

110 : 305 : 10 (惑星気象 ; 古気候 ; 地球関連分野)

2. 水惑星の形成と進化

はしもと じょーじ*

1. 地球のような惑星

宇宙望遠鏡 Kepler によって観測された系外惑星の候補は3000個を越え (<http://www.exoplanets.org/> 2018年1月6日閲覧), 惑星は宇宙にありふれた存在であることが科学的な観測によって明らかになった。系外惑星研究は, 系外惑星の発見だけでなく, 系外惑星がどのような惑星であるのかを明らかにすることも含めた段階へと移行しつつある (田村 2018)。近い将来には, 系外の地球型惑星の直接観測が可能になり, 系外惑星の中に地球のような惑星があるのかどうかについて科学的な根拠をもって議論することができるようになるだろう。

ここでは簡単に, 地球のような惑星という言い方を

したが, それを科学的に議論するためには「地球のような惑星」を科学的に定義する必要がある。地球の特徴は何であるのかというのは簡単に決められる問題ではないが, 地球の表面が広く液体の水からなる海洋に覆われていることをもって地球の特徴とし, 「地球のような惑星」を定義するものとして「水惑星」という言葉が使われることがある。たしかに, 地球の両隣にある金星と火星の表面に海洋は存在せず, 地球にだけ海洋が存在していることを考えると, 水惑星というのは地球の特徴をよく捉えているようにも思える。また, 地球の生命が生存していくためには液体の水が必要とされることから, 水惑星であることは生命を育む惑星 (生存可能惑星) であるための必要条件と考えることもできる。生命を育む惑星であることが地球の一番の特徴であると考えられるなら, 水惑星は地球のような惑星を定義するにふさわしいと言うこともできる。

後述するように, 「水惑星」もまたそれを明確に定

* 岡山大学大学院自然科学研究科。

george@gfd-dennou.org

© 2018 日本気象学会

義しようとするに困難に直面するのだが、ここではそのことは置いておいて、水惑星とは「惑星の表面がある程度のもまとまった量の液体の水で覆われた惑星」ということにして、水惑星の形成とその存在確率について議論していくことにする。最初に1次元放射対流平衡モデルに基づいた古典的な海洋形成条件についてレビューし、次に太陽系内の地球型惑星について探査が明らかにしたことと理論的な水惑星の形成条件の整合性について考察する。最後に水惑星の形成に関する現在の知見をまとめ、もう一度「水惑星」とは何であるのかについて議論する。

2. 海洋存在条件

惑星の表面に海洋が形成されるためには、まずなによりも惑星表面に十分な量の H_2O が存在していなければならない。 H_2O は宇宙にありふれた元素である水素 (H) と酸素 (O) から構成される分子で、宇宙には広く存在していることが知られているが、惑星表面にある H_2O の量がどのようにして決まっているのかについては、ほとんどわかっていない。 H_2O の存在量についての議論は先送りすることにして、十分な量の H_2O が存在する場合に海洋が形成される条件について考えることにする。

液体の水が安定に存在する条件は、温度と圧力によって物理的に定義することができる。まず圧力については、三重点の圧力 (611.73 Pa) よりも高い圧力が必要となる (これより低圧では気相と固相のみが安定となる)。大気を保持することのできる重力を持つ惑星であれば、惑星表面でこの圧力の条件は満足されていると考えてよい。したがって、惑星表面で液体の水が安定に存在できるかどうかを決めるのは、惑星表面の温度ということになる。すなわち、温度が低すぎれば凍り付いて固体の氷となり、温度が高すぎれば蒸発して気体 (水蒸気) になるということである。

惑星表層の温度は加熱と冷却が釣り合うように決まる。冷却は惑星自身が熱放射を宇宙空間へ射出することによっておこなわれ、加熱は入射した中心星 (太陽系の場合は太陽) の光を吸収することで生じる。本当は惑星深部から惑星表層に流入する熱の寄与もあり、これは地球の場合、地殻熱流量と呼ばれている。現在の地球において地殻熱流量による加熱の大きさ (100 mW/m^2) は太陽光の吸収による加熱の大きさの1000分の1以下であり、無視することができる。中心星放射加熱の大きさは、中心星の光度、中心星からの距

離、惑星アルベドで決まる。中心星放射の加熱と釣り合う熱放射を出す温度は有効放射温度 T_e と呼ばれ、次の式で計算される。

$$T_e = \left(\frac{S(1-A)}{4\sigma} \right)^{1/4}$$

ここで S は大気上端における中心星放射のフラックス、 A は惑星アルベド、 σ はステファン・ボルツマン定数である。加熱と冷却が釣り合った状態にある惑星を外から見ると、有効放射温度になっている。この有効放射温度になっている場所は、外から見て光学的深さが1になる場所である。大気が惑星の出す熱放射に対して不透明であれば、地表でなく大気のどこか上の方の温度が有効放射温度になり、地表の温度は有効放射温度よりも高い温度になることがある。この地表温度と有効放射温度の差が温室効果で、温室効果の大きさを見積もることができれば、惑星表面の温度を見積もることができ、海洋が存在できるか否かを決めることができる。

海洋が存在できるか否かという問題を広いパラメタ空間の中で調べるにあたっては、1次元放射対流平衡モデルを用いて温室効果の強さを見積もることがおこなわれてきた (例えば, Abe 1993)。これらのモデルにおいては、惑星表面に大量の H_2O があるものとして大気中の H_2O 量は大気温度に応じてしかるべく調節されると仮定し、 H_2O 以外の温室効果気体の量が変ったときに地表温度がどう変わるのかを計算によって求めている。 H_2O 以外の温室効果気体として何を仮定するかによって詳細は変わるが、これらのモデルによって明らかにされたのは、海洋が存在するためには中心星放射による加熱の大きさがある程度の範囲に入っていないなければならないということであった。中心星放射の加熱が強すぎる場合には暴走温室状態に陥って海洋は蒸発し、中心星放射の加熱が弱すぎる場合には CO_2 などの温室効果気体を加えても H_2O が液体として安定に存在できる温度まで暖まらず凍結してしまう。中心星放射の加熱の強さは、中心星の光度と惑星アルベドが決まると、中心星からの距離だけで決まる。地球のように海洋に覆われた惑星のアルベドは地球と同程度であろうと思うと、海洋が存在できる (暴走温室にも凍結にもならない) ちょうどよい中心星からの距離の範囲というものがあることになる。この中心星からちょうどよい範囲はハビタブルゾーンと呼ばれ、現在の太陽系においては太陽から0.95 au

から1.37 au (1 au は太陽・地球間の距離) の間が海洋の存在できるハビタブルゾーンであるとされており(例えば Kasting and Catling 2003), その中にある惑星は地球だけである。

暴走温室と凍結によって制約される海洋存在条件(ハビタブルゾーン)は, 水惑星になるか否かを判定するひとつの目安となるものであるが, これだけ見ていけばよいというものでももちろんない。ハビタブルゾーンの中にあつたとしても, 惑星表層に H_2O がなければ水惑星にならない。惑星表層に十分な量の H_2O があつたとしても, 大気中にしかるべき量の温室効果気体が含まれていないと水惑星にならない。これらのことは, ハビタブルゾーンが十分条件でなく必要条件にすぎないことを意味している。

一方で, ハビタブルゾーンが必要条件になっているかどうかについても考える必要がある。1次元放射対流平衡モデルでは大気中のガス成分が放射に及ぼす影響はよく評価されているが, 雲やエアロゾルといった大気中に存在する粒子が放射に及ぼす影響はあまりきちんと評価されていない。雲はその粒径を決めてやらないと放射強制力を評価することができないし, そもそも雲は時間的・空間的に偏在しているためそれを1次元放射対流平衡モデルで扱うことが難しい。雲やエアロゾルの放射強制力を考慮に入れたとき, ハビタブルゾーンがどのように変更されるのかは, あまりよくわかっておらず, 今後の課題として残されている。また, 惑星アルベドについても考える必要がある。地球の場合, 惑星アルベドの値は雲の影響を強く受けているが, 現在の地球と異なる条件(中心星放射加熱, 大気組成, 大気温度)においたとき雲がどのように変化し, 惑星アルベドがどのように変化するのか, それを推測することすら難しい。惑星アルベドが想定よりも大きくなればハビタブルゾーンは内側へ移動し, 惑星アルベドが想定よりも小さくなればハビタブルゾーンは外側へ移動する。案外に, ハビタブルゾーンは広いのかもしれないし, 狭いののかもしれない。

3. 太陽系の地球型惑星

3.1 地球

現在の地球はその表面の約7割を海洋で覆われている。地質記録を見ると, 一時的に全球凍結のようなことはあつたにしても, 海洋は38億年くらい前からほぼ途切れることなく存在し続けてきたと考えられる。すなわち, 地球は38億年前からずっとハビタブルゾーン

の中にいたことになる。

ずっと海洋が存在していたのなら, 安直に昔の地球は今の地球と変わらなかったと考えてもよいように思えるが, 昔の太陽は現在の太陽と違うため, 昔の地球は今の地球と同じであるわけにはいかない。このことは「暗い太陽のパラドクス」と呼ばれている(例えば Sagan and Mullen 1972)。太陽は中心核でおこる核融合反応で発生したエネルギーを放出することで光り輝いているが, この核融合反応の活発さは時間とともに増大すると考えられている。これは, 核融合反応が水素をヘリウムに変えるため, 時間の経過とともに中心核を構成するガスの平均分子量が大きくなって粒子数は減少し, 星の重さを支える圧力を維持するために中心核の温度は上昇し, その結果として核融合反応が起こりやすくなるためである。太陽は形成直後の現在の70%程度の明るさから時間とともに徐々にその光度が大きくなってきたと推定されており, 地球のアルベドと大気組成が現在のそれと変わらないのであれば, 20億年前以前の地球は凍結してしまうことになる。

地質記録との整合性をとるものとして一般に考えられているのは, 昔の地球大気には現在よりも多い量の温室効果気体が含まれており, その温室効果が弱い太陽光度を補って温暖な環境を維持していたとするものである。1次元放射対流平衡モデルによると, およそ1気圧の CO_2 が大気にあれば暗い太陽の下でも地球は海洋を保持することができるとされている。地表には炭酸塩岩の中に固定された CO_2 が50~100気圧分あるので, 1気圧程度の CO_2 が大気にあつてもよい。

海洋を持つ惑星の大気 CO_2 量は, 火成活動で大気に放出される CO_2 量と, 海洋中で炭酸塩岩に固定されて大気から除去される CO_2 量の釣り合いで決まるとする考えがある(Walker *et al.* 1981)。海洋中で生成する炭酸塩岩の量は, 海洋に供給されるCaイオンの量で規定されており, 海洋に供給されるCaイオンの量は陸地に降った雨によって陸地の岩石がどれだけ化学風化するかによって決まる。温暖な環境では, 降水量が増え化学風化も進みやすいためCaイオンが大量に供給され, 大量の CO_2 が炭酸塩岩に固定されて除去される。そうすると大気中の CO_2 量は減少して温室効果が弱まることによって表層環境は寒冷化する。逆に寒冷な環境では, 降水量が少なく化学風化も進みにくいためCaイオンの供給量が抑えられ, 炭酸塩岩に固定される CO_2 量が少なくなるため大気中の CO_2 量は増える。そうすると CO_2 の温室効

果によって表層環境は温暖化する。このように大気中のCO₂量が決められているならば、大気CO₂量が自動的に調整されることによって、ちょうど海洋が存在するような表層環境が維持されることになる。

この大気CO₂量を維持する機構は、ウォーカー・サイクルと呼ばれたり、ウォーカー・フィードバックと呼ばれたりする。地球ではウォーカー・サイクルが働くことによって、太陽光度の時間変化によらず地球は海洋が存在できる条件にあり続けたのかもしれない。ウォーカー・サイクルは、化学風化によって供給されるCaイオンの量を変化させることによって表層環境を変えるため、表層環境が変わるには100万年程度以上の時間がかかる。これより短い時間スケールでは、全球凍結のような極端な状態に陥ることもありえる。そしてもし全球凍結に陥った場合でも、ウォーカー・サイクルが働いていればいずれ全球凍結から抜け出して海のある状態に戻ることができる。全球凍結の発見以前において、ウォーカー・サイクルが地球の表層環境に影響していたことを示す明確な証拠は存在していなかったが、地質記録に残る全球凍結とそこからの脱出は、地球においてウォーカー・サイクルが確かに働いたことを示す証拠と見ることができる。

3.2 火星

現在の火星に海洋は存在しない。火星の表層は乾燥しているが、この乾燥状態は平均の地表温度が230 Kという低温のため、H₂Oそのものが存在しないわけではない。H₂Oはあっても乾燥している現在の火星は「地球のような惑星」という意味での「水惑星」ではないが、いくつかの証拠から考えて過去には地表が海洋で覆われた「水惑星」の時代があったと考えられている（例えば、Baker *et al.* 1991）。

過去の火星に海洋が存在したと考えられるようになったのは、探査機Vikingによって撮影された地表の写真の解析によって、波打ち際とおぼしき地形や、流水によって形成されたとしき河川状の地形が発見されたからである。その後、探査機Mars Global Surveyorによる重力場の測定により、この波打ち際とされた一連の地形が確かに等重力ポテンシャル面上にあることが確認され、過去の火星に海洋が存在したことは確からしいと考えられるようになった。また、探査機Mars Odysseyのガンマ線スペクトロメーターの観測によって地下にH₂Oが大量に存在することが示唆されている。火星が温暖湿潤であった時代はクレーター年代学（衝突クレーターの数に基づいて年代を推

定する手法。絶対年代を決めるのは難しいが、相対年代はよく決まる）に基づいて見積もることができ、流水によって作られたと考えられているバレー・ネットワークは38億年前以前に形成されたと推定されている。もしも温暖湿潤な環境が長期間にわたって維持され活発な水循環があったとすると、おそらく古い地形は浸食され消えてしまうと考えられるが、火星には古い地形も残されていることから温暖湿潤であった期間は比較的短いものであったと考えられる。一方で、水に関連する地形は多様で広域に分布しており、これらが一度に形成されたとも考えにくいことから、海洋が形成されたのは1回だけでなく、寿命の短い海が何度か繰り返し形成されたのではないかと推察されている。地質学的に温暖湿潤な火星が存在したことはほぼ間違いないと考えられる一方で、気候学的には38億年前以前の火星に温暖な表層環境をつくりだすことは難しい。地球の項で説明したように38億年前の太陽光度は現在に比べるとだいぶ暗いため、火星地表の広い範囲が液体の水が安定に存在する温度になるためにはかなり強い温室効果が必要とされる。かつては5 bar程度の分厚いCO₂の大気が形成されれば温暖な火星になると考えられていたこともあったが、中心星放射の加熱がある程度以上に弱い条件下ではCO₂自身が凝結してしまうので、十分な温室効果をもたらすことはできないことが明らかにされた（Kasting 1991）。地球型惑星の表層に大量に存在すると考えられるCO₂は温室効果気体としてもっとも考えやすいものであるが、温暖な火星を作り出すためにはCO₂以外の温室効果が必要である。凝結したCO₂の雲が持つ温室効果、CH₄やSO₂といったCO₂以外の温室効果気体、さらにはCH₄から光化学反応で生成する有機エアロゾルによる太陽放射の吸収など、火星を暖める機構としていくつかのものが提案されているが、それらで本当に火星が暖まるのかどうかは明らかではない。暗い太陽の下でハビタブルゾーンが太陽系の内側へ縮んだ過去において、火星がハビタブルゾーンの中に入るのとは簡単なことではない。

なぜ過去に火星が温暖であり得たのかという謎が解けていないのと同様に、温暖な火星が現在あるような寒冷な火星へとどのように進化したのかについてもあまりわかっていない。単純には太陽光度が大きくなるにつれて火星の表層環境もより温暖な環境になると考えるのが自然であるが、そうはならなかった。おそらくは温室効果を担っていた成分の一部が大気から失わ

れることによって寒冷化したと考えられるが、それが何であるのかはわかっていない。

また、過去の火星を温暖にするのにCO₂だけでは不足だが、大量に存在するであろうCO₂が温室効果のある程度の部分をまかなったことは間違いない。現在の火星大気はCO₂が主成分であるがその量は6 hPaでしかないため、過去に数 bar のCO₂大気があったとしたらそのCO₂は大気から取り除かれたことになる。液体の水が存在すれば炭酸塩岩を生成することで大気からCO₂を取り除くことができるが、寒冷化した後の火星で大量の炭酸塩岩を生成することはできないとすると、凍結した時点でかなりの量のCO₂が大気に残ることになる。ある程度の量は宇宙空間へ逃散 (escape) することによって失われたと考えられているが、十分な量のCO₂を宇宙空間へ逃散させることができるのかどうかは明らかでない。

H₂Oの行方もまた、CO₂の行方と同様に問題である。現在の火星の表面には極域に氷の形でいくばくかのH₂Oが存在しているが、その量は海洋を形成するほどではない。かつて海洋を形成したH₂Oの一部は宇宙空間へ逃散し、一部は地下に潜ったと思われるが、それぞれどのような過程でどれくらいの量が表面から移動したのかはわかっていない。惑星表層に存在する水の量がどのように決まっているのかという問題に絡んでも、火星の表面からH₂Oが消失する過程がどのようなものであったのかを考えることは興味深い。

3.3 金星

現在の金星に海洋は存在しない。金星の表層は乾燥していて、H₂Oは大気中にほんの少しの量が含まれているにすぎない。大気中の水蒸気量を可降水量で表すなら30~100 mmで、地球の表層には平均水深にして約3000 mの水があることに比べると、その量は10万分の1程度でしかない。現在の金星は表層にあるH₂Oの量がとても少なく、水惑星ではない。しかしながら、金星もまた過去には海洋を保持していた可能性が示唆されている。まず、金星大気に含まれる水素の同位体比から、過去の金星には現在ある量の100倍以上のH₂Oが存在していたと推定される。金星大気の水素同位体比は地球の海水のそれに比べると、重水素が100倍ほど多くなっている。太陽系において地球と金星はごく近傍にあり、地球と金星はほぼ同じ物質から形成されたと考え、地球と金星の材料物質の水素同位体比は同じであったと考えられる。水素が宇

宙空間へ逃散する過程では、軽い水素は重い水素よりも逃散しやすいため、水素が逃散すると惑星に残った水素は重い水素の割合が増加する。すなわち、金星大気の水素同位体比は金星から大量の水素が逃散した結果として説明することができる。過去の金星に大量の水素があったのなら、水素と酸素が結合してつくられるH₂Oも大量にあったと考えられる。

海洋が形成されるためには、H₂Oが大量に存在するだけでなく、地表がほどよい温度になっている必要もある。金星は地球に比べると太陽に近く、大気上端に入射する太陽放射のフラックスは地球のその約2倍となっている。そのため、地球をそのまま金星の位置まで移動させると暴走温室状態に陥ってしまう。すなわち、現在の金星はハビタブルゾーンの外にある。しかし、過去の太陽光度は現在の70%程度であったとすると、その時代のハビタブルゾーンは現在よりも太陽系の内側にずれて設定されることになる。惑星アルベドがそこそこに大きくなれば、過去の金星は暴走温室状態に陥らず海洋存在条件を満足していた可能性がある。金星には火星と違って古い地形が残されていないため、地形学的手法で海洋の存在を調べることはできないが、化学的な痕跡が残されている可能性はある。火成岩の一種に花崗岩と呼ばれる種類の岩石があり、この岩石は水が存在する条件下で玄武岩が溶融して生成すると考えられている。花崗岩は地球以外の惑星で発見されておらず、花崗岩は水と深く関連していると考えられる。水がないと生成しない花崗岩が金星に発見されたなら、過去の金星には海洋が存在していたと考えるのが妥当であろう。

金星はその全面を分厚い雲で覆われているため、その地表を観測することが難しく、地表物質を全球的に調べることができないでいた。近年になって、近赤外域の特定の波長において地表から射出された光が大気を透過して漏れ出ていることが発見され、この近赤外線を使って金星地表を構成する物質を推定することができるようになった (Hashimoto and Sugita 2003)。ごく限られた情報しか取得できないため全てを確定することはできないが、金星の地表は玄武岩的な組成と花崗岩的な組成の2つに分けられることが明らかになった (Hashimoto *et al.* 2008)。玄武岩的な組成は主に金星の低地に見られ、花崗岩的な組成は主に金星の高地に見られる。玄武岩と花崗岩の密度を比べると後者の方が軽く、軽い物質が高地を作ることはアイソスタシーの考え方も整合的である。近赤外線の観測

だけで花崗岩の存在を断定することはできないが、金星の高地は花崗岩で構成されている可能性がある。

過去の金星に海洋が存在していたとしたら、金星は湿潤な状態から現在の乾燥した状態へと進化したことになる。太陽光度の増大にともなって暴走温室状態に陥り、海洋は失われたと考えるのが自然であろう。海洋を形成していた H_2O は水素が宇宙空間へ逃散することで消失したと考えられるが、水素が、いつ、どのように、どれくらいの量、逃散したのかについては不明なことも多い。ここでもまた、惑星表層に存在する水の量がどのように決まっているのかという視点で見ると、金星の海洋の消失過程は興味深い。

4. 水惑星の存在確率

地球という惑星を特徴づけている海（地表に存在する大量の液体の水）であるが、海が存在することはどれくらい特殊なことなのだろうか。太陽系内の3つの地球型惑星、金星、地球、火星を見ると、この中で現在海洋を保持しているのは地球のみであり、水惑星の存在確率は1/3である。しかし先に見たように、過去においては火星にも金星にも海洋が存在していた可能性がある。火星と金星にも海洋が存在していたとしたら、過去の太陽系において水惑星の存在確率は3/3であったことになる。この数字だけを見ると、水惑星の形成はありふれたことであると結論される。一方で、現在の太陽系において海洋を保持している惑星は地球だけであるということもまた事実であるので、水惑星はどこにでも形成されるが、それが長期間にわたって存在することができるかどうかの方が問題ということなのかもしれない。

水惑星と呼ばれるためには、どれくらいの量の水があればよいのかという問題はとても難しい。惑星表層に液体の水が存在するだけでよいのなら、現在の火星と金星は実は水惑星である。現在の火星表層は酷寒の環境だが、定常的ではないが一時的には液体の水が存在することのできる温度・圧力条件になる地域が存在する。そして、液体の水が流れて形成されたと考えられる地形が現在もつくりられており、地表近くに液体の水が存在することがあることは間違いない。金星は、地表温度が735 Kにも達していて地表で液体の水は安定に存在することはできないが、高度50~70 kmにある雲層の温度・圧力は地球の対流圏とあまり変わらず、そこには濃硫酸水溶液からなる雲が存在している。濃硫酸ではあるが水溶液であり、液体の水が存在

している。現在の火星と金星に存在する液体の水は量が少ないため、地球のような惑星という意味で水惑星と呼ぶことはできないと思うが、こうした液体の水の存在する領域は生存可能領域と考えることはできるので、その意味で地球外生命の探索という意味においては探索の対象とされるべきなのかもしれない。

水が大量にある惑星もまた、地球のような惑星とは違うものになる。惑星表面に大量の水があると陸地は水没してしまう。陸地がない惑星こそ水惑星と呼ぶべきなのかもしれないが、陸地がない惑星は地球のような惑星とは違うように思われる。地球の気候が安定に維持されてきたのは、ウォーカー・サイクルによって大気 CO_2 量がちょうどよい量に維持されてきたからであるとする、地球のように安定な気候が維持されるためには陸地が必要ということになる。ウォーカー・サイクルが働くためにはある程度の大きさの陸地が必要であり、陸地が存在するためには惑星表層にある水の量が多すぎたはいけない。

陸地が存在するかどうかは、惑星表面の凸凹の大きさと、惑星表面にある水の量の兼ね合いで決まる。凸凹が大きければ水が多少たくさんあっても水没をまぬがれる地面が存在する。ある程度の大きさの惑星においては重力がそこそこに強いいため、あまり大きな凸凹は維持することができない。そう考えると陸地が存在するという条件を満足する水の量の上限は、それほど大きくなることができない。地球の表層にある水の量が2倍になれば陸地の大部分は水没してしまうことを考えても、地球が地球らしくあることのできる水の量というのは狭い範囲に縛られているように思われる。地球の海水の量は 1.4×10^{21} kg であり、地球の質量 (6×10^{24} kg) に対する割合は0.02%でしかない。惑星表層に存在する水が多すぎたはいけないという条件は、もしかすると非常に厳しい条件であるのかもしれない。

参考文献

- Abe, Y., 1993: Physical state of the very early Earth. *Lithos*, 30, 223-235.
- Baker, V. R., R. G. Strom, V. C. Gulick, J. S. Kargel, G. Komatsu and V. S. Kale, 1991: Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars. *Nature*, 352, 589-594.
- Hashimoto, G. L. and S. Sugita, 2003: On observing the compositional variability of the surface of Venus

- using nightside near-infrared thermal radiation. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2003JE002082.
- Hashimoto, G. L., M. Roos-Serote, S. Sugita, M. S. Gilmore, L. W. Kamp, R. W. Carlson and K. H. Baines, 2008 : Felsic highland crust on Venus suggested by Galileo Near-Infrared Mapping Spectrometer data. *J. Geophys. Res.*, **113**, doi:10.1029/2008JE003134.
- Kasting, J. F., 1991 : CO₂ condensation and the climate of early Mars. *Icarus*, **94**, 1-13.
- Kasting, J. F. and D. Catling, 2003 : Evolution of a habitable planet. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, **41**, 429-463.
- Sagan, C. and G. Mullen, 1972 : Earth and Mars: Evolution of atmospheres and surface temperatures. *Science*, **177**, doi:10.1126/science.177.4043.52.
- 田村元秀, 2018 : 太陽系外惑星一発見20年で見えてきたもの. *天気*, **65**, 211-216.
- Walker, J. C. G., P. B. Hays and J. F. Kasting, 1981 : A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *J. Geophys. Res.*, **86**, doi:10.1029/JC086iC10p09776.
-