

氏 名	加 納 慎 一 郎
授 与 学 位	博 士 (工 学)
学 位 授 与 年 月 日	平 成 8 年 3 月 26 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項
研 究 科, 専 攻 の 名 称	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 (博 士 課 程) 電 気 及 通 信 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	聴 覚 系 に お け る 時 間 長 情 報 の 保 持 に 関 す る 研 究
指 導 教 官	東 北 大 学 教 授 星 宮 望
論 文 審 査 委 員	東 北 大 学 教 授 星 宮 望 東 北 大 学 教 授 曾 根 敏 夫 東 北 大 学 教 授 澤 田 康 次 東 北 大 学 助 教 授 二 見 亮 弘

論 文 内 容 要 旨

ヒトは聴覚系は、音源方向の知覚、周波数の高低の知覚にはじまり、話者認識、音声に対する選択的注意、雑音により失われた情報の復元、音声情報の構文的／意味的分割に基づく意味理解に至るまで優れた時系列処理能力を持っている。しかしこの能力を実現する機構は極めて複雑であり、その解明は未だ進んでいない。脳における高次情報処理の解明のため、また工学的な見地からもこの時系列処理機構のモデル化が待たれている。

そこで本研究では、周波数、強度とならび聴覚時系列のうちで最も基本的なパラメータである時間の長さに関する情報（時間長情報）に注目し、その脳内における情報表現法、およびその短期記憶機構を明らかにすることを目的として大別して3種類の基礎的な実験を行なった。本論文はそれらの成果をまとめたもので、全文5章からなる。以下に各章の要旨を述べる。

第 1 章 序 論

第1章は序論である。本研究の背景および従来の研究の問題点を述べ、本研究の目的を示した。

第 2 章 時間長情報の短期記憶能力に関する聴覚心理物理実験

第2章では、時間長情報の短期記憶能力を心理物理的に計測し、その特性を明らかにする実験の結果について述べている。本実験は従来の時間長情報の取り扱いに関する実験では意識的に排除されていた短期記憶の要素に着目し、「呈示された時間長情報の記憶痕跡の経時変化」を調べることを目的としたものである。

被験者に長さ T_1 (150~750ms, 15段階) の第1音と長さ T_2 ($T_1/1.5 \sim 1.5T_1$, 7段階) の第2音を、刺激間間隔 (ISI) 1~5s (9段階) でランダムに呈示し、この2音の長短を3件弁別法により判断することを求めた。呈示音には60dB SL, 1kHz トーンバーストによる継続音を用い、ヘッドフォンから両耳呈示した。この実験から各条件における主観的等価値、不定域を恒常法によって求め、それと第1音の音長 (T_1)、刺激間間隔 (ISI) との関係調べた。主観的等価値は「呈示後の第1音のイメージ」、不定域は「そのイメージの忘却の度合」を表すものであると考えてよい。

本実験の結果、200~500ms 程度の長さの音には、他の長さの音に比べて、刺激間間隔 (ISI) が長くなるに従い不定域 (IU) の増加が認められた (図1)。この結果は、ある長さの音が他の長さの音に比べてより忘れやすい、すなわ

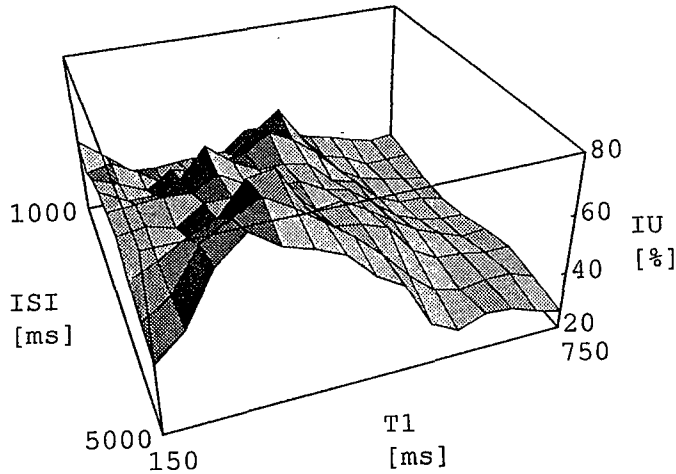


図1 不定域 (IU [%]) の測定結果の例

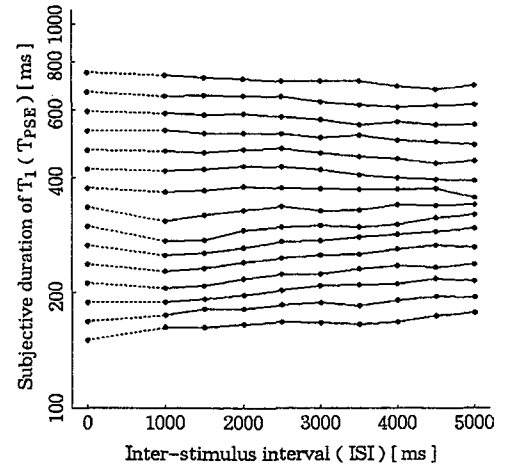


図2 主観的時間長 (T_{PSE} [ms]) の測定結果の例

ち「忘れやすい長さの音」が存在することを示すものであり、脳内において時間長情報が、その長さによって異なった扱い方をされることを示唆するものである。

また、第1音の物理音長に対する比率で表される主観的等価値を時間スケール変換した値である主観的時間長 (T_{PSE}) は、時間経過と共に実験中に呈示した音長の平均値の方向へ徐々に近づく傾向を示したが、異なる時間長の主観的時間長が幾つかの値に収束する傾向 (量子化) は認められなかった (図2)。これはアナログ量として表される時間長情報が短期記憶における忘却過程でもカテゴリー化されず、異なる時間長の相対的關係 (長短に関する情報) は保存されていることを示すものである。

これらの結果は、脳の時間長保持、弁別の性質の一端を明らかにするもので、聴覚系における短期記憶機構の解明に大きな示唆を与えるものであると考えられる。

第3章 大脳聴覚野における音長の情報表現法に関する実験

第3章では、音の呈示に対する誘発脳磁界を計測し、それから誘発応答の信号源を推定することにより、大脳聴覚野における音長に関する情報の表現法を調べる実験を行なった結果について述べている。

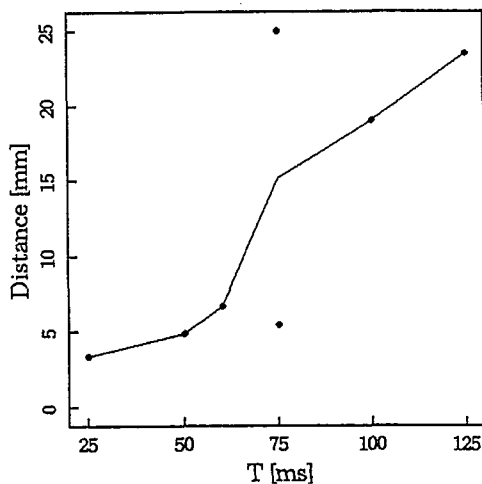


図3 N100m, P200mの信号源間の距離と呈示音長の関係

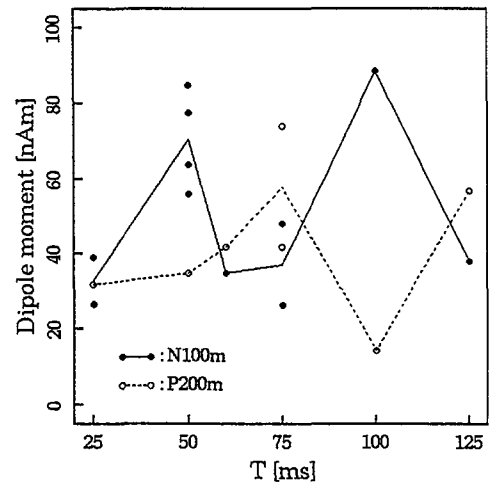


図4 ダイポールモーメントと呈示音長の関係

磁気シールドルーム内の被験者の左耳にクリスタリアフォンにより音を呈示し、64チャンネル SQUID (superconducting quantum interference device : 超伝導量子干渉素子) 磁束計によって右側側頭部の誘発脳磁界を計測した。計測した誘発脳磁界の信号源として単一の等価電流双極子を仮定して、推定された電流双極子の性質 (位置, 向き, 強

さ)と呈示音の音長との関係を検討した。

本実験の結果、25~125msの音長の呈示に対するN100m、P200mの信号源の位置間の距離、およびこの両者のダイポールモーメント(信号源の強さを表し、その活動に参加するニューロンの個数が反映される)に、呈示音長の違いが反映されることを示唆するデータが得られた(図3、図4)。また、さらに長い音長(500~3000ms)に関する情報の表現法を調べるために、その音の呈示終了に対する誘発応答(オフ反応)に注目して検討を行なうための予備実験を行った。この実験の結果、呈示音にホワイトノイズを用いた場合にオフ反応の信号源推定を行なうことが可能であることが示され、さらに検討を行なうことが今後の課題として残された。さらにこの両者の実験で、音の呈示に対する誘発脳磁界であるN100m、P200mの信号源の位置が大脳聴覚野上に推定され、P200mの分布がN100mの分布の前方に位置することが確認された。

第4章 大脳聴覚野における音長の短期記憶に関する実験

第4章は、誘発応答により聴覚短期記憶のメカニズムを推定し、また第2章で示された時間長情報の複雑な忘却特性を検証するために行なった実験について述べている。1種類の刺激(標準刺激)を繰り返し与えているときに、まれに別の刺激(特異刺激)を与える(オドボール課題)と、その別の刺激に対して被験者に異なった反応を示す。この反応はミスマッチ反応と呼ばれ、聴覚短期記憶が反映しているといわれている。本実験では標準刺激と特異刺激との属性の差を音長のみとし、脳電位により計測されるミスマッチ反応であるMMN(mismatch negativity)、および脳磁界によるMMF(mismatch field)を計測した。(MMFの計測波形の例を図5に示す。)

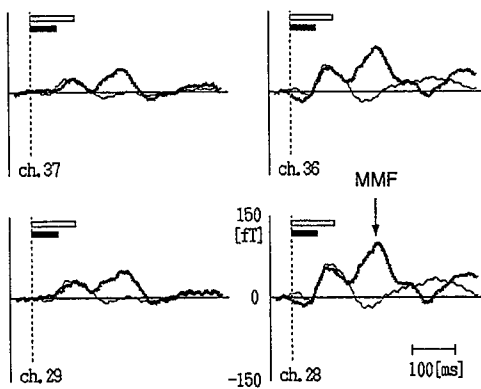


図5 MMF計測波形の例。細線：標準刺激(音長100ms：呈示時刻を白抜き四角で表示)に対する誘発応答。太線：特異刺激(音長60ms：呈示時刻を黒四角で表示)に対する誘発応答。

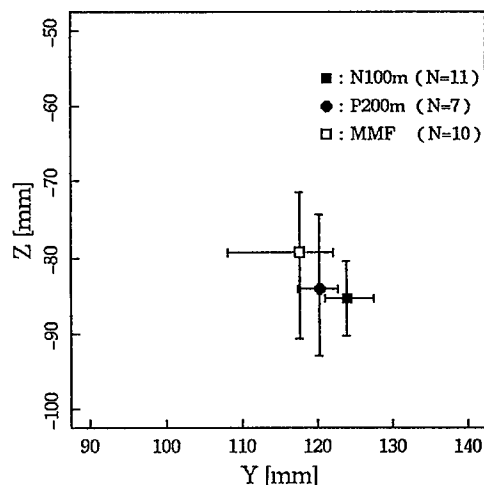


図6 N100m、P200m、MMFの信号源分布。y軸の左向きが前頭方向、z軸の上向きが頭頂方向。図のエラーバーは信号源の各軸方向の分布範囲、交点はその平均値を示す。

MMN計測実験では、標準刺激音長(T_{std})を100~400ms(4段階)、特異刺激音長(T_{dev})を標準刺激音長の60~90%(4段階)として計測を行なった。被験者には60dB SL、1kHzトーンバーストによる音刺激をヘッドフォンから両耳呈示し、その誘発応答を F_2 、 F_4 、 T_4 、 P_4 の4箇所から双極誘導した。本実験の結果、標準刺激音長を固定とした場合、MMNの振幅、潜時と、特異刺激音長と標準刺激音長の比率(T_{dev}/T_{std})との関係は、対数関数で近似できることが確認された。これをふまえて、その曲線の形状と、被験者の標準刺激音長に対する短期記憶特性とに相関があることを作業仮説として、標準刺激音長と近似曲線の形状との関係を調べた。その結果、第2章で示された「忘れやすい長さの音」の存在を裏付ける結果が得られ、ミスマッチ応答には心理物理的実験により定量化されるヒトの聴覚情報の短期記憶能力が反映されることを示した。これはミスマッチ応答を用いることで、ヒトの聴覚情報の短期記憶能力を非侵襲計測からも検証可能であることを示唆するものであり、興味深い知見である。

上記のうち標準刺激音長を100msとした4条件を含むいくつかの条件についてMMFを計測した。用いた計測シス

テムは第3章と同一の64チャンネルSQUID磁束計である。その結果、MMFの信号源は、第3章で示されたN100m、P200mの信号源より数mm前方に推定された(図6)。また T_{dev}/T_{std} が大きくなると共に、MMFの信号源が頭部の深さ方向に分布する可能性を示唆した。このうち1条件については、現在世界最大規模である256チャンネル全頭型SQUID磁束計による計測も実施している。この結果誘発脳磁界の全頭での時空間ダイナミクスを明瞭に観察でき、256チャンネル脳磁界計測の希少な臨床計測例の一つとなった(図7)。

なお、本研究によって得られた知見をもとに、第4章の最後で時間長情報の大脳聴覚野における情報表現法に関する仮説を提案し、議論を試みた。これは聴覚刺激の呈示によって大脳聴覚野上に興奮の伝搬が生じ、N100m、P200m、MMFの信号源がその軌道上に存在するというもので、ミスマッチ応答を利用することで、この大脳聴覚野の発火の時間特性を観測できる可能性を示唆している。

第5章 結 論

第5章は結論である。本研究をまとめ、今後の課題を示した。

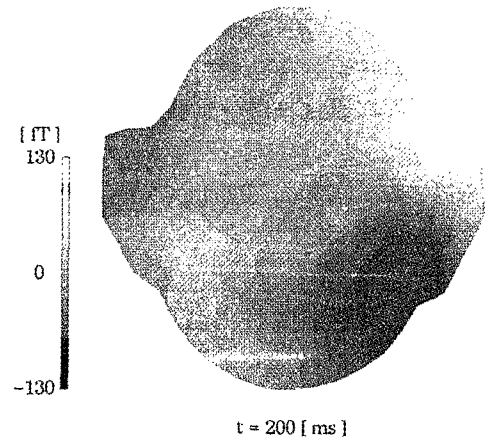


図7 MMFの256チャンネル全頭計測の例。特異刺激に対する誘発応答の潜時200msにおける等磁界図。上が前頭部、右が右側側頭部である。

審 査 結 果 の 要 旨

ヒトの聴覚系は、単語の識別から、音声情報の意味理解に至るまでの優れた時系列処理能力を持っている。しかしこの能力を実現する機構は極めて複雑であり、その解明は未だ進んでいない。筆者は、聴覚系で扱われている時系列のうちで周波数、強度と並んで最も基本的なパラメータのひとつである時間の長さに関する情報に着目し、その脳内における情報表現法、およびその短期記憶のしくみを明らかにすることを目的として研究を行なった。本論文は、それらの成果をまとめたもので、全文5章からなる。

第1章は序論である。

第2章では、時間長情報の短期記憶能力を調べるために行なった提示音長比較の聴覚心理物理実験の結果について述べている。200～500msの長さの音が他の長さのものに比べて忘却されやすいことを明らかにした。また、アナログ量である時間長は、短期記憶における忘却過程でも、異なる時間長の相対的な長短の関係は保存されることを示した。

第3章では音の提示に対する誘発脳磁界を計測し、その信号源を等価電流ダイポールにより推定することで大脳聴覚野における音長に関する情報の表現法を調べる実験の結果について述べている。25～125msの音の長さに関する情報が、その誘発応答の信号源の位置、応答に参加するニューロンの個数（信号源の強さ）に反映されることを示した。さらに長い音長の表現法は、提示音にホワイトノイズを用い、オフ反応の信号源を推定することにより検討可能であることを示した。

第4章では、音長の違いによるミスマッチ応答を脳電位、脳磁界の両方で計測した実験の結果について述べている。ミスマッチ応答には心理物理的実験により定量化されるヒトの聴覚情報の短期記憶能力が反映されることを明らかにした。またこれを用いて第2章で示した「忘れやすい長さの音」の存在が、非侵襲脳活動計測によっても支持されることを示した。この知見は、心理学と生理学の接点を工学的観点から探る上で極めて有意義である。また時間長ミスマッチ応答を利用することにより、聴覚刺激の提示に対する大脳聴覚野上での発火の時間特性を脳磁界計測によって観察できる可能性を指摘した。

第5章は結論である。

以上要するに本論文は、ヒト聴覚系における時系列処理機構の解明に関して有用な知見を与えたものであり、生体情報工学、生体電子工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。