様式Ｃ－１９

科研費 KAKENHI

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成　25 年　5 月　23 日現在

機関番号：10101
研究種目：若手研究（B）
研究期間：2010～2012
課題番号：22740306
研究課題名（和文）気候監視のための高層気象観測用・超小型・高精度水蒸気センサーの開発

研究課題名（英文）Development of a balloon-borne chilled-mirror hygrometer for climate monitoring

研究代表者
藤原　正智（FUJIWARA MASATOMO）
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・准教授
研究者番号：00360941

研究成果の概要（和文）：
気候監視を目的とした、地表から成層圏の水蒸気を高精度に測定できるラジオゾンデ用ペルチェ冷却方式鏡面冷却式露点計を開発した。また、現業用ラジオゾンデ RS-06G に搭載された高分子膜相対湿度計の系統的誤差の補正、及び水蒸気の液相・固相である雲粒子を測定できる雲ゾンデの開発に取り組んだ。これらの測定システムによって、従来の水蒸気測定に比べ信頼性・安定性に優れた大気中の水蒸気の測定が可能になる。

研究成果の概要（英文）：
We have developed a chilled mirror hygrometer for the climate monitoring, which accurately measures atmospheric water vapor from the surface to the lower stratosphere. Additionally, we re-evaluated the relative humidity measurement uncertainty of the RS-06G operational radiosonde, and developed a cloud particle sensor for balloon sounding. These measurement systems can make more reliable and stable water vapor measurements.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2010 年度	600,000 円	180,000 円	780,000 円
2011 年度	1,900,000 円	570,000 円	2,470,000 円
2012 年度	700,000 円	210,000 円	910,000 円
年度			
年度			
総　計	3,200,000 円	960,000 円	4,160,000 円

研究分野：数物系科学
科研費の分科・細目：地球惑星科学　気象・海洋物理・陸水学
キーワード：水蒸気測定

１．研究開始当初の背景

地球温暖化問題においては、長期にわたる精度の高い大気測定が不可欠である。大気の諸パラメタの中でも、特に水蒸気は、降雨・天気現象に関わるだけでなく、上部対流圏においては地球の放射エネルギー収支に重要な役割を果たす。しかし、その測定技術は、実はいまだ極めて不満足な状況にある。高層大気の水蒸気濃度は、気温などとともに1940年代より世界の気象官署で始まった高層気象観測（ゴム気球を用いたラジオゾンデ観測）によって測定されてきている。しかし、その主目的は天気予報のための基礎データ収集にあり、低濃度で測定が困難な上部対流圏・成層圏の測定は事実上できていなかった。この高度領域の水蒸気は気象官署の“業務”ではなく、研究者たちの“研究”目的で、以下で説明する大型で高価な特殊水蒸気センサを用いて測定されてきた。しかし、ここ20 年ほどで地球温暖化問題への理解が深まるとともに、気候変動の監視も“業務”への強い要請となってきた。上空大気での定常的な“その場”観測が唯一実現できるものは高層気象観測であるので、その枠組みにおいて、高精度かつ安価に、上部対流圏・下部成層圏も含めて水蒸気測定ができるセンサが必要とされてきた。

気候監視のための高精度な測定のためには、通常の高層気象観測で使用される物性を利用した簡便法（静電容量型高分子膜湿度計）ではなく、物理原理に基づいた測定法を採用すべきである。そのような水蒸気測定方法として、鏡面冷却式露点計と呼ばれるものがある。これは、大気に晒した鏡面を適切に冷却し、鏡面上に露（霜）を結ばせ、露（霜）の蒸発速度と凝結速度が釣り合う平衡状態を保つことで鏡面の温度を露（霜）点温度に保ち、この時の鏡面温度を連続測定して露（霜）点温度を得るものである。この方式は信頼性が高く、各国の保有する湿度の国家標準の同等性の比較において仲介のための標準器としても採用されている。

高層気象観測用としては、現在世界的に次の２種類の鏡面冷却式露点計が存在する。米国海洋大気庁およびコロラド大学によって開発された、冷媒冷却方式の鏡面冷却式露点計（Cryogenic Frostpoint Hygrometer, CFH; Voemel et al., J. Geophys. Res., 2007）では、鏡の冷却に冷媒（トリフルオロメタンHFC-23）を使用することにより、成層圏の極端低霜点環境の測定を可能としている。このセンサの問題は、強力な温暖化物質であるトリフルオロメタンを使用していることにあり、観測の度に大気中にまき散らすため問題視されている。一方、スイス・Meteolabor社により開発された、ペルチェ素子を用いた冷却方式の鏡面冷却式露点計 Snow White（Fujiwara et al., J. Atmos. And Oceanic Technology (JTECH), 2003）では、鏡の冷却にペルチェ素子を用いるので冷媒が不要であり、電池を繋ぐだけで動作するため操作が容易である。しかし、成層圏の極端低霜点の環境では、冷却能力が足りない。さらに、冷却能力には問題のないはずの熱帯の上部対流圏においても、その測定にバイアスが生じることがわかった(Voemel, Fujiwara et al., JTECH, 2003)。この問題は、制御回路の調整が不十分であるためだと考えられ、アナログ回路方式から精密な制御の設定が行えるデジタル回路方式への移行が検討されたが実現されておらず、未だ解決されていない。

上記のように現存の水蒸気センサはいずれも気候監視の目的には適さない。一方、日本には、工業用として実績のある超小型・ペルチェ冷却方式鏡面冷却式露点計 FINEDEW（アズビル株式会社）と世界の６大ラジオゾンデメーカーのひとつ明星電気株式会社が存在する。FINEDEW の開発には、鏡面冷却の制御パラメタの調整のための各種実験等に本研究代表者も大きく貢献している。また、明星電気とは近年ラジオゾンデ用 CO_2 センサの開発や高精度気温測定用タングステンセンサーを共同開発してきた。そこで、両日本メーカーの協力のもと、オールジャパン体制で、気候監視のための水蒸気測定に相応しい高精度水蒸気センサ“ラジオゾンデ用鏡面冷却式露点計”を開発するという本計画を着想するに至った。

２．研究の目的

研究開始当初の研究目的は、工業用の鏡面冷却式露点計FINEDEWを基に高層気象観測用に適した制御基板および制御アルゴリズムを新たに開発し、ラジオゾンデ RS-06G に接続することによって、地表から成層圏の水蒸気を高精度に測定できる小型で安価な測定システムを確立することであった。さらに、研究開発を進める中で、以下の２点の新たな研究課題が生まれ、これらにも取り組んだ。

高精度水蒸気センサの開発を進める過程の中で、現業の高層気象観測でも使用されるRS-06G に標準搭載された静電容量型高分子膜相対湿度計（以下、相対湿度計という）に系統的誤差が生じることが開発機との比較測定から明らかとなった。この系統的誤差は相対湿度計の温度依存性を補うための補正式に起因するもので、気温 0℃において2.9%RHの不連続な変化を生む。この相対湿度計によって測定された全ての湿度の鉛直プロファイルは、気温 0℃高度において人為的な不連続が発生しており、気候監視の面からは看

過できないものであった。このため、RS-06Gの相対湿度計の室内評価を実施し、系統的誤差の補正法を開発することに取り組んだ。

大気中の水蒸気の液相・固相である雲粒子は通常の鏡面冷却式露点計では測定することができない。雲は水蒸気濃度に関与するだけでなく、それ自体が地球の放射収支に大きく影響する。しかし、雲の微物理量を測定するためには高価な機器を必要とするため、これまで定常的な雲の“その場”観測は実施されてこなかった。そこで、神栄テクノロジー株式会社の協力を得て、ラジオゾンデ用高精度水蒸気センサと合わせて飛揚できる、安価な雲粒子センサを開発することを目的に加えた。

３．研究の方法

ラジオゾンデ用鏡面冷却式露点計の開発過程は、（１）ハードウェアおよびソフトウェアの設計と製作、（２）室内実験による動作確認と制御パラメタの調整、（３）飛揚試験、が主なものである。本研究課題では、さらに（４）現業用ラジオゾンデ RS-06G の相対湿度計の評価実験および補正式の開発、（５）雲センサの開発、に取り組んだ。

（１）ハードウェア・ソフトウェアの製作

FINEDEW は、工業用として設計・開発された超小型・ペルチェ冷却方式の鏡面冷却式露点計である。ラジオゾンデ用として使用するためには、制御回路や電源部を含めた装置全体を気球に吊るして飛揚可能な重量に軽量化する必要があった。また、高層大気は地上では有り得ない超低温・低圧の環境となり、このような環境での動作を保証するハードウェアが必要とされた。そこで初年度はまず、市販の H8 マイコンボードを利用して、FINEDEW のセンサプローブを駆動させる制御回路、ラジオゾンデと接続するためのインターフェース回路およびファームウェアを試作した。このハードウェアを用いて、室内実験および飛揚試験を行い、鏡面冷却式露点計の基本動作やPID制御特性を調べた。翌年度以降は、これを基に明星電気にてプリント基板化し、更なる軽量化に取り組んだ。また、測定空気を鏡面付近まで取り込むためにはゾンデの上昇に伴う大気に対する相対的な動きを利用するが、ゾンデは水平方向にも大きく揺れ通風筒内の流れは大きく変動する。測定空気を安定した流れにするためには、通風筒の形状を検討する必要があった。熱線風速計の原理を利用した流速計ゾンデを自作し、飛揚中の通風筒内の流速を実測し、通風筒の形状の検討を行った。

（２）動作確認と制御パラメタの調整

鏡面冷却式露点計の開発における最重要項目は、鏡面冷却の制御のための PID（Proportional・Integral・ Derivative）制御のパラメタ調整である。P、IおよびDの3 種の制御パラメタの組み合わせにより、制御の応答性・安定性を決定することができる。高層気象観測では、地上から上空へ上昇していくに伴って、気温・気圧・水蒸気量などが常に変化し続ける。工業用等で用いられる安定性を重視した制御では、測定環境の急激な変化に追随できないため、高層気象観測用としては応答性を重視しつつ、自動制御が不安定を起こさないギリギリの調整を行う必要があった。低温実験室や真空チャンバーおよび風洞装置等を用いて再現した仮想高層大気中で最適な制御パラメタの調整に取り組んだ。また、鏡面付近で生じる物理現象（熱・物質移動現象）について理論的考察を行うことで、鏡面冷却式露点計の制御パラメタの環境依存性を導いた。

動作確認については、主にペルチェ素子の冷却能力の温度依存性や気圧依存性について調べ、鏡面の冷却限界（霜点温度の測定限界）について考察した。

（３）飛揚試験

飛揚試験については、初年度に１回（茨城県守谷市）、２年目に５回（札幌市、守谷市、インドネシア Biak 島）、３年目に２回（インドネシア Biak 島、守谷市）の計８回を実施し、中緯度および熱帯地域の上空における動作を確認した。

（４）RS-06G 相対湿度計の不確かさ評価

鏡面冷却式露点計は高精度な水蒸気の測定方法であるため、ラジオゾンデに搭載される相対湿度計の校正（値付け）にも利用されている。本研究では、FINEDEW を利用して温度湿度槽内で－50℃～40℃における RS-06G の相対湿度計の温度依存性を再評価した。これらの結果から、従来用いられてきた温度補正式に代わる新たな補正式を考案した。

（５）雲ゾンデの開発

花粉センサ「PS2」（神栄テクノロジー株式会社）は、大気中に浮遊する花粉を測定するために開発されたセンサであり、粒子を光学的に検知するものである。このセンサは、空中の浮遊粒子の大きさに依存する散乱光強度、形状に依存する偏光度、数密度に対応する１秒間あたりのカウント数を得ることができる。水滴および氷晶に対するＰの出力と粒径との対応、偏光度と形状との対応関係、及び測定空気の流量を把握することができれば、雲粒子の粒径、形状、数密度を測定することが可能となる。超音波加湿器や霧吹きの水滴を利用し、センサ出力と顕微鏡によって確認した水滴の大きさとの対応、低温室内で作り出した氷晶に対する偏光度、などを確かめ、その後、ラジオゾンデに接続して国内外で計７回の飛揚試験を実施した。

4．研究成果

（1）ハードウェア・ソフトウェアの製作

開発機の外観を図 1 に示す。センサプローブの形状の改良やマイコンを組み込んだ小型の制御回路の開発によって、最終的な装置重量は CFH などに比べて半分以下の 300g 以下まで軽量化することに成功した。また、従来の水蒸気観測で問題視されてきた下層雲を通過した際に過冷却水滴が通風筒に付着して生じる測定汚染を最小限に抑えるため、測定空気を取り込む通風筒を図 1 の通り必要最小限の大きさにした。また、流速計ゾンデによりゾンデ上昇中に生じる通風筒内の流速を実測した結果、流入口を絞った形状とすることで流速の変動を軽減できることがわかった。これにより、鏡面冷却の自動制御の不安定から生じる鏡面温度の振動を抑えることができ、また、鏡面から奪われる熱も減少するため冷却能力の低下を防ぐことができ、測定精度および測定範囲の向上に繋がった。

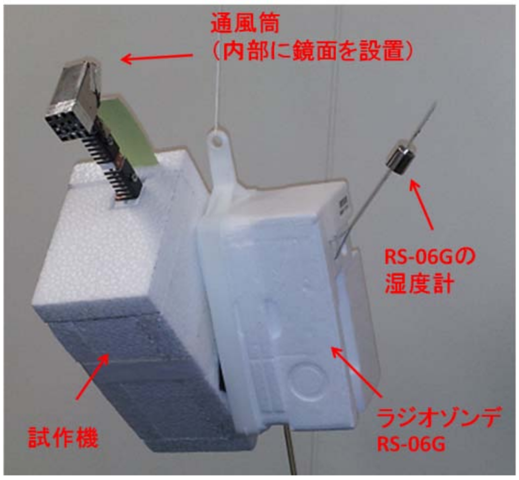

図1　開発機およびラジオゾンデ RS-06G

（2）動作確認と制御パラメタの調整

制御パラメタの環境依存性について、理論的検討を行った結果、鏡面に生じる露および霜の成長・衰退は鏡面付近の水蒸気分子の濃度に依存すると考えられ、気温・気圧の依存性は水蒸気濃度の依存性に比べ非常に小さいことがわかった。また、温度槽を用いた実験結果からも、PID 制御パラメタは水蒸気濃度（露点温度）に強く依存することが確かめられた。これらの結果を利用し、鏡面温度（露点温度）に応じて制御パラメタを切り替えるアルゴリズムをファームウェアに埋め込んだ。さらに、PID 制御パラメタは鏡面に形成される霜の形状にも依存することが経験的にわかってきた。具体的には、露から霜へ相変化し凍結してできた氷と直接水蒸気から昇華凝結してできた霜では、成長速度や散乱特性が異なると考えられる。このため、観測中に定期的に新鮮な霜を作り直すための鏡面の強制加熱制御を追加することで、PID 制御パラメタの氷の形状依存性による制御の不安定や時定数遅れを防いだ。

（3）飛揚試験

計 8 回実施した飛揚試験のうち、ここでは、2012 年および 2013 年のインドネシア Biak 島における飛揚試験の結果の 2 例を紹介する。図 2 は 2012 年 2012 年 1 月 13 日に実施した飛揚試験で得られた露（霜）点温度の鉛直プロファイルと散乱光強度とペルチェ素子による冷却強度を示す。地表から対流圏中層（～高度 11km）では、気温－40℃以上の測定が可能な RS-06G の相対湿度計と比較すると±5%RH 以内で一致した。また、地表～中部成層圏の露点・霜点温度測定が信頼できる CFH により前日に観測された水蒸気混合比と比較すると、対流圏界面～高度約 23km で約 1 ppmv 以内で一致した。また、対流圏界面以上では、散乱光強度と鏡面温度（霜点温度の測定値）に振動が生じる事が確認できた。この振動は、PID 制御パラメタの調整において、測定の時定数を早めるためゲインをやや大きすぎる設定して試験を行ったため生じたもので、真値付近を中心として振動していると考えられる。次に、2013 年 1 月 10 日での飛揚試験は CFH との同時比較測定を行った。この結果、高度 15km 以下では両センサによる露（霜）点温度が±0.5℃以内でよく一致することが確かめられた。

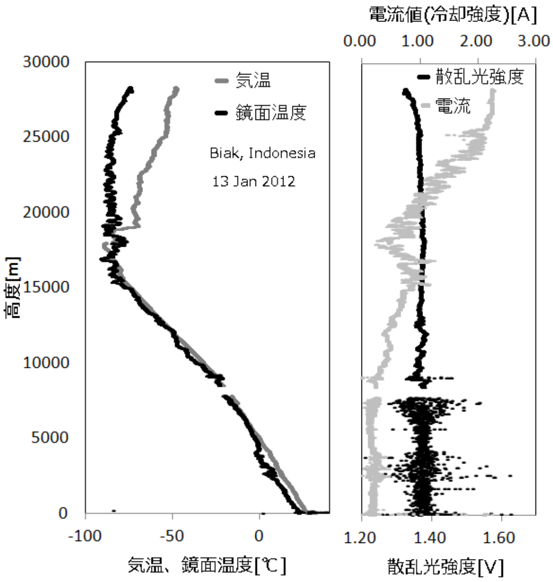

図 2　2012 年 1 月 13 日、インドネシア Biak での飛揚試験の結果。地表～高度 30km における気温と鏡面温度(左)、散乱光強度と電流値(右)。

（４）RS-06G 相対湿度計の不確かさ評価

RS-06G の相対湿度計の温度依存性を温度槽内で鏡面冷却式露点計と比較測定により再評価した結果、気温+10℃以下において 7% RH 以上の湿潤バイアス示すことがわかった。このような大きな湿潤バイアスは過去に実施されたラジオゾンデの相互比較観測等で確認されていないため、ラジオゾンデ上昇中に生じる湿度センサの温度の遅れが引き起こす乾燥バイアスの影響についても調べた。この結果、対流圏では湿度センサの温度の遅れによる乾燥バイアスが生じる可能性があり、湿度センサの温度依存性による湿潤バイアスを一部キャンセルしていると考えられる。室内実験における温度湿度依存性の結果に湿度センサの時定数遅れによる乾燥バイアスを考慮すると、−40℃～0℃で適用されていた従来の温度補正式を+14.5 ℃まで外挿した式とよく一致した。従って、気温０ ℃で生じる不連続な変化を解消するための温度補正式として、従来の温度補正式を+14.5 ℃まで外挿することを考案した。この結果について、投稿論文(Correction of the stepwise change observed at 0 ° C in Meisei RS2-91, RS-01G, and RS-06G radiosonde relative humidity profiles)にまとめ、Journal of the Meteorological Society of Japan (JMSJ) に投稿し、2013 年 3 月に受理された (Sugidachi and Fujiwara, 2013)。

（５）雲ゾンデの開発

花粉センサについて、加湿器による水滴、および低温室内で発生させた氷晶に対する応答を調べたところ、水滴および氷晶を検出できることがわかった。また、水滴と氷晶では偏光度に違いがあることが確認でき、このセンサにより雲の相の判別も可能であることが確かめられた。また、花粉センサを用いて北海道中山峠に発生する霧の観測を実施したところ、実際の大気中の水滴にも反応することが確かめられた。日本およびインドネシアで飛揚試験を実施した結果、中緯度の下層雲や熱帯対流圏界面に発生する巻雲を検出できることを確かめた。対流圏下層の濃い雲に対しては数密度を過小評価するという課題は残っているものの、対流圏上層の巻雲に対しては先行研究の数密度とオーダーが一致しており、薄い雲に対しては数密度の測定および雲の相の判別に利用できることが分かった。雲センサの重量は 200g と非常に軽く、高精度水蒸気センサと組み合わせ飛揚することも可能である。

以上の通り、本研究によって上空の水蒸気濃度の測定について、従来に比べてより高精度な測定が可能になりつつある。本研究で開発した高精度水蒸気センサおよび雲センサは、気候監視のための高層気象観測や、上部対流圏の水蒸気・巻雲の科学などにおいて、非常に有力なツールとなると期待される。一方、本研究課題の枠組みの中では実際の飛揚試験は８回のみに留まった。本研究によって創出された成果を今後の気候監視のための水蒸気測定に発展させるためには、メーカーによる本センサの量産体制を整えていく必要がある。

５．主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計　１件）

① Sugidachi, T., and M. Fujiwara, Correction of the stepwise change observed at 0 ° C in Meisei RS2-91, RS-01G, and RS-06G radiosonde relative humidity profiles, *Journal of the Meteorological Society of Japan,* in press (accepted March 2013)（査読有）

〔学会発表〕（計　５件）

① 新井徹・杉立卓治・藤原正智・清水健作・奥村聡・林真由美, 花粉センサを利用した雲粒子ゾンデの開発, 日本気象学会春季大会, 2013 年５月 18 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター（東京都）

② 杉立卓治・藤原正智・清水健作・井端一雅・金井良之, 気候監視のためのラジオゾンデ用水蒸気センサの開発（第２報）, 日本気象学会春季大会, 2013 年５月 17 日, 国立オリンピック記念青少年総合センター（東京都）

③ Sugidachi T., M. Fujiwara, K. Shimizu, K. Ibata, Y. Kanai, Development of a balloon-born Peltier-based chilled-mirror hygrometer for the troposphere and the lower stratosphere, October 16, 2012, A U.S.-Japan Bilateral Workshop on the Tropical Tropopause Layer: State of Current Science and Future Observational Needs, the International Pacific Research Center at the East-West Center (Honolulu, Hawaii, USA)

④ 杉立卓治・藤原正智, Meisei RS－06G ラジオゾンデに寄る湿度測定の気温０度における不連続な変化とその補正法, 2012 年 10 月５日, 北海道大学学術交流会館（札幌市）

⑤　杉立卓治・藤原正智・清水健作・井端一雅・金井良之，気候監視のためのラジオゾンデ用水蒸気センサの開発，日本気象学会春季大会，2012 年 5 月 27 日，つくば国際会議場（茨城県）

６．研究組織

(1)研究代表者

藤原　正智（FUJIWARA　MASATOMO）
北海道大学・大学院地球環境科学研究院・准教授
研究者番号：00360941