

気象ロケット観測について —綾里における観測を中心として—*

清水正義** 五月女敬太郎*** 鈴木剛彦****

1. はしがき

現在では、気球による高層観測が世界中に普及しているが、この気球による観測到達高度は平均で25~30kmぐらいで、特別高価な気球を使わない限り、約30kmというのが限界と思われる。

他方、高さ70~80kmより上で起こるオーロラ・夜光雲・流星などの発光現象は地上から観測できるし、電離層も地上から電波を放射することにより観測できるため、19世紀の終わり頃から高さ約80kmより上の現象の研究が地球物理学者によって盛んに行われるようになった。

このような研究の結果、高さ約80kmより上の現象が太陽活動との関連で論じられるようになったにもかかわらず、また気象現象が究極的には太陽活動に支配されているはずであるにもかかわらず、気球により到達することが難しく電離現象や発光現象もない中間の領域の観測があとまわしとなり、太陽活動と気象現象との関係の結びつけが間接的とならざるを得なかった。

それでは、この中間の領域の気象観測はどのように発展してきたか？ その発展過程は次のように三つに分けることができよう (Craig, 1965)。

第1期は1920年代から1940年代の中頃までで、流星跡や音の異常伝播現象を地上で観測して、高さ約50kmに気温の最大層が、高さ約80kmに気温の最低層があるという推定がされたり、夜光雲の動きから風に関する情報を得ていた。

第2期は、1940年代後半から1957~58年のIGY (国際地球観測年)までである。1944年にドイツで成功したV2号ロケットの技術は、第二次大戦後すぐアメリカにわたり、1946年にはV2号による上層大気の観測が成功している (ちなみに、V2号ロケットの大きさは長さ14m、機体の直径1.65m、重さ13トン、いま日本で一番大きい東大宇宙研のMロケットは長さ23.6m、直径1.4m、重さ44トンである)。第1期に地上からの観測で推定した上層の気温の鉛直分布は、こうしたロケットによる直接観測により、定性的には正しかったことが認められたが、定量的にはもっと正確な値に修正された。またレーダー技術の発達により流星跡のイオンを追跡してその高さにおける風の知識が得られるようになった。

第3期はIGYから現在までで、比較的安価な小型ロケットが開発され、数多くの地点でより頻繁な上層大気の直接観測が行われるようになった。この間に、観測機器を小型化する技術が進歩したことは観測ロケットの小型軽量化——一機あたりの費用の軽減——観測回数を増大を促進し、観測種目も、気温・風 (あるいは密度とか気圧)のみならず、大気の組成・電離現象・地磁気・太陽からの種々の放射強度の測定など、地球物理的現象の全てにわたるようになった。

2. ロケットによる高層気象の観測

2.1 中間圏上部の観測法

上層大気の気温・気圧または密度を飛行中のロケットから測定するのは決して簡単ではない。高速度で飛ぶロケットの表面では空気は圧縮または摩擦によって加熱されているため直接気温を測ることは容易でない。ロケット表面の動圧は比較的正確に測れるが、これは周囲の大気の静的な気圧に換算しなければならない。初期の観測はこうして行われたが、この方法は今では100km 以高

* Meteorological Rocket Observations, referring to Those at Ryori in Japan.

** M. Shimizu 気象庁予報部予報課

*** K. Saotome 気象庁観測部高層課

**** T. Suzuki 気象庁観測部南極事務室

の観測に使われているだけで、上部成層圏と中間圏の測定には、ロケットから物体を放出してその落下を観測することにより空気の密度または風を計算する方法が採用されている。ロケットから放出する物体としては、落下球・発音弾・人工発光雲などがある。

(a) 落下球法

ロケットの最高点付近で球を放出すると、この球は空気密度による抵抗を受けながら重力によって落下する。球の抵抗係数を風洞実験によって正確に求めておけば、球の落下速度から空気抵抗、したがって空気密度がわかり、さらに気温も計算できる。放出する球としては小型送受信機を入れた直径1.2mのナイロン球や、加速度計のはいった直径約18cmの固体球が使われた。

(b) 発音弾法

上昇途中のロケットから、高さ数 km ごとに発音弾を幾つか放出し、次々と爆発させる。この爆発音を地上で一列に並べた幾つかのマイクロホンで捕捉し、一つ一つの爆発音の到着時刻・到着方向（方位と高度角）を観測する。音の伝播速度は気温（絶対温度）の平方根に比例し、音が風下に伝わる時は音速が早くなる（逆向きの時は遅くなる）から、これらの性質を利用して二つの爆発間の層の平均気温と平均風とを求めることができる。

(c) 人工発光雲の追跡

晴れた日の日出直前または日没直後にロケットからナトリウム蒸気を放出すると、この高さではまだ太陽が照ってナトリウムが発光し、夜空をバックにしてこの発光雲が風に流されるのが写真撮影できる。ナトリウム蒸気のほか、太陽光がなくても光る閃光物質や、多段ロケットの燃料排気も使われたことがある。この写真撮影から算出する風の資料は風の鉛直分布の微細構造（乱れ）を知るのに使われる。

2.2 気象ロケットによる観測

前節で述べたロケット観測は初期のロケット観測に比べて安くなったとは言え、定期的な観測を行うにはまだ経費がかさみ、観測後の計算も複雑であるため、特別観測として時々行われるだけで、この意味では研究観測または実験観測と言えよう。

しかしながら、気象観測の重要な側面は観測網を形成する複数の観測点で規則的に観測を継続することであり、このために使われるのがもっと安価（と言っても気球によるゾンデ観測にくらべて桁違いに高価であるが）で、小型な気象観測専用のロケットである。

各種の気象ロケットに共通して言えることは、ほとんどが一段式で、重さ数 kg 以下の物体（測定器）を積んで高さ約50~80kmに達し、最高点付近でロケットからこの物体を放出し、この物体が落下する際に各高度の風や気温を測定するようになっている。

風の測定のためには、放出物体の落下速度を空気抵抗を利用して十分おそくすればよい。こうすればこの物体は風に流されるので、この流される時々刻々の位置を地上の追跡装置で測定して各高さの風向風速を算出することが出来る。この意味で、ゆっくり落下する物体は風の感部であり、追跡装置が風の測定器とも言えよう。このような風の感部としては次のようなものがある。

無数のアルミの細い線やアルミ蒸着したナイロン片——チャフという——をロケットから放出し、チャフが風に流されるのを地上のレーダーで追跡する。しかし、このチャフは落下するにつれて拡散するのでレーダーの目標としてはぼけてくる。

ロケットから放出されて自動的に膨脹するプラスチック気球（直径約1m）の内部にレーダー反射板を入れたロビンという装置も、風の感部として使われた。

チャフやロビンでは風の観測だけしかできないが、パラシュートを風の感部として使えばこのパラシュートで気温の感部とその情報を伝達する発信機を緩降下させることができる。気温感部を緩降下させることは、空気密度の小さい上部成層圏より上でなるべく正確に各高さの気温を測るためにも必要である。今後は、このように気温感部と発信機をパラシュートで緩降下させ、あわせて風の測定を行うというのが気象ロケットの主流となるだろう。

アメリカでは金属塗布したパラシュート（あるいは緩降下中の振動を少くするように工夫したスタートと呼ばれる気球とパラシュートとの合いの子のようなもの）を使ってレーダー追跡用の目標とし、気温感部には直径0.25mmのビードサーミスタを使っている。フランスの気象ロケットの気温感部は直径0.005mmの金メッキしたタングステン線を使っている。日本の気象ロケットについては次節で述べる。

3. 日本の気象ロケット観測

日本の気象ロケット MT-135型（MTは気象用、135は胴体直径135mm、を意味する）は、東大宇宙航空研究所と気象庁との協力のもとに開発されたもので、1964年以来、東大の内之浦宇宙空間観測所で発射実験がくり返され、1969年にはアメリカのワロップス島でアメリカの

気象ロケット「アークス」との比較観測が行われて、その実用性と観測資料の compatibility が確かめられた。

その後、日本で気象ロケットによる定常観測を実施するためには専用の発射場が必要なことから、岩手県三陸町綾里(りょうり) (39° 02'N, 141° 50'E) に気象ロケット観測所を設けることになり、この設置と併行して、定常的に発射をしてもロケットの落下による危険を最小限におさえるため、MT-135 P 型への改造が行われた。このP型という名前は、ロケットモーターの燃えがらもパラシュートにより緩降下するように工夫されていることからつけられた。

1970年4月17日付けで、気象ロケット観測所が正式に設置され、約3か月の準備期間を経て、同年8月5日からルーチンとしての気象ロケット観測が開始された。以来、同年中は隔週1回、1971年1月からは毎週一回の観測が続けられている。週一回というのは、気象ロケット(測定器を含む)が消耗品としては非常に高価なことから、観測の対象となる約20~60kmの気象変化の規模が大きいことから割り出された回数である。このような週一回位しか行われない気象観測は、なるべく水曜日を中心

にして行うようにとの国際的な申し合わせに従って、ロケットの発射は毎週水曜日の午前11時から11時30分の間に行われ(この30分は発射猶予時間であって、観測に要する時間ではない)、水曜日に天気その他の条件が悪くて発射できないときは翌木曜日の同時刻に発射される。

世界の気象ロケット観測所(第1図)の大部分がアメリカ大陸上に偏まっていることを考えれば、気象ロケット資料を用いた超高層天気図を書く上において、日本で木曜日に観測することは、アメリカの気象ロケット観測との同時性が(水曜日よりも)むしろ良いくらいである。第1図から、日本の綾里が極東では唯一の気象ロケット観測所であり、成層圏循環で重要な役割を果たしているアリューシャン高気圧の監視のためにも、綾里の観測資料が貴重なことは容易に想像されよう(4.2節参照)。

3.1 MT-135P ロケット

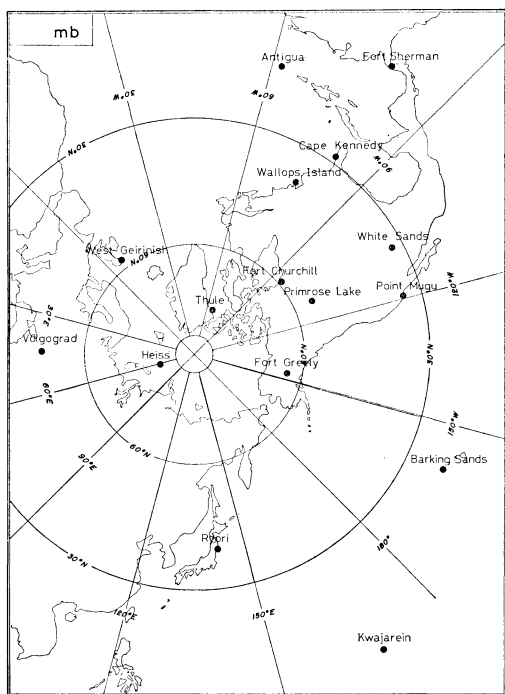
MT-135P ロケットの主要諸元を第1表に示す。

次に第2図、第3図を参照しながら MT-135P による観測の方法を説明する。発射台は長さ7mのレール型である。発射管制装置のスイッチにより発射台上に乗せられたロケットに点火すると、ロケットモーター内の固

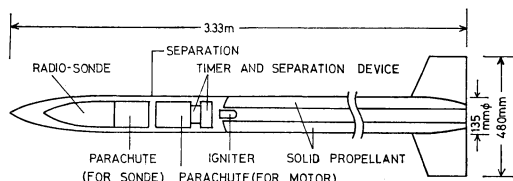
第1表 MT-135P の主要諸元

名 称	MT-135P
形 式	一段式、固体燃料
全 長	3.33m
直 径	135mm
全重量(発射時)	68kg
搭載機器重量*	2.7kg
燃焼時間	10.2sec
到達高度	50~60km

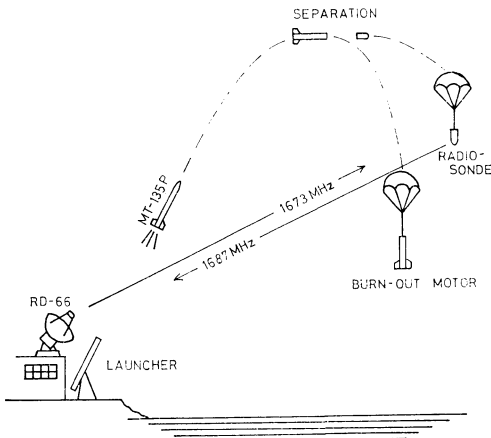
* 測定用緩降下物の全重量で、ラジオゾンデ、パラシュートおよびそのコンテナを含む。外国文献などで payload と書かれているものにはモーター部以外のノーズコーン、切断装置などを含む場合があるから比較には注意を要する。



第1図 北半球の気象ロケット観測所(現在、かなり定常的に観測資料を入手し得る地点)。



第2図 日本の気象ロケット MT-135 P の概念図。



第3図 日本の気象ロケット MT-135P の観測システム。

体燃料が急速に燃焼し、モーター内の圧力を高め、この高圧ガスが後尾のノズルから噴射されてロケットが飛び出す。燃焼が続く約10秒の間、ロケットは加速され続け、燃焼終了時には高さ約7kmで最高速度約1.3km/secになる。これ以後はロケットは放物線に空気抵抗の加わった径路をとりながら上昇を続け、発射後約110秒で最高点に達する。発射後約95秒で電気タイマーが働いて頭胴部をモーター部から切り離し（第1次切断）、その直後に一つのパラシュートが放出されてモーター部（燃えながら、重さ約30kg）を吊るして緩降下する。同時にノーズコーンからラジオゾンデが放出され、第1次切断後約17秒でもう一つのパラシュートが放出されて（第2次切断）、ラジオゾンデを吊るして緩降下する。発射時からずっとゾンデの周囲に収容されていた温度センサーは第1次切断後約22秒でゾンデ側壁から15cm程突き出される。ラジオゾンデの降下速度は高さ50kmで約80m/sec、30kmで20m/sec、地面近くで2m/secであり、モーター部燃えがらの落下速度はこの約3倍である。

3.2 ロケット用エコーゾンデ ES64B-P

MT-135P ロケットに搭載されるゾンデはES64B-P型と呼ばれるエコーゾンデ（トランスポンダー）で、地上追跡装置からの電波（1673MHz）に搬送される4msec毎のパルスに応答して2つのパルスを1687MHzの波で返信するようになっている。このうち、第1の返信パルスは追跡装置からゾンデまでの直距離を与え、第1と第2のパルス間隔が温度情報となる。

温度センサーは直径0.02mm、長さ18cmの鉄・ニッ

ケル合金で、温度が30°Cから-80°Cまで変わる時、電気抵抗が150Ωから100Ωまで変わり、これに対応して2つの返信パルスの時間間隔は850μsecから350μsecまで変わるようになっている。

地上からの送信パルス（4msec毎）に対して直距離と温度の情報が返信されるから、実際には連続的な情報が得られると考えてよい。しかし、30秒毎に150Ωと100Ωとの2つの基準抵抗信号がそれぞれ約2秒挿入されて観測値が中断される。（一般になるべく安価で軽量であることが必要なゾンデでは、地上装置で可能なような完全な電気回路を構成するよりも、基準信号を情報信号の間に挿入することにより回路特性をチェックして計算時に補正する方法がとられる）。

地上で受信された直距離および追跡装置からゾンデを見た方位角と高度角は一定時間毎にデジタルに印字され、さらにアナログで連続記録される。ゾンデからテレメータされた温度信号および30秒毎の基準抵抗の信号はアナログで連続記録される。これらの資料から高度、風向・風速、気圧（密度）などが計算されるが、計算法の概要は次節で述べることにする。

ロケット用ゾンデで特に注意しなければならないことは、発射時、上昇時、切断時などの振動・衝撃に耐えるような構造と部品配置でなければならないこと、地上の1/1000以下の空気密度の所でも電気回路に放電を生じたり、注液電池の液が吹きこぼれたりしないよう、気密に保たれること、などである。このため、一つ一つのゾンデについて、普通の状態での動作試験のほか、一定の振動・衝撃・気密試験を数回行い、これら全てに合格したもののだけが使用される。

3.3 資料計算法

3.3.1 風向・風速

一定時間間隔で印字された直距離・方位角・高度角のうちから高度間隔が1~2kmになるものを抜き出す。追跡誤差は直距離については50m以下、方位角・高度角については0.1度以下と考えられる。

ゾンデの海拔高度は直距離と高度角の他に追跡装置の高さと地球曲率を考慮して計算する。ゾンデの水平距離はゾンデの高さでの水平距離をとる。各高度における風向・風速はゾンデの位置の時間微分として得られる。最高点付近でゾンデが放出されてからパラシュートの制動効果が現われるまでの資料は、ロケットの弾道飛行の影響が残っている可能性があるため資料としては捨てた方がよい。

3.3.2 気温

温度記録は、高度間隔が約1~2km になるような時間間隔の点と、これらの点を内挿した値よりも 2°C 以上外れそうな特異点について読みとる。これらの読み取り値および2つの基準抵抗の信号記録と、発射前に用意した温度センサーの抵抗対温度の検定曲線とを使って、“生の温度”を計算する。

こうして得た“生の温度”はセンサーの温度であって、高さ約40km より上では気温からかなりかけはなれたものである。この差は次のような理由で起こるもので、“生の温度”はこれらの誤差の補正を行って“気温”に換算する。

(a) 空力加熱：温度センサーと空気との相対的な動きによる摩擦熱で、両者の相対速度の2乗に比例する。パラシュートが効いて水平方向の風に乗っている時は、落下速度を相対速度にとってよい。しかし、パラシュートが効き始めるまでは、ゾンデの水平方向の動きと風との相対速度と落下速度との合成ベクトルを採用すべきであるが、この間の風がわからないのが普通であるから、パラシュートが効いてからの風を上方へ外挿して近似するしかない(もっとも簡単には、一番高い所の風の観測値が、それより上でも同じであると仮定する)。

(b) 日射による加熱：これが太陽の高度角、したがって観測時間によって変わることは言うまでもない。その他、センサーの日射に対する吸収率にもよる。

(c) ジュール加熱：温度センサーの電気抵抗を測るための電流による加熱である。

(d) 放射による冷却：センサー自体が持つ温度によって長波長の放射を出すことによる冷却である。

(e) 空気との間の熱伝導による冷却：以上のうち(a)の空力加熱が一番大きく、センサーの温度は気温より高くなるのが普通で、したがって熱伝導によって空気に熱を奪われる。

これらの補正計算の詳細は Yata (1970) を参照されたい。(a)~(e) はどのような気象ロケット用温度センサーについても言えるのであるが、その値は、センサーの材質・形状などによって異なり、MT-135P 用のセンサーでは、高さ50km で空力加熱が $6\sim 7^{\circ}\text{C}$ 、日射による加熱が約 2°C で、他の影響は 1°C 以下であり、高さ40km 以下では何れも無視できる。

ただ問題は、これらの補正量を計算するには気温や空気密度をあらかじめ知る必要があるのに、これらの量は補正がすむまで未知数そのものであるということであ

る。したがって、まず気温を生の温度または標準大気の温度で近似することによって補正量を出し、この補正量を生の温度に加えた第二近似でまた補正量を出すという逐次近似を行う。実際は2~3回のくり返しで $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 以内に収束する。

3.3.3 気圧

普通の気球によるゾンデ観測では、気温と気圧を測って、両者から高さを計算するが、気象ロケット観測では、直距離と高度角とから高さを出し、この高さから気圧を算出する。また、気象ロケット観測では、最高点付近(あるいは気球が風に乗る高さ)から高さ15~20km まで観測するのが普通で、綾里では仙台における最寄り時間の高層観測による70mb の高さを基準にして、それより上の気圧を算出している。

3.3.4 観測資料の発表

計算結果は、国際気象通報式 FM39E-ROCOB (地上ロケットゾンデ高層実況気象通報式)により、観測日内に放送され、またより詳しい資料は月毎にまとめて Aerological Data of Japan に掲載されるほか、World Data Center A, Meteorology, Ashville に報告され、その出版物 Data Report, High Altitude Meteorological Data に載せられる。

3.4 国際比較観測の結果

日本の気象ロケット MT-135 とアメリカの気象ロケット「アーカス」との比較観測が1967年にワロップス島で実施された事はすでに述べた。この結果は、The Japan-United States Meteorological Rocket Project Data Report, 1967 その他で報告されており、その中で「両システムは見事に一致した資料を提供した」と結論されている。

この比較観測は日米二国間の協議によって行われたものであるが、WMO でも、各国が使用しているロケット、測定センサー、および計算法に関心を持ち、WMO の「測器および観測法委員会 (CIMO)」は、その第4回会議で「気象ロケットのセンサーとテレメトリーについての作業委員会」を設け、CIMO-V では「気象ロケットのセンサーとテレメトリーに関する報告者」を任命して(初めオーストラリアの Mr. B. Rofe が任命されたが、後アメリカの Mr. R. Leviton になった)、気象ロケットの国際比較観測を計画・実施して報告することを委任した。

これによって提案された比較観測は、実施の場所や時期の問題で結局2回に分けられ、その第1期は1972年3

月に日本、フランス、アメリカが参加して行われ、第2期は1973年の秋に仏領ギアナにあるクールー (Kourou) で行われているはずである。ここでは日本が参加した第1期の比較結果 (Leviton, 1973) の要点を紹介しておく。

ワロップス島における第1期比較観測は、1972年3月15日から21日に日本、フランス、アメリカの気象ロケットの10回の比較を行ったが、このうち8回に有効な比較資料が得られた。さらに詳しく言うと、日米間には昼間5回、夜2回、米仏間には昼間3回、夜2回、日米仏間には昼間3回、夜1回の比較があった。

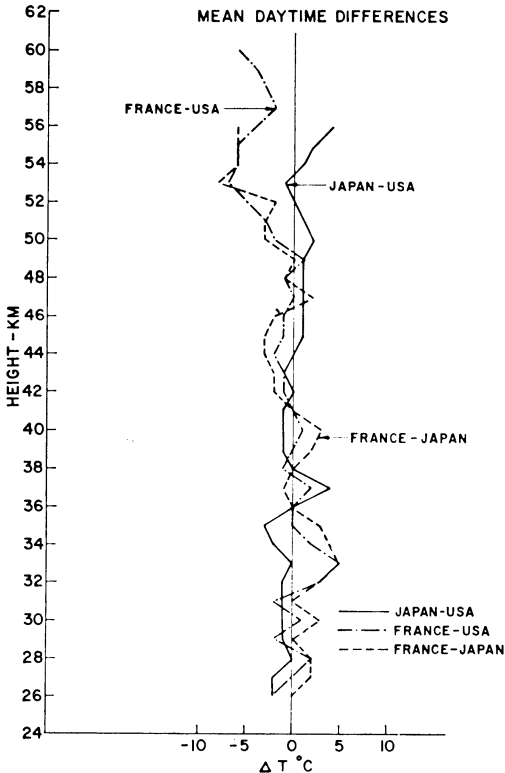
これらのうち、昼間の、気温および風の南北成分・東西成分の各国間の平均の差をそれぞれ第4、5、6図に示す (気象ロケットの発射は、現実的には、各国とも昼間に行われている)。これらの図についてあまり説明を要しないと思われるが、日本の結果は、フランスに比べて、気温も風もアメリカの結果により近いことを示している。このことは、必ずしも日米の値がフランスの値より正しいことを意味するものではないが、第1図に見

られるように、アメリカの気象ロケットの観測が比較的多数である現状では、一応都合なことではある。各国間の差は、高さ約45km以下では、気温で2~3°C、風速で2~3m/secであるが、高さ50km以上で風には著るしい差が、気温にもかなりの差が見られるようになる。これは、計算法 (3.3節) で述べたように、空気の薄い所でパラシュートの制動効果が効きにくく充分風に追従しないこと、したがってまた、温度に対する空力加熱の補正が確定しないことによる。

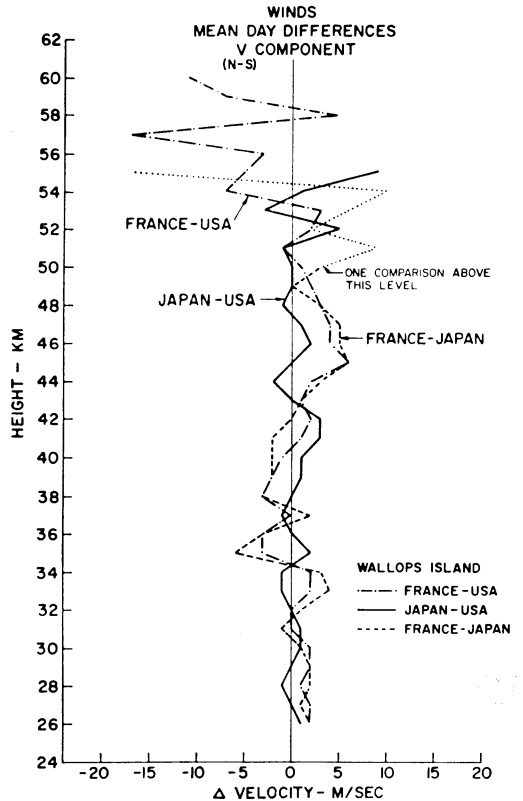
4. 観測成果

4.1 綾里観測以前の平均的状态

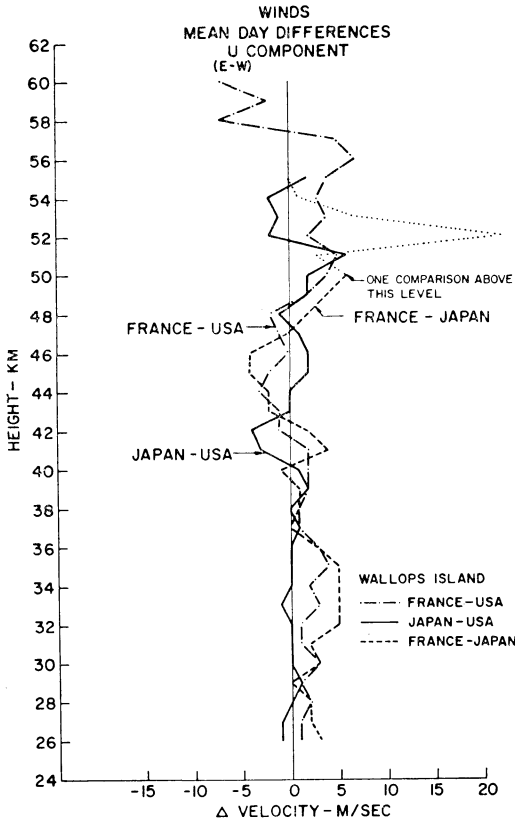
綾里における観測成果を述べる前に、それ以前にわかっていた上部成層圏・中間圏の風と気温の分布の要点を述べておきたい。これらは日本語では中村・清水(1967)にまとめてあり、また、筆者等がよく使うものに U.S. Standard Atmosphere, 1962 および U.S. Standard Atmosphere Supplement, 1966 があるが、さらに COSPAR International Reference Atmosphere(CIRA,



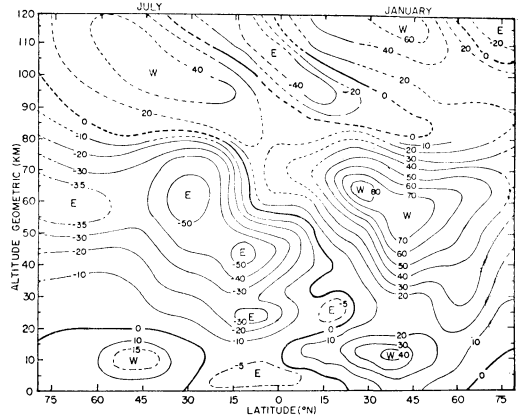
第4図 気温観測値の2国間の差の平均 (昼). Leviton (1973) による.



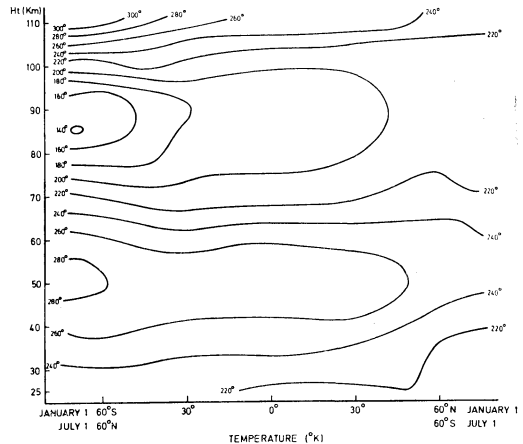
第5図 風の南北成分の2国間の差の平均 (昼). Leviton (1973) による.



第6図 風の東西成分の2国間の差の平均(昼). Leviton (1973) による.



第7図 平均風(東西成分, m/sec)の緯度対高度断面図. Groves (1971) による.



第8図 平均気温(°K)の緯度対高度断面図. Groves (1971) による.

1965)がある。最近のものでは、Groves (1971) の総合報告があり、その中で極東ではグアムのほか秋田・内ノ浦でのロケット実験の結果も使われているが、大部分は西半球の資料に基づいたものである。

さて、この Groves (1971) による1月・7月の風(東西成分)と気温の緯度対高度断面図を第7図と第8図に示す。

第7図で、夏は、20~80kmの全域が東風であり、高さ60km、緯度30°付近に東風の最大域がある。対流圏の中緯度には弱いながらも偏西風がある。冬は中緯度の対流圏ジェットが強くなるとともに、低緯度以外では成層圏中間圏を通じて偏西風となり、高さ約60km、緯度30°近くに80m/secの強い西風が現われる。

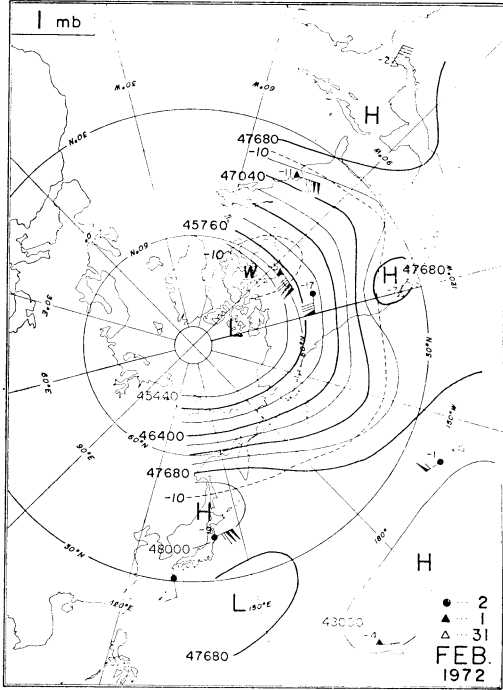
第8図の気温分布では、高さ約50kmでは夏の極地方が暖かく冬の極地方が冷たいという、いわば納得しやすい温度勾配を示しているが、高さ約85kmでは夏の極の方が冬の極よりも冷たいという温度勾配を示し、高さ約

60kmで南北の温度勾配がなくなっている(これは第7図の強風軸の高さに対応する)。

4.2 綾里の観測結果

綾里における気象観測は、すでに満3年を経過しており、気象ロケット観測通報式で入電する外国資料を用いて、5mb、2mbおよび1mbの天気図が週に一回ずつ作成されているが、現在入電する資料は北米大陸のものが大部分であるため北半球全体の解析はできず、日本の観測でやっと太平洋地域をカバーしている状態である。

これらの解析(五月女・鈴木, 1972)によると、夏の上部成層圏は極に中心をもつ温暖高気圧に支配され、一般的に偏東風が卓越する状態が定常的に続いて変化に乏しい。これに反し、冬は、第9図に例示するようによく

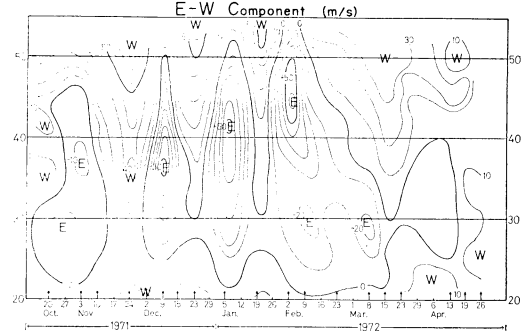


第9図 気象ロケット資料による1 mb 天気図 (1972年1月31日～2月2日)。

大まかに言えば極付近に中心をもつ寒冷低気圧に支配されて偏西風が卓越するが、中部成層圏や下部成層圏の冬の循環でよく知られているところのアリューシャン高気圧に相当する高気圧 (第9図で北海道上部にある) があって、綾里の風が偏東風になるなどの興味深い変動が見られる。なお第9図では、宇宙開発事業団が行った種が島における MT-135P の観測も記入されている。

ここで真冬にもかかわらず綾里上空の上部成層圏に毎秒数十mの偏東風が現われていることに、特に注目していただきたい。このようなことは綾里の資料を含まない平均的な状態 (第7図) からは予想しにくいことである (高さ約50km における東西風の月平均値からの標準偏差が20~30m/sec である (Groves, 1971) ことを考慮に入れても)。このような真冬の偏東風は綾里上空ではかなり頻繁に観測される。第10図は1971~72年の例であるが、綾里上空に約1か月の周期で偏東風が現われている。1970~71年には1月の始めに高さ約48km に実に80 m/sec の偏東風が観測され、1972~73年には1月10日に高さ約42km に40m/sec の偏東風が観測されている。

Hirota, Saotome, Suzuki and Ikeda (1973) はこの綾里上空の冬の偏東風を解析した。それによると、綾里



第10図 綾里における東西風 (m/sec) の高度対時間断面図 (1971~1972年の冬)。

(39°N, 142°E) とワロップス島 (38°N, 75°W) の高さ40km の東西風 (第10図と同じ時期の) の間に強い負の相関がある (平均値ではワロップス島では約40m/sec の偏西風であるが) ことから、綾里上空の偏東風が決して局地的なものでなく、成層圏の大循環を反映したものであること、下部・中部成層圏でアリューシャン域にある高気圧は高くなる程西に傾いていて上部成層圏では日本の北方にあること、そしてこのアリューシャン高気圧が比較的西に偏よって北日本がその影響下にはいった時に綾里で偏東風が観測され、アリューシャン高気圧が比較的東に動いた時には日本はこの高気圧よりも極わずの影響下にはいって偏西風になること、が示された。

さらに上記の広田等は、ニンバス4に搭載された Selective Chopper Radiometer の観測から出した冬の高緯度の平均気温が上部成層圏で CIRA モデル (1965) より20~30°C も温かいことを示し、極東域の上部成層圏・下部中間圏の観測を加えることによって既存のモデル大気をかなり改訂しなければならないことを示唆している。このような意味からも、冬の成層圏のアリューシャン高気圧の動向に極めて敏感に反応する綾里の気象ロケット観測は、今後ますます貴重な資料を提供するものとして注目されよう。

5. 観測上の問題点と今後の展望

(a) 実施上の問題点

気象ロケット観測の実施上で、他の観測にくらべてはるかに重要な問題は、火薬類 (発射用の点火薬、推進用燃料、頭胴部切断用の一次切断薬、ゾンデ用パラシュートコンテナを開く二次切断薬) を扱っていることと、ロケットモーター (燃えがら、重量約30kg) が落下することである。第1の問題について、火薬類の取扱い基準を観測従事者が厳重に守るとともに発射場付近の安全に充

分配慮しなければならない。第2の問題は、日本のように人口密度が高くしかも周囲を漁場でかまれている条件では、他の国々よりも困難な点であり、そのために燃えがらにまでパラシュートを着けているのであるが、このことがロケットの構造を複雑にしている。なおその上、発射予定日時と落下予想海域を航空局や水路部を通じて公表しておくとともに、外務省や水産庁からも関係者への周知方を依頼しているため、何らかの理由により発射を中止することはあっても、予定以外の任意の日時に観測を実施することはできないのが日本における実状である。

(b) 観測地点を増やすことについて

第9図の説明でちょっと触れたように、MT-135Pを使った観測は宇宙開発事業団でも行っているが、これは衛星を打上げるような大型ロケット発射のために種が島上空の気象資料を収集するのが目的であり、(a)で述べたような漁業問題などの制約のため、現在では冬2回夏2回しか行われていない。

日本の南方、例えば南島鳥などにもう一つ気象ロケット観測所を設けることについては、経費の問題の他に、後述するような気象衛星からの鉛直温度分布観測とのかねあいで考える必要がある。

もう一つの可能性は、南極昭和基地での気象ロケット観測であるが、ここでは周囲の人口密度の問題は無いに等しいが、逆に越冬隊員の人数上の制約があることを考えなければならない。もう一つの問題は、昭和基地に最寄りのマラジョージナ(ソ連基地、昭和基地から約300km)で気象ロケット観測を行っていることも考慮する必要がある。

(c) 観測成功率について

綾里で昭和48年4月末までに発射した111機のうち86回の観測が成功している(気象庁観測部高層課, 1973)。外国の成功率としては、すこし資料が古いかも知れないが、ソビエトでは1957~1966年(6月まで)に2地点と5隻の船上で計909発以上の気象ロケットを発射し、750回の観測に成功している(Quiroz, 1967)。アメリカの気象ロケットの成功率も8割前後と聞いている。

綾里における観測失敗の事例は、現象と原因との分離や分類が難かしいのではあるが、切断系不良、パラシュート開傘不良、温度センサー切断、テレメーター不良などがあげられる。気象ロケット観測関係者としては、成功率をすこしでも上げようと一回一回の観測に成功を期していても、一般的に言って気象ロケット観測の不良原

因を追求することは非常に難しい。これはロケットもゾンデも海中に没してしまって残骸が何も回収されないからである。しかし、何らかの残骸が回収され得るような所に落ちるという事は、保安上の意味から逆に大問題になりかねないのである。

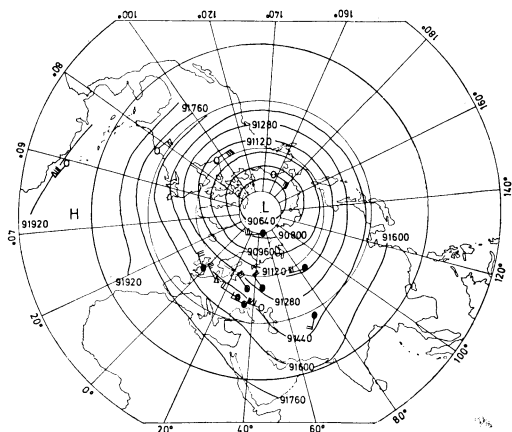
(d) 観測高度を高くすることについて

綾里で気象ロケット観測が開始された当初は、ロケットの平均到達高度は約50kmであったが、現在では55~60kmに達している。

有効な観測値が得られる高度はロケットが到達する最高高度より数km低くなるのが普通で、これはたとえ最高点でパラシュートを放出しても、空気の薄い所で制動効果が現われるまでにしばらくの間急速に落下するからである。

ロケットがもっと高くまで達するようになって、パラシュートが同じならパラシュートが効くまでの時間が延びるので、到達高度の増分ほどには観測高度は伸びない。より効果的なパラシュートの開発か、あるいはパラシュートが完全に効いてなくても風を算出できるような計算法を開発しておく必要がある。

高さ80km以上までの観測にはMT-135Pよりひとまわり大きいロケットが必要と思われる。しかし高さ約60kmまでの気象ロケット観測が準定常的に行われるようになってきたのに比べ、中間圏の観測はまだまだ実験的色彩が濃く、高さ60kmの上下での資料数のギャップはより一層大きくなりつつある。



Key:
 ● meteor trail winds, ○ rocket data, △ ionospheric drift data: — 2-3 m/s,
 ↗ 5 m/s, ↘ 25 m/s, → 50 m/s

第11図 1月の0.001mb天気図, Groves (1971)による。

20年程前から行われている、流星跡の地上レーダーによる追跡から風を出す方法は、最近非常に感度の良い流星観測用のレーダーが作られるようになって (Rawer 1970), 中間圏の気象のシノプティックな研究への可能性を開くものとして注目すべきである。第11図は、実に“0.001mb” (高さ約91km) の等圧面チャートであり (流星観測による風から等高線間隔をきめ、等高線の値はロケット観測により決めてある), この高さまで冬の偏西風循環が達していることを示しているが、ロケットによる資料よりも流星跡による資料の方が多くことに気付かれるだろう。流星跡による観測はほぼ連続的に観測できるという大きな長所があり、このことは風の主成分と潮汐成分との分離を可能とする。

(e) 気象衛星による観測について

気象衛星から対流圏・成層圏の温度の鉛直分布を測定することはニンパス3と4に積んだ Satellite Infrared Spectrometer (SIRS) や Infrared Interferometer Spectrometer (IRIS), およびニンパス4に積んだイギリスの Selective Chopper Radiometer (SCR) により実験的に行われてきたが、1972年10月15日に打上げられた ITOS-D (軌道に乗ってから NOAA-2 と改名) では、Vertical Temperature Profile Radiometer (VTPR) による実用ペースでの観測が行われ、この資料からアメリカで計算処理をした世界各地の鉛直温度分布がルーチ的に気象テレタイプ回線に乗せて放送されている。

これらの観測原理や概括的な説明は Quiroz (1972) にあるし、詳しくは嘉納 (1971) を参照されたい。Smith et al. (1970, 1972) によると、衛星観測から出した温度分布は、前線性の逆転などの小さい変化を検知しにくいのは当然予想される通りであるが、晴天時には地表面近くから圏界面を経て成層圏にいたる鉛直温度分布はゾンデなどの直接観測による結果とかなり一致するものが得られるようになっており、雲がある時の雲より上の温度分布の補正法や、雲の下の温度を推定する方法まで研究されている。

このような衛星による温度鉛直分布の観測は、観測点のすくない洋上で特に貴重な資料となるだけでなく、(4.2節の廣田等 (1973) の紹介で述べたように)、地球上を一樣に観測できるという利点 (したがって観測密度の大きい所の資料に偏る危険がない) をもっている。

しかし、現在のところ、SIRS や VTPR で観測できる温度鉛直分布は約 30mb 位の高さまでであり、SCR で 1 mb 位までである。

また、Smith et al. (1970, 1972) によれば、鉛直分布の計算法は、ゾンデやロケットにより直接測定した各高さの気温と衛星の放射計の幾つかの波長で観測した放射の強さとのある意味での相関に基づいて、この相関関係を直接観測の無い所へ適用していると言える。しかもこの相関関係は数日毎 (南半球では数週間毎) に更新されているようである。

これらの点を考慮すると、衛星による温度鉛直分布の観測は気球やロケットによる直接観測にとって変わるような性質のものではなく、これらの直接観測は衛星による間接観測を較正するために必要不可欠であろうと思われる。

おわりに、気象ロケット観測について種々御教示をいただいた清水逸郎氏および各種資料を用意して下さった気象庁観測部高層課と綾里気象ロケット観測所の諸氏に感謝する。

文 献

- CIRA (1965): COSPAR International Reference Atmosphere. North-Holland Publ. Co., Amsterdam.
- Craig, A.R. (1965): The upper atmosphere, Meteorology and Physics. Int. Geophysics Series, **8**, pp 509.
- Groves, G.V. (1971): Atmospheric structure and its variations in the region from 25 to 120km, AFCRL-71-0410, Environmental Research Papers. No. 368, pp 200.
- Hirota, I., K. Saotome, T. Suzuki and S. Ikeda (1973): Structure and behavior of the Aleutian anticyclone as revealed by meteorological rocket and satellite observations. J. Met. Soc. Japan. (気象集誌), ser II, **51**, No. 5, p. 353-363.
- The Japan-United States meteorological rocket project data report (1967): Japanese Science and Technology Agency, Japan Meteorological Agency and US National Aeronautics and Space Administration.
- 嘉納宗靖 (1972): 放射測定およびそれによる気象要素の推定. 気象研究ノート, **111**, p. 211-238.
- 気象庁観測部高層課 (1970): 気象ロケット観測, 測候時報, **37**, p. 96-121.
- 気象庁観測部高層課 (1972): 現用のゾンデ. 測候時報, **39**, p. 323-353.
- 気象庁観測部高層課 (1973): 満3年を迎えた気象ロケット観測所. 観測部時報, 1973年5月号.
- Leviton, R. (1973): Final report on sensors and telemetry for meteorological rockets. WMO. CIMO-VI/Doc. Item 10. 4.

(同抄訳) 気象庁観測部高層課 (1973): 気象ロケット国際比較観測の結果. 測候時報, **40**, p. 293-300.

中村繁・清水正義 (1967): 成層圏, 中間圏の温度, 風の状態. 気象研究ノート, **92**, p. 459-497.

Quiroz, R.S. (1967): Meteorological rocket observations and research in the Soviet Union. Bull. Amer. Met. Soc., **48**, p. 697-703.

Quiroz, R.S. (1972): On the relative need for satellite remote soundings and rocket soundings of the upper atmosphere. Bull. Amer. Met. Soc., **53**, p. 122-133.

(同抄訳) 清水正義 (1972): 高層大気の観測における人工衛星とロケットとの相対的役割について, 測候時報, **39**, p. 445-457.

Rawer, K. (1970): Aspects of the ionosphere. Ann. Geophys., **26**, p 95-107.

(同抄訳) 清水正義 (1971): 電離圏研究の現状. 測候時報, **38**, p, 219-230.

五月女敬太郎・鈴木剛彦 (1972): 気象ロケット資料による成層圏天気図解析. 東大宇宙研, 第5回IASY シンポジウム, p. 294-302.

清水逸郎 (1971): ロケットと高層気象. 日本気象学会, 第5回夏季大学教室「新しい気象学」, p. 42-48.

Smith, W.L., H.M. Woolf and W. J. Jacob(1970): A regression method for obtaining real-time temperature and geopotential height profiles from satellite spectrometer measurements and its application to NIMBUS 3 "SIRS" observations. Mon. Wea. Rev., **98**, p. 582-603.

Smith, W.L., H.M. Woolf and H.E. Fleming (1972): Retrieval of atmospheric temperature profiles from satellite measurements for dynamical forecasting. J. Appl. Met., **11**, p. 113-122.

US Standard Atmosphere (1962): NASA, USAF and USWB.

US Standard Atmosphere, Supplement (1966): ESSA, NASA and USAF.

Yata, A. (1970): Correction for the temperature data obtained by MT-135 system. Geophys. Mag., Japan Met. Agency, **35**, p. 99-121.

(以下70ページの続き)

青木(東北大): 実際に, 試験的にやってみて報告されており, しかも非常にいい精度で測定されています.

廣田(気象研): 新しい観測方法が開発され新しいデータが出てくることによって, 今まで断片的で使われていなかったデータもよみがえってくるわけで, そういうことを考えると, 衛星の観測データだけではなく, 従来あ

たロケットの観測データもつきあわせて考えていくこいとなが必要になってくるのではないかと思います.

中島(気象庁高層): 新しい方法がいろいろと開発されてきており, ある意味では気象学の中心になってきているかもしれないのですが, このようなときに, もう一度基本に立ち返って, 測定とは何かということを考えなおす必要があるのではないかと思います.

訃 報

氏 名	住所または勤務先	死亡年月日
松 本 克 己	仙台管区気象台調査課	昭和48年12月 5 日
竹 花 峯 夫	伊東市松原谷津676	昭和49年 1 月 9 日
阿 部 安 三	堺市金岡町1147	昭和48年 9 月 1 日