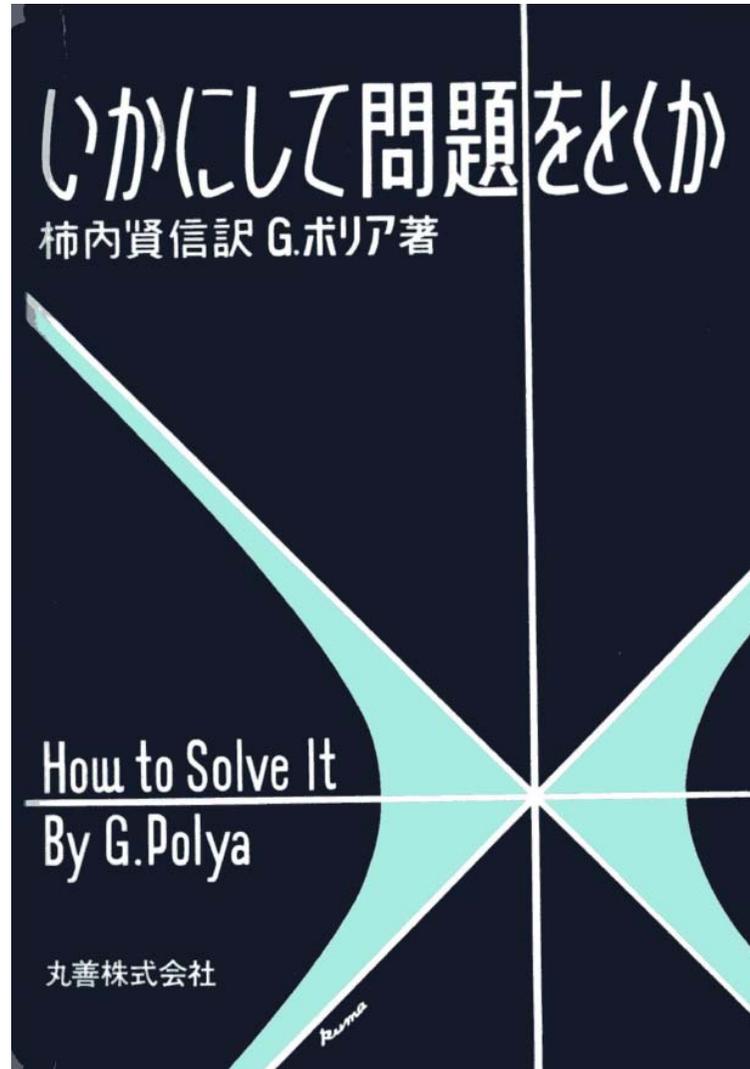

地球磁場の短時間変動: 西方移動, ジャーク,
ねじれ振動

Geomagnetic field variations of short time-scales:
Westward drift, jerks and torsional oscillations

櫻庭 中

2009 年 5 月 13 日



George Pólya 著, 柿内賢信 訳, 丸善 (1954)

いかにして問題をとくか？

1. 問題を理解せよ.

未知のものは何か？ 与えられたデータは何か？ 条件は何か？

2. 計画を立てよ.

似た問題はないか？ 条件の一部をのこし, 他を捨てよ. 未知のもの, あるいは与えられたデータを変えることができるか？

3. 計画を実行せよ.

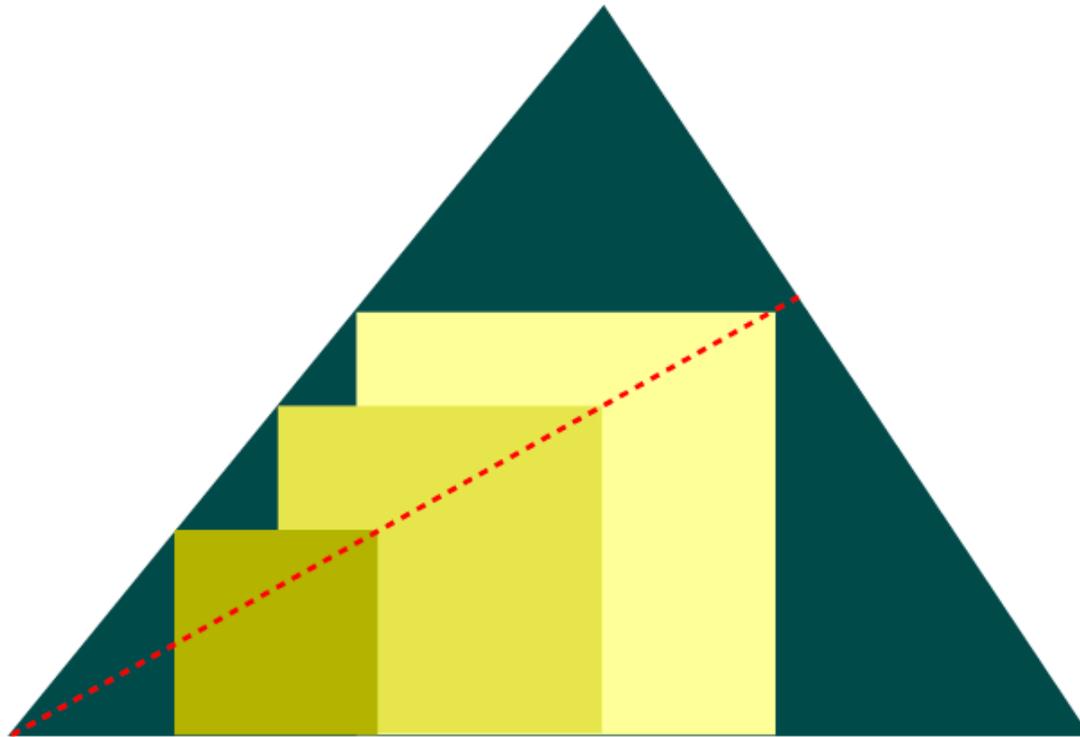
4. 振り返ってみよ.

例題

「与えられた三角形に内接する正方形を作図せよ」



「条件の一部をのこし，他を捨てよ」



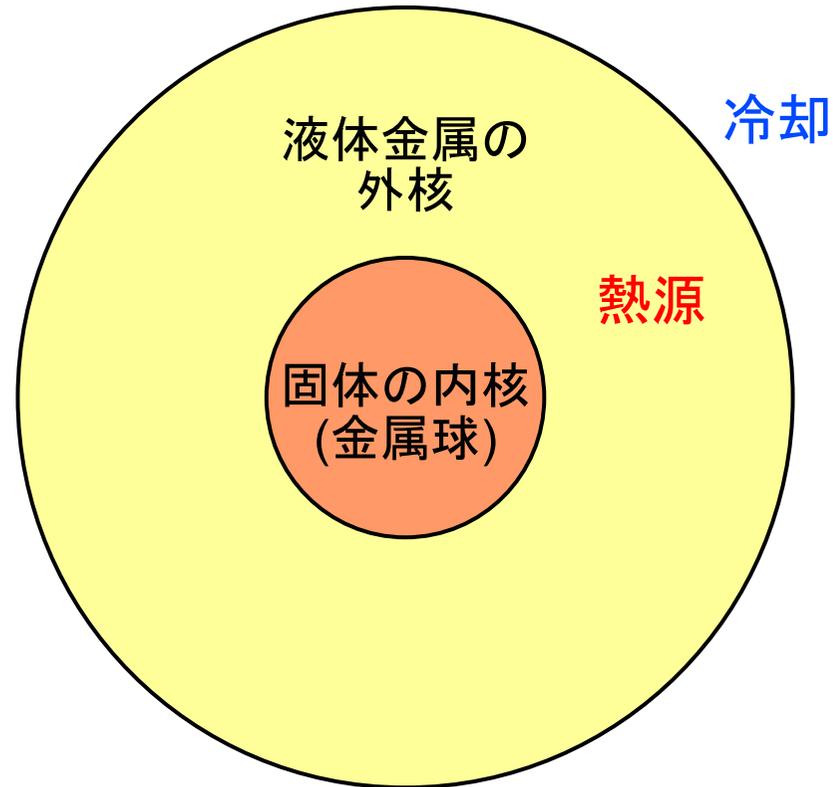
わたしの場合 — 地球ダイナモ問題

- 未知のもの: 「地球の深部」
 - 組成, 熱力学的状態, ダイナミクス, 経年変化.
- 与えられたデータ: 「地球磁場」
 - 古地磁気学的, 測地学的, 地震学的, 地球化学的データも.
- 条件: 「地球磁場はコアの対流によってつくられる」
 - ⇒ どんな条件下でどんな磁場がつくられるか, という
フォワードモデリングが必要.

地球ダイナモのフォワードモデリング

- 模擬実験 (シミュレーション)
 - コアを模した系の熱対流の数値計算.
 - 対流による起電力で, 磁場は自然発生する.
- 系を特徴づけるパラメーター
 - 流体の粘性や電気伝導度, 容器のサイズと回転角速度, 熱源分布と境界条件, など.
- 地球シミュレーター
 - 2009年4月から新システムが稼働. 理論演算性能 131 TFLOPS (普通のデスクトップの数万倍).

マントルは不導体で
一定角速度で回転



- コアの一様な冷却, 内核成長にともなう潜熱解放をモデル化.
- 実際は組成対流がおこっていると予想されるが, それは考えない.

キーになる無次元数

1. エクマン数: $E = \nu / 2\Omega r_0^2 \approx 10^{-15}$

– 粘性散逸時間と容器の回転の時間スケールの比.

2. 磁気プラントル数: $P_m = \nu / \eta \approx 10^{-6}$

– 粘性散逸時間と磁気散逸 (ジュール散逸) 時間の比.

(ν 動粘性率, η 磁気拡散率, Ω 自転角速度, r_0 コア半径)

- 地球の液体金属コアでは粘性がきかない.
- これまでの数値シミュレーション:

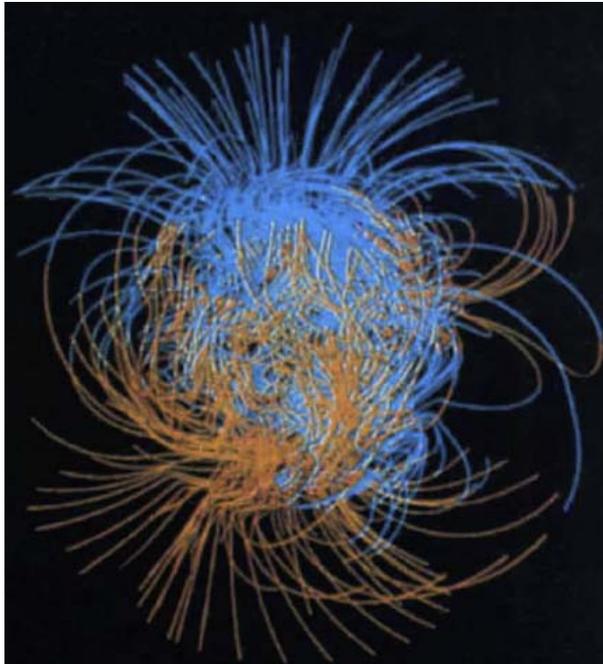
$$E > 10^{-6}, P_m > 1 \text{ (高粘性)}$$

ほんとうにコアのダイナミクスを再現しているのか疑問.

これまでの地球ダイナモシミュレーション

~ 高粘性のわりに意外と Earth-like ~

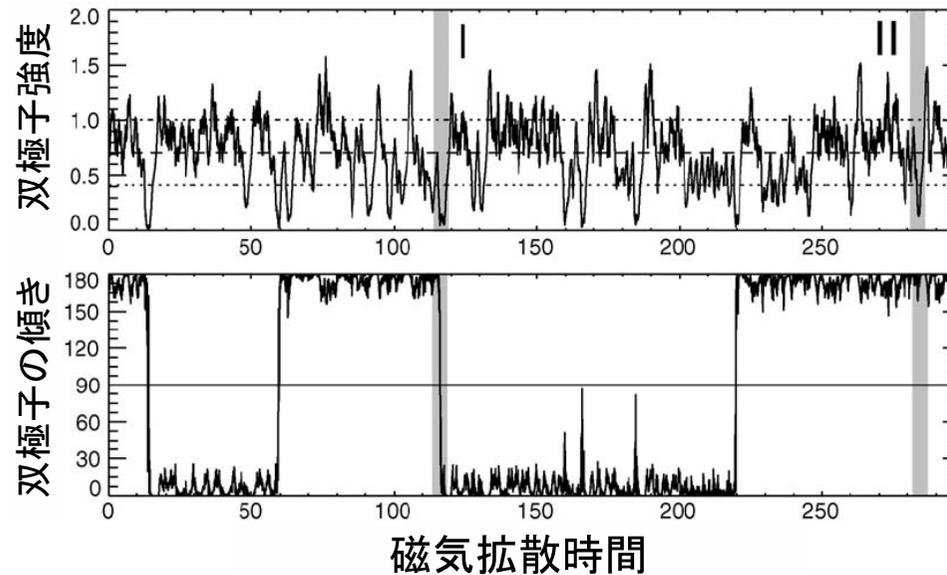
双極子磁場の卓越と磁極の逆転



Glatzmaier & Roberts (1995)

$$E = 8.5 \times 10^{-7}$$

$$P_m = 500$$



Olson *et al.* (2009)

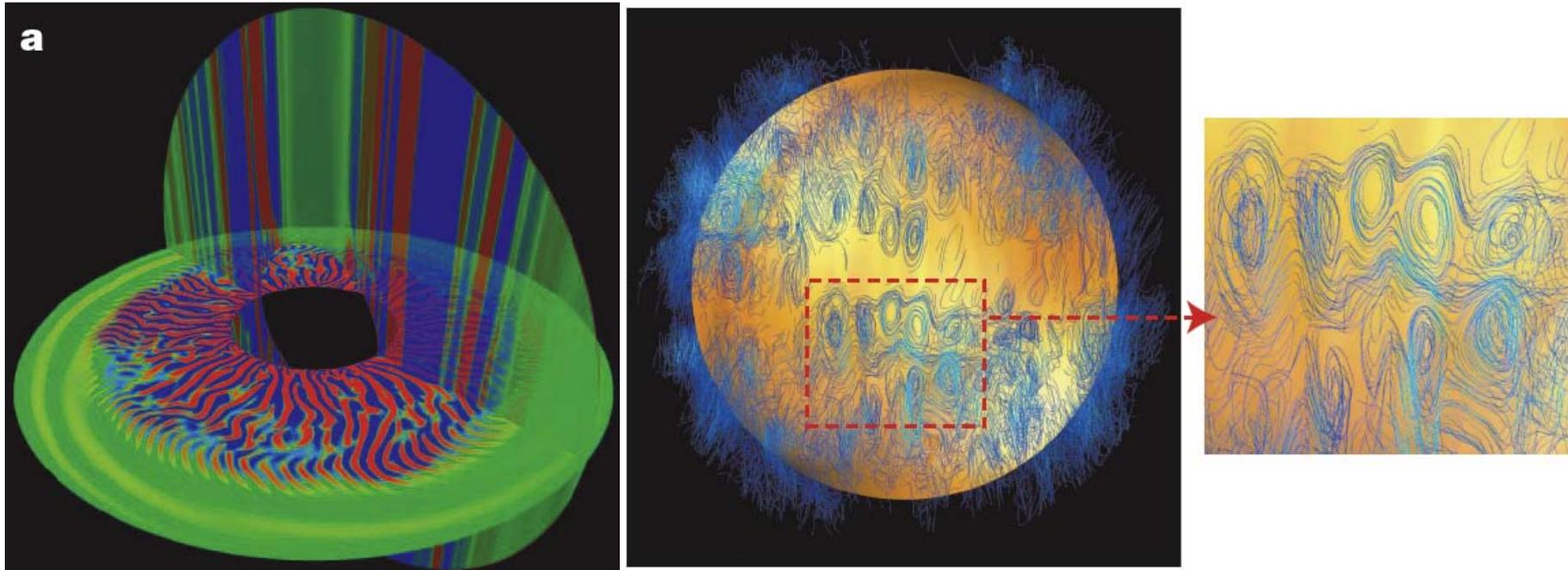
$$E = 1.4 \times 10^{-3}$$

$$P_m = 20$$

低粘性の地球ダイナモシミュレーション

~ むしろ Un-Earth-like ? ~

微細な対流・磁場構造

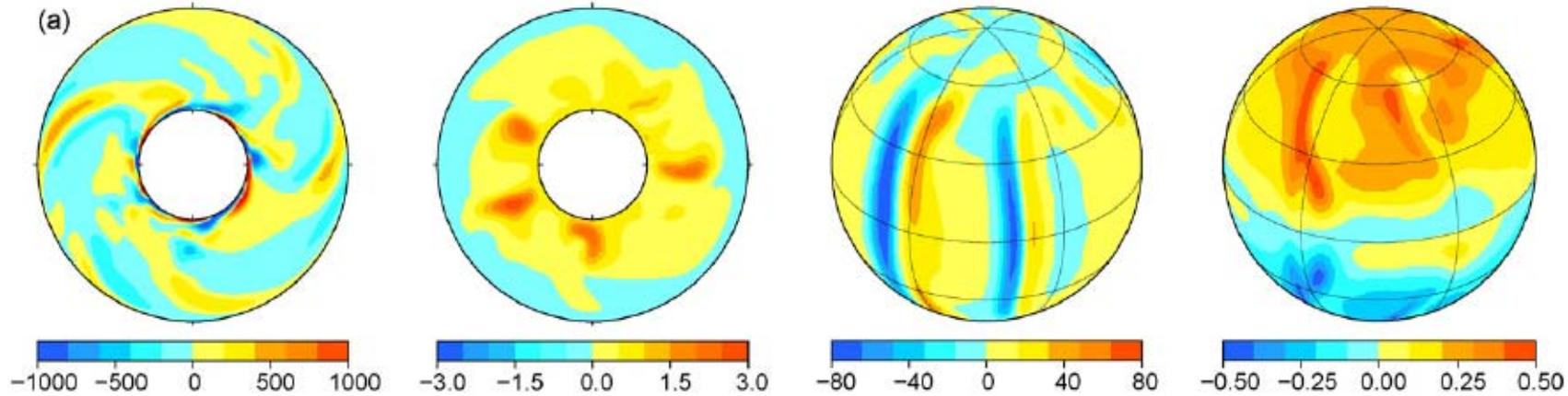


Kageyama *et al.* (2008)

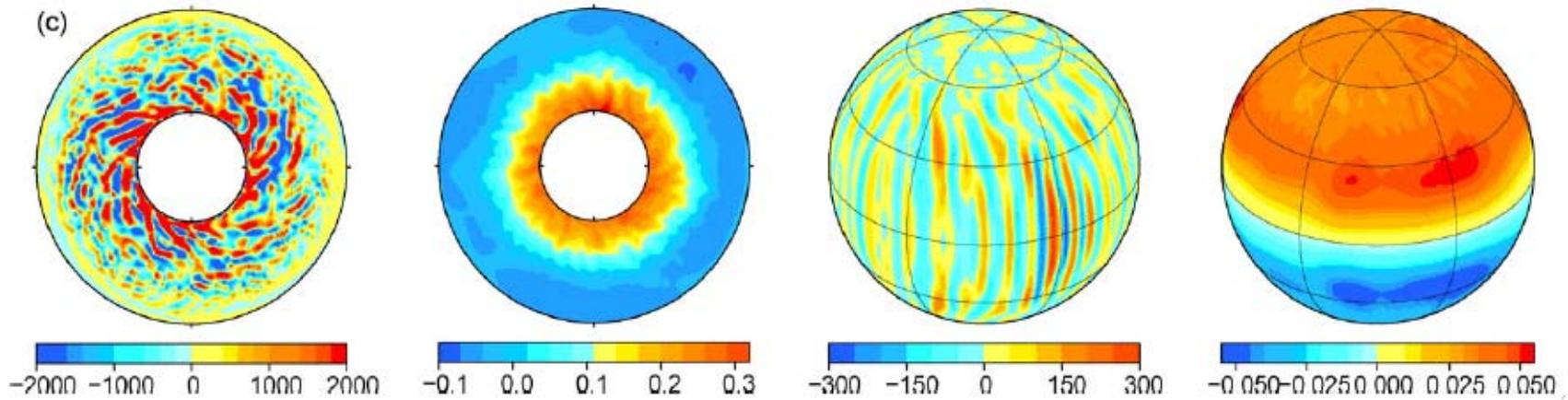
$$E = 2.3 \times 10^{-7}, P_m = 1$$

双極子が卓越しない！

$$E = 4.2 \times 10^{-5}, P_m = 2$$



$$E = 4.2 \times 10^{-7}, P_m = 0.2$$



Takahashi *et al.* (2008)

粘性の低下とともに磁場強度が弱くなる傾向

疑問

粘性を下げると地球っぽくなる？

コア表面温度の境界条件の両極端

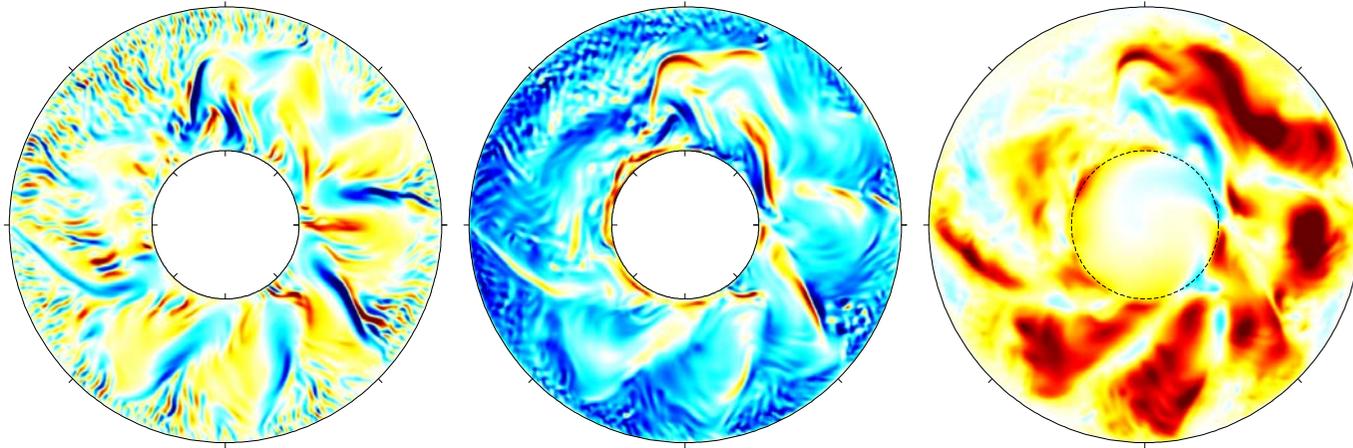
1. 表面温度が一様

- 壁側の熱輸送効率が高いときに相当.
- 最近の低粘性モデルはこれを採用.

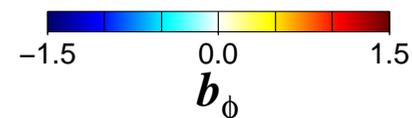
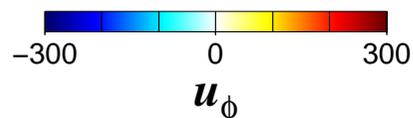
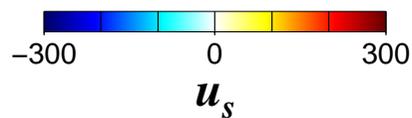
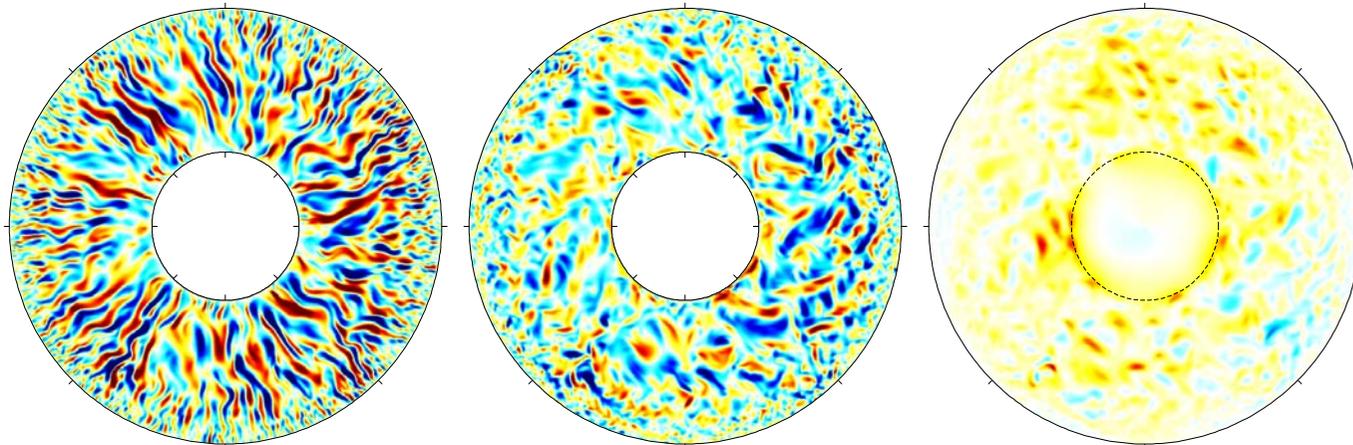
2. 表面の熱フラックスが一様

- 流体側の熱輸送効率が高いときに相当.
- コアの流速 \gg マントルの流速
- コアの温度不均質 \ll マントルの温度不均質
- 表面温度一様はまずありえない!

熱フラックス一様の場合



温度一様の場合



$$E = 5 \times 10^{-7}, P_m = 0.2 \quad (\text{Sakuraba \& Roberts, } \textit{submitted}, 2009)$$

ここまでイントロダクション

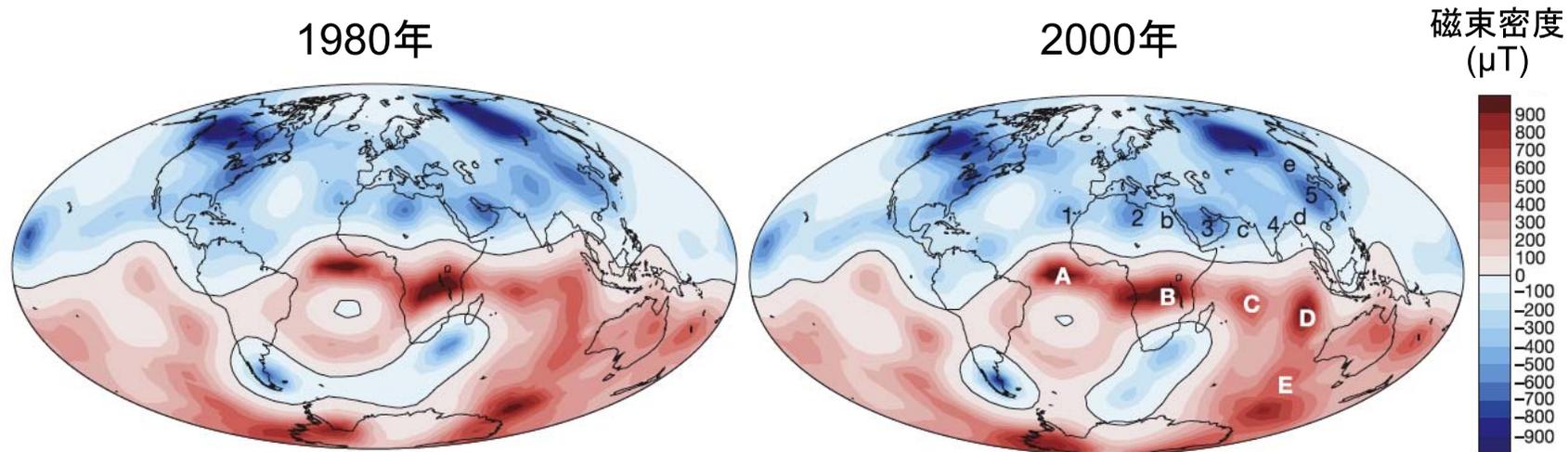
- 地球ダイナモのフォワードモデリングは、地球深部を磁場を通した目で見ると必要。
- 「粘性」という条件をコアのそれに近づけたい。
 - それだけじゃなく温度境界条件も大切。
- 地球の磁場が再現できるだろうか？
 - そして本当の意味の「未知のもの」も。

これより本編

地球磁場の短時間変動（数年～数百年）

1. 地磁気西方移動 (westward drift)
2. ジャーク (jerks)
3. コアのねじれ振動 (torsional oscillations) と
マントル・コア間の角運動量交換

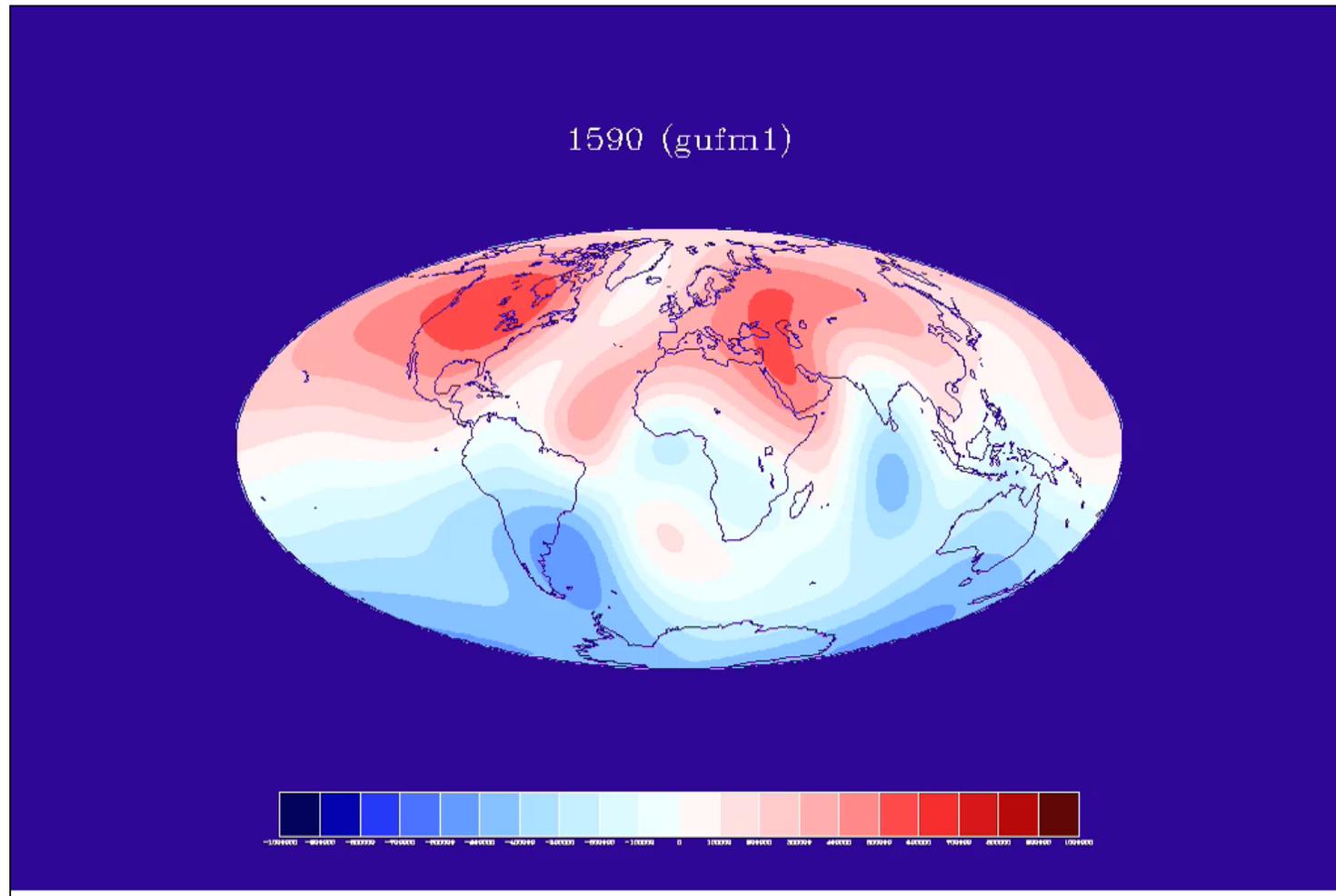
1. 地磁気西方移動



コア表面磁場の推定例 (Jackson, 2003)

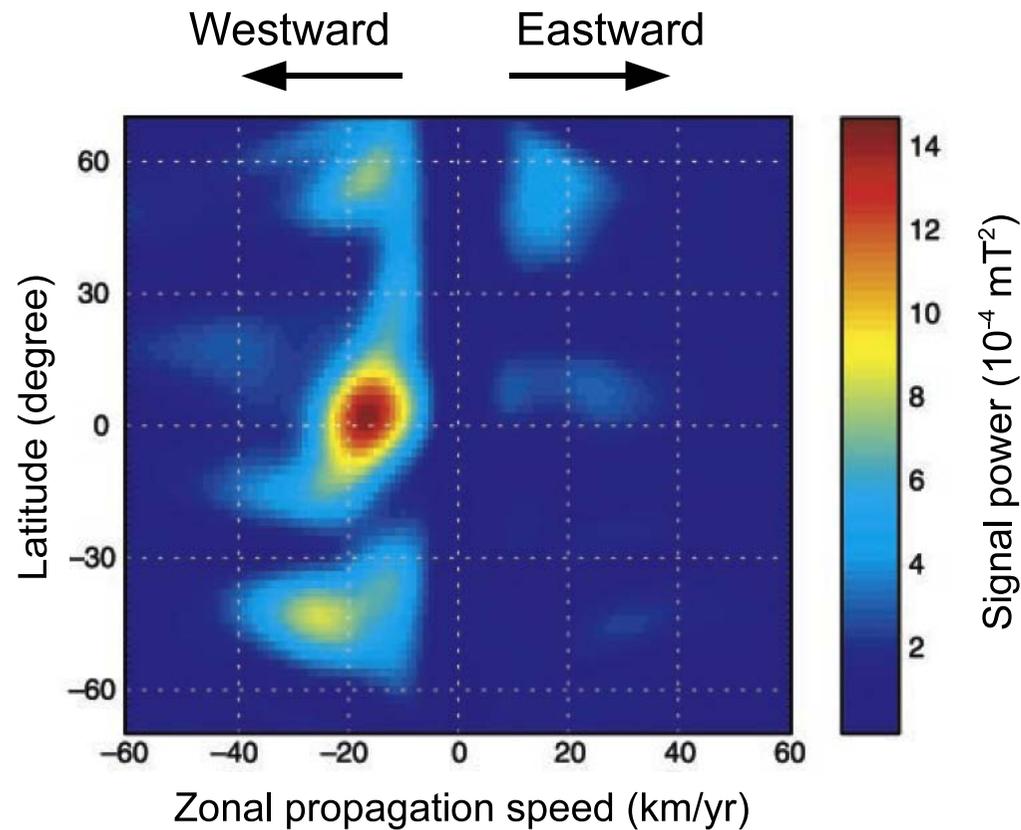
- 赤道付近のパッチ状の磁束が西向きに移動する。
 - アフリカの下で顕著.
 - 太平洋域はあまりみえない.
- 歴史
 - E. Halley (1683), E. C. Bullard (1950), T. Yukutake (1967).

過去 400 年のコア表面磁場パターンの復元



“*gufm1*” by Jackson *et al.* (2000)

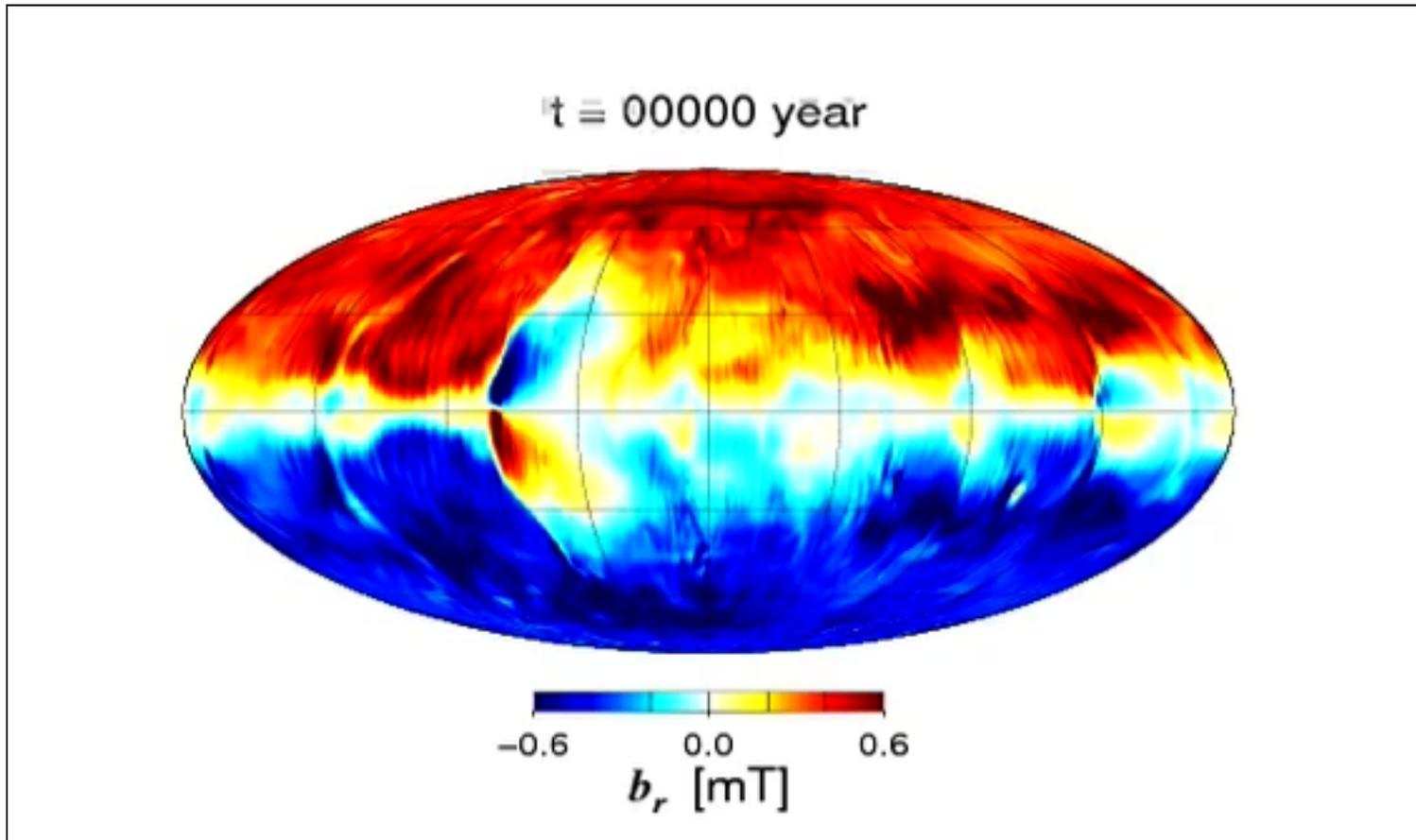
西方移動の緯度依存性



Finlay & Jackson (2003)

- 移動速度はピーク値で $0.27^\circ/\text{yr} = 17 \text{ km/yr}$.
 - 1300 年でコアの赤道を一周.

数値シミュレーションで得られたコア表面磁場

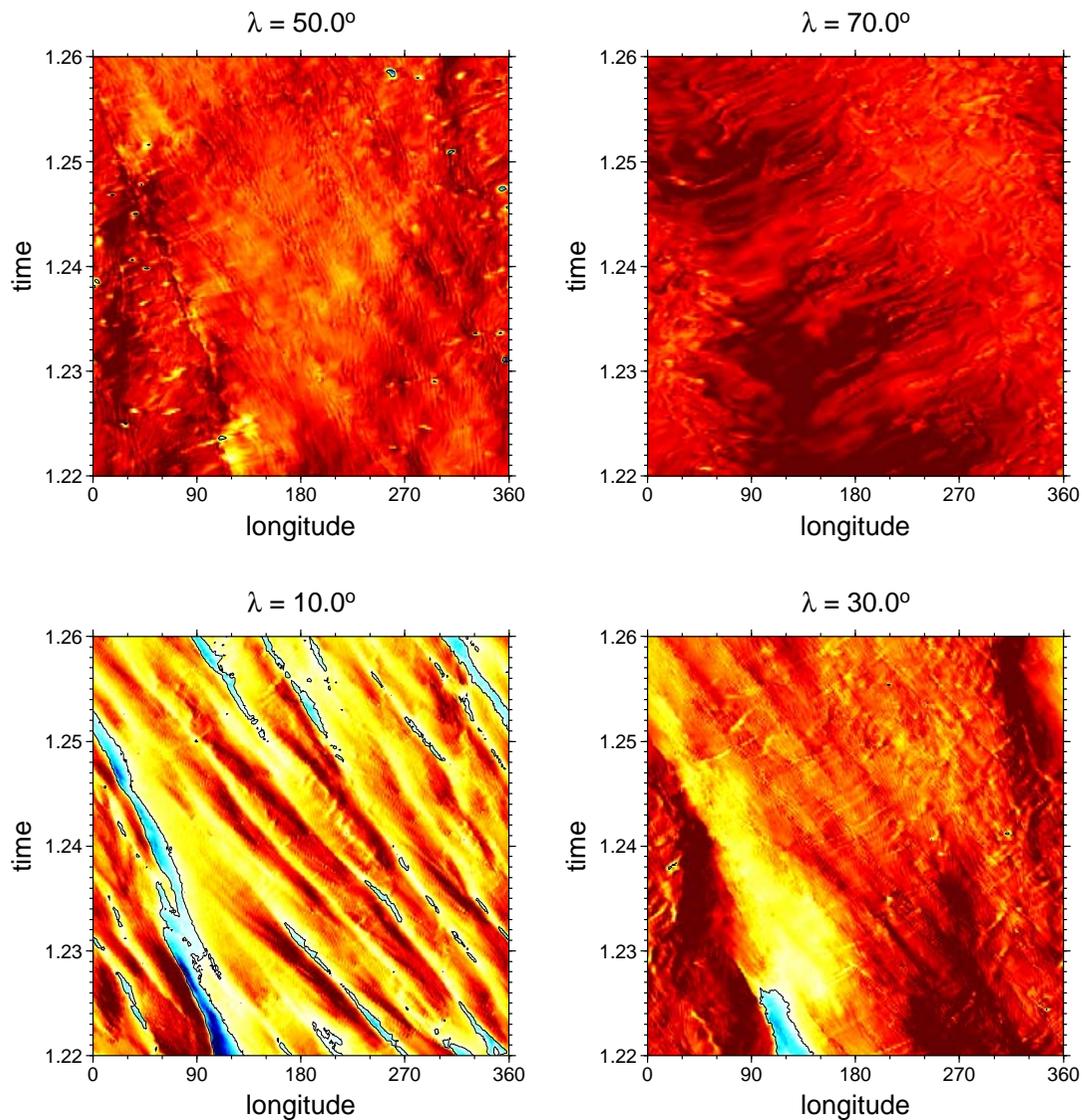


Sakuraba & Roberts (2009)

ある緯度上での磁場の時間変動

Radial magnetic field at fixed latitudes λ

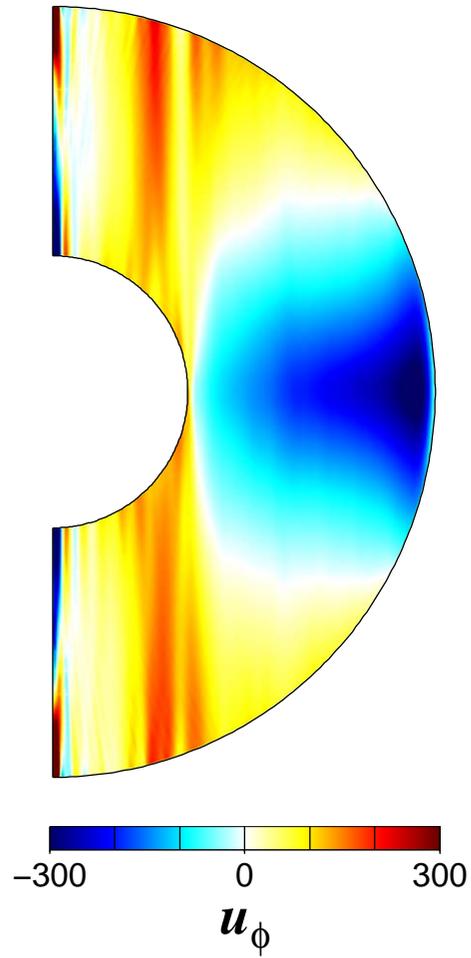
/Volumes/RAID3/ataru/dynic/e62q02r16000c/e62q02r16000c_s1.22000_1.26000.dat.gz



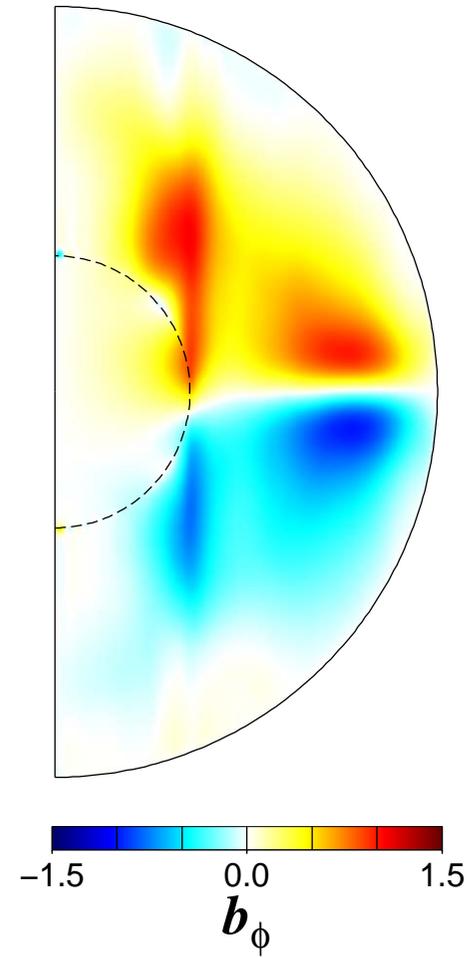
Sakuraba (in preparation)

流れと磁場の軸対称成分

流れの東西成分

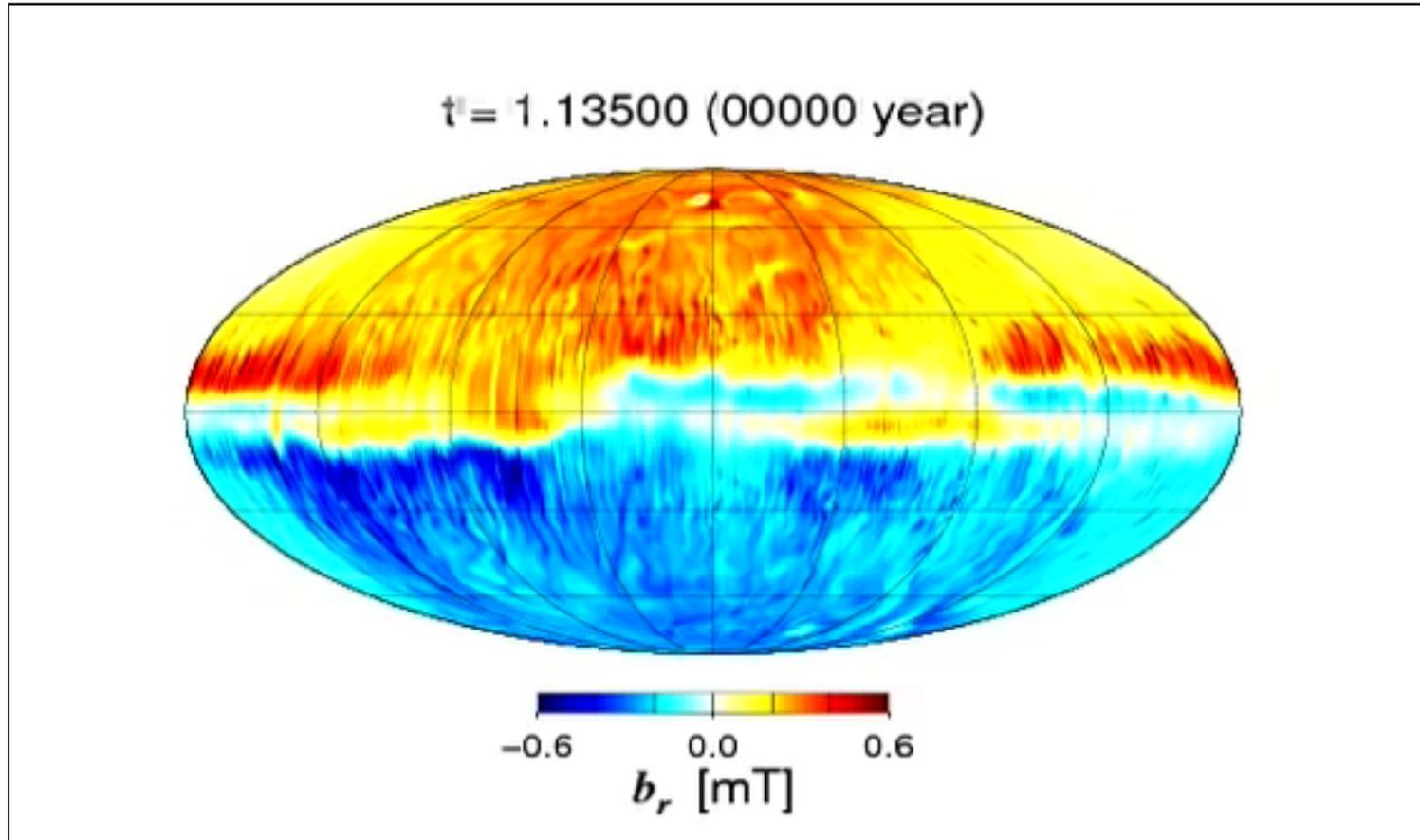


磁場の東西成分



Sakuraba & Roberts (2009)

ちなみにコア表面温度一様の場合



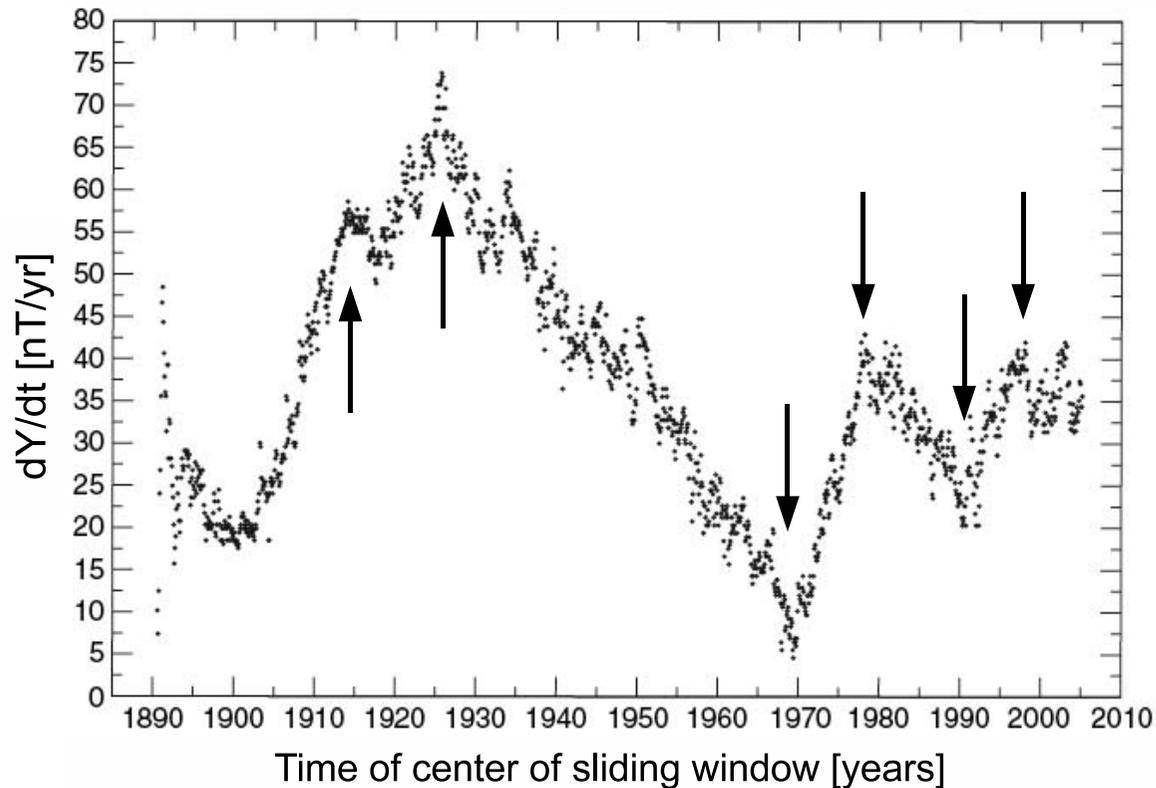
Sakuraba & Roberts (2009)

西方移動についてのまとめ

- 赤道域に卓越する磁場のパッチの西方移動がシミュレートされた。
- 強いトロイダル磁場の存在と西向きの流れとが原因と推論する。
- 地磁気と異なる点:
 1. 位相速度が遅すぎる (1/5 程度)
もっと熱源を多くすれば流速は速くなるかも
 2. 西方移動の地域性
コア表面の熱フラックスの水平不均質性が必要か

2. 地磁気ジャーク

Secular variation in Y-component at Niemegek, Germany

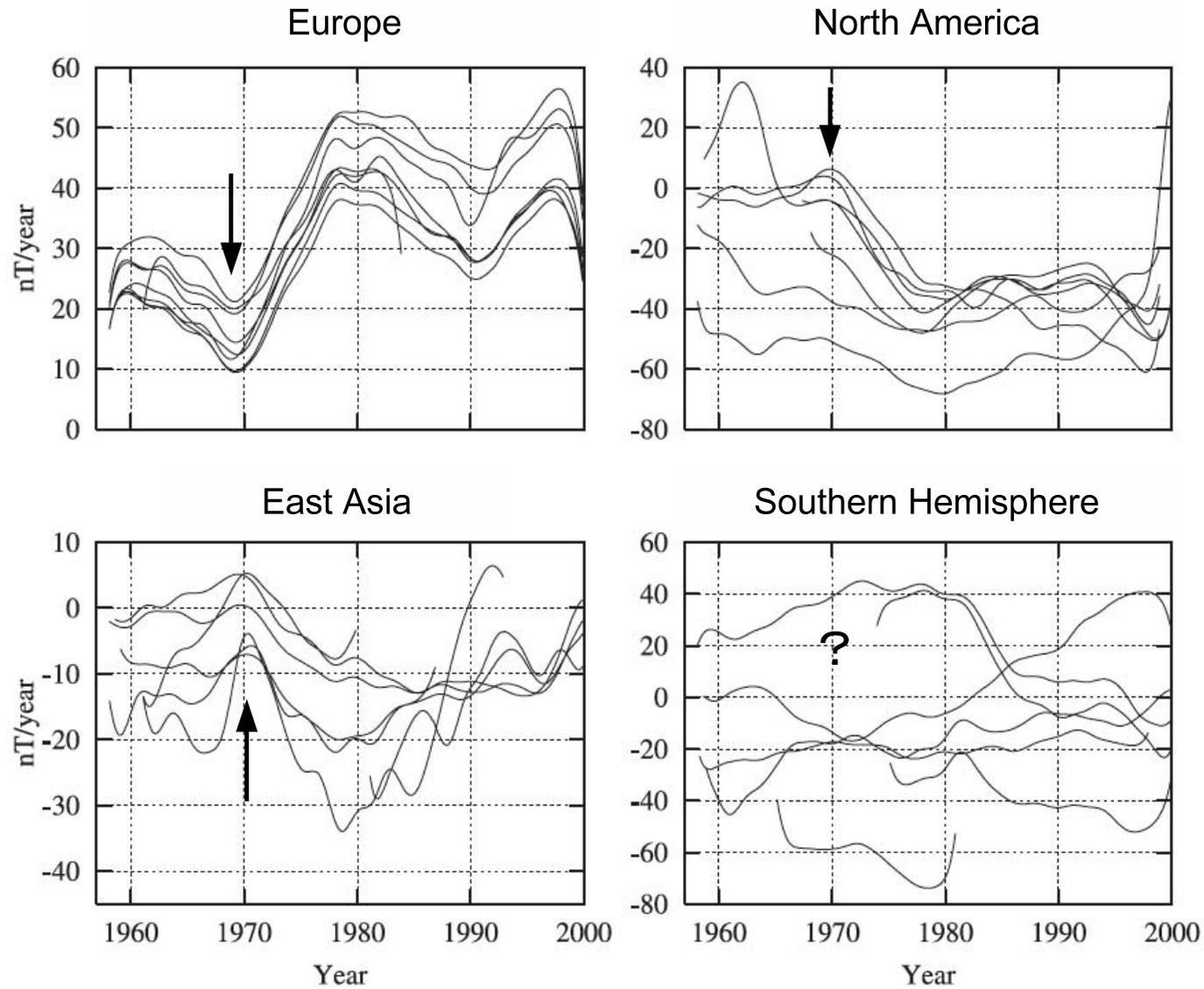


- インパルス的な地磁気の変動現象。
 - 磁場の時間 2 階微分係数が不連続.

地磁気ジャークの特徴

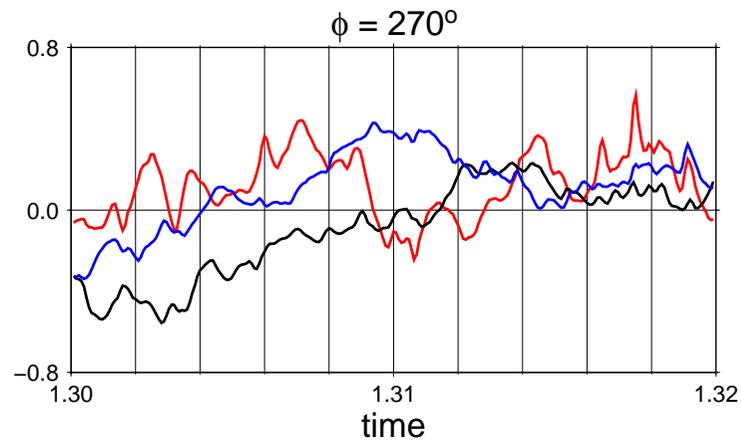
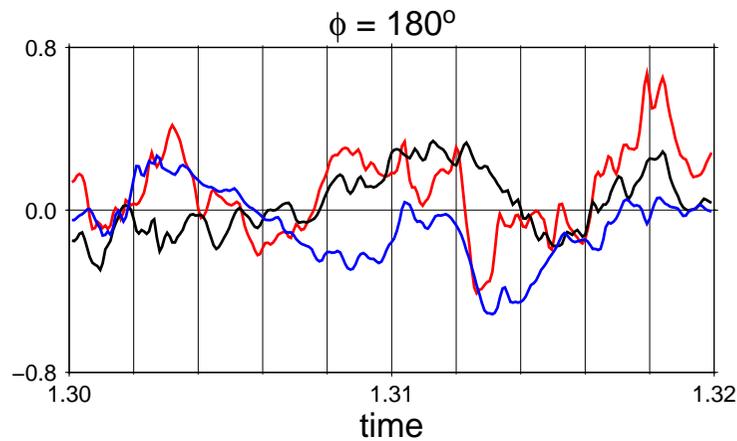
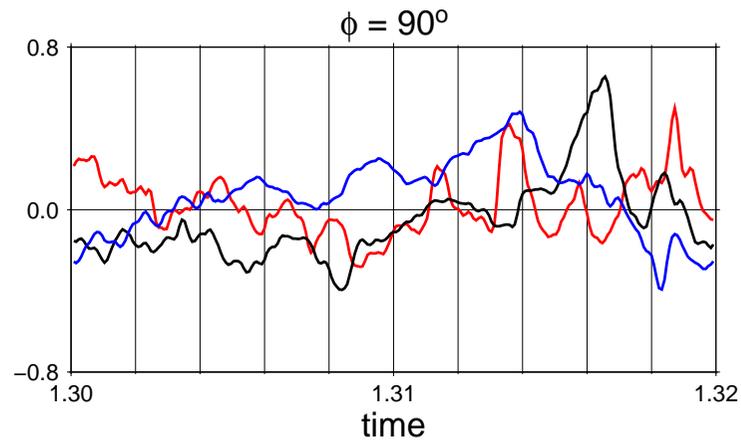
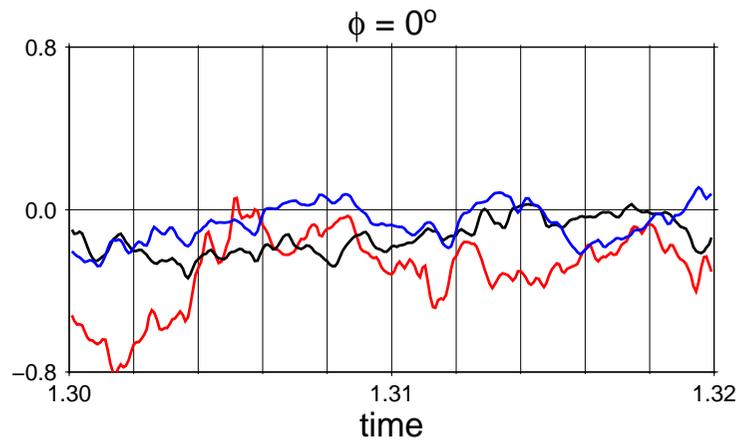
- 磁場の東西成分 (Y 成分) に顕著.
- コア起源.
 - ただし本質的原因については議論がある.
- 必ずしもグローバルでない. 完全に同時でもない.
 - ヨーロッパで顕著.
 - ジャークの源を反映? マントル電気伝導度の不均質の影響?

さまざまな観測点での dY/dt



(Nagao *et al.*, 2003)

数値シミュレーションで得られた磁場の時間微分

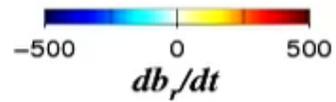
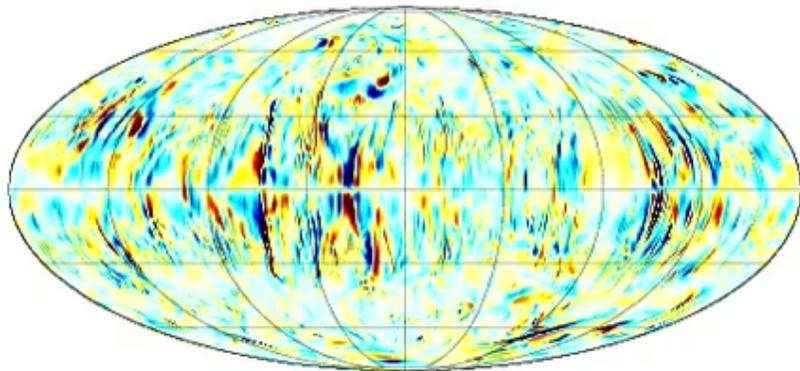


北緯 30° 上の 4 点における, 黒 dX/dt , 青 dY/dt , 赤 dZ/dt .

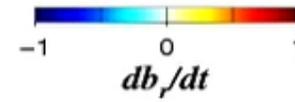
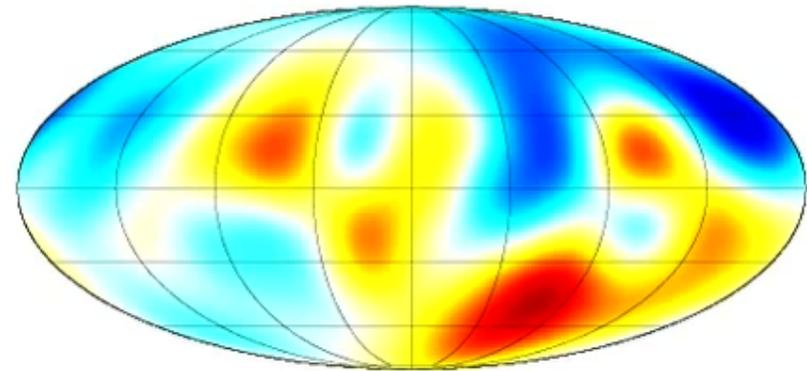
$E = 2.5 \times 10^{-7}$, $P_m = 0.2$; 時間は約 3000 年分に相当.

コア表面および地表面における dZ/dt

$t = 1.30008$ (00000 year)



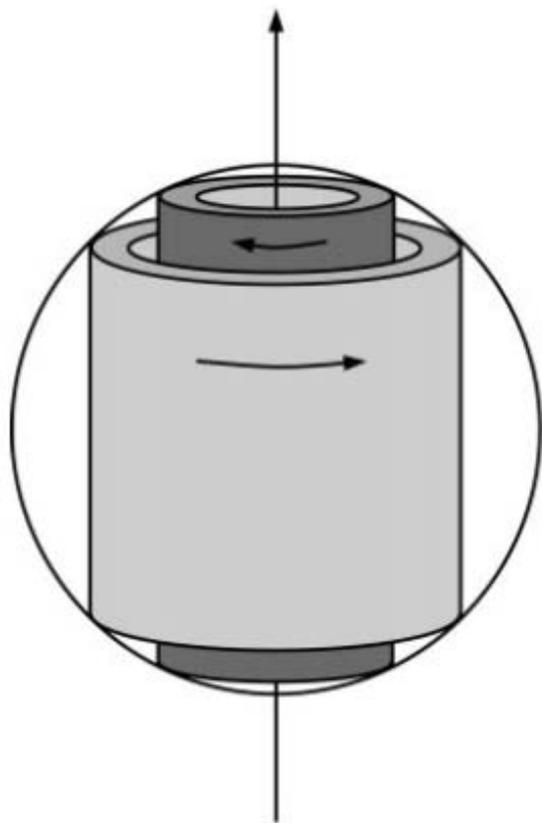
$t = 1.30008$ (00000 year)



地磁気ジャークについてのまとめ

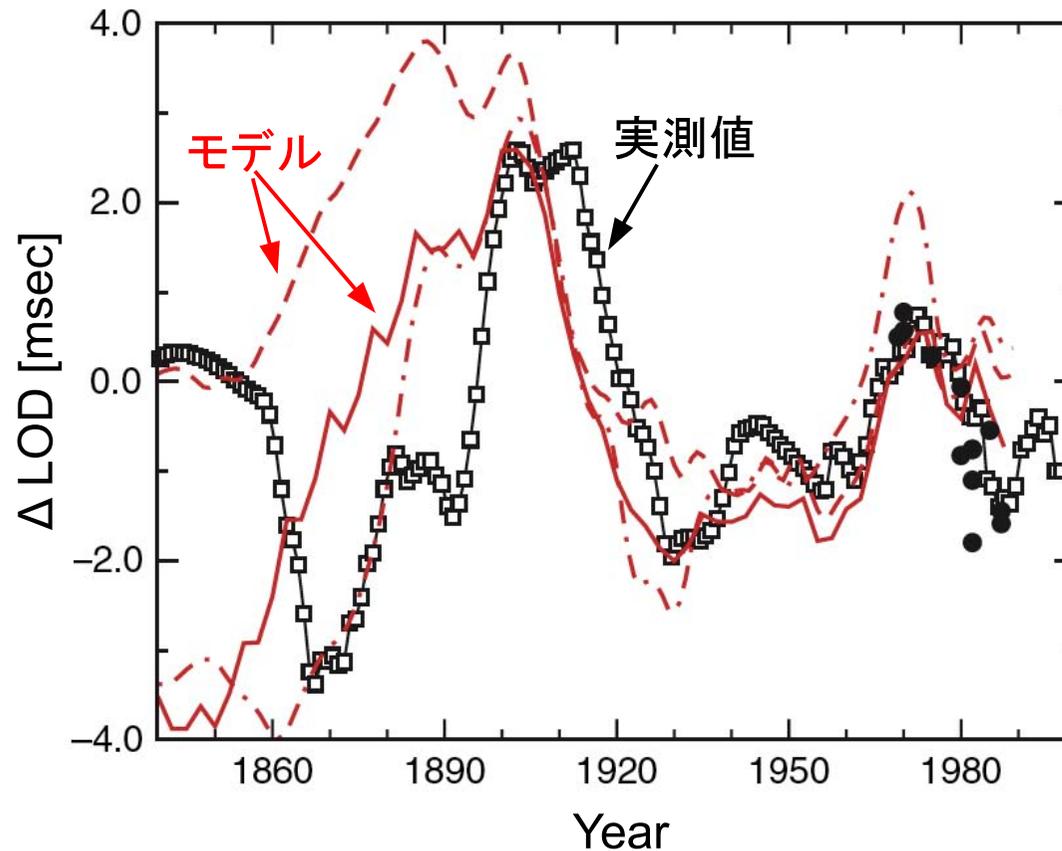
- Jerk-like な磁場変動がシミュレートされた。
- コア表面の磁場のなんらかの局所的な不安定, その MHD 波動としての伝搬が原因と示唆される。
- 地磁気と異なる点:
 1. 時間スケールの問題
より低粘性かつ乱流的なモデル
 2. 3成分すべてにジャークがみられる
実際の地磁気も3成分すべてにみられるのかもしれない

3. コアのねじれ振動



- コアの基本状態では, 自転軸と共軸の円筒面を回転させようとするトルクがゼロ.
 - 磁気地衡流状態, テーラー状態.
- 基本状態からのずれは波動方程式をみます.
 - ローレンツ力が復元力. 波動伝播速度 c_T は円筒面を貫く平均磁束に比例.
 - $|B_s| \sim 1 \text{ mT}$ ならば $c_T = 1 \text{ cm/s}$. 外核の深さを往復するのに 15 年.

ねじれ振動と自転角速度変動

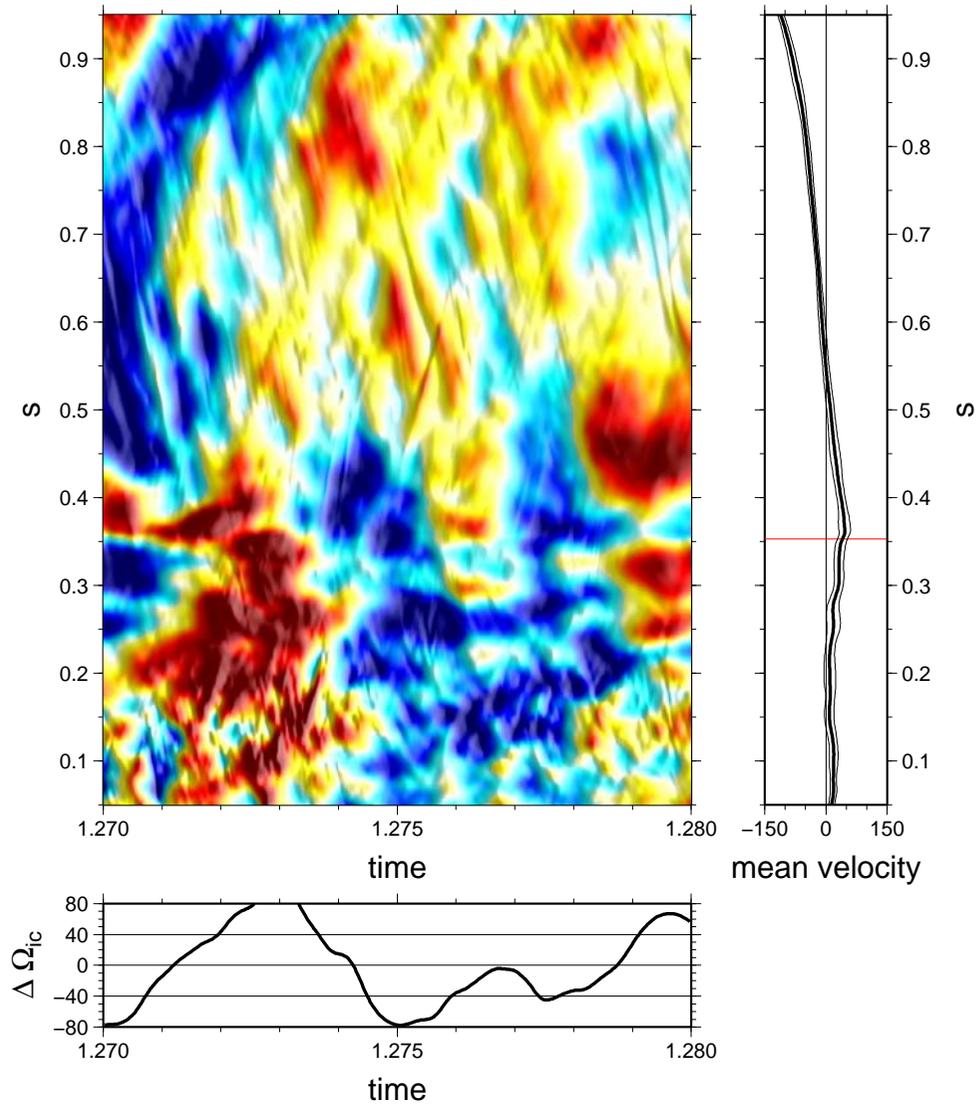
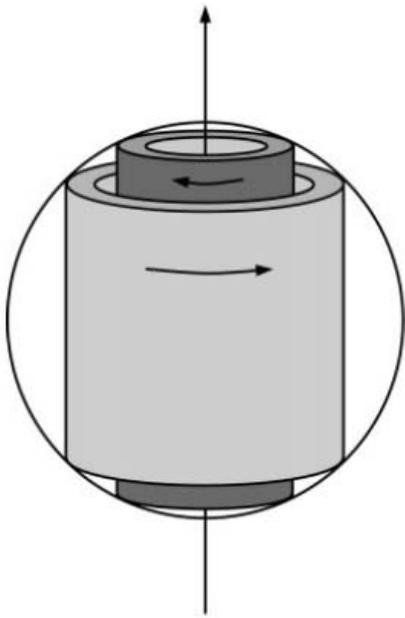


- 地球の「1日」の長さ (Length Of Day) の変化.
 - 長周期の LOD 変動は, コアのねじれ振動の固有周期が決められている.
 - コア・マントル間の角運動量交換.

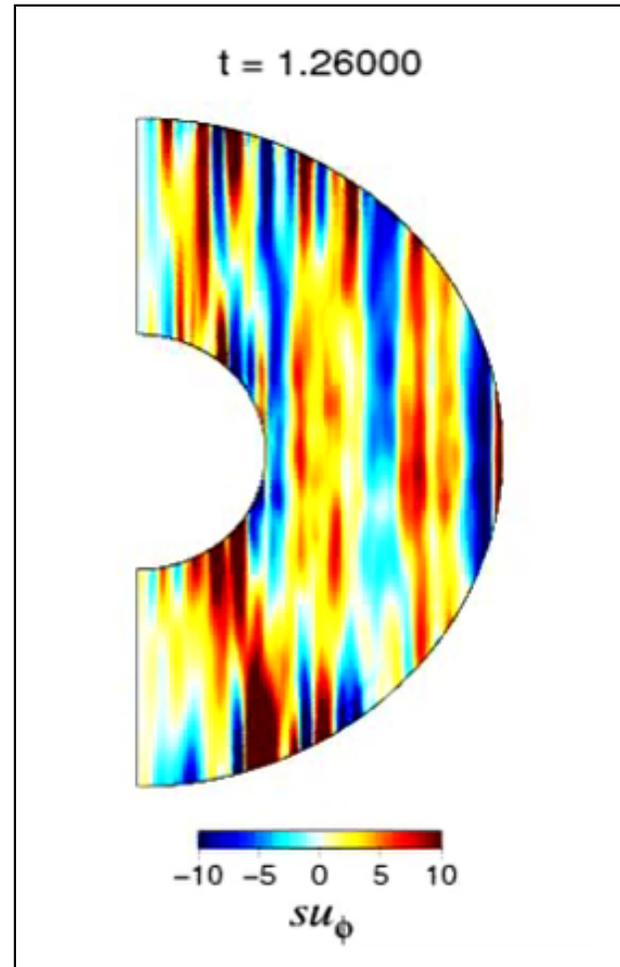
シミュレーションで検証すること

- ねじれ振動が理論どおり起こるか？
 - 高粘性のダイナモモデルでは過去に研究例あり.
 - 移流項が無視できない？
- コア表面の流れだけで，コア全体の角運動量が推定できるのか？

円筒の平均回転速度 $\bar{v}_\phi(s, t)$



平均東西風の時間平均値からのずれ



ねじれ振動についてのまとめ

- 内向き, 外向きの進行波がみられた.
 - 反射はしない. 定在波というわけではなさそう.
 - 伝搬速度は理論 ($|B_s|$ に比例) に近いが, 移流の効果も無視できない.

高い磁気エネルギー / 運動エネルギー比の実現

- コア内部の東西流の変動は, ほぼ \approx 座標によらない.
- 励起源:
 - コア表面のなんらかの不安定現象が原因で, マントルに伝搬すればジャーク, 内部に伝搬すればねじれ振動になるかもしれない.

本日のまとめと展望

- 粘性を低く抑えたダイナモの数値シミュレーション結果は、かなりよく地磁気の短時間変動の特徴をとらえているようだ。
 - ついに「現実的」なダイナモモデルを手にした。
 - 長周期変動（逆転など）はどうか？
- モデルの改善：
 - 熱対流をもっと活発に（高いレイリー数）。
 - コア表面での水平不均質な冷却。
 - もっと粘性を抑えて、もっと強い磁場を。
- データとモデルの整合性の吟味。

いかにして問題をとくか？

1. 問題を理解せよ.

未知のものは何か？ 与えられたデータは何か？ 条件は何か？

2. 計画を立てよ.

似た問題はないか？ 条件の一部をのこし, 他を捨てよ. 未知のもの, あるいは与えられたデータを変えることができるか？ データをすべて使ったか？ 条件のすべてを使ったか？

3. 計画を実行せよ.

4. 振り返ってみよ.

おしまい