

# 人工生命における遺伝子 ネットワークの進化

概要編

～～ 細胞の分化と器官の形成 ～～

# 概要

## <狙い>

生物の器官の生成には 様々な遺伝子が 発生過程で絶妙のタイミングでON/OFF状態となることで、器官を生成する。そこで、人工生命(植物)内に、**遺伝子のネットワーク**を形成し、その遺伝子ネットワークを進化させることで、**細胞の分化や器官発生等**が起こるかをシミュレーションしてみた。

## <結果>

シミュレーションにより下記のような現象が見られた。

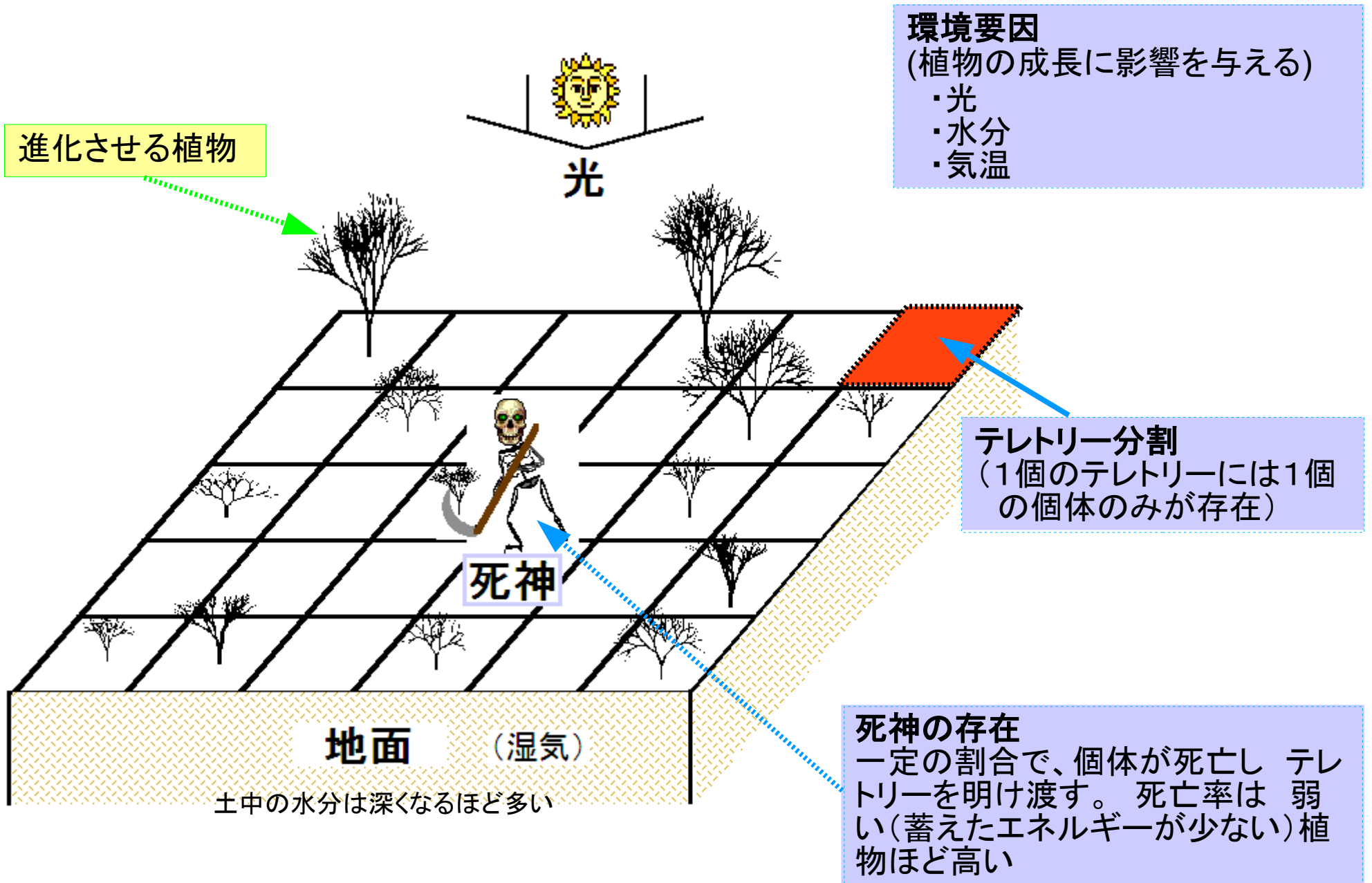
- (1) 発現する遺伝子の違いにより、役割に合わせた**細胞の分化**が起こり、**器官が生成**された。
- (2) **断続的進化**: 世代が進むに従って、徐々に形状が変化するのではなく、遺伝子のネットワークの変化によって、断続的に形状が変化した。
- (3) **発生時の反復**: 進化した仮想生物は、**発生過程(成長過程)**で **自らの進化の過程**をなぞるように成長した。

# シミュレーションの特徴

## <シミュレーションの特徴>

- 人工生命体(本シミュレーションでは植物)は**多細胞生物**で、成長するに従って、「**細胞分裂**」や「**細胞機能の分化**」が行われる。同一個体内の各細胞が持つ**遺伝子**は同じであるが、**活性化(発現)**している**遺伝子**は各細胞で**異なり** 発現する**遺伝子の違い**によって細胞機能の分化が起こる。
- 人工生命個体の持つ**複数の遺伝子**は**相互に影響しあい(ネットワークを形成)**、各遺伝子はネットワークに従って、それぞれのタイミングで**活性化(発現)**する。
- 人工生命が暮らす**仮想世界**の中で、個体は **成長し、成熟し、他の成熟個体と交配して 種子を残す**(遺伝子は種子の中に入っている)。従って、仮想世界の中では、**色々な成長段階の個体(子供から大人まで)**が存在している。

# シミュレーション世界（実験舞台）

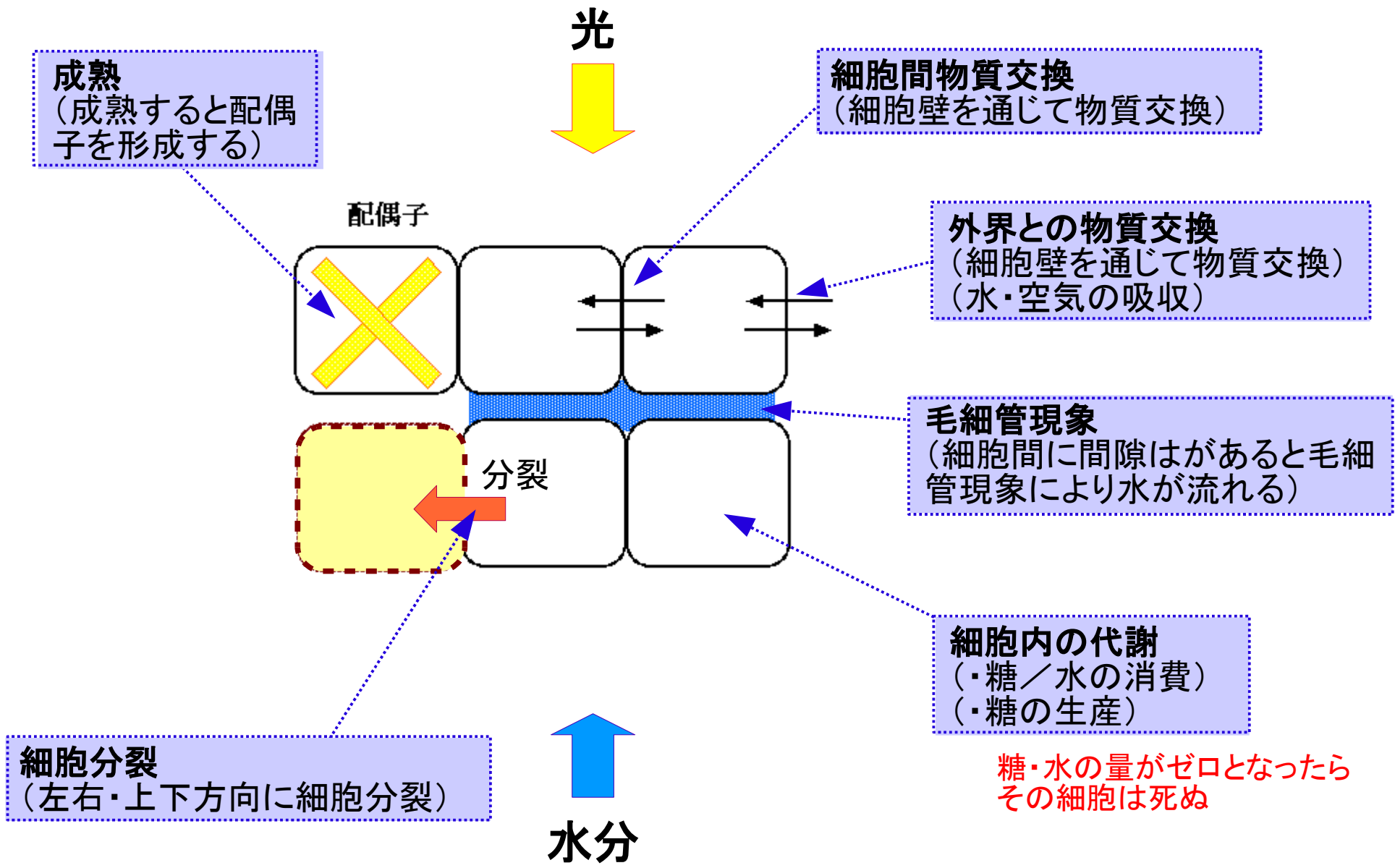


# シミュレーション世界（実験舞台）

## ＜シミュレーション世界の特徴＞

- 世界には**多細胞植物**が生息可能である。
- 地面に蒔かれた種子は成長し、成熟すると配偶子を生成し、自家または他家受精し種子を形成する。配偶子を生成しない植物は子孫を残せない。
- 配偶子生成は同期しないため、世界には**色々な成長過程の個体が同時に存在**する。
- 世界はテレトリーに分割され、各テレトリーに1個の植物が生育可能である。すべてのテレトリーが埋まっている時には**新しい種子を蒔くことができない**。
- 地面には水分があり、空からは日光が射す。
- 植物は日光、水分、空気を利用して**光合成を行い、糖分を生成**することができる。
- 世界には**死神が存在**し、定期的に一部の植物を枯らす。糖分の蓄えの少ない植物ほど、死神の餌食になりやす。
- 植物個体の死は、個体を形成するすべての細胞が死滅するか、死神に個体が刈られた時である。
- 種子は**親の配偶子が蓄えた水分と糖分を相続**する。

# 仮想2次元植物(多細胞生物)の構造



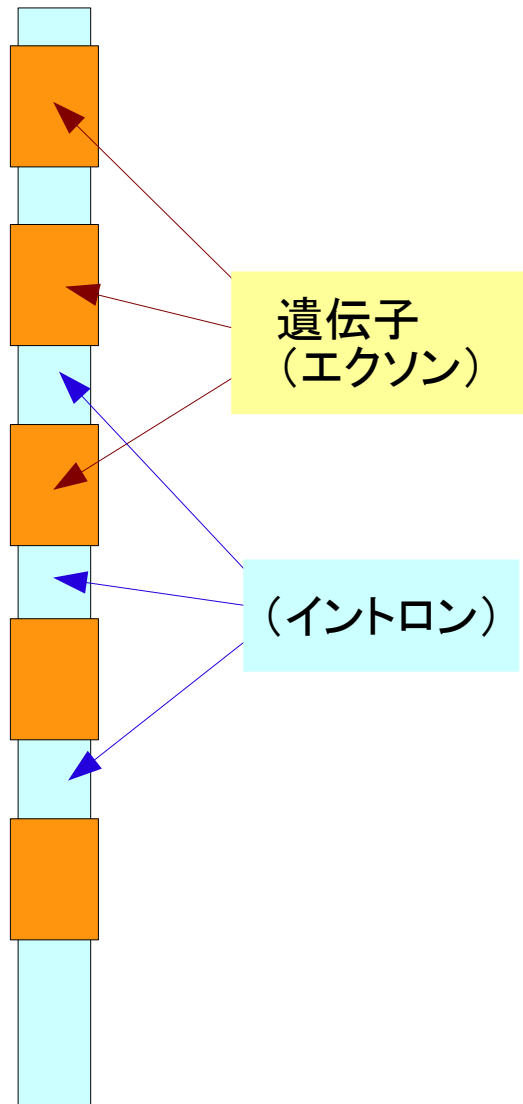
# 細胞の性質

シミュレーションに於いて細胞は下記に示す性質を持つとする

- ① 細胞の性質は 細胞の色によって異なる
- ② 細胞の色は、 緑／赤／灰色の3種類がある
- ③ 色と 細胞の性質の関係

糖生産量 (光が当たっている時)	緑色 >> 赤色 > 灰色 = 無色 = 0
糖消費量 (光が当たっていない時)	緑色 >> 赤色 > 灰色 > 無色 > 0
水の吸収量	0=緑色 < 赤色 << 無色 < 灰色
水の消費量	緑色 >> 赤色 > 灰色 > 無色 > 0

# 遺伝子の構造



染色体

- ①染色体上に複数の遺伝子を配置
- ②エクソンとイントロンが存在する
- ③各遺伝子は各発現型に対応する
- ④通常の遺伝的アルゴリズムとは異なり  
突然変異／交叉／の他に **挿入／欠損**が発生  
(染色体の長さや遺伝子数が変化することがある)
- ⑤突然変異により遺伝子の型が他の発現型を示す遺伝子に変化することがある  
また、エクソンがイントロンに、イントロンがエクソンに変化することもある
- ⑤発現型と対応する遺伝子は天下り的に定義しておく(次頁)

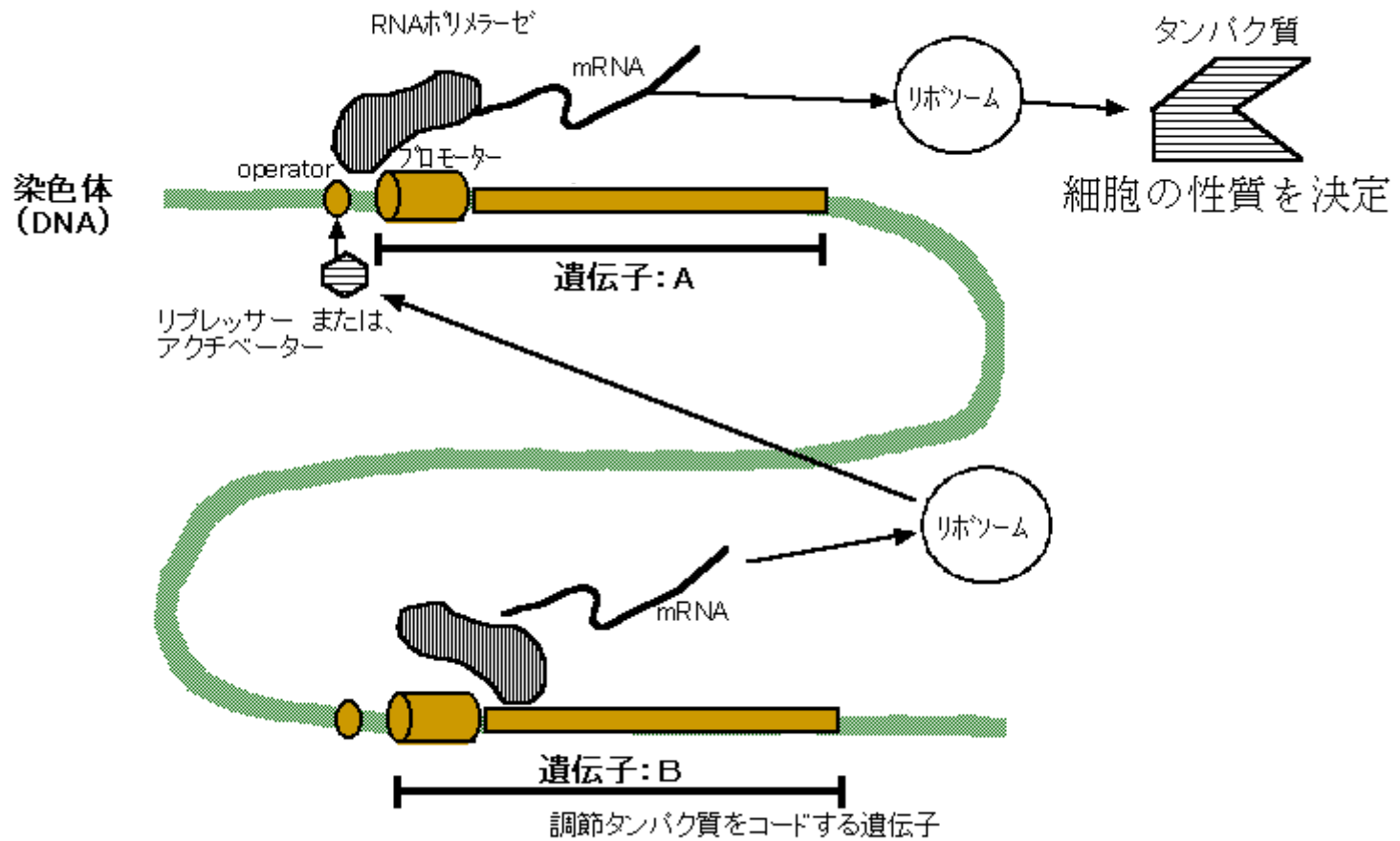
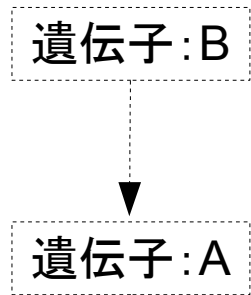


# 準備した遺伝子の発現型

記号	遺伝子の性質
TM-	細胞が生まれてから一定期間のみONとなる遺伝子 (一定時間経過後はOFFとなる)
RP+	細胞を成熟(配偶子生成)させるタンパク質を生成する遺伝子
GRY	灰色の色素を生成する遺伝子
RED	赤色の色素を生成する遺伝子
GRN	緑色の色素を生成する遺伝子
HD+	細胞の水平方向成長を促進するタンパク質を生成する遺伝子
HD-	細胞の水平方向成長を抑制するタンパク質を生成する遺伝子
VD+	細胞の垂直方向成長を促進するタンパク質を生成する遺伝子
VD-	細胞の垂直方向成長を抑制するタンパク質を生成する遺伝子
WTR	水に曝されるとスイッチONとなる遺伝子
LGT	光に曝されるとしてスイッチONとなる遺伝子
TMP	気温が高温になるとスイッチONとなる遺伝子
ENG	生体内エネルギーが一定以上になるとスイッチOFFとなる遺伝子
R1	
~R5	介在タンパク質(細胞の性質には直接影響しない)を生成する遺伝子

# 遺伝子ネットワーク

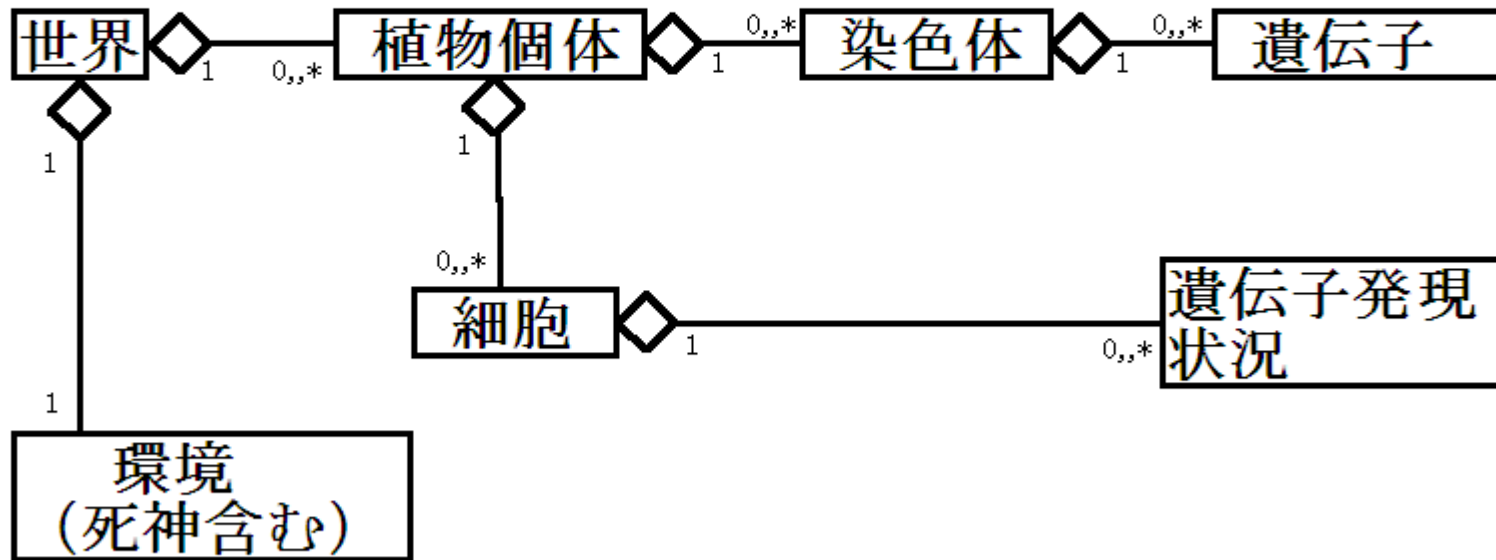
< 遺伝子:Bが遺伝子:Aに影響を与える原理 >



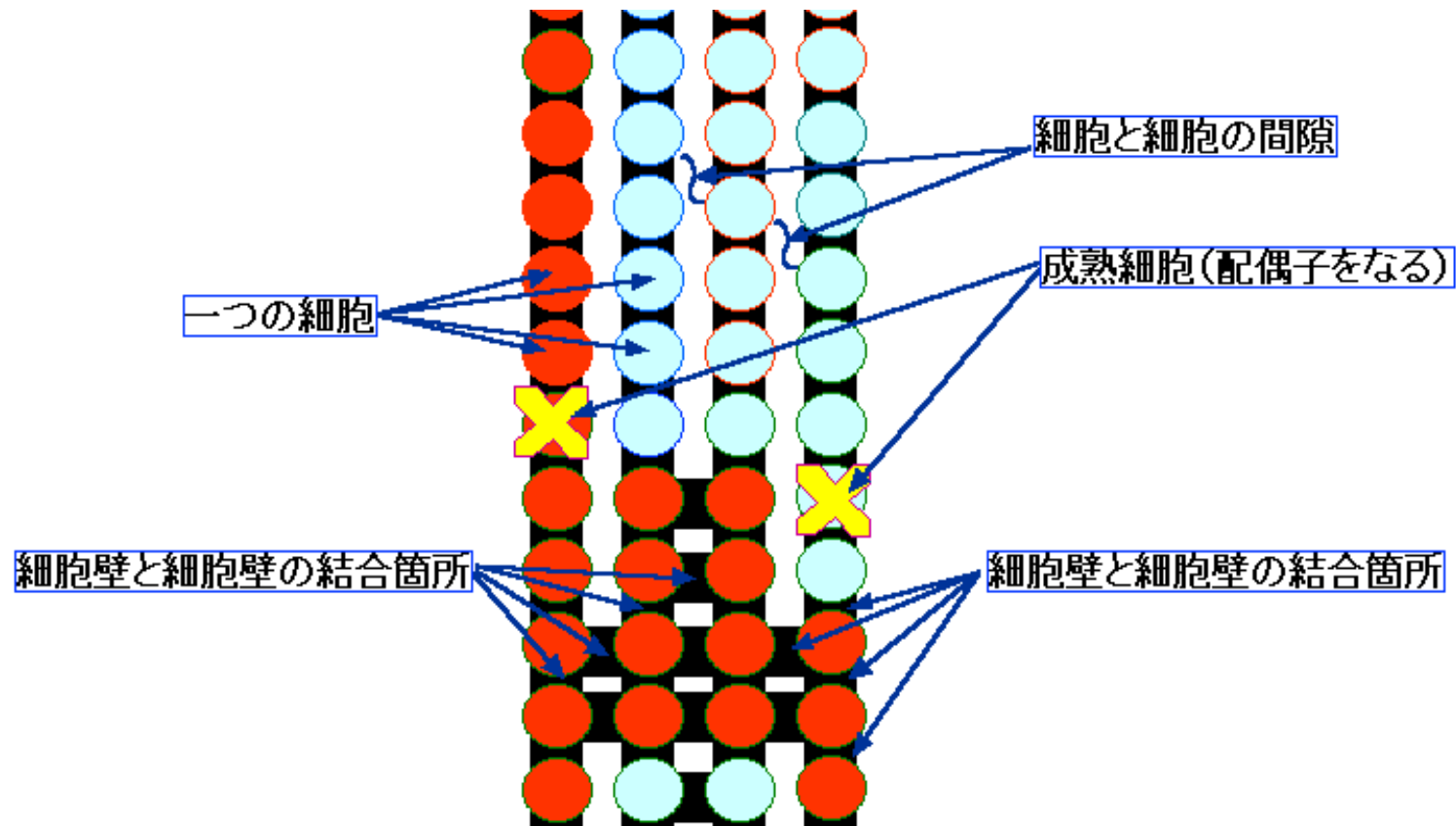
# シミュレーションのソフトウェア構造

シミュレーションプログラムはオブジェクト指向で制作

クラス図を示す

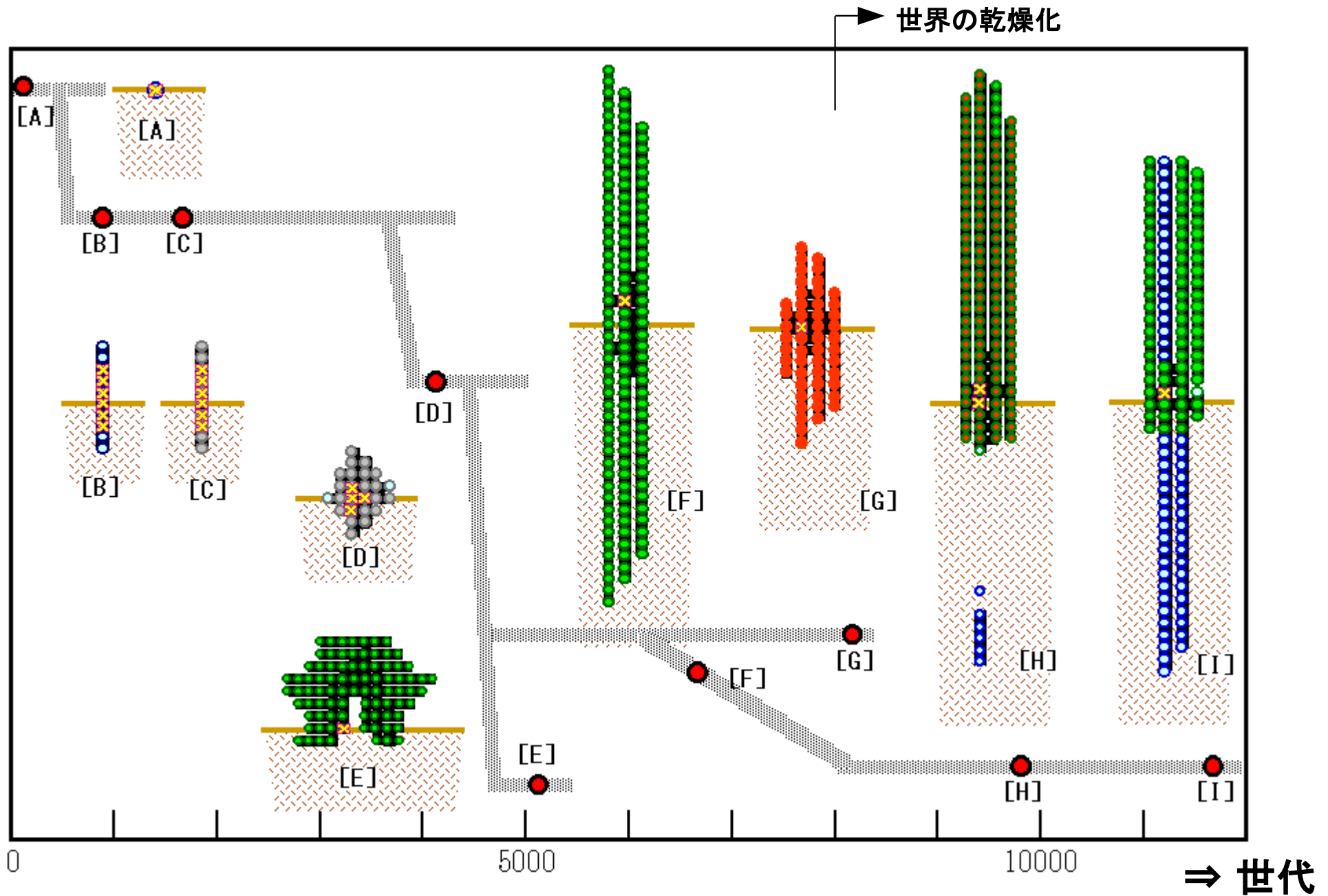


# 2次元生物(植物)の表示方法



- 一つの細胞は○印で表示する。
- 結合した細胞壁は太い黒線で示す。
- 結合しない細胞の間は隙間ができる。
- 成熟細胞(配偶子)は×印で表す。
- 細胞の色は発現した色と同じ色で表す。

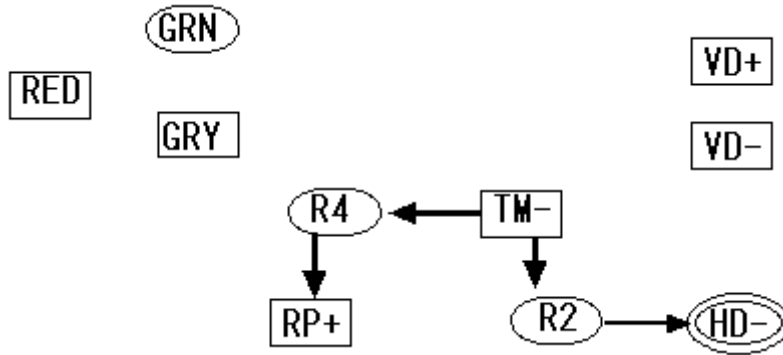
# (シミュレーション結果) 進化系統図



# (シミュレーション結果) 遺伝子ネットワークの進化



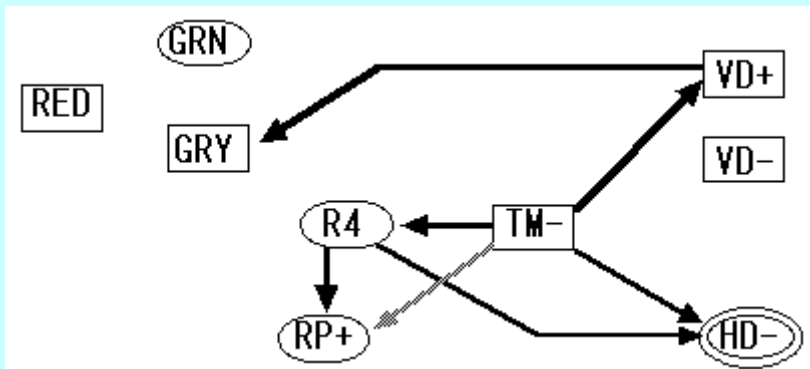
200 世代



●種が蒔かれると、タイマー (TM-) が直ちにONとなり、R4を介して成熟 (RP+) を活性化し配偶子を生成する。  
 (染色体には初期値として、複数の遺伝子を配置しておくが、それぞれ孤立しているため、ON状態になることは無い)



1500 世代

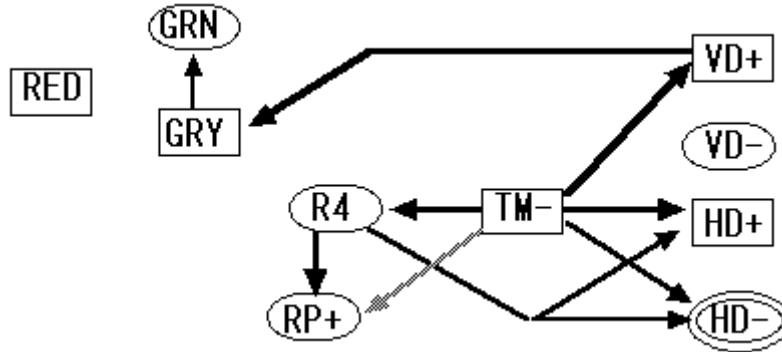


●[A]の個体に 垂直成長遺伝子 (VD+) への結合が追加。  
 ●VD+がONとなり、垂直方向へ成長する。暫くして配偶子を生成する。

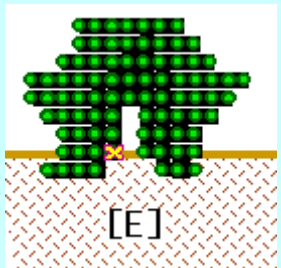
# (シミュレーション結果) 遺伝子ネットワークの進化



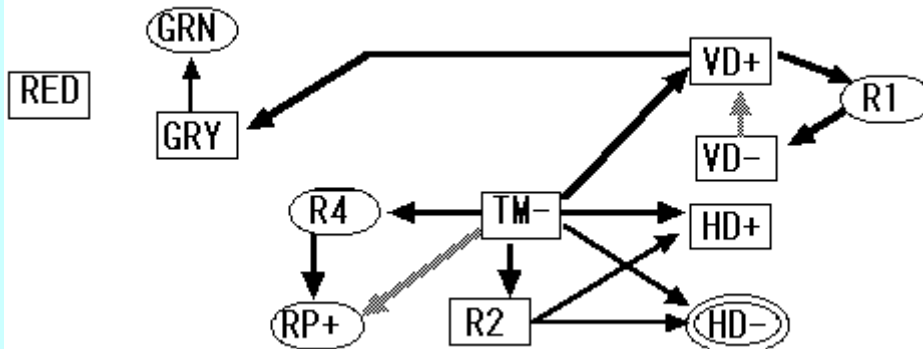
4150 世代



- [C]に 水平方向成長遺伝子(HD+)が活性化する結合が追加。
- 垂直・水平方向への成長が始まり、ダイヤモンド型の形状に変化。
- 灰色(GRY)から、緑色(GRN)へ結合も発生したが、GRY)側が強い為、全体は灰色のまま成長する。

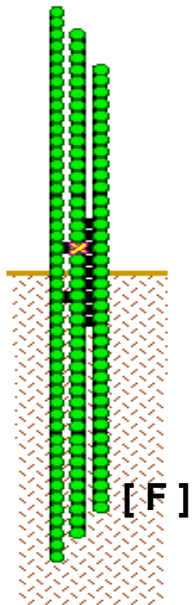


5050 世代

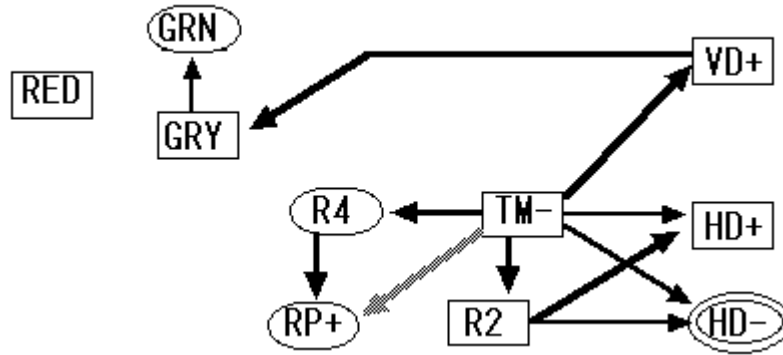


- [E]の個体に対し、一定時間経過後、垂直成長抑制遺伝子(VD-)がONとなり、垂直方向の成長が止まる。
- 水平方向成長抑制遺伝子(HD-)の発現は、R2を経由し少し遅れるため、暫くは水平方向の成長が継続し水平方向に層状の構造となる。
- 緑色(GRN)も発現して全体が緑色になる。但し緑色は水を吸収しないため、灰色時に層の間隙に蓄えられた水がなくなると個体は死ぬ。その前に配偶子を生成する必要がある。
- 他の個体との生存競争に負けて絶滅。

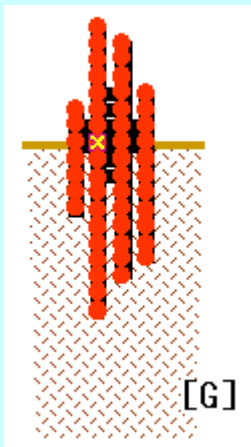
# (シミュレーション結果) 遺伝子ネットワークの進化



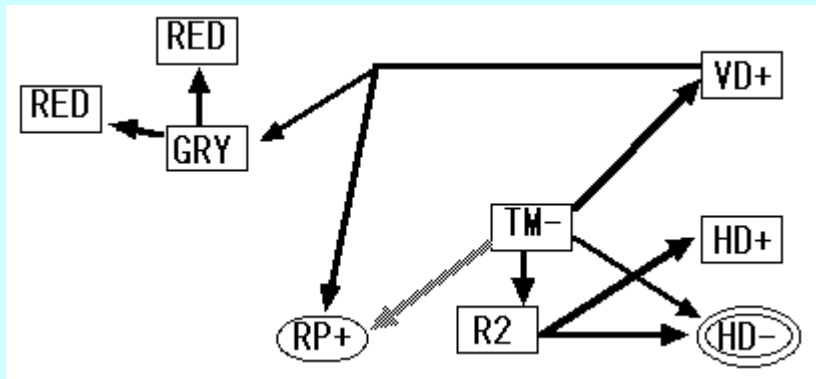
6850 世代



- 水平方向の成長は水平方向成長抑制遺伝子 (HD-) が発現することで、ある程度、横方向に成長すると止まる。一方、垂直方向成長は継続するため縦に長い形状となる。
- 個体の色は灰色となった後、最終的には (GRN) により緑色になる。
- 緑色 (GRN) 細胞は水吸収能力は低いが、垂直方向の間隙が毛細管となり、かなり高い位置まで水を組み上げる。但し、水の消費量も多い為、蓄えた水を使い果たす前に配偶子を生成する必要がある。



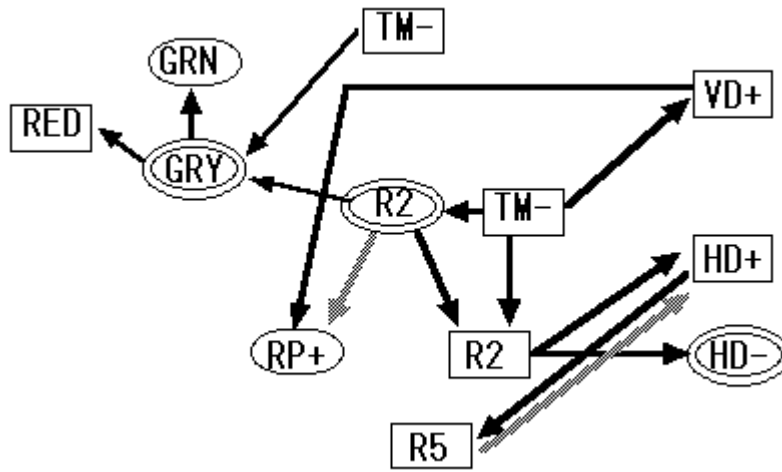
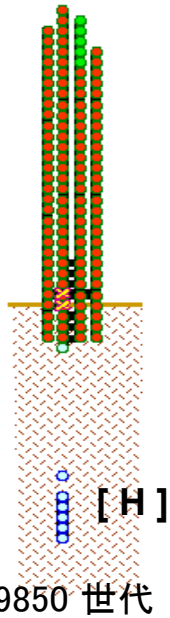
8100 世代



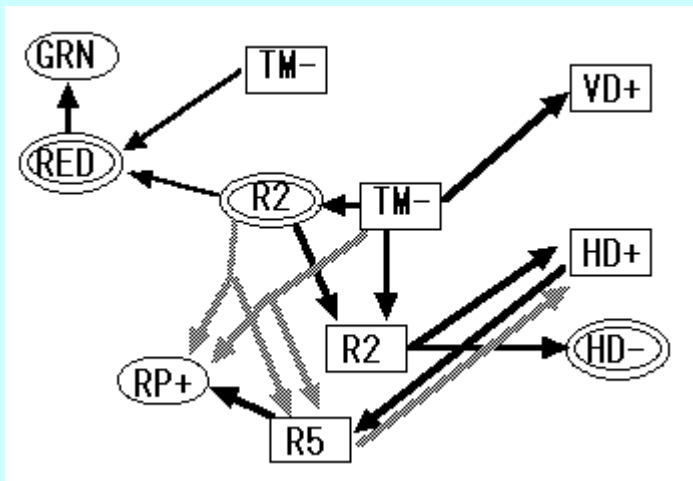
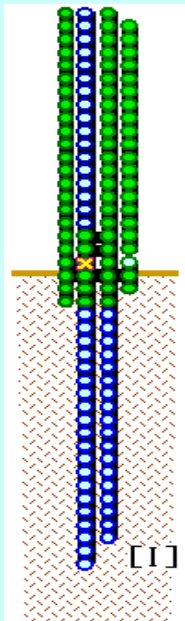
- [F] との最終色が赤色 (RED) に変化。
- 赤色は、緑色に較べて「糖」生産能力が低く、種子へ相続させる「糖」分が少ない。従って、他の個体との生存競争に負けて絶滅。



# (シミュレーション結果) 遺伝子ネットワークの進化



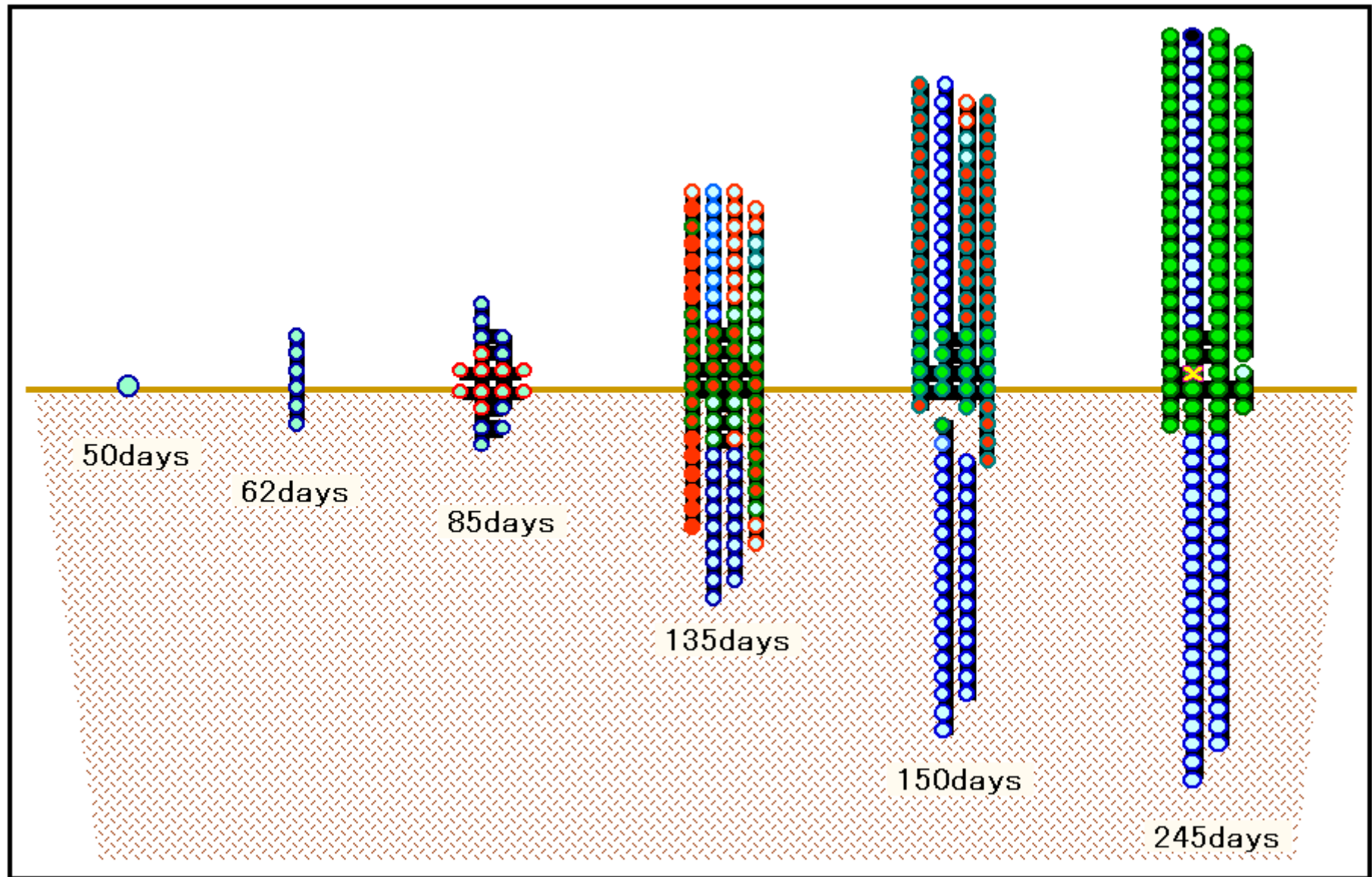
- [F]に較べてネットワークは複雑化しているが、基本的に発現する遺伝子は同じシーケンスになる。
- 灰色 (GRY) から結合は赤色 (RED) 側が強く個体の最終色は赤色になる。
- 配偶子の生成は遅くった為、土中の色付き細胞は死亡始めている。(土中の下側に取り残された灰色細胞は、かろうじて生き残っている細胞)



- [H]に比べて、成熟遺伝子 (RP+) の発現はさらに遅くなっている。
- 一旦切り離された土中の灰色細胞は成長を続け 再度、地上部と結合・合体。土は水の吸収に都合の良い灰色。地上は光合成に都合の良い緑色になり、さらに毛細管を通じて 土中の水分、合成した「糖」の移動が 個体全体に行き渡る様な構造になった。この為、種子細胞にも多くの「糖」を相続させることが可能となった。

# (シミュレーション結果) 個体の発生・成長過程

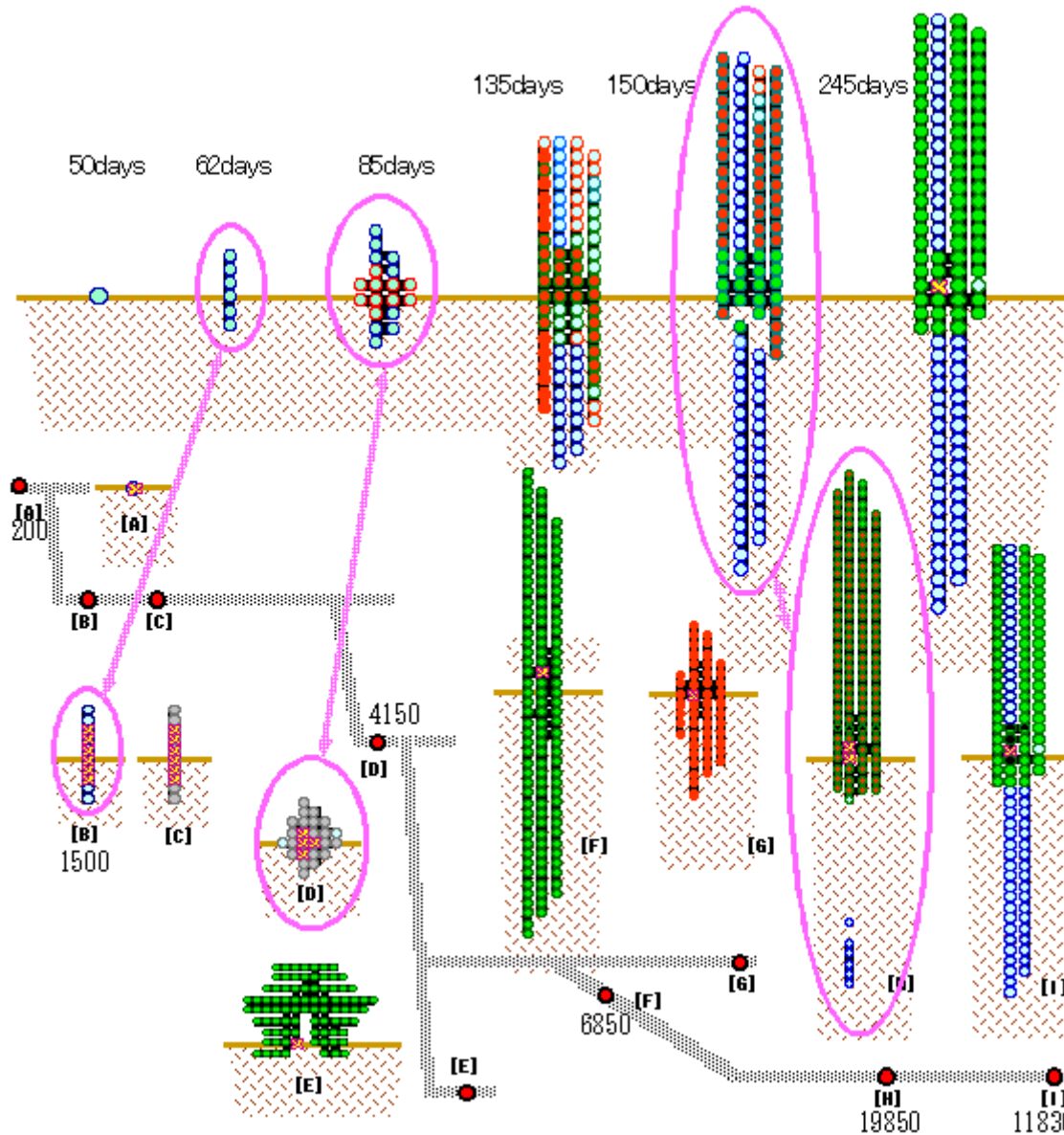
11830世代 進化後の個体の成長過程



⇒ 経過日数

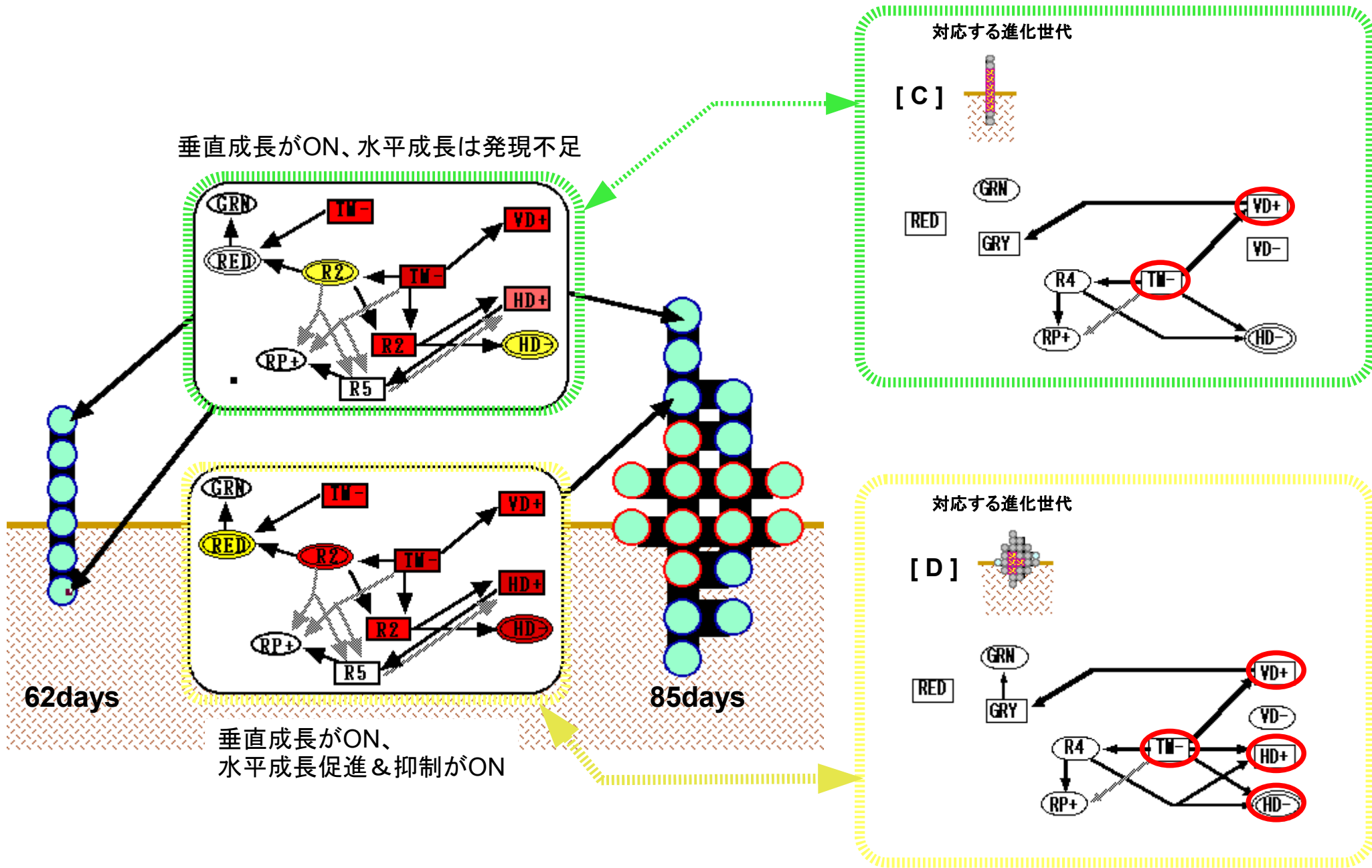
# (シミュレーション結果) 発生と進化系統比較

発生系統

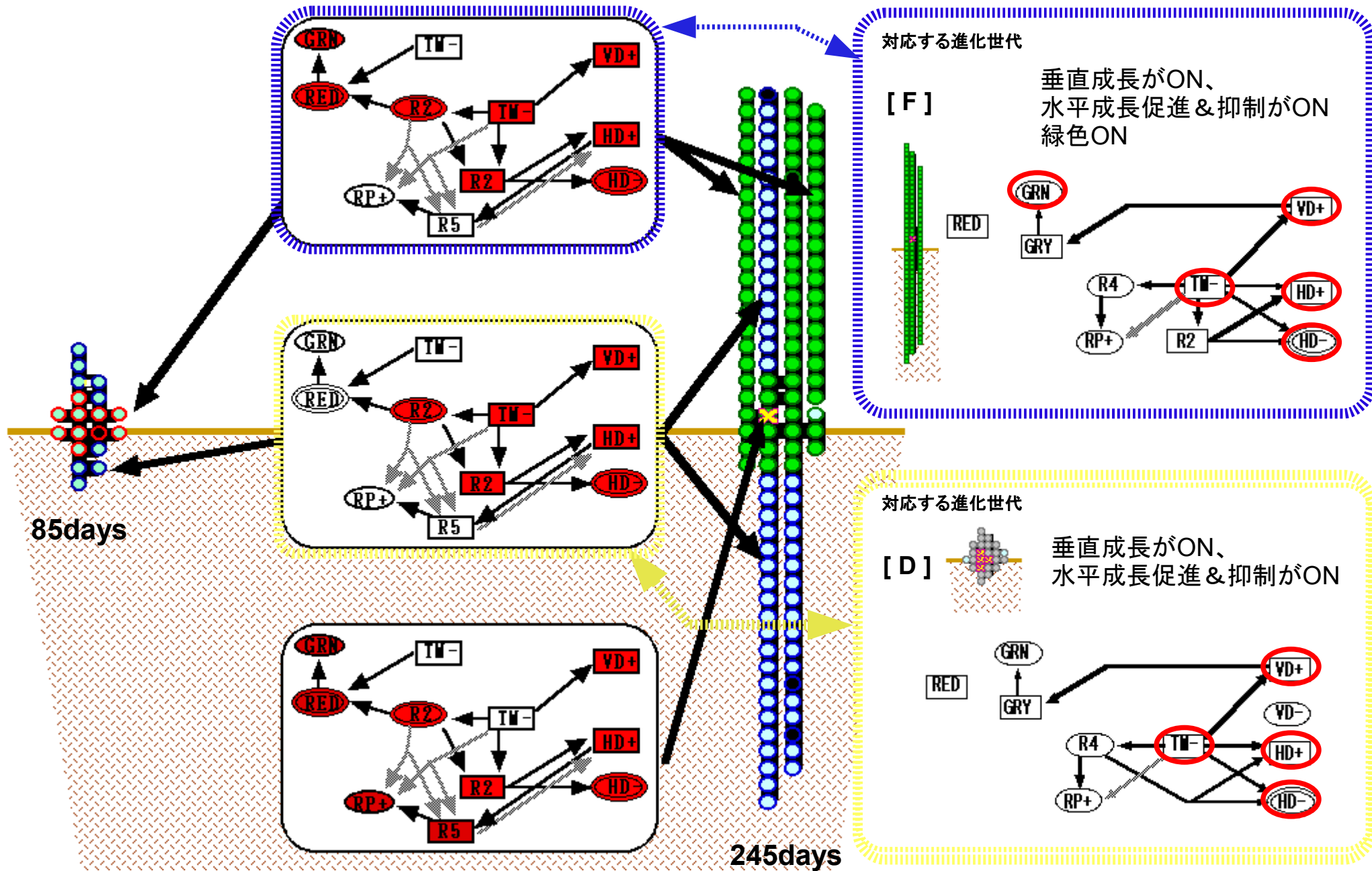


進化系統

# (シミュレーション結果) 成長中の遺伝子発現



# (シミュレーション結果) 成長中の遺伝子発現



# まとめ

●**遺伝子のネットワークの変化**に伴い、植物の形状が単細胞から多細胞へ変化し、形状も、団塊形状から 垂直に立った形状に変化した。

また、**細胞の「分化」**が発生し、根の働きをする器官や、維管束の様な**器官が発生した**。

## ●断続的進化

徐々に形状が変化するのではなく、ある**時期に急激に形状が変化**する現象が現れた。これは遺伝子が個体の形状を直接決定するのではなく、分裂の方向を決定する遺伝子のON/OFF (発現のタイミングも含めて) が遺伝子のネットワークの進化により変化するからである。

●**仮想生物の発生過程(成長過程)**で 自らの進化の過程をなぞるような現象が現れた。(ドイツの生物学者エルンスト・ヘッケルの唱えた「**个体発生は系統発生を繰り返す**」と同じ現象)

この理由としては、以下が考えられる。

①過去のネットワークを捨てる、発生が進行しなくなり死滅する可能性が高い。

②このため 最後まで成長(成熟)する為には 過去の成長の上に新しい成長を積み重ねる方向に進化しやすい。

③この痕跡が発生過程で進化の過程を繰り返すという現象につながる。

# 参考文献

- 1) Mark Ptashne 著  
2) 江口吾郎・鈴木義明・名取俊二著  
3) 木村資生著  
4) T. A. Brown 著  
5) 塩川光一郎著  
6) 中原英臣著  
7) 吉永良正著  
8) 宮田隆著  
9) 木庶佑著  
10) 今木文雄著
  - 11) 石川統  
12) 金子隆一・中野美鹿  
13) Ellen Thro 著  
14) ルーディ・ラッカー  
15) 財団法人 日本情報処理開発協会監修
  - 16) L・デービス著  
17) 北野宏明編  
18) 北野宏明編  
19) ウィリアム・パウンドストーン著
  - 20) クラウス・エメッカ著
- 遺伝子スイッチ  
発生・分化の遺伝子的背景  
分子進化入門(第7版)  
分子遺伝学  
分子発生学  
ウイルス進化論  
ウイルスが人間を支配する  
分子進化学への招待  
遺伝子が語る生命像  
DNAはどのように折り畳まれて動くか
- 細胞内共生  
大進化する進化論  
人工生命  
人口生命研究室 on Window
- 人工生命の方法  
遺伝子アルゴリズムハンドブック  
遺伝的アルゴリズム  
進化するコンピューター
- ライフゲームの世界  
マシンの園 人口生命叙説
- (1989) オーム社  
(1990) 東京大学出版会  
(1990) 培風館  
(1991) 東京科学同人  
(1990) 東京大学出版会  
(1989) 三報社印刷  
(1990) 光文社  
(1994) 講談社  
(1994) 講談社
- (1996) 共立出版  
(1987) 東京大学出版会  
(1995) NTT出版  
(1994) カットシステム  
(1996) アスキー出版
- (1995) 工業調査会  
(1994) 森北出版  
(1993) 産業図書  
(1993) ジャストシステム
- (1992) 日本評論社  
(1989) 産業図書



<http://snakeisland.my.coocan.jp/evoldoc/evoltop.html>

[http://island.geocities.jp/snakeman\\_dyna/evoldoc/evoltop.html](http://island.geocities.jp/snakeman_dyna/evoldoc/evoltop.html)

キーワード: 人工生命、遺伝子ネットワーク、進化、断続平衡進化、反復説