

学位論文題名

Precise sonde observations of the atmospheric temperature profile: Development of a temperature reference sonde with the analysis of test flight data

(鉛直気温分布の精密ゾンデ観測

～温度基準ゾンデの開発と試験観測データの解析～)

学位論文内容の要旨

気候監視をはじめ地球環境の理解にとって高層気象観測は重要な役割を担っているが、高度分解能の高いデータが手軽に得られるラジオゾンデは、現在でも必要不可欠な観測手法の1つである。ラジオゾンデ搭載のセンサは、気温40～90 °C、気圧1000～5 hPaという広いダイナミックレンジをカバーしつつ、十分な精度を確保する必要がある。近年のGPS技術を応用した気圧算出手法により気圧データにおけるバイアスは大きく減少したが、温度センサ及び湿度センサに関しては、今なお、測定値にバイアスの存在する事が知られている。特に温度センサについては、日射に起因するバイアスの正確な把握が困難で本質的な問題解決がなされないまま、日射補正という便宜的な経験的手法に依存してきている。そのため、周囲の気温にセンサが同化するのに長時間を要し、日射の強い成層圏においては、より顕著なバイアスが現れる。この事実は近年の国際比較観測でも日中の温度データが製造メーカー間で有意に異なることから明らかである(Nash et al., 2005)。しかしながら、全球的・地域的な気候変動の兆候を監視・検知するためにも成層圏までの気温を正確に計測することができる温度センサは非常に重要であり、高精度で信頼のおける温度ゾンデが求められている(WG-ARO, 2008)。

本研究では、温度基準ゾンデを新たに開発した。この温度基準ゾンデはかつてロケットゾンデに使用されてきたタングステン線の電気抵抗値の温度依存性を利用するもので、その特長は応答時間が短いことである(以下、本ゾンデをTungstenゾンデと称する)。室内実験の結果から推定される応答時間は10 hPaで46 msであり、これにより日射によるバイアスは0.5 K以下と見積もられる。さらに、6 Hzの高速サンプリングにより、従来議論されてこなかった微細な温度構造を見ることができる。プロトタイプのTungstenゾンデによる観測の結果、昼間は正、夜間は負のパルス状温度変動が数多く見出された。その振幅は高度とともに増大し、昼間の10 hPaでは7 Kに達した。当初この変動は、昼間は短波による加熱、夜間は長波による冷却や気球内部ガスの断熱冷却により生成される気球表面の温度擾乱がゾンデに到達したためであると理解された。しかし、気球直下とゾンデとにおける1対のGPS位置データを解析した結果、気球による

熱流の影響は二次的で、主要な原因はゾンデ本体により生成された熱流であることが明らかとなった。このゾンデ本体による影響はタングステン線の装着法の変更により取り除く事ができた。一方、気球に起因する温度変動は吊り紐を十分長くすることにより回避できた。しかし、タングステン線の太陽放射に対する立体角に依存した変動(0.4 K以下)は構造的に回避することができないため、観測値にフィルタを適用することにより除去した。これにより、Tungstenゾンデは鉛直温度構造の精密観測に耐えうるものとなった。

本研究では、Tungstenゾンデにより明らかにされた従来の高層気象観測に内在する誤差要因についてまとめ、試験観測データにより得られた精密な温度構造について議論する。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 長谷部 文 雄  
副 査 教 授 山 崎 孝 治  
副 査 教 授 渡 辺 力  
副 査 准教授 藤 原 正 智  
副 査 教 授 津 田 敏 隆 (京都大学生存圏研究所)

## 学位論文題名

Precise sonde observations of the atmospheric temperature profile: Development of a temperature reference sonde with the analysis of test flight data

(鉛直気温分布の精密ゾンデ観測

～温度基準ゾンデの開発と試験観測データの解析～)

高層気象観測は地球環境・気候変動の理解や監視に対して重要な役割を担っており、高度分解能の高いデータが容易に得られるラジオゾンデは、現在でも必要不可欠な観測手法のひとつである。ラジオゾンデ観測が手軽に実施できるとはいえ、その搭載センサには、気温 +40～90 °C、気圧 1000～5 hPa という広いダイナミックレンジをカバーしつつ、高い精度が要求される。近年のGPS技術を応用した気圧導出法の進歩により、気圧データにおけるバイアスは大きく減少したが、温度センサ及び湿度センサに関しては、今なお測定値に無視できないバイアスの存在する事が知られている。温度センサについては日射に起因するバイアスの正確な把握が困難で、本質的な問題解決がなされないまま、便宜的手法として日射補正に依存する状態が現在でも続いている。そのため、センサが周囲の気温に同化するのに長時間を要し強い日射に曝される成層圏において、不適切な日射補正により顕著なバイアスが現れる。この事実は、近年の国際比較観測において日中の温度データに見出される製造メーカー間の有意差(Nash et al., 2005) からも明らかである。こうした現状と全球的・地域的な気候変動監視の重要性に鑑み、成層圏まで温度測定可能な高精度で信頼のおけるゾンデの開発が求められている (WG-ARO, 2008)。

本研究では、基準ゾンデとしての使用に耐える精度を有するラジオゾンデ搭載型の温度ゾンデを新たに開発した。このゾンデは、かつてロケットゾンデに使用されたタングステン線の電気抵抗値の温度依存性を利用するもので、直径10  $\mu\text{m}$ の極細線の採用により極めて短い応答時間を実現している。室内実験の結果から応答時間は10 hPaで46 msと評価され、これによ

り見積もられる日射によるバイアスは、通常の上昇速度の仮定の下で0.5 K以下となる。この高応答特性に6 Hzの高速サンプリングを組み合わせることにより、従来議論されてこなかった微細な温度構造を観測することができる。

タングステンゾンデによる初期の観測の結果、昼間は正、夜間は負のパルス状温度変動が数多く見出された。その振幅は高度とともに増大し、昼間の10 hPaでは7 Kに達した。この変動は、昼間は短波放射による加熱、夜間は長波放射と気球内部ガスの断熱膨張による冷却により気球表面に生成される正負の温度擾乱が気球後流に乗ってゾンデに到達したためであると解釈された。しかし、気球直下と15 m下に取り付けた1対のゾンデによるGPS位置データを解析した結果、この温度擾乱は気球後流の外側で観測されていることが明らかとなった。さらに、ゾンデの振り子運動を2次元的に制限するために設置した平板の両端に、センサが外を向くように配置した1対のゾンデによる同時観測において、2つのセンサで交互に温度擾乱が観測されたことから、これらの温度擾乱はゾンデの筐体から発生する熱流により生じていることが明らかとなった。このゾンデ本体による影響はタングステン線の装着法の変更により取り除く事ができた。一方、気球後流に伴う温度擾乱と気球による日食に起因する日射変動は二次的効果しか持たず、吊り紐を十分長くすることにより回避することができる。最後まで残った変動(0.4 K以下)は、タングステン線の太陽放射に対する立体角に依存した変動と解釈され、構造的には回避することができない。こうした変動を必要に応じてフィルタリングすることにより、タングステンゾンデは鉛直温度構造の精密観測に耐えうるものとなる。

開発されたタングステンゾンデは1 mという高い高度分解能を有するため、既存のラジオゾンデでは測定できない温度の鉛直微細構造を観測することができる。そこで、中緯度と熱帯域の2か所で実施した試験観測データを用いて、鉛直温度変動に対するスペクトル解析を行った。その結果、波長50 m程度までは過去の観測で知られていたような波数の $-3$ 乗に比例するスペクトルが得られたが、それより短波長の領域ではスペクトルに振動が現れ、30 mより短波長域では波数の $-5/3$ 乗に比例する成分が多くみられるようになった。これが実体を伴ったものかノイズに過ぎないのかを現時点で判別することはできないが、今後の研究の発展が期待される。

審査委員一同は、これらの成果を高く評価し、大学院博士課程における研鑽や修得単位などもあわせ、申請者が博士(環境科学)の学位を受けるのに十分な資格を有するものと判定した。