

1 研究目的、研究方法など

本研究計画調書は「小区分」の審査区分で審査される。記述に当たっては、「科学研究費助成事業における審査及び評価に関する規程」（公募要領参照）を参考にすること。

本研究の目的と方法などについて、4頁以内で記述すること。

冒頭にその概要を簡潔にまとめて記述し、本文には、(1)本研究の学術的背景、研究課題の核心をなす学術的「問い」、(2)本研究の目的および学術的独自性と創造性、(3)本研究の着想に至った経緯や、関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ、(4)本研究で何をどのように、どこまで明らかにしようとするのか、(5)本研究の目的を達成するための準備状況、について具体的かつ明確に記述すること。

本研究を研究分担者とともに行う場合は、研究代表者、研究分担者の具体的な役割を記述すること。

（概要）

同一の子午線上にあり緯度方向に～100km離れた2つの地上磁力計のデータのみを用い、その磁力計ペアで同時観測された磁力線固有振動から、その2つの磁力計を含む子午面（宇宙空間まで広がる）におけるプラズマ密度を地上緯度の連続関数として推定するリモートセンシング法を開発する。また、磁力線共鳴幅（磁力線固有振動のエネルギーの電離層での吸収損失効率の指標）を地上緯度の連続関数として求める方法も開発する。

この方法を複数の地上磁力計ペアに適用し、磁気圏（地球近傍の宇宙空間）のプラズマ密度空間分布、及び共鳴幅分布の時間変化を追跡する。特に磁気嵐等の擾乱時の時間空間変化を明らかにする。

磁気圏を同時観測する科学衛星の数は10のオーダーで、広大な体積（地球体積の千倍を超える）を持った磁気圏をとてカバーできないが、現在稼働している地上磁力計の数は1000のオーダーで、磁気圏内を覆う磁力線はその先を辿ると地上を通過する為、地上での磁力計分布の空隙を埋める事も出来るこのリモートセンシング法は有用である。

（本文）

(1) 本研究の学術的背景、研究課題の核心をなす学術的「問い」

研究課題の核心をなす学術的「問い」から記すと、「任意の時刻における磁気圏プラズマ密度空間分布の snapshot を出来る限り広範囲で測定するにはどうすれば良いか？」である。何故この測定を行いたいかというと、磁気嵐等の擾乱時の時間空間変化を出来る限り克明に追跡する事でその物理的性質を現在より深く理解したいからである。磁気圏プラズマ密度は人工衛星で直接観測するのが正確であるが、上述の通り、現在磁気圏内を飛翔している科学衛星の数は10のオーダーであり、広大な磁気圏（半径は最小でも地球半径の10倍）の密度分布の snapshot を得るには圧倒的に足りない。それに対し地上磁力計の数は現在1000に近く、全世界に分布しており、磁気圏の磁力線は全て地表に届いているので、地上磁力計の観測データを用いて磁力線沿いの磁気圏プラズマ密度を推定できれば、より広範囲の空間分布の snapshot が得られる。

本研究の学術的背景：その推定の為にこれまで使われてきた方法は、地上磁場観測データ中から (a) 磁力線固有振動に伴う成分を同定し、(b) その周波数を用いて磁力線沿いの磁気圏プラズマ密度を推定する、というものであった。

まず(b)について記す。(b)の為の方法はこれまでに数多くの研究がなされてほぼ確立しており [e.g., Singer et al., 1981; Takahashi et al., 2004]、本申請研究でもその方法を用いる。

次に本申請研究の中心テーマに関わる(a)について記す。地上磁場観測データ中には、磁力線固有振動以外の成分（磁力線固有振動より大きい振幅と広い周波数幅を持つ）が重畳しているので、単に時系列プロットやスペクトル解析を行っただけでは磁力線固有振動成分を抜き出す事は出来ず、その目的に特化した解析方法が必要である。

その解析方法として現在世界的にもっとも多く使われているのは、「振幅比法」及び「位相差法」の2方法 [e.g., Baransky et al., 1985; Waters et al., 1991] であり、磁力線固有振動の以下の性質を利用している。

磁力線固有振動は磁力線共鳴 [e.g., Southwood, 1974] により励起され、その磁場変動の

【1 研究目的、研究方法など（つづき）】

振幅は、〔磁気圏内を伝搬してきて磁力線固有振動の励起源となる波動〕の周波数と磁力線固有振動周波数が一致する磁力線において最大になり、また、磁力線固有振動の位相の空間勾配も同じ磁力線において最大になる。励起源が広範囲の周波数を含んでいる場合、図1(a), (c)のようになる。この図1(a), (c)では、例として、周波数 f_1 , f_2 , f_3 を持った成分を緯度の関数として表示している。ここに、 $f_1 < f_2 < f_3$ としている。また、2観測点は緯度 x_1, x_2 ($x_1 > x_2$) にあり、 f_1 の共鳴点は x_1 より高緯度、 f_2 の共鳴点は2観測点の中間 $x_m \equiv (x_1 + x_2)/2$ 、 f_3 の共鳴点は x_2 より低緯度、としている。それぞれ共鳴点の緯度において振幅最大となり（図1(a)中 f_1, f_2, f_3 とラベルされた曲線）、位相の空間勾配も最大になる（図1(c)）。地球磁場は dipole 磁場で近似され高緯度ほど磁力線が長く低周波振動する傾向があるので、 f の上記設定は自然なものである。

このとき、 x_1 と x_2 での振幅の比(f の関数)は図1(b)のように bipolar 型になり、その左右反対称形の中心で $f = f_2$ になる。また、2点での位相の差は図1(d)のように unipolar 型になり、その極小値の位置で $f = f_2$ になる。

一方、磁場データ中に重畳されている〔磁力線固有振動以外の成分〕は、磁力線の向きにかかわらず等方的に伝播し、磁気圏のスケールの波長を持っているので、地表で100km離れた程度では殆ど差が出ない、と過去の観測から判っている。よって、地上で南北に～100km離れた2点(図1では x_1, x_2 の2点で表している)で観測された磁場の比を取ると、重畳成分は互いに打ち消され、磁力線固有振動成分が残って図1(b), (d)のような図が得られ、2観測点の中間 x_m での固有振動周波数 f_2 が求められる。

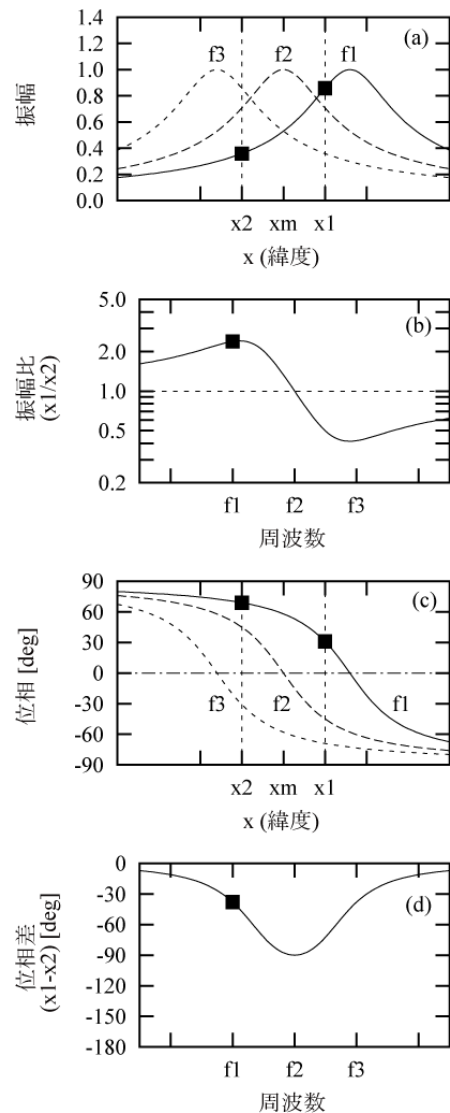


図1. (a), (c) : 磁力線固有振動の振幅と位相、横軸は緯度、観測点は緯度 x_1, x_2 に位置 ($x_1 > x_2$)。 (b), (d) : 振幅比と位相差、横軸は周波数。 f_1, f_2, f_3 ($f_1 < f_2 < f_3, f_3 - f_2 = f_2 - f_1$) は例として表示。 図中■点は、例として、 x_1, x_2 での f_1 の観測を示す。

(2) 本研究の目的および学術的独自性と創造性

以下の2点がある。

1点目：上記の方法には以下の2つの問題点がある。

問題点(2.1) は、「振幅比法」「位相差法」で得られるのは「地上2点の中間位置 (x_m) における固有振動周波数 (f_2)」のみ、という点である。観測データは f_2 を含む広い周波数範囲をカバーしているが、 f_2 の値以外の情報は「振幅比法」「位相差法」では捨てられる。しかし、他の周波数でのデータは2観測点より高緯度側及び低緯度側での磁力線固有振動の情報を含んでおり、解析において有効利用されるべきものである。

問題点(2.2) は、「振幅比法」「位相差法」による磁力線固有振動の同定は一般に昼側でしか機能しない、という点である。これは、磁力線固有振動の励起エネルギー源が昼側太陽風に集中している為である。

この2つの問題点を解決するのが**本研究の目的**の1つであり、その**学術的独自性と創造性**はその解決法（(4)にて説明）にある。

2点目：磁力線固有振動に関する上記以外の重要な物理過程として、その振動エネルギーの電離層における吸収損失がある。その損失率が大きいほど、図1(a)の振幅の緯度プロファイルの広がり（共鳴幅と呼ばれる量で表現される。これは半値幅に比例する量である）

【1 研究目的、研究方法など（つづき）】

は大きくなる（判りやすさの為 図1中では f1, f2, f3 全て同じ共鳴幅で描いてあるが実際には同じ共鳴幅である必然性はない）。この物理量は、磁気嵐等の擾乱の発達減衰を考えると重要であるにもかかわらずこれまでその空間分布の詳しい解析は行われていない。

本研究の目的のもう1つは、この解析を行うために、共鳴幅についても、離散2点の磁場データのみから、緯度の連続関数として求める方法を開発することである。その方法（(4)にて説明）は学術的独自性と創造性を有している。

(3) 本研究の着想に至った経緯や、関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ

(3.1) 本研究の着想に至った経緯

(3.1.1) 以前より地上観測磁場データを用いた磁気圏のプラズマ密度推定の研究を行っており、その際に振幅比法・位相差法も用いていたが、地上2点の中間点での密度しか得られない事に物足りなさを感じていた。特に、密度空間勾配の情報は重要であり、それが得られない事に物足りなさを感じていた。そこでホドグラフ法を使用して見て、その際ホドグラフ法は共鳴幅も求められる事を知った。ただホドグラフ法では共鳴幅が定数と仮定されている事に物理的不自然さを感じた。それを解決する新しい方法を考えよう、というのが本研究の着想に至った経緯である。そして、考えた結果、新しい方法を考えついた（Improved Hodograph Methodと命名；以下 **IHM** と略記）。

(3.1.2) 夜側での密度・共鳴幅の推定が行えない事も、地上磁場からの推定法の弱点であった。その弱点を解消する方法をずっと考えてきていた。これも本研究の着想に至った経緯である。そして、考えた結果、下記(4)の方法を考えついた。

(3.2) 関連する国内外の研究動向と本研究の位置づけ

南北アメリカ、ヨーロッパでは、はじめから振幅比法・位相差法を用いる事を想定して1つの子午線上の複数点に磁力計ペアが位置するように磁力計を設置する研究計画が提案・採用・実行されてきている。そして、それらによって得られたデータに振幅比法・位相差法を適用して磁力線固有振動周波数を求め、それを用いて磁気圏プラズマ密度を推定した研究が存在する [e.g., Chi et al., 2005]。ただ、隣り合うペア間の距離は～100km(ペアを構成する2磁力計間の距離)より有意に広く、低緯度から高緯度まで稠密なものはない。さらに、振幅比法・位相差法ではペアの位置での密度だけが求まるので、解析結果は横軸緯度・縦軸密度の図中に点を複数プロットしたものになっている。それらをスプライン関数等で補間するよりは、**IHM**は最初から緯度の連続関数として密度を求めることが出来る（下記(4)で説明）ので、**IHM**の方が方法論として優れている。また、上記先行研究では共鳴幅に関する解析は行われておらず、本研究で初めて行う事になる。

また、日本近辺の経度範囲では、～100km間隔の磁力計ペアの数はアメリカ・ヨーロッパよりずっと少なく、よって、磁力計ペア間の距離もずっと広がっている。その間隙を埋める方法として **IHM** は優れている。そして、これによって日本近辺の経度範囲の密度情報が得られるようになれば、アメリカ、ヨーロッパ、日本近辺、の子午線がそれぞれ～120°離れているので、常にこの3つの子午線の少なくともどれか1つが昼側に位置する事となり、昼側の磁気圏・電離圏の情報が途切れなく得られる事になる。

(4) 本研究で何をどのように、どこまで明らかにしようとするのか

まず、上記問題点(2.1)を解決し、かつ上記(2)中の「2点目」を解決するために考案した下記の方法を具現化する。次に問題点(2.2)を解決するために考案した下記の方法を具現化する。この2つにより、磁気圏全体でのプラズマ密度分布、及び共鳴幅分布を時間の関数として追う事ができるようになる。本研究では、その具体的適用として、既存の地上磁場多点同時観測データに上記方法を適用して、特に磁気嵐等の擾乱時の時間空間変化を明らかにする。

○問題点(2.1)および「2点目」の解決法：離散2点の磁場データのみから磁力線固有振動周波数を緯度の連続関数として求める既存の方法にホドグラフ法（Hodograph Method；以下

【1 研究目的、研究方法など（つづき）】

HM [e.g., Pilipenko et al., 2013] (←論文中的数据解析は共著者である河野が実行) がある。

HM では、磁力線共鳴の理論式 $H = CK_1(\lambda(x - x_R + i\delta))$ (式(1)) の近似形 $H' = \frac{C'}{1+i\frac{x-x_R}{\delta}}$

(式(2)) を用いる (ここに H, H' は地上磁場変動南北成分、 K_1 は 1 次の変形ベッセル関数、 C, C', λ は定数、 x は緯度、 x_R は **共鳴点の緯度** (周波数の関数)、 δ は **共鳴幅** (周波数の関数))。 H と H' との差は H の半値幅の範囲では 5% 以下 [Pilipenko et al., 2013] で、 H' は H の充分良い近似となっている。

HM では、2 点での観測値の比のデータ (FFT 結果の 1 周波数毎に 1 データ) を複素平面上にプロットした点に、理論式(2)で計算した比の理論値を複素平面に描いて得られる 理論ホドグラフ を最小自乗フィットする。この 理論ホドグラフ は、 δ が周波数によらず一定と仮定すれば真円になる。**HM** ではデータに真円を fit して、 $x_R(f)$ と δ (仮定により定数) を求める。データ点の理論ホドグラフからのずれが noise 項と理解出来るので、誤差解析 も可能である。また、FFT で得られた全ての f の値に対応する $x_R(f)$ が得られる。つまり、この方法でも、FFT 結果の全ての周波数のデータから結果が得られる。

しかし、**HM** の「 δ が周波数によらず一定」の仮定は常に妥当とは到底思われない。

例えば磁気嵐等の擾乱時にオーロラ粒子が磁気圏から電離層に降り注ぐ位置では、オーロラ粒子による電離層加熱の効果で δ が局所的に増大している筈である。そのようなダイナミクスを追うためには、「共鳴幅 δ が緯度の任意の関数 $\delta(x)$ であるとして、それに基づくホドグラフをデータにフィッティング出来る」方法が必要である。

そこで私は、そのような方法である上記 Improved Hodograph Method (**IHM**) の開発に取り組んできた。本申請研究にてそれを完成させ、実際の地上磁場データに適用する。

○問題点 (2.2) の解決法：相対的に小さいとはいえ夜側磁気圏内にも励起エネルギー源は存在しており (磁気圏プラズマ対流等)、それにより夜側でも小振幅の磁力線固有振動は起きている筈だが、「磁力線固有振動以外の重畳成分」に対する比が小さすぎる為現在の

「振幅比法」「位相差法」でも抜き出せない、と考えられる。この困難を克服して、夜側でも磁力線固有振動周波数及び共鳴幅を求める為に、重畳成分を既存の方法よりもさらに徹底的に取り除く以下の方法を考案した： 本計画書の p2 上半部に記したように、磁場データ中に重畳されている 磁力線固有振動以外の成分は、磁力線の向きにかかわらず等方的に伝播し、磁気圏のスケールの波長を持っていると考えられる。そのような成分であれば、磁力線が地表面に殆ど水平である 赤道領域において、最もピュアな形で (磁力線沿いに伝わる成分が含まれない形で) 観測される筈である。

そこで、夜側磁場データの解析の第 1 段階において、**IHM** に使用する観測点 2 点の磁場データから、同じ子午線上で赤道に位置する観測点の磁場データを、あらかじめ引き算して差し引いておく。これにより、データ中の磁力線固有振動以外の成分の比率を、**IHM** の適用前にかなり下げることが出来ると期待され、差し引き後のデータを使って振幅比と位相差を計算する事で、磁力線固有振動以外の成分の比率を更に減少させ、夜側の小振幅の磁力線固有振動現象でも同定出来るようになると期待出来る。本研究ではこの方法を実行するプログラムを作成し、実際の地上磁場データに適用する。

(5) 本研究の目的を達成するための準備状況

(3.1.1) の 準備状況：**IHM** のプログラムは、イベント数例 (テストの為、磁気嵐等の擾乱が生じていない時の例を選んだ) の地上磁場観測データに適用してテストしながら作成しており、本申請研究期間中に完成出来る。**IHM** のプログラムの完成後に上記のイベント数例の最終的な解析結果で case study 論文を作成し、その後、磁気嵐等磁気擾乱時のイベント複数 を **IHM** で解析し、その結果を統計解析して論文化する。

(3.1.2) の 準備状況：(3.1.2) の実際の適用については、**IHM** のプログラムの完成後に行う計画である。

2 応募者の研究遂行能力及び研究環境

応募者（研究代表者、研究分担者）の研究計画の実行可能性を示すため、(1)これまでの研究活動、(2)研究環境（研究遂行に必要な研究施設・設備・研究資料等を含む）について2頁以内で記述すること。

「(1)これまでの研究活動」の記述には、研究計画に関連した国際的な取組（国際共同研究の実施歴や海外機関での研究歴等）がある場合には必要に応じてその内容を含めること。また、研究活動を中断していた期間がある場合にはその説明などを含めてもよい。

(1)これまでの研究活動

私は1987年度の東京大学大学院修士課程（理学系研究科地球物理学専攻）入学以降、同博士課程（1992年3月に博士の学位を取得）、日本学術振興会特別研究員（東京大学在籍、1995年1月まで）、同 海外特別研究員（米国UCLAに滞在、1997年1月まで）、名古屋大学COE研究員（1997年末まで）、の期間を通して、数々の人工衛星による地球磁気圏のプラズマ直接観測データの解析研究を行ってきた。

私は、プラズマという、イオンと電子が分離した上で再結合しないまま混ざり合い、電磁場にその運動の影響を受けると共に電磁場・電流を生む事も出来る、という物質に興味があった。

私はまた、磁気圏という、惑星起源の磁場が支配する宇宙空間領域（地球、水星、木星、等、固有磁場を持つ惑星は全てその周りに磁気圏を持つ）に興味があった。

そして私は、理論的研究よりは観測的研究の方に興味があった。

プラズマに満たされた自然環境領域を直接その場観測できるのは人工衛星のみであり、私の上記研究期間にはプラズマを観測する人工衛星は地球近傍を飛翔するものがほとんどだった為、上記の興味を全て満たす人工衛星データの解析研究を行ってきた、というのが上記の研究履歴の背景にある。研究対象は磁気圏内部の様々な時間・空間スケールの擾乱現象が多く、昼間側の太陽風・磁気圏境界で局所的リコネクション（磁力線繋ぎ換え現象）によって生じる磁束管構造、太陽風動圧の急変に伴う磁気圏の変形、サブストームと呼ばれる磁気圏全体が荒れる現象、等であった。また、これらの解析に用いる解析手法の開発にも興味がありその開発研究も行った。これらの研究の結果、1997年末の時点までの査読つき論文総数は、主著論文数は14、共著も入れた全論文数は30だった。

1998年1月以降現在まで継続して九州大学大学院理学研究院地球惑星科学科に在籍している。所属研究室では当時（から現在まで）日本を通る子午線沿いと赤道沿いの多点で地上磁場観測研究を進めていたことから、そのデータを活用し、かつ私のそれまでの研究ともつながるような研究テーマとして、本申請に記したテーマ（地上からグローバルな磁気圏プラズマ密度分布を推定する）の研究、また、同一磁力線上での地上磁力計と人工衛星での磁場同時観測による「磁気圏－電離層を繋ぐ電流回路の同定とその特徴の解析研究」、を行ってきた。また、1997年までおこなっていたような人工衛星中心の研究もペースは落ちたが続けている。さらに、本研究計画調書のp2, p3や本段落2行上に記したように、電離層の研究も開始している。これらの研究の結果、現時点までの査読つき主著論文数は27、共著も入れた査読つき論文数は98である。

そのうち本研究計画に関わる論文は以下の通りである。

- Kawano, H., K. Yumoto, V. A. Pilipenko, Y.-M. Tanaka, S. Takasaki, M. Iizima, and M. Seto, Using two ground stations to identify magnetospheric field line eigenfrequency as a continuous function of ground latitude, *Journal of Geophysical Research*, 107(A8), 1202, doi:10.1029/2001JA000274,

【2 応募者の研究遂行能力及び研究環境（つづき）】

August 24, 2002.

- Takasaki, S., H. Kawano, Y. Tanaka, A. Yoshikawa, M. Seto, M. Iizima, Y. Obana, N. Sato, and K. Yumoto, A significant mass density increase during a large magnetic storm in October 2003 obtained by ground-based ULF observations at L~1.4, Earth, Planets and Space, 58, 617-622, May 12, 2006.
- Abe, S., H. Kawano, J. Goldstein, S. Ohtani, S. I. Solovyev, D. G. Baishev, and K. Yumoto, Simultaneous identification of a plasmaspheric plume by a ground magnetometer pair and IMAGE Extreme Ultraviolet Imager, Journal of Geophysical Research, 111, A11202, doi:10.1029/2006JA011653, Nov. 1, 2006.
- Kawano, H. and D.-H. Lee, Gradient methods applied to simulated ULF data: The effects of the ionospheric damping factor, Journal of Geophysical Research, 112, A07212, doi:10.1029/2006JA011849, 17 July, 2007.
- Takasaki, S., N. Sato, A. Kadokura, H. Yamagishi, H. Kawano, Y. Ebihara, and Y.-M. Tanaka, Interhemispheric observations of field line resonance frequencies as a continuous function of ground latitude in the auroral zones, Polar Science, vol. 2, issue 2, pages 73-86, Jun. 2008.
- Maeda, N., S. Takasaki, H. Kawano, S. Ohtani, P. M. E. Decreau, J. G. Trotignon, S. I. Solovyev, D. G. Baishev, and K. Yumoto, Simultaneous observations of the plasma density on the same field line by the CPMN ground magnetometers and the Cluster satellites, Advances in Space Research, doi:10.1016/j.asr.2008.04.016, 43(2), 265-272, 15 January 2009.
- Pilipenko, V. A., H. Kawano, and I. R. Mann (2013), Hodograph method to estimate the latitudinal profile of the field-line resonance frequency using the data from two ground magnetometers, Earth Planets Space, Vol. 65 (No. 5), pp. 435-446, 2013, doi:10.5047/eps.2013.02.007, June 10, 2013.
- Kawano, H., A. S. Yukimatu, Y. Tanaka, S. Saita, N. Nishitani, and T. Hori, SC-triggered 1.6mHz waves including an interval with latitude-dependent phase shift, observed by the SuperDARN Hokkaido East Radar in mid latitudes: Possible global magnetospheric cavity-mode waves and their field-line resonance with poloidal Alfvén-mode waves, Memoirs of the Faculty of Science, Kyushu University, Series D, Earth and Planetary Sciences, Vol. 34 (No. 1), pp. 1-15, Nov. 21, 2016.

(2) 研究環境（研究遂行に必要な研究施設・設備・研究資料等を含む）

私は健康上の問題を抱えており、加齢とともにプログラミング速度が遅くなっています。私が指示するプログラミングとそれを用いたデータ解析を行える研究補助者を得られれば、研究立案・方向づけ能力は悪化しておりませんので、健康上の問題が少なかった40代までに近い研究遂行速度を取り戻せると信じています。本科学研究費によってそのための人件費が得られれば幸いです。

本研究はデータ解析中心の研究で、それに必要なパーソナルコンピューター・ハードディスク・ソフトウェア等の設備・備品・消耗品は現在足りています。

