

A3-4 インタラクティブサウンド生成システムへの 大規模カオスの適用に関する研究

福井大学大学院 工学研究科 知能システム工学専攻
山本 昌幸 (指導教官: 前田 陽一郎 助教授)

1 緒言

近年、人間の生活に娯楽性や癒し効果を与えることを目的とし、さまざまなペットロボットが開発されている。これに伴い、人間とエージェント(ロボットやシステムなど)がより円滑にコミュニケーションを行うためのヒューマンエージェントインタラクション(HAI)が重要な研究テーマとなりつつある[1,2]。これは人間の知的行為としての科学や技術の発展の過程とも密接に関係しながら生まれてきた、人間要素を取り込む計算知能とも言える新しい研究分野の一つでもある。

中でも人工生命において盛んに研究されているインタラクティブアートは、感性を刺激し、作者である人間の予想を越える多様性と複雑さをもつグラフィックスやサウンドを、コンピュータを利用して実現することが目的である。特に音楽は結びつきが強く、新しい技術の発展とともに新しい音楽の形態が誕生している。これらは従来の音楽のようにあらかじめ演奏される楽曲が完成されたものではなく、人工生命の手法や人間と対話することで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生成する。これによって作品が生成されるたびに違うサウンドが形成されたり、外部の影響によって結果が変わってくるといったインタラクティブ(対話的)な感性表現が可能となる[3,4,5]。

本研究室では、人工生命と芸術を結びつけるものとしてカオス理論に着目している。カオティックサウンドの研究目的は、人工生命の方法論を用いることにより、複雑かつ多様なサウンドを作り出す有効な手法を見出すことである。本研究室ではこれまで、カオス性や同期性の制御が可能な大規模カオスを用い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・聴覚的效果を人間に与えることができる ICAS (Interactive Chaotic Amusement System) と呼ばれるインタラクティブ感性システムを開発するための研究を進めてきた[6]。しかしながら、単純にカオスで得た数値を音高等に割り当てて演奏する場合、ただ音が鳴るだけの不協和音となることが多かった。

そこで本研究では、より人間の感性を刺激するような音に感じられるよう伝統的な音楽理論の要素技術の一部を導入する手法を提案する。これは大域結合写像(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を追加するものである。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期待できる。さらに音楽理論により適合させるため、GCMに正負の等しい特性を有する変形ロジスティック写像を用いて、その有効性を検証した。これら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。

2 大規模カオスについて

大規模カオスは金子[7]によって提唱されたもので、これは差分方程式のようにカオスの多振る舞いを示す要素(カオス要素)をネットワークのように多数結合させたものであり、大規模結合写像とも呼ばれる。これを用いることによって、その写像全体の挙動をより複雑かつ多種多様にする事が可能である。

大規模カオスには、カオス要素の結合構造によりいくつかの類型が存在し、それぞれ結合写像格子(CML)、大域結合写像(GCM)と呼ばれる。CMLは、カオス要素を多数並べ、自己と隣接する要素と相互作用を行わせることによって状態を遷移させていくモデルである。GCMは、基本的な考えはCML

と同じであるが、個々のカオス要素の影響が大域的であるという点でCMLと異なる。

大域結合写像(Globally Coupled Map: 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って状態を遷移させていくモデルである。本研究ではGCMを構成するカオス要素にはロジスティック写像を用いる。

しかしながら、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。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。

$$f(x_i(t)) = 1 - ax_i^2(t) \quad (1)$$

$$x_i(t+1) = [1 - e]f(x_i(t)) + \frac{e}{N} \sum_{j=1}^N f(x_j(t)) + \sigma \eta_n^i \quad (2)$$

ここで $x_i(t)$ が状態、 $f(x_i(t))$ がロジスティック写像、範囲 $[-\sigma, \sigma]$ からとった一様な乱数 η_n^i が雑音を示す。GCMの重要なパラメータは個々の要素の非線形性を強める a と、全要素間の結合力を強める e の2つである。 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)となり、 e の値が大きければ全ての要素は同じような軌道をとる(同期相)。

3 ロジスティック写像による GCM を用いた ICAS

本研究では、音を発現するカオスエレメントを大規模カオスによって複数結合し、大規模カオスのパラメータを調整することによって全体として様々な音を発現させ、それを制御可能にするとともに、視覚的效果により音の変化を表現するインタラクティブ感性システム(ICAS)を提案する。

過去の研究での ICAS(ICAS1 と呼ぶ)は、音高制御に GCM、音長制御に CML を用いていた。しかし、音長制御に CML を用いると、各メロディが同じロジスティック写像によって支配されているため、音長に関して同時に鳴るサウンドの発音タイミングがすべて同じであり、ひどく単調に感じられることが多かった。

そこで、この問題を回避し、音高・音長・音量制御に関して、オーケストラサウンドの指揮者のような機能を持たせるため全体のカオス要素を同時に制御可能な GCM を用いた。さらに本研究では生成された音を人間にとってより聞き慣れた音、心地良い音にするため、音楽的要素を取り入れることも試みた(ICAS2 と呼ぶ)。

図1に今回提案した ICAS2 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、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_{li} , 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 によって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。

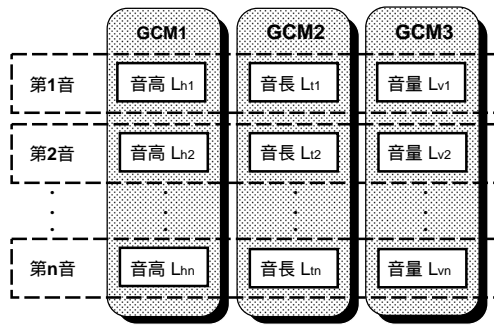


図 1: ICAS2 の概念図

3.1 GCM による音の要素制御

本研究では、それぞれの音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調和を行なうことにより、オーケストラのような効果を得ることを目的とし、全要素の同期性の制御が可能な GCM を用いた。また、今回は同時に 12 個の音を演奏することを想定したため、GCM のカオス要素の総数は $n = 12$ となる。それぞれ音の要素の決定方法は式 (2) の出力値 $x_i(t+1)$ の取り得る範囲を、式 (1) のロジスティック写像の初期値によって $-1.0 < x_i(t) < 1.0$ の範囲で以下のように分割した。

- 音高
この範囲を 0.1 刻みで分割し、その 20 の範囲にミドル 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を順に割り当てる。選択される調ごとに音は異なり、調性のない通常の音階の場合、 $C-$ から $G+$ までの 20 の音が順に割り当てられる。
- 音長
この範囲を 0.2 刻みで分割し、その範囲に 2000 : 1000 : 500 : 250 : 62.5 : 62.5 : 250 : 500 : 1000 : 2000(msec) の音長を順に割り当てる。これは 500msec(四分音符) を基準と考え、32 分音符から全音符の長さに対応させている。
- 音量
この範囲を 0.4 刻みで分割し、その範囲に 0/127 : 70/127 : 85/127 : 100/127 : 120/127(127: max volume) の音量の値を順に割り当てる。

それぞれのカオス要素が GCM によってどのように制御されるかという概念を音高、音長、音量ごとに表したものを図 2 に示す。

3.2 ICAS に導入した音楽的要素

本研究では大規模カオス (GCM) によるカオティックサウンド生成を行なうシステムを構築した後、さらに出力サウンドが人間にとって心地良いものとなるように音楽理論の要素技術の一部を取り込むことを試みた。以下に、今回の研究で導入した音楽的要素について説明する。

- 小節
本研究では 1 小節の長さは 4 拍子 (=2000msec) と設定し、音長の合計が 2000 以上になると強制的に音を区切るように設定した。
- 調性
本研究では八長調から口短調までの 14 調に、12 音平均律、無音階、沖縄音階、ジブシー音階、ホールノート音階の 5 パターンを選択できるようにした。
- 休符
音量の値を 0 とした音符を導入した。
- テンポ
拍の長さ、即ち拍の最小単位の速さを規定した。本研究では 1 分間に 4 分音符を 120 個打つ速度 (4 分音符 = 120) を標準に設定し、テンポを変更可能にした。

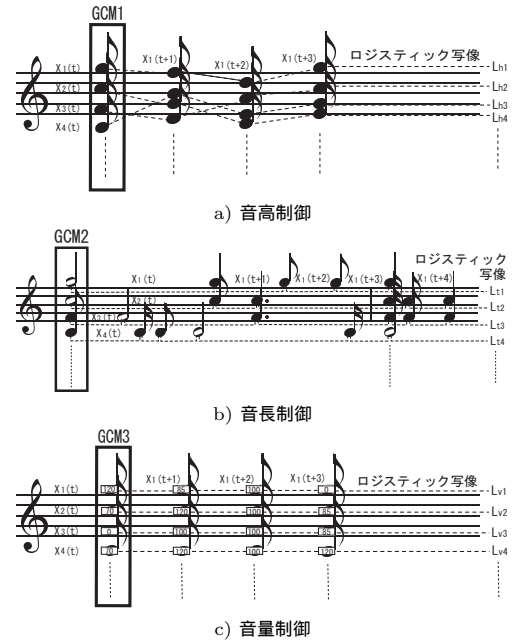


図 2: GCM による音の要素制御イメージ

- エコー
生成した音の音量を減衰させ、少し遅れて出力させるという操作をある一定時間再帰的に繰り返す方法をとった。エコーの強さはある程度調整できるようにした。
- 音色
本研究では 128 種類の音色を選択できるように設定した。

4 変形ロジスティック写像による GCM を用いた ICAS

前述の ICAS2 では、GCM の出力値を音高、音長、音量へ直接マッピングをすることによりサウンド生成を行なった。しかしながら、人間は音や音楽を認識する場合、ある瞬間に鳴った音とその直前に鳴らされた音と比べてどのくらい高いか、長いか、また大きいかといった相対的評価でメロディを把握していることが知られている。よって本手法では GCM によって決定される音高・音長・音量要素の割り当て方法を前音との差分を基に行う方法を試みる。ただこの方法の場合、(1) 式の通常のロジスティック写像では周期倍分岐に対して上下非対称の特性を示すため、ロジスティック写像による GCM の出力値の差分の累積を取っていくといつかは発散してしまうという問題が生じる。そこで、ここでは正負の等しい特性を有する変形ロジスティック写像を新たに提案し、これを用いて GCM で結合した ICAS シミュレータ (ICAS3 と呼ぶ) を構築する。

4.1 変形ロジスティック写像について

GCM によって決定される音高・音長・音量要素の割り当て方法を前音との差分方式に変更するため対称性をもつ周期倍分岐を有する変形ロジスティック写像を提案する。これは一般的なロジスティック写像を变形することによって得られたもので、基本的なパラメータ特性は等しいが、対称的なアトラクタ分布を持つ写像である。また、式 (1) の構造もほぼ残した形になっている。

$$f(x_i(t)) = \begin{cases} 1 - ax_i^2(t) & (-1 < x_i(t) < 0) \\ -(1 - ax_i^2(t)) & (0 < x_i(t) < 1) \end{cases} \quad (3)$$

ここで $x_i(t)$ は i 番目のカオス要素における時刻 t における写像の値、 a は (2.0 $< a < 4.0$) の範囲を取るカオスの挙

動を決定するパラメータである。一般的なロジスティック写像と同様に、パラメータ a の値が 4.0 に近づくと、この写像の軌道は徐々にカオス的になっていく。図 3 にこの変形ロジスティック写像の周期倍分岐図 (横軸にパラメータ a 、縦軸に $f(x_i(t+1)) - f(x_i(t))$ とした場合) を示す。

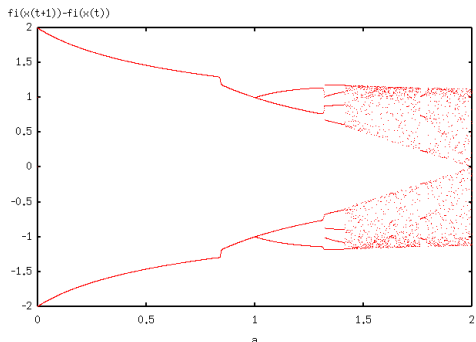


図 3: 変形ロジスティック写像の周期倍分岐図

図 3 から、パラメータ a の値が約 1.4 から 2.0 の間でカオス状態になっているのがわかる。また、縦軸 $f(x_i(t+1)) - f(x_i(t))$ に対してほぼ上下対称のアトラクタになっていることも確認できる。

4.2 変形ロジスティック写像を用いた GCM

次に、 $f(x_i(t+1)) - f(x_i(t))$ を (2) 式の $f(x_i(t))$ と考え、GCM の式で大域的に結合させる。この式から得られた出力値 $x_i(t+1) - x_i(t)$ を、各エレメントの発現する音高、音長、音量に割り当てサウンドを生成する。音高、音長、音量のそれぞれの割り当て方法は前章と同様のためここでは割愛する。これらの式のパラメータ a と e を調整することによって、個々の前音との差要素のカオス性または全体の同期性を任意に制御することができる。

5 ICAS シミュレーション

今回提案した手法の有効性を検証するために、Cycling'74 社が開発した音楽プログラムソフト "Max/MSP 4.5" を用いて ICAS2、ICAS3 の基本システムとなるカオティックサウンドシステムを作成し、パラメータ a 、 e の値を変えてシミュレーションを行なった。

図 4 に ICAS のシステム外観を示す。作成したシミュレータでは起動時にテンポ: 4 分音符 = 120、反響音量度: 80%、ディレイタイム: 200msec とし、音色は古典的なクラシックの 12 編成の楽器を基本とした。テンポ、反響音量度、ディレイタイムの設定は、「その他の設定」ボタンの on/off により、extra ウィンドウを開き数値を変更することができる。音色はチャンネル番号の隣のナンバーボックスを操作することにより、自由に変更することができる。

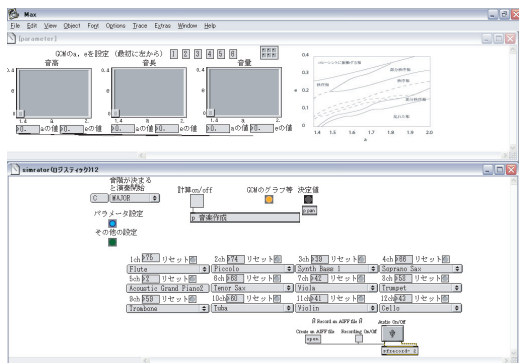


図 4: ICAS シミュレータの外観

図 5 はシミュレーション結果の一例 (ICAS2) を示しており、各楽譜においてサウンドの推移を確認することができる。シミュレーションの結果、音高制御、音長制御、音量制御に GCM を使うことによってそれぞれのパラメータ a 、 e を変化させることでシステムの音高推移及び音長推移が同期的な挙動や非同期的な挙動、同期状態と非同期的な状態が混在するような挙動など、様々な挙動を示すことがわかった。

6 感性評価実験

本研究で開発した ICAS2、ICAS3 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、生成されたサウンドに対してアンケート方式によるイメージ調査を行い、カラーイメージスケール [8] に基づく感性評価を試みた。ここでは、工学院大学の山脇 [9] らの研究を参考にした。人間は音楽においても色彩と同様にイメージを形容詞に置き換えて認識している。さらに、共感覚保持者、特に色聴保持者と呼ばれる音と色彩に関する共感覚をもつ人々からの様々な報告から、音と色彩の感性的対応が想起されることが知られている。これにより、色彩分野で利用されているイメージを表現する形容詞 (感性語) と色を、座標軸上にマッピングしたカラーイメージスケールを、音楽の感性的な特徴の抽出にも応用できるというものである。この方法により山脇らは音楽の微妙な特徴を抽出することができたと報告している。そこで、ここでは本研究における ICAS2、ICAS3 シミュレータで生成したいくつかのサウンドをカラーイメージスケールによるアンケート評価を行うことによって感性的特徴を抽出し、本システムの出力結果が人間の感覚とどの程度一致しているかを調べる。

6.1 カラーイメージスケールを利用した感性評価

ICAS2、ICAS3 シミュレータを用いて生成された同期、非同期的、秩序、部分秩序状態の計 8 サウンドを 20 代 20 人の被験者 (本学修士 1 年の大学院生) に聴かせ、そのサウンドのイメージをアンケートにより評価してもらった。まず、使用する感性語については、被験者が選択しやすいように、カラーイメージスケールで使われている 180 の感性語の中からイメージスケールにおける均等分布を崩さないように、できるだけ音楽の感性語として使えそうな 50 の形容詞 (表 1 参照) を選択した。

被験者には 1 つのサウンドに対して以上の 50 の感性語の中からイメージに近いと思うものから順に 4 つ選択してもらった。次に、被験者一人あたりの持ち点を 10 点として、イメージに近いと強く感じるものから 4 点、3 点、2 点、1 点として加算した。8 曲のサウンドについて、各感性語ごとに選択された得点を円の大きさとしてイメージスケールプロットしたものの一例を図 6 に示す。

表 1: カラーイメージスケールより選択した 50 の感性語

快適な	シックな	真面目な	華やかな	飾り気のない
軽快な	力強い	開放的な	やさらかな	なじみやすい
新鮮な	自然な	にぎやかな	ワイルドな	ユーモラスな
地味な	重厚な	シャープな	スカットした	エネルギー的な
静かな	豪華な	活動的な	のんびりした	ロマンチックな
古風な	素朴な	魅惑的な	さわやかな	ダイナミックな
厳粛な	優雅な	清らかな	活気のある	親しみやすい
可憐な	情熱的な	気品のある	どっしりした	おおらかな
陽気な	キュートな	メルヘンの	クラシックな	情緒的な
モダンな	人工的な	ダンディな	風格のある	のどかな

6.2 考察

感性評価結果において、サウンド全体を通してみると、ICAS2 シミュレータの方が「人工的な」「軽快な」といった印象が強く、ICAS3 シミュレータの方が「優雅な」という印象を強く受けていることがわかった。また、ICAS2 シミュレータでは秩序状態、部分秩序状態、非同期的な状態でのサウンドに対するイメージの分布が似ていた。これは、GCM の出力値を音高、音長、音量へ直接マッピングをすることによりサウンド生成を行なった結果、人間にとっては慣れないサウンド識別となり区別できなかったものと考えられる。一方、ICAS3 シミュレータでは ICAS2 シミュレータと比べるとイメージスケールの

分布が各状態ごとに異なった結果となっている。これは、GCMによって決定される音高・音長・音量要素の割り当てを前音との差分を基に行う方法をとったため、前者よりもサウンドが聞き分けやすくなったためであると考えられる。

問題点としては、全体的にイメージスケールの「Soft」「Cool」軸方向へのイメージが固まるようなサウンドが生成されなかった。これは、システムで使われているMIDI音源が性能上全体的に無機質で重たい音色であったためであると考えられる。よって今後の課題としては音色や音響効果の解析、さらに細かい感性評価と生成されるサウンドの解析を行い、システムがより多種多様なサウンドを生成できるように改良が必要であると考えられる。さらに、今回行った感性評価では、負のイメージに対する感性語がなかったため、被験者が感性語を選ぶ際に該当するものが見つからないといった問題があったため、「力強い-弱々しい」といった反対語を使ったSD法による感性評価などを今後は行っていく必要があると考える。

7 結言

本研究では、人間がコントロールできる3つのGCMを用いて音の三大要素(音高、音長、音量)を操作できるようなシステムインタラクティブ感性システム(ICAS2)を提案した。また、人間の感性を刺激するような音に感じられるような伝統的な音楽理論の要素技術の一部(小節、調性、休符、テンポ、エコー、音色)もフィルタとしてシステムに導入した。さらに音楽理論により適合させるため、正負の等しい特性を有する変形ロジスティック写像を用いたシステム(ICAS3)を構築した。大規模カオスのパラメータの調整により音高・音長・音量に関して自在に調和させることが可能となり、また、いくつかの音楽的要素の導入により、オペレータである人間がさまざまな様相をもつ音を作成することができた。また、ICAS2、ICAS3によって生成された各サウンドに対して、感性評価を行い、各システムで生成されるサウンドの感性的特徴の抽出を行った。その結果、いずれもさまざまな様相のサウンドが作成できていたが、特にICAS3により印象の異なるサウンドが生成できたことも確認された。

今後の課題としては、より複雑な挙動を示すカオス要素への変更、例えば3変数カオスで音高、音長、音量の3要素を同時に関連付けたサウンド生成システムの構築などが考えられる。さらにアミューズメント効果を向上させるため、オペレータのシステムに対する介入方法を検討し、オペレータがよりシステムとインタラクティブな関係を築くことができるようなシステムを構築することも必要である。また、生成されるサウンドに対して様々な感性評価を行い、生成されるサウンドに対する細かい分析によって、より人間の感性を刺激するようなシステムの改良も行い、最終的にはオペレータが自在にパラメータを操作することでオーケストラを指揮するようなインタラクティブアミューズメント自動作曲支援システムの開発などを目指して行きたい。

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] 畝見 達夫, ダニエル・ピシグ, "群れを指揮する-群れ行動と鑑賞者の視覚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)
- [4] 長嶋 洋一, "マルチメディア作品におけるカオス理論の応用", 京都芸術短期大学紀要 [瓜生], Vol.18, pp.30-40 (1995)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] 金子 邦彦, 複雑系のカオスのシナリオ, 朝倉書店 (2001)
- [8] 日本カラーデザイン研究所, <http://www.ncd-ri.co.jp/>
- [9] 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.615-621 (2005)



(a) 同期状態

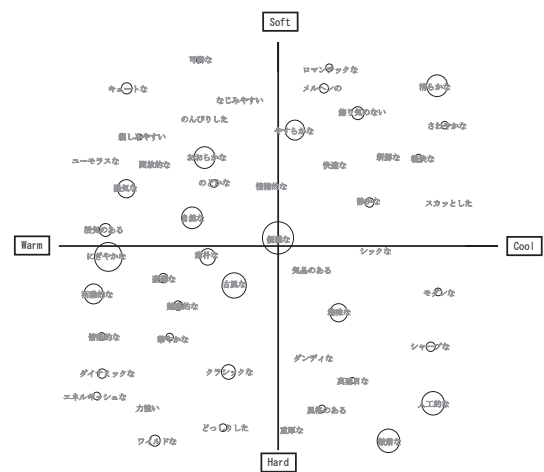
(b) 秩序状態



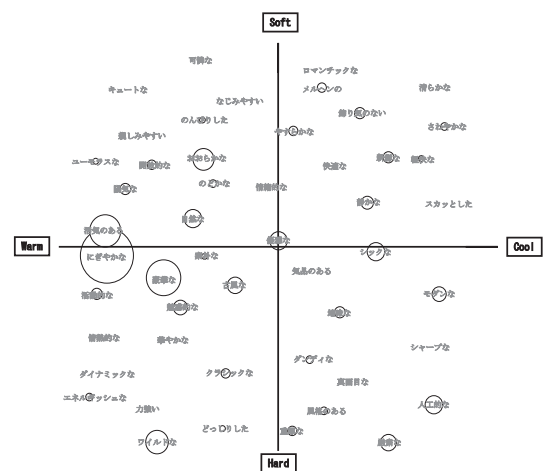
(c) 部分秩序状態

(d) 非同期状態

図5: ICAS2によるサウンド出力例の楽譜



(a) 部分秩序状態



(b) 非同期状態

図6: ICAS3で生成されたサウンドのイメージスケール例