

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 5月10日現在

機関番号：17102

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2009～2011

課題番号：21654066

研究課題名（和文） 系外惑星を視野に入れた海洋大循環理論の再構築

研究課題名（英文） Re-examination of ocean circulation theory aimed at the application to the situations on extra solar planets

研究代表者

中島 健介 (NAKAJIMA KENSUKE)

九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：10192668

研究成果の概要（和文）：地球とは異なる条件にある太陽系外惑星をも視野に入れた「汎惑星海洋学」の構築に向けた第一歩として、自転と公転が同期した惑星の全表面を覆う海洋の運動について鉛直1層の数値モデルによる研究を行った。風の効果を見せず、流れが昼半球の降水・蒸発で駆動されるとした場合でも、流れは東西流が支配的となる。その強さは、昼夜半球間に無視出来ない量の熱を輸送し得る。風の効果を入れれば流れと熱輸送はさらに強くなる。

研究成果の概要（英文）：As the first step toward the establishment of “pan-planetary oceanography”, which should consider the oceans on all possible planets including extra solar planets that could be very different from the earth, the circulation of an ocean covering a synchronously rotating planet is investigated using one-layer ocean model. Even when the ocean is forced only by the rainfall and evaporation in the day-hemisphere without the forcing by wind, the flow is dominated by zonal flow encircling the planet, which would transport non-negligible amount of heat from the dayside to night-side. The oceanic flow, and the heat transport thereby, is estimated to be much stronger if the forcing by wind is considered.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：地球惑星科学、気象・海洋物理・陸水学

キーワード：惑星科学、系外惑星、地球流体力学、海洋大循環、
ハビタブル惑星、アストロバイオロジー

1. 研究開始当初の背景

1995年の最初の発見以来13年を経た本研究の申請の時点で太陽系外惑星の個数はすでに200個を超えており、本研究終了の現在、ケプラー衛星の活躍により、その数は3000個に迫っている。中には中心星

からの距離から考えて、表面に海を持つものもあると予想され、その構造と運動特性は、表層環境への影響や生命存在の可能性とも関係して重要な問題である。これまでに知られている系外惑星のバラエティから想像するに、惑星のサイズ、海の深さ、自転・公転の周期、大陸の存否など、あり得る海洋の多

様性は極めて大きいと予想される。然るに現在の海洋物理学は「5つの大陸と七つの大洋」という地球固有の設定のもとで発展して来たため、多様な系外惑星海洋に対して、そのまま適用することには非常に大きな不安がある。たとえば、現在までに発見されている地球惑星の多くは、太陽よりも暗い「赤色矮星」のごく近傍に存在し、中心星の潮汐力のため、惑星の自転と公転が一致した「同期回転惑星」であると考えられている。このような惑星においては、惑星の半分は永遠の昼、残りの半分は永遠の夜であり、この東西方向の熱的コントラストが大気や海洋の運動を支配する可能性がある。この状況は、主に赤道と極の間の南北方向の熱的コントラストが支配する我々の地球の設定とは大きく異なっている。また、惑星の全表面を覆うような海洋についての考察は、大陸に囲まれた海に特化した現在の海洋学が不得意とするところである。これらの場合を含めて考察の対象とするためには、海洋物理学を現在のものから大きく拡張し「汎惑星海洋学」ともいべき枠組を構築する必要がある。

2. 研究の目的

海を持つ系外惑星全般を視野に入れた「汎惑星海洋学」を構築する第一歩として、惑星のサイズ・自転周期・自転軸の傾斜・自転公転の共鳴の有無・海の深さが、海洋大循環にどのように影響するかを、理論的考察と数値実験によって吟味する。大陸の存否については少数の代表的な条件に限定する。数値実験は3次元の現実的海洋大循環計算だけでなく、鉛直1層モデルなど単純なモデル実験も行い、理論的考察を十分に行う。最後にこれらの結果を総合して、改めて汎惑星海洋大循環理論の構築への課題を展望する。

3. 研究の方法

水平2次元の一層流体モデル、鉛直断面の2次元モデル、3次元大循環モデルの3つを組み合わせ、多様な条件における海洋循環を吟味する。大陸の存否については、全惑星が海洋に覆われた場合、地球と同様に大陸と大洋に区分される場合、海洋中に多数の島が点在する場合に限定する。非地球的设置を含めた計算を行う事が出来るよう、数値モデルの作成から着手する。

4. 研究成果

海洋中に多数の島が点在する場合も想定して数値モデルの構成に着手したが、安定な数値計算を行うことが出来ず、そのため、当初に構想していた数値実験の多くは行う事

ができず、系外惑星海洋学の文字通り「第一歩」を踏み出したに留まった。それでも、自転と公転が同期した惑星の全表面を海洋が覆うという、最も「非地球的」な場合については有用な結果を得る事が出来た。

(1) 降水・蒸発駆動の循環の基本形

惑星の自転と公転が同期した惑星における降水と蒸発は、もっぱら惑星の昼半球で生じる。その具体的な様相は納多ほか(2011)の数値計算で求められており、蒸発が広い範囲で起こるのに対して、降水は狭い範囲に集中するという特徴がある。そこで、これを単純化して鉛直一層の海洋モデルに対する質量源として与え(図1)、生じる運動を調べた。

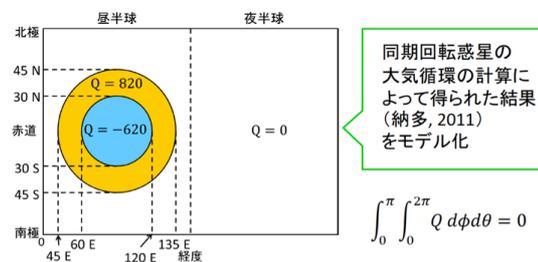


図1. モデル海洋に与えた降水(青)と蒸発(オレンジ)の水平分布。

結果として生じる海洋循環の特徴は、全体的には地球の海洋とは全く異なるものとなった。具体的特徴は次のように整理出来る。

降水と蒸発の局所的なアンバランスに対応して、定常な南北流が生じる。これは、良く知られた「スベルドラップ平衡」により支配されるものであり、地球の海洋学の枠内にある(図2)。

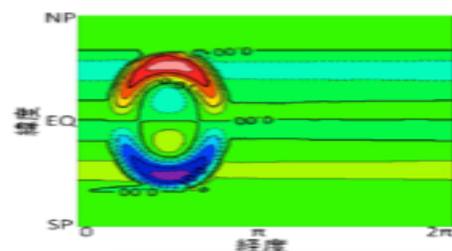


図2. 南北流の水平分布。蒸発域では、北半球で北向き(赤のトーン)、南半球で南向き(青のトーン)の流れが定常的に生じる。降水・蒸発域の外側の流れの南北成分は極めて弱い。

これに重複して、降水・蒸発ともに昼半球に集中しているにもかかわらず、昼・夜の両半球にまたがった、経度方向にほとんど一様な東西流が形成され、これと地衡流バランスした海面高度の高低が生じる（図3）。

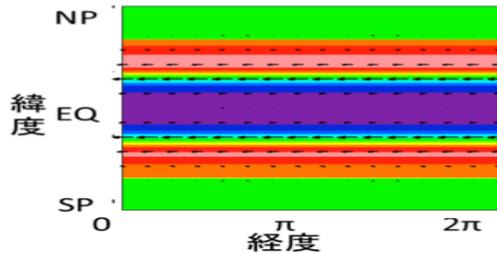


図3. 海洋の流れ（全体に東向き）と海面高度（赤い部分で高く、青い部分で低い）の水平分布。昼半球に集中した強制によって駆動されているにもかかわらず、極めて東西一様である。

ただし、極めて重要なことであるが、この解は定常ではなく、流れの東西成分と海面高度は、この分布を保ったまま、時間に比例して強まって行くという特徴がある（図4）。

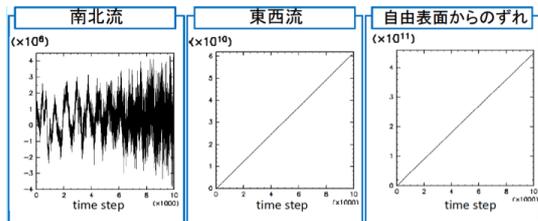


図4. モデル海洋中の一地点における南北流（左）、東西流（中央）、海面高度（右）の時間発展。南北流は振動しつつも平均的には定常に至るが、東西流と海面高度は増大する。

このような振る舞いは、数値計算上の不安定ではないことが、解析的に分かった。即ち、解を時間の一次関数に比例すると仮定して支配方程式に代入すると、南北流が定常、東西流と海面高度が時間に比例して増大する、という解が得られ、その空間構造は数値計算で得られたものと良く一致していた。

以上の様な特徴は、本質的には惑星の自転の影響で生じている。実際、惑星が自転していないと設定して同一の降水・蒸発分布を与えた場合には、流れは定常で、降水域と蒸発域の間に生じるのみで、その影響は夜半球には全く及ばなかった。

(2) 海底摩擦の効果についての考察

ここで求めた海洋循環は時間とともに限りなく強まって行く。これは、用いた方程式に消散過程が入っていなかったためである。そこで海底摩擦の効果、境界層近似を用いて導入した場合の流れの強度について考察を行った。

その結果、中心星からの光の強度が、我々の太陽からの光の総量と同程度である場合には、平均的な東西流の速度は 3 mm/s 程度となることを見積もられた。これは我々の地球の海洋循環の強度（典型的には 10 cm/s ~ 1 m/s 程度）と比べて極めて小さく思える。しかし、これは鉛直 1 層のモデル海洋についてのものであるので海洋の全深度に及び、また東西方向には昼夜半球の両方にまたがっていることに注意せねばならない。このような鉛直・東西への広がりやを考慮すると、この東西流による熱輸送は、我々の地球で赤道と極の間に運ばれている熱量とほぼ同じ程度になることがわかった。

なお、消散の効果を生じ得る今ひとつの要素としてとして、降水・蒸発に伴って大気と海洋との間で角運動量が交換されることが寄与する可能性がある。これは、海の流れが強くなると重要になるが、その考察を進めるためには、大気側の水の輸送と、その間の角運動量の変化についての考察が必要となる。これは、将来の検討課題として残している。

(3) 風の効果についての考察

ここまでの計算では、風による運動量強制は考慮していなかったが、我々の地球では風による強制も重要であることがわかっていく。そこで、やはり境界層近似を導入して、風による強制を考慮した場合の流れの強さについて考察を行った。

その結果、典型的な風の強さにおいて、海洋の東西流の強さは 10cm/s 程度と見積もられ、風を含まない場合の 30 倍程度に達する。したがって、単純に計算した場合の昼夜半球間の熱輸送は、我々の地球の赤道と極の間の熱輸送よりもずっと大きいことになる。

(4) 今後に向けて

以上の結果から、同期回転惑星における海洋循環は、昼夜半球にまたがった東西流として生じ、その強度は我々の地球の海流と比べてそれほど強くないものの、それによる熱輸送はかなり大きい。我々がこれまで行って来た同期回転惑星の大気に関する数値モデリングにより得られた大気による

昼夜半球間の熱輸送は、我々の地球の南北熱輸送と同程度である。したがって、本研究の結果が示唆する海洋熱輸送は、同期回転惑星においても大気熱輸送に匹敵するか、これを凌駕する可能性がある。となると、我々の地球についてと同様、海洋を持つ惑星の気候の決定には、大気だけでなく海洋の効果の見積もりが不可欠であり、当然、大気と海洋は結合されたシステムとして、その振る舞いを知らねばならない。

本研究の次の段階としては、鉛直1層ではなく、本格的な3次元海洋大循環モデルを用いる必要があるだろう。しかし、我々の地球で用いられているモデルがそのまま使用可能であるかは必ずしも明白ではない。たとえば、上の(2)と(3)で想定した海底摩擦は現在の地球の海洋での値を援用したが、これを系外惑星の海で使う事の正当性は全く保証されない。また、熱的循環の駆動において本質的に重要である海洋中の鉛直拡散係数にも注意が必要である。即ち、我々の地球の海洋における拡散係数は、月と太陽による潮汐の存在によって大幅に底上げされていることが分かっており、月の様な巨大な衛星を持たない惑星において、鉛直拡散係数がどのように定まるかは未知の問題である。

さらに、3次元計算を行うにあたって、今ひとつの不確定要素が上げられる。本研究の結果、全惑星を海洋が覆う場合には多少とも強い東西流が生じる可能性が示唆されるが、そのような場合には、大気と同様に海洋中の東西流も流体力学的不安定を生じて流れは乱流状態となると考えられる。そのような状況で、水平拡散係数としてどのような値を用いるべきであるかは、我々の観測が存在する地球の海でさえ、大きな不確定を含んだ問題である。観測が不可能である太陽系外惑星に関して、水平拡散係数をどう予測するかは大きな課題である。高解像度の数値モデル実験を行う事がもちろん、一つの重要な方向であるが、多様な系外惑星の広汎なパラメタについて高解像度実験を行う事は、特に地球より巨大な惑星を想定する場合には、容易ではないと懸念される。

上のような不定性を念頭におくと、「汎惑星海洋学」の構想を進めるにあたっては、三次元計算と少なくとも並行して、鉛直1層モデル等の単純なモデルによる数値実験と考察を行うことが、まだまだ不可欠であろうと思われる。本研究は、その第一歩として位置づけられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 中島健介、松尾花枝、同期回転惑星の海洋循環についてのコメント～全惑星を海洋が覆う場合～、系外惑星大気ワークショップ、2013. 03. 05, 東京大学
- ② Hanae Matsuo, Masaki Ishiwatari, Shin-ichi Takehiro, Yoshi-Yuki Hayashi, Kensuke Nakajima, "A preliminary study on the circulation of an ocean covering a synchronously rotating planet", American Geophysical Union, 2012 Fall Meeting, 2012.12.04, San Francisco, CA, USA.
- ③ K. Nakajima, S. Noda, M. Ishiwatari, Y. O. Takahashi, S. Takehiro, Y. Morikawa, S. Nishizawa, Y.-Y. Hayashi, "Atmospheric general circulations of synchronously rotating terrestrial planets: Dependence on planetary rotation rate", Comparative Climatology of Terrestrial Planets 2012, 2012.06.27, Boulder, CO, USA.
- ④ 中島健介、松尾花枝、同期回転惑星の海洋循環についてのコメント、系外惑星大気ワークショップ、2012. 03. 17, 神戸市
- ⑤ 松尾花枝、中島健介、同期回転惑星の海洋循環についての基礎的考察、地球流体力学研究集会、2011. 12. 13, 九州大学応用力学研究所
- ⑥ 松尾花枝、中島健介、同期回転惑星の海洋循環についての基礎的考察、日本惑星科学会秋季講演会、2011. 10. 24, 相模女子大

6. 研究組織

(1) 研究代表者

中島 健介 (NAKAJIMA KENSUKE)
九州大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号：10192668

(2) 研究分担者

石渡 正樹 (ISHIWATARI MASAKI)
北海道大学・大学院理学研究院・准教授
研究者番号：90271692