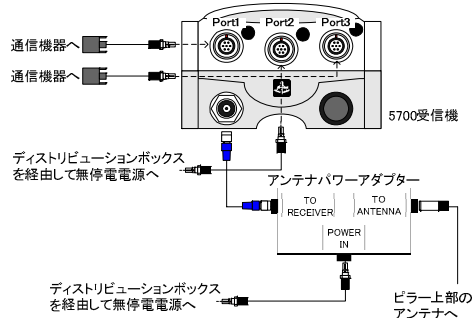


図-2 通常の接続

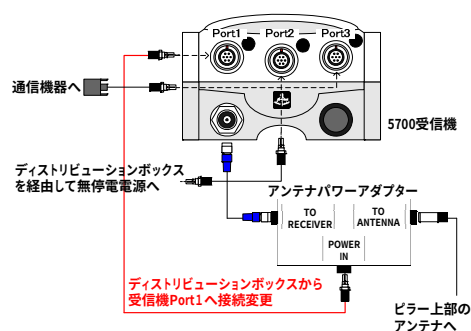


図-3 内蔵バッテリー利用時の接続

1. 3 「栗駒2」のまとめ

17 日に回収したデータより、「栗駒 2」は平成 6 年の日本全国での国土地理院 GPS 連続観測開始以来、最大となる水平で約 1.5m、垂直で約 2.1mの変動が捉えられ、また断層面の傾斜方向が西向きであることが決定づけられた。今回のような直下型の地震では、1 点の電子基準点の変動情報が重要な意味を持つ場合があるので、あらゆる手段を通じて迅速にデータの回収を試みる必要がある。

2. 成果停止地域での VRS 観測

この地震による地殻変動に伴い、「栗駒 2」をはじめとする 21 点の電子基準点成果を停止した(図-1)。このような成果停止地域で VRS 観測を実施した場合、どのような解が得られるのか検証するため、7 月 2 日に REGMOS を用いて「栗駒 2」を暫定的に復旧させる作業と同時に VRS 観測を実施した。

2. 1 観測の概要

写真-1 のように「栗駒 2」の近傍のテーブルに Leica 社製受信機を設置し、株式会社ジェノバが提供する VRS 観測を実施した。三脚を利用しなかったのは器材をヘリコプターで運ぶ必要があり、できる限り少なくしたためである。約 2 時間 45 分の VRS 観測と同時に、スタティック解析ができるよう受信機内部に GPS データを記録した。



写真-1 VRS 用 GPS (手前) と「栗駒 2」(奥)

2.2 検証手法

VRS の各エポックの平均値を次の 2 通りのスタティック解析の方法で求めた結果と比較した。手法①：VRS 補正情報作成時に利用されていて成果公開を停止していない遠方の電子基準点を固定した解析，手法②：速報暦を用いて暫定座標値を算出した近隣の電子基準点を固定した解析，である。

2.3 検証結果

VRS の平均値とスタティック解の差は表－1 のようになった。

表－1 スタティックとの比較

	手法① 成果停止していない遠方の電子基準点を固定	手法② 暫定座標値を算出した近隣の電子基準点を固定
d N	-3.4cm	-2.4cm
d E	-1.5cm	-0.3cm
d U	+4.6cm	+1.8cm

電子基準点成果を固定したスタティック解と VRS 解は，衛星配置や周辺環境により一致の程度が異なるものの，経験的には通常水平で 2 cm，垂直で 3 cm 程度で一致する。このことから，手法①ではやや大きいとも思えるが，50km 以上の長基線のスタティック解析の精度や三脚を用いなかった観測条件などの影響も含まれていると考えると，解は概ね一致している。また，暫定座標値を利用した手法②は手法①よりさらに一致がよい。

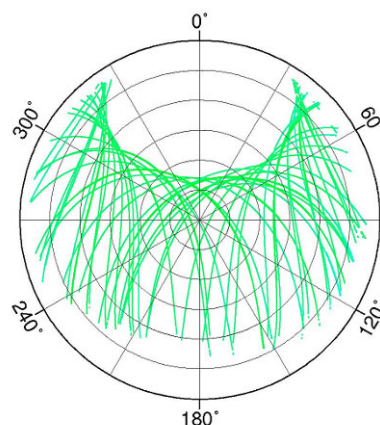
今回の検証において VRS 解はスタティック解と概ね一致していた。これは VRS 補正情報を作成する電子基準点網を今回の地震の変動範囲（数十～数百 km 程度）を包括する形で再構築することが可能であったためと考えられる。

3. 電子基準点「水沢 1」のデータ品質低下について

「水沢 1」において，地震後のデータの品質に南側低仰角にある衛星が取得できておらず（図－4），マルチパスの値が地震前後で大きく異なる（表－2）という問題が見られた。ここでは，この問題の原因の解明から座標値への影響までを述べる。

表－2 地震前後のデータ品質

	データ 取得率	L1 マル チパス	L2 マル チパス
地震前（2008/6/12）	99%	0.29m	0.38m
地震後（2008/6/14）	91%	0.53m	0.69m



図－4 地震後（6/14）の衛星取得状況

3.1 アンテナの傾きによるデータへの影響

データの品質低下の原因がアンテナの傾きによるものなのかを検証するために，国土地理院構内で試験観測を行った。

「水沢 1」は南側低仰角の衛星が取得できていないことから，アンテナが北側に傾いていることが考えられた。このため，アンテナを約 45° 北向きに傾けて観測を行い，アンテナを傾けない場合とのデータ品質の比較を行った（写真－2）。

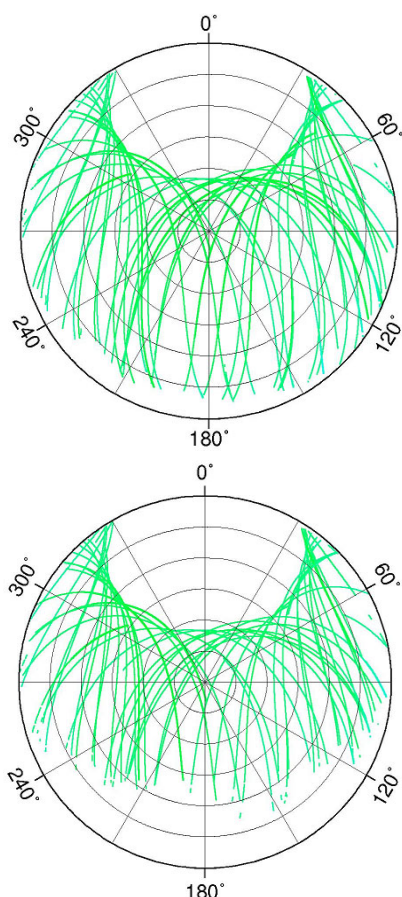


写真－2 アンテナを 45° 傾けた観測（写真左が北）

その結果，「水沢 1」と同様なデータ品質を取得することができた（図－5，表－3）。このため，「水沢 1」のデータ品質の問題は，アンテナが傾いていることに主な原因があると考えられた。

表－3 屋上観測のデータ品質

	データ 取得率	L1 マル チパス	L2 マル チパス
アンテナ正常	99%	0.27m	0.37m
アンテナ傾斜	87%	0.57m	0.73m



図－5 衛星取得状況（上：正常，下図：傾斜）

3.2 現地での観測

試験観測の結果を受け、地震発生9日後の6月23日に現地入りし、復旧作業を行った。純粋な地震による変動を求めるためには、傾斜したことによるアンテナ位相中心の変位量を求め、補正する必要がある。このため、復旧作業では、アンテナがどのように傾いているか確認し（写真－3）、位相中心の変動量算出に必要なアンテナ傾斜角・傾斜方向角等の要素を測定した。また、地震によりアンテナが傾いた原因の検討も行った。



写真－3 傾いたアンテナと脱落した回転台座

3.2.1 位相中心変動量の計算

アンテナは地震の揺れによる衝撃で回転台座が整準盤から外れたことが原因で傾いていた。アンテナの北端点と南端点が水平方向と鉛直方向にそれぞれ変動した量とアンテナ傾斜角、傾斜方向角から位相中心変動量を計算した。アンテナ傾斜角・傾斜方向角・位相中心変動量は表－4に示すとおりである。位相中心はアンテナのグランドプレーン中心点から鉛直上方向に7.5cmのところにあると考えて計算した。

表－4 測定により求めた位相中心の変動量

傾斜角	42°
傾斜方向角	磁北から東へ6°
位相中心移動量（南北）	北へ7.9cm
位相中心移動量（東西）	東へ1.5cm
位相中心移動量（鉛直）	下へ1.1cm

3.2.2 アンテナが傾いた原因

回転台座が整準盤から外れていたことから、アンテナが傾いた原因は整準盤のロックを閉め忘れていたことであると考えられるが、そのまま正常な位置に戻し再度ロックをしても簡単に外れてしまった。この原因は回転台座の留め金爪が緩んでいたためであり（写真－4）、留め金爪を閉めるとロックが簡単には外れなくなった。



写真－4 回転台座留め金の緩み

3.3 アンテナの傾き修正後の影響

3.3.1 データ品質

アンテナの傾きの修正後は、データ品質・衛星取得状況も地震前の状態にもどっていたため、地震後のデータ品質の低下はアンテナの傾きが影響を与えていたことがわかる。

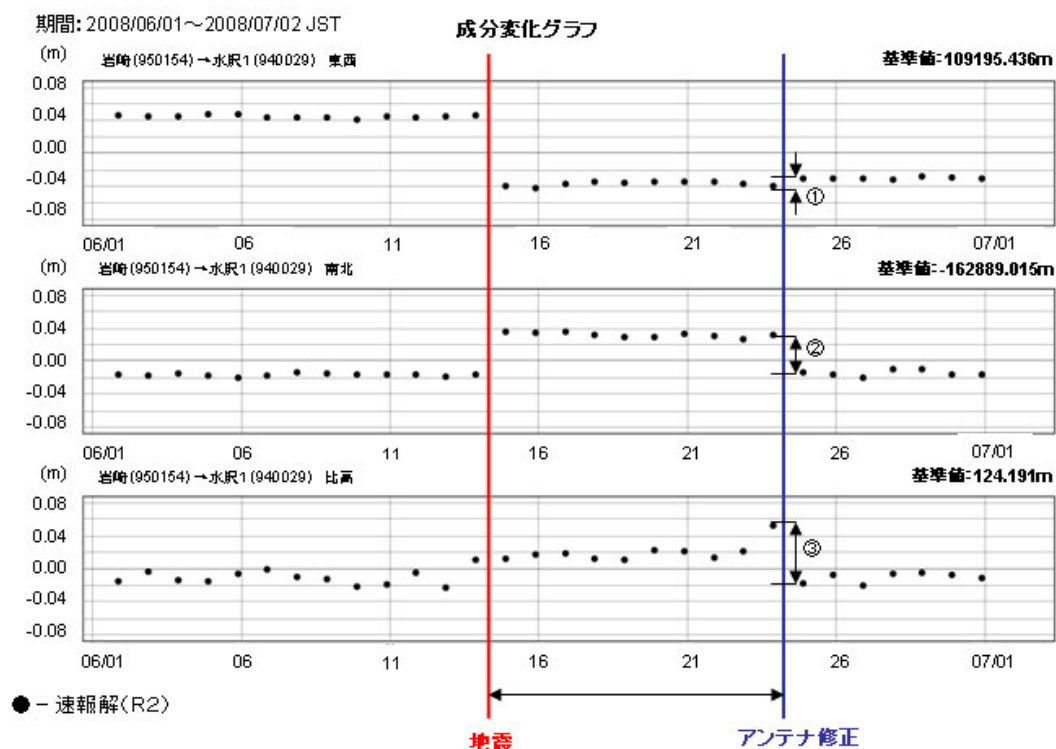


図-6 水沢1の成分変化グラフ (R2 2008/6/1~2008/7/2)

表-5 復旧前後のデータ品質

	データ 取得率	L1 マル チパス	L2 マル チパス
復旧前(2008/6/14)	91%	0.53m	0.69m
復旧後 (2008/7/1)	99%	0.28m	0.38m

3.3.2 成分変化グラフとの比較

電子基準点「岩崎 (950154)」と「水沢1」の基線の成分変化グラフが図-6である。地震後から復旧作業までの期間と復旧作業後1週間の速報解 (R2) の平均値の差が表-6である。これらの値は、測定によって求めたアンテナの傾斜による変動量 (表-4) と一致していない。これはアンテナが傾いた状態の観測では、データ品質やアンテナ位相特性が変わることに加え、回転台座の留め金を調整したことにより整準台を厳密には、元の状態に再現しきれていないことが原因だと考えられる。

表-6 復旧作業前後の成分変化グラフ変動量

位相中心移動量 (南北) ②	南へ 4.9cm
位相中心移動量 (東西) ①	東へ 0.8cm
位相中心移動量 (鉛直) ③	下へ 2.1cm

3.4 「水沢1」の復旧作業のまとめ

地震後に「水沢1」のデータ品質が低下した原因は、国土地理院構内で試験観測し推測された通りア

ンテナが傾いていることにあった。傾いてしまった原因は、アンテナの下にある回転台座が地震により整準盤から外れてしまったことであり、その緩みを修正しアンテナを正常に戻す復旧作業を行った。また、傾いたアンテナの各要素を測定し位相中心変動量を計算し、その値と復旧作業前後の速報解 (R2) の変動量を比較した結果、値や方向が異なっていた。この原因は、アンテナが傾いていたことによる観測条件やアンテナ位相特性の違いが考えられる。また、レドームの開閉や整準台の調整、アンテナの再設置は解析結果に影響を与える。このため、「水沢1」が純粋に地震の影響でどれだけ変動したのかを厳密に算出することは難しい。

4. 傾斜測定と傾斜計データの比較による傾斜計の信頼性の評価

地震が発生した場合、可能な限り電子基準点の緊急現地調査作業を行い、周辺環境および機器に異常がないか確認するとともに、傾斜測定を行いピラーの傾きの有無を把握する必要がある。この緊急現地調査作業の選点には、傾斜計データの結果を用いて傾斜が予想される点を重点的に行っている。ここでは岩手・宮城内陸地震に伴う緊急現地調査作業で実施された傾斜測定と傾斜計データの結果を比較し、傾斜計データの信頼性の評価を行った。

4. 1 傾斜計について

電子基準点で採用されている傾斜計の仕様、特性について以下に述べる。

4. 1. 1 種類・仕様

電子基準点の内部には APPLIED GEOMECHANICS 社製の傾斜計が備え付けてある(写真-5)。仕様を表-7に示す。なお、傾斜計は30分に1度観測を行うつくばヘデータを転送している。



写真-5 APPLIED GEOMECHANICS MD900T (左)
APPLIED GEOMECHANICS D900T (右)

表-7 傾斜計の仕様

範 囲	±20° (±45°)
繰返し性	0.02°
感 度	各軸 100 (22)mV/° ±20%
温度特性	水平 0.008°/°C 感度 0.05%/°C
出力 Z0	270Ω
コネクタ	コード 450mm
取 付	水平M3 4本 D44.7 W44.7mm
分解能	0.01°
時定数τ	1 s
直線性	全域 5% 半域 2%
環境温度	使用 -10~+50 °C 保管 -10~+50 °C
湿度	使用 0~80% 保管 0~80%
電 源	+8~+24V +8mA
外 形	D50.8 W50.8 センサ H16.3(23.6)mm
温度出力	オプション 10mV/°C ±.75°C

(パシコ貿易株式会社 HP より抜粋)

4. 1. 2 傾斜計の原理

傾斜計内部の管内に封入された導電液体と、気泡からなるバブルセンサがあり、傾斜の変化による気泡の移動が左右2つの電極を覆う面積を変えて導電抵抗変化を生じさせ、形成ブリッジと同期整流回路でSN比向上を図り、増幅器を経てアナログ電圧として出力される(パシコ貿易株式会社 HP より抜粋)。

4. 1. 3 傾斜計の特性

上述の傾斜計の仕様より、電子基準点で利用した場合、以下の特性がある。

- 1) 分解能が0.01°であることから、5mピラーの電子基準点の場合、アンテナの位置で約1mmに相当する。
- 2) 傾斜計の温度特性(水平方向で0.008°/°C)より、夏と冬で温度変化の激しい地域においては、傾斜量に約0.1°の傾斜変化(電子基準点アンテナの位置で約10mmに相当)が見られる(図-7)。このような傾斜計の特性である見せかけの変動の影響を取り除くために、地震による傾斜計データの変化の確認は、地震発生直前の値と比較するべきである。

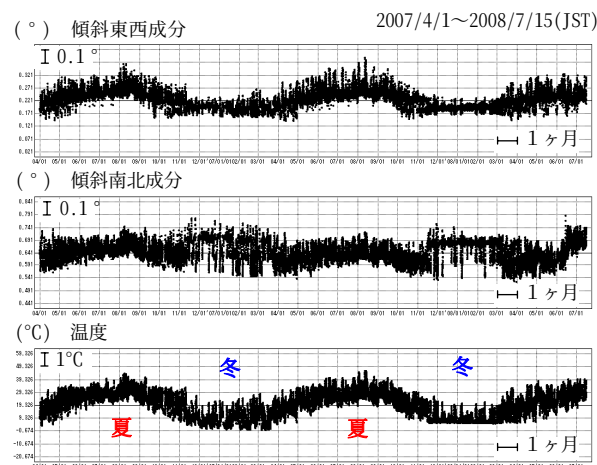


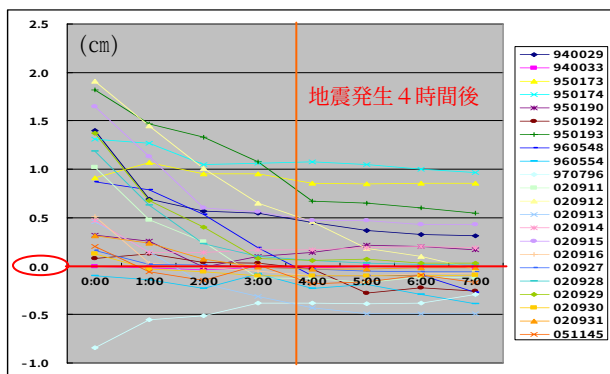
図-7 傾斜計の年周変化

4. 1. 4 傾斜計の設置方向

傾斜計は上面に記載されたY方向を真北に向けて設置している。ただし、「電子基準点現地調査作業要領」第10条(3)①によると、「傾斜計上面に記載されているY方向が、真北と一致しているかどうか確認する。30°以上ずれている場合に調整し、調整した概略の角度を記録する。」と記載されていることから、傾斜計の真北方向への設置精度は概ね±30°の誤差があると考えられる。

4. 1. 5 地震後の傾斜計データの変動

岩手・宮城内陸地震の震源周辺の電子基準点22点について、地震後の傾斜計データ(図-8)の変化を見ると、傾斜計に内蔵されているバブルセンサは地震によって激しく揺れた後、再び安定するまで約4時間を要することがわかる。



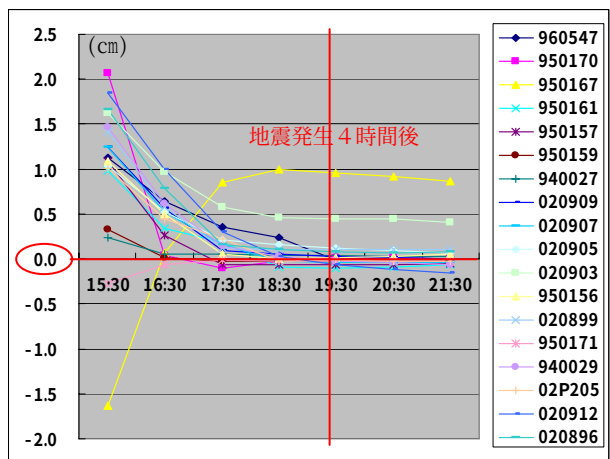
図－8 岩手・宮城地震後の傾斜計データ変化 (南北)

図－8 より、2つの傾向に分類される。

傾向①：地震発生直後に一番大きく変動し、時間が経過するとともに小さくなり、約4時間経過すると一定の値を保つ。

傾向②：地震発生直後から時間の経過に関係なくほぼ変動量が一定値を保つ。

傾向①は、平成 20 年 7 月 24 日午前 0 時 26 分に発生した岩手県沿岸北部地震 (M6.8) においてより顕著であった。この地震においても地震発生から約 4 時間経過すると、一定の値に収束していることがわかる (図－9)。



図－9 岩手沿岸北部地震後の傾斜計データ変化 (南北)

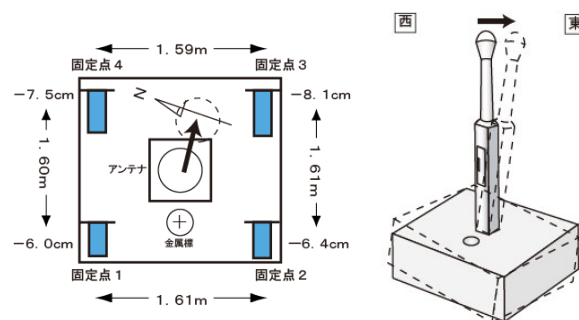
これら結果より、緊急現地調査作業の選点の資料とするための傾斜計データは、地震発生から 4 時間程度経過後のデータを用いる必要がある。

4. 2 水準測量による傾斜測定結果との比較

地震発生翌日の 15 日から東北地方測量部の緊急現地調査班が電子基準点 7 点で水準測量による傾斜測定を行った。その結果と傾斜計データ比較を行った。

4. 2. 1 水準測量による傾斜測定の説明

電子基準点と少し離れた場所に設置している参照点または電子基準点付属標を基準とし、基礎の 4 隅に設置している固定点間の比高を水準測量により測定する。その測定結果と固定点間の距離から基礎の傾斜量を算出し、ピラー上部のアンテナの位置の水平移動量を求める。なお傾斜方向は方位磁針によって得られた磁北に偏角を補正した真北方向を基準としている。



図－10 水準測量による傾斜測定

4. 2. 2 傾斜量と傾斜方向の比較

傾斜計データ (地震発生から 4～7 時間後の平均値) と緊急現地調査作業により傾斜測定を行った 11 点 (内 7 点はレベル、4 点は垂球により測定) の傾斜測定結果の傾斜方向及び傾斜量を比較した (表－8)。

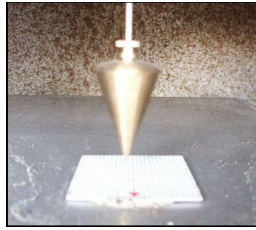
1) 傾斜方向の許容範囲

傾斜計データによる傾斜方向は、4. 1. 3 で述べたとおり $\pm 30^\circ$ の誤差があると考えられる。したがって、傾斜計データと水準測量による傾斜測定結果の傾斜方向の差が 30° 以内であれば傾斜方向は一致していると言える。

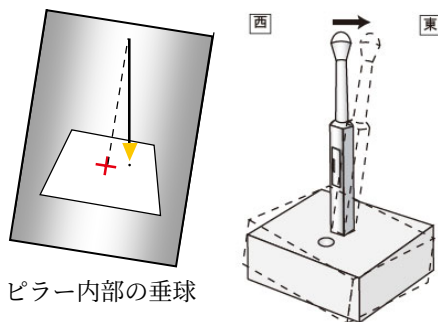
2) 傾斜量の許容範囲

水準測量による傾斜測定の読定単位は 1 mm 位で行う。このため、この測定方法で検出できる最も小さい傾斜量は、前回と今回の傾斜測定値で固定点 4 点のうち 1 点に 1 mm の差が生じたときであり、電子基準点アンテナの位置で約 2.4mm に相当する (図－11 左)。また、一般的に考えられる観測誤差を 1 mm と仮定したとき、前回値と今回値の差の誤差は $\sqrt{(1^2 + 1^2)} = 1.4\text{mm}$ (約 1 mm) と見積もられる。この誤差が最も大きく影響する場合を見積もると、固定点 4 点のうち隣り合う 2 点を +1 mm、それに向かい合う 2 点を -1 mm の較差が生じたときであり、電子基準点アンテナの位置での移動量に換算すると 6.7mm となる。 (図－11 右) つまり、傾斜量が 6.7mm であったとしても誤差の範囲内と考えられる。また傾斜測定の往復測値の較差の許容範囲は「電子基準点現地調査作業要領」第 13 条 (5) により 2 mm である。

よって傾斜方向，傾斜量を算出する。（写真－6，図－13）



写真－6 垂球



図－13 垂球を用いた傾斜測定の原理

4. 3. 2 傾斜量と傾斜方向の比較

4. 2. 2 と同様に傾斜計データと傾斜測定結果の傾斜方向及び傾斜量を比較する（表－8）。

電子基準点「高清水（020915）」と電子基準点「東成瀬（020928）」は垂球による傾斜測定の前回値がないため，傾斜方向，傾斜量を比較できなかった。

①電子基準点「平泉（020912）」と電子基準点「雄勝（020929）」における傾斜方向の差はいずれも 30° 以上であり傾斜測定結果と一致していない。

②「雄勝」における傾斜量は微小であるが差は一致している。「平泉」における傾斜量の差は大きく，傾斜計データと傾斜測定結果が一致していない。

2 点の傾斜計に異常がある可能性は否定できないが，垂球による計測は限られた視界で目視して側方

から行うため正確な値を出すのが難しいことが原因だと思われる。

4. 4. 傾斜測定と傾斜計のまとめ

①地震発生から傾斜計内臓のバブルセンサが安定するまでの約 4 時間後の傾斜計データを用いて緊急現地調査作業を実施する電子基準点を選点する必要がある。

②水準測量による傾斜測定と傾斜計データの結果は，傾斜量についてはほぼ一致している。傾斜方向に関しては許容範囲と考えられる $\pm 30^{\circ}$ を超えた点もあったが，概ね一致していた。

③傾斜計データと垂球による傾斜測定結果はサンプル数が少ないが，傾斜方向及び傾斜量ともに一致していなかった。

④傾斜計データが何らかの原因によって方向が回転したかのような現象が見られた。このことから傾斜測定結果と比較しながら，異常な傾斜計がないか確認する必要がある。

今回の検証において緊急現地調査作業の選択に傾斜計データが有効であることが確認された。また，水準測量による傾斜測定の傾斜量とよく一致していたことから，地殻変動量と傾斜量の分離のために今後は傾斜計データを利用するなど，より活用できる可能性がある。そのためには，傾斜計データの傾斜方向の信頼性をさらに上げる必要があり，電子基準点現地調査作業において傾斜計の方向を確認，記録する項目を追加するなどの検討を行う。

謝 辞

本調査の実施に際して，東北大学理学研究科地震・噴火予知研究観測センター，日立造船株式会社，測地部機動観測課，その他関係機関よりヘリコプター同乗の許可，傾斜測定，器材の借用，その他さまざまな便宜をはかっていただき，この場を借りて御礼申し上げる。

参 考 文 献

小島秀基，小清水寛，米溪武次，根本盛行，岩田昭雄，湯通堂亨，雨貝知美，矢萩智裕，今給黎哲郎，岩田和美（2005）：平成 16 年（2004 年）新潟県中越地震に伴う GEONET の緊急対応と地殻変動，国土地理院時報，107，71。
熊木洋太，大滝茂，山際敦史，畑中雄樹，宮崎清博，岩田昭雄，野神憩，仲井博之，重松宏実，相田清，田辺正，雨宮秀雄（2004）：小特集 電子基準点 1,200 点の全国整備について，国土地理院時報，103，7。
パシコ貿易株式会社，AGI 精密型傾斜計，<http://www.pacico.co.jp/agi.html> (accessed 18 Sep. 2008)。