

## EXOS-D の EMI 測定 (VLF 波動観測装置への干渉)

長野 勇\*・木村 磐根\*\*・岡田 敏美\*\*\*・山本正幸\*\*\*\*  
橋本 弘蔵\*\*\*\*\*・鶴田浩一郎\*\*\*\*\*・川口 正芳\*\*\*\*\*  
杉森 明志\*\*\*\*\*

## Electromagnetic Interference (EMI) Measurements for the EXOS-D Satellite

By

ISAMU NAGANO, IWANE KIMURA, TOSHIMI OKADA, MASAYUKI YAMAMOTO,  
KOZO HASHIMOTO, KOICHIRO TSURUDA, MASAYOSI KAWAGUTI, AND  
AKASHI SUGIMORI

**Abstract:** High quality observations of VLF waves in the magnetosphere by VLF instruments on board EXOS-D have been possible because electromagnetic interference (EMI) tests were carried out twice before launch. As a result some of the instruments on board were modified to either eliminate magnetic noise sources or reduce magnitude of the noise. The present paper describes magnetic noise data from the on-board instruments acquired during the assembly tests and discusses several ways to reduce the magnetic noise. Magnetic intensities were measured, in a shielded room, in a frequency range of 20 Hz to 20 kHz with both on-board loop antennas and a horizontally orientend search coil located at a distance of 1.5m from the center of the satellite. The interference data obtained after launch are also presented. Our experiences of EMI measurements for EXOS-D were used to define requirements for electromagnetic interference of GEOTAIL which are briefly introduced.

---

\* 金沢大学工学部                   \*\*\*\*\* 東京電機大学  
\*\* 京都大学工学部               \*\*\*\*\* 宇宙科学研究所  
\*\*\* 富山県立大学               \*\*\*\*\* 日本電気(株)  
\*\*\*\* 三菱電気

## 概 要

EXOS-D 衛星は1989年2月21日に打ち上げられ、その後伸展物の展開、高圧電源の投入を経て、観測態勢に入った。VLF 装置によるプラズマ波動の観測は、一部他の搭載機器との電磁干渉が見られるが、概ね良質のデータが取得されており、PFX 装置で観測されたオメガ信号及びホイストラ空電の  $k$  及び Poynting vector の解析に成功している<sup>1), 2), 3)</sup>。また、WB 受信機や MCA 装置により、オーロラに関連した Hiss や funnel type のエミッションのスペクトラムが観測されている。この様に、概ね良質な波動データを取得できたのは、次のような EMI 対策によるところが大きい。すなわち第1次噛み合わせにおいて、全てのサブシステムを衛星に組み込んだ後に各サブシステムからの放射磁界雑音特性を測定し（システム全体により構成されるループからの放射も含む）、その雑音強度が VLF 班の測定対象としている波動のレベル（磁界センサーが検出できる最小レベルを基準にすることが望ましいが）を越えている場合、そのサブシステムについて EMI 対策をお願いした。改修後、単体による EMI 測定を行なった。更に、第2次噛み合わせにおいて、組み上げ後再度 EMI テストを行なった。このようにして、各サブシステムの PI のご協力により、放射磁界干渉雑音強度を減少させることが出来た。しかし、一部の搭載機器においては、その改修によるシステム全体に与える影響を避けるため、そして改修にかかる時間的制約のもとで、干渉を減らす為の装置の改修を諦めざるを得なかった。

本報告では、EXOS-D の干渉試験を通して得られたいくつかの EMI 対策方法や資料について述べる。また、打ち上げ後の軌道上における VLF 装置と他サブシステムとの干渉結果についても述べる。そして、これらの経験を通して作成された1992年打ち上げ予定の科学衛星（GEOTAIL）に於ける EMC 規制値についても触れる。

### 1. 放射雑音磁界強度の測定

機器間の電磁干渉には、伝導電流と放射電磁界による干渉がある。EXOS-D の電気設計基準によれば、各機器のパワーラインに生ずるリップル電圧の最大値が決められている<sup>4)</sup>。この基準は伝導電流雑音による各機器間の干渉を規制している。しかし、放射電磁界に関する規制値を予め決めることは、これまでの干渉データや経験不足のため困難であったので、実際の測定をみて、対策を取るようになった。放射電磁界の干渉強度の許容値は、搭載波動測定器のセンサー感度及びそのセンサーの搭載位置による。EXOS-D では、電界センサーとしては、全長60mの直交ワイヤーアンテナが搭載されている。磁界センサーとしては、衛星の側面から1.5m離れた位置に3軸ループアンテナ、3m離れた位置に3軸サーチコイルが置かれている。ループアンテナは周波数800Hz以上を対象として、その感度は、0.02

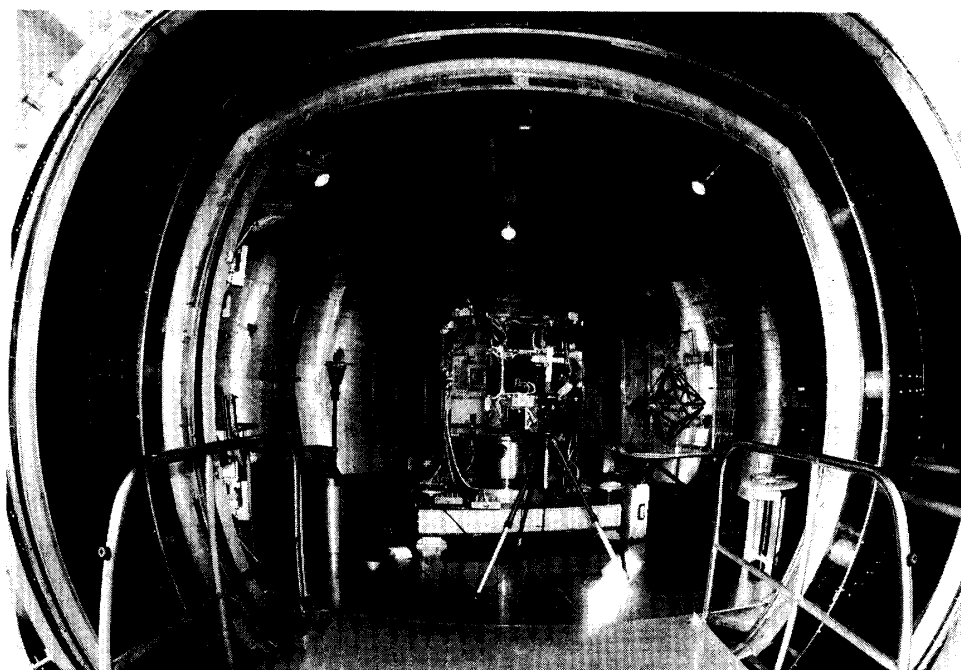


図1. EXOS-D衛星EMI干渉試験風景

$\text{pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  (1kHz),  $0.005 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  (5kHz) である。一方、サーチコイルは800Hz以下を対象にしており、その感度は  $0.2 \text{ pT}/\sqrt{\text{Hz}}$  (100Hz) となっている<sup>2)</sup>。

第1次及び第2次総合試験における干渉試験は、図1に示すようにシールドルームに衛星を入れて行われた。干渉レベルの測定は、搭載用電界アンテナの端子に1mの疑似アンテナを接続し、搭載用3軸ループ及び3軸サーチコイルを衛星の中心より1.5m離し、それぞれVLF装置内のWB受信機、MCA、及びELF受信機で行なわれた。衛星のテレメータ電波はシールドルームから有線でチェックアウトルームへ運ばれ、復調された。コマンドラインはシールドルームの外より計装ラインを経由して衛星に接続された。EXOS-Dの試験では、この衛星と外部との計装ラインを電氣的に絶縁することはできず、外部よりコンピューターや商用電源ノイズ（特に電界成分）がシールドルームに侵入した。また、同時に搭載用でない3軸のサーチコイル（ここでは、外部サーチコイルと呼ぶ）を衛星の中心から1.5m離れたところに設置し、衛星近傍の放射磁界強度をシールドルーム外のスペアナで測定した。衛星の電源は外部及び内部の両方で行なった。表1は各サブシステムからの放射磁界強度を示す。搭載センサーによる測定値は、干渉があったかどうかを大、小の相対値で示され、外部サーチコイルによる測定では、絶対値が示されている。いくつかの機器では、放射磁界強度がセンサー感度の40dB以上もオーバーしている状況であった。実際に予測される Auroral Hiss（最大値数 pT）やホイストラ等の強度とも比較しても、この干渉強度は30dB以上も越えていた。この干渉は、機器間の伝導により生じたものでなく、波動測定器のセンサーによってピックアップされるもので、波動班では対策の立てようがなく、磁界を放射している機器並びにシステム側にその対策をお願いした。表1には、更に対策の方法及び打ち上げ後の干渉の程度が備考欄に記されている。干渉の原因及び対策について以下に述べる。

表1. 一次噛み合わせ時の干渉レベル及び対策

VLFセンサー	ワイヤ (Ex)	ループ (By)	サーコイル (sBy)	外部サーコイル	対策 (処置)	備考 (軌道上の干渉)
位置 (中心 よりの距離)	~2.5m	1.5m	1.5m	1.5m		
MGF	f<1kHz 少し有り		少し	低域ではCMDノイズのため 判断できず、f=15kHzに 数mγのpure toneあり		干渉なし
LEP(注) HV max	?	?	?	f<3kHz, ~5mγのノイズあり	μメタルシート ツイスト化	ほぼ干渉なし
EFD-B clock(fm) (fmin) saw max PN select	大 大	大	大	認められない f<4kHz, ~3mγ f<1kHz, ~10mγ f<4kHz, ~10mγ	μメタルシート	—
DMS ミラ回転	大	大	大	f<5kHz, ~数十mγ	なし	f<1kHz 以下で間 欠的に干渉あり
ATV	-	-	-			
TED	-	-	-			—
SMS(注)	?		?	f<2kHz, ~5mγ	なし	強く干渉あり
SPW power on sweep	大 大	大 大	大 大	f<5kHz, ~数mγ, ワイド f<10kHz~5mγ, ワイド		干渉あり
CMD	大	大	大	0.5, 1, 1.5kHzに数十mγ	フィルタ改修 ツイスト化	干渉なし
BDR(H) (M)	大 大	大 大	大 大	f<2.5kHz, ~数十mγ 同上	μメタルシート フィルタ挿入	f<1kHz 以下で干 渉あり
MTQ				測定項目外		f<100Hz で強く 干渉 (高度の低い 処)

注：1.5kHz以下でCMDからの干渉が非常に大きかったので、VLF搭載受信機は、その強力な干渉レベルでAGCが制御されたため、f<1.5kHzでの干渉は充分に見れていない。もしCMDノイズが小さいならば見えていただろうと言う意味で“?”印をつけた。

## 2. EMIの原因と処置

観測点に比して、磁界を発生するループの半径が小さい場合には、磁界強度は次のように求められる。磁気双極モーメントを $M=SI$  ( $S$ :ループの面積,  $I$ :ループの電流), 双極からの観測点までの距離を $r$ , 双極と位置ベクトルとのなす角度を $\theta$ として,  $r$ 点の磁界強度の絶対値は

$$B = \frac{M\mu_0}{4\pi r^3} \sqrt{1 + 3 \cos^2 \theta} \quad (T) \quad (1)$$

となる。  $\theta = \pi/2$ ,  $r = 1.5\text{m}$ で,  $B = 1\text{pT}$ となるためには,  $M = 3.4 \times 10^{-5} (\text{Am}^2)$ となる。

これは、10cm×10cmのループに約3.4mAの電流を流したとき、1.5mの地点に1pTの磁界が発生することに相当する。EXOS-Dに搭載しているループアンテナの感度は前述したように、周波数1kHz、帯域50Hzで0.12pT程度となり、放射磁界雑音レベルをこれ以下にするには、各サブシステムに対して相当の注意を払わねばならないことが分かる。

各サブシステムからの放射磁界は、図2に示すように主に3種類（RE1-3）の電流ループによって生じていると考えられる。

RE1： サブシステム内のロジック回路のループ電流による放射磁界、及び高圧電源を供給するDC/DCコンバータのトランスからの漏れ磁束による放射磁界。EXOS-Dの搭載装置では、DC/DCコンバータに使用する周波数の電流よりも、粒子エネルギーの測定レンジが変化するとき、トランスの1次側に流れる電流により磁界を放射するようであった（LEP, SMS）。この対策としては、トランスに磁気シールドを施すこと、装置内の基盤内の信号ラインのループ及び電源ループ面積を減少させること、そして、余分な電流を流さないこと等である。

RE2： 衛星の電源装置から各サブシステムへ電力を供給するパワーラインからの磁界放射。この対策としては、電源ラインをツイストペア線にして、電流バランスをとる。また、サブ

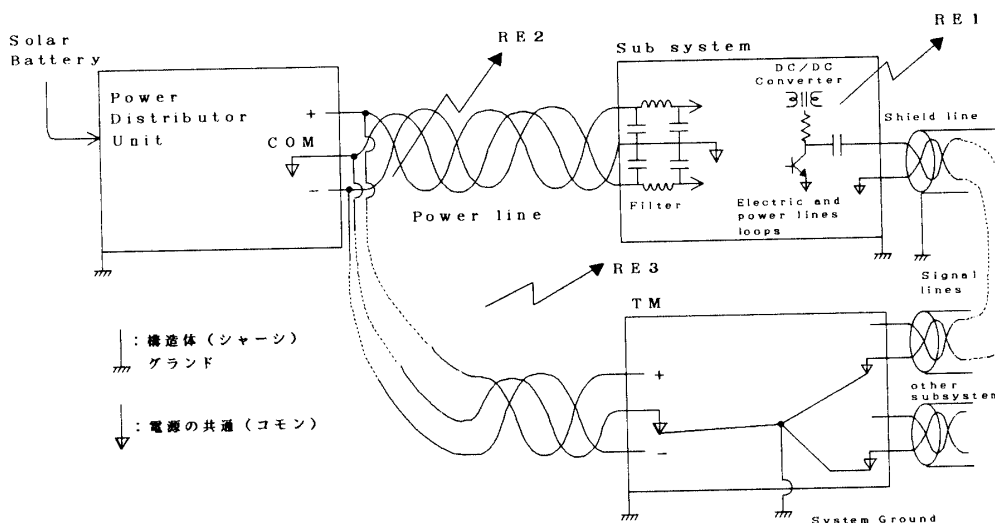


図2. 放射磁界雑音を理解するための概念図

表2. トランスの漏れ磁束例

トランスの規格	巻数	インダクタンス (mH)	Gap(mm)	漏れ磁束を発生させる M (実測値) (Am <sup>2</sup> /1mA)	空心に相当する M (計算値) (Am <sup>2</sup> /1mA)
EP17	78	0.65	0.3	4.8×10 <sup>-5</sup>	2.2×10 <sup>-6</sup>
EP17	78	21.8	0	1.9×10 <sup>-6</sup>	//
P26 (ポットコア)	78	53.6	0	1.7×10 <sup>-5</sup>	//

システム側で電源フィルターを強化することなどが考えられる。

RE3： 各サブシステム内では、電源のコモンと信号ラインのマイナス側が接続されているため、信号ケーブルを経由して、衛星の共通機器のテレメータ装置内で、その装置内の電源のコモンとサブシステムのコモンが接続することになり、衛星内で大きなループを作ることになる。このループにサブシステムの帰路電流の一部が流れ、衛星全体から磁界が放射されることになる。これが起こると、サブシステムへの往復の電源ラインがバランスを崩し、ここからも磁界を放射する (RE2)。テレメータ装置内において、通信用の送信電波を発生させる故、電源コモンラインが必ずシャーシに接地される。シャーシ経由の余分なループを作らないためにも、各サブシステムではコモンラインをシャーシに接地しないことが決められていた (システムとしての1点接地)。しかし、一次噛み合わせ時では、電源のコモンをサブシステム内でシャーシに接地してあるところがあり (BDR)、電源ラインの電流がインバランスとなっていた。このためサブシステム単体より計装ラインからの放射が大であった。各サブシステム内で、コモンが接地されていなくとも、高周波では、回路電流が装置ケースの浮遊容量を経由してシャーシに流れ、パワーラインにインバランス電流が流れ、大きなループ電流を形成する。この大きなループによる磁界放射を避けるには、各サブシステムの信号ラインとテレメータを結ぶラインを絶縁しなければ完全には解決しない。実際には、信号ラインに少し抵抗を加えることにより、帰路電流を軽減できる。EXOS-Dではこの大きなループによる放射を確かめるための、磁界強度の距離特性をシールドルームで取れなかった。もし、強度が $r^{-2}$ に比例するようならば、波源は大きなループと考えられる。

## 2. 1 トランスの漏れ磁束による放射磁界

表1に見られるように、LEP、EFD、SMS、BDRにおいては、強い磁界放射が認められた。これらのサブシステム装置には、共通して、DC/DCコンバータが使用されていた。DC/DCコンバータはスイッチングトランスとトランスから構成されている。このトランスの形状は図3に示すようにEP型とポット型がある。ともに材質は、高透磁率のフェライトコアであり、そのため漏れ磁束が少ないと思われていた。ところが、実際に測定したところ、表2に示すように、両タイプともに、フェライトに巻かれているコイルを空心としたときの磁気モーメントの約10倍の漏れ磁束があることが分かった。このトランスからの放射磁界を防ぐには、トランスに磁気シールドを施すこと、及びトランスの一次側にDC成分を作らないようにプッシュプル回路を使用することである。BDRでは、この放射を減らすために、トランスに直接パーマロイ板で磁気シールドを施した。LEPでは、個々の高圧トランスにシールドをすることは困難であったので、LEPボックス全体にシールドがなされた。EFD-Pではビーム発生部がシールドされた。実験では、0.05mmのパーマロイ板でEPコアトランスを全面シールドした場合には、約1kHzで-10dBの効果があった。これはパーマロイの表皮効果の計算式とほぼ一致する。

## 2. 2 ツイストペア計装の効果

パワーラインをツイスト化すればそれからの放射磁界が減少することは容易に理解できるが、定量的に減衰量を求めることは困難であるので実験的に考察した。長さ1m、幅13mmの平行線、そして長さ1mに20回、98回のツイスト線を作成した。それらをそれぞれ、タイプ1、2、3とする。それに周波数1kHzの電流を1mA流し、その線の中心から垂直方向

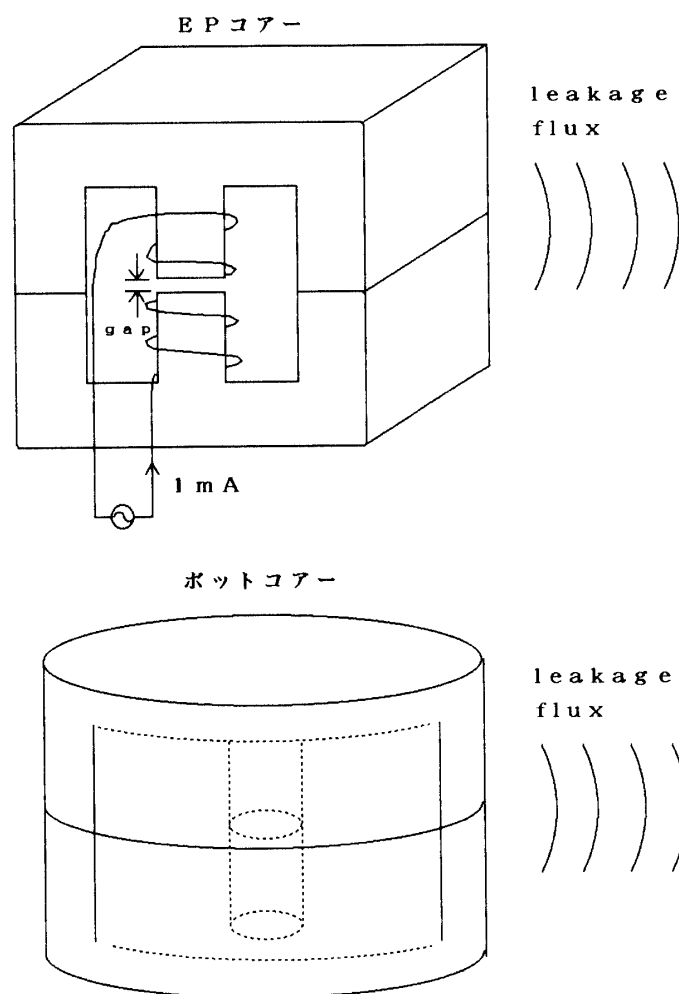


図3. フェライトコアの漏れ磁束

に1 m離れた点で磁界強度を測定した（図4）。図4の実線はタイプ1の計算値である。それは実験値とよく合っている。1 cm 当りおよそ1回ツイストするだけで効果があることが分かる。表1に示すように、LEP, CMDでは、放射磁界雑音を減少させるために、プラス、マイナス、そしてコモンを含めた3本の電源ラインを独立な計装としてツイストされた。ツイストの効果을最大にする為、ツイストライン内の電流バランスを常にとることが考慮された。

### 2. 3 電源フィルターによる電流リップルの減少

電源回路にフィルターを挿入することは、電源の電圧リップルを減少させるばかりでなく、サブシステム内の電流変動を電源ラインを経由して共通電源に記さないような働きもしている。このフィルターはローパスフィルターとして働き、EXOS-D 搭載機器では、フィルターを構成している素子の重量、サイズの関係で、その遮断周波数は1 - 2 kHz となっていた。フィルターを挿入すれば干渉が減少する事が分かっているが、システム全体に与える影響が大きいため、干渉のあったサブシステムでは、新規のフィルターを追加することは出

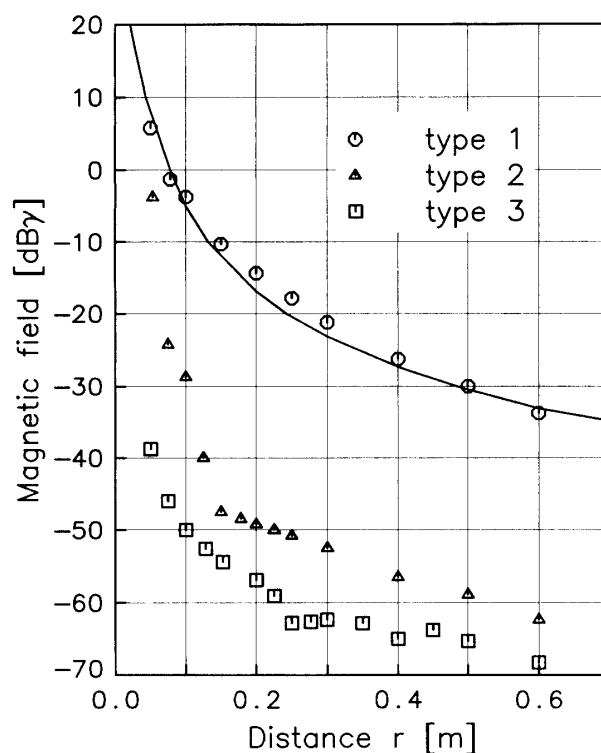
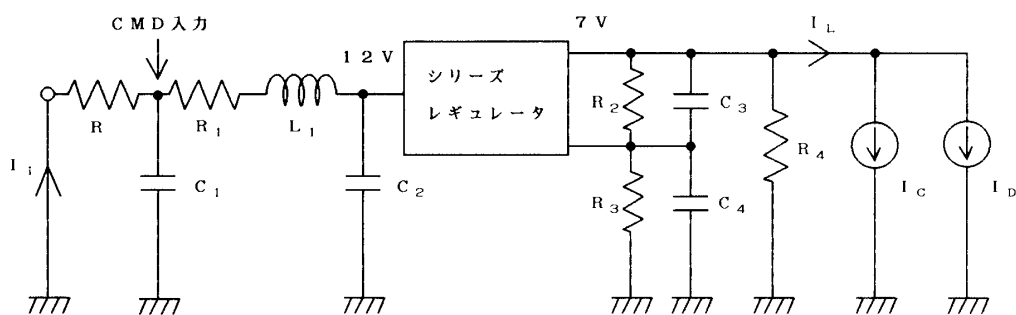


図4. ツイストペア効果

Type 1: 平行線, Type 2: 20回/m, Type 3: 98回/m



$I_i$ : 入力電流	$R_1 = 0.3 \Omega$	$C_1 = 20 \mu F$	$L_1 = 630 \mu H$
$I_L$ : 負荷電流	$R_2 = 7 k \Omega$	$C_2 = 20 \mu F$	
$I_D$ : データに伴う電流	$R_3 = 2.87 k \Omega$	$C_3 = 40 \mu F$	
$I_C$ : クロックに伴う電流	$R_4 = 73 \Omega$	$C_4 = 40 \mu F$	

### CMD + 12V系電源等価回路

図5. CMD (コマンドデコーダー) の電源等価回路



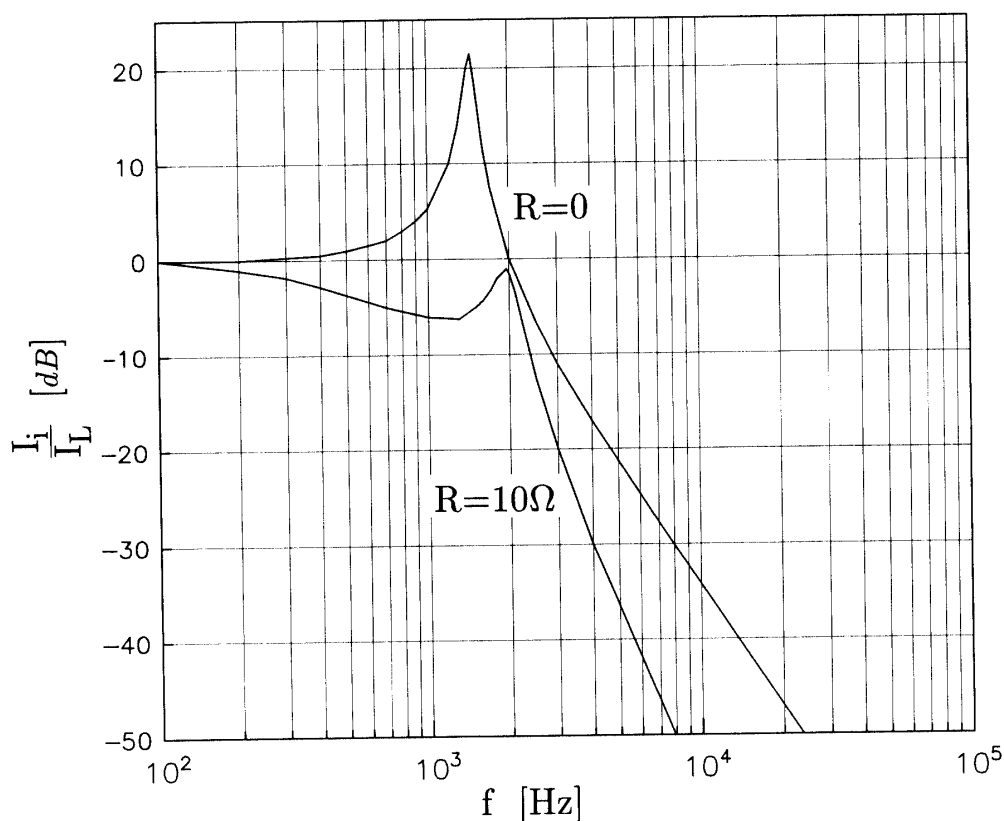


図6. 図5の入出力電流比の周波数応答

来なかった。BDRでは、コンデンサーを追加しただけである。また、CMDでは、図5に示すように、+12V系電源等価回路において、入力に抵抗を挿入するだけで、入力と出力の電流比が改善された（図6参照）。CMDでは、クロックとコマンドデータに伴う電流の変化が電源側に漏れていたため、表1に示すように0.5、1.0、1.5kHzの強い干渉があった。これを前述したように、電源ラインのツイスト化、フィルターの改善、そしてデジタル回路のプルダウン抵抗を取り外し、またレベル変換回路の抵抗値を高くして、回路電流を減らすことで対策した。その結果、干渉レベルが大きく低減されていることを単体レベルで確認した<sup>5)</sup>。

図7には、BDRの改修前後の放射磁界強度を示す。測定には、1次・2次とも衛星の中心から1.5mに置かれた外部サーチコイルの水平軸が用いられている。改修前後のスペクトラムから電源フィルターの遮断周波数が2kHzから1.5kHzに減少しているのが分かる。また、1次噛み合わせデータには、500Hz、1kHzにCMDのシャープなノイズが見えているが、2次には見えていない。図8には、改修の出来なかった、SMS及びATVのミラー回転装置（DMS）からの放射磁界強度の周波数特性を示す。使用サーチコイルは図7の測定と同一である。SMSは観測モードにより放射スペクトルが大変異なっている。ATVのミラー電源投入では、2.5kHzに数十pTの強い磁界放射が認められる。

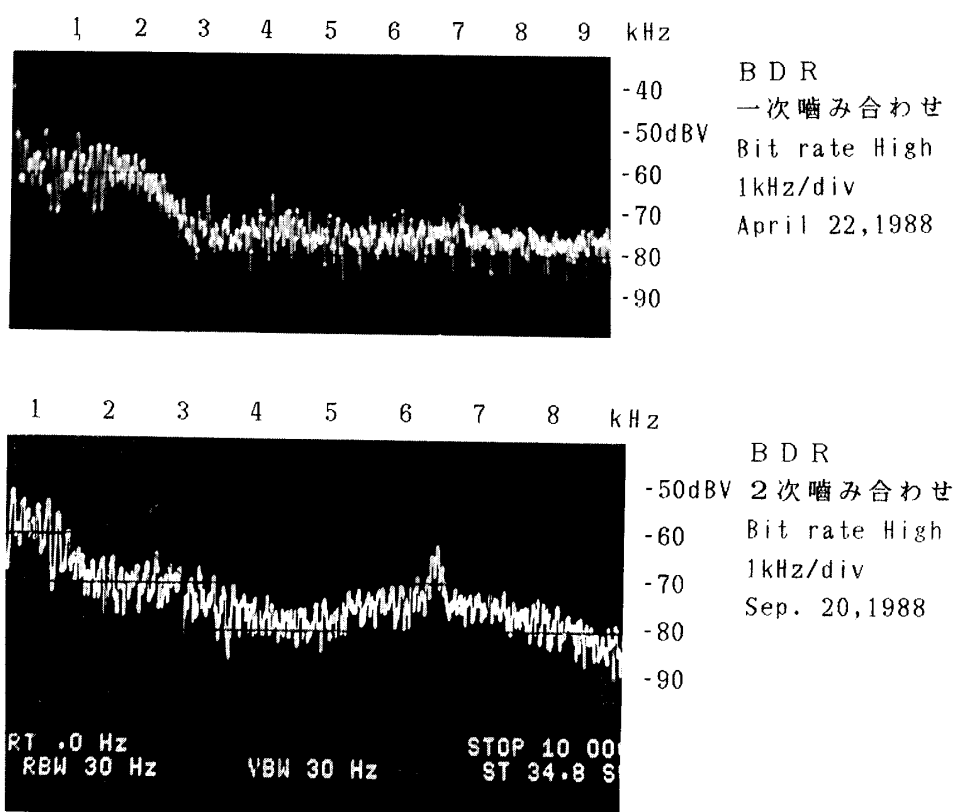


図7. 1次・2次噛み合わせ時における、BDRの放射磁界強度測定に用いたサーチコイルに1pTの磁界強度を与えた時の周波数レスポンスは、200Hz, 500Hz, 1kHz, 2kHz, 5kHz, 10kHzで、それぞれ-90, -83, -77, -73, -68, -70dBVである。それ故、1kHzにおけるBDRの放射強度は、約15pTになる。

### 3. 軌道上での干渉レベル

打ち上げ後、1989年3月下旬から4月上旬にかけて、高圧電源を使用している搭載機器の試験を兼ねて、VLF機器と最初の干渉試験が行われた。図9にVLF装置のMCAで観測した電界及び磁界のスペクトラムを示す。UT07:15から07:30までは、PWIサウンダーが行なわれており、その間、図の電界の弱いところは、電界アンテナをショートしている区間で、最後の区間に見える縦じまの2本は、電波が送信されていないアンテナで見たサウンダーの干渉である。UT07:32でBDRがストップされている。それにともなって、1.2kHz以下の比較的弱い磁界雑音（数pT）、そして約60Hzにあるライン状の強い干渉（数十pT）が消えている。また、UT07:30から、磁界の100Hz以下で見られるスペクトル構造のある雑音は、MTQからのノイズである。これは衛星の高度が約3000km以下になると、常時見える。一方、VLF装置内のWB受信機において、センサーをループアンテナとした場合に、やはりBDRとの干渉が周波数650Hz-850Hzにわたって見られている。また、原因が不明であるが、およそ8秒間隔に常時ではないが時々極めて細かい全帯域にわたるスパイクノイズが見

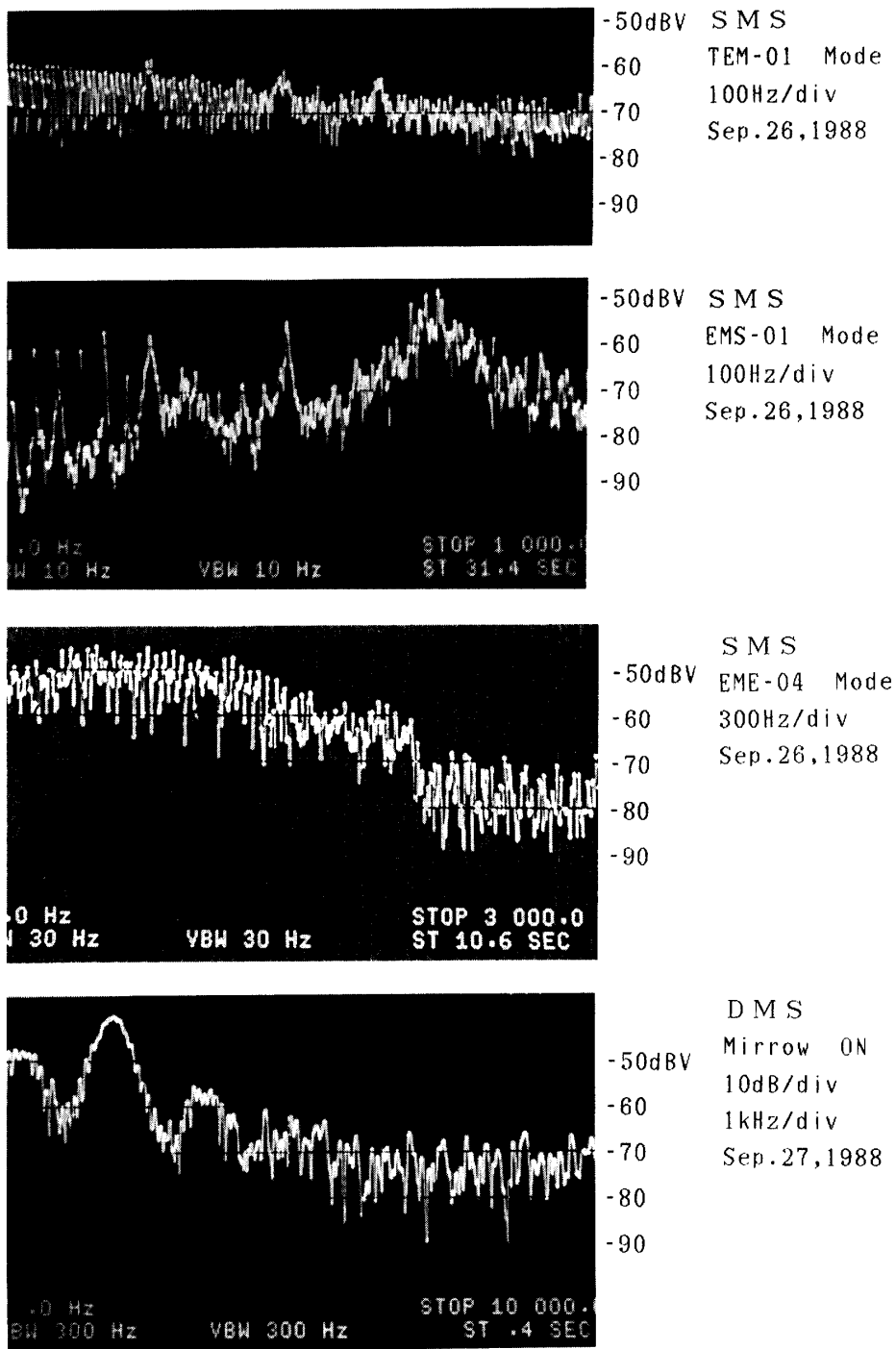


図8. 2次噛み合わせ時に測定した、SMS、DMSの放射磁界強度  
 例えば、SMS-EME-04モードでは、周波数2.6kHzで磁界強度は20pTにもなる。

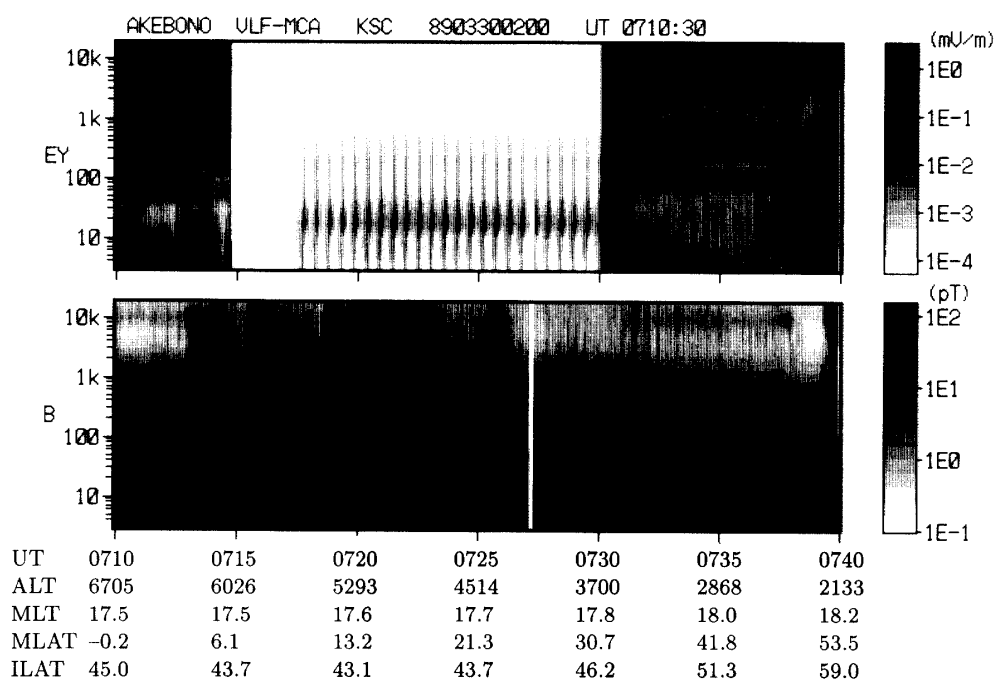


図9. MCAで観測されている干渉 (PWI, BDR, MTQ)

PWI サウンダーは07:17-07:31間に動作している。07:15から07:30までは電界センサーはExに変更され、その時、EXはサウンダー用に使用されており、Exのプリアンプは接地されている。図に見られる薄い縦縞は、プリアンプの接地状態での干渉を示す。07:30から見られる2本の縦縞は、Eyで測定したサウンダーの干渉である。BDRは07:32でオフになっている。その間、磁界スペクトルの60Hzに約10pT及び150Hzから1.2kHzまで数pTの強い干渉が見られる。一方、100Hz以下で、MTQからの磁界ノイズが07:30以降に見られる。

られる。

SMS, ATV, LEPは主に極域において動作し、1990年3月16日観測したMCAにおいて(図10)、電界・磁界とも1kHz以下で強くSMSと干渉している。UT02:37付近に見られる縦のスパイク的なノイズは、イオンエネルギーの測定範囲を変化させるために、高圧電源をスイープするとき生じたものである。図8に示したように、SMSには多くの観測モードがあり、それらのモード毎に干渉パターンが異なっていることが、図10からも確かめられる。SMSとの干渉は打ち上げ前からすでに分かっていた(表1)が、装置は外国で製作されたもので、短い期間での改修は困難であった。現在、VLFとSMSの同時観測は大変難しい状況にある。一方、ATVとの干渉は、図11に示すようにMCA磁界スペクトラムにおいて、100Hzから数kHzにわたって、およそ1分間隔で見られる。これは、ミラーの回転により発生しているものと思われる。電界には、ATVとの干渉が見られないようである。

また、LEPとの干渉は現在のところ殆ど見られない。これは、1次・2次噛み合わせで干渉を発見し、適切な対策を施したためである。

EXOS-Dにおける電磁干渉に関して幸運であったことは、太陽電池からスピンに伴う電

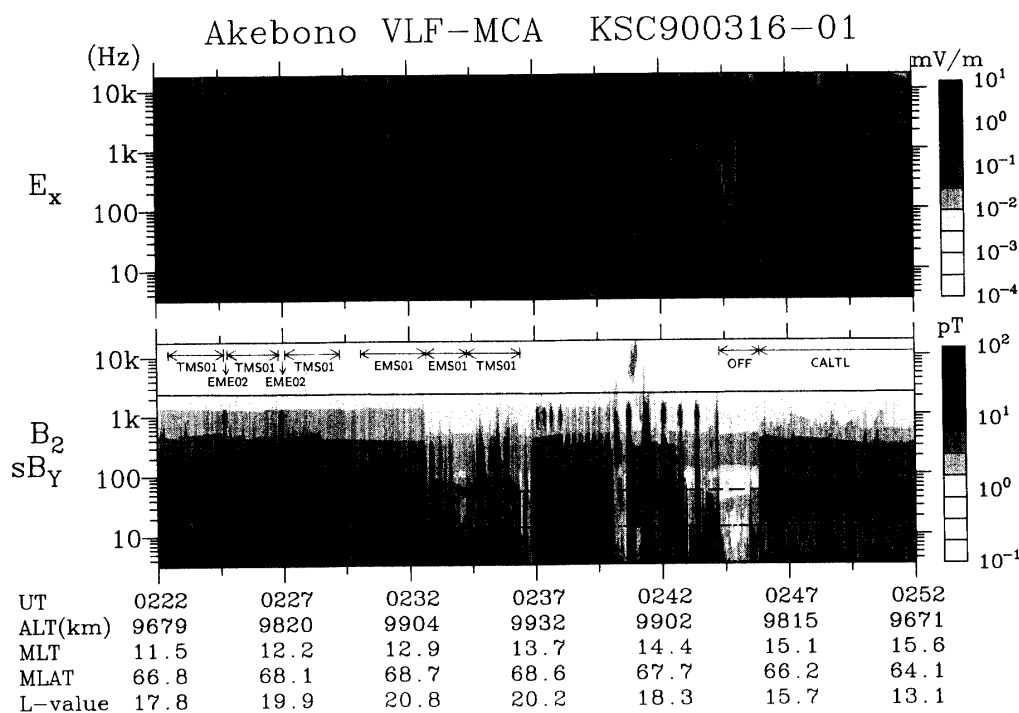


図10. MCAで観測されている干渉（SMS）

磁界スペクトルの10kHz付近にSMSの観測モードを示す。各モードにより干渉スペクトル異なっていることが分かる。図中の実線、点線、一点鎖線及び二点鎖線は、それぞれLHR、プロトン、ヘリウム及び酸素のサイクロトロン周波数を示す。

磁雑音であり、また太陽電池がアンテナやマストなどより太陽側に配置されているため、マスト等の影が太陽電池上に生じなかったことによる。

#### 4. GEOTAILでのEMC規則

EMI/EMC問題がクローズアップされてきた背景には、電磁界雑音によるミサイルの誤発射やロボットの誤動作により大きな社会的問題が生じたことによる。これらの電磁界雑音による誤動作を避けるために、電磁波を放射する側及び受け側にそれぞれ規制がおこなわれている<sup>6)</sup>。米国では、MIL規格に準拠して、スペースシャトルの搭載機器や科学衛星の搭載機器に対して、早くからEMI規制が行なわれていた。GEOTAIL衛星機器の約半数が外国製であること及びEXOS-D等の経験を活かして、設計段階からEMCの思想を取り入れてきた。これには、故Prof. Scarfの強力なサポートのもとで、GEOTAIL搭載のPWIのセンサー感度に基づいて、次の3つの規制値が作られた<sup>7)</sup>：パワーラインの伝導電流雑音周波数特性（CE-03, 04）、放射電界周波数特性（RE-02）、放射磁界周波数特性（RE-04）。磁界の規制値はEXOS-Dに比して、センサー位置が衛星より6m離れていることで、幾分緩和されている。これらの規制値を各サブシステムが遵守することにより、波動装置と他の機器との干渉が無くなることが期待されている。

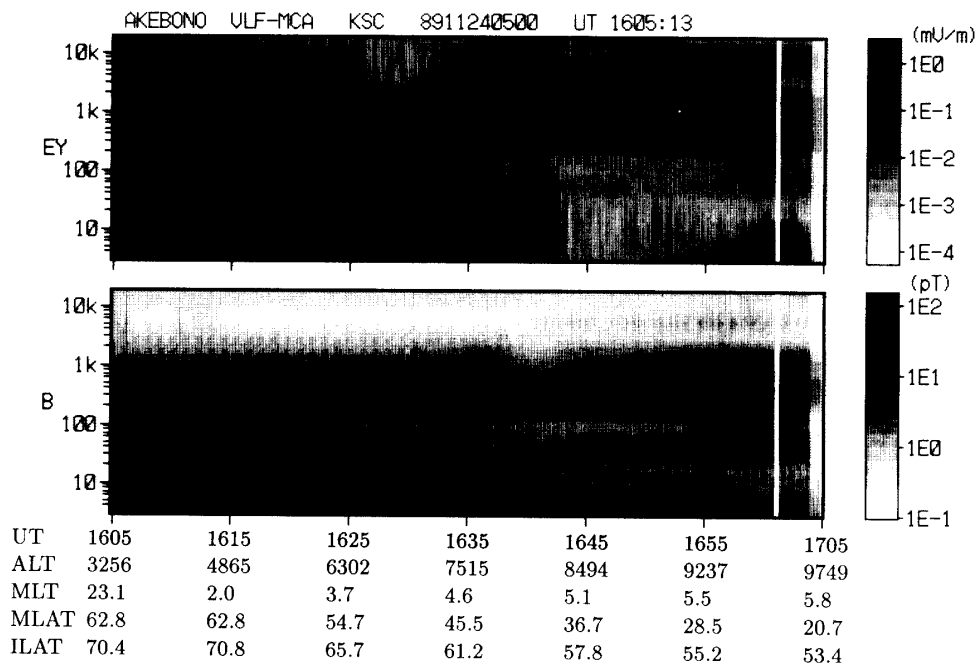


図11. MCA で観測されている干渉 (ATV)

ATVは16:37まで観測しているその間、磁界スペクトルに間欠的に100Hz-1 kHzまでは強い、そして5kHzまでは弱い干渉が見られる。一方、電界には現われていない。

## 5. まとめ

EXOS-D衛星の第1次および第2次噛み合わせ時に行なわれたVLF装置への放射磁界干渉試験結果及びその対策について述べた。干渉を減らすための対策時に得られた身近な原因について説明を加えた。それらは交流電気回路論や基礎電磁気学で説明できるもので、特に新しいものではないが、今後のロケットや衛星におけるVLF波動観測に役立つものと思う。搭載磁気センサーの感度を最大限に利用するには、他の搭載機器への規制を強くするかセンサーを衛星から遠く離すかである。マストの伸展技術が進歩すれば、センサーを衛星より遠くに離すことを考えた方がよいかもしれない。

本報告では、放射する側についてのみ述べたが、干渉を受ける側についても責任があり、その防止方法を考えねばならない。特に、伝導性電流雑音や波動観測自身からの干渉について触れることが出来なかった。それらについては別の機会にしたい。

## 謝 辞

1次・2次噛み合わせ時の干渉試験では、EXOS-D搭載機器のPI、宇宙科学研究所の関係スタッフ及び搭載機器の製作会社の関係各位には大変なご協力を得た。特に、宇宙科学研究所向井利典(LEP-PI)博士には、多くの有益な助言を戴いた。ここに併せて深く感謝の意を表します。また、EMI測定はPWI班及びMGF班と協力して行なわれた。その際、特

に東北大学森岡昭博士にはいろいろと助言を戴いた。また、電通大学吉野超夫教授には、1次噛み合わせにおいて一部参加して戴いた。BDRの改修にあたって、日立製作所宇宙技術推進本部土岐氏、LEP、EFDの改修では、明星電気阿部氏に大変お世話になった。本報告はGEOTAIL各サブシステムのEMC測定期間中に纏めたもので、京都大学松本紘(GEOTAIL-PWI-PI)教授、筒井稔博士、小嶋浩嗣氏に有益な討論をして戴いた。MCAデータの作図にあたって、金沢大学学生橋本直樹君にお世話になった。ここに、併せてお礼を申し上げる。

### 参考文献

- [1] 山本正幸他, 宇宙科学研究報告, 63-67, 特集25号, 1990
- [2] I. Kimura et al., 42, 459-478, J. Geomag. Geoelectr., 1990
- [3] M. Yamamoto et al., 18, 2, 325-328 GRL, 1991
- [4] EXOS-D-100, 電気設計基準, 1988
- [5] EXOS-D-1247, CMD/VLF干渉に関するCMD電流リップル調査とその対策, 1989
- [6] Electromagnetic Interference and Compatibility VOL. 5-6
- [7] GEOTAIL(FM) Design Presentaion Apr. 18-19, 1990