氷衛星内部海におけるテイラー柱の計算

神戸大学理学部惑星学科
流体地球物理学教育研究分野
2263410s 中澤 惠人

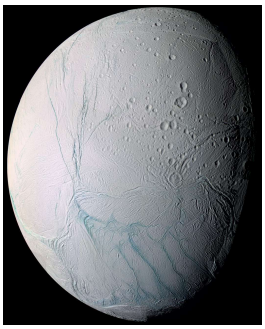
研究の目標

氷衛星内部海では,
- どのような東西方向の流れが存在するのか
- どのような熱対流・熱伝導が生じうるのか

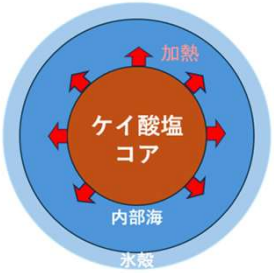
を計算する.

氷衛星内部海とは？

- 氷衛星(icy satellite / ice moon)：
  表面をH_2Oの氷に覆われた衛星
  または,
  主にH_2Oの氷で構成された衛星
  - 例: エウロパ, ガニメデ, エンセラダスなど
- 氷衛星には, 大きく分けて 3 種類の層が存在すると考えられている. (Soderlund, 2024)
  1. ケイ酸塩コア
     - ケイ素(Si)と酸素(O)を主成分とする, ケイ酸塩鉱物からなる固体核
     - 相対的に高温であり, 内部海に熱を伝える
  2. 内部海
     - 液体の H_2O を主成分とする層
     - ケイ酸塩コアから熱を受け取る
  3. 氷殻
     - 固体の H_2O でできた層
- 主に 4 種類の加熱要因
  - ケイ酸塩コアからの加熱
  - 潮汐加熱
  - H_2O の凍結と融解による塩分フラックス
  - 水の氷点が圧力に依存することによる, 氷殻直下の温度変化



エンセラダスの写真
(カッシーニ探査機が2005年に撮影, NASAより引用)



氷衛星内部の模式図

テイラー柱とは？

- 回転する球殻流体では, コリオリの力と圧力傾度力がつり合う.
- 結果,

$$\mathbf{\Omega}\cdot\nabla\mathbf{u}=0$$

が成り立つ.

速度勾配と$\mathbf{\Omega}$が直交する

↓

速度勾配が$\mathbf{\Omega}$成分を持たない

↓

流体の運動が$\mathbf{\Omega}$方向に一様

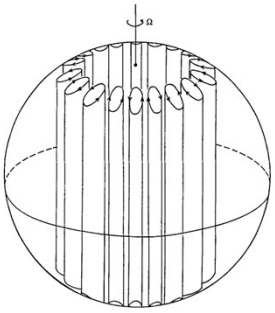
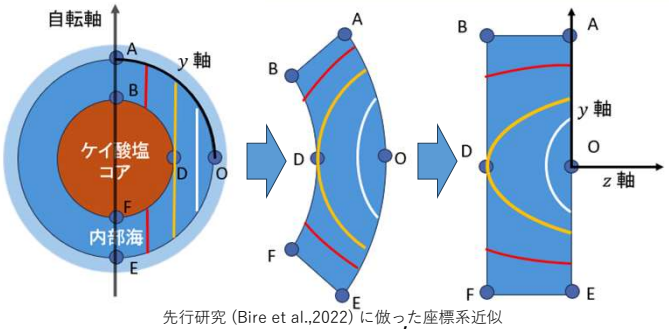


図: テイラー柱の様子. Busse(1970)[1]より引用.

実験設定

- 手法：数値シミュレーション
  - Julia のパッケージ Oceananigans.jl を使用
- 計算する座標系： Bire et al.(2022)[2]に準拠したデカルト座標系
  - 球殻ジオメトリを, 直方体の箱として近似
- 境界条件 (本研究も同じ条件設定)
  - 東西: 周期的
  - 南北, 底面 ($z=-60$ kmの面): 壁 (滑りなし)
  - 内部海の上面 ($z=0$ kmの面): 壁 (滑りあり)
  - $z=-60$ kmから一定加熱 10 W/m^2, $z=0$ kmで $\mathrm{T}=0$ ℃



先行研究 (Bire et al.,2022) に倣った座標系近似

- 運動方程式: $\frac{\mathrm{D}\mathbf{u}}{\mathrm{Dt}}+2\mathbf{\Omega}\times\mathbf{u}=-\frac{1}{\rho_0}\nabla\mathrm{p}'+\frac{\rho'}{\rho_0}\mathbf{g}+\nu\nabla^2\mathbf{u}$
- 連続の式 (非圧縮を仮定): $\nabla\cdot\mathbf{u}=0$
- 温度移流の式: $\frac{\mathrm{DT}}{\mathrm{Dt}}=\kappa\nabla^2\mathrm{T}-\delta_{\mathrm{top}}\frac{\mathrm{T}-\mathrm{T}_0}{\tau}+\frac{\delta_{\mathrm{bottom}}}{\Delta z}\frac{\mathrm{Q}}{\rho C_p}$

$$\delta_{\mathrm{top}}=\begin{cases}1(z=0[km])\\0(z\neq 0[km])\end{cases}\qquad \delta_{\mathrm{bottom}}=\begin{cases}1(z=-60[km])\\0(z\neq -60[km])\end{cases}$$

項目	パラメータ	本研究
計算領域 (x)	Lx	$0\ \mathrm{km}\le x\le 50\ \mathrm{km}$
計算領域 (y)	Ly	$-395\ \mathrm{km}\le y\le 395\ \mathrm{km}$
計算領域 (z)	Lz	$-60\ \mathrm{km}\le z\le 0\ \mathrm{km}$
格子間隔	$\Delta x,\Delta y,\Delta z$	2 km
粘性係数・熱拡散係数	ν,κ	$0.89\ \mathrm{m}^2/s$
自転角速度	Ω	$7.3\times10^{-5}/\mathrm{s}$
衛星半径	R	251km
重力加速度	g	$0.1\ \mathrm{m/s}^2$
初期温度	T	$T=0$(擾乱あり)
初期流速	u	$\boldsymbol{u}=\mathbf{0}$
温度の緩和時間	τ	$\tau=2\times10^6/\mathrm{s}$

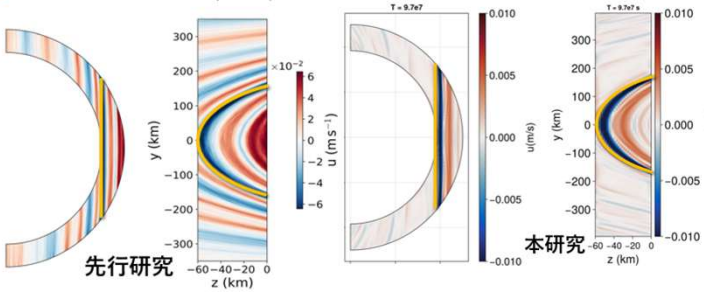
※コリオリの力を, 赤道付近のみで正確となるような関数を用いて計算した.

$$2\mathbf{\Omega}=\boldsymbol{f}=\begin{pmatrix}0\\\tilde{f}\\f\end{pmatrix}\qquad \begin{cases}\tilde{f}=2\Omega\cos\left(\frac{y}{R}\right)\\f=2\Omega\sin\left(\frac{y}{R}\right)\end{cases}\qquad \begin{cases}\tilde{f}=2\Omega\left(1-\frac{z}{R}\right)\\f=2\Omega\frac{y}{R}\end{cases}$$

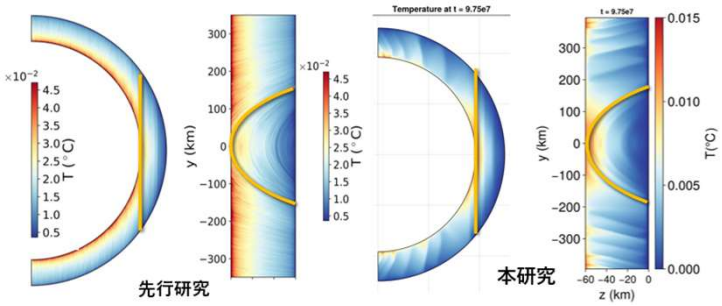
@先行研究　　@本研究

実験結果・考察

- 東西方向の流れ (m/s)



  - 低緯度でテイラー柱が出現していると考えられる.
  - 高緯度のテイラー柱は流速が小さく, $\mathbf{\Omega}$ の向きから傾いている.
- 温度分布 (°C)



  - 底面付近の水が暖められ, 鉛直上向きに熱が伝わる様子が見えた.

参考文献
[1] **Busse, F. H. (1970).** Thermal instabilities in rapidly rotating systems. *Journal of Fluid Mechanics*, 44(3), 441-460.
[2] **Bire, S., Kang, W., Marshall, J., & Soderlund, K. M. (2022).** Exploring Ocean Circulation on Icy Moons Heated From Below. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 127(4), e2021JE007020.