

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：34504

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14603

研究課題名（和文）競争と環境のハイブリッドシステムに対する解析 惑星温暖化とパターン形成

研究課題名（英文）Analysis of competition-environment hybrid system: Planetary warming and pattern formation

研究代表者

陰山 真矢（Kageyama, Maya）

関西学院大学・理学部・助教

研究者番号：80824060

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：生物と環境の相互作用システムを非常に単純に再現した地球システムモデルであるデイジーワールドモデルに対して、温室効果の影響を新たに加え、解析的および数値的に研究を行った。まず、解の安定性解析により、システムが持つ解の構造を簡単に調査し、空間的パターン解が得られるパラメータの絞り込みを行った。これにより、実際に数値シミュレーションによってパターン解を得ることができた。さらに、惑星の温室効果が強まるもしくは弱まると、惑星上の植生は自らの生育域、生物量を変化させながら、惑星の温度を自律的に調節することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、温室効果が強まる中で、温度が植生にとって適した値に保たれているにもかかわらず、その水面下では植生が自らの生育域、生物量を大きく変化させていることを明らかにした。これは植生の分布パターンを観測することが、温室効果の影響度合いを測る新たな指標となることを示唆している。さらに、先行研究との比較によって、非常に長い期間においても僅かである太陽光度の強まりと温室効果の強まりが同程度もしくはそれ以上の影響を植生に与える可能性を明らかにした。これは温室効果ガスの減少が地球温暖化の抑止のための喫緊の課題であることの一つの証左となり得ることを意味する。

研究成果の概要（英文）：Daisyworld model is known as one of the Earth system model, which simplifies the interaction system between life and its environment. I conducted analytical and numerical studies on Daisyworld model added anew the greenhouse effect. First, by investigating the stability and instability of the solutions, I clarified the structure of the solutions of the system and narrowed down the parameters to obtain the spatial pattern. In fact, some pattern solutions were obtained by numerical simulation. Furthermore, it was showed that when the greenhouse effect of the planet is strengthened or weakened, the vegetation on the planet autonomously regulates the temperature of the planet while changing its habitat and biomass.

研究分野：数理解析学

キーワード：反応拡散系 パターン形成 惑星温暖化 デイジーワールド 数理モデル 植生と環境

1. 研究開始当初の背景

1983年にワトソンとラブロックは、地球における生物と環境の相互作用システムのメカニズムを明らかにするためにデイズワールドモデルを導入した。このデイズワールドモデルは、惑星に棲息する生物を反射率の異なる2色のデイズのみに、環境を温度のみに単純化した数理モデルである。ワトソンとラブロックはこのモデルを用いて、仮定の惑星が予測や計画性無しに、大域温度をデイズの成長に最適な値へと自律的に調節するような結果を示した。デイズワールドの最初の方程式は空間的な広がりを考えていない0次元のモデルであったが、その後の研究で、1次元モデル、2次元モデルとモデルの拡張がなされている。加えて、デイズワールドモデルは非常に単純な地球システムモデルとして様々な問題への活用が期待されており、地球温暖化問題もそのひとつである。

現在、地球温暖化は国際的な取り組みが必要とされている深刻な問題であり、その進行防止あるいは完全な解決を目指した様々な研究が進められている。特に温暖化が現時点でどの程度進行しており、どのような影響を与えているのかを知ることは、温暖化問題を取り扱うにあたって非常に重要である。

2. 研究の目的

本研究では、単純な地球システムモデルのひとつであるデイズワールドモデルを、温室効果の影響を考慮した2次元反応拡散方程式へと拡張する。このモデルを用いて、植生の分布パターンが温暖化の進行度合いを知るための指標になり得るのかを調べることを目的とする。この方法が可能となれば、リモートセンシングによる衛星画像データの新たな活用手段を得ることができ、さらに、温暖化の進行を防止するために植生保全の面でどのように行動すべきかの指針が得られる可能性がある。

3. 研究の方法

2次元デイズワールドモデルに温室効果の強度を表すパラメータ a と ε を加えた以下の方程式系を考える。

$$\begin{aligned}\frac{\partial u}{\partial t} &= d\Delta u + [(1-u-v)\Phi(u,v,w) - f]u, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= d\Delta v + [(1-u-v)\Psi(u,v,w) - f]v, \\ \frac{\partial w}{\partial t} &= D\Delta w + (1-a)[1-g(u,v)]R - (1-a)\left(\frac{2-\varepsilon}{2-a}\right)\sigma w^4.\end{aligned}$$

$u = u(x, y, t), v = v(x, y, t)$ は、それぞれ領域上の各点 (x, y) 、各時刻 t における白色と黒色のデイズの被覆率を表し、 $w = w(x, y, t)$ は温度を表す。 $\Phi(u, v, w), \Psi(u, v, w)$ はそれぞれ白と黒のデイズの成長率を表す。 $g(u, v)$ は地表面の平均光反射率 (アルベド) であり、 R は太陽から届くエネルギー、 σ はシュテファン・ボルツマン定数である。 a は短波放射に対する大気の吸収率、 ε は長波放射に対する大気の射出率である。

この方程式系に対して以下の手順で研究を行う。

- (1) 上記モデル方程式に対して、放物型発展方程式の理論を用いて時間大域的一意解を構成し、力学系を定め、指数アトラクタの存在を示す。これによって、解の挙動が有限自由度なものへと絞り込まれることを示すことができる。
- (2) 解の安定性解析を行う。これにより一様状態の不安定化が起こる条件を調べることができ、パターン形成が起こることが理論的に示唆される。
- (3) 有限差分法を用いてモデル方程式を離散化し、数値シミュレーションを行う。温室効果の強さが変化した際に現れる植生パターンの変化を観察する。
- (4) 上記(1)-(3)によって得られた結果から、温室効果強度と植生分布パターンの関係性について考察する。

4. 研究成果

温室効果の影響を考慮したデイズワールドモデルに対して、温室効果の強度を表すパラメータ ε を動かすことによって、温暖化が植生パターンに与える影響を仮定の惑星上で調べた。

まず、方程式の各定数定常解に対して安定・不安定性の分岐を明らかにした (図1)。温室効果の影響力が低いとき、つまり ε の値が0に近いとき、定数定常解はデイズが全くない零解のみを持ち、この零解は安定となる。 $0.337 \leq \varepsilon \leq 0.552$ では、零解だけでなく黒いデイズのみが領域上に育つ2つの黒色相 $(u, v) = (0, v_*)$ 、 $(0, v^*)$ を持つ。このとき、零解と黒色相 $(0, v^*)$ は双安定となり、黒色相 $(0, v_*)$ は不安定である (ただし $v_* < v^*$ とする)。 $0.553 \leq \varepsilon \leq 0.595$ の場合、不安定な零解と安定な黒色相を持つ。さらに、 $0.596 \leq \varepsilon \leq 0.744$ では、零解、黒色相、白いデイズと黒いデイズが領域上に共存している共存相を持つ。このとき共存相のみが安定、それ以外の定数定常解は不安定となる。 $0.745 \leq \varepsilon \leq 1.032$ の区間では、零解、黒色相、共存相、白いデイズのみが育つ白色相の4種類の定数定常解を持つ。この場合も共存相のみが安定、それ以外の定数定常解は不安定である。 $1.033 \leq \varepsilon \leq 1.149$ では、零解、共存相、白色相を持ち、共存相の

み安定である。 $1.150 \leq \varepsilon \leq 1.236$ の区間では、零解、共存相、2つの白色相を持ち、零解と共存相は安定、白色相は不安定となる。 $1.237 \leq \varepsilon \leq 1.336$ の区間では、零解と2つの白色相 $(u, v) = (u_*, 0), (u^*, 0)$ を持つ。この場合、零解と白色相 $(u^*, 0)$ は双安定となり、白色相 $(u_*, 0)$ は不安定である（ただし $u_* < u^*$ とする）。 $1.337 \leq \varepsilon$ では定数定常解は零解のみであり、この解は安定である。

また、共存相に関しては、デ이지の拡散率 d が熱拡散率 D よりも十分小さい場合には不安定となることが分かっている。このように、反応拡散方程式において拡散率の違いが空間一様状態の不安定化を生み、空間パターンを形成する現象は拡散誘導不安定性と呼ばれている。このことから、温室効果を考慮した2次元デ이지ワールドモデルにおいても、拡散率の選び方によって何らかの空間パターンが得られることを示すことができた。

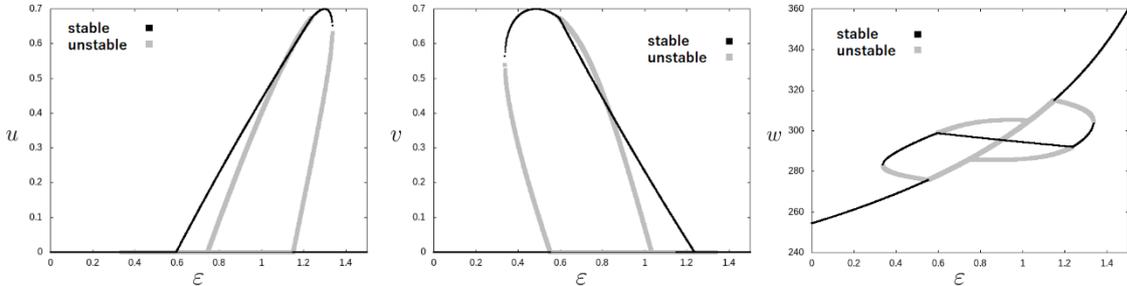


図1. ε を動かしたときの定数定常解の分岐図。左から白いデ이지 u 、黒いデ이지 v 、温度 w の分岐図を示している。

次に、上記の定数定常解の安定性解析の結果を受けて、実際に数値シミュレーションを行った。特に、共存相となる定数定常解をもつ ε の値においては、デ이지の拡散率 d と熱拡散率 D をうまく選ぶことにより一様状態の不安定化が起こり、パターンを観測することができた(図2)。図2(a) $\varepsilon = 0.75$ のとき、黒いデ이지が領域上に優位に拡がり、その中に白いデ이지が斑点状に分布している(黒優勢斑点パターン)。これは、惑星での温室効果が弱いため、より高い光吸収率を持つ黒いデ이지が優位に育つことができるためである。図2(b) $\varepsilon = 0.80$ 、(c) $\varepsilon = 0.85$ では、同じく黒いデ이지が優勢であるが、白いデ이지が $\varepsilon = 0.75$ のときよりも生育領域を広げている(黒優勢連銭パターン)。図2(d) $\varepsilon = 0.90$ のとき、白いデ이지と黒いデ이지は均衡状態となっている(迷路パターン)。このとき、惑星の温度はデ이지の成長に適した温度に非常に近づいている。図2(e) $\varepsilon = 0.95$ の場合、惑星の温室効果は比較的強くなっており、領域上には効率的な光反射効果を持つ白いデ이지が優位に育ち、その中に黒いデ이지が生育している(白優勢連銭パターン)。図2(f) $\varepsilon = 1.00$ では、同じく白いデ이지が優勢であり、黒いデ이지は $\varepsilon = 0.95$ の場合よりも生育領域を狭めていることが分かる。この結果から、惑星の温室効果の度合いが強まっているにもかかわらず、2色のデ이지による自己調節機能により惑星の温度はデ이지の成長に適した温度周辺に保たれていることが分かった。さらに、温度の恒常性が保たれている区間においても、植生の分布パターンは各 ε に対して変化していることを明らかにした。

また、このような ε の値の変化に対するデ이지の分布パターンの移り変わりは、2次元デ이지ワールドモデルにおいて太陽からの光の強さを変動させた際にも見られている。ただし、現実における太陽からの光の強さの変動が長い期間においても少量である。これらの結果は、温室効果の僅かな変化が太陽からの光の強さの変化と同等、もしくはそれ以上の効果をもって植生の分布に影響を与えている可能性を示唆している。

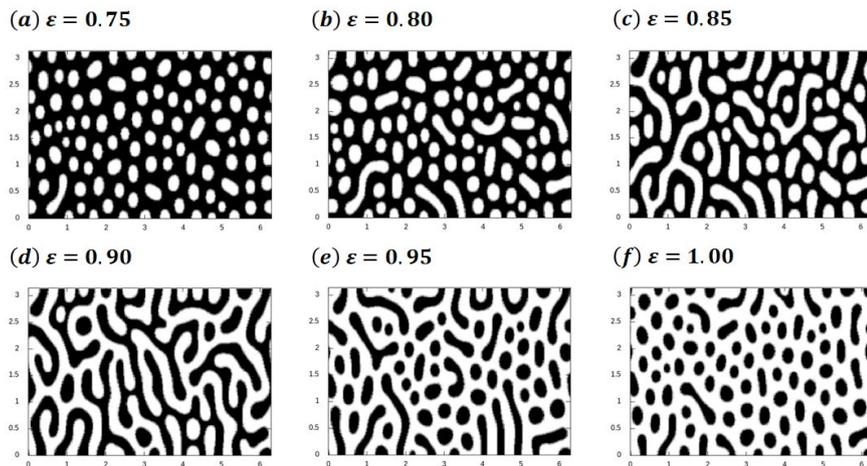


図2. ε を動かしたときの白いデ이지 $u(x, y, t)$ と黒いデ이지 $v(x, y, t)$ の分布。時刻 $t = 10000$ での数値計算結果。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kageyama Maya, Yagi Atsushi	4. 巻 81
2. 論文標題 Mechanisms of climate homeostasis in Daisyworld and spatial segregation patterns	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation	6. 最初と最後の頁 1~12
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.cnsns.2019.104990	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 陰山真矢
2. 発表標題 デイジーワールドモデルにおける温室効果と植生パターン形成
3. 学会等名 異分野・異業種研究交流会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Maya Kageyama
2. 発表標題 Vegetation pattern formation in Daisyworld model with the greenhouse effect
3. 学会等名 Modeling and Mathematical Analysis of Dynamics of Patterns（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 陰山真矢
2. 発表標題 温室効果を考慮したデイジーワールドモデルと惑星温度恒常性
3. 学会等名 明治非線型数理セミナー・秋の学校
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陰山真矢
2. 発表標題 温室効果を考慮したデイズワールドモデルと惑星温度恒常性
3. 学会等名 異分野・異業種研究交流会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陰山真矢
2. 発表標題 温室効果を含むデイズワールドモデルに対する数値シミュレーション
3. 学会等名 西日本非線形科学研究会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陰山真矢
2. 発表標題 デイズワールドモデルに対する温度調整機構と棲み分けパターン
3. 学会等名 第2回松江数理生物学・現象数理学ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Maya Kageyama
2. 発表標題 Climate regulation and spatial segregation patterns in Daisyworld
3. 学会等名 The 7th China-India-Japan-Korea International Conference on Mathematical Biology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 陰山真矢
2. 発表標題 2次元デイズワールドモデルにおける棲み分けパターン
3. 学会等名 日本応用数理学会2019年度年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Maya Kageyama
2. 発表標題 Climate Homeostasis of Daisyworld and Segregation Patterns
3. 学会等名 Symmetry: Art and Science -11th Congress and Exhibition (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------