

NetLogoを用いたセル・オートマトン型デージーワールド シミュレーションとアクティブラーニングでの活用

澤口 隆*

A Cellular Automaton “Daisyworld” simulation using NetLogo and Its
Application in Active Learning

Takashi SAWAGUCHI*

Abstract

This paper proposes one of the active learning pedagogical ideas for an Earth system science education using a “Daisyworld” simulation. The “Daisy world” is a model of an imaginary planet in Watson and Lovelock (1983) that includes only two species, black daisies and white daisies on its surface. Although increasing solar luminosity leads to rise of the amount of absorbed energy, habitation of black and white daisies controls the effective temperature of daisyworld. Such biological response to environment is regarded as “homeostasis” and its self-regulating system is taken into “Gaia hypothesis”. A multi-agent programmable modeling environment called “NetLogo” runs on multi-platform environments, Windows, Mac OS X, Linux and any web-browser. Students can understand a fundamental concept of the Earth system science when they discuss with other students in a lecture using cellular automaton “Daisyworld” simulation by NetLogo.

Keywords : NetLogo, Daisyworld, Gaia Hypothesis, Cellar Automaton, Earth System Science, Active Learning

1. はじめに

英国の科学者ラブロック (James Lovelock, 1919～) は、地球が自己調節機能を有した、

*) 東洋大学自然科学研究室 112-8606 東京都文京区白山5-28-20
Natural Science Laboratory, Toyo Univ., 5-28-20 Hakusan, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8606

あたかも1つの大きな生命体であるとする「ガイア仮説」を提唱した (Lovelock, 1979; ラブロック, 1984)。生命は一方的にその周りの環境に適応するだけでなく、地球と生命が相互に関係をし、生命から環境に対しても大きな影響を及ぼしているという考えに対して、ギリシア神話の女神“ガイア”にちなんで名付けられた。こうした惑星の恒常性 (homeostasis) ともいえる概念は、地球を1つのシステムとしてとらえる、“地球システム科学”という分野の発展に大きく寄与した。世界経済の急速な発展と人口増加、それに伴う様々な環境問題が顕在化してきた20世紀後半以降において、システム学を用いた地球環境の理解は不可欠であり、日本の大学でも“地球システム”を冠する学部・学科・講座などが増えた (例えば、地球システム科学講座 (東大)、地球環境システム学分野 (筑波大)、地球惑星システム学科 (広島大)、地球圏システム科学科 (山口大学) など)。

日本の高等教育界では18歳人口の減少に伴い、大学入学希望者総数が入学定員総数を下回る、いわゆる“大学全入時代”が到来して久しい。2012年の文部科学省中央教育審議会 (中教審) の答申「新たな未来を築くための大学教育の質的転換に向けて～生涯学び続け、主体的に考える力を育成する大学へ～」では、学生の「受動的な受講」から「能動的な学修」への転換が求められている (中央教育審議会 online: 1325048_1.pdf)。“アクティブラーニング”と呼ばれる、学修者が主体となった能動的な学修手法も、この頃から日本の高等教育に浸透してきた。

本論では、地球システム科学の講義においてアクティブラーニングを実践するために活用できる、NetLogoを用いたシミュレーション教材と、その学習指導案について報告する。

2. デイジーワールド

ラブロックは、生命が気候を調整するというガイア仮説の恒常性機能を説明するために、“デイジーワールド”と名付けた仮想的な惑星モデルの寓話を用いたシミュレーションを行った (Watson and Lovelock, 1983)。

デイジーワールドでは、太陽放射が降り注ぐ非常に単純な平板状の惑星を想定する。大気は温室効果が無視できるほどに薄く、雲は存在しない。そこには、白いデイジーと黒いデイジーの2種類のみが生育する。白いデイジーは地面より高いアルベドを持ち、黒いデイジーは低いアルベドを持つ。地球に降り注ぐ太陽放射は、46億年にわたって増加を続けていることが知られているが (Sagan and Mullen, 1972, Gough, 1981)、太陽光度の増加に伴って、惑星の放射平衡温度は変化する。デイジーは最適温度 (22.5℃) で最も成長が早く、生育最低温度 (5℃) から最高温度 (45℃) までの範囲で変化する成長曲線が設定されている。太陽光度が充分ではない初期には、デイジーは生育ができないほどに放射平衡温度は低い。太陽光度が増加をしていき、デイジーの生育可能温度に到達すると、最初に黒いデイジーが繁殖をはじめ (Fig. 1の太陽光度0.7)。黒いデイジーは地面より低いアルベドを持つため、黒いデイジーの占める面積が増えると、より太陽放射を吸収するようになり、惑星の温度は急激に上昇する。ここでは、黒いデイジーの繁殖と太陽放射の吸収が正のフィードバックループを構築している。この温度上昇は一定の温度で止まり、そ

れ以上では温度上昇はおきない。なぜなら、ダイジーの成長曲線で示される通り、生育可能温度（5℃～45℃）の範囲内でも最適温度（22.5℃）を超えると繁殖速度が減少し、負のフィードバック効果が生じるからである。黒いダイジーの増加に伴う温度の上昇により、白いダイジーも増え始める。白いダイジーは、地面よりも高いアルベドを持つため、黒いダイジーとは反対に、面積が増えると太陽放射をより反射するようになり、放射平衡温度は減少する（負のフィードバックループ）。白いダイジーが増加するに従って、黒いダイジーは徐々に面積を減らし、最後には死滅する（Fig. 1の太陽光度1.4）。ダイジーには一定の死亡率が存在するため、白いダイジーが惑星表面全てを覆うことはない。最終的には、太陽光度の上昇し、温度がダイジーの最適温度（22.5℃）を超えると、白いダイジーの面積は減少に向かう。この時、白いダイジーの面積割合減少は、相対的にアルベドが低い地面の露出を引き起こすため、正のフィードバックループ効果によって、温度は急激に上昇、白いダイジーも急速に死滅する（Fig. 1の太陽光度1.5から1.6）。

このように、ダイジーワールドを用いることで、生命と惑星環境との相互作用を簡潔に表現することができる。また、地球システム科学の理解の上で重要な、正と負のフィードバックループと環境変化を理解するための良い教材となる。伊勢（2013）は一般向けの啓蒙書のなかで、オリジナル版のダイジーワールドを更に簡略化し、白いダイジーのみが存在するダイジーワールドを用いて説明を展開している。

2.2 ダイジーワールドの基礎方程式

Watson and Lovelock（1983）、および、Sessini（2007）に従って、ダイジーワールドの基礎方程式を以下に概説する。

ダイジーワールドの気温は、シュテファン・ボルツマンの法則に従う。

$$E_{em} = \sigma_{SB} T^4 \quad (2.1)$$

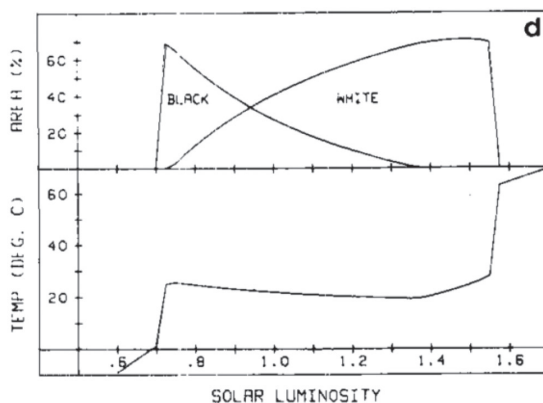


Fig. 1：ダイジーワールドモデルにおける太陽光度の増加、ダイジー面積割合、温度変化（Watson and Lovelock, 1983）。横軸が太陽光度（Solar Luminosity）。縦軸は、ダイジーの占める面積割合と放射平衡温度

ここで、 E_{em} は放射エネルギー、 σ_{SB} はシュテファン・ボルツマン定数、 T は惑星の温度である。放射エネルギーは、太陽定数 (S) と太陽光度 (L)、および惑星の平均アルベド (α_p) を用いて次のように表せる。

$$E_{em} = S \times L (1 - \alpha_p) \quad (2.2)$$

よって、放射平衡温度 (T_p) は、

$$T_p = \sqrt[4]{\frac{S \times L (1 - \alpha_p)}{\sigma_{SB}}} \quad (2.3)$$

となる。

惑星の平均アルベド (α_p) は、デイジーの面積比を用いて

$$\alpha_p = \alpha_w \alpha_w + \alpha_b \alpha_b + \alpha_{um} \alpha_{um} \quad (2.4)$$

と表される。ここで、 α_w 、 α_b 、 α_{um} はそれぞれ、白デイジー、黒デイジー、地面のアルベドである。 α_w 、 α_b 、 α_{um} はそれぞれ、白デイジー、黒デイジー、地面の面積割合である。

デイジーは、ある一定温度内でしか成長できないとし、その中で生育に最適な温度にピークを持った、放物線型の成長率 (g_s) を仮定する (Fig. 2)。

$$g_s = (1 - 0.0032 \times (22.5 - T_s)^2) \quad (2.5)$$

デイジーの面積割合の時間変化は、次の成長方程式に従う。

$$\frac{da_s}{dt} = a_s (a_{um} g_s - \text{deathrate}) \quad (2.6)$$

ここで、 α_s は、黒デイジーまたは白デイジーの面積割合、 α_{um} は地面の面積割合、 g_s は成長率、 deathrate は死亡率である。

デイジーが生えている近傍温度は、デイジーのアルベドに応じて、惑星の気温と比べて高く (または低く) なっている。

$$T_s = F_{HA} (\alpha_p - \alpha_s) + T_p \quad (2.7)$$

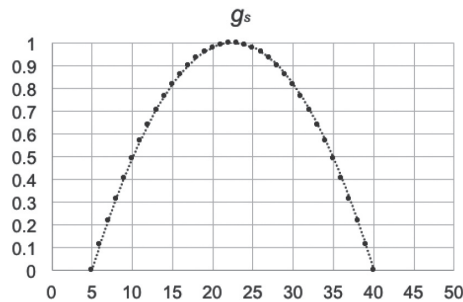


Fig. 2: デイジーの成長率。22.5℃で最大値1をとり、生育下限 (5℃) から上限 (45℃) まで放物曲線を描く。

ここで、 T_s は黒デージーまたは白デージーの近傍の温度、 F_{HA} は熱吸収係数、 α_p は惑星の平均アルベド、 α_s は黒デージーまたは白デージーのアルベド、 T_p は惑星の平均温度である。

3. シミュレーション

3.1 NetLogo

NetLogoは、“敷居は低く、限界はなく (low threshold and no ceiling)”というLogo言語のコンセプトを元にデザインされた、エージェント型プログラミング言語（と、その統合モデリング環境）である。Northwestern大学のUri Wilenskyらによって開発されている (Wilensky, 1999)。自然現象や社会現象のシミュレーションとその教育に主眼が置かれており、時間発展する複雑システムをモデリングするのに適している。NetLogoのモデルライブラリには、400以上のサンプルが含まれている。また、NetLogo Modeling Commonsと呼ばれるウェブ上の空間では、ユーザが作成したモデルの公開やディスカッションが活発に行われており、1,000以上のモデルが公開されている (NetLogo Modeling Commons online : list_models)。

3.2 NetLogo版デージーワールド

NetLogoのモデルライブラリには、デフォルトでデージーワールドのモデルがインストールされている (Fig. 3; Novak and Wilensky, 2006)。画面 (View) 上に格子状のパッチが設定されており、黒いデージーと白いデージーがそれぞれ温度条件によって成長と死滅を繰り返しながら、惑星全体の平衡温度を調整している様子を再現することができる。太陽光度には、いくつかのシナリオが用意されており、太陽光度の変化に応じたデージー面積の変化を観察できる。設定できるパラメータはTable 1の通りである。

このシミュレーションにも、いくつかの学習のためのチュートリアルが記載されており、デージーワールドを用いた地球システム科学の教育に利用すること可能であるが、以下の点が欠点として挙げられる。

- ・オリジナルのデージーワールド (Watson and Lovelock, 1983) と同様の、一方的な太陽光度の増加とデージーの面積の変化が再現できない。
- ・パッチ数が少なく、地面の温度が隣接するパッチ間での熱の伝導がモデルに含まれており、温度およびデージー数が、時間が経過しても平衡に達せず、システムが安定しない。
- ・デージーが存在しない場合の平衡温度との比較ができない。

3.3 System Dynamic Modeler版デージーワールド

NetLogoには、System Dynamics Modelerと呼ばれるモデル作成および実行環境があり、ボックス、フロー、変数などを用いてシステム図を作成しながら、シミュレーションを作成することができる。このSystem Dynamics Modelerを用いたデージーワールドの

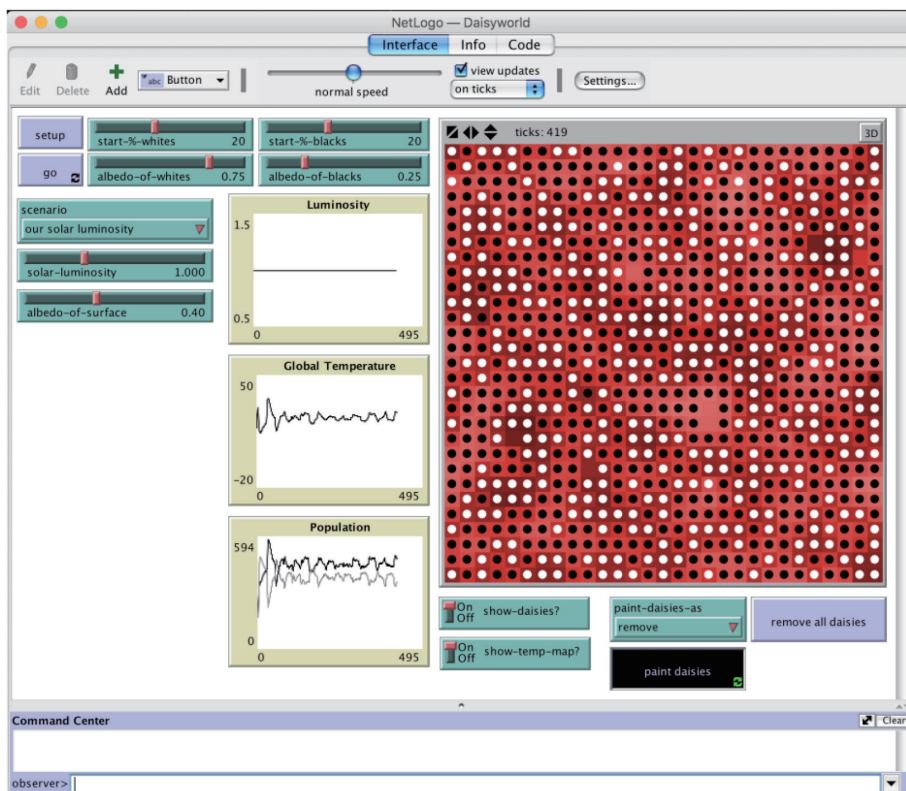


Fig. 3 : NetLogoモデルライブラリ版デージーワールド (Daisyworld)

Table 1 : デージーワールドで設定できるパラメータ群

パラメータ	説明	範囲	初期値
start-%-whites	白いデージーの初期値 (個体数)	0~50	20
start-%-black	黒いデージーの初期値 (個体数)	0~50	20
albedo-of-whites	白いデージーのアルベド	0.0~0.99	0.75
albedo-of-blacks	黒いデージーのアルベド	0.0~0.99	0.25
scenario	太陽光度の変化シナリオ	<ul style="list-style-type: none"> ・ 一定 ・ 上下変化 (0.8~1.8~1.175) ・ 低 : 0.6 ・ 太陽 : 1.0 ・ 高 : 1.4 	
solar-luminosity	太陽光度	0.001~3.000	0.8
albedo-of-surface	地面のアルベド	0.0~0.99	0.4

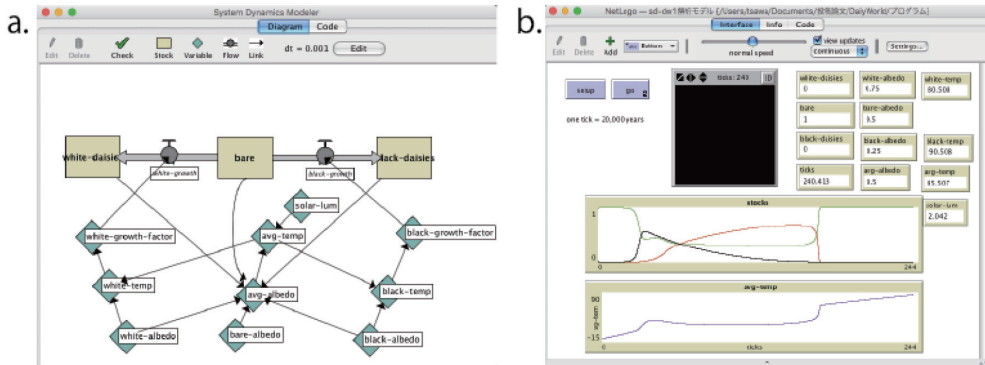


Fig. 4 : NetLogo System Dynamic Modeler版デイズワールド (Ralph Abraham online : NetLogo)。a. システム図、b. シミュレーション結果

例をFig. 4に示す (Ralph Abraham online : NetLogo)。

システム図において、[地面]、[黒デイズ]、[白デイズ] の3つがボックス (Stock) として与えられている。初期値は順に、0.98, 0.01, 0.01である。[地面] からは [黒デイズ] および [白デイズ] に対して、[black-growth] および [white-growth] と名付けられた流量 (フロー) がつながっている。フローは、(2.6) 式に相当する。太陽光度は0.6から時間とともに増加し、太陽光度と惑星の平均アルベドを用いて、惑星の平均温度が求められる ((2.3) 式に相当)。平均アルベドは、地面、黒デイズ、白デイズそれぞれのアルベドに面積比を乗じた和として計算される。黒デイズおよび白デイズ近傍の温度を計算し、成長率に応じて [地面] から [黒デイズ] および [白デイズ] に移流が生じる (繁殖する)。このシミュレーションの結果は、Fig. 4bに示されているが、オリジナルのデイズワールドと同様の結果が得られている。

実際にボックスモデルを使ったシステム図を作成しながらシミュレーションを行えるため、デイズワールドの理解には適しているが、空間上のデイズの変化などが視覚的に見えないところが、教育用のシミュレーションとしては欠点である。

3.3 セル・オートマトン型デイズワールド

Sessini (2007) は、NetLogoを用いたセル・オートマトン型 (以下、CA型と略す) のデイズワールドモデルを作成し、解析的に求められたデイズワールドと比較をした。

本論では、地球システム科学講義でのアクティブ・ラーニングによる活用を想定し、Sessini (2007) で開発されたCA型デイズワールドモデルについて、以下の2点を改良した (Fig. 5)。

- ・ 黒デイズおよび白デイズそれぞれに対するスイッチを設置し (switch_b、switch_w)、i) デイズなし、ii) 黒デイズのみ、iii) 白デイズのみ、iv) 黒デイズおよび白デイズ、の4つのパターンでのシミュレーションを可能とした。
- ・ Sessini (2007) では、デイズの成長率を以下のように計算している。

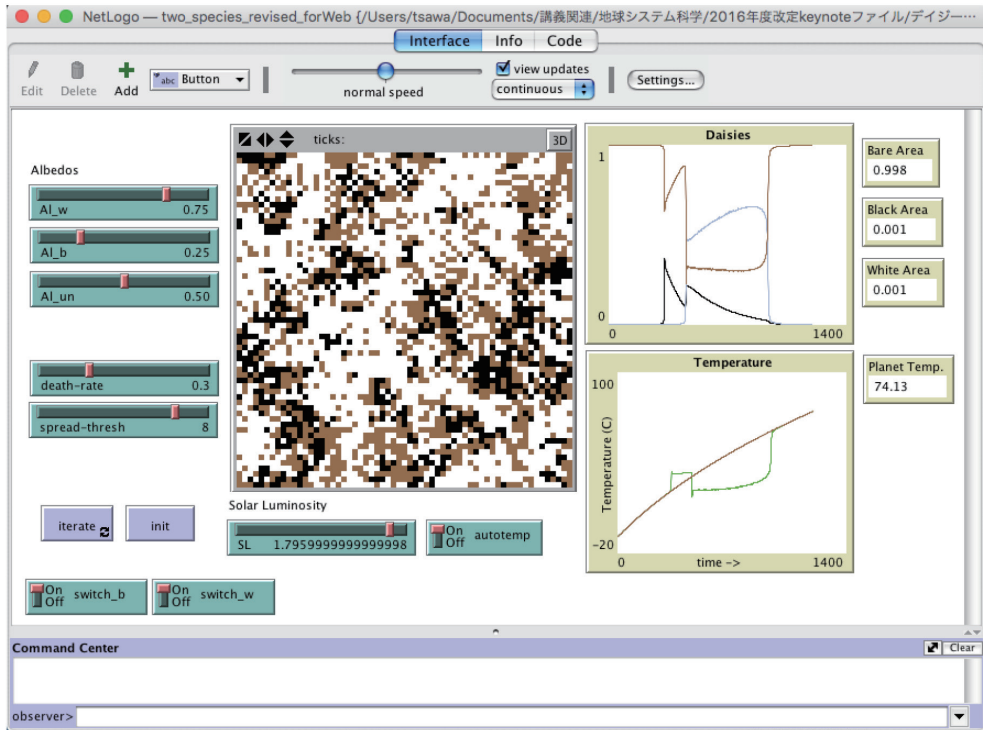


Fig. 5 : セル・オートマトン型ダイジーワールドの操作画面

$$\frac{da_s}{dt} = a_s(a_{un}g_s - deathrate) + 0.001$$

この式の最後の項 (+0.001) は、元となったSTELLAのシミュレーション (Bice STELLA model online : world_model.htm) で導入された項で、最初の1輪のダイジーを生やすためのわずかな後押しのためと説明されている (*the .001 is needed to give the system a bit of a nudge; without it the daisies never get going.*)。しかし、CA型モデルでは全くダイジーが生えていない、かつ成長率が正の値の場合に、確率的に最初の1輪のダイジーを空き地に生やすプロセスが組み込まれているため、この補助項を追加する理由はない。そこで、本論ではこの項を削除して計算を行った。

CA型ダイジーワールドモデルのルールは以下の通りである (Fig. 6)。

- 1) 与えられた初期値・パラメータを元に、ダイジーワールドの平均温度と平均アルベドを計算する (式 (2.4))。
- 2) ダイジー近傍の温度 (g_s) を計算により求める (式 (2.5))。
- 3) 黒および白ダイジーに関して、それぞれダイジーの面積がゼロ、かつ、 g_s が0より大きい場合、空いている地面の1箇所ダイジーを生やす。
- 4) ダイジーの面積割合の時間変化 ($\frac{da_s}{dt}$) を、式 (2.6) の成長方程式に従って計算する。
- 5) $\frac{da_s}{dt}$ が0より大きい場合は、画面上に存在する個々のダイジーに対して、その周囲の

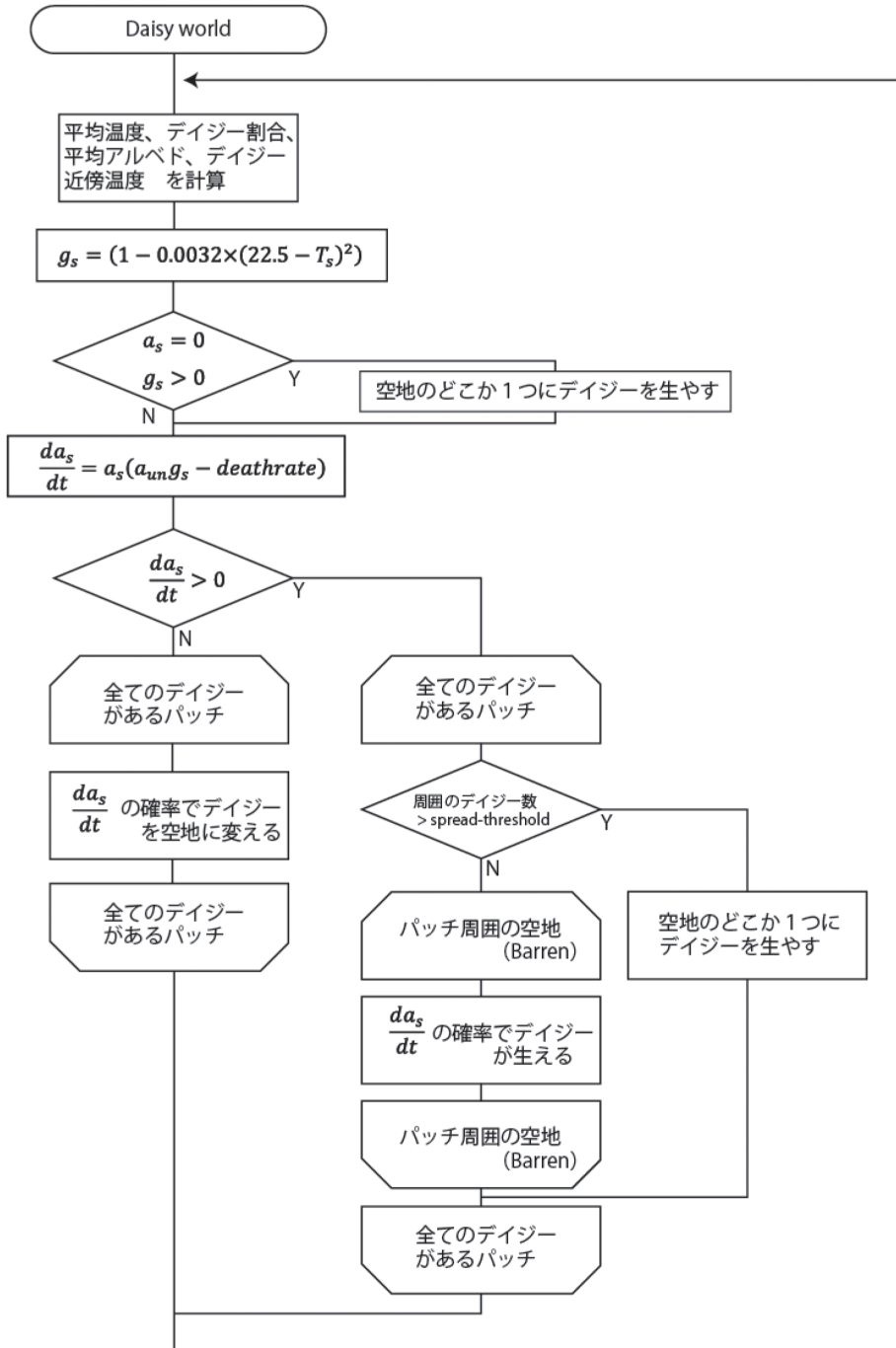


Fig. 6 : デイズワールドが増えるアルゴリズムのフローチャート

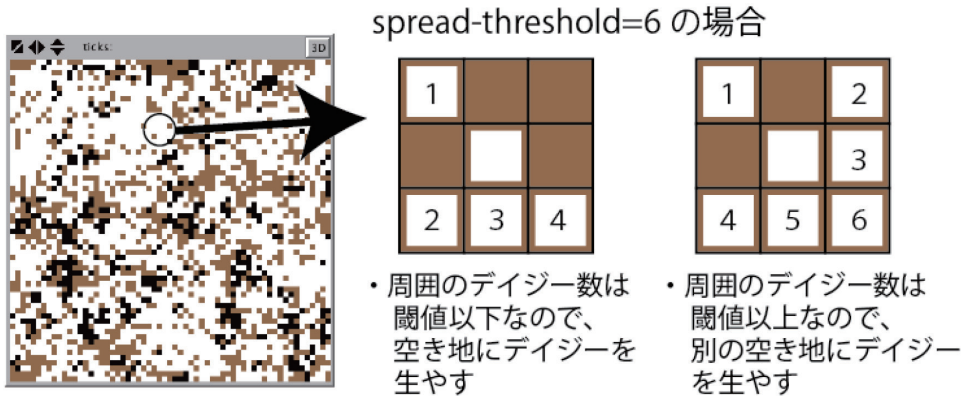


Fig. 7 : 閾値 (spread-threshold) によってデイジーを増加させる箇所を決めるルール

パッチに $\frac{da_s}{dt}$ の確率でデイジーを増やすが、この時デイジーの周囲のパッチ (合計8つ) に、設定された閾値 (spread-threshold) よりも多い数のデイジーが存在している場合は、画面上の別の空いている空き地にデイジーを生やす (Fig. 7)。

6) 1) に戻って、再度計算を繰り返す。

4. 結果

Watson and Lovelock (1983) のオリジナルのデイジーワールドでは、i) アルベドが地面と同じ“ニュートラル”なデイジー、ii) 黒デイジー、iii) 白デイジー、iv) 黒および白デイジー、の4パターンのシミュレーションを行い、太陽光度の増加に伴う放射平衡温度の計算を行っている。ここではまず、太陽光度を変化させずにそれぞれのデイジーがどのように繁殖するかを確認した上で、太陽光度を増加させるシミュレーションを行うこととする。

比較のために、デイジーが存在しない条件での放射平衡温度のデータをTable 2に示す。

4.1 太陽光度を一定 (時間と共に増加しない) にしたシミュレーション

4.1.1 黒デイジーのみ

黒デイジーのみが生育する設定で、太陽光度 (Solar Luminosity; 以下S.L.と略す) を0.7から1.3まで0.1ずつ増加させて、デイジー数と温度が一定な平衡状態になるまでシミュレーションを行った (Fig. 8a, Table 2)。

黒デイジーは、S.L.=0.7以下およびS.L.=1.1以上では繁殖しなかった。S.L.=0.8~1.0では、比較的早い段階で黒デイジーが急増して、一定数まで到達した後に落ち着いて数の増減がほぼなくなる。平衡状態に達した時の黒デイジー面積 (Table 2; Fig.8) は、S.L.が小さいほど広く (S.L.=0.8でBlack Area=0.589)、S.L.が大きいほど狭い (S.L.=1.0で

Black Area=0.151)。平衡温度は30℃前後でほぼ同じ値となる。

4.1.2 白ダイジーのみ

白ダイジーのみが生育する設定では、白ダイジーは、S.L.=0.8以下およびS.L.=1.3以上では繁殖しなかった。S.L.=0.9~1.1では黒ダイジーと同様に、比較的早い段階で白ダイジーが急増して平衡状態に到達するが、S.L.=1.2では、しばらく時間が経過したあと（time=480）に急増した。平衡状態に達した時の白ダイジー面積（Table 2；Fig. 8）は、S.L.が小さいほど狭く（S.L.=0.9でWhite Area=0.170）、S.L.が大きいほど広い（S.L.=1.0でBlack Area=0.578）。平衡温度は13℃前後でほぼ同じ値となる。

4.1.3 黒ダイジーおよび白ダイジー

黒ダイジーおよび白ダイジーが生育する設定では、平衡に達するまでの過程が複雑になる。ダイジーが繁殖しない条件は、S.L.=0.7およびS.L.=1.3のみで、S.L.=0.8~1.2の広い条件でダイジーは繁殖した。平衡条件に達するまでの変化には、2段階の遷移が見られる。まず比較的早い段階で、黒ダイジーまたは白ダイジーのどちらか一方のみが急増して、一旦平衡状態になる。その後しばらく時間が経過した後にもう片方のダイジーが急増し、平衡に達する。これらの経過時間は、セル・オートマトン・シミュレーションの性質上、常に一定ではなく、シミュレーションの実行毎に変化する。S.L.=0.8および0.9では、黒ダイジーが先に増加し、S.L.=1.1および1.2では白ダイジーが先に増加する。S.L.=1.0では、シミュレーション実行毎にどちらのダイジーが先に増加するかが異なる。Fig. 9およびTable 2には、S.L.=1.0で黒ダイジーが先に増加する場合と、白ダイジーが先に増加する場合を示している。平衡状態に達した時の黒ダイジーと白ダイジー面積割合（Table 2；Fig. 9）は、S.L.が小さいほど黒ダイジーの面積割合の方が白ダイジーよりも大きく、S.L.が大きいほど白ダイジーの面積割合の方が黒ダイジーよりも大きい。全ての場合において、最終的な平衡温度は20~25℃に収まっている。

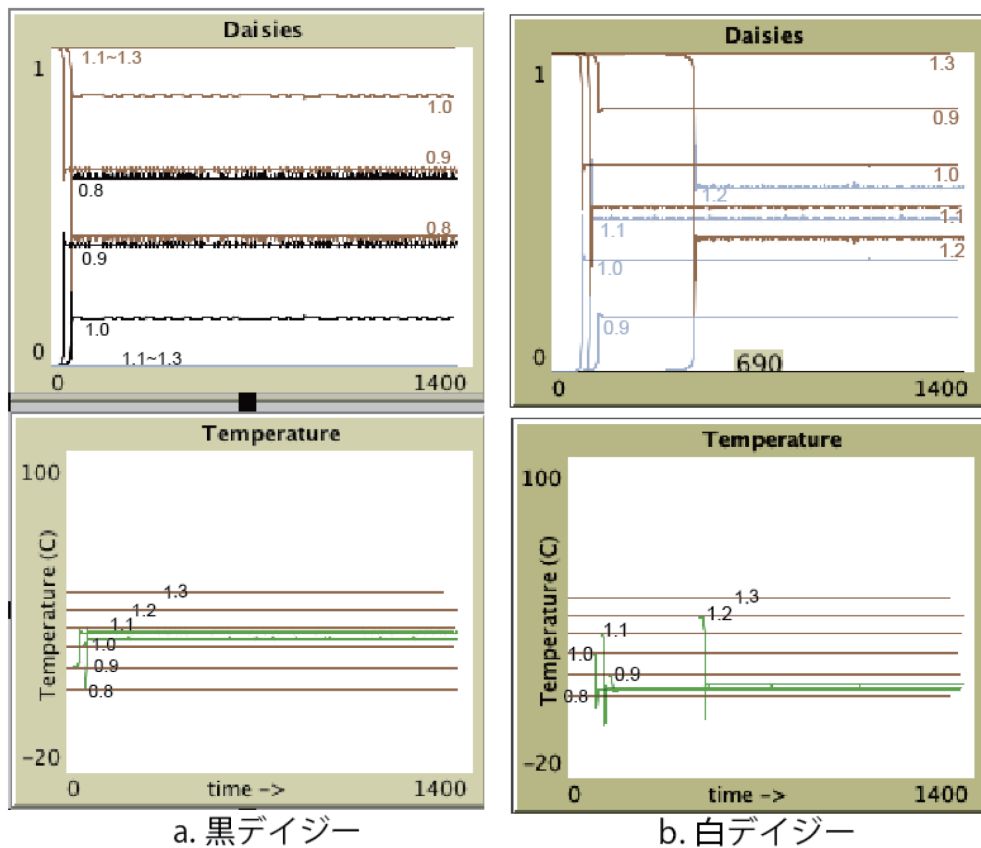


Fig. 8 : 時間経過に対するデイジーの面積割合と温度変化。太陽光度は時間と共に一定の場合。(上段) 茶線: 地面の面積割合、黒線: 黒デイジーの面積割合、白線: 白デイジーの面積割合 (下段) 茶線: デイジーがない場合の放射平衡温度、緑線: デイジーが存在する場合の放射平衡温度

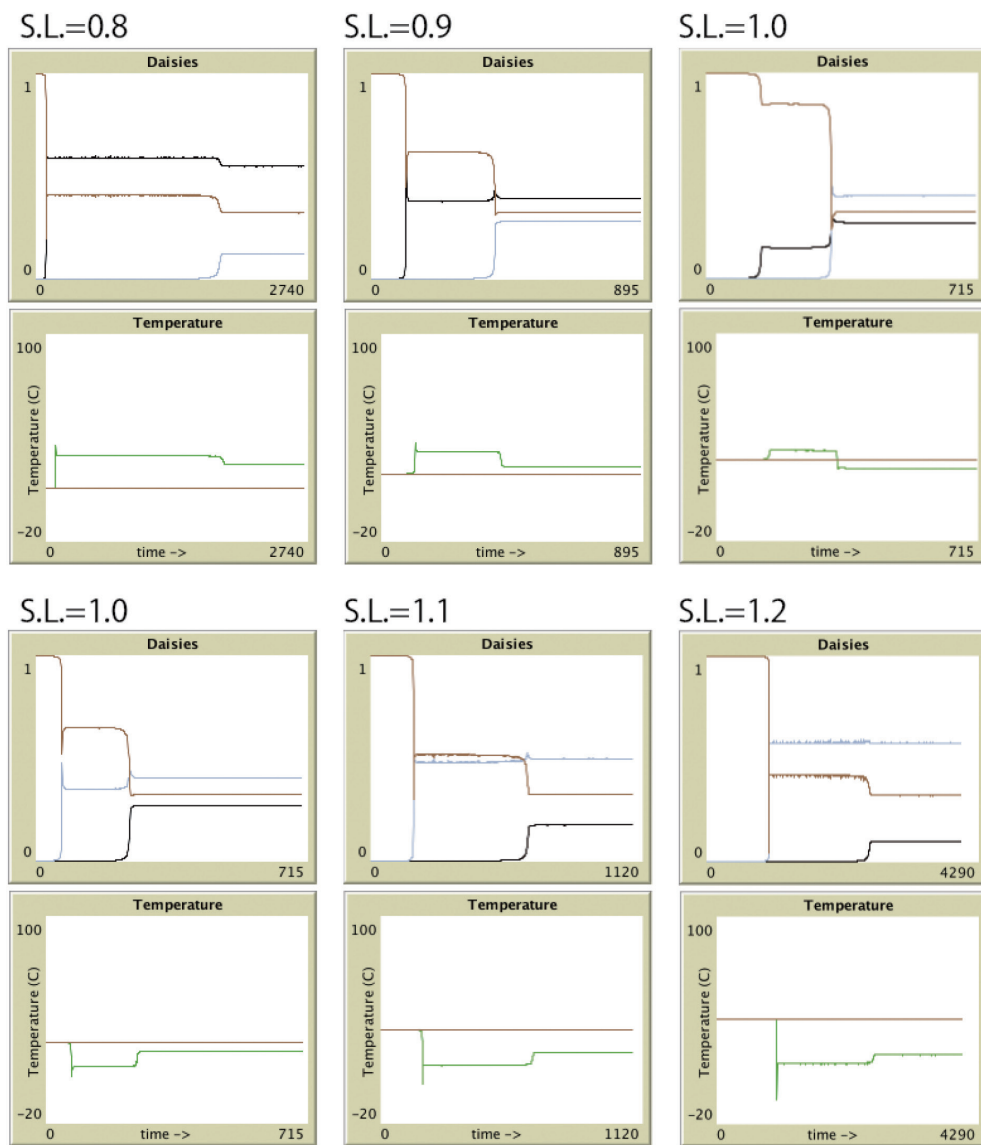


Fig. 9: デイジーの面積割合と温度変化(黒デイジーおよび白デイジー)。太陽光度は時間と共に一定。S.L.は太陽光度 (Solar Luminosity)。

Table 2 : デイジーの面積割合と平衡温度

デイジーなし						黒デイジーのみ					
Solar Lumi.	Bare Area	Black Area	White Area	Planet Temp.	Time*	Solar Lumi.	Bare Area	Black Area	White Area	Planet Temp.	Time*
0.7	1.000	-	-	1.304	0	0.7	1.000	0	-	1.313	0
0.8	1.000	-	-	10.616	0	0.8	0.411	0.589	-	29.543	68
0.9	1.000	-	-	19.091	0	0.9	0.615	0.385	-	32.293	54
1.0	1.000	-	-	26.877	0	1.0	0.849	0.151	-	32.409	74
1.1	1.000	-	-	34.119	0	1.1	1.000	0	-	34.129	0
1.2	1.000	-	-	40.873	0	1.2	1.000	0	-	40.873	0
1.3	1.000	-	-	47.217	0	1.3	1.000	0	-	47.217	0

白デイジーのみ						黒デイジーと白デイジー**					
Solar Lumi.	Bare Area	Black Area	White Area	Planet Temp.	Time*	Solar Lumi.	Bare Area	Black Area	White Area	Planet Temp.	Time*
0.7	1.000	-	0	1.304	0	0.7	1.000	0	0	1.313	0
0.8	1.000	-	0	10.607	0	0.8	0.409	0.590	0	29.566	100
0.9	0.83	-	0.170	12.651	162	0.8	0.325	0.546	0.117	24.623	1880
1.0	0.652	-	0.348	12.901	101	0.9	0.613	0.374	0	31.200	75
1.1	0.52	-	0.480	13.719	122	0.9	0.325	0.393	0.282	23.047	506
1.2	0.422	-	0.578	15.202	480	1.0***	0.847	0.147	0	32.000	145
1.3	1.000	-	0	47.217	0	1.0***	0.319	0.270	0.399	20.200	328
						1.0***	0.65	0	0.35	11.500	70
						1.0***	0.319	0.273	0.399	21.847	256
						1.1	0.515	0	0.479	11.500	179
						1.1	0.326	0.176	0.498	20.941	660
						1.2	0.417	0	0.576	14.400	970
						1.2	0.313	0.086	0.576	20.124	2610
						1.3	1.000	0	0	47.217	0

*平衡温度に達した時間、**2段階で平衡温度に達する、***2パターン出現

Table 3 : 最終平衡温度の比較 灰色のハッチはデージーが繁殖した条件

太陽光度	デージーなし	黒デージーのみ	白デージーのみ	黒および白デージー
0.7	1.304	1.313	1.304	1.313
0.8	10.616	29.543	10.607	29.566
0.9	19.091	32.293	12.650	23.047
1.0	26.877	32.409	12.901	21.847
1.1	34.119	34.129	13.719	20.941
1.2	40.873	40.873	15.202	20.124
1.3	47.217	47.217	47.217	47.217

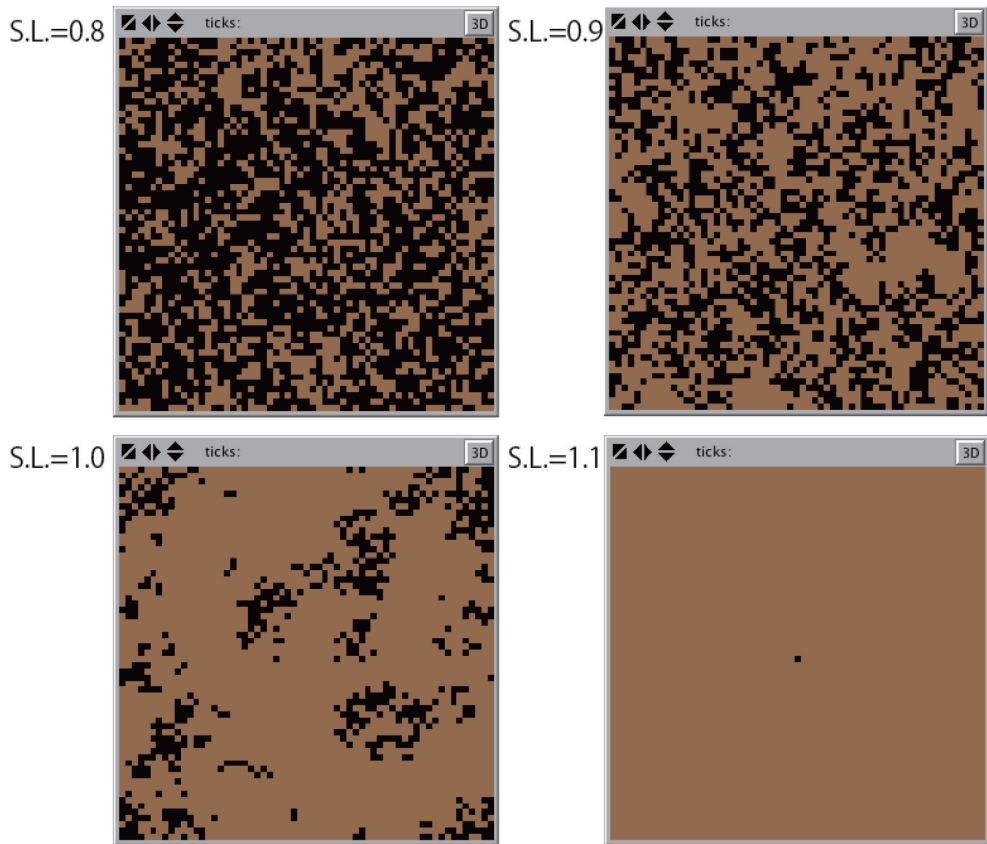


Fig. 10 : 太陽光度を時間と共に増加させない場合のシミュレーション（黒デージーのみ）。平衡状態に到達した状態。S.L.は太陽光度（Solar Luminosity）。

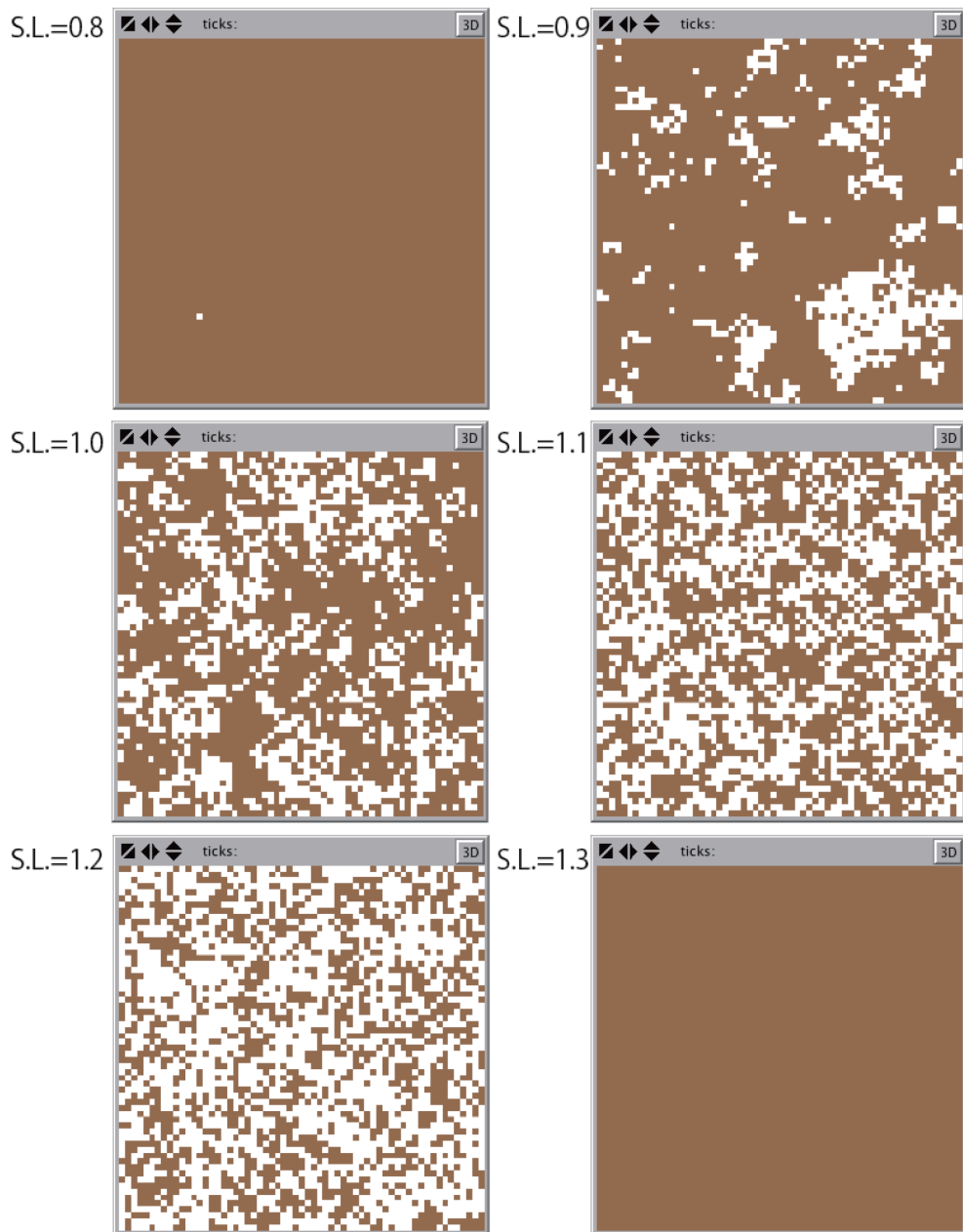


Fig. 11 : 太陽光度を時間と共に増加させない場合のシミュレーション (白デイズーのみ)。平衡状態に到達した状態。S.L.は太陽光度 (Solar Luminosity)。

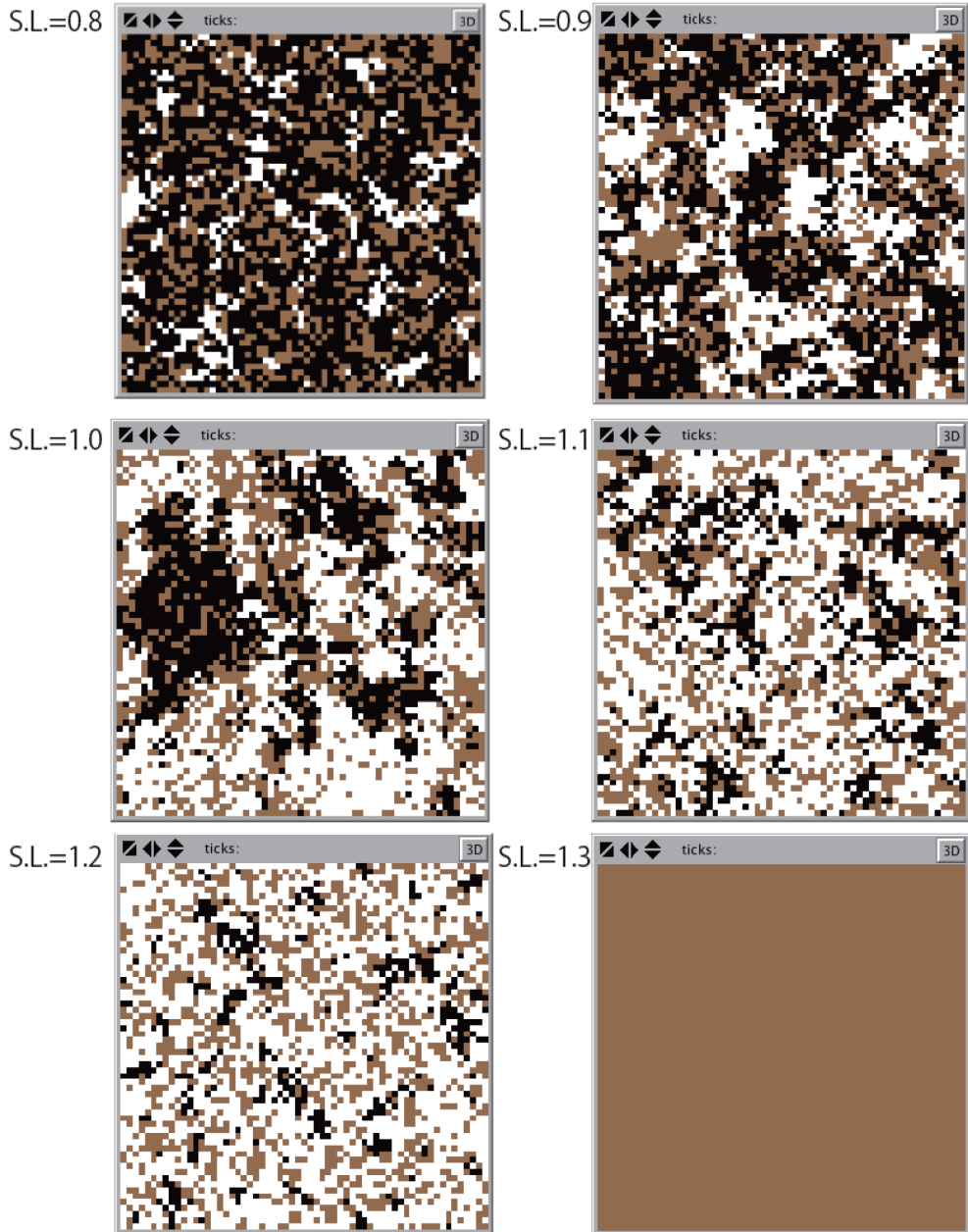


Fig. 12 : 太陽光度を時間と共に増加させない場合のシミュレーション（黒デージーおよび白デージー）。平衡状態に到達した状態。S.L.は太陽光度（Solar Luminosity）。

4.2 太陽光度が時間と共に増加するシミュレーション

シミュレーション画面上のスイッチ [autotemp] をオンにすると、太陽光度を0.6から2.0まで時間と共に増加させながら、デイジーワールドモデルのシミュレーションを行うことができる。

4.2.1 黒デイジーのみ

S.L.=0.6でシミュレーションを開始した時の平衡温度は、 -9.0°C である (Fig. 13)。太陽光度が増加して、S.L.=0.85近辺で黒デイジーが0.45程度まで急増する。この時の平衡温度は約 30°C である。その後、太陽光度が増加するにつれて、黒デイジーは減少しながら、温度は緩やかに上昇していく。黒デイジーが死滅すると、温度はデイジーがない場合の放射平衡温度と同じ曲線をたどって増加していく。

4.2.2 白デイジーのみ

開始時の温度は黒デイジーのみの場合と同じく、 -9.0°C である (Fig. 13)。S.L.=1.0付近で白デイジーが0.35程度まで急増し、温度は 11.5°C まで下がる。太陽光度が増加するにつれて、白デイジーの面積は徐々に増加し、温度は緩やかに上昇していく。温度が 30°C を超えた付近で白デイジーは急激に減少を始めて死滅する。この時に温度は急上昇して、デイジーがない場合の放射平衡温度と同じ曲線をたどって増加していく。

4.2.3 黒デイジーおよび白デイジー

シミュレーション開始当初は、黒デイジーから繁殖が始まるため、デイジー面積および温度は4.2.1の黒デイジーのみの場合と同様の曲線を描く (Figs. 13, 14)。黒デイジーが減少する途中で、今度は白デイジーが急増する。これに伴って温度は 13°C 程度まで急減するが、この時に黒デイジーがわずかに増加する。この後、白デイジーは増加をしていくが、白デイジーのみの場合と比較して増加の割合は緩やかである。これは同時に存在する黒デイジーが面積を減少させることで、太陽光度の増加を相殺しているためである。最終的には、白デイジーも黒デイジーも死滅をして、デイジーがない場合の放射平衡温度と同じ曲線をたどって増加していく。

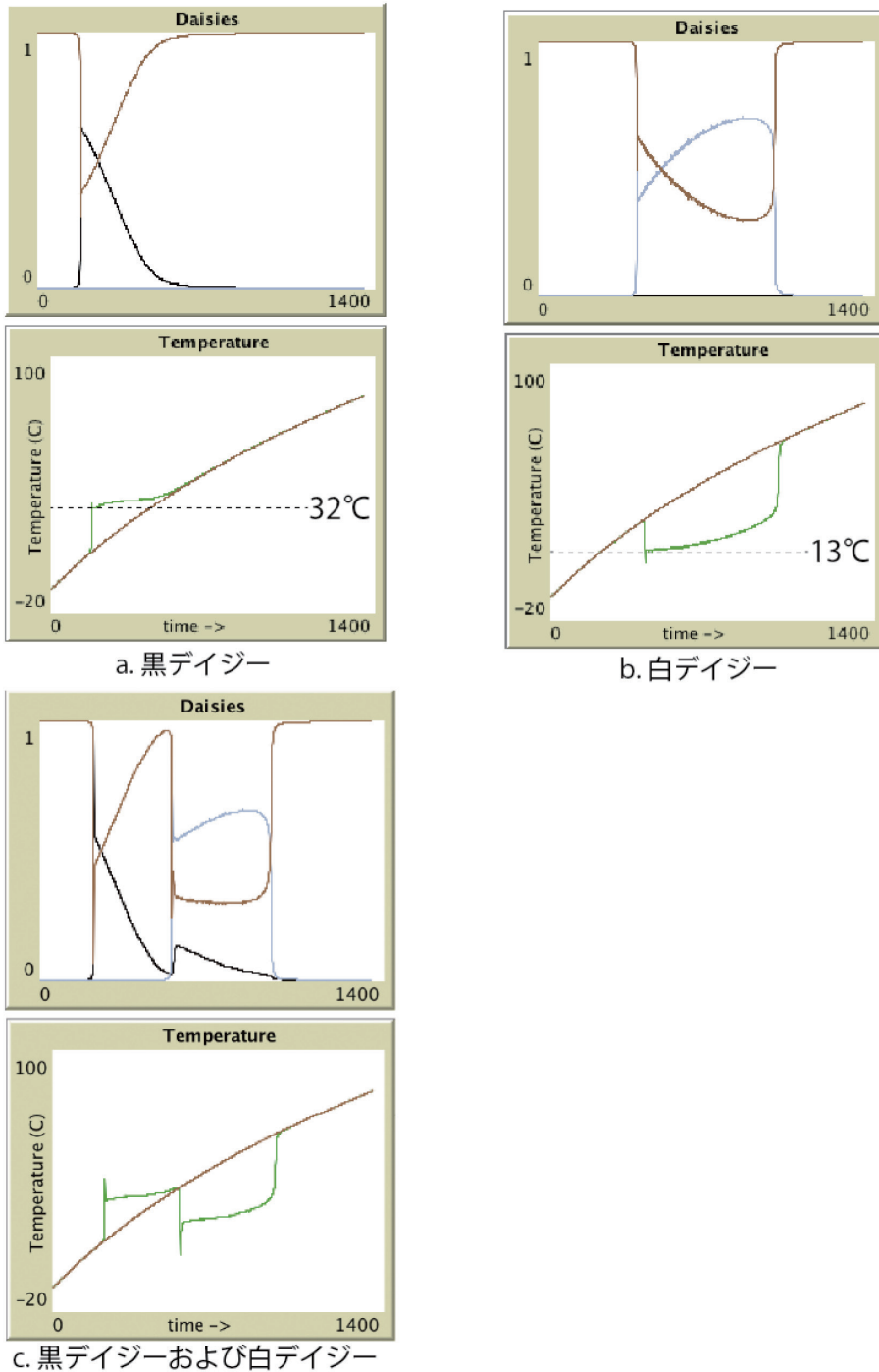


Fig. 13: 太陽光度を時間と共に増加させた場合のシミュレーション (a) 黒ダイジーのみ、(b) 白ダイジーのみ、(c) 黒ダイジーと白ダイジー

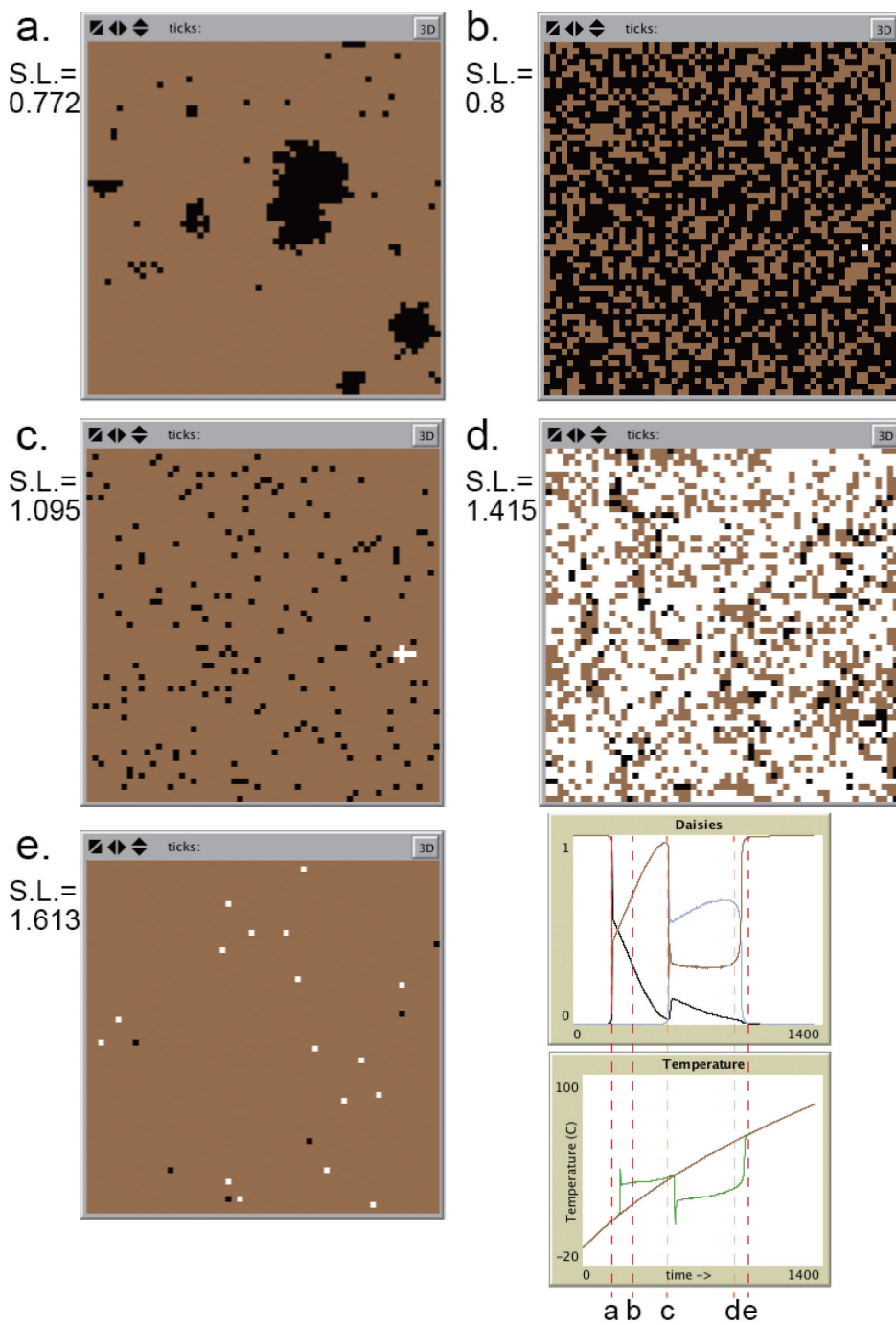


Fig. 14 : 太陽光度が増加、黒ダイジーおよび白ダイジーが存在する場合の変化

5. 考察

太陽光度を一定にし、ダイジーなしの条件でのシミュレーション結果から、太陽光度が0.8から1.2の間において、有効放射温度が、ダイジーが生育可能な5℃～45℃に収まることがわかる。ただし、ダイジー近傍の温度はダイジーのアルベドによって変化するため、黒ダイジーのみの場合、黒ダイジーが繁殖したのは太陽光度が0.8～1.0のみ、白ダイジーのみの場合、白ダイジーが繁殖したのは0.9～1.2の範囲に限定された。ただし、黒ダイジーと白ダイジーが共存する場合は、太陽光度が0.8～1.2の範囲で繁殖した。また、黒ダイジーのみの平衡温度（およそ30℃前後）や白ダイジーのみの平衡温度（およそ13℃前後）と比べて、両ダイジーが存在する場合の平衡温度（およそ20～25℃）は、ダイジーの最適生育温度（22.5℃）に近い。これらの結果から、単種よりも多種存在する方が、より広い環境条件でダイジーが生育でき、さらにはその温度条件もよりダイジーに適するように調節されていることがわかる。

太陽光度が時間と共に増加するシミュレーションでは、太陽光度が低い間は黒ダイジーが広く繁殖することで平衡温度を押し上げ、徐々に黒ダイジーの面積が縮小していく。太陽光度が高くなってくると代わりに白ダイジーが一斉に繁殖し、白ダイジーは面積を増大させながら、太陽光度の増加にตอบสนองしていく（この際、残った黒ダイジーが面積を減少することも同時に進行している）。黒ダイジーのみの場合に黒ダイジーが繁殖するのは、太陽光度が0.85～1.8程度、白ダイジーのみの場合に白ダイジーが繁殖するのは、太陽光度が1.0～1.9程度であるが、両ダイジーが存在する場合は、0.85～1.9までの長い期間に渡ってダイジーが繁殖する。

6. アクティブラーニングでの学習指導案

溝上（2011）によれば、アクティブラーニングとは、「授業者からの一方向的な知識伝達型授業（学習者の受動的な学習）から、学習者の能動的な学習を取り込んだ授業への転換を目指す教育政策用語」と定義される。ここでは、地球システム科学の講義において、システム学の考え方を深く学ぶために、ダイジーワールドのCA型シミュレーションを使ったアクティブラーニングの実践例をまとめる。試験的に、早稲田大学教育学部で行っている「地球システム科学」において、2016年度秋学期・履修者33名の講義でアクティブラーニングの実践を行った。パソコン教室を利用して、三～四人でのグループで作業を進めた。

NetLogoはJavaをベースにオープンソースで開発が進められており、Windows、Mac OS X、Linuxの全てのプラットフォームでインストールすることが可能である（Wilensky, 1999）。また、ウェブブラウザで動作する「NetLogo Web」も開発されており（NetLogo Web online:launch）、自分で作成したNetLogoシミュレーションを、パソコンやタブレット端末、スマートフォン等のブラウザを利用して動作させることができる。html形式で保存をして直接公開することもでき、本論で使用したNetLogo版ダイジーワールドは、以下のURLから直接利用できる（<http://www.igeoscience.com/dw/>）。このサイトから、ソー

スコードのダウンロードも可能である。

太陽光度を時間とともに変化させない場合（演習1）と、変化させる場合（演習2）の2つに分けて行った。

演習1：太陽光度の時間による増加がない場合

- 1-1) デイジーを生やさない場合で、太陽光度を0.7から1.3まで0.1ずつ変化させると、平衡温度はどう変化するかを、表に記載させる。これが、デイジーが生えない場合の、有効放射平衡温度の基準となる（Table 2）。
- 1-2) シミュレーションを行う前に、黒デイジーのみ、白デイジーのみ、黒デイジーおよび白デイジー、の3つの条件で、それぞれ太陽光度を0.7から1.3まで0.1ずつ変化させた場合の、デイジー面積の変化を学生に推測させる（3名ほどのグループで議論しても良い）。
- 1-3) 実際に、黒デイジーのみ、白デイジーのみ、黒デイジーおよび白デイジー、の3つの条件で、それぞれ太陽光度を0.7から1.3まで0.1ずつ変化させて、そのデイジーの面積変化をシミュレーションで観察する。最終的に平衡温度に達した温度と時間を記録する（Table 2）。NetLogoでは、出力されたグラフやデータは外部ファイルとして保存が可能であるので、それらを保存させてもよい。
- 1-4) 上記の4つの条件での最終的な平衡温度を、太陽光度毎に表にまとめる（Table 3）
- 1-5) これらのシミュレーション結果から、「太陽光度、デイジー面積、平衡温度」の3つの関係を考察させる。
- 1-6) 平衡温度を規定しているその他のパラメータは何かを考えさせ、実際にシミュレーションで確認させる。特にdeath-rateを変化させると平衡温度は変化するかを考えた上で、確認させる。

ここでは、以下に挙げる点などを学生が理解できることを目的とした。

- i) 太陽光度の違いによって、それぞれアルベドの異なるデイジーがその面積を変化させることで、デイジーの生育条件内に収まるように温度が調節される。
- ii) 複数のデイジーが存在する場合は、どちらか一方のデイジーの面積が増えて温度が調整され、その後にもう一方のデイジーが増えて、平衡温度がよりデイジーの生育に最適な条件に移行する（太陽光度が低い場合はアルベドの小さい黒デイジー、太陽光度が高い場合はアルベドの大きい白デイジーが先に繁殖する）。
- iii) 黒デイジーまたは白デイジーが単独で繁殖する場合よりも、両方のデイジーが繁殖することで、より広い太陽光度でデイジーが生育することができる。
- iv) 死亡率（death-rate）を変化させると、黒デイジーのみ、白デイジーのみの場合は、平衡温度が変化をするが、両デイジーが存在する場合は、死亡率を変化させても平衡温度はほとんど変化しないで安定している。

演習2：太陽光度の時間による増加がする場合

- 2-1) デイジーを生やさない条件で、[autotemp] をオンにし、太陽光度が増加するにつれて、放射平衡温度が増加することをシミュレーションで確認する。

- 2-2) シミュレーションを行う前に、黒ダイジーのみ、白ダイジーのみ、黒ダイジーおよび白ダイジー、の3つの条件で、ダイジー面積と平衡温度がどのように変化するかを予測させる。
- 2-3) 実際に、黒ダイジーのみ、白ダイジーのみ、黒ダイジーおよび白ダイジー、の3つの条件でシミュレーションを行い、その時間変化を考察する。

ここでは、以下に挙げる点などを学生が理解できることを目的とした。

- i) ダイジーが生えない場合、放射平衡温度がシュテファン・ボルツマンの法則に従って、時間と共に緩やかに上昇する。
- ii) 太陽光度が増加するに従い、黒ダイジーは減少、白ダイジーは増加することで、平衡温度を調整している。
- iii) 黒ダイジーまたは白ダイジーが単独で繁殖する場合よりも、両方のダイジーが繁殖することで、より広い太陽光度（長い時間）でダイジーが生育することができる。

7. まとめ

ダイジーワールドは、惑星の気候条件を極端に簡略化したシミュレーションであるが、生物と気候のフィードバックループによって、平衡状態が達成される恒常性機能と、それに関連する諸条件の理解を深めることができた。こうしたフィードバックループの理解は、第四紀に入って顕著となるミランコビッチサイクルに起因した気候変動や、それに関連したアイス・アルベド・フィードバック、また、地質時代における全球凍結など、地球システムの気候変動の理解とその教育において効果を発揮するであろう。

引用文献

- Gough, D. O. (1981) Solar Interior Structure and Luminosity Variations. *Solar Physics* 74: 21-34.
- Lovelock, J. (1979) 『Gaia: A New Look at Life on Earth.』 Oxford University Press UK: 1-176.
- Sagan C. and Mullen G. (1972) Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures. *Science*, 4043: 52-56.
- Watson, A. and Lovelock, J. (1983) Biological homeostasis of the global environment: the parable of Daisyworld. *Tellus*, 35B: 284-289.
- 伊勢武史 (2014) 『「地球システム」を科学する』, ベレ出版: 1-264.
- 溝上慎一 (2011) 『アクティブラーニングでなぜ学生が成長するのか—経済系・工学系の全国大学調査からみえてきたこと』河合塾 (編), 東信堂: 1-320.
- ラブロック・ジェームズ (1984) 『ガイアの時代—地球生命圏の進化』 工作舎: 1-296.

オンライン文献 (全て、2016年11月4日アクセス)

Bice STELLA model, http://www3.geosc.psu.edu/~dmb53/DaveSTELLA/Daisyworld/daisyworld_model.htm

NetLogo Modeling Commons, http://modelingcommons.org/browse/list_models

NetLogo Web, <http://www.netlogoweb.org/launch>

Novak, M. and Wilensky, U. (2006). NetLogo Daisyworld model.

<http://ccl.northwestern.edu/netlogo/models/Daisyworld>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

Sessini, P. (2007), Modelling the Gaia Hypothesis: Daisyworld, <http://hdl.handle.net/1880/46480>

Wilensky, U. (1999) NetLogo. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern Institute on Complex Systems, Northwestern University, Evanston, IL.

Ralph Abraham, <http://www.vismath.org/research/gaia/2007/NetLogo>

中央教育審議会 (2012) (答申)『新たな未来を築くための大学教育の質的転換に向けて』.

http://www.mext.go.jp/component/b_menu/shingi/toushin/__icsFiles/afieldfile/2012/10/04/1325048_1.pdf