

熱圏下部及び中間圏探査用バルートシステム
—新しい観測手段の提案—

雛田 元紀・小山孝一郎・橋元 保雄・徳永 好志
中田 篤・佐藤 進司・河島 信樹・秋葉鏢二郎

A combination of balloon and parachute to explore lower
thermosphere and mesosphere

By

MOTOKI HINADA, KOH-ICHIRO OYAMA, YASUO HASHIMOTO, KOHJI TOKU-
NAGA, ATSUSHI NAKATA, SHINJI SATO, NOBUKI KAWASHIMA

AND

RYOJIROH AKIBA

Abstract: A new parachute system (Ballute) is being investigated in order to study the lower thermosphere and mesosphere of the earth, regions left unexplored so far because conventional in-situ measurement technique can not be applied in these regions.

After a ballute system is ejected from a rocket at the height of 120–130 km, parachute of the system is forced to inflate. It, however, still gains the falling velocity down to 85 km and then gradually the velocity decreases. In order to have maximum falling velocity of less than 500 m/sec, the total weight of the system is required to be less than 5 kg, which includes a telemetry system, battery and scientific instruments. Depending on the experiment, we might be able to increase the weight up to 10 kg. Part of the system is conductive so that it is used as a counter electrode for the plasma measurements and also it can be used as a reflector of electromagnetic wave for radar tracking.

概 要

高度40km から130km に亘る領域を探査するため、気球と落下傘とのあい

のこ、バルートが考案された。これによれば高度120~130kmでバルート系を放出すると高度85kmでシステムは最高速度になるがその後高度の減少と共に、落下速度は急激に減少する。最終的なバルートの直径は12m、最高落下速度は500m/秒にしたい。バルートの一部は導電性を持つようにし、地上からのレーダーによる追尾を可能にする。同時にプラズマ計測のためのカウンタ電極としての役目をもたせる。

ここではバルートシステムとこれを使った近い将来のロケット実験について述べる。

1. はじめに

高度40km以下は測定パラメータなどに制限があるが気球による直接観測が可能である。最近本研究所においても気球グループによる高度40kmまでの測定が可能になった[1]。米国の衛星 Atmosphere Explorer-C は高度140kmまで降下してこの高度までのプラズマパラメータ、大気成分などを測定した。[2]。即ち、まだ頻繁とは言えないまでも高度40km以下、高度140km以上は私達は測定する手段を手にいれた事になる。

高度40kmから140kmまでの領域の in-situ な探査手段は結局ロケットであり、1947年、第二次世界大戦後米国がドイツより持ち帰った V-2ロケットによる電離層 E 領域の電子温度測定以来この領域はロケットにより測定されてきた。しかしながら、測定されうるパラメータは電子密度、温度などのごく基本的な物理量に限られている。これらのパラメータと言えども十分な精度で測定がなされているわけではない。たとえば高度80km以下の電子温度は今もって波動法により校正しなければならないし、電子温度はかろうじて高度90kmより高い領域で信頼されうる。研究者によっては高度100km~120km領域での測定にさえ疑議を呈する。この理由は図1の例のように高速で飛行するロケットの全面に形成されるショックであり、このショックはロケットが音速以上で飛翔している限り避ける事はできないし、ショックの中と外においては物理パラメータは大きく違っているかもしれない。私達はこの意見はもっともらしいと受け入れてきたし、このためにこの領域を既存のロケットを用いて探査する事に大きなためらいを感じてきた。必然の結果としてこの高度領域の研究は10年前に比べてほとんど進んでいないし[3]、新しい何らかの観測手段を考えない限りこれからもこの領域の研究の進展は期待できない。例えばいくつかのD層の化学反応に関する理論も検証されずに残っているし、実験結果がなければ更なる理論の発展もありえない。

多くの人々は磁気圏、電離圏とこの下に横たわる大気圏を総合的に議論すべきであるとは考えているが、いままで適当な手段が提案されなかった。

ここに提案するのはこの高度領域を探査する事のできる新しい観測手段である。即ち強制開傘されたパラシュートを緩降下させる事により衝撃波に関する問題を取り除こうとした。本システムはなんとかしてこの高度領域探査のブレークスルーを見いだしたいとする研究者と、このシステムそのものを工学的見地から扱いたいとする研究者との幸運な出会いによって生まれたものである。

強制開傘型パラシュートのひな型は過去に雛田によって検討され、実際に S-160型ロケッ

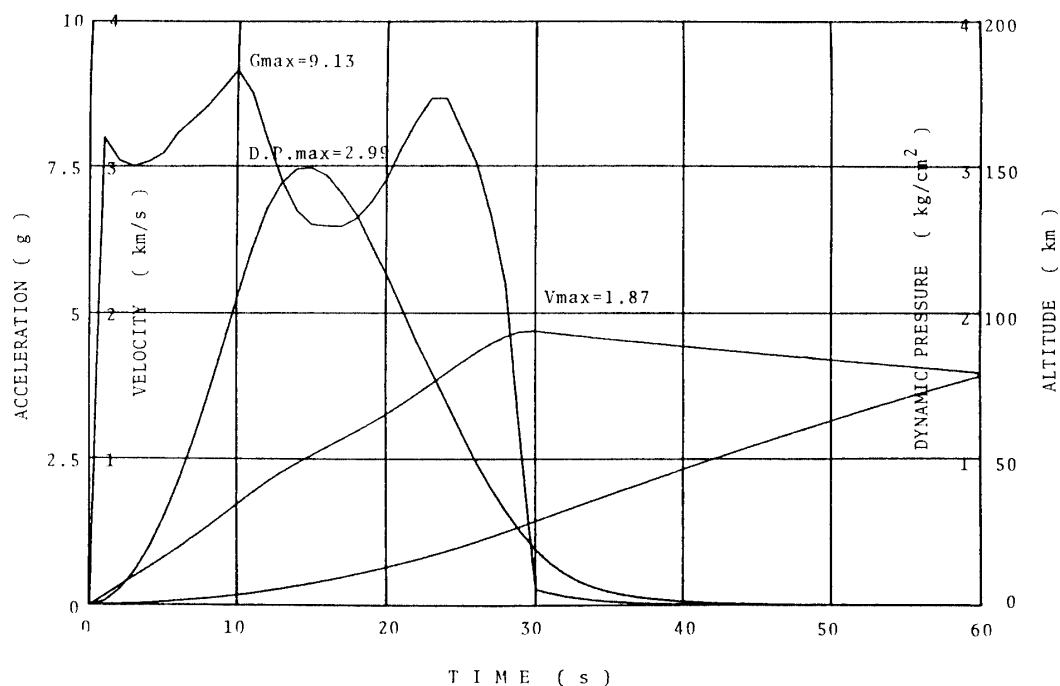


図1. 現有 S-310-型ロケットの発射後の時間に対する速度，高度，動圧，加速度

トにより実験が行われた事があり[4]，本システムを構築するための基本的な技術の一部はすでに我々は有していると考えている。

2. 合い補う気球と落下傘，バルート

現在考案中の強制開傘型パラシュート（気球，Balloon とパラシュート，Parachute との中間という意味で仮称バルートとする）は図2のようなものである。

トーラス型の強制膨脹型骨組み（トーラス部）に薄い膜（キャノピー部）を張る。バルートの直径は最終的に12mを予定している。キャノピー部分は地上レーダーによる追跡を可能にするため導電性とする。これによりバルートに吊り下げた観測データを相補うための風向，風速が同時に得られる。またプラズマ量測定のためのカウンターエレクトロードとして用いる事ができる。テレメータ送信機，観測器及び電池はひもの先端に吊り下げる。図3は半径2m及び6mのバルートを高度155km，115km，98kmより自由落下せしめた時の落下速度と高度との関係を示す。この場合のシステムの総重量は10kgとして計算した。システムは大気抵抗が無視できる高度まで自由落下する。半径6mのバルートでは高度115kmより自由落下させると高度約90kmにおいて最終落下速度640m/秒である。この後大気密度の上昇につれ減速され高度80kmにおいて300m/秒となる。ちなみに高度80km～100kmにおける音速は約260m/秒である。図4はシステム重量5kgおよび10kgのバルートを高度117kmから自由落下させたときのバルートの落下速度を示す。バルートは106km付近まで自由落下した後，5kg重さのシステムの場合には高度96kmで，10kgのシステムの場合には83kmで，それぞれ600/秒，780/秒の最高落下速度に達する。その後システムの降下速度は急激に

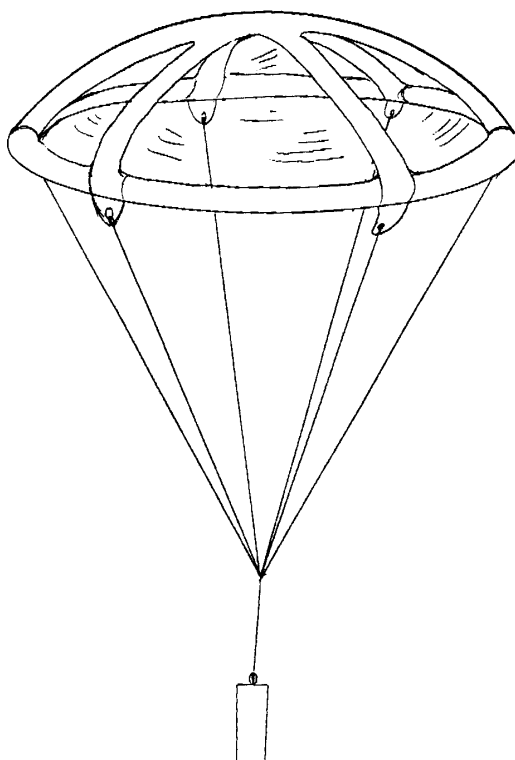


図2. バルートの概念図

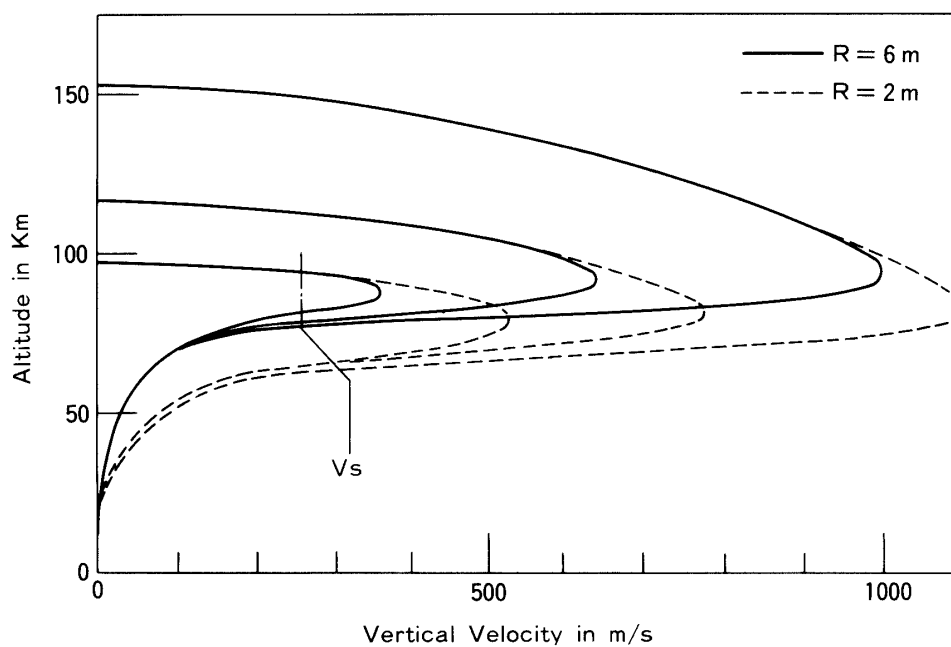


図3. バルートの放出高度と落下垂直方向速度. 実線は直径12m, 点線は直径4mのバルート. システム重量は10kg. V_s は音速

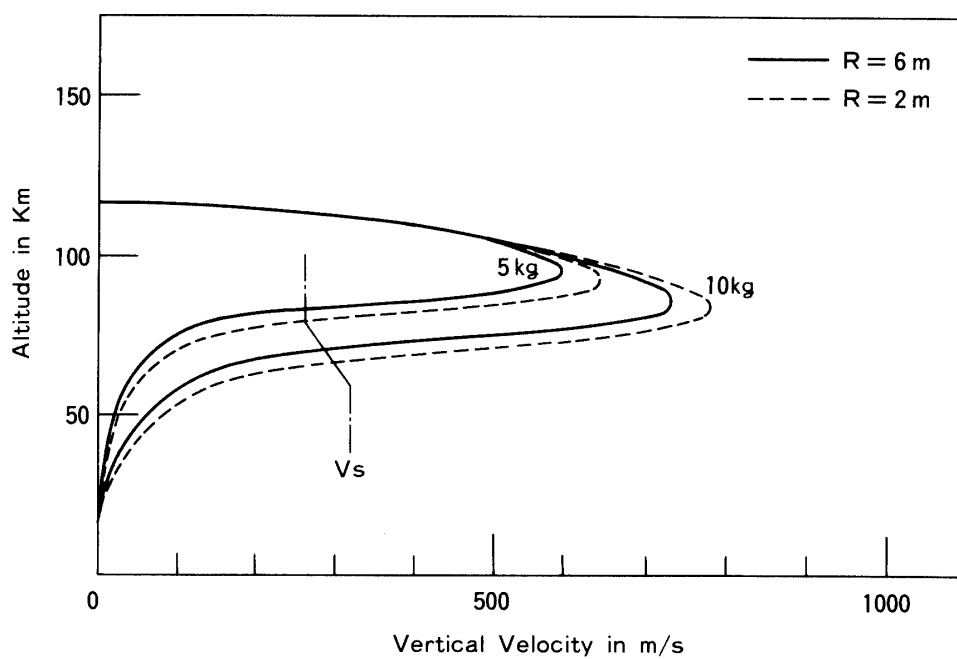


図4. 高度117kmより落下せしめた時のバルートシステム重量5 kg 及び10kg に対する落下垂直方向速度

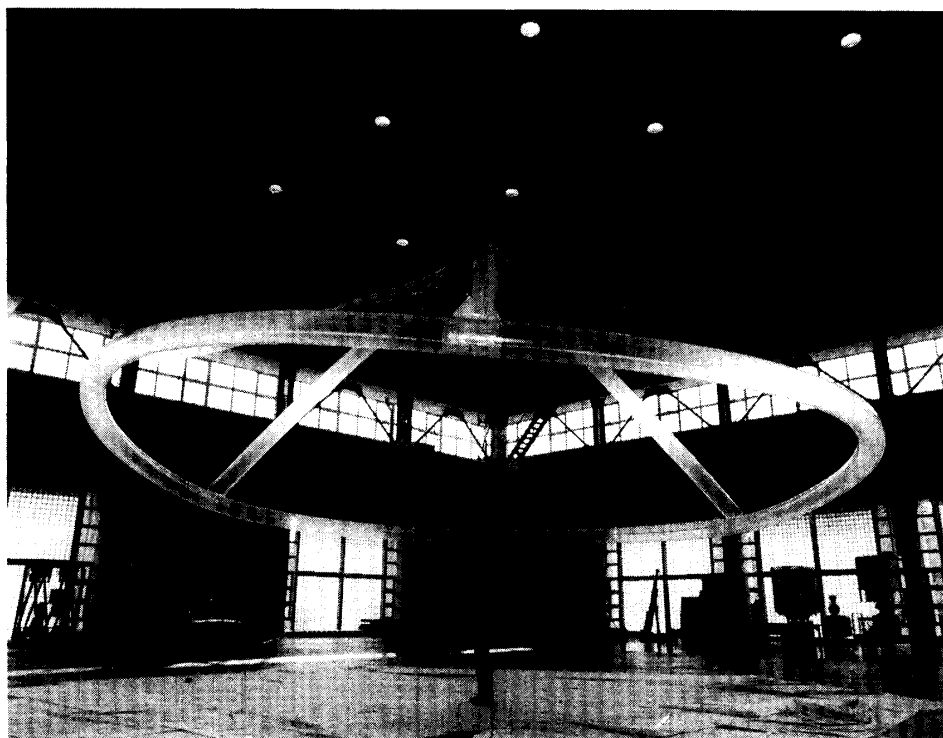


図5. バルートの骨格部（トーラス）の写真

減少する。図4には図3と同じように高度40km から100km 領域に亘る音速もプロットした。図3及び4からシステムの最高落下速度を音速以下に抑えるには、システムの放出高度を下げる以外にないが、初期における実験では約500m/秒の落下最高速度を有するようにバルート放出高度を設定したい。

システムの設計において注意すべき事の一つはシステム減速時の減加速度である。例えば重量5kgのシステムを高度140kmにおいて自由落下させると高度80kmにおいては5Gの減加速度を受け120kmにおいて自由落下させる高度80kmにおいて3.5Gの減加速度を受ける。

図5には試験的に作った外径約10mのバルートのトーラス部を示した。

3. S-310-型観測ロケットを用いた初期実験

本システムを使用した観測を始めるに当たり、後述するようなS-310-型ロケットの大きな改良無しでまず実験を試みたい。図6はS-310型ロケットの頭胴部であるが、直径8mのバルートシステムを本ロケットの最上部に搭載しこれをS-310型ロケットの通常の高高度約190km～200km付近で放出する。図7のように放出されたシステムは約100kmまで自由落下しその後減速を受けて緩降下を始める。表1に頭胴部の重量構成をまとめた。このうちバルート部は表2に示すように直径8mのバルート（重量約1.8kg）に重量1kgの測定器を吊り下げた例を示した。テレメータ送信器としては現在MT-135型ロケットに使用されているオゾンゾンデ用テレメータを予定しているが、他の選択もあると思っている。

表3には参考としてバルートの直径を8m、15m及び20mにした時のバルート部のみの重量をまとめた。算出にあたってはトーラス部の径200mm、トーラス部のシート厚20 μ m、材質はポリエチレンを使用する事とした。キャノピー部は3.5 μ m厚さのポリエステルを仮定した。

表2でわかるようにトーラス部に注入する液体の重量が全重量のほぼ半分を占めるので、注入液については充分な検討が必要である。過去のS-180-型ロケットによる実験ではメチルアルコールと水の混合液を使用した。

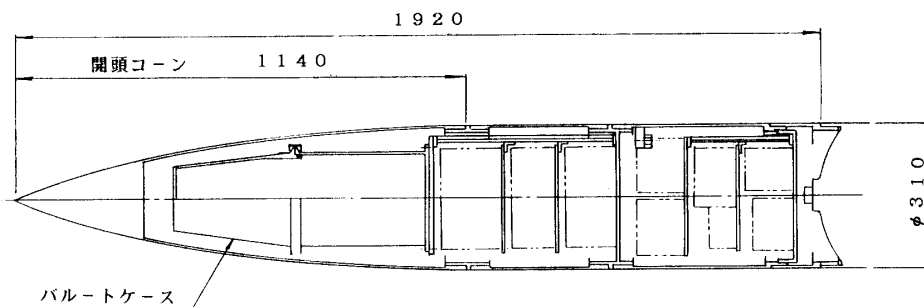


図6. S-310-型ロケットに搭載するバルートケースの配置案

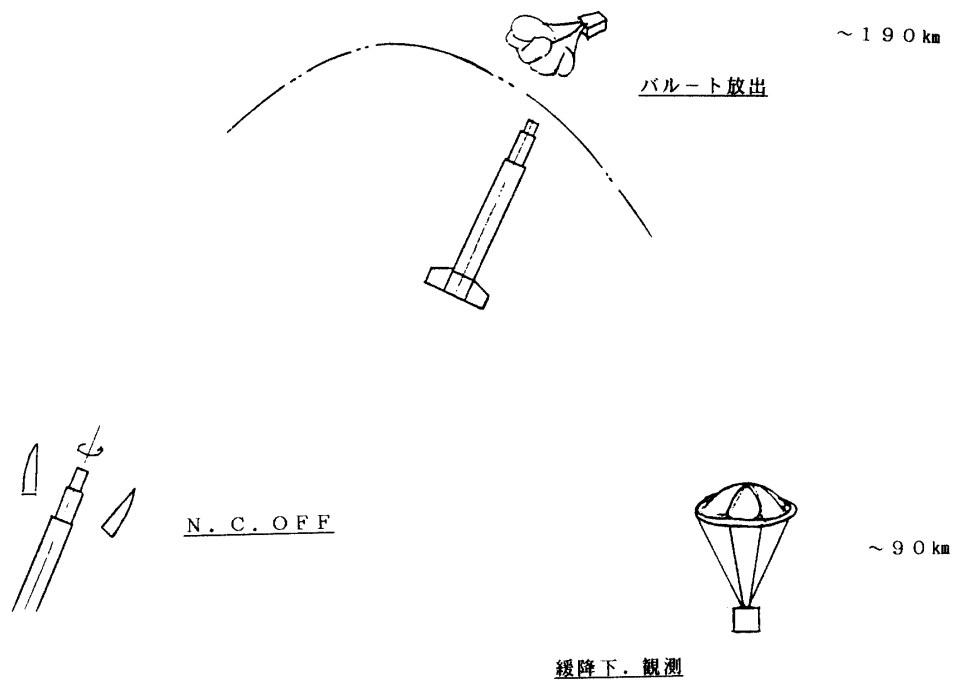


図7. S-310-型ロケットを使用したバルート実験のタイムシーケンス

表1. 頭胴部重量構成

| 各部名称 | 重量 |
|---------|---------|
| 接手部 | 9.0 kg |
| 基本計器部 | 11.0 |
| 開頭コーン | 12.0 |
| P I ケース | 5.5 |
| コンテナ | 5.5 |
| 共通機器 | 14.0 |
| 観測機器 | 12.0 |
| バルート | 5.5* |
| P I 構造 | 5.0 |
| 計表他 | 5.0 |
| 総計 | 84.5 kg |

* 直径 8 m, 観測部は表 2 に示した 3.7 kg を含む。バルート部の重量については表 3 参照のこと

表2. 表1におけるバルート部重量
のうちバルート自身を除いた
部分の重量

| 各部名称 | 重量 |
|--------|--------|
| テレメータ | 1.2 kg |
| 搭載計器部 | 1.0 |
| データ処理系 | 0.5 |
| 電池 | 1.0 |
| 総計 | 3.7 kg |

表3. バルート各部の重量とバルートの総重量

| 各部名称 \ バルートの直径 | 8 m | 15 m | 20 m |
|----------------|----------------|----------------|--------|
| トーラス部 | 610 g | 1300 g | 1550 g |
| キャノピー部 | 280 | 1100 | 1900 |
| 紐 | 70 | 100 | 200 |
| 注入液 | 820 | 1500 | 2000 |
| 重量総計 | 1780 (1320) | 4000 (2950) | 5650 |

重量中の () 内の数字はトーラスの直径を150mm とした場合である。

4. 将来におけるバルートシステム

既存の S-310-型システムを使った予後実験の後は、S-310-型ロケットにいくつかのバルートシステムを搭載して物理量を同時に測定することが可能となろう。この場合バルートシステムの最高到達高度を120～130km に抑えたい。このために二通りの方法が考えられる。その一つは S-310型ロケットの最高高度を高度120～130km に抑える事である。図8に見るように現在の S-310-型ロケットの重量高度130km の場合には92kg、高度120kmの場合には113kg 増やす必要があるが、ロケットの飛翔安定等に関する困難及び警戒水域に対する問題がなければ頭胴部もいくつかのペイロード部を継ぎ足し、これを最高高度付近で順次切り離した後バルートシステムを展開せしめ観測に共する事ができる。この考え方はロケットの機数が少なくなった現在、十分に検討に値するものと信ずる。因みに我々は1987年米国テキサス州ホワイトサンズ射場においてブラックブランチVに15.9フィート (4.8m) のペイロード部を継ぎ足してテザーロケット実験を行った。その二つは、S-310-ロケットの最高高度を120～130km に抑えなくても、ペイロード部の尾部にバルートを継ぎ足しこれを切り離す。この場合の切り離し高度は切り離されたバルートシステムが空気抵抗で減速されて最高高度が120～130km になるように選ばれる。切り離されたそれぞれのセクションにはテレメータ送信機、電池等を搭載してあり、それぞれのセクションからの観測データは1680MHZ 帯の

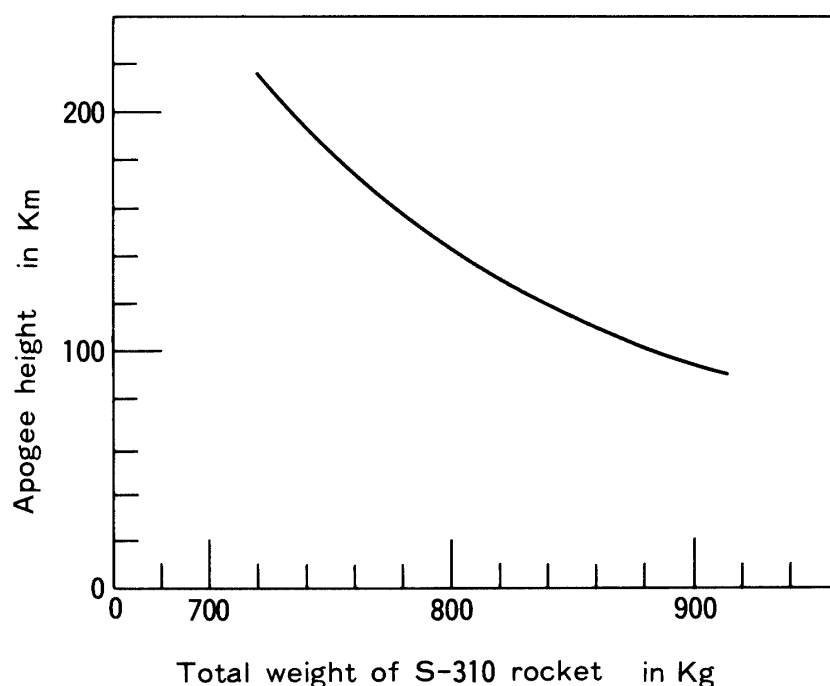


図 8. S-310-型ロケットにおけるロケット全重量と最高高度との関係

気象バンド、及び296MHZ の電波によって回収されうる。後者の場合、頭胴部先端は高い高度まで測定できる。上記した二つの方法のうちいずれを採用するかは今後の検討課題である。

5. バルートシステムの利用法

これまで述べてきたようなバルートシステムは図9に示すようなロケット実験に供する事ができる。高度90～130kmにおいて電子温度 T_e 、電子密度のゆらぎ N_e 及び大気密度等はまず通常のロケット速度 (1.7km/sec) で得られた結果とバルートで約500m/秒で得られた結果と比較する事が重要である。中低緯度で検出される N_e のゆらぎについては、ロケットによる擾乱によるものが自然のものかまだ結論が出ていないと思われる。スプラジックE層付近の熱構造及び力学に関する研究も不十分である。MSTレーダーによって検出される中間圏のエコーの原因については、それが中性ガスの擾乱によるものか、電子密度の不規則構造によるものか、あるいはいずれも寄与しているのか、MSTレーダとの共同実験において追求する必要がある。また高速で飛翔するロケット前面に生成されるグローのため測定のあいまいさが指摘されている酸素原子密度等は、ロケット上昇中はロケットにより、下降時はバルートシステムにより測定することによりグロー中測定の影響を評価できる。

高度40km から90km にわたるC、D層のイオン化学反応の研究のためにまずTotal負イオン、Total性イオン及び電子を同時にリターディングポテンシャルトラップで測るべきである。同時に地上からの気球により高度40km までの同じパラメータを測定する。ロケットより放出されたバルート、及び地上から放球された気球のレーダ追尾により地上より上層約

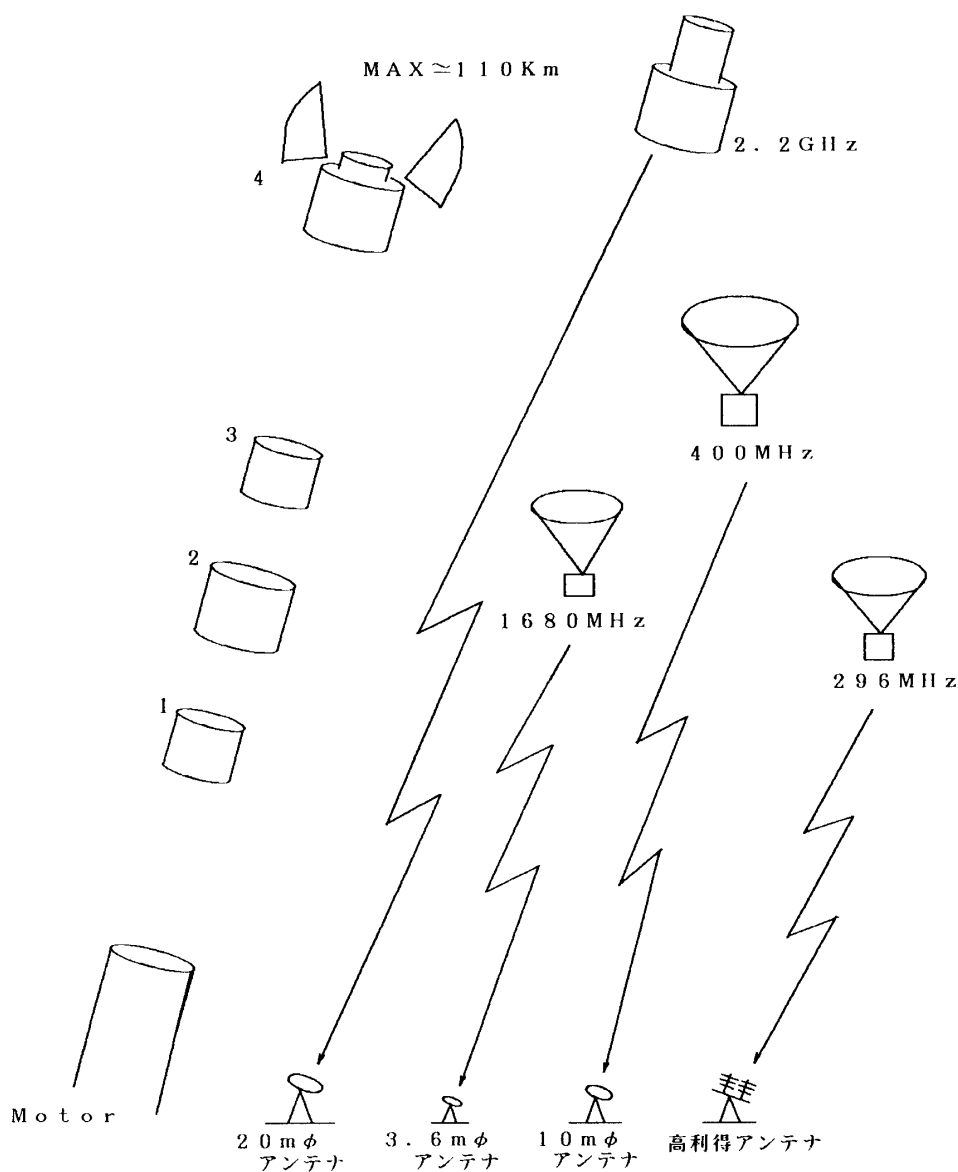


図9. 将来における複数個パールの実験

80km までの風向，風速を同時に知ることができる．これにより高度約40～90km までの荷電粒子分布とその分布に及ぼす力学の影響を知ることができると期待される．たとえばD層の電子密度プロファイルが成層圏の風に影響されているらしいことが報告されており[5]，荷電粒子分布への大気力学に及ぼす影響についてはようやくにして研究が始まろうとしている．次のステップは正，負イオンの組成を測定する事である[6, 7, 8, 9, 10, 11]．過去にD層化学反応に関するいくつかの理論的論文が出されているが，この高度領域の正負イオンの質量分析が数回繰り返し行われ，全体的な描像が描き出されなければならない．前述したように，この領域は大気力学との関連が強い高度領域であるが，大気力学を考慮した荷電粒子

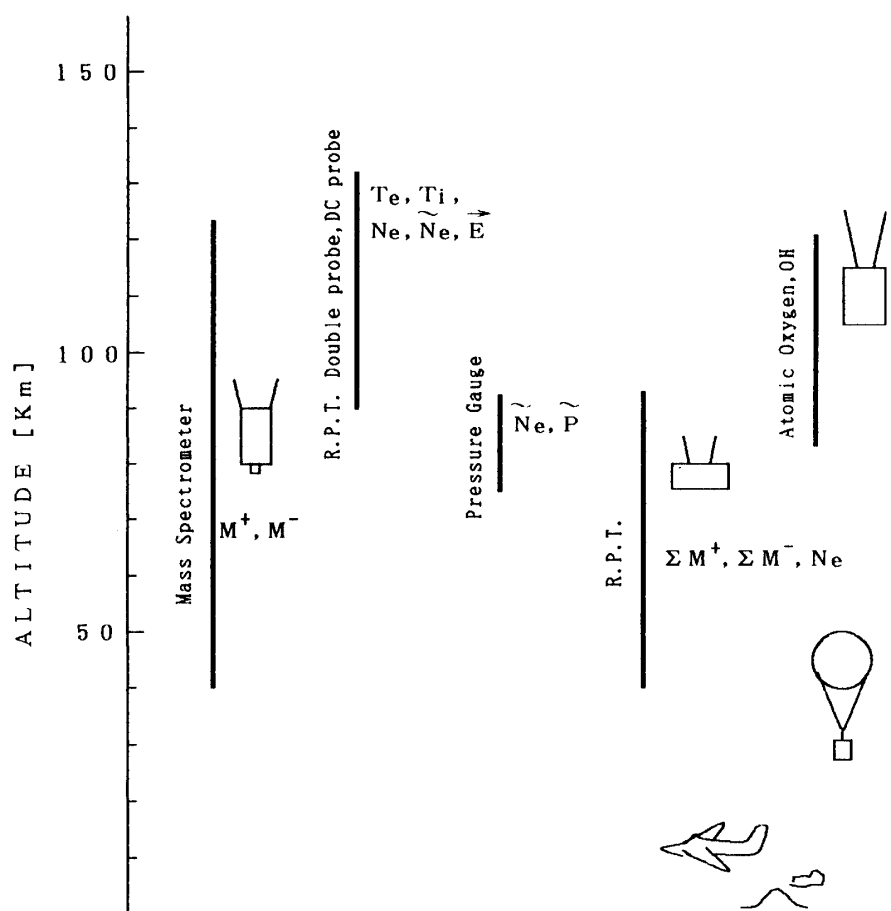


図10. バルートを利用する研究の探査領域

分布に関する論文はまだ発表されていない。

結 び

バルートシステムを下部熱圏、中間圏研究を行いたいとする地球物理研究の立場から記述した。このシステムの初期落下高度を変えることにより、最高落下速度を変えることができ、衝撃波中のイオン化学反応に興味を持つ工学研究者の道具としても使用できる可能性を提供する。

幸いにして本研究所は工学と科学の研究目的が一致するような構想が実現できる一番近い距離にある。このシステムを作り上げる事は私達に課せられた責務ではないかとも考える次第である。

謝 辞

本稿をまとめるに当たり、日産自動車(株)、航空宇宙事業部資料の一部を提供していただきました。

参考文献

- [1] 岡部選司他, 薄型高高度気球について大気圏シンポジウムプロシーディング, 平成2年度 42-48, 1990
- [2] Dalgarno, A., W. B. Hanson, N. W. Spencer, E. R. Schmering, The atmosphere explorer mission, *Radio Science*, **8**, 263-266, 1973
- [3] Danilov, A. D., Achievements in the D-region studies during map, *Adv. Space Res.*, **10**, 133-149, 1990
- [4] 雛田元紀, 液体蒸気圧を利用したパラシュート強制開傘方式, 宇宙研報告第8巻, 225-247, 1972
- [5] Danilov, A. D., G. Nestorov, E. N. Mikhaylov, D. Pancheva and M. Todorova, Variability of the electron concentration and the dynamics of the atmosphere at D-region heights, *Geomag & Aeronomy*, **26**, N5, 599-602, 1986
- [6] Narcisi, R. S., A. D. Bailey, L. D. Lucca, C. Sherman and D. M. Thomas, Mass spectrometric measurements of negative ions in the D- and lower E-regions, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **33**, 1147-1159, 1971
- [7] Thomas, L., P. M. Gondhalekar and M. R. Bowman, The negative-ion composition of the day-time D-region, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **35** 397-404, 1973
- [8] Kopp, E. and U. Herrmann, Ion composition in the lower ionosphere, *Annales Geophysicae*, **2**, 83-94, 1984
- [9] Viggiano, A. A. and F. Arnold, The first height measurements of the negative ion composition of the stratosphere, *Planet. Space Sci.*, **29**, 895-906, 1981
- [10] Sechrist, C. F. Jr., Comparisons of techniques for measurement of D-region electron densities, *Radio Science*, **9**, 137-149, 1974
- [11] Weisemberg, J. and G. Kocharts, Negative ion chemistry in the terrestrial D region and signal flow graph theory, *J. Geophys. Res.*, **85**, 4642-4652, 1980