

内核の研究の最近の話題から

吉田茂生

1 内核は重要か？

内核が地球全体に占める体積は、1%以下なので、長い間注目された来なかったが、最近では以下のような理由で注目をされている。

内核が注目される理由：

- 地震学的な異方性
- 外核の流れにはコリオリ力が大きく影響するために、内核が小さくても幾何学的影響が遠くまで伝わる（2次元性）
- 電気伝導性がある固体→磁場の変化を妨げる（安定化）
- 内核の差動回転→ダイナモに対する制約になるかもしれない

本日は、内核の部分熔融度、異方性に関して、最近出た論文に関するレビューとそれに関わる話題の紹介をする。

2 内核の部分熔融度と内核の進化

コアの鉄は不純物を含むから、内核は部分熔融していてもかまわない。部分熔融度は内核の進化と関係が深い。なぜなら、内核の成長とともに部分熔融度が決まると考えられるから。

私たちは、以前、圧密を考えると、内核から液体は絞り出されているはずだと考えた (Sumita et al., 1996)。そうすると、内核はほとんど固体のはずである。最近の研究でも、以下のように、内核はそんなに液体を含んでいないだろうという傾向になっている。

かつて部分熔融の証拠と考えられたことのひとつは、内核の Poisson 比が高いことである。しかし、最近の第一原理計算の結果 (Steinle-Neumann et al., 2001) だと、高温高压下では、固体の純鉄でも Poisson 比が高くなることが示された。部分熔融体のようなもの考える必要はない。

ついでに、Steinle-Neumann et al. (2001) は、計算した弾性定数から、内核の温度を 5700K と推定した。

部分熔融の度合いを拘束する可能性があるのは、地震波の Q 値である。しかし、今のところ、まだ観測でもきっちりとは決まっておらず、理論もいまいかげんである。たとえば、最近、Singh et al. (2000) は、波長に比べて十分小さい流体包有物による Q を計算した。しかし、仮定されている液体鉄の粘性が高すぎて ($\sim 10^2$ Pa s) 意味がない。実際には、液体鉄の粘性はかなり低い ($\sim 10^{-2}$ Pa s) と予想されている。低い粘性ならば、たいして Q を下げる効果がない。もっとも、融点の近くの粘性は微妙ではある。

Q を下げるものは他にもいろいろあるので、何ともいえない。

3 内核の地震学的な異方性、不均質性

内核の地震学的異方性の発見 (1986) :

内核を通る地震波のP波は、南北方向（自転軸方向）に速く、東西方向（赤道面内方向）に遅いという特徴がある。異方性は、かなりの大きさ（3%程度）で、自転軸に対して軸対称。

3.1 異方性の成因の一般論

自転軸に対し軸対称

⇒ 外核が関わっている。（内核は固体で粘性が大きいので、内核の流れに直接コリオリ力が効くということが考えられない）

⇒ 異方性は外核ダイナミクスを解くひとつの鍵

地震学的異方性の成因には一般には次のようなものがある。

- 結晶の選択配向（結晶の方向がそろうこと）
- 鉄の液体が閉じ込められたいわば流体包有物の形がそろう

今のところは前者を考える人が多い。あまり強くはない理由としては

- 速度の異方性と減衰の異方性が正の相関を持つこと (Souriau and Romanowicz, 1996)
- 圧密を考えると、内核が多量に液体を保持しているとも考えにくい (Sumita et al., 1996)

が挙げられる。

実際に流体包有物の効果を計算した最近の論文：Singh et al. (2000)

流体包有物だけで3%の異方性を説明しようとするには14%のmelt fractionが必要。これは、ちょっと多すぎる。

3.2 内核の鉄の物性

内核の鉄の構造：おそらくhcp（六方晶系）

これは、理論計算でも実験からの推測でも支持されている。

とすると、弾性的には一方向が特別で、それに垂直方向に等方的 (transverse isotropy) という異方性がある。

最近の理論計算：Vočadlo et al. (2000)

第一原理計算で、可能性のある結晶構造を複数計算してみて、やっぱりhcp構造が安定。

弾性的異方性の最近の話題：Steinle-Neumann et al. (2001) 高温高压下の鉄の弾性率の第一原理計算。絶対零度の計算はすでにあつたが、有限温度での計算は初めて。

結果：高温では c/a が増えて、 c 軸方向が柔らかくなり、basal plane を通る波が、 c 軸方向に進む波よりも約 12 % 速くなる。絶対零度の計算では c 軸方向が速いと思われていた。

3.3 内核の異方性の成因

Steinle-Neumann et al. (2001) の計算を信じるならば、内核内の鉄は c 軸を赤道面に平行に並べるような配向をしているはず。それはいかにして可能か？いろいろな可能性がある。

(a) 私たちが昔出した仮説：Yoshida et al. (1996)

外核内の熱輸送の異方性（赤道面方向に熱がたくさん運ばれる）

⇒ 内核の成長の異方性

⇒ 内核は oblate になろうとするが、重力緩和をする。それに伴う応力で異方性ができる。

この考え方は、欠点はあるものの今でも通用する。これを書いたときは鉄の P 波速度は c 軸方向が速いと思っていたが、 c 軸方向が遅いとしても、この理窟だと、やはり自転軸方向に地震波速度が速いという結果が出る。弾性エネルギーで配向を決めているので、硬い方向が自転軸方向に向いてしまうためだ。

(b) 異方性を作るメカニズムの最近の仮説：Buffett and Wenk (2001)

内核内の磁場が糸巻き型をしているとする。すると、ローレンツ力として、ひとつには内核内向きの力がかかるが、これは圧力や浮力とバランスする。もうひとつには、 ϕ 方向の力が発生する。それで、結晶面の向きを考えたときにどういうふうに結晶が配向するかを計算した。そうすると、 c 軸は赤道面内に向く。要するに赤道面内にシアがあって、そのシアにしたがって basal plane がむくと考えるとそうなる。

その他、いろいろあるが省略。

3.4 内核の中の Maxwell 応力について

Buffett and Wenk (2001) に関連した問題：内核の内部で、ローレンツ力は、どういう力とバランスするか？

ローレンツ力は、私たちが昔考えた仮説にとっても重要である。もしこれが重要ということになれば、その仮説は成立しなくなる。私たちは、最初ローレンツ力もちらっと考えたのだが、圧力などとバランスするだろうということで、軽率にもそれあまりよく考えなかった。Karato (1999) は、反対の意味で軽率にも、力のバランスを考えずにローレンツ力がコアの中に流れを産む原動力になるという考えを出した。これが、どういうわけか Nature に載ってしまった。これに対し、それはいくらなんでもひどすぎで、力のバランスを考えましょう、という論文を Buffett and Bloxham (2000) が出した。そこにおいて、実は、圧力と完全にバランスすると思うのは軽率であることがわかる。

彼らは、まず、内核の中で速度がゼロになる解があるとすると、どういうことになるかを考え、それは表面で破綻することを示す。そこで速度がゼロでない解を数値計算するが、最終的には、速度は非常に小さくなるということを示す。

内核の中での力のバランス

$$-\nabla P + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} = 0 \quad (1)$$

ここで、 \mathbf{f} はローレンツ力である。これの rotation を取ると

$$\nabla \rho \times \mathbf{g} + \nabla \times \mathbf{f} = \mathbf{0} \quad (2)$$

となる。ローレンツ力には rotational な部分もあって、これは圧力とはバランスできない。この部分が流れを引き起こす可能性がある。Buffett and Bloxham (2000) では、内核に密度成層があると考え、すると rotational な部分も浮力と釣り合えらした。しかし、表面ではその関係が破れるので、流れが生じるとした。そして、その流れは、計算の結果、小さいとした。

しかし、表面での熱的な境界条件などの詰めがこの論文では今一つ不十分な意味がある。今回、ちゃんと考えようと思ったが、時間切れになってしまった。

引用文献

- Buffett, B.A. and Bloxham, J. (2000) Deformation of Earth's inner core by electromagnetic forces, *Geophys. Res. Lett.*, **27**, 4001–4004.
- Buffett, B.A. and Wenk, H.-R. (2001) Texturing of the Earth's inner core by Maxwell stresses, *Nature*, **413**, 60–63
- Karato, S.-I. (1999) Seismic anisotropy of the Earth's inner core resulting from flow induced by Maxwell stress, *Nature*, **402**, 871–873.
- Singh, S.C., Taylor, M.A.J. and Montagner, J.P. (2000) On the presence of liquid in Earth's inner core, *Science*, **287**, 2471–2474.
- Souriau, A. and Romanowicz, B. (1996) Anisotropy in inner core attenuation: a new type of data to constrain the nature of the solid core, *Geophys. Res. Lett.*, **23**, 1–4.
- Steinle-Neumann, G., Stixrude, L., Cohen, R.E., and Gülseren, O. (2001) Elasticity of iron at the temperature of the Earth's inner core, *Nature*, **413**, 57–60.
- Sumita, I., Yoshida, S., Kumazawa, M., and Hamano, Y. (1996) A model for sedimentary compaction of a viscous medium and its application to inner-core growth, *Geophys. J. Int.*, **124**, 502–524.
- Vočadlo, L., Brodholt, J., Alfè, D., Gillan, M.J., and Price, G.D. (2000) Ab initio free energy calculations on the polymorphs of iron at core conditions, *Phys. Earth Planet. Inter.*, **117**, 123–137.
- Yoshida, S., Sumita, I., and Kumazawa, M. (1996) Growth model of the inner core coupled with outer core dynamics and the resulting elastic anisotropy, *J. Geophys. Res.*, **101**, 28085–28103.