

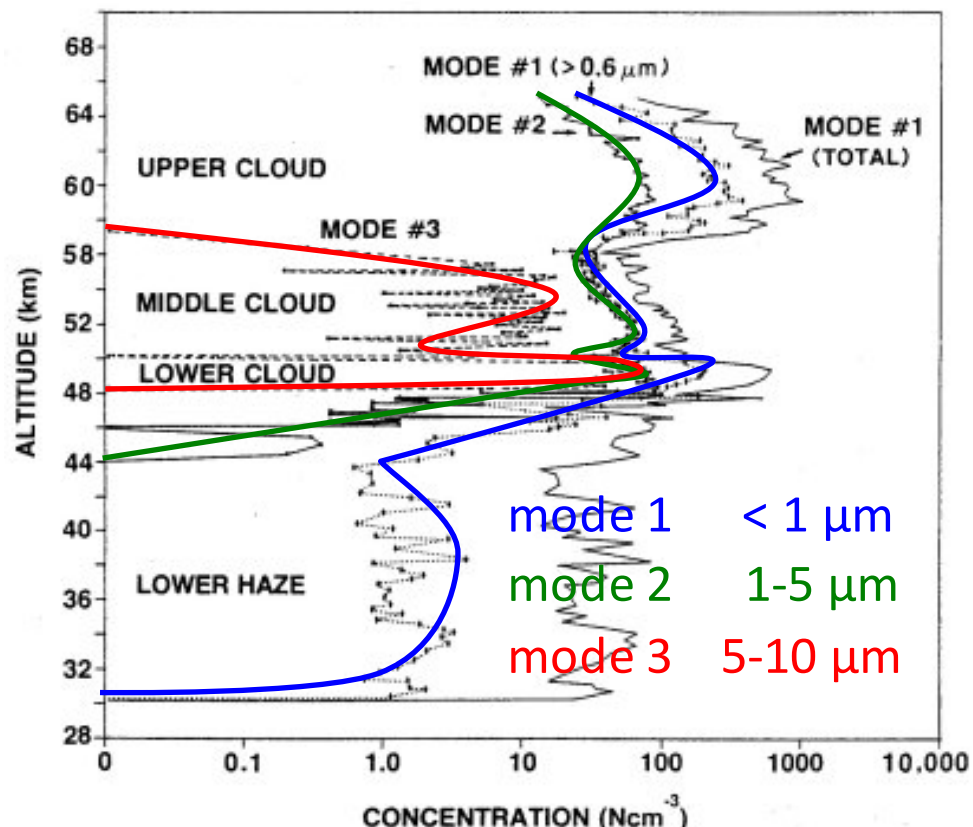
# 金星における 雲の粒径分布の数値計算

2016年3月8日 大気圏シンポジウム

\*林田 和大、中島健介(九大院・理)

# 金星の雲の特徴

- ・ 厚い雲（高度45-70km）が全球を覆っている。
- ・ 雲粒は、濃硫酸（ $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ ）の液滴である。
- ・ 粒径分布によって、3層に分けられる。  
上層は mode 3 が無く、  
中層は mode 1-3 全て、  
下層は mode 3 が多く  
含まれる。



粒径ごとの数密度の高度分布  
(Knollenberg and Hunten 1980)

# 本研究の目的

## 先行研究

Imamura and Hashimoto (2001) は、鉛直1次元モデルにより雲の粒の鉛直分布を数値的に研究し、これまでの断片的な観測結果の再現に成功した。

しかし、モデル中のプロセスの記述はそれほど詳細ではなく、また、観測結果の再現に限らない、より広い範囲でのパラメタ依存性の調査が必要である。

本研究では、Imamura and Hashimoto (2001) に準拠した鉛直1次元の雲微物理モデルを構築し、より多様な条件下での数値実験を行う。

# モデル概要

- 鉛直1次元の雲微物理モデルを構築する。  
粒径分布( $0.17\mu\text{m}$ - $\sim 30\mu\text{m}$ )を計算する。
- 鉛直流による移流、渦拡散、重力による沈降、凝結成長/蒸発、併合過程、核生成を計算する。  
雲微物理過程のスキームは Toon et al. (1988)による。
- 気相の $\text{H}_2\text{SO}_4$ と $\text{H}_2\text{O}$ の鉛直分布も計算する。
- 雲粒子は液相の $\text{H}_2\text{SO}_4$ と $\text{H}_2\text{O}$ の混合物とする。
- 雲粒子の組成と $\text{H}_2\text{O}$ の凝結・蒸発は、熱力学平衡を仮定して診断的に計算する。

# 雲粒子の1次元の連続の式

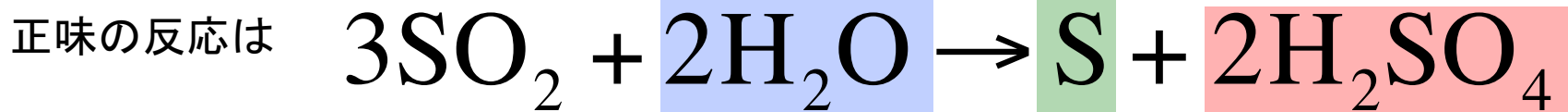
粒径分布関数の支配方程式の概略は以下の通りである。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C(m, z, t)}{\partial t} = & \underbrace{-w(z, t)\rho(z)\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{C(m, z, t)}{\rho(z)}\right]}_{\text{鉛直流による移流}} + \underbrace{\frac{\partial}{\partial z}\left\{D_{\text{diff}}(z)\rho(z)\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{C(m, z, t)}{\rho(z)}\right]\right\}}_{\text{渦拡散}} \\ & - \underbrace{\frac{\partial}{\partial z}\left[w_{\text{sed}}(m, z)C(m, z, t)\right]}_{\text{重力による沈降}} - \underbrace{\frac{\partial}{\partial m}\left[G(m, z, t)C(m, z, t)\right]}_{\text{凝結成長/蒸発}} \\ & + \frac{1}{2} \int_{m_{\text{cn}}}^m K_{\text{coag}}(m', m - m')C(m', z, t)C(m - m', z, t)dm' \\ & - C(m, z, t) \int_{m_{\text{cn}}}^{m_{\text{max}}} K_{\text{coag}}(m', m)C(m', z, t)dm' \\ & \underbrace{\hspace{10em}}_{\text{併合}} \end{aligned}$$

# H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>(gas)・S(凝結核)の生成

- 高度60-62kmで以下のような光化学反応により、硫酸と硫黄が生成することを想定する

(Yung and DeMore 1982;Krasnopolsky and Parshev 1983)



- 全気柱のH<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>生成率は標準実験で  $10^{12}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  とする。
- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>生成率と等しいH<sub>2</sub>Oが消費される。
- Sは半径0.17 $\mu\text{m}$ の塊として分布関数の最小クラスに加わる。

# 計算条件

- ・ 計算領域は高度40-70km、鉛直解像度は100mとする。
- ・ 大気構造は VIRA (Seiff et al 1985 )に準拠して与える。
- ・ 時間積分はモデルがほぼ定常となるまで続ける。  
典型的な積分時間は  $2 \times 10^8$  秒である。
- ・ 初期条件は以下の通りである。

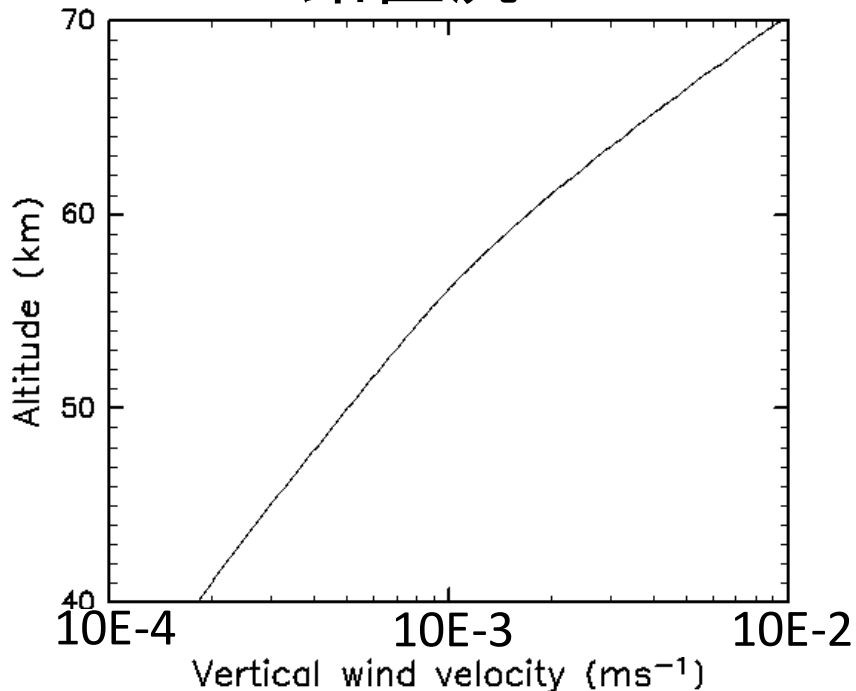
凝結核	...	一様に $40\text{cm}^{-3}$
雲粒子	...	存在しない
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	...	4ppm
H <sub>2</sub> O	...	30ppm

- ・ 境界条件は、下端はディリクレ、上端はノイマンとする。

# 鉛直流・渦拡散係数

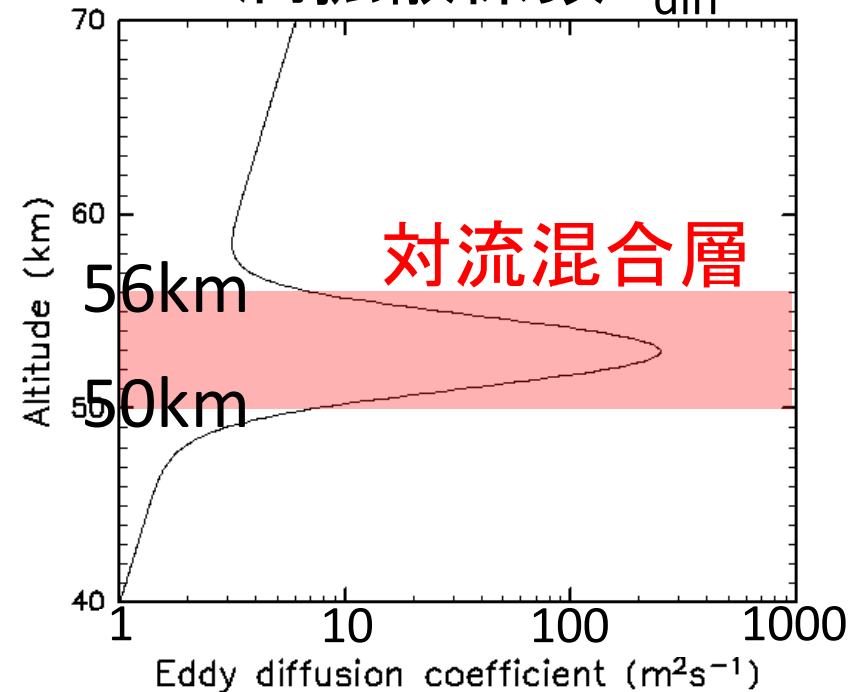
- 標準計算では Imamura and Hashimoto(2001)に準拠する。鉛直分布は以下のとおりである。

鉛直流  $W$



質量フラックスが一定となるように与える。

渦拡散係数  $D_{\text{diff}}$

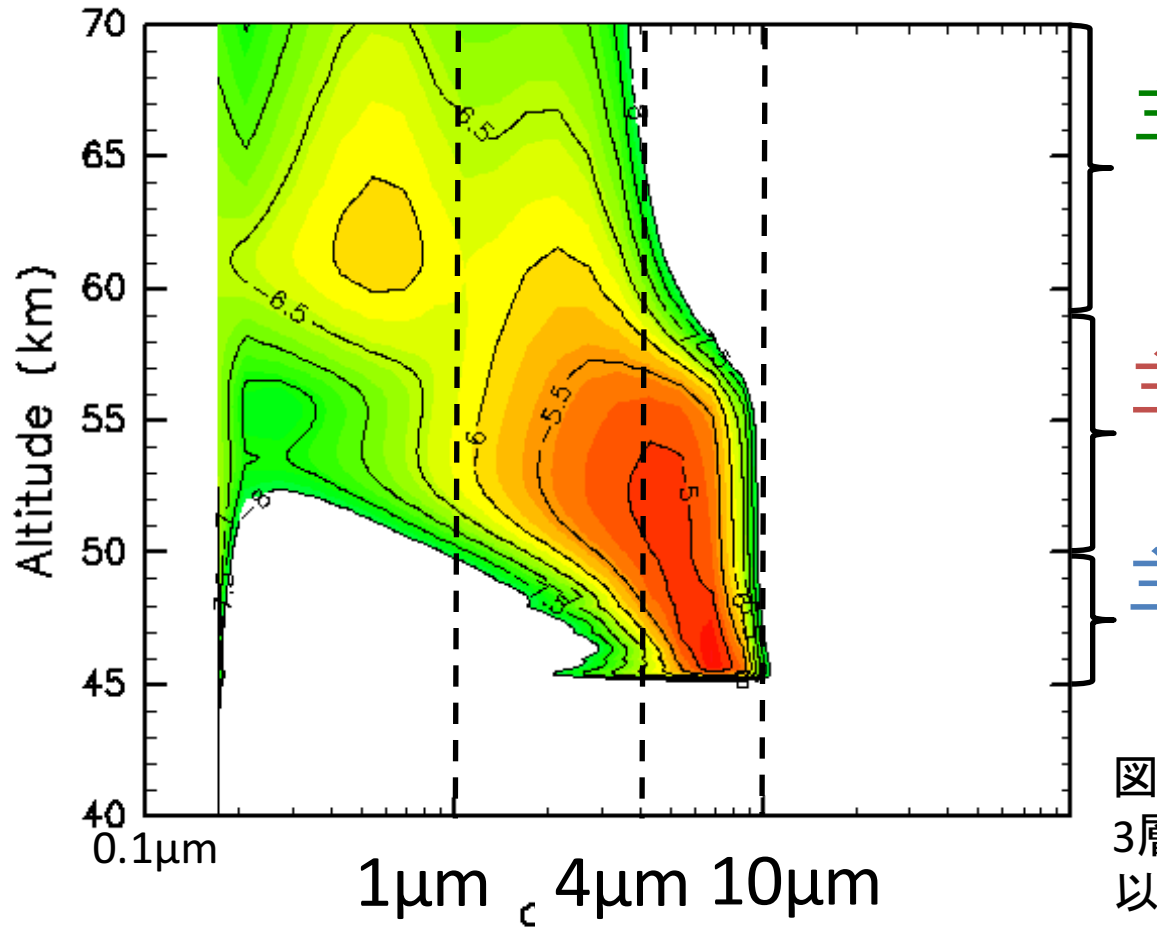


高度53kmで最大値  
 $250\text{m}^2\text{s}^{-1}$ をとる。



# 標準計算の結果の特徴

- ・ 粒径、高度における雲の質量分布、単位は $10^{-6}\text{kgm}^{-3}(\log r)^{-1}$

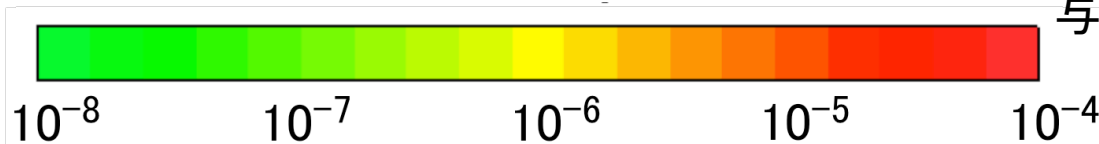


主に  $<1\mu\text{m}$  の雲粒子  
UPPER CLOUD

主に  $1-10\mu\text{m}$  の雲粒子  
MIDDLE CLOUD

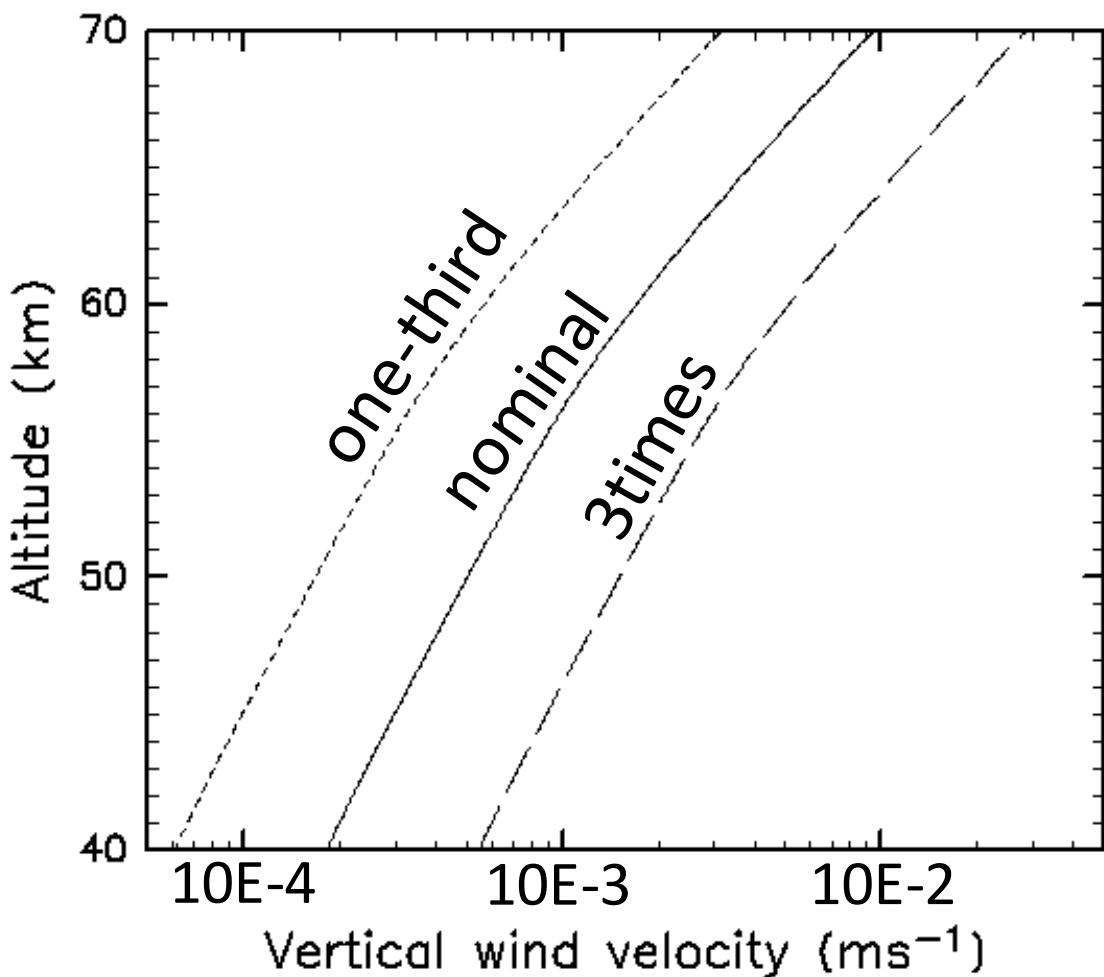
主に  $4-10\mu\text{m}$  の雲粒子  
LOWER CLOUD

図のように、観測結果を再現する3層の雲構造が再現された。以下、モデルのパラメタが雲構造に与える感度を調べる実験を行う。



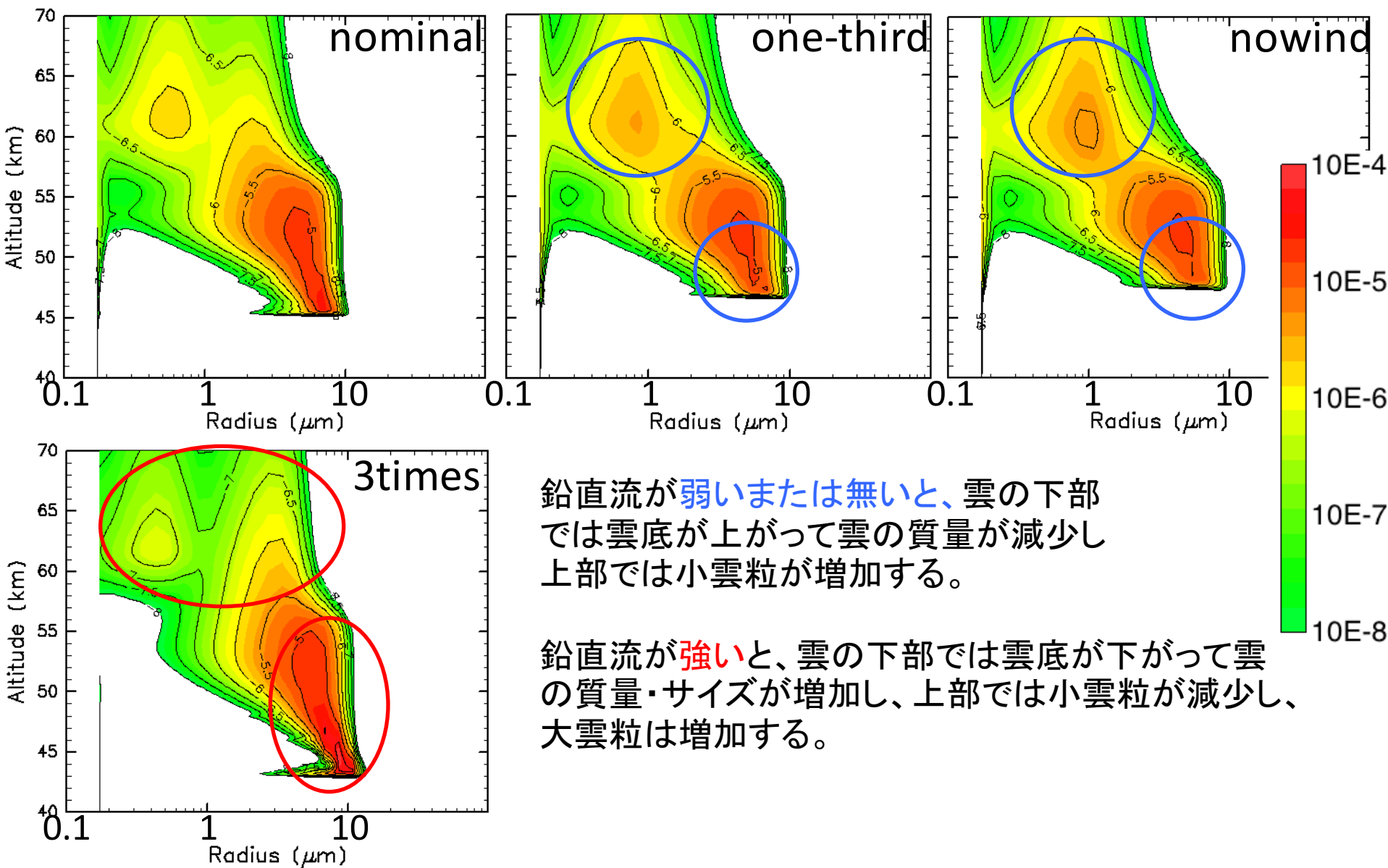
# 鉛直流に関するパラメータ実験

- 鉛直流を標準の3倍、1/3倍にした実験、  
および、鉛直流を無くした実験を行う。



—	標準	nominal
- - -	3倍	3times
⋯	1/3倍	one-third
	なし	nowind

# 鉛直流に関するパラメータの結果

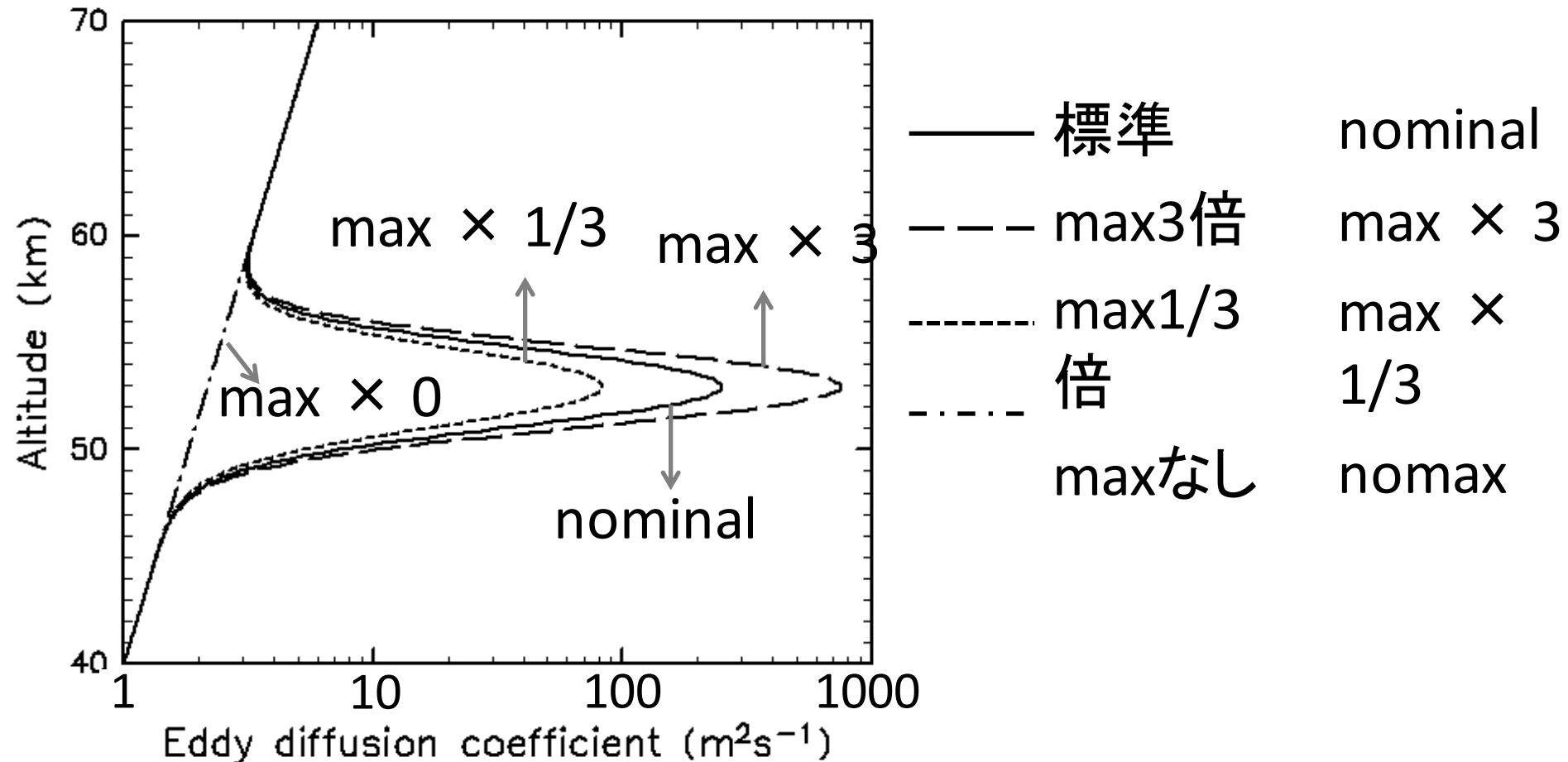


鉛直流が**弱い**または**無い**と、雲の下部では雲底が上がって雲の質量が減少し、上部では小雲粒が増加する。

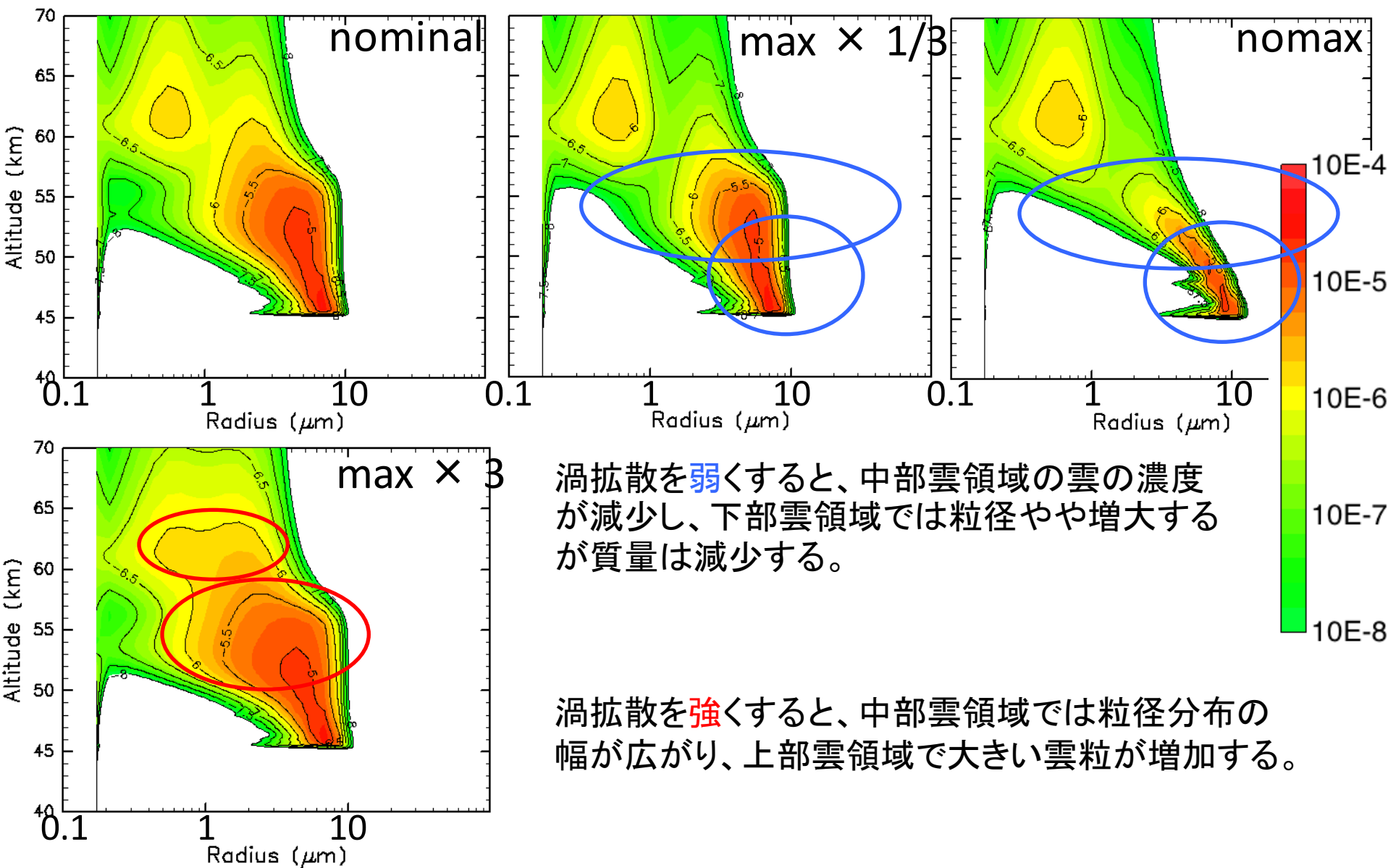
鉛直流が**強い**と、雲の下部では雲底が下がり、雲の質量・サイズが増加し、上部では小雲粒が減少し、大雲粒は増加する。

# 渦拡散係数に関するパラメータ実験

- 渦拡散係数を3倍、1/3倍、なしにする実験を行う。



# 渦拡散係数に関するパラメータ実験の結果



渦拡散を弱くすると、中部雲領域の雲の濃度が減少し、下部雲領域では粒径やや増大するが質量は減少する。

渦拡散を強くすると、中部雲領域では粒径分布の幅が広がり、上部雲領域で大きい雲粒が増加する。

# 硫酸・凝結核生成率に関するパラメータ実験

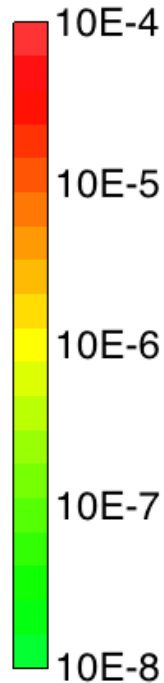
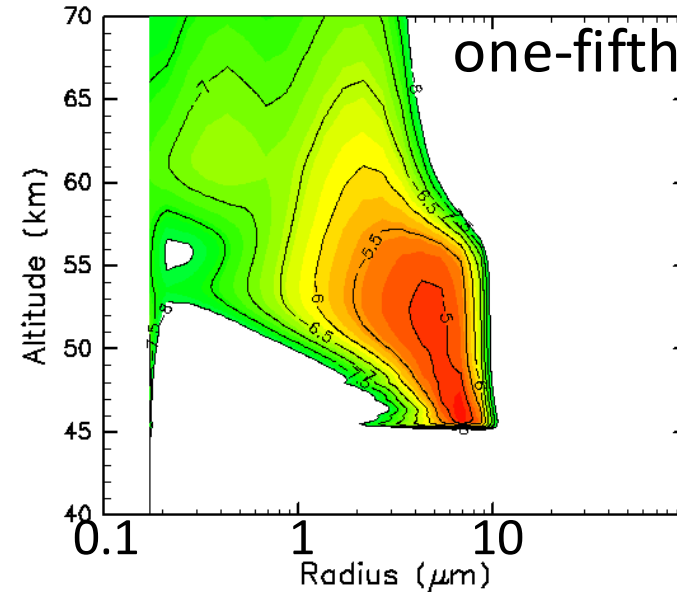
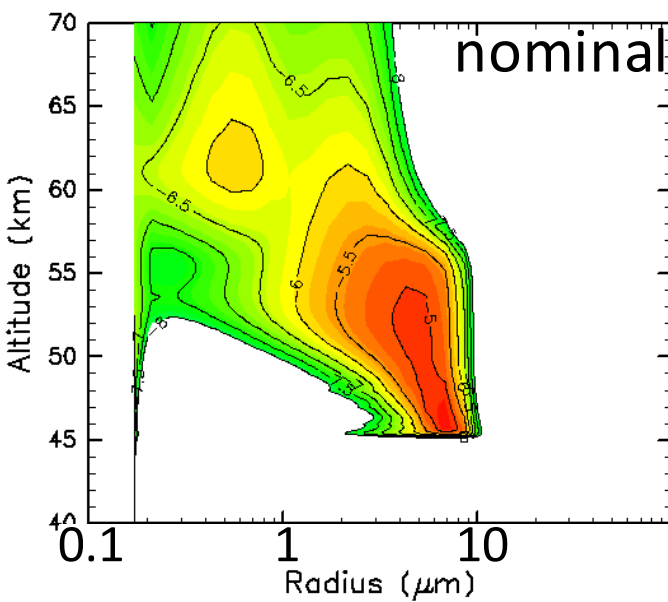
光化学反応による硫酸生成率には50倍程度の不確定さ  
( $2 \times 10^{11} \sim 1 \times 10^{13} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )がある。

(Yung and DeMore 1982; Krasnopolsky and Parshev 1983)

そこで、標準値および、その 1/5 とする実験を行う。

(なお、生成率を小さくした実験も試みたが、計算不安定が生じたので、結果は示さない。)

# 硫酸・凝結核生成率に関するパラメータ実験の結果



生成率を小さくすると、上部雲領域の雲が薄くなる。特に小さい雲粒の減少が顕著である。

# まとめ

- 金星における鉛直1次元の雲微物理モデルを構築した。
- 標準計算の結果は、Imamura and Hashimoto (2001)をほぼ再現し、観測に近い粒径高度分布が得られた。
- 鉛直流、渦拡散係数、硫酸・凝結核生成率を幅広くかえるパラメータ実験を行った。雲の高度粒径分布は、これらのパラメータに依存することがわかった。



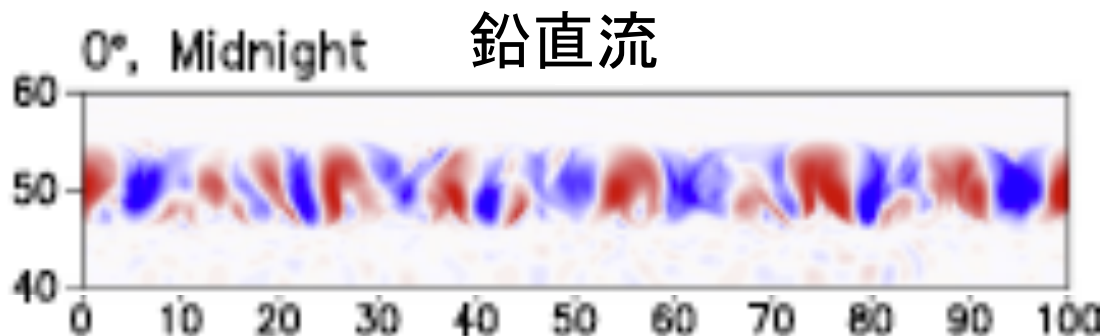
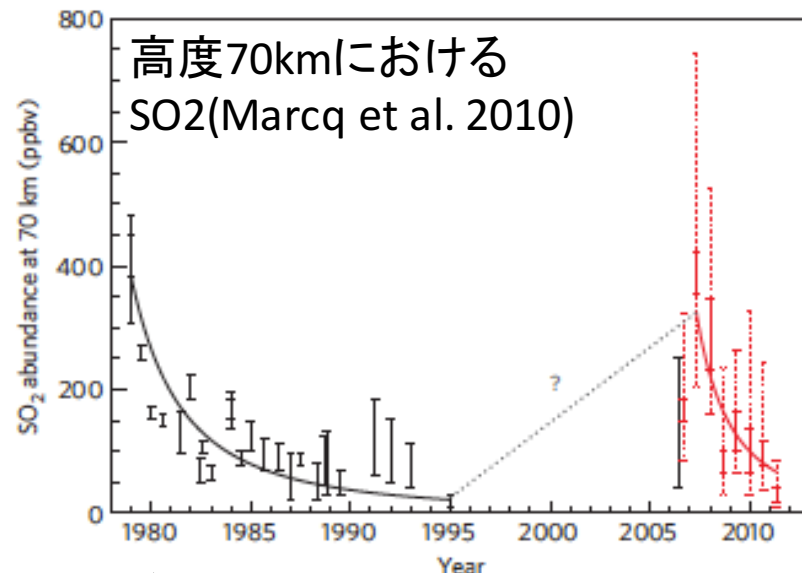
# 今後の課題

- 一部の計算で、計算不安定が生じている。計算スキームの工夫し、解決したい。

- 長期間の観測ではSO<sub>2</sub> の濃度が変動することが知られているので、SO<sub>2</sub> 濃度に対する感度を調べるべきである。

- 対流運動は時間変動し3次元であるので、その影響を動的に考慮すべきである。

- H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、凝結核の生成過程(光化学)に関しては、別種の反応も提案されているので、その影響を吟味すべきである。



金星の対流運動(Imamura et al., 2014)

# 参考文献

- Imamura, T., and G. L. Hashimoto, 2001: Microphysics of Venusian clouds in rising tropical air. *J. Atmos. Sci.*, 58, 3597-3612.
- Toon, O. B., R. P. Turco, D. Westphal, R. Malone, and M. S. Liu, 1988: A multidimensional model for aerosols: Description of computational analogs. *J. Atmos. Sci.*, 45, 2123-2143.
- James, E. P., O. B. Toon, and G. Schubert, 1997: A numerical microphysical model of the condensationl Venus cloud. *Icarus*, 129, 147-171.
- Marcq, E., J. L. Bertaux, F. Montmessin, and D. Belyaev, 2010: Variations of sulphur dioxide at the cloud top of Venus's dynamic atmosphere. *Nat. Geosci.*, 6, 25-28.
- Krasnopolsky, V. A., and V. A. Parshev, 1983: Photochemistry of the Venus atmosphere. *Venus*, D. M. Hunten et al., Eds., The University of Arizona Press, 431-458.
- Yung, Y. L., and W. B. DeMore, 1982: Photochemistry of the stratosphere of Venus: Implications for atmospheric evolution. *Icarus*, 51, 199-247.
- Seiff, A., and Coauthors, 1985: Models of the structure of the atmosphere of Venus from the surface to 100 kilometers altitude. *Adv. Space Res.*, 5, 3-58.
- Imamura, T., T.Higuchi, Y. Maejima, M. Takagi, N. Sugimoto, K. Ikeda, and H. Ando, 2014: Inverse insolation dependence of Venus' cloud-level convection. *Icarus*, 228, 181-188.