

気象庁メソ解析値を用いた気象補正に伴う光波測距のノイズレベル定量化

Noise Level Quantification for Electro-optical Distance Measurement with Atmospheric Correction Using Japan Meteorological Agency Meso-scale Analysis Data

入山 宙¹, 鬼澤真也¹, 新堀敏基¹, 高木朗充¹

Yu IRIYAMA¹, Shin'ya ONIZAWA¹, Toshiki SHIMBORI¹, and Akimichi TAKAGI¹

(Received July 11, 2023; Accepted May 2, 2024)

ABSTRACT: Electro-optical distance measurement (EDM) is implemented to observe ground deformation in volcanic areas. In this context, volcano-related deformation needs to be assessed in consideration of background noise, which generally varies with mountainous slope distance/atmospheric conditions and related heterogeneity. This study was conducted to clarify the relationship between such noise and slope distance after correction using Japan Meteorological Agency (JMA) three-dimensional atmospheric Meso-scale Analysis data (MA).

In the study, continuous EDM observation data with 15 distances (2 EDM sites and 13 reflector sites) collected at Izu-Oshima volcano in Japan from 2010 to 2021 were analyzed. Conventional and MA-based correction were individually applied using observation and objective analysis data at EDM sites. Comparison results based on regression analysis showed that noise levels with MA correction were lower than with conventional correction due to differences in temperature data, and that the relationship between noise and slope distance can be used to estimate noise under given observation settings.

1 はじめに

火山地域では、地下で生じるマグマの移動や蓄積を把握するために、地殻変動観測を行う。地殻変動観測の手法は複数あるが、火山活動に伴うシグナルを検知するためには、観測の背景にあるノイズレベルを把握しておく必要がある（例えば、須田, 1994; 青木, 2016）。本稿では、光波測距とそのノイズレベルに着目する。

光波測距では、任意の地点（反射点）に設置した反射鏡に向けて、器械点に設置した測距儀（トータルステーション）から光波を照射し、器械点と反射点の間の経路を光波が往復する際の、射出光と入射光の位相時間を計測する。その際、光波伝搬経路上の気象要素の日変化や季節変化及び空間的な不均質が、距離測定においてノイズとして働く。このため、気象要素を適切に与えた補正（以下、気象補正と呼ぶ）が必要である。従来の手法では、気象要素（気

圧、気温、水蒸気量）の日変化や季節変化に対処するために、測距時の器械点での気象要素を与えた気象補正を行う（以下、従来気象補正と呼ぶ）。しかしながら、気象要素の空間的な不均質が大きくなると、器械点での気象要素で代表することができなくなるため、ノイズが大きくなる。

高木・他 (2010) は、気象要素の空間的な不均質性に対処するために、数値気象モデルを用いた気象補正手法を提案した。また、浅間山の光波連続観測事例に対して同手法を適用し、従来気象補正よりもノイズを軽減できることを示した。同手法は他の事例においても、従来気象補正よりもノイズを軽減できると期待される。しかしながら、一般に光波測距のノイズレベルは、水平方向だけでなく、鉛直方向も考慮した距離である斜距離に依存するため（例えば、須田, 1994）、器械点と反射点の位置関係毎にノイズレベルを適宜把握する必要がある。

¹ 気象研究所火山研究部, Department of Volcanology Research, Meteorological Research Institute

光波連続観測では、データの蓄積によって統計的にノイズレベルが得られる。つまり、斜距離が異なる複数の光波連続観測データを用いれば、斜距離とノイズレベルの定量的な関係が得られる。この関係を用いると、器械点と反射点の位置関係に応じてノイズレベルを推定できるようになる。

本稿では、気象研究所による伊豆大島での光波連続観測データに対して、気象庁メソ解析 (Meso-scale Analysis Data, 以下, MA と呼ぶ) を用いた気象補正 (以下, MA 気象補正と呼ぶ) を適用し、斜距離とノイズレベルの関係式を導出することを目的とする。第 2 章では、光波測距の原理、気象補正手法及び誤差要因を説明する。第 3 章では、使用する光波測距データと気象データについて説明する。第 4 章では、斜距離とノイズレベルの関係の定式化の手順と手法を説明する。第 5 章では、気象補正の結果と得られた斜距離とノイズレベルの関係式を示す。第 6 章では、気象補正の手法間の比較検討を行う。第 7 章で、本稿のまとめを行う。

2 光波測距

2.1 光波測距の原理

光波測距時に大気中を光波が伝搬する速度 (つまり、大気中の光速) c [m/s], 射出光と入射光の位相時間 t [s] とすると、往復伝搬経路の距離 l [m] は以下のように表される:

$$l = ct \quad (1)$$

従って、求めたい片道分の伝搬経路 L [m] は、

$$L = \frac{l}{2} = c \frac{t}{2} \quad (2)$$

と表される。光波測距は式 (2) に基づいて行われるが、実際には伝搬する媒質の屈折率に依存して光速が変化するため、媒質の屈折率に応じて適切に補正を行う必要がある。

2.2 気象補正手法

任意の媒質の屈折率 n は、以下のように定義される:

$$n = \frac{c_0}{c} \quad (3)$$

ただし、 c_0 [m/s] は真空中の光速を表す。光波測距での媒質は大気であり、大気中の光速 c は、伝搬経路に存在する大気の屈折率 n に依存する。屈折指数 (refractivity) N [ppm] は、屈折率 n を用いると、

$$N = (n - 1)10^6 \quad (4)$$

と表される。大気の refractivity N は、具体的に以下のように表現できる (例えば、高木・他, 2010):

$$N = m_1(\lambda) \frac{p}{T} + m_2(\lambda) \frac{e}{T} \quad (5)$$

ただし、 p は気圧 [hPa], T は気温 [K], λ は観測に使用する光波の波長 [μm], e は水蒸気圧 [hPa], m_1 及び m_2 は波長に依存する係数を表す。式 (5) では、refractivity N に対して、右辺第 1 項に乾燥大気の、右辺第 2 項では水蒸気部分の寄与を各々表す。屈折率に対する波長依存性 m_1 及び m_2 は、経験式によって記述されることがある (例えば、Ciddor, 1996; Hill et al., 1980)。本稿では、高木・他 (2010) の手法と同様に、光波測距における気象補正で汎用される、Barrell and Sears (1939) の式に基づく近似式 (須田, 1994) の表現を一部変更した以下の式を用いることとする:

$$N = n_d \frac{p/p_0}{T/T_0} + n_w \frac{e/p_0}{T/T_0} \quad (6)$$

ただし、 $p_0 = 1013.25$ hPa, $T_0 = 273.15$ K。また、式 (6) では、式 (5) 中の係数 m_1 及び m_2 を、以下で定義される波長 λ に依存した n_d 及び n_w に各々置き換えている (高木・他, 2010):

$$\begin{aligned} n_d &= (n_g - 1)10^6 \\ &= 287.6155 + 4.88660\lambda^{-2} \\ &\quad + 0.06800\lambda^{-4} \end{aligned} \quad (7)$$

$$n_w = -(47.424 - 0.5168\lambda^{-2}) \quad (8)$$

ただし, n_g は大気の標準屈折率を表す. 飽和水蒸気圧 e_{sat} は, 露点気温 T_d [°C] から Tetens (1930) の式

$$e_{\text{sat}} = 6.11 \times 10^{\frac{7.5 T_d}{237.3 + T_d}} \quad (9)$$

により算出できる. 式 (9) 及び相対湿度 H [%] から, 水蒸気圧 e は

$$e = \frac{H}{100} e_{\text{sat}} \quad (10)$$

となる.

測距儀に標準気象場の気圧 p_{std} , 気温 T_{std} 及び相対湿度 H_{std} を与えることによって, 標準状態における大気の屈折率 n_{std} または refractivity N_{std} を設定できる. ここで, 標準状態における光速及び斜距離を c_{std} 及び L_{std} とすると, 観測時の気象場によって補正された光速 c_{corr} 及び斜距離 L_{corr} との間に, 以下のような関係が成り立つ:

$$\frac{L_{\text{corr}}}{L_{\text{std}}} = \frac{c_{\text{corr}}}{c_{\text{std}}} \quad (11)$$

ここで, 我々が最終的に求めたい値は, 気象補正を行った斜距離 L_{corr} である. 式 (3), (4), (11) より, L_{corr} を以下のように表すことができる:

$$\begin{aligned} L_{\text{corr}} &= \frac{c_{\text{corr}}}{c_{\text{std}}} L_{\text{std}} \\ &= \frac{n_{\text{std}}}{n_{\text{corr}}} L_{\text{std}} \\ &= \frac{1 + \left(\frac{N_{\text{std}}}{10^6}\right)}{1 + \left(\frac{N_{\text{corr}}}{10^6}\right)} L_{\text{std}} \end{aligned} \quad (12)$$

ただし, N_{corr} は測距時の refractivity を表す. ここで, $N/10^6 \ll 1$ より, 式 (12) は以下のように近似して表される:

$$\begin{aligned} L_{\text{corr}} &\approx \left(1 + \frac{N_{\text{std}} - N_{\text{corr}}}{10^6}\right) L_{\text{std}} \\ &= \left(1 + \frac{dN}{10^6}\right) L_{\text{std}} \end{aligned} \quad (13)$$

$$dN \equiv N_{\text{std}} - N_{\text{corr}} \quad (14)$$

従来気象補正では, 器械点で気象データを観測し, 式 (13) に基づいた気象補正処理を実行する. 一方, 大気の不均質性によって, 光波が伝搬する経路 x 上で refractivity が変化する場合, 式 (14) より, 経路 x 上の refractivity の差分 $d\bar{N}$ は, 微小距離 dx を用いて以下のように表される:

$$\begin{aligned} d\bar{N} &\equiv \frac{1}{L} \int dN(x) dx \\ &= \frac{1}{L} \int (N_{\text{std}} - N_{\text{corr}}(x)) dx \end{aligned} \quad (15)$$

本稿では, 本章で説明したような高木・他 (2010) で採用された気象補正手法を適用する. 具体的には, 気象データとして気象庁メソ解析 (3.2 章参照) を使用し, 式 (6)–(9), (13) 及び (15) により MA 気象補正を行う.

2.3 光波測距における誤差

本章では, 光波測距における誤差について整理する. 須田 (1994) より, 電磁波測距儀の原理式は以下のように表される:

$$L = UC + U \frac{\phi}{2\pi} + K \quad (16)$$

ただし, U は単位波長, C は正の整数, ϕ は測定される位相差, K は器械定数を表す. 式 (16) は, 単位波長 U を半波長 $\lambda/2$ に置き換えると,

$$L = \frac{\lambda}{2} C + \frac{\lambda}{2} \frac{\phi}{2\pi} + K \quad (17)$$

となる. 信号周波数 f と信号の 1 波長 λ の間には,

$$\lambda f = \frac{c_0}{n} \quad (18)$$

という関係式が成り立つので、式 (17) , (18) より、以下の関係式が得られる：

$$L = \frac{c_0}{n} \frac{1}{2f} \left(C + \frac{\phi}{2\pi} \right) + K \quad (19)$$

ここで、式 (19) が表すように、測定距離 L の精度は、 c_0 , n , f , ϕ , K の精度によって決定される。ここで、光速、屈折率、周波数、位相差、器械定数の誤差を各々、 m_{c_0} , m_n , m_f , m_ϕ , m_K とすると、測定距離 L の誤差 M_L は、誤差の伝搬法則から、以下のように表される：

$$M_L^2 = \left(\frac{\partial L}{\partial c_0} \right)^2 m_{c_0}^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial n} \right)^2 m_n^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial f} \right)^2 m_f^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \phi} \right)^2 m_\phi^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial K} \right)^2 m_K^2 \quad (20)$$

なお、 C は正の整数なので、本稿では式 (20) 中の C に由来する誤差は無視できるものとした。式 (19) より、器械定数 K が測定距離 L に対して十分小さい場合、すなわち $L \gg K$ の場合、各項の変数で偏微分を行うと、以下ようになる：

$$\frac{\partial L}{\partial c_0} = \frac{1}{n} \frac{1}{2f} \left(C + \frac{\phi}{2\pi} \right) \approx \frac{L}{c_0} \quad (21)$$

$$\frac{\partial L}{\partial n} = -\frac{c_0}{n^2} \frac{1}{2f} \left(C + \frac{\phi}{2\pi} \right) \approx -\frac{L}{n} \quad (22)$$

$$\frac{\partial L}{\partial f} = -\frac{c_0}{n} \frac{1}{2f^2} \left(C + \frac{\phi}{2\pi} \right) \approx -\frac{L}{f} \quad (23)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \phi} = \frac{c_0}{n} \frac{1}{2f} \frac{1}{2\pi} = \frac{\lambda}{2} \frac{1}{2\pi} \quad (24)$$

$$\frac{\partial L}{\partial K} = 1 \quad (25)$$

光速の測定誤差の式 (21) については、光波測距によって地殻変動のみ検出する場合は問題とならないので無視する (須田, 1994)。式 (22)–(25) を式 (20) に代入すると、以下ようになる：

$$M_L^2 \approx \left\{ \left(\frac{m_n}{n} \right)^2 + \left(\frac{m_f}{f} \right)^2 \right\} L^2 + \left(\frac{\lambda m_\phi}{2} \right)^2 + m_K^2 \quad (26)$$

式 (26) が表すように、測定距離の誤差は、測定距離に比例する項 (右辺第 1 項) と、測定器の位相差分解能に由来する項 (右辺第 2 項)、及びその他の項 (右辺第 3 項) に分けられる。すなわち、火山地域で光波測距による地殻変動観測を実施する際、測定誤差が斜距離に比例する項を含むことに留意する必要がある。また、測定距離の誤差のうち、斜距離に比例する項の中には、大気屈折率に依存する項があることにも留意する必要がある。

3 データ

本稿では、気象研究所による伊豆大島の光波連続観測データを用いる。伊豆大島は、東京の約 120 km 南西に位置する火山島であり、島の中央に位置する三原山の標高は 758 m である。近年では、1912 年、1950 年、1986 年に、数千万トンの噴出物を伴う噴火が発生し、1912 年から 1986 年までの間に、20 以上の小規模な噴火が発生した。

1986 年から 1987 年に発生した噴火以降、伊豆大島の地殻変動では、全島的な変動と局所的な変動が見られる (例えば、気象研究所火山研究部, 2013; 気象研究所・伊豆大島火山防災連絡事務所, 2022)。全島的な変動は、長期的な変動と短期的な変動が重畳している。長期的には、10 年以上膨張が継続した後、2018 年頃から停滞している。短期的には、1 年から 2 年程度の周期で膨張と収縮を繰り返している。局所的には、三原山山頂付近で三原山の収縮に伴う経年的な変化が見られる。

3.1 光波測距データ

伊豆大島における器械点及び反射点の位置を Fig. 1 に、各地点に関する情報を Table 1 に示す。

観測では、日の出器械点 (A01) 及び二子山器械点 (A02) の 2 点に設置した光波測距儀 EDM (Electro-optical Distance Measurement) を使用した。日の出器械点 (A01) では、Leica 社製 TCA1201M を、2020 年 3 月以降は Leica 社製 TS16 を使用した。二子山器械点 (A02) では、Leica 社製 TCRA1201 を使用した。反射点では計 13 点 (M01–03, 05–06, 08–12, 14–16) で、SOKKIA 社製 (当時) AP01AR を使用した。また、対象とした器械点と反射点のペアは、Fig. 1 の実線で示した 15 ペアとした。

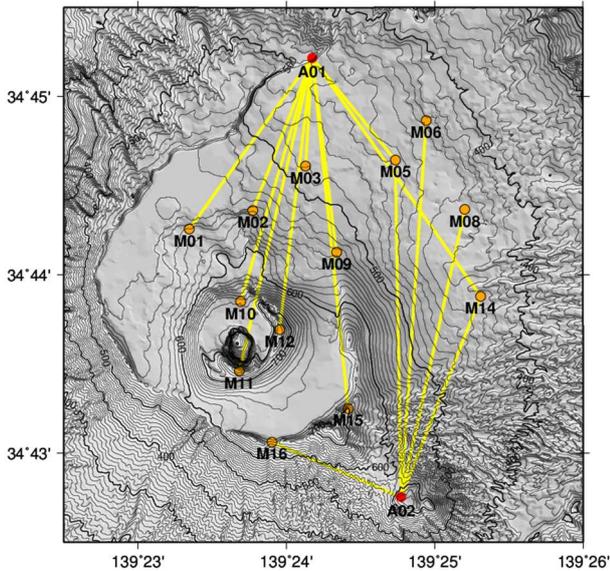


Fig. 1 Electro-optical distance measurement (EDM) sites (red dots) and reflector sites (orange dots) at Izu-Oshima volcano, Japan. Yellow: baselines.

光波測距儀の制御は、測距儀と外部接続した端末にインストールした、計測ネットサービス社製のソフトウェア (DAMSYS) を用いて行った。制御システムを通じて、各ペアで 30 分毎に観測を行い、データの収録を行った。器械点で気象観測を実施し、制御システムによって従来気象補正を実行した。測距儀搭載の測定モードは、自動視準 (反射光及び画像情報を利用してプリズムを自動で捕捉する機能) 可能なプリズム・モードと、位置固定のノンプリズム・モードがあるが、自動視準の失敗やプリズムの経年劣化を考慮し、測距の成功率を高めるためにノンプリズム・モードを選択した。光波測距における気象データの標準設定として、 $p_{std} = 1013.25 \text{ hPa}$, $T_{std} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$, $H_{std} = 60 \%$ を与えた。

解析では、2010 年から 2021 年までの 12 年間に得られた観測データを対象とした。なお、観測データには天候不良や植生による視程不良、機器障害等によるデータの欠測が一部含まれている。A01-M09 及び A02-M08 については、対象期間中にミラーの移設を各 1 回行ったが、移設前後に並行観測を実施し、移設後の観測値に移設に伴うオフセット量を与えた。また、A01-M12 及び A01-M15 の各ペアは、観測環境の悪化に伴い、対象期間途中に観測を終了した。以上のように、斜距離及び標高差が異なる複数の光

波連続観測データを比較解析することで、斜距離とノイズレベルを関係づける。

3.2 気象データ

本稿では、従来気象補正と MA 気象補正の 2 種類の気象補正手法を適用するが、各手法で使用する気象データが異なる。従来気象補正では、各器械点に設置した気象計で観測された気象データ (気圧及び気温) を用いた。気象計は、DAVIS 社製 Weather Monitor II を使用した。相対湿度は器械点で観測しなかったため、標準設定と同じ 60% を一定で与えた。

MA 気象補正で使用する MA は、解析手法や気象庁で運用するスーパーコンピュータシステム (NAPS) の更新に伴い改善されてきた。本稿で使用した MA に関連するスーパーコンピュータシステム及び解析手法の概要を Table 2 に示す。なお、Table 2 には、本稿では使用していないが、執筆時 (2023 年現在) の MA に関する情報を参考として含めた。

本稿で扱う 2010 年から 2021 年までの期間において、MA の解析手法は、2009 年 4 月に静力学 4 次元変分法から気象庁非静力学モデル JMA-NHM を基にした 4 次元変分法 (JNoVA, Honda et al., 2005) に、2020 年 3 月に JNoVA から次世代非静力学モデル asuca を基にした 4 次元変分法 (asuca-Var, Ikuta et al., 2021) に変更された。

4 解析

4.1 解析手順及び手法

距離とノイズレベルの関係式導出の手順は以下の通りである：

- (1) 気象補正の適用 (従来気象補正, MA 気象補正)
- (2) ノイズレベルの算出 (未補正, 従来気象補正, MA 気象補正)
- (3) 斜距離とノイズレベルの関係式導出 (未補正, 従来気象補正, MA 気象補正)

手順 (1) について、MA 気象補正の詳細は 4.2 章で後述する。

手順 (2) について、本事例では火山活動に伴う地殻変動を含むことが想定されるため、ノイズレベルの決定に当たっては、任意の期間に区切って算出することが妥当である。本稿では、斜距離の月別標準偏差をノイズレベルの指標とし、未補正、従来気象

補正, MA 気象補正の各手法で算出・比較した.

手順 (3) では, 手順 (2) で得られたノイズレベルと斜距離の関係式を回帰分析により導出し, 比較によって各補正手法の効果を検討した. 定式化は, 2 つの式に対して行った. 1 つ目は, 誤差の式 (26) :

$$M_L^2 \approx a_1 L^2 + b_1 \quad (27)$$

$$a_1 = \left\{ \left(\frac{m_n}{n} \right)^2 + \left(\frac{m_f}{f} \right)^2 \right\}$$

$$b_1 = \left(\frac{\lambda m_\phi}{2\pi} \right)^2 + m_K^2$$

より, 最適な a_1 , b_1 を求めた. 2 つ目は, 一般的にトータルステーションの付属カタログ等で示される直線的な関係式:

$$M_L \approx a_2 L + b_2 \quad (28)$$

より, 最適な a_2 , b_2 を求めた.

なお, 手順 (3) では, 前処理として外れ値の除去を行った. 外れ値は, 斜距離の月別標準偏差に月別データ数で重み付けをして得られる四分位点範囲 (interquartile range : IQR) を用いて, (第一四分位点 $-1.5 \times \text{IQR}$) から (第三四分位点 $+1.5 \times \text{IQR}$) の範囲を超える値とした. 回帰分析では, R ソフトウェア (バージョン 4.2.2) の Hmisc パッケージ (Harrell, 2023) を利用し, 月別データ数で重み付けをした.

4.2 MA 気象補正

MA は 3 時間毎の気象データが 3 次元空間に配置された格子に格納されているため, 光波が通過する経路上に存在する格子点の気象要素を使用して MA 気象補正を行えば良い. 本事例では, MA の水平格子点間隔 (5 km) に比べて斜距離が小さいので, 各高度での気象要素は, 器械点位置の緯度経度で代表されるものとみなした. この際, 器械点の水平方向に周囲 4 点の格子点にある気象要素を, 高度 10 m 毎に鉛直内挿し, その後器械点緯度経度へ水平内挿した. また, 式 (15) を離散化して 3 時間毎, ペア毎の気象補正量を予め計算し, 測距時刻前後の気象補正量を時間内挿することで, 対象時刻における気象補正量を決定した. なお, 本事例では, 器械点と

反射点の標高は全て MA の最下層より高度が高く, 各ペアの気象補正量計算に器械点と反射点を挟む鉛直層の気象データを使用した.

光波の伝搬経路は, 経路上の屈折率が不均質に分布することによって屈曲し得る. 高木・他 (2010) の事例 (斜距離約 7000 m, 標高差約 1500 m) では, 経路の屈曲によって生じる斜距離の伸びは, 最大で約 3 ppm と小さなことが示された. 本事例は, 最大斜距離が約 4000 m, 最大標高差が約 250 m と, 高木・他 (2010) の事例に比べて斜距離及び標高差が共に小さいことから, 屈曲の影響を無視できるものとした.

5 結果

5.1 気象補正手法別の斜距離

Fig. 2 に斜距離の時系列図を示す. 未補正データ (気象補正していない斜距離) と気象補正データ (従来気象補正や MA 気象補正を行った斜距離) を比較すると, 未補正データでは顕著な年周変動が見られるが, 気象補正データでは年周変動とは異なるパターンの変化が見られた.

従来気象補正データと MA 気象補正データとを比較すると, 器械点と反射点の鉛直位置関係に依存した差異が生じた. 標高差が小さなペアでは, 従来気象補正データと MA 気象補正データは概ね一致したが, 標高差が大きなペアでは, 斜距離の分布に違いが生じた. 従来気象補正データに対し, MA 気象補正データでは, 器械点の標高 z_{EDM} が反射点の標高 $z_{\text{reflector}}$ よりも低い ($z_{\text{reflector}} - z_{\text{EDM}} > 0$) 場合には斜距離が伸びる方向に, 器械点の標高が反射点の標高よりも高い ($z_{\text{reflector}} - z_{\text{EDM}} < 0$) 場合には斜距離が縮む方向にシフトした.

5.2 ノイズレベルの特徴

Fig. 3 にノイズレベル (斜距離の月別標準偏差) の時系列図を示す. 未補正データと気象補正データを比較すると, 未補正データのノイズレベルは気象補正データに比べて大きい. 従来気象補正ではノイズレベルの年周変化が見られたが, MA 気象補正ではノイズレベルが時間に対して概ね一定であった. ノイズレベルの大きさについて, 従来気象補正データと MA 気象補正データとを比較すると, 斜距離が小さな場合にはノイズレベルは両者で概ね同等であ

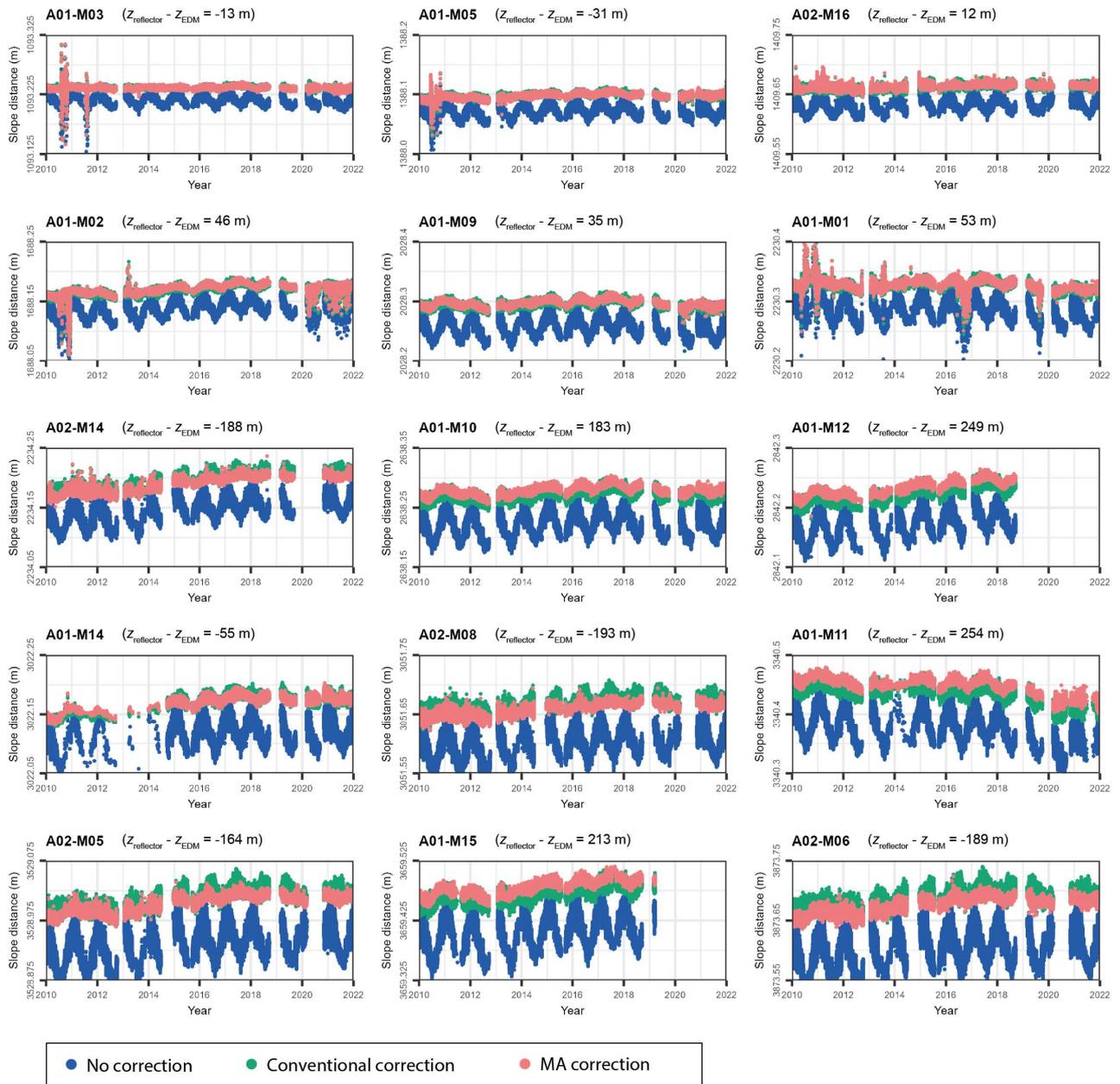


Fig. 2 Temporal changes in slope distance observed every 30 minutes from 2010 to 2021. Red: MA correction data; green: conventional correction data; blue: no correction; z_{EDM} and $z_{reflector}$: altitudes [m] at EDM and reflector sites, respectively.

るが、斜距離が大きくなるにつれて、MA 気象補正データの方が従来気象補正データに比べてノイズレベルが小さくなった。

5.3 斜距離とノイズレベルの関係

斜距離とノイズレベル（斜距離の月別標準偏差）の関係を Fig. 4 に示す（回帰分析で得られた最適解

を Table 3 に示す）。Fig. 4 が示すように、各補正手法でノイズレベルは斜距離に対して直線的に並ぶ。

斜距離とノイズレベルの関係式を用いることで、ノイズの軽減量（MA 気象補正適用前後の月別標準偏差の差の絶対値 ÷ MA 気象補正適用前の月別標準偏差）が定量的に得られる。Fig. 5 に示すように、MA 気象補正の適用に伴うノイズの軽減は、斜距離

が大きいほど効果的であるが、ノイズ自体の増大に伴いその効果は次第に鈍化する。本事例での観測条件の範囲内では、MA 気象補正によって、未補正比

で 58–72 %，従来気象補正比で 0–51 % 減少することがわかった。

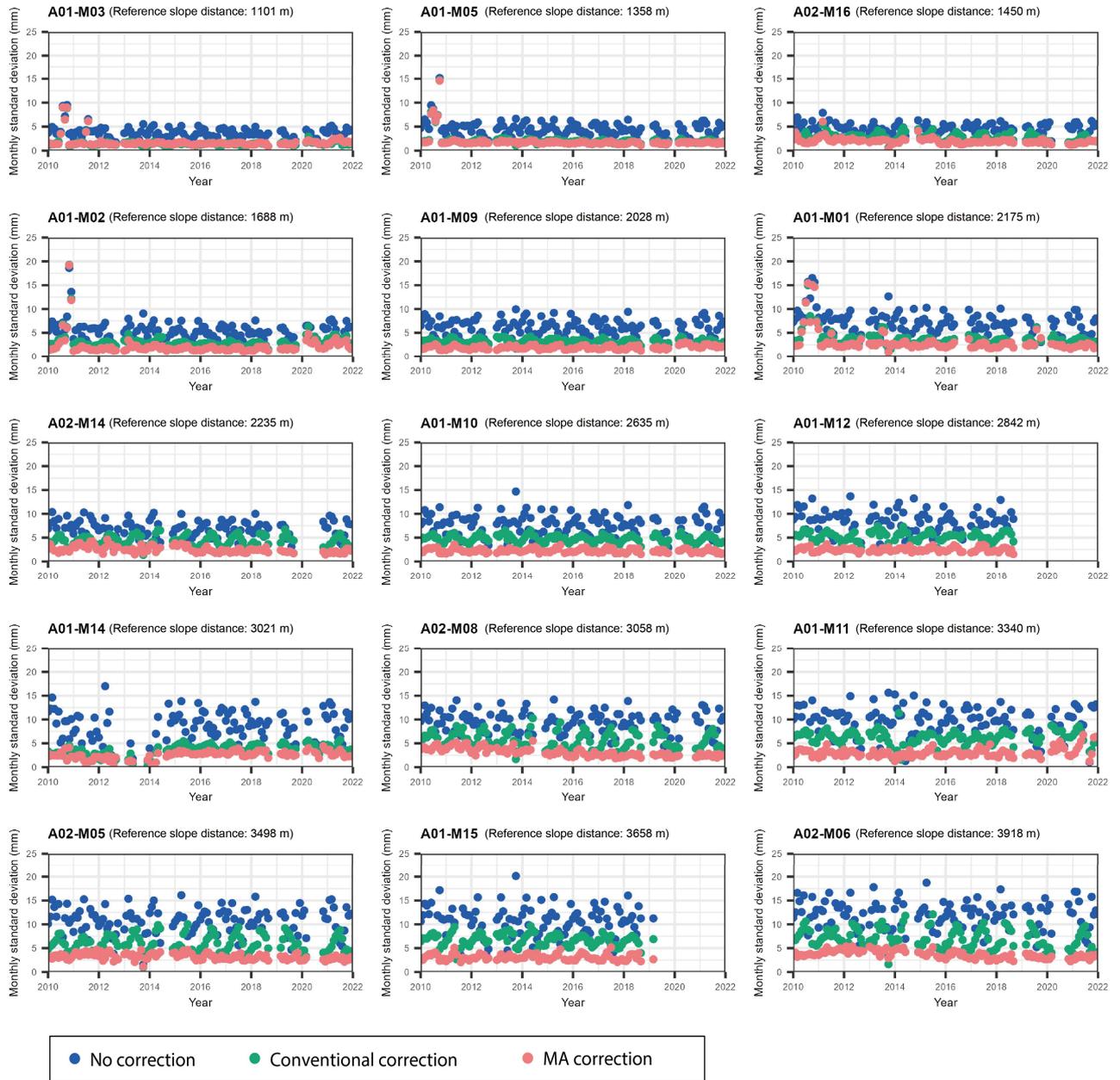


Fig. 3 Temporal changes in monthly standard deviation for slope distance (colors as per Fig. 2).

6 議論

6.1 斜距離の比較：未補正データと気象補正データ

Fig. 2 の未補正データと気象補正データを比較すると、未補正データでは明瞭な年周変動が見られる特徴がある。具体的には、冬季に斜距離が過大になり、夏季に斜距離が過小になる傾向がある。これは、測距儀の標準設定温度と実際の気温の乖離を反映していると考えられる（式 (6)）。本事例では、標準設定温度 $T_{\text{std}} = 12 \text{ }^{\circ}\text{C}$ を与えたが、冬季には実際の気温がこの値よりも小さくなり、屈折率が過小となったために斜距離が過大となったと説明できる（式 (13)）。逆に、夏季には標準設定温度が実際の気温よりも過小となり、屈折率が過大となった結果、斜距離が過小になったと説明できる。

気象補正データは、未補正データで見られた年周変動とは異なるパターンの変動が見られた。この変動パターンは、気象研究所・伊豆大島火山防災連絡事務所 (2022) によって報告されている伊豆大島における地殻変動パターンと一致し、適切に気象補正が行われたことがわかる。

6.2 斜距離の比較：従来気象補正データと MA 気象補正データ

従来気象補正データに対し、MA 気象補正データでは、器械点の標高が反射点の標高よりも低い場合には斜距離が伸びる方向に、器械点の標高が反射点の標高よりも高い場合には斜距離が縮む方向にシフトした。この要因について、大気鉛直構造に着目して考察する。

従来気象補正では、大気気象要素の鉛直変化が考慮されない。一般には、高度が高くなるにつれて、気圧及び気温共に低下する。例えば、反射点の標高が器械点の標高よりも高い場合、器械点の気象要素には器械点と反射点の間の気象要素よりも気圧と気温を過大に与える。式 (6) 及び (13) より、過大な気圧は斜距離を過小に、過大な気温は斜距離を過大にする。このような斜距離に対する気圧と気温の鉛直変化による補正効果を踏まえると、従来気象補正データに比した MA 気象補正データの斜距離の分布における差異 (Fig. 2) の主な要因は、気圧の鉛直変化によることが推測される。

この推測を検証するため、MA 気象補正で使用した気象要素の鉛直変化の有無に対する気象補正結果

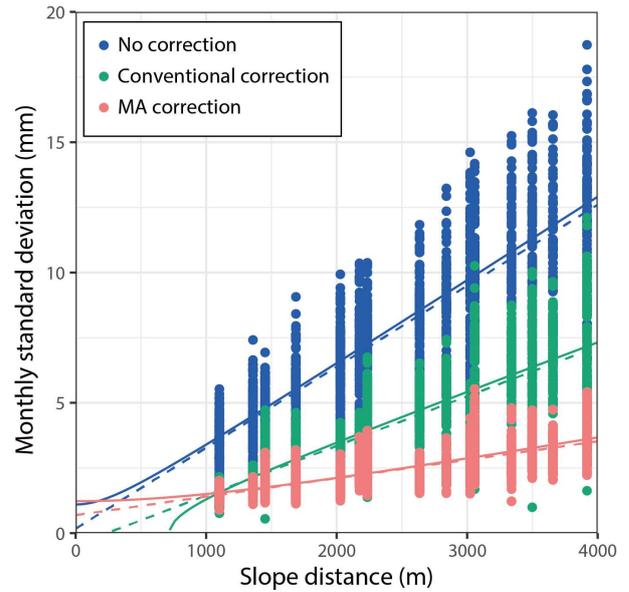


Fig. 4 Relationship between slope distance and related monthly standard deviation (colors as per Fig. 2). The solid and dashed lines correspond to equations (27) and (28) based on the estimated fitting parameters in Table 3, respectively.

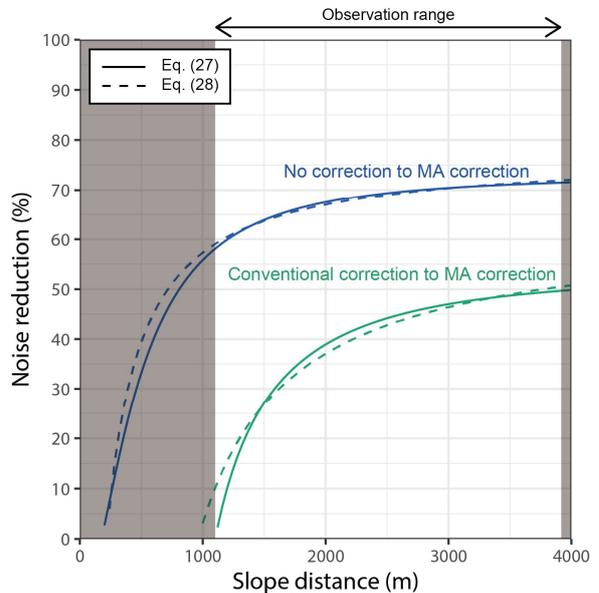


Fig. 5 Relationship between slope distance and noise reduction. Blue lines: difference between MA correction and no correction; green lines: difference between MA correction and conventional correction. The solid and dashed lines correspond to equations (27) and (28) using the estimated fitting parameters in Table 3, respectively. The grey regions represent out-of-observation settings.

を比較した (Fig. 6). 鉛直方向に一定の気象要素を与える場合, MA から器械点位置に空間内挿した値を使用した. Fig. 6 では, MA 気象補正結果に対し, 気圧, 気温, 相対湿度のいずれかを鉛直方向に一定とした気象補正結果を比較した. ここで, 気象補正後の斜距離の差が負の場合は MA 気象補正の方が斜距離が大きく, 正の場合にはいずれかの気象要素を鉛直方向に一定で与えた気象補正結果の方が斜距離が大きくなることを示す. Fig. 6 の赤色の分布が示す, 気圧のみ鉛直方向に一定とした場合, 前述の推測と整合的な鉛直距離との相関を示した.

このことから, 従来気象補正データに比した MA 気象補正データの斜距離の分布のシフト (Fig. 2) の主な要因が, 気圧の鉛直変化によるものであったと考えられる.

6.3 ノイズレベルの比較

未補正データと気象補正データの主な違いは, 気象要素の日変化や季節変化といった時間変化の取り扱いである.

気象補正データは, 気象要素の時間変化を考慮することによって, 未補正データよりもノイズレベルは低下した. また, MA 気象補正データは従来気象補正データよりもノイズレベルが小さくなった (Figs. 3-5).

誤差の式 (26) より, 従来気象補正と MA 気象補正に見られるノイズレベルの違いは, 主に屈折率の誤差に起因する. 従来気象補正で使用する気象要素は器械点での観測値で鉛直方向に一定であるのに対し, MA 気象補正で使用する気象要素は鉛直方向に変化する. 次節では, ノイズレベルを低下させた要因について, 気象要素の鉛直変化の有無による差異及び気象データの差異に着目して考察する.

6.4 ノイズレベルの軽減要因

ノイズレベルに対する気象要素の鉛直変化による補正効果を確認するため, MA 気象補正と気圧, 気温, 相対湿度の全てを鉛直方向に一定とした気象補正 (以下, MA 鉛直一定気象補正と呼ぶ) との間でノイズレベルの比較を行ったところ, 同程度の結果が得られた (Fig. 7(a) の (p_{MA}, T_{MA}, H_{MA})). また, 器械点で観測した気象要素をもとに, 測高公式 (静水圧の式) 及び一定の気温減率 (6.0 °C/km) を与え,

Difference from MA correction

Replace one atmospheric element with a variable that is constant in vertical direction

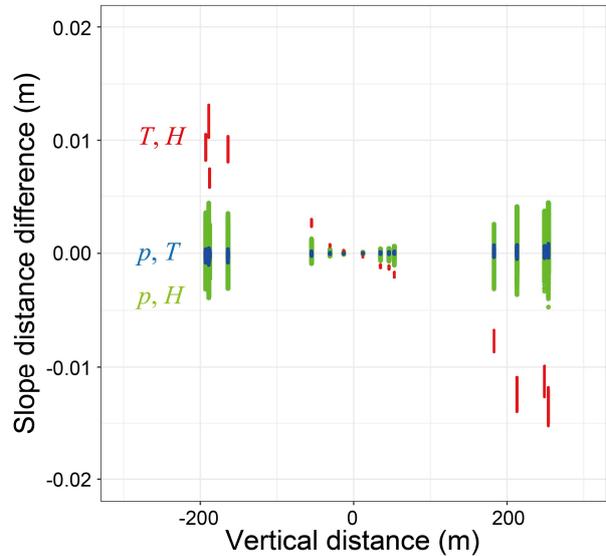


Fig. 6 Relationship between vertical distance and slope distance difference in applied atmospheric elements. Vertical distance is defined as $z_{\text{reflector}} - z_{\text{EDM}}$. Slope distance differences are based on MA correction data. The variables represent vertically changing atmospheric elements for each instance of correction. Non-listed elements are vertically constant.

気圧及び気温の鉛直変化を考慮した気象補正を行ったところ, 従来気象補正と同程度の結果が得られた (Fig. 7 (a) の $(p_{EDM}, T_{EDM}, H_{std}, z)$). これらの結果から, 本事例では, 気象要素の鉛直変化による補正効果がノイズレベル軽減の主たる要因ではないことがわかる.

気象データの差異を確認するため, MA 鉛直一定気象補正において, 気圧, 気温又は相対湿度のいずれかを従来気象補正で使用した値に置換して気象補正を行った (Fig. 7 (b)). 気圧あるいは相対湿度を置換した結果 (各々, Fig. 7 (b) の $(p_{EDM}, T_{MA}, H_{MA})$ 及び $(p_{MA}, T_{MA}, H_{std})$ に対応) は MA 鉛直一定気象補正データと同程度であったのに対し, 気温を置換した結果 (Fig. 7 (b) の $(p_{MA}, T_{EDM}, H_{MA})$) は従来気象補正データと同程度となった. このことから, 気象補正に使用する気温の差異により, 従来気象補正データと MA 気象補正データのノイズレベルに差が生じたことがわかる.

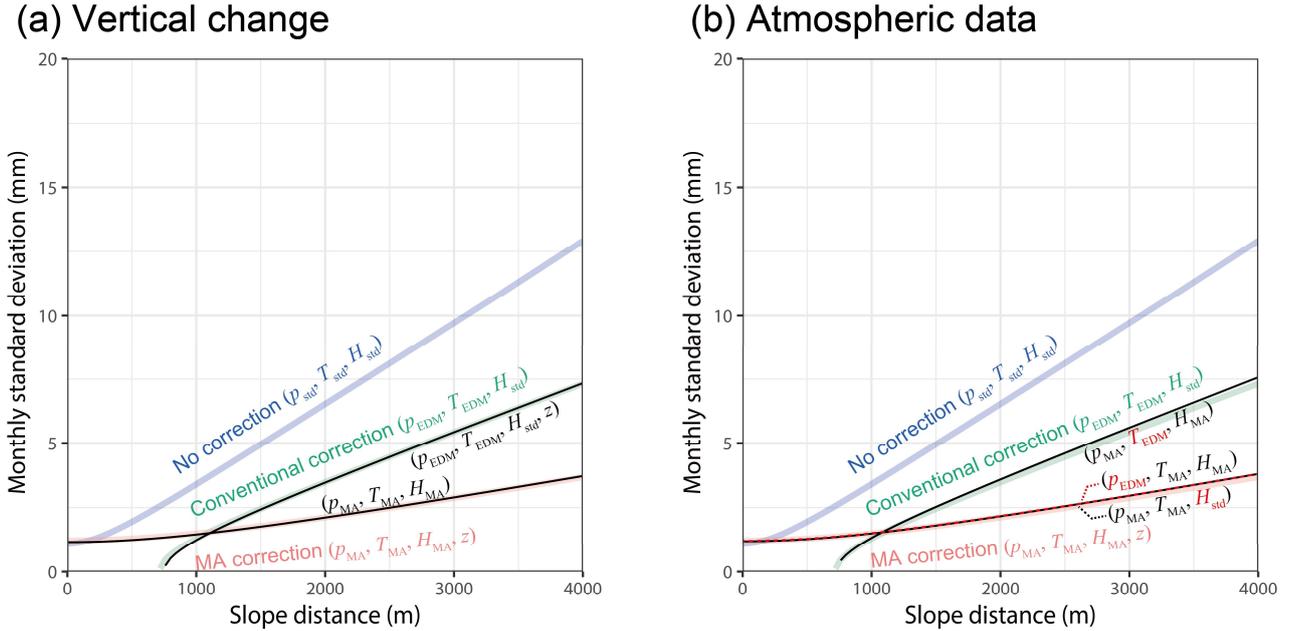


Fig. 7 Relationship between slope distance and related monthly standard deviation (based on equation (27)). The red, green and blue lines are as per the solid lines in Fig. 4. The subscripts MA, EDM and std indicate atmospheric elements of MA, observation at EDM sites, and given, as standard, respectively. Lines with variable z values include vertical atmospheric changes. (a) Comparison of effects of vertical differences on atmospheric elements; (b) comparison of effects of differences in atmospheric data application. Red variables indicate atmospheric element replacement from MA to observation data from EDM sites (p_{EDM} or T_{EDM}) or given values as constants (H_{std}).

Fig. 8 に MA から得られた器械点位置における気温に対する器械点で観測された気温の差を示す. Fig. 8 では、気温の差が正の値をとる場合には器械点で観測された気温が、負の値をとる場合には MA から得られた器械点位置における気温が相対的に高いことを示す. 気温の差異を比較した結果、気温差は日中に大きく、春季に極大となった. このことから、従来気象補正データに見られたノイズレベルの年周変動は、器械点における観測温度の周囲大気温度からの乖離により生じたことが推測される.

器械点で観測された気温が MA から得られた器械点位置における気温に比べて日中に高くなる要因の 1 つとして、日射に伴う地表付近の気温の上昇が気象計で観測されることが考えられる. MA の使用により、このような日射の影響の排除に加え、気象観測のコスト削減が可能となる.

6.5 距離とノイズレベルの関係式の応用方法と改良方法

本稿で距離とノイズレベルの関係式 (式 (27) - (28); Fig. 4; Table 3) を決定したことにより、任意の観測条件下への適用が期待される. Fig. 9 は、この関係式の活用手順例を示す.

気象庁では、光波連続観測とは別に、任意のタイミングで観測機材を現地に持参し観測を行う光波繰り返し観測を全国の火山にて実施してきた. しかしながら、光波繰り返し観測は観測頻度の観点からノイズレベルの評価が困難なため、地殻変動評価が困難であった. 光波連続観測データと本研究にて導入したノイズレベルに関する関係式を適用することにより、ノイズレベルの評価が可能となり、過去のデータを踏まえた地殻変動評価が可能となる.

観測点の選定時には、候補地で期待されるノイズレベルを関係式から予め推定できる. 推定したノイズレベルと地殻変動シミュレーションから想定される地殻変動量を比較することで、適切な観測点選定

や検知可能なシグナルの下限値の把握が可能となる。

本稿で提示した斜距離とノイズレベルの関係式は伊豆大島の事例のみで得られた関係である。本事例は、最大斜距離は 4000 m 程度、最大標高差は 250 m 程度と、火山地域で実施する光波の観測条件の中では比較的小さい。Fig. 7 で示した通り、本事例は気象要素の鉛直変化を考慮したことによるノイズ軽減効果がほとんど認められなかったが、対象とした器械点と反射点のペアの標高差が十分に大きくなかった可能性がある。このような課題を解決し、距離とノイズレベルの関係式を一般化するためには、今後事例を蓄積する必要がある。事例蓄積では、統計的な観点から、データ数が十分にある光波連続観測データが望ましい。気象庁では、伊豆大島の他に、浅間山や口永良部島でも光波連続観測を実施しており、これらのデータが活用され得る。

第 4.2 章で述べたとおり、本事例では MA の格子点間隔に比べて斜距離が小さいため、器械点位置へ空間内挿した値を使用したが、観測条件によって適用出来ないことに注意が必要である。具体的には、器械点と反射点の間の水平距離が MA の格子点間隔 (5 km) に比べて大きな場合、水平方向の不均質性が無視できなくなり、これがノイズとして働く。この場合、経路に沿った格子点データを使用した MA 気象補正が適切となる。

7 まとめ

本稿では、伊豆大島での光波連続観測事例から、MA 気象補正の適用時の斜距離とノイズレベルの関係式を導出した。これにより、任意の観測条件下でのノイズレベルを推定できるようになった。また、従来気象補正から MA 気象補正への変更に伴うノイズ軽減量と距離の関係がわかった。これにより、MA 気象補正を適用する利点が定量的に示された。

MA 気象補正のノイズレベルは、従来気象補正に比べて小さく、季節に依らず概ね一定である。このことから、MA 気象補正適用時の距離とノイズレベルの関係式は汎用性があると言える。今後の事例蓄積により、今回得られた関係式がより一般に適合可能なものに改良され得る。

謝辞

光波測距の実施に当たっては、気象研究所火山研

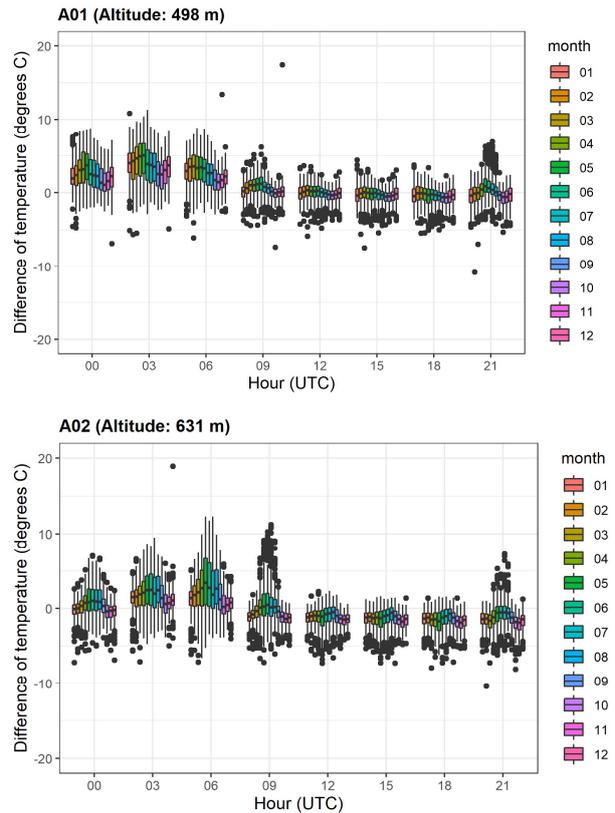


Fig. 8 Temperature differences at EDM sites between observation and MA interpolated. The horizontal lines in each box denote median values; boxes extend from the 25th to the 75th percentile of each monthly group's value distribution; vertical lines denote adjacent values (i.e., extremes within the 1.5 interquartile range of the 25th and 75th percentile of each group); dots denote observations outside the range of adjacent values.

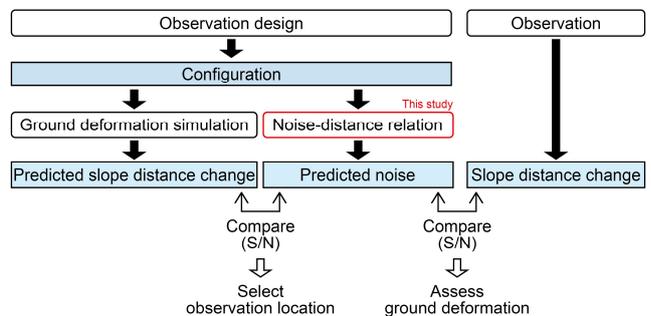


Fig. 9 Application of the noise-distance relationship derived in the study.

究部（旧地震火山研究部を含む）及び気象庁地震火山部火山監視・警報センター（旧火山監視・情報センターを含む）伊豆大島火山防災連絡事務所の歴代担当者により、設置及び維持管理の支援を行っていただいた。気象研究所火山研究部の吉田康宏前部長（現地磁気観測所長）、川口亮平主任研究官、奥山哲主任研究官及び石井憲介主任研究官より、観測及び解析に関する有意義な助言をいただいた。また、査読者の加藤輝之台風・災害気象研究部長及び福井敬一火山研究部客員研究員、並びに編集委員の山里平氏からのご意見により、本稿は大幅に改善された。本稿中の地図の作成に当たっては、国土地理院の承認を得て、同院発行の『数値地図 10m メッシュ（火山標高）』を使用した。記して感謝の意を表す。

文献

- 青木陽介 (2016): 火山における地殻変動, 火山, **61**, 311–344.
- 越智健太・石井憲介 (2013): 領域拡張・予報時間 39 時間化されたメソモデルの特性, 平成 25 年度数値予報研修テキスト, 気象庁予報部, 1–17.
- 気象研究所・伊豆大島火山防災連絡事務所 (2022): 第 151 回火山噴火予知連絡会資料, その 2 の 4, 5–10, https://www.data.jma.go.jp/vois/data/tokyo/STOCK/kaisetsuka/CCPVE/shiryo/151/151_2-4.pdf.
- 気象研究所地震火山研究部 (2013): マグマ活動の定量的把握技術の開発とそれに基づく火山活動度判定の高度化に関する研究, 気象研究所技術報告, **69**, 36–41.
- 気象庁数値予報開発センター (2021): メソ解析とメソモデルの改良, 数値予報開発センター年報（令和 2 年）, 48–55.
- 気象庁数値予報開発センター (2023): メソモデルの鉛直層増強, 予報時間延長, 数値予報開発センター年報（令和 4 年）, 21–24.
- 須田教明 (1994): 電磁波測距儀 改訂版, 森北出版, 242pp.
- 高木朗充・福井敬一・新堀敏基・飯島 聖 (2010): 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—, 火山, **55**, 41–51.
- 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.
- Barrell, H. and J. E. Sears, (1939): The refraction and dispersion of air for the visible spectrum, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, A*, **238**, 1–64.
- Ciddor, P. E. (1996): Refractive index of air: new equations for the visible and near infrared, *Applied Optics*, **35**, 1566–1573.
- Harrell Jr F. (2023): Hmisc: Harrell Miscellaneous. R package version 5.0-1, <https://CRAN.R-project.org/package=Hmisc>.
- Hill, R. J., S. F. Clifford, and R. S. Lawrence (1980): Refractive-index and absorption fluctuations in the infrared caused by temperature, humidity, and pressure fluctuations, *Journal of the Optical Society of America*, **70**, 1192–1205.
- Honda, Y., M. Nishijima, K. Koizumi, Y. Ohta, K. Tamiya, T. Kawabata, and T. Tsuyuki (2005): A pre-operational variational data assimilation system for a non-hydrostatic model at the Japan Meteorological Agency: Formulation and preliminary results, *Q. J. R. Meteor. Soc.*, **131**, 3465–3475.
- Ikuta, Y., T. Fujita, Y. Ota, and Y. Honda (2021): Variational data assimilation system for operational regional models at Japan Meteorological Agency, *J. Meteor. Soc. Japan*, **99**, 1563–1592.
- Tetens, O. (1930): Über einige meteorologische begriffe, *Zeitschrift für Geophysik*, **6**, 297–309.

(編集担当 山里 平)

Table 1 EDM and reflector sites. Reference vertical distance: $z_{\text{reflector}} - z_{\text{EDM}}$ (altitudes [m] at the reflector and EDM sites, respectively).

	Site	Latitude (degree)	Longitude (degree)	Altitude (m)	Reference slope distance (m)		Reference vertical distance (m)		Maker	Product name	Notes
					A01	A02	A01	A02			
EDM	A01	34.75361	139.4029	498					Leica	TCA1201M	Wavelength: Reflectorless (RL) mode: 0.670 μm End: 2020.03.04
										TS16	Wavelength: RL mode: 0.658 μm Update: 2020.03.04
	A02	34.71256	139.4129	631					Leica	TCRA1201	Wavelength: RL mode: 0.670 μm
Reflector	M01	34.73761	139.3891	551	2175		53		SOKKIA	AP01AR	
	M02	34.73936	139.3963	544	1688		46				
	M03	34.74350	139.4022	485	1101		-13				
	M05	34.74408	139.4123	467	1358	3498	-31	-164			
	M06	34.74778	139.4157	442		3918		-189			
	M08	34.73944	139.4201	438		3058		-193			
	M09	34.73544	139.4056	533	2028		35				Update: 2019.02.27 (difference: +7.71891 m)
	M10	34.73083	139.3949	681	2635		183				Update: 2019.02.27 (difference: +10.59278 m)
	M11	34.72433	139.3947	752	3340		254				
	M12	34.72822	139.3993	747	2842		249				
	M14	34.73133	139.4218	443	3021	2235	-55	-188			End: 2019.03.20
	M15	34.72083	139.4069	711	3658		213				End: 2019.03.19
	M16	34.71769	139.3984	643		1450		12			

Table 2 JMA numerical weather model values (Meso-scale Analysis: MA) used in the study as of 2023. Unused data from Mar. 22, 2022 onward are listed for reference only.

	Apr. 7, 2009–	Mar. 28, 2013–	Mar. 25, 2020–	Mar. 22, 2022–
Computer system	NAPS8, 9	NAPS9, 10	NAPS10	
Horizontal resolution (Horizontal grid numbers)	5 km, 721×577	5 km, 817×661	5 km, 817×661	
Vertical levels (Model top)	48 21.8 km		76 21.8 km	96 37.5 km
Analysis time	every 3h			
Analysis scheme	JNoVA (4D-Var)		asuca-Var (4D-Var)	
References	Honda et al. (2005) Honda and Sawada (2009)	Ochi and Ishii (2013)	JMA (2021) Ikuta et al. (2021)	JMA (2023)

Table 3 Fitting parameters based on equations (27) – (28).

Equation	Fitting parameter	No correction	Conventional correction	MA correction
(27)	a_1 slope (mm ² /m ²)	1.0×10^{-5}	3.5×10^{-6}	7.5×10^{-7}
	b_1 intercept (mm ²)	1.2	-1.8×10^{-1}	1.5
	multiple R-squared	0.65	0.59	0.49
	adjusted R-squared	0.65	0.59	0.49
	p-value	$< 2.2 \times 10^{-16}$	$< 2.2 \times 10^{-16}$	$< 2.2 \times 10^{-16}$
(28)	a_2 slope (mm/m)	3.1×10^{-3}	1.9×10^{-3}	7.1×10^{-4}
	b_2 intercept (mm)	1.7×10^{-1}	-4.6×10^{-1}	6.9×10^{-1}
	multiple R-squared	0.70	0.71	0.56
	adjusted R-squared	0.70	0.71	0.56
	p-value	$< 2.2 \times 10^{-16}$	$< 2.2 \times 10^{-16}$	$< 2.2 \times 10^{-16}$