

# GRUAN



Global Climate Observing System (GCOS)  
Reference Upper Air Network

## 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

北海道大学・地球環境科学研究所

2011年7月27日(水)CPSセミナー

Global Climate Observing System (GCOS) Reference Upper Air Network  
全球気候観測システム・基準高層観測網

# 内容

1. はじめに：気候変動問題と大気観測網
2. 高層気象観測の問題
  1. 気温測定の問題
  2. 水蒸気測定の問題
3. GRUAN：その必要性、発展の道筋、課題
4. WMOラジオゾンデ国際比較観測（2010）
5. まとめ



# 1. はじめに：気候変動問題と大気観測網

- 温暖化問題とは：

- 産業革命以降の温室効果ガス人為排出
- 全球平均気温が過去100年で $1^{\circ}\text{C}$ 近く上昇、全球海面水位が過去100年で20cm近く上昇、etc.
- 世界各国の数値気候モデルと社会経済シナリオに基づく将来推定
- 現代文明の維持に重大な問題であると認識

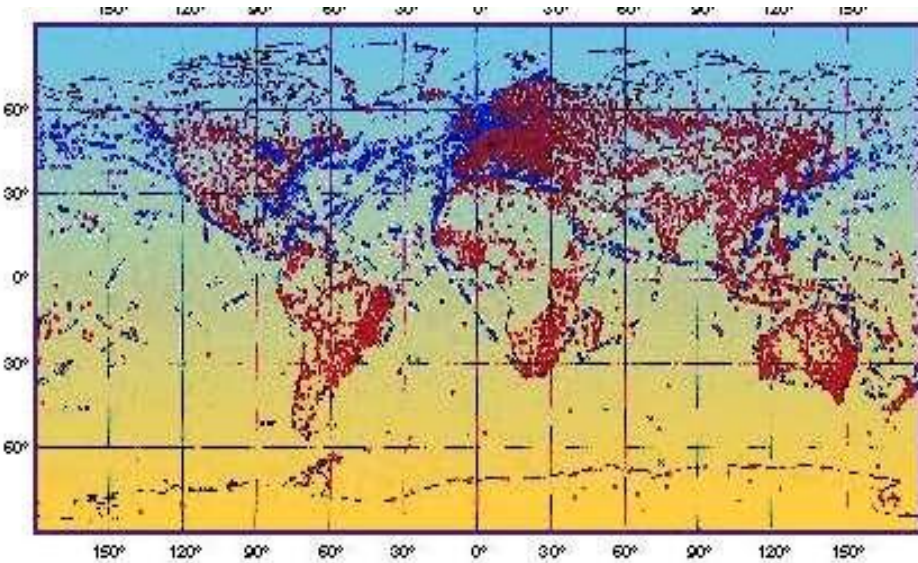
- 1987年：「オゾン層を破壊する物質に関するモントリオール議定書」が採択される
- 1988年：IPCC（気候変動に関する政府間パネル）が設立される

# 1. はじめに：気候変動問題と大気観測網

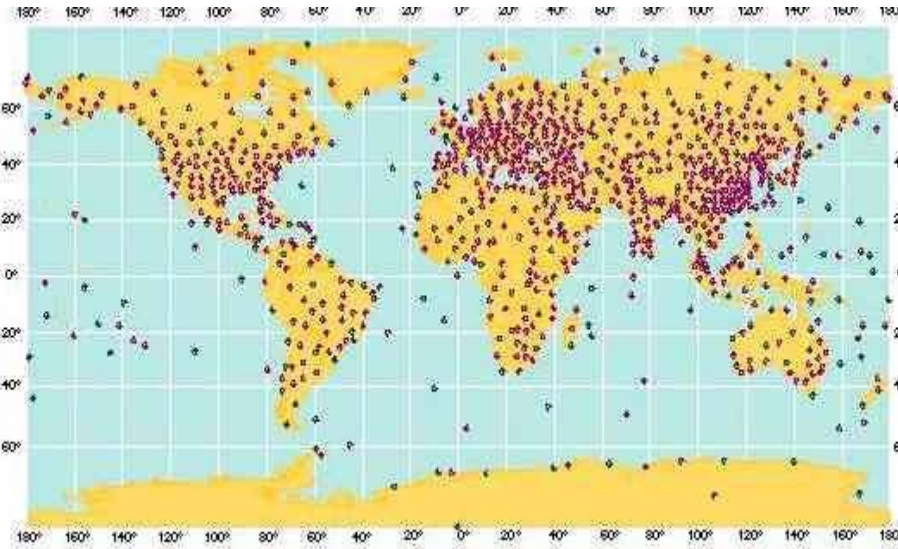
- 気候監視のための観測網の現状は？
  - 1990年・第2回世界気象会議
  - 1992年・気候変動に関する国際連合枠組条約
    - 気候監視のための観測システム確立が提言される
  - 1992年国際的な気候観測の枠組としてGCOS(全球気候観測システム)が発足(GRUANの“G”)
  - “気象”観測網の流用+“気候”監視用に改良
  - 大気の100年で $1^{\circ}\text{C}$ 、10年で $0.1^{\circ}\text{C}$ の変化を検出することは、簡単なことではない(cf. 低気圧通過に伴う変化は数 $^{\circ}\text{C}$ 以上... “気象”/“天気” vs. “気候”)

# 世界の“気象”観測ネットワーク

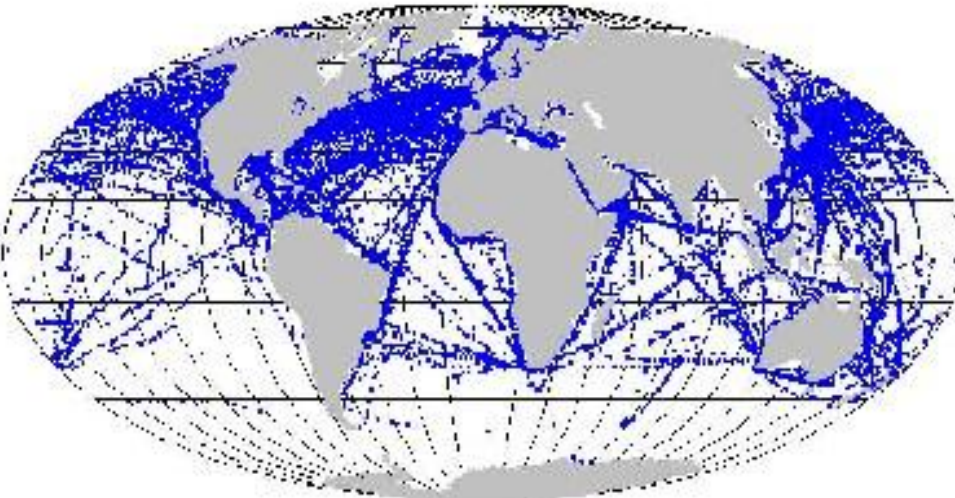
地上観測ステーション(約11,000箇所)



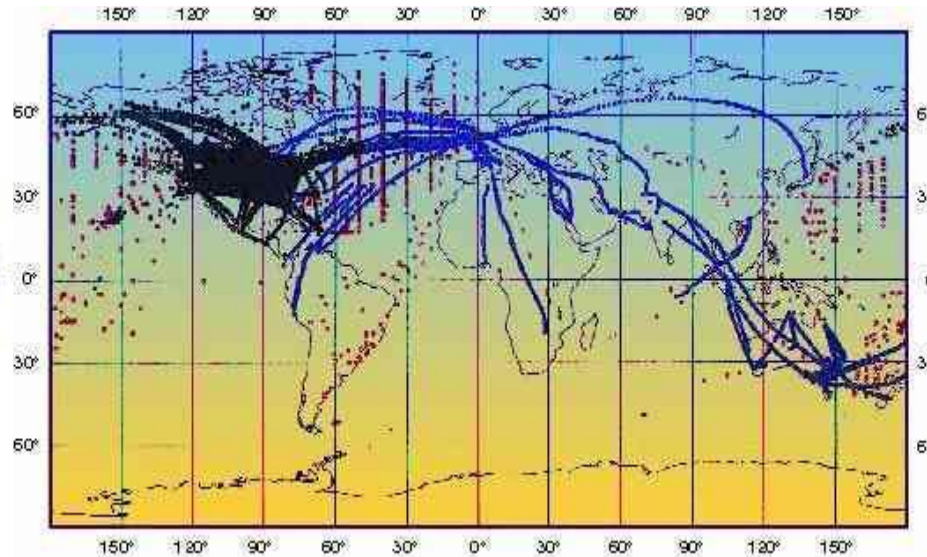
高層気象観測所(約900箇所)



海洋気象観測(船舶約7,000隻(の40%)、ブイ約750個)



航空機観測(約3,000機)

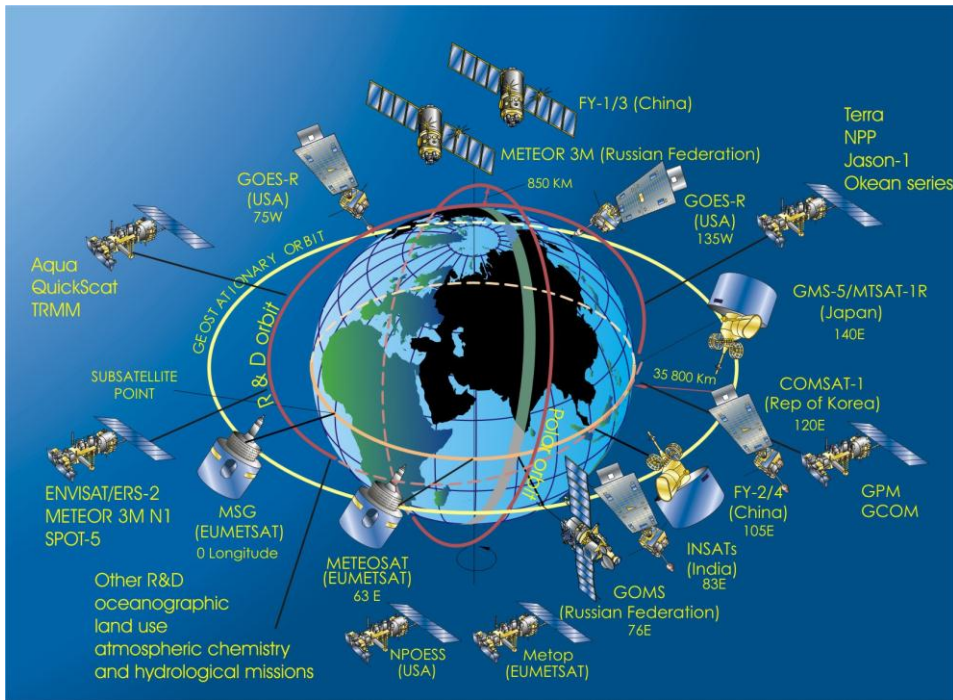


**WMO: World Meteorological Organization**  
(世界気象機関) 一 国連の専門機関のひとつ

<http://www.wmo.ch/web/www/OSY/gos-components.html>

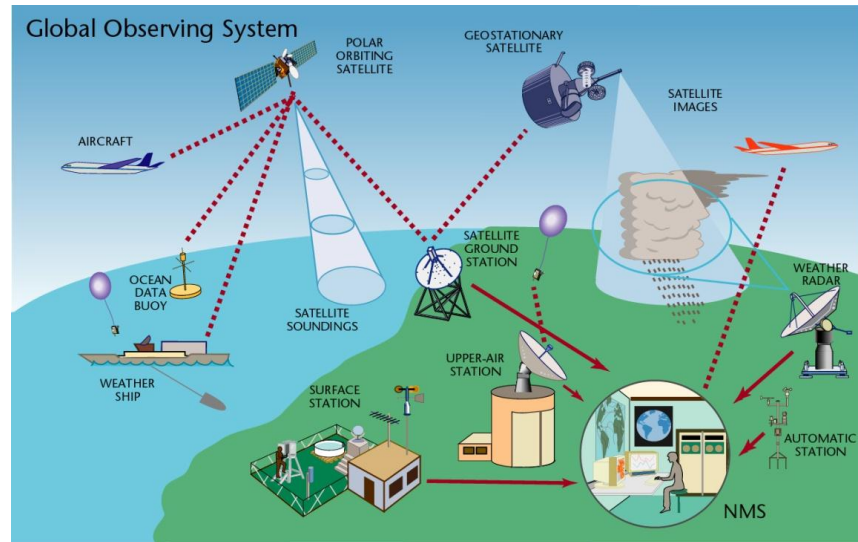
# 世界の“気象”観測ネットワーク(続き)

人工衛星観測(静止衛星6機、極軌道衛星5機、  
各種研究・開発衛星; 気象要素・大気微量成分等の観測)

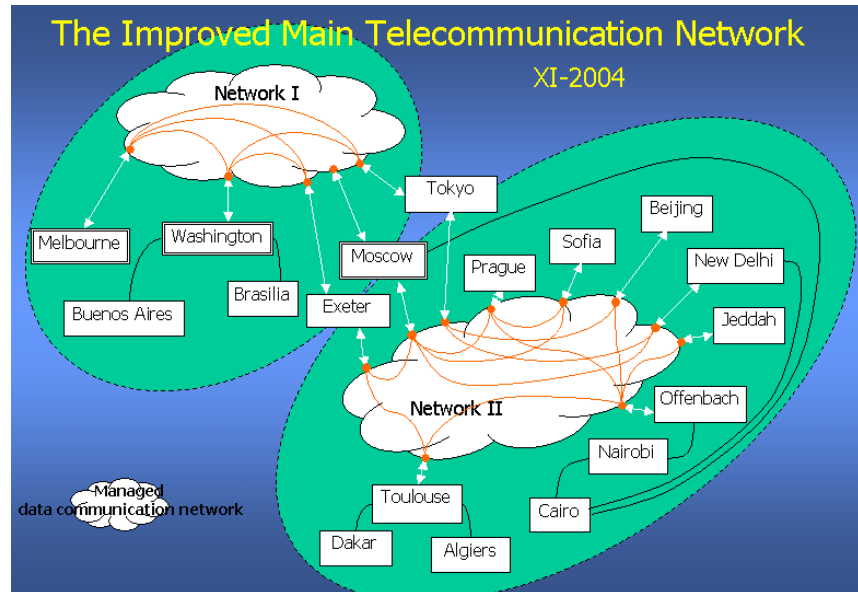


<http://www.wmo.ch/web/www/OSY/gos-components.html>

## Global Observing System (GOS)



## Global Telecommunication System (GTS)



- ・現代の天気予報:  
大気力学・物理過程等の時間発展偏微分方程式系を大型計算機上で解く(数値モデル;いくつかの国で独自に)
- ・方程式系の初期条件として、比較的最近(数時間前)のグローバルな気象観測値が必要となる  
(気象観測データを“同化”手法を用いて数値予報モデルになじませて気象場の最適推定値を作成する:“解析”)
- ・従って、観測はグローバルに系統的に実施されなければならないし、得られたデータがすみやかに収集されて数値モデルへ入力される体制が必要となる

<http://www.wmo.ch/web/www/www.html>

# 内容

1. はじめに: 気候変動問題と大気観測網
2. 高層気象観測の問題
  1. 気温測定の問題
  2. 水蒸気測定の問題
3. GRUAN: その必要性、発展の道筋、課題
4. WMOラジオゾンデ国際比較観測(2010)
5. まとめ



# 2. 高層気象観測の問題

- 現在の高層気象観測(“**現業**”、“operational”...)
  - ラジオゾンデ観測(20世紀前半より)、現業用人工衛星観測(1979年より)
  - 本来の目的: **天気予報**、航空機運航のための基礎データ収集。 **気候監視は想定されておらず**
- 気温測定の問題
  - ラジオゾンデの場合、短波放射・長波放射による気温測定の誤差を補正(“**放射補正**”)する必要あり
  - 測定機器や観測処理システムの変更 → **データの品質・特性が変化**(十分に記述されてきていない)
  - “**気候データ**”としての**一様性に問題**(+測定値の不確かさに関する情報が不十分)
- 水蒸気測定の問題
  - 上部対流圏・下部成層圏(UTLS)の水蒸気測定が(現業用センサーでは)できていない
  - UTLS水蒸気は分圧や数密度で地上の4~6桁落ち程度(体積混合比で100~1 ppmv)
    - 技術上その測定は容易ではない。**研究用機器にて測定。**
    - 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
  - しかし、UTLSの水蒸気は地球の放射エネルギー収支や成層圏オゾンの光化学収支に重要な役割を果たしている→**長期監視の必要性**



## 2-1. 気温測定の問題(1)ラジオゾンデ



Vaisala RS92-SGP



Meisei RS-06G



GRAW DFM-06

気温センサー:

日中は太陽放射によりセンサーが加熱されてしまう。

(この加熱効果は周囲の空気密度が小さいほど大きい。)

→ 周囲の空気の温度(=気温)より高い値(0°C~1°C~3°C)を示してしまう。

→ この人工的な昇温値(太陽高度、気圧依存)を見積もって“補正”している。

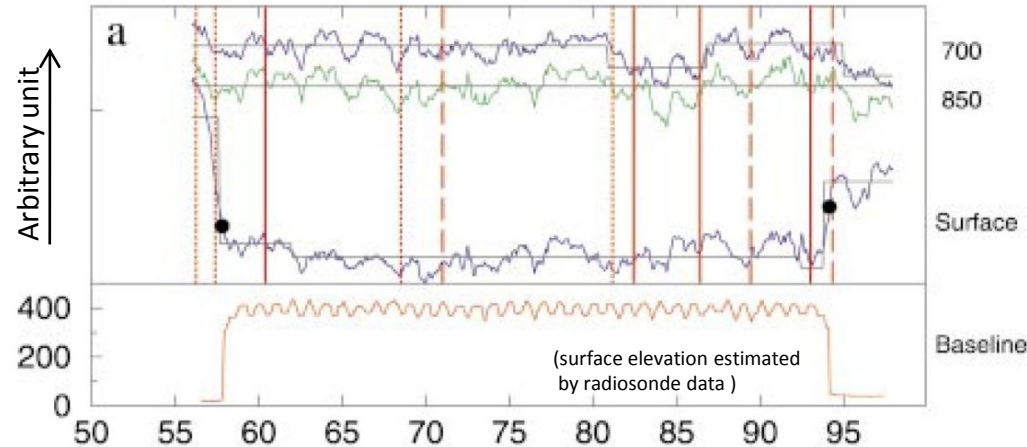
# 2-1. 気温測定の問題(1)ラジオゾンデ

## 世界各地の高層気象観測所で 過去数十年にわたり起きてきたこと

- ・メーカーが新しいモデルを開発し、古いモデルを生産中止として新しいモデルを納品するようになる
- ・観測所において使用する観測システムのメーカーを変更する
- ・ある日ある時から、観測に使用する測器を新しいモデルあるいは別のメーカーのものに変更(ソフトウェアのバージョン変更なども多数ある)
- ・その変更の情報が記録されていないあるいは記録が紛失、あるいは、変更の影響が評価されていない(あるいは、そういった情報が他の人に容易に利用可能な状態になっていない)

→観測データの時系列図を作成してみると、階段状変化としてみえる。

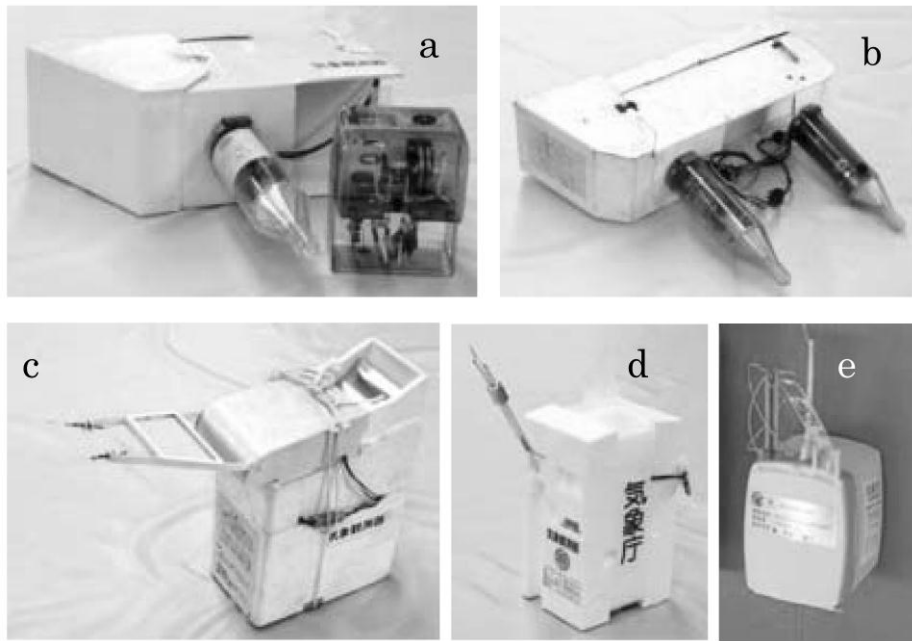
→気候研究の観点からゆゆしき事態



Lanzante et al. [JC, 2003]: 客観的手法と主観的手法  
を組み合わせた“changepoint”決定法(87地点)  
—鹿児島観測所の気温データの例—

1957年と1993年に地表気温・LT気温に大きな変化  
→ 1957: 世界的な観測時刻の3時間変更  
→ 1993: 著者らは情報(メタデータ)がないと  
書いているが、ゾンデタイプの変更あり

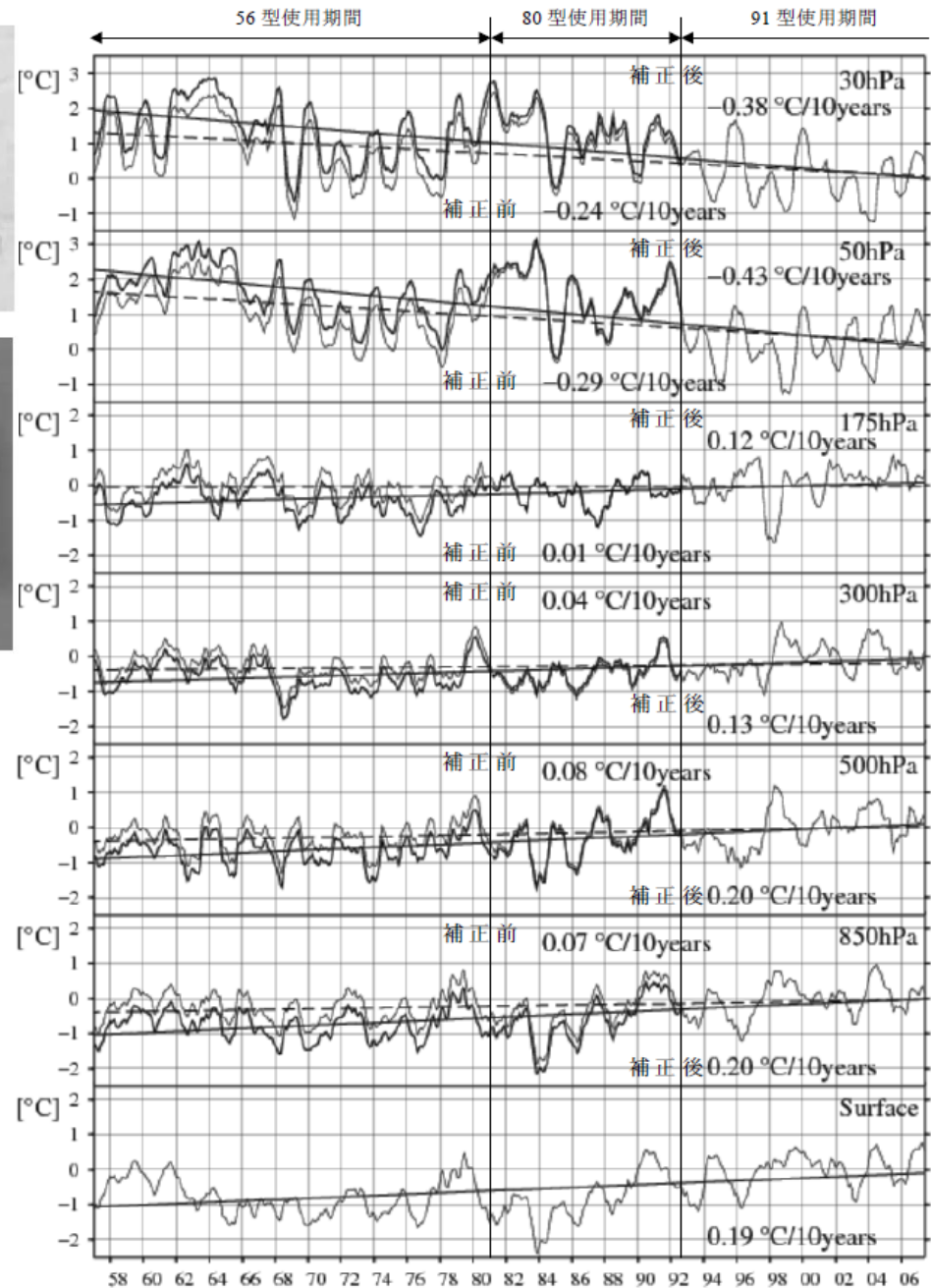
(赤の縦線はなんらかのメタデータがあった箇所)  
(黒丸は今回彼らの手法でch.pnt.と判定された箇所)  
(実は、80年代初頭にもゾンデタイプの変更あり)



気象庁高層気象台(館野)におけるゾンデの変遷。

- (a) RS II 56型レーウィンゾンデ(1956~1981、  
120×330×373mm、約1300g、バイメタル)
- (b) エコーゾンデ(1962~1982、  
120×370×430mm、約1400g、バイメタル)
- (c) RS2-80型レーウィンゾンデ(1981~1992、  
107×182×262mm、約600g、サーミスタ)
- (d) RS2-91型レーウィンゾンデ(1992~2009、  
91×110×183mm、約300g、サーミスタ)
- (e) RS92-SGP型GPSゾンデ(2009~、  
80×75×220mm、約300g、  
静電容量式ワイヤ温度計)

写真: 気象庁高層気象台提供 [藤原, 天気, 2011]



気象庁では、ラジオゾンデ変更時に同時飛揚試験を多数行い、バイアス量を評価している [上里ほか, 高層気象台彙報, 2008]

## 2-1. 気温測定の問題(2)人工衛星

- 1979年から、現業用人工衛星(極軌道)搭載のマイクロ波放射計“群”の観測データあり
- ラジオゾンデ観測と異なり、全球を一様に観測
- 各衛星は3年から5年で次々と入れ換わっている
  - 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
- 気候データとしての一様性には問題あり

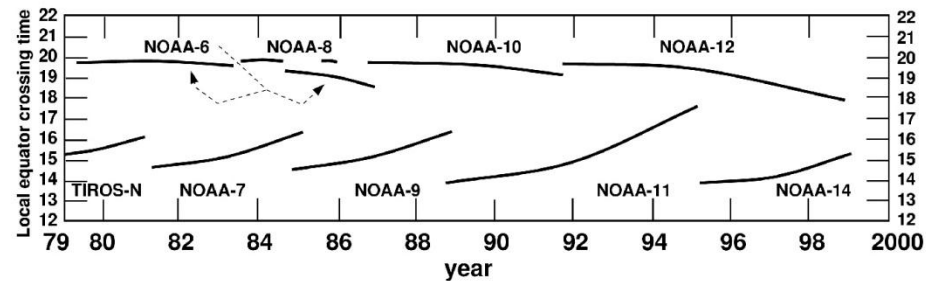
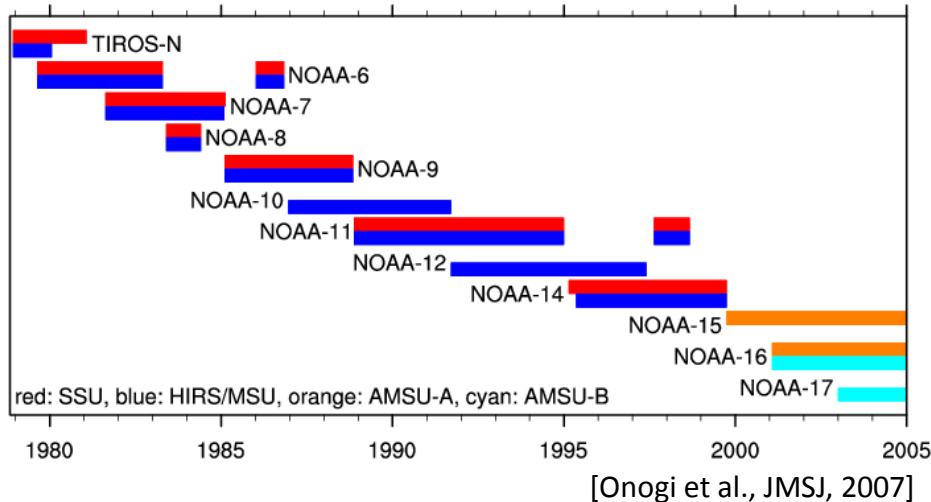


FIG. 4. The local equator crossing time of the ascending orbit of the operational NOAA series of satellites is given.

[Trenberth et al., BAMS, 2002]

# 人工衛星観測の問題 — 全球気温の偏差 —

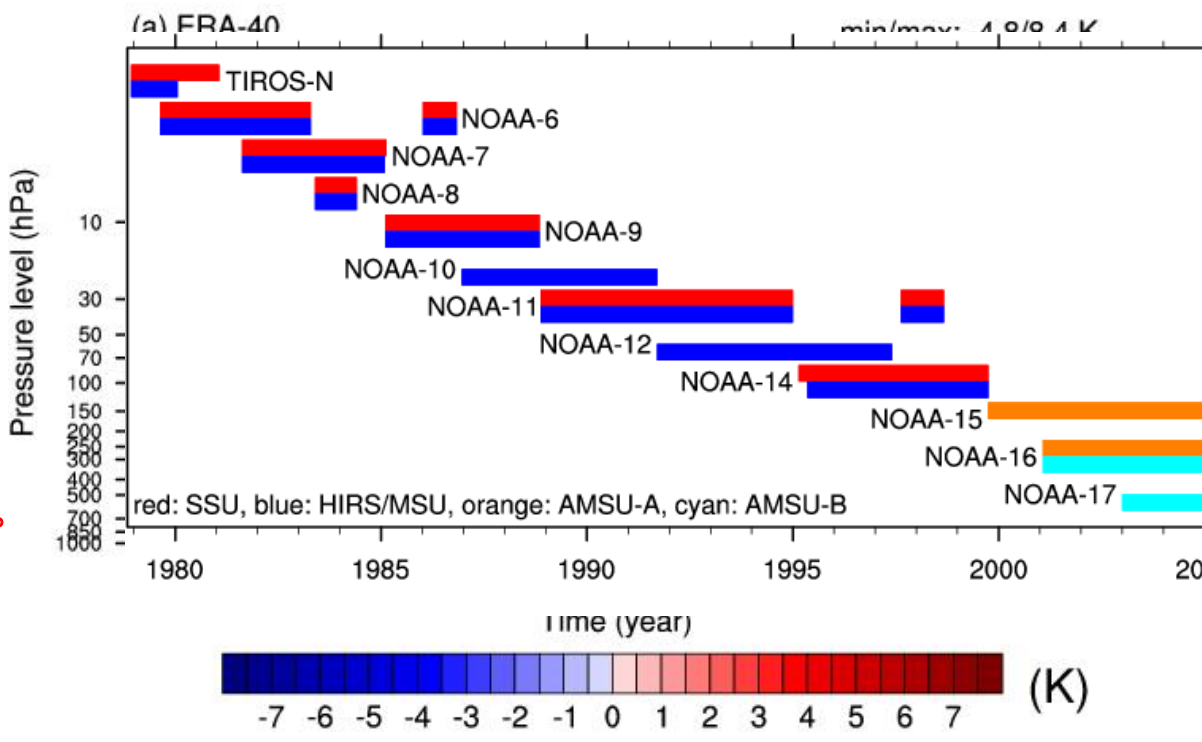
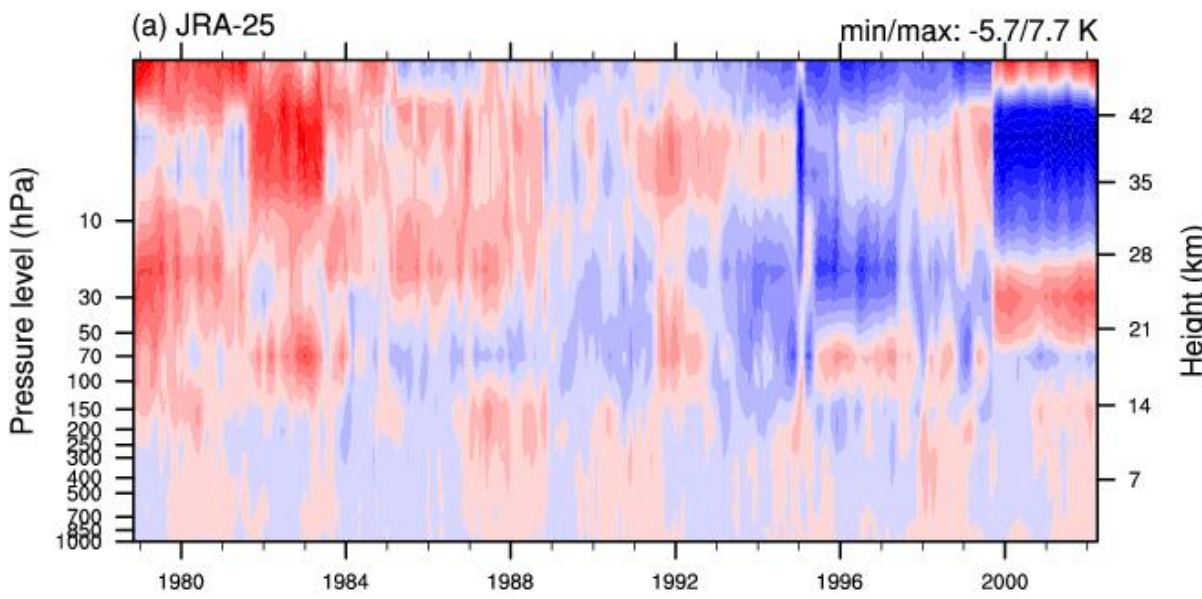
Anomaly from averaged temperature of each level for each reanalysis

“Reanalysis” (“再解析”):  
 気象観測データを  
 “同化”手法を用いて  
 数値予報モデルに  
 なじませて作った、  
 気象場の最適推定値  
 (同一モデル使用→“再”解析)

JRA-25: 日本の再解析  
 ERA-40: 欧州の再解析

→ 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

Courtesy: J. Tsutsui and M. Sakamoto  
 [Onogi et al., JMSJ, 2007]



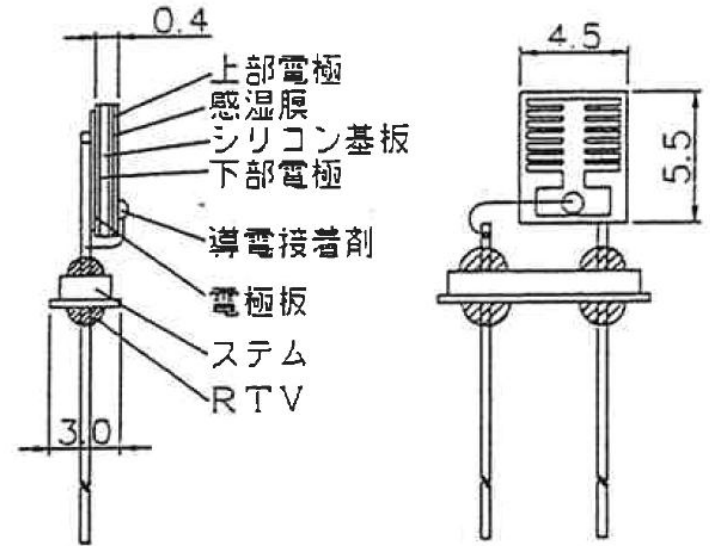
## 2-2. 水蒸気測定の問題



Vaisala RS92-SGP



Meisei RS-06G



Meisei RS2-91, RS-06Gの静電容量型高分子膜相対湿度計。

ガラス板上に蒸着された金属電極(下部電極)と水蒸気が通過できる薄膜電極(上部電極)で高分子膜(セルロース系)を挟みコンデンサを形成。(気象庁, 1995)

現業用ラジオゾンデの水蒸気センサー:

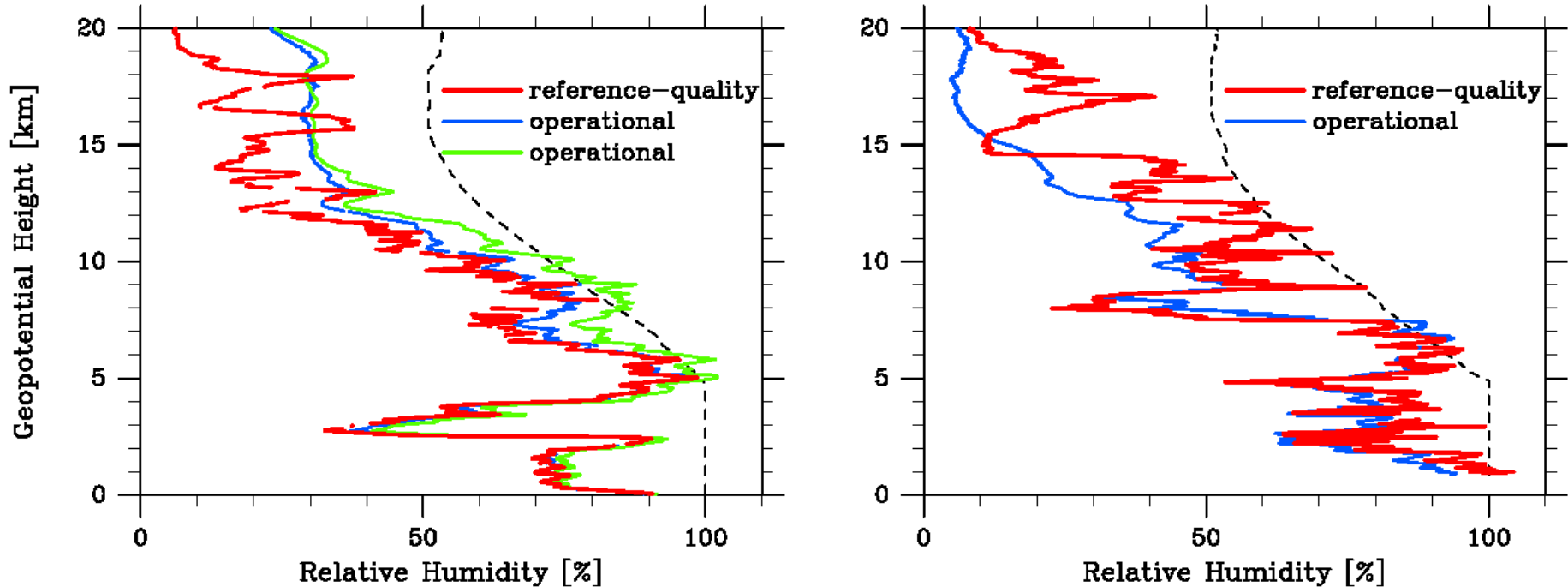
以前は、牛の腸の外膜、毛髪、塩化リチウム溶液、カーボン抵抗式

現在では、静電容量型の有機高分子膜(多孔質ポリマー)

→ 低水蒸気濃度領域(UTLS)で、レスポンスが極めて遅いかほとんどない

しかし、UTLSの水蒸気は気候や成層圏オゾンに重要、長期監視必要

## 2-2. 水蒸気測定の問題

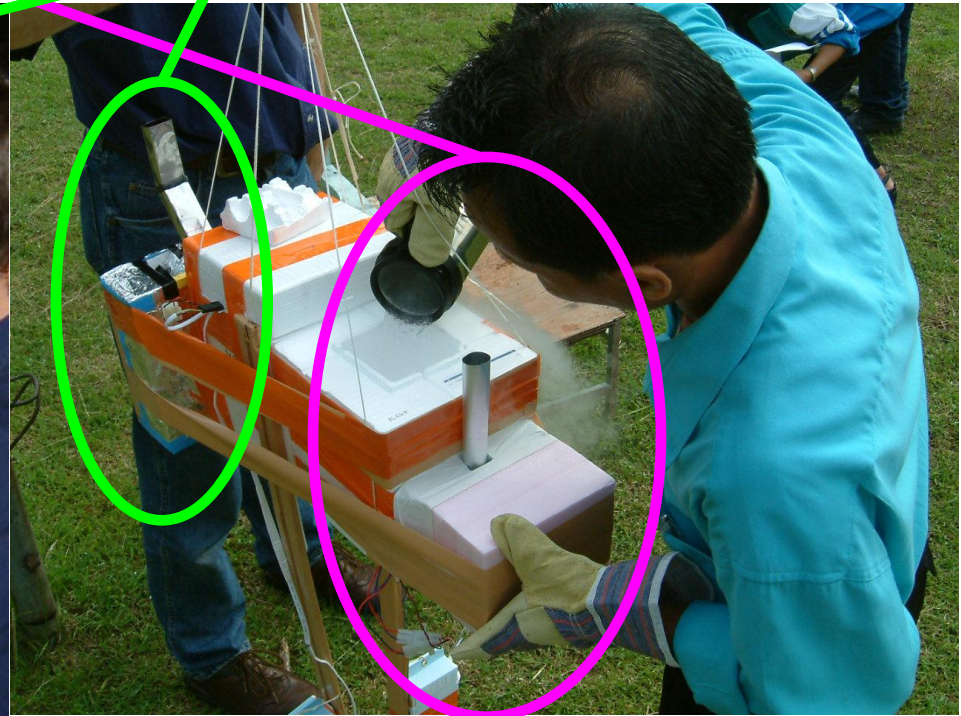


相対湿度(液体の水に対する)の同時比較観測の例。SOWER観測キャンペーンより。  
(左) インドネシア・ワトウコセツ(7.57S、112.65E)、2001年12月3日3:36LT放球(対流圏界面18.0 km)  
(右) インドネシア・コタババン(0.20S、100.32E)、2008年1月10日6:09LT放球(対流圏界面17.9 km)。

赤線: 左がSnow White鏡面冷却水蒸気計、右がCFH鏡面冷却水蒸気計 → “reference-quality”  
青線: Vaisala RS80ラジオゾンデ(左: H Humicapセンサー、右: A Humicapセンサー)  
緑線: 明星電気RS2-91ラジオゾンデ  
点線: 飽和相対湿度

# 鏡面冷却方式露点・霜点温度計

NOAA FPH, CFH, Snow White



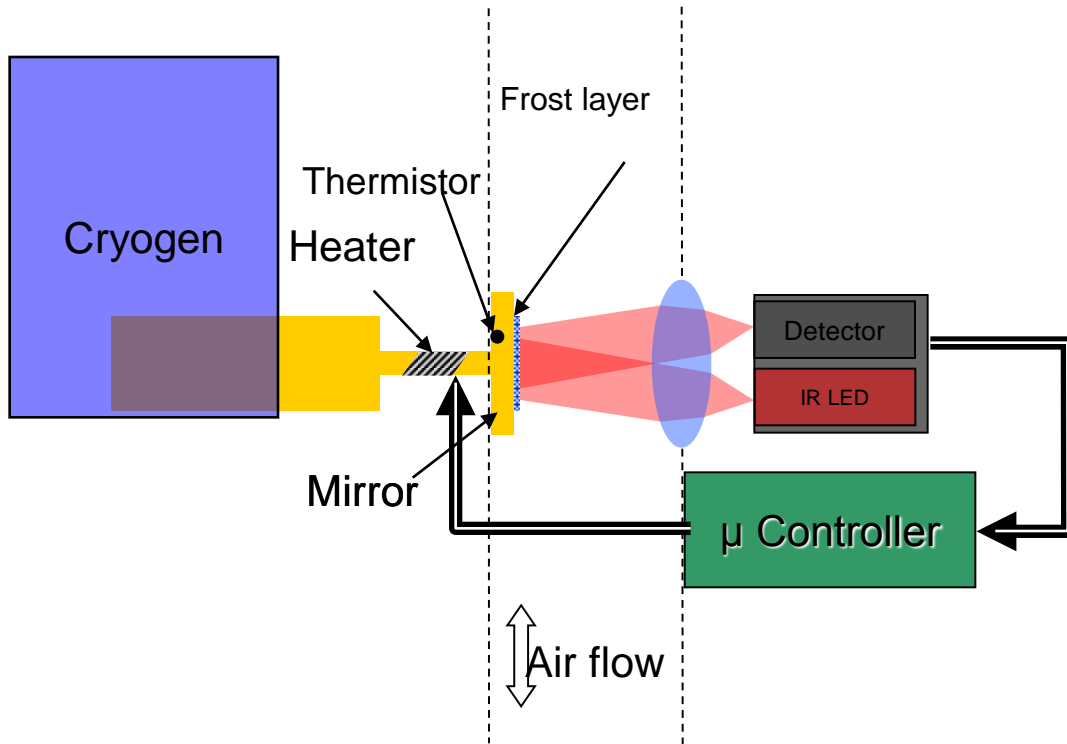
**CFH** (U. Colorado Cryogenic Frostpoint Hygro.) :  
Since 2003  
Same as NOAA FPH but with digital controller  
(Indonesia, December 2003, with ECC + SW)

**NOAA FPH** (NOAA Frost Point Hygrometer) :  
~30 years of stratospheric observation  
(Indonesia, January 2003, with SW+ECC)

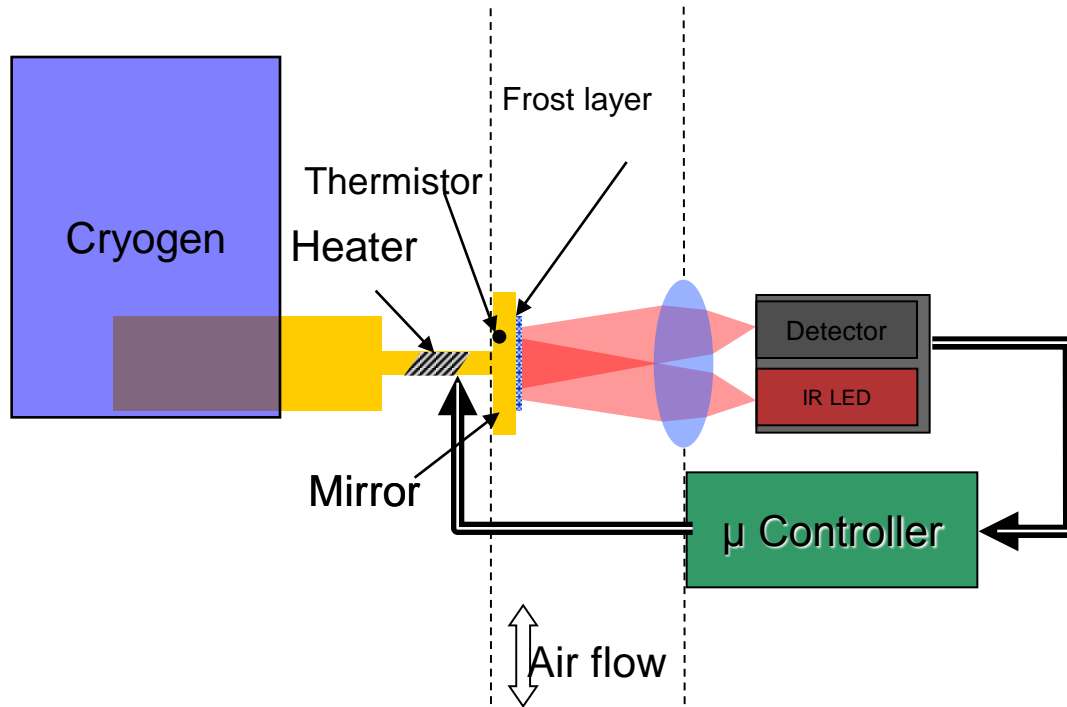
**Snow White** (Meteolabor AG, Switzerland):  
Since ~1996  
Peltier cooler with analog controller



# 露点·霜点(鏡面冷却)水蒸気測定法



# 露点・霜点(鏡面冷却)水蒸気測定法



この測定手法をゾンデ観測に適用する際の鍵：  
測定環境(気圧、水蒸気圧、気温)が激変するので、  
コントロール回路の最適化が必要

- NOAA FPH (flown in the tropics): Analog controller (P)
- CFH : Digital controller (PID)

熱力学に直接依っている  
i.e., Clausius-Clapeyron equation  
(飽和蒸気圧と温度(露点・霜点)の関係)

Considered as  
“Secondary or reference standards” or  
“laboratory transfer standards”  
(ゾンデに限らず水蒸気測定器一般)  
(Primary standards include gravimetric  
hygrometer)

この測定システムの動作手順  
(NOAA FPHとCFHの場合):

1. 鏡は冷媒( $\text{CHF}_3$ )により冷やされ、電気ヒーターにより適度に加熱される
2. 鏡面上に露・霜が生成され、その様子は光学系によりモニターされる
3. コントロール回路が電気ヒーターの電流を制御し、鏡面上の露・霜の厚さを一定に保つ(平衡状態を実現する)
4. その時、鏡面温度は露点・霜点温度であることが期待されるので、この温度を露点・霜点温度として測定する

# AquaVITの顛末(1/2)

- AquaVIT: 2007年ドイツ、上部対流圏・下部成層圏(UTLS)の水蒸気濃度・気圧・気温を再現できるAIDAチャンバー(Aerosol Interaction and Dynamics in the Atmosphere)を用いた比較計測キャンペーン
- CFH、Snow Whiteなどを含む16種25台の水蒸気計の比較
- UTLSの水蒸気観測(航空機、気球、人工衛星)では、センサ間によって1 ppmv(相対誤差25%)を超えるような差異が生じることが報告されていた。



AIDA Facility, Karlsruhe, Germany

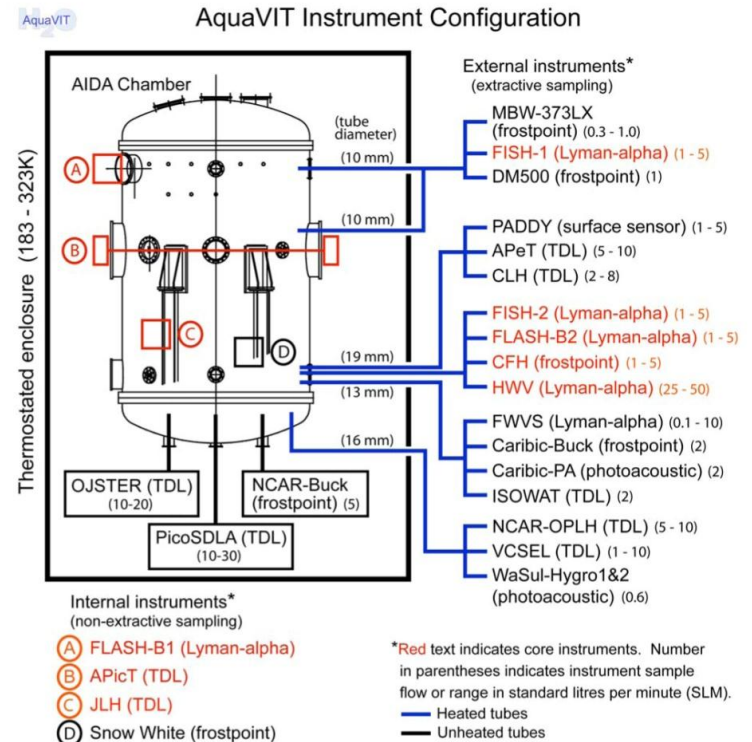


Figure 2. Configuration of the AquaVIT instruments in the AIDA chamber facility.

# AquaVITの顛末(2/2)

- “core”測定器に指定した6種の測器(CFH、FLASH-B、ApiT、FISH、HWV、JLH)は、1～150 ppmvの水蒸気濃度範囲では10%以内で一致。
- 1 ppmv 以下の水蒸気濃度範囲では、各センサ間で-100%～+150%の差が生じた

ApiT: The AIDA-PCI-in-cloud-TDL (APiT)。Tunable diode laser (TDL)方式の水蒸気計。

FISH: The Fast In situ Stratospheric Hygrometer (FISH)。Forschungszentrum Jülich (ドイツ)のLyman- $\alpha$ 線水蒸気計。

HWV: 航空機搭載のHarvard University Lyman- $\alpha$ 水蒸気計。

JLH: The NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL) Laser Hygrometer (JLH)。航空機搭載用のTDL方式の水蒸気計。

- SI単位系にトレーサビリティをもつ標準器による計測が行えず、“absolute reference”が存在せず。相対的な比較は行えたが、絶対値を評価するには至らず。

トレーサビリティ: 不確かさが正しく評価された測定を複数連鎖・介在させることにより、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。

- チャンバー実験による測定の不確かさの評価結果は、必ずしも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
- →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。

# 内容

1. はじめに：気候変動問題と大気観測網
2. 高層気象観測の問題
  1. 気温測定の問題
  2. 水蒸気測定の問題
3. GRUAN：その必要性、発展の道筋、課題
4. WMOラジオゾンデ国際比較観測（2010）
5. まとめ

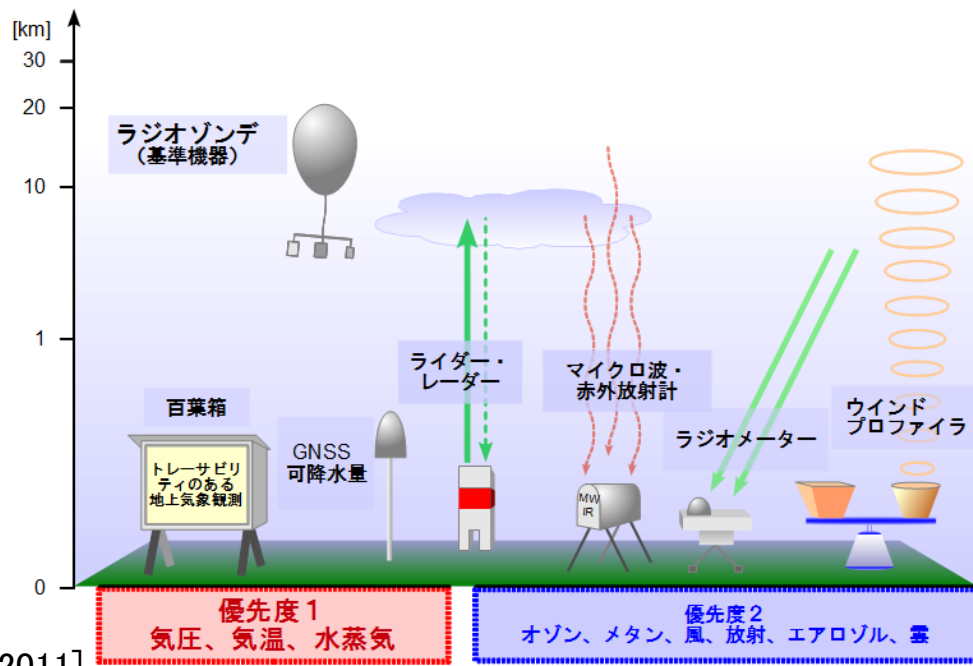
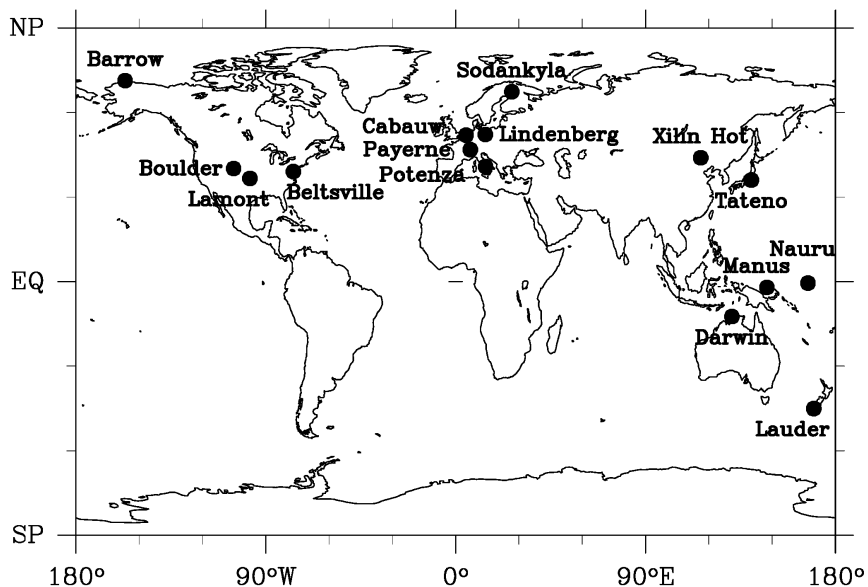


### 3. GRUAN: その必要性、発展の道筋、課題

- 過去・現在の高層観測システムは天気予報等を主目的としており、気候監視の観点からは極めて不十分である
  - 気温測定: 測器の変更(改良)に伴う気候データとしての一様性に問題がある
  - 水蒸気測定: 気候問題で重要なUTLSの水蒸気測定が系統立ててなされていない
- “気候データ”とは？
  - (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...が大前提だが...)
  - 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る
  - 各測定値にuncertainty(不確かさ)の情報が付されている
  - 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

# 3. GRUAN: その必要性、発展の道筋、課題

- **GRUAN: 気候監視のための高層観測ネットワーク**
- 気温、水蒸気、気圧・高度(水平風、微量成分、エアロゾル・雲に関する諸量等)
- 高層観測用気球搭載機器・研究レベルの高性能機器(H<sub>2</sub>OならNOAA FPH, CFH, Snow White) + 地表設置型リモートセンシング機器
- 向こう数十年間に渡り、“気候データ”(traceability, uncertainty, metadata)を提供
- よりグローバルな観測システム・データセットである、衛星観測、GUAN(既存の高層観測網のうち継続性の高い150地点ほど)、再解析、など、に対して検証データを提供
- 世界の15地点の観測点で開始、最終的には30~40地点に



# 3. GRUAN: その必要性、発展の道筋、課題

## GRUAN観測所に要求される主な項目

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



# 3. GRUAN: その必要性、発展の道筋、課題

## 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)

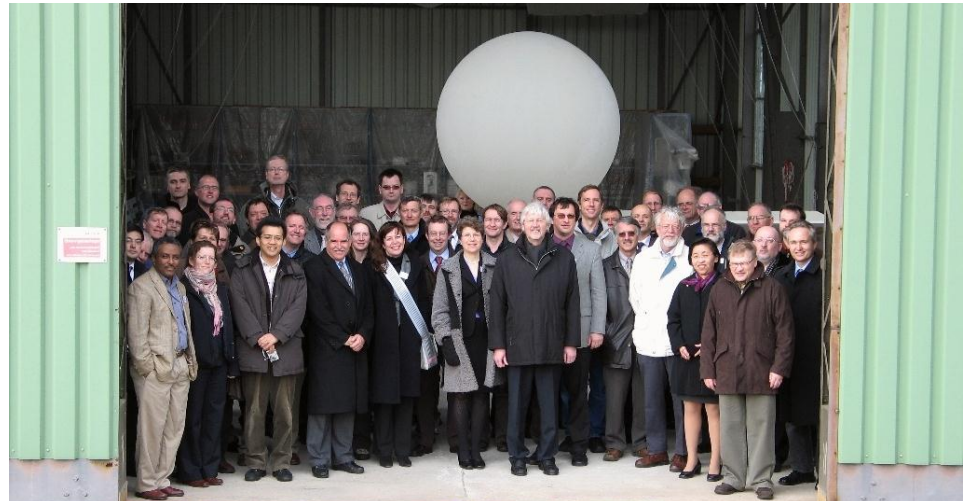
気象要素	気温	水蒸気	気圧
測定範囲	170~350 K	0.1~90000 ppmv	1~1100 hPa
高度範囲	0~40 km	0~40 km	0~40 km
高度分解能	0.1 km (0~30 km) 0.5 km (>30 km)	0.05 km (0~5 km) 0.1 km (5~30 km)	0.1 hPa
精度 (反復可能性、再現性)	0.2 K	2%(対流圏) 5%(成層圏)	0.01 hPa
確度 (系統誤差、バイアス)	0.1 K(対流圏) 0.2 K(成層圏)	2%(対流圏) 2%(成層圏)	0.1 hPa
長期安定性	0.05 K	1%(0.3%/decade)	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	

# GRUAN structure

- GCOS (Global Climate Observing System): 世界気象機関WMO、ユネスコ政府間海洋学委員会 UNESCO/IOC、国連環境計画UNEP、国際科学会議ICSUのもとにあるプログラム。大気(AOPC)、海洋、陸面の3つのパネルがある。
- **GCOS/WCRP AOPC Working Group on Atmospheric Reference Observations (WG-ARO)**
- GRUAN **Lead Centre** at the Lindenberg Meteorological Observatory (DWD)
- GRUAN sites world wide (currently 15 to be expanded to 30-40)
- GRUAN task teams for
  - Radiosondes
  - GNSS-Precipitable Water
  - Measurement schedules and associated site requirements
  - Ancillary measurements
  - Site representation
- GRUAN Analysis Team for Network Design and Operations Research (GATNDOR)



WG-ARO members (Feb. 2008)



GRUAN "community" (Feb. 2008)

# GRUAN history

- 1980年代後半: 気候問題(温暖化問題)が広く認識され始める
- 1990年代: 既存の高層気象観測データの利用→問題発覚
- 2003年ごろから具体的な検討始まる
- White paper for WMO/GCOS by Kevin Trenberth in 2003
- White paper by Dian Seidel of NOAA in 2004
- 2005年2月: Boulder会議(気候変動研究者・データユーザー)
- 2006年5月: Seattle会議(測器開発者や各種観測ネットワーク運営者も出席)
- 2006年8月: Working Group結成(藤原、メンバーの一員に)
- 2008年2月: LindenbergにLead Centre開設、Lindenberg会議
- 2009年3月: Oklahoma会議(ICM-1)
- 2010年3月: Payerne会議(ICM-2)
- 2010年7月: WMO Intercomparison of Radiosonde Systems (Yangjiang, China)
- 2011年3月: Queenstown/Lauder会議(ICM-3)  
β版データ公開(Vaisala RS92) <ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/gruan/>



# GRUANの課題

- 観測機器の確保：
  - 放射補正不要な気温センサー？
  - 低コストなUTLS水蒸気センサー？
  - メーカーや測器開発者の理解
- 観測地点・資金の確保：
  - 経済動向(と人々の理解)と長期観測へのコミットメント
  - 南米、アフリカ、南極、大洋内の島嶼などにも
- GRUANデータ(15~40地点)の活用：
  - 全球気候データセットにどう反映させていくか
  - 再解析にどうしたら影響を与えられるか

# 内容

1. はじめに：気候変動問題と大気観測網
2. 高層気象観測の問題
  1. 気温測定の問題
  2. 水蒸気測定の問題
3. GRUAN：その必要性、発展の道筋、課題
4. WMOラジオゾンデ国際比較観測（2010）
5. まとめ



# 4. WMOラジオゾンデ国際比較観測

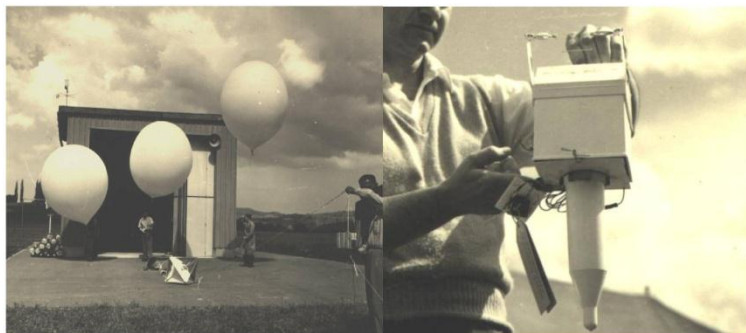


Figure 1. WMO World Comparison of Radiosondes at Payerne, Switzerland, 1956.



Figure 2. WMO Radiosonde Comparison (Phase I) at Beaufort Park, U.K., 1984.



Figure 3. High quality radiosondes involved in the WMO Radiosonde Comparison at Vacaos, Mauritius, 2005.

[Jeannet et al., WMO/TD, 2008]

- WMO測器・観測法委員会の主催による各国ラジオゾンデの相互比較
- 全体としての精度向上、品質一様化を狙う
- 1950～2010の間に11+回
  - 1950: Payerne, Switzerland
  - 1956: Payerne, Switzerland
  - 1968: Tateno, Japan
  - 1979: USA
  - 1984: UK
  - 1985: USA
  - 1989: the former USSR
  - 1993: Tateno, Japan
  - 2001: Brazil
  - 2005: Mauritius
  - 2010: Yangjiang, China

# 4. WMOラジオゾンデ国際比較観測

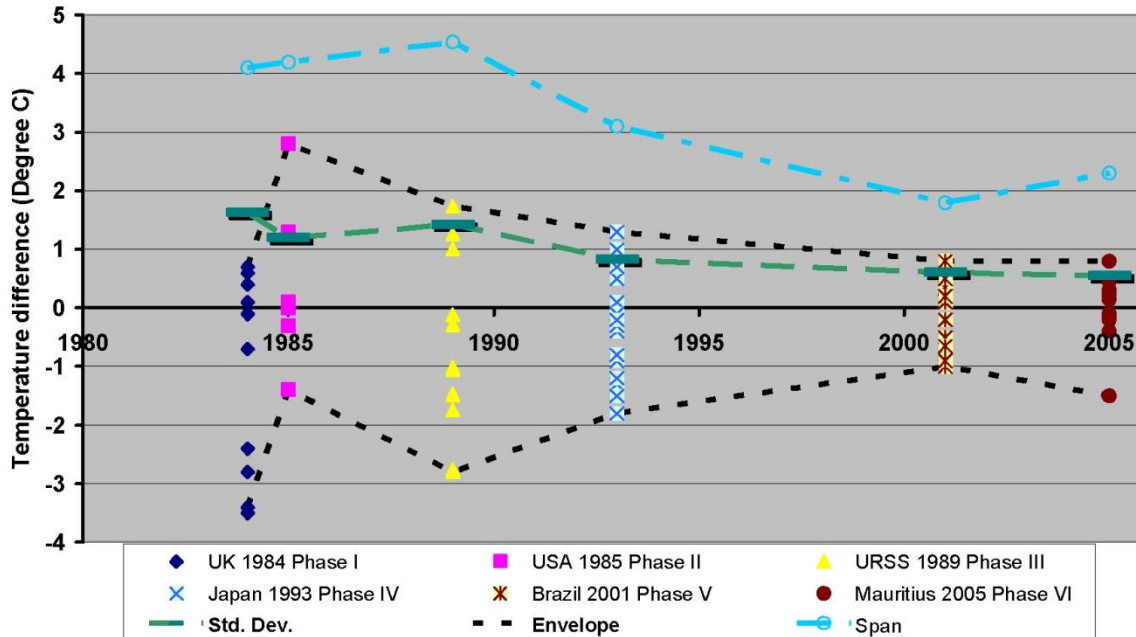


Figure 9. Night and day time temperature bias around 10 hPa for the six WMO Radiosonde Comparisons (simultaneous measurements). The two dotted lines represent the envelope of all individual results, which is converted into a span with the dash-dotted line. The horizontal green bars on the green dashed curve correspond to one standard deviation of the biases of each comparison.

[Jeannet et al., WMO/TD, 2008]

- 1984～2005年の6回の比較観測の結果
- 10 hPaの気温
- 個々のラジオゾンデタイプ、昼・夜
- ある参照値(数種のゾンデ値の平均など)からのずれ
- ばらつき(SD/Span)が年代とともに減少していることがポイント

# 8th WMO Intercomparison of Radiosonde Systems (中国・広東省・陽江、2010年7月～8月)

- 現業用だけでなく、GRUAN用の“science”ラジオゾンデセンサーの比較・評価も行う
- (GRUAN用センサーとして採用可能性のあるものの参加を募集)
- 世界11のラジオゾンデメーカー、11種の現業用ゾンデ、4種の“science”ゾンデ
- 72回の同時飛揚観測(現業用60回、“science”12回)





## “チームジャパン” Meisei (明星電気)



$$T_s - T_a = \frac{1}{H} \left\{ \alpha \times \frac{S}{A} + \epsilon \left( \frac{L}{A} - \sigma T_s^4 \right) + \frac{I^2 R}{A} \right\} + T_b,$$

$T_s$ : 測定値、 $T_a$ : 気温

$H$ : 熱伝導係数

$\alpha$ : 短波吸収率、 $\epsilon$ : 長波射出率

$S$ : 短波放射、 $L$ : 長波放射

$A$ : センサー断面積

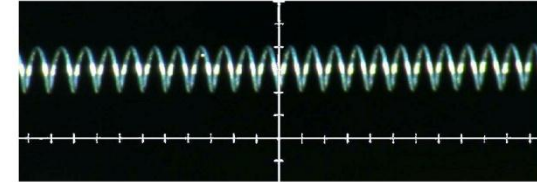
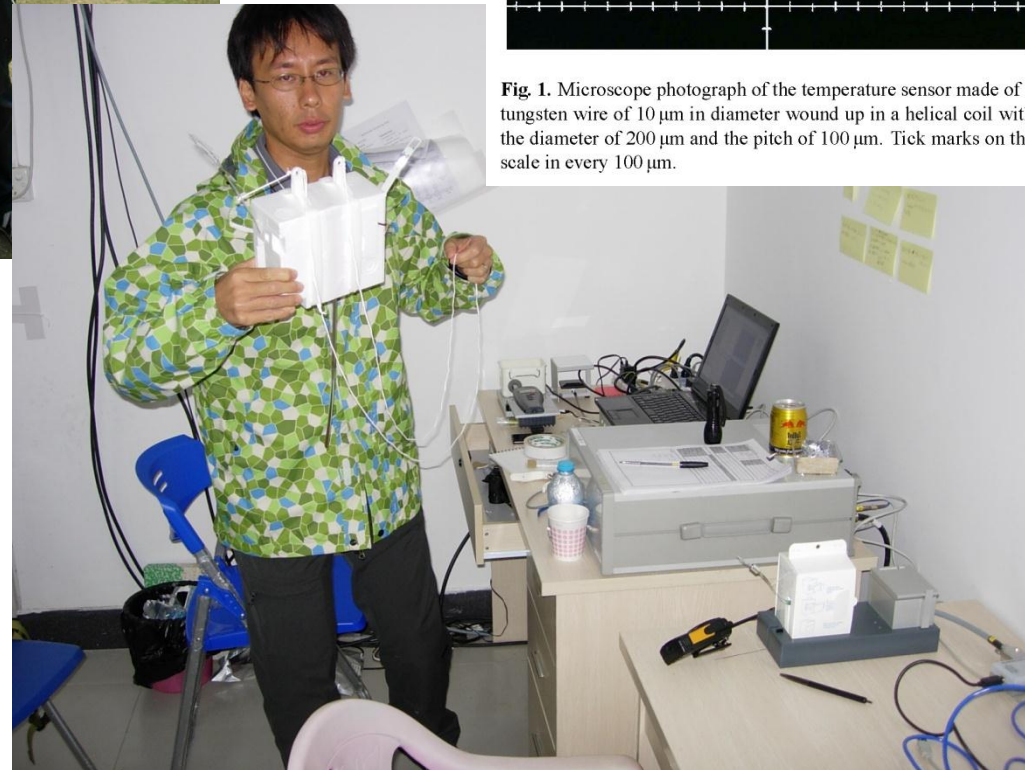


Fig. 1. Microscope photograph of the temperature sensor made of a tungsten wire of 10  $\mu\text{m}$  in diameter wound up in a helical coil with the diameter of 200  $\mu\text{m}$  and the pitch of 100  $\mu\text{m}$ . Tick marks on the scale in every 100  $\mu\text{m}$ .

Meisei Temperature Reference (MTR) sonde  
(タングステンのワイヤを用いた気温計)  
+ Meisei RS06G

- 大変レスポンスが速い (<40ms at 10 hPa)
- 放射補正量が比較的小さい (<0.5 K)
- センサーパッケージや気球による測定汚染を検出

[Shimizu and Hasebe, AMT, 2010]



# “チームUSA”



## Lockheed Martin Sippican “Multithermistor sonde”

- ・ ラジオゾンデによる気温測定では、短波放射加熱等による誤差が避けられない
- ・ 通常は、誤差量を推定し差し引く
- ・ Multithermistorは、放射特性( $\alpha$ 、 $\epsilon$ )の異なる3つのセンサーを用いることで、3つの式から3つの量  
気温 $T_a$ と短波放射 $S$ と長波放射 $L$ を同時に解く

$$T_s - T_a = \frac{1}{H} \left\{ \alpha \times \frac{S}{A} + \epsilon \left( \frac{L}{A} - \sigma T_s^4 \right) \right\}$$

(ただし、 $\alpha$ や $\epsilon$ の不確かさに関する情報が公開されておらず、算出された $T_a$ の不確かさの評価が出来ていない；本当に $\alpha$ や $\epsilon$ の不確かさを十分に小さく抑えられる？)

$\epsilon$  and  $\gamma$  for various thermistor coatings

Coating	$\epsilon$	$\gamma$ ( $=\alpha$ )
White (Standard VIZ)	0.86	0.12
Aluminum	0.22	0.31
Black	0.86	0.94

## “チームSwitzerland”



Meteolabor SRS-C34 radiosonde  
+ Snow White chilled-mirror hygrometer

## “チームGRUAN”







# WMO国際比較観測の結果と問題点

- 11の現業用ラジオゾンデ + Snow White + Multithermistorについては、各パラメタについて1～6点の評価表
  - 4点: 現業用としてはよいがGRUAN用としては改良必要
  - 5点: 現状ではGRUANに使用可
  - 6点: GRUAN Lead Centreに補正・処理の情報を提出済み
- 気温: 全高度で5点が3種
- 相対湿度: 対流圏全域で4-5点が3種
  
- 明星電気MTR: 高速レスポンスにより測定汚染の検出に力を発揮
- LMS Multithermistor: 測定の不確かさ評価のための情報開示必要
- Vaisala RR01 (RD100 Drycap sensor): UTLS水蒸気センサー; 今回は期待通りに動作せず評価対象から外した
  
- → 気温、水蒸気 (CFH、Snow White) 含めて、SI単位系にトレーサビリティをもつ “absolute reference” が存在せず、相対評価に留まる (cf. AquaVITの顛末) (“多数決” でも問題あるセンサーの洗い出しは可能であったが)

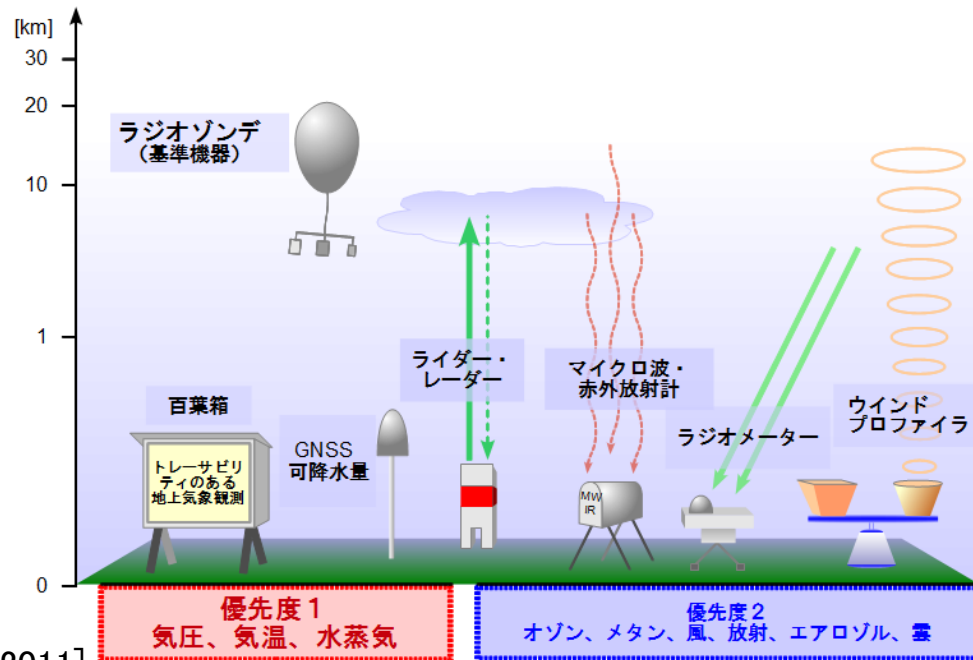
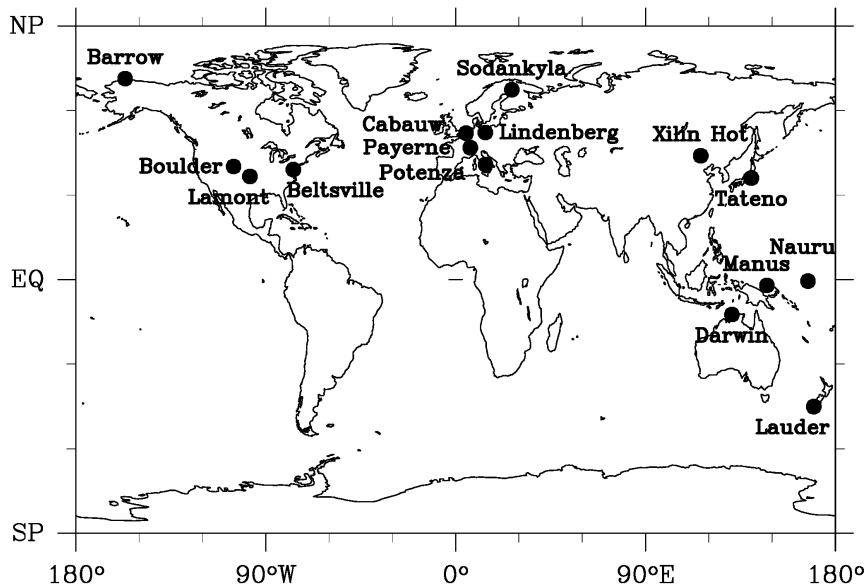
# 内容

1. はじめに: 気候変動問題と大気観測網
2. 高層気象観測の問題
  1. 気温測定の問題
  2. 水蒸気測定の問題
3. GRUAN: その必要性、発展の道筋、課題
4. WMOラジオゾンデ国際比較観測(2010)
5. まとめ



# 5. まとめ

- **GRUAN: 気候監視のための高層観測ネットワーク**
- 気温、水蒸気、気圧・高度(水平風、微量成分、エアロゾル・雲に関する諸量等)
- 高層観測用気球搭載機器・研究レベルの高性能機器(H<sub>2</sub>OならNOAA FPH, CFH, Snow White) + 地表設置型リモートセンシング機器
- 向こう数十年間に渡り、“**気候データ**”(traceability, uncertainty, metadata)を提供
- よりグローバルな観測システム・データセットである、衛星観測、GUAN(既存の高層観測網のうち継続性の高い150地点ほど)、再解析、など、に対して検証データを提供
- 世界の15地点の観測点で開始、最終的には30~40地点に





## 5. まとめ： GRUANの課題

- 観測機器の確保：
  - 放射補正不要な気温センサー？
  - 低コストなUTLS水蒸気センサー？ →
  - メーカーや測器開発者の理解
- 観測地点・資金の確保：
  - 経済動向(と人々の理解)と長期観測へのコミットメント
  - 南米、アフリカ、南極、大洋内の島嶼などにも
- GRUANデータ(15~40地点)の活用：
  - 全球気候データセットにどう反映させていくか
  - 再解析にどうしたら影響を与えられるか

# 新たなラジオゾンデ用鏡面冷却式センサ(ペルチェ冷却方式)の開発



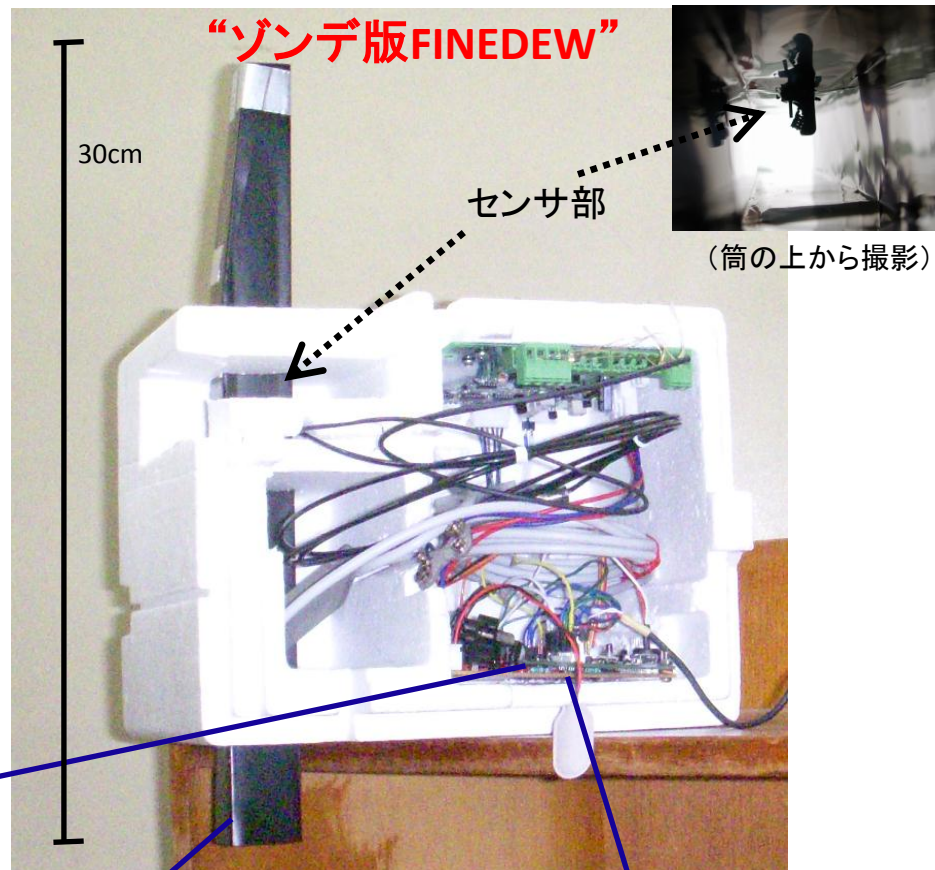
産業用鏡面冷却式センサ”FINEDEW”(山武)

- ・超小型
- ・ペルチェ冷却方式
- ・散乱光受光方式で結露の検出感度が高い
- ・動作露点温度範囲:  $-40 \sim +100^{\circ}\text{C}$

マイクロコンピュータ(マイコン)  
を用いたデジタル制御  
⇒ ゾンデ観測に適した制御設定

ゾンデ観測で想定される露点・霜点温度:  
 $-100 \sim +40^{\circ}\text{C}$ @地上高度 $\sim 30\text{km}$

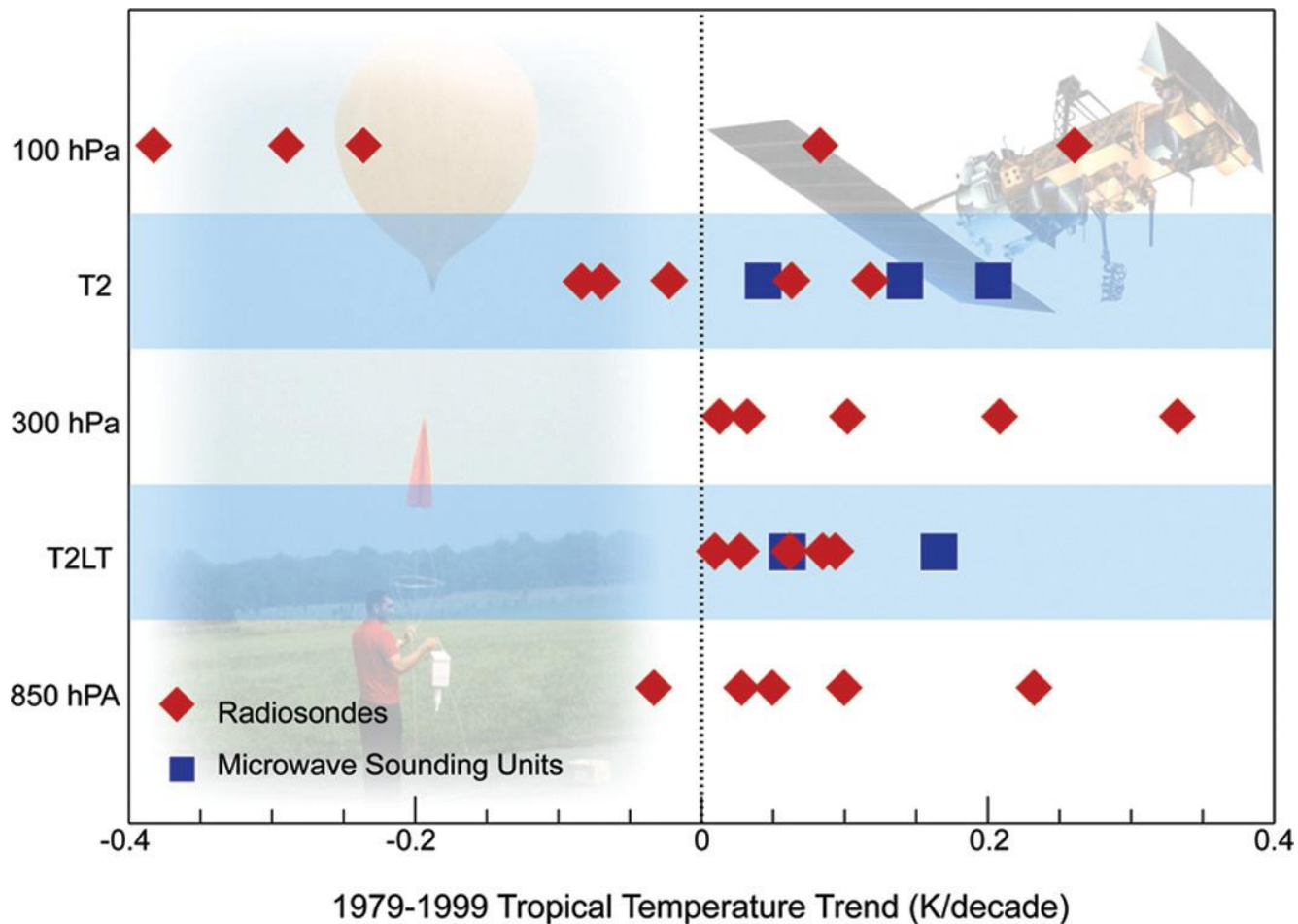
- ・ NOAA FPH、CFHは、冷媒( $\text{CHF}_3$ )を使用
- ・ Snow Whiteは、analog controller/LSでバイアスあり



装置構成の検討  
・計測空気導入用の筒  
・太陽光による影響を避ける

コントロール回路の作成  
(軽量化、乾電池式、耐低温)





[Seidel et al., BAMS, 2009; Santer et al., IJC, 2008]

様々な“一様化手法”によるデータセットより計算された気温トレンド

(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る手法など。

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。)

- 異なるデータセットは異なる気温トレンド値を提示
- 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いる
- そもそも観測ネットワーク、観測システム自体の改善が必要

## 上空の気温の1979-1999におけるトレンドの比較

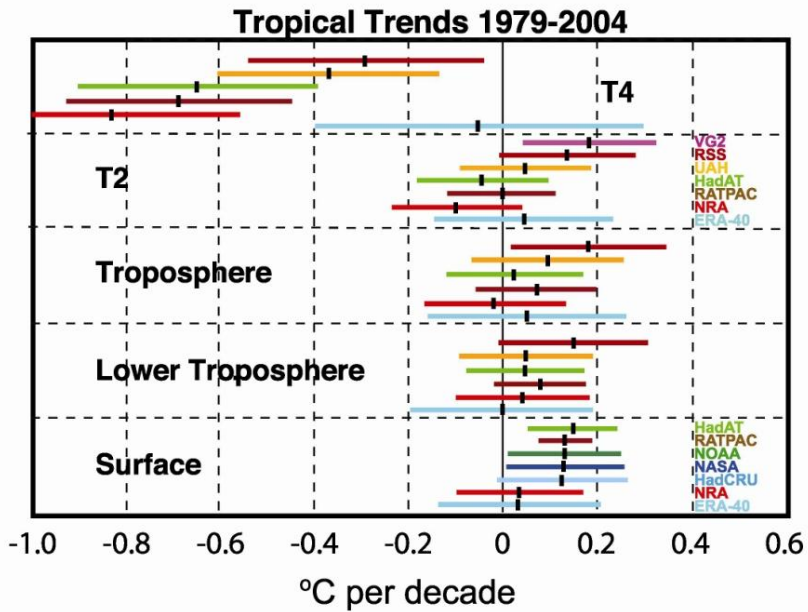
5つのラジオゾンデデータセット(“changepoint”補正): Thorne et al. (2005a), Free et al. (2005), Haimberger et al. (2008, two datasets), and Sherwood et al. (2008)

3つの人工衛星(MSU)データセット(補正):

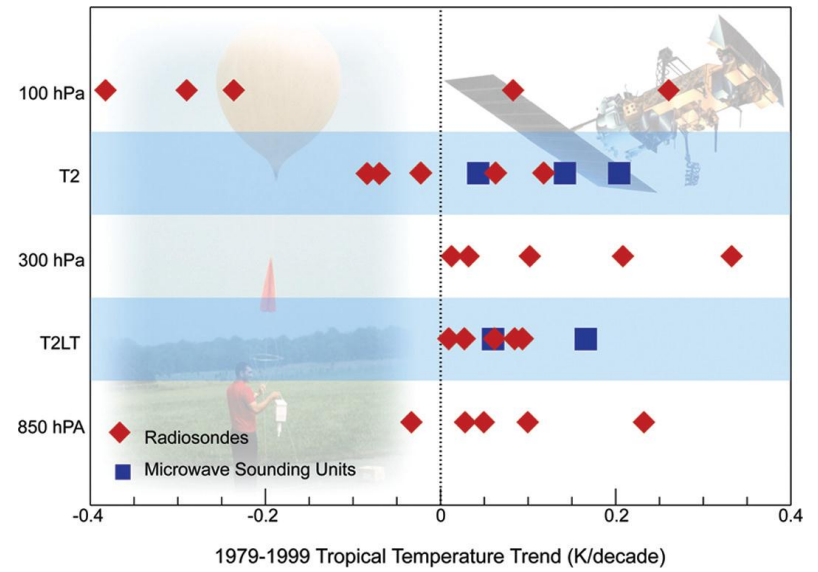
Mears and Wentz (2005), Christy et al. (2003), and Vinnikov et al. (2006)

(T2: 対流圏ただし下部成層圏の影響あり。 T2LT: 下部対流圏)

左図:ラジオゾンデ放球の様子。 右図:人工衛星(Polar Operational Environmental Satellite, POES)



[IPCC AR4, 2007]



[Seidel et al., BAMS, 2009; Santer et al., IJC, 2008]

# Lyman- $\alpha$ 水蒸気計（例：ロシア製FLASH-B）

水素原子の発光スペクトルの1つであるLyman- $\alpha$ 線付近 (121.6 nm) を大気に照射

→  $H_2O$ 分子が光解離を起こし、励起状態のOHラジカルが生成、  
これが蛍光 (310 nm付近) を発する



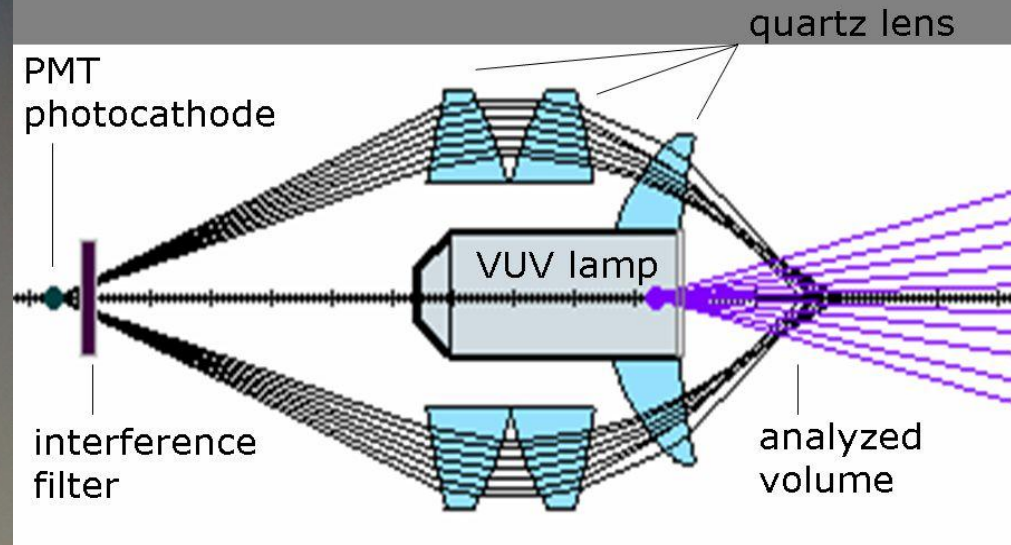
$$I_{PM} = \frac{[H_2O] J \Phi A}{A + [air] k_{q,air}} \exp\{-\sigma_{O_2} [O_2] L\}$$

→ 実験室で事前に校正必要  
→ 鏡面冷却よりレスポンス速いとされる



Biak, Indonesia (SOWER campaign)

## Fluorescent Advanced Stratospheric Hygrometer for Balloon (FLASH-B)



Optical layout of the fluorescent hygrometer (FLASH) for balloon