

## 論文の内容の要旨

論文題目            A model of time-averaged geomagnetic field  
                          and paleosecular variation for the last 5 million years  
(過去 5 百万年間の平均地球磁場および古地磁気永年変化モデル)

氏 名                島山唯達

### 1. 研究の背景

ダイナモ作用によって生み出される地球内部起源の磁場は、主に数万年程度の短い時間スケールで不規則に変動していることが知られている。このような変動を解析するために2つのアプローチが考えられる。1つは時間変動そのものを追うことである。そのために、機械観測や考古地磁気学などの正確な時間が測定できるデータ、あるいは堆積物を用いた古地磁気学測定から得られる連続性が確保できるデータが用いられる。しかしこれらのデータは、サンプルが十分に確保できないため数千年前までしか遡ることができない。さらに長い時間(大陸移動の影響がない、つまりコアーマントル境界の状態が変わらない、過去5百万年間程度)の変動を知るためには古地磁気データを統計的に解析することが必要である。火山岩試料を用いた古地磁気学データは、時間的連続性・同時性を持たない。しかし、各サイトにおける個々のデータの分布は、地球磁場変動の統計的性質、すなわち「平均的な磁場 (time-averaged field: TAF)」+「時間的変動の振幅 (Paleosecular Variation: PSV)」を反映していると考えられる。そしてその特徴を表すガウス係数の平均 (TAF)、および変動分 (PSV) を求めることで地球磁場変動の特徴をつかむことが可能になる。

1970年代以降、TAFは軸対称地心双極子 ( $GAD:g_1^0$ ) だけではなく、地心四重極子 ( $g_2^0$ ) もある程度含むことが知られてきた。また、ダンピングを入れた近代的なインバージョン手法が90年代に入り洗練されたことで、他の成分についても球面調和解析を用いて求められるようになってきた。しかし、求められたモデルでは、モデルへの制約の大きさやかけ方がまちまちなことなどが原因で結果が大きく異なる。また、Kono *et al.* (2000) は、過去の非線形インバージョンによるモデルでは

PSV の影響により古地磁気データの平均方向がずらされる効果を考慮していないことを指摘した。

一方古くから、古地磁気データが示す仮想古地磁気極 (VGP) のサイト毎のばらつきがサイトの緯度に依存し、その大部分は PSV を起源としていることが指摘されていた。この特徴を説明するためにさまざまな PSV モデルが議論されてきたが、Constable and Parker (1988) は、観測される地磁気の分散と地球磁場の変動を表すガウス係数の分散を結びつけるという、画期的な “Giant Gaussian Process” を提唱した。その後、これを土台としたいくつかのフォワードモデルが提出され、特徴的な分散を持つガウス係数の成分について論じられるようになってきた。

本研究では、地球磁場の長期的な変動を統計的・総合的に理解するために、まず、PSV が平均方向データをずらす効果を定量的に検討し、その結果を用いて TAF および PSV についてお互いに整合性を持った逆問題を解き、統一的な TAF+PSV のモデルを提唱した。

## 2. 平均磁場方向への古地磁気永年変化の影響

強度を含まない方向データは、ガウス係数に対して非線形な関係をもっている。そのため、その平均値 (期待値) はガウス係数の平均のみならず、高次のモーメントの影響も受けてしまう。そこで、ガウス係数が正規分布に従い独立に時間変動をすると仮定し、その分散 (PSV) が平均方向をずらす効果をモンテカルロ法による数値的、および展開による 2 次 (分散の 1 次) までの解析的な方法を用いて定量した。その結果、伏角に対して、中低緯度で最大数度浅くする効果があることがわかった。また非系統的な測定誤差は、平均方向をずらさないことも確認された。

## 3. 平均地球磁場、古地磁気永年変化モデル

上記の結果から、データの平均、分散とモデルの平均 (TAF)、分散 (PSV) は相互に複雑な関係をもっている。そこで、矛盾のない TAF および PSV を求めるために以下のような手順を踏む。まずはじめに、PSV の初期モデルを仮定し、(1) それを用いて古地磁気データの平均から TAF を決める。(2) 次にその TAF の値を基本場として用いデータの分散から PSV を求める。以下、(1)、(2) を繰り返し、収束したところを最終的な TAF、PSV モデルとする。本研究では、過去 5 百万年間の逆転途中やエクスカージョンの時期を含まない静磁極期に地上に噴いた熔岩を用いた古地磁気方位データベース (Johnson and Constable, 1996) を使う。古地磁気強度データや堆積物から得られた方位データは、質的に問題があるので使用しない。

TAF の計算にはモデルに物理的に妥当な制約を入れた逆計算の 1 種の Stochastic Inversion を用いる。そこで用いられる制約条件の大きさ  $\lambda^2$  は ABIC によって決定した。また上記の平均方向に対する PSV の影響については、ガウス係数の 2 次までの展開式を用いた。一方 PSV を求める計算では、 $g_1^0, g_2^1 + h_2^1$ , 残りのガウス係数という 3 つのパラメータにしぼり、それらの分散を最小

自乗法によって決定した。モデルの標準偏差は正規乱数を用いて数値的に計算した。

上記の計算は数回の繰り返しの後うまく収束し、その解析結果より以下のことがわかった。

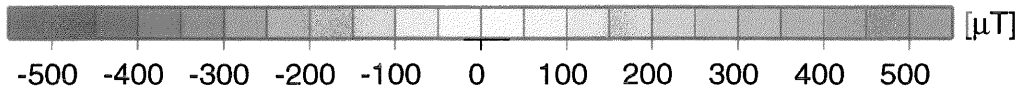
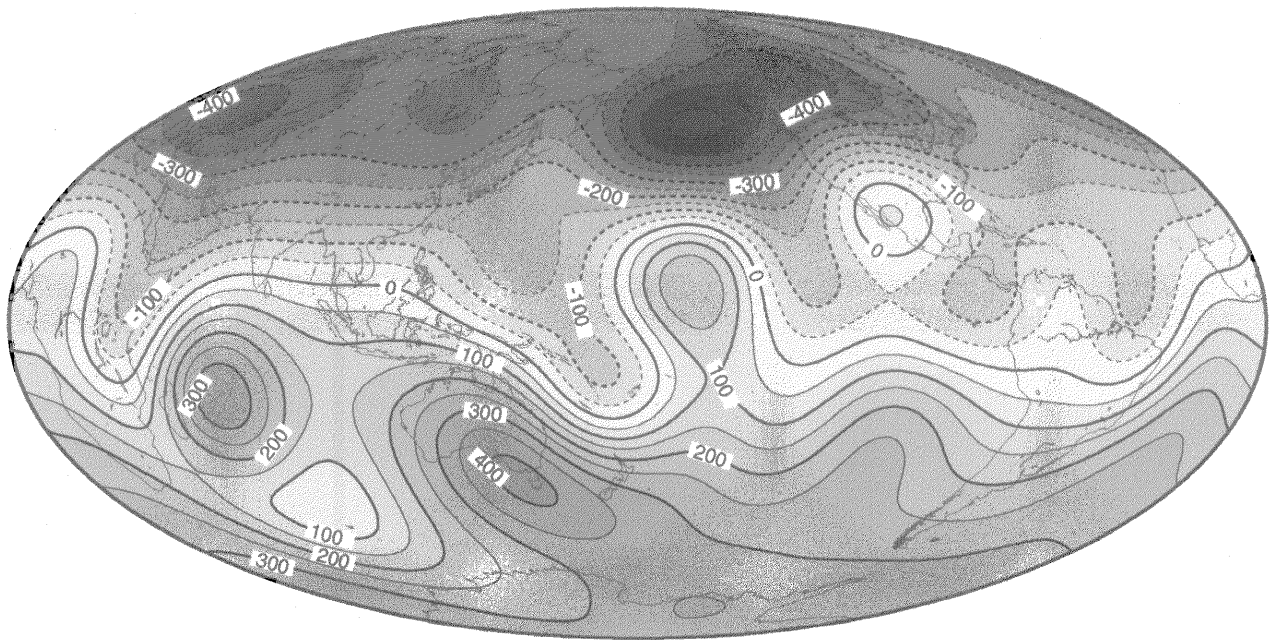
#### 平均地球磁場 (TAF) について (図 1)

- ABIC は従来のモデルに比べて幾分ダンピングが小さな解を選択する。このことはデータ重視を重視していて、TAF のより細かい構造が表されている。
- 正・逆磁極期のどちらでも、 $g_1^0$  を除いて一番顕著な成分は  $g_2^0$  で、その符号は  $g_1^0$  と同じである。このことからどちらの時期にも VGP はサイトに対して地理的な北極の向こう側に行くと言う、Far-side effect が起こっていたことがわかる。

#### 古地磁気永年変化 (PSV) について (図 2)

- $g_1^0$  (GAD) の変動は小さく、その上限は  $g_1^0$  の平均の 2 割程度である。一方、古地磁気強度データ分布を用いて  $g_1^0$  の分散を推測した、過去のいくつかの研究では、平均の 3~6 割程度の大きな変動を予測している。しかし、これらの値は実際の変動を過大評価してしまっていると考えられる。というのも、古地磁気強度データは方向データに比べ誤差が大きい。また、強度データの分布から  $g_1^0$  の分布を推定するためには、「個々の岩石が磁化を獲得した瞬間の形」がわかっていることが必要であるが、それは困難である。この 2 つの要因は、いずれも  $g_1^0$  成分の分散を大きくする方向に寄与するため、過大評価につながってしまうと考えられるのである。
- $g_2^1, h_2^1$  の変動は大きい (他の  $l = 2$  次の偏差の約 4 倍)。従来から、この成分は VGP のばらつきの変動を説明するために大きいと思われていた (Kono and Tanaka, 1995)。さらに、 $g_3^2, h_3^2$  の分散も独立に求めるようにパラメータを増やした計算の結果、やはり大きくなった。一般的に  $P_l^m$  の分散は大きいと考えられる。このような特徴は、外核内における対流のパターンとダイナモ作用によってそのようなパターンから生成される地球磁場と関連づけることができるであろう。
- モデルが示す地球上の各点での方位データの分布は、子午面方向に歪んでいる。一方、そこから得られる VGP の分布は丸くなるが、中緯度では  $g_2^1, h_2^1$  の分散が強い影響を受け、若干反対方向に歪む。この特徴はデータにも強く現れている。

以上のように、本研究で求められた平均地球磁場および古地磁気永年変化のモデルは、古地磁気測定によって得られた方位データをよく説明しており、基本的な地球磁場の変動の特徴を顕著に表している。



Br at CMB (Final TAF Model, Normal)

図1: 正磁極期の古地磁気方位データによる過去5百万年間の平均地球磁場(TAF)モデル. コア表面における磁場の鉛直外向き成分( $B_r$  [ $\mu\text{T}$ ]). 方位データのみからでは, 磁場の絶対強度を推測することができないので, 地心双極子成分( $g_1^0$ )の平均値を $-30\mu\text{T}$ にしている.

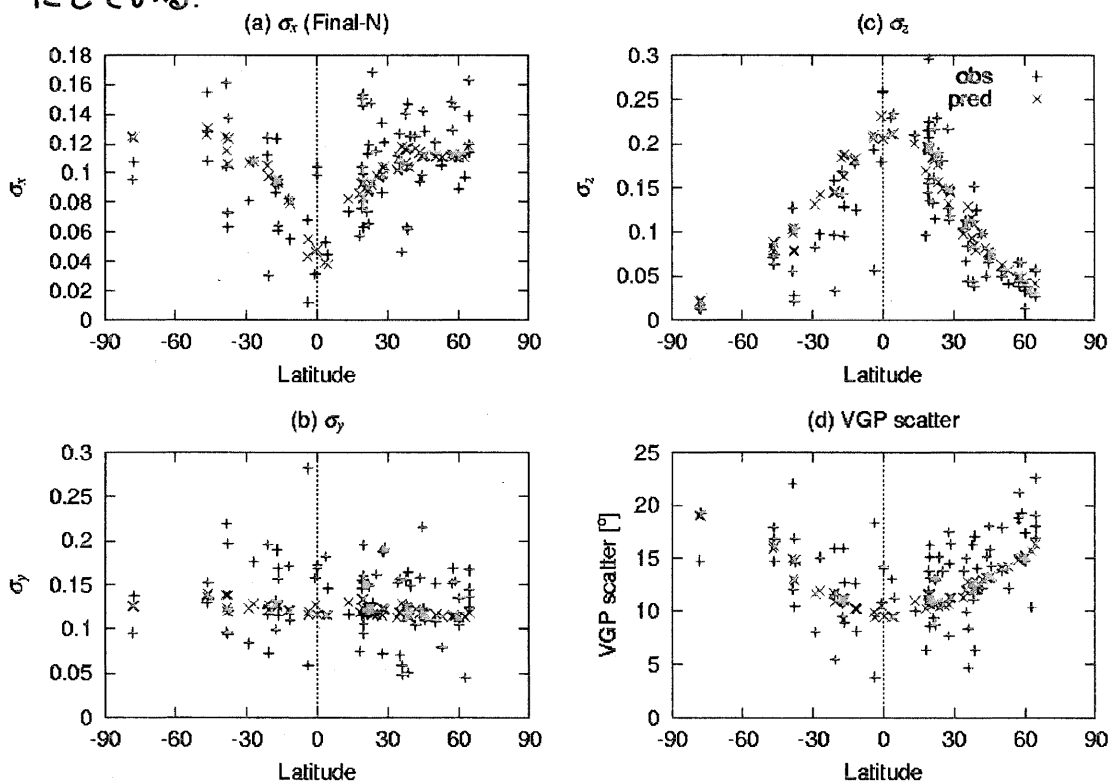


図2: 正磁極期の古地磁気永年変化(PSV)モデル. データ(+ )に対してモデルによる予測値(x)の緯度依存性. 方向余弦の標準偏差, (a)  $\sigma_x$ , (b)  $\sigma_y$ , (c)  $\sigma_z$  に対してフィットしてモデルを決定した. 過去の研究で主として用いられてきたVGP(仮想地磁気極)のばらつき(d)に対してはフィットしていないにもかかわらず, データをよく説明している.