

2011年度前期開講 生物学特論A 分類系統学II

担当：浅川伸一
asakawa@ieee.org

1

自己紹介

- 氏名：浅川伸一（あさかわしんいち）
- メールアドレス：asakawa@ieee.org
- 肩書き：東京女子大学現代教養学部助教
- 研究室：9303
- 電話：03-5382-6746（研究室直通）

2

2

この授業のルール

- 飲食禁止, PETボトルはカバンの中に
- ケータイはサイレントモードに
- 授業開始のチャイムの前に着席していること, 開始のチャイムと同時に授業を始めます
- 欠席をしないこと。全授業に出席すること
- 分からないときは, 分からないとハッキリ言うこと
- 欠席する場合には, あらかじめ申告しておくこと
- その他必要とされるもの: お昼ご飯を食べたあとなので, 眠くなります。だから絶対に寝ないぞという強い決意(^^)

3

3

要求される知識

1. PCに関する知識: あればあった方がよいですが, PCに嫌悪感を持っていない程度でよいです。
2. プログラミングに関する知識: まったく不要
3. 数学に関する知識: 大学一年生のごく初歩レベル (線形代数の初歩)

4

4

この授業のホームページ

[http://www.cis.twcu.ac.jp/
~asakawa/MathBio2011/](http://www.cis.twcu.ac.jp/~asakawa/MathBio2011/)

をブラウザでブックマークしておいてください。

成績について

まず、毎回出席するようにしてください。そして、毎回授業に積極的に参加したんだ、という証拠を見せてください。具体的には、簡単なレポートや、その代わりになるものを提出してもらおうかと思っています。授業はできる限りわかりやすいように工夫するつもりです。説明が分かりにくかったり、進度が速過ぎると思ったり、実習についていけなかったりしたら、遠慮なく申し出てください。その申し出によって評価が下がるということは一切ないと約束します。

成績について (2)

中間、期末レポートは、授業に参加していなければ書けないような、それでいて、授業にマジメに参加していれば、簡単に書けるような楽勝な課題が理想だと思っています。だって、他の授業もあるし、サークル活動だってあるし、就職活動をする人だっているだろうし、大学院に進学する人だったら受験勉強しなくっちゃいけないだろうし、バイトだってあるだろうし、デートもしたいだろうし、大学生ってけっこう大変ぢやないですか。その辺は理解しているつもり。

成績について (3)

授業ではコンピュータによる実習を行います。配布されたプログラムを使って、いろいろ遊んでみることは、この分野の重要な概念を理解するためにはとても大切なことです。だから、「私はこんなふうにして配布されたプログラムを使って遊んでみました」的な報告をするような課題レポートにしようかしらん、と思っています（今のところはね）。明るく楽しくマジメに授業しようと思っていますので、協力してください。

成績について (4)

- 中間, 期末レポート各30点, 計60点
- 出席点40点

点数	評価
90点以上	S
80点以上	A
70点以上	B
60点以上	C
それ以下	F

9

9

出席点

- チャイムと同時に授業が始まります。それ前に着席してください。
- 毎回の出席点として、ショートレポートをメールで提出してもらいます。ショートレポートとは、asakawa@ieee.org 宛に2~3行程度のメールを送ることを指します。
- 今年は東日本大震災の影響で授業回数が13回なので、 $40/13=3.076$ なので、授業開始時に着席していれば1点、授業後のショートレポート2点、とします。

10

10

中間， 期末レポート

- それまでに取り上げた内容について，ワープロでA4版，1～2枚程度のレポートです。書式は特に定めませんが，11ポイント程度の文字の大きさを作成してください。ワードファイルでもPDFでもリッチテキストでもオープンオフィスのファイルでも構いません。
- レポートで取り上げるテーマは，授業の進行状況によっても変わります。授業中に指示します。

11

11

ライフゲーム

- 今日は最初だから，みんなでゲームをしよう
- え，ゲーム？
- そう，ゲーム。簡単で誰でもが楽しんで，しかも奥が深いゲームを紹介します。

12

12

ライフゲームには、勝者も敗者もいません。あらかじめ定められた簡単なルールに従って変化していく PC の画面をただ眺めているだけなのです。だから、例えていうなら **万華鏡** に近いです。今日の授業は、画面上に現れる様々なパターンを眺めて楽しむことが目的です。

ライフゲームのルールは非常に簡単です。画面上にはセルと呼ばれる一つ一つの区画が用意されています。これが、2次元上に配置されてライフゲームの世界を構成しています。ライフゲームの画面は、それ自身が一つの世界なのです。そこにはさまざまな現象が発生する、ある物理法則によって支配された世界です。

今回配布するライフゲームでは、青のセルが生命がいる状態を表わし、白いセルが、その生命がない状態を表します。つまり、あるセルには生命がいるかないかのどちらか、0か1か、存在か無か、オンかオフか、という2つの状態しかありません。そして、時間の流れは一定で離散的です。一つの時刻の単位を世代と呼ぶこともあります。次の瞬間に、あるセルに生命が産まれるか否かは、一つ前の状態に依存します。つまり次の時間にどういう状態になるのかは、一つ前の状態から完璧に予測できるのです。それにもかかわらず、予想もしなかったような複雑な未来を観察することができます。スローガンのように書けば「**単純な法則から複雑な結果が生じる**」ということになります。

ラプラス的宇宙観の崩壊

18世紀のフランスの数学者ラプラスは、この宇宙を創造した全知全能の神は宇宙の全ての原子の詳細を知っていると考えました。この宇宙を支配する物理法則と宇宙を構成する原子の全情報が分かれば、全知全能の神は、未来を予知でき、過去を再構成できると考えました。このような世界観には、不仮定な要素は一切存在しません。全知全能の神にはすべてのことは予測可能だということです。別の言い方をすれば、ラプラスは、この宇宙を一つの巨大な機械だと考えていました。

しかし、このような考え方は、19世紀の終わりから始まる、量子論と相対論によって瓦解してしまいます。量子論は不確定性を含みます。物理学者よれば、量子の世界では宇宙は非決定的なのです。量子論によれば、ある電子のふるまいを確実に予測することは不可能なのですから、未来の予測もまた不可能であるということになります。

さらに20世紀に入ると、「単純な法則から複雑な結果が生じる」を具現化する現象がつぎつぎに発見されました。今日「カオス」「複雑系」と呼ばれる現象（あるいはその研究分野）においても、単純な法則からほとんど予測不可能な複雑な結果が生じることがあることが繰り返し確認されています。

ライフゲームもそうした単純な法則、複雑な結果を具現化したデモンストレーションなのです。

ライフゲームのルール

どのセルにも8個の隣接するセルがあります（ムーア近傍と呼ばれたりします）。どの時刻においても、この近傍のセルがオンであるかオフであるかによって、次の時刻でそのセルがオンになるかオフになるかが決まります。

- ・セルの状態がオンのとき：8個の近傍のセルのうち、2つあるいは3つのとき、そのセルは次の世代でもオンになります。
- ・一方、8個の近傍のセルがそれ以外のとき（0,1,4,5,6,7,8）は、次の世代でオフになってしまいます。
- ・セルの状態がオフのとき：8個の近傍のセルのうち3つがオンのとき、次の世代でそのセルはオンになります。
- ・一方、それ以外のとき（0,1,2,4,5,6,7,8）、次の世代もオフであり続けます。

ライフゲームのルールはこれだけです。

これをなぜライフゲームと呼ぶのかについてですが、ライフゲームの開発者であるコンウェイは、バクテリアなどの単純な生命体が培養器の中で増殖するパターンをシミュレートしたかったかららしいです。このたとえでいけば、ライフゲームのルールは次のように解釈できます。すなわち、周囲に 2 個未満しか仲間がいないセルは孤独のため死んでしまう。逆に周囲に 4 個以上仲間がいるセルは、過密のため（栄養状態の不足など）にやはり死んでしまう。周囲に 2 個または 3 個の仲間がいる状態が、過疎でも過密でもない健全な状態だと考えるわけです。また、そのセルが空の場合、周囲に 3 個の仲間がいると性交によって新しい生命が誕生する、と考えられます。

ライフゲームの開始時に、プレイヤーがすべきことは、初期状態を決めることです。一旦ゲームがスタートしてしまえば、あとは何もすることがありません。ただ画面を眺めているだけです。

ライフゲームの遊び方

まずは教材を自分のホームディレクトリにコピーしてください。端末エミュレータを起動して、以下のようにタイプしてください

```
cp -r ~asakawa/20110429 .
```

このコマンドで、浅川のホームディレクトリにある、20110429というディレクトリを自分のホームディレクトリにコピーすることになります。最後のピリオドも重要です

21

21

ライフゲームの遊び方



22

22

画面の説明

画面の大半を占める部分には、2次元上のセルが見え、その下にメニューがあります。



左から「スタート」「ストップ」「クリア」「セーブ」「ロード」という5つのボタンであり、一番右はチョイスボタンになっており、「ノーマルマージン(Normal Margin)」か「惑星ワトール(Planet Wator)」かを、選べるようになっています。

23

23

ノーマルマージンと惑星ワトール

チョイスボタンの「ノーマルマージン」と「惑星ワトール」について説明します。ライフゲームは本来、無限に広がる2次元状の世界を扱います。ですが実際のコンピュータでは表示に限界があるため、端の扱いが問題になります。「ノーマルマージン」とは、最端のセルの外側には何もないように振る舞うことを意味します。一方「惑星ワトール」を選ぶと、一番右端のセルの隣りに一番左端のセルがつながっているように動作します。同様にして、一番上のセルのさらに一つ上は、一番下のセルにつながっています。したがって、「惑星ワトール」を選択した状態で、画面を右から左に移動するパターンがあったとすると、そのパターンが一番左までくると、次の時刻に、突然右端から現れます。「ノーマルマージン」ではそのようなことはありません。

24

24

ライフゲームのルール

どのセルにも 8 個の隣接するセルがあります（ムーア近傍と呼ばれたりします）。どの時刻においても、この近傍のセルがオンであるかオフであるかによって、次の時刻でそのセルがオンになるかオフになるかが決まります。

- ・セルの状態がオンのとき：8 個の近傍のセルのうち、2 つあるいは 3 つのとき、そのセルは次の世代でもオンになります。
- ・一方、8 個の近傍のセルがそれ以外のとき (0,1,4,5,6,7,8) は、次の世代でオフになってしまいます。
- ・セルの状態がオフのとき：8 個の近傍のセルのうち 3 つがオンのとき、次の世代でそのセルはオンになります。
- ・一方、それ以外のとき (0,1,2,4,5,6,7,8) , 次の世代もオフであり続けます。

初期状態の入力

画面上のセルをマウスでクリックすれば、セルは青くなります。もう一度そのセルをクリックすれば、白に戻ります。青がオンの状態を現し、白がオフです。セルのいくつかをクリックして初期状態を決めれば、後は「スタート」ボタンを押すだけです。

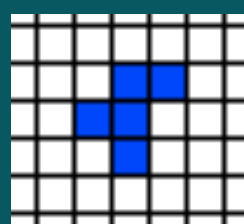
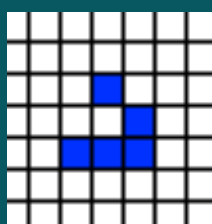
動作を中止したければ、「ストップ」ボタンを押し、次に「クリア」ボタンを押せば全てがオフの状態に戻ります。

データの読み込みと保存

実習で用いる代表的なパターンはあらかじめ data というディレクトリに保存されています。「ロード」ボタンを押すと別ウィンドウが開いてデータを読み込むことができます。また、自分で作成した初期状態は、「セーブ」ボタンで保存しておくことができます。

なお、読み書きされるデータファイルは csv 形式ですので、エディタ、ワープロ、スプレッドシートなどで読み書きすることもできます。0 がオフで 1 がオンとなっています。

1970 年 10 月のサイエンティフィック・アメリカンという雑誌に、マーチン・ガードナーが紹介したことで反響を呼びました。サイエンティフィック・アメリカン誌が読者からの手紙を中心とした記事を何度も組んだのだそうです。興味深いことに、ライフゲームは万能チューリングマシンであることが証明されています。これは、ライフゲームは計算機で実行可能な全てのアルゴリズムを作ることができるということを表しています。サイエンティフィック・アメリカン誌の出版後すぐに、グライダーパターンとR-ペントミノというパターンが発見されました。



左はグライダー，右は r-ペントミノ

これらのパターンの発見やコンピュータの普及によってライフゲームは流行しました。夜間あるいは未使用のコンピュータ上でライフゲームのプログラムが動かされることとなり、興味深いパターンが多数発見されました。その後、セル・オートマトンの研究はライフゲームのような 2 次元のタイプではなく、1 次元を中心に進みます。1980 年には、スティーブン・ウルフラムによって 1 次元セル・オートマトンの 4 分類が完成し、クリストファー・ラングトンによって「カオスの縁」と呼ばれる概念が確立しました。また、3 次元以上のセル・オートマトンも研究対象となっています。

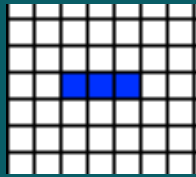
生成されるパターンの多様性

コンウェイは、動作の振る舞いが予測不可能であり、かつ、状態遷移ルールができるだけ単純なオートマトンを探してきました。すなわち、物理現象がわずかな基本的な法則に凝縮される宇宙のモデルです。物理学者は未だ、そういった基本的な法則を見つけ出していませんが、もしこのような法則があるとするれば、化学、生物学、心理学の最も複雑な構造さえも説明するものでなければならないはずです。もし、物理学者がそのような基本法則（後ほどこの問題に立ち返ります）を導くことに成功したとしても、現実の世界同じように神秘的であり続けることをライフゲームは示しているのです。

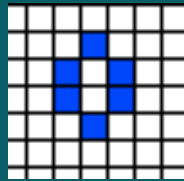
一列に並んだセル

たとえば、一列に並んだセルを初期状態としてスタートさせた場合、何が起こるか見てみましょう。先述のとおり、何が起こるかは、最初に並べたセルの長さによって決定論的に定まっています。ですが、セルの長さの違いによる振る舞いの変化には目を見張るものがあります。是非各自実行してみてください。

一列に並んだ 3 つのセルは「信号点滅機 blinker」と呼ばれます。 blinker は永遠に点滅を繰り返す最小のパターンです。



4 つの場合は、「蜂の巣 beehive」に変化します。

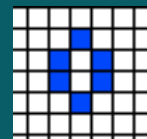
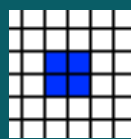


33

33

5 つの場合には、4 つの「点滅信号機 blinker」に変化します。

- ・ 6 つの場合、12世代かけて消滅していきます。
- ・ 7 つの場合には、爆発して4つの「蜂の巣 beehive」になります。
- ・ 8 つの場合、最終的に 4 つの「ブロック block」と 4 つの「蜂の巣 beehive」に変化します。



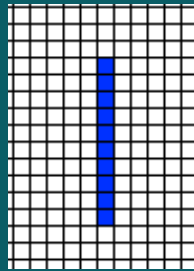
ブロックblock 蜂の巣beehive

34

34

9つの時には、8つの「信号点滅機 blinker」になります。

- ・ 10個のセルのときにできるパターンは「ペンタデカスロン pentadecathlon」という15回ごとに元の形に戻るパターンです。



ペンタデカスロン

35

35

11個のときには、2つの「点滅信号機 blinker」に縮退します。これは13個のときにも同じ結果になります。

- ・ 12個の並んだセルの時には2つの「蜂の巣 beehive」になります。
- ・ 14個と15個の時には引き延ばされる形で、最終的に消滅します。
- ・ 16個の時には、8個の「点滅信号機 blinker」からなる「交通信号 traffic light」という動き続けるパターンになります。
- ・ 17個の時には、4つの「ブロック block」へと変化します。
- ・ 18個の時と19個の時には消滅してしまいます。
- ・ 20個の時には2つの「ブロック block」になります。

これらの全てに共通する法則は未だに誰も知りません。まさにこれこそが、コンウェイがライフゲームを楽しんだ理由なのでしょう。

36

36

無限に増殖するパターン

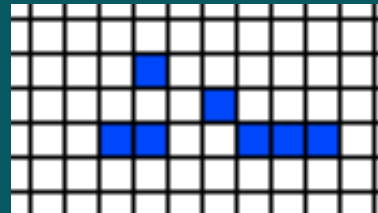
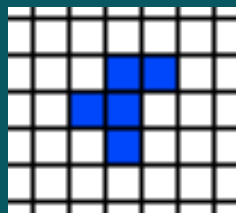
また、コンウェイは、無限の成長を続けるパターンがあるのかを問題としました。

ただし、この問題はただコンピュータを眺めているだけでは絶対に解くことができません。スクリーンを越えて広がっていくパターンを思いつくだけでは不十分で、その成長が永遠に続くものであることを証明しなければなりません。つまり、数百万世代経ても消滅することのないことを証明する必要があります。r-ペントミノ r-pentomino やドングリ acron の成長パターンが無限であることを示すことは、簡単に手に負える類いの問題ではないことを示しているように思われます。

37

37

無限に増殖するパターン



無限の成長をするか否かを検証するのが困難なパターンの例。

左：r-ペントミノ，右：ドングリ

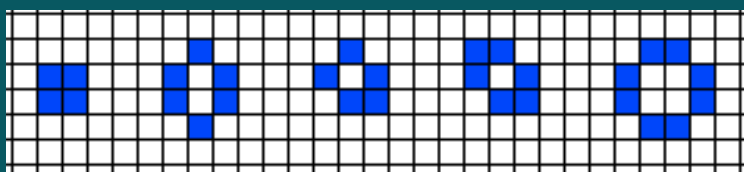
38

38

さまざまパターンの例

ライフゲームでは世代を経ることで最終的に死滅する図形が多いです。生き延びる場合の変化は4パターンに分類することができますと言われています。

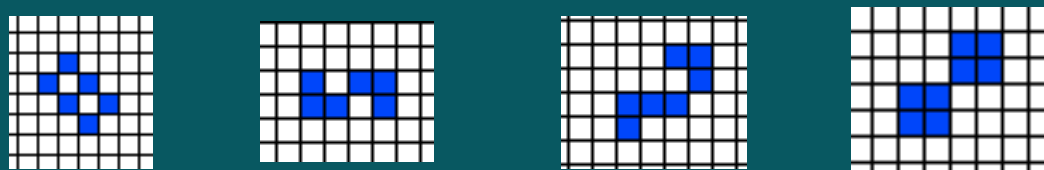
1. 固定型は世代が進んでも同じ場所で形が変わらないものを指します。



固定型の例。左からブロック，蜂の巣，ボート，船，池と呼ばれます。

39

39

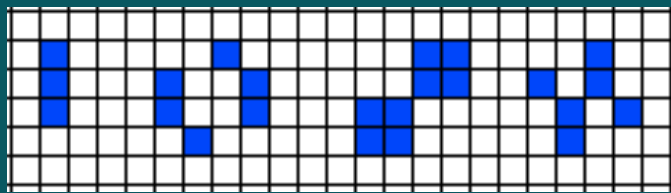


固定型の例。左から，はしけ barge, へび snake, イーター eater, 標識

40

40

2. 振動型はある周期で同じ図形に戻るものを指します

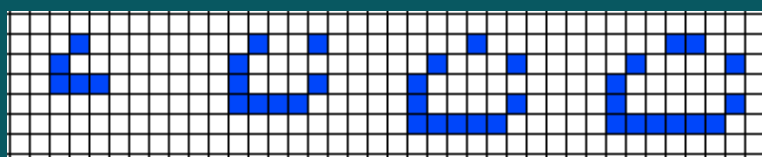


振動型の例。左からブリンカー，ヒキガエル，ビーコン，時計，と呼ばれます。

41

41

3. 移動型は一定のパターンを繰り返しながら移動していくものを指します。 グライダー glider と呼ばれるものが有名です。



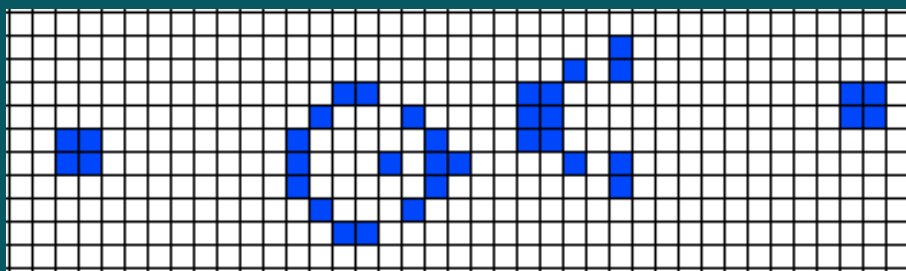
移動型の例。左からグライダー，軽量級宇宙船，中量級宇宙船，重量級宇宙船，と呼ばれます。

42

42

4. 繁殖型はマス目が無限であれば無限に増え続けるパターンです。

先述のとおりコンウェイは「無限にセルの数が増えつづけるパターンはありうるか」という問題に懸賞金をかけ、1970年11月にゴスパー (Bill Gosper) により解かれました。30 世代毎にグライダーを打ち出す「グライダー銃」と呼ばれるパターンです。



43

43

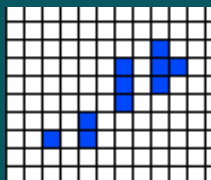
繁殖型には他にも、本体が通過した後に破片を残していく「シュシュポッポ列車」 (puffers) や、宇宙船が集まって移動しながらグライダーを発射していく「宇宙艦隊」と呼ばれるものを含め様々なパターンが見つかっています。

また、繁殖型の中には時間の2乗に比例した増加を示すパターンがあり、それらは「ブリーダー」と呼ばれています。これもゴスパーにより発見されました。繁殖型には後にもっと単純なものも見つかっています。次の3つはいずれも無限に増え続けるパターンです。

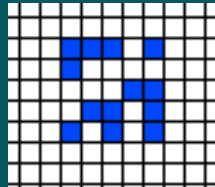
44

44

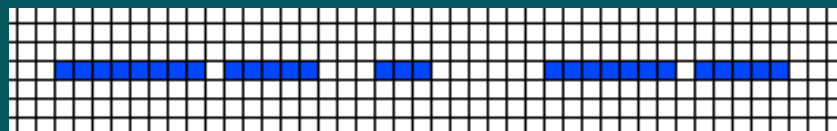
1つ目のパターンは初期配置ではわずか10個のセルしか生きておらず（これが最少であることが証明されている）、2つ目のパターンは5×5に収まっています。3つ目のパターンはわずか1列です。



ブリーダー1



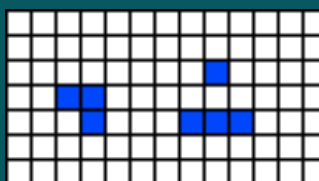
ブリーダー2



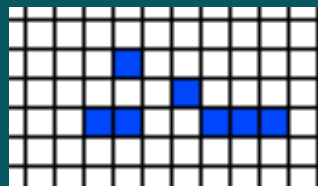
ブリーダー3

長寿型

非常に長い間変化を続ける長寿型（メトセラ）と呼ばれるパターンがあります。「ダイハード」は130世代後に死滅するパターンであり、「ドングリ」(acorn)は13個のグライダーを生み出すのに5206世代かかるパターンです。



ダイ・ハード



ドングリ

グライダーを利用することで他のオブジェクトとの相互作用を得ることができます。例えばタイミングよくいくつかのグライダーを打ち出すことでブロックを近くに運んできたり遠くへ移動させたりすることができます。移動機構はカウンターをシミュレートしていると考えることができます。グライダーなどのパターンの組み合わせで AND, OR, NOT ゲートを構築することができます。現在に至るまで他にも様々な性質を持つパターンが発見されていて、グライダー銃による論理ゲート以外にも、素数生成器や大規模でゆっくりとした速度でライフゲームをエミュレートする unit cell などが発見されています。

ライフゲームのパターンはチューリング完全であり、ライフゲームはチューリングマシンと同等の計算能力を持つことが示されています。つまりライフゲームの計算能力は昨今のコンピュータと同等なのです。ライフゲームはパターンで表現されたプログラムを実行するコンピュータであると言えるのです。

来週までの宿題

スタートアップアンケートに答える

[http://www.cis.twcu.ac.jp/
~asakawa/MathBio2011/
questionnaire.html](http://www.cis.twcu.ac.jp/~asakawa/MathBio2011/questionnaire.html)

Thank you for joining me.

All the contents of these
slides ~~to be reserved by~~ Shin
Asakawa.