

デイジーワールドにおける環境と植生の相互作用について

陰山真矢*

* 岡山理科大学理学部応用数学科
m-kageyama@ous.ac.jp

1970年代に J.E. Lovelock は、地球は、そこに棲む生物とそれらを取り巻く環境とが相互作用することによって、地球全体を安定化に向けて自己調節しているひとつのシステムであると考えた。このようなシステムを理想的に単純化した仮想の惑星がデイジーワールドである。Watson-Lovelock [1] によって導入されたデイジーワールドは地球に似た惑星で、恒星の周りを公転している。この惑星上には黒色と白色の2種類のデイジーしか存在しておらず、これらは地球の植物と同様に互いの生育域を争っている。また、デイジーワールドの大域温度は恒星からの放射熱と地表面の光反射率（アルベド）によってのみ決まる。つまり、地表面の色が濃いほど恒星からの光を吸収して温度が上昇しやすく、色が薄いほど温度は上昇しにくい。Watson と Lovelock による最初のデイジーワールドの方程式 [1] は、惑星全体を1点として考えた0次元のモデルであった。これは非常に単純なモデルであったにもかかわらず、2種類のデイジーが生育域を争いながら、惑星の大域的な温度を自らの成長に最適な値へと自律的に調節していくことを示した。その後、モデルは Kageyama-Yagi [2] において以下の2次元反応拡散系へと拡張され、解析的かつ数値的に調べている。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = d\Delta u + [(1 - u - v)\Phi(u, v, w) - f]u \quad \text{in } \Omega \times (0, \infty), \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = d\Delta v + [(1 - u - v)\Psi(u, v, w) - f]v \quad \text{in } \Omega \times (0, \infty), \quad (2)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = D\Delta w + [1 - g(u, v)]R - \sigma w^4 \quad \text{in } \Omega \times (0, \infty), \quad (3)$$

ここで、2次元長方形領域 $\Omega = (0, \ell_x) \times (-\ell_y, \ell_y)$ とし、 $u = u(x, y, t)$ を白いデイジーの被覆率、 $v = v(x, y, t)$ を黒いデイジーの被覆率、 $w = w(x, y, t)$ を温度とする。また、 f はデイジーの枯死率、 $\Phi(u, v, w)$ 、 $\Psi(u, v, w)$ はそれぞれ白と黒のデイジーの成長率であり、

$$\begin{aligned} \Phi(u, v, w) &= \{1 - \delta(\bar{w} - w - q[g(u, v) - A_w])^2\}_+, \\ \Psi(u, v, w) &= \{1 - \delta(\bar{w} - w - q[g(u, v) - A_b])^2\}_+. \end{aligned}$$

によって与えられる。 $g(u, v)$ は地表面の平均アルベドとし、白いデイジー、黒いデイジー、裸地のアルベド A_w , A_b , A_g を用いて以下の式で計算される。

$$g(u, v) = A_w u + A_b v + A_g(1 - u - v),$$

R は太陽からの入射エネルギー、 σ はシュテファン・ボルツマン係数を表す。 d はデイジーの拡散係数、 D は熱拡散係数とする。

Kageyama-Yagi [2] では、2次元デイジーワールドモデルにおいて、2種類のデイジーが同じ点上で共存することのない棲み分けパターン (Figure 1) が現れることを明らかにした。



Figure 1: 太陽からの光の強さを変化させた場合の白と黒のデイジーの分布.

本講演では、上記の2次元デイジーワールドモデル(1)-(3)に対して新たに温室効果の強度を表すパラメータを追加した反応拡散方程式系を扱う。

温室効果ガスは、短波放射（太陽からの日射）に対して透明、長波放射（地表面や大気からの赤外放射）に対して不透明な大気である（Figure 2）。このことから、2次元デイジーワールドモデルにおける温度の方程式(3)に温室効果強度を表すパラメータを新たに追加する。

本講演では、温室効果の影響を考慮したデイジーワールドモデルに対して、定数定常解の安定性と数値シミュレーション結果について述べる。特に、温室効果強度を表すパラメータ ε をチューニングパラメータとすることで、温室効果の強さの変化がデイジーの植生パターンにどのような影響を与えるかを、数値シミュレーションによって得られたパターン解から紹介する。また、デイジーワールドにおける温室効果が種の多様性に与える影響について簡単に述べる。

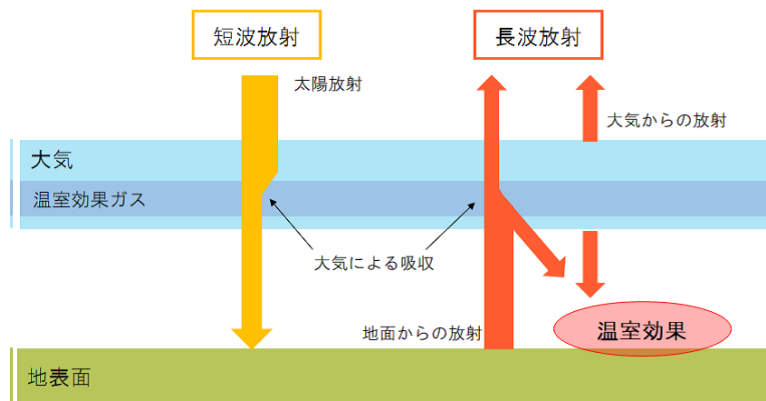


Figure 2: 地表面の熱収支.

それらの結果を踏まえて、世界的な取り組みが必要とされている地球温暖化問題に対して、数理モデルの観点から問題の解決へ向けた今後の展望について議論する。

References

- [1] A. J. Watson and J. E. Lovelock, *Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld*, *Tellus* Vol. 35B (1983), 284–289.
- [2] M. Kageyama and A. Yagi, *Mechanisms of climate homeostasis in Daisyworld and spatial segregation patterns*, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.*, **81** (2020).