

地球型系外惑星の気候研究

北海道大学大学院理学研究院 石 渡 正 樹

1 系外惑星とは

系外惑星とは太陽以外の恒星の周囲に存在する惑星である。系外惑星は 1995 年にはじめて発見されて以来、現在までに 500 個近くが発見されている (<http://exoplanet.eu/>)。系外惑星を観測する主な方法はドップラー法とトランジット法の 2 つである。ドップラー法とは系外惑星をもつ恒星のふらつきを観測する方法である。恒星とそのまわりの惑星は共通重心を焦点としたケプラー運動を行うため、恒星もわずかながら動く。このため、地球から惑星をもつ恒星を観測すると周期的に遠ざかったり近づいたりする。この恒星のふらつきを恒星から射出される光のドップラー偏移から求め、惑星の存在を確認するのがドップラー法である。太陽と木星から成る系を考えると太陽の視線速度変化は約 12 m/sec であり (佐藤, 2009)、このような微小な速度変化をとらえなければならない。一方、トランジット法は惑星が恒星の前を横切るときに起こる恒星光度の一時的な減少を検出するものである。太陽の前を木星が横切るときには、太陽の光は 1% 減光する (井田, 2003)。トランジット法は恒星の光の強度の微小な変化をとらえる方法なのである。これらの観測により、系外惑星の存在だけでなく、系外惑星の質量・軌道長半径・離心率・軌道傾斜角などを推定することもできる。

これまでの観測によって、系外惑星は太陽系内の惑星とはかなり異なる性質を持っていることがわかってきた。太陽系の場合、恒星(太陽)に近い領域には岩石を主成分とする質量の小さい惑星が存在し、太陽から遠い領域には気体を主成分とする質量の大きい惑星が存在している。いずれの惑星の軌道も円軌道に近く、離心率は小さい。ところが、これまでに発見された系外惑星には、恒星のごく近傍に大きな質量を持つものや非常に大きな離心率を持つものが多く発見されている。離心率の大きい惑星はエキセントリックプラネットと呼ばれている。恒星の近傍に存在する惑星のうち、大質量の木星型惑星と考えられるものはホットジュピターと呼ばれる。また、恒星の近傍に惑星が存在すれば、惑星質量によらず恒星から惑星に非常に強い潮汐力が働くため自転周期と公転周期が等しくなると考えられる。このような惑星は同期回転惑星と呼ばれている。

観測手法の制限から、これまで発見されてきた系外惑星の大部分は地球の 10 倍以上の質量をもつ重い惑星であった。しかし、最近地球の数倍程度の質量をもつ惑星も発見されるようになってきた。これらは地球型惑星である可能性があり、スーパーアースと呼ばれ注目されている。数年のうちには、宇宙望遠鏡を用いた観測プロジェクト(ケプラーミッション;<http://kepler.nasa.gov/> など)により地球程度の質量をもつ系外惑星も発見されるだろうと期待されている。このような状況において、地球型の系外惑星に関する気候を推定しようとする試みがいくつかなされている。生命の発生・維持に適した温度範囲をもつ惑星がありえるかどうかというのが主に問題とされている。以下では、その中のいくつかの研究例を紹介する。

2 地球型系外惑星気候の計算例

2.1 太陽定数を変化させた水惑星

太陽定数は惑星の気候を決定する重要な外部パラメータであり、気候状態の太陽定数依存性は系外惑星の気候を考える上での基礎となる。このため最初に太陽定数を変化させた数値実験について紹介しておく。

気候の太陽定数依存性は、これまで主に南北 1 次元エネルギーバランスモデル (EBM) を用いて調べられてきた。EBM とは、大気の熱輸送を表面温度の関数としてパラメタライズして表面温度の南

北分布を求める南北 1 次元モデルである。基礎方程式は North (1975) または Ishiwatari et al. (2007) などを参照されたい。図 1(a) は灰色放射スキームを用いた EBM の結果であり、海氷の境界緯度の太陽定数依存性を示した図である。この図には、複数の気候状態が示されている。海氷の境界緯度が 0 度となるもの(図中の◇)は、赤道まで氷が広がった状態(全球凍結状態)をあらわしている。氷の境界緯度が 90 度となるものは惑星表面に氷が存在しない状態をあらわす。氷無し状態には、氷無し平衡状態(図中の○)と暴走温室状態(図中の×)がある。暴走温室状態は、水蒸気を含む大気が射出できる赤外放射量を越えた入射が大気に与えられた場合に発生する状態であり、平衡状態に達することはできずに温度が上昇を続ける(Ishiwatari et al., 2002)。全球凍結にも至らず氷が完全に消失しない状態は部分凍結状態に対応する(図中の●)。部分凍結状態の一部のみが安定となる(図中のγの部分のみ)。この図から、太陽定数が地球の値よりもずっと小さい場合には大気状態として許容されるのは全球凍結状態のみであり、太陽定数が大きい場合には平衡状態には至らず暴走温室状態が発生することがわかる。太陽定数が地球の値に近い場合には、全球凍結状態・部分凍結状態・氷無し状態の組み合わせの多重解が存在する。

大気の運動を陽に取り扱った大気大循環モデル(GCM)でも同様の結果が得られることが確認されている。図 1(b) は灰色放射、雲無し、全球 swamp ocean (熱容量ゼロの海面)という簡略化した大気 GCM を使って太陽定数を変化させた数値実験をおこなった結果である。部分凍結状態が存在できる太陽定数の範囲や安定性がやや異なるものの、太陽定数が小さい場合には全球凍結状態のみ、大きい場合には暴走温室状態のみしか得られないこと、その中間程度の太陽定数では全球凍結状態・部分凍結状態・氷無し状態の多重解が存在することは、EBM の結果と共通するものである。これらのモデルの結果が示す重要なポイントは、とある太陽定数の値のもとでは、全球凍結状態も部分凍結状態も暴走温室状態も解になり得る場合があるということである。太陽定数を与えた場合に実際に生じる状態は、初期条件と太陽定数をどのように変化させたかで決定されることになる。

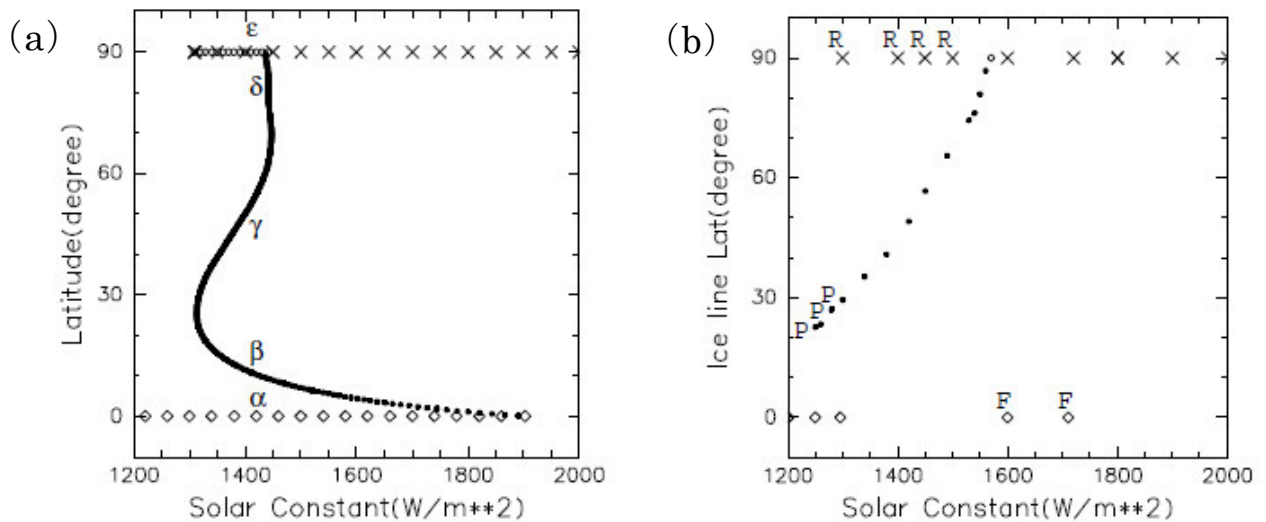


図 1: 太陽定数と氷境界緯度の関係。(a)EBM の結果、(b)GCM の結果。

○は氷無し平衡解を、●は部分凍結解を、◇は全球凍結平衡解を、×は暴走温室状態を示す。αからεは平衡解のブランチを表している。αは全球凍結平衡状態、βとδは不安定な部分凍結平衡状態、γは安定な部分凍結平衡状態、εは氷無し平衡状態をあらわす。(b)でFの文字が付いたものは $S=1000\text{Wm}^{-2}$ (S は太陽定数の値)で得られた全球凍結状態を初期値とするものである。Rの文字が付いたものは $S=1600\text{Wm}^{-2}$ で得られた暴走温室状態を初期値とするものである。Pの文字が付いたものは $S=1300\text{Wm}^{-2}$ で得られた部分凍結状態から徐々に太陽定数を減少させていって得られた解たちである。文字がついていない記号は 280K の等温状態を初期値とする結果を示す。Ishiwatari et al.(2007) を改変。

2.2 エクセントリックプラネット

地球の軌道の離心率は約 0.017 であり、非常に小さい。これに対して、0.7 以上の非常に大きな離心率を持つエクセントリックプラネットも多数発見されている。Williams and Pollard(2002) は地球用の大気 GCM と 50m 深の海洋混合層モデルを結合させたモデルを用いて、エクセントリックプラネットを模した数値実験を行った。彼らの計算では、離心率以外は、基本的に地球に準拠したものが与えられている。大気組成や大陸配置などは地球と同じもの、地形と植生も現在の地球に基づいて決めたものが使用されている。公転周期は 1 年、軌道長半径は 1 天文単位とし、年平均日射量が地球の値と同じになるように太陽定数が与えられている。

図 2 に離心率を 0.7 とした場合の結果を示す。もっとも表面温度が高くなる時(図 2 上図)には熱帯域の大陸上の表面温度が 373K 以上になり、もっとも表面温度が低くなる時(図 2 下図)には緯度 60 度より高緯度領域は全て氷に覆われる。しかし、どの時期においても、惑星表面には液体の水が存在できる温度領域(273K から 373K)が存在する。離心率が大きいため、惑星が近星点の近くに存在する期間は短く 1 年のうちの大部分は日射が弱い。しかし、大気が存在するために惑星が急激に冷却されることはなく、1 年を通じて惑星表面の一部は温度が結氷点以上に保たれることになる。このため表面温度の最高値および最低値は地球の値よりも極端なものにはなるが、平均値は地球の値とはあまり変わらないものとなる(この場合の全球年平均地表温度は地球の値よりも 7.8K 高いものとなる)。この結果をもとに、Williams and Pollard (2002) は惑星表面に液体の水が存在できるかどうかは惑星の軌道要素によらず平均日射量で決定されるだろうと論じている。

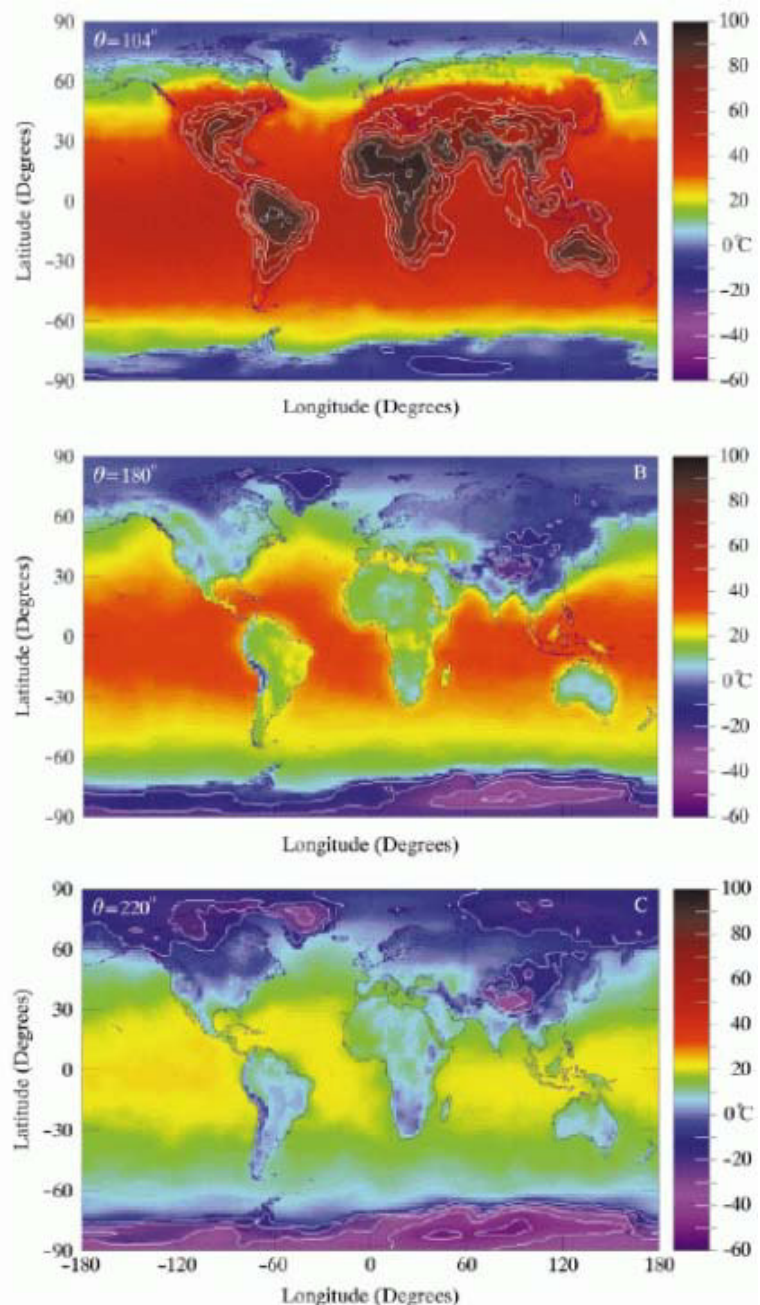


図 2: エクセントリックプラネットの計算例。離心率として 0.7 を与えた場合に大気 GCM と海洋混合層の結合モデルによって得られた表面温度分布。上図は表面温度の最高値が得られた時の表面温度分布、中図は恒星からもっとも惑星が遠ざかった時(遠星点)における表面温度分布、下図は表面温度の最低値が得られた時の表面温度分布を示す。Williams and Pollard (2002) の Figure 3 を転載。

2.3 自転傾斜角の大きな惑星

系外惑星の自転傾斜角はほとんど観測されていない。地球の自転傾斜角は約 23 度であるのに対して、一般に惑星は多様な自転傾斜角を持ち得る。火星の場合には過去において自転傾斜角が大きく変動したと推定されており、系外惑星の中にも地球よりも大きな自転傾斜角をもつものが存在する可能性がある。自転傾斜角が大きい場合の気候状態を推定することを目的として、Williams and Pollard (2003) は大循環モデルを用いた数値計算を行った。彼らは、エキセントリックプラネットの計算を行った Williams and Pollard (2002) と同様のモデルを用いて自転傾斜角を変更した数値実験を行った。

図 3 に自転傾斜角を 85 度とした場合に得られた表面温度分布の季節変化を示す。1 月には南半球の高緯度で表面温度が高くなり、7 月には北半球の高緯度で表面温度が高くなる。これは、自転傾斜角が大きいので夏半球の高緯度域で日射量が大きくなるためである。逆に、熱帯域は日射量が小さく表面温度も低くなる。つまり、自転傾斜角が大きい惑星は低温の熱帯と高温の高緯度で特徴づけられると言える。この場合、熱帯域が低温になるとはいえ、万年雪が形成されるほどには冷却されない。表面温度の分布は地球とは異なるものではあるが、全球平均年平均温度は地球の値とはあまり変化はない。この場合も、液体の水が存在できる温度領域は惑星表面上に常に存在している。この結果をもとに、Williams and Pollard(2003) は自転傾斜角の大きな惑星においても生命が存在できる可能性があると論じている。

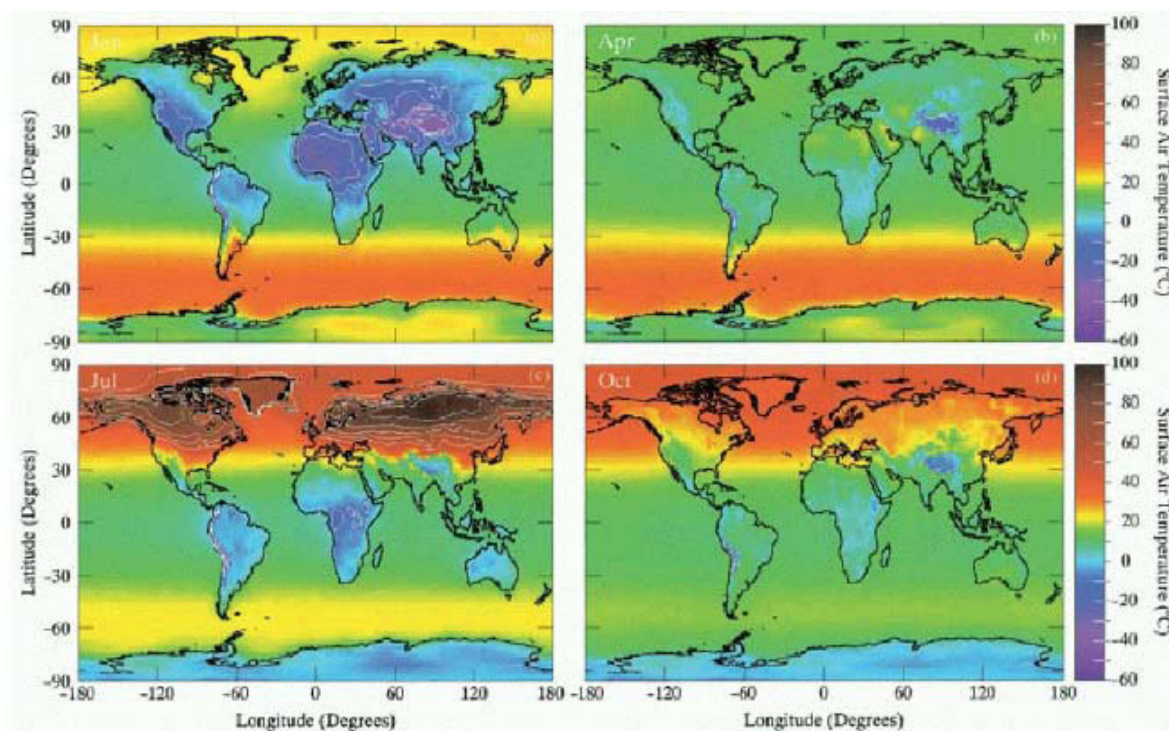


図 3: 自転傾斜角の大きな惑星の計算例。自転傾斜角を 85 度とした場合に大気 GCM と海洋混合層の結合モデルによって得られた表面温度分布。左上図は 1 月、右上図は 4 月、左下図は 7 月、右下図は 10 月の表面温度を示す。Williams and Pollard (2003) の Figure 9 を転載。

2.4 陸惑星

軌道要素ではなく、惑星表層の H_2O 量に注目した研究もなされている。過去の火星では表層に液体の H_2O が存在したと言われている。しかし、過去の火星における H_2O 存在量は不確定であり、その見積もりには現在の地球の海洋程度とするものから湖沼程度のごく少量とするものまで大きな幅がある。これから、系外惑星においても、地球とはかなり異なる H_2O 量が存在している可能性がある。Abe et al. (2005) は、惑星全体が陸で覆われ表層の H_2O 量が地球に比べてずっと少ない陸

惑星における気候を考察している。かれらは、大気 GCM と深さ 5m のバケツモデルを結合させたモデルを用いて、自転傾斜角を変更させた数値実験を行った。

図 4(a, b) に地球と同じ太陽定数と自転傾斜角を与えて陸惑星設定で計算した結果を示す。これらの図は横軸に時間、縦軸に緯度を取り、東西平均値の緯度分布の時間変化を示したものである。図 4(a) から、地球とは異なり 1 年を通して赤道域には雨がまったく降らないことがわかる。これは、大気循環により低緯度から水が運び出されてしまい熱帯域が乾燥してしまうためである。これに対して、太陽定数の値は同じでも自転傾斜角を 60 度とした場合の結果を図 4(c, d) に示す。この場合は、夏に低緯度で降水が起こる。自転傾斜角が大きい場合、表面温度がもっとも高くなるのは夏半球の高緯度となる。このため、夏半球の高緯度から低温となる熱帯域に水蒸気の輸送が起こり低緯度でも降水が起こる。以上の結果は、陸惑星の場合でも表層に液体の水を保持できる可能性があることを示唆している。

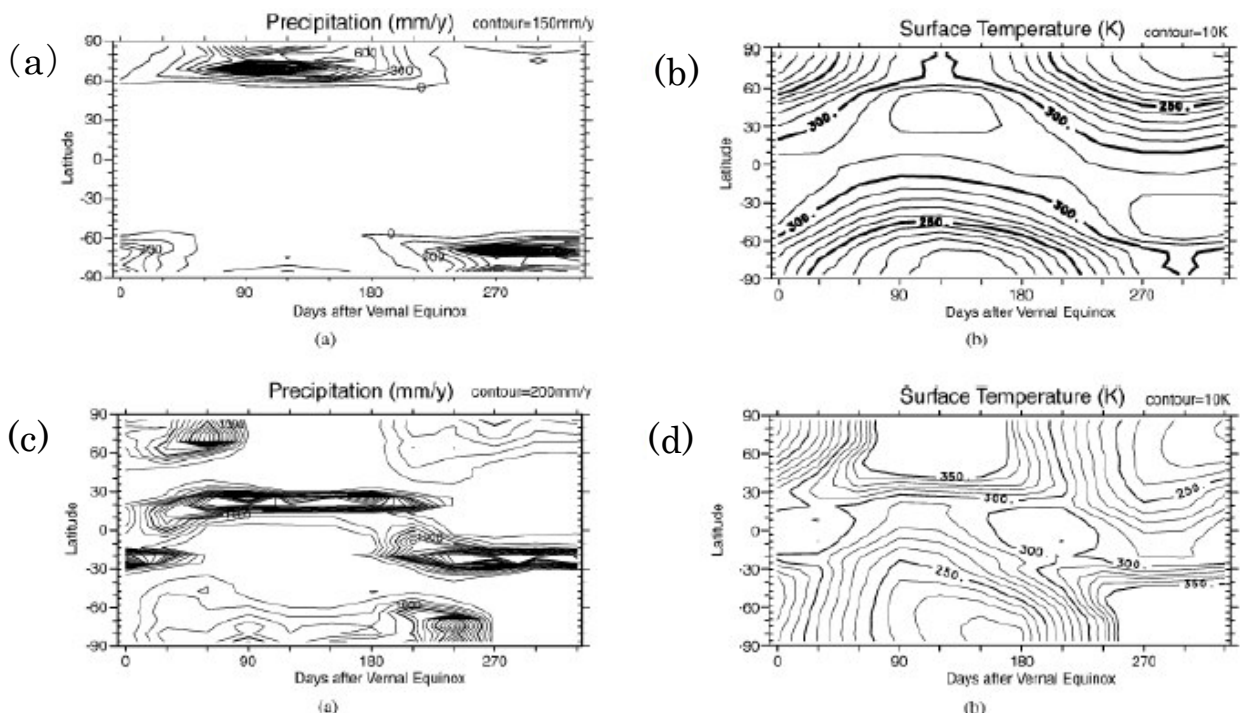


図 4: 陸惑星の数値計算例。GCM と深さ 5m のバケツモデルの結合モデルによって得られた結果。

(a)、(b) は自転傾斜角を 23.5 度(地球の値)とした場合の結果。(c)、(d) は自転傾斜角を 60 度とした場合の結果。(a)、(c) は東西平均降水量の年変化を示す。(b)、(d) は東西平均表面温度の年変化を示す。いずれの図も横軸は春分の日からの日数を示す。Abe et al. (2005) を改変。

2.5 同期回転惑星

1 節で述べたように、恒星のごく近傍に惑星が存在すると強い潮汐力が働くために惑星の自転周期と公転周期が等しくなる。この場合、惑星は恒星に対して常に同じ半球を向けることになり昼半球と夜半球が固定される。太陽よりも輝度が小さい恒星の場合、ごく近傍に地球型惑星が存在していたとしても惑星地表面に液体の水(海洋)を有する温暖な気候が実現される可能性がある。しかし、同期回転惑星の日射分布は非常に極端なので、地球の太陽定数のもとでも昼半球では暴走温室状態が発生する条件化にあり夜半球では凍結条件にある。惑星表面において液体の水が存在できるかどうかは自明な問題ではない。

大気の水蒸気を含む場合の同期回転惑星についての GCM 実験は納多他(2010)が行っている。納多他(2010)は、2.1 節で述べた太陽定数変更実験をおこなった Ishiwatari et al. (2007) と同様のモデルを用いて入射放射分布を変更した数値計算を行った。同期回転惑星を想定して、経度 0 度から 180 度までの西半球領域のみに入射太陽放射を与え、経度 180 度から 360 度までの東半球領域

には入射が無いものとした。太陽定数や惑星半径・重力定数などのパラメータは現在地球の値を用いる。自転角速度 Ω は $1/13 \Omega_E$, Ω_E の 2 種類を用いた。ここで Ω_E は地球の自転角速度の値である。

納多他(2010)の結果を図 5 に示す。自転角速度を $\Omega = 1/13 \Omega_E$, Ω_E としたいずれの場合においても、暴走温室状態には至らずに統計的平衡状態が得られた。いずれの場合でも昼半球から夜半球への熱輸送により夜半球が暖められ、統計的平衡状態が実現されている。

図 5 (a)~(c) は $\Omega = \Omega_E$ の場合の結果である。表面温度分布(図 5a)には、昼半球から夜半球に向かう赤道波に伴う熱輸送があらわれている。赤道域において昼半球から夜半球へ東向きに伸びる高温域は赤道ケルビン波の伝播に伴い形成され、西方向に夜半球側に伸びる高温域は赤道ロスビー波の伝播に伴い形成されたものと考えられる。また、表面温度分布(図 5a)には、中緯度領域において北東方向に夜半球へ伸びる高温域もあらわれている。この高温領域に対応して、水蒸気の凝結加熱が起こっている(図 5b)。凝結に伴う潜熱解放により中緯度大気が加熱され、それによって地表面温度の高温領域が形成されたものと考えられる。この場合、昼半球の恒星直下点で上昇し夜半球の対蹠点で下降する昼夜間対流の存在は認められない。南北風の水平分布においても極を越える流れは見られない(図 5 c)。

$\Omega = 1/13 \Omega_E$ の場合の結果を図 5(d)~(f) に示す。 $\Omega = \Omega_E$ の場合と同様に、赤道ケルビン波に伴って形成されたと考えられる高温域が存在している(図 5 d)。この高温領域の緯度幅は $\Omega = \Omega_E$ の場合に比べて広がっている。これは、 $\Omega = \Omega_E$ の場合に比べて赤道変形半径が増加して赤道ケルビン波の緯度幅が増加したことによるものと考えられる。 $\Omega = \Omega_E$ の場合と異なり、夜半球の中緯度では凝結加熱(図 5 e) は生じていない。この場合では、南北風速の水平分布(図 5 f) から、昼半球から夜半球に極を越える循環が存在することが分かる。

以上の結果は、地球と同じ太陽定数が与えられた同期回転惑星では熱輸送の形態は違っても昼半球から夜半球へ相当量の熱輸送が起こり、暴走温室状態には至らず液体の水が存在できる温度範囲が実現されることを示唆している。

3 まとめにかえて：系外惑星気候計算の問題点と今後の展望

地球型の系外惑星の気候を想定した数値計算が行われるようになってきた。これまでに行われた計算は、いずれも地球用の GCM を用いていくつかのパラメータを変更するというものであった。それらの結果は、系外惑星を想定した状況においても惑星表層に液体の水が存在し、生命が発生維持できる環境が実現される可能性があることを示している。しかし、これまでの計算は少数のパラメータを変更したものに過ぎない。系外惑星においてどのような表層環境が実現されるかという議論を更に一般化するには、惑星半径・日射放射量・軌道要素・大気量・大気成分などの多様なパラメータを徹底的に変更したパラメータスイープ実験が必要となる。

系外惑星を想定した数値計算の問題点の 1 つは、観測が困難あるいは不可能であるため、数値解と観測結果の比較によって計算結果の正当性を評価することができないことである。この問題を回避する方法として、簡単モデルから大気大循環モデルに至るまで複数種類のモデルの数値解を順次対応づけ、複数のモデルで得られた結果同士の整合性を確認するということが考えられる。2.1 節では、太陽定数変化実験において EBM と GCM の解の対応付けができることを述べた。太陽定数以外の他のパラメータに関しても、これと同様なパラメータ依存性の調査および複数モデルの解の対応付けができれば、パラメータ空間における数値解の分枝の分岐ダイアグラムの決定、多重平衡解や解の安定性に関する議論も可能となると期待される。このような複数モデルを用いたパラメータ実験を効率的に進めるためには多様な複雑度をもつモデル群を共通のプログラミングスタイルで整備すると良いだろうと考えられる。このようなモデル群を開発することを目的として、地球流体電脳倶楽部 dcmodel プロジェクト(<http://www.gfd-dennou.org/library/dcmodel>)では GCM (dcpam;高橋他, 2010) と非静力学対流モデル(deepconv/arare; 杉山他, 2010) の開発を進めている。これらのモデル群による数値計算と新たな観測プロジェクトの結果を有機的に結合することに

より地球型の系外惑星の気候の姿が明らかになるであろうと期待される。

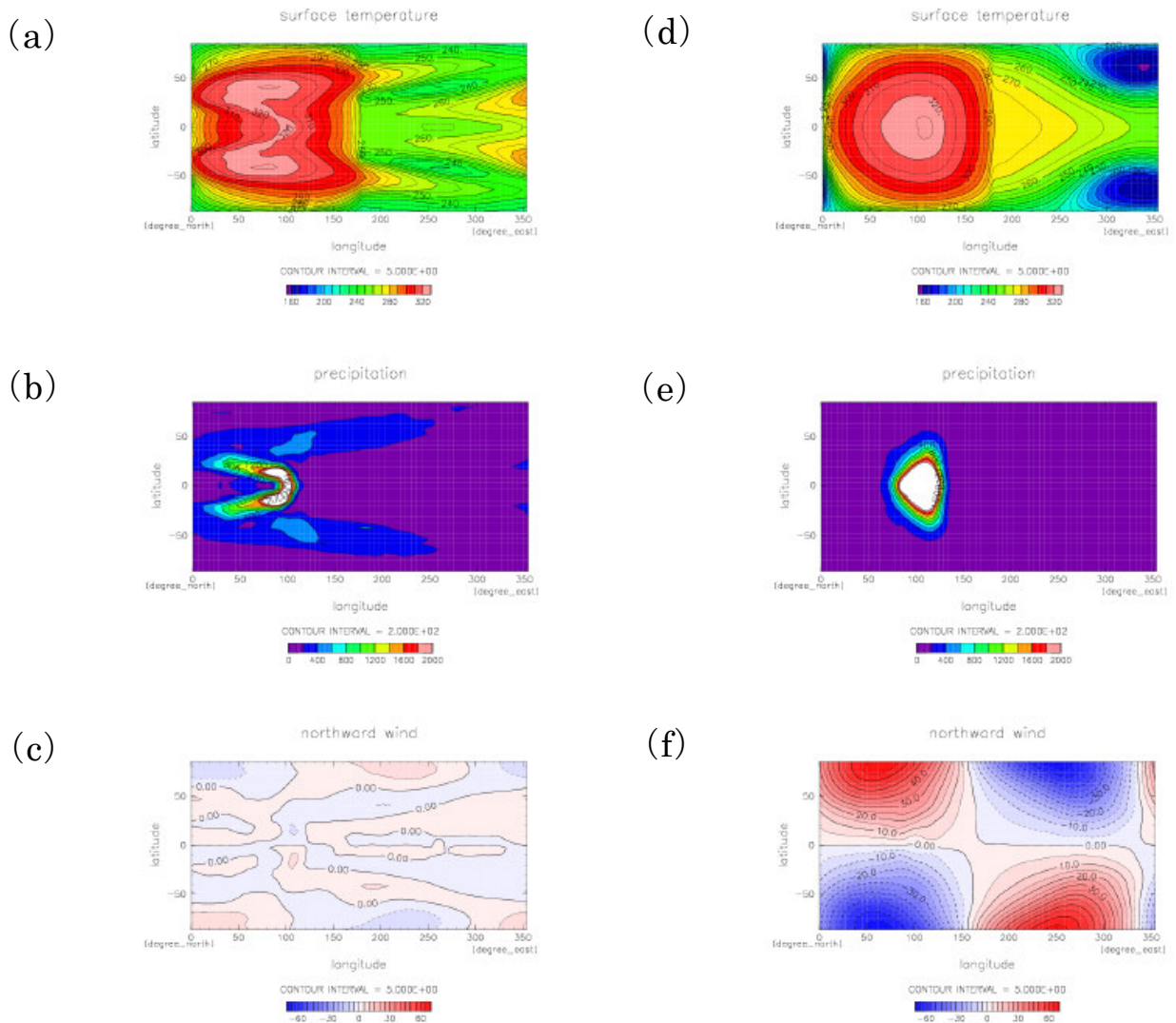


図 5: 同期回転惑星の計算例。(a)~(c) は $\Omega = \Omega_E$ の場合の結果、(d)~(f) は $\Omega = 1/13 \Omega_E$ の場合の結果を示す。(a)、(d) は地表面温度[K]。等値線の間隔は 5K。(b)、(e) は凝結加熱率[W/m²]。等値線の間隔は 200 W/m²。白い部分は 2000 W/m² 以上を示す。(c)、(f) は $\sigma = 0.4$ 断面の南北風速の水平分布 [m/s]。等値線の間隔は 5m/s。いずれも 1000 - 2000 日の時間平均場を示す。納多他(2010) を改変。

参考文献

- [1] Abe, Y., Numaguti, A., Komatsu, G., Kobayashi, Y., 2005: Four climate regimes on a land planet with wet surface: Effects of obliquity change and implications for ancient Mars. *Icarus*, 178, 27–39.
- [2] Ishiwatari, M., Takehiro, S., Nakajima, K., Hayashi, Y., 2002: A numerical study on appearance of the runaway greenhouse state of a three-dimensional atmosphere. *J. Atmos. Sci.*, 59, 3223-3238.
- [3] Ishiwatari, M., Nakajima, K., Takehiro, S., Hayashi, Y., 2007: Dependence of climate states of gray atmosphere on solar constant: from the runaway greenhouse to the snowball states. *J. Geophys. Res.*, 112, D13120.
- [4] North, G. R., 1975: Analytical solution to a simple climate model with diffusive heat transport, *J. Atmos. Sci.*, 32, 1301–1307.

- [5] Williams, D. M., Pollard, D., 2002: Earth-like worlds on eccentric orbits: excursions beyond the habitable zone. *International Journal of Astrobiology*, 1, 61–69.
- [6] Williams, D. M., Pollard, D., 2003: Extraordinary climates of Earth-like planets: threedimensional climates simulations at extreme obliquity. *International Journal of Astrobiology*, 2, 1–19.
- [7] 地球流体電脳倶楽部 dcmode1 プロジェクト, 2005: <http://www.gfd-dennou.org/library/dcmode1/>, 地球流体電脳倶楽部.
- [8] 高橋芳幸, 森川靖大, 石渡正樹, 納多哲史, 佐々木洋平, 小高正嗣, 西澤誠也, 竹広真一, 中島健介, 堀之内武, 林祥介, DCPAM 開発グループ, 2010: 惑星大気モデル DCPAM, <http://www.gfd-dennou.org/library/dcpam/>, 地球流体電脳倶楽部.
- [9] 杉山耕一郎, 小高正嗣, 山下達也, 中島健介, 林祥介, deepconv 開発グループ, 2010: 非静力学モデル deepconv, <http://www.gfd-dennou.org/library/deepconv/>, 地球流体電脳倶楽部.
- [10] 納多哲史, 石渡正樹, 中島健介, 高橋芳幸, 森川靖大, 西澤誠也, 林祥介, 2010: 同期回転惑星における大気大循環の数値実験第 24 回大気圏シンポジウム講演集, <http://www.isas.ac.jp/j/researchers/symp/>
- [11] 佐藤文衛, 2009: ドップラー法による系外惑星探索. *遊星人*(日本惑星科学会機関誌), 18, 138–146.
- [12] 井田茂, 2003: 異形の惑星. 日本放送出版協会.
- [13] The Extrasolar Planets Encyclopaedia. <http://exoplanet.eu/>.
- [14] NASA Ames Research Center, 2010: Kepler, A search for habitable planets. <http://kepler.nasa.gov/>.