

気候監視のための新しい高層気象観測ネットワーク GRUAN

藤原 正 智*

1. はじめに

気候変動問題においては、長期にわたる精度の高い大気の測定が不可欠である。上空大気の状態は、19世紀末以降、経緯儀使用型や係留型を含む無人気球や風およびそれらに搭載した測定器を用いて、1930年代以降はレーウィンゾンデやラジオゾンデを用いて、測定・監視されてきた（例えば、高橋ほか 1987；北海道大学大学院環境科学院 2007；須田 1968；中川 1986；Lewis 2003）。1970年代以降は各種人工衛星搭載機器も投入されている（例えば、Onogi *et al.* 2007）。しかし、これら高層気象観測の主目的は天気予報や航空機運航のための基礎データ収集にあり、気候の監視は想定されていなかった。そのため、例えば、天気予報においては問題とならないような機器の変更・改良に伴う人工的な変化（データの非一様性）が、上空の気候変動の検出を実は極めて困難にしている。こうした既存の観測システムの問題は、温暖化問題が意識されるようになってきた1990年代から徐々に認識されてきていた（例えば、Gaffen 1994；Elliott 1995）。2000年代に入ってから、一部の気候研究者の間で、気候監視のためのまったく新しい高層気象観測ネットワークが構想され始めた。2006年8月には全球気候観測システム（GCOS）の気候のための大気観測パネル（AOPC）のもとにこの件に関する作業部会（WG-ARO、本稿ではGRUAN作業部会あるいは単に作業部会と呼ぶ）が設置され、筆者もメンバーのひとりとして参加することになった。翌年には、この観

測ネットワークの名称をGCOS Reference Upper Air Network（GRUAN；GCOS基準高層観測網）とすることが決まった。2010年秋からは一部試験的な運用が開始されている。本稿では、まずGRUANの概要を紹介し、GRUANはなぜ必要なのか、高層気象観測の過去と現状を解説し、さらに、GRUANを実現し発展させていくための道筋や課題などについて作業部会メンバーの立場から記したい。なお、本稿末尾に略語一覧を付す。

2. GRUANの概要

本節では、GRUANの概要や考え方を筆者なりに概観する（よくまとまった文献としては、Seidel *et al.* (2009) と Immler *et al.* (2010) がある。さらに詳細な情報については、GCOS (2007, 2008, 2009a, 2009b, 2010) の報告書にまとめられているが、特に、GCOS (2009b) が現時点で最新の包括的な文書（2013年までの実施計画）である。また、本誌本号に水野・中村による2010年3月の会議報告が掲載されている。最新情報については<http://www.gruan.org/>も参照されたい）。

GRUANの目的は、長期にわたり高層大気の“高精度で品質の一律な気候データ”を提供することにある。測定機器としては、ゴム気球・ラジオゾンデ搭載型の高精度センサーによる *in situ*（“その場”または“現場”）測器を中心とするが、各種地上設置型リモートセンシング機器の活用も積極的に考慮していく。第1図にGRUAN観測所における必須機器と必須測定要素を、第1表にGRUAN観測所に要求される主な項目を、第2表にGRUAN用の基準ラジオゾンデに要求される性能を示す。第1図に示すような観測所を将来的に世界に30~40地点ほど確保することを目指す。そもそも“高精度で品質の一律な気候データ”と

* 北海道大学大学院地球環境科学研究院。

Email : fuji@ees.hokudai.ac.jp

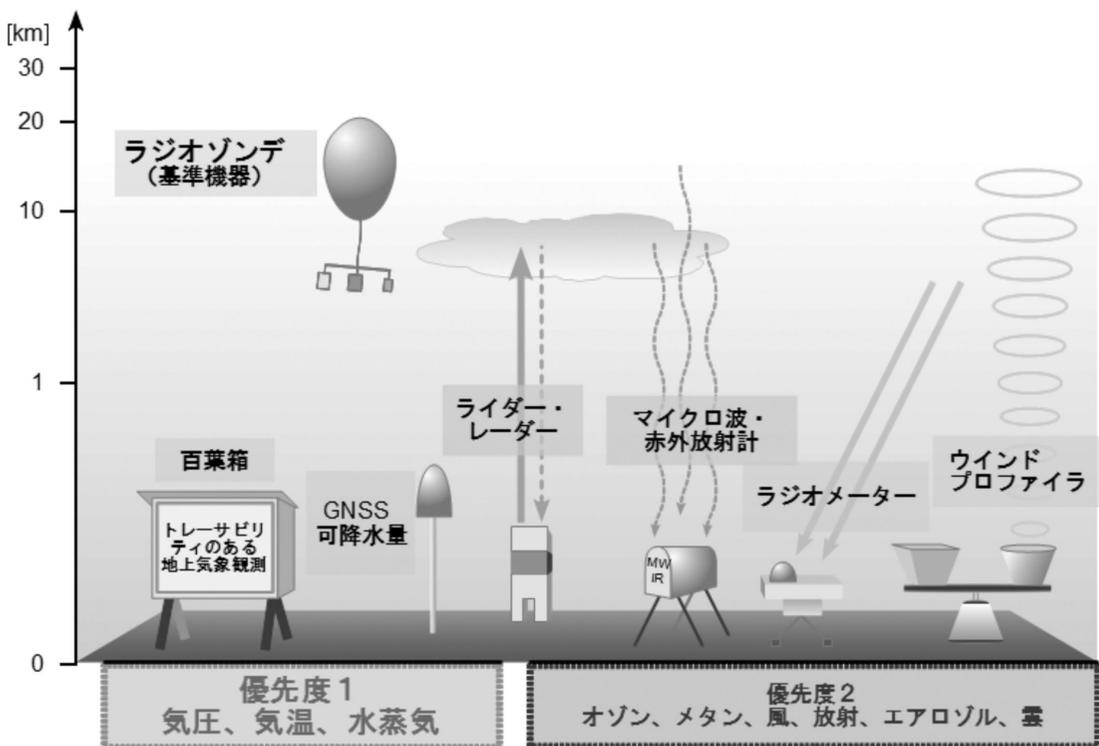
—2011年1月31日受領—

—2011年5月26日受理—

は何か、であるが、各時代で最も精度が高くかつコスト的に現実的なセンサーを導入して取得されたデータ、ということが大前提にはなるが、さらに重要なことは、「少なくとも地上の一点でSI単位系標準にトレーサビリティがあり、各測定値に精度確度あるいは系統誤差・バイアスの情報（GRUANでは、uncertainty, 測定値の不確かさ、の語を使用する）が付されており、測定データの特性理解や再処理に必要な全てのメタデータが付されていること」であり、これが“referenceデータ”あるいは“GRUANデータ”の重要な定義である。なお、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複数連鎖・介入させることにより、国家標準や国際標準に切れ目なく結びつけられる性質のことを言う（例えば、ある気温計が、製造メーカー内で基準センサーによりある不確かさの

範囲内で校正されており、さらにその基準センサーが公的な検定機関により国家標準にて検定済みである場合、その気温計にはトレーサビリティがあると言う）。測定とその不確かさに関する各種用語については Immler *et al.* (2010) に詳しくまとめられている。

GRUANで使用されるセンサーの測定値の不確かさの情報は、当然、比較観測などで検証され、査読付き論文等に発表されて、コミュニティ内で妥当であると評価されている必要がある。また、メタデータには、生データ、処理・補正アルゴリズム等のソフトウェア、観測時の地上校正・測器等構成・日時・天候等の情報、観測所の位置などの諸情報が含まれる。“気候データ”とは測定値だけでなくその不確かさの大きさの値および必要な全てのメタデータを含むもの、と考えるのである。さらに、技術的な改善・革新



第1図 GRUAN 観測所における必須機器、必須測定要素等を示した模式図。必須機器は、基準機器とみなせるラジオゾンデ（複数の機器の同時飛揚を含む）、トレーサビリティのある地上気象観測機器、GNSS/GPS 受信機（可降水量測定）である。さらに、ライダー、レーダー、マイクロ波・赤外放射計、ラジオメーター、ウインドプロファイラなどのリモートセンシング機器があることが望ましい。気象要素として優先度1に分類されるのは、気圧、気温、水蒸気、優先度2に分類されるのは、オゾン、メタン、風、放射、エアロゾル、および、雲に関する諸量の一部である。優先度3、4（図には示していない）には、二酸化炭素、雲に関する他の諸量（詳細については GCOS (2009b) の Appendix 1 を参照のこと）が含まれる。

やパーツの入手状況の変化等による測器の様々なレベルにおける変更は今後もやむを得ないが、そのような場合に各観測所にて一定期間新旧システムによる同時飛揚観測を行い、気候データとしての一様性を確保することを保証する。

GRUAN は、既存の GCOS 高層観測網 (GUAN : 高層観測網のうち、観測の継続性があり品質が高いと考えられる地点をグループ化したもので、2009年現在、世界161地点を擁する。第4.1節にてさらに解説する) やマイクロ波放射計搭載の人工衛星群などの全球観測システムや、データ同化技術を利用する長期再解析システム (例えば、大野木ほか 2008) により作成される気候データを置き換えようとするものでは決してない。GRUAN は独立な気候データを提供するだ

けでなく、これら全球を時空間的により均一にカバーする観測・解析システムに対して、検証用、補正用のデータを提供することも主要な目的としている。GRUAN 中の “Reference” の語にはそのような意味もこめられている。大気組成変化検出のためのネットワーク (NDACC), GEWEX 基準地上放射観測網 (BSRN), WMO 全球大気監視計画 (GAW), 南半球オゾンゾンデ観測網 (SHADOZ) など、既存の国際観測ネットワークとの情報交換や協力なども積極的に行いつつある。さらに、将来万が一衛星観測の空白が生じた際に、それを埋めることも念頭に置いている。

GRUAN 観測所 (第 1 図) において、もっとも優先度の高い気象要素は気圧 (高度)、気温、水蒸気である。しかも個々の測定システムの不確かさの評価や予期せぬエラーの検出のために、定期的と同じ気象要素を複数・多種の測定器で測定する (第 1 図の気球部分参照)。高精度ラジオゾンデに加え、SI 単位系標準にトレーサビリティのある地表気象測器、および原理的に高精度で安定した測定が可能ないわゆる GNSS/GPS 可降水量測定器、を必須構成要素とする。さらに、今後、技術の進展などに伴い、水平風、オゾン、メタン、放射、エアロゾルや雲に関する変数、二酸化炭素なども GRUAN が取り扱う対象に加えていくことを考えている。測定器を開発しているメーカーや研究者へは、予想される市場規模も示しながら、新たな測定器開発を積極的に働きかけると同時に、測定の不確かさを評価するのに必要な各種情報 (知的財産とされる情報も当然含まれる) の公開も促

第 1 表 GRUAN 観測所に要求される主な項目 (GCOS 2009b, Section 2.2より)。

GRUAN の規約と要件の遵守
データの品質の確保 (測定の不確かさの完全な解析を含む)
標準化された測定手順の遵守
完全なメタデータの提供
トレーサビリティの確保
適切に管理された機器変更 (一定期間にわたる同時比較観測の実施)
時間変化の観測 (初期における観測頻度の最低要件は、(1) 高性能ラジオゾンデによる週 1 回の観測、(2) 上部対流圏・下部成層圏の水蒸気測定が可能なセンサーを含む高性能ラジオゾンデによる月 1 回の観測)
長期観測へのコミットメント

第 2 表 GRUAN 用の基準ラジオゾンデに要求される性能、ただし優先度 1 に分類される気象要素のみ (GCOS 2009b, Appendix 1 より)。

気象要素	気温	水蒸気	気圧
測定範囲	170~350 K	0.1~90000 ppmv	1~1100 hPa
高度範囲	0~40 km	0~40 km	0~40 km
高度分解能	0.1 km (0~30 km) 0.5 km (>30 km)	0.05 km (0~5 km) 0.1 km (5~30 km)	0.1 hPa
精度 (反復可能性, 再現性)	0.2 K	2% (対流圏) 5% (成層圏)	0.01 hPa
確度 (系統誤差, バイアス)	0.1 K (対流圏) 0.2 K (成層圏)	2% (対流圏) 2% (成層圏)	0.1 hPa
長期安定性	0.05 K	1% (0.3%/decade)	0.1 hPa
備考	長期安定性の値の根拠は、1979年以降 (衛星時代) の気温変動の大きさが 0.1~0.2 K/decade 程度であることに基づく	精度, 確度, 長期安定性の%とは、体積混合比の値に対する割合のこと	

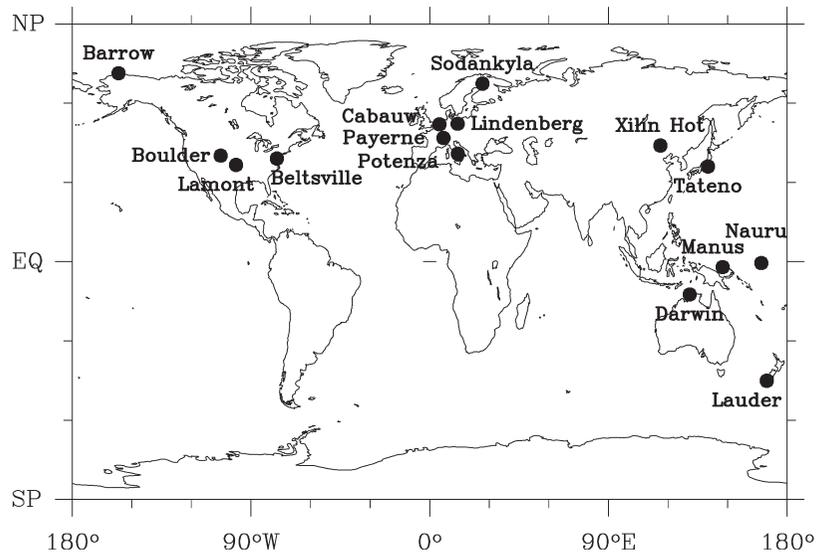
している (WG-ARO 2008 ; GCOS 2009b). 各気象要素について, GRUAN が要求する精度確度に関する最新値は, これらの文書にまとめられている. 第 2 表に, 優先度 1 に分類される気象要素に関する数値を示す. ただしこれらの値は, 今後どれだけの変動が想定され, どれだけの頻度の測定が実現可能で, 何年以内にその変動を統計的に有意だと確定する必要があるか, などにも依存すると考えられ, 今後の理論研究等により変更される可能性がある.

GRUAN では, 観測ネットワーク全体の稼働状況を日々監視し “気候データ” の取得を保証するため, Lead Centre (リードセンター) を設置している. リードセンターは現在ドイツ気象局リンデンベルグ観測所内に設置されており (2008年 6 月より正式稼働開始), 3 名の専属サイエンティストと 1 名の専属事務・技官で構成されている (奇遇にも筆者は, センター長の Holger Vömel 氏とスタッフの Franz Immeler 氏とは, 熱帯でのゾンデ観測プロジェクト SOWER (例えば, 長谷部・塩谷 2000 ; Fujiwara *et al.* 2010) などでも長年共同研究を行ってきた). なお, リンデンベルグ観測所には彼らとは別に, 高層気象観測のスタッフがいる. リードセンターでは, 各観測所と密に連絡をとりながら日々の業務が滞りなく行われるよう様々な調整と技術サポートを行うと同時に, 測定データを準リアルタイムで収集して品質の管理 (QC/QA) を行い, 観測データに問題があれば即座に観測所と連絡をとり解決につとめ, その上で, データのアーカイブと公開を行う (GCOS 2009b). データのアーカイブと公開は他の複数の機関においても同時に行う予定である. ここで, “データ” には, 測定データ, 測定値の不確かさの情報だけではなく, 測定の特性・不確かさの理解およびのちの再処理に必要なあらゆるメタデータが含まれる.

現在, 世界で 15 の観測所があり, GRUAN に参加して

いる (第 2 図). 日本からはつくば市にある気象庁の高層気象台 (館野) が 2009 年 9 月より参加している. 15 観測所のうち, 例えば, 11 地点が BSRN, 8 地点が GAW, 6 地点が GUAN, 3 地点が NDACC, 3 地点が GEWEX 統合地球水循環強化観測計画 (CEOP), 3 地点が全量炭素カラム観測ネットワーク (TCCON), 複数地点が GAW エアゾルライダー観測網 (GALION) に参加している. こうしてみると, GRUAN が, 既存の観測ネットワークを横断する存在であることも分かる. さらに, 大学が運営に関わっている観測所 (Beltsville ; アメリカ・Howard University) もあり, 長期にわたるコミットメントや学生の教育という観点で大学人である筆者には大変興味深い. 2010 年秋には, 館野を含むいくつかの観測所とリードセンターとの間で, ラジオゾンデ観測データの送受信のテストを行っている. GRUAN は最終的に 30~40 の観測地点にて構成される予定であるが, 第 2 図から分かるように, 今のところ観測地点は北半球中緯度域にかなり偏在しており, 今後, 南米, アフリカ, 南極, 太平洋等大洋内の島嶼などにも観測点を確保していくことがひとつの大きな課題である.

本節の最後に, GRUAN の位置づけ, 内部構成, 他組織との関係等について簡単にまとめておく. まず, 全球気候観測システム GCOS は, 1990 年に開催



第 2 図 2010 年現在の GRUAN 観測所. なお, Barrow, Lamont, Nauru, Manus, Darwin は, 米国 (DOE ACRF) が管理している観測所である.

された第2回世界気候会議の要求により1992年に設立された気候観測のための国際組織であり、世界気象機関 (WMO)、ユネスコ政府間海洋学委員会 (IOC)、国連環境計画 (UNEP)、国際科学会議 (ICSU) の4組織がスポンサーとなっている。GCOSには大気、海洋、陸域それぞれの観測要素があるが、大気観測に関するパネルとしてAOPCがある (AOPCはWCRPの後援も受けている)。AOPCの委員は14名程度であるが、日本からは、大野木和敏氏 (気象庁、2004年~2009年)、大河原 望氏 (気象庁、2010年~)、鈴木 睦氏 (JAXA、2002年4月頃~2006年5月)などが委員を担当されている。このAOPCの作業部会のひとつとして、2006年8月にGRUAN作業部会 (WG-ARO) が設置された。第3図に2008年2月の初会合時の全メンバーを示す。2009年以降は、15名の委員と5名の職務上の委員により構成されている (GCOS (2009b) に名簿がある)。作業部会長は、過去のラジオゾンデデータを利用して気候変動を研究してきた Peter Thorne 氏 (UKMO、現 NOAA) である。作業部会は、必要に応じて他の組織・機関・有識

者とも協力しながら、GRUANを実現し維持・発展させるために必要なあらゆる事項を検討しガイドラインを作成するとともに、リードセンターに対して科学面、技術面、および運営上の監督を行う。さらに2010年には、正式稼働に伴い生じてくる特定の諸問題に対応するため6つのタスクチームが作業部会のもとに設置された (第4.2節参照)。GRUANの主役はもちろん、リードセンターと各観測所であり (第1、2図)、それらは各国の気象機関・研究機関・大学等により支えられている。さらに、GRUANが正式稼働を開始すれば、WMO統合全球観測システム (WIGOS) に組み込まれることになり、WMO基礎システム委員会 (CBS) やWMO測器・観測法委員会 (CIMO) から技術面のサポートも受けることになる。GRUAN作業部会が立ちあがってから現在までの4年間は、作業部会、リードセンター、GRUAN観測所の3者が、他の組織・観測ネットワーク等の関係者からのコメントも参考にしながらGRUAN全体の詳細設計について議論を積み重ね、GCOS報告書を作成し、AOPCに報告するという形で、正式稼働への準備を行ってきた。



第3図 2008年2月当時のGRUAN作業部会メンバー。ドイツ気象局リンデンベルグ観測所にて。左から (敬称略)、Dian Seidel (NOAA)、Howard Diamond (U.S. GCOS)、Ells Dutton (NOAA)、Douglas Sisterson (DOE ACRF)、Leopold Haimberger (Univ. Vienna)、Franz Berger (ドイツ気象局)、David Goodrich (GCOS)、Peter Thorne (UKMO、現 NOAA; 作業部会長)、Bill Murray (NOAA)、Junhong Wang (NCAR)、John Dykema (Harvard Univ.)、筆者、Miroslav Ondras (WMO)。なお、すぐそばには、高層気象観測の大家、Richard Assmann (1845~1918) の石碑があった。

3. GRUAN はなぜ必要か

IPCC 第4次評価報告書 (IPCC 2007) では、主として地表気温・海表面温観測に基づいて「気候システムの温暖化には疑う余地がない (unequivocal)」とのメッセージが出されている。どうして今新たに上空大気の気候監視ネットワークが必要とされているのか、気温測定と水蒸気測定の問題に絞って概説する。

3.1 上空大気の気温測定の問題

上空大気の現業の気温測定は、天気予報を主たる目的として、ラジオゾンデおよび人工衛星搭載マイクロ波放射計「群」により行われてきた。これらのデータ

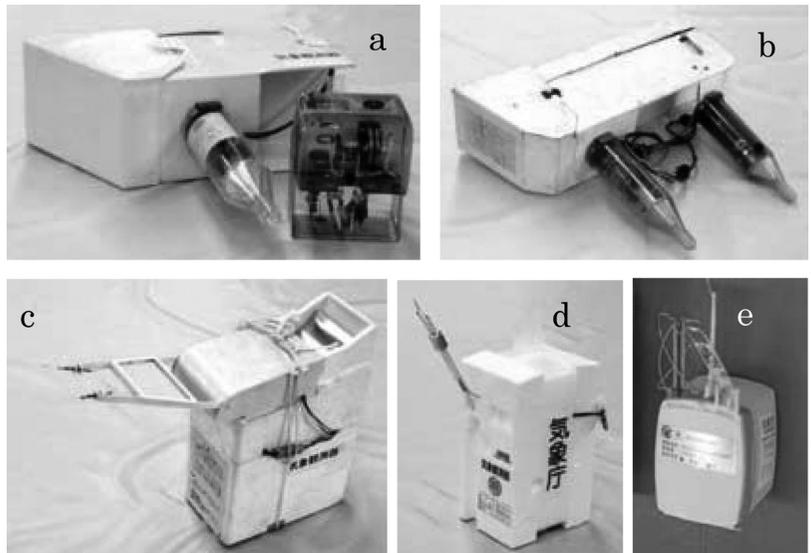
を気候変動の長期監視に利用しようとする場合、測定機器や観測処理システムの変更によるデータの品質・特性の変化が大きな問題となる。しかも、多くの場合これらの変更とそれに伴う品質・特性の変化は十分に記述されてこなかった。過去の上空の気温データは、気候データとしての一様性に大きな問題があるのである。

(1) ラジオゾンデ

ゴム気球により飛揚するラジオゾンデの気温センサーは、過去何十年にもわたり上空大気の気温測定の基本的手法であった。この種の気温センサーは、外気に暴露する形でゾンデにセットされているため、太陽放射による加熱および赤外放射による加熱冷却の影響を必然的に受けてしまう。そのため、測定時の太陽高度角や気圧高度に依存した「放射による気温測定誤差の補正」(「放射補正」と呼ばれる)が、観測処理システム内においてリアルタイムに施されている。補正アルゴリズムについては、少なくとも最近10~20年間に使われているラジオゾンデについては、多くの場合直接メーカーに問い合わせればある程度の情報は得ることができる。たとえば、1990年代に広く使われたある型のラジオゾンデでは、補正の大きさは対流圏中層で最大1°C程度、成層圏中層で最大3°C程度である。気候変動で問題となるのは10年に0.1°Cのオーダーの変化であるから、放射補正の取り扱いが極めて重要であることが分かる。なお、飛揚時の地表面状況や雲分布により放射影響は異なるはずであるが、その点は通常無視されている。さらに、温度計の素材等により応答時間は異なるし、ゾンデ全体のデザインによってはパッケージ(放射過程により周囲の空気と異なる表面温度を持つ)の影響が生じうるし、同様の理由で、気球後流 (balloon

wake) の影響も議論されることがある(気球後流とは、太陽放射や赤外放射の影響を受けて空気と異なる温度を持った気球の影響を受けた流れのこと。飛揚中、気球とラジオゾンデの間は長いロープ(7 m, 15 m, 30 m, 60 mなど)で離してあるが、気球表面に触れて温度が変化した空気が測定に影響を与えることがある)。ラジオゾンデによる気温測定の諸問題については Gaffen (1994), Immler *et al.* (2010), Shimizu and Hasebe (2010) を参照されたい。気球後流問題については Gaffen (1994) が気象庁の取り組み (Suzuki and Asahi 1978; 宮川 1991) を紹介している。最近の気象庁の取り組みには、鎌田ほか (2002) がある。

過去何十年にもわたり、こうした問題に対処するためラジオゾンデの“改良”がメーカーや気象官署によってなされてきている。第4図に、気象庁高層気象台(館野)におけるラジオゾンデの変遷を示す。ゾンデの筐体およびセンサーの形状や素材の変更は気温測定誤差の大きさの変化をもたらす。たとえ当時の最新



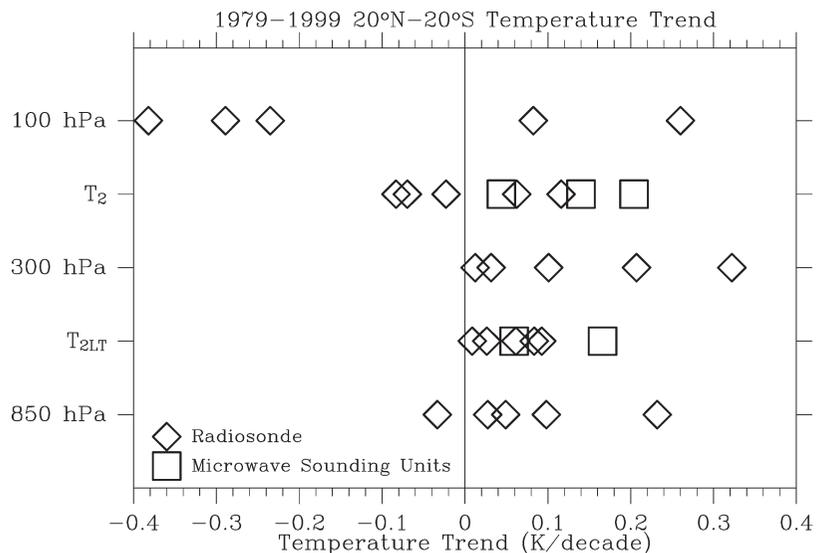
第4図 気象庁高層気象台(館野)におけるゾンデの変遷。(a) RS II56型レーウィンゾンデ(使用期間:1956~1981, 大きさ:120×330×373 mm, 重さ:約1300 g, 気温センサー:バイメタル), (b) エコゾンデ(1962~1982, 120×370×430 mm, 約1400 g, バイメタル), (c) RS2-80型レーウィンゾンデ(1981~1992, 107×182×262 mm, 約600 g, サーミスタ), (d) RS2-91型レーウィンゾンデ(1992~2009, 91×110×183 mm, 約300 g, サーミスタ), (e) RS92-SGP型GPSゾンデ(2009~, 80×75×220 mm, 約300 g, 静電容量式ワイヤ温度計)。気象庁高層気象台提供。

の知見で放射補正アルゴリズムを作成していたとしても、10年に0.1°Cのオーダーの変化を検出しようとする気候監視のためのデータとしての一様性には問題が出る。さらに、各観測所においては、測定器の仕様変更のみならず、観測手順の変更、観測時刻の変更、観測所の移転など、測定の一様性をもたらすイベントが過去に何度もあった。そういった測定の一様性は、たとえ天気予報の目的においては問題にならなかったとしても、気候監視の目的においては大きな問題となりうるわけである。気象庁は、1980年代初頭、1990年代初頭のラジオゾンデ変更の際に、同時比較飛揚実験を行い新旧システムの測定値の差を定量化していたが、その結果は基本的に内部向けの和文文書の形で残されたため（気象庁観測部高層課 1983；迫田ほか 1999；上里ほか 2008）、万人に容易に利用可能というわけにはいかなかった（気象庁は2009～2010年のラジオゾンデ変更に際しても同時比較観測を行っており、このデータはいずれGRUANのアーカイブ等より公開される予定である）。WMOの全球通信システム（GTS）を通して収集されたラジオゾンデデータを利用して過去の全球の気候変動を解析しようとする（特に海外の）気候研究者にとっては、メタデータとして従来から利用可能だった情報だけでは気候データとしての一様性を確保するには全く不十分であった。

ここで比較として、地上気象観測による気候監視の場合（近藤 2010）を考えてみると、高層気象観測の困難さおよびメタデータの重要性がよりよく理解できる。地上気象観測における気温測定には、ラジオゾンデの放射補正のような問題はなく、測定自体の信頼度はずっと高いと考えられる（それでも過去には百葉箱内の通風の問題などがあった）。しかし、たとえば都市化など、観測所周辺や露場近傍の環境の変化が、気

候データとしての非一様性をもたらすことが指摘されているように、必要なメタデータ（ここでは観測所周辺の環境変化情報）がなければ気候データとしては利用できないことになる。さらに、地上観測の場合は適切な観測環境の管理も必要となる。

測定の一様性が存在している可能性がある時刻は気候研究者には“undocumented change point”などと呼ばれており、様々な研究者が“データ一様化”（homogenization；あるいはadjustやmergeなどの動詞が使われる）と総称される様々な客観的・主観的各種補正法を提案している。第5図に、5種の異なる一様化ラジオゾンデデータセットによる熱帯の20年間の気温トレンドの例を示す。それぞれのデータセットにおける具体的な一様化手法については、Santer *et al.* (2008) から個々の文献を参照して頂きたいが、ごく簡単に紹介すると、気候学的に同領域と考えられる“近隣”のゾンデデータのコンポジット時系列と比較することにより非一様点を見出し補正する手法、再解析データとの比較を用いる手法、風のシアアのデータも補助的に用いながらある種の統計モデルを利用す



第5図 5種の異なる一様化ラジオゾンデデータセット (◇) および3種の異なる一様化マイクロ波放射計データセット (□) による、1979～1999の期間の20°N～20°Sの領域における気温のトレンド (K/10年). Santer *et al.* (2008；Fig. 6) および Seidel *et al.* (2009；Fig. 4) に基づく。T₂ および T_{2LT}はマイクロ波放射計の重み関数に対応しており、前者は主として対流圏に重みがあるが下部成層圏からの寄与を多少含むのに対して、後者はほぼ下部対流圏に限定される（例えば、Christy *et al.* 2003）。異なる一様化データセットの概説については、本文を参照のこと。

る手法などがある。不完全なメタデータも非一様時刻の検出に利用しているものが多いが、一切利用しないで与えられた時系列だけで判断している手法もある。こうした一様化手法は非常に複雑でその適用には多大な労力を伴うものであるが、第5図に示すように、異なるデータセットは異なる気温トレンド値を提示してしまっている。特に、熱帯の上部対流圏～対流圏界面では、トレンド値の符号さえ異なってしまっている。

(2) 現業用人工衛星搭載マイクロ波放射計

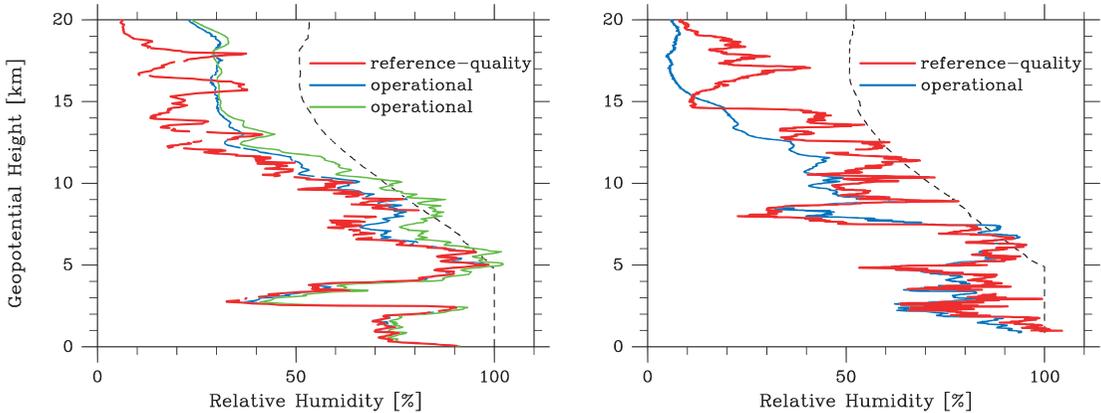
1979年からは、現業用人工衛星搭載のマイクロ波放射計“群”の観測データが利用可能となり、全球解析および再解析に取り込まれるようになってきた。各衛星は3年から5年で次々と入れ替わっている(例えば, Onogi *et al.* (2007), Fig.26)。これらマイクロ波放射計群には、衛星軌道要素(したがって測定ローカルタイム)の変化、測定器のドリフト、異なる放射計間の感度の差異、測定波長域の違いなどがあり、気候データとしての一様性には問題がある。実際、Onogi *et al.* (2007) の Fig.21 の日本の再解析(JRA-25)とヨーロッパの再解析(ERA-40)の気温偏差図には、数年おきに気温値のずれ(対流圏で 0.4°C 以上のジャンプ、成層圏で 2°C 以上のジャンプ)がみられ、こうしたジャンプの時期と彼らの Fig.26 に示されている新衛星導入時期が非常によく対応していることが分かる。再解析データユーザーには衝撃的な図である。JRA-25再解析システムにおいては、放射輝度温度の補正が導入されている(Sakamoto and Christy 2009)。新しい再解析には、さらに進んだ放射輝度温度のデータ一様化の方法として変分法バイアス補正(例えば, Dee 2005; 佐藤 2007)が導入されている。変分法バイアス補正は衛星切り替え時のジャンプを大きく軽減する効果があるが、モデル気候値に漸近させるので、モデルに大きな系統誤差がある場合には真値からずれてしまう問題が残る。第5図には、3種の異なる一様化マイクロ波放射計データセットによる気温トレンドも示してある(詳細は, Santer *et al.* (2008) を参照のこと)。異なる一様化衛星データセットは異なる気温トレンド値を示しており、当然、ラジオゾンデデータに基づく研究とも整合的でない。

1990年代には、ラジオゾンデおよび衛星観測データセットに含まれる人工的な非一様性がみかけの長期変化を生み出し、真の気候変化を見積もる上で大きな問題であることが気付かれた。こうした問題を軽減しながら上空大気の気温変化を見積もるため、既述の通

り、2000年代には様々な研究者が様々な考え方で“一様化した”データセットを作成した。その結果、異なる一様化データセットでは異なるトレンド値が得られてしまった。このような問題を解決するためには、そもそもラジオゾンデデータや衛星データのバイアスを一意に補正するための“reference”観測データセットが必要不可欠である。GRUANの大きな動機のひとつはまさにこの点にある。

3.2 上部対流圏・下部成層圏の水蒸気測定の問題

上部対流圏・下部成層圏の水蒸気濃度は分圧や数密度で言えば地上の4~6桁落ち程度(体積混合比で100~1 ppmv)と大変低く、技術上その測定は大変困難であると同時に、降水過程つまり天気予報の問題においては無視しても大きな問題はないと考えられている。実際、第6図に示すように、近年においてもラジオゾンデの相対湿度計は、この高度領域においてレスポンスが非常に遅いかほとんどなく、その測定値ははなはだ不正確であるが、天気予報に悪影響を与えるとは認識されていない。しかし、水蒸気は上部対流圏においては地球の放射エネルギー収支に主要な役割を果たし、成層圏においては放射収支およびオゾンの光化学収支に重要な役割を果たす(例えば, Elliott 1995; SPARC 2000)。つまり、この領域の水蒸気は気候変動やオゾン層変動に非常に重要な役割を果たしており、従ってその長期監視は必要不可欠なのである。なお、近年、研究の世界で活発に議論されている問題としては、下部成層圏水蒸気濃度の長期増加傾向と近年の急減問題(例えば, SPARC 2000; Fujiwara *et al.* 2010)、それに伴う放射強制力変化の問題(Solomon *et al.* 2010)、および熱帯対流圏界面領域における高い過飽和の問題(Peter *et al.* 2006)などがある。上部対流圏・下部成層圏の水蒸気は、気象官署の天気予報を目的とした“業務”よりむしろ研究者達の気候に関する“研究”の目的で、特殊でより大がかりな気球・航空機・衛星等搭載センサーを用いて測定されてきた。GRUANの目的に沿った高層気象観測用ゴム気球に搭載可能なセンサーに絞って紹介すると、NOAAにより過去30年間開発・運用されてきたNOAA冷媒使用型鏡面冷却水蒸気計 NOAA FPH(例えば, Hurst *et al.* 2011)、その改良版であるCFH(Vömel *et al.* 2007a; Fujiwara *et al.* 2010)、スイスの気象機器会社 Meteolabor によるペルチエ使用型鏡面冷却水蒸気計 Snow White(Fujiwara *et al.* 2003; Vömel *et al.* 2003; 成層圏での動作には問題が



第6図 相対湿度（液体の水に対するもの）の同時比較観測の例。（左）インドネシア・ワトコセツ（7.57° S, 112.65°E），2001年12月3日03：36 LT 放球（気温最小点で定義した対流圏界面の高度18.0 km），（右）インドネシア・コトタバン（0.20°S, 100.32°E），2008年1月10日06：09 LT 放球（対流圏界面17.9 km）．赤線は“reference-quality”とされる機器による測定結果で，左が Snow White 鏡面冷却水蒸気計，右が CFH 鏡面冷却水蒸気計によるもの．青線は Vaisala RS80 ラジオゾンデ（左：H Humicap センサー，右：A Humicap センサー），緑線（左のみ）は明星電気 RS2-91 ラジオゾンデによる測定結果．点線は飽和相対湿度を示す（0°C以上では100%，0°C以下では現業用ラジオゾンデの相対湿度の定義により氷に対する飽和値は100%未満の値となる．詳細は Fujiwara *et al.* (2003) を参照のこと）．いずれも SOWER の観測キャンペーンにより取得されたデータ．上部対流圏・下部成層圏の領域で，現業用ラジオゾンデのレスポンスが非常に遅くなっていることが分かる．他の事例として Seidel *et al.* (2009) の Fig. 5 も参照のこと．

あることが分かっている），ロシア中央大気研究所によるライマン α 線利用の FLASH-B（例えば，Vömel *et al.* 2007b）などがある（ちなみに，過去には日本でも成層圏測定用の鏡面冷却水蒸気ゾンデが開発・運用されていた（Kobayashi 1960；外山 1979；小林 2007））．このほか，様々な研究者が開発している高高度航空機搭載用の水蒸気センサーや，成層圏に関しては各種研究用人工衛星搭載センサーなどが存在する．しかし，非常に重大な問題は，同時比較観測キャンペーンを行うと，異なるセンサーの測定結果に気候変動監視の観点から看過できない差異（相対誤差 10%~20%，ひどい場合は 50%以上）が依然として見出されることである（例えば，SPARC 2000；Fujiwara *et al.* 2010）．

2007年にはドイツの AIDA（Aerosol Interaction and Dynamics in the Atmosphere）チャンパーという上部対流圏・下部成層圏の気圧・気温・水蒸気濃度を実験室内で再現できるチャンパー（実験用の閉鎖室）を用いた AquaVIT という名の水蒸気センサー比較キャンペーンが行われた．CFH, FLASH-B, Snow White を含む 16 種類 25 台の水蒸気センサーが参加した（Fahey *et al.* 2009）．上部対流圏・下部成層

圏の水蒸気測定を念頭においたこのような室内比較実験は世界初であった．このキャンペーンの大きな問題は，チャンパー内で経験される気圧・気温・水蒸気濃度の範囲において，測定の不確かさが客観的に評価されていて SI 単位系標準にトレーサビリティがあるという意味で真に“reference”となる測定器がそもそも存在しなかったことである．結局，“core”測定器に指定してあった 6 種の水蒸気センサー（CFH と FLASH-B を含む）の測定値を用いて暫定的な参照値を作成し，比較を行っている．その結果，少なくとも“core”測定器については相対誤差 10%以内でお互いに一致しているという結論になっている．ただし，ここで評価された個々のセンサーの測定の不確かさを，気球や航空機に搭載して実際の大気中の水蒸気濃度を測定する場合にすぐにあてはめることはできないことが明記されている．実験室内でのセンサーの振る舞いと飛行体に搭載された上での実大気中のセンサーの振る舞いが同じである保証はないからである．GRUAN においては，NOAA FPH, CFH, Snow White, FLASH-B が，当面採用可能性のある機器として認識されているが，さらなる測器の開発改良，比較手法・不確かさの評価手法の開発改良が必要不可欠

である。なお、降雨現象等に直接かかわる下部対流圏についても測器間の違いが顕著である（近年でも相対誤差10%程度のバイアスがありうる）ことが1990年代以降、認識されるようになってきている（例えば、Fujiwara *et al.* 2003）。水蒸気は、気候問題、オゾン層問題において非常に重要な分子種であるが、現在の気候変動監視の要求を十分に満たすだけの高精度な測定を行える段階にはまだ至っていないのが現状である。

以上、第3節では、GRUANが今なぜ必要なのか、過去・現在の上空大気的气温測定と水蒸気測定の問題に絞って議論した。GRUANによる真の上空大気的气候監視活動によって、たとえばIPCC（2007）の結論がくつがえる可能性さえあるなどと主張するつもりは全くない。温暖化問題について気象学・気候学が取り組むべき現在の重要課題は、気候のサイエンスの不確かさを低減することであり、GRUANはその目的に沿った本質的な活動のひとつであると筆者は考える。また、新しい測定、新しい観測システムの登場が、地球科学の進展の原動力になってきた歴史があるということも指摘しておきたい。

4. GRUANの道筋と課題

本節では、GRUANの経緯、最近の新しい展開として6つのタスクチーム結成の件、および、GRUAN用のラジオゾンデを確保していく方法について、情報をまとめたい。これらを通して、こういった国際的な観測ネットワークがどのようにして生まれ、どのように育っていくかについてもお伝えしたい。

4.1 GRUANの経緯

1990年に開催された第2回世界気象会議において気候監視のための観測システム確立が提言され、1992年に国際的な気候観測の枠組としてGCOS（全球気候観測システム）が発足した。それとほぼ同時期に気候変動に関する国際連合枠組条約（UNFCCC）が締結されているが、この条約では温室効果ガス削減だけでなく気候変動に関する研究と組織的観測についても定めており、GCOSがその組織的観測を担うことになった。高層観測については、過去にデータの蓄積があり今後の継続性が保証されている、WMO全球観測システム（GOS）を構成する現業の高層観測点群の中から新たなネットワークを構築することが考えられた。総観規模波動を捉えるのに十分な数として150地点が選ばれ、GCOS Upper Air Network（GUAN、

GCOS高層観測網）が作られた（GCOS 2002）（なお、日本のGUAN観測所は南極昭和基地を含めて7地点あるが、そのうちの一点、那覇の観測が2008年3月に打ち切られてしまい、代わりに石垣島がGUANとして新たに選定されるということがあった）。その後、しっかりした中央管制がなく各国の事情に左右されてしまうGUANでは気候監視観測の条件を十分に満たせないという認識が広がっていったようである。

一方、研究の世界においては、1990年代の様々な研究やそれに基づいた提言（例えば、Elliott 1995）を受けて、2002年に、IPCCの第4次等の報告書でリードオーサーもつとめたNCARのKevin Trenberth氏が筆頭著者となり、気候変動監視のための統合化された観測システム構築の必要性を提言し（Trenberth *et al.* 2002）、さらに翌年には、気候監視のための高層気象観測網の必要性に特化した提言をシカゴで開かれたNOAA Climate and Global Change Panel meetingにおいて“Proposed upper air baseline network”というタイトルで発表している。2004年には、現GRUAN作業部会メンバーのひとりのDian Seidel氏（旧姓Gaffen）が、“*In Situ* Upper-Air Observations for Climate Monitoring and Research”に関する提言を行った内部文書をまとめ、NOAA内部で議論を行った。また、2003年には、当時GCOS AOPCの議長だったMike Manton氏から現GRUAN作業部会長のThorne氏に対して、そうした観測網確立に向けた動きを主導するよう個人的な要請があったとのことである。このあたりから、現業の世界と研究の世界との協力が始まったと言えそうである。UNFCCCからの要請を受けて2004年に策定されたGCOS実施計画（GCOS 2004）では、長期にわたる気候変動監視のための基準となる高精度な高層気象観測ネットワークの確立が課題のひとつとされ、“Key action”のひとつとして、“establish a high quality reference network of about 30 precision radiosonde stations and other collocated observations”の文言が入っている。

これらの提言を受けて、2005年2月に米国ボルダーにて、2006年5月に米国シアトルにて2回のワークショップが開かれた。前者では、気候変動研究者・データユーザーが集まり、サイエンスの観点から気候監視のための高層気象観測に必要な要素は何かを議論され、後者では、測器開発者や各種観測ネットワーク運営者も出席して、技術的な観点から実現の方向性が

議論された（なお、後者については筆者にも参加要請が来たが、この時点ではまだこういった動きを全く理解できていない状況であった。結局筆者は欠席し、京都大学の塩谷雅人氏が SOWER プロジェクトの代表という形で出席している）。

これら 2 つの会議での議論を踏まえ、GCOS の AOPC のもとに 2006 年 8 月に GRUAN 作業部会 (WG-ARO) が設置された。シアトル会議の Steering Committee メンバーのほとんどが作業部会メンバーとなっているが、米国の研究者がほとんどだったので、真に国際的なプロジェクトとするために、アジアや欧州の研究者を数名探し、筆者にも白羽の矢が立ったということのようである（日本における昨今の科学への人的・施設の・資金的貢献の大きさを思い起こせば、各分野における同様の意思決定プロセスに日本の科学者はもっと積極的に関わるべきなのであろう）。専門性という点では、SOWER プロジェクトにおける特殊水蒸気ゾンデへの取り組み (Fujiwara *et al.* 2003; Vömel *et al.* 2003; Fujiwara *et al.* 2010)、および、インドネシアでの長期定常オゾンゾンデ観測 (1993 年～現在; 自身の参加は 1994 年より) と熱帯オゾンゾンデ観測ネットワーク SHADOZ (1998 年～) に関わってきている経験 (Fujiwara *et al.* 2000; 藤原 2001; Thompson *et al.* 2003) を活かしつつある。作業部会によって初めてまとめられた報告書が GCOS (2007) であり、上記 2 つの会議における議論のまとめという位置づけである。その上で、2007 年にリードセンターの募集を行い、ドイツ気象局リンデンベルグ観測所に決定した。当時のドイツ政府が気候変動問題に強くコミットしようとしていることを感じた。2008 年 2 月に一部のスタッフが着任し、2008 年 6 月より正式稼働を開始している。

2008 年 2 月にリードセンターにおいて会議が開催され (GCOS 2008; 第 5 節)、既述の通り作業部会メンバーが初めて一堂に会した (第 3 図)。2008 年 12 月には、筆者が主導して作業部会として、測器開発者・メーカー向けに、GRUAN で必要とされる “reference radiosonde” の仕様を GCOS (2007) に基づいてまとめ直した (WG-ARO 2008)。その後、毎年 1 回、2 月終わりから 3 月頭の時期に、GRUAN 観測所のひとつで、GRUAN 実施・調整会議 (Implementation Coordination Meeting, ICM) が開催されてきている。2009 年の ICM-1 は米国オクラホマ (GCOS 2009a)、2010 年の ICM-2 はスイス・バイエル

ン (GCOS 2010; 水野・中村 2011) にて開催された。2011 年の ICM-3 はニュージーランドで開催される予定である。なお、2010 年からは数ヶ月に 1 度、1 回 1～2 時間程度の作業部会メンバー等による電話会議も開かれるようになってきた。

なお、GRUAN の観測所候補については、2005 年のボルダー会議、2006 年のシアトル会議あたりで、(おそらく主として研究者の間で) 議論されていたようである (GCOS 2007)。その際、日本のサイトは考慮されていなかった。2008 年のリンデンベルグ会議 (GCOS 2008) では、すでに GRUAN 観測所候補の責任者たちが会議に招かれていた。この会議の休憩時間中に、さらなる観測所候補について議論の場が設けられ、筆者はむしろ SHADOZ・SOWER 関係者の立場で参加した。GCOS (2007) の原稿準備時およびこのリンデンベルグ会議で、筆者が気象庁サイトを提案することは不可能ではなかったが、責任を持てる立場にあるわけではなかったので発言を控えてしまった。その後も気象庁のしかるべきルートとのコネクションがなく、気にはなりながらも時間が過ぎて行ってしまったというのが正直なところである。2008 年 10 月の GCOS 運営委員会で GRUAN の計画について GCOS 事務局に内容を確認された大野木 AOPC 委員が、当時気象庁観測部観測課におられた水野 量氏に連絡され、気象庁内で参加検討が具体的に始まった。同じ月に水野氏から筆者に GRUAN への参加要件についての問い合わせがあり、情報交換が始まった。その後、気象庁内で正式参加が決定され、2009 年 4 月の AOPC の定期会合で大野木委員から気象庁の GRUAN 参加表明があり、翌月には筆者が気象庁を訪問して GRUAN の詳細な説明と議論を行った。今後の観測地点の追加については、次の節にて解説する「GRUAN 観測所の評価・拡張 (追加)・認可」に関するタスクチームが、GRUAN 観測所として満たすべき要件をより明確化したのちに、作業部会が主導して検討する予定となっている。

4.2 6 つのタスクチーム

第 2 節に GRUAN 観測所と GRUAN データの諸要件、および GRUAN の構成について GRUAN 実施計画 (GCOS 2009b) 等に基づいて簡単にまとめたが、このような条件を満たす真の GRUAN を実現するためには、多岐にわたる具体的な諸問題に対応する必要がある。2010 年半ば以降、リードセンターが中心となって GRUAN Guide (旧名 GRUAN Manual) を

作成中であるが、作業部会とリードセンターでは対応しきれない検討項目がまだ多数残っている。ICM-2後の新しい展開として、GRUAN 正式稼働を目前にひかえ、そうした検討項目のうち特に重要で緊急を要する6つの項目について、作業部会のもとにタスクチームを立ちあげることとなった。各タスクチームには2名の議長がおり、うちひとりとは作業部会メンバーであることが条件となっている。個々のタスクチームについて、以下に簡単に説明する。

(1) ラジオゾンデ

GRUAN の目的に沿ったラジオゾンデセンサー(気温、水蒸気、気圧、他の気象要素)について情報収集し、個々について測定の不確かさの評価を行い、作業部会に対して、GRUAN 観測所で使用可能なセンサー、その操作手順、収集すべき全メタデータ等について推薦する。

(2) GNSS/GPS 可降水量測定

GNSS/GPS 可降水量測定とは、GNSS/GPS 衛星からの電波信号を地上アンテナで受信し、電波伝搬遅延量から水蒸気カラム量を推定するものである。高精度で安定な観測が実現できると評価されていることから、GRUAN 観測所の必須項目のひとつとなっている。このチームでは、ハードウェアとソフトウェアに関する情報を収集し、GRUAN としてのガイダンスを作成する。

(3) 観測スケジュール

気候トレンド検出、衛星校正・検証、日変動・メソ現象等の局地気象研究などといった異なる目的・要請を満たす最適な観測ガイダンスを作成する。

(4) GRUAN 観測所の評価・拡張(追加)・認可

GRUAN 観測所として満たすべき要件をより明確化し、各観測所の調査・評価を行うとともに、現在手薄な地域・気候区にネットワークを拡張する各種サポートを行う。

(5) 補助的な観測

ラジオゾンデ、GNSS/GPS 機器以外の GRUAN に関連した地上・衛星リモートセンシング機器・観測に関する各種検討を行う。

(6) GRUAN 観測所連合

各観測所から1名が委員として参加し、各観測所間、および、観測所・リードセンター・作業部会の間のコミュニケーションを効率化する。

2011年1月現在、まだ一部のタスクチームについて

は仕事内容とメンバーを詰めている最中ではあるが、日本からは、気象研究所の小司禎教氏が(2)のメンバー、京都大学の塩谷雅人氏が(4)のメンバー、気象庁の水野量氏が(6)のメンバー、そして筆者が(1)の共同議長のひとりを務めることになっている。

4.3 新しい“reference”ゾンデの開発に向けて

第3節に述べたように、現在利用可能なラジオゾンデは、気候観測に必要な要件を満たしていない。気温センサーについては放射補正問題があるし、現業用ラジオゾンデの水蒸気センサーは上部対流圏での性能が不十分であり下部成層圏では測定できない。特殊な水蒸気ゾンデの運用は依然としてコストがかかる。より高性能で、かつ、より低コストのラジオゾンデセンサーの開発を、測器開発者・メーカーに促していく必要がある。そのため、WG-ARO (2008) では、HMEI を通じて、必要な仕様を測器開発者に提示した。HMEI (<http://www.hydrometeoindustry.org/>) とは世界の水文・気象測器のメーカーの協会である。2000年にWMOの事務局長が提案して出来た組織であり、WMOと測器メーカーとをつなぐ役割を持つ。HMEI事務局はジュネーブのWMO内に設置されている。今回のように、WMOとして測器開発メーカーに新しい仕様の測器を開発して欲しいと考える場合などに有効活用される。

上記のWG-ARO (2008) では、ひとつの目標として、2010年に行われる予定であったWMO測器・観測手法委員会(CIMO)主催による第8回WMO Intercomparison of Radiosonde Systems (中国広東省陽江、2010年7~8月実施済み)を提示し、ここにGRUAN用の“reference”センサーとして採用可能性のあるラジオゾンデ搭載機器を持ってきて参加してもらえれば、比較・評価をする旨告知した。このようなCIMOによるラジオゾンデ観測キャンペーンは、5年に1度程度の頻度で実施されてきている(Jeanet *et al.* 2008)。従来は世界各国の現業用ラジオゾンデの同時飛揚比較・評価を行ってきたものであったが、この第8回からは、GRUAN用の“reference”ゾンデの比較評価も要素のひとつとして取り入れることになった。キャンペーンは2010年7月中旬から8月初めにかけて実施され、GRUANからはリードセンターのVömel氏とImmler氏、作業部会メンバーのWang氏、および筆者(CFHの一部供給、Snow White用自作インレットチューブの供給、米国Lockheed Martin Sippican社のMultithermistorsondeの

オペレーションも担当)の4名がGRUAN代表として現地へ赴いた。日本からは、明星電気株式会社の清水健作氏と甲斐浩平氏が、現業用ラジオゾンデRS06Gと新たに北海道大学と共同開発した高速応答タングステン気温計 Meisei Temperature Reference (MTR; Shimizu and Hasebe 2010) を持ちこんで参加した。この中国観測キャンペーンについては、CIMO/GCOSによる正式な報告書の出版(2011年5月, Nash *et al.* 2011)を踏まえて、本誌にて別途詳しく紹介したい。なお、今後の“reference”ゾンデの開発促進、評価等はラジオゾンデタスクチームの枠組で取り組んでいくことになる。

5. さいごに

筆者が作業部会に参加を要請された2006年には、GRUANの全体像は全くよく見えていなかった。その後、GCOS(2007)のドラフトやメールのやりとりを何度も読んである程度は理解したが、どうもまだ具体的なイメージを得ることはできなかった。そういう状況で出席した2008年2月のリンデンベルグ会議(GCOS 2008)は、記憶に非常に深く刻まれるものであった。一言でいえば“異文化コミュニケーション”の場であった。まず、研究業界(気候研究)と現業業界(天気予報)という対立があった。これには、NOAAでは気候と天気が全く別の部署に分かれているということも背景にあるようであったが、もちろん、データ解析を行う研究者(理論)と観測所・観測ネットワーク関係者(現場)、という対立もあった。観測の中でも、地上設置型の微量成分測器を扱う人々とラジオゾンデ観測に関わる人々との間には“reference”の語に対する極めて大きな認識の違いがあったし、衛星観測の検証ネットワークが必要だと思っている人々が要求する観測スケジュール(overpass観測:衛星が観測所上空を通過するのと同期してゾンデ等の地上観測を行うこと)は現業ラジオゾンデ観測業界の現状(UTCに即した定時観測)に簡単には合わない。また、そもそも上昇速度が有限なゾンデによる厳密なoverpass観測は不可能であり衛星検証を優先するのはナンセンスとの意見も出たりした。観測ネットワーク間でも運営のやり方に大きな違いがあって、しっかりした中央管制のもと理想をかなり追究できているものと、各国・各観測所の事情により結局現実的な選択をせざるを得なかったものがある。また、何十年にもわたり定期的にメーカーを集めて比較観測

キャンペーンを実施しながら世界のラジオゾンデの性能を高めてきたCIMOの立場からすれば、気候研究者達が要求している“reference radiosonde”の仕様はあまりに現実離れしているように映ったし、メーカーの立場からすれば、科学者がいろいろな要求を出すのはよいが結局ビジネスの観点抜きに新たな機器の開発は考えられない。また、気候監視観測という点でいくつか成功していると思われるプログラムがあるが、成功の秘訣は“stable staff, stable funding, stable instrument”であると持論を展開する人もいた。ネットワークの全体デザインも非常に大事だが、特定の個人の貢献・献身、安定した資金供給、適切な測定原理・測定器の存在が結局最後には非常に重要になってくる。さらに、“reference”という用語のとらえ方や、“精度・確度”なのか“トレーサビリティ・不確かさ”なのか、など、業界による用語の意味合い、使用法・選択の違いがあるのだということも次第に明らかになった。同じ気象学・気候学の範疇にいらながらも異なる背景を持った人々の議論は大いに白熱した。作業部会長のThorne氏や、Dave Goodrich氏をはじめとするGCOS事務局の面々が議論を適宜なんとかうまくコントロールし前向きな方向性を打ち出そうとした。科学政策の立案には、科学者だけ集めてもだめなのだということがよく分かった。その後、年を経るに従い、GRUANに対する皆の共通認識がそれなりに形成され、議論は極めて建設的になってきた。“気候データ”取得という点では妥協せず、しかし現実的なGRUAN実現の方策を皆で考えるようになってきた。しかし、リンデンベルグ会議での異なる立場からの様々な議論は永遠に有効であり、常に原点として立ち返って現状を反省する際の指針とすべきだと思われる。

地球温暖化問題としての気候変動問題が明確に意識されるようになって20年である。はじめの10年で既存の観測データを用いた研究が進んだと同時に、そういったデータの持つ重大な問題が徐々に露見した。全体のシステムデザインをしっかりと行った新たな気候監視のための高層気象観測ネットワークの必要性が認識され、作業部会を立ち上げるまでに約5年、それから観測ネットワークの実現までにまた約5年かかってようやく今に至った。GRUANは気候監視を目的として構築されるほぼ初めての高層観測ネットワークであり今後数十年以上継続される必要があるが、課題はまだ山積しており様々なレベルで引き続き努力がな

されている。今後は、気象学会会員の皆さまおひとりおひとりにも、GRUANの様々な要素に対してお知恵をいただいたり、データを利用して気候変動研究を進めていただいたりしながら、信頼に値する気候データ作成のためぜひ長期にわたりサポートを頂ければと思います。

追記

2011年2月28日～3月4日の期間、第3回実施調整会議(ICM-3)がニュージーランドのQueenstownにおいて開催された。この中で、「GRUAN観測所の評価・拡張(追加)・認可」に関するタスクチームの仕事は、作業部会が引き取ることに決まり、塩谷雅人氏には作業部会メンバーになっていただくこととなった。また、この会議に出席された木津暢彦氏には「ラジオゾンデ」に関するタスクチームに参加していただくこととなった。リードセンターからは、2011年3月1日より、GRUANデータ“β版”がftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/gruan/から公開されたことが報告された。さらに、2011年4月に、水野量氏の釧路気象台異動に伴い、横田寛伸氏(気象庁観測部観測課)が「GRUAN観測所連合」のタスクチームのメンバーとなられた。

謝辞

NOAAのPeter Thorne氏、Dian Seidel氏、NCARのJunhong Wang氏には、GRUANの経緯に関する情報を頂きました。GRUANリードセンターのMichael Sommer氏にはGRUAN観測所に関する諸情報等を頂きました。気象庁の大野木和敏氏、山本哲氏、木津暢彦氏、能登美之氏、水野量氏、京都大学の塩谷雅人氏からは原稿に対する貴重なコメントを頂きました。GRUANの諸会議出席には、UCAR、WMO、米国GCOS事務局よりサポートを受けました。原稿初期版は、北海道大学のサバティカル研修制度を利用して滞在していた米国NCAR/ACDにて執筆しました。北海道大学地球環境科学研究所およびNCAR/ACDの関係諸氏に感謝します。第6図に使用したデータはSOWERの観測キャンペーンにより取得されたものです。第2、5、6図の作成には地球流体電脳ライブラリーを使用しました。最後に、適切なコメントをいただいた小司禎教担当編集委員および2名の査読者の方に感謝いたします。

略語一覧

ACRF : ARM Climate Research Facility
 AOPC : Atmospheric Observation Panel for Climate
 気候のための大気観測パネル
 ARM : Atmospheric Radiation Measurement 大気放射観測計画
 BSRN : Baseline Surface Radiation Network 基準地上放射観測網
 CBS : Commission for Basic Systems WMO 基礎システム委員会
 CEOP : Coordinated Energy and water cycle Observations Project GEWEX 統合地球水循環強化観測計画
 CFH : University of Colorado Cryogenic Frostpoint Hygrometer
 CIMO : Commission for Instruments and Methods of Observation 測器・観測法委員会
 DOE : Department of Energy 米国エネルギー省
 ERA-40 : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) 40 Year Re-analysis
 ヨーロッパ中期予報センター再解析
 FLASH-B : Fluorescent Advanced Stratospheric Hygrometer for Balloon
 GALION : GAW Aerosol LIDAR Observation Network
 GAW エアロゾルライダー観測網
 GAW : Global Atmosphere Watch WMO 全球大気監視計画
 GCOS : Global Climate Observing System 全球気候観測システム
 GEWEX : Global Energy and Water Cycle Experiment
 全球エネルギー・水循環観測計画
 GNSS : Global Navigation Satellite System (米国によるGPSをより一般化した用語)
 GOS : Global Observing System WMO 全球観測システム
 GPS : Global Positioning System 全地球測位システム
 GRUAN : GCOS Reference Upper Air Network
 GCOS 基準高層観測網
 GSN : GCOS Surface Network GCOS 地上観測網
 GTS : Global Telecommunications System WMO 全球通信システム
 GUAN : GCOS Upper Air Network GCOS 高層観測網
 HMEI : The Association of Hydro-Meteorological Equipment Industry
 ICSU : International Council for Science 国際科学会議
 IOC : Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO
 ユネスコ政府間海洋学委員会
 IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
 気候変動に関する政府間パネル
 JRA-25 : Japanese 25-year Reanalysis (気象庁・電力

- 中央研究所による再解析)
- JAXA : Japan Aerospace Exploration Agency 宇宙航空研究開発機構
- NCAR : National Center for Atmospheric Research 米国大気研究センター
- NCAR/ACD : NCAR Atmospheric Chemistry Division
- NDACC : Network for the Detection of Atmospheric Composition Change 大気組成変化検出のためのネットワーク
- NOAA : National Oceanic and Atmospheric Administration 米国海洋大気庁
- NOAA FPH : NOAA Frost Point Hygrometer
- QC/QA : Quality Control and Quality Assurance
- SHADOZ : Southern Hemisphere Additional Ozone-sondes 南半球オゾンゾンデ観測網
- SI : International System of Units/Système International d'Unités 国際単位系
- SOWER : Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region
- SPARC : Stratospheric Processes And their Role in Climate 成層圏過程とその気候影響
- TCCON : Total Carbon Column Observing Network 全量炭素カラム観測ネットワーク
- UCAR : University Corporation for Atmospheric Research 米国大気科学大学連合
- UKMO : United Kingdom Met Office イギリス気象局
- UNEP : United Nations Environment Programme 国連環境計画
- UNFCCC : United Nations Framework Convention on Climate Change 気候変動に関する国際連合枠組条約
- UTC : Coordinated Universal Time 協定世界時
- WCRP : World Climate Research Programme 世界気候研究計画
- WG-ARO : Working Group on Atmospheric Reference Observation GRUAN 作業部会
- WIGOS : WMO Integrated Global Observing System WMO 統合全球観測システム
- WMO : World Meteorological Organization 世界気象機関
- 参 考 文 献**
- Christy, J. R., R. W. Spencer, W. B. Norris, W. D. Braswell and D. E. Parker, 2003 : Error estimates of version 5.0 of MSU-AMSU bulk atmospheric temperatures. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 613-629.
- Dee, D. P., 2005 : Bias and data assimilation. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **131**, 3323-3344.
- Elliott, W. P., 1995 : On detecting long-term changes in atmospheric moisture. *Clim. Change*, **31**, 349-367.
- Fahey, D. W., R. S. Gao and O. Möhler, 2009 : Summary of the AquaVIT Water Vapor Intercomparison : Static Experiments. Available from <https://aquavit.icg.kfa-juelich.de/WhitePaper/> (2011.1.21閲覧)
- 藤原正智, 2001 : 赤道ケルビン波に伴う成層圏対流圏大気交換と熱帯対流圏界面領域の研究 —2000年度山本・正野論文賞記念講演—. *天気*, **48**, 801-810.
- Fujiwara, M., K. Kita, T. Ogawa, S. Kawakami, T. Sano, N. Komala, S. Saraspriya and A. Supto, 2000 : Seasonal variation of tropospheric ozone in Indonesia revealed by 5-year ground-based observations. *J. Geophys. Res.*, **105**, 1879-1888.
- Fujiwara, M., M. Shiotani, F. Hasebe, H. Vömel, S. J. Oltmans, P. W. Ruppert, T. Horinouchi and T. Tsuda, 2003 : Performance of the Meteorolabor "Snow White" chilled-mirror hygrometer in the tropical troposphere : Comparisons with the Vaisala RS80 A/H-Humicap sensors. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 1534-1542.
- Fujiwara, M., H. Vömel, F. Hasebe, M. Shiotani, S.-Y. Ogino, S. Iwasaki, N. Nishi, T. Shibata, K. Shimizu, E. Nishimoto, J. M. Valverde-Canossa, H. B. Selkirk and S. J. Oltmans, 2010 : Seasonal to decadal variations of water vapor in the tropical lower stratosphere observed with balloon-borne cryogenic frost point hygrometers. *J. Geophys. Res.*, **115**, D18304, doi : 10.1029/2010JD014179.
- Gaffen, D. J., 1994 : Temporal inhomogeneities in radiosonde temperature records. *J. Geophys. Res.*, **99**, 3667-3676.
- GCOS (Global Climate Observing System), 2002 : Guide to the GCOS Surface and Upper-Air Networks : GSN and GUAN. GCOS-73, WMO/TD-No. 1106, 37pp.
- GCOS (Global Climate Observing System), 2004 : Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC. GCOS-92, WMO/TD-No.1219, 136pp.
- GCOS (Global Climate Observing System), 2007 : GCOS Reference Upper-Air Network (GRUAN) : Justification, requirements, siting and instrumentation options. GCOS-112, WMO/TD-No.1379, 25pp.
- GCOS (Global Climate Observing System), 2008 : GCOS Reference Upper Air Network (GRUAN). Report of the GRUAN Implementation Meeting, Lindenberg, Germany, 26-28 February 2008. GCOS-121, WMO/TD-No.1435, 36pp.
- GCOS (Global Climate Observing System), 2009a : Report of the first GCOS Reference Upper Air Net-

- work Implementation and Coordination Meeting (GRUAN ICM-1) (2-4 March 2009, Norman, Oklahoma, USA). GCOS-131, WMO/TD-No.1492, 21pp.
- GCOS (Global Climate Observing System), 2009b : GRUAN Implementation Plan 2009-2013. GCOS-134, WMO/TD-No.1506, 53pp.
- GCOS (Global Climate Observing System), 2010 : Report of the Second GCOS Reference Upper Air Network Implementation and Coordination Meeting (GRUAN ICM-2). GCOS-140, WMO/TD-No.1526, 57pp.
- 長谷部文雄, 塩谷雅人, 2000 : SOWER/Pacific (Soundings of Ozone and Water in the Equatorial Region/Pacific Mission) について. 天気, 47, 47-51.
- 北海道大学大学院環境科学院, 2007 : オゾン層破壊の科学. 北海道大学出版会, 408pp.
- Hurst, D. F., S. J. Oltmans, H. Vömel, K. H. Rosenlof, S. M. Davis, E. A. Ray, E. G. Hall and A. F. Jordan, 2011 : Stratospheric water vapor trends over Boulder, Colorado : Analysis of the 30 year Boulder record. *J. Geophys. Res.*, 116, D02306, doi : 10.1029/2010JD015065.
- 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. Technol.*, 3, 1217-1231.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2007 : Climate Change 2007 : The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller, eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jeannot, P., C. Bower and B. Calpini, 2008 : Global Criteria for Tracing the Improvements of Radiosondes over the Last Decades. Instruments and Observing Methods Report No. 95, WMO/TD-No. 1433, 32pp.
- 鎌田吉博, 藤田 建, 日野原正己, 澁江 昇, 川江 訓, 2002 : 気球後流が観測に及ぼす影響に関する調査 (第一報). 高層気象台彙報, (62), 17-26.
- 気象庁観測部高層課, 1983 : RS2-80型と RS II-56型レーウィンゾンデの比較観測について. 測候時報, 50, 373-384.
- Kobayashi, J., 1960 : Investigations on hygrometry. *Pap. Meteor. Geophys.*, 11, 213-338.
- 小林壽太郎, 2007 : ゾンデ開発の余韻-湿度とオゾンの計測-. 気象研究ノート, (213), 111-116.
- 近藤純正, 2010 : 日本における温暖化と気温の正確な観測. 伝熱, 49 (208), 58-67.
- Lewis, J. M., 2003 : Oishi's observation : Viewed in the context of jet stream discovery. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 84, 357-369.
- 宮川幸治, 1991 : レーウィンゾンデ観測における気温の昼夜差の検討. 天気, 38, 112-122.
- 水野 量, 中村雅道, 2011 : 全球気候観測システム基準高層観測網第 2 回実施調整会議 (GRUAN ICM-2) 出席報告. 天気, 58, 711-717.
- 中川 勇, 1986 : 陸軍気象史. 陸軍気象戦友会協議会・陸軍気象史刊行会, 520pp.
- Nash, J., T. Oakley, H. Vömel, W. Li, 2011 : WMO intercomparison of high quality radiosonde systems Yangjiang, China, 12 July - 3 August 2010. Instruments and Observing Methods Report No. 107, WMO/TD-No. 1580, 238pp.
- Oltmans, S., H. Vömel, D. Hofmann, K. Rosenlof and D. Kley, 2000 : The increase in stratospheric water vapor from balloonborne, frostpoint hygrometer measurements at Washington, D. C., and Boulder, Colorado. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 3453-3456.
- Onogi, K., J. Tsutsui, H. Koide, M. Sakamoto, S. Kobayashi, H. Hatsushika, T. Matsumoto, N. Yamazaki, H. Kamahori, K. Takahashi, S. Kadokura, K. Wada, K. Kato, R. Oyama, T. Ose, N. Mannoji and R. Taira, 2007 : The JRA-25 Reanalysis. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85, 369-432.
- 大野木和敏, 釜堀弘隆, 竹内綾子, 海老田綾貴, 筒井純一, 高橋清利, 2008 : 第 3 回 WCRP 再解析国際会議報告. 天気, 55, 947-959.
- Peter, T., C. Marcolli, P. Spichtinger, T. Corti, M. B. Baker and T. Koop, 2006 : When dry air is too humid. *Science*, 314, 1399-1402.
- Sakamoto, M. and J. R. Christy, 2009 : The influences of TOVS radiance assimilation on temperature and moisture tendencies in JRA-25 and ERA-40. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26, 1435-1455.
- 迫田優一, 永沼啓治, 萩原裕一, 井上長俊, 三田昭吉, 1999 : RS-91型レーウィンゾンデ. 気象研究ノート, (194), 3-24.
- Santer, B. D., P. W. Thorne, L. Haimberger, K. E. Taylor, T. M. L. Wigley, J. R. Lanzante, S. Solomon, M. Free, P. J. Gleckler, P. D. Jones, T. R. Karl, S. A. Klein, C. Mears, D. Nychka, G. A. Schmidt, S. C. Sherwood and F. J. Wentz, 2008 : Consistency of modelled and observed temperature trends in the

- tropical troposphere. *Int. J. Climatol.*, **28**, 1703-1722.
- 佐藤芳昭, 2007: 変分法バイアス補正. 数値予報課報告・別冊第53号, 気象庁予報部, 171-175.
- Seidel, D. J., F. H. Berger, H. J. Diamond, J. Dykema, D. Goodrich, F. Immler, W. Murray, T. Peterson, D. Sisterson, M. Sommer, P. Thorne, H. Vömel and J. Wang, 2009: Reference upper-air observations for climate: Rationale, progress, and plans. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **90**, 361-369.
- Shimizu, K. and F. Hasebe, 2010: Fast-response high-resolution temperature sonde aimed at contamination-free profile observations. *Atmos. Meas. Technol.*, **3**, 1673-1681.
- Solomon, S., K. Rosenlof, R. Portmann, J. Daniel, S. Davis, T. Sanford and G.-K. Plattner, 2010: Contributions of stratospheric water vapor to decadal changes in the rate of global warming. *Science*, **327**, 1219-1223.
- SPARC (Stratospheric Processes And their Role in Climate), 2000: SPARC assessment of upper tropospheric and stratospheric water vapour. Kley, D., J. M. Russell and C. Phillips, eds., WCRP 113, WMO, Geneva, Switzerland, 312pp.
- 須田瀧雄, 1968: 岡田武松伝. 岩波書店, 612pp.
- Suzuki, S. and M. Asahi, 1978: Influence of solar radiation on temperature measurement before and after the change of the length of suspension used for the Japanese radiosonde observation. *J. Meteor. Soc. Japan*, **56**, 61-64.
- 高橋浩一郎, 内田英治, 新田 尚, 1987: 気象学百年史. 気象学の近代史を探究する. 東京堂出版, 230pp.
- Thompson, A. M., J. C. Witte, R. D. McPeters, S. J. Oltmans, F. J. Schmidlin, J. A. Logan, M. Fujiwara, V. W. J. H. Kirchhoff, F. Posny, G. J. R. Coetzee, B. Hoegger, S. Kawakami, T. Ogawa, B. J. Johnson, H. Vömel and G. Labow, 2003: Southern Hemisphere Additional Ozonesondes (SHADOZ) 1998-2000 tropical ozone climatology. 1. Comparison with Total Ozone Mapping Spectrometer (TOMS) and ground-based measurements. *J. Geophys. Res.*, **108**, 8238, doi: 10.1029/2001JD000967.
- 外山芳男, 1979: 現用露点ゾンデの露霜点測定の誤差の要因と改良について. 気象研究所研究報告, **30**, 93-109.
- Trenberth, K. E., T. R. Karl and T. W. Spence, 2002: The need for a systems approach to climate observations. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **83**, 1593-1602.
- 上里 至, 伊藤智志, 熊本真理子, 茂林良道, 中村雅道, 2008: ラジオゾンデの歴史の変遷を考慮した気温トレンド (第1報). 高層気象台彙報, (68), 15-22.
- Vömel, H., M. Fujiwara, M. Shiotani, F. Hasebe, S. J. Oltmans and J. E. Barnes, 2003: The behavior of the Snow White chilled-mirror hygrometer in extremely dry conditions. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **20**, 1560-1567.
- Vömel, H., D. E. David and K. Smith, 2007a: Accuracy of tropospheric and stratospheric water vapor measurements by the cryogenic frost point hygrometer: Instrumental details and observations. *J. Geophys. Res.*, **112**, D08305, doi: 10.1029/2006JD007224.
- Vömel, H., V. Yushkov, S. Khaykin, L. Korshunov, E. Kyrö and R. Kivi, 2007b: Intercomparisons of stratospheric water vapor sensors: FLASH-B and NOAA/CMDL frost-point hygrometer. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **24**, 941-952.
- WG-ARO (Working Group on Atmospheric Reference Observations), 2008: Specifications for a Reference Radiosonde for GRUAN. HMEI Newsletter, December 2008. Available from <http://www.hydrometeorology.org/> (2011.1.21閲覧)

A New Upper-Air Sounding Network for Climate Monitoring, GRUAN

Masatomo FUJIWARA*

* *Faculty of Environmental Earth Science, Hokkaido University, N10 W5, Kita-ku, Sapporo, Hokkaido 060-0810, Japan.*

(Received 31 January 2011; Accepted 26 May 2011)
