制約により生じる調和 — 謎の算術生命体ナミーバの組織化

佐藤 進也 (NTT), 竹内 郁雄 (電通大)

2001 年のプロシンでポスター発表を行なった謎の算術生命体ナミーバに階層関係を導入し，ナミーバの組織といえるものを構成する．ナミーバの振る舞いはすでに十分複雑であるが，ナミーバの組織は，より “生き物らしい” 振る舞いをみせる．これは，組織の一部となるという個体にとっての制約が適切に作用し，組織全体に調和が生じていることの現れであると考えられる．

1　ナミーバの “生き物らしさ”

1.1　ナミーバとは

未解決の算術問題 (3n+1 問題) に使われている基本演算を，木構造の成長規則へ拡張することによって，興味深い成長・変態・老死のし方をする人工生命体ナミーバ (図 1) が得られた [1].

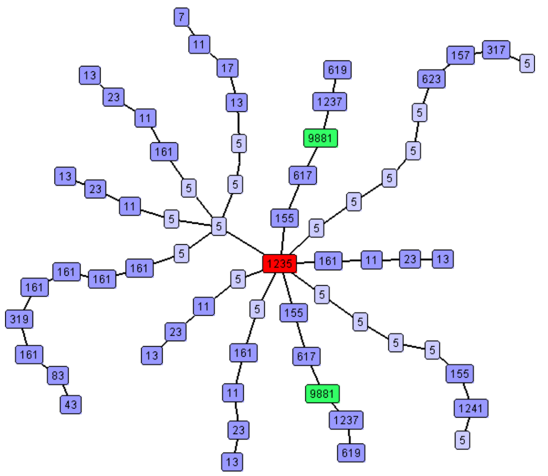

図 1: ナミーバ.

ナミーバは細胞が算術をする奇妙なアミーバの共同体である．個々のアミーバは単細胞でありながら，細胞分裂をするとお互いに寄りそって離れない木構造の共同体をつくる．その中にリーダーと呼ばれる細胞があり，木構造の根となる．

すべての細胞は中に正の奇数を表すナムボソーム (numbosome) という物質をもつ．1 クロック経つと各細胞のナムボゾームの値は 3n+1 問題の基本演算 (3 倍して 1 を足す．それを 2 で割れるかぎり割る) の結果に変化する．この値に応じて細胞の死滅，細胞分裂，リーダーの交代が起こる．以下にその規則を示す．規則 (1)，(2)，(3) はこの順に適用される．以下，親細胞や子細胞は木構造の意味で使う (世代の親子ではない).

(1) ナミーバの木構造を根から葉のほうへトップダウンに走査しながらナムボソームの値を調べる．ナムボソームの値が 1 になると，その細胞は死ぬ．リーダー細胞が死ぬとナミーバ全体が解体して死ぬ．それ以外の場合は，死細胞を根とする部分木はこのナミーバから切り離される．(死細胞の子細胞以下の運命については，とりあえず不問にしておく．) ただし，死細胞がリーダーでなく，かつそれの子細胞が 1 個だけの場合は，子細胞が死細胞にとって代わる．つまり，一本でつながっていたものは，そのまま縮退する．例えば，A をリーダーとするナミーバ

$$\begin{tikzcd}[row sep=small] \boxed{\mathrm{A}} \arrow[r] & \mathrm{B} \arrow[r] & \mathrm{C} \arrow[r] & \mathrm{D} \arrow[r] & \mathrm{E} \arrow[r] \arrow[dr] & \mathrm{F} \\ & & & & & \mathrm{G} \arrow[r] & \mathrm{H} \end{tikzcd} \qquad (\alpha)$$

で A が死んだら，ナミーバ全体が死ぬ．ナミーバ α で D が死んだら

$$\begin{tikzcd}[row sep=small] \boxed{\mathrm{A}} \arrow[r] & \mathrm{B} \arrow[r] & \mathrm{C} \arrow[r] & \mathrm{E} \arrow[r] \arrow[dr] & \mathrm{F} \\ & & & & \mathrm{G} \arrow[r] & \mathrm{H} \end{tikzcd}$$

となる．ナミーバ α で E が死んだら

$$\boxed{\mathrm{A}} \to \mathrm{B} \to \mathrm{C} \to \mathrm{D}$$

となる．個々の細胞が死ぬかどうかの判定は現在のリー

ダーから出発して葉のほうに向かいながら逐次的に行う．α で E も F も 1 になったとしても，E が死んだと判定されたときは，まだ E に子細胞が 2 つあると見るので，G，H が生きていても，

$\boxed{\mathrm{A}} \to \mathrm{B} \to \mathrm{C} \to \mathrm{D}$

となる．

(2) 上の手順を経て生き残った木構造で，直前のクロックでも葉だったもののナムボソームの値 n が増加していたら，その細胞から新しい細胞が生まれて葉になる．新しい細胞のナムボソームの初期値は $(n+1)/2$ 以上の最小の奇数である．新しい細胞を葉ボーナスと呼ぶ．

(3) 生き残った細胞と新たに生まれた葉のうち，唯一の最大値ナムボソームをもつ細胞が新たなリーダーになる．旧リーダーから新リーダーへ至る道の親子関係はすべて反転され，木構造は新リーダーを根にするように組み替えられる．唯一の最大値なので，最大値ナムボソームが複数あった場合，リーダーは交代しない．最大値 m をもつリーダーが選ばれると (再選可能)，リーダーは, $(m+1)/2$ 以下の最大の奇数をナムボソームの初期値としてもつリーダー直属の葉細胞を生む．これをリーダーボーナスと呼ぶ．

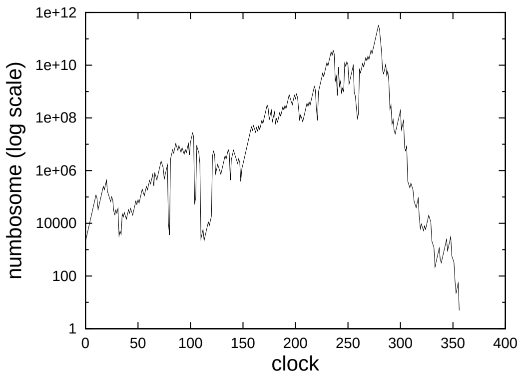

図 2: リーダのナムボソームの変化.

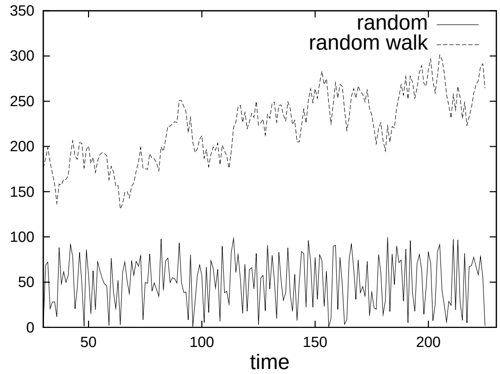

図 3: 乱数とランダムウォークの時系列.

1.2　ナミーバの振る舞い

以上のように定義されるナミーバの振る舞いは非常に複雑であり，図 1 に示したように視覚化してその変容を眺めていると，いかにも生命体の感がある．数量的にも，細胞の数，リーダのナムボソームなどそれぞれが時間経過にともない複雑に変化する．一例として，$n(2047)$(2047 をナムボソームとする単細胞ナミーバ) のリーダのナムボソームの変化を図 2 に示す．

しかし，果たしてこの振る舞いがどれほど本物の生命体に近いものなのだろうか?

一口に複雑な変化と言っても，その変り方の具合いは様々で，例えば，単純な乱数とランダムウォークの時系列のグラフ (図 3) はともに複雑な形状を呈しているが，時間経過にともなう変化のパタン (ゆらぎ方) に違いがある．

乱数のスペクトルはホワイトノイズであり，どの周波数成分も同程度存在する (図 4)．これは，事象間に時間的な相関がない (現在の状況が過去に依存しない) ことを示している．一方，ランダムウォークのスペクトルはいわゆる $1/f^2$ ゆらぎであり，比較的強い時間的相関のある変化であることを示している．

一方，生物，あるいはもっと一般に複雑系においては，ホワイトノイズと $1/f^2$ ゆらぎの中間である $1/f$ ゆらぎが特徴的であると言われている．$1/f$ ゆらぎを呈する変化は，ランダム事象に比べると秩序立ったものだが，$1/f^2$ よりも時間的相関が低く予測が難しい．たまに急激な変化が起きるため予断を許さないという，いかにも生物らしいゆらぎ方である．

では，ナミーバの振る舞いのゆらぎはどのようになっているのだろうか．図 5 は，図 2 で示したナムボソームの変化のスペクトルであるが[1]，$1/f$ ゆらぎは認められない．ナミーバの振る舞いに認められるゆらぎは，いままで議論してきた $1/f^n$ タイプとは異なるもので

[1] 3n+1 問題の基本演算の繰り返しによって得られる数列からも同じようなスペクトルが得られる．

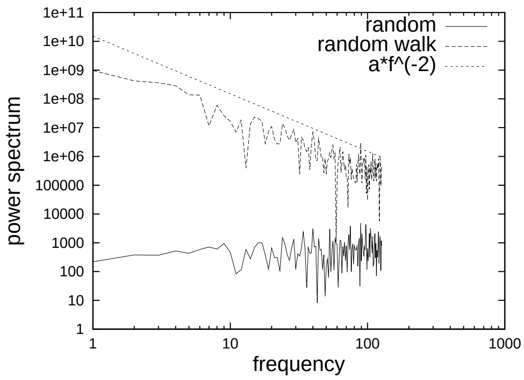

図 4: 乱数とランダムウォークのスペクトル.

ある．このゆらぎで "生き物らしさ" を判定する限り，この事実はナミーバに生命体としての改善の余地があることを示している．ちなみに，ライフ・ゲームにおける各セルの値 (0/1) の変化は $1/f$ ゆらぎを呈していることが知られている [2]．

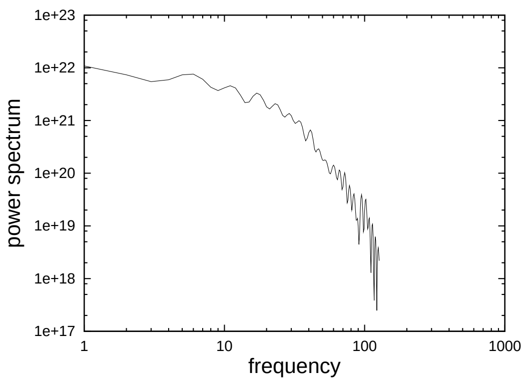

図 5: ナムボソームのスペクトル.

2 ナミーバの組織化による "生き物らしさ" の導出

一般に，複雑系の特徴としては次の 3 つが挙げられる：(1) 系を構成する要素間のミクロな相互作用 (2) 相互作用の結果として自発的に出現するマクロな振る舞い (3) マクロな振る舞いがもたらす各要素への影響．つまり，複雑系においては，系の要素のミクロな振る舞いは系全体のマクロな振る舞いに反映され，さらに，それ自身へとフィードバックされることになる．弱い時間相関の現れである $1/f$ ゆらぎは，このようなフィードバックの存在を示していると考えられる．

そこで，ナミーバに不足している生き物らしさを導き出すため，複雑系のメカニズムに倣って階層化されたナミーバの集合体 (ポリナミーバ; polynumoeba) を考える．

ポリナミーバは，上位ナミーバと下位ナミーバからなる (図 6)．下位ナミーバは上位ナミーバの各細胞ごとに存在し，下位ナミーバのリーダ細胞が対応する上位の細胞とつながっている．上位ナミーバのナムボソームは 3n+1 問題の基本演算にはよらず，各細胞に付随する下位ナミーバのリーダからその値を譲りうける．リーダの交代，細胞の死滅のルールはオリジナルのナミーバと同じとする．下位ナミーバが死滅すれば同じナムボソームを持つ対応する上位ナミーバの細胞も死ぬ．逆に，上位ナミーバの細胞が死んだ場合には，その下位のナミーバ全体が死滅するものとする．

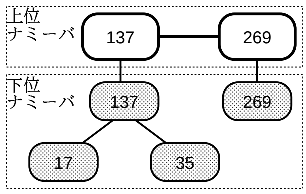

図 6: ポリナミーバの構造.

細胞分裂については，以下のように，それぞれのボーナスチャンスにおいて確率的に分裂を許すルールに変更した．これは，オリジナルのルールをそのまま適用した場合に発生する細胞の爆発的増加を防ぐためである．

- 上位ナミーバに属する細胞の場合
  付随する下位ナミーバの細胞数を x としたとき，確率 $f(x)$ で分裂を許す．
- 下位ナミーバに属する細胞の場合
  所属ナミーバの細胞数を y としたとき，確率 $g(y)$ で分裂を許す．

例えば，上位ナミーバのリーダボーナスは以下の手順で与えられる．まず，下位ナミーバがそれぞれ 3n+1 問題の基本演算に基づきナムボソームを更新し，新しいリーダを選出する (下位ナミーバの細胞分裂はここで発生する)．上位ナミーバはこれらリーダのナンボ

ソームを譲りうけることでナムボソームを更新する．もっとも大きい値を譲りうけた細胞が上位ナミーバのリーダに選出され，リーダボーナスのチャンスを与えられるが，実際の分裂は $f(x)$ の確率でだけ許される．

さて，関数 f, g を選ぶにあたっては，これらが組織としてのポリナミーバに対してどのような意味を持つかを考慮した．まず，規模が大きくなるにつれ柔軟性が失われ活性度が低下するという実社会での組織の特性に基づき，f, g を減少関数から選ぶことにした．また，ポリナミーバの階層構造に注目すると，関数 g は下位ナミーバという局所に対するミクロな制約であり，f は階層間の関係に影響を与えるマクロな制約であると考えられる．一方，一般に，組織における要素間の関係 (相互作用，制約) は局所においては密 (強) であるが，範囲が広がるにつれて疎 (弱) になる．このことを減少関数の性質に反映させ，f としては緩やかに減少する関数，g は f よりも減少が急であるもの — 一例としてそれぞれ線形関数 $(-ax + \mathrm{b})$ と指数関数 (c^{-y+d}) を採用した．

この条件下で，実際にいくつかの具体的な関数を試した結果，長い寿命をもち変化に富んだ時間発展をするポリナミーバが以下の関数によって得られた．

$$
\begin{aligned}
f(x) &= max(1.0 - 0.2x, 0) \\
g(y) &= 2^{-(y-1)}
\end{aligned}
$$

図 7 は，そのポリナミーバの一例である．白い細胞，色のついている細胞はそれぞれ上位，下位ナミーバのものである．階層化により木構造にフラクタル性が加わり，より複雑性が増しているように見える．そして，リーダのナムボソームの変動には，ポリナミーバを構成する目的であった $1/f$ ゆらぎがはっきりと認められる (図 8)．

3　おわりに

複雑系のメカニズムを真似ることで $1/f$ ゆらぎを導き出したこの事例は，創発による問題解決というアプローチの可能性を示唆している．

例えば，3n+1 問題を解くことを考えてみよう．ナミーバは，ある意味で，3n+1 問題の一つの表現であり，ナミーバの生態を理解することは 3n+1 問題の理解につながる．しかし，ナミーバの各個体のふるまい

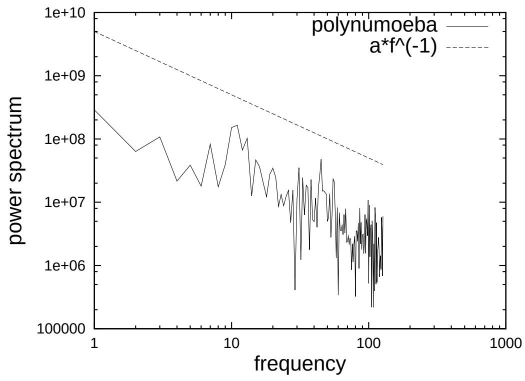

図 8: ポリナミーバのナムボソームのスペクトル．

もまた複雑でその特徴を捉えることは，オリジナルの問題同様，容易ではない．このような状況において，創発による問題解決は，ナミーバの系から得られるマクロな特徴に解決の糸口を見い出すというアプローチを提案する．

現実問題としては，マクロな特徴が得られたとしてもそれが 3n+1 問題の解決にどの程度寄与できるかは不明である．しかし，3n+1 問題の本質を変えないような相互作用の工夫など，系を構成していくプロセス自体，パズル (レクリエーション数学) として十分楽しめると我々は考えている．

参考文献

[1] 佐藤進也, 天海良治, 竹内郁雄, ある種の算術生命体 — ナミーバ, 第 42 回プログラミング・シンポジウム報告集, pp. 169–174, 2001.

[2] Shigeru Ninagawa, Masaaki Yoneda, Sadaki Hirose, 1/f fluctuation in the “Game of Life”, Physica D, 118, pp. 49–52, 1998.

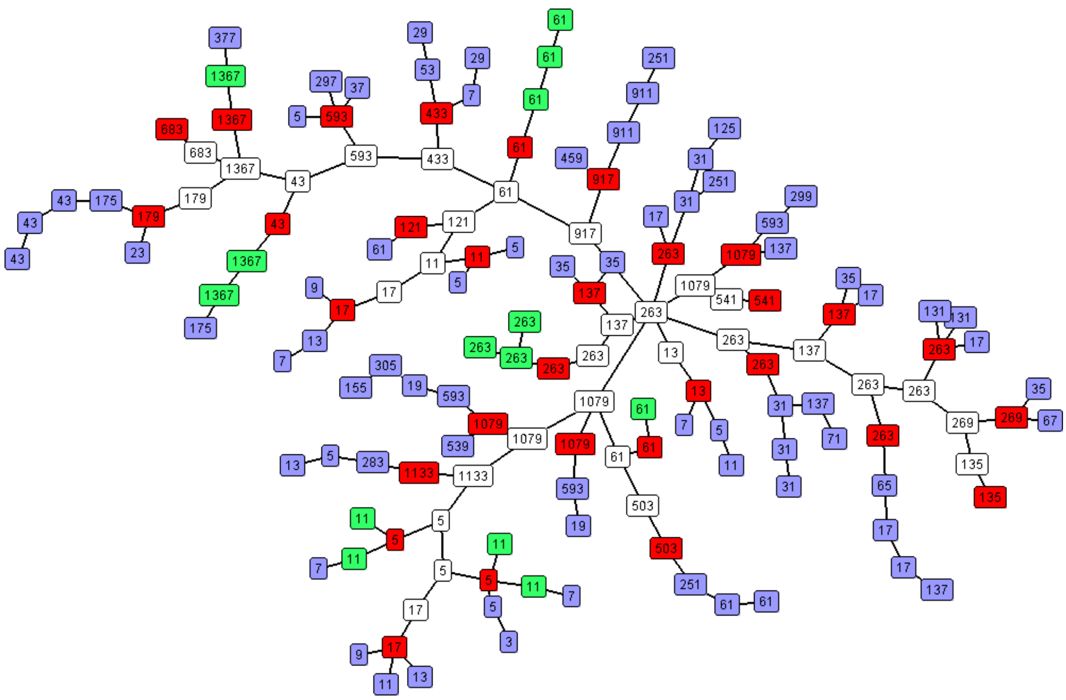
61
29
29
61
251
377
53
7
1367
297
37
911
433
61
5
593
125
1367
683
911
61
31
459
683
593
433
251
1367
917
43
61
31
299
43
175
179
17
593
179
43
121
263
917
1079
137
43
61
23
5
1367
11
35
35
11
5
1079
35
9
1367
17
137
541
541
17
131
131
175
17
263
137
263
137
263
13
17
13
263
263
7
263
263
263
137
305
263
155
19
13
263
35
593
1079
61
31
137
269
67
1079
7
5
263
71
539
1079
61
61
13
5
283
1133
1133
31
135
11
593
503
31
135
65
11
5
19
17
11
11
5
5
503
7
17
11
7
251
61
61
17
5
137
9
17
3
13
11

図 7: ポリナミーバ.