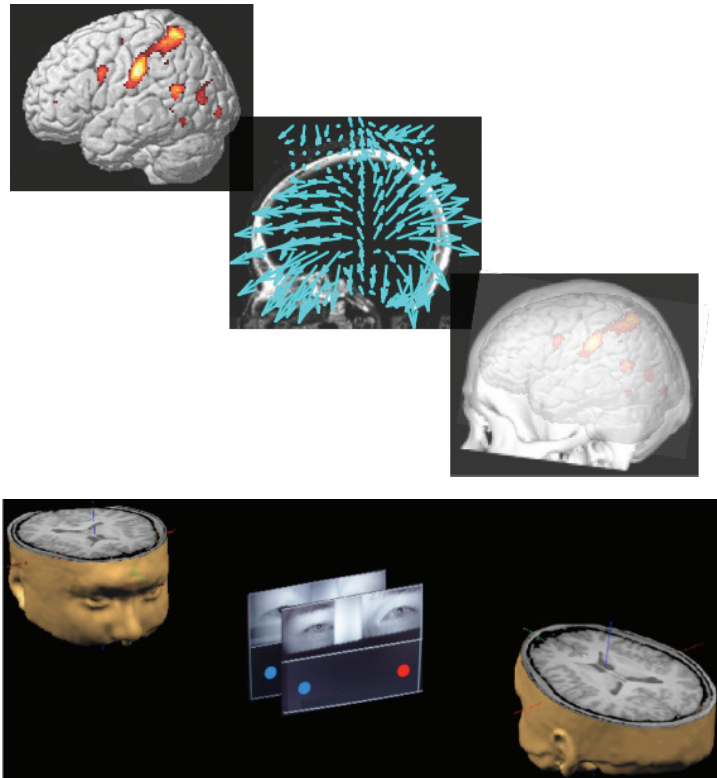


# 交替劇

ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究

研究項目 C02 2010-11 年度 研究報告書

旧人・新人の学習行動に関する脳機能マップの作成



文部科学省科学研究費補助金（新学術領域研究）2010-2014



ネアンデルタールと  
サピエンス交替劇の真相：  
学習能力の進化に基づく  
実証的研究

研究項目 C02 2010-11 年度 研究報告書

「旧人・新人の学習行動に関する脳機能マップの作成」

文部科学省科学研究費補助金（新学術領域研究）2010-2014

## 編集

田邊宏樹

名古屋大学大学院 環境学研究科

社会環境学専攻 心理学講座

464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

TEL: 052-789-2256

FAX: 052-789-2256

## 発行

文部科学省・科学研究費補助金「新学術領域研究」2010-2014

研究領域名「ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：

学習能力の進化に基づく実証的研究」

領域番号 1201

## 印刷

秋田活版印刷株式会社

〒011-0901 秋田県秋田市寺内字三千刈 110-1

TEL: 018-888-3500

All communications pertaining to this Conference and Publication should be addressed to Koutaigeki Project Office below;

Tokyo satellite Campus,

Kochi University of Technology

CIC Tokyo 302, 3-3-6 Shibaura, Minato-ku, Tokyo 108-0023, Japan

TEL: 03-5440-9039

URL: <http://www.cictokyo.jp/>

Email: [akazawa.takeru@kochi-tech.ac.jp](mailto:akazawa.takeru@kochi-tech.ac.jp)

© Koutaigeki Project

領域ホームページ(Project Homepage)

URL: <http://www.koutaigeki.org/>

## 目次

### CONTENTS

---

#### 研究組織

研究項目 C02 研究組織	2
---------------	---

#### 研究報告

現代人脳機能地図作成：創造的社会的神経基盤	4
-----------------------	---

田邊宏樹（名古屋大学・生理学研究所）・定藤規弘（生理学研究所）

他者の行動観察による模倣学習の神経基盤	15
---------------------	----

三浦直樹（東北工業大学）

打製石器作成時の熟練技術者の身体動作解析	23
----------------------	----

星野孝総（高知工科大学）・三浦直樹（東北工業大学）

計算論的解剖学を利用した化石脳頭蓋骨から脳実質の再構成	29
-----------------------------	----

河内山隆紀（京都大学 霊長類研究所）

模倣行為と動機づけの関連における神経基盤	37
----------------------	----

川道拓東（生理学研究所）

内発的報酬による社会・個体学習強化の神経基盤に関する研究	42
------------------------------	----

水野敬（理化学研究所 分子イメージング科学研究センター）

#### 研究業績

2010～11 年度 研究業績	48
-----------------	----

# 研究組織

## 研究項目 C02 研究組織

### 研究代表者

田邊 宏樹 名古屋大学大学院 環境学研究科 准教授

### 研究分担者

定藤 規弘 生理学研究所 大脳皮質機能研究系 教授

三浦 直樹 東北工業大学 工学部 講師

河内山 隆紀 京都大学 霊長類研究所 研究員

### 連携研究者

星野 孝総 高知工科大学 システム工学群 准教授

### 公募研究

川道 拓東 生理学研究所 大脳皮質機能研究系 特任助教

水野 敬 理化学研究所分子イメージング科学研究センター 研究員

# 研究報告



# 現代人脳機能地図作成：創造的社會の神経基盤

田邊宏樹（名古屋大学・生理学研究所）・定藤規弘（生理学研究所）

## 1. はじめに

我々の作業仮説である「旧人・新人の学習能力差」を化石脳の比較解剖学・古神経学的証拠から検証することを目的として、脳機能イメージング手法を用いた現代人脳の学習機能地図作成研究に着手した。その際に、従来進化モデルから提唱されていた「個体学習者と社会学習者の生存戦略から旧人ネアンデルタールと新人サピエンスの学習能力差を考える」という枠組みから脱却し、「創造性とそれを受容する社会」という切り口からその神経基盤を探ることとした。これは、従来の進化モデルのベースにある、模倣・教示など文化伝達を支えるもの（社会学習）と試行錯誤・洞察など発明や発見を支えるもの（個体学習）という二分法では、そこから抜け落ちてしまうものがあるという思いがもととなっている。すなわち、発明や発見を革新のきっかけとする累進的なプロセスにはそれを受け入れる側の心的状態に対応する神経基盤の解明が不可欠であり、創造的な社会とは創造者（発明・発見）とそれを十分に受容して広める側の者達（社会能力）の二側面からアプローチしなければならないと考えたからである。

トマセロはその著書の中で、累進的な文化進化のプロセスが起こるには、創造的な発明が求められるだけでなく、忠実な社会継承によって歯車が逆に回らないようにすることが重要であると述べている（Tomasello, 1999）。ここで重要な役割を持つのが認知資源の蓄積であり、これは個体が同種の者について自分と同じく意図や精神生活を持っているものとして理解する能力をベースとしている（Tomasello et al., 1993）。この能力により、他者から直接的に学習するだけでなく、他者を通して学習できるようになるのである。我々は、旧人と新人の違いとして、この学習能力差があるのではないかと考え、まずは社会性の能力に焦点を当てて研究を行った。

## 2. 社会的相互作用の神経基盤の解明に向けて

1990年代中頃からヒトを対象とした脳機能イメージング研究が盛んになり、まず始めに感覚知覚・運動の脳機能マッピングが、続いてヒト特有の高次脳機能についての研究が発展してきた。この流れを汲んで、近年ヒトの社会性に関する研究が盛んになってきている。機能的磁気共鳴画像法(functional MRI)を用いた研究も増加し、いわゆる“社会脳”の実験も増加の一途をたどっている。社会的な場面においては心の理論のような「他者理解能力」が必須であるが、その能力の発現を可能とする下位能力のうち最も重要なものの1つが「視線の認識」といわれている(友永, 2009; Balon-Cohen, 1995)。

視線認識の神経基盤についても多くの研究がなされ、これまでに上側頭溝(STS)や前頭葉内側部(MPFC)・前頭眼窩皮質(OFC)などが重要な役割を担っていることが示されている。しかしこれらはいくまで個人の社会認知の一側面としての視線認識の神経基盤である。現実の対面コミュニケーション場面では、視線のやりとりはダイナミックで相互作用的であり、今までの視線認識の研究ではとらえきれない本質が残されていると考えられる。

上記のように、これまでのいわゆる“社会脳”の研究では社会認知という個人の脳機能メカニズムへ還元される形での研究がほとんどであった(Jaegher et al., 2010)。視線の役割における神経基盤についてもその理解は進んでいるが、ほとんどの課題は絵や写真・動画ビデオを用いたものであり、社会的相互作用の脳機能メカニズムについてはわかっていない。現実の場面では視線は相互にやりとりされるものであり、ダイナミックに変化するものである。これをとらえ、1つのダイナミカルシステムとして考えない限り、真の意味での社会的相互作用の脳機能メカニズムは理解できない。

ここで問題となるのが、ではどのようにして二者の相互のやりとりをリアルタイムに計測するかである。それには克服しなければならない点が多い。一つは装置の制約である。特に両者の視線を媒介とした社会的相互作用を見るには複数のfMRI同時計測(いわゆるハイパースキャン)だけでは不十分で、それぞれの目あるいは顔をリアルタイムで相互観察できるシステムの構築が必要である。カメラなど持ち込む機材はMRI撮像に対し強力なノイズ源となるので、その対処にはかなりの工夫が必要である。次にfMRIにおける低時間分解能の問題である。一般に機能的MRIは脳のどの部位がこういった課題や刺激に対して反応するかについて調べるには強力なツールであるが、脳機能の時間的ダイナミズムを研究するには時間分解能が不足している。逆にEEGはその低空間分解能から脳内の機能責任部位の特定は難しいが時間分解能は優れている。我々は将来的にはfMRIとEEGの両者を用いることで、それぞれの欠点を補いながら研究を遂行することとし、まずはfMRIをその枠組みとして研究を進めることとした。

我々はすでに福井大学との共同研究で、簡易型の二者のfMRI同時計測システムを立ち上げ研究を進めていた。そこでは、リアルタイムでお互いの視線を交換でき視線を通してコミュニケーションできたが、お互いの映像が目の周囲だけであったため研究の適応範囲は極めて限られたものであった。しかも二台のMRIは磁場の強さも違いまた臨床機であったため、実験をするには不都合な点が多かった。そこで、福井に構築したdual fMRIでの研究を行いつつ、我々が属する生理学研究所にも、もっと適応範囲の広い社会相互作用課題遂行中の脳活動を計測出来るdual fMRIシステムの立ち上げを行うこととなった。まず上記にも述べたように、MRIを二台繋げたことによるMRI画像

へのノイズ、映像へのノイズの対処を行うところからはじめた。ノイズ対策そのものは研究の成果ではないが、その対処法は今後の研究に多いに役立つと考えられるため、次段ではそのノイズ対策についての経過と対処について述べる。

### 3. 生理研に導入した Dual fMRI システムにおけるノイズ対策

#### 【導入直後の状態】

MRI 撮像室内に持ち込んだ顔撮影用カメラ・眼球運動計測装置の電源を全て ON にして MRI 撮像を行ったところ、MRI 画像にも電源由来と思われるノイズが大きく見られ、またカメラで撮影した顔にもノイズが見られた。これでは実験に大きな支障が出てしまうため、以下の対策を講じた。

対策：カメラ・眼球運動計測装置などに用いている電源をシールドボックスに入れ、装置の配線の配置（取り回し）を工夫することによりノイズを軽減させた。また顔カメラの位置とシールド対策を行った。

効果：上記の対策により、顔画像のノイズは解消された。シングル使用時の MRI 画像のノイズも低減したが、全て消えたわけではない。周辺機器の電源を落とした場合にはノイズは低減するため、完全にシールド出来ているわけではない。また2台の MRI のうち、1つは部屋の照明系に問題がありそれがノイズ源となっていることが判明したため、対策を講じ解決した。

#### 【Single MRI x 2】

シングル MRI のノイズがかなり低減したため、2台の MRI を別々に動かした場合の画像に対するノイズチェックを行った。すると、撮像によって頭を挟むように強い二本の線ノイズが発生した。これは MRI 撮像のタイミングや用いるシーケンスによって異なった。また手で2台の MRI を同時スタートさせた場合、上記二本の強い線ノイズの生起確率が格段に上がることが分かった。

対策：分配器や MRI 撮像室のドア（電波漏れ）には問題がないことをまず確認した。また周辺機器の電源を落とした場合にはノイズは低減することも確かめられた。可能性としてアースのループ問題があり、各社それぞれのシステムでアースの確認を行った。またヘッドフォンのケーブル出口を変更したところ若干の改善が見られたが、引き続きノイズは強く残っていた。

また、上記対策を講じている際に、ヘッドフォンのケーブルがアンテナとなり MRI 室内の電波ノイズを拾っている可能性が強く示唆された。ヘッドフォン自体がノイズ源である可能性は低く、外から混入した何らかの形で MRI 室内に電波ノイズが侵入しているものと考えられた。

対策：ヘッドフォン無しだとノイズはのらないこと、シングルの MRI であればヘッドフォンを着用してもノイズは出ないこと、ケーブルの配置によってノイズの強さが変化することから、やはり原因はヘッドフォンのケーブルがアンテナとなっていることが可能性として高いことが確認された。対策として、(1) ヘッドフォンが必要な無い場合は使用しない、(2) 徹底的にノイズ源を探し特定して処置する、があり、(2) に時間がかかりそうな場合は (1) で実験を行うこととした。

#### 【Dual MRI】

2台の MRI を同時にスタートさせているときに強いノイズが現れ、そのノイズパターンが2台で異なる、すなわち一方にだけ出たり両方に出たりすることが見られた。またノイズがスキャン毎に強度・パターンを変えることも確認された。システムティックに調べるため、外部トリガをもちいてスキャンの同期・ズレとノイズパターンを調べた。その結果、2台の MRI がほぼ完全に同期すると N/2 アーチファクトとなって現れ、100ms ずれると線状のノイズとなって現れることが確認できた。

対策：MRI 導入初期の設定と異なる点として、外部トリガ入力のための配線が加わっていることがあり、これを伝って別の MRI の電波が混入する可能性が出てきた。このため外部トリガ入力の配線をシールド性の高いものに変更したところ、一方の MRI 装置だけでは上記現象が残ったが、二台とも配線をシールド性の高いものに変更すると N/2 アーチファクト、線状ノイズともに消失した。

#### 【現状とさらなる改善】

初期に見られた強いノイズおよびアーチファクトは、上記対策を順次講じたことによりかなり減少した。結局のところ、一番大きなノイズの原因は、フィルタ板を通していてもかかわらず、外部トリガ入力のための配線を伝って入り込んだ反対側の MRI から電磁波ノイズをヘッドフォンのケーブルがアンテナとなって拾い、それが画像に乗ったものと考えられた。したがって、対策としてはノイズ源を減らすことはもちろんであるが、まずアンテナとなっているヘッドフォンのケーブルを以下の通りにすることとなった。すなわち(1) 現状のヘッドフォンでも使えるように、ケーブルにシールドを施す、(2) 有線ケーブルからエアチューブ式のヘッドフォンに交換する、である。

この対策により、fMRI 研究に耐えうる脳機能画像を取得できる見込みが出来たので、前段にあげた社会的相互作用の研究を開始した。

#### 4. 社会的相互作用としての共同注意 –その神経基盤を探る–

ヒトの社会は遺伝的に無関係な個体の間での役割分担と共同により成立している。このような社会にあって円滑なコミュニケーションが出来ることはきわめて重要であり、近年その神経基盤の解明が進んでいる。しかし、これまでは社会的事象に対する個々の

脳の働き（社会的認知）に関する研究が多く、リアルなコミュニケーション場面での視線や脳活動を計測する研究は、装置上の制約や困難性・解析手法の複雑さなどからほとんどなされていない。我々は福井大学および生理学研究所に二台の機能的MRI同時計測系(dual functional MRI system)を立ち上げ、「視線のやりとり」を社会的インタラクションの例として、その神経基盤の解明を目指した。

アイコンタクトはコミュニケーションを成立させる上で極めて重要であり、また共同注意を促進する。さらに共同注意の欠如は自閉症の有力な早期マーカーになりうるともいわれている。我々は二者間の視線のやりとり（アイコンタクト）と共同注意の神経基盤を調べるため、福井大学に二台のMRIそれぞれに被験者が入った状態でリアルタイムにお互いの目を見られるシステムを構築し（図1）、実験を行った。1つ目の実験では二台とも健常成人のペアで、2つ目の実験では健常成人と高機能自閉症(ASD)のペアに入ってもらい、それぞれの課題遂行中の脳活動を比較検討した。

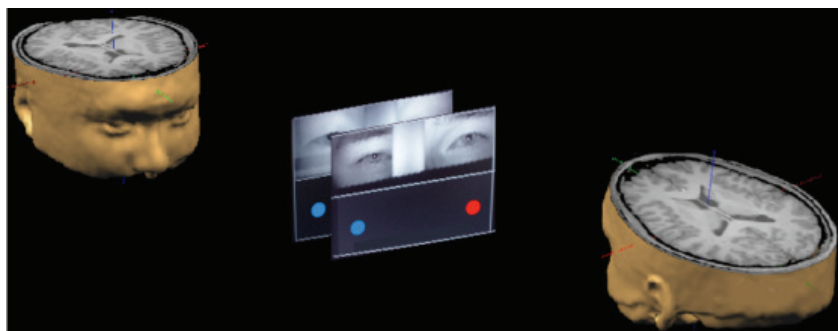


図1 福井大学に構築した dual fMRI システムの模式図

実験の結果、まず共同注意の成績が予想通り高機能自閉症被験者(以下 ASD)で有意に低下しているのみならず、その相手となった健常成人でも低下する傾向にあることが分かった（図2）。一般に ASD は視線を読むことが苦手であるといわれているが、それだけでなく相手へ視線を介して自分の意図を伝えることも上手く出来ないということが分かった。

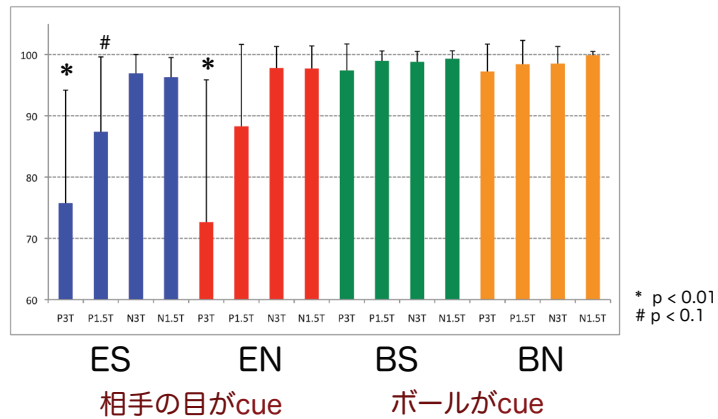


図2 共同注意課題の成績 各色の左から、ASD 群、ASD が相手の健常群、健常群が相手の健常群1、健常群が相手の健常群2

脳機能イメージングの結果を見ると、ASD では共同注意課題遂行中の脳活動、特に視覚野の活動が低下していること、ASD とペアを組んだ健常群では、健常-健常ペアの被験者よりも同課題遂行中の脳活動、特に右下前頭前野と視覚野の活動、が亢進していることが見いだされた (図3、図4)。

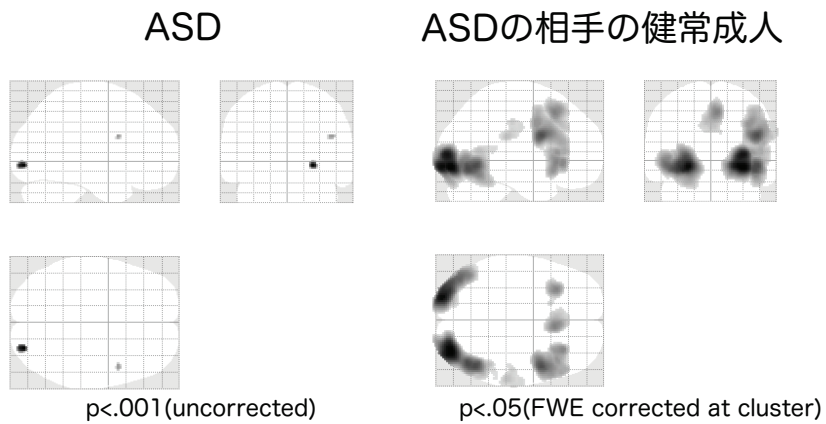


図3 視線処理をしている時の脳活動

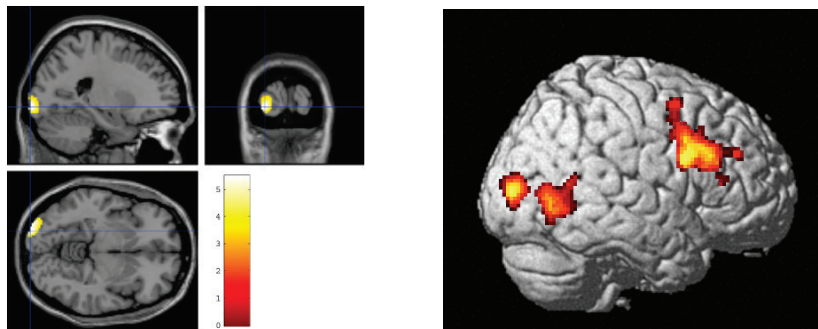


図4 (右) ASD で視線処理時に脳活動の低下していた場所  
 (左) ASD の相手の健常成人で視線処理時に脳活動の増加していた場所

また課題関連の脳活動を差し引いた残差時系列データを用いて2つの脳の相同部位の相関解析を行ったところ、右下前頭回において、実際のペア(pair)の方が組合せをランダム化したペア(non-pair)よりも相関が高いことが分かった(図5)。この“ペアで高くなる相関”は自閉症-健常のペアではみられなかった。

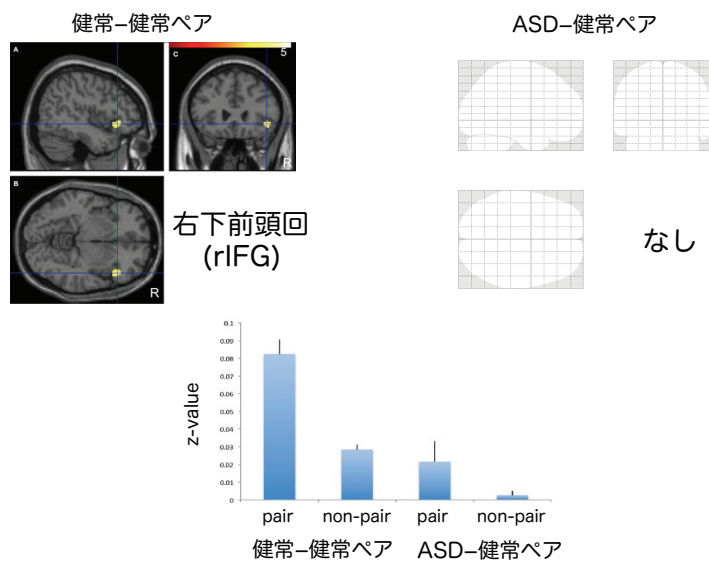


図5 ペアで脳活動の同調が認められた部位

さらに、この右下前頭回が個人の脳内でどこも機能的に繋がっているか、その違いが健常成人と ASD であるか調べたところ、ASD のペアとなった健常成人で右下前頭回と右上側頭溝の機能的結合が低下していることが分かった(図6)

### 右下前頭回との機能的結合

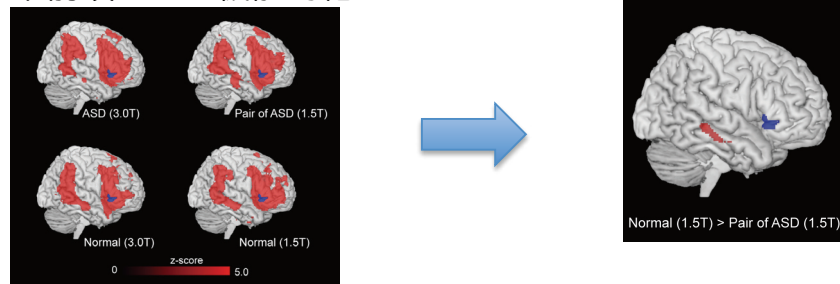


図6 (右) 右下前頭回との機能的結合 (左) 結合に差があった脳領域

これらのことから、共同注意において右前頭前野と視覚領域が重要な役割を果たしていること、また右下前頭回と右上側頭溝がアイコンタクトによる心理的場の共有に重要な役割を果たしていること、が示唆された。

## 5. まとめ

旧人と新人の交替劇において、社会性やコミュニケーションに関わる両者の能力差が交替劇を引き起こした主要な一要因であると考えられる。今後は他班とも協力しながら、社会性や社会認知能力の特にどの部分に能力差があったと考えられるかを探りながら、その神経基盤を明らかにしていきたいと考えている。また、革新を起こす創造性・創造力は、新人サピエンスが旧人ネアンデルタールより優れていたと考えられるもう1つの主要因である。こちらも、どのような能力を想定して研究を進めれば良いか、他班の協力を仰ぎながら実験計画を練っていきたい。

### 参考文献：

- Baron-Cohen S (1995) *"Mindblindness: An Essay on Autism and Theory of Mind"*, MIT Press.
- Jaegher HD, Paolo ED, Gallagher S (2010) "Can social interaction constitute social cognition?", *Trends in Cognitive Science*, **14**, 441-447.
- Tomasello, M. (1999) *"The Cultural Origins of Human Cognition"*, Harvard Univ. Press.
- Tomasello, M., Kruger, A.C., Ratner, H.H. (1993) Cultural learning. *Behavioral and Brain Sciences*, **16**, 495-552.
- 友永雅己 (2009) 「目はこころの窓」 開一夫・長谷川寿一 (編) 「ソーシャルブレインズ」 pp.131-160, 東京大学出版会.



## Joint attention between individuals with normal and autism spectrum disorders using dual fMRI

Hiroki C. Tanabe<sup>1,2</sup>, Hiroataka Kosaka<sup>3,4</sup>, Daisuke N. Saito<sup>4</sup>, Toshio Munesue<sup>5</sup>, Hidehiko Okazawa<sup>4</sup>, Yuji Wada<sup>3</sup>, Norihiro Sadato<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Cerebral Research, National Institute for Physiological Sciences, Okazaki, Aichi, 444-8585, Japan

<sup>2</sup>Department of Physiological Sciences, The Graduate University for Advanced Studies, Okazaki, Aichi, 444-8585, Japan

<sup>3</sup>Department of Neuropsychiatry, Faculty of Medical Sciences, University of Fukui, Eiheiji, Fukui, 910-1195, Japan

<sup>4</sup>Biomedical Imaging Center, Faculty of Medical Sciences, University of Fukui, Eiheiji, Fukui, 910-1195, Japan

<sup>5</sup>Research Center for Child Mental Development, Kanazawa University, Kanazawa, Ishikawa, 920-8641, Japan

### Introduction

Joint attention is an ability to coordinate attention between interactive two persons regarding objects or events. Lack of joint attention is one of the most reliable markers in children with autism. Recently, we developed simultaneous measurement of the brain activity of two persons engaged actual mutual gaze and joint attention task, using hyperscan MRI (Saito, Tanabe et al., 2010). In the present study, we try to elucidate the differences of neural mechanisms of joint attention between adult individuals with normal and autism spectrum disorders (ASD) employing this system.

### Methods

Forty-two volunteers were participated in the present study. Half of them were diagnosed as high-functioning ASD based on the DMS-IV and standardized criteria using the Diagnostic Interview for Social and Communication Disorders (DISCO). Individuals with normal and ASD were paired (21 dyad in total). In

addition, the data of another 19 normal-normal dyads, obtained by our previous study, were used to compare the results of the present study.

To measure the neural activation during the on-line exchange of eye signals between the pairs of participants, two MRI scanners were combined with an infrared eye-tracking system. They performed the joint attention task with exchanging their eye gaze information in real time. The other participant's eyes were presented on the upper half of the screen, and two ball targets were displayed at both ends of the screen in the lower half. The task was to look at one of the ball targets cued either by the eye movement of the partner or by the change in color of the ball target. Two (ball/eye cue) x two (shared/nonshared attention) factorial design was used. Ball cue provided simultaneously to both participants was set as control condition. Participants were required to keep eye contact during the experiment except above 5 task conditions.

Functional MRI data were obtained using T2\*-weighted gradient echo, echo planar imaging sequences of a 1.5T or 3T MR imager. Individuals with ASD were set in the 3T MRI whereas those with normal were set in the 1.5T MRI. The data were analyzed using SPM8. After the estimation of individual task-related activation, we conducted a 3-way analysis of variance using a random effects model.

## **Results**

Behavioral results showed that accuracy of eye-cued condition of the ASD group ( $74.2 \pm 1.9\%$ ) was significantly lower than that of control normal group paired with ASD ( $87.8 \pm 1.9\%$ ), and other two normal groups ( $97.9 \pm 2.1\%$ ,  $98.2 \pm 2.1\%$ , respectively) of the previous study. Significant difference was also shown in between control normal group paired with ASD and other two normal groups of the previous study. No statistically significant differences were observed in ball-cue condition.

Imaging results showed that eye cue effect was observed in the bilateral occipital cortex, posterior superior temporal sulcus (STS), posterior rostral medial prefrontal cortex (MFC), and right inferior frontal gyrus (IFG) in normal participants. The direct comparison of eye cue effect between ASD and normal

group showed that the activation in the occipital cortex was reduced in ASD. In contrast, the comparison between the normal group paired with ASD and that paired with normal ones, greater activity was observed in the bilateral occipital cortex and right IFG, indicating that more workload of following the other's eye is necessary if the partner is individual with ASD. No significant difference was observed in ball cue conditions.

### **Conclusion**

Individuals with ASD showed less activation of the occipital cortex by eye-cued gaze. In contrast, normal individuals paired with ASD showed greater activity of the occipital cortex and right IFG. These results indicate that right IFG and visual area have an important role for gaze following, and reduced activity of visual area might be one of the causes of poor performance of joint attention in ASD.

### **Reference:**

Saito, D.N. (2010), "Stay tuned": Inter-individual neural synchronization during mutual gaze and joint attention', *Front. Integ. Neurosci.*, vol. 4, article 127.

# 他者の行動観察による模倣学習の神経基盤

三浦直樹 (東北工業大学)

共同研究者：長井謙治 (東京大学総合研究博物館)、田邊宏樹 (名古屋大学・生理学研究所)

赤澤威 (高知工科大学)、定藤規弘 (生理学研究所)

## 1. はじめに

ヒトの社会学習能力を解明する事は、人類の歴史における文化や技術の継承が如何にされてきたかを明らかにする上で非常に重要である。ヒトは他者の行動の観察や模倣等といった、他者との社会的な相互作用を介して未知の情報を学習する事が出来、それらの社会的相互作用を介して他者の意図を理解する事で、未知の知識や技術の有用性を自らの知識として獲得する事が出来る。死して、そのような情報伝達の蓄積により文化や技術の継承が実現されていると考えられるからである。

このようなヒトの社会学主脳力を明らかにする上で脳機能計測は非常に有用な手法であり、石器製作を対象とした脳機能計測実験も行われてきている(Stout and Chaminade, 2007)。これまでの認知神経科学の研究から、他者の行動の観察・模倣に関わる神経基盤としてミラーニューロンシステムの存在が知られており(Buccino et al., 2004)、これは言語や道具使用とも密接に関連する事が報告されている。しかしながら、未知の技術を他者との相互作用を介して学習する際に、ミラーニューロンシステムがどう関与するかは分かっておらず、特に社会学習による技術獲得を実現する神経基盤が、言語学習を実現する神経基盤とが共通の要素を持っているかは調べられていない。そこで本研究では、他者の行動の観察により未知の技術獲得する際の脳活動を機能的MRIにより測定する。そして学習時に生じる脳活動に言語情報を学習する際の脳活動と共通の要素があるかどうかについて解析を行う。

## 2. 方法

fMRI 実験には、実験について書面と口頭で説明を行った後に、書面による同意書を得た24名の健康成人が参加した。実験方法については、自然科学研究機構生理学研究所の倫理委員会の承認を得ている。

実験課題としては、被験者には画面に提示される映像を視聴しその内容を覚える事を行わせた。実験映像には打製石器の製作過程を録画した映像クリップまたはウズベク語の単語を発話している男性の顔の映像を用いた。映像の長さは各1秒で、石器製作映像では打割りをする等のある一工程、ウズベク語映像では一単語の発話が提示され、映像

と映像の合間には画面の真ん中に十時の固視点が表示された。また視覚刺激の統制条件として、石器製作映像とウズベク語発話映像の静止画を提示する条件を組み入れた。被験者は映像を見てその動作や発音を記憶するよう教示され、またその学習程度を評価するために fMRI 実験後に事後テストとして映像の内容を実演するテストを行う事があらかじめ教示された。また実験中の被験者の覚醒度合いを確認するために、時折固視点の色を変化させ、変化に気づいたら右手に持ったボタンを押すよう教示した。

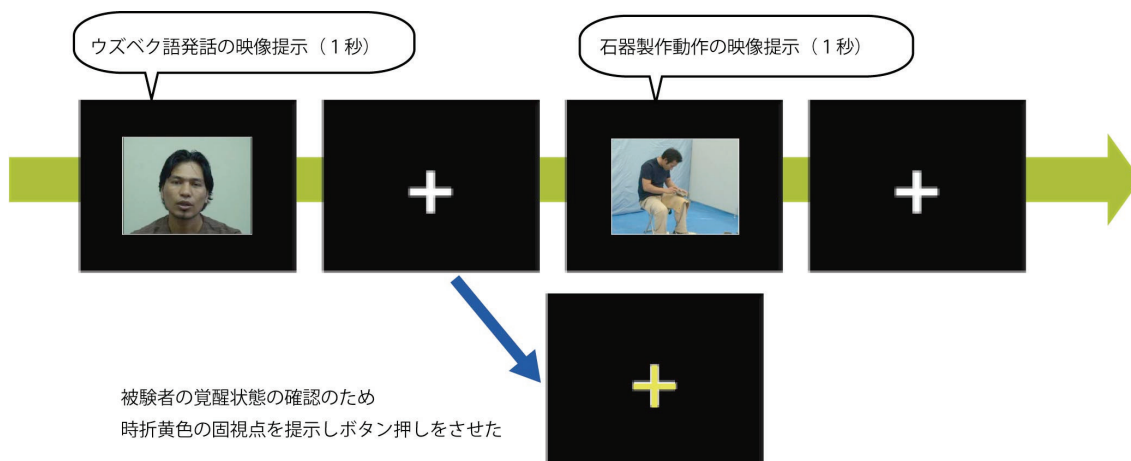


図 1. 実験用視覚刺激の時間変化

fMRI による撮像は 4 回に分けて行われ、被験者は 1 回の撮像当たり 15 種類の石器製作映像とウズベク語単語映像を 2 度繰り返して観察した。従って実験を通じて同じ映像を 8 回繰り返して観察する事となった。撮像は生理学研究所の 3-T Siemens Allegra MRI スキャナーを用いて行われ、fMRI 撮像の後に全脳の構造画像についても撮像を行った。

データ解析には、fMRI 研究において標準的な手法である Statistical Parametric Mapping ソフトウェアを用いて行った。参加した被験者のうち fMRI 撮像時の頭部の反応の大きさや課題への反応等の基準を用いて 6 名の被験者のデータを除外し、18 名のデータを用いて以後の解析を行った。データ解析は、被験者内解析と被験者間解析の二段階に分けて行われた。被験者内解析では、一般線形モデルを用いて石器製作やウズベク語発話の各映像を観察しているとき、各々の静止画を観察しているとき、固視点の色の変化に気づきボタンを押したときに関連した脳活動変化が生じると仮定し、計画行列の作成を行った。その上で重回帰分析により仮定したモデルと相関する脳領域の特定を行った。被験者間解析では 2 要因因子デザインを用いて、観察する映像の違いが脳活動変化に与える影響、および繰り返し観察が脳活動変化に与える影響について解析を行った。統計閾値は Family-wise error による補正を行った上で 5% 未満とした。

### 3. 結果と考察

図2に石器製作映像観察時に、ウズベク語発話映像観察時よりも有意な脳活動が得られた領域、図3にウズベク語発話映像観察時に、石器製作映像観察時よりも有意な脳活動が得られた領域を示す。これらの図は脳活動変化が典型的に現れたある被験者の脳活動を標準脳テンプレート上に写像したものである。

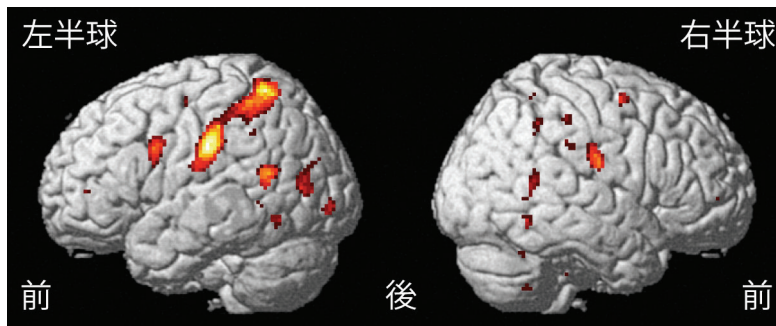


図2. 石器製作映像観察時に有意な脳活動が得られた脳領域

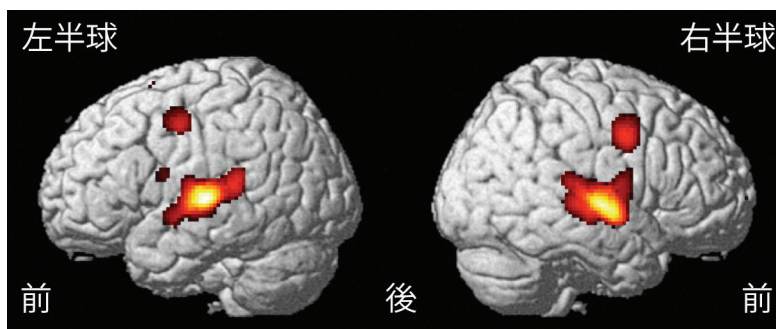


図3. ウズベク語発話映像観察時に有意な脳活動が得られた脳領域

図2・3からも分かる通り、石器製作動作を観察している際には、両側の頭頂葉から前頭葉にかけての多くの脳領域に有意な活動が認められた。これらの領域は他者の動作理解とも関連の深い領域であり、ミラーニューロンシステムとして報告されている脳領域とも一部重複している。従って、石器製作の動作を観察しそれを理解するために認知活動を反映したものと考えられる。一方で、ウズベク語の単語聞き取りを行っている際には、特に聴覚刺激の処理と関与する両側の上側頭回と、前頭前野において発音の処理に関する領域に有意な脳活動が認められた。ウズベク語発話の観察時には、また、両者の共通した活動領域としては、他者の認知や運動の知覚と関連する後側側頭領域 (Grossman et al., 2002) に有意な活動が認められた。

石器製作動作を繰り返し観察する事によって生じる学習を反映した脳活動変化は右側小脳に観察され、ウズベク語単語学習においては、左側上側頭回に反復学習を反映した脳活動変化が観察された。これまでの脳機能計測研究で、右側小脳は運動制御のための内部モデルの構築と関与する事が報告されており (Imamizu et al., 2000)、また左側上側頭回は知覚する聴覚刺激の学習に応じて活動が変化する事が報告されている (Rauschecker et al., 2008)。従って、他者の行動観察による学習の場合、一部共通した神経基盤が存在するものの、観察する他者の行動から何を獲得すべきかに応じて、異なる脳領域の活動変化が生じる事が認められた。

## 引用文献

- Buccino, G., Vogt, S., Ritzl, A., Fink, G.R., Zilles, K., Freund, H.J., Rizzolatti, G. 2004 Neural Circuits Underlying Imitation Learning of Hand Actions: An Event-Related fMRI Study. *Neuron*, 42: 323-334.
- Grossman, E.D., Blake, R. 2002 Brain areas active during visual perception of biological motion. *Neuron* 35: 1167-1175.
- Imamizu, H., Miyauchi, S., Tamada, T., Sasaki, Y., Takino, R., Puetz, B., Yoshioka, T., Kawato, M. 2000 Human cerebellar activity reflecting an acquired internal model of a novel tool. *Nature* 403:192-195.
- Rauschecker, A.M., Pringle, A., Watkins, K.E. 2008 Changes in neural activity associated with learning to articulate novel auditory pseudowords by covert repetition. *Human Brain Mapping*. 29: 1231-1242.
- Stout, D., Chaminade, T. 2007 The evolutionary neuroscience of tool making. *Neuropsychologia* 45: 1091-1100.

## 関連業績

- Miura N, Akazawa T, Yamazaki M, Nagai K, Yoshida Y, Tanabe HC, Sadato N. Learning effect on cortical activity during implicit imitation of bimanual tool production and word speech. 17th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping, Quebec, Canada, June 2011.

# A neural mechanism of social learning through an observation of other's behavior

**Naoki Miura**

Faculty of Engineering, Tohoku Institute of technology

**Kenji Nagai**

The University Museum, The University of Tokyo

**Hiroki C. Tanabe**

Graduate School of Environmental Studies, Nagoya University

**Takeru Akazawa**

Research Institute, Kochi University of Technology

**Norihiro Sadato**

Department of Cerebral Research, National Institute for Physiological Sciences

A determination of cognitive ability of social learning is a keystone for explaining transmission of technology or culture. Especially, imitative learning, which constitutes a major part of social learning skills, is specific to humans. In this study, we focused a neural mechanism to learn the construction of a Mousterian stone tool by an observation of the others' behavior, and a contribution of the linguistic ability to the mechanism. For this purpose, we used functional magnetic resonance imaging to investigate a cortical activity during a repetitive observation of the stone tool-making, and that of unknown word-pronunciation.

Our result showed that the learning-related activation change during observing the stone tool-making was shown in the right cerebellum and that of word-pronunciation was shown in the left superior temporal gyrus. It indicate that the progress of imitation learning by observation for the stone tool-making and word-pronunciation were involved cortical activity on different neural network, and the network was dependent on the information which the subject focused to learn.



## Learning effect on cortical activity during implicit imitation of bimanual tool production and word speech

Naoki Miura<sup>1</sup>, Takeru Akazawa<sup>2</sup>, Mika Yamazaki<sup>3</sup>, Kenji Nagai<sup>4</sup>, Yumiko Yoshida<sup>3,5</sup>, Hiroki C. Tanabe<sup>3,5</sup>, Norihiro Sadato<sup>3,5</sup>.

<sup>1</sup> Department of Information and Communication Engineering, Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology, Sendai, Japan.

<sup>2</sup> Research Institute, Kochi University of Technology, Kami, Japan.

<sup>3</sup> Division of Cerebral Integration, Department of Cerebral Research, National Institute for Physiological Sciences, Okazaki, Japan.

<sup>4</sup> The University Museum, The University of Tokyo, Tokyo, Japan.

<sup>5</sup> Department of Physiological Sciences, School of Life Sciences, The Graduate University for Advanced Studies (Sokendai), Hayama, Japan.

### Introduction

Imitative learning, which constitutes a major part of social learning skills, is specific to humans; however, its neural substrates have not yet been fully elucidated. In particular, elucidating the basis of imitative behaviors involves understanding sensory-motor integration, in other words the integration between the perceived intent of actions and the actions themselves. These features of imitative learning are likely to have different roles and be represented in different brain areas. In this study, we investigated a brain activity during observing novel and intentional hand action using functional magnetic resonance imaging (fMRI). And, we compared it with an activity during observing novel word pronunciation to clarify a difference of neural process between observation and imitation of body action and unknown word pronunciation and its learning effect.

### Methods

Eighteen healthy Japanese volunteers participated. All participants gave written informed consent to an experimental protocol approved by the Ethical

Committee of the National Institute for Physiological Sciences. The fMRI experiment was consisted with four sessions of actual measurement and one practical session. During fMRI sessions, all participants observed 15 moving pictures and a still picture of bimanual hand action for stone tool making, and 15 moving pictures and a still picture of the pronunciation of Uzbek word. Each moving picture was presented twice in each session. In total, the participants were observed same moving picture eight times. The participants were instructed to observe the pictures and to memorize the content of those action or pronunciation. And, to assure their consciousness for the task, the participants were also asked to imitate those presented actions and the pronunciation of the words with video recording immediately after the fMRI measurement. The fMRI data analysis was conducted using a random effect model in SPM8. Specific activation during observation of the bimanual hand action and word pronunciation were analyzed at group level. Furthermore, a repetition suppression of task-related activation was also analyzed to detect a learning effect of observed hand action or pronunciation.

## **Results**

We obtained the significant activation of parieto-frontal network during observing the bimanual hand action for stone tool making. By contrast, the activations of the inferior part of dorsal premotor area and superior temporal gyrus were found during observing the Uzbek word pronunciation. The repetition suppression effect was showed a region in the right posterior part of cerebellum, which was suggested the involvement of motor sequence learning (Orban et al., 2010), for stone tool making, and left superior temporal gyrus, which was shown a learning effect on the perception of auditory stimuli (Raucheker et al., 2008), the for Uzbek word pronunciation, respectively.

## **Conclusion**

Those results indicate a differential neural response for the focused information that the participants tried to learn. That is, the subject paid their attention to the motor sequence to imitate observed bimanual hand action. By contrast, the subject focused to the phonological components to imitate the

spoken word. Thus, the leaning related suppression on cortical activation was observed at different region.

**References:**

- Orban, P., Peigneux, P., Lungu, O., Albouy, G., Breton, E., Laberenne, F., Benali, H., Maquet, P., Doyon, J. (2010), 'The multifaceted nature of the relationship between performance and brain activity in motor sequence learning', *Neuroimage*, vol. 49, no. 1, pp. 694-702.
- Rauchecker, A.M., Pringle, A., Wtkins, K.E. (2008), 'Changes in Neural Activity Associated With Learning to Articulate Novel Auditory Pseudowords by Covert Repetition', *Human Brain Mapping*, vol. 29, no. 11, pp. 1231-1242.

# 打製石器作成時の熟練技術者の身体動作解析

星野孝総（高知工科大学）・三浦直樹（東北工業大学）

共同研究者：長井謙治（東京大学総合研究博物館）

## 1. はじめに

本研究計画の最終目標は、ネアンデルタール人がその社会環境下で行っていたと考えられる学習行動の神経基盤を明らかにする事である。その中でも個体間での道具製作技能の伝達などに関与する「社会学習」の重要な一形態である模倣学習に焦点を当て、その神経機序を明らかにする事を目的とする。

このような学習行動を明らかにするためには、学習の進展と学習行動の産物との対応を取る事が必要となるため、本研究計画では学習行動の痕跡が博物誌料として残る石器製作の学習を対象とする。そして学習の進展を評価するために、ネアンデルタール人が用いたと考えられる石器製作技法であるルヴァロア技法による石器製作行動における熟練の要素化を試みる。

ヒトが技術や知識を習得する時、暗黙知と形式知が関係している。形式知は明確に言語化できる知識のことを示し、暗黙知は逆に明確に言語化できない知識のことを指す。言い換えれば、経験者の勘や知識といったものである。知識や技術を効率よく取り出すことができるのなら、その伝承において大いに役に立つと思われる。形式知を獲得するためには社会学習・模倣学習が必要であり、獲得した形式知を個人の技能により実現するためには、個体学習・試行錯誤学習が必要となる。

本研究では、モーションキャプチャーを用いて、熟練技術者が反復ルヴァロア技法によりルヴァロア剥片類を製作する際の身体動作の3次元動作計測を行い、熟練技術者が身体動作にどのように表象されるかについて分析を行った。このような運動解析から反復ルヴァロア技法での技能レベルについて動作の観点から解析し、運動学習における難易度と骨格との関連性について検証する。具体的には、(1) モーションキャプチャーを用いて熟練者の反復ルヴァロア技法での石器製作過程をデータ化し、ルヴァロア剥片類の獲得を宣言して打撃した動作の速度解析とその衝撃を考察する。(2) 取得したデータから骨格がどのように動いているかを解析するためのCG動画ソフトを開発し、ホモサピエンスモデル構築を進める、の2つのテーマについて研究を進める。

## 2. 方法

今回の実験では、採取された加工が行われていない状態の母岩から、反復ルヴァロア

技法を用いて複数のルヴァロア剥片類を製作する一連の製作過程を対象とし、熟練技術者一名による二回の製作過程について動作計測を行った（図1）。石器製作者は、加工に際しどのような意図を持って加工を行うかについて発話することとし、その発話内容は筆記記述およびビデオによって記録された。製作により得られた約2 cm以上の剥片は、どの加工動作によって作成されたかについて記録され、接合分析等の考古学的分析に利用できるように保存された。



図1. 石器製作実験風景

3次元動作計測には、光学式モーションキャプチャシステム Visualeyez3000（Phoenix Technologies 社製）を用いた。この装置は、計測対象者に装着するLEDマーカと位置計測用トラッカー、制御用PCから構成される。LEDマーカ位置計測の時間分解能を約0.02[sec]、空間分解能を0.1 [mm]に設定し計測を行った。本実験では、計測対象となる石器製作者が移動しないこと・上肢の運動が主計測対象となることを考慮し、3個の位置計測用トラッカーを図2に示すように石器製作者の前方および左右に配置した。LEDマーカは、石器製作が両腕の協調運動でかつ複合間接運動であること、さらに右手でハンマーストーンを操作することを考慮し、石器製作者の右肩に3個・両肘に各2個・両手甲に各4個のLEDマーカを配置し、さらに基準点として胸部に1個、両膝に各1個のLEDマーカを配置した。

動作計測とあわせて、石器製作者の前方・右側方・後方からの見下ろし視点の三方向からビデオ撮影を行い、後の聞き取り調査・分析で用いることとした。また今回の実験では、重さの異なる4種類のハンマーストーンが用いられたため、動作計測終了後に、撮影ビデオを用いて記録資料の確認を行い、どの加工動作をどのハンマーストーンで行ったか等について記述を行った。

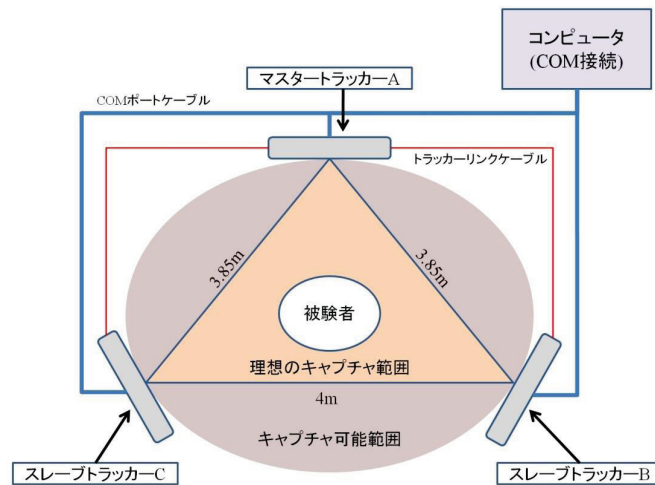


図2. 被験者とモーションキャプチャーの配置図

計測された身体動作の軌跡データについて、今回の報告ではルヴァロア剥片類の獲得を宣言し打ち込んだ動作（LF 動作）に関して手先速度の解析を行った。LF の獲得には最も計画性が要求され、一点の打点ポイントに最も高速に打ち込み LF を獲得するプロセスである。したがって、そこまでの石の整形や打点ポイントの見極めが重要である。

### 3. 結果と考察

被験者から取り出したモーションのデータを解析し、LF 動作時の最大速度を算出した結果が図3である。試行回数毎に比較した際の最大速度の最小値は 2.55m/s であり、最大値は 4.53m/s であった。また最高速度の平均値は 3.36m/s であり、ばらつきは±0.25m/s 程度であった。このことから各 LF 動作に関して同じような速度で打ち抜いていることが観察された。このデータとハンマーストーンからどの程度の衝撃になるのかを算出することが出来る事から、記録された打面形状とその時の運動学的情報から、被験者がどのような意図を持って加工動作を行ったかを考察する事が可能になると考えられる。

表 1. 各 LF とトップスピードの関係

番号	速度 (m/s)	コメント
LF13	3.51	
LF15	3.37	
LF19	2.87	
LF30	3.04	
LF32	3.18	
LF35	2.55	数回軽く叩いて 1回強打して砕いた←た腕の振りが小さい
LF36	3.36	
LF38	3.69	
LF39	3.14	
LF42	2.74	
LF43	4.53	3回強打して右を砕いた
LF44	3.37	
LF47	3.85	
LF51	3.88	
	3.36	平均の速度 (m/s)
	0.50	標準偏差
	0.25	分散

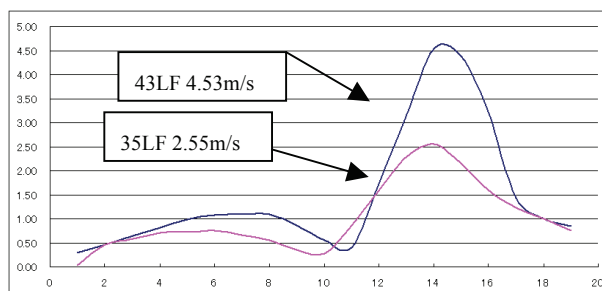


図3. 43LF と 35LF のハンマーストーンのスPEED比較

実験に用意したハンマーストーンは4種類であり、LF動作時には主に115gのストーンが使われていた。これはコーヒーカップ程度の重さであり、比較的軽量であるため、LF動作時の高速打撃において打点ポイントへの制御はかなり容易であると考えられる。また、軽量であるためかなり高速で打撃をしないと石を割ることは出来ない。次に速度の差から打点ポイントへの打ち込みには大きな速度差が見られる。熟練者の過去の経験から来る試行錯誤によりこの技術を習得している。またLF動作時のLEDマーカの軌跡の分析結果より、目的加工物であるルヴァロア剥片類を剥離する意図を持って加工を行う過程では、他よりも腕を振る軌跡が大きくその動作軌跡のばらつきが小さい事が認められた。従って、非常に正確に大きな力を加える必要があるルヴァロア剥片類の剥離加工において、身体動作が熟練により収斂されて最適な加工動作がなされている事が示唆された。これは他の石器加工動作の分析研究においても同様の事が報告されている(Biryukova et al., 2005)。

それに加えて、被験者が行っているハンマーストーンを振り下ろす動作は、肘から先だけを用いて振り下ろすような単関節運動ではなく、手首・肘・肩の関節を複合的に協調運動させる事によって、最適な加工動作および打面に過不足無く力を与える事を実現している事が観察された。これは被験者が自身の体格や筋肉量等の条件の中で、打割りに必要な力を生じさせる運動を実現するために、暗黙のうちに最適と考えられる戦略をとり獲得したものと考えられる。この事は武道の熟練者においても同様の事が報告されており、小脳の微細構造に学習を反映した変化が認められる事が報告されている(Roberts et al., 2012)。

一方、新人と比較して身体構造が大きかったと考えられるネアンデルタール人では、骨格が被験者よりかなり大きかったと予測できる事から、単純な動作でも同様の力を産出できたと推測でき、打撃動作の学習に関して時間をかけた学習をせず、容易に習得できていたと思われる。したがって打割り動作だけをみれば、短期間の個体学習のみで実

現できたと考えられ、社会的継承なく伝統的な技法となりえたと推測できる。一方、ルヴァロア技法の手順的な側面については形式知である事が推測できるから、各個体が独自に獲得したと考えるよりは、周囲の他者の石器作成を模倣して学習したと考えるのが自然であろう。なぜなら形式知の獲得には、ネアンデルタール人の体格的な利点を生かすことは出来ないためである。そこで彼らは社会的な模倣が必要であったと考えられる。また、これらの個体内での技術的な成熟には個体学習の能力が求められ、成熟には試行錯誤的な時間が必要である。どれだけの時間が必要となるのか不明であるが、ネアンデルタール人の寿命が平均的に短命であったことを考えれば、彼らの人生のほとんどをこの習得に費やしていたのではないかと推測する。

#### 4. オリジナル CG 解析ソフトの開発

モーションデータの解析及び、描画による検証を目的として、本研究用のオリジナル CG 解析ソフトを開発している。モーション取得時のデータから各点の動く方向・速度・加速度などのデータを取り出し、CGやグラフにするソフトウェアであり解析も行える。今後はこのソフトウェアの開発を進め、現在のデータからネアンデルタール人の骨格に近づけた場合のモデル構築を行う予定である。

#### 引用文献

- Biryukova EV, Bril B, Dietrich G, Roby-Brami A, Kulikov MA, Molchanov PE. The organization of arm kinematic synergies: the case of stone-bead knapping in Khambhat. Stone knapping, eds. Roux V and Bril B. McDonald Institute Monographs. 73-89. 2005.
- Roberts RE, Bain PG, Day BL, Husain M. (2012) Individual Differences in Expert Motor Coordination Associated with White Matter Microstructure in the Cerebellum. Cerebral Cortex. 2012 Aug 14. [Epub ahead of print]



# A motion analysis of an expert's action during a construction of stone-tool by the Levallois technique

**Yukinobu Hoshino**

School of Engineering, Kochi University of Technology

**Naoki Miura**

Faculty of Engineering, Tohoku Institute of Technology

**Kenji Nagai**

The University Museum, The University of Tokyo

It is important to analyze how skill is acquired, in order to understand human's learning ability. In this study, we analyzed a difference of kinematic information of hand motion between each procedure to construct a stone-tool by the Levallois technique from a 3D motion data measured from a skilled subject. As a result, maximum velocities of the striking operations which make a flake like a Levallois flake is faster than that of another kinds of operations. Furthermore, a track of the right hand of the striking operations to make a flake like a Levallois flake showed a small variation. And, track of each arm joint showed that the striking operation is a multi-articular motion to obtain the stronger striking force. Thus, these results suggest that the skilled subject performed optimal body motion control to acquire large striking force. And, it is considered that the subject learned the optimal motion strategy to acquire large striking force under the limitation of his own physique or the amount of muscles.

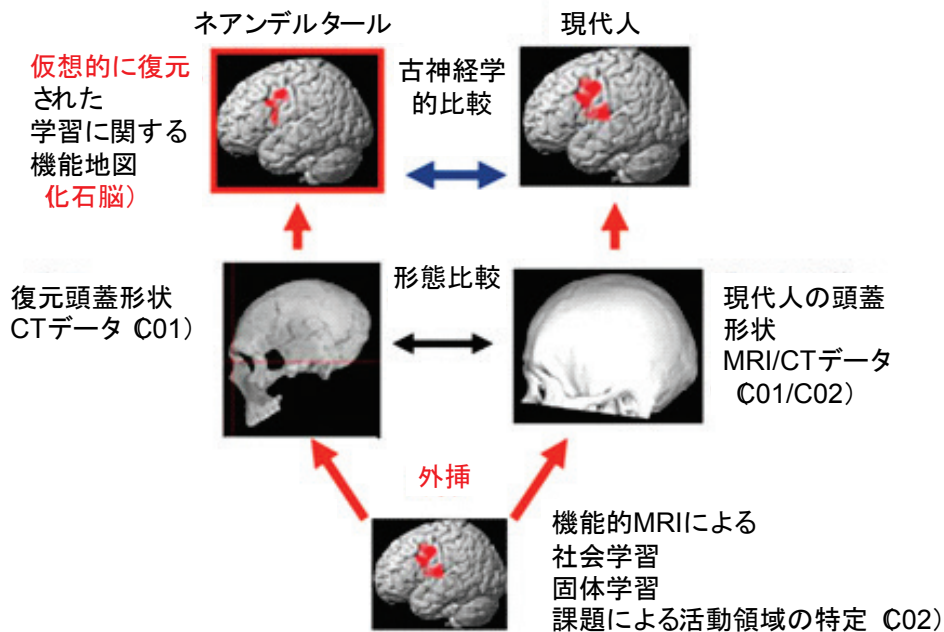
From the previous anthropological findings, the Neanderthals were estimated to have had larger body and muscular strength compared with the modern humans. The Neanderthals may easily learn the stone knapping action itself, because they can easily produce the large striking force. By contrast, an acquisition of the procedure of the Levallois technique may require the social learning from the other individuals. Therefore, it is necessary to evaluate the difference among the Neanderthals and modern humans in the process in which skill is acquired.

# 計算論的解剖学を利用した化石脳頭蓋骨から脳実質の再構成

河内山隆紀（京都大学 霊長類研究所）

共同研究者：田邊宏樹（名古屋大学・生理学研究所）、荻原直道（慶應義塾大学）

本研究グループでは、旧人の化石脳の形態解析結果と現代人の脳機能地図を統合し、その違いから旧人・新人の学習能力差を検討している。ここで重要となるのが、現代人脳機能地図を旧人の化石脳へ写像する手法の開発である。我々は、脳イメージングにおける計算論的解剖学的手法を用いて、全脳の形態情報に基づいた写像法の開発を試みている。具体的には、まず、化石脳の CT 画像から得られる頭蓋形状を MRI 画像から得られる現代人の頭蓋形状へ変形する。ここでは非線形形態変換（例えば、DATREL 法）を用いて、2つの形状の間の滑らかで連続的な 1 対 1 写像（変形場）を推定する。推定した変形場を用いて、現代人の MRI 画像から得られた脳実質を逆変換することで旧人の脳実質を得る。同様に、現代人の脳活動地図に変形場を適用することで、旧人の脳活動地図を推定することもできる（図 1 に C01/C02 班を中心とした研究の概要を示す）。本報告では、昨年度より行っている手法開発のための基礎実験についての成果を紹介し、今後の展開について言及する。



## 研究 1：現代人の頭蓋データを用いた個体間での脳の交換可能性の検討

本研究の目的の達成のためには、現代人の脳を化石脳の頭蓋内に入れ込む為の最適な変換パラメータを推定しなければならない。ここには幾つかの技術的課題がある。第一は、特性の異なる画像データの取り扱いの問題である。現代人の脳の形態情報は基本的に MRI 画像で与えられ、化石脳については CT 画像で与えられる。また厳密に言えば、現代人の脳の実質（灰白質・白質）については MRI 画像で、頭蓋は化石脳と同じく CT 画像から得る。これら特性の異なる画像データ間で変換を推定しなければならない。第二は、変換の精度の問題である。通常の計算論的解剖学が対象とするのは脳実質（灰白質・白質）データであるが、本研究では、それらに比べて多くの形態情報が欠落した頭蓋データを用いる。このような特殊な状況で、どの程度の精度が確保できるのか検討する必要がある。また、変換アルゴリズムの初期パラメータを頭蓋データ用に最適化する必要もあるかもしれない。前者に対しては、後述するように、今後、復元化石脳の提供を受ける予定である C01 班との連携のもと研究を継続している。研究 1 では、後者の頭蓋データを用いた計算論的解剖学に関する評価実験について報告する。評価実験は、現代人の脳を用いて行った。MRI 画像から推定して得られた頭蓋骨画像を利用して、任意の現代人の脳を他人の頭蓋内に入れ込む為の変換が可能かどうか検討した。

被験者は健康な成人男女 15 人である。実験は、生理学研究所の倫理委員会の承認を得ている。各被験者には実験の詳細を説明した後、インフォームド・コンセントを得た。生理学研究所に設置された 3T MRI 装置（シーメンス社製 Allegra）を利用して、通常の T1 強調画像を撮像した。撮像パラメータは以下の通り。撮像シーケンス：MPRAGE; TR=2500 ms; TE=4.38 ms; inversion time = 1100ms; FA = 8°; FoV = 230 mm; 1 slab; number of slices per slab = 192; voxel dimensions = 0.9 × 0.9 × 1.0 mm.)。

解析には、MATLAB (Mathworks Inc., Natick, MA, USA) 上で動作する、Statistical Parametric Mapping package (SPM8; Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK) を利用した。解析の手順について説明する。まず各被験者の T1 強調画像に対して Segmentation-Normalization を適用して灰白質・白質・脳脊髄液・頭蓋・頭表の画像を得た。次に DARTEL 法を用いて、各被験者の頭蓋画像から全員の平均頭蓋画像への標準化変換を推定した。頭蓋形状による変換の精度を比較検討するために、脳実質（灰白質・白質）画像から全員の平均脳実質画像への標準化変換も推定した。ここで DARTEL 法は、異なる脳形状間の滑らかで連続的な 1 対 1 写像（変形場）を推定する手法であり、正確な逆変換を推定できる特徴を持っている。次に、被

験者 1 から平均脳への変換と平均脳から被験者 2 への逆変換を合成して、被験者 1 の脳を被験者 2 の脳に変換するための合成変換を作成した。図 2 に解析手順を示した。

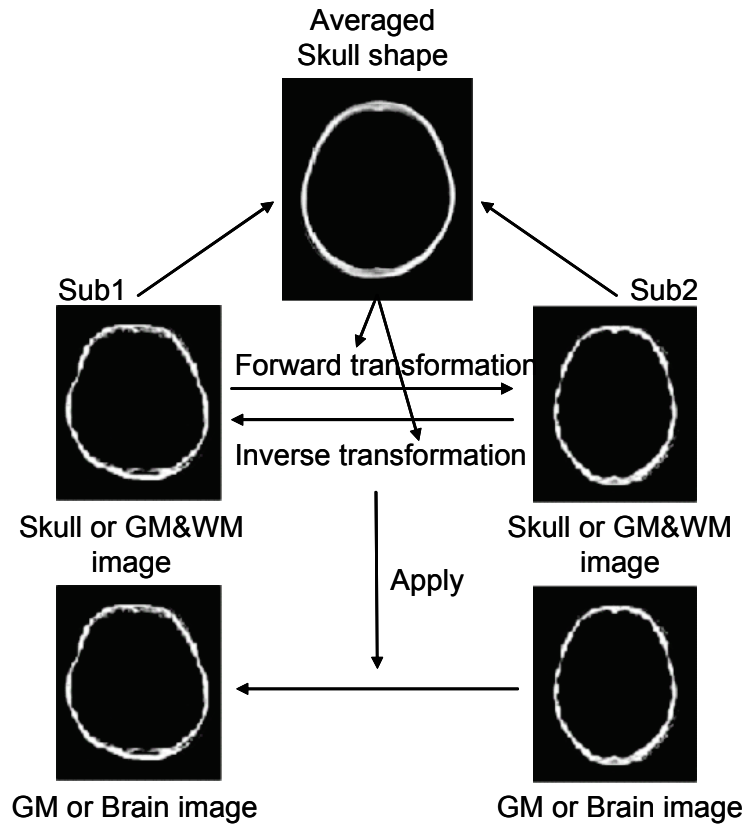


図 2 個体間での脳形態変換の解析プロトコール

脳実質に基づく変換の場合、変換後の被験者 1 の脳は、被験者 2 の脳に非常に類似していた (図 3)。基底核などの脳深部構造の形状及び位置まである程度正確に再現することができた。変換前後で被験者 1 の脳構造のトポロジーが保存しているので、微細構造については必然的に差異がある。頭蓋に基づく変換の場合、脳の全体的な形状や脳表面に近い部分は被験者 2 の脳に見えるが、回や溝の配置や深部構造については、あまり一致していない。この結果より、頭蓋画像に基づく現代人から旧人への変換によって、脳の全体的な形状については再現ができる可能性が示唆された。しかしながら、内部構造については、限界が明らかになった。旧人の脳の内部構造に関する情報はほとんどない状況であり、別の推定方法が必要であろう。例えば、現代人の個体間変換より推測する、頭蓋形状から内部構造を予測するようなモデルを構築するなどが考えられる。

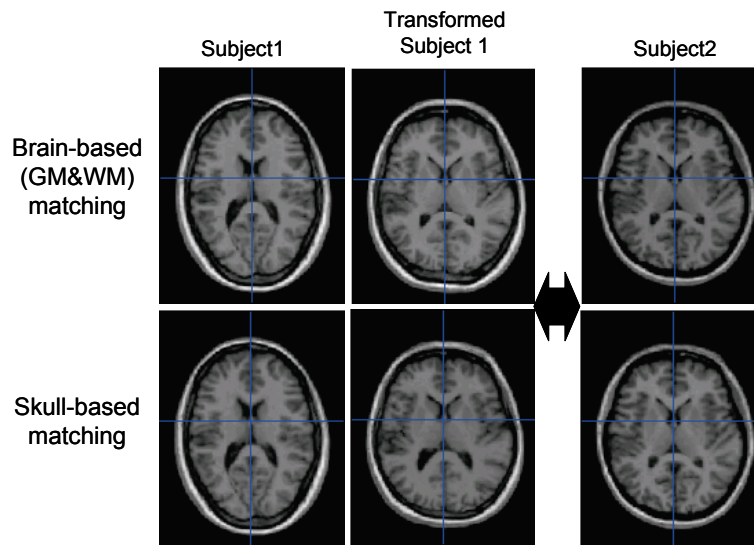


図 3 個体間での脳形態変換の結果。上段は脳実質（灰白質・白質）に基づく変換による被験者 1 の脳の被験者 2 の形態への変換。下段は、頭蓋に基づく変換による。

## 研究 2：頭蓋データに基づいた脳形態変換による脳機能地図の変換精度の検討

仮に現代人と化石脳の間で頭蓋形状に基づいた変換を構築できたとして、次に必要となるのは、現代人の脳機能地図の化石脳上への復元である。手法的には、研究 1 で導入した計算論的解剖学が基本的に利用できる。しかしながら、復元に用いる変換も頭蓋形状に基づいて推定されたものであるから、その精度においては、研究 1 と同様な限界がある。もちろん、研究 1 で対象とした構造画像と脳機能地図の間には、空間解像度に大きな違いがある。脳機能地図は大量現代人の脳活動画像を平均化して得られるものであり、しかもその計測原理である機能的磁気共鳴画像法（fMRI）は、血流動態を計測しているため、空間解像度は構造画像に比べて低い。そのため、頭蓋形状による変換精度への制限が緩和される可能性もある。そこで研究 2 では、頭蓋形状に基づく形態変換によって fMRI データした場合に、どの程度の精度で活動部位が特定できるのか評価した。

具体的には、視覚認知課題に関する複数被験者の平均的脳地図を作成する際に、脳形態の標準化を脳実質の形状で行った場合と頭蓋形状で行った場合で、結果として得られる活動パターンを比較した。

被験者は健常な成人男女 15 人である（研究 1 の被験者と同一）。実験は、生理学研究所の倫理委員会の承認を得ている。各被験者には実験の詳細を説明した後、インフォームド・コンセントを得た。

実験装置及び構造画像の撮像パラメータは、研究 1 と同一である。機能画像には、以下の撮像パラメータを用いた。撮像シーケンス：Gradient-echo echo planar imaging; TR = 2500ms; TE = 30ms; Flip angle (FA) = 80deg; matrix size = 64\*64; slice 枚数 = 39slice; voxel size = 3\*3\*3.51 mm; Slice acquisition order = Ascending; 全 130 volume。

実験課題には、単純な視覚認知課題を用いた。実験刺激は、プロジェクターにより MRI 装置内に設置されたスクリーン上に投影された、顔、体、風景、車の 4 種類のモノクロ写真である。被験者は、画面中央の固視点を注視しており、実験刺激とは無関係の赤色+マークの検出するダミー課題を行った。本報告では、安静条件に比べて顔条件で活動する領域に着目した。

解析には SPM を用いた。機能画像の解析には標準的な解析プロトコールを用いた。標準化は、研究 1 と同様に DARTEL 法で行った。各被験者の頭蓋画像あるいは脳実質（灰白質・白質）から全員の平均頭蓋画像あるいは平均脳実質（灰白質・白質）画像への標準化変換を推定した。推定された変換は、各被験者の構造画像と統計解析で得られた顔条件と安静条件の差分機能画像に適用し、それぞれ標準化した画像を得た。全員分の差分機能画像を用いて集団統計を実施して、（顔視覚処理に関する）平均脳活動地図を得た。また比較のため、上記の標準化を行わず全被験者の個人脳画像を単純に平均した場合の平均構造画像と平均脳活動地図も作成した（平均に先立って、各被験者の画像の原点位置は被験者間でできるだけ揃えた）。

図 4(a)に平均構造画像を示した。脳実質による標準化では 15 人の平均脳であるにも関わらず溝や回の構造がはっきりとわかる。頭蓋の形態情報のみによる標準化では、脳実質の場合に比べて、大部分の回や溝の構造は拡散し消失している。しかしながら、シスビウス溝や中心溝など目立った大きな構造は確認できた。またこの場合、変換の際に脳の内部構造の情報は使われていないにも関わらず、脳室や基底核の形状にもある程度の一致が見られた。単純平均の場合には、画像が全体的に滑らかな大部分の構造は消失している。

図 4(b)は集団解析の結果得られた平均脳活動地図である。意外にも、どの平均脳活動も同じような空間的活動パターンを示した。特に、脳実質に基づいた変換画像と頭蓋に基づいた変換画像では、活動クラスターの位置及び広がり目視による差は見られなかった。頭蓋に基づいた変換画像では、推定の際に、皮質下領域を含む脳中心部の情報を

使っていないにもかかわらず、脳実質に基づいた変換画像と同様の活動領域を検出した。一方、単純平均画像では、活動領域は他の変換画像に比べて平滑で広がっていた。

構造画像については、頭蓋形状を揃えることで、少なくとも単純平均に比べて、大きな回や溝の構造を含めた全体的な形態を揃えることが出来た。変換の歪み場を調べると、頭蓋に基づく変換では、脳の深部構造は、脳の全体的な大きさに比例して中心から外に向かって放射的にかつ線形的に拡大・縮小していた。このような比較的単純な変換によって、ある程度、深部構造を揃えることができることから、それらの構造の尺度普遍性の存在が示唆される。機能画像の場合、頭蓋と脳実質に基づいた変換画像では、同様の結果を得た。もともと機能画像の空間的解像度（解像度は 3mm 程度）は低く、また統計的な感度を向上するために用いるスムージング処理によってぼやけている。さらに BOLD 信号は神経-血管連関などの影響により神経活動源に比べて潜在的な空間的な広がりを持つ。その結果、頭蓋に基づいた形態変換による精度の低下が埋め合わされたものと考えられる。

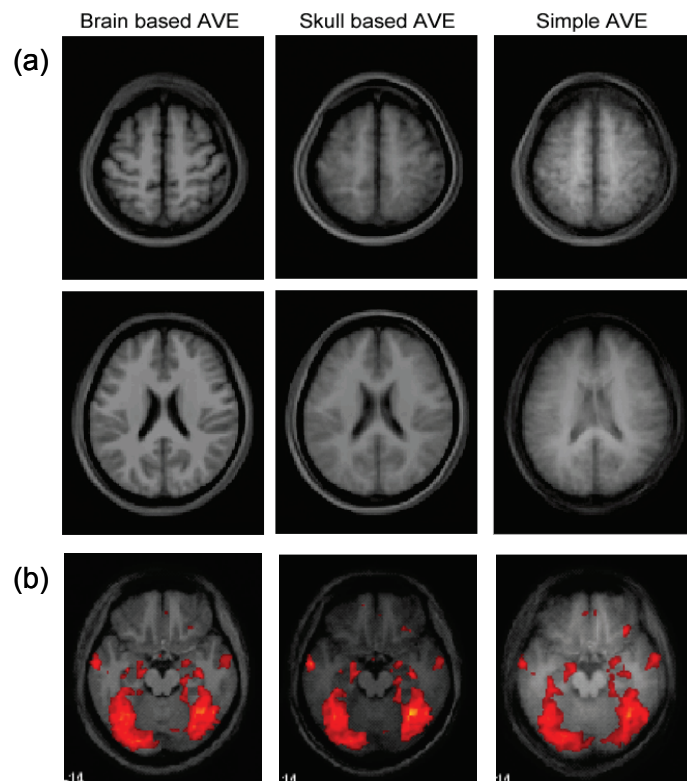


図 4 平均構造画像(a)と顔の視覚情報処理に関する平均脳地図(b)。左から順に、脳実質（灰白質・白質）に基づく変換、頭蓋に基づく変換、単純な平均（形態合わせの過程を含まない）による平均画像

## 今後の展望

過去 2 年間の研究により頭蓋形状を用いる基本的な解析手法は確立できた。一方で、回や溝などの微細構造や内部構造に対しての変換精度の限界なども明らかになった。今後は、より現実的な化石脳研究への適用を踏まえた解析手法への拡張と、これまで不足していた解析手法の定量的な評価を実施したいと考えている。

## CT 画像を用いた検討

これまでの解析は、頭蓋画像として現代人の MRI 画像からの推定画像を用いてきた。化石脳への適用の際には、上記の解析手法を CT 画像で行う必要がある。今後の課題として、上記の解析手法が CT 画像でも問題なく機能するか確認をしたいと考えている。しかしながら、CT 画像の撮像は放射線被爆を伴うため頻繁に行えるものではない。同様の問題は、化石脳の復元に作業に従事する C01 班も抱えているため、今後は、両研究グループの連携により貴重な CT データの収集と共有を行いたいと考えている。また今後、復元脳と現代人の脳との比較検討においては、C01 班との密接な連携が必須であり、その第一ステップとして、解析プラットフォームの統一、具体的には SPM による画像処理に関する知識共有を昨年度より開始している。今後は、データや解析結果の共有などを進めて、C01 班と C02 班の研究成果の統合による新たな発見を導きたい。

## 変形場に対する検討

これまでの研究成果においては、形態の目視による評価が多く、手法の違いや形態の差異についての定量的検討が不十分であった。我々が用いている変換は、変形場という 3 次元のベクトル場で表現することができ、それに対して統計処理を行う手法が計算論的解剖学の分野で提案されている。例として、図 4(a)には、変形場のヤコビアン（行列式）を示した。この画像のスケールは、局所的な変換の強度を表している。被験者の頭蓋を平均形状に変換する際に、男・女でどのような差があるかを図示したものである。図(b)には、解析法の 1 つである Deformation Based Morphometry の結果を示した。現在検討中の結果であるが、男女で局所的な変形がその強度と方向を含めてどのように違うのか、統計的に評価したものである。これらの手法を用いて、旧人の脳と現代人の脳の間にはどのような形態の差があるのか、定量的に検討したいと考えている。



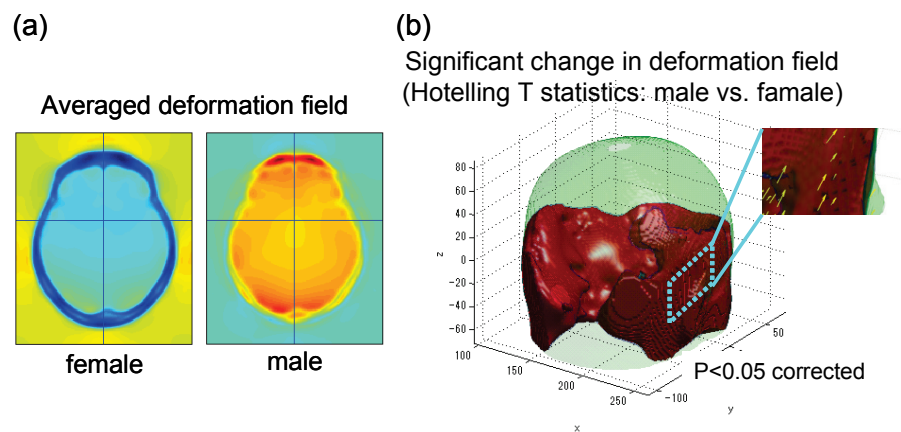


図 5 歪み場の例。男性と女性を平均する場合の変換強度(a)。男女間でのベクトル場の違いを多変量解析で分析したテスト結果(b)。

# 模倣行為と動機づけの関連における神経基盤

川道拓東 (生理学研究所)

## 1. はじめに

旧人と新人の間で行われた交替劇では、学習能力面の新人の優位性が大きな影響を与えたと考える。新人は学習能力を通じて優れた石器などを創造し、旧人に対する競争力を有したと考える。こうした創造性につながる学習能力は、個体学習に加えて、社会学習が重要な役割りを果たす。個体学習においては、社会の構成員が試行錯誤的に実施し、新たな知識や技能を獲得する。社会学習では、模倣や他者の観察などを通じて、他者が得た知識や技能を獲得する。個体学習は広範な生物で見られる一方で、社会学習は社会性を有する生物にしか見いだすことができない。新人は、現代において最も高度な社会性を有する動物種であることから、学習能力の中でも、社会学習能力は創造性に富んだ現代人ならではの能力と考えられる。そこで、本研究においては、社会学習に焦点をあて、新人ならではの学習能力に寄与する脳機能の検証を実験的研究により推進する。

社会学習は、他者の行為を観察すること(Bandura, 1965)やそれを模倣する(Field & Walden, 1982)ことにより進展する。こうした社会学習においては、観察対象に注意を払い、観察対象の行為を覚え、再生することと、そうした行動をとることに対する動機付けを高めることが重要となる(Bandura, 1977)。すなわち、前者においては、他者の行為を受容して学習対象に関するモデルを構築することが、後者においては、他者に受容されることで動機付けを増し行動をとるとともにすることが重要なステップとなる。本研究では、特に、この他者の受容という行為にフォーカスをあてる。

他者を受容するという行為には、他者と同等の感情を生起し、その感情を理解する共感がある(Decety, 2011; de Waal, 2008)。共感においては、自己の知覚や行動と同等のものをシミュレーションしているという Perception-Action model が提唱されている(Preston & de Waal, 2002)。痛み(Hutchison et al., 1999; Singer et al., 2004)やむかつきなどにおいて、自己が知覚するときと共通の領域が他者に共感するときにも賦活することが示されている。一方で、他者に受容されるということに関する神経基盤は、その重要性にも関わらず十分に調べられていない。そこで、本研究においては、受容される際の神経基盤について確認することを目的に研究を推進した。

## 2. 実験課題の開発

受容される際の神経基盤を検討するにあたり、まず、実験協力者に課す課題の開発を行った。受容行動は受容者と受容対象者の2者間の相互作用で実施される。この2者間の

立場の違いを考慮に入れた、実験課題を開発した。実験課題においては、受容されているか否かという状況を実験室内で作り出すために、2日間からなる体験談の評価実験を実施した。

実験参加者に対しては、過去の体験の中で、うれしかったこと、および、悲しかったことに関して、5個ずつ事前に考えることを課した。さらに、実験室に到着後に、事前に考えたうれしかったこと、および、悲しかったことに関する体験談を4個ずつ計8個を400字以内で作文することを課した。その後、実験参加者は、ビデオの前でそれぞれのストーリーに関して、1分程度でスピーチを行った。実験参加者には、事前にうれしさ・悲しさが他者にどの程度伝わるかを確認する実験であると説明し、ビデオを元に評定者がそのうれしさ・悲しさを評定するということを説明した。2日目に、実験参加者には、自己の話したストーリーのうれしさ・悲しさに対する評定をfMRI内で行うことを課し、その際の脳活動を計測した。この際に、初日に話したストーリーの音声と評定者が評価している動画を重畳表示した動画を実験参加者に提示した。ここで、表示する評定者の評価画像は、事前に撮影したものを利用した。撮影に際しては、ポジティブな態度、あるいは、ネガティブな態度で評定するという演技を評定者に課した。



図1 評定風景の例

### 3. 実験課題の評価

実験課題の評価においては、実験素材の第三者による評価、並びに、実験参加者による内観評価を実施した。

### 4. 実験素材の評価

評定者の評価画像に関する評価を、第三者により実施した。5件法(5：ポジティブ／1：ネガティブ)で評定画像について評価を実施した。その結果ポジティブな評定風景

( $4.62 \pm 0.07$  [平均 $\pm$ 標準誤差])の方が、ネガティブな評定風景( $1.55 \pm 0.07$ )と比べて、有意に評定が高いという結果を得た( $p < 0.001$ )。これから、本実験にて作成した評価画像の妥当性を確認した。

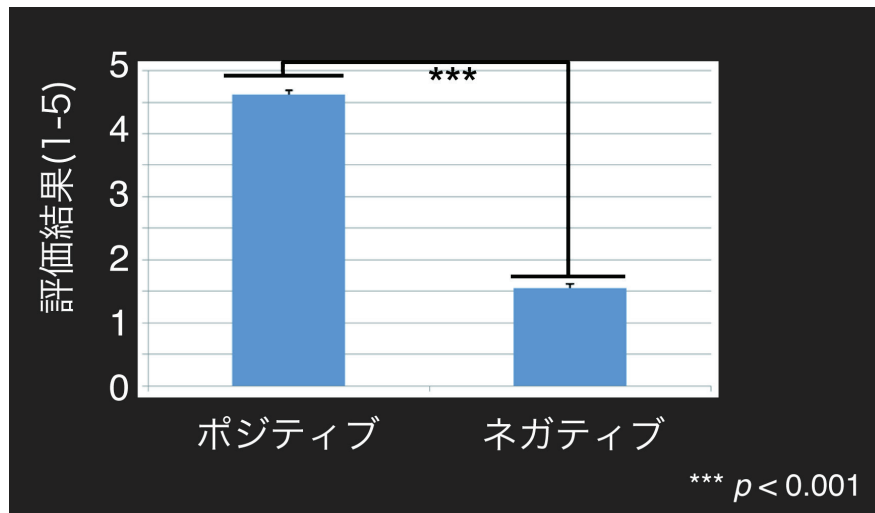


図2 第三者による評定風景の評価

## 5. 実験課題の評価の妥当性

本実験課題の妥当性検証のために、実験参加者による内観評価を実施した。実験参加者は、22名(男性13名/女性9名)であり、平均年齢( $\pm$ 標準誤差)は、 $21.72 \pm 0.59$ 歳(男性： $21.92 \pm 0.67$ 歳/女性： $21.44 \pm 0.44$ 歳)である。今回の実験において、評価されていることに疑問を呈した実験参加者は男性1名のみであった。こうしたことから、実験課題についての妥当性を確認した。これにより、被受容行動を実験室環境で再現できることを確認した。

## 6. 被受容行動における神経基盤

被受容行動における神経基盤を調べるために、SPM8を用いて解析を実施した。解析対象者は、前述の実験に疑問を呈した男性1名に加えて、実験中に入眠した被験者2名、体調不良を訴えた被験者1名を除外した18名(男性10名/女性8名)である。解析においては、被受容行動として、実験参加者が自己のストーリーを評定中の風景を閲覧している際(評定条件)に、コントロール画像(評定者の写真に音声をあわせて流した場合)を閲覧している際(コントロール条件)の比較により、対応する神経基盤を抽出した。結果として、心的状態の忖度を行う内側前頭前野(medial prefrontal cortex [mPFC]):

peak = (4, 54, 20),  $t = 9.63$ , voxel size = 1339, family-wise error [FWE] corrected  $p < 0.05$ )などの賦活が見られた。

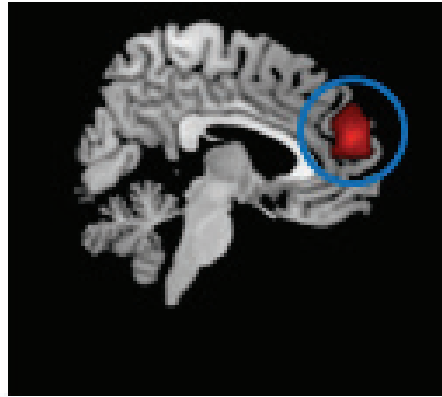


図3 被受容行動における mPFC の活動

ここで、カメレオン効果に見られるように、他者が自己と同一の行動を取っている際に、その他者への好感度が向上するということが知られており(Chartrand & Bargh, 1999)、模倣行動は基本的な受容行動であるといえる。こうした被模倣行動において、mPFC が今回の実験と同様に賦活することが知られており(Kuhn et al., 2010)、受容行動に相手の心的状態の忖度が非常に重要な働きを示すといえる。

これらの結果は、相手に受容されることがきっかけとなって、社会的行動の一つである相手の心的状態の忖度を促進することを示唆する知見であり、社会的行動の神経基盤について検討する上で非常に重要である。これは、社会学習を行う上で必要な他者の受容という能力の解明につながり、新人が有する学習能力において、mPFC の重要性を示唆する。

### 謝辞

本研究の推進にあたっては、生理学研究所定藤規弘教授、佐々木章宏研究員、吉原一文研究員、筑波大学安梅勅江教授、篠原亮次客員研究員、杉澤悠圭客員研究員、望月由妃子氏、徳竹健太郎氏にご協力いただきました。ここに感謝の意を表する。

**参考文献：**

- Bandura, A. (1965) Influence of models' reinforcement contingencies on the acquisition of imitative response. *Journal of Personality and Social Psychology*, 1, 589-595.
- Bandura, A. (1977) Social learning theory. General Learning Press.
- Chartrand T.L., & Bargh, J.A. (1999) The chameleon effect: the perception-behavior link and social interaction. *Journal of Personality and Social Psychology*, 76, 893-910.
- Decety, J. (2011) Dissecting the neural mechanisms mediating empathy. *Emotion Review*, 3, 92-108.
- de Waal, F.B.M. (2008) Putting the altruism back into altruism: the evolution of empathy. *Annual Review of Psychology*, 59, 279-300.
- Field, T.M. & Walden T.A. (1982) Production and perception of facial expressions in infancy and early childhood. *Advances in child development and behavior*, 16, 169-211.
- Hutchison, W.D., Davis, K.D., Lozano, A.M., Tasker, R.R., Dostrovsky, J.O. (1999) Pain-related neurons in the human cingulate cortex. *Nature Neuroscience*, 2, 403-405.
- Kuhn, S., Muller, B.C., van Baaren, R.B., Wietzker, A., Dijksterhuis, A., Brass, M. (2010) Why do I like you when you behave like me? Neural mechanisms mediating positive consequences of observing someone being imitated. *Social Neuroscience*, 5, 384-92.
- Preston S.D., & de Waal F.B.M. (2002) Empathy: its ultimate and proximate bases. *Behavioral and Brain Sciences*, 25, 1-20.
- Singer, T., Seymour, B., O'Doherty, J., Kaube, H., Dolan, R.J., Frith, C.D. (2004) Empathy for pain involves the affective but not sensory components of pain. *Science*, 303, 1157-1162.

# 内発的報酬による社会・個体学習強化の神経基盤に関する研究

水野敬 (理化学研究所 分子イメージング科学研究センター)

## 1. はじめに

当該領域研究「ネアンデルタールとサピエンス交代劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究」において、旧人・新人の学習能力差を、学習行動を司る神経基盤の形態差に基づいて比較解剖的に検証する手法は大変興味深い。両者の化石脳復元による形態学的な違いを明らかにし、現生人類を対象とした神経心理学的手法に基づく社会学習と個体学習機能の脳局在と、その形態差の比較検討により、旧人と新人の学習能力差の立証が期待される。

当該領域研究では、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI: functional Magnetic Resonance Imaging) および脳波計測により、社会学習に関しては模倣学習の神経基盤、個体学習に関しては思考錯誤を通じて報酬を手掛かりに環境に適応する学習制御 (強化学習) の神経基盤をターゲットとしている。さらに、個体学習においては、学習の強化因子として社会報酬 (他者からの承認・賞賛) を挙げ、その効果の検証するモデルを提案している。本研究では、さらに、他の学習の強化因子として、学習行動に直結する学習意欲喚起に資する内発的報酬を挙げ、内発的報酬による強化学習の神経科学的な検討を企図した。さらに、内発的報酬は社会学習における模倣学習の促進にも寄与すると仮説を立て、その立証研究の遂行も計画した (図 1)。

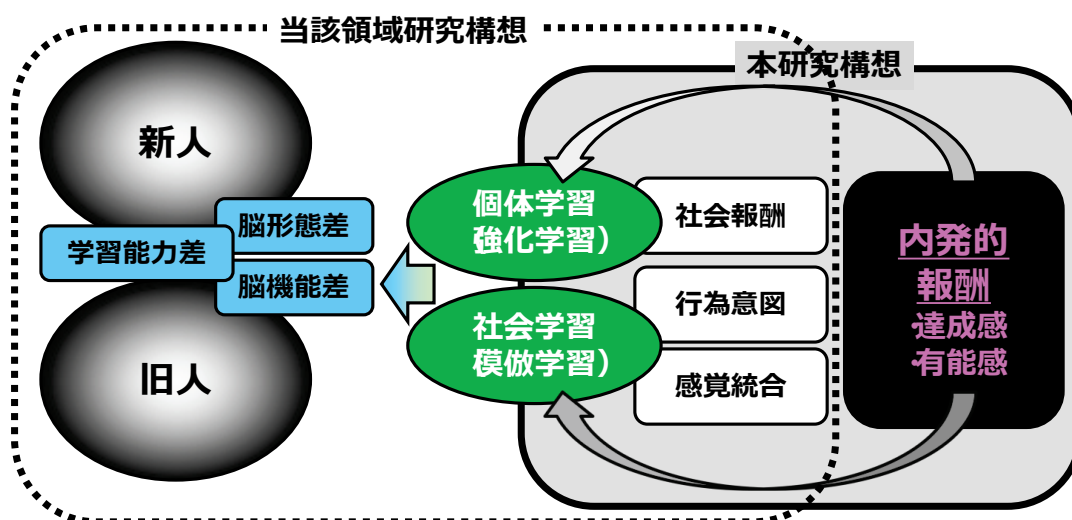


図 1 研究構想図

## 2. 学習意欲喚起因子

学習意欲喚起のための報酬として、達成感、有能感（自らが有能であるという感覚・認識）、自己決定感（自己行動を自ら決定できる感覚）や他者受容感（親密な者から受容される感覚）が挙げられる（Deci et al., 1991, 1996）。他者受容感は、当該領域研究における社会報酬と同等であり、他者に依存して成立する感覚であるのに対し、達成感、有能感や自己決定感は他者に比較的依存しない感覚、つまり内発的報酬といえる。以上より、強化学習には社会報酬のみならず内発的報酬も重要な因子と考えられる。

fMRI を用いた実験から他者受容感と達成感の神経基盤が明らかになりつつある。他者からの良い評判の知覚により、内側前頭前野と線条体の活性がみられた (Izuma et al., 2008)。一方、課題の正答に伴いパズルのピースが埋まり、複数回の正答でパズルが完成することにより得られる達成感の知覚により、同様に線条体の活性がみられた

(Mizuno et al., 2008)。よって、社会報酬の他者受容感と内発的報酬の一つである達成感は、共通して線条体により情報処理がなされていることが明らかとなった (図 2)。

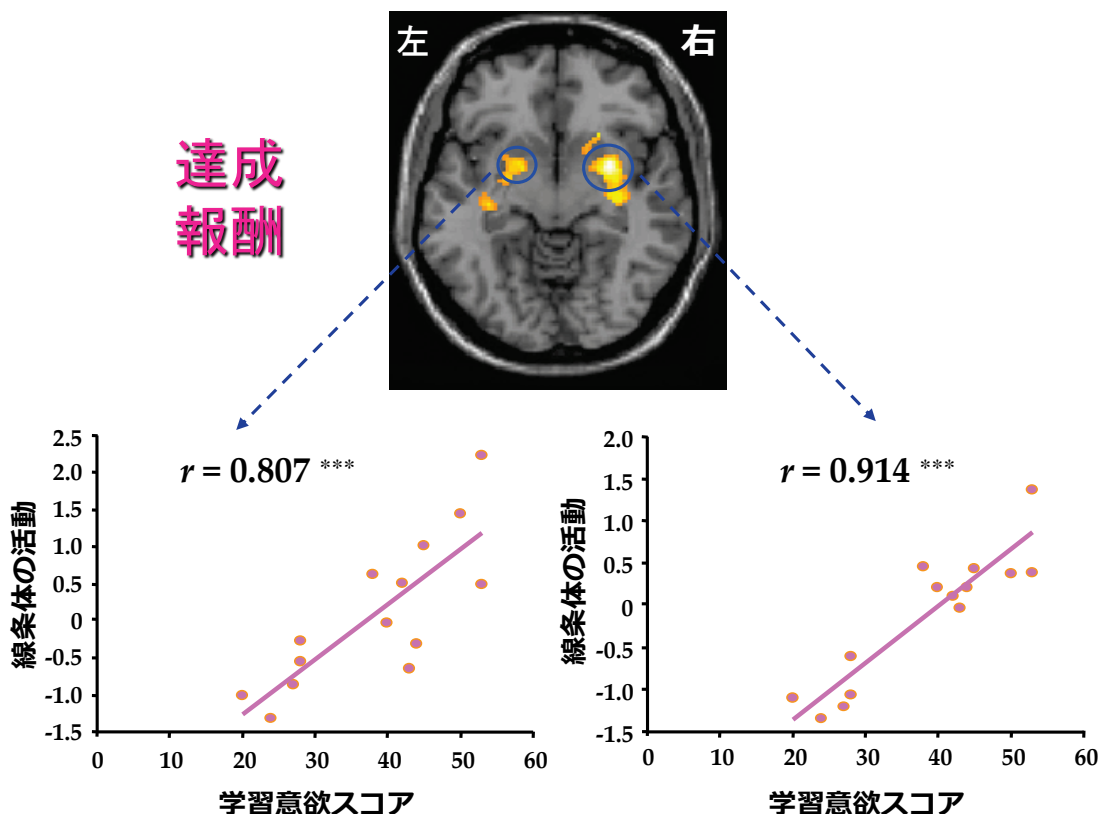


図 2 学習意欲と線条体活性



Mizuno らの研究では、さらに、線条体の活性度は課題成績と正の相関関係にあったが、金銭報酬（課題の正答に伴い金銭が得られる）における線条体の活性度は課題成績と相関しないことがわかった。この場合の遂行課題は学習課題でないが、良好な課題成績と線条体の高活性の関係がみられることから、強化学習（課題成績の向上）のために内発的報酬が有用であることを示唆する。

しかしながら、達成感の内発的報酬の一側面であり、その他の有能感や自己決定感に関する神経基盤は明らかでない。よって、本研究では、その他の内発的報酬も線条体の活性と関連すると仮説を立て、実際の fMRI の実験上で再現可能な有能感に関する神経基盤について検討を進めている。有能感は、さらに難易度の高い課題を達成しようとする学習行為に寄与する因子である。つまり、学習意欲に直結する重要な報酬感と考えられる。

### fMRI タスク

有能感の神経基盤を探るための課題として作業記憶（ワーキングメモリ）課題の一つである n-back task を用いた。n-back task は、ディスプレイ上に n 個前に呈示された数字が、現在呈示されている数字と一致するか否かの判定を要する（図 3）。

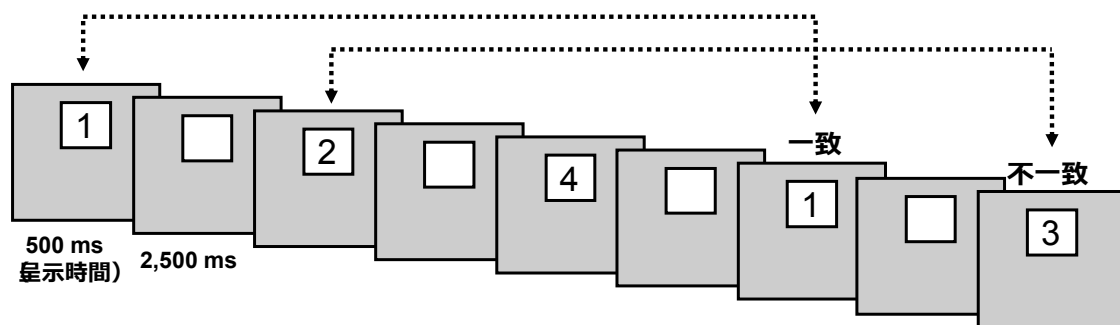


図 3 n-back task 例 (3-back task)

3 つ前に呈示された数字と現在呈示されている数字の一致・不一致を判断する課題

先行研究における 3-back task を用いて刺激呈示間隔を 3.0 s に設定した実験では、健常成人における正答率が平均で 90% を超えていたため (Mizuno et al., 2008)、刺激間隔を 2.0 s と 1.5 s に設定することで、難易度の調整を試みた。また、これまで 1-back task、2-back task および 3-back task までは実験で用いた経験があるが、今回新たに 4-back task と 5-back task を追加し、難易度の分散の程度を検討した。図

4 に示すように、1-back task、2-back task と 5-back task において、1.5 s の刺激呈示間隔のほうが 2.0 s に比し有意に正答率が低かった。3-back task と 4-back task では有意差を認めなかった。

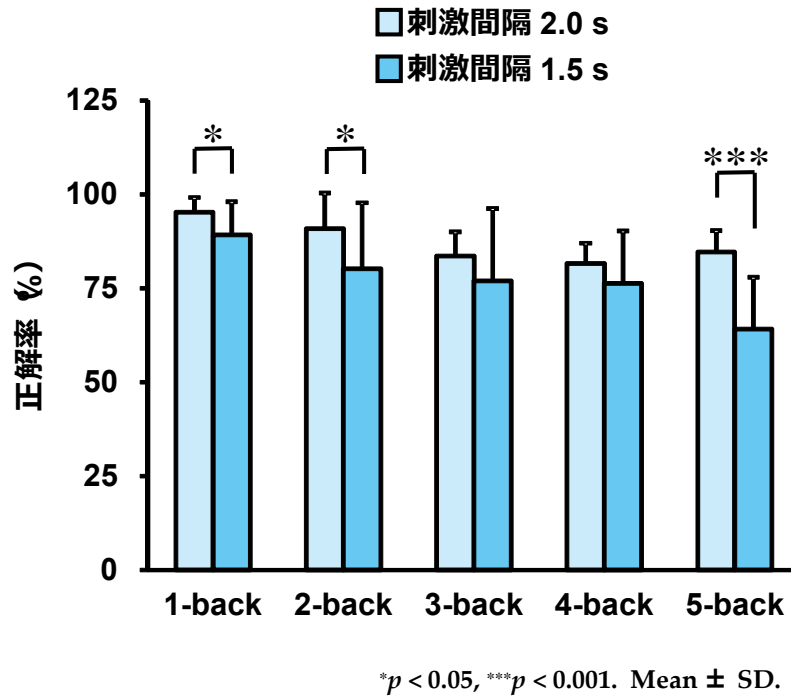


図 4 n-back task の刺激呈示間隔と正答率の関係

1-back task から 5-back task にかけての主観的難易度を 7 段階スケールで記録した (図 5)。刺激間隔 2.0 s と 1.5 s、いずれもワーキングメモリ負荷が上がるにつれて主観的な難易度は高くなることを認めた。刺激間隔の比較では、5-back task にて、刺激間隔 2.0 s に比べ 1.5 s のほうが、難易度が高いと感ずることが分かった。

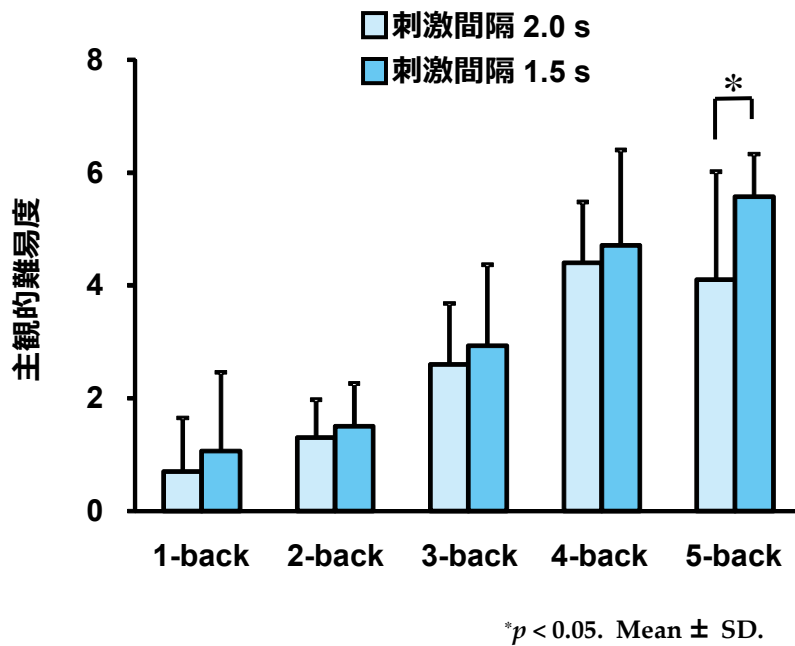


図 5 n-back task の刺激呈示間隔と主観的難易度の関係

正答率においても、同様に 5-back task で刺激間隔 1.5 s のほうが、正解率が低いことから、課題成績と主観的難易度、いずれも刺激間隔 1.5 s のほうが 1-back task から 5-back task 間の難易度の分散が大きく、fMRI の実験に適していると判断した。よって、これらの行動実験の成果を基に、有能感の神経基盤を明らかにするための fMRI 実験を開始した。

**参考文献：**

Deci, E. L., Vallerand, R. J., Pelletier, L. G., Ryan, R. M.: Motivation in education: the self-determination perspective. *Educational Psychologist* 26(3-4): 325-346, 1991.

Deci, E. L., Ryan, R. M., Williams, G. C.: Need satisfaction and the self-regulation of learning. *Learning and Individual Differences*, 8(3): 165-183, 1996.

Izuma, K., Saito, D. N., Sadato, N.: Processing of social and monetary rewards in the human striatum. *Neuron*, 58(2): 284-294, 2008.

Mizuno, K., Tanaka, M., Ishii, A., Tanabe, H. C., Onoe, H., Sadato, N., Watanabe, Y.: The neural basis of academic achievement motivation. *NeuroImage*, 42(1): 369-378, 2008.

# 研究業績

## 2010～11 年度 研究業績

### 【論文】

- Izuma K., D.N. Saito, and N. Sadato (2010) Processing of the Incentive for Social Approval in the Ventral Striatum during Charitable Donation. *J Cogn Neurosci* 22: 621-631. (査読有)
- Izuma K., D.N. Saito, and N. Sadato (2010) The roles of the medial prefrontal cortex and striatum in reputation processing. *Soc Neurosci* 5: 133-147. (査読有)
- Miura N., M. Sugiura, M. Takahashi, Y. Sassa, A. Miyamoto, S. Sato, K. Horie, K. Nakamura, and R. Kawashima (2010) Effect of motion smoothness on brain activity while observing a dance: an fMRI study using a humanoid robot. *Social Neuroscience* 5: 40-58. (査読有)
- Yokoyama O., N. Miura, J. Watanabe, A. Takemoto, S. Uchida, M. Sugiura, K. Horie, S. Sato, R. Kawashima, and K. Nakamura (2010) Right frontopolar cortex activity correlates with reliability of retrospective rating of confidence in short-term recognition memory performance. *Neuroscience Research*, 68: 199-206. (査読有)
- Tanabe H.C., T. Sakai, Y. Morito, T. Kochiyama, and N. Sadato (2011) Neural correlates and effective connectivity of subjective colors during the Benham's top illusion: A functional MRI study. *Cerebral Cortex*, 21: 124-133. (査読有)
- Morita T., H. Kosaka, D.N. Saito, M. Ishitobi, T. Munesue, S. Itakura, M. Omori, H. Okazawa, Y. Wada, and N. Sadato (2011) Emotional responses associated with self-face processing in individuals with autism spectrum disorders: An fMRI study. *Soc Neurosci* Sep 22 [Epub ahead of print] (査読有)
- Sadato N. (2011) *The neural basis of social reward and decision-making*. In *New Frontiers in Social Cognitive Neuroscience*, Kawashima R., M. Sugiura, T. Tsukiura (eds.) pp.137-145. 仙台：東北大学出版会.
- Kambara T., S. Yokoyama, K. Takahashi, N. Miura, T. Miyamoto, D. Takahashi, S. Sato, and R. Kawashima (2011) Lexical Categories and the Human Brain: An fMRI Study. *Studies in Language Sciences* 10: 187-199. (査読有)

- Yusa N., M. Koizumi, J. Kim, N. Kimura, S. Uchida, S. Yokoyama, N. Miura, R. Kawashima, and H. Hagiwara (2011) Second language instinct and instruction effects: Nature and nurture in second language acquisition. *Journal of Cognitive Neuroscience* 23: 2416-2430. (査読有)
- 河内山隆紀 (2011) 「機能的磁気共鳴画像法による領域間結合分析」『神経心理学』27 (1) : 35-46. (査読無)
- Sato, W., T. Kochiyama, S. Uono, K. Matsuda, K. Usui, Y. Inoue, and M. Toichi (2011) Rapid amygdala gamma oscillations in response to eye gaze. *PLoS One* 6: e28188 (査読有)
- Sato, W., T. Kochiyama, S. Uono, K. Matsuda, K. Usui, Y. Inoue, and M. Toichi (2011) Temporal Profile of Amygdala Gamma Oscillations in Response to Faces. *J Cogn Neurosci* Oct 7 [Epub ahead of print] (査読有)
- Sato, W., T. Kochiyama, and S. Yoshikawa (2011) The inversion effect for neutral and emotional facial expressions on amygdala activity. *Brain Res* 1378: 84-90. (査読有)
- Sato, W., T. Kochiyama, S. Uono, K. Matsuda, K. Usui, Y. Inoue, and M. Toichi (2011) Rapid amygdala gamma oscillations in response to fearful facial expressions. *Neuropsychologia* 49: 612-617. (査読有)
- Mizuno, K., M. Tanaka, S. Fukuda, T. Sasabe, K. Imai-Matsumura, and Y. Watanabe (2011) Changes in cognitive functions of students in the transitional period from elementary school to junior high school. *Brain & Development* 33: 412-420. (査読有)
- Mizuno, K., M. Tanaka, S. Fukuda, K. Imai-Matsumura, and Y. Watanabe (2011) Relationship between cognitive functions and prevalence of fatigue in elementary and junior high school students. *Brain & Development* 33: 470-479. (査読有)
- Kawatani, J., K. Mizuno, M. Takano, T. Joudoi, S. Shiraishi, S. Fukuda, Y. Watanabe, and A. Tomoda (2011) Cognitive dysfunction and mental fatigue in childhood chronic fatigue syndrome - A 6-month follow-up study. *Brain & Development* 33(10): 832-841. (査読有)
- Mizuno, K., M. Tanaka, S. Fukuda, K. Imai-Matsumura, and Y. Watanabe (2011) Relationship between cognitive function and prevalence of decrease in

- intrinsic academic motivation in adolescents. *Behavioral and Brain Functions* 7: 4. (査読有)
- Mizuno, K., M. Tanaka, K. Yamaguti, O. Kajimoto, H. Kuratsune, and Y. Watanabe (2011) Mental fatigue caused by prolonged cognitive load associated with sympathetic hyperactivity. *Behavioral and Brain Functions* 7: 17. (査読有)
- Mizuno, K., M. Tanaka, S. Fukuda, E. Yamano, Y. Shigihara, K. Imai-Matsumura, and Y. Watanabe (2011) Low visual information-processing speed and attention are predictors of fatigue in elementary and junior high school students. *Behavioral and Brain Functions* 7: 20. (査読有)
- Tanaka, M., K. Mizuno, K. Yamaguti, H. Kuratsune, A. Fujii, H. Baba, K. Matsuda, A. Nishimae, T. Takesaka, and Y. Watanabe (2011) Autonomic nervous alterations associated with daily level of fatigue. *Behavioral and Brain Functions* 7: 46. (査読有)
- Uchiyama H., D.N. Saito, H.C. Tanabe, T. Harada, A. Seki, K. Ohno, T. Koeda, and N. Sadato (2012) Distinction between the literal and intended meanings of sentences: A functional magnetic resonance imaging study of metaphor and sarcasm. *Cortex*, 48: 563-583. (査読有)
- Shigihara, Y., M. Tanaka, K. Mizuno, A. Ishii, E. Yamano, M. Funakura, E. Kanai, and Y. Watanabe (2012) Effects of daily levels of fatigue and acutely induced fatigue on the visual evoked magnetic response. *Brain Research*, in press. (査読有)
- Mizuno, K., M. Tanaka, H.C. Tanabe, N. Sadato, and Y. Watanabe 2012 The neural substrates associated with attentional resources and difficulty of concurrent processing of the two verbal tasks. *Neuropsychologia*, in press. (査読有)
- 水野 敬, 定藤規弘, 松村京子, 三池輝久, 渡辺恭良 (2012) 小児慢性疲労症候群の注意配分機能障害. 日本疲労学会誌, in press. (査読無)
- 水野 敬, 渡辺恭良 (2012) 急性～亜急性～慢性疲労に共通する自律神経機能の変調, 自律神経, in press (査読無)

### 【投稿中論文】

- Tanabe, H.C., H. Kosaka, D.N. Saito, T. Koike, M.J. Hayashi, K. Izuma, H. Komeda,

- M. Ishitobi, M. Omori, T. Munesue, H. Okazawa, Y. Wada, and N. Sadato. Hard to “tune in”: neural mechanisms of eye contact and joint attention in high-functioning autistic spectrum disorder. *Frontiers in Human Neuroscience* (in minor revision)
- Miyahara, M., R. Kitada, A. Sasaki, Y. Okamoto, H.C. Tanabe, and N. Sadato. From gestures to words: Verbal labeling of sequential hand movements reduces fMRI activation of the imitation-related regions: Preliminary findings. Submitted to *J. International Neuropsychological Society*.
- Okamoto, Y., R. Kitada, A. Sasaki, T. Morita, S. Itakura, T. Kochiyama, H.C. Tanabe, and N. Sadato. “Like me”: congruency detection in the extrastriate body area during reciprocal imitation. Submitted to *Cerebral Cortex*.
- Sasaki, A.T., T. Kochiyama, M. Sugiura, H.C. Tanabe, and N. Sadato. Neural networks for action representation: A functional magnetic resonance imaging and dynamic causal modeling study. Submitted to *Frontiers in Human Neuroscience*.

### 【学会発表】

- 田邊宏樹、定藤規弘、赤澤威 (2010) 「旧人・新人の学習行動に関する脳機能マップの作成」 2010.10.2. 第 64 回日本人類学会大会. 北海道：だて歴史の杜カルチャーセンター.
- 田邊宏樹 (2010) 「脳科学の最前線 —教育学への可能性を探る— 神経科学の立場から」 2010.10.20. 佛教大学開学 100 周年記念事業総合研究所公開シンポジウム. 京都：佛教大学常照ホール. (招待講演)
- Sadato N. (2011) The Neural Basis of Social Reward and Decision-Making. 2011.1. Proceedings of The First International Society for Social Neuroscience Symposium. Shanghai, China.
- 定藤規弘 (2011) 「社会能力の発達過程：脳機能画像法によるアプローチ」 2011.6.3. 第 26 回日本生体磁気学会. 福岡：九州大学百年講堂.
- Sasaki, A.T., T. Kochiyama, M. Sugiura, H.C. Tanabe, N. Sadato (2011) Neural networks for action representation. 2011.6.11. The 15th annual meeting of the Association for the Scientific Study of Consciousness. Kyoto, Japan.



Tanabe, H.C., H. Kosaka, D.N. Saito, T. Munesue, H. Okazawa, Y Wada, and N. Sadato (2011) Joint attention between individuals with normal and autism spectrum disorders using dual fMRI. 2011.6.27. 17th Annual Meeting of the Organization on Human Brain Mapping. Quebec, Canada.

田邊宏樹、定藤規弘 (2011) 「二台の機能的 MRI 同時計測による見つめ合い(mutual gaze)および共同注意(joint attention)の神経基盤と二個体間の機能的結合」  
2011.8.20. 第二回名古屋大学・生理学研究所合同シンポジウム 名古屋：名古屋大学医学部中央診療棟3階講堂.

岡本悠子、小坂浩隆、北田亮、田邊宏樹、棟居俊夫、石飛信、林正道、齋藤大輔、河内山隆紀、谷中久和、大森晶夫、和田有司、岡沢秀彦、定藤規弘 (2011) 「自閉症スペクトラムにおける EBA の機能低下—相互模倣時の自他の動作の比較に関わる神経基盤」2011.9.2. 第 13 回日本ヒト脳機能マッピング学会 京都：京都国際会議場.

佐々木章宏、河内山隆紀、杉浦元亮、田邊宏樹、定藤規弘 (2011) 「視覚運動的な動作表象を担う脳内ネットワーク」2011.9.2. 第 13 回日本ヒト脳機能マッピング学会、京都：京都国際会議場.

岡本悠子、小坂浩隆、北田亮、田邊宏樹、棟居俊夫、石飛信、林正道、齋藤大輔、谷中久和、河内山隆紀、大森昌夫、和田有司、岡沢秀彦、定藤規弘 (2011) 「自閉症スペクトラムにおける Extrastriate body area (EBA) の機能低下—相互模倣時の自他の動作の比較にかかわる神経基盤」2011.9.16. 第 34 回日本神経科学大会、横浜：パシフィコ横浜.

Tanabe H.C. (2011) Neural substrates and inter-individual functional connectivity during mutual gaze and joint attention using dual functional MRI. 2011.9.16. 第 34 回日本神経科学大会、横浜：パシフィコ横浜.

定藤規弘 (2011) 「社会能力の発達過程：脳機能画像法によるアプローチ」2011.11.1. 第 58 回中部日本生理学会、福井：福井県民ホール、(招待講演)

田邊宏樹、定藤規弘 (2011) 「社会的文脈における学習—社会的認知能力と創造性—」  
2011.11.6. 第 65 回日本人類学会大会、那覇：沖縄県立博物館・美術館.

Makita, K., H. Yokokawa, H.C. Tanabe, H. Yoshida, M. Murase, and N. Sadato (2011) The role of the right cerebellum during foreign language vocabulary learning enhanced by the phonological loop: an fMRI study. 2011.11.22. The 41th Annual Meeting of the Society for Neuroscience. Washington DC, USA.

Miura N., T. Akazawa, M. Yamazaki, K. Nagai, Y. Yoshida, H.C. Tanabe, and N.

- Sadato (2011) Learning effect on cortical activity during implicit imitation of bimanual tool production and word speech. 2011.6.27. 17th Annual Meeting of the Organization for Human Brain Mapping. Quebec, Canada.
- 河内山隆紀 (2011) 「SPM による脳機能画像データ解析」 2011.7.23. 第 14 回日本光脳機能イメージング研究会. 東京：星陵会館. (招待講演)
- Kawamichi H., H.C. Tanabe, H.K. Takahashi, K. Shimada, and N. Sadato (2011) Directed altruism induced by "warm-glow" through empathy: an fMRI study. 2011.6.27. 17th Annual Meeting of the Organization on Human Brain Mapping. Quebec, Canada.
- Kawamichi H., R. Kitada, K. Yoshihara, H.K. Takahashi, and N. Sadato (2011) Activation of the reward system by joining hands with familiar person: an fMRI study. 2011.07.17. 8th IBRO World Congress of Neuroscience. Florence, Italy.
- Kawamichi H., A.T. Sasaki, H.K. Takahashi, H.C. Tanabe, and N. Sadato (2011) Empathy for social positive emotion activates cognitive empathy network. 2011.11.16. The 41th Annual Meeting of the Society for Neuroscience. Washington DC, USA.
- 川道拓東、田邊宏樹、高橋陽香、定藤規弘 (2011) 「温情効果を介して向社会行動の動因となる共感に親密さが与える影響」 2011.09.17. 第 34 回日本神経科学大会. 横浜：パシフィコ横浜.
- 川道拓東、北田亮、吉原一文、佐々木章宏、高橋陽香、定藤規弘 (2011) 「fMRI を用いた手つなぎ時の脳活動計測」 2011.10.22. 第 16 回認知神経科学学会学術集会. 福岡：産業医科大学.
- 水野 敬 (2011) 「小児慢性疲労症候群の脳機能低下のメカニズム」 2011.5.21. 第 7 回日本疲労学会総会・学術集会. シンポジウム口頭講演. 名古屋：名古屋大学医学部.
- 水野 敬、友田明美、米田哲也、渡辺恭良 (2011) 「fMRI による注意欠陥多動性障害 (ADHD) の報酬系に対するメチルフェニデート徐放剤投薬効果の検証」 2011.5.26. 第 6 回日本分子イメージング学会総会・学術集会. ミニシンポジウム口頭発表 (ポスター発表もあり). 神戸：神戸国際会議場.
- Mizuno, K., A. Tomoda, T. Yoneda, and Y. Watanabe (2011) Neural substrates associated with reward system of ADHD using fMRI. 14th International

- Congress of European Society for Child and Adolescent Psychiatry (ESCAP).  
Poster presentation. 2011.6.13. Helsinki, Finland.
- Mizuno, K., M. Tanaka, H. C. Tanabe, J. Kawatani, T. Jodoi, A. Tomoda, T. Miike,  
K. Imai-Matsumura, N. Sadato, and Y. Watanabe (2011) Divided Attention  
and Childhood Chronic Fatigue Syndrome (CCFS). 2011.9.17. The 34th  
Annual Meeting of the Japan Neuroscience Society (Neuroscience 2011).  
Poster presentation. Pacifico Yokohama, Yokohama, Japan.
- Yamano, E., S. Fukuda, K. Mizuno, M. Tanaka, T. Joudoi, J. Kawatani, M. Takano,  
A. Tomoda, K. Imai-Matsumura, T. Miike, and Y. Watanabe (2011) Risk  
factors of sleep disturbance among school children in Japan: The 2-year  
follow-up study. 2011.10.19. Worldsleee2011. Poster presentation. The  
International Conference Center, Kyoto, Japan.
- 水野 敬, 渡辺恭良 (2011) 「疲労による自律神経機能の変調」 2011.10.28. 第 64 回  
日本自律神経学会総会. シンポジウム口頭発表. 秋田：秋田ビューホテル.
- Sadato, N. (2012) Inter-individual neural synchronization eye-contact and joint  
attention. 2012.3.6. 42nd NIPS International Symposium. Okazaki, Japan.
- 定藤規弘 (2012) 「脳機能画像法をもちいた社会能力発達過程へのアプローチ」  
2012.3.10. 第 52 回脳医学・生物学研究会. 名古屋：名城大学名駅サテライト会  
議室. (招待講演)
- 定藤規弘 (2012) 「社会能力の神経基盤：脳機能画像法によるアプローチ」 2012.3.17.  
第 7 回日本統合失調症学会. 名古屋：愛知県産業労働センター. (招待講演)
- Mizuno, K. (2012) Functional loss of adolescence ADHD and its recovery by  
therapeutics. 2012.2.14. The 14th Conference of Peace through Mind Brain  
Science: Advances in Molecular Medicine and Imaging: Between Bench and  
Bedside. Hamamatsu Crown Palais Hotel, Hamamatsu, Japan. (招待講演)

### 【研究大会での発表】

- 田邊宏樹 (2010) 「現代人脳の学習機能地図作成と化石脳への写像法の確立に向けて」  
『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研  
究』 2010. 10. 23. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第 1 回研究大会. 東  
京：学術総合センター.

- 定藤規弘 (2010) 「ネアンデルタール人の脳、新人との違いを探る—イメージング手法による学習と創造性へのアプローチ—」 『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』 2010. 10. 23. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第1回研究大会. 東京：学術総合センター.
- 三浦直樹 (2010) 「三次元動作解析を用いた熟練者および初心者の石器製作工程の身体動作比較」 『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』 2010. 10. 23. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第1回研究大会. 東京：学術総合センター
- 田邊宏樹、河内山隆紀 (2011) 「現代人脳機能地図の化石脳への写像方への第一歩」 『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』 2011. 2. 20. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第2回研究大会. 神戸：神戸学院大学.
- 定藤規弘 (2011) 「意図理解の神経基盤」 『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』 2011. 2. 20. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第2回研究大会. 神戸：神戸学院大学.
- 三浦直樹、長井謙治、星野孝総 (2011) 「三次元動作計測を用いた熟練者の石器製作工程の身体動作解析」 『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』 2011. 2. 20. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第2回研究大会. 神戸：神戸学院大学.
- 田邊宏樹、定藤規弘 (2011) 「現代人脳機能地図生成：共同注意の神経基盤と社会的文脈における学習の関係」 『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』 2011. 4. 24. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第3回研究大会. 東京：学術総合センター.
- 三浦直樹、星野孝総、長井謙治 (2011) 「ルヴァロア剥片制作における熟練行動の運動的特徴抽出」 『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』 2011. 4. 24. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第3回研究大会. 東京：学術総合センター.
- 河内山隆紀、田邊宏樹 (2011) 「計算論的解剖学を利用した化石脳頭蓋骨から脳実質の再構成の試み」 『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』 2011.4.24. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第3回研究大会. 東京：学術総合センター.
- 川道拓東 (2011) 「模倣行為と動機付けの連関における神経基盤の解明」 『ネアンデル

ターとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』2011.4.24. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第3回研究大会. 東京：学術総合センター.

水野 敬 (2011) 「内発的報酬による社会・個体学習強化の神経基盤解明のための研究戦略」『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』2011.4.24. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第3回研究大会. 東京：学術総合センター.

田邊宏樹 (2011) 「現代人脳機能地図作成：社会的認知能力の萌芽としての共同注意—その神経基盤を探る—」『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』2011. 12. 10. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第4回研究大会. 岡崎：岡崎コンファレンスセンター.

川道拓東 (2011) 「模倣行為と動機付けの連関における神経基盤の解明」『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』2011.12.11. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第4回研究大会. 岡崎：岡崎コンファレンスセンター.

水野 敬 (2011) 「内発的報酬による意欲喚起の神経基盤」『ネアンデルタールとサピエンス交替劇の真相：学習能力の進化に基づく実証的研究』2011.12.11. 科学研究費補助金新学術領域研究「交替劇」第4回研究大会. 岡崎：岡崎コンファレンスセンター.

### 【その他の活動】

田邊宏樹、定藤規弘、川道拓東 (2011) 生理学研究所 一般公開「見て聞いて感じてみよう！心と体の不思議」2011.11.5.岡崎：生理学研究所.