

カオスに対する聴覚的なアプローチ (1)

長嶋 洋一†

†静岡文化芸術大学 〒430-8533 静岡県浜松市中区中央2-1-1

E-mail: †nagasm@suac.ac.jp

あらまし 2011年1月に「非線形科学の視点からコンピュータ音楽を考える」というタイトルで、自分の専門であるComputer Music領域で、15年ぶりにカオスや非線形現象と新たに取り組むことを宣言した。今回はそれに続く報告の第一弾であり、(1)sonification(auditory display)というアプローチからのchaosの再考察、(2)“音響を生成するchaos”と“音響を知覚するchaos”との相互作用としてのサウンド現象、という2点について、過去の成果を検討しつつ考察・実験した報告を行う。

キーワード 非線形科学, sonification, 音楽情報科学, カオス

The sonic/auditory approach for chaos (1)

Yoichi NAGASHIMA†

†Shizuoka University of Art and Culture 2-1-1, chuo, Naka-ku, Shizuoka, 430-8533 Japan

E-mail: †nagasm@suac.ac.jp

Abstract This is a report and a discussion for computer music with nonlinear science. The key concept is sonification(auditory display) and chaos.

Keyword Nonlinear Science, sonification, Computer Music, Chaos

1. はじめに

筆者は過去に音楽情報科学/Computer Musicの領域において、カオスやニューラルネットのアイデアを作曲や公演(パフォーマンスとライブComputer Musicシステムとのインタラクション)に応用したり、マルチメディア知覚心理学のテーマで音楽リズム知覚の引き込み現象等を研究してきた[1-9]。

2011年には、同期理論に関する文献とNLP研究会等の過去の研究をサーベイする中で、断片的であった概念を整理統合して非線形科学のアプローチから音楽情報科学研究を進めるために、(1)関連領域での筆者の研究創作活動の概要報告、(2)内外の関連研究のサーベイ報告、(3)Computer Musicにおける新しいアイデアの可能性、について報告した[10]。

そして、音楽領域におけるフラクタル・カオスなどの応用事例[11-20]を調査するとともに、chaosに関してNLP研究会等の過去の研究を再検討する中で、(1)sonification(auditory display)というアプローチからのchaosの再考察、(2)“音響を生成するchaos”と“音響を知覚するchaos”との相互作用としてのサウンド現象、という2点を、新たな取り組みの起点とした。本報告はその第一報である。

2. 非線形科学のComputer Musicへの応用

カオスや非線形システムの同期現象[21-23]をあらためて検討するとともに、「Computer Musicへの応用」という視点から、電子情報通信学会論文誌をサーベイした結果、今後に関連のありそうな研究や視点として重要であろうとピックアップした論文15本について、ここで備忘録として簡単に整理紹介しておく。論文を時系列に並べた関係で、生体情報関

連のトピックが不連続に混じることを了承されたい。

文献[24]は神経核の相互抑制と発火モードの解析であるが、発火モードに「長周期」「超長周期」などの現象が現れる部分は筆者が文献[9]で報告したアイデアにも繋がる点に注目した。文献[25]は複数のニューロンの相互作用から呼吸リズムの形成/調節を解析した研究であるが、遅延を伴う相互作用モデルから本稿で検討する聴覚モデルのアイデアに繋がる点に注目した。文献[26]はカオスに至る倍周期分岐に関して整理したバイブル的基礎として重要である。

文献[27]はComputer Musicに繋がる離散のカオスの検討基礎として、特に基本的なLogistic Functionを取り上げている点を重視した。文献[28]は取り上げた発振器よりも、カオス現象を解析するベクトル場のvisualizationに注目した。文献[29]は「樹状パターン」という視点からのアプローチに注目したが、これは本研究にも繋がる視点である。文献[30]も引き込み現象に至る境界の部分のvisualizationに注目した研究である。文献[31]はGAに繋がる別領域での応用であるが、カオス現象を客観的に整理した記述は参考となった。

文献[32]は脳波の現象解析からのフラクタル/カオスの議論であるが、本研究でのアプローチに多くの示唆を与えた。文献[33]は従来のカオス研究と違った視点の「不安定化させてカオス化する」というものであるが、これは筆者の内観にあるカオス現象と共鳴する発想として重視する。また、最後に紹介されていた「生命現象においてはカオスの変動の方がむしろ健康である」という指摘は、本研究における基礎水脈の一つとして尊重したいと考えている。文献[34]はリアプノフ指数でないカオス尺度を提案したが、Logistic Function

へのこだわりの部分を評価した。文献[35]から文献[38]までの比較的新しい報告については、その一部に新鮮な視点/示唆がありおおいに参考となった。

3. 可聴化(sonification)

音楽においてもっとも基本となるのは「聴覚」であり、聴覚に関する世界的に新しい研究領域として「sonification (可聴化)」あるいは「auditory display(聴覚的ディスプレイ)」という分野がある。筆者が20年前(1992頃)にカオス研究の初期に行った実験プログラムも、Logistic Functionに従って刻々と数値計算した値を、「刻々と」の部分で時間軸の音符間隔として、計算結果を音楽的ピッチに割り当ててリアルタイム発音させる一種の自動演奏システムとして、カオスの振る舞いを可聴化したものであった(図1)。

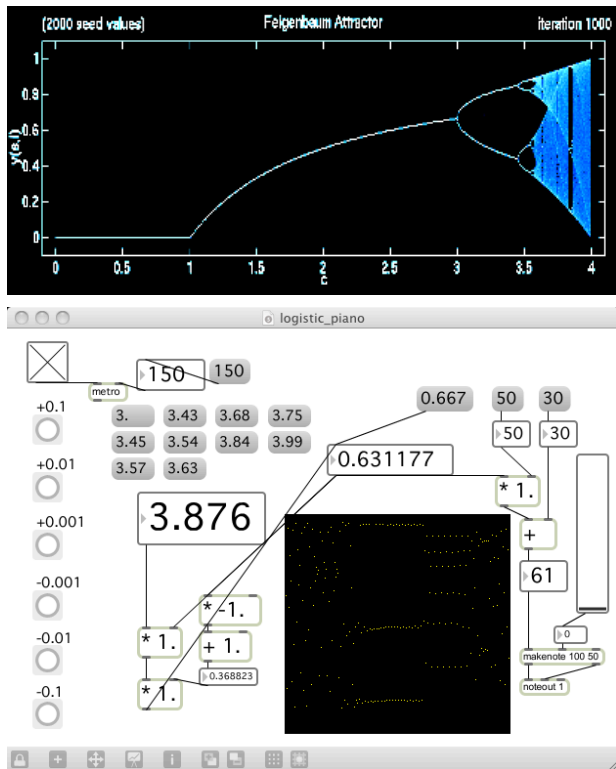


図1 Logistic Functionとカオス可聴化ソフトの画面

筆者が文献[2-6]の時期の研究と作曲(作品公演)の中でカオスに注目したのも、このようなシミュレーションから、カオス状態にあるダイナミズムとの相互作用の中に、ある種の生命感を見出したからであり、それは図2のような2次元カオスを用いた作品においても継承して採用した。

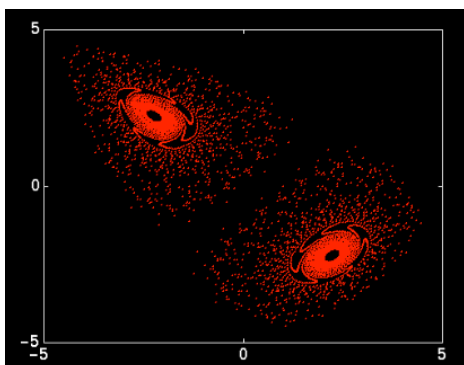


図2 2次元カオスの例(Henon Map)

人間は圧倒的に視覚情報処理が優れた動物であり、聴覚はあまり注目されてこなかったが、最近では音を聞くのは耳ではなく脳である、という知見が深まるにつれて、人間の聴覚的認知能力が注目されてきた。例えば、運転前に車両の軸を叩いて点検する、建物を叩いて破壊診断する、内科で聴診器を当てて胸を叩いて音を聞く・・・などは全て、人間の高度な聴覚的診断能力に依存した解析である。患者に繋がれた生命維持装置から発生する機械音/電子音のわずかな変動からその異常/病変を感知できるのも、短期/中期/長期の複合した記憶領域と時間軸をゲシュタルトとして知覚認知できる、人間の聴覚的脳機能の好例である。

筆者はカオスではなく、1990年代後半からの筋電センサに関する研究の中で、高性能筋電センサからの筋電パルス信号をそのままオーディオ出力として「聞く」研究、および電気刺激フィードバックによって音楽を「皮膚電気刺激から聞く sonification」という可能性を検討し、auditory displayの国際会議であるICADなどの場で発表報告し、海外の聴覚障害者からも反応があった[39-42]。

直接的に「sonification」「chaos」を結びつけた研究を調査してみると、クォーク量子色力学の振る舞いを可聴化する研究[43]、筆者が過去に行ったものと同様の「カオス演算結果を音楽的ノート(音階)にマッピング」という研究[44]、倍周期分岐からカオスに至る振動態様をscanned synthesisと同様の手法で可聴帯域のサウンド波形に置換して可聴化する研究[45]などがあったが、当然のことであるが筆者が注目するカオス境界のダイナミズム(振る舞い)とは目的意識が異なり、方向性の一致した従来研究は見出せなかった。

4. 「カオスの可聴化」の新しい試み

カオスの可聴化に対する新しいアプローチを検討するにあたり、あらためて最もシンプルなLogistic Functionを起点とすることとした。2次元や3次元などの有名な「美しい」カオスは多々あるものの、聴覚は基本的に時間軸に対して1次元の現象であり、他の次元によってパラメータがいたずらに複雑になり焦点がぼやける事を避け、まずは極限まで単純な1次元カオスからスタートする意義を重視した。改良の起点となったのは、図1の20年前に実験したプログラムであり、数式は以下ようになる。

$$X(n+1) = \mu \cdot X(n) \cdot (1 - X(n))$$

このアルゴリズムでは、およそ100-150msecオーダの時間間隔で刻々と1次元ロジスティック関数値 $X(n)$ を計算し、その計算結果を拡大して12等分平均律のMIDI音階に量子化/マッピングしているので、人間には16分音符ないし8分音符程度の短い音が刻々と連続した音楽的フレーズとして知覚される。浮動小数点パラメータ μ を僅かずつ変化させると、倍周期分岐により2音が繰り返される領域では2音のトレモロ演奏、4音や6音、さらには3音や5音などに倍周期分岐した領域でも、人間の聴覚は綺麗なトレモロ演奏として繰り返しパターンを知覚する。そしてパラメータ μ の変化によって倍周期分岐がさらに細くなり、遂にカオス領域に到達すると、繰り返しフレーズでない「ランダムな音列」として、カオス領域についても自然に知覚認知できる。

このシステムの欠点は、繰り返し周期がある程度の長さまでは音楽的フレーズとして把握できるものの、「カオスの縁」付近での長くて僅かな変動パターンでは、脳の短期記憶

区域から溢れて「長いフレーズ」という知覚が困難になっていく事である。発音する音色をパーカッシブ特性にして発音間隔(演算間隔)を小さくするにも限度があり、もっとも注目したい「カオスの縁」付近での「次第にカオス領域に引き込まれていく」「カオス領域から押し戻される」といった状況を聴覚的に把握する限界が立ちはだかっていた。

そこで今回、図1のプログラムから発展させたのが、図3にあるような改訂版(1)の実験プログラムである。これは、元のプログラムが演算ごとに1音を鳴らしてトレモロ風のサウンドを知覚していたのに対して、もっと演算周期を高速で回すとともに、24個のサインオシレータを用意して、24回分の演算結果に対応した周波数でそれぞれのオシレータが全部同時にずっと鳴り続ける、その全体の複合音響をサウンドとして知覚しよう、という発想のシステムである。環境としてはMax5上に実装し、あらかじめ予備実験にて、内部的な位相累進値更新演算によって、各オシレータの出力波形の位相は一致しない(例えば同じ値を同時に書き込んだ場合にも逆位相でサウンドが消えたりしない)事を確認している。

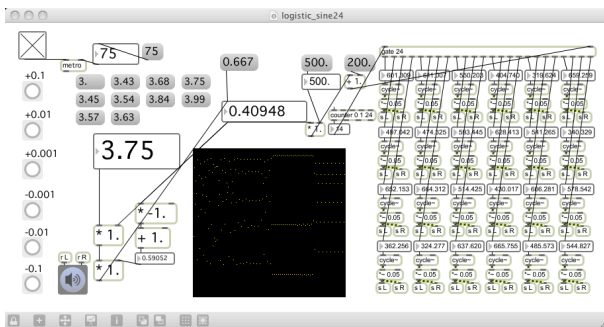


図3 カオス可聴化ソフト改訂版(1)

このプログラムによる実験で、従来のカオス可聴化システムに比べて非常に良好なカオス状態の知覚認知に成功した。これは、単音の羅列でなく同時に発生する非協和関係の複合音によって「静的に持続するサウンド」であり、長い周期で繰り返すサウンドとともに、カオス領域の縁の付近での微妙な振る舞いがより良好に知覚できた。ごく一例を挙げれば、 $\mu = 3.858$ と $\mu = 3.859$ の付近などで顕著であった。

この改訂版(1)の実験プログラムの欠点としては、サイン波の音源を24個としたために、例えばロジスティック関数の演算を75msec間隔で行った場合には、 $75 \times 24 = 1800$ msecごとに演算が一周する「周期」が発生することで、音楽的には「ゆるやかな唸り」程度の現象と知覚される。そこでさらに改訂版(2)として制作したのが、図4のプログラムである。

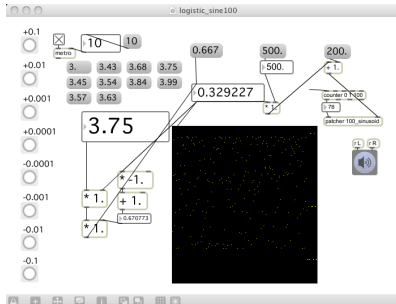


図4 カオス可聴化ソフト改訂版(2)

図4のプログラムはパラメータ μ の設定精度を小数点以下4桁まで精密化しただけでなく、サウンド生成のサブパッチと

して、内部的に図5のブロックを持っている。すなわちこのプログラムでは、同時に100個のサインオシレータを用意して、100回分の演算結果に対応した周波数でそれぞれのオシレータが全部ずっと鳴り続ける、その全体の複合音響をサウンドとして知覚しよう、という発想のシステムである。ロジスティック関数の演算間隔を10msecとした場合には1周が約1秒となるが、改訂版(1)で知覚できなかった長いスパンの変化を聞き取ることができた。

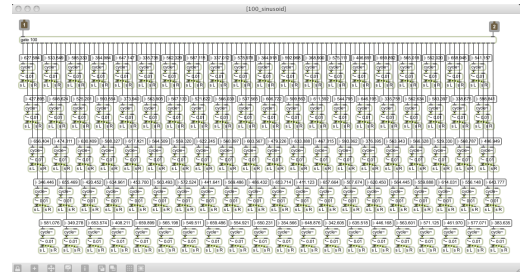


図5 カオス可聴化ソフト改訂版(2)のサブパッチ

5. 「カオスとインタラクション」の実装

このプログラムによる実験とともに、従来のカオス可聴化システム(図1)に対して検討したのが、筆者の従来研究[2-6]で注目していた「カオスとのインタラクション」の新しい視点からのアプローチと、その具体的な実装である。図6はこの新カオス可聴化ソフトの実行時モードの画面例である。

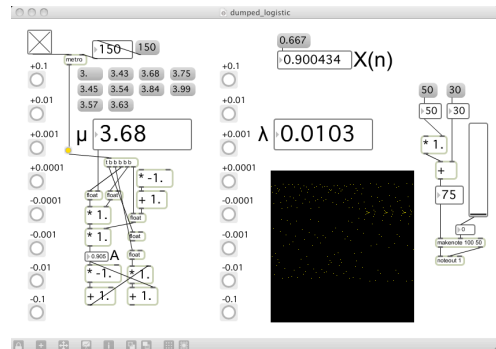


図6 新カオス可聴化ソフト(1)の画面例

過去には、もっぱらLogistic Function演算のパラメータ μ に対して微細な変化を与えてきたが、位相空間内での軌道を変位させるという相互作用の可能性があることから、今回は演算値 $X(n+1)$ を与えるために、以下のような新しいパラメータ λ (正負の値をとる微小量)を定義した。

$$A = \mu \cdot X(n) \cdot (1 - X(n))$$

$$X(n+1) = A + \lambda \cdot (X(n) - A)$$

この意味するところは、従来のLogistic Function演算で得られる値 $X(n+1)$ を仮にAとして、ここに、Aの「前回値からの変位量」にパラメータ λ の重み付けをした変位量を減算したものを最終的な $X(n+1)$ にする、という事である。数学的/抽象的に定義されているパラメータ μ に対して、実際に変動する量 $X(n)$ をその変動要因として相互作用させる、というのは、素朴なもののやや強引な発想であるが、この新しいカオス相互作用の発想は、軌道を与える $X(n)$ 自身によってカオス状態にある $X(n+1)$ を変化させるというもので、物理的な定義としてはより自然であると言える。 $\lambda > 0$ の場合には、粘性のある媒体上での振動における粘性抵抗のよう

なイメージである。 $\lambda < 0$ の場合にはカオス力学の反発性のような不思議な挙動を生み出す可能性もあるが、値域が発散するために、 $X(n)$ の最大値を1.0に、最小値を0.0に制限する処理も必要となった。図6は一部オブジェクトを非表示としたMax5による実行時の画面例であるが、実際の編集時には図7のようにプログラミングしている。

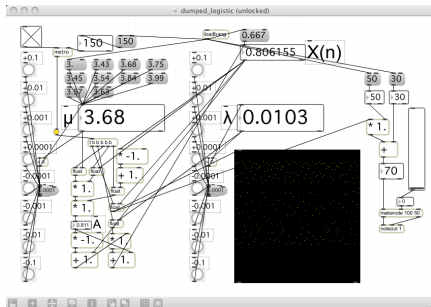


図7 新カオス可聴化ソフト(1)の画面例(編集時)

図8のプログラムは、この新しいカオスのインタラクションのアルゴリズム("dumped logistic function"と命名)を、前項で紹介した新しい可聴化システム)に適用したもので、100個のサインオシレータが隣接する100回分の演算結果に対応した周波数で全部ずっと鳴り続け、その全体の複合音響をサウンドとして知覚するシステムである。

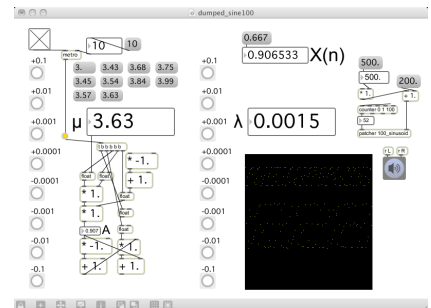


図8 新カオス可聴化ソフト(2)の画面例

そして図9が、可聴化とともに重要な可視化の機能を強化した、新カオス可聴化ソフトの最新版バージョン(3)である。ここでは、座標 $(X(n-1), X(n))$ をプロットすることにより、倍周期分岐やカオスに至る振る舞いを刻々とアニメーションのように「見る」ことが出来る。ごく一例を挙げれば、 $\mu = 3.9301$, $\lambda = 0.0079$ の付近で、これまでは発見できなかったような長周期の複雑な振る舞いを容易に認識できた。このツールによって、 μ と λ の変化に対応したカオス領域の「縁」付近のダイナミクスについて、今後、詳細な実験を進める計画である。

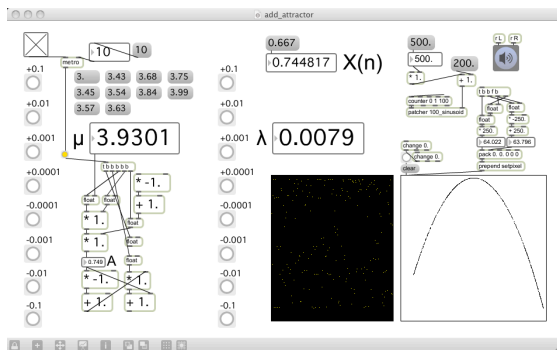


図9 新カオス可聴化ソフト(3)の画面例

6. 音響を生成するカオスの聴覚カオスによる知覚

今回、上述のカオスの可聴化とともに検討を試みたのは、「音響を生成するchaos」と「音響を知覚するchaos」との相互作用としてのサウンド現象」という視点である。これはすぐモデル化して実験を行えるほど簡単なものではないが、カオス計算結果を単純に音楽的要素にマッピングするのでない「カオスと音楽」へのアプローチには重要となる視点である。現状では、音響/音楽の生成アルゴリズム自体にカオスの考え方を適用する発想、一方で耳からの聴覚的知覚に関する生理学的反応モデルにおけるカオス的振動、さらに脳内(高密度・遅延付き離散ニューラルネットワーク)での聴覚的認識機構モデルにおけるカオス的共鳴/同期の枠組み、の3要素の検討が必要であると考えている。

2011年に筆者が報告[10]した際のプレゼンで提示したモデルで解説すると、図10は古来からの古典的な音楽の「作曲-演奏-聴取」の3者モデルである。作曲家から演奏者に「楽譜」として伝達される情報には「解釈/表現」を加える余地があり、それが演奏者の存在意義となっている。

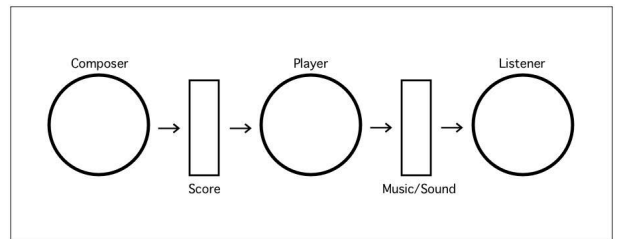


図10 古典的「Composer-Player-Listener」モデル

図10のモデルをさらに分析すると、図11のように「作曲」のプロセス自体が、音響イメージを生成するPlayerとそれを客観的に聴取/評価/試行/取捨選択するListenerを内在させている事が判る。コンピュータ音楽においては、これらをマルチエージェントのアルゴリズムで実現している。

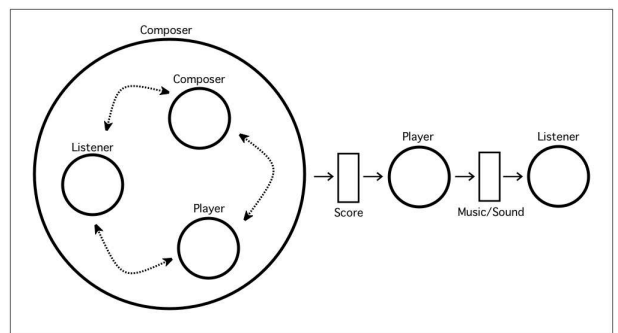


図11 「拡張されたComposer」モデル

また図10のモデルを分析すると、図12のように「演奏」のプロセス自体にも、楽譜を解釈しアレンジ(ときにアドリブで作曲)する要素、自身の演奏出力フィードバックを客観的に聞いて補正するListenerが存在する。コンピュータ音楽の領域で歴史の長い自動伴奏システムでは、初音ミクのように単純に打ち込みされたデータをそのまま再生するだけでなく、現在の音楽演奏のテンション(盛り上がり)や一緒に演奏している人間の演奏者のノリやタメやテンポ/音量の変化などをリアルタイムにモニタして反応する、というインタラクティブ性を向上させている。さらにネットワークを介して他の伴奏システムとセッションする、という展開もある[46-47]。

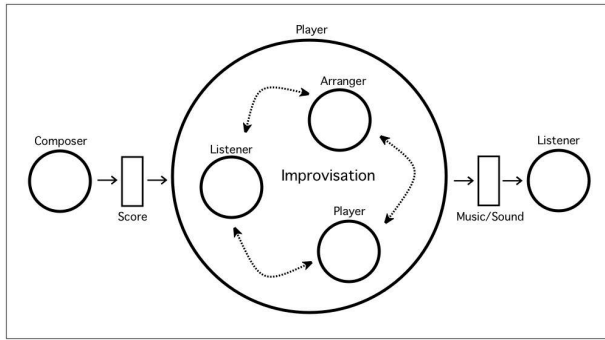


図12 「拡張されたPlayer」モデル

そして図10のモデルをさらに分析すると、図13のように「聴取」のプロセスでも、もっとも好例としてはJazz音楽の愛好者であれば、音楽演奏におけるコード進行やアドリブフレーズを半ば無意識に追いかけて、その後の展開を予想している。この予想をうまく裏切る演奏や解釈がJazzの醍醐味であり、短期記憶スケールで裏切られたものが中期記憶スケールで新たな解釈として整理されると快感となる。

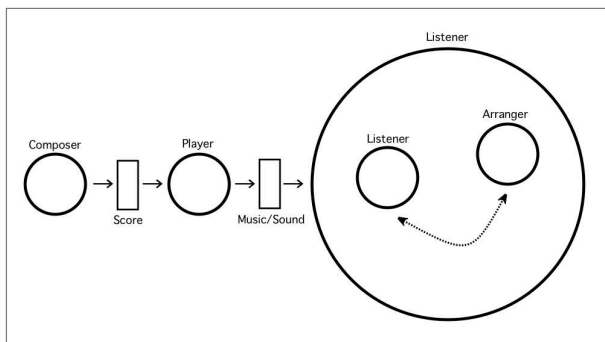


図13 「拡張されたListener」モデル

図14は、図10の古典的モデルから最近のテクノロジーの支援により進化してきた、いわば21世紀型の音楽エンタテインメントの基礎モデルである。作曲家は楽譜の代わりにデータやプログラムを作品として創作し、人間の演奏家に限らないシステムがこれを音楽/音響に変換する。

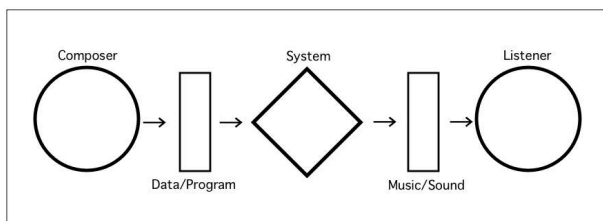


図14 「21世紀の音楽享受」モデル

図15は、図14の上流がさらに拡張したクリエイターとなったモデル、図16は、逆に図14の下流のリスナーが、単なる受動的聴取にとどまらず、積極的にシステムに働きかけてインタラクティブな変化まで享受する、というモデルである。この両者において、本研究で検討しているカオスのインタラクションの発展系をアルゴリズムとして盛り込みたい、というのが現段階での構想である。

この図式によれば、作曲家は音響として確定した音楽でなく、システムの挙動というアルゴリズムをプログラムの形で提供できる。これをアクティブリスナーが聴取体験する際には、ゲームやスマホアプリのように、インターフェースを介

して生成される音楽の挙動とインタラクションすることが出来るため、両者のカオスが自然な形で共鳴できる環境が整ってきた、と言えよう。

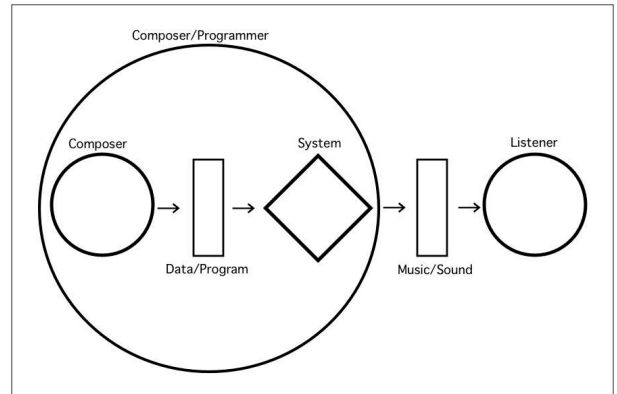


図15 「拡張されたクリエイター」モデル

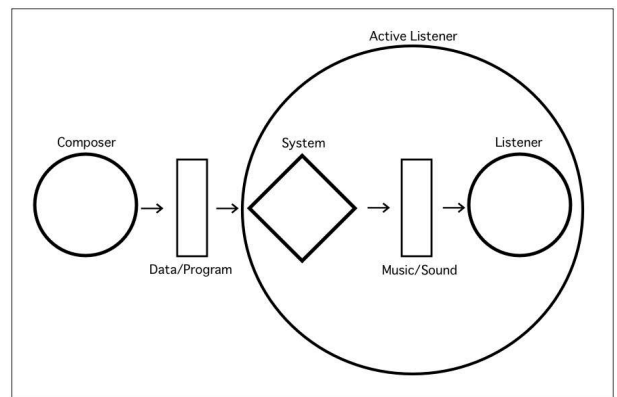


図16 「アクティブListener」モデル

7. おわりに

新しいと言われたカオスも既に古典的科学領域に属しているものの、まだまだ知られざるテーマの宝庫だ、というのが20年ぶりに再会/再開した第一印象である。これまでの研究を生かした新しい視点により、生理学的・生物学的にも納得できるような方向に向かって、音楽情報科学/Computer Music研究の新しいリベンジを進めていきたい。NLP領域の専門家の諸兄からも、ぜひ発展的・網羅的な御意見・コメント・アドバイス等をいただければ幸いである。

文献等

- [1] Art & Science Laboratory <http://nagasm.org>
- [2] 長嶋洋一, Chaotic Interaction Model for Hierarchical Structure in Music, 平成5年度前期全国大会講演論文集II, 情報処理学会, 1993.
- [3] 長嶋洋一, Musical Concept and System Design of "Chaotic Grains", 情報処理学会研究報告 Vol.93, No. 32 (93-MUS-1), 情報処理学会, 1993.
- [4] 長嶋洋一, Chaotic Interaction Model for Real-Time Composition, 1993年度人工知能学会全国大会論文集I, 人工知能学会, 1993.
- [5] Y. Nagashima, PEGASUS-2 : Real-Time Composing Environment with Chaotic Interaction Model, Proceedings of 1993 International Computer Music Conference, ICMA, 1993.
- [6] Y. Nagashima, Chaotic Interaction Model for Compositional Structure, Proceedings of IAKTA /

- LIST International Workshop on Knowledge Technology in the Arts, IAATA, 1993.
- [7] 長嶋洋一, Chaos理論とComputer Music, 京都芸術短期大学紀要 [瓜生] 第16号1993年, 京都芸術短期大学, 1994.
- [8] 長嶋洋一, マルチメディア作品におけるカオス情報処理の応用(研究ノート), 京都芸術短期大学紀要 [瓜生] 第18号1995年, 京都芸術短期大学, 1996.
- [9] 長嶋洋一, アルゴリズム作曲における非周期的ルールの考察, 日本音響学会音楽音響研究会資料 Vol. 15, No. 4, 日本音響学会, 1996.
- [10] 長嶋洋一, 非線形科学の視点から「コンピュータ音楽」を考える, 電子情報通信学会非線形問題研究会(NLP)研究会資料(技術研究報告) NLP2010-133, 電子情報通信学会, 2011.
- [11] C. Madden, Fractals in Music, High art Press, Salt Lake City, 1999.
- [12] F. R. Moore, Elements of Computer Music, pp. 413-453, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1990.
- [13] G. Loy, Musimatics, pp. 304-363, The MIT Press, Cambridge, 2006.
- [14] B. Degazio, Musical Aspects of Fractal Geometry, Proceedings of International Computer Music Conference, pp. 435-442, ICMA, 1986.
- [15] R. L. Devany, An Introduction to Chaotic Dynamical Systems (Second Edition), Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- [16] K. Aihara, T. Yoshikawa, Ordered and Chaotic Systems and Information Processing, Journal of JSAI, vol. 8, no. 2, pp. 179-183, 1993.
- [17] L. Pecora, T. Carroll, Synchronized Chaotic Signals and Systems, Proceedings of 1992 IEEE ICASSP, vol. 4, pp. 137-140, IEEE, 1992.
- [18] R. Bidlack, Chaotic Systems as Simple (but Complex) Compositional Algorithms, Computer Music Journal, vol. 16, no. 3, pp. 33-47, MIT Press, 1993.
- [19] 平野砂峰旅, 大域結合カオスのコンピュータミュージックへの応用, 情報処理学会研究報告 Vol. 1996 No. 19, 情報処理学会, 1996.
- [20] 松本昭彦 作曲アルゴリズムのいろいろ http://homepage.mac.com/sinx_music/maxmsp/
- [21] R. L. Devaney, 後藤憲一(訳), カオス力学系入門 第2版, 共立出版, 2003.
- [22] A. Pikovsky, M. I. Rosenblum, and J. Kurths, 徳田功(訳), 同期理論の基礎と応用, 丸善, 2009.
- [23] 蔵本由紀(編), リズム現象の世界, 東京大学出版会, 2005.
- [24] 長篠博文, 田村博, 牛田富之, 多細胞相互抑制神経回路における発火モードとその解析, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J61-A No. 6 pp. 588-595, 1978.
- [25] 小島満, 山本克之, 三上智久, 呼吸リズムの形成と調節に関するシミュレーション, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J64-A No. 3 pp. 179-186, 1981.
- [26] 川上博, 小林邦博, 非線形方程式に現れる分岐集合の大域的性質, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J64-A No. 9 pp. 699-706, 1981.
- [27] 潮俊光, 平井一正, 平山裕, 不感帯をもつサンプル値システムにおける分岐現象とカオス, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J66-A No. 8 pp. 754-761, 1983.
- [28] 上原哲郎, 稲葉直彦, 森真作, パルス幅制御発振器におけるカオス現象, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J72-A No. 5 pp. 760-769, 1989.
- [29] 吉永哲哉, 川上博, 周期倍分岐過程に生じる樹状パターン, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J73-A No. 3 pp. 639-641, 1990.
- [30] 山口健次郎, 生島章好, 柴山廣, 強制自励振動系における分岐と周波数引込み現象, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J74-A No. 3 pp. 465-473, 1991.
- [31] 藤田得光, 安田恵一郎, 横山隆一, 散逸系カオスを用いた大域的最適化手法, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J77-A No. 6 pp. 881-889, 1994.
- [32] 小河清隆, 中川匡弘, 脳波におけるカオスとフラクタル性, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J78-A No. 2 pp. 161-168, 1995.
- [33] 高坂拓司, 上田哲史, 川上博, 不安定化制御によるカオスの一生成法, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J79-A No. 8 pp. 1418-1426, 1996.
- [34] 大矢雅則, 小坂稔, 情報力学によるカオス現象の考察, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J80-A No. 12 pp. 2138-2144, 1997.
- [35] 松葉育雄, “ラグ復帰, しきい値モデル, カオスの臨界特性”, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J81-A No. 3 pp. 389-396, 1998.
- [36] 平井一正, 非線形制御系のカオス発生パラメータ領域, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J81-A No. 3 pp. 369-376, 1998.
- [37] 福田徹, 吉田勝俊, 佐藤啓仁, 菅又厚, ノイズによる非結合型の同期化制御, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J88-A No. 9 pp. 1055-1062, 2005.
- [38] 野口和博, 早川幸孝, 中川匡弘, カオス・フラクタル理論に基づいたバイオアッセイ技術, 電子情報通信学会論文誌 A Vol. J90-A No. 11 pp. 797-805, 2007.
- [39] Y. Nagashima, Interactive Multi-Media Performance with Bio-Sensing and Bio-Feedback, Proceedings of International Conference on Audible Display, ICAD, 2002.
- [40] Y. Nagashima, Interactive Multimedia Art with Biological Interfaces, Proceedings of 17th Congress of the International Association of Empirical Aesthetics, IAEA, 2002.
- [41] Y. Nagashima, Bio-Sensing Systems and Bio-Feedback Systems for Interactive Media Arts, Proceedings of 3rd International Conference on New Interfaces for Musical Expression, NIME, 2003.
- [42] Y. Nagashima, Combined Force Display System of EMG Sensor for Interactive Performance, Proceedings of 2003 International Computer Music Conference, ICMA, 2003.
- [43] Alberto de Campo, Sonification of Monopoles and Chaos in QCD, http://eproceedings.worldscinet.com/9789812790873/9789812790873_0060.html
- [44] Heinrich Konrad Taube, Notes from the Metalevel - An Introduction to Computer Composition, http://www.moz.ac.at/sem/lehre/lib/bib/software/cm/Notes_from_the_Metalevel/index.html
- [45] Toshihiro Kita, Sonification of Bifurcation and Chaos, <http://www.computer.org/portal/web/csdl/doi/10.1109/ICICIC.2007.530>
- [46] 長嶋洋一, GDS Music - ネットワーク遅延を伴う音楽セッション・モデル, 情報処理学会研究報告 Vol. 2002, No. 41 (2001-MUS-46), 情報処理学会, 2002.
- [47] Y. Nagashima, GDS (Global Delayed Session) Music - new improvisational music with network latency, Proceedings of 2003 International Computer Music Conference, ICMA, 2003.