

LTS-72 型低層ゾンデのはなし*

伊藤 昭三** 渡辺 好弘*** 岡野 博***

1. はじめに

“低層ゾンデ Lower Troposphere Radiosonde”は昭和41年頃、小林らによって開発され、各方面に利用されてきた。開発された後も部分的に改良を重ねられてきた。しかし、電波法の改正等もあって部分的な改良では、精度を向上することができず、(財)日本気象協会と明星電気株式会社は、昭和44年末より新型低層ゾンデの開発をはじめた。開発をはじめて約2年半、昭和47年5月新型低層ゾンデ“L.T.S-72型”を完成した。

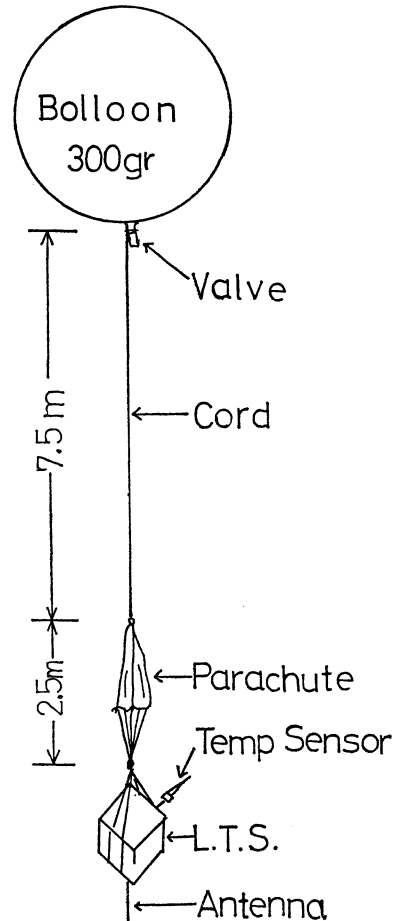
このL.T.S-72型低層ゾンデは、温度精度 ± 0.2 deg Response $\cong 0.2$ sec 空ごう精度 ± 1.0 mb の成績を示し、開発の目的である精度の向上は一応達成された。しかも価格面では従来の低層ゾンデより多少安くなった。ここでは試作時の各種実験をはじめ電気的な性能、実際に観測した例をあげてL.T.S-72型のゾンデの紹介をすることにする。

本器は気象官署で使用しているRadio sondeと同様第1図のように気球にsondeを懸吊して、気球と共に上昇させ高さ2,000m位までの大気温度の鉛直分布を測定する装置である。

“低層ゾンデ”と称して、他のRadio sondeと区別しているのは、低層大気専用のRadio sondeであるがためて型名のL.T.SはLower Troposphere Radio Sondeの略である。第2図にL.T.S-72型低層ゾンデと受信装置のブロック・ダイアグラムを示す。このシステムについて若干の説明をすると、L.T.S-72型低層ゾンデは温度測定部の感部にTungsten wire (w)、高度(気圧)測定部の感部に空ごうがそれぞれ使用されている。温度測定部は、感部の温度による電気抵抗変化をブリッジ回路により電圧に変換し、ブリッジの出力電圧は低周波発振部によってV-F変換され、出力電圧に応じた低周波(10~200 Hz)となる。この低周波は変調回路によって、

404.5 MHz を変調し送信器によって送信される。送信された情報は専用の受信装置(Type RM-418)により受信される。さらに変換器によって、低周波は周波数に応じた直流電圧(0~1 Vまたは0~10 mV)となり記録器で記録される。高さの信号は温度信号に重畳させて送信される。

記録された情報は、温度、高さの順で必要な処理がなされ、解析に用いられる。温度測定部、高度測定部以外は他のRadio sondeと電気的には大差はないのでこ



第1図 ゾンデの構成

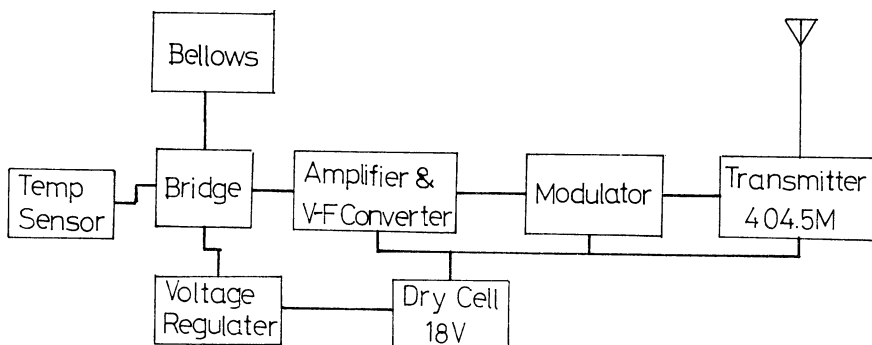
* Introduction to the LTS-72 Type Lower Troposphere Radio Sonde.

** S. Ito 大阪府立大学工学部環境工学講座

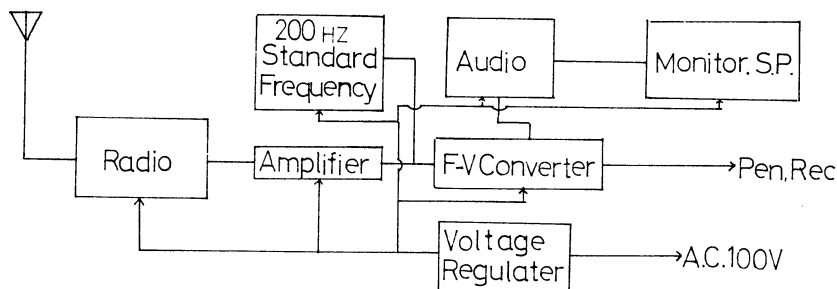
*** Y. Watanabe, H. Okano 日本気象協会

—1973年11月14日受理—

LTS-72



RADIO SET



Radio Unit ———— Signal Converter Unit

第2図 観測装置のブロックダイアグラム

では省略する。

2. 温度測定部

温度計の感部としては各種あるが、電気的に扱いやすく(温度係数大)、追従性がよく、しかも直線性がすぐれ野外において十分使用できる等考慮して Tungsten wire を選んだ。これらの要求を完全に満足させることはできなかったが、ほぼ実用に供せられる段階となった。

2-1. 感部

第1表に示すような Tungsten wire を感部とした。白金に比較し電気抵抗値は約5倍と大きい、素線のみでは長さが約80cmとなり野外での取扱には不都合が生じる。そこで見掛の長さを短くするため、写真1に示すように内径0.1mmのコイル状に巻いた。

感部は直接外気に接するように開発を進めたために、Response が短いことが予想され、電磁オシロ (Type Y.E.W 2091) で測定した。測定の方法はブリッジ回路の一辺に感部を組込み、感部の温度を $-27^{\circ}\text{C} \sim +40^{\circ}\text{C}$

第1表 感部の仕様

項目	内容	
名称	メテオーム	
材質	Tungsten	
形状	10 $\mu\phi$ \times \approx 80 cm (素線)	
電気抵抗	0 $^{\circ}\text{C}$ \approx 500 Ω 規格 \pm 10 Ω	
温度係数	\approx 0.4% deg	
温度特性	温度	-20 $^{\circ}\text{C}$ -10 $^{\circ}\text{C}$ 0 $^{\circ}\text{C}$ 10 $^{\circ}\text{C}$ 20 $^{\circ}\text{C}$ 30 $^{\circ}\text{C}$
	抵抗値	452.0 Ω 272.5 Ω 490.0 Ω 510.0 Ω 529.8 Ω 549.4 Ω

の 67 deg 変化させ、その時のブリッジの出力電圧を電磁オシロで記録した。この結果を第3図に示してある。この記録から明らかのように Response は 0.2 sec 以内で、温度に対する追従性に関しては観測値を補正する必

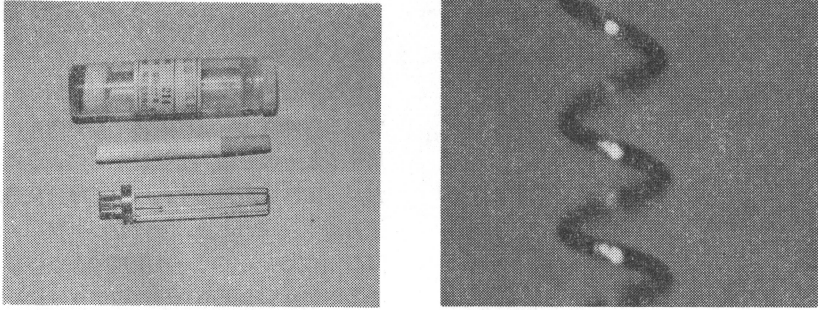
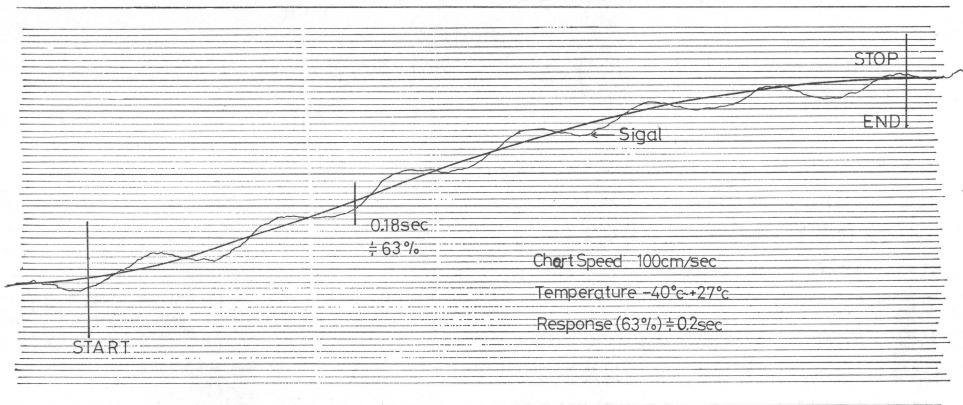


写真1 感部と容器 (右, 感部の拡大×150)



第3図 Response の測定例

要はない。

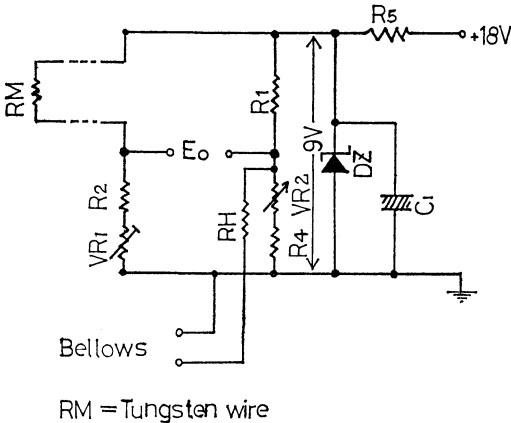
感部が $10\mu\phi$ と細いため取扱いに神経を使う破目となり、感部の收容方法で議論した結果、乾燥材を入れたガラス容器に入れ、密封し必要以外に取り出さないようにした。感部の経時変化が開発当初から話題になったが、昭和46年12月5日から昭和48年6月23日までの約1年7カ月間ガラス容器に入れたサンプルの温度特性を調べたが 0.1 deg 以内であった。経時変化は現在も実験中であるが、現在の使用率からみて1年以上保存することはない。従って測定値からみて観測上はほとんど無視できると判断している。完成した感部は -10°C 、 $+10^{\circ}\text{C}$ 、

$+30^{\circ}\text{C}$ の3点正確に抵抗測定がなされ、各感部毎に温度特性表が添付され出荷される。

2-2. 温度計変換回路

抵抗式温度計の抵抗電圧変換回路として、ブリッジ回路が多く使用されている。本器では第4図に示すような“ブリッジ”を構成した。

使用する電気部品は、温度係数の小さい金属被膜抵抗器を、可変抵抗器については必要最小限度の値にして温度ドリフトをさけた。また電源には全国どこでも入手出来る乾電池 (Type 006 p 9V×2ヶ) を使用した。乾電池であるがため、端子電圧の変動が大きく、当然電源電



第4図 温度計変換回路

RM = Tungsten wire

圧変動による誤差が生じる。そこで、定電圧ダイオード Dz によって定電圧回路を組み、定電圧化された電圧が供給できるようにした。

この変換回路の出力電圧は(1)式によって求めることができる。

$$E_0 = \left(\frac{RM}{RM + (R_2 + VR_1)} - \frac{R_1}{R_1 + (R_4 + VR_2)} \right) \times E \dots\dots\dots (1)$$

回路を構成する部品の定数は、測定条件により決まる。低層大気と云う目的から測定対象高度を地上より約 2,000m とし、大気状態は乾燥断熱減率 $-1^\circ\text{C}/100\text{m}$ を仮定した。この条件から Span は 20 deg あれば測定条件を満すことになる。

半固定抵抗器 VR_1 は Span 調整用のもので 20 deg に Span を調整したのち固定される。測定対象温度は $-20^\circ\text{C} \sim +40^\circ\text{C}$ の範囲とし、ブリッジの平衡点は任意に移動できる方式とした。平衡点の移動、即ち Range の選定は地上気温と大気の状態によって決まる。この操作は、可変抵抗器 VR_2 によってなされる。Range が固定されてないため、絶対値を知るには何かの方法で比較検定が必要となる。

この温度計の出力電圧は(1)式によって求めると約 $1.8 \times 10^{-3} \text{V/deg}$ となる。感部の端子電圧をパラメーターとしているため、自己加熱による測定誤差が考えられる。自己加熱について数回の実験をし確認したが 0.1deg より小さいと云うことだけで、定量的に把握することはまだできていない。この他感部を外気に直接晒しているため日射による誤差が考えられる。この問題に関しても今まで何回となく実験したが、Response が早く非常に

むずかしい。定量的には、通風速度が約 2 m/sec の時 0.05deg (13th Nov 1972, 明星電気KK守谷工場内, 天気快晴) が得られている。この値には、自己加熱誤差等も含まれており、通風速度が 3 m/sec 以上であれば $\pm 0.1 \text{deg}$ より小さいものと推測される。この他、感部に水分が付着した時、例えば降雨中の観測などの場合、記録のみで判断することはむずかしいと思われる。なおこれらの課題は目下検討中である。

2-3. 標準抵抗器

比較検定の方法について検討したが、感部に添付されている特性表を有効に利用する方向で、標準抵抗器を使用することにした。抵抗器をどのように作るかで議論したが、回路を複雑にすれば1個の抵抗器で済む。しかし複雑にすればする程、故障等のトラブルが発生する。故障の内容によっては全々使用できない事態もでてくる。そこで第2表のような値の標準抵抗器を各々独立させ13本で1組とした。

第2表 標準抵抗器の抵抗値例

No	抵抗値	温度	No	抵抗値	温度
1	458.2Ω	約 -20°C	8	529.2Ω	約 15°C
2	469.4Ω	" -15°C	9	540.4Ω	" 20°C
3	478.7Ω	" -10°C	10	549.6Ω	" 25°C
4	489.0Ω	" -5°C	11	559.6Ω	" 30°C
5	499.9Ω	" 0°C	12	570.4Ω	" 35°C
6	508.2Ω	" 5°C	13	579.6Ω	" 40°C
7	518.7Ω	" 10°C			

第2表の温度は大体の温度であり、実際には温度計感部に添付されている特性表から求めなければならない。観測の場合はこの標準抵抗器で最低3点以上較正し絶対値を求めている。本抵抗器は高周波のシールドを兼ねた黄銅のパイプ形ケース(外型 $18 \text{mm}\phi \times 40 \text{mm}$)に温度係数の小さい抵抗器を入れ、さらにシリコンゴムを封入し、感部と同規格のコネクターをつけた。写真2に標準抵抗器を示すが、コネクターの接触抵抗値が測定誤差になることが予想されたので実際に同規格のコネクター20数個について測定した。その結果を第3表に示した。

第3表から接触抵抗値は最大 $9 \times 10^{-3} \Omega$ であり、温度に換算しても $\approx 1 \times 10^{-2} \text{deg}$ となる。この値であれば事

第3表 接触抵抗値

	最大	平均	最小
抵抗値	$9 \times 10^{-3} \Omega$	$4.3 \times 10^{-3} \Omega$	$1 \times 10^{-3} \Omega$
温度換算値	$\approx 9 \times 10^{-3} \text{ deg}$	$\approx 4.3 \times 10^{-3} \text{ deg}$	$\approx 1 \times 10^{-3} \text{ deg}$

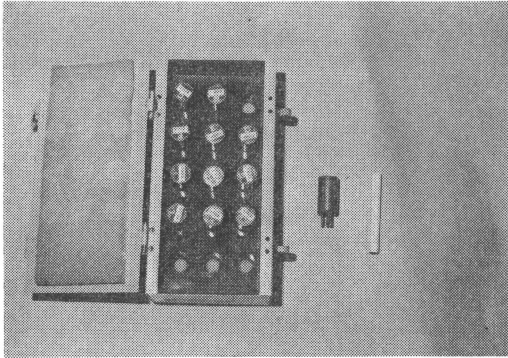


写真2 標準抵抗器とケース

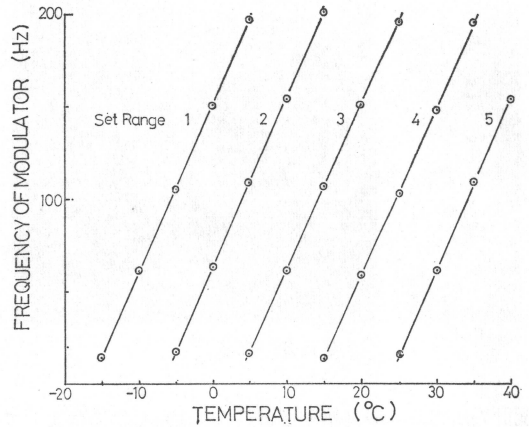
実上問題ない。標準抵抗器の安定性が重要になる。観測前後にデジタル抵抗測定器 (Type TR 6515 D) で較正しているが、測定器の誤差内で問題はない。

2-4. Range の直線性

今まで論じたような方向で十分検討し試作改良を重ね、回路定数を決定し完成した。しかし、情報を送る手段として無線方式を採用しているがために、温度のみ検討することはできない。最終的には低周波発振回路も含め議論した。低周波発振回路、即ち、V-F 変換については温度計の出力電圧を最も忠実に周波数に変換する方法として、演算増幅素子 (Operational Amp) を使用した積分回路を応用した。これら V-F 変換回路は各種発表されているのでここでは省略する。

観測者が最も関心をもつ温度 Range の直線性について、V-F 変換も含め測定 (第7図参照) したのが第5図である。

Range の設定は任意の 5 Ranges 10 数台について調べたが $\pm 1 \text{ Hz}$ (温度換算値 $\pm 0.1 \text{ deg}$) の直線が得られた。第5図については受信側の変換誤差は除外してある。念のため観測と同じ状態で Range の直線性を調べたが、使用した設備では $\pm 0.1 \text{ deg}$ 以内であった。受信側の変換器の直線性は $\pm 0.5\%$ 以内、記録器の直線性も $\pm 0.5\%$ 以内である。当初これらの直線性が関係するので $\pm 0.2 \text{ deg}$ 以内と考えていたが、予想に反して小さ



第5図 Range の直線性

い。設備が変わった場合については不明であるが、 $\pm 0.1 \text{ deg}$ 以内に入るものと推定される。

3. 高度測定部

高度を測定する方法については、電波を利用する方法も含め、2~3の方法について試作検討を重ねた。しかし、消耗品と云うことで経費をかけることができず“妥当な価格”におさめるという大課題があった。小林¹⁾らの開発した低層ゾンデは、気球の上昇によって生ずる下向風圧を利用して、軽量の風車を回転させ、その回転数によって高度を求める方法が採用されていた。当時としては、技術的にも経費的にも最も手近で、確実な方法であったであろう。

しかし、この方法は“気球の上昇速度が常に一定である”と云う大前提と“周囲の空気は静止して上下気流はない”という仮定が入っている。これらの前提や仮定は成立しない場合が多い。気流に関係なく正確に高度を測定できるものとして、最終的に南極用ゾンデに使用されている“恒弾性材料 Sumi Span”の2連空ごうを用いた空ごう式気圧高度計 (以下高度計という) とした。この高度計の新規開発が最も大きな課題でもあった。この Sumi Span については岡田²⁾ (1973) の報告を参照されたい。このような高度計は以前からあったのではなく、最近の製作技術の進歩によって開発され精度に対し価格が安くなり、消耗品として使用できるようになった。

高度計は写真3に示すように、空ごう、ペン、フレーム、接点板その他の部品によって構成され、気圧の変化による空ごうの動きはペンに伝えられ、ペンが接点板上を摺動することによってペンと接点は電子回路 (第5図参照) の一部を順次 ON, OFF する。ON になると温

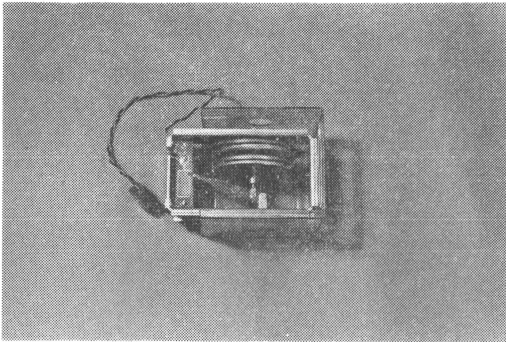


写真3 高度計

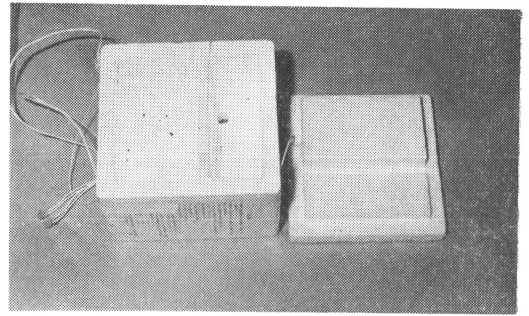


写真4 収容箱

度計の出力は RH (第4図参照) を流れる電流によって (2) 式のようになる。

$$E_0 = \left(\frac{RM}{RM + (R_2 + VR_1)} - \frac{R_1}{R_1 + R'} \right) \times E \dots (2)$$

$$R' = \frac{(VR_2 + R_4) \times RH}{(VR_2 + R_4) + RH}$$

RH は、温度計の出力が 1 deg シフトする値に設定した。また、ON となる気圧は、1040 mb~950 mb の間では約 10 mb 毎、950 mb~750 mb の間では約 30 mb 毎に接点をもうけてある。第4表に気圧接点の一例を示した。

第4表 高度計気圧目盛例

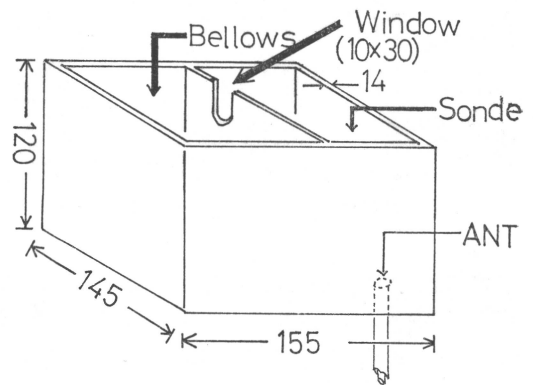
No	気 圧	No	気 圧	No	気 圧
1	1048.3 mb	7	975.0 mb	13	836.6 mb
2	1035.0	8	962.8	14	807.5
3	1022.8	9	950.8	15	777.2
4	1010.0	10	939.1	16	747.0
5	998.6	11	905.6	17	718.2
6	986.7	12	871.5	18	689.0

(明星電気KK社内検定)

3-1. 高度計の収容方法と応答速度

高度計を収容するについては、外気圧の変動に十分追従し、常に外気圧と等しくなることが要求される。そこで、電子回路、アンテナ、電源等も考慮し写真4に示すような収容箱を作り収容した。

材質は、電子回路の保温、落下した時の障害等を考慮し発泡スチロールを用いた。収容箱に直接高度計を入れ



第6図 収容箱の切削部分

ても、十分な追従性能は得られない。そこで境界壁を第6図に示すような幅 1cm、長さ 3cm の寸法で切削すれば、アンテナ、Range、周波数調整用の穴を通じて常に外気圧と等しくなることが確認され、この方法を採用した。

どの程度の追従性が得られるのか各種の試験を行なった。第5表は、排気速度を 30 mb/分 とし、収容箱に入れた場合と高度計のみ検定した時の差である。

排気速度を 30 mb/分 としたのは、実際に観測する場合のゾンデの上昇速度が今までの経験では大体 30 mb/分付近となるからで、第5表の値をみても ±0.3 mb 以内で追従する。この気圧の検定は、オープンマノメータ式の気圧検定槽を用いた。高度計を異なる2種の排気速度で比較したのが第6表である。試験は 10 mb/分 と 30 mb/分、20 mb/分 と 50 mb/分 を比較した。この試験では ±1 mb の誤差がみられた。

高度計の残存歪が問題となるが、伊藤精機の実験では約10分で 1 mb 差位にもどることが報告されている。こ

第5表 高度計の追従試験

マーク No	収容箱内	単 独	差
4	1009.0 mb	1009.0 mb	0.0 mb
5	997.0	996.7	0.3
6	985.0	984.7	0.3
7	973.0	973.2	-0.2
8	961.5	961.5	0.0
9	950.0	950.2	-0.2
15	778.5	778.7	-0.2
16	749.5	749.2	0.3

第6表 高度計の追従試験排気速度による差

マーク No	10 mb/分	30 mb/分	差
4	1008.5 mb	1008.7 mb	-0.2 mb
5	697.5	697.2	0.3
6	985.7	986.0	-0.3
15	783.0	783.7	-0.7
16	754.5	755.0	-0.5

マーク No	20 mb/分	50 mb/分	差
4	1008.5 mb	1009.4 mb	-0.9 mb
5	996.7	996.8	-0.1
6	985.5	985.9	-0.4
15	786.0	786.3	-0.8
16	757.2	757.6	-0.4

これらの実験を参考にし使用する1時間前までに検定を完了するようにしている。

3-2. 高度計の検定

高度計は軽量(≒65 gr)に作られており、力学的に非常に弱い。従って、一度検定しても振動等外部から力を加えると検定値は誤差が大きくなる。検定後7日間静かに放置したのち再検定したが、静止した状態であれば±1 mb 以内にはなった。しかし、社内検定と現地検定を比較した場合 2 mb となり、精度を要求する場合は、現地検定が必要となる。原則的には現地で検定するようにし、写真5に示すような検定装置を製作した。

この検定装置は水銀のオープン、マンメーターを使用しており、水銀の温度補正は取付てある温度計でできる。完成直後、試験観測で装置を中型トラックで運搬したところ、我々が考えていた以上の力加わり、水銀が漏れる事故があった。しかし部分的な改良で現在は解決

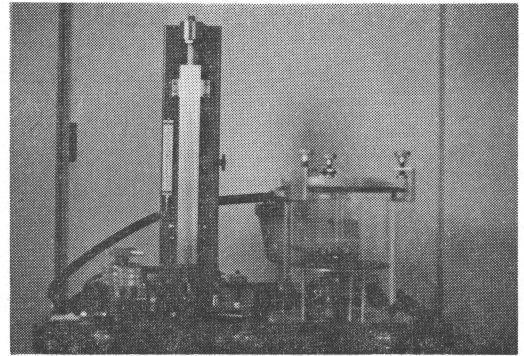
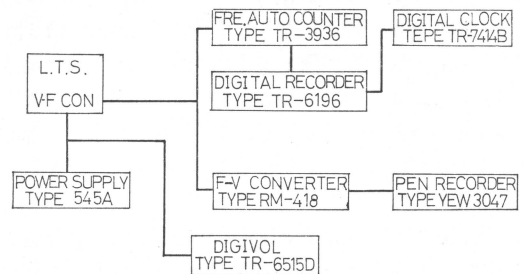


写真5 気圧検定装置

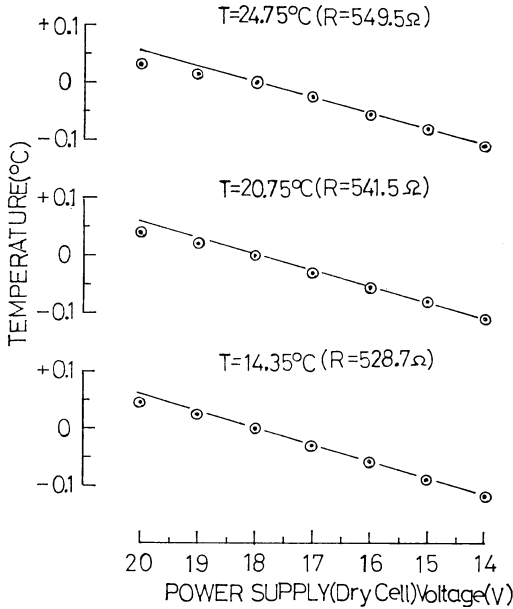
し、改良後は一度も事故はない。検定をする時は、高度計の接点板を必ず掃除しゴミ等をとってから実施している。また検定がやりやすいように、接点が ON になればブザーが鳴るようにした(接点保護のため、流れる電流は小さくしている)。

4. 試験

電源に乾電池を使用しているため、当然電圧変動の誤差が考えられる。温度計回路には定電圧回路を使用した。他の回路にはそれ程電圧変動が問題とならないと考えた。しかし、温度計以外の電圧変動誤差は把握しておく必要がある。測定方法は、感部の代りに標準抵抗器をつけ、電池の代りに定電圧装置(電圧可変式 Type 545 A)を使用した。ゾンデの信号は、送信部分は使用せず低周波のみ取り出し、周波数カウンター(Type TR 3936)とデジタルプリンター(Type TR-6196)で直接周波数を記録させた。第7図は測定の概略である。送信部分を除外したのは、情報を送るだけで誤差の要因がない。また送信出力が 20 mW と割合大きい上に、各回路からコードがでており、高周波の誘導が測定に影響すると考えたからである。



第7図 試験装置のブロックダイアグラム

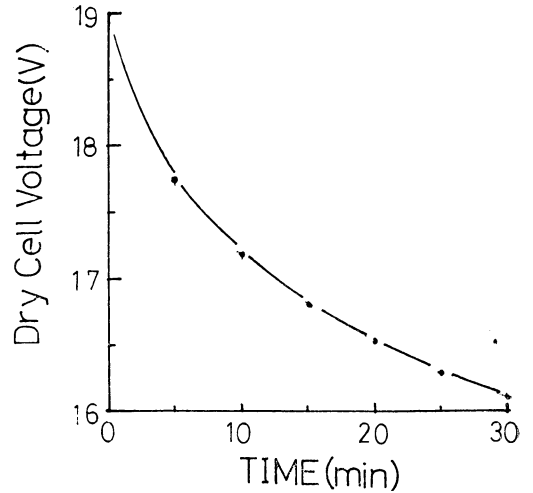


第8図 電圧変動による誤差試験結果

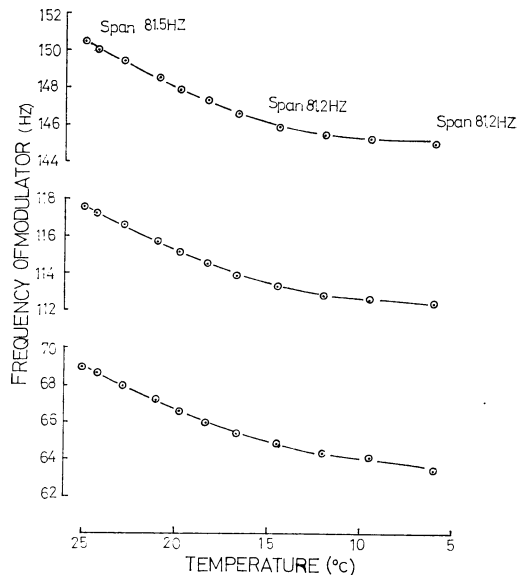
定電圧装置の電圧を 20 V→10 V, 10 V→20 V と 1 V 毎に変化させ、各電圧で 3 点周波数を測定した。この時の電圧を X 軸に、周波数を Y 軸にとり図化したのが第 8 図である。

電圧が 20 V～15 V の範囲では誤差 $\pm 0.1 \text{ deg}$ であり、Span は一定である。しかし全体が電圧に比例し平行移動することが解った。電源に乾電池を用いた場合、マンガ電池は新品の場合、定格電圧よりやや高い。実際に Type 006 P 9 V の電池について調べたところ最大 9.9 V が測定された。この試験で、電池の電圧降下が定量的に必要となり、ゾンデを正常の作動状態にして電池の端子電圧を測定した。X 軸に電池の放電時間、Y 軸に電池の端子電圧をとり第 9 図に示した。

第 9 図で Power ON から約 30 分で 16 V まで降下し約 3 V の電圧降下が確認された。この試験とは別に長時間発信させ電圧降下を測定し 15 V になるまで約 2 時間かかった。実際に観測する場合、30 分以上連続に発信させることはまずない。しかしこの試験はゾンデの周囲温度が一定(室温)であるという条件で成立する。そこでゾンデの周囲温度を変化させ温度ドリフトの試験をせざるをえなくなり測定してみた。ゾンデを収容箱から出し、周囲温度を変化させ周波数の測定をした。周囲温度は 25°C から 6°C まで変化させ、任意の Range を設定し 3 点の周波数を測定した。この試験でも Span に大差



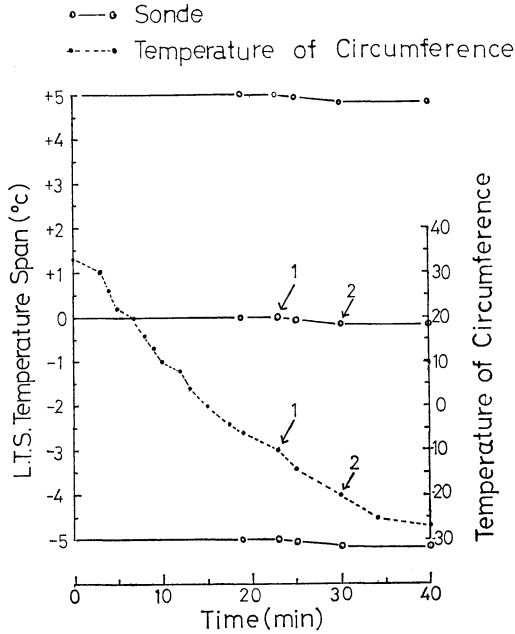
第9図 電源電圧の降下試験結果



第10図 温度ドリフト試験結果

はなく温度に比例し平行移動する傾向がみられた。この時の周囲温度を X 軸に、周波数を Y 軸とし図化したのが第 10 図である。

周囲温度が 25°C から 6°C, 19 deg 変化して周波数は約 6 HZ 変化し、温度に換算すると約 0.6 deg に相当する。収容箱に入れた場合、収容箱の断熱(保温)効果により温度ドリフトは当然小さくなる。実際の程度になるか測定した。測定方法は、恒温槽の中に収容箱に



第11図 環境温度試験

入れたゾンデを入れ、恒温槽の温度を下げた。ゾンデの情報は受信設備によって受信し記録器で記録した。この記録から温度ドリフトを求めたが、その時のゾンデは任意の1 Rangeを設定した。この Range の中で5 deg 幅に相当する標準抵抗器3本をつけ、3点のずれと恒温槽内の温度の関係を求めた。試験中のゾンデの温度指示値をY軸左側(L.T.S Temperature Span)に恒温槽内の温度をY軸右側(Temperature of Circumference)、測定に要した時間(Time)をX軸にとり第11図に示した。

なるべく観測時の環境変化に近づくようにしたが、恒温槽の性能も関係しやむをえなかったが、試験開始(Power ON)後23分でドリフトがはじまり、その時の恒温槽内部の温度は $+33^{\circ}\text{C}\sim-10^{\circ}\text{C}$ の約43 deg 下がっている(図中1参照)。また30分後にはドリフトは止まり(図中2参照)以後一定となっている。一方Spanはほとんど変化していない。第10図と比較すると、発泡スチロールの収容箱はすぐれた断熱(保温)効果を示していることが分る。実際に観測する場合、気球の上昇速度を200 m/minと仮定しても2000 mの高度まで約10分であり、地上試験などの時間的余裕をみても20分以内に観測は終了する。この他、何回か室内実験をしたが、Power, ONして直ぐに温度較正をすると温度ドリフト、

電源電圧降下によるドリフトは大きくなる傾向がある。5分程度通電し、しかも収容箱にフタをした後温度較正をすれば各ドリフトはかなり改善され0.1 deg 以下になる(昭和47年3月の室内実験で2時間発信して、ドリフトがないという結果が得られている)。

5. LTS-72 型の規格

新型ゾンデの開発条件に旧型ゾンデの受信設備を使用する考えがあり、使用する電波帯は400 MHzとした。発信の方式は“レッヘル線回路”により404.5 MHzを発振し、低周波発振回路の出力で搬送波発振をON, OFFするA₂変調方式とした。またアンテナは $\frac{1}{2}\lambda$ ダイポールを使用し、電圧き電を行っている。出力については20 mWの実験を開発以前から行っていたので、20 mWとした。実験の一例を述べると、300 grの気球に出力を20 mWにした試作ゾンデを懸吊して約200 mまで上昇させ保留した。受信感度の実験であるため、受信装置を車にのせて水平距離をとり受信の様子をみた。実験の結果は水平距離が8 km位になっても十分受信できた。実際の場合、高度角はもっと大きくなるので20 mWの出力で十分と判断した。以上のような試作、実験過程をへて第7表に示す規格の新型低層ゾンデ“LTS-72 型低層ゾンデ”を完成させた。

第7表 LTS-72 型低層ゾンデ規格

1) 測定要素及び精度

温度	$-20^{\circ}\text{C}\sim+40^{\circ}\text{C}$	精度 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 感度 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$
高度	1040~950 mb の間は約 10 mb 毎に高度マーク 950~750 mb の間は約 30 mb 毎に高度マーク 現地検定を条件に ± 1 mb の精度	

2) 送信器

搬送発振周波数	$404.5 \pm 2500 \times 10^{-6}$ MHz
空中線電力	20 mW
変調周波数	10~200 HZ
電波型式	AM (A ₂)

3) 電源

積層乾電池	18 V (006 P×2)
-------	----------------

4) 寸法及び重量

寸法	$(145 \pm 10) \times (150 \pm 10) \times (125 \pm 10)$ m/m
重量	410 g 以下 (LTS のみ)

5) パラシュート気球

パラシュート	和紙製 $\approx 1 \text{ m} \cdot \phi$ のパラシュート
気球	300 gr 赤色バルーン

本器は電波法による型式検定合格品であり、合格番号を第8表に示す。

第8表 型式合格番号

項 目	内 容
型 名	LTS-72 型低層ゾンデ
型 式 名	MS 3 MES 400 T 0.02 A-1
型式検定合格番号	M 72001
型式検合格年月日	昭和47年5月2日

LTS-72 型低層ゾンデの構成は第9表のようである。

第9表 LTS-72 低層ゾンデの構成

項 目	内 容	数	重量
収 容 箱	発泡ステロール製	1	41gr
本 体	電子回路	1	111
温度計感部	容器入検定表付	1	2
高 度 計	ケース入	1	81
ア ン テ ナ	1/2λ ダイポール	1	6
パラシュート	和紙製	1	60
電 池	006 P 9 V	2	63
気 球	赤色 300 gr ゴム気球	1	342

なお写真6に構成部品を示す。

6. 高度の計算

高度の算出は高度信号と温度の情報をもとに求める。算出に使用する式は、ラプラスの公式で(3)式に示す。

$$h = 18400(\log B_0 - \log B)(1 + 0.00367t) \dots \dots (3)$$

一般に知られた公式であるが、式中 B_0 は低所の高度マークの指示気圧 (mb), B は高所の高度マークの指示気圧で (mb), t は2高度間の平均温度である。これらを代入し高度マーク間の高度差 h (m) が求まる。観測記録を処理する場合、まず地上の較正值から高度マークの時の温度を求め、2高度の平均温度を t の値として用い、気圧検定表から B_0, B 値を代入している。平均温度については多少問題があるが、温度の減率が一定の場合以外は誤差が大きくなる。不都合の生じるような時は、高層観測指針にあるような方法で t を求めている。観測現地では卓上計算器 (SOBAX) でプログラムを組んで温度、高さを求めると便利である。

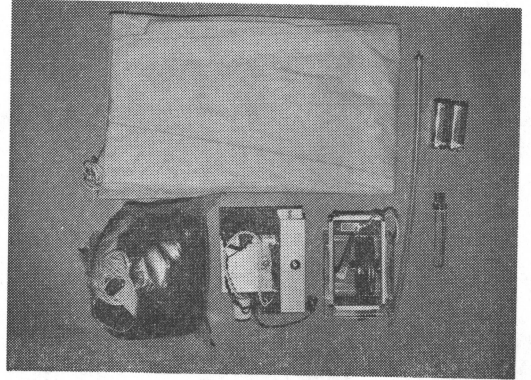


写真 6-1 LTS 構成部品

左上より、パラシュート、アンテナ、電池、気球、本体、高度計、温度計感部

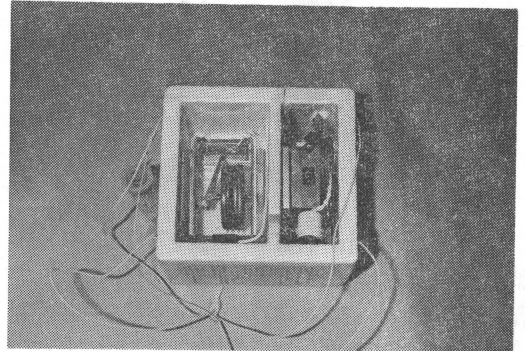


写真 6-2 収容箱内の高度計、本体

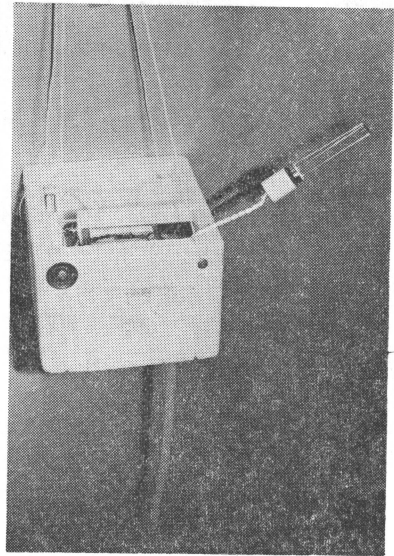
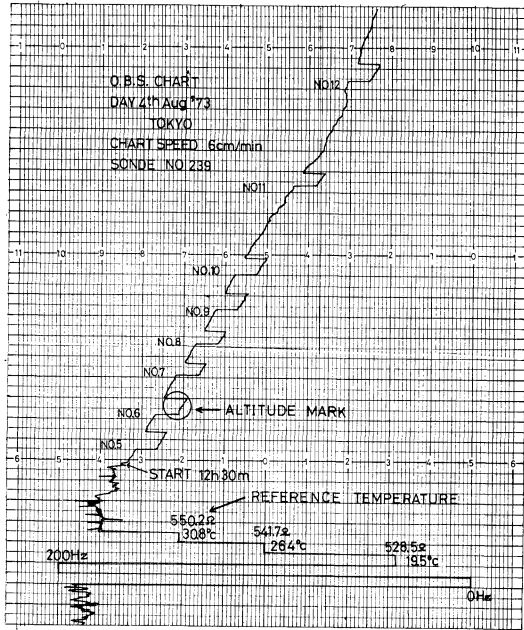


写真 6-3 観測前、準備中 LTS アンテナと温度計感部が外に出る (フタを外した場合)。

一例として第12図に示すような記録紙の記録を解析し温度、高さを求め第10表に示した。



第12図 観測記録

第10表 観測例 (4th Aug, 1973, 東京. 放球時刻 12 h 30 m)

高度マーク No	温度 °C	平均温度 °C	高度計気圧 mb	高度差 m	高さ m
No 5	33.1	—	1000.1	47	47
No 6	32.2	32.7	988.3	106	153
No 7	31.1	31.7	977.2	101	254
No 8	30.0	30.6	965.5	107	361
No 9	29.0	29.5	954.2	104	465
No 10	28.0	28.5	943.0	104	569
No 11	24.9	26.5	909.9	313	882
No 12	22.2	23.6	877.7	313	1195

むしろ、高度マーク時の温度だけではなく、必要な高さの温度は、記録紙の記録を比例配分することにより求めることもできる。この時の地上気温は、乾球温度 35.2°C、湿球温度 29.4°C、気圧 1005.3 mb であった。

7. 気球

気球の上昇速度は充てんするガス（水素又はヘリウム）の量で決まるが、高度が正確に求められるため、およその上昇速度を与えるガスの充てんでよい。ガスの量

は(4)式で求めた値に、パラシュート(WP)、LTS-72型低層ゾンデ(Ws)の重量を加えた値を目安としている。

$$V = 46.02 \left[\frac{L}{Q^{1/3}} \right]^{1/2.182} \dots\dots\dots (4)$$

V = 気球の上昇速度 (m/min)

L = 浮揚力 (gr)

Q = L + 気球の重さ (gr)

(4)式の値は表になって市販³⁾されており、測風気球観測常用表などにある。(4)式の値を第11表に示した。観測には L₁ の値を使用している。

第11表 浮揚力 (300 gr 気球)

	m/min	m/min	m/min	m/min	m/min
V	150	200	250	300	350
L	98 gr	195 gr	347 gr	571 gr	885 gr
L ₁	505 gr	602 gr	754 gr	978 gr	1292 gr

$$L_1 = L + \text{パラシュート重量}(Wp) + \text{ゾンデ重量}(Ws)$$

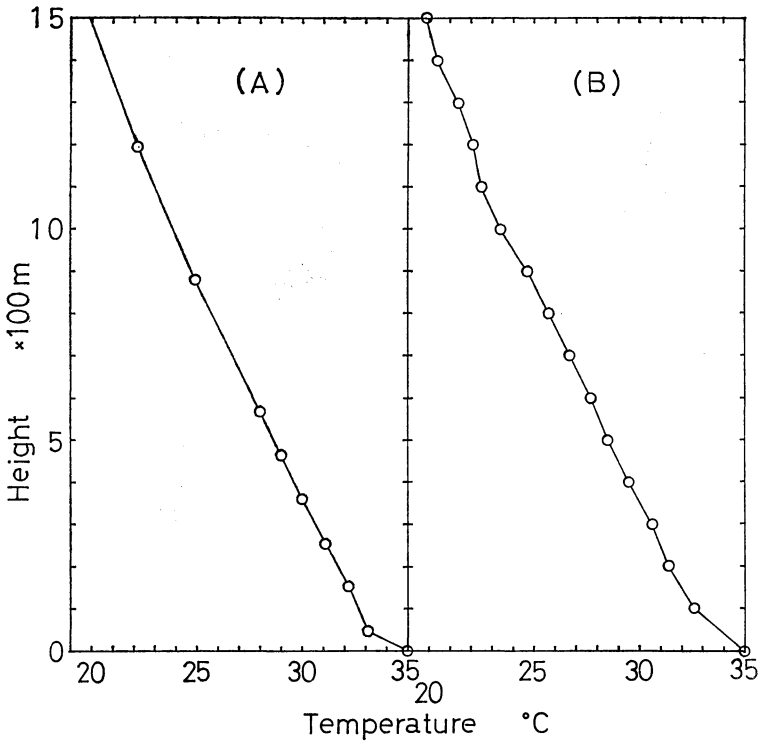
この他、ゾンデ観測をする場合、航空機に対する安全性の点で、法的な根拠はないが航空局に対し1ヶ月前に届けている。詳しくは地元の飛行場または航空局に問い合わせるとよい。これらを考慮して現在はずべて赤色の気球に統一している。

LTS-72 型低層ゾンデについてまとめると次のようになる。

1. 温度の測定は種々の条件を考慮し、精度は ±0.2 deg Response 0.2 sec 以内である。
2. 高さの測定には、空ごう式の気圧高度計を使用し、現地で検定することを条件に精度 ±1 mb 以内である。
3. 残っている問題については、現在も検討中であるが、実用には十分使用できる。

8. 測定結果

第12図に LTS-72 型低層ゾンデの記録例を示したが、その整理結果を第13図に示す。読取りは各高度マークごとの気温と高さ、そして必要に応じて決定する特異点での気温について行なうのが普通である。この場合特異点の高さは自記紙上で高度マークの高度値から内挿される。又特に必要な場合には 100m 毎、50m 毎、もしくはそれ以下の高度間隔毎の気温を読み取る場合もある。この場合も各高さは自記紙上で高度マークの高度値から内挿される。図において (A) は前者の例、(B) は同じ観測の 100m 毎の後者の読取りの例である。



第13図 観測例 Aug. 4, 1973, Tokyo

この節では初期の低層ゾンデの開発の観測目標であった逆転層を LTS-72 型ゾンデが捉えた場合の観測例を示し、次いで昭和47年の夏に東京で行なった1カ月間というまとまった期間の観測結果を紹介する。

9-1. 逆転層

大気中の気温の逆転層 Inversions とは 通減率 γ が正 ($\gamma = \frac{\partial T}{\partial Z} > 0$) の大気層を呼び、大気が非常に安定な層である。一般に鉛直方向に向って γ の値が負から正に変わる高さを逆転層の下面、再び γ の値が正から負に変わる高さを逆転層の上面と呼び、その間の高さを逆転層の厚さと呼ぶのが普通である。逆転層は様々の形で、又様々な原因で形成されるが、LTS-72 型低層ゾンデの観測によって得られた逆転層を紹介してゆく。

(1) 放射逆転 Radiation inversion

晴天下の夜間などに地表面の放射冷却によって形成される逆転層。第14図に放射逆転の形成初期の観測例を示す。この逆転は最も一般的に形成される逆転層の一つで、上空に放射冷却を妨げる厚い雲などがある場合以外にはほとんど夜間には地上付近に形成される。

(2) 上層逆転 Free-atmosphere inversion 上層に形成される逆転。

(イ) 沈降性逆転 Subsidence inversion

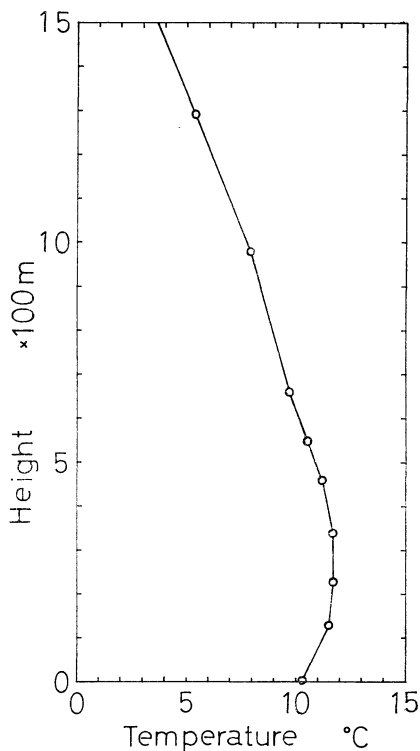
高気圧の勢力内では上空で空気がゆっくりと下降している。この下降している空気は断熱圧縮によって昇温する。このために上空のある高さに逆転層が形成される。これを沈降性逆転という⁴⁾。第15図に沈降性逆転を捉えた観測例を示す。地上900mから1,200mまで典型的な逆転層の形成が明らかである。

(ロ) 前線性逆転 Frontal inversion

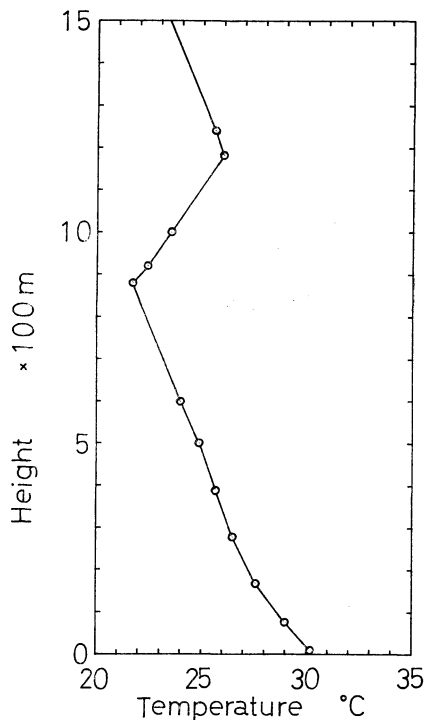
寒冷前線の通過直後に現われる逆転で、冷たい空気塊に押し上げられた暖気が上空で逆転層を形成する。第16図に前線性逆転の観測例を示す。

9-2. 昭和47年7月18日—8月18日, 東京

昭和47年の夏、日本気象協会は環境庁の依頼により、「光化学反応による大気汚染立体調査」の一環として、LTS-72 型低層ゾンデによる東京上空の気温鉛直分布の観測を約1カ月間に渡って行なった⁵⁾。観測地点として東京都千代田区神田錦町の日本気象協会東京本部付近の



第14図 接地逆転の測定例 OCT. 1973, 8 p.m



第15図 沈降性逆転の測定例 Aug. 1972, 9 a.m

ビルの屋上を用い、7月18日から8月18日まで毎日9時と13時に観測を行なった。この内気象条件によって、9時の観測の分が6回、13時の観測の分が8回欠測したため、結局この間の観測日数は9時が26日、13時が24日間であった。

以下にこの間の結果を統計したものを示す。

(1) 逆転層下面の高さ

9時の観測結果について測定精度、現象の大きさを考慮し厚さ100m以上の逆転層を選び出し、それらのすべての逆転層の下面の高さを地上から高さ1,500mまでのものに限って統計した。第17図にその結果を示す。

夏季の9時A.Mには接地逆転はなく、最も低い逆転が400m~500mの間に観測された。50%出現頻出値は1050mという結果で高さ1500m以下に逆転がある場合には平均して1000mくらいが多いということが示される。

(2) 平均気温鉛直分布

9時の観測結果についてすべての観測例を100m毎に読み取って、高さ別に平均して平均値と標準偏差をとった。この結果を第18図に示す。

気温てい減率 $\gamma = \left(\frac{\partial T}{\partial Z} \right)$ は下層程大きく、上層へ行く程小さくなっている。最初の500mでは $-1.0^\circ\text{C}/100\text{m}$ であったものが、500~1000mでは $-0.5^\circ\text{C}/100\text{m}$ になり、最後の500mでは $-0.3^\circ\text{C}/100\text{m}$ であった。標準偏差は地上近くより上層の方が大きくなっているが、これは上層へ行くと若干測定値の数が少なくなったためであろう。

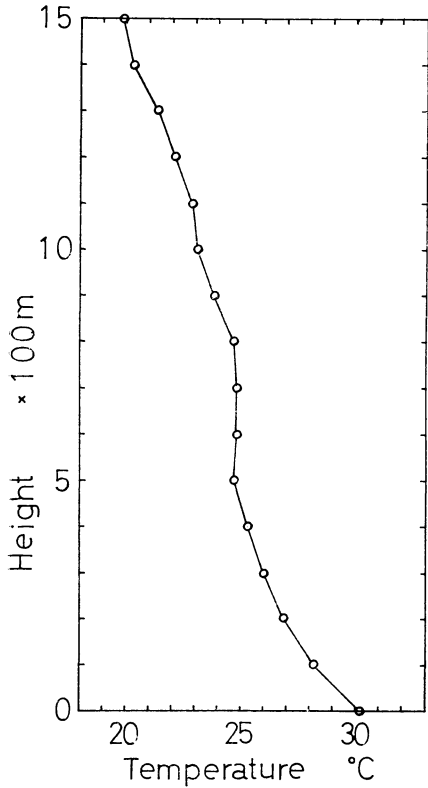
(3) 気温鉛直傾度の出現率

第19図に気温てい減率についての統計を示した。この気温てい減率について(2)でやったのと同じように地上から1500mまでを500m毎に3つの層に分けて、9時の観測のすべての場合について値を出し、出現頻度を統計した。

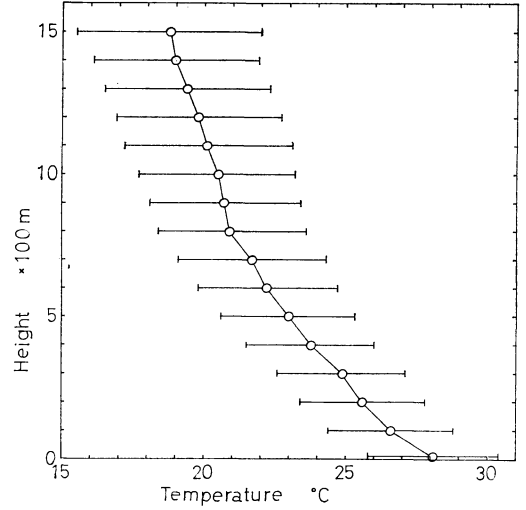
この結果は(2)で得られたのと同様に、地上から500mの最初の500mでは気温てい減率が大きい値の出現が多く、二番目の500mでは気温てい減率のより小さい値の出現が多くなり、最後の500mの層では気温てい減率の小さい値の出現が最も多くなっている。

(4) 気温鉛直分布の時間差

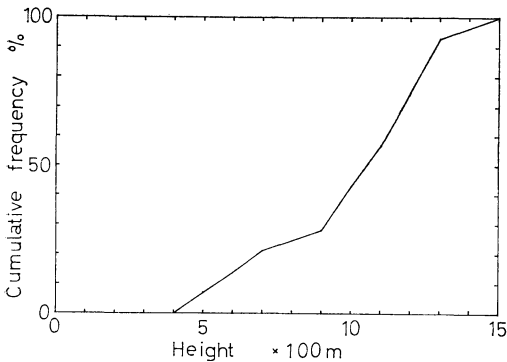
13時と9時の観測の共通にある日について、各100m



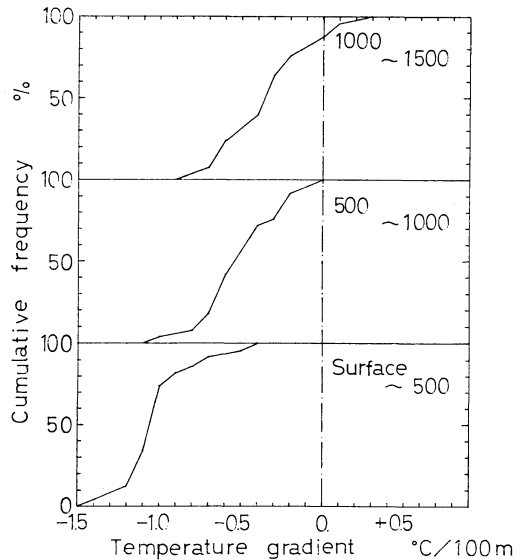
第16図 前線性逆転の測定例 Aug. 1973, 9 a.m



第18図 夏季における9 a.m の平均の大気温度の鉛直分布



第17図 1972年7月18日～8月18日における9 a.m における逆転層の底の高さの統計結果



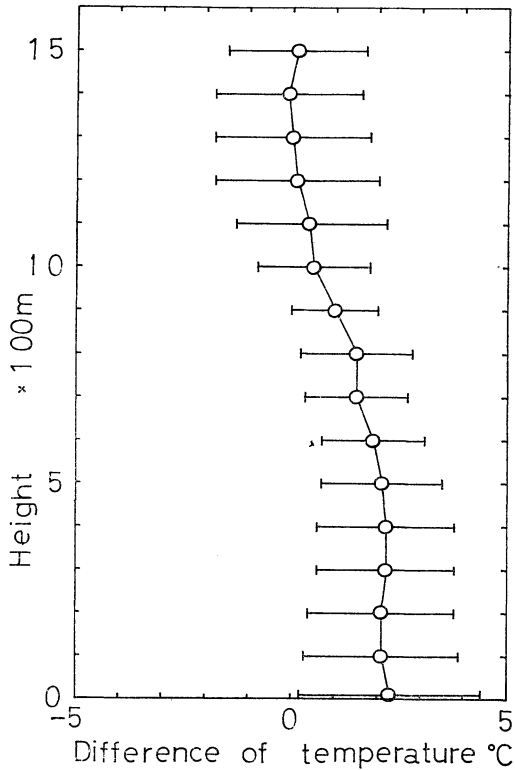
第19図 夏季における9 a.m の温度傾度の統計

毎の気温を読み取り、13時の気温から9時の気温を引いた値の平均値と標準偏差をとった。この結果を第20図に示す。この結果、地上では平均2.3°Cだけ13時の方が高いのに対して、500mでも平均2.1°Cとおおよそ同程

度、これが1000mになると0.5°Cとなり、1300mで平均が0°Cとなった。このあたりが気温日変化の影響が顕著に及ぶ上限であろうと考えられる。標準偏差は900m付近が最も小さくなっている。

10. 結論

LTS-72 型低層ゾンデの開発の経過、実験、測定例についてのべた。若干基礎実験の不十分な点もあるが、そ



第20図 9 a.m と 1 p.m における温度差の平均

れらについては順次検討を加えて行く予定である。測定値はほぼ実用性を満足していると考えられる段階にあ

る。

謝 辞

低層ゾンデ LTS-72 型の開発にあたり、明星電機株式会社守谷工場の武本工場長をはじめ第一技術課諸氏の協力を紙上をかりて厚くお礼申します。

また、本器の開発にあたり、淵本一（当時気象協会、相談役）、渡辺清光（気象協会、計測測器課長）を始め多くの方々の御指導、御協力を載いた。本報告にある多くの基礎的計測を担当した吉川敏男、高中康恵両氏の功も大きい、ここに記して深く謝意を表します。

最後に本稿は、気象大学校、駒林誠教授の適切な御助言があつて出来たものであり、深く感謝します。本稿が低層観測の今後の進歩に役立てば幸いである。

文 献

- 1) J. Kobayashi, F. Kitahara, S. Ohta and H. Naito Dec, 1966. Reprinted from "Papers in Meteorology and Geophysics" Vol. XVII No. 4. 1966. A lower Troposphere Radiosonde.
- 2) 岡田芳隆：1973. ゾンデ用空こう (I), (II). 天気, Vol. 20, No. 5 (21~88), No. 6 (21~25).
- 3) 気象庁：1973, 測風気球観測常用表. p. i~iv.
- 4) R.E. Munn: 1966, Descriptive Micrometeorology. Academic Press New York and London.
- 5) 環境庁：昭和 47 年度業務委託報告 1974；光化学反応による大気汚染立体調査報告. 日本気象協会.