浅間山周辺に設置された機動観測点の障害要因の究明と対策について

Investigation and Countermeasure against the obstacle to measurement at mobile observation points located around Mt. Asama.

測地観測センター　小清水 寛・石倉信広・雨貝知美・根本盛行
Geodetic Observation Center
Hiroshi KOSHIMIZU, Nobuhiro ISHIKURA, Tomomi AMAGAI and Moriyuki NEMOTO
測地部　岩田和美・山田晃子・沼川邦男・志茂久男
Geodetic Department
Kazumi IWATA, Akiko YAMADA, Kunio NUMAKAWA and Hisao SHIMO

要　旨

2004 年に浅間山周辺に設置された２つの機動観測点では，冬季に地殻変動としては不自然な座標変化が見られ，山体の膨張や収縮の傾向の定量的な見積りに困難が生じた．浅間山周辺の正味の地殻変動を推測するために，この変動を分析した結果，レドームへの着雪による受信障害や凍上現象による基礎の傾斜が原因であることが判明した．さらに，これを踏まえて，２つの機動観測点に対して，レドームへの着雪や凍上現象を回避ないし軽減することを目的とした改良作業を実施した．

１．はじめに

2004 年９月１日 20 時頃浅間山で噴火が観測された．噴火時の短期的な変動や山体の長期的な膨張・収縮の傾向は，GEONET の広域な観測網でも捉えられているが，活動の推移をより詳細に監視するために山腹に２つの機動観測点「M浅間鎌原」「M浅間砂塚」が設置された（機動観測課，2005）．

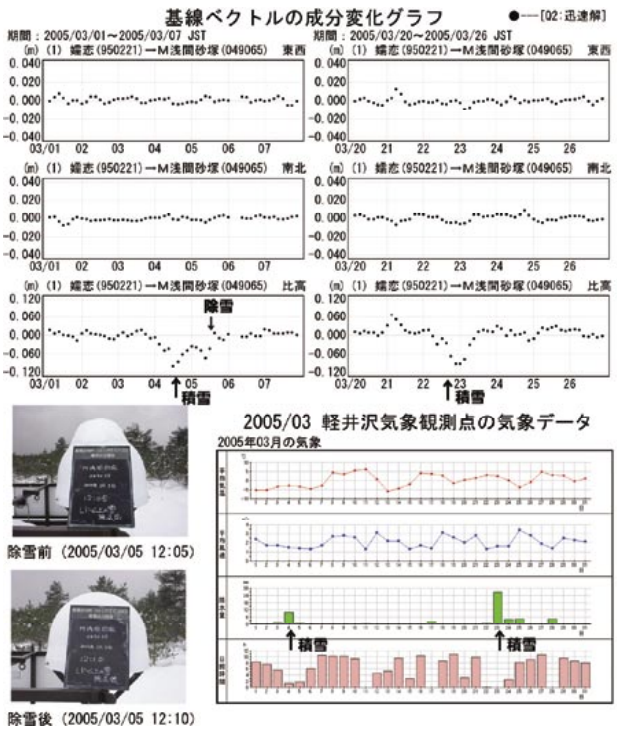
観測開始後 2004 年から 2005 年にかけての冬季に，２つの機動観測点を含む基線で大きな変化が見られた．その変化は，特徴から２つのパターンに類別される．１つは，基線ベクトル比高成分に見られる一時的な擾乱であり，冬季に発生を繰り返した．もう１つは，基線ベクトル成分が冬以前のトレンドとは異なる方向へ緩やかに変動し，春先にもとのトレンドに戻るような長周期の変動であった．これらの変動については，対応するような火山活動は観測されておらず，原因としておのおのレドームへの着雪，凍上現象が推測された．

そこで以下では，これら障害要因の究明と対策の詳細を報告する．

２．障害要因の究明

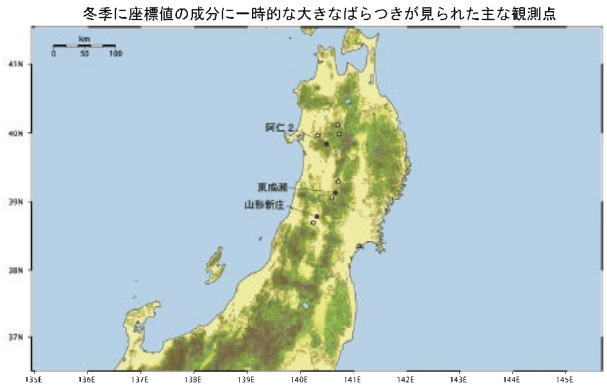
２．１　レドームへの着雪による座標値の擾乱

2004 年から 2005 年にかけての冬季期間，中部地方の高原地帯に位置するM浅間砂塚観測点において，解析座標値が一時的に数 cm ～ 10 数 cm 程度変動してもとに戻るような現象が，繰り返し観測された．近傍の気象観測点における降水量から降雪との因果関係が疑われたものの，その原因は不明のままであった．しかしながら，３月４日前後のケースでは，レドームの頭頂部に積もった雪を取り除いた直後に座標値が急激な沈下前のレベルに戻ったことから，レドームへの着雪が解析座標値の擾乱の原因であった疑いが強くなった（図－１）．

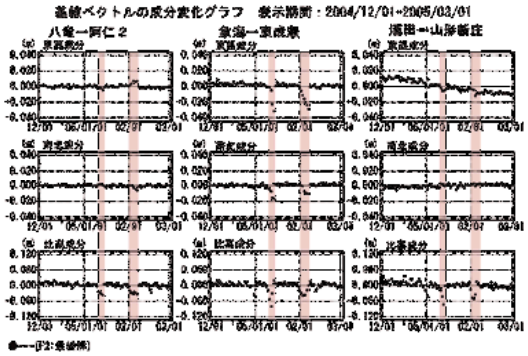


図－１　M浅間砂塚観測点における基線ベクトルの成分変化グラフ及び軽井沢気象観測点における気象データ（写真は株式会社近計システム提供）

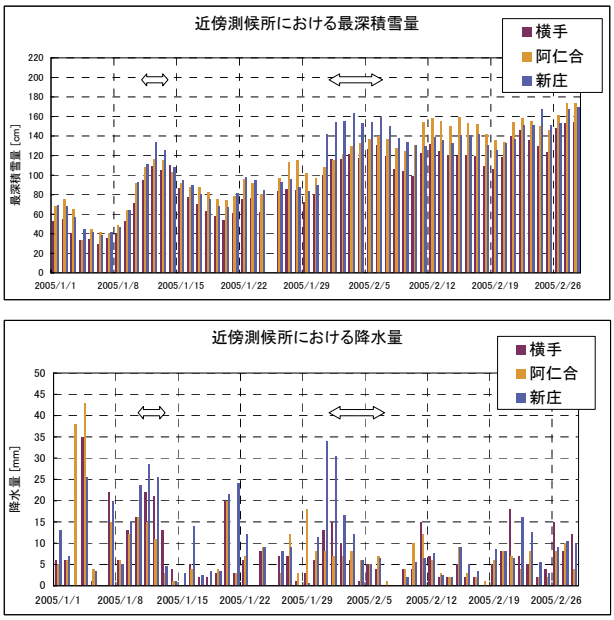
類似の現象は浅間山周辺に設置されたもう１つの機動観測点及び，東北地方の脊梁山脈沿いを中心とした地域の電子基準点でひろく観測されており，近傍の気象観測点における降水量・最深積雪量の推移との良い相関が得られている（図－２，３，４）．また，解析座標値の擾乱が観測された時期に冬型の気圧配置によって山間部に大雪が降ったことが，気象庁秋



図－２　冬季に一時的なばらつきが見られた主な電子基準点



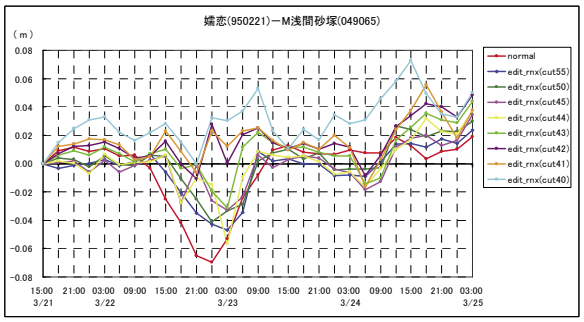
図－３　阿仁２，東成瀬，山形新庄各観測点における基線ベクトルの成分変化グラフ



図－４　横手（東成瀬観測点近傍），阿仁合（阿仁２観測点近傍），新庄（山形新庄観測点近傍）気象観測点における気象データ

田地方気象台（2005）において報告されている．

積雪と解析座標値の擾乱の因果関係については，位相特性の変化という観点から，畑中・藤咲（1999）の研究があるが，小清水ほか（2005）では，一時的にレドーム頭頂部に積もった雪を通過する搬送波が遅延することによって座標値が見かけ上沈降したという仮説を立てて，これを検証した．その方法は，高仰角衛星のデータをエポック毎にRINEXファイルから削除して基線解析を行うという手法であったが，M浅間砂塚観測点で３月23日前後に観測された座標値の一時的な沈下現象を回避することができた（図－５）．

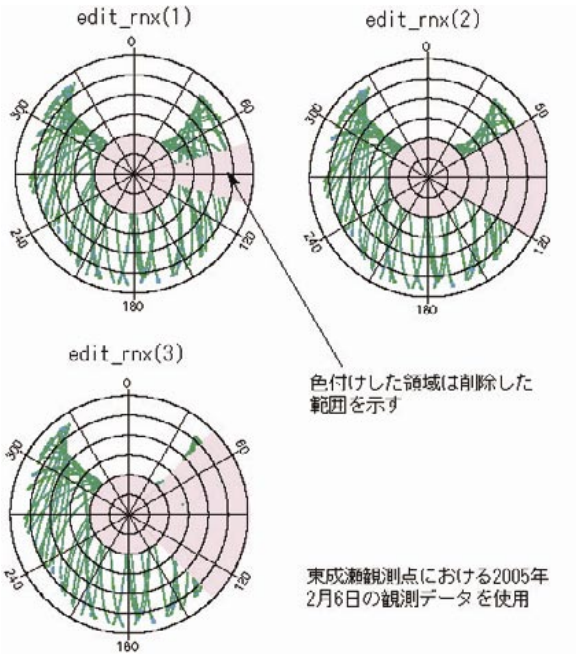


横軸：観測時間帯の中央値
縦軸：最初のセッションで得られた座標値からの相対変位量
normal：未補正の場合
edit_rnx(cut##)：## 度以上の仰角を持つ衛星の信号を削除した場合

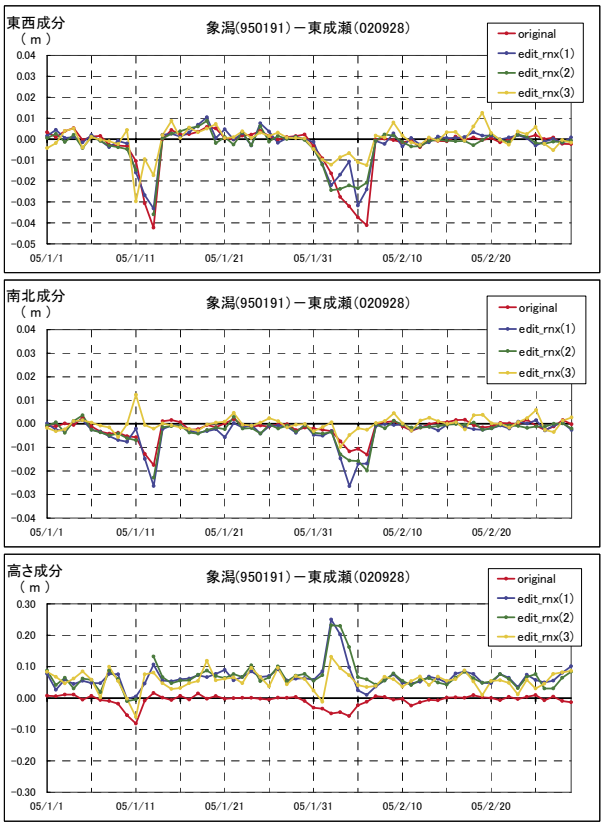
図－５　M浅間砂塚観測点におけるレドームへの着雪による受信障害の検証事例

しかしながら，比高成分はもともと定常時の解のばらつきが大きいため，上記の結果を補強するために，水平方向の擾乱を生じた東成瀬観測点（図－２，３）の事例で更に検証を重ねる．この事例では，東成瀬観測点の解析座標に，一時的な沈下に加えて西方向への大きな擾乱が加わっている．これは，レドーム上では着雪分布が非対称的で東側に偏っていたためと考えれば良さそうである．着雪領域を実測できないため，この仮説を検証するために，図－６に示す３パターンの領域を通過する衛星データをRINEXファイルから削除することによって，水平方向の擾乱が回避されるかを試みた．

図－７は日本海沿岸部の象潟観測点を基準とする東成瀬観測点の基線ベクトル成分の変化である．通常の基線解析結果（以下「通常解」）を赤で表示し，図－６で示した３パターンの領域の衛星データをエポック毎に削除した基線解析結果（以下「カットオフ解」）を青・緑・黄色で示す．これらの時系列グラフは同じ基準値からのずれをプロットしているため，値の違いは基線ベクトル成分値の差である．



図－６　東成瀬観測点における衛星データ削除領域



図－７　東成瀬観測点におけるレドームへの着雪による受信障害の検証事例

カットオフ解の基線ベクトル東西成分の変化を見ると，削除領域を拡大する毎に西方向へのずれが減少していることが分かる．カットオフの対象としていない南北成分及び比高成分では着雪時のずれが減少する傾向は見られず，異常な値を示しているが，検証の焦点である東西成分のみ着目してみると，西方向のずれは回避されており，水平成分への擾乱に対して提示した仮説を裏付けている．

なお，比高成分において，通常解とカットオフ解とでほぼ一定の較差が見られる．前述したとおり，グラフは同じ基準値からのずれをプロットしているため，これらは解析座標値の較差である．このような較差は，測位上は注意を要するが，基線ベクトル成分の変化を見る地殻監視上では障害とはならない．現時点では較差の原因は明らかではないが，高仰角の衛星データを削除したことによる衛星の分布の変化が影響した可能性がある．

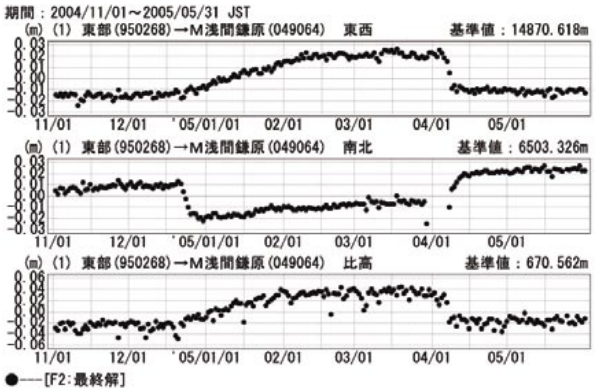
以上のように，レドームへの着雪によって搬送波が遅延し，座標値が一時的に擾乱するという推論は，複数の観測点，複数の成分（水平・比高）で検証されていることから，妥当なものと言える．

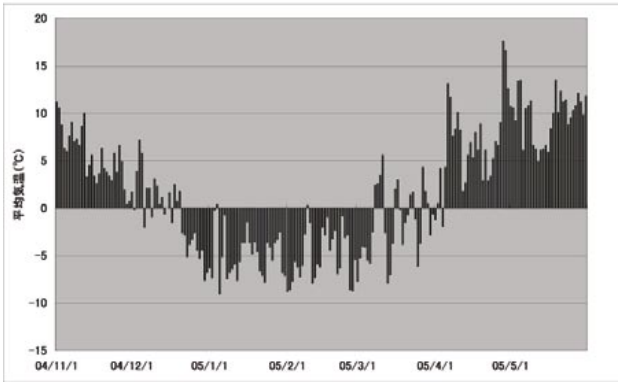
しかしながら，着雪の場合では障害領域が広域になることから解の標準偏差の劣化を招き，座標値の補正までには至らない．したがって，急激な座標値の変動を地殻変動のシグナルと誤認するような事態を防ぐためにも，レドームへの着雪防止の対策が望まれる．

２．２　凍上現象による座標値の擾乱

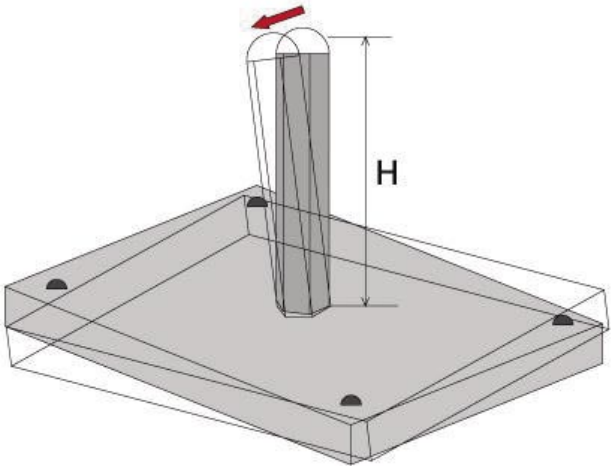
浅間山に設置された２つの機動観測点では，冬季に２．１で述べた一時的な擾乱とは異なる緩慢な座標値の変動が見られる（図－８）．近傍の田代気象観測点（各機動観測点との標高差はおよそ 100 m）における気温の変化と比較すると，日別平均気温が氷点下になる年末に変動がはじまり，平均気温が０℃を上まわる春先に変動がもとに戻る．この傾向から，機動観測点における変動は凍上現象を記録していると考えられる．

２つの機動観測点では，座標値に表れた変動において，凍上現象に伴う影響を定量化するために，基礎の傾斜測定が繰り返し実施された．基礎の傾斜測定は，レベルを使用して観測点基礎の四隅に設置された固定点の高さを測定し，基礎の傾斜角度・傾斜方向を求めるものである．この結果得られた傾斜角にアンテナ高を乗じることで，基礎の移動がないものと仮定することによってアンテナ部分の移動量が推測される（図－９）．





図－８　M浅間鎌原観測点の変動と気象観測点「田代」における気温変化

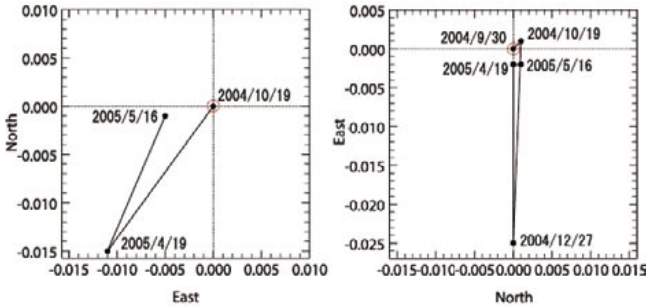


図－９　傾斜測定の概念図

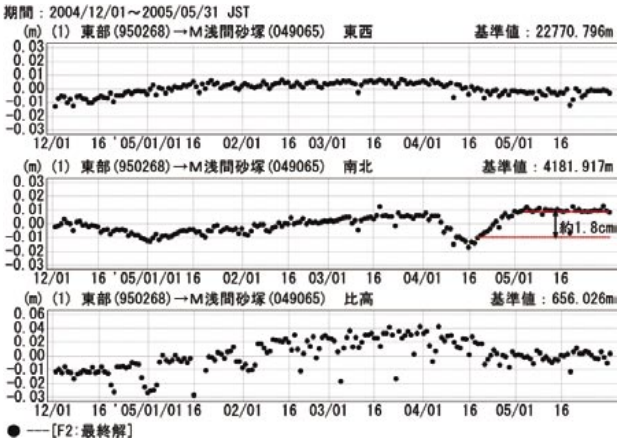
M浅間砂塚観測点において算出されたアンテナ部分の変動履歴（図－10）のうち，2005年４月19日測定時から2005年５月16日測定時にかけての変動量は北北東方向に約1.5cmである．

他方，凍上現象を受けていない東部観測点を基準としたM浅間砂塚観測点の基線ベクトル成分の変化量は，北方向に約1.8cmである（図－11）．

図－10の2005年４月19日と2005年５月16日の傾斜測定結果から算出されたアンテナ部分の変動量と，図－11の基線ベクトル成分の変動量は良く整合



図－10　傾斜測定結果から推定したアンテナ部分の変動履歴（左：M浅間砂塚観測点，右：M浅間鎌原観測点）

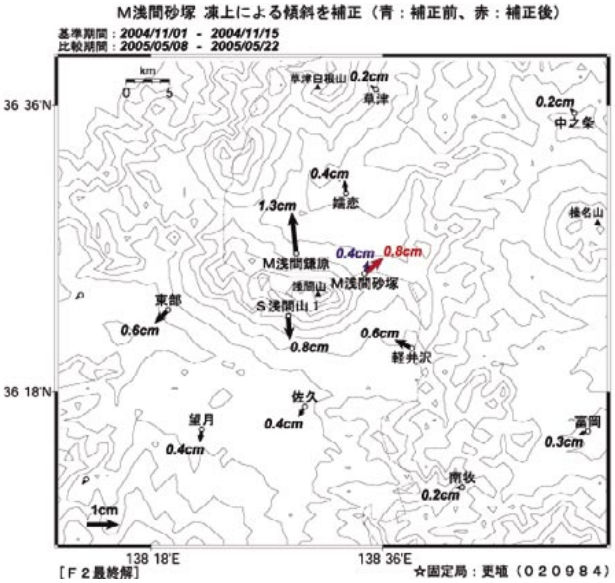


図－11　M浅間砂塚観測点の変動

している．この間顕著な地殻変動が観測されていないことを考慮すると，傾斜測定値がほぼ凍上時の変動を再現していると言える．

アンテナ部分の変動履歴から推定されたM浅間砂塚観測点における凍上履歴は，凍上後の基礎の位置が，必ずしも凍上前の基礎の位置に戻らないことを示している．そこで，このギャップを補正することで，2004年噴火後から2005年春先に至るまでの長期的な火山活動を推測してみた．図－12は浅間山噴火後の2004年10月から2005年５月までの基線ベクトル水平成分の変化を表現している．その中で，M浅間砂塚観測点における観測値（青矢印）を，傾斜測定から得られたギャップ量を用いて補正すると，赤矢印のようになる．この変動ベクトルは，浅間山周辺の他の観測点の変動パターンから推測される山体の膨張傾向と調和的である．傾斜測定結果を用いた補正は水平成分のみに有効であるが，長期的な地殻監視にとってある程度有効な情報が得られると思われる．

以上の傾斜測定量の追跡結果及び，それを踏まえた地殻監視結果から得られた問題点は，凍上による地盤の変動が必ずしも元に戻るとは限らないことである．従って，長期的な地殻変動の水平成分を監視するには，傾斜測定を秋期及び春期に実施して凍上



図－12　浅間山周辺の水平変動図（赤矢印はM浅間砂塚の凍上前後の傾斜量を補正したもの）

前後の残留変位を補正しないと正確な地殻変動量を把握することができない．また，凍上現象は長期にわたって座標値に擾乱をもたらすため，変動期間中の１日ごとのデータを補正することはできない．従って，比較的短期の地殻変動パターンを監視することが困難である．

更に現地調査によって得られた監視上の問題として，凍上前後の基礎周辺の地盤の変形が浮かび上がってきた．M浅間砂塚観測点において，春先に基礎周辺で窪みが見られた（写真－１）．その形状から，凍上時に膨張したピラー側方の土が春先に収縮する際に，基礎周辺の土がピラー側方の隙間に押し込まれた可能性がある．この可能性を更に追求すると，基礎の傾斜が凍上後に現状に復さないことや，基礎そのものが凍上終息時に水平変動するというシナリオが想定される．後者のシナリオが現実に起こることを仮定すると，傾斜測定で凍上時の変動を求めることは困難である．

写真－１　M浅間砂塚観測点の基礎周辺の窪み

傾斜測定の追跡結果や現地調査結果は，凍上現象を未然に防がなければ，長期・短期ともに地殻変動を捉えることができない可能性を提示している．

３．障害要因の除去に向けた対策

以上の問題点を除去するために，観測点のアンテナを観測点の架台から切り離し，対策を施したピラーへと移行することとした．主な改造点は次の３点である．

１）着雪への対策を施したアンテナ架台頭部
２）凍上現象への対策を施した架台基礎
３）傾斜計の設置位置の変更

３．１　着雪への対策を施したアンテナ架台頭部

２．１で述べたようにレドームへの着雪による解析座標値の一時的なばらつきは，機動連続観測点や電子基準点で確認されている．そこで，レドームへの着雪を避けるために，超撥水塗料の使用とレドームの小型化を行った．

まず，レドームに着雪しにくくなるように超撥水塗料の塗布を考慮に入れた．試験観測の１つとして，水沢測地観測所敷地内にて超撥水塗料の効果を検証中である．使用している超撥水塗料はNTTアドバンステクノロジー社製のHIREC450である．中間の成果として，レドームへの着雪の差が現れた．明らかに着雪量が少ないことが分かる（写真－２）．水沢測地観測所では，現在も試験観測を続行中である．

これらの結果から今回の改造時に，超撥水塗料を塗布することを決定した．

左：塗布あり　　右：塗布なし
写真－２　超撥水塗料塗布の有無による着雪状況

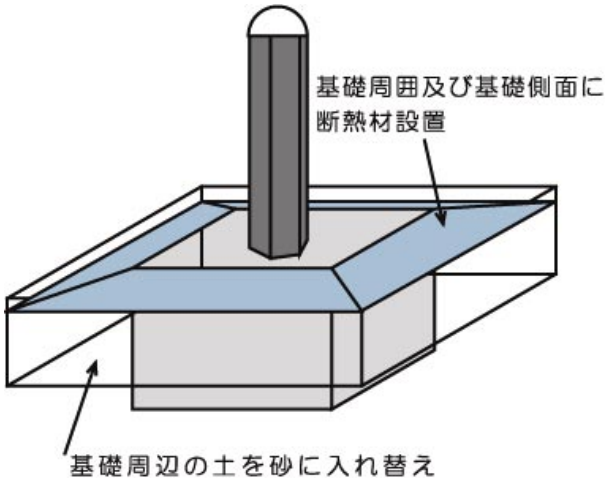
ここで，超撥水塗料についての注意点がある．超撥水塗料を塗布したレドームの上部については，その効果が現れにくいことである．実際，M浅間砂塚観測点では，レドーム頭頂部への着雪が認められた（図－１）．その付近は風が周辺の樹木に遮られて弱いのも着雪が長引く原因の１つである．

そこで，レドームの表面積を小さくすることで，着雪（氷）が軽減されることを期待し，レドームの小型化をはかった．現行で使用されているGPSのレドームは，機動連続観測点及び電子基準点共に，直径が約61cmある．レドームが大きければその着雪面積も多くなる．レドームの小型化のためにアンテナも小型のものを選定した．アンテナは，従来使用していたMicrocenter（48cm）からグランドプレーン無しのTrimble Zephyr without Ground Plane（16.2cm）に変更した（写真－３）．その結果，レドームの直径を約20cmまで小さくすることができた．

左：アンテナ　　右：レドーム
写真－３　アンテナ架台上部

このアンテナは，グランドプレーンが無くマルチパスが従来よりも多いと予想されるため，電波吸収材を使用し，マルチパスの軽減をはかる．

３．２　凍上現象への対策を施した架台基礎



図－13　凍上対策の概要

凍上現象は北海道東部地方の複数の電子基準点で観測されている．そこで，同地域では，凍上現象の軽減を目的として，凍上対策工事が実施されている（図－13）．工事は，基礎周囲の土を不凍上土材（砂）に入れ替える置換工法，地表からの寒気を遮断する断熱工法からなる（田村・菅，2001）．この方法を参考として，架台の基礎工事を設計する．その際，基礎の深さをどれくらいにするのかが，重要となる．

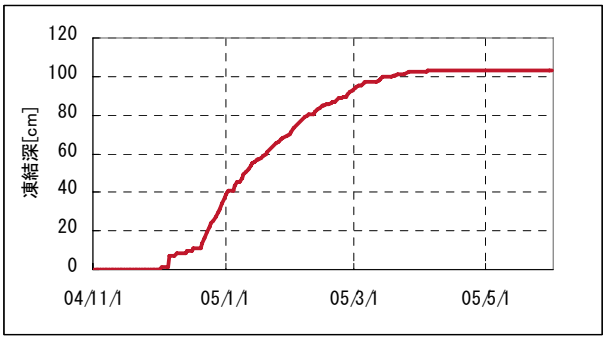
凍結深は一般的に次式(Aldrich-Neumannの簡易式)により求める（河上，1997）．

$$Z = C\sqrt{F}$$

Z: 凍結深
C: 定数（土の含水率や土壌に依存：日本では３～５）
F: 積算寒度（氷点以下の温度と日数の積和）

凍結深は安全側で設定するように，定数（C）を５とし，積算寒度に使用する気温は，田代気象観測点の2004年～2005年冬季の毎日の平均気温を使用した（図－14）．

これらの値から計算した凍結深は最大103cmであり，この結果から基礎の深さを120cmとした．



図－14　凍結深の計算

３．３　傾斜計の設置位置の変更

電子基準点では傾斜計が設置されているが，これまで機動連続観測点においては，設置実績がなかった．２．２で述べたように，浅間の機動観測点にて凍上に伴う傾斜変動が観測されたが，このような変動を現地にいかなくても遠隔地で連続的に観測することが望ましい．

しかし，電子基準点に設置されている傾斜計には，２つの問題点がある．１つ目は，傾斜計が温度変化に敏感であるということである．それゆえ，ステップ的な傾斜の有無については測定可能であるが，長期の緩やかな傾斜に関しては，温度変化に伴うドリフトのため，傾斜量の見積りが難しい．またドリフトからは規則的な周期成分が抽出できないため，温度による補正も難しい．２つ目は傾斜計がピラーの収納箱に設置されていることである．ピラーは，太陽により暖められ，変形することが分かっている（高原ほか，1999）．ピラーの変形については，ピラーの構造を二重管にすることでかなり押さえられるが，

ピラーの変形を完全に防ぐものではない．

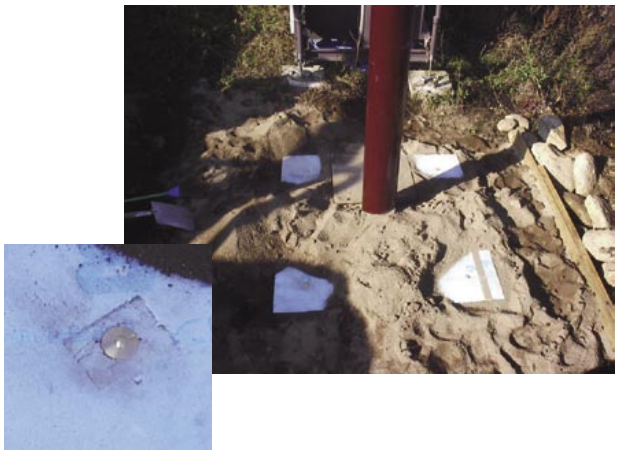
これらの問題点を鑑み，今回の傾斜計は基礎部分の傾斜を捉えるために，ピラーに設置するのではなく，基礎部分に傾斜計を設置することとした（写真－４）．コンクリート基礎部分に傾斜計を収納するスペースを作り，結露防止と熱による傾斜計への影響ができるだけ小さくなるようにその周囲を断熱材で覆った．このような傾斜計の設置の試みは，電子基準点全体でも初めてである．

写真－４　傾斜計

しかしながら，このような工夫だけで，傾斜測定と同等の信頼性のあるデータが得られるかは，検証が必要である．そこで，架台基礎の４隅には，傾斜測定を行うための鋲を設置した（写真－５）．

これまで述べてきた３つの対策をもとにアンテナ架台を設計した（図－15）．

発電・通信については現行のまま機動連続観測点のものを使用し，アンテナ部分を新規架台に移設し，収納箱の受信機へと接続した．



写真－５　鋲

これらの対策により，凍上現象及びレドームへの着雪が軽減されれば，年間を通して GEONET における迅速解・速報解を用いた浅間山の地殻変動監視が可能になると期待される．

観測点属性情報

観測点番号：059069（写真－６）
名称：M浅間鎌原　M-ASAMAKANBARA-A
移行年月日：2005 年 10 月 28 日
受信機：Trimble 5700 S/N 0220292771
アンテナ：Trimble Zephyr without Ground Plane S/N 12605889

写真－６　M浅間鎌原Ａ

観測点番号：059070（写真－７）
名称：M浅間砂塚　M-ASAMASUNATSU-A
移行年月日：2005 年 10 月 27 日
受信機：Trimble 5700 S/N 0220311453
アンテナ：Trimble Zephyr without Ground Plane S/N 12578117

写真－７　M浅間砂塚Ａ

４．まとめ

2004年９月噴火以後に浅間山山腹に設置された２つの機動連続観測点における監視活動を通じて，その解析結果に，火山活動に伴う地殻変動に加えて，凍上現象に伴う長周期の変動と，レドームへの着雪に伴う短周期の変動が記されていることがわかった．傾斜測定や基線再解析を通じて，これらの変動量を定量的に把握する試みは部分的には成功し，冬季を挟んだ時期の長期的な浅間山の変動傾向を掌握することができた．

しかし，火山活動の監視では，リアルタイム性を求められるため，誤差要因を除去するような施工方法を考慮し，２つの機動観測点に改良作業を実施した．主要な改良点は，①着雪対策を施したアンテナ架台，②凍上対策を施した架台基礎，③アンテナ架台への傾斜計の埋め込み，の３点である．

今後の観測を通じて，実施された改良作業の検証を行う．

謝　辞

超撥水塗料の検証については，HIRECの塗布・状況確認等を株式会社近計システムにご協力頂きました．気象データについては，気象庁のデータを使用いたしました．また，本論のとりまとめにあたっては，測地観測センター畑中雄樹調査官より多大なご指摘を頂きました．ここに記して感謝いたします．

参 考 文 献

気象庁秋田地方気象台（2005）：月別の天候，http://www.sendai-jma.go.jp/kansoku-toukei/tukinomatome.html（accessed 17 Oct 2005）．

小清水寛，雨貝知美，石倉信広，根本盛行，納田俊弘，山口和典，植田勲（2005）：GPS連続観測データを用いた地殻監視支援装置の開発，国土地理院時報，108，39-48.

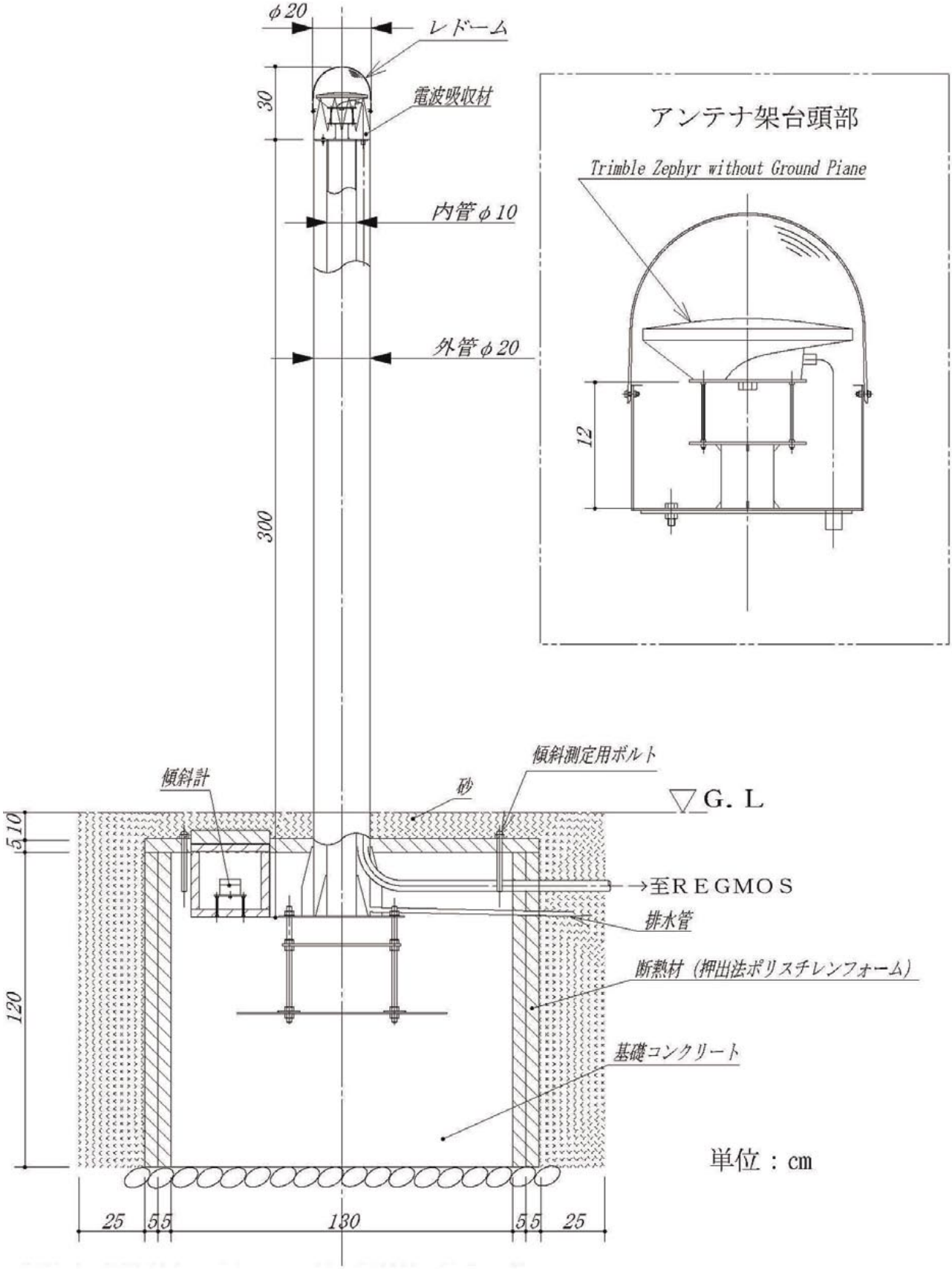
高原正勝，菅富美男，藤咲淳一，田村孝，河和宏，都筑三千夫，堀田暁子，阿部馨（1999）：凍上，日照による電子基準点の変形に関する調査研究，国土地理院調査研究年報，103-106.

田村孝，菅富美男（2001）：北海道道東地方における電子基準点の凍上対策，国土地理院調査研究年報，95-96.

畑中雄樹，藤咲淳一（1999）：GEONETにおける積雪の影響について，日本測地学会第92回講演会要旨，111-112.

機動観測課（2005）：浅間山の火山活動を監視するGPS火山変動リモート観測装置の設置，国土地理院時報，107，5-8.

河上房義（1997）：土質力学　第６版，森北出版株式会社，247-258.



図－15　アンテナ架台図面