

平成 22 年 3 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(B)  
 研究期間：2007～2009  
 課題番号：19300090  
 研究課題名（和文）  
 ヒトの音検知に対する注意の効果の脳波，脳磁界，fMRI による情報科学的研究  
 研究課題名（英文）Auditory selective attention studied by EEG, MEG and fMRI recording  
 研究代表者  
 堀川 順生 (HORIKAWA JUNSEI)  
 豊橋技術科学大学・工学部・教授  
 研究者番号：50114781

研究成果の概要（和文）：聴覚における注意，特に，聴覚空間選択的注意の脳機構について，ヒトの脳電位（EEG），脳磁界（MEG）および fMRI 計測を行い解析した．注意時に上側頭皮質，上頭頂皮質，上前頭回，外側前頭皮質，前島で活動が増大し，これらの部位は事象関連電位（ERP）の P200，N300，P600 成分の増大の分布に一致した．注意時には，前頭-側頭-頭頂領域の時空間的相互作用により非注意刺激への抑制が働くことが示唆された．

研究成果の概要（英文）：The brain mechanisms of auditory selective attention were investigated by recording EEG, MEG and fMRI from subjects performing dichotic oddball tasks. fMRI recordings showed that under attention the brain activity increased in the superior temporal area, superior parietal area, superior frontal gyrus, lateral prefrontal area and anterior insula. These areas coincided with the distribution of the increased P200, N300 and P600 components of the event-related potentials. The present results indicate that the spatiotemporal interaction among the frontal, parietal and temporal areas provides inhibitory effects on the unattended sounds.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	7,500,000	2,250,000	9,750,000
2008 年度	4,400,000	1,320,000	5,720,000
2009 年度	2,800,000	840,000	3,640,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・脳認知科学

キーワード：聴覚空間選択的注意，脳機構，EEG，MEG，fMRI，両耳分離聴オドボール課題，ヒト

## 1. 研究開始当初の背景

ヒトの聴覚における選択的注意の脳機構の研究は，1970年代初頭に行われたHillyardらによる選択的注意時の脳波（EEG）計測に

始まる．彼らは，左右の耳に別々の音（純音）を与え，片側の耳に注意したとき（聴覚空間選択的注意）に，音開始後90-100 msの脳波（事象関連電位 event-related potential:

ERP)の陰性成分(N1またはN100)が増大することを報告した。その後Woldorffら(1987)は、音開始後20-50 msの陽性成分P20-50も増大することを示した。この増大は、これらの成分に対応する脳磁界ダイポールが聴覚皮質に位置すること、および、開始後10 ms以内に現れる聴性脳幹反応には増大が見られないことから、聴神経ではなく聴覚皮質で起きる変化であることが示された。

PETやfMRIを用いた研究から、聴覚の空間選択的注意時に、前頭皮質や一次および高次聴覚皮質の活動が増大することも報告されている(Alhoら1999, Janckeら1999)。この活動の増大が脳内のどのような機構で起きるのかについてはまだ明らかではない。しかし、前頭前野が損傷した患者で、音に対する聴覚皮質の脳波(ERP)が音開始後30 ms(N30成分)で増大すること、また、損傷側と反対側の耳に注意した場合には、健常者で見られるN1成分の増大が見られなくなること(Knightら1995)から、注意時に前頭前野が聴覚皮質に対して抑制と興奮の両方の影響を与えていることが示唆される。

近年、多チャンネル脳波記録による電流密度解析から、オドボール課題(低頻度刺激に対する反応を調べる課題)を用いて空間選択的注意を行うと、注意刺激に対して300-400 ms後に側頭皮質で陰性電位(Nd/PN成分)が増大し、非注意刺激に対しては140-220 msで前頭正中部で陽性電位(P200成分)が増大することが報告されている(Arakiら2005)。脳波の陰性電位は神経の興奮活動を、陽性電位は抑制活動を表していると考えられることから、側頭皮質は注意刺激に対して興奮性に、前頭正中部は非注意刺激に対して抑制性に影響を与えることが示唆されている(Arakiら2005)。しかし、課題の違いによる脳波成分の現れ方の違いや、側頭皮質(聴覚皮質)や前頭皮質やその他の皮質(特に頭頂皮質)が注意にどのように関わるか、また各皮質間の相互作用については、未解明の部分が多い。

## 2. 研究の目的

本研究では、音に対する注意時の脳波、脳磁界、fMRIを計測し、活動部位、活動の時間的關係、脳部位間の相互作用について調べ、選択的注意の脳機構に関する基礎的な研究を行うことが目的である。具体的な研究目標は、(1)聴覚における注意時と非注意時の脳の部位的、時間的活動と、(2)聴覚注意時の脳活動の部位間相互作用について解析することである。

## 3. 研究の方法

本研究は豊橋技術科学大学安全衛生委員会「ヒトを対象とする研究」倫理審査会、東京歯科大学倫理委員会および日本大学松戸歯学部倫理委員会の承認を受けて行われた。

### (1) EEG, MEG, fMRI 計測

EEG計測は32ch脳波計(BioSemi社, Active Two システム, 豊橋技術科学大学所有)を使用した。音刺激にはヘッドホンを使用した。MEG計測は全頭型306ch脳磁計(Elekta社, Neuromag, 東京歯科大学所有)を使用した。音刺激はプラスチックチューブを介して耳栓を通して与えた。fMRI計測は1.5T MRI装置(Philips社, 日本大学松戸歯学部所有)を使用した。音刺激には、非磁性ヘッドフォン(日立アドバンスシステムズ社, AS-3000H)を用いた。

被験者は豊橋技術科学大学の男子学生で、EEG計測が17名(年齢 $21.7 \pm 1.0$ 歳)、MEG計測が9名( $21.9 \pm 1.0$ 歳)、fMRI計測が5名( $23.0 \pm 1.2$ 歳)である。被験者は事前に実験内容と本人の意思で実験を中断できることの説明を受け、同意書を提出した。

### (2) オドボール課題および注意条件

音刺激には、音の長さの違いを検出する両耳分離聴オドボール刺激を用いた。EEGおよびMEG計測では、基本刺激(standard stimulus: SS)として長さ100 msの純音(立上り立下り時間各10 ms, 周波数1 kHz)を、逸脱刺激(deviant stimulus: DS)として長さが50 msの純音(立上り立下り時間各10 ms, 周波数1 kHz)を用いた。SSは片耳80個(頻度80%), DSは片耳20個とし(頻度20%), 1セクションあたり両耳合計200個の音を与えた。SSとDSの順番をランダムにし、刺激音の間隔は左右耳を含めて800 msから1200 msの間でランダムに設定した。

被験者は、照明を消した防音室内の椅子に座り、安静閉眼状態で刺激音を聞き、逸脱刺激の個数を数えた。注意条件は、(1)左耳に注意、(2)右耳に注意、(3)両耳に注意、(4)非注意(暗算、大きな整数から7を引き続ける)の4つである。暗算条件では、両耳に流れる刺激音を無視して暗算を行う。それぞれの注意条件で行う課題セクションを2回ずつ、合計8セクションの計測を行った。1セクション毎に集中度や数えた逸脱刺激の回数を調べるためにアンケートをとり、4セクション毎に休憩を挟んだ。

fMRI計測では、被験者に与える刺激音列は、6つの音刺激ブロック(20 s)と、音刺激ブ

ロックの間の刺激が無く何もしない安静期間 (20 s) で構成される。刺激ブロックでは、音の長さの違いを検出する両耳分離聴オドボール刺激を用いた。SS (頻度 80%) には 500 ms の純音を、DS (頻度 20%) には 250 ms の純音を用いた (立ち上がり立下り時間 各 10 ms を含む)。刺激間隔 (ISI) は、400 ms ~ 700 ms でランダムに変化させ、半分を左耳に、もう半分を右耳にランダムに振り分けた。音の長さが EEG 計測の場合より長いのは、音の持続時間が短い場合には fMRI による活動が出てこないことによる。

注意条件は、(1) 左耳注意、(2) 右耳注意、(3) 両耳注意、(4) 非注意 (両耳に音が流れるがなにもしない)、(5) 非注意 (両耳に流れる音を無視して数を数える)、(6) 非注意 (左耳または右耳のみに音が流れ、なにもしない) である。1~5 の注意条件では、それぞれの条件で 6 つある音刺激ブロックの内、半分は逸脱刺激が入っていない。また、条件 6 の片耳刺激では、音刺激ブロックには基本刺激のみが入っている。4 と 6 の条件では被験者は何もせず音刺激を無視し、5 の条件では音刺激を無視し 1~20 の数を繰り返し数えた。1 つの注意条件の実験ごとに集中度や数えた逸脱刺激の回数を調べるアンケートを実施した。

#### 4. 研究成果

##### (1) EEG 計測による成果

##### ① 注意刺激に対する陰性成分

注意耳基本刺激に対する ERP には、刺激後 300 ms 付近に、前頭極部を中心として両側性に陰性成分 (N300) が現われる (図 1)。この陰性成分 N300 は注意耳逸脱刺激に対しても前頭局部を中心として両側性に現われ、前頭部のより広い領域に分布する。逸脱刺激に対してはさらに 600 ms 近辺をピークとする陰性電位 (N600) が現われる。

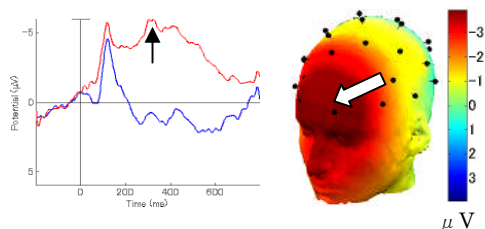


図 1. 基本刺激に対する N300 成分 (矢印) とその分布。右耳注意、左耳基本刺激、波形は左前頭極部 (Fp1) の記録 (赤: 注意刺激、青: 非注意刺激)、分布は刺激後 300 ms。

N300 は、出現部位と出現時刻の類似から、N2b に対応すると考えられる。N2b は、注意課題において逸脱刺激に対する反応から基

本刺激に対する反応を引き算した際に現われる電位で、前頭正中部を中心として比較的広範囲に分布し、感覚情報の注意処理関連電位であると考えられている (Näätänen 1982)。しかし、今回観察された N300 は、逸脱刺激と基本刺激では差はなく、注意刺激と非注意刺激の間で差が現われていた。この結果は、N300 は低頻度刺激 (逸脱刺激) に対して現われるのではなく、注意刺激に対して現われる成分であることを示している。

##### ② 非注意刺激に対する陽性成分

非注意耳の基本刺激に対する ERP には、刺激後 200 ms 付近に、刺激同側の前頭部から側頭および頭頂部を中心として陽性電位 (P200) が現われる (図 2)。右耳注意、左耳基本刺激の場合、P200 は左側の前頭、側頭、頭頂部に分布する。逆に、左耳注意、右耳基本刺激の場合、P200 は右側の前頭、側頭、頭頂部に分布する。P200 は非注意耳逸脱刺激に対しても観察されるが、その振幅は基本刺激

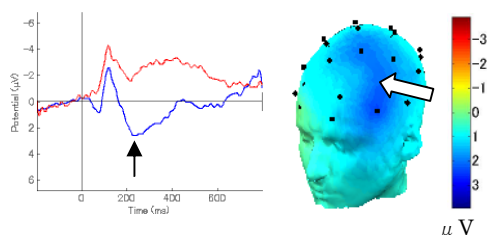


図 2. 基本刺激に対する P200 成分 (矢印) とその分布。右耳注意、左耳基本刺激、波形は左前頭部 (F7) の記録 (赤: 注意刺激、青: 非注意刺激)、分布は刺激後 240 ms。

の場合よりもかなり小さい。

P200 は両耳注意条件下での基本刺激および逸脱刺激に対しても、刺激同側の前頭部を中心として現われる。注意の状態と刺激入力の状態を考慮すると、P200 の増大は、無関係な刺激の抑制処理に関係しているのではなく、刺激入力のない注意側半球 (注意耳の対側半球) の活動を抑制する処理に関わることを示唆する。

非注意耳基本刺激に対する ERP にはさらに、600 ms 付近にピークをもつ陽性電位 (P600) が、刺激対側の前頭部および側頭部の後方にかけて現れる。この成分は非注意耳の逸脱刺激に対しては観察されない。逆に同側 (注意耳の対側) の前頭 - 側頭部には陰性電位 N600 が現れる。耳から聴覚皮質への入力の多くが交差していることを考慮すると、P600 は非注意刺激を抑制する過程に、N600 は注意刺激に対して注意を集中する過程に関わると推察される。

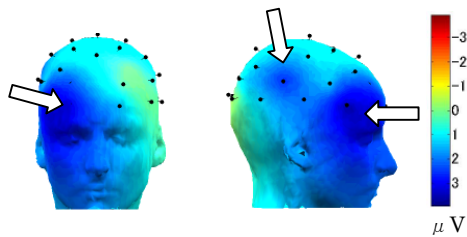


図 3. 非注意基本刺激に対する P600 成分の分布. 右耳注意, 左耳基本刺激, 刺激後 600 ms.

### ③ 逸脱刺激に対する陽性成分

逸脱刺激に対しては, 刺激後 300~600 ms に, 400 ms 付近にピークをもつ頭頂正中部を中心とした大きい陽性成分が現われた. 刺激の方向による左右差はなかった. この電位は, 一般的に逸脱刺激に対して現れる P300 に対応すると考えられる. 出現時刻が異なるのは, オドボール課題が音の長さを検知する課題であり, 標的刺激と基本刺激を区別するには 50 ms 以降を聞かなくてはならなかったためと考えられる.

### (2) MEG 計測による成果

MEG 計測では, 事象関連脳磁界 (event-related magnetic field: ERMF) において, ERP の N1 (N100), N300, P200, P600 に対応する成分 N1m, N300m, P200m, P600m が観察された. 分布は ERP 成分と同様であった. P300 に対応する P300m は観察されなかった.

ERMF 成分のダイポール推定を行うと, N1m は上側頭平面 (聴覚皮質) に位置した (図 4). しかし, 他の成分 (N300m, P200m, P600m) は振幅が小さく, 有意なダイポール推定ができなかった. MEG 計測では計測コイルに対して垂直な方向の電流は計測できないという短所があり, これらの成分の振幅が小さいのは, 電流がコイルに垂直であったからと考えられる.

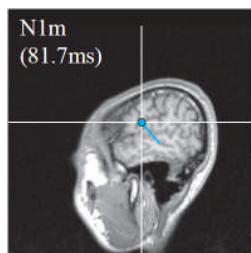


図 4. 非注意基本刺激に対する P1m 成分のダイポール推定. 右耳注意, 左耳基本刺激.

### (3) fMRI による成果

#### ① 注意による脳活動の増大

音に注意せずに (選択的注意課題を行わない状態で) 左耳のみに入ってくる基本刺激を聞いているとき, BOLD (blood oxygenation level dependent) 活動は右の上側頭皮質のみに見られ, その他の領域にはほとんど見ら

れない. これに対して, 注意条件下では脳の広範囲に活動が現れる (図 5). 左耳注意条件下で左耳に入ってくる逸脱音の数を数える課題を行うと (注意条件 1), 活動は両側の上側頭皮質 (42, 22 野), 右上頭頂皮質 (5, 7 野), 両側上前頭皮質 (5, 7 野), 上前頭回 (6A 野正中部), 両側前島 (46 野), 左側小脳で増大した. 前帯状皮質 (ACC) の活動は見られなかった.

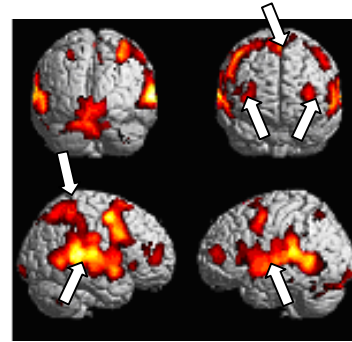


図 5. fMRI 画像: 左耳に注意  
音あり+逸脱音を数える vs 音なし+数えない.

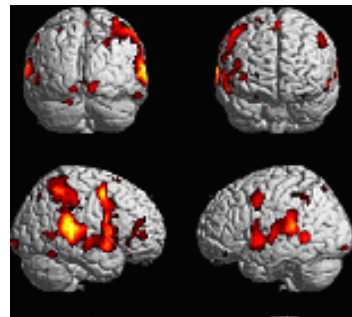


図 6. fMRI 画像: 非注意 (数える)  
音あり+音を無視して数える vs 音なし+数えない.

この活動の増大には, 注意による影響とともに音の数を数えることによる影響も含まれている. 非注意条件下で音を無視して数を数えた場合には, 左上頭頂小葉と両側の上前頭皮質および両側の上側頭皮質に活動が現れた (図 6). 上側頭皮質 (音で活動) 以外のこれらの活動は, 数を数えることによる活動であると考えられる.

#### ② EEG の結果と fMRI の結果の比較

EEG の結果と fMRI の結果を比較すると, 注意時に前頭部で現れる N300 の増大は, 前島の活動を反映していると考えられる. P200 成分は外側前頭皮質から前頭正中部にかけて分布し, P600 成分は外側前頭皮質から上側頭皮質にかけて分布する. これらの部位は fMRI で見られた活動の増大部位と対応する位置にある. 前島は先行研究から, 注意の割り当

てに (Bamiou ら 2003), 右側上頭頂皮質の活動は空間的な音の処理に関係することが示唆されている (Tiitien ら 2006).

#### (4) EEG 位相同期解析

聴覚空間選択的注意に関わる脳のネットワークを調べるために, 脳波の位相同期の解析を行った. 位相同期解析は, 脳波にバンドパスフィルタ (バンド幅 4 Hz) をかけ, その中心周波数を 4 - 40 Hz 間で 1 Hz ごとにずらして行った. 位相同期の指標として, Phase-Locking Value (PLV) (Lachaux ら 1999) を用いた. 脳波の実信号  $x(t)$  を実部とし,  $x(t)$  のヒルベルト変換  $xi(t)$  を虚部とする信号  $x+(t)$  (解析信号と呼ばれる) を作り, この信号から時刻  $t$  における瞬時位相  $\phi(t)$  を求めた. 任意の 2 つの電極 ( $x$  と  $y$ ) 間で試行ごとの瞬時位相を求めてその差を取り, 試行回数で平均して  $PLV_{xy}(t)$  を求めた. 背景活動による位相同期を除去するため, 刺激提示前 200 ms 間の  $PLV_{xy}(t)$  の平均値をベースラインとして差し引いた. さらにベースライン区間の標準偏差で割り, 正規化した値を  $PLV_z(t)$  を求めた.  $PLV_z(t)$  の値が正であれば, 刺激提示後に位相同期が増加したことを, 負であれば位相同期が減少したことを意味する.

位相同期の増加の有意性は, 代理の PLV を求め検定した. 代理 PLV は, 2 つの電極のうち片方の電極のトライアルの順番をシャッフルして求める (Lachaux ら 1999). このようにして求めた 200 個の代理 PLV と, オリジナルの PLV を正規化し, オリジナルの PLV の値が代理の PLV 分布の 97.5% より上であるならば, 有意性のある位相同期の増加 ( $p < 0.05$ ) とした (Doseburg ら 2005).

位相同期の増加は主として  $\alpha$  周波数帯域 (8-13 Hz) で見られた (図7). 図では, 左耳注意時に左耳への基本刺激に対する活動における位相同期が増加したチャンネル間を実線で結んでいる. 注意条件では, 主に前頭-頭頂-側頭部を中心として位相同期が増加した.  $\beta$  (13-25 Hz) および  $\gamma$  周波数帯域 (25-40 Hz) においても, 前頭-頭頂-側頭部で位相同期がやや増加した.  $\alpha$ ,  $\beta$  周波数帯域での位相同期の増加は刺激後 100-400 ms で見られたが,  $\gamma$  周波数帯域では刺激開始から 600 ms 以降にも位相同期の増加が見られた. 非注意条件 (暗算時) では位相同期の増加は見られなかった (図7下).  $\theta$  周波数帯域 (4-8 Hz) では頭頂部に若干位相同期の増加が見られたが, その他の周波数帯域では, 位相同期の増加が起こっていたとしても, 左側頭部付近を

中心とするものであり, 注意時に見られる前頭部から頭頂部付近にかけての位相同期の増加は見られなかった.

本研究では, 聴覚空間選択的注意時に前頭-頭頂-側頭部で位相同期の増加が観察された. 聴覚空間選択的注意時に, これらの領域で多くの同期した活動が起きることを示している. 視覚では, 注意時に 40 Hz 付近 ( $\gamma$  周波数帯域) で位相同期の増加が起こることが報告されているが (Doseburg ら 2005, Sauseng ら 2008), この周波数付近での増加は今回の解析では見られなかった. 注意時に位相同期が増大する周波数帯域は聴覚と視覚とでは異なることを示唆する.

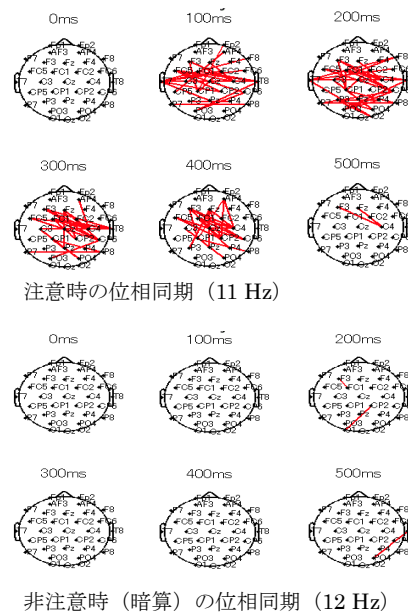


図7. 注意時 (上) と非注意時 (下) の  $\alpha$  周波数帯域での位相同期. 有意に位相同期が増加した場所間を実線で結んでいる. 左耳注意, 左耳基本刺激.

#### (5) 研究成果のまとめと先行研究との比較

この研究で得られた結果は, 両耳分離聴オドボール刺激による聴覚空間選択的注意の機構として, 刺激入力のない注意側半球 (注意耳の対側半球) の活動を抑制するプロセス (P200 成分) と, 入力された非注意刺激を抑制するプロセス (P600 成分) の二つがあることを示している. この二つのプロセスは, 異なる時間に, 異なる脳領域 (前頭-頭頂部と前頭-側頭部) で遂行されると考えられる. N300 成分の増大は前島の活動を反映し, 注意の割り当てに関わると考えられる.

本研究の fMRI 計測では, 注意時に上前頭回で活動の増大が見られた. 上前頭回はタスクスイッチングや注意対象の変更に係るという報告がある (Cutini ら 2008). 本研

究で用いたオドボール課題では、被験者は音の持続時間（基本刺激、逸脱刺激）と左右方向の二つの対象を判断する必要があった。今回見られた上前頭回の反応は、判断対象の変更から生じた反応である可能性がある。

一方、本研究では前帯状皮質（ACC）の活動は増大しなかった。Menon ら（1997）、Michael ら（2005）および Wu ら（2007）は fMRI 計測により、聴覚注意課題遂行中に前帯状皮質（ACC）に活動が現われることを報告している。ACC は空間的注意に関わるといわれているが、Weissman ら（2005）は、ACC は注意をそらすものを除外するため、標的により注意を向ける機能があると報告している。今回 ACC に反応が見られなかった理由として、実験で用いたオドボール課題が、Wu らが行った手がかり聴覚空間注意課題に比べて比較的容易であり、注意をそらすものを除外することが比較的容易であったということが考えられる。

今後の課題として、注意時の前頭一頭頂一側頭皮質間の時空間的相互作用の機構について、信号処理技術を応用して解析する必要がある。また、聴覚注意と聴覚空間的注意の機構の差異について解析する必要がある。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計 10 件）

[1] 堀川順生. 聴覚空間選択的注意時の脳活動の EEG, MEG, fMRI による計測. 統計数理研究所共同研究リポート, 査読無, 240: 35-44, 2010.

[2] 杉本俊二, 塚原伸亮, 池田尚生, 山口陽子, 堀川順生. 音声の振幅包絡と脳波活動の関係. 日本音響学会 2010 年春季研究発表会講演論文集, 査読無, pp. 559-560, 2010.

[3] 池田尚生, 堀川順生, 杉本俊二. 日本語音声に対する補完現象の脳機構. 日本音響学会聴覚研究会資料, 査読無, 40: 117-122, 2010.

[4] 谷口直弥, 猪狩えみ, 堀畑聡, 杉本俊二, 堀川順生. 聴覚空間選択的注意時の EEG 位相同期解. 日本音響学会聴覚研究会資料 39: 153-158, 2009.

[5] 猪狩えみ, 谷口直弥, 堀畑聡, 新谷益郎, 杉本俊二, 堀川順生. 音に対する空間選択的注意の効果の MEG と EEG による解析. 日本音響学会聴覚研究会資料, 査読無, 38: 701-706, 2008.

[6] 杉本俊二, 塚原伸亮, 池田直樹, 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, 査読無, 38: 677-681, 2008.

[7] Sugimoto, S., Suzuki, Y. and Horikawa, J. Time-frequency feature extraction from frequency-modulated sounds in a population of auditory cortical neurons. Acoust. Sci. & Tech., 査読有, 29: 36-40, 2008.

〔学会発表〕（計 10 件）

[1] Yasui, T., Taniguchi, N., Sugimoto, S. and Horikawa, J. EEG analysis of spatial and nonspatial auditory selective attention. The 14<sup>th</sup> Auditory Research Forum, Dec. 5, 2009, 滋賀.

[2] Sugimoto, S. and Horikawa, J. 音声に対する事象関連電位のモデル化. The 2<sup>nd</sup> Symposium on Frontiers of Intelligent Sensing, Global COE Symposium, Mar. 4, 2009, 豊橋.

[3] Sugimoto, S., Tanaka, H. and Horikawa, J. Physiological basis of auditory stream segregation interpreted by spatio-temporal response characteristics of auditory cortical neurons. The 31<sup>th</sup> Annual Meeting of the Neuroscience Society Japan, July 10, 2008, Tokyo.

[4] Igari, E., Sugimoto, S. and Horikawa, J. MEG analysis of the effects of spatial selective auditory attention. The 12<sup>th</sup> Auditory Research Forum, Dec. 1, 2007, 滋賀.

[5] Sugimoto, S., Tanaka, H., Suzuki, Y. and Horikawa, J. Auditory stream segregation induced by low-pass filtering characteristics of auditory cortical neurons. The 30<sup>th</sup> Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society, Sep. 11, 2007, 横浜.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

堀川 順生 (HORIKAWA JUNSEI)  
豊橋技術科学大学・工学部・教授  
研究者番号: 50114781

### (2) 研究分担者

新谷 益郎 (SHINTANI MASUROU)  
東京歯科大学・歯学部・准教授  
研究者番号: 60171071  
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  
堀畑 聡 (HORIHATA SATOSHI)  
日本大学・松戸歯学部・准教授  
研究者番号: 20238801