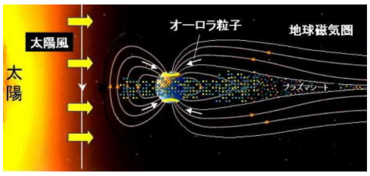
オーロラ現象における
プラズマ流体のシミュレーション

池田研究室

序論

未だ謎が多いオーロラという現象が, “なぜゆらゆらしているのか”,”なぜ局所的に発生するのかなどの原因を解明したいという動機のもと,
オーロラは「プラズマ」による流体現象であるという観点からコンピュータ上でシミュレーションしすることが目的である.

オーロラはなぜできるのか. 原因を辿ると原点は太陽であることがわかっている.



太陽風 = プラズマの流体

プラズマの流体
現象を扱いたい

太陽から流れてくるプラズマ(太陽風)が地球の磁場に沿って北極及び南極に流れ込んでくることによって, 地球上の分子にぶつかり発光する.
したがって, 研究目標はプラズマ流体のシミュレーションである.

目標

プラズマ流体は圧縮性ナビエ・ストークス方程式で書くことができる.
さらに, 地球の磁場などの外力を加えた方程式をコンピュータで計算させることによって, オーロラ現象につながるプラズマ流体挙動を調べる.

モデル式

圧縮性ナビエ・ストークス方程式

今回使うのは以下のような圧縮性ナビエ・ストークス方程式

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho \boldsymbol{u}) = 0$$

$$\rho\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \rho(\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u} = \nabla\cdot\left[-\boldsymbol{p} + \mu\left(\nabla\boldsymbol{u} + (\nabla\boldsymbol{u})^{\mathrm{T}}\right) - \frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot\boldsymbol{u})\right] + \boldsymbol{F}$$

を用いる. さらに, 外力に関して, 地球の磁場とプラズマ流体の電流との相互作用を考えれば,
$\boldsymbol{F} = \boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}$ さらに, $\boldsymbol{F} = \boldsymbol{F_0} + \boldsymbol{F_1}\sin at \sin bx \sin cy$ と設定する.

条件設定

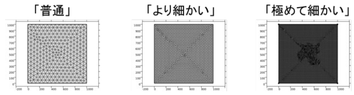
(1) 使用したソフトウェア
COMSOL Multiphysics (バージョン : COMSOL 5.2)

(2) 境界条件
今回考える空間は縦1000[km]×1000[km]の平面を考える. 水平方向は周期境界条件, 垂直方向は上部が流入口, 下部が流出口となっている.

(3) メッシュ
メッシュ生成はCOMSOLのコマンドによって自動生成される.本研究で使用したコマンドは「普通」,「より細かい」,「極めて細かい」である.

(4) 物性値

$$\rho = 1.1708\times10^{-15}[\mathrm{kg/m^3}]$$
$$\mu = 2.0441\times10^{-18}[\mathrm{A/m^3}]$$

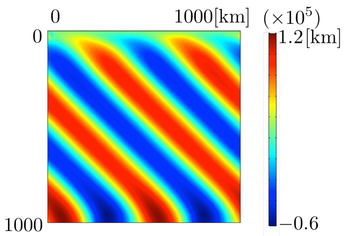


(6) パラメータ

$$\boldsymbol{F_0} = \boldsymbol{F_1} = 114\times10^{-11} \quad a = 1 \quad b = c = \frac{4\pi}{10^6}$$

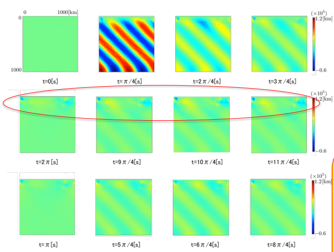
シミュレーション結果

圧縮性粘性流体の
二次元シミュレーションに成功.



シミュレーション結果は全て, y方向の速度場.
左に表示させた結果は空間的に,
周期的な模様が確認できる.
右に時刻0[s]から11π/4[s]までの時間発展を表示させた.
このことかた, 時間的にも周期的な模様を確認することができた

メッシュ : 普通

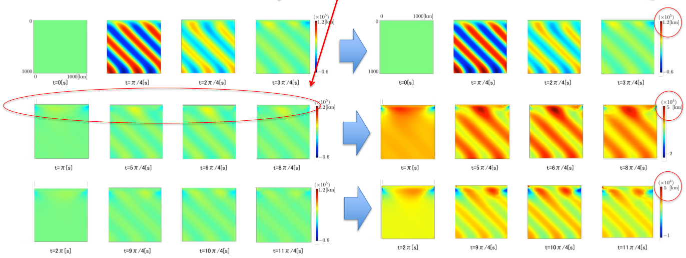


メッシュを細かくしたことで,
綺麗な模様を表示させることができた.

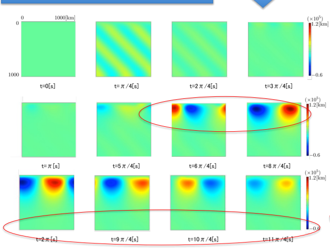
時間の幅と速度場の大きさ(カラーバーの値)を狭めることで, 空間的な周期性がはっきり存在していることがわかる.

また, 速度場の大きさが減衰している.

メッシュ : より細かい



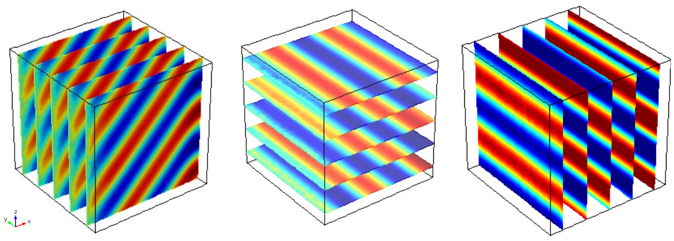
メッシュ : 極めて細かい



メッシュをさらに細かくすることで,
流入口付近の影響の大きさを確認できた.

流入の影響が強く, 周期的な模様が消えてしまった.

3次元でのシミュレーションにも成功.



表示させているのはx方向の速度場, x軸水平方を 流入口と流出口とし, y軸方向はすべり壁, z軸方向は周期境界となっている.
外力については以下のように設定した.

$$\boldsymbol{F} = \begin{pmatrix} F_0 + F_1 \sin at \sin bx \sin cz \\ 0 \\ F_0 + F_1 \sin at \sin bx \sin cz \end{pmatrix} \qquad F_0 = F_1 = 114\times10^{-11} \quad a = 1 \quad b = c = \frac{4\pi}{10^6}$$

z-x平面には上図の2次元シミュレーションと同じような模様を表示させることができた.
また, x-y平面, y-z平面の周期的な模様も観察することができた.

結論

2次元, 3次元での圧縮性ナビエストークス方程式のシミュレーションに成功.

パラメータを設定することで, 周期的な模様を表示させることができ, 時間発展をし食べることで, 流体の挙動を検証することができた.
模様が減衰しているこうに見えることから, 長時間の検証が今後の課題である. また, 3次元でのシミュレーションによって, さらに詳しく調べてみる価値があるだろう.