

明星電気製 RS-11G および iMS-100 ゾンデの

GRUAN データプロダクト(GDP)の作成

星野 俊介*・木津 暢彦**・古林 絵里子*

Processing of GRUAN Data Products (GDP) for the Meisei RS-11G / iMS-100 radiosondes

Shunsuke HOSHINO, Nobuhiko KIZU and Eriko KOBAYASHI

要旨

高層気象台は Tateno の名称で 2009 年に GRUAN(GCOS 基準高層観測網)サイトとして登録され、RS-11G(明星電気製)及び RS92-SGP(ヴァイサラ社製)を使用してラジオゾンデ観測を行い、その高層気象観測データおよびメタデータを GRUAN リードセンター(LC)に送信している。GRUAN では、(1)データのトレーサビリティが確保されている、(2)不確かさの情報が付加されている、(3)データの特性の理解や再処理のために必要なメタデータが付加されている、(4)処理方法が査読付き論文などで公開され評価を受けている、といった基準を満たす高精度のデータである GRUAN データプロダクト(GDP)を作成・公開しているが、この GDP 作成処理についてはゾンデの種類ごとに担当するデータ処理センター(PC)が決められており、RS92-SGP を用いた観測については LC が、RS-11G を用いた観測については Tateno が担当することになっている。本稿では、この RS-11G の観測データに基づく GDP 作成の流れの概要を解説するとともに、今後の高層気象台としての取り組みについて紹介する。

1. はじめに

ゾンデによる高層気象観測データはこれまで主に短期予報のための総観気象場の把握を中心に利用されてきた。ゾンデの性能向上やデータ処理技術の向上はゾンデデータの気候変動の監視目的での利用を可能とする一方、機器やデータ処理方法の変更による観測データの系統誤差が気候変動の検出を困難にするという問題も明らかになってきた。これを受け、2006 年、気候監視のための高品質かつ高層気象観測の基準となる高層気象観測ネットワークの構築を目的とした全球気候監視システム(Global Climate Observation System; GCOS)の

作業部会が設置され、2007 年には名称を GRUAN (GCOS Reference Upper Air Network; GCOS 基準高層観測網)とすることが決定した(Seidel *et al.* : 2009, 藤原 : 2011)。2008 年にはドイツ気象局のリンデンベルグ観測所にリードセンター(Lead Centre; 以下 LC)が設置され、GRUAN の統括業務やデータのアーカイブを行っている。2016 年 3 月現在では 20 地点が GRUAN サイト(観測地点)として登録されており、さらに 4 地点の登録を予定している(図 1)。将来的には、世界で 30~40 地点でのネットワークを目指している。

GRUAN でいう「高品質」とは単なるセンサの高精度化だけを意味するものではない。重要なのは(1)データにトレーサビリティがあり、(2)各測定値に精度や系統誤差の情報(GRUAN では

*高層気象台 観測第二課

**気象庁 観測部 観測課

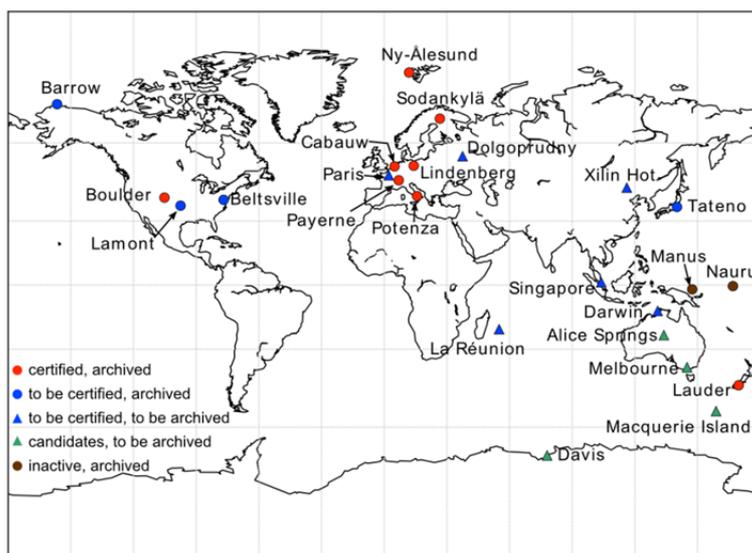


図1 2016年3月時点でのGRUAN参加サイト

赤:認証済みサイト(8地点), 青:認証準備中(丸:データがLCにアーカイブされているサイト; Tatenoを含む4地点, 三角:LCにアーカイブされていないサイト; 6地点), 緑:登録準備中(4地点), 茶色:休止中のサイト(2地点, いずれも運用していた期間についてはデータをLCにアーカイブ済).

uncertainty, すなわち「測定値の不確かさ」という用語を用いる. 以下, 単に「不確かさ」とする.) が付加されていること, さらに(3)測定データの特性の理解や再処理のために必要なメタデータが付加されていること, である. トレーサビリティとは不確かさが正しく評価された測定を連鎖的に介在させることにより国際標準と結びつけることができることをいう. 不確かさについては Immler *et al.* (2010)に詳しくまとめられている. また, このGDPのデータ処理プロセスは(従来のゾンデメーカー提供の観測ソフトウェアによるブラックボックスであった処理プロセスとは異なり)査読付き論文などで透明化され評価を受けることが求められている. この「実際のプロダクト作成」「処理プロセスの論文化」および「GRUANのテクニカルドキュメントとしての文書化」を経て認証されたデータプロダクトをGRUANデータプロダクト(以下GDP)と呼ぶ. GDPは気候変動の監視のための基礎データとして利用されるとともに, 衛星データによる全球観測や再解析データの検証用(ツールズデータ)としての利用も想定されている.

高層気象台は2009年9月にTatenoの名称でGRUANサイトとして登録され(能登ほか:2012), 1日2回の定時のラジオゾンデ観測データ(観測ソフトウェアによる物理量への変換を行う前のデー

タ. 以下「1次データ」と呼ぶ)およびそのメタデータをLCへ送信している. 本稿執筆時点ではGRUANサイトとしての認証を受けるための準備(各種要件の再確認)やGNSS(Global Navigation Satellite System)データの送信に向けての準備, さらに高層気象台が2013年7月以来使用しているRS-11Gの1次データを用いたGDPの作成プログラムの開発および認証を受けるための論文・テクニカルドキュメントの作成作業が進められている.

1次データファイルおよびそのメタデータファイルはLCでアーカイブされるとともに, 観測機器の種別ごとに担当するデータ処理センター(Processing Centre; PC. ゾンデに関しては通常そのゾンデを主に使用する, もしくはGRUANサイトとして最初に使用した公的機関もしくは研究所などが担当する)により観測に使用した(メーカー

表1 GDPの開発環境

モジュール	バージョン	説明
Python	3.4.2+	
Numpy	1.9.1+	数値演算
Scipy	0.15.1+	科学計算
bitstring	3.1.3+	バイナリデータ操作
pandas	0.1.7+	データ操作

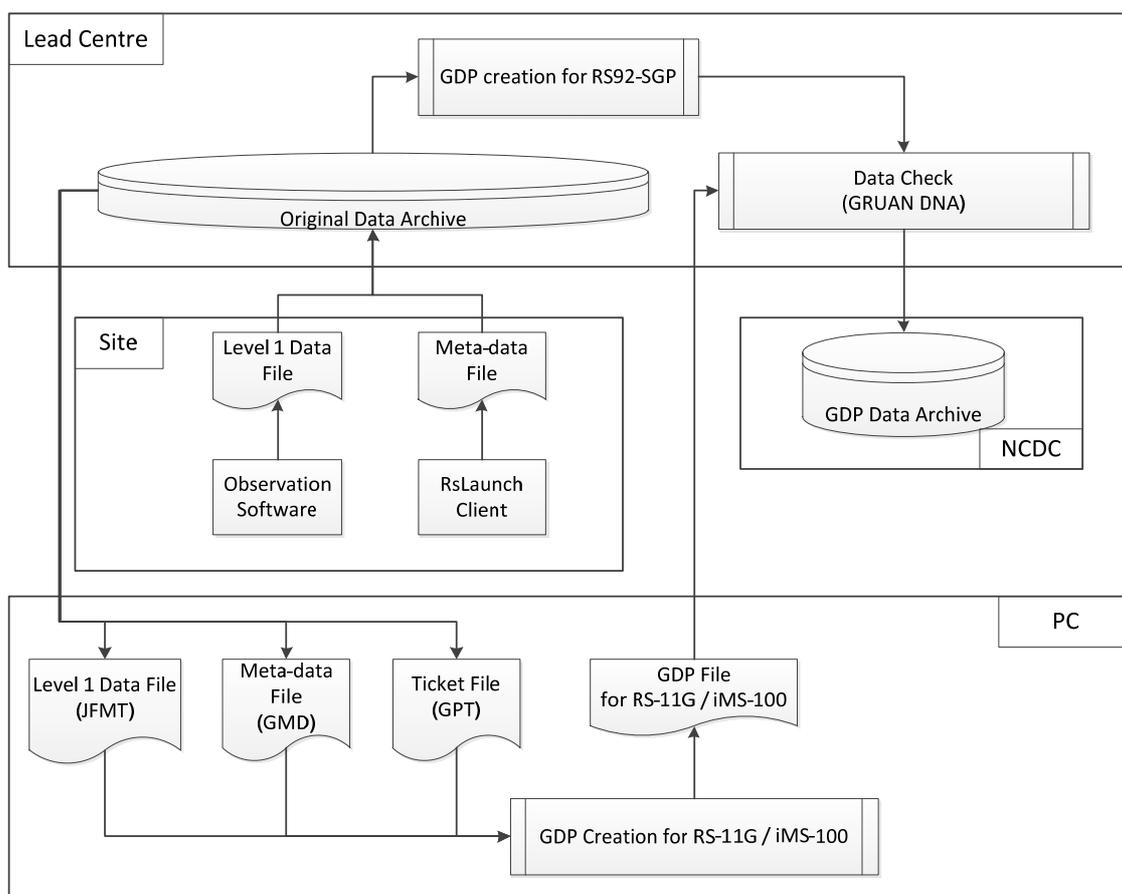


図 2 データ送信から GDP 公開までのフロー

が提供する)プログラムとは独立して各物理量およびその不確かさを算出した GDP が作成される。作成された GDP は LC で品質管理を行った上でアメリカ海洋大気庁(NOAA)の National Climate Data Center (NCDC)において公開される。この GDP は、基準ゾンデに準ずる観測値として GRUAN では位置づけられている。RS92-SGP については LC が担当 PC となっており、既に評価を受けた手法 (Dirksen *et al.*: 2014)にしたがって、GDP の作成および品質管理処理を行っている (RS92-SGP は本稿執筆時点で唯一 GDP として認証済み)。RS-11G (および明星電気製次世代ゾンデ iMS-100)については Tateno が担当 PC となっており、高層気象台では RS-11G の 1 次データに基づく GDP 作成プログラムの開発を行っている (その他の PC としては例えばメテオラボ社のラジオゾンデ SRS-C34 の 1 次データに基づく GDP 開発をスイス気象局のパイエルヌ高層気象台 - GRUAN サイト名 Payerne - が担当している)。開発にはスクリプト言語 Python を用いた。Python を用いて開発を行った理由はバ

イナリファイル・XML ファイル・NetCDF ファイルという多種のフォーマットのファイルの扱いが容易であること、科学計算用のライブラリが充実していること、マルチプラットフォームであること等が挙げられる。環境および使用モジュールの概要を表 1 に示す。

本稿では、RS-11G および iMS-100 による 1 次データからの GDP 作成の手順の概要について述べる。まず 1 次データおよびメタデータの送信から GDP の公開までの流れの概要を 2 節で示し、その後データプロダクト作成の各ステップの処理について 3 節から 12 節まで順を追って示す。実際の計算例を 13 節に示し、今後の流れについては 14 節で述べる。なお本稿の内容は執筆時点の 2016 年 2 月時点の GDP 作成アルゴリズムをもとにしており、将来的にアルゴリズムが見直される可能性がある点は留意されたい。

2. GRUAN データプロダクト公開までの流れ

1 次データファイルおよびその観測のメタデー

タファイルの送信から NCDC における GDP の公開までの流れを図 2 に示す。この図における中段の「Site」ブロックが観測サイトとしての、下段の「PC」ブロックが PC としての処理内容を示す。

2.1 1次データおよびメタデータの送信

1次データファイルおよびメタデータの送信は、LC が作成したデータ送信用ソフトウェア RsLaunch Client を用いて行われる。ここでいうメタデータとは、単にサイト名や観測の日時(UTC)、ゾンデの種類といった基本的な情報のみならず、観測者名(高層気象台では実名ではなくイニシャル文字列と数字の組み合わせでコード化したものを使用)、観測に使用したソフトウェアとそのバージョン、飛揚形態とそれを構成する器材の種類(重量や大きさなどは通常使用するものについては既に LC に登録済み)や補足的な情報(気球の場合は充填気体の種類と充填量もしくは浮力錘重量、巻下器ではなく紐を利用する場合はその長さ等)、飛揚前点検の結果(ゾンデの測定値および基準器の値)、地上値等が含まれる。これらのメタデータは RsLaunch Client により GMD (GRUAN Meta Data) ファイルと呼ばれる XML 形式のファイルにまとめられる。RsLaunch Client は 1次データファイルと GMD ファイルをインターネット経由で LC へ FTP 送信する。

2.2 GDP ファイルの作成

1節で述べたようにゾンデの種別ごとに担当する PC にて GDP が作成された後、GDP がリードセンターに集積され、品質管理を経て NCDC で公開される。RS-11G(もしくは iMS-100)に関しては、高層気象台で処理を行うことになるが、そのためにまず LC においてアーカイブされた 1次データファイルとメタデータファイルを取得する必要がある。この際、LC における GRUAN データの管理情報を記述した GRUAN Product Ticket (GPT) ファイルも併せて取得する。GPT ファイルには 1次データファイルと GMD ファイルとの対応のほか、GDP ファイルの作成時に必要な管理番号(プロダクト ID および飛揚 ID)や出力すべき GDP ファイル名等が XML 形式で記述されている。

これらのファイルから次節以降の手順にしたがって GDP ファイルが作成される。GDP 作成におけるステップを図 3 に示す。なお、本稿執筆時点では GDP ファイルは開発途上版(ベータ版)という扱いであり、NCDC での公開に向け LC と調整中である。

3. メタデータの読み込み

GPT ファイルから GMD ファイル名を取得し、該当する GMD ファイルから観測時刻、観測ソフトウェア情報、ゾンデ番号、器材リスト、飛揚前

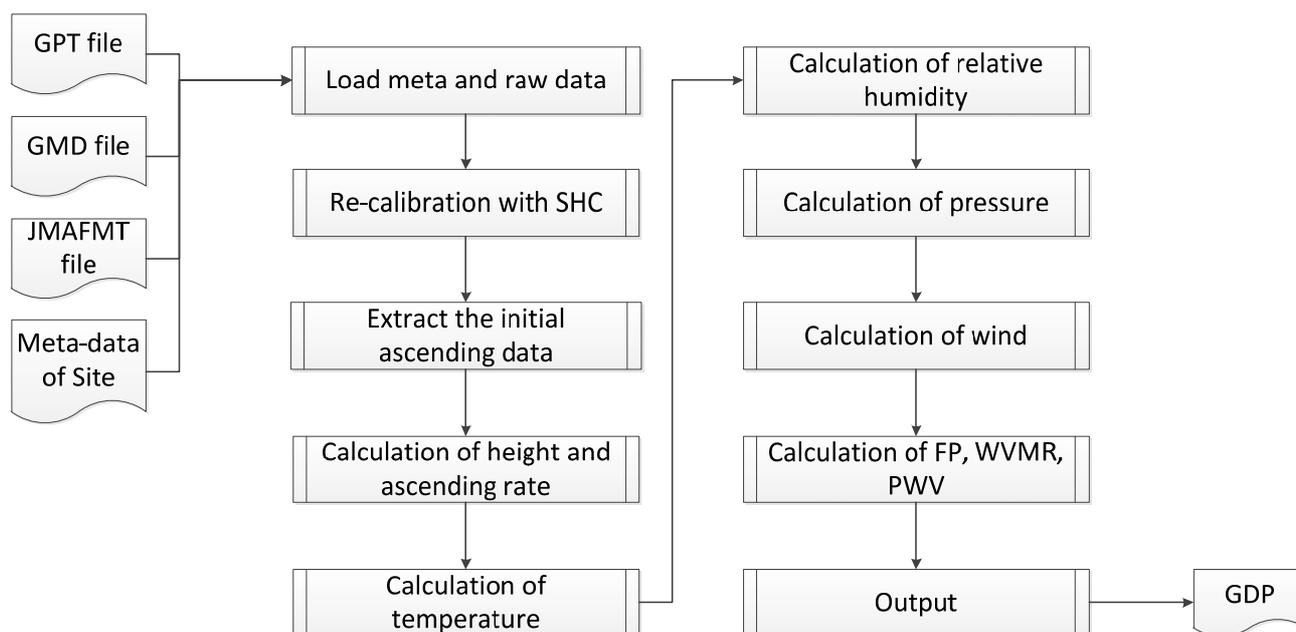


図 3 GDP 作成処理の全体のフロー

点検結果，地上値，サイト名を読み込む．器材リスト情報からは気球の浮力とつり紐(もしくは巻下器)の長さを取得する．この他に，サイトの緯度・経度・標高データを RsLaunchClient で使用するメタデータファイルから読み込む．

4. 1 次データファイルの読み込みと物理量への変換

4.1 1 次データファイルの構成と読み込み

RS-11G および iMS-100 の GDP 作成に用いる 1 次データファイルは JMA フォーマット(JFMT)と呼ばれる形式のファイルである．このファイルは 30Byte×4 フレームで 1 秒ごとの値を構成し，これを繰り返すバイナリ形式になっている．フレーム 1 にはゾンデのシリアル番号や気温・湿度の算出に必要な係数などの情報(係数については連続する 16 秒のデータで 1 組となるよう規定されている)が，フレーム 2 にはゾンデから送信された気温・湿度の送信用周波数値やレファレンス周波数などが，フレーム 3 には GPS の時刻・緯度・経度・高度および風向・風速データが格納されており，フレーム 4 は外部センサ(オゾンゾンデ観測における ECC センサなど)のデータを格納できるようになっている．

これらの値を読み込み，GPS 時刻・緯度・経度・GPS 高度・風向・風速についてはこれを「生データ」として用いる．放球時刻に関しては，本稿執筆時点の JFMT ファイルは放球時以降のデータに限定されているため先頭のデータの時刻を放球時刻として扱う(ただし，この仕様は将来的に変更される可能性があり，その場合は放球時刻の判定処理が必要となる)．気温・湿度・湿度センサ温度(iMS-100 のみ)については次節以降示す手法により物理量へと変換されたものを「生データ」として扱う．

4.2 気温の算出

気温 $T[^\circ\text{C}]$ は 16 ビット値(気象庁仕様)で送信される送信周波数値 $S_t[\text{Hz}]$ から実際の気温センサ周波数値 $F_t[\text{Hz}]$ に復号され，これとレファレンス周波数 $F_r[\text{Hz}]$ (送信レファレンス周波数値 $S_r[\text{Hz}]$ から復号)から求められるレファレンス補正済み周波数 R_t を電気抵抗値 $T_r[\text{k}\Omega]$ に変換した後，3 次スプライン補間により算出される．

$$F_t = S_t \times 8 \times 0.01 \quad (1)$$

$$F_r = S_r \times 8 \times 0.01 \quad (2)$$

$$R_t = 4 F_t / F_r \quad (3)$$

$$T_r = A_0 + A_1 \left(\frac{1}{R_t - 1} \right) + A_2 \left(\frac{1}{R_t - 1} \right)^2 + A_3 \left(\frac{1}{R_t - 1} \right)^3 \quad (4)$$

$$T = \text{Spline}(\ln T_r) \quad (5)$$

ここで， $A_0 \sim A_3$ は抵抗値算出用係数であり，スプライン補間は工場におけるセンサ校正時の最大 15 点の抵抗値 ($C_{r1} \sim C_{r15}$) の対数値と温度値 ($C_{T1} \sim C_{T15}$) の組の値を用いて行う．

4.3 相対湿度の算出

相対湿度 $U[\%RH]$ はゾンデからの送信周波数値 $S_u[\text{Hz}]$ から復号された湿度センサ周波数値 $F_u[\text{Hz}]$ を用いてレファレンス補正済み周波数 R_u を求め， R_u の 3 次式を用いて算出される．

$$F_u = S_u \times 8 \times 0.01 \quad (6)$$

$$R_u = 4 F_u / F_r \quad (7)$$

$$U = B_0 + B_1 R_u + B_2 R_u^2 + B_3 R_u^3 \quad (8)$$

ここで， $B_0 \sim B_3$ は湿度算出用係数である．

4.4 湿度センサ温度の算出

湿度センサの温度は，日射の影響および自身の熱容量のため，必ずしも気温と一致するとは限らない．そのため，湿度センサによって測定された相対湿度は，厳密には湿度センサの温度に対応した飽和水蒸気圧に対する値となる．8 節で述べる湿度の補正には，このほかにも時定数など湿度センサの温度に依存するパラメータがある．そのため，湿度センサの温度を正しく見積もることによる精度の向上を期待して iMS-100 には湿度センサ部にも別途温度センサが搭載されている．この湿度センサ温度 $T_s[^\circ\text{C}]$ は 4.2 節で示した気温センサの送信用周波数から電気抵抗値への変換と同様に式 1・3・4 を用いて湿度センサ温度の送信周波数 $S_{Ts}[\text{Hz}]$ から電気抵抗値 $R[\text{k}\Omega]$ へ変換された後，以下の式を用いて求める．

$$T_s = \frac{1}{C_0 (\ln R)^3 + C_1 \ln R + C_2} - 273.15 \quad (9)$$

ここで $C_0 \sim C_2$ は湿度センサ温度算出用の係数である．

なお，RS-11G にはこのセンサは搭載されていないため，湿度センサ温度については別途推定する(詳細は 8.1 節)．

5. 改良型飛揚前点検結果を用いた湿度センサの再校正

4.3 節で示した湿度算出用の係数 $B_0 \sim B_3$ は、工場において湿度センサを気温 25℃において 15, 30, 50, 70, 90, 95%RH の各湿度環境においた場合に測定された R_u に加えて、15%RH と 30%RH, 90%RH と 95%RH の校正点からそれぞれ線形外挿により求められた 0%RH および 100%RH における R_u の組を用いて校正曲線を 3 次式に近似して求めたものである。これに対して、高層気象台では RS-11G の 0%RH および 100%RH 環境下における改良型飛揚前点検(以下、点検装置 Standard Humidity Chamber の頭文字をとって「SHC」と呼ぶ)を行っており(古林ほか：2014)、この結果を用いることでより正確な校正曲線を推定できると期待される。

あるゾンデに対して湿度センサの再校正を行った結果を図 4 に示す。横軸は R_u 、縦軸は湿度であり、黒点はメーカー工場での校正時の 15~95%RH 湿度環境における校正点(R_u は測定値)、緑三角はメーカーによる校正曲線決定時の 0%RH および 100%RH の点(R_u は外挿値)、赤四角および×は SHC の基準器の値とゾンデの出力値 (R_u はメーカーによる校正曲線からの逆算)であり、黒線はメーカーによる校正曲線(黒点+緑三角を 3 次式近似)、赤線は SHC を反映させた再校正の校正曲線(黒点+赤四角を 3 次式近似)である。0%RH 付近を拡大した図を右上に示す。この例においては、SHC 時に 0%RH 環境下における基準器の湿度観測値が 0.42%RH であったのに対してゾンデの湿度観測値が -2.3%RH と大きな負偏差を示していた。特に 0%RH 付近において校正曲線のオリジナルからのずれが大きくなっているが、再校正結果を適用して算出した湿度値は 0.27%RH となり、誤差が大きく改善された。一方、100%RH 環境下での湿度についても、基準器の観測値 97.7%RH に対してゾンデの観測値 94.5%RH だったものが、再校正結果の適用により 95.7%RH となり、改善が見られた。以上の結果から、SHC の結果を反映させることにより低湿・高湿環境下でより正確な湿度が求められると期待される。ここで新たに得られた係数 $B'_0 \sim B'_3$ を用いて、式を用いて湿度初期値の再計算を行う。

なお、工場における湿度校正が一定の気温条件下(25℃)で行われているのに対して、SHC は点検

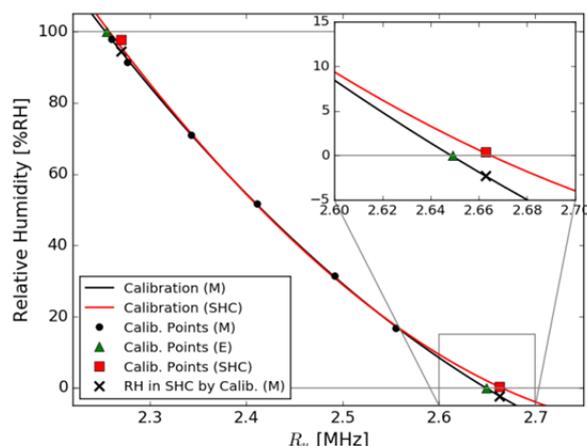


図 4 湿度センサの工場における校正と SHC の結果を反映した再校正の比較

横軸は湿度センサの周波数値、縦軸は相対湿度。黒点はメーカー工場での校正時の 15~95%RH 湿度環境における校正点(実測値)、緑三角はメーカーによる校正曲線決定時の 0%RH および 100%RH の点(黒点からの外挿値)、赤四角は SHC の基準器の値、×は SHC のゾンデの出力値であり、黒線はメーカーによる校正曲線(黒点+緑三角を 3 次式近似)、赤線は SHC を反映させた再校正の校正曲線(黒点+赤四角を 3 次式近似)。右上は 0%RH 付近の拡大図。

時の室温(2015 年 1 年間に飛揚したゾンデの場合、平均 25.54℃、標準偏差 0.94℃)で行われている。後述(8.4 節)の通り RS-11G および iMS-100 で用いられる湿度センサには温度依存性があるが、式 25 を用いて温度依存性の補正量を算出したところ、25℃の場合との差は湿度 0.5%の場合で最大 0.002%、湿度 98%の場合で最大 0.088%と小さく、また、いずれも工場での校正に使用している湿度センサの不確かさの範囲(露点温度で 0.2K 以内。湿度 0.5%, 98%ではそれぞれ 0.01%, 1.17%に相当)内に入っており、点検時の気温の違いは無視しても問題ないと考えられる。なお、この再校正のためには、工場における校正時のセンサごとの正確な湿度と湿度周波数値のリストが必要である。このリストについては明星電気から提供を受ける予定である。

6. 高度と上昇速度の算出

JFMT ファイル(本稿執筆時点のバージョン)は放球時刻からのデータのみを収録しているため、

先頭のデータの時刻を観測の開始(放球)時刻として扱う。一方、GPS 高度の生データにおける最高点を探索し、その時刻を観測の終了時刻とする。開始時刻から終了時刻までのデータを上昇中の値として実際の算出に用いる。電波の受信不良などで欠損した1秒値については内挿して補間し、各物理量の平滑化や補正処理の「初期値」とする。なお、通常の観測データ処理においては連続する欠損時間の長さに応じて内挿する、もしくは内挿せずに欠測として扱うと処理を変えているが、GDP においては欠損時間の長さを考慮せず内挿する。

放球時刻の GPS 高度[m]の初期値 $alt_{0,0}$ は必ずしも実際の放球高度 alt_{launch} とは一致しない。そのため、この差分 alt_{offset}

$$alt_{offset} = alt_{0,0} - alt_{launch} \quad (10)$$

により GPS 高度の初期値を補正する。

$$alt_{1,i} = alt_{0,i} - alt_{offset} \quad (11)$$

ここで第二の添え字 i は放球時刻を 0 とする時系列順のデータ番号を示す(RS-11G および iMS-100 では1秒ごとのデータが収録されるため、これは放球時刻からの経過時間[秒]と同義である)。 $alt_{1,i}$ の前後 30 秒の移動平均を行い、その値を確定値 alt_{fin} とする。GPS 高度の不確かさ $u(alt)$ はこの移動平均に伴う統計的不確かさ(Appendix A 参照) $u_{ma}(alt)$ と GPS の精度の指標となる PDOP 値から求めた GPS 測位由来の不確かさ $u_{GPS}(alt)$ の平方和の平方根から求められる。

ジオポテンシャル高度の確定値 $geopot_{fin}$ は alt_{fin} およびゾンデの緯度初期値 lat_0 から以下の式にしたがって算出する。

$$geopot_0 = \frac{g_\phi R \times alt_{fin}}{g_0 R + alt_{fin}} \quad (12)$$

ここで R は地球の半径[km]、 g_0 は標準重力加速度

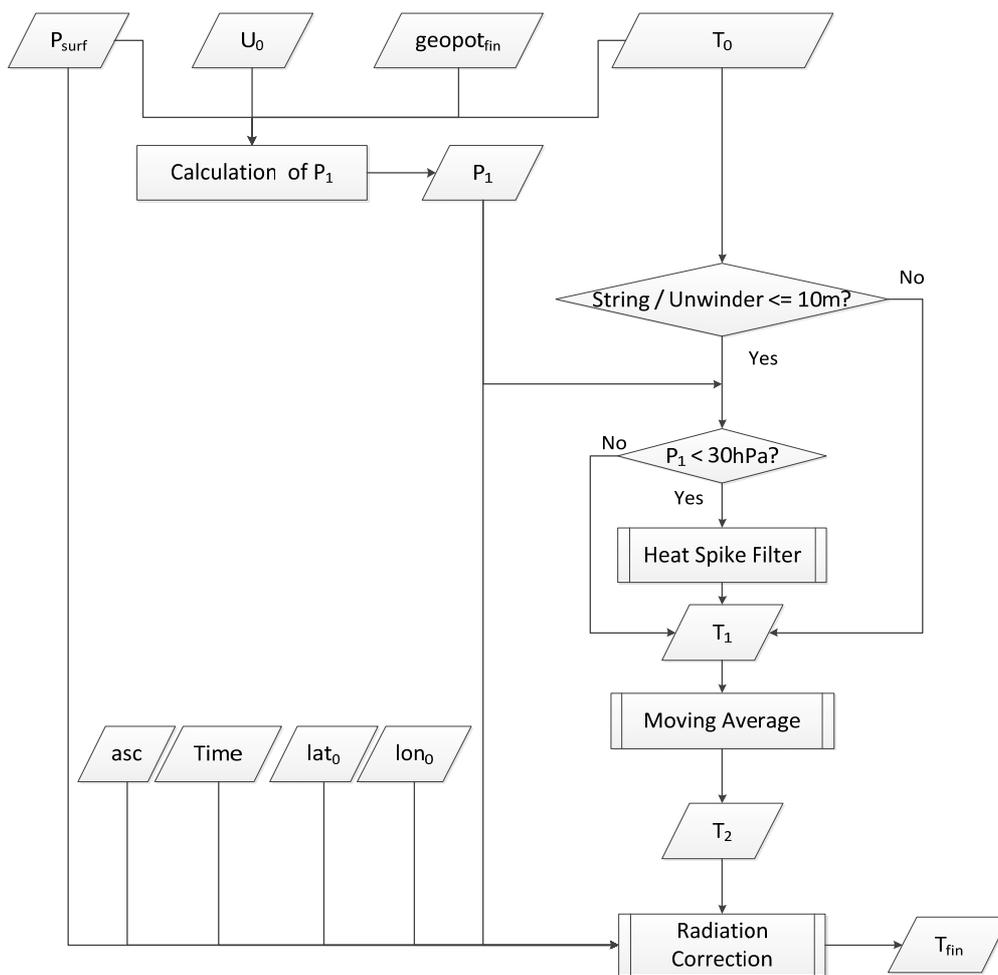


図 5 気温の算出フロー

$[m\ s^{-2}]$, g_{ϕ} はゾンデの緯度における重力加速度 $[m\ s^{-2}]$ であり, 次式で求められる.

$$g_{\phi} = 9.80616 \times (1 - 0.0026373 \cos(2lat_0) + 0.0000059 (\cos(2lat_0))^2) \quad (13)$$

ジオポテンシャル高度は GPS 高度からの派生パラメータとなるため不確かさは算出しない.

上昇速度 $asc\ [m\ s^{-1}]$ は前 1 秒値との $geopot_{fin}$ の差分として求める(放球時刻については $asc=0$ とする).

7. 気温の算出

気温の算出は(1) 気球の影響によるスパイクノイズの除去, (2)初期値の移動平均, (3)日射補正のステップからなる(図 5).

7.1 気圧暫定値の算出

スパイクノイズの除去および気温の日射補正值の算出のためには気圧値が必要となるが, 気圧計が搭載されていない RS-11G および iMS-100 では気温初期値 T_0 , 湿度初期値 U_0 , ジオポテンシャル

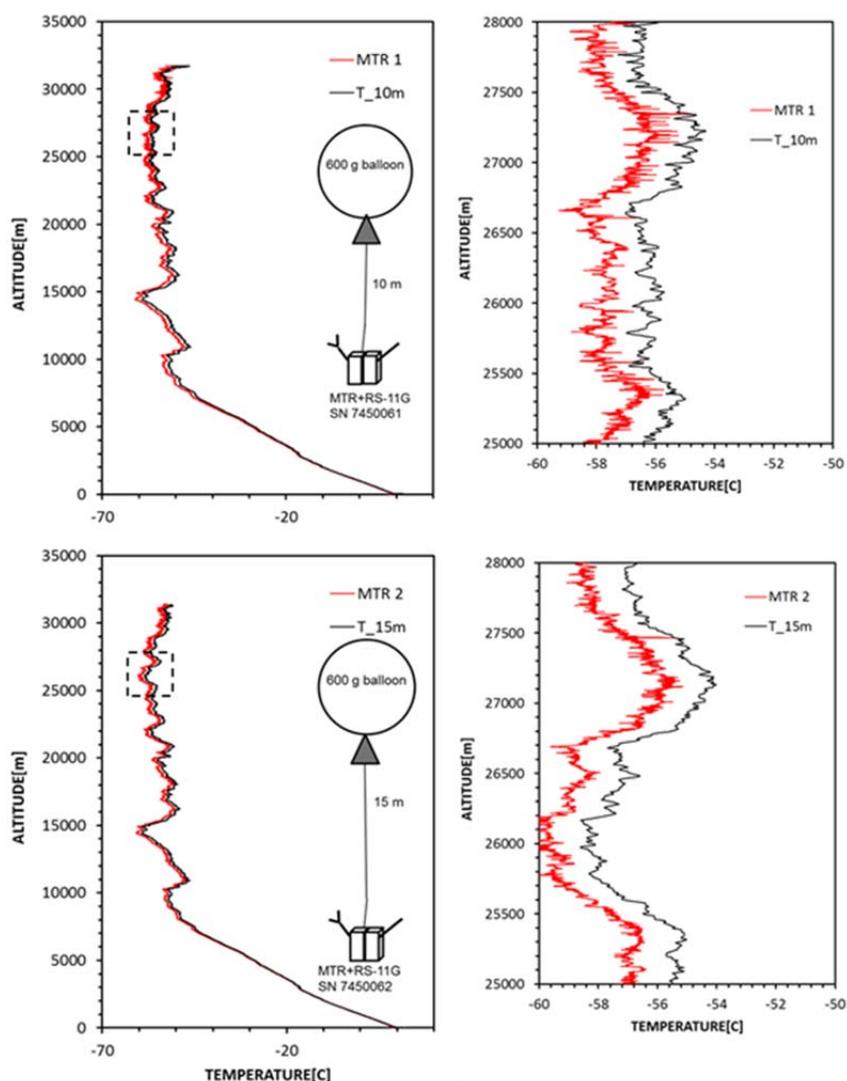


図 6 つり紐の長さによる気温スパイクの影響調査(MTR との比較)結果

上段はつり紐が 10m の場合, 下段は 15m の場合. それぞれ(左)気温の鉛直プロファイル(気温スパイクおよび日射補正適用前. 黒:RS-11G, 赤:MTR), (右)左図の高度 25000–28000m(気圧約 25–15hPa に相当)の拡大図. つり紐が 10m の場合には細かいスパイク状のノイズが見られるが, 15m の場合はほとんど見られない. (図提供: 明星電気)

高度 $geopot_{fin}$ を用いて地上気圧 P_{surf} [hPa] から積み上げる形で気圧の暫定値 P_1 を算出する必要がある。

$$P_{1,i+1} = P_{1,i} \exp \left[-\frac{g_0}{T_v R_d} (geopot_{fin,i+1} - geopot_{fin,i}) \right] \quad (14)$$

ここで $P_{1,i+1}$ は求めたい気圧, $P_{1,i}$ は 1 つ下の点の気圧, T_v は T_0 と U_0 から求めた層の平均仮温度, R_d は乾燥気体の気体定数であり, $P_{1,0} = P_{surf}$ である. T_v は次式で求める.

$$T_v = T \frac{1 + r_v / \varepsilon}{1 + r_v} \quad (15)$$

$$r_v = \frac{\varepsilon e}{p - e} \quad (16)$$

ここで r_v は重量混合比 [$g \ g^{-1}$], ε は乾燥空気と湿潤空気の気体定数の比, p は気圧 [hPa], e は水蒸気圧 [hPa] である. 飽和水蒸気圧 e_s [hPa] の算出には Hyland and Wexler (1983) の式を用いる.

$$\begin{aligned} e_s = & -0.58002206 \times 10^4 T_K + 1.3914993 \\ & - 0.48640239 \times 10^{-1} T_K + 0.41764768 \times 10^{-4} T_K^2 \\ & - 0.14452093 \times 10^{-7} T_K^3 + 6.5459673 \ln T_K \quad (17) \end{aligned}$$

$$e = e_s \times U_0 \times 0.01 \quad (18)$$

ここで T_K [K] は T_0 を絶対温度に変換した値である.

7.2 気温スパイクの除去

気温センサの値に影響を与える外的要因として、日射の影響のほかに、日射により暖められた気球からの熱(気球後流, balloon wake と呼ばれる)がセンサの気温値にスパイク状のノイズをもたらす現象があると言われている(World Meteorological Organization : 2008). つり紐の長さが十分であれば(気球からの距離が一定確保されれば)この気球後流の影響を回避できると考えられる. 高層気象台ではつり紐の長さが 10m の場合と 15m の場合で RS-11G の気温値がどのような影響を受けるか、気温基準センサ MTR (Meisei Temperature Reference) (Shimizu and Hasebe : 2010) を用いた同時飛揚観測を行い検証した. 図 6 の上段・下段がそれぞれつり紐の長さが 10m および 15m の場合の観測結果であり、各段左図は気温スパイク除去処理および日射補正を行っていない気温プロファイル(黒:RS-11G, 赤:MTR), 右図は左図の高度 25000–28000m(気圧約 25–15hPa)の拡大図である. この比較結果より、つり紐の長さが 15m の場合には気温スパイクの影響が(顕著には)見られないが、つり紐が 10m の場合には 30hPa 面より上層で気温

スパイクが発現することが確認された.

この結果を受け、つり紐の長さが 10m 以下の場合には、 P_1 が 30hPa 面より上層では「最小値平均フィルタ」(設定した窓幅内で最小値をとり、それを移動平均するフィルタ)を適用し、スパイクノイズを除去することとした. この際の窓幅はつり紐による振り子運動の周期 $T_{pendulum}$ の半分の窓幅とした. このフィルタの適用結果を T_1 とする(フィルタを適用しない場合は $T_1 = T_0$ とする). なお、このフィルタの適用に伴う不確かさ $u_{spike}(T)$ も算出する.

7.3 移動平均

T_1 について前後 1 秒間の移動平均を行ったものを T_2 とする. この際、移動平均処理に伴う不確かさ $u_{ma}(T)$ を算出する.

7.4 日射補正

GPS 時刻・緯度・経度から太陽高度角を求め、これと P_1 からセンサ各部が吸収する太陽からの直達日射エネルギーを算出する. また、 P_1 , T_2 , asc (上昇速度をセンサへの通風速度として扱う)から熱伝達率を求める. 雲の影響は P_1 を用いて算出する. 以上の手法により、各部が吸収する日射エネルギー、熱伝達率及び雲の影響を表すパラメータを求め、気温の日射補正量 T_{cor} を算出する. 気温の確定値 T_{fin} は T_2 から T_{cor} を差し引いて求める.

日射補正に伴う不確かさは、(1)各部が吸収する日射エネルギーを算出する際のアルベドの不確かさの寄与分 $u_{albedo}(T)$, (2)センサへの通風を上昇速度のみで仮定していることによる寄与分 $u_{ventilation}(T)$, (3)気温センサの校正における誤差の寄与分の 3 点を原因と仮定して算出を行う. (1)についてはアルベドの取りうる値の最大値・最小値を仮定してそれぞれの日射補正値を算出し、その変動幅をもとに推定する. (2)については上昇速度に加え一定の通風があるものと仮定した場合の日射補正値を算出し、上層速度のみを仮定した場合との差をもとに推定する. (3)についてはセンサそのものの誤差と、校正に用いる恒温槽内の気温の一様性の不確かさが考えられるが、それぞれ固定値を与える ($u_{calib1}(T)$, $u_{calib2}(T)$).

7.5 気温の不確かさ

最終的な気温の不確かさ $u(T)$ は、 $u_{ma}(T)$, $u_{spike}(T)$,

$u_{\text{albedo}}(T)$, $u_{\text{ventilation}}(T)$, $u_{\text{calib1}}(T)$, $u_{\text{calib2}}(T)$ の平方和の平方根により求める。

Dependence; TUD)の補正, (4)センサ温度/気温 (T_s/T_a)補正の各ステップからなる(図7)。

8. 相対湿度の算出

相対湿度の算出は(1)時定数遅れ(Time lag; TL)の補正, (2)雨・雲による汚染の除去, (3)湿度センサの温度依存性 (Temperature-Humidity

8.1 湿度センサ温度の算出

湿度の各種補正のためには湿度センサ温度 T_s を見積もる必要がある。iMS-100 は湿度センサ用の温度センサが搭載されているため, その値を湿度

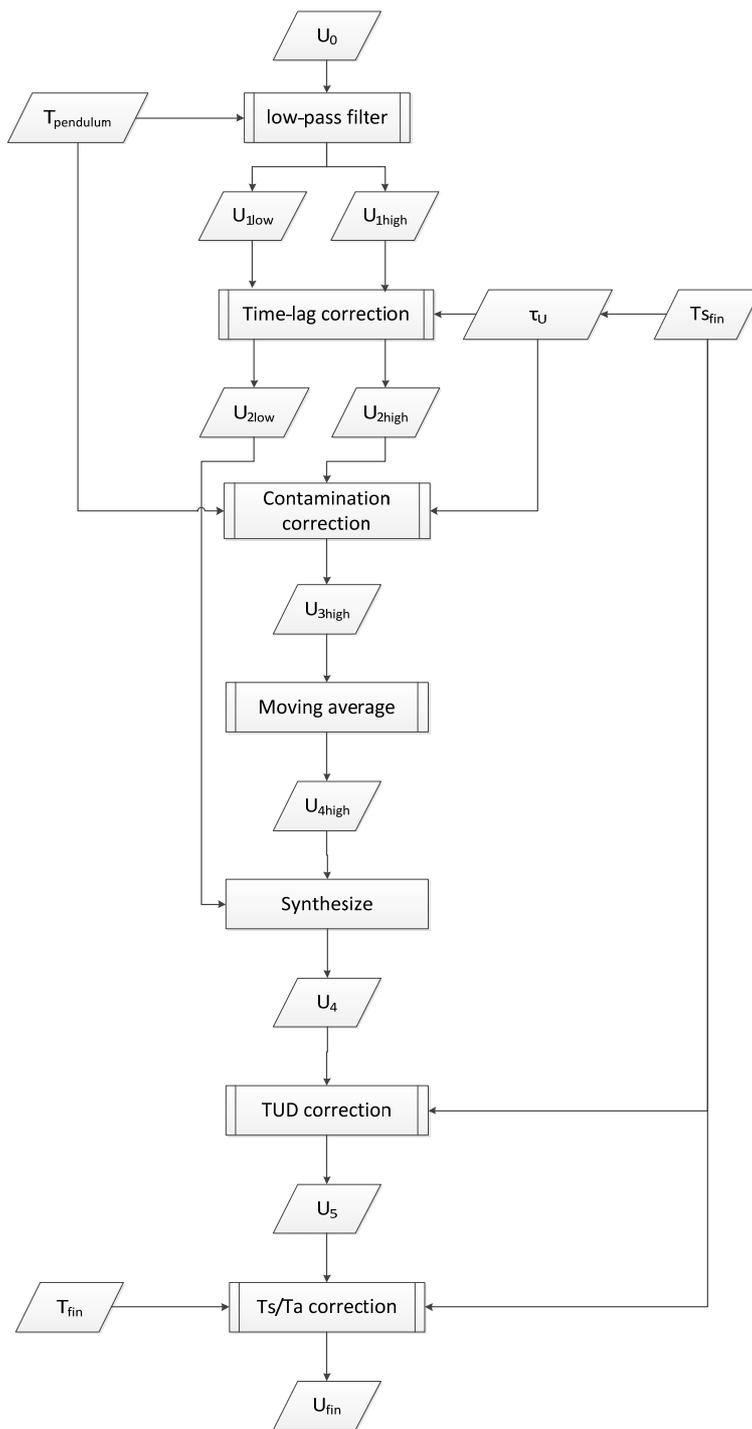


図7 湿度の算出フロー

センサ温度の初期値 T_{S0} として用いるが、RS-11G の場合は T_{fin} から T_{S0} を別途推定する必要がある。まず、 T_{fin} と P_1 を用いて気圧に応じた湿度センサ温度の時定数 τ_{TS} を求める。この時定数の影響を考慮して次式により日射補正前の湿度センサ温度 T_{Sraw} を求める。

$$T_{Sraw,t} = \frac{T_{fin,t} \delta t + \tau_{TS} T_{Sraw,t-\delta t}}{\tau_{TS} + \delta t} \quad (19)$$

ここで第二添字は放球時刻からの経過時間を表す。 δt はゾンデのサンプリング間隔(1秒)である。

この T_{Sraw} に対して日射補正を行い、 T_{S0} とする。

さらに、RS-11G、iMS-100 とともに、 T_{S0} に対して P_1 に依存する係数 K と T_{fin} で重み付けを行い、湿度センサ温度の確定値 T_{Sfin} とする。

$$T_{Sfin} = K T_{S0} + (1 - K) T_{fin} \quad (20)$$

$$K = \begin{cases} 0 & (P_1 > 600) \\ 1 - \frac{\ln P_1 - \ln 400}{\ln 600 - \ln 400} & (400 < P_1 < 600) \\ 1 & (P_1 < 400) \end{cases} \quad (21)$$

8.2 時定数遅れ補正

湿度センサの時定数は気温の低下とともに増大する(遅くなる)傾向があるため、時定数遅れの補正を行う。

湿度センサの時定数 τ_U およびその不確かさ $u(\tau_U)$ は T_{Sfin} から次式により求める。

$$\tau_U = 0.1537 \exp(-0.087 T_{Sfin}) \quad (22)$$

$$u(\tau_U) = 0.25 \tau_U \quad (23)$$

まず、8.3節で述べる汚染除去処理のため、湿度の初期値 U_0 をつり紐の振り子運動の周期 $T_{pendulum}$ の4倍をカットオフ周期とするフィルタにより低周波成分 U_{1low} と高周波成分 U_{1high} に分割する。このフィルタの適用に伴う統計的な不確かさ $u_{std1}(U)$ も算出する。 U_{1low} 、 U_{1high} それぞれについて次式により時定数遅れの補正を適用した結果を U_{2low} 、 U_{2high} とする。

$$U_{2,t} = \frac{U_{1,t} - U_{1,t-\delta t} \exp\left(-\frac{\delta t}{\tau_U(T_{Sfin,t})}\right)}{1 - \exp\left(-\frac{\delta t}{\tau_U(T_{Sfin,t})}\right)} \quad (24)$$

8.3 汚染除去

ゾンデが雨や雲を通過する際、センサおよびその周辺に着水・着氷が生じ、雲を抜けた後にそれらが昇華蒸発することにより、相対的に湿度の高い(汚染された)空気をセンサが観測することがあ

る。この影響は「乾燥している成層圏に突入しても相対湿度が 0%RH まで急速に低下しない」「汚染された空気がセンサに流れてくることにより、湿度プロファイルがパルス状の挙動を示す」といった形で現れる。この影響を除去するため、湿度の高周波成分 U_{2high} について、気温スパイクの除去(7.2節)と同様、最小値平均フィルタを適用する。ここでフィルタの窓幅は、 $T_{pendulum}$ もしくは τ_U のいずれか小さい値を適用した。さらにこの結果に τ_U をカットオフ周期とする平滑化フィルタを適用し、汚染除去後の高周波成分 U_{3high} とした。この汚染除去フィルタによる統計的不確かさ $u_{std3}(U)$ は最小値平均フィルタ・平滑化フィルタそれぞれの統計的不確かさから求められる。

U_{3high} はさらに前後 90 秒の移動平均により平滑化され(U_{4high})、低周波成分 U_{2low} と合成されて汚染除去処理適用後の湿度 U_4 となる。この移動平均処理による統計的不確かさ $u_{std4}(U)$ も算出される。

8.4 湿度センサの温度依存性(TUD)補正

RS-11G および iMS-100 で湿度センサに用いられている静電容量型高分子膜相対湿度計には温度依存性があり、低温域において湿潤バイアスを示す特性がある。このバイアスの補正値 U_{5cor} は U_4 と湿度センサ温度 T_{Sfin} を用いて次式により求められる。

$$U_{5cor} = (K_0 + K_1 T_{Sfin} + K_2 T_{Sfin}^2 + K_3 T_{Sfin}^3) \times (K_4 + K_5 U_4 + K_6 U_4^2) \quad (25)$$

ここで $K_0 \sim K_6$ は係数である。

U_{5cor} を U_4 から引くことにより TUD 補正後の湿度 U_5 を求める。

8.5 センサ温度/気温補正

湿度センサによって測定された相対湿度は、厳密には気温ではなく湿度センサの温度に対応した飽和水蒸気圧に対する値となる。対流圏下層(600hPa 面より下層)では日射の影響が小さく、空気の密度が高いためセンサ温度が気温になじみやすいため $T_{fin} = T_S$ として扱えるが、それより上層では T_S と T_{fin} の差の影響を補正する必要がある。次式によりこの補正を行う。

$$U_{fin} = U_5 \times \frac{e(T_{Sfin})}{e(T_{fin})} \quad (26)$$

ここで U_{fin} は補正後の湿度であり湿度の確定値となる。 $e(T)$ は気温 T における飽和水蒸気圧 [hPa]

である(算出は式 17 による)。

8.6 相対湿度の不確かさ

時定数遅れ補正に伴う不確かさ $u_{TL}(U)$ は時定数の不確かさ $u(\tau_U)$ に依存することから、湿度センサの時定数を $\tau_U + u(\tau_U)$ とした場合と $\tau_U - u(\tau_U)$ とした場合でそれぞれ湿度を算出し、その差から見積もることが出来る。

TUD 補正に伴う不確かさ $u_{TUD}(U)$ については固定値を与えることとした。

センサ温度/気温補正に伴う不確かさ $u_{TS}(U)$ は、湿度センサ温度の不確かさに依存することから、 T_{Sfin} に一定の幅を持たせて算出した場合の湿度の変動幅から見積もることが出来る。

このほかの相対湿度に誤差を与える要因として、高湿環境から低湿環境に変化した場合の湿度センサのヒステリシスの問題がある。これについては補正が困難であることから、補正は行わず、相対湿度の不確かさとして扱う。実際には、ヒステリシスによる不確かさ $u_{hysteresis}(U)$ は U_{fin} の変化傾向が規定値よりも負側に大きくなる場合、固定値を与えることとする。これに加え、工場での湿度センサ校正時の誤差による不確かさ $u_{calib}(U)$ が考えられるが、これについても固定値を与えることとした。

最終的な相対湿度の不確かさ $u(U)$ は $u_{std1}(U)$, $u_{std3}(U)$, $u_{std4}(U)$, $u_{TL}(U)$, $u_{TUD}(U)$, $u_{TS}(U)$, $u_{hysteresis}(U)$, $u_{calib}(U)$ の平方和の平方根により求める。

8.7 湿度値の妥当性の判定

8.5 節の段階で $U_{fin} < 0$ となる場合があるが、GDP ではこれがただちに不適切な値と判断されるわけではなく、不確かさを考慮した値の取りうる範囲(すなわち $U_{fin} \pm u(U)$) が現実的な範囲に収まるかどうかという観点から値の妥当性を判断する。仮にある時刻において $U_{fin} = -1.0\%RH$ であっても、 $u(U) = 1.5\%RH$ であれば値の取りうる範囲は $-2.5 \sim 0.5\%RH$ となり、 $0 \sim 0.5\%RH$ という現実的な値の範囲が含まれることから、この時刻の湿度データ (U_{fin} および $u(U)$) は採用される。一方で $u(U) = 0.5\%RH$ であれば値の取りうる範囲は $-1.5 \sim -0.5\%RH$ となり $0\%RH$ 以上の(現実的な)値は含まれない。この場合はこの時刻の湿度データは不採用となる(データ上は NaN で埋められる)。

なお、 $U_{fin} + u(U) > 100$ の場合は過飽和の可能性が

考えられるため、特に妥当性の判定は行わない。

9. 気圧の算出

9.1 気圧の確定値の算出

気圧の確定値 P_{fin} は T_{fin} , U_{fin} , $geopot_{fin}$ および P_{surf} から式 14 により求められる。 U_{fin} が NaN の場合は $0\%RH$ として計算する。

9.2 気圧の不確かさ

気圧は気温、湿度、ジオポテンシャル高度および地上気圧から算出されるパラメータであるため、それぞれの不確かさが伝播する形で不確かさが現れることとなる。

地上気圧の不確かさの寄与分 $u_{psurf}(P)$ は P_{surf} に誤差(固定値)を与えて気温・湿度を別途算出し、その結果を用いて算出された気圧と P_{fin} との差分から算出する。

ジオポテンシャル高度の不確かさの寄与分 $u_{GPS}(P)$ はその元となる GPS 高度が alt_{fin} から不確かさ $u(alt)$ だけ増減した場合のそれぞれのジオポテンシャル高度を求め、それらと T_{fin} , U_{fin} から算出される気圧の差から算出する。気温の不確かさの寄与分 $u_{temp}(P)$ および湿度の不確かさの寄与分 $u_{RH}(P)$ については、それぞれ T_{fin} , U_{fin} をそれぞれ $u(T)$, $u(U)$ だけ増減させた気温・湿度を用いて算出した気圧の差から算出する。

最終的な気圧の不確かさは、 $u_{psurf}(P)$, $u_{GPS}(P)$, $u_{temp}(P)$, $u_{RH}(P)$ の平方和の平方根により求める。

10. 風の算出

風の初期値は風向と風速の組で得られるが、これを東西成分 u_0 と南北成分 v_0 に変換する。各成分に対して $T_{pendulum}$ をカットオフ周期とするローパスフィルタを適用して振り子運動の影響を除去し、各成分の確定値 u_{fin} , v_{fin} およびそれぞれの統計的不確かさ $u_{std}(u)$, $u_{std}(v)$ を算出する。風向および風速の確定値 $wdir_{fin}$, $wspeed_{fin}$ は u_{fin} , v_{fin} から求めることが出来る。風向および風速の不確かさ $u(wdir)$, $u(wspeed)$ は以下の式により算出する。

$$u(wdir) = \frac{180 \sqrt{u_{std}(u)^2 + u_{std}(v)^2}}{\pi \left(1 + \left(\frac{u_{fin}}{v_{fin}}\right)^2\right) |v_{fin}|} \quad (27)$$

$$u(wspeed) = \sqrt{\frac{(u_{fin} \cdot u_{std}(u))^2 + (v_{fin} \cdot u_{std}(v))^2}{u_{fin}^2 + v_{fin}^2}}$$

(28)

ただし $v_{fin} = 0$ の場合は式 27 の, $wspeed_{fin} = 0$ の場合は式 28 のそれぞれ右辺の分母が 0 になってしまい不確かさが計算できない. これに対応するため, $v_{fin} = 0$ の場合は $u(wdir) = 180^\circ$, $wspeed_{fin} = 0$ の場合は $u(wspeed) = 0 \text{ m/s}$ とする.

1 1. 派生パラメータの算出

GDP では前節までに示した物理量に加え, 派生パラメータも収録される. 収録されるのは露点温度, 水蒸気混合比(体積比), 可降水量, 圏界面高度およびその気圧・気温・温位, 気球破裂高度およびその気圧である.

1 2. GDP 形式での出力

GDP は NetCDF ファイルとして出力される. この中には, 前節までに示した物理量およびその不確かさに加え, NetCDF の属性として観測および GDP 作成に関わるメタデータが収録される.

1 3. 算出例

実際の GDP の算出例として, 2015 年 11 月 1 日 09 時(日本標準時)の観測の鉛直プロファイルを図 8 に示す((a)気温, (b)湿度, (c)気圧, (d)風速, (e)風向). それぞれ GDP の確定値を赤線, 不確かさをシェードで, 観測ソフトウェア MGPS2 による 1 秒値データ(以下 High Resolution Data の頭文字をとって HRD とする)を黒線で示している. 図 9 に

HRD / GDP profile (2015-11-01T00:00:00)

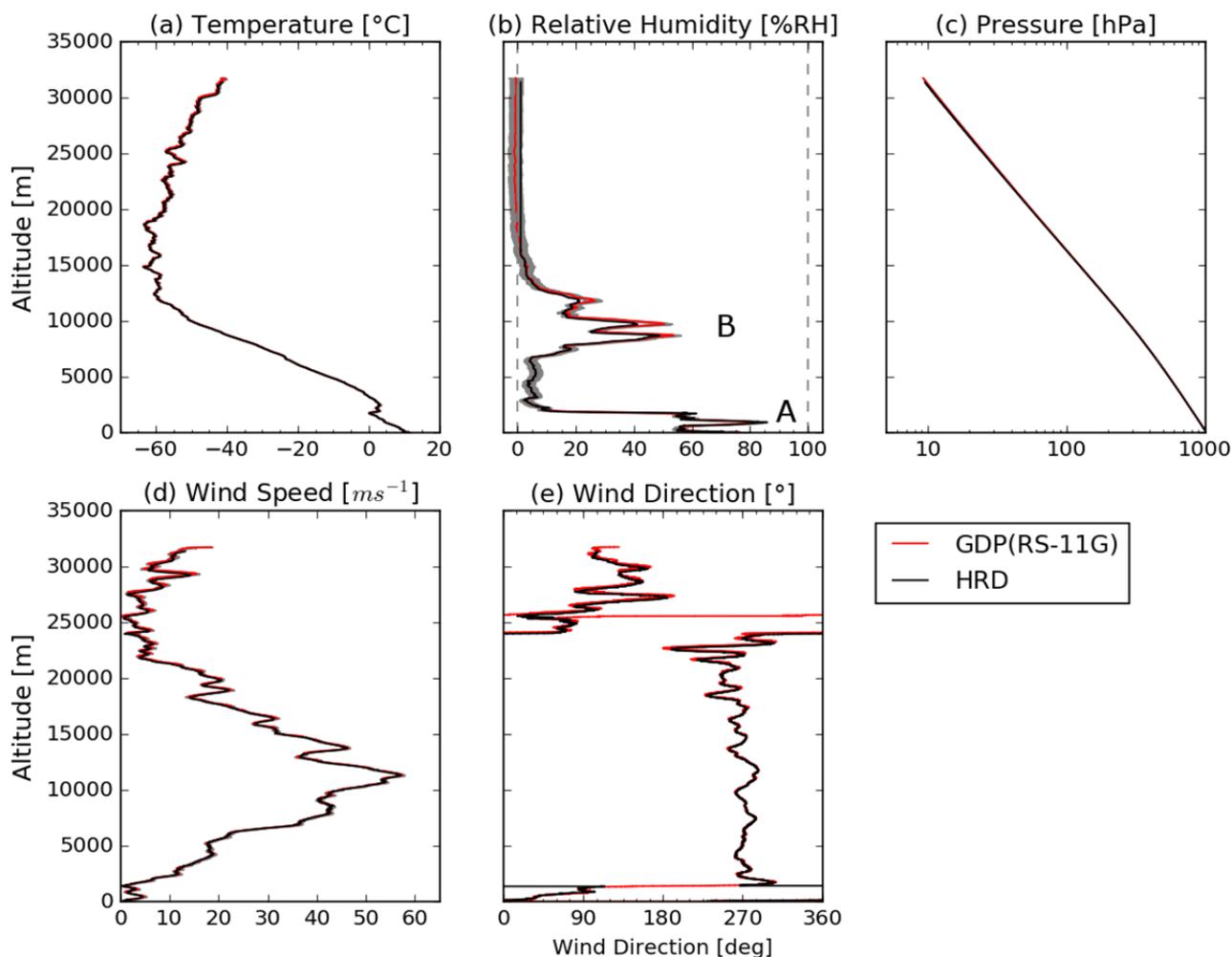


図 8 2015 年 11 月 1 日 09 時(日本標準時)の HRD(黒線)と GDP(赤線)のプロファイル GDP の不確かさをシェードで示す. (a)気温, (b)湿度, (c)気圧, (d)風速, (e)風向.

は同時刻における値の差(GDP-HRD;赤線)と GDPの最終的な不確かさ(黒線)のプロファイルを示す。さらに、気温・湿度・気圧の不確かさの最終値と各要素の寄与分のプロファイルについて図10に示す((a)気温, (b)湿度, (c)気圧。それぞれ黒太線が最終的な不確かさ)。

気温については同時刻の HRD との比較でバイアスは-0.01Kと小さかった。不確かさの値は高度とともに増大し、最大で0.57Kに達する(図9(a))が、ほとんどの高度では気温の差はこの範囲内に収まっている。不確かさの成分別のプロファイル(図10(a))からは、 $u_{\text{albedo}}(T)$ (青線)が高度とともに増大し支配的になっていく様子がみられる。なお、1200g気球を使用し紐の長さが30mでの観測であったため、スパイクノイズの処理は行われていない。そのため、 $u_{\text{spike}}(T) = 0$ となっている。

相対湿度については、プロファイル全体のバイアスでは0.16%RHとわずかにGDPのほうが大きくなった。不確かさは最大3.77%RHであり、ほとんどの高度ではGDPとHRDとの差はこの範囲内に収まっているものの、一方で差が顕著にみられる層では最大で±10%RHに達していた(図9(b))。特に差が顕著であるのが高度約1750~1850mの層Aと高度約8800~10230mの層Bである。これらの層は湿度のヒステリシスの影響がみられる($u_{\text{hysteresis}}(U) \neq 0$; 図10(b)青線)ことに加え、汚染除去フィルタに伴う不確かさ $u_{\text{std3}}(U)$ の増大もみられる(図10(b)赤線)ことから、湿度低下時の処理の違いが差となって現れたものであると考えられる。一方、層Aについては湿度の急速な上昇と現象がみられる(図8(b))こと、正負双方に同程度の差がみられること(図9(b))などから、この湿度の急変

Uncertainty / Difference profile (2015-11-01T00:00:00)

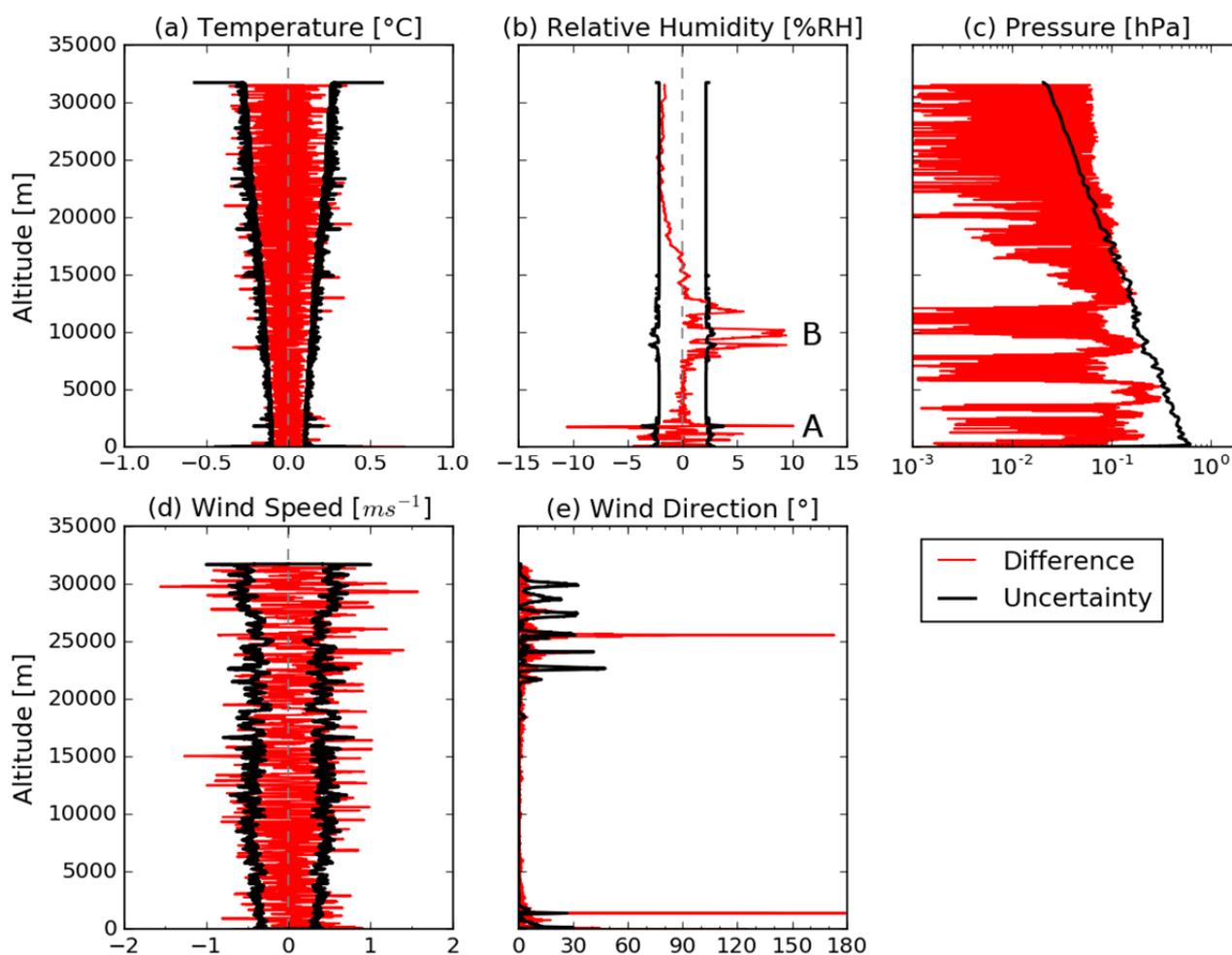


図9 図8の不確かさ(黒線)とGDPとHRDの差(赤線)のプロファイル

が GDP と HRD に反映されるタイミングのずれによる可能性も考えられる。

気圧については GDP と HRD の差は 500hPa 面より下層, 500hPa 面~100hPa 面, 100hPa 面~50hPa 面, 50hPa 面以上でそれぞれ最大 0.31hPa, 0.21hPa, 0.12hPa, 0.10hPa となった。ただし気圧の差は(対数軸で見ると)変動が大きい(図 9(c))。気圧の不確かさは 1000hPa 面で 0.61hPa, 500hPa 面で 0.31hPa, 100hPa 面で 0.11hPa, 50hPa 面で 0.067hPa, 10hPa 面で 0.024hPa であり, 全データの 86%は GDP と HRD の差が不確かさの範囲内に収まっていた。成分別の寄与をみると, 下層では $u_{GPS}(P)$ (図 10(c)の alt)が支配的であるのに対して, 上層では $u_{temp}(P)$ が支配的になっているという特徴がみられる(図 10(c))。一方で $u_{psurf}(P)$ および $u_{RH}(P)$ の寄与は比較的小さい。

風速については, バイアスは 0.1m/s, 差の標準偏差は 0.5m/s となり, 差は小さかった。これは HRD・GDP いずれも GPS モジュールが算出した風向風速の値の移動平均であり, 気温湿度のような

補正を行わないためである。不確かさは最大で 1.0m/s 程度であった。

風向については, 弱風時は風向差・不確かさも大きくなる。そのため, プロファイル全体では最大で不確かさは約 50° , 風向差は 180° となっているが, $wspeed_{fin} \geq 2 \text{ m/s}$ のデータに限れば約 87%のデータでは不確かさは 5° 以下であり, 風向差も約 90%のデータで 5° 以下であった。

14. 今後の流れ

以上, GDP データ作成の流れの概要について解説した。本稿作成時点では 2013 年 7 月以降の RS-11G による 1 次データの実際の処理には着手しておらず, サンプルデータの処理を行いプログラムの動作チェックおよびデータの受け渡し方法などについて明星電気および LC との調整をしている段階である。この調整が完了した段階で過去のデータについても処理を行う予定である。また, 各パラメータの詳細な算出手法について記述したテクニカルノートの作成も進められている。

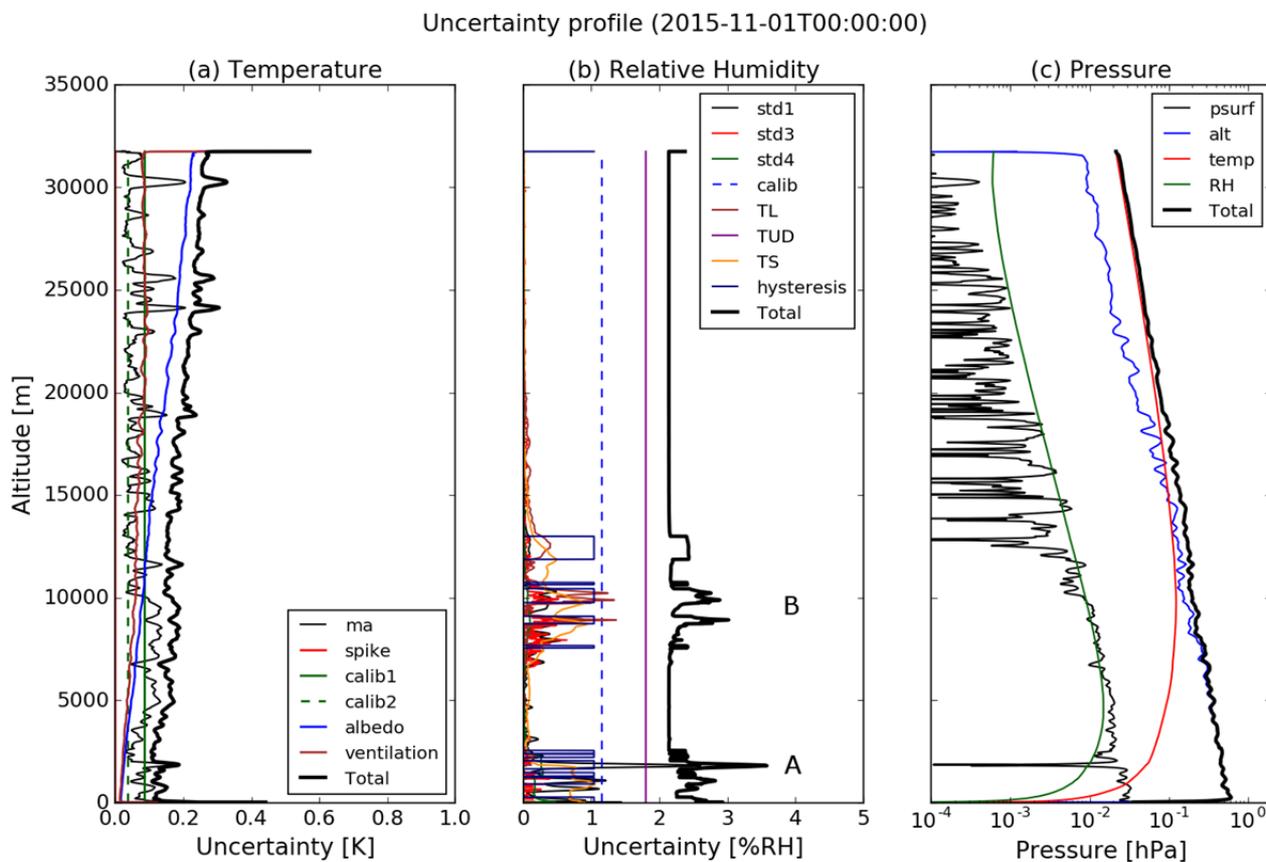


図 10 図 9 の不確かさの各成分。(a)気温(b)湿度(c)気圧

過去データの処理が進んだ段階で、RS92-SGPとの連結比較観測時のそれぞれのゾンデのGDPの比較を行い、両者の特性の比較を行う予定である。

Appendix A. 平滑化処理に伴う統計的不確かさの算出方法

移動平均やローパスフィルタといった平滑化処理に伴う統計的な不確かさについては、Dirksen *et al.* (2014)の Appendix. A に示された手法にならい、以下の式により算出した。

$$N' = \left(\sum_{j=-M}^M h_j^2 \right)^{-1} \quad (29)$$

$$u(\bar{s}_i) = \sqrt{\frac{N'}{N'-1} \sum_{j=-M}^M h_j^2 (s_{i+j} - \bar{s}_i)^2} \quad (30)$$

ここで s は平滑化処理適用前の値、 M は平滑化処理の窓幅の $1/2(2M+1)$ が窓に含まれるデータの総数にあたる、 h は正規化された重み係数であり、 N' は effective sample size と呼ばれるパラメータである。移動平均の場合、 h は窓内の全データに対して $1/(2M+1)$ となる。ただし、 $M=0$ の場合は $N'=1$ となるため式 30 が計算できなくなることから $u(\bar{s}_i) = 0$ とした。

謝 辞

明星電気株式会社の清水健作氏、杉立卓治氏には GDP 開発にあたって技術協力をいただいた。また、北海道大学大学院環境科学院の藤原正智准教授には GRUAN 作業部会メンバーとして、リンデンベルグ観測所の Michael Sommer 博士には LC の担当者として貴重な助言をいただいた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

Dirksen, R. J., M. Sommer, F. J. Immler, D. F. Hurst,

R. Kivi, and H. Vömel (2014): Reference quality upper-air measurements: GRUAN data processing for the Vaisala RS92 radiosonde. *Atmos Meas Tech*, **7**, 4463 - 4490.

藤原正智 (2011): 気候監視のための新しい高層気象観測ネットワーク GRUAN. *天気*, **58**, 679 - 695.

Hyland, R., and A. Wexler (1983): Formulations for the thermodynamic properties of the saturated phases of H₂O from 173.15K to 473.15K. *ASHRAE Trans*, **89**, 500 - 519.

Immler, F. J., J. Dykema, T. Gardiner, D. N. Whiteman, P. W. Thorne, and H. Vömel (2010): Reference Quality Upper-Air Measurements: guidance for developing GRUAN data products. *Atmos Meas Tech*, **3**, 1217 - 1231.

古林絵里子・脇野定則・宮林直人・矢代和也・萩谷聡 (2014): RS-11G 型 GPS ゾンデを用いた改良型飛揚前点検手法の検討. *高層気象台彙報*, **72**, 19 - 24.

能登美之・吉井博之・岩淵真海 (2012): GRUAN (GCOS Reference Upper Air Network)における高層気象台の役割. *高層気象台彙報*, **70**, 7 - 12.

Seidel, D. J., F. H. Berger, F. J. Immler, M. Sommer, H. Vömel, H. Diamond, J. Dykema, D. Goodrich, W. Murray, T. Peterson, D. Sisterson, P. Throne and J. Wang (2009): Reference Upper-Air Observations for Climate: Rationale, Progress, and Plans. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **90**, 361 - 369.

Shimizu, K., and F. Hasebe (2010): Fast-response high-resolution temperature sonde aimed at contamination-free profile observations. *Atmos Meas Tech*, **3**, 1673 - 1681.

World Meteorological Organization (2008): *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*, WMO-No. 8. 7th edition.