

M A G S A T 計 画 (II)

LANDSATに続く地球観測衛星 (2)

駒井 二郎 (物理探査部) 松野 久也 (環境地質部)

II. M A G S A T (続)

5. 物理探査技術者側の動き

前章までの経緯によって明らかなように 空中 船上測定によるデータ量が逐年急速に増加の一途をたどり隣接地域の接合による広域磁気図の編集が一段と緊急の度を加えてきた近年 バックグラウンドをなす傾向面の適確な除去法としての IGRF の利用は探査技術者にとっても 単にその場限りの問題ではすまされなくなってきた。このような状況を踏まえ1975年3月 SEG (Society of Exploration Geophysicists—米国物理探査技術者協会) はコロラドスプリングスに「Zmuda 記念ワールドモデル会議」を召集した。会議の主題は IGRF の改訂におかれ 2日間の会期全部を費して討議した結果 より正確な標準モデルを確立することの必要性を再確認し SEG 内部に Geoterrex 社の Reford を長とする Ad hoc 委員会をつくって IAGA 側への積極的な働きかけを行なうこととなったのである。

探査側からすれば 一般に IGRF に含まれる絶対誤差の大きさにはあまり拘泥しないが それが長年月にわたって一定であることが望ましい。しかし前記のような全般的傾向のほか とくに68年以降の IGRF は実際とかけ離れている実態が指摘されただけでなく それまで広く使われていた FABIANO and PEDDIE (1969) の表よりもはるかに精細な小地域毎の改訂や 小型コンピュータに適した共通コードの制定などがこの会議で要望された。また鉛直成分だけを測定する探査が今でも時たま行なわれるので このモデリングの必要性も合せ強調されている。

同年9月 IUGG の第16回総会がグルノーブルで開かれたが このとき SEG 側より2名の代表が正式に参加し Ad hoc 委員会の結晶である決議を申し入れることとなった。以下はその内容の要約である。

IGRF の制定以来 物理探査の分野においても その便益は絶大なものがあつた。しかし近年 その欠陥もまたようやく目立ちはじめている… (中略) …よって SEG としては きたるべき IGRF の改訂に際し 下記の諸点につき配慮されるよ

う要望したい。

- (1) 高い精度を以て永年変化を予測することは不可能と考えられる。したがって改訂は5年以下の間隔を以て行なわれるべきこと。
- (2) すべての改訂には連続性を保持されたい。すなわち改訂時の IGRF は直前値から出発させ 新 IGRF はその発効数ヶ月前に出版すること。
- (3) IAGA は IGRF の数式表現 コンピュータプログラム 普遍的に使用される5成分の等値線図 ならびに69年版と同様の数表を提供して欲しい。ただし数表に関しては次の諸点の改善が望ましい。
 - a. 格子間隔をなるべく15分間隔に 少なくとも1°以上は好ましくない。
 - b. 永年変化係数は0.1ガンマ単位で記載されたい。現在の1ガンマ単位では 数年分について外挿すると数値に不確定性が生ずる。
- (4) IGRF の主目的のひとつは 異なった諸機関によるバラバラな磁気図の適正な編集基準を与えることにあるのだから前記数表は次の2点で補完されなければならない。
 - a. NS方向とEW方向の内挿計算を行なう場合についての適切な指導。
 - b. 空中磁気探査のデータを海水面に引き直すため 海水面上の鉛直傾度値。
- (5) 空中磁気探査は1945年に開始されているが これより65年までの20年間は IGRF に相当する標準モデルがつくられていない。したがって この間に蓄積された空中磁気探査データの再編集に便なるよう 過去にさかのぼった「決定 (definitive) モデル」を制定されたし。ただしこれは1965年の IGRF にスムーズに接続されなければならない。
- (6) 上記の「決定モデル」は 65年以降についても毎年 かつ2年以上遅れないように発行されたし。「予測 (predictive) モデル」の修正項としてのデータ表でよい。

ただ折角のこの SEG 側の努力も 果してどこまで実ったかは残念ながら疑わしい。グルノーブルで SEG 代表が趣旨説明を行なうための根回しは終っていた模様

であるが 実際には時間不足を理由に機会は与えられず土台 ワーキンググループへの出席自体も許されなかった。

議長が SEG の決議を出席者に説明したことは確かのようにだが どの程度真剣に検討されたかは不明であり IGRF の大ユーザーである SEG の声が直接 届けられなかったのはきわめて遺憾、という関係者の弁が伝えられている。

もっとも IAGA 側も あらためて SEG の要請を受けるまでもなく IGRF を是正する必要性は強く認識しており 73年の京都 75年のグルノーブルを経て "IGRF-1975" が新たにまとめられた。適用期間は1975～1980である。しかしこのとき採用された永年変化係数(候補として提出された二つのモデルの平均値)も 原モデルの双方につき日本の実測データと比較したところ一致はしたもののもっともよく適合したのはむしろ71年の値であったというから この分では"決定モデル"こそ再計算の労はあるが広域再編集のキメ手となるかも知れない。

IAGA は昨年8月にもシアトルで総会を開き 不連続モデルの採択や"決定モデル"と"予測モデル"の暫定的併用などが討議された(行武一私信-1977)。また MAGSAT にも多大の関心が寄せられ 地上観測陣の強化 協体制等も議題にのぼったようである。MAGSAT のデータが利用可能になるのは1980年初頭とみられるから 81年にエジンバラで開催予定の次回 IAGA 総会に提出されるモデルが この問題に対する最終的解答になるかとも考えられる。

蛇足ながら IGRF とは独立に一というよりは IGRF 自体を原データの一部として主磁場の球関数展開を12次まで行なった標準モデル AWC/75 が 米海軍の US World Magnetic Chart の基礎となっていること さらにこのほかにも GSFC 1266 UK 75 あるいは多項式を使用したもの等々 多くのモデルがあり NOAA のNGSDC(National Geophysical and Solar-Terrestrial Data Center)がパンチカードされた 磁力値と Fortran プログラムのサービスを提供していることなどを付け加える。

これまで述べてきたように 磁気観測を行なったこれまでの衛星は COSMOS 49 以外はあまりにも高度が高い。また測定量は全磁力のみだったからそれ自体の精度はいかに高くとも これから導かれるベクトル量の信頼性には限度があり 全磁力のみの議論にとどまっている間はよいがベクトル的な取扱いをするときには いろ

いろな問題をひき起した。この面の研究も一群の人々によって熱心に取り組みされたが 解決策としてはやはり3成分測定をたとえ全部でなくともよいからデータセット中に付加するよりほか妙策は無い。理論的には全磁力分布が3次的に求められれば何とかなることにはなっているが OGO 系程度の高度変動では満足にはほど遠く 低高度ベクトル測定の強く望まれる所以である。

さらに問題なのは 前記のように固体地球科学に対する衛星磁気データの効果が立証されているにもかかわらず 71年以降はとくにこれといった衛星観測の予定がないことで この時間的断絶は大きい。現にさきほど触れた AWC/75 の永年変化項を決めるに際しても OGO 系のデータは古すぎるとしてすでに使用されなかった。

以上のような状況下にあつては MAGSAT が生まれてくるのは遅かれ早かれ必然であったろう。GSFC と USGS が MAGSAT 計画の具体的な検討を開始したのは 60年代後半といわれているから時期的には諸般の状況と符合している。

それにしても MAGSAT の需要について 各界の声を集める徹底的な世論調査が行なわれたのには いつもながら感心させられる。すなわち1975年5月 GSFC の委託を受けた USGS は 固体地球科学と地質調査のための低高度衛星による磁気測定に関する潜在的ユーザーへのアンケート調査を行なった。この時点ではまだ MAGSAT という表現はされていなかったが 8,900 の照会状が SEG (6,000) と AGU の Geomagnetism and Paleomagnetism Section (2,900) に送付され 9月には2,448 の回答が寄せられた。二つのメンバー間には内輪にみて10パーセントの重複があるとみられているが これは約28パーセントの回収率にあたる。

この結果も熟読玩味するとなかなか含蓄に富んでいるが ここでは簡単に要点を紹介するだけにとどめる。まず使用目的としての分類では『油田探査』が1366と一番多く 次に『金属鉱床探査』の731 『地殻研究』の690と続き 以下『地方的異常の除去』495 『宇宙科学』303 『地磁気成因論』208 『永年変化』170 『その他』346の順になっている。

また所要精度の面からは 探査用では2ガンマと8秒角を望む声は断然多く 20ガンマがこれに次ぐ。当然ながら100ガンマは少数派であるが 地球物理学研究の方はこの傾向がほぼ逆になっており 20ガンマをトップに100 2ガンマと続いてゆく。

6. M A G S A T の 性 能

MAGSAT の意義は すでにこれまでの説明によって

おのずから明らかと思われるが 重複をいとわずNASA (USGS) がかけけるその目的と効用を再整理すれば次の通りである。

- (1) 全地球的規模にわたるスカラー・ベクトル双方の地殻磁気異常図の作成により 現時点における最新にしてもっとも正確なる地球磁界の定量的把握。測定精度は衛星高度において全磁力が3ガンマ rss ベクトル3成分とも 6ガンマ rss 地表面に引き直した場合で20ガンマを目標とする。また磁気図の空間分解能は300km。
- (2) この地殻磁気異常図と他の諸データを以て総合的な地質・地球物理学的解釈を行ない 各種天然資源の賦存状態の評価・分析とその探査・開発に対する将来戦略の策定に寄与せしめる。この結果は学術的見地からも 地球内部に関する物性的知識の増進をもたらし とくにマントル上部の導電率分布の間接的推定ならびに核 核-マントル境界層およびマントル内部の構造とその動態についての理解を前進させるであろう。
- (3) 標準モデルの精密化により 広域磁気探査に際してのバックグラウンドの除去に貢献が期待される。

GEOSAT 同様 資源探査への応用を強調している点は暗示的である。もちろん規模からして局所性の強い資源探査への効果はきわめて間接的で 個々の鉱床の直接発見などはごく特殊な場合以外は望むべくもない。しかしバング異常にしても その経済的稼行価値はともかく 早くもぼう大な鉄鉱床の潜在が予想されているのは自然な成行きであるし しばしばその生成が亜大陸級の広大な地域特性に支配されることの少なくない 石油地熱 金属鉱床等の探査計画立案者が 今後とるべき長

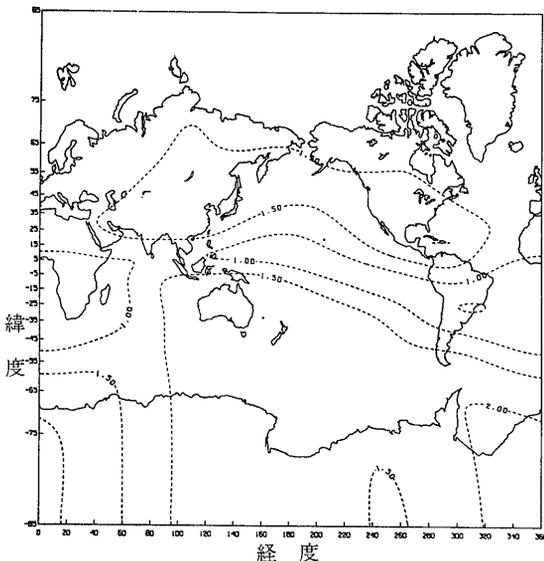
期的戦略の方向を何らかの形で示唆する可能性は何人も否定しえないであろう。

さて MAGSAT の宇宙船は現在 Johns Hopkins 大学の APL (Applied Physics Laboratory) で製作中であるが かつての SAS (Small Astronomy Satellite) — C の設計とハードウェアの残存部分を一部そのまま利用しており 打上げ用ロケットは多分 Scout となるだろう。因みにこの Scout は Poorman's rocket と俗称されるほど小型で経済的であり 宇宙シャトル計画が順調に進捗したとしてもなお存在価値がひきつづき保たれると見込まれているものである。前回でも言及した STEREO-SAT は 主にこの Scout を予定している AEM (Applications Explorer Mission) の一部として構成されている。

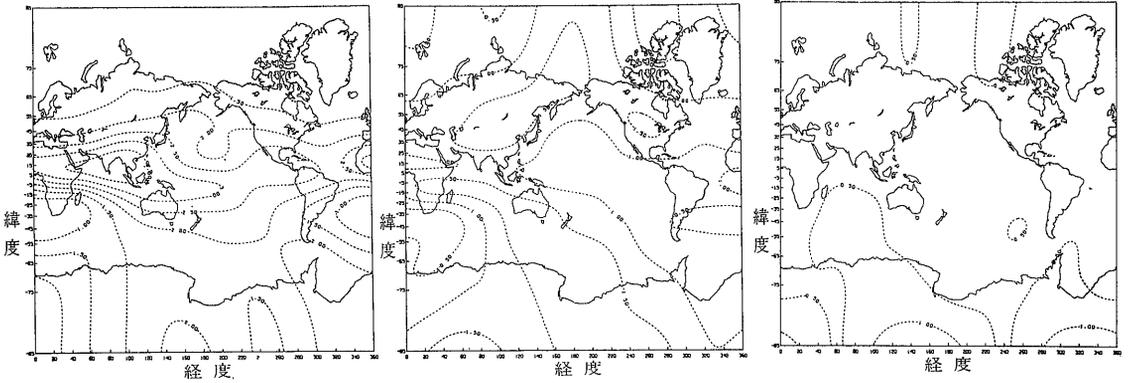
MAGSAT の中核ともいべき磁力計は 全磁力計用としては精度±1ガンマのセシウム型が使用される。パイオニア10号ではマリナー4 5号から引き継いだ3成分のヘリウム磁力計の改造型(感度:0.01ガンマ)を搭載していたが この辺の選定基準はよく判らない。ヘリウム磁力計は 動作温度範囲が広いがレスポンスが遅いためかとも思われる。全磁力測定の場合の主たる誤差源が 磁力計本体よりもむしろ衛星の位置標定精度に起こることは 海域における空中(船上)磁気探査の場合と同様である。第14図は軌道誤差による標準偏差値分布を示しているが 同図より全域にわたって3ガンマ以下 ときには2ガンマ以下におさまることが判る。この軌道誤差は along track について300m across track で30m 鉛直方向で60mを以てランダムに分布した状態を仮定しているが 実際にはこれよりもう少し位置精度は高いものとみられる。

ベクトル測定の方は前記の通りフラックスゲート磁力計を用いるが 問題ははるかに複雑となり なお技術開発の途中にある部分も少なくない。デジタル化の過程も含めて 磁力計自身の精度は約3ガンマという。第15図として第14図と同一条件下の誤差を 緯度方向成分(B_{θ}) 経度方向成分(B_{ϕ}) および鉛直成分(B_r) について示す。前二者については ほとんどいたるところで1~2ガンマ rss にとどまるが 鉛直成分は赤道付近で3ガンマ rss を越す地域もみられる。

このほかベクトル測定に固有の誤差源として センサー姿勢の安定性がある。宇宙船本体の姿勢制御は 地球に示準した座標系に対し $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 以下におさえる通常の動作システムに加えて恒星走査センサー(Star Scanning Sensor)を用い 10秒角以内で決定できる。しかし空



第14図 全磁力値の軌道誤差(1σ)の分布(誤差は along track で300 m across track で30m 鉛直方向に60mを以てランダムな分布を仮定)



第15図 第14図と同一条件下におけるベクトル値の軌道誤差(左:緯度方向成分 中:経度方向成分 右:鉛直方向成分)

中磁気探査におけるパード曳航やスティンガ方式と同じく 搭載機の影響をさけるためセンサーは宇宙船本体から延伸される長さ20フィートのブームの先端部に取付けられることになる(前号の第1図参照)。長さは異なるがこのようなやり方はパイオニア10号やOGOなどでも同様であった。この場合ブームはもちろんできるだけ「剛」につくられるがそれでも屈曲とねじれによって5〜20分角程度の変動はさけられないと予想される。これをモニタリングするため特別に“Orbital Attitude Transfer System(軌道姿勢変換システム)”が開発された。これはブーム中心線の周囲のねじれとその直交2方向について先端部に生ずる変位量を非接触の光学的手段(3軸自動コリメータと反射鏡の組合せ)により測定するものでこの結果最終精度は7秒角ぐらいにおさまるものと期待されている。

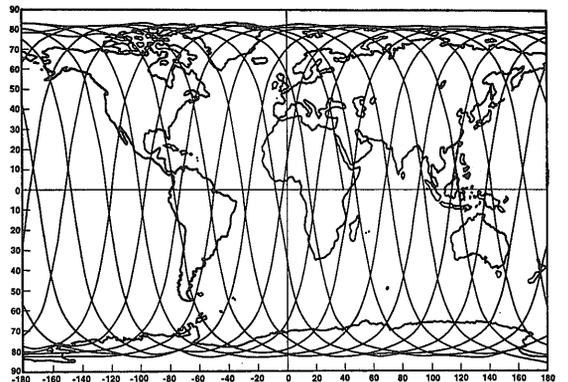
MAGSATの予定軌道は第16図の通りでほぼ地球全域をカバーすることLANDSAT並みである。また第17図は打上げ後時間の経過とともに高度の減少してゆく有様についての理論計算の結果を示しているが近地点を325kmにえらべば遠地点は所望の寿命によってきまり4〜8ヶ月の寿命の場合には約550kmとなる。

この高度が果して最適かどうかについてはおそらく異論があると思われるが一般に低高度軌道は短命に通じとくに200km以下ではわずかに存在する大気抵抗のため運動エネルギーは急速に失われてゆく。今のところ200km以下は観測時間が5〜10分程度にすぎないロケットに頼るほかに水平方向の二次元的分布を知るためには非常に不向きで高くとも数kmを越すことのまねな通常の空中磁気探査との間には測定高度の大きなギャップが存在する。詳細は不明であるが宇宙シャトルと“連結(tethered)”し高度約130km周辺をカバーしようとする磁気衛星の計画が進められていると

いうから将来この間隙はある程度埋められるかも知れない。また空間分解能は前記の通り300kmを目指しているが高度が約150kmにまで低下したとき精度の犠牲において多少の改善が期待できるといわれている。

なお電源の関係で衛星は常に太陽光に直面するような配置をとる必要がある。かつ正午前後の2〜3時間は電離層中のエレクトロジェットやSq電流系の影響が強く低緯度帯での測定が困難となる。MAGSATが“dawn—dusk子午線”に沿ったtwilightの太陽同期軌道をとっているのはこのためである。

MAGSATに関する限りデータの公開はまったく問題ないとみられる。現在の計画では解析の下準備が終了した段階でデータはすべてGSFCの国立宇宙科学データセンターに引き渡されわずかな経費で一般に提供されることとなる。スカラ量の処理はPOGOなどのときにほぼ確立された手法におおむね準じて行なわれるがベクトルデータの方はかなり厄介で姿勢決定の進行に応じての2段階(20分角精度のデータが打上げ後2〜3ヶ月20秒角精度が8ヶ月)に分けて使えるよう



第16図 MAGSATの予定軌道

になる。ただ少しでも早くユーザーの要望に応えるため 第一次近似のモデルを2ヶ月ぐらいでまず流しデータの蓄積とともに順次 高度なモデルを提供してゆくようサービス体制が組まれる予定である。

おわりに

MAGSAT 計画は本来 NASA の地球・海洋ダイナミクス応用計画 (EODAP—Earth and Ocean Dynamics Applications Program) の一環である。このEODAPはまことに野心的というか 雄大なまわるプロジェクトであって その一端をうかがい知っただけでも GEOSAT とは別の意味で圧倒される想いかられるのを否めない。参考までにこの EODAP に包含されるサブプログラムを列記すると

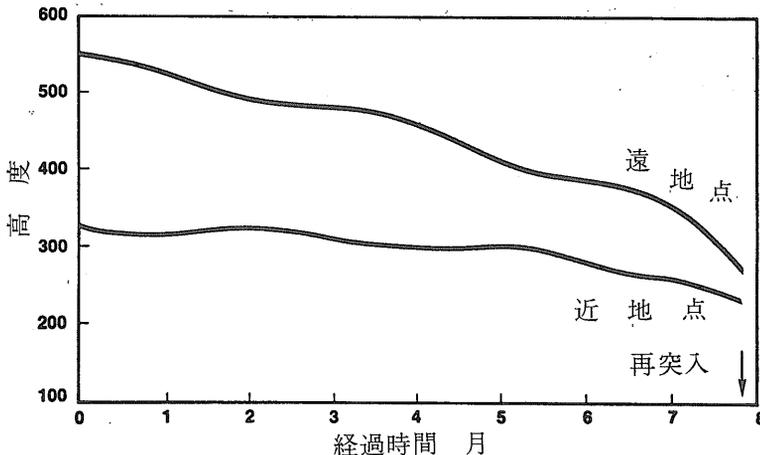
- Geodetic Systems Technique Development (測地システム技術開発)
- Topographic Mapping Techniques Development (地形図化技術開発)
- Solid Earth Dynamic Modeling (固体地球動態モデリング)
- Gravity Field and Geoid Modeling (重力場・ジオイドモデリング)
- Crustal Modeling for Resources Assessment (資源評価のための地殻モデリング)
- Modeling and Forecasting of Crustal Hazards (地殻災害モデリングとその予知)
- Advanced Earth Dynamics Studies (高等地球ダイナミクス研究)

これだけでは各々の内容は必ずしも明確には理解しにくいと思われるが そのひとつひとつが現在の固体地球科学が直面している重要課題に結びついており 詳細についてはいずれ別の機会があろう。MAGSAT が属しているのはこのうちの Crustal Modeling for Resources

Assessment サブプログラムであり 磁気 重力ならびにレーダーを含む映像系の諸データ さらには地震波速度分布 熱流量等あらゆる物理・地質資料の総合解析を通じて 各種天然資源のポテンシャルを的確に見究めようとするものである。すでにいくつかのモデル地域についてこの種の重点研究が USGS によって進められており 皮切りとして「中央アフリカ」はほぼ完成に近い。さらに「米国」「カナダ西部」および「ヒマラヤー帯」が進行中「オーストラリアーニュージーランド」が間もなく着手されるとのことであり これら特定地域の地質・地球物理学的意義については ここに冗言を費す必要はあるまい。

このサブプログラムによって一般に公開されるとみられる最終的な成果物は 81年に初版予定の Global Geophysical Atlas (世界地球物理図幅) で それ自体もさることながら前段階としても たとえば Suture (Paleo-Plate boundary) Map Rift Map Hot Spot Map Anomalous Physiographic Map Precision Global Map 等 名前を聞いただけでも一体どのような新情報新解釈が織り込まれるのか 好奇心をそそられずにいられない。

同サブプログラムは1977年を初年度とする5ヶ年計画であるが このうち磁気関係だけを抜粋すると：77年—POGO COSMOS データを使用して一定高度と伏角の磁気図編集 78年—高緯度帯磁気異常図 全世界相対磁化強度図 POGO による“決定的標準モデル”の制定 79年—全世界絶対磁化強度図の作成 80年—MAGSAT のデータが利用可能となり これによる暫定版標準モデルの制定と LANDSAT・空中磁気図の総合解析による



第17図 打上げ後の衛星高度の経時変化 (理論値)

地質構造図 81年—POGO と MAGSAT の合同標準モデル MAGSAT 磁気異常図 およびシャトル “連結衛星の実験 という風に進んでゆく。ここでいう磁化強度図とは地表からキュリー等温面との間にはさまれる部分のそれを指す。ゆくゆくは5年ぐらいの間隔でなるべく安価な MAGSAT 型衛星を継続的に打上げる運びとなろう。

MAGSAT に関する呼びかけは GEOSAT 以上に広く内外に向け行われたらしく GSFC から “MAGSAT : A SATELLITE FOR MEASURING NEAR EARTH MAGNETIC FIELDS” と題する小冊子が関係各方面に送られてきたのは昨年(1976)の9月であった。

GEOSAT の方は “GEOSAT News” という文字通りニュースの性格の速報が希望者に随時 無料で送付されているが MAGSAT では “MAGSAT Bulletin” がこれに相当する役割を担っている模様である。この Bulletin は1975年のアンケート調査時の回答者全員に送られてきたが 同じメンバーに対し本年早々には次のステップとして AO (Announcement of Operation) が通達される予定であり いよいよ動きはあわただしくなってくでであろう。AO の内容の詳細はまだ不明であるが データ利用に関する積極的な勧誘とみられ シャトル計画と同じく参加者を募って Principal Investigator を選ぶことになっている。希望者は NASA に申し込めば いずれ “Pre-proposal briefing” に招かれ 何らかの形でデータ利用計画に参画を求められることになるものと思われる。

最後に 実現するにしてもかなり先の話ではあろうが例の LOS MOS 等の計画と並行して 磁気・重力測定を複合した MAGRAS なる衛星が わが国でも検討されはじめたことを付記してこの項を終る。

参 考 文 献

ALLREDGE, L. R. et al., 1963, A Magnetic Profile around the World: J. Geophys. Res., vol. 68, no. 12

ANONYMOUS, 1975, Status and Plans of the Dept. of the Interior EROS Program: USGS Open file report, 75-376

ANONYMOUS, 1976, Utility of Satellite Magnetometer Data for Application to Solid-Earth Geophysical and Geologic Studies: Geophysics, vol. 41, no. 3

ANONYMOUS, 1976, Ad hoc Committee on Magnetic Field Models: Geophysics, vol. 41, no. 4

ANONYMOUS, 1977, Earth Dynamics Monitoring and Forecasting Subprogram Plans.

BENKOVA, V. P. et al., 1973, Residual Geomagnetic Field from the Satellite Cosmos 49: J. Geophys. Res., vol. 78, no. 5

IAGA Division 1 Study Group, 1976, International Geomagnetic Reference Field 1975: J. Geophys. Res., vol. 81, no. 28

IGRF Evaluation Group of Japan, 1975, Evaluation of IGRF Models Proposed for 1975. 0: J. Geomag. Geoelectr., vol. 27

北村泰一 1973, SQUID 磁力計の地球宇宙科学への応用: 日本物理学会誌 vol. 28 no. 11

北村泰一 1978, フィールド・サイエンスの難しさ—SQUID による地球磁場の微小変動測定: 科学, vol 48, no. 3

LANGEL, R. A. et al., 1977, MAGSAT: A Satellite for Measuring Near Earth Magnetic Fields: Goddard Space Flight Center, X-922-77-199

松野久也 1976 米国第 94 議会上院宇宙科学委員会ヒアリング資料を読んで: RESTEC, no. 2

中塚 正 1977, 日本周辺における地磁気傾向面: 物理探鉱技術協会講演会予稿集

PEDDIE, N. W. and FABIANO, E. B., 1976, A Model of the Geomagnetic Field for 1975: J. Geophys. Res., vol. 81, no. 14

小川 徹 1975 地磁気の精密測定: 応用物理 vol. 44 no. 4

REGAN, R. D. and CAIN, J. C., 1975, Revision of the IGRF: Geophysics, vol. 40, no. 5

————— 1975, The Use of Geomagnetic Field Models in Magnetic Surveys: Geophysics, vol. 40, no. 4

REGAN, R. D. et al., 1975, A Global Magnetic Anomaly Map: J. Geophys. Res., vol. 80, no. 5

力武常次 1972, 地球電磁気学

STERN, D. P. and BREDEKAMP, J. H. 1975, Error Enhancement in Geomagnetic Models Derived from Scalar Data: J. Geophys. Res., vol. 80, no. 13

ZIETZ, I. and ANDREASEN, G. E., 1970, Magnetic Anomalies from Satellite Magnetometer: J. Geophys. Res., vol. 75, no. 20