

# 人間のリズム記憶能力の研究

福本 一朗\*

## A Basic Study on Human Rhythmic Memory

Ichiro FUKUMOTO

Rhythmic memory as the most essential factor not only for melody but also for speech, is studied through learning experiments and neuronal modeling. Measurements of rhythmic capacities shows 5bit for normal subject and 4bit for the hearing disabled. An algorithm of rhythmic pattern recognition is proposed and is implemented in the neuron model for the human rhythmic memory. The presented mechanism of rhythmic memory and the measured data of rhythmic capacity on students in a school of deaf and dumb, indicate a possibility to improve their speech ability through the development of rhythmic training systems.

**Key words:** rhythmic memory / mathematical model / memory capacity / rhythmic training / speech rehabilitation

### 1. はじめに

人間の記憶能力の中で、最も原始的な能力に属しながら、他の生物に比べると特に発達していると考えられているものに音楽的なメロディーを記憶する能力が挙げられる。このメロディー記憶は音の高低・強弱・長短の3要素からなると考えられる。この中でも、世界の民族音楽中最も原始的な楽器が太鼓などの打楽器であることから類推できるように、音の強弱と長短の記憶が基本的であると考えられる。特に人間のリズム認識記憶能力は、単に音楽を記憶再生するときのみならず、日常の動作や会話においても必須の要素となっている。この基本的な音楽要素記憶能力を「リズム記憶 rhythmic memory」とよぶ<sup>1)</sup>。

幼少時より音刺激に親しむ機会の少ない聴覚障害者にとっては、リズム感を養うことは健常人に比して容易なことではないと推測できる。現在の聾学校教育においては一般に信じられているような手話ではなく、補聴器を用いた口話が中心であり、そのため発話訓練などを中心とする残存機能訓練が最重要視されている。ただ聴覚障害者の発話は一般人にとって必ずしも聞き取りやすいものではない。その理由の一つに、発話リズムの不安定性と文の抑揚の不明瞭性が挙げられる。

我々は1975年以来人間のリズム記憶能力とリズム認識機序に興味をもちその解明に勉めてきたが、特にリズム認識アルゴリズムとリズム記憶のニューロンモデルを提唱するとともに健常人の音楽的能力を高めるためのシステムの開発を試みてきた<sup>2)~7)</sup>。本研究では今までの研究を元に人間のリズム認識記憶機序に関する基本的な性質を研究し、聴覚リハビリテーションや聾啞者教育への応用をめざすリズム認識記憶能力訓練システム開発の可能性を探ることを目的とするものである<sup>2)~8)</sup>。

### 2. リズム記憶の基本的性質の解明

#### 2.1 人間のリズム認識記憶における基本的仮説

最も基本的な強弱リズムを例にとると、リズム列は、音の大きさの異なる2つの音を例えば強拍を1、弱拍を0として表した一連の記号列として定義される (Fig. 1)。この仮定の下で人間のリズム記憶を考察してみるとつぎの二つの仮説がえられる。

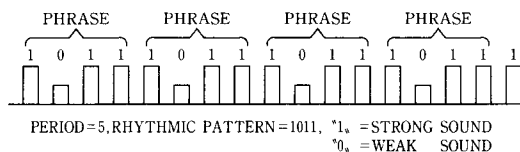


Fig. 1 Examples of the rhythmic pattern.

原稿受付：平成6年6月9日

\*長岡技術科学大学生物系

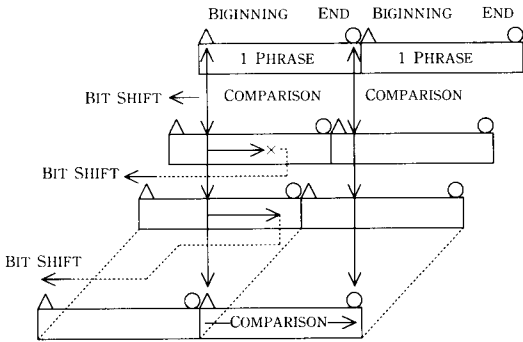


Fig. 2 An correlation algorithm of rhythmic pattern recognition.

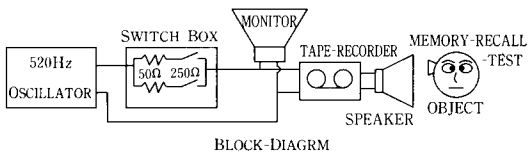


Fig. 3 The learning experiment for human rhythmic memory.

- \*1 原則として人間はリズム列を最低2フレーズ（例えば“強弱強，強弱強”）を入力されなければ，一つのリズムパターンを認識しない。
- \*2 ただしそれまでに何度も入力され十分に聞き慣れているリズム列は，1フレーズ入力されるだけで認識でき，自動的に再生して2フレーズ目以降は自分で続けることができる。

このうち前者はリズムの本質である「繰り返し」の性質を現しており，1フレーズ目と2フレーズ目を逐次的に照合してリズム認識を行なっていることを示している（Fig. 2）。

## 2.2 リズム短期記憶容量の測定

前述の仮説を検定するために男子大学生11名女子学生1名の計14名の健康な被験者に対して，リズム音列短期記憶再生実験を行なった（Fig. 3）。音としては聞き取りやすい520Hzの正弦波を用い，押しボタンによって減衰度を調整し，強拍（1）と弱拍（0）を作りだした。1拍の持続時間は0.2秒に固定し，リズム列の早さは76，116，152ビート／分の3段階に変化させた。リズム記憶再生課題としては，このシステムを用いて，乱数表により3から9bit長のフレーズ長のリズム列32種をあらかじめ作成してテープレコーダに記録して記憶実験テキストとしておき，被験者毎に聴取順序をランダムに変えて試行した。なおこのテキストに

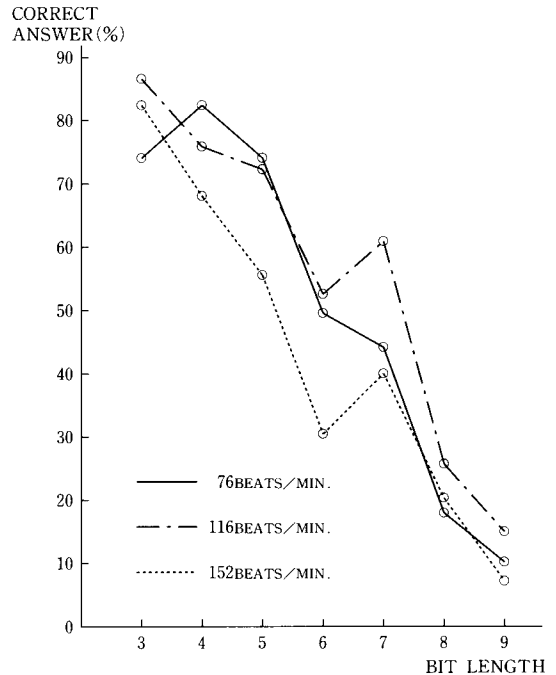


Fig. 4 The stress rhythmic capacity of normal subjects.

は実験に関する指示と例題をも付加しておき，全被験者をできるかぎり一様な条件の下に検査した。

まず最初に人間のリズム記憶容量を知るために，種々のbit長のリズム列を1フレーズづつランダムに聴取させ，試行毎に記憶したリズム列を1-0で記入させる記憶再生実験を行なった。Fig. 4に正答率で示したリズム記憶容量を示す（Fig. 4）。これによると7bit長のリズム列で正答率の一時的上昇が見られるほかは，大体においてリズムフレーズ長が長くなるほど正答率の低下を示すことがわかる。また予想されたとおりリズム列呈示速度の上昇と共に正答率は低下している。

またこの強弱リズムによる実験とは別に，高低リズムにおける記憶容量の違いを調査するため，音量は同じで高さが600Hzと700Hzの2種類の音をそれぞれ0と1のリズム列と考えたときに，同様の実験系でリズム記憶容量を計測した結果をFig. 5に示す。多少のパラ付きはあるものの強弱リズムを用いた場合と類似の結果が得られている。同じ被験者群の間で3種類のリズム列呈示速度を平均し，強弱リズム記憶容量と高低リズム記憶容量を比較した結果をFig. 6に示す。これによるとすべてのリズムフレーズ長において高低リズムよりも強弱リズムのほうが良い正答率を与えてい

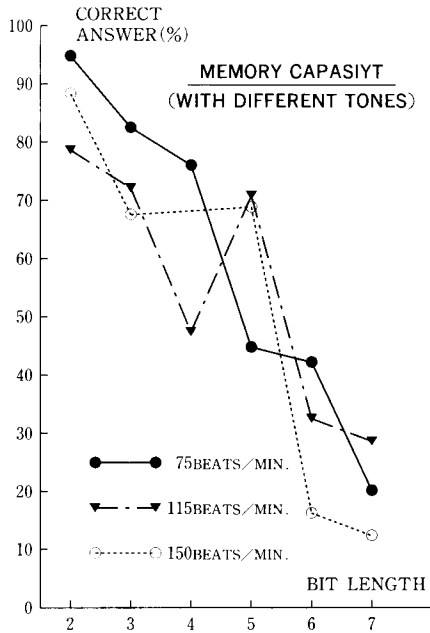


Fig. 5 The pitch rhythmic capacity of normal subjects.

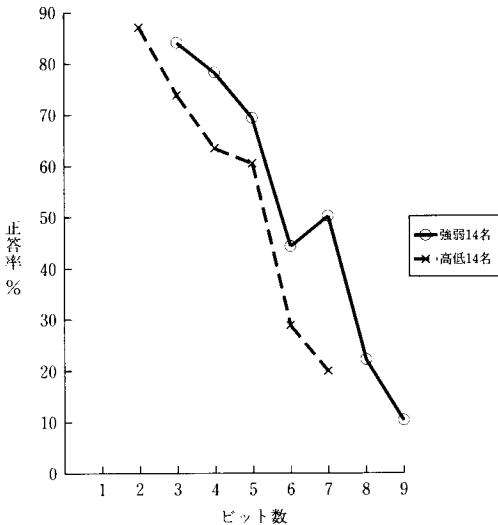


Fig. 6 The comparison between stress and pitch rhythmic memories.

ることがわかる。このことは世界中の言語において、高低アクセントより強弱アクセントのほうが優位であることによく対応していると思える。

両実験において、正答率50%を一つの指標として考えれば人間のリズム短期記憶容量として約5bitという値を得ることができる。なお個人差は大きいように見

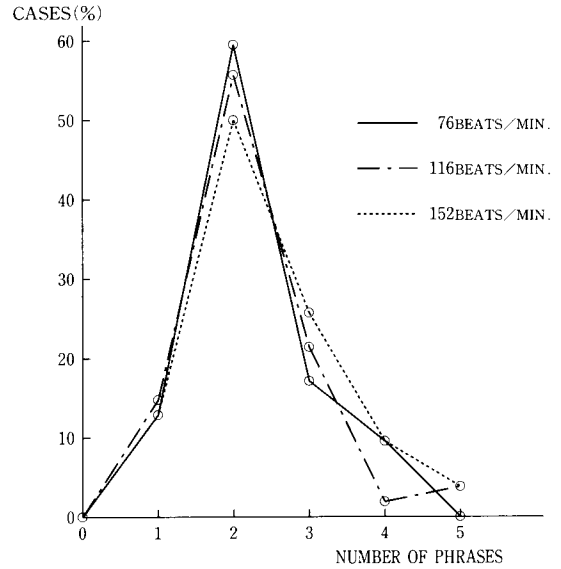


Fig. 7 Time points for rhythmic phrase recognition.

受けられたが、被験者の感想から今までに受けた音楽教育の程度がもっとも影響していると考えられた。

### 2.3 リズム認識機序仮定の検証実験

上記の仮説\*1の検証のために、健康な大学生男女延べ45名を被験者として、リズム列を連続的に提示した時どの時点で被験者がリズムフレーズを認識できるかを調べる実験を行なった。被験者には前述の強弱リズム列テキストの中からランダムに18種のリズム列を抽出し、それぞれを5秒間隔で提示し、被験者が一つのリズムパターンを認識できたときに「はい」と申告させ同時に認識したリズムの1フレーズを解答用紙に記入させた。結果を Fig. 7 に示すが、リズム提示速度に関わらず、第2フレーズを聴取し終わった時点でリズム列を認識できた被験者が大多数であった。このことにより、人間は2フレーズ聴取すると同時にリズムパターンを認識していることがわかり仮説\*1は実証されたといえる。仮説\*2については、Fig. 7 中で1フレーズ目で正答しているものも10%存在することから部分的に証明されたとも考えられるが、本来被験者の経験に依存する長期記憶に属した現象であるので厳密な証明は困難であると考えられる。

### 3. リズム認識アルゴリズムの研究

#### 3.1 リズム認識アルゴリズムの構築

リズム列が2フレーズ入力された時点で、未知のリズムパターンを認識することが可能になるためには、実時間で入力列の相関演算が行なわれねばならない。記憶容量と演算回数の立場から最適の方法は、Fig. 2に既に示したように位相の異なるリズム列を1bitづつ移動させて比較しながらリズムパターンの一致を見いだす方法である。これはリズムフレーズの先頭を仮定して、最後尾を検出して行く方法であるとも言える。

このリズム認識アルゴリズムを定式化すると次のようになる。

##### 「リズム認識アルゴリズム」

1. 入力は1で始まる (1, 0) の任意の長さのリズム列であり、最低2フレーズ繰り返され、以下の手順により認識される。
2. 第1レジスタ R1には左から順にリズム列が入力される。
3. 先頭でない1が入力された時、第2レジスタ R2にもその1以後の入力リズム列をR2の左から順に入力する。
4. 入力がある毎にR1とR2の排他的ORを取り、その値  $E_x$  が1の時は次の規則に従う
  - A.  $E_x = 1$  にした R2の値が1の時  
… R2を1bit 左にシフトする。
  - B.  $E_x = 1$  にした R2の値が0の時  
… R2の内容を R3に転送する。
5.  $E_x = 0$  でかつ R3の内容が R2の内容に含まれている時、R2の内容を1フレーズのリズムパターンとして認識・出力する。

#### 3.2 リズム認識神経回路の構築

人間の脳には約140億個のニューロンが存在すると考えられているが、各ニューロンが1bitの記憶素子であると仮定してその1%前後が音楽的なメロディーの記憶に使われているとしても、 $1.4 \times 10^8$  bitのメロディー記憶容量しかないことになる。50小節程度の通常の歌謡曲が含む情報量は約 $1.4 \times 10^8$  bitと言われており、これらの数値を考え合わせると人間は一生に100曲程度しか歌謡曲を暗唱できないことになる。しかし義務教育で教えられる小学校唱歌だけでも100曲以上あり、キリスト教徒が毎日親しんでいる日本語の讃美歌だけでも500曲以上存在していることを考えると、人

間は楽曲に含まれる情報のすべて記憶しているわけではなく、例えばリズムパターンを想起する時には記憶してきたリズムパターンを自動的に再生すること等の情報圧縮を行なっていると考えられる。

前記のリズム認識アルゴリズムを人間の脳が実際に採用しているかどうかは、現在まで神経生理学的に証明されていない。ただいかなるアルゴリズムと言えどもニューロン素子で実現できることは、類似のアルゴリズムが脳内に現実存在するための必須条件であるといえる。そのためここでは、脳内に存在することが確認されている通常の閾値ニューロン素子と抑制性・促進性の可変シナプス（以後基本素子と呼ぶ）だけで前述のリズム認識アルゴリズムを構築することを試みた。

人間の記憶には秒から分の長さの記憶保持時間をもつ「短期記憶」とそれ以上の記憶保持時間をもつ「長期記憶」の両者が存在することが、学習実験などから確認されている。通常の短期記憶の機序としては反響回路が想定されている。ここでも制御信号によって一巡時間が変化する反響回路を短期記憶回路 (STM: Short Term Memory) として採用した。一方長期記憶はシナプスの長期増強などがその機序であると考えられているが、ここではD. O. Hebbの提案による可促進シナプスを長期記憶回路 (LTM: Long Term Memory) の機序として採用した。

基本素子を組み合わせて排他的論理和回路・遅れ素子・時計素子・短期記憶回路・長期記憶回路など必要な演算回路を構築してFig. 8に示した。ここで小さな白丸は促進性シナプス、黒丸は抑制性シナプスを表し、シナプスの個数は結合重みを示している。また特に示されないかぎり、通常の神経細胞は値2の閾値を有するとしている。2つのニューロンに挟まれた矢印付きの線は、その始点と終点の双方のニューロンが同時に発火する度に結合が強化される可促進性シナプスを示している。

以上のニューロン回路を統合してリズム認識アルゴリズムを実現したニューロンモデルをFig. 9に示す。文献7で既に報告済みであるので本論文では詳細は示さないが、このニューロンモデルをPDP11/34計算機内でFORTRANで実装しシミュレーションをおこなった結果、人間と類似の応答を示すことが確認されている<sup>7)</sup>。

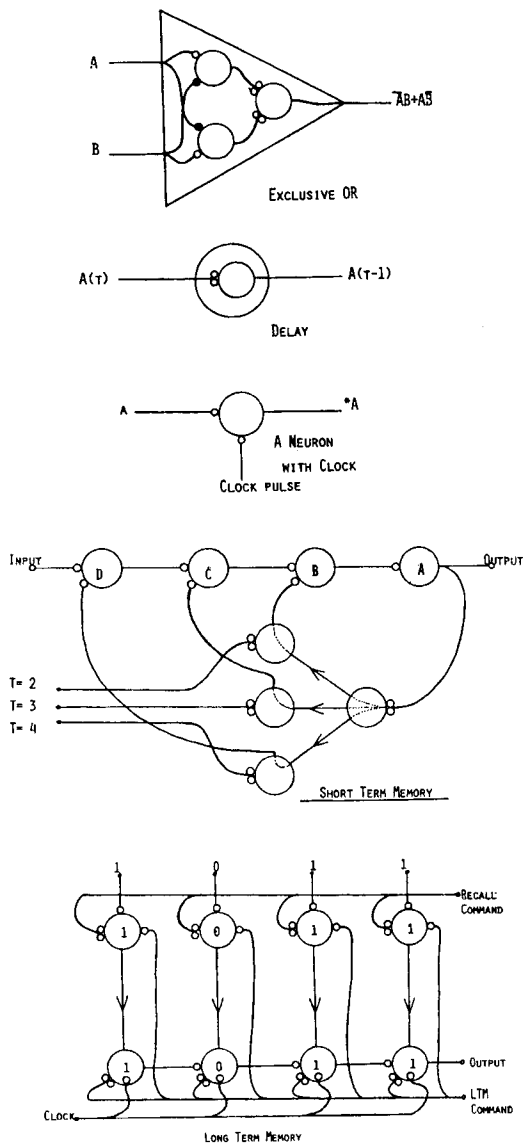


Fig. 8 The basic neuron circuits for rhythmic memory.

#### 4. 聾啞者のリズム記憶容量の計測

本研究で構築したニューロンモデルによれば、リズム短期記憶容量は短期記憶 STM の反響回路における一巡経路の容量で示される。人間の脳における反響回路の長さは経験と訓練によって変化しうるものであると考えられており、そのためリズム短期記憶容量も経験と訓練によって増加できることが推測できる。前述の健常者によるリズム記憶容量計測実験において、音

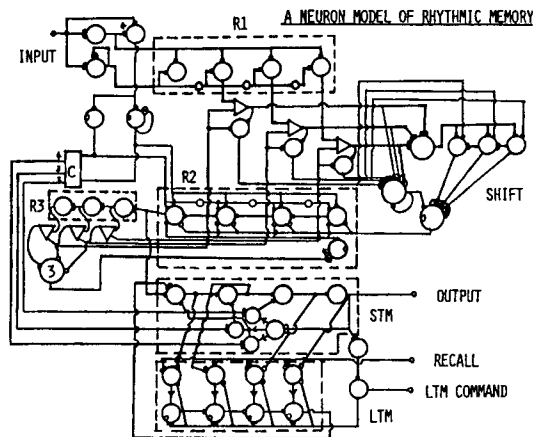


Fig. 9 The neuron model for human rhythmic memory.

楽教育の履歴の有無と日常生活における音楽に対する興味の程度が、記憶再生実験の成績と関連が深いという印象を得ている。例えば最長リズム短期記憶容量の 9bit 長を示した被験者はピアニストであり、最短の 4 bit 長を示したものは音楽教育を受けたことがなく音楽に対する趣味も全く持ち合わせていない壮年の被験者であった。

聾啞者はその聴覚障害のために幼少時から適切な音刺激を受ける機会に恵まれないことが多い。聾啞者教育においては高性能の補聴器のおかげで手話に頼らず健常者からの音声情報を理解することができる場合がほとんどであるにも関わらず、一般的に聾啞者の発語は聞き取りにくい。その理由の一つとして、聾啞者の発語は文の抑揚が健常人のものから大幅に偏移していることが挙げられる。もとより文の抑揚は世界の言語においても各言語毎に特長的で、その学習には文化的・幼児発達の素因が色濃く反映し、その解析・要因分析・矯正は容易ではない<sup>9)</sup>。

ここでは聾啞者の発語偏移が、そのリズム認識記憶能力の不足によるものであるとの仮定に立ち、発語訓練機器の開発をめざした基礎研究を行なった。

##### 4.1 聾学校生徒を対象としたリズム短期記憶能力計測実験とその結果

長岡聾学校の小学 4 年生から中学 3 年生までの計 18 名の聴覚障害児を対象群としてリズム認識記憶能力を計測した。リズム列はランダムに作成される 2 から 9 bit 長を 1 フレーズとする音の列であり、Fig. 10 に示すようにパソコンから出力されたリズム列はアンプを介してスピーカーより被験者に呈示される。またこれ

とは別に比較群として大学生健常者14名を用いてリズム認識記憶能力をあらかじめ計測しておいた<sup>2)</sup>。

聴覚障害者を対象とする実験においては、十分に調整された補聴器を用いたにもかかわらず、予備実験で強弱リズムの強拍と弱拍を区別することは極めて困難であったため、1055Hzと1408Hzの2種の音を用いた高低リズムについてのみ実験を行なった。また健常者に比してリズム認識に長時間を要するため、リズムの速さは113beats/minでのみ行なった。結果をFig. 11に示すが、健常者14名に対しての高低リズム列を用いて計測した結果を実線で、聾学校生徒18名の平均を破線で示した。これを見ると障害児と健常者のリズム

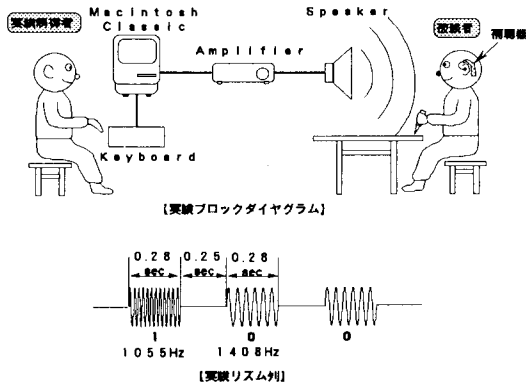


Fig. 10 Measurement of rhythmic capacity on the hearing disabled.

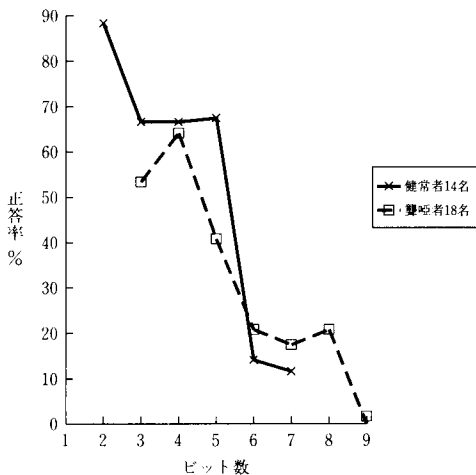


Fig. 11 The comparison between the hearing disabled and the normal subjects.

記憶能力差は正答率50%で考えて高々1bitであることがわかった<sup>9)</sup>。

今回は高低リズムのみのリズム記憶能力の調査ではあったが、健常者との差は予想より少なく、一方健常者では適切なリズム訓練を行うことによりリズム記憶能力を向上させられることが確認されているので聴覚障害者においても適当な訓練装置を開発することにより、障害者の社会参加を助ける発話援助システムが構築できる可能性があると言えよう。

## 5. 考 察

人間のリズム認識機構とリズム記憶能力に注目し、基礎的な記憶認識再生実験を行なって健常者のリズム記憶能力を計測した。またリズム認識機構のアルゴリズムを考案しニューロンモデルで実現した。以上の結果をもとにリズム記憶能力が短期記憶の反響回路の容量に依存することを仮定し、聴覚障害者の発話能力訓練装置開発をめざして、その基礎的なデータを得るため聾学校の生徒のリズム記憶能力を測定し健常人と比較した。その結果平均的には聴覚障害者は1bit程度、健常者より少ないリズム記憶能力を有していることがわかった。実験中、聴覚障害者においても適切な補聴器を用いれば十分に健常者と同じ装置でリズム聴取実験が可能であることがわかった。また健常者との違いが予期したより少ないこと、およびリズム認識記憶能力は訓練によって増加させることができると考えられていることから、適当な訓練装置を開発することにより聴覚障害者のリズム記憶能力も改善できる可能性は高いと考えられる。

この訓練装置は聴覚障害者が自分自身では自覚困難なリズム能力を意志により改善することをめざすもので、広義のバイオフィードバック装置と見做すことができよう。最近のバイオフィードバック理論においては、人間の内部モデルを機器自身の中に備えた第3世代のバイオフィードバック装置の重要性が提唱されている。ここで提唱したリズム認識機構のニューロンモデルは、リズム認識記憶現象に関して現在知りうるかぎりの生理学的知識に基づいた生体のモデルと考えることができ、このアルゴリズム中のパラメータを指標として、優しくしなやかに人間に適応したリズム認識記憶訓練装置を開発できる可能性があると考えられる。

## 6. 謝 辞

激務の間を快く実験に協力して下さった長岡聾学校の先生方および長時間被験者となってく下さった聾学校の生徒さん達、マッキントッシュ上で作動するリズム記憶計測プログラムを作成してくれた長岡技術科学大学生物系山元研究室高原美規助手、および聾学校におけるリズム記憶再生実験を担当してくれた本学生物機能工学専攻修士1年の早川岳英君はじめ実験に協力してくれた福本研究室の院生諸君に感謝します。

## 参 考 文 献

- 1) 黒沢隆朝：「楽典」，音楽の友社，pp.13-14，1973
- 2) 福本一朗：「人間のリズム記憶特性」，人間工学，Vol.11，No. 5-6，pp.177-178，1975
- 3) 福本一朗・斎藤正男「リズム記憶のニューロンモデル」，医用電子と生体工学，Vol.13 特別号，pp.537，1975
- 4) 福本一朗・斎藤正男「リズム記憶のニューロンモデル」，電子通信学会総合全国大会論文集，Vol.43，No.4，pp.206，1977
- 5) 福本一朗・斎藤正男「人間のリズム記憶認識アルゴリズム」，日本人間工学会第18回大会論文集，pp.51-52，1977
- 6) I. Fukumoto & M. Saito；「A model for the mechanism of human recognition of rhythmic patterns」，The 4th Int. Joint Conf. on Pattern Recognition，Kyoto，Nov.，pp.401-404，1978
- 7) 福本一朗；「リズム記憶能力診断装置の開発」，東京大学医学部情報処理室報告書，Vol.8，No.1，1981
- 8) 櫻林仁・村井靖児・林庸二・中村均・泉山中三；「音楽療法入門」，芸術現代社，1981
- 9) 早川岳英・松本義伸・高原美規・福本一朗；「リズム記憶再生能力訓練システムの基礎研究」，日本人間工学会第35回大会講演集 1B06，120-121，1994.6