

特集「惑星大気」

金星の大気・地殻の化学相互作用

はしもとじょーじ¹，阿部 豊¹

1. 大気と地殻の化学相互作用

地球ともっとも近い軌道にある金星は、その質量も地球とほぼ同程度であることから地球の双子とみられることが多い。しかしVeneraやPioneer Venusといった探査機によって観測された金星の表層環境は、地球のそれとは大きく違ったものであった。表面に大量の液相の水すなわち海洋が存在する地球に対して、金星の地表は735Kにも達する高温で液相の水は存在しない。また大気組成・大気量も、地球が窒素・酸素を主成分とする1barの大気であるのに対して、金星は二酸化炭素が主成分の92barsの厚い大気となっている。このような地球とまったく違った表層環境がどのようにつくられたのかについては、金星表層環境研究の中心課題となっている。

金星表層環境に関してはさまざまな研究がなされてきたが、もっとも立ち遅れていたのは雲に関する研究であった。金星の雲は惑星の全面を覆い温室効果とアルベドを介して表層環境に大きな影響を与える。そのため金星表層環境の進化を考える場合には、大気の物理・化学条件の変化に対して雲がどのように振る舞うかを知る必要がある。特に金星の場合には大気組成が変化した場合の雲の応答が重要であると考えられる。これは金星の雲は光化学反応によって生成した硫酸で形成されているため、雲の生成と大気組成が強く関係しているからである。最近になって雲の振る舞いを記

述できるモデルが構築され [1, 2]、金星表層環境の進化はようやく定量的な議論ができる段階となった。

金星においては、大気組成をコントロールするメカニズムとして大気と地殻が直接化学的に反応する過程が重要であると考えられている [3]。これは地球と違って生物活動も海洋も存在しない金星では、高温・高圧の金星地表面ですすむ化学反応が大気組成のコントロールに大きな影響を持つと考えられるためである。大気と地殻の化学反応によって大気組成がコントロールされる場合、大気組成は地表温度によって変化する。大気組成の変化は温室効果や雲を通じて地表温度に影響を与えることから、大気組成と大気温度の間でフィードバックが働く。この大気組成と大気温度の間で働くフィードバックは惑星表層環境をコントロールするメカニズムとして重要であることが、最近の惑星表層環境に関する研究によって明らかにされてきている [4, 5]。大気温度の変化に対して大気組成がどのように変化するかを明らかにすることは、惑星表層環境を考える上で重要である。

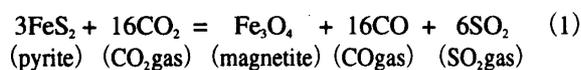
大気と地殻の化学相互作用を考えると問題となるのは、金星の地表物質がわからないことである。金星表面については探査機が降りた数点でXRF（蛍光エックス線分析法）による測定データがあるだけで、どのような鉱物が存在しているかについての観測はない。地表物質がわからなければどのような反応が大気と地殻の間でおこるのか

¹ 東京大学大学院理学系研究科地球惑星物理学専攻

わからないため、大気と地殻の化学相互作用を考
えるときには地表物質を仮定することになる。地
表物質に仮定する鉱物の組み合わせによって得ら
れる結論が異なる場合もあることから、金星地表
にどのような物質が存在しているのかについてさま
ざまな議論がなされている [6, 7]。本稿では対立
すると考えられているふたつの立場について検討
する。ひとつは金星表層にパイライト (FeS₂) が
存在するとする立場で [8]、筆者らはこれを
Pyrite-Magnetite bufferと呼んでいる。もうひとつは
1950年代からある考え方でCarbonate bufferと呼ば
れるものである。こちらの立場では金星表層に炭
酸塩 (CaCO₃) が存在することを仮定する。最近
の研究成果 [4, 9] を考慮して、この2つの立場を
比較・検討したいと思う。

2. Pyrite-Magnetite buffer

Pyrite-Magnetite buffer は、



の反応で大気中のSO₂量がコントロールされるとす
る考え方である。この化学反応は、金星の高い山
の上でレーダー反射率が大きくなることを説明す
る際にKloseらが用いたものでもある [8]。熱力学
データと観測された金星大気中の温度およびSO₂、
CO濃度を用いて、pyriteとmagnetiteがそれぞれ安定
に存在できる領域を計算した結果が図1である。こ
れによると高度約2kmよりも高地ではpyriteが、低
地ではmagnetiteが安定に存在する。Kloseらは
pyriteとmagnetiteの存在が切り替わる高度とレー
ダー反射率の変化する高度がほぼ一致することから、
金星の高い山の上の大きいレーダー反射率はpyrite
によって説明されるのではないかと考えた。レー
ダー反射率の変化がpyriteによるものか否かについ

ては議論があるが [10]、たとえそれがpyriteによ
らなかったとしても現在の金星大気中のSO₂量 (約
150ppmv) が (1) の化学平衡のSO₂量にほぼ等し
いことにはかわりはない。いずれにしろ金星大気中
のSO₂量は金星表層のpyriteとmagnetiteによる (1)
のバッファー反応によってコントロールされてい
ると考えることで、うまく説明される。

先に述べたように、このPyrite-Magnetite buffer
は地表温度=大気組成=雲アルベドの結合問題の
一部として捉える必要がある (図2)。これは金星
の硫酸の雲がSO₂を材料にした光化学反応によっ
て生成しているためである。SO₂は金星大気の微量成

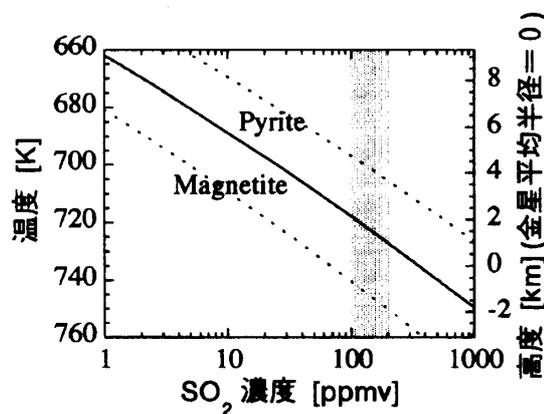


図1 温度とSO₂濃度の関係。縦軸には温度に対応する場所
の高度も示してある。実線は (1) の反応が化学平衡にあ
るときの温度とSO₂濃度の関係。破線は熱力学データの不確定
性を考慮した場合の幅を表す。金星で観測されているSO₂濃
度はハッチで示してある。CO濃度は11.5ppmvとした。

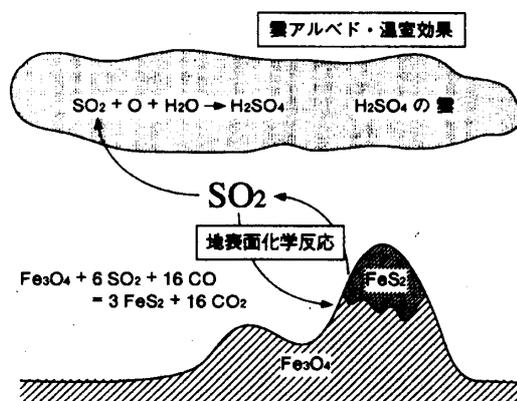


図2 金星におけるSO₂を介した地表温度=大気組成=雲ア
ルベドの結合問題の概念図。

分にすぎないが、雲をとおして金星の地表温度に大きな影響を与えることができる。特に金星では雲が惑星の全面を覆い惑星アルベドを支配しているためこの効果は大きいと予想される。また地表温度の変化は化学平衡にある大気中のSO₂量を変化させることから、地表温度と大気中のSO₂量のあいだにフィードバックがはたらくことになる。

このSO₂の地表温度=大気組成=雲アルベド結合問題は化学反応モデル・雲モデル・大気構造モデルを結合した金星気候モデルを用いて調べられ、地表温度を安定化する強いフィードバック・メカニズムChemical-Albedo Feedbackが存在することがみつまっている [4]。図3と4はそれぞれ太陽光度と大気量の変化に対する地表温度の変化を表したもののだが、図をみてわかるように雲を介してはたらくフィードバックによって地表温度の変化は小さく安定化されている。安定化のメカニズムは、地表温度の上昇に対しては大気中のSO₂量が増加、硫酸生成量が増加して雲アルベドが大きくなることで地表温度の上昇をおさえる。また地表温度の低下にたいしても同様で大気中のSO₂量の減少によって雲アルベドが小さくなり地表温度の変化を小さくする。このフィードバックにかかる典型的な時間スケールはPyrite-Magnetite bufferの化学反応

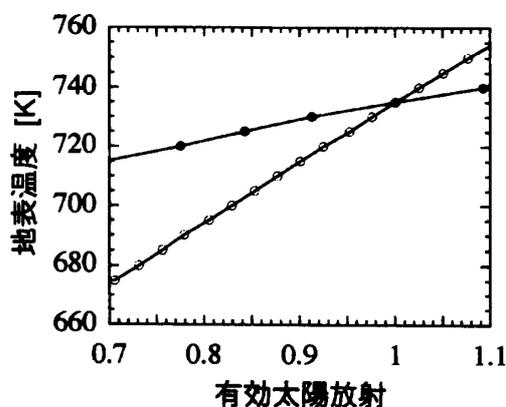
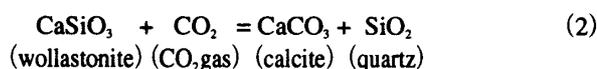


図3 太陽放射定数の変化に対する地表温度の変化。横軸の有効太陽放射は現在の太陽放射定数で規格化した太陽放射の強さを表す。●はChemical-Albedo Feedbackが働いた場合、○は働かなかった場合を表す。

の時間スケールで規定され、実験的に求められた(1)の化学反応の時間スケール [11] から数百万年程度と推定される。したがって金星地表温度は数百万年より長い時間スケールでは一定に保たれてきたと考えられる。このような強いフィードバックが存在することは、金星表層環境の進化を考える上でも重要になると考えられる。

3. Carbonate buffer

2で述べたPyrite-Magnetite bufferは大気中の微量成分であるSO₂量をコントロールするメカニズムであったが、Carbonate bufferは金星大気の主成分であるCO₂すなわち大気量をコントロールすると考えられているメカニズムである。観測される金星表層の温度・圧力条件 (735K, 92bars) は、地表面における炭酸塩・シリケートとCO₂ガスとの反応



が化学平衡にあるときのそれに非常に近い (図5)。このことは金星の地表に炭酸塩が存在し、金星大気量が炭酸塩によってバッファーされていると考えることの強い根拠であった [3]。

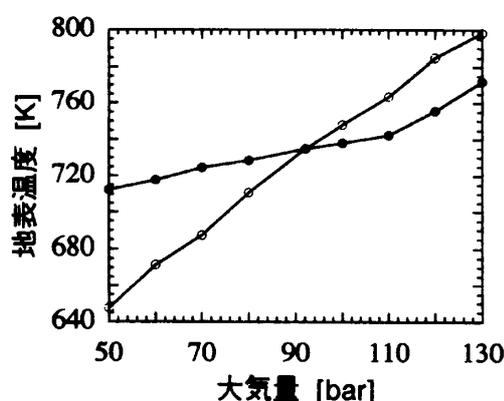
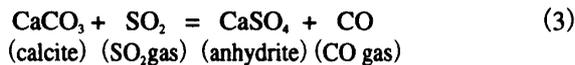


図4 大気量の変化に対する地表温度の変化。●はChemical-Albedo Feedbackが働いた場合、○は働かなかった場合を表す。

しかしCarbonate bufferについてはいくつかの問題が指摘されている。まずひとつめは観測される金星大気中のSO₂量が過剰であるという問題である。Carbonate bufferがはたらいっている場合には地表にcalciteが存在し、calciteとSO₂が反応することになる。



このcalciteとSO₂が反応してanhydriteを生成する反応が化学平衡になったときのSO₂濃度を熱力学データと現在の金星大気で観測されるCO濃度(11.5ppmv)から計算すると、それは現在の金星大気のSO₂濃度の約100分の1程度になる[3]。したがって金星表層の炭酸塩は現在の金星大気中のSO₂量に対して不安定であり、長い時間の間には炭酸塩はSO₂と反応して分解することになる。このことは大気と反応が可能な金星表層に炭酸塩が存在しないことを意味するとも考えられるが、現在の金星大気のSO₂量は火山噴火による供給で一時的に過剰になった結果として説明できるのかもしれない[12]。

もうひとつの問題はCarbonate bufferがはたらくと(2)の化学反応が暴走的にすすんで大気量が大き

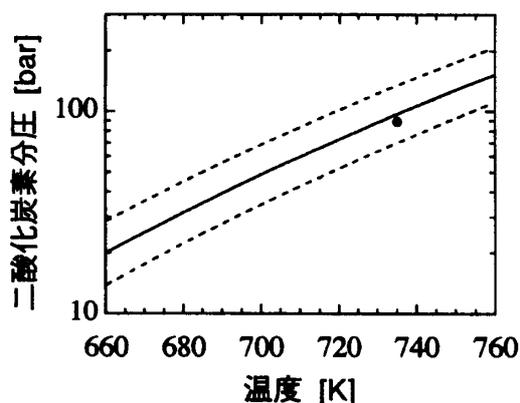


図5. 温度とCO₂分圧の関係。実線は(2)の反応が化学平衡にあるときの温度とCO₂分圧の関係。破線は熱力学データの不確実性を考慮した場合の幅を表す。●は現在の金星地表での温度とCO₂分圧を表す。

きく変化する、気候状態の不安定が発生する可能性があることである[9, 13]。不安定は、大気中のCO₂と地表面のシリケートが反応することで大気中のCO₂が減少すると、その温室効果がさがることによって地表面の温度が低下し、さらに大気中のCO₂が地表面に固定される反応がすすむ、というようにして発生する。これは化学反応による大気量のコントロールと、大気の温室効果による地表温度のコントロールが結合した結果あらわれた不安定である。この不安定は発生条件として温室効果の他に惑星表面のでこぼこが重要であることから[9]、Topographic-Greenhouse Instabilityと名付けられている。

Topographic-Greenhouse Instabilityの研究における重要な仮定は、アルベドは変化せず一定と仮定したことである。仮にアルベドがCO₂の温室効果を相殺するように変化すれば、不安定を発生させないことも可能となる。実際、Pyrite-Magnetite bufferについてもCarbonate bufferと同様にSO₂の温室効果によって不安定が発生する可能性があるにもかかわらず安定となっているのは、Chemical-Albedo Feedbackによるアルベドの変化が温室効果を相殺して不安定の発生を抑えているためである。したがってCarbonate bufferと同時にPyrite-Magnetite bufferがはたらきChemical-Albedo Feedbackによってアルベドがコントロールされるならば、Topographic-Greenhouse Instabilityによる不安定は発生しないかもしれない。

しかしCarbonate bufferとPyrite-Magnetite bufferが同時にはたらくとするのは難しい。仮にCarbonate bufferとPyrite-Magnetite bufferが同時にはたらいっている場合には先に述べたように大気中のSO₂は炭酸塩と反応してanhydriteを生成することによって大気から失われる。また同時にSO₂はpyriteが分解することによって大気へ放出される。このSO₂の固定と放出は炭酸塩とpyriteのどちらかがなくなるまで

続く。anhydriteの生成とpyriteの分解はともに地質学的な時間スケールに比べて短い時間ですむことが実験的に確認されていることから [11, 12], Carbonate bufferとPyrite-Magnetite bufferが地質学的な時間スケールで同時にはたらくためには、微妙なバランスを保ってSO₂と炭酸塩が地表に供給されなければならない。SO₂供給の微妙なバランスが地質学的な時間スケールにわたって保たれるとは考えにくいことから、Carbonate bufferとPyrite-Magnetite bufferが同時にはたらくことはないように思われる。したがってCarbonate bufferを安定にはたらかせるためにはChemical-Albedo Feedbackとは違うAlbedo feedbackメカニズムを考える必要がある。ちなみに大気組成が変化しない場合 Hashimoto and Abe (1996) の雲モデル [1] では、大気温度の変化は不安定を助長するように雲を変化させる。これは大気温度が低下する場合には凝結がおこりやすくなって雲が厚くなることでアルベドが大きくなり、また逆に大気温度が上昇する場合には凝結がおこりにくくなって雲が薄くなることでアルベドが小さくなるためである。現在に

おいてはCarbonate bufferがはたらいっている場合に発生するTopographic-Greenhouse Instabilityによる不安定を防ぐメカニズムはみつかっていない。

4. まとめ

Pyrite-Magnetite bufferとCarbonate bufferについてまとめたものが表1である。Pyrite-Magnetite bufferはpyrite, magnetiteといった地球上ではありふれた鉱物によるバッファ反応で大気中のSO₂量をよく説明することができる。またChemical-Albedo Feedbackがはたらくため金星表層環境は安定になる。高地におけるpyriteの存在もレーダー反射率の観測によって支持されるのかもしれない。ただし大気量については何も説明しない。大気量は従来Carbonate bufferによって説明されると考えられてきたが、Carbonate bufferは不安定を発生させるため安定化のための別のメカニズムを必要とする。また金星大気中のSO₂の量は金星表層の炭酸塩と化学平衡にある場合に比べてかなり過剰であるので、大気中の過剰なSO₂を維持する過程も必要となる。

表1 Pyrite-Magnetite buffer と Carbonate buffer の比較。

	Pyrite-Magnetite buffer	Carbonate buffer
地表の鉱物	Pyrite, Magnetite	Calcite, Wollastonite, Quartz
大気量	—	△*
地表温度	—	—
SO ₂ 濃度	○	×
レーダー反射率	× or △**	—
気候状態の安定性	安定	不安定***

○ 説明される

△ 条件付きで説明される

— 説明されない

× 説明が難しいか矛盾する観測がある

* Topographic-Greenhouse Instability の発生を防ぐ、地表温度を安定化するメカニズムが必要。

** 大量に FeS₂ があると×になるかもしれない。逆に少量の FeS₂ ではレーダー反射率を説明するかもしれない。説明できないのなら=。

*** 現在のところ Carbonate buffer によって発生する不安定を安定化するメカニズムは見つかっていない。

現段階においては金星表面の鉱物組成が観測されていないため、どちらのバッファー反応も排除することはできないが、どちらのバッファー反応がはたらいっているかによって金星表層環境の描像は大きく違ったものになってくる。Pyrite-Magnetite bufferがはたらいっている場合には Chemical-Albedo Feedbackによって地表温度が一定に保たれるのに対し、Carbonate bufferでは大気量が一定に保たれる。また金星表層環境の進化がたどる道筋も、働いているバッファー反応によって違ったものになることが予想される。金星表層ではたらくバッファー反応を特定するような金星表層の物理・化学状態を測定する探査が望まれるところである。

参考文献

- [1] Hashimoto, G.L. and Y. Abe, 1996: Albedo on Venus: I Cloud Model. *Proc. 29th ISAS Lunar Planet. Symp.*, 87-90.
- [2] Hashimoto, G.L. and Y. Abe, 1996: Albedo on Venus: II Climate Evolution. *Proc. 29th ISAS Lunar Planet. Symp.*, 91-94.
- [3] Fegley, B., Jr. and A.H. Treiman, 1992: Chemistry of Atmosphere-Surface Interactions on Venus and Mars, in *Venus and Mars: Atmospheres, Ionospheres, and Solar Wind Interactions*, J.G. Luhmann, M. Tatrallyay, and R.O. Pepin, Editors, American Geophysical Union, Washington D.C., 7-71.
- [4] Hashimoto, G.L. and Y. Abe, 1997: Controlling Mechanism of Venus' Surface Temperature: Surface Chemical Reaction and Cloud Albedo Feedback. *Proc. 30th ISAS Lunar Planet. Symp.*, 39-42.
- [5] Lorenz, R.D., C.P. McKay, and J.I. Lunine, 1997: Photochemically Driven Collapse of Titan's Atmosphere. *Science*, **275**, 642-644.
- [6] Wood, J.A. and R. Brett, 1997: Comment on "The Rate of Pyrite Decomposition on the Surface of Venus". *Icarus*, **128**, 472-473.
- [7] Fegley, B., Jr., 1997: Why Pyrite Is Unstable on the Surface of Venus. *Icarus*, **128**, 474-479.
- [8] Klose, K.B., J.A. Wood, and A. Hashimoto, 1992: Mineral Equilibria and the High Radar Reflectivity of Venus Mountaintops. *J. Geophys. Res.*, **97**, 16353-16369.
- [9] Hashimoto, G.L., Y. Abe, and S. Sasaki, 1997: CO₂ Amount on Venus Constrained by a Criterion of Topographic-Greenhouse Instability. *Geophys. Res. Lett.*, **24**, 289-292.
- [10] Pettengill, G.H., P.G. Ford, and R.A. Simpson, 1996: Electrical Properties of the Venus Surface from Bistatic Radar Observations. *Science*, **272**, 1628-1631.
- [11] Fegley, B., Jr., K. Lodders, A.H. Treiman, and G. Klingelhöfer, 1995: The Rate of Pyrite Decomposition on the Surface of Venus. *Icarus*, **115**, 159-180.
- [12] Fegley, B., Jr. and R.G. Prinn, 1989: Estimation of the Rate of Volcanism on Venus from Reaction Rate Measurements. *Nature*, **337**, 55-58.
- [13] Bullock, M.A. and D.H. Grinspoon, 1996: The Stability of Climate on Venus. *J. Geophys. Res.*, **101**, 7521-7529.