

1.7 光波測距の数値気象モデルに基づく大気補正 —浅間山への適用—

光波測距の数値気象モデルに基づく大気補正 — 浅間山への適用 —

高木朗充^{*,**}・福井敬一^{*}・新堀敏基^{*}・飯島 聖^{***}

(2009 年 8 月 31 日受付, 2010 年 1 月 15 日受理)

Atmospheric Correction in EDM by Using the JMA Numerical Weather Model: Application to Measurement at Asamayama Volcano

Akimichi TAKAGI^{*,**}, Keiichi FUKUI^{*}, Toshiki SHIMBORI^{*} and Sei IJIMA^{***}

Electro-optical distance measurement (EDM) and Global positioning System (GPS) observation are applied to monitor precise time variation of the ground deformation at active volcanoes. But observations using electromagnetic waves such as these are accompanied by errors associated with inhomogeneity of refractive index along the propagation path in atmosphere. In particular, the inhomogeneity in troposphere degrades the accuracy of positioning. An improved atmospheric correction method in EDM was developed, based on the Japan Meteorological Agency (JMA) operational mesoscale analysis (MANAL) for numerical weather prediction. In this method, the precise velocity and ray path of propagated lights are estimated from the adequate vertical profile of refractive index by MANAL. Consequently distance along the bowing ray path measured by EDM is corrected to be precise slope distance. Applying this procedure to EDM data at Asamayama volcano, the seasonal fluctuation caused by inhomogeneity of refractive index in atmosphere was removed entirely.

At Asamayama volcano, very small eruptions occurred in August 2008 since the latest 2004 eruption, and then a small eruption occurred in February 2009. Based on the EDM observation by Meteorological Research Institute and Karuizawa Weather Station, we detected that the slope distance had been shortened since August 2008. Slope distances from the observation site to reflectors were corrected by using MANAL in this correction method. Though slope distances have increased in length at a rate of 1–7 mm per year since the 2004 eruptions, ground deformation turned over to inflation in August 2008 and slope distances shortened to 5–28 mm per five months by January 2009.

In order to account for those observation data, we assumed a pressure source beneath the summit crater, whose depth and volume increase were estimated to be at a height of 2380 m above sea level (200 m under the summit) and 15,300 m³, respectively.

By developing this atmospheric correction method in EDM with the use of the JMA's numerical weather model, it became possible to precisely detect ground displacements and thus to reliably estimate their sources. Therefore, this method is very effective to monitor activity of volcanoes.

Key words: Atmospheric Correction, EDM, JMA numerical weather model, Asamayama volcano, MANAL

* 〒305-0052 茨城県つくば市長峰 1-1
気象研究所地震火山研究部
Seismology and Volcanology Research Department,
Meteorological Research Institute, 1-1 Nagamine,
Tsukuba, Ibaraki, 305-0052 Japan.

** 現所属: 〒100-8959 東京都千代田区霞ヶ関 3-2-2
文部科学省研究開発局地震・防災研究課
Present address: Earthquake and Disaster-Reduction
Research Division, Research and Development Bureau,
Ministry of Education, Culture, Sports, Science and

Technology - Japan.

*** 〒389-0111 長野県北佐久郡軽井沢町大字長倉字北倉
1706-8
気象庁浅間山火山防災連絡事務所
Asamayama Resident Office for Volcanic Disaster Miti-
gation, JMA, 1706-8, Kitakura, Nagakura, Karuizawa,
Nagano, 389-0111, Japan.

Corresponding author: Akimichi Takagi
e-mail: atakagi@mext.go.jp

1. はじめに

光波測距は、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斜距離の観測が可能なることもある。しかも反射点には電力の必要がなく、あらかじめ反射プリズムさえ設置しておけば地殻変動のモニタリングが可能である。火山監視においては、活動が活発になっても山麓から安全を確保しながら測定できることから、GPS 観測が普及した現在でも今なお有効な観測手法である(例えば、斎藤・他, 2003)。

光波測距の原理は、変調した異なる複数の周波数の射出波と受光波の位相差から、斜距離を mm 単位の精度で測定する(須田, 1994)。ところが光波が伝搬する大気屈折率が一様でない、伝搬速度あるいは波長は伝搬経路上で一定とならない。屈折率は媒質の気温、気圧、湿度に依存する。そのため大気の不均質を補正して正確な斜距離を算出するためには、伝搬経路上のすべての気象状態を測定することが望ましいが、現実には困難である。そのため、一般には器械点の一箇所、あるいは器械点と反射点の二箇所の気象データを測定し、全経路の代表値として大気補正に用いることが多い(以下、これを従来手法と呼ぶ)。

ところが、火山地域における観測では器械点と反射点の標高差が大きいため、あるいは活動的な火山では安全確保の観点から測線が長距離となることが多い。この場合、1~2 箇所だけで測定した気象データによる大気補正では、正確な斜距離の算出には不十分である。

これまで、光波測距観測の大気補正について多くの試みがなされてきた。例えば須田(1970)や Fujii and Miyamoto(1987)は、地表面付近の大気鉛直分布を簡便に推定するための式を提案した。また、木股・山内(1981)は大気境界層の気温の鉛直分布の観測から日の入り前後の測定が最も精度が高まると報告し、実測データから屈折率の鉛直プロファイルを明らかにするため、係留ゾンデや気

象鉄塔の観測から低層の気象観測がなされた(田島・他, 1970; 木股, 1986)。

光波測距の正確な補正を行うには、地表付近の大気屈折率分布をより正確に把握する必要があるが、経験式だけでは限界があり、また気象観測に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る。

一方で、天気を予測するための数値気象モデルは計算機の進歩とともにより高分解能になり予報精度が向上している。高木・他(2005)は 2004 年浅間山噴火活動前後の光波測距データに対して、20 km の水平格子間隔の数値気象データを利用した補正を試み、簡単な報告をした。しかし、それよりも高分解能の数値気象データに対しての検証は行っていない。そこで小論では、気象庁の分解能の異なるモデルの数値気象データを用いて大気屈折率を計算し、光波測距の補正に適用した場合の比較・検証を行い、現状における、より適切な大気補正について報告する。また、リアルタイム補正を行うために必要となる予報値を用いた補正についてもその精度を検証した。

さらにこの手法を浅間山における測距データに適用することで、斜距離の時系列の S/N 比が著しく改善され、活動静穏期に山頂部が収縮し、活動期には膨張することを検出することができた。

2. 数値気象データ

気象庁では、日々の気象予報業務のために数値予報資料を作成している。このための数値予報モデルには、地球全体を予報領域とする全球モデルや、全球モデルの予報結果を側面境界値として日本周辺をより細かく予報するメソモデル等の予報モデルがあり、現業運用されている。2009 年 8 月現在、各モデルの水平方向の格子点間隔は、全球モデルが 20 km、メソモデルは 5 km である。一方、鉛直方向の格子点間隔は一定ではなく、地表近くほど密で上層ほど疎なモデル面の構造を有している。また

Table 1. History of two ANALs' horizontal resolution used to this atmospheric correction.

Horizontal resolution of analysis	Mar.1, 2006	Nov.21, 2007	Apr.7, 2009
20km-ANAL	RANAL every 6h, 20km grid, 40 layers		GANAL every 6h, 20km grid, 60 layers
5km-ANAL	MANAL every 6h, 10km grid, 40 layers	MANAL every 3h, 10km grid, 40 layers	MANAL every 3h, 5km grid, 50 layers

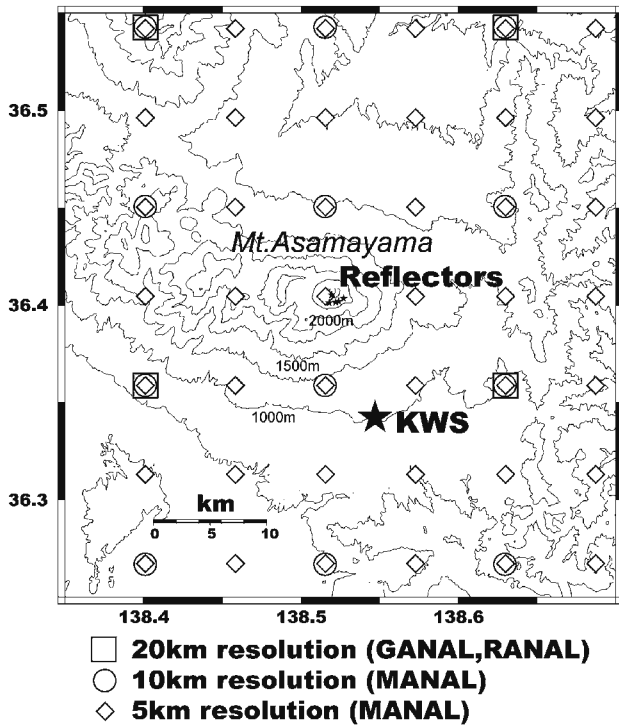


Fig. 1. Distribution of horizontal grid points of every ANALs around Asamayama volcano. Squares, circles and diamonds denote 20km-RANAL, 10 km-MANAL and 5km-MANAL, respectively.

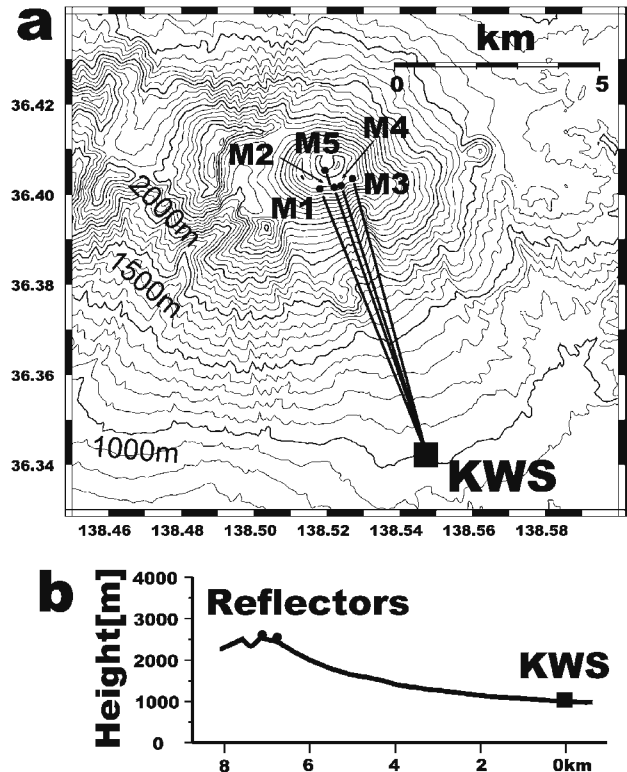


Fig. 2. Distribution of reflector sites (M1-M5) and observation site (a), and topographical profile (b).

モデル地形に対して滑らかな層構造を形成しているので、同一モデル面でも場所によってモデル面高度が異なる。

全球モデルやメソモデルを用いて数値予報を行うためには、初期条件が必要である。初期条件は現在の大気の状態をできるだけ正確に捉えたものでなければならない。この大気の状態を、離散的に配置された格子点で代表して正確に求める作業を客観解析といい、大気科学に加え統計学を駆使して、初期条件となる格子点データを作成する。以後、客観解析をANAL、格子点データをGPVと記す。

小論では、分解能の異なる数値予報モデルに対するANALによるGPVを光波測距の大気補正に適用し、補正結果を比較する。適用する測距データは2003年5月から2009年7月までであるが、この期間中に数値気象モデルの改良が行われており、各ANALのGPVの空間分解能も上がっている。大きな変更として2007年11月20日までは水平60km格子の全球モデル(GANAL)、20km格子の領域モデル(RANAL)、及び10km格子のメソモデル(MANAL)の3つが共存していたが、2007年11月21日以降はRANALが廃止され、GANALが格子間隔20kmとなり、それまでのRANALと同等の水平分解能になった。また、2009年4月7日からは、MANAL

の水平分解能が10kmから5kmとなり、力学過程が静力学モデルから非静力学モデルとなった(本田・澤田, 2009)。このように分解能や計算手法の変遷はあるが、小論では光波測距の大気補正に使用した客観解析値として、20km格子のANAL(20km-ANALと記す)と5km格子のANAL(5km-ANAL記す。ただし2009年3月までは10km格子)の2種類の空間分解能をもつGPVを取り扱う。その詳細をTable 1に示す。また、各ANALの浅間山周辺における水平格子点分布をFig. 1に示す。

補正に用いたGPVの解析時刻は、2006年3月以降の5km-ANALは00UTC(協定世界時)を含む3時間毎であり、それ以前の5km-ANALと20km-ANALは00UTCを含む6時間毎である。また、大気補正処理では各ANALのGPVを、測距時刻と器械点直上に対して時間・空間的に線形内挿した値を用いた。

3. 光波測距データ

2002年7月に浅間山山頂火口縁から約500m南方の前掛山南縁の3カ所(M1, M2, M3)に3素子の反射点を設営した(Fig. 2)。その後、新たに2005年8月にM2とM3の間にM4を、2005年9月に火口縁南側にM5を設営した。反射点は全てGPS繰り返し観測用のベンチ

Table 2. Specifications of electro-optical distance meters.

Instrument	Wave length	Standard condition (pressure, temperature and humidity)	Measurement period	Specific of measurement
Geodimeter 6000	0.885 μ m	1013.25 hPa 20 $^{\circ}$ C 60%	May, 2003 - July, 2009	Manual Non-telemeter Fair-weather
Leica Geosystems TPS1200	0.670 μ m	1013.25 hPa 12 $^{\circ}$ C 60%	Mar., 2005 - Feb., 2007	Automatic Telemeter Every hour

Table 3. Location of reflector sites and observation site for EDM at Asamayama volcano.

Site	Latitude (deg.)	Longitude (deg.)	Altitude (m)	Note
KWS	36.34220	138.54711	1010 (Manual) 1006 (Automatic)	Manual and automatic measurement at Karuizawa Weather Station.
M1	36.40121	138.51802	2455	Reflector site.
M2	36.40151	138.52200	2443	Reflector site.
M3	36.40348	138.52698	2443	Reflector site.
M4	36.40190	138.52388	2433	Reflector site with GPS receiver.
M5	36.40511	138.51961	2546	Reflector site.

マークを兼ね、M4 では 2006 年 5 月以降現地集録型の GPS 連続観測を継続している。

器械点は、山頂から約 8 km 南南東の軽井沢測候所 (KWS) とした。測候所測風塔に測距儀の台座を固定しておき、好天時に測距儀を設置して手動による繰り返し観測を行った。反射点までの斜距離は 7~7.5 km, 比高は約 1.5 km である。2003 年 5 月から測定を開始し、2009 年 7 月までに 436 回の測定を行った。この測定では Geodimeter 6000 型を用いた。また、2005 年 3 月から 2007 年 2 月までの 2 年間は、自動視準式光波測距儀 (Leica Geosystems 社, TPS1200) で自動観測も実施した。測定サンプリングは 1 時間毎であり、設置場所は KWS の遠望観測室 (繰り返し光波測距の器械点の下方 4.2 m) である。なお、連続観測の器械点からは視程障害物のため M2 を観測できていない。以後、これらの光波測距により得られたデータセットを、それぞれ繰り返し測距データ、及び自動測距データと呼ぶことにする。

測距儀の仕様等を Table 2 に示す。また、Fig. 2 に観測点配置と、器械点から反射点までの地形断面を示す。Table 3 に観測点の位置を示す。

4. 補正方法

光の伝搬速度は大気屈折率によって変化する。よって器械点と反射点の相対的な位置が不変であっても、伝搬経路上の大気状態に時間的、空間的不均質がある場合

には、屈折率、つまりは伝搬速度が一定とはならないので、測定する位相に影響を及ぼし、結果的に斜距離が変化したように見える。

さらに、伝搬する大気屈折率が一律でないと光波は屈折して経路が曲げられる。よって伝搬距離を正確に求めたとしても、斜距離を正確に求めたことにはならない。

これら、伝搬速度の補正と伝搬経路の補正が不完全であった場合に生じる補正斜距離のばらつきを光波測距における気象ノイズと呼ぶことにする。この気象ノイズを軽減するには、正確な大気屈折率分布を知り、適切な補正を行うことである。

4-1 屈折率の推定

真空中の光速を C , 大気屈折率 n の中を進む光速を v としたとき、それらの関係は、

$$n = \frac{C}{v} \tag{1}$$

と表されるので、大気屈折率 n から v が求まる。伝搬経路上の全てで大気屈折率がわかれば、正確な光速が推定でき、正確な位相を測定できる。真空中の屈折率は 1.0 であり、標準大気 (高度 0 km, 気温 15 $^{\circ}$ C, 気圧 1013.25 hPa) における可視光の屈折率は約 1.0003 である。

一般にある地点での屈折率 n は、乾燥大気と水蒸気部分による寄与により、

$$(n-1)10^6 = m_1(\lambda) \frac{p}{T} + m_2(\lambda) \frac{e}{T} \quad (2)$$

と表現される。ここで、 p は気圧 (hPa)、 e は水蒸気圧 (hPa)、 T は気温 (K) であり、 m_1 と m_2 は波長 λ (μm) に依存する係数である。屈折率の波長依存を表す経験式は多い (例えば、Ciddor, 1996; Hill et al., 1980) が、小論では光波測距の大気補正で汎用されている Barrell and Sears (1939) の式の近似式 (須田, 1994) の表現を一部書き換えた、

$$(n-1)10^6 = n_d \cdot \frac{p/p_0}{T/T_0} + n_w \cdot \frac{e/p_0}{T/T_0} \quad (3)$$

を用いた。ここで、 $T_0=273.15$ (K)、 $p_0=1013.25$ (hPa) とする。 λ に依存する係数 n_d および n_w は、

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

$$n_w = -(47.424 - 0.5168\lambda^{-2}) \quad (5)$$

と表される。 n_g は大気標準屈折率である。

ANAL の GPV は、気圧、気温、及び露点を与えられる。ここで水蒸気圧 e は、露点 T_d ($^{\circ}\text{C}$) から Tetens (1930) の式、

$$e = 6.11 \times 10^{\frac{7.5T_d}{237.3+T_d}} \quad (6)$$

を用いて求めている。

本補正手法では、ANAL の GPV から伝搬経路上の気圧、気温、及び (6) 式で求めた水蒸気圧を内挿推定し、屈折率を (3)~(5) 式を用いて計算し、それに層厚の重みをつけた平均値を使用した。

4-2 伝搬速度の補正

一般に、光波測距儀には射出する光波の波長が設定されている他、伝搬距離の読み取り値そのものが大気補正を必要としない斜距離に相当する、測距儀固有の標準状態の気象値が設定されている (Table 2)。

実際の補正では、ANAL の GPV から (3)~(5) 式を用いて算出した伝搬経路上の大気の屈折率の平均値と、測距儀に設定された標準状態を (3)~(5) 式に代入して算出した屈折率の差を、伝搬距離の読み取り値に乗じた値が伝搬距離の補正值となり、計測した伝搬距離の読み取り値からこれを差し引いた距離が補正後の伝搬距離となる。

4-3 伝搬経路の補正

屈折率の不均質な大気の分布によって光波の伝搬経路は屈折するため、伝搬経路に対する補正も必要である。そこで伝搬経路の領域の大気の状態を近似的に水平多層と仮定し、器械点 (KWS) 直上の ANAL のモデル面の

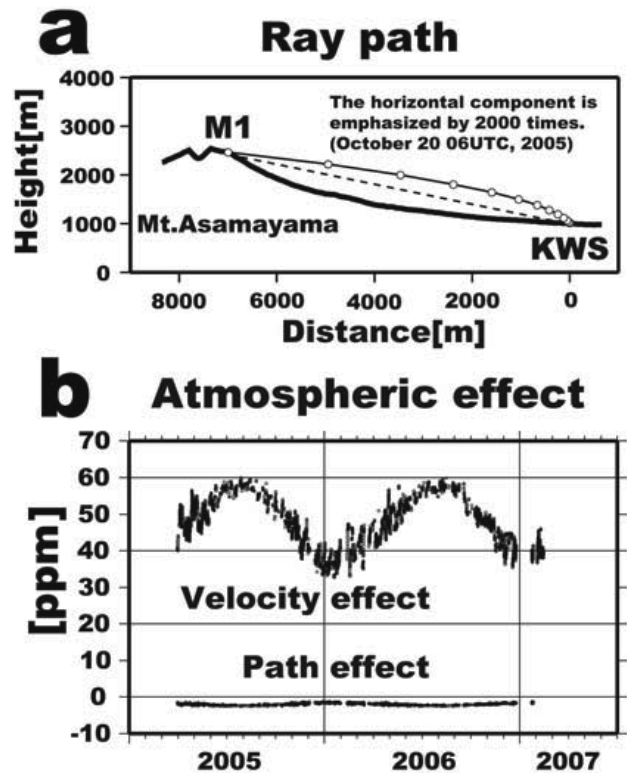


Fig. 3. Velocity and ray path effect on slope distance caused by inhomogeneity of refractive index along the propagation path in atmosphere. Ray path is bended propagating through the inhomogeneous atmosphere (a). Seasonal changes' ratios of velocity and path effect calculated by actual JMA's GPV are ± 15 ppm and ± 0.5 ppm, respectively (b).

高さ毎に層境界を設定し、スネルの法則に基づき波線追跡法で伝搬経路を推定した (Fig. 3a)。観測を行った浅間山周辺では、器械点と反射点の標高差約 1.5 km の間に、モデル面が 11 層存在する。Fig. 3a は、KWS から M1 までの伝搬経路の屈折の様子を 2005 年 10 月 20 日 06UTC の実際の ANAL の GPV から推定したものである。ただし、水平方向に 2000 倍に強調している。

なお、器械点と反射点の座標は期間を通して固定として近似した。測線の伝搬経路を季節によって異なる様々な現実の気象条件で計算した結果、経路の屈曲によって生じる距離の伸びは最大でも約 3 ppm であった。この程度であれば、仮に地殻変動によって反射点が 1 m 変動したとしても固定近似による誤差は 0.003 mm 以内であり無視できる量であることを確かめた。

4-4 伝搬速度と伝搬経路への補正の効果

以上の手法を用い、補正斜距離に対する伝搬速度の補正と伝搬経路の補正の効果を GPV を用いて計算して、斜距離からの比の変化として比較した (Fig. 3b)。気象の季節変化がもたらす伝搬速度の変化の影響は、温暖期に

大きく寒候期に小さいことがわかる。温暖期の屈折率 n が相対的に (3) 式により小さくなり、これは (1) 式より光の伝搬速度 v が大きくなることを示す。つまり測距儀が測定する波数は減るため、補正をしなければ結果的に温暖期に距離を短く測定していることを意味する。補正の効果の季節変動の振幅は ± 15 ppm 程度である。なお、この値は測距儀に設定された標準状態の屈折率から 1 を引いた値 (約 285 ppm) からの差で示されており、絶対量自体には意味はない。一方、伝搬経路の影響の効果の季節変動の振幅は ± 0.5 ppm 程度であり、伝搬速度の影響による振幅の 1/10 以下である。また短周期成分の標準偏差も同程度に小さい。

5. 補正結果

5-1 補正手法の違い

以上の補正手法を測距データに適用し、本手法による補正結果の定量的な評価を行う。測距データは、観測頻度の高い TPS1200 による自動測距データを用いた。対象期間は 2005 年 3 月から 2007 年 2 月までの約 2 年間にすぎないが、1 時間毎の高サンプリングの測定結果である。この期間は、浅間山では顕著な地殻変動はなかった。この間、器械点と反射点の相対的位置は不変であったとすると、補正処理が完全に行われているとすれば、斜距離の標準偏差は 0 に近いはずである。しかし、気象の変化は日周変動と年周変動が顕著であり、光波測距に対して適切な気象補正がなされていない場合、日射に伴う日変化や大気擾乱に伴う短周期ノイズ、あるいは季節の違いによる年周期ノイズが重畳する。そこで、補正が適切に行われているかどうかの尺度として、この期間の補正処理後の斜距離時系列の標準偏差を用いることにする。標準偏差が小さいほど、気象補正が適切に行えていることを意味する。

Fig. 4 に、器械点 KWS から反射点 M1 の測定距離に MANAL (5 km-ANAL) を用いて本手法の補正処理をした斜距離の時系列を示す。比較のため、未補正の場合と、従来手法である器械点の実測気象データのみを使用した補正結果も示す。図中の括弧内の数値は、各補正手法によって算出された斜距離のこの期間の平均に対する標準偏差 (mm) である。従来手法による大気補正では気象ノイズの年周変動が残存しており、その位相は未補正の場合と半波長のずれがある。このことは従来手法が気象の季節変化に対して過大補正していることを示す。一方、本手法による気象ノイズの年周変動は極めて小さい。標準偏差 7.4 mm は短周期の気象変動に起因するノイズ振幅と考えるとよく、年周期のノイズ振幅は 0 に近い。また斜距離の絶対量は、本手法の補正によって従来手法と比

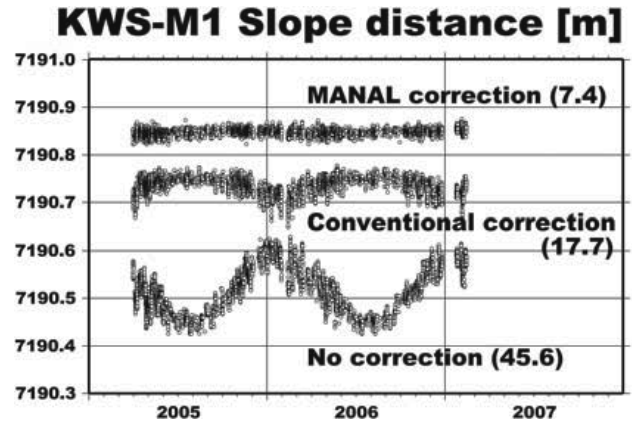


Fig. 4. Slope distance from KWS to M1 measured with auto EDM system from March, 2005 to February, 2007. Distance corrected with MANAL has smaller seasonal noise than that by the conventional correction. Parenthetic figures show standard deviation (mm).

べ約 10 cm 大きく修正された。

M1 以外の反射点との斜距離も、これらの傾向は同様であった。

5-2 ANAL の空間分解能の違い

次に、本手法を、時間分解能は低いが、2 回の噴火活動期を含む 2003~2009 年の長期の繰り返し測距データに適用し、空間分解能の異なる ANAL の GPV による補正結果の違いを比較する。Fig. 5 に、KWS から M2 の繰り返し測距データに対する 20 km-ANAL と 5 km-ANAL による補正結果を示す。比較のため、未補正の場合と、従来手法である器械点の実測気象データのみを使用した補正結果も示す。

従来手法と比べ、20 km-ANAL、5 km-ANAL による結果の方が年周ノイズも短周期ノイズも小さいことがわかる。浅間山では 2004 年 9 月~12 月に噴火活動があった。この期間、従来手法でも測線が短縮 (火口が膨張することを意味する) していることがわかるが、従来手法ではノイズが大きいため変動の定量的評価は困難である。しかし本補正手法では約 2 cm の短縮があったことが明瞭にわかる。また、2008 年 8 月の微噴火から始まった活動度の高まりは 2009 年 2 月に小噴火をもたらしたが、この期間にも斜距離の短縮があった。しかし従来手法ではノイズに埋もれ検知することすら不可能である。また、20 km-ANAL を使った補正では短縮の傾向が読み取れるが、定量的評価は困難であり、従来手法と比べてもそれほど改善していないことがわかる。一方、5 km-ANAL を使った補正では、1 cm 以上の明瞭な短縮を読み取れる。

なお、この期間、20 km-ANAL には数値モデルの変更

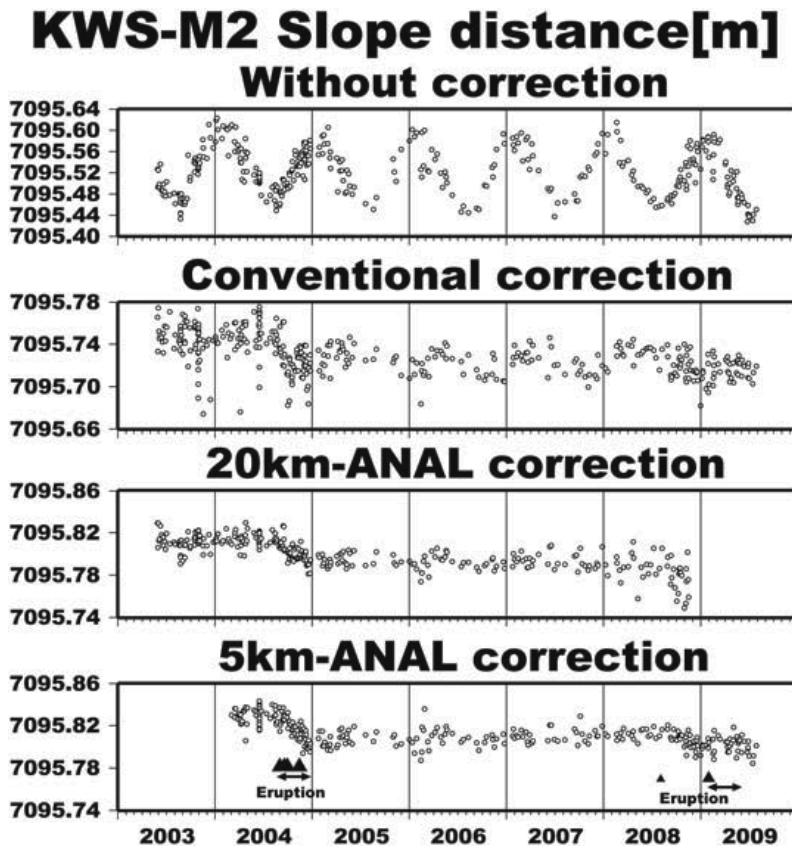


Fig. 5. Slope distance corrected with 20km-ANAL and 5km-ANAL from KWS to M2 measured with manual EDM from 2003 to 2009. Triangles and arrows show the eruptions at Asamayama.

があった。2007年10月までは補正に RANAL（水平格子間隔 20km の領域モデルの客観解析値）を利用していたが、2007年11月にこれが廃止され、GANAL（全球モデルの客観解析値）の格子間隔が 60km から 20km となり、それまでの RANAL に置き換わった。このように大気補正に用いる数値気象モデルに変更が生じることにより、補正結果にも影響が出ている可能性がある。2007年後半以後の 20 km-ANAL の補正結果はばらつきが大きいが、それがモデルの変更による可能性も完全には否定することはできず、今後検討していく課題である。5 km-ANAL も、水平格子間隔 10km の静力学モデルをベースとした 4 次元変分法データ同化システム（石川・小泉, 2002）によるものだったが、2009年4月以降は格子間隔 5 km の非静力学モデルをベースとした同化システムに移行した（本田・澤田, 2009）。2009年以降の 5 km-ANAL による補正結果の斜距離がわずかな伸縮を繰り返しているように見える。浅間山は 2009年5月頃までごく小規模な噴火を繰り返しており、この斜距離の伸縮が火山活動に対応するものなのか、それとも気象モデルの変更によるノイズレベルの変化であるのかを判断するには、少なくとも1年以上の長期間にわたってデータを

蓄積して検証する必要がある。

このように、予報業務の改善のために気象モデルが数年ごとに改良されていくため、光波測距データを完全に同一の条件で補正して比較することは困難であった。しかし、浅間山で観測された長期の測距データに対して、分解能の異なる 2つの ANAL を使用して補正した結果、器械点だけの気象データで補正を行う従来手法と比べて、飛躍的に高い精度が得られ、現状では 5 km-ANAL を使用した方がより高精度に補正できることがわかった。

6. 客観解析値と予報値による補正結果の比較

以上から、ANAL による大気補正は従来手法の補正と比べて明らかに改善された手法であることを示し、活動監視に有効なことが明らかになった。しかし火山活動モニタリングのため、現業的にリアルタイムでこの補正手法を用いるには、GPV が即時取得できる必要がある。しかし ANAL は、データセットが利用できるまでに数時間かかるので、リアルタイム監視のためにはそれ以前の ANAL を基に作成された予報値（以下、FCST と略す）を使用せざるを得ない。

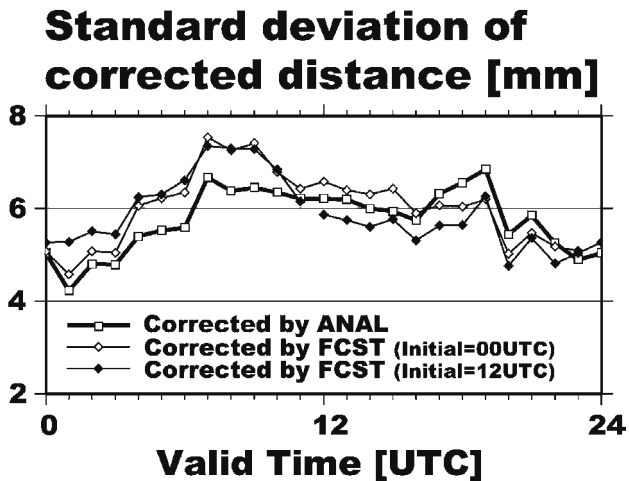


Fig. 6. Standard deviation of corrected distance. Open squares show S.D. of distance corrected by ANAL. Open diamonds and solid diamonds show that by FCST of 00UTC and 12UTC initial time, respectively.

そこで、客観解析値 (ANAL) を使った場合の補正結果と、FCST を使った場合の補正結果の比較を行った。KWS-M1 測線の自動測距データで、統計期間は 2006 年 4 月～2006 年 12 月である。なお、これまでと同様、標準偏差の小ささを気象補正の適切さの尺度とする。

Fig. 6 に、20km-ANAL (RANAL) 補正による時刻別の斜距離標準偏差を示す (四角形)。例えば、図中で 00 UTC で標準偏差 5 mm を示しているのは、2006 年 4 月～2006 年 12 月の期間の 00UTC の補正斜距離時系列の標準偏差が 5 mm であったことを示す。他の時刻と比較して、00 UTC (=24 UTC) 前後の標準偏差が小さいことがわかる。なお、この期間の 20km-ANAL は 6 時間毎に作成されており、補正には時間的に線形内挿して使用している。

次に、ANAL ではなく FCST を使用した補正斜距離の標準偏差について見る。この時期の RANAL を初期値とする領域モデルによる FCST は、1 日 2 回、00 UTC と 12 UTC を初期時刻として 24 時間後までの 1 時間毎の予報値を用いた。毎時の FCST の GPV で補正した斜距離の標準偏差を図中に菱形で示した。白い菱形は 00 UTC を初期時刻とする FCST で補正計算された斜距離の標準偏差を示し、黒い菱形は 12 UTC を初期時刻とするものである。それらによると、初期時刻が 00 UTC の FCST であっても 12 UTC の FCST であっても、夜間 (07～19 UTC) には同様に標準偏差が大きくなる傾向であった。この傾向は ANAL を使用した結果でも同様であった。測距データの標本数は昼夜で大きく異なるので、この原因は GPV にあると考えられ、それは予報精度の問題となる。

予報精度の問題は小論の域を出るので詳細な検討は行わない。ただし、全国のアメダス観測点における地上気温の観測値と予報値 (FCST) を比較検証した結果、FCST には夜間に高温のバイアスが存在するという報告がある (平井・坂下, 2006)。屈折率の算出は気象要素のうち気温の影響が最も大きいことを考えると、FCST で補正した夜間の斜距離の標準偏差が大きいことはこの報告と調和的である。また補正に用いた RANAL は領域モデルおよびその予報値 (FCST) を活用した 4 次元変分法データ同化システムで作成されていたため、ANAL による補正結果でも同様の結果であったと推定される。

また、初期時刻が 00 UTC の FCST であっても 12 UTC の FCST であっても、12～24 UTC の補正斜距離の標準偏差は、ANAL と同程度かそれ以下である。

ところで、予報時刻が遅い FCST ほど現実大気と乖離していくと考えられるために、これを使って補正した斜距離の標準偏差も大きくなると予想していた。しかし、FCST を使用した補正斜距離に対する予報誤差の影響は見えにくかった。これは GPV の昼夜バイアスに埋もれてしまっているという事実もあるものの、現状では ANAL を使用しなくても FCST で十分に補正が可能であることを示している。

なお、2009 年 8 月現在、空間分解能が高くなった 5 km-ANAL についても同様の検証をする必要がある。

7. 浅間山への適用と活動評価

7-1 浅間山山頂部の斜距離変化

浅間山の手動測距データに 5km-ANAL を使用して補正した全ての測線の斜距離の時間変化を Fig. 7 に示す。浅間山の火山活動が高まった後の 2008 年 9 月から、小噴火 (2009 年 2 月 2 日) が発生する前の 2009 年 1 月までの 5 か月に、全ての斜距離は明瞭に短縮した。つまり山頂部が膨張する傾向を示した。その量は 6～28 mm で山頂に近いほど大きく、火口縁にある M5 の変化量が最も大きい。この短縮量は、この期間の斜距離変化を直線で近似して求めた変化速度から算出した。2009 年 2 月以降は、M5 では伸びに反転した傾向が見えるが、それ以外は停滞している。なお、M3 は反射点の破損により 2008 年 4 月の測定を最後に欠測が継続している。今活動期間と 2004 年の活動期を通して観測された反射点は M1 と M2 のみであるが、この 2 点で変化量を比較すると、今期間の変化量は 2004 年活動時の半分程度であった。

また、前回の噴火活動 (2004 年 9 月～12 月) が終了した直後から、ごく小規模な噴火が間欠的に発生した今回の活動期 (2008 年 8 月～2009 年 5 月) に入るまでの時期を活動静穏期とし、その期間の斜距離変化を見ると、い

Slope distance

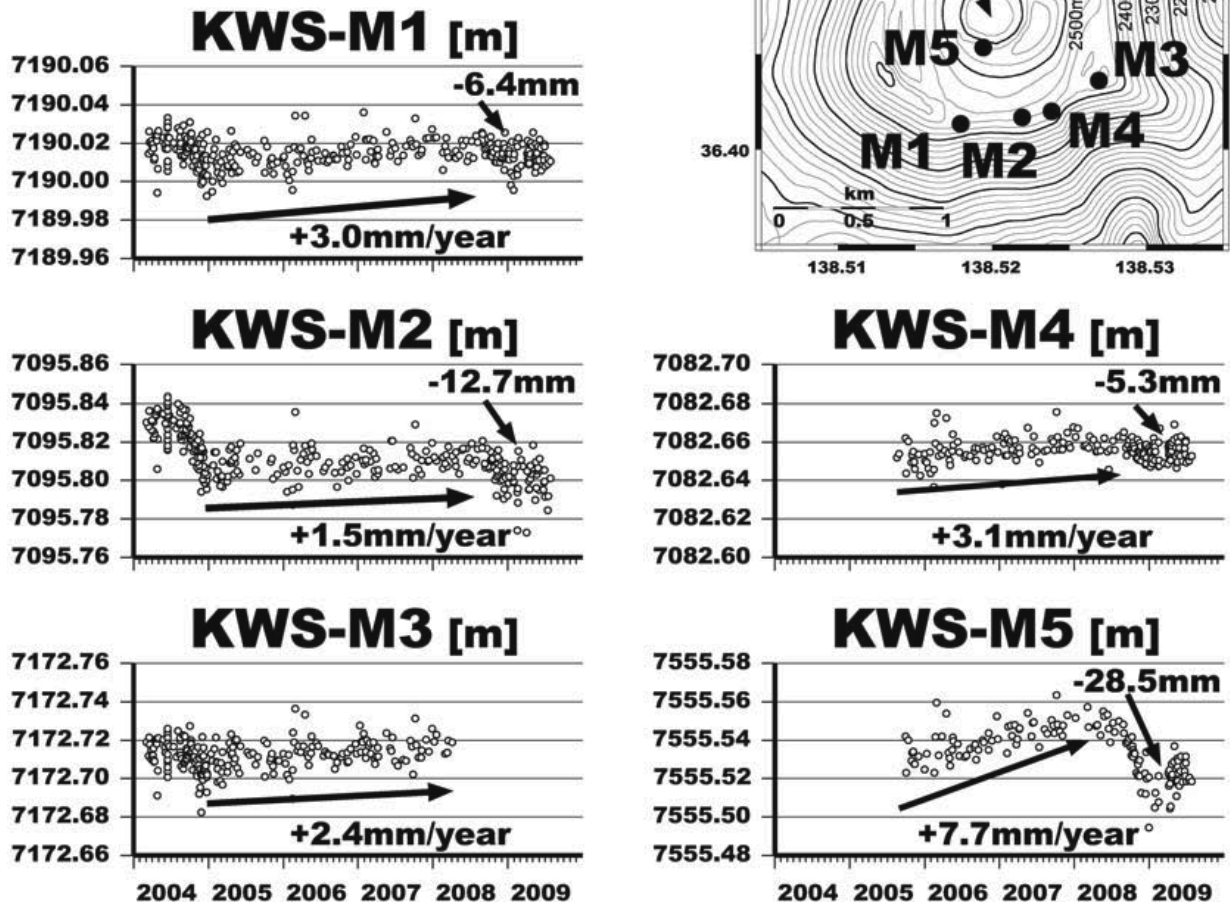


Fig. 7. Temporal change of slope distance corrected with 5km-ANAL and distribution of reflectors on and around the summit.

ずれの測線の斜距離もわずかであるが伸張していることがわかった。つまり山頂部が収縮した傾向を意味する。この静穏期の観測期間は反射点により異なるため、斜距離変化の絶対量で示すことができない。そこで各斜距離を直線で近似し、1年あたりの変化量に換算すると+1.5~+7.7 mm/yearであった。また、活動期と同様山頂火口に近い M5 の変化量が最も大きかった。静穏期の山頂部収縮の経年変化は、従来手法の補正結果からは検出できず、また 20 km-ANAL の補正でも M5 以外は検出できていなかった。このことは 5 km-ANAL による補正が気象ノイズを軽減したことによる。

7-2 浅間山山頂部の圧力源

2004 年噴火活動期の斜距離変化量は、2008~2009 年活動期よりも大きかった。この時期は M1, M2, M3 の 3 点の反射点のみの観測であり、推定誤差も大きいと思われるが、測定値を最もよく説明できる圧力源は火口直下

の標高 2200 m であった (高木・他, 2005)。2008~2009 年活動期の変動も極めて局所的であり、その圧力源は山体の極めて浅い場所であろうと推測された。そこで、斜距離変化を説明できる圧力源を、茂木モデル (Mogi, 1958) を仮定して推定した。火口直下に圧力源の位置を固定し、斜距離の観測値と圧力源からの計算値の残差自乗和が最小となる場所と体積変化量を、深さ方向に 10 m 間隔、体積量 100 m³ 間隔で探索した。Fig. 8b に圧力源の最適値、及び斜距離変化量の観測値と計算値を示す。斜距離変化量の矢印は、変位ベクトルを器械点方向に投影した成分である。標高 2380 m (山頂直下約 200 m) の圧力源で 15,300 m³ の体積増加量があれば観測値を最もよく説明することができた。この深さはほぼ火口底と同程度の極めて浅部である。同様に静穏期のうち 5 つの反射点で同時に観測がされた 2005 年 9 月~2008 年 4 月の斜距離の伸びから圧力源を求めたところ、活動期でまっ

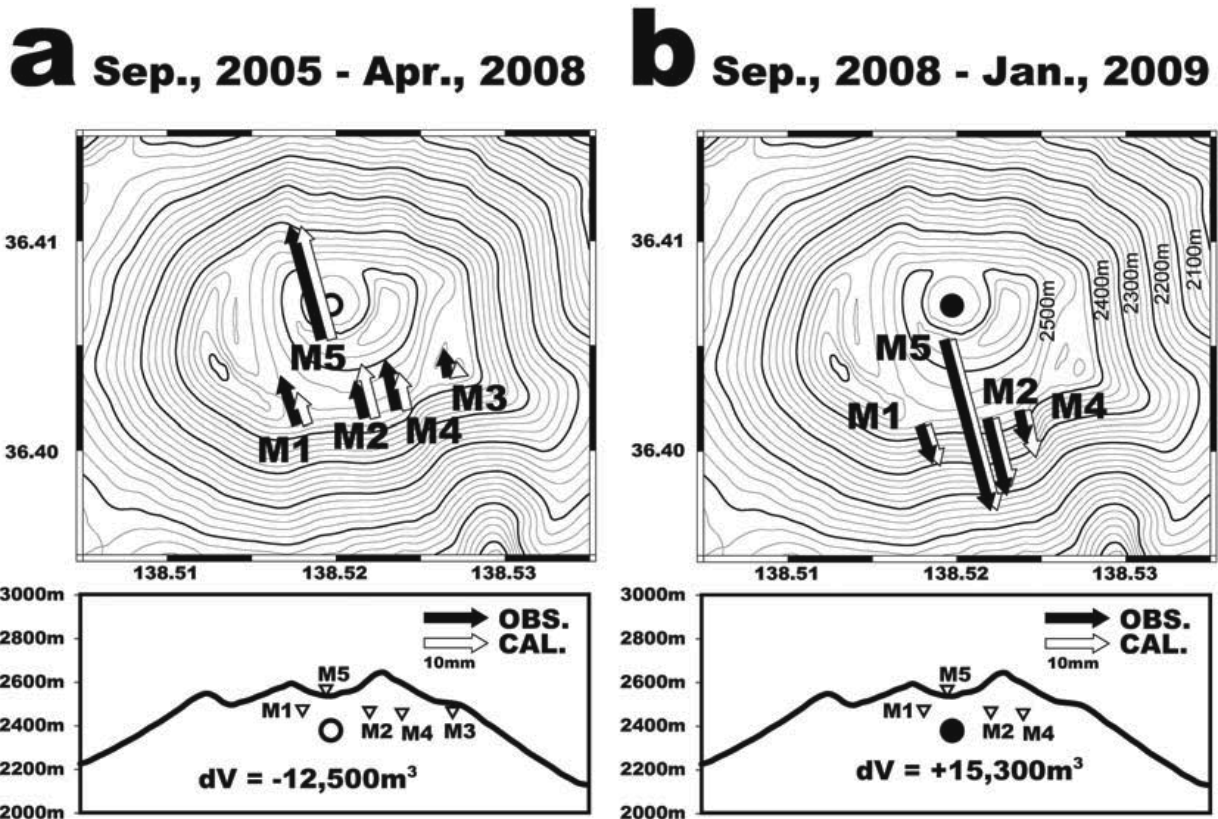


Fig. 8. Distribution of changes of slope distances corrected by 5 km-ANAL and estimated pressure source beneath the summit crater. Arrows show changes of slope distance projected toward to KWS. White arrows show changes measured by EDM and black arrows show changes calculated from the estimated pressure source. a: Quiet period, Sep., 2005-Apr., 2008. b: Active period, Sep., 2008-Jan., 2009. Both pressure sources (open and solid circles) are at same depth right beneath the crater.

た場所とほぼ同じ深さ（標高 2360 m）で $12,500 \text{ m}^3$ の体積減少があれば説明できた (Fig. 8a)。つまり浅間山火山口直下の膨張期と収縮期の圧力源は極めて浅部の同じ場所である可能性が高い。

ところで、これまで浅間山では活動期にはマグマ起源と考えられる膨張が GPS で捉えられており、その圧力源は山体北西側 5 km 付近の海拔下数 km に推定されている (村上, 2005) が、この場所では静穏期には収縮が観測されている。このように、今回明らかにされた浅間山山頂部の局所的な山体変動は、このやや深部の圧力源の活動とも強い時間相関がある。浅間山が噴火に至る過程を明らかにするためには、深部のマグマ活動と、マグマ起源とは考えにくい極めて浅部の山体変動を結びつけるメカニズムを解明しなければならない。しかし、この間をつなぐ場所を圧力源とする地殻変動は観測されていない。

8. ま と め

気象庁の数値気象データである客観解析 (ANAL) の

格子点データ (GPV) を用いて、光波測距データを補正する手法を開発した。とくにメソモデルの客観解析値 (MANAL) を用いて、伝搬速度の補正及び伝搬経路の補正を行うことで、大気補正が不完全であった場合に生じる斜距離のばらつきである光波測距の長期的な気象ノイズはほぼ除去できた。

2003 年以降に浅間山で測定した測距データについて本補正手法を適用したところ、噴火を伴うような活動期には山頂部は膨張し、静穏期には収縮することがわかった。

謝 辞

浅間山の光波測距観測においては軽井沢測候所並びに浅間山火山防災連絡事務所の職員による全面的な協力を得て行われた。上田義浩氏、前川和宏氏、松村智之氏にはとりわけ火山活動活発時には精力的に観測に協力を頂いた。反射点の設営では、藤原健治氏、坂井孝行氏の協力を得た。環境省万座自然保護官事務所及び林野庁東信森林管理署には、観測点設営においてご配慮頂いた。

また、山里 平研究室長には研究の過程において様々

な助言を頂いた。予報研究部の加藤輝之氏には、数値気象データの取り扱いについて懇切丁寧にご指導頂いた。2名の匿名の査読者の助言によって、本論文の内容は改善されました。ここに記してみなさまへ感謝の意を表します。

引用文献

- Barrell, H. and Sears, J.E. (1939) The refraction and dispersion of air for the visible spectrum. *Phil. Trans. Roy. Soc. London, A*, **238**, 1–64.
- Ciddor, P.E. (1996) Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared. *Appl. Opt.*, **35**, 1566–1573.
- Fujii, Y. and Miyamoto, H. (1987) A general formula for atmospheric correction in electro-optical distance measurement. *J. Geod. Soc. Japan*, **33**, 205–214.
- Hill, R.J., Clifford, S.F. and Lawrence, R.S. (1980) Refractive-index and absorption fluctuations in the infrared caused by temperature, humidity, and pressure fluctuations. *J. Opt. Soc. Am.*, **70**, 1192–1205.
- 平井雅之・坂下卓也 (2006) 地上気温・風速の検証. 平成 18 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 23–27.
- 本田有機・澤田 謙 (2009) 非静力学メソ 4 次元変分法の現業化. 平成 21 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 65–71.
- 石川宜広・小泉 耕 (2002) メソ 4 次元変分法. 数値予報課報告・別冊, **48**, 37–59.
- 木股文昭 (1986) 日の入り前後における接地境界層内の温度差分布. 測地学会誌, **32**, 224–225.
- 木股文昭・山内常生 (1981) 光波測距における温度補正. 測地学会誌, **27**, 173–182.
- Mogi, K. (1958) Relations between the eruptions of various volcanoes and the deformations of the ground surfaces around them. *Bull. Earthq. Res. Inst.*, **36**, 99–134.
- 村上 亮 (2005) GPS 連続観測結果が示唆する浅間火山のマグマ供給系. 火山, **50**, 347–361.
- 斎藤英二・須藤 茂・渡辺和明 (2003) 九重硫黄山, 1995 年噴火後の山体変動. 火山, **48**, 275–282.
- 須田教明 (1970) 光波測距儀による距離測定における気象補正法に対する考察. 測地学会誌, **16**, 137–147.
- 須田教明 (1994) 電磁波測距儀 改訂版. 森北出版, 242 p.
- 田島 稔・佐藤 裕・須田教明 (1970) 光波距離測定 of 気象補正 (I) — 係留ゾンデによる低層気温観測 —. 測地学会誌, **15**, 121–129.
- 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・瀧山弘明 (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.
- Tetens, O. (1930) Über einige meteorologische begriffe. *Zeitschrift für Geophysik*, **6**, 297–309.

(編集担当 古屋正人)