

非音声音による数値情報伝送手法の検討

藤森 潤一*¹ 及川 靖広*² 山崎 芳男*³

Evaluation of Methods for Numerical Information Transmission by Means of Non-vocal Tone

Jun-ichi Fujimori*¹, Yasuhiro Oikawa*² and Yoshio Yamasaki*³

Abstract – Identification number of a subway station or telephone number of a shop on a signboard helps foreigners to access them easily because the Arabic numerals are used worldwide. This paper proposes audio representations of the Arabic numerals by means of non-vocal tone as a minimal and universal communication for security and safety. The audible numerals are useful also for operating devices in situation of driving a car. The proposed method employs base-5 numeral system and on-off keying. The listening test shows that the explanation about the method is needed only once for the subjects to understand the coding scheme correctly.

Keywords : safety, secure, device-to-human communication, non-vocal tone

1. はじめに

筆者らは人の聴覚能力を活用した新しい非音声音による表現手法について研究を行っているが、本論文は非音声音による数値表現を人類共通のミニマルなコミュニケーション手段の一つに位置づけ、安全・安心を支える技術として、その応用を提案するものである。

言語に依存しない情報提示の方法として、サイン音などがある。たとえば、地震情報の伝達手段として実用化されている [1] [2]。これはある音に警告などの意味を結びつけており、定量的な情報を提示するためのものではないが、提案する非音声音による数値表現を用いれば、例えば警告音とともに '119' や '110' などの数を伝えることが可能である。

ある環境において状況を知るための情報が得られない、あるいは意味不明であると不安である。たとえば、読める文字がほとんど見当たらない街並みで、知らない言葉で流れるアナウンスを聞くのは不安である。そのような状況でも、店の看板に書かれた電話番号はほとんどアラビア数字なので苦労なく読め、店を特定するのに安心である。

また、車の運転中に操作する装置（エアコンやオーディオ装置）の現在の値を視覚によらず得られるならば、より安全である。

このような、視覚からの情報や言語による情報が実質的に制限を受ける状況で有効であると考えられるの

が非音声音による数値表現である。しかし、それを人が使えるようになるために学習を強いるようでは共通のコミュニケーションになり難い。

本研究では、古くから用いられてきたモールス符号の歴史を振り返り、新たに学習が殆ど不要なコード体系を非音声音で伝送する手法を提案する。

2. モールス符号

モールスはテレグラフ開発の初期段階では、単語に数字を対応させて、その数字を電流のオン/オフ信号を用いて表し、アナログ電話のダイヤルパルスに類似した方式を用いて情報を伝送した。その後、アルファベット文字に符号を割り当て現在のモールス符号に近い体系が生まれた。そしてほぼ同時期に人にモールス符号の学習を強いることなくテレグラフを扱えるように、文字を印字できる装置（テレプリンタあるいはテレタイプ）が開発された [3]（タイプライターはそれより後に誕生した [4]）。

このように通信符号を人が特別な訓練なしに理解できる信号に変換できる技術が確立すると、通信符号は人に解る必然性は失われ、装置間の伝送に特化してその効率を高めてきた。したがって、音による通信に関して言えば、人の聴覚能力を生かした非音声音によるコミュニケーション手法の開発は Audification や Sonification などの分野で扱われているものの、いまだ広く実用化されている例は少ない。さらに、装置間の伝送に関しては音をメディアとして利用する例は少ないが、最近になって再考する動きがある。

*1: ヤマハ株式会社

*2: 早稲田大学

*3: 早稲田大学

*1: Yamaha Corporation

*2: Waseda University

*3: Waseda University

3. 非音声音によるコミュニケーション

通信系の物理層として非音声音を使う試みが報告されている [5] [6] [7]。これら研究では、音による通信の一部として device-to-human の通信を扱ってはいるものの、定量的な情報の伝送まで踏み込んでおらず、重点は device-to-device の通信に置かれている。

装置から人間に対して音を用いて正確に情報を伝えるには音声音を用いることが第一に考えられる。しかし、音声音による装置からの情報提示はそれが母語であれば理解しやすい反面、聞き流すことが難しいなど実際の応用面では必ずしも最良の方法とは言いがたい。一方、非音声音による情報提示は、スイッチを押したことの触覚的なフィードバックを補助あるいは代替する目的や、報知音（アラーム）などある事象を通知するために用いられている。非音声音の利用に関して音楽（器楽）は高度に体系化されているが、その原始的な役割はともかく、現在の音楽は明確な情報の表現を主な目的としているわけではない。

非音声音による装置から人に対する情報表現は、人がその装置からの情報表現を理解できるように学習することが不可欠であるので、容易に学習できるような表現でなければならない。また、その表現はある装置に固有であるよりは、できるだけ共通の表現が用いられるほうが学習する立場からは都合が良い。つまり、非音声音による表現の共通化をする手段にも配慮が必要である。この点について、日常的にはインターネットは強力な手段になりうると考えられる。インターネットの普及で全世界の無数の音楽を容易に聴くことができる。つまり、同じ音を全世界を対象に多くの人と共有することが容易になっている。以前は困難であった音による情報表現体系を普及できる可能性がますます高くなっていると考えられ、さらにインターネットで接続された仮想世界も一般的になってきており、仮想世界あるいは複合現実における音環境デザインの中で、新しい音の表現を探ることができるようになってきていると考える。

4. 数値の符号変調方式

以上のような考察に基づき、符号および変調の仕様を決めるにあたり、次のような目標を設定した。

目標

1. 符号体系は学習しやすいこと（簡単な規則性のある体系）
2. 変調方式は音響信号として人が判別しやすいものであること
3. 通信速度はできるだけ速くすること

目標 (1) は、提案する符号変調方式が実際に使われるための必要条件と考えられる。恐らく非音声音によ

る数字の符号化方式で普及しているものがあるとは言いがたく、まず普及するための条件として、目標 (1) の符号化方式そのものが受け入れ易いかどうか、および対象とする符号化方式を使った例に多く接することができるかどうか（遍在性）に着目して検討することが重要と考えられる。

目標 (2) は、想定している通信の受信端が人であるので当然考慮すべきであるが、聴覚の特性は複雑であるため詳細を規定することはできない。しかし変調方式の周波数帯域、周波数分解能、時間分解能については数々の聴覚研究によって与えられている聴覚の特性に配慮した。例えば、音響信号の周波数帯域として、300 Hz～3400 Hz（電話帯域）あるいは、加齢による聴覚機能の低下に配慮して、上限を 2500Hz 程度とする。この帯域内でトーンピッチが感じられる音の継続時間は 15 ms 程度とした [8]。連続するパルスの数を数えられる能力については聴覚感覚貯蔵が 5 秒程度、短期記憶の容量が 7 ± 2 チャンク程度であることなどを参考に試聴実験によって実用的な信号を検討する。

5. モールス符号と提案符号の比較

上記のような目標に適するであろうとまず挙げられるのがモールス符号である。まず提案する符号とモールス符号と比較する。

モールス符号の数字コードには通常のコードと省略コードがある。本論文の目標はアルファベットなどの文字を全て扱うことはせず、数字だけを扱うので省略コードで十分である。図 1 は各数字のコードを横軸が時間、縦軸を信号強度として表したものである。視覚によれば、この図形から数字 5 を境に線対称になることを容易に気づくであろう。一方、聴覚はこの対象性を容易には気づくことができない。例えば音楽においても楽譜では対称性が明確でも、演奏を聴いてそれが意識されることはほとんどない。これは聴覚に与える刺激は実時間の信号であるためと考えられる。いずれにせよ、このような対象性が解らないと符号の規則性が記憶されにくいのではないかと考えた。また、理想的には目標とする符号は、自明であって何も説明がなくとも理解できるものがよい。そこで、両手を使って数を数えることに対応する 5 進法を基本にした符号化は、理解しやすいと考えた。これは四つ玉の算盤（そろばん）に似た数値表現なので、便宜上”ソロバン符号”と呼ぶことにする。

ここで、モールス符号とソロバン符号の理解のしやすさを調べるために、次のような試聴実験を行った。

5.1 試聴実験

符号テーブル音

符号を説明するために、1 から 9 そして 0 の順番で

数字を読み上げた音声信号に続いて、それに対応する非音声音による符号を提示する音を「符号テーブル音」と呼ぶことにする。モールス符号テーブル音とソロバン符号テーブル音の2種類を用意した。非音声音の符号変調は、1 kHzの正弦波に立ち上がり立下りがどちらも20 msの台形エンベロープをかけた。短いパルスは100 ms、長いパルスは300 ms、シンボル間の無音区間は100 msとした。この符号化速度は、モールス符号として12 WPS(words per minute)である。読み上げ音声と非音声音による符号提示のペアは3 s間隔である。

符号試験音

各符号の理解のしやすさを調べるために、ある数を表す非音声音信号をモールス符号とソロバン符号それぞれ1つ用意した。

試聴実験環境

さらにWEBブラウザで試聴と回答ができるようにJavaScriptを用いた試聴実験環境を構築した。この環境では、試聴回数を任意に設定でき、また被験者が再生を途中で止めたり再生位置を変更できないようにすることができる。また提示順序をランダムにしたり、先の質問がわからないように現在の質問以外は表示されないようにすることができる。

このWEBベースの試聴環境を用いて、次のような手順の試聴実験を行った。

1. 試聴実験の目的などの説明
2. Q1: 性別 Q2: 年齢 Q3: ヘッドフォンの種類
3. 試聴音のレベル調整
4. 試聴実験開始の確認
5. Q4.1: 「符号テーブル音 1」(再生回数1回)を聴いて符号の規則性がわかったかどうか?
6. Q4.2: 「符号テーブル音 2」(再生回数1回)を聴いて符号の規則性がわかったかどうか?
7. Q4.3: Q4.1とQ4.2の符号のどちらがわかりやすいか?
8. Q5: モールス信号を知っているか?
9. Q6: 「符号試験音 1」(再生回数2回まで)が示す数は?
10. Q7: 「符号試験音 2」(再生回数2回まで)の示す数は?
11. Q8: コメント
12. 謝辞

ここで、Q4ではモールス符号テーブル音とソロバン符号テーブル音の提示順序をランダムに設定しているため、符号テーブル音1, 2としている。また、Q6, Q7の符号試験音の提示順序は固定しているが、どちらの場合でも用いている符号がどちらであるかは示し

ていない。

5.2 実験結果

現時点で7名の非験者から回答を得た。その結果を表1に示す。

表1 被験者の回答-1
Table 1 Response of subjects - 1

| | Q1 | Q2 | Q4.S | Q4.M | Q4.3 | Q5 | Q6 | Q7 |
|---|-------|----|------|------|------|----|----|----|
| 1 | 60-69 | M | y | y | S | 2 | S | S |
| 2 | 50-59 | M | y | y | S | 1 | S | S |
| 3 | 30-39 | M | y | n | S | 2 | S | S |
| 4 | 40-49 | F | y | y | S | 2 | S | S |
| 5 | 50-59 | F | y | n | S | 2 | S | S |
| 6 | 20-29 | M | y | y | S | 2 | S | S |
| 7 | 50-59 | F | y | n | S | 2 | S | S |

Q1は、年齢を1)20歳未満 2)20~30歳未満 3)30~40歳未満 4)40~50歳未満 5)50~60歳未満 6)60~70歳未満 7)70歳以上からの選択の結果を年齢で示した。

Q2は、「M」が男性、「F」が女性を示す。

Q4.SとQ4.Mはモールス符号テーブル音とソロバン符号テーブル音の提示順序をランダムにしているので、それに考慮してQ4.Sはソロバン符号テーブル音、Q4.Mはモールス符号テーブル音に対する回答を意味する。回答の'y'はその符号テーブル音に規則性があると思われたことを意味し、'n'はそうでない事を意味する。

Q4.3は、「1番目の表現と2番目の表現のどちらが簡単にその音を聴いて数値がわかるようになると思いますか?」の質問には4つの選択肢 1)どちらも難しい 2)1番目のほうがやさしい 3)2番目のほうがやさしい 4)どちらもやさしい から1つ選択するようにした。先に述べたように符号テーブルの種類はランダムで提示されているので、それに配慮して'S'はソロバン符号のほうがやさしいとする回答であることを意味する。

Q5は、1)知らない 2)名前を知っている 3)使うことができる から選択した番号である。

Q6は、示した符号試験音を最大2回まで試聴した後に、11個の選択肢 {? 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0} から選択した結果、ソロバン符号として正解した場合を'S'、モールス符号として正解した場合を'M'、不正解を'×'、不明を'? 'で示した。

Q7は、示した符号試験音を最大2回まで試聴した後に、11個の選択肢 {? 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0} から選択した結果、ソロバン符号として正解した場合を'S'、モールス符号として正解した場合を'M'、不正解を'×'、不明を'? 'で示した。

5.3 考察

この結果から、おそらくソロバン符号は符号と数の対応の説明を1度だけ受ければ理解できるようになる可能性が高いことを示していると考えられる。さらに興味深いのは、Q6, Q7の結果である。ソロバン符号テーブル音とモールス符号テーブル音の提示順序にかかわらず、しかも提示している符号試験音がどちらの符号で解釈するように指定していないにも関わらず、どちらの音もソロバン符号であるとした正解を全ての被験者が与えている。つまり、ソロバン符号のほうが理解しやすいと考えられる。もし、ソロバン符号を提示できる装置が身近にありさえすれば、一桁の数値であればほとんど説明なしに理解できるのではないと思われる。

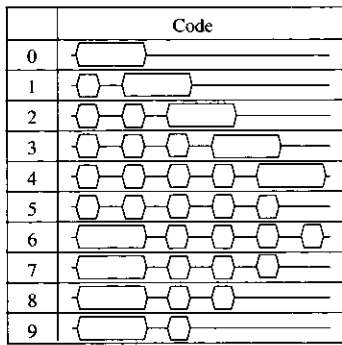


図1 モールス符号の数字(略体)に対する信号
Fig.1 Signal for the Morse code numbers (abbreviated).

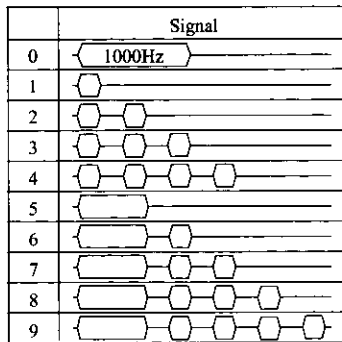


図2 提案する符号の数0~9に対する信号
Fig.2 Proposed OOK signal for number 0 to 9.

6. 通信速度の検討

数をパルス音の数に1対1で対応させた場合、パルス間隔と人が数えられるパルスの数の関係を調べた。目的は、ソロバン符号での通信速度の上限を知るためであるが、同時にソロバン符号の妥当性の確認にも利用できる。先に述べたように、モールスも当初は同様のコードで実験したようだが、人にとってパルス音が存在するかどうかの判別が容易である音量においては、

パルス音の時間間隔がある程度の範囲にあれば、その数を数えることは容易である。パルス音の時間間隔を変化させて数えることができるパルス音の数との関係を調べた。表2に実験の結果を示す。回答されたパルス数のうち不正解のものにはアンダーラインを引いている。

表2 T ms 間隔で提示したパルス音の数 N と被験者による回答

Table 2 Response of a subject to N number of pulse tones with time period T ms.

| Period T | Number of pulses N | | | | | | | | | |
|----------|--------------------|---|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 24 ms | 1 | 2 | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? |
| 64 ms | 1 | 2 | 3 | <u>3</u> | <u>4</u> | <u>4</u> | <u>6</u> | <u>5</u> | <u>8</u> | <u>7</u> |
| 114 ms | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | <u>7</u> | 9 | 10 |
| 164 ms | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |

この実験結果から、もし1から10までの整数値をパルス数に直接対応させた場合正しく10個のパルス聞き取れるためには、表1の実験4で与えられたパルス周期164ms程度より長いパルス周期が必要である。確実に数え上げられるためには200ms程度の周期が必要である[9]。したがって、数値10を表すには、約1640ms程度の時間が必要であることがわかる。これより時間を短くするには、シンボルの種類を2つ、例えば短いパルスと長いパルスを導入し、その組み合わせを用いる方法が考えられる。短いパルスをS、長いパルスをLとした場合、Sを1単位、Lを5単位とすると10進数を表現するのに都合がよい。

7. 符号変調方式の比較

ソロバン符号を含む次の3つの符号変調方式に関し学習の難易度を調査した。

OOK(On-Off Keying)方式

提案のソロバン符号そのものを用いた。ただし、短いパルスの1周期132ms(オン時間31ms, オフ時間101ms)とした。

AFSK(Audio Frequency-Shift Keying)方式

目標の(1)に配慮して図3に示すように数字0~9に対して(2)で想定した周波数帯域300Hz~2500Hzに収まる10個の周波数に対応させた。ただし、変調された信号から数字0~9を判別するには、絶対音感が必要となるため、基準となる周波数の音と数字0~9に対応する周波数の音を経時的に提示することにした。つまりシンボル2つで1つの数字を表す方法である。この方法では相対的な音程を判別する能力は必要であるが、2つの音を同時に提示する、つまり和音で提示するよりは判別が容易であると予想される。AFSKを用いた符号変調は、基準音の音程をC3として数字0~9を”C3, C#3, D3, D#3, E3, F3, F#3, G3, G#3,

A3”に対応させた。パルスの1周期 100 ms(オン時間, オフ時間 はそれぞれ 50 ms)である。

DTMF(Dual-Tone Multi-Frequency) 方式

2つの音を同時に提示する方法として既に広く用いられているものをそのまま採用した。図4にDTMFによる数0~9に対する変調信号を示す。DTMFの符号変調はオン時間 132 msとした。

学習の難易度を評価してもらうために、3つ符号変調方式 OOK, AFSK, DTMF を選択できる電話のダイヤルボタンを模した GUI を備えた実時間で符号変調した音を再生するソフトウェアを作成した。ソフトウェアは被験者の名前からの入力からはじまって、全てのボタン操作イベントをタイムスタンプ付きでログファイルに記録する。被験者は 24 歳から 38 歳までの男性 6 名である。試聴はノート PC (SONY VGN-TX90PS) と密閉型ヘッドフォン (audio-technica ATH-A900) を用いて、通常の室内で行った。

7.1 手順

被験者に実験の目的と実験用のアプリケーションの使用法を説明し、実験用プログラムを起動した。被験者には 3 種類の符号変調方式を自由に選択し、好きなだけ数字 0~9 に対応する音を聴いてよく、それぞれの方式についてそれを学習する難易度の絶対評価を 7 つの選択肢 1) ととても易しい、2) 易しい、3) やや易しい、4) どちらでもない、5) やや難しい、6) 難しい、7) とても難しいから 1 つを選ぶように伝えた。また、評価は操作を行う中で学習すればその方式を使えるようになり得るかどうかを判断してもらうように補足した。

7.2 結果

図 5 に結果を示す。被験者 A~F の全てが OOK, AFSK, DTMF の順で学習の難易度が高くなる傾向で評価している。

| | Signal |
|---|---------------|
| 0 | 523Hz — 523Hz |
| 1 | 523Hz — 554Hz |
| 2 | 523Hz — 587Hz |
| 3 | 523Hz — 622Hz |
| 4 | 523Hz — 698Hz |
| 5 | 523Hz — 740Hz |
| 6 | 523Hz — 784Hz |
| 7 | 523Hz — 831Hz |
| 8 | 523Hz — 880Hz |
| 9 | 523Hz — 932Hz |

図3 AFSKによる数0~9に対する変調信号
Fig.3 AFSK signal for number 0 to 9.

| | Signal |
|---|----------------|
| 0 | 941Hz + 1336Hz |
| 1 | 697Hz + 1209Hz |
| 2 | 697Hz + 1336Hz |
| 3 | 697Hz + 1477Hz |
| 4 | 770Hz + 1209Hz |
| 5 | 770Hz + 1336Hz |
| 6 | 770Hz + 1477Hz |
| 7 | 852Hz + 1209Hz |
| 8 | 852Hz + 1336Hz |
| 9 | 852Hz + 1477Hz |

図4 DTMFによる数0~9に対する変調信号
Fig.4 DTMF signal for number 0 to 9.

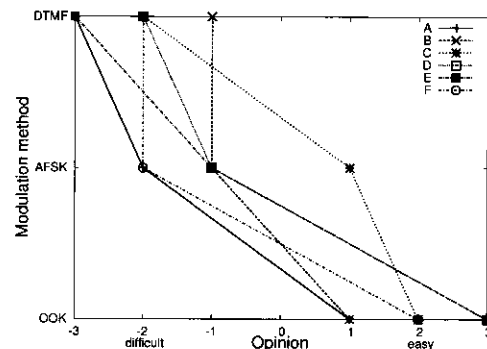


図5 一桁の数0~9をOOK, DTMF, AFSKの3種類の変調方式を用いた場合の、了解可能性の評価結果

Fig.5 Rating of potential intelligibility for three different modulation methods including OOK, DTMF and AFSK to display single digit form 0 to 9.

8. 2桁以上の数字表現

多桁の数字を構成する2種類の方法を検討した。

試聴実験は次に述べる警報音への応用を含めて一括して行ったが、多桁の数字表現方法に関する実験と警報音への応用に関する実験とを分けて記述する。なお、質問の参照番号(Q1など)は一括した試聴実験で用いた番号である。実験方法は5.節の試聴実験と同様のWEBベースの試聴環境を用いた。それぞれの実験に共通する内容は下記の通りである。

1. 試聴実験の目的などの説明
2. Q1: 性別 Q2: 年齢 Q3: ヘッドフォンの種類
3. 試聴音のレベル調整
4. 試聴実験開始の確認
5. Q9: コメント
6. 謝辞

被験者は、20才代から50才代までの女性3名と、

20才代から30才代までの男性3名の計6名である。

8.1 聴覚実験

2桁以上の整数を構成する2つの方法をそれぞれタイプA、タイプBと呼ぶことにし、次の規則を用いて多桁の数字を構成する。

タイプA: モールス符号に準じて、2つの桁の間隔を短いパルス長の3倍にする

タイプB: 提示する桁が上がる毎にキャリアの周波数を上げる

どちらのタイプも、5.節と同様のエンベロープ波形を持つ信号によって3桁の数字を表し、試験信号とした。タイプAの提示速度は、それをモールス符号と見た場合12WPS(words per minute)である。ただし、タイプBは1の位は1kHz、10の位は1.2kHz、100の位は1.4kHzのように200Hzの差を持たせることで桁の区切りを表現する。

このような試験信号を用いて、次の手順で聴覚実験を行った。

1. Q4:「ソロバン符号テーブル音」(再生回数1回)を聴いて一桁の符号の規則性がわかったかどうか?
2. Q5.1: 3桁の数をタイプ1で表現したサンプル音(再生回数2回まで)を聴いた後に試験音(再生回数2回まで)が表す数字を入力
3. Q5.2: 3桁の数をタイプ2で表現したサンプル音(再生回数2回まで)を聴いた後に試験音(再生回数2回まで)が表す数字を入力
4. Q5.3: Q5.1とQ5.2の符号のどちらがわかりやすいか?

ここで、Q5ではタイプAの音とタイプBの音の提示順序をランダムに設定しているため、タイプ1, 2としている。

8.2 実験結果

被験者からの回答を表3に示す。

表3 被験者の回答-2a
Table 3 Response of subjects - 2a

| Subject | Q1 | Q2 | Q4 | Q5.A | Q5.B | Q5.3 |
|---------|-------|----|----|------|------|------|
| 1 | 50-59 | F | y | ○ | ○ | 4 |
| 2 | 40-49 | F | y | ○ | ○ | B |
| 3 | 20-29 | M | y | ○ | ○ | B |
| 4 | 30-39 | M | y | ○ | ○ | A |
| 5 | 30-39 | M | y | ○ | × | 2 |
| 6 | 20-29 | F | y | × | ○ | B |

Q1は、年齢を1)20歳未満 2)20~30歳未満 3)30~40歳未満 4)40~50歳未満 5)50~60歳未満 6)60~70歳未満 7)70歳以上からの選択の結果を年齢で示した。

Q2は、'M'が男性、'F'が女性を示す。

Q5.1とQ5.2はタイプAの音とタイプBの音の提示順序をランダムにしているため、それに考慮し

てQ5.AはタイプAの音、Q5.BはタイプBの音に対する回答を意味する。試験音が表す数字が解らなかった場合は、'?」、正解を○、不正解を×で示す。

Q5.3は、「1番目の表現と2番目の表現のどちらがわかりやすかったですか?」の質問には5つの選択肢 0)1番目のほうがやさしい 1)2番目のほうがやさしい 2)どちらもいえない 3)どちらも難しい 4)どちらもやさしいから1つ選択するようにした。先に述べたように2種類の音はランダムな順序で提示されているので、それに配慮して'A'あるいは'B'はそれぞれタイプA、タイプBのほうがやさしいとする回答であることを意味する。それ以外の場合は選択肢の番号(0ベース)を示す。

タイプA、タイプBどちらの試験音に対しても被験者6名のうち5名が正しい数字を入力している。解りやすさに関しては、被験者の半数がタイプBを選択している。

8.3 考察

1桁の数字は全て実際の音を1回だけ提示し、2桁以上の数字はその構成方法を文書で説明した後に3桁の数字'123'の音を提示(2回まで)する条件で、コード体系の理解はできていると思われる。コード体系の説明の後の試験音(数字'745')に対して不明という回答は1つもなかったからである。多桁の数字を構成する方法として、桁毎に周波数を変えるタイプBのほうが桁の区切りがわかり易いと感じられる可能性を示唆している。ただし、被験者からのコメントによれば、この実験に使われた試験音では2つの問題点

- 桁の区切りが解りにくい
- '5'と'0'の区別がつきにくい

があることが解った。この問題の対策としては、提示する符号速度を遅くする、2つの桁の間隔を長くする、符号の長さが解りやすいようにガイド音を付加するなどが考えられる。

9. 警報音への応用検討

危険を知らせる信号音が満足すべき要件として、人がそれを検知でき、認知できることの2点が挙げられ、具体的には、

1. 種々の騒音下において検知されやすいこと
 2. 高齢者など、広い年齢層を対象にしても検知されやすいこと
 3. 音が検知された場合、それがなんらかの警報であることが容易に認知されること
 4. 音の認知は文化の相違を超えた普遍性があること
- である[10]。

また、避難誘導に関しては信号音の認知に加えて、音響信号によって出口へ誘導する機能も提案されている[11]。

非音声音による数字表現の警報音への応用は、少なくとも警報音として上記の要件を満足している音と同時あるいは継時的に提示して、警報音に情報を付加する手法を検討する。

9.1 試聴実験

警報音の例として、警察庁が公開している防犯ブザーのサンプル音に、タイプAで構成した119と110を表す音を混合した音を作成した。このように数字表現を含むアラーム音を'複合アラーム音'と呼んで、オリジナルのアラーム音と区別する。特に前者を'複合アラーム音119A'、後者を'複合アラーム音110A'と呼ぶことにする。数字を表す音の振幅は、防犯ブザーの音の振幅の1/4とし、その音が1.5sおきに3回現れるように混合した。

このような試験信号を用いて、次の手順で試聴実験を行った。

1. Q6.1: このアラーム音(再生回数2回)の中に数字表現が聞こえるか?
2. Q6.2: いま聞いたアラーム音は何を表しているか?
3. Q7.1: このアラーム音(再生回数2回)の中に数字表現が聞こえるか?
4. Q7.2: いま聞いたアラーム音は何を表しているか?
5. Q8: この音(再生回数1回)は何の音か知っているか?

Q6.1とQ7.1の試験音はそれぞれ'複合アラーム音119A'と'複合アラーム音110A'である。Q8の音は、数字表現の音を含まないアラーム音、すなわちオリジナルの防犯ブザー音である。

9.2 実験結果

被験者からの回答を表4に示す。

表4 被験者の回答-2b
Table 4 Response of subjects - 2b

| Subject | Q1 | Q2 | Q6.1 | Q6.2 | Q7.1 | Q7.2 | Q8 |
|---------|-------|----|------|------|------|------|----|
| 1 | 50-59 | F | y | 1 | y | 3 | ? |
| 2 | 40-49 | F | y | 1 | y | 3 | 3 |
| 3 | 20-29 | M | y | 1 | y | 3 | ? |
| 4 | 30-39 | M | y | 3 | y | 3 | 3 |
| 5 | 30-39 | M | y | 3 | y | 3 | ? |
| 6 | 20-29 | F | y | 4 | y | ? | 3 |

Q1は、年齢を1)20歳未満 2)20~30歳未満 3)30~40歳未満 4)40~50歳未満 5)50~60歳未満 6)60~70歳未満 7)70歳以上からの選択の結果を年齢で示した。

Q2は、'M'が男性、'F'が女性を示す。

Q6.1は、複合アラーム音119Aを最大2回まで試聴した後に、数字表現の音が聞こえるか?

Q6.2は、そのアラーム音の内容として5つの選択肢?)わからない 1)火災 2)地震 3)盗難 4)故障から選択した番号である。

Q7.1は、複合アラーム音110Aを最大2回まで試聴した後に、数字表現の音が聞こえるか?

Q7.2は、そのアラーム音の内容として5つの選択肢?)わからない 1)火災 2)地震 3)盗難 4)故障から選択した番号である。

Q8は、アラーム音を最大1回まで試聴した後に、4個の選択肢?)知らない 1)火災報知機 2)目覚時計 3)防犯ブザーから選択した番号である。

9.3 考察

被験者1,2,3は、Q6, Q7のどちらの試験音に対しても複合アラーム音から正しい数字、それぞれ'119'と'110'を解釈し、さらにその数字が緊急の電話番号であると推定していると思われる回答をしている。この場合には、質問の'アラーム音'という語が示している内容を'複合アラーム音'であると解釈していると考えられる。

一方、被験者4,5は、Q6, Q7のどちらの試験音に対しても数字表現は検知しているが、'盗難'の意味として理解している。もし、被験者が数字を正しく解釈していたとすると、質問の'アラーム音'という語が示している内容を文字通り'アラーム音'であると解釈し、数字の情報を無視した結果と考えられる。また、被験者6も恐らく'アラーム音'を同様に解釈したが、Q6, Q7, Q8の全てに'アラーム音'としては同一の音が提示されたために困惑したのではないかと想像される。この試験環境は既に回答した内容を後戻りして修正できないようになっていることの影響も考えられる。

10. むすび

本論文は、装置から人への通信に関して定量的な情報を非音声音を用いて伝送する方法を人類共通のミニマルなコミュニケーション手段の一つに位置づけ、安全・安心を支える技術として、その応用を提案した。

具体的には、長さの異なる3種類のパルスを組み合わせて数0~9を表現する"ソロバン符号"にOOK変調を用いた方式である。これはモールス符号に似ているが、モールス符号に比べてほとんど学習する努力なしに理解できる可能性が高いことが実験によって示された。2桁以上の数字を構成する方法に関しては、モールス符号に準じた方法、あるいは、キャリアの周波数を桁ごとに変える方法のどちらでも容易に規則を理解できることが示された。しかし、具体的なソロバン符

(2008年9月17日)

号の解読のしやすさについては、まだまだ改良の余地があることも解った。

さらに、応用例として3桁の数字を表現する音と警告音を混合した音を用いることで、数字には意味を付与し、音色や音のパターンには緊急性などの感覚的な情報を担わせるような表現の可能性を示した。試聴実験からは、複合アラーム音を構成する音それぞれの意味が認知されたとしても、複合アラーム音として認知されるためには、組み合わせの結果の意味が予め知らされている必要があることも示された。

このような数字表現と音色や音のパターンの組み合わせ手法は、まだ今後さらに発展が期待される。たとえば、実世界において駅や停留所の番号、エレベータの停止階の案内や、緊急時や非常時の連絡先の電話番号の提示、あるいは日常的にはタイマーの残り時間や、体温計の温度など適応範囲は広い。そして日常的に使うことにより、非常時に使える手段となるはずである。

今後は、提案の符号と変調方式をより人が解りやすくなるような改良を進めると同時に、人と装置の双方に対して、その機能や扱える情報量を通常より大幅に減少させた状態をつくり出せる Virtual Reality に着目し、安全・安心を支える応用の検討を行う予定である。

参考文献

- [1] 高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト：“(平成17年度)成報告書”, Technical report, 文部科学省 研究開発局 and 独立行政法人 防災科学技術研究所 (2006).
- [2] 高度即時的地震情報伝達網実用化プロジェクト：“(平成18年度)成報告書”, Technical report, 文部科学省 研究開発局 and 独立行政法人 防災科学技術研究所 (2007).
- [3] 安岡孝一, 安岡素子：“文字符号の歴史 欧米と日本編”, 共立出版 (2006).
- [4] 三上喜貴：“文字符号の歴史 アジア編”, 共立出版 (2002).
- [5] V. Gerasimov and W. Bender: “Things that talk: Using sound for device-to-device and device-to-human communication”, IBM Systems Journal, **39**, 3/4, pp. 530-546 (2000).
- [6] A. Madhavapeddy, D. Scott and R. Sharp: “Context-aware computing with sound”, 5th Int'l Conf. Ubiquitous Computing(UbiComp 03), Springer-Verlag, pp. 315-332 (2003).
- [7] A. Madhavapeddy, R. Sharp, D. Scott and A. Tse: “Audio networking: The forgotten wireless technology”, IEEE Pervasive Computing, **4**, 3, pp. 55-60 (2005).
- [8] 境久雄 (編): “聴覚と音響心理”, コロナ社 (1978).
- [9] R. M. Warren: “Thinking in Sound: The Cognitive Psychology of Human Audition”, chapter 3, pp. 37-68, Oxford Univ Press (1993).
- [10] 桑野園子：“音環境デザイン”, 第2章, pp. 37-68, コロナ社 (2007).
- [11] 山崎芳男, 矢野博夫, 徳山久雄：“公共空間における音による非難誘導システム”, 騒音制御, **15**, pp. 138-141 (1991).

[著者紹介]

藤森 潤一 (正会員)



1979年早稲田大学工学部建築学科卒業。1981年同大学院修士課程終了。1981年ヤマハ株式会社入社。デジタル信号処理装置、バーチャルリアリティ音楽環境、デジタルオーディオネットワークなどの研究・開発に従事。IEC、IEEE、AESなどの規格に携わる。現在、ヤマハ(株)サウンドテクノロジー開発センター勤務。

及川 靖広 (正会員)



1995年早稲田大学工学部電気工学科卒業。1997年同大学院修士課程修了。2000年同大学院博士課程単位取得退学。2001年博士(工学)(早稲田大学)。音場の記述と伝送、音響信号を対象としたデジタル信号処理に関する研究に従事。現在、早稲田大学理工学術院基幹理工学部表現工学科准教授。

山崎 芳男 (正会員)



1968年早大・理工・通信卒業。1970年同大学院修士課程修了。以降、早大理工学研究所、千葉工業大学、早大理工学総合研究センターにおいて音響学、デジタル信号処理、建築音響等に関する研究に従事。現在、早稲田大学大学院国際情報通信研究科教授。1984、1990年日本音響学会佐藤論文賞受賞。電子情報通信学会フェロー。工学博士(早稲田大学)。