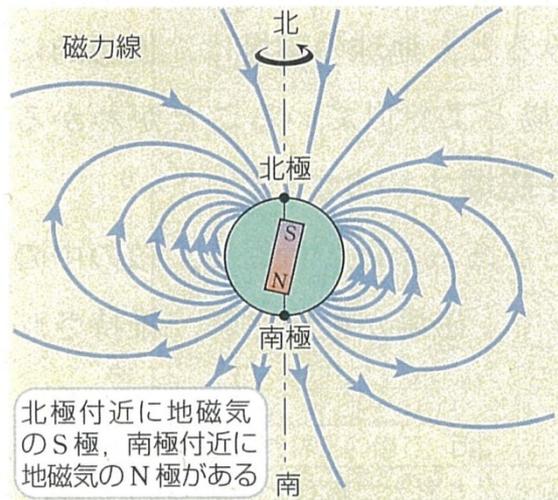


# 地球磁場逆転の歴史における チバニアン時代

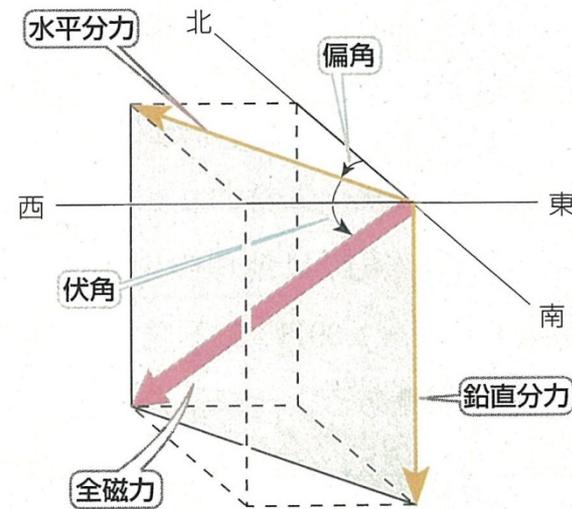
DF会員No.1075  
渋谷和雄

1. 地球磁場の基礎知識
2. 惑星磁場形成(固有磁場と残留磁化)
3. ダイナモ作用
4. 何故逆転するか? 今後の逆転可能性
5. 地層に記録されている逆転の歴史
6. GSSPとチバニアン時代
7. 終わりにあたって

磁場はベクトル量である。独立な三成分として全磁力、偏角、伏角がある。地点を定め、三成分を計測すると、その時間変動は意外に大きい。現在、磁針の指す向きを北と定める。従って北にS極、南にN極がある。しかし、地球の自転軸と磁場の双極子軸は一致していない



⑩図10 地磁気モデル



⑪図11 地磁気の5つの要素

IGRFという標準磁場を5年毎に決定する。最新の標準場はIGRF2015で2015年以前は確定モデル、2015-2020は年変化率の予測モデルである。モデルは地球上の多くの観測点の磁場変化がラプラス方程式を最適化するように定める。この時、求まるガウス係数から双極子磁場、四重極子、などの強度が判る。係数の次数を16とれば、大体、最適化できる。

惑星磁場の性質について、平成19年の教科書(知識としては2005年頃)と平成24年の研究会プレゼン(知識としては2011年頃)を対比させた。

高等学校理科用教科書

地学I地球と宇宙、地学II 地球と宇宙の探求

数研出版、平成19年1月10日発行



2005年頃までの知見中心



2011年頃の知見含む

# 水星

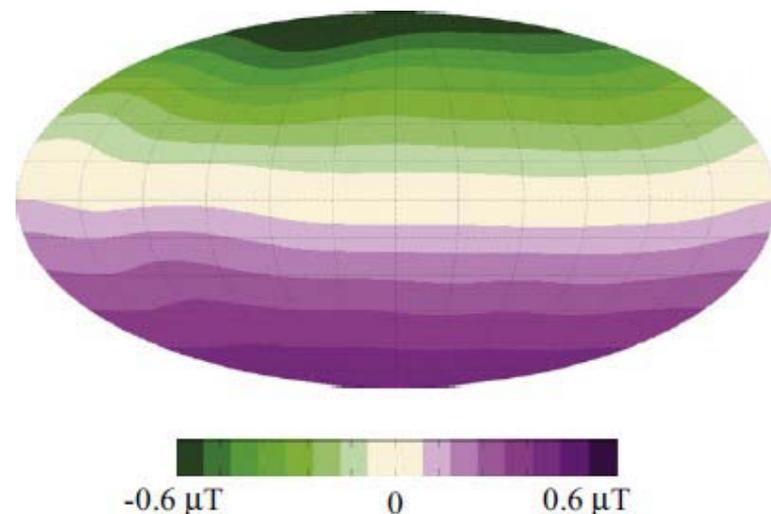


1974年マリナー10号が観測。弱い磁場があるが、太陽風による擾乱が強く詳細はわからない。

弱いながらも固有磁場存在

- 表面磁場強度 $0.3\mu\text{T}$   
→地球の100倍弱い  
(CMB では500倍弱い)

ダイナモモデル→弱い固有磁場の説明として4種類のメカニズムが提案されている。



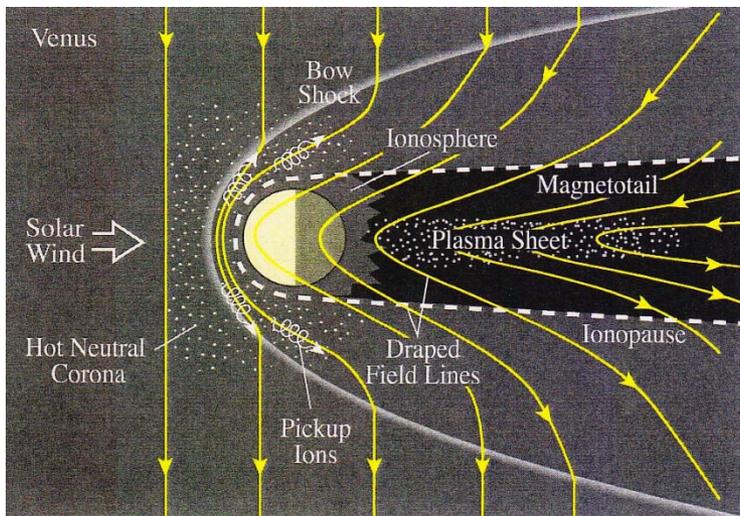


# 金星

固有磁場はない。自転速度が遅いことが理由か？

固有磁場は検出されていない

- 厚い大気とのプラズマ相互作用  
→ 誘導磁気圏の形成



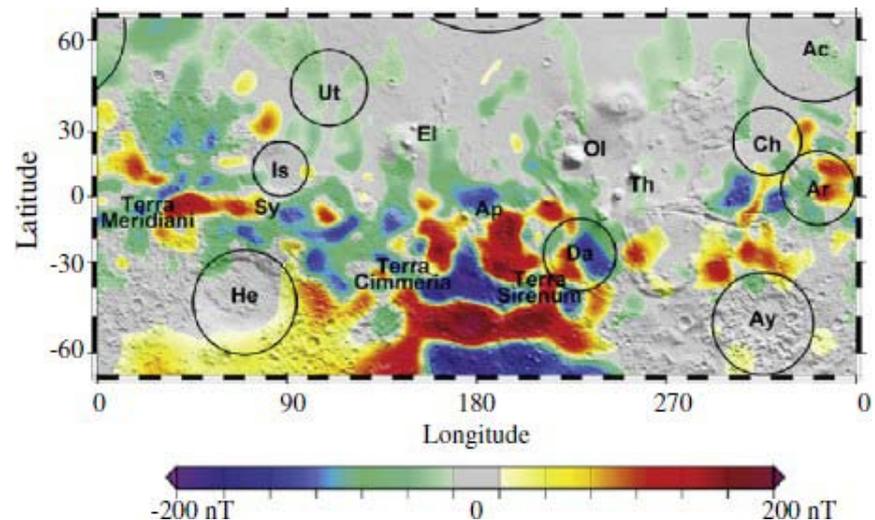
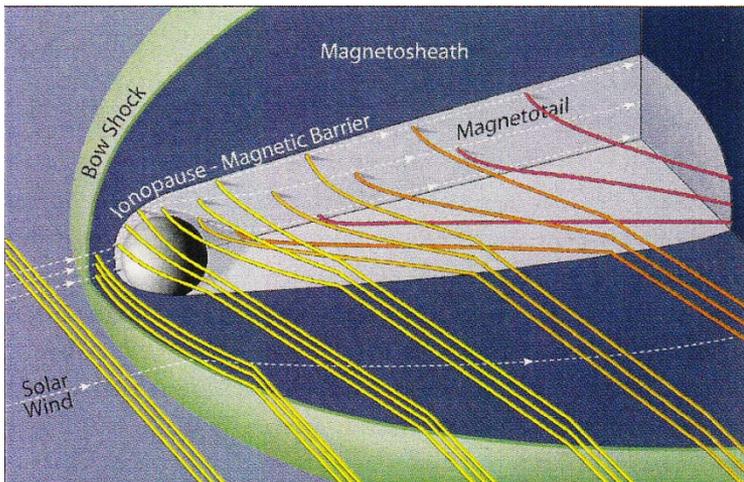


# 火星

核起因のグローバルな磁場はなさそう。地磁気異常と呼ばれる局所的な磁場はある。

固有磁場なし、大気存在→誘導磁気圏の形成

- 残留磁化の存在
- 南半球(高地)に集中、北半球には見られない



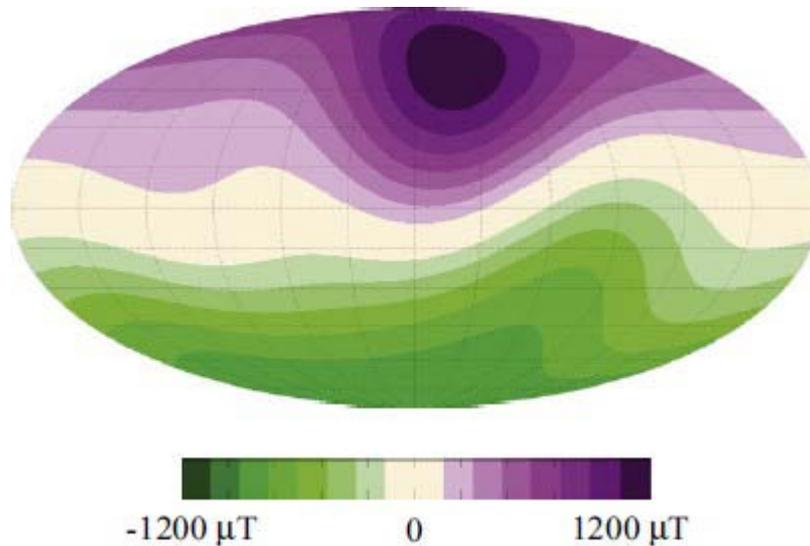
# 木星

地球よりはるかに強い(約33000倍)磁場がある。自転速度も速い。

太陽系最強の惑星固有磁場( $\sim 550\mu\text{T}$ )

● 回転軸と磁気双極子軸が傾いている

→衛星に対する周期的磁場変動→磁気誘導源



# 土星

木星に比べれば弱い、地球に比べれば強い磁場

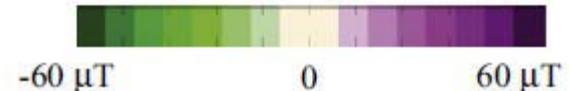
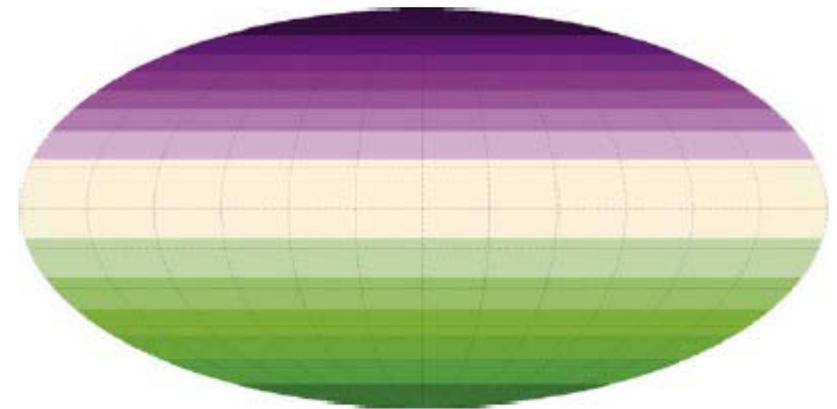
表面強度木星より弱い( $\sim 30\mu\text{T}$ )

● 双極子成分卓越、軸対称的

←隠れている非軸対称磁場の存在？

● 回転軸からの磁場の傾き小さい

→誘導磁場源にならない

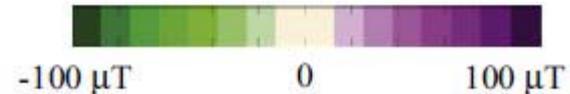
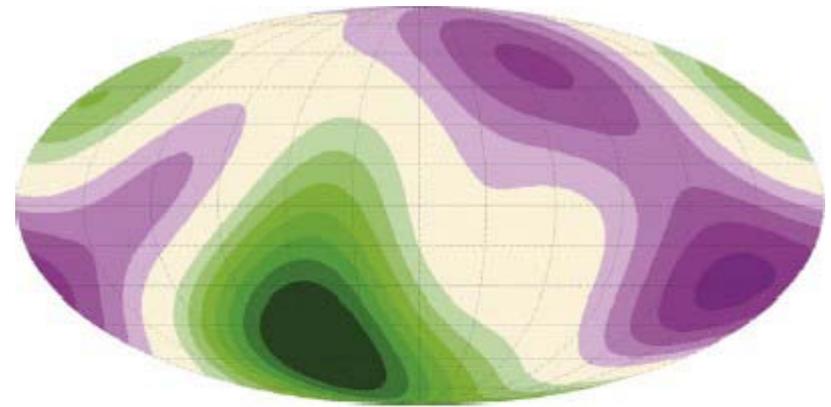


# 天王星



一概に木星型と呼ぶには核の構造が木星と異なり、重たい元素が核にあるらしい。自転軸が横倒しになっている。磁場中心は惑星中心から大幅にずれていて、磁軸も自転軸から60度傾いている。

多重極成分が目立つ。  
(双極子的ではない)

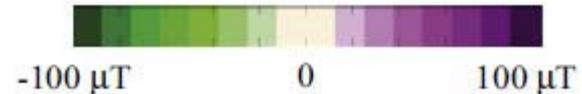
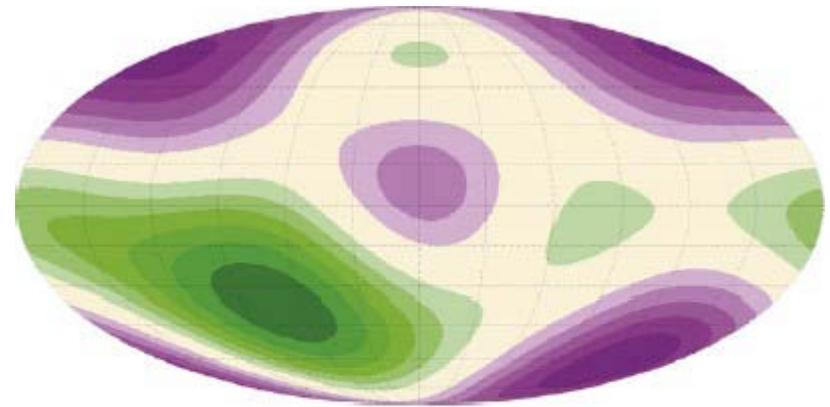


# 海王星



自転軸の傾きは28度。磁場の軸は自転軸からさらに47度ずれている。磁場中心は南半球にかたよっていて、北半球より南半球の方が10倍強い。

多重極成分が目立つ  
(双極子的でない)

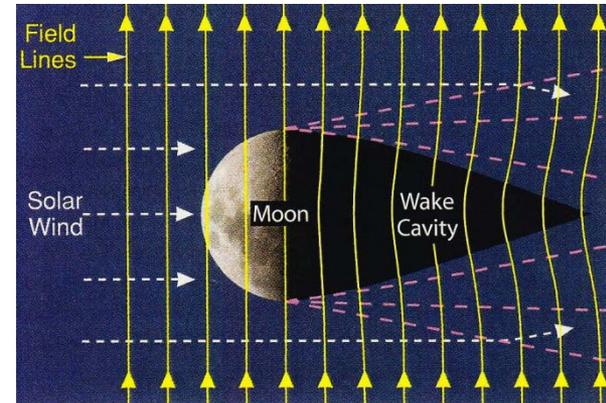
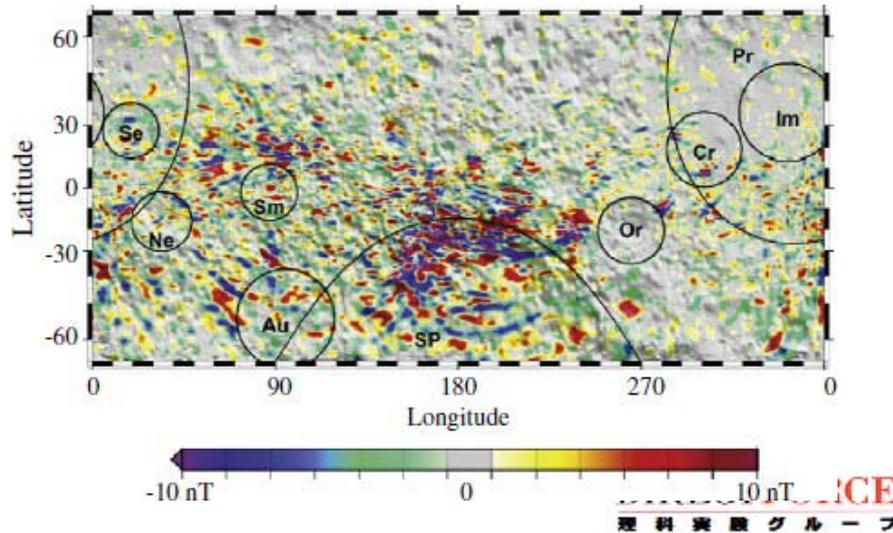




# 月

謎が多いが残留磁化がある。かぐや打ち上げで説明が進むだろう。

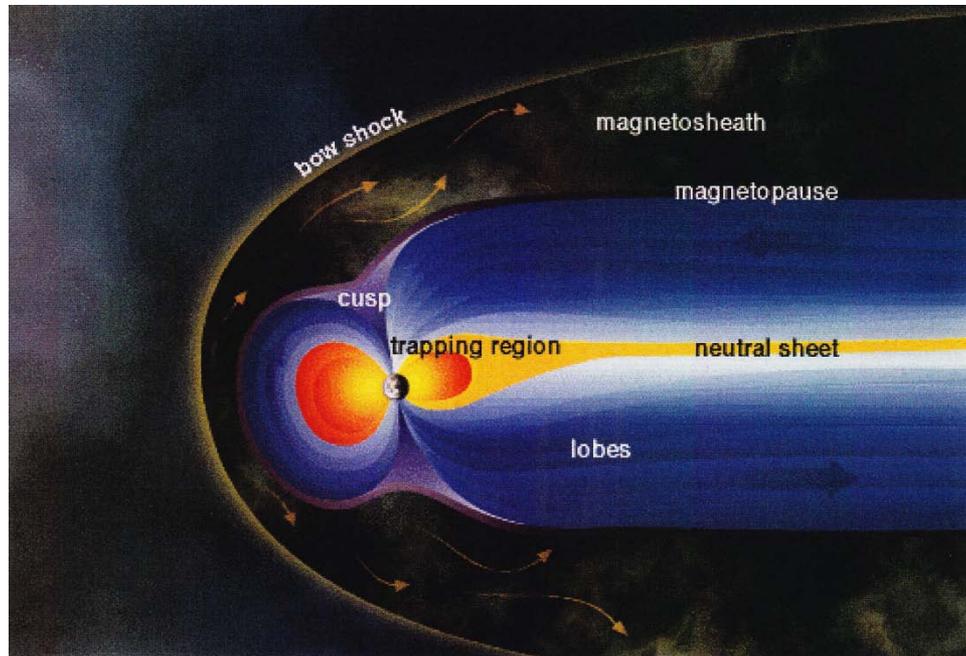
固有磁場なし、大気なし、  
電気不導体→磁気圏なし  
● 地殻残留磁化の存在





# 地球

固有磁場の存在→磁気圏の形成

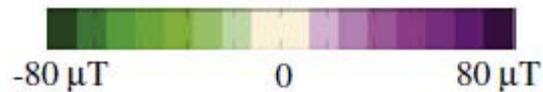
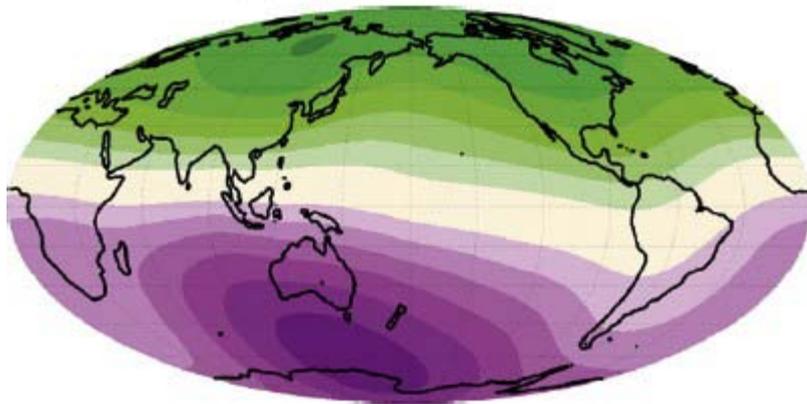




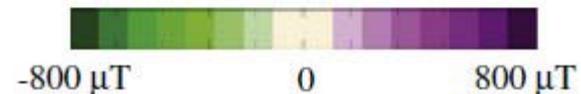
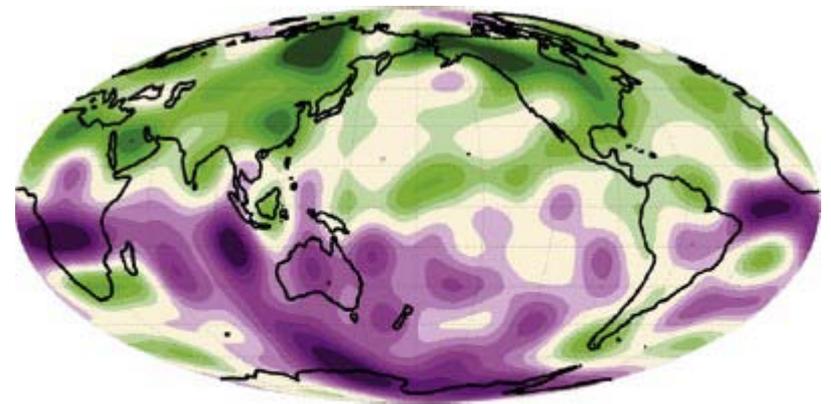
## 地球：固有磁場

- 固有磁場
- 35億年以前から存在
- 強い双極子成分、しばしば逆転
- 逆転時には強度減少し多重極子卓越
- 西方移動などの様々な永年変動

表面磁場



CMB磁場





## 惑星磁場の分類

### 固有磁場

現在、ダイナモ作用による内部磁場がある

### 残留磁化

過去に岩石を磁化させる活動があったが、現在はダイナモ作用はない

### プラズマ相互作用

外部磁場らしきものはあるが、大気起源である

	磁場強度(nT)	特徴
水星	$2 \times 10^{-7}$	固有磁場
金星	$< 10^{-8}$	プラズマ相互作用
地球	$5 \times 10^{-5}$	固有磁場
月	$10^{-9} - 10^{-7}$	残留磁化
火星	$10^{-9} - 10^{-4}$	残留磁化
木星	$4.2 \times 10^{-4}$	固有磁場
土星	$2 \times 10^{-5}$	固有磁場
天王星	$2 \times 10^{-5}$	固有磁場
海王星	$2 \times 10^{-5}$	固有磁場

## 固有磁場

金属核の回転に関連してダイナモ作用が今現在生じている(今も生きている)。

## 残留磁化

過去のダイナモ作用あるいは火成活動により、岩石が磁気を帯びて残っている(今は死んでいる)。

プラズマ相互作用  
ダイナモとは無関係

# ダイナモに必要な条件

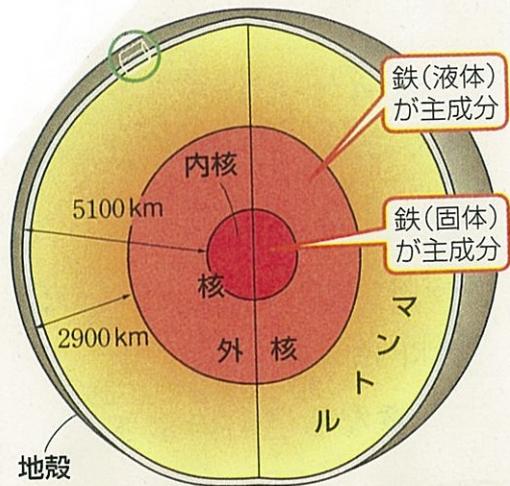
- エルサッサー数：ローレンツ力 / コリオリ力
  - 普通のダイナモ解では  $O(1)$

$$\Lambda = \frac{B^2}{\rho\mu\eta\Omega} \sim O(1)$$

- 磁気レイノルズ数：誘導項 / 磁気拡散項

$$Rm = \frac{UL}{\eta} \geq O(10^2)$$

- ダイナモ作用が働くには  $O(100)$  以上が必要

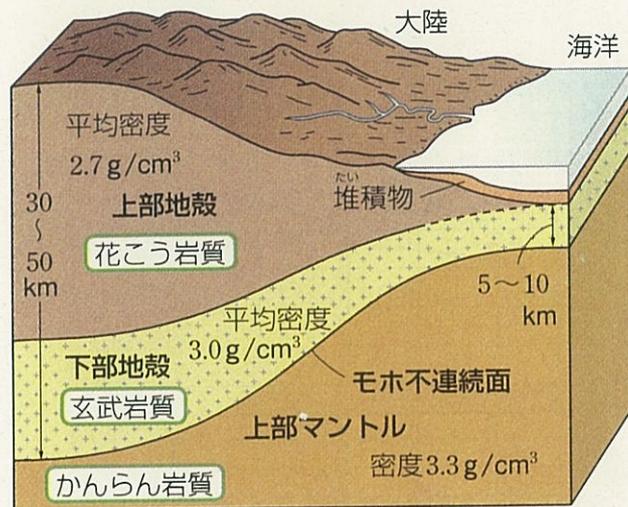


## ローレンツ力

磁場は経度線に沿い南から北へ、電流はマントルから核方向に間欠的に通電する。フレミングの左手の法則により、核には紙面から手前向きに力が働き右回転しようとする。作用・反作用の法則によりマントル(及びは地球全体は)左回転しようとする。

## コリオリ力

外核は流体であり、自転に伴い北半球では右向き、南半球では左向きの力を受ける。



④図42 地球の内部構造

## 磁気誘導項と磁気拡散項

下部地殻、上部マントルは玄武岩、かんらん岩である。キュリー点温度以上の環境下なので磁性は持たない。CMBは鉄、ニッケル、 $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ の液相混合状態なので温度、圧力、生成熱エネルギーの状態により、磁気誘導されやすさと拡散しやすさの比が変わるだろう。



## 固有磁場の存在

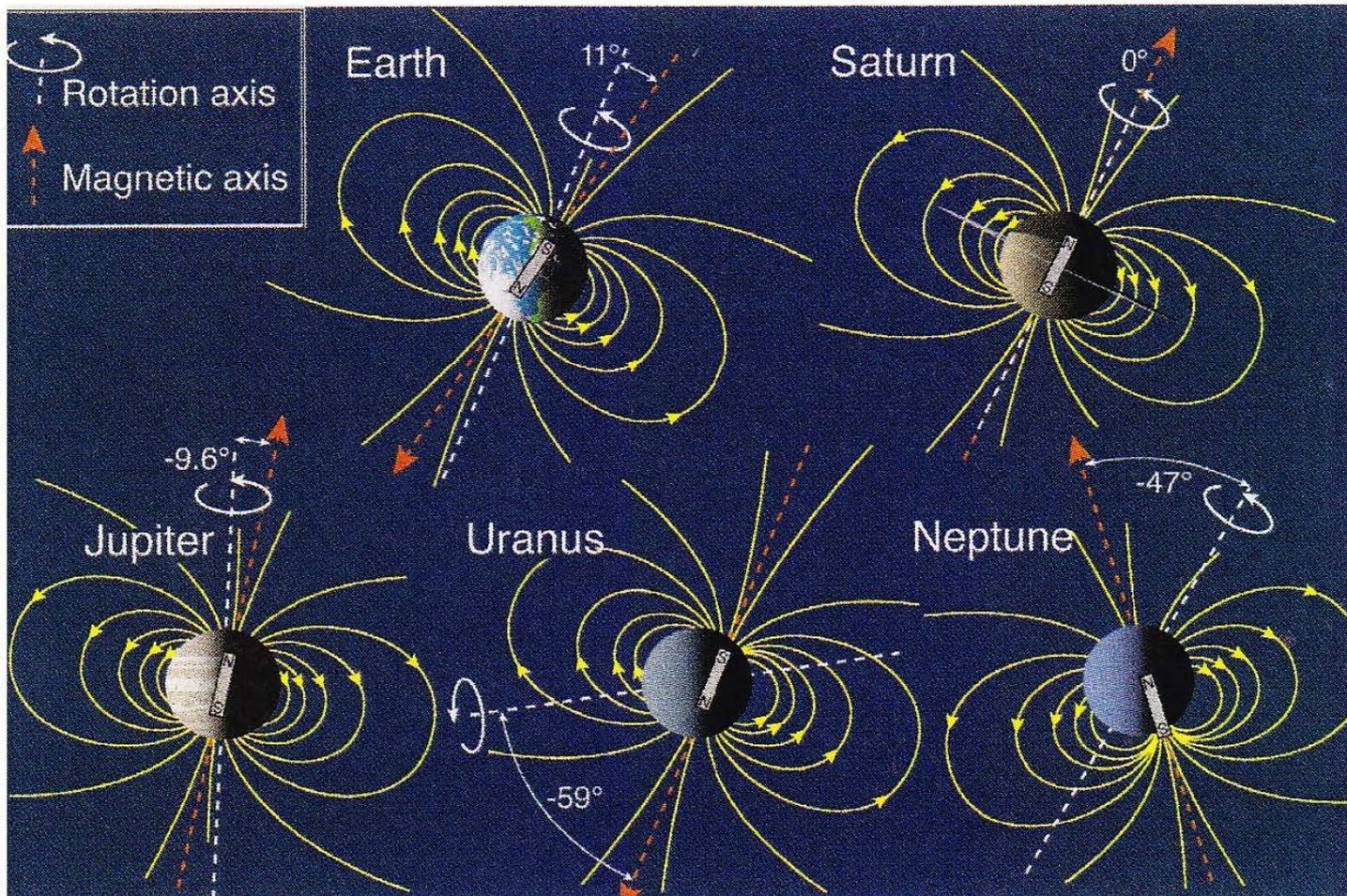
中心部に鉄などの金属、岩石質の電気伝導性の良い物質を持ち、自転速度が速いこと。

シミュレーションによるダイナモ・モデル計算が可能  
 いろいろなパラメーターがあるが、 $R_m$ と $\Lambda$ が重要。

**Magnetic Reynolds Number**  $R_m = U D / \eta$  ; Magnetic Induction / Magnetic Diffusion  
**Elsasser Number**  $\Lambda = B^2 / (\rho \mu_0 \eta \Omega)$ ; Lorentz force/Coriolis force

Dynamo	$E$	$Pr$	$Pm$	$R_m$	$Ro$	$Re$	$\Lambda$	$R_{DI} / R_D$	$R_D / R_P$
Mercury	$10^{-12}$	0.1	$10^{-6}$	$10^2$	$10^{-4}$	$10^8$	$10^{-5}$	0.6	0.75
Earth	$10^{-15}$	0.1	$10^{-6}$	$10^2$	$10^{-7}$	$10^8$	0.1	0.35	0.55
Jupiter	$10^{-19}$	0.1	$10^{-7}$	$10^2$	$10^{-10}$	$10^9$	1	0.2	0.95
Ganymede	$10^{-13}$	0.1	$10^{-6}$	$10^2$	$10^{-5}$	$10^8$	$10^{-3}$	0	0.2
Saturn	$10^{-18}$	0.1	$10^{-7}$	$10^2$	$10^{-9}$	$10^9$	0.01	0.5	0.5
Uranus	$10^{-16}$	10	$10^{-8}$	$10^2$	$10^{-6}$	$10^{10}$	$10^{-4}$	0.6	0.8
Neptune	$10^{-16}$	10	$10^{-8}$	$10^2$	$10^{-6}$	$10^{10}$	$10^{-4}$	0.4	0.8

# ダイナモの維持 → 自転軸と磁軸がずれていること?



(McFadden et al. 2007)

## 地球磁場は何故逆転するのか？

推測として・・・

核は常時にはマントルと同じ方向に回転しているが、回転速度は若干違う(差分回転と言い、核の方が遅い)。これは Lorentz力による右回りのブレーキがはたらいているから。何らかの理由により、核に働く Lorentz力が逆転し、左廻りの力(自転を加速する方向)になるとき、電流方向は変わらないが、磁場方向が逆転するのではないか？

## 逆転に要する時間はどれくらいか？

推測の推測になるが・・・

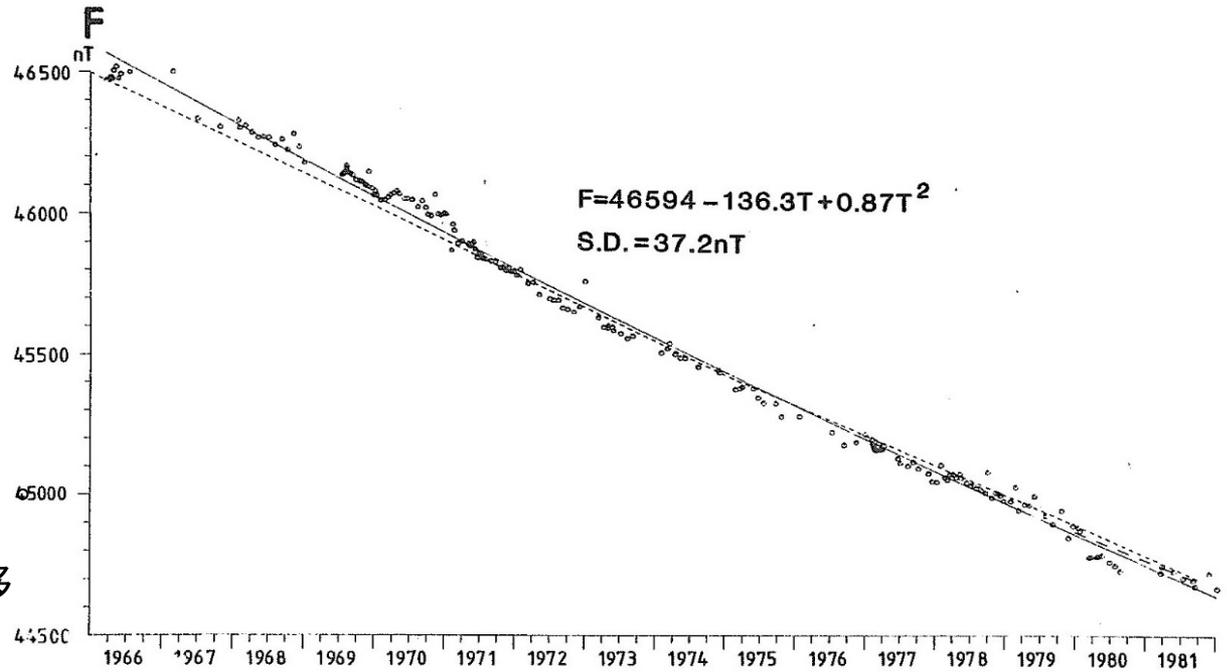
1000年から10,000年と一般には思われている(地質学的時間スケールからすると短い)。

数100年という研究例もある(2～3例だが。)

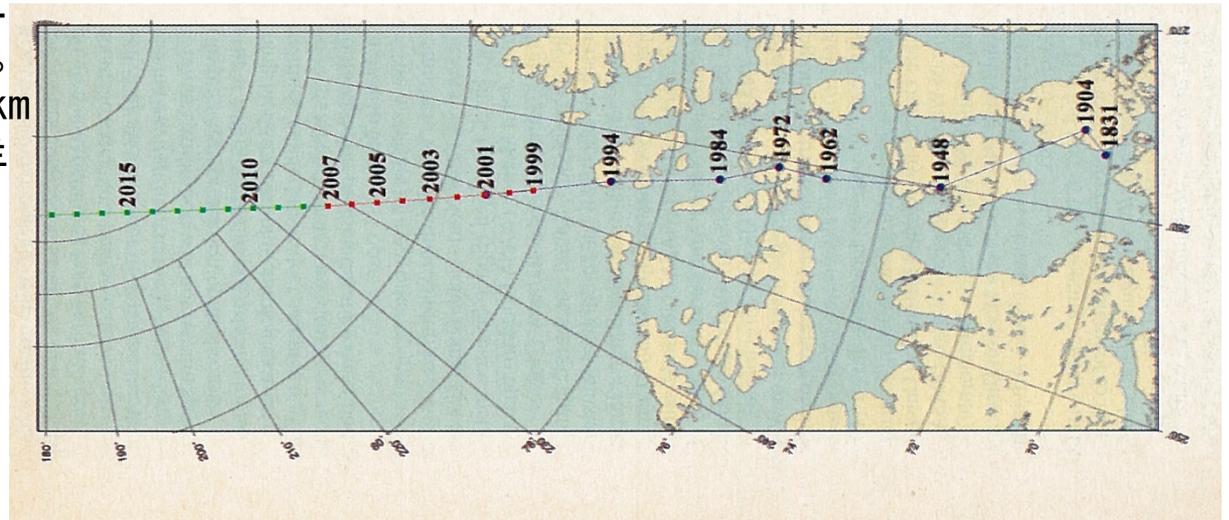
## 今から逆転する可能性は？

主磁場(双極子成分)の強度が著しく減少し、多重極子成分が際立つようになると逆転する、と言われている。

昭和基地の全磁力はこの数十年以上、 $\sim 136$  nT/yrで減り続けている（右上図）（双極子モーメントは1900-2000年の100年間で約5%減少した）。この勢いが続くと今後2000年で双極子磁場は消滅する）



非双極子磁場は西方への偏移 ( $0.2^\circ$  /yr)が目立つ。日本での偏角は現在西へ $7^\circ$ であるが、1600年代後半では東に $8^\circ$ であることが判っている。1900-2000年で磁南極は800 km以上移動し、現在は南太平洋上にある。磁北極は1200 km以上移動し、北極海にある（右下図）



## 「地磁気逆転研究」の歴史 --Wikipediaから

1600年に、ウィリアム・ギルバートが地球は一つの大きな磁石であると主張した。

1828年には、カール・フリードリヒ・ガウスが地磁気の研究を開始した。

1906年には、ベルナルド・ブルンによって現在の地磁気の向きとは逆向きに磁化された岩石が発見された。

1926年、京都帝国大学(現在の京都大学)教授の松山基範が、兵庫県の玄武洞の岩石が、逆向きに磁化されていることを発見した。松山はその後、国内外36か所で火成岩の磁気の調査を行い、他にも逆向きに磁化された岩石を発見した。松山は1929年、地磁気逆転の可能性を示す論文を発表した。当時の常識に反する考え方だったため、当初の評判はよくなかった。その後、古地磁気学が盛んになり、年代測定技術も進歩した。その結果地磁気が逆転を繰り返していることがはっきりしてきた。

1964年には、アメリカの研究グループが地磁気極性の年代表を発表した。このとき、アラン・コックスは2つの「逆磁極期」(反対は「正磁極期」)のうちの1つに、松山の名前を選んだ。

# 年代測定法いろいろ

表1 地球科学に広く用いられる年代測定法一覧. 気候変遷の研究に有用な U-Th 法と  $^{14}\text{C}$  法も示す.

方法	核種 (親 - 娘)	壊変様式	半減期 (年)	試料	年代範囲(年)
K-Ar 法 (Ar/Ar 法)	$^{40}\text{K} - ^{40}\text{Ar}$	電子捕獲	$1.25 \times 10^9$	雲母、角閃石、カリ長石、 火山岩	$> 10^4$
Rb-Sr 法	$^{87}\text{Rb} - ^{87}\text{Sr}$	$\beta$ 壊変	$4.88 \times 10^{10}$	雲母、カリ長石、深成岩	$> 10^7$
U, Th-Pb 法	$^{238}\text{U} - ^{206}\text{Pb}$	壊変系列 ( $\alpha, \beta$ )	$4.47 \times 10^9$	ジルコン、モナズ石	$> 10^6$
	$^{235}\text{U} - ^{207}\text{Pb}$	壊変系列 ( $\alpha, \beta$ )	$7.04 \times 10^8$		
	$^{232}\text{Th} - ^{208}\text{Pb}$	壊変系列 ( $\alpha, \beta$ )	$1.40 \times 10^{10}$		
Sm-Nd 法	$^{147}\text{Sm} - ^{143}\text{Nd}$	$\alpha$ 壊変	$1.06 \times 10^{11}$	火山岩、深成岩	$> 10^9$
U, Th-He 法	$^{238}\text{U} - ^4\text{He} (\times 8)$	壊変系列 ( $\alpha, \beta$ )	$4.47 \times 10^9$	アパタイト、ジルコン	$> 10^6$
	$^{235}\text{U} - ^4\text{He} (\times 7)$	壊変系列 ( $\alpha, \beta$ )	$7.04 \times 10^8$		
	$^{232}\text{Th} - ^4\text{He} (\times 6)$	壊変系列 ( $\alpha, \beta$ )	$1.40 \times 10^{10}$		
フィッション・ トラック法	$^{238}\text{U}$ - 核分裂飛跡	自発核分裂	$(4.47 \times 10^9)$	アパタイト、ジルコン	$> 10^6$
U-Th 法	$^{234}\text{U} - ^{230}\text{Th}$	$\alpha$ 壊変	$2.48 \times 10^5$	炭酸塩 (方解石等)	$< 5 \times 10^5$
$^{14}\text{C}$ 法	$^{14}\text{C} - ^{14}\text{N}$	$\beta$ 壊変	5730	木片、貝殻、骨	$< 3 \times 10^4$

\*京都大学大学院理学研究科地球惑星科学専攻教授

田上高広教授

第 285 回京都化学者クラブ例会 (平成 26 年 3 月 8 日) 講演

現在判明している逆転期

過去360万年の間に11回逆転したことが知られている。最近の逆転は

松山ーブルン逆転 - 78万年前 松山期が逆磁極期

ガウスー松山逆転 - 258.1万年前 ガウス期は正磁極期

ギルバートーガウス逆転 - 358万年前

ギルバート期(589.4万年前)は逆磁極期

完新世 1.15万年前～現代

更新世 260万年前～1.15万年前



## GSSPの申請とチバニアン時代の提案

タイトル: The Chiba Composite Section, Japan: a proposed Global Boundary Stratotype Section and Point (GSSP) for the base of the Middle Pleistocene Subseries

### 申請地

千葉県市原市にある地層「千葉セクション」

### 申請グループ

茨城大学(学長:三村信男)

の岡田誠教授、

国立極地研究所(所長:白石和行)

の菅沼悠介准教授、

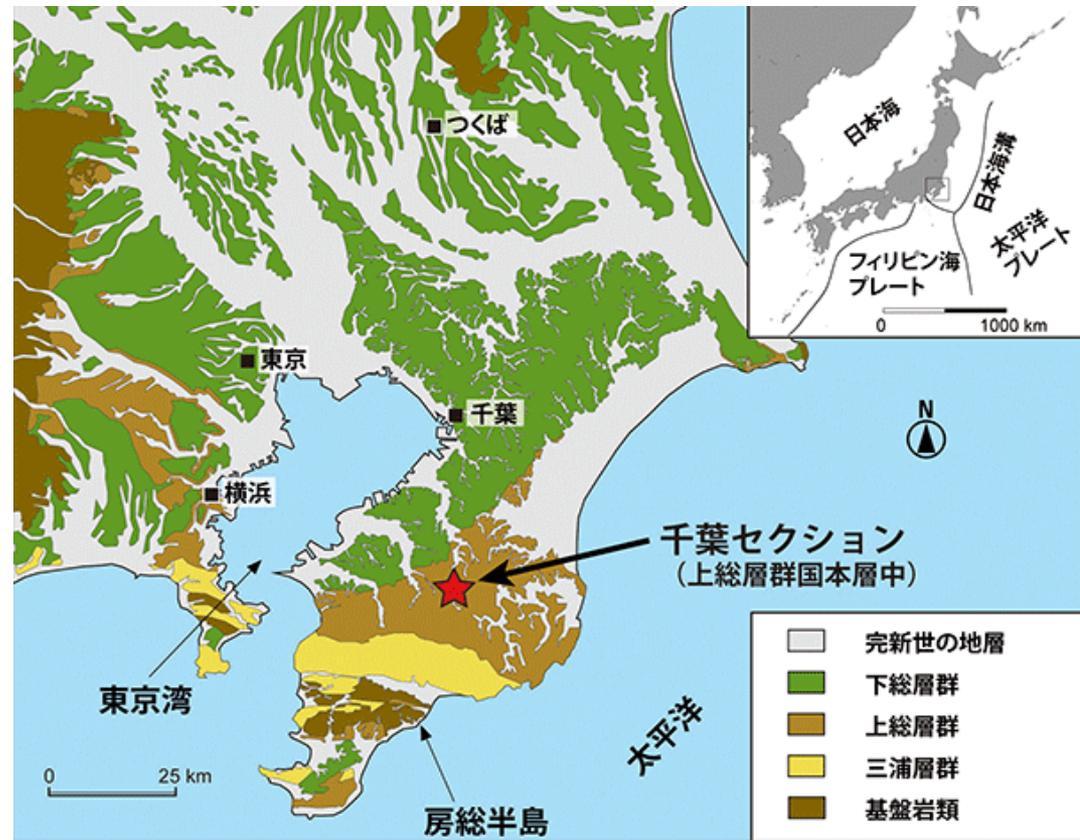
千葉大学(学長:徳久剛史)

の亀尾浩司准教授

国立科学博物館(館長:林良博)

の久保田好美研究員

を中心とする22機関の32名  
からなる研究グループ



## 提案理由

千葉セクションは**更新世の前期と中期の境界(約77万年前)**を示しており、**GSSPとして最適である**。千葉セクションがGSSPとして選定された場合は、**約77万年前から12万6千年前**の地質時代に対する名称として「チバニアン」(「千葉の時代」の意)を提案する。

## GSSPについて

地質学では、地球上の岩石が形成された年代や生物化石等の変遷に基づいて、地球の歴史を115の時代に分けている。地質時代区分を標準化するため、それぞれの地質時代境界について地球上で最も観察・研究をする上で優れた地層1カ所を国際標準模式地(Global Boundary Stratotype Section and Point、GSSP)と認定している。たとえば、恐竜が絶滅した白亜紀と古第三紀の境界(約6600万年前)のGSSPはチュニジア北部のエル・ケフ近郊にある。……

## 千葉セクションの地層断面



更新世の前期と中期の境界・・・

最後の地球磁場逆転が起きた時期で、まだGSSPが決まっていない。  
この境界のGSSPとして認定されるための条件でとくに重要なものは以下の3つ。

1. 海底下で連続的に堆積した地層であること
2. 地層中に、これまでで最後の磁場逆転が記録されていること
3. 地層の堆積した当時の環境変動が詳しく分かること

研究グループは、上述の推奨条件を満たすことを示すため、研究を進めてきた。

- a. 過去70年にわたる先人の研究成果(邦文なので海外の研究者は読めなかった)をまとめたレビュー論文を国際学術誌に発表した。
- b. 千葉セクションから見つかった「白尾火山灰」と呼ばれる地磁気逆転境界付近の火山灰層の年代測定を行い、地磁気逆転の年代を高精度で決定した。
- c. 千葉セクションの地層は、堆積物がゆっくりと降り積もる深海環境で形成されたことを、詳細な観察と分析から明らかにした。
- d. 地磁気逆転の記録と当時の海洋環境変動を従来よりもさらに高解像度で復元し、世界各地の海底堆積物や南極氷床コアの分析から求められた記録と比較し地磁気逆転の記録がほかの記録と矛盾しないことを確認した。

さらに、これらの論文発表に加えて、新たに陸域の環境変動を復元するために

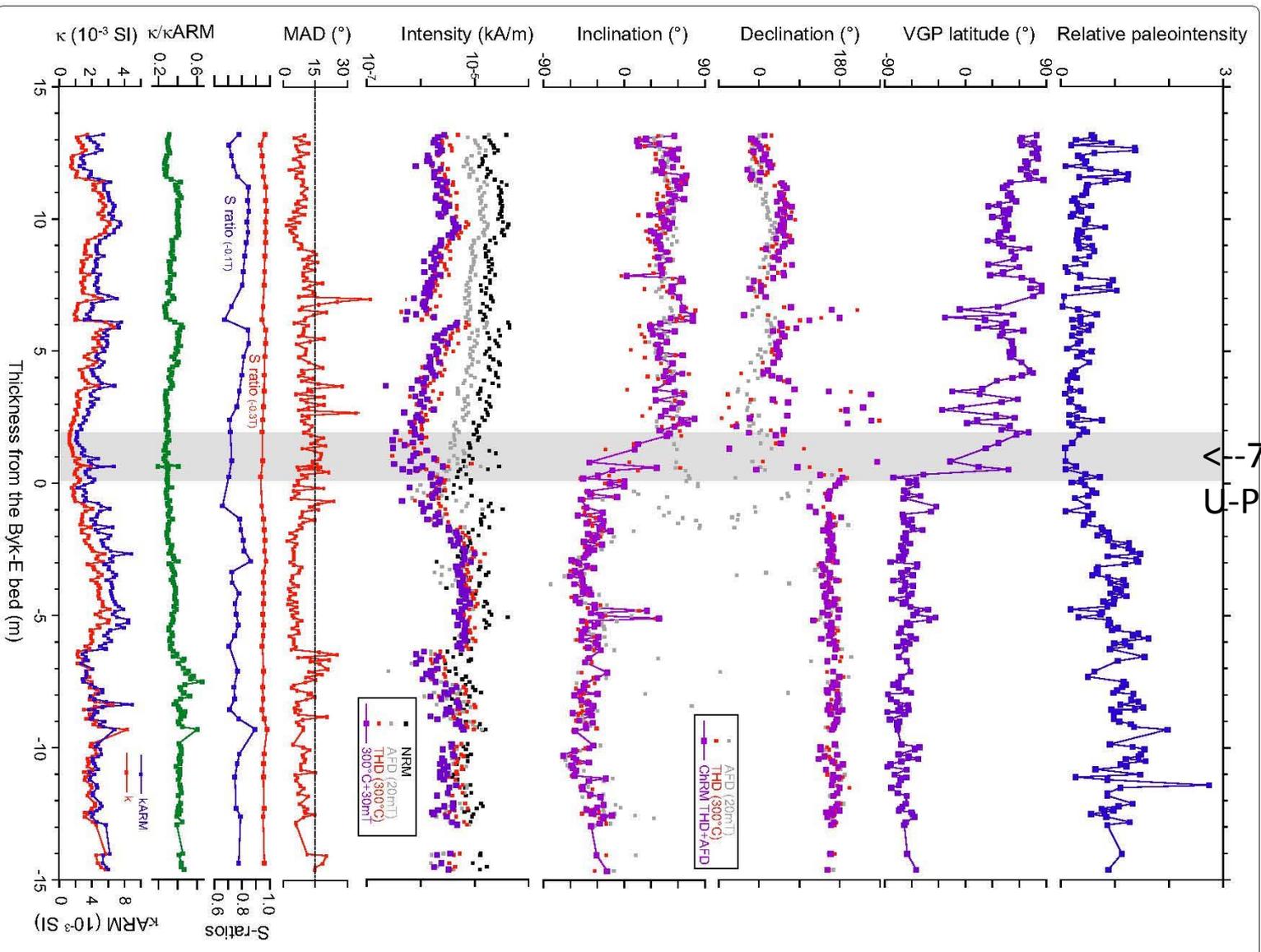
- e. 超高解像度での花粉化石の分析、海域の環境変動を復元するための微化石の分析、そして地球化学的分析をそれぞれ行い、当時の気候の復元を試みた。

この結果から、千葉セクションが堆積した当時の日本周辺の気候変動が詳細に復元可能であり、気候変動を研究する上で非常に適した場所であることを明らかにした。

Brunhes

U-Pb Zircon  
-770 ka

Matuyama



## 逆転期の環境気候

白尾層 Byakubi-E bedが逆転に対応

境界は $770.9 \pm 7.3$  ka

年代はジルコンのウラン-鉛同位体法による

微化石、有孔虫化石の酸素同位体比によると

79-77万年前は現在と同様の間氷期

77-75万年前は氷期に向かって寒冷化進行

親潮は現在より南に張り出していたらしい

終わりにあたって  
主な引用元は以下の通り。

・**磁場逆転、地層年代の基礎事項**は

高等学校理科用教科書、地学I、II 数研出版

・**惑星磁場**は

惑星・衛星の磁場について、京大数理解析研、竹広真一氏の平成24年8月23日  
惑星系形成小研究会(マリンヒルホテル小樽)のプレゼンファイル

・**地球磁場逆転**は

南極観測隊報告、EOS

・**地磁気逆転研究の歴史**は

Wikipedia

・**年代測定法**は

京都大学教授・田上高広氏、第285回京都化学者クラブ例会(平成26年3月8日)  
講演資料、海洋化学研究、第27巻第2号、100-105頁から

・**GSSPとチバニアン時代**は

国立極地研究所HP研究成果・トピックス広報資料

千葉県市原市の地層を地質時代の国際標準として申請、認定されれば地質時代の  
ひとつが「チバニアン」に、2017年6月7日

特に、Okada, M., Suganuma, Y., Haneda, Y., Kazaoka, O., 2017. Paleomagnetic  
direction and paleointensity variations during the Matuyama-Brunhes polarity  
Transition from a marine succession in the Chiba composite section of the Boso  
Peninsula, central Japan, Earth, Planets and Space, 69:45, DOI 10.1186/s40623-017-0627-1