

問題の可聴化表現における音の属性と解きやすさの関係

城 一裕, 山田 和明, 中小路 久美代

東京大学先端科学技術研究センター

概要: 我々は、どのような音の特性が、音を利用した表現形態の理解や操作のし易さに影響を与えるかを調査することを目的として、可聴化表現したハノイの塔の問題を利用した観察実験をおこなってきた。本稿では、新たに得られた知見を報告し、音による表現を利用したインタラクションデザインへのガイドライン構築へ向けての考察をおこなう。

Sound Attributes and the Ease of Problem Solving in Auditory Interaction Design

Kazuhiro JO, Kazuaki YAMADA, Kumiyo NAKAKOJI

RCAST, University of Tokyo

Abstract: We have conducted several experiments using auditory representations of the Tower of Hanoi problem to explore how sound attributes affect the understanding, remembrance, and comparisons of auditory expressions in problem solving. This paper reports some of our recent findings from the experiments, and discusses auditory interaction design guidelines.

1 はじめに

我々は、インタラクションデザインを、「ユーザがどのような思考と行為の過程を経験しながらシステムを利用するのか」という視点から、システムの表現系と操作系とを決めていくこととして捉えている[1]。既存のアプローチでは主に、視覚表現が表現系として利用されてきた。本論で説明をおこなうプロジェクトでは、聴覚表現、すなわち「音」を表現系として利用するインタラクションデザインについて研究をおこなってきた[2][3][4]。本研究における音を利用したインタラクションのデザインとは、ユーザの操作に対するフィードバックとシステムの状況を示す表現系として、どのような音を利用すべきかをデザインすることを指す。

既存の音を利用したインタフェース研究の多くは、音を利用した情報表示という分野で進められてきている[5]。DiGianoらは、音を使ったプログラミング環境を構築している[6]。この環境は、プログラム内の特定のイベン

トと音を対応づけ、音でプログラムの状況をフィードバックすることで、ユーザのデバッグ時の負担を軽減することを目指したものである。Gaverの Auditory Icon[7]は、通常の GUI で用いられるアイコンに音を対応づけ、マウスでアイコンをクリックすると音が鳴るようにしたツールである。Hayward による地震の可聴化システム[8]では、地震計の測定したデータを可聴領域に変換して、地震動の変動を音としてモニターできるようにしている。

また、音を利用した情報技術として、メディアアートの分野での研究が挙げられる[4][9][10]。これらのプロジェクトでは主に、どのようなユーザの行為を通してどのような音の表現を生成するかに着目している。例えば、ユーザのジェスチャを音に変換するものや[11]、複数ユーザの地理的位置を合成して音を生成するもの[12]などである。このようなツールを利用するユーザにとっては、音表現の生成そのものが目的となっている場合が多い。

これらの既存の研究の多くは、データの状態やシステムの状況の理解を助ける手段として、システムからユーザへ、いわば一方通行的に音表現を利用したものか、音表現の生成そのものをゴールとしてユーザの行為を音にマッピングしたものかのどちらかである。それに対して我々が着目する音を利用したインタラクションデザインでは、ユーザの行為を音でフィードバックしつつ、ユーザとシステムとのインタラクションの手段として音を利用することを目指している。すなわち、ユーザの行為と、システムの状況との双方を、一貫性を有した形態で音で表現する必要がある。

このためには、どのような音が人間のどのような認知処理に有効か、というより一層深い理解が必要となる。Mitsopoulos[13]は、音の知覚的な特性である、音の高さ、音の大きさ、音色、定位を使って、GUIのチェックボックスや、メニューなどのウィジェットを音で表現しようとしている。われわれのアプローチは、この Mitsopoulosの研究と同様に、人間が多様な音をどう認知するか、という理解を踏まえて、音を利用したインタラクションのデザインをおこなうというものである。

次章では、音を利用したインタラクションデザインの際に考慮すべき事項として、音の特性を概観し、音で事象を表現する際の区別、同定、順序づけという三つの視点について説明をおこなう。3章では、Zhang らの representational analysis の手法に基づき [14]、ハノイの塔問題を音を利用して表現した課題を利用した、我々のアプローチについて説明をおこなう。4章では最新の実験から得られたデータについて説明をおこなう。5章では得られた知見をもとに、音による表現を利用したインタラクションデザインへのガイドライン構築へ向けての考察をおこなう。

2 音の特性と音を利用した表現系

2.1 音の特性

本節では、時間的、物理的、知覚的、という三つの側面から音の特性を概観する。

音は、時間軸上で一定の長さを持ち、時間軸に沿って変化する。また大抵の音は、始まりと終わりを経験できる程度の長さをもつ。同じ時間軸を伴う表現である動画(ムービーやアニメーションなど)と同様に、音による表現では、その一部だけを利用するということが可能

である。例えば、曲の一部を聴いただけで、その曲がどの曲か、ということがわかる。一般に、音は動画よりも時間軸方向の解像度が高いと言われている。動画では、時間的に静止した状態でその一部分をフレームとして表示することができるのに対し、音は静止した状態では何も表現することはできない。

最も単純な音の一つに正弦波がある。これは、ある場所での音圧の変動が、時間のサイン関数として表される音であり、物理学的・数学的に単純であるだけでなく聴覚系の観点から見ても単純であるため、純音とも呼ばれる。この純音は、工学系、心理系を問わず、音を伴う数多くの実験に使われている。純音は、音圧と、周波数と、位相という物理的な特性によって規定される。音圧とは、ある場所での圧力の音による変化分として表される特性であって、その単位は dB となっている。周波数とは、同一の波形が一秒間に繰り返される回数であって、その単位は Hz となっている。位相とは、一つの周期における位置である。全ての音は周期的に繰り返される限りにおいて、フーリエ変換によって、周波数の異なる純音の集合として表すことができる。この集合を構成する個々の純音のことを成分と呼ぶ。

われわれの耳に入ってくる大気の振動は、物理的な特性そのままではなく、聴覚系での処理をへて、音として知覚される。この音の知覚的な特性としては、音の大きさ、音の高さ、音色、方向定位、音質、を考慮することができる。音の大きさ(loudness)は、主に音圧に関係するが、その音の周波数や音の成分にも関係する[15]。大きさの違いだけではなく、大小の順序をもつ順序尺度[16]で表現される。音圧の差がある閾値以上であれば(0.5-2dB)、複数の音の大きさの違いを順序づけることができる。しかしながら、音の大きさの絶対値を同定することは難しいとされている。

様々な周波数の純音について、音の大きさが等しいと知覚された音圧は、等感曲線で表されるが[15]、等感曲線の形状は全体の音圧の大きさに影響される。例えば、全体の音圧が小さい場合は、低音域の音がより大きく聴こえるようになる。また、等感曲線の形状は年齢によって大きく異なるといわれている。特に周波数の高い音に対しては、年齢を重ねるに連れて、より大きな音圧が必要となる。他の音がない状態で、どの位小さな音まで聴こえるかという限界を、絶対閾(absolute threshold)、という。実際に音が聞き取れるか否かは、他

にどのような音が聴こえているか否かに、強く依存する。

音の高さ(pitch)は、主に周波数に関係し、「音を音階上に順序づけることができるような聴覚の属性」[17]と定義されている。一般的にある音の音の高さとは、その音と主観的な高さが等しい純音の周波数[18]のことをいい、音の大きさと同様に、高さの違いだけではなく、高いから低いまでの順序をもつ順序尺度[16]上で表現される。音の周波数の差がある閾値以上(周波数によって異なる)であれば、複数の音の高さが違っているということとを区別することができる。しかし、どちらの音が高くどちらの音が低いかの順序付けは人に依存する部分が多い[18]。また、音の高さの絶対値の同定も人に依存する部分が多く、この音の高さに対する絶対的な基準を絶対音感と言う。

音色(tone)とは、同じ大きさと同じ高さをもった2つの音が提示された場合に、その2音が異なると判断するときの、その違いに対応する音の性質[17]である。例えば、ギターとピアノで同じ音符を演奏したとき、これらの音を区別できるのは、音色が違うからだ、物理的な特性と対応づけた定義は難しい。音の高さや大きさが低い音から高い音、小さい音から大きい音へと一つの尺度上に並べることができるのに対して、音色は多次元的であって、様々な音の音色を単一の尺度の上で比較(区別)したり順序づけたりすることはできない[18]。

方向定位とは、音源の方向と、音源までの距離を示す。主に、左右の耳に到達する音の、時間差と、音圧の違いに関係する。音の周波数の違いにより、音の回り込み(低い周波数の音は波長が長いのでよく回る)、が異なる。また、方向の違いによって、鋭敏さが異なる[18]。左右2つのチャンネルをもつスピーカやヘッドフォンで提示する場合は、主に左右から発する音に時間差を設けること、もしくは音圧の差を設けることで定位を表現することができる。

音質は主観的な量であり、主に歪み率やサンプリングレート、圧縮率に関係する。一般的には、歪み率が低く、サンプリングレートが高い場合に、高音質だと判断されやすい。

また、音を知覚する場合、音の大きさ、高さ、方向定位、音色、といった個々の特性を聴く、というよりはそれらをまとめて一つの音として聴くことが多い、と考えられる。このひとまとまりになった音の流れを音脈とよぶ。音

脈は、単一の音源から発せられた、継続的および/あるいは同時的な音の要素全体[18]であって、様々な音が混じりあった中から適切な要素のまとまりとして聴覚系によって取り出される[18]。具体的な例としては、オーケストラの中から聞き分けられた特定の楽器の音、何十人もの人の声の中から聞き分けられた特定の人の声、が挙げられる。

最後に、音による表現では、視覚表現と異なって、事前の注意(アテンション)を必要としないことが挙げられる。この例としては、目覚まし時計や、電話の呼び出し音等が挙げられる。

2.2 音を利用した表現系

我々は、ユーザが自らの行為のフォードバックやシステムの状況を音で理解するためには、システム上に表示された複数の事象の違いを音で区別、同定、順序付けできる必要があると考えている。そのためには、以下のような音の特性と人間の知覚との関係を明らかにする必要がある。

- ・ 複数の音がある場合、それらを「区別」しやすい
- ・ ある音を聴いた場合、その音を「同定」しやすい
- ・ それらの間にある順序関係が理解しやすい

音による表現を利用したインタラクションデザインにおいては、これらの音の特性と、事象とのマッピングを適切におこなう必要があると考えられる。

そこで本研究では、事象と音による表現とのマッピングを考えることを目的として、まず複数の物理的なオブジェクトと音とのマッピングを考察することとした。次章では、これを目的として実施したハノイの塔を利用した実験について説明をおこなう。

3 ハノイの塔問題を利用した Representational Analysis

Zhang らは、ハノイの塔の同型問題を利用して、どのような表現形態がユーザの問題解決時の認知的負荷に影響するかを分析している [14]。

一般的なハノイの塔問題では、3本の棒(A,B,C)の内の1本に積み重なっている大中小の3つの輪を全て、以下のルールに従って、別の棒に移動する。

- (1) 一度に動かすことができる輪は一つ。
- (2) 小さい輪の上にはそれより大きな輪を積み重ねることはできない。

(3) 一つの棒からは、その棒に重なっている一番小さな輪しか移せない。

一般的なハノイの塔問題では、ルール(3)は、輪が上下に重なって棒にささっているという物理的な制約により、上の輪からしか取れないため自明となっている。しかし、問題の表現方法を変えて、輪を重ねずに平面におくと、このルールは自明ではなくなる。Zhang らの Representational Analysis の研究では、輪の大きさの代わりに、モノの大きさ、モノの色、およびモノのかたちを使った、ハノイの塔の同型問題を作成し、表現を変えるとタスクの難しさが大きく変化する、ということを知覚的負荷という観点から分析している[14]。

一般的なハノイの塔問題と Zhang らの研究とを図1に示す。モノの大きさは、それ自体が、大、中、小という客観的な順序尺度[16]を持った特性である。それに対し、モノの色およびかたちというのは、それ自体は客観的な順序尺度を持つ特性ではない。Zhang らは、被験者に図に示すようなハノイの塔問題を解答させ、それにかかる時間やエラーの数を測定するという方法で実験を行い、表現の違いが問題解決にどのような知覚的影響を与えているかを報告している。彼らはこの結果を踏まえて、Representational Analysis という、表現形態による知覚的負荷の違いを考慮してインタフェース分析を行う手法を提案している。

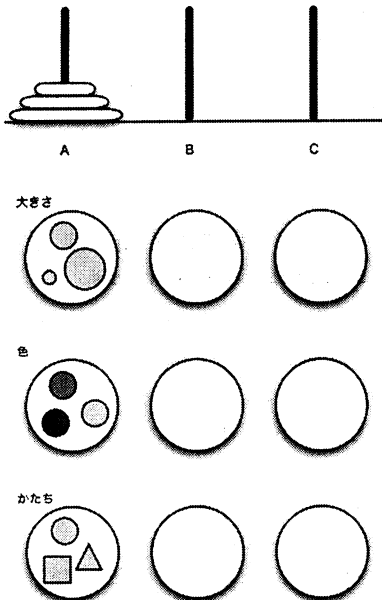


図1: Zhang らによるハノイの塔の同型問題

Zhang らのアプローチを基に、我々は音による表現を利用したハノイの塔の同型問題を作成し、実験をおこなった。ハノイの塔問題における異なる大きさの3つの輪の代わりに、異なる音の高さ、音の大きさ、音色、和音、曲、などをマッピングした、見かけの等しい3つのオブジェクトを用いる。オブジェクトに触れることで、それにマッピングした表現が生成されることとした。オブジェクトにマッピングする特性条件ごとに解答時間やオブジェクトに触れた回数を測定し、人がどのような特性を区別、同定、順序づけしやすいのか、被験者実験により解析した。

次章で、我々が実施した音による表現を利用したハノイの塔の実験について説明する。

4 音を利用したハノイの塔問題

4.1 実験概要

本研究では、実験環境としてテーブル型の多点入力デバイスである DiamondTouch[19]と、3つの同一形状の金属オブジェクト、およびステレオスピーカーから成る環境を用いた(図2)。これら3つの金属オブジェクトを DiamondTouch テーブル上におき、被験者がこれに触ることで、それぞれ異なる音が生成されるようにした。また、音以外にも、異なる大きさの形や色のオブジェクトなどが視覚表示されるようにした。実験環境では、被験者が金属オブジェクトに触れた回数と時刻を記録できるようにした。

DiamondTouch テーブル上には、オブジェクトを配置するために3つの円を描き、一番左側の円内に平面上に並べられたオブジェクトを、決められたルールに従い一番右側の円内に移動させる課題とした。

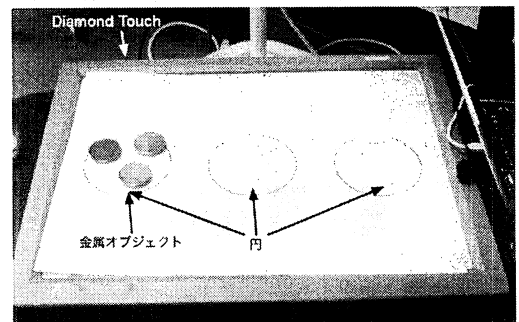


図2: 実験環境

表 1: 課題条件

条件		小	中	大	客観的な順序	
S	基準	金属オブジェクト 小	金属オブジェクト 中	金属オブジェクト 大	*	
A1	聴覚表現	音の高さ(純音)値の差大	10000Hz	1000Hz	100Hz	*
A2		音の高さ(純音)値の差小	1020Hz	1000Hz	980Hz	*
A3		音の大きさ(純音)値の差大	基準音	5倍	10倍	*
A4		音の大きさ(純音)値の差小	基準音	1.5倍	2倍	*
A5		音の高さ(ピアノ)値の差大	基準音(ド)	一オクターブ下	2オクターブ下	*
A6		音の高さ(ピアノ)値の差小	ソ	ミ	ド	*
A7		音の大きさ(ピアノ)	基準音	3倍	5倍	*
A8		音色	ピアノ	トランペット	バイオリン	
A9		和音(ピアノ)	C	Cm	C7	
A10		曲 異なるジャンル	クラシック	ロック	ジャズ	
A11		曲 同一ジャンル	A	B	C	
V1	視覚表現	長方形の大きさ	長方形 小	長方形 中	長方形 大	*
V2		長方形の色	赤	緑	黄	

例えば、金属オブジェクトをそれぞれ異なる「音の大きさ」にマッピングさせた条件課題の場合のルールは、
 (1) 一度に動かすことができるオブジェクトは一つ。
 (2) ある音を出すオブジェクトにおいてある円内に、それより大きい音を出すオブジェクトはおけない。
 (3) 一つの円内で最も小さい音を出すオブジェクトだけを動かすことができる。

実験では、表 1 に示す条件を用いた。基準条件として、大きさの異なる金属オブジェクトを平面に配置し、円の間で移動させるという、Zhang らが用いたハノイの塔課題と同等の条件を用いた。予備実験 [2]より、マッピングされた音ではなく、オブジェクトそのものの位置で記憶してしまっているのではないかという問題が指摘されたため、音のみでなく、オブジェクトに触れることで視覚表現が生成される条件も加えた。異なる大きさの長方形の図形が表示される条件と、同じ長方形が異なる色で表示される条件である。

なお、これらの条件のうち、音の高さや大きさ、長方形の大きさ、などは大小関係に客観的な順序があり、本実験ではそれをそのままの関係をマッピングすることとしている。和音の順序や音色では、そのような順序関係が存在しないが、実験者側で恣意的に決定した順序を指定している。

本論で報告する実験では、被験者 5 名に対し、以下の手順で実験を実施した。被験者が金属オブジェクトに触れた回数および時刻、および実験の様子をビデオデータで記録した。

(Step 1) 準備として、大きさの異なる三つの金属オブジェクトを積み重ね、従来のハノイの塔問題を数回解く。問題解決の戦略をほぼ獲得したと被験者が宣言をするまでこれを続ける。

(Step 2) 基準条件 S の設定で課題を1度解く。

次に、各条件について以下の二つのステップを繰り返して実施した。

(Step 3-1) ランダムに並べた金属オブジェクトを、小、中、大の順番に並べる。

(Step 3-2) ハノイの塔課題を解く。これを3回繰り返す。

被験者はタスクを実施する過程で、随時オブジェクトに触れて、マッピングされた音や視覚表現(長方形の大きさ、色)を確認することができることとした。また、複数個のオブジェクトに同時に触れることは禁止した。

オブジェクトを順番に並べるのに要した時間、解答に要した時間とオブジェクトに触れて音を確認した回数を計測した。各被験者には、各条件終了後にそれぞれ課題を解くにあたって留意した点や苦労した点などを述べてもらい、フリーフォームのインタビューを実施し、ビ

デオに記録した。

4.2 実験結果

各被験者ごとに、各条件について、

- オブジェクトを順番に並べるのにかかった時間
- 3回のタスクで解答にかかった時間の平均値、最大値、最小値
- 3回のタスクでオブジェクトに触れて音を確認した回数の平均値、最大値、最小値

を算出した。

それぞれの値について、条件間で差異があるかどうかを、一元配置分散分析法で調べた(有意水準5%)。有意差がある場合は、チューキーの多重範囲検定により多重比較を行った(有意水準5%)。

図3に、各条件に対して、Step-3-1に要した時間(「並べるのに要した時間」と表示)、Step-3-2に要した時間の平均(「解答に要した時間」と表示)、金属オブジェクトに触れた回数の平均の、被験者間の平均を示す。Step-3-2すなわちハノイの塔問題を解答するのに擁した時間と、オブジェクトの接触回数は、ほぼ同じように推移することがわかる。また、オブジェクトを順番づけるのに擁した時間と、ハノイの塔問題を解決する時間も、条件間でほぼ同様に推移している。

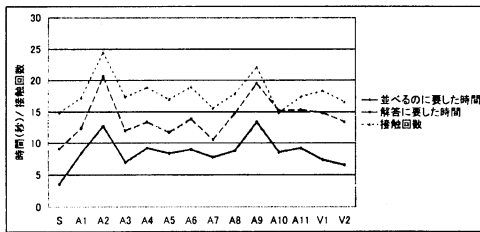


図3: 条件ごとの平均値

続いて、多重比較を行った結果、解答にかかった時間の平均値では、表2のような有意差が見られた。オブジェクトに触れて音を確認した回数の平均値では、表3のような有意差が見られた。

音の高さ(純音)の値の差が小さい条件(A2)の場合と、和音を用いた条件(A9)では、他の条件に比べてオブジェクトに接触する回数、および解答に擁する時間が増加する傾向にあることが確認される。一方、長方形の大きさや、長方形の色といった視覚表現を条件とした場合との差異は今回のデータからは認められなかった。

表2: 解答にかかった時間の平均値間の多重比較結果。

*は有意差あり、-は有意差なしを示す。

	S	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	V1	V2
S														
A1														
A2		*	*											
A3														
A4														
A5														
A6														
A7														
A8														
A9		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
A10														
A11														
V1														
V2			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

表3: オブジェクトに触れて音を確認した回数の平均値の多重比較

結果。*は有意差あり、-は有意差なしを示す。

	S	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	V1	V2
S														
A1														
A2		*	*											
A3														
A4														
A5														
A6														
A7														
A8			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
A9		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
A10														
A11														
V1														
V2			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

5 考察

現在までに得られている実験データの結果からは、どの音の特性を条件とした場合にハノイの塔課題が解き易くなったり難しくなったりするかに関しては、これまでの経験的な理解との差は認められなかった。すなわち、純音で差が小さい場合には音の識別が難しく、また和音の場合にも、順序づけがおこないにくい様子がグラフから読み取れる。ただし、被験者ごとの結果を見てみると、特にそれらの条件ではその差異がかなり大きなことがわかる(図4)

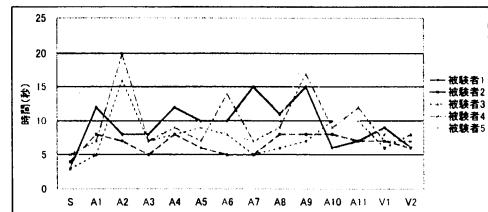


図4: 被験者間による並べ替えに触れた時間

2章で概観したように、既存の研究でも音の認識に関しては個人差が大きいと報告されている。音を利用したインタラクションデザインでは、一般的な傾向と個人に

よる認識差を考慮して進める必要があると考えられる。

実験後に得られたアンケート、およびビデオから得られた観察結果をまとめると、以下のようになる。

(1) 音の区別と識別

音の大きさや高さの間に明らかな差があるとわかりやすいが、差が小さいと、違いがあることはわかってもらいが高いのかの順序づけが困難であるとの指摘があった。順序における客観性の有無のみでなく、差異の大きさが認識のし易さに影響を与えられられる。

(2) 確認時の順序

順序を持った音は触る順番によってわかりやすさが異なり、たとえば、小、中、大の順で触るとわかりやすいが、小、大、中の順になると小と中の差がよくわからなくなるとのコメントがあった。たとえば音の高さ(ピアノ)の場合、ド、ミ、ソをこの順番で確認してからしか解けないといった状況である。このことは、下記の音の絶対的認識と相対的認識にも関わってくる考えられる。

(3) 絶対的認識と相対的認識

識別する際に、比較が必要な音と比較が不要な音とがある。例えば、音の高さ(ピアノ)や和音では、人によっては比較をせずに音を認識できる。一方、それができない人は、お互いの音をその都度比較して聞くために解答時間が長くなる。絶対音感の有無が、音による表現力の差異と関連してくると考えられる。

(4) 曲の利用

同一ジャンルの曲はわかりづらく、認識するのに認知的負荷が高いとの指摘があった。そのジャンルや曲に対する個人個人の経験の量によって、これらの負荷も変化すると考えられる。

(5) 環境

実験中に、外界で音がすると、思考が阻害されるとの指摘があった。本実験中に、ポットの電子音が鳴った際のコメントである。実験環境設定の改善項目のひとつであるが、逆に、音を利用してインタラクションデザインをおこなう際に、このような外界からの音によって思考が阻害されてしまう点に関しては、考慮すべき課題であると考えられる。

(6) 実験の設定に関して

最初に音の差異を確認した後は、オブジェクトの位置で解いてしまう、オブジェクトの重さで見当をつけ

てしまう、といった指摘があった。これらの差異は、視覚表現条件と比較する際に相殺されると考えているが、今回は差異が認められていない。実験設定の改善については今後の課題である。

(7) 音を利用したハノイの塔問題

通常のハノイの塔の問題よりも、音が付加された面白みがある、とコメントした被験者がいた。また、解く手順を音の連なり(メロディー、リズム)として覚え、つらなりとして記憶との照合を行う、といった指摘もあった。すなわち、どの金属オブジェクトを次に動かすべきか、を考慮する際に、大小関係のルールではなく、音の連なりを生成する手順として認識する、という指摘である。

最後の点に関しては、音を利用したインタラクションデザインをおこなう上で今後着目すべき点と考えている。電子機器の操作インタフェースなどでは、手順の記憶をいかに補助するかは大きな課題である。現状では同一の電子音でフィードバックしている機器がほとんどであるが、異なる音を用いることで、その連なりを認識し、それによって誤った手順を知覚することも可能となる。それに加えて、機器を操作して音とインタラクションすることの面白さ、といった側面も重要となる。

今後は、これらの考察結果を踏まえて、音による表現を用いたインタラクションデザインの事例を構築しようと考えている。音の認識に関しては、ハノイの塔のオブジェクトの数をさらに増やした実験を実施することで、上記(6)での指摘に対処しつつ、さらに音を利用したわかりやすさ、考えやすさ、心地よさ、といったことを考えていく材料とできるであろう。

6 謝辞

本実験の開始時にコメントをいただいた Jiajie Zhang 氏、本実験に参加していただいた被験者の方々、および本実験設定に関して助言を頂いた山本恭裕氏に感謝する。本研究は文部科学省科学研究費基盤研究(A)(1)16200008 のもとに実施されたものである。

参考文献

- [1] 中小路久美代, 山本恭裕, 創造的情報創出のためのナレッジインタラクションデザイン, 人工知能学会論文誌, Vol. 19, No. 2, pp.154-165, 2004.
- [2] 城一裕, 山本恭裕, 中小路久美代, 問題解決における外在化表現のための音の利用: ハノイの塔問

- 題における試み, 信学技法, HIP 2005-8, 電子情報通信学会, pp.43-46, 2005.
- [3] 城一裕, 山本恭裕, 中小路久美代, 音を伴う身体パフォーマンスのための聴覚インタラクションのモデルの提案, 情報処理学会ヒューマンインタフェース研究会, IPSJ-SIG-HI, Vol.2004, No.74, pp.27-32, 2004.
- [4] Jo, K., Furudate, K., Ishida, D., Noguchi, M., The SINE WAVE ORCHESTRA stay, Proceedings of the 13th ACM international conference on Multimedia, 2005 (in print).
- [5] Kramer, G., An introduction to auditory display, In Auditory Display: Sonification, Audification and Auditory Interfaces (ed. Kramer, G.), SFI Studies in the Sciences of Complexity, Proceedings Volume XVIII, pp.1-77, Addison-Wesley, Reading, Mass., 1994.
- [6] DiGiano, C.J., Baecker R.M., Program Auralization: Sound Enhancements to the Programming Environment, in Proc. Graphics Intelface '92, CIPS, pp.44-52, 1992.
- [7] Gaver, W. W., The SonicFinder, a prototype interface that uses auditory icons, Human Computer Interaction 4(1), pp.67-94, 1989.
- [8] Hayward, C., Listening to the Earth Sing, in G. Kramer (ed.) Auditory Display, Addison-Wesley, Reading MA, 369.-416, 1994.
- [9] Gaye, L., Maze, R., and Holmquist, L. E., Sonic City: The Urban Environment as a Musical Interface, Proceedings of NIME'03 (New Interfaces for Musical Expression), 2003.
- [10] Weinberg G., and Gan S., The Squeezables: Toward an Expressive and Interdependent Multi-player Musical Instrument, Computer Music Journal. MIT Press: 25:2, pp.37-45, 2001.
- [11] Waisvisz, M., The Hands: A Set of Remote MIDI Controllers., Proceedings of the International Computer Music Conference: International Computer Music Association, pp.86-89, 1985.
- [12] Tanaka, A., Mobile Music Making, Proceedings of NIME'04 (New Interfaces for Musical Expression), pp.154-156, 2004.
- [13] Mitsopoulos, E., A principled approach to the design of auditory interaction in the non-visual interface, PhD Thesis, 2000.
- [14] Zhang, J. and Norman, D. A., Representations in distributed cognitive tasks, Cognitive Science, Vol. 18, pp.87-122, 1994.
- [15] 小橋豊, 音と音波, 裳華房, 1969.
- [16] Stevens, S.S. On the theory of scales of measurement, Science, 103 (2684), pp.677-680, 1946.
- [17] American Standards Association, Acoustical Terminology SI, 1-1960, American Standards Association, New York, 1960.
- [18] B. C. J. ムーア, 聴覚心理学概論, 誠信書房, 1994.
- [19] Dietz, P.H., Leigh, D.L., DiamondTouch: A Multi-User Touch Technology, ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST), pp.219-226, 2001.