科学技術の進歩と聴覚医学

「聴覚と脳機能画像」

内藤 泰

神戸市立医療センター中央市民病院耳鼻咽喉科

要旨：本稿では、大脳皮質における聴覚情報処理のどのような段階あるいは側面が、皮質のどの領域、あるいはネットワークで行われているのかについて脳機能画像で得られた知見を概括した。聴覚野における音の周波数に応じた配列は外側が低音、内側が高音という単純な配置から、複数の軸を有する複雑な配列へと理解が深まっている。音の強さの認知には聴覚野以外の皮質領域の関与が示唆されており、語音と楽音のように異なる音色が聴覚野の異なる領域で処理されることも報告されている。また、難聴や背景雑音による S/N 比の低下、人工内耳を介する言語聴取など、困難な条件下の聴覚認知では視覚野や前頭葉の運動関連領域などとの協同が観察され、難聴などに起因する種々の障害の背景にある神経機序を理解し、治療やリハビリテーションの方針を考える上で有用な情報が得られている。

キーワード

PET, fMRI, 一次聴覚野, 聴覚連合野, 音声言語

はじめに

聴覚の評価は通常、純音聴力検査あるいは語音聴力検査などのように種々の提示音に対する被検者の反応を観察することで行われ、その結果は耳から脳に至る聴覚路の機能を反映する。このうち、脳の認知機構が関与する機能については、神経心理学的方法でそれが脳のどの領域あるいは領域間のネットワークで生じているのかを知ることは容易でない。脳を含む中枢聴覚路の機能を生理学的に評価するには、刺激音に対する脳波上の反応を計測する誘発脳波検査が有用であるが、脳波は神経の活動部位から記録電極までの電気抵抗の影響を受けるため、その発生源の正確な局在推定が難しい。これらの問題点を克服し、各種の認知機能の脳内局在をより精密に特定する方法が脳機能画像法であり、1970年代からポジトロン断層法 (positron emission tomography: PET) が、次いで1980年代から1990年代にかけて脳

磁図 (magneto-encephalography: MEG) や磁気共鳴機能画像 (functional magnetic resonance imaging: fMRI), 近赤外機能画像法 (near infra-red spectroscopic topography: NIRS) などが用いられるようになった。本稿ではこのうち特に PET, MEG, fMRI による聴覚の脳機能評価について概説する。

聴覚野における音の高さと大きさの処理

入力音の神経活動への変換は蝸牛で行われ、聴覚路の1次ニューロンである蝸牛神経細胞の特徴周波数とその蝸牛内での位置は厳密に対応している。このような周波数に応じた空間配列 (tonotopic organization) は、蝸牛から大脳の一次聴覚野に至る聴覚路全体に見られるが、基本的に上位になるにしたがって複雑な空間配列になる。音響誘発脳磁界反応の N1m は高音が内側、低音が外側に局在すると報告され^{1,2)}、PET でも同様の周波数に応じた脳賦活の空間的配列が示されている³⁾。脳幹聴覚路の神

経細胞の周波数選択性は下丘で最も鋭くなるが、大脳皮質では鋭い選択性のものだけでなく広く多峰性の応答野を持つものも見られる。異なる周波数をもつ複数の音のランダム刺激による脳賦活を fMRI で計測した報告では、一次聴覚野（Heschl 回）の外側部分が低周波数音に反応し、その前後に高周波数音に反応する領域が広がっており、Heschl 回を挟んで2つの周波数勾配が鏡像的に存在していると報告された⁴⁾。その後さらに、Heschl 回外側の低周波数領域を起点として内側と前方に向かうV字型の2軸からなるマップが示されており、一次聴覚野の tonotopic organization に関する考え方（図1）は、外側が低音で内側が高音という単純な配列（図1：b）から、高音・低音・高音という折り返し型（図1：c）になり、さらに前述のV字型（図1：d）へと変遷している。聴覚野の tonotopic organization についての最近の知見については、Saenz と Langers⁵⁾ が詳細に検討を加えている。

聴覚路の神経細胞の音に対する反応は上位中枢になるほど多様になり、音の開始や終了に際してだけ活動するものから音の持続に応じて反応も持続するものまで様々である。一般に聴覚路神経細胞の発火

頻度と入力音圧との関係は、音圧の上昇に伴って発火が増加する単調型と、ある音圧まで発火が増加して、それより大きい音では発火が減少する非単調型に分類されるが、サルの聴覚路の神経細胞では、上位になるほど非単調型が多くなり、一次聴覚野では75%以上の細胞が非単調型であるとされる^{6,7)}。ヒトにおいても、脳磁図によって音の入力から約100ms後に観察され一次聴覚野近傍に局在する脳磁界反応（N1m）は、純音を提示した場合、約60dBHLまでは増大するが、それより大きい音に対してはわずかな増大しか見られない⁸⁾。また、まず持続音を呈示し、のちにその音圧を変化させる刺激パラダイムでは、音圧変化時に音が大きくなる場合だけでなく、小さくなる場合でも誘発反応が出現し、その大きさは刺激周波数によっても変化する⁹⁾。さらに、音の大きさの増大に対する反応は聴覚野以外の領域でも観察される。呈示音の刺激音圧を各被験者の閾値上10から60dBHLでランダムに変化させて最大と最小音圧呈示で有意に脳磁界反応の賦活差が出る領域を調べた Wyss らの報告¹⁰⁾ では、聴取音圧の増大に応じて一次聴覚野だけでなく帯状回後部、運動前野、一次体性感覚野も有意に賦活されることが示されている（図2）。これら、聴覚野以外の領域の賦活の生理学的意義付けはいまだ確定していない。大きな音への驚愕や注意の反応との解釈も可能である

図1 一次聴覚野の周波数配列

a：ヒト左側頭葉上面とHeschl回（HG）。b：Heschl回の外側が低音（L）、内側が高音（H）という単純な配列。PPは側頭極平面、PTは側頭平面。c：Heschl回の長軸に沿って配列が高音・低音・高音と折り返す配列、d：外側の低音域を起点にしたV字型の配列。（文献5より一部配置を変更して引用）

図2 聴取音圧の増大で有意に脳磁界反応が増大する領域。聴取音圧の増大に応じて一次聴覚野（a）だけでなく帯状回後部（b）、運動前野（c）、一次体性感覚野（d）も有意に賦活される。（文献10より一部配置を変更して引用）

が、そもそも「音が大きい」と認知する神経活動には様々な要素が含まれるとも考えられ、これらの機能画像結果を解釈するには「音の大きさを認知するとはどういうことか」という本質的考察も必要であろう。

言語音の音響的处理

前項では音の基本的3要素のうち「高さ・大きさ」について述べたので、ここでは残る「音色」について検討する。音色から見た音の種類には音声、楽音、環境音などが挙げられるが、このうち臨床的意義の大きい音声、特に言語音の脳での処理について以下に述べる。

蝸牛で神経信号に符号化された言語音が中枢聴覚

路を上行して最終的に言語として理解されるまでには、その音響的分析に始まって、音韻処理、単語の意味処理、統辞過程など多段階の処理を経る。このうち、その初期の段階に位置づけられる音響的処理(acoustic processing)には、入力音を周波数スペクトルや時間的推移に基づいて分析(spectro-temporal analysis)し、入力された複合音の中から言語音を抽出する処理が含まれる。

音声言語の音響処理段階を検討する一つの手法に逆回し言語音の利用がある。逆回し言語音は通常の音声を逆方向から再生した音で、周波数スペクトルや強弱の経時的変化などの音響情報の総量は順方向に再生した言語音と全く同じであるが、音韻としては通常の言語と全く異なり、意味は理解できない。日常生活文の逆回し再生音と無音状態との間で脳賦活状況を比較すると、逆回し言語聴取によって両側の側頭葉が賦活されるが、普通に再生した言語音による賦活範囲(図3:a)よりは相対的に狭く、概ね上側頭回に局限している(図3:b)¹¹⁾。逆回し言語音は、ヒトの声には聴こえるが意味は理解できないので、語彙・意味処理は働かない。この音は総じて聞いたこともない音声の連続であるが、あえて聞こえた通りに文字にすることは不可能ではないので、音韻処理機構が部分的に活動している可能性はある。簡単な物語の言語音による脳賦活から逆回し音声の脳賦活を直接差し引いたCrinionらの報告¹²⁾を見ると、側頭葉において一次聴覚野を挟んで上側頭溝の前方と後方に2分された有意の賦活領域があり、賦活は左半球優位で後方では角回に及んでいる。これらは音声言語の音韻処理以降の情報処理を担当する部分と推測される。

矩形波のクリックは雑音に近く、特徴のない広い周波数成分をもつが、語音をクリック列に変換して時間情報だけで呈示しても、ある程度「コトバ」として認知できる。PETでみると、この条件でも側頭葉で逆回し言語音より広い賦活が確認され、その範囲は上側頭溝から中側頭回まで広がる¹³⁾(図3:c)。言語音に含まれる周波数情報と時間情報のうち、時間情報処理は単独でも側頭連合野を広範に駆動し、音響処理にとどまらず音韻から、一部意味処理まで含むことが推測される。

語音と楽音の処理領域の違いを検討した例として

図3 言語音による脳の賦活

a: 日常生活文による脳賦活状況(対照は無音状態)。両側の側頭回、上側頭溝、中側頭回、左下側頭回(ブローカ野)が有意に賦活される。b: 逆回し言語聴取(対照は無音状態)では賦活範囲が相対的に狭く、概ね上側頭回に局限している(文献11より改変して引用)。c: 言語音を周波数情報のないクリック列に変換して時間情報だけで呈示しても、側頭葉で逆回し言語音より広い賦活が確認され、その範囲は上側頭溝から中側頭回を含む(文献13より改変して引用)。

Benson らの報告¹⁴⁾を取り上げる。彼らは、それぞれ複雑さの異なる語音と楽音を被験者に聴取させ、fMRI で賦活の差を観察した。語音は母音単独、子音-母音音節、子音-母音-子音音節という3段階の複雑さ、楽音ではピアノ音で単音、一つの和音、変化する3つの和音の3段階の複雑さを設定している。それぞれ、複雑さに応じて賦活が有意に強くなる領域を求めると、言語音が上側頭回の後方、楽音（この場合ピアノの楽器音）が前方に局在し、両者はほとんど重複していない（図4）。また、言語音のほう相対的に広く多様な領域を賦活しており、それには次項で述べる音韻認知に関与する領域も含まれている。

音韻の認知

語音認知における音響分析の次の段階、つまり語彙以前（sublexical）の音韻処理の脳内機構についても多くの研究結果が報告されている。異なる脳機能画像（fMRI/PET）研究の結果を統合的に評価する手法としてALE（Activation Likelihood Estimation）という方法があり¹⁵⁾、複数の異なる脳機能画像の研究報告の中から対象と方法で一定の基準に合致するものを選択し、その結果の脳賦活部位の標準座標から、それらの報告に共通する賦活部位などを数学的に推計することが出来る。言語の音韻分析についてALEを用いたmeta-analysisでは¹⁶⁾、音声言語聴取と非言語音聴取との間のコントラストで両側の上側頭回から上側頭溝に連続する広い領域と、中

前頭回の小さな領域が有意の共通賦活領域として抽出され、その賦活は左半球側頭葉の方が右半球より2倍近く強い。さらに、対照条件を人工音声などの、語音近似複合音にすると、実際の語音との間に音響的差異がほとんどなくなり、より選択的に音韻処理領域を抽出できる。そのような比較で同定される音韻処理領域は左側頭葉の上側頭回腹側から上側頭溝に局限し（図5）、有意の賦活のY座標（前後方向の座標）は-12から-40に広がっている¹⁶⁾。一次聴覚野（Brodmann area BA: 41）の標準脳におけるY座標は概ね-15から-35であるので、この領域は側頭平面の中央付近で一次聴覚野の外側部分とその周囲領域（BA 42, 22）と同定できる。

この比較は語音の音響分析と音韻分析担当領域の関係を良く明らかにしており、音響分析は両側側頭葉の上側頭回に広がっているのに対し、音韻分析は、より左半球に偏して上側頭回中央領域外側から、その腹側の上側頭溝付近に局在していると概括できる。

図4 言語音と楽音処理領域の分離

言語音と楽音でそれぞれの複雑さに応じて賦活される領域を示す。上側頭回では前方が非言語音（ピアノの楽音。緑で表示）、後方が言語音（赤）を処理しており、両者はほぼ完全に分離している。（文献14より引用）

図5 音声言語と語音近似複合音の賦活比較によって抽出される音韻処理領域

言語音と言語近似複合音による脳賦活のコントラストでは左半球側頭葉の上側頭回腹側から上側頭溝に局限した賦活が観察される（文献16より改変して引用）。

語彙・意味処理

経験により学習された対象物の形、色、材質、動き、音、においなど多様な知識は、言語によって記号化され、単語の意味理解の基盤を形成する。言語において、個々の単語に対応して貯蔵されている知識にアクセスする認知的行為を意味処理（semantic processing）と呼ぶ。ここでは、音声言語の認知過程で、音韻の次の段階になる単語の意味処理が脳内のどこで行われているかを見てみる。

脳の限局した病変、例えば脳血管障害、脳外傷、てんかんに対する手術などで言語の意味理解に障害をきたす場合がある。Damasio ら¹⁷⁾ は言語の意味理解に障害をきたした多数例の脳病変部位をテンプレート脳上で集計し、個々の患者で行った単語の意味処理（有名人の顔、動物、道具の3つのカテゴリーに属する対象物の絵を示して、その名前を回答する）の検査結果との関係を検討した。また、患者で行ったのと同じ検査を健常成人でも行い、単語の意味処理中の脳賦活状況を PET で計測した。その結果、まず、脳病変患者では、名前付けする対象物が所属するカテゴリーによって主たる病変部位が異なることが確認された。

同じ検査を使用した脳賦活検査でも対象のカテゴリーに応じて異なった脳領域の賦活が広範囲で観察されている。しかし、同じカテゴリーの対象でも脳病変で名前が言えなくなっている領域と、健常者での名前付けによる賦活領域は必ずしも同じではなく、共通する部分と、全く異なる部分がある。これらの結果は、対象の性状によって単語（対象の名前）の意味処理を担当する領域が異なり、通常の言語野を越えて分布するという点で共通しているが、一方で脳病変による障害と健常者での賦活試験では意味処理の異なる側面が含まれる可能性も示唆している。

音声あるいは書字で提示された単語に対して、その意味付けを行う過程を調べた fMRI あるいは PET による研究について、前述の ALE 手法を用いて Binder らが行った meta-analysis の結果¹⁸⁾ でも、言語の意味処理に関与する領域はいわゆるウェルニッケ野や前頭葉のブローカ野といったシルビウス裂周囲の古典的な言語担当領域内に限局せず、大脳に広

く分布するが、明瞭に左半球に偏していることが示されている。多数の脳機能画像の研究結果に共通して言語の意味処理を遂行していると推測される部位は、1) 頭頂葉の後下部（角回）、2) 中側頭回、3) 紡錘状回と海馬傍回、4) 前頭前皮質背外側部、5) 下前頭回、6) 前頭前皮質腹内側部、7) 帯状回後部、の7つの領域に分かれている。これらの中でも1)の頭頂葉後下部で2)の中側頭回につながる部分にある角回は、概ね BA 39 に該当し、ヒト以外の霊長類に比して極めて大きく拡大している。この領域は脳内のほとんど全域の連合野と線維連絡があるが、一方で一次感覚野からはほとんど入力を受けていない。Binder らは、角回を意味処理機構の中で最高位に位置づけ、概念の検索、統合を行う領域と推測している¹⁸⁾。

聴覚認知に対する視覚の影響

難聴者は相手の声が分かりにくい時には話者の顔や口元を見て聴覚認知を補い、健常聴力者でも周囲の雑音が大きければ読唇にも頼るのが普通である。音声聴取時に音と矛盾する口元の動きの画像を見ると音声認知を誤ることは、McGurk 効果として広く知られており、これは健常聴力者でも音声言語の聴覚認知過程に視覚が組み込まれていることを示している。McGurk 効果についての脳機能画像研究もいくつか行われているが、例えば Sekiyama ら¹⁹⁾ は雑

図6 McGurk 効果出現時に賦活される脳領域
雑音を負荷して聴覚的に聞き取りにくくした McGurk 効果刺激で、通常の McGurk 効果刺激に比して、上側頭溝後方領域（矢印）に有意の賦活増強が見られ、この領域が視聴覚統合に関与していることが示唆される（文献19より引用）。

音を負荷して聴覚的に聞き取りにくくした McGurk 効果刺激で、左半球の上側頭溝後方領域に有意の賦活増強を見出し（図6）、この領域の視聴覚統合への関与を推測している。また、Kawase ら²⁰⁾ は音声に低域通過フィルタをかけて認知しにくくして発話時の顔の動画とともに呈示し、通常の音声の場合と比較すると視覚野で特に顔の認知に関与する紡錘状回が有意に賦活される（図7）ことを示しており、ここでも聴覚的に困難な状況下で音声言語認知に視覚情報処理が介在してくることが示されている。

難聴の聴覚中枢機能に対する影響

ここまでは健常聴力者の聴皮質機能についてのべてきたが、最後に難聴がこれらの脳活動にどのような影響を与えるかについて我々の得た知見を中心に紹介する。

内耳性難聴では聴覚閾値上昇とともに音の大きさの増大を過敏に感じる聴覚補充現象が生じるのは日常臨床で経験するところであるが、これが聴皮質活動にどのように反映されるかは調べられてこなかった。そこで、内耳性難聴で補充現象がある患者に閾値上の様々な音圧で音刺激を呈示して、それに対す

る脳磁界反応の強さ（N1m の等価電流双極子モーメント）を計測したところ、内耳性難聴者では閾値上の提示音圧増加に対して健常聴力者に比してはるかに急峻な磁界反応の増大が観察された（図8）。N1m は一次聴覚野の Heschl 回近傍に局在しており、この結果は内耳性難聴者の補充現象に一次聴覚野の過剰な反応が伴っていることを明らかにしている²¹⁾。

中等度の内耳性難聴で単音節の語音弁別能が低下すると、単語レベルでも理解できない場合が出てくる。日常生活で常用される単語を使用し聞き取りテストを行い、正答率の高い単語群と低い単語群を作成し、これらを右耳から単耳で聴取したときの脳賦活状況を観察すると、認知しやすい単語を聴取しているときには両側の上側頭回、左中側頭回、左下前頭回、左角回で有意の賦活が見られるが、認知しにくい単語聴取では右側の上側頭回と角回で有意の賦活を認めなくなる²²⁾（図9）。ここで呈示した単語は理解良好群と不良群の間で音圧や音節数など音響的側面には差はないので、観察された脳賦活の差異は音韻から語彙・意味処理の段階を担当する脳機能の違いを反映すると考えられる。語音の音韻処理

図7 聴取しにくい言語による紡錘状回の賦活

音声に低域通過フィルタをかけて認知しにくくして、発話時の顔の動画とともに呈示し、通常の音声の場合と比較すると視覚野で特に顔の認知に関与する紡錘状回（青線の交叉部）が有意に賦活される（文献20より引用）。

の項で述べた通り、音韻処理には左半球聴覚連合野の上側頭回から上側頭溝領域が中核的な役割を果たすと考えられるが、この内耳性難聴者の脳機能を見る

図8 聴覚補充現象のある内耳性難聴者で見られる音圧増加に対する脳磁界反応の増大
横軸は閾値上の呈示音圧 (sensation level), 縦軸はN1mの等価電流双極子モーメント。健常聴力者(白丸)でも閾値上の刺激音圧上昇に伴ってある程度磁界反応も増大するが、補充現象のある内耳性難聴患者(黒丸)では反応増大が急激である(文献21より引用)。

と、角回で正確な単語の認知語音処理が行われるためには、両側の上側頭回が共に活動する何らかの神経活動も必要であることが示唆される。

健常聴力者が音声言語(日常会話文)を聴取すると両側の上および中側頭回とブローカ野の賦活が見られるが、中途失聴者が人工内耳を介して同じ言葉を聴取すると、それらの領域の賦活が健常者より強くなり、上側頭溝から一部、中側頭回にまで拡大し、これはSekiyamaら¹⁹⁾がMcGurk刺激で見出した視聴覚統合の領域も含んでいる。また、聴覚野に加えて右半球のブローカ野相当部分、補足運動野、帯状回前部など、健常聴力者では見られない領域の賦活も観察される(図10)²³⁾。これは人工内耳で符号化された、通常より情報量が少なく非生理的聴覚信号をもとに語音認知を達成するためには、視聴覚統合領域を含む聴覚連合野の広い領域でより多くの情報処理が行われると同時に、前頭葉の主として言語の表出に關与する言語領域も活用されていると解釈できる。聴覚野とウェルニッケ野、前頭葉のブローカ野、補足運動野の間には解剖学的に線維連絡があり、これらの領域が協同して、聴取困難な音声を認知するためのワーキングメモリを形成しているのかもしれない²³⁾。

これとは対照的に先天聾で学童後期から成人にかけて人工内耳手術を受けた患者の語音弁別成績は不良で、人工内耳を介する語音聴取による上および中

図9 中等度感音難聴者の単語聴取時の脳賦活状況

認知しやすい単語聴取しているとき(上段)には両側の上側頭回、左中側頭回、左下前頭回、左角回で有意の賦活が見られるが、認知しにくい単語聴取(下段)では同側の上側頭回(青矢印)と角回(b下段矢印)で有意の賦活を認めなくなる(文献22より引用)。

図10 日常的言語聴取時の脳賦活状況

日常的な話し言葉の聴取では、健常者（a）で両側の上および中側頭回とブローカ野の賦活が見られるが、中途失聴者（b）ではそれらの領域の賦活が健常者より強く、上側頭溝から一部、中側頭回にまで拡大する（矢印）。加えて右半球のブローカ野相当部分、補足運動野、前帯状回など、健常者では見られない領域の賦活も観察される（文献23より改変して引用）。

側頭回中央領域の聴覚連合野の賦活は極めて僅かである²⁴⁾。側頭連合野の神経回路網は生後の言語聴取に強く依存して発達し、一定の年齢域をすぎるとその可塑性が低下して、後から音声言語刺激が入力されても発達は期待できない。

言語習得前失聴小児においてFDG-PETで読話課題（視覚的言語関連刺激：話をしている人の顔の動画が無音にしたもの）を課した際の脳代謝亢進部位を健常聴力成人の反応と比較すると、視覚の背側経路に加えて本来なら聴覚連合野に相当する上側頭回でも健聴成人より高い賦活が認められた（図11：a 矢印）²⁵⁾。これは、言語習得前の失聴によって聴覚野が視覚情報処理を行っていることを示しており、発達期小児における感覚の種類を越えた可塑性を脳機能画像で確認した知見と位置づけられる。

同じ方法で、今度は先天性難聴がある成人2名に読話課題を負荷して脳代謝を観察した²⁶⁾。現在の聴力は両者とも両側100dB程度の重度難聴であるが、健聴成人に比して、図11：b-1の症例では両側の上側頭回に活動亢進部分が観察され（矢印）、視覚入力を聴覚野で処理していることが推測される。一方、図11：b-2の症例は右半球の前頭葉と下側頭回に代謝亢進部分があるが聴覚野には有意の

図11 言語習得前失聴者の読話によるFDG-PETを用いた脳賦活所見

a：言語習得前失聴小児において読話課題を課した際の脳代謝亢進部位を健常聴力成人の反応と比較すると、視覚の背側経路に加えて上側頭回でも健聴成人より高い賦活が認められた（矢印）（文献25より引用）。b-1：両側の上側頭回に活動亢進部分が観察される（矢印）。b-2：右半球の前頭葉と下側頭回に代謝亢進部分があるが聴覚野には有意の所見がない。（b-1，2は文献26より引用）。

所見がない。b-1の症例はGJB2遺伝子変異による難聴で、手話と読話が主なコミュニケーションモードで発音の歪みも大きいのにに対し、b-2の症例はSLC26A4遺伝子変異による難聴で日常的に音声言語を使用し、発音の歪みは軽微である。これらの症例で観察された読話による脳賦活所見の差は言語習得期の音声言語使用の程度の差を反映していると推測され、脳機能画像と遺伝子変異に関する情報は、現在の音声言語使用の良否の背景にある小児期の難聴の経緯や音声言語の皮質神経機構の発達について考えるための資料となる。

小児期からの難聴例における音声言語習得の臨界期や人工内耳の手術時期、適切なコミュニケーションモードの選択など、種々の問題に取り組むには、それらの基盤となる脳機能の理解が重要で、それには脳機能画像によって得られる音声言語の脳内ネットワークに関する知見が役立つ。

ま と め

脳機能画像により、大脳皮質における聴覚情報処理のどのような段階あるいは側面が、皮質のどの領域、あるいはネットワークで行われているのかを非侵襲的に観察することができる。この方法を用いると、場合によっては聴覚の認知が聴覚野だけでなく、脳内の他の機能領域と連携しながら行われることも明らかになる。特に難聴や背景雑音によるS/N比の低下、人工内耳を介する言語聴取など、困難な条件下の聴覚認知では視覚野や前頭葉の運動関連領域などとの協同が観察され、難聴などに起因する種々の障害の背景にある神経機序を理解し、治療やリハビリテーションの方針を考える上で有用な情報が得られる。

Functional brain imaging of hearing

Yasushi Naito

Department of Otolaryngology, Kobe City Medical Center General Hospital

The functional imaging findings of cortical regions or their networks related to various steps or

aspects of auditory processing are reviewed. The understanding of tonotopic organization of the primary auditory cortex has been deepened from a simple lateral-to-medial gradient model to more complex multiple-axes models. Auditory loudness processing may be performed in both the temporal auditory cortex and some areas outside the auditory cortex. Musical and speech sounds are processed in different areas within the superior temporal gyrus. Co-activations of the visual cortex and frontal motor related areas are found in addition to stronger and more extensive activation of the auditory cortices under difficult situations for auditory perception, such as hearing loss, low signal-to-noise ratio due to increased background noise, or hearing through cochlear implants. Functional brain imaging offers insights into the neurological mechanisms that underlie various difficulties arising from hearing loss, which may contribute to appropriate treatment and rehabilitation.

参 考 文 献

- 1) Elberling C, Bak C, Kofoed B, et al: Auditory magnetic fields. Source location and “tonotopic-organization” in the right hemisphere of the human brain. *Scand Audiol* **11**: 61-65, 1982
- 2) Romani GL, Williamson SJ, Kaufman L, et al: Tonotopic organization of the human auditory cortex. *Science* **216**: 1339-1340, 1982
- 3) Lauter JL, Herschovitch P, Formby C, et al: Tonotopic organization in human auditory cortex revealed by positron emission tomography. *Hear Res* **20**: 199-205, 1985
- 4) Humphries C, Liebenthal E, Binder JR: Tonotopic organization of human auditory cortex. *Neuroimage* **50**: 1202-1211, 2010
- 5) Saenz M, Langers DRM: Tonotopic mapping of human auditory cortex. *Hear Res* **307**: 42-52, 2014
- 6) Ryan A, Miller J: Single unit responses in the inferior colliculus of the awake and performing rhesus monkey. *Exp Brain Res* **32**: 389-407,

1978

- 7) Pfingst BE, O'Connor TA: Characteristics of neurons in auditory cortex of monkeys performing a simple auditory task. *J Neurophysiol* **45**: 16–34, 1981
- 8) Elberling C, Bak C, Kofoed B, et al: Auditory magnetic fields from the human cortex. Influence of stimulus intensity. *Scand Audiol* **10**: 203–207, 1981
- 9) Soeta Y, Nakagawa S: Auditory evoked responses in human auditory cortex to the variation of sound intensity in an ongoing tone. *Hear Res* **287**: 67–75, 2012
- 10) Wyss C, Boers F, Kawohl W, et al: Spatiotemporal properties of auditory intensity processing in multisensor MEG. *Neuroimage* **102**: 465–473, 2014
- 11) Hirano S, Naito Y, Okazawa H, et al: Cortical activation by monaural speech sound stimulation demonstrated by positron emission tomography. *Exp Brain Res* **113**: 75–80, 1997
- 12) Crinion JT, Lambon-Ralph MA, Warburton EA, et al: Temporal lobe regions engaged during normal speech comprehension. *Brain* **126**: 1193–1201, 2003
- 13) Kojima H, Hirano S, Shoji K, et al: The role of the temporal coding system in the auditory cortex on speech recognition. *NeuroReport* **8**: 2395–2398, 1997
- 14) Benson RR, Whalen DH, Richardson M, et al: Parametrically dissociating speech and nonspeech perception in the brain using fMRI. *Brain and Language* **78**: 364–396, 2001
- 15) Laird AR, Fox PM, Price CJ, et al: ALE meta-analysis: controlling the false discovery rate and performing statistical contrasts. *Hum Brain Mapp* **25**: 155–164, 2005
- 16) Turkeltaub PE, Coslett HB: Localization of sublexical speech perception components. *Brain and Language* **114**: 1–15, 2010
- 17) Damasio H, Tranel D, Grabowski T, et al: Neural systems behind word and concept retrieval. *Cognition* **92**: 179–229, 2004
- 18) Binder JR, Desai RH, Graves WW, et al: Where Is the Semantic System? A Critical Review and Meta-Analysis of 120 Functional Neuroimaging Studies. *Cereb Cortex* **19**: 2767–2796, 2009
- 19) Sekiyama K, Kanno I, Miura S, et al: Auditory-visual speech perception examined by fMRI and PET. *Neurosci Res* **47**: 277–283, 2003
- 20) Kawase T, Yamaguchi K, Ogawa T, et al: Recruitment of fusiform face area associated with listening to degraded speech sounds in auditory-visual speech perception: a PET study. *Neurosci Lett* **382**: 254–258, 2005
- 21) Morita T, Naito Y, Nagamine T, et al: Enhanced activation of the auditory cortex in patients with inner-ear hearing impairment: An MEG study. *Clin Neurophysiol* **114**: 851–859, 2003
- 22) Tateya I, Naito Y, Hirano S, et al: Inner ear hearing loss modulates ipsi-lateral temporal lobe activation by monaural speech stimuli. *Neuroreport* **14**: 763–767, 2003
- 23) Naito Y, Tateya I, Fujiki N, et al: Increased cortical activation during hearing of speech in cochlear implant users. *Hear Res* **143**: 139–146, 2000
- 24) Naito Y, Hirano S, Honjo I, et al: Sound-induced activation of auditory cortices in cochlear implant users with post- and prelingual deafness demonstrated by Positron Emission Tomography. *Acta Otolaryngol (Stockh)* **117**: 490–496, 1997
- 25) Fujiwara K, Naito Y, Senda M, et al: Brain metabolism of children with profound deafness: a visual language activation study by 18F-fluorodeoxyglucose positron emission tomography. *Acta Otolaryngol* **128**: 393–397, 2008
- 26) Moteki H, Naito Y, Fujiwara K, et al: Different cortical metabolic activation by visual stimuli possibly due to different time courses of hearing loss in patients with GJB2 and SLC26A4 mutations. *Acta Otolaryngol* **131**: 1232–1236, 2011

(2014年11月11日受稿 2014年11月24日受理)

別冊請求先：〒650-0047

神戸市中央区港島南町2-1-1

神戸市立医療センター中央市民病院耳
鼻咽喉科

内藤 泰

Yasushi Naito

Department of Otolaryngology, Kobe
City Medical Center General Hospital

2-1-1 Minatojima-Minamimachi, Chuo-
ku, Kobe 650-0047, Japan