

高高度気球による大気放射フラックス鉛直プロファイルのin-situ観測

○山田昇（長岡技科大） 岡島淳之介（東北大流体研） 櫻井篤（新潟大）
小宮敦樹（東北大流体研） 円山重直（東北大流体研）

1. はじめに

大気放射フラックスとは、大気各層における上向き（地球→宇宙）および下向き（宇宙→地球）の放射エネルギー流束密度 (W/m^2) であり、地球大気の加熱冷却、すなわち地球温暖化に直接的に影響する重要な量である。この大気放射フラックスの空間分布、とくに鉛直分布は地球大気の放射収支メカニズムや変動を研究する上で必要不可欠な情報となっている。

しかし、大気放射フラックスの鉛直分布の「その場」観測報告はそれほど多くはない。航空機や大型繫留気球による観測^[1-2]が報告されているが、高コストであること、プロセスが複雑であることから継続的運用には至っていない。一方、比較的小型のラジオゾンデを用いる手法は、上記の手法よりも精度は低いが、低コストであるために散発的にはあるが、開発と観測が行われてきた^[3-6]。最近では日射計と赤外放射計を搭載したラジオゾンデを用いた観測報告がある^[7,8]。これらに用いられる日射計と赤外放射計は地上観測用であるため、時定数は10s前後と遅く、放射計の熱容量に起因する温度変化による誤差に対して慎重な校正が必要であることがわかっている。また、これらの機器は未だ高価であり、容易に使い捨てできないため長期観測にはあまり向かない。

そこで著者らは、最近の機械工学研究に使用されている薄膜型放射流束センサを用いたラジオゾンデを開発した。このセンサは応答性が高く、また、原理的に温度変化による影響がなく、且つ、安価のため使い捨てもできる。また、従来よりも格段に軽量である。これまでに数回の飛揚テストを行っており有効性を確認している。以下に本ゾンデの概要と飛揚テスト結果の一部を紹介するとともに、信頼性向上のための大気球実験と高高度気球による高層大気観測への適用計画について述べる。

2. 大気放射フラックス観測用ラジオゾンデ

図1に本ゾンデの概要を示す。放射流束センサにはCAPTEC社の標準タイプ（RF-30、センサ表面積30mm×30mm、厚さ0.3mm、T型熱電対内臓）を用いた。この薄膜型センサは、表面が帯状の薄い吸熱板（放射率が相対的に大きい）と反射板（放射率が相対的に小さい）で交互に覆われており、原理的に放射流束のみが熱電対の接点にエネルギー差を発生させる構造になっており、センサ温度が変化しても感度は一定で、対流および伝導の影響を受けず、放射流束のみを高精度に電圧出力できる。センサの応答速度は約50ms、使用温度範囲は-200～250℃である（いずれもメーカーカタログ記載値）。このセンサをラジオゾンデRS-06G（明星電気(株)）をベースに改造したゾンデの上下面に両面テープで貼り付けた。このゾンデを直径約1mの気球に約15mの糸でぶら下げて飛揚させた。気温、相対湿度、放射流束センサ出力（+熱電対出力）、位置情報、風向風速などの観測値が1s毎に地上の受信機で収集される。なお、上面のセンサ面からバルーンへの形態係数は 10^{-6} 程度であり無視できる。

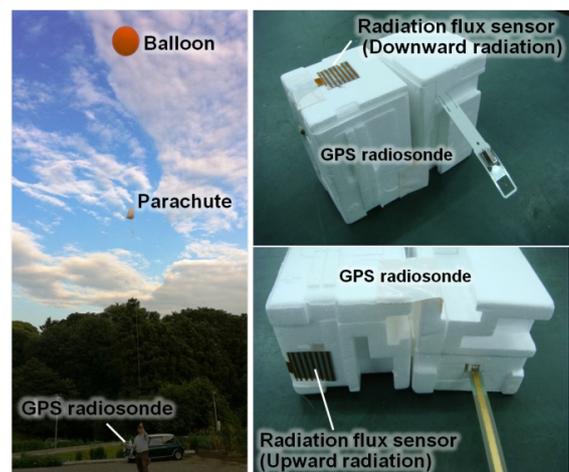


図1 放射流束センサを搭載した小型ラジオゾンデ

3. 仙台市におけるテスト飛揚結果

2012年4月12日に本ゾンデによる気球観測を実施した。飛揚地点は仙台市青葉区片平の東北大学流体科学研究所1号館屋上（地上約25m）とし、日没後の18:48JSTに1台目のゾンデ(Sonde #1)を打ち上げ、次いで19:21JSTに2台目(Sonde #2)を打ち上げた。2台目は1台目よりも浮力が若干小さくなるよう気球へのHeガス充填量を調整した。図2にゾンデ高度の時間変化と水平方向の飛行経路を示す。平均上昇速度は各々6.7m/s, 3.7m/sで、1台目は飛揚開始 37min後にピーク高度13kmでバーストし、太平洋にパラシュート落下した様子がわかる。一方、2台目は飛揚開始48min後に高度11km付近に達した後、受信不能となった。また、1台目は飛揚開始から約16min後には市街地・陸地を抜け、太平洋上に出ている。図3に観測で得られた気温、相対湿度、上向き/下向き大気放射フラックス、さらに、正味フラックスから求められる放射加熱率の鉛直プロファイルを示す。2台のゾンデによる結果は良く一致しており、測定の妥当性を示唆している。また、各量の分布傾向は過去の文献等で報告されている観測結果とも整合する。地表面近傍における下向き大気放射フラックスの値は市販の赤外放射計による地上観測値と一致した。1台目と2台目とで大気下層における下向きフラックスに差異があるのは、1台目は日没時刻(18:10JST)直後の飛揚開始であったため、散乱日射の寄与があったためであると考えている。

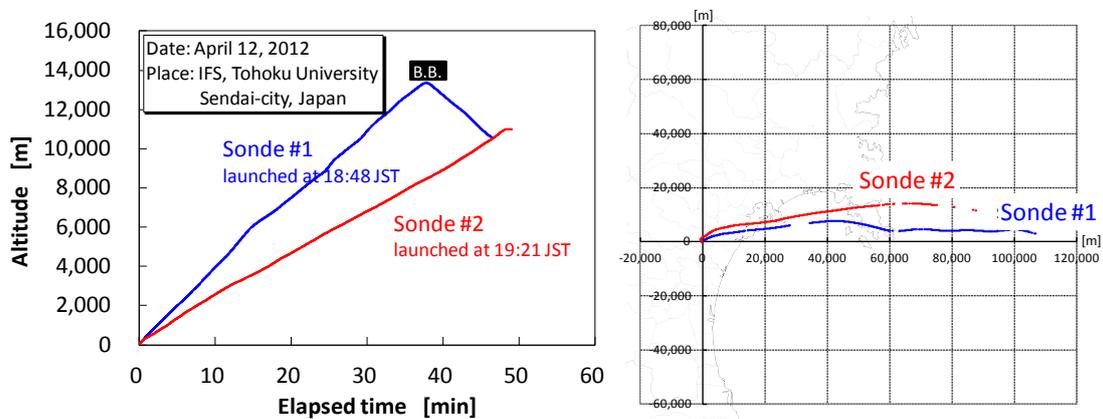


図2 放球からの経過時間と高度変化(左), ゾンデのフライト経路(右).

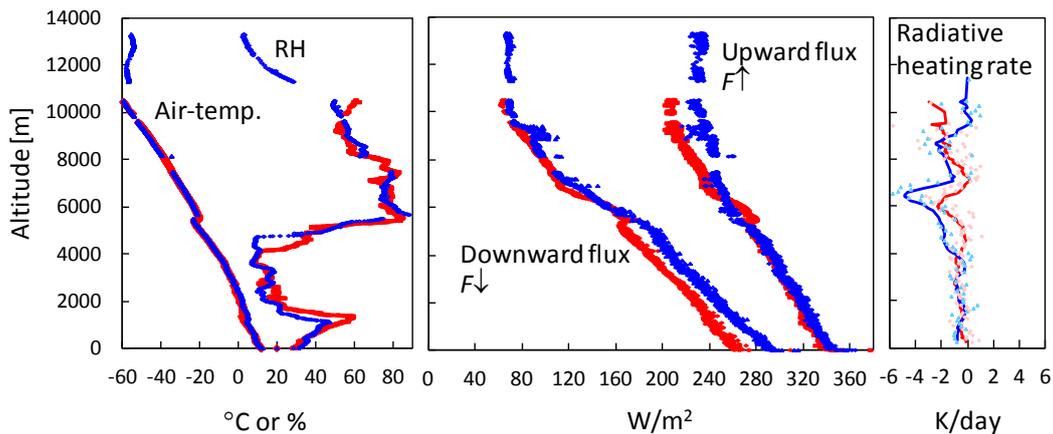


図3 気温、相対湿度、上向き/下向き赤外放射フラックス、および放射加熱率の鉛直プロファイル (青: sonde#1, 赤: sonde#2).

4. 大気球による飛揚テスト計画

4.1 観測値の信頼性検証

実用化をはかるためには観測値の妥当性をさらに検証しなければならない。とくに高層においてセンサ表面への着氷の有無と測定値への影響検証、従来手法との比較検証が必要である。これらは機器類の重量が重くなるため通常の小型気球では実施困難である。そこで、大型気球にセンサ表面状態をモニタリングするための小型カメラを搭載する。さらに高精度の地上観測用放射計と開発ゾンデを搭載し、両者の計測値を比較検証する。実験装置は、市販の4成分放射計（上向き大気放射フラックス、下向き大気放射フラックス、それぞれ可視と赤外領域）、開発ゾンデ、小型USBカメラ、データロガー（および記録用PC）から構成される。これらのほとんどは既有である。到達高度は10km～30km程度を想定しており、1～2回の飛揚のうち1回は雲層を通過したい。4成分放射計は高価な機材であるため回収する。夜間観測となる場合は4成分放射計の代わりに2成分放射計を用いることができ、若干軽量となる。

4.2 高高度気球による高層大気観測

従来よりも軽量（218g）である開発ゾンデの特長を活かし、高高度気球による高層観測を実施したい。従来手法によるゾンデ観測では高度35km付近までが限界であり^[9]、ゾンデによる大気放射フラックスのin-situ観測データは極めて希であり、対流圏—成層圏—中間圏にまたがる放射フラックスの鉛直プロファイルが取得できれば成果としてのインパクトは大きい。本データは大気上端付近における放射伝達モデルの妥当性検証などにおいて重要なデータとなり、また、マイクロ波放射計などの地上観測データおよび衛星観測データに基づく放射フラックスプロファイルの解析値との比較検証などにも適用できる。

参考文献

- [1] S.A. Ackerman, S.K. Cox, *J. Atmos. Sci.*, 44(1987), 3052-3078.
- [2] J.M. Alzheimer et al., *Preprints 8th Symp. on Meteorological Observations and Instrumentation*. (17-22 Jan. 1993, Anaheim, CA), 175-180.
- [3] V.E. Suomi, P.M. Khun, *Tellus*, 1(1958), 160-163.
- [4] P.M. Khun, D.R. Johnson, *J. Geophys. Res.*, 71(1966), 367-373.
- [5] K. Sekihara, *Papers Meteorol. Geophys.*, 26(1975), 93-110.
- [6] M. Miyauchi, N. Ohkawara, *Proc. NIPR Symp. Polar Meteorol. Glaciol.*, 6(1992), 53-70.
- [7] S. Asano, Y. Yoshida, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82-2(2004), pp.623-637.
- [8] Y. Yoshida, S. Asano, *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 82-2(2004), 639-656.
- [9] Rolf Philipona, *Geophysical Research Letters*, 39(2012), L13806.