

金星および火星の熱圏・電離圏 スーパーローテーション

寺田直樹、寺田香織(東北大学)

CPSセミナー
2012年11月12日

Outline

1. イントロ

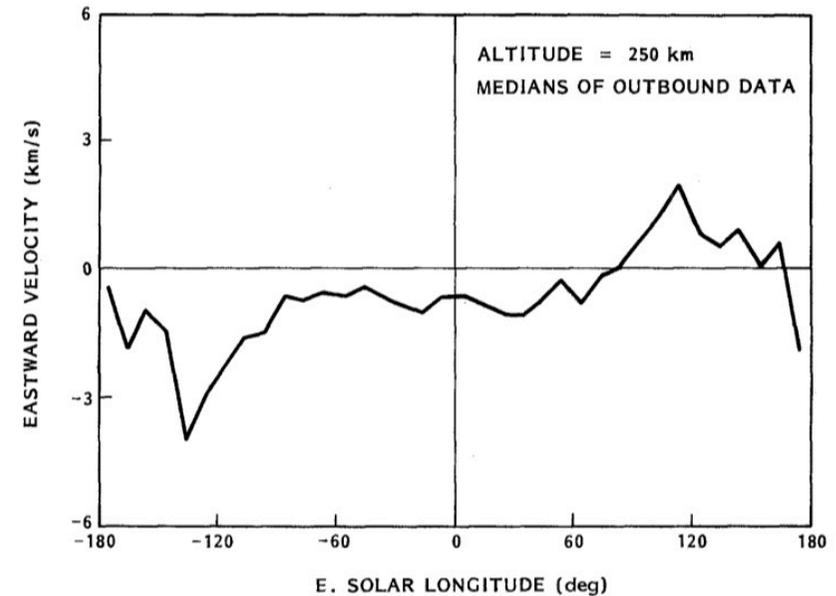
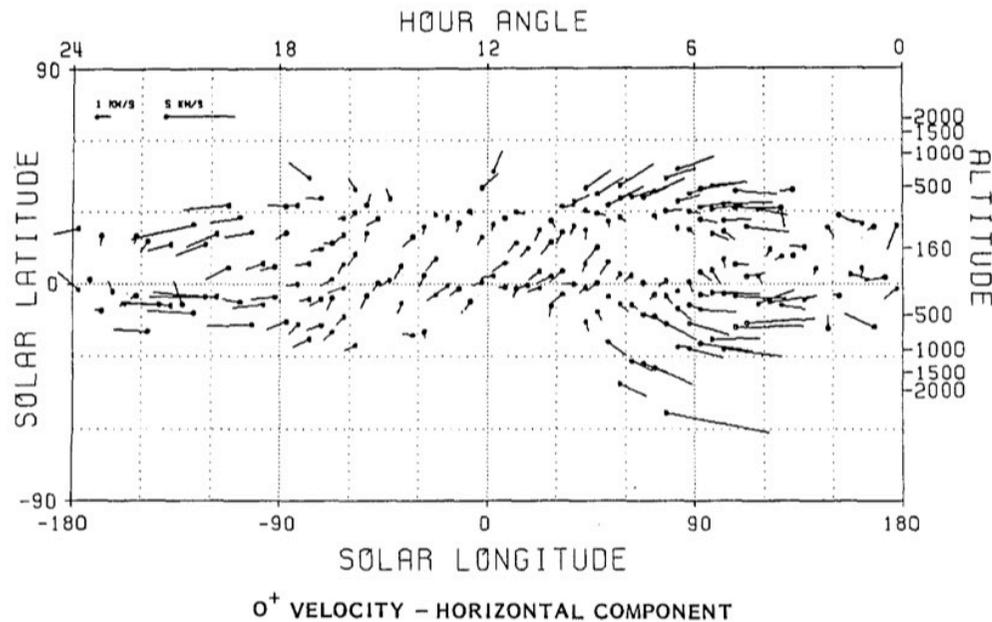
- 金星電離圏のスーパーローテーション (>400 m/s)
 - Pioneer Venus Orbiter (PVO) 観測
- 金星電離圏、火星電離圏の近年の観測
 - Venus Express (VEX), Mars Express (MEX) 観測
- 金星中間圏-熱圏結合シミュレーション

2. 「遷移領域 (高度150~250 km)」を含むモンテカルロ直接 (DSMC) シミュレーション

- 中層 (下層) 大気起源の非対称トルク
- 太陽風起源の非対称トルク

3. 電磁圏-大気圏結合シミュレーションの今後の課題

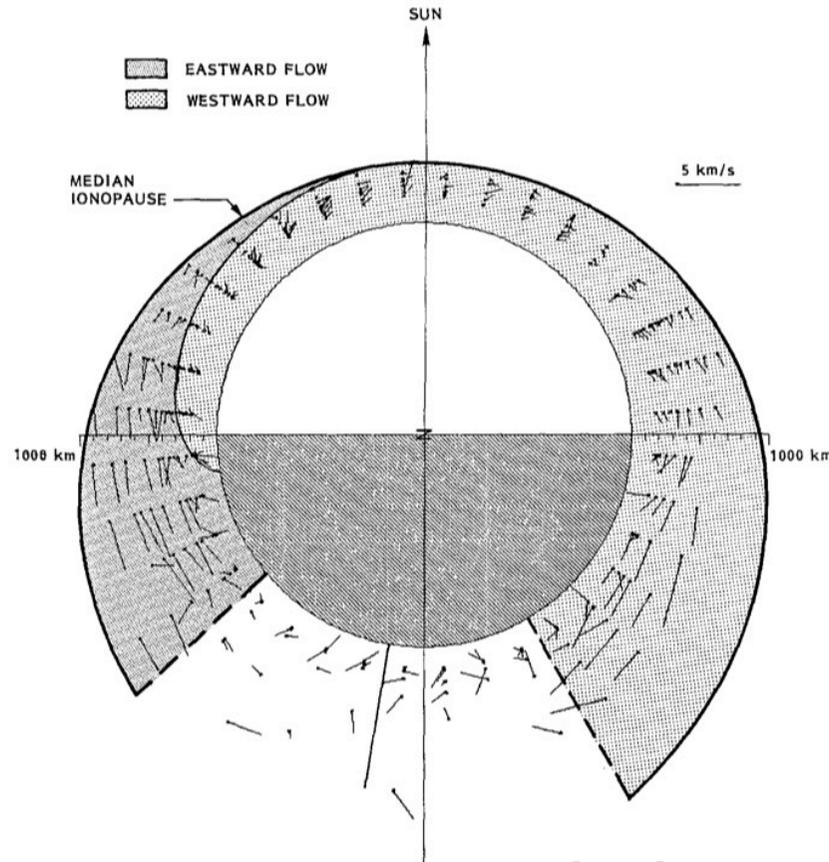
金星電離圏のスーパーローテーション (PVO/RPA観測)



[Miller and Whitten, 1991]

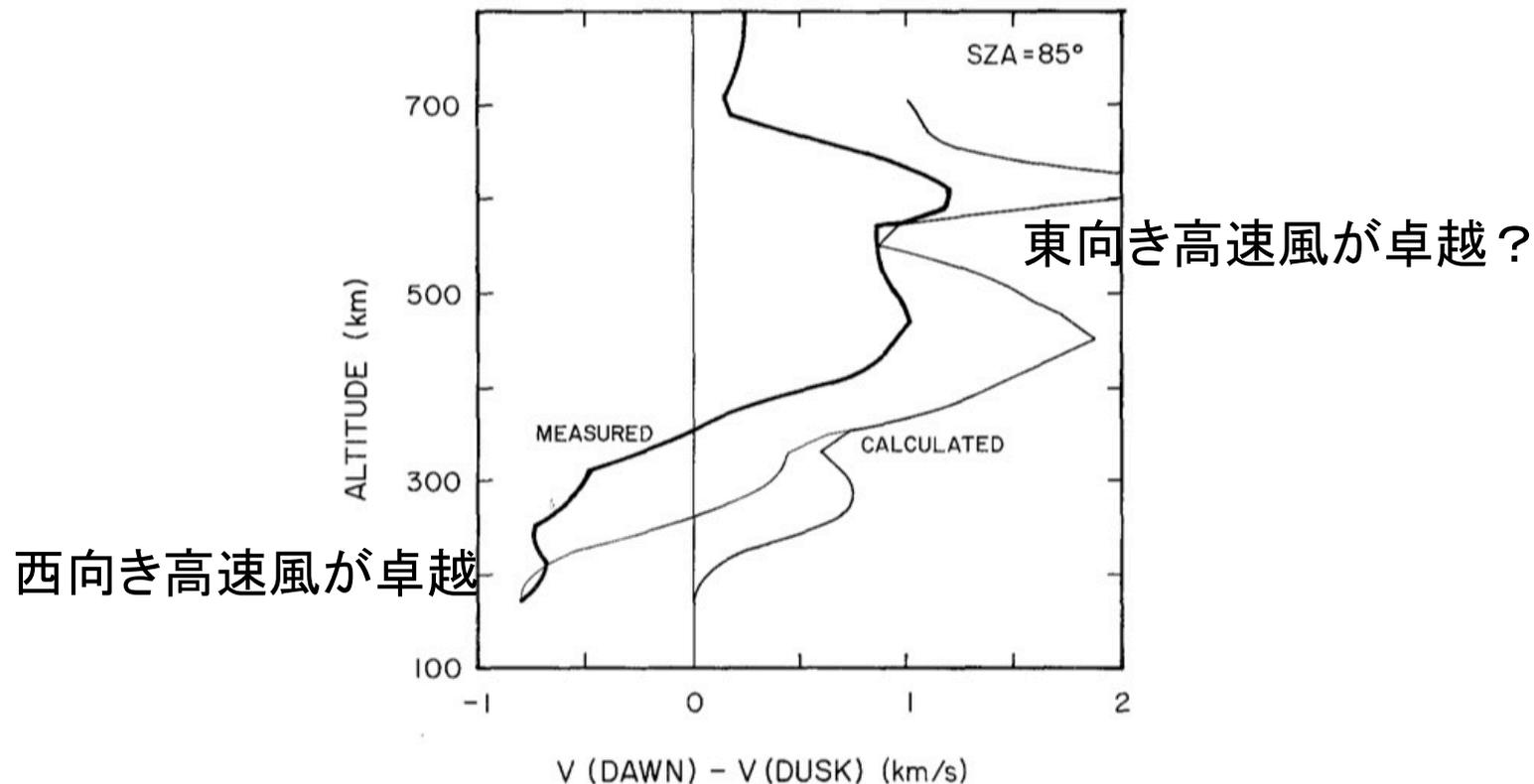
- 高度250 kmで、400 m/s以上の西向き高速風 (cf. 金星雲頂では100 m/s)
- 同高度の中性大気(熱圏大気)も同様の速さでスーパーローテーションしていると考えられる³

金星電離圏のスーパーローテーション (PVO/RPA観測)



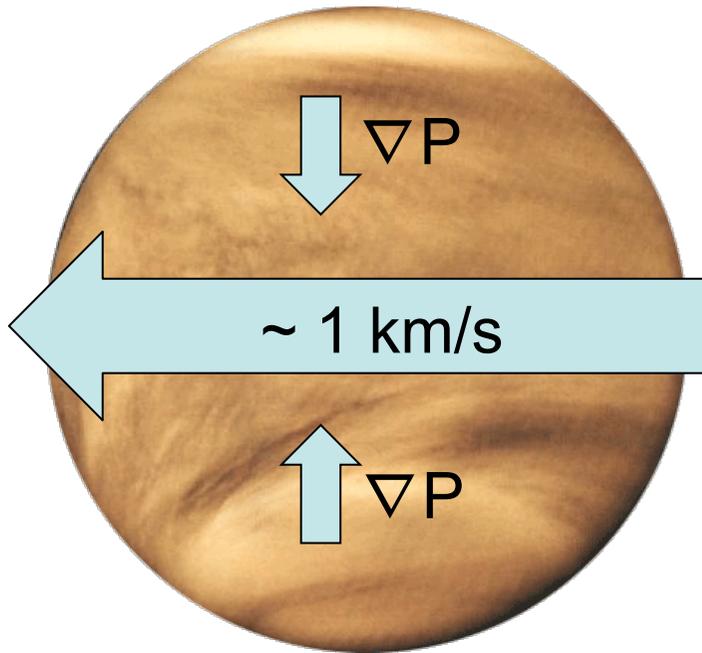
- 昼夜間対流 + 西向き的高速風
- 系統的な測定誤差が含まれている可能性もある(近金点での衛星のラム方向は常に南西向き)⁴

金星電離圏のスーパーローテーション (PVO/RPA観測)



- 電離圏の高高度、ターミネーター付近では、東向きの高速度風が卓越?
- 観測された密度、温度 + 熱圏で400 m/sのスーパーローテーションを仮定して、運動方程式を計算すると一致

金星電離圏のスーパーローテーション



Cyclostrophic balance
in ionosphere?

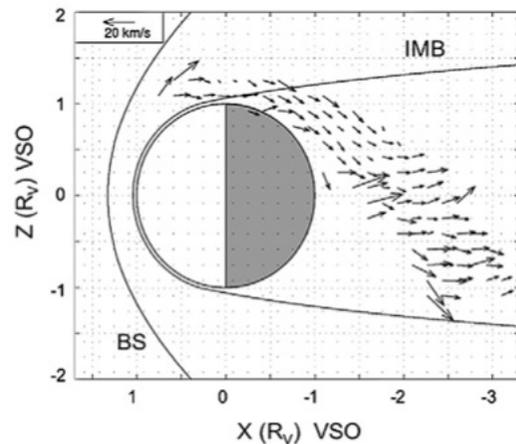
$$\frac{u^2 \tan \phi}{a} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y}$$

$$u = \left(-\frac{a}{\rho \tan \phi} \frac{\partial P}{\partial y} \right)^{1/2} \sim \left(\frac{kT}{m_i} \right)^{1/2} \sim 1 \text{ km/s}$$

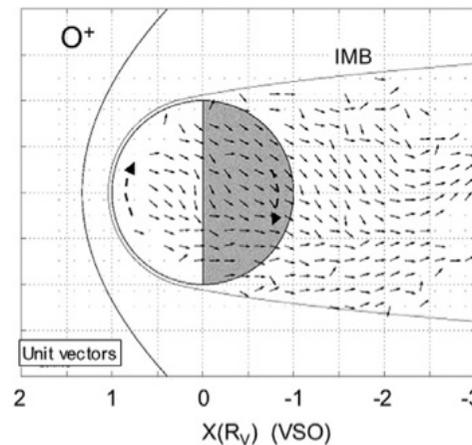
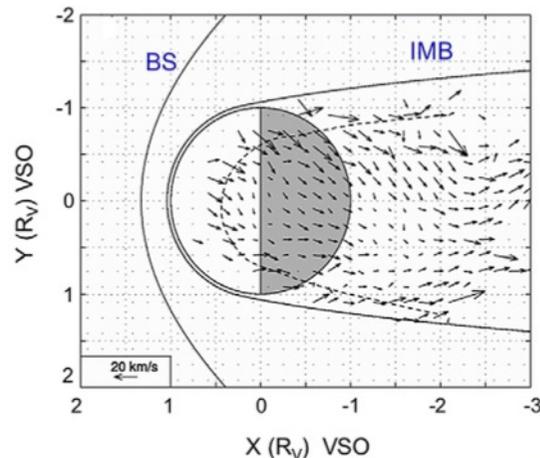
[Elphic et al., 1984]

- 旋衡風バランスで説明可能
- しかし、「何が駆動しているか」は不明

金星電離圏のスーパーローテーション (VEX/ASPERA-4観測)

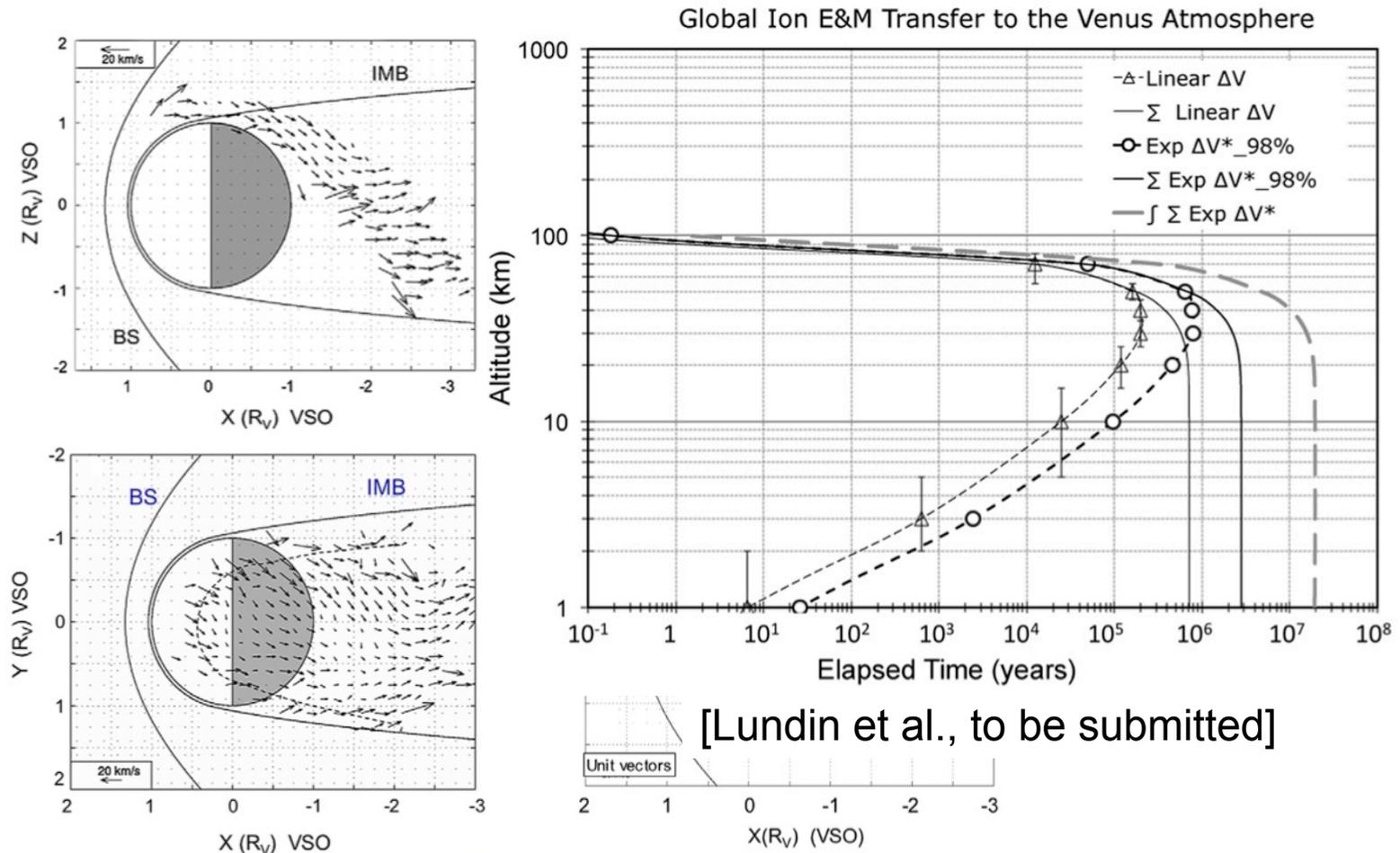


1000 x 1000 km²ビン
VEXの近金点高度は~300 km
Jul. 2006-Dec. 2009
[Lundin et al., 2011]



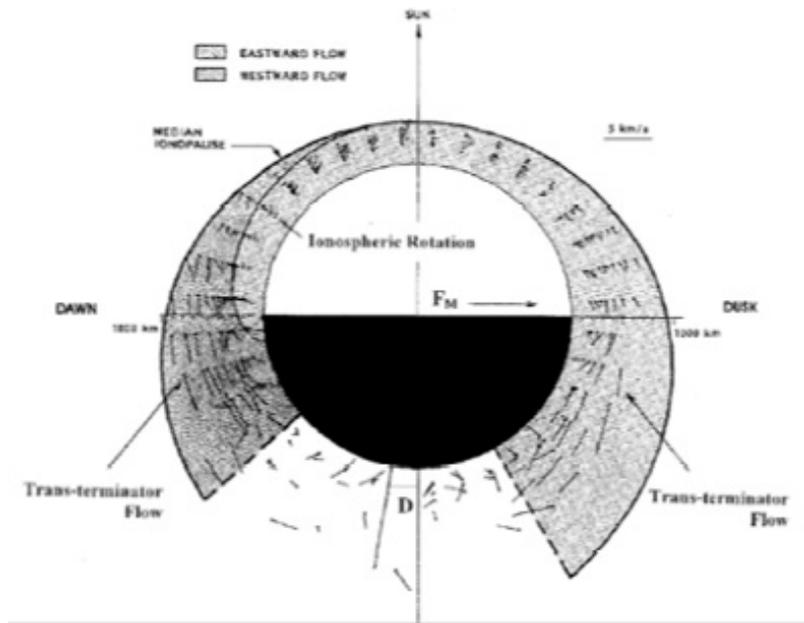
- VEX観測でも電離圏のスーパーローテーションらしきものが見えている？

金星電離圏のスーパーローテーション (VEX/ASPERA-4観測)

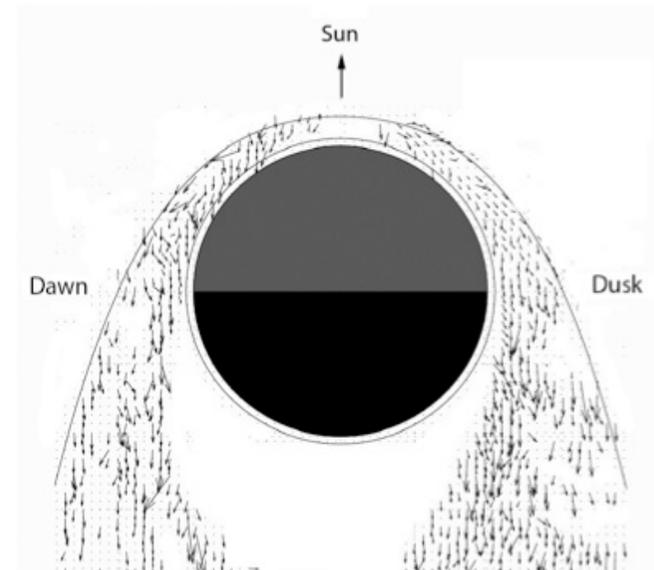


- VEX観測でも電離圏のスーパーローテーションらしきものが見えている？

火星電離圏のスーパーローテーション (MEX/ASPERA-3観測)



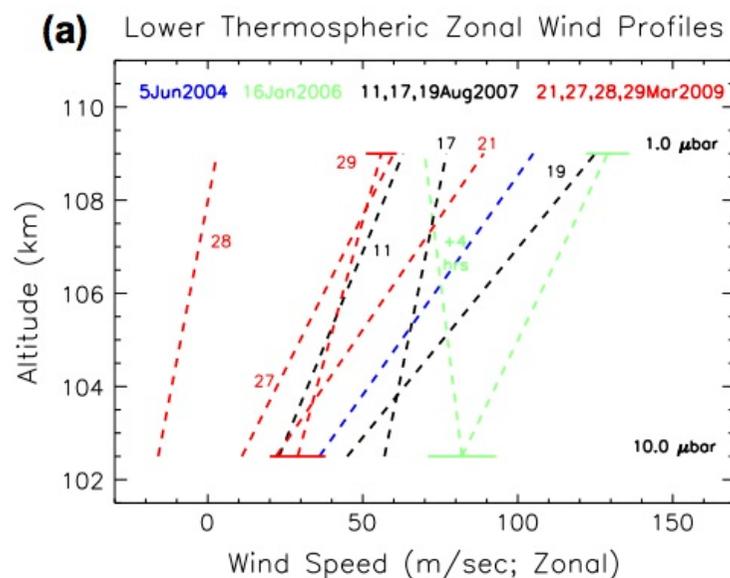
@金星



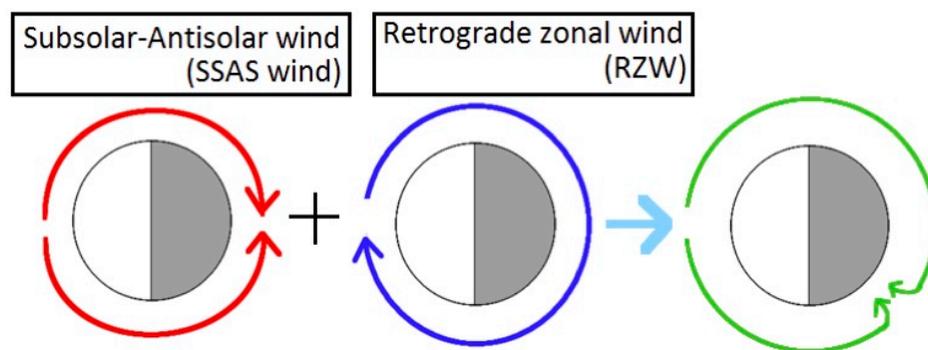
< 200 eVのO⁺イオン速度分布
@火星 [Perez-de-Tejada and
Lundin, 2009]

- MEX観測でも電離圏のスーパーローテーションらしきものが見えている???
- MAVEN観測(2014-)で明らかになることを期待⁹

金星中間圏-下部熱圏のスーパーローテーション



サブミリ波夜側観測
[Clancy et al., 2012]



Altitude [km]	SSAS wind [m/s]	RSW [m/s]	Time Period	Reference
94.5 ± 6	45 ± 15	35 ± 15	8/1991	Lellouch et al., 1994
94.5 ± 6	50 ± 35	45 ± 30	11/1994	Rosenqvist et al., 1995
99 ± 6	< 40	132 ± 10	4 - 5/1988	Shah et al., 1991
105 ± 10	120 ± 20	25 ± 15	12/1985, 10/1986, 03/1987	Goldstein et al., 1991
105 ± 9	110 ± 20	75 ± 20	11/1994	Rosenqvist et al., 1995

[Hoshino, 2012]

- 中間圏-下部熱圏での西向き高速風観測
- ローカルタイム依存性(昼夜間対流+西向き高速風)

金星中間圏-熱圏結合シミュレーション

带状平均流

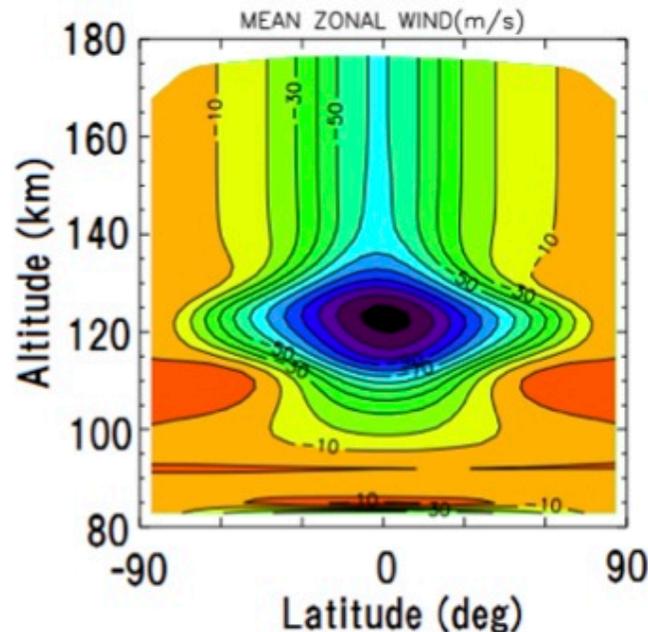


Fig. 25. 带状平均流の高度-緯度分布

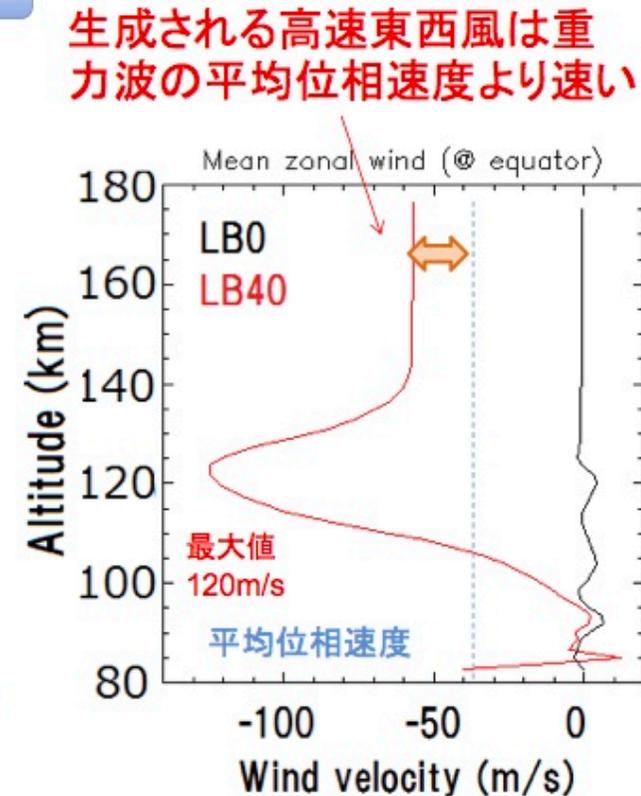


Fig. 26. 赤道における带状平均流の高度分布

[Hoshino, 2012]

- 金星中間圏-熱圏結合シミュレーション
- 下端: 重力波の平均位相速度40 m/s → 高速東西風の駆動
- 高度150 km以上では、分子粘性により波が減衰

流体から希薄気体への遷移

高度(金星)	150 km	200 km	250 km	
クヌーセン数	0.01	1	10	[Tsien, 1946]



- Local thermodynamic equilibrium (LTE)
 - Energy of molecules are distributed according to Maxwell distribution

- Collision frequency is not high enough to maintain equilibrium.
- Momentum exchange via collisions between atmospheric molecules is still important.

- Collisions between atmospheric molecules are negligible.

Navier-Stokes equations

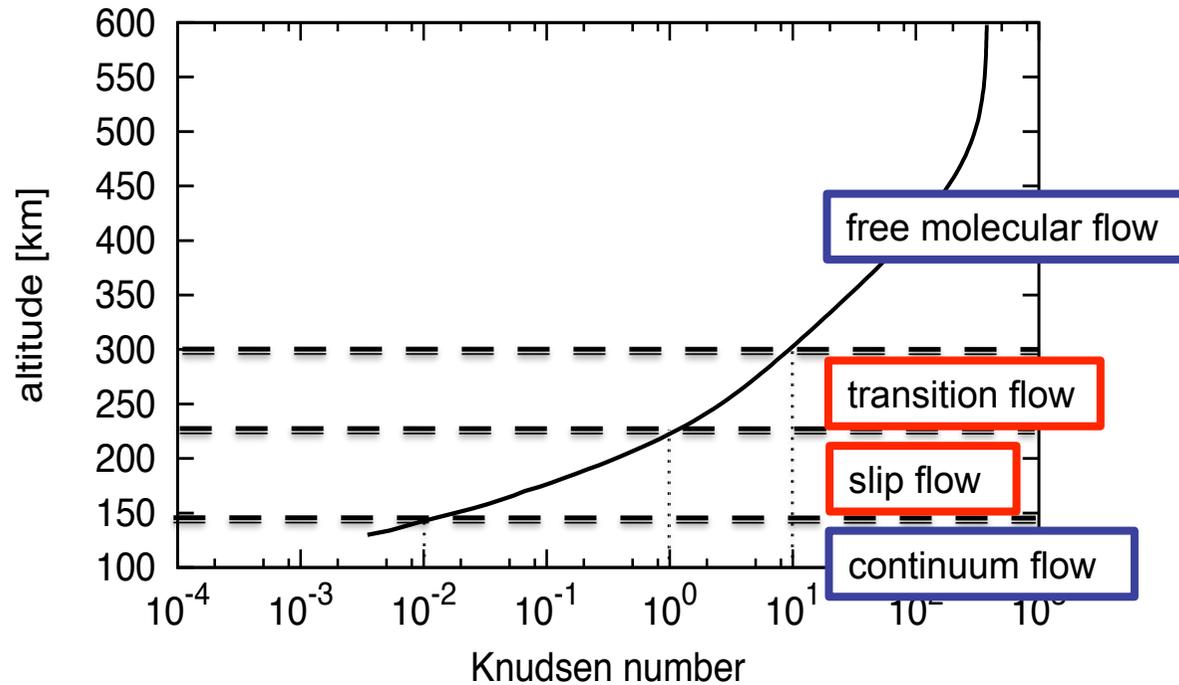
- First order moment of f

Boltzmann equation

$$\frac{\partial}{\partial t}(nf) + c \frac{\partial}{\partial r}(nf) + F \frac{\partial}{\partial c}(nf) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{4\pi} n^2 (f^* f_1^* - ff_1) c_r \sigma d\Omega dc_1$$

n : number density, f : velocity distribution function, c : molecular velocity, c_r : relative molecular speed, F : external force per unit mass, subscript * : post-collision values, f and f_1 : distribution functions of two different types of molecules of class c and c_1 , respectively, σ : collision cross-section, t : time, r : physical space, Ω : solid angle

本研究では

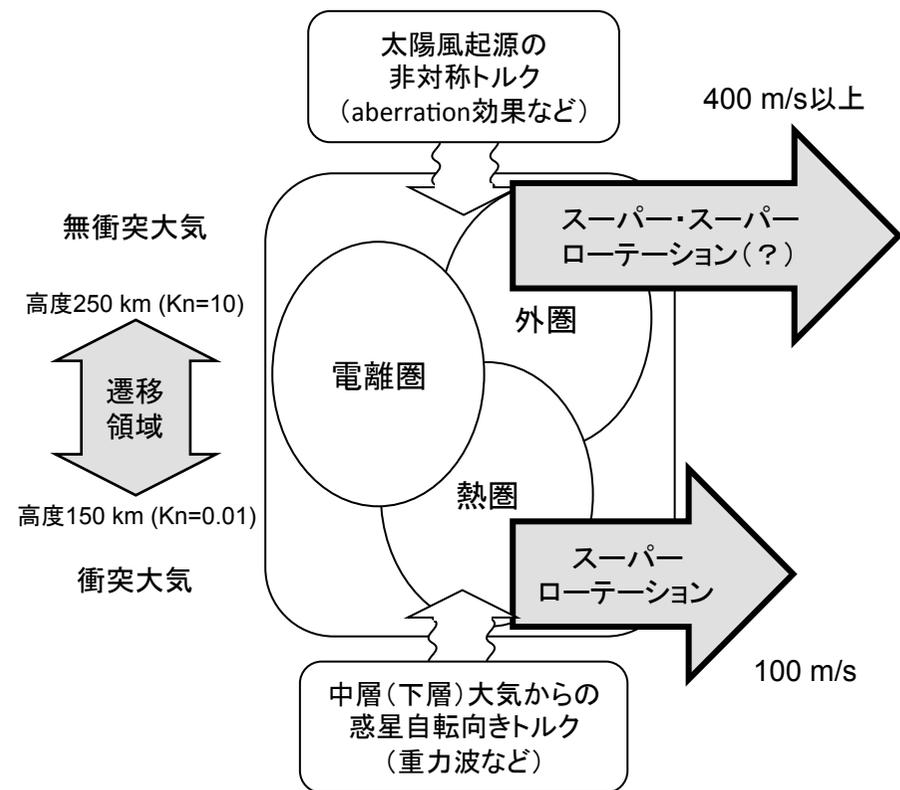


火星(金星)上層大気におけるクヌーセン数

- 熱圏-外圏DSMC (Direct simulation Monte-Carlo) モデルを用いて、粒子的に、流体から希薄気体へと遷移する領域を含めて解く(高度130 km以上を解く)

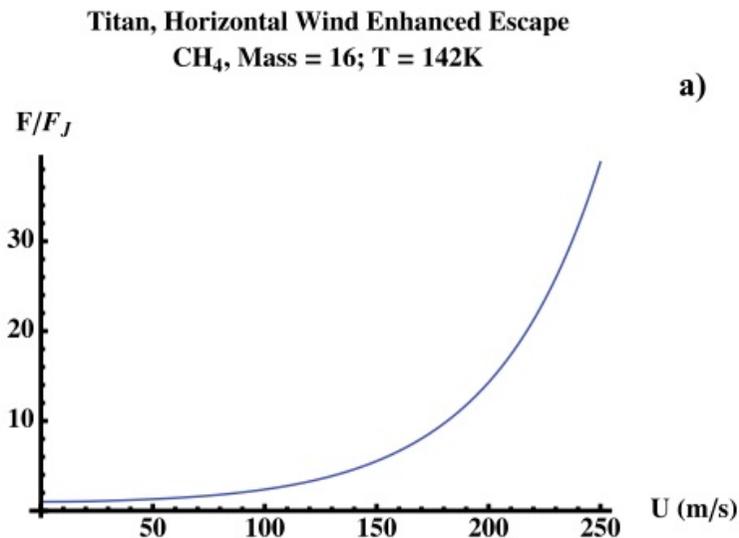
遷移領域における スーパーローテーションの駆動源

- 中層(下層)大気起源の非対称トルク(下から)
 1. 重力波
 2. (プラネタリースケール波(熱潮汐波、ロスビー波、ケルビン波))
- 太陽風起源の非対称トルク(上から)
 3. パークースパイラルの効果
 4. Aberration効果(惑星公転の効果)
- 自発的な効果
 5. 外圏成分の角速度-エネルギー空間での拡散



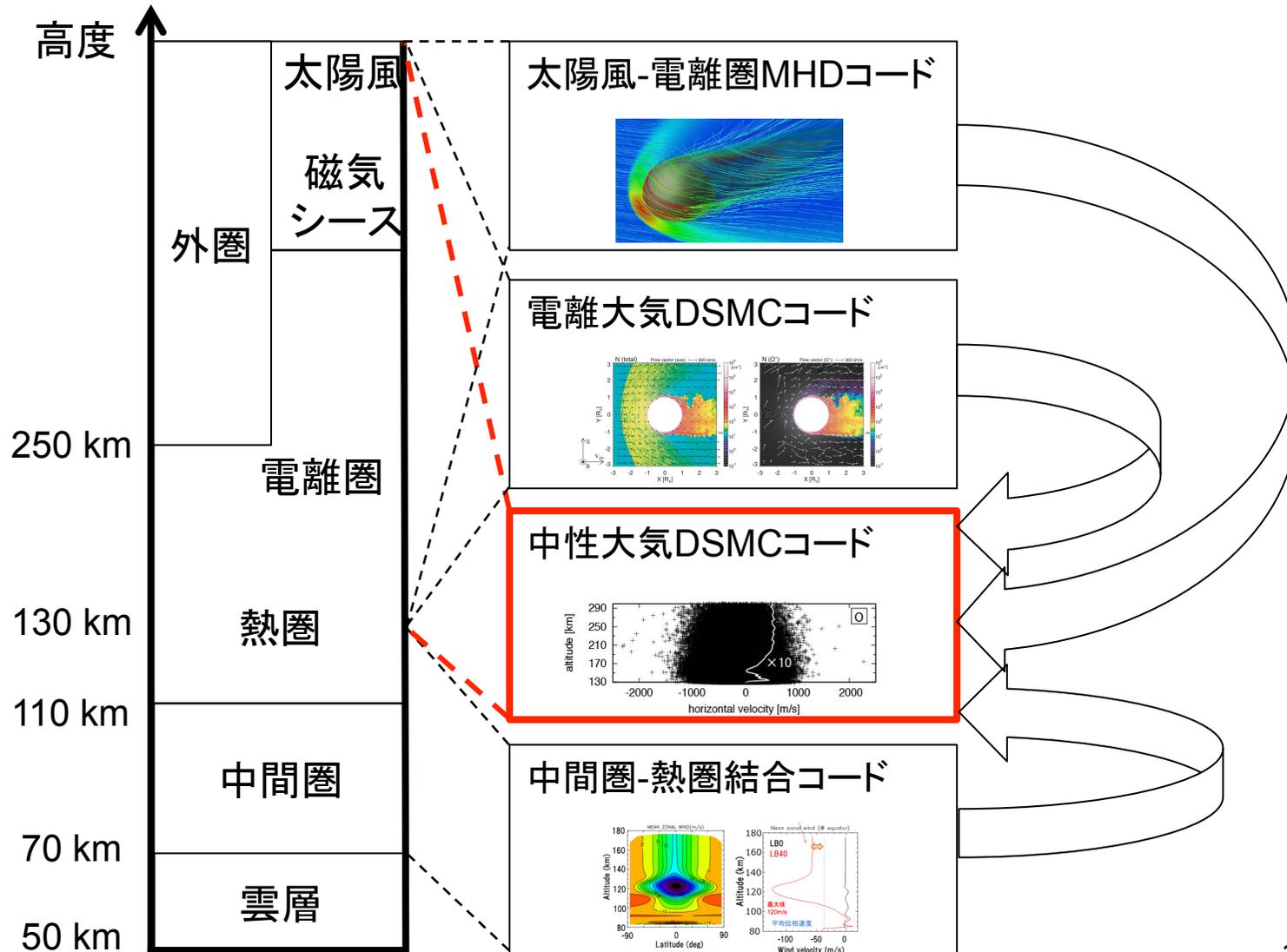
熱圏・電離圏のスーパーローテーション がわかると何がうれしいのか

- 熱圏・電離圏の基本構造の理解
- 大気の宇宙空間の流出・大気進化にも関係する



F_Jはジーンズエスケープフラックス
[Hartle et al., 2012]

領域名称と用いるコードの関係



中性大気DSMCコード

- 熱圏-外圏DSMC (Direct simulation Monte-Carlo) コード

- 確率を用いて分子・原子の移動と衝突を決定

- Lennard-Jones(6-12)型ポテンシャル

- 電離

- Solar EUV model (EUVAC model)

- 加熱・冷却

- O_2^+ の解離再結合

- non-LTE 15 μm CO_2 cooling

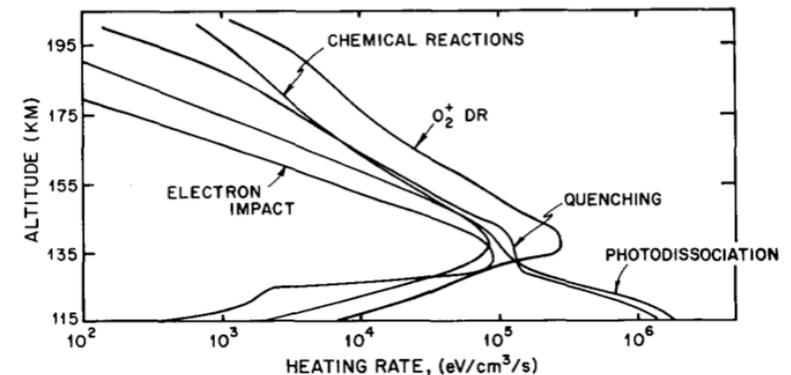
- 電離圏モデル

- 光化学平衡を仮定

$$\phi(r) = 4\varepsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right]$$

Molecule	σ [Å]	ε/k [K]
CO_2	3.769	245.3
H	2.708	37.0
N_2	3.681	91.42
O	2.80	117.0

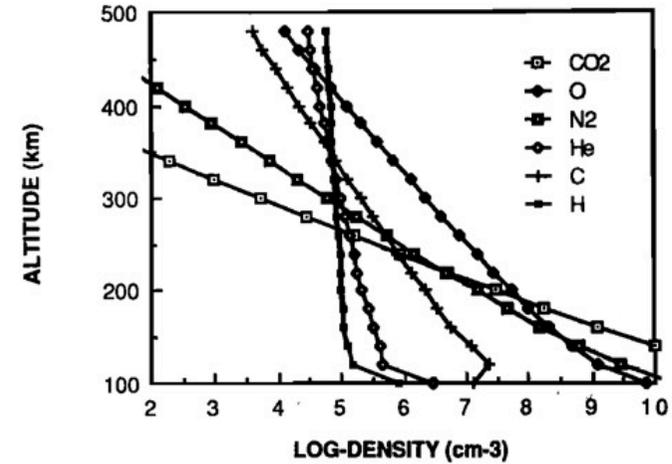
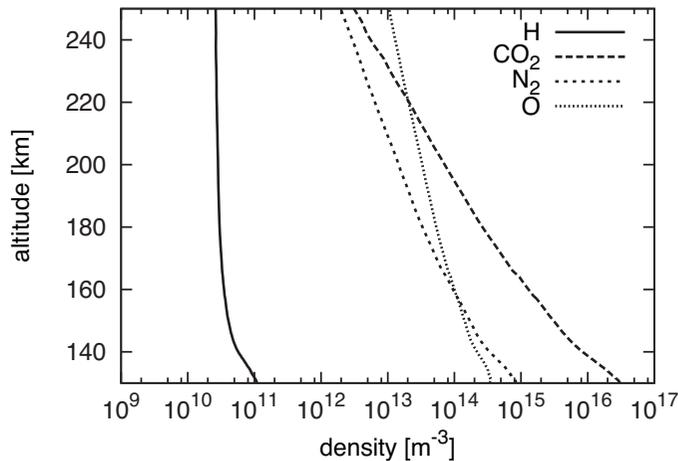
Lennard-Jonesパラメーター



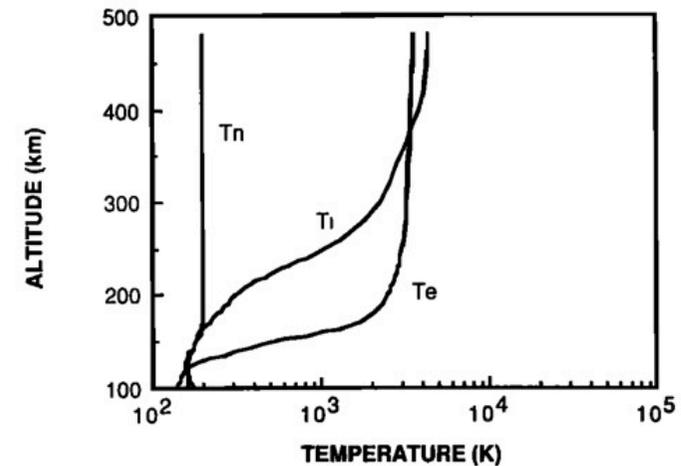
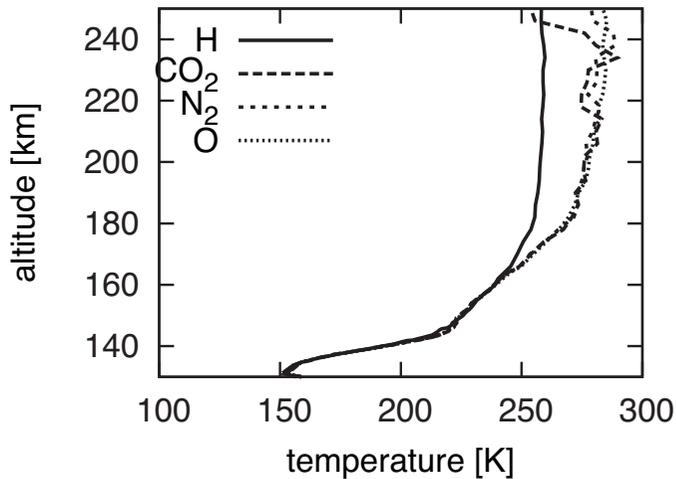
金星熱圏における加熱率の見積り
[Fox, 1988]

計算結果：密度、温度

密度 (DSMC)



温度 (DSMC)

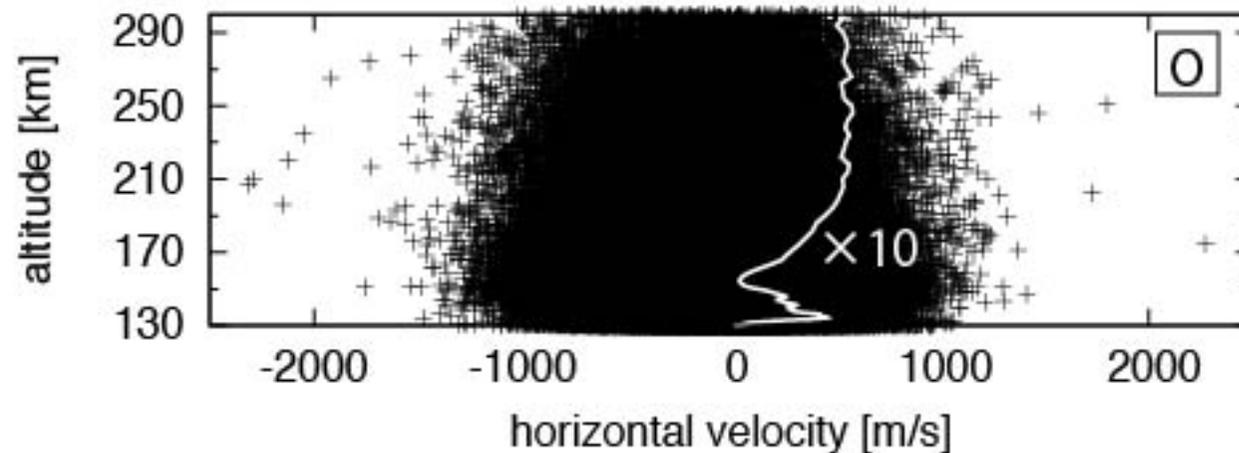
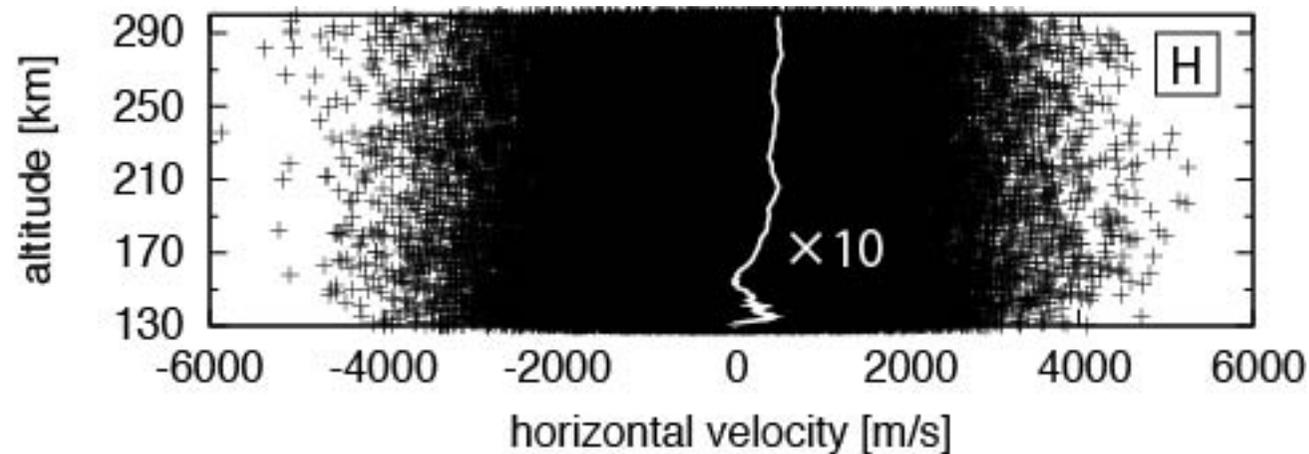


from Shinagawa and Cravens [1989]

- 密度、温度の高度分布は過去のモデルと一致 ¹⁸

計算結果：速度

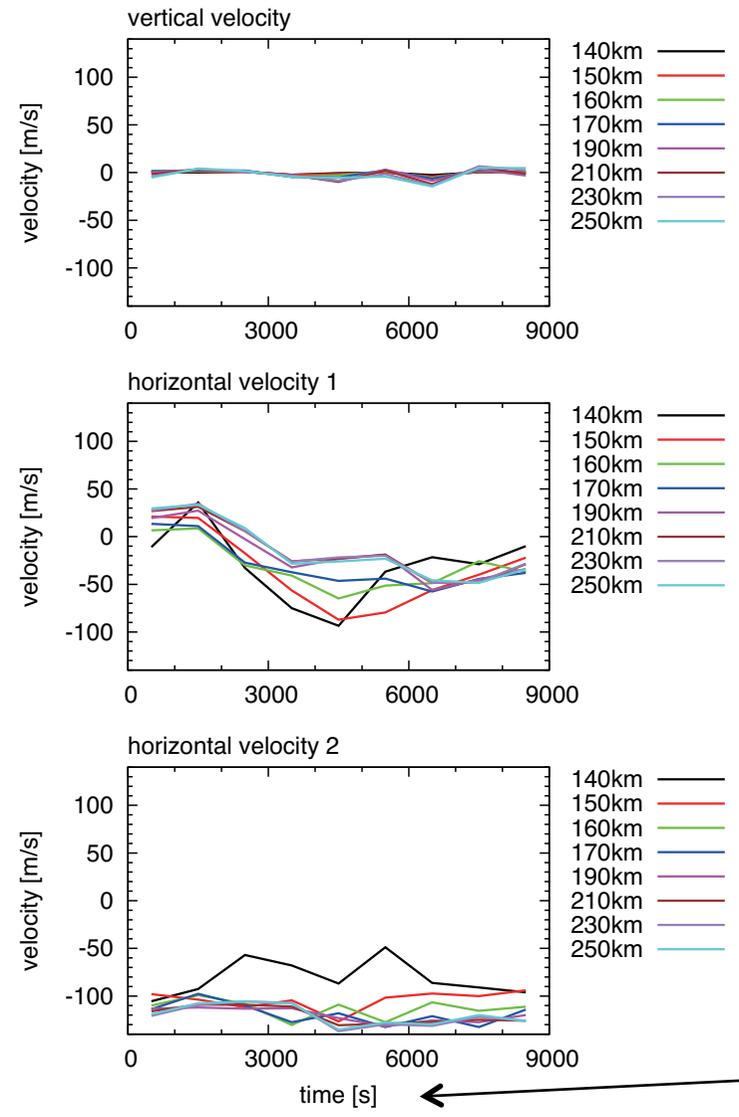
速度(DSMC)



- 1次元モデル(空間1次元、速度空間3次元)にも関わらず、水平方向に数十m/sの速度が出ている

計算結果：速度

速度 (DSMC)
1000秒平均値



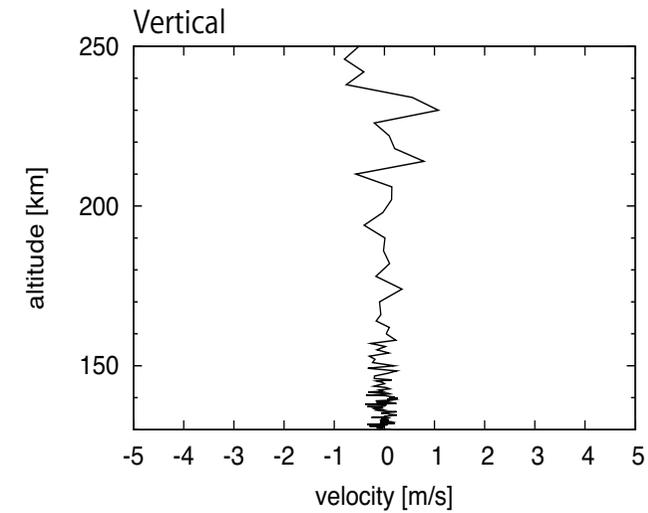
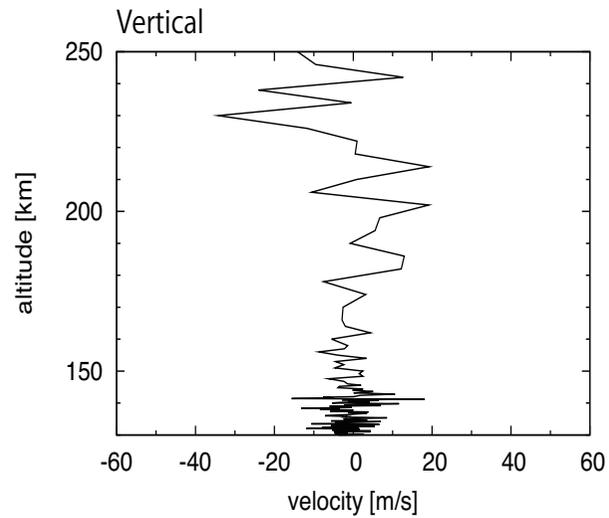
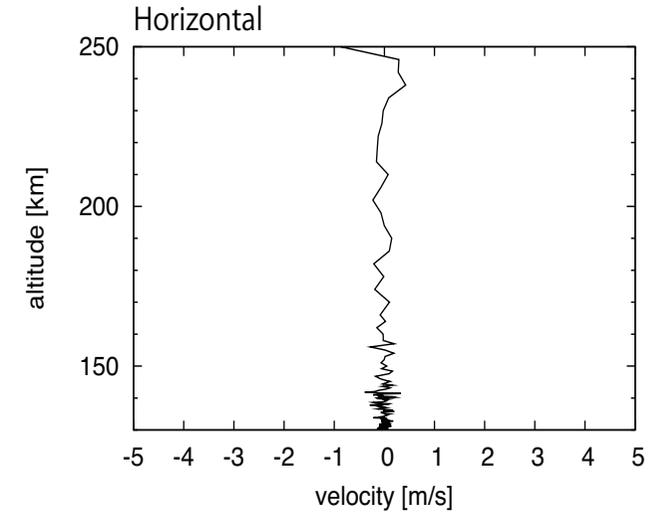
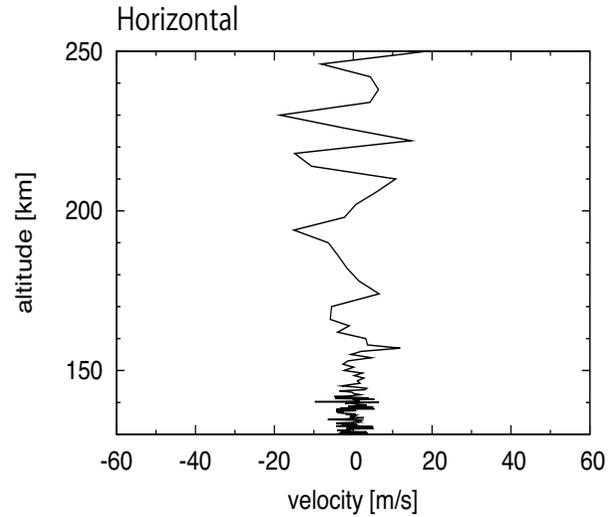
time from 50000 sec

- ~100 m/sの水平速度が長時間持続している

計算結果：速度

熱ノイズ(DSMC)

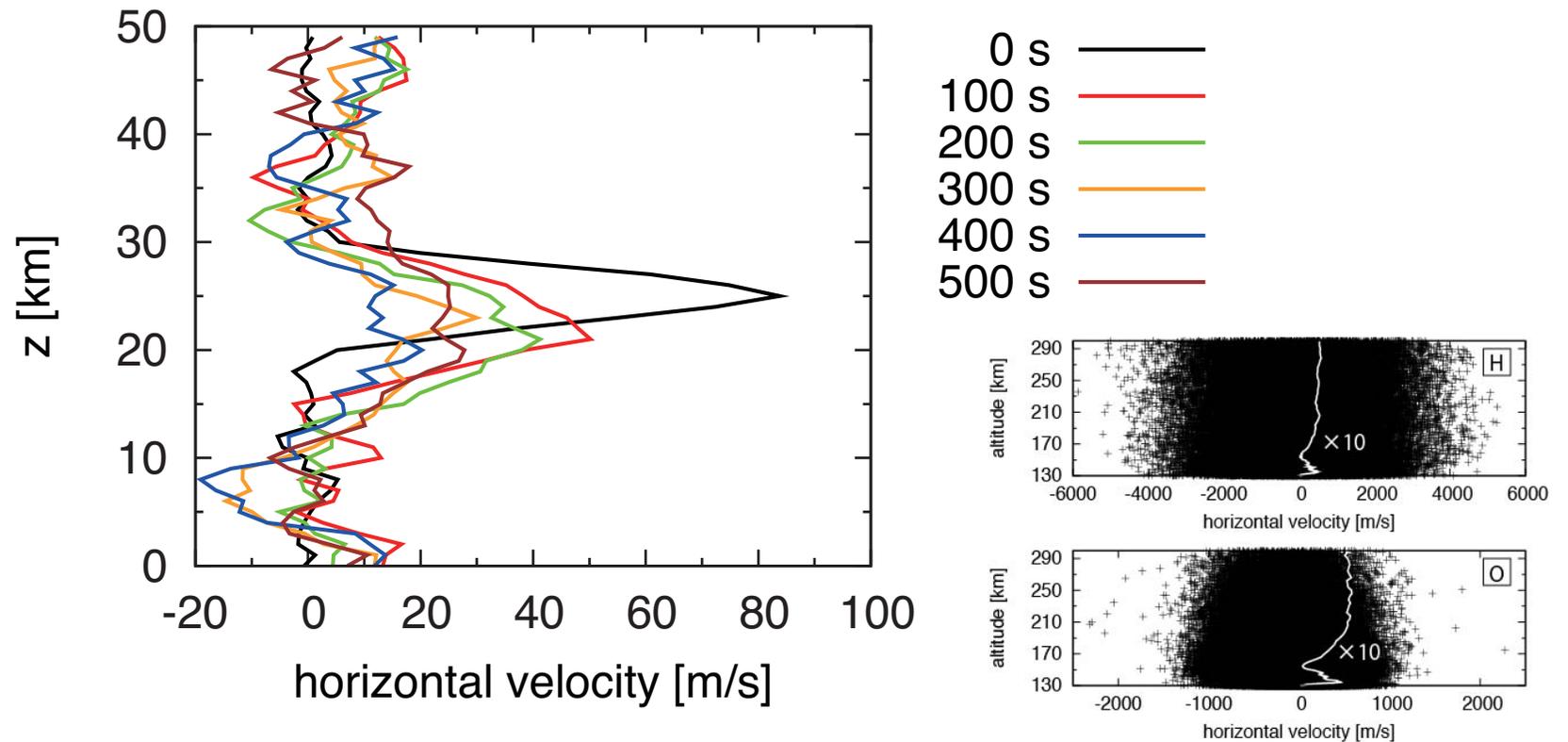
10秒平均



- 粒子数が不足している訳では無さそう

計算結果：速度

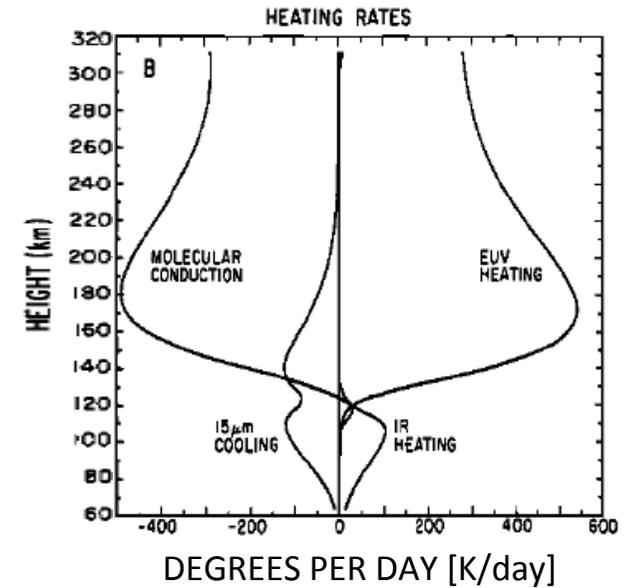
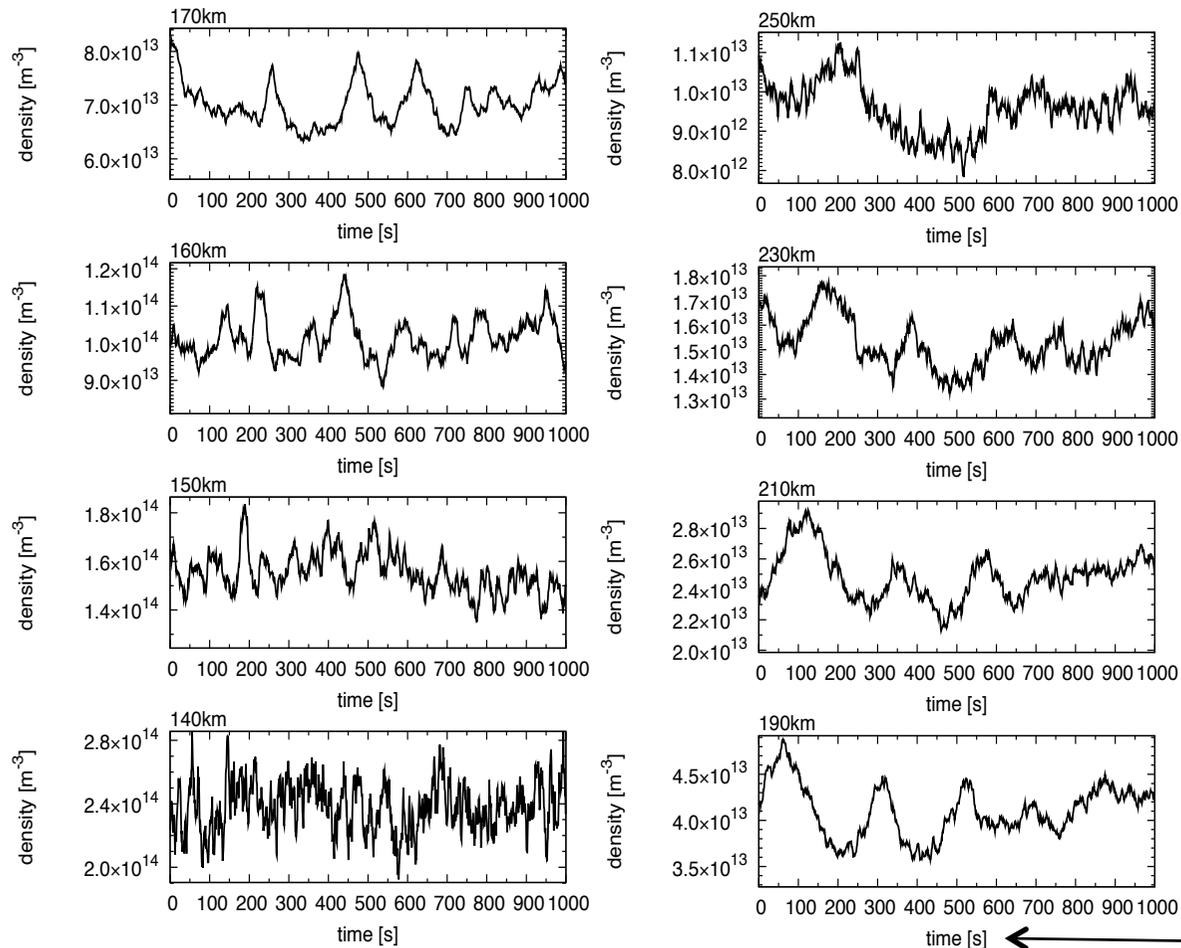
速度 (DSMC)



- 重力や加熱・冷却が無い場合は、200~300秒で速度シアーは拡散
- 速度シアーを駆動・維持する力が必要

計算結果：密度

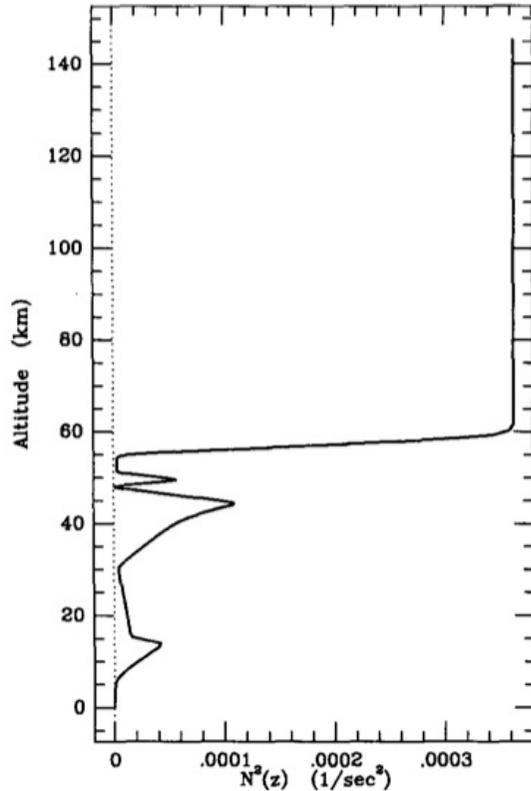
密度(DSMC)
1秒値



Heat budget of the Martian atmosphere [Bougher et al., 1988]

- 50秒(高度150 km)~250秒(高度>200 km)周期の密度変動
- 加熱・冷却のインバランスが駆動?

駆動メカニズム？

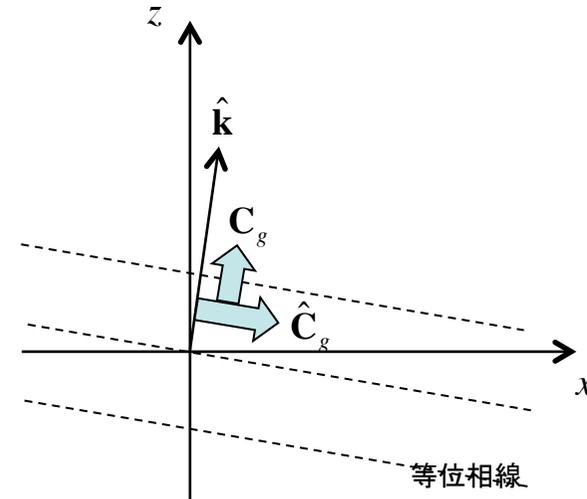


$$N = 2\pi / 50s$$

$$m = 2\pi / 10km$$

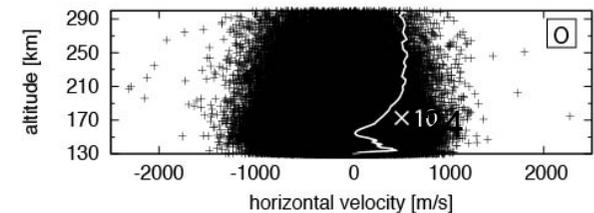
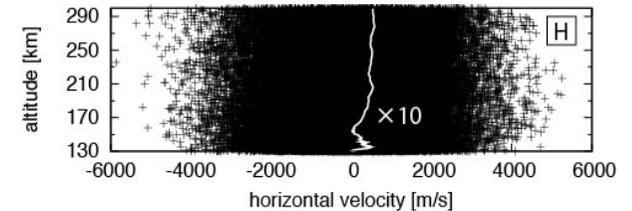
$$k \ll m$$

$$\hat{C}_{gx} = C_{gx} - \bar{u} = \frac{Nm^2}{(k^2 + m^2)^{3/2}} = 10km / 50s = 0.2km / s$$



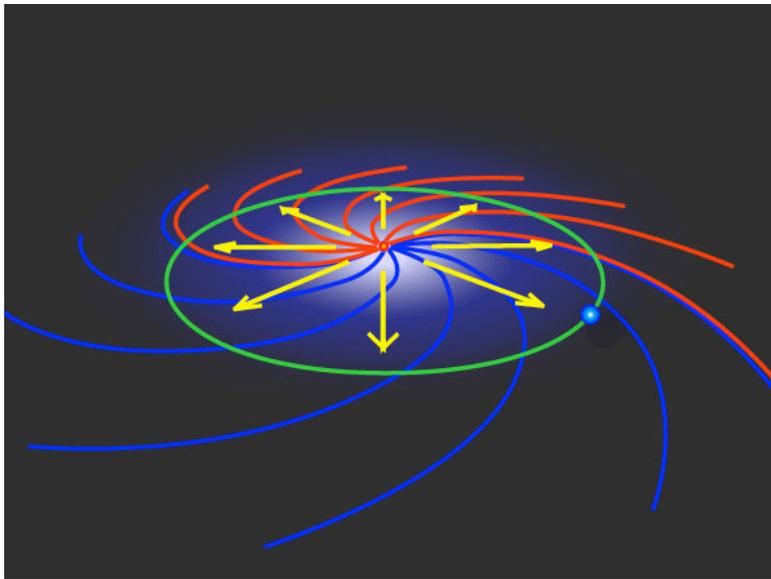
ブラント・バイサラ周期は約50秒
[Smith et al., 1993]

- 高度200~250 kmの速度はどのようにして決定？



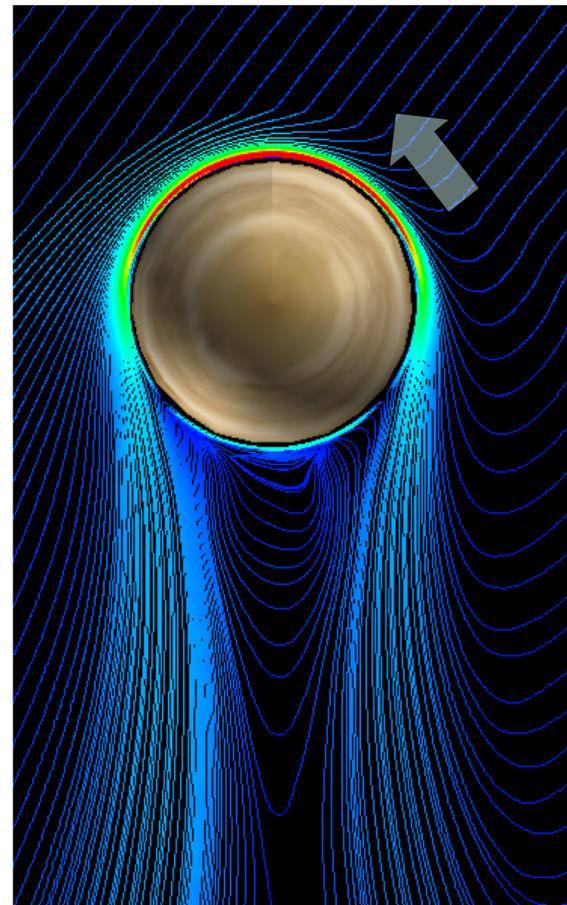
太陽風起源の非対称トルク1: パーカースパイラルの効果

パーカースパイラル



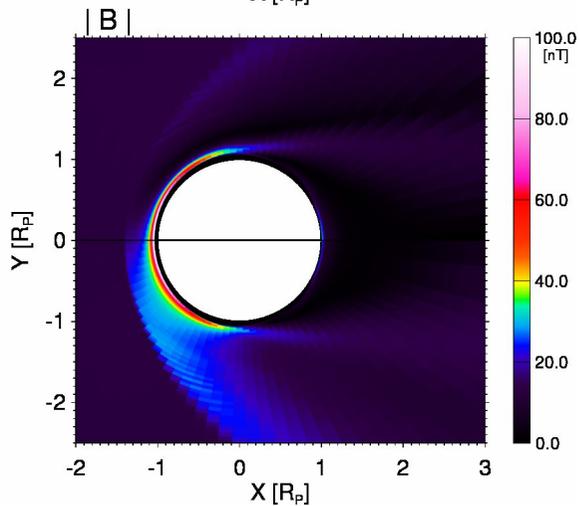
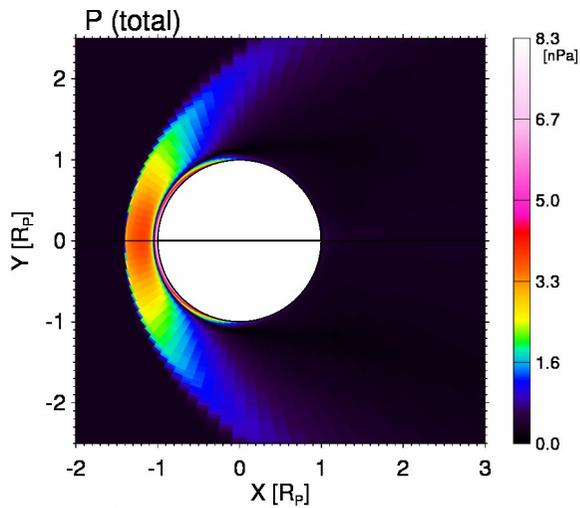
© Tomoko Nakagawa

磁気張力によって惑星周りの
プラズマ流が非対称になりうる

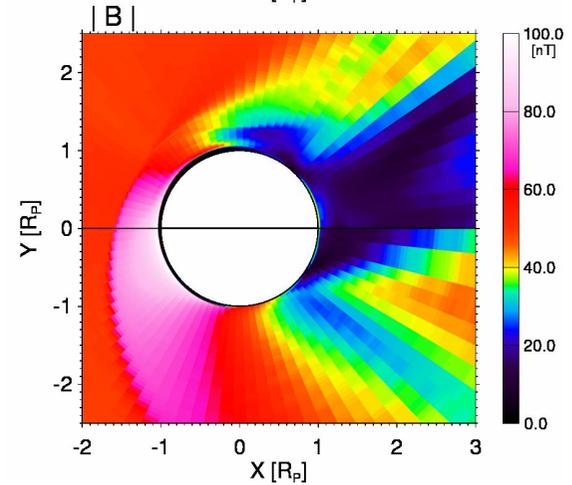
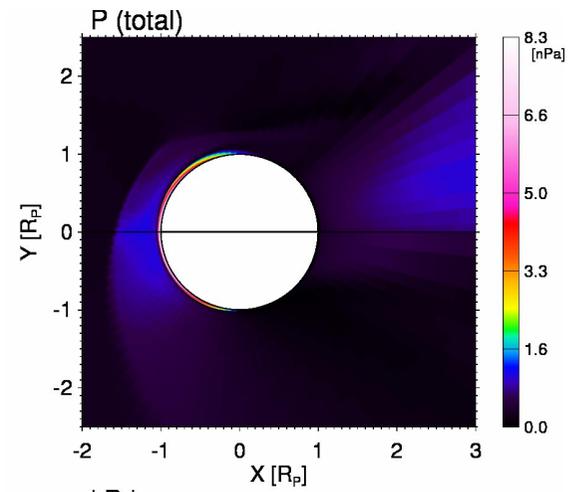


Our Venus MHD simulation

$B_{\text{IMF}}=12$ nT
Cone angle=20 deg
($M_A=6.3$)



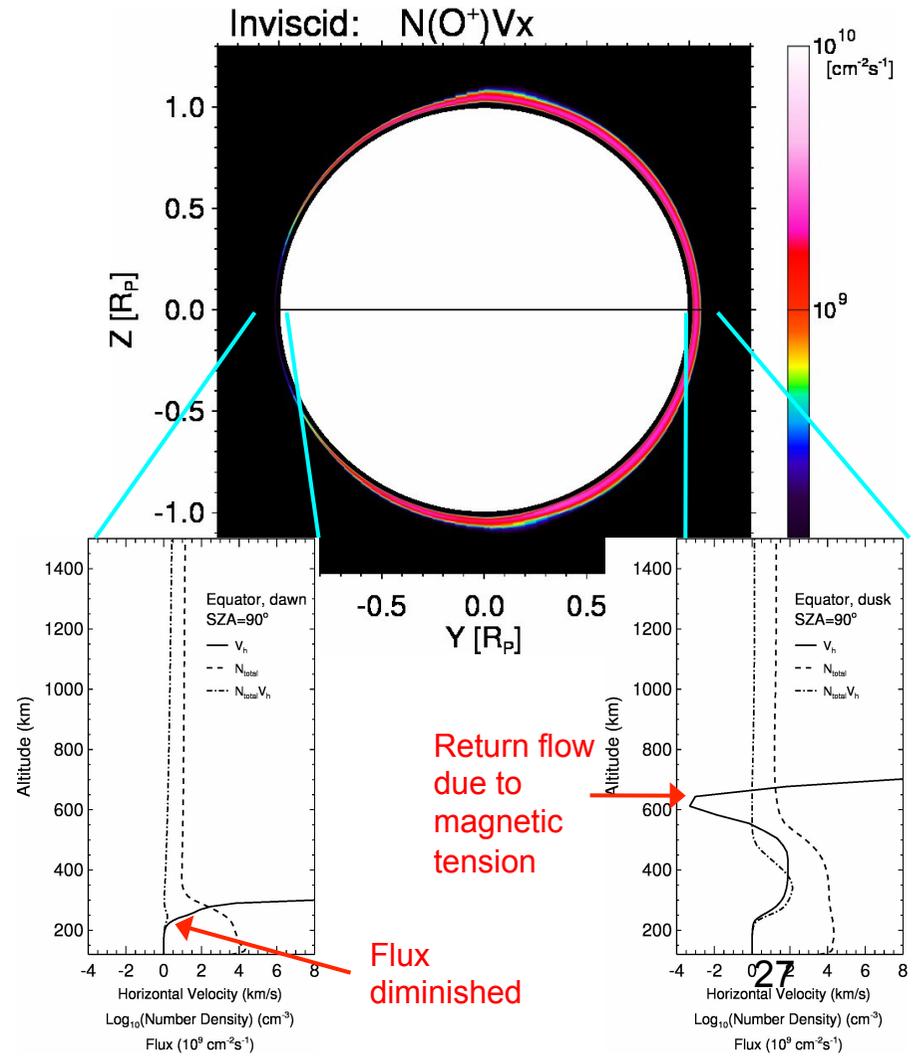
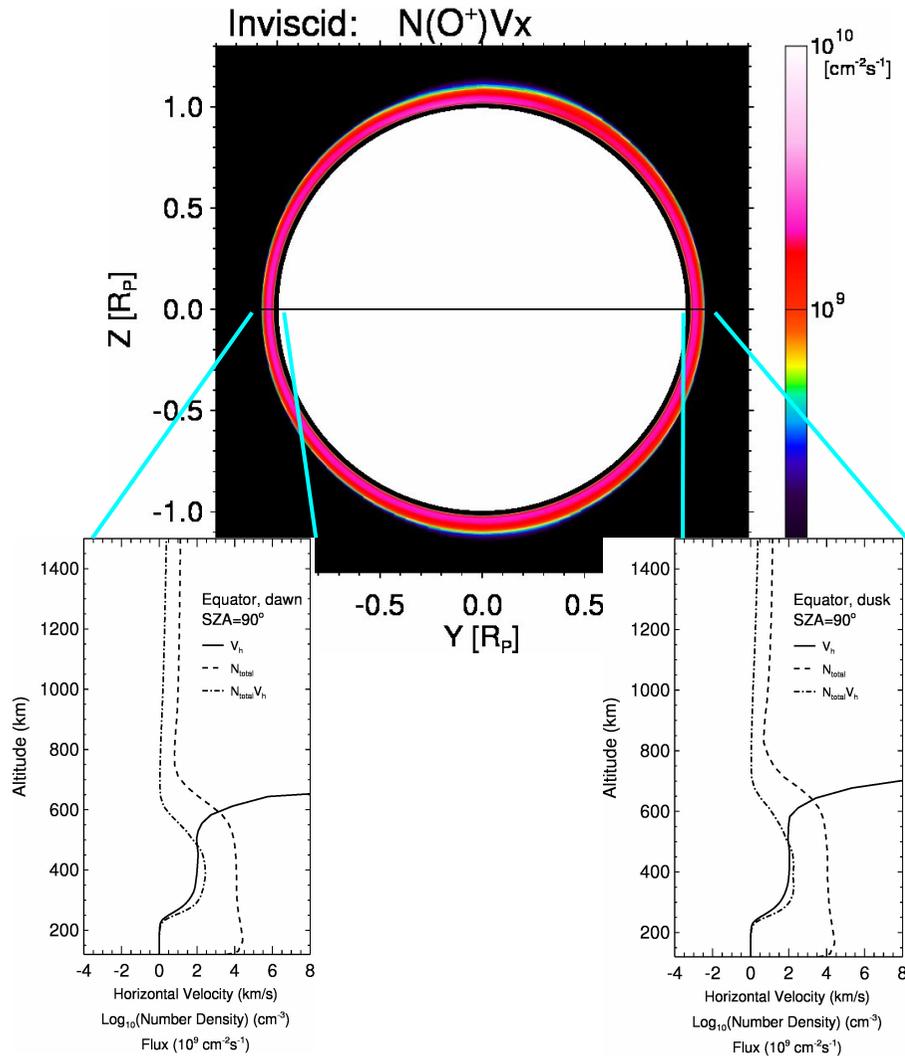
$B_{\text{IMF}}=48$ nT
Cone angle=20 deg
($M_A=1.6$)



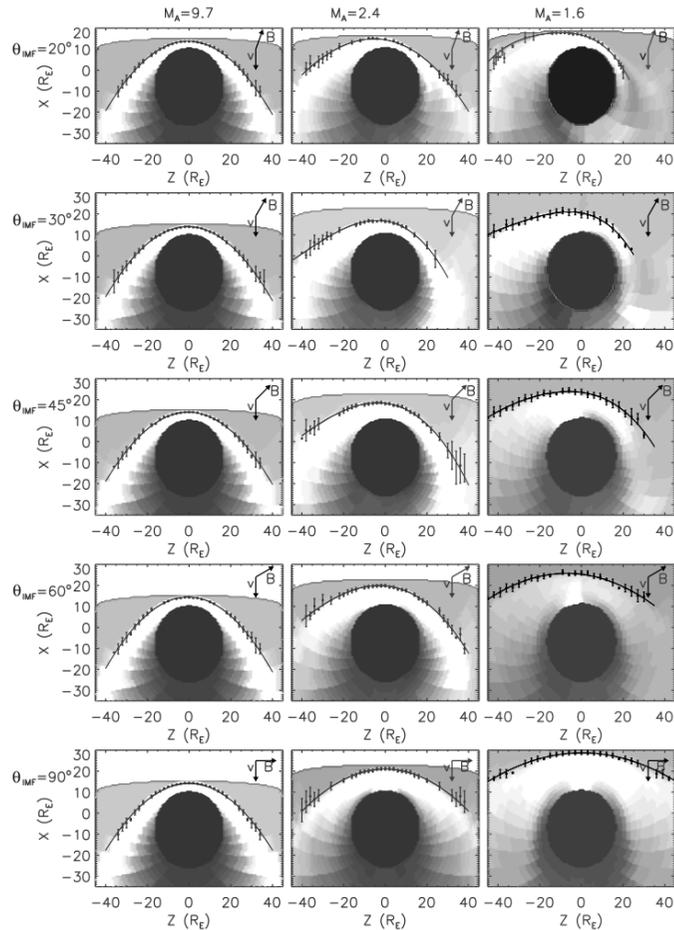
Trans-terminator O^+ flux

$B_{IMF} = 12 \text{ nT}$
 $(M_A = 6.3)$

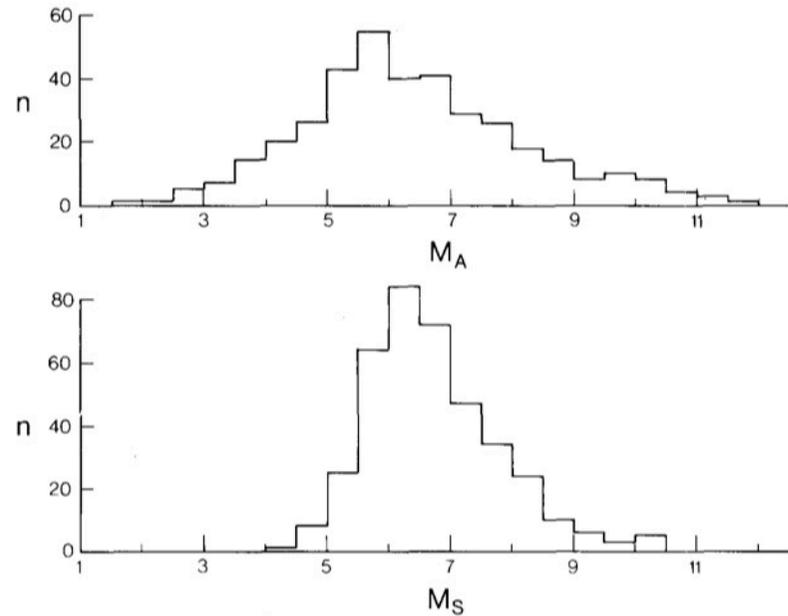
$B_{IMF} = 48 \text{ nT}$
 $(M_A = 1.6)$



太陽風起源の非対称トルク1: パーカースパイラルの効果



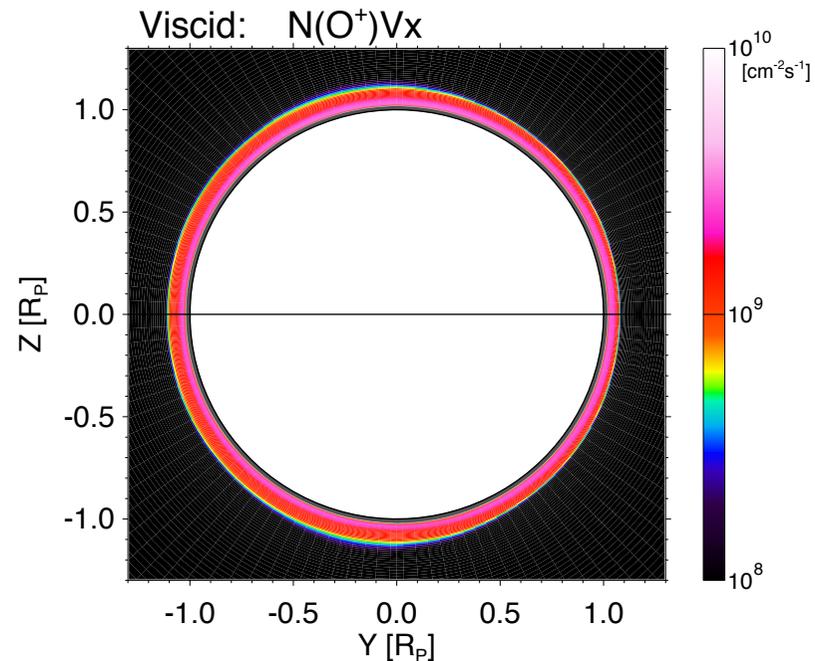
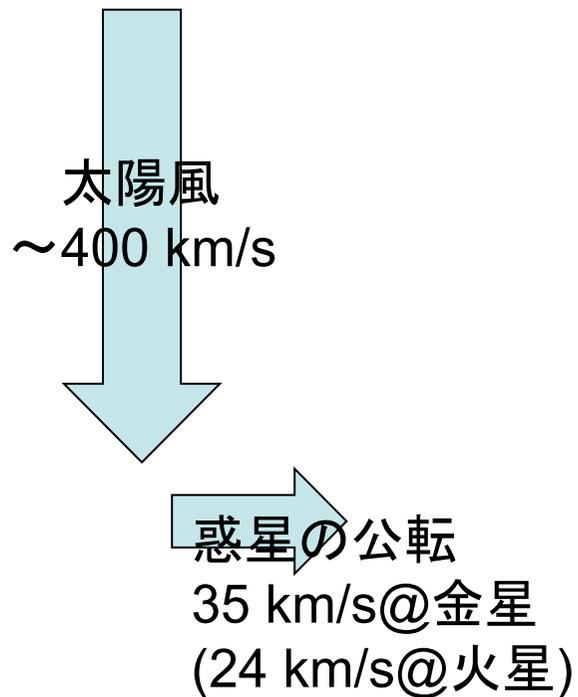
Effect of low M_A shock at Earth's bow shock [Chapman et al., 2004]



金星軌道における太陽風マッハ数のヒストグラム [Luhmann, 1986]

- 金星や火星で本非対称が顕著になる可能性は低い

太陽風起源の非対称トルク2: Aberration効果(惑星公転の効果)

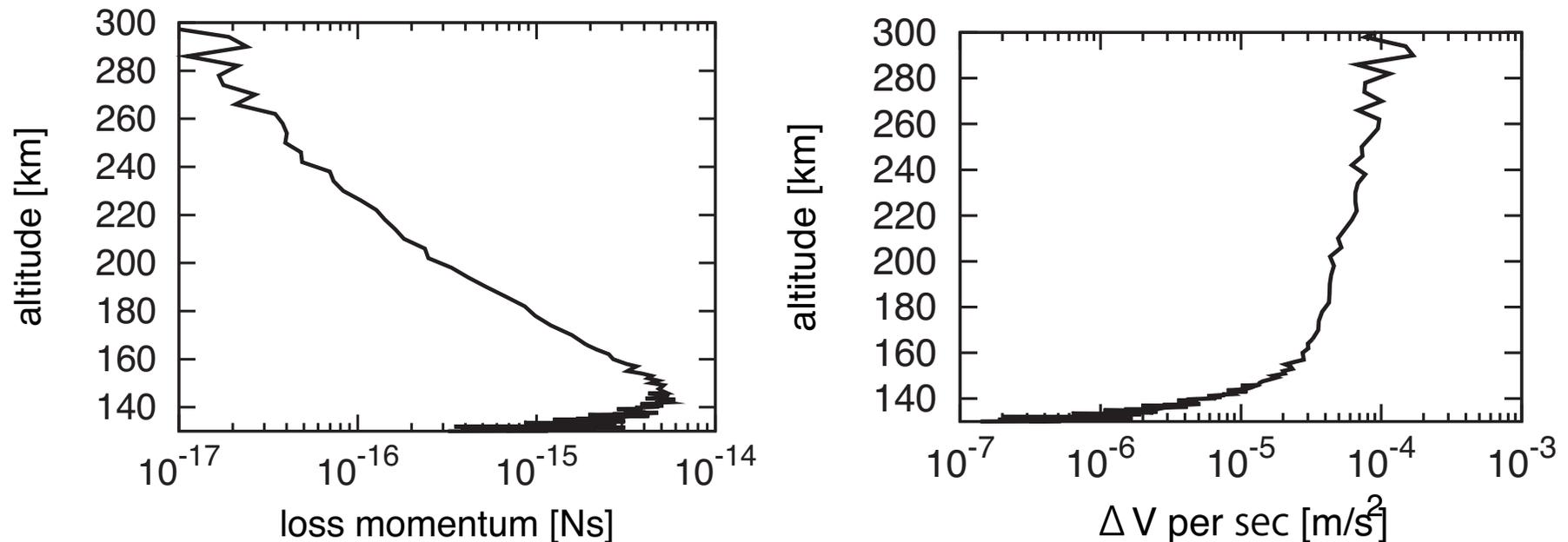


Aberration効果を含めたシミュレーション結果。電離圏界面高度に約200 kmの非対称性が生じる

- この効果は常に起こっている

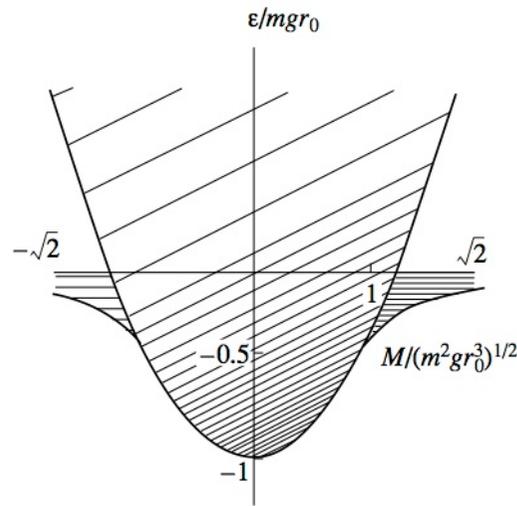
太陽風起源の非対称トルク2: Aberration効果(惑星公転の効果)

太陽風起源粒子の降り込みによる水平風の加速の評価

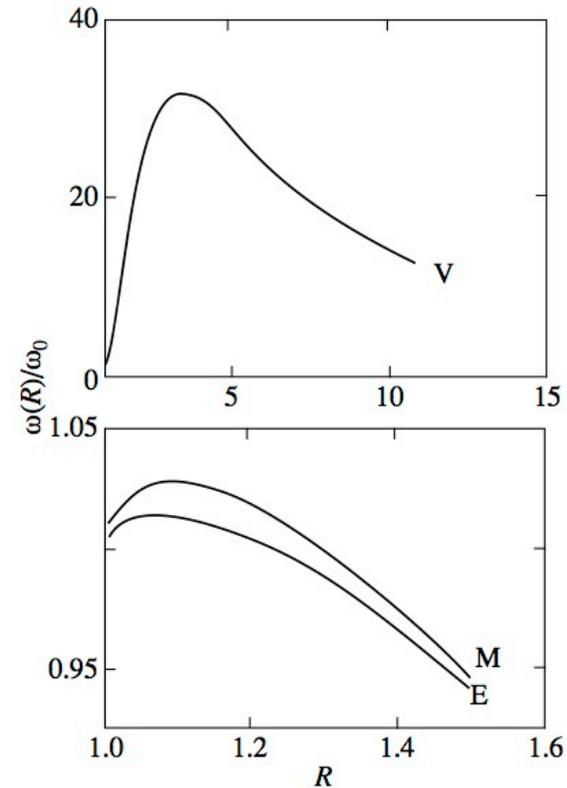


- 太陽風起源粒子の降り込みによる非対称な加速。熱圏0.5自転につき、最大で~5 m/sの速度増加
- 電離圏流によって駆動される非対称な加速も考慮すれば、もう少し増加する可能性がある

自発的な効果： 外圏スーパーローテーション

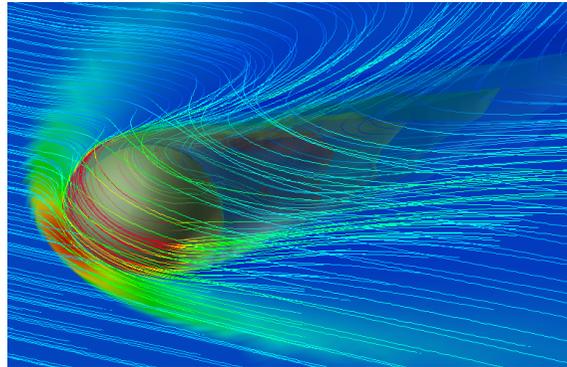


角速度-エネルギー空間での拡散
による金星・火星・地球の外圏での
スーパーローテーションの駆動
[Bespalov and Savina, 2003]

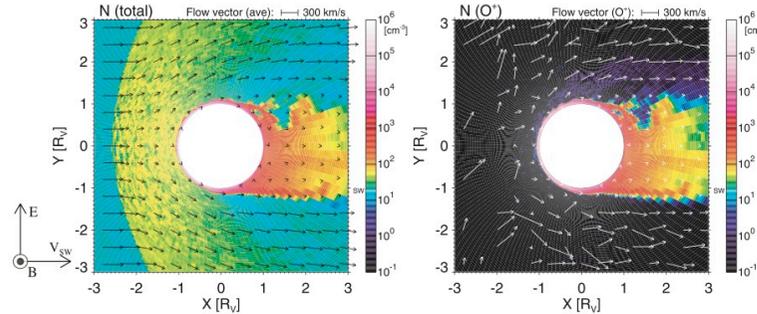


- 外圏底高度 (~250 km) ではsatellite粒子の数が少ないので効果は小さいが、さらに高高度ではスーパーローテーションを生じる可能性がある

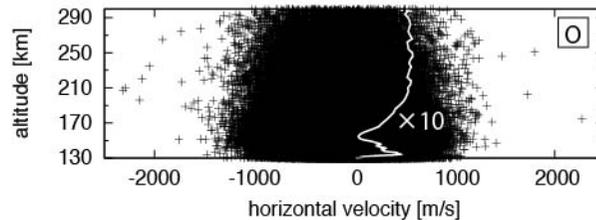
電磁圏-大気圏結合シミュレーションの今後の課題



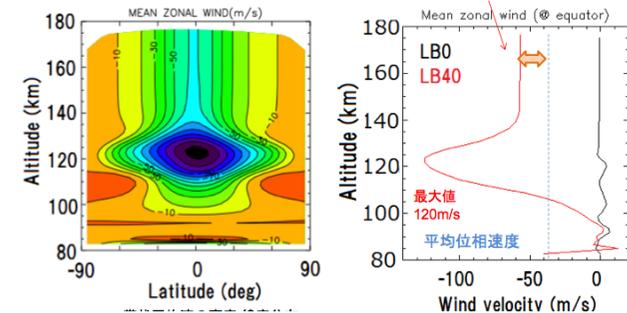
電磁圏MHDコード
[Terada et al., 2009]



電磁圏ハイブリッドコード
[Terada et al., 2002]



中性大気DSMCコード



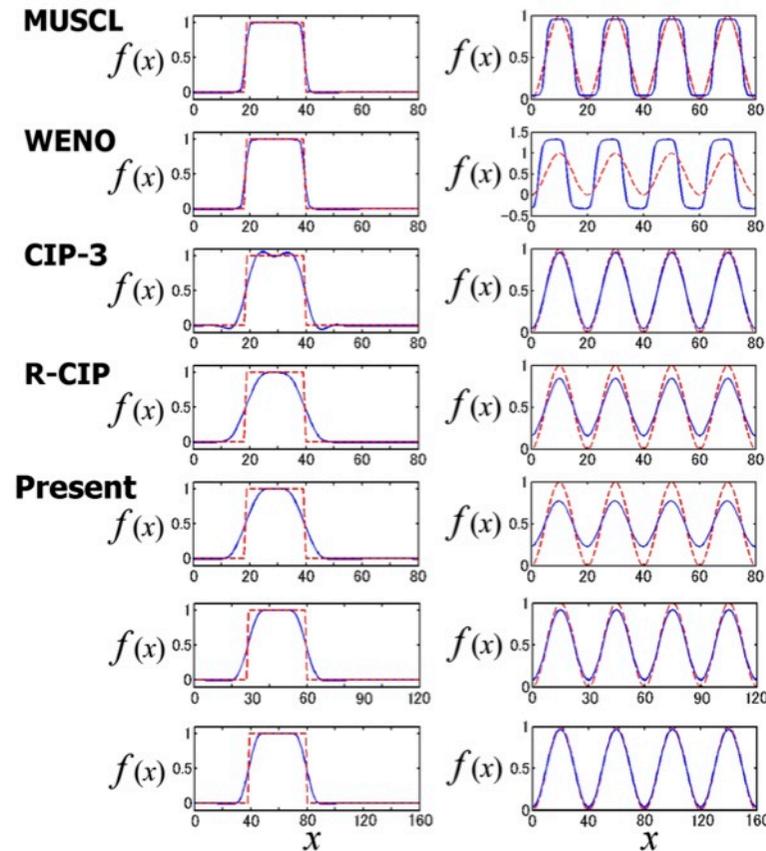
中間圏-熱圏結合コード
[Hoshino, 2012]

- 共有可能な高精度スキームと計算格子の開発が課題
- 例: HELIOSARES (仏)

高精度中心スキームの開発

- 惑星電磁圏-大気圏シミュレーション
 - 多成分、non-MHD項の組み込みが課題
- TVDなどの高精度風上スキームは適用が困難
 - 風上スキームは高精度だが、リーマン問題を解く必要がある(システム方程式の固有値と固有ベクトルを求める必要がある)
- 目標：数値散逸が小さく、風上化不要な(ユニバーサルな)高精度中心スキームを用いた惑星電磁圏-大気圏流体コードを開発。粒子コードとも親和性が高いものをつくる

高精度スキームの開発



[Umeda, 2008]

- 不連続と小振幅波の両者を正確に解くことは通常困難

例えば、

HDシステム方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \mathbf{v} \\ U \end{bmatrix} + \nabla \cdot \begin{bmatrix} \rho \mathbf{v} \\ \mathbf{v} \rho \mathbf{v} + P \mathbf{I} \\ \mathbf{v}(U + P) \end{bmatrix} = source$$

MHDシステム方程式

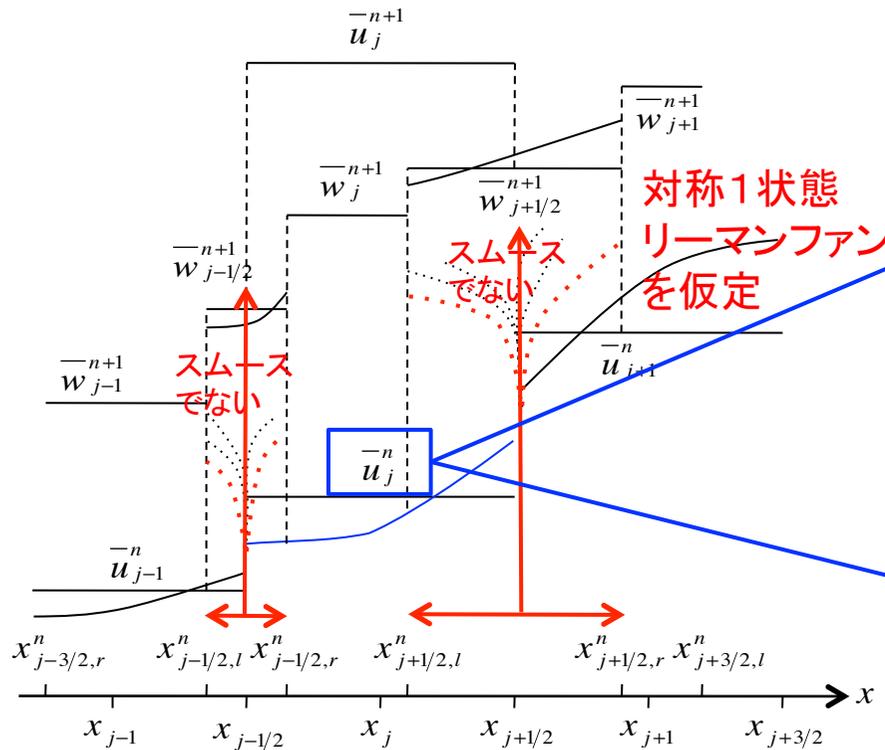
$$\frac{\partial}{\partial t} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \mathbf{v} \\ \mathbf{B} \\ U \end{bmatrix} + \nabla \cdot \begin{bmatrix} \rho \mathbf{v} \\ \mathbf{v} \rho \mathbf{v} - \mathbf{B} \mathbf{B} + (P + \frac{B^2}{2}) \mathbf{I} \\ \mathbf{v} \mathbf{B} - \mathbf{B} \mathbf{v} \\ \mathbf{v}(U + P + \frac{B^2}{2}) - \mathbf{B} \mathbf{B} \cdot \mathbf{v} \end{bmatrix} = source$$

や、non-MHDシステム方程式などの
保存形のシステム方程式を解く

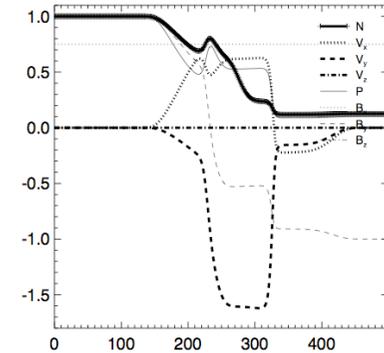
$$\frac{\partial}{\partial t} \mathbf{u} + \nabla \cdot \mathbf{F} = source$$

KT系 高精度中心スキームの概要

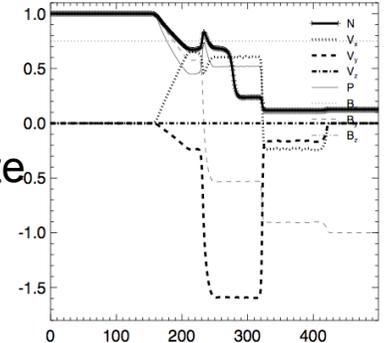
- Semidiscrete central scheme [Kurganov and Tadmor, 2000]



u_j 区間一定
→ 1次精度
local Lax
-Friedrich
スキーム



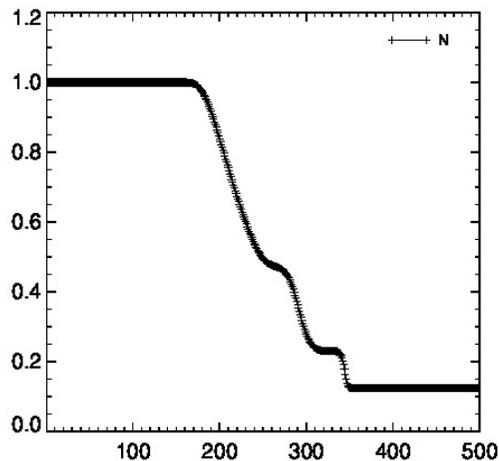
u_j 区間1次
→ 2次精度
semi-discrete
スキーム



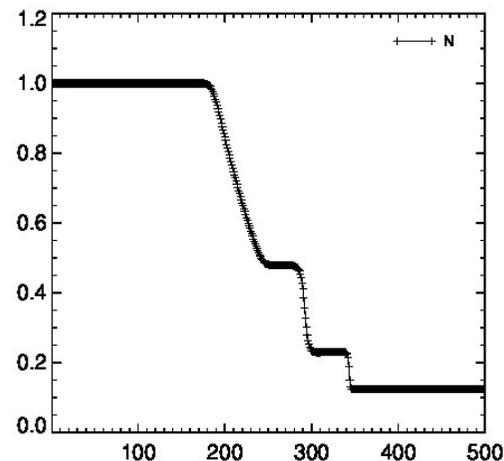
- 伝搬速度(リーマンファンのスペクトル半径)の評価方法を変更することで容易に精度向上
 - 3次精度CWENO (central weighted ENO) [Levy et al., 2000]との組み合わせなど 36

Example: Shock tube test

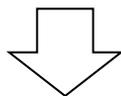
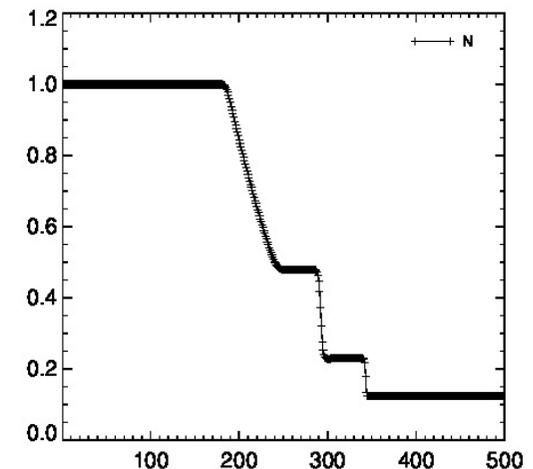
Rusanov scheme
(TVD Lax-Friedrichs)



2nd order semidiscrete
scheme (minmod limiter)



Our new scheme:
4th order semidiscrete
scheme (UNO limiter)



Michigan U.
multi-fluid model
[Benna et al., 2004]

can be applied to

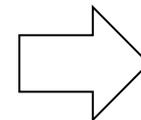
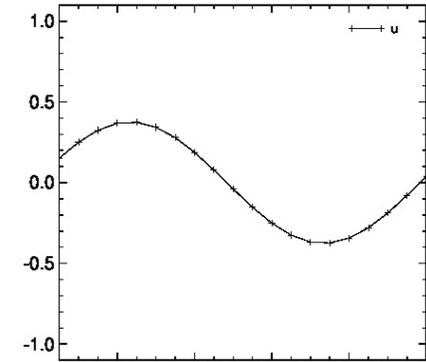
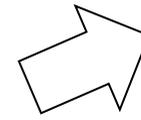
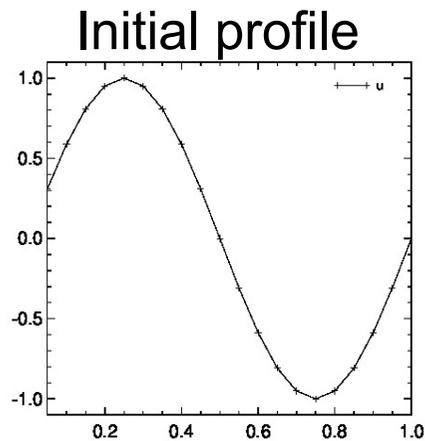
- HD model
- MHD model
- Multi-fluid model
- Hybrid mode
- ...

Example: Sinusoidal wave propagation

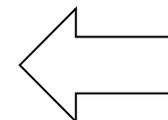
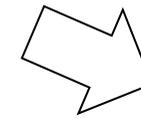
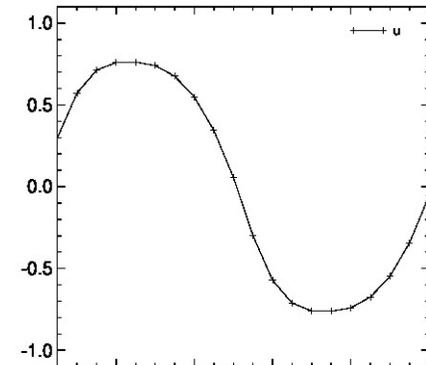
Rusanov scheme
(TVD Lax-Friedrichs)

2nd order semidiscrete
scheme (minmod limiter)

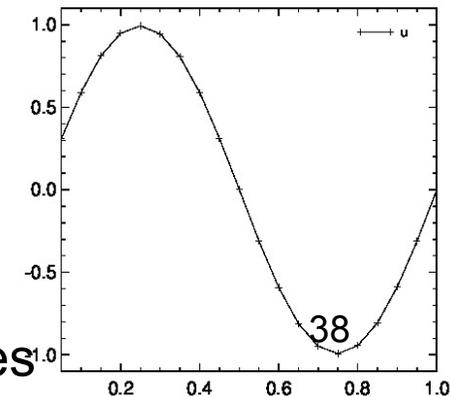
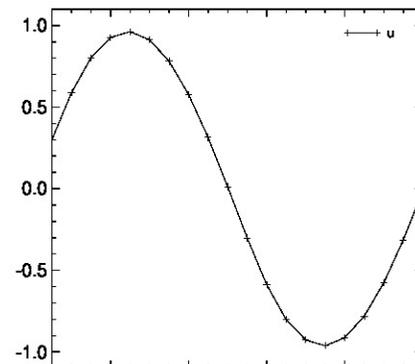
Our new scheme:
4th order semidiscrete
scheme (UNO limiter)



1 cycle



10 cycles



- 線形スカラー波の伝搬テスト

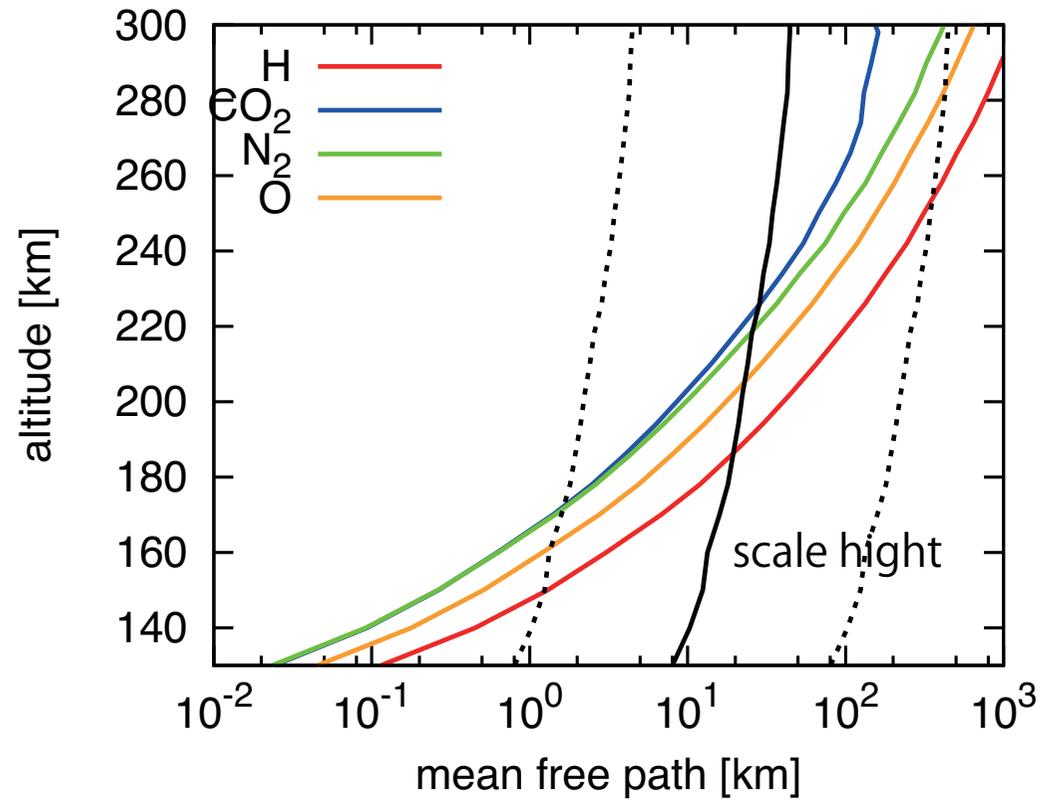
1st <u>semidiscrete Rusanov</u>			2nd <u>semidiscrete minmod</u>		3rd <u>semidiscrete CWENO</u>	
Cells	L1	Order	L1	Order	L1	Order
250	4.83325E-02	-	1.63945E-03	-	3.85717E-04	-
500	2.46431E-02	0.97181	4.42086E-04	1.89081	2.66221E-05	3.85685
1000	1.24432E-02	0.98583	1.16929E-04	1.91869	1.47139E-06	4.17737
2000	6.25228E-03	0.99290	3.05034E-05	1.93859	8.43951E-08	4.12388
20	3.99376E-01	-	1.03053E-01	-	9.31360E-02	-
40	2.48004E-01	0.68738	4.60404E-02	1.16241	3.63891E-02	1.35583
80	1.39207E-01	0.83313	1.33480E-02	1.78628	8.89501E-03	2.03244
160	7.38891E-02	0.91380	3.80682E-03	1.80997	1.60762E-03	2.46807
320	3.80833E-02	0.95620	1.02616E-03	1.89133	1.56522E-04	3.36049
640	1.93353E-02	0.97792	2.75924E-04	1.89491	9.41271E-06	4.05561
2nd <u>semidiscrete UNO</u>			4th <u>semidiscrete UNO</u>			
Cells	L1	Order	L1	Order	L1	Order
20	3.37455E-02	-	3.26428E-03	-		
40	8.25809E-03	2.03082	2.19966E-04	3.89141		
80	2.05666E-03	2.00550	1.47912E-05	3.89447		
160	5.13916E-04	2.00070	1.01675E-06	3.86270		
320	1.28487E-04	1.99991	9.57824E-08	3.40806		
640	3.21247E-05	1.99987	1.07240E-08	3.15892		

CFL = 0.4

時間更新には全て3次のTVD Runge-Kuttaを使用

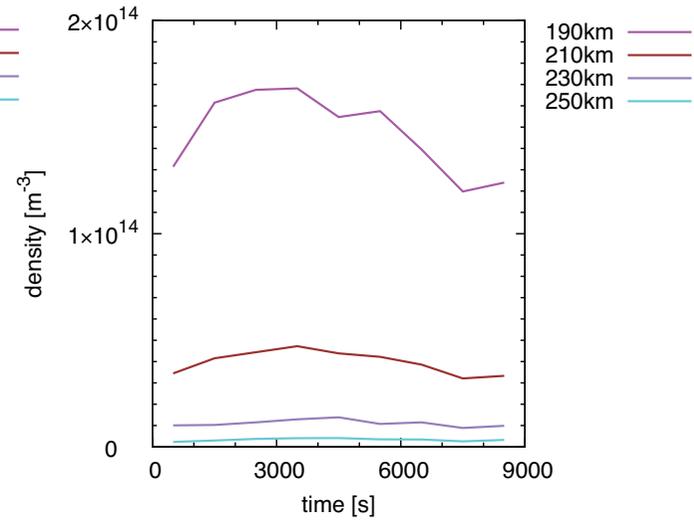
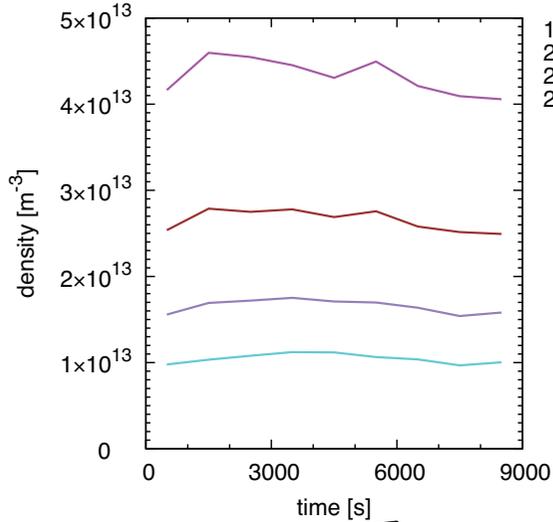
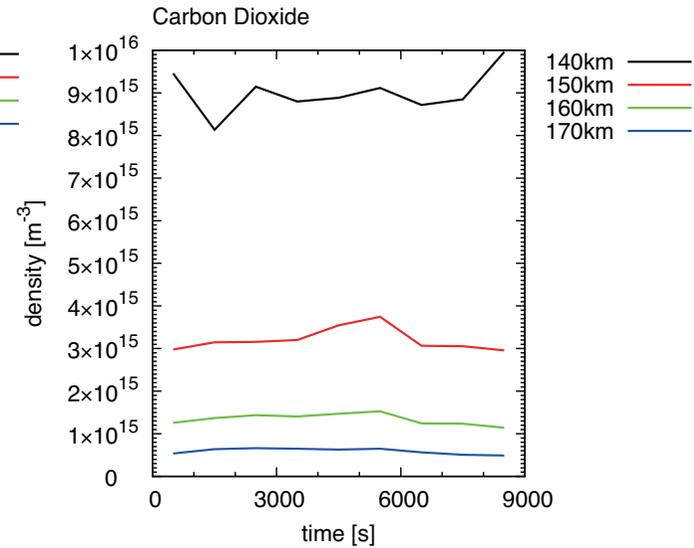
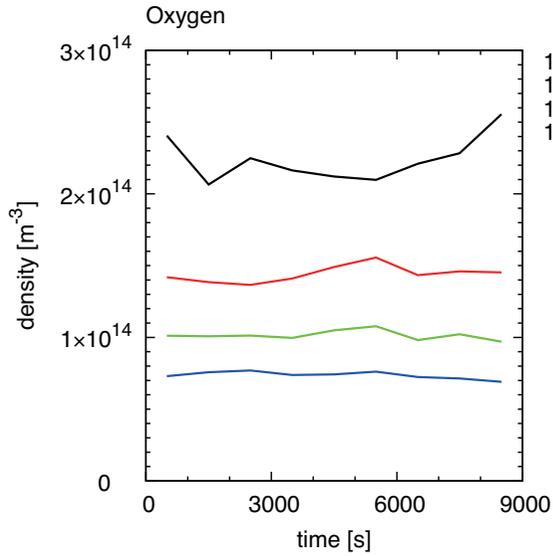
Backup charts

Mean free path



計算結果：密度

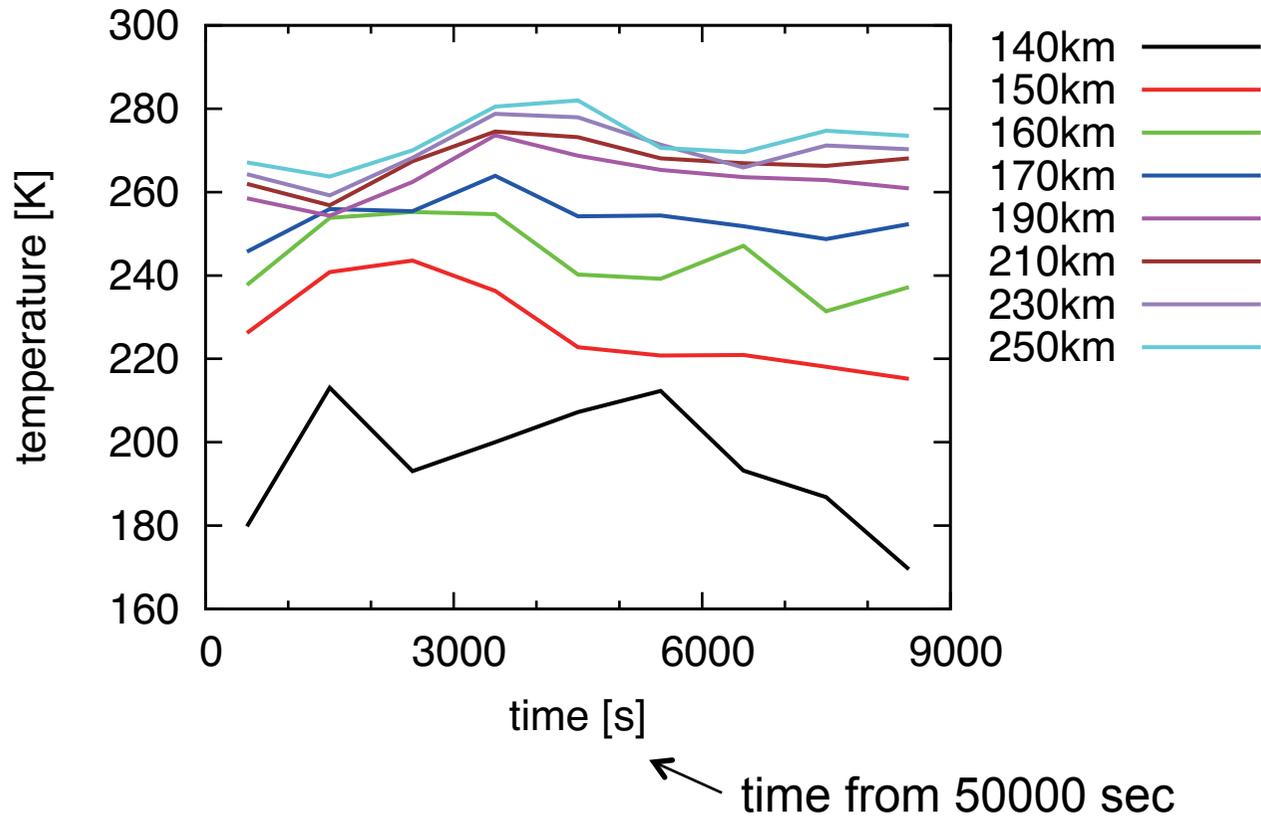
密度(DSMC)
1000秒平均值



time from 50000 sec

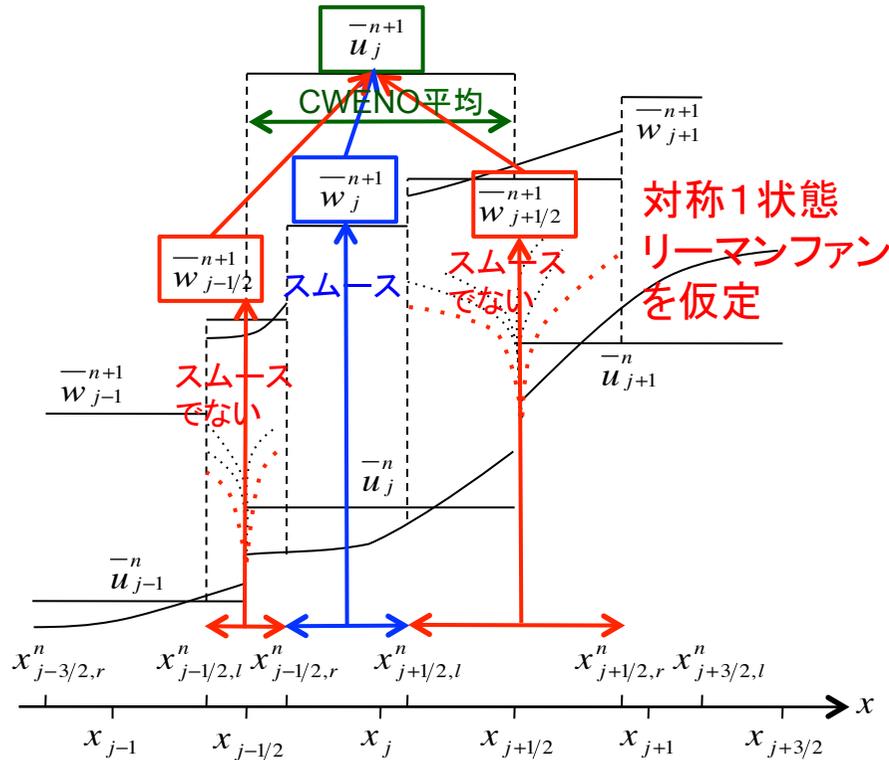
計算結果：温度

温度(DSMC)
1000秒平均值



KT系 高精度中心スキームの概要

- Semidiscrete central scheme [Kurganov and Tadmor, 2000]



$$\frac{d\bar{u}_j}{dt} = - \frac{H_{j+1/2}(t) - H_{j-1/2}(t)}{\Delta x}$$

及び数値流束

$$H_{j+1/2}(t) = \frac{f(u_{j+1/2}^+(t)) + f(u_{j+1/2}^-(t))}{2} - \frac{a_{j+1/2}(t)}{2} (u_{j+1/2}^+(t) - u_{j+1/2}^-(t))$$

ここで、 $a_{j+1/2}$ は最大スペクトル半径(波の最大伝搬速度:磁気音波速度など)

$$a_{j+1/2}(t) = \max \left\{ \rho \left(\frac{\partial f}{\partial u} u_{j+1/2}^-(t) \right), \rho \left(\frac{\partial f}{\partial u} u_{j+1/2}^+(t) \right) \right\}$$

$$u_{j+1/2}^+ = P_{j+1}(x_{j+1/2}, t^n), \quad u_{j+1/2}^- = P_j(x_{j+1/2}, t^n)$$

- セルの幅を仮想的に変えて、 $\Delta t \rightarrow 0$ の極限でsemidiscrete形式に
- $\Delta t \rightarrow 0$ でエラーが大きくなるしない $O(\Delta x^{2r-1})$