

上空の気温計測に熱気球を使用する試み

遠峰 菊郎*・黒崎 一成*・山崎 充*
小野塚 裕也*・黒木 祐樹*・菅原 広史*

要旨

熱気球は比較的安価で、通常用いられる気象用気球よりも積載能力が大きく、ガス飛行船と比較して、管理が容易である。この熱気球を観測用プラットフォームとして使用し、大気境界層中の気温を観測することを試みた。

今回の実験では、熱気球より温度センサーを懸垂して気温を測定する場合、直径17 mの熱気球から40 m以上離して気温を測定すれば、熱気球水平飛行時及び下降時には $\pm 0.2^\circ\text{C}$ より高い精度で気温を測定できることが示された。ただし熱気球が鉛直運動をする際に生じる、温度センサーの応答の遅れによる測定誤差を 0.05°C より小さくするためには、応答時間が1秒以下の温度センサーを用いることが望ましい。

1. はじめに

大気境界層の観測は、直接観測やドップラーレーダー等のリモートセンシングの手法を用いて、近年盛んに行われている。これらの研究の中で、直接に大気境界層を観測するための手段としては、主に観測塔、低層ゾンデ、パイロットバルーン(竹内・近藤, 1983)、係留ゾンデ (Kaimal *et al.*, 1976)、ヘリコプター (鳥谷・ほか, 1994)、及び飛行機 (Young, 1987) 等が使用されている。

ドップラーレーダー (Ecklund *et al.*, 1986) 観測によれば、風速 10 ms^{-1} 以下の日には、鉛直速度のパワースペクトルは Brunt-Väisälä の振動数に大きく影響され、風が強い日にはさらに長周期の波が卓越することが述べられている。また、航空機を用いた大気境界層の観測によれば (Högström *et al.*, 1999)、気温の振幅は Brunt-Väisälä 振動数の二乗に比例することが述べられている。ここで大気境界層の観測を実施する際には、大気境界層を乱さない手段により、Brunt-Väisälä の振動数が解析できる程度に長時間(約30分以上)観測できることが望ましい。

このような観点より上記観測手段を検討してみる

* 防衛大学地球海洋学科。

—2002年8月29日受領—

—2003年4月11日受理—

と、低層ゾンデやパイロットバルーンは同一高度にとどめることが困難であり、瞬間的な風向・風速・気温等を測定することは可能であるが、各要素間の相関を求める統計的手法が適用できるような同一高度での長時間の連続データを取得することは不可能である。係留ゾンデを使用する際には、風が強い場合にバルーンの姿勢が安定せず、風を測定することが不可能になることが多い。ヘリコプターで風を測定する場合にはローターの影響を考慮せねばならず、飛行機による場合は、対気速度を約 80 ms^{-1} 以下にすることが困難であり、サーマル等を詳細に観測することが不可能な状況である。また一般的に、航空機を利用するためには、観測機材等の設置に当たって航空法に準拠せねばならず、経費も増大し、本邦では利用しにくい状況である。このように検討していくと、観測塔を使用して大気境界層を観測することは信頼できる観測法であることが理解され、事実、多数の研究がなされている (Mahrt and Gibson, 1992; Boppe *et al.*, 1999)。しかし、混合層頂部を観測できるような高い観測塔を建設、維持することは困難である。このために観測塔は主に、接地境界層の研究に使用されてきた。

ここで近年、1 km 高度以下の下層大気中における、気象観測用の低速プラットフォームとしてガス飛行船を使用する試みが実施された (Plant *et al.*, 1998)。彼らの研究の中では、海面の波が風に与える抗力が議論

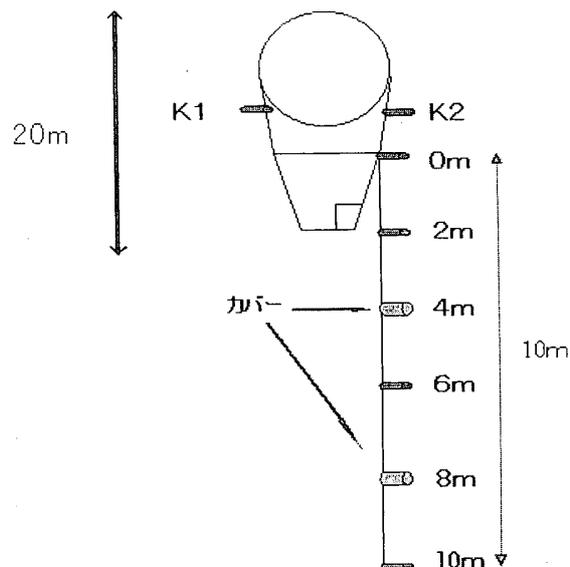
されており、風について高精度の観測が実施されていることが理解される。このような高精度の観測が可能になる理由は、飛行船を浮かべて推力を無くした場合、飛行船の対気速度が非常に小さくなるためであろうと推察される。しかしガス飛行船は管理・運営が困難である。

そこで彼等の結果を参考にして、管理・運営が比較的容易である熱気球により大気境界層を観測することを検討した。熱気球とは球皮の底部にある開口部でプロパンなどの可燃ガスを燃焼させ、球皮内空気を暖めることにより浮力を得、バスケット及び人員を浮揚させる装置である。熱気球は観測器材と観測員を搭載するにあたり十分な積載能力を有し、ガス飛行船と同様に対気速度が小さいのでサーマル等の観測を詳細に実施できる。また航空機ではないので、観測器材の搭載にともなう検査を受ける必要が無く、他の航空機の運用を妨げない空域であるならば何処でも飛行可能であるという利点がある。さらに、観測器材をつるすためのロープ等を長く垂直に吊り下げることが可能であり、機体が測器に与える影響を小さくすることができる。しかし熱気球は、離着陸時の地上風が 4 ms^{-1} を超えると運用が困難になる。また、基本的に有視界飛行をしなければならず、雨に濡れると球皮が劣化するという欠点がある。これらの条件を考えると、降水が見られない早朝や夕方の風の時間帯が熱気球により観測可能な時間帯であり、着陸に適当な場所があるならば、通常の航空機が侵入できない低高度でも観測可能である。熱気球による観測の第一段階として、熱気球が影響を及ぼすと想像される、上空における気温を測定することを試みた。

2. 観測場所、日時、環境、及び熱気球の概要

観測場所はいずれも栃木県南端部に位置する渡良瀬遊水地である。ここでは葦原が約10 km 四方に広がり、その周囲には水田が広がっている。観測は2001年12月2日から2002年7月7日の早朝に実施され、ここでは2001年12月2日、2002年6月2日、6月23日、7月7日の4日間の観測結果を用いた。いずれも晴天であり、地上風速は 2 ms^{-1} 以下であった。

今回使用した熱気球の球皮体積は $2,320 \text{ m}^3$ 、直径約17 m、バスケットの縦、横、高さはそれぞれ97 cm、107 cm、115 cm である。この熱気球の大きさは AX8型と呼ばれているもので、やや大きめの熱気球である。ガスのバーナーはパイロットの頭上約30 cm にあり、こ



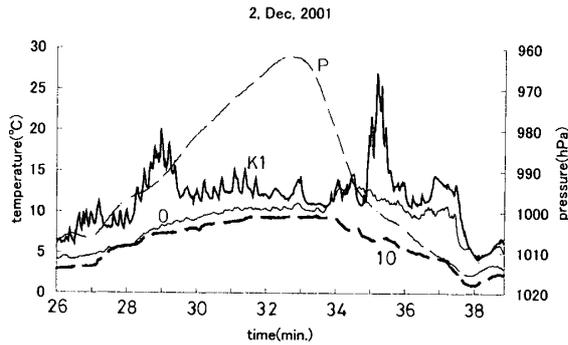
第1図 2001年12月2日観測時の熱電対の配置図。4 m と 8 m の熱電対にはカバーを装着した。気圧計、データロガー、蓄電池はバスケットの右下隅に設置した。

のバーナーから炎が4 m 程度球皮の中に伸びている。この炎の温度を白金-白金ロジウム熱電対で測定したところ、最も温度が高い所で約 $1,490^\circ\text{C}$ であった。球皮、バスケット、パイロット、及び観測員等の総重量は約500 kg であった。冬季観測時の外気温度は約284 K であったので、熱気球の浮力と重力が釣り合う際の球皮内平均温度は約344 K (71°C) であったと推察される。

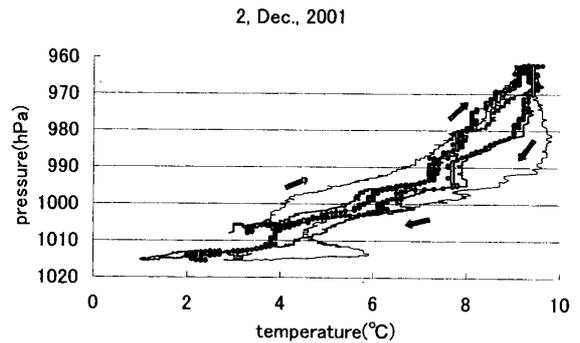
3. 熱気球近傍における距離に対する温度変化

2001年12月2日の観測は、気温を測定する際にバーナーの影響を受けない温度センサーの位置を調査することを目的とした。温度センサーとしては直径0.3 mm の銅コンスタンタン熱電対を用い、バーナーから30 cm 離れた位置に2点(今後この位置を K1, K2点と呼ぶ)、バスケットの縁から下方に0, 2, 4, 6, 8, 10 m の位置に6点、計8点に熱電対を設置した。全体のセンサー配置を第1図に示す。これらの熱電対は電波からシールドされているものを用い、熱電対の器差は各測定の前に 0.1°C 以下に調整した。

ここで、バーナーあるいは太陽からの放射の影響を検証するために、カバーを装着した熱電対と装着していない熱電対を混在させることとし、4 m と 8 m の位置の熱電対にファン無しのカバーを装着した。カバーの形状は縦横7 cm、長さ10 cm の四角い筒であり、プラスチックのストローを並べた板のような素材を用い



第2図 温度と高度の時間変化図。太実線、太破線、細実線、細破線はそれぞれK1点、10 m点、0 m点における気温と気圧を表す。横軸は7時以降の分刻を表す。



第3図 温度の高度分布図。図中の矢印は熱気球の上昇・下降を表す。太実線、細実線、細実線と黒丸はそれぞれ、10 m点、8 m点（カバー付）、6 m点の温度を表す。

てあり、断熱性に優れている。このカバーをアルミニウム製のテープで包み、反射率を良くした。このカバーの中心部に熱電対を固定し、後の実験でファンを取り付ける際にはこのカバーの端に取り付けた。

また、気球の高度はバスケットに搭載した気圧計により測定した。気圧計と fan を動かすための電源には蓄電池を用い、気圧と温度は1秒間隔でデータロガー（江藤電気（株）の THERMIC MODEL 2100A）に収録した。このデータロガーは0.1°C間隔で温度を、0.09 hPa 間隔で気圧を記録する。2001年12月2日の観測では、気圧計、データロガー、電池はバスケットに搭載したが、これ以降の観測では信号線が無用に長くなることを防ぐために、これらの器材は熱電対の近傍にロープでバスケットから懸垂した。これらの観測器材を取り扱うために、熱気球を操縦するパイロットのほかに観測員1名を必要とした。

熱気球の高度変化と K1、0 m、10 m の位置にある熱電対の温度変化を第2図に示す。当時の地上気圧は1017.0 hPaであった。今回のフライトでは、7時26分から33分の間は1.5 ms⁻¹で上昇し、33分から35分の間は2.6 ms⁻¹で下降した。これらの鉛直速度は、1 hPa の気圧変化は9 mの高度変化に対応するものとして算出した。バーナー近傍の点 K1でほぼ10秒間隔で昇温しているのが、バーナーを炊いた時刻である。点 K1ではバーナーを炊くと直ぐに昇温しているので、この昇温に関してはバーナーの炎からの放射熱と炎の近傍の空気が移流してくる効果が大きいものと推察される。また35分と37分頃には、降下する気球に制動をかけるために、通常は1秒間程度しか炊かないバーナーを比較的長時間（5秒間程度）炊いた。その結果、バーナー近傍の熱電対だけでなく、0 m 高度の熱電対の測

定値が顕著な影響を受けている。しかし0 m 高度における温度変化は比較的緩やかなので、バーナーの炎からの放射熱の影響は小さく、炎の近傍の空気や急制動の際に球皮内よりあふれた暖気が移流してきたためであろうと推察される。しかし、10 m 高度の熱電対による温度変化は滑らかであった。図には示されていないが、6、8 m 高度の熱電対も10 m 高度の熱電対とほぼ同様の時間変化を示した。

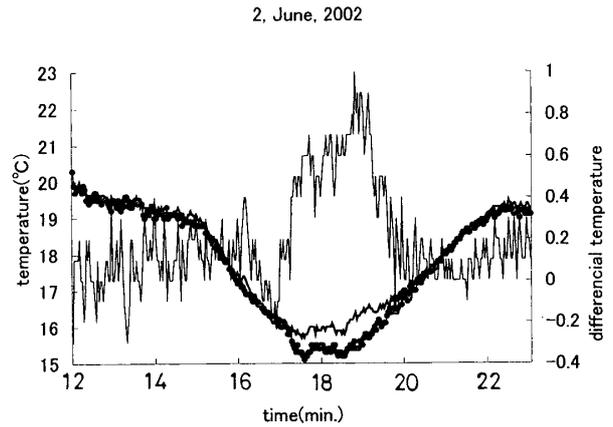
そこでバーナーの影響が少ないと考えられる6、8、10 m の位置の熱電対による温度を気圧に対して並べ第3図とし、さらに詳しく検討した。この図によれば気温の鉛直分布は990 hPa 高度以下で接地性の強い気温逆転層、それ以上の高度では弱い逆転層であった。上昇時を見ると1005 hPa 高度から980 hPa 高度まではカバーをしてある熱電対（8 m）の方がカバー無しの熱電対よりも低い温度を示し、下降時には970 hPa 高度から1000 hPa 高度まで高い温度を示している。この、上昇時には低温を、下降時には高温を示す傾向はカバーをしていない熱電対（6と10 m）にも見られるが、その傾向はカバーをつけている熱電対と比較すると弱い。このように低温側から上昇する時には低めの温度を示し、高温側から下降する時には高めの温度を示すような熱電対の反応は、気温の変化に対して熱電対の反応が遅れている結果であると推察される。そこで、室温が異なる隣接した部屋の間を移動させることにより、これらの熱電対の応答時間（時定数）を測定してみると約90秒であった。このように熱電対のレスポンスが遅いのはセンサーの問題であるが、特にファン無しのカバーをつけた熱電対でこの傾向が顕著である理由は、熱気球とともにゆっくりと移動する熱電対では、通風速度がカバーの有無にかかわらず不十分で

あり、特にカバーは通風を妨げるからであろうと推察される。当初このカバーは、熱気球及び太陽からの放射を防ぐために取り付けたが、カバーを付けた熱電対が特に低温を示す傾向は見られず、本実験では放射を防ぐカバーの効果は明らかでない。また、上昇時995 hPa 高度以下では6 m 高度の熱電対は10 m 高度の熱電対に比較してやや高い温度を示している。これは、バーナーの影響は熱気球からの距離が大きくなるに従って弱くなっており、また、バーナーの影響がこの6 m から10 m の位置までは到達していることを示している。降下時、965 hPa から985 hPa まで8 m 高度の熱電対は0.6°Cの昇温を示している。これはカバー内の空気が断熱圧縮された影響であろうかと想像される。また、1010 hPa から1015 hPa にかけて、8 m 高度の熱電対だけが昇温を示している。図には示していないが、他の熱電対ではこの昇温は計測されておらず、1010 hPa 高度付近で厚さ10 hPa 程度の等温層が観測されているだけである。故に、この昇温は低高度における大気の乱れによるものであろうと想像される。

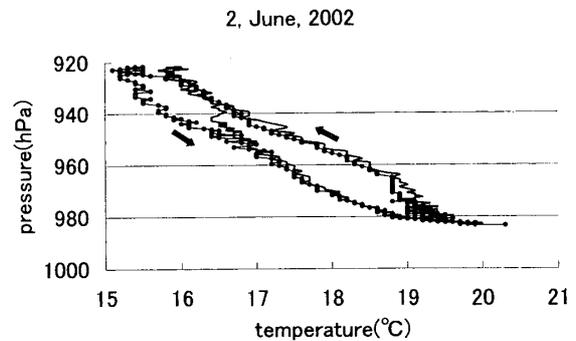
4. 熱気球から離れた位置における温度変化

熱気球から懸垂した熱電対により気温を測定する場合に、熱電対に対する通風が不十分になりやすいことが分かったので、熱電対にファン付きのカバーを取り付けた。このファンによる通風の風速は約3 ms⁻¹であり、室内実験では、この通風により熱電対の応答時間は約28秒と短くなった。今後の実験で熱電対を使用する際には、このファン付きのカバーを付けることとする。また、熱気球から10 m 程度離しても熱気球の影響を受けていることが理解されたので、Plant *et al.* (1998) を参考としてなるべく遠く離すために、このファン付きの熱電対を熱気球から40 m と50 m の位置に懸垂し、気温の測定を2002年6月2日に実施した。この時の両熱電対による温度と温度差の時間変化を第4図に、これらの温度を気圧高度順に並べたものを第5図に示す。当時の地上気圧は1002.8 hPa であった。この時の15分から18分までの上昇速度と19分から22分までの下降速度は、それぞれ、約3.5 ms⁻¹と-3.0 ms⁻¹であった。

第4図によれば、12分から17分までの間と20分以降の温度差は小さく-0.2~0.3°Cの間である。この時の気温減率は0.7°C/100 m であり、両熱電対の間は10 m 離れていたので0.07°C程度の差は気温減率によるものであろう。また、ここで使用しているデータロガーは



第4図 温度と温度差の時間変化図。横軸は7時以降の分刻を表す。太実線、細実線と黒丸、細実線はそれぞれ、50 m 点、40 m 点、両点の温度差を表す。



第5図 温度の高度分布図。太実線、細実線と黒丸はそれぞれ50 m 点と40 m 点の温度を表す。図中矢印は熱気球の上昇、下降を表す。

0.1°C単位で温度を記録していた。これらのことを考慮すると、両熱電対の時間変化は良く一致していたと言える。すなわち熱電対が熱気球から受ける影響の距離依存性が、無視できる程度に小さくなっていることが理解される。また、熱電対が熱気球から影響を受ける過程として伝導の効果は小さいので、放射あるいは熱気球により暖められた空気塊が熱電対に大きい影響を与える可能性があるものと考えられる。熱電対がこれらの過程による影響を受けているならば、熱気球に近い方が高温を示すであろうと推察され、2 高度で同程度の影響を受けているとは考えにくい。このように距離依存性が小さいことから、熱電対を40 m 以上熱気球から離れた場合、熱気球が放射や熱気球により暖められた空気塊を通して熱電対に与える影響はかなり小さくなっていることが推察される。17分から19分の間で50 m の位置の温度が40 m の温度よりも0.6°C程度高

温を示している。この時、熱気球は最高高度に到達しており、上昇から下降運動に向かう時間帯であった。

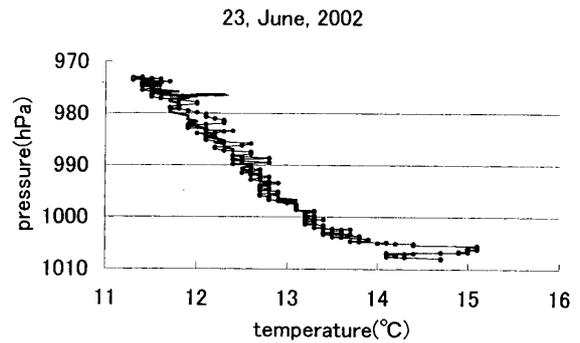
第5図によれば、上昇中の温度は下降中の温度よりも高い。その上昇中と下降中の温度差は、960 hPa 付近では約1.1°Cである。この温度差が熱電対の応答時間による遅れであると仮定すると、その温度差 ΔT は上昇時と下降時の $w\tau\Gamma$ の差になるはずである。ここで、 w は熱気球の鉛直速度、 τ は熱電対の応答時間、 Γ は大気気温減率である(付録)。 Γ として第5図より0.7°C/100 mを与え、この時の上昇、下降速度として観測時の値 3.5 ms^{-1} と -3.0 ms^{-1} を与えると、この熱電対の応答時間 τ は約24秒となった。この応答時間が室内実験による応答時間28秒とほぼ等しくなることから、この上昇・下降時に計測された温度差が、当初の仮定通り、応答時間による計測データの遅れによりほぼ説明できるものであることが理解される。この野外実験による応答時間24秒が室内実験による応答時間よりやや短くなるのは、野外実験ではファンによる通風以外に熱気球の鉛直運動による通風効果を加えられるためであろうと推察される。またここでは、観測に費やした時間が7時12分から22分の10分間と短く、サーマル等の現象も発生している様子が見られなかったため、観測時間中の場の変化は無視し得る程度であったものと考えている。

さらに第4図の所でも述べているように、熱気球が上昇から下降運動に移る時間帯、第5図では主に熱気球下降時の920 hPa から950 hPaの間、高度50 mに懸垂した熱電対は高度40 mに懸垂した熱電対よりも高温を示していた。この件については、第7節で後述する。

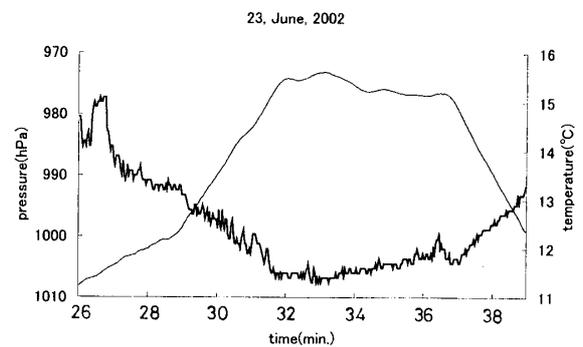
5. 熱電対の応答速度による相違

2002年6月2日の実験により、上昇から下降に移行する時間帯を除いて、熱気球から40 m以上離せば熱電対に対する熱気球の影響の距離依存性は無視できる程度に小さくなることが理解された。しかし、熱電対にファンを装着しても応答速度による気温測定時の誤差が生ずることが示されている。この応答速度を速くするために直径0.1 mmの熱電対を使用した。この熱電対の応答時間は約1秒である。この熱電対を熱気球から50 m離して懸垂し、6月23日に気温の測定を実施した。この時の各気圧高度に対する温度を第6図に示す。当時の地上気圧は1009.1 hPaであった。

第6図によれば上昇時と下降時の温度差は小さく、

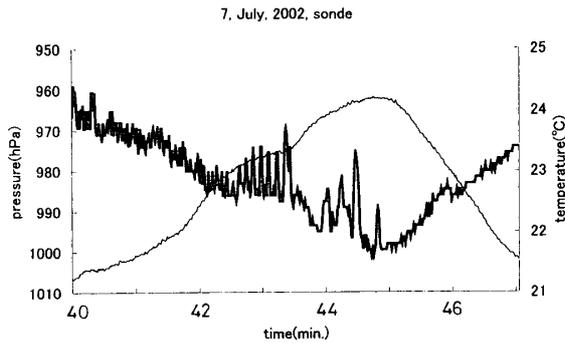


第6図 第5図と同様。ただし、直径0.1 mmの熱電対によるもの。細実線と黒丸が上昇時、太実線が下降時の温度を示す。

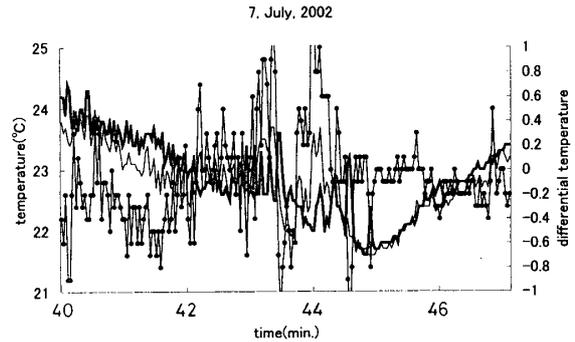


第7図 第2図と同様。ただし、直径0.1 mmの熱電対によるもの。横軸は7時以降の分を表す。太実線と細実線はそれぞれ、温度と気圧を示す。

980 hPa 高度付近で0.3°C程度の差が存在する以外は温度差はほぼ無視できる。これは、熱電対の応答速度が1秒以下になれば、熱気球の鉛直速度に対する熱電対の応答時間が十分に短くなり、鉛直運動をすることによる気温測定誤差が小さくなることを示している。また、熱電対が熱気球によりあたためられた空気塊の効果を受けやすい上昇時と影響を受け難い下降時とで温度差が小さいということは、50 m程度離せば熱気球により暖められた空気塊の効果は小さくなることを示している。しかし温度のゆらぎを見ると、上昇時の温度のゆらぎは下降時のものよりもはるかに大きい。このゆらぎを調べるために、温度と気圧の時間変化を第7図に示す。第7図によれば、29分から32分にかけて特に温度のゆらぎは大きく、0.3°Cから0.5°Cである。この29分から32分は熱気球の上昇速度が約 1.5 ms^{-1} と最大となっている時間帯である。しかし熱気球がほぼ水平飛行をしている32分から37分にかけては、36分30秒頃に0.5°C程度のゆらぎを生じている他は、温度のゆらぎは小さく0.1°C程度である。36分30秒頃には熱気球



第8図 第7図と同様。ただし、レーウィンゾンデによるもの。横軸は6時以降の分刻を表す。



第9図 第4図と同様。ただし、レーウィンゾンデ(太実線)と直径0.1 mmの熱電対(細実線)によるもの。細実線と黒丸は熱電対-ゾンデの温度差を表す。横軸は6時以降の分刻を表す。

は7 m程しか上下運動をしていないので、上下運動と大気気温減率によってはこの0.5°Cの温度のゆらぎを説明できない。この温度のゆらぎは第4図の所でも述べているように、熱気球が上昇から下降運動に移る時間帯に特に顕著になる。この件についても、第7節で後述する。また熱気球が降下している37分以降においては、温度のゆらぎは0.1°C程度であり小さい。このように上昇速度が大きい時に温度のゆらぎが大きくなることから、このゆらぎは熱気球が通過する際の排熱による空気の乱れをあらわしているのではないかと推察される。

6. レーウィンゾンデとの比較

2002年7月7日に応答時間が短く0.2秒であるレーウィンゾンデの白金温度センサーと、直径0.1 mmの熱電対を水平方向に30 cm程離して熱気球から懸垂し、比較した。この場合、ゾンデ受信機は地上に設置し、データのサンプリング間隔は1秒である。またゾンデによる温度は0.1°C間隔で、日射の影響に対する補正がなされているデータを記録した。レーウィンゾンデの気圧と気温の時間変化を第8図に示す。当時の地上気圧は1012.8 hPaであった。この時は6時42分から45分にかけて約1.6 ms⁻¹で上昇し、その後3 ms⁻¹で下降している。この図によれば、熱気球が上昇中に温度の乱れは大きく0.3°C程度であり、特に熱気球の上昇速度が遅くなった時に現れる温度の乱れは第7図以上に顕著であり0.6から1°Cであった。このように温度の乱れが顕著になる原因としては、ゾンデの白金温度センサーの応答時間が短いためであろうと推察される。この乱れの周期は1秒以下であり、暖気の小さい渦によるものであらうと想像される。また熱気球の上昇速度が遅くなった時間帯に特に大きく温度が乱れるのは、

熱気球の排熱により熱気球の下方に生じた小渦の上昇速度と熱気球の上昇速度の速度差が小さくなり、暖気の小渦が熱電対に与える影響が大きくなったためであらうと想像される。

両者の温度とその差の時間変化を第9図に示す。両者の温度は6時41分から42分の間を除き、平均値は概ね一致している。しかし、上昇時、及び上昇速度が遅くなる時間帯における温度のゆらぎが大きいため、この時間帯は両者の差も大きく乱れている。45分以降の下降時における両者の差は-0.2°Cから0.2°Cであり、温度の乱れも小さかった。このレーウィンゾンデの気温センサーの精度が0.2°Cなので、今回使用した熱電対の精度も0.2°C程度かそれ以上良いことが分かる。

7. 考察

今回の実験では、熱気球より温度センサーを懸垂して気温を測定する場合、熱気球から10 m程度離れた所では、熱気球の影響により、熱気球に近い方が高い気温を示すことが示されている。この場合熱伝導の影響は小さく、熱気球は放射と熱気球により暖められた空気塊を通じて温度センサーに影響を与えているものと考えられる。しかし、熱気球から40 mと50 m離して気温を測定した場合、両熱電対の示す温度差は小さくなる。熱気球により暖められた空気塊は拡散をとまうと考えられ、放射は熱源からの距離に依存する。故に、距離依存性が小さくなったことから、今回使用した球皮体積2,320 m³、直径約17 mのAX8の熱気球では、熱気球から40 m程度離れると、熱気球が熱電対に与える影響は小さくなっていることが推察される。しかし未だ、熱気球が熱電対に与える影響の中で、熱気球から

の距離依存性が小さい影響が残っている可能性がある。また、応答時間が28秒である熱電対を用いた場合、上昇時と下降時で約 1.1°C というかなり大きい温度差を生じることが分かった。

そこで応答時間が1秒である熱電対を熱気球より50 m 離して気温測定をした。この場合、上昇時と下降時に測定した気温がほぼ一致した。上述しているようにこれまでは、熱気球により暖められた空気塊が、熱電対に対して距離依存性が小さいなんらかの影響を与えている可能性が残されていた。ここで、熱気球により暖められた空気塊の影響を受けやすい上昇時と影響を受け難い下降時とで測定された気温がほぼ一致したことから、熱気球により暖められた空気塊の影響は50 m の距離では小さいことが理解された。しかし、上昇時に測定された気温は水平飛行時や下降時に測定された気温よりも乱れており、この乱れの大きさは 0.3°C から 0.5°C であった。この気温の乱れは、水平飛行時もしくは下降時には 0.1°C と小さい。また、さらに応答時間が短いレーウィンゾンドのセンサーを用いて計測した場合、この上昇時に現れる気温の乱れはさらに顕著になり、上昇時には 0.3°C 程度であった。これらのことから、上昇時には熱電対が熱気球の後から上昇していくために、熱気球からの排熱により形成される暖気の小さい渦が熱電対により観測され、これらの気温の乱れの原因となっているのであろうと想像される。しかし、上昇時と下降時に計測された気温がほぼ等しいことから、この排熱により形成された暖気の小渦は、小渦による気温の乱れの周期(約6秒)以上の気温の平均値にはあまり影響を与えないことが理解される。

この気球上昇時に観測される温度の乱れが、上で想像したように排熱による暖気の小渦によるものであるとするならば、この乱れは気球の鉛直方向の対気速度の他に、水平風の鉛直シアの大きさと、小渦の上昇速度に影響されるはずである。水平風の鉛直シアは、熱電対が熱気球からの排熱により乱された温度場の高度に到着する時まで、この排熱の影響を受けた空気塊を吹き流し、熱電対に対する影響を弱める作用をする。この鉛直シアを $1\text{ ms}^{-1}/50\text{ m}$ 程度とすると、熱気球の直径20 m の範囲で乱された空気は、 2 ms^{-1} の上昇速度を持つ熱気球から50 m 離して懸垂した熱電対が熱気球の位置に到達する間に、ほとんど吹き飛ばされてしまうことになる。ただし、風の鉛直シアが非常に小さい場合には、気温測定値が影響を受ける可能性がある。現実問題としては、適当な風の鉛直シアが

常に存在するとは考えられず、排熱による気温の乱れは熱気球の直径よりも広がる可能性がある。このために、熱気球上昇時に計測した気温は、下降時に計測した気温よりもゆらぎが大きいものと思われる。また小渦の半径1 m、周囲の大気との温度差 1°C と仮定すると、小渦の上昇速度は 0.2 ms^{-1} 程度となる。この上昇速度は熱気球の上昇速度と比較してはるかに小さく、熱気球の上昇速度が急激に減少する時以外は無視できる。

第4図の所で述べているように、熱気球が上昇から下降運動に移る時間帯に高度50 m に懸垂した熱電対は高度40 m に懸垂した熱電対よりも高温を示していた。また、第7、8図の所で述べているように、上昇運動から下降運動に移行する際、もしくは上昇速度が遅くなる際に計測された気温のゆらぎは大きくなる。熱気球の上昇速度が大きい際には、熱気球により暖められた周囲の空気塊は速やかに下方に取り残されているものと推察される。しかし熱気球の上昇速度が小さくなると、熱気球が周囲の大気に与える影響が大きくなり、また、熱電対が排熱により形成された小渦の中に捉えられる時間が長くなることから、熱電対はこの小渦の影響を大きく受けることになる。このために、熱気球の上昇速度が遅くなると、気温のゆらぎが大きくなるものと推測される。また、熱気球が上昇速度を遅くする際にはバーナーを炊かない間隔を長くする。このため、上昇する際に排熱を残してきた下方の空気がゆっくりと上昇し、第4図のように上昇速度が遅くなった50 m 高度の熱電対の測定値に影響を与え、熱気球直下の排熱の影響が少ない気温を40 m 高度の熱電対が計測している可能性がある。

8. まとめ

以上をまとめると、今回使用した球皮体積は $2,320\text{ m}^3$ 、直径約17 m のAX8の熱気球により大気境界層の観測をする場合には、熱電対を熱気球から40 m 以上離して計測すれば、熱気球が水平飛行時もしくは下降時には熱気球からの排熱の影響は小さく、特に下降時には $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ より高い精度で気温を測定できることが確認された。ただし熱気球が鉛直運動をする際に生じる、温度センサーの応答の遅れによる測定誤差を小さくするためには、応答時間が1秒以下の温度センサーを用いることが望ましい。また、熱気球が上昇時、特に上昇速度を遅くする時は、熱気球からの排熱の影響によるものと推察される気温の乱れが応答時間0.2秒のセ

ンサーで計測した場合は0.3から1.0°C程度と大きくなり、気温測定値が影響を受ける可能性がある。また観測に際して熱気球が上昇時に通過する大気境界層を乱す効果を排除するために、熱気球を一旦上昇させ、熱気球により熱的に乱された大気境界層とは離れた場所に風の鉛直シアーを利用して移動し、その後所定の高度まで降下し、水平飛行しながら測定を実施する必要がある。

謝 辞

本研究を実施するに当たり協力して下さった、バルーンクラブ夢飛行の皆様には感謝いたします。

付録

応答時間 τ である熱電対が気温減率 Γ である大気中を鉛直運動する際の温度変化

熱電対の温度を T 、周囲の大気温を T_e とする。この熱電対の応答時間を τ とするとその温度変化は、

$$\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{\tau} (T - T_e) \tag{A1}$$

となる。ここで大気の気温減率 Γ と熱電対の鉛直速度 w は一定とすると、

$$T_e = T_0 - \Gamma z \tag{A2}$$

$$z = wt \tag{A3}$$

となる。ここで、 $t = 0$ で $z = 0$ 、 $z = 0$ で $T_e = T_0$ とする。

式 (A2)、(A3) を式 (A1) に代入して解くと、

$$T = T_e + \Gamma w \tau + C \exp(-t/\tau) \tag{A4}$$

となる。ここで、 $t = 0$ における、熱電対と大気温の差を ΔT_0 とすると、

$$C = \Delta T_0 - \Gamma w \tau \tag{A5}$$

となる。ここで、応答時間 τ に対して十分な時間が経過した後では、熱電対の温度 T と大気温 T_e の差は、 $\Gamma w \tau$ となる。

参 考 文 献

Boppe, R. S., W. L. Neu and H. Shuai, 1999 : Large-scale motions in the marine atmospheric surface layer, *Bound.-Layer Meteor.*, **92**, 165-183.

Ecklund, W. L., K. S. Gage, G. D. Nastrom and B. B. Balsley, 1986 : A preliminary climatology of the spectrum of vertical velocity observed by clear-air Doppler radar, *J. Climate Appl. Meteor.*, **25**, 885-892.

Högström, U., A. Smedman and H. Bergström, 1999 : A case study of two-dimensional stratified turbulence, *J. Atmos. Sci.*, **56**, 959-976.

Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, D. A. Haugen, O. R. Cote, Y. Izumi, S. J. Caughey and C. J. Readings, 1976 : Turbulence structure in the convective boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, **33**, 2152-2169.

Mahrt, L. and W. Gibson, 1992 : Flux decomposition into coherent structures, *Bound.-Layer Meteor.*, **60**, 143-168.

Melling, H. and R. List, 1980 : Characteristics of vertical velocity fluctuations in a convective urban boundary layer, *J. Appl. Meteor.*, **19**, 1184-1195.

Plant, W. J., W. C. Keller, V. Hesany and K. Hayes, 1998 : Measurements of the marine boundary layer from an airship, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, **15**, 1433-1458.

Stull, R. B., 1997 : An introduction to boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, 670pp.

竹内清秀, 近藤純正, 1983 : 第2版 大気科学講座1 地表に近い大気, 東京大学出版会, 226pp.

鳥谷 均, 内藤玄一, 小林文明, 佐々木保徳, 村治能孝, 遠峰菊郎, 1994 : ヘリコプターとゾンデによる観測データの照合, *天気*, **41**, 669-677.

Young, G. S., 1987 : Mixed layer spectra from aircraft measurements, *J. Atmos. Sci.*, **44**, 1251-1256.

A Trial to Use a Hot-Air Balloon for Measuring Upper Atmospheric Temperature

Kikuro TOMINE*, Kazunari KUROSAKI**, Mitsuru YAMAZAKI**,
Yuuya ONOZUKA**, Yuuki KUROKI** and Hirofumi SUGAWARA**

* (Corresponding author) Department of Earth and Ocean Sciences, National Defense
Academy, Kanagawa 239-8686, Japan.

** Department of Earth and Ocean Sciences, National Defense Academy.

(Received 29 August 2002 : Accepted 11 April 2003)

Abstract

A hot-air balloon is handy, needs only low cost to operate, and has considerably large loading capacity. Then we tried to use a hot-air balloon as a platform for measuring atmospheric temperature in a planetary boundary layer.

Accuracy of temperature measurement in this experiments becomes to be better than $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ when a thermo-couple is suspended more than 40 m away from the hot-air balloon and the balloon flies horizontally or downward. The response time of the thermo-couple is required to be less than one second in order to make smaller than 0.05°C the temperature measurement errors caused from vertical movement with the hot-air balloon.

第11回日産科学賞の候補者推薦募集と日産科学振興財団研究助成のご案内

1. 日産科学賞

- (1) **趣旨**：若手・中堅研究者の中から、特に優れた業績を上げ、さらに今後発展の可能性が大である方を表彰することを通して、学術文化の向上発展に貢献することを目的とする。
- (2) **推薦基準**：自然科学分野（人文・社会科学分野との複合領域を含む）において以下の卓越した研究業績をあげ、さらに今後の発展が期待されるわが国の公的研究機関に所属する新進気鋭の研究者。
 - a. 学術研究における重要な発見
 - b. 新しい研究分野の開拓
- (3) **賞の内容**：賞状、金メダル、副賞として賞金500万円。授賞人数は原則1名。
この賞の応募には**学会の推薦が必要です**。日本気象

学会では、7月末ごろに「学会外各賞推薦委員会」を開催して推薦者を選考する予定です。その際の参考にするため、推薦するにふさわしい方をご存じでしたら、簡単な推薦理由を添えて2003年7月22日までにお知らせ下さい。

連絡先：〒100-0004 東京都千代田区大手町1-3-4
気象庁内日本気象学会
学会外各賞候補者推薦委員会

2. 日産科学振興財団学術研究助成

この助成は、申請者が財団へ直接応募することになっています。助成の詳細と申請用紙については <http://www.t3.rim.or.jp/~at02-nsj/> をご覧下さい。

締切は2003年7月31日（木）必着です。