社団法人 電子情報通信学会
THE INSTITUTE OF ELECTRONICS,
INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS

信学技報
IEICE Technical Report

カオスに対する聴覚的なアプローチ (2)

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　2012年3月に報告した「カオスの可聴化」に関する続報である。まずLogistic Functionのフラクタル構造のズームアップ・システムに可聴化機能を組み込んで、視覚と聴覚からの探究ツールを完成させた。次いで、既報告の改良型Logistic Functionについて調査し、問題点を明らかにした。さらに次数を上げた改良型Logistic Functionを試作して、細部での振る舞いの違いについて検討した。

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 (2)

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 the second 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(パフォーマーとライブ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[1-9]し、2011年からは、非線形科学のアプローチから音楽情報科学研究を進めている[10-17]。そして2012年には、(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NLP研究会で報告した[18]。

本稿はその続報として、Logistic Functionのフラクタル構造のズームアップ・システムに可聴化機能を組み込んで、視覚と聴覚からの探究ツールを完成させた。次いで、既報告の改良型Logistic Functionについて調査し、問題点を明らかにした。さらに次数を上げた改良型Logistic Functionを試作して、細部での振る舞いの違いについて検討した。

2. カオスの可聴化(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22年前(1992頃)にカオス研究の初期に行った実験プログラムは、Logistic Functionに従って刻々と数値計算した値を、「刻々と」の部分を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)。

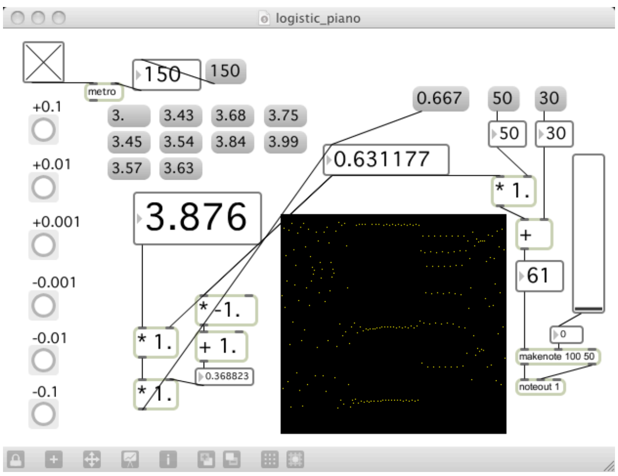

図1 Logistic Functionとカオス可聴化ソフトの画面

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、極限まで単純な1次元カオスを重視している。図1の22年前に実験したプログラムの数式は以下のようになる。

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

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、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た。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、人間の聴覚は奇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かくなり、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った。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あった。

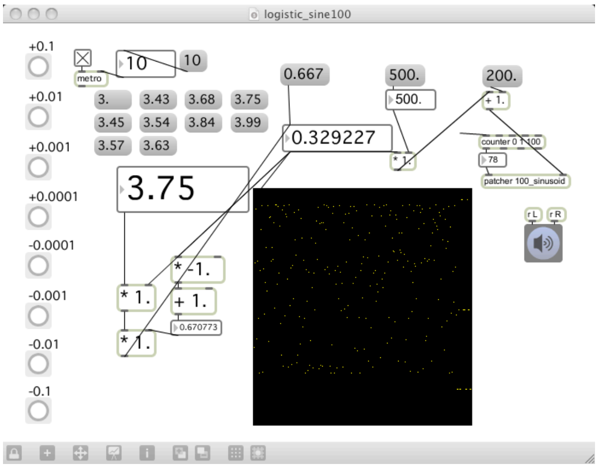

図2 カオス可聴化ソフト改訂版

そこで前回、図1のプログラムから発展させたのが、図2にあるような改訂版の実験プログラムである[18]。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、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。図3はそのサブパッチ部分であり、愚直にオシレータが並んでいる。

開発環境としてはMax5/MSP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)事を確認した。

この改訂版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、μ= 3.858とμ= 3.859の付近などで顕著であった。

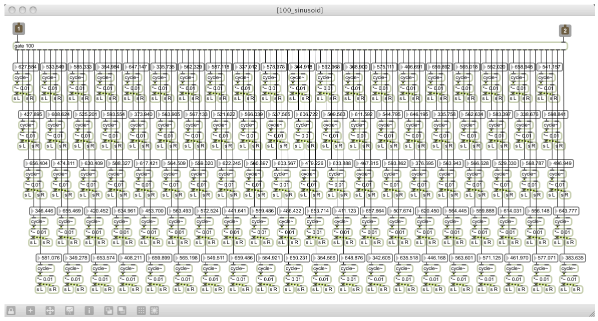

図3 カオス可聴化ソフト改訂版のサブパッチ

3. 「カオスとインタラクション」の実装

前回の報告では、カオス可聴化システムに対して「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、その具体的な実装を報告した[18]。図4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。

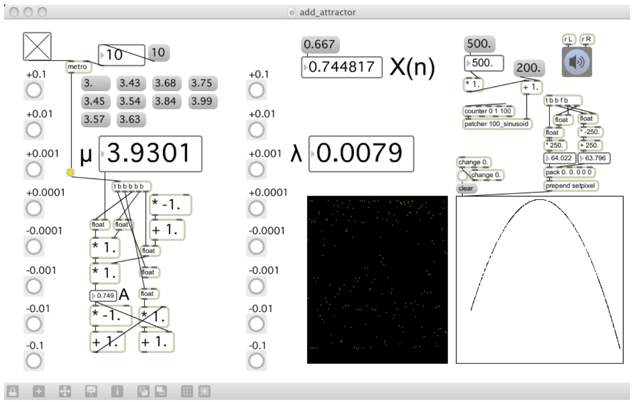

図4 新カオス可聴化ソフトの画面例

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、ここでは演算値　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発想であった。λ> 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。λ< 0 の場合にはクオーク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。

この新しいカオスのインタラクションのアルゴリズムを"dumped　logistic　function"と命名した。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り、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、μ= 3.9301, λ= 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。

4. 「カオスとインタラクション」の失敗

前回の報告[18]では、「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」としていた。そこでまず、λ=0としたシンプルなLogistic Functionの可聴化改訂版プログラムを、プロットされた画面内でマウスにより任意に指定した領域(矩形)をフルスクリーンに拡大して描画する、という図5のようなシステムを制作した。

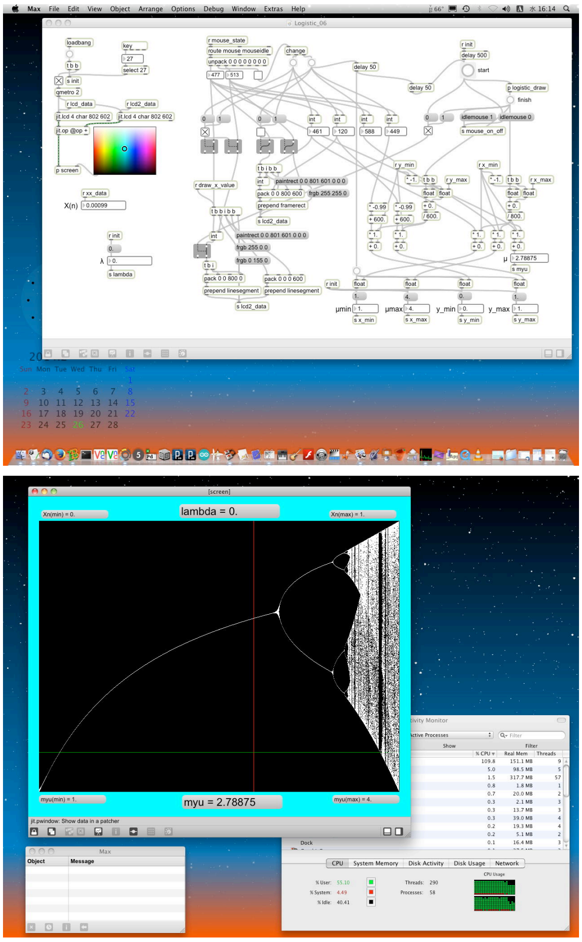

図5 カオス領域拡大表示ソフトの画面例

このカオス領域拡大表示ソフトをベースに、今度はλを微細に変化させて視覚的に拡大ズームの実験を試行してみたところ、どうやらλを0.1、0.2、・・・と増やしてみても、ロジスティックマップがμのプラス方向に移動しつつX(n)のプラス方向に増えているような感じで、あまりドラスティックな変化は無さそうな印象であった。詳しく実験してみて判ったのは、μとX(n)の変域の全域でもアフィン変換のような拡大だったが、さらに領域拡大モードでオフセットがかかると、λがゼロより大きい場合には、あまり全体に変化なく、単に画面外に出てしまうという事であった。

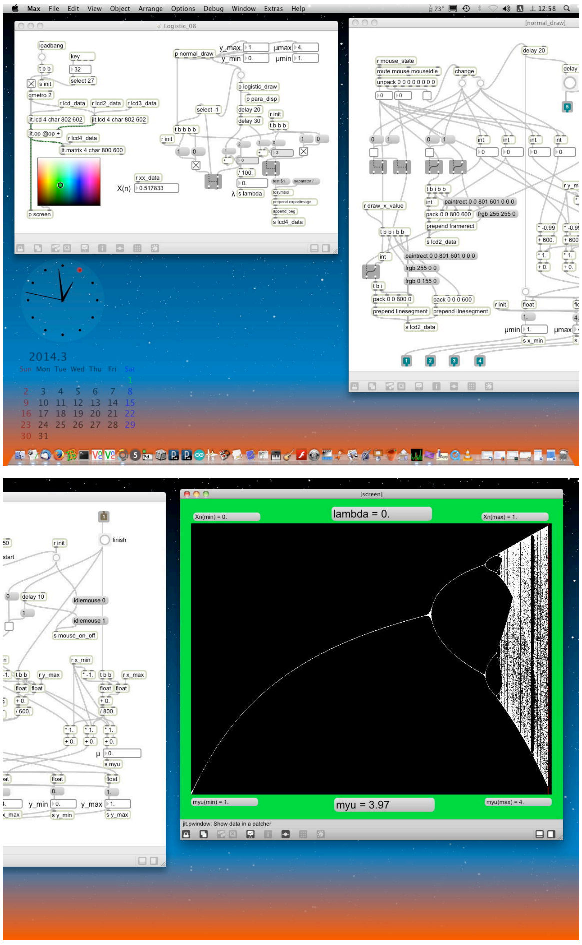

図6 μとλを変化させるカオス領域拡大表示ソフト画面例

どうやらλの導入はあまり効果が無さそう、と判明したので、確認のために、図6のようにλを刻々と刻んで連続スクリーンショットを撮る、というバージョンを制作した。結局、新たに導入したλというパラメータによる"dumped logistic function"は、本質的にそれほど面白い効果が無い、と結論づけて、とりあえずこのアプローチを終了した。

5. ロジステック関数の拡張の実験

古典的なロジスティック関数

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

は、μが1から最大で4という範囲では、X(n)の値域が繰り返し演算でも発散しない「0≦X(n)≦1」に収まり、その関数グラフの形状は、いわゆる上に凸な2次関数である。そこで、同じ固有値「0」「1」を持つような「0≦X(n)≦1」の区間で上に凸な関数として、3次関数はどうだろう、と思いついた。まずは

$$X(n+1) = \mu \cdot (X(n))^2 \cdot (1 - X(n))$$

というのをやってみたが、何故かグラフは一度も点を打つこともなく真っ暗であった。そこで今度は、

$$X(n+1) = \mu \cdot X(n) \cdot (1 - X(n))^2$$

というのをやってみたが、グラフは持ち上がったものの、何も分岐が起きなかった。そこで次に、2次関数と同様に固有値付近の傾きが十分に大きい、4次関数として

$$X(n+1) = \mu \cdot (X(n))^2 \cdot (1 - X(n))^2$$

というのを試す中で、その頂点X=0.5の場合にはX^4=0.25^2となることから、μをさらに4倍することにして、「X(n+1)=4・μ・X(n)・X(n)・(1-X(n))・(1-X(n))」とすると、図7のように、μの変域は「1≦μ≦4」よりも狭くなるものの、奇麗にロジスティックマップと類似したグラフを描画できた。

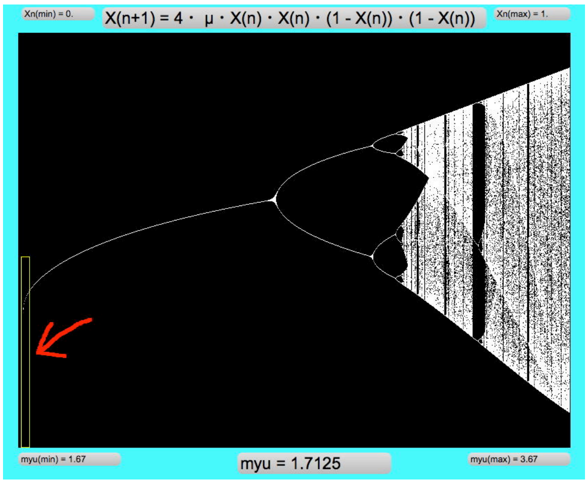

図7 4次関数の試行画面例

図7のグラフはほんど古典的なロジスティックマップであるが、図の矢印の立ち上がり部分を拡大すると、図8のように、新たな形状を発見することができた。

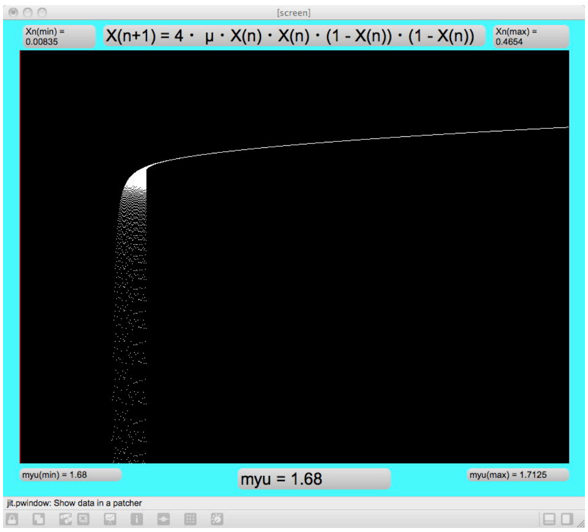

図8 4次関数の拡大部分の画面例

この結果から、さきの2種類の3次関数の形式についても、μを持ち上げるスケールが欠けていた、と判明したので、ここからμを3倍して、「X(n+1)=3・μ・X(n)・(1-X(n))・(1-X(n))」というもの(パターンAと呼ぶ)と、「X(n+1)=3・μ・X(n)・X(n)・(1-X(n))」というもの(パターンBと呼ぶ)の2種類についても同様に実験して、色々な部分でズーム拡大してみると、こちらもμの変域は「1≦μ≦4」よりも狭くなるものの、図9(パターンA)・図10(パターンB)のように、これまでの古典的なロジスティックマップでは観られなかった興味ある形状のグラフをいくつも発見できた。

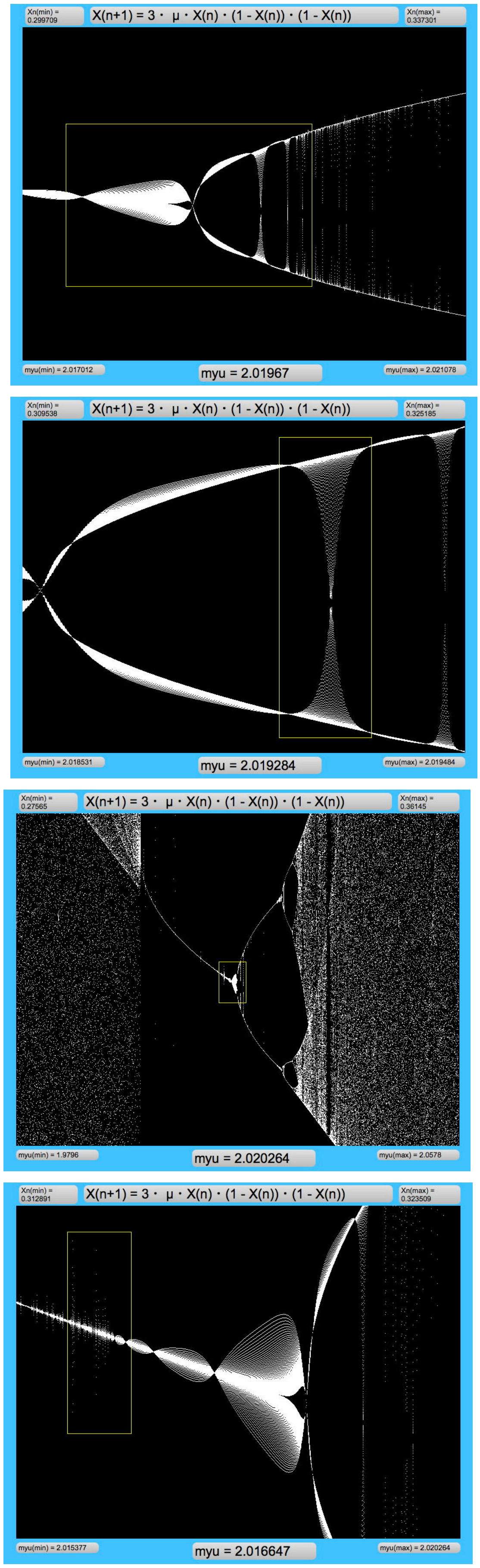

図9 3次関数(パターンA)の拡大部分の画面例

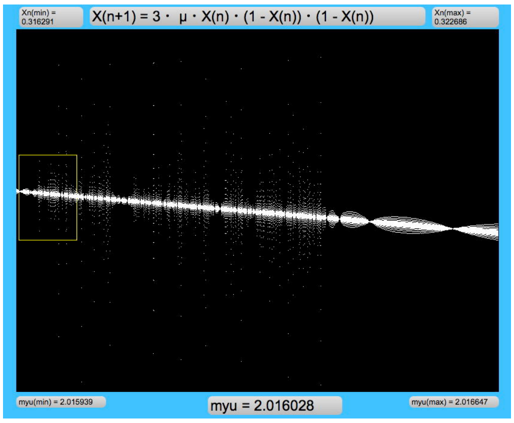

図9 3次関数(パターンA)の拡大部分の画面例

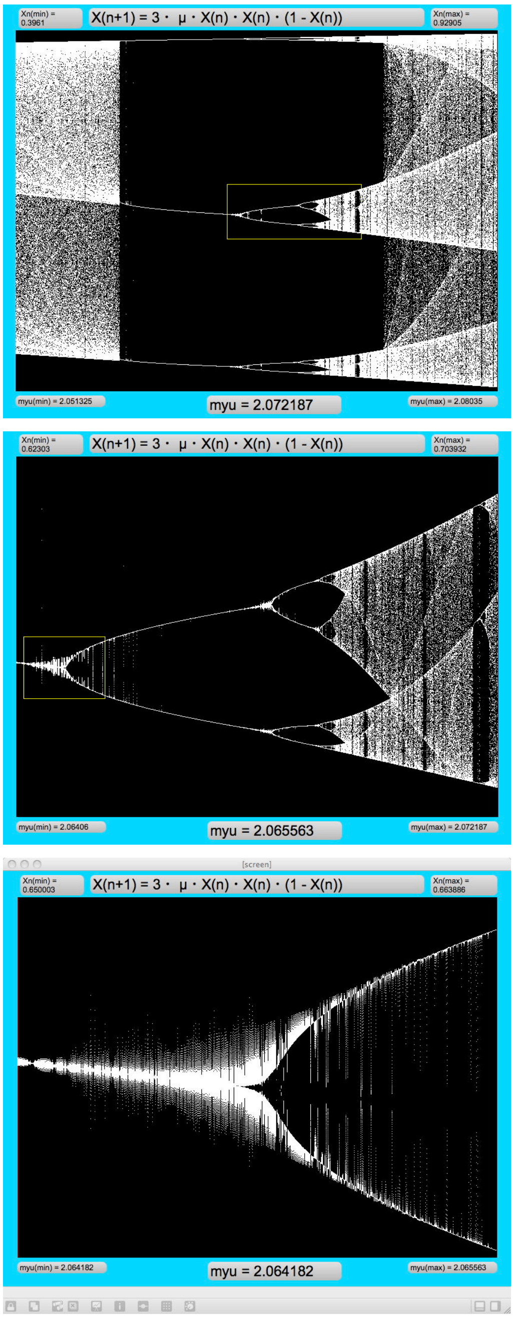

図10 3次関数(パターンB)の拡大部分の画面例

6. ロジステック関数の拡張の可聴化

上記のロジスティック関数の拡張の実験は視覚的な領域だけだったので、ここで前回の改良[18]の100オシレータを適用させて、まずは図11の、古典的ロジスティックマップに対して、任意にズーミングした領域内で、カーソルでインタラクティブにμの値を移動させてその地点でのサウンドを可聴化させるプログラムを開発した。

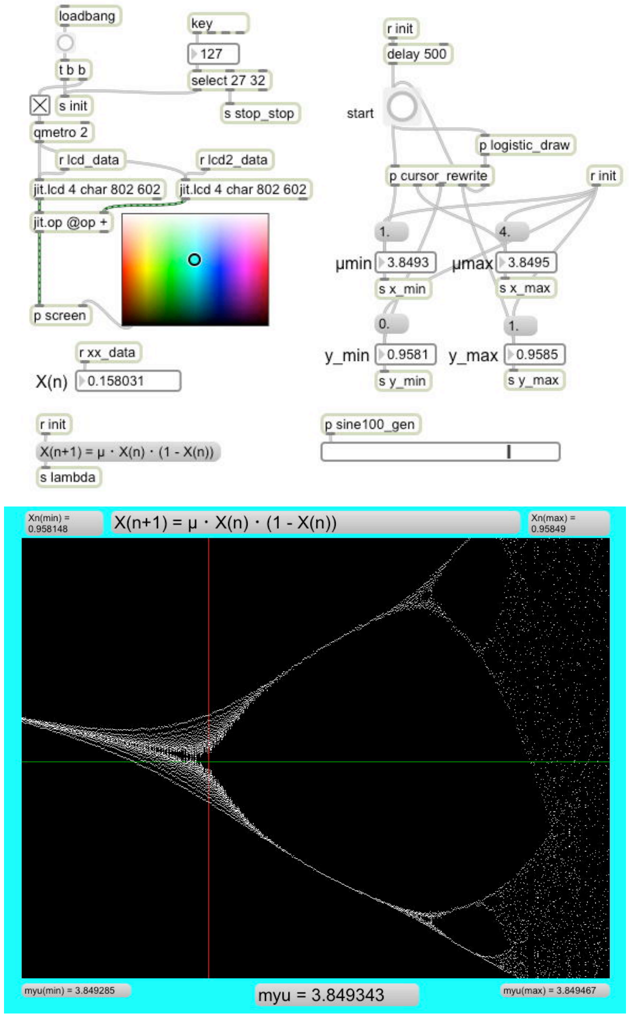

図11 ロジスティック拡大可聴化ソフトの画面例

さらに、上記の古典的ロジスティック関数の拡張に次いで、3次関数ではパターンAの方がより興味深い形状が散見できたので、これを微調整によって「定数=3」から「定数-1.7」として、図12のようなバージョンとして完成させた。これは自分でズームを指定し、さらに描画される画面内で自分で聴取ポイントのμの位置をカーソル指定することで体験できるインタラクティブなシステムであり、静止画はおろかムービー化しても興味は著しく低下する。この様子は2014年7月の非線形問題研究会の場でデモンストレーションする予定であるがプログラム(Max6ソース)は筆者のWeb[19]で公開しているので、興味のある方は実際に体験されたい。

なお、可聴化によって、これらの拡張されたロジスティック関数の状態を聞き分けられるかどうか、については、多数の学生を用いたメディア心理学実験のようなアプローチで検証する必要があり、今後の課題である。

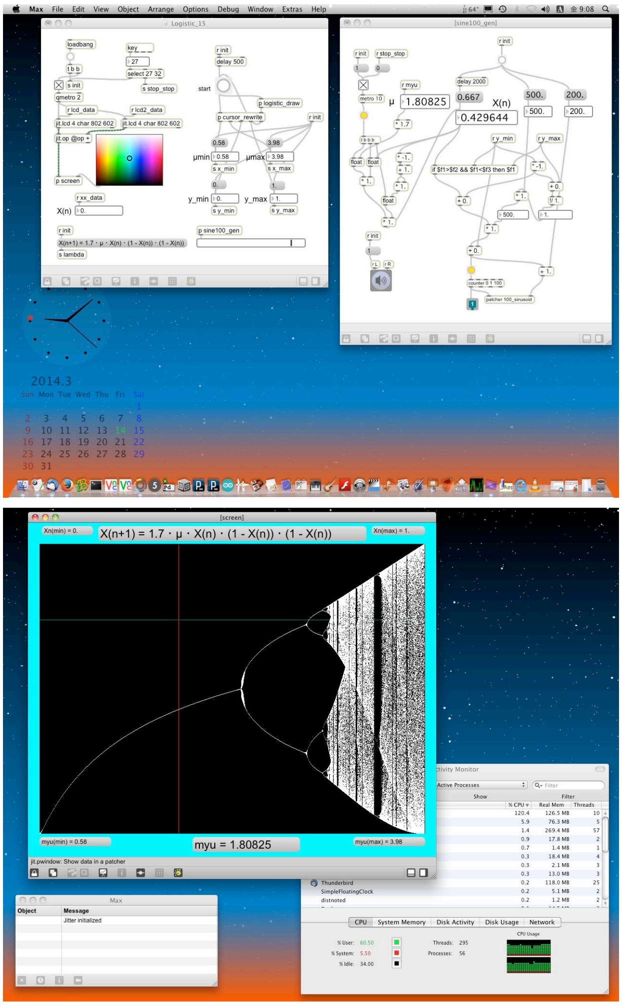

図12 ロジスティック拡大可聴化改良ソフトの画面例

7. おわりに

Logistic Functionのフラクタル構造のズームアップ・システムに可聴化機能を組み込んで、視覚と聴覚からの探究ツールの開発実験について報告した。今後も、音楽情報科学/Computer Music研究の新しい検討を進めていきたい。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, IAKTA, 1993.

[7] 長嶋洋一, Chaos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. Devaney, 後藤憲一(訳), カオス力学系入門　第２版, 共立出版, 2003.

[16] A. Pikovsky、M.l Rosenblum、and J. Kurths, 徳田功(訳), 同期理論の基礎と応用, 丸善, 2009.

[17] 蔵本由紀(編), リズム現象の世界, 東京大学出版会, 2005.

[18] 長嶋洋一, カオスに対する聴覚的なアプローチ(1), 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) NLP2011-158, 電子情報通信学会), 2012.

[19] Max日記(2014年3月14日(金)のところを参照), http://nagasm.org/ASL/mac03/index.html

[20] 長嶋洋一, 音楽的ビートが映像的ビートの知覚に及ぼす引き込み効果, http://nagasm.org/ASL/beat/index.html

[21] 長嶋洋一, グロッケン音色の利用に関する考察, http://nagasm.org/ASL/Glocken/index.html

[22] 長嶋洋一, 聴覚的クロノスタシス, http://nagasm.org/ASL/Chronostasis/index.html