

GCM study of the Venusian cloud formation and distribution: Effects of atmospheric chemistry and circulation

伊藤一成（東北大），黒田剛史（東北大），笠羽康正（東北大），
寺田直樹（東北大），池田恒平（環境研），高橋正明（東大・大気海洋研）

1. 背景

金星は全球の高度約 48-70km を硫酸の雲に覆われている。金星探査機あかつきが軌道に投入されたことにより三次元的な大気循環の観測が期待される。観測結果に理論面からの貢献を行う上で大気大循環モデル（General Circulation Model: GCM）を用いた硫酸雲の生成・移流過程の研究は有効な手段である。そこで、我々は VGCM に雲生成過程とそれに関連する化学過程を導入し、その効果及びモデルの信頼性について調べた。また、信頼性があると判断した中低緯度域において雲の生成システムを変化率および、大気循環から研究を行った。

2. モデル概要

2.1. モデル

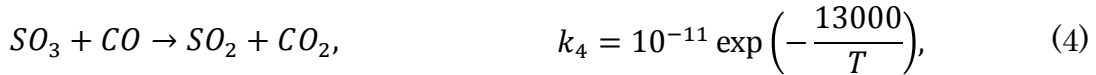
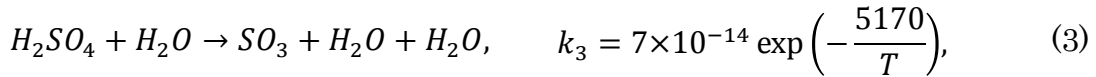
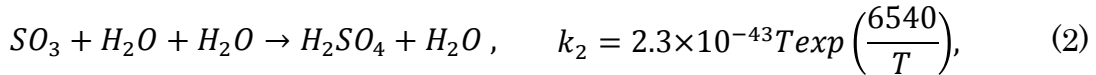
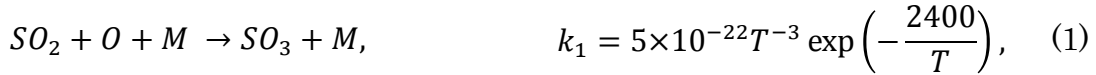
使用したモデルは CCSR/NIES/FRCGC Atmospheric GCM をもとに金星用に開発された VGCM[Ikeda 2011]を用いた。スペクトル法により三次元プリミティブ方程式系を解いている。分解能は水平方向に T21 ($\sim 5.6^\circ \times 5.6^\circ$)、鉛直方向に地表面から高度約 95km までを σ レベルで 52 層である。放射過程は Ikeda [2011]による金星大気放射伝達モデルを用いているが、その雲分布は水平方向、時間的に一定としている（雲パラメタリゼーションで求められる雲分布とは一致していない）。本研究では 25 金星日（ 25×117 地球日）分の計算を行った。

2.2. 雲パラメタリゼーション

凝縮・蒸発過程を説明する。各グリッドで温度、圧力から硫酸飽和蒸気混合比を求め、総硫酸混合比（雲混合比と硫酸蒸気混合比の和）が飽和蒸気混合比を超えた分を雲として取り扱い、雲の半径は Haus and Arnold [2010]で示された雲モデルの 4 つのモード比に分配した。

2.3. 化学過程

今回モデルに導入したのは以下の(1)-(4)式である。また、 SO_2 , H_2O に関しては以下の式では考慮できない他の反応を代替するため、式(5)を用いた。緩和時間 τ はそれぞれ、 $\tau_{\text{SO}_2}=5\times 10^5\text{s}$ 、 $\tau_{\text{H}_2\text{O}} = 1\times 10^6\text{s}$ とした。



$$\frac{\partial q}{\partial t} = \frac{q_i(\lambda, \phi, z, t) - q_i^0(z)}{\tau_i}. \quad (5)$$

3. 結果 1：化学過程による効果及びモデルと観測結果の比較

本研究では導入した化学過程の効果を確認するために、化学過程を導入したモデル (With Chemistry: WC モデル) と化学過程を導入していないモデル (No Chemistry: NC モデル) の 2つのモデルの結果の比較を行った。また、モデルの信頼性を調べるために WC モデルと観測結果との比較を行った。

3.1. 硫酸蒸気

図 1 は WC モデルと NC モデルにおける硫酸蒸気の全球平均の高度分布である。図 1 より、WC モデルでは NC モデルに比べ、高度 40km 以上で最大 3 倍大きくなっており、40km 以下では NC モデルの方が大きくなっている。この差について、硫酸蒸気の単位体積あたりの質量変化率の各効果 (凝縮・蒸発、化学、移流、鉛直拡散) を求め要因を調べた。図 2 より、高度 48km において WC モデルでは硫酸雲の蒸発による硫酸蒸気の生成が NC モデルより大きくなっており、拡散、移流による減少を補っていることがわかる。これは高度 65km 付近での化学過程による硫酸蒸気の生成によるものと考えられる。WC モデルの結果と Magellan の観測結果[Kolodner and Steffes 1998]を比較したのが

図 3 である。図 3 より WC モデルは極域を除いて観測結果と整合することが示された。極域での観測との差の原因はモデルの気温が高度 45-50km において 5K ほど高く、それによって飽和蒸気混合比が大きくなっているためであると考えられる。

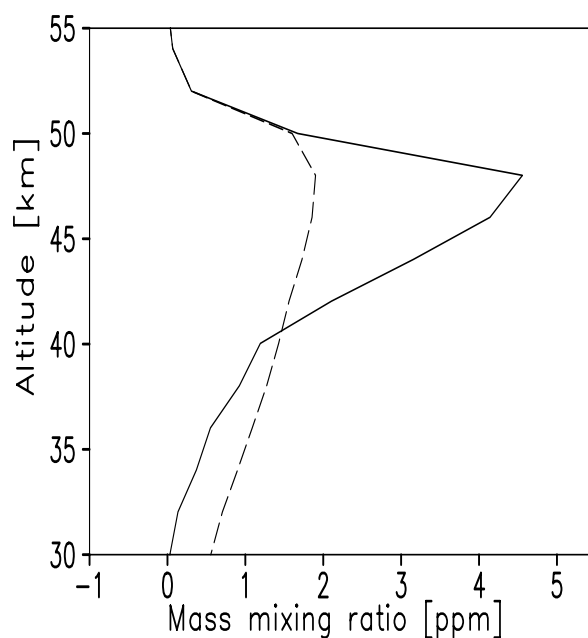


図 1 : 硫酸蒸気の質量混合比量の鉛直分布 (実線 ; WC、破線 ; NC)、全球平均、時間平均。

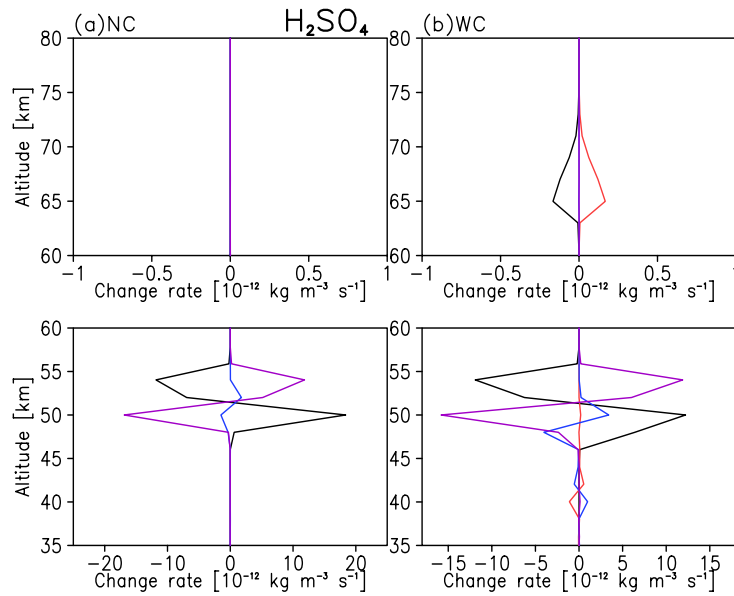


図 2：各効果による硫酸蒸気の単位体積あたり質量変化率の鉛直分布（黒；凝縮/蒸発、赤；化学、青；移流、紫；鉛直拡散）、全球平均、時間平均。

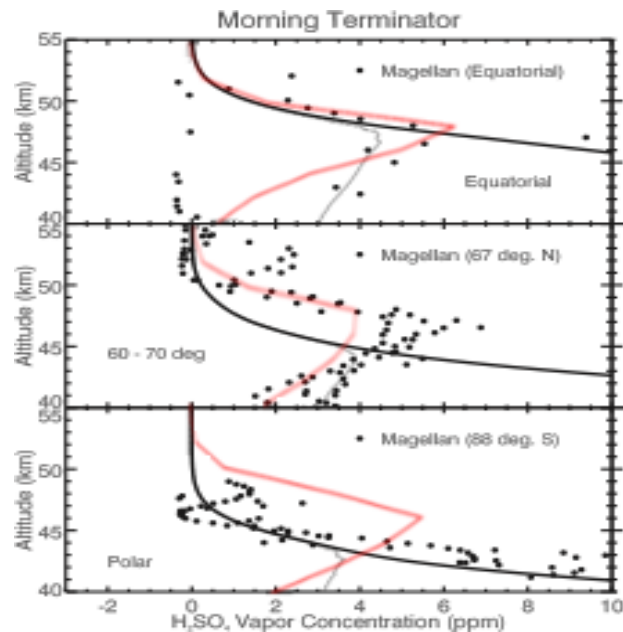


図 3：硫酸蒸気の高度分布（赤：WC モデル、黒実線：Parkinson et al. [2015] の一次元モデル内の飽和硫酸蒸気混合比、グレー：同モデル内硫酸蒸気混合比、黒丸：Magellan による観測結果[Kolodner and Steffes 1998]）。

3.2. 硫酸雲分布

図 4 は硫酸雲の質量混合比の緯度高度分布である。NC モデルと WC モデルの比較から、WC モデルでは雲量が全体的に増え、特に高度 70km 付近で混合比が最も大きくなっていることがわかる。図 5 は各効果（凝縮・蒸発、沈降移流、鉛直拡散）による雲の単位体積あたり質量変化率($\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$)である。図 5 による WC モデルと NC モデルの比較から、WC モデルでは高度 65km 付近の化学過程により生成された硫酸蒸気の凝縮により高度 70km 付近で雲が増加し、下層（50–60km）では上層でできた雲が移流、拡散により供給され、雲が維持されているということがわかる。光学的厚さについて比較を行った結果を図 6 に示す。WC モデルと NC モデルの比較から、化学過程を導入したことにより、15 以上増加していることがわかる。WC モデルと VIRTIS/VEX の観測結果 [Haus et al. 2014]の比較から、WC モデルは緯度 60N 付近まで観測結果の傾向を再現していることがわかる。しかし、中緯度から極域に向かって増加する傾向は再現することができなかった。

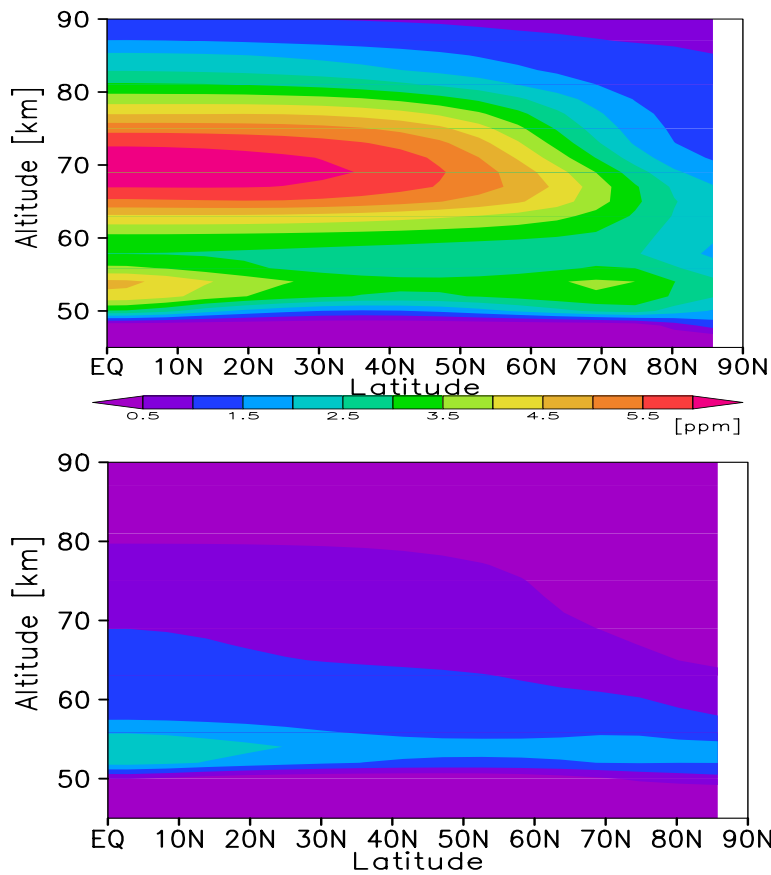


図 4：雲のモード総和の質量混合比緯度高度分布(ppm)。

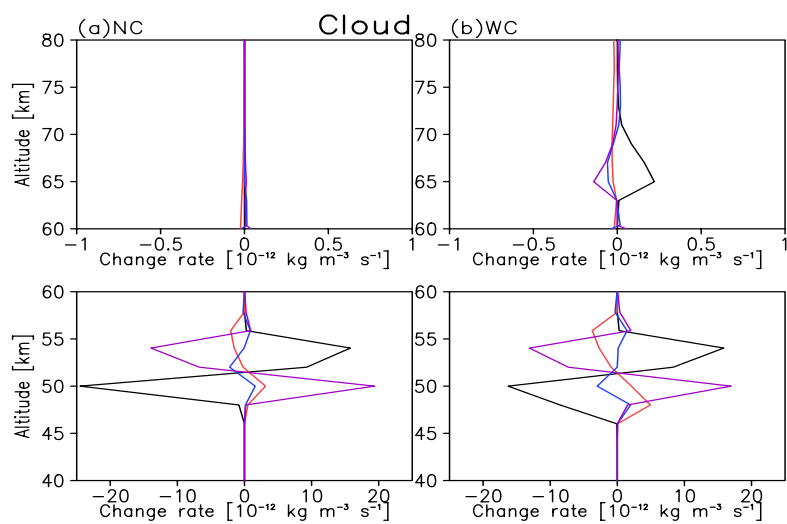


図 5：各効果による雲の単位体積あたり質量変化率（黒；凝縮/蒸発、赤；沈降、青；移流、紫；鉛直拡散）、全球平均。

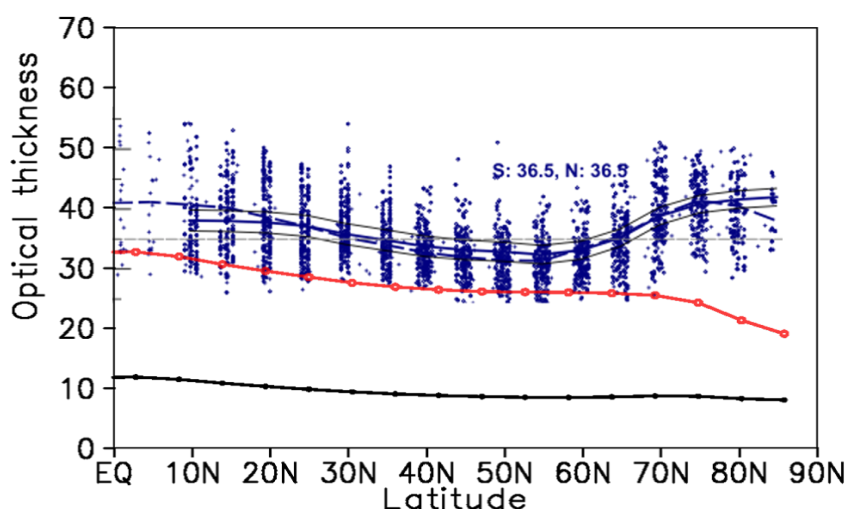


図 6：波長 $1\mu\text{m}$ の光学的厚さの緯度分布の比較（黒：NC、赤：WC、青：VIRTIS/VEX による観測結果[Haus et al. 2014]）。

4. 結果 2：中低緯度の雲分布、サイクル

結果 1 から、硫酸蒸気量、雲の光学的厚さともに化学過程を導入したことにより、中低緯度域 ($0\sim 60^\circ\text{N}$) において観測の傾向を再現できていることがわかった。我々は中低緯度において WC モデルは信頼性があると判断し、さらに詳しく雲分布、生成システムについて調べた。

4.1 雲生成サイクル

図 7 は WC モデルでの雲の質量混合比量の緯度高度断面図（シェード）、残差質量流線関数（コンター）、図 8 は各効果による雲の単位体積あたり質量変化率（高度 $60\text{-}80\text{km}$ 、緯度 2.8N 、 40N 、 60N ）である。これらの図から高度約 65km で化学反応により生成された硫酸蒸気が凝縮し、移流、拡散によりさらに上層、極方向へ運ばれることで高度約 70km 付近がピークとなっていることがわかる。また、同様に図 7、図 9（図 8 と同様、高度 $40\text{-}60\text{km}$ ）から拡散、移流で上方に運ばれた硫酸蒸気が $50\text{-}54\text{km}$ で凝結し、雲の生成が行われ、特に赤道域で上昇流により生成され、子午面循環にそって運ばれていることがわかる。本モデルで示された雲生成サイクルは先行研究[Knollenberg and Hunten 1980; Imamura and Hashimoto 1998]で示されたサイクルと概ね整合している。

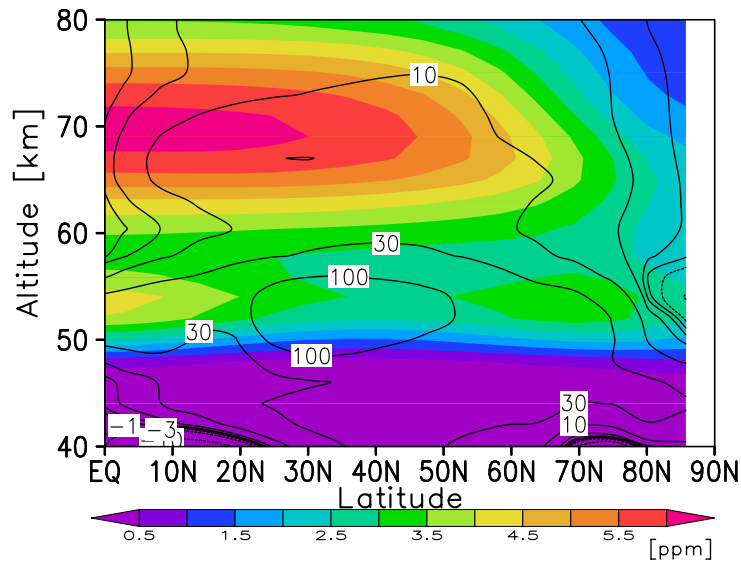


図 7 : WC モデルでの雲の質量混合比量の緯度高度断面図（経度平均、最後の 1 金星日平均）（シェード、ppm）、残差質量流線関数（コンター、 $10^9 \text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ）。

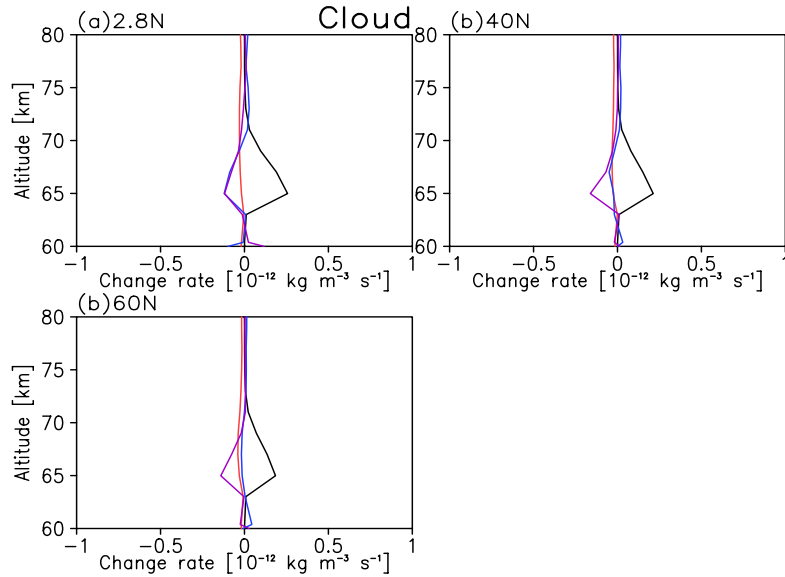


図 8 : 各効果による雲の単位体積あたり質量変化率（60-80km、黒；凝縮/蒸発、赤；沈降、青；移流、紫；鉛直拡散）。

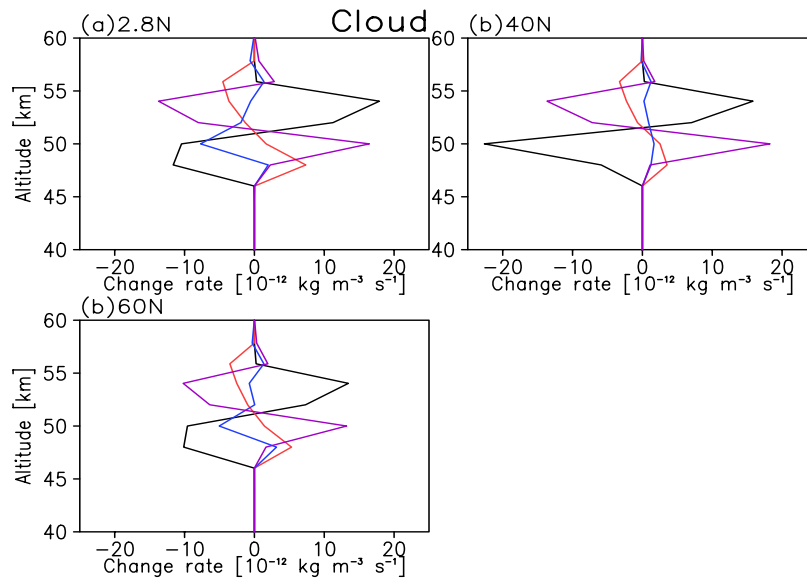


図 9：各効果による雲の単位体積あたり質量変化率（40-60km、黒；凝縮/蒸発、赤；沈降、青；移流、紫；鉛直拡散）。

4.2. 波動の子午面循環への影響

循環を駆動しているメカニズムを調べるために TEM 方程式の運動量の式 (6) を用いた。

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = \bar{v}^* \left[f - \frac{(\bar{u} \cos \phi)_\phi}{a \cos \phi} \right] - \bar{w}^* \bar{u}_z + \frac{\nabla \cdot \mathbf{F}}{a \cos \phi}, \quad (6)$$

図 10 は式(6)、右辺の各項の緯度高度分布である、この図から中低緯度の高度 40 から 70km において第三項と第一、二項が釣り合っていることがわかり、このことから波動が子午面循環を駆動している可能性が示唆された。さらに波動について調べるためにフーリエ変換を行い、それぞれの波動の寄与を求めた。

図 11 は一日潮、半日潮、13 日周期波、10 日周期波の EP フラックスダイバージェンスの緯度高度図である。この図から一日潮が最も大きな寄与を示していることがわかり、一日潮が金星子午面循環、雲の移流に対して重要な役割を果たしていることが示唆された。

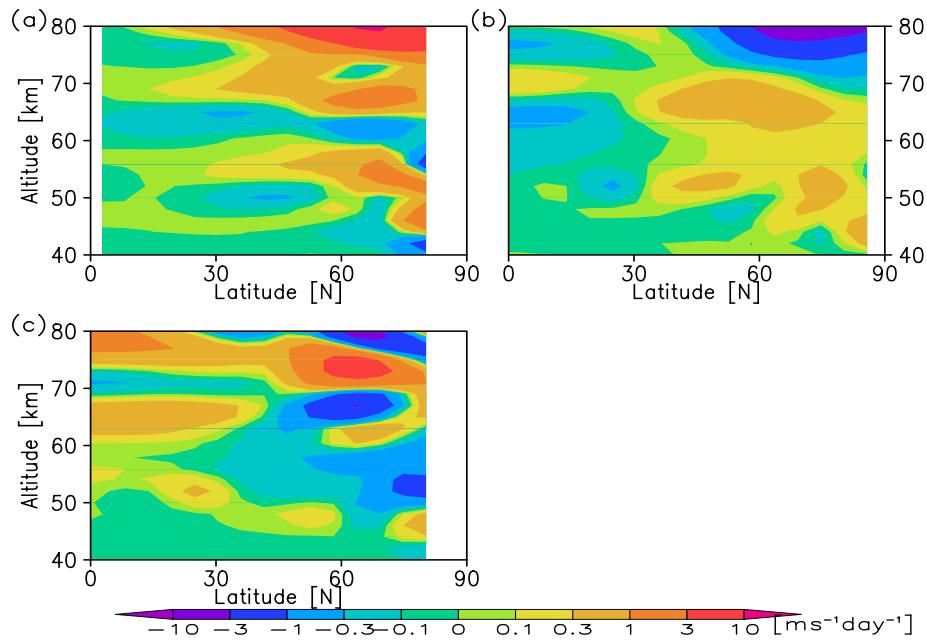


図 10 : (6)式の(a)右辺第一項、(b)第二項、(c)第三項($\text{m s}^{-1} \text{ day}^{-1}$)。

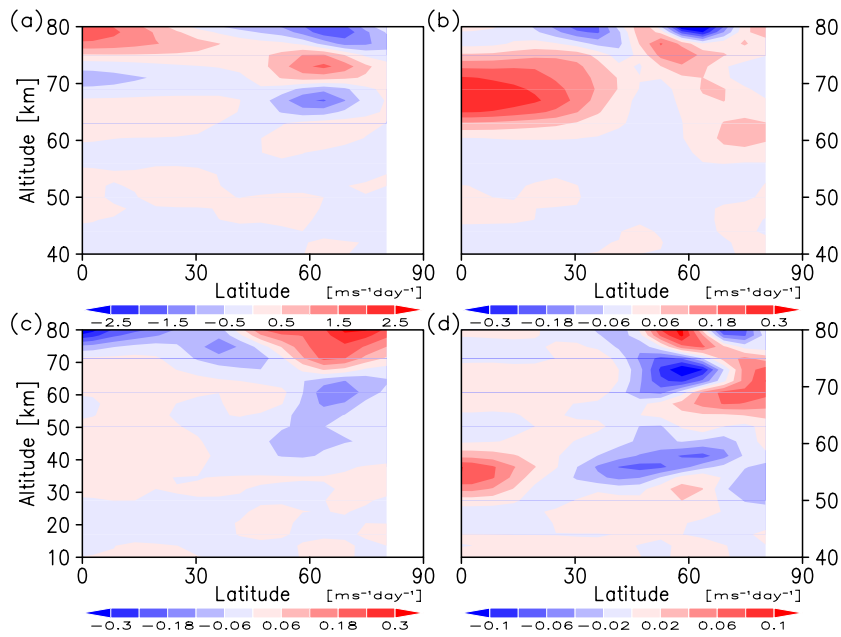


図 11 : EP フラックスダイバージェンス (a)一日潮、(b)半日潮、(c)13 日周期波、(d)10 日周期波。

5. まとめ

我々は VGCM に化学反応を導入し、化学過程の効果について調べた。その結果、化学過程を導入したことにより、中低緯度において我々の VGCM は観測結果を概ね再現し、信頼性があることを示した。次に VGCM を用いて雲の分布及び生成サイクルについて調べた。その結果、先行研究と概ね整合する雲生成サイクルを示し、特に一日潮が金星子午面循環、雲分布に重要な役割を果たしていることを示した。

参考文献

- Haus, R., D. Kappel, and G. Arnold (2014), Atmospheric thermal structure and cloud features in the southern hemisphere of Venus as retrieved from VIRTIS/VEX radiation measurements, *Icarus*, *232*, 232-248.
- Haus, R., and G. Arnold (2010). Radiative transfer in the atmosphere of Venus and application to surface emissivity retrieval from VIRTIS/VEX measurements, *Planetary and Space Science*, *58 (12)*, 1578–1598.
- Ikeda, K. (2011). Development of Radiative Transfer Model for Venus Atmosphere and Simulation of Superrotation Using a General Circulation Model. Ph.D. thesis, Univ. of Tokyo, Tokyo, Japan.
- Imamura, T., and G. L. Hashimoto, (1998), Venus cloud formation in the meridional circulation, *J. Geophys. Res.*, *103*, 31,349-31,366.
- Knollenberg, R. G., and D. M. Hunten (1980), The microphysics of the clouds of Venus: Results of the Pioneer Venus particle size spectrometer experiment, *J. Geophys. Res.*, *85*, 8039-8058.
- Kolodner, M. A., and P. G. Steffes (1998), The microwave absorption and abundance of sulfuric acid vapor in the Venus atmosphere based on new laboratory measurements, *Icarus*, *132*, 151-169.
- Parkinson, C. D., P. Gao, R. Schulte, S. W. Bougher, Y. L. Yung, C. G. Bardeen, V. Wilquet, A. C. Vandaele, A. Mahieux, S. Tellman, and M. Pätzold (2015), Distribution of sulphuric acid aerosols in the clouds and upper haze of Venus using Venus Express VAST and VeRa temperature profiles, *Planetary and Space Science*, *113-114*, 205-218.