

# 中国東北部における電磁気観測

歌田久司・上嶋 誠 (東京大学地震研究所),

趙 國澤・湯 吉 (中国地震局地質研究所),

馬明志 (中国吉林省地震局)

## Electromagnetic observation in the northeastern part of China

Hisashi UTADA, Makoto UYESHIMA (Earthquake Research Institute, University of Tokyo),

ZHAO Guoze, TANG Ji (Institute of Geology, Seismological Bureau of China),

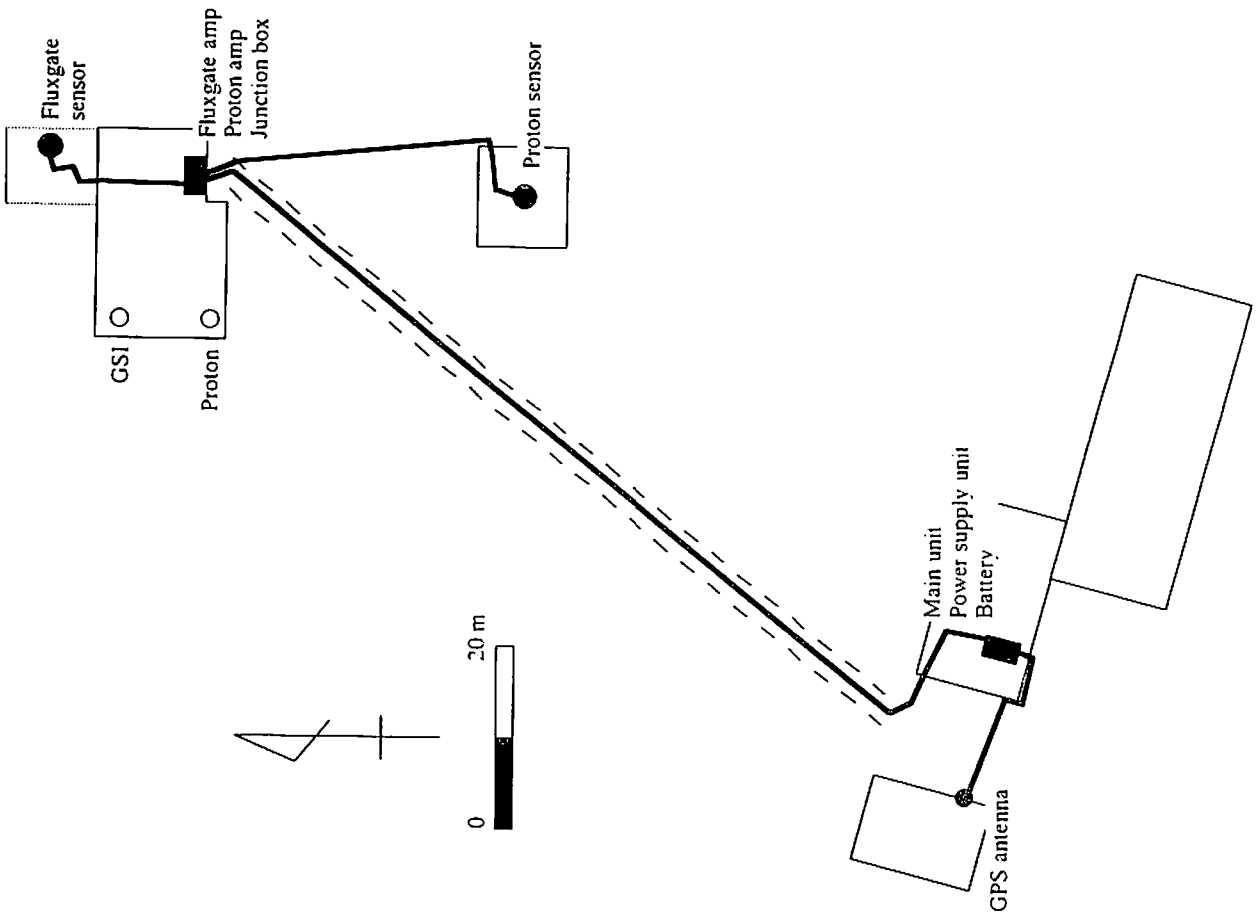
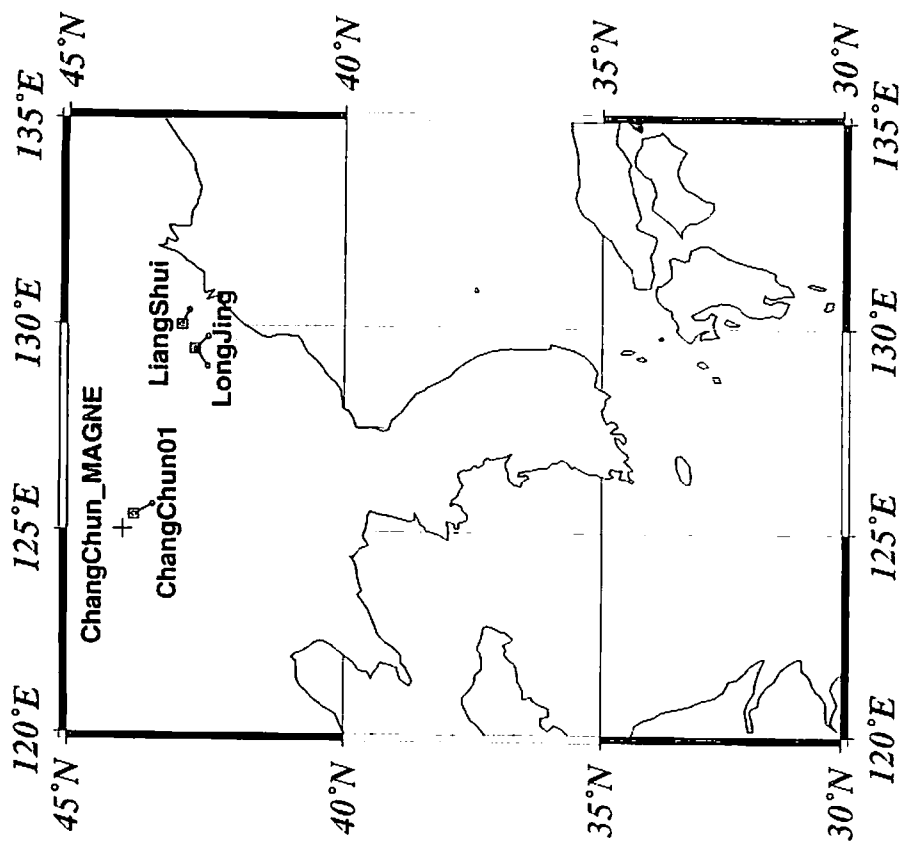
MA Mingzhi (Seismological Bureau of Jilin Province, China)

### 1. はじめに

最近の全地球的な地震波トモグラフィーによれば、いくつかの沈み込み帯において沈み込んだ海洋プレート物質に対応する高速度領域が沈み込んだ先のマントル遷移層(400-660km)のあたりに淀んでいる様子が描かれている。このような淀んだスラブは *stagnant slab* と呼ばれる。典型的な *stagnant slab* の例は、日本～中国大陸の地域に見ることができ、日本海溝から沈み込んだ太平洋プレート物質が中国大陸の東部にかけてのマントル遷移層付近に広く存在していることが示唆されている(例えば、Fukao et al., 1992)。

一方、西南日本および朝鮮半島から中国大陸の東北部にかけての地域には、ほとんど *stagnant slab* の存在するゾーンと重なるように第4紀の活発な火山活動が見られる。この火山活動は、島弧・中央海嶺・ホットスポットなどに由来するものとは明確に異なる特徴があるとされ、多くの研究者が注目してきた。Miyashiro (1986)は西太平洋に数多く存在する背弧海盆の拡大の原因となったマントル内部の高温領域「ホットリージョン」がその活動の原因と考えた。岩森(1996)は、山陰地方の火山活動も同じグループに属するものと考え、同地方の火山岩の岩石学的特徴から、この活動のものはマントルが通常より高温であることではなく、深部からの流体(水)の供給によるという考えを示した。そして、水に富む領域ということから「ウェットリージョン」と名付けた。また、巽(1995)は *stagnant slab* の中のハーツバーガイトがその温度圧力条件下で周囲のマントル物質よりも低密度になってプリューム状に上昇するモデルを提案している。

岩石学的なアプローチによる火山活動の成因の解明については、今後の研究の進展を待つ必要があるが、同時に地球物理学的な情報すなわち地下構造についての情報を積み重ね、両者が矛盾無く説明できるようなモデルを立てることがこれを明らかにする上で重要であろう。このような議論の上で、電気伝導度分布は、地震学的データとは独立な情報をもたらす。同様の観点に立った研究はすでに九州の電磁気研究グループによって行なわれている。Handa, et al. (1992)は九州におけるインダクションベクトルの特徴を、九州西方のマントル高電気伝導度領域の存在によって説明できるとした。さらに、



第1図(上) 観測点配置. +が地磁気連続観測点, ○を線で結んだものが電位差の測線で, 四角で囲んだ場所に記録装置を設置した.

第2図(右) 長春観測所における海半球磁力計の設置状況.

Shimoizumi, et al. (1997)は、短周期地磁気観測を追加して薄層モデルや2次元モデルなどによる解析を行なって、高電気伝導度領域の存在領域をより明確にした。本論文集にある下泉他(1999, 本論文集)や田中他(1999, 本論文集)の報告に見られるように、この研究は、最近では韓国との共同による地磁気観測や海底ケーブルによる電位差観測などを取り入れ、発展している。

1996年の大沼のインダクションワークショップに趙國澤教授が参加した際に、このような問題について議論を行なった。そしてこの火山活動の中心部である中国東北地方のマントル深部の電気伝導度を明らかにしたいと考え、日本でも行なっているネットワーク MT 観測を日中共同で行なうことを計画した。2年間の準備期間を経て、1998年夏に吉林省において観測を開始するに至った。ここでは、観測と結果の概要について報告する。

## 2. 地磁気観測

ネットワーク MT は、電話回線を用いた長基線電位差変化観測と地磁気変化観測を組み合わせた観測法である。地磁気観測は新プログラム「海半球観測ネットワーク」(深尾, 1998)の一部として長春の吉林省長春観測所(第1図)に設置した。ここでは、アナログ式の吊磁石変化計と国土地理院型一等磁気儀による観測が行なわれている。今回、我々の海半球磁力計(Shimizu and Utada, 1999)を設置して高感度デジタルデータを観測所に提供する代わりに、観測所の絶対観測データの提供を受け、海半球ネットワークとしての長期観測の品質を確保する、という相互に利益となるデータ交換の約束を取り交わした。ただし、この報告の主題であるネットワーク MT 観測は電磁誘導の解析を目的とするので、長期間の基線の安定性についてはここではこれ以上言及しない。

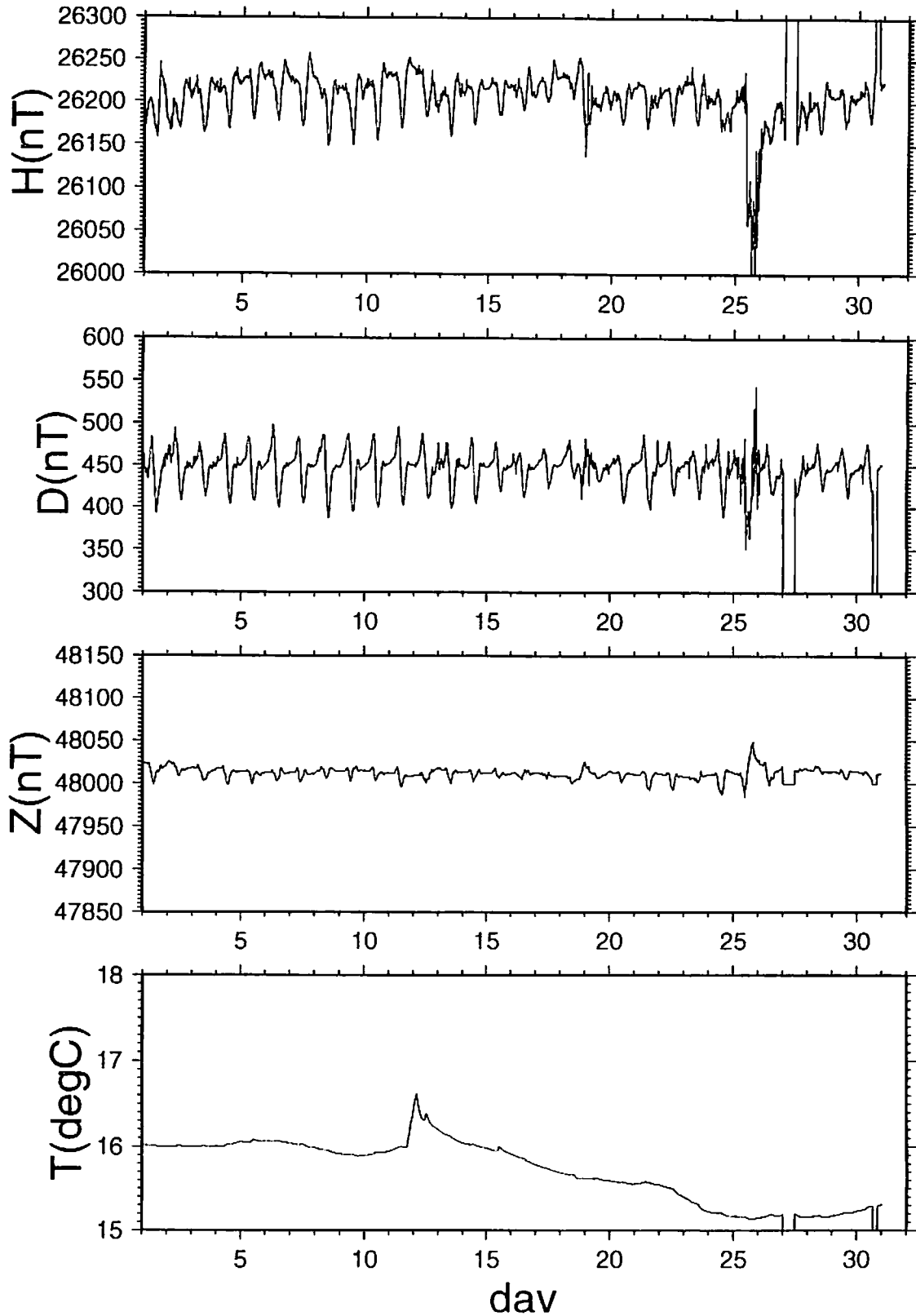
設置作業は、1998年7月19日~8月1日までの間に行なった。第2図に、観測所の構内の概略を示す。記録計および電源は、オフィス建物の中の一室に設置した。測定装置およびセンサーはそこから50m以上離れた観測用の建物の中に設置した。フラックスゲート磁力計のセンサーは、変化計の地下壕(地下約1.5m)に設置した。プロトン磁力計のセンサーは、現在は使用していない絶対観測用の小屋の中に設置した。このように、屋外に設置しない理由は2つあって、1つは厳冬期には-40°Cにもなるという気象条件であり、もう1つには盗難にあう危険性を考えたためである。装置同志をつなぐケーブルもほとんどはプラスチックチューブを通した上で1mの深さに埋設した。これも、凍結による事故を防ぐためである。

観測所は、市街地から20km以上離れているためデータは極めて良好である。第3図に長春における9月の3成分データを示す。このうち、9月25日の擾乱時における3成分毎秒値データを第4図に示し、同期間の八ヶ岳の毎秒値データを第5図に比較する。水平成分の擾乱は両者の間の違いはそれほど大きくないが、鉛直成分は長春では八ヶ岳に比べても非常に小さいことがわかる。

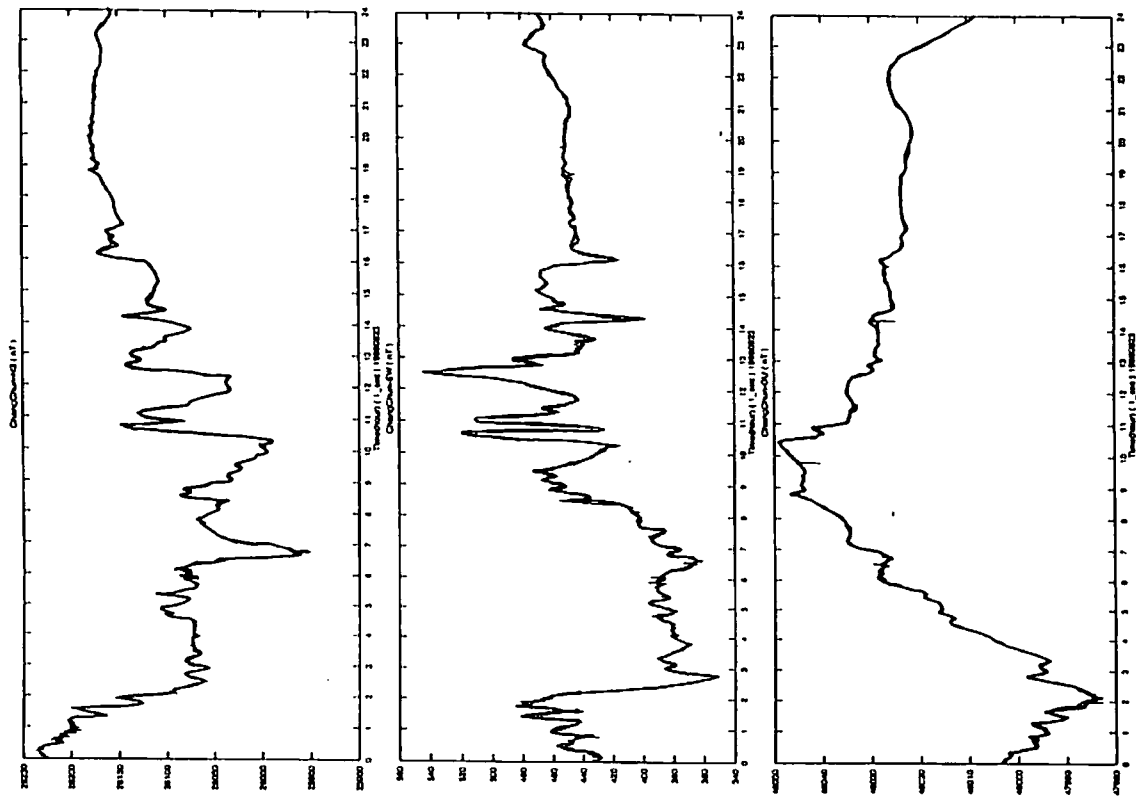
## 3. 地電位差観測と見かけ比抵抗曲線

地電位差観測は、吉林省電話公社の保有する長距離回線を使用して行なった。この計画の準備を始

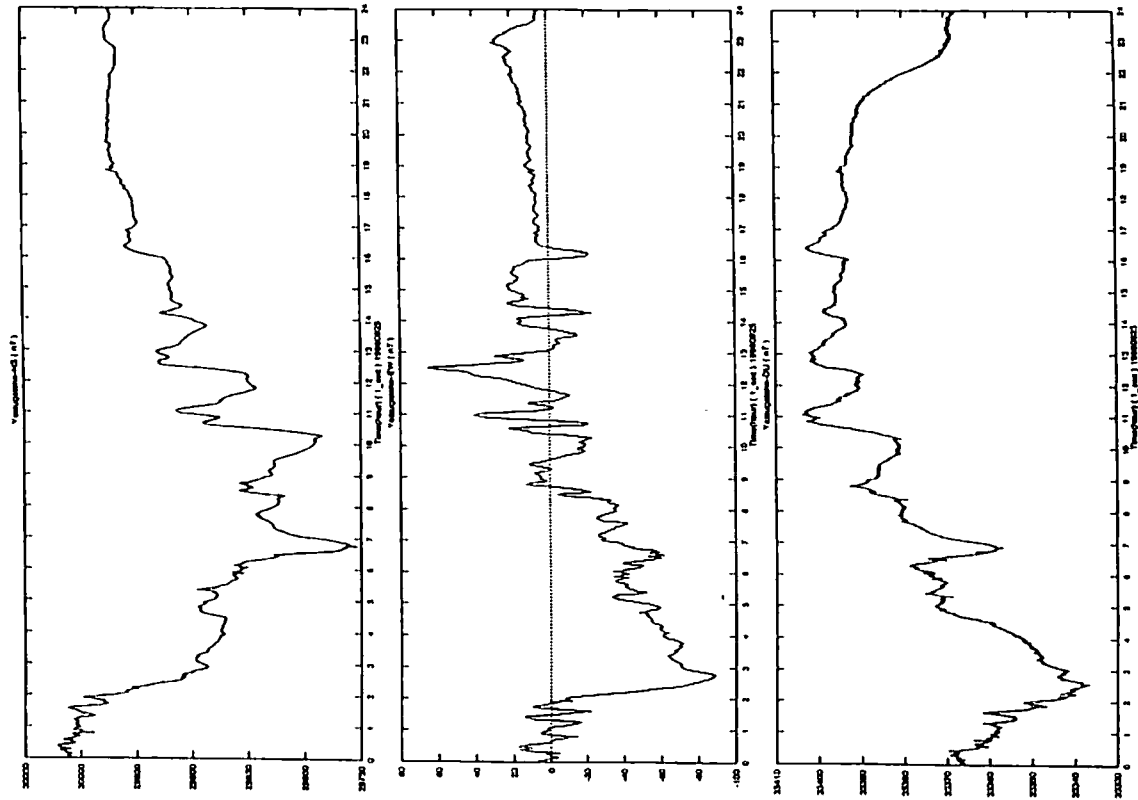
# Changchun 9809



第3図 1998年9月の長春における地磁気3成分とフラックスゲート磁力計センサー内部の温度変化。



第4図 1998年9月25日の長春における地磁気3成分毎秒値。



第5図 1998年9月25日の八ヶ岳における地磁気3成分毎秒値。

めてからわかったことであるが、中国では最近になって全国規模で回線の光ファイバー化が急速に進められている。そのため、観測に使用可能な回線の確保がまず問題となり、現在使用可能なメタリック回線は10本程であることがわかった。また、それらについてもできるだけ早く撤去したいというのが公社側の意向であることもわかった。そこで、3台のネットワーク MT 測定装置 (SES93) を持ち込み、1エリアの測定を3ヵ月程度として、できるだけ早く観測を終了させることにした。1998年8月に開始した第1回目の観測においては、第1図に示すような基線を用いた観測を行なった。

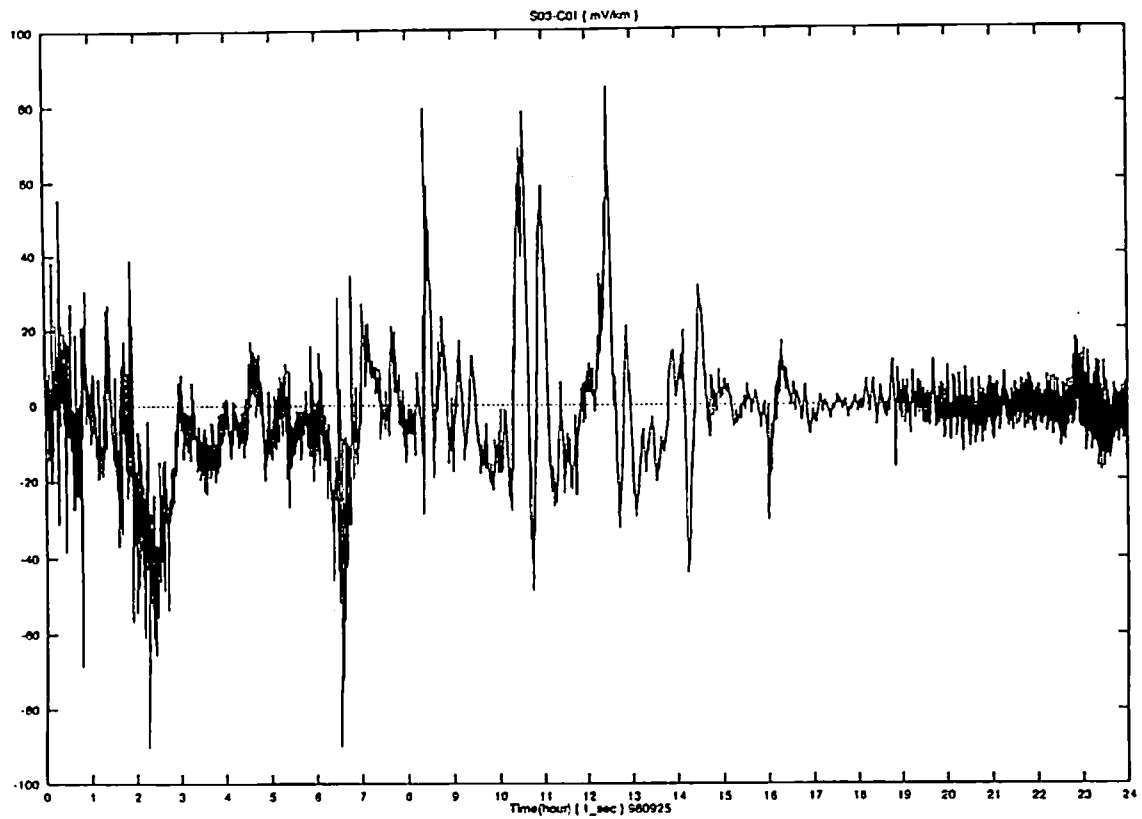
第6図に、第4・5図と同じ期間の長春郊外の地電位差変化データを示す。地電位差は地磁気 비해短周期が強調されるのでノイズのように見えるが、実際には極めて良好なデータであることがわかる。後半で線が太くなっているが、地磁気データの方を拡大してみるとこの部分で非常に短周期の現象(地磁気脈動)が発生していることがわかった。

本題からはそれるが、現地において電位差観測を行ないながら予想外の発見があった。第7図に長距離回線路から観測点に回線を引き込んでいる電柱の様子を示すように、ラインがガイシによって電柱と絶縁されている。電話公社の技術者によれば、使用している電線は外部絶縁がない裸の銅線で、1対で1回線に対応するということである。電電公社 OB の鈴木欽也氏(1998, 私信)によれば、このような通信方式は裸線方式と呼び、日本では1950年代まで使用していたものであるらしい。この方式の欠点は、保守が困難である点である。外部絶縁がないので、線が樹木の枝に触れても大きな障害源となる。実際、今回開始した観測のうち他の地域のデータはノイズが大きく解析には使用できなかった。調べると、このような回線は開放時の線間のインピーダンスが低くなっており、線路の途中に何らかの接触物が存在している可能性がある。これらの原因は、中国側の研究者によって調査中である。

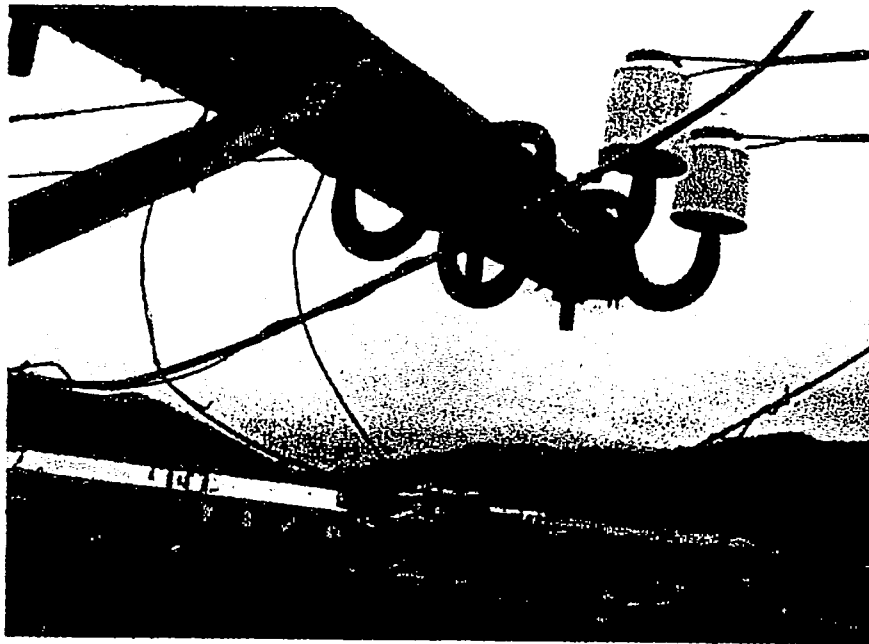
第8図にこの地電位差データと長春の地磁気データとから求めた、見かけ比抵抗と位相曲線を示す。解析では、電位差の測定方向に直交する成分の磁場(○)と平行な成分の磁場(□)に関係する2つのインピーダンスを求めた。均質な半無限空間に一樣な磁場変化が与えられた場合を想定すると、前者が媒質の真の比抵抗を与え、後者はゼロとなる。このうち、100秒程度よりも短周期では回線の経路による地磁気鉛直成分変化の誘導の効果(Uyeshima et al, 1999)が無視できないので、これよりも長周期側のみ注目する。簡単にまとめると、およそ2000秒周期までは主要な成分の見かけ比抵抗は500Ω-mでほぼ一定であり、そこから長周期側に向かって減少し、周期200,000秒で約30Ω-mになる。一方、これに直交する成分の見かけ比抵抗は周期による変化があまりないので、相対的に長周期になるほど両者の比は小さくなる傾向がある。主要成分の位相は、周期5000~20,000秒で約60度であるが、さらに長周期側に向かって急速に増大する。また、位相の急激な増大とともにエラー・バーが大きくなる。

#### 4. 西太平洋~アジア大陸東部のセミ・グローバルな電気伝導度構造

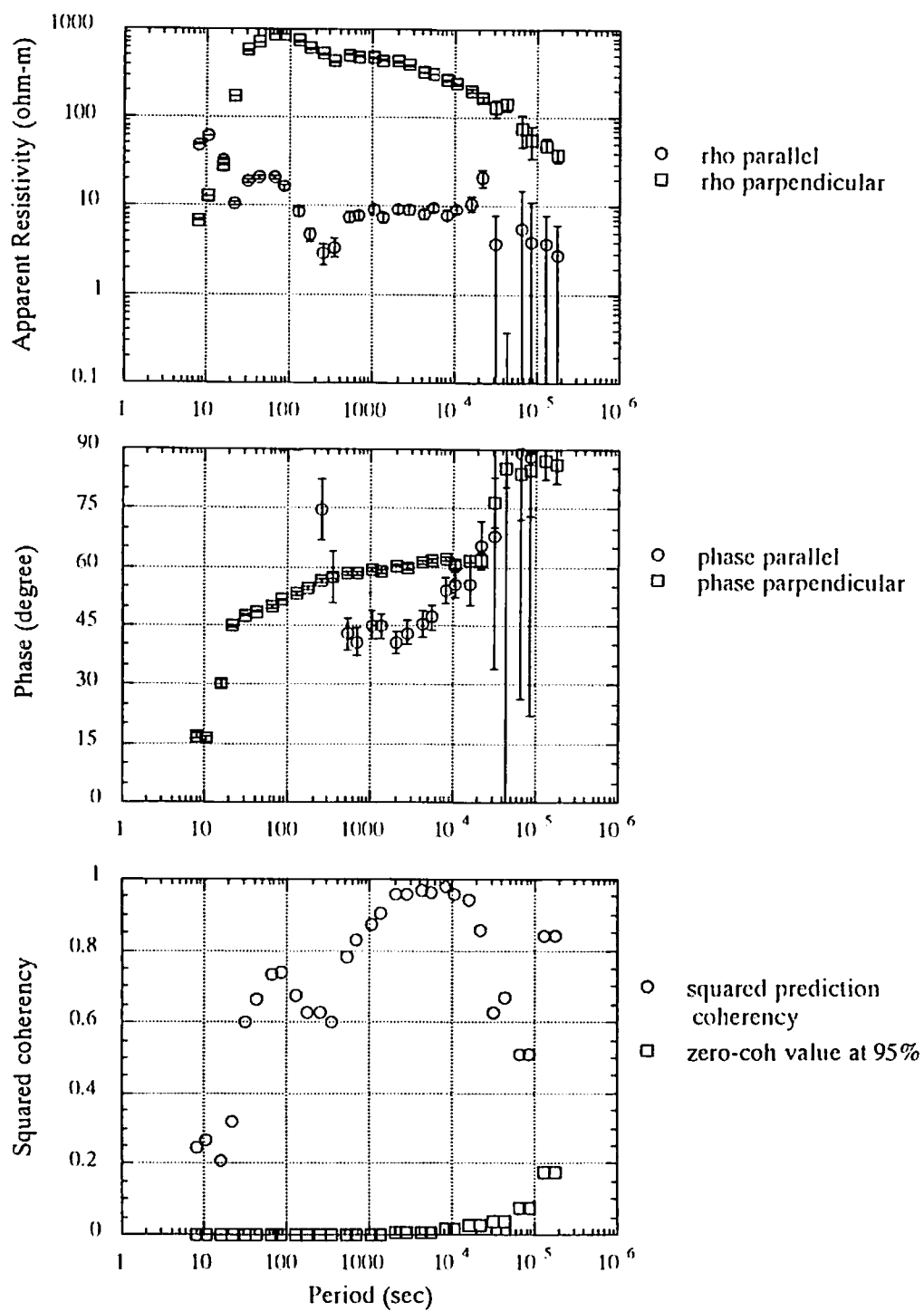
第7図に示す見かけ比抵抗曲線の最大周期における見かけのスキン・デプスはおよそ1,000kmにな



第6図 1998年9月25日の長春における地電位差変化(10秒値).



第7図 長春近郊の観測点近くの電柱の写真。ガイシによって裸線が絶縁されている。



第8図 RRRMTによる見かけ比抵抗(上), 位相(中), コヒーレンシー(下).



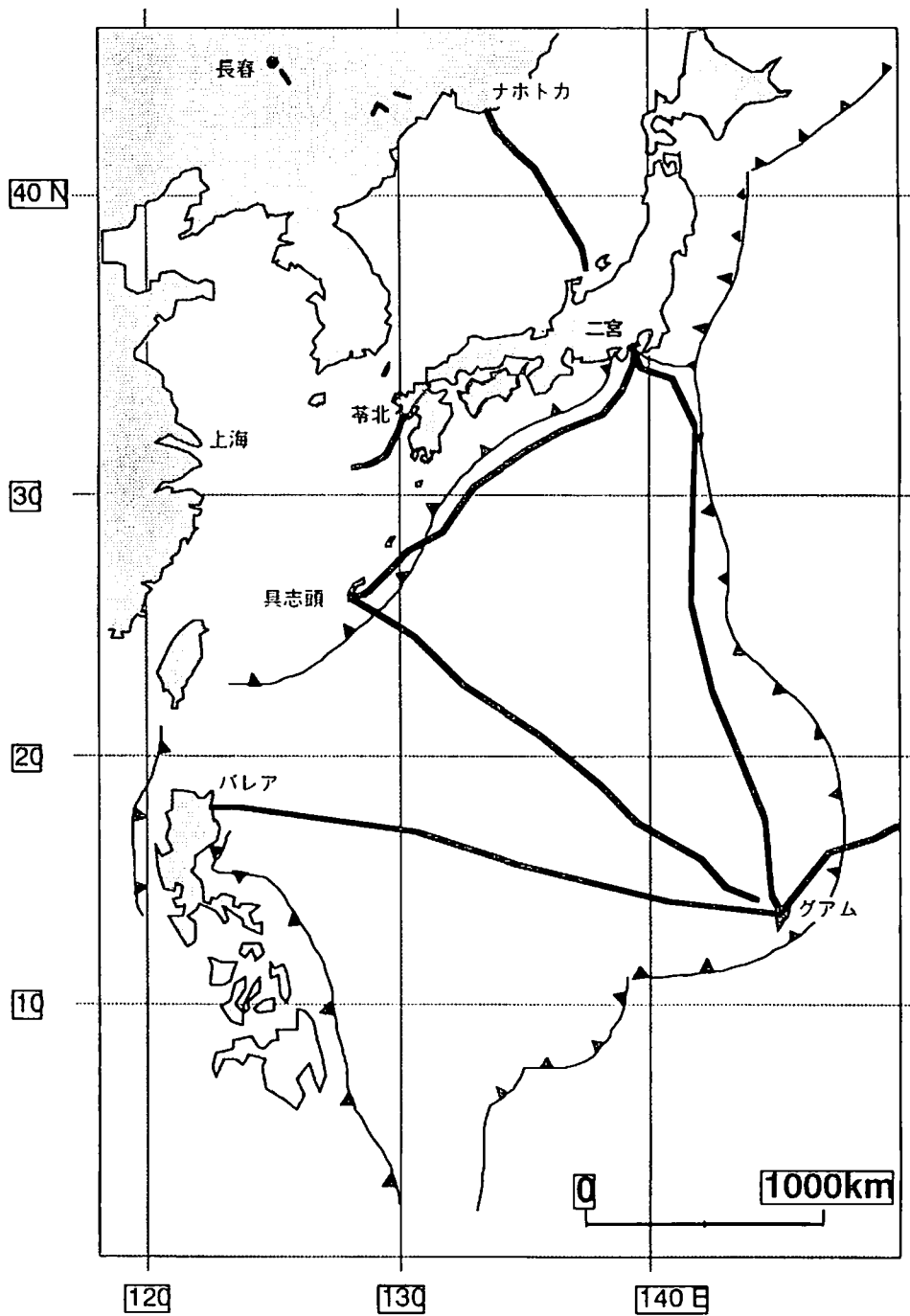
る。したがって、この観測によってマントル遷移層までの構造を明らかにするという、当初の目的を達成することは原理的に可能である。中国との共同研究によって、主な回線が光ファイバー化されるまでにできるだけ多くの電位差観測を行ないたい。しかしながら、このような観測から当初の目的である火山活動の成因やそのスタグナント・スラブの存在との関連などを解明するためには、さまざまな未解決の問題がある。

我々が対象としている地域は、西太平洋から東アジアにまたがっている。同地域の地図に今回の観測点をプロットすると、第9図のようにごく小さな領域をカバーしているにすぎない。したがって、問題にしている沈み込み帯の構造を解明するためには、この観測だけではなく、日本周辺の海底ケーブルによる電位差観測や、各地における地磁気3成分観測、国内におけるネットワーク MT 観測、さらには海底電磁気観測などのデータを総動員してモデリングを行なう必要がある。

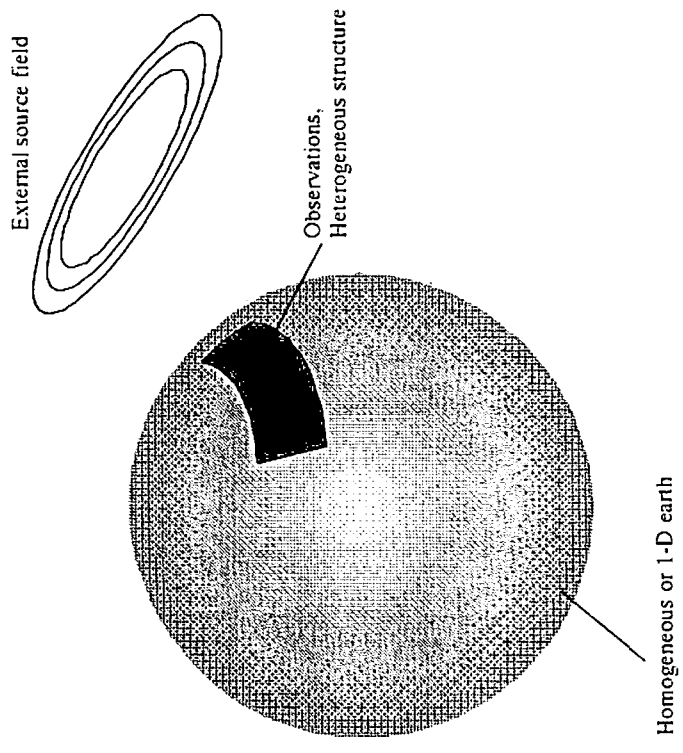
具体的にどのような構造解析を行なうかを考える上でまず重要なのは、スケール長の問題である。これによって、通常の MT 法で行なわれるように半無限不均質空間に一様な外部磁場変化を与えた問題というアプローチが可能であるのか、地球を球体として扱うグローバルなアプローチが必要なかが決定される。この関係は、第10図に簡単に示した。MT法のようなアプローチは、Induction number  $M = L/\lambda$  が十分に大きな場合にのみ可能である。ただし、 $L$  は対象とする構造の実スケールでここでは地球の大きさ、 $\lambda$  はスキン・デプスである。上に述べたように、今注目する周期における見かけのスキン・デプスは 1,000km にもなるので、地球が球体であることを意識したアプローチが必要であることがわかる。このことは同時に、ソースとなる外部磁場変化の空間分布もその形を意識してモデルにとりこむ必要があることを意味する。第7図に示した応答のうち、磁気嵐の擾乱に関係する変動と日変化の外部磁場の分布は明らかに異なっている。周期数万～十万秒付近の応答の特異な様相はソースの形の違いを反映している部分もあるかも知れない。

グローバルなアプローチが必要であることはわかったが、いきなり数百～数千キロメートルのスケールの不均質構造をもったグローバル電磁誘導解析を行なうことは、いかに大容量かつ高速な計算機が使える現代とはいえ容易ではない。そこで、我々はセミ・グローバルという新しいアプローチを提案する(第11図)。ここでは、地球は球体でソースの形も考慮する点はグローバルなアプローチと全く同様である。異なるのは、3次元的な不均質が存在する領域が全球の一部である点である。電磁誘導方程式を有限差分法や有限要素法 (Everett and Schultz, 1996) で解く場合には、両者の違いはそれほど大きくはないが、積分方程式法 (例えば Pankratov et al., 1995) の場合には大きな違いがある。このアプローチでは、グリーン関数と不均質パラメータを核とする積分を実行するのは不均質が存在する領域だけだからである。このような問題として扱うためには、もちろんソースの外部電磁場をどのように決めるかという深刻な問題も存在することを忘れてはならない。

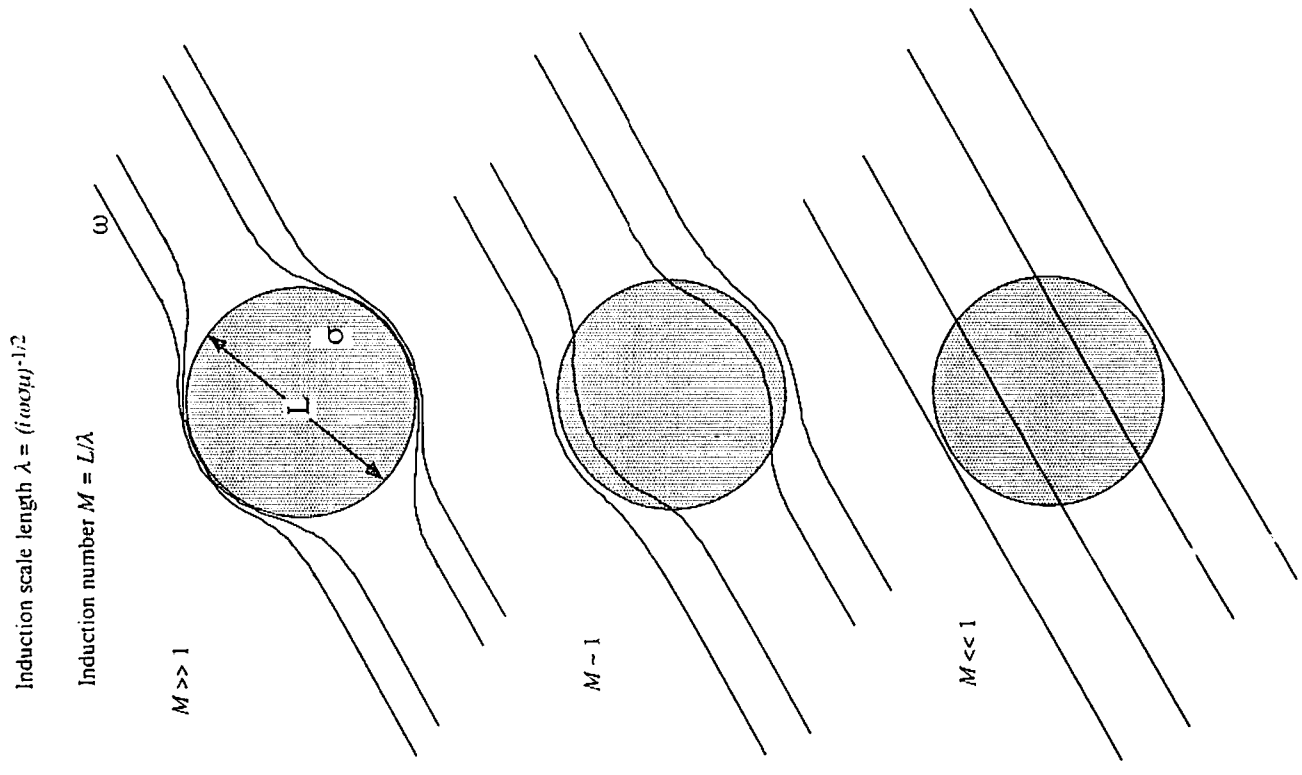
終わりに近づくとつれて、本来のテーマから筋道がずれてしまったきらいがあるが、中国における共同観測を行ないつつ考えたことを述べさせていただいた。



第9図 西太平洋の沈み込み帯と中国における観測点の分布。将来的には、ここに示すような海底ケーブルを用いた電位差観測データも取り入れて構造解析を行なう。



第10図(左) 一様な導体球に平行な磁力線で表わされる外部磁場変動が与えられたときの電磁誘導の様子. 上から induction number が大きい場合, 1程度の場合, 非常に小さい場合 (static).  
 第11図(上) 3次元不均質を含む電磁誘導の問題へのセミ・グローバルなアプローチ.



#### 参考文献

- Everett, M. E. and A. Schultz, Geomagnetic induction in a heterogeneous sphere: azimuthally symmetric test computations and response of an undulating 660-km discontinuity, *J. Geophys. Res.*, 101, 2765-2783, 1996.
- 深尾良夫, 地球内部を覗く新しい目, 月刊地球, 20, 313-320, 1998.
- Fukao, Y., M. Obayashi, H. Inoue, and M. Nishida, Subducting slabs stagnant in the mantle transition zone, *J. Geophys. Res.*, 97, 4809-4822, 1992.
- Handa, S., Y. Tanaka, and A. Suzuki, The electrical high conductivity layer beneath the northern Okinawa Trough, inferred from geomagnetic depth sounding in northern and central Kyushu, Japan, *J. Geomag. Geoelectr.*, 44, 505-520, 1992.
- 岩森 光, 中国地方新生代玄武岩類の成因—ホットスポットかウエットスポットか, 月刊地球, 17, 368-375, 1995.
- Miyashiro, A, Hot regions and the origin of marginal basins in the western Pacific, *Tectonophysics*, 122, 195-216, 1986.
- Pankratov, O.V., D.B. Avdeev, and A.V. Kuvshinov, Electromagnetic field scattering in a homogeneous earth: a solution to the forward problem, *Izvestia, Phys. Solid Earth*, 31, 201-209, 1995.
- Shimizu, H. and H. Utada, Ocean Hemisphere Geomagnetic Network: its instrumental design and perspective for long-term geomagnetic observations in the Pacific, *EPS*, 1999 (in press).
- Shimoizumi, M., T. Mogi, M. Nakada, T. Yukutake, S. Handa, Y. Tanaka, and H. Utada, Electrical conductivity anomalies beneath the western sea of Kyushu, Japan, *Geophys. Res. Lett.*, 24, 1551-1554, 1997.
- 巽 好幸, 沈み込み帯のマグマ学, 東京大学出版会, pp.186, 1995.
- Uyeshima, M., Utada, H. and Nishida, Y., Network-MT Method and its first results in the central and eastern part of Hokkaido, northern Japan, *Phys. Earth planet. Int.*, 1999 (in press).