

ヘリコプターとゾンデによる観測データの照合*

鳥 谷 均^{*1}・内 藤 玄 一^{*2}・小 林 文 明^{*3}
 佐 々 木 保 徳^{*4}・村 治 能 孝^{*5}・遠 峰 菊 郎^{*6}

要 旨

相模湾および金沢・小松周辺においてヘリコプターとゾンデによる気温の比較観測を行ない、ヘリコプター観測の特性を調べた。その結果、つぎのことが明らかになった。(1)ヘリコプターによる気温の鉛直プロファイルの型はゾンデによって得られたものとよく一致する。(2)ヘリコプターによる観測では、同じ高度の気温の測定値は上昇時の方が下降時より高い傾向がある。この大きさは、異なる飛行時においても平均して0.4°C以下である。(3)ヘリコプターの観測によって得られた気温の測定値には機体の影響が含まれているが、これは鉛直分布の測定時において+0.6~+1.0°Cと見積ることができる。これらのことはヘリコプターによって得られた測定値がゾンデなど他の方法で得られた測定値と一緒に議論できること、そして、ヘリコプターの観測が中・小規模の大気現象の観測に対して有効な手段であることを示すものである。しかし、気圧高度計によって得られた高度は、場合によって真の高度と観測精度上、無視できない差を生じることがあるので、高度の補正が必要となる。

1. はじめに

航空機は現在、地表面の温度分布や植生・キャノピーの観測、大気下層の構造を明らかにするための気象要素(気温、湿度など)の測定に有力な手段となっている。また、大気微量成分や汚染物質、雲水そして雨水の採取とモニタリング、水蒸気や雲の放射特性に関する観測、さらには流水観測などにも用いられている。航空機の中でもヘリコプターを用いた観測の長所は、水平方向・鉛直方向の広い範囲における短時間の観測、そしてホバリングによる静止観測が可能なことである。しかしこの場合、個々の温度計の応答性だけでな

く、ヘリコプターの航行が測定の場合に与える影響についても、時間的・空間的に考慮しなければならない。とくに後者に関しては、ヘリコプターが機体周辺の大気を乱しながら移動するため、測定する空間の距離応答性を含めた総合的な応答性を見積ることが必要となる。渡辺ほか(1972)はヘリコプターによる気温測定の実験から、回転翼によるダウン・ウオッシュの効果について、また渡辺ほか(1975)は風洞実験とヘリコプターを用いた実験から、センサー感部のダイナミック・ヒートについて論じている。しかし、ヘリコプターで測定した気温とゾンデを用いて測定した気温を比較することによって、ヘリコプターが気温の測定値に及ぼす影響を論じた報告はない。

1990年9月の相模湾、92年1月の金沢・小松周辺において、大型ヘリコプターによる気温と湿度の鉛直分布と、それとほぼ同時刻に放球した低層ゾンデまたはレーウィン・ゾンデのデータを得ることができた。そこで今回はこれらの観測データから気温に関するデータを照合・比較検討を行い、ヘリコプターによる気温の観測結果の精度について評価したので報告する。

2. 観測方法

相模湾における観測は1990年9月10~12日までの3日間、神奈川県南岸から静岡県伊豆半島東岸、そして

* Comparisons of observational data using a helicopter with radio sonde data.

*1 Hitoshi Toritani, 防衛大学校地球科学科(現所属: 農業環境技術研究所気候資源研究室).

*2 Gen'ichi Naito, 防衛大学校地球科学科.

*3 Fumiaki Kobayashi, 防衛大学校地球科学科.

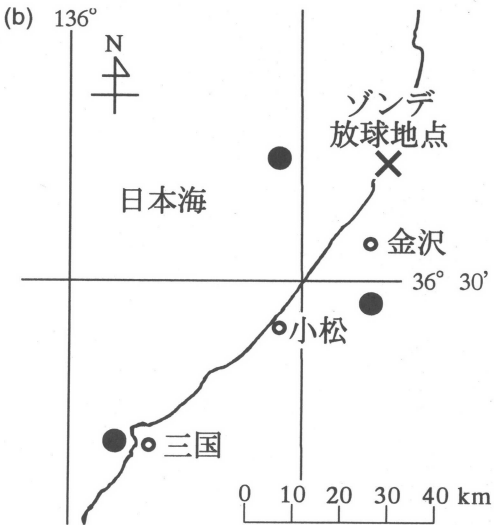
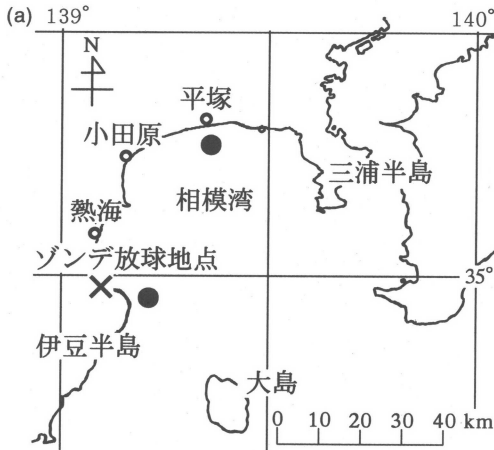
*4 Yasunori Sasaki, 海洋科学技術センター.

*5 Yoshitaka Muraji, 国際気象海洋株式会社(現所属: 株式会社エナジシェアリング).

*6 Kikuro Tomine, 防衛大学校地球科学科.

——1993年6月23日受領——

——1994年7月5日受理——



第1図 観測地域の概要.

(a)相模湾。(b)金沢・小松周辺。●印はヘリコプターによる観測地点を、×印はゾンデ放球地点を示す。

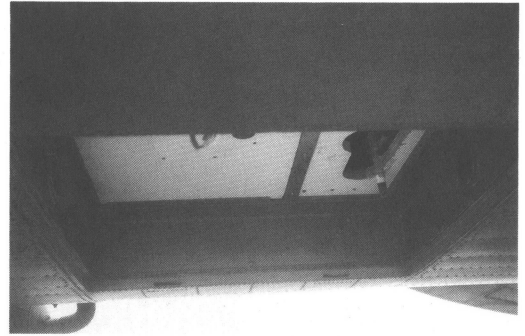


写真1 ヘリコプターのオープンナブル・ハッチと観測に使用したセンサーの取付け状態。

部にあるオープンナブル・ハッチ (0.8×0.8 m) から下方に約 5 cm 突き出した熱電対温度計と容量式湿度計 (パイサラ, HMP35A) によって測定された (写真1). 測定されたデータは、データロガー (英弘精器, ソラックIII) によって A・D 変換された後、フロッピー・ディスクに保存されると同時に、記録紙に印字された。また、このヘリコプターの操縦席前方の窓の外側には、バイメタル温度計 (MS280-28-1) が付いており、この測定値をレファレンス高度毎にパイロットに読み取ってもらい、記録した。これらの観測と同時に、赤外放射温度計 (松下通信, ER-2007) によって地表面温度を連続的に測定したが、この測定値は地表面の状態、そして地表面と飛行高度間の大気物質により多少変化した。さらに、地表面および大気の状態は目視観測の他、フォト・カメラやビデオ・カメラを用いて記録した。第1表(a), (b)にそれぞれ相模湾、金沢周辺の観測に関する、ヘリコプターの観測地点と観測時間を示す。

相模湾の観測におけるゾンデ放球地点は静岡県伊東市北部の海岸線に面した埋立地である (北緯34度59分, 東経139度6分, 観測当時は臨時ヘリポートとして使用されていた, 第1図(a)を参照, ×印はゾンデ放球地点を示す)。この地点から1日2回 (12時と15時), 低層ゾンデ (明星電気, JWA-89W) を放球し、この信号を自動追尾式ゾンデ受信装置 (明星電気, RD-80H) によって受信した。さらに、受信した信号を変換器 (明星電気, MSD-80-5) によって A・D 変換した後、パーソナルコンピュータ (エプソン, PC-286LF-H10-N) によって物理値に変換し、保存した。観測項目は地上から高度 8,000 m までの風向・風速, 気温, 湿度, 気圧の鉛直分布である。このうち、気温はタングステン抵抗温度計, 湿度はカーボン型湿度計によって測定し

東京都大島に及ぶ相模湾から相模灘にかけての海域で行った。また、金沢・小松周辺における観測は1992年1月22~24日までの3日間、福井県三国から石川県宇ノ気、そして富山県砺波までの日本海沿岸および内陸部で行った (第1図(a), (b)を参照, ●印はヘリコプターによる観測地点を示す)。

観測に用いたヘリコプターは陸上自衛隊大型輸送ヘリコプター (ボーイング・バートル社, V-107) である。このヘリコプターを高度 150~3,600 m (500~10,000 ft) まで半径約 500 m で、機体を水平に保つようなら旋状に旋回しながら上昇・下降をさせ、気温と湿度の鉛直分布を測定した。ここで、気温と湿度は機体の腹

第1表(a) ヘリコプターの観測地点と観測時間, 上昇・下降速度 (相模湾, 1990年).

Flight No.	観測地点	観測時間	速度 (m/s)	備考
SH1	神奈川県 平塚沖	9/10 10:41~11:01	上昇 2.6	300 m まで
		11:01~11:22	下降 2.7	下層雲・ガス
SH2	静岡県 伊東沖	9/10 13:45~14:01	上昇 3.3	積乱雲
		14:01~14:22	下降 2.7	雲頂高度 2500 m
SH3	静岡県 伊東沖	9/11 9:27~9:42	上昇 3.5	1200 m 以下 ガス有り
		9:42~10:00	下降 3.2	1500 m 以上 雲なし
SH4	神奈川県 平塚沖	9/11 13:22~13:38	上昇 3.3	1600 m 以下 ガス
		13:38~13:59	下降 2.7	
SH5	静岡県 伊東沖	9/12 10:11~10:28	上昇 3.1	強風 1500 m 以下ガス
		10:28~10:46	下降 3.2	3000 m ガス・視界不良

第1表(b) ヘリコプターの観測地点と観測時間, 上昇・下降速度 (金沢・小松周辺, 1991/92年).

Flight No.	観測地点	観測時間	速度 (m/s)	備考
KH1	石川県 宇ノ気沖	1/21 13:20~13:32	上昇 3.5	上層雲 (くもり)
		13:32~13:44	下降 3.4	
KH2	福井県 三国沖	1/21 14:08~14:14	上昇 6.2	上層雲
		14:16~14:27	下降 3.7	
KH3	石川県 金沢市 南方 10 km	1/24 08:39~08:48	上昇 5.0	下層 Cu (雲頂 500 m)
		08:48~08:58	下降 4.3	観測地点 雲なし

第2表 気温センサーの特性.

	センサー	精度 (°C)	時定数 (sec)
ヘリコプター	熱電対	±0.2	0.2
	バイメタル	±1.5	15.0
ゾンデ (相模湾)	タングステン抵抗線	±0.2	0.2
ゾンデ (金沢・小松周辺)	静電容量式	±0.2	2.5

た.

また, 金沢・小松周辺の観測におけるゾンデ放球地点は石川県河北郡宇ノ気町にある石川県砂丘地農業試験場構内(北緯36度43分, 東経136度42分, 第1図(b)を参照)である. この地点から1月22~24日の3日間に計17回, レーウィン・ゾンデ(バイサラ, RS-80)を放球し, この信号をゾンデ受信装置(バイサラ, MW-11)によって受信し, 収録した. 観測項目は相模湾の観測と同じく高度10,000 mまでの風向・風速, 気温, 湿度, 気圧の鉛直分布であり, 気温と湿度はそれぞれ容量型ビーズ温度計と容量式湿度計によって測定した. 第2表に, 観測で用いた温度計の応答特性を, 第3表(a), (b)にそれぞれ, 相模湾と金沢の観測に関するゾンデの放球時刻とその上昇速度, そしてその時の気象状況を示す.

3. 結果

ここでは, ヘリコプターとゾンデの観測時間がほぼ一致しており, 照合するのに適していると考えられる. 1990年9月10・11日午後の相模湾の観測結果と, 1992年1月24日朝の金沢・小松周辺の観測結果について述べる.

3.1 相模湾における観測結果

9月10日午後の相模湾におけるヘリコプター観測は, 13時45分から14時22分までの37分間, 静岡県伊東沖で行われた (Flight No. SH2). この場所はゾンデ放球地点から東に約5 km離れた海上である (第1図(a)を参照). ここではこの測定値と, 12時5分と15時6分に放球したゾンデ (Runs No. SS1, No. SS2) によって得られた測定値を照合することにする. ここで, ヘリコプターの値はレファレンス・レベル (150 m, 500

第3表(a) ゾンデの放球時刻, 上昇速度, 気象状況(相模湾, 1990年).

Run No.	放球時刻		上昇速度 (m/s)	気象状況 (風向・風速:網代, 気温・雲:放球地点)
SS1	9/10	12:05	3.6	ESE 2 m/s, 27.8°C 1/Cu/900 m, 3/Ci/6900 m
SS2	9/10	15:06	3.5	N 2 m/s, 28.7°C 1/Cu/900 m, 2/Ci/6000 m
SS3	9/11	12:00	3.7	SSE 2 m/s, 30.2°C 3/Cu/750
SS4	9/11	14:55	3.4	W 3 m/s, 32.2°C 2/Cu/750 m

第3表(b) ゾンデの放球時刻, 上昇速度, 気象状況
(金沢・小松周辺, 1992年).

Run No.	放球時刻	上昇速度 (m/s)	気象状況
KS 1	1/22 10:44	5.4	4.2°C, 93%, 小雨
KS 2	1/22 12:17	5.5	6.0°C, 83%, 晴れ
KS 3	1/22 14:51	5.4	6.7°C, 80%, 曇り
KS 4	1/22 18:12	5.5	5.7°C, 83%, 曇り
KS 5	1/22 21:01	4.5	3.7°C, 79%, 曇り
KS 6	1/22 23:59	4.7	2.7°C, 92%, 小雪
KS 7	1/23 03:05	4.6	0.4°C, 98%, 小雪
KS 8	1/23 05:59	4.4	1.3°C, 92%, 雪
KS 9	1/23 09:00	3.0	0.4°C, 97%, 雪
KS10	1/23 11:58	4.6	1.5°C, 82%, 雪
KS11	1/23 14:53	7.0	0.5°C, 87%, 雪
KS12	1/23 17:56	4.3	-1.5°C, 93%, 吹雪
KS13	1/23 21:02	5.2	1.5°C, 80%, 曇り
KS14	1/24 00:06	5.1	1.5°C, 80%, 曇り
KS15	1/24 03:07	5.6	2.4°C, 60%, 曇り
KS16	1/24 06:07	5.0	-0.5°C, 95%, 雪
KS17	1/24 08:29	5.1	0.1°C, 100%, 雪

ft 毎)の瞬間値である。また、ゾンデの値には、約1.5秒の瞬間値データを2個平均して約3秒毎のデータとし、これを高度50m毎の値に内挿するという処理が施されている。

第2図(a)にヘリコプターの熱電対温度計による鉛直分布を示す。気温は一部の高度(3,450m以上)を除き、同じ高度では上昇時の方が下降時より高く、その差は平均して約0.4°C(1.0°C以下の範囲)となる。しかし、上昇時と下降時に高度750~1,500mで等温層が観測されること、上昇時と下降時のプロファイルの型はよく一致することが認められる。

第2図(b)にヘリコプターのバイメタル温度計による鉛直分布を示す。前述の熱電対温度計の観測例と同様に、同じ高度では上昇時の方が下降時より気温が高く測定されるが、その差は熱電対温度計より大きい(平

均して約1.5°C, 2.0°C以下の範囲)。また、等温層は上昇時では高度900~1,500m, 下降時では1,350~900mに観測される。しかし、上昇時と下降時のプロファイルの型は、熱電対温度計の場合と同様によく一致する。

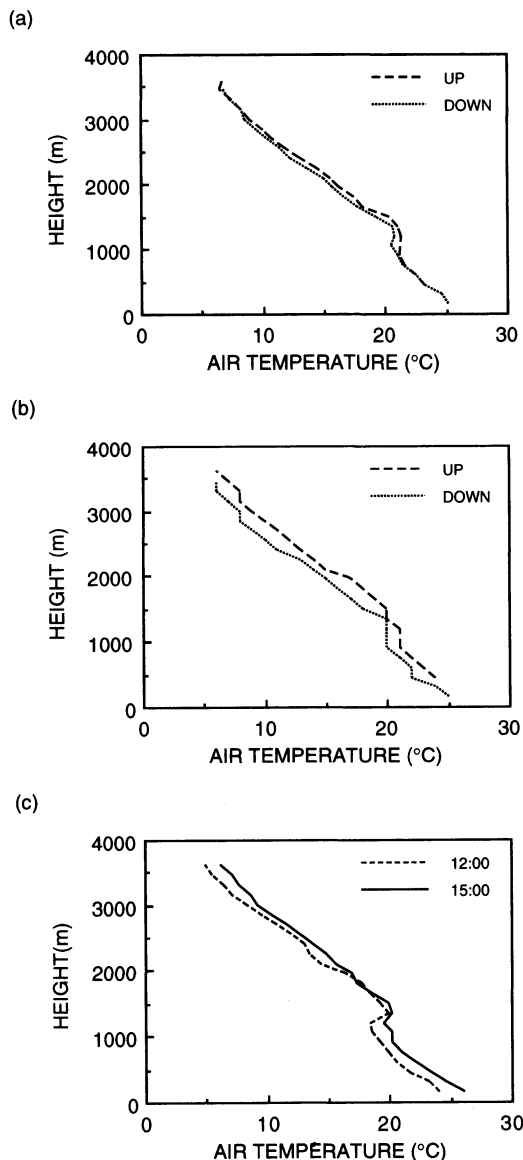
第2図(c)にゾンデの抵抗温度計による鉛直分布を示す。12時と15時に放球したゾンデによる気温のプロファイルと比較すると、高度1,200m以下と2,000m以上の大気層で気温が上昇したことがわかる。また、両時刻のプロファイルとも1,200m付近に逆転層が存在し、900~1,600mでは高度に関して気温が複雑に変化するが、これはヘリコプターによる測定結果で示された等温層によく対応する。高度に関して気温が一樣に変化する1,600~3,600mでは、プロファイルの型はヘリコプターによって得られたものとほぼ等しい。さらに、地表面から3,600mでは気温傾度は約 $-5.8 \times 10^{-3} \text{C/m}$ となる。

9月11日午後の相模湾におけるヘリコプター観測は、13時22分から13時59分までの37分間、神奈川県平塚沖、ゾンデ放球地点から北東に約40km離れた地点で行われた(Flight No. SH4, 第1図(a)を参照)。この測定値を、12時と14時55分に放球したゾンデ・データ(Runs No. SS3, No. SS4)と照合した。

第3図(a)にヘリコプターの熱電対温度計による鉛直分布を示す。高度2,700m以下では、同じ高度で気温は上昇時の方が下降時より高く測定される(平均して約0.3°C, 1.0°C以下の範囲)。また、3,600mまでのプロファイルの型は、上昇時と下降時ではほぼ一致する。

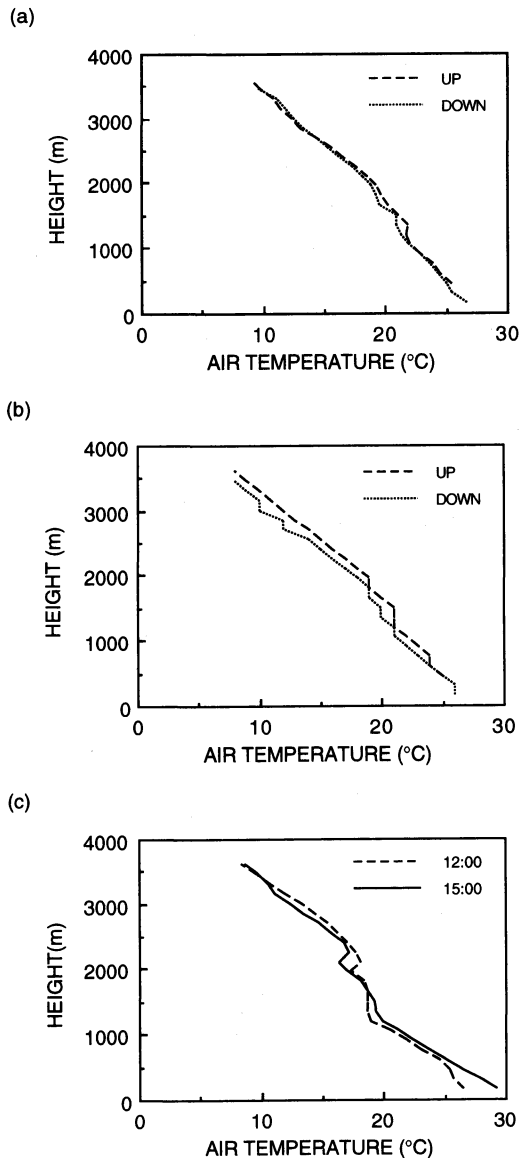
第3図(b)にヘリコプターのバイメタル温度計による鉛直分布を示す。10日と同様に、同じ高度では上昇時の方が下降時より測定値が高く、その差は熱電対温度計によって測定されたものより大きい(平均して約0.9°C, 2.0°C以下の範囲)。

第3図(c)にゾンデの抵抗温度計による鉛直分布を



第2図 気温の鉛直分布 (1990年9月10日, 相模湾)

(a)ヘリコプターに搭載された熱電対温度計の測定結果 (Flight No. SH2). (b)ヘリコプターに搭載されたバイメタル温度計の測定結果 (Flight No. SH2). (c)ゾンデに搭載された抵抗温度計の測定結果 (Runs No. SS1, No. SS2).



第3図 気温の鉛直分布 (1990年9月11日, 相模湾)

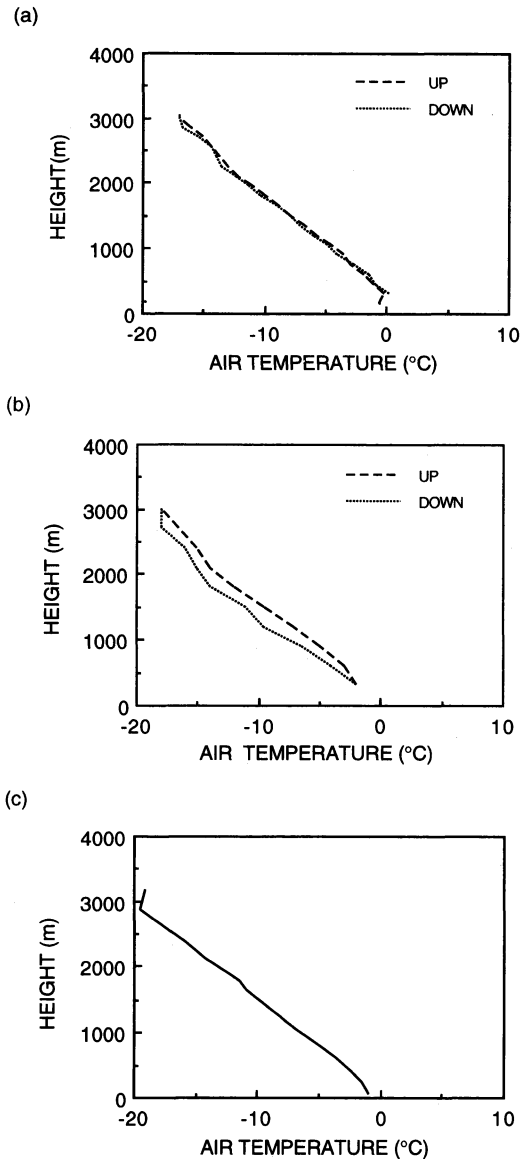
(a)熱電対温度計 (Flight No. SH4). (b)バイメタル温度計 (Flight No. SH4). (c)抵抗温度計 (Runs No. SS3, No. SS4).

示す. 12時と15時にゾンデから得られた気温のプロファイルと比較すると, 高度 1,500 m 以下の大気層で気温が上昇しており, 500 m 以下でとくに大きい. 両プロファイルとも 1,200~2,300 m では測定値は高度とともに複雑に変化し, 2,000~2,300 m には逆転層が

観測される. 2,300 m 以上では, ゾンデによるプロファイルはヘリコプターの熱電対温度計によるプロファイルとほぼ一致する. また, 地表面から 3,600 m では気温傾度は約 $-5.6 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ となる.

3.2 金沢・小松周辺における観測結果

1月24日朝の金沢・小松周辺におけるヘリコプター



第4図 気温の鉛直分布 (1992年1月24日, 金沢・小松周辺).

(a)熱電対温度計 (Flight No. KH3). (b)バイメタル温度計 (Flight No. KH3). (c)抵抗温度計 (Run No. KS17).

観測は、8時39分から58分までの19分間、石川県金沢市南方10 km, ゾンデ放球地点から南に約30 km離れた地点で行われた (Flight No. KH3, 第1図(b)を参照)。この測定値は、8時29分に放球されたゾンデ・データ (Run No. KS17) と照合した。ここで、ヘリコプターとゾンデの値は、レファレンス・レベル(150~200

m, 500~700 ft 毎) の瞬間値である。

第4図(a)にヘリコプターの熱電対温度計による鉛直分布を示す。高度300 m以下で逆転層が観測されるが、高度800 m以上では上昇時、下降時ともほぼ等しいプロファイルが得られる。また、相模湾の観測結果と同じように、同じ高度では上昇時の気温の方が下降時より高く測定される (平均して約0.3°C, 0.4°C以下の範囲)。

第4図(b)にヘリコプターのバイメタル温度計によって得られた鉛直分布を示す。相模湾の観測の結果と同じく、同じ高度における上昇時と下降時の測定値の差は、熱電対温度計による差より大きい (平均して約1.3°C, 3.0°C以下の範囲)。

第4図(c)にゾンデの容量型ビーズ温度計による鉛直分布を示す。プロファイルには、ヘリコプターの熱電対温度計による測定でみられた下層の逆転層が観測されていない。しかし、高度800 m~2,500 mではプロファイルの型はヘリコプターの熱電対温度計によるものとよく一致する。また、地表面から3,200 mでは気温傾度は約 $-6.9 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}/\text{m}$ となる。

4. 考察

ここでは、ヘリコプターとゾンデの気温の測定値の差を比較・考察することにより、ヘリコプターの航行が測定値に与える影響について明らかにする。また、相模湾における2日目(9月11日)の観測と金沢・小松周辺における観測では、ヘリコプターとゾンデの観測場所がかなり離れており、測定法による違いばかりでなく気象現象とそのスケールをも考慮した上での比較となる。

ヘリコプターに取付けた温度計とゾンデに取付けた抵抗温度計 (または、容量式ビーズ温度計) の気温の測定値の差を ΔT とすると、 ΔT はつぎのように表すことができる。

$$\Delta T = \Delta T_s + \Delta T_e + \Delta T_a + \Delta T_t + \Delta T_p \quad (1)$$

ここで、 ΔT_s はセンサーの違いによる測定値の差、 ΔT_e は温度計を取付けた場所の違いによる測定値の差となる。とくに後者は、測定値がヘリコプターの機体の影響をどの程度受けるのかを示す項でもある。また、 ΔT_a は高度の求め方の違いによる測定値の差、 ΔT_t は観測時刻の違いによる測定値の差、 ΔT_p は地理上の観測場所のちがいでによる測定値の差である。以下、各項を評価しながら議論を進めることにする。

まず、式(1)の ΔT_s について考えることにする。観測で用いた温度計の応答特性について、第2表から、1)ヘリコプターのバイメタル温度計は他の温度計と比較して、時定数と精度で1桁劣ること、2)相模湾の観測で用いたヘリコプターの熱電対温度計とゾンデの抵抗温度計はほぼ同じ応答特性をもつこと、3)金沢・小松周辺の観測で用いたヘリコプターの熱電対温度計とゾンデの容量型ビーズ温度計との間には、時定数に1桁の違いがあることがわかる。1)は、バイメタル温度計による測定値はゾンデによる測定値と比較することに適していないことを示している。そこでこれ以後、ヘリコプターの測定値は熱電対温度計によって測定されたものについてのみ議論する。また2)は、相模湾における観測では ΔT_s は熱電対温度計と抵抗温度計の精度のみを考慮すればよいことを示している。さらに3)に関して、熱電対温度計と容量型ビーズ温度計の時定数の違いによって生じる測定値の差を、金沢・小松周辺の観測結果から見積ると 0.1°C 以下となる。

つぎに、 ΔT_e について考察する。第2~4図(a)で示されているように、ヘリコプターによる気温の測定値は、同高度では上昇時の方が下降時より $0.3\sim 0.4^\circ\text{C}$ 高い。これは、一つには上昇時には気温の高いより下層の大気の影響を、下降時には気温の低いより上層の大気の影響を測定値が受けることにより起こる現象と考えられる。もう一つの可能性としては、センサーの感部が受けるダウン・ウオッシュの効果が上昇時と下降時で異なること(渡辺ほか;1972)が考えられる。そこでここでは、同じ高度における上昇時と下降時の測定値の平均値をヘリコプターによる測定値とし、上昇と下降がセンサーの感部に与える影響を取り除くことにする。

また、渡辺ほか(1975)はセンサー感部におけるダイナミック・ヒートの問題について指摘している。これは、ヘリコプターの航行により、センサーの感部に圧力がかかり、測定値が実際より高くなる現象である。この現象による気温の上昇は、航速 $20\sim 30\text{ m/s}$ で 0.2°C 以下と見積られる。今回の観測では、センサーの感部は機体腹部のオープンブル・ハッチ面から下方に約 5 cm 突き出し、気温測定時には上昇気流にさらされていた。しかし、この気流は $5\sim 10\text{ m/s}$ であるので、このダイナミック・ヒートによる測定値への影響は無視できるものと考えられる。

そこで、 ΔT_e は上記で示した以外に考えられる機体

の影響ということになる。

さらに、 ΔT_a について考察する。ゾンデから求める高度は、ゾンデ自身が観測した気圧、気温、湿度から計算されたものであることから、真の高度と考えることができる。これに対して、ヘリコプターの高度計が示す高度は、飛行中の気圧を測定し、ICAOで採用している国際標準大気(平均海面から高度 11 km までの気温傾度は -6.5°C/km と仮定)にあてはめて求めたものである。そこで、平均海面からヘリコプターの飛行高度までの大気の気温傾度が標準大気の気温傾度と一致しないときには、真の高度と気圧高度が示す高度との間に差が生じる。例えば、飛行中の大気の気温傾度の絶対値(あるいは気温減率)が標準大気のそれより小さい場合、ヘリコプターの気圧高度計が示す高度は真の高度より低く見積られる。

9月10日の相模湾の観測の場合、ヘリコプターの気圧高度計による高度は真の高度と比較して、高度 900 m では約 40 m 、高度 $3,600\text{ m}$ では約 180 m 低く示す(ヘリコプターの高度計が 900 m を示す時、真の高度は 940 m である)。これを ΔT_a に換算すると、それぞれ約 0.2°C 、約 0.3°C ほどヘリコプターの方が低く測定されることになる。また、11日の場合は、高度 900 m では約 50 m 、高度 $3,600\text{ m}$ では約 210 m ヘリコプターの方が低く示す(それぞれ約 0.4°C 、約 1.3°C 低く測定される)。1月24日の金沢・小松周辺の観測の場合は、ヘリコプターの高度は真の高度より、高度 830 m では約 50 m 、高度 $2,800\text{ m}$ では約 190 m 高く示す(それぞれ約 0.3°C 、約 1.5°C 高く測定される)。以上のことから、気圧高度計を用いた観測の場合、 ΔT_a は他の差と比較して無視することができないので、考慮する必要があることがわかる。

最後に ΔT_t と ΔT_p を考察することにする。

相模湾の観測では、ヘリコプター観測の前後でゾンデを1回ずつ放球している。この間に高度 $3,600\text{ m}$ までの大気層では、9月10日では平均して約 1.0°C 、11日では平均して約 0.2°C 上昇しているが、この気温の上昇はヘリコプターとゾンデの測定値を比較するうえで無視できないものである。そこでここでは、ゾンデによる測定値をヘリコプターの観測時刻と一致するように時刻補正を施し、ヘリコプターの測定値(上昇時と下降時の平均値)と比較することにする。この結果、 ΔT_t を考慮する必要がないことになる。また金沢・小松周辺の観測では、ヘリコプターの観測時間が8時39分から58分(第1表(b))、ゾンデの放球時刻が8時29分(第

第4表 ヘリコプターとゾンデとの測定値の差の見積り（地表面から3600 mまでの大気全体における平均的な値）。ただし、各々の評価値は式(1)で定義されたものである。また、符号はゾンデの測定値を基準とする。

		ΔT	ΔT_s	ΔT_e	ΔT_a	ΔT_t	ΔT_p	気象状態
相模湾	9月10日	+0.2	+0.2	+0.6 ～ +1.0	-0.6	0.0	0.0	太平洋に高気圧、日本海に前線を伴った低気圧がある。気圧傾度は小さい。観測地域は南よりの風が卓越（2～3 m/s）。晴れ。気温が高い。
	9月11日	+0.2	±0.2	+0.6 ～ +1.0	-0.8	0.0	-0.4 ～ 0.0	
金沢・小松周辺	1月24日	+2.0	±0.3	+0.6 ～ +1.0	+0.8	0.0	-0.1 ～ +0.9	西高東低の冬型、強い寒気が流入し、日本海側では北西風が卓越（～10 m/s）。降雪。

3表(a)なので、 ΔT_t は無視できるものと考えられる。

さらに ΔT_p に関して、9月10日の観測ではヘリコプターの観測場所とゾンデ放球地点は約5 kmしか離れておらず、 ΔT_p を考慮する必要がないと考えられる。

9月11日の相模湾観測の場合は、ヘリコプターの観測場所とゾンデ放球地点は約40 km離れているので、 ΔT_p を考慮する必要がある。

1月24日の金沢・小松周辺の観測では、日本は西高東低の冬型で強い寒気が流入し、観測地域では北西の風（～10 m/s）が卓越し、降雪を記録した。降雪をもたらしたシステムのスケールが20 km以下であったので、ゾンデ放球地点では雲頂高度3,000 mに達する積雲に覆われ、降雪であったが、そこから約30 km離れたヘリコプター観測地点付近では雲頂高度500 mの小さな積雲が存在し、その上空には雲がないという状況であった。このように、ヘリコプター観測地点とゾンデ放球地点との距離が気象現象を支配するシステムより大きい時は、 ΔT_p を考える必要がある。

以上のことを考慮して、各観測において地表面から高度3,600 mまでの大気層における平均的な ΔT 、 ΔT_s 、 ΔT_e 、 ΔT_a と ΔT_p を見積り、その結果を第4表に示す。この表から、ヘリコプターが測定の場合に与える影響は+0.6～+1.0°C、空間スケールに換算すると、鉛直方向で80～180 mであることがわかる。今回は水平方向のヘリコプター観測について検証はしていない。しかし、気象要素の水平分布は、鉛直分布と比較してその時間・空間スケールが1～2オーダー大きいので、その変化率は水平方向の方が鉛直方向と比較して小さい。さらに、ヘリコプターはその飛行特性から水平方向の大気を鉛直方向ほど乱さない。これらのこ

とは、ヘリコプターが測定の場合に与える影響の水平スケールは100 m以下であることを示す。以上のことから、水平方向の測定は鉛直方向よりかなり良い精度でできることが期待される。

5. 結論

相模湾および金沢・小松周辺におけるヘリコプターとゾンデによる気温の比較観測から、ヘリコプター観測の特性に関してつぎのことが明らかになった。

- (1)ヘリコプターによる気温の鉛直プロファイルの型はゾンデによって得られたものとよく一致する。
- (2)ヘリコプターによる観測では、同じ高度の気温の測定値は上昇時の方が下降時より高い傾向がある。この大きさは、異なる飛行時においても平均して0.4°C以下である。
- (3)ヘリコプターの観測によって得られた気温の測定値には機体の影響が含まれているが、これは鉛直分布の測定時において+0.6～+1.0°Cと見積ることができる。

これらのことは、ヘリコプターによって得られた測定値がゾンデなど他の方法で得られた測定値と一緒に議論できること、そして、ヘリコプターの観測が中・小規模の大気現象の観測に対して有効な手段であることを示すものである。しかし、気圧高度計によって得られた高度は、場合によって真の高度と観測精度上、無視できない差を生じることがあるので、高度の補正が必要となる。

謝辞

本研究では陸上自衛隊第1ヘリコプター団の支援を受けました。また、ゾンデ観測では、朝日航洋（株）

と石川県砂丘地農業試験場にゾンデ放球場所を提供していただきました。さらに、川崎重工運用システム部より、ヘリコプター搭載の温度計に関する資料をいただきました。ここで、関係者の皆様に厚く御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 渡辺好弘・吉川敏夫・高中康恵・高橋克己, 1972: ヘリコプターによる大気温度測定の実験(1), 天気, 19, 497-505.
- 渡辺好弘・有澤雄三・吉川敏夫, 1975: ヘリコプターによる大気温度測定の実験(2), 天気, 22, 665-670.

日本気象学会および関連学会行事予定

行事名	開催年月日	主催団体等	場所	備考
アジアモンスーンとその変動に関する国際シンポジウム	1994年11月2日 ～6日		中国広州市	東大気候システム研究センター 新田 勅
第13回風工学シンポジウム	1994年11月30日 ～12月2日	日本風工学会, 電気学会 日本気象学会, 土木学会 ほか	日本学術会議講堂 (港区)	東京大学生産技術研究所村上研究室 Tel. 03-3401-7439
第41回風に関するシンポジウム	1994年12月19日	日本航空宇宙学会 日本気象学会 ほか	東京大学山上会館 大会議室 (文京区)	東京大学航空宇宙学科 久保田 弘 Tel. 03-3812-2111
月例会「レーダー気象」	1994年12月20日	気象庁	気象庁 (千代田区)	気象研究所台風研究部 榑原 均 Tel. 0298-53-8691
気象・海洋のデータ同化に関する国際会議	1995年3月13日 ～17日	WMO (世界気象機関)	気象庁講堂 ほか (千代田区)	気象庁数値予報課 平 隆介 Tel. 03-3212-8341
日本気象学会 1995年度春季大会	1995年5月15日 ～17日	日本気象学会	気象庁, KKR 竹橋 (千代田区)	
第19回国際理論・応用力学会議	1996年8月25日 ～31日	International Union of Theoretical and Applied Mechanics (IUTAM)	国立京都国際会館 (京都市)	事務局 渡邊英一 Tel. 075-753-5079