

Shuttle Electrodynamic Tether System (SETS) の電気的特性について

P. M. バンクス*・P. R. ウィリアムソン**・小山孝一郎

Electrical Behavior of a Shuttle Electrodynamic Tether System (SETS)

By

P.M. BANKS, P.R. Williamson and K.I. OYAMA

Abstract: Many novel electrodynamic and space plasma physics experiments can be done from the space shuttle using a gravity gradient stabilized sub-satellite tethered 10 to 30 Km above the Orbiter via a long, conducting wire. The three principal physical processes involved include electron collection at the sub-satellite, the generation of a Large emf through the orbital motion of the wire across geomagnetic field lines, and the active ejection of electrons from the Orbiter by means of an electron emitter. This system, called the Shuttle Electrodynamic Tether System (SETS), is described in this paper with emphasis on the many electrical processes acting, including those present at the sub-satellite and Orbiter interfaces with the ambient ionosphere plasma. An electrical circuit analogy is presented with discussion of several possible operating modes.

概 要

プラズマ物理、宇宙空間物理において多くの興味ある実験を重力勾配を利用して Shuttle 上空 10 km~30 km に位置させた Subsatellite によってなす事ができる。この実験に含まれる三つの主な物理的過程は Subsatellite における電子の捕集、Tether が地球磁場を切る事によって生じる電磁波動の励起、および電子銃によるオービタからの電子の放出である。

ここでは、Subsatellite およびオービタとまわりの電離層プラズマとの境界に存在する多くの電気的なプロセスに重点をおいて、Shuttle Electrodynamic Tether System とよばれるこの System について述べる。

*米国ユタ州立大学物理学科

** 米国航空宇宙局本部

この論文の一部は、AIAA Journal に、全文は Planetary & Space Sciences に受理されている。

1. 序

Space Plasma の物理実験のために長い Wire を用いる事は1974年 AMPS (Magnetospheres and Plasmas in Space) Science Definition Study の中で提案された (Williamson and Banks, 1976). この提案の中で, 重力勾配を使って Shuttle Orbiter の上空におかれた物体と Shuttle Orbiter との間にのばされた導電性 wire に, これが地球磁場をきることによって $0.2\sim 0.3\text{V/m}$ の電圧を生じることが強調された. Wire の両端で電離層プラズマとの電気的な接続が行われれば wire に電流が流れ, その結果多くの興味ある現象がひきおこされるであろう. AMPS 研究の中では, 電子を集める電極としてはたらく上方の物体は導電性の表面をもつ風船であった. 従って, この System はもともと "Tethered Balloon Current Generator" とよばれ最近になって, 長い wire を上部の電子捕集の電極として働く小さい物体を使うことによって多くの研究がなされうる事がわかるようになってから "Electrodynamic Tether" あるいは "Shuttle Electrodynamic Tether System (SETS)" という名がつけられるようになった. この論文では SETS の振舞いを支配する基本的な物理現象について述べ, 更に SETS 実験の科学的目的を大まかに述べる. ここで述べられる大略は1978年5月2~3日, アラバマ州ハンツビルでの NASA Sponsor の Workshop で発表されたものである.

2. Review

AMPS Science Definition Study グループの活動の期間に研究された Electrodynamic Tether の概念図が図1に示されている. 導電性 Tether の両端に, 大きな電極として働く Subsatellite (ここでは電極表面を金属 Coating した球状物体として記されている) は電離層プラズマに浸される. Orbiter では Tether は周りのプラズマに電子を放出する電子銃に接続されている (電氣的に中性なプラズマ源を使用する事も可能である). Tether はまわりのプラズマとは電氣的に絶縁されており, 電流はその長さ方向に沿っては捕集もされないし放出もされないと仮定する. Orbiter-Tether-Subsatellite System が地球磁場の中をうごく事によって起電力が誘起され, その結果電子は Subsatellite であつめられ, Tether にそってオービタへ流れ電子銃を通して電離層へ流れ込む. 電氣的には, この回路は電位差 ΔV の存在する回路を Tether にそって上方に流れる電流によって記述される. 後述するように, この電気回路に付随する電気エネルギー $I\Delta V$ はオービタの中で実際に用いられうるか, まわりのプラズマ中に種々の波を励起するのに用いられる. この System によって人工的な Disturbance を電離層にひきおこすことができるという事は, 以前には不可能であった多くの科学実験への道を開くものである. この種のじょう乱に関する研究は Drell 等(1966) によってなされ, 彼らは大きな導電性物体と磁化プラズマとの相互作用を研究し, 大振幅のアルフヴェン波とエネルギーの消費が大きな導電性物体が電離層を走る事によって生じうるであろう事を示している. Drell の研究に端を発した物体と磁化プラズマとの相互作用の研究は人工的な物体だけでなく, 木星磁気圏の中を走る IO のような自然の衛星と磁場との相互作用の研究にまでひろがっている.

Orbiter-Tether-Subsatellite 系の安定性は Tether に張力 T があることによる. これに

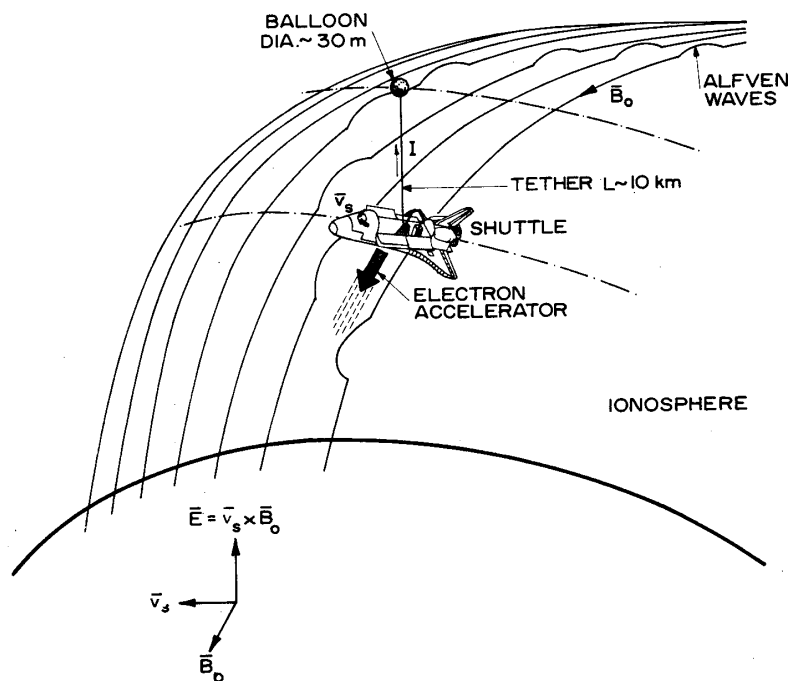


図1 Shuttle Electrodynamic Tether System(SETS) の一般的概念図.
Tether の長さは 10 km ~ 30 km で Tether 径は約 0.5 mm ~ 1 mm で長さ方向からの電離層プラズマによる電流の流入をふせぐため Tether 表面は coating を施す. 上方の物体は導電性表面をもつ球状電極である.

よって重力, Tether の張力および遠心力の平衡が保たれる. これらの力によって, 全体の系は Subsatellite をオービタの上方にもつ場合と, オービタのま下にもつ場合の 2 つの場合に安定点を持つ. 実際にはこのほかに大気の Drag と Tether の単位長当り $I(\overline{ds} \times \overline{B})$ によって与えられる電磁力とが加わって, 上記の安定点はずれ. 大気の Drag は Subsatellite をオービタの後方へうごかし, 従って, 平衡状態では Tether と Subsatellite に働く水平 Drag \overline{D} は Tether 張力の反対方向に働く水平成分で打ち消される (図 2).

電流 I が Tether を流れると, 単位長より $\overline{F} = I(\overline{ds} \times \overline{B})$ によって与えられる電磁力が Tether に働く. この力は軌道面に平行な成分と垂直な成分をもつ. この研究に伴うパラメータのうち, この電磁力は重力勾配と大気 Drag による Tether の張力よりはるかに小さい事がわかっており, 機械的な安定に必要な平衡は容易に実現される.

AMPS 研究の初期には, Subsatellite として 10 A の正味電流を捕集できるに十分な球として直径 30 m の導電性球が考えられた. 十分な重力勾配安定を得る事と, 大きな起電力を得る事と, Tether System の制御を容易にする事とは相反する事であるが, その妥協点として Tether 長は 10 km にとられた. 後述するように, 典型的な軌道では 10 km 長の Tether は 1000 ~ 2000 V の起電力を誘起し, かくして Tether に 10 A 流せるとするとこの系で

費されるエネルギーは 10^4 ワットになる。この電氣的エネルギーの源はオービタの位置エネルギーと運動エネルギーである。典型的な軌道パラメータではオービタの全エネルギーは $8 \times 10^{11} J$ であり、このエネルギーは電氣的エネルギーに徐々に変えられてゆく。初期の AMP S 研究における “Electrodynamic Tether” の詳細については Williamson と Banks (1976) および Williamson 他 (1978) にみられる。

3. 基礎的な物理概念

SETS におよぼす基礎的な物理過程の中には Tether のオービタ運動に伴う起電力と、プラズマと固体との相互作用（そこでは固体が電離層から電流を引出したり、逆に電離層へ電流を流れ込ませるような作用が生じている）の際におこる種々の現象とが含まれている。個々のプロセスの詳細について述べる事は困難であるが、全体の系としての振舞いは、システムの各部で起こっている電位差の変化を記述する簡単な電気回路のモデルによって容易に理解できる。現在までの所、各々のポテンシャル降下に関するすべてを解析的に理解する事は難しいが、ここに提供した基本的なモデルは SETS 実験から得られる種々の電氣的なモードを記述するのに充分である。

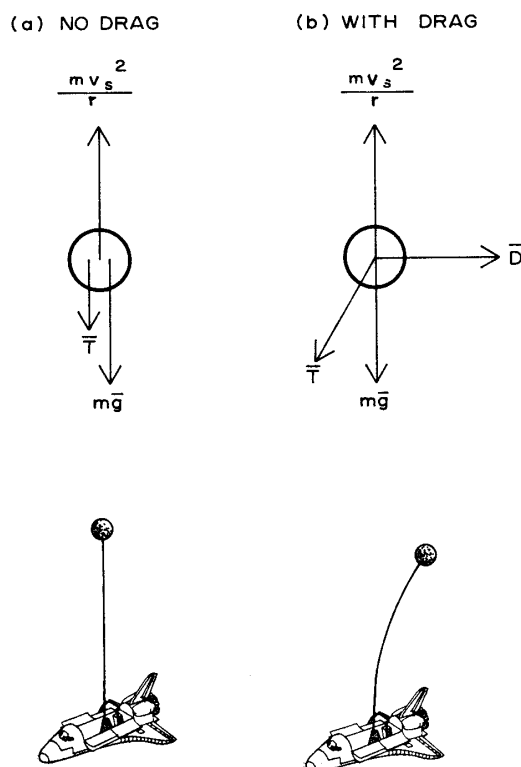


図2 大気のドラッグの影響を示す Subsatellite に働く力の様子。ダイアグラムはオービタ上空の Subsatellite に対するものである。

3.1 電場と電位

Electrodynamic Tether の電気的な振舞いは、オービタと共に動く座標系を用いる事によって最も容易に説明できる。この基準となるフレームにおいて、電離層プラズマは速度 \bar{v}_p でオービタに向かって動く。従って、オービタ上による観測者は下記の式であらわされる電場 \bar{E} の存在を感じる事になる；

$$\bar{E} = -\bar{v}_p \times \bar{B} \quad (1)$$

電離層内に上記以外の電場は存在しないとすると、プラズマを基準にしたオービタの速度 \bar{v}_s は下記の式によって \bar{v}_p と関係づけられる、

$$\bar{v}_s = -\bar{v}_p \quad (2)$$

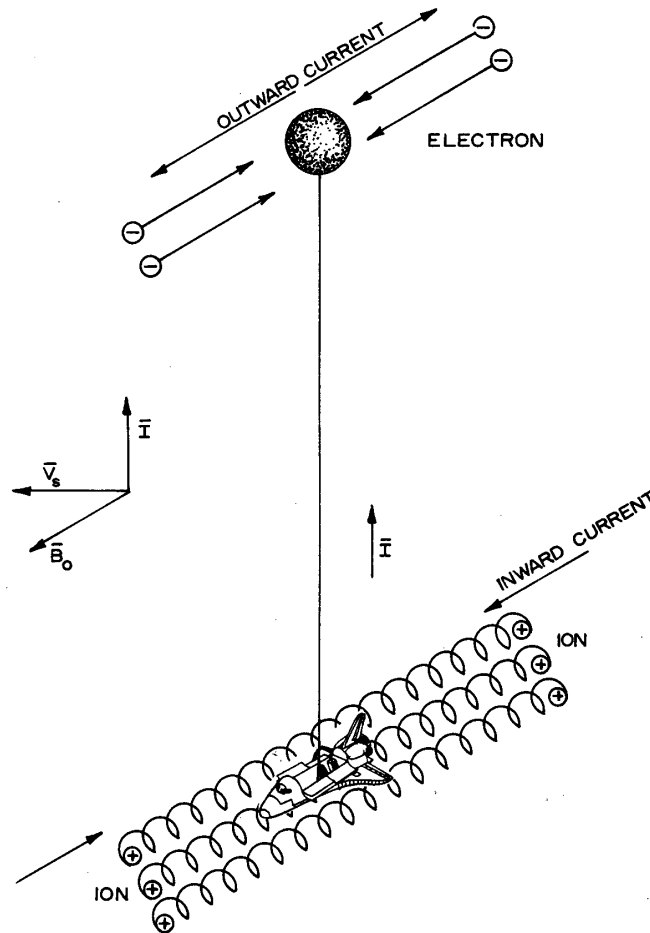


図3 Shuttle Electrodynamic Tether System の電気回路；
 \bar{v} と B は直交し、Tether はオービタから上方へのびている。

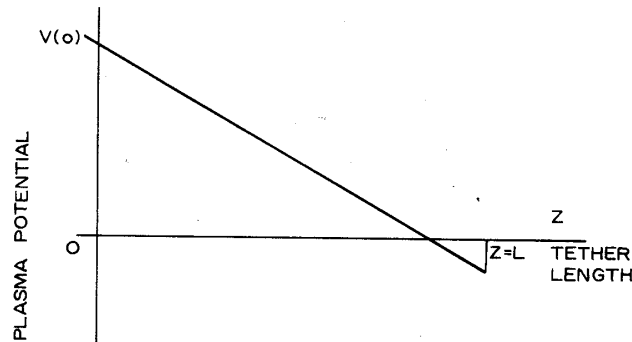


図4 Tether 長 z の関数としてのプラズマ電位. z はオービタから上方へ正にとられた距離である.

従ってプラズマ内に存在する電場は

$$E = \bar{v}_s \times \bar{B} \quad (3)$$

(3) 式を用いて, 点 \bar{r} におけるプラズマでの電位差はある点 \bar{r}_0 における電位と下の式によって関係づけられている.

$$V(\bar{r}) = V(\bar{r}_0) - \int_{\bar{r}_0}^{\bar{r}} (\bar{v}_s \times \bar{B}) \cdot d\bar{l} \quad (4)$$

図3に示されたように, \bar{v}_s と \bar{B} は互いに直交し, Tether はオービタの真上にあるような時, Tether の外側のプラズマ中の任意の点 z における電位は

$$V(z) = V(0) - v_s z B \quad (5)$$

ここで $V(0)$ はオービタにおける任意の電位で z はオービタから上に向かって正にはかられた距離である. オービタから上方への距離 z の関数として電位が図4にプロットされている. これから東に向かうオービタの場合, Subsatellite 位置でのプラズマは Tether の低い方の端にあるオービタでのプラズマより, 低い (より負) 電位にあることがあきらかである. プラズマに較べて高い電気伝導度を持つ Tether (Tether は \bar{B} に垂直) はこの電位差を短絡するように働き, その結果, 仮想的な正電荷はオービタの近くにあるプラズマから Subsatellite の近くのプラズマへ移る間にエネルギーを得る事になる. 実際にはシステム内の電流は電子によって運ばれるが, 同じ概念は依然としてなりたつ.

Tether 系の中でプラズマ内で得られる電位の総和 ΔV は (5) 式より

$$\Delta V = V(L) - V(0) = -v_s B L \quad (6)$$

で, ここで L は Tether の全長である (\bar{v}_s , \bar{B} および $d\bar{l}$ の任意の方向に対して, 式(4)に与えられたベクトル関係が, 式(5)(6)を変形するのに用いられる). 上記の式における負の符号は v_s , B および L の正の値に対し, Subsatellite とオービタにおけるプラズマの間に負の電位差があるという事を意味する.

3.2 電気的なモデル

式(5)で与えられ図4に示されるプラズマの電位は, Subsatellite とオービタを取り巻くプラズマを介して Tether System へ伝えられる. オービタ上空の電極表面においては電子の捕集は Tether に電気的につながれた金属表面によってなされる. この表面がまわりのプラズマに対して正あるいはやゝ負の場合, プラズマ内の熱電子による電流を電極表面にとり込む事ができる.

これとは対称的に, オービタは Subsatellite と違ってその passive な状態においては後に述べるように, 科学実験の目的に十分な光電子電流もなく十分な量の正イオンをかき集める事も不可能であるので, オービタとまわりのプラズマとは電氣的に良好な接触を保つ事は難しい. 従って, オービタにおいて回路をとじさせるためには, 積極的な電荷の放出(プラズマ源の電子とイオンあるいは電子銃による電子)が必要とされる.

Tether およびまわりのプラズマ系内の分布は図5に示されている. もっともここでの図は, Tether の inductive な影響が無視されうる低い周波数領域での話である.

システムでの電位変化を記述する式は, 図5の電位および静電位の変化の和は零であるとする要求から得られる. かくして, 電位 V_0 にあるオービタ周辺のプラズマから出発して,

$$\{V_0 - V(o)\} - IR - IrL + \{V(L) - V_B\} + \{V(o) - V(L)\} = 0 \quad (7)$$

$$\text{即ち } \Delta V_0 - I(R + rL) - \Delta V_B = \Delta V \quad (8)$$

ここで $\Delta V_0 = V_0 - V(o)$ はオービタとまわりのプラズマの間の電位差, IR はオービタ内の内部負荷抵抗による電位降下, IrL は長さ L および単位長与りの抵抗 r をもつ Tether による電位降下で $\Delta V = V(L) - V(o)$ は前に与えられたようにプラズマ空間電位の差である.

オービタ上空の物体とそのまわりのプラズマとの間の電位差は通常, その物体がまわりのプラズマに対して正になるようになっており, 電子はその表面にひきつけられる(ここでは Tether は $\Delta V/kT_e \gg 1$ となるように充分長く, L は電子あるいはイオンのジャイロ半径よりはるかに長いと仮定する). 上方の物体の表面近くに存在する半径方向の電場は, 電極を取り巻くプラズマシースの中に閉じ込められる. 電子の熱エネルギーとくらべて小さい ΔV_B に対してはシースの厚さは普通数 Debye 長である. このような状態での導電性表面における電流の放出(電子の捕集)は熱電子束できまり, 下記のようにかける.

$$J_e = \frac{1}{4} en_e \langle u_e \rangle = \frac{1}{4} en_e \left(\frac{8kT_e}{\pi m_e} \right)^{1/2} \quad (9)$$

ここで J_e は電流密度, n_e は電子密度, $\langle u_e \rangle$ は電子の平均熱速度, および T_e は電子温度である.

プラズマの熱エネルギーにくらべて小さい ΔV_B に対しては地球磁場が存在する事によって生じる複雑さは無視でき, Subsatellite によって集められた電子 flux は電離層プラズマにさらされた全体の捕集面積を考慮する事によって得られる. ΔV_B が正で kT_e にくらべて大きい時は, 電子の捕集は局所的なプラズマ密度の減少がおこるのでより複雑になる. この

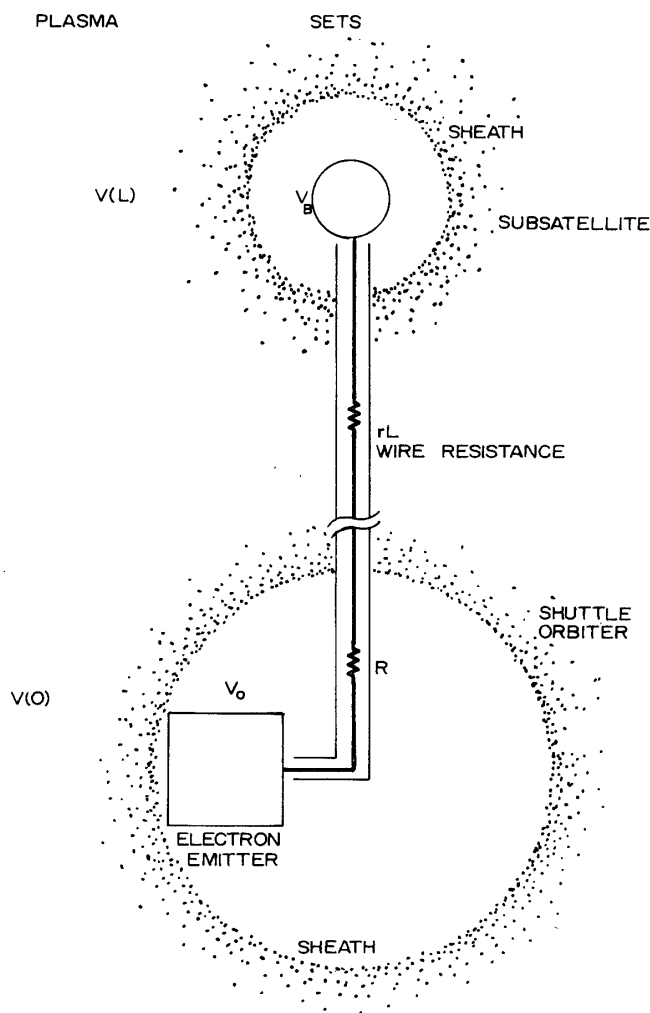


図5 SETS の電位の模式図

環境では、磁場を横切る電子の輸送によってプラズマのじょう乱がひき起こされる(Linson, 1969)。現在、この状況で生じているプロセスについてはほとんど知られていない。

上部の物体で集められた電子電流は、Tether に沿ってオービタへ流れる。プラズマのもつ導電性のため、電流が Tether にそって流れるよりはむしろプラズマの中を流れる可能性が考えられるが、現在の実験に考えられている高度は 200 km 以上であって磁場を横切って流れる電流の寄与は wire 中を流れる電流にくらべると少ない (Drummond et al., 1969)。

電子放出に関しては、放出源はオービタにあると仮定している。電子はオービタに対して電位差 ΔV_0 を持つシース領域を通して電離層プラズマに流れこむ。

式(8)によって与えられた結果は、Electrodynamic Tether System 内で起る電位降下の様子を示している。この結果はまた、Orbiter-Tether フレームの中では絶縁された Te-

ther は外部のプラズマ電位を一方から他方へ伝える役目をしていることを示している。今、上部物体がまわりのプラズマと良い電氣的接触状態にある ($\Delta V_B=0$) と、式(6)と(8)からまわりのプラズマに対するオービタの電位は

$$\Delta V_o = -v_s BL + I(R + rL)$$

あるいは $v_s BL$ にくらべて Tether の電圧降下が小さいと

$$\Delta V_o = -v_s BL$$

となり、オービタはまわりのプラズマより、より低い電位にあることを示している。従って、オービタへの電離層内イオンの加速、あるいはオービタから外へ向かう電子の加速が起る。

もし十分な電子放出がオービタでおこれば、同じような結果が生じ $\Delta V_o=0$ となる。一方、上部物体での電子捕集には限りがあり、この状態では(再び IR と IrL を無視すると)

$$\Delta V_B = -\Delta V = v_s BL$$

即ち Subsatellite はまわりのプラズマに対して正電位になり、電離層内電子が金属表面へ引きつけられる。

これらの例から、SETS の電磁氣的な振舞いはその内部の特性と電子の捕集および放出がまわりのプラズマと系をつなぐのにどれほど効果的に行われるかによる。Subsatellite として大きな金属表面を用いるというもともとの考えは、その簡単さにおいてだけでなく Plasma Wake の研究等のため、これを利用できるという長所を持つ。しかしながら、SETS の終端電極に関しては他の可能性も考えられる。

そのままの物体として、オービタはその表面はほとんど絶縁材料でおかれ、従って光電子電流あるいは電離層内の ion をかき集める事も不可能であって、特によい電極とはいえない。このためオービタからの積極的な電子放出が、通常の“オービタ上空 Subsatellite”の配置では基本となる。

極端な場合をのぞいて、オービタ上で積極的な電子放出を行う事によって、Tether 系内での電流 I を独立な変数として扱う事ができる。 I と R のある値に対してプラズマ-導電体およびプラズマと電子放出の過程が ΔV_B と ΔV_o を決める。しかし後述するように、電子の放出があまり大きくなりすぎると、オービタ電位はまわりのプラズマへの電子の放出をさまたげるように働き、電流 I は独立にきめる事はできない。

前にみたように、Tether-Orbiter 系と共に動く観測者にとって Tether は異なった空間電位の領域を電氣的につなぐように働く。これに関する別な表現法として、上部電極とプラズマ、およびオービタとまわりのプラズマとの電氣的な結合が大変よく ($\Delta V_B \approx 0$, $\Delta V_o \approx 0$)、かつ Tether が図6に示されるように高抵抗の中間タップをもっているとすると、Tether の両端は、それぞれの両端の電位差を中間タップに伝え、この中間タップの両端に電位差 ΔV があらわれる事になる。この配置では Electrodynamic Tether は電場測定におけるふつうのプラズマプローブとにている。

もちろん空間電位をとり出す他の多くの配置が考えられ実際に応用できるが、SETS の有

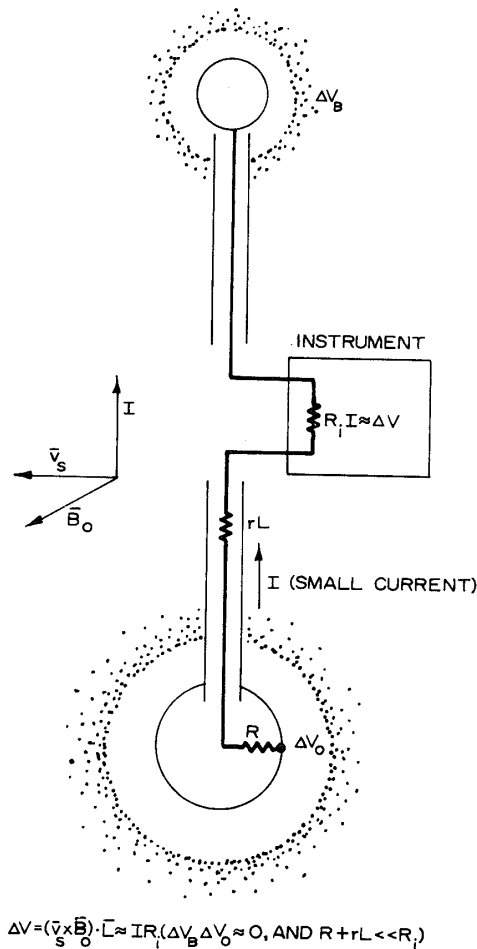


図6 高抵抗をもった SETS の電気回路

用性は得られる大きな電位差および電流，さらに系の電流，負荷抵抗および電子ビーム電流を変える事により生ずる種々のプラズマ効果に起因する。

3.2.1 弱電流の場合

まず積極的な電子放出がおこり，Tether に電流 I を生じる場合を考える．上部電極においては，電子捕集は電子束が熱電子束 J_e より小さいかぎり，効果的に進む．この状況では Subsatellite はほとんどプラズマ電位に等しい．即ち $\Delta V_B \approx 0$ で式(8)による電位の平衡は

$$\Delta V_0 = -v_s BL + I(R + rL)$$

となり，この事は $I > 0$ となる通常の動作ではまわりのプラズマに対するオービタの負電位は減少する事を示している．更に，オービタからの電離層プラズマへの電子放出がおこる．この際の電子の加速電圧は $-e\Delta V_0$ である．もし多量の電子が放出されれば，電流 I は ΔV_0 。

≈ 0 , 即ち $I(R+rL)=v_s BL$ になるまで上昇する. しかしながら, もし $(R+rL)$ が小さすぎると, 電子銃によって得られる電流 I は上部物体で得られる熱電子流より大きくなり ΔV_B はもはや小さくはなりえない. この大電流の場合については次節で議論する.

直径 30 m の球状電極 (表面積 $\sim 10^3 \text{ m}^2$) の場合, 熱電子電流は $J_e \approx 1 \text{ mA/m}^2$ となり, ΔV_B が極端に大きくなる前に 1 A の電流がとりこめる.

ΔV_0 が負であるかぎり, オービタからの電子放出は局所的な電子源を作り出す事で容易になされるが, $I(R+rL) \approx \Delta V$ となる点においてはオービタから電子がとび出せるに十分な加速電圧は存在しなくなる. 大電流をうるためには電子が $I(rL+R) - \Delta V$ かこれ以上の加速電圧をもつように加速系をつくらねばならない.

3.2.2 大電流

種々な方法によって上部電極での捕集電流を熱電子束による電流よりも大きくする事は可能であり, この状況では ΔV_B は式 (8) からわかるように, 電流増加のための要求を満すように増加する.

$$\Delta V_B = v_s BL - I(R+rL) + \Delta V_0$$

しかしながら, この場合, 高電圧が電極に印加された場合の電子捕集は複雑でその詳細はよく知られていない (Linson, 1969). この状況の中では電流 I は独立に選ぶ事はできず, 第一次近似の $\Delta V_0 \approx 0$ はなりたたなくなるであろう. 実際には, もし上部電極によって熱電子束による以上の電流を集めようとする, オービタにおける電子エミッションの量と上部電極における捕集電流の量が等しくなるように ΔV_0 はまわりのプラズマに対して正になるであろう. この状態での SETS の振舞いについてはまだ研究されておらず, 地球磁場中での高電圧を印加された電極による電流の捕集に伴う物理過程の研究を行い, これを明らかにしてゆく事は SETS 実験の目的の一つである.

3.3 プラズマのじょう乱

SETS から流れ出た電流をまわりの電離層へ送りこむ事によってシース内では複雑なモードの波が励起され, かつ磁力線に沿う種々の波の伝播がみられるであろう. 伝播する波についての詳細な研究は Drell et al., (1965) によってなされた. Drell 等によって採用されたモデルには, 伝送線の概念がとりいれられている. 即ち地上の観測者からみると, 大きさ b の電極を持つ SETS は速度 v_s で磁力線を横切る. 時間 $T = b/v_s$ の間, 一つの磁力線には電流 I が流れる. もし T が十分に長ければ, 伝送線の特性インピーダンスでできるような速度で, B に沿って伝播するアルフヴェン波が励起される (図7).

アルフヴェン波近似においては, 電流パルスはプラズマ密度, 磁場の強さ, シヤント抵抗の変化に応じてその振幅, 位相を変えながら磁場に沿って伝播する. E領域においてはペダーセン導電率は系に対して, 波のエネルギーを吸収, 反射する損失抵抗として働く. 基本的には, Tether 系によって励起された波のエネルギーは, 熱として E領域で消費される. 更に, 波は地球磁場で捕捉された粒子と相互作用し, 波の増幅あるいは, 大気への電子降下をひきおこす.

伝送線理論についてのより詳しい議論が, Drell 等 (1965) と Williamson および Banks

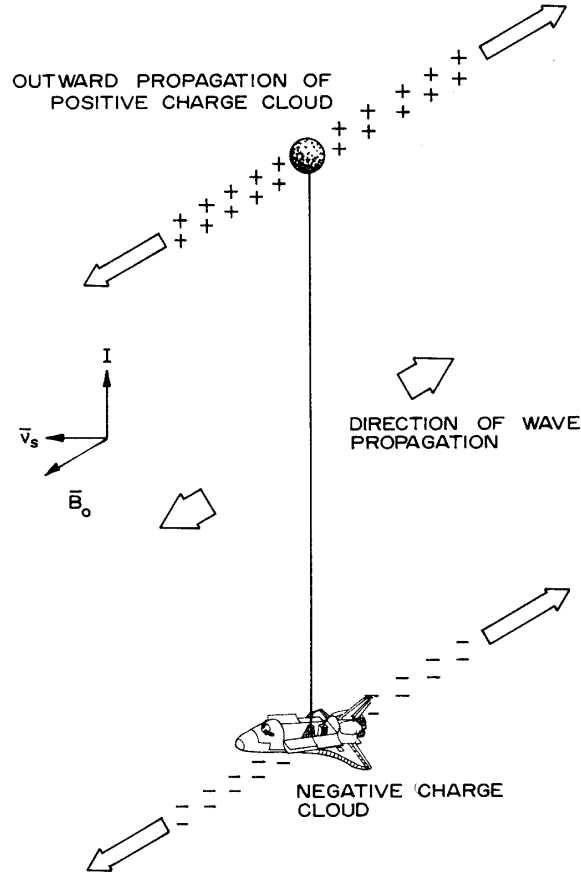


図7 Shuttle Electrodynamic Tether System による
Alfven 波励起の一般的な idea

(1976) によってなされている。

Drell が考えたよりより小さい電極での近辺の場と電極よりはなれた所での場については、まだ研究されていない。特に興味深いのは、アルフヴェン波領域より高い周波数の波を励起するために、小さい物体が上部電極として用いられる場合で、これについては別稿で述べる。

4. 実験の構成

初期のSETS の概念は、重力、遠心力、大気 Drag, $I \times B$ 電磁力および Tether 張力間の平衡が保たれるように、電子捕集電極をオービタの上空においた(図1)。電磁気的実験のために有用な別な構成もまた可能で、ここではこれらについて簡単に述べる。

4.1 Subsatellite 上空のオービタ

この構成においては、重力勾配によって系の安定がたもたれる。通常の軌道ではより低い

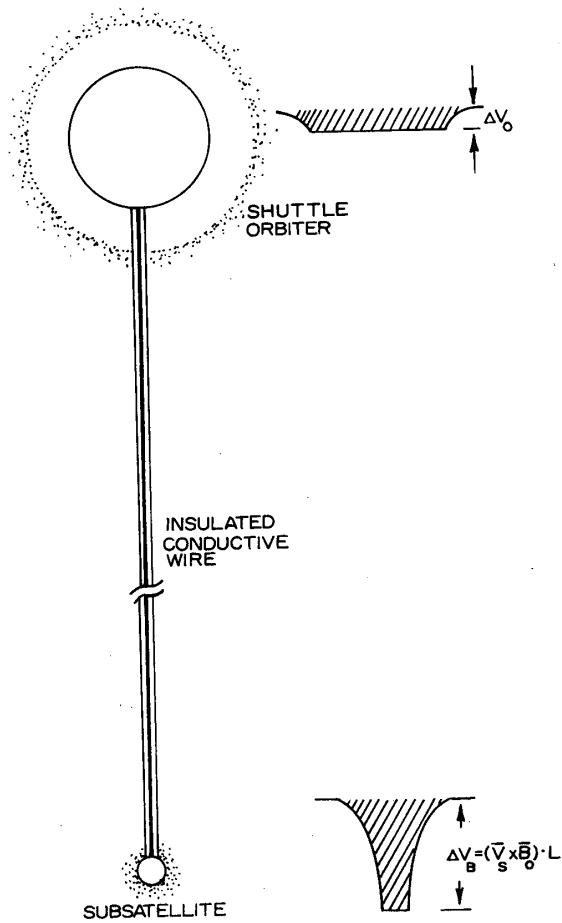


図8 “Subsatellite 上空のオービタ”における Shuttle Electrodynamic Tether の電位分布

高度にある物体は、オービタの近くの電位より高い電位にあるプラズマで囲まれている (図8)。Tether に電流が流れるためには低高度にある物体から電子を放出するか、正イオンを引き寄せ、オービタにおいては電子を捕集するか正イオンを放出する事が必要となる。荷電粒子捕集と放出のためのいくつかの組み合わせが考えられるが、これらを列記すると；

	下方物体	オービタ
A	イオン捕集	電子捕集
B	イオン捕集	イオン放出
C	電子放出	電子捕集
D	電子放出	イオン放出

A の場合は完全に受動的であって、イオン捕集は主に電極が電離層を動く事によってまわりのイオンをかきあつめる事によってなされる。典型的な Subsatellite の速度 7.7 km/sec

では、イオン電流は 0.22 mA/m^2 になる ($n_i = 2 \times 10^{11} \text{ 個/m}^3$).

イオンの熱速度は Subsatellite 速度より小さい (1 km/sec 対 7 km/sec) ので、電極電位は大きく負にずれる。たとえば、電極に到達する酸素イオンは、電極表面に対して 5 eV の運動エネルギーをもつ。

オービタについていえば、電子捕集面積は 50 m^2 で、全体の熱電子電流は $\sim 2.8 \text{ mA/m}^2$ ($n_e = 2 \times 10^{11} \text{ ele/m}^3$) である。かくして 0.1 A の電流がオービタの電子捕捉で得られるが、電極ではイオンの寄与はえられる捕集面積による。

小電極の場合の状態をしるために、今 1 m^2 の表面積があるとする。この場合 Tether 電流は 0.22 mA とイオン電流によって制限される。オービタでの電子捕集は $\Delta V_o \approx 0$ で上記の電流をとりこむことができる。 ΔV_B は

$$\Delta V_B = -v_s BL + I(R + rL)$$

でイオンの運動 energy を無視している。

$I(R + rL)$ が $v_s BL$ にくらべて小さい時は ΔV_B はまわりのプラズマ電位に対して負となり、下方の電極にはいりこむイオン電流を増加させる傾向がある。もし $I(R + rL)$ が大きいとイオンのかき集めは $\Delta V_B = 0$ の時ですら続くので、 I に影響をおよぼす事なく ΔV_B は $v_s BL$ とくらべて小さくなりうる。

下部に大きな捕集面積をもつ物体の場合、イオン電流はオービタの電子電流をこえうる。この状態では ΔV_o は電子電流を増加させるために正になる。この場合の電位平衡は

$$\Delta V_o = v_s BL - I(R + rL) + \Delta V_B$$

で ΔV_B と ΔV_o は系全体の電流をバランスさせるに必要な値を仮定した。

Bの場合、積極的なイオン放出がオービタによってなされ電子捕集を助ける。この場合の電気的モデルはAの場合よりより複雑になり、オービタによる電子捕集とイオン放出は同時におこりうる。

オービタに積極的にイオン源をとりつけることによっていろいろな電流、電圧が要求されるような実験を遂行する際に、Aの場合に示唆されたような変化する電離層パラメータへの依存性を軽減することができる。

Cの場合、積極的な電子放出は下部電極でなされるので導電性の表面がプラズマに浸される必要はない。このシステムの動作は前に議論された基本的な "Orbiter 上空 Subsatellite" の考えに依っている。オービタでの電流捕集面積が限られているので、 ΔV_o が正で大となるモードへの移行は、大きい電極の場合よりはより小さい Tether 電流でおこる。

Dの場合、積極的な荷電粒子の放出は Tether の両端で行われる。この配置は $\Delta V_B, \Delta V_o$ をかえるための機会をより多く与える事ができ、一方では電極とプラズマとの相互作用にもなう不確定性を少なくすることができる。

長いひもを用いてオービタの下 100 km で実験を行う "Skyhook" については特別な注意が払われなければならない (Colombo et al., 1974)。表面を絶縁した導電性の Tether が用いられると、ひもの両端にあらわれる電位差は 10000 V から 20000 V となる。これは小さ

いイオン捕集面積をもつAの場合であって、従って、比較的大きな電子捕集面積をもつオービタでは $\Delta V_o \approx 0$ で

$$\Delta V_B = -v_s BL + I(rL + R)$$

おおよその値として $I(\sim 0.2 \text{ mA})$, $r(\sim 2 \Omega/\text{m})$, $L(\sim 100 \text{ km})$ を上式にいれると, Tether の電圧降下は $\Delta V(\sim 10000 \sim 20000 \text{ V})$ にくらべて 4 V と小さい. 従って, Subsatellite はまわりのプラズマに対して大きく負に沈み, イオンを大きなエネルギーをもって Subsatellite 表面へ加速する(あるいは光電子を表面から電離層へ向って加速する). この状態では, Subsatellite のまわりには大きなシースが形成され, まわりには複雑な電流が流れる. この現象は図9に示されている.

4.2 Dynamical Models

SETS は前節で議論された構成のほかに, 二つの物体を互いに運動させる事によってまた一層興味深いものとなる. この状況では遠心力と Tether の張力が重力のほかに加わる:

一つの動的構成は図10に示されるような Cartwheel Mode である. 電極は角周波数 Ω

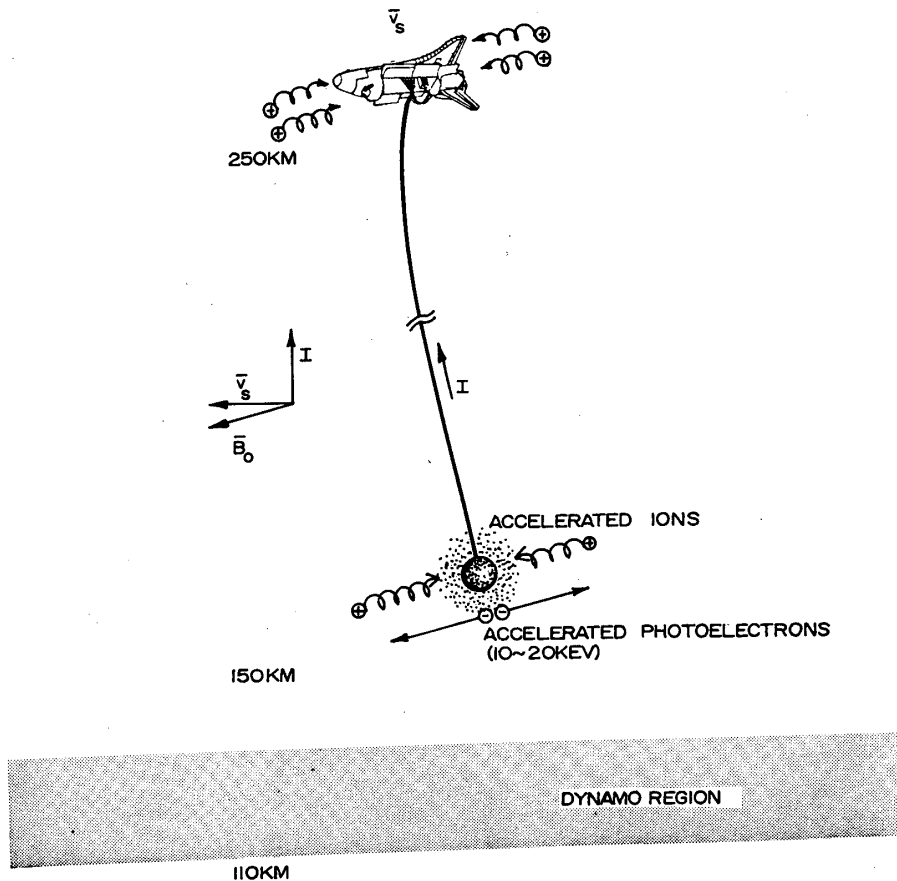


図9 長い Tether をもつ “電極上空のオービタ”

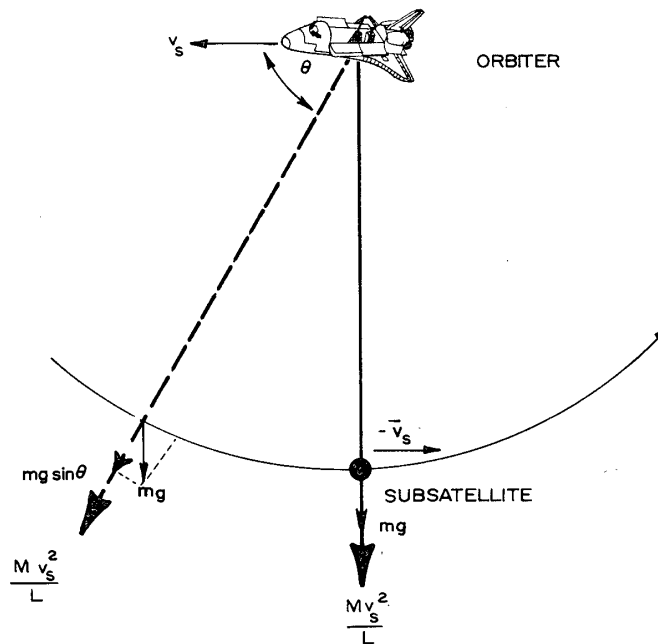


図10 Shuttle Electrodynamic System におけるカート
ホイールモード

でオービタのまわりを回転する。この結果、電極でみられるプラズマ電位は時間と共に変化する。このような構成は Subsatellite への大気の Drag の影響を減少させるのに有用である。

$\Omega = v_s/L$ を考えると、大気に対する Subsatellite 速度は Subsatellite が達する最低高度で零となる。Cartwheel Mode でのひもにかかる張力は、

$$T = Mv_s^2/L + Mg \sin \theta$$

ここで θ はオービタの速度ベクトルとひものなす角(図10), g は重力加速度である。

8 km/sec の衛星速度, $L=100$ km, $M=100$ kg を上式に代入すると $T=6.4 \times 10^4 N$ となり, これは非常に大きな引張り強さをもつ Tether を必要とすることを意味している。

5. 結 論

Shuttle Electrodynamic Tether System の電氣的な振舞いをプラズマシースの形成, システムの抵抗損失, オービタからの電子の加速を考慮して議論した。電子を放出するオービタの上空に電子を捕集する電極を位置させる配置が, Electrodynamic Tether の実験に最も適しているようにみえる。この System による広い範囲にわたる波の励起, 磁力線に沿う方向に流れる電流による種々の不安定性の励起, 極域における電場の測定等ができるようになるであろう。

謝 辞

W. B. Thompson 教授, F. Crawford 教授, および R. A. Helliwell 教授との多くの有意義な Discussion に謝意を表す。この研究の一部はグラント番号 NSG-7289 および NAS 5-23837 の2つのグラントによって, 著者の一人(小山)が米国ユタ州立大学で行ったものである。

1980年10月13日 新設部(科学)

参 考 文 献

- [1] Chu, C.K. and R.A. Gross, Alfvén waves and induction drag on long cylindrical satellites, *AIAA Journal*, 4, 2209-2214, 1966.
- [2] Colombo, G., E.M. Gaposchkin, M.D. Grossi and G.C. Weiffenbach, Shuttle-borne "Skyhook"; A new tool for low-orbital altitude research, *Smith. Astrophys. Res. Rep. in Geoastronomy No. 1*, 1974.
- [3] Drell, S.D., H.M. Foley, and M.A. Ruderman Drag and propulsion of large satellites in the ionosphere; An Alfvén propulsion engine in space, *J. Geophys. Res.*, 70, 3131-3145, 1965.
- [4] Drummond, J.E. and D.J. Nelson, Resistance of the magnetosphere, *J. Geophys. Res.*, 74, 1270-1274, 1969.
- [5] Lighthill, M. J., Note on waves through gases at pressures small compared with the magnetic pressure, with applications to upper-atmosphere aerodynamics, *Fluid Mech.*, 9, 465-472, 1960.
- [6] Linson, L.M., Current-Voltage characteristics of an electron-emitting satellite in the ionosphere, *J. Geophys. Res.*, 74, 2368-2375, 1969.
- [7] Moore, R.D., The geomagnetic thruster - A high performance "Alfvén wave" propulsion system utilizing plasma contacts, *AIAA Paper No. 66-257*, 1966.
- [8] Oyama, K.-I., P.R. Williamson, P.M. Banks, and W.J. Raitt, An investigation of interaction between plasma and moving conductive sphere, *CRA-Memo 1/78*, 1978.
- [9] Williamson, P.R., and P.M. Banks, The tethered balloon current generator-a space shuttle-tethered subsatellite for plasma studies and power generation. A final Report Submitted to NOAA, Environmental Research Laboratories, Boulder, Colorado, 80302, 1976.
- [10] Williamson, P.R., P.M. Banks and K.I. Oyama, The Electrodynamic tether, *CRA-Memo 2/78*, 1978.