

(研究展望)

脳科学と視覚障害

－盲者の大脳体性感覚野および視覚野に関する脳画像による研究について－

金子 健

(企画部)

要旨:近年、陽電子放射断層撮像法 (PET: positron emission tomography), 機能的磁気共鳴画像法 (fMRI: functional magnetic resonance imaging), 脳磁図 (MEG: magnetencephalography) といった脳画像技術による脳の各領域の活動の測定や、経頭蓋磁気刺激 (TMS: transcranial magnetic stimulation) による脳機能の推定など、脳科学の手法による研究が進展している。そのなかで、盲者の脳の体性感覚野や視覚野の活性状態についての研究は、盲者の視覚的活動ではなく、点字触読をはじめとした触覚的活動、聴覚的活動等に対応した可塑性のために、重要な研究領域となっている。本論では、上記の脳科学の手法による盲者の体性感覚野及び視覚野に関しての近年の研究をレビューするものである。ここでは、この体性感覚野、視覚野と関連する触覚的活動、聴覚的活動等行動上及び認知機能上の分野として、点字触読、指先の空間解像度、言語機能、音についての処理、記憶、物の認知を取り上げ、これらと盲者の体性感覚野、視覚野の活性化の状況や機能等との関係についてレビューを行う。また、晴眼者が目隠しをして過ごした場合の脳機能上の変化についての研究も取り上げる。

見出し語: 視覚障害, 盲者, 脳科学, 脳画像, レビュー

I. はじめに

近年、従来の事象関連電位 (ERP: event related potentials) による脳機能測定その他、陽電子放射断層撮像法 (PET: positron emission tomography), 機能的磁気共鳴画像法 (fMRI: functional magnetic resonance imaging), 脳磁図 (MEG: magnetencephalography) とった脳画像技術により、非侵襲的にヒトの脳の各部の活性状況を調べることが可能となってきた。これらのうち、PET と fMRI は、脳の各部の神経活動に伴う血流の変化により、その活動を測定するものであり、MEG は、神経活動に伴う磁場の変化により、その活動を測定するものである。また、経頭蓋磁気刺激 (TMS: transcranial magnetic stimulation) によって頭蓋の外から脳の各部に磁気刺激を与えて、その活動

を引き起こしたり、あるいは阻害したりすることで、被験者において起こる行動上の変化や、脳の他の領域に起こる変化をみることも可能となっている (栗木, 2008; Gazzaniga, Ivy, Mangun & Steven, 2006等)。なお、この研究紀要においても、以前、「脳科学と障害のある子どもの教育」という特集が生まれ、そこでも、こうした測定法について述べられている (渥美, 玉木, 篁, 海津, 2006)。

こうした測定法による研究の中で、盲者の脳の体性感覚野や視覚野についての研究は、脳の可塑性について重要な知見を提供することもあって、現在、数多くの研究がなされている。即ち、盲者の点字触読経験によるその体性感覚野の可塑的变化や、本来視覚の機能を担うはずの視覚野が、そこへの視覚刺激入力がない盲者においては、触覚や聴覚にかかわる機能を担う等の可塑的变化を示すことが知られるようになってきている。

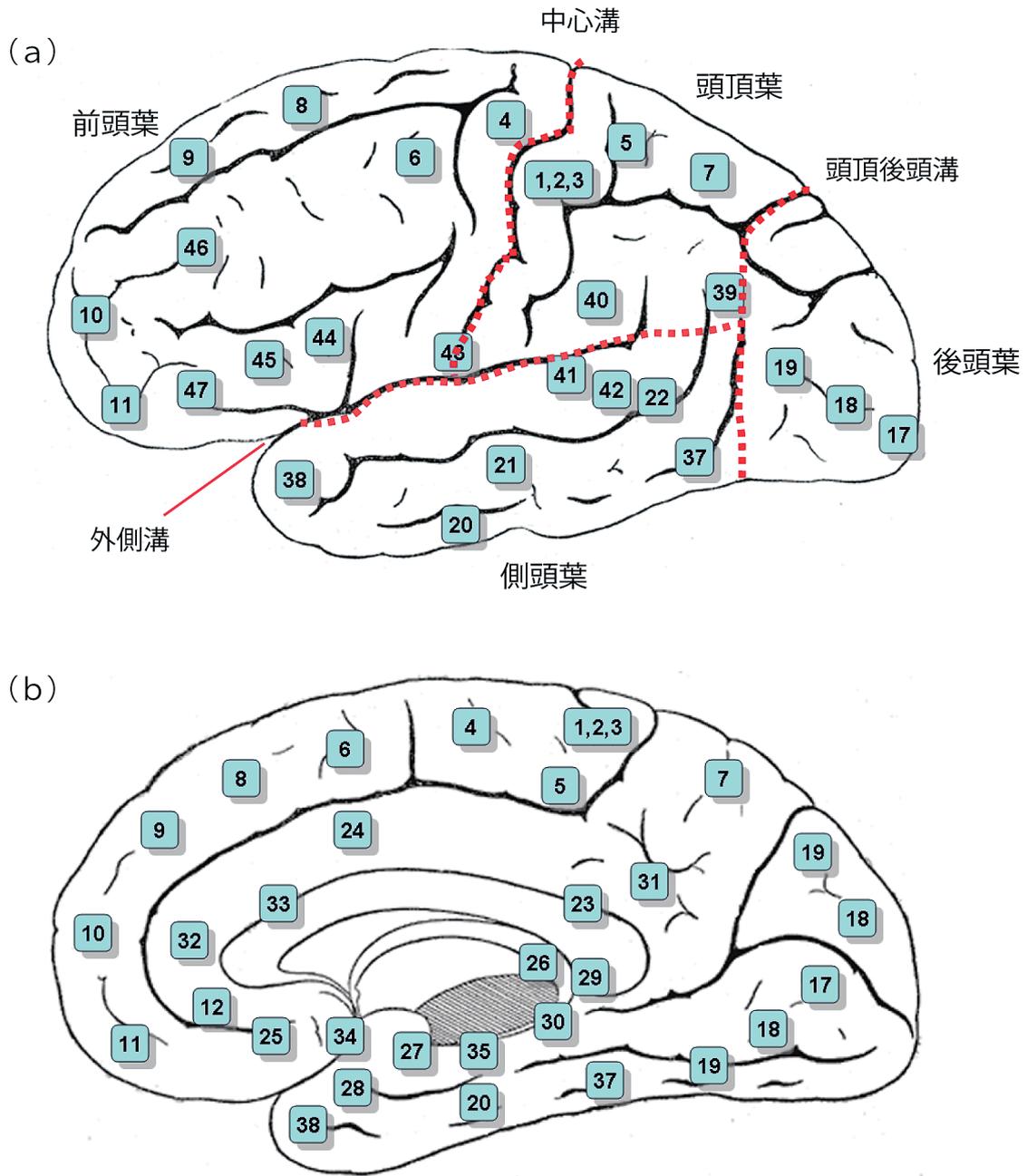


図1 大脳左半球の外側面と内側面

(a)は大脳左半球の外側面、(b)は同内側面を示す。また、大脳の領野は4つに大きく分けられるが、(a)にはその、前頭葉、頭頂葉、側頭葉、後頭葉の4領野、およびそれらを分ける脳溝も示す。さらに数字はBrodmannの脳地図の番号(細胞構築上差異のある領域を示す)である。

この図のなかで、触覚の処理に関わる体性感覚野は、頭頂葉の中心溝後方にあり、1、2、3野が第1体性感覚野、その腹側(下方)部に第2体性感覚野がある。なお、第2体性感覚野は外側溝のなかに入り込んでいる。

また、視覚野は後頭葉の領域で、Brodmannの17野(番号17)が1次視覚野、それ以外の視覚野の領域が外線条皮質である。視覚野については、その領域が大脳の内側面にも及んでいる。

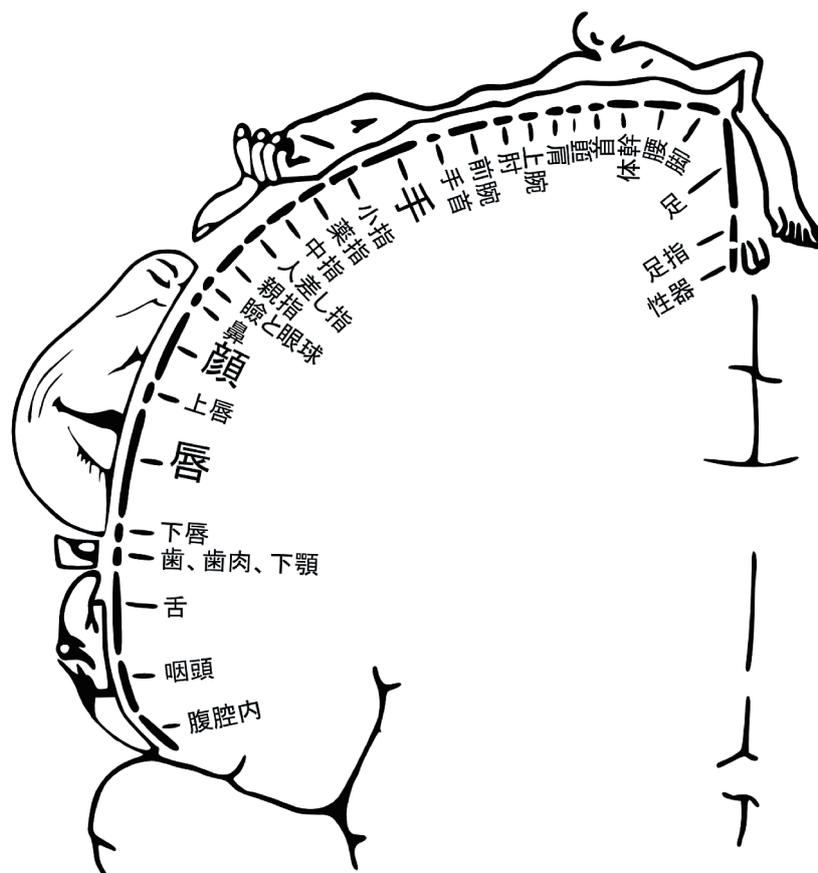


図2 体性感覚野における体部位表現地図

右上が中心溝，左下に外側溝があり，その間にある体性感覚野で各領域が対応している身体各部位を，その名称および図により示している。なお，各体部位の図の大きさの違いは，それを表現している体性感覚野の領域の大きさの違いを表わしている。

ここで図1に，体性感覚野や視覚野を含めて大脳の各領域の位置と名称について示す。以下でも，大脳の各領域について言及する際には，適宜，この図1を参照願いたい。

本論文では，盲者の体性感覚野および視覚野についての，上記のような脳機能測定法による近年の研究に関してレビューを行うものである。なお，ここで取り上げる研究での被験者は，断わりのない限り全て成人の被験者である。

なお，前述の特集においても，盲者の点字触読時の視覚野の活性化について言及されているが(渥美，渡辺，小田，大内，2006)，ここではその知見を含めて視覚野についての他の多くの知見についても取り上げ，また体性感覚野も含めて包括的なレビューを行うものである。

II. 盲者の大脳体性感覚野および視覚野についての研究

1. 体性感覚野について

大脳の体性感覚野には，身体各部に対応して，それら各部を表す地図があり，手の指についても各指を表す体性感覚野の領域がある(図2参照)。その各指に対応する体性感覚野の領域の大きさや配置が，サルにおいて各指の使用状況や損傷によって変化することを示す研究があり(Jenkins, Merzenich, Ochs, Allard, Guic-Robles, 1990; Merzenich, Nelson, Stryker, Cynade, Schoppmann et al., 1984)，近年，ヒトにおいてもERPやMEGを用いた研究により，同様の変化が見られることを示す研究がある。

晴眼者における各指の使用状況に関しての例として、MEGによる測定により、弦楽器奏者の体性感覚野（第1体性感覚野）で、左手の第2～5指に対応する領域が拡大していたという報告（Elbert, Pantev, Wienbruch, Rockstroh, Taub et al., 1995）があるが、盲者において、その指を刺激した場合の体性感覚野からのERPにより、その体性感覚野での指の領域が晴眼者よりも広く、また、点字触読に使用される右手の人差し指の領域の方が左手の人差し指よりも広がったという報告（Pascual-Leone & Torres, 1993）がある。

また、MEGにより、点字触読において多指（第2, 3, 4の3指）を同時に用いる盲者において、それらの体性感覚野での領域が拡大していることを示す研究もある（Sterr, Müller, Elbert, Rockstroh, Pantev et al., 1998）。この点字触読に3指を用いる盲者の、その指の用い方は、人差し指で点字を読み、中指で単語間の空白部分を見つけ、薬指は行たどりを維持するために用いるというものであった。この研究では、その領域の拡大とともに、1～5指の領域の配置が通常のものから変化していることも示されており、また、各指への触刺激検出閾値を測定してみると、その閾値は晴眼者に比較して低かったが、点字触読に3指を用いる盲者は、どの指を刺激されているのか分からないことがあったことも報告されている。このことについて、筆者らは、どの指を刺激されているか分からないという点では不適応的な変化であるが、各指からの刺激が融合することにより、点字触読に有効な変化をもたらしているかもしれないと述べている。

2. 視覚野の活性化について

(1) 点字触読について

Sadato, Pascual-Leone, Grafman, Ibañez, Deiber, et al. (1996) において、PETによる脳機能測定により、盲者の点字触読時に、その視覚野が活性化するという報告がなされ、以降、PETやfMRI等の脳機能測定による、この、盲者の視覚野の活性化についての研究が数多く報告されている。（Cohen, Celnik, Pascual-Leone, Corwell, Falz et al., 1997 ; Büchel, Price, Frackowiak, & Friston, 1998; Burton,

Snyde, Conturo, Akbudak, Ollinger et al., 2002a; Sadato, Pascual-Leone, Grafman, Deiber, Ibañez et al., 1998; Sadato, Okada, Honda & Yonekura, 2002, Sadato, Okada, Kubota & Yonekura, 2004, 他）

Sadato et al. (1996) では、平均4.3歳（±5.5歳）以下で視覚障害になった盲者で、点字の提示文字列が意味のある単語か無意味な文字列であるかの弁別課題において、その1次視覚野および外線皮質に活性化がみられたと報告している。また、Sadato et al. (1998) では、同様の課題において、盲者においては視覚野が活性化し、第2体性感覚野は活性化していなかったが、晴眼者では視覚野は活性化せず、第2体性感覚野が活性化するという、両者で逆のパターンがみられたことを報告している。

Burton et al. (2002a) では、fMRIにより、先天性及び5歳以下で視覚障害になった盲者、及び平均12歳（10-25歳）以下で視覚障害になった盲者の双方で、点字の名詞の単語を触読してそれに対応する動詞を答える課題（例えば、“cake” に対して “bake”）で、Sadato et al. (1996, 1998) の結果と同様の活性化がみられたと報告している。なお、盲者2群のうち、前者は後者に比較してV5/MT野およびV8野と推測される領域でより強い活性化がみられ、また、点字触読に使用する手の対側の視覚野がより強く活性化していたことも報告している。

Büchel et al. (1998) では、PETにより、点字の単語の中の1文字に6の点（右下の点）があるか否かを検出する課題で、やはり盲者の視覚野に活性化がみられたと報告している。ただし、この研究では、後述のように、1次視覚野と外線皮質の活性化のパターンは、Sadato et al. (1996, 1998) や Burton et al. (2002a) の結果とは異なっている。

またCohen et al. (1997) では、TMSをその後頭葉に与えて視覚野の活動を阻害すると、点字触読の正確さが損なわれるという結果から、この視覚野の活性化は点字触読に付随する副次的な現象なのではなく、点字触読のために実際の機能を担っているとの主張もなされている。なお、この際の被験者の言語報告では、点字を触っていることは分かるが、異なって感じられる、より平坦に感じられる、ぼやけ

て感じられるといった報告がなされている。また、点が余分に感じられると報告した被験者もある。

さらに、視覚野に障害を受けた盲者において点字触読の機能が損なわれたという症例 (Hamilton, Keenan, Catala, & Pascual-Leone, 2000) も、視覚野が点字触読において実際に機能を担っていることを支持するものと言える。なお、この症例では、触覚によって、面の粗さの弁別や日常品の同定は可能であり、点字についても点があることは分かるが、単語および文字としての同定ができなかったという報告がなされている。

以上のように、盲者の点字触読において視覚野が活性化し、それが実際の機能も担っていると考えられるが、ここで、点字触読は、触覚が関与する過程であることは当然のこととして、点の位置や配置の弁別・同定、点の配置が作るパターンの弁別・同定、言語機能、記憶等も関与する複合的な過程であるといえる。

盲者の点字触読における視覚野の活性化が、これらのうちのどの機能を担っているかについて、先の Cohen et al. (1997) での被験者の言語報告をみると、点の配置あるいはパターンの弁別・同定の機能を担っているのではないかとも思われ、また、後述の、盲者の指先の空間解像度の高さや視覚野の活性化との関連も考えられるが、以下で取り上げるように、盲者の視覚野が言語機能、記憶機能等とも関連することを示す研究があり、現在、明確な結論は出ていないようである (Sathian, 2005)。

また、盲者において点字触読で活性化する視覚野のうち、外線条皮質については、先天および早期に視覚障害になった盲者 (早発性盲とする) と、より後期に視覚障害になった盲者 (後発性盲とする) の両者ともに活性化するが、1次視覚野については前者では活性化するが後者では活性化しないという知見が示されている (Sadato et al., 2002; Cohen, Weeks, Sadato, Celnik, Ishii et al., 1999) (注)。この、1次視覚野が活性化する臨界期として、Sadato et al. (2002) ではfMRIを用いた測定により16歳、またCohen et al. (1999) では、TMSで後頭葉を刺激して視覚野の活動を阻害した実験から14歳という年齢を挙げている。

一方、Büchel et al. (1998) では、PETを用いた測定で、早発性盲 (この実験では先天性盲者) ではなく後発性盲 (発症時期が 18.3 ± 3.8 歳) において1次視覚野が活性化するという結果が示されている。なお、Büchel et al. (1998) は、後発性盲における過去の視覚経験や視覚的イメージが点字触読における視覚野の活性化に関与するという解釈であるが、この研究ではコントロール条件として言語課題 (音声で提示される単語の後に高い音が聞こえるか否かの検出課題) を用いているので、視覚野における言語的処理機能 (後述) を差し引いた結果、先天性盲者では1次視覚野の活性化が見られなかったのではないかとの見解もある (Sathian, 2005)。

また、Sathian (2005) は、こうした1次視覚野活性化の臨界期について、思春期が1つの境界になるのではないかと推測している。

また、TMSで盲者の体性感覚野 (第1体性感覚野) を刺激してその活動を引き起こし、かつPETによりその際の視覚野の活性との相関をみることで、1次視覚野 (Brodmann 17野) および18野の活性化の程度が早発性盲 (5歳前に視覚障害になった) の方が後発性盲 (5歳以降に視覚障害になった) よりも高かったという結果が示されている (Wittenberg, Werhahn, Wassermann, Herscovitch, Cohen, 2004)。この結果は、筆者らも述べているように、Sadato et al. (2002), Cohen et al. (1999) の報告を支持するものといえる。

注：このSadato et al. (2002) については、前述の渥美、渡辺、小田、大内 (2006) でも紹介されており、ここでの言葉で早発盲者、遅発盲者、及び晴眼者の視覚野の活性化の様子を示す脳画像の図も転載されている。

(2) 指先の空間解像度について

盲者の指先における触覚による空間解像度 (spatial acuity: 視覚での視力に相当する) が晴眼者よりも高いかどうかについては、従来、その差がないとする知見も示されていたが (Hollins, 1989)、近年、従来の2点弁別閾測定法に代わり、より妥当と考えられる、隙間の検出 (gap detection) 課題や格子方向弁別 (grating orientation discrimination)

(格子縞が縦か横かを弁別する)課題を用い、かつ刺激パターンを機械的に指に押し当てる等による測定方法によって、盲者の方が空間解像度が高いとする結果が示されている (Goldrich & Kanics, 2003, 2006; Stevens, Foulke & Patterson, 1996; Van Boven, Hamilton, Kauffman, Keenan, Pascual-Leone, 2000)。従来の2点弁別閾測定法は、空間解像度以外の刺激の大きさ(表面積)や強度等の要因が関与すること等により、その妥当性についての問題点が指摘されていたが、近年の測定法は、これらの問題点を解決する測定法と考えられているものである。

上記の近年の結果をみると、閾値にして、盲者の方が晴眼者よりも0.2mm~0.4mm程度低い(空間解像度が高い)という結果となっている。

Goldrich & Kanics, (2003) は、この結果に関与している要因について、被験者の空間解像度と点字触読経験の有無(被験者の中には点字触読の経験のない被験者もある)との相関がなかったこと、また1指の損傷が、その体性感覚野における領域が拡大していると思われる隣接する他の指の空間解像度の向上につながらなかったという研究(vega-Bermudez & Jonson, 2002)を挙げ、前記の体性感覚野での点字触読に用いる指の領域の拡大(Pascual-Leone & Torres, 1993)との関連によるのではなく、視覚野の活性化が関与しているのではないかとしている。

さらに、盲者の場合、その点字触読に使用される指の空間解像度が、他の指に比べて高いという結果も示されている (Van Boven et al., 2000)。

この研究については、この実験と同じ被験者の盲者に関して、fMRIにより、その指先に触刺激を与えた場合の視覚野の活性化の程度について、点字触読に使用される指を刺激した場合の方が他の指を刺激した場合に比べて高いという結果が報告されている (Kiriakopoulos, Baker, Hamilton, Pascual-Leone, 1999)。

また、近年の測定結果では、盲者も晴眼者も、加齢によって、その空間的解像度が低下するという結果も示されている (Goldrich & Kanics, 2003, 2006; Stevens et al., 1996)。例えば、Goldrich and

Kanics (2003) では、格子方向弁別による測定で、25歳から75歳までの間で、晴眼者の閾値は1.65mmから2.62mmまで、盲者では1.49mmから2.01mmまで上昇することが報告されている。

これについて、点字の点(3点2列の6点)の上部4点のうち1点を欠くパターン及びランドルト環を触覚的に翻案した刺激パターンによって、手指を動かして刺激を触る条件での空間解像度の測定では、盲者の場合は加齢によっても空間解像度が低下しないという結果が示されている (Legge, Madison, Vaughn, Cheong & Miller, 2008)。前述の隙間の検出や格子方向の弁別測定では、どちらも刺激を指に静的に押しつけるものであるが、この実験では被験者が能動的に刺激パターンを触る条件での結果である。

この研究の実験1については被験者が視覚障害になった時期は分からないが、実験2をみると、測定に参加した盲者の年齢は23歳から81歳までで、視覚障害になった時期が、平均1.4歳(標準偏差2.49)であり、早期に視覚障害になった場合の例である。

また、実験1では、盲者は点字触読に主として用いる手の人差し指の他、薬指についても測定を受けている。

この研究の筆者らは、盲者において上記の条件で空間的解像度の低下がみられなかった理由について、点字触読に用いない薬指でも空間解像度の低下が見られなかったことから、前記の、盲者の点字触読に使用される指の体性感覚野での表象領域が広いという (Pascual-Leone & Torres, 1993) 体性感覚野の関与は退け、盲者の視覚野が活性化することによる視覚野の関与を推測している。

(3) 言語的な機能について

前述の、盲者の1次視覚野を含む視覚野の活性化についての初期の研究 (Sadato et al, 1996) でも、点字触読の他、点字以外の触覚的弁別課題(触覚的な線分の角度の弁別や凹部の幅の大きさの弁別課題)においても、その領域の活性化がみられたが、点字触読の課題(点字の提示文字列が単語であるか否かの弁別課題)よりも活性化の程度が低かったということから、点字触読で視覚野が活性化する要因

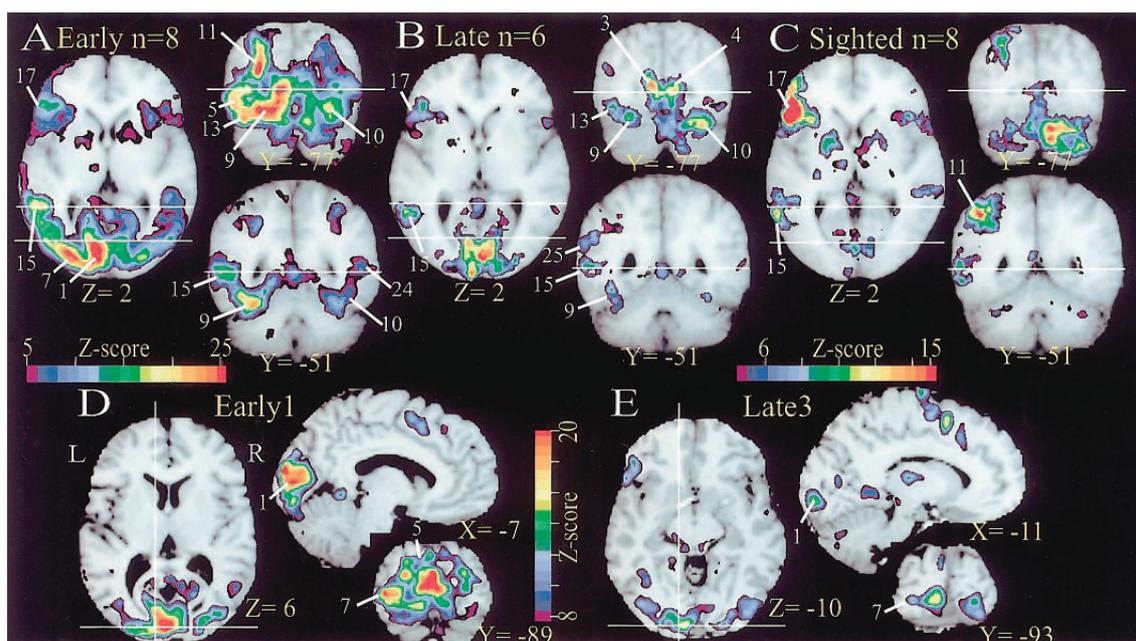


図3 言語課題で有意に活性化した脳の部位

Aは8人の早発性盲の被験者における脳の活性化部位の平均値（脳血流のz-scoreの平均値）を同じ被験者の平均的な脳構造の上に重ねて表している。

Bは6人の後発性盲の被験者における同様の平均値を示している。

Cは8人の晴眼者の平均値である。

Dは1人の早発性盲の被験者において、鳥距溝周辺（V1:1次視覚野）とその隣接領域で有意に活性化した部位を表している。

Eは、1人の後発性盲の被験者において、Dと同様に鳥距溝周辺（V1:1次視覚野）とその隣接領域で有意に活性化した部位を表している。

Burton, H. Snyder A. Z., Diamond J. B. et al. (2002). Adaptive Changes in Early and Late Blind: A fMRI Study of Verb Generation to Heard Nouns. *Journal of Neurophysiology*, 88 (6), 3359-3371. の FIG. 3. を著者の許可を得て転載。 © 2002 The American Physiological Society.

として、言語的な要因も挙げられていたが、その後、盲者の視覚野が言語的な処理にかかわっていることを示す研究がみられている。

前述のように、Burton et al. (2002a) では、点字の名詞の単語を触読してそれに対応する動詞を答える課題で盲者の視覚野に活性化がみられたとの報告があったが、Burton, Snyder, Diamond, & Raichle (2002b) では、耳で聞いた名詞の単語に対して動詞を答える課題で、同様の活性化がみられたことを報告している（図3参照）。さらに、この実験の被験者の盲者でBurton et al. (2002a) にも参加している被験者があるが、その被験者についてBurton et al. (2002a) で点字触読時に活性化した視覚野の領域と、この実験で活性化した領域が同じであった

としている。また、晴眼者との比較では、視覚野以外の、通常、言語機能を担っている領域の活性化については違いがみられなかったという。また、Burton, Diamond & McDermott (2003) では、言語機能のうち、音韻的課題（音声提示される単語リストの単語のリズムと同じリズムの語を答える）と意味的な課題（音声提示される単語リストの単語に意味的に関連する語を答える）による活性化の違いを検討し、盲者の視覚野の活性化は、音韻的処理に比較して、意味的な処理に、より対応しているのではないかと報告している。

さらに、こうした、盲者の言語課題についての視覚野の活性化については、TMSにより、その被験者の視覚野の活動を阻害すると、Burton et

al. (2002b) と同様の言語課題の成績が低下することを示した研究もある (Amedi, Malach, Hendler, Peled & Zohary, 2004)。この結果は、先の点字触読による視覚野の活性化の場合と同様、この場合の視覚野の活性化が、実際の機能をもっていることを示すものである。また、この研究では、その際の誤答について、音韻の間違いではなく意味的な間違いが多かったことから、この場合の視覚野の言語処理は音韻の処理ではなく意味的な処理ではないかとしている。

(4) 言語以外の音に関する処理について

言語ではない音についての処理に関しても、盲者の視覚野が活性化することを示した研究がある。

これについては、両耳から聞こえる音のうち片方の耳から聞こえる音に注意を向けた場合のERPの測定により、盲者の視覚野が活性化していることを示した研究 (Alho, Kujala, Paavilainen, Summala & Näätänen, 1993) や、一連の音のうち高さが変化した音の数を数える課題についてのMEGにより、その視覚野が活性化していることを示した研究 (Kujala, Huottilainen, Sinkkonen, Ahonen & Alho, 1995) がある。また、音源の方向を判断する課題についてのPETを用いた測定で、やはり、その視覚野が活性化していることを示した研究もある (Weeks, Horwitz, Aziz-Sultan, Tian & Wessinger, 2000)。なお、この研究で活性がみられた視覚野は、右側の外線条皮質である。また、同研究では盲者でも晴眼者の被験者でも右側後部頭頂葉 (posterior parietal cortex) での活性化もみられ、かつ、盲者ではこの領域の活動が右側の外線条皮質の活動と相関していたことから、その視覚野の活性は右側後部頭頂葉との結合に基づくのではないかと報告している。

(5) 記憶機能について

従来、視覚障害児において、WISC-R での数唱課題 (数列を聞いて、その順及び逆順に復唱する。順唱で3～9個、逆唱で2～8個の数の数列を用いる。) の成績が晴眼児と比較してよいことを示す研究があり (Smits & Mommers, 1976; Tillman,

1967)、視覚障害児の言語記憶能力は晴眼児に比較して高いのではないかとする考えがあったが、近年の測定でも同様の結果が出ている (Hull & Mason, 1995)。また、この研究では、被験者の視覚障害児のうち、先天盲の子どもで視力が最大でも光覚の群と、後天盲の子どもで視力が誕生時あるいは実験時点で光覚よりもよい群では、前者のみが晴眼児と比較して数唱課題の成績がよかったという結果を示している。また、大人の盲者についても同様に、音声言語の文章の記憶課題について、晴眼者に比較してその成績がよかったという研究がある (Röder, Rösler & Neville, 2001)。

こうした知見について、fMRIを用いて、盲者の言語記憶課題 (音声での抽象語のリストを記憶して再生する) 時に、その視覚野が活性化すること、および、1次視覚野の活性化の高さが記憶課題の成績と相関することを示した研究がみられる (Amedi, Raz, Pianka, Malach & Zohary 2003)。この相関は、前述の抽象語の長期記憶課題 (6ヶ月後にそのリストを再生) とWechsler 記憶テスト (memory scale) の中の音声言語課題 (直後の記憶再生であり短期記憶課題) の両方の課題でみられたものである。なお、この研究の被験者は1人のみ強い光を感じる程度の視力で、残りの者は光覚もない先天性の盲者であった。筆者らも取り上げているように、この結果は先のHull & Mason (1995) での結果と一致している。

(6) 物の空間的把握と同定およびイメージ

晴眼者の大脳での視覚情報処理は、1次視覚野以降、物の空間 (位置や位置関係) に関わる処理と物の同定に関わる処理とが、それぞれ背側経路 (後頭葉から頭頂葉)、腹側経路 (後頭葉から側頭葉) に分かれて処理されることが示されている (Mishkin, Ungerleider & Macko, 1983; Milner & Goodale, 2006)。また、視覚イメージについての処理が、こうした視覚についての処理と同じ部位で行われるという知見もある (Kosslyn, Alpert, Thompson, Maljkovic, Weise et al., 1993; Mellet, Tzourio, Crivello, Joliot, Denis et al., 1996; O'Craven & Kanwisher, 2000)。このような視覚につ

いての知見に対して、晴眼者の触覚による物の位置と物の同定の判断についても、視覚と同様な処理経路の分離が認められるとしている研究がある (Reed, Klatzky & Halgren, 2005)。また、晴眼者での触覚での空間的処理 (格子方向弁別課題) において、背側経路の頭頂-後頭皮質が活性化すると報告がある (Sathian, Zangaladze, Hoffman & Grafton, 1997; Zangaladze, Epstein, Grafton & Sathian, 1997)。晴眼者における物の同定については、視覚的な対象と触覚的な対象のどちらに対しても活性化する腹側経路の部位 (外側後頭-側頭皮質) があるとの報告もある (Amedi, Malach, Hendler, Peled, & Zohary, 2001; Amedi, Jacobson, Hendler, Malach & Zohary, 2002)。

盲者についても、背側経路に関しては、2次元の格子状に配置された触図のパターンを触って覚え、次いで特定の軸に対して対称か否かをイメージする課題で、PETにより、晴眼者においてと同様に頭頂-後頭皮質の部位 (Brodmann 7野, 19野) が活性化したとの研究がある (Vanlierde, De Volder, Wanet-Defalque, Veraart, Vanlierde, 2003)。また、音についての空間的処理について、前述のように、Weeks et al. (2000) では、盲者においての音源の方向判断について、PETにより、盲者でも晴眼者の被験者でも右側後部頭頂葉 (posterior parietal cortex) での活性化がみられたことを報告している。

腹側経路に関しては、触覚による物の同定において、fMRIにより、盲者においても晴眼者においても、腹側の外線条皮質 (特に下側頭溝の後部) が活性化したとの報告がある (Pietrini, Furey, Ricciardi, Gobbini, Wu et al., 2004) (図4参照)。この実験で用いられた刺激素材は、人のライフマスク、ペットボトル、靴の3種であるが、触覚による物の同定課題では被験者は手袋をしており、その素材等の情報はとりにくくしてある。また、この研究では、盲者では晴眼者に対して、より腹側の部位にも活性化が見られている。この研究での被験者の盲者は視覚的なイメージをもったことのない先天性の盲者である。この研究では、晴眼者での視覚による物の同定での同様の測定結果を含めて、その活性化

Sighted Subjects

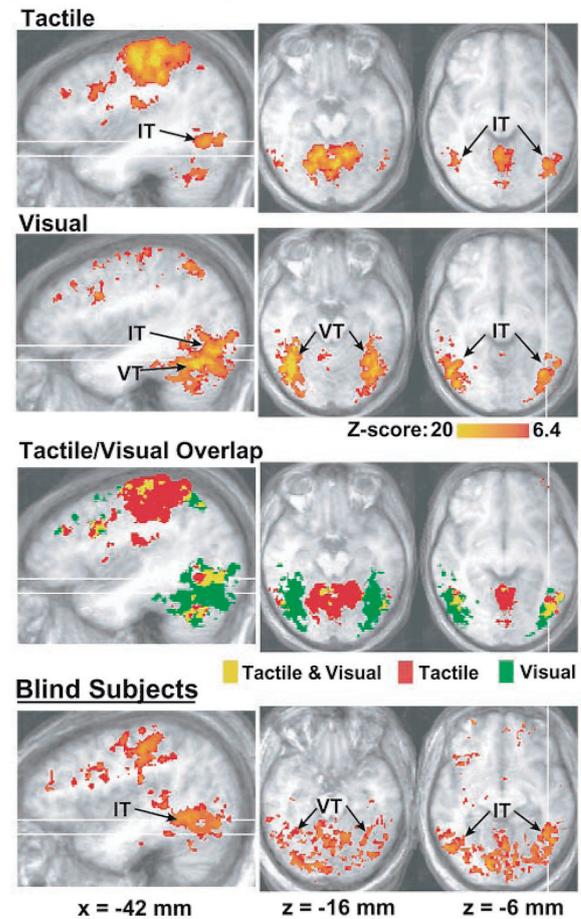


図4 物の知覚同定課題での脳の活性化部位

晴眼者において物を視覚的及び触覚的に知覚した場合と盲者において触覚的に知覚した場合に活性化した脳の部位を表している。上から、晴眼者が触覚的に知覚した場合の部位、視覚的に知覚した場合の部位、この両者の活性化部位を重ねたもの、盲者が触覚的に知覚した場合の部位を、それぞれ示している。触覚的及び視覚的に物を知覚した場合に活性化した下側頭 (inferior temporal : IT) 部と腹側側頭 (ventral temporal : VT)部も示されている。晴眼者で触覚的に知覚した場合と視覚的に知覚した場合の活性化部位を重ねて示した図では、触覚的にのみ活性化した部位 (赤色の部分)、視覚的にのみ活性化した部位 (緑色の部分) とともに、両者で活性化した部位 (黄色の部分) が示されている。

Pietrini, P., Furey M. L., Ricciardi, E. et al. (2004). Beyond sensory images: Object-based representation in the human ventral pathway. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, 101(15), 5658-5663. のFig. 1. を著者の許可を得て転載。

© 2004 by The National Academy of Science of the USA.

部位が表象しているのは必ずしも視覚的なイメージではなく、また視覚と触覚のモダリティーにかかわらない、より抽象的な特性ではないかと主張されている。

また、物を触っての同定ではなく、よく知っている物の音によって、その物の形のイメージを喚起する課題においても、PETにより、遅くとも6歳以下で視覚障害になった盲者においても、同じ条件での晴眼者においてと同様、後頭-側頭皮質と視覚連合野（外線条皮質）（Brodmann 19-37野）、特に左紡錘状回において活性化が見られたという報告がある（De Volder, Toyama, Kimura, Kiyosawa, Nakano et al., 2001）。

(7) 晴眼者の目隠し実験について

Pascual-Leoneらのグループは、晴眼者に目隠しをして5日間過ごさせ、音知覚課題（音のマッチング課題）、触弁別課題（点字のマッチング課題）について、fMRIにより、脳の活性化の状態を調べている（Pascual-Leone & Hamilton, 2001; Pascual-Leone, Theoret, Merabet, Kauffmann & Schlaug, 2006）。なお、この研究は、スペインの点字指導員志望者が、その訓練の一環として1週間目隠しをして過ごすことが求められており、その結果として音の方向や距離の判断能力、声により人を同定する能力、触覚により物の表面を判別したり物を同定する能力等が向上したということに示唆を得て実施されたものである。

5日間通して目隠しをして過ごした実験群の被験者には、その間、点字触読の訓練を受けさせているが、統制群の晴眼者にも同様の訓練を訓練時のみ目隠しで受けさせている。この訓練に関しては同じ条件だったにもかかわらず、点字マッチング課題の成績は、実験群の被験者の方が有意に向上したという結果になった。

さらに、fMRIによる測定で、音刺激及び指への触刺激に対して、実験群の被験者の1次視覚野及びその周辺部が活性化していることがみられたと報告している。さらに、5日間の後、目隠しを外して12~24時間で、このような脳の活性化がみられなくなったという。

また、目隠しをして5日目に、TMSにより、その被験者の視覚野の活動を阻害すると、点字のマッチング課題の成績が低下したと報告している。

こうした短期間での視覚野の活性化、及び目隠しをはずして間もなくその活性化がみられなくなったことについて、筆者らは、体性感覚野及び聴覚野と視覚野の神経連絡経路はすでに存在しているものだが、通常、視覚を用いている状況では抑制されており、目隠しによって視覚系の入力がなくなり、抑制がとれたことにより、触覚および聴覚を用いる状況での活性化がみられるようになったものとしている。

さらに、45~60分の目隠しでも、晴眼者の視覚野の活性が高まることを示す研究（Borojerd, Bushara, Corwell, Immisch, Battaglia et al., 2000）があり、また、Facchini & Aglitoti（2003）は、晴眼者での90分間の目隠しにより、その触覚による指先の空間解像度が向上したと報告している。ここで用いられているのは格子方向弁別による測定方法であり、測定結果をみると閾値にして0.2mm程度の低下である。この結果は、前記の、晴眼者と比較して盲者の触覚による空間解像度が高いことを示した研究の場合と同程度の向上である。

以上のような結果は、ヒトの視覚野が従来考えられていたよりも可塑性が高く、短期間で、状況の変化に対応して変化し得ることを示しているといえる。ただし、Pascual-Leoneらの結果は、18歳~35歳の被験者についての結果であり、その活性化の程度の問題あるいはその期間のみの一時的な活性化なのかもしれないが、これは前述の思春期を過ぎて視覚障害になった盲者では1次視覚野が活性化しないという研究の結果とは矛盾するように思われる。

Ⅲ. おわりに

以上のように、近年、盲者の体性感覚野、視覚野に関わる脳画像技術を用いた研究が数多く報告されている。

その中には、先天盲の子どもでは点字習得がそれほど困難ではないが成人期に視覚障害になった中途失明者では点字習得が困難であることと1次視覚野

の活性化との関連、子ども及び大人の盲者の言語記憶能力の高さと視覚野の活性化との関連等を示唆する研究があり、それらは従来心理学的あるいは教育上経験的に知られていたことを裏づけるような脳科学的知見を提供していると思われる。

これとは逆に、Goldrich & Kanics, (2003) や Facchini & Aglitoti (2003) による盲者や目隠しをした晴眼者の指先の空間解像度に関する研究は、その序文をみると分かるように実は盲者の視覚野が活性化するという脳科学的知見に刺激されて行われたものようであり、脳科学的知見が盲者に関わる心理学的研究を促すということもあるようである。

また、ここで取り上げた諸研究が共通して示しているのは、ヒトの脳が従来考えられていたよりも可塑性に富むものであるということであり、盲者の場合は、視覚障害という状況に対応して、その脳が可塑的に大きく変化し得るということである。この可塑性は、教育という観点からは、その可能性の大きさを示すものとも思える。ただし、以上の研究からは、指先の空間解像度と点字触読経験の有無との相関がない、あるいは晴眼の被験者で90分の目隠しをただけで空間解像度が高くなるなど、教育の関与なしに起こりえる変化もあるように思われる。脳機能測定と教育という観点からは、その測定で示される程度に、教育あるいは経験という要因が、どの程度、あるいはどのように脳機能上の変化に関与し得るのかが問題ではないかと思われる。

引用文献

Alho, K., Kujala, T., Paavilainen, P. et al. (1993). Auditory processing in visual brain areas of the early blind: evidence from event-related potentials. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 86 (6), 418-427.

Amedi, A., Malach, R., Hendler, T. et al. (2001). Visuo-haptic object-related activation in the ventral visual pathway. *Nature Neuroscience*, 4 (3), 3.

Amedi, A., Jacobson, G., Hendler, T. et al. (2002). Convergence of visual and tactile shape processing in the human lateral occipital complex. *Cerebral Cortex*, 12 (11), 1202-1212.

Amedi, A., Floel, A., Knecht, S. et al. (2004).

Transcranial magnetic stimulation of the occipital pole interferes with verbal processing in blind subjects. *Nature Neuroscience*, 7 (11), 1266-70.

Amedi, A., Raz, N., Pianka, P. et al. (2003). Early 'visual' cortex activation correlates with superior verbal memory performance in the blind. *Nature Neuroscience*, 6 (7), 758-766.

渥美義賢, 玉木宗久, 篁倫子, 他 (2006). 特集3: 障害児教育と関連した脳科学的研究の方法論: ヒトの脳の形態と機能の計測及び心理学的検査. 独立行政法人国立特別支援教育総合研究所研究紀要, 33, 27-37.

渥美義賢, 渡辺哲也, 小田侯朗, 他 (2006). 特集2: 障害児教育と関連した脳科学的知見について: 脳の可塑性と障害の機能補填. 独立行政法人国立特別支援教育総合研究所研究紀要, 33, 15-25.

Boroojerdi, B., Bushara, K. O., Corwell, B. et al. (2000). Enhanced excitability of the human visual cortex induced by short-term light deprivation. *Cerebral Cortex*, 10 (5), 529-534.

Büchel, C., Price, C., Frackowiak, R. S. et al. (1998). Different activation patterns in the visual cortex of late and congenitally blind subjects. *Brain*, 121 (Pt 3), 409-419.

Burton, H. Snyder A. Z., Conturo T. E. et al. (2002). Adaptive Changes in Early and Late Blind: A fMRI Study of Braille Reading. *Journal of Neurophysiology*, 87 (1), 589-607.

Burton, H. Snyder A. Z., Diamond J. B. et al. (2002). Adaptive Changes in Early and Late Blind: A fMRI Study of Verb Generation to Heard Nouns. *Journal of Neurophysiology*, 88 (6), 3359-3371.

Burton H., Diamond J. B., McDermott K. B. (2003). Dissociating Cortical Regions Activated by Semantic and Phonological Tasks: A fMRI Study in Blind and Sighted People. *Journal of Neurophysiology*, 90 (3), 1965-1982.

Cohen, L. G., Celnik, P., Pascual-Leone, A. et al. (1997). Functional relevance of cross-modal plasticity in blind humans. *Nature*, 389 (6647), 180-183.

Cohen, L. G., Weeks, R. A., Sadato, N. et al. (1999). Period of susceptibility for cross-modal plasticity in the blind. *Annals of Neurology*, 45 (4), 451-460.

De Volder, A. G., Toyama, H., Kimura, Y. et al. (2001). Auditory triggered mental imagery of shape involves

- visual association areas in early blind humans. *NeuroImage*, *14*, 129-139.
- Elbert, T., Pantev, C., Wienbruch, C. et al. (1995). Increased cortical representation of the fingers of the left hand in string players. *Science*, *270* (5234), 305-307.
- Facchini, S. & Aglitoti, S. M. (2003). Short term light deprivation increases tactile spatial acuity in humans. *Neurology*, *60* (12), 1998-1999.
- Gazzaniga, M. S., Ivy, R. B., Mangun, G. R. et al (2006). *Cognitive Neuroscience: The Biology of the Mind Third Edition*. New York · London: Norton.
- Goldreich D. & Kanics I. M. (2003). Tactile acuity is enhanced in blindness. *Journal of Neuroscience*, *23* (8), 3439-3445.
- Goldreich D. & Kanics I. M. (2006). Performance of blind and sighted humans on a tactile grating detection task. *Perception & Psychophysics*, *68* (8), 1363-1371.
- Hamilton R., Keenan J. P., Catala M. et al. (2000). Alexia for Braille following bilateral occipital stroke in an early blind woman. *Neuroreport*, *11* (2), 237-240.
- Hollins M. (1989). *Understanding blindness: An integrative approach*. NJ: Erlbaum.
- Jenkins W. M., Merzenich M. M., Ochs M. T. et al. (1990). Functional reorganization of primary somatosensory cortex in adult owl monkeys after behaviorally controlled tactile stimulation. *Journal of Neurophysiology*, *63* (1), 82-104.
- Kiriakopoulos, E. T., Baker, J., Hamilton, R. et al. (1999). Relationship between tactile spatial acuity and brain activation on brain functional magnetic resonance imaging. *Neurology*, *52* (Suppl 2), A307-308.
- Kosslyn, S. M., Alpert, N. M., Thompson, W. L. et al. (1993). Visual mental imagery activates topographically organized visual cortex: PET investigation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *5* (3), 263-287.
- Kujala, T., Huotilainen, M., Sinkkonen, J. et al. (1995). *Neuroscience Letters*, *183* (1-2), 143-146.
- 栗木 一郎 (2008). 8 非侵襲脳機能計測. 内川 恵二・岡嶋 克典 (編), 講座 感覚・知覚の科学 5 (pp.186-214). 朝倉書店.
- Legge, G. E., Madison, C., Vaughn, B. N. et al. (2008). Retention of high tactile acuity throughout life span in blindness. *Perception & Psychophysics*, *70* (8), 1471-1488.
- Mellet, E., Tzourio, N., Crivello, F. et al. (1996). Functional anatomy of spatial mental imagery generated from verbal instructions. *Journal of Neuroscience*, *16* (20), 6504-6512.
- Merzenich M. M., Nelson R. J., Stryker M. P. et al. (1984). Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys. *Journal of comparative neurology*, *224* (4), 591-605.
- Milner, A. D. & Goodale, M. A. (2006). *The visual brain in action second edition*. New York: Oxford University Press.
- Mishkin, M., Ungerleider, L. G., Macko, K. A. (1983). Object vision and spatial vision: two cortical pathways. *Trends in Neurosciences*, *6*, 414-417.
- O'Craven, K. M. & Kanwisher N. (2000). Mental imagery of faces and places activates corresponding stimulus-specific brain regions. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *12* (6), 1013-1023.
- Pascual-Leone, A. & Torres, F. (1993). Plasticity of the sensorimotor cortex representation of the reading finger in Braille readers. *Brain*, *116* (Pt 1), 39-52.
- Pascual-Leone, A. & Hamilton, R. (2001). The metamodal organization of the brain. *Progress in Brain Research*, *134*, 427-445.
- Pascual-Leone, A., Theoret, H., Merabet, L. et al. (2006). The role of visual cortex in tactile processing: A metamodal brain. In Heller, M. A. & Ballesteros, S. (Eds.), *Touch and Blindness: Psychology and Neuroscience* (pp.171-195). London: Erlbaum.
- Pietrini, P., Furey M. L., Ricciardi, E. et al. (2004). Beyond sensory images: Object-based representation in the human ventral pathway. *Proceedings of the National Academy of Science, USA*, *101* (15), 5658-5663.
- Reed, L., Klatzky, R. L., Halgren, E. (2005). What vs. where in touch: an fMRI study. *NeuroImage*, *25* (3), 718-726.
- Röder, B., Rösler, F., Neville, H. J. (2001). Auditory memory in congenitally blind adults: a behavioral-electrophysiological investigation. *Brain Research*.

- Cognitive Brain Research*, 11 (2), 289-303.
- Sadato, N., Pascual-Leone, A., Grafman, J. et al. (1996). Activation of the primary visual cortex by Braille reading in blind subjects. *Nature*, 380 (6574), 526-528.
- Sadato, N., Pascual-Leone, A., Grafman, J. et al. (1998). Neural networks for Braille reading by the blind. *Brain*, 121 (Pt 7), 1213-1229.
- Sadato, N., Okada, T., Honda, M. et al. (2002). Critical period for cross-modal plasticity in blind humans: A functional MRI study. *Neuroimage*, 16 (2), 389-400.
- Sadato, N., Okada, T., Kubota, K. et al. (2004). Tactile discrimination activates the visual cortex of the recently blind naive to Braille: A functional magnetic resonance imaging study in humans. *Neuroscience Letters*, 359 (1-2), 49-52.
- Sathian, K., Zangaladze, A., Hoffman, et al. (1997). Feeling with the mind's eye. *Neuroreport*, 8 (18), 3877-3881.
- Sathian K. (2005). Visual cortical activity during tactile perception in the sighted and the visually deprived. *Developmental psychobiology*, 46 (3), 279-86.
- Sterr A, Müller M. M., Elbert T. et al. (1998). Perceptual Correlates of Changes in Cortical Representation of Fingers in Blind Multifinger Braille Readers. *Journal of Neuroscience*, 18 (11), 4417-4423
- Smits, B. W. & Mommers, M. J. (1976). Differences between blind and sighted children on WISC verbal subtests. *New Outlook for the Blind*, 70, 240-246.
- Stevens, J. C., Foulke, E., Patterson, M. Q. (1996). Tactile acuity, aging, and Braille reading in long-term blindness. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 2 (2), 91-106.
- Tillman, M. H. (1967). The performance of blind and sighted children on the Wechsler Intelligence Scale for Children: Study 2. *International Journal for Education of the Blind*, 16, 106-112.
- Van Boven R. W., Hamilton R. H., Kauffman T. et al. (2000). Tactile spatial resolution in blind Braille readers. *Neurology*, 54 (12), 2230-2236.
- Vanlierde, A., De Volder, A. G., Wanet-Defalque, M. C. et al (2003). Occipito-parietal cortex activation during visuo-spatial imagery in early blind humans. *Neuroimage*, 19 (3), 698-709.
- Vega-Bermudez, F. & Johnson, K. O. (2002). Spatial acuity after digit amputation. *Brain*, 125 (Pt 6), 1256-1264.
- Weeks, R., Horwitz, B., Aziz-Sultan, et al. (2000). A positron emission tomographic study of auditory localization in the congenitally blind. *Journal of Neuroscience*, 20 (7), 2664-72.
- Wittenberg G. F., Werhahn K. J., Wassermann E. M., et al. (2004). Functional connectivity between somatosensory and visual cortex in early blind humans. *European journal of neuroscience*, 20 (7), 1923-1927.
- Zangaladze, A., Epstein, C. M., Grafton, S. T. et al. (1999). Involvement of visual cortex in tactile discrimination of orientation. *Nature*, 401 (6753), 587-590.

(受稿年月日：2009年8月20日，受理年月日：2009年9月28日)

Brain science and visual impairment: Review of studies on somatosensory and visual cortex activity in the visually disabled persons by use of brain imaging technology

KANEKO Takeshi

(Department of Policy & Planning)

Recently, research is progressing on human brain activities by use of brain imaging technologies such as PET (positron emission tomography), fMRI (functional magnetic resonance imaging), MEG (magnetoencephalography) in addition to ERP (event related potentials). Besides, TMS (transcranial magnetic stimulation) makes it possible to research brain functions, causing brain areas to activate or deactivate. Especially, researches on somatosensory and visual cortices activities in the visually disabled persons are very important since these activities indicate plasticity of brain. It has been known that in the visually disabled persons, activities of the somatosensory

cortices change according to Braille reading experiences and the visual cortices, without input signals from vision, activate according to tactile and auditory signals. This study reviews such recent research. As to brain activities in the visually disabled persons, these subjects are taken as follows: Braille reading, spatial acuity in fingers, lexical function, sound processing, memory function, and object recognition. Blindfolding experiments in person without visual impairment are also taken as a subject.

Key Words: visual impairment, visually disabled persons, brain science, brain imaging, review