

## 特集「惑星大気」

地球型惑星の大気循環に  
大気微量成分の観測から迫る今村 剛<sup>1</sup>

## 1. はじめに

金星も火星も地球と同様に広大な大地と空を従えた表層環境を持つ。この領域は地球において生命圏であるため特に馴染みが深く、まずこの領域を深く理解したいと欲するのは至極当然である。本稿で扱う大気循環は表層環境の一側面である。

大気循環が、光化学工場である上層大気まで様々な原料物質を選び上げ、生成物を全球にばらまく。あとの例からもわかるように、微量気体やエアロソルや雲の分布は大気循環に大きな影響を受ける。その結果、アルベド、温室効果、固体惑星とやりとりされる物質、宇宙空間に散逸していく大気成分など、表層環境全体の長期的な変化を支配する多くの要因が大気循環に左右される。大気循環の探求は気象力学的興味からのみなされるものではない。また、大気循環を含む大気内部の物理を正しく理解できれば、精密な組成データ（同位体比も含む）を得やすい大気という部分を詳しく調べることによって（大気の境界条件を与える）惑星全体の成り立ちに迫る、いうことも可能になる。

大気循環は、まずは雲や塵が描く複雑で繊細かつ壮大な模様として捉えられる。ただ眺めているだけでも楽しいが、ここでは、この混沌とした流れの結果として大気は平均的にはどのように循環しているのだろうかを考える。ここでいう平均的な循環とは、空気塊に印をつけてその動きを長時

間追跡して得られるパターンに相当するラグランジュ的平均循環であり、風速場の単純な平均であるオイラー的平均風速とは一般には異なる（教科書 [1, 2, 3] を参照）。地球、金星、火星の大気循環は安定した大きな東西風成分を持っていて、この東西風成分による循環については限られた風速の測定値からでも推定できる。ところが子午面循環（南北および鉛直成分）は多くの場合様々な大気擾乱の寄与を足し合わせた僅かな残差として現れてくる小さな量であり、そのような循環を風速データから直接求めるには多数の観測点での長期にわたる測定が必要である。地球以外の惑星ではそのようなアプローチはまず不可能だし、地球でさえ成層圏以上ではデータが限られるため容易ではない。しかし手段がないわけではない。平均的な循環を推し量るには、全球的な分布が局所的な化学よりも輸送に大きく支配されるような大気微量成分に注目するという方法がある。本稿では、大気微量成分の観測から地球、金星、火星の大気循環について何がわかるか概観する。

## 2. 地球

地球においては、大気微量成分の観測によって成層圏（高度10-50km）の子午面循環が解明されてきた。成層圏の基本的な風系は夏半球で東風、冬半球で西風、春や秋には両半球とも西風であり、大気は東西方向には比較的よく均されていると考

<sup>1</sup> 宇宙科学研究所

えられている。子午面循環は、まず水蒸気の分布から推定された [3]。成層圏での水蒸気混合比は地上のそれに比べると数百分の一に乾燥しており、露点温度に換算すると対流圏界面付近の気圧条件では190K程度に対応する。このような低温は赤道域の対流圏界面付近にのみ見られることから、1949年にBrewerは成層圏の空気塊は赤道域の圏界面を通った経験があると考えた。対流圏大気の成層圏への侵入口は赤道にあり、ここで水蒸気が凝結して重力沈降して除かれた ("freeze dry"と称される) 乾燥した気塊が成層圏の中を中高緯度まで輸送されるというわけである。

オゾンの分布も同様の子午面循環を示唆する [4]。高度25-40kmの中・上部成層圏ではオゾン混合比は低緯度から極に向かって緯度とともに小さくなる。この高度領域ではオゾンが光化学反応で壊れる時定数は数日程度と短く、オゾン密度は主に光化学反応によってコントロールされることになるので、このような分布は太陽紫外線量が多い低緯度でオゾンの生成量が大いいためと考えられる。ところが高度10-20kmの下部成層圏では事情が異なり、低緯度よりも高緯度でオゾン混合比が大きい。この高度領域ではオゾンが光化学反応で壊れる時定数が1ヶ月から数ヶ月と長いので、オゾン分布は大気運動による輸送に大きく支配される。このことから1956年にDobsonは、低緯度の比較的高度の高いところで作られたオゾンが高緯度の下部成層圏に運ばれていると考えた。

赤道域から両半球に成層圏内を循環の道筋が伸びていく様子は、メタンや一酸化二窒素といった対流圏に起源を持つ大気成分の分布から読みとれる [6]。これらの観測によって子午面循環の構造の季節変化も明らかになった。エアロソルの分布からは、循環の構造がQBO (quasi-biennial oscillation: 赤道域の下部成層圏の風系が約2年の周期で変化する) に伴って変化する様子も見い出された [7]。

最近、赤道域で対流圏界面から中部成層圏に気塊が上昇していく様子が衛星からの水蒸気観測によって鮮やかに捉えられた [8]。赤道域の下部成層圏での水蒸気量の時間-高度断面図を見ると、対流圏界面付近の水蒸気変動のシグナルが上方に約0.3mm/sの速さで伝わり、2年近くかかって高度25-30kmまで到達している。このことは、赤道域の圏界面を通して成層圏に流入した大気の子午面循環で上方に運ばれていることを示唆する。発見者らはこの現象を"大気のテープレコーダー"と呼ぶ。レコードヘッドにあたる圏界面において水蒸気濃度を"録音"された気塊が子午面循環に伴ってテープのように送り出されていくというイメージである。この観測によって季節やQBOに伴う上昇速度の変動も明らかになった。

対流圏でのオゾンや水蒸気の観測からは、中高緯度対流圏界面付近のジェット気流の南北蛇行に伴って気圧の谷の近くで成層圏起源の気塊が中緯度の上部対流圏に沈降する、tropopause folding (圏界面の折り重なり) と呼ばれる現象がしばしば見つかる [4, 9]。成層圏起源の気塊はオゾン濃度が高く乾燥しているという特徴があるのでそれと知れる。この現象は、赤道域での上昇で始まった成層圏循環の終着点のひとつとして、また対流圏オゾンの起源の一つとして、重要と考えられている。

以上のような循環の結果、成層圏の大気は約2年で入れ替わる。大気を持つ絶対角運動量は低緯度ほど大きいので、このような循環が存在するという事は、低緯度から流れ込む角運動量が何らかのメカニズムで散逸させられているということである。プラネタリー波や大気重力波などの大気波動がこの角運動量散逸を担うと考えられていて、成層圏循環は"波が駆動する循環"などと称される (図1)。

### 3. 金星

金星は主成分が二酸化炭素の分厚い大気で覆われており、地表面付近では気圧は92bar、気温は735Kに達する。高温高圧下での熱化学反応が卓越するであろう下層大気から光化学反応が重要な上層大気までが連続的につながっている。高度45-70kmに硫酸エアロソルの雲層があり、雲頂付近では数10m/sの東風が吹いている（赤道域では約4日で惑星を一周する、いわゆる4日循環）。風速は雲頂付近で最大であり、地表面付近では数m/s以下である。自転軸の傾きも軌道の離心率も小さいので季節変動は小さいと思われる。

探査の初期から知られている子午面循環は、紫外域でのアルベドの模様（二酸化硫黄などの紫外吸収物質の濃度むらによるとされる）の動きから推定された、雲頂高度65-70kmにおける数m/s程度の極向き循環である [12]。近年、ガリレオ探査機がフライバイの際に近赤外域の撮像で雲層下部の高度50km付近での雲の動きを観察し、この高度においても同様の極向き循環を確認した [13]。このことは、雲層付近の極向き循環を補償する赤道

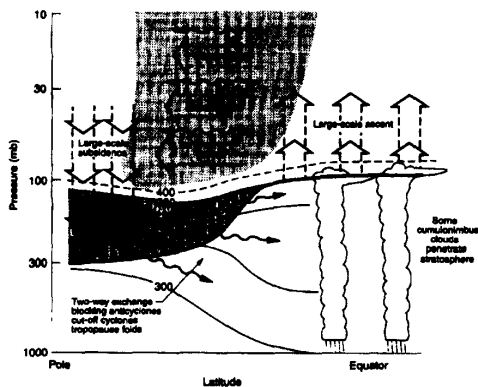


図1. 成層圏-対流圏間の物質交換の力学的側面。太線は対流圏界面、細線は等温位面（単位はKelvin）を示す。太い破線矢印は大気波動が駆動する残差平均子午面循環を表す。（文献 [11] より）

向き循環は雲層よりも下に存在することを意味する。ガリレオ探査機はさらに近赤外域の分光スペクトルから、雲の下の高度30-50kmにおいて一酸化炭素の混合比が高緯度ほど大きいことも見出した [14]。これは、雲層より上の上層大気で二酸化炭素が光解離してできた一酸化炭素が高緯度において子午面循環によって雲層の下に運ばれるためと解釈されている。

雲粒（硫酸エアロソル）の材料となる硫酸蒸気の分布がPioneer Venusの電磁波掩蔽観測によって調べられていて、それによると硫酸蒸気は高度35-50kmに存在し、その濃度は高緯度に比べて低緯度で著しく高くなっている [15]。硫酸蒸気層の高度範囲については、上方では凝結によって、下方では熱分解による消滅で制限されていると考えられている。一方、緯度分布についてはまだ一般に受け入れられている説明がないが、雲層直下に赤道向き循環が存在するという仮定のもとに、東京大学のはしもとじょーじと筆者が共同で以下のような金星大気中の硫酸の循環についての仮説を提出している（図2, 3, 4）。まず、低緯度の雲頂付近で光化学反応によって作られた硫酸蒸気は凝結し

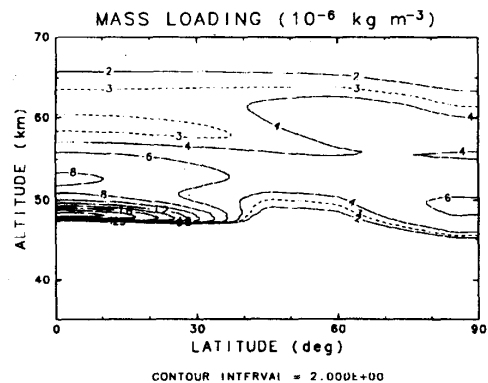


図2. 雲粒（硫酸エアロソル）の質量密度分布の計算結果。高度47-48kmに雲層の底がある。低緯度と高緯度において特に厚い雲が生じている。前者は子午面循環の上昇流で持ち上げられた硫酸蒸気が凝結するため、後者は雲頂付近で光化学的に作られた雲粒が極向きの子午面循環によって高緯度に運ばれるためである。（はしもとじょーじ氏との共同研究 [16] より）

て雲粒となる。これらの粒子は小さいため重力によって沈降するよりも早く子午面循環によって高緯度に運ばれていく。高緯度で子午面循環の方向が下向きに変わると同時に雲粒も下向きに運ばれ、高緯度に鉛直方向に比較的一様な厚い雲を形成する。雲粒は高度47km付近に達すると温度の上昇のために蒸発する。ここで発生した硫酸蒸気はさらに子午面循環に乗って運ばれていく。雲層より下では高温のため硫酸蒸気の一部は熱分解するが、分解しなかった硫酸蒸気は赤道向きの子午面循環によって低緯度に運ばれる。雲層の下を低緯度まで輸送された硫酸蒸気は子午面循環の上昇流によって持ち上げられて凝結する。ここで凝結する雲粒は比較的粒径が大きく、重力によって効果的に沈降するため、凝結が起こると凝結していなかった場合に比べて硫酸の上向き輸送量が減少する。その結果、低緯度の雲底付近では硫酸の子午面循環が滞り、硫酸蒸気の濃集が起こる。この仮説では硫酸蒸気の分布だけでなく、雲層の厚さの緯度依存性についても中緯度で相対的に雲が薄くなるという観測 [17] と整合的な雲の分布が得られることが数値実験によって確認されている (図

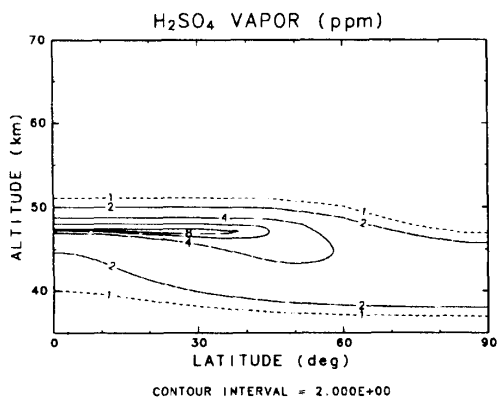


図3. 硫酸蒸気分布の計算結果。低緯度の雲底付近に濃集している。(はしもとじょーじ氏との共同研究 [16] より)

2)。これらのことから、我々が仮定したような雲層直下の赤道向き循環の存在はもっともらしいと言えるだろう。

地表面近くの大気循環は謎に包まれている。地表面付近の風向は赤道向きであるらしいことがマゼラン探査機が観測した地表面の風痕から示唆されているが [18]、確かな証拠とは言い難い。上層の大気循環との関わりや循環速度などは一切わからない。Pioneer Venusの観測によると雲より上での二酸化硫黄の濃度が数年スケールで大きく変化しており、これを火山活動と結び付ける意見がある [19]。もしそうであればこの観測によって地表面付近と上層大気とを結ぶ循環の時定数について何らかの制約を課せられるが、そもそも雲の上の二酸化硫黄濃度が雲の下に比べて異様に低い理由がわかっておらず、今のところ解釈に困る。下層から上層まで循環がつながっていれば下降流の領域は上層大気の組成を反映するだろうから、下層大気組成の全球的な分布がわかれば循環を知る手がかりになる。数年前に近赤外域の分光スペクトルから下層大気中の水蒸気、二酸化硫黄、硫化カルボニル、一酸化炭素、メタン、塩化水素、フ

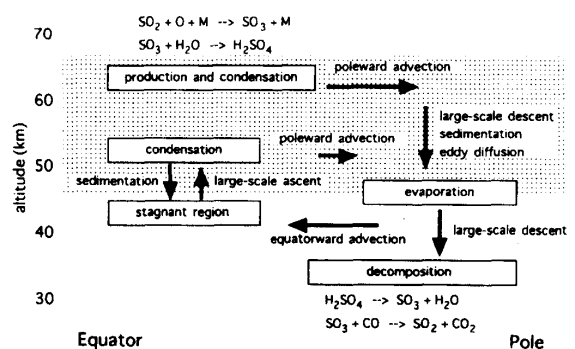


図4. 金星大気における硫酸循環の新しい描像。影をつけた部分は雲層を表す。雲頂付近で光化学的に作られた硫酸は子午面循環によって高緯度から雲層の下に運ばれる。低緯度の雲底近くでは子午面循環の上昇流に抗して硫酸液滴が重力沈降するため、そこで硫酸の循環が滞り、硫酸蒸気が濃集する。(はしもとじょーじ氏との共同研究 [16] より)

ッ化水素などの濃度がわかることが見い出され、精力的に地球から観測が行なわれているが [20]、精度が悪く水平分布もよくわからない。このような分光観測を金星周回軌道で行えば、表層環境化学のみならず大気循環についても大きく理解が進むだろう。

## 4. 火星

かつては厚い大気のもとで表層に大量の液体の水が存在したと考えられている火星だが、二酸化炭素を主成分とする現在の火星大気は薄く、地表気圧は0.6mbar程度しかない。大気圧は1火星年(地球での約2年)の間に25%程度変動するが、これは二酸化炭素が冬極において凝結・蒸発を繰り返すためと考えられている。よって厳密には火星の大気循環は大気の中だけでは閉じない。平均的な風系は地球成層圏と同様に概ね夏半球で東風、冬半球で西風、春と秋には両半球とも西風と考えられている。

子午面循環は水蒸気量の変動から示唆されている [21]。Viking探査機の観測によると、北半球で夏になって(極冠や地中からの蒸発で)水蒸気量が増えた直後に、南半球でも水蒸気量が増え始める。この時期にはまだ南半球には水蒸気の供給源は無いと思われるので、この時期の南半球での水蒸気量の増加は北半球から運び込まれた結果と考えられる。数値シミュレーションでは夏半球から冬半球へ赤道を越える子午面循環が存在すると予想されていて [22]、水蒸気量の変動はこの予想を支持するように思われる。

数ミクロン以下の微小なダストが大気中に大量に巻き上げられる"ダストストーム"がしばしば観測されていて [23, 24]、大気中に浮遊するそのようなダストが火星の気象に大きな影響を及ぼしている。ほとんどのダストストームは局地的なものだ

が、全球を覆いつくすような"大ダストストーム"が南半球の夏に1-2回起こる。大ダストストームはまず夏の南半球で始まり、やがて全球規模のストームに発展する。大ダストストームが冬の北半球に広がる過程では南半球で巻き上げられたダストが北半球に流れ込むことが重要と考えられていて、このダストの流入も上述の赤道越えの子午面循環によるのかもしれない。

北半球の春の終わり頃に氷晶雲が南緯10°から北緯30°の低緯度帯をベルト状に取り巻いているのがハッブル望遠鏡によって観測された [25]。このような雲は上昇流で上空に運ばれた水蒸気が凝結する結果として生じると考えるのが自然だろう。数値シミュレーションではこの季節には子午面循環の上昇流が北半球の亜熱帯に存在すると予想されていて [22]、観測された雲はこのような大規模な上昇流によって作られたと考えてよさそうである。

宇宙科学研究所の火星探査機Planet-Bが1998年7月に打ち上げられる。Planet-Bに搭載される可視光カメラは、地形だけではなく大気中のダストや雲も観測する予定である。Planet-Bは主に低緯度を周回するので、低緯度帯での氷晶雲やダストの子午面分布を大気縁方向を見て観測することにより、子午面循環の上昇流の構造や季節変動を明らかにすることが期待される。

Planet-Bの主な科学目的は火星大気と太陽風の相互作用を解明することであり、とくに火星大気が太陽風に剥ぎとられていくメカニズムを明らかにすることが期待されている。Phobos探査機の1989年の観測によると、火星の夜側で酸素イオンが宇宙空間に大量に流れ出しており、その流出量は現在の火星大気中の二酸化炭素と酸素分子に含まれる全酸素原子を約1億年で枯渇させるほどであるという [26]。このような時間スケールでは火星大気循環は宇宙空間に向かって開いているといえるかもしれない。

火星では、下層大気まで達する紫外光のもとで  
 水酸ラジカルや過酸化水素などの酸化水素類を中  
 心とした活発な光化学反応が進行すると思われ、  
 光化学的に生成したオキシダントが土壤に大きな  
 影響を与えることも予想されているが、微量成分  
 の観測はほとんど行なわれていない [27]。火星周  
 回軌道上からミリ波領域で大気の縁方向を見る分  
 光観測を行えば、ダストにも邪魔されず、火星  
 大気中で重要と思われる化学成分のほとんどを高  
 空間分解能で全球的に観測できるだろう。それら  
 の微量気体のデータからは、表層環境化学の理解  
 が進むのはもちろん、先に紹介した地球の成層圏  
 循環のように、大気循環の構造が様々な時間スケ  
 ールで変動するさまが手に取るように見えてくる  
 に違いない。

## 謝辞

東京大学の藤原正智氏、はしもとじょーじ氏、関  
 華奈子氏には、原稿を改訂する上で助言をいただき  
 ました。記して感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Andrews, D. G., Holton, J. R., and Loey, C. B., 1987: *Middle Atmosphere Dynamics*, 150 pp., Academic, San Diego, Calif.
- [2] 松野太郎, 島崎達夫, 1981: 「成層圏と中間圏の大気」(大気科学講座 3), 東京大学出版会.
- [3] 木田秀次, 1983: 「高層の大気」(気象学のプロムナード16), 東京堂出版.
- [4] 小川利紘, 1991: 「大気の物理化学」(第2期気象学のプロムナード12), 東京堂出版.
- [5] McPeters, R. D., Heath, D. F., and Bhartia, P. K., 1984: Average ozone profiles for 1979 from the NIMBUS 7 SBUV instrument. *J. Geophys. Res.* **89**, 5199-5214.
- [6] Jones, R. L., and Pyle, J. A., 1984: Observations of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O by the NIMBUS 7 SAMS: a comparizon with in situ data and two-dimensional numerical model calculations. *J. Geophys. Res.* **89**, 5263-5279.
- [7] Trepte, C. R., and Hitchman, M. H., 1992: Tropical stratospheric circulation deduced from satellite aerosol data. *Nature* **355**, 626-628.
- [8] Mote, P. W., et al., 1996: An atmospheric tape recorder: the imprint of tropical tropopause temperatures on stratospheric water vapor. *J. Geophys. Res.* **101**, 3989-4006, 1996.
- [9] Johnson, W. B., and Viezee, W., 1981: Stratospheric ozone in the lower troposphere - 1. presentation and interpretation of aircraft measurements. *Atmos. Environ.* **15**, 1309-1323.
- [10] Ko, M. K. W., and Tung, K. K., 1985: A zonal mean model of stratospheric tracer transport in isentropic coordinates: numerical simulations for nitrous oxide and nitric acid. *J. Geophys. Res.* **90**, 2313-2329.
- [11] Holton, J. R., Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Douglass, A. R., Rood, R. B., and Pfister, L., 1995: Stratosphere-troposphere exchange. *Rev. Geophys.* **33**, 403-439.
- [12] Rossow, W. B., Del Genio, A. D., and Eichler, T., 1990: Cloud-tracked winds from Pioneer Venus OCPP images. *J. Atmos. Sci.* **47**, 2053-2084.
- [13] Carlson, R. W., et al., 1991: Galileo infrared

- imaging spectroscopy measurements at Venus. *Science* **253**, 1541-1548.
- [14] Collard, A. D., et al., 1993: Latitudinal distributions of carbon monoxide in the deep atmosphere of Venus. *Planet. Space Sci.* **41**, 487-494.
- [15] Jenkins, J. M., and Steffes, P. G., 1991: Results for 13-cm absorptivity and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> abundance profiles from the season 10 (1986) Pioneer Venus orbiter radio occultation experiment. *Icarus* **90**, 129-138.
- [16] Imamura, T., and Hashimoto, G. L., 1998: Venus cloud formation in the meridional circulation. *J. Geophys. Res.*, 投稿中.
- [17] Crisp, D., et al., 1991: Ground-based near-infrared imaging observations of Venus during the Galileo encounter. *Science* **253**, 1538-1541.
- [18] Greeley, R., Bender, K., and Thomas, P. E., 1995: Wind-related features and processes on Venus: summary of Magellan results. *Icarus* **115**, 399-420.
- [19] Esposito, L. W., Sulfur dioxide: episodic injection shows evidence for active Venus volcanism. *Science* **223**, 1072-1074.
- [20] Pollack, J. B., et al., 1993: Near-infrared light from Venus' nightside: a spectroscopic analysis. *Icarus* **103**, 1-42.
- [21] Jakosky, B. M., and Haberle, R. M., 1992: The seasonal behavior of water on Mars. in *Mars*, edited by H. Kieffer et al., pp. 969-1016, Univ. of Ariz. Press, Tucson.
- [22] Haberle, R. M., et al., 1993: Mars atmospheric dynamics as simulated by the NASA Ames general circulation model 1. the zonal-mean circulation. *J. Geophys. Res.* **98**, 3093-3123.
- [23] Kahn, R. A., Martin, T. Z., Zurek, R. W., and Lee, S. W., 1992: The Martian dust cycle. in *Mars*, edited by H. Kieffer et al., pp. 969-1016, Univ. of Ariz. Press, Tucson.
- [24] 森山茂, 1993: 「惑星の気象」(清水幹夫編「惑星の科学」第2章), 朝倉書店.
- [25] James, P. B., et al., 1996: Global imaging of Mars by Hubble space telescope during the 1995 opposition. *J. Geophys. Res.* **101**, 18883-18890.
- [26] Lundin, R., et al., 1990: ASPERA/PHOBOS measurements of the ion outflow from the Martian ionosphere. *Geophys. Res. Lett.* **17**, 873-876.
- [27] Barth, C. A., et al., 1992: Aeronomy of the current Martian atmosphere. in *Mars*, edited by H. Kieffer et al., pp. 1054-1089, Univ. of Ariz. Press, Tucson.