

平成 21 年 3 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2007～2008

課題番号：19700244

研究課題名 (和文)

脳波・脳磁図計測と計算モデルを用いた音の補完現象の研究

研究課題名 (英文)

Restoration of sounds revealed by EEG, MEG and a computational model

研究代表者

杉本 俊二 (Shunji Sugimoto)

豊橋技術科学大学・工学部・助教

研究者番号：50422811

研究成果の概要：

本研究では、脳波/脳磁図計測を用いて音声の補完現象にかかわる事象関連電位 (ERP) を明らかにし、その成果を踏まえて、ERP 成分を予測する計算論的神経モデルを作成することによって、音声の符号化にかかわる神経処理機構を調べた。音声入力に対して予測した ERP 成分と、実際に観察された ERP を比較したところ、本計算モデルにより予測可能であるという画期的成果が得られた。本成果は、並列な 2 次線形システムとして再現可能な各神経集団の活動が音声符号化の基礎になっていることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,100,000	0	2,100,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,100,000	300,000	3,400,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：脳認知科学

1. 研究開始当初の背景

ある音から一部分を除いた後、その部分に雑音を挿入すると、元の音が存在しているかのように知覚されることがある。このような音の補完現象あるいは聴覚誘導については、

純音や周波数変調音 (Ciocca と Bregman, 1987)、音声 (Nakajima ら、1995)、音楽 (Sasaki, 1980) などにおいて生じることが知られている。最近の脳波計測研究では、音声に対する補完が生じたときの指標として、事象関連電位 (ERP) 成分である N400 に

差がみられることが明らかになっている (Sivonen, 2006) .

一方、音声刺激に対して生じる ERP としては、N1-P2 複合体など、誘発電位 (EP) に分類されてきたものを含め様々な成分が知られている (Wunderlich ら, 2006) . また、音声の意味的または統語的な特性に応じて惹起される ERP 成分として、音調の切れ目に生じる陽性成分 (Steinhauer ら, 1999) , 意味的な負荷が高いときに現れる N400 (Sivonen ら, 2006) , 統語的な逸脱に対して生じる N400-P600 (Meuller ら, 2007) などが観察されている.

しかし音声の時間周波数情報が、特に中枢神経系での神経集団によってどのように符号化され、またその結果としてどのように ERP として現れるかについてはこれまで明らかになっていない. 音声に対する ERP 成分の発生を再現するモデルを作成し、音声の符号化にかかわる神経処理機構を明らかにすることは、音声認識システムやブレイン-コンピュータインタフェースなどの様々な認知科学的・工学的分野での研究発展において不可欠であると思われる.

2. 研究の目的

本研究では、脳波/脳磁図計測を用いて、音声の補完にかかわる ERP を明らかにするとともに、神経応答のコンピュータシミュレーションを用いて ERP をモデル化し、音声に対する神経処理機構を明らかにすることを目的とした. 音声に対する ERP のモデル化に際しては、電位感受性色素を用いたモルモット聴覚皮質応答パターン計測結果も用いた. 音声に対する ERP が 2 次線形システムによって表現されると仮定し、そのシステムへ音声刺激を与えたときの応答と、実際に頭皮上で観察される ERP を比較することに

よって、音声の符号化に関連した神経処理機構を調べた. 音声の補完現象の生理学および計算論的研究を通じ、音声処理機構の基礎を明らかにすることが本研究のねらいである.

2. 研究の方法

32 チャンネルデジタル脳波計 (Active Two System, BIOSEMI 社)を用いて、10%法 (拡張 10-20 法) により脳波計測を行った. 各音刺激条件 (純音, 音声) において 100 回の試行を行い、100 μV を超えた電位を持つ試行をデータから除去した. 両耳朶または鼻尖を基準電極とし、刺激提示前 100 ms の平均電位を 0 μV として振幅補正を施した後、加算平均により ERP を求めた.

聴覚実験で使用した音声は、「ごゆっくりおくらしてください」、「ありがとうございます」、「どういたしまして」などの日常句である. まず、各オリジナル音声の一部分を無音にすることによって、そのままでは聴取不可能であるような音声を作成した. 次に、それが聴き取り可能になるよう、その無音区間にホワイトノイズを挿入した音声を作成した. 各音声を被験者へそれぞれ 100 回繰り返し呈示し ERP を求めた.

ERP のコンピュータシミュレーションは、ERP 成分 i の波形 $v_i(t)$ を、次の 2 次線形システムによってモデル化することにより行った.

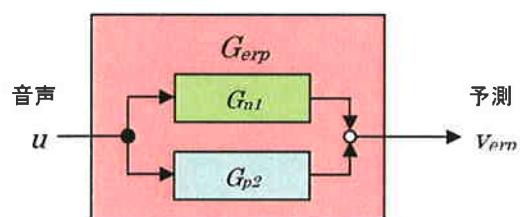


図 1. 音声に対する ERP を予測する計算モデル. 純音に対する N1 と P2 から伝達関数 G_{n1} , G_{p2} を得る.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_i(t) \\ m_i(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_i & -\omega_i \\ \omega_i & \alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_i(t) \\ m_i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p_i \\ q_i \end{bmatrix} u(t) \quad (1)$$

$v_i(t)$ をそのERP成分に寄与する神経集団の膜電位, $m_i(t)$ を膜電位修飾因子, $u(t)$ を外部入力とした. 神経集団の膜電位をERP成分の線形和で表現できると仮定すると, 頭皮上で観察されるERPの伝達関数 G_{erp} は次式によって表現される.

$$G_{erp} = \sum_i \frac{p_i(s - \alpha_i) - q_i\omega_i}{(s - \alpha_i)^2 + \omega_i^2} \quad (2)$$

一般に, 純音に対するERPには, N1, P2成分が顕著に現れるのに対し, 定常成分は観察されない. この前提の下に, ある神経集団において純音に対する応答をステップ入力に対する出力として近似したときの応答波形 $v_{erp}(t)$ は次式となる.

$$v_{erp}(t) = \sum_i \frac{e^{\alpha_i t}}{\alpha_i^2 + \omega_i^2} \{ (p_i\omega_i - q_i\alpha_i) \sin \omega_i t \} \quad (3)$$

ただし $q_i = -p_i\alpha_i/\omega_i$ であり, 各ERP成分は3つのパラメータ α_i, ω_i, p_i により決定される.

3. 研究成果

補完音声を提示した場合, 実際に補完が生じて

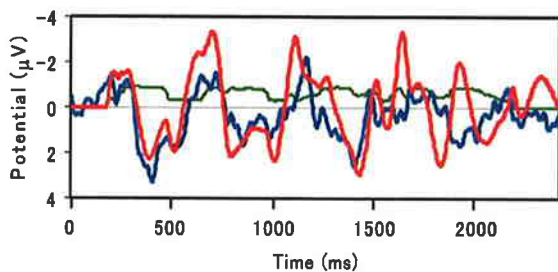


図2. 音声 (/ごゆっくりおくつろぎください/) の振幅変化を計算モデルへ入力したときのERP予測. 赤線は予測ERP, 青線は実測ERP (FC1, 5名平均), 緑色は符号反転した入力振幅を示す.

聞き取り可能になった被験者と, 聞き取り可能に

ならなかった被験者がみられた. 音声の補完が生じた参加者の脳波を調べたところ, 前側頭部や前頭中心部でのERPに, 約10 Hzの周期的リズムが生じるという傾向が観察された. この周期的リズムは, オリジナルの音声を提示した場合にも同様に観察されたことから, 音声の補完や理解に関連した生理学的基礎であると考えられた.

計算論的神経モデルの作成に当たり, 電位感受性色素を用いた光学的計測を行って, 交替音や周波数変調音に対するモルモット聴覚皮質ニューロンの応答パターンを観察した. その結果, 聴覚皮質において発生する周期的リズムの周波数特性と, 興奮と抑制の相互作用による音刺激の聴覚皮質表現が示された. これらの結果から, 聴覚皮質ニューロンの周期的リズムを再現する計算論的神経モデルを作成した.

音声に対するERPの予測に際しては, 純音によって惹起されるERP成分によりパラメータ特定を行った. 純音 (周波数1 kHz, 持続時間3 s) に対するERP波形を求めたところ, 計測した32チャンネル中, FC1 (front-central: 前頭・中心部) におけるERPが最大振幅を示した. そこで, モデル化および予測にはこの部位の波形を用いた. 波形では, N1およびP2成分が顕著に認められたことから, 勾配法を用いてこれら両成分を式(3)により近似し伝達関数 $G_{erp} = G_{n1} + G_{p2}$ を得た (図1). ただし, N1, P2の両成分において $\alpha_i < 0, \omega_i > 0$ とし, また, $p_{n1} > 0, p_{p2} < 0$ として近似解を求めた.

図2に, デシベルスケールに変換した音声の振幅変化 (図2緑線) を G_{erp} へ入力した例を示す. モデルによる予測波形 (図2赤線) を, 音声に対し実際に得られたERP波形 (図2青線) と比較したところ, 基本的な特徴がよく一致していることが確認された. この結果は, 音声に対するERP波形が, 純音によつ

て生じるN1 (約 5 Hz) とP2 (約 2 Hz) の周波数特性によって近似可能であることを示している。ただし、時間の経過とともに、大きな振幅を持つ誤差が生じるようになるという傾向が観察された。この差が、音声理解の有無 (Takeichiら, 2007) や意味のおよび統語的な音声処理において特有に現れるERP成分 (Sivonenら, 2006 ; Muellerら, 2007) をどのように反映しているかを調べるのが、将来の課題となる。

本研究では、音声の補完現象についての脳波計測実験等により、音声に対するERP成分が、その音声の振幅変化によって引き起こされる2次元線形システム応答であるという仮説を得た。この仮説に基づき、音声刺激に対するERP波形を予測する計算論的神経モデルを作成した。モデルシステムへ音声の振幅変化を与え、実際に頭皮上で観察されたERPと比較したところ、予測可能であるという画期的な結果が得られた。本結果は、並列な2次元線形システムとして再現可能な各神経集団の活動が音声符号化の基礎になっていることを示しており、本計算モデルは、音声の意味的・統語的処理の理解へ向けた新たな脳研究の発展に貢献すると思われる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

杉本俊二, 山口陽子, 堀川順生, 音声に対する事象関連電位のモデル化, 豊橋技術科学大学グローバルCOEプログラム「インテリジェントセンシングのフロンティア」第2回“センシングアーキテクト”による発表会 最先端インテリジェントセンシング研究開発2009資料集,

150-151, 2009, 査読無

杉本俊二, 塚原伸亮, 池田尚生, 山口陽子, 堀川順生, 聴覚事象関連電位のモデル化, 日本音響学会聴覚研究会資料. Vol. 39, No. 7, 677-681, 2008, 査読無

Shunji Sugimoto, Yuta Suzuki, Junsei Horikawa, Time-frequency feature extraction from frequency-modulated sounds in a population of auditory cortical neurons, Acoust. Soc. & Tech. 29, 36-40, 2008, 査読有

杉本俊二, 堀川順生, 聴覚皮質ニューロンの時空間応答パターンが示す音脈分凝の生理学的機構. “センシングアーキテクト”による最先端「インテリジェントセンシング研究開発」事例集 (2008), 50-51, 2008, 査読無

[学会発表] (計 4 件)

杉本俊二, 塚原伸亮, 池田尚生, 山口陽子, 堀川順生, 音声に対する事象関連電位を予測する計算モデル, 日本音響学会2009年春季研究発表会, 2009年3月18日, 東京工業大学

杉本俊二, 山口陽子, 堀川順生, 音声に対する事象関連電位のモデル化, 豊橋技術科学大学グローバルCOEプログラム「インテリジェントセンシングのフロンティア」第2回“センシングアーキテクト”による発表会, 2009年3月4日, 豊橋技術科学大学

Naoki Ikeda, Shunji Sugimoto, Junsei Horikawa, EEG analysis of auditory induction of spoken words, 第13回聴覚研

究フォーラム，2008年12月6日，同志社び
わこリトリートセンター

Shunji Sugimoto, Junsei Horikawa, Physiological
mechanisms of auditory stream segregation
interpreted by spatio-temporal response patterns
of auditory cortical neurons. Proceedings of the
First Symposium on Frontiers of Intelligent
Sensing FIS2008, Toyohashi, March 4, 2008,
Toyohashi, Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

杉本 俊二 (SUGIMOTO SHUNJI)
豊橋技術科学大学・工学部・助教
研究者番号：50422811

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者