

ラバーハンド錯覚における筋電位および皮膚電位反応の解析

辻 琢真*・濱崎 峻資*・前田 貴記**
加藤 元一郎**,*^{***}・岡 敬之****・山川 博司*
高草木 薫*,*****・山下 淳*・浅間 一*

Analysis of Electromyography and Skin Conductance Response during Rubber Hand Illusion

Takuma TSUJI*, Shunsuke HAMASAKI*, Takaki MAEDA**,
Motoichiro KATO**,*^{***}, Hiroyuki OKA****, Hiroshi YAMAKAWA*,
Kaoru TAKAKUSAKI*,*****, Atsushi YAMASHITA* and Hajime ASAMA*

Recently, the rubber hand illusion (RHI), which is one of phenomena that the sense of ownership (SOO) is extended to the objects over the external area, attracts much attention to explain the brain mechanism of self body recognition of human. However, most previous research have only focused on the conditions for the occurrence of the RHI. In this study, we measured electromyography (EMG) of the arm and skin conductance response (SCR) of the end of the finger when the strong hit with a hammer is given to the fake hand in order to examine whether the RHI is in fact occurred at a certain time during the experiment. As a result, we showed that the measurement of EMG could satisfy above requirement. Also, it is implied that the measurement of EMG gets closer to the same tendency of subject's introspection report than that of SCR.

Key Words: rubber hand illusion (RHI), sense of ownership (SOO), electromyography (EMG), skin conductance response (SCR)

1. はじめに

近年、科学技術の発展に伴い、バーチャルリアリティやハプティックデバイスの研究・開発が活況を呈している。将来的にこれら複合現実感システムをわれわれの日常により浸透させるためには、優れたインタフェース設計が重要であり、かつ不可欠である。この課題を解決するために、昨今では、ヒトの脳機能や身体機能を工学的な側面からモデル化する研究が盛んに行なわれている。たとえば、2005～2009年にかけて実施された移動知 (Moboligence) に関する一連の研究では、

生物の適応的な行動能力の発現メカニズムを明らかにするために、神経生理学の知見やロボティクスなどの技術を適用してそのモデル化が試行された¹⁾。しかし、このようにさまざまな研究が実施される中でも、自身の身体認知における脳内メカニズムは未開の領域が多く、現在までその解明には至っていない。

身体の認知において、自身の身体に対する認知は Jeannerod が論文内で用いた身体所有感 (SOO: Sense of Ownership) に分類されており²⁾、身体にかかわる複数の視覚・触覚などの内部情報が脳内で同時に結合、および処理されることによって生じるとされる³⁾。このメカニズムを解明するために、近年では、身体所有感が外界の対象に拡張する現象の顕著な例の1つとして知られるラバーハンド錯覚 (RHI: Rubber Hand Illusion) に関する研究が注目を集めている^{4),5)}。

これは、**Fig. 1** に示すように、自分の視界から隠された本物の手と、目の前に置かれたラバー (フェイク) ハンドに絵筆などで一定時間 (2～20分程度) の時間的・空間的に同期した触刺激が連続して与え続けられると、次第にラバーハンド上に触刺激を知覚ようになる錯覚現象である⁶⁾。この錯覚現象は、1998年、BotvinickとCohenによってNatureで発表されて以来、数多くの研究者によって追試実験やより詳細な検証などが実施されており、昨今では、RHIの生起に要する諸条件の中でも、本物の手とラバーハンドに与えられ

* 東京大学大学院工学系研究科 東京都文京区本郷 7-3-1

** 慶應義塾大学医学部 東京都新宿区信濃町 35

**** 東京大学医学部附属病院 22世紀医療センター

東京都文京区本郷 7-3-1

***** 旭川医科大学医学部 北海道旭川市緑が丘東2条1丁目

* Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

** School of Medicine, Keio University, 35 Shinanomachi, Shinjuku-ku, Tokyo

**** 22nd Century Medical and Research Center, Graduate School of Medicine, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo

***** Division of Neural Function, Asahikawa Medical University, 2-1 Midorigaoka-Higashi, Asahikawa, Hokkaido

(Received November 20, 2013)

(Revised January 30, 2015)

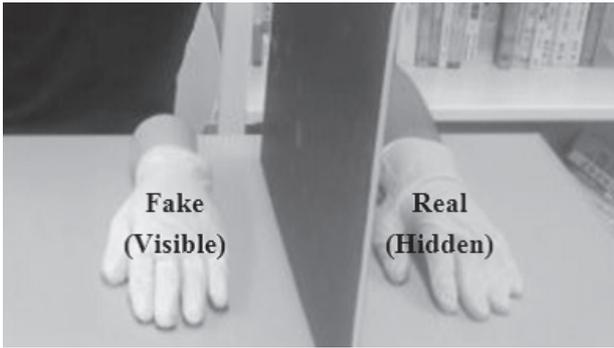


Fig. 1 Experimental condition for the RHI experiment. Right hand in the figure is real, which is hidden from the subject's sight, and left one is real, which is visible from the subject

る触刺激の時間的・空間的に十分な同期性、および本物の手とラバーハンドの形態的な類似性の2点が特に重要であることが多数の論文などで示唆されている^{7),8)}。しかし、これら先行研究の大部分はRHIの生起に必要な条件の究明に焦点が当てられており、その生起メカニズムの解明を図る研究は少ない。そこで本研究では、実験中の任意の時間におけるRHI生起を客観的に検証可能な手法について新たに提案し、身体所有感の生じるメカニズムの解明を目指す。

2. 従来手法と本研究のアプローチ

本章では、まず始めに先行研究における代表的なRHI生起の検証方法についておのおの簡単に説明する。つぎに、これら検証方法における難点を整理し、それらを満足する新たな検証方法の導入に関するアプローチについて述べる。

2.1 先行研究におけるRHI生起の検証方法

RHIの生起を検証する従来の代表的な方法としては、内観報告の実施や主観的な手の位置におけるドリフトの測定、皮膚コンダクタンス反応の計測などが挙げられる。以下、これら3つの検証方法の概要についておのおの順に述べる。

内観報告では、実験終了後に「刺激されているラバーハンドを見ていると、自分の手が刺激されているように感じた」などの複数の質問項目に、7件法（1：全く感じない～7：強く感じる）などで答える形式が主である⁶⁾。

位置ドリフトの測定では、実験の実施前と実施後に答えた視界から隠された被験者自身の手の主観的位置における位置誤差を測定する。この検証方法においては、RHIが生起していれば、実際に手が置かれている位置と比較して、ラバーハンドにより近い位置に本物の手を知覚する傾向にあることが報告されている⁹⁾。

皮膚コンダクタンス反応（SCR: Skin Conductance Response）の計測では、本物の手には何も刺激を与えず、ラバーハンドにのみ、指を無理やり反り返らせる・急に注射器を近付けるなどの刺激を与えた際の、本物の手における精神性発汗を計測する。この検証方法においては、RHIが生起していれば、ラバーハンドに与えようとした刺激に対する恐怖や不

安に応じて、本物の手に刺激を与えた場合と同様にSCRの値が有意に上昇することが報告されている¹⁰⁾。

2.2 筋電位計測に基づくRHI生起の検証方法の提案

RHI生起時における脳内メカニズムを考える上で、RHIの生起タイミングを知ることはきわめて重要な観点であり、そのためには、実験中の任意の時間にRHIが生起しているかを客観的に検証できる手法が求められる。何故なら、RHIの生起までに要する時間の計測が可能になれば、より短時間でRHIを生起させるために必要な条件を調べることが可能になり、RHIが生起するまでに脳内で生じるさまざまな活動について推定できるようになることが期待されるからである。しかし、先述した従来のRHI生起の検証方法のうち、内観報告や位置ドリフトの測定は実験終了後のみの実施になるため、先の「実験中の任意の時間」という要件を満足するものではない。加えて、これら検証方法においては、少なからず被験者の主観に依存する傾向にあると考えられるため、被験者個人によって評価の仕方に微妙な差が生じる可能性は否定できない。その点、SCRの計測は、刺激を与えるタイミングを変更することで実験中の任意の時間においてRHI生起の検証が可能である上に、被験者の主観がほとんど入らない評価方法であると考えられる。ただし、一般的にヒトの発汗量は個人差が大きいので、電位変化の定義を一意に定めることが非常に困難であるほか、刺激を与えてから発汗が生じ始めるまでに数秒程度の時間遅れを伴うことが多く、計測電位の中からRHI生起による電位変化のみを抽出することはきわめて難しい。

そこで本研究では、SCRのように実験中の任意の時間に計測が可能な生理指標に焦点を当て、その中でも特に、刺激から反応までの即時性に優れる筋電位（Electromyography）に注目する。筋電位の変化は、SCRにおける電位変化と比較して非常に明確であり、客観的にRHI生起を検証する手段として適していると考えられるためである。以下、本研究で新たに提案する筋電位の計測に基づいたRHI生起の検証方法の具体的な概念について述べる。

過去の研究において、RHIが生起している間、被験者にはラバーハンドを自分の手であると強く身体所有感が生じ、ラバーハンドにハンマーを振り降ろして打撃を与えようとしたときに、手を引いて打撃を避けようとするといった行為が度々見受けられることが報告されている¹¹⁾。このような回避行動を検出することにより、RHI正規の検証につなげることが可能であると考えられる。検出手段には手と机の間の圧力計測やモーションキャプチャなどによる動作計測などもあげられるが、実際に大きな動作に現れない筋活動などが関係することも考えられ、これらの検出には筋活動自体の計測が必要である。そこで、ハンマーでラバーハンドに強い打撃を与えようとした際の、手を引いて打撃を避けようとするといった行為に伴う筋肉の緊張を、筋電位の計測から推定することを試みる。これらの行為は絶対に確認されるとは限らないが、実際の動作として実験者に確認されずとも筋活動が生じている

ということは考えられ、RH 生起の検証方法の 1 つとして有効たりえると予想される。本研究においては、実験中の任意の時点において計測可能であり、明確な電位変化として抽出可能である筋電位の変化を定量的に評価することで、打撃に応じて手を引く・手を強張らせるという行為を検出することを可能とし、RHI 生起の検証方法として用いることを目指す。

3. 計測手法

本章では、本研究における生理指標の計測手法について一般的な説明を述べる。今回の計測では、提案手法が先の要件を満足するものであるか、およびほかの検証方法との比較検証を行なうため、内観報告、および SCR の計測を併せて実施する。以下、筋電位、および SCR のおのおの計測方法、計測電位の解析方法、計測の実施環境、および計測の手順についておのおの順に述べる。

3.1 筋電位および SCR の計測方法

今回の計測においては、手を引く・手を強張らせる際に生じる筋電位の変化や、皮膚電位の変化を解析するため、目的に応じておのおの計測部位を以下のように定める。

筋電位の計測部位は、橈（とう）側手根屈筋（flexor carpi-radialis muscle）を用いる。橈側手根屈筋は上肢に位置する筋肉であり、手関節の掌屈、および肘関節の屈曲補助などを行なう筋肉である。本研究の計測においては、手を引く・手を強張らせる際に必然的に手関節の掌屈や肘関節の屈曲が生じるため、計測部位として適している。なお、被験者の利き手の違いによる RHI 生起への影響はないという報告から¹²⁾、被験者の利き手に依らず、左手による計測に統制する。計測は表面筋電位の双極導出法を用いた。表面電極を用い、後肘部下方 1 cm の部位に 2 cm の電極間距離を設けておのおの貼付する。

一方、SCR の計測部位は、精神性発汗が生じやすい部位であり、本計測に支障を来さない右手の指先を用いる。計測は通電法を用いて、電極を示指（人指し指）と中指の腹におのおの貼付する。Fig. 2 に実際に本研究において行なった筋電位計測および SCR 計測における実計測機器の貼付状況を示す。

3.2 計測電位の解析方法

今回の計測で解析する筋電位、および SCR は、室内の家電などから発生する種々のノイズによる影響を非常に受けやすく、解析に必要な信号がノイズによって埋没してしまうことがあるため、計測で得られた信号からノイズを軽減する処理を施す。以下、本計測で行なう信号処理について、筋電位の計測、および SCR の計測の順におのおの述べる。

筋電位の計測で得られる信号の一例を Fig. 3 に示す。Fig. 3 は、実際に被計測者が手を引いた際における計測結果の一部分を示したものであり、波形は処理を施す前の実信号を表わしている。信号処理の手順は以下のとおりである。まず、先に述べたノイズなどの軽減処理を行なうために、Band-pass フィルタ、および電源ノイズを除去する HUM フィルタを設定する。つぎに、得られた電位を整流化した後、時刻 t に得



Fig. 2 Experimental condition for the EMG and SCR measurement

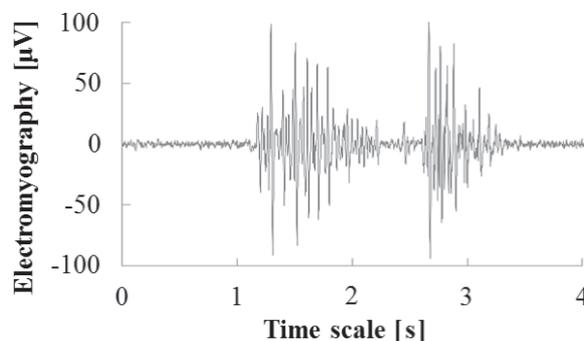


Fig. 3 Example of the result of flexor carpi radialis muscle electromyography (EMG). Vertical axis indicates the potential of EMG and horizontal axis indicates the time scale

られる電位値を $e_e(t)$ とし、ハンマーでフェイクハンドに強い打撃を与える時刻を t_{blow} とする。このとき、 $e_e(t)$ が打撃時刻 t_{blow} 以前の β 秒間における電位平均値の α 倍を超えた場合、筋電位が変化した、と定義する。 $\rho = \frac{\alpha}{\beta}$ とし、以上の定義を (1) 式に表わす。

$$e_e(t) > \rho \int_{t_{blow}-\beta}^{t_{blow}} e_e(t) dt \quad (1)$$

つぎに、SCR の計測で得られる信号の一例を Fig. 4 に示す。Fig. 4 は、計測結果の一部分を示したものであり、波形は処理を施す前の実信号を表わしている。信号処理の手順は以下のとおりである。まず、Low-pass フィルタを設定し、時刻 t に得られたコンダクタンスを $g_s(t)$ とする。また、SCR 値は室温やそのほかさまざまな外的要因に依って、実験中緩やかな増減を繰り返すことがある。本実験においても、長時間の実験の中でその増減が見られたため、打撃後の SCR は単に最大値を評価するのではなく、コンダクタンスの変化量 $\Delta g_s(t)$ で評価するものとし、(2) 式で示したとおり定義する。

$$\Delta g_s(t) = \max g_s(t) - \int_{t_{blow}-\gamma}^{t_{blow}} \frac{g_s(t)}{\gamma} dt \quad (2)$$

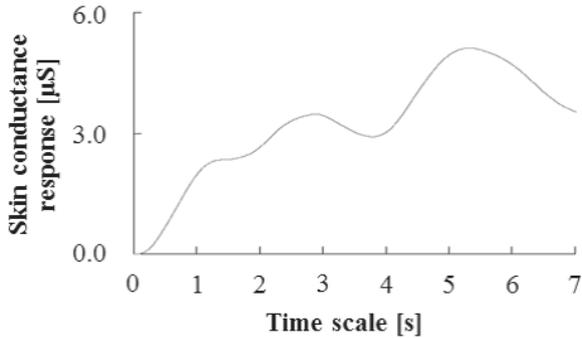


Fig. 4 Example of the result of skin conductance response (SCR). Vertical axis indicates the potential of the skin conductance response and horizontal axis indicates the time scale.

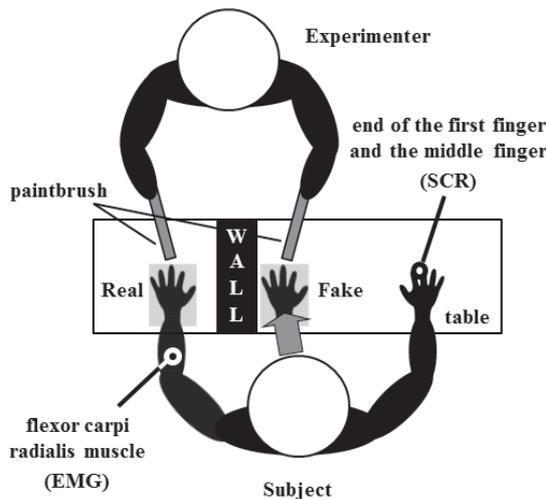


Fig. 5 Overview of the RHI experiment. A subject sits in the front side of the table and an experimenter stands in the other side. Subject's own hand is set at the left side of the wall, and a fake one is set at the right side of the wall, and a subject cannot see an own hand directly. An experimenter gives stimuli to both the real hand and the fake one synchronously with two paint brushes. Also, white marker shows flexor carpi radialis muscle.

ただし、皮膚電位は刺激から反応までに数秒程度の生起時間を要することが一般的に知られているため、式中の $\max g_s(t)$ は打撃時刻 t_{blow} 以降の 10 秒間における SCR の最大値を用いる。また、打撃時刻 t_{blow} 以前の SCR 基準値は打撃時刻 t_{blow} 以前の γ 秒間における電位平均値と定める。

3.3 計測の実施環境

計測の実施環境を俯瞰したようすを Fig. 5 に示す。机上に設置されたついたての左側に被験者の左手を、右側に左手のフェイクハンドを本物の手と同姿勢で設置し、被験者が本物の手を直接見ることができない環境を整える。被験者が目の前に置かれたフェイクハンドのみに視線を集中させている間、被験者と机を挟んで反対側に位置する実験者が、絵筆を用いて本物の手とフェイクハンドの両方に時間的・空間的に同期した触刺激を一定時間連続して与え続け、被験者に RHI

Table 1 An example of a table

1. It seems as if I were feeling the touch of the paintbrush in the location where I saw the rubber hand touched.
2. It seemed as though the touch I felt was caused by the paintbrush touching the rubber hand.
3. I felt as if the rubber hand were my hand.
4. It seemed as if my (real) hand were drifting towards the right (toward the rubber hand).
5. It seemed as if I might have more than one hand or arm.
6. It seemed as if the touch I was feeling came from somewhere between my own hand and the rubber hand.
7. I felt as if my (real) hand were turning "rubbery".
8. It appeared (visually) as if the rubber hand were drifting towards the left (towards my hand).
9. The rubber hand began to resemble my own (real) hand, in terms of shape, skin tone, freckles or some other visual feature.

を生起させた後に、ハンマーでフェイクハンドにのみ強い打撃を与える。また、被験者には計測中できるだけフェイクハンドにのみ視線を集中させるように事前に指示を与え、ヘッドホンを通してホワイトノイズを連続的に提示し続けることで、計測中の外部の音を遮断する。

3.4 計測の手順

計測を開始する前に、被験者には実際にフェイクハンドを手に取りさせ、自由に観察や確認を行なわせ、フェイクハンドが自分の手でないことを十分に確認してもらおう。その上で、フェイクハンドの甲へハンマーで強い打撃が与えられるようすを目の前で観察してもらい、そのときの筋電位、および SCR を計測する。

つぎに、実験者が 10 分間絵筆で同期した触刺激を、被験者の本物の手とフェイクハンドに与えた後、フェイクハンドにのみハンマーで強い打撃を与え、そのときの筋電位、および SCR を計測する。なお、今回の計測で実験者が与える触刺激はメトロノームで 1 Hz に調整されており、刺激は手の甲から指先の全体にかけてなぞるように与えられる。

また、実験終了後には、Botvinick と Cohen が実験に用いた合計 9 個の質問事項で構成される内観報告書を日本語に翻訳したものに、YES/NO の二択形式で回答してもらおう。なお、1~9 の質問番号に対応するおのおのの質問事項は Table 1 のとおりである。

4. 計測結果

被験者は東京都内の大学、または大学院に在籍中の健常な学生 11 名 (平均年齢 22.5 歳、レンジ 20~24 歳、男性 7 名、女性 4 名) で、計測の目的に関して事前知識を全く有さなかった。なお、本計測は東京大学医学部倫理委員会の承認を得ており、被験者全員からインフォームドコンセントを得て実施された。以下、内観報告、橈側手根屈筋の筋電位、および SCR の結果についておのおの順に述べる。

4.1 内観報告結果

被験者 11 名全員の内観報告結果を Fig. 6 にまとめて示す。

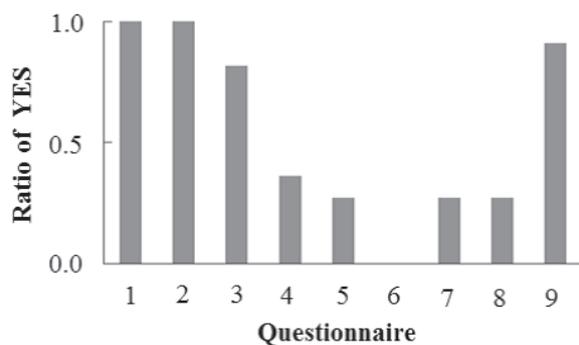


Fig. 6 Result of introspection report of all the subjects. Vertical axis indicates the ratio of subjects who answered yes at each question

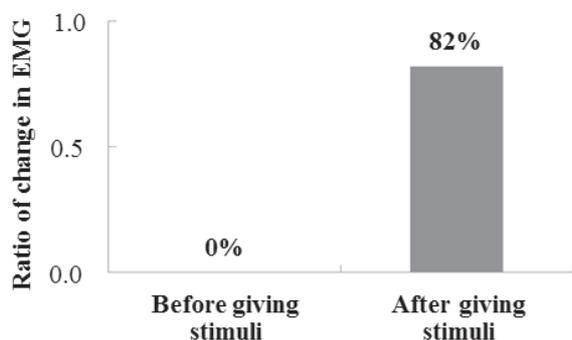


Fig. 7 Result of flexor carpi radialis muscle electromyography (EMG) of all the subjects. Vertical axis indicates the ratio of subjects who pulled a hand before or after stimulation

質問番号 1, 2, 3, 9 に YES と答えた被験者の割合がほかの質問番号と比較して高い傾向は, Botvinick と Cohen らが行なった実験やほかの報告などでも同様であり, 被験者に十分な RHI が生起していること, および本実験環境の妥当性が示されたと考えられる. また, フェイクハンドを「自分の手である」と認知している傾向は, 質問番号 3 の “I felt as if the rubberhand were my hand.” (日本語訳: フェイクハンドがあたかも自分の手であるように感じた) という項目から大凡推測できると考えられるが, 被験者 11 名中 9 名から YES の回答を得た.

4.2 筋電位の計測結果

(1) 式における α , および β の値は, 予備実験を元に最適な数値を求め, 今回は $\alpha = 5.0$, $\beta = 10$ と設定した. また, Band-pass フィルタは 10~500 Hz に, HUM フィルタは 50 Hz に定めた. 計測機器は PowerLab, Bio Amp (バイオリサーチ社) を使用し, サンプリング周波数は 1,000 Hz とした.

被験者 11 名全員の計測結果を Fig. 7 にまとめて示す. 同期した触刺激を与える前後において, フェイクハンドへの強い打撃時に, 筋電位が変化した被験者の割合を比較している. 図から, 同期した触刺激を与える前には全く筋電位変化が生じていなかったのに対し, 同期した触刺激を与えた後では 8 割以上の被験者に筋電位変化が生じていることがわかる. 即

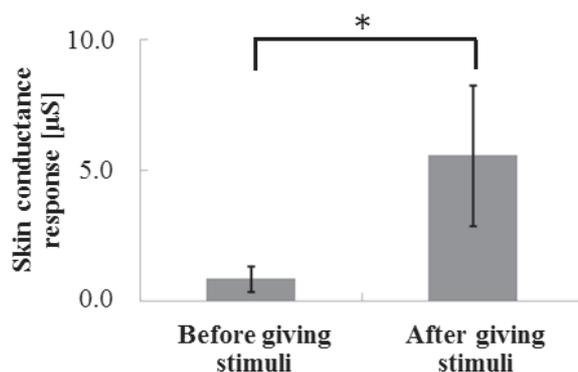


Fig. 8 Result of skin conductance response (SCR) of all the subjects. Vertical axis indicates the amount of increase in skin conductance level. Error bars show standard error of the mean

ち, RHI が生起していれば, 打撃時に打撃を避けるために手を引く・手を強張らせるという行為が誘発され, 筋電位に変化が生じるということが確認された. したがって, 本手法は打撃を与える時刻を変更することで計測中の任意の時点で RHI 生起の検証が可能であることが示された.

4.3 SCR の計測結果

今回, (2) 式における γ の値は, 実験的に $\gamma = 10$ と設定した. また, Low-pass フィルタは 20 Hz に定めた. 計測機器は筋電位と同様とした.

被験者 11 名全員の計測結果をまとめて Fig. 8 に示す. 垂直軸は SCR を示し, グラフ上のエラー・バーは平均値からの標準偏差 (SD) を示す. RHI を生起させる刺激の前後の SCR について t 検定を行なった結果, 有意差が確認された ($p = 0.0002, 0.05$). 同期した触刺激を与える以前にもわずかの SCR が確認されているが, これは計測上生じる誤差で説明できる範囲であり, 筋電位計測による検証の優位性を述べることはできない. ここでは触刺激前後における SCR 値の上昇値の差に着目する. 同期した触刺激を与える前後において, 打撃時における SCR 値の上昇量が約 6.6 倍増加しており, フェイクハンドへの打撃に対して, 触刺激後は通常時より多くの発汗が生じていることが示された.

5. 考 察

本研究では, 内観報告, 橈側手根屈筋の筋電位, および SCR の計測に基づいて, RHI 生起の検証を実施したが, これらのうち, 内観報告では評価の仕方に被験者の主観が含まれると考えられる. 一方, 筋電位, および SCR の生理指標では, 被験者の主観が入りにくい形で検証が行なわれるため, 実際に被験者の意思と同様の結果が得られているのかについては検証し難い. 即ち, 被験者が主観的にはフェイクハンドを自身の手であると感じている一方で, 生理指標ではそれが反映されない場合や, 或いはその逆の場合などが考えられる可能性があるということである. もしそのような結果が得られているのであれば, 実施した検証方法のうち, いずれかが RHI 生起

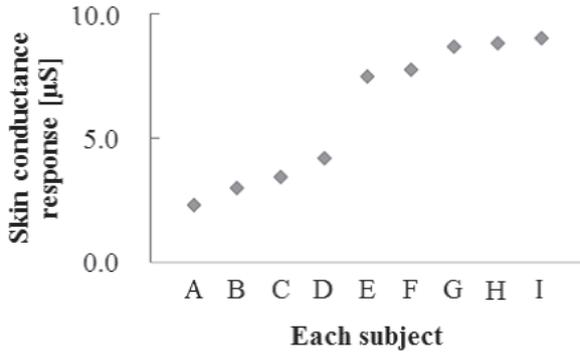


Fig. 9 Increase of the potential of each subject who answered yes at the questionnaire No. 3 of the introspection report, “I felt as if the rubber hand were my hand”. Vertical axis indicates the amount of increase in SCR

の検証方法として妥当であるのか判断が難しい。そこで、実施したすべての検証の結果を比較するため、内観報告に用いた質問事項のうち、最も被験者への RHI 生起を客観的に示すと考えられる質問番号 3 に対して YES と答えた被験者 9 名が、フェイクハンドへの打撃時に筋電位の変化が生じたか、および皮膚電位に変化が生じたかを調査することでこれを評価する。しかし、皮膚電位の変化については、先にも述べたとおり、被験者個人によって電位の変化量に個人差が大きく、変化の基準を一意に定めることが困難である。そこで、**Fig. 9** に示すように、被験者全員分のフェイクハンドへの打撃時における電位上昇量を比較したところ、電位の上昇量が $5\mu\text{S}$ を境界として大きく二分化されており、本研究では $5\mu\text{S}$ を超えて打撃時刻前後に電位が上昇した場合を皮膚電位に変化が生じたものと定めて評価を行なった。

質問番号 3 に対して YES と答えた被験者 9 名の筋電位、および SCR の計測結果を **Fig. 10** にまとめて示す。筋電位反応の計測結果は、78% と高い割合で内観報告の結果と合致しており、筋電位計測が従来の検証手法と大きく矛盾しない手法であることを示している。内観報告の結果と合致しなかった 22% は、内観報告によって RHI 生起を示したが、筋電位反応においては RHI 生起を示さなかった被験者である。これらの被験者について分析を行なうと、これらの被験者は SCR においても RHI 生起を示していなかった。より定量的に評価可能な複数の計測指標において RHI 生起を示さず、内観報告によって RHI 生起を示したこれらの被験者におけるくいちがいは、内観報告が被験者の主観によって左右されやすいことに起因すると考えられる。

また、刺激を与えてから反応が生じるまでにかかる時間を考慮すると、多少の個人差はあるものの、SCR 計測は発汗が生じるまでに数秒の時間がかかるのに対し、筋電位計測では概して数百 ms 程度の短時間での計測が可能であり、検証の即時性に優れていた。さらに、SCR 計測では先述したように電位変化の個人差が大きく、変化の定義を一意に定めることが困難であるのに対し、筋電位計測では個人に依らず電位

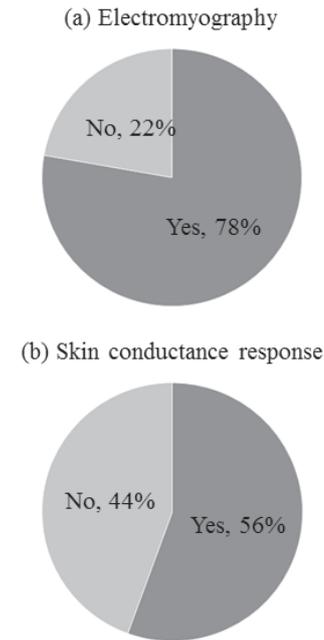


Fig. 10 Ratio of subjects (a) who pulled a hand in carpi radialis muscle EMG experiment and (b) who elevated sweat in SCR experiment, among nine subjects who answered yes at the questionnaire No. 3 of the introspection report, “I felt as if the rubber hand were my hand”. Dark gray area shows the ratio of subjects who pulled a hand or elevated SCL, and bright gray one shows the ratio of subjects who did not

の変化が明確であり、定量的な評価が可能であった。

6. おわりに

本研究では、実験中の任意の時間における RHI 生起の検証方法として、フェイクハンドにハンマーで打撃を与えた際の筋電位の計測に基づく新たな検証手法を提案した。この手法では、被験者本人に何らかのタスクを課すことがないため、被験者の主観に依存しにくいほか、打撃を与える時刻を変更することで実験中の任意の時間における RHI 生起の検証が容易に可能であることが最大の利点であると考えられる。また、SCR の計測に基づく RHI 生起の検証方法と比較して、刺激から反応までの時間が即時的であり、実験中の任意の時間における RHI 生起の検証方法として有用であると考えられる。加えて本研究では、筋電位と SCR の生理指標を用いた RHI 生起の検証結果と内観報告結果との関係についても言及した。その結果、SCR の計測に基づく RHI 生起の検証方法と比較して、筋電位の計測に基づく RHI 生起の検証方法では、より内観報告と同様の結果を示す可能性があることが示された。

一方、本研究における今後の課題として、予備実験により定めた変数の値について、その厳密な妥当性についての検証を深める必要がある。さらに、今後の研究課題として、ラバーハンド錯覚とミラーシステム (Mirror System) との関連性を明らかとすることが挙げられる。ミラーシステムとは、他者行為の観察時、脳内で自身が他者と同一の行為を行なって

いるときと同様の活動を誘起される現象のことを指す¹³⁾。こうした観点からラバーハンド錯覚を鑑みると、ラバーハンド上に触刺激を知覚する現象は、このミラーシステムときわめて類似すると考えられるが、これまでのところ両者の関連はまだ解明されていない。身体所有感における脳内メカニズムに関する諸研究は、本研究の冒頭でも述べたように、昨今では、工学的な側面のみならず、医学分野や認知心理・哲学分野などのほかの分野からの注目も多く、幅広い応用性を有する。今後の本研究においては、引き続きラバーハンド錯覚における脳内メカニズムのモデル化を目指し、ヒトの身体認識にかかわる脳機能解明の一助としたい。

謝辞 本研究は、科研費基盤研究 (B)24300198 の一部として実施されたものである。

参 考 文 献

- 1) 浅間, 伊藤: シリーズ 移動知, オーム社 (2010)
- 2) M. Jeannerod: The Mechanism of Self Recognition in Humans, *Behavioural Brain Research*, **142**, 1/15 (2003)
- 3) S. Gallagher: Philosophical Conceptions of the Self: Implications for Cognitive Science, *Trends in Cognitive Sciences*, **4-1**, 14/21 (2000)
- 4) 本間元康: ラバーハンドイリュージョン: その現象と広がり, *Cognitive Studies*, **17-4**, 761/770 (2010)
- 5) 樋渡, 松永, 豊田, 藪田: ハプティックデバイスを用いた目隠しラバーハンド錯覚における触刺激の遅延の影響に関する研究, *電子情報通信学会論文集 D*, **J96D-4**, 1085/1088 (2013)
- 6) M. Botvinick and J. Cohen: Rubber Hands 'Feel' Touch that Eyes See, *Nature*, **391**, 756 (1998)
- 7) M.P.M. Kammers, F. de Vignemont, L. Verhagen and H.C. Dijkerman: The Rubber Hand Illusion in Action, *Neuropsychologia*, **47-1**, 204/211 (2009)
- 8) H.H. Ehrsson, C. Spence and R.E. Passingham: That's my Hand! Activity in Premotor Cortex Reflects Feeling of Ownership of a Limb, *Science*, **305**, 875/877 (2004)
- 9) M. Tsakiris and P. Haggard: The Rubber Hand Illusion Revisited: Visuotactile Integration and Self-Attribution, *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **31-1**, 875/877 (2005)
- 10) K.C. Armel and V.S. Ramachandran: Projecting Sensations to External Objects: Evidence from Skin Conductance Response, *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, **270**, 1499/1506 (2003)
- 11) 藤井直敬: ソーシャルブレインズ入門, 講談社 (2010)
- 12) A. Haans, W.A. IJsselstein and Y.A.W. de Kort: The Effect of Similarities in Skin Texture and Hand Shape on Perceived Ownership of a Fake Limb, *Body Image*, **5-4**, 389/394 (2008)
- 13) C. Keysers, B. Wincker, V. Gazzola, A. Jean-Luc, L. Fogassi and V. Gallese: A Touching Sight: SII/PV Activation during the Observation and Experience of Touch, *Neuron*, **42-2**, 335/346 (2004)

[著 者 紹 介]

辻 琢 真 (学生会員)



2012年東京大学工学部精密工学科卒業。2014年東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻修士課程修了。2014年より三菱総合研究所勤務。現在に至る。

濱 崎 峻 資



2010年東京大学工学部精密機械工学科卒業。2013年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。2013年東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻博士課程入学。現在はヒトの認知能力に関する研究に従事。

前 田 貴 記



1995年慶應義塾大学医学部卒業後、慶應義塾大学医学部精神神経科研修医。97年慶應義塾大学医学部精神神経科助手。2006年、同特別研究助手(助教)。2010年より、同専任講師。現在に至る。

加 藤 元 一 郎



1980年慶應義塾大学医学部卒業後、慶應義塾大学医学部精神神経科研修医。2002年同助教。2007年同准教授。2013年より、慶應義塾大学医学部精神神経科教授。2014年3月3日逝去。

岡 敬 之



1997年信州大学医学部卒業。2006年より東京大学医学部付属病院22世紀医療センター関節疾患総合講座特任助教。現在に至る。

山 川 博 司 (正会員)



1985年琉球大学工学部電気工学科卒業。87年琉球大学大学院電気情報工学専攻修士課程修了。92年より東京大学工学部文部技官。現在に至る。2006年に東京大学にて博士(工学)を取得。

高 草 木 薫



1984年旭川医科大学医学部卒業。88年旭川医科大学大学院医学系研究科博士課程修了。医学博士。旭川医科大学医学部助手、講師、助教授、准教授、テネシー大学医学部研究員などを経て、2011年より旭川大学医学部教授。現在に至る。

山下 淳 (正会員)



1996年東京大学工学部精密機械工学科卒業。98年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。2001年同博士課程修了。博士(工学)。静岡大学助手、助教、准教授、カリフォルニア工科大学客員研究員などを経て、2011年東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻准教授。現在に至る。

浅間 一 (正会員)



1984年東京大学大学院工学系研究科精密機械工学専攻修士課程修了。86年理化学研究所化学工学研究室研究員補。同研究所研究員、副主任研究員を経て、2002年東京大学人工物工学研究センター教授。2009年東京大学大学院工学系研究科精密工学専攻教授。現在に至る。

.....