

2.2.3 気象格子点データを用いた光波測距データの補正手法

2.2.3.1 はじめに

光波測距観測は、2地点間の斜距離を測定するための比較的簡便な観測手法である。測量手法として広く普及したGPS観測のように、3次元的な変位ベクトルを測定することはできないものの、一定の条件下であればGPS観測よりも精度の高い観測が可能である。

光波測距の原理は、変調した異なる複数の周波数の射出電磁波と受光電磁波の位相差から、斜距離をmm単位の精度で測定する。ところが電磁波信号が伝播する大気屈折率が一様でないと伝播速度は行路上で一定とならず、また波長も同様となる。屈折率は媒質の気温、気圧、湿度に依存する。そのため正確な距離を算出するには、伝播行路上の大気の不均質を補正するために、行路上のすべての気象データを測定することが必要であるが、現実には困難である。そのため、一般には機械点の一箇所、あるいは機械点と反射点の二箇所の気象データを測定し、全行路の代表値として大気補正に用いることが多い。

ところが、火山地域における光波測距観測では機械点と反射点の標高差が大きいこと、あるいは活動的な火山では安全確保の観点から測線距離が長基線となることが多い。この場合、1～2箇所だけで測定した気象データで大気補正を施しても、正確な斜距離を算出していないことがある。

これまで、光波測距観測の大気補正については、多くの試みがなされてきた(Fujii et al., 1987, 木股, 1986, 等)。しかし、気象補正のための労力をかけすぎると、光波測距観測の簡便で比較的精度の高い地殻活動モニタリング手法という利点からはかけ離れてしまうことになり、本末転倒となる。

小論では、気象庁の気象格子点データを用いた精度の高い大気補正により、2004年浅間山噴火前後に山頂部で約2cmの斜距離変化を捉えたことを報告する。

2.2.3.2 補正手法

気象庁では、気象予測のために数値予報を行っている。定時の地上観測あるいは高層観測によって得られた気温、気圧、風向、風速等の気象要素を国内外から収集し、数値予報のための初期値データとして、空間的な格子点データを作成する。大気モデルを全球的に作成する必要があるが、当該予報領域の分解能を高めるために、ネステイング手法を用いて領域によって格子点間隔に違いをもたせ、効率的な計算を行う。全球的には、水平方向の格子点間隔が60kmの全球モデルを用い、さらに日本周辺のアジア地域では20km間隔の領域モデル(RSM)を組み込み、そして日本周辺領域では5km間隔のメソモデル(MSM)を組み込んでいる。一方、鉛直方向の格子点間隔は等圧面で与えられ、地上、1000hPa面、925hPa面、850hPa面、700hPa面～というような指定面高度で与えられている。初期値モデルの格子点データは00、06、12、18時(UTC)の1日4回作成される。本補正手法では、領域モデルの6時間毎の初期値から、気象データを時間・空間的に線形内挿した値を用いた。

電磁波による測距とは、機械点の発振器による参照信号と、反射点から返ってきた受信信号とを比較し、その位相を測定することにより行う。ところで、光の速度は気温、気圧、湿度によって変化する。よって、測定された位相も、信号の光路上の大気状態の時間的、空間的不均質性の影響で変化を受ける。このため、機械点と反射点の相対的な位置が不変であっても、大気の状態によって斜距離が変化したように見える。これが不完全な大気補正による気象ノイズである。

この気象ノイズを軽減するためには、光の速度を正確に知ることである。今、真空中の高速度をC、大気屈折率nの中を進む光速度をvとしたとき、それらの関係は、

$$n = \frac{C}{v} \quad (2.2.3.1)$$

で表されるので、大気屈折率を求めれば、vが求まることになる。

ある地点での大気屈折率nは、以下のように表せる。

$$(n-1)10^6 = n_g \cdot \frac{p/p_0}{T/T_0} - \frac{11.27 \cdot e}{T} \quad (2.2.3.2)$$

ここで T は気温 [K], p は気圧 [hPa], e は水蒸気圧である。また, $T_0=273.15$ [K], $p_0=1013.25$ [hPa] とする。 n_g は大気の標準屈折率であり, 以下の式のように電磁波の波長 λ に依存する。

$$(n_g - 1)10^6 = 287.6155 + \frac{4.88660}{\lambda^2} - \frac{0.06800}{\lambda^4} \quad (2.2.3.3)$$

格子点データは, 指定気圧面で高度, 気温, 及び露点が与えられる。これらから, 浅間山における光波測距測線の機械点-反射点間を分割し, 時間, 空間的に内挿して T, p, e を求め, 光路上の屈折率を算出した。なお, 露点 Td から水蒸気圧 e に換算する式は Tetens (1930) の式,

$$e = 6.11 \times 10^{\frac{7.5Td}{237.3+Td}} \quad (2.2.3.4)$$

を使用した。

機械点である軽井沢測候所の標高は1003m, 浅間山山頂に近い反射点の標高は約2500m であり, これらをカバーできる指定気圧面は, 700, 800, 850, 900, 925hPa の5つである。さらに, 機械点の軽井沢測候所では地上気象観測を行っており, この1点と5つの指定面の格子点データから内挿されたデータを用いた。

2.2.3.3 浅間山火山への適用

浅間山はランク A の活火山のひとつであり, 活動期には浅部にマグマ供給がなされ, 噴火活動や山頂カルデラでの溶岩湖形成など活発な活動を呈する。この場合, 山頂部にはマグマ活動に伴う山体変動が観測されることが期待されるが, これまでに噴火前後のマグマ活動に起因する山頂部の変動を, 地殻変動観測によって検知することに成功した事例はない。我々は, マグマ活動に起因する山頂部の山体変動を捉える目的で2002年からGPSの繰り返し観測を1年に2回の割合で実施するとともに, 時間分解能を高めるために山頂部に反射鏡を設置して, 山麓部からの光波測距観測を2003年から実施した。

機械点は山頂から約8 km 南方の軽井沢測候所 (KWS) とし, 測風塔にジオジメーター社6000型の測距儀を用いた。反射点は山頂火口縁から500m 程南方の前掛山南縁の3箇所 (M1, M2, M3) で3素子反射鏡を用いた。測線の斜距離は約7000m, 標高差は約1500m である。Fig. 2.2.3.1に観測点の配置を示す。観測回数は2003年5月から2006年12月までに274回である。観測初期から継続しているKWS (軽井沢測候所) からM1~M3までの観測結果を Fig. 2.2.3.2に示す。緑色は気象補正を何もしない斜距離変化を示したものである。なお, M2とM3の斜距離は噴火活動の噴石衝突により, 反射鏡を設置した礎石が動き, それぞれ67mmと13mm 短縮したが, それは補正済みである。(2.2.3.2)式からわかるように屈折率は気温, 気圧, 水蒸気圧に依存し, 温度が低いほど, あるいは圧力が高いほど

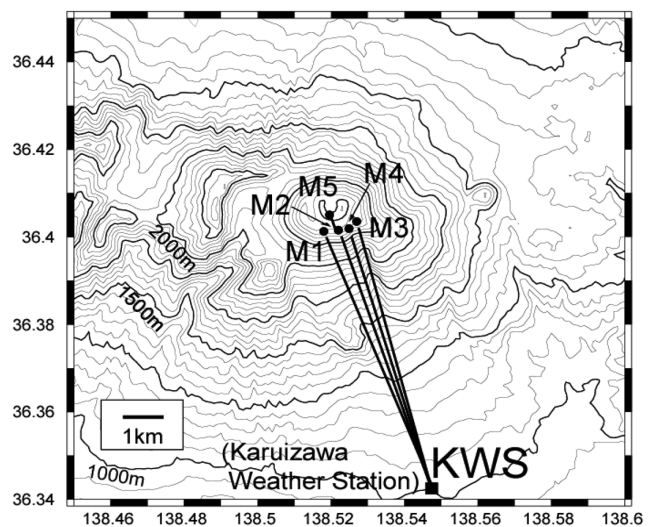


Fig. 2.2.3.1 EDM observation network around Asama volcano.

ど大きくなる。また、蒸気圧変化による寄与は小さいものの、蒸気圧が低いほど屈折率は大きくなる。この気象3要素の年較差はたとえば機械点ではそれぞれ、30℃、20hPa、25hPa程度であり、屈折率の年較差に直すとそれぞれ25ppm、6ppm、および1ppmになる。よって、気象補正を施さない斜距離変化の長期的な年周変動は、気温の季節変化によって大きく依存しており、気温の高い夏季には屈折率が相対的に小さくなるので、斜距離が短縮するようみかけの傾向が見られる。この場合の変動の振幅は約15cmにもなる。Fig. 2. 2. 3. 2及びFig. 2. 2. 3. 3の青色は従来の機械点1点での気象補正による斜距離変化であるが、2～3cm程度の振幅の年周変動が残っており、1点での気象補正では不十分であることがわかる。また、夏季に短縮ではなく伸張傾向であり、過大補正されていることを示す。この場合、2～3cm程度の火山活動による地殻変動が起きていても、検知は困難であるか、そうでなくても定量的な評価を行うことは難しい。

Fig. 2. 2. 3. 3は、格子点データを使用した補正結果（赤）と機械点のみの気象データを使用した補正結果（青）を示す。青はFig. 2. 2. 3. 2と同じである。縦軸の目盛縮尺はFig. 2. 2. 3. 2と2倍異なる。噴火活動中の2004年9～12月には、浅部へのマグマ供給により山頂周辺の膨張が確認された。最も大きな変動を示したM2では、格子点データを用いた補正では、約2cmの斜距離の短縮となった（Fig. 2. 2. 3. 3Bの赤）。ところが、機械点である測候所だけの補正では、この期間の変動量はその2倍程度にも大きくなって見える。その理由は、機械点1点のみの気象データにより過大補正をしてしまい、みかけの年周変動が重畳しているからである。そのみかけの年周変動速度の最も大きい季節（春季あるいはあ秋季）にかかってしまったので、いっそうその影響が強くなったものと思われる。

このように、従来の1点補正では困難であった変動量の正確な把握が、格子点データによる補正で可能になった。浅間山2004年の活動においては、従来の手法に頼った場合、約4cmと2倍もの大きさの山体変動と見なすことになり、この違いは活動評価に大きな影響を及ぼすことになる。これらの結果等から、高木・他（2005）は噴火活動中の浅部にマグマが蓄積した場所は火口直下の標高1000mより高い場所（火口直下の約1500m以浅）と見積もった。

Fig. 2. 2. 3. 4は2005年11月の4日間における毎時のM1までの斜距離を示す。従来の機械点1点補正、および格子点データによる補正の両方を示す。また、機械点における気温、気圧変化も示している。従来の機械点における1点補正では、約8cmもの振幅の日周変化が見えるにも関わらず、格子点データを使用した補正では、日周変化は完全に除去された。この時期の天候は快晴が続き、日中の日射量も多い。このような気温の日較差が大きい時期には、比熱の小さい地表付近の気象データだけで補正を行うと適切な補正ができない。日中の昇温時には斜距離が短縮するように補正されており、結果的に過大補正となっている。

気象の日変化による上下方向の気象状態の影響を最低限にするため、従来は日没直後や、日中の曇天時など、気象状態を選んで測定していた（木股、1986）。しかし、本補正手法を用いれば、観測時間や気象条件を厳しく選択する必要性は小さい。

2. 2. 3. 4 まとめ

光波測距データを、気象庁の気象格子点データを利用することにより、従来の機械点1点補正よりも高精度な補正をすることを示した。この手法により、移設的な年周変動を完全に除去することができた。また、これまでは機械点1点の気象データによってより適切な補正を行うために、接地境界層による影響等を避けようと、日没前後の時間帯等、気象状態を選択して測定する必要があった。しかし本手法を適用することにより、時間帯を選ぶことなく測定することが可能となった。気象の日変化による、みかけの日周期ノイズも大幅に軽減することが可能になった。

2004年の浅間山噴火活動期に、山頂付近は最大膨張を示した。従来の機械点1点補正の場合、4cm程度の斜距離短縮に見えたものが、この補正手法を用いることにより、2cmの短縮であることがわかった。

なお、この解析結果を用いた活動評価は、2. 2. 1～2節を参照のこと。

（高木朗充）

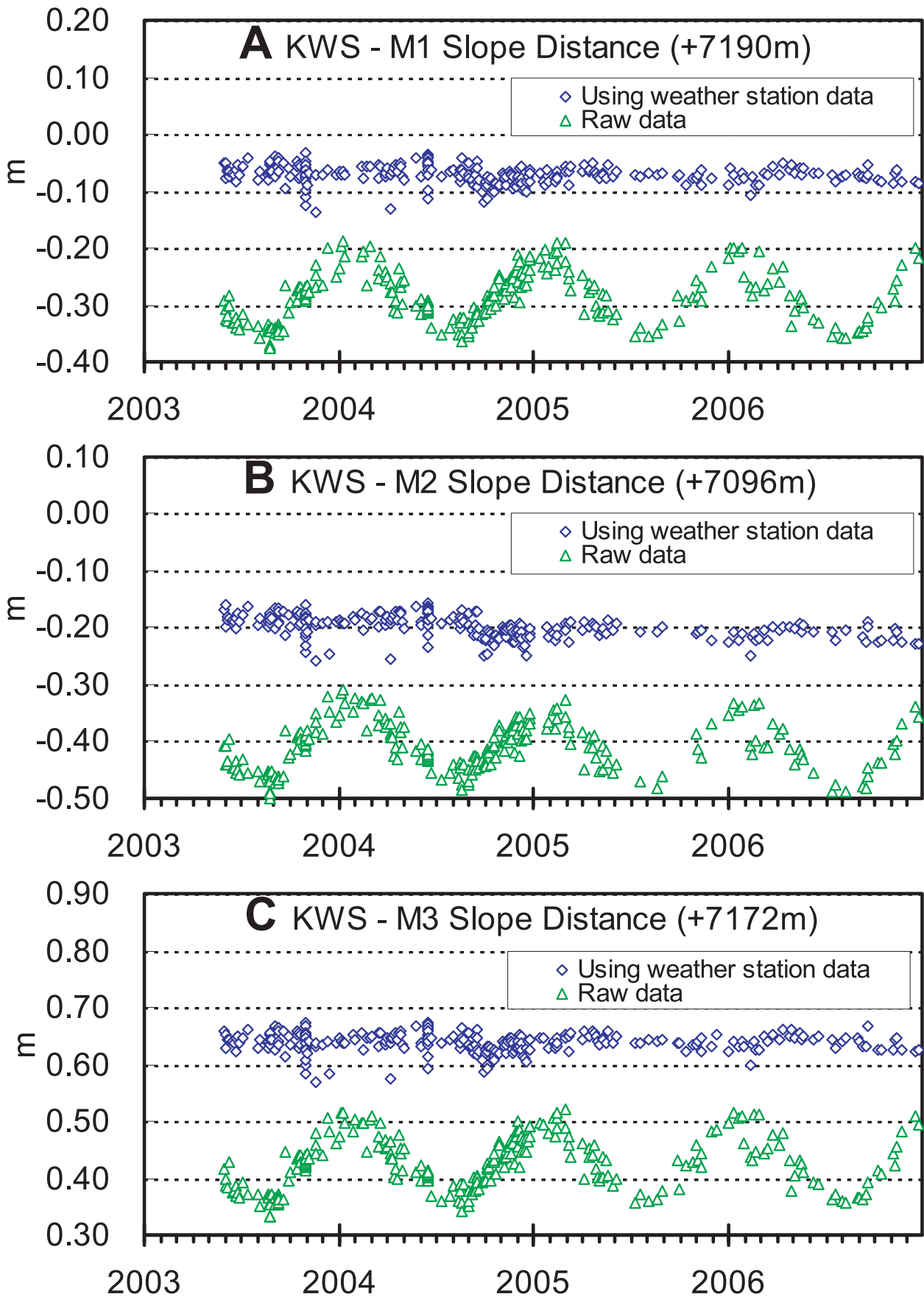


Fig. 2.2.3.2 Time series of slope distances by EDM. The green triangle indicates raw distance without atmospheric correction, and the blue diamond indicates distance corrected by weather data of KWS.

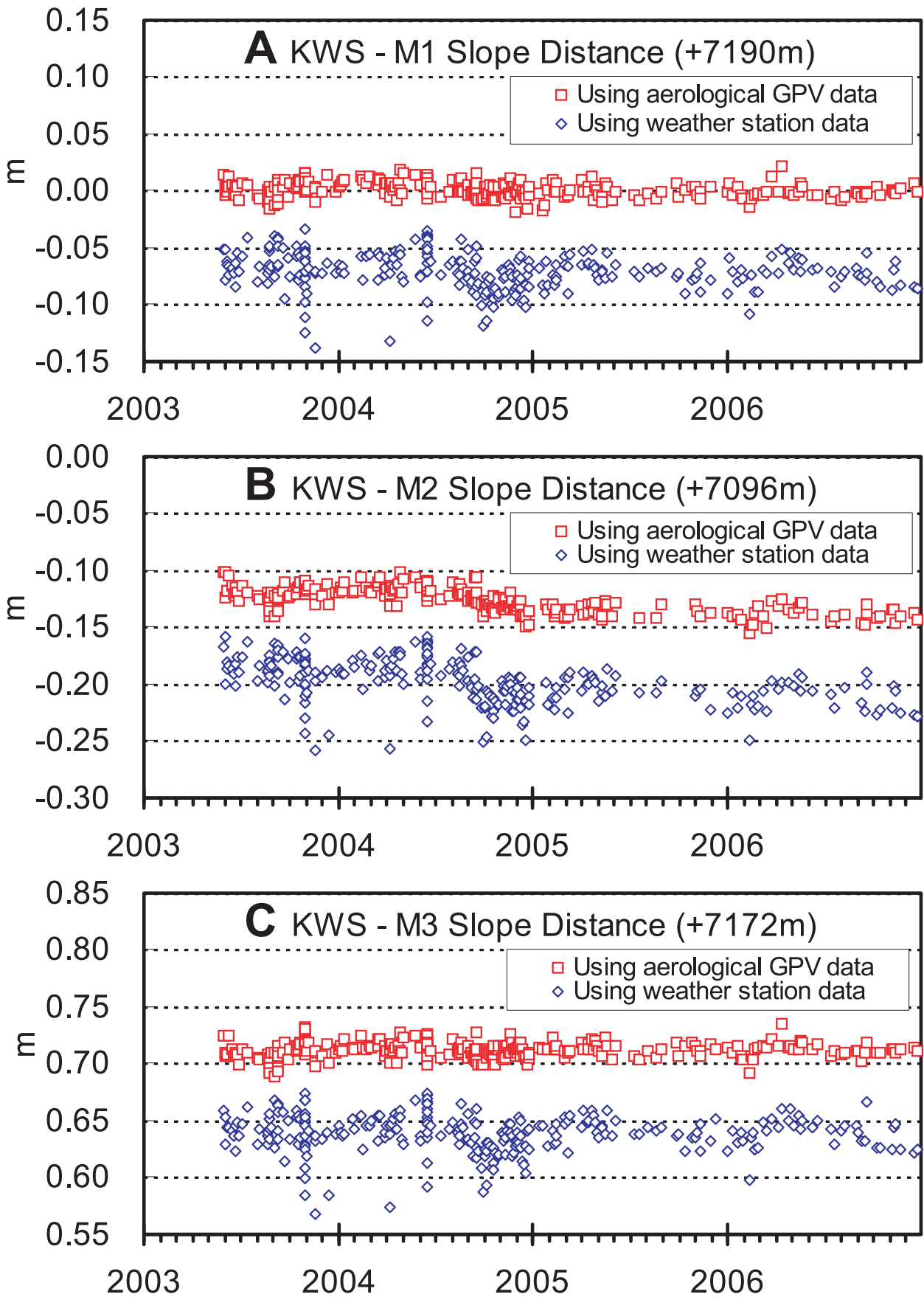


Fig. 2.2.3.3 Time series of slope distances by EDM. The blue diamond indicates distance corrected by weather data of KWS. The red square denotes distance corrected by GPV data.

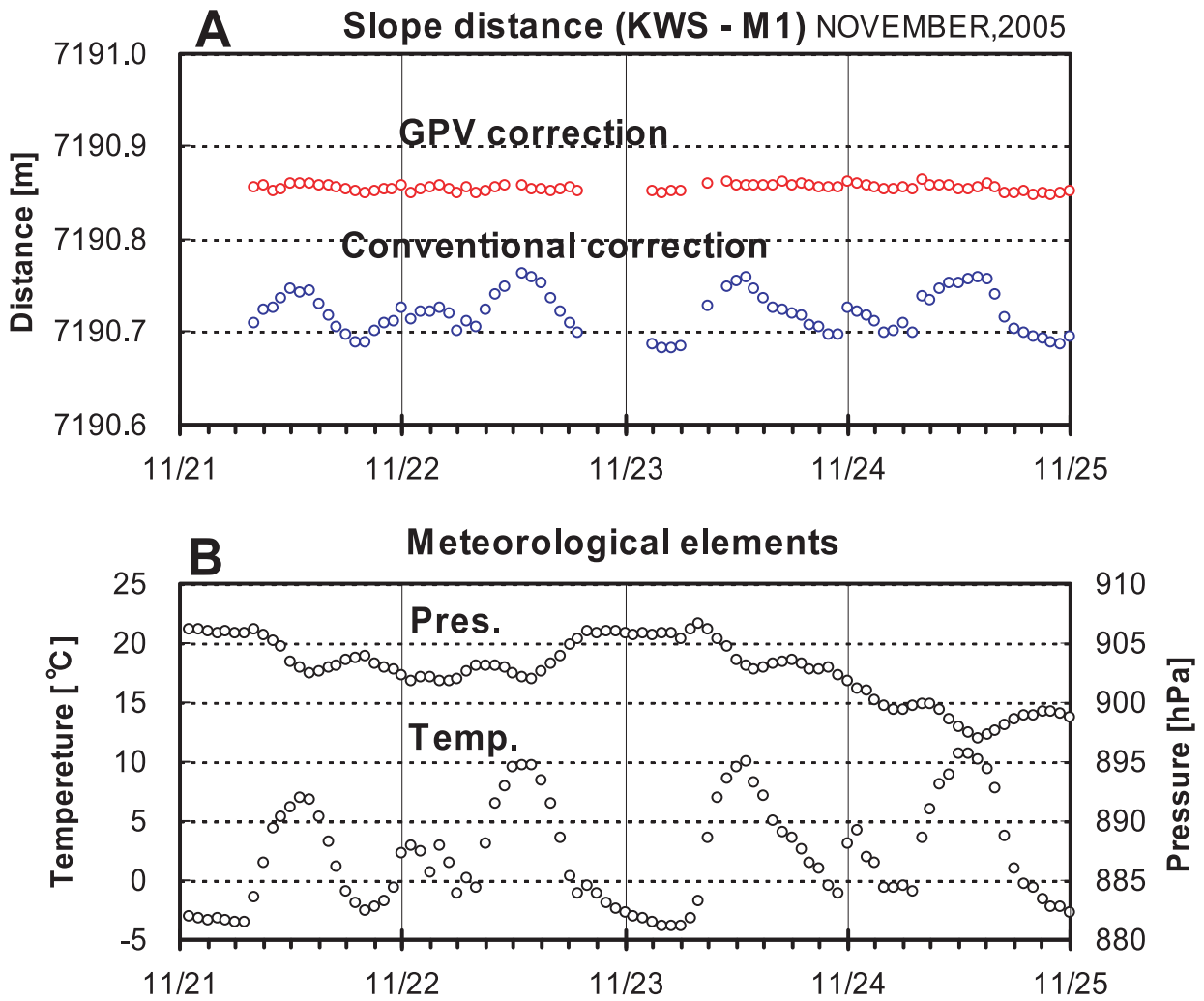


Fig. 2.2.3.4 Hourly variance of slope distances by EDM and meteorological elements. A: Slope distance corrected by the GPV data (red open circle) and corrected by the only weather station data (blue open circle). B: Atmospheric temperatures and pressures recorded at KWS.

参考文献

- Fujii,Y. and Miyamoto,H., 1987: A General formula for atmospheric correction in electro-optical distance measurement, *J. Geod. Soc. Japan.*, **33**, 205-214.
- 木股文昭, 1986: 日の入り前後における設置境界層内の温度差分布, 測地学会誌, **32**, 224-225.
- 高木朗充, 福井敬一, 藤原健治, 上田義浩, 飯島 聖, 山本哲也, 坂井孝行, 菅野智之, 湯山弘明, 2005: 地殻変動から推定される2004年浅間山噴火前後の浅部マグマ供給系, 火山, **50**, 363-375.