

アンテナへの着雪による GNSS 局上下位置
および SN 比の異常について

On the anomalous vertical positions and signal-to-noise ratio of GNSS stations
due to snow accretion to antennas

北海道大学理学部地球惑星科学科

02180449

池谷 駿

2022年2月1日

目次

1 はじめに

1.1 GNSS について

1.2 冬季に見られる GNSS 局データの異常値について

1.3 冬季に見られる GNSS 異常の原因の代表的な例

1.4 着雪によって発生する見かけの沈降の発生メカニズム

2 上下位置の異常値と気象データ

2.1 解析手法

2.1.1 outlier 検出のアルゴリズム

2.1.2 着雪日と非着雪日の判定

2.1.3 着雪量と積雪の屈折率の整合性

2.2 解析結果

2.2.1 異常値の検出とヒストグラム

2.2.2 北海道北西部の 6 局の例

3 SN 比の異常

3.1 解析手法

3.1.1 SN 比の RINEX ファイルからの抽出とプロットの仕方

3.1.2 異なる日の SN 比を比較するときに必要な時刻のずらし方

3.1.3 仰角と方位角の計算とそれを用いた全天プロットの方法

3.2 解析結果

3.2.1 SN 比の時系列プロット

3.2.2 SN 比の全天プロット

3.2.3 3つのイベント

3.2.4 SN 比と沈降量の相関

4 現地観察

5 考察

6 まとめ

7 謝辞

8 参考文献

校了したら最後にページ数入れよう

1はじめに

1.1 GNSS について

GNSS(Global Navigation Satellite System/全地球航法衛星測位システム)は、アメリカによる GPS (Global Positioning System)、ロシアによる GLONASS、EU による Galileo、中国による北斗(Beidou)、日本による QZSS (Quasi-Zenith Satellite System)などの衛星測位システムの総称である(図1-1-1)。測位方法として、衛星と地上の観測局との間で L バンドのマイクロ波を送受信し、時計の誤差等を考慮しながらその距離から局の位置を推定する。その際4機以上の衛星を必要とし、いずれの測位システムにおいても地上局から常に上空に4機以上の衛星が見えるようになっている(図1-1-2)。GNSS による測位の方法は、単独測位と相対測位の2つに大別される。単独測位では、コードを用いて衛星から送信されたマイクロ波が観測局で受信されるまでにかかる時間から距離を導出することで局位置の推定を行う。これは単一局の位置を測定するため、単独測位と呼ばれる。コードを用いた単独測位では10m程度の推定誤差が発生するが、位相を用いた精密単独測位の精度は相対測位と遜色ない。一方、相対測位では2点以上の観測局を利用し、マイクロ波の位相差から観測局間の相対的な位置関係を求める。相対測位では数 mm 単位の測位が可能であるが、固定点の局位置に誤差が生じると全体の局位置推定に影響が出るという欠点がある。

本研究においては GNSS 点位置の異常値について取り扱うため、他地点の影響を受けない精密単独測位 (PPP, Precise Point Positioning)によって求められたデータを利用する。PPP は見かけ上単独測位だが、実際には多くの基準局のデータから得られた衛星時計の情報をダウンロードして使用することによって相対測位に近い測位精度が実現される。ネバダ大学が公開しているデータベース(URL:<http://geodesy.unr.edu/index.php>)から UNR/NGL の精密単独測位による GNSS 点の時系列変化のデータを取得した。解析の詳細は同ページに詳しい記述がある。



図 1-1-1 QZSS に用いられる衛星みちびき3号機の CG 画像 (出典 : qzss.go.jp)

GPSの軌道

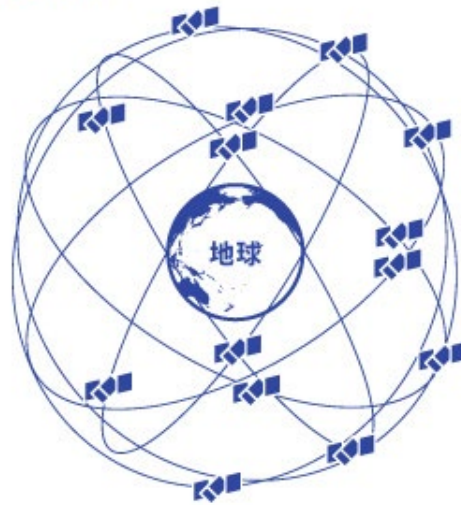


図 1-1-2 GPS の軌道イメージ (出典：qzss.go.jp)

1.2 冬季に見られる GNSS 局データの異常値について

GNSS 観測のデータには測位精度をはるかに超える数 cm から十 cm を超える異常値がしばしば見られる(図1-2)。その原因として本研究でも扱う着雪以外に、凍上や植生の変化の影響等が考えられている。しかし、具体的な特定の異常がどのようなことが原因で生じたのか、実際に研究された事例は少ない。また、上下位置の異常で科学的な根拠の乏しい商業的な地震予知を行っている会社も見受けられ、上下位置の具体的な異常の原因を一つ一つ解明することには重要な意味がある

本研究では、寒冷地特有の現象として着雪を取り上げ、アンテナへの着雪が上下位置に異常値を発生させるメカニズムを解明することを目標とした。また上下位置の誤差に加えて、同じ時期の信号対雑音比 (Signal-to-Noise Ratio, SN 比) の異常についても併せて考察を行った。

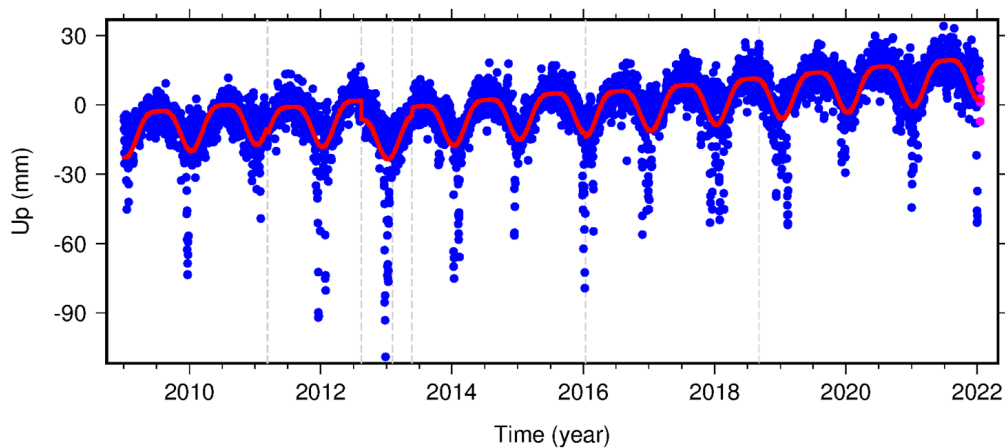


図 1-2 NGL から取得した GNSS 局位置の時系列の例。北海道中川の GNSS 点の上下変位の変化をプロットしており、冬季に異常な沈降が見られる。

1.3 冬季に見られる GNSS 測位異常の原因の代表的な例

1.3.1 凍上について

凍上とは地中に氷の層が発生することで地面が隆起する現象である。そのメカニズムとして、気温が低下して地表面から地中に向かって凍結が徐々に進んでいくと、あるところで凍結面の停滞が起こる。そこに向かって未凍土側から水が移動し、氷の層（アイスレンズ）を形成する。そして、気温がさらに低下して熱的バランスが崩れ、凍結面がさらに深部へ移動してまたアイスレンズができる。これを繰り返して地中には縞状にアイスレンズが形成される。また、未凍土側の水が凍土中を移動し、アイスレンズを成長させる（図 1-3-1）。また、上記のような仕組みでアイスレンズが成長するので、地表面での凍上量が数10cm にも及ぶこともあり、その量は地中にできたアイスレンズの厚みの総和にほぼ等しくなる。

GNSS 観測に与える影響として、寒冷地の GNSS 局位置が冬期に数 cm 上昇することがしばしばみられる（図 1-3-2）。凍上現象による変位は地中の氷が解けるまで残るため数ヶ月に及ぶ。ただし近年はアンテナ土台に断熱材を取り込む事などにより対策が進んでいるため、GNSS アンテナの凍上はあまり見られなくなった（岩田, 2006）。

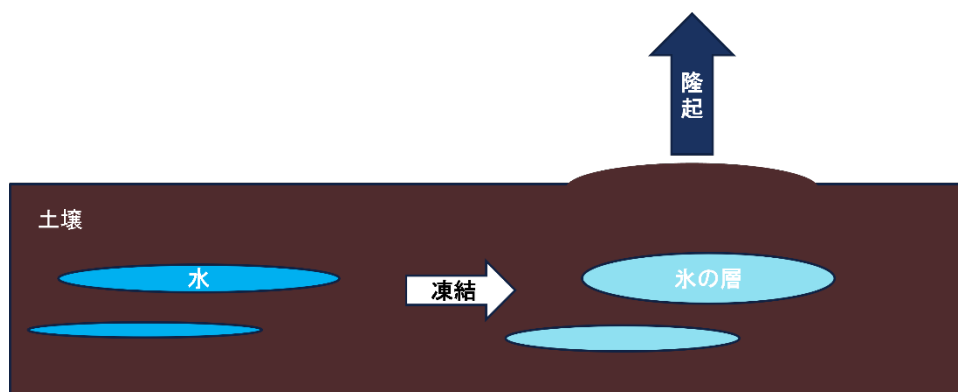


図 1-3-1 凍上のモデル。地中の水が凍結することで氷の層（アイスレンズ）の形成、成長を繰り返すことで地面が隆起する。

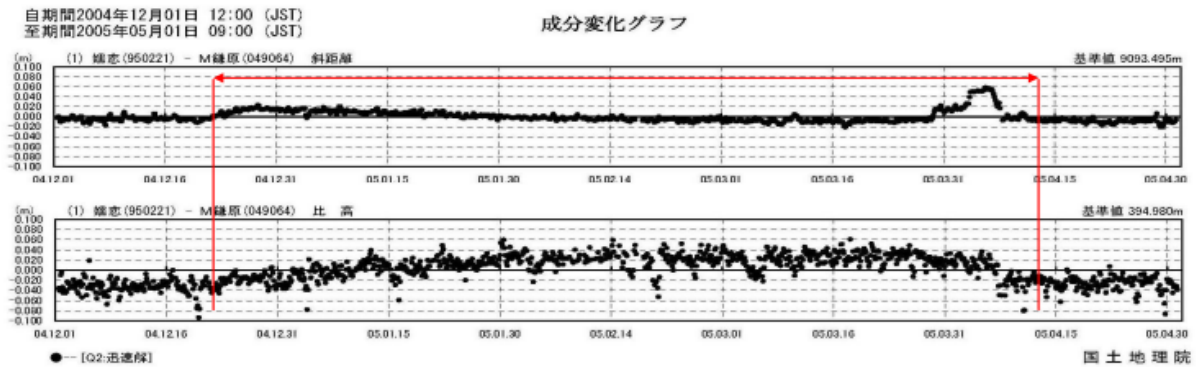


図 1-3-2 凍上による異常変位 (岩田, 2006)。平成 16 年 12 月中旬から平成 17 年 4 月中旬の解析結果の座標値 (嬬恋と浅間鎌原のデータを使用) 上側が斜距離、下側が比高を表しており、図で示された約 4 か月の期間、比高が凍上のため大きくなっているのが確認できる。

1.3.2 着雪

着雪とは文字通り雪が付着する現象のことである(図1-3-3)。着雪について古くから多くの研究が行われており、着雪の発生条件には様々なものが挙げられている。その一つとして、水分を多く含んだ湿降雪であることが挙げられる(松下、西尾, 2006)。一度着雪が始まると着雪個所に連鎖的に着雪が起こる。また、気象庁から発表される様々な注意報の中には着雪注意報があり、著しい着雪により、電線等の断線や送電鉄塔等の倒壊等の災害が発生するおそれがあると予想したとき(気温 0°C 付近で降雪が起こると発生しやすい)に発表される。



図 1-3-3 着雪が発生している GNSS 局の写真 (国土地理院資料)

1.4 着雪によって発生する見かけの沈降の発生メカニズム

着雪によって発生する見かけの沈降の要因として、大きく以下の二つが挙げられる。

一つ目は雪の表面で入射するマイクロ波の屈折が起き、電波の到達経路が本来のものより長くなることである。二つ目は積雪中では電波の速度が大気中の速度に比べて遅くなることである。

これら二つの要因で電波の到達時間が遅くなり、「遅延」が発生する。

図1-4を用いて説明する。La は積雪がない場合通過する信号経路で、Ls は積雪が存在するときに通る経路を示す。この時、幾何学的に $L_s > L_a$ となる。また、積雪中のマイクロ波速度は大気中のマイクロ波速度より遅くなるため、 $C_s < C_a$ となる。このことから、それぞれの経路を通過するのにかかる時間が $L_s/C_s > L_a/C_a$ となる。したがって媒質を通過することで電波の遅延が生じる。

電波の遅延は等価的に衛星からの距離が遠くなることに相当するため、測位誤差として見かけの沈降（負の上下位置変化）が生じる。また着雪の形によっては水平位置にも誤差が生じるが、それらの成分については特定の向きに偏ることは少ないと考えられる。

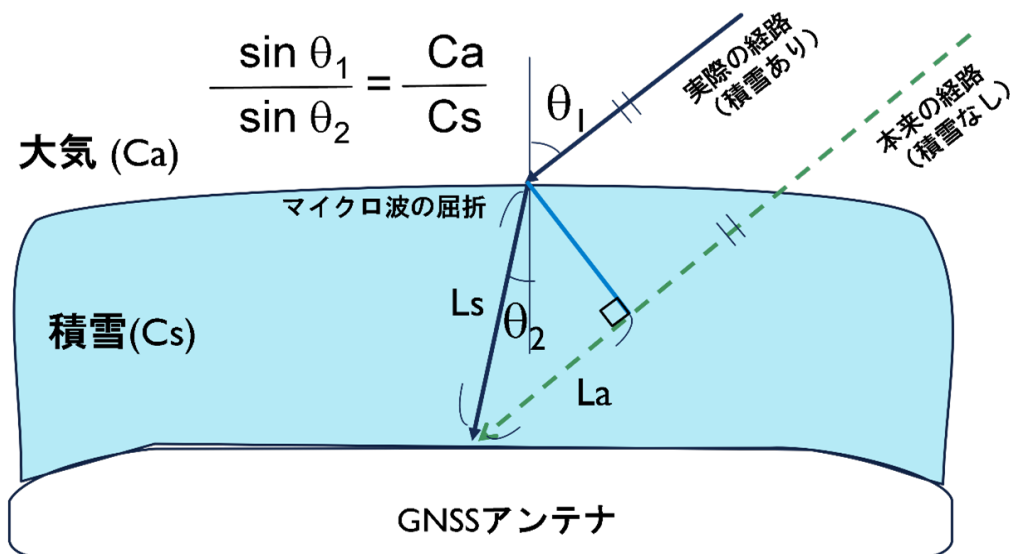


図 1-4 マイクロ波の信号経路のモデル。それぞれ C_a , C_s は大気中と着雪中のマイクロ波速度、 L_s , L_a はアンテナ上に積雪がない場合に通過する信号経路、積雪が存在するときに通る経路を示す。

2 上下位置の異常値と気象データ

2.1 解析手法

2.1.1 outlier 検出のアルゴリズム

データはネバダ大学が公開しているデータベース(URL:<http://geodesy.unr.edu/index.php>)から UNR/NGL の精密単独即位による GNSS 点の時系列変化のデータを利用した。取得時に、北日本の GNSS 局の時系列を、北米プレートから見た値として指定した上でダウンロードを行った。それらについてさらに、地震による位置のとびや平常時の地殻変動による全体的な傾き等を除去し、残差をプロットした。

続けて、異常値かどうか確かめたい点を中心とした1か月の時間窓を設定し、その時間窓でのメジアン（中央値）を異常値推定の基準とした。時系列データの傾向を知るためには移動平均というものがあるが、こちらはデータに異常値が入った際に大きく影響を受けてしまう。そのため異常値の影響を受けにくいメジアンを使用した。また、同様な理由で異常値と判断するための閾値を、四分位数を用いて設定した。今回は異常値とみなされるデータの数が過多にならないように四分位数の4倍を超えるものを異常値とした（図2-1-1,2-1-2）。

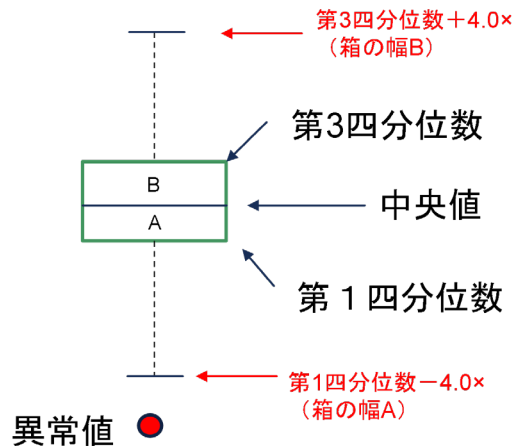


図 2-1-1 異常値の判別方法
四分位数の4倍を超える値を異常値と設定した。

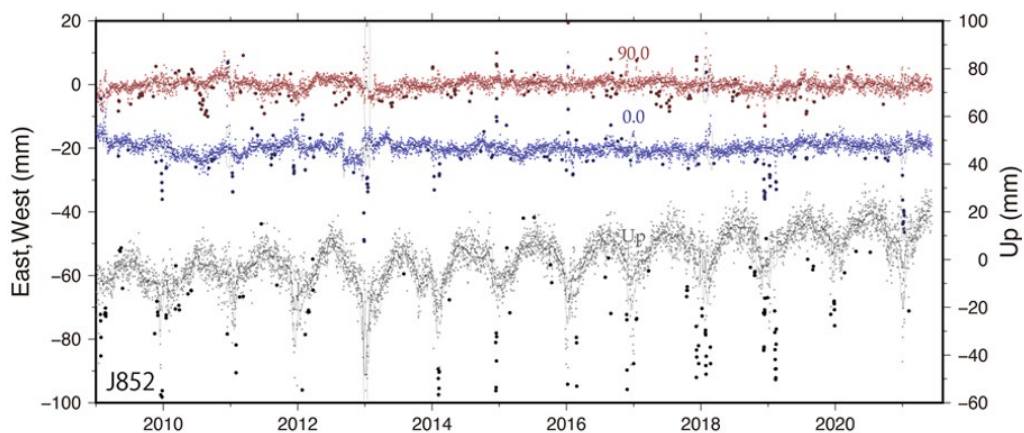


図2-1-2時系列変化と異常値のプロット

上から東西成分、南北成分、上下成分の変位を示す。黒く強調された点が異常値として判定された点。

2.1.2着雪日と非着雪日の判定

着雪による見かけの沈降の発生を見分けるため、道北にある J852 (0852) GNSS 局の時系列変化を、付近のアメダスの1時間毎の降雪量と気温データと併せてプロットした（図2-1-3）。アメダス点は GEONET 点と同じ程度の空間密度で展開されており、様々な気象データが気象庁のホー

ムページからダウンロードできる(URL:<https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>)。

2012年の年末に相当する Day350付近では、気温が0度付近であり、かつ同時期に降雪が発生しているため、それらが湿降雪であった可能性が高い。その頃から十センチにおよぶ沈降が徐々に進行し、ある日急に上昇してもとに戻っている。これらの特徴から、GNSS のこの異常値は、着雪が徐々に進行し、ある日突然の落雪によって回復することが原因であると想像できる。当時のアンテナを直接撮影した写真等は存在しないが、沈降が見られる日を着雪日、上下変位が急激に低下し始めた点より少し前と上下変位がもとに戻ったあとの日を非着雪日と本研究では仮定した。

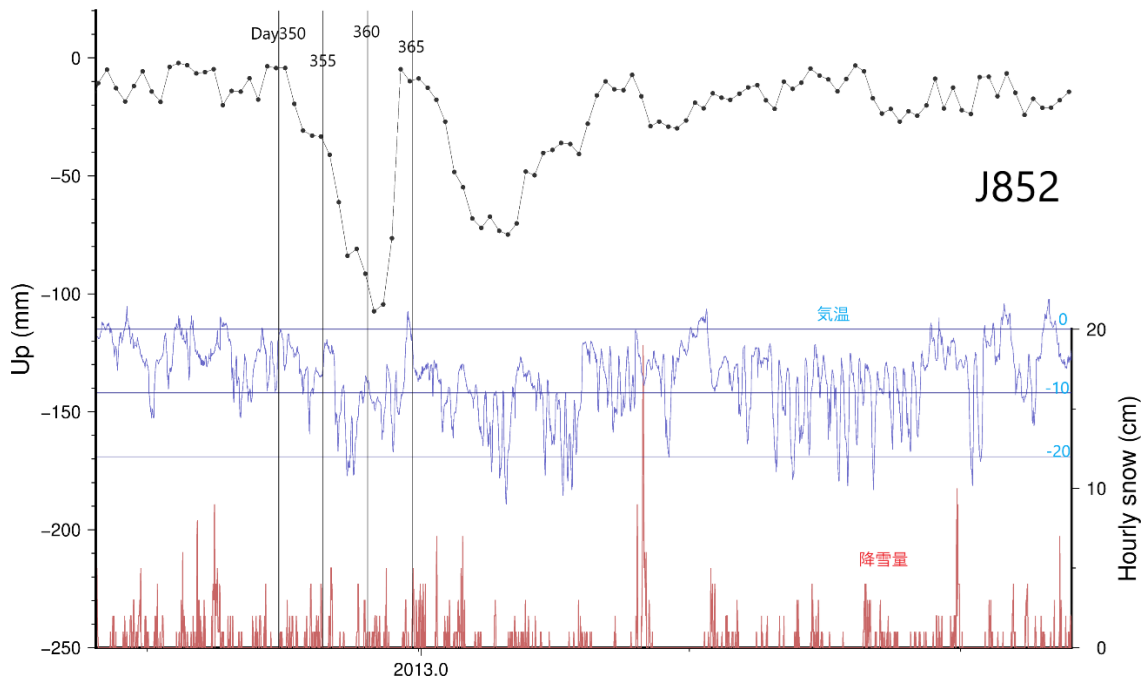


図 2-1-3 上下変位と気象情報。黒が GNSS 局の上下変位、青がアメダス（音威子府）における1時間ごとの平均気温、赤が積雪量を示す。

2.1.3 着雪量と積雪の屈折率の整合性

見かけ上の沈降と着雪量の量的整合性を確かめるため、簡単な計算を行った。大気中のマイクロ波速度を C_a 、雪中のマイクロ波速度を C_s 、着雪量を d とすると見かけ上の沈降 (Apparent subsidence) は下に示す関係が成り立つ。ただし、単純化のためすべての方向の衛星が、一様な厚さ d の板状の雪を通り抜けると仮定している。

$$\text{Apparent subsidence} = \frac{C_a - C_s}{C_a} \times d$$

積雪中の L1マイクロ波の伝搬速度は Steiner et al. (2019) に表 1 のように与えられている。左側にある C_m はそれぞれの媒質中でのマイクロ波速度を表している。右側はそれぞれの媒質中の液体の水の含有量を表していて、上から粉雪、湿った雪となっている。また、大気中のマイクロ波速度 C_a は真空のマイクロ波速度の値をそのまま用いた。

ここで、図2-1-3から見かけの沈降を約0.1mと設定し計算したところ推定着雪量が約0.4mとあ

る程度現実味のある結果が得られた。このことから見かけの沈降量が着雪の影響であることに特に矛盾はないことがわかる。

表 1 雪の含水量とマイクロ波伝搬速度(Steiner et al., 2019)

Medium	κ_m in cm^{-1}	ρ_m in cm	c_m in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	Medium	W in %
Dry snow	0.0	39'857.69	2.28×10^8	Dry snow	0
Moist snow	0.007	143.47	2.02×10^8	Moist snow	2
Wet snow	0.022	45.81	1.66×10^8	Wet snow	6
Very wet snow	0.045	22.01	1.30×10^8	Very wet snow	12
Ice at 0°C	0.0	9'011.09	1.68×10^8	Ice at 0°C	-
Freshwater at 0°C	0.306	3.27	3.24×10^7	Freshwater at 0°C	100

減衰率
貫通距離
媒質中の速度
液体の水の含有量

2.2 解析結果

2.2.1 異常値の検出とヒストグラム

冬季北海道北西部の GNSS 点で発生する異常値がどのように出ているのかを調べてみる。まずは中川 (J852) における2009年から2021年夏にかけての上下成分の異常値を検出し、それらの分布の特徴を、ヒストグラムを作成して調べた。ヒストグラムは冬季とそれ以外の二種類を作成した。このヒストグラムから、冬季以外では見られない異常値の分布の負の方向への偏りが、冬季だけ明らかに生じていることがわかる。

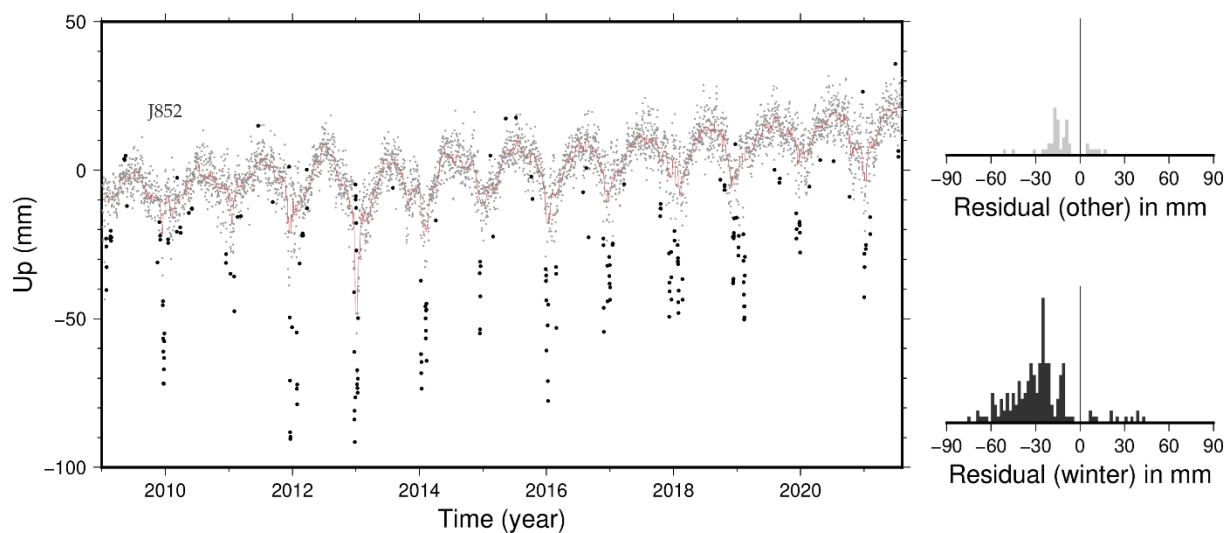


図 2-2-1 J852における上下成分の時系列変化及び異常値とヒストグラム。上側のヒストグラムは冬季以外、下側は冬季のみの異常値を抽出。冬季の異常値が負に偏っていることがわかる。

2.2.2 北海道北西部の6局の例

先ほどの異常値の検出について、J852だけでなく高頻度で冬季の異常値が見られる北海道日本海側に位置する6地点の上下位置の時系列をプロットした（図2-2-2）。冬季の異常な沈降は、これらのすべての地点で同様に発生していることがわかる。またその頻度には地域差があることもわかる。

また、図右下に、冬季以外の異常値、冬季のみの異常値のヒストグラムを比較。このヒストグラムから、冬季以外の異常値の分布は隆起と沈降の間の偏りが小さく、冬季の異常値は沈降を示す（負の値を示す）ものが卓越していることが確認できる。

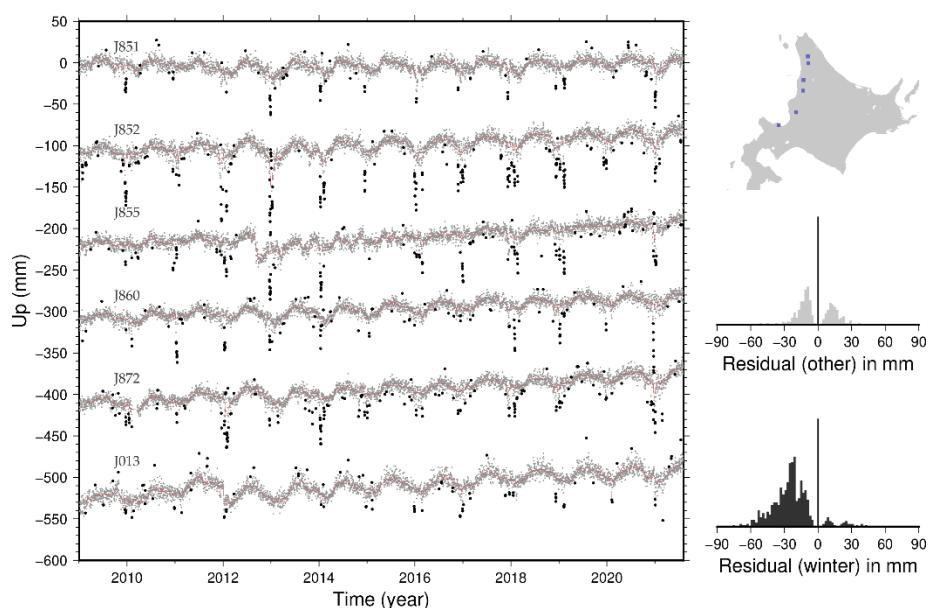


図 2-2-2 北海道北西部の6局の上下変位及びヒストグラム。上側のヒストグラムは冬季以外、下側は冬季のみの異常値を抽出。図2-2-1と同様に冬季で負の偏りが顕著である。

3 SN 比の異常

3.1 解析手法

3.1.1 SN 比の RINEX ファイルからの抽出とプロットの仕方

SNR (SN 比, Signal to Noise ratio)

SNR とは信号電力と雑音電力の比を表していて、SN 比が高いと信号の強度が高いといえる。SN 比は仰角に依存し、通常15dB から50dB ほどの値をとる。

$$\left[\frac{S}{N}\right]_{dB} = 10\log_{10} \frac{P_S}{P_N} \quad P_S: \text{信号電力} \quad P_N: \text{雑音電力}$$

RINEX データについて

国土地理院で公開されている GNSS の観測データは RINEX ((Receiver Independent Exchange Format)形式が用いられている。このデータ形式は異なる機材で取得された GPS の観測データを円滑に処理するために開発された共通フォーマットである。RINEX v.2では GPS, GLONASS のみ正式対応だったが、RINEX v.3 からはマルチ GNSS に対応した。(v.3.00 では Galileo のみ、v.3.02 から QZSS 等に対応) RINEX データファイルは、観測データファイル (Observation Data File)、航法データファイル (Navigation Message File)、気象データファイル (Meteorological Data File) の3種類のファイルから成り立っている。本研究では観測データファイル、航法データファイルを用いた。

本研究では SN 比のデータを国土地理院が公開している観測データファイルから入手した (URL:<https://terras.gsi.go.jp/>)。その RINEX ファイルの中には SN 比のデータが含まれている。その中でも、今回は L2搬送波の SN 比を用いた。

```
1      2.10      OBSERVATION DATA      G (GPS)      RINEX VERSION / TYPE
2      teqc 2002Mar14      20121217 23:05:55UTC      PGM / RUN BY / DATE
3      Linux 2.0.36|Pentium II|gcc -static|Linux|486/DX+      COMMENT
4      teqc 2002Mar14      GSI, JAPAN      20121215 03:10:14UTC      COMMENT
5      0852      MARKER NAME
6      GSI, JAPAN      GEOSPATIAL INFORMATION AUTHORITY OF JAPAN      OBSERVER / AGENCY
7      00000      TRIMBLE NETR9      Nav 4.61 Sig 0.00      REC # / TYPE / VERS
8      TRM59800.80      GSI      ANT # / TYPE
9      -3577694.2362      2791309.3971      4467169.5360      APPROX POSITION XYZ
10     0.0000      0.0000      0.0000      ANTENNA: DELTA H/E/N
11     1      1      WAVELENGTH FACT L1/2
12     6      L1      C1      L2      P2      S1      S2      # / TYPES OF OBSERV
13     30.0000      INTERVAL
14     teqc windowed: start @ 2012 Dec 15 00:00:00.000      COMMENT
15     teqc windowed: end @ 2012 Dec 15 23:59:59.000      COMMENT
16     2012      12      15      0      0      0.0000000      GPS      TIME OF FIRST OBS
17     END OF HEADER
18     12 12 15 0 0 0.0000000 0 7G17G28G19G20G32G11G 1
19     122552364.170 7 23320932.555 95495360.49845 23320940.5044 44.100
20     31.6004
21     111530540.052 8 21223572.617 86907010.86546 21223579.0824 50.500
22     41.5004
23     125034855.377 7 23793365.789 97429829.58844 23793372.4494 43.700
24     29.8004
25     111865821.660 8 21287349.422 87168200.17246 21287356.6024 48.100
```

図 2-1 RINEX ファイルの最初の部分の例。赤い丸で囲まれているのが L2波の SNR

3.1.2 異なる日の SN 比を比較するときに必要な時刻のずらし方

別日の SN 比を同じ図にプロットする際、GNSS 衛星は恒星日(23:56:4.091)で周回しているのと同じ衛星が現れる時刻が毎日約 4 分ずつ前にずれてしまう。そのため横軸の位置を調整してカーブが重なるようにした。

3.1.3 仰角と方位角の計算とそれを用いた全天プロットの方法

プログラムを用いて国土地理院の軌道データファイルから地球固定系での衛星位置計算を行っ

た。さらに、衛星の方位角、仰角を求めた。このデータと観測ファイルのデータを用いて、SN比の天球上の分布を示すプロットを作成した。

3.2 解析結果

3.2.1 SN比の時系列プロット

引き続き2012年冬の中川（道北）のデータを用い、SN比の時系列をプロットした。図より、SN比は仰角に依存し、高仰角で高くなることがわかる。またそれぞれ着雪日、非着雪日のSN比の差を見ると、低仰角では非着雪日と比較して着雪日のSN比の値が小さくなるのに対し、高仰角では逆に高い値を示すことがわかる。

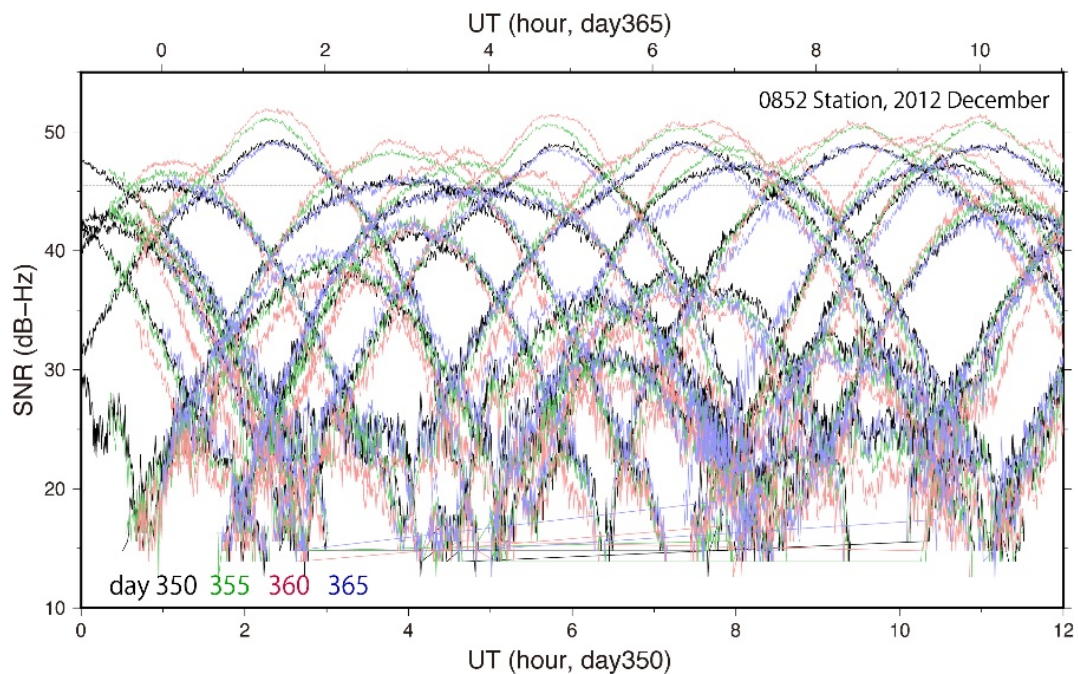


図 3-2-1 中川における SN 比の時系列プロット。黒・青のデータが着雪していないであろう日、緑・赤のデータが、着雪が疑われる日の SN 比を示す。高仰角で後者が高い値を示すが、中低仰角では逆に前者が高い値を示す。

3.2.2 SN比の全天分布プロット

つづけて、SN比の全天分布のプロットを行って、着雪によるSN比の変化を調べる。

SN比の絶対値プロット

着雪前と着雪日の全天分布のSN比の絶対値プロットを行った。この図から、高仰角でSN比が高く（赤い色）、低仰角で低い（青い色）を示すことが明瞭である。一方着雪前と着雪日を比

べると、着雪日に高仰角でわずかながら高 SN 比を示すようだが明瞭ではない (図3-2-2)。

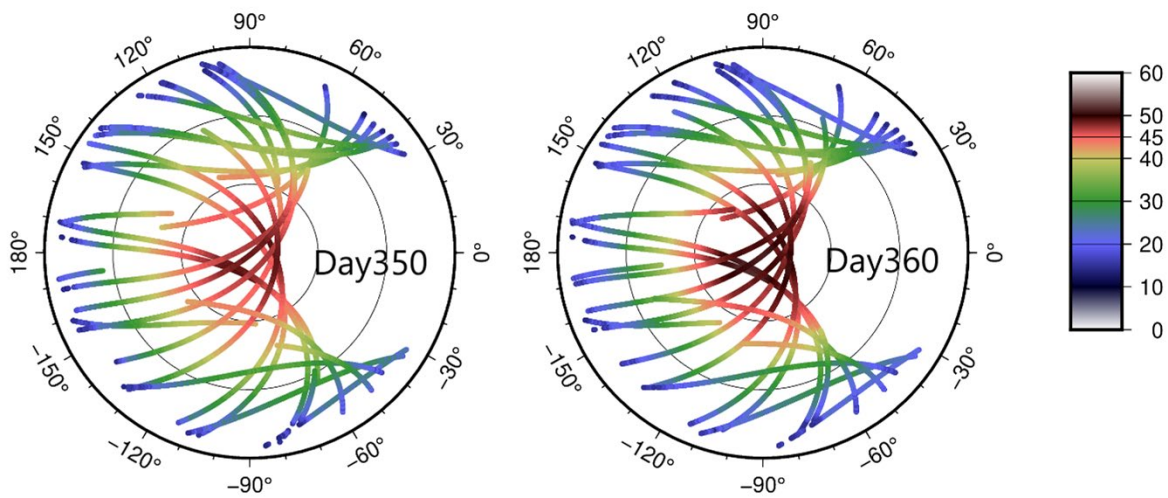


図 3-2-2 中川における SN 比の絶対値の全天プロット (図3-2-1と同じデータ)。左側が着雪前、右側が着雪中の日を示す。

SN 比の日々の差の全天分布

絶対値では着雪による影響が見えにくいので、着雪後の SN 比から着雪前の SN 比を差し引いてプロットした (図3-2-3)。着雪日(day 355, 360)の SN 比の非着雪日(day350)からの差をとった左側の図二つを見ると、着雪日には低仰角から中仰角までは SN 比の低下がみられる。また、この傾向は落雪後の Day365ではほぼ元にもどっていることがわかる。また、70度程度以上の高仰角で着雪日に SN 比が上昇していることも確認でき、これも落雪後元の値に戻っている。なお全体でみると高仰角より中低仰角の衛星が圧倒的に多いため、SN 比は着雪により低下すると考えて良い。

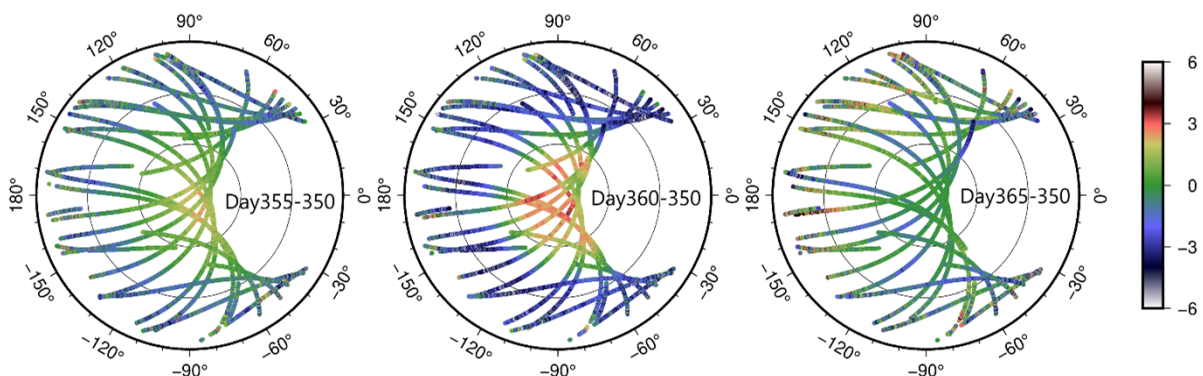


図 3-2-3 中川における SN 比の日々の差の全天分布。左と中は着雪日(355, 360)の非着雪日(350)からの差、右側は落雪後(365)の SN 比から着雪前(350)の SN 比の値を差し引いた値の分布。

3.2.3 見かけの沈降量の程度ごとの3つのイベント

見かけの沈降量から着雪の規模をいくつかのクラスに分け、先ほどの中川の大規模イベントに加え計より小規模な2つの着雪イベントについて同様に解析を行った。中川（期間2012-2013）、当別（2013-2014）、小樽（2015-2016）の局の着雪イベントのデータを用いた。見かけの沈降量の程度は順に約10cm、6cm、3cmとなっており、ここではそれぞれ大規模、中規模、小規模着雪イベントと位置づける。

三地点の着雪日と着雪前の SN 比差の比較

三地点の着雪中と着雪発生前の SN 比差の比較を行った。左から中川、当別、小樽の順になっている。いずれのイベントでも SN 比は全体的に低下、高仰角でのみ上昇という形をとっている（図3-2-4）。

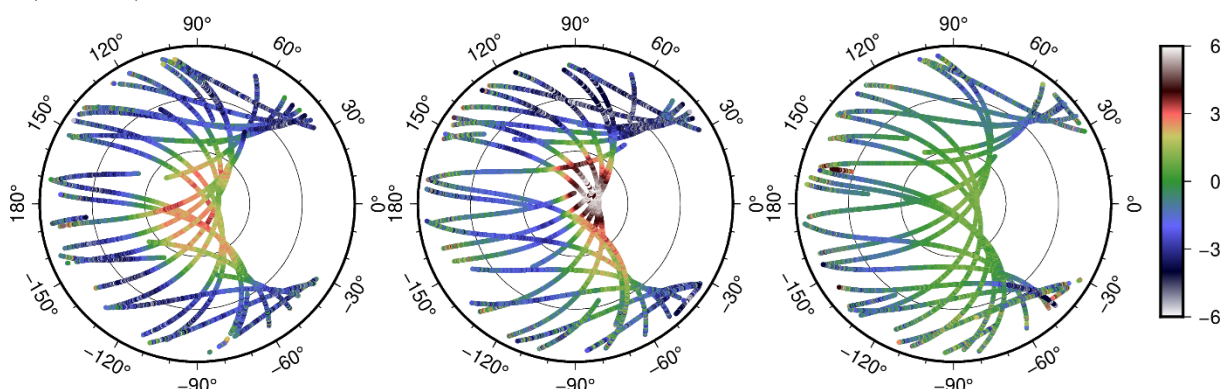


図 3-2-4 中川、当別、小樽で確認された大規模、中規模、小規模の着雪イベントについて、着雪中の日と着雪前の SN 比差を比較したもの（それぞれ何年の何日かここに書くこと）

三地点の着雪日と落雪後の SN 比差の比較

図3-2-5は三つの着雪イベントに関して、着雪後と着雪前の SN 比の差をプロットしたものである。すべての局において差はほぼゼロであり、着雪前と落雪後の SN 比にはほとんど変化がないことがわかる。

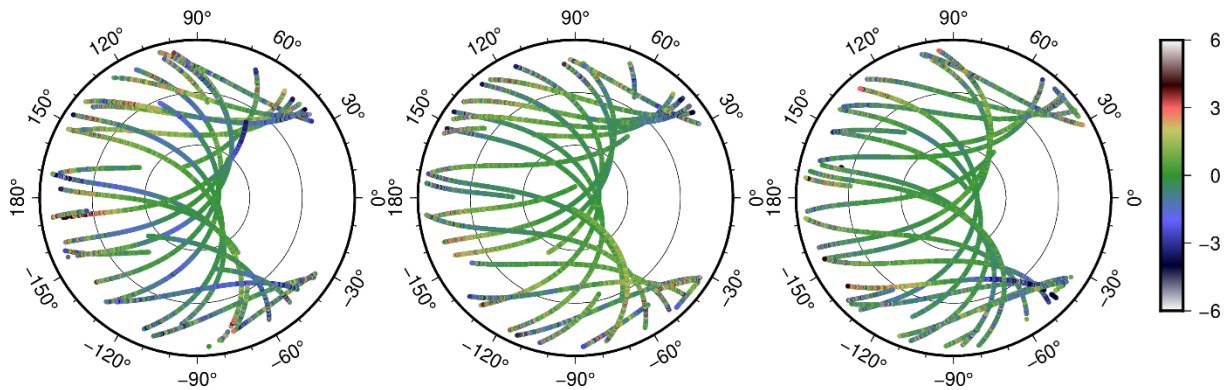


図 3-2-5 中川、当別、小樽で確認された大規模、中規模、小規模の着雪イベントについて、落雪後と着雪前の SN 比差を比較したもの（それぞれ何年の何日かここに書くこと）

3.2.4 SN 比と沈降量の相関

見かけの沈降量と SN 比変化の関係を調べるために、図3-2-6に日ごとの上下変位と SN 比の時系列を比較した。低仰角では両者の間に強い正の相関、高仰角では負の相関がみられた。単に着雪によって高仰角と中低仰角でそれぞれ SN 比が単に上昇および劣化するのではなく、その程度に綺麗な比例関係があることが示唆される。これは、着雪量の多寡に対して、見かけの沈降量と SN 比の変化の双方が線形に応答していることを意味する。

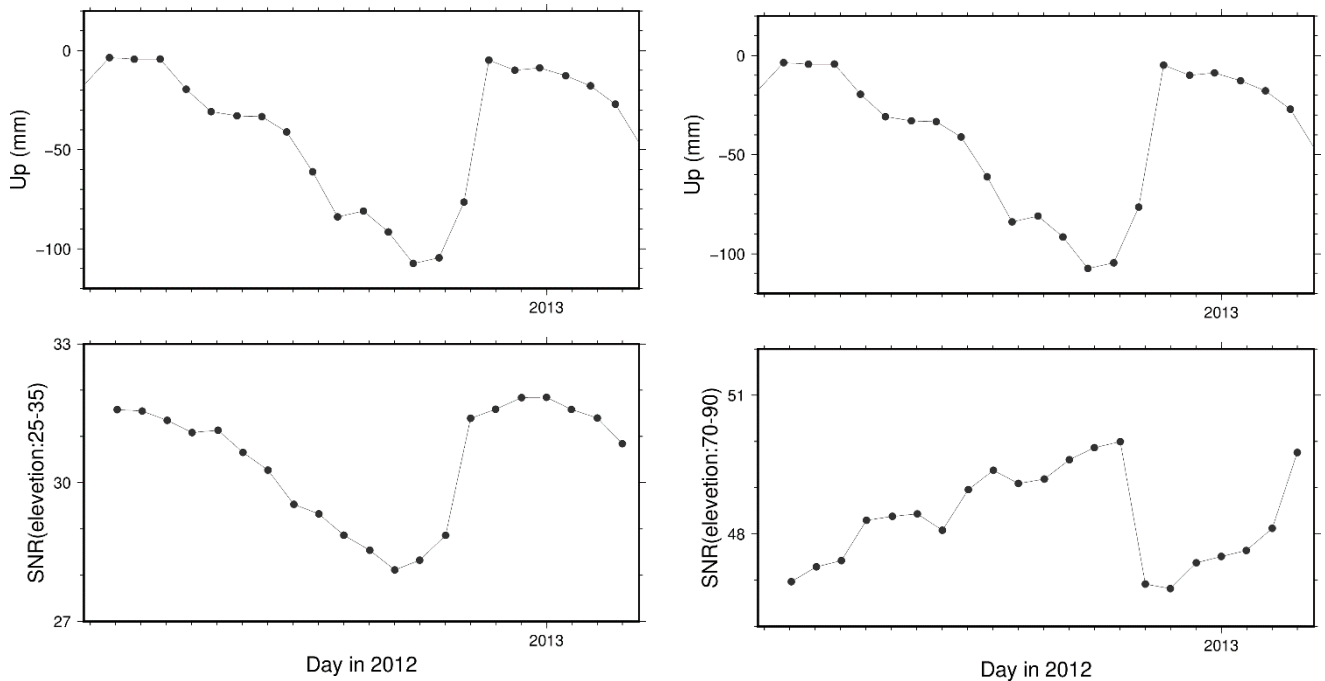


図 3-2-6 大規模着雪イベントについて、中川局の上下位置（上段）と SN 比（下段）の時系列を比較したもの。SN 比は中低仰角を左に、高仰角を右に示す。前者は正の、後者は負の相関を上下位置との間に示す。

次に、五つの着雪イベントを取り上げ（この着雪イベントに関する詳細な記述がどこにも見当たりません、どの時期にどの局で起こったイベントなのか詳しく書いてください）、それぞれについて SN 比と見かけの沈降の線形関係が成り立つかどうかを確認する。着雪が起こった日の前後 20日程度のデータを用いて、縦軸に SN 比、横軸に見かけの沈降をとってプロットを行った。この図から、オフセットは異なっているが、低仰角、高仰角どちらにおいても近似線の傾きは同程度であるように見える。（図3-2-7、図3-2-8）

この章、一番のハイライトなのでもっと丁寧に書いてください

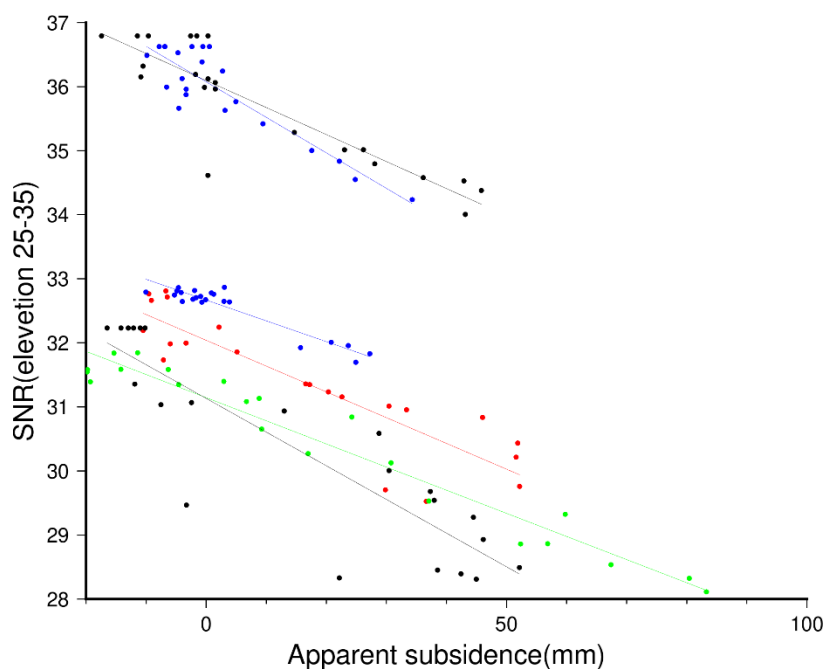


図 3-2-7 低仰角における SN 比と見かけの沈降との相関図。縦軸に SN 比、横軸に見かけの沈降。オフセットは違えど負の相関が見られる。どの色がどのイベントに相当するのかきちんと説明する

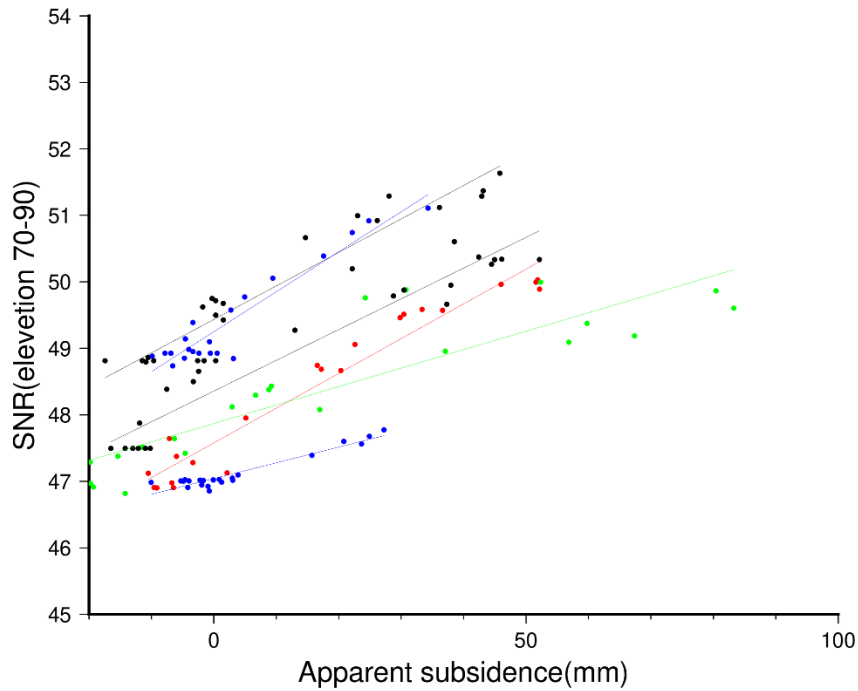


図 3-2-8 高仰角における SN 比と見かけの沈降との相関図。こちらも正の相関が見られる。色の説明が必要

4 現地観察 この章書き直し

冬季の GNSS 点の現状を確認するため札幌近郊の GNSS 局の現地観察を行った。しかしながら前日に湿降雪があったにもかかわらず着雪は見られなかった。(図4-1、図4-2)

いずれも札幌近郊というより市内です。それぞれ局名と地図くらい書きましょう。当日前後の気象条件、あとで調べたこの時期の上下位置に異常がなかったこともグラフで示すべきです。丁寧に書きましょう。



图 4-1 GNSS 局。札幌市手稻区星置 札幌市立星置中学校構内（2022 1/12 16:00）



図 4-2 GNSS 局。札幌市南区白川 札幌市北方自然教育園構内（2022 1/13 15:30）

5 考察

5.1 北海道で冬季に生じる GNSS 点上下位置の異常値について

図2-2-2のヒストグラムから、冬季に発生する異常値には負の方向に偏りが見られることがわかる。また、冬季に異常値が一つの観測点で見られたとき、近傍の観測点でも同様な異常がしばしば見られたことから、ある程度広範囲で発生している気象的な原因による異常であると解釈できる。1.4節では、着雪によって上下位置に発生する異常について量的に考察したが、予測されるマイクロ波遅延量と見かけの沈降量の比較より、観測された見かけの沈降をもたらす着雪量は現実的であることを確認した。これらのことから、冬季に北海道北西部で見られる GNSS 点の上下変位における異常値は着雪が原因である可能性が極めて高いといえる。

5.2 SN比の異常について

着雪が起こると中低仰角でSN比が低下、高仰角ではSN比が上昇することを見出した。このことは着雪中と着雪がない日のSN比の差の全天分布をプロットして確認した。また着雪中にSN比におきた変化は、落雪後には元に戻ることも確認した。これらのことから、SN比の変化は見かけの沈降と同様に着雪の影響であると考えられる。中低仰角でSN比が低下するのは信号電力が雪中を通過する際に減衰されることを考えると説明できるが、高仰角においてSN比が上昇することはそれでは説明できない。高仰角におけるSN比が着雪によって上昇する原因は不明である。受信機内部で信号強度の全体的な減少に伴って何らかのゲインの自動調整が行われた結果であるのかも知れない。また着雪によって高仰角でノイズレベルが選択的に下がることがSN比の見かけの上昇の原因なのかも知れない。

また、3.2.4節では、上下変位に異常が見られる日を取り上げ、SN比の変化と見かけの沈降の時系列を比較し、SN比の変化と見かけの沈降量が比例し、それらの間の比例定数は異なる局でもほぼ一定であることがわかった。

(節の番号の付け方がおかしいです。3.24節ではなく3.2.4節だと思います。3章の24番目の節ではないですね)

5.3 現地観察の必要性

また、札幌市内にあるGNSS観測点を実際に訪れて写真撮影を行った。当日は湿った降雪があったにもかかわらず、目視の結果着雪は見られなかった。いずれの局も、上下位置の時系列から見る限り、冬季の見かけの沈降の発生は多くない。アンテナのレドームが球状であることもあり、これらの局ではよほどの条件がそろわないとアンテナ着雪は発生しないのだろう。このことは、北海道の中でもかなり限られたGNSS局でしか着雪特有の見かけの沈降を示さないことと整合性がある。本研究を完成させるには、実際に着雪したアンテナで見かけの沈降とSN比の変化を確認する必要があるだろう。そのためには大学構内で実際にアンテナに着雪させること、または着雪が比較的頻繁に発生するGNSS局に出向いて、冬季にある程度長期滞在し、目視で確認した着雪と見かけの沈降およびSN比の変化を比較することが必要であろう。

6 まとめ (短すぎて章をもうける意味がわからない)

今回の研究より、今後はSN比の低下を調べることによって、沈降が着雪による見かけのものか、実際の沈降なのかを判断できるようになった もっと書くこといっぱいあるでしょう？

7 謝辞

本研究で使用したRINEXデータは国土地理院から、NGL/UNRファイルはネバダ大学から提供していただきました。本研究を進めるうえで宇宙測地学研究室の皆様をはじめ、固体ゼミの皆様から多くのご指導、ご協力を頂きました。指導教官である日置幸介教授には大変お世話になりました。テーマ設定、プログラミング、研究の方向性など、研究のすべての中でご助力いただきま

した。心よりに感謝申し上げます。また宇宙測地学研究室の先輩方には PC のセットアップやプログラミングについてなど教えていただきました。お忙しい中ありがとうございました。

8 参考文献

- [1] L. Steiner, M. Meindl, and A. Geige. Characteristics and limitations of GPS L1 observations from submerged antennas, *Journal of Geodesy* Vol. 93, pp267–280, 2019
- [2] 岩田和美, “GPS リモート観測システムの冬期対策に関する研究”, 国土地理院調査研究年報 (平成17年度), 2006.
- [3] 松下拓樹, 西尾文彦, 着雪を生じる降水の気候学的特徴, *日本氷雪学会誌 雪氷* 68巻5号(2006年9月)421-432頁, 2006
- [4] 宍戸真也, 山本春生, 飯倉重弘, 遠藤徹, 増成友宏, GPS アンテナへの着雪が測位性能に及ぼす影響, *日本雪氷学会全国大会講演予稿集 2005 (0)*, 43-43, 2005
- [5] 石崎武志, 凍上現象の物理, *日本結晶成長学会誌* 18(2), 181-187, 1991
- [6] 石本正芳, 北海道道東地方における電子基準点の凍上対策 (第 10 年次), 国土地理院調査研究年報 (平成19年度), 2008.