身体知獲得過程における動作の再現性と脳賦活反応との関係

浅賀 裕介^{*1}, 綿貫 啓一^{*2,*3,*4}The relationship between brain activity and accuracy of replicating actions
in the process of embodied knowledge acquisitionYusuke ASAKA^{*1} and Keiichi WATANUKI^{*2,*3,*4}^{*1,*2} Graduate School of Science and Engineering, Saitama University
255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama 338-8570, Japan^{*3} Institute of Ambient Mobility Interfaces, Saitama University
255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama 338-8570, Japan^{*4} Brain Science Institute, Saitama University
255 Shimo-okubo, Sakura-ku, Saitama-shi, Saitama 338-8570, Japan

Received 1 April 2016

Abstract

In this paper, we analyze the relationship between brain activity and accuracy of replicating actions in the process of embodied knowledge acquisition. Subjects learned a series of actions as fundamental embodied knowledge as a experiment. Remembering and executing the actions, oxy hemoglobin increase in dorsolateral prefrontal area and decrease in frontal pole. Subjects watched a video clip of a working procedure, and executed the same series of actions as another experiment.. We conducted this experiment twice. After the first experiment, we set up three practice terms. In the observation task, oxy hemoglobin stabilize at a low level in dorsolateral prefrontal area and frontal pole with elevation of accuracy of replicating actions. In the execution task, oxy hemoglobin increase in dorsolateral prefrontal area and decrease in frontal pole with elevation of accuracy of replicating actions. These results suggest frontal pole relate self body imaging and dorsolateral prefrontal area relate working memory, and activity in these areas changes during the process of embodied knowledge acquisition.

Key words : Body intelligence, Embodied knowledge, Brain activity, Near-infrared spectroscopy, Knowledge acquisition

1. 緒 言

文章や図、表等で明示的に表現が可能である形式知に対して、文章や図、表等で表現が困難な知識を暗黙知という(Polanyi, 1966), (Nonaka, 1991). 身体知とは、暗黙知に内包される知識であり、芸術、スポーツおよび工芸等における、経験や勘に基づく技能および技術である。明示的な表現が難しいため、他者との情報共有が困難である。身体知を獲得するためには、知識を授与する側だけでなく、享受する側も努力が必要となる。

近年、技術の発展により産業用機械が人の手作業に代わり、国内外で広く用いられている。一方、依然としてものづくり産業における人材の育成と確保は重要視されている(経済産業省, 2014)。ものづくり産業において、技能が身体知であり、その効率的な伝承が課題となっている。身体知の獲得過程において、身体知を既に保有している指導者が作業者の様子およびその結果から助言をすることで、身体知獲得の支援となる。しかし実際の作業現場では、指導者の確保が困難であり、指導を行う時間を確保することも難しいのが現状である(労働政策研究・研修機構, 2014)。

No.16-00150 [DOI:10.1299/transjsme.16-00150], J-STAGE Advance Publication date : 24 August, 2016

^{*1} 正員, 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255)

^{*2} 正員, フェロー, 埼玉大学大学院 理工学研究科

^{*3} 埼玉大学アンビエント・モビリティ・インターフェイス研究センター

^{*4} 埼玉大学脳科学融合研究センター

E-mail of corresponding author: s15dr001@mail.saitama-u.ac.jp

また、身体知は明示が困難な情報であるため、作業者の上達は評価することが難しい。技能水準を判定する場合は、作業者の技能に関する形式知を問う筆記試験と、身体知を問う実技試験を行うのが一般的である。実技試験の判定者は、高い技能を既に保有している熟練技能者が行い、自らの経験に基づいて技能の達成度を判定する。

このような身体知の性質と作業現場における実情を踏まえると、作業者は自身の技能に関する達成度を客観的に評価し、身体知獲得を単独で行うことが求められる。身体知の獲得を自身の主観によらずに評価するためには、作業者の生体的な状態変化を計測することが有効であり、明示できない情報の内面化という高度な情報操作においては、脳機能計測により、その活動が計測できると考える。

そこで本論文では、近赤外分光法（NIRS）を用いた脳機能計測装置を用いて身体知獲得の達成度を評価することを目的とする。脳機能の活動変化から身体知獲得の達成度を判断することが出来れば、作業者単独でも客観的な学習進度を判断できる。習熟度を定量的に評価し、モデル化することで上達を予測できれば、より効率的な学習方法を選択することが可能となり、指導できる人材の確保にも繋がる。

基盤産業での身体知獲得過程においては、機器の操作手順を覚えることが基本事項のひとつとなる。本研究では手続き記憶の見まね学習を対象とし、身体知獲得過程における動作の再現性と脳賦活反応との関係を考察する。

2. 近赤外分光法を用いた身体知獲得過程における脳賦活反応

2・1 近赤外分光法

脳で神経活動が起きると、活動神経近傍の組織で血流量および血液量が増加し、血中の酸素化ヘモグロビン（oxy-Hb）濃度と脱酸素化ヘモグロビン（deoxy-Hb）濃度の比率が変化する。近赤外光は波長域が 700~900nm で人体への透過性が高く、人体には無害である。ヘモグロビンは酸素の含有濃度によって 700~900nm の近赤外光の吸収度が異なるという特徴を利用し、血液中のヘモグロビンの濃度変化を測定することができる。この神経活動によるヘモグロビン増加と近赤外光の吸収度により、NIRS は脳賦活反応を非侵襲的に計測することが可能となる。また、NIRS は既存の脳機能計測方法に比べ、時間分解能が高く、低拘束であるという利点がある。被験者が実験中の姿勢を制限されないため、本研究における身体知獲得過程の計測に対し、非常に有用な装置であると考ええる。

2・2 身体知獲得過程における脳賦活反応の計測部位およびアーティファクトの除去

背外側前頭前野では長期記憶をする際のワーキングメモリ機能との関与が示されている(甘利, 田中, 2008)。また、fMRI による計測において、被験者が後に思い出せた単語を学んでいるときには左下前頭前皮質の一部において脳活動が高まったことが示唆されている(Wagner et al., 1998)。そのため、身体知獲得過程における脳賦活反応の計測部位は、図 1 に示す前頭前野とする。測定位置のチャンネル（Ch.）は国際 10-20 法に基づき、F8 : Ch.20（右外側前頭前野）、Fpz : Ch.23（前頭極）、F7 : Ch.26（左外側前頭前野）に対応するよう配置する。

また、NIRS における計測値は、頭皮上に接したプローブから近赤外光を照射しているため、被験者の体動、代謝および呼吸等の生体機能による影響を受ける。そのような体動および生体機能による影響は、広範囲において一様に及ぶと仮定し、大域平均基準を用いる(野澤, 近藤, 2009)。各実験について、課題前の安静期間における計測結果を基準として各計測結果を標準化する。その後、前頭野における全 32 チャンネルの平均値を各計測結果から減算し、大域平均基準化を行う。oxy-Hb が局所脳血流と関連し、脳の賦活を最も反映するとされ(Hoshi et al., 2001)、また MRI の BOLD 信号との間に相関性があることが示されているため(Okamoto et al., 2004)、本実験においては oxy-Hb を解析対象とする。

実験結果に適応する大域平均基準の手順を示す。実験1試行は、被験者が課題を実行する期間（課題期間）、その前後に被験者が安静にする期間（安静期間）をそれぞれ設定する。課題期間前の安静期間を基準とし、式（1）に示すとおり計測結果に対して標準化を行う。

$$\Delta oxy(t)_{Z-Score} := \frac{\Delta oxy(t)_{raw} - \mu_{pre-rest}^{\Delta oxy}}{\sigma_{pre-rest}^{\Delta oxy}} \quad (1)$$

ここで、 $\Delta oxy(t)$ は時刻 t における各チャンネルのoxyHb 計測値であり、 $\mu_{pre-rest}^{\Delta oxy}$ 、 $\sigma_{pre-rest}^{\Delta oxy}$ はそれぞれ基準とな

る安静期間のoxy-Hb平均値, 標準偏差である. 次に, 式 (2) に示すように標準化を行った計測結果に対して, 時刻 t におけるoxy-Hbの空間平均値を減算する. ここで n は全チャンネル数の32となる.

$$\Delta oxy(t)_{GR} := \Delta oxy(t)_{Z-SCORE} - \frac{\sum_{l=1}^n \Delta oxy_l(t)_{Z-SCORE}}{n} \quad (2)$$

Fig. 1 Measurement region

3. 手続き記憶獲得過程における脳活動変化

3 章では, NIRS を用いて被験者が動作を学習および再現する際の脳活動を計測する. 実験の手順を図 2 に示す. 被験者は実験中, 直立の姿勢で目の前のスクリーンを見る. そのスクリーン上に人物が一連の単純動作をする映像を呈示する. 被験者はその動作を記憶し, その後その動作を被験者自身が再現する.

被験者は健康な 20 代前半の男性 10 名であり, 3 章ではこのうち 5 名が, 4 章では残りの 5 名が参加している. 実験前に実験参加者に対して各実験の内容と目的を説明し, 同意を得た. なお実験は, 埼玉大学倫審査委員会にて事前に審議し, 承認を得ている (受付番号 H26-31).

3・1 視覚情報呈示による身体操作の学習

実験 1 試行は, 課題期間を 50 秒とし, その前後の安静期間をそれぞれ 30 秒と設定する. 本実験において各被験者は 3 種類の課題を順に実行する. 安静期間では, 被験者は何も考えずにスクリーンを見る. スクリーンには人物の直立した静止画を呈示する. (1) 1 試行目の課題は安静にすることであり, 被験者は 1 試行を通して安静を保つ (安静課題). スクリーン上の映像は切り替わらない. (2) 2 試行目の課題は, 観察および記憶である. 課題期間開始と同時に映像を切り替え, スクリーンに人物が一連の単純動作を行う映像を呈示する. 単純動作は図 2 に示す通り, 左手を挙げる, 左ひざを上げるといった一連の四肢の操作である. その場で直立したまま動作可能な操作であり, 体幹が変化する動作は含まない. 被験者はこの間この人物の動作を観察し, 記憶する (観察課題). (3) 3 試行目の課題は再現である. 課題期間開始と同時に被験者に口頭で指示をし, 被験者は 2 試行目に記憶した一連の単純動作を再現する (再現課題). 3 試行目の課題期間では, 1 試行目と同様にスクリーンの映像は切り替わらず, 人物の直立した静止画を呈示する. また, 各試行における課題については, 事前に被験者に説明する. ただし人物の動作内容については言及しない.

3・2 動作の学習および再現における脳活動傾向

右外側前頭前野 (F8) と左外側前頭前野 (F8) 前頭極 (Fpz) における, 各試行の計測結果について, oxy-Hb の大域平均基準化を行った. 各被験者を加算平均したものを図 3, 4 に示す.

図 3 では 1 試行目の安静課題と, 2 試行目の観察課題とを比較する. 安静課題では, oxy-Hb の変化は見られない. 観察課題においては, F7, F8 において上昇する傾向が示され, Fpz では下降する傾向が示された. F7 においては, 安静課題と比較し, 上昇が見られた. 図 4 では, 1 試行目の安静課題と, 3 試行目の再現課題とを比較する. 再現課題においては, F7, F8 において上昇する傾向が示され, Fpz では下降する傾向が示された.

前頭前野の両外側部における oxy-Hb の上昇傾向は, 被験者が動作を学習している時と, 再現する時の両者において見られるため, 他者の動作を模倣する行動と関連していると考えられる. 計測結果では前頭前野の左側だけではなく, 両側において oxy-Hb が上昇している. また背外側前頭前野では長期記憶をする際のワーキングメモリ機能との関与が示されている(甘利, 田中, 2008). よって前頭前野の両外側部における oxy-Hb の上昇傾向は,

動作を学習し、記憶として保存する際の脳機能、そして同様の動作を行うために、その記憶を想起するという機能を反映していると考えられる。

前頭極については、観察課題と再現課題において oxy-Hb の下降が示された。手を使用した遅延視覚フィードバックへの適応過程に関連して oxy-Hb が低下することが報告されており(嶋田, 開, 2003), 自己身体イメージと前頭葉における oxy-Hb 低下傾向の関連性が示唆されている。そのため、視覚情報を運動情報に適応する機能、あるいはその逆の機能と関連した反応傾向であると考えられる。さらに本実験では全身の身体操作について学習をしているため、前頭極における oxy-Hb の低下が、手だけでなく、全身の身体イメージと関連している可能性が示唆された。

4. 作業手順学習における脳活動変化

4・1 基盤産業における技能を想定した手続き記憶の見まね学習

4章では、NIRSを用いて被験者が身体知を獲得する際、上達により脳活動が変化するかを検討することを目的とし、基盤産業における技能獲得を想定した実験を行う。学習対象とする身体知を手続き記憶に限定し、見まね学習により一連の組立作業の記憶および再現を行う。被験者は机の前の椅子に座り、目の前のディスプレイを見る。実験1試行は、課題期間を180秒とし、その前後に安静期間をそれぞれ30秒設定する。本実験では各被験者に対して3回試行する。課題期間の開始直後5秒間には作業開始の指示を画面に呈示し、終了直前5秒間には作業終了の指示を画面に呈示する。

安静期間では、被験者は何も考えずにディスプレイを見る。図 5 に実験の手順を示す。(1) 1 試行目は課題期間を通して安静状態を保つ(安静課題)。(2) 2 試行目は課題期間に組立作業を行っている作業者の手元を撮影した動画が流れる。被験者はこの動画を観察し、作業手順を覚える(観察課題)。組立作業は 157 秒で終了し、その後完成部品の画像が 13 秒呈示される。(3) 3 試行目には、試行開始前に机上に部品を用意する。作業者は 3 試行目の課題期間において、2 試行目において記憶した手順通りに作業を行う(再現課題)。課題期間終了時は、画面に終了指示を呈示すると共に、3 試行目のみブザーにより合図する。実験前に被験者に実験構成の説明と、作業手順を覚えるよう指示した。

実験は2日に渡り行う。表1に被験者の実験日程を示す。1日目は計測後に、2試行目の課題期間および3試行目の課題期間を行う。2日目は計測前に、2試行目および3試行目の課題期間を連続で2回実行し、その後計測を行う。同一被験者について、作業精度の向上により脳賦活反応がどのように変化するのか解析を行う。

Fig. 2 Experimental design

Fig. 3 Mean Oxy-hemoglobin variation. (Comparison of Rest trial with Observation trial) (a) Operated oxy-Hemoglobin variation in the right dorsolateral prefrontal area (F8). (b) Operated oxy-Hemoglobin variation in the medial prefrontal area (Fpz). (c) Operated oxy-Hemoglobin variation in the left dorsolateral prefrontal area (F7).

Fig. 4 Mean Oxy-hemoglobin variation. (Comparison of Rest trial with Execution trial) (a) Operated oxy-Hemoglobin variation in the right dorsolateral prefrontal area (F8). (b) Operated oxy-Hemoglobin variation in the medial prefrontal area (Fpz). (c) Operated oxy-Hemoglobin variation in the left dorsolateral prefrontal area (F7).

Fig. 5 Experimental design

Table 1 Experimental schedule. The numerals indicate the subjects' performance counts.

	First day		Second day	
	Measurement by NIRS	Practice after measurement by NIRS	Practice before measurement by NIRS	Measurement by NIRS
Task 1 Rest	1	-	-	1
Task 2 Observation	1	1	2	1
Task 3 Execution	1	1	2	1

4・2 組立作業の再現精度の評価

各被験者の実験において、再現課題における組立作業について、どの程度同じ手順で作業過程を再現できたかを評価する。技能の水準を評価する場合、一般的には熟練技能者が判定を行う。単純な作業に限定した本実験においては、手順を12の過程に分割および番号付けして加算方式により採点を行う。

分割した過程において、必要な部品が適切な場所に配置されている場合、その過程は達成となる。その後、達成した過程が前に達成された過程番号よりも大きければ1点加算する。12の過程をすべて手順通りに実行すると、11点満点となる。組立部品における形状および色の左右非対称は区別する。

4・3 動作再現性と脳賦活反応における関係性の考察

表2に各被験者の1日目の再現結果と2日目の再現結果を示す。課題を初めて行った実験の初日においては、各被験者共に0点から2点までの比較的低い再現性を示している。課題に対する練習を行った後の実験2日目においては、各被験者共に10点を示した。実験における課題を各被験者が学習し、組立作業に習熟したといえる。

図6に実験1日目の安静課題と観察課題を比較したoxy-Hbの計測結果を示す。観察課題について、F7, F8においては上昇傾向が見られ、Fpzにおいては下降傾向が示された。図7は実験2日目におけるoxy-Hb計測結果である。練習前の結果と比較するとF7, F8の上昇傾向およびFpzの低下傾向は緩和している。また、練習前の観察課題における結果に比べ、練習後の結果においては標準誤差が縮小した。作業に習熟することで、各被験者における脳賦活反応が、一定の傾向に集約する傾向があることが示された。先行研究においては、小脳の内部モデルとの関連が考えられる(Imamizu et al., 2000), (Ito, 2000)。内部モデルは、行動の結果の予測、および行動の制御を可能とする機能を有する。本実験における両外側部および前頭極における脳賦活反応の減少は、観察および記憶を繰り返すことにより課題に関する内部モデルを獲得する過程を反映している可能性がある。

図8に実験1日目の安静課題と再現課題を比較したoxy-Hbの計測結果を示す。Fpz, F7, F8においては、安静課題と類似した傾向であり、その差異は見られない。図9は実験2日目におけるoxy-Hb計測結果である。F7においては安静課題と比べて上昇を示している。またF8においては上昇傾向を示し、Fpzにおいては、下降傾向を示している。練習前と比較すると、F7, F8は習熟することで上昇傾向となり、Fpzにおいては下降傾向となることを示している。練習後では2試行目の観察課題において提示された情報を、被験者が練習前に比べて豊富に保有しており、このような傾向の変遷は、記憶した情報を引き出す脳機能と、それを実行する作業に関連した反応であると推察できる。再現課題においては被験者が実際に作業を行うため、動作の想起、組立部品の認知など身体知の要素が、複合的に脳活動へ影響することが考えられる。随意運動を含まない観察課題に対し、再現課題における結果は身体知の複合的な要素も含めた結果であると捉える必要がある。

ここで、練習前と練習後の結果についてt検定を試みる。安静課題と観察課題および再現課題をそれぞれ比較した。練習前の安静課題と観察課題における結果では、両外側部において有意差および有意な傾向が示された。練習後では、両外側部と内側部において、有意差および有意な傾向を示した。これは図に示す通り、練習により各被験者におけるoxy-Hbの標準誤差が変化した影響であると考えられる。見まね学習においては、学習を繰り返すことでoxy-Hbはある一定の値に収束する可能性が示された。安静課題と実行課題における結果では、練習を行うことで実行課題の傾向が変化し、練習後では両外側部と内側部において有意差および有意な傾向を示している。

練習前と練習後を比較し、組立作業の再現性は上昇し、見まね学習は効果を示している。身体知獲得の過程を手続き記憶の獲得に限定した場合、初期段階においては観察および記憶におけるF7, F8のoxy-Hbが上昇傾向を示し、Fpzのoxy-Hbは下降傾向を示す。記憶する情報が減少するにつれて傾向は緩和する。初期段階における手続きの再現では、Fpz, F7, F8のoxy-Hbは課題に依存した変化傾向を示さず、再現する情報が増加するにつれてF7, F8のoxy-Hbが上昇傾向を示し、Fpzのoxy-Hbは下降傾向を示す。3章における単純動作の学習および再現を行う実験においては、記憶する手続きが1度観察することで覚えられる程度の情報であり、1回の実験において観察課題でoxy-HbがF7, F8で上昇傾向を、Fpzで下降傾向を示し、再現課題においてもoxy-HbがF7, F8で上昇傾向を、Fpzで下降傾向を示したと考えられる。

5. 結 言

本論文においては、手続き記憶の見まね学習を対象とし、身体知獲得過程における練習による動作の再現性変化と脳賦活反応との関係を考察した。課題練習前の、動作の再現性が低い場合では、観察および記憶の過程において、右外側前頭前野と左外側前頭前野で oxy-Hb の上昇傾向と前頭極で oxy-Hb の下降傾向を示し、動作を再現する際には、安静状態と同様の傾向を示した。練習を行った後、動作の再現性が高い場合では、観察および記憶する際に、安静状態と同様の傾向を示し、動作再現の過程においては、右外側前頭前野と左外側前頭前野で oxy-Hb の上昇傾向と前頭極で oxy-Hb の下降傾向が示された。本研究においては、身体知獲得を対象としているため、被験者ひとり当たりに複数回の実験を行うことは困難であり、体動に伴う脳反応と体動によるアーティファクトを分類する必要がある。また、手順を最初から覚える、全体から把握する等、身体知獲得に対するアプローチは各個人で異なる。より普遍的な身体知獲得における脳機能を解析するためには、今後さらに被験者数を増やし、多様な課題に対して検討する必要がある。また身体知獲得における脳活動を解析する際には、体動に伴う脳反応と体動によるアーティファクトを分類する必要がある。分析法により生体機能や体動による影響を低減するとともに、適切な課題を設定することが重要であると考ええる。

Table 2 Results of the execution procedure

Subjects		Execution procedure (The figures mean a number of procedures)												Total
A	First day	1	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
	Second day	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	-	10
B	First day	2	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	Second day	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	-	10
C	First day	1	4	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1
	Second day	1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	5	12	10
D	First day	1	2	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2
	Second day	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	-	10
E	First day	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
	Second day	1	2	3	4	5	6	7	8	10	9	11	12	10

Fig. 6 Mean Oxy-hemoglobin variation. (Comparison of Rest trial with Observation trial on the 1st day) (a) Operated oxy-Hemoglobin variation in the right dorsolateral prefrontal area (F8). (b) Operated oxy-Hemoglobin variation in the medial prefrontal area (Fpz). (c) Operated oxy-Hemoglobin variation in the left dorsolateral prefrontal area (F7). (* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$)

Fig. 7 Mean Oxy-hemoglobin variation. (Comparison of Rest trial with Observation trial on the 2nd day) (a) Operated oxy-Hemoglobin variation in the right dorsolateral prefrontal area (F8). (b) Operated oxy-Hemoglobin variation in the medial prefrontal area (Fpz). (c) Operated oxy-Hemoglobin variation in the left dorsolateral prefrontal area (F7) (* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$)

Fig. 8 Mean Oxy-hemoglobin variation. (Comparison of Rest trial with Execution trial on the 1st day) (a) Operated oxy-Hemoglobin variation in the right dorsolateral prefrontal area (F8). (b) Operated oxy-Hemoglobin variation in the medial prefrontal area (Fpz). (c) Operated oxy-Hemoglobin variation in the left dorsolateral prefrontal area (F7). (* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$)

Fig. 9 Mean Oxy-hemoglobin variation. (Comparison of Rest trial with Execution trial on the 2nd day) (a) Operated oxy-Hemoglobin variation in the right dorsolateral prefrontal area (F8). (b) Operated oxy-Hemoglobin variation in the medial prefrontal area (Fpz). (c) Operated oxy-Hemoglobin variation in the left dorsolateral prefrontal area (F7). (* $p < 0.1$, ** $p < 0.05$, *** $p < 0.01$)

文 献

- 甘利俊一, 田中啓治, 認識と行動の脳科学, 東京大学出版会 (2008).
- Hoshi, Y., Kobayashi, N. and Tamura, M., Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 90 (2001), pp.1657-1662.
- Imamizu, H., Miyauchi S., Tamada T., Sasaki Y., Takino R., Puetz B., Yoshioka T. and Kawato, M., Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool, *NATURE*, Vol.403 (2000), pp.192-195.
- Ito, M., Internal model visualized, *NATURE*, Vol.403 (2000), pp.153-154.
- 経済産業省・厚生労働省・文部科学省, 2014 年版ものづくり白書, 経済産業省 (online), available from <<http://www.meti.go.jp/report/whitepaper/mono/2014/>>, (参照日 2016 年 3 月 27 日).
- Nonaka, I., The knowledge-creating company, *Harvard Business Review* (1991), pp.96-104.
- 野澤孝之, 近藤敏之, NIRS 脳計測データのオンライン分析のためのアーティファクト除去手法の比較, 生体・生理工学シンポジウム論文集 (2009).
- Okamoto, M., Dan, H., Shimizu, K., Amita, T., Oda, I., Sakamoto, K., Isobe, S., Suzuki, T., Kohyama, K. and Dan, O., Multimodal assessment of cortical activation during apple peeling by NIRS and fMRI, *Neuroimage*, Vol. 4 (2004), pp.1275-1288.
- Polanyi, M., The tacit dimension, Routledge and Kegan Paul (1966).
- 嶋田総太郎, 開一夫, 自己身体イメージにおける遅延自己映像の影響 - NIRS を用いた脳活動計測 -, 信学技報, Vol.133 (2003), pp.31-36.
- 独立行政法人労働政策研究・研修機構, 「ものづくり企業の新事業展開と人材育成に関する調査」結果, (online), available from <<http://www.jil.go.jp/press/documents/20140516.pdf>> (2014) (参照日 2016 年 3 月 27 日).
- Wagner, A.D., Schacter, D.L., Rotte, M., Koutstaal, W., Maril, A., Dale, A.M., Rosen, D.B. and Buckner, R.L., Building memories: remembering and forgetting of verbal experiences as predicted by brain activity, *Science*, Vol.282 (1998), pp.1188-1191.

References

- Amari, S. and Tanaka K., Brain science of cognizance and behavior, University of Tokyo Press, Tokyo (2008) (in Japanese).
- Hoshi, Y., Kobayashi, N. and Tamura, M., Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model, *Journal of Applied Physiology*, Vol. 90 (2001), pp.1657-1662.
- Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., Yoshioka, T. and Kawato, M., Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a new tool, *NATURE*, Vol.403 (2000), pp.192-195.
- Ito, M., Internal model visualized, *NATURE*, Vol.403 (2000), pp.153-154.
- Ministry of Economy, Trade and Industry, Health, Labour and Welfare Ministry and Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology, White paper on manufacturing industries (Monodzukuri) (online), available from <http://www.meti.go.jp/english/report/index_whitepaper.html#monodzukuri>, (accessed on 27 March, 2016) (in Japanese).
- Nonaka, I., The knowledge-creating company, *Harvard Business Review* (1991), pp.96-104.
- Nozawa, T. and Kondo, T., Comparison of artifact reduction methods for real-time analysis of NIRS data, In: 24th Symposium on Biological and Physiological Engineering (2009) (in Japanese).
- Okamoto, M., Dan, H., Shimizu, K., Amita, T., Oda, I., Sakamoto, K., Isobe, S., Suzuki, T., Kohyama, K. and Dan, O., Multimodal assessment of cortical activation during apple peeling by NIRS and fMRI, *Neuroimage*, Vol. 4 (2004), pp.1275-1288.
- Polanyi, M., The tacit dimension, Routledge and Kegan Paul (1966).
- Shimada, S. and Hiraki, K., Effect of delayed visual feedback on self body-image –a NIRS study-, Technical report of the institute of electronics, information and communication engineers, Vol.133 (2003), pp.31-36 (in Japanese).
- The Japan Institute for Labour Policy and Training, Results of the survey on new business deployment and human resource cultivation of manufacturing enterprise, <<http://www.jil.go.jp/press/documents/20140516.pdf>>, (2014) (accessed on 27 March, 2016) (in Japanese).
- Wagner, A.D., Schacter, D.L., Rotte, M., Koutstaal, W., Maril, A., Dale, A.M., Rosen, D.B. and Buckner, R.L., Building memories: remembering and forgetting of verbal experiences as predicted by brain activity, *Science*, Vol.282 (1998), pp.1188-1191.