

小特集

衛星を使った宇宙プラズマの測定

2. 宇宙における能動実験

2.2 テザー衛星実験

小山 孝一郎

(宇宙科学研究所)

(1995年11月14日受理)

Active Experiments in Space Tethered Subsatellite Experiments

OYAMA Koh-ichiro

Institute of Space and Astronautical Science, Sagami-hara 229, Japan

(Received 14 November 1995)

Abstract

Basic configuration for active experiments using long tether in space is an electron emitter, an electron collector and conductive tether connecting these two subsystems. The system can be used to receive or radiate VLF waves in the ionosphere, and to measure potential of the electrode which charges up to extremely high voltage as a result of electron emission. Recently conductive tether experiment was carried out by using a Space Shuttle. In the future this basic system can be evolved to simulate interaction between Io and Jupiter. Orbit maneuver of Space Station may become possible by using conductive tether.

Keywords:

electrodynamics tether, space plasma, power generation, space station, VLF wave

1. はじめに—Tether とは

英語でテザー (Tether) という言葉は、オクスフォード辞典によると “rope”, “chain” と同義語である。日本語では著者が “Tethered Subsatellite” を ‘ひもつき衛星’ として紹介した時より ‘ひも’ という言葉を用いたが、本稿では “テザー” を用いることにする。宇宙におけるテザーの利用に関する研究の歴史およびその科学観測への応用については拙著 [1] をご覧いただくとして、ここでは導電性のいわゆるコンダクティブ・テザー (conductive tether) を用いた宇宙での能動実験 (active experiments) について概説する。宇宙でのテザーは私達が地上で使っている長い柔軟なひもの概念と変わらず、例えば電離圏、磁気圏での探査には長さ約100km、直径1～5mmのテザーに間隔をおいて複数個の衛星 (Tethered

Subsatellites) をぶらさげる案も検討されている。後述するようにスペース・ステーションでの軌道制御等では曲げることのできない大口径の導体柱もテザーの中に取り込んで考えることになる。

2. 宇宙におけるテザー伸展の原理

テザーというからには一般的には長い柔軟なひもであるので、宇宙にテザーを持って行ってから、これを伸ばしてやる必要がある。ここでは地球周回衛星でのテザー伸展について述べ、次に観測ロケットにおけるテザーの伸展について述べる。

a) 周回衛星でのひもの伸展

ここではスペース・シャトル・オービタ (space shuttle orbiter) で考えられてきた最も基本的なテザー伸展

の原理について述べる。直径約2mmのテザーの先端に取付けられた衛星は、スペース・シャトルから20～50m地球方向に突き出されたブームの先端に固定されている(この距離は衛星と地球、スペース・シャトル・オービタと地球との重力差がテザーが元々持っている引張り力より勝る点で衛星の重量に依存する。)この時点で衛星を離すと衛星はスペース・シャトルと衛星高度の位置エネルギーの差に相当する分だけ、スペース・シャトルより前へ進もうとする(Fig. 1 (a))。この時、衛星を引張り上げたい程度でテザーを引くと、引張り力のスペース・シャトル進行方向への分力は衛星の速度を遅くするように振る舞い、最終的に予定された高度に投入される。スペース・シャトルは衛星が地球の引力に引かれて落ちてこないように常時テザーで引張り上げる役目をしていることになる。衛星を上方に伸展させる時も全く同じ考え方が適用できる。

1992年に行われたスペース・シャトルでの実験では、上記のように長いブームの他に500kgの衛星を窒素ガスジェットでテザー方向に押し出した。

さて、特にスペース・シャトルでの実験においては実験終了後システムを回収することが起こり得る。この場合にはFig. 1 (b)のようにシャトル後方に位置する衛星をつないでいるテザーに張力をかけると、この力は衛星

を前方に加速する力となり、結果として衛星は高度を上げる。衛星がシャトルに近づくとシャトルへの衛星の衝突が懸念されるので、回収の速度は遅くなる。

b) 観測ロケットによるテザーの伸展

約10分にも満たない飛翔時間中に実験を行わねばならない観測ロケットのテザーの伸展は長時間宇宙に滞在する地球周回衛星とは自ずと異なる。これまで私達が行ってきた日米共同テザーロケット実験では一貫してFig.2のようなテザー伸展装置が用いられた[2]。テザーを宇宙でスムーズに伸展するのは、決して容易ではなかったが、結局魚釣り用のリールと同じように、リールに巻いたテザーをリールの回転軸方向に引張るというやり方に着いた。伸展されたテザーの長さはテザーがリールからほどける時に細い光のビームを2回さえぎることを利用して測定した。これによって400mのテザーを伸展したが、この長さは当時の世界記録であったことを後で知った。Fig. 3は親ロケットから切り離された子ロケットをつないでいるテザーの振る舞いを親ロケットに搭載したカメラで撮影したものである。Fig.4はテザーの伸展速度とテザー長を示したものである。テザー伸展速度がパルス的に時々速くなっているのは、この時間にリアクション・コントロール装置をふかして子ロケットを前進させていることによる。

最近米国ではGPS衛星を軌道に乗せる時に用いるデルタ型ロケットにピギーバックとしてテザー伸展システム

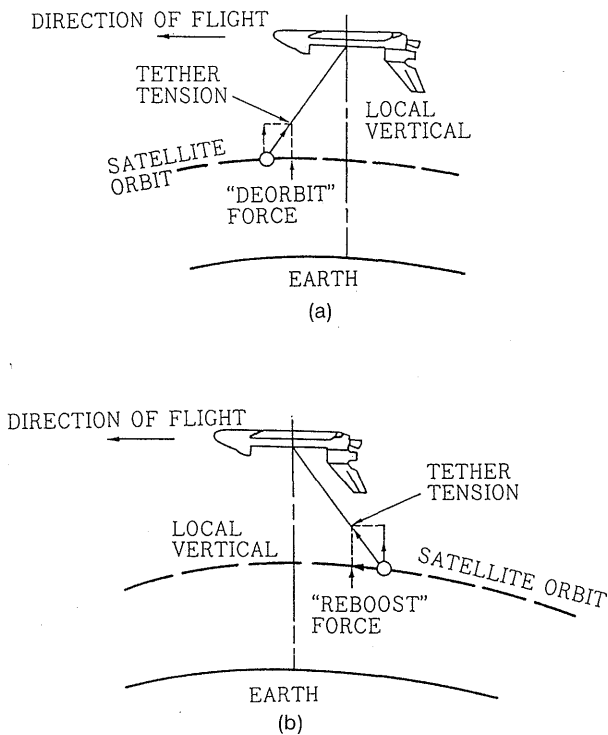


Fig. 1 Deployment and Retrieval of Tether

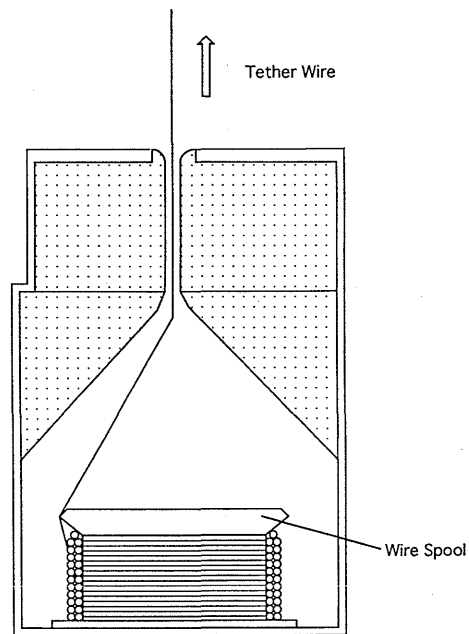


Fig. 2 Tether Deployment System which was developed by Kawashima et al. [2]

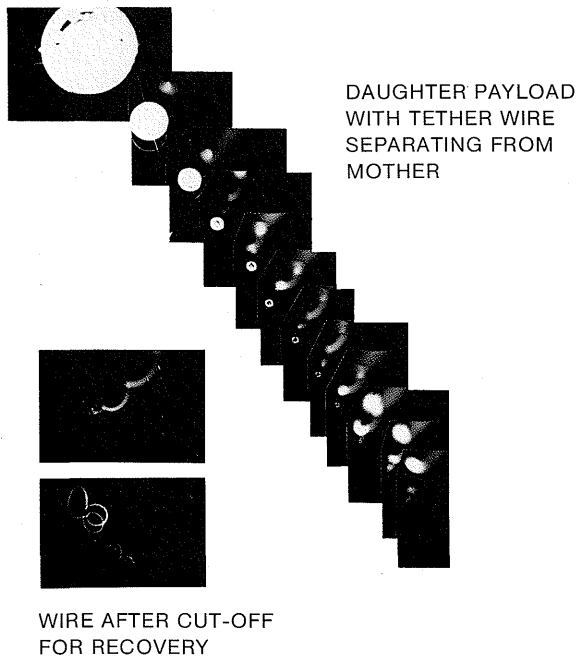


Fig. 3 Snapshot taken by a camera which was on board a mother rocket [2]

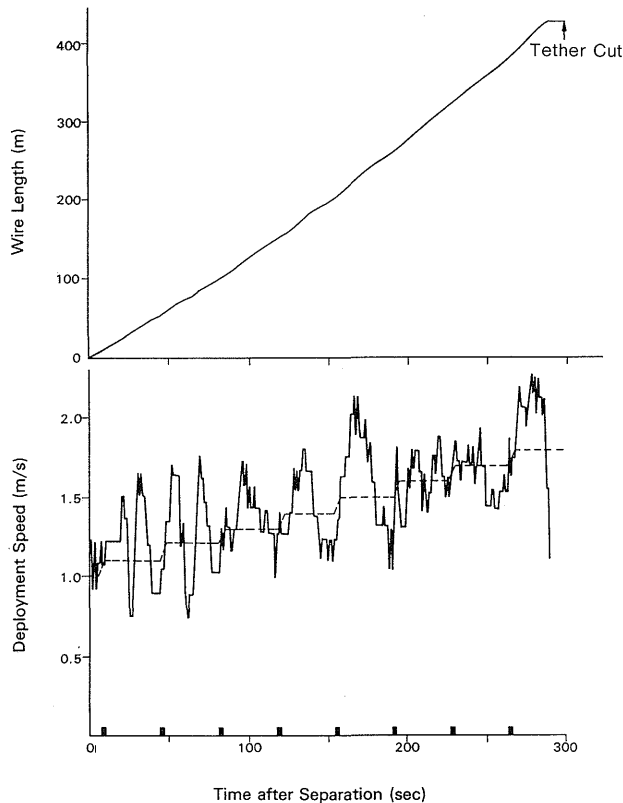


Fig. 4 Tether deployment speed versus time after mother/daughter separation (lower panel) and length extended (upper panel) [7]

ム (Small Expendable Deployment System, SEDS) を搭載し、これまで3回のテザー伸展実験を行った[3]. Fig.5 にデルタロケットに搭載された SEDS の概観図を示す.

3. 宇宙における能動実験 (Active Experiments)

テザーを利用したこれまでのあるいは将来考えられている宇宙空間での理工学実験では、極域での磁力線方向の電場測定、電子ビーム放出時の飛翔体の電位測定、VLF 電波の放射あるいは受信、スペース・ステーションの軌道制御、および木星磁場中での衛星イオの振る舞いに関するシミュレーション等がある。極域での電場測定を別にすると、上述した能動実験のための基本的な構成は Fig.6 に示すように電子を放出する電子銃とこれに接続されたコンダクティブ・テザーおよびテザーの端につけられた電子捕集のための大きな電極である。

まず電子銃より宇宙空間に電子が放出されると、システムは不足した電子を補充しようとして、テザーの端につけられた電極で捕集し、これはテザーを通じて電子銃へと流れて行く。したがってテザーによって VLF 電波

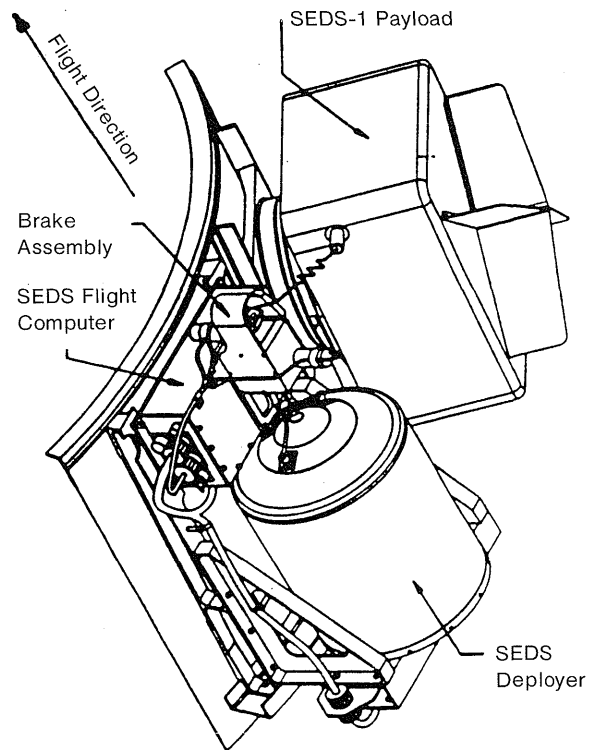


Fig. 5 Sketch of small expendable deployment system (SEDS) as configured for its finest flight in 1993. [3,14]

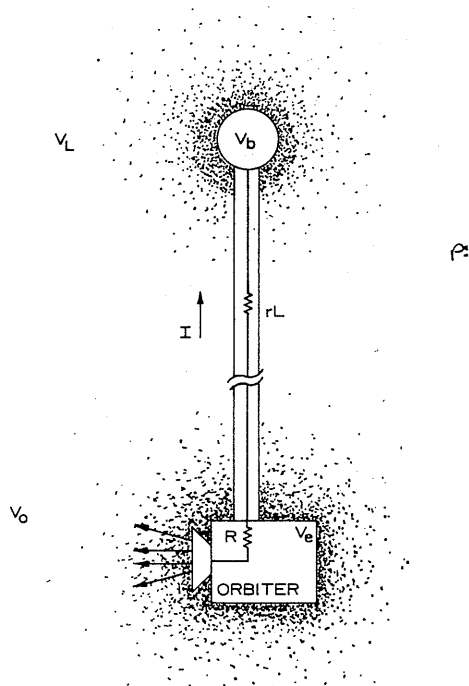


Fig. 6 Schematic view of the conductive Tether system. V_b is the potential of the subsatellite, V_o is the Orbiter ground system potential, rL is the Tether resistivity per unit length and R is an internal resistance. The plasma sheaths surrounding the sub-satellite and the Orbiter are shown by the dense dotted regions [4]

を放射するためには、電子銃からの電子放出を時間的に変動させてテザー中を流れる電流を変化させれば良いことになる。知られた送信周波数、送信電力、そして知られた高度で放射される VLF 電波源は、電波伝播の研究に役立つかも知れないし、また VLF 放射によって放射線帯の降下荷電粒子量を自由に制限することができるかもしれない。大都市上空で荷電粒子量の大きな降下は電力線放射された 50/60Hz の電波によるものと解釈されている。

さて、コンダクティブ・テザーが地球磁場を横切って運動すると $E_p = V \times B$ の起電力が誘起される。この場合、系全体は東へ V の速度で地球磁場 B の環境を用いようとしているとする。もし、両端の電極と周りのプラズマとの電氣的な接触が充分であれば電流は Fig. 6 における上端の電極から周りの電離層を通して、下端の電極へ流れ込む。生じた起電力による電力の一部はテザーの内部抵抗および系の外側の電離層で損失される [4]。

さて、この電力発生は系の運動エネルギー $1/2MV^2$ が電気エネルギーに変換されることによるものであり（ここでは M は系の総質量）、したがって発電と共にシ

ステムの速度は減少し、そのためにシステムは高度を落とすことになる。すなわちテザーの中を流れる電流により生ずる力 $F = I \times B$ は系を減速する向きに働いている。

上述したテザーを流れる電流はどのような回路で閉じているのでしょうか。Fig.7a のように上部の電極から流れ出た電流は上部の電極を通る磁力線を通じて高度約 105km 付近のいわゆる電離圏 E 層を通り、再び磁力線を通じて下部の電極に到達すると考えられている。システムに載っている観測者から見ればテザーを流れる電流は直流であるが、地上におかれた観測者は E 層に流れた電流による磁場をごく短い時間にパルス的に感じることになる。

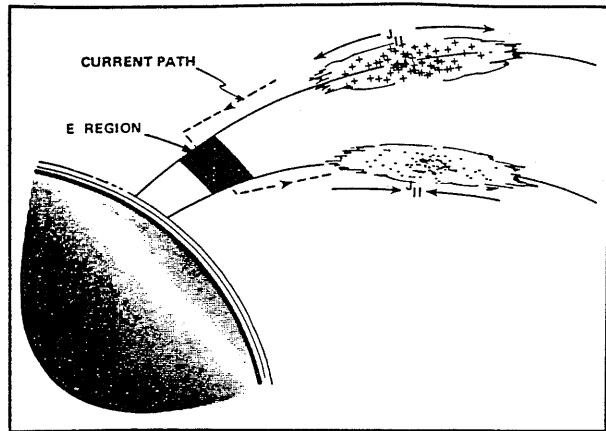


Fig. 7 (a) "Current circuit for conductive Tether experiment" The operation of conductive Tether system transfers electrons from one magnetic field region to another. The net charge in balance in each region spreads outward along the within the ionosphere E-region [5]

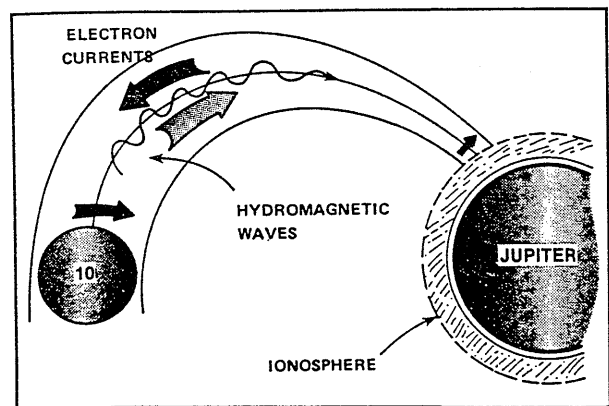


Fig. 7 (b) The interaction of Io with the rapidly rotating Jovian magnetosphere. The interaction generates large-amplitude hydromagnetic waves and magnetic-field-aligned currents [5]

実はこのような電流回路は太陽系の巨大惑星の一つ、木星の磁場の中を木星の衛星イオが運動している時に作られる電流回路と似ている (Fig. 7b) [5]. すなわち高速で回転する木星の磁場の中におかれたイオ (イオは火山の爆発によって生じたイオウの蒸気に太陽光と木星の放射線帯からの荷電粒子によって作られた電離層を有しており、外から見るとこれは電導体である) の両端には大きな電圧が生じ、この電圧は木星の磁力線を介して木星の電離圏に印加される。かくしてイオを通る木星の磁力線をたどったところにイオが原因となるオーロラが発生する。エレクトロ・ダイナミック・テザーを利用した研究の一つとして木星磁場中のイオとの相互作用が挙げられる理由がここにある。

4. これまでのテザーを用いた能動実験

電子銃を使わなかったという意味では能動実験に入らないかもしれないが、カナダのグループは1989年、磁力線に沿う方向にテザーを1 km 伸展した (OEDIPUS 実験) [6]. この実験ではロケットの姿勢などの多くの要因に支配されるが、磁力線に沿う方向の電磁場測定の可能性を示唆した。これにより私達が達成した宇宙での400mのテザー伸展世界記録は破られたことになる。

私達はこれまで米国と共同して観測ロケットによるテザー実験を行ってきた。ここでは1985年に米国ニューメキシコ、ホワイトサンズ実験場で行われた実験について述べる。図に示すように測定器を搭載したロケットは二つのセクションに分けられ、ペイロードの一方には電子銃を、一方にはできるだけ導電表面を作れるように測定器を配置した。この間を0.6mm径のコンダクティブ・テザーでつないだ。この実験はテザー中を流れる電流を変化させてVLF電波を放出するために行われ、地上ではVLF電波受信機も設置された。テザーを伸展するのにロケット側にリアクション・コントロール・システムを設け、間隔をおいてジェットをふかした (私達が日本で行ったテザー伸展の実験によると、約1m/secで切り離された子ロケットは約60mテザーが出たところで止まってしまう、何らかの理由でこれ以上はどうしても出ないことがわかっていた)。

テザーの最後の実験はカナダのポーカ・フラットで行われた (Raitt, 1995) [7]. この時もニューメキシコの場合と同じように地上に3点のVLF観測点を置いたが、VLF電波は検出できなかった (もともとこの時はテザーは電子ビーム放出時における親ロケットの電位をモニターするために遠く離れた子ロケットとをつなぐ

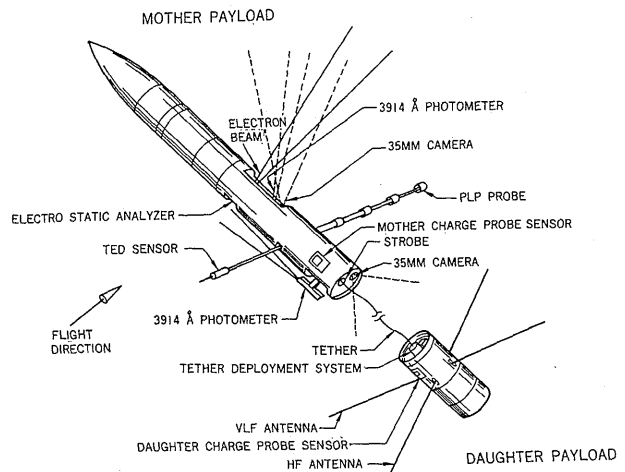


Fig. 8 Experiment set up for Tethered payload [7]

ものとして用いられ、ビームそのものからの電波の地上での検出を考えていた。

これまで行ってきたテザーによる能動実験の目的は、将来考えられる大型能動実験を考慮に入れたものである。この際の最大の関心は“電子捕集用のコレクターが集められ得る電流の大きさはいくらか?”ということであった。一方の電極から電子を強制的に放出すると、このコレクターは大きく正に帯電するが、1KV オーダの高電圧が印加された電極の捕集メカニズムにはいくつかの理論があるが、著者の知るかぎり、十分に理解されていない[8]. しかし、いずれにしても電流を多く集めるためには周りのプラズマと電極の間の電気抵抗をできるだけ少なくすることであり、このためにプラズマ・コンタクターの研究がなされている[9,10].

私達の行った研究を大型化したのが、1992年8月に行われたシャトルによる TSS-1 (Tethered Subsatellite System-1) の実験であった[11].

シャトルにつながれた導線の端に約500kgの表面が導電性の球状衛星が繋がれており、シャトルには電子銃が搭載されていた。球状衛星の周りの荷電粒子の分布状態 (シース内の構造) を知るために衛星の壁から電極をつけたブームが伸展できるようになっていた。初めは20kmまでのテザーの伸展を予定していたこの実験は極めて初歩的ミス (といわれる) で約250m 伸展したところで終わってしまった。しかしこの実験から、工学的には当初心配であったテザーの伸展は予想以上にスムーズにいき、かつ伸展された後の衛星はふらつくことはないということがわかり、今後のテザー実験に有用な情報が得られたこと、また科学的には電圧が理論通りに誘起した

ことが証明されたということであった。この実験のリフ
 ライトが予定されている。ロシアは Savich 教授が
 VOLCANO 計画を提案し[12]，その後を引き続いて
 Zaicev 氏が大気観測ミッションと同時に能動実験を行
 う計画を提案している[13]。

このコンダクティブ・テザーの一つの応用として、
 Fig. 11 に示されるようにスペース・ステーションの高
 度をテザーで制御し、かつスペース・ステーション内で
 夜に用いられる電力をシステムの運動エネルギーでまか
 ながうことが提案されている。

5. 将来に向けて

これまでのテザーを用いた能動実験のうち特に、カナ
 ダグループが行った EDIPUS 実験は素晴らしい成果を
 挙げている。これまでのロケットによる能動実験で放出
 されるエネルギーでは地球環境に攪乱を与えて、その応
 答をみて環境を知るというまでにはいかなかったので、
 本格的なテザー能動実験はスペース・ステーションの定
 常運用が始まるとまた提案されてくるのではないと思
 う。この時のために、やはり地道な研究を続ける必要が
 あるのではないかと考えている。

ここでは能動テザー実験に限ってその一部を紹介した
 が、長い絶縁性のテザーを用いた電磁気圏の観測は、地
 球周辺の研究に大きな飛躍をもたらすと信じている。

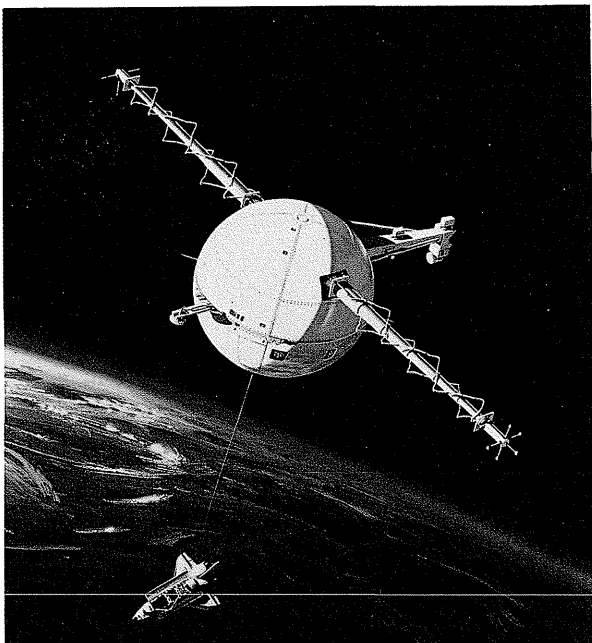


Fig. 9 Space shuttle experiment set up carried out in 1993 [courtesy, NASA]

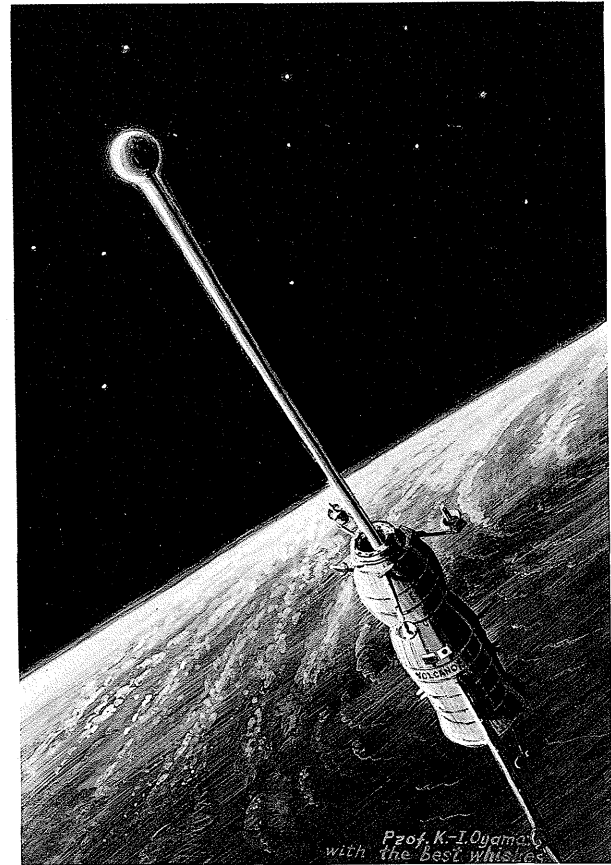


Fig. 10 Artist picture of VOLCANO project proposed by Prof. Savich (The picture was presented to Oyama by his son in law)

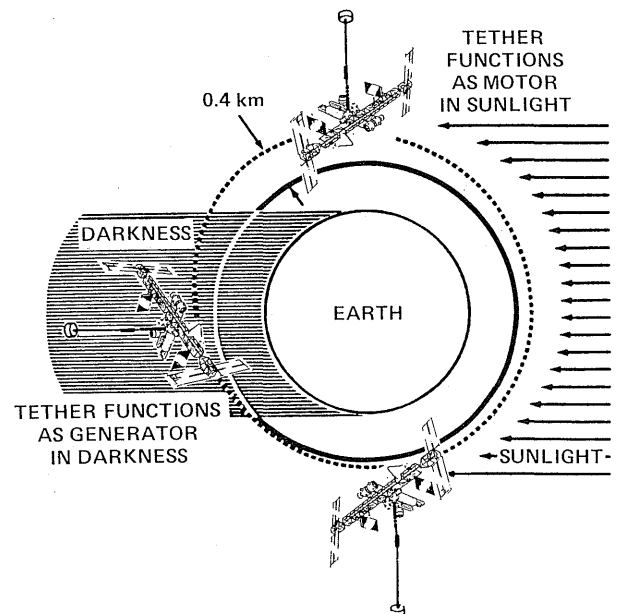


Fig. 11 Schematic configuration of orbit maneuver of space station by using conductive tether

謝 辞

本稿を書くに当たっては、著者が宇宙科学研究所、河島教授、佐々木進助教授と共同し行った実験で得られた資料を多く使わせて頂いた。ここに謝意を表する。

追 記

本稿の校正中にカナダの James Gordon 博士からの mail が、東北大学、渡部重十助教授を通じて私に届けられました。概略は以下の通りです。カナダ、スペース・エイジェンシー (Canadian Space Agency) は、20人以上のカナダ及び米国からの研究者が従事した OEDIPUS-C (Observation of Electric-field Distributions in the Ionospheric Plasma — a Unique Strategy) をフェアバンクス近くのポーカフラット・ロケット発射場 (Poker Flat Research Range) から、1995年11月7日6時38分 UT に打ち上げられたことを公表した。ブラックブランチ XII ロケットによって869kmの高度に達した。すべての観測機器が正常に働いた。

参考文献

- [1] 小山孝一郎：日本航空宇宙学会誌, **37** (429), 464 (1989).
- [2] S. Sasaki, K.-I. Oyama, N. Kawashima, T. Obayashi, K. Hirao, W. J. Raitt, N. B. Myers, P. R. Williamson, P. M. Banks and W. E. Sharp, *Radio Sci.*, **23**, 975 (1988).
- [3] J. A. Carroll, *Am. Inst. of Aero. and Astronaut.*, Paper 93-4764, 1 (1993).
- [4] P. M. Banks, P. R. Williamson and K.-I. Oyama, *Planet. Space Sci.*, **29**, 139 (1981).
- [5] P. M. Banks, P. R. Williamson and K.-I. Oyama, *Am. Inst. of Aero. and Astronaut.* 31 (1981).
- [6] H. G. James, *J. Geophys. Res.*, **96**, 17865 (1991).
- [7] W. J. Raitt, A. B. White, S. Sasaki, K.-I. Oyama and N. Kawashima, A. C. Fraser-Smith, B. E. Gilchrist and T. J. Halliman, *J. of Spacecraft and Rockets*, **32**, 670 (1995).
- [8] G. M. Vannaroni, Dobrowolny, E. Melchioni and F. De Venuto, Characterization of the Interaction between a Hollow Cathode Source and an Ambient Plasma, *J. Appl. Phys.*, **71**, 4710 (1992).
- [9] V. A. Davis, I. Katz, M. J. Mandell and D. E. Parus, *J. Spacecr.*, **25**, 175 (1988).
- [10] L. M. Linson, *J. Geophys. Res.*, **74**, 2368 (1987).
- [11] M. Dobrowolny and E. Melchioni, *J. Geophys. Res.*, **98**, 13761 (1993).
- [12] N. Savich, K.-I. Oyama and S. Sasaki, *International Astronautical Federation* 92-0577 (1992).
- [13] E. A. Zaicev, V. A. Modestov, V. A. Ponjukhov, A. E. Reznikov and G. V. Bashilov, *Proc. of the 2nd International Tether Workshop*, Sagami-hara, 192 (1995).
- [14] B. Gilchrist, P. Banks, C. Bonitazi, R. Heelis, T. Neubert, K.-I. Oyama, J. Raitt, C. Rupp and S. Sasaki, *Proposal Summary of the Space Tethered Instrument Concept for ITM Science*, (1995).