

第 24 回 一般社団法人 日本光脳機能イメージング学会
学 術 集 会

抄 録 集

開催日時

2022年 7 月 16 日(土) 10 時 00 分～18 時 00 分

参加費

一般 4,000 円, 学生 2,000 円

第 24 回大会長 : 河野理(徳島大学)
理事長 : 渡辺 英寿(厚生労働省)
副理事長(事務局代表) : 酒谷 薫 (東京大学)
問合せ先 (E-Mail) : jofbis@gmail.com

本プログラム (PDF 版) の利用方法

本プログラムは、各演題名にリンクが設定されています。

クリックすると、該当する抄録へ飛ぶことができますので、ご活用ください。

MRI と fNIRS の元開発技術者が考える fNIRS のこれまでとこれから

河野 理

徳島大学 大学院医歯薬学研究部 放射線理工学分野

演者は、企業の製品を開発する事業部において、MRI の開発を約 15 年間、fNIRS の開発を約 10 年間行ってきた(1986 年～2012 年)。そして現在は、これらの装置を使用して研究を行うユーザの立場にいる。本講演では、MRI と fNIRS の発展史の中で、演者がこれらの装置を開発してきた内容を中心にお話し、fNIRS のこれまでとこれからを考えたい。

1970 年代の医用機器メーカーによる X 線 CT の製品化後、1980 年頃に NMR-CT (MRI) の開発競争が始まった。演者は、1986 年から日立と島津において MRI 開発を担当し、1990 年頃は、夢の超高速イメージングと呼ばれていた EPI 法を用いた装置開発を担当していた。1991 年に、犬の心臓の 2 次元画像を 0.1 秒で撮像することに成功したが、取得画像には、克服困難と考えられる信号欠損や大きな画像歪み等が見られ、EPI 法によって、臨床診断可能な画像を得ることは困難と考えられた。そのような中で、1992 年頃に、EPI 法を用いて、ヒトの脳機能イメージングに成功したというニュースが飛び込んできた。脳機能イメージングという新しいパラダイムの登場によって、臨床診断において致命的な画像歪みをもつ EPI 法を用いた fMRI が、脳機能イメージングのゴールドスタンダードになった事例は、技術の発展を考える上で、一考すべき出来事であると思われる。

一方、1980 年代後半に、光 CT の開発競争が始まった。1991 年に、島津は、ラット脳の酸素分布を示す断層画像の撮像に成功していたが、成人ヒト脳の光 CT 画像を取得することは、極めて困難と考えられていた。そのような中で、1993 年に、NIRS によるヒト脳機能計測の報告、1995 年に、ヒトの脳機能マッピング画像 (トポグラフィー) の報告がなされた。これを契機に、島津や日立は、光 CT の開発を断念し、2000 年頃に fNIRS 装置 (光トポグラフィー) の製品化を行い、演者は、2002 年に、fNIRS の開発グループに配属されることとなった。ここで、米国の NIRx 社は、2000 年代前半には、拡散光トモグラフィー (DOT) の製品化を実現しており、欧米においては、DOT の研究開発が精力的に継続されていたことは記憶に留めておくべきことと思われる。

演者は、fNIRS の開発グループの配属直後に、ポバース記念病院との共同研究において、歩行時に頭皮血流が fNIRS 信号に重畳されること、独立成分分析によって、頭皮血流を除去できることを見出した (2003 年)。また、異なる頭部形状に対する頭皮と光ファイバーの密着不良をなくすため、送受光ファイバの間隔を一定に保ちつつ形状を自在に調整できる光ファイバーホルダ (FLASH (Flexible Adjustable Surface Holder)) を考案した (2004 年)。さらに、頭部全体をカバーする FLASH と平均部分光路長に依存しない GLM を用いた統計的解析手法を開発し、全脳表の t 値マッピング画像を得ることに成功した (2005 年)。そして、富山大学との共同研究において、脳波と fNIRS の同時計測を可能にする全脳 EEG-FLASH を開発し、正中神経刺激時の全脳での脳波と fNIRS の同時計測マッピング画像を取得することに成功した (2006 年)。その後、京都大学との共同研究を通して、頭部全体をカバーする新生児ホルダを開発した (2010 年)。また、fNIRS の理論的仮定や装置精度等による誤差成分やアーチファクト等の問題、そして、頭皮血流、前頭洞および上矢状静脈洞の存在による fNIRS 信号への影響に関しても実験や光拡散方程式の数値解の結果等を報告してきた。

装置開発においては、ユーザの最先端の研究を支援するために、研究動向を調査し、新しい機能を追加したり、装置の適用限界と問題点を明らかにすることによって、それらの解決方法を考案し、迅速に製品化を行うことが重要になる。DOT は、光の物理的挙動に基づいた再構成アルゴリズムを用いており、感度分布等を考慮するため、光トポグラフィーの技術的限界を克服する技術として期待されているが、実用化のためには、簡便性等を含めて様々な問題がある。そのような中で、最近、海外のいくつかのベンチャー企業等でウェアラブル DOT が製品化された。また、fNIRS は、現実の様々なコミュニケーションの中での計測が可能であるため、ハイパースキャニングの計測技術として注目されている。そこで、fNIRS のこれからを考えるために、それぞれの分野の最先端でご活躍されている先生方をお招きして、シンポジウム 1 「ハイパースキャニング脳機能イメージング最前線」とシンポジウム 2 「拡散光トモグラフィーの実用化に向けて」を企画した。これらのシンポジウムが、新しい時代の fNIRS 装置の開発や脳研究を推進する契機となることを期待する。

ハイパースキャンを用いた複数人相互作用神経メカニズム研究の現状とこれから

田邊 宏樹¹

¹名古屋大学情報学研究科

ヒトの社会認知や社会性の脳機能イメージング研究は今世紀に入ったくらいから増え始め、今では認知神経科学の1つのサブカテゴリになるほどの隆盛を誇っている。そこで用いられる実験手法は、その当初から今日に至るまで、他の認知機能の神経基盤を調べるのと同様に絵や写真あるいは文章を用いた課題を課した際の個人の脳活動を計測するものである。このアプローチにより社会認知の神経基盤が次々と明らかになり、多くの成果があげられてきた。一方で、現実のコミュニケーション場面でのやりとりは、リアルタイム性を持ちダイナミックで相互作用的であるため、実験参加者が実際の他者と関わることなくその事象を観察する従来の実験パラダイムではそのすべてを捉えきれない。Schilbach ら(2013)は、自分と他者が直接的に関わる視点、つまり二人称視点を実験パラダイムに導入することにより、今まで見えてなかったコミュニケーションの新たな側面を見いだすことができると主張しており、この考えに賛同する研究者を中心に少しずつその神経基盤を探る研究の拡がりをみせている。

リアルタイムで相互作用する「あなた」と「わたし」を重視する研究者の中でも、脳活動はあくまで個人の頭の中に閉じたものであると考え、相互作用する二者のうちの一人の脳活動を計測するアプローチを取る研究者も多い。その一方で、絶え間なく続くコミュニケーション中に起こる二方向性の刺激-脳-行動カップリング（個人間の行動-知覚ループ）を1つのシステムとして捉え、その相互作用メカニズムを探りたいと考える研究者もあり、その場合は二者の脳活動も同時に計測することが必須となる。

複数人の脳活動を同時に計測する、いわゆるハイパースキャンは、磁気共鳴画像装置(MRI)や脳磁計(MEG)で行おうとすると実験環境を構築するだけでとてつもない労力と資金が必要となるが、脳波計(EEG)や近赤外線分光鏡装置(NIRS)を用いたシステムは前者と比べれば比較的容易である。このようなこともあり、近年 EEG や NIRS を用いたハイパースキャン研究が飛躍的に増加している。

ところで、ハイパースキャン研究の難しさは課題の設計とデータの解析にある。リアルタイムで二者が相互作用するという事は実験者が制御できない交絡要因が多くなることを意味し、あまりに自由なやりとりでは何の脳活動を見ているのかがよく分からない。かといって実験者がそれを統制しすぎると、二者のやりとりの自然さが失われてしまい、見たかったものがこぼれ落ちてしまう。そのため、実験者は二者がなるべく自然にインタラクションでき、かつどのような脳活動を見ているのかが明確な実験デザインの構築に苦心することとなる。また、データ解析においても、現在は二者の脳活動の相関を見る研究がほとんどであるが、使用する計測装置によって実験パラダイムやデータの生理学的特性、解析手法がバラバラであり、言葉としては同じ「相互作用する二者の脳活動の同期」であってもそのことが持つ意味は全く異なる。しかしこのことをきちんと意識している当事者が以外に少なく、しかも脳活動の同期が見られたかどうかの現象論的な議論に終始し、その先の神経メカニズムに迫る研究はほとんどない。そしてこれらのことが、ハイパースキャン研究に混迷をきたし、外部から批判される原因ともなっている。はたして二者の脳活動が同期することに何らかの意味はあるのか、それともただの副産物なのかを明らかにするような研究も必要だろうし、同期以外の指標や解析法の確立も急務である。

本発表では、上記のことを踏まえ、ハイパースキャン研究の現状を概観し、この研究フィールドの進むべき方向性について議論したい。

言語コミュニケーションにおける複数脳の機能的・因果的ネットワーク解析

小野 弓絵

明治大学理工学部電気電子生命学科

ヒト対ヒトの言語コミュニケーションは、情報の送信者（発話者）と受信者（聴取者）が交互に役割を交代しながら、伝達される言語的情報と表情や声のトーンなどの非言語的情報とが周囲の環境の文脈に沿って一定の目的のために処理される、極めて高次な脳機能の発現である。本発表では、fNIRS を用いたハイパースキニング技術を用いて、日常的空間に近い実験環境において行われた言語コミュニケーション中の脳活動ネットワークの研究成果について紹介する。

実験では提示された物体の画像を交互に説明する **Object naming & description task** を用い、相手が説明した直前の話題と現在の画像の内容を関連付けて説明する **interactive** 条件と、提示された画像のみを説明する **monologue** 条件を設け、ペアとなる被験者の会話の双方向性の有無を変化させた。被験者が実際に自然な発話を行って課題を実行できることが、アーチファクトの観点から発話が制限される fMRI や EEG のモダリティと比較した fNIRS の大きな利点となっている。また、fNIRS データには主成分分析に基づく **global mean removal** 法を適用し、全身血流ノイズを除去したデータを用いて解析を行った。

発話時と聴取時を対比させた GLM 解析の結果、発話時には聴取時に比べ運動性言語野(Broca 野)の活動が増大し、聴取時には発話時に比べ感覚性言語野(Wernicke 野)の活動が増大する賦活パターンが得られた。これは発話想起や言語聴取課題による fMRI 研究の先行結果と一致しており、自然な言語コミュニケーションにおける言語性皮質活動を fNIRS が精度良く捉えられることを示している。双方向性コミュニケーションを伴う **interactive** 条件では、聴取時の Wernicke 野の活動が **monologue** 条件よりも有意に増大した。また、ウェアブレットコヒーレンスによる機能的結合性解析では、Wernicke 野の一部である左上側頭回と口腔感覚運動野の一部と考えられる左 **Subcentral area** の被験者間結合が **interactive** 条件において有意に増大した。グレンジャー因果による有向性結合性解析からは、双方向性が求められる **interactive** 条件にのみ、会話の受信者の Broca 野・Wernicke 野の間に双方向性の因果的結合が発生することを明らかにした。これは双方向性のある言語コミュニケーションを定義づけるのが、発話者-聴取者間の言語野活動の同期性の向上と、聴取者の主体的な言語情報処理の促進、すなわち「聞く態度」の変化にあることを示唆している。

fNIRS は発話を伴う日常的な言語コミュニケーション時の脳活動を捉えうる唯一のモダリティとして重要である。コミュニケーションの成立に関わる脳活動ネットワークの解明により、コミュニケーションの質の可視化や、自閉症者のコミュニケーション訓練システムの開発など、様々な医工学的応用が期待できる。

実世界インタラクションの fNIRS ハイパースキャニングによる脳同調研究

野澤 孝之¹

¹ 富山大学 nozawa@eng.u-toyama.ac.jp

概要

講演者らは、複数人が実世界で相互作用するなかで機能的なまとまりをダイナミックに形成していくプロセスを理解・評価・支援するという目標に向けて、fNIRS ハイパースキャニングをリアルなインタラクション場面に適用する一連の研究を行ってきた。二者間での統制された実験課題を用いていたそれまでの枠組みを超えて、集団での自然なコミュニケーションにおいて前頭前皮質活動の集団同調が促進されることを示すとともに、偽の脳同調検出につながるノイズの評価と分離の重要性を確立した(Nozawa *et al.*, 2016)。また、混雑状況下での集団歩行を対象にしたハイパースキャニング研究では、歩行者間の脳活動同調が集団としての身体的協調を反映することを見出した(Ikeda *et al.*, 2017)。身体同調と脳活動同調の間の因果的な関係を分析した研究では、先行する身体リズム同調体験が続けて行うコミュニケーションにおける社会的結合（ラポール）を促進し、その社会的結合促進効果がコミュニケーション参加者間の脳活動同調から定量的に評価できることを示した(Nozawa *et al.*, 2019)。さらに、fNIRS ハイパースキャニングを中学校や大学など実際の教育現場に応用し、教師と生徒間の脳活動同調による生徒の授業へのエンゲージメント評価や、アクティブラーニングにおける学習者間の脳同調による学習没入（フロー）体験の共有度の評価に活用できること(Nozawa *et al.*, 2021)などを示している。本講演ではこれらの研究について紹介させていただき、最後に現在行っている研究の方向性や問題意識についても触れたい。

参考文献

- Ikeda, S., Nozawa, T., Yokoyama, R., Miyazaki, A., Sasaki, Y., Sakaki, K., Kawashima, R., 2017. Steady beat sound facilitates both coordinated group walking and inter-subject neural synchrony. *Front. Hum. Neurosci.* 11, 147. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00147>
- Nozawa, T., Kondo, M., Yamamoto, R., Jeong, H., Ikeda, S., Sakaki, K., Miyake, Y., Ishikawa, Y., Kawashima, R., 2021. Prefrontal Inter-brain Synchronization Reflects Convergence and Divergence of Flow Dynamics in Collaborative Learning: A Pilot Study. *Front. Neuroergonomics* 2, 686596. <https://doi.org/10.3389/fnrgo.2021.686596>
- Nozawa, T., Sakaki, K., Ikeda, S., Jeong, H., Yamazaki, S., dos Santos Kawata, K.H., dos Santos Kawata, N.Y., Sasaki, Y., Kulason, K., Hirano, K., others, 2019. Prior physical synchrony enhances rapport and inter-brain synchronization during subsequent educational communication. *Sci. Rep.* 9, 12747. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-49257-z>
- Nozawa, T., Sasaki, Y., Sakaki, K., Yokoyama, R., Kawashima, R., 2016. Interpersonal frontopolar neural synchronization in group communication: An exploration toward fNIRS hyperscanning of natural interactions. *Neuroimage* 133, 484–497. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.03.059>

Best practices for fNIRS publications の勘所

檀 一平太

中央大学

2021年1月、Society for functional near-infrared spectroscopy (SfNIRS)の公式論文誌である *Neurophotronics* に fNIRS による論文報告のガイドラインとして、“Best practices for fNIRS publications”(*Neurophotronics*, 2021, 8: 012101)が発表された。かつて研究論文報告のガイドラインとして発表された論文としては、fMRI 研究用の“Guidelines for reporting an fMRI study” (*NeuroImage*, 2008, 40: 409–414)、ERP 研究用の“Guidelines for using human event-related potentials to study cognition: recording standards and publication criteria”(*Psychophysiology*, 2000, 37:127-52)等が有名である。本論文は、それらをベンチマークとしつつ、fNIRS 研究における自由度を損ねることなく、科学的論文としての質を担保するために必要な情報を提供し、fNIRS 研究の推進をサポートしようという試みである。

著者は総勢 22 名で、筆頭著者は Meryem A. Yücel (ボストン大学)、 Alexander v. Lühmann (ハーバード大学)、 Felix Scholkmann (チューリッヒ大学)、 Judit Gervain (パドバ大学)、 Ipeita Dan (中央大学) の 5 名である。これらが中心となって、方法論に詳しい斯界のエキスパートを招待し、執筆にあたっていただいた。さらに Society for fNIRS の執行役員が執筆者として加わり、記述の妥当性を入念に検討した。なお、日本からは、Fumitaka Homae (都立大学) が参加し、主にネットワーク解析の執筆を担当している。

fNIRS 研究は、新規参入の研究者が多いため、英語論文の発表に慣れていないことも想定し、本ガイドライン論文は、IMRAD 方式を念頭に構成されている。ある意味、fNIRS 研究に例を取った論文執筆入門という面もあり、fNIRS 研究のみならず、一般的に便利な情報も満載である。たとえば、論文のタイトルの選び方や、要旨の構成法、序論に何を書くべきか、サンプルサイズをどのように扱うかなど、他分野にも通じる知識も多い。これは、fNIRS 研究は異分野との融合性が高く、学際的な側面を持ちやすいため、一般的な読者にも通じる内容を書かねばならないというためでもある。

一方で、Methods に関しては、かなり専門的な解説が施されている。背景にあるのは、再現性を担保するという哲学であり、fNIRS 研究を他者が再現するために、必要不可欠な情報を記載すべきという姿勢が明確に示されている。たとえば、実験デザインの記載法、プローブ配置の方法、体動ノイズ、生理的ノイズ、フィルタリング、信号の計算手法など、fNIRS 独特の解析方法をほぼ網羅し、その上で、再現性を担保する記述をどうなすべきかに言及している。もちろん、典型的な統計解析手法や、ネットワーク解析、画像再構築法、マルチモーダル計測の取り扱いなど、fNIRS に頻出する手法に関しても、基本的な言及はなされている。このような特色を踏まえると、Methods に関しては、ある意味 fNIRS 研究における方法論の実用的レビュー論文という側面もあり、影響力のある方法論論文へのアクセスが容易になるという意味でも便利である。

Results に関しては、fNIRS 論文は比較的コンパクトな場合が多いが、その中でも図の重要性はかなり強調されている。端的に言って、分かりやすく、見栄えのよい図が、fNIRS 研究の肝である。キメの図が一目瞭然のインパクトを持てば、その論文はまず成功していると言っても過言ではない。

Discussion に関しては、日本人研究者にとっては比較的耳の痛い情報が並んでいる。なぜか日本からの研究論文は、結果の解釈で議論が終わる場合が多く、既存の知識体系にどのように研究成果が位置付けられるかを述べている場合が少ない。この点を最初から強調することを、本ガイドライン論文では推奨している。

発表 1 年半を経て、すでに 75 件の被引用がなされ、本ガイドライン論文の有用性は示されつつある。少なくとも本論文を一読すれば、fNIRS 研究論文で書くべき点は明瞭になり、その結果、論文の採択率は向上すると期待できるだろう。

拡散光トモグラフィとトポグラフィ

星 詳子

浜松医科大学

近赤外光を用いるコンピュータ断層撮影(optical computed tomography : optical CT)は、多チャンネルの拡散光スペクトロスコープ(diffuse optical spectroscopy : DOS)装置を用いて複数の領域を計測し、検出された光をDOSとは異なる方法で解析して、計測対象の吸収係数(μ_a)と換算散乱係数(μ_s')の分布をもとめて画像表示する方法である。 μ_a からヘモグロビン(Hb)など光吸収物質濃度を算出して、それらの分布を画像表示することができる。Optical CTは、X線CTやMRIなどのような画像診断法として、また、光吸収物質濃度の定量計測法としての用途があり、DOSの限界(生体内の限局した領域における光吸収物質の濃度・濃度変化を選択的に定量計測することが困難である)を克服することができ、近赤外光による生体計測の中で最も高度な技術の一つである。

Optical CTの開発当初は、散乱を受けずに、あるいは受けたとしても数回程度でほぼ直進してきた光を検出し、X線CTと同様の方法(フィルタ補正逆投影法)での画像再構成が試みられた。しかし、強散乱体である生体において光は何度も散乱され(多重散乱)、ランダムな方向に広がり(拡散)、体表で直進光はほとんど検出されない。そのため、拡散光を検出して逆問題解析によって μ_a と μ_s' の分布を求める方法が提案され、現在は拡散光トモグラフィ(diffuse optical tomography: DOT)、近赤外光トモグラフィ(near-infrared optical tomography, NIROT)、光トモグラフィ(optical tomography, OT)と呼ばれている。

DOTは、しばしばDOSによる光トポグラフィと混同されるが、全く異なる方法である。脳計測の場合を例にすると、光トポグラフィは頭皮、頭蓋骨、くも膜下腔、脳に起因する吸収変化を組織ごとに分離することなく、融合された信号を複数の照射・検出ペアで検出し、さらにデータ補間をして信号強度の二次元画像を作成し、頭皮上あるいは脳表に重ねあわせて表示する。一方、DOTは頭部における光伝播数理モデルを解いて検出される光を予測し、予測値と実測値の差を最小にする μ_a と μ_s' の分布を求めることによって、脳組織に由来する信号を脳外組織に由来する信号と分離して画像を再構成し、三次元画像表示も可能である。

DOT画像再構成法は、二種類に大別される。一つは、 μ_a と μ_s' の変化とそれらによって生じる計測値の変化の関係を線形式で表して逆問題を解く方法(線形化画像再構成法)で、もう一つは、 μ_a と μ_s' の値と計測値の関係を非線形のまま表記して逆問題を解く方法(逐次近似画像再構成法)である。前者は、連続光計測で高性度の画像を再構成することができるが、線形式が成立するのは、脳臓活領域のように μ_a 、 μ_s' の変化が量的にあるいは空間的に小さい場合に限られ、主として脳機能イメージング研究で用いられている。線形化画像再構成法では、ある時点での μ_a 、 μ_s' の値(バックグラウンド値)ではなく、バックグラウンド値からの変化量が計測されるが、正確な定量計測は困難である。一方、非線形逐次近似画像再構成法は、バックグラウンド値を定量計測することができ、この方法によるDOTは画像診断法として期待され、乳がんや甲状腺がん診断のための開発が行われている。

本シンポジウムでは、まず、光トポグラフィの課題を整理し、次にDOT画像再構成アルゴリズムと臨床応用について概説し、最後に今後の展望について述べる。

【参考文献】

1. Y. Hoshi, Y. Yamada. Overview of diffuse optical tomography and its clinical applications. J. Biomed. Opt. 21: 091312, 2016.
2. 星詳子, 山田幸生(監修). 生体ひかりイメージング 基礎と応用. エヌ・ティー・エス, 東京, 2021.

線形逆問題による連続光型拡散光トモグラフィの基礎検討 実現可能性と限界

藤井 麻美子¹

¹旧所属 上智大学 理工学部
(現都立産業技術高専非常勤講師)

はじめに

線形逆問題法による連続光型の拡散反射型光 CT はベッドサイド以下の機器サイズでリアルタイムの実装の可能性があるので、上智大学では CW 型の拡散 CT について検討を行っていた。散光 CT の逆問題では不良設定問題にならざるを得ない、本報告の多くは文献[1][2]等にて発表していたもので、ここではその後の知見も加え設計要件の概要を報告するとともに“感度”の重要性についても触れたい。

報告概要

線形逆問題のシミュレーション

図のように頭部表面組織を想定した対象領域を矩形状に j 個の voxel に分割し体表面上に 5×5 の検出器と 4×4 の光源を交互に配置した。 $i (=400)$ 個の計測データ \mathbf{b} 、感度行列 \mathbf{A} および j 個の voxel の吸収係数変化の分布を \mathbf{X} とすると(1)式で表される。 \mathbf{A}_{ij} の係数行列要素は均質媒質を想定した光拡散近似で与えた。(2)式に示す Moor-Penrose 一般逆行列と Tikhonov の正則化により \mathbf{X} を求めた[2]。

$$\mathbf{b}_i = \mathbf{A}_{ij} \cdot \mathbf{X}_j \quad \dots(1)$$

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A} + \mathbf{D})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad \dots(2)$$

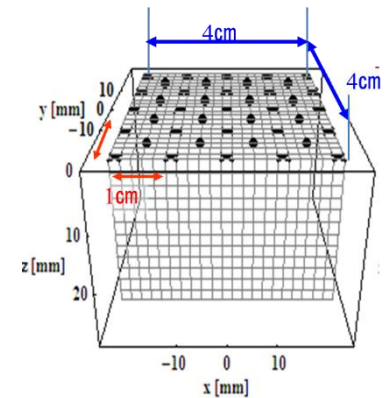


Fig. 1 Simulation model
最小オプトード間隔：14 mm

検討結果のまとめ

設計要件の概略 (1) 光源・検出器配列は対象層に測定感度を与える配置であること。(2) 再構成範囲は測定信号感度が低い領域を再構成範囲から排除する。(3) 同時に測定信号感度が高い不要領域を再構成範囲に含める。(3)適切な正則化により画像ノイズの画像分解能の取引関係適切な正則化を選ぶ。(4) 必要に応じボクセルサイズの場合により変える。(5)高分解能化には高密度の計測が必要。(2)～(4) の正則化およびボクセルサイズの与え方は感度分布が利用できる。

線形逆問題の問題点 悪条件の解の不安定により再構成画像にはゴースト信号が必ず入る。一つの解は全てのチャンネルの計測データ \mathbf{b} の影響を受けるため、たとえ 1ch への混入雑音でも影響が広がる。深部と表層を同時に標的とする場合には短距離と長距離間隔の計測が必要となる。検出器の飽和対策が必要でさらにノイズの増大も配慮しなければならず、必要な SN を保証するには技術的な工夫も求められる。

おわりに

脳の構造も取り込んでボクセル配置と正則化法を工夫すると再構成画像は改善する。しかし、ほぼ非拘束の機器を目指すとなると、多数のケーブルを引き回しての CW 型の拡散光 3D イメージングは実用性がないとの結論になり、表層血流の分離に特化した fNIRS の実験機を開発することになった[3]。CW型の実現にはでは高密度の多数の計測 \mathbf{ch} が必要なため軽量で高速切り替え可能な高密度センサヘッドの実現が求められる。

参考文献

- [1] 遠藤 怜子. 拡散反射型光 CT の研究. 上智大学. 2005. 博士論文
- [2] Reiko Endoh, et al, "Depth-Adaptive Regularized Reconstruction for Reflection Diffuse Optical Tomography" Optical Review, 15,51-56 (2008)
- [3] Fujii, M. and Nakayama, K., "Signal filtering algorithm for depth-selective diffuse optical topography," Phys. Med. Biol. 54, 1419-1433 (2009).

電流源推定法の発展から考える拡散光トモグラフィ法の未来

山下宙人^{1,2}

¹ ATR 脳情報解析研究所, ² 理化学研究所革新知能統合研究センター

本講演は、脳波・脳磁図の分野で研究が進められている電流源推定法をロールモデルとして、拡散光トモグラフィ法の将来を議論するための話題提供することを目的とする。電流源推定法も拡散光トモグラフィ法と同様に順問題・逆問題を解くことにより、頭の外に設置したセンサで計測したデータから脳内の活動を推定する方法であり、すでに分野内では標準的な解析手法として広く普及していることから、電流源推定法の発展の歴史を振り返ることは、拡散光トモグラフィの将来を考える上で参考になるだろう。

電流源推定法は、ミリ秒オーダーの速い電気活動を非侵襲的な方法で脳内にマップする唯一の方法である。1980年代初頭に研究が開始されてから、その後20年ほどは方法の改良や理解のための研究が続けられた。2000年代中盤になって、ブレインストームやSPM, MNE, VBMEGなどのオープンソースソフトウェアの開発に伴い、急速にコミュニティに普及し、2010年代には全脳ダイナミクスの研究が *Nature neuroscience* や PNAS などのハイインパクトジャーナルに研究が次々と掲載された。現在では大半の脳波・脳磁図の研究では電流源推定が利用されている。電流源推定を普及した要因を、コスト・ベネフィットの観点から考えてみると、大きなコストであった高度なアルゴリズム開発がオープンソース化により不要になり、かつ fMRI では観測できない脳ダイナミクスを可視化出来るという付加価値が大きく上回ったことが要因であったと考えられる。

では、拡散光トモグラフィ法の場合はどうであろうか。拡散光トモグラフィ法は、多チャンネル fNIRS と計算アルゴリズムを用いて脳内のヘモグロビン濃度変化を3次元画像として再構成する方法である。脳皮質上の活動位置・ヘモグロビン濃度の物理量など、fNIRS データからは得られない情報を得ることができる。現在の膨大なヒト脳機能研究の知見は脳解剖上の位置情報とリンクする形で蓄積されていることを考えれば、fNIRS 研究の利便性を活かしつつソリッドな脳研究を実施できるということは1つの付加価値であろう。しかし、光拡散トモグラフィを実施するためには、高度な物理・数学の知見に基づいたアルゴリズム開発が必要であり、さらに画像の空間分解能を上げようと思えば高密度計測が必須であるが、高密度計測のための専用ハードウェアの調達および実験コスト問題となり、膨大なコストがかかる。現状のままでは、まだコストがベネフィットを超えるのは難しいように思う。

将来、拡散光トモグラフィ法が普及するためには、ユーザのコストを下げ、ベネフィットを上げる必要がある。前者のためには、やはりオープンソースの普及が有効であろう。後者のためには、fNIRS の利便性と拡散光トモグラフィの正確性が必要な真に付加価値のあるキラーアプリケーションを発掘することが必要だろう。そのためには、コミュニティとして進む大きな方向性をもち、ラボを超えた共同研究体制を構築することが重要かもしれない。

医療イノベーションと医療経済の見地から

江田 英雄^{1,2}

¹光産業創成大学院大学, ²株式会社フォトニクス・イノベーションズ

はじめに

拡散光トモグラフィーの実用化の検討にあたり、イノベーションなどの見地から検討を進めることが本発表の目的である。前向きな姿勢で検討を進めたい。

イノベーション研究の視点から

イノベーションは、シュンペーター (1912)、ドラッカー (1985)、クリステンセン (1997) などで微妙に定義が異なっている。シュンペーターはマルクス経済学を視野にいれて語るような気がする。ドラッカーは日米のプラザ合意とヤング・レポート (1985)、その後のパルミサーノ・レポート (2004) など政治的な視点を持つと俯瞰しやすい。クリステンセンの「イノベーションのジレンマ」は技術者の視点からも理解しやすい。他にもイノベーション研究は多い。何がイノベーションであるかを、現在進行形で確認するのは難しい。イノベーションとはどんな価値を社会に与えるのか、つまるところその一点に尽きるように思う。

近赤外分光法 (Near Infrared Spectroscopy, NIRS) 研究において、1チャンネルのシステム、多チャンネルの計測装置を使った画像表示システムが開発されてきた。画像化手法の違いで、光トモグラフィーと拡散光トモグラフィーとが分類される。NIRS 画像表示システムは、1チャンネル NIRS の制約を引き継いでいる。NIRS 開発の経緯をふまえて、それぞれのシステムが医療分野、脳研究分野にどのような価値をもたらしてきたのか、イノベーションの視点からの議論が望まれる。開発経緯、計測手法の長所短所、できることとできないことなどをきちんと知ることが、将来の可能性の議論につながる。

医療経済の見地から

ヒト計測装置のビジネスは、医療と医療以外とで分けて考える傾向が日本には強い。医療ビジネスは薬機法の対象であり、医療機器として市場に出すのであれば必須となる。薬機法対応に加えて、使用する側に利益をもたらすためには、保険適用が必要となる。医療経済の視点からは、病院に利益をもたらす装置が歓迎されることは事実である。医療応用にあたってはどのような症例に使えるのかについて、たくさん事例を持つほうが有利である。医療ビジネスにおいては「その装置がどれだけ命を救えるか」の問いに対する答えを準備する必要がある。ビジネスでは知的財産戦略や標準化対応が必要となることは言うまでもない。

また、研究の範囲を突き詰めるならば「そのシステムを使ってどんな新しい研究が進められるのか」の問いに対する答えを準備する必要がある。国からの助成金獲得の検討だけでなく、助成金をどのように仕掛けていくかなど、政治的な見方もあると強い。

光拡散トモグラフィーの実用化のための検討メモ

研究及び実用化を積極的に進めていきたい。そのためにも、次のような点について考えていきたい。この計測システムは何に使えるのか。主に誰が使うのか。他の画像装置と比べた特徴は何か。この計測システムでしか計測できないもの、かつ、重要なものは何か。ヒトの QOL (quality of life) 向上にどうやって役立たせるのか。ハードウェアは極上のものになっているか。日本として勝てるか。この研究を続けることで、若手の研究者が happy になれるか。どのような価値を社会にもたらすことができるのか。

ポスター発表 演題一覧

会場	ポスター番号	演題名	発表者
3A	P1-1	安静時と課題時における前頭前野活動の左右優位性と心拍数の関係	胡 献引, 伴 祐樹, 山田 幸生, 酒谷 薫, 割澤 伸一
	P1-2	嫌悪画像に対する聴覚刺激の影響	山内美穂 岩切昌宏 榎藤恭之 猪原匡史
	P1-3	脳NIRS信号の拍動成分の解析法(第2報)―PaO2とPaCO2との関係	栗田太作 灰田宗孝 沓澤智子
	P1-4	仮想現実空間の視覚刺激による姿勢外乱時の脳活動への影響	西本遼輝、三原雅史
	P1-5	近赤外分光法を用いた線維筋痛症患者におけるStroop test実施中の前頭前野機能局在について―中高年線維筋痛症を対象とした―考察―	藤田 信子1) 仙波 恵美子2)
	P1-6	ASDリスクの異なる乳児における母の語りかけに対する脳反応	星野英一、秦政寛、徐鳴鏞、宮原冨佳、山本絵里子、皆川泰代
3B	P2-1	早産児周期性呼吸が脳ヘモダイナミクスに与える影響	白木杏奈1、城所博之1、渡辺はま2、多賀巖太郎2、成田肇1、光松孝真1、隈井すみれ1、鈴木良輔1、澤村文1、伊藤祐史1、山本啓之1、中田智彦1、佐藤義朗3、早川昌弘3、夏目淳1、4
	P2-2	正期産児の睡眠段階と脳機能ネットワークの関連	城所博之、白木杏奈、渡辺はま、多賀巖太郎、牛田貴文、野坂麗奈、成田肇、光松孝真、隈井すみれ、鈴木良輔、澤村文、伊藤祐史、山本啓之、中田智彦、佐藤義朗、早川昌弘、夏目淳
	P2-3	アイコンタクトに伴う脳活動信号 ―対面とオンラインコミュニケーションの比較―	佐藤練、佐藤大樹
	P2-4	情報量を用いた脳活動間相互作用の定量化	森本 智志, 皆川泰代
	P2-5	多波長NIRSによる脳組織酸素化・代謝・流体輸送のダイナミクスの分析	多賀巖太郎、渡辺はま
	P2-6	心理的プレッシャー下における運動パフォーマンスと関連する脳活動信号の探索	仲田 記士、眞名井 貴裕、佐藤 大樹

安静時と課題時における前頭前野活動の左右優位性と心拍数の関係

胡 献引¹, 伴 祐樹¹, 山田 幸生¹, 酒谷 薫¹, 割澤 伸一¹

¹ 東京大学 新領域創成科学研究科

【研究背景】前頭前野（PFC）による自律神経系・内分泌系のストレス反応の調節には左右優位性が存在し、右側 PFC は左側より大きな役割を果たしていることが NIRS 研究により報告されている^[1]。しかしながら、このような PFC による自律神経系・内分泌系の調節機構は、ストレス刺激を受けた時にのみ機能しているのか、それともストレスのない状態でも機能しているのかは未だ明らかではない。また、PFC によるストレス反応の調節機構の時間応答性も不明である。

【研究目的】本研究は安静時、及びストレス課題遂行時において、健常人の PFC の左右優位性と心拍数の関係を調査した。さらに、ストレス反応の PFC 調節機構の時間応答性を検討した。

【実験と解析】被験者 29 名（男性 28 名、女性 1 名、平均年齢 24.9±2.4 歳）を対象とした。被験者の両側前額部に 2 チャンネル NIRS センサー（Hb133、アステム社）、胸部に心電センサー（Plux 社^[2]）を装着し、PFC 活動と心電信号を同時計測した。計測した NIRS 信号に血流動態分離法^[3]を適用して脳機能性成分のみ抽出し、安静時と課題遂行時の PFC 活動の左右優位性指標 Laterality Index（LI）^[4]と心拍数（HR）の相関分析を行った。さらに NIRS 計測の全期間終了後に解析するオフライン解析のほかに、一定の時間窓を扱うオンライン解析（リアルタイム解析）を行った。オフライン解析では各被験者の各セッションにつき 1 組の LI と HR が算出されるのに対して、オンライン解析では 2 秒から 1 分までの時間窓を分析区間とし、各被験者の各セッションについて複数組の LI と HR が算出される。実験プロトコルは、5 分間の安静状態（pre-Rest）の後に、高い認知負荷を要する 2-back 課題を 5 分間行い（Task）、最後に 10 分間安静状態とした（post-Rest）。

【結果と考察】オフライン解析では、安静時（Pre-Rest、Post-Rest）には LI と HR の間には相関が認められず、課題遂行時にのみ相関が認められた（ $R=0.28, p=0.137$ ）。また、オンライン解析においても同様の結果が得られた（表 1）。これらの結果は、右優位の PFC による自律神経系の制御は、ストレス刺激を受けた時にのみ機能していることが示唆された。さらに、この関係性は 60 秒から 2 秒の全ての分析間隔で観察できた。

表 1 各解析時間窓（2s～60s）における PFC 活動の左右優位性指標（LI）と HR の相関関係

セッション/窓時間	2s	5s	10s	20s	30s	40s	50s	60s
Pre-Rest	0.08**	0.06*	0.07*	0.08 n.s.	0.07 n.s.	0.09 n.s.	0.08 n.s.	0.07 n.s.
Task	0.24**	0.22**	0.22**	0.22**	0.24**	0.26**	0.27**	0.28**
Post-Rest	0.02 n.s.	0.04*	0.05*	0.05 n.s.	0.05 n.s.	0.06 n.s.	0.06 n.s.	0.05 n.s.

**: $p<0.01$, *: $p<0.05$, n.s.: $p>0.05$

引用文献

1. [Sakatani K.](#) Optical diagnosis of mental stress: review. Adv Exp Med Biol. 737:89-95, 2012.
2. PLUX wireless biosignals S.A. Biosignalplux, Wearable body sensing sensing.
3. T. Yamada, et al. Separation of fNIRS Signals into Functional and Systemic Components Based on Differences in Hemodynamic Modalities. PLoS One. 2012;7(11):e50271.
4. Ishikawa W., et al. Correlation between asymmetry of spontaneous oscillation of hemodynamic changes in the prefrontal cortex and anxiety levels: a near-infrared spectroscopy study. J Biomed Opt. 2014 Feb;19(2):027005.

謝辞：NIRS センサー（Hb133）を貸与して下さったアステム社に感謝いたします。

嫌悪画像に対する聴覚刺激の影響

山内美穂^{1,3}, 岩切昌宏², 権藤恭之³, 猪原匡史¹

¹国立循環器病研究センター, ²大阪教育大学, ³大阪大学

【背景】

脳卒中発症後には抑うつ状態がみられることが知られているが、脳卒中後の脳内神経線維のダメージと抑うつ症状が関連しており、脳内神経ネットワークの改善が抑うつ症状を改善する可能性が示唆されている。抑うつ症状の改善には大別して薬物療法と心理療法があり、心理療法の一つである EMDR(Eye Movement Desensitization and Reprocessing)は否定的記憶の神経ネットワークを適応的なネットワークに変化させることで症状の緩和や消失をもたらす、抑うつに対しても治療効果が示されている。EMDR の治療手続きの中で用いられる眼球運動や音、触覚などの両側性刺激が脳に直接的に刺激を与えることに効果があると考えられているが、その治療機序はまだ十分に明らかにはなっていない。うつ病には前頭前野が大きく関与しており、うつ病者では左前頭前野の活動の低下と、不快予測に関わる右前頭前野の活動の亢進が知られている。そこで本研究では前頭前野の活動に両側性刺激がどのような効果をもたらすのかの検討を目的とした。なお脳卒中後には高頻度で眼球運動障害が起こることが知られていることや、うつ病者では追跡眼球運動に異常が見られるという報告がある。そこで、本研究では受動的に享受できる聴覚的両側性刺激を用いた嫌悪画像による不快時の前頭前野の活動への影響を検討した。

【方法】

被験者は健康な大学生・大学院生 12 名（男性 3 名、女性 9 名、平均年齢 22.4±2.7 歳、右利き）である。実験前には STAI による心理状態の評価を実施した。実験はブロックデザインを用い、国際感情画像システムによる嫌悪画像および中立画像呈示時に、聴覚刺激を呈示した。聴覚刺激は EMDR 用オーディオデバイスの音を参考に実験用に作成した電子音を用い、イヤホンから 250 ミリ秒間の刺激音を 750 ミリ秒間隔で左右交互に呈示した。fNIRS には ETG-7100(日立メディコ社)を用いて、国際 10 - 20 システムに準拠して 47 チャンネルで実施し、酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)濃度変化を測定した。

【結果】

聴覚刺激なし条件での嫌悪画像と中立画像の差分では、左背外側前頭前野よりも右背外側前頭前野の活性が高く示された。これは、先行研究と同様に嫌悪画像による不快な状態が反映されていると考えられた。一方、聴覚刺激あり条件での嫌悪画像と中立画像の差分では、右背外側前頭前野の活性は低かった。また、同部位は、聴覚刺激なし条件と聴覚刺激あり条件の間で有意な活性の低下があった($p<0.05$)。これは聴覚的両側性刺激により実験画像呈示時の右背外側前頭前野の活動が相対的に低く変化したといえる。STAI・状態不安の結果から被験者を 2 群に分けて検討すると、不安が高い群で聴覚刺激なし条件と聴覚刺激あり条件の間の右背外側前頭前野における活性が有意に低下しており($p<0.01$)、不安が高い群の方が聴覚的両側性刺激の効果が大きかった。左背外側前頭前野は、聴覚刺激なし条件よりも聴覚刺激あり条件のほうが活性化していたが、有意差はなかった。

【結論】

聴覚的両側性刺激によって不快時の前頭前野の活動に変化が起こることが示された。実験画像に対する右背外側前頭前野の活動の変化から、両側性刺激によるネガティブな情動の軽減が推測される。本研究で確認された両側の背外側前頭前野で活性の変化は、聴覚的両側性刺激が脳内神経ネットワークに働きかけた結果と考えられ、EMDR における両側性刺激は抑うつの改善に関与する可能性が示唆される。

脳 NIRS 信号の拍動成分の解析法（第 2 報）—PaO₂ との関係

栗田 太作¹, 灰田 宗孝², 沓澤 智子³

¹東海大学理系教育センター, ²東海大学スポーツ医科学研究所, ³東海大学医学部看護学科

【目的】近年、近赤外分光法(NIRS)において、定性的ヘモグロビン(Hb)濃度変化を測定する修正ピア・ランバート則(MBL)により酸素化と脱酸素化、およびそれらの和として総 Hb 濃度長変化(ΔHbO_2 、 ΔHb 、 ΔHbT)の経時変化である NIRS 信号が、高時間分解能で得られるようになった。MBL によるヒト脳 NIRS 計測において、NIRS 信号に脈派（拍動成分）が観測されているが、 ΔHbO_2 の拍動成分 ($\text{P-}\Delta \text{HbO}_2$) に由来するものであった。しかしながら、 ΔHb の拍動成分 ($\text{P-}\Delta \text{Hb}$) は、 $\text{P-}\Delta \text{HbO}_2$ と比べ検出感度や信号対雑音(SN)比が低く微弱と考えられるため、一般的に観測困難である。我々は、拍動成分に着目し、高 SN 比が得られる NIRS 信号の積算アルゴリズムを開発して、 $\text{P-}\Delta \text{Hb}$ を観測可能とした。本研究では、その手法を用い、吸入気酸素濃度(FiO_2)を変化させたときの $\text{P-}\Delta \text{HbO}_2$ と $\text{P-}\Delta \text{Hb}$ および $\text{P-}\Delta \text{HbT}$ の変化を明らかにすることを目的とした。

【方法】対象は雄性 Wistar rat、9-10 週齢、体重 260-310g、計 9 匹。Isoflurane 1.4-2.1%と 30% O₂ 混合の吸入麻酔下で、大腿動静脈にカニューレを挿入し、気管切開後、人工呼吸管理を行って、頭蓋半透明モデルを作製した。頭蓋半透明モデルは、頭皮を除去し大脳周辺の頭頂骨を薄く削ることで作製した。このモデルでは、皮膚血流の影響なく脳内の直接的な NIRS 信号を得ることができる。NIRS 計測は、alpha-chloralose の静脈麻酔のみで行った。NIRS 装置は、Spectratech OEG-17APD を使用した。オプトード(光照射部と光検出部の対)は、外径 2.5mm ϕ の光ファイバーケーブルを使用し、オプトード分離距離 (SD)を 2.5、5.0、7.5、10.0 mm とし、頭蓋半透明モデルの大脳周辺に設置した。NIRS 信号のサンプリング時間は、ラットの心拍数に十分対応した、 5.12×10^{-3} sec の高時間分解能で行い、血圧データと同時に取得した。呼吸管理は、1 回換気量を 8 ml/kg、呼吸数を約 70 回/分とし、 FiO_2 を 12-30%で変化させた。各 FiO_2 条件下において、血液ガス分析(pH、動脈血二酸化炭素分圧(PaCO_2)、動脈血酸素分圧(PaO_2))を施行した。拍動成分の解析は、前回当学会で報告した NIRS 信号の積算アルゴリズムを使用し、各 FiO_2 に対する $\text{P-}\Delta \text{HbO}_2$ と $\text{P-}\Delta \text{Hb}$ および $\text{P-}\Delta \text{HbT}$ の経時変化を求め行なった。また、 PaO_2 は FiO_2 に反映されるので、得られた経時変化において、起点から終点までの曲線下の面積(AUC)を求め、 PaO_2 に対する 9 例の AUC の平均値(AUC 平均)の関係を検討した。なお、 PaO_2 が正常範囲である 30%O₂ 吸入下を正常状態と仮定した。今回は、SD 7.5 mm のデータを中心に報告する。

【結果】代表例として正常状態 FiO_2 30%から 18%において、 $\text{P-}\Delta \text{HbO}_2$ の経時変化はプラス側に変化したのに対し、 $\text{P-}\Delta \text{Hb}$ はマイナス側に変化した。対照的に、低酸素状態 FiO_2 15%から 12%の $\text{P-}\Delta \text{Hb}$ の経時変化は、プラス側に変化し、 FiO_2 12%ではより明確となった。 $\text{P-}\Delta \text{HbO}_2$ の経時変化の最大値は、正常状態と比較し、低酸素状態で増加した。 $\text{P-}\Delta \text{Hb}$ の AUC 平均は、 PaCO_2 をほぼ一定(30-42 mm Hg)にし、 PaO_2 を 120-35mm Hg の範囲で変化させると、 PaO_2 120-70 mm Hg ではマイナス側で、ほぼ一定となり、70-35 mm Hg でプラス側に増加した。 $\text{P-}\Delta \text{HbO}_2$ の AUC 平均は、120-60 mmHg で緩徐に増加し、60-35 mm Hg で僅かに減少する傾向を示した。 $\text{P-}\Delta \text{HbT}$ の AUC 平均は、120-80 mm Hg で増加傾向を示し、80-35 mm Hg で急峻に増加した。

【結論】 PaO_2 低下に伴う $\text{P-}\Delta \text{HbT}$ の AUC 平均が増加する変化は、脳血管拡張による脳血液量の増加を反映するものと考えられた。 $\text{P-}\Delta \text{Hb}$ の AUC 平均がマイナス側からプラス側に増加する変化は、毛細血管内での変化と仮定するならば、産生された脱酸素化 Hb が PaO_2 60 mm Hg 以上では washout される脳血流速度を保っていたが、脳血管拡張により PaO_2 60 mm Hg 以下では脳血流速度が低下して washout されていないと考えられた。 $\text{P-}\Delta \text{HbO}_2$ の AUC 平均が、緩徐に増減する変化は、保たれていた脳血流速度が、血管拡張により低下したためと考えられた。

仮想現実空間における姿勢外乱時の脳活動の解明

西本 遼輝¹, 三原 雅史²

¹ 東京大学医学部附属病院リハビリテーション科, ² 川崎医科大学神経内科学

【背景】ヒトの立位バランスの制御は、その小さな支持基底面と高い重心から、四足動物と比較して不安定性が強い構造となっている。中枢神経系による立位制御には大脳皮質の働きが重要であることがいくつもの先行文献から示唆されているが、その多くは研究デザインに二重課題条件を用いている。二重課題条件では、一方もしくは両方の課題成績の悪化がみられることが多いが、いくつかの条件設定では課題成績の低下がみられず、反対に課題成績が向上することが報告されている。このような課題間の干渉を説明すべくいくつかの理論モデルが提案されているが、結論はでていない。よって本研究では、二重課題条件下で機能的近赤外分光法 (fNIRS) による脳活動測定を行い、課題間干渉の理論モデルを検討することとした。

【方法】24名の健常若年者 (24.4±5.4歳, 平均±SD) が参加した。二重課題条件として、運動課題を、前後方向に水平移動するプラットフォーム上で立位を維持する (姿勢動揺) 課題とし、視覚課題を、Virtual reality (VR) 機器により再現した前後方向のVR空間の動揺 (視覚動揺) 課題と、多数配置された移動するアバターによる視覚情報負荷 (視覚散乱) 課題を用いた。実験条件は次の4条件とした。①VISUAL条件: 視覚動揺のみ, ②POSTURAL条件: 姿勢動揺のみ, ③COMBINED条件: 視覚動揺+姿勢動揺, ④BUSY条件: 視覚動揺+姿勢動揺+視覚散乱。動揺課題はランダム間隔 (平均6秒) で計10回与えられ, ③, ④条件では動揺課題は同じタイミングで与えた。全4条件の順番はランダム化して測定を行った。測定項目は、動揺課題時の重心移動速度と下腿筋活動, および、脳皮質活動とした。fNIRS測定は16対の発光器・検出器 (プローブ間隔3cm) による50チャンネル計測として (OMM-3000, 島津製作所), 先行文献を参考に、fNIRSの装着と、計測チャンネルと脳皮質領域のレジストレーションを行った。high-pass filter (0.25 Hz) を用い、また、脳皮質計測チャンネル, および、ショートディスタンスチャンネル (プローブ間隔1.5cm) のそれぞれの第一主成分を回帰式に組み込んだ一般線形モデル (GLM) によって、脳活動評価を行った。

【結果】重心移動速度と下腿筋活動の結果では、全4条件で安静時と比較して有意な姿勢反応がみられた。条件間の比較では、②POSTURAL条件と③COMBINED条件の間には有意な差はみられなかったが、③COMBINED条件より④BUSY条件で有意に重心移動速度が増加した。脳活動測定では、姿勢動揺を含む3条件で背外側前頭前野 (DLPFC) の有意な活動がみられた。視覚動揺との組み合わせ (③) では補足運動野 (SMA) と上頭頂小葉 (SPL) の有意な活動がみられたが、視覚散乱がある条件 (④) ではその脳活動促進効果が消失していた。条件間の比較では、②POSTURAL条件と比較して③COMBINED条件で有意なSPLの活動亢進がみられ、また、③COMBINED条件と比較して④BUSY条件では有意なSMAの活動低下がみられた。

【考察】視覚動揺のみ (①) で姿勢反応が誘発される結果は先行研究と一致した。また、姿勢動揺に対する姿勢制御時にDLPFCが活動する結果も先行研究と一致した。また、③COMBINED条件で有意に活動を示したSMA, SPLは姿勢制御に重要な脳領域とされており、先行研究では視覚動揺と姿勢動揺のそれぞれに対してSMA, SPLを含む脳領域の活動が報告されていることから、両者に対する神経活動が干渉されることなく、促進された可能性が示唆された。この結果は、理論モデルのひとつ“Cross talk model”を支持すると考えられた。視覚散乱の存在によって姿勢制御能の低下がみられ、視覚動揺による脳活動促進効果が消失した結果から、視覚情報の特徴によって姿勢制御能は両方向に影響を受けることが示唆された。

【結論】姿勢動揺と視覚動揺を組み合わせた二重課題条件下での姿勢制御能と脳活動評価を行った結果、課題間干渉の理論モデルのひとつである“Cross talk model”を支持する結果が得られた。負荷する視覚情報の特徴によって、姿勢制御に対する脳活動は促進および阻害される可能性が示された。

近赤外分光法を用いた線維筋痛症患者における Stroop test 実施中の前頭前野機能局在について — 中高年線維筋痛症を対象とした一考察 —

藤田信子¹⁾ 仙波恵美子²⁾

¹⁾奈良学園大学保健医療学部リハビリテーション学科 ²⁾大阪行岡医療大学医療学部

【要旨】 目的：近赤外分光法 NIRS (Spectratech OEG-16, スペクトラテック社) を用いて Stroop test 開始前および実施中の中高年線維筋痛症 (fibromyalgia: 以下 FM) 患者および健常中高年者の前頭前野脳血流動態を用いて測定し, test 実施中の前頭前野の3領域 (左右背外側前頭前野、前頭極) の脳活動を比較し検討を行った。

方法：中高年 FM 患者 10 名 (65.8±10.7 歳) および健常中高年者 29 名 (69.3±6.2 歳) を対象とし, Stroop-A, -B test 開始から実施終了までの前頭前野3領域の酸素化ヘモグロビン濃度 (oxy-Hb 値) を測定した。また test 開始前の準備期と test 実施中の oxy-Hb 値の差分、 Δ oxy-Hb 値を求め, 課題実施中には前頭極の脳活動は不活性化する (TID: task induced deactivation) としたデフォルトモードネットワークの状態についても検討を行った。

結果：Stroop-A の右 DLPFC の oxy-Hb において中高年 FM 患者は健常中高年者に比べ有意に低い値を示した ($p<0.01$)。その他に有意な差はみられなかったが, Stroop-A, -B ともに, 健常中高年者の右 DLPFC の oxy-Hb は他の領域よりも高い傾向がみられたが、一方で中高年 FM 患者の右 DLPFC の oxy-Hb は他の領域よりも低い傾向を示した。

中高年 FM 患者の DLPFC の Δ oxy-Hb 値は左右ともに健常中高年者のよりも低い値 (右： $p<0.05$ 、左： $p<0.01$) を示したが、前頭極の Δ oxy-Hb はグループ間に差はみられなかった。

考察：健常中高年者は test 実施中には右背外側前頭前野が他の領域より活性化していることが明らかとなったが, 中高年 FM 患者にはその傾向がみられなかった。タスク前よりも task 実施中には不活性化するとされる前頭極の脳の活動については, 中高年 FM 患者では前頭極の活動が上昇する傾向がみられた。これらのことから、Stroop test 実施中において中高年 FM 患者には健常中高年者に見られたような前頭前野の機能局在はみられず、さらに中高年 FM 患者のデフォルトモードネットワークを反映する前頭極の TID 活動は低下している可能性が示唆された。

ASD リスクの異なる乳児における母の語りかけに対する脳反応

星野英一¹, 秦政寛¹, 徐鳴鏞¹, 山本絵里子³, 皆川泰代²

¹慶應義塾大学 グローバルリサーチインスティテュート, ²慶應義塾大学 文学部, ³相模女子大学

乳児は、養育者との相互作用を通して様々な認知能力を発達させる。第一言語の習得もそのほとんどが養育者からである。このような乳児と養育者の相互作用において、声の同一性の認識は、音声知覚だけでなく、他の社会的シグナルの理解にもつながる重要な側面の一つである。ところが自閉症スペクトラム障害 (ASD) 児は定型発達児と比較して、聞き慣れた声かどうかの認識に障害があり[1]、声選択的領域として知られる上側頭回 (STG) と前頭眼窩皮質を含む報酬系間の機能的結合が弱い[2]。この乖離が乳幼児期に生じるかどうかは明らかになっていない。本研究では、ASD リスクの異なる乳児における聞き慣れた声の認識に関する脳処理の違いに注目した。そのため ASD リスクの高い乳児と低い乳児に、母親の語りかけと知らない人の語りかけを聞かせ、皮質の活動や脳部位間結合の違いを fNIRS を用いて調べた。

参加者は、生後 6 ヶ月の ASD 高リスク (高群) 児 (ASD の兄姉を持つ) 15 人と同月齢の ASD 低リスク (低群) 児 34 人であった。fNIRS を用いて、語りかけ音声に対して反応する乳児の前頭部と側頭部の脳活動を測定した。刺激は、母親または知らない人が乳児向け音声で、1 試行 15 秒発話したものであった。それを各条件で 6 試行以上聞かせた。解析では、酸化ヘモグロビン変化量を用い、各脳部位 (各 CH) の脳活動については試行と時間窓を平均した値に対し順列検定を行い、脳部位間の機能的結合については位相ロッキング値に対しウィルコクソンの順位和検定を行った。

結果は、母親の語りかけを聞いた場合、低群では、両側の STG、縁上回 (SMG)、背外側前頭前皮質 (dIPFC) において有意に活動が上昇したのに対し、高群では左の STG と dIPFC において有意に活動が低下した。一方、知らない人の語りかけでは、低群は母親の語りかけよりも活動する CH が少なくなり、高群では右 dIPFC で活動が低下した。群間比較の結果、母親の語りかけを聞いた場合、右 STG と右運動前野において低群は高群より有意に活動が高かった (図 1)。母親の語りかけを聞いたとき、低群では右 STG をシードとして両側の dIPFC と左 STG への有意に強い結合が見られた (図 2)。しかし、高群はこれと似たような結合パターンを知らない人の語りかけに対して示した。これらの結果は、高群では生後 6 ヶ月の時点ですでに聞き慣れた発話に対する処理が弱くなっており、これが言語・社会的スキルの発達を阻害している可能性を示唆している。これらの結果について、我々の縦断研究の他の行動データ (Still-face パラダイム、発達検査など) や質問紙調査 (CDI など) との関連で考察する。

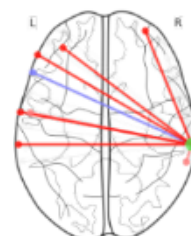
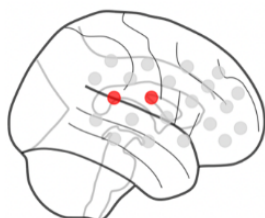


図 1. 母親の語りかけによる脳反応 低群 > 高群.

図 2. 母親の語りかけによる低群の有意な脳機能結合

Boucher et al. (1998). *J. Child Psychol. Psychiatry* 39(2), 171-181.

Abrams et al. (2013). *PNAS* 110(29), 12060-12065.

早産児周期性呼吸が脳ヘモダイナミクスに与える影響

白木 杏奈¹、城所 博之¹、渡辺 はま²、多賀 巖太郎²、成田 肇¹、光松 孝真¹、
隈井 すみれ¹、鈴木 良輔¹、澤村 文¹、伊藤 祐史¹、山本 啓之¹、中田 智彦¹、
佐藤 義朗³、早川 昌弘³、夏目 淳^{1,4}

¹ 名古屋大学大学院医学系研究科小児科学

² 東京大学大学院教育学研究科

³ 名古屋大学医学部附属病院総合周産期母子医療センター新生児部門

⁴ 名古屋大学大学院医学系研究科障害児（者）医療学寄附講座

【目的】周期性呼吸（PB）は、新生児に特徴的な5～10秒おきに呼吸と呼吸停止を繰り返す生理的な呼吸パターンで、早産児によく見られる。成人では周期的な呼吸リズムの変動が脳ヘモダイナミクスに影響を与えることが報告されているが、早産児のPBが脳ヘモダイナミクスに与える影響や、それが睡眠段階（動睡眠と静睡眠）により受ける影響は未解明である。本研究の目的は、早産児に行った脳波-機能的近赤外分光法（EEG-fNIRS）同時記録データを後方視的に解析し、PBが脳ヘモダイナミクスに与える影響を睡眠段階別に明らかにすることである。

【方法】在胎34週以下の早産児に対してEEG-fNIRS同時記録を行った。脳波は10-20法に基づき8チャンネルのポリグラフを、NIRS装置（ETG-100, Hitachi）のプロブは、児頭の前頭、左右側頭、後頭に2チャンネルずつ装着した。睡眠段階は、脳波ポリグラフのデータを用いて、動睡眠と静睡眠に分類した。PBは、アメリカ睡眠学会の定義に基づき、3秒以上の呼吸停止を3回以上繰り返し、呼吸停止間の呼吸が20秒未満である呼吸パターンと定義した。呼吸生データに呼吸周波数（0.3～2.0Hz）のバンドパスフィルターをかけたデータからPBの定義に基づき自動検出された判定（図1）を用いて、PB区間を同定した。動睡眠、静睡眠ともに計10回以上ずつPBの呼吸停止を繰り返した11記録を対象として、動睡眠、静睡眠での平均呼吸停止時間をWilcoxonの符号順位和検定を用いて比較した。また、酸素化ヘモグロビン変動について、呼吸停止時刻を起始にして重ね合わせた時の加算平均波形を求め、呼吸停止時間と呼吸停止から加算平均波形の底値の時間との関連を評価するためにPearsonの相関係数を求めた。

【結果】11記録の在胎週数、記録時修正週数、記録時間の中央値（範囲）は、それぞれ32.7（28.6～34.1）週、36.7（33.9～38.3）週、77（53.5～99.5）分だった。PBの呼吸停止数と平均呼吸停止時間の中央値（範囲）は、それぞれ動睡眠で、34（11～81）回、6.9（5.8～9.5）秒、静睡眠で26（10～80）回、8.1（7.0～11.2）秒であり、平均呼吸停止時間は動睡眠の方が静睡眠より有意に短かった。動睡眠、静睡眠ともに、呼吸停止中は

酸素化ヘモグロビンが全チャンネルで低下する傾向にあり（図2）、呼吸停止時間と各チャンネルの加算波形の底値の時間との間には有意な正の相関が見られた（動睡眠 $r=0.64, p<0.001$ 、静睡眠 $r=0.83, p<0.001$ ）。

【考察】早産児のPBは、動睡眠の方が静睡眠よりも平均呼吸停止時間が短かった。どちらの睡眠段階においても、早産児のPBでは呼吸停止時間の長さに応じた脳ヘモダイナミクスへの影響が観察された。

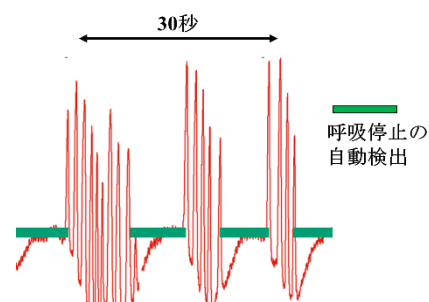


図1：周期性呼吸の検出

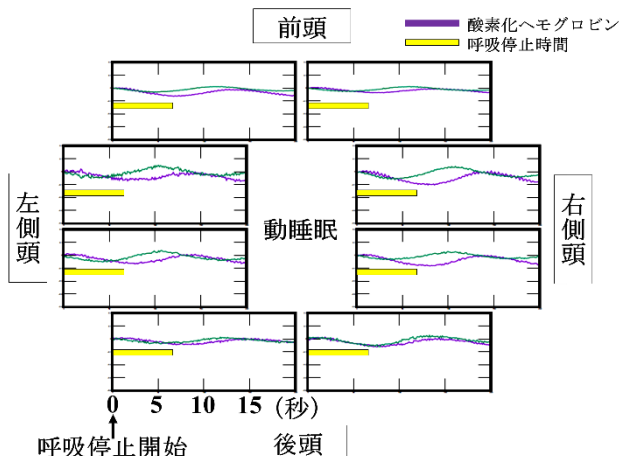


図2：8チャンネルの加算平均波形

正期産児の睡眠段階と脳機能ネットワークの関連

城所博之¹、白木 杏奈¹、渡辺 はま²、多賀 厳太郎²、牛田 貴文³、野坂 麗奈³、成田 肇¹、
光松 孝真¹、隈井 すみれ¹、鈴木 良輔¹、澤村 文¹、伊藤祐史¹、山本 啓之¹、中田 智彦¹、
佐藤 義朗⁴、早川 昌弘⁴、夏目 淳^{1, 5}

¹名古屋大学大学院医学系研究科小児科

²東京大学大学院教育学研究科

³名古屋大学医学部産婦人科

⁴名古屋大学医学部附属病院総合周産期母子医療センター新生児部門

⁵名古屋大学大学院医学系研究科障害児（者）医療学寄附講座

【目的】近年、脳内の機能的ネットワークの発生や発達過程と睡眠段階の關係に注目が集まっている。本研究の目的は、脳波-機能的近赤外分光法（EEG-fNIRS）同時測定を生後数日の正期産児に行い、睡眠段階と脳機能ネットワークの關係を明らかにすることである。

【方法】名古屋大学医学部附属病院で出生した正常新生児 19 名に対して EEG-fNIRS 同時記録を行った。脳波は 10-20 法に基づき 11 チャンネルのポリグラフを、NIRS 装置（ETG-100, Hitachi）のプロープは AFz, POz, C5, C6 を中心に前頭、後頭、左右側頭に各 2 チャンネルずつ計 8 チャンネルを全周性に装着した。動睡眠と静睡眠を含む 40 分以上の記録を仰臥位で行った。脳波、眼球運動、呼吸運動、ビデオの所見から 30 秒ごとに睡眠段階を評価した。脳機能ネットワークの結合強度の指標として、functional connectivity（FC）と phase synchronization index（PSI）を以下のように算出した：1）NIRS で得られた酸素化ヘモグロビン（oxy-Hb）、脱酸素化ヘモグロビン（deoxy-Hb）の時系列データにバンドパスフィルター（0.01~0.1Hz）をかけたのち、二時系列データのピアソンの相関係数を睡眠段階別にそれぞれ算出し、Fisher の z 変換を施して求め、全結合の FC の平均値を算出した。2）oxy-Hb、deoxy-Hb のデータにヒルベルト変換を施して瞬時位相を求め、8 チャンネルの瞬時位相をベクトル加算し、PSI を求めた。さらに、チャンネルごとに oxy-Hb と deoxy-Hb の位相差の時間平均である hPod（hemoglobin phase of oxygenation and deoxygenation）を算出した。これらのデータを、対応のある t 検定を用いて動睡眠と静睡眠で比較した。

【結果】対象の在胎週数は 37 週~41 週、男児 12 例、生後 1~9 日目（中央値 2 日）に記録した。oxy-Hb における全結合 FC の平均は、動睡眠 0.54、静睡眠 0.43、deoxy-Hb では、動睡眠 0.58、静睡眠 0.47 であり、oxy-Hb と deoxy-Hb ともに動睡眠で有意に高値であった（ $p < 0.001$ ）。また、oxy-Hb の PSI は、動睡眠 0.67、静睡眠 0.52、deoxy-Hb の PSI は、動睡眠 0.66、静睡眠 0.52 であり、動睡眠で有意に高値であった（ $p < 0.001$ ）。記録時修正週数が増すにつれ静睡眠では FC と PSI は有意に低下したが、動睡眠では相関はみられなかった。hPod については、動睡眠 5.27、静睡眠 5.32 であり、睡眠段階によらず、ほぼ同位相であった。

【考察】生後数日の正常新生児においても、脳機能ネットワークの睡眠段階に応じた変化が観察され、動睡眠で高く、静睡眠で低かった。hPod は睡眠段階に影響を受けない指標と考えられた。さらに症例数を増やし、正常な脳機能ネットワークの睡眠段階別の発達的变化を明らかにする予定である。

アイコンタクトに伴う脳活動信号の同期

ー対面とオンラインコミュニケーションの比較ー

佐藤 練, 佐藤 大樹
(芝浦工業大学大学院 理工学研究科 システム理工学専攻)

人と人のコミュニケーションには、会話などの言語コミュニケーションの他に、言葉を使わない非言語コミュニケーションがある。非言語コミュニケーションは、表情や視線、動作などにより感情や意図を伝えるため、円滑な対面コミュニケーションに不可欠なものである。特に、お互いの視線を合わせるアイコンタクトは、最も基本的な非言語コミュニケーションである。本研究では、このアイコンタクトに着目した。

アイコンタクトに関する先行研究では、機能的近赤外分光法 (fNIRS) を用いて、人が写真もしくは録画に映った状態 (非対面条件) と実際に向かい合った状態 (対面条件) におけるアイコンタクト時の 2 人の脳活動を同時計測し、同期性を比較した。その結果、非対面条件よりも対面条件における脳活動の同期性が高まった[1][2]。しかし、ビデオ通話のように非対面でありながらリアルタイムにアイコンタクトを行う条件と対面条件を比較した先行研究はない。そのため、対面とリアルタイムの非対面におけるアイコンタクト時の脳活動同期性の違いを明らかにすることを目的とした。

芝浦工業大学に在学中の男子学生 18 名 (20 ± 0.35 歳) が実験に参加した。参加者 2 人 1 組での計測を行い、対面条件と非対面条件の 2 条件を比較した。非対面条件は、代表的なオンラインミーティングツールである Zoom を使用し、目の前に設置されたディスプレイに、相手の顔が対面条件と同様のサイズで映るように調整した。計測機器には NIRS 装置 (Hitachi, ETG-4000) を使用し、側頭葉を中心とした 44 計測点 (チャンネル: ch) において、アイコンタクト課題に伴うヘモグロビン信号を計測した。

対面条件とオンライン条件におけるアイコンタクト時の脳活動同期をウェーブレットコヒーレンス分析で比較した結果、対面条件の方が非対面条件よりも同期性が高くなる傾向が見られた。特に、下前頭回や上側頭回などの領域で条件間の差が顕著だった。本結果より、アイコンタクトにおける脳活動の同期性は、非対面条件に比べ、対面条件の方が高いことが示唆された。

- [1] Hirsch et al. (2017) : Frontal temporal and parietal systems synchronize within and across brains during live eye-to-eye contact, *NeuroImage*, 157, pp.314-330.
- [2] Adam et al. (2020) : Real-Time Eye-to-Eye Contact Is Associated With Cross-Brain Neural Coupling in Angular Gyrus, *Frontiers in Human Neuroscience*, 14(19).

情報量を用いた脳活動間相互作用の定量化

森本 智志¹, 皆川 泰代²

¹慶應義塾大学 グローバルリサーチインスティテュート, ²慶應義塾大学 文学部

背景 fNIRS は、拘束が比較的少なく動きにも頑健であるため、複数人の日常的な場面における脳活動を同時計測するハイパースキャンニング研究において有用な計測方法である。脳活動同士の相互作用分析には、血流応答の非線形性を考慮して時間周波数領域の相関に対応するウェーブレット・コヒーレンスが広く用いられてきた。しかし、ウェーブレット・コヒーレンスは活動の時間的な同期現象を評価する手法であり、時間的に相互に影響を与えるような因果的な相互作用は想定されていない。

方法 本研究では移動エントロピーに着目し、fNIRS 信号間の因果的相互作用の定量化を試みた。ランダムな神経活動イベントを高さ1の矩形波でモデリングし、少量のガウスノイズ $0.1 * N(0,1)$ を加えたのち血流動態応答関数を畳み込むことで疑似脳活動信号 (Oxy-Hb を想定) を合成した。サンプリング周波数は 10 Hz とした。信号はペアで作成し、相手へ影響を与える時間遅れは 1 秒、神経活動イベントの生起確率と相手へ影響を与える確率、イベントの継続時間をそれぞれ操作した。移動エントロピーは最も単純な一次の離散時間マルコフ過程を想定し、離散時間窓は 1 秒とした。10 秒窓で白色化したのちベースライン区間から求めた有意閾値($p < 0.05$)で離散状態に変換し、正規化移動エントロピーを計算した。従来の相互作用定量化指標との関係を調べるため、同じデータを用いてウェーブレット・コヒーレンス (Morse wavelet, 12 bands/oct.) 及び相関係数 (バンドパス処理 0.009-0.08 Hz) を算出した。ランダムな神経活動イベント系列を 1000 パターン作成し、それぞれの指標の平均値を求めて比較検討した。

結果・考察 計算例として、活動イベント系列ペア (A と B) の生起確率をそれぞれ $P(A) = 0.01$, $P(B) = 0.001$ としたときの結果を図 1 に示す。正規化移動エントロピーにより、A と B の互いの相手への影響力の効果を分離して評価できた。また normalized directionality index (NDI)により、因果性の強さの方向性を検出できた。相関係数は相手への影響力を変化させても平均値が 0 に近く相互作用を検出できなかった。ウェーブレット・コヒーレンスは 0.03 Hz 程度の低い帯域のパワー平均値では安定的に A と B 両方の相手への影響力の効果と相互作用を検出できたが、0.08 Hz 程度の帯域では正確に反映されないことがあった。これらの結果から、本シミュレーションで想定されるような時間遅れの因果的相互作用に対して、活動の 2 値化に基づく移動エントロピーの有用性が示唆された。またウェーブレット・コヒーレンスは十分に遅れの影響を吸収できる低い周波数帯域であれば、相互作用を定量化できることが分かった。今後、より実データに近いノイズ下での検証を進める予定である。

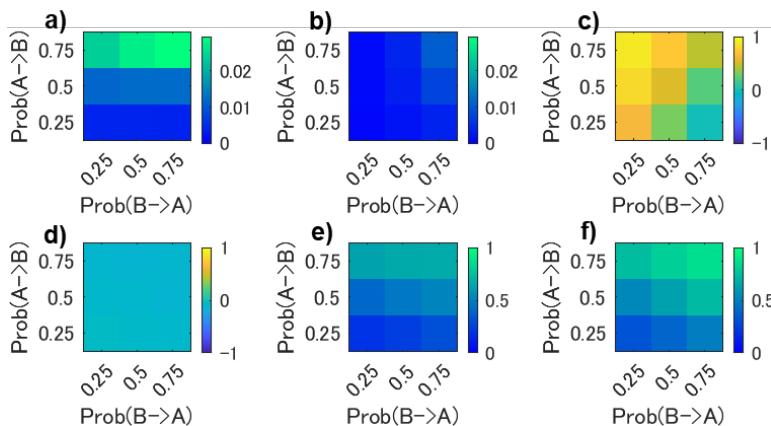


図 1. 相互作用定量化指標の平均値

相手系列への影響確率を A、B とも $Prob \in \{0.25, 0.5, 0.75\}$ の範囲で操作したときの

- a) 正規化移動エントロピー (A→B)、
 - b) 正規化移動エントロピー (B→A)、
 - c) NDI (A→B)、d) ピアソン相関係数、
 - e) ウェーブレット・コヒーレンス 0.08 Hz、
 - f) ウェーブレット・コヒーレンス 0.03 Hz
- の平均値をそれぞれ示す。

多波長 NIRS による脳組織酸素化・代謝・流体輸送のダイナミクスの分析

多賀巖太郎、渡辺はま
東京大学大学院教育学研究科

脳組織における酸素化ヘモグロビン(oxy-Hb)および脱酸素化ヘモグロビン(deoxy-Hb)の動態は、神経活動にともなう血流や酸素代謝と関連しており、これらを検出することが機能的近赤分光法(fNIRS)の基礎となっている。しかし、例えば、oxy-Hb が減少したとき、脳血流が減少したのか、酸素消費が増加したのか区別することができない。それを明らかにするには、酸素代謝を担う酸素化シトクロム c オキシダーゼ(oxCCO)の変動を捉えることが必要である。また、近年、脳血管系の変化が脳組織中の水(H₂O)の流れと連動して老廃物を排除する流体輸送機構が議論されている。これまで、fNIRS 研究の多くは、2波長の連続波レーザーを用いて、oxy-Hb と deoxy-Hb の変化の検出を行ってきた。さらに、異なる波長のレーザーを多数組み合わせれば、異なる吸収スペクトルを有する oxCCO や H₂O 等の変化の同時検出も理論的には可能であると考えられる。実際、多波長レーザーを用いて、oxy-Hb と deoxy-Hb に加えて CCO の酸化型(ox-CCO)の検出が行われている(Bale et al. 2016)。また、H₂O の変化の検出も報告されている(Myllylä et al. 2017)。本研究の目的は、多波長連続波レーザーを用いて、脳組織の酸素化・代謝・流体輸送の検出を確立することである。

8波長の連続波レーザー光源(730、780、800、811、830、840、880、900nm)と4つのAPD検出器による4チャンネルの測定ユニット(スペクトラテック社製)を用いた。送信側の8入力1出力の生体装着光ファイバー1本に対して、受信側の1入力1出力の生体装着光ファイバーを4本、直線状に1、2、3、4cmの距離に配置したプローブを作成した。81.92msでのサンプリングを行った。成人2名を対象とし、前頭部または側頭部にプローブを装着し、閉眼安静時(計測1)、呼吸の操作時(計測2)での計測を行った。また、前腕筋にプローブを装着し、上腕のカフによる虚血状態(計測3)での計測を行った。検出された8波長の光量変化と、oxy-Hb、deoxy-Hb、シトクロム c オキシダーゼの酸化型と還元型の差分(ox-redCCO)の濃度変化の間には、ランベルト=ベール式が成り立つと仮定した。分子吸光度については文献値(Cope 1991)を参照し、ランベルト=ベール式より、一般逆行列を計算し、8波長の光量変化から、3種類の分子の相対的濃度変化を計算した。得られた時系列データにおいて、ヘモダイナミクス、呼吸、脈波、計測ノイズの周波数帯域に分解した上で、変動の位相差を求めた(Watanabe et al. 2017)。また、計測2と3では、濃度変化のブロック加算を行った。

計測1では、oxy-Hb と deoxy-Hb の変化に比較して、ox-CCO の小さな振幅の変化が一貫して得られた。ヘモダイナミクスの周波数領域では、oxy-Hb と ox-CCO が同位相で変動する傾向が見られた。計測2では、吸気と呼気のタイミングや長さに応じて、oxy-Hb、deoxy-Hb、ox-CCO が一貫した応答傾向を示した。計測3では、カフ加圧による虚血の進行に伴って、oxy-Hb の減少と deoxy-Hb の鏡像的变化に加え、ox-CCO のわずかな減少が見られた。

これらの予備的な結果は、本システムを用いて、ヘモグロビンに加え、シトクロム c オキシダーゼの酸素化動態を 100msec の時間分解能、かつ多チャンネルで検出できることを支持している。さらに、多くの対象者や計測条件の検討を行い、検証していく予定である。また、H₂O の吸収を考慮した検討を行い、さらに、血流や代謝の変動と同時に、脳組織中の水の量の変動を検出できるかどうかについても検討を進める。

心理的プレッシャー下における運動パフォーマンスと関連する脳活動信号の探索

仲田 記士¹, 眞名井 貴裕², 佐藤 大樹^{1,2}

¹ 芝浦工業大学理工学研究科システム理工学専攻, ² 芝浦工業大学システム理工学部生命科学科

研究背景

心理的プレッシャーがかかるスポーツ競技や人前での発表において、緊張に伴いパフォーマンスが低下する現象は「choking under pressure (あがり)」と定義されている。パフォーマンス向上を目指したメンタルトレーニングの種類は多岐に渡るが、そのほとんどは個人の主観や経験則にされやすく、科学的根拠に欠けるといった問題点がある。脳機能計測技術の発達に伴い「あがり」は脳の状態と判明しつつある背景を踏まえ、この問題をニューロフィードバック(NF)トレーニングによって克服することが期待されている。そこで本研究では「良い緊張」と「悪い緊張(あがり)」において、脳活動信号がどのように異なるか調べた。

方法

右利き男子学生 20 名 (21.3±1.25 歳) がゴルフパッティングを模擬した運動課題において、実験者と 1 対 1 の競争を行った。目標までの距離は 1.5[m] に設定し、練習 5 回、本番 5 回の計 10 回パッティングを行ってもらった。パッティングしたボールから目標までの距離をエラー値とし、それぞれ 5 回の平均を練習エラー値、本番エラー値とし、本番エラー値を競争に用いた。本番時のプレッシャー要素として、後攻パッティング、勝敗による謝礼金の変動(勝: 3000 円, 負: 1000 円)、また女子学生による競争相手と観衆を採用した。パフォーマンスの評価は [100-本番エラー値] で算出し、練習時から本番時にかけてパフォーマンスが向上した群を向上群、低下した群を低下群とした。

脳活動計測には、ウェアラブル光トポグラフィ(WOT-HS, NeU)を使用し、前頭葉と側頭葉の一部を含む 34ch からデータを取得した。パッティング直前の運動準備中 10[s] を解析対象とし、oxy-Hb 信号の平均値を脳活動値(Δ oxy-Hb)として算出し、向上群と低下群で比較した(マンホイットニーの U 検定)。その後、有意差が得られた ch を対象に、脳活動値とパフォーマンスの相関を検討した。

結果および考察

パフォーマンスについて、参加者 20 名中パフォーマンス向上群は 13 名、低下群は 7 名であった。次に、向上群と低下群の本番時における脳活動値を比較した結果、右側頭回(ch3)と前頭領域(ch10, 13, 16, 18, 21)で向上群の方が低下群より大きい脳活動値を示した($p < 0.05$) (Fig. 1)。また、本番時脳活動値と本番スコアに相関があるか検討した結果、右側頭回(ch3)と前頭極(ch16)において有意な相関が得られた(ch3: $r = -0.47$, $p < 0.01$, ch16: $r = -0.52$, $p < 0.01$)。このことから、心理的プレッシャー下でも右側頭回と前頭極での脳活動値が高い人ほどパフォーマンスが向上していることが示唆され、NF トレーニングへの応用が期待される。

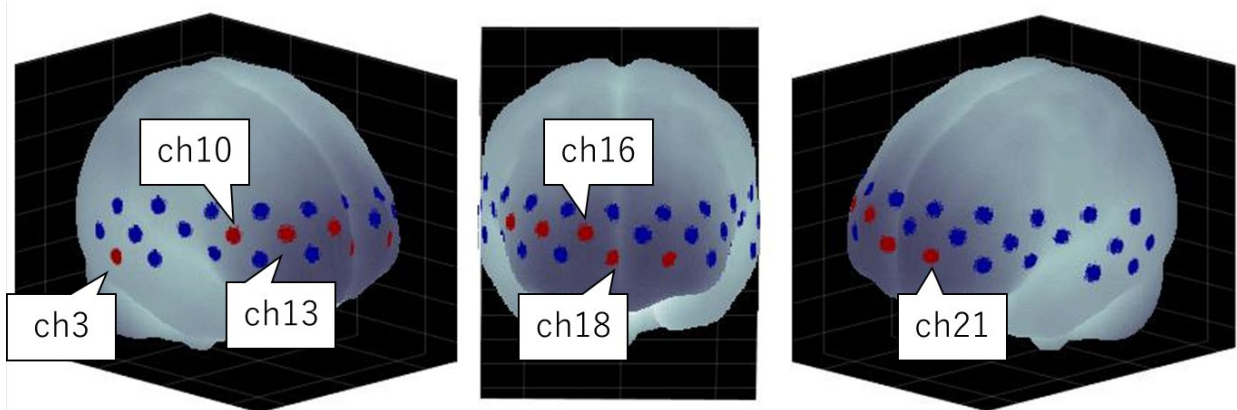


Fig. 1 向上群と低下群の間で有意差が確認された脳活動部位