

# 地 球 磁 場 観 測

— 現 状 と 将 来 —

昭 和 63 年 6 月

日本学術会議地球電磁気学研究連絡委員会  
地磁気観測作業委員会

## 序 言

地球の磁場及びその変動を精密に測定し研究するために、多くの行政機関・大学において地磁気観測が行われている。これらの観測は、地球科学のいくつかの主要な分野において基本的物理量を提供するのみならず、実用的必要性もあって、長い歴史を持ち、現在もその継続及び拡張に多大の努力が払われている。しかしながら、研究面でも実用面でも、地磁気観測はきわめて広範囲な目的を持っているために、地磁気観測に携わる行政機関の担当者や、観測或は資料解析に従事する研究者は、学問諸分野の専門化と分化につれて、地磁気観測の実情やその成果について広い視野から検討する機会を持つことが少なくなった。この事情をふまえて、地磁気観測及び研究に関係する代表者が、地球電磁気学研究連絡委員会の下に地磁気観測作業委員会を形成し、日本における地磁気観測の現状について広範かつ詳細な調査検討を行い、将来への展望を議論した。この報告は、その結果をとりまとめたものである。

地磁気観測作業委員会  
委員長 杉浦 正久

地球電磁気学研究連絡委員会地磁気作業委員会

- 委員長： 杉浦正久 (京都大学理学部)  
幹事： 行武 毅 (東京大学地震研究所)  
委員： 荒木 徹 (京都大学理学部)  
石井晴雄 (国土地理院)  
植田義夫 (海上保安庁水路部)  
大林辰藏 (宇宙科学研究所)  
小口 高 (東京大学理学部)  
北村泰一 (九州大学理学部)  
河野 長 (東京工業大学理学部)  
国分 征 (東京大学理学部)  
斎藤尚生 (東北大学理学部)  
佐藤夏雄 (極地研究所)  
住友則彦 (京都大学教養部)  
瀬川爾朗 (東京大学海洋研究所)  
中塚 正 (工業技術院地質調査所)  
西田泰典 (北海道大学理学部)  
乗富一雄 (北九州職業訓練短期大学)  
浜野洋三 (東京大学地震研究所)  
福島 直 (東京大学名誉教授)  
福西 浩 (東北大学理学部)  
本蔵義守 (東京工業大学理学部)  
宮腰潤一郎 (鳥取大学教養部)  
村上律雄 (気象庁地磁気観測所)  
横山 泉 (北海道大学名誉教授)  
力武常次 (日本大学文理学部)  
専門委員： 桑島正幸 (気象庁地磁気観測所)  
中川久穂 (海上保安庁水路部)  
細野武庸 (国土地理院)

## 目 次

1. 地磁気観測の目的	1
2. 地磁気観測所の役割と今後の課題	5
3. 磁気測量	21
4. データ処理・管理	33
5. キャンペイン・海外調査	53
6. 飛翔体による磁場観測	77
7. 観測装置	84
8. 国際組織・国際関係	115
9. 研究者養成・理科教育	119
10. まとめ	123

## 1. 地磁気観測の目的 (概要)

地球磁場は、重力などと同じように、その主要部分が地球内部に起因し、周辺空間にまで大きな拡がりをもつ地球の基本的「場」のひとつである。地球磁場の存在は、地球内外に多種多様の電磁現象を生み出すもとになっている。これらの電磁現象は、直接間接人類や地表で生活する生物に大きな影響を与えている。したがって地球磁場の分布とその時間的変化を正確に知ること自体が基本的に重要なことである。

地球磁場の情報は地球内部や地球の外の電離圏・磁気圏で起こっている現象を理解するうえで不可欠である。地球磁場が地球核の中でどのようにしてつくられるか、はそれ自身地球物理学上の大問題であるが、地球核内の流体運動の研究や地球核・マントルの発展過程の研究などの面からもきわめて重要である。そのためには、数十年から数百万年にわたる地球磁場変動のデータが必要となる。

また地質時代の岩石の帯磁を調べることにより過去の地球変動の様子が明らかにされ、プレートの運動やマントル対流を調べる重要な手がかりが得られる。地殻起源の磁気異常の調査とその時間変化の観測は、熱・鉱物資源の探査や地殻構造の研究に重要な手がかりを与えるし、火山噴火予知・地震予知にとっても重要である。

一方、地表での電場磁場変化の観測から地球内部の電気伝導度を求めることができる。下部地殻の電気伝導度や中部、下部マントルの電気伝導度分布など多くの未解決の課題が残されている。

地球の外圏は太陽風というプラズマ風にさらされているが、地球磁場はこの太陽風によって磁気圏内に閉じ込められている。太陽風から粒子や電磁エネルギーが磁気圏に運ばれ、磁気圏・電離圏でオーロラその他さまざまな現象をひき起こしている。磁場変動の観測はこれら諸現象を理解する上で基本的に重要である。

磁気圏内へ流入するプラズマ粒子のエネルギーを表現するにも、プラズマ対流の大きさを表すにも、磁場変動量が大きく役だっている。太陽風にたいする磁気圏のレスポンスや、その結果として現れる極光帯でのいろいろなプラズマ現象を解明するには、磁場観測は不可欠である。

磁気圏への粒子や電磁エネルギーの流入に関連して本質的な部分はまだまだまったく未解決のまま残されている。問題の解決には磁気圏内部の磁場分布が正確にわかっている必要があるが、さらに磁気圏境界や磁気圏尾部での磁気構造およびその時間的変動を詳しく知ることが大事である。

このように地球磁場は地球内外の諸現象に密接に関係している。これは地球磁場が地球内部およびその周辺域の環境の大きな枠組みを構成する大事な要素のひとつであるからにほかならない。地球科学にかぎってみても、地球電磁氣的発見が学問の進展に大きな展開をもたらした例は少なくない。これからも地球磁場観測の重要性はますます高まるであろう。

地球磁場について人類は古くからある程度の知識をもっていた。13世紀に中国では磁石の指北性を利用したコンパスが使われていたといわれる。17世紀になると地球磁場が双極子磁場的分布をしていることが明らかになり、広く航海に利用されるようになった。同時に、航海の途中や寄港地で地磁気偏角・伏角が測定された。航路が世界中に広がるにつれて、地球磁場分布に関する知識は飛躍的に増大した。現在でもコンパスは航空・海上航法の一手段として利用されている。

進路決定に地球磁場を利用しているのは人類ばかりではない。生物の中には鳩や蜜蜂のように磁場を感じて飛行方向を知るものがあり、地球磁場の存在は人類のみならず、他の生物の生活にも大きな影響力をもつと考えられる。しかしその詳細については未解明の部分が多い。

一方、地球外圏に広がった地球磁場は太陽風との相互作用で磁気圏を構成するなど地球周辺の電磁気的環境の基本的枠組みをつくるのに大きな役割を果たしている。宇宙線を遮蔽するなど生物環境の保護にも役だっている。

### 1-1. 地球磁場の分布と時間変化

地球磁場は地球およびその周辺空間に広がって地球環境の重要な一部を構成し、意識するとしないにもかかわらず、人類や地表で生活する生物に大きな影響を与えている。例えば地磁気コンパスは現在でも航空・航海に利用されている。したがって地球磁場の分布とその時間的変化を正確に知ること自体が基本的に重要なことである。

地球磁場は地球核や地殻に起因する内部起源の磁場と電離圏や磁気圏に起源をもつ外部起源の磁場とからなる。主要部分は内部起源の磁場であるが、内部磁場と外部磁場とではそれぞれに違った空間分布をしており、時間変化のしかたも異なる。

### 1-2. 地球核内現象と地球深部構造

地球磁場の主要部分は地球核内の電磁流体運動によると考えられている。しかし、現実に観測される磁場がどのようにして生成されているか、その詳細についてはまだ充分解明されていない。磁場を維持するためのエネルギー源は、地球核の生成発展の過程と密接に関係しており、地球全体の熱史を理解する上でもきわめて重要である。また、地球核とマントルとの電磁結合は地球自転速度の変動にも大きな影響を与える。これらを解明するには数10年から数万年にわたる地球磁場の時間変化のデータが用いられる。

### 1-3. 地球磁場の長期的変動

地球核内の現象や地球の発達史を調べるには、地質時代からの地球磁場の変動を知ることが重要である。このためには、岩石の磁性を調べるのが有効である。

いろいろな年代の岩石の帯磁を調べることにより、地球磁場の歴史が明らかになった。このような方法で地質時代には地球磁場が頻繁に逆転していることもわかった。このことから逆に岩石磁気を測定して年代の同定も行われるようになった。

### 1-4. 地球テクトニクス・マントル対流

海底地殻の正逆帯磁による磁気縞模様が発見は海底拡大説を導くことになったし、いくつかの大陸の古地磁気データから得られた極移動軌跡は、大陸移動を実証するデータとなった。このように地質時代の岩石の帯磁を調べることにより過去の地球変動の様子が明らかにされ、プレートの運動やマントル対流を調べる重要な手がかりが得られる。

### 1-5. 地殻構造と地殻活動

岩石の帯磁は地殻起源の磁気異常を作り出す。したがって火山地域の磁気異常や、地質構造と関連した磁気異常は、地殻構造を調べる重要な手掛かりである。これら磁気異常の調査は熱・鉱物資源探査に広く活用されている。また、火山や地震活動地域での磁場変化は火山噴火や地震予知のために有効な前兆変化のひとつと見なされている。

### 1-6. 地球内部の電気伝導度構造

外部磁場変化に伴い、地球内部に電流が誘導される。誘導される電流は、地球内部の電気伝導度構造に依存する、2次的な電場磁場変化を生ずる。観測された2次的電磁場変化から、地殻やマントルの電気伝導度構造を求めることができる。地震波速度の400km, 600km不連続層に関連した電気伝導度分布、下部地殻の電気伝導度、地震・火山活動に関連した電気伝導度変化の解明など重要課題である。

### 1-7. 太陽風-地球磁気圏輸送現象

地球の外圏は太陽風にさらされており、太陽風はプラズマの風であって地球磁場を磁気圏に閉じ込める。磁気圏内には太陽風領域から粒子や電磁エネルギーが流入し、粒子の加速、大気中への入射、オーロラ現象や超高層大気の運動に伴って磁気圏-電離圏領域に電流を流し、磁場の変動をもたらす。磁気圏内に捕捉されているプラズマ粒子の全エネルギーは $Dst$ と呼ばれる変動磁場の大きさで表現でき、また、太陽風との相互作用によって磁気圏内に起こるプラズマ対流の大きさは極冠域での電離圏電流によって起こるDP2型の磁場変動で表される。い

まだに謎のまま残っている磁気圏境界での太陽風と地球磁気圏の相互作用を明らかにするためには、グローバルな磁場観測は欠かすことができない。

#### 1-8. 太陽風変動に対する磁気圏のレスポンス

前項で述べた準定常的な輸送現象以外に、太陽風動圧変動や太陽風中の磁場変動に対する磁気圏のダイナミックなレスポンスを調べるには地磁気脈動などの速い磁場変動の観測が重要である。特に極光帯や昼間カサブ域を中心とする2次元ネットワーク観測と太陽風プラズマパラメータの比較が必要とされる。

#### 1-9. プラズマ粒子加速の問題

地球磁気圏尾部では、太陽面でのフレア現象と同様に、磁場のエネルギー（電流のエネルギー）が粒子の運動エネルギーに変換され、オーロラ粒子として超高層大気中に入射するものと考えられている。オーロラ粒子の入射に伴って夜間のオーロラ帯の電離圏には電流が流れ、極磁気嵐を起こす。また、このような粒子の加速とともに、磁気圏尾部の磁場構造が大きく変化することが知られている。衛星による磁気圏内部での観測と同時に極光帯での磁場観測はこの問題を明らかにするために本質的重要性を持っている。

#### 1-10. 磁気圏内磁場分布

地球磁気圏内に捕捉された粒子は最終的には大気中に入射して失われる。その入射機構は磁気圏物理の最大の問題の一つであるがいまだに結論が得られていない。前項で述べた粒子の加速に直接に関わる入射、及び、いったん捕捉軌道に捕らえられて後に入射するもの、いずれもその機構を明らかにしようとするれば磁気圏内のプラズマパラメータと地球上での関連現象の厳密な対比が必要とされる。また、磁気圏-電離圏での電流構造やその変動、電流の起源などを明らかにするためにも、同一の磁力線上での現象の対比が必要である。しかし、磁気圏内の磁場分布の統計的モデルはあるが、いまだに厳密な対比ができるほどの精度はない。

#### 1-11. 太陽風の磁場

太陽風中の磁場が地球磁気圏の変動に大きな役割を担い、外部起源の磁場変動を強くコントロールしていることは既によく知られている。のみならず、太陽風磁場は太陽系外から飛来する宇宙線粒子の変動をもたらしている。地球の外圏から下層大気にかけて、このような宇宙線強度の変動がどのような影響を及ぼしているかについてはまだまったく判っていない。地球外圏環境の研究には、地磁気とともに太陽風磁場の観測が必須である。



## 2. 地磁気観測所の役割と今後の課題

### (概要)

地球をとりまく電磁気的環境は絶えず変化している。地磁気観測所はそのような地球の電磁気的環境の時間的変化を、連続的に観測しようとするものである。

わが国には行政機関に属する観測所と大学・研究機関に属する観測所とがあって、それぞれの目的にしたがって観測を実施している。学術研究上の見地や、社会的実用的立場から観測所に期待される役割はいろいろであるが、大きくまとめると(1)世界観測網の一環としての観測、(2)地域的観測において基準データを提供するための観測、(3)観測器械の検定、(4)研究者の教育・観測技術者の養成・機器開発、などがある。

わが国の地磁気観測の質はきわめて高く、気象庁地磁気観測所など世界観測網の重要な一環を担っている。しかし観測所の分布が陸上に限られているため、北西太平洋地域全体としては観測点の分布が著しく不均一になっている。海底に固定観測点を設置する必要がある。将来は人工衛星を利用した宇宙空間の無人観測所の建設をはかることも重要である。

日本国内およびその周辺地域で高密度観測網による臨時の電磁気観測を行う場合や磁気測量を実施する場合、比較基準用のデータを提供する観測が観測対象地域内に必要である。地震予知や火山噴火予知などにも基準観測所が大きな役割を果たしている。現在の国内の観測所の分布をみると、西南日本に基準観測点が不足している。

観測器械の検定は観測所の重要な機能のひとつであるが、最近では高精度の磁力計が開発されるようになり、観測所自体がその基準となる、より高精度の磁力計や設備を整備充実しておく必要が生じてきた。同時に増加の一途をたどる人工擾乱にたいして、いかにして観測環境を整備・維持するか、が根本的に重要な課題である。

観測所は地磁気研究者の実習・教育の場、観測技術者の養成の場としてきわめて大きな意味を持つ。世界的規模での観測を維持発展させてゆくためには、たんにわが国内の技術者の養成をはかるだけではなく、開発途上国のかんそく技術者の養成にも配慮すべきである。また観測所は新技術の開発にも大きな役割を担うことが期待される。

地球をとりまく電磁気的環境は絶えず変化している。地磁気観測所はそのような地球の電磁気的環境の時間的変化を、連続的に観測しようとするものである。基本となるのは地磁気の観測である。地殻や地球核でつくられる磁場も、電離圏や磁気圏でできる磁場とともに時間的に変化している。地磁気変化は磁場の逆転に伴う数百万年の現象から、数Hzの変動まできわめて広い周期帯の現象を含んでいる。しかもその空間的ひろがりも多様である。百万年程度の時間間隔で起こる磁場極性の反転や、11年周期の磁場変動、あるいは磁気嵐などは全地球的規模の現象であるのに対して、地震や火山活動に伴う数日あるいは数か月の変化は地域の限られた局地的現象である。極光帯に起源をもつ高緯度に特有の現象もある。これら時間変化を完全に観測記述しようとする、全地球を極めてちゅう密な観測所網で覆うことが必要となるが、それは現実的に不可能であるので、目的に応じて観測体制を敷くことになる。

地磁気変化の観測は、磁場の空間的分布を調べる上でも必要である。空間的分布を調べる磁気測量を広域にわたって同一時刻に行うことは不可能で、相当の時間を要する。その間に地球磁場の変化が起こるからある特定時の磁場分布を求めるには、測定時の測量結果を必要な時間または時期に引き直す必要がある。このためには測量域内で磁場変化がわかっていることが大事である。このためにも固定点での連続観測が必要となる。

## 2-1. 観測所に期待される役割

学術研究上の見地や、社会的実用的立場から観測所に期待される役割は多岐にわたる。大きくまとめると

- (1) 世界観測網の一環としての観測
- (2) 地域的観測において、基準データを提供するための観測
- (3) 観測器械の検定
- (4) 研究者の教育・観測技術者の養成・機器開発

などである。もちろんすべての観測所に一律に(1)～(4)の役割が期待されるわけではなく、ある観測所には世界観測網の一環としての標準観測所の機能が、ある観測所には主として地域観測の基準観測所の役割が期待され、大学の観測所ではとりわけ研究教育の機能が重視される、というように観測所によって期待される役割は少しずつ違っている。

### (1) 世界観測網の一環としての観測

全地球的变化を捉えるには国際協力が必要である。一定の形式に則った資料(例えば地磁気3成分の毎分値、毎時値)を適当な国際機関(例えば世界資料セン

ターなど)へ提供することが要請される。このためには、高精度で安定した連続観測が必要となる。

基本となるのは地磁気の観測で、磁気圏・電離圏で起こる現象の解明や地磁気永年変化の解析、世界磁気図の作成、国際標準地球磁場の作成のための基礎資料となる。国際地球電磁気学・超高層物理学協会のresolutionなどで要請されるのは、もっとも時間間隔の短いもので毎分毎のデジタルデータであるが、学術研究上の立場からはさらに短周期の数Hzの現象から数10年変化まできわめて広い周期範囲にわたっての観測が要求される。例えば国際地球観測年(IGY)には、特定年次に限って超早廻しの記録をとるなど時間の分解能を挙げて観測を行ったことがある。

地磁気永年変化の観測は地球核内で起こっている現象を知る上で重要であるが、数10年から数100年で変動する現象であるから、同一地点で長期間、安定に、連続して記録をとることが必要である。永年変化観測の基準となる観測所では100年以上にわたって安定な観測を行うことが要請される。

地磁気観測のほかに地電流(地電位差)観測も重要で、国際的にもその必要性が認識され、標準的観測所で連続観測が実施されてきた。

標準観測所の役割として、さらに2次データの作成が挙げられる。各種地磁気指数作成のための資料作成である。K-indexなど国際地磁気指数サービス機関(ISGI)への提供が要請される。

## (2) 地域的観測の基準としての観測

日本国内およびその周辺地域で高密度の電磁気観測を行う場合、比較基準用のデータを提供する観測が観測対象地域内に必要である。また磁気図の作成などある特定時点での磁場の空間分布を求める場合にも、日変化など外部磁場変化の補正や、永年変化補正などのため基準観測データが要求される地震予知や火山噴火予知の観測でも、臨時観測データや磁気測量値に含まれる磁気嵐や日変化など外部磁場変化の影響を除くために観測域内に基準観測点が必要である。

これらの観測は、比較的短期間の研究的観測であることも多く、観測精度や、周期帯などでは、通常の観測より遙かに厳しい要求を課せられることもある。例えば磁場の測定精度としては0.1nTが要求されるし、相対的精度としては0.01nT、周波数帯も短期的には数10Hzまでの観測も要望される。

観測項目は、やはり地磁気観測が主体であるが、地球内部構造の研究や地震予知観測の中で実施されている電気伝導度測定との関連で、地電流(地電位差)の観測は重要な観測項目である。そのほか必要に応じて研究的観測を追加して行う柔軟性が基準観測所に求められる。空中電気の観測は今後研究的観測として実施されることになろう。

### (3) 観測器械の検定

観測所には大なり小なり観測器械の検定機能が要求される。新しく開発された磁力計の精度の検定から、磁気測量を行うに当っての器差検定までいろいろの段階の検定がある。衛星に搭載する器械や海底磁力計など、新しい高精度磁力計の精度や感度検定となると、観測所自体が極めて精密な測定装置を整備しておく必要がある。このような高精度の検定はすべての観測所で可能ではなく、限られた標準観測所にのみ期待できることであろう。器械の検定には比較用の高精度の測定装置が必要なだけでなく、検定の可能な観測環境が維持されることが重要である。人工擾乱の少ない環境が観測所にとって不可欠である。また高精度検定のためには特別のシールドルームなども必要となろう。

### (4) 研究者の教育・観測技術者の養成・機器開発

観測所は地磁気研究者の実習・教育の場としてきわめて大きな意味を持つ。とくに大学に所属する観測所にはこの点での期待が大きい。

地磁気の観測には熟練と技術を要する面がある。高い水準の観測を維持するには観測技術者の養成が重要な課題である。世界的規模での観測を維持発展させてゆくためには、たんにわが国内の技術者の養成をはかるだけではなく、開発途上国の観測技術者の養成にも配慮すべきである。

観測機器開発の上でも観測所は有利な立場にある。各種の観測装置、観測環境が整備されているからである。開発された器械の検定は最終的には観測所に頼らざるを得ない。

#### 2-2. 観測所の現状

我国の観測所は政府行政機関に属するものと、大学・研究機関に属するものがある。ほとんどが日本国内に分布するが、南極およびアイスランドにも観測基地ならびに連続観測点があり、これらの測点の維持・運営は文部省極地研究所によって行われている。

##### 2-2-1. 行政機関の観測所

###### (a) 気象庁地磁気観測所

###### 目的・沿革

地球磁気および地球電気に関する観測および調査を行う機関として設置（運輸省組織令）。柿岡（1913年）、女満別（1949年）、鹿屋（1948）、父島（1972年）・柿岡

地理的緯度経度： 36°14' N, 140°12' E

観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力、地磁気脈動、地電流、空中電気

観測方式・器械：

- 地磁気絶対観測： 偏角・伏角、毎週1～2回、DI-72型磁気儀  
全磁力、毎週1～2回、プロトン磁力計（精度0.1nT）
- 地磁気変化観測： 光ポンピング磁力計（全磁力，3成分，毎秒1回）  
吊り磁石型変化計（3成分）  
フラックスゲート磁力計（3成分）
- 地震予知永年変化  
精密観測： 全磁力、毎分1回、プロトン磁力計
- 脈動観測： 誘導磁力計（3成分）
- 地電流観測： 東西190m，南北180m
- 空中電気： ベンドルフ電位計、回転集電器

報告書

- ・年報：地磁気観測所報告（地磁気） 柿岡、女満別、鹿屋、父島  
地磁気観測所報告（地球電気） 柿岡、女満別、鹿屋  
地磁気脈動報告 柿岡、女満別、鹿屋、父島
- ・速報（月ごと）：柿岡、女満別、鹿屋の毎時値、K-指数、磁気嵐発生状況
- ・英文：Report of the Geomagnetic and Geoelectric Observations  
（柿岡・女満別・鹿屋），  
[1986年から地磁気年報と Report of Magnetic Pulsations に分割掲載し廃刊]  
： Report of Magnetic Pulsations （柿岡・女満別・鹿屋・父島）

国際機関などへの通報

地磁気デジタル毎分値を3か月ごとに米国の世界デジタル資料センターへ、Dst指数を毎月国際指数サービス機関へ、また毎日2回地磁気擾乱についての情報を郵政省電波研究所へ通報している。

ウルシグラム通報（柿岡）

地球電磁気観測気象報（柿岡）

その他

- 地磁気検定： 地球電磁気測器の検定機関（運輸省令）。  
4台の光ポンピング磁力計を中心とした標準磁気儀。
- 地震予知地磁気資料の取りまとめ。

・女満別

地理的緯度経度： 43°55' N，144°12' E

観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力、地磁気脈動、地電流、空中電気

観測方式・器械：

地磁気絶対観測： 偏角・伏角、毎週1～2回、DI-75型磁気儀  
全磁力、 毎週1～2回、プロトン磁力計（精度0.1nT）  
地磁気変化観測： 吊り磁石型変化計（3成分）  
フラックスゲート磁力計（3成分）  
地震予知永年変化  
精密観測： 全磁力、毎分1回、プロトン磁力計  
脈動観測： 誘導磁力計（3成分）  
地電流観測： 東西150m， 南北130m  
空中電気： 回転集電器

・鹿屋

地理的緯度経度： 31°25′N， 130°53′E  
観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力、地磁気脈動、地電流  
観測方式・器械：

地磁気絶対観測： 偏角・伏角、毎週1～2回、MO-I型磁気儀  
全磁力、 毎週1～2回、プロトン磁力計（精度0.1nT）  
地磁気変化観測： 吊り磁石型変化計（3成分）  
フラックスゲート磁力計（3成分）  
地震予知永年変化  
精密観測： 全磁力、毎分1回、プロトン磁力計  
脈動観測： 誘導磁力計（3成分）  
地電流観測： 東西200m， 南北200m

・父島

地理的緯度経度： 27°06′N， 142°11′E  
観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力、地磁気脈動  
観測方式・器械：

地磁気絶対観測： 偏角・伏角、2カ月1回、GSI型磁気儀  
全磁力、 2カ月1回、プロトン磁力計（精度0.1nT）  
地磁気変化観測： フラックスゲート磁力計（3成分）  
脈動観測： 誘導磁力計（3成分）

（b）海上保安庁水路部

・八丈水路観測所

目的・沿革

水路測量のうちの地磁気測量ならびに水路の測量に伴う地磁気に関する調査お

よび研究（運輸省組織令）を円滑に遂行するため、昭和29年（1954年）和歌山県下里に下里水路観測所が設置された。昭和52年（1952年）八丈島に移転、昭和54年（1979）より八丈水路観測所として観測を開始。

地理的緯度経度： 33°04.2' N, 139°49.7' E

観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力

観測方式・器械：

地磁気絶対観測： 偏角・伏角、毎週1回、GSI型一等磁気儀  
全磁力、 毎週1回、プロトン磁力計（精度0.1nT）

地磁気変化観測： 吊り磁石型変化計（3成分）  
フラックスゲート磁力計（3成分）

地震予知永年変化

精密観測： 全磁力、毎分1回、プロトン磁力計

報告書

- ・下里地磁気観測所報告 第1号（1957）～第7号（1964）  
1954年から1960年までの観測成果
- ・水路部観測報告地磁気編 第1号（1965）～第14号（1980）  
1961年1月から1978年2月までの観測成果
- ・水路部観測報告地磁気編 第15号（1981）～第18号（1984）  
1979年11月から1982年12月までの観測成果
- ・水路部観測報告八丈水路観測所地磁気観測年報 第1号（1985）～第2号（1986）  
1983年1月から1984年12月までの観測成果

（c）建設省国土地理院

目的・沿革

国土地理院では、重力、水準、天文、三角測量などとならんで磁気測量を行っている（建設省設置法）。これら測量業務を円滑に遂行するために、昭和31年（1956年）千葉県鹿野山に鹿野山測地観測所が、昭和44年（1969年）岩手県水沢に水沢測地観測所が、さらに昭和55年（1980年）には江刺市に江刺観測場が設置された。

・鹿野山測地観測所

地理的緯度経度： 35°15.2' N, 139°57.5' E

観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力

観測方式・器械：

地磁気絶対観測： 偏角・伏角、毎週1～2回、GSI型磁気儀  
全磁力、 毎週1～2回、プロトン磁力計

地磁気変化観測： 吊り磁石型変化計（3成分）

フラックスゲート磁力計(3成分)

地震予知永年変化

精密観測： 全磁力、毎分1回、プロトン磁力計

・水沢測地観測所

地理的緯度経度： 39°06.5' N, 141°12.4' E

観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力

観測方式・器械：

地磁気絶対観測： 偏角・伏角、毎週1～2回、GSI型磁気儀  
全磁力、 毎週1～2回、プロトン磁力計

地磁気変化観測： 吊り磁石型変化計(3成分)  
フラックスゲート磁力計(3成分)

地震予知永年変化

精密観測： 全磁力、毎分1回、プロトン磁力計

・水沢測地観測所江刺観測場

地理的緯度経度： 39°14.1' N, 141°21.5' E

観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力、地磁気脈動、地電流

観測方式・器械：

地磁気絶対観測： 偏角・伏角、毎月1～2回、GSI型磁気儀  
全磁力、 プロトン磁力計

地磁気変化観測： フラックスゲート磁力計(3成分)

脈動観測： 誘導磁力計(3成分XYZ)

地電流観測： 東西315m, 南北180m

報告書

・年報：地球磁気観測報告(水沢・鹿野山)

## 2-2-2. 大学

(a) 東北大学理学部附属地磁気観測所(女川)

目的・沿革

地磁気観測および地球電磁気に関する学理ならびにその応用の研究を行い、あわせて学生の地球電磁気学実習を行うことを目的として、昭和22年(1947年)地震津波地磁気観測所として女川町小乗浜に設置、昭和32年(1957年)理学部附属地磁気観測所に改組(国立学校設置法施行規則第20条1項)。昭和35年(1960年)女川町桐ヶ崎に移転。磁性材料関係の研究組織が多い東北大学に附属し、地磁気脈動周期帯の人工擾乱が全国でも珍しく少ない場所にあり、大学に附属する唯一の



超高層大気関係の観測所である。

地理的緯度経度： 38° 26' N, 141° 28' E

観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力、ULF磁波、地電流

観測方式・器械：

地磁気絶対観測： 全磁力、 10分1回、プロトン磁力計（感度0.25nT）

地磁気変化観測： 3成分、R u l f m e t e r（感度50nT/V, 精度0.05nT）  
3成分、フラックスゲート磁力計（感度20nT/11mm, 精度2nT）

3成分、誘導磁力計（感度, 1V/nT at 0.1Hz,  
15mm/nT at 0.1Hz）

報告書

- ・ IGY Report of Onagawa Magnetic Observatory, No.2 and No.3, Sci.Rept.Tohoku Univ. Ser.5, Geopys., Suppl., 1960.
- ・ Solar Terrestrial Activity Chart, Hissagram for 1969, for 1970 published by IACSTA in March 1978.

(b) 東京大学地震研究所八ヶ岳地磁気観測所

目的・沿革

地震予知計画の一環として、地磁気永年変化精密観測のため昭和45年(1970年)に設置され、甲信越地方の基準観測所の機能を果している。

地理的緯度経度： 36° 04' N, 138° 27' E

観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力、地電流

観測方式・器械：

絶対観測： 偏角・伏角、毎月1回、G S I一等磁気儀（精度0.1'）  
全磁力、 毎分1回、プロトン磁力計（精度0.1nT）

変化観測： 吊り磁石型磁力計(3成分、感度0.1nT)  
フラックスゲート磁力計(3成分、感度0.1nT)

地電流： 東西150m, 南北175m

(c) 東京大学伊豆大島火山観測所

目的・沿革

火山活動に伴う電磁気現象の観測、およびこの地域の基準観測点として昭和34年(1959年)に設置され、昭和59年(1984年)に伊豆大島津波観測所と統合して伊豆大島火山観測所となる。

地理的緯度経度： 34° 44' N, 139° 22' E

観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力、電気抵抗変化

観測方式・器械：

- 地磁気絶対観測： 全磁力、毎分1回、プロトン磁力計（精度0.1nT）  
地磁気変化観測： フラックスゲート磁力計（3成分、感度0.2nT）  
電気抵抗変化観測： 人工電位法（カルデラ内）

（d）京都大学理学部阿蘇火山研究所

目的・沿革

汎世界的地磁気成因の研究、および火山活動に伴う地磁気変化の研究を目的として設立。昭和25年（1950年）から地磁気三成分観測。

地理的緯度経度： 32°53' N, 131°01' E

観測項目： 地磁気3成分変化、全磁力

観測方式・器械：

- 地磁気絶対観測： 偏角・伏角、毎月1回、G S I 一等磁気儀（精度0.1'）  
全磁力、毎分1回、プロトン磁力計（精度0.1nT、1984年より）  
地磁気変化観測： 三成分光学式吊り磁石型磁力計（3成分、感度D~0.38' / mm, H~3nT/mm, Z~4.5nT/mm、分解能0.1mm、1950年より）

2-2-3.南極における観測所

（a）国立極地研究所

（イ）昭和基地

目的・沿革

極域における地磁気変動の研究。1959年4月より定常観測開始（1962年1月から1966年3月まで一時中断）。1981年4月より研究観測開始。

地理的緯度経度： 69°00' S, 39°35' E

・定常観測

観測項目： 地磁気全磁力、偏角・伏角、地磁気3成分変化

観測方式・器械：

- 地磁気絶対観測： 全磁力、毎月1回、プロトン磁力計（Geometrics, G816/826）  
偏角・伏角、毎月1回、G S I 二等磁気儀  
地磁気変化観測： フラックスゲート磁力計（チャート記録, 2.5cm/h, 5cm/h）

・研究観測

観測項目： 地磁気3成分変化、地磁気脈動（3成分）

### 観測方式・器械：

- 地磁気変化観測： フラックスゲート磁力計（島津MB162：DC～0.01Hz,分解能0.25nT, 1秒値,デジタル記録）
- 地磁気脈動観測： 誘導磁力計（0.001～3Hz, 1秒値(デジタル記録),10Hz(アナログ記録)）

### 報告書：

JARE Data Reports, Upper Atmosphere Physics Series（毎年極地研より刊行）

### 国際機関への通報：

WDC-C2 for Geomagnetism および WDC-C2 for Aurora

(ロ) あすか基地

### 目的・沿革

極域における地磁気変動の研究。1987年2月より研究観測開始。

地理的緯度経度： 73° 31' S, 24° 08' E

### ・研究観測

観測項目： 地磁気3成分変化、地磁気脈動（3成分）

### 観測方式・器械：

- 地磁気変化観測： フラックスゲート磁力計（島津MB162：DC～0.01Hz,分解能0.25nT, 1秒値,デジタル記録）
- 地磁気脈動観測： 誘導磁力計（0.001～3Hz, 1秒値(デジタル記録),10Hz(アナログ記録)）

## 2-3. 観測所に関する諸問題

観測所の現状と観測所に期待される役割とを比較して、観測所の観測体制観測内容、観測技術者の養成の問題等を検討する。

### (1) 世界観測網の一環としての役割

国際的つながりの最も強いのは気象庁地磁気観測所である。柿岡、女満別、鹿屋、父島のデータを世界資料センターなどへ報告して標準観測所としての責を果している。観測器械も第一級のものが整備されており、これらセンターへ送られるデータの質も極めて高い。水路部の八丈水路観測所は国際水路機構（IHO）との関係が深い。同観測所および国土地理院の水沢、鹿野山測地観測所では定期的に実施される絶対観測によって基線値を常時一定精度で維持しており、観測結果は年報などにまとめられている。他国の観測所にひけをとらない。また南極では昭和基地で定常観測が維持され結果は極地研究所のデータ報告書として刊行さ

れている。これらの観測所は質的には充分世界観測網の一環を担うに足りる。また観測所の配置にしても分布密度は世界的に見れば極めて高い。

しかし、これらの観測所はすべて陸上に分布しており、海域まで含めた場合には日本周辺の観測所分布は極めて不十分な状態にある。国際地球電磁気学超高層物理学協会では地球上を均一な観測点分布で覆うのが望ましいとして海域の観測強化を勧告している。北太平洋も例外ではない。現在は気象庁の父島観測点が、観測点不備の一部を補っているが、例えば北緯40°、東経150°、の付近や沖縄および小笠原南方海域などにも観測点配置が望まれる。最近では海底観測も可能になったのであるから海域の観測を充実させることは今後の大きな課題である。

静止衛星を利用した宇宙空間の無人観測所の建設や人工衛星により絶えず地球の全表面をカバーする移動観測を継続することはこれからきわめて重要な課題となる。

## (2) 地域の基準観測としての役割

業務的に観測を実施している行政機関の観測所のほかに、我国には宮城県女川に東北大学理学部附属地磁気観測所、長野県小海に東京大学地震研究所八ヶ岳地磁気観測所、伊豆大島に東京大学伊豆大島火山観測所、阿蘇に京都大学理学部火山研究所があって地磁気観測を行っている。さらに地震予知観測のために全国で約20カ所にプロトン磁力計が設置され全磁力連続測定を実施している。

このように見ると、全国きわめて高密度に観測所が分布しているように見える。それぞれの観測所の質も高く、観測所自体としては基準観測の役割を果たしている。しかし地震予知の観測や地下構造の研究などではさらに高密度に臨時観測点を展開したり、より密に磁気測量を実施したりしている。現在の観測所の配置を見ると、中部地方の八ヶ岳地磁気観測所から西は阿蘇の火山研究所にいたるまで観測所が存在せず空白域になっている。これは西南日本で電磁気観測を実施する場合の大きな障碍となっている。西南日本に全磁力および3成分の連続観測を実施する観測所を早急に設置すべきである。

## (3) 観測内容

これまでも国際地球観測年(IGY)のような特別の時期には、行政機関の観測所でも例えば大気光の観測も行うなど一時的に業務が拡大されることがあった。このような柔軟性は今後も維持されるべきであろう。地磁気観測を中核として、他の電磁気現象の観測も必要に応じて取り入れる積極性が望まれる。例えば最近地球内部の研究ではマグネトテルリク法等による電気伝導度観測が広く行われている。このためには広い周波数帯にわたって磁場と電場変化を測定する必要がある。標準観測所では地電流観測の充実などが望まれる。

#### (4) 観測器械の検定

磁力計の検定設備がもっとも整っているのは気象庁地磁気観測所（柿岡）である。現在の通常の磁気儀および磁力計については、精度および感度の検定がほぼ満足すべき状態で実施されている。しかし最近は技術の進歩に伴い、高精度の磁力計も多く開発されるようになった。標準観測所では新型の高精度磁力計への対応を検討しておくべきである。

#### (5) 新技術の開発・導入

海底での地磁気変化観測が可能になったとはいえ、海底観測所の設置にはなお技術開発を要する。一方地磁気測定への人工衛星の利用の問題がある。我国でも積極的に取り組むべき課題である。これら新技術の開発導入に、観測所は大きな役割を果たすべきである。

観測所固有の問題も多い。例えば絶対観測の自動化、無人化が可能となれば、今後の観測所の運営の仕方にも大きな影響を及ぼすことになる。早急に実現をはかるべき問題である。

#### (6) 観測環境の維持

観測所にとって最も深刻な問題は、人工擾乱による観測環境の汚染である。都市開発や交通機関の整備あるいは大型農業機具の普及などによって観測適地は確実に縮小しつつある。これに対する速効的対応策は見あたらないが日頃から地域社会の理解を得ておくことが観測環境を維持する上でも大事なことであろう。

現在人口が都市部に集中する傾向があることを考えると、僻地は観測適地として残る可能性がある。観測の完全自動化、無人化をはかり、山間僻地へ移設可能な観測はいつでも移設できる体制を整えておくことが重要である。

#### (7) 観測技術者の養成・研究者の教育

観測従事者の教育養成は、国の内外を問わず観測事業を続ける上でもっとも重要なことである。最近では我国の研究者が海外へ出かけて行って観測する場合も増えてきた。このような場合海外観測所の技術者養成がひとつの問題となっている。海外観測所から観測者養成の要望も強い。観測所間で適当な機関を作って、海外研修生の受入教育を行うなど、観測技術者養成の問題は今後の重要な課題である。

また現存する大学附属の観測所はわずかに4カ所（地球内部関係3カ所、超高層大気関係1カ所）で、研究者教育の重要性を考慮するとさらに強化する必要がある。

(8) 観測研究のための予算・人員の増強

以上述べた(1)～(7)の項目はいずれも重要であり、これらの必要性を満たすためには最低限の予算と人員の増強が必要である。とくに大学の観測所が研究教育の責務を果たすためには、経常的運営費の増額がはからなければならない。

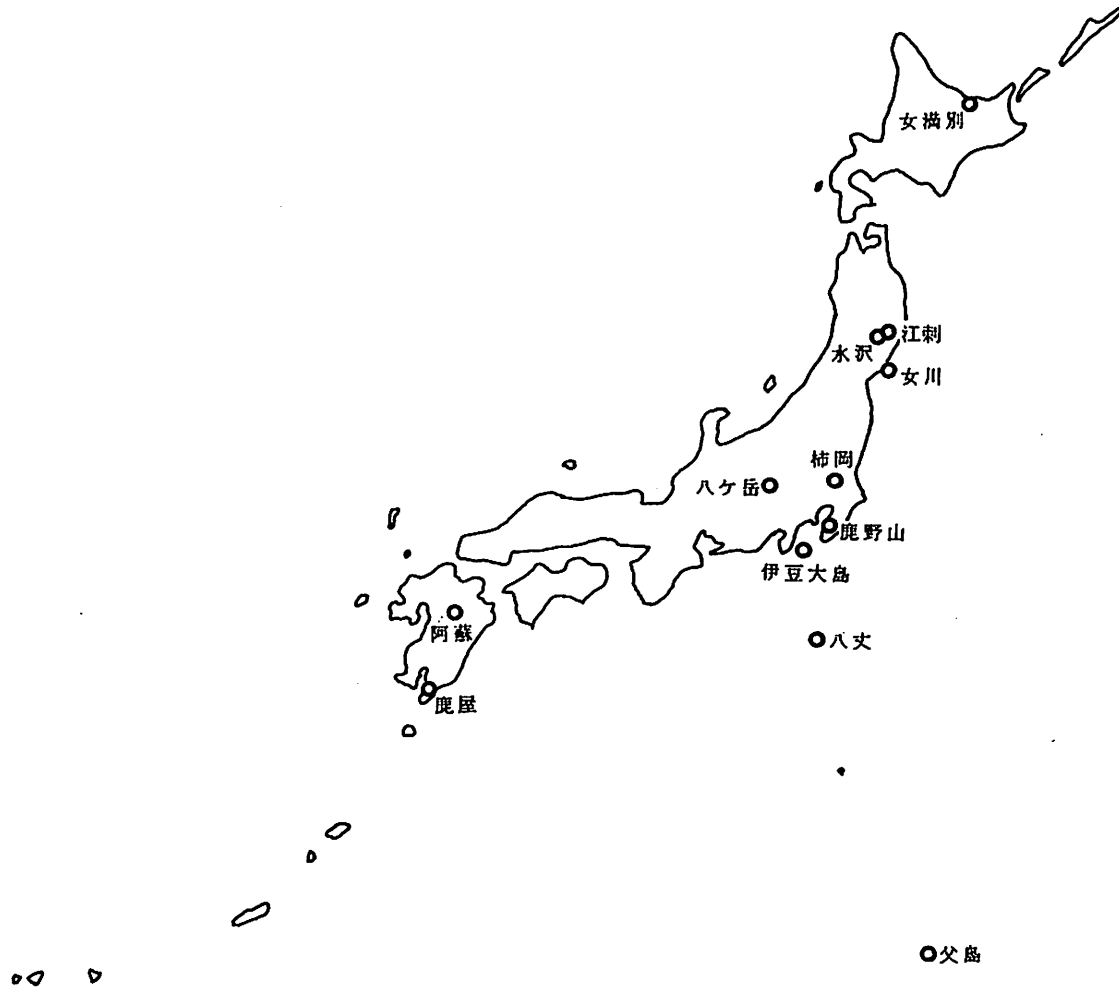


图 2-1 観測所の分布图

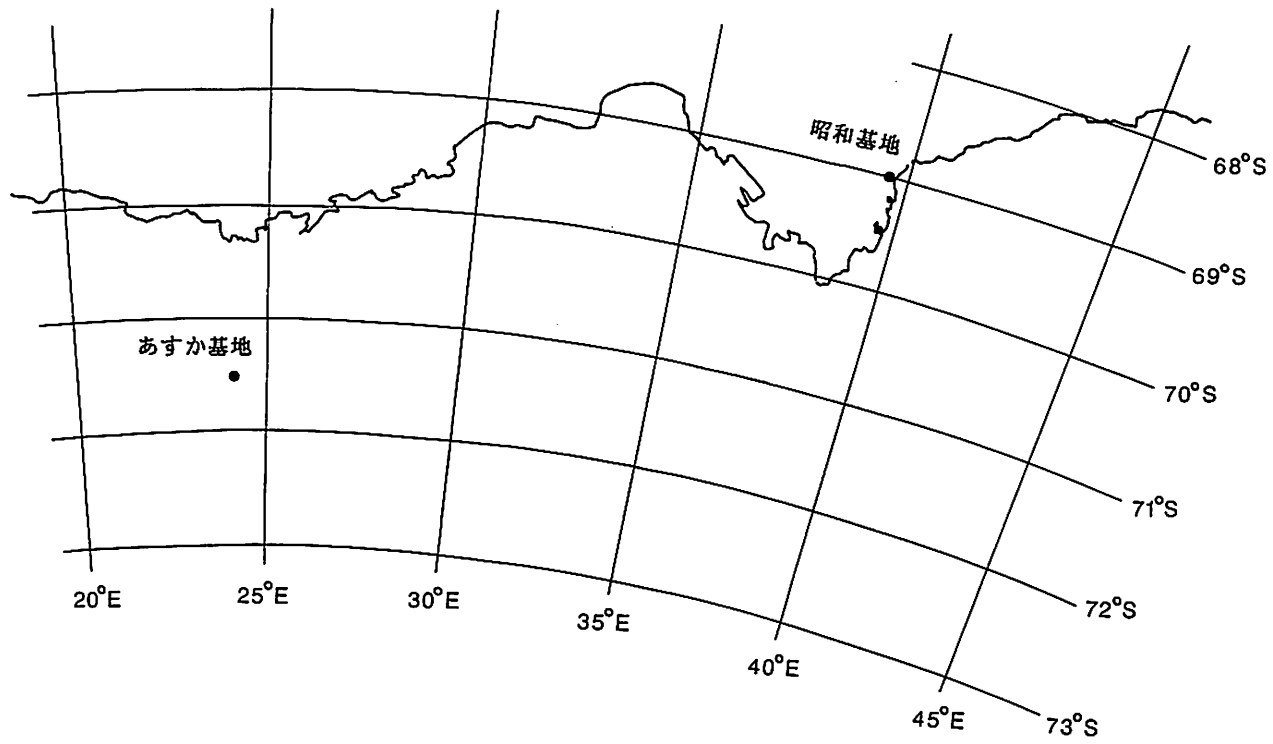


図 2-2 南極における観測所の分布図



### 3. 磁気測量

#### (概 要)

磁気測量の目的として、地域的なものには地殻の構造調査、資源探査、地震、火山噴火の予知などがあげられるが、世界的規模では地球の主磁場の成因を探るためなどもある。磁場はベクトル量であるから3成分の測量から得られる情報は、一般には重力などに比べると多い特徴がある。測量は陸上磁気測量、航空磁気測量、海上磁気測量に大別される。わが国の陸上における磁気測量の歴史は古く、明治15年頃にまでさかのぼることができる。当時は地質調査所によって行なわれていたが、その後海軍水路部でも磁気測量を担当するようになった。現在は国土地理院および海上保安庁水路部によって定期的に全国精密測量が実施されている。また、大学等によって局地的な測量もなされている。これらは、例えば地震予知情報としても重要な役割を果たしている。航空磁気測量は水路部、地質調査所、国土地理院などにより、海上磁気測量は水路部によって実施されており、大陸棚での石油、天然ガス資源情報や陸域での地熱資源情報などが得られている。このような広域での観測が比較的容易に行えるようになったのはプロトン磁力計の実用化に負うところが大きい。以下の節ではこれら陸上、航空、海上における磁気測量のそれぞれの歴史、方法、補正の仕方、データ解析および主な成果が述べられている。

一般に、任意の地点の磁場の測定値は時時、刻刻に変化する。これは主に地磁気日変化や磁気嵐などの擾乱磁場によるもので、磁気測量にとってはノイズとみなされる。地震、火山噴火予知を目指した測量などでは、主磁場の数十万分の一以上の測定精度が要求されるのでノイズの除去は最大の問題である。多くの場合ノイズ除去は測量時と同時刻の基準観測所の観測値を用いて行なわれる。これを補正と呼ぶが、擾乱磁場に地域性があるので一般には測量地域と観測所との距離が離れるに連れて補正の精度は低下する。最適の補正方法の開発自体一つの研究テーマになっている。この他、近年では直流電車軌道からの漏洩電流の影響など人工的ノイズも深刻な問題となっている。

地球が巨大な球形磁石になっていることは、17世紀初頭ギルバートによって指摘された。19世紀はじめには、ガウスが偏角、伏角および磁場強度の測定結果に対しポテンシャル論や球関数論を適用し、地表で観測される磁場の数パーセントを除けばすべて地球内部に起因することを明らかにした。また、これと同時に地球中心に磁気双極子の存在を仮定し、この磁気モーメントを計算した。

20世紀に入って、世界各地で本格的な磁気測量、地磁気観測が行われるようになった。これらの測量結果などから主磁場の解析が行われ、双極子磁場や非双極子磁場が求められた。双極子磁場については、磁気モーメントが1世紀で5%も減少していることが明らかになった。また、非双極子磁場については、移動性磁場と停滞性磁場が存在することが分かり、移動性磁場は約0.3度/年で西方に移動していることが確認された。さらに、北磁極は年間20kmを越える早さで北方に移動していることなどが磁気測量で確認されている。以上のように、地球内部に起因する磁場の研究は、惑星としての地球の内部構造や活動を明らかにする上で極めて重要な役割を演じている。

また、磁気測量は地殻構造の研究や資源探査のためにも広く応用されている。地殻を構成している岩石や鉱床などの磁化の強さは磁鉄鉱などの含有率によって大きく変わる。さらに、磁化はベクトル量なので、地磁気3成分の観測から地殻構造のより詳しい情報をうる事が出来る。また、磁化の強さは温度にも依存するので地熱開発にも利用されている。

近年、地震、火山噴火予知への社会的要請が強くなってきた。いままでに、国内でも精密磁気測量の繰り返しによって、地震発生、火山噴火に関連する磁場変化をとらえ得たとの報告が多く為されている。これらの異常変化の理論的裏付けとして、ピエゾ磁気効果、熱消磁効果、流動電位効果などが考えられている。何れの場合でも、一般に期待される変化量は、数nT-数10nTで、主磁場の数万分の1程度と極めて小さい。これに対して、地磁気日変化や磁気嵐時などの擾乱磁場の変化量は数10nT-数100nTにもおよぶのでこれらの観測値からの除去が大きな問題である。

以上に述べたように、磁気測量は地球物理学、資源探査、地震、火山噴火予知など様々な目的を持って、大学、国土地理院、地質調査所、水路部などで陸上、空中、海上等で実施されている。目的によって、測定の方法、精度、化成方法、測定頻度など様々である。以下の各節で、測量の現況、問題点及び将来への展望について述べる。

### 3-1 磁気測量の現況

### 3-1-1 陸上磁気測量

#### イ) 歴史

日本における地磁気測量の歴史は古く、明治13年地質調査所に招へいされたオット・シュットによる観測が日本の本格的磁気測量の最初と考えられている。明治15年～16年にかけて地質調査所は地質調査の観点から、磁気測量を実施し磁気図を作成した。明治16年、東京大学教授となったノットはこの磁気測量結果を検討した結果、火山等局地的な影響のない日本の地磁気の分布を求める磁気測量を計画した。明治20年ノット、田中館愛橋、長岡半太郎等は全国で磁気測量を実施し磁気図を作成した。明治24年濃尾地震による地磁気変化を調査するための磁気測量が行われた。翌明治25年、文部省に設置された震災予防調査会の決定に基づき、明治26年～29年にわたり全国磁気測量を実施した。磁気測量は船舶の安全な航海をはかる上でも重要であることが解り、磁気測量は海軍水路部に引き継がれた。第一回磁気測量が明治45年～大正2年に実施され、これ以降10年毎に繰り返し測量が行われた。戦後、海上保安庁となり測量の繰り返し周期が5年に改められ、昭和24年～25年戦後第一回(通算第五回)の測量が実施され、全国磁気測量の一環として5年毎に実施している。陸地測量部は昭和18年磁気測量に着手した。戦後、地理調査所(現国土地理院)に引き継がれ、昭和25年から一等磁気測量が開始された。昭和27年二等磁気測量を開始し約850点の磁気点が設置された。現在、一等磁気点約100点を2～3年周期で繰り返し測量を実施している。この他、地震予知、火山噴火予知等、局地的な磁気測量が大学等関係機関で実施されているが、プロトン磁力計による全磁力だけの測量が多い。

#### ロ) 測量の方法

地磁気三成分の測量には、通常、GS1型磁気儀とプロトン磁力計が用いられる。これらにフラックスゲート磁力計を加えることもある。磁気点(観測点)は人為的磁気擾乱の無い林野、畑地に設置されているが、観測前にその周囲の草刈等整備を行い、磁性物が無いことを確認する。標石の中心上一定の高さに磁気儀の中心がくるよう、三脚を設置する。(鉛直勾配が大きい場所があるので注意)標石の北方約100mに方位標を、また、2～3mの所に補助点を設置する。三脚上と補助点において、交互にプロトン磁力計で全磁力の測定を短時間で繰り返し、地域差を求める。これ以降、全磁力の測定は補助点で行う。三脚上に整置した磁気儀を操作し偏角、伏角を、プロトン磁力計で全磁力を測定する。一等磁気測量は6時～22時(JST)まで毎時1回の観測を行う。再度、地域差を測定する。この他、晴天夜北極星を観測し方位標の方位角を求めておき、偏角測定の方

基準とする。磁気嵐の時は観測を避ける様にしている。

## ハ) Epoch Reduction

地磁気の観測値には通常、電離層や磁気圏に起因する地磁気日変化や磁気嵐等による変動磁場が含まれている。従って、ある期間に渡って、広い範囲の多くの磁気点で行われた磁気測量結果には、各々の観測時刻に応じた変動磁場が含まれている。通常は、磁気点での観測と同じ時刻の基準観測所の観測値を用いて変動磁場を補正し、磁気点での観測値を特定の日時の値に引き直す操作が行われる。国土地理院ではこの操作を年度化成と呼び、次のように行う。

$$M^P(t_0, t) = M^P(t) + C_1 \quad \text{但し} \quad C_1 = M^K(t_0) - M^K(t)$$

ここで  $t_0, t$ : 観測時刻、化成の基準日

$M^P(t_0, t), M^P(t)$ : 磁気点Pの化成値、観測値

$M^K(t_0), M^K(t)$ : 基準観測所の基準値、観測時刻の値

一等磁気測量では地磁気観測所柿岡を基準観測所とし、全国の磁気測量で得られた観測値には  $C_1$  補正が加えられ、基準日に化成される。一等磁気測量の様に数多く繰り返し測量が行われている磁気点では、観測値を化成しても同じ値にならず、経年変化がみられる。これは磁気点と観測所の間で経年変化量が異なるためであるが、逆にこれから各磁気点の柿岡に相対的な経年変化を求めることができる。国土地理院では年度化成した多数の観測値を時間の二次関数として近似し、基準観測所に対する磁気点の経年変化を求める。この経年変化の補正  $C_2$  は

$C_2 = \{M^K(t_0) - M^K(t)\} - \{M^P(t_0) - M^P(t)\}$  で表される。式の右辺は各々基準観測所と磁気点Pにおける  $t_0$  から  $t$  までの経年変化である。磁気図を製作するときはこの補正を行うときがある。

## ニ) データ解析

固体地球に起因する地球磁場を論ずる立場からすると、外部磁場を除去することは重要である。単純な方法としては外部磁場の影響が同じと考えられる地域内で観測点と基準点との差をとる (epoch reduction) 方法があるが広い地域では精度が悪い。観測精度が高くなった今日、外部磁場の除去のため多くの手法が考えられているが、その精度向上が望まれる。地磁気観測所柿岡を基準とする一等磁気測量成果の精度には自ずから限度がある。地磁気は高さによって異なる。一つの基準面に統一するためには地磁気各成分の鉛直勾配が必要であり、これを得る一つの方法として、地磁気ベクトルを  $F$  として、 $\text{rot } F = 0, \text{div } F = 0$  から求めることができる。この高さに対する補正  $C_3$  は 100 m あたり 1 nT 程度であり、陸上の磁気測量では省略されることがある。航空磁気測量では無視できない量になる。地磁気測量結果から統一した各 epoch に

おける全国の地磁気各成分の分布と経年変化が明かにされる。このことから一等磁気測量結果は日本の地球磁場分布とその経年変化に関する諸現象を調べる資料となっている。日本付近の地球磁場分布を表すため、約100点の一等磁気点の値を用い地磁気各成分を次に示す様な経緯度の二次式が求められる。

$$M_t = M + a \Delta \phi + b \Delta \lambda + c \Delta \phi^2 + d \Delta \lambda^2 + e \Delta \phi \Delta \lambda$$

$$\Delta \phi = \phi - 37^\circ$$

$$\Delta \lambda = \lambda - 138^\circ \quad \phi, \lambda \text{ は度単位で表した緯度、経度}$$

この全国的な磁気測量結果と共に局地的な全磁力の繰り返し測量から地殻変動による地殻応力の蓄積状況、火山活動によるマグマの状況など、地震予知と火山噴火予知の研究に活用されている。

#### ホ) 成果

磁気測量の成果として各磁気点の観測値、化成値が得られ、磁気図が作成される。国土地理院では一等磁気測量結果と同一epochに化成した二等磁気点の値を総合して磁気図を作成している。磁気図は偏角(D)、伏角(I)、水平分力(H)、鉛直分力(Z)、全磁力(F)の5種類で400万分の1のスケールにD、Iは10', H、Z、Fは100nTのコンター間隔で表されている。また、日本の標準的磁場を示す二次曲線が描かれている。国土地理院はこれまでに1955.0年D、I、H、1970.0年と1980.0年に化成したD、I、H、Z、Fの磁気図を作成した。これらの成果は大学、関係機関で研究資料として活用されている。また、局地的全磁力測量の結果は地磁気経年変化の異常など地震予知、火山噴火予知研究に活用されている。

### 3-1-2 航空磁気測量

#### イ) 歴史

日本における航空磁気測量の歴史は、1950年代前半に始まる。航空機のような移動体での地磁気測定は、機械的可動部分のない方式の磁力計を必要とし、フラックスゲート磁力計・プロトン磁力計の実用化によって可能になった。日本で最初の航空機による地磁気測定は、東北大学の加藤愛雄らによるもので、鉛直成分および全磁力測定用のフラックスゲート磁力計が開発され、試験測定が行われた。その技術は、海上保安庁水路部に引き継がれ、1962~64年には世界磁気測量(WMS)の一環として、3成分フラックスゲート磁力計による海域の第1回航空磁気測量が行われた。水路部では、その後、航空磁気測量を定期化し、5年ごとのMagnetic Chart (磁気図)を作成しているが、第2回の調査からはプロトン磁

力計による全磁力測定も行っている。また、国土地理院では、プロトン磁力計とヘルムホルツコイルを用いた3成分磁力計の開発を行い、1961年以後、陸域の航空磁気測量を実施している。これらは、いずれも測線密度が粗く、我が国の地磁気の大局的分布を明らかにする性格のものであった。

一方、地質調査所では1963年頃より、石油・天然ガス資源の探鉱と地質構造の解明を目的として、プロトン磁力計による全磁力のみの精密航空磁気測量（空中磁気探査と呼ばれる）のシステムの開発が行われ、1966年より本格的な大陸棚海域等の探査を実施してきている。また近年では、新エネルギー総合開発機構（NEEDO）が、地熱資源の評価を目的として、地質調査所の協力の下に、北海道から九州に至る陸域の大規模な全磁力測量を行っている。

#### ロ）測量の方法

地磁気異常は異常体に近づくにつれて距離の3乗（～2乗）に逆比例して強くなるので、地上測定では測点付近の非常に浅く局所的な不均一性が大きく影響し、一般にノイズ源となる。これに対し、航空磁気測量では、そのような表層地質あるいは人工構造物の影響は、飛行高度を適切に設定することによって小さくすることができ、目的にかなった調査が行える。

航空磁気測量においては、地磁気の精密な測定とともに位置（および機体の姿勢）を正確に決定することも重要であり、そのために種々の位置測定装置（および機体姿勢測定装置）が用いられる。測量の実施は、これらの測定装置を航空機に搭載して、観測を連続的に行いつつ予定測線に沿っての飛行を行うこととなる。ここで、地磁気の測定からは機体磁気の影響を除去する必要があり、今日では、磁力計センサーを機体尾部の非磁性材料で作られた突起部（スティングーと呼ぶ）に収容するとともに、機体磁気補償のための装備が行われる。

#### ハ）Epoch Reduction

空中での地磁気測定には、位置による変化とともに時刻による変化が含まれ、磁気測量では経時的变化を除去する必要がある。このため、一般的には、地上定点での地磁気の連続観測結果を用いて、地上定点と空中での経時的变化が等しいものと仮定して補正を行う。

しかし、この仮定は、とくに広域的な調査においては成立しない。広域的な精密調査では、複数の地上定点での観測結果を用いて補正を行う試みもあるが、経時变化の様子が地下の電気伝導度異常（CA）や海岸線の形（半島効果・離島効果）に対応して局地的に変動することも知られており、短周期の地磁気変化が卓越する場合には、その完全な除去は難しい。従って、精密な磁気測量は、磁氣的に静穏な日に実施するのが最良である。

## 二) データ解析

取得された観測データは、磁場についての経時変化補正と位置（および機体姿勢）測定についての必要な補正等の処理ののち、2次元的な地磁気分布図として表現される。交差測線群を有する探査では、この過程で交点コントロールと呼ばれる処理が行われる。各種補正後の測線の交点においては、両磁力値は、理想的には一致するが、現実には、位置決定誤差・機体磁気残留分・経時変化磁場補正誤差等のため、差を生ずる。単一の交点の状況からその原因を決定することは難しいが、多数の交点での状況と各データの精度の見積りからは、差を生じた原因を推定することができる。その結果、いずれか一方（もしくは双方）の測線の磁力値または位置座標値を修正することにより、妥当性のより高い地磁気分布が得られる

得られた地磁気分布は、それ自体で種々の地学的考察のための情報源となるが、大局的地磁気分布の定式化と地下構造推定の基礎データとして用いられる。地下構造解析としては、直接間接に地下の磁性体の形状深さ等を求める手法が多く用いられる。地磁気分布はポテンシャル場から導かれるものであり、その原因となっている地下構造を求めることは、ポテンシャル場の逆境界値問題に相当し、一般的な解の一意性がない。従って、地下構造解析のためには、地下構造に何らかの制約条件を与えること、すなわち地下構造のモデリングが必要である。地下構造のモデリングには、球モデル・角柱モデルのような単純なものから2層構造モデルや任意形状の一様磁化モデル等の複雑なものまで、種々のものが考えられており、対象に即して使い分けられる。

## ホ) 成果

航空磁気測量の成果は、客観的なデータとしての地磁気分布図として表現される。海上保安庁水路部では、日本周辺海域の航空磁気測量結果から地磁気3成分の分布を経緯度の3次式で表現する式を求め、1000万分の1程度の分布図を作成するとともに、海図の上に記入される磁針方位の基礎としている。また、国土地理院では、北海道から九州をおおう規模の航空磁気測量結果から、コンター間隔100nTの250万分の1全磁力図を出版した。これらはいずれも、絶対量としての地磁気の分布を示すものである。一方、地質調査所では、日本周辺大陸棚海域を中心とする全磁力異常分布図を作成しており、縮尺20万分の1でコンター間隔5~10nTのIGRF残差図を空中磁気図シリーズとして刊行している。

また、航空磁気測量の成果は、これら地磁気分布図の作成にとどまらず、各種の地下構造解析により、火山や海山を含む地質構造・テクトニクス の 解 明、石油・天然ガス資源に関連した堆積盆地の規模・分布の把握、地熱資源評価のための

キュリー点深度分布の推定など、多種多様な分野での社会的貢献がある。

### 3-1-3 海上磁気測量

#### イ) 歴史

海上における組織的な磁気測量が始めて実施されたのは、1900年代初期の木造船カーネギー号によるものが最初の試みであろう。測量方法は磁気コンパスや伏角計を用いたものであった。その後フラックスゲート型磁力計を用いた測量もなされたが、現在のように1 nT以上の精度で全磁力の測定ができるようになったのはプロトン磁力計の出現によるところが大である。これを契機に海上における磁気測量は質量ともに飛躍的な進展をみることとなった。なかでも、最大の発見は、海嶺軸に関して対称な海洋性地磁気異常の発見である。この発見がVine-Mathewの仮説の提唱とそれ以後のプレートテクトニクス仮説の発端となり、それまでの地球観に一大変革をもたらすこととなった。

我が国においては1950年代半ばから力武ほか(1958)により船舶用プロトン磁力計の実用化へ向けた研究が行われ、第一次南極観測船「宗谷」に搭載され始めてプロトン磁力計による海上磁気測量が実施された。それ以後、1960年代の上部マントル計画では、三陸沖日本海溝付近や日本海大和堆付近の海上磁気測量が水路部により実施され、また同じ頃、上田ほか(1967)のグループによっても北西太平洋の海上磁気測量が実施され大西洋に見られたような異常が発見された。

我国周辺海域での磁気測量はそれ以後、大学や関係機関(水路部、地質調査所)等によっても海底調査の重要な一部門として、他の諸観測と併行的に実施されるようになる。水路部では、1967年から20万分の1海の基本図計画を開始した。この計画は日本列島周辺の大陸棚から大陸斜面を包含する海域について地形地質地磁気重力の測量を実施し、その成果を20万分の一の海の基本図として刊行することを目的にしたものである。本計画は現在第五次地震予知計画における海底地殻構造調査に引き継がれ、伊豆一小笠原弧北部の海底調査として実施されている。また、1983年からは、大陸棚画定のための50万分の一海の基本図計画が、新たに開始された。

海域に於ける地磁気異常を明かにすることは、海底の構造解明や資源探査、さらには、大陸棚の限界画定といった問題にとっても不可欠な情報であり、今後、より一層の進展が期待される。

#### ロ) 測量の方法

現在、普通に行われている海上磁気測量の方法は、船舶用プロトン磁力計により全磁力測定を行う場合がほとんどである。実際の測量では船体磁気の影響を避け



るため、プロトンセンサーを船尾から200m-300m曳航して全磁力を測定する。海上磁気測量ではこのほかに、測位、測深、音波探査、重力測定なども併行して実施する 경우가多く、測定値は他の観測データと合わせて磁気テープなどにデジタル収録される。又磁力計本体からは信号モニター用の出力端子があり、S/N比の監視に用いられる。

測線の方向は磁気異常の極地を抑えるためには、現在の地球磁場方向に設けるのが良いが、地形や地質構造等に明らかに方向性が認められる場合には、その構造方向に直交するように測量を実施することが、後のデータ解析にとって有効である。

測量期間中の外部磁場変化の補正は、測量海域の近くに固定観測点を設け、そこでの地磁気連続記録をもとに補正する。しかし、最近のように外洋域での測量となると今までの方法を用いることはできない。この場合には、観測機器の項で述べた3センサー曳航式プロトン磁力計を用いるとか、あるいは、測量海域に固定ブイを設け、そこで地磁気変化を記録するなどの方法も検討する必要がある。又、海底磁力計を設置するのも一方法であるが、その場合には短周期成分の減衰効果がありデータ処理の段階で工夫がいる。

現在のところ、海上磁気測量と言えば、プロトン磁力計による全磁力測定を意味する 경우가ほとんどであるが、地磁気3成分の測定、磁気傾度計による磁気勾配の測定、深海曳航式プロトン磁力計による測定なども、今後は重要な測量課題となろう。

#### ハ) データ処理

海上磁気測量の生データには、磁場の時間的変化と空間的変化の二つが混入している。そのため、地磁気全磁力図や磁気異常図の作成にあたっては、時間的な変化を取り除き、ある時点の値に変換する必要がある。これをEPOCH REDUCTIONと呼ぶ。又、船体磁気の大さは船の進行方向に依存するため、それについての補正も必要となる。

地球磁場の時間変化には、磁気嵐や日変化などの比較的短い周期の変化とそれらに重畳した地球内部コアに起因する経年変化などがある。このうち日変化はその場所の地方時に依存する周期変化を示し、又、第1図に示すように、場所によっても振幅の大きさが異なる。固定観測点が測量海域に近接している場合には、固定点における測量期間中の平均値を基準値( $F_0$ )とし、各時刻Tにおける観測値が $F_T$ である場合、外部磁場変化分を $F_T - F_0$ として、この分を測量データから差し引く。もし、固定観測地点が標準観測所のように長期間にわたる地磁気測定データが得られる場合には、そこでの日平均値や月平均値をもとに経年変化曲線を作成し、それにより基準値を決定する。

外洋域のように近くに利用できる固定観測点がない場合は、測量海域の経度に近い観測点の観測記録に地方時のずれを補正し、外部磁気変化の補正量を算出する。しかし、この場合には日変化などの周期的変化については補正できるが、磁気嵐などの世界時に依存する外部磁場変化については補正できない。このため、測量期間中の外部磁場変化のK指数が4以上の期間については、静穏日に再測することが望ましい。しかし最近では海底磁力計が開発され、測量期間中は測量海域の海底で磁場3成分の連続観測も行われるようになった。

船体磁気については、船の進行方向により周期変化するので、船体磁気を方位でフーリエ展開し、それにより船体磁気補正量を等出する。ちなみに水路部測量船「拓洋」の場合、曳航距離300Mで、船体磁気の振巾は6-7 NTである。

磁気異常の計算は、IAGAが勧告したIGRF85、DGRF80モデルを用いる。今までは、標準時場モデルとして確定したものなかったが、この勧告では1965年から1980年までのモデルが確定しており、さらにそれ以前のモデルについての確定作業が進められている。

## 二) 成果

今までの海上磁気測量の成果は、それぞれの実施担当機関や大学等により刊行されている。水路部では第2-1図に示す範囲について、海上磁気測量が行われ、それぞれの海域毎の地磁気全磁力図、地磁気異常図が作成されている。又、1983年から始まった大陸棚面定調査では第2-2図に示す海域について海上磁気測量が行われている。

地質調査所でも、地形・地質などの調査と併行して海上磁気測量が実施されており、それらは、各航海レポートを始め、調査海域毎の地質構造図などに重ね刷りされているものもある。大学などで実施した成果については、論文という形式で報告される場合が多い。

海洋データセンター（水路部内）、では、水路部による測量データを始め、他機関・大学から提供された海上磁気測量資料が、標準的フォーマットにもとずいて分類・整理が行われつつある。この中には、米国をはじめとする外国資料も含まれておりデータ数は膨大な数にのぼっている。

今後は、質の高いデータの集積が必要であるとともに、これらの資料を有効に利用し、海洋開発や資源探査、さらには、地球科学の進展に役立たせる必要があらう。

### 3-2. 磁気測量の問題点

#### 3-2-1 Epoch Reduction

前節でも述べたように、ある地点で測定される磁場の値は時々、刻刻に変化している。変動の第1次原因の大部分は電離層や磁気圏にある。さらにこの変動磁場は地球内部に誘導電流を生じさせ、これによる磁場が第2次原因となる。後者は、地球内部の電気伝導度分布や海の効果によって場所毎に地域特性を持つ。一般に磁気測量では地球内部に起因する静的な磁場を問題とするので、周期数10秒から数日間におよぶ種々の変動はすべてノイズと見なされる。従って、磁気測量における最大の問題は、これら磁気ノイズをいかにして観測値から除去するかにある。この磁気ノイズ除去のことを epoch reduction (化成) と呼ぶことがある。通常は、第1次近似として観測点と基準点 (reference station) とにおける観測値の単純差が用いられる。しかし、地球内部の電気伝導度異常 (CA) が日本列島下では複雑であること及び四方を海で囲まれていることなどを考慮すると、きめ細かい補正が必要である。このためには、国内の適当な位置に基準観測点を配置し補正の精度向上を計るべきである。

さらに、磁気測量では、例えば、陸上の場合日本全国をカバーするのに数年を要する。測定結果をまとめる場合、この間の主磁場の永年変化を考慮する必要が生じる場合がある。この主磁場の永年変化の地理分布は数年程度で変化することがあるので、少なくとも5年ごとには日本周辺の正確な永年変化の reference field を求めておくことが望ましい。このためには、全国磁気測量の繰り返し頻度を少なくとも2年に1回の割合で実施することが望ましい。また、この際、epoch reduction の精度を向上するために複数の基準観測所の観測値を利用することが望ましい。これに関して、現在西南日本には九州の鹿屋にしか基準観測所がないので、中国、四国に観測所の整備が必要である。

### 3-2-2 人工ノイズ

主に、都市近郊における直流電車軌道からの漏洩電流が作る磁場が最大のノイズ源になる。これに加え、近年問題になっているのは、電力会社による直流送電である。これには大電力長距離輸送に適すること、需要の時間変動に迅速な対応をするための潮流制御が容易、交直変換技術の向上などにより、世界的にも直流送電の増加がみられる背景がある。これの実態は、必ずしも明らかにされていないが、早急に調査が必要と思われる。北海道と本州間の直流送電は既に昭和54年から実施されている。これら人工ノイズに対する抜本的な対策を行わない限り、磁気測量や地磁気観測は極めて制限された地域でしか実施できなくなる恐れがある。現在地磁気観測所などにのみ緩やかな法律的保護がなされているだけである。

### 3-2-3 磁気点の確保

地震、火山噴火予知のための精密磁気測量は全く同じ場所での繰り返し測量が要求される。このため標石等が埋設されているが、人為的破損を受けたり、周囲環境の変化などにより長期にわたっての安定した測量が行えない事態が近年増えてきている。これについても何等かの規制を加える必要がある。

### 3-3. 磁気測量の将来展望

20万分の1の地形図に対応する磁気異常図を作りデータベース化を計りたい。できれば3成分が望ましい。これを実現するには簡便な測定器の開発が必要である。航空磁気測量成果は一定の飛行高度に換算する必要がある。いままでに各機関などで得られている成果を見直せば新たに測量をすべき地域、観測項目の見通しが得られると思われる。また、通常の航空磁気測量に用いられている高度より低い高度でのヘリコプターを利用したヘリボン磁気測量の実現を計りたい。

地震、火山噴火予知のための定点観測の成果を生かすために、国土地理院などの磁気測量の成果を活用すべきである。またこのためには磁気点の配置を考慮すること、長期にわたる確保に努める事などが考えられる。更に、化成精度を高めるため方法の検討及びreference stationの適正な配置を考えるべきである。また、大学などによる臨時の測定結果などもデータベースにいれ総合的な活用を計ることが望ましい。このためには、測量に当たってある程度統一化した標準の観測方法及び化成方法を確立する必要がある。

## 4 データ処理・管理

### (概要)

地磁気データの特徴は、ひとつには時系列データとしてできるだけ長期間を連続的に含んだデータほど価値が高いこと、また不規則な分布を記述するために、できるだけ多くの点のデータを必要とすることである。このため、取り扱うデータの量は必然的に膨大なものとなるをえない。それに伴ってかすかすの問題が生ずる。例えば、

- (1) 未整理データの蓄積、データ処理のルーチン化
  - (2) アナログデータのデジタル化
  - (3) デジタルデータのデータベース化
  - (4) 磁気テープ (MT)、フロッピーディスク (FD) の保存可能期間
  - (5) 大量磁気テープデータの保管場所
  - (6) データ交換の効率化
- 等である。

これらを解決するためには、最新計算機技術を用いたデータ処理システム、新しい大量データ収納媒体を用いたデータ収納施設、先端情報技術を取り入れた高速度のデータおよび情報交換ネットワークの整備が必要である。これから新たに得ようとするデータについては、観測立案当初からデータ処理・管理法を決めておく「データマネジメントシステム」を導入・確立することが不可欠である。

#### 4-1 地磁気観測とデータ処理の現状

国内の大学および研究・観測機関で行われている地磁気観測とデータ処理をまとめると表4-1(a) (文部省関係), (b) (他省庁機関) のようになる。

#### 4-2 地磁気データの現状

現在, 国内で, 印刷物, データベース, データセンター所蔵データとして公開されている地磁気データ・資料は下記の通りである。

##### 4-2-1 印刷物資料

印刷物として公開されている磁気図, 速報, データブック, カタログ等を作成機関別に表4-2(a)-(e)に示す。

##### 4-2-2 データベース

###### (1) 京都大学理学部地磁気世界資料解析センター

Relational型データベース "G E O M A G" (京都大学大型計算機センター)

内容: カタログ情報 (データ収集状況と観測所情報) と A E 指数 (1分値) および, D s t 指数 (1時間値), K p 指数, 太陽黒点数

サイズ: 約16メガバイト

###### (2) 東京大学地震研究所地震予知観測情報センター

内容: 日本全国の19観測点について全磁力夜間値, 日平均値, 月平均値, 気象庁地磁気観測所 (柿岡) 及び八ヶ岳地磁気観測所の全磁力毎分値。

アクセス方法: 地震予知地域センターからは微小地震専用回線を利用してアクセス。その他の地域からは N T T の第2種パケット交換回線 (D D X - T P) によりアクセス可能。

入力方法: 全磁力夜間値に関しては各観測機関から柿岡の気象庁地磁気観測所にフロッピーディスクまたは M T のかたちで送り, 柿岡で編集した M T を地震研究所において入力。気象庁地磁気観測所 (柿岡) および八ヶ岳地磁気観測所の全磁力毎分値については, それぞれ M T とフロッピーディスクから地震研究所において入力。

##### 4-2-3 W D C - C 2 for Geomagnetism 所蔵データ

- |       |                          |          |        |          |
|-------|--------------------------|----------|--------|----------|
| 1. 媒体 | マイクロフィルム                 | 約 8,100巻 | データブック | 約 1,600冊 |
|       | マイクロフィッシュ                | 約 400枚   | 磁気図    | 約 50枚    |
|       | 磁気テープ                    | 約 700巻   | 数値表    |          |
| 2. 期間 | 1882年 - 現在 (主として1957年以降) |          |        |          |

3. データソース 世界約400ヶ所の地磁気観測所

4. データ種類

地磁気データ

アナログデータ : ノーマルランマグネトグラム, ラピッドランマグネトグラム

デジタルデータ : 1秒値, 10秒値, 1分値, 2.5分値, 1時間値

地磁気指数 : A E, D s t, K p, a p, K, A n, A s, A m, A p, C q, その他

等値線図

地電流データ : 1時間値, ノーマルランテルリグラム, ラピッドランテルリグラム

人工衛星磁場データ : IMP, MAGSAT, GOES, その他

4-3 国際組織

4-3-1 世界資料センター組織

世界資料センター (World Data Center:WDC) は、表4-3(a) (下線部は代表者) に見られるように、WDC-A (アメリカ), B (ソ連), C1 (ヨーロッパ), C2 (日本) に分かれ、国際学術連合会議 (ICSU) 世界資料センターパネルによって統轄されている。地磁気データは、WDC-A for STP, WDC-A for Solid Earth Geophysics (ポールダー), WDC-B2 (モスクワ), WDC-C1 for Geomagnetism (コペンハーゲンとエディンバラ), WDC-C2 for Geomagnetism (京都) に集められ、整理・評価・加工されている。一般的に使われる地磁気指数は、4ヶ国の機関によって表5-3(b)のように分担して算出・公表されている。表4-3(c)はWDC関係のガイド・カタログ類の一覧表である。

4-3-2 国際地球電磁気学・超高層大気物理学会 (IAGA)

国際地球電磁気学・超高層大気物理学会では、第5部が観測、測器およびデータを扱うことになっている。第5部を構成するワーキンググループとChairmanは次の通りである。

- |  |                |
|--|----------------|
| 1. Geomagnetic Observatory                     | (A. W. Green)  |
| 2. " Application                               | (J. Joselyn)   |
| 3. External and Internal Geomagnetic Relations | (G. Gregori)   |
| 4. Geomagnetic Surveys and Charts              | (C. Barton)    |
| 5. Geomagnetic Indices                         | (M. Menvielle) |
| 6. Collection and Dissemination of Data        | (M. Sugiura)   |
| 7. Geomagnetic Survey Satellite                | (J. Achache)   |

地磁気活動度指数を主とする地磁気データは、IAGA Bulletin (No.12シリーズ, No.18, 20, 21, No.32シリーズ, No.33, 39)に印刷されている。

#### 4-4 問題点と今後の課題

データ処理・管理の問題点として、次のようなことがあげられる。

- (1) 未整理データの蓄積, データ処理のルーチン化
- (2) アナログデータのデジタル化
- (3) デジタルデータのデータベース化
- (4) 磁気テープ (MT), フロッピーディスク (FD) の保存可能期間
- (5) 大量磁気テープデータの保管場所
- (6) データ交換の効率化

(1) は、特に、大学における研究観測の深刻な問題となっている。データ処理には、まず最初に、ノイズ除去、欠測・ベース値のチェック、時刻・ドリフトの補正等、人手を要する作業が必要であるが、装置の整備・維持にほとんどの精力と時間をさかれ、データの整理・加工に人手と予算をまわせぬことがきわめて多い。(2) については、最近ではデジタル磁力計による観測が多くなってきたが、過去のデータはほとんどがアナログである。これを計算機可読データに変えることはWDCの主要業務の一つになっているが莫大な人手を要するため実行は容易ではない。また、デジタルデータもMTやFDに記録しただけでは効率的解析は行いにくく、データベース化を必要とするが、これまた人手が問題となって、促進されない。

これらの問題の解決には、観測計画立案の最初に、最終目的を達成するのに最適の解析方法を確定し、そのためのデータ処理の費用を含めた予算措置が必要である。

(4) については現在MTは数年に1回読み変えないと記録が欠落すると言われている。テープの数が多くなるとこれには莫大な人手と時間を要する。(5) を解決するためにも、光ディスクの普及と規格統一が望まれる。データ交換・提供は、現在、主としてフィルムやMTで行われているが、将来、光ディスクに作ったデータベースに通信回線を通してアクセスする方法が一般的になるであろう。通信回線と光ディスクのコストダウンの動向が今後のデータ処理・管理・交換方法を決める鍵になると考えられる。



## 4-5 将来展望

地磁気データは次の特徴を持つ。

[1] 地球の進化に関係する時系列データとして蓄積量が多いほど価値がある。

[2] 不規則な分布を記述するため、できるだけ多くの点のデータを必要とする。

最近の人工衛星による磁場観測では、0.1-1秒の時間間隔でデータが取られており、それに対応して地上観測からも1秒値データが供給されるようになってきた。特に、1990年から始まるSTEP計画期間には、海外数十点での高時間分解能地磁気観測が予定されており、その中のいくつかはSTEP終了後も観測が継続されるはずである。従って、データ処理・管理も、長期連続多点高時間分解能観測に対応できるよう改善されなければならない。そのためには、次のようなことが必要である。

### (1) データマネジメント思想の確立

今までは、データ処理は観測の後始末として従属的に考えられてきたが、データ量が増すとそれでは済まなくなり、データ処理に観測と同等の重要性を与え、それなりの予算と人手を手配しておく必要が生じてくる。観測立案当初から、データ処理方法、公開の原則、管理・配布方法を確定しておくことが必要となる。

### (2) 大量データ収録検索システムの開発と通信回線による利用

最近の光ディスク装置の発達により、100 G バイト位のサイズのデータベース保持が可能になってきた。データ値当り2バイトとして計算すると、これは1秒値データ 3成分 x 50観測所 x 10年間のデータ量に相当する。1分値なら、300観測所 x 50年間で50 G バイトになるから、現在の地磁気データは1台の光ディスクライブラリーにすべて納まることになる。以前には、夢物語でしかなかったことが、技術革新により、実現可能になってきたのである。とすれば、我々は、大量地磁気データを収録し、通信回線を通してオンラインで短時間に取り出せ解析できるシステムの実現に向けて努力すべきであろう。

### (3) 体制の整備

(1) (2) を実行するためには、それなりの体制が必要である。最も重要なことは、データ解析と計算機システムの両方に通じた専門技術者の養成と地位の確保である。大量の地磁気データを扱う機関には、この専門技術者を中心とする独立したデータ処理部門が設置されなければならない。各機関のデータ処理体制を、この様な観点から整備する必要がある。

地磁気・地電流観測データに関する調査

実施機関	観測名	観測種類	観測期間	観測地点 緯度・経度 高度	観測 装置	成分	記録 媒体	記録速度 sampling rate	保存データ		データ公開	データ処理・その他
									媒体	内容		
東工大 理学部	戸田	地磁気 絶対観測 不連続 (不定期)	80/10-84/8	静岡県戸田村 34.6N 138.5E	proton	F	CHT		FD	1分値	定期的に 外部へ送付	
"	藤枝	"	83/4-85/10	静岡県藤枝市 34.5N 138.2E	proton flux 磁気儀	F D I D I	CHT		FD	1分値	要求により 外部へ	
北大理学部	地磁気全磁力 (地震予知)	地磁気 絶対観測 連続	76-	北海道上杵白 42.1N 142.6E 185m	proton	F	CHT	1 min	CHT	1分値	定期的に 柿岡へ送付	
"	地磁気全磁力	"	78-	北海道幌美内 42.3N 140.1E 235m	proton	F	CHT	1 min	CHT Chart	1分値	機関内 要求により 外部へも	
鳥取大学 教養部	CA山陰	地磁気 変化観測 不連続 (不定期)	82/1-	島根県松江市 35.3N 133.1E 50m	flux	X Y Z	Chart	30mm/hr			機関内	地磁気擾乱部分を読み取り
"	CA山陰	地電流 変化観測 連続	83/5-	鳥取県東郷町 35.3N 133.5E 3.6m	地電流 変化計	EW NS	Chart	20mm/hr			機関内	夜間正時値及び地磁気擾乱部分 を読み取り
"	CA山陰	"	83/5-	鳥取県三朝町 35.2N 133.5E 70m	地電流 変化計	EW NS	Chart	30mm/hr			機関内	夜間正時値及び地磁気擾乱部分 を読み取り
鳥取大学 教養部 京大 防災研究所	山崎断層地震予 知システム	"	75/12-	兵庫県安富町 34.6N 134.4E 150m	地電流 変化計	EW NS	HT Chart	25mm/hr			機関内	野外および地下トンネル内に電極設 置・夜間正時値を読み取り電話回線 により京大防災研のMTへ
九大理学部		地磁気 変化観測 連続	86/7-86/12	Koror (Korea気象 観測所)	flux	X Y Z	CHT	3 sec	FD	3秒値	グループ内	PC9801にて処理、欠測多し
"			86/7-86/12	Guram (Korea大学)	flux	X Y Z	CHT	3 sec	FD	3秒値	グループ内	PC9801にて処理、欠測多し

表4-1(a)-1

地磁気・地電流観測データに関する調査

実施機関	観測名	観測種類	観測期間	観測地点 緯度・経度 高度	観測 装置	成 分	記録 媒体	記録速度 sampling rate	保 存 データ		データ公開	データ処理・その他
									媒体	内容		
九大理学部 イフ <sup>TM</sup> 地磁気 研究所			86/5-86/12	Trivandrum (イフ <sup>TM</sup> ) 8.5N 77.0E 300m						3秒値		PC9801にて処理, データ未入手
"		地磁気 変化観測 連続	86/5-86/12	Alibag (イフ <sup>TM</sup> ) 18.6N 72.9E 10m	flux	X Y Z	CMT	3 sec	FD	3秒値	グループ内	PC9801にて処理, データ未入手
九大理学部		"	86/2-86/6	Garoua(カガ <sup>TM</sup> -)	flux	X Y Z	CMT	3 sec	FD	3秒値	グループ内	PC9801にて処理, 2月-4月はほぼ 完全
九大理/ 京大理		"	86/1-86/12	Huancayo(ハ <sup>TM</sup> -) 12.1S 75.3W 3313m	flux	X Y Z	CMT	3 sec	FD	3秒値	グループ内	PC9801にて処理, 欠測少し
九大理学部		"	85/1-86/0	大分県久住町	flux	X Y Z	CMT	3 sec	FD	3秒値	要求により 外部へ	PC9801にて処理, 欠測少し
東大理学部 Univ. B.C.	地磁気	地磁気 変化観測 連続	85/12-86/2 一部 84/9-86/12	カナダ 7地点 北 <sup>TM</sup> ア <sup>TM</sup> カ <sup>TM</sup> ン ハ <sup>TM</sup> -	flux	H D Z	CMT	1 sec	CMT FD	1秒値 1分値 チャート	グループ内 要求により 外部へも	チャート上振幅プロット
東大理学部 Univ. B.C. Univ. Vic.	地磁気脈動 (ULF)-I	"	76/8-76/9	カナダ5地点	induc	H D Z	MT	0.8mm/s FM	MT FD CMT Book	1秒値 ハ <sup>TM</sup> カ <sup>TM</sup> ン	グループ内 要求により 外部へも	チャート上振幅出力 データミックス <sup>TM</sup> 外部処理 A/D変換後デジタル処理
東大理学部 Univ. B.C.	地磁気脈動 (ULF)-II	"	78/8-78/0	カナダ 米国 10地点	induc	H D Z	MT	0.8mm/s FM	MT FD CMT Book	1秒値	グループ内 要求により 外部へも	チャート上振幅出力 データミックス <sup>TM</sup> 外部処理 A/D変換後デジタル処理
東大理学部 九大理学部 Univ. B.C. Univ. Vic.	地磁気脈動 (ULF)-III	"	80/1-80/2	カナダ 米国 12地点	induc	H D Z	MT	0.8mm/s FM	MT FD CMT Book	1秒値	グループ内 要求により 外部へも	チャート上振幅出力 データミックス <sup>TM</sup> 外部処理 A/D変換後デジタル処理
東大理学部 九大 " 京大 " 拓殖大学 Univ. B.C. Univ. Vic. S.U. New York	地磁気脈動 (ULF)-IV	"	85/12-86-2 (一部84/12 -86/12)	カナダ 米国 北 <sup>TM</sup> ア <sup>TM</sup> カ <sup>TM</sup> ン ク <sup>TM</sup> リ <sup>TM</sup> ラ <sup>TM</sup> ント <sup>TM</sup> 等 36地点	induc	H D Z	MT CMT	MT 0.8mm/s (FM) CMT 0.2mm/s (FM)	MT FD CMT Book	1秒値	グループ内 要求により 外部へも	チャート上振幅出力 データミックス <sup>TM</sup> 外部処理 A/D変換後デジタル処理

表4-1 (a) - 2

地磁気・地電流観測データに関する調査

実施機関	観測名	観測種類	観測期間	観測地点 緯度・経度 高度	観測 装置	成 分	記録 媒体	記録速度 sampling rate	保 存 データ		データ公開	データ処理・その他
									媒体	内容		
東北大理学部		地磁気 変化観測 連続	46/9-	東北大理学部 女川地磁気 観測所 宮城県女川町 38.3N 121.3E	proton flux induc	F H D Z X Y Z	フロッピー Chart MT	1pt/30s 1mm/min 1047x1巻 /2週間	数値表 記録紙 MT	30秒値 マイクロ ULF波	要求により 外部へ	digital解析にはA/D変換必要
京大理火山 研究施設	地磁気 日変化観測	地磁気 変化観測 連続	50-	阿蘇 C223 32.5N 131.0E 525m	変化計	H D Z	Photo	20mm/hr			要求により 外部へ	最近ではZ成分が欠測
"	阿蘇火山活動に 伴う全磁力磁場 観測	地磁気 連続	83-	阿蘇 32.5N 131.0E 525m	proton	F	CHT	1 min	CHT		要求により 外部へ	
"	桜島火山活動に 伴う全磁力磁場 観測	地磁気 連続	74-	桜島古里 31.3N 130.4E 180m 桜島黒神 331.3N 130.4E 70m	proton	F	CHT	1 min			要求により 外部へ	
東大 海洋研究所	伊豆小笠原 海嶺電磁気調査	地磁気 変化観測 特定期間	86/8-86/10	JK6, 7, 8, 9 32N 139E 4000m	proton flux	F X Y Z	MT FD	1 min	MT FD	1分値	機関内	EPR0M → FD → MT
京大 防災研究所	地磁気変化観測 (地震予知)	地磁気 変化観測 連続	82/1-	遊賀県高山 35.3N 136.2E 250m	flux	H D Z	CHT Chart	1 min (CHT) 30mm/hr (Chart)	CHT	1分値	機関内	依託観測, 未整理データ多し
"	全磁力観測 (地震予知)	地磁気 絶対観測 連続	68/1-	鳥取(TOT) 35.3N 134.1E 50m	proton	F	CHT Chart	1 min	MT	1分値	機関内 夜間値(0040- 6300, 10分値) を定期的に 柿岡へ	防災研資料センターで20日毎に編集 しMTに保存
"	"	地磁気 絶対観測 連続	84/6-	西天生 36.3N 137.0E 650m	proton	F	CHT Chart	1 min	MT	5分値	"	
"	"	地磁気 絶対観測 連続	87/1-	宝立 37.4N 137.1E 240m	proton	F	CHT Chart	1 min	MT	5分値	"	

表4-1(a)-3

地磁気・地電流観測データに関する調査

実施機関	観測名	観測種類	観測期間	観測地点 緯度・経度 高度	観測 装置	成分	記録 媒体	記録速度 sampling rate	保存データ		データ公開	データ処理・その他	
									媒体	内容			
極地研究所	昭和基地における超高度現象のモニタリング	地磁気 絶対観測 変化観測 磁気測量 連続	66-	昭和基地 69.0S 39.6E 29m	proton flux induc 磁気磁	F H D Z EW NS D I	MT Chart	変化観測 2 sec 絶対観測 2回/月	MT マイクロ Film 印刷物	マイクロ スベア 2秒値	定期的に外部 (地磁気3成分 要求により 外部へ	電算機 スベアナ ディジタルMTは1981年4月開始	
	"	多点観測	76/10-85/N	MIZUHO 70.7S 44.4E 2230m	flux induc	H D Z EW NS	MT Chart	60m/hr (Chart)	MT 記録紙		要求により 外部へ	A/D変換 チャート紙からの読み取り	
	"	共役点観測	地磁気 変化観測 連続	83/9-	HUSAFELL 64.7N 21.0W (アイスランド)	flux induc	H D Z EW NS Z	MT Chart	2 sec	MT	スベア 2秒値	要求により 外部へ	電算機 スベアナ
	"	"	地磁気 変化観測 連続	84/9-	ISAFJOLDUR 66.1N 23.1W (アイスランド)	flux induc	Z H D EW NS Z	MT Chart	2 sec	MT	スベア 2秒値	要求により 外部へ	電算機 スベアナ
	"	"	地磁気 変化観測 連続	84/9-	TJORNES 66.2N 17.1W (アイスランド)	flux induc	H D Z EW NS Z	MT Chart	2 sec	MT	スベア 2秒値	要求により 外部へ	電算機 スベアナ
東大 地震研究所	火山観測所 (伊豆大島)	地磁気 比抵抗	66/4-	伊豆大島野増 34.4N 139.2E 30m	proton flux 磁気磁	F X Y Z H D D I	MT CMT	1 min	MT FD	1分値	要求により 外部へ 定期的に 柿岡へ送付	FD、HDを介してMTに	
	"	八ヶ岳地磁気 観測所	地磁気 地電流 絶対観測 変化観測 連続	71/6-	長野県 36.0N 138.3E 1170m	proton flux 変化計 磁気磁 地電流	F X Y Z H D Z D I EW NS	CMT FD	1 min	MT	1分値	要求により 外部へ 定期的に 柿岡へ送付	
	"	地震予知	地磁気 変化観測 連続	85/4-	静岡県相良町 34.4N 138.1E 20m	proton	F	CMT	1 min				2週間毎にカセット回収
	"	"	地磁気 地電流 変化観測 連続	84/3-	静岡県富士宮市 35.2N 138.4E 520m	proton VLF	F 比抵抗	CMT	1 min	MT FD	1分値	要求により 外部へ 定期的に 柿岡へ送付	FDにおとして保存

表4-1(a)-4

地磁気・地電流観測データに関する調査

実施機関	観測名	観測種類	観測期間	観測地点 緯度・経度 高度	観測 装置	成 分	記録 媒体	記録速度 sampling rate	保 存 データ		データ公開	デ ー タ 処 理 ・ そ の 他
									媒体	内容		
東大 地震研究所	地震予知	地磁気 変化観測 連続	83/4-	静岡県春野町 34.6N 137.5E 420m	proton	F	OMT	1 min	MT FD	1分値	要求により 外部へ 定期的に 柿岡へ送付	FDを介してMTに
"	"	地磁気 地電流 変化観測 連続	81/11-	静岡県篠坂 35.2N 138.4E 520m	proton	F	OMT				要求により 外部へ 定期的に 柿岡へ送付	
東大 地震研究所	"	地磁気 地電流 変化観測 連続	81/11-	静岡県俵峰 35.1N 138.2E 490m	proton	F	OMT	1 min	MT FD	1分値	要求により 外部へ 定期的に 柿岡へ送付	FDを介してMTに
"	"	"		静岡県浜岡町	proton flux 地電流	F X Y Z H D I E V N S	OMT	1 min	MT FD	1分値	要求により	FDを介してMTに

表4-1(a)-5

地磁気・地電流観測データに関する調査

実施機関	観測名	観測種類	観測期間	観測地点 経度・緯度 高度	観測 装置	成 分	記録 媒体	記録速度 sampling rate	保存データ		データ公開	データ処理・その他
									媒体	内容		
地質調査所	空中磁気探査	磁気測量	1964頃-	42探査区域	proton	F	MT CMT Chart	1 sec	MT 磁気図	1GRF残差 磁気異常 値	磁気図は公刊 MT7-9は要求 により外部へ	コンピュータによる多段階バッチ処理により1GRF残差磁気異常の磁気異常図(面データ)を作成する。
海上保安庁 水路部	地磁気	地磁気 絶対観測 変化観測 連続	54/9-78/2	SIMOSATO (下里地磁気 観測所) 33.6N 135.9E 59m	proton 変化計 磁気儀	F D H Z D I	Photo	20mm/hr	Film Book	1時間値 日平均値 年平均値	要求により 外部へ 定期的に外部 へ送付	induction印画紙記録有り 時間値はマイクロフィルムより読み取り 観測報告
"	"	"	79/11-	HATIZYO (八丈水路 観測所) 33.1N 139.8E 220m	proton flux 変化計 磁気儀	F D H Z D H Z D I	MT FD Photo	1 min	MT Book	1分値 1時間値 日平均値 年平均値	要求により 外部へ 定期的に外部 へ送付 ビターへ送付	
国土地理院	地磁気	地磁気 絶対観測 変化観測 連続	62/1-	千葉県鹿野山 (鹿野山測地 観測所) 35.3N 140.0E 342m	proton flux 磁気儀	F D H Z D I	FD Chart	1 min (FHZD) 2回/週 (1 D)	FD 印刷物	1分値 1時間値 日平均値 年平均値	要求により 外部へ 定期的に外部 へ送付	FDに記録済の毎分値を時間平均値 日平均値、月平均値表に作成
"	地磁気	"	69/4-	岩手県水沢市 (水沢測地 観測所) 39.1N 141.2E 130m	proton flux 磁気儀	F D H Z D I	MT CMT Chart	1 min (F H D) 2回/週 (1 D)	MT 印刷物	1分値 1時間値 日平均値 年平均値	要求により 外部へ 定期的に外部 へ送付	CMTに記録済の時間平均値を使用 して日平均値、月平均値表を作成
"	地磁気・地電流	地磁気 地電流 絶対観測 変化観測 連続	80/3-	岩手県江刺市 39.2N 141.4E 390m	proton flux induc 磁気儀 地電流	F D H Z X Y Z D I EW NS	MT Chart	1回/月 (D I) 1min (F) 15 sec (H D Z) (EW NS) 2 sec (X Y Z)	MT	1分値 15秒値 2秒値	要求により 外部へ	インダクション、フラックアウト、地電流のデータ を基に地磁気短周期(数秒~数時間) におけるCA変換関数を求める
"	地磁気	地磁気 磁気測量 不連続 (定期)	1951-	一等磁気点 106地点	proton 磁気儀	F D I	観測 手簿	18回/日	磁気図 印刷物	日平均値	要求により 外部へ 定期的 外部へ送付	6時~22時,1時間毎+9時30分1回 観測手簿からF, H, D, Z, I成分の 値を計算する

表4-1(b)-1

地磁気・地電流観測データに関する調査

実施機関	観測名	観測種類	観測期間	観測地点 経度・緯度 高度	観測 装置	成分	記録 媒体	記録速度 sampling rate	保存データ		データ公開	データ処理・その他
									媒体	内容		
気象庁 地磁気 観測所	地磁気通常観測 (標準観測)	地磁気 絶対観測 変化観測 連続	1913-	茨城県柿岡 36.1N 140.1E 28.2m	proton flux o-pump 変化計 磁気儀	F D H Z	MT Photo	20mm/hr (1913-) 1 min (1976-) 1 sec (1983-)	MT Film Book	1秒値 (1983-) 1分値 (1976-) 1時間値 (1913-) マクネogram (1913-)	要求により 外部へ 定期的に 外部へ送付	1913-1980: 毎時値はマクネogramから読み取った 1913-20: 月平均毎時値・年報 1924-54: 毎時瞬間値・" 1955-80: "平均値・" 1981以降: データ別1分値をベースにした毎時平均値 * MTには毎時値が1913年からあり
"	"	"	1952-	北海道女満別 43.5N 144.1E 39.2m	proton flux 変化計 磁気儀	F D H Z	MT Photo	20mm/hr (1952-) 1 min (1985-)	MT Film Book	1分値 (1985-) 1時間値 (1952-) マクネogram (1952-)	定期的に 外部へ送付	1984年以前の毎時値はマクネogramから読み取ったもの 1952-56: 月平均値・年報 1956-57: 毎時平均値・" 1958- : " "・MT
"	"	"	1958-	鹿児島県鹿屋 31.3N 130.5E 105.0m	proton flux 変化計 磁気儀	F D H Z	MT Photo	20mm/hr (1958-) 1 min (1985-)	MT Film Book	1分値 (1985-) 1時間値 (1958-) マクネogram (1958-)	定期的に 外部へ送付	1984年以前の毎時値はマクネogramから読み取ったもの 1958- : 年報・MT
"	"	"	1973-	父島 27.1N 142.1E 154m	proton flux 磁気儀	F D H Z	Chart	15mm/hr (1973-)	MT Book Chart	1時間値 (1973-)	要求により 外部へ 定期的に 外部へ送付	毎時値は記録紙から読み取る (年報は月平均毎時値のみ)
"	地電位差 通常観測	地電流 連続	1933-	茨城県柿岡 36.1N 140.1E 28.2m	地電流 観測装 置	EW NS	MT Chart Photo	15mm/hr (1933-) 1 min (1987-)	MT Film Book	1分値 (1987-) 1時間値 (1962-) マクネogram (1933-)	定期的に 外部へ送付	1933-86: マクネogramから毎時瞬間値を 読む
"	"	"	1950-	北海道女満別 43.5N 144.1E 39.2m	"	EW NS	MT Chart Photo	15mm/hr (1950-) 1 min (1987-)	MT Film Book	1分値 (1987-) 1時間値 (1962-) マクネogram (1950-)	定期的に 外部へ送付	1950-86: マクネogramから毎時瞬間値を 読む 年報: 1950-60: 毎時掲載 1961- : 月平均毎時値のみ

表4-1(b)-2



地磁気・地電流観測データに関する調査

実施機関	観測名	観測種類	観測期間	観測地点 経度・緯度 高度	観測 装置	成 分	記録 媒体	記録速度 sampling rate	保存データ		データ公開	データ処理・その他
									媒体	内容		
気象庁 地磁気 観測所	地電位差 通常観測	地電流 連続	1950-	鹿児島県鹿屋 31.3N 130.5E 105.0m	〃	EW NS	MT Chart Photo	15mm/hr (1950-) 1 min (1987-)	MT Film Book	1分値 (1987-) 1時間値 (1962-) フィルム (1950-)	定期的に 外部へ送付	1950-86:フィルムから毎時間値を 読む 年報:1950-60:毎時値掲載 1961- :月平均毎時値のみ
〃	地磁気脈動観測	地磁気 連続	1957-	茨城県柿岡 北海道女満別 鹿児島県鹿屋	induc	X Y Z	MT Photo	6mm/min (1957-) 15inch/ 4000sec (1975-)	MT Film Book	早廻し フィルム スナップ 現象リスト フィルム 磁気テープ	要求により 外部へ 定期的に 外部へ送付	アナログMTからスペクトル解析 →年報 (Rept. of Mag. Pulsations) 早廻しフィルムから脈動の起時 →年報(rapid Variations)
〃	〃	〃	1973-	父島	induc	X Y Z	MT	30inch/ 4000sec	MT Book	スナップ フィルム 磁気テープ	要求により 外部へ 定期的に 外部へ送付	フィルムMTからスペクトル解析 →年報 (Rept. of Mag. Pulsations)
〃	地電位差脈動 観測	地電流 特定期間	1957-1986	女満別 鹿屋	地電流 観測装置	EW NS	MT Photo	6mm/min	Film Book	早廻し フィルム 現象リスト	定期的に 外部へ送付	顕著脈動起時読み取り →年報(Rapid Variations) (-1986まで)
〃	大地電気伝導度 異常(CA)観測	地磁気 変化観測 連続	1968-	福島県いわき市 36.6N 140.5E 30.0m	flux	D H Z	Chart	25mm/hr	Chart		要求により 外部へ	
〃	地磁気永年変化 精密観測	地磁気 連続	1983-	茨城県北浦村 36.0N 140.3E 30.0m	proton	F	Chart	1 min	MT	1分値	定期的に東大 地震研へ送	記録紙に書かれた1分値のうち夜間 値(0h40m-3h00mLT)の10分毎の値15 個)を計算機に入力
〃	火山噴火予知 観測	地磁気 連続	1979-	阿蘇山麓 32.6N 131.1E 535m 阿蘇山上 32.5N 131.0E 1140m 桜島白浜 31.4N 130.4E 120m 桜島持木 31.3N 130.4E 47m	proton	F	MT	1 min	MT	1分値	要求により 外部へ	

表4-1(b)-3

地磁気・地電流観測データに関する調査

実施機関	観測名	観測種類	観測期間	観測地点 経度・緯度 高度	観測 装置	成分	記録 媒体	記録速度 sampling rate	保存データ		データ公開	データ処理・その他
									媒体	内容		
気象庁 地磁気 観測所	東海地震予知 観測(仮称)	地磁気 絶対観測 変化観測 連続	80/5-	静岡県松崎町 34.4N 138.5E 静岡県御前崎 34.4N 138.1E	proton flux 磁気圏	F D H Z	MT	1 min	MT	1分値	要求により 外部へ	
"	"	地電流 連続	1981-	静岡県松崎町 34.4N 138.5E 静岡県御前崎 34.4N 138.1E	地電流 観測装 置	EW NS	MT	1 min	MT	1分値	要求により 外部へ	
"	地電位差 通常観測	特定期間	1950-1957	福島県原町市 37.4N 140.6E 61.1m	地電流 観測装 置	EW NS	Photo	15mm/hr	Book	1時間値 (月平均 毎時値)	要求により 外部へ	

表4-1(b)-4

1. 空中磁気図 TOTAL INTENSITY AEROMAGNETIC MAPS (1:200,000) (刊行年)

1. 酒田一糸魚川海域, 1:500,000, 1972.	XIV-1. 豊橋一尾鷲海域, 1977.
1. 酒田一村上海域, 1972.	-2. 尾鷲一串本海域, 1977.
2. 村上一弥彦海域, 1972.	XV-1. 紀伊水道海域, 1977.
3. 弥彦一糸魚川海域, 1972.	-2. 串本一室戸海域, 1977.
II-1. 稚内一利尻海域, 1972.	-3. 室戸一足摺海域, 1977.
-2. 利尻一遠別海域, 1972.	-4. 足摺一延岡海域, 1977.
-3. 遠別一留萌海域, 1972.	XVI-1. 延岡一宮崎海域, 1977.
-4. 留萌一札幌海域, 1972.	-2. 日南一佐多岬海域, 1977.
III-1. 浜頓別一雄武海域, 1973.	XVII. 天北地域, 1977.
-2. 雄武一網走海域, 1973.	XVIII. 十勝地域, 1977.
IV-1. 御前崎一浜松海域, 1973.	XIX. 日高地域, 1978.
-2. 浜松一豊橋海域, 1973.	XX. 大雪山地域, 1978.
V-1. 西九州長崎一川内海域, 1973.	XXI-1. 奥尻一津軽海域, 1978.
VI-1. 気仙沼一岩沼海域, 1974.	-2. 津軽海域, 1978.
-2. 岩沼一磐城海域, 1974.	XXII-1. 西津軽-男鹿半島海域, 1977.
-3. 磐城一日立海域, 1974.	-2. 男鹿半島一酒田海域, 1978.
VII-1. 日立一鹿島海域, 1974.	XXIII-1. 五島一野母崎海域, 1978.
-2. 鹿島一鴨川海域, 1974.	-2. 男女群島一島海域, 1978.
VIII-1. 厚岸一浦幌海域, 1974.	XXIV. 北見地域, 1979.
-2. 浦幌一襟裳海域, 1974.	XXV-1. 大隅半島一屋久島海域, 1980.
IX-1. 苫小牧一森海域, 1974.	-2. 種子島東方海域, 1980.
-2. 函館一尻尾崎海域, 1974.	XXVI-1 佐渡相川一輪島海域, 1980.
-3. 富川一浦河海域, 1974.	-2. 糸魚川一七尾海域, 1980.
-4. 襟裳海域, 1974.	XXVII-1. 伊豆沖海域, 1980.
X. 積丹一奥尻海域, 1974.	-2. 相模灘一伊豆諸島海域, 1980.
XI-1, -2. 輪島一福井海域, 1975.	-3. 房総沖海域, 1980.
XII-1. 陸奥湾海域, 1975.	XXVIII. 常盤沖東方海域, 1981.
-2. 尻尾崎一八戸海域, 1975.	XXIX. 日本海周辺海域, 1:1,000,000 1982.(3枚組)
-3. 八戸一宮古海域, 1975.	XXX. 三陸沖東方海域(1,2,3,4), 1982.
-4. 宮古一気仙沼海域, 1975.	XXXI. 関東沖東方海域(1,2,3,4), 1982.
-5. 花巻地域, 1975.	XXXII. 沖縄島北西方海域(1,2), 1984.
XIII-1. 福井一豊岡海域, 1977.	XXXIII. 沖縄島西方海域(1,2), 1985.
-2. 豊岡一壱岐海域, 1977.	

2. 海洋地質図 MARINE GEOLOGY MAP SERIES

- △ 7. 琉球島弧周辺広域海底地質図, 1:1,000,000, 1977.
- 10. 八戸沖海底地質図, 1:200,000, 1978. (説明書付)
- △ 11. 日本海溝, 千島海溝南部およびその周辺広域海底地質図,  
1:1,000,000, 1978.
- △ 13. 日本海南部および対馬海峡周辺広域海底地質図,  
1:1,000,000, 1979.
- △ 14. 北海道周辺日本海およびオホーツク海域広域海底地質図,  
1:1,000,000, 1979.
- △ 15. 日本海中部海域広域海底地質図, 1:1,000,000, 1981.
- △ 17. 小笠原島弧北部広域海底地質図, 1:1,000,000, 1982.
- △ 18. 小笠原島弧南部およびマリアナ島弧北部広域海底地質図,  
1:1,000,000, 1982.
- 20. 隠岐海峡海底地質図, 1:200,000, 1982.
- 22. 釜石沖海底地質図, 1:200,000, 1983. (説明書付)
- 24. 房総半島東方海底地質図, 1:200,000, 1983. (説明書付)
- 26. 八丈島北東方海底地質図, 1:200,000, 1985.
- 28. 室戸岬沖海底地質図, 1:200,000, 1986. (説明書付)
- 29. 土佐湾海底地質図, 1:200,000, 1987. (説明書付)
- 30. 西津軽海盆海底地質図, 1:200,000, 1987. (説明書付)

○印は地磁気異常図  
(20nTコンター図, 但し, 10, 30は50nTコンター図,  
20は100nTコンター図, 28は10nTコンター図) つき  
△印は地磁気異常パターン図(プロファイル図) つき

表4-2(a) 印刷物資料(地質調査所)

下里地磁気観測所報告地磁気編 第1号(1957)～第7号(1964).

1時間値とマグネットグラム(サンプル)(下里, 1954-1960)

水路部観測報告地磁気編 第1号(1965)～第14号(1980).

1時間値とマグネットグラム(サンプル)(下里, 1961.1-1978.2)

水路部観測報告地磁気編 第15号(1981)～第18号(1984).

1時間値とマグネットグラム(サンプル)(八丈, 1979.11-1982.12)

水路部観測報告八丈水路観測所地磁気観測年報 第1号(1985)～第3号(1987).

1時間値とマグネットグラム(八丈, 1983.1-1985.12)

全国磁気測量	(測量年次)	(刊行年月)
水路部報告 第2巻	明治45年 - 大正2年 測量	大正7年9月
同上 第5巻	大正11年 - 大正12年 測量	大正15年8月
同上 第8巻	昭和7年 - 昭和8年 測量	昭和12年3月
同上 第12巻	昭和24年 - 昭和25年 測量	昭和29年12月
同上 第14巻	昭和17年 - 昭和19年 測量	昭和35年3月
同上 第15巻	昭和29年 - 昭和30年 測量	昭和36年2月
同上 第16巻	昭和34年 - 昭和35年 測量	昭和39年3月
水路部観測報告		
全国磁気測量編 第1号	昭和37年 - 昭和40年 測量	昭和43年2月
同上 第2号	昭和44年 - 昭和45年 測量	昭和48年3月
同上 第3号	昭和49年 - 昭和50年 測量	昭和53年6月
同上 第4号	昭和54年 - 昭和55年 測量	昭和58年3月

日本近海磁針偏差図 注 5年毎の全国磁気測量成果にもとずき、作成  
日本近海地磁気伏角図 刊行されている。伏角図、水平分力図は10  
日本近海地磁気水平分力図 年毎に作成、刊行されている。

大陸棚の海の基本図(1/20万) 地磁気全磁力図

日本周辺の大陸棚から大陸斜面までの海域について地磁気全磁力を1/20万の縮尺で刊行している。同一区域についてフリーエア重力異常図、海底地形図、地質構造図も刊行されている。

表4-2(b) 印刷物資料(海上保安庁水路部)



地磁気毎時値月表	(柿岡, 女満別, 鹿屋: 年12回)
地磁気永年変化精密観測 全磁力夜間値資料	(地磁気観測所の測点7, 部外18: 年4回)
地磁気年平均値	(柿岡, 女満別, 鹿屋, 父島(1回/3年): 年1回)
地磁気活動K一指数月表	(柿岡, 女満別, 鹿屋: 年12回)
地磁気急変化現象月表	(柿岡, 女満別, 鹿屋: 年12回)
磁気嵐判定資料	(鹿屋: 年12回)
気象要覧原稿 (地磁気・地電流・空中電気)	(柿岡, 女満別, 鹿屋: 年4回) (印刷・発行は気象庁図書資料管理室)
中央気象台年報(地磁気及空中電気ノ部)	-- 東京 -- 1897-1912
地磁気観測所報告(地球磁気)	----- 柿岡 -- 1913-
"          ( " )	----- 女満別 -- 1952- 1985以後合冊
"          ( " )	----- 鹿屋 -- 1958- (年報)
"          (地球電気)	----- 柿岡 -- 1933-
"          ( " )	----- 女満別 -- 1950- 1960以後合冊
"          ( " )	----- 鹿屋 -- 1950- (年報)
"          (地球磁気)	----- 父島 -- 1973- (3年報)
"          (急変化現象)	----- 柿岡・女満別・鹿屋 -- 1957-1985(年報)
	1986以後は地球磁気・Report of Magnetic Pulsationsに分離合冊
Report of Magnetic Pulsations	----- 柿岡・女満別・鹿屋・父島 -- 1976-
地磁気観測所要報	--- 調査・研究の成果(年1回)
地磁気観測所技術報告	--- " (年2回)

表4-2(d) 印刷物資料(気象庁地磁気観測所)

International Council of Scientific Unions (ICSU)  
Panel on World Data Centers  
(Geophysical and Solar)

**WDC-A** : P. Hart (WDC-A Coordination Office, Natl. Academy of Sci.)

WDC-A for	Glaciology	(U. of Colorado, Boulder)
	Marine Geology and Geophys.	(NOAA, Boulder)
	Meteorology	(NOAA, Ashville)
	Oceanography	(NOAA, Washington, D. C.)
"	Rockets and Satellites	(NASA, Greenbelt)
	Rotation of Earth	(US Naval Obs., W. D. C.)
	Seismology	(USGS, Denver)
	Solar Terrestrial Physics	(NOAA, Boulder)
	Solid Earth Geophysics	(NOAA, Boulder)

**WDC-B** : V. V. Belousov (Soviet Geophys. Committee, Acad. of Sci.)

WDC-B1 (Oceanography, Meteorology, Glaciology and Rot. of Earth)  
WDC-B2 (Solar Terrestrial Physics and Solid Earth Geophysics)

**WDC-C1** : H. Rishbeth

WDC-C	for Earth Tide	(Obs. Royal de Belgique, Brussels)
WDC-C1	for Geomagnetism	(Danish Meteorol. Inst., Copenhagen)
WDC-C1	for "	(British Geolog. Survey, Edinburgh)
WDC-C	for Glaciology	(Scott Polar Res. Inst., Cambridge)
WDC-C	for Recent Crustal Movement	(Intl. Center for R. C. M., Zibiy)
WDC-C	for Solar Activity	(Obs. de Paris, Meudon)
WDC-C1	for Solar Terr. Phys.	(Rutherford Appleton Lab., Chilton)
WDC-C	for Sunspot Number	(Obs. Royal de Belgique, Bursseis)

**WDC-C2** : M. Sugiura (Working Group on WDCs,  
National Committee on STP, Science Council of Japan)

WDC-C2 for	Airglow	(Univ. of Tokyo, Tokyo)
	Aurora	(Natl. Inst. Polar Research)
	Cosmic Rays	(Physical and Chemical Inst., Wako)
	Geomagnetism	(Kyoto Univ., Kyoto)
"	Ionosphere	(Radio Res. Lab., Tokyo)
	Solar Radio Emission	(Nagoya Univ., Toyokawa)
	Solar Terr. Activity	(Inst. Space Astronaut. Sci., Tokyo)

表4-3(a) 世界資料センター組織

Auroral Electrojet Index, Dst Index  
 WDC-C2 for Geomagnetism, Kyoto University, Japan  
 Kp, Ap Index, Q- and D-days  
 Institut für Geophysik der Universität Göttingen, FRG  
 aa, Km, Kn, Ks Index  
 Institute de Physique du Globe de Paris, France  
 sfe, sc  
 Observatorio del Ebro, Spain

表4-3(b) 地磁気指数の算出の分担

Guide to International Data Exchange through the World Data Centers,  
 ICSU WDC Panel (Geophysical and Solar), June 1979.

Guide to the World Data Center System Part I, The World Data Centers  
 (General Principle, Locations and Services), ICSU WDC Panel (Geo-  
 physical and Solar), August, 1987.

Combined International Catalogue of Geomagnetic Data, Report UAG-92  
 (WDC-A for STP), July 1985.

A Directory of Geomagnetic Observatories with high resolution digital  
 results 1987, Report SE-43 (WDC-A for Solid Earth Geophysics), July  
 1987.

Geomagnetic Observatories 1978, Report SE-21 (WDC-A for Solid Earth  
 Geophysics), November 1979.

Materials of the World Data Center B, Catalogue of Data 1957-80  
 (Moscow), 1981.

Catalogue of Data, World Data Center C1, Geomagnetism, (Copenhagen),  
 September 1984.

Users manual, Catalogue of machine readable data, WDC-C1 (Edinburgh),  
 1980.

WDC-C2 for Geomagnetism Data Catalogue, No. 21 (Kyoto), 1987.

表4-3(c) WDC関係ガイド及びカタログ



## 5. キャンペーン・海外観測 (概要)

従来実施されて来た地磁気の海外観測は、

- 1) 地球の歴史を探るための古地磁気調査、
  - 2) 地球内部構造を調べる電磁気観測、
  - 3) 太陽地球系の変動磁場及び関連現象を研究するための超多点観測、
  - 4) 地球外部起源の長期変動を調べる長期電磁気観測、
- などに分類される。

研究の目的や方法によって資料の収集、解析の仕方も異なるので問題の全てを尽くすのは難しいが、この種の海外多点観測に共通の問題点として、

- 1) 採集した資料や記録の持ち出しに関する問題、
  - 2) 多点長期の場合、観測点数に関わる人件費、
  - 3) 単年度予算から来る観測期間への制約、機器輸送などの問題、
  - 4) 超多点の場合、並びに自動化などに関する機器の準備の費用に関する問題、
  - 5) 同時調査の規模と海外旅費の制約、
  - 6) 記録方式の不統一に由来する資料有効利用に関する問題、
- などが挙げられる。なお、研究全体に関わる大きな問題点として、従来、海洋域での地磁気観測が著しく乏しいために、グローバルな観測点での研究に重大な支障となっていることを強調すべきであろう。

グローバルな多点観測の将来計画への要請は

- 1) 人工衛星観測に対応するキャンペーン観測の実施、
  - 2) 電話連絡などにより必要に応じて運用できる準定常観測点、
  - 3) 長期観測を可能とする観測拠点の設置、その自動化など、
  - 4) 超多点観測用長期自動記録カプセルの開発、
  - 5) 記録方式、データフォーマットの統一、ネットワークの整備、
  - 6) 定常観測所への技術的支援、
- などが考えられる。将来的には、無人観測装置及び人工衛星によるデータ収集システムの実現がきわめて有効かつ能率的であろう。

地球物理学の主要な問題の研究には本質的にグローバルな視点を要求されることが多い。地球電磁気に関わる研究には特にその要請が強い。地球内部に於ける地球磁場の起源の研究に止まらずその地質年代にわたっての変動や、更には地磁気を利用しての地球構造とその変遷の研究、或は地球周辺の電離層、磁気圏、宇宙空間、太陽系空間の研究に到るまで殆どの領域で地球全体としての情報が決定的に重要な要素であると言える。日本という狭い空間に止まらず広く海外における観測を効果的に実施することの意味がここにある。最近、各方面の研究の進展に伴ってこの種の観測、調査の重要性が益々高まり、既に多くの海外観測が実施されている。ここでは従来の観測を振り返ってその問題点を探り、将来の参考としたい。

#### 5-1 従来の海外観測の概要

従来の海外調査は大きく2つの範疇に分けることができる。1つは地球内部の現象に関わるもの、他の1つは超高層大気、宇宙空間の現象に関わるものである。これらは又それぞれ目的や手法に応じて幾つかに分類される。

##### 5-1-1 地球内部

地球内部に関連する地球電磁気関係の海外調査は今までに数多く実施されてきた(表5-1参照)。これらは主としてその目的、手法、対象などから、古地磁調査と電磁気観測の二つに分類される。これらの海外調査から得られた結果のうち、国際誌掲載文献リストを表5-3に、Proceedingsなどを表5-5に示す。

##### 5-1-1-1 古地磁気調査

地球の歴史を通じて生成された岩石、堆積物、土器などを採集して、それらに記録された過去の地球磁場の変動を求めることを目的とする。調査の主体は岩石試料などの採集であるが、各々の地域の変動史や歴史、試料の年代等が必要であるので、地質学、考古学、火山学や、地球物理学の他の分野を含めた総合調査として行う場合が多い。

過去の地球磁場変動研究の目的は、地球磁場の起源を探ることと、過去の地球磁場を座標系として地塊の運動や変形史を求めることである。第一の目的については空間的に広い範囲の磁場変動の観測が望ましく、海外での調査は必須である。特に南半球での観測データは重要である。第二の目的に対しても、地球全体のテクトニックな運動を把握する上で海外調査は欠かせない。

調査の形態としては、現地ですべての試料の整形および測定を行おうとする計画もあったが、ほとんどの場合は現地では試料の採集のみにとどめ、帰国後に古地磁気測

定を行っている。この方式は岩石試料の国外持ち出しがむずかしい国では問題となるが、現地での調査期間を最大限に利用できる点で有利である。ただし、この方法では調査結果が得られるのに通常の場合数年を要する。表5-1に今までに行われてきた海外調査の例を示すが、ここに示した以外にも国際深海掘削計画などの国際的なプロジェクトの中で海外で調査を行っているものが多数ある。

#### 5-1-1-2 電磁気観測

電磁気観測は地球内部の構造を求めることを目的とするが、磁気測量と電磁場変動観測の二つのグループに分けられる。磁気測量では磁場の空間分布を求めて、おもに地殻の磁気構造を明らかにする。陸上での観測に比べて、船を利用した海上での観測が特に盛んである。海洋底拡大説、プレートテクトニクス発展のもととなった海底の地磁気異常の縞模様は特に顕著な例である。縞模様の波長は10 km程度であり、人工衛星による観測は難しい。このように地上及び海上での磁気測量は短い波長の磁場空間変動を捕らえ、深さ数 kmから数10 kmの範囲の地下構造を求める。

電磁場変動の観測は後で述べる超高層、宇宙空間の研究を目的とするものと同様に、短期観測と長期観測に分類される。短期観測は磁場や電場の時間変化から地下の電気伝導度構造を求めようとするものであり、通常は数カ月程度の観測期間で行われる。磁場及び電場変動の記録はカセットテープやICメモリーに蓄えられ、帰国後に解析する。地下数100 kmまでの地球内部構造は地域性が大きいので、広い範囲での観測が重要となる。磁場測定のための観測装置は数分以上の周期ではFluxgate型磁力計が用いられ、短い周期に対してはInduction磁力計を使用する。最近では地球表面の3分の2を占める海底での観測も海外調査として行っている。長期観測は地球磁場の数年以上にわたる長期変動を求め、磁場の起源や地殻内の応力変化を用いた地震予知などを目指すが、長期的な観測を必要とするので、今までの所は海外調査としては例はそう多くはない。地球表面での地磁気観測所の分布はかなり偏っているため、これを補うために今後必要な観測である。特に海底での観測が空間的に一様なデータを得るために必須であると考えられる。

#### 5-1-2 超高層、宇宙空間

超高層関係のキャンペーン、海外観測についても従来様々なプロジェクトが実施されてきた(表5-2参照)が大きく二つのグループに分けると一つは小数の観測点での長期観測で他の一つは多数の観測点での短期キャンペーンである。前者は長期的変動に焦点を合わせ、後者は短周期変動の空間分布とその時間変動に重点を置くものである事は言うまでもない。調査結果のうち国際誌掲載文献リス

トは表5-4、Proceedings などへの掲載分は表5-6の通りである。

#### 5-1-2-1 長期観測

長期観測の一つの例はアイスランドにおいて極地研究所が実施している共軌点観測であろう。

アイスランドは昭和基地の地磁気共軌点にあたり、超高層物理のさまざまな現象が同時に良い対応関係をもって現れることは早くから知られていた。対応関係は磁気圏における物理を知る上で極めて本質的な点であり、精密な対応関係を明らかにするために極地研究所では1983年以来、アイスランドに3点の観測点を置いて、Fluxgate及びInduction マグネトメーターによる地磁気変動及び関連のオーロラ、V L F波動などの連続観測を実施している。1987年からは更に1点を加え、計4点での共軌点観測を今後も続ける予定である。観測記録はアナログのFMテープ及びデジタルテープに収録されている。この共軌点観測の結果、例えばオーロラの共軌性がオーロラの種類により、時間、空間的にかなり変動するものであることや、また、地磁気共軌点は従来考えられていたよりはずっと速く移動するものである事などが知られるに至った。

#### 5-1-2-2 短期キャンペーン

短期のキャンペーンベースの超多点観測の例は東京大学理学部が九州大学、京都大学、拓殖大学、極地研究所、プリティッシュコロンビア大学、ビクトリア大学、ニューヨーク州立大学、オスロ大学等と共同で実施して来たAurora-ULF-VLFキャンペーンを挙げてよいであろう。

東京大学理学部では1976年以来主として九州大学及びプリティッシュコロンビア大学などと共同で地磁気及び関連現象（オーロラ、ULF、VLF波動など）の多点観測を実施してきた。即ち、1976年にはカナダ中央部マニトバ州において5点のInduction Magnetometer観測を、1978年にはカナダアメリカで10点、1980年には同じくカナダアメリカで関連観測を含めて12点、1985-1986年に行った最近のキャンペーンではカナダ、アラスカ、グリーンランド、アイスランド、スピッツベルゲンを含む北極地域からカメルーン、インド、コロール、ペルーの磁気赤道域に及ぶ観測点総数は46点に達している。これらの観測点のうち、極地域を主として東京大学が、赤道域を九州大学が担当した。総数46点のうち、36点ではInduction Magnetometerを用い、必要に応じてFluxgate Magnetometerを併用し、また9点ではオーロラ、V L F波動などの観測を同時に実施した。記録は、Fluxgate Magnetometerについてはデジタルカセットに、Induction MagnetometerについてはアナログFMカセットに、また、オーロラ及びV L F波動についてはビデオテープに収録されている。

これらの観測は地球磁気圏におけるエネルギーと粒子の流れ、及び、粒子の入射機構やオーロラ活動に伴う、磁場変動、電流系などを明らかにするために、人工衛星による直接観測に呼応するよう計画、実施されたものである。この観測、及び、これに対応する衛星観測との比較の結果、脈動性オーロラに伴う地磁気脈動が電離層の電気伝導度変化によってもたらされるものである事、脈動性オーロラを光らせる脈動的な電子の入射は磁気圏赤道面付近の圧縮性ULF波動によって起こるものでない事、オーロラ構造のドリフトは磁気圏電場によるドリフトである事などが明らかにされた。

なお、東北大学理学部ではおもに1955年から1966年までに6回の海外観測を実施し、皆既日食の地磁気に及ぼす効果を明らかにした。1981年から1987年にいたる6回の海外観測においては、東北工業大学と名古屋大学空電研究所が参加し、アラスカ大学、ジェット推進研究所、ラトロップ大学、ニューキャッスル大学、台湾国立中央大学、LAPAN等と協同でULF波動エネルギーの中低緯度への伝搬機構、およびサブストームの広域発生機構に研究目的をおいた観測が行われた。まず初年度の北太平洋を囲む日米多点同時観測によって現象の大局的な経度効果をおさえた。次にその結果にもとづいて、1982年から1983年にわたって日本から台湾、インドネシアをへてオーストラリアに到る多点同時観測を実施し、緯度効果を求めた。さらに精密な緯度効果と低緯度共役性を求めるには、地球上で日濠両国のみが適していることに着目して、1984年以降両国における測点密度を年々高めながら多点同時観測を実施している。記録は1964年以前はストリップチャート、1965年以降はカセット磁気テープに収録されている。これらの観測の結果、昼側のPc3の波源は、太陽風によって地球磁気圏の衝撃波面で反射されるイオンビームの、サイクロトロン不安定性ににより励起されるupstream waveであり、この波動エネルギーが地球磁気圏を横切って、中緯度の磁力線の様々な振動モードと結合共鳴していることが明らかにされた。又、アラスカチェーンで観測されたオーロラサブストームに伴って、Pi2型波動が汎地球規模でほぼ同時に発生していることが実証された。

## 5-2 従来の観測の問題点

海外での観測、調査には国内でのそれらとかなり異なった要素がある。特に観測点の数の多い場合、あるいは広い領域をサーベイする必要があるような場合には観測の問題にとどまらず、実行上でもさまざまな問題がある。

### 5-2-1 人件費

長期と短期とを問わず海外観測の場合問題となるのは、現地で機器の保守、記録紙や磁気テープの交換、郵送などを依頼する為にかんがりの費用を確保する必要

が生ずる事である。現地の研究者との共同研究や、或は資料を共用するなどといった方法で人件費を節約出来る場合を除いてこの費用は無視できない。特に人件費の高い北極圏などの場合、長期観測や超多点観測の場合特に大きな問題となる。

#### 5-2-2 機器、記録の持ち出し、輸送

国によっては一旦設置した観測機器やオリジナルの記録媒体、採集した試料などを持ち出すことに困難を来すこともある。古地磁気調査の場合、採集した岩石がほとんど唯一の成果であることが多く、この試料の持ち出しが許されない場合には、調査全体が無駄になることもある。また磁場観測などの場合、オリジナルの記録媒体でないと再生が困難なこともあり、大きな問題となる。

この種の問題は相手国によってさまざまな形をとる。その国の研究所や研究者との利害の衝突といったことも考えられないことではない。こうした事態を避けるためには、例えば資料の共用とかあるいはその学術調査をきっかけとしてわが国のハイテク技術や研究手法などを提供するなど相互の利益にかなうよう然るべき配慮が必要と考えられる。それぞれの国での事情に対応して相互に合意が得られるよう努力し、貿易摩擦などの轍を踏まぬよう十分に考慮する必要がある。

地球内部、超高層を問わず海外調査全般に云えることであるが、測定器の数やそれに付随する装置が多い場合、輸送が問題となる。航空機による輸送は金額がかさばり、船の輸送の場合は荷物の到着日程が大幅に狂って調査計画に大きな影響を与えることがある。

#### 5-2-3 単年度予算、備品の持ち帰り

研究費の単年度予算も観測の連続性や観測効率の点で問題が多い。また、備品を持ち出した場合、年度内に持ち帰る事を義務づけられると年度にまたがった観測が不可能になる。特に冬期の観測に重点がおかれる超高層関係では観測期間設定に制約を受けることとなり、また、海外旅費使用の能率という点においても具合の悪い場合が多い。

#### 5-2-4 観測機器の準備

超多点観測の場合、従来の最大の問題点は同一規格の測定装置を多数用意する為の予算が認められ難い点である。大きなまとまった機器は予算要求に際して説得力を持ち易いが多数の機器を用意する事もまた極めて重要である点を理解して貰う必要がある。

観測実施地域によっては商用電源の電圧、周波数とも不安定で、停電の多いところもある。将来計画の項で述べるようないくつかの対策が必要不可欠と考えられる。

### 5-2-5 観測、調査の規模

海外観測の場合、準備段階から海外旅費が必要になり、現状では主として文部省科学研究費補助金海外学術調査に頼る事になるが、海外旅費は予算上特別の枠である為に、他とのバランスもあってあまり大きな規模の計画を立てる事は難しい。しかし、何年かに一度は例えば人工衛星観測に対応して大きなキャンペーンが実施できるような体制も今後は必要になるのではないかと考えられる。

### 5-2-6 記録方式

従来のさまざまなキャンペーンでは、それぞれのプロジェクトの事情に応じて観測装置が設計、製作され、観測装置、記録装置、記録方式などの統一はほとんど考慮されていない。このため異なるプロジェクト間でのデータ交換に著しい不便を生じている。今後の観測に於ては、予算の問題があるにしても、出来るだけ記録方式の規格化を進めるべきであろう。

## 5-3 将来計画への要請

地磁気の起源や地球磁気圏の物理を明らかにする為には更に長期に亘っての観測が重要であることは云うまでもない。特に今後10年間程度を考える時、単に地上観測だけではなく、磁場観測衛星まで含めて全体計画を立案する必要があるであろう。

### 5-3-1 人工衛星対応観測

将来計画される地球周辺の人工衛星観測には必ず地上観測のバックアップが要求されるものと考えられる。地上超多点観測、及び共軌点観測については現時点では1989年に打ち上げが予定されているEXOS-D衛星及び1991年に予定されているGEOTAIL衛星との同時観測を目指して計画が進められている。観測点数は従来の経験から全体で60-70点程度が妥当な線と考えられる。尚、これらの観測はいずれも磁場観測にとどまらず、極光帯地域におけるオーロラ、自然電波、電離層吸収などの観測とともに実施される事が極めて望ましい。

### 5-3-2 セミパーマネントステーション

超多点観測の実現には多くの研究者の国際的な協力が必要とされる。超多点観測の将来における重要性を考えると、この種の観測は短期のキャンペーンに終わらせること無く、少なくともかなりの数の観測点はセミパーマネントの観測点になしうるように考慮して行く事が望ましい。セミパーマネントとは、例えば観測の必要に応じて、電話連絡などによっていつでも観測が始められるように準備さ

れた観測点という意味である。こうする事によって、キャンペーンにおけるSET UPの手数を省き、小数の研究者でも観測点の総数を効果的に増やす事が可能になる。

### 5-3-3 観測拠点

地球内部を目的とする観測でも超高層観測でも、磁場の長期変動を観測するためのステーションは必須の要請である。このためには適当な数の観測拠点を常時キープしておくことも重要な点であろう。これはキャンペーンベースの超多点観測のベースキャンプとしても有用である。また、現在の観測所の分布から考えて、海洋地域での観測が今後極めて重要となる。この場合、後で述べる観測カプセルと同様に記録の処理（記録媒体、伝送方式）、電源などの研究が重要となる。なお、既に地震学分野で考えられている海底ケーブルを利用しての地震計設置に呼応して磁力計を設置することの可能性も検討する必要があるだろう。

### 5-3-4 観測カプセル

先進諸国に於ては社会環境の急激な変化に伴って、国際的な標準観測所に於てすら観測の適地を得ることが難しくなりつつある。また、極めて多数の観測点を必要とするキャンペーンに於ては、従来行われてきたような、現地の人に保守やテープの交換を依頼する形式の観測は費用の問題とも関連して著しく困難となる。この問題を解決する最も正統的な方法は観測装置を低消費電力、高記録密度のカプセル化し、カプセルを適当に配置したのち、半年ないし1年程度の長期に亘る自動記録を行わせてカプセルを回収するといった方向であろう。

### 5-3-5 記録方式、データ交換

地磁気観測の国際性を考えるとき、観測記録をデジタル方式で統一し、相互利用を容易にする事が極めて望ましい。しかしながらまた一方では、特に超多点観測などでは記録密度を上げたいという要請から特殊なアナログ記録を採用せざるを得ない場合も多い。この種の問題を解決するためには資料処理の段階における規格化を考慮する必要がある、その手続きの簡素化の為の設備投資もまた極めて重要な問題といえる。また、方式の統一、規格化にも関連して、準備段階での機器の検定などについても充分考慮しておく必要があるだろう。なお、データの有効な利用のためにNetworkの整備は緊急欠くべからざる要請である。

### 5-3-6 定常観測所の支援

海外観測を広義に考えれば、短期の超多点集中観測、共軌点観測などで代表される長期の特殊な観測とともに定常観測所の強化についても考慮する必要がある



う。狭義の海外観測は前二者であるが、世界的規模で考える時、定常観測所、特に発展途上国の観測所に対する支援もまた極めて重要な要素と考えられる。例えば日本側が観測装置を、現地側が場所と人員とを提供するといった形での協力態勢が行われるようになれば、相互に利益は大きいものと言えよう。観測者の研修を日本で行うことも考慮すべきことの一つであろう。

なお、これら総ての観測について、無人観測装置及び人工衛星によるデータ収集システムの実現に向けて一層の努力が必要と考えられる。

表5-1 地球内部関係海外調査一覧

年	実施機関	観測(調査)地域	目的
1968,69	大阪大学基礎工学部	セイロン	セイロン島における考古地磁気学の研究
1969,72	東京大学地震研究所	インド	インドデカン高原の地学総合調査
1971-72	東京大学理学部	グアム、サイパン パカ	伊豆、小笠原、マリアナ弧状列島に沿った古地球磁場永年変化の研究
1971-74	北海道大学理学部	チリ-南部	チリ及び日本における環太平洋造山帯の地質構造の比較研究
1971,73 74,75	東北大学理学部	イタリア、フランス	新第三紀時階区分の標識地における古地磁気層位
1977-79	国立極地研究所	南極地域	南極マクマードサウンド地域の古地磁気学的研究
1978,79	神戸大学	タヒチ、西サモア等	太平洋の三大火山島群のホットスポット説を基礎とした古地磁気学的調査
1979,81	山形大学理学部	インドネシア ジャワ島中部	インドネシア、ジャワ島の中新統古地磁気、微化石層序の確立
1980,81 84	東京大学理学部	ペルー、チリ ホルヒア	中部アンデスの地球物理学的調査
1980,82 84	北海道大学理学部	中央ペルー	ヒマラヤ山脈およびその周辺地域の地殻変動の研究
1980,84 86	大阪大学人間科学部	ケニア北部	東アフリカにおける第三紀霊長類と古環境の研究

1981	神戸大学	キリバス共和国	太平洋火山島列の構造と運動に関する地球電気磁気学的研究
1981-83	京都大学理学部	中国陝西省	中国と第四紀編年に関する諸問題
1981, 83 84	静岡大学理学部	ニュージーランド	ニュージーランド北島の新第三紀古地磁気層序
1981, 82 86	東京工業大学理学部	トルコ共和国	北アナトリア断層の地球物理学的調査
1981, 83 86	神戸大学	フィジー、ポナペ ヤップ	オセアニア海域における水陸総合学術調査
1982	京都大学霊長類研	ボリビリア、コロンビア	熱帯新大陸における広鼻猿類の種分化に関する研究
1983	神戸大学	仏領ポリネシア	南東太平洋諸島の地球物理学的研究
1983-84	国立極地研究所	南極地域	昭和基地周辺及びセールロンダ ーネ山脈の古地磁気学的研究
1983, 84	京都大学理学部	韓国	韓半島の古地磁気研究
1984, 85	東京大学地震研究所	北東太平洋	北東太平洋ファンデフカプレート の電磁気学的調査
1984, 85	山形大学理学部	ニュージーランド南島	始新世・漸新世境界部の古地磁 気、同位対比層序
1986	高知大学理学部	ミクロネシア連邦	ミクロネシアの古地磁気予備調 査
1986	国立極地研究所	ブラジル	ブラジル産及び南極産隕石と岩 石の磁気学的研究
1986, 87	東京工業大学	中国	日本と中国の古地磁気学的比較 にもとづく北アジアのテクトニ クスの研究

表 5 - 2 超高層関係海外調査一覧

年	実施機関	観測(調査)地域	目的
1955	東北大学理学部	セイロン	皆既日食の地磁気 に及ぼす効果
1958	東北大学理学部	メフロフ島	皆既日食の地磁気 に及ぼす効果

1962	東北大学理学部	ニューギニア	皆既日食の地磁気に及ぼす効果
1963	東北大学理学部	アラスカ	皆既日食の地磁気に及ぼす効果
1965	東北大学理学部	ハワイ、ハーウヱー島	皆既日食の地磁気に及ぼす効果
1966	東北大学理学部	ペール	皆既日食の地磁気に及ぼす効果
1972	東海大学	カナダ	カナダ極冠帯に於ける地磁気微細変動の観測
1974	東海大学	カナダ	カナダ極冠帯とオーロラ帯に於ける地磁気脈動の観測
1975	東京大学理学部	カナダ	オーロラ、ULF、VLF波動の同時観測
1976	東京大学理学部	カナダ	オーロラ、ULF、VLF波動の多点観測
1976	国立極地研究所	ノルウェー	オーロラ現象の共軌点観測
1977	東京大学理学部	カナダ	オーロラ、ULF、VLF波動の同時観測
1977	国立極地研究所	アイスランド	オーロラ現象の共軌点観測
1978	東京大学理学部	カナダ	ULF波動の多点観測
1978	国立極地研究所	アイスランド	オーロラ現象の共軌点観測
1979	東京大学理学部	カナダ	オーロラ、ULF、VLF波動の同時観測
1979	国立極地研究所	ノルウェー	オーロラ現象の共軌点観測
1979-80	東京大学理学部	カナダ	カナダ地域における磁気圏入射
	九州大学理学部	アメリカ	粒子と電磁波動の到来方向調査
1980	国立極地研究所	スウェーデン	北極域におけるオーロラ現象の大気球観測
1981	東北大学理学部	アメリカ	ハワイ及び米大陸における観測に基づく磁気圏サブストームと銀河系磁気圏に関する研究
1982	国立極地研究所	ノルウェー スウェーデン	北極域におけるオーロラ現象の大気球観測
1982	東北大学理学部	オーストラリア	太陽系磁気圏構造の研究
1983	東北大学理学部	インドネシア 台湾	昭和58年6月11日インドネシア皆既日食による太陽・地球・月の研究
1983	国立極地研究所	アイスランド	アイスランドにおけるオーロラ現象の多点観測

1984	名古屋大学空電研究所 東北大学理学部	オーストラリア	磁気圏波動・粒子相互作用能動 実験のための調査
1984	東京大学理学部 九州大学理学部 京都大学理学部 拓殖大学工学部	カナダ、アメリカ ヘル、ノルウェー カメルーン	カナダ地域の磁気圏入射粒子が 広域変動励起におよぼす影響
1984	国立極地研究所	アイスランド	アイスランドにおけるオーロラ 現象の多点観測
1984-85	東京大学理学部	スピッツベルゲン	カスプ領域のオーロラ、ULF、V LF波動の研究
1985	国立極地研究所	アイスランド グリーンランド ノルウェー	アイスランドにおけるオーロラ 現象の多点観測
1985-86	東京大学理学部 九州大学理学部 京都大学理学部 拓殖大学工学部	カナダ、アメリカ インド、ヘル カメルーン、コロール グリーンランド	カナダ地域の磁気圏入射粒子が 広域変動励起におよぼす影響
1985-86	東京大学理学部	スピッツベルゲン	カスプ領域のオーロラ、ULF、V LF波動の研究
1986	国立極地研究所	アイスランド	アイスランドにおけるオーロラ 現象の多点観測
1986	九州大学理学部	アメリカ、パラオ	低緯度、赤道ULFの研究
1986	名古屋大学空電研究所 東北大学理学部	オーストラリア	日豪共軌多点観測に基づく低緯 度磁気圏プラズマ波動の発生及 び伝播特性の研究
1986	国立極地研究所	グリーンランド アイスランド	グリーンランド、アイスランド、 スピッツベルゲン地域における 極域電磁現象の特性
1987	九州大学理学部	アメリカ、ヤップ パラオ	低緯度、赤道ULFの研究
1987	名古屋大学空電研究所 東北大学理学部	オーストラリア	能動実験を用いた磁気圏波動・ 粒子相互作用の研究
1987	国立極地研究所	グリーンランド アイスランド	グリーンランド、アイスランド、 スピッツベルゲン地域における 極域電磁現象の特性

表 5 - 3 地球内部関係海外調査文献リスト (International Journals)

- Kono, M., Kinoshita, H., and Aoki, Y.,  
Paleomagnetism of Deccan Traps in India,  
J. Geomag. Geoelectr., 24, 49-68, 1972.
- Kinoshita, H. and Aoki, Y.,  
The stability of NRM of Deccan Traps in India,  
J. Geomag. Geoelectr., 24, 459-470, 1972.
- Nakagawa et al.,  
Preliminary results on magnetostratigraphy of Neogene stage stratotype  
section in Italy,  
Riv. Ital. Paleont., 80, 615-630, 1974.
- Ozima, M., Joshima, M., and Kinoshita, H.,  
Magnetic properties of submarine basalts and the implications on the  
structure of the oceanic crust,  
J. Geomag. Geoelectr., 26, 335-354, 1974.
- U.S.-Japan Paleomagnetic Cooperation Program in Micronesia,  
Paleosecular variation of lavas from the Marianas in the Western  
Pacific Ocean,  
J. Geomag. Geoelectr., 27, 57-66, 1975.
- Larson, E. E., Reynolds, R. L., Ozima, M., Aoki, K., Kinoshita, H.,  
Zashu, S., Kawai, N., Nakajima, T., Hirooka, K., Merrill, R.  
and Levi, S.,  
Paleomagnetism of Miocene volcanic rocks of Guam and the curvature of  
the Southern Mariana island arc,  
Geol. Soc. Am. Bull., 86, 346-350, 1975.
- Kawai, N., Sto, T., Sueishi, T. and Kobayashi, K.,  
Paleomagnetic study of Deep-Sea sediments from the Melanesia Basin,  
J. Geomag. Geoelectr., 29, 211-224, 1977.
- Fujiwara, Y.,  
Paleomagnetism of the plateau basalt in Patagonia,  
in Geology of the Circum-Pacific orogenic belt in Japan and Chile,  
Japan Society for the Promotion of Science, 194pp., 1977.

- Hamano, Y., T. Nishitani and M. Kono,  
Magnetic properties of basalt samples from Deep Sea Drilling Project  
Holes 417D and 418A,  
Init. Rept. DSDP, 51, 1391-1405, 1979.
- Heki, K., Y. Hamano and M. Kono,  
Rotation of the Peruvian Block from palaeomagnetic studies of the  
Central Andes,  
Nature, 305, 514-516, 1983.
- Yukutake, T., J.H. Filloux, J. Segawa, Y. Hamano and H. Utada,  
Preliminary report on a magnetotelluric array study in the Northwest  
Pacific,  
J. Geomag. Geoelectr., 35, 575-587, 1983.
- Sasajima, . et al.,  
The recent research of Loess in China,  
Eds. Sasajima, S. and Y.Y. Wang, pp.242, Kyoto Univ. and Northwest  
Univ., 1984.
- Heki, K., Y. Hamano, H. Kinoshita, A. Taira and M. Kono,  
Paleomagnetic study of Cretaceous rocks of Peru, South America:  
Evidence for rotation of the Andes,  
Tectonophysics, 108, 267-281, 1984.
- Heki, K., Y. Hamano and M. Kono,  
Paleomagnetic study of the Cretaceous Atajana Formation and the Arica  
dike swarm, Northernmost Chile,  
J. Geomag. Geoelectr., 37, 107-117, 1985.
- Heki, K., Y. Hamano, M. Kono and T. Ui,  
Palaeomagnetism of Neogene Ocosingo dyke swarm, the Peruvian Andes:  
implication for the Bolivian orocline,  
Geophys. J. R. Astron. Soc., 80, 527-534, 1985.
- Shibuya, H., K.D. Min, Y.S. Lee, S. Sasajima and S. Nishimura,  
Some paleomagnetic measurements in Korean Peninsula,  
in Physical Geology of Central and Southern Part of Korea,  
eds. Nishimura S. and K.D. Min, Kyoto Univ. 41-83, 1985.
- Kono, M., K. Heki and Y. Hamano,  
Paleomagnetic study of the Central Andes: counterclockwise rotation of  
the Peruvian block,  
J. Geodynamics, 2, 193-209, 1985.
- Fujii, N. and Y. Hamano,  
Anisotropy of basalts, Hole 462A, Nauru basin, Deep Sea Drilling  
Project Leg 89,  
Init. Rept. DSDP, 89, 647-650, 1985.

ODP Leg 107 Shipboard scientist,

A microlism of ocean basin evolution in the Mediterranean,  
Nature, 321, 383-384, 1986.

Isikara, A.M. and Y. Hohkura,

Electric and magnetic reserach on active faults in the North Anatolian  
fault zone, 139pp., 1986.

McCabe, R.J., E. Kikawa, J.T. Cole, A.J. Malicse, P.E. Baldauf, J. Yumul  
and J. Almasco,

Paleomagnetic results from Luzon and the Central Philippines,  
J. Geophys. Res., 92, 555-580, 1987.

表 5 - 4 超高層関係海外調査文献リスト(Internatianl Journals)

Yumoto, K. and T. Saito,

Nonlinear resonance theory of Pc 3 magnetic pulsation,  
J. Geophys. Res., 87, 5159-5168, 1982.

Yumoto, K. and T. Saito,

Relation of compressional HM waves at GOES 2 to low-latitude Pc 3  
magnetic pulsations,

J. Geophys. Res., 88, 10041-10052, 1983.

Yumoto, K., T. Saito, B.T. Tsurutani, E.J. Smith and S.-I. Akasofu,

Relationship between the IMF magnitude and Pc 3 magnetic pulsations in  
the magnetosphere,

J. Geophys. Res., 89, 9731-9740, 1984.

Yumoto, K., T. Saito, S.-I. Akasofu, B.T. Tsurutani and E.J. Smith,

Propagation mechanism of daytime Pc 3-4 pulsations observed at  
synchronous orbit and multiple ground-based stations,

J. Geophys. Res., 90, 6439-6450, 1985.

Yumoto, K., T. Saito and Y. Tanaka,

Low-latitude Pc3 magnetic pulsations observed at conjugate stations  
(L - 1.5),

J. Geophys. Res., 90, 12202-12207, 1985.

Yumoto, K.,

Low-frequency upstream wave as a probable source of low-latitude Pc 3-4  
magnetic pulsations,

Planet. Space Sci., 33, 239-249, 1985.

Yumoto, K.,

Generation mechanism of Pc 3 magnetic pulsations at very low latitudes,

Planet. Space Sci., 34, 1329-1334, 1986.

- Yumoto, K., T. Saito, Y. Tanaka, K.J.W. Lynn, F.W. Menk and B.J. Fraser,  
Polarization and amplitude characteristics of Pc 3 pulsations in  
conjugate area around L=1.3-2.1,  
J. Geophys. Res., 93, in press, 1988.
- Yumoto, K., K. Takahashi, T. Saito, F.W. Menk, B.J. Fraser, T.A. Potemra  
and L.J. Zanetti,  
Relations of Pi 1-2 magnetic pulsations at L=1.3-2.1 to substorm-  
associated phenomena at AMPTE/CCE,  
J. Geophys. Res., 93, in press, 1988.
- Sato, N. and S. Kokubun,  
Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Quasi-  
periodic ELF-VLF emissions associated with Pc 3-4 magnetic pulsations  
and their geomagnetic conjugacy,  
J. Geophys. Res., 85, 101-113, 1980.
- Sato, N., M. Ayukawa and H. Fukunishi,  
Conjugacy of ELF-VLF emissions near L=6,  
J. Atmos. Terr. Phys., 42, 911-928, 1980.
- Sato, N. and S. Kokubun,  
Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations: Regular  
periodic ELF-VLF pulsations and their geomagnetic conjugacy,  
J. Geophys. Res., 86, 9-18, 1981.
- Sato, N. and H. Fukunishi,  
Interaction between ELF-VLF emissions and magnetic pulsations:  
Classification of quasi-periodic ELF-VLF emissions based on frequency-  
time spectra,  
J. Geophys. Res., 86, 19-29, 1981.
- Tonegawa, Y. and H. Fukunishi,  
Harmonic structure of Pc 3-5 magnetic pulsations observed at the Syowa-  
Husafell conjugate pair,  
J. Geophys. Res., 89, 6737-, 1984.
- Tonegawa, Y., H. Fukunishi, T. Hirasawa, R. L. McPherron, T. Sakurai and  
Y. Kato,  
Spectral characteristics of Pc 3 and Pc 4/5 magnetic pulsation bands  
observed near L=6,  
J. Geophys. Res., 89, 9720-, 1984.



- Yamagishi, H., T. Ono, H. Fukunishi, T. Yamagami, J. Nishimura, M. Kodama, Y. Hirashima, H. Murakami, J. A. Holtet, S. Ullaland and R. J. Pellinen,  
Pulsating phenomena of auroral-zone X-rays associated with quasi-periodic VLF emissions and Pc 3 magnetic pulsation,  
J. Geomagn. Geoelectr., 37, 927-943, 1985.
- Sato, N., Y. Shirokura and T. Hirasawa,  
Fingerprint structure Pc 1 geomagnetic pulsations,  
Geophys. Res. Lett., 14, 664-667, 1987.
- Sakurai, T., N. Sato, Y. Tonegawa and R. Fujii,  
Effects of auroral activities on phase relation of Pi 2 magnetic pulsations observed at conjugate stations, Syowa in Antarctica and three stations in Iceland,  
submitted to J. Geophys. Res., 1988.
- Watanabe, T., T. Oguti, K. Hayashi, K. Tsuruda, and R. E. Horita,  
Magnetic pulsations and auroral displays during the expansion phase of a substorm, 18 September, 1986,  
J. Geomagn. Geoelectr., 30, 199-200, 1978.
- Hayashi, K., K. Tsuruda, S. Kokubun, T. Oguti, R. E. Horita and T. Watanabe,  
Arrival direction of VLF emissions and corresponding activities in aurorae and geomagnetic pulsations,  
J. Geomagn., Geoelectr., 30, 361-362, 1978.
- Hayashi, K., T. Oguti, T. Watanabe, K. Tsuruda, S. Kokubun and R. E. Horita,  
Power harmonic radiation enhancement during the sudden commencement of a magnetic storm,  
Nature, 275, 627-629, 1978.
- Kokubun, S., K. Hayashi, T. Oguti, K. Tsuruda, S. Machida, T. Kitamura, O. Saka and T. Watanabe,  
Correlation between VLF chorus bursts and impulsive magnetic variations at L - 4.5,  
Can. J. Phys., 59, 1034-1041, 1981.
- Hayashi, K., S. Kokubun, T. Oguti, K. Tsuruda, S. Machida, T. Kitamura, O. Saka and T. Watanabe,  
The extent of Pc-1 source region in high latitudes,  
Can. J. Phys., 59, 1097-1105, 1981.

- Oguti, T., S. Kokubun, K. Hayashi, K. Tsuruda, S. Machida, T. Kitamura, O. Saka and T. Watanabe,  
 Latitudinally propagating on-off switching auroras and associated geomagnetic pulsations; A case study of an event of February 20, 1980,  
 Can. J. Phys., 59, 1131-1136, 1981.
- Oguti, T., J.H. Meek and K. Hayashi,  
 Multiple correlation between auroral and magnetic pulsations,  
 J. Geophys. Res., 89, 2295-2303, 1984.
- Oguti, T. and K. Hayashi,  
 Multiple correlation between auroral and magnetic pulsations.  
 2. Determination of electric currents and electric fields around a pulsating auroral patch,  
 J. Geophys. Res., 89, 7467-7481, 1984.
- Oguti, T. and K. Hayashi,  
 Polarization and wave form of magnetic pulsations below pulsating auroras: Magnetic effects of electric currents induced in an ionization tail of a moving auroral patch,  
 J. Geomagn. Geoelectr., 37, 65-91, 1985.
- Oguti, T. and K. Hayashi,  
 Estimates of electric field and its fluctuations below a pulsating aurora and a discrete aurora,  
 J. Geomagn. Geoelectr., 37, 739-757, 1985.
- Oguti, T.,  
 Relationships between auroral and concurrent geomagnetic pulsations,  
 J. Geomagn. Geoelectr., 38, 837-859, 1986.
- Oguti, T., K. Hayashi, T. Yamamoto, J. Ishida, T. Higuchi and N. Nishitani,  
 Absence of hydromagnetic waves in the magnetospheric equatorial region conjugate with pulsating auroras,  
 J. Geophys. Res., 91, 13711-13715, 1986.
- Oguti, T., R. Nakamura and T. Yamamoto,  
 Oscillations in drifts of auroral patches,  
 J. Geomagn. Geoelectr., 39, 609-624, 1987.
- Nakamura, R. and T. Oguti,  
 Enhancements in auroral drift velocity in the dusk sector associated with a small substorm in the midnight sector,  
 J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.
- Oguti, T., T. Kitamura and T. Watanabe,  
 Global aurora dynamics campaign,  
 J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.

- Oguti, T., T. Yamamoto, K. Hayashi, S. Kokubun, T. Ogawa, N. Iwagami, T. Kitamura, O. Saka, T. Araki, K. Makita, N. Sato, T. Watanabe, R.E. Horita and J.S. Kim,  
Fast auroral evolution and related magnetic field changes on the ground and at conjugate satellites,  
J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.
- Kokubun, S., T. Yamamoto, K. Hayashi, T. Oguti and A. Egeland,  
Impulsive Pi bursts associated with poleward moving auroras near the polar cusp,  
J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.
- Yamamoto, T., K. Hayashi, S. Kokubun, T. Oguti, T. Ogawa, N. Iwagami, T. Kitamura, O. Saka, T. Araki, K. Makita, N. Sato, T. Watanabe, R.E. Horita and J.S. Kim,  
Auroral activities and long-period geomagnetic pulsations. 1. Pc5 pulsations and concurrent auroras in the dawn,  
J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.
- Yamamoto, T., K. Hayashi, S. Kokubun, T. Oguti, T. Ogawa, N. Iwagami, T. Kitamura, O. Saka, T. Araki, K. Makita, T. Watanabe, R.E. Horita and J.S. Kim,  
Auroral activities and long-period geomagnetic pulsations. 2. Ps5 pulsations following auroral breakup in the premidnight hours,  
J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.
- Hayashi, K., T. Yamamoto, S. Kokubun, T. Oguti, T. Ogawa, N. Iwagami, T. Kitamura, O. Saka, T. Araki, K. Makita, T. Watanabe, R.E. Horita, D.J. McEwen and J.S. Kim,  
Multi-station observation of IPDP micropulsations. --Two dimensional distribution and evolution of the source regions--,  
J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.
- Kitamura, T., O. Saka, M. Shimoizumi, H. Tachihara, T. Oguti, T. Araki, N. Sato, M. Ishitsuka, O. Veliz and J.B. Nyobe,  
Global mode of Pi2 waves in the equatorial region. --The difference of Pi2 mode between high and equatorial latitudes--,  
J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.
- Saka, O., T. Kitamura, M. Shimoizumi, T. Araki, T. Oguti, O. Veliz and M. Ishitsuka,  
The effects of non-uniform ionosphere on the equatorial Pc pulsations,  
J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.

Oguti, T., T. Yamamoto, K. Hayashi, S. Kokubun, A. Egeland and J.A. Holtet,  
Dayside auroral activities and related magnetic impulses in the polar cusp region,

J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.

Nishitani, N. and T. Oguti,  
Magnetic field variations at synchronous satellites conjugate with active auroral forms,

J. Geomagn. Geoelectr., 40, in press, 1988.

表 5-5 地球内部関係 Proceedings, 報告書など

Hirooka, K.,

Archaeomagnetic study for the past 2,000 years in Southwest Japan,

Mem. Fac. Sci., Kyoto Univ., Ser. Geol. Mineral., 38, 167-207, 1971.

Kobayashi, K.,

Reconnaissance paleomagnetic and rock magnetic study of igneous rocks of Cuam, Marian and related sites: Izu Peninsula,

Tokai Univ. Press, 385-390, 1972.

Chun, L., Maenaka, K., and Sasajima, S.,

Paleomagnetism of some Late Cenozoic basalt group in Datong Province, north China,

Rock Mag. Paleogeophys., 8, 9-16, 1981.

Torii, M., T. Matsuda and S. Ishida,

Natural remanent magnetization of the Miocene phonolite from norther Kenya,

Rock Mag. Paleogeophys., 8, 34-37, 1981.

Otofuji, Y., Oh, J. Y., Hirajima, T., Min, K. D., and Sasajima, S.,

Paleomagnetism and K-Ar age of Cretaceous rocks from Korean Peninsula . . . Gyeongsang supergroup in south Korea,

Rock Mag. Paleogeophys., 8, 46-52, 1981.

Isezaki, N. et al.,

Preliminary report on the magnetic survey in Niue Islands,

Rock Magnetism and Paleogeophysics, 7, 36-39, 1982.

Torii, M. et al.,

Report of field study in Kirimun, Kenya,

Study of the Tertiary hominoids and their paleoenvironments in East Africa, Eds. H. Ishida and S. Ishida, vol. 1, pp.181, Osaka University, 1982.

- Kono, M., Fukao, Y., Hamano, Y., Heki, K., Kinoshita, H., Onuki, Y.,  
Taira, A., Ui, T., and Ocola, L.,  
Geophysical studies of the Central Andes,  
Rock Magn. Paleogeophys., 9, 66-71, 1982.
- Funaki, M.,  
Natural remanent magnetizations of Beacon Group in McMurdo Sound,  
Antarctica,  
Rock Magn. Paleogeophys., 9, 80-87, 1982.
- Kaneoka, I.,  
K-Ar age determination of the Late Tertiary and Quaternary Andean  
volcanic rocks, Southern Peru,  
Rock Magn. Paleogeophys., 9, 111-116, 1982.
- Heki, K., Hamano, Y., and Kono, M.,  
Paleomagnetic study in Andean Peru: Cretaceous sediments and volcanics,  
Rock Magn. Paleogeophys., 9, 72-79, 1982.
- McCabe, R. J., Shibuya, H., Almasco, J., Zanoria, F., Pagautan,  
and Torii, M.,  
Evidence against late Neogene rotation of the island of Luzon,  
in Paleomagnetic research in Southeast and East Asia, ed. J. Briden,  
Committee for Co-ordination of Joint Prospecting for Mineral  
Resources in Asian Offshore Areas, United Nation Development  
Project Publication, Bangkok, 117-129, 1982.
- Isezaki, N. et al.,  
The prompt report of the scientific survey of the south Pacific,  
Research Center for the south Pacific, Kagoshima University,  
1982, 1984, 1987.
- Funaki, M.,  
Mem. Nat'l. Inst. Polar Res., Ser.C, 16, 1-81, 1984.
- Nakajima, T. and M. Torii,  
Paleomagnetism of Miocene rocks in the western area of Baragoi,  
northern Kenya,  
Rock Mag. Paleogeophys., 12, 59-65, 1985.
- Funaki, M. and P. Wasilewski,  
Mem. Nat'l. Inst. Polar Res., Spec. Issue, 1986.

表5-6 超高層関係 Proceedings, 報告書など

Saito, T.,

Three projects on intercontinental ULF observations in five countries surrounding Pacific Ocean,

Solar Terr. Environ. Res. in Japan, 7, 8-12, 1983.

Saito, T., K. Yumoto, M. Seto, K. D. Cole, P. Dyson, J. Ward and B. Gibsonwilde,

Low-latitude conjugate ULF observation by rulfmeters,

Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Special Issue, 31, 52-62, 1984.

Yumoto, K., T. Saito, B. T. Tsurutani, E. J. Smith and S.-I. Akasofu, Effects of the interplanetary magnetic field on the characteristics of Pc 3-4 pulsations at globally coordinated stations,

Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Special Issue, 36, 15-26, 1985.

Yumoto, K., T. Saito and Y. Tanaka,

Pc3 magnetic pulsations observed at low latitudes; A possible model,

Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Special Issue, 47, 139-147, 1987.

Iwabuchi, M., H. Fukunishi and N. Sato,

Spectral and polarization characteristics of Pc 3-5 magnetic pulsations observed at the Syowa Station - Iceland conjugate pair,

Antarctic Record, 68, 294-310, 1980.

Kuwashima, M.,

Wave characteristics of magnetic Pi 2 pulsations in the auroral region: Conjugate relations,

Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Special Issue, 18, 161-178, 1980.

Ishizu, N., O. Saka, T. Kitamura, H. Fukunishi, N. Sato and R. Fujii, Polarization study of Pc 1 and Pc 2 band pulsations at conjugate stations,

Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Special Issue, 18, 118-126, 1981.

Fukunishi, H. and H. Miyaoka,

Summary report on international balloon campaign in Sweden and Norway, 1980-1982,

Mem. Nat'l Inst. Polar Res., 134-, 1984.

Yamagishi, H., T. Ono, H. Fukunishi, T. Yamagami, J. Nishimura, M. Kodama, Y. Hirashima, H. Murakami, J. A. Holtet, S. Ullaland and R. J. Pellinen,

Auroral zone X-ray pulsations associated with VLF pulsations: B15-3 balloon experiment,

Mem. Nat'l Inst. Polar Res., 31, 124-136, 1984.

- Iversen, I. B., H. Miyaoka, N. Sato, S. Ullaland and R. Fujii,  
 Preliminary results from the auroral zone ionosphere observations  
 during AZCO balloon campaign in 1985,  
 Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Special Issue, 47, 36-43, 1987.
- Nagano, H., T. Araki, T. Iyemori, H. Fukunishi, N. Sato and M. Ayukawa,  
 Geomagnetic sudden commencements observed at the Syowa - Iceland  
 conjugate stations,  
 Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Special Issue, 47, 78-91, 1987.
- Araki, T., N. Sato, R. Fujii and T. Kikuchi,  
 Phase and amplitude of VLF omega signals observed simultaneously at  
 three stations in Iceland in association with magnetospheric substorms,  
 Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Special Issue, 47, 109-116, 1987.
- Ono, T.,  
 Temporal variation of the geomagnetic conjugacy in Syowa-Iceland pair,  
 Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Special Issue, 48, 46-57, 1987.
- Oguti, T., K. Hayashi, S. Kokubun, K. Tsuruda, T. Watanabe and  
 R. E. Horita,  
 Auroral and magnetic pulsations,  
 Proc. Int'l Workshop on magnetospheric physics, Tokyo, 111-115, 1979.
- Oguti, T., S. Kokubun, K. Hayashi, K. Tsuruda, S. Machida, T. Kitamura,  
 O. Saka and T. Watanabe,  
 Pulsating auroras and related geomagnetic pulsations,  
 Highlights of the Japanese IMS program, 41-51, 1980.
- Kokubun, S., K. Hayashi, T. Oguti, K. Tsuruda and S. Machida,  
 Correlations between chorus bursts and impulsive magnetic variations at  
 L - 4.5,  
 Highlights of the Japanese IMS program, 111-114, 1980.
- Hayashi, K., S. Kokubun, T. Oguti, K. Tsuruda, S. Machida, T. Kitamura,  
 O. Saka, T. Watanabe and R. E. Horita,  
 Profile of Pc-1 geomagnetic pulsation based on multi-point observation  
 in high latitudes,  
 Highlights of the Japanese IMS program, 206-214, 1980.
- Oguti, T.,  
 Pulsating auroras and related ULF-VLF waves,  
 Proc. US-Japan seminar on wave-particle interactions in space  
 plasmas, 98-103, 1981.
- Hayashi, K., S. Kokubun and T. Oguti,  
 Multi-station f-t spectra of short period ULF waves during the aurora-  
 ULF-VLF campaign (Jan.-Feb. 1980 in Canada),  
 STAC Chart, Science Council of Japan, 1982.

Oguti, T.,

Modes of pulsating auroras and related geomagnetic pulsations,

Mem. Nat'l. Inst. Polar Res. Special issue No.22, 94-103, 1982.

Hayashi, K., S. Kokubun, T. Oguti, T. Kitamura, O. Saka and T. Watanabe,

Substorm associated Pcl emissions in the morning sub-cleft latitudes,

Proc. Conf. Achievements of the IMS, 26-28 June, 1984, Graz, Austria,

ESASP-217, 603-607, 1984.

Oguti, T., T. Yamamoto, K. Hayashi and R. Fujii,

Proof of ionospheric origin of PiC pulsation: Magnetic pulsations as  
observed by MAGSAT above and on the ground below a pulsating aurora,

Proc. Symp. Prospect and Retrospect in Studies of Geomagnetic Field

Disturbances, G.R.L., U. of Tokyo, 180-195, 1985.

Kitamura, T., O. Saka, M. Takefu, T. Oguti, S. Kokubun, K. Hayashi,

K. Tsuruda, S. Machida and T. Watanabe,

HF doppler measurement in the auroral ionosphere,

Mem. Nat'l Inst. Polar Res., Special Issue, 22, 267-277, 1982.

Kitamura, T., O. Saka, M. Shimoizumi, H. Tachihara, T. Oguti, T. Araki,

N. Sato, M. Ishitsuka and J. Nyobe,

Global mode of ULF oscillations in the equatorial region,

Proc. Chapman Conf. on "Plasma Waves and Instabilities in the Mag-  
netosphere and in Comets", 329-332, 1987.



## 6. 飛翔体による磁場観測

### (概要)

地球周辺の磁場測定は、技術的困難さのために長い間地球を取り巻くプラズマ中を流れる電流によってつくられる磁場の測定が主体であったが、1979～1980年米国のNASAによる本格的な地磁気測定衛星MAGSATの打ち上げによって地磁気三成分の観測が可能になり、地球主磁場の精密な測定が行われた。MAGSATは地球核および地殻に起因する磁場の観測に大きな成果をあげたばかりではなく、磁気圏・電離圏の研究にも重要な貢献をした。

地表の観測が、観測所や観測点の分布が不均一なため一様なデータがとれないのにたいして、人工衛星による測定は、地球のほぼ全域にわたって一様で均質なデータを短時間のうちにとることができる。地球磁場の変動を調べるため、数年間隔で衛星観測を実施することが望まれている。

地磁気衛星を繰り返し打ち上げて磁場測定を実施するというような事業は、ひとつの国だけでできるものではなく、国際的協力体制を整えて実行する必要がある。このため国際地球電磁気学・超高層物理学協会 (IAGA) では磁場衛星に関する作業委員会を設けて、関係機関に働きかけを行っている。フランスのCNESと米国のNASAとは協力して1993年に磁気測量衛星の打ち上げを計画している。わが国にたいしても地磁気衛星打ち上げの国際的要請が強い。

わが国では1980年代にはいって宇宙科学研究所の衛星「じきけん」およびハレー彗星探査機「さきがけ」によって、磁気圏や惑星間空間の微弱磁場測定が実施された。近い将来ふたつの衛星、1989年にはEXOS-D、1992年にはGEOTAIL、が打ち上げられ、磁気圏尾部や磁気圏境界域の磁場測定が計画されている。これらの技術や研究成果を生かしてわが国でも本格的な地磁気衛星の開発に取り組むべき時期がきている。

## 6-1. 衛星観測の重要性

地球周辺における磁場の測定には二つの側面がある。その一つは地球を取り巻くプラズマ中を流れる電流に起因する磁場の測定であり、もう一つは地球のコアや地殻に起因する地球の主磁場の測定である。これまでの衛星による観測の多くは、前者即ち、主磁場からの変動分の測定に費やされてきた。これには、幾つかの理由が考えられるが、その一つは技術的な問題である。主磁場の測定では、少なくとも $10\text{ nT}$ 程度の絶対精度が要求されるが、飛翔体上で十分な安定度と精度を持ってベクトル磁場の測定を行うことは容易ではない。全磁力を測定するものとしては、プロトン磁力計や光ポンピング磁力計等があり、絶対精度 $1\text{ nT}$ を確保することは難しくない。しかしながら、現在実用化されているベクトル磁力計は全て相対的な測定しかできないため、安定で精度の高いベクトル磁場測定を飛翔体上で実行することは容易ではなかった。飛翔体である人工衛星により高い精度で地球の主磁場の測定を行うためには、衛星の軌道や姿勢の決定にも高い精度が要求されることも測定を難しくする要因である。例えば、地球磁場を約 $1\text{ nT}$ の精度まで測定しようとする、 $100-200\text{ m}$ 程度の誤差で衛星の位置を決定することが要請される。このような技術的な制約から地球主磁場の研究を主目的とした衛星による磁場観測は、70年代まではスカラー磁力計によるもののみであった。衛星による本格的な主磁場のサーベイは、1979-80年にアメリカの衛星「MAGSAT」により漸く実現された。MAGSATによる観測では、磁場強度約 $60000\text{ nT}$ の地球磁場中で誤差約 $3\text{ nT}$ の精度、即ち4桁以上の精度を持つ精密観測が実施された。

地上に於ける磁場の測定を定常的に行っている地磁気観測所は、現在200程ある。観測所は大部分が北半球にあり、しかもかなりの数はヨーロッパに集中している。従って、地上観測のみにより地球磁場の球関数展開係数を求める場合は、観測点の地域的偏りの影響は本質的に避けられない。また、各々の観測所における測定が必ずしも同一の精度や時間的なスケールで行われていないことも、誤差の原因の一つである。球関数展開による磁場の表現は、これまで5年ごとに国際標準地球磁場 (International Geomagnetic Reference Field: IGRF) として決定され、標準的な地球磁場を表すものとして、地磁気研究の基礎として用いられてきた。MAGSAT観測以前にはこのIGRFの精度は $100\text{ nT}$ 程度と云われていた。

衛星による磁場観測の利点は、同一の精度と確度で短期間に連続的で且つグローバルなデータを取得できることにある。精度、確度ともに初期の目標を達成し得たMAGSATの観測では、約 $10\text{ nT}$ の精度でIGRF係数が決定され得たとされている。一挙にほぼ一桁の精度の向上が達成できたことはMAGSATの観測が画期的なものであったことを示すとともに、地磁気やそれに関連した研究

に大きなインパクトを与えた。

MAGSATの観測は固体地球物理学の研究に貴重なデータをもたらしたばかりではなく、精度分解能の高いデータを提供したことから磁気圏物理学にも大きく寄与した。平均的な地球磁場からの時間的・空間的な変動分として観測される磁気圏や電離圏を起源とする磁場変動を研究する際、基本となる標準磁場の精度の向上が望ましいことは言うまでもない。磁気圏と電離圏の結合に重要な役割を果たす沿磁力線電流の微細構造や惑星間磁場が北を向く際の極冠域における沿磁力線電流の特性などが、MAGSATデータの解析から明らかにされたことは、測定精度の向上の直接的な効果の一例でもある。

衛星による磁場の精密測定が地球物理学の最も基本的な問題の一つである地磁気の成因や地磁気変動に関する研究に資するためには、単発的ではなく継続的に計測を繰り返すことが重要である。衛星による観測を5年程度の間隔で実施し、永年変化や地域的な磁気異常の変化をこれまで以上に定量的に把握することが必要である。地磁気異常の詳細なマッピングは地殻やマントル、特に大陸下の地殻深部の組成や熱構造の解明に貴重な情報となると考えられている。

## 6-2. MAGSAT衛星

MAGSAT衛星は、1979年10月30日に遠地点561km、近地点352km、太陽に同期し常に明け方から夕方の子午面内にある軌道に打ち上げられ、7か月半後の1980年6月1日まで軌道上にあった。太陽同期の朝夕の軌道が選ばれたのは、この軌道が磁気圏・電離圏の電磁現象の影響を受けにくく、固体地球に起因する磁場変化を捉えるには最も良いと考えられるからである。この衛星には、スカラー磁力計としてセシウム(Cs)を利用した光ポンピング磁力計が搭載された。全磁力の測定精度は、約1.5nTであった。ベクトル磁力計としては、NASA/GSFCで開発された環状コアを用いたフラックスゲイト磁力計が採用された。この磁力計はセンサー部のコイルにプラチナを用いるなど熱膨張収縮が最小になるよう設計され、芸術的な技術の結晶ともいえるべきものであった。これにより、各成分とも3nT以下の精度で測定が行われた。磁場のような場の量を飛翔体によって測定する場合には、計測器自体の精度だけではなく、姿勢の決定精度、衛星の位置や時間の誤差が問題となる。MAGSATではこのためいろいろな工夫を凝らし、位置の誤差は500m以下で、姿勢の精度は20秒以下という難しい要求を成功裡に達成した。これによりミッションの要求誤差6nTが満足された。

データの基本的な整理はNASAとUSGS(合衆国地質調査所)に於て行われたが、NASAの公募に応じて選ばれた世界各国の研究者チームにデータが提供されている。我が国では、東京大学の福島教授(現名誉教授)が中心となり、

全国的な研究チームを作りNASAの公募に応じ、いくつかの重要な研究成果を上げている。

### 6-3. 磁場サーベイ衛星に関する国際的な動き

MAGSATの成果を踏まえて、衛星による磁場のサーベイの重要性を認識した地磁気関係者を中心として、国際的な磁場観測衛星に関する作業委員会 (International Working Group on Magnetic Field Satellites: IWGMFS) が組織され、衛星による磁場のサーベイに対する各国の計画の情報交換、衛星打ち上げの働きかけなどの努力が続けられてきた。我が国にも二三の研究者を通じて、日本の衛星による磁場観測衛星の実現の可能性の打診があったが、残念ながら具体的な衛星打ち上げを目的とした計画の立案にまでには至っていない。1987年の夏、カナダのバンクーバーで開かれた国際測地学・地球物理学連合 (IUGG) 総会に於ては、国際地球電磁気学・超高層物理学協会 (IAGA) の第5分科が衛星により磁場サーベイの重要性・緊急性を取り上げ、地球および惑星磁場サーベイ衛星作業委員会を設置し、IWGMFSに代わり各国の宇宙開発担当機関に積極的に働き掛けを行うなど更に組織的な活動を始めることとなった。

現在計画中のプロジェクトとして実現性が高いものとしては、NASAとフランスのCNES (Centre National d'Etudes Spatiales) の共同観測計画として準備が進められている1993年打ち上げを目標としたMFE/MAGNOLIAがある。この共同実験では、NASAとCNESがそれぞれ磁力計を用意し、同一のプラットフォーム上で冗長度を持たせた測定を行う計画が進められているが、予算は未だ承認されていないようである。IAGAの衛星作業委員会は、1987年IUGG総会中にまとめたいくつかの勧告の中で、この計画を積極的にサポートするとともに、他の国のこれに引き続くミッションを計画することを強く希望している。また、ESAが計画中の重力観測衛星GRADIOにNASAが磁力計を提供する形で参加し、できうれば160km程度の低高度で重力と磁場の同時測定を行うことを勧めている。また、この他の計画、例えばスペースステーションプログラムの中に半恒久的な磁場観測計画を織り込むなど、があれば積極的にサポートする姿勢を示している。

我が国における地磁気研究は、固体地球物理学、磁気圏・電離圏物理学のどちらの分野でも国際的に高い評価を受けてきた。また、日本における地磁気の研究は、大学の研究者ばかりではなく、気象庁地磁気観測所、国土地理院、地質調査所、海上保安庁水路部等でも活発に行われており、衛星を利用した磁気測定の計画を遂行する十分なポテンシャルを持っている。こうしたポテンシャルを生かし、我が国でも国際的な研究動向を考慮して、地球主磁場サーベイ衛星を早急に計画すること必要と思われる。この際、大学関係の研究者ばかりではなく、当然これ

らの現業官庁の関係者をも含めた広範囲の研究者による計画の検討が必要である。

#### 6-4. 衛星観測に対する要望

人工衛星による磁場の測定では、これまで圧倒的にアメリカが世界をリードしてきた。磁力計の技術的な面だけを取り上げても、MAGSATによる高精度計測、VOYAGERによる微小磁場計測などから分かるように、アメリカの技術力は他を圧倒している。残念ながら、我々が持っている衛星による磁場計測の経験は少ない。わが国の衛星観測で、低高度衛星に姿勢計として磁力計が搭載されたことは少なくないが、これらの場合は、精度の低いものであり本格的な磁場測定とはいえないものであった。1980年代に入り、磁気圏や惑星間空間探査を目的とした探査機、宇宙科学研究所の探査機「じきけん」や「さきがけ」により、ようやく微弱磁場測定が実施された。現在進行中の計画としては、1989年打ち上げ予定のEXOS-D及び1992年のGEOTAILに磁力計が搭載されることになっている。磁気圏尾部の探査や磁気圏境界面や衝撃波の精査を主目的としているGEOTAILでは、数10 nT以下の微弱磁場の計測が主となるが、遠地点を約10000 kmとする極軌道衛星EXOS-Dでは、14ビット分解能の高精度計測が計画されている。

今後の地球周辺や惑星探査などのプラズマ環境の直接測定においては、磁場の計測は最も基本的なものとして、上記の観測の実績の上に立って計画に組み入れられると考えられる。しかしながら、地球主磁場のサーベイを目的とする衛星観測の実施計画を策定するためには、関係研究者による具体的な働きかけが必要と思われる。将来磁場サーベイ衛星を計画するとすれば、技術的には、EXOS-Dで培った技術の延長としてベクトル磁力計の開発に取り組むべきものと思われる。スカラー磁力計に関しては、柿岡地磁気観測所が光ポンピング磁力計を絶対磁力計として長年使用しており、世界的にも定評のある観測技術を持っている。この観測所で使用しているCs光ポンピング磁力計は国産であり、これらの技術を生かして、新しい衛星搭載用の磁力計の開発に進むべきであろう。

主磁場や地磁気異常の研究から見ると、永年変化を精度良く継続的に測定することが基本的に重要である。このためには、5年から10年程度の時間スケールで、決まったインターバルを設定し、測定を繰り返すことが最も有効な手段である。また、地殻の局所的な磁気異常を測るためには、可能な限り低高度で飛ぶ衛星が望ましいがこのような衛星の寿命は短い。従って、数年程度の寿命を持つ比較的高い高度を持つ衛星と、200-300 km程度の高度で精密観測を行う衛星を交互に打ち上げるといった計画が、国際的な協力のもとに立案できれば最も効果的なものとなる。

1993年打ち上げを目標とし国際的な共同計画として米仏による磁場サーベ

イ衛星が計画されているように、今後のこの種の計画は国際的なものとしてのみ存在意義がある。計測用センサーや衛星の製作、衛星の打ち上げは、一二の国のみで行うとしても、データは世界中の研究者に公開されるべきものである。

磁場サーベイ衛星はその性格からみて、いわゆる実用衛星の範疇に入れられている地球観測衛星と科学研究のための衛星との中間に属するものと考えられる。

目的からいえば、純粋に学術的ともいえるが、磁場測定が現業官庁の業務としても実施されていることから判るように、磁気図の作成等基礎的且つ実用的な解析も重要な研究目的である。

磁場サーベイ衛星で最も重要なことは、姿勢が安定であり秒オーダーまでの絶対姿勢決定が可能なことであり、軌道については500m以下の追跡精度が要求される。従って、国内の追跡だけではなく国際的な協力の下に組織化された軌道追跡が必要となろう。MAGSATと同じ程度の観測を行うためには、センサーとしての高性能磁力計の製作ばかりではなく、衛星本体からの磁気的な影響を避ける工夫など衛星システム全体の設計に関わる難しさもある。衛星本体の磁場の影響を避けるためには通常は磁力計を特殊なプラットフォームに配置しブームにより本体から離すが、この場合は衛星とプラットフォーム間の姿勢を正確に測定しなければならない。非磁性の計測器を製作することは難しいため、スターセンサー等の高精度姿勢計は衛星本体上に置かれるため、衛星とプラットフォーム間の微小な姿勢の変化を検出する必要が生ずる。MAGSATではこのためにレーザーが使用された。

データ処理についていえば、姿勢決定の処理を含めてルーチン的ではあるが高度な取り扱いが必要であるので、組織的なデータ処理態勢を組める現業機関の支援が不可欠であろう。気象庁地磁気観測所、国土地理院などがこのようなデータ処理の中核となり得よう。打ち上げ時期は、現在進行中の米仏の共同計画が1993年打ち上げを目標としていることを考慮すると、1998年頃が今後の計画としては妥当と考えられる。

#### 6-5. 研究推進の方策

NASA/CNESの計画は、未だ予算が承認されていないようであるが、1993年に第二番目の磁場サーベイ衛星が実現するとして、日本で計画する衛星は1998年頃を目標とするのが、現在では妥当なところであろう。衛星や搭載計器の製作としてエンジニアリングモデルに2年、フライトモデルに3年を充てるとしても、1989年度からスタートすれば3年間を、国際共同計画としての立案、国内の研究組織の確立および機器の開発に充てることができる。

国内の研究組織としては、前にも述べたように、大学関係者のみでなく、当然気象庁地磁気観測所、国土地理院、地質調査所、海上保安庁水路部など、現業官

庁の研究者を含めて構成されるべきものである。全体計画の取りまとめ、国際的な対応を図ることの他、機器の開発としては、ベクトル磁力計およびスカラー磁力計の開発などが考えられる。また、弱磁場測定のため、磁力計はプラットフォームに取り付け衛星本体からブームにより5-10m程度離すことになるが、このための非磁性プラットフォームや衛星本体とこのプラットフォームの間の相対姿勢を測定する機器の開発も必要となる。これらの開発は、2-5名程度で構成される機器開発サブグループにより実施されよう。磁力計の開発は、大学と地磁気観測所の研究者を中心として進めるとしても、姿勢の計測を含めたプラットフォームの検討は、航空磁気測量に深い経験を持つ国土地理院、地質調査所や水路部の関係者が主となって実施されるのが適当であろう。また、飛翔体上で4桁以上の精度を持って磁場ベクトルを測定するためには、姿勢の決定など高度のデータ処理を必要とするので、これに対するサブグループも考慮すべきであろう。

地球磁場計測衛星のミッションを設定する場合、2つのケースが考えられる。1つは、衛星をできるだけ低高度で飛ばし、短期間であっても局所的な地磁気異常を詳しく測る場合、もう1つのケースは、地域的な分解能は少々犠牲にしても、衛星の高度を上げて時間的に長いミッションを計画する場合が考えられる。前者は技術的に相当難しい問題が予想されるので、日本における最初の計画としては、400-500kmの高度を持つもの軌道とし、ミッションライフ1-2年程度の観測計画を策定することが適当であろう。磁場計測の場合は姿勢の安定性が最も問題となるため、非スピンの三軸制御衛星となるが、MAGSATのように軌道を太陽同期とし、太陽方向に対して常に固定された軌道とするかどうかは計画段階で十分検討する必要がある。

## 7. 観測装置

### (概要)

地磁気観測には、光学式磁力計に代表される伝統的な測定機器類がかなり使用されているが、最新のエレクトロニクス技術を応用した新しい計測機器も数多く導入されている。特にデジタル記録やデータ処理における進歩は、時代に即応したものとして当然であるが、衛星等の飛翔体観測のために開発された技術を土台にした発展も著しい。

観測所の定常観測のうち絶対観測には、磁場強度の測定にプロトン磁力計、光ポンピング磁力計、磁場方位の測定に絶対磁気儀が使われることが多い。変化観測には光学式磁力計が用いられてきたが、最近ではフラックスゲート磁力計の性能が向上し、光学式磁力計にとってかわる傾向がみられる。観測所の観測については、ますます高精度の安定した観測が要請されるようになってきた。技術の進歩に伴い、必要とされながら、これまでできなかった地域での固定点定常観測の実現への期待が高まっている。海底観測所の建設や静止衛星による連続観測などこれからの課題である。また陸上においても、完全自動化による観測の無人化は、南極のような厳しい自然環境での観測や、人工擾乱を避けるための僻地での観測などにとって避けられない問題である。

磁気測量の面では、航空機や船舶を利用した磁気測量が活発に行われている。観測精度も向上しつつあるが、機体磁気あるいは船体磁気の除去と測定点の正確な位置決定がいぜんとして大きな課題である。

電磁誘導を利用した地球内部電気伝導度探査には広い周波数帯の電磁場変化の観測が必要である。現在はVLF帯、ELF帯、ULF帯、それぞれの周波数帯で精度をあげた観測がなされている。

最近注目されているのは海底磁力計や衛星搭載用磁力計の開発である。海底磁力計はほぼ実用化の段階の達し、量産化の問題が残されているが、衛星搭載用の磁力計については、磁力計をとりつけるブームの問題や磁力計の姿勢決定の問題などなおいくつか解決を要する問題がある。人工衛星による磁場観測は、その重要性からいって、わが国でも早急に取り組むべき課題である。



地磁気観測には、伝統的な測定機器類がかなり使用されているが、最新のエレクトロニクス技術を応用した新しい計測機器も数多く導入されている。特に、デジタル記録やデータ処理における進歩は、時代に即応したものとして当然であるが、衛星等の飛翔体観測の為に開発された技術を土台にした発展も著しい。ここでは、観測所で定常観測に用いられている機器、航空機や船舶を利用した磁気測量、研究観測を目的とし機動性を考慮した移動観測用の測定器、ロケット・人工衛星搭載用に設計されたものなどについて、現況、問題点をまとめた。また、観測の無人化など、将来の観測技術についても簡単に述べる。

## 7-1 絶対観測

絶対測定の目的は、変化観測により得られる地磁気各成分と絶対観測から得られる変化観測の基準となる値（基線値）とから観測所の各成分の代表値を決めるための重要な観測である。絶対測定の種類は変化観測の安定度にもよるが、通常は週1-2回の割合で行われており、国際的にもIAGAの観測所に関する作業委員会から絶対観測は毎週行うよう勧告されている（IUGG No.18 General Assembly, Hamburg 1983, Circular Letter）。

絶対測定に使用される測定器は、全磁力（F）が精度よく容易に求められるプロトン磁力計が開発された1960年代からは、プロトン磁力計によるFと磁気儀による伏角（I）と偏角（D）の測定が主として採用され、FとIから水平分力（H）と鉛直分力（Z）が求められている。

$$H = F \cdot \cos I \quad (7.1)$$

$$Z = F \cdot \sin I \quad (7.2)$$

一部の観測所では成分測定用のベクトルプロトン磁力計なども使用している。また、柿岡の標準磁気儀観測装置では光ポンピング磁力計により各成分絶対値を毎秒計測し、比較校正装置（プロトン磁力計と角度測定器）により、週1回の検定を行い、正しい絶対値に校正するなど高度な観測装置も使用されている。これらの測定器の特性、問題点などについて次に記す。

### 7-1-1 プロトン磁力計

核磁気共鳴を応用した磁場の絶対値を測定する測器である。被測定磁場Fと垂直になるように置いた励磁コイルの内側に水を入れ、水のプロトンを磁化する。磁化が平衡に達した後急速に励磁電流を切ると、プロトンの磁気モーメントは被測定磁場のまわりをラーモア核周波数で歳差運動する。この歳差運動の周波数と磁場の関係は

$$2\pi f = \gamma_p \cdot F \quad (7.3)$$

ここで、 $\gamma_p$ はプロトンの磁気回転比で、 $\gamma_p = 2.67513 \times 10^4$  (rad/gauss.sec)と与えられる (IAGA 1960, HELSINKI No.7)。励磁コイルを検出コイルとして回転フラックスによる起電力を検出する。これを増幅して周波数を測定すれば (7.3) 式によって磁場の強さ  $F$  が求められる。これがプロトン磁力計の原理で、周波数測定によって比較的簡単に精度良く磁場の絶対値が測定できることから、国際的にもこのプロトン磁力計の使用が勧告されている (IAGA, 1963 BARKELEY No.9)。図7-1にプロトン磁力計の原理を示す。測定精度に大きく影響を与える要素としては、検出器材料の磁化と雑音である。励磁磁場は数10 Gauss程度であるのでコイル構成材料の磁性不純物の少しの存在でも測定誤差の原因となる。雑音の対策として同調や通倍などのほか検出コイルをトロイダルコイルにするなどの改善が行われている。

プロトン磁力計を用いて成分測定をするには、ヘルムホルツコイルにより補償磁場を作り、水平成分を測定するときは鉛直分力を、鉛直分力測定るときは水平分力をそれぞれほとんど消去することによって測定することができる。通称、ベクトルプロトン磁力計と呼ばれているが、それぞれの消去磁場の水平または垂直からのずれの誤差を除くため  $180^\circ$  回転位置で測定するなど安定な機構部 (架台) を必要とする。また偏角を測定するには、経緯儀と同様望遠鏡などの装置が必要である。現在使用されているプロトン磁力計は原理的に励磁と測定を繰り返す間欠測定であることが欠点の一つとされているが、最近、連続測定が可能なオーバーハウザー型プロトン磁力計がカナダで開発されつつあり、検出器の小型計量化や絶対値の安定性などの実用試験の結果などに注目すべきであろう。

### 7-1-2 光ポンピング磁力計

原子のゼーマン効果を利用して磁場の強さを測定する磁力計である。原子を磁場内におくと、ゼーマン効果によりエネルギー準位は副順位に分離する (図7-2)。磁場  $F$  が十分に弱い場合は副順位間隔に相当する角周波数は近似的に  $2\pi f = \gamma_0 \cdot F$  とあらわされる。 $\gamma_0$ は基底順位の磁気回転比である。この周波数  $f$  が測定できれば磁場の強さ  $F$  を知ることができる。

光ポンピング法によって右まわり円偏光を照射すると励起状態の副順位のうち磁気量子数が  $+1$  となる上の副順位へのみ励起される。これを繰り返すうち基底状態の上の副順位に原子は集中する。これが光ポンピングである。この状態に周波数  $f$  の電磁場を加えると、ゼーマン遷移をおこして原子は各副順位に再配分され、再び光を吸収して光リポンピングが始まる。この原理を応用したのが光ポンピング磁力計である。原子としてはアルカリ金属のセシウムやルビジウムが用いられる。

通常は図7-3に示すように光ポンピングの光学系を含めて発振器とする原子

発振方式が使われる。

セシウムランプからの光は、セシウムガスを封入したセルを透過して光検知器により電気信号に変換され、増幅、位相変換してセルに巻いたコイルに与えられる。磁場と光軸とのなす角を $45^\circ$ としておくと、平行光は光ポンピングの作用をし、垂直光は周波数 $f$ で変調される。

したがって、光検知器の出力を図7-3のようにフィードバックした系を適当に調整すれば周波数 $f$ の発振器として働き、この周波数を測定することによって磁場の強さ $f$ を知ることができる。この光ポンピング磁力計では磁場に比例する周波数信号を連続して得られ、分解能が $0.01 \text{ nT}$ に達することがプロトン磁力計よりも優れている。

しかしながら、絶対値の確度については、検出器周囲の温度、光軸と磁場の間の角度、光の強さなどによって発信周波数が微妙に変化する問題があって、この点がプロトン磁力計よりは劣っている。光ポンピング磁力計とプロトン磁力計の比較測定から、光ポンピング磁力計測定値を校正して器機常数として適当な頻度で検定しておけば、光ポンピング磁力計は地球磁場の連続測定器としてもっとも優れている。成分磁場を測定するにはベクトルプロトン磁力計と同様に補償磁場をつくるコイル系が必要である。

気象庁地磁気観測所では1972年より、光ポンピング磁力計を主体とした標準磁気儀KASMMER(Kakioka Automatic Standard MagnetMetER)により成分磁場の常時観測が行われている。1981年-1984年にかけて、このシステムの計測部、データ処理装置が部分更新され、測定精度の維持が図られた。このシステムの概要は次のとおりである。

#### KASMMER標準磁気儀システム

KASMMERシステムは光ポンピング磁力計4成分(F、H、Z、D)、プロトン磁力計(MO-PK)と角度測定器(DI-72)からなる比較校正装置ならびにデータ処理部によって構成されている(図7-4)。光ポンピング磁力計は $0.1 \text{ nT/}$ 週程度の安定度が保たれるよう温度制御その他に充分な配慮がなされている。光ポンピング磁力計の出力信号周波数はカウンタで毎秒計測され、デジタル値として処理装置に供給される。またこの出力周波数は電圧信号に変換され、アナログレコーダーにより記録される。光ポンピング磁力計は毎週行われる比較校正観測によって定数の検定がなされ、絶対値の精度が維持されている。光ポンピング磁力計の校正された測定値は4成分間の自己相互比較とプロトン磁力計測定値とから常にデータの質がチェックされ、万一精度の低下が検知されると自動警報ブザーにより異常が知らされる。

毎秒デジタル値は磁気ディスクに記憶され、磁気テープに編集ののち毎分平均値、あるいは毎時平均値等が計算処理され、世界資料センター等への資料の提供

が行われている。最近のデータ提供の要請は、高精度、高分解能なものとなりつつあり、特に衛星データの解析研究には地上観測の高分解能データは不可欠のもので、これからは毎秒値の利用の増加が見込まれる。

今後さらに観測精度、分解能の向上をはかる必要がある。同時に雑音の少ない観測環境をいかにして維持するかも重要な問題である。

### 7-1-3 絶対測定用磁気儀

#### 気象庁地磁気観測所

地磁気3成分(H、Z、D)の絶対値を測定するには通常プロトン磁力計と磁気儀が用いられる。即ち、全磁力をプロトン磁力計により、伏角及び偏角を磁気儀により測定し、全磁力と伏角の組合せからH、Zが求められる。偏角は磁気儀により方位標からの角度が測定され、真方位の補正(年1-2回測定)をして絶対値が得られる。このように磁場の方向を測定する経緯儀を磁気儀と呼んでいる。気象庁地磁気観測所において使用されている磁気儀について次に記述する。

KASMMERシステムの比較校正装置の角度測定器(DI-72)は、従来の磁気儀がサーチコイル回転軸方向により磁場の方向を検出していたのに対して、この磁気儀はヘルムホルツコイルによって磁場の方向を検出する。即ち、磁気儀のヘルムホルツコイルに安定な電流を流し、自然磁場を殆ど消去しておき、残存する横方向の磁場を回転コイルで検出してこの磁場が零になるようにヘルムホルツコイルの方向を調整する。横方向磁場が零になったときヘルムホルツコイル軸は地球磁場の方向と一致している。この方法によると、回転コイル軸にクリアランスがあっても零検出器として使うだけなので測定誤差の原因とはならないよう改良・工夫されている。偏角測定の基準となる方位標測定や、真方位観測のための望遠鏡は他の磁気儀と同じく備えつけられている。水平、鉛直の目盛盤は、マイクロメーターで最小1秒目盛、読取分解能は0.2秒となっているが、総合観測精度を考慮して1秒単位の読取りで測定が行われている。なお、回転コイルの起電力の検出には10 Hzの低雑音増副器と信号表示器としてシンクロスコープが使用され、信号の位相も表示されるので磁気儀の調整は容易となっている。

女満別においてはDI-72型と測定原理が同じのDI-75型角度測定器が、鹿屋においては回転コイル軸により磁場方向を決めるM0型磁気儀が使用されている。磁場方向の絶対測定は、一部に改良・工夫がなされたものの、全体としては30年前にくらべて大幅な進歩はなかったように思われる。今後の課題としては零磁場検出法の改善、目盛讀取りの自動化、真方位決定法の改善等偏角絶対値の自動測定法の開発が急務であると考えられる。

## 国土地理院

G S I 型一等磁気儀は昭和 22 年 11 月、国土地理院（当時地理調査所）で開発され、試作、実験観測の後、昭和 25 年に完成して以来、広く地磁気測量に使用されている。この磁気儀はアースインダクター型で、地磁気の偏角、伏角だけでなくヘルムホルツコイルを備え人工磁場を加用して、全磁力の測定も出来るよう設計され、地磁気三成分を観測することができる。現在プロトン磁力計が実用化され、容易に全磁力が測定できるようになったので、今日では偏角、伏角の測定にのみ使用されている。昭和 27 年、この磁気儀を小型にした二等磁気儀が完成した。

### 磁気儀の原理

一様な磁場の中でコイルを回転すると起電力が発生する。発電機と同じ原理である。起電力  $e$  は

$$e = A \omega \sin \theta \sin \omega t \quad \text{で表される。}$$

ここで  $A$  : コイルの形状、大きさ、巻数によって定まる定数  
 $\theta$  : 磁場の方向とコイルの回転軸のなす角  
 $\omega$  : コイルの回転角速度

式から明らかな様に  $\theta = 0$ 、即ち磁場の方向とコイルの回転軸が一致すると起電力は零となる。

磁気儀はこの様な回転コイルを、経緯儀の水平軸、鉛直軸の中心に組み込んである。回転コイルの軸は、経緯儀の水平軸、鉛直軸のまわりを  $360^\circ$  任意の方向へ向けることができる。コイルを回転しながら、起電力零の方向を見だし、その方位（偏角）を水平輪盤で、鉛直角（伏角）を鉛直輪盤で、読み取ることができる。もちろん、偏角を求める場合、北極星（太陽）の観測を行い水平輪盤上であらかじめ真北方向を求めておく必要がある。通常、方位標を設置し、その方位角を求めておく。磁気儀には星や方位標を観測するための望遠鏡が取り付けられている。磁気儀の軸誤差にともなう観測誤差は、経緯儀による角観測の場合と同様な処理が行われる。

地磁気を観測すると言う特殊性から、磁気儀に使用する金属材料は全て非磁性でなければならず、かつ、純度の高いものが要求される。写真に磁気儀を示す。磁気儀の右にあるハンドルを毎秒 1 回転の割合で回すと、コイルは 10 回転する、従ってコイルに誘起される電圧は、10 Hz の交流電圧となり増幅器で増幅した後、整流してメーター等で出力電圧が表示される。ハンドルを廻しながらコイルの回転軸を動かし出力電圧零（最小）の方向を見いだす。その方向を水平、鉛直輪盤から読み取り、偏角、伏角を測定する。

回転コイルは特殊な形状のポピンに、細い銅線が 1 万回以上も巻かれており、その出力電圧はおよそ  $0.6 \times 10^{-6} \Delta F \text{ volt}$  である。  $\Delta F$  は n T で表した



磁場の強さである。変化する微弱な出力電圧のなかから、その最小値を見いだすため、出力電圧は増幅器を用いて増幅される。その増幅度は120 db (10°)以上で、しかも入力電圧が極めて小さいので、内部で発生する雑音電圧を極力避けるため、ローノイズの設計をするとともに、帯域幅を狭くする必要があり、中心周波数10 Hzのバンドパスフィルターが設けられている。また、コイルの巻線抵抗等による熱雑音が発生する。これら雑音のため、磁場の方向と回転コイルの軸が一致しても、出力電圧は必ずしも零にはならないが最小点を見いだせば、0.1 nT程度の分解能を持っている。このため、偏角、伏角の観測精度は地磁気の水平分力、全磁力の大きさに若干影響を受けるが、充分0.1'の分解能がある。出力電圧の表示には、メーター或は数個のLEDを並べ電圧が小さくなるに従い順次消灯していく方法が用いられる。増幅器の配線には、ツイストペア等外部に直流磁場を作らないよう配慮するとともに、電圧計等メーターを使用する場合は注意が肝要である。観測の際、ハンドルの回転が毎秒1回からずれると、発生する電圧の周波数がずれ、フィルターで大幅に増幅度が低下し、十分な分解能が得られなくなるので注意しなければならない。

磁気儀で正確に偏角、伏角を測定するためには磁気儀の検定が必要である。検定は地磁気観測所の絶対観測室で、その標準とする磁気儀と比較観測を行い、器差を求める。0.1'～0.3'程度の器差がみられる。通常、野外での測量の前線で比較観測を行っている。また、磁気儀には砂鉄等磁性物を含む恐れのあるほこり等が付着しないよう気をつけなければならない。

## 7-2 変化観測

地球磁場は時間的に余り変化しない部分が大きく、それに重なって比較的小さい変化部分がある。日本中央部においては、全磁力は46000 nTでいどであるのに対して変化部分は、日変化で通常数10 nT程度、磁気嵐の著しい擾乱でも1000 nT以下である。したがって、測定は通常絶対測定と変化測定に分けて行われている。10年前までは、変化観測用測定器として吊磁石式変化計による写真記録方式が長い間採用されてきたが、性能の良いフラックスゲート磁力計の開発が進み、また3成分のデジタルデータの必要性が高まり、国内の観測所においては、毎分値、毎時値のデジタルデータはフラックスゲート磁力計により、磁気嵐等の現象、K-指数等の読取報告ならびに自記記録コピーの世界資料センターへの報告には吊磁石変化計による写真記録を使用するのが最近の状況である。

### 7-2-1 光学式磁力計

光学式磁力計は吊磁石変化計、光源器及びドラム式記録器により構成される。測定の原理は磁石を鱗青銅または水晶糸により吊し、磁石と共に回転する鏡に光

を当て反射してくる光を時計により回転するドラム上のプロマイド紙に光点を結ばせ写真記録する古典的な方法である（図7-5）。通常、水平分力、鉛直分力及び偏角の3成分の変化とそれぞれの成分の基準線（基線という）ならびに刻時マークを1日1枚の記録紙に記録する。記録速度は20 mm/時、記録の寸法値は中低緯度の観測所では2.5 nT/mm程度とすることが国際的にとり決められている。各成分の変化分は基線からの変位量（寸法値×讀取値）で示され、絶対観測値から該当する時刻の変化量を差し引くことにより基準線の値が求められる。この基準線の値は基線値と呼ばれ、週1-2回の割合で行う絶対観測日間の基線値は、変化計の温度等の補正が施されて決められる。

光学式磁力計は暗室を使用し、写真処理するまで変化の状況を見ることができないなどの不便さがあり、変化計からの反射光を光電素子などで受けて電気信号に変換し、変化分に相当する電流を変化計のヘルムホルツコイルに逆向きに流し、その電流を明るい部屋で記録する等の方法が幾つかの観測所で実施されたが、現在はフラックスゲート磁力計による測定が主流となっている。

#### 7-2-2 フラックスゲート磁力計

フラックスゲート磁力計は、磁場中におかれた強磁性体の飽和特性の非対称性を利用したものである。磁場が無い場合、強磁性体コアを数kHzから20kHz程度の低周波で十分に飽和するまで励振すると、コア内の磁束密度は正負対称の変化を示すが、外部磁場があると対称性が崩れる。強磁性体コアを飽和するまで励振したときの磁束密度の変化を二次コイルで検出し、非対称性によって生ずる二次高調波成分から外部磁場を測定する。励振磁場が測定磁場より充分大きければ、第二高調波成分が測定磁場に比例することを利用して、磁場を測定するのがフラックスゲート磁力計の原理である。また、励振波に対する位相から磁場の方向も知ることが出来る。

センサーとしては、これまで2本のロッドコアを用いるものやセラミックの筒の上にパーマロイ箔をヘリカルに巻いたもの（Helifluxと呼ばれショーンステッド社の特許となっていたもの）がよく使われてきた。最近では、環状コアがフラックスゲートセンサーとしていろいろな利点を持っていることが判り、衛星用の磁力計としてだけでなく地上観測用にも使われるようになってきた。環状コアセンサーは、Gordon, et al., (1968)により改良され、オフセット及びノイズの非常に少ないものになった。彼らは磁歪の小さい磁性材料 6-81.3 モリブデンパーマロイと、この磁性材料と熱膨張係数がほぼ等しいステンレス（Inconel X-750）の巻枠を用い高性能環状コアを実現した。

図7-6はフラックスゲート磁力計のブロック図の一例である。センサーからの出力のうちの第二高調波成分は、センサーコイルとCとの並列共振により効果



的に取り出される。この信号はフィルター・増幅器を通り励振の二倍の周波数の同期信号で検波される。検波出力は適当な時定数で積分され、その出力は抵抗或は定電流回路を通じてセンサーコイルにフィードバックされる。フィードバックにより、常にセンサー内部の磁場を零にするような閉ループ回路を採用することにより安定化をはかる。外部磁場の値はフィードバックの電流量に比例する。

フラックスゲート磁力計はプロトン磁力計などとは異なり相対的な磁力計である。閉ループフィードバックにより安定化を計っているが、精度やリニアリティの変化、オフセットや温度ドリフトなどに対して長期安定度を保つことはそれほど容易ではない。従来、感度や基線の温度ドリフトがもっとも問題となっていた。センサーコイルや外部磁場補償回路を含めたフィードバック回路系の温度ドリフトに問題があった。しかし、演算増幅器や超安定抵抗などの電子部品の進歩やコアの改良によるフラックスゲートセンサーの高性能化により、観測所の標準磁力計としても使用に耐える性能を持つフラックスゲート磁力計も実現しうようになってきている。よく設計されたものでは、ノイズ： $0.01nTRMS(f < 1Hz)$ 、温度係数： $\sim 2ppm/^{\circ}C$ 程度の性能が実現しうる。次表は、MAGSAT衛星に搭載された磁力計の性能を示したものであるが、コイルの巻棒やセンサー台（結晶化ガラス：マコール）、巻線（プラチナ線）の材料を吟味し、センサーコイルの抵抗の温度変化を積極的に補償する定電流回路を採用するなどして、このような高い精度安定度の磁力計を製作した。

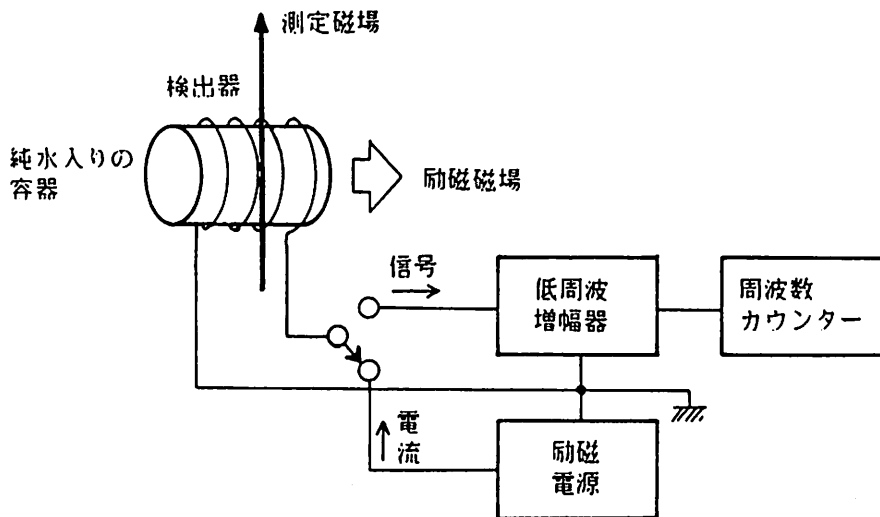


図 7-1 プロトン磁力計の原理

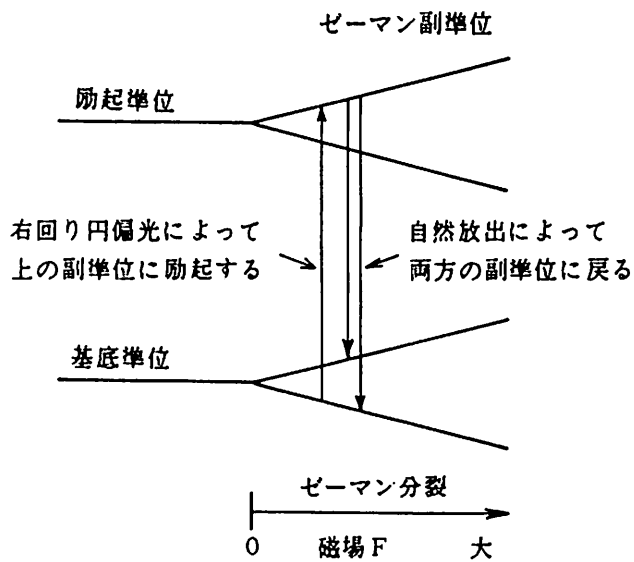


図 7-2 光ポンピングの概念

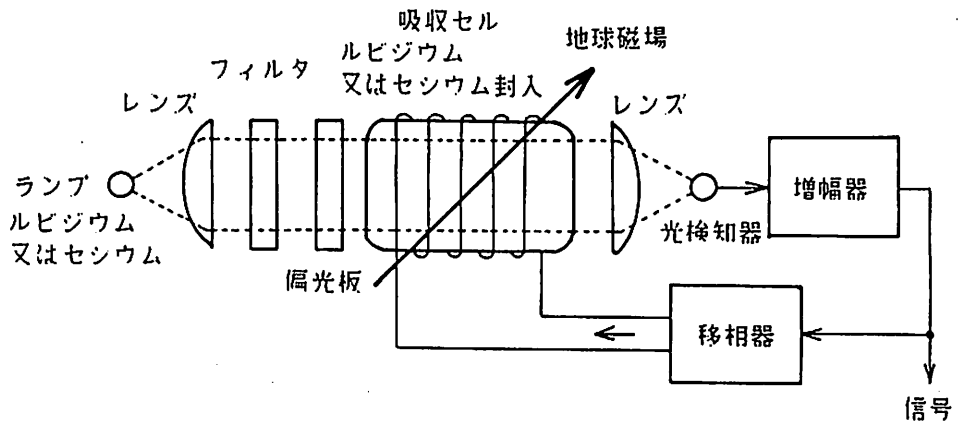


図 7-3 光ポンピング磁力計の原理

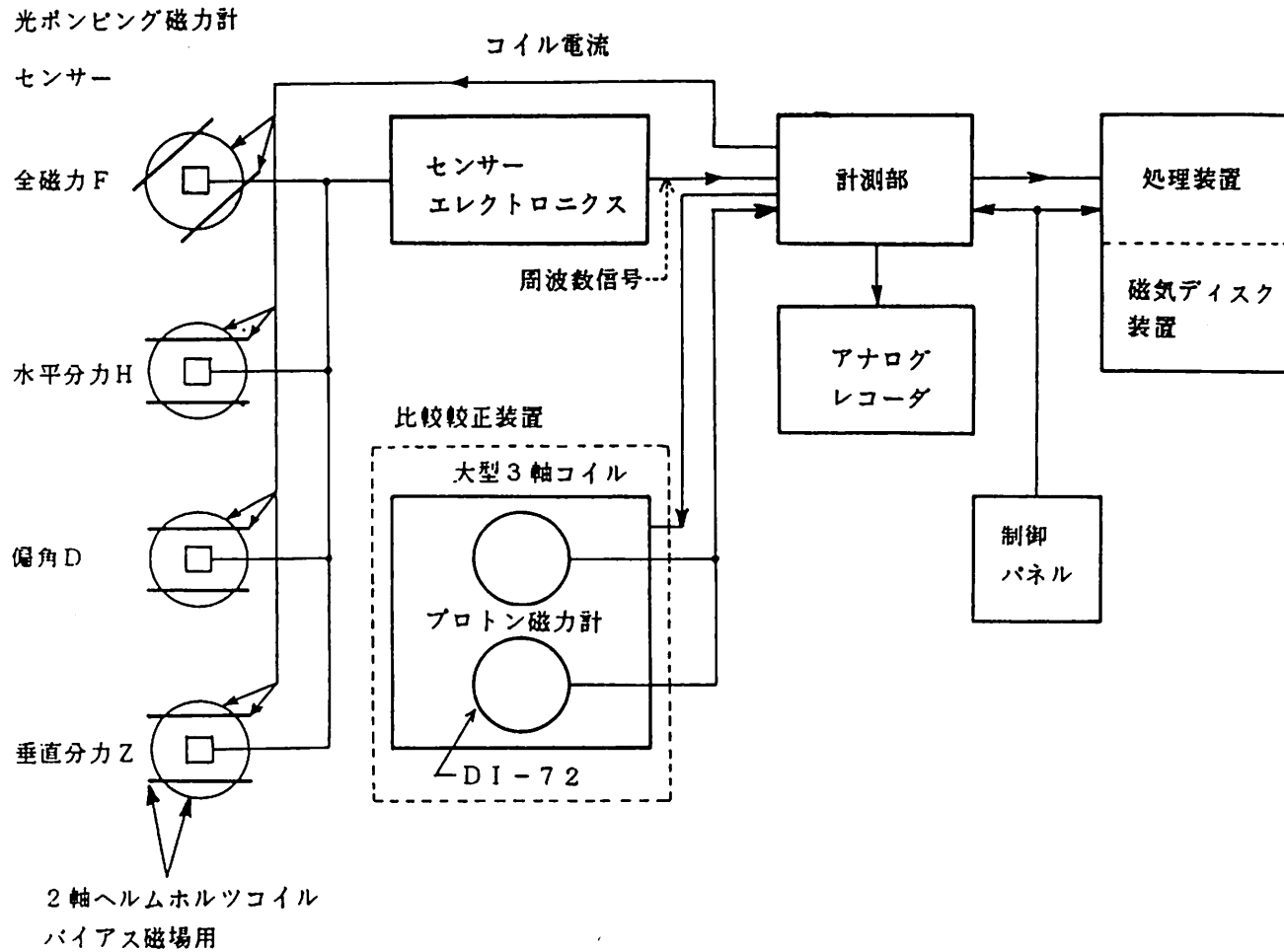


図7-4 KASMMER標準磁気儀 構成図

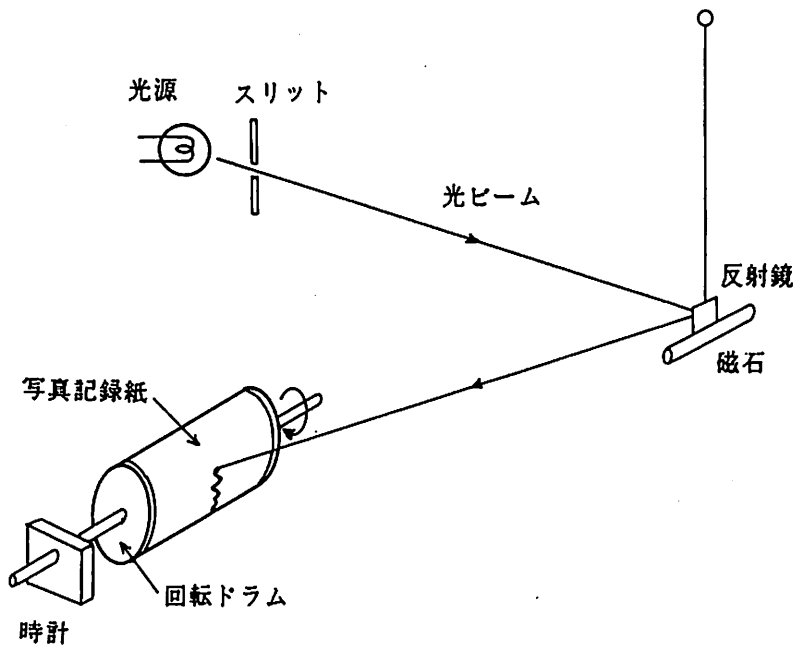


図 7-5 光学式磁力計 概念図

## 7-3. 磁気測量・移動観測

### 7-3-1 航空磁気測量-I

航空磁気測量では、航空機を利用することにより、広範囲にわたる地磁気を迅速に測定する。この空中での測定値には、磁場の場所的な変化のほかに時間的な変化も含まれるので、一般に地上定点での磁場の連続観測結果を用いて、経時変化分の補正（化感と呼ばれる）を行う。この補正済磁気値は、さらに同時刻の位置測定結果と対応され、磁場の空間分布が得られる。

航空磁気測量としては、地磁気的全磁力成分のみを測定する場合と、3成分をも測定する場合とがある。航空機の空中での姿勢は絶えず変化しており、方向成分を精度よく測定することは困難を伴うが、全磁力成分の測定はプロトン磁力計の出現により非常に高精度かつ容易に行えるようになった。方向成分の測定には方位の検出が不可欠であるが、実際には0.1度程度の精度が実情であり、総合的な精度の上で全磁力測定に比べて1桁以上劣ることは否めない。

#### 空中磁力計

空中での全磁力測定には、通常、プロトン磁力計が用いられるが、航空機は高速であるので、地磁気の変化を正しく捉えるためには、測定周期を短くする必要がある。プロトン磁力計センサーからのラーマー信号は、磁力値（全磁力）に比例した周波数の信号であるので、この信号を直接周波数カウンターに入力することによって磁力値に変換できるが、ラーマー信号は2kHz程度であり、1nT分解能の測定を行うためにも20秒以上を要することとなる。これは実用的でないばかりか、ラーマー信号の減衰のため測定自体が不可能になる。ラーマー信号を精度よく短時間に測定するためには2つの方式がある。1つは周波数てい倍方式と呼ばれ、電圧制御発振器(VCO)をもった位相同期回路によって、数100倍の周波数の信号を得て、これを周波数カウンターに導く。もう1つは、逆数方式と呼ばれ、周波数のかわりに周期を精密に測定したのち、その逆数演算を行う。プロトンの歳差運動は、励磁によって揃えられた位相が時間と共に不揃いとなりラーマー信号も減衰するが、測定間隔が短い場合には歳差運動の位相がまだ比較的揃っている状態で次の励磁電流を流すこととなる。このとき、励磁電流を流すタイミングをうまく調整してやると、S/Nの良いラーマー信号が得られ、測定精度の向上に寄与できる。このような操作を同期励磁と呼ぶ。空中プロトン磁力計では、これら技術が駆使され、分解能0.1nTで1秒以下の測定間隔のものが実用化されている。なお、空中磁力計用センサー内のプロトン源としては、測定間隔との関係で水よりも緩和時間の短いものが適しており、ケロシンやガソリンが用いられる。

## 機体磁気補償

空中磁力計を航空機に搭載するにあたっては、航空機自体の発生する磁場の影響を除く必要がある。古くは、非磁性の容器にセンサーを収容して機体から遠ざけて曳航するバード方式がとられたが、安全性と経済性の両面から、今日ではセンサーを翼端もしくは機尾に設けられた突起部に収容するスティングァーが専ら用いられる。スティングァー方式では、機体磁気の影響を補償することが不可欠となる。

機体磁気補償の方法は、ハードウェアによる場合とソフトウェアによる場合に大別される。前者は機体磁気の影響を打ち消すためさらに別の人工的磁場を加える方法であり、後者は機体の姿勢データを取得してデータ処理の過程で補正を行う方法である。しかし、後者の場合には機体の姿勢データの取得に伴う誤差が補正に影響することとなるので、その場合にも、ある程度ハードウェアによる機体磁気補償を実施しておくことが望ましい。

ハードウェアによる機体磁気補償では、通常、センサーの近傍に設置された3軸コイルに定電流を流すとともに、センサーの両翼に高透磁率合金を置くことにより、永久磁気成分と誘導磁気成分を補償するが、機体の姿勢変化に応じて3軸コイルに流す電流を制御する方法もある。この種の調整を適切に行うと、機体磁気の影響を1 nT程度におさえることも可能である。

## 位置測定装置

航空磁気測量においては、航空機の位置を正確に測定することが、地磁気測定と同様に重要である。航空機の時々刻々の位置を決定するためには、種々の方法が考えられ、それぞれに長所短所があるが、現状では、対地映像撮影装置と電波航法装置を用いるのが通例となっている。なお、3次元空間での位置を決定する意味では高度計による測定も重要である。

対地映像装置としては、旧来の写真フィルムによる方法にかわってビデオカメラとビデオレコーダ(VTR)が使用されているが、時刻を数字で画面に表示するとともに、航空機のピッチロールの揺動の影響を除くため、鉛直ジャイロからの信号により直下点を示す十字マークを表示する装置も開発されている。対地映像は当然、陸域の位置決定にのみ用いられるが、次に述べるように海域の調査においても重要である。

電波航法装置としては、使用する電波の種類、送受信方式、サービスエリアの広さおよび位置決定精度を異にする種々のものがあるが、そのうちロランC・オメガ等が一般的である。これらによる位置決定は、とくに海域での調査に威力を発揮するが、気象条件等の変化に伴う誤差をも含む。このため、海域の調査においても、陸域で対地映像との比較による誤差測定を行い、系統的誤差分の補正を

行うのが適切である。なお、近年、人工衛星を用いた測位システムであるGPSが注目されており、その実用化の後には航空磁気測量にも取り入れられることとなる。

### 航空磁気3成分測量

航空機による地磁気3成分の測量には、フラックスゲート磁力計が用いられるが、機体の姿勢変化による各成分の測定方向の変化が問題となり、高精度の機体の方位測定が必要となる。従って、3成分測定システムは、直交3成分のフラックスゲート磁力計と機体の姿勢検出装置で構成される。フラックスゲート磁力計は本質的に連続測定であるので、必要な時間間隔でサンプリングを行えばよく、今日ではその感度もプロトン磁力計をしのぐ程度にまで達しており、温度ドリフトと校正に注意を払うだけでよい。一方、姿勢の検出にはとくに精巧さが要求される。実際のシステムでは、姿勢の相対的な変化を3軸ジャイロを用いた検出器で連続的に測定しつつ、ジャイロのドリフト・オフセットを補正するために、絶対方位の求まる太陽方位撮影装置（魚眼レンズ付カメラ）を適当な周期で駆動している。

### 7-3-2 航空磁気測量-I I

航空磁気測量は、短時間で広い地域を高い密度で一様に観測できるが、反面機体磁気による擾乱を完全に除くことは困難であり、また観測点の位置決定精度に問題があるため、測量の精度には自ら限界がある。

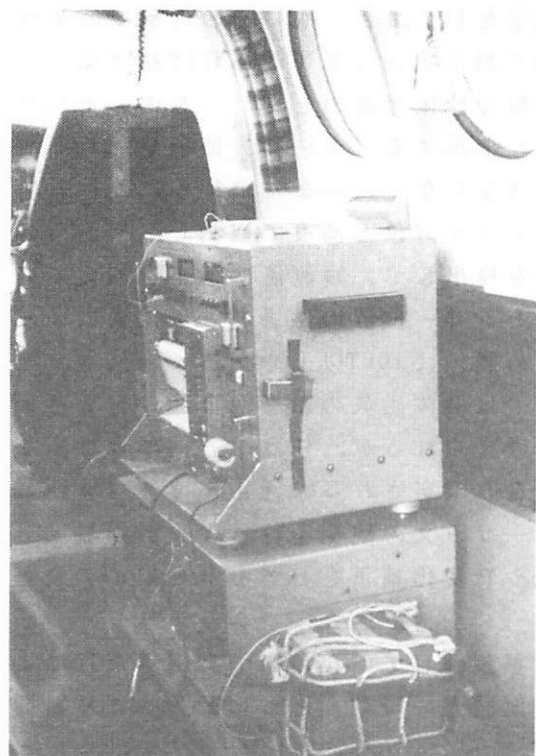
国土地理院は、世界磁気測量に際し、昭和36年に航空機（ビーチクラフト B65 クインエアー）を購入し、ヘルムホルツファンズロウコイルを備えたプロトン磁力計を主体として、機体の飛行方向やその傾きを検知する太陽カメラ、ジャイロ等で構成する地磁気3成分の観測装置を搭載し観測を実施してきた。

現在は、プロトン磁力計による全磁力の観測を継続している。この測量では、航空機の機体磁気による擾乱を少なくするため、合成樹脂の容器にプロトン磁力計の検出コイルを収納し、アルミ合金のパイプで機体尾部の外約1.5mの所に取り付けている。テールランプ等機内後部の電気配線にも注意が必要である。

観測はプロトン磁力計の性質上、連続観測は不可能で3~6秒間隔（約100m~200m）での繰り返しとなる。観測値は10nT単位で観測時刻とともにデジタル記録する他、DA変換されたアナログでも記録される。プロトン磁力計は、励起電流等によりかなりの電力を消費する。機内には十分な電力（直流28V、15A）があるが、微小な信号を増幅する増幅器では、ノイズ源となるため磁力計は電池で動作させている。

機体磁気の検定は飛行場内の磁気擾乱の少ない場所（ジャイロコンパス等を検





プロトン磁力計



検出器



航空機

定する場所がある)であらかじめ地磁気測定をしておき、次にその位置に航空機を移動し、実際の航空磁気測定と同じ状態で測定する(必要があれば航空機のエンジン、その他電気系統を動作させる)。順次機体尾部のセンサーを中心として航空機の機首の方位を変えて測定を繰り返し検出する(この間、地磁気の時間的变化が大きい場合は変化量を考慮しなければならない)。また飛行中における機体磁気の検定は地磁気観測所の上空をいろいろな方位と高度で観測し、観測所の記録と比較する。この様に機体磁気の影響を検出して、観測値に補正を加えている。補正值は飛行方向によって異なるが、センサー位置の磁場を人工磁場によって補償しない場合およそ約10nTである。その誤差は10nT以上であろう。

従って一方向に飛行する一コースの観測では機体磁気の影響がほぼ一定と考えられるので、コース上の相対精度は高いと考えられるが、任意の方向に飛行する磁気測量から得られる面的な結果の精度は自ら限定される。通常、南北(東西)に飛行するが検定の立場から東西(南北)一コースの観測を行うよう計画している。南北と東西のコースの交点で機体磁気や日変化補正をしても10~20nTの残差が出る(位置の精度の問題もある)。

観測位置の決定は、現在電子航行用機器を装備していないので有視界飛行によるナビゲーターの地上観測から50万分の1地図上に時刻とともに記入した航跡図の提供を受け使用している。

国土地理院の航空機は小型で、航続距離(時間)が短い(約1,600km 4時間)ので、観測地域に近い利用可能な飛行場を基地として使用する。

航空機は観測計画図に沿って飛行するため、離陸後、偏流測定を行いコース上を飛行する。途中、風向、風速が変わると計画図からずれてくるが、地上を観測して航路を修正しつつ飛行する。地上に適切な標定点がなかったり、雲がかかったりすると、位置の誤差は大きくなる。現在コース間隔10km高度5,000mで観測している。

プロトン磁力計は、1nTの観測精度があるが、機体磁気の補正、観測位置の精度から精度を上げることは必ずしも容易ではない。

最近GPSが実用化しつつあり、近い将来GPS受信機を装備したいと考えている。GPS測位のトランスロケーションを用いれば、三次元的位置がおおよそ10m程度の精度で決定でき、航空磁気測量の精度向上が期待される。

### 7-3-4 海上磁気測量

船舶による海上磁気測量では、かつてはフラックスゲート型磁力計が使用されていたが、プロトン磁力計の普及により現在ではもっぱら曳航式プロトン磁力計を使用するのが普通である。又、海上磁気測量では、同時に、測位、測深、音波探査、重力測定等といった他の諸観測と併行して実施する場合が多く、海上磁気測量のデータもこれらと総合的に収録処理できることが望ましい。最近の測量船や調査船では、船内に搭載したコンピュータシステムにより、データのオンライン処理が可能となり、磁気異常図の作図処理なども船内作業で作成できるようになっている。

#### 船舶用プロトン磁力計の構成と特徴

海上磁気測量に用いられる測量船の多くは鉄製の船が大部分である。このため海上での磁気測定では、船体磁気の影響を避けるため、プロトン磁力計センサー部を船尾からケーブルで曳航して全磁力を測定する。

船舶用プロトン磁力計の原理も、他の定点観測用プロトン磁力計と同じで、ケロシンや水の中のプロトン原子のラーマー周波数 ( $f_1$ ) を計測し、全磁力  $F$  との間の関係式

$$F = 2\pi f_1 / \gamma_p = 23.48741 \cdot f_1 \text{ (nT)}$$

ここで  $\gamma_p$ : ジャイロマグネティック ratio で  $26751.3 \times 10^{-5}$

により全磁力を測定する。中緯度帯では、ラーマー周波数は約 2 kHz であり、これを直接計測して全磁力を 0.1 nT の精度で測定するには計測時間が約 225 秒必要となり、実用でない。そのため実際の観測機器では、phase lock loop (PLL) により信号に同期した通倍数を作り、その同期周波数を計測して全磁力を測定している。

#### 曳航体 (検出部)

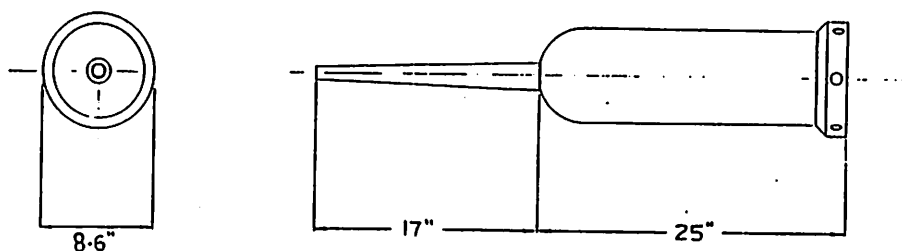
船舶用プロトン磁力計の検出部は、同時に曳航体でもあり、これら二つの機能を満足するものでなければならない。検出部としては

- (1) いかなる方向でも  $S/N$  比の高い信号を得るため、センサーコイルは指向性のないトロイダル型であること。
- (2) 曳航ケーブルと合わせたコイルの自己共鳴周波数は少なくとも 6kHz 以上であること。
- (3) 赤道付近や極域を含め、使用可能温度範囲は、 $-20 \sim 40^\circ \text{C}$  を満足するもの。等の条件を満たす必要がある。

又、曳航体としては、

- (1) 非磁性の素材で構成されていること。

- (2) 曳航抵抗が少ない流体力学的構造を有すること。
  - (3) 曳航中の姿勢が安定していること。
  - (4) 曳航ケーブル長分の水床に対する水圧に対しても破壊されないだけの耐圧構造を有すること、又、サメなどの攻撃にも耐える材質であること。
- 等の条件を充足することが必要であろう。



MARINE SENSOR OS1045

図 7-7 曳航体の構造

曳航体の一般的な構造は図 7-7 に示すような構造で、非磁性の円筒状ファイバーグラスのなかに、ケロシンとトロイダルコイルを収納している。又、防水や曳航張力に耐えるように、全体をフェノール樹脂と円錐状ウレタンで密閉している。

曳航体の抵抗は船速と相関があり、M-123 型海上磁力計に使用している曳航センサー OS 1045 では図 7-8 に示す関係が知られている。この場合、最大曳航速度は 20 ノットである。

曳航中のセンサーの姿勢の安定性も船速、海況、曳航長等によって異なる。センサーの姿勢が安定せず回転するようであれば、ケーブルによりかかり、最悪の場合にはケーブルの切断につながる場合もある。センサーの姿勢を安定させるため、センサー後部にロープを取り付ける場合もある。

曳航の長さは船体磁気の影響を避けるため船体の長さの少なくとも 3 倍以上の長さが必要である。船体磁気は船の永久磁化と誘導磁化によって生じる。実測例では、船体磁気は方位依存性を示し、その振幅の大きさは距離の 3 乗に反比例することがわかっている。海上保安庁の測量船拓洋の場合では曳航距離 300m の場合、船体磁気は 6~7nT に達し、1 nT の精度で海上磁気測量を実施しようとするれば、その補正が必要である。

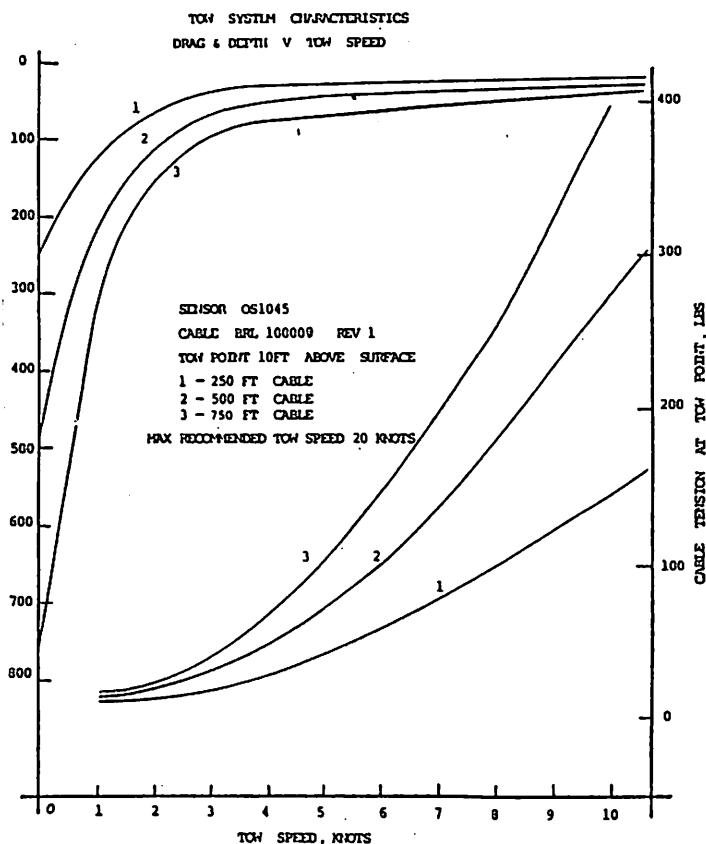


図 7-8 曳航速度と抵抗との関係

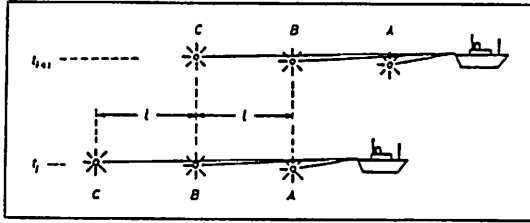
### 曳航ケーブル

曳航ケーブルは非磁性の2芯シールド線で、曳航張力に耐えるものでなければならない。又、塩分等に強く腐食しない材質であることが必要である。船舶用プロトン磁力計では1点接地の状態では測定するため、ケーブルのシールド層はコネクタの外皮と絶縁されていなければならない。又、コネクタと磁力計本体をはずした際の、ケーブルと船体間との絶縁抵抗は10 MΩ以上であることが必要である。これらについては測量前に十分な点検、調整を行う必要がある。

### 3センサー曳航式プロトン磁力計

海上磁気測量で1 nT以上の精度で測量するとなると、先に述べた船体磁気の問題とともに外部磁場変化の補正についても有効な方法を考えなければならない。友・藤本(1980)によって開発された3センサー曳航式プロトン磁力計も外部磁場変化を船上観測中に自動的に補正しようとする一つの試みである。原理は図7-9に示すように、A、B、Cの3つのプロトン磁力計センサーを一定間隔で曳航し、励磁間隔、船速等を制御することにより、異なる時刻  $t_i$ 、 $t_{i+1}$  において、

2 地点での測定値が得られるように工夫したものである。このようにすれば原理的には船体磁気と外部磁場変化量を同時に測定することが可能である。しかし、実際問題となると、3つのセンサーを曳航するのは、船上作業としてはかなりの労力を要する作業であり、又、曳航距離も従来のものと比べ2倍以上（現在は、250m、500m、750mで曳航している）曳航する必要があり、曳航によるトラブルが発生しやすい等の問題がある。



Principle for determination of both the magnetization of the vessel and geomagnetic daily variation by use of towing three proton magnetometers.

図 7-9 3センサー曳航式磁力計

#### 7-3-4 海底磁力計

地球内部の電気伝導度構造を求めるために電場及び磁場変動の観測を行う。このような観測では地震波の観測とは違って観測点直下の構造しかわからない。従って求めたい構造の上で観測を行う必要がある。日本のような沈み込み帯に位置する場所では海溝や縁辺海などの重要な構造は海にあるので海底での観測が重要となる。また日本のような島国では陸上での観測を行っている場合、良導体である海水中を流れる電流が大きな影響を与え、観測点直下の電気伝導度構造による情報を覆い隠す。従って、島弧の構造を知るためにも海での観測が必要となる。また、地磁気起源論や地震予知の目的のためにはプロトン磁力計による長周期磁場変動の観測が行われる。この観測では地球表面に均一な観測点を持つことが重要であるが、地球表面の3分の2は海で覆われているために、均一な観測点を得るためには海底での観測が必須である。陸上での観測では人工的なノイズの増大のために長期間の観測が続けられなくなった観測点も多くなってきており、この意味でも深海底での観測が将来重要となる。また、日本付近の大きな地震が海溝周辺で起こることを考えると、地震予知の目的のためにも、震源付近での海底観測が必要である。

海底で電場と磁場の変動を観測した場合、この比は海底より下の電気伝導度に

対する情報を与えるので、上部の海水の影響を受けない。電磁気観測では一般に GDS (Geomagnetic Deep Sounding) 法と MT (Magneto-Telluric) 法が用いられる。前者では磁場の鉛直成分と水平成分との関係から地下構造の非均質性を推定し、後者では電場と磁場の比から地下構造を求める。このような観測を行うためには磁場3成分と電場水平2成分を測定する必要がある。これらの観測装置そのものは陸上での観測と同じ物であるが、海底で観測するためにはこれに付随する装置を必要とする。これらは耐圧容器、電源、切り離し装置、記録装置である。

観測する電場及び磁場変動の周期は現在のところは数分以上である。これは深海底では海水のシールド効果により変動が減衰するため、現在のフラックスゲート型磁力計の分解能である  $0.1 \text{ nT}$  ではこの程度の周波数帯までが限界であるからである。

現在のところ海底観測機器の耐圧深度は  $6000 \text{ m}$  までのものが普通である。耐圧容器は非磁性である必要があるのでガラス球、抗張力アルミ製のシリンダーまたは球が用いられている。現在までに実用化されているのは自己浮上型の物であり、ケーブル式の磁力計は敷設のために多額の費用を要するので、沿岸部での試験観測に留まっている。プロトン磁力計等による長周期変動の観測ではケーブル式も考慮する必要がある。自己浮上型は装置の敷設や回収が比較的簡単に行えるという利点があるが、電源や記録部を持つ必要があるので、1年以上の非常に長期の観測には適さない。自己浮上型の装置による観測では現在のところは2カ月程度の観測期間が通常である。これはおもに電源と記録容量によって制限されているが、回収するまでは測定記録を見ることができないことも、あまり長期間の観測が行われない理由である。

電源は重量や容積が限られた範囲で大きな容量を必要とするのでリチウム電池が主に用いられている。しかし、リチウム電池は内部抵抗が大きく、大電流を短い時間の間に流すには適さない。このような用途の場合にはNiCd電池やアルカリ電池も用いられる場合がある。

自己浮上型の装置では装置自体は海水中で浮力を持つように作られ、敷設の際にはおもりによって海底に沈められる。回収の際にはこのおもりを切り離すことによって浮上する。このため装置の重量はできるだけ軽くすることが必要である。浮力はガラス球の場合には直径  $40 \text{ cm}$  ぐらいの球で  $20 \text{ kg}$  程度の水中浮力を持つので装置をこれ以下の重量にすれば全体で浮力が得られる。アルミ製の場合には球状の場合には浮力を持たせることが可能であるが、シリンダー状の場合には十分な浮力を持たせるのは強度的に難しい。従ってガラス球やシタクティックフォーム等を浮力材として用いる。

上に述べたように海底電磁気観測ではあまり短周期のデータは取得しないので、記録方式としてはデジタル記録が主流である。記録媒体はカセットテープ、I

Cメモリーが使われている。特に、磁力計の場合カセットテープと駆動モーターの磁化の影響が無視できないので、ICメモリーが望ましい。

切り離し方式はタイマー式と超音波による呼び出し式が用いられてきた。タイマー式は敷設時に回収の時間を正確に知る必要があり、船の運行は天候に左右されるので、今までに回収できなかった場合もある。従って、現在ではほとんどの装置が超音波呼び出し式となっている。

海底磁力計として現在あるのはフラックスゲート型の3成分磁力計であるが、地震予知や磁場永年変化の観測にはプロトン磁力計が必要とされる。海底のプロトン磁力計は現在開発中であるが、消費電力を小さくすることと、磁場勾配を小さくするためにセンサーと測定器を別の耐圧容器に入れるなどの考慮がなされている。

### 7-3-5 MT法測器・観測

マグネトテルリク(MT)法では地球表面で電場と磁場変動の水平2成分を測定することにより地下の電気伝導度構造を求める。狭義のMT法では地下の1次元構造を仮定するが、現在では計算機を用いた大規模モデル計算が可能であるので2次元、3次元構造にも適用される。MT法では電場/磁場比の周期数依存性から電気伝導度の深さ分布を求めるが、低い周波数ほどより深部の構造に関する情報を持つ。MT法に用いられる測定器は観測しようとする周波数帯によって違ってくる。ここではVLF帯、ELF帯、ULF帯に分けて説明する。

#### VLF帯

VLF帯でのMT観測は100m程度以下の深部構造を求めることを目的とする。従って、鉱物資源調査、地熱地帯の調査等に利用されてきたが、地球物理的には火山の構造や活断層の探査に有効である。VLF帯のシグナルは人工的に発射されている電波を用いる。世界中では8カ所の送信局がある。日本で使用されているのは愛知県依佐美の17.4KHzが主であるがオーストラリアのNorthwest Capeからの20.2KHzも使用可能である。人工的な電波であるため保守や定期点検の期間を除いては常時使用可能である。17.4KHzを用いた場合、地下上部の電気抵抗が10Ωmおよび1kΩmのとき、スキンプスはそれぞれ12mおよび120mとなる。普通に用いられるのはGeonics社製のEM16-EM16Rである。この装置では磁場測定はループアンテナで行い、電場の測定は5m間隔のステンレススチール製の電極を用いる。この装置では電場/磁場比から求まる見かけ比抵抗と位相差が直読できるようになっており、非常に簡便に観測が行える。また、周波数が高いために電極の接地に関する問題もない。現在では日本製の測定器や連続観測を行えるようにした装置も使用され



ている。

### ELF帯

ELF帯のMT観測では雷によって地表と電離層の間に励起されるシューマン共鳴の周期を利用する。雷は世界中のどこかでは常時起きているので、この周波数帯のシグナルはいつも測定可能である。共鳴周波数の基本モードは8 Hz、14 Hz、20 Hzである。地下の電気抵抗を $1\text{ k}\Omega\text{ m}$ としたときの基本モードのスキンドプスはおよそ2 kmとなる。ELF帯の観測ではこの程度の深さの情報が得られることになる。従って、地殻上部の観測に適しており、地熱地帯や火山の調査に利用されている。ELF帯の磁場観測にはパーマロイの芯に巻かれた誘導コイルが用いられる。コイルの有効断面積は $3 \times 10^3\text{ m}^2$ 程度である。測定系の周波数特性は数10 Hzまでフラットであることが望ましいが、日本での測定では商用周波数や他のノイズが非常に大きいので各種のフィルターを必要とする。電場の測定はしんちゅうまたは鉛の電極を30～50 m間隔で用いる。電場及び磁場測定とも全体のゲインが大きいので風や振動によるノイズの影響が大きい。通常の観測ではアナログ出力をレコーダーに記録して、実験室で200 Hz程度のサンプリング間隔でデジタイズして解析を行う。安定した観測結果を得るためには通常1地点で5～10分間の観測を必要とする。

### ULF帯

ULF帯のMT観測では電離層や磁気圏での自然磁場変動をシグナルとして用いる。観測する変動の周期は1秒から数時間までのものが用いられる。変動の周期帯が広いので磁場観測に用いる測定器は通常2種類のものを用いられる。周期が1秒から数分までの範囲は誘導コイルをセンサーとして使い、それ以上の長い周期ではフラックスゲート型磁力計を用いる。探査される深さは地下の比抵抗に依存するが、上記の短周期側では10 Km、長周期側では100 Km程度の深部構造に関する情報が得られる。

1秒から数分までの周期帯の磁場変動は地球内部の観測だけでなく、電離層や磁気圏の研究にも用いられる。この範囲の磁場変動は地磁気脈動と呼ばれ、Pc-1、Pc-3、Pc-5のピークが見られる。Pc-1は周期1秒程度のところにピークを持ち中緯度地方で観測可能であるが、日本では1 Hz付近のノイズレベルが大きく、実用的には用いられない。Pc-3は20～40秒の周期を持ち、日本のような中緯度地方ではよく観測される。磁場擾乱時にはこれ以外の大きな変動も観測される。

ULF帯の短周期側の観測で用いられる誘導コイルは $2 \times 10^4\text{ m}^2$ 程度の有効断面積を持ち、周期10秒でのノイズレベルは0.01 nTぐらいである。サン

プリングレートは通常1秒である。長周期側では磁場測定にはフラックスゲート磁力計が用いられる。測定精度は0.1 nTで、通常毎分1回のサンプリングを行う。

ULF帯の電場測定には、鉛または鉛・塩化鉛の電極を約100 mの間隔で用いる。鉛・塩化鉛電極は平衡電極の一つである周りのイオン濃度の影響を受けにくく、今のところ陸上で使用するには最も適当と考えられる。海底での観測ではやはり平衡電極の一種である銀・塩化銀電極が用いられる。長周期の観測にはこのような平衡電極を用いることが必須であるが、短周期では金属単体である鉛電極を用いても、比較的安定な観測が可能となる。

電場及び磁場変動の記録は過去にはチャートレコーダーによるアナログ出力が普通であったが、現在ではカセットレコーダーまたはICメモリーによるデジタル記録が行われる。解析に必要な記録長は短周期側で半日、長周期側で3日程度でよいが、S/N比の向上のために自然磁場擾乱の大きな時期の記録が必要なために、通常は1カ月以上の長期記録を取ることが必要となる。長周期側の場合には毎分1回のサンプリングなので長期間連続記録は可能であるが、短周期側では毎秒サンプリングなので、記録量を減らすためにトリガー方式も用いられている。

ULF帯の短周期側では特に人工ノイズの影響が大きく、日本において測定可能な場所を、研究上で必要な地域においてを見つけることは非常に困難である。長周期側においても人工ノイズは問題となるが、最近では海底観測が可能となり、有用な結果が得られている。短周期側においても測定分解能をあげるなどの技術革新により、海底での観測が可能となろう。

### 7-3-6 ロケット・人工衛星磁力計

小型で高感度なリングコア型フラックスゲート磁力計が開発されたことから、近年ロケットや人工衛星での高精度磁場観測が可能となった。1979年10月に打ち上げられた磁場観測衛星MAGSATや1981年8月に打ち上げられた電磁圏観測用の兄弟衛星DE-1、DE-2はリングコア型フラックスゲート磁力計の優秀さを実証した。日本でも1978年衛星搭載用磁力計の開発を目指した研究グループがつくられ、東京大学、東北大学、極地研究所が中心となり、リングコア磁力計の開発が開始された。そしてこれまでにハレー彗星探査機「さきがけ」で数nT以下という微弱な惑星間空間磁場の観測に成功した。(Saito et al., 1986) 他、南極ロケットでも沿磁力線電流の観測に成功している(遠山他、1987)。現在1989年2月に打ち上げ予定のオーロラ観測衛星EXOS-Dと1992年に打ち上げ予定の磁気圏尾部観測衛星GEOTAILにもリングコア型フラックスゲート磁力計が搭載されることになっており、その準備が進められている。

### バルーン・ロケット搭載用磁力計

ロケットで観測すべき電離層電流による磁場変化は、中低緯度で 10-30nT、高緯度で 100-500nT程度である。また、オーロラ帯の沿磁力線電流による磁場変化も 100-1000nT程度である。これに対し、ロケットはスピンをしながら 1 km/s程度の高速で地球磁場を横切って飛翔する。従ってロケット搭載用磁力計には、広い測定レンジ、高い分解能、速い周波数応答が要求される。さらに、ロケットの刻々の姿勢と位置を正確に決めることも必要となってくる。

ロケット搭載用磁力計としては光ポンピング磁力計とフラックスゲート磁力計がある。光ポンピング磁力計は一般に全磁力しか測定できず、消費電力も大きいという欠点をもつが、高い分解能(0.01nT程度)をもち、周波数応答もよい(約 100Hz)ことから、中低緯度電離層電流の検出も可能である(小川他、1980)。

3軸フラックスゲート磁力計はベクトル量が観測できるという利点をもつことから最もよく用いられている。しかしこれまで使用されてきた Two-core型はノイズレベルが 10nT程度ありロケット姿勢計としては十分な能力をもっていたが、磁場観測には不十分であった。これに対し最近開発された Ring-core型フラックスゲート磁力計は、小型軽量で、ノイズレベルも 0.1nT以下と大幅に改善されている。しかも 14ビットあるいは 16ビットの高速 A/D変換器とハイビットレートの PCM テレメータが利用できるようになり、測定レンジ、分解能、周波数応答は大幅に向上した。

ロケット搭載用磁力計のもう一つの大事な点は、ロケット本体からの磁気バイアスや搭載機器から磁気ノイズの影響をいかに小さくするかということである。磁力計センサーをロケット頭胴部内に配置した場合には、普通数 1000nT程度の磁気ノイズの影響があり、これらのデータから数 100nT以下の自然の磁場変動を算出することはきわめて困難である。従って良質のデータを得るにはブームを用いセンサー部だけロケットから離す必要がある。

### 人工衛星搭載用磁力計

低高度衛星搭載用ベクトル磁力計はロケット搭載用ベクトル磁力計と同じく、大きなダイナミックレンジに加え、高い分解能と周波数レスポンスが要求される。しかも、観測すべき磁場変動は、沿磁力線電流の場合 10-100nT、ULF帯磁波の場合には 0.1-10nTと小さいことから衛星からセンサー部をできるだけ離すことが必要となってくる。EXOS-Dの場合には 5 mのマストを使用することにより、衛星からの磁気ノイズを 1nT以下に抑えることになっている。高高度衛星や惑星間空間を飛翔する探査機に関しては、周囲の磁場 100nT以下と地球近傍に比べはるかに小さいため、ダイナミックレンジはそれほど大きくなくてもよい。しかし

0.1~10nT程度の微小な磁場変化を検出するためには、低高度衛星と同様に、長いブームを使用する必要がある。MST-5（さきがけ）では2mブームが使用されたが、GEOTAILでは6mマストが使用されることになっている。

EXOS-DおよびGEOTAIL用の本格的マストの開発は、1980年より宇宙科学研究所工学グループ（三浦他、1983）によって開発された。いかに軽量で精度のよいマストをつくり出すことができるかが衛星磁場観測を成功させるポイントである。このため形状、材質、伸長機構などにさまざまな工夫がこらされている。5mブーム先端部のセンサーは衛星本体に対し0.1°程度の精度でアライメントが保たれることになっている。

## 文献

小川 徹、藪崎 努、北野 正雄、

総合研究報告、地球磁場変動観測用磁力計の開発と応用、p.150, 1981  
三浦公亮、酒巻 正守、名取 通弘、田畑 真毅、柿坪 由明、矢作 寿男、  
科学衛星シンポジウム、p.51, 宇宙科学研究所、1983.

Saito, T., K. Yumoto, K. Hirao, T. Nakagawa and K. Saito,  
Natuare 321, 303-307, 1986

遠山 文雄、高橋 陸男、藤井 良一、山岸 久雄、國分 征、福西 浩、  
第10回極域における電離圏磁気圏総合観測シンポジウム要旨、p.38,  
極地研究所、1987.

## 7-3-7 インダクション磁力計

この磁力計は原理的に最も簡単なもので、磁場の時間的変動をコイルを用いて測定するものである。従って、本質的に交流用のものであり、通常0.01~数10Hzの周波数範囲の計測に使われている。かつては、空心の直径1メートルにも及ぶ大きなコイルを用いることもあったが、現在では高透磁率のコアを使用して小型化を計ることが多い。数Hz以下の周波数帯の地磁気脈動の測定には、長さ70cm~2m程度、断面積 $5 \times 5\text{mm} \sim 20 \times 20\text{mm}$ の5-79モリブデンパーマロイ積層をコアとし、0.2~1mm $\phi$ 程度の銅線を $10^4 \sim 10^5$ 回巻いたものを用いる。効果断面積は $\sim 10^3 \text{ m}^2$ 程度が普通である。ELF帯の測定には、 $10^3 \sim 3 \times 10^3$ の巻数のコイルが使われる。

インダクション磁力計の製作上で最も問題になったのは、初段の増幅器であったが、最近ではチョッパー増幅器や高性能の演算増幅器が容易に得られるようになった。DC~50Hzでノイズ0.1 $\mu\text{Vp-p}$ 、温度ドリフト0.03 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ 程度の増幅器としては、Ancom 15-3（英国製）これと同等のアイコー電気 MAZ-02がある。ドリフトをそれほど問題にしない場合、OP 27、LT1037などの演算増幅器が使用

しうる。太い線を使って、抵抗の少ないインダクションコイルを使うことが、インピーダンスを下げノイズを少なくするためには望ましいが、そうするとコイルの重量が大きくなる。従って、コイルの設計は、観測の目的例えば観測所に恒常的に設置するか移動観測に使用し可搬性を重視するかなどの、目的に応じて考慮される。

#### 7-4 無人・自動観測

地球物理量の時間変動・空間分布を詳しく観測するために、地球上に多くの観測点を設置する必要がある。しかし、地球上の極地、海、山岳、砂漠地等の人々が住んでいない地点で観測するためには無人で動作する観測装置を用いなければならない。

観測装置が無人で動作するためには、i) 電源、ii) データ収録、(データレコーダ等)、iii) 保温、iv) 時刻管理、v) ハウジング、vi) 輸送・設置等の諸項目を十分に考慮した安定なシステムを作らねばならない。ここでは、自然条件が最も厳しい極地における無人観測システムについて述べる。

##### 7-4-1 極地における無人観測

極地における無人観測システムを製作するにあたり、次の自然条件下で動作することを考慮する必要がある。

- i) 低温 (平均気温が  $-20 \sim -30^{\circ}\text{C}$ 、最低気温  $-50 \sim -60^{\circ}\text{C}$ )
- ii) 夏は全日照、冬は全暗夜
- iii) 強風 (平均風速  $5 \sim 15\text{m/s}$ 、最大風速  $50 \sim 60\text{m/s}$ )
- iv) メンテナンスが困難 (特に冬期)
- v) 輸送量に制限がある。

現在までに、極地における無人観測の試みが多くなされてきた。しかし、気象観測ロボット等のデータ量や消費電力の少ない観測を除くと、いまだに年間を通して安定に動作する無人観測システムが完成していないのが現状である。現在、最も多くの問題が残されているのが、電源とデータ収録装置・方法である。もし、電力が安定に十分供給可能であれば、保温、省電力化等の対策は、困難でなくなる。表は、Dr. J. H. Doolittleが市販されている電源を用いて、60ワットのシステムを南極で1年間稼働させた場合の価格、重量等を計算したものである。南極での自然条件を考慮すると、自然エネルギーを利用した太陽電池と風力発電との組合せが最も良い方法である。しかし、風力発電は南極において安定に動作した実

績がなく、この方面の実用研究が急務である。現段階では、熱起電電源 (Thermoelectric generator, TEG) が有力視されており、South Pole 基地や昭和基地周辺での無人観測システムはこの電源を用いてテスト観測を実施している。

データ収録装置は駆動部があるため、常時  $10^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{C}$  に保温しておく必要がある。また、消費電力の点でアナログレコーダは連続的に駆動部を動作させなければならず、無駄な電力を消費してしまう。このため高記録密度のデジタルデータレコーダが現在の主流である。しかし、記録媒体の容量に限界があり、時間変動の早いオーロラ現象等のデータを長期間にわたって収録する場合には短周期変動データ収録は不可能であり、長周期変動データのみ記録せざるをえない。したがって、人工衛星を介してのデータ伝送が必要である。現在利用者に開放されている ARGOS 衛星伝送システムでは、データ伝送量がきわめて少ないため、ハウスキューピングや観測データのモニターとしてしか使用できない。近い将来には高速のデータ通信衛星を介してのデータ伝送が望まれる。

#### 7-4-2 時刻管理・自動化

時刻管理に関しては、標準電波 (オメガ電波、JJY等) や衛星 (NNSS, GPS等) を用いて世界中どこでも高精度で時刻管理をすることができるようになった。このため、超高精度 ( $1 \mu\text{s}$ 以下) を要求する観測でない限り、時刻管理の問題は解決されたと言える。

観測システム自動化に関しては、マイクロプロセッサ (CPU) によるシステム管理が最適であろう。但し、この場合でも、無停電装置等の対策が必要である。

無人観測の今後の課題として、前述したように厳しい自然条件下で安定に動作する電源および衛星を用いたデータ伝送等の問題点を解決していかねばならない。また、多点で観測するためには低価格のシステム開発も望まれる。

## 8 . 国際的関連

### (概要)

全地球規模の地磁気観測は国際協力なしに実施することは不可能である。例えば、地磁気の測定自体をとっても国際的な基準を必要とする。このような国際協力の中心的組織が国際測地学・地球物理学連合 (International Union of Geodesy and Geophysics—略して I U G G) に属する国際地球電磁気学・超高層物理学協会 (International Association of Geomagnetism and Aeronomy—略して I A G A) である。

I A G A の活動は広い範囲におよぶ。地球磁場の分布とその時間変化を正確に知ることは、学問的にも実用上からも重要であるが、I A G A は5年毎に国際標準地球磁場として地球磁場モデルを作成するなど、地球磁場観測や地球およびその周辺の電磁現象の観測研究の促進に極めて大きな役割を果たしている。

また国際学術連合 (International Council of Scientific Unions) は、世界資料センター (World Data Center—略して W D C) を組織して、地球物理データの収集、保存、交換を行っている。日本には W D C - C 2 が置かれ、地磁気データを扱う地磁気資料センター (World Data Center for Geomagnetism) を京都大学理学部の地磁気世界資料解析センターが運営している。

わが国は現在でもこれらの国際機関のなかで大事な役割を担っているが、こんごますますこれら国際機関との結び付きを強固にし、その活動の指導的役割を果たす事ができるよう努める必要がある。

## 8-1. 国際地球電磁気学・超高層物理学協会

地磁気の観測は、グローバルな規模で行うので、国際的に取り扱う必要がある。まず第一に、地磁気測定について国際的な基準を必要とする。次に観測或は測量は、各国が協力して行わなければ、組織だった観測網を作ることが出来ない。このような国際協力は、国際地球電磁気学・超高層物理学協会（International Association of Geomagnetism and Aeronomy—略して IAGA）によって計画され、実行されている。また、この協会は地磁気に関する研究発表の場を提供している。IAGAは、国際測地学・地球物理学連合（International Union of Geodesy and Geophysics—略して IUGG）に属する協会の一つで、4年に一度 IUGG の総会と合同で総会を持ち、総会の2年後、研究成果の発表を主要目的とした学会を開く。最近では、1987年8月にカナダのバンクーバーにおいて、IUGG及びIAGAをも含めて各協会の総会が開催された。

IAGAは、次の5つの部（Division）から成る。

- ・ 地球内部磁場（Internal Magnetic Fields）
- ・ 超高層物理現象（Aeronomical Phenomena）
- ・ 磁気圏現象（Magnetospheric Phenomena）
- ・ 太陽風及び惑星間空間磁場（Solar Wind and Interplanetary Field）
- ・ 観測所、測定機、指数及びデータ（Observatories, Instruments, Indices and Data）

そして、この第5部が観測及び観測資料に直接関係する諸問題を取り扱っている。更に、第5部は、次の7つのワーキンググループ（W.G.）を持ち、各々の計画立案、検討、実行を行う。

- W.G. 1 地磁気観測所、測定機、標準（Geomagnetic Observatories, Instruments, and Standards）
- W.G. 2 流星と部分反射（Meteor and Partial Reflection）
- W.G. 3 光学測定標準（Optical Calibration Standards）
- W.G. 4 地磁気測量と地磁気図（Magnetic Surveys and Charts）
- W.G. 5 地磁気活動指数（Geophysical Indices）
- W.G. 6 データ収集・配布（Collection and Dissemination of Data）
- W.G. 7 地磁気測量衛星（Geomagnetic Survey Satellites）

W.G.2と3を除いてその他すべてのワーキンググループは、地磁気の観測に関するものである。



## 8-2. 国際標準地球磁場モデル

1957年から1969年にかけて、IAGAを中心として、全地球地磁気測量計画 (World Magnetic Survey) が行われた。この計画の下に、地磁気観測所による観測、地表及び海上における地磁気測量、飛行機を用いた地磁気測量の他、新たに開発された人工衛星による地磁気測量により、地磁気測量データは画期的に拡充された。その結果、種々の地磁気図は非常に正確になり実用性を増した。この国際協力事業により、球関数を用いた地球磁場モデルを国際的に標準化しようという機運が高まり、1965年に標準化された国際標準地球磁場モデル (International Geomagnetic Reference Field 1965) が初めて作成された。地球磁場は、永年変化をするので、そのような磁場モデルも数年に一度更新する必要がある。1979年から1980年にかけて行われた、米国航空宇宙局 (NASA) の地磁気測量衛星 (Magsat) による観測は、優れた測定精度を持つので、その結果を含めた観測資料に基づいて作成した国際標準地球磁場モデル1980は、以前のモデルに比べてはるかに正確なモデルと考えられる。

信頼度の高い地磁気モデルを維持するために、国際協力により1990年代半ばに次の地磁気標準モデルを作ることが計画されている。

## 8-3. 地磁気世界資料センター

地磁気観測データは、地球に関する重要な資料であるので、長期間保存する必要がある。また、地磁気データを必要とする研究者、一般社会の利用者に広く利用されるように、特定の場所に収納し、必要に応じてデータを供給できるような設備を設けることが望ましい。国際地球観測年 (International Geophysical Year 1957-58) の計画の一環として、国際学術連合 (International Council of Scientific Unions) は、世界資料センター (World Data Center - 略してWDC) のシステムを設置し、地球物理データの収集、保存、交換等のための新しい組織を導入した。かくして、WDC-Aはアメリカに、WDC-Bはソ連に、WDC-C1はヨーロッパ諸国に、そしてWDC-C2は日本にそれぞれ設立された。これらのデータセンター組織のうち、アメリカ(A)とソ連(B)には、地球物理学のいろいろな分野を網羅する総合的なシステムがあり、ヨーロッパ(C-1)と日本(C-2)には分野別のセンターのみが存在する。分野別のセンターのうち、地磁気 of データを取り扱うものを、地磁気資料センター (World Data Center for Geomagnetism) と呼び、日本では京都大学理学部の地磁気世界資料解析センターがこれを運営している。このセンターでは、地磁気の観測データを収集し、利用者に提供するほか、2種類の地磁気活動指数を算出し、世界中

の研究者と一般利用者に配布している。このセンターでは現在、マイクロフィルム約8200巻、マイクロフィッシュ約800枚、磁気テープ約750巻、データブック約1650冊、磁気図約50枚、その他多数の数値表を保管している。

これらのデータセンターでは、最新のデータ処理、データ保管、データ及び情報交換の技術を取り入れつつあり、例えば、多くの世界資料センター間では、コンピュータを用いた通信が可能である。WDC-Aでは、最近多量のデータをコンパクトディスク（CD）に入れ、他のWDCや研究機関に配布した。これらのデータセンターでは、まもなく光ディスク等の先端技術を利用することになると考えられる。

## 9. 教育

### (概要)

地球内部および地球周辺空間で起こる様々な現象を理解する上で、地球電磁気学の研究は大きな役割を果たしている。地球電磁気学の研究を推進するためには、研究者の養成と確保がきわめて大切である。

地磁気研究において世界に占めるわが国の高い地位を維持するには、この分野での教育の充実を計らなければならない。日本列島が地殻活動の活発な変動帯に位置するという特殊事情を考慮すると、わが国の地球科学教育にはより大きな比重が置かれてしかるべきである。地球科学のなかで地球および周辺空間の電磁気学についても、それなりに他の分野と均衡のとれた教育研究が進められるべきである。しかし現実にはこの分野の研究者・教育者の数は著しく少なく、研究者の養成・大学の教育ともに不十分な状態にある。大学における地球及びその周辺空間の電磁気学の教育を充実し研究体制の強化をはかる必要がある。さらに初等・中等・高等学校の教育課程を見ると理科教育のなかで地磁気の学習をする機会がほとんどない。教育課程の見直しが望まれる。

外国からの研修生の受け入れもわが国の責務のひとつであろう。

地球磁気およびその変動は、「生きている地球」と太陽活動に支配されている「地球周辺空間環境」を理解する上に重要な役割を果たしている。従って各国の地磁気研究者は、それぞれの立場から地球内部と地球周辺空間に関する研究成果をあげて人類共通財産である知識の集積に貢献しようと努力している。地磁気の研究を推進するためには、研究者の養成と確保が大切である。国としてどの程度の数の研究者や技術者を地磁気研究のために養成・確保するかは、それぞれの国における教育・文化水準に依存し、また政治・経済事情に左右される。ここでは、世界におけるわが国の役割とわが国固有の事情とを考慮して検討を試みる。

### 9-1. 世界におけるわが国の役割

地磁気研究において、日本は過去百年の間に優れた伝統をもつ先進国のひとつになった。国際共同観測や観測資料相互利用が行われている研究分野では、先進国がこのような国際共同事業で果たすべき役割は必然的に大きい。地磁気観測と資料活用においては、わが国は次のような任務を持っている。

- a) 日本国内および近海に於ける地磁気分布とその経年変化を調査し報告する。
- b) 何か所かの固定観測所で観測された地磁気三成分変化記録を提供する。
- c) 地磁気世界資料センター（京都大学理学部附属）は、全世界各観測所から送られてくる資料を整理保管して、各国の研究者からの資料送付個別注文に応じるほか、国際的要請に応じて利用度が高い地磁気活動度指数を算出し表示図示印刷してひろく配布する奉仕的業務も担当している。世界資料センターは国際地球観測年(1957-1958)を契機に発足したものであるが、資料の重要性はますます高まるいっぽうで、新たな手法や大型の研究計画で得られた資料の整理保管の必要性も感じられている。最新のしかも大量の資料をいかに利用し易いかたちで研究者に提供するか、がセンター創設当時の課題である。このために地磁気資料センター業務要員の確保は、研究者の確保と同様に重要である。

### 9-2. わが国固有の事情

日本列島は太平洋の北西縁にあって、太平洋プレートとフィリピン海プレートのふたつの海洋プレートがユーラシア大陸の下に沈み込むところに位置している。このため日本列島およびその周辺地域の地殻活動は著しく活発で、地震や火山活動などさまざまな地学現象が起こっている。北米大陸や中国大陸などと比べると地殻構造はきわめて複雑である。このような地学的特殊性のあるわが国にあっては、地球科学教育はとくに重視されてしかるべきである。

地殻構造調査や地殻活動研究には、地球電磁氣的観測はかかせない項目である。地磁気変化の観測や地殻の電気抵抗観測を通して地震予知・火山噴火予知の研究

にも大きな貢献をしている。地殻構造の複雑なわが国にあっては、研究体制面からできるだけ高密度の観測網を敷くのが望ましいが、同時にそのような観測体制が全国大学の地球科学教育にも貢献するような方策がとれば最も好都合である。

### 9-3. 専門研究者の養成

全国でいくつかの国立大学においては、学部・大学院に地球物理学専攻課程が置かれている。ここで地球物理学各方面に進む専門家の教育が行われているが、さきに述べたような地球電磁気学研究の重要性にもかかわらず、この方面に進む研究者の数は必ずしも多くはない。

近年地球科学・宇宙科学関係の研究が多方面にわたって急速に進展したため、各大学とも現有の教官数と設備および経費だけでは、拡大した学問分野にわたって深くつつこんだ教育を施すことは困難になってきている。また最先端の実験的研究を手掛けることも難しくなっている。専門的な地球電磁気学教育の充実が望まれる。

### 9-4. 大学・研究機関における外国人研究者の研修

地磁気研究の進んでいるわが国の大学・研究機関あるいは観測現業機関に一定期間滞在して地磁気研究の諸方法（測器開発、資料解析法、資料利用法など）を学び、帰国して自国での地磁気研究の推進者となる外国人研究者はかなり多い。わが国がこのような人々を受け入れることは、先進国としての当然の義務であろう。

### 9-5. 地方大学における地球科学教育と地磁気観測

わが国における従来の教育体制が生み出した結果として、全国の大学の自然科学系教室の中で地学系研究者の占める率は低い。さらに地学系教室の研究者のほとんどは地質学分野の研究者であり、天文・地球物理学分野の研究者は少ない。そのなかで地球電磁気学分野の研究者は一部物理学科に所属する研究者を含めてもさらに一段と少ないのが実情である。これでは大学における地学教育を充分バランスのとれた形で行うことは困難である。

このような事態にいたった背景には、大学の地球物理学教育体制の影響、それぞれの大学内の事情、中・高校教育のカリキュラムのあり方、社会的要請など複雑な要素が絡みあっているが、事態是正のためには、まず在来の地球物理学科を置く大学において各分野の教育・研究が跛行的にならないよう努めることが大事である。

もうひとつ地球科学教育の振興策として考えられることは、高密度の地球物理観測を全国で実施する場合に、その一端を各地の大学の地球科学関係研究者が積

極的に分担するという方式である。例えば地磁気をはじめ各種の自然現象を観測できる実習教育施設をつくり、観測・実験装置を整備して、あわせて全国観測網の一端をも担うようにする。このような施設は、その地域で臨時多点観測などを実施する場合（電磁探査の野外実習であってもよい）その拠点とすることもできる。

大学生が教養課程において地球科学を野外実習または見学をまじえながら学習する効果はきわめて大きい。とくに社会科学方面に進む学生にとっては、教養課程における最後の理科学習の機会に「地磁気などの観測と研究を通じて全世界の地球物理研究者たちが国境を超えて協力して地球およびその周辺環境を理解しようと努力している実情を、地球科学担当教官の魅力に満ちた講義と楽しかった実習のおかげでよくわかった」という思い出が残り、その後の社会的活躍にも役立つところがある。

#### 9-6. 理科教育における「地磁気」

地球磁場およびその変動は「生きている地球」と、太陽活動に支配されている「地球周辺空間環境」を理解する上に重要な役割を果たしている。理科教育において重要なことは、教育の対象となっている事象に興味を示す時期に適切な指導を行うことである。自然に対する探求心が芽生える時期に、日常接している地磁気に対する深い関心を育てるように心がけることが望ましい。しかし現実には、地磁気という自然科学教育に格好の題材がせつかく身近にありながら、なぜかわが国の理科教育用検定教科書では地磁気のことあまり述べられていない。

文部省指定の学習指導要領によれば、まず小学校3学年で磁石の性質とはたらきを学び、自由に動きうる磁針は南北をさして止まることを教わる。中学校用の理科学習指導要領を見ると、授業で教えるべき事項のなかに地磁気は含まれていない。高等学校では、選択科目（物理・化学・生物・地学および理科I）のうち地学を選ぶごく少数の限られた生徒だけが第3学年で地磁気の知識を断片的に教わるにすぎない。したがって現在のところほとんどの高校卒業生は、地磁気に関する知識を小学校3年生以来一度も教わる機会に恵まれない。学習指導要領は学問の進展・科学技術の発達による知識の増大・時代の要請などにしたがって随時改訂されるべきものであるから、中学理科・高校理科の学習指導要領を次回に見直す機会に、地磁気ならびに地球周辺空間に関する学習が適宜取り入れられようになることを強く要望する。そのような学習指導要領の改訂が行われるまでの過渡期においては、さしあたり全国各大学の教養課程において「自然における地磁気の役割」を含めて現在の科学・技術の進歩によって得られた最新の地球観・宇宙観を（場合によっては非常勤講師を依頼してでも）教えるように取り計らうことが現実的な解決策であろう。

## 10. ま と め

### ( 概 要 )

最近の約20年間に固体地球科学もその周辺空間の科学も飛躍的な進歩をとげた。現在新たな展開を求めて模索の時代にはいりつつある。一方で技術の発達著しく、観測方法観測手段を一新しかねない情勢である。新技術によって得られたデータの蓄積が新しい学問分野の開拓につながることも期待される。このような情勢のもとで地磁気観測の現状を見直し、観測所の役割・機能、必要とされる分布、磁気測量の進め方、新たな観測装置の開発、グローバルな観測を行うための海外観測の諸問題、データの収集・処理体制の確立、国際組織との関連、研究者・観測者の養成と教育の諸問題などについて今後のあり方をまとめた。

地球磁場は地球内部から地球周辺空間にひろがり、地球およびその周辺環境を構成するひとつの重要な要素となっている。このため、その影響する範囲も広く大きい。最近の約20年間に地球科学もその周辺空間の科学も飛躍的な発展をとげた。そのきっかけとなったのが地球電磁気学的研究観測であったことはよく知られている。プレートテクトニクス展開の契機となったのは海底地磁気縞模様が発見や古地磁気学による大陸移動説の復活であったし、磁気圏・電離圏研究のなばなしい進展の基礎には地球磁場の観測研究があった。目を見張るような進展をとげた地球科学と地球惑星圏の科学は、現在新たな展開を求める模索の時代にはいりつつある。一方で技術の発達は著しく、観測方法観測手段を一新しかねない情勢である。新技術によって得られたデータの蓄積が新しい学問分野の開拓につながることも期待される。このような情勢のもとで地磁気観測の現状を見直し、今後のあり方を検討した。

地磁気観測所には世界的観測網の一環としての観測と、地域的基準観測としての役割がある。わが国の観測は、地球規模の観測について言えば、質の高いデータを供給して世界的に高く評価されている。しかし、観測所の分布が陸上に限られているため、北西太平洋地域での観測点分布はきわめて不均一になっている。海底に観測所を設置して海域での観測を補う必要がある。また地域的基準観測という機能からみると、西南日本は空白域になっている。中国・四国地方に観測所の設置が望ましい。

観測所の重要な機能の一つは連続したデータをとることである。高精度で安定した観測を長年月にわたって継続することが極めて重要である。

その他観測所には観測器械の検定、機器開発、研究者教育、観測技術者養成などが期待される。

最近の急速な地域開発や、交通網の発達によって人工擾乱が増大し、地磁気観測が次第に困難になってきている。観測環境の保全に大きな努力が払われるべきである。

磁気測量は、地球上の地磁気の分布と変化を明らかにするものであり、地殻の構造調査、資源探査、地震・火山噴火予知、地球主磁場の成因研究などに大きく貢献している。今後より一層の研究を推進するためには、さらに高精度・高密度の測定を陸上、海上、空域において広範囲にわたって実施してゆく必要がある。そのためには高精度かつより簡便な磁力計への改良、開発；測定環境の保全確保；データ解析法の改善・確立等が必要である。

人工衛星・スペースステーションによる磁場測定の重要性が急速に高まっている。わが国もその実現に努力するべき時期がきている。



このように地球磁場観測を充実させるためには、観測装置の向上を図らねばならない。従来地磁気観測には、その時代々々の先端技術を取り入れた磁力計が用いられてきたが、特に近年の飛躍的な技術革新に対応して、旧来の観測装置が一新されようとしている。すなわち固定点における定常観測に対しては、高精度・広帯域での安定性のよい磁力計が開発される必要がある。

また、海底や宇宙空間やスペースステーションを含む地上無人観測点に対しては、上記諸性能に加えてさらに小型省エネルギー化の方向で磁力計が開発されねばならない。

グローバルに多数の観測点を同時に必要とする種類の研究においては、海外にも観測網を展開する必要がある、海外旅費の制約が最大の問題点となっている。世界各地域の関連研究者との有機的コーディネーションを推進してゆかねばならないのはもちろんであるが、同時にグローバルな観測を円滑に実行するための国内の諸体制の整備を計る必要がある。また、長期観測が必要な研究においては、海外にも施設を要するケースが多いが、単なる備品の持ち出しという考えだけでなく、施設の保持、運用、管理についても、国際協力による運営など新たな方式を考える必要がある。

地球科学の進展により1990年代から21世紀にかけて、地磁気観測のデータ量は急激に増加することが予想されている。従ってこの予測に対応するデータマネージメントシステムを計画し、確立することが必要である。その計画は最新計算機技術を用いたデータ処理システム、新しい大量データ収納媒体を用いたデータ収納施設、先端情報技術を取り入れた高速度のデータ及び情報交換ネットワークの確立を含まねばならない。

全地球規模の地磁気観測は、国際協力なしにこれを遂行することは不可能である。日本が地球科学の分野で国際的に指導的役割を果たすためには、地磁気観測に関しても、関連国際機関の活動に積極的に参加するのみならず、この報告に述べたような諸問題について独自の方針と計画を確立する必要がある。

地球内部及びその周辺空間での電磁現象を研究する上で、新時代に対応できる研究者及び技術者の養成と確保が基本的に重要である。実際はむしろ研究者・教育者とも著しく数の少ないのが現状である。大学における地球およびその周辺空間の電磁気学の教育を充実して研究体制の強化を図る必要がある。さらに初等・中等・高等学校の教育過程を見ると理科教育の中で地磁気の学習をする機会がほ

とんだない教育過程の見直しが望まれる。

以上要約して、地磁気観測に関する5年から10年の将来計画として、特に重要視する必要があるものを列挙すると次のようになる。

- ◎基準観測網の整備、特に北西太平洋地域の海底に固定連続観測点を、西南日本に地磁気観測所を設置する。
- ◎各省庁及び大学の地磁気観測所において高精度で安定した連続観測を長年月にわたって継続する努力をする。
- ◎最近の人工擾乱の増加に対処して地磁気観測環境の保全に格段の努力をする。
- ◎海陸プレート境界域におけるベクトル磁気測量を強化する。
- ◎地殻活動域において高密度・高精度の地磁気観測・測量を実施する。繰り返し測量期間は短縮する。
- ◎人工衛星による地磁気測量を国際的プロジェクトとして計画し実施する。
- ◎海底やスペースステーションを含む宇宙空間及び無人観測点で使用する高性能磁力計を開発する。
- ◎太陽地球系物理学研究からの要請に応答できる地磁気観測ネットワークを整備する。
- ◎グローバルな超多点観測を可能とする国内研究体制を確立し、海外施設の保持運用に関して弾力的対応を考慮する。
- ◎急激に増大するデータ量に対処するデータ処理・収納システムとデータおよび情報交換用ネットワークを確立する。
- ◎多目的を持つ全地球規模の地磁気観測網の確立のため、また長時系列地磁気観測資料の確保、保存のため関連国際諸機関の活動に積極的に参加し、指導的役割を果たすことができるよう国内体制の整備を計る。
- ◎新しい時代の要請に応えうる技術者及び研究者の要請と確保に努力する。
- ◎地磁気に関する初等・中等・高校理科教育を充実し、一般市民の地磁気に関する知識の啓蒙に務める。

