


 原著論文
 

大域結合写像によるインタラクティブカオティックサウンド生成システムおよび音楽的要素の導入†

前田 陽一郎*1・丹羽 俊明*2・山本 昌幸*3

カオティックサウンドは、インタラクティブアート生成システムの1つとして人工生命の分野で研究が行われている。これにより、人間の予想を超える多様性と複雑さをもつ音楽をコンピュータを利用して生成することが可能である。カオティックサウンドの研究目的は、カオス理論を用いることにより、複雑かつ可変なサウンドを作り出す有効な手法を見つけることである。しかしながら、単純にカオスで得た数値と対応する音を演奏する場合、人間にとってただ音が鳴るだけの不協和音となることが予想される。そこで本研究では、カオスの非同期性や全体の同期性の制御が可能な大規模カオスを用いて音の生成を行い、さらにより自然な音に感じられるよう音楽理論の要素技術の一部を導入する手法を提案する。本システムでは、大域結合写像(GCM)によって音高、音長、音量要素を決定し、生成した音楽に小節、調性、休符、テンポ、エコー、音色などの音楽的要素が追加される。これにより生成される音は自然音、環境音楽などの、ヒーリングミュージックのような効果が予想される。また、この手法を用いてインタラクティブカオティックアミューズメントシステム(ICAS)を構築し、シミュレーションにより生成された音の感性評価を試みたので、これについても報告する。

キーワード：大規模カオス、インタラクティブアート、カオティックサウンド、人工生命

1. はじめに

近年、人間の生活に快適性や娯楽性を与えることを目的とするロボットやシステムの開発が進められており、人間とエージェント(ロボットやコンピュータなど)との相互作用による知的支援システムを研究するヒューマンエージェントインタラクション(HAI)などの研究分野も生まれている[1, 2, 3]。これはコンピュータを利用した人間要素を取り込む計算知能ともいえる新しい研究分野のひとつでもある。中でも芸術を対象としたものとしては、人間の感性を刺激する複雑かつ多様なグラフィックス、サウンドの生成を目的としたインタラクティブアートが人工生命研究の分野において盛んに研究されている。特に、音楽に関する研究では、主に人間と音楽の関係を解明しようとする方向性が主流となっている。例えば、作曲や演奏における人間の感性に与える影響や音楽の中の人間らしさの特徴抽出などの研究もいくつか報告されている[4,

5, 6]。

一方、インタラクティブアートの中でも、音楽生成に関する研究も人工生命の分野で盛んになりつつある。例えば、フラクタル図形であるマンデルブロ集合を用いてサウンドを生成するマンデルブロ音楽[7]、人間が心地よいと感じる1/fゆらぎを用いた音楽生成[8]、人工生命と実生命の視覚相互作用の試みとして音楽を奏でる群れ行動エージェント群を鑑賞者が指揮するシステム[9]、などが挙げられる。これらは従来の楽曲のように完成されたものではなく、人工生命の手法や人間との対話により、人工的・人為的に状態を変えていくようなアルゴリズムを用いてサウンドを自動生成するものである。これにより試行のたびに異なる音楽が生成されたり、外部からの影響により音に変化するといった新しい音楽生成手法の確立が可能となる。

また、カオス理論を応用したコンピュータミュージックの研究例も最近ではいくつか報告されている。カオス理論が音楽の分野において注目されてきた理由は、構成する単純な数式とは対照的に複雑かつ多様な挙動を示すことから、それらを音楽的要素に適用することで人間の感性に影響を与える新しい音楽が生まれる可能性を持っていると考えられるためである。その代表的なものとして、平野らの観客の動きや会場内の話し声などの自然環境により、大域結合写像(GCM)のパラメータを変動させ、環境に応じた音楽を生成す

† Interactive Chaotic Sound Generation System by Using Globally Coupled Map and Incorporation of Musical Factors
Yoichiro MAEDA, Toshiaki NIWA and Masayuki YAMAMOTO

*1 福井大学大学院工学研究科知能システム工学専攻
Dept. of Human and Artificial Intelligent Systems,
Graduate School of Engineering, Univ. of Fukui

*2 日本通信特機(株)
Nittoku Corporation

*3 トヨタテクニカルディベロップメント(株)
Toyota Technical Development Corporation

る研究[10]や、長嶋らのロジスティック写像によって発生されるメロディにさまざまな音楽的フィルタを適用したサウンドを生成する研究[11,12]などがある。これらは、音楽理論に基づく作曲システムとしては大変興味深いもので、出力されるサウンド（音楽）は芸術性という点では優れている。しかしながら、これらの研究では大規模カオスまたはロジスティック写像を楽器や音楽的フィルタの一つとして扱っており、ユーザにはある程度の音楽的知識が必要である。

これに対し、筆者らは現在、カオス理論を応用して生成したサウンドとグラフィックスを組み合わせることによって、様々な視覚的・聴覚的効果を人間に与えることができるICAS (Interactive Chaotic Amusement System)を開発するための研究を進めている[13,14,15]。本研究ではその基本システムとして、人間がインタラクティブにサウンドを生成することが可能なシステムの開発を対象としており、複数のカオス要素を融合することで個々の要素のカオス性と全体の同期性の制御が可能な大規模カオスをサウンドの生成に用いる。これによって、生成されるサウンドにそれぞれの旋律や時間的変化をカオス的に変動させたり、同期性を持たせたりすることを可能にし、聴覚的に複雑かつ多様性を持つ音の生成を行なうことができる。筆者らのICASでは、GCMのパラメータをユーザが自在に制御して好みの音を作成するサウンド生成支援システムとして大規模カオスを利用しており、音楽的知識をもたないユーザでも少ないパラメータでより効果的にさまざまなサウンド生成ができるシステムを目指している。

しかしながら、ICASにより大規模カオスのみで基本的なサウンド生成を行なうと、不協和音になってしまうなどGCMだけではユーザが十分にコントロールできない場合も起こるため、これを補う目的で本研究では音楽的要素を導入する。すなわち、基本システムにおいてGCMを用いて音の主要要素（音高、音長、音量）を作成し、さらに音楽理論の各要素（小節、調性、休符、テンポ、エコー、音色）を付加できるシステムを構築する[16,17]。これにより、ユーザの意図したサウンドを作成できる自由度が増え、サウンド生成支援システムとしてはより優れたものになる。また音楽的要素の導入により、自然音、環境音楽、ヒーリングミュージックといった癒し効果をもつ心地よいサウンドの生成を目指している。本研究で提案するインタラクティブサウンド生成システムの有効性を検証するため、ICASシミュレータを作成し、これにより生成された音についてアンケート方式による感性評価を行ったので、それについても報告する。

2. 大規模カオスについて

本研究では音の生成システムにおいて、主要な3つの要素（音高、音長、音量）の制御に大規模カオスを用いている。大規模カオスは金子ら[18,19]によって提唱されたものであり、差分方程式のように複数のカオス要素をネットワーク状に多数結合させており大規模結合写像とも呼ばれる。これを用いることにより、写像全体の挙動を複雑かつ多様化させることが可能となる。また、大規模カオスはカオス要素の結合構造によって結合写像格子(CML)、大域結合写像(GCM)に大別される。CMLとGCMの違いは、要素間の相互作用が大域的であるか局所的であるかという点である。

図1にCML, GCMの結合構造を示す。結合写像格子(Coupled Map Lattice: CML)は、時空カオス(時間的にも空間的にも複雑な挙動をなすカオス)を考える上で生まれたモデルであるが、以下では、本論文において用いたGCMについて概略説明を行なう。

大域結合写像(Globally Coupled Map: GCM)は、1つの非線形要素が、他のどの要素に対しても同程度の強さで相互作用しているという大域的なカオスを考える上で生まれたモデルである。GCMはまったく同じカオスを示す要素で構成されており、それぞれの要素の出力値の平均を用いることで全体に影響を与えている。数学的モデルで表した場合、GCMはカオス要素を多数並べ、全ての要素を相互作用させることにより状態を遷移させていく。

一般にカオス要素としては、カオス特性を表す非線形写像の中でも最も単純な以下のようなロジスティック写像がよく用いられる。

$$x_{n+1} = ax_n(1 - x_n) \quad (1)$$

$$x_{n+1} = 1 - ax_x^2 \quad (2)$$

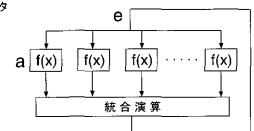
式(1)は生物の世代による個体数変化などを数学的にモデル化したものであり、式(2)は大規模カオスな

$f(x)$: カオス要素(ロジスティック写像)

a: 個々のカオス要素の非同期性を高めるパラメータ

e: 全体としての同期性を高めるパラメータ

$$a \left[\begin{array}{c} f(x) \\ f(x) \\ f(x) \\ \dots \\ f(x) \end{array} \right] \xrightarrow{e} \left[\begin{array}{c} f(x) \\ f(x) \\ f(x) \\ \dots \\ f(x) \end{array} \right]$$



(a) 結合写像格子(CML) (b) 大域結合写像(GCM)

図1 大規模カオスの結合構造

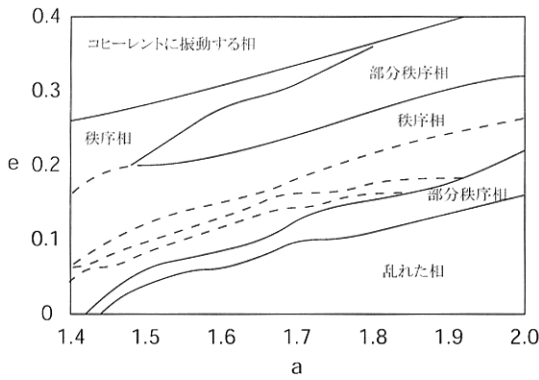


図2 GCMの相図(文献[18]より引用)

どによく用いられるものである。これらは良く似た特性を示し、いずれも変数 x の時刻 t における値 x_t により次の時刻 $t+1$ の値 x_{t+1} が決まる一次元写像である。

GCMにおいて、ある要素の次の新しい状態は全ての要素の状態とその要素の状態により決定され、要素間の相互作用は大域的である。GCMは、ロジスティック写像を用いて、式(3)により統合される。

$$x_i(t+1) = [1 - e]f(x_i(t)) + \frac{e}{N} \sum_{j=1}^N f(x_j(t)) \quad (3)$$

ここで $f(x)$ は式(2)のロジスティック写像(カオス要素)で、 N はGCMの全カオス要素数を示している。またパラメータ e は全てのカオス要素間の結合力を示す。

GCMの挙動の性質はモデル内の2つのパラメータによって決定される。2つのパラメータの1つは非線形性、カオス性(非同期性)の強さを示す a 、もう1つは全体の結合力(同期性)を示す e である。図2にGCMの取り得る状態を表した相図を示す。GCMは e の値が大きければ各要素は同じような軌道を取り(同期相、図ではコヒーレントに振動する相)、 a の値が大きければ各要素の振動は無秩序の状態(非同期相、図では乱れた相)になる。また、同期相と非同期相の間には、それらが混在した中間的な相である秩序相や部分秩序相が存在する[18]。

3. 大規模カオスを用いたインタラクティブサウンド生成システム

本研究では、音を生成するカオス要素を大規模カオスを用いて複数結合し、人間が2つのパラメータを調整することにより、さまざまな特徴の異なる音を生成することが可能なICAS(Interactive Chaotic Amusement System)を提案する。これは人為的に挙動を制御することが可能な大規模カオスを用いることによ

り、人工的には生成が困難な音の生成支援を目的としたものである。さらに、人間の意図した音を作成する自由度を増やすために音楽的要素を取り入れることも試みた。

3.1 ICAS

すでに述べたように、大規模カオスはカオス要素の結合構造によってGCMとCMLに大別される。筆者らの以前の研究[15]では、音長要素の決定にCMLを用いて音長の時系列調和を行なった。しかしながら、本研究ではそれぞれの要素同士をローカルに調和するのではなく、他の音とのグローバルな要素間調和を行なうことにより、オーケストラのような合奏効果を得るため、音長要素の決定にはCMLではなくGCMを用いることとした。他の音高および音量についても同様に全体のカオス要素を同時に制御可能なGCMを用いた。

図3に今回提案したICASの概念図を示す。生成される音は第1音から第 n 音までであり、これらが同時に出力される。第 i 音の音高、音長、音量は、それぞれ個別のロジスティック写像 L_{hi} 、 L_{ti} 、 L_{vi} により生成される。さらに、 L_{h1} から L_{hn} のすべての音高はGCM1により大域結合されており、これにより音高の調和が行なわれる。同様に、音長、音量についてもGCM2、GCM3により大域結合されている。カオス性を高め、非同期に近い音を生成したい場合は、各カオス要素であるロジスティック写像のパラメータ a の値を高くし、全体に統制を取って同期的な音を生成したい場合には、GCMにおける結合係数 e を高くすることにより、生成される音の調和に関する制御を行なうことができる。

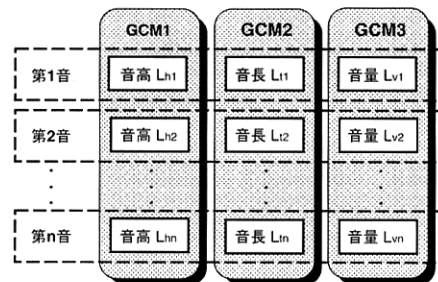


図3 ICASの概念図

3.2 GCMによる音高要素の決定

音の変化を表現するための重要な要素の1つに音高の変化と同時に発生している他の旋律との調和が挙げられる。本研究では生成する音の数だけカオス要素を

用意し、それを大規模カオスによって大域的に制御することにより、個々の旋律の音高の変化と全体の調利を行なう(図4参照)。GCMを用いることにより、要素の全体的な同期・非同期制御ができ協調的な音高の変化が得られる。

ICASのカオス要素には以下のようなロジスティック写像Lhiを用いる。

$$f_i(x_i(t)) = 1 - ax_i^2(t) \quad [i = 1, \dots, n] \quad (4)$$

a はロジスティック写像のパラメータで非線形性の強さを表す。 $f_i(x_i(t))$, $x_i(t)$ は時刻 t における i 番目の要素の出力値とGCMで計算されたロジスティック写像への入力値を意味する。GCMの統合演算は式(3)に基づいて行われる。本研究では同時に4音を演奏することを想定したため、カオス要素の総数は $n=4$ となる。

本研究で作成したシミュレータにおける音高の割り当ては、GCMの出力値を条件分けすることにより決定している。具体的にはカオス要素であるロジスティック写像Lhiを初期値により、 $-1.0 \leq x_i < 1.0$ の範囲でのみ出力値を出すようにする。そしてその範囲を0.1刻みで分割し、その20の区間にミドルCより1オクターブ低いCから2オクターブ高いG#までの異なる高さの音(MIDIのノート番号の48~92、ノート番号とはMIDI内の音高の番号を示す)を順に割り当てる。このとき割り当てられる音は選択される調により異なる。無調性の音階(音高周波数を高低の順に均等に並べたもの)の場合、CからG+までの20の音が順に割り当てられることとなる(表1参照)。シミュレータは

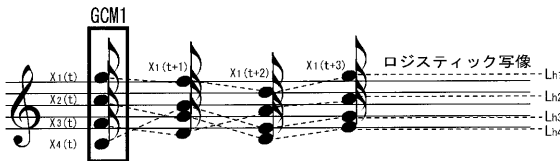


図4 GCMによる音高制御のイメージ

表1 出力値と音高の関係(無調性)

出力値	音高(ノート番号)
$0.9 \leq x_i(t+1) < 1.0$	G+(79)
$0.8 \leq x_i(t+1) < 0.9$	F#+(78)
$0.7 \leq x_i(t+1) < 0.8$	F+(77)
.	.
$-0.8 \leq x_i(t+1) < -0.7$	D(62)
$-0.9 \leq x_i(t+1) < -0.8$	C#(61)
$-1.0 \leq x_i(t+1) < -0.9$	C(60)

4つのカオス要素が、GCMによって出力したそれぞれの値の属する範囲に対応した音高を生成する。

3.3 GCMによる音長要素の決定

音長要素の決定にも音高と同様にGCMを用いた。カオス要素には式(4)と同じロジスティック写像Lti ($i=1, \dots, m$)を用いる。ロジスティック写像の総数は音高の要素数に合わせるため $m=4$ とした(図5参照)。

音長の割り当ては、音高と同様にGCMの出力値を条件分けすることにより決定している。カオス要素であるロジスティック写像Ltiを初期値により、 $-1.0 \leq x_i < 1.0$ の範囲でのみ出力値を出すようにする。さらに、その範囲を1:2:4:2:1の割合で分割し、各区間に125:250:500:1000:2000(msec)の音長を順に割り当てた(表2参照)。比例分割を行わなかった理由は、500msec(四分音符)の音長を基準と考え、中央値が最も高い確率になるように設定したためである。

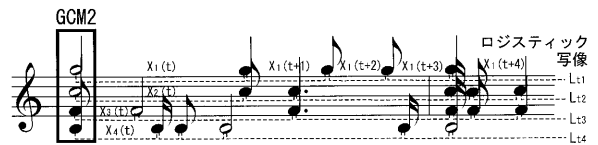


図5 GCMによる音長制御のイメージ

表2 出力値と音長の関係

出力値	音長(msec)
$0.8 \leq x_j(t+1) < 1.0$	2000
$0.4 \leq x_j(t+1) < 0.8$	1000
$-0.4 \leq x_j(t+1) < 0.4$	500
$-0.8 \leq x_j(t+1) < -0.4$	250
$-1.0 \leq x_j(t+1) < -0.8$	125

3.4 GCMによる音量要素の決定

音量要素の決定にも音高要素と同様にGCMを用いた。カオス要素には式(4)と同じロジスティック写像Lvi ($i=1, \dots, l$)を用いた。ロジスティック写像の総数は音高の要素数にあわせ、 $l=4$ とした(図6参照)。

音量の割り当ても、音高、音長と同様にGCMの出力値を条件分けし、ロジスティック写像Lviを初期値により、 $-1.0 \leq x_i < 1.0$ の範囲で出力する。その範囲を2:3:5:5:5の割合で分割し、各区間に0/127:70/127:85/127:100/127:120/127(Max Volume:127)の音量の値を順に割り当てた(表3参照)。

照). この比率はなるべく音量を小さめに設定し, 大きな音量と小さな音量の範囲を同程度にすることで同時に生成されたときに音の強弱が強調されるように決定した. 作成したシミュレータでは, この音量決定の部分に後述する音楽的要素の「休符」も導入している.

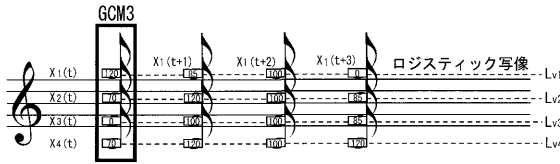


図6 GCMによる音量制御のイメージ

表3 出力値と音量の関係

出力値	音量 (Max: 127)
$0.5 \leq x_k(t+1) < 1.0$	120/127
$0.0 \leq x_k(t+1) < 0.5$	100/127
$-0.5 \leq x_k(t+1) < 0.0$	85/127
$-0.8 \leq x_k(t+1) < -0.5$	70/127
$-1.0 \leq x_k(t+1) < -0.8$	0/127

3.5 GCM へのノイズ成分の付加

本研究で作成したシミュレータは, GCMの重要な2つのパラメータ a と e の値を特定の範囲内で自由に変更可能な点が特徴の1つである. これはオペレータがこれらのパラメータを任意に変更することにより, カオスのさまざまな状態を変え, 生成される音を自在に操作できるようにするためである.

しかしながら, 式(3)のGCMでは, カオスの状態が一旦同期状態や秩序状態になり, 構成するカオス要素が同期して1つまたは少数のクラスタになった後に, 非同期状態などに遷移させても, 要素の挙動が同期状態などから脱出できない. これはGCMを構成しているロジスティック写像の式がすべて同じであるため, パラメータが非同期状態で異なる値であっても個々の式に与えられる数値が同期すると同じになることにより起こるもので, デジタル計算機での演算では避けられない問題である. この状態に陥った場合, 同期した要素は同一のロジスティック写像の挙動を取り続けるため, 自由にカオス状態を制御できるといったICASの特性が失われることになる.

そのため本研究では, シミュレータのGCMの式に微小な雑音を加えることとした. これはカオスの状態が同期状態から非同期状態に戻る時, 同期状態から脱出するために必要となるノイズ成分である. 雑音を加えたGCMは式(5)のようになる.

$$x_i(t+1) = [1-e]f(x_i(t)) + \frac{e}{N} \sum_{j=1}^N f(x_j(t)) + \sigma \eta_n^i \quad (5)$$

ここで, 範囲 $[-\sigma, \sigma]$ からとった一様な乱数 η_n^i が雑音を示す. 雑音は非常に小さい値で十分であるため本研究のシミュレータでは, $50.0 \times 10^{-6} \pm 49.0 \times 10^{-6}$ の範囲からランダムに選んだ値を加算, もしくは減算することとした. 加算, もしくは減算のみとしないのは, 同期状態などで要素が同期した場合, 出力値が $-1.0 \leq x_i < 1.0$ の範囲を超えないようにするためである.

3.6 ICAS に導入した音楽的要素

本研究のICASは基本システムにおいて大規模カオスを用いており, GCMのパラメータを変化させて音の主要要素(音高, 音長, 音量)をユーザが自在に作成することができる. しかしながら, GCMのみでサウンド生成を行うと, 場合によっては不協和音になってしまうなどユーザが十分にコントロールできない場合も起こるため, 本研究ではさらに音楽理論の各要素(小節, 調性, 休符, テンポ, エコー, 音色)を導入し, ユーザの意図したサウンドを作成できる自由度を増やすことを試みた. 但し, 本システムは文献[10, 11, 12]のような音楽理論に基づいて楽曲を演奏したり作曲するシステムを目的とはしていないため, 音楽理論の導入はいくつかの代表的な最低限の要素にとどめ, 楽曲の知識がないユーザにも音楽的制約の少ないサウンド生成ができるよう配慮した.

本研究では現代音楽の要素ではなく, 古典的な音楽理論に用いられていた基本的な音楽的要素のみを導入した. 今回導入した音楽的要素は, 「小節」, 「調性」, 「休符」, 「テンポ」, 「エコー」, 「音色」の6つである. 例えば, 調性は比較的濁った響きをなくすことができ, 小節・休符は人間が拍をとって音楽の構造を把握しやすくすることができる. さらに, テンポに関してはGCMではあまり大きく変化しなかった全体の速さを変えることができ, 音色・エコーに関しては音に表情や雰囲気をつけることができる.

以下に, 本研究で導入した音楽的要素について簡単に説明する. まず「小節」は, 音楽の時間の基本単位, 拍子のまとまりを示す. 1小節の長さは4拍子(四分音符 $\times 4 = 2000\text{msec}$)と設定し, 音符, 休符の音長の合計が2000以上になるたびに2000にするため強制的に音を区切るように設定した. 「調性」は, 調ごとに使用する音高を限定した. 調性は長調と短調に分けることができ, それぞれ全音高のC(ド)の音とA(ラ)の音が中心となっている. 本研究ではハ長(短)調, ニ長(短)調, ホ長(短)調, ヘ長(短)調, ト長(短)調, イ長(短)調, ロ長(短)調の14調と通常の音調(無調性)の

今回使用したMax/MSPは、サウンド加工、データ入出力制御、グラフィカルパネルの作成などが比較的容易にできるグラフィックプログラミングツールである。これにより作成したGCMのサウンド生成部のプログラム例を図8に示す。このプログラムは、上半分はロジスティック写像を表しており、各要素の出力はカオス的な変化をしている。また、右中央部分では各要素に追加する雑音を算出している。下半分では全要素の平均を計算し、要素間の結合力を表すパラメータ e を掛け、その値にもとのロジスティック写像と雑音の値を足し合わせてGCMの出力としている。

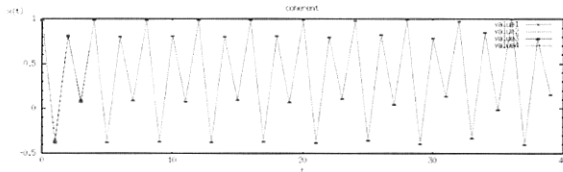
シミュレータで実際に音を演奏する場合、ユーザはまず図7のパネル上部のパラメータウィンドウで音高・音長・音量の各GCMパラメータ(a と e)を選択した後、調性や音色等の音楽的要素のパラメータを決定する。これらの準備をした後、計算on/offボタンを押

すことにより演奏が開始される。さらにシミュレータでは、各要素のグラフや挙動を確認することが可能で、実際の出力値を確認することもできるようになっている。

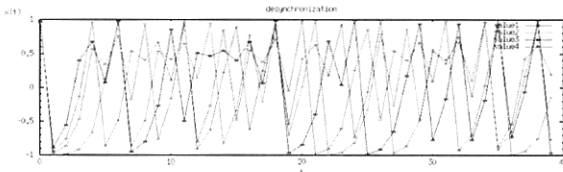
4.2 サウンド生成シミュレーション

今回作成したシミュレータを用いたオペレータ操作により、カオス状態が同期、非同期、秩序、部分秩序状態となるように音高・音長・音量のカオスパラメータ a 、 e を同時に変更し、シミュレーションを行った。図9に4つの代表的な各カオス状態における要素の挙動を示す。グラフにおける曲線は4音の音高に関するロジスティック写像 Lhi の出力を時系列でプロットしたものである。相図における代表的なカオス状態が挙動により視覚的にも確認できる。図10にそのとき実際に出力された音のサンプルを楽譜にしたものを各カオス状態ごとに示す。

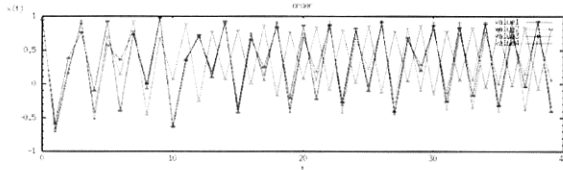
また、これら4つの典型的なカオス状態以外における生成サウンドを確認するため、音高・音長・音量に対して独立にカオスパラメータ a と e を設定して、4状態とは異なる状態のサウンドを生成してみた。この結果のGCMパラメータの設定値を表4に、生成サウ



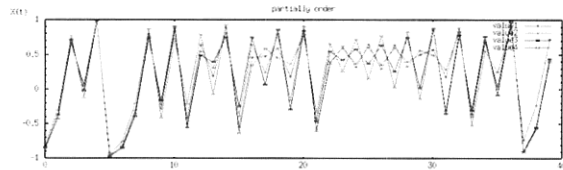
a) 同期状態 : $a = 1.40$, $e = 0.40$



b) 非同期状態 : $a = 2.00$, $e = 0.002$



c) 秩序状態 : $a = 1.73$, $e = 0.18$



d) 部分秩序状態 : $a = 2.00$, $e = 0.40$

図9 代表的カオス状態における要素の挙動



a) 同期状態

b) 非同期状態



c) 秩序状態

d) 部分秩序状態

図10 代表的カオス状態において生成された音

表4 各種生成音のGCMパラメータ設定

生成音		生成音1	生成音2	生成音3	生成音4	
大規模カオス	音高	a	1.640	1.774	1.530	1.978
		e	0.008	0.126	0.088	0.072
	音長	a	1.948	1.868	1.866	1.532
		e	0.338	0.062	0.170	0.212
	音量	a	1.450	1.440	1.692	1.796
		e	0.332	0.376	0.092	0.140

ンドの楽譜を図11に示す。これにより、典型的な4状態以外でもさまざまな種類のサウンドを生成できることが確認できる。尚、ここに示した楽譜はほんの一例であるが、生成された音の楽譜を見ると、部分秩序状態付近が最も一般の音楽の楽譜に近い印象を受けることもわかった。



a) 生成音1

b) 生成音2



c) 生成音3

d) 生成音4

図11 代表的カオス状態以外の各種生成音

5. 感性評価実験

本研究で開発したICAS シミュレータを用いてサウンド生成シミュレーションを行ない、これをもとに大規模カオスの特徴的な状態において生成されたサウンドが人間の感性に与える影響を確認する実験を行なった。ここでは2種類の感性評価実験を行ない、生成されたサウンドと人間の印象との関連性について検証した。

5.1 GCMによる生成音に対する感性評価(実験1)

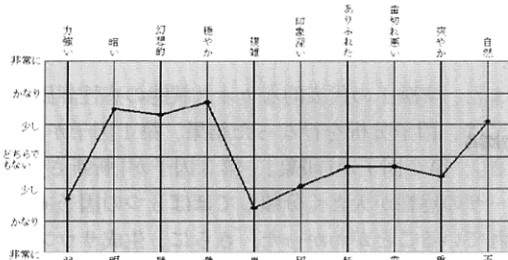
今回行なったシミュレーション結果をもとに20代の20人の被験者を対象に、前述の4つのカオス状態で生成した音を感性語対(これを評定尺度と呼ぶ)を用いたアンケート方式によるSD法の感性評価を試みた。シミュレーションは音高、音長、音量の3つの要素全てを図9の代表的なカオス状態とし、被験者に音の変化が分かりやすいよう同期、非同期、秩序、部分秩序状態の順で行なった。感性評価は、10対の評定尺度を設定し、被験者に演奏される音を30秒ほど聞いてもらうたびに、それぞれの感性語対に対し7段階評価をしてもらう方法をとった。

この感性評価の結果を図12に示す。各図は演奏したそれぞれの音の被験者全員の平均プロフィールを表している。感性評価の結果、同期・秩序状態での評価はほぼ等しく、どちらも要素が同期し単調なためか印象が薄いことがわかる。非同期状態では非常に複雑で歯切れが悪いこともわかる。部分秩序状態では他の状態の場合と異なり、わずかであるが斬新で明るい印象を与えていることが確認された。これ以外にも同じ4状態に対して異なるサウンドを生成したときの感性評価なども異なる被験者に対して何度か行ったが、4つのカオス状態におけるサウンドの印象はほぼ同様の傾向が見られたことも確認できた。

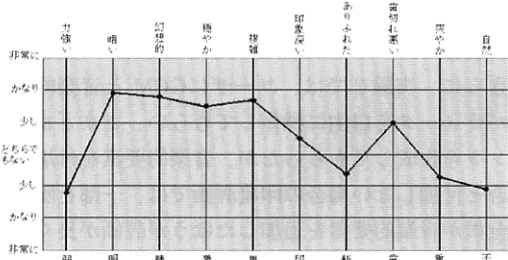
前述の感性評価結果からさらに因子分析を行なった。ここでは10対評定尺度を尺度間の相関行列にもとづいて整理し、少数の共通因子でまとめ、より次元数の少ない簡潔な意味空間へと対応づける。因子の決定には相関行列の固有値が1以上のものを選択した。

表5 因子負荷量(実験1)

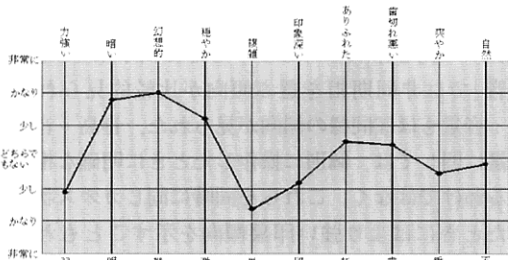
評定尺度	第1因子	第2因子	第3因子
強々しい-力強い	0.773	-0.006	-0.415
明るしい-暗しい	-0.696	-0.155	0.485
機嫌のよい-機嫌の悪い	0.672	-0.396	0.03
激しい-穏やか	-0.807	0.096	0.152
単純-複雑	0.116	-0.728	-0.419
印象が薄い-印象深い	0.175	-0.732	-0.41
斬新-ありふれた	-0.196	0.228	0.711
歯切れ良い-歯切れ悪い	0.392	-0.743	-0.199
重苦しい-軽やか	-0.595	0.153	0.626
不自然-自然	0.19	0.744	-0.215



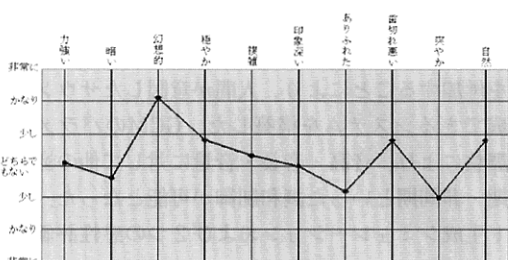
a) 同期状態



b) 非同期状態



c) 秩序状態



d) 部分秩序状態

図12 感性評価結果(実験1)

また、選択した因子をより解釈しやすくするため、選択した因子の意味空間において因子軸を回転させる。このとき因子軸の回転は、理解の容易さと知名度とを考慮し、直行回転のうちのバリマックス回転を用い

た、小数第4位で四捨五入した回転後の因子負荷量を表5に示す。因子分析によって10対の評定尺度は3つの因子に収束した。因子負荷量の絶対値が大きいものほど尺度と因子の関係が強いことを示している。

ここでは因子負荷量の絶対値が0.6以上の尺度で因子の性質を考える。第1因子は「弱々しいー力強い」、「明るいー暗い」、「機械的ー幻想的」、「激しいー穏やか」などの尺度の因子負荷量が大きい。この因子は生成される音の“穏やかさ”などを示す因子であると考えられる。第2因子は「単調ー複雑」、「印象が薄いー印象深い」、「歯切れ良いー歯切れ悪い」、「不自然ー自然」などの尺度の因子負荷量が大きく、“印象”などを示す因子であると考えられる。第3因子は「斬新ーありふれた」、「重苦しいー爽やか」などの尺度の因子負荷量が大きい。この結果から、ユーザの感性が大きく分類してほぼ3つの因子で支配されていることと、同期状態と秩序状態および非同期状態と部分秩序状態がこれらの因子に対して、それぞれ似たような傾向を示しているということがわかった。

表6 被験者のICASパラメータ設定(実験2)

a) 「楽しい音」

種別名 No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
GCM	音高	a	1.47	1.87	1.96	1.43	1.84	1.48	1.63	1.50	1.84	1.94
		e	0.26	0.23	0.03	0.26	0.32	0.32	0.17	0.35	0.34	0.38
	音長	a	1.51	1.69	1.96	1.98	1.96	1.44	1.61	1.65	1.96	1.95
音楽的要素	音高	e	0.19	0.40	0.03	0.17	0.04	0.34	0.19	0.24	0.09	0.36
	音長	a	1.32	1.40	1.97	1.60	1.93	1.48	1.52	1.92	1.85	1.92
		e	0.33	0.00	0.02	0.34	0.07	0.34	0.09	0.35	0.33	0.38
音楽的要素	調		ハ長調	ヘ長調	ニ長調	ト長調	ハ短調	ヘ短調	ニ短調	ト短調	ホ長調	ヘ長調
	反復音値 (%)		76	81	34	15	40	0	2	0	0	53
	アタック(秒速)		1.00	1.25	2.00	1.30	1.17	1.82	0.84	1.70	1.50	1.59
	遅延 (msec)		200	200	400	500	200	0	100	700	300	500
	1	#10	#11	#1	#7	#102	#55	#41	#68	#11	#11	
	音色 (MIDI)	2	#20	#28	#55	#19	#18	#24	#41	#62	#8	#9
	3	#43	#28	#61	#18	#4	#2	#34	#47	#19	#21	
	4	#83	#33	#65	#33	#55	#45	#41	#59	#19	#59	
	印象評価 (10段階)		4	3	1	6	4	3	2	2	6	
	音楽的要素平均		8	6	5	7	7	8	3	4	8	8

b) 「悲しい音」

種別名 No.		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
GCM	音高	a	1.78	1.48	1.97	1.45	1.87	1.44	2.00	1.90	1.55	1.40
		e	0.10	0.35	0.36	0.24	0.10	0.00	0.03	0.03	0.05	0.00
	音長	a	1.91	1.48	1.46	1.97	1.54	1.95	2.00	1.80	1.96	1.94
音楽的要素	音高	e	0.16	0.07	0.36	0.35	0.02	0.01	0.01	0.17	0.35	0.33
	音長	a	1.79	1.71	1.46	1.93	1.73	1.62	2.00	1.88	1.86	1.52
		e	0.11	0.22	0.37	0.16	0.18	0.00	0.02	0.24	0.10	0.05
音楽的要素	調		ハ長調	ヘ長調	ニ長調	ト長調	ハ短調	ヘ短調	ニ短調	ト短調	ホ長調	ヘ長調
	反復音値 (%)		0	27	40	0	0	0	80	72	30	36
	アタック(秒速)		0.08	0.50	0.50	0.50	0.74	0.50	0.50	0.50	1.30	0.40
	遅延 (msec)		0	100	600	100	400	0	200	700	300	100
	1	#26	#65	#1	#14	#24	#4	#30	#51	#35	#35	
	音色 (MIDI)	2	#27	#65	#32	#10	#81	#28	#3	#81	#33	#2
	3	#30	#65	#20	#3	#19	#35	#20	#84	#26	#33	
	4	#31	#65	#10	#14	#92	#18	#15	#109	#20	#24	
	印象評価 (10段階)		6	7	3	5	5	6	3	5	5	7
	音楽的要素平均		7	9	7	6	8	7	6	6	8	9

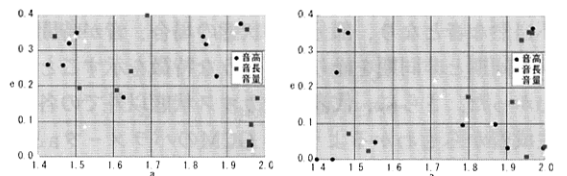


図13 被験者のパラメータ設定傾向(実験2)

5.2 音楽的要素の導入に対する感性評価 (実験 2)

前節の実験 1 では、大規模カオスの代表的な 4 状態における生成サウンドについての感性評価を行った。しかしながら、ICAS ではこれらの典型的な状態以外にもカオスパラメータを変化させて異なる種類のサウンドを生成することもでき、音楽的要素を付加すればさらに多様な印象をもつサウンドを生成することも可能である。そこで、さらなる追加実験(実験 2)として、20 代の 10 名の被験者にそれぞれ「楽しい音」と「悲しい音」という 2 種類の異なる印象をもつサウンドを自由に生成してもらった実験を行ってみた。

この実験では、被験者に GCM のパラメータと音楽的要素の両方を自由に操作することにより、2 つのサウンドをそれぞれ作成してもらった。この実験 2 において、被験者が設定した GCM および音楽的要素のパラメータ値を表 6 に、GCM のカオスパラメータの値を相図と同様のグラフ(横軸 a, 縦軸 e)にプロットしたものを図 13 に示す。ここで表 6 に記載された音色は、GM 規格対応の MIDI 音源の音色番号を示す。これにより GCM の各パラメータを、ユーザがどのように設定しているかといった傾向のようなものがある程度把握することができる。

さらに、音楽的要素の有無による印象に与える効果をみるため、音楽的要素を入れた場合と入れない場合に対して、アンケート形式でサウンドの印象評価を 10 段階(1[悪い]~10[良い])で実施した。この結果を表 6 の最下欄に示す。この結果から、一部を除いてほぼ全員が 2 つの生成サウンドのいずれも音楽的要素を付加したほうが良い印象が得られていることもわかった。これにより、音楽的要素の導入がサウンド生成において印象を向上させる方向に働く効果をもつことが確認された。

5.3 考察

まず代表的なカオス状態におけるサウンド生成シミュレーションにおいては、カオス状態が同期もしくは秩序状態の場合、生成される音は 1 つまたは少数にまとまった状態となるため単調に感じられ、非同期状態の場合では、音がほとんど同期していないためやや不自然な音となり、部分秩序状態の場合、音が時間と共に同期と非同期を繰り返すような特徴を示すことがわかった。さらに、代表的なカオス状態以外での各種生成音からもわかるように、GCM のパラメータ a と e を音高・音長・音量のそれぞれに対して独立に操作した場合、比較的音楽の楽曲に近いようなサウンドや代表的なカオス状態と全く異なるサウンドも生成され、GCM の 2 つのパラメータだけでも十分に多様性をも

つサウンド生成を行うことができることが確認された。

また、実験 1 の代表的なカオス状態の感性評価においては、因子分析を行なった結果、第 1 因子が「穏やかさ」、第 2 因子が「印象」、第 3 因子が「斬新さ」と、ユーザの感性が大きく分類してほぼ 3 つの因子で支配されていることがわかった。さらに、生成サウンドの楽譜の特徴からも見られるように、同期状態と秩序状態、または非同期状態と部分秩序状態がこれらの因子に対して、同様の傾向を示したことから、代表的なカオス状態により生成されるサウンドが大きく分けて 2 つの特徴グループに分類されることもわかった。

さらに、実験 2 では、ユーザに GCM と音楽的要素のパラメータを自由に操作してもらい、さまざまなサウンドを作成してもらったが、音楽的要素を付加した場合と付加しない場合の印象評価では、一部を除くほぼ全員が音楽的要素を追加したほうが評価が良かった。今回「楽しい音」と「悲しい音」をサンプルとして作成してもらったが、音楽的要素を付加しない状態での生成音が全般的に暗く感じられ、「悲しい音」のほうが評価が高い傾向が見られた。また、音高については、「楽しい音」を作成してもらくと部分秩序相を、「悲しい音」では非同期相を選ぶ傾向が比較的に見られ、音長・音量もほぼ同様の傾向が見られた。音高・音長・音量に関しては、個別に操作したときに明確な相違が出るわけではなく、これらを同時に同じカオス状態にしたときにはより強い印象傾向を示すこともわかった。

6. おわりに

本研究では、大規模カオスの 1 つである GCM のカオスパラメータを操作し、さらにいくつかの音楽的要素を付加することにより、人間が意図したサウンドを生成できるシステムを構築した。GCM のパラメータの調整により、音高・音長・音量に対して他の音との同期・非同期といった調和制御が可能となった。サウンド生成シミュレーションおよび 2 つの感性評価実験により、GCM の 2 つのカオスパラメータのみでさまざまな種類のサウンド生成が可能であること、代表的なカオス状態における生成サウンドの感性評価に対する主要因子、ならびに音楽的要素の有無によりユーザに与える印象の相違、などについて検証することができた。

今後の課題としては、3 変数カオスなどによる音高・音長・音量の 3 要素を同時に関連付けるサウンド生成システムの開発、大規模カオスと音楽的要素の関連付けによる人間の印象に与える効果に関する感性評

価, などがあげられる。将来的には, サウンドとグラフィックスを融合した人間対話型のインタラクティブアミューズメント創造支援システムや多くの音色を用いたオーケストラサウンドの自動生成システムなどを目指して研究を進めていく予定である。尚, 今回 ICAS にて作成したさまざまなサウンドは当研究室のホームページでも公開している[20].

参 考 文 献

- [1] 特集「感性とロボット」, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.7, pp.1-41 (1999)
- [2] 特集「HAI:ヒューマンエージェントインタラクション」, 人工知能学会誌, Vol.17, No.6, pp.657-700 (2002)
- [3] 特集「エンターテインメントコンピューティング」, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.17, No.2, pp.8-119 (2005)
- [4] 井口征士, “音楽演奏における人間らしさの抽出と表情付け”, 日本ファジィ学会誌, Vol.12, No.4, pp.19-28 (2000)
- [5] 牧野真緒, 大島千佳, 他, “子どもの音楽創作意欲を高めるための「音に触って聞く」作曲システムの提案”, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.17, No.2, pp.28-38 (2005)
- [6] 山脇一宏, 椎塚久雄, “カラーイメージスケールを利用した音楽の特徴抽出”, 日本知能情報ファジィ学会誌, Vol.17, No.5, pp.101-107 (2005)
- [7] 尾上文男著, “Mandelbrot Set, Chaos, Fractal”, <http://members.jcom.home.ne.jp/onoue/>
- [8] 堀内征治, ゆらぎの不思議, 信濃毎日新聞社 (1997)
- [9] 畝見達夫, ダニエルビシグ, “群れを指揮する-群れ行動と鑑賞者の視覚的相互作用による音楽の試み-”, 第11回創発システム・シンポジウム, P07 (2005)
- [10] 平野砂峰旅, “大域結合カオスのコンピューターミュージックへの応用”, 音楽情報科学研究会, MUS-14-7 (1996)
- [11] 長嶋洋一, “カオス理論と Computer Music”, 京都芸術短期大学紀要 [瓜生], Vol.16, pp.28-44 (1993)
- [12] 長嶋洋一, “Chaotic Interaction Model for Real-Time

Composition”, 第7回人工知能学会全国大会, pp.207-211 (1993)

- [13] 柴田瑞樹, 前田陽一郎, “大規模カオスを用いたカオティックサウンドの生成手法”, 第11回インテリジェントシステムシンポジウム, pp.1-4 (2001)
- [14] 山本昌幸, 前田陽一郎, “大規模カオスを用いたインタラクティブサウンド生成システム”, 第20回ファジィシステムシンポジウム, pp.641-644 (2004)
- [15] M.Yamamoto and Y.Maeda, “Interactive Kansei System for Sound Generation Based on Network of Chaotic Elements”, Proc. of the 4th International Symposium on Human and Artificial Intelligence Systems (HART 2004), pp.315-320 (2004)
- [16] 山本昌幸, 前田陽一郎, “大規模カオスを用いたインタラクティブ感性サウンド生成システムへの音楽的要素の導入”, 第21回ファジィシステムシンポジウム, pp.280-285 (2005)
- [17] 宮下滋, 山本昌幸, 前田陽一郎, “音楽的要素を導入した大規模カオスによるインタラクティブサウンド生成システム”, 日本知能情報ファジィ学会第17回ファジィ・コンピューティング研究会ワークショップ, 05-18 (2005)
- [18] 金子邦彦, “多様性を生み出すカオス”, 日経サイエンス, pp.34-41 (1994)
- [19] K.Kaneko, “Partition complexity in a network of chaotic elements”, Journal of Physics A, pp2107-2119 (1991)
- [20] ICAS Web Page, <http://www.ir.his.fukui-u.ac.jp/icas/>

(2006年1月4日 受付)

(2006年4月18日 採録)

[問い合わせ先]

〒910-8507 福井県福井市文京3-9-1

福井大学大学院 工学研究科 知能システム工学専攻

前田 陽一郎

TEL: 0776-27-8050(直通)

FAX: 0776-27-8050

E-mail: maeda@ir.his.fukui-u.ac.jp

著者紹介



まえだ よういちろう
前田 陽一郎 [正会員]

1981年大阪大学基礎工学部機械工学科卒業。1983年同大学院基礎工学研究科修士課程修了。同年、三菱電機(株)入社。中央研究所、応用機器研究所を経て、1989年から1992年まで通産省技術研究組合国際ファジィ工学研究所(LIFE)へ出向。1992年から三菱電機(株)産業システム研究所へ帰任。1995年より大阪電気通信大学工学部経営工学科を経て、総合情報学部情報工学科助教授。博士(工学)。1999年から2000年までカナダ・ブリティッシュコロンビア大学(UBC)客員研究員。2002年福井大学工学部知能システム工学科助教授。現在に至る。主として、ソフトコンピューティング手法による自律ロボットの知能化研究に従事。計測自動制御学会、日本ロボット学会、人工知能学会、日本感性工学会などの会員。



にわ としあき
丹羽 俊明 [非会員]

2005年福井大学工学部知能システム工学科卒業。同年、日本通信特機(株)へ入社。現在に至る。



やまもと まさゆき
山本 昌幸 [学生会員]

2004年福井大学工学部知能システム工学科卒業。2006年同大学大学院工学研究科知能システム工学専攻博士前期課程修了。同年、トヨタテクニカルディベロップメント(株)へ入社。現在に至る。

Interactive Chaotic Sound Generation System by Using Globally Coupled Map and Incorporation of Musical Factors

by

Yoichiro MAEDA, Toshiaki NIWA and Masayuki YAMAMOTO

Abstract :

The research for chaotic sounds is performed in the field of Artificial Life as one of the interactive art generation system. It becomes possible to create a music, which are generated by the computer, with the diversity and complexity exceeding the anticipation of human. The research purpose of the chaotic sounds is finding the effective method of making complex and variable sounds by using the chaotic theory. However, playing the corresponding sounds of a simple value generated by the chaos is expected to create the discord like a noise for human. Therefore, in this research, we propose a method of generating sounds by using the network of chaotic elements which both a chaotic asynchronous and a whole synchronism are controllable, and a method of incorporating some musical factors to be felt more natural music in the generated sounds. In this system, the musical note, duration and volume are decided by Global Coupled Map (GCM), and the additional music factors such as a track, a tonality, a rest, a tempo, an echo, and a timbre are applied. The created sounds are expected an effect of the healing music like a natural sound and an environmental music. We constructed the Interactive Chaotic Amusement System (ICAS) by applying this method and also report results of the Kansei evaluation carried out to confirm the effectiveness of a comfortable feeling for the sound made by this system.

Keywords : Network of Chaotic Elements, Interactive Art, Chaotic Sound, Artificial Life

Contact Address : Yoichiro MAEDA

*Dept. of Human and Artificial Intelligent Systems, Graduate School of Engineering, Univ. of Fukui
3-9-1, Bunkyo, Fukui-shi, Fukui 910-8507 JAPAN*

TEL : 0776-27-8050

FAX : 0776-27-8050

E-mail : maeda@ir.his.fukui-u.ac.jp