

2008年岩手・宮城内陸地震における荒砥沢ダム北方の水平変位
Horizontal displacement in the north of the Aratozawa dam
caused by the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008

神谷 泉・小荒井 衛・関口 辰夫・岩橋 純子・中埜 貴元

Izumi KAMIYA, Mamoru KOARAI, Tatsuo SEKIGUCHI, Junko IWAHASHI, Takayuki NAKANO

Abstract: An earthquake-fault-like structure was reported in the north of the Aratozawa dam after the Iwate-Miyagi Nairiku Earthquake in 2008. Horizontal displacements around the structure were measured by photogrammetry. We found 2 rigid blocks on both side of the structure. Comparing with the nearest GPS-based control station (permanent GPS receiving station), we judged that relative displacement between the rigid blocks was caused by the movement of the earthquake fault. Displacements are smoothly varying between the structure and the rigid blocks. Therefore we concluded that the structure is based on the movement of the earthquake fault.

1 はじめに

2008年6月14日、栗駒山北東11kmを震源とするM7.2の2008年岩手・宮城内陸地震が発生した。地殻変動の観測結果から、震源断層は、北北東-南南西方向、西北西傾斜の逆断層と推定されている(国土地理院, 2008a)。現地調査の結果、地表地震断層の可能性のある地表変位(以後、「地表地震断層候補」と呼ぶ)が10箇所以上報告されている(産業技術総合研究所, 2008; 石山ほか, 2008)。これらの地表地震断層候補の変位量は、後述の荒砥沢ダム北方の地表地震断層候補を除き、水平変位、上下変位とも1.5m以内である。特に、奥州市餅転から一関市柵木立を経て栗原市沼ヶ森にかけては、震源断層モデルと平行な直線に近い曲線(図1の破線)に沿って、地表地震断層候補が連続しており、それらの変位量は、水平変位、上下変位とも、0.5m以内である。

一方、吉見ほか(2008)は、荒砥沢ダム北方において、最大で7.3~8.3mの右横ずれ、最大で3.6mの北西側隆起の地表地震断層候補を報告した。この場所は、餅転と沼ヶ森を結ぶ線から、北西側に約3.5km離れている(図1)。走向は、主に東北東-西南西であり、東北東側は三迫川支流の御沢右岸の崩壊まで、西南西側は荒砥沢ダム北方の大崩壊の近くまで達している(図2)。遠田ほか(2008)は、プレッシャーリッジ(圧縮によって生じた尾根状の高まり)等の圧縮性の変形の証拠をあげ、地すべりの変形では説明できず、大局的にはテクトニックな変状である可能性が高いと判断した。しかし、地震の規模、あるいは他の場所で報告された地表地震断層候補と比べ変位量が多いこと、他の地表地震断層候補との連続性が乏しいこと、地表地震断層候補の走向が震源断層と異なること、テンションクラック(張力によって生じた割れ目)が認められることから、地すべり等の重力性の変位である可能性も指摘されている(日本地質学会2008年秋田大会における議論等)。

荒砥沢ダム北方の地表変位が地表地震断層であるか否かを判断する上で、その周囲の変位を面的に把握することが重要である。このような面的な地表変位の計測方法として、干渉SARによる方法が有効である。このため、「だいち」のPALSARを用いた干渉SARが試みられたが、荒砥沢ダム周辺では地表の変化が激しすぎ、変位を計測できる干渉画像が得られなかった(国土地理院, 2008a)。そこで筆者らは、地震前後の空中写真を用いた写真測量により、荒砥沢ダム北方の地表地震断層候補の周辺の水平変位を計測した。なお、高さについては、計測に適した対象が少なく、また地震前後の航空レーザ測量

による計測も行われていたことから、計測を行わなかった。以下では、変位は水平変位の意味で用いる。

2 方法

地震前後の空中写真の密着印画焼きを、事務用スキャナー（EPSON Offirio ES-10000G）を用いてスキャンした（表 1）。現地が変動しており、絶対標定の基準として適切なものがないため、ブロックを固定するために必要な数の地上基準点（平面位置 2 点，高さ 3 点）のみを用いて、バンドル調整を行った。一方、ブロック内の歪みを少なくするため、多数のパスポイントを使用した。パスポイント数，指標の残存誤差，相互標定の残存縦視差，バンドル調整の交会残差を表 2 に示す。

地震前の空中写真の立体モデルをディスプレイ上に表示し，地震後の空中写真の立体モデルを反射式立体鏡下におき，両者を比較しながら対応点を探した。同定の誤りを防ぎ，また精度を向上させるため，複数の対応点を計測し，各対応点の変位量の平均をとり，計測結果とした。本稿では，この対応点の集合を計測点と表現する。計測点あたりの対応点数は，最小 3 点，最大 10 点，平均 6.5 点である。

計測点の計測例を図 2 に示す。25 点の計測点のうち，5 点は道路の白線の端等の明瞭な地物を計測したもので，残りの 20 点は図 2 に示すような樹冠の間隙を計測したものである。地震前の 1/30,000 空中写真では，針葉樹の樹冠の同定が困難な場合が多く，主に広葉樹の樹冠の間隙を計測した。なお，樹冠より樹冠の間隙の方が座標計測精度が高いため，樹冠ではなく樹冠の間隙を計測した。太陽方位角，高度角の違いの補正は行っていない。

正確な絶対標定がなされていないため，上記の変位量には，平行移動，回転，拡大縮小の任意性が含まれる。そこで，相対的な変位が小さいと予想される下盤側と想定される範囲（図 3 の A 群）の計測点の変位量の 2 乗和が最小となるよう，地震前のブロックの平面位置を，ヘルマート変換を用いて修正した。以下，変位は，この修正を施した値をさす。

3 結果

変位量の計測結果を，図 3 に示す。図中の計測点の誤差は，計測点に含まれる対応点の変位の母標準偏差の推定値である。なお，計測結果の妥当性を評価できる基準点測量成果等はない。

図 3 の A 群中で，A 群の変位量の平均値から最も離れている計測点は，計測点 4 である。A 群全体を 1 つとするモデル（1 つの平均値で説明するモデル）と，計測点 4 と 4 以外に分けるモデルについて，AICc（脚注参照）を比較したところ，前者の方が小さかった。このため，計測点 4 は A 群に含めた。A 群以外で，A 群の変位量の平均値に最も近い計測点は，計測点 18 である。同様の AICc の比較により，計測点 18 は A 群に含めなかった。B 群についても同様の検討を行った結果，計測点 16 は B 群に含め，計測点 17 は含めないことにした。なお，計測点 16 と計測点 17 は隣接しているため，この間の変位を連続的に計測しようとしたが，変位が連続するように樹冠を対応させることができず，採用しなかった。

A 群を基準とした B 群の変位量（B 群の計測点の変位量の平均値から，A 群の計測点の変位量の平均値を差し引いた値）は，東南東～南東（北から時計回りに 124 度）方向に 5.0 m であった。群の変位量の誤差は，計測点の変位量のばらつきから，計測点の変位量の母標準偏差の推定値として求めることができる。一方，群の変位量は，群内の計測点の変位量の平均値であるため，計測点の変位量の誤差から誤差伝播の法則を用いて計算することもできる。2 つの方法で求めた群の変位量の誤差を表 3 に示す。

観測値を説明するいくつかの数学的なモデルがある場合，AIC（赤池情報量基準）を最小にするモデルを選択する方法がよく用いられるが，より高精度の AICc の使用が推奨されている（Burnham and Anderson, 2004）。特に，サンプル数が少ない場合には，AICc が有効である。重みのない最小 2 乗法の場合，残差の 2 乗和を S ，サンプル数を n ，パラメータ数を k とすると，AICc は $n \ln(S/n) + 2kn/(n - k - 1)$ である。

計測点 1 (C 群) と計測点 2 (D 群), 計測点 5 (C 群) と計測点 6 (D 群) は, 地表地震断層候補を挟んでほぼ対応する位置にある。計測点 1 に対する計測点 2 の変位量, 計測点 5 に対する計測点 6 の変位量を求め, 地表地震断層候補を近似する直線 (図 3 の $g - g'$) に投影した結果, すなわち計測結果から予想される横ずれ成分は, 計測点 1-2 間で 6.2 m の右横ずれ, 計測点 5-6 間で 6.7 m の右横ずれであった。

4 考察

表 3 を見ると, 計測点の変位のばらつきから求めた群の変位量の誤差は, 群内の計測点の変位量の誤差から予想されるものよりも大きい。したがって, A 群内, B 群内の計測点の変位量のばらつきは, 実際の変位のばらつきを示すものと考えられる。B 群内の変位量のばらつきは, A 群内より大きい。荒砥沢ダム北方の地表地震断層候補を地表地震断層と仮定すると, A 群は下盤, B 群は上盤に含まれる。逆断層では, 上盤は下盤と比べ被害が大きいため, 複雑に変形すると考えられている (太田, アイダン, 2005)。従って, B 群内の変位量のばらつきが A 群内より大きいことは, 上記の仮定と調和的である。

この地表地震断層候補から北北西に約 4 km (このうち, 断層モデルに垂直な成分は約 3 km) の位置に, 電子基準点栗駒 2 がある。栗駒 2 は, 南東方向へ 1.5 m 変位した (国土地理院, 2008b)。A 群を基準とした B 群の変位の方向 (東南東~南東) は, 栗駒 2 の変位の方向に近い。また, A 群を基準とした B 群の変位の大きさは 5.0 m であるが, ①栗駒 2 の変位は上盤のみの変位を表していること, ②栗駒 2 がこの地表地震断層候補から離れていることから, A 群と B 群の間の変位が震源断層の運動によるものと仮定しても, 栗駒 2 の変位の大きさと矛盾しない。

逆に, A 群と B 群の間の変位が震源断層の運動によるものでないと仮定すると, このような広域的かつ一様な変位を説明することができない。よって, A 群と B 群の間の変位は, 震源断層の運動によるものと結論付けられる。

次に, C 群と D 群の間の変位の全てが, 地表地震断層候補に沿って現われると仮定すると, 6.2 m ないし 6.7 m の右横ずれであったが, これは, 吉見ほか (2008) が報告した地表変位と同程度である。したがって, 吉見ほか (2008) が報告した地表変位は, C 群と D 群の間の変位を反映するものである。

A 群の変位と C 群の変位は類似している。また, 計測点を 3, 16, 2, 9, 6 の順にたどると, 変位は連続している。すなわち, 震源断層の運動による A 群と B 群の間の変位が地表地震断層候補まで連続している。したがって, この地表地震断層候補の変位は, 震源断層の運動を反映していると認められる。すなわち, 震源断層の直接の延長か, 震源断層とは直接繋がらないものの, この付近における震源断層の動きの主要部分を反映する断層である。震源断層の運動に加え, 地すべりや山体の重みによる変形等の重力性の変動の寄与も考えられるが, 本研究の計測結果からは, 重力性の変動の寄与を肯定することも否定することもできない。なお, 地表地震断層候補の南側が尾根ごと滑ったという意見もあるが (日本地質学会 2008 年秋田大会における議論等), A 群に対する C 群の変位は南へ約 1.5 m であるため, 右横ずれを含む地表地震断層候補の変位をこの滑りだけで説明することはできない。

E 群の変位は, 計測点 24 を除き, 下盤に属する A 群と上盤に属する B 群の間で漸進的に遷移する。この部分は, 「明瞭な地表地震断層を伴わず, 連続的に地表が歪んだが, 計測点 24 は崩壊地に近いためその影響を受けた」と解釈することもできるが, 「計測点 24 と 25 の間の変位の違いは断層運動の結果である」と解釈することもできる。

F 群は, A 群に対して北方に変位している。この部分では, 地震前の空中写真上で, 地すべりにより北方に移動したブロックと推測される地形が認められる。F 群の変動は, 地震に伴う地すべりによると

推測される。

地表地震断層候補付近に認められる樹冠の開きを延長すると、計測点 16 と計測点 17 の中間を通る。この 2 点の中間で樹冠の対応がつかなかったことは、その間がある線を境に明瞭に変動したのではなく、ある幅を持って破碎と変形をしたのではないかと推測される。

指標の残存誤差は公共測量作業規程の制限値から大きく外れるのに対し、残存縦視差、交会残差は、制限内に収まった（表 2）。この理由は、指標は写真の隅にあるのに対し、パスポイントは隅の近くを避けて選択したため、密着印画焼き写真の歪みとスキャニングの歪みが写真の隅の近くに集中すると仮定すれば説明できる。

5 結論

荒砥沢ダム北方の地表地震断層の可能性のある地表変位の周辺の水平変位量を、地震前後の空中写真から計測した。この地表変位を挟んで、内部の変形が少ない 2 つのブロックが存在した。これらのブロックの間の変位は、地震断層の運動によるものである。荒砥沢ダム北方の断層様の地表変位は、このブロックの変位から連続するものであり、震源断層の運動を反映している。なお、計測結果は、重力性の変位の寄与については、否定も肯定もしない。

謝辞

産業技術総合研究所の遠田晋次氏、吉見雅行氏、丸山正氏には、現地の状況を説明していただいた。国土地理院の政春尋志氏、津沢正晴氏、中川弘之氏、今給黎哲郎氏には、計測結果の解釈について、議論していただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

天野一男，藤縄明彦，本田尚正，松原典孝，2008. 岩手・宮城内陸地震 日本地質学会調査団茨城大学 班報告.

<http://www.geosociety.jp/hazard/content0033.html> (accessed 17 Sep. 2008)

石山達也，今泉俊文，越谷信，杉戸信彦，堤浩之，廣内大助，丸島直史，2008. 2008 年岩手・宮城内陸地震の地震断層調査（第 2 報）.

<http://www.dges.tohoku.ac.jp/~geomorph/08iwatemiyagijisin/jishinsokuhou2dan.html> (accessed 3 Sep. 2008)

遠田晋次，吉見雅行，丸山正，2008. 2008 年岩手・宮城内陸地震速報 荒砥沢ダム北方で確認された変位について.

http://unit.aist.go.jp/actfault/katsudo/jishin/iwate_miyagi/report/080709/index.html (accessed 2 Sep. 2008)

太田良巳，アイダン・オメル，2005. 地震断層近傍における地震動および永久変形に関する実験的研究，「海—自然と文化」東海大学紀要海洋学部，2(3)，pp.1-12.

川辺孝幸，風岡修，香川淳，楠田隆，酒井豊，古野邦雄，吉田剛，2008. 2008 年岩手・宮城内陸地震によって発生した荒砥沢ダム上流部の地すべり調査報告.

<http://kei.kj.yamagata-u.ac.jp/kawabe/www/2008iwatmyg/aratozawa/> (accessed 4 Sep. 2008)

国土地理院，2008a. 平成 20 年（2008 年）岩手・宮城内陸地震に伴う地殻変動と震源断層.

<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h20-iwatemiyagi/080614houdou3.html> (accessed 3 Sep. 2008)

国土地理院, 2008b. 平成 20 年 (2008 年) 岩手・宮城内陸地震による地殻変動 (最終解).

<http://www.gsi.go.jp/BOUSAI/h20-iwatemiyagi/0808hendousaisyu.html> (accessed 4 Sep. 2008)

産業技術総合研究所, 2008. 平成 20 年岩手・宮城内陸地震.

http://www.gsj.jp/jishin/iwatemiyagi_080614/ (accessed 2 Sep. 2008)

吉見雅行, 遠田晋次, 丸山正, 2008. 2008 年岩手・宮城内陸地震に伴う地震断層. 活断層研究, 29, pp.i-ii, (印刷中).

Burnham, K. P., and D. R. Anderson, 2004. Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection, Amsterdam Workshop on Model Selection.

産業技術総合研究所による地表変状地点確認位置図 (http://unit.aist.go.jp/actfault/katsudo/jishin/iwate_miyagi/080709_1map.pdf) を改変。石山ほか(2008)で報告された点、国土地理院の指摘により産業技術総合研究所が確認した点を含む。以下の分類は、産業技術総合研究所による。

- 地表地震断層
- 地表地震断層(確実度やや低い)
- 地表地震断層の兆候
- 地表地震断層の可能性はあるが地すべりの可能性が高い

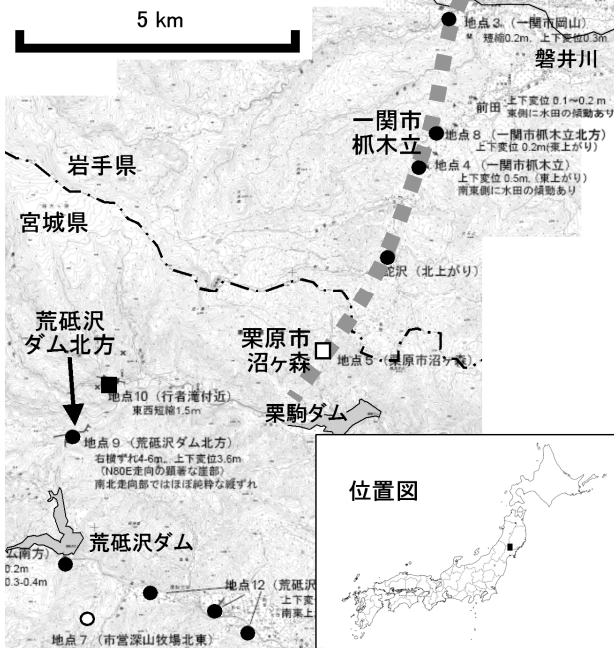


図1 地表地震断層候補の分布

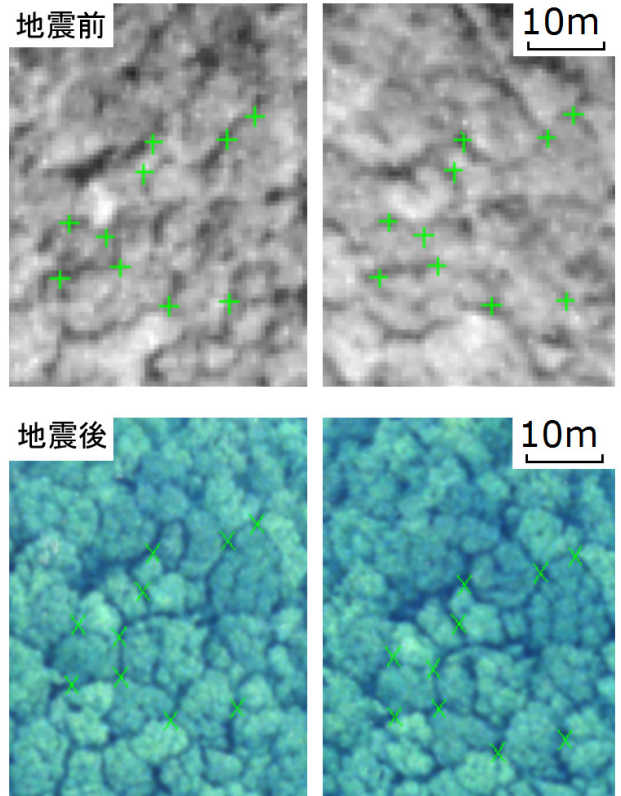


図2 計測点の計測例(計測点2)

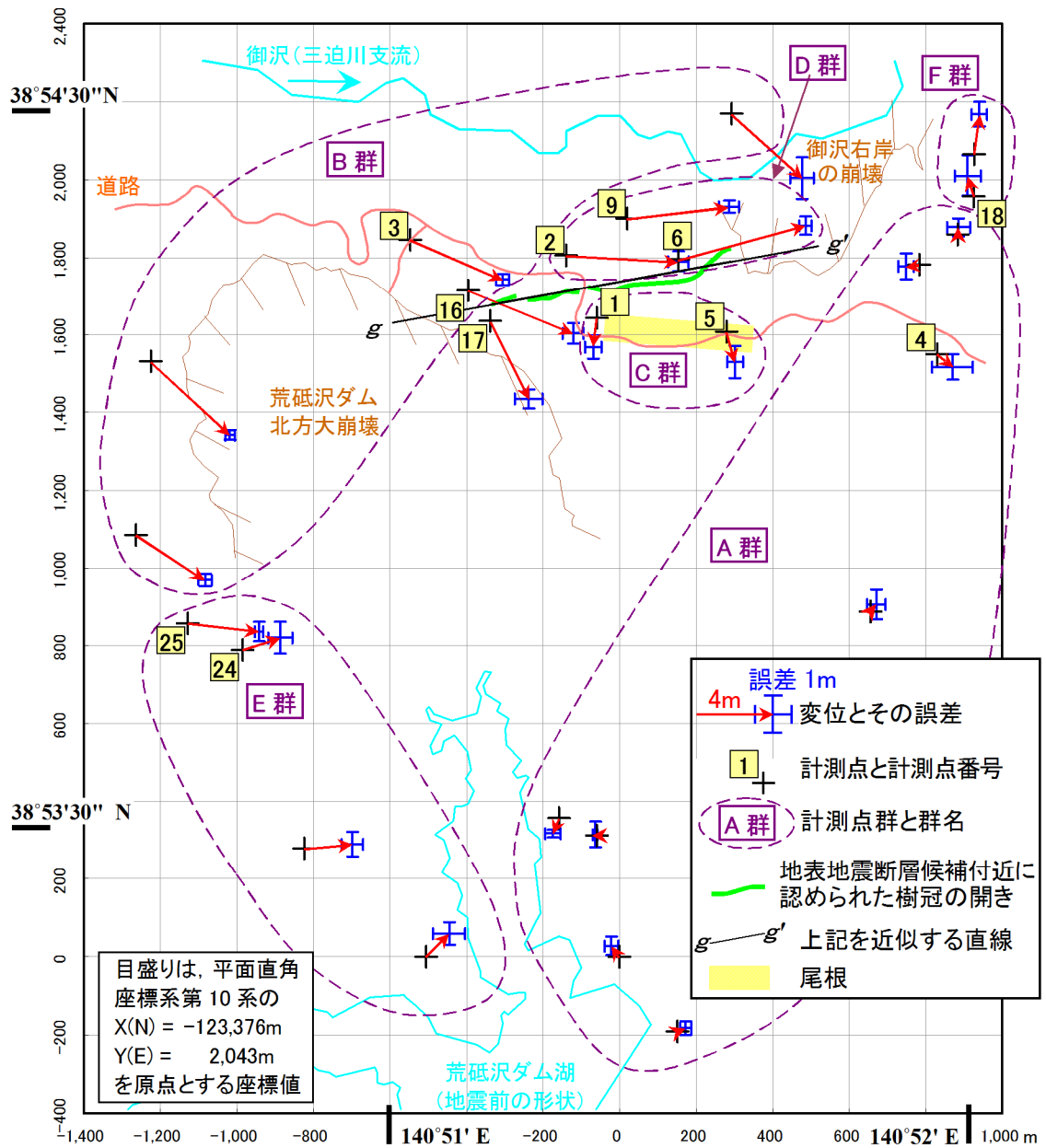


図3 水平変位量の計測結果

表 1 使用した空中写真

撮影年月日	測量計画機関	撮影地区名	コース番号 写真番号	撮影高度	縮尺	スキャン ピッチ
2006年9月3日	国土地理院	志津川(T0-2006-2X)	C4-7~8	4,600m	1/30,000	2,400dpi
2008年6月16日	国土地理院	岩手・宮城内陸地震(CT0-2008-3)	C6-13~15	2,200m	1/10,000	1,200dpi

表 2 標定精度と使用したパスポイント数

撮影年	コース番号 写真番号	指標の残存誤差 (アフィン変換)	残存縦視差 (最大)	パスポイント数	交会残差 (μm)		パスポイント 総数
					最大	標準偏差	
2006年	C4-7	57.3 μm	19.5 μm	24	9.7 μm	5.5 μm	24
	C4-8	42.3					
2008年	C6-13	48.2	11.1	11	28.0	5.8	17
	C6-14	43.7	13.8	12			
	C6-15	47.6					
(参考)	公共測量作業 規程の制限値	30.0	20.0		30.0	15.0	

表 3 A 群を基準とした B 群の変位量等の誤差

群の変位量の誤差の計算方法	A 群の変位量		B 群の変位量		A 群に対する B 群の変位量		
	東西	南北	東西	南北	東西	南北	平面位置
計測点の変位量のばらつきから求める	0.5 m	0.5 m	0.8 m	0.8 m	0.9 m	0.9 m	1.3 m
計測点の変位量の誤差から求める	0.2 m	0.2 m	0.2 m	0.2 m			