

盲者の脳の可塑性と機能補償に関する最近の研究

筑波技術大学 障害者高等教育研究支援センター

石田久之

要旨：盲者の脳の可塑性が論じられている。先天・早期失明の盲者では、通常、視覚刺激に反応する視覚皮質が、触覚刺激や聴覚刺激によって、活性化されるのである。これは、機能的磁気共鳴画像法や経頭蓋磁気刺激などの研究・解析技術の進歩によるものである。本論文は、盲者における最近の脳科学の研究をまとめ、それらを踏まえた上で、盲者の機能補償を論じた。

キーワード：盲者, 脳の可塑性, 機能補償

1. はじめに

青年期に失明した盲者が本学に入学した後、点字の読み書きの訓練を希望することがある。勿論、主要な情報収集手段として、より速く触読がしたいという理由からである。一方、網膜色素変性症などの進行性の疾患の場合、視力の低下が進み、失明する場合もあるという理由から、現在は学習や日常生活に有効な視力を有していても、将来のそのような事態に備え、点字の読み書きの訓練を始めたいという学生もいる。

訓練により、速く読み書きができるようになる学生もいれば、そうでない学生もいるが、中途失明者で訓練効果の上がない理由として、点字を読み書きの主要な手段として考えられていないことや残存視力への依存による学習意欲の少なさを、著者は経験的に感じている。

しかし、近年、脳の可塑性 (Plasticity) という面から、改めて、障害者の“特別な感覚”の有無や“高い感受性・弁別力”を研究しようという動きがみられるようになってきた (Sadowski, B. 2008[1]; Boakye, M., 2009[2]; 金子, 2010[3])。

これは、脳波や脳誘発電位という従来の研究方法に加え、ポジトロン断層法 (PET: Positron Emission Tomography) や機能的磁気共鳴画像法 (fMRI: functional Magnetic Resonance Imaging) などの脳の画像技術や解析技術の進歩を受けてのものである。

Boakye, M. (2009) [2] は、脳活動を測定する最も良い非侵襲的方法として、fMRIと経頭蓋磁気刺激 (TMS: Transcranial Magnetic Stimulation) を挙げている。fMRIは、脳の内部の神経活動に伴う血管中の血流量の変化或いは酸素代謝の変化を、脳機能画像解析を用いて研究するものである。また、経頭蓋磁気刺激は、磁場に

より生体内に局所的な電流を引き起こし、これを刺激とする方法で、反応は誘発電位の記録により、得ることができる。これらの脳活動研究技術により、局所的-広範囲の活動の総和という形ではなく、かつ、イメージ化された-誰でもが視覚的に確認できる-結果を得られるようになってきたのである。

確かに、青年期以降の点字触読能力の習得は難しいが、その難しさは気持ちや意欲の違いに帰されるものなのか、或いは、生体の機能の一つとして議論されるべきものなのかは、指導法をも変える大きな問題であり、脳科学の分野の様々な知見は、触読訓練という領域においても、多くの示唆を与えてくれるものと思われる。

本論文は、盲者における視覚に代わる他感覚-触覚、聴覚、或いは、嗅覚-による脳機能の変化や脳内の神経ネットワークの再構築についての研究を、指先の触弁別解像度や嗅覚に関する研究成果などで補足しながら、まとめることが目的である。なお、2008年までの盲者の脳画像の研究については金子 (2010) [3] に詳しく、聴覚処理については Hötting, K. & Röder, B. (2009) [4] に、触知覚については Sathian, K. & Stilla, R. (2010) [5] に示されているので、本論文では2009年以降の最新の研究を中心に、その到達点を明らかにする。

2. 盲者の脳の機能と構造の変化

2.1 先天盲・早期失明盲における研究

Wan, C.Y. et al. (2010) [6] は、出生後の早い時期における完全な視覚遮断により、触知覚の正確度が高まるとしている。彼らは、33名の盲成人を失明時期から、先天盲、早期失明盲、後天盲の3群に分けて、触振動弁別課題の正確さを検討し、先天及び早期失明盲群は晴眼群

より成績が良いが、14歳以後に失明した後天群は、晴眼群との違いがないことを報告した。

Collignon, O. et al. (2009) [7] は、晴眼群 (12名)、早期失明盲群 (10名)、後天盲群 (11名) に、音刺激、触刺激 (皮膚への電気刺激)、音-触同時刺激を提示し、反応時間を測定したところ、早期失明盲群が、他2群より速いと報告している。

また、Jiang, J. et al. (2009) [8] や Park, H.J. et al. (2009) [9] も、解剖学的に早期失明盲群と、後天盲群及び晴眼群との違いを示している (後述)。

Gougoux, F. et al. (2004) [10] は、純音の周波数変化の判断課題において、先天盲群は、後天盲群、晴眼群に比し、高い正確度であることを示し、脳の可塑性は、発達の早い段階で効果的という考えを支持している。

これらの知見は、脳の可塑性と失明時期や視経験との関係を窺わせている。つまり発達の早い時期において、視覚情報の脳への流入がなくなることにより、脳内に新しい体制が構築されることを示唆するものである。上に挙げた研究では、後天盲も被験者となっているが、結果的に、視経験のない先天・早期失明盲群と、視経験のある後天盲群・晴眼群との対比という構図がよくみられる。

2.2 脳の構造的変化

次に、視覚情報を失うことにより、脳がどのような構造的変化を示すかについて述べる。

Jiang, J. et al. (2009) [8] は、17名の早期失明盲者、19名の後天盲者、29名の晴眼者について、脳の磁気共鳴画像法で解析し、両側視覚皮質の厚さが、早期失明盲群で他2群よりも厚いことを示した。また、後天盲群と晴眼群では違いはないことから、脳の発達の臨界期における視経験の不足が、視覚皮質のシナプス刈り込み (シナプスが過剰に形成された後に生じる余分なシナプスの除去) を減じたとしている。

Park, H.J. et al. (2009) [9] も同様の結果を得ているが、同時に、先天盲群の視覚皮質 (一次視覚野と視覚連合野) 領域が狭くなっていることも報告している。他方、後天盲群と晴眼群との領域の広さの違いは左鳥距溝周辺領域のみで、この研究でも、両群間の違いは大きくない。

Shu, N. et al. (2009) [11] は、先天盲群における視覚皮質でのネットワーク接続の疎らさ (晴眼群に比べ13.4%の減少) やネットワーク長の延伸を示しており、これらは、信号の伝搬や対応力、或いは、協調性に、非効率的に作用すると述べている。

さて、脳の構造的変化は皮質だけではない。Lepore, N. et al. (2009) [12] は22名の盲者において、海馬の大きさを検討し、健常者に比べ、右半球の海馬前部は統計

的に有意に大きく、海馬後部は小さいことを報告した。海馬は、記憶や方向定位に関係するといわれている (太田, 2006[13]; 菊地・内藤, 2010[14]) が、Lepore, N. et al. は、海馬前部の肥大という結果を、大量の空間情報を記憶するために生じたとし、また、海馬後部の結果については、この部位が視空間記憶 (visuo-spatial memory) と関係しており、盲者の場合、“他者中心の空間地図 (allocentric spatial map)” がないため小さくなったと述べている。

Deutschlander, A. et al. (2009) [15] は、移動をイメージする課題で、先天盲は、前庭、体性感覚、一次運動領域が賦活され、晴眼者は、海馬傍回や紡錘状回の活動が高まるとしている。これは、移動の際、視覚入力への補償として、盲者は晴眼者以上に、前庭情報や体性感覚情報に、依存していることを表しており、他方、海馬傍回や紡錘状回は、視覚を用いる環境下での視空間定位に関与しているためとしている。

Jahn, K. et al. (2009) [16] は、26名の晴眼者、9名の盲者、8名の慢性前庭求心路遮断患者で、fMRIを用い、姿勢と歩行時の海馬の活動を検討し、i) 右利き者の空間定位における右半球優位、ii) 姿勢は海馬の活動と、移動は海馬傍回の活動と結びついていること、iii) 視覚を用いた移動や目印の認識は海馬後部と、前庭及び体性感覚情報は海馬前部や嗅内野と関係することを報告した。

Elbert, T. et al. (2002) [17] は、先天・後天盲において、晴眼者に比較し、聴覚誘発電位のN1m成分の潜時は有意に短く、また、聴覚皮質領域は、晴眼者の84%大きいと考えられることを示した。

以上のように、盲者における皮質の厚さや皮質以外の部位の大きさの変化が報告されており、それぞれが、視覚情報の無さや他の機能の補償的活動との関係で考察されている。

2.3 視覚皮質の機能的変化

視覚皮質は、通常、視覚情報の処理に関わっているが、盲者の視覚皮質については、異なった報告が得られている。

Ptito, M. et al. (2008) [18] は、早期失明盲者及び後天盲者において、後頭皮質のTMSの位置に対応して、強さや広がり異なる指先の刺痛を報告している。また、これらの触覚を引き起こす皮質上の位置の数は、触読時間や触読速度、器用さにより異なると述べている。

Fujii, T. et al. (2009) [19] は、点字弁別課題時、早期失明盲者の背側皮質視覚路 (視覚皮質-上後頭回-前頭頂内回) は、後天盲者よりも強い繋がりを示し、早期失明者の視覚皮質における視覚情報処理から触覚情報処理への機能的変化を表わしているとしている。

Cheung, et al. (2009) [20] は、6歳時に角膜混濁で重度視覚障害者（視力 0.02）となった点字触読者において、視覚刺激（数字、文字、簡単な形）により視覚皮質周辺部が、また、点字触読時は中心部が賦活されることを示した。視覚皮質におけるニューロンの効果的な再分布を示唆しているとしている。

Hüfner, K. et al. (2009) [21] は、先天盲者への“開眼”の指示で、後頭葉が活動することを報告し、触読等の注意の集中時に必要な活動だとしている。Stilla, R. et al. (2008) [22] も、早期失明盲群、後天盲群共に、触覚的空間弁別課題時に、視覚皮質領域が賦活されたと報告している。

Fiehler, K. et al. (2009) [23] は、12名の先天盲者において、触覚的選択課題により、外線条皮質と聴覚皮質が賦活されたと報告した。また、中心後回や頭頂間溝も活性化していることから、一連の回路が、対象の位置や動きの把握に関係しているとされ、更に、“where system”とも呼ばれる背側皮質視覚路は、視覚情報がなくても発達するとしている。Ptito, M. et al. (2009) [24] も、触運動刺激により、盲者の一次視覚野、頭頂間溝が賦活されることを報告し、感覚間の可塑性から、盲者の後頭葉は、入力モダリティと無関係に皮質視覚路の機能を維持していると述べている。

Obretenova, S. et al. (2009) [25] は、早期失明先天聾者の言語処理を検討し、点字触読、指文字、皮膚へのアメリカ手話によるコミュニケーションにおいて、後頭葉、腹側後頭側頭皮質、頭頂間溝、下前頭皮質（通常、それぞれ、視覚、聴覚、空間、言語処理に関与している）が、共通して、活性化されると報告した。

Goldreich, D. & Kanics, I. M. (2003) [26] は、19.7～71.0歳の盲者47名で、触覚的格子方向弁別の閾値について、晴眼者より成績が良いこと（同性間で0.33mmの差があり、これは年齢で23歳の違いに相当する）、年齢の増加とともに閾値は上昇すること（年に0.014mmの増加）、男性より女性の閾値が低いこと（0.18mmの差）を示した。また、この結果は、脳の体性感覚領域の可塑性によるものではなく、視覚皮質領域の感覚間の可塑性によるものとしている。更に、Goldreich, D. & Kanics, I. M. (2006) [27] も、盲者は晴眼者より閾値が0.267mm低く、年齢の増加とともに、年に0.011mmの割合で上昇すると報告している。

これらの結果は、全て、視覚刺激ではなく、触覚刺激で、盲者の視覚皮質が賦活されることを示しており、感覚間の可塑性が生じていることを示唆するものである。

同様な知見は聴覚についても報告されている。

Klinge, C. et al. (2010) [28] は、11名の先天盲者に

おいて、無意味語に対する反応課題時、後頭皮質の活動が、晴眼者よりも有意に高いと報告している。

Merabet, L. B. et al. (2009) [29] は、後頭視覚野への反復経頭蓋磁気刺激は、盲者の視覚-聴覚感覚代行（音によるイメージの符号化）機器の操作を阻害するが、視覚イメージ課題には、影響しないことを明らかにした。

人の下前頭皮質、運動前野、下頭頂皮質間のネットワークが、模倣や言語発達に重要な役割を演じるミラーシステムに関係する (Iacoboni, M. et al. (2005) [30]) とされているが、Ricciardi, E. et al. (2009) [31] は、8名の盲者において、前述のネットワークが音刺激によって賦活されることを示し、ミラーシステムに視覚入力はいらないと述べている。

2.4 様々な刺激や課題への盲者の反応

脳画像を用いない研究においても、盲者における反応の大きさや晴眼者との違いが報告されている。

Van Boven, R. W. et al. (2000) [32] は、格子方向弁別課題において、盲群（1.04mm）は晴眼群（1.46mm）より有意に閾値が低いこと、及び、触読指の閾値は、0.80mmで、他の指よりも有意に低いことを示している。

Pascual-Leone, A. & Torres, F. (1993) [33] は5名の触読者で、人差指への体性感覚誘発電位を測定し、触読指（右人差指）への刺激が、非触読指（左人差指）への刺激よりも、大きな反応を示すと報告した。

Collingnon, O. & De Volder, A. G. (2009) [34] は、聴覚及び触覚刺激への反応時間が、盲者で有意に速いことを示し、盲者には、非視覚事象におけるより効果的な注意のシフトがあるという考えを支持している。

Yoshimura, A. et al. (2010) [35] は、ある設定値に向けた肘の角度調整において、拮抗筋へのフィードバックがある条件から無い条件への変化による盲者の誤りの変化は、目隠しされた晴眼者のそれよりも大きく、このことは、盲者が健常者以上に筋感覚（自己受容モダリティ）に、依存していることを表わしているとしている。Gosselin-Kessiby, N. et al. (2009) [36] も、盲者の手の方向定位に視経験は必要なく、誤りの修正は筋の自己受容入力のみで行われるとしている。

Cuevas, I. et al. (2009) [37] は、それぞれ13名の先天盲群と晴眼群に、香水の弁別課題等を課し、前者で2種の香水の異同弁別課題、名称をいう課題、4つに分類する課題で、有意に成績が良いことを示した。Cuevas, I. et al. (2010) [38] は、匂いの感覚で盲者が優れているのは、可値閾や弁別課題等の基本的な感覚レベルであり、これは、実践に依存した知覚増強と注意のストラテジー (practice-related perceptual enhancements and

attention strategies) を反映しており、火災時の煙や腐った食べ物など触覚や聴覚で得られない日常生活での重要な情報を得るためだとしている。

Dayananda, G. et al. (2008) [39] は、それぞれ 15 名の先天盲群と晴眼群において、手首の正中神経刺激による体性感覚誘発電位を頭頂・後頭部に装着した表面電極から導出し、N20 成分の振幅を比較したところ、前者で有意に振幅が大きいことを示した。振幅の大きさは、反応が頭皮上広く分布していることを示し、このことは体性感覚皮質局在が広がっていることを示唆していると述べている。また、Giriappa, D. et al. (2009) [40] は、人差指の電気刺激でも同様の結果を示している。

Röder, B. & Rösler, F. (2003) [41] は、音に名前をつけて記憶する (semantic encoding) 場合と、音を五段階評価して記憶する (physical encoding) 場合の、記憶得点を先天盲者、後天盲者、健常者で調べた。先天盲群は、健常群に比べ有意に得点が高く、semantic encoding が、physical encoding よりも高い記憶力を示し、聴知覚・認知課題における補償的变化を表わしていると述べている。しかし、この知見は、従来より言われている、盲の semantic encoding は有効ではなく、彼らの概念は抽象的、との見解とは異なるものである。

以上に示した嗅覚の弁別、聴覚や触覚刺激への反応時間の晴眼者との違いなどは、盲者の日常生活や緊急時への対応における特別な生体内の体制の存在を示していると考えられる。今まで述べてきた内容は、「盲者と晴眼者とは何か違う気がする」という感覚を、科学の目で捉えた時の実態であり、いわゆる脳の機能補償と考えられているものである。

そこで、次に、本論文の主題である脳の可塑性という視点でこの機能補償を考えることとする。

3. 脳の可塑性と機能補償

上にみてきた脳内の変化は、活性化 (血流量の増加)、ある機能を行う領域の拡大、反応精度の増加、反応時間の短縮とまとめることができる。これらは脳の可塑性の具体的な現れ方といえるが、概念的に脳の可塑性を定義すると、脳の神経回路が、新たな状況に対して再構築されることをいう。Cheung, et al. (2009) [20] が示した、視覚刺激による視覚皮質周辺部の活性化、また、点字触読時の中心部の活性化は、視覚系の情報を処理する視覚皮質が触覚にも対応するように再構築されたと考えるものである。また、Fiehler, K. et al. (2009) [23] は、先天盲者での触覚的選択課題で、中心後回なども活性化されていることから、位置や動きの把握に関与するといわれる背側皮質視覚路は、視覚入力なしでも形成されると考えている。これを脳の

機能補償と関係付けるならば、(i) 視覚モダリティと無関係に背側皮質視覚路が形成され (where system)、(ii) その結果として生じる位置や動きの把握力の良さが、(iii) 機能補償=感受性が良い・敏感、という周囲の人間の感じ方に繋がるものと思われる。

さて、2.1で、脳の可塑性は、発達の早い時期に、特殊な環境に入る必要があることを述べた。つまり、多くの研究は、先天或いは早期失明盲において、脳の可塑性が生じるとしている。しかし、一方で異なる知見もある。

Merabet, L. B. et al. (2008) [42] は、晴眼成人の 5 日間の完全な視覚遮断後に、触刺激に対する視覚皮質活動の増加がみられたと報告し、視覚遮断により、以前より存在していた神経接続が現れ出たものと推測している。これは、発達の早期における視覚遮断が脳の可塑性には必要である、とする多くの見解に反する結果である。

Lissek, S. et al. (2009) [43] は、2 週間手をギブスで固定すると、手の当該脳領域である体性感覚皮質の活動が下がったが、ギブスを取った後 2 週間で、活動の左右差はなくなり、皮質の変化はもとに戻ったとしている。しかし、ギブスをしていた手の触覚の正確度は、はずして 2 週間後も、元に戻っていなかったと報告している。

Schmid, M. et al. (2007) [44] は、平衡機能の検討において、盲者は晴眼者よりも体の揺れが大きく、姿勢の安定という面に関して、感覚間の可塑性は生じていないとしている。

これら三つの研究は、それぞれ大きな意味を持っている。

Merabet, L. B. et al. の知見は、先天・早期失明盲者でなくとも、脳の可塑性を期待できるものである。しかし、Schmid, M. et al. の知見は、生体の全ての機能に、脳の可塑性を考えることは難しいことを示唆している。更に、Lissek, S. et al. は、手を動かさない時間が長時間に及ぶと、触覚の正確度は持続しないことを示しており、持続的な活動が必要であることがわかる。

実際の活動に伴い脳の神経回路も変化するという近年の研究の成果は、単に脳研究の分野だけではなく、治療や教育現場の様々な人々 (Johnston, M. V. 2009[45]) に、大きな期待を提供しつつある。同時に、その範囲や程度も、近い将来明らかになってくるものと思われる。上に示した三つの研究は、その先駆けである。どのような領域に、どのような機能補償を、どの程度想定できるのかを十分に吟味しつつ、適切なステップで上に述べてきた知見を応用すべきことを示している。

4. 終わりに

各種疾患のリハビリテーションにも脳の可塑性という考え方が取り入れられてきている。大学は、勿論、リハビリテーショ

ン機関ではないが、冒頭に示した点字触読訓練を希望する学生への対応を始めとして、大学という一時期を過ごすための手段ではなく、卒業後を含めた社会自立の手段としての各種スキルを提供する場ともなりうるのである。具体的な訓練マニュアルと同時に、本論文で述べてきた脳の可塑性・機能変化を踏まえつつ、最も有効な考え方と方法で、将来を見据えながら、学生への指導を行う必要がある。

参考文献

- [1] Sadowski, B.: Plasticity of the Cortical Motor System. *Journal of Human Kinetics* 20: 5-21, 2008.
- [2] Boakye, M.: Implications of neuroplasticity for neurosurgeons. *Surgical Neurology* 71: 5-10 , 2009.
- [3] 金子 健: 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- . 国立特別支援教育総合研究所研究紀要 37: 71-84, 2010.
- [4] Hötting, K. & Röder, B.: Auditory and auditory-tactile processing in congenitally blind humans. *Hearing Research* 258 (1-2) :165-174, 2009.
- [5] Sathian, K. & Stilla, R.: Cross-modal plasticity of tactile perception in blindness. *Restorative Neurology and Neuroscience* 28:271-281, 2010.
- [6] Wan, C.Y., Wood, A. G., Reutens, D. C. & Willson, S. J.: Congenital blindness leads to enhanced vibrotactile perception. *Neuropsychologia* 48 (2) : 631-634, 2010.
- [7] Collignon, O., Charbonneau, G., Lassonde, M. & Lepore, F.: Early visual deprivation alters multisensory processing in peripersonal space. *Neuropsychologia* 47 (14) : 3236-3243, 2009.
- [8] Jiang, J., Zhu, W., Shi, F., Liu, Y., Li, J., Qin, W., Li, K., Yu, C. & Jiang, T.: Thick visual cortex in the early blind. *Journal of Neuroscience* 29 (7) : 2205-2211, 2009.
- [9] Park, H. J., Lee, J. D. Kim, E. Y., Park, B., Oh, M. K., Lee, S. & Kim, J. J.: Morphological alterations in the congenital blind based on the analysis of cortical thickness and surface area. *Neuroimage* 47 (1) : 98-106, 2009.
- [10] Gougoux, F., Lepore, F., Lassonde, M., Voss, P., Zatorre, R. J. & Belin, P.: Pitch discrimination in the early blind. *Nature* 430:309, 2004.
- [11] Shu, N., Liu, Y., Li, J., Li, Y., Yu, C. & Jiang, T.: Altered anatomical network in early blindness revealed by diffusion tensor tractography. *PLoS ONE* 4 (9) :e7228, 2009.
- [12] Lepore, N., Shi, Y., Lepore, F., Fortin, M., Voss, P., Chou, Y. Y., Lord, C., Lassonde, M., Dinov, I. D., Toga, A. W. & Thompson, P. M.: Pattern of hippocampal shape and volume differences in blind subjects. *Neuroimage* 46 (4) :949-957, 2009.
- [13] 太田紘史: 経験科学における多重実現と多様性探求 . 哲学論叢 33:77-90, 2006.
- [14] 菊地正弘・内藤泰: 6. fMRI (functional MRI: 磁気共鳴機能画像法) 前庭情報と空間識の皮質処理機構—fMRIによる知見—. *Equilibrium Research* 69 (2) :66-75, 2010.
- [15] Deutschlander, A., Stephan, T., Hufner, K., Wagner, J., Wiesmann, M., Strupp, M., Brandt, T. & Jahn, K.: Imaged locomotion in the blind: an fMRI study. *Neuroimage* 45 (1) :122-128, 2009.
- [16] Jahn, K., Wagner, J., Deutschlander, A., Kalla, R., Hufner, K., Stephan, T., Strupp, M. & Brandt, T.: Human hippocampal activation during stance and locomotion: fMRI study on healthy, blind, and vestibular-loss subjects. *Annals of the New York Academy of Sciences* 1164:229-235, 2009.
- [17] Elbert, T., Sterr, A., Rockstroh, B., Pantev, C., Müller, M. M. & Taub E.:Expansion of the tonotopic area in the auditory cortex of the blind. *Journal of Neuroscience* 22 (22) :9941-9944, 2002.
- [18] Ptito, M., Fumal, A., Martens de Noordhout, A., Schoenen, J., Gjedde, A. & Kupers, R.: TMS of the occipital cortex induces tactile sensations in the fingers of blind Braille readers. *Experimental Brain Reserch* 184:193-200, 2008.
- [19] Fujii, T., Tanabe, H. C., Kochiyama, T. & Sadato, N.: An investigation of cross-modal plasticity of effective connectivity in the blind by dynamic causal modeling of functional MRI data. *Neuroscience Research* 65 (2) :175-186, 2009.
- [20] Cheung, S., Fang, F., He, S. & Legge, G. E.: Retinotopically specific reorganization of visual cortex for tactile pattern recognition. *Current Biology* 19 (7) :596-601, 2009.

- [21] Hübner, K., Stephan, T., Flanagin, V. L., Deutschlander, A., Stein, A., Kalla, R., Dera, T., Fesl, G., Jahn, K., Strupp, M. & Brandt, T.: Differential effects of eyes open or closed in darkness on brain activation patterns in blind subjects. *Neuroscience Letters* 466 (1) :30-34, 2009.
- [22] Stilla, R., Hanna, R., Hu, X., Mariola, E. & Deshpande, G.: Neural processing underlying tactile microspatial discrimination in the blind: A functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Vision* 8 (10) :1-19, 2008.
- [23] Fiehler, K., Burke, M., Bien, S., Röder, B. & Rösler, F.: The human dorsal action control system develops in the absence of vision. *Cerebral Cortex* 19 (1) :1-12, 2009.
- [24] Ptito, M., Matteau, I., Gjedde, A. & Kupers, R.: Recruitment of the middle temporal area by tactile motion in congenital blindness. *Neuroreport* 20 (6) :543-547, 2009.
- [25] Obretenova, S. Halko, M. A., Plow, E. B., Pascual-Leone, A. & Merabet, L. B.: Neuroplasticity associated with tactile language communication in a deaf-blind subject. *Frontiers in human neuroscience* 3: 60, 2009.
- [26] Goldreich, D. & Kanics, I. M.: Tactile acuity is enhanced in blindness. *Journal of Neuroscience* 23 (8) :3429-3445, 2003.
- [27] Goldreich, D. & Kanics, I. M.: Performance of blind and sighted humans on a tactile grating detection task. *Perception & Psychophysics* 68 (8) :1363-1371, 2006.
- [28] Klinge, C., Röder, B. & Büchel, C.: Increased amygdala activation to emotional auditory stimuli in the blind. *Brain* 133:1729-1736, 2010.
- [29] Merabet, L. B., Battelli, L., Obretenova, S., Maguire, S., Meijer, P. & Pascual-Leone A.: Functional recruitment of visual cortex for sound encoded object identification in the blind. *Neuroreport* 20 (2) :132-138, 2009.
- [30] Iacoboni, M., Molnar-Szakacs, I., Gallese, V., Buccino, G., Mazziotta, J. & Rizzolatti, G.: Grasping the intentions of others with one's own mirror neuron system. *PLoS BIOLOGY* 3 (3) :e79, 2005.
- [31] Ricciardi, E., Bonino, D., Sani, L., Vecchi, T., Guazzelli, M., Haxby, J. V., Fadiga, L. & Pietrini, P.: Do we really need vision? How blind people "see" the actions of others. *Journal of Neuroscience* 29 (31) :9719-9724, 2009.
- [32] Van Boven, R. W., Hamilton, R. H., Kauffmann, T., Keenan, J. P. & Pascual-Leone, A.: Tactile spatial resolution in blind Braille readers. *Neurology* 54:2230-2236, 2000.
- [33] Pascual-Leone, A. & Torres, F.: Plasticity of the sensorimotor cortex representation of the reading finger in Braille readers. *Brain* 116 (1) :39-52, 1993.
- [34] Collingnon, O. & De Volder, A. G.: Further evidence that congenitally blind participants react faster to auditory and tactile spatial target. *Canadian Journal of Experimental Psychology* 63 (4) :287-293, 2009.
- [35] Yoshimura, A., Matsugi, A., Esaki, Y., Nakagaki, K. & Hiraoka, K.: Blind humans rely on muscle sense more than normally sighted humans for guiding goal-directed movement. *Neuroscience Letters* 471 (3) :171-174, 2010.
- [36] Gosselin-Kessiby, N., Kalaska, J. F. & Messier, J.: Evidence for a proprioception-based rapid on-line error correction mechanism for hand orientation during reaching movements in blind subjects. *Journal of Neuroscience* 29 (11) :3485-3496, 2009.
- [37] Cuevas, I., Plaza, P., Rombaux, P., De Volder, A. G. & Renier, L.: Odour discrimination and identification are improved in early blindness. *Neuropsychologia* 47 (14) :3079-3083, 2009.
- [38] Cuevas, I., Plaza, P., Rombaux, P., Collignon, O., De Volder, A. G. & Renier, L.: Do people who became blind early in life develop a better sense of smell? A psychophysical study. *Journal of Visual Impairment & Blindness* 104 (6) :369-379, 2010.
- [39] Dayananda, G., Roopakala, M. S., Sprinivasa, R. & Rajeev, S.: A comparative study of median nerve somatosensory evoked potential in the totally blind and normal subjects. *Indian Journal of Physiological Pharmacology* 52 (2) :183-188, 2008.

- [40]Giriyyappa, D., Subrahmanyam, R. M., Rangashetty, S. & Sharma, R.: Index finger somatosensory evoked potentials in blind Braille readers. *Neurologia i Neurochirurgia Polska* 43 (5) :439-445, 2009.
- [41]Röder, B. & Rösler, F.: Memory for environmental sounds in sighted, congenitally blind and late blind adults: evidence for cross-modal compensation. *International Journal of Psychophysiology* 50:27-39, 2003.
- [42]Merabet, L. B., Hamilton, R., Schlaug, G., Swisher, J. D., Kiriakopoulos, E. T., Pitskel, N. B., Kaufmann, T. & Pascual-Leone, A.: Rapid and reversible recruitment of early visual cortex for touch. *PLoS ONE* 3 (8) :e3046, 2008.
- [43]Lissek, S., Wilimzig, C., Stude, P., Pleger, B., Kalisch, T., Maier, C., Peters, S. A., Nicolas, V., Tegenthoff, M. & Dinse, H. R.: Immobilization impairs tactile perception and shrinks somatosensory cortical maps. *Current Biology* 19 (10) :837-842, 2009.
- [44]Schmid, M., Nardone, A., De Nunzio, A. M., Schmid, M. & Shieppati, M.: Equilibrium during static and dynamic tasks in blind subjects: no evidence of cross-modal plasticity. *Brain* 130:2097-2107, 2007.
- [45]Johnston, M. V.: Plasticity in the developing brain: Implications for rehabilitation. *Developmental Disabilities Research Reviews* 15:94-101, 2009.

Recent Studies on Brain Plasticity and Functional Compensation of the Blind

ISHIDA Hisayuki

Research and Support Center on Higher Education for the Hearing and Visually Impaired

Abstract: Recently brain plasticity of the blind has been discussed. For example, in congenitally or early blind persons, the visual cortex that normally responds to visual stimuli is activated by tactile or auditory stimuli. The increased uses of such channels result in compensatory actions of the brain neural networks. Many findings of this area are due to the progress of technology for studying and analyzing the brain, such as functional Magnetic Resonance Imaging and Transcranial Magnetic Stimulation. This review summarizes recent research of brain science and discusses functional compensation of the blind.

Keywords: Blind, Plasticity, Compensation