

積雪地帯における GNSS 電波を用いた積雪特性の推定

Estimation of Snow Cover Characteristics using GNSS Radio Waves in Snowy Areas

入江 修平¹, 横山 諒¹, 久保 幸弘¹ 吉原 貴之² 本吉 弘岐³

1 立命館大学

2 国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所

3 防災科研雪氷防災研究センター

Shuhei Irie¹, Ryo Yokoyama¹, Yukihiro Kubo¹, Takayuki Yoshihara², and Hiroki Motoyoshi³

1 Ritsumeikan University

2 National Institute of Maritime, Port and Aviation Technology

3 Snow and Ice Research Center

Abstract 日本は世界的にも積雪が多い地域である。こういった積雪地帯では、雪崩や融雪による地滑り、積雪による家屋の倒壊などの雪害を引き起こす場合がある。これらの雪害は積雪深や積雪密度、積雪水量、積雪内含水率などの積雪特性の変化によって生じる。したがって、さまざまな積雪特性の変化を連続的に観測することが雪害の事前予測や減災につながる。本研究では、積雪面上および積雪底面にそれぞれ設置した GNSS アンテナにより受信された衛星信号から搬送波位相観測量と受信強度を利用して受信機近傍の積雪特性を連続的に推定する手法を検討する。

1 はじめに

雪は環境に対してさまざまな影響を与える。積雪によって、雪崩や融雪による地滑り、洪水等の災害を引き起こす場合がある。また、融雪からの水は水力発電や農業などにとっては重要な水資源である。このようなことから、積雪地帯では積雪深や積雪密度、積雪含水量等のさまざまな積雪特性の変化を常に監視しておく必要がある。積雪特性の一つである積雪深を計測する一般的な装置として、レーザー式積雪深計や超音波式積雪深計があり、これらの積雪深計からは精度の良い測定値が得られる。しかし、これらの装置は積雪深しか測定することができないので、そのほかの積雪特性である積雪密度や積雪含水量等を測定することができない。よって、さまざまな積雪特性を把握したい場合には、積雪重量計等の大掛かりな装置や、複素誘電率測定装置等の取扱いに免許が必要な装置を積雪深計と組み合わせて用いる必要がある。

近年では、精密測量等に用いられる GNSS(Global Navigation Satellite System) を利用した積雪深の計測技術開発が進んでいる。これらは大別して積雪面のマルチパスを抽出する方法 [1] と積雪の遅延と減衰を抽出する方法 [2, 3] が提案されている。電子航法研究所では、後者の方法を用いた積雪特性推定法を提案している [4]。また、電子航法研究所の手法を発展させたものが、本研究である。[4] では積雪が無い期間から測位を行い、積雪面上および積雪底面アンテナの座標と衛星毎の搬送波位相バイアスを決定している。その後、搬送波位相観測量の受信機間一重差から幾何学的距離差と搬送波位相バイアスを補正することにより積雪伝搬遅延を抽出している。

本研究で提案する手法では、積雪面上および積雪底面にそれぞれ設置した GNSS アンテナにより受信された衛星信号の搬送波位相観測量と受信強度から、積雪による GNSS 電波の遅延と減衰を解析する。その後、カルマンフィルタを適用して積雪深や積雪密度、積雪含水量等の様々な積雪特性を推定する。また、積雪特性だけでなく搬送波位相観測量に含まれる搬送波位相バイアスと受信機時計誤差も合わせて推定する。この手法は従来の測定方法と比較して、観測地点の非破壊、低コスト、省スペース化が実現できる。また、GPS 衛星は上空が開けている場所では最低 4 機以上観測できるように衛星配置がされているので、連続的な観測が可能である。

2 積雪伝搬遅延量

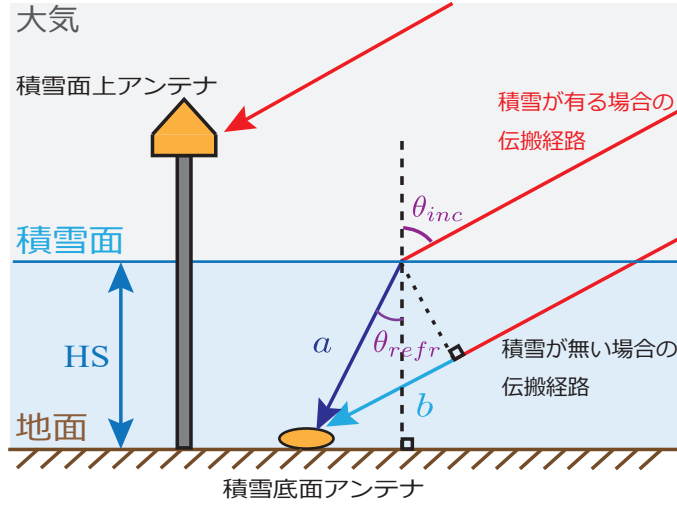


図1 積雪伝搬遅延

図1において、 θ_{inc} は積雪面への GNSS 衛星信号の入射角であり、 θ_{refr} は積雪面における GNSS 衛星信号の屈折角である。HS は積雪深、 a は積雪時の伝搬経路における積雪内伝搬経路長、 b は積雪がない時の伝搬経路長を表している。ここで積雪内の複素屈折率実部 n_r はスネルの法則により、次のように表すことができる。

$$n_r = \frac{\sin \theta_{inc}}{\sin \theta_{refr}} \quad (1)$$

ここで、 θ_{inc} は衛星の仰角から計算することができる。衛星の仰角を θ_{ele} とすると、次のようになる。

$$\theta_{inc} = \frac{\pi}{2} - \theta_{ele} \quad (2)$$

また、衛星の仰角 θ_{ele} は、受信機位置を原点とした ENU 座標系における衛星の座標を (e, n, u) とすることで次のように表すことができる。

$$\theta_{ele} = \tan^{-1} \frac{u}{\sqrt{e^2 + n^2}} \quad (3)$$

積雪伝搬遅延量 δS は式 (4) のように表すことができる [4]。

$$\delta S = n_r \times a - b = HS \left(\sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta_{inc}} - \cos \theta_{inc} \right) \quad (4)$$

3 観測方程式

積雪面上および積雪底面に設置された GNSS アンテナではコード擬似距離観測量および搬送波位相観測量を観測できる。一般的にコード擬似距離観測量は搬送波位相観測量よりも雑音が大きい。したがって、積雪伝搬遅延量を正確に抽出するにはコード擬似距離観測量は不向きである。よって、本研究では搬送波位相観測量から積雪伝搬遅延量を抽出し、積雪深および複素屈折率実部の推定を行う。

積雪面上アンテナ受信機 r と積雪底面アンテナ受信機 u における観測方程式について述べる。以下では、衛星 p の L1, L2 帯における搬送波位相による観測量をそれぞれ $\Phi_{L1}^p(t)$, $\Phi_{L2}^p(t)$ とする。積雪面上アンテナ受信機 r での観測方程式は

$$\Phi_{L1,r}^p(t) = r_r^p(t, t - \tau_r^p) + c[\delta t_r(t) - \delta t^p(t - \tau_r^p)] - \delta I_r^p(t) + \delta T_r^p(t) + \lambda_1 B_{L1,r}^p + \varepsilon_{L1,r}^p(t) \quad (5)$$

$$\Phi_{L2,r}^p(t) = r_r^p(t, t - \tau_r^p) + c[\delta t_r(t) - \delta t^p(t - \tau_r^p)] - \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_r^p(t) + \delta T_r^p(t) + \lambda_2 B_{L2,r}^p + \varepsilon_{L2,r}^p(t) \quad (6)$$

となり，積雪底面アンテナ受信機 u での観測方程式は

$$\begin{aligned} \Phi_{L1,u}^p(t) &= r_u^p(t, t - \tau_u^p) + c[\delta t_u(t) - \delta t^p(t - \tau_u^p)] \\ &\quad - \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + \delta S_u^p(t) + \lambda_1 B_{L1,u}^p + \varepsilon_{L1,u}^p(t) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{L2,u}^p(t) &= r_u^p(t, t - \tau_u^p) + c[\delta t_u(t) - \delta t^p(t - \tau_u^p)] \\ &\quad - \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + \delta S_u^p(t) + \lambda_2 B_{L2,u}^p + \varepsilon_{L2,u}^p(t) \end{aligned} \quad (8)$$

となる．ただし， $c(\approx 2.99792458 \times 10^8 [\text{m/s}])$ は光速を表しており， f_i ， λ_i は，Li 帯の周波数 [Hz] と波長 [m] を表している．(5)–(8) 式において， $r^p(t, t - \tau^p)$ は時刻 $t - \tau^p$ における衛星 p と，時刻 t における受信機との幾何学的距離 [m] を表しており， τ^p は衛星数を n_s とした衛星 $p(p = 1, \dots, n_s)$ から受信機への衛星信号の伝搬時間 [s] を表している．また， $\delta I^p(t)$ ， $\delta T^p(t)$ はそれぞれ電離層，対流圏における伝搬遅延 [m] であり， $\delta t_u(t)$ ， $\delta t_r(t)$ は時間 t における受信機 u ， r の受信機時計誤差 [s]， $\delta t^p(t - \tau^p)$ は時間 $t - \tau^p$ における衛星 p の衛星時計誤差 [s]， B は搬送波位相バイアス [cycle] であり， ε は搬送波位相による観測雑音 [m] を示している．(7)，(8) 式において， δS^p は積雪伝搬遅延 [m] である．

4 受信機間一重位相差

積雪面上アンテナ受信機および積雪底面アンテナ受信機において，両地点から同一の衛星 p に対する搬送波位相による観測量の差を式 (9)，(10) に示す．この観測量の差は搬送波位相の受信機間一重位相差と呼ばれる．衛星に搭載されている原子時計の安定度は極めて高く，また，同一の衛星に対する観測量の差をとっているため，受信機間一重位相差では，衛星時計誤差や衛星位置誤差は除去される．

$$\begin{aligned} \Phi_{L1,ur}^p(t) &= \Phi_{L1,u}^p(t) - \Phi_{L1,r}^p(t) \\ &= r_{ur}^p(t, t - \tau_{ur}^p) + c\delta t_{ur}(t) - \delta I_{ur}^p(t) + \delta T_{ur}^p(t) + \delta S_u^p(t) + \lambda_1 B_{L1,ur}^p + \varepsilon_{L1,ur}^p(t) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{L2,ur}^p(t) &= \Phi_{L2,u}^p(t) - \Phi_{L2,r}^p(t) \\ &= r_{ur}^p(t, t - \tau_{ur}^p) + c\delta t_{ur}(t) - \frac{f_1^2}{f_2^2} \delta I_{ur}^p(t) + \delta T_{ur}^p(t) + \delta S_u^p(t) + \lambda_2 B_{L2,ur}^p + \varepsilon_{L2,ur}^p(t) \end{aligned} \quad (10)$$

ただし，

$$\begin{aligned} r_{ur}^p(t, t - \tau_{ur}^p) &\equiv r_u^p(t, t - \tau_u^p) - r_r^p(t, t - \tau_r^p) \\ \delta I_{ur}^p(t) &\equiv \delta I_u^p(t) - \delta I_r^p(t) \\ \delta T_{ur}^p(t) &\equiv \delta T_u^p(t) - \delta T_r^p(t) \\ B_{L1,ur}^p &\equiv B_{L1,u}^p - B_{L1,r}^p \\ B_{L2,ur}^p &\equiv B_{L2,u}^p - B_{L2,r}^p \\ \varepsilon_{L1,ur}^p(t) &\equiv \varepsilon_{L1,u}^p(t) - \varepsilon_{L1,r}^p(t) \\ \varepsilon_{L2,ur}^p(t) &\equiv \varepsilon_{L2,u}^p(t) - \varepsilon_{L2,r}^p(t) \end{aligned}$$

である．ここで，受信機間の距離が 10km 程度までの短基線長の場合には電離圏屈折効果，対流圏屈折効果の影響を無視することができ， $\delta I_{ur}^p \approx 0$ ， $\delta T_{ur}^p \approx 0$ となる [5]．

5 幾何学的距離差補正

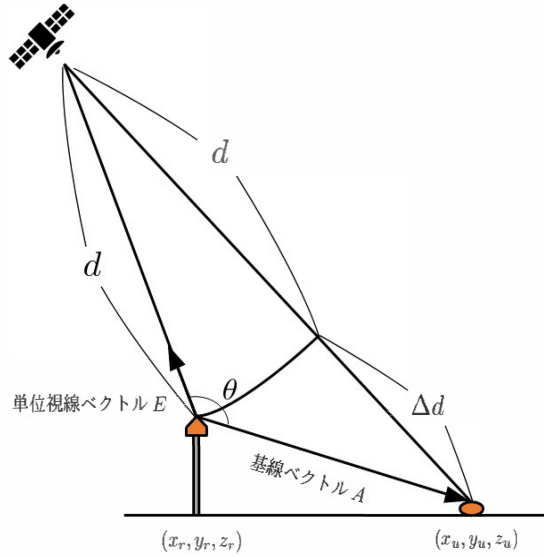


図2 積雪面上アンテナと埋雪アンテナの幾何学的距離差

図2において、 d は積雪面上アンテナと衛星の幾何学的距離であり、 Δd は衛星からの積雪面上アンテナと埋雪アンテナの幾何学的距離差である。また、 \mathbf{A} は積雪面上アンテナから埋雪アンテナへの基線ベクトル、 \mathbf{E} は積雪面上アンテナから衛星への単位視線ベクトル、 θ はベクトル \mathbf{A} とベクトル \mathbf{E} がなす角である。ここで、余弦定理を用いることで次のような式が得られる。

$$\begin{aligned} (d + \Delta d)^2 &= d^2 + |\mathbf{A}|^2 - 2d|\mathbf{A}| \cos \theta \\ &= d^2 + |\mathbf{A}|^2 - 2d\mathbf{A} \cdot \mathbf{E} \\ \Delta d^2 + 2d\Delta d - |\mathbf{A}|^2 + 2d\mathbf{A} \cdot \mathbf{E} &= 0 \end{aligned} \quad (11)$$

式(11)より、幾何学的距離差 Δd は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \Delta d &= -d + \sqrt{d^2 + |\mathbf{A}|^2 - 2d\mathbf{A} \cdot \mathbf{E}} \\ &= r_{ur}(t, t - \tau_{ur}) \end{aligned} \quad (12)$$

このように、幾何学的な伝搬距離差は衛星および積雪面上アンテナ、積雪底面アンテナの位置関係に依存する。本研究では、積雪が無い期間に相対測位などの高精度測位を行い、積雪底面および積雪面上に設置されたアンテナ座標を測位しておく。また、衛星座標を精密暦を利用して求める。これより、衛星と受信機の正確な幾何学的距離を求めることができる。求めた幾何学的距離を用いて、搬送波位相観測の受信機間一重位相差から、受信機間の幾何学的距離差を補正すると次のようになる。

$$\tilde{\Phi}_{Li,ur}^p(t) = \Phi_{Li,ur}^p(t) - r_{ur}^p(t, t - \tau_{ur}^p) \quad (13)$$

$$= \delta S_{Li,u}^p(t) + c\delta t_{ur}(t) + \lambda_i B_{Li,ur}^p + \varepsilon_{Li,ur}^p(t) \quad (14)$$

ただし、 $i = 1, 2$ である。

6 積雪伝搬遅延の抽出

式 (14) から，状態方程式を式 (15)，観測方程式を式 (16) とおく．

$$\mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{F}_t \mathbf{x}_t + \boldsymbol{\omega}_t \quad (15)$$

$$\mathbf{y}_t = \mathbf{H}_t \mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \quad (16)$$

ただし，

$$\mathbf{y}_t \equiv \begin{bmatrix} \tilde{\Phi}_{L1} \\ \tilde{\Phi}_{L2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_t \equiv \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{m \times m} & \mathbf{O}_{m \times m} & \mathbf{1} & \lambda_1 \mathbf{I}_{m \times m} & \mathbf{O}_{m \times m} \\ \mathbf{O}_{m \times m} & \mathbf{I}_{m \times m} & \mathbf{1} & \mathbf{O}_{m \times m} & \lambda_2 \mathbf{I}_{m \times m} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_t \equiv \mathbf{I}_{(2m+1) \times (2m+1)}, \quad \mathbf{x}_t \equiv \begin{bmatrix} \delta S_{L1} \\ \delta S_{L2} \\ c\delta t_{ur} \\ B_{L1} \\ B_{L2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_t \equiv \begin{bmatrix} \varepsilon_{L1} \\ \varepsilon_{L2} \end{bmatrix}$$

である． $\mathbf{1} \equiv [1, 1, \dots, 1]^T$ ， $\mathbf{I}_{m \times m}$ は m 次の単位行列， $\mathbf{O}_{m \times m}$ は m 次の零行列と定義する．また，上式におけるベクトルを以下で定義する．

$$\tilde{\Phi}_{Li} \equiv \begin{bmatrix} \tilde{\Phi}_{Li,ur}^1 \\ \tilde{\Phi}_{Li,ur}^2 \\ \vdots \\ \tilde{\Phi}_{Li,ur}^m \end{bmatrix}, \quad \delta S_{Li} \equiv \begin{bmatrix} \delta S_{Li,u}^1 \\ \delta S_{Li,u}^2 \\ \vdots \\ \delta S_{Li,u}^m \end{bmatrix}, \quad B_{Li} \equiv \begin{bmatrix} B_{Li,ur}^1 \\ B_{Li,ur}^2 \\ \vdots \\ B_{Li,ur}^m \end{bmatrix}, \quad \varepsilon_{Li} \equiv \begin{bmatrix} \varepsilon_{Li,ur}^1 \\ \varepsilon_{Li,ur}^2 \\ \vdots \\ \varepsilon_{Li,ur}^m \end{bmatrix}$$

$\boldsymbol{\omega}_t$ はシステム雑音 ($\boldsymbol{\omega}_t \sim N(0, \mathbf{Q}_t)$) であり， \mathbf{Q}_t はシステムノイズ共分散行列である．式 (16)，式 (15) に線形カルマンフィルタを適用することで，搬送波位相観測量の受信機間一重位相差から積雪伝搬遅延量 δS を抽出する．

7 積雪特性推定

7.1 積雪深および複素屈折率実部推定

搬送波位相観測量の受信機間一重位相差から抽出された積雪伝搬遅延量は式 (17) ように表すことができる．

$$\delta S_{Li,u}^p = \text{HS} \left(\sqrt{n_{r,Li}^2 - \sin^2 \theta_{inc}^p} - \cos \theta_{inc}^p \right) + \varepsilon_s^p \quad (17)$$

アンテナ座標および衛星座標から各衛星の積雪面に対する入射角 θ_{inc} を計算することができる．したがって，式 (17) に含まれる未知数は積雪深 HS，複素屈折率実部 n_r である．ここで，式 (17) から状態方程式を式 (18)，観測方程式を式 (19) とおく．

$$\mathbf{x}_{t+1,s} = \mathbf{F}_{t,s} \mathbf{x}_{t,s} + \boldsymbol{\omega}_{t,s} \quad (18)$$

$$\mathbf{y}_{t,s} = \mathbf{H}_{t,s} \mathbf{x}_{t,s} + \mathbf{v}_{t,s} \quad (19)$$

ただし，

$$\mathbf{y}_{t,s} \equiv \begin{bmatrix} \delta S_{L1} \\ \delta S_{L2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_{t,s} \equiv \begin{bmatrix} S_{\text{HS},L1} & S_{n_r,L1} & \mathbf{0} \\ S_{\text{HS},L2} & \mathbf{0} & S_{n_r,L2} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{F}_{t,s} \equiv \mathbf{I}_{3 \times 3}, \quad \mathbf{x}_{t,s} \equiv \begin{bmatrix} \text{HS} \\ n_{r,L1} \\ n_{r,L2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v}_{t,s} \equiv \begin{bmatrix} \varepsilon_{L1,s} \\ \varepsilon_{L2,s} \end{bmatrix}$$

であり， $\boldsymbol{\omega}_{t,s}$ はシステム雑音 ($\boldsymbol{\omega}_{t,s} \sim N(0, \mathbf{Q}_{t,s})$) である．また，上式の各要素を以下に示す．

$$\begin{aligned}
S_{HS, Li} &\equiv \frac{\partial \delta S_{Li}}{\partial HS} \Big|_{x=\hat{x}_t^-} = \begin{bmatrix} \sqrt{n_{r, Li}^2 - \sin^2 \theta_{inc}^1} - \cos \theta_{inc}^1 \\ \sqrt{n_{r, Li}^2 - \sin^2 \theta_{inc}^2} - \cos \theta_{inc}^2 \\ \vdots \\ \sqrt{n_{r, Li}^2 - \sin^2 \theta_{inc}^m} - \cos \theta_{inc}^m \end{bmatrix} \\
S_{n_{r, Li}} &\equiv \frac{\partial \delta S_{Li}}{\partial n_{r, Li}} \Big|_{x=\hat{x}_t^-} = \begin{bmatrix} \frac{HS \cdot n_{r, Li}}{\sqrt{n_{r, Li}^2 - \sin^2 \theta_{inc}^1} - \cos \theta_{inc}^1} \\ \frac{HS \cdot n_{r, Li}}{\sqrt{n_{r, Li}^2 - \sin^2 \theta_{inc}^2} - \cos \theta_{inc}^2} \\ \vdots \\ \frac{HS \cdot n_{r, Li}}{\sqrt{n_{r, Li}^2 - \sin^2 \theta_{inc}^m} - \cos \theta_{inc}^m} \end{bmatrix}, \quad \epsilon_{Li, s} \equiv \begin{bmatrix} \epsilon_{Li, s}^1 \\ \epsilon_{Li, s}^2 \\ \vdots \\ \epsilon_{Li, s}^m \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

式 (19), 式 (18) に拡張カルマンフィルタを適用することで積雪深および複素屈折率実部を推定する.

7.2 受信強度を用いた複素屈折率虚部推定

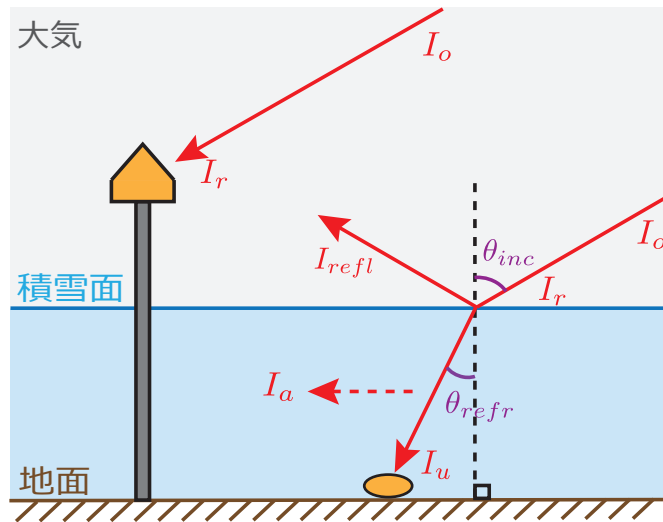


図3 受信強度

一般的に、大気中を伝搬する際に生じる減衰は積雪中を伝搬する際に生じる減衰や積雪と大気の間で発生する減衰より小さい。図3において、積雪底面アンテナでの受信強度 I_u は次のように表すことができる。

$$I_u = I_r - I_{refl} - I_a \quad (20)$$

ここで、 I_o は衛星から電波が射出されたときの信号強度 [dB-Hz], I_a は積雪中を伝搬する際に生じる減衰強度 [dB-Hz], I_r は積雪が無い期間に観測された積雪底面アンテナでの受信強度 [dB-Hz], I_{refl} は積雪表面での反射強度 [dB-Hz] である。

積雪面での反射強度 I_{refl} は式 (21) に表せる [6].

$$I_{refl} = \frac{\int_0^{2\pi} \left\{ (r_{\perp} \sqrt{I_r} \sin \alpha)^2 + (r_{\parallel} \sqrt{I_r} \cos \alpha)^2 \right\} d\alpha}{2\pi} = \frac{r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2}{2} I_r \quad (21)$$

ここで、垂直方向の反射係数 r_{\perp} および水平方向の反射係数 r_{\parallel} は次のように表すことができる。

$$r_{\perp} = \frac{E_{\perp}^r}{E_{\perp}^i} = \frac{Z_s \cos \theta_{inc} - Z_v \cos \theta_{refr}}{Z_s \cos \theta_{inc} + Z_v \cos \theta_{refr}} \quad (22)$$

$$r_{\parallel} = \frac{E_{\parallel}^r}{E_{\parallel}^i} = \frac{Z_v \cos \theta_{inc} - Z_s \cos \theta_{refr}}{Z_v \cos \theta_{inc} + Z_s \cos \theta_{refr}} \quad (23)$$

また、波動インピーダンス Z_s および Z_v はそれぞれ次のように表せる。

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0(\varepsilon_r + j\varepsilon_i)}}, \quad Z_v = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

ここで、 μ_0 は真空における透磁率、 ε_0 は真空における誘電率である。ランベルト・ベールの法則より、減衰率 α [dB/m] は式 (24) のように表せる。

$$\alpha = -\frac{I_a}{10 \log e} \times \frac{1}{a} \quad (24)$$

ここで、積雪内伝搬経路長 a は積雪伝搬遅延量から推定した積雪深および複素屈折率実部を用いて式 (25) より求める。

$$a = \frac{HS}{\cos \theta_{refr}} \quad (25)$$

大気複素屈折率実部を 1 とするとスネルの法則から、衛星信号の屈折角 θ_{refl} は式 (26) で表せる。

$$\theta_{refr} = \arcsin\left(\frac{\sin \theta_{inc}}{n_r}\right) \quad (26)$$

また、複素屈折率虚部 n_i には式 (27) が成り立つ。

$$n_i = \frac{\lambda_i \alpha}{4\pi} \quad (27)$$

式 (24) と式 (27) を用いて、Li 帯における衛星 p における時刻 t での減衰強度 $I_{a, Li}^p$ は式 (28) で表せる。

$$I_{a, Li}^p(t) = -10 \log e \times \frac{4\pi}{\lambda_i} \times a^p(t) \times n_i(t) \quad (28)$$

本研究では、L1 帯の受信強度を用いて複素屈折率虚部 n_i を推定する。積雪内の複素屈折率 \bar{n} は、複素屈折率実部と複素屈折率虚部によって次のように表せる。

$$\bar{n} = n_r - jn_i \quad (29)$$

7.3 複素誘電率および積雪特性推定

カルマンフィルタを利用して積雪深と複素屈折率実部を推定し、得られた推定値とアンテナの受信強度から複素屈折率虚部を推定した。積雪内の複素屈折率実部および虚部を用いて、積雪内の複素誘電率 $\bar{\varepsilon}$ は式 (32) のように表される。

$$\bar{\varepsilon} = \bar{n}^2 \quad (30)$$

$$= (n_r^2 - n_i^2) - j(2n_r n_i) \quad (31)$$

$$= \varepsilon_r - j\varepsilon_i \quad (32)$$

ここで、 ε_r は積雪内の複素誘電率実部、 ε_i は積雪内の複素誘電率虚部である。複素誘電率の値とモデル式を利用することで、含水率および積雪密度を推定する。

積雪の複素誘電率実部と含水率、密度の関係式はさまざまなものが提案されている [7]–[12]。本研究では、4 つのモデル式を比較する。

1. 空気・水・氷複合モデル [7]

$$\varepsilon_r = \left(0.01 \text{LWC} \sqrt{\varepsilon_{r,w}} + \frac{\rho_{ds}}{\rho_i} \sqrt{\varepsilon_{r,i}} + \left(1 - \frac{\rho_{ds}}{\rho_i} - 0.01 \text{LWC}\right) \sqrt{\varepsilon_{r,a}}\right)^2 \quad (33)$$

ここで、空気の複素誘電率実部は $\varepsilon_{r,a} = 1$ 、氷の複素誘電率実部は $\varepsilon_{r,i} = 3.18$ 、 0°C 、 1GHz での水の複素誘電率実部は $\varepsilon_{r,w} = 88$ 、氷の密度は $\rho_i = 917 \text{ kg/m}^3$ である [8]。

2. Sihvola&Turi によるモデル [9][10]

$$\varepsilon_r = 1 + 1.7 \times 10^{-3} \rho_{ds} + 7.0 \times 10^{-7} \rho_{ds}^2 + 8.7 \times 10^{-2} \text{LWC} + 7.0 \times 10^{-3} \text{LWC}^2 \quad (34)$$

3. Denoth によるモデル [11]

$$\varepsilon_r = 1 + 1.92 \times 10^{-3} \rho_{ws} + 4.4 \times 10^{-7} \rho_{ws}^2 + 1.87 \times 10^{-1} \text{LWC} + 4.5 \times 10^{-3} \text{LWC}^2 \quad (35)$$

4. Debye によるモデル [12]

$$\varepsilon_r = 1.0 + 1.83 \rho_{ws} + 0.02 \text{LWC}^{1.05} + \frac{0.073 \text{LWC}^{1.31}}{1 + (f_i/f_0)} \quad (36)$$

ここで、 $f_0 = 9.07 \text{GHz}$ である。

どのモデルにおいても含水率 LWC は体積含水率で与えられる。また、モデル 1, 2 では乾雪の密度 $\rho_{ds} [\text{kg}/\text{m}^3]$ から式 (37) を用いて湿雪の密度 $\rho_{ws} [\text{kg}/\text{m}^3]$ に変換する。

$$\rho_{ws} = \rho_{ds} + 0.01 \text{LWC} \rho_w \quad (37)$$

ここで、水の密度は $\rho_w (= 1000 [\text{kg}/\text{m}^3])$ に変換する。

複素誘電率虚部は含水率と周波数に依存して変化するモデルがいくつか提案されている。本研究で用いる積雪の複素誘電率虚部 ε_i は以下の 2 つのようにモデル化されるものを用いる。

1. Debye によるモデル [12]

$$\varepsilon_i = \frac{0.073 (f_i/f_0) \text{LWC}^{1.31}}{1 + (f_i/f_0)} \quad (38)$$

2. Sihvola&Turi によるモデル [10]

$$\varepsilon_i = \frac{f_i}{10^9 \text{Hz}} (1.0 \times 10^{-3} \text{LWC} + 8.0 \times 10^{-5} \text{LWC}^2) \varepsilon_{i,w} \quad (39)$$

ここで、 0°C 、 1GHz での水の複素誘電率虚部は $\varepsilon_{i,w} = 9.8$ 、対象周波数は GPS L1 帯の周波数 $f_1 = 1.57542 \text{GHz}$ である。

Debye のモデルでは式 (38) から含水率を求める。その後、式 (36) から求めた含水率を用いて積雪密度を推定する。その他のモデルでは式 (39) から含水率を求めた後、式 (33)–(35) を用いて積雪密度を求める。

8 実験

実験では、新潟県長岡市防災科学研究所雪氷防災センター敷地内に設置した積雪面上アンテナと積雪底面アンテナを用いて観測を行い、得られた L1 帯および L2 帯の搬送波位相観測量から、アンテナ間の幾何学的距離差補正と受信機間一重位相差により、積雪伝搬遅延量と受信強度低下量の抽出を行った。また、得られた積雪伝搬遅延量と受信強度低下量から積雪深や積雪密度、積雪内含水率等の積雪特性推定を行った。2 つのアンテナ間の基線は約 20m と短く、受信機間一重位相差をとることで電離圏遅延と対流圏遅延の大部分を除去できる。また、積雪面上および積雪底面アンテナ座標は積雪のない期間に相対測位を行い求めた。

8.1 実験条件

実験期間では降雨・降雪がなく、気温および積雪表面温度の急激な変化も見られなかったため、複素屈折率の変化は小さいと考えられる。積雪面上アンテナへの着雪もないため、積雪面上アンテナにおける搬送波位相観測量には積雪伝搬遅延量は含まれていない。その他の実験条件は表 1 に示す。表 1 において、観測時刻は GPS 時刻 (GPS Time; GPST) から求めた時刻である。また、積雪面上アンテナ座標および積雪底面アンテナ座標における Height はその地点の楕円体高を示す。

表 1 実験条件

観測場所	新潟県長岡市防災科学技術研究所雪氷防災センター
観測時刻	2015 年 2 月 15 日
更新間隔	0.5 s
衛星位置	精密暦
衛星時計誤差	精密暦
使用衛星	GPS
仰角マスク	30 deg.
受信機	DL-4 plus (NovAtel)
積雪面上アンテナ	AT2775-43W-NTPF-000-RG-40-NM (AeroAntenna)
積雪底面アンテナ	GPS-702-3.01 (NovAtel)
積雪面上アンテナ座標 (ITRS)	Lat:37.426626161, Lon:138.886684286, Height:140.782
積雪底面アンテナ座標 (ITRS)	Lat:37.426533033, Lon:138.886691259, Height:138.431

アンテナ間から約 20m ほど離れた場所にレーザー式積雪深計、積雪重量計、気温計などの気象観測装置が設置されている。レーザー式積雪深計では積雪深の cm の一の位まで求める。また、レーザー式積雪深計と積雪重量計は 10 分毎に計測値を出力する。レーザー式積雪深計と積雪重量計の計測値から式 (40) を用いて積雪全層密度 ρ_s を算出した。

$$\rho_s = \frac{\text{SWE}}{\text{HS}} \quad (40)$$

ただし、SWE は積雪水量 (Snow Water Equivalent) である。本研究では、レーザー式積雪深計と積雪重量計の計測値から算出した積雪全層密度 ρ_s と、モデル式から推定した湿雪の密度 ρ_{ws} を比較する。

8.2 実験結果

図 4, 5 に L1 および L2 搬送波位相観測量から抽出した積雪伝搬遅延量を示し、図 6, 7 に積雪伝搬遅延量の仰角特性を示す。グラフにおいて線の色の違いが衛星の違いを表す。L1 と L2 で積雪伝搬遅延量が異なる理由として、積雪内の複素屈折率は周波数依存性があることがあげられる。また、図 6, 7 より衛星の仰角が低くなるにつれて GNSS 電波の積雪内伝搬経路長が大きくなるため、積雪伝搬遅延量の値が大きくなることが分かる。図 4 の 12:00 頃において、積雪伝搬遅延量が多い低仰角衛星には推定の値が飛んでいる箇所がある。サイクルスリップは積雪伝搬遅延量を抽出する際に同時に補正している。そのため、この時点ではハーフサイクルスリップが発生して、推定結果に半波長分の飛びが発生していると考えられる。

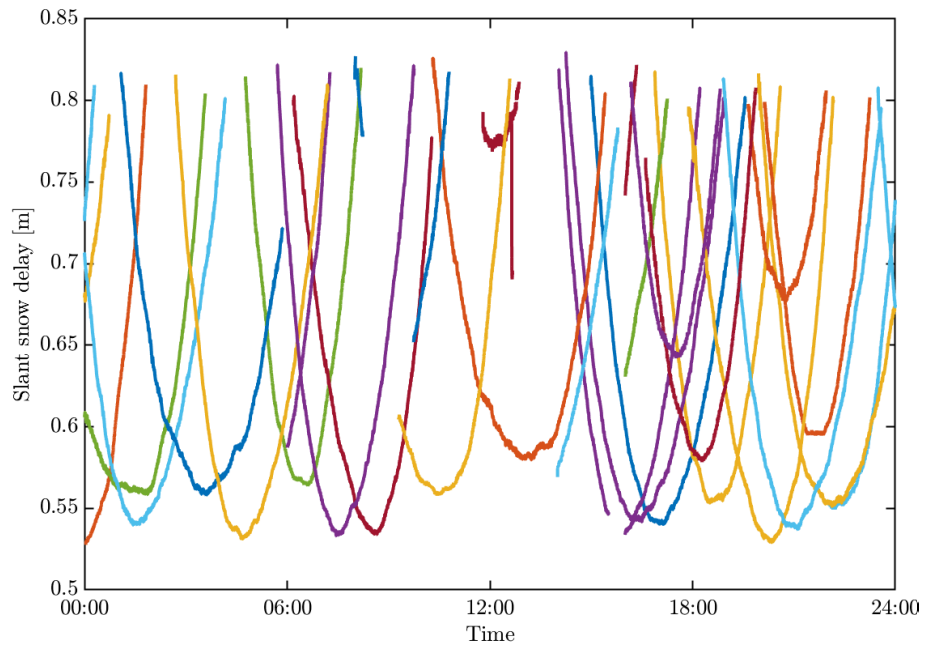


图 4 積雪伝搬遅延推定結果 (L1)

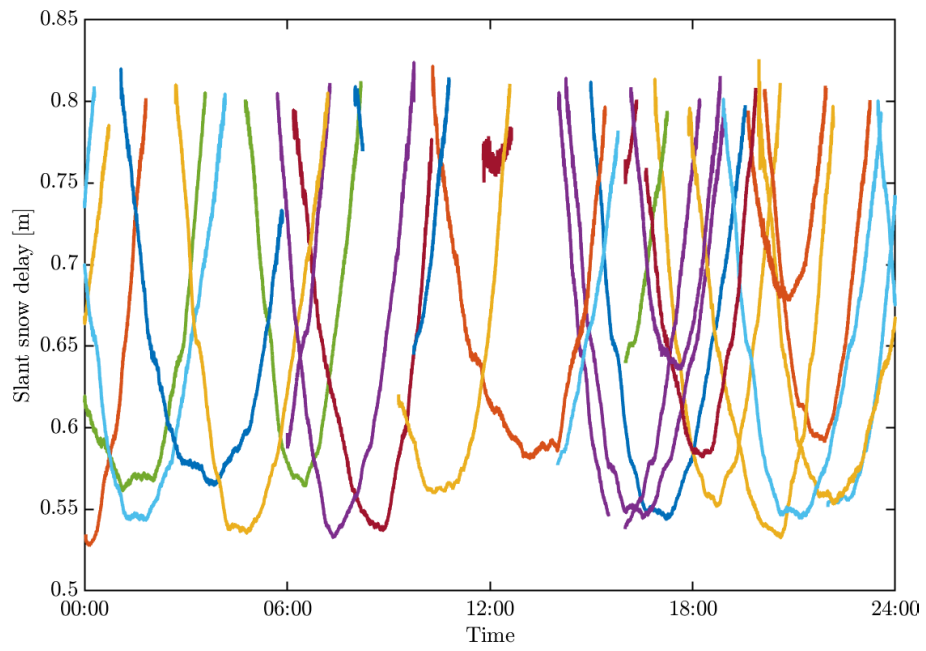


图 5 積雪伝搬遅延推定結果 (L2)

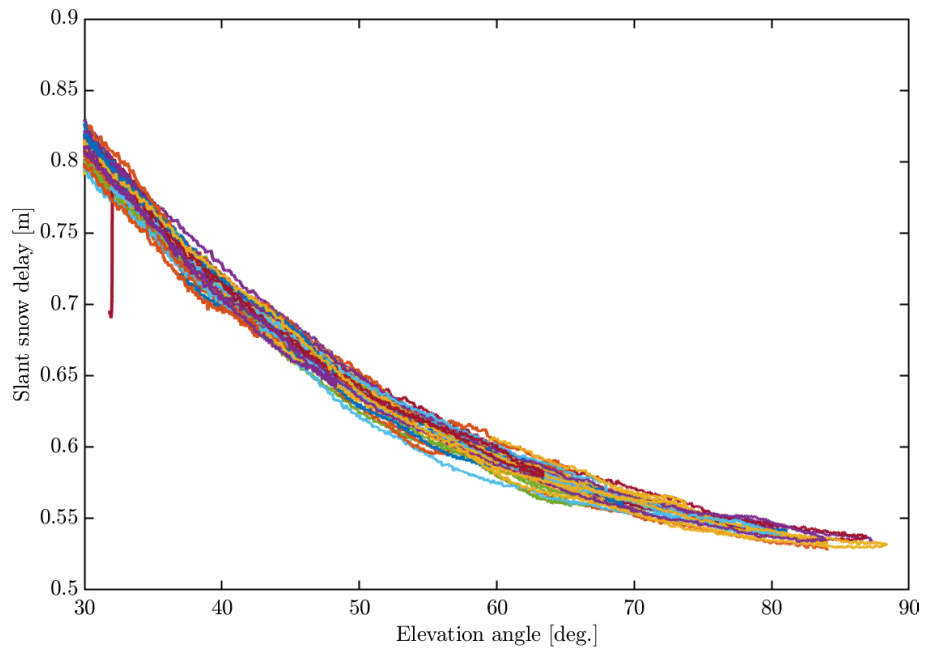


図 6 積雪伝搬遅延の仰角特性 (L1)

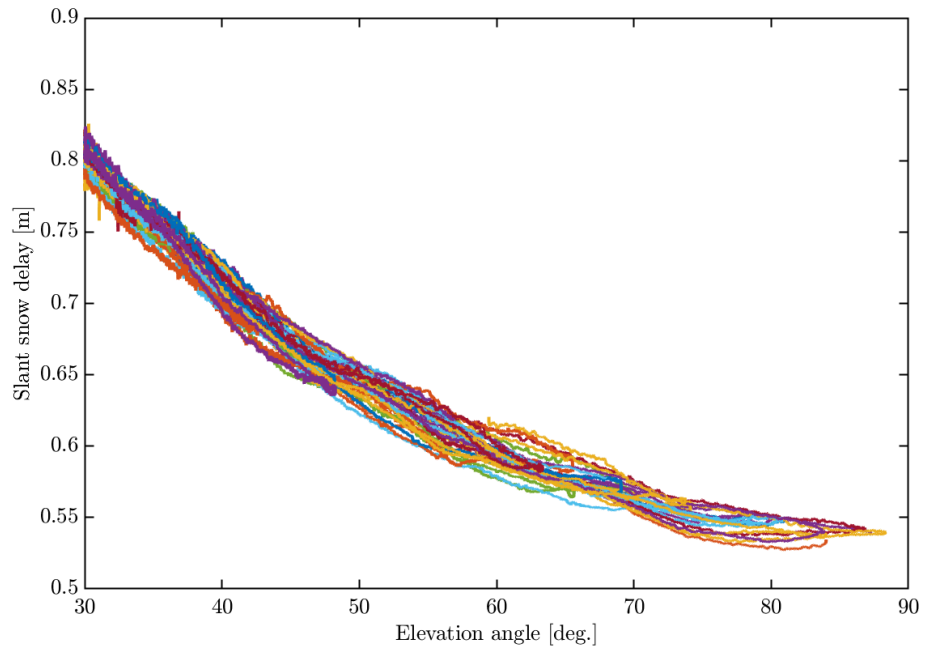


図 7 積雪伝搬遅延の仰角特性 (L2)

図 8 に拡張カルマンフィルタを用いて推定した積雪深および複素屈折率実部を示す。ここで、レーザー式積雪深計での計測値は水色マーカーで示している。2:00-5:00, 7:00-18:00 において GNSS を用いた推定値とレーザー式積雪深計の計測値には 5cm 以上の乖離があり、最も大きい箇所で 11.5cm の乖離が発生している。一方、18:00 以降は GNSS を用いた推定値とレーザー式積雪深計の計測値との差が 2cm 以下と小さい。この結果は、時間によってアンテナから観測される衛星の数が異なることが大きく影響していると考えられる。観測される衛星の数が多いほど、積雪深の推定値の精度が高くなっている。また、複素屈折率実部の推定結果に関しては、L1 帯、L2 帯において大きな違いはみられない。

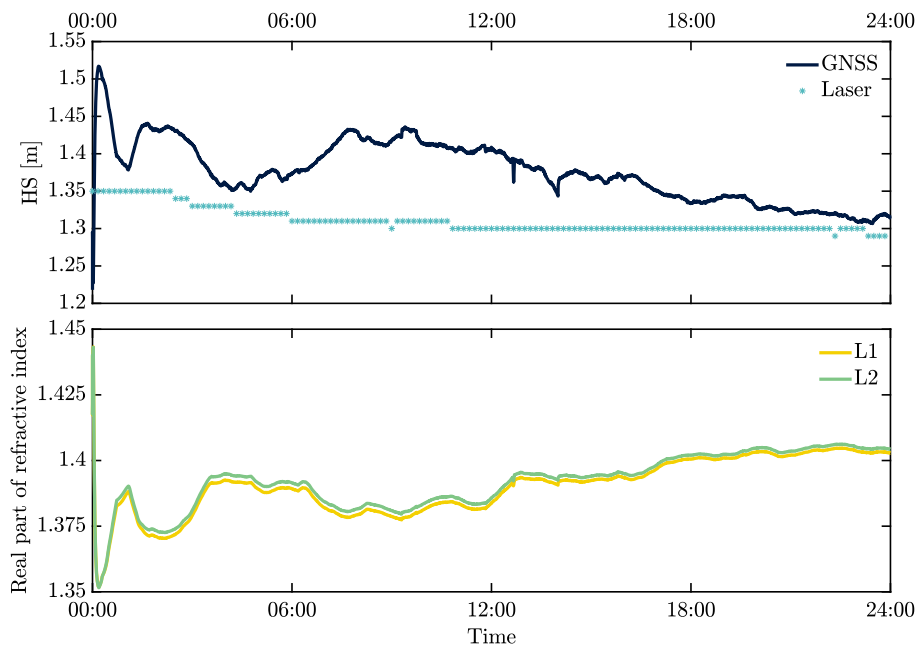


図 8 2015 年 2 月 15 日の積雪深および複素屈折率実部推定結果

図 9 に観測期間での気温、積雪表面温度、2つのモデルを用いた体積含水率の推定結果を示す。体積含水率の推定結果として、どちらのモデルを用いても大差がなく 2-3% の値をとった。観測期間では、気温および積雪表面温度の変化が小さいため、この日の含水率は小さいと予測される。

図 10 に体積含水率および複素誘電率実部から 4つのモデルを用いて推定した積雪密度の結果を示す。また、気象観測での測定値をひし形マーカーで示している。sihovola&Turi および Debye のモデル式から推定された積雪密度は気象観測値と近い値をとった。一方、Denoth および Tree-phase-mixing のモデル式から推定された積雪密度の結果は、気象観測値よりも 200kg/m^3 ほど小さい。

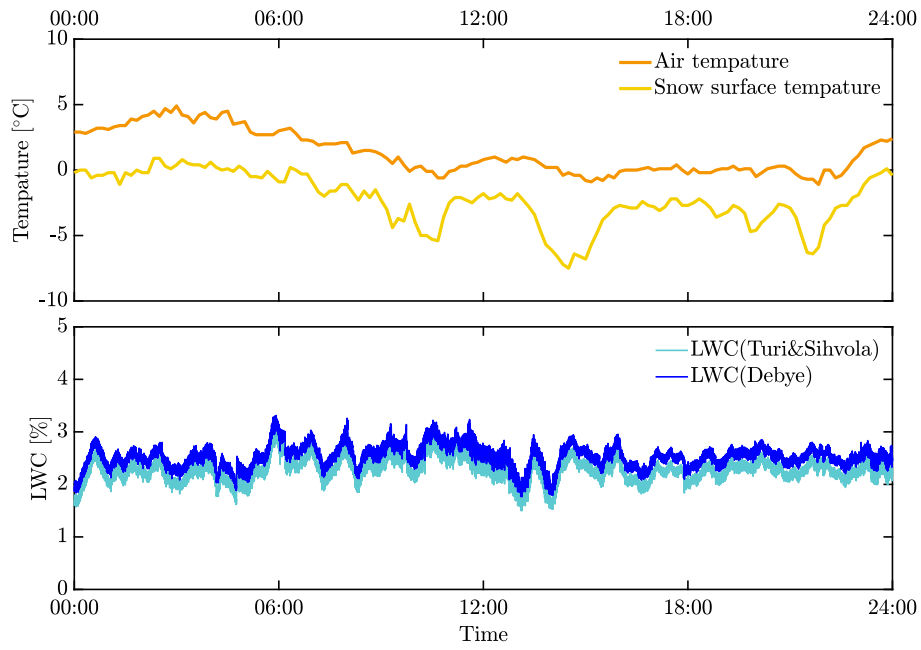


図9 気温・積雪表面温度および体積含水率推定結果

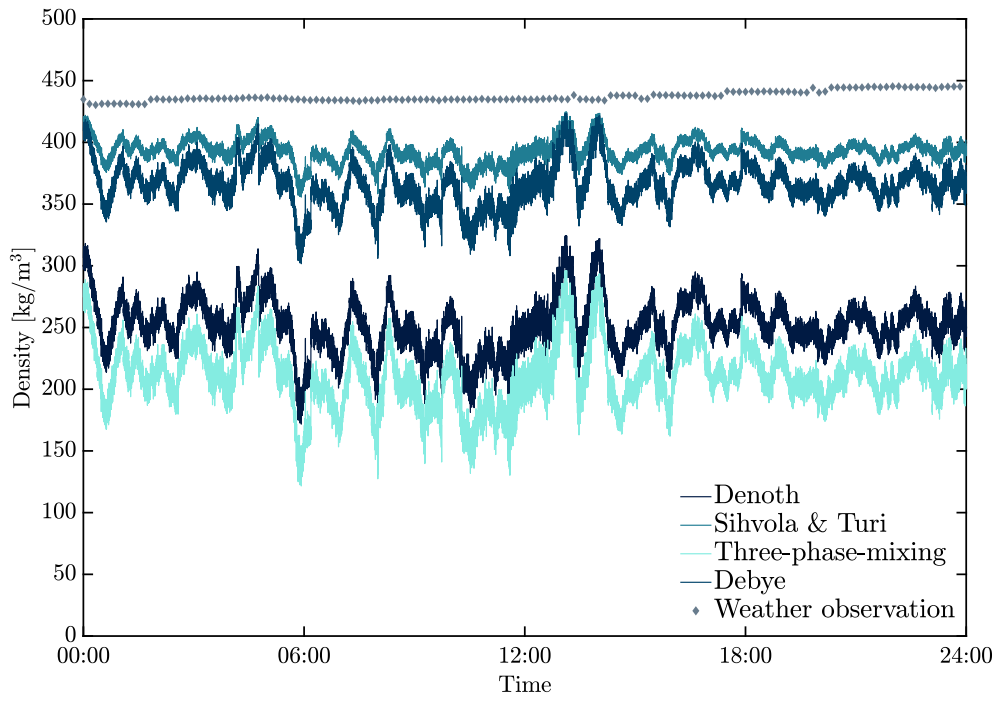


図10 積雪全層密度推定結果

9 結論

本研究では GNSS 電波を用いて積雪深、複素屈折率、体積含水率、積雪密度を推定する手法を提案した。この手法は従来の積雪特性観測方法と比べて、低コスト・省スペースであり、非破壊かつ連続的な観測が可能である。

本研究の結果から、含水率や積雪密度の推定に関しては適切なモデルを選択すれば気象観測値に近い推定結果が得られることが分かった。積雪深の推定に関しては、アンテナから観測される衛星の数が推定精度に大きく影響していることが分かり、観測された衛星の数が長い時間帯ではレーザー式積雪深計の計測値と近い推定結果を得られた。本研究では GPS の観測データのみを利用しているが、QZSS や Galileo 等の GPS 以外の GNSS 衛星を利用することができれば、観測される衛星の数が増えることになり、さらなる推定精度の向上が期待できる。また本研究では搬送波位相観測量の受信機間一重位相差を利用して積雪特性の推定を行っているが、この手法ではわずかにケーブル間遅延やアンテナ位相特性による誤差が残留している。こういった誤差の除去を目的として、観測量の二重位相差を用いた積雪特性の推定方法も考えていく予定である。

参考文献

- [1] K. Lason, E. Gutman, V. Zavorotny, J. Braun, M. Williams, F. Nievinski: Can we measure snow depth with GPS receivers?, *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L17502, doi:10.1029/2009GL039430, 2009.
- [2] P. Henkel, F. Koch, F. Appel, H. Bach, M. Prasch, L. Schmid, J. Schweizer, W. Mauser: Snow water equivalent of dry snow derived from gnss carrier phases, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 56, no. 6, pp. 3561–3572, 2018.
- [3] F. Koch, P. Henkel, F. Appel, L. Schmid, H. Bach, M. Lamm, M. Prasch, J. Schweizer, W. Mauser: Retrieval of snow water equivalent, liquid water content, and snow height of dry and wet snow by combining gps signal attenuation and time delay, *Water Resources Research*, vol. 55, no. 5, pp. 4465–4487, 2019.
- [4] 吉原 貴之: 積雪特性を測定する方法及びその装置及びこの積雪特性を測定する方法を利用した融雪災害の予測監視方法及びその装置
- [5] 杉本 末雄, 柴崎 亮介 (編): GPS ハンドブック, 朝倉書店, 2010.
- [6] F. Koch: *Snow Cover Properties and Soil Moisture Derived from GPS Signals*. PhD thesis, Imu, 2017.
- [7] K. Roth, R. Schulin, H. Flüeler, W. Attinger: Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric approach, *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 10, pp. 2267–2273, October, 1990.
- [8] 国立天文台: 理科年表, 丸善出版, 東京, 2021.
- [9] A. Sihvola, E. Nyfors, M. Tiuri: Mixing formulae and experimental results for the dielectric constant of snow, *Journal of Glaciology*, Vol. 31, No. 108, pp. 377–382, December, 1985.
- [10] M. Tiuri, A. Sihvola, E. Nyfors, M. Hallikaiken: The complex dielectric constant of snow at microwave frequency, *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, Vol. 9, No. 5, pp. 377–382, December, 1984.
- [11] A. Denoth: Snow dielectric measurements, *Advances in Space Research*, Vol. 9, No. 1, pp. 233–243, 1989.
- [12] 細谷 良雄: 電波伝搬ハンドブック, リアライズ理工センター, 東京, 2004.