自然発生と進化の記述に向けて

ＮＥＣ基礎研究所　飯田一浩
〒305 つくば市御幸が丘 34 番地　iida@exp.cl.nec.co.jp

概要

生命の基本構造とそれを生んだ物理化学作用とを探るために，システムの記述方法を見直す．自然発生と進化を議論するモデルは，シンプルなだけでは不十分である．繰り返す階層的な組織化現象を旨く表現でき，その遷移規則は自然法則に対応することが望ましい．以下では，システムを遷移方程式でなく出力パターンによって表すアイデアを紹介する．出力パターンから得られるテンプレートにより，システム構造の発展を無理なく記述でき，発展をもたらした物理化学作用が計量できる．さらに「創発」，「保存」等の基本概念が自然に定義されるため，明確な根拠をもって演算結果を解釈できる．この表現は，生命と相似な系を探る上で有効なツールに成りうる．

1. はじめに

分子生物学は信憑性の高い系統樹を描いた[1]．遺伝子の塩基配列に裏付けられたそれは進化の歴史を示すと同時に，その根に存在する空白，自然発生の問題を照らし出す．歴史から一歩前進して，自然発生と進化の機構を説明することは生命科学の次の大きなテーマになるだろう．

筆者らの最終目標もそこにある．我々の目標は，生命の起源で創られたものと同等の機能を持つ基本的システム，いわば生命の相似系を得ることであり，その相似系を生じさせ進化させるべき妥当性を持った物理化学法則，いわば進化の法則を自然の中に見いだすことである．

筆者らは数理モデルとシミュレーションによるアプローチを選ぶ．原始の環境を模擬した条件で無機物質から生命を化学合成しようとする研究もあるが[2]，数理モデルを用いた研究は様々な条件が簡単に選べるため，近年特に盛んである．興味深い知見も続々と得られている．

しかしながら，それらの知見や方法論は，果たして我々の目標に合致するのか疑問も残る．自然発生の研究と，モデル自体の性質を明らかにする研究とでは事情が異なる．例えば CA のシミュレーションで nontrivial なパターンが生じたとしても，それに対応する実世界の現象がない場合どう解釈すれば良いだろうか．

以下では，まず従来の数理的アプローチを簡単に振り返り改善の指針を得る．次に，それらの条件を満たす新しい表現を提案する．未完成ではあるが，基本的アイデアを述べ今後の研究方向を示したい．

2. 従来の取り組みと問題点

2.1. 従来のアプローチ

1. 記号論理による取り組み,
2. 力学系による記述,
3. 進化仮説の翻訳

の三つに分けて説明する.

記号論理による取り組みは，生命の創発的性質を特徴づける「Closure」,「意味論的境界 Semantic Border」，「関係子」などの概念を与えた.

Varela は，人間の弁別過程を記述する Brown の代数に Closure，即ちある系が構造的に閉じているという概念を導入することで，自系の構成要素を生み出すような現象 Autopiesis[A] を記述した（例えば図 1）[3].

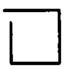

図 1. 自律状態を示す Varela の演算子

郡司は Brown と Varela の代数を利用して，時間逆行的，つじつま合わせ的な生命進化の特徴を記述した[4].

清水は関係子と Induced-fit により，生物の発展メカニズムを説明している[5]. 既存の述語系とは別の語が与えられると，意味論的境界をまたぐ相互作用によって関係子が形成され，述語系が拡張されるとする.

これらの定性的なアプローチに対して力学系による記述は，定量的モデルを与える.

[A] Varela は Autopiesis こそが，生命と不可分の特徴と考える.

1971 年 Eigen[6]は自然発生のモデルとして，自己複製する核酸分子群が系の材料となる物質の合成を触媒しあうような，相互補助的ループ系 Hiper-Cycle を提案し，このサイクルを記述する力学系が外乱に対して安定であることを示した.

Prigogine は生命研究に直接には関わらなかったが，散逸構造と生物の起源との関連を指摘している．生体など散逸のある非平衡系に自律的に生じるパターン，散逸構造 Dissipative structures の生成機構を非線形マスター方程式を使って説明した[7]. Haken は複数の力学系の協同現象 Synargy に注目し，隷属原理 Slaving-Principle を提唱した[8]. 複数の非線形系を結合するとマスター系の挙動にその他の系が引き込まれ，マクロな秩序が生じることを示した. Haken は Slaving Principle が生物の発生や脳機能にも関与していると考える.

力学系による記述の中でも，小規模な系が組織されて高次の系ができるという考え方，Collectionism は特に注目されている.

Kauffman は，環境に相当する複雑なブール関数を単純なブール関数群がネットワークを組織しながら近似する過程を，進化に見たてた[9]. 組織化のパラメタを調節してゆくと，ブール関数群の振る舞いがカオス化する直前に優れたネットワークが効率良く生成された. Packard[10]，そして Langton[11]も，同様の結果を得た．セルオートマトン CA を用いた研究の結果，系がカオスとなる直前で，情報処理的振る舞いを含む複雑なパターンが形成された．これら

の現象はカオスの縁（Edge of Chaos）と呼ばれている．

金子はカオスの持つ創発的性質に着目している[12]．$x_{t+1}(i) = (1-\varepsilon)(1 - a x_t(i)^2)$ なる小規模なカオス系[B]を多数結合したモデルをつくり性質を調べたところ，複数のアトラクタが自律的にクラスタをつくり階層化するなど，複雑な組織化現象が観察された．この結果から生物進化に，カオスとグローバルフィードバックが寄与する可能性を指摘している．

記号論理，力学系による記述では模擬される具体的事物が不明瞭である．これに対して遺伝子の進化仮説を模写することで進化のメカニズムに迫るアプローチがある．

Holland は有性生殖と自然淘汰による遺伝子進化仮説をモデル化し，遺伝的アルゴリズム Genetic Algorithm を開発した[13]．組み合わせ最適化問題の解空間を一次元配列で表し，これを染色体上の遺伝子のならびと見なす．この人工染色体を用いて，交叉，増殖，突然変異，そして自然淘汰に相当する処理を繰り返すと，早期に良い解が得られることを示した．工学的価値だけでなく，進化仮説の妥当性を支持する結果と言える．池上と金子は，遺伝子配列の長さが可変な新しいモデルを提案し，それが進化をさらに加速することを指摘した[14]．

T. Ray はシミュレーションシステム Tierra[15]を作り，種間競争と淘汰によって予め書かれていない機能を持つプログラムが自律的に生じうることを示した．自らのコピーを増やすように組まれた短いプログラム群を同じメモリー上で増殖させ，メモリと計算時間とにおいて競合させた．すると初め見られなかった複雑で効率的な増殖戦略を持つプログラムや，より大きなプログラムの内部に寄生して増殖に便乗するプログラムが観察された．

以上の取り組みは，いづれも生命の起源と進化のメカニズムの理解にとって興味深い視点を提供している．

2.2. 改善の指針

しかしこれらの取り組みにも，次の基本的な問題点がある．

1. 概念の未定義
   創発，保存等々，重要だが曖昧な概念群が明確に定義されないまま使われている．そのためシミュレーション結果を生命と関連づけて解釈すべき根拠を欠く．

2. 実世界との解離
   もともと実世界を対象に作られたモデルではないため，創発的パターンが得られても対応する現象が存在しない．

記号論理的取り組みは抽象に過ぎてリアリティーを欠き，そこで使われる論理式だけでは生命的振る舞いが生じうるか判定し難い．

力学系による記述の場合，シミュレーション結果が如何に複雑で創発的であるといっても創発や進化を主張する論理基盤が

[B] $x(i)$は i 番目の要素，t は時間ステップ．

未確立である．先の例における進化，創発などの議論も根拠を欠く．そしてシミュレーション結果が実世界の何に相当し，何が新しく生じたのかは不明のままである．

シミュレーションを思考ツールとして用いるという方針もありうるが，我々は実在する物理化学法則に進化の根拠を見い出したい．先の例では計算規則は議論できても，計算機の力を借りることなく実世界に生命現象を生じさた法則は見えてこない．

進化仮説を翻訳したモデルは，自己複製する実体を仮定しており既に精巧な複製メカニズムを持った生物ならともかく，自然発生は議論できない．交叉，分裂などの諸機構がどのように生じたかも同様である．

従って筆者らの目標へと向かうには従来のアプローチで使われた表現を見直し，自然発生と進化の議論に適した表現を見いだす必要がある．即ち，

1. 定量的でリアリティーのあるシミュレーション結果が得られ，
2. その結果から現実世界の物理化学法則に遡ることができ，さらに，
3. その表現を元に，保存，創発などの基本概念が明確に定義されることである．

しかし従来の表現以外にどのような書き方が可能だろうか．

3. システムの新しいとらえ方

生命を発展するシステムとして捉えるとき，世界の中に考察の対象となる部分，「部分系」を区別することは最も重要なステップである．次々に進むシステムの発展を記述するには，他と明確に区別できる部分系が組織の階層によらず同じ形式で記述されることが望ましい．

翻って従来の力学系による記述を見ると，Collectionism のアプローチすら部分系の表現が未確立なことがわかる．システムの最小単位は

$$y_i\,(t+1) = f\{\,\ldots, y\,(t-1), y\,(t)\,\},$$

といった遷移方程式，あるいはプログラムによって明確に記述される．しかし，それらの相互作用によって生じる高次のシステムを記述する枠組みを欠いている．そのため，系の発展は常に最小単位のミクロな記述でしか追えず，高次系のマクロな振る舞いが記述できない[c]．従来の表現は，システムの構造が遷移方程式で強固に指定されているため，困難を生じるとも言える．

筆者らは，逆にシステムの構造を具体的に記述することなくパターンとして部分系を扱う方法を提案する．従来のシミュレーションにおいて，高次の系はマクロな‘時空間パターン’として見いだされた．筆者らは，このパターンを積極的に使って部分系を記述する．強固な遷移方程式の集合としてでなくシステムの出力パターンをもって部分系を規定する．システムの構造を不問としてブラックボックスとして扱うため，系の発展を階層によらず無理なく記述できる．

[c] アトラクタの形成状態を識別するコードでシステムの発展を記述する方法もあるが定性的である．

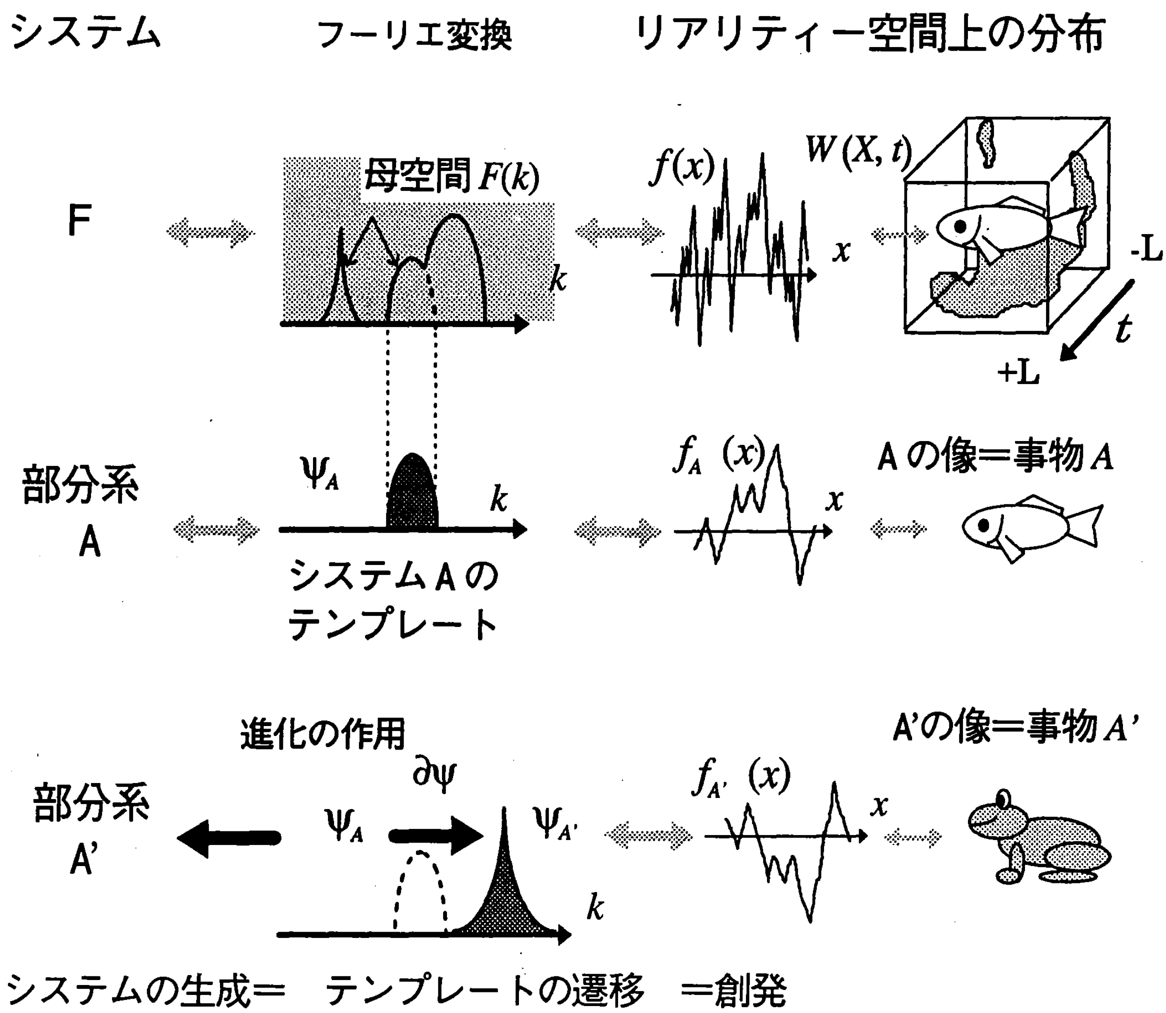

図 2. 基本概念図

f_A: 部分系Aの出力．便宜的に１次元で表現してある（本文参照）．

3.1. テンプレートによる部分系の表現

システムをブラックボックスとして出力パターンのみを扱うとき，フーリエ変換は便利なツールとなる[D]．

図 2 にフーリエ変換を活用するアイデアを示す．図の中央，左よりに示すフーリエ変換パターンψ_A が部分系と事物とを代表する．

右上の立体は実世界をイメージした時空間，リアリティー空間である．このリアリティー空間上に任意の粒子，例えば原子

D 時空間に直交する軸への変換であればよく，例えばラプラス変換でも良い．

や分子などの存在を仮定し，その時空間分布を $W(X,\ t)$ としよう．X は3次元の位置座標，t は時間で，レンジは全て $[-L,\ +L]$ （L は大きな数）である．

リアリティー空間上の特定の事物 A，例えば図の‘魚’を示す分布は明らかに W の一部である．もし，ある関数 f をもって W をユニークに指定できるような写像が存在すれば，同じ写像を介して事物 A を指定する f_A もまた，f の部分パターンとなる．つまり f は f_A とそれ以外のパターンの重ね合わせと見なすことができ，f と f_A のフーリエ変換（図の中央．複素空間をパワーで表現してある）についても同じことが言える．

我々は，この部分と全体の関係が f_A と f を出力する未知のシステム（図の左端）でも成り立つと仮定し，f_A を出力するシステムAをFの「部分系」と呼ぶ．

今，説明の便宜のため f を1変数関数 $f(x)$ としよう[E]．$f_A(x)$ のフーリエ変換 $F_A(k)$ を元に

$$\psi_A = \frac{F_A}{P_A}$$

で定義される関数 ψ_A を，Aのテンプートと呼ぶなら，Aのテンプートは A と同じ形状で振幅のみが異なるパターンを出力する全ての部分系を，他の部分系から区別できる．P_A は $f_A(x)$ の平均パワー $P_A^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \left| f_A(x) \right|^2 dx$ である．

[E] 例えば，W を4次元マトリクスと考え，これを1次元配列として扱うなどの写像が考えられる．

ψ_A，P_A をもとに f_A が再構成でき，逆に ψ_A 以外のテンプレートではそれができないことから，ψ_A と P_A は A と事物 A とをユニークに指定すると言える．

事物が W の形状を元に認識されるとすれば，テンプレートは部分系と事物とをユニークに指定すると言え，我々はテンプレートに注目して系の発展を追うことができる．

3.2. 創発のとらえ方

部分系をこのように定義することで，創発現象をテンプレートの生成と遷移とに置き換えて考えることができる．事物は部分系を規定するテンプレートで表されており，テンプレートの遷移はリアリティー空間における事物の生成と消滅を意味するからである．

創発は，元になる事物からは想像もできない斬新な事物が生じることを意味する．しかしその斬新さは主観に依存し，明確には定義し難い．Varela や郡司の試みは，その新さを定性的に示す試みと言える．

筆者らは，F とテンプレート ψ の変化を創発と定義する．リアリティー空間に直交する母空間 F において，創発を定量的に扱う．

リアリティー空間は過去から未来にわたる全ての出来事を知っている．テンプレートの変化は，リアリティー空間自体の変化を引き起こす．ψ_A が，$-L < t < L$ 上の分布に対応していることに再度注意しよう．

この変化は時間軸 t 上の変化とは異なる．ψ_A は，部分系 A に関する我々の知識の全てであり，$-L<t<L$ にわたる予言を与える．テンプレートの変化は，この予言からのズレを意味し，このズレを創発と考えるのである．ズレ $\partial\psi$ が大きい程，創発の度合いも大きい．我々の定義では創発は定量的である．

こうして進化の原理は，創発を引き起こす作用の中に含まれることになり，

$$\partial F, \ \partial\psi$$

を導く規則に置き換えて考えることができる（図 2の下段参照）．

$\partial\psi$ は，部分系に加わった作用をトータルに表現している．もしシステムに F に，なんらの作用も生じなければ事物は全て予測可能である．部分系が様々な作用を受けた結果が創発 $\partial\psi$ として予測を妨げる．

局所的な相互作用も，この部分系の表現で扱える．Collectionism の考え方では要素間の局所的な相互作用が重要であるとされる．積分変換を用いる表現では局所的相互作用が扱えないように見えるかもしれない．しかし $\partial\psi$ が，様々な作用の結果を表すことを思いおこそう．局所的相互作用もその作用の一つである．我々の扱いでは，局所的相互作用は無数の要素の振る舞いを一つ一つシミュレートすることによってでなく，テンプレートどうしのマクロな演算を通じて，作用の結果のみが新たなテンプレートに織り込まれる．

3.3. シミュレーションの構図

部分系をテンプレートとして扱えば事物を緻密に再現できるだけでなく，系の階層によらない表現なので，システムの発展を無理なく記述できる．

この表現を用いて生命の起源は次のようにシミュレートされるだろう．まず，進化を引き起こす作用の候補を $\partial\psi$, ∂F を定める遷移規則として用意する．次に初期条件に相当するテンプレートを用意し，そのテンプレートと母空間とに先の遷移規則を適用する．遷移の結果として，後に定義するような概念を満たす生命的な振る舞いが生じるか否かを判断の基準として，自然発生と進化の原理を探る．

それほど組織されていなかった初期条件のテンプレートは遷移結果として組織された複雑な形状となり，その一部のパターンはある分岐条件が満たされる時，新たなテンプレートとして区別される．そしてそれらのテンプレートが細胞膜や核に似た事物を構成するに至るといったイメージである．

3.4. 物理法則に遡る

この部分系の表現を用いれば，シミュレーションの初期条件，作用，そして遷移規則を，現実の物理化学量と作用，そして法則に対応づけて議論できる．

フーリエ変換の性質から，我々は個々のテンプレートに対応する，ある量子力学系を仮定できる．部分系のシステム構造として，この最も単純な系を仮定する時，テ

ンプレートを遷移させる物理作用が評価可能となる.

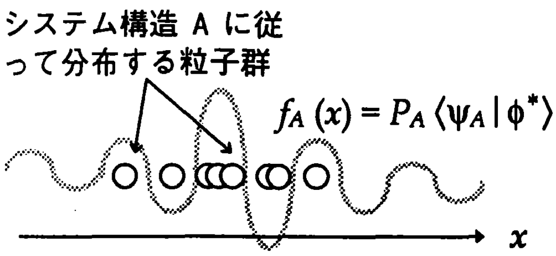

図 3. Fourier 変換と量子力学モデル

テンプレートψ_Aを用いてフーリエ逆変換の式を書き直すと

$$\frac{f_A(x)}{P_A} = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_A(k) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{ikx} dk$$

となる. この式が量子力学モデルを表す.

経路積分[16]の見方で説明する. $\phi(k,x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{ikx}$ は, 運動量の固有関数で, 自由粒子が位置 x において波数 k の状態にある確率振幅を与える. $\psi_A(k)$も明らかに確率振幅の要件$\int_{-\infty}^{\infty} \left| \psi_A(k) \right|^2 dk = 1$ を満たす.

量子状態が個々の部分系の構造に対応すると考えると, ψ_A は粒子が波数 k のとき構造 A をとる振幅を与える. すなわちψ_Aは構造Aの特性関数に相当し, $\psi_A(k)\,\phi(k,x)$は, 位置 x において波数 k であり, しかも構造 A である振幅を与える. フーリエ逆変換の式は, この振幅を波数 k の状態について積分すれば位置 x において構造 A である振幅, $\varphi_A(x) = f_A(x) / P_A$ が得られることを示している. フーリエ変換の式も

$$\psi_A(k) = \langle \varphi_A \ | \phi^* \rangle_x$$

と書け, 全く同様の解釈が可能である.

ここで, フーリエ逆変換の式の両辺を 2 乗すると,

$$\left| f_A(x) \right|^2 = P_A^2 \left| \int_{-\infty}^{\infty} \psi_A(k) \phi(k,x) dk \right|^2$$

となる. 左辺は平均パワーP_A^2の位置 x における成分を意味する. 右辺は, 位置 x における平均パワーの期待値を与える. 今, 2 乗することで, あるシステムの出力のパワーの期待値が得られるような量を, 確率振幅に対して「実振幅」と呼ぶことにすれば, フーリエ逆変換の式は, $f_A(x)$が位置 x における構造 A (＝部分系 A) の実振幅であることを意味すると解釈できる. 全く同様にフーリエ変換の式 は, 波数 k における構造 A の部分系の実振幅が $F_A(k)$であることを意味する.

P_A を粒子数を示す係数と考えるとフーリエ逆変換の式 $f_A(x) = P_A \langle \psi_A | \phi^* \rangle$ は, A に属する粒子群が, ある作用, 例えば粒子間の相互作用を受けた結果, x 軸上の実振幅が$f_A(x)$になったと解釈できる (図 3) . つまり f_A , ψ_A は, 初め自由に運動していた P_A 個の粒子群が受けた作用を, トータルに示していると言える.

ではこの関係から, 部分系 A の持つ物理量, 例えばエネルギーはどう計算されるだろうか.

部分系 A のエネルギーは, A の実振幅から得られる. 振幅 ϕ に対応する波数 k の

自由粒子は運動量 $p=\hbar k$ を持ち，粒子の質量を m とするとき運動エネルギーは

$$\frac{p^2}{2m}=\frac{\hbar^2 k^2}{2m}$$

である．この振幅を定数倍した実振幅 $P_A\phi$ に対応する運動量は $P_A \hbar k$ で与えられ，そのエネルギーは $\frac{(P_A \hbar k)^2}{2m}$ である．

従ってテンプレートを

$$\psi_A(k)=R(k)\,e^{i\theta(k)x}$$

と極形式に書く時，位置 x において，波数 k で，しかも状態 A である実振幅に対応する運動量は，

$$p(k;x)=P_A R(k)\,\hbar\{\theta(k)+k\}$$

で表される．その運動エネルギーは，

$$E(k;x)=\frac{p(k;x)^2}{2m}$$

である[F]．

位置 x における運動エネルギーの期待値 $E(x)$は，x において波数 k で状態 A である振幅，$q(k;x)=\psi_A(k)\,\phi(k;x)$をかけ，

$$E(x)=\left|\int_{-\infty}^{\infty}\sqrt{E(k;x)}\,q(k;x)\,dk\right|^2$$

で得られる．逆に $\varphi_A(x)=R(x)e^{-i\theta(x)x}$ を $F(k)$のテンプレートと考え，波数 k におけるエネルギーの期待値 $E(k)$も同様にして得られる．

[F] A に属する粒子数が不変とすると，$P_A\hbar k$ との差は系内部の相互作用のエネルギーに相当すると考えられる．

このエネルギーをもとに，自由エネルギー，エントロピーなどの統計力学指標が得られる．断熱的なゆっくりした変化を仮定し，部分系が熱平衡にあるという仮定の下で分配関数 Z が得られる．固有値 y が連続な系の分配関数は

$$Z=\int e^{-\frac{E(y)}{k_B T}}dy$$

と表せる．$E(y)$は，状態 y のエネルギーで，積分範囲は系によって規定される．今の場合 yは，例えばk，xで，$-\infty\le k\le\infty$, $-\infty\le x\le\infty$ である．T は系の温度で，定温を仮定する．k_B はボルツマン定数である．

この時，系のヘルムホルツ自由エネルギーF_Hは，$-k_B T\log Z$，全エネルギーUは，

$$U=\int E(y)e^{-\frac{E(y)}{k_B T}}dy$$

$$\left(=\frac{\partial}{\partial\beta}(\beta F),\ \beta=\frac{1}{k_B T}\right),$$

エントロピーSは，$S=(U-F_H)/T$ で得られる[16]．

例えば部分系 A の実振幅で，波数 k の成分だけに注目し，それが自由度 x を持つ部分系であると考える時，

$$E(y)\ =\ E(k)$$

と見て上式に代入すれば，それらの熱力学指標が得られる．

以上の関係から，システム構造の変化すなわちテンプレートの遷移に伴うエネルギーの授受や散逸が議論できる．情報量もまた確率振幅から自然に算出できる．

3.5. 幾つかの概念の定義

進化モデルの３つめの条件として，その表現を元に，保存，創発などの基本概念が明確に定義できることを挙げた．得られた系が生命の相似系であることを言うには，これらの概念の定義が不可欠である．

我々は，部分系を特定の事物の時空間分布を生むシステムとして定義し，テンプレートψに代表させた．そして創発をFとψの遷移として定義した．この構図から，不完全ながらも次のような事柄が定義できると考えている．

<u>保存</u>

数理生物学では，保存は個体数を N として，$\forall t, \mathrm{N}(t) > 0$（$t$は物理時間）などと表される．ところが自然発生を扱う場合，生命以前の事物を個体として明確に定義することは困難であり，進化によって事物自体が変化するため個体数が定義し難い．むしろあるパターンがtによらず検出されることをもって保存を定義する方が合理的である．

リアリティー空間上の分布$W(X,t)$のXに関する３次元フーリエ変換からテンプレートψ_Fが，そして事物AのXに関するテンプレートψ_Aが得られたとしよう．ある時点tで事物AがW上に検出される確率Pは，振幅$\psi_A\ \psi_F\ \phi^*$から計算できる．そこで

$$P > \varepsilon$$

（εはある検出限界）が保存の条件と考えられる．

この定義では，事物はテンプレートによって表現されるので進化によって新しい事物を生じても定義可能である．上の条件がテンプレートの遷移の後も満たされるような存在は，システム構造を変えながらも保存する．この条件は，さらに曖昧な概念「生き残り」の定義へとつながるかもしれない．

<u>分裂と凝集</u>

システムの分裂増殖を起こす作用は，F上では，テンプレートの位相をずらして重ね合わせる作用とみなせる．勿論，エネルギー保存則等に合わせて振幅の調整は必要ではあるが，基本的には作用

$$B = \sum_h e^{-\theta_h k}$$

で表現できる．hはコピー数，θ_hは分裂に伴う位相遅れである．逆に凝集はθ_hが得られる時B^{-1}で表現できる[G]．

その他にも，情報，価値，目的など生命の振る舞いを解釈する際に不可欠な種々の概念がある．これらを新しい部分系の表現を元に見直し，一つ一つ定義してゆきたい．

まとめ

自然発生と進化を記述するための新しいシステム表現のアイデアを紹介した．こ

[G] 現象論的には上記のように単純に表現できるが，分裂，凝集の発生機構は不明である．一般的な物理化学的法則から必然的に生じることを示したい．

の表現は未完成ではあるが，定量的でリアルなシミュレーションが可能であり，さらにそこに使われた遷移規則は現実の物理化学法則に対応づけることができる．この表現をもとに，生命を特徴づける幾つかの概念が自然に定義できそうである．曖昧な概念を定義しつつシミュレーションを通じて，生命と相似な系の条件とは何かを明らかにしてゆきたい．

もし我々のシミュレーションシステム上に自発的に発展する自己保存系が生じるならば，それは生命の基本的メカニズムを理解する助けになるはずである．そして付け加えれば，得られたシステムを工学的に活用する道もまた大きく開けているのである．

参考文献

[1] 根井正利，*分子進化遺伝学*，培風館，1990.

[2] 柳川弘志，*生命はＲＮＡから始まった*，岩波書店，1994.

[3] Varela, F.J., *Principles of Biological Autonomy*, North Holland, 1979.

[4] Gunji, Y. and Nakamura, T. (1991), *Biosystems* 25:151-177.

[5] 清水博 (1991), *Holonics* 2:173-190.

[6] Eigen, M. (1971), *Naturwissenschaften*, Heft 10: 465-523.

[7] Nicolis, G. and Prigogine, I., *Self-Organization in Nonequilibrium System, From Dissipative Structures to Order through Fluctuations*, John Wiley & Sons, 1977.

[8] Haken, H., *Synergetics: An Introduction*, Springer-Verlag, 1978.

[9] Kauffman, S.A., *The Origins of Order*, Oxford University Press, 1993.

[10] Packard, N. (1988) "Adaptation to the Edge of Chaos," In: Complexity in Biological Modelling, S. Kelso and M. Shlesinger eds.

[11] Langton, C.G. (1992), In: *Artificial Life II,* the Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity Proceedings Volume 10, pp. 41-93, Addison-Wesley.

[12] Kaneko, K. (1994), *Physica D* 75: 55-73.

[13] Holland, J.H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, 1975.

[14] Ikegami, T. and Kaneko, K. (1990), *Physical Review Letters* 65:3352-3355.

[15] Ray, T. (1991), In: *Artificial Life II,* the Santa Fe Institute Studies in the Science of Complexity Proceedings Volume 10, C.G. Langton, J.D. Farmer, S. Rasmussen, and C. Taylor, eds., pp. 371-408, Addison-Wesley.

[16] R.P. Feynman and A.R. Hibbs, *Quantum Mechanics and Path Integral*, McGraw-Hill, 1965.