

# 相対音感に関わる灰白質の髄鞘と神経線維束の可視化 左島皮質後部の役割

清水 祐一郎1,2) 酒井邦 嘉1,2)\*

相対音感とは外的または内的な音高に基づいて1音の高さを同定する能力である。基準音を途中で3回提示して音名を解答させる課題の成績により、参加者を3群に分けた。灰白質の髄鞘をT<sub>1</sub>強調画像とT<sub>2</sub>強調画像の比で可視化したところ、満点群で左島皮質後部において有意差が検出された。さらに、左島皮質と聴覚野を結ぶ線維の前方領域で満点群の方が成績下位群よりも一貫して描出できた。これらの領域は音声情報の処理に関与しており、音楽の能力が言語能力に関連すると考えられる。

相対音感,島皮質,髄鞘,拡散 MRI

### はじめに

音の高さ(音高, ピッチ)を外部の参照音なしに同定 する能力である「絶対音感(absolute pitch, perfect pitch)」に関して,これまで行動実験による研究がなさ れてきた<sup>1)</sup>。また,MRI(magnetic resonance imaging)によって脳の構造や機能を非侵襲的に可視化でき るようになり,絶対音感と脳部位の関連を調べた研究も 報告されている。絶対音感のある音楽家は,左右の側頭 平面(planum temporale)の非対称性の程度が,絶対 音感のない音楽家や非音楽家より大きいことが報告され ている<sup>2)</sup>。神経線維束を可視化する拡散テンソル画像法 を用いた研究によると,絶対音感のある音楽家は中側頭 回と上側頭回を結ぶ神経線維束の体積が両側ともに大き く,さらに左右差がみられた<sup>3)</sup>。最近のMRI研究でも, 両側の上側頭回の皮質が絶対音感のある音楽家で厚いこ とを裏づけている<sup>4)</sup>。

一方,長期記憶として「a」などの音高を内的に保持 しており,それらを参照することで相対的に音の高さを 同定する能力を「準絶対音感(quasi-absolute pitch)」 と分類することがある<sup>5)</sup>。しかし,「真絶対音感(genuine absolute pitch)」を持つ人が内的な音高を瞬時に (かつ自動的・無意識的に)参照するという可能性は, 原理的に排除できないのである。そこで、外的または内 的な音高に基づいて1音の高さを同定する能力である 「相対音感 (relative pitch)」が聴音の基礎であり、絶 対音感はその一部にすぎないとわれわれは考える。 Benguerel ら<sup>6</sup>は、2音を連続して提示した際、被験者 が絶対音感を持つか否かによらず先行音との相対差に基 づいて判断するという結果を示している。2音の同時提 示であっても,アンサンブル演奏のような実際的な観点 からは、楽器間のピッチの相対差を認識することが重要 である。また,言語において話者の声のピッチが異なっ ていようとも,単語の高さアクセントや,会話中のイン トネーションの判別において、ピッチの相対的変化を聞 き分けなくてはならない。したがって、少なくとも聴覚 においては相対感覚のほうが絶対感覚よりも生物学的意 義 (biological significance) を持つと言えよう。そう した重要性にもかかわらず,相対音感に着目した研究は これまで限られていた。

そこでわれわれは相対音感に着目して,相対音感を測 定する課題を新たに作成した (Fig. 1)。刺激は24音か ら成り, a<sup>1</sup>の基準音を途中で3回提示しながら音名を

<sup>1)</sup> 東京大学大学院総合文化研究科相関基礎科学系(〒153-8902 東京都目黒区駒場 3-8-1)

<sup>2)</sup> CREST 日本科学技術振興機構

<sup>\*〔</sup>連絡先〕 sakai@mind.c.u-tokyo.ac.jp

受付日:2015年1月27日,受理日:2015年3月5日

下の楽譜の各小節に,これから聞こえてくる音を,順番に書き込んで下さい。 あらかじめ書きこまれている「ラ」の音のように,全音符で記入して下さい。 楽譜の記入に慣れていない場合,音名で記入してもかまいません。 例1)ド,レ#,ミb 例2)イ,ロ,八 例3)C,Dis,Ges 音は全部で24音で,5秒に1音流れます。



Fig. 1

An answer sheet for the relative pitch task 1. At 5-s intervals, one of 24 synthesized piano tones was presented, and the participants wrote down the names of the tones except for the reference tones of  $a^1=440$  Hz, which were presented as the 1st, 9th, and 17th stimuli. The tone pitches ranged from h=247 Hz to  $cis^2=544$  Hz.



The scores of the relative pitch task 1 for all participants. The participants were classified into Group A (n=12, full points), Group B (n=22, 6–20 points), and Group C (n=14, 0–5 points).

解答させた。この比較的単純な課題条件で、相対音感に ついて十分な個人差がみられた。次に相対音感に関わる 神経ネットワークを同定するため、白質のみならず灰白 質の髄鞘を MRI によって可視化することで、その個人 差を詳細に解析した。白質の描出には拡散 MRI を用 い、灰白質の髄鞘の描出には、T<sub>1</sub>強調画像(T<sub>1</sub>-weighted:T<sub>1</sub>w)とT<sub>2</sub>強調画像(T<sub>2</sub>-weighted:T<sub>2</sub>w) の比(T<sub>1</sub>w/T<sub>2</sub>w比)を用いた<sup>n</sup>。相対音感の個人差を 反映する脳部位を特定したうえで,その脳部位を通る神 経線維束が聴覚野とどのような関係にあるのかを解剖学 的に明らかにしたので,ここに報告する。

## I.研究手法

#### 1. 実験参加者

実験参加者は48人(男性15人,女性33人,平均年

BRAIN and NERVE 67卷9号 2015年9月





Fig. 3

A: A  $T_1$ -weighted ( $T_1w$ ) image, B: A  $T_2$ -weighted ( $T_2w$ ) image, C: A normalized " $T_1w/T_2w$  ratio" image of a typical brain (L, left).

For each participant, a T<sub>1</sub>w image was acquired using a fast spoiled gradient recalled sequence (FSPGR; TR: 7.4 ms, TE: 3 ms, flip angle: 10°, FOV: 256×256 mm<sup>2</sup>, 192 sagittal slices, resolution: 1 mm<sup>3</sup>). A T<sub>2</sub>w image was acquired with a fast spin echo sequence (Cube T<sub>2</sub>; TR: 2500 ms, TE: 80 ms, FOV: 256×256 mm<sup>2</sup>, 192 sagittal slices, resolution: 1 mm<sup>3</sup>). With the default recon-all preprocessing tool (FreeSurfer v5.1.0 software (http://surfer.nmr.mgh.harvard.edu/)), we obtained the segmented  $T_1$  w images with intensity normalization and surface topology correction, but without surface inflation. By using FSL (Oxford Centre for Functional MRI of the Brain's (FMRIB) Software Library 4.1.9; http://fsl.fmrib.ox.ac.uk/fsl/ fslwiki/] and FLIRT (FMRIB's linear image registration tool)<sup>18)</sup> software with six rigid-body parameters, we registered the  $T_2$ w image to the segmented  $T_1$ w image. To minimize contamination of grey matter voxels by white matter and cerebrospinal fluid, we further resampled the  $T_2$  wimage using the spline interpolation with an applywarp tool of FSL<sup>7</sup>. By using Caret software (5.5; http://brainvis.wustl.edu/wiki/index.php/Main\_Page)<sup>19</sup>, we obtained a T<sub>1</sub>w/T<sub>2</sub>w ratio image within the gray matter. We then normalized the  $T_1w/T_2w$  ratio images to the Montreal Neurological Institute (MNI) space using statistical parametric mapping software (SPM8; http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/software/spm8/)<sup>20</sup>, and smoothed the  $T_1w/T_2w$  ratio images within the gray matter using an isotropic Gaussian kernel of 5 mm full-width at half maximum. As the  $T_1w$  and  $T_2w$  signals are proportional to myelin content in opposite directions, we calculated the square root of a voxel's value. All brain images (except those shown in Fig. 5) are shown using MRIcroN software (http://www.mccauslandcenter.sc.edu/mricro/mricron/).





**A**: The left posterior long insular cortex (L. insula), where  $T_1w/T_2w$  ratios in Group A were significantly higher than those in Group C. The result of a *t*-test was thresholded at t > 3.0 for the voxel level, and at corrected p < 0.05 for the cluster level (FDR correction). The right panel is a cross-section at the Sylvian fissure (a blue line in the left sagittal plane) of the standard brain (A, auterior; P, posterior; L, left; R, right). **B**: Significantly higher  $T_1w/T_2w$  ratios for Groups A and B than Group C (\*corrected p < 0.05) at the left long insular cortex. A yellow dot denotes the peak voxel (-41, -7, -10). Error bars: the standard error of the mean.

Diffusion MRI data were acquired with a diffusion-weighted spin-echo echo-planar imaging sequence (b-value: 4,000 s/ mm<sup>2</sup>, TR: 17 s, TE: 110 ms, FOV:  $192 \times 192$  or  $216 \times 216$  mm<sup>2</sup>, 50 axial slices, resolution:  $3 \times 3 \times 3$  mm<sup>3</sup>). For each participant, a single image without diffusion-weighting (b0) was acquired first, and then diffusion-weighting was isotropically distributed along 60 diffusion-encoding gradient directions. To register the diffusion MRI data, we acquired a T<sub>1</sub>w image with an FSPGR (TR: 10 ms, TE: 4 ms, flip angle:  $25^{\circ}$ , FOV:  $256 \times 256$  mm<sup>2</sup>, 192 axial slices, resolution: 1 mm<sup>3</sup>). We first resliced 60 diffusion-weighted images to isotropic voxels of 1 mm<sup>3</sup>, and then corrected eddy current distortions and motion artifacts using affine registration to the b0 image. We extracted the brain shape from the b0 image, and created the binary mask image (i.e., zero for the outside of the brain).

Fiber orientations were estimated for the constant solid angle orientation distribution functions (ODFs) using a spherical harmonic decomposition and residual bootstrapping, as implemented in the QBOOT (q-ball ODFs and residual bootstrap) toolbox in FMRIB's Software Library<sup>21)</sup>. By using FLIRT on FSL, we first coregistered the b0 image to the individual  $T_1$ w image. The  $T_1$ w image was spatially normalized to the MNI space by using both affine and nonlinear transformations with FLIRT and FNIRT (FMRIB's Nonlinear Image Registration Tool).

齢20±4.2歳)である。すべての参加者が小学校および 中学校で音楽の授業を受けており,最低限の音楽知識を 有している。課外での声楽・楽器の経験年数は0~23 年で,13人は大学で音楽を専攻していた(以下,音楽 家)。すべての参加者に聴覚障害や神経疾患の既往はな かった。また,脳の左右差を含めて検討するため,利き 手調査<sup>8)</sup>の結果をもとに右利きに限定して研究を行っ た。すべての参加者から実験参加への同意を書面で得て おり,20人の高校生については保護者からも同意を得 た。また,本研究は東京大学教養学部の倫理委員会で承 認された。

相対音感課題の成績結果に基づいて,実験参加者を3 つの群に分けた (Fig. 2)。21 点中満点を取った Group A が 12 人 (音楽家 10 人), 6~20 点の Group B が 22 人 (音楽家 3 人), 5 点以下の Group C が 14 人である。 基本的な解析においては,課題成績が明確に異なる Group A と Group C の 2 群を比較対象とした。

#### 2. 相対音感課題

刺激音は、ソフトウェア Mozart 7 (David Webber, UK) で合成したピアノ音であり、 $a^1$ の基準音を相対音 感課題の途中で3回提示しながら、21音(おのおのの 提示時間は0.5秒)の音名をそれぞれ5秒以内に筆記に よって解答させた(Fig.1)。この課題1の成績が満点で あった実験参加者(Group A)に対して、最低1時間半 の時間を空けて追加の音感課題を2つ行った。課題2 は、 $a^1$ の基準音を提示しないで行ったが、他の条件は 課題1と同一である。課題3は、やはり基準音を提示し ないが、1音ごとの解答時間を無制限とした。さらに、 課題1で重複のあった  $c^2$ の音の一方を $a^1$ の音に換え、 音の提示順序を変えて履歴の効果を排除した。反応時間 が5秒より伸びた場合は、前の試行で提示された音が参



A: The left middle longitudinal fasciculus (MdLF) for a representative participant in Group A (shown in orange). Left lateral and dorsal views of the brain are shown. B: The left MdLF for a representative participant in Group C. The seed mask (red sphere) was positioned in the left long insular cortex of an individual brain (see below). The waypoint mask was a 20-mm square (shown in blue) perpendicular to the Sylvian fissure, placed 50 mm posterior to the seed mask along the fissure. We set five exclusion masks (thick black lines) that spared the temporal cortex as much as possible: a diagonal plane on the Sylvian fissure (10 mm superior to the seed mask), a vertical plane just below the waypoint mask, a sagittal plane attached to the medial side of the seed mask, a sagittal plane attached to the medial side of the seed mask, and a midsagittal plane.

With the transformation matrices and estimated deformation fields of spatial normalization, a mask (a sphere of 10-mm radius) at a region (-41, -7, -10) in the MNI space (see Fig. 4A) was transformed back to the native space of each participant. We created a sphere with a 6-mm radius as the seed mask at the center-of-gravity of the transformed mask. We performed a tractography as previously described<sup>22</sup>. With the use of the probtrackx tool of FDT 2.0 (FMRIB's Diffusion Toolbox)<sup>23</sup>), probabilistic fiber tracking was initiated from all voxels within the seed mask to generate 5,000 streamline samples, with a step length of 0.5 mm, 2,000 as the maximum number of steps, a curvature threshold of 0 ( $\pm$  90.0°), and a loopcheck option. In the connectivity distributions obtained, each voxel value represented the total number of streamline samples passing through that voxel. We then created a connectivity probability map for each participant by dividing the connectivity distributions with the sum of the waytotal values, i.e., the total number of tracts generated from the seed mask and through the waypoint mask. To remove any spurious connections, the pathways for individual participants were thresholded to include only voxels that had at least 0.2 % connectivity probability values.

照しにくくなるため,解答がより難しくなると考えられ る。

#### 3. MRI の撮影と解析

撮影はすべて 3.0 T の MRI 装置 (Signa HDxt; GE Healthcare, Milwaukee, USA) で, 8 チャンネルの フェイズドアレイコイルを用いた。T<sub>1</sub>w 画像と T<sub>2</sub>w 画 像の撮影 (Fig. 3) は全脳を覆うように矢状面での撮影 を行い,解析には T<sub>1</sub>w/T<sub>2</sub>w 比の画像を用いて,Group A と Group C 間で t 検定を行った。拡散 MRI の撮影で は,前交連と後交連 (AC-PC line) に平行な水平断面 で全脳を覆うように撮影を行い,q-ball imaging<sup>9)</sup> で解 析を行った。 Ⅱ.結 果

#### 1. 相対音感課題の成績

相対音感の課題1の成績が示した人数分布によると、 満点と4点に2つの明確なピークがあり、それぞれ異な る群を成すことがわかる(Fig. 2)。そこで、両者を Group A(満点のみ)とGroup C(5点以下)と見なし た。この両群に属さない中間的な成績群がGroup Bで ある。

Group A の実験参加者 12 人に対する課題 2 の結果 は、11 人が満点(21 点)で、音楽家の1 人が19 点で あった。課題 3 の結果は、10 人が満点であり、課題 2 で19 点だった人が14 点になり、さらに音楽家の1 人が 20 点になった。課題 2 と 3 の結果から、Group A には



A: A population probability map of the left MdLF for Group A participants. **B**: A population probability map of the left MdLF for Group C participants. The color maps (>50 %) on the left lateral view are shown with a maximum intensity projection. Note that the left MdLF pathways are more consistent near the seed mask for Group A. The individually thresholded pathways of the left MdLF were spatially normalized, binarized at the size of  $2 \times 2 \times 2$  mm<sup>3</sup>, and overlaid across participants to produce a population probability map. The voxel values represent a percentage of the number of participants who showed a pathway through that voxel. Black circles and blue lines denote the seed mask and waypoint mask, respectively. **C**: Differential percentages of the number of participants between Groups A and C, plotted for the left MdLF against the distance from the center of the seed mask along the Sylvian fissure (long blue lines in the upper panels). Note that Group A (red line) showed larger percentages from 15 to 40 mm (region of interest, ROI 1), whereas Group C showed larger percentages from 40 to 65 mm (ROI 2). The lines a, b, and c correspond to those in the upper panels.

音高の同定に外部の参照音を必要とする参加者が含まれ ていたことになる。つまり Group A と Group C の比較 では,相対音感の定義に則って明確な差があることが保 証される。

#### 2. T<sub>1</sub>w/T<sub>2</sub>w比の解析

Group AとGroup Cの間で全脳において t検定を 行った結果,  $T_1w/T_2w$ 比がGroup Aで有意に高かっ たのは, 左島皮質後部 (left posterior long insular cortex)のみであった (Fig. 4 A)。左島皮質後部のピーク 座標 (-41, -7, -10) における  $T_1w/T_2w$ 比を比較し



Fig. 7

An anatomical identification of ROI 1. The left panel is a sagittal plane (a thick line in the right panel). The right panel is a cross-section at the Sylvian fissure (a thick line in the left panel). Note that ROI 1 spans white matter in the Heschl's gyrus and planum temporale, both of which include the major auditory areas. Lines a and b correspond to those in Fig. 6.

た結果, Group A および Group B のほうが Group C よ り有意に高いことがわかった [Group A: t(24) = 6.6, ボンフェローニ補正 p < 0.001; Group B: t(34) = 2.9, ボンフェローニ 補正 p < 0.05] (**Fig. 4 B**)。な お, Group A と Group B の間には有意差がなかった [t(32)=2.2, ボンフェローニ補正 p > 0.1]。

3. MdLF(middle longitudinal fasciculus)の描出

島皮質を経由する線維としては、弓状束、下前頭後頭 束、下縦束、鈎状束、MdLF<sup>10,11)</sup>などが知られている。 本研究では特に、左島皮質と聴覚野を結ぶ MdLF に注 目して、左半球のみで線維の描出を行った。上記の解析 で明らかになった左島皮質後部に各個人の seed mask を設定し、シルヴィウス溝に沿った後方 50 mm の位置 に waypoint mask を設定した。これらの両方を通過す る神経線維束のトラッキングを行ったところ、Group A と Group C に含まれるすべての実験参加者で左 MdLF が描出できた (Fig. 5)。

次に, 描出した左 MdLF を標準脳に変換したうえで 二値化した。その各個人の結果を Group A と Group C のそれぞれで重ね合わせ,重なりの割合を確率マップと して表示する(Fig. 6 A, 6 B)。各群の左 MdLF の走行 を詳細に調べるため,waypoint mask に平行な断面に おいて 50%を超えるボクセル値を 2 mm ごとの断面で 平均してプロットした(Fig. 6 C)。左島皮質後部のピー ク座標から 15~40 mm の領域に ROI (region of interest) 1を,40~65 mm の領域に ROI 2を設定し,各 ROI に含まれるボクセル値を平均して 2 群で比較した ところ,ROI 1 では Group A の値が Group C より有意 に高かった [t(386)=3.2,ボンフェローニ補正 p < 0.05]。一方 waypoint mask を含む ROI 2 では, Group C の値が Group A より有意に高かった [t(311)=4.1,ボンフェローニ補正 p < 0.05]。

ROI 1 に含まれる白質の分布をさらに調べたところ, ROI 1 は聴覚領域であるヘシュル回(Heschl's gyrus) と側頭平面<sup>12)</sup>を含み,上側頭回に沿うことが明らかと なった(Fig. 7)。以上の結果より,聴覚領域に至る左 MdLFの前方領域では,Group AのほうがGroup Cよ りも一貫して束ねられた線維連絡が存在すると結論でき る。左 MdLFの後方領域で2群の傾向が逆転したのは, waypoint maskによってシルヴィウス溝に平行な線維 が強調されるという効果にもかかわらず,Group Aに おける神経線維の投射範囲が広がっていたためと考えら れる。

#### Ⅲ.考 察

今回われわれは、新たな相対音感課題と $T_1w/T_2w$ 比を用いることで、相対音感の個人差が左島皮質後部の髄 鞘化と関係することを初めて明らかにした。さらに、左

BRAIN and NERVE 67卷9号 2015年9月

島皮質後部を通る神経線維束として、聴覚領域に至る左 MdLFを特定することに成功した。以上の結果は、音 高の同定における左島皮質後部と聴覚領域を含む神経 ネットワークの重要性を示唆する。

これまでの先行研究は断片的であるが,島皮質は基本 的な音声処理に関わっており,特に島皮質後部は感覚皮 質としての役割が指摘されている<sup>13)</sup>。相対音感の個人差 に関する今回の知見も,音高に関する感覚情報が左島皮 質後部で処理されるという点で合致している。さらに左 島皮質については,単音節の音韻処理<sup>14)</sup>や,音声の周 波数処理<sup>15)</sup>に関連した活動が報告されている。した がって,音楽の相対音感は普遍的な言語能力に関連する とわれわれは考える。

絶対音感に関わる神経線維束の研究では、上縦束を調 べたもの16)や、上側頭回と中側頭回を結ぶ線維に関す る報告3)などがあるが、角回から上側頭回を経由して側 頭極を結ぶ線維である MdLF<sup>11)</sup> に関する知見は知られ ていなかった。音声と単語の意味を新たに連合する学習 課題では、左 MdLF の一部で拡散異方性が成績と相関 するという報告がある17)。本研究では、聴覚野であるへ シュル回と側頭平面を境として、左 MdLF の束ねられ 方と広がり方が Group A と Group C の2 群間で異なる ことを明らかにした。ただし、これらの髄鞘化や神経線 維束の違いが先天的素質として音感能力の差をもたらし たのか, 音楽の経験や環境によって神経線維に変化が生 じたのかは、まだ明らかではない。相対音感を聴覚野と 左島皮質後部に関連づけた今回の知見は, 音楽の基礎能 力を聴覚と言語の問題として明確に位置づけたという点 で重要であろう。

#### 文 献

- Takeuchi AH, Hulse SH: Absolute pitch. Psychol Bull 113: 345-361, 1993
- Schlaug G, Jäncke L, Huang Y, Steinmetz H: In vivo evidence of structural brain asymmetry in musicians. Science 267: 699-701, 1995
- 3) Loui P, Li HC, Hohmann A, Schlaug G: Enhanced cortical connectivity in absolute pitch musicians: a model for local hyperconnectivity. J Cogn Neurosci 23: 1015–1026, 2011
- 4) Dohn A, Garza-Villarreal EA, Chakravarty MM, Hansen M, Lerch JP, et al: Gray- and white-matter anatomy of absolute pitch possessors. Cereb Cortex 25: 1379–1388, 2015
- Bachem A: Various types of absolute pitch. J Acoust Soc Am 9: 146-151, 1937
- 6) Benguerel AP, Westdal C: Absolute pitch and the perception of sequential musical intervals. Music

Percept 9: 105-119, 1991

- 7) Glasser MF, Van Essen DC: Mapping human cortical areas *in vivo* based on myelin content as revealed by T1- and T2-weighted MRI. J Neurosci **31**: 11597-11616, 2011
- 8) Oldfield RC: The assessment and analysis of handedness: the Edinburgh inventory. Neuropsychologia 9: 97-113, 1971
- 9) Tuch DS: Q-ball imaging. Magn Reson Med 52: 1358-1372, 2004
- 10) de Champfleur NM, Maldonado IL, Moritz-Gasser S, Machi P, Le Bars E, et al: Middle longitudinal fasciculus delineation within language pathways: a diffusion tensor imaging study in human. Eur J Radiol 82: 151-157, 2013
- 11) Dick AS, Tremblay P: Beyond the arcuate fasciculus: consensus and controversy in the connectional anatomy of language. Brain **135**: 3529–3550, 2012
- 12) Tervaniemi M, Hugdahl K: Lateralization of auditorycortex functions. Brain Res Rev **43**: 231–246, 2003
- 13) Bamiou DE, Musiek FE, Luxon LM: The insula (Island of Reil) and its role in auditory processing: literature review. Brain Res Rev 42: 143–154, 2003
- 14) Hsieh L, Gandour J, Wong D, Hutchins GD: Functional heterogeneity of inferior frontal gyrus is shaped by linguistic experience. Brain Lang 76: 227-252, 2001
- 15) Tervaniemi M, Szameitat AJ, Kruck S, Schröger E, Alter K, et al: From air oscillations to music and speech: functional magnetic resonance imaging evidence for fine-tuned neural networks in audition. J Neurosci 26: 8647-8652, 2006
- 16) Oechslin MS, Imfeld A, Loenneker T, Meyer M, Jäncke L: The plasticity of the superior longitudinal fasciculus as a function of musical expertise: a diffusion tensor imaging study. Front Hum Neurosci 3: 76, 1–12, 2010
- Wong FC, Chandrasekaran B, Garibaldi K, Wong PC: White matter anisotropy in the ventral language pathway predicts sound-to-word learning success. J Neurosci 31: 8780-8785, 2011
- 18) Jenkinson M, Bannister P, Brady M, Smith S: Improved optimization for the robust and accurate linear registration and motion correction of brain images. Neuroimage 17: 825-841, 2002
- 19) Van Essen DC, Drury HA, Dickson J, Harwell J, Hanlon D, et al: An integrated software suite for surface-based analyses of cerebral cortex. J Am Med Inform Assoc 8: 443–459, 2001
- Friston KJ, Holmes AP, Worsley KJ, Poline JP, Frith CD, et al: Statistical parametric maps in functional imaging: a general linear approach. Hum Brain Mapp 2: 189–210, 1995

- 21) Sotiropoulos SN, Moeller S, Jbabdi S, Xu J, Andersson JL, et al: Effects of image reconstruction on fiber orientation mapping from multichannel diffusion MRI: reducing the noise floor using SENSE. Magn Reson Med 70: 1682-1689, 2013
- 22) Ohta S, Fukui N, Sakai KL: Syntactic computation in

the human brain: the degree of merger as a key factor. PLOS ONE 8: e56230, 1-16, 2013

23) Smith SM, Jenkinson M, Woolrich MW, Beckmann CF, Behrens TE, et al: Advances in functional and structural MR image analysis and implementation as FSL. NeuroImage 23: S208-S219, 2004

BRAIN and N	NERVE 67(9): 1147-1155, 2015 Original Article
Title	Visualization of Gray Matter Myelin and Fiber Bundles Critical for
	Relative Pitch: A Role of the Left Posterior Long Insular Cortex
Authors	Yuichiro Shimizu <sup>1,2)</sup> , Kuniyoshi L. Sakai <sup>1,2)</sup> *
	<sup>1)</sup> Department of Basic Science, Graduate School of Arts and Sciences, The University of
	Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan; 2)CREST, Japan Science and
	Technology Agency
	*E-mail: sakai@mind.c.u-tokyo.ac.jp
Abstract	Relative pitch is the ability to identify a tone pitch based on external or internal pitches. Here
	we used magnetic resonance imaging (MRI) to determine which cortical region is responsible
	for relative pitch. Forty-eight participants were asked to listen to 24 piano tones, and then
	write down the names of the tones (except reference tones of $a^1 = 440$ Hz, which were intermit-
	tently presented three times). We classified the participants into three groups based on their
	task scores: Group A (n=12, full points), Group B (n=22, 6-20 points), and Group C (n=14, 0-5
	points). We focused on the myelin of the gray matter, which can be visualized by the ratio of
	MR signals from a pair of $T_1^-$ and $T_2^-$ weighted images. We found significantly increased
	ratios in the left posterior long insular cortex for Group A. We also observed more consistent
	pathways in the anterior region of the left middle longitudinal fasciculus for Group A compar-
	ed to Group C, which passed through the left superior temporal gyrus. Because these regions
	are involved in the processing of speech sounds, the present results suggest that the ability to
	identify musical pitches is associated with universal linguistic abilities.
Key words	relative pitch, insular cortex, myelin, diffusion MRI
	(Received January 27, 2015; Accepted March 5, 2015; Published September 1, 2015)