

GNSS電波を用いた 地表面の積雪状態の推定

見永大輔¹, 入江修平¹, 久保幸弘¹, 吉原貴之², 本吉弘岐³

¹立命館大学 大学院

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

目次

- 研究背景・目的
- 積雪伝搬遅延
- 積雪特性推定
- 実験
- 今後の展望

研究背景・目的



- ◆ 雪崩
- ◆ 融雪による地滑り
- ◆ 積雪による家屋の倒壊

積雪特性の変化で発生

積雪深・積雪水量・密度・含水率

従来^の積雪特性計測

- レーザー積雪深計 複数の装置を組み合わせる必要
- 積雪重量計 設置コストが高い
- 積雪断面観測 連続的な観測×

研究背景・目的

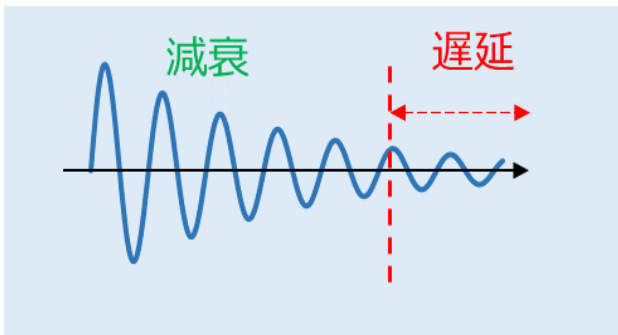
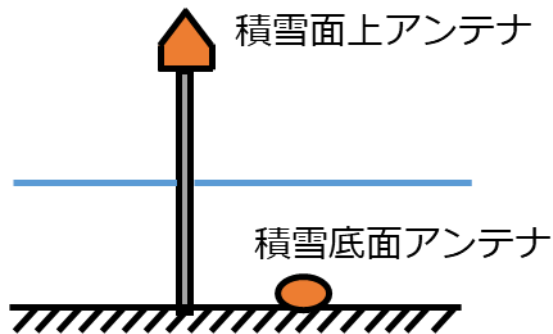
GNSS積雪計

利点

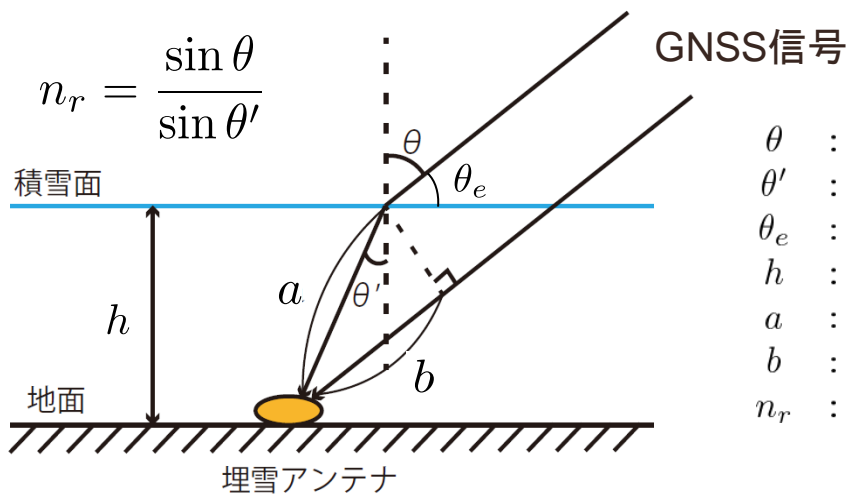
安価 測定箇所の非破壊
省スペース 連続的な観測

推定可能な積雪特性

積雪深	積雪密度
積雪水量	誘電率
含水率	屈折率



積雪伝搬遅延量



- θ : 入射角
- θ' : 屈折角
- θ_e : 仰角
- h : 積雪深
- a : 積雪時の伝搬経路長
- b : 積雪がないときの伝搬経路長
- n_r : 屈折率実部

積雪深・屈折率はアンテナ近傍で一樣と仮定

$$\text{積雪伝搬遅延量} : \delta S = n_r \times a - b = h(\sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta} - \cos \theta)$$

観測方程式

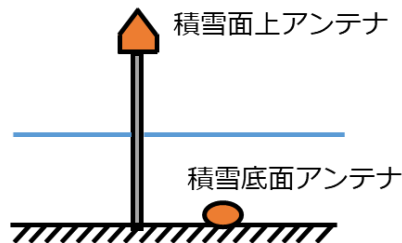
積雪底面での搬送波位相観測量

$$\begin{aligned}\Phi_u^p(t) &\equiv \lambda\varphi_u^p(t) \\ &= r_u^p(t) + c[\delta t_u(t) - \delta t^p(t - \tau_u^p)] + \delta S_u^p(t) - \delta I_u^p(t) + \delta T_u^p(t) + \lambda N_u^p + \varepsilon_u^p(t)\end{aligned}$$

t :	受信機における真の受信時刻	δI :	電離層伝搬遅延
τ^p :	衛星 p から受信機への伝搬時間	δT :	対流圏伝搬遅延
$r^p(t)$:	衛星 p と受信機との幾何学的距離	δS :	積雪伝搬遅延
c :	光速 (= 2.99792458×10^8 [m/s])	λ :	L1 帯の波長 [m]
$\delta t_u, \delta t_r$:	受信機 u, 受信機 r の時計誤差	N :	整数値バイアス
$\delta t^p(t - \tau^p)$:	時刻 $(t - \tau^p)$ での衛星 p の時計誤差	ε :	搬送波位相観測雑音

時刻同期 + 幾何学的距離差補正 + 短基線受信機間一重位相差

$$\begin{aligned}\bar{\Phi}_{ur}^p(t) &\equiv \Phi_{ur}^p(t) - r_{ur}^p(t) - \lambda N_{ur}^p \\ &= \delta S_u^p(t) + \varepsilon_{ur}^p(t) \\ &= h \left(\sqrt{n_r^2 - \sin^2 \theta^p} - \cos \theta^p \right) + \varepsilon_{ur}^p(t)\end{aligned}$$



積雪特性推定

複素屈折率虚部

$$n_i = \frac{\lambda \alpha}{4\pi}$$

λ : 衛星信号の波長
 α : 単位長さあたりの減衰率

減衰率

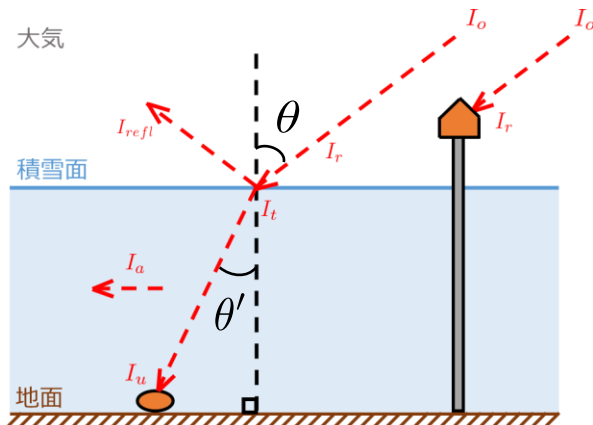
$$\alpha = -\frac{\text{ACN}}{10 \log_{10} e} \times \frac{1}{a}$$

受信強度低下量

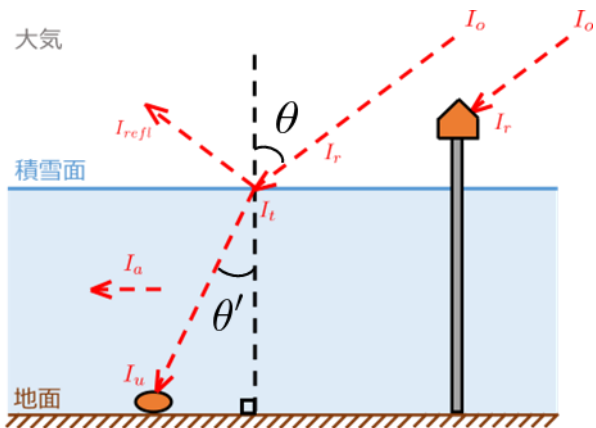
$$\text{ACN} = (I_u - I_{\text{refl}}) - I_r$$

衛星毎に観測方程式を構築

$$\left\{ \begin{array}{l} n_{i_1} = -\frac{\text{ACN}_1 \times \lambda}{4\pi \times a_1 \times 10 \log_{10} e} \\ \vdots \\ n_{i_m} = -\frac{\text{ACN}_m \times \lambda}{4\pi \times a_m \times 10 \log_{10} e} \end{array} \right.$$



積雪表面での反射



受信強度低下量

$$\text{ACN} = (I_u - I_{\text{refl}}) - I_r$$

反射強度

$$\begin{aligned} I_{\text{refl}} &= \frac{\int_0^{2\pi} \sqrt{(r_{\perp} \sqrt{I_r} \sin \alpha)^2 + (r_{\parallel} \sqrt{I_r} \cos \alpha)^2} d\alpha}{2\pi} I_r \\ &= \frac{r_{\perp}^2 + r_{\parallel}^2}{2} I_r \end{aligned}$$

スネルの法則

$$\sin \theta' = \frac{\sin \theta}{n_r}$$

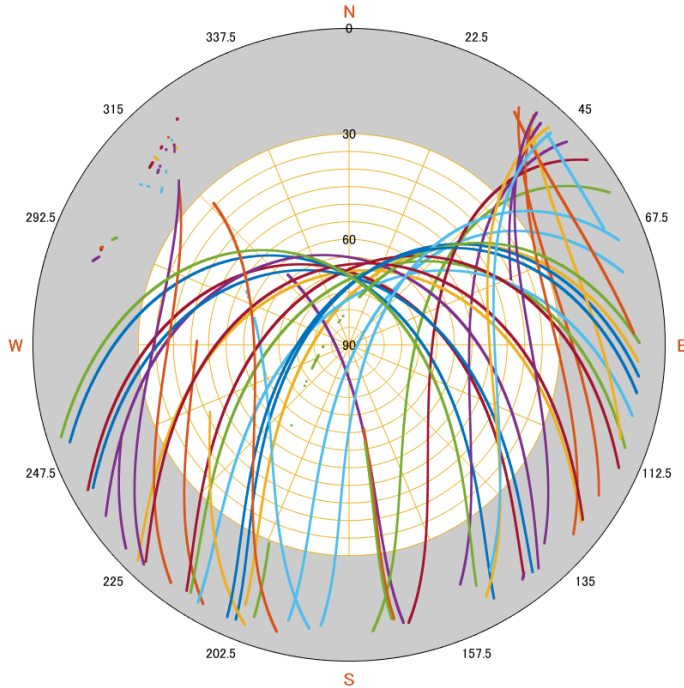
$$Z_v = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$

$$r_{\perp} = \frac{Z_s \cos \theta - Z_v \cos \theta'}{Z_s \cos \theta + Z_v \cos \theta'}$$

$$Z_s = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0(\varepsilon_r + i\varepsilon_i)}}$$

$$r_{\parallel} = \frac{Z_v \cos \theta - Z_s \cos \theta'}{Z_v \cos \theta + Z_s \cos \theta'}$$

積雪特性推定



受信強度低下量

$$ACN = (I_u - I_{\text{refl}}) - I_r$$

積雪・電離圏擾乱無い日に
観測された受信強度を参照する

仰角：5°

方位角：22.5°

各衛星ごとにクラス分け

各クラスの平均を基準
受信強度 I_r とする

含水率・積雪密度推定

複素屈折率

$$\bar{n} = n_r - jn_i$$

複素誘電率

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \bar{n}^2 \\ &= (n_r^2 - n_i^2) - j(2n_r n_i)\end{aligned}$$

ρ_s	:	積雪密度
LWC	:	含水率
$\varepsilon_{w,i}$:	9.8 (水の誘電率虚部)
f	:	1MHz - 2GHz

複素誘電率実部^[1]

$$\varepsilon_r = 1 + 1.92 \times 10^{-3} \rho_s + 4.4 \times 10^{-7} \rho_s^2 + 1.87 \times 10^{-1} \text{LWC} + 4.5 \text{LWC}^2$$

複素誘電率虚部^[2]

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

[1] Denoth, A. Snow dielectric measurements. *Adv. Space Res.* **1989**, 9, 233–243.

[2] Sihvola, A.; Tiuri, M. Snow fork for field determination of the density and wetness profiles of a snow pack. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* **1986**, 5, 717–721.

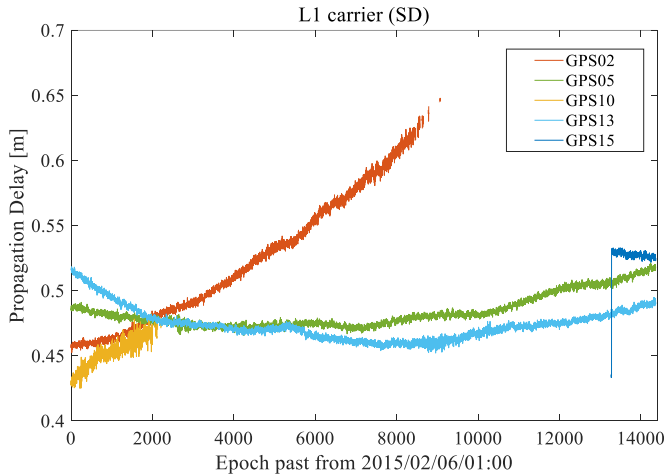
実験条件

観測日	2015/02/06
観測時刻(GPST)	01:00'00~03:00'00
実験場所	新潟県長岡市防災科学研究所 雪氷防災センター
使用衛星	GPS
仰角マスク	30 deg.
L1信号強度マスク	35 dB-Hz
データ更新間隔	0.5 sec.

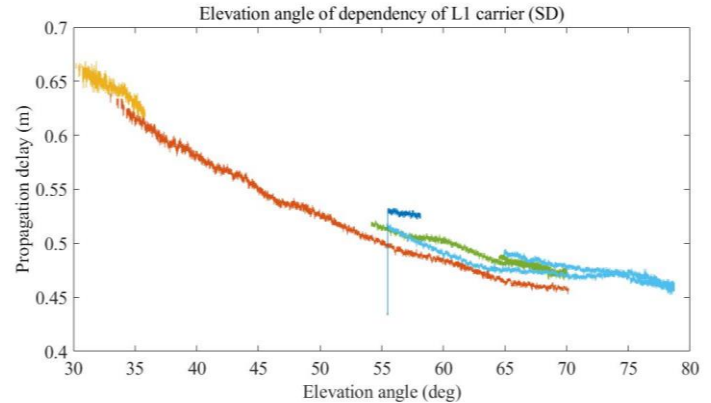
受信機間で時刻同期あり
アンテナ間は水平方向10 m隔離

実験結果

積雪伝搬遅延量



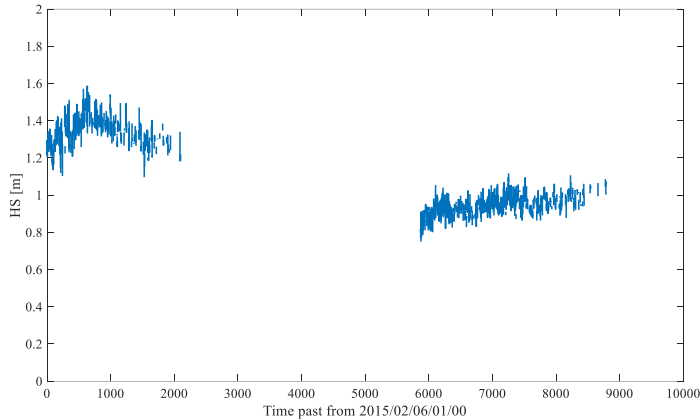
積雪伝搬遅延量の仰角特性



実験結果

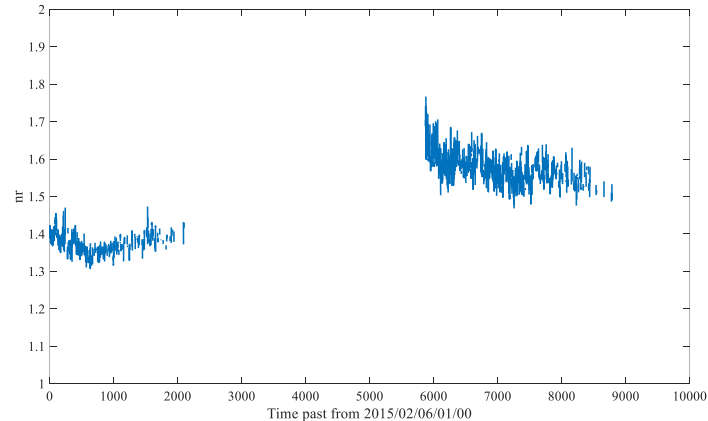
積雪深

レーザー積雪深計測定値：0.95 m



複素屈折率実部

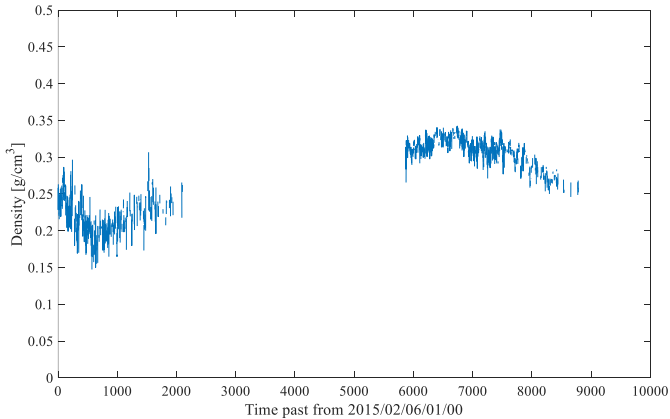
積雪断面観測測定値：1.4~1.5



実験結果

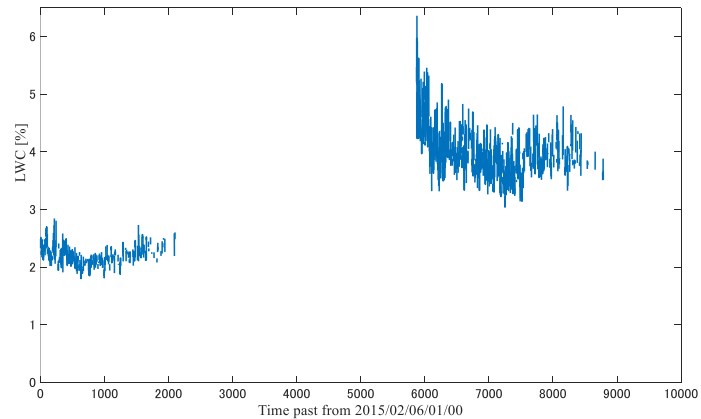
積雪密度

気象観測測定値：0.4 g/cm³



含水率

積雪断面観測測定値：3%



まとめ・今後の展望

まとめ

- ◆ 積雪伝搬遅延の仰角特性を確認した
- ◆ 積雪伝搬遅延と受信強度低下量から積雪特性の推定を行った

今後の展望

- ◆ 積雪全期間を通じた解析を行う
- ◆ 受信機間の時刻同期がとれない場合を考慮した、二重位相差を用いた積雪特性推定