

ヒューマン・マシン・システム研究部会セッション

ヒューマンファクタに係る新たな展開

New development in human factors

(1) 脳機能解析を用いたインタフェース評価

(1) Evaluation of Human Machine Interface based on Brain Imaging

*高橋 信¹¹ 東北大・工

1. はじめに

原子力発電プラントにおける安全性の更なる向上のためには、ヒューマンファクタに関連する事象についての検討を行う必要がある。これまで運転員のパフォーマンス評価に関しては多くの研究が行われているが、緊急時の運転員のパフォーマンスに関しては特に人間の認知的活動や精神作業負荷の評価が重要であると考えられる。認知活動を評価する方法には様々なものがあり、例としては主観的なアンケートが挙げられるが、主観的評価であるが故に個人差が大きく影響し、潜在的な認知活動に対する負荷の自覚がない等の問題があり、単体のみでの評価では不十分であると考えられる。客観的なパフォーマンス指標としては、認知活動に対応したユーザのタスク遂行時間、エラー率、学習度合い等に基づく評価が考えられる。しかし、人間は訓練することでタスクに適応してしまうため、実際には負荷がかかっているにもかかわらずパフォーマンス的には問題なくタスクが遂行できているような結果が得られる可能性は否定できない。このような従来の評価方法では、ヒューマンエラーの潜在的原因である負荷がかかる操作や状況を適切に評価することが困難であり、客観的かつ定量的に認知活動に対する負荷を評価するためには、別の観点からの評価が必要である。客観的かつ定量的な評価方法として、心拍、発汗、脳波等の生理指標を用い、認知活動に伴う身体状態の変化に基づく評価が行われている。しかし、心拍や発汗等の機能を制御しているのは自律神経系であり、自律神経系を制御しているのは大脳である。自律神経系は交感神経系と副交感神経系により構成されており、右脳が交感神経系を、左脳が副交感神経系を支配している。このように脳波以外の生理指標は人間の認知活動の結果から副次的に現れる生理現象を観測しており、認知活動の内容を直接反映する指標ではない。実際に人間にかかっている精神的な負荷を評価するためには、人間が実際に認知活動を行っている脳機能を計測することが有効であると考えられる。

人間が認知活動を遂行するためには、大脳の各領域をネットワークとして利用するが大まかには以下のように領域ごとに機能が局在することが知られている。

- ・前頭葉: 運動野 (前頭葉の背側), 注意, 判断, 記憶, 想像, 運動性言語
- ・頭頂葉: 体性感覚野, 空間的情報処理, 行動の制御
- ・後頭葉: 視覚情報処理
- ・側頭葉: 聴覚情報処理, 形態的視覚情報処理, 記憶, 感覚性言語

特にヒューマンエラーを評価する研究においては、思考、記憶、コミュニケーション、意思決定等の機能を司る前頭連合野 (前頭前野) に焦点を当てることが重要である。さらに、脳の情報処理においては、神経活動が起こる際、周囲にある血管が拡張し、血流量、血液量が増大し、血液の酸化状態が変化するとされている。前述した脳機能局在により、特定の脳の活動状態を計測することで、認知的負荷と認知状態の客観的評価の可能性が示唆される。先行研究では、前頭前野に焦点を当てた研究では難易度の増加に伴い活性状態が増強される、課題に対して熟練するにつれて活性状態が減少する等の知見が報告されている。現在脳科学の分野では、非侵襲であり、脳の活性状態を時間的、空間的に比較的高い分解能で計測可能な機能的磁気共鳴画像法 (functional Magnetic Resonance Imaging: fMRI) を用いた脳機能計測が行われている。前述したように、脳内で何らかの認知活動が行われる際には、その機能と関わる領域周辺の血流状態が変化することが実証されており、fMRI では血流変化に伴う MR 信号の変化を観測している。fMRI の特徴と

しては、高い空間分解能を有しており、詳細なデータを脳の深部においても得ることができる。しかし一方で、強力な磁場を用いるため金属類を装置内で用いることができず、実験環境の構築に大きな制約がある。一方、近年注目されている計測手法として近赤外線分光法 (Near-InfraRed Spectroscopy: NIRS) が挙げられる。NIRS は fMRI と同様に非侵襲的計測方法であり、計測箇所の表面にプローブを設置することで血流量や心拍の変化を計測する装置である。NIRS は生体組織での吸収、散乱等の影響から深部の計測は困難であり、fMRI と比較すると空間分解能が低く詳細なデータを得ることはできないが、fMRI のように強磁場を用いないため実験環境に制限がなく幅広い環境で実験を行うことが可能というメリットがある。

2. 適用事例：複数同時 NIRS 計測によるプラント運転員の状態推定に関する研究

本研究グループでは、研究の初期段階では個人の脳活動に着目し、異なるインタフェースに対峙した被験者の脳活動を比較することで、インタフェースが認知活動に与える負荷の違いを検証することに主眼を置いた研究を行ってきた[1,2]。その後、複数人同時計測が可能な脳活動計測デバイス (NIRS) の開発に携わり、その結果実現された超小型 NIRS 装置を図 1 に示す。本装置は、830 nm と 780 nm の 2 種類の近赤外光を使用し、サンプリング周波数 10 Hz で 1ch の計測を行うことが可能で、Bluetooth による無線接続で 20 台まで同時計測が可能でとなっている。脳機能計測においては、計測された活動の絶対値を評価することは困難であり、主にイベントに対しての総体的な脳活動の変化に着目している。本研究では、複数の人間の脳活動編を同期して計測できる本デバイスのメリットを最大限活用し、複数のプラント運転員の脳活動の同時計測を試みた[3]。

原子力プラントにおいては、チームで運転操作を行うため、信頼性の高い運転のためには 4 人が協力し、良いチームワークを築くことが必要不可欠である。本研究では、良いチームワークの状態では互いに協力関係が存在するため、タスク実行に関係性が深い運転員間の脳活動の相関が高くなるという仮説を立てた。この仮説は予備実験によりある程度検証されている。この仮説に基づけばプラント運転操作を行っている際の 4 人の脳活動を計測し、相関を調べることで、

- ① 当直長と運転員が意思疎通できているか
- ② 全員が一つのことに集中し過ぎていないか
- ③ 孤立し過ぎていないか



図 1 超小型 NIRS 装置 (HOT05)

等の評価を行うことができる可能性があり、相関の有無を良いチームワークが築けているかの判断材料として用いることができる可能性があると考え、BTC における認知実験を計画した。本実験ではオペレータが異常事象を含むシナリオ対応操作を行っている際の脳活動を計測し、脳活動の変化の有無を確認し、脳活動データの相関からプラント運転員の状態推定が可能かを検証することを目的とした。本実験では、BTC における BWR プラントシミュレータ運転時のオペレータの脳活動を計測した。原子力プラント運転操作は基本的には 4 人で行うため、脳活動を計測するための NIRS 装置をオペレータ 4 人全員に装着してもらった。図 2 に実験環境の概要を示す。本研究では、異なる役割を担う 4 名の運転員の脳活動を同時に計測し、それぞれの運転間の脳活動の相関の大きさを推定した。この相関の大きさと、発生した過渡事象の対応操作におけるそれぞれの運転員間の期待される関係性の深さ (コミュニケーションの必要性、対応する事象の共通性から判断) を対応させることで、脳活動相関と運転員間の共感度合いの妥当性を評価した。

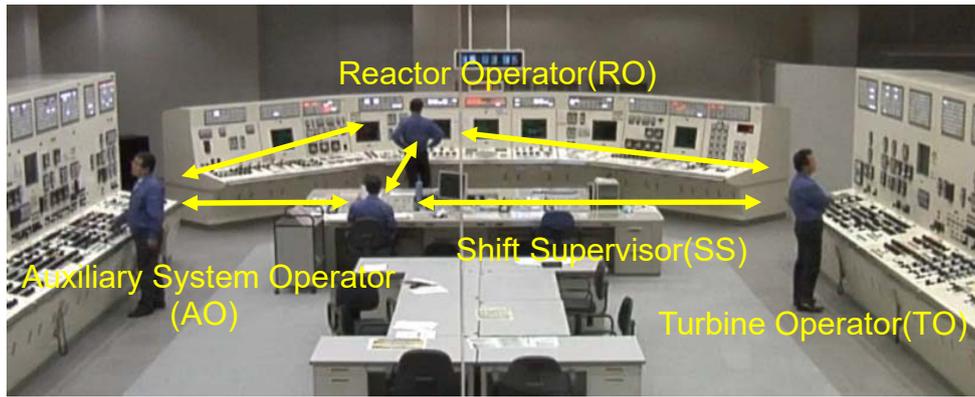


図2 実験環境の概要

BTCにおけるBWRシミュレータ運転には、異常対応訓練用に異常事象を含むシナリオが多数用意されている。本実験は、原子力プラント運転操作に熟練したオペレータを対象としたため、シナリオの中でも比較的難易度の高い以下に示す4シナリオを選択した。

1. Station blackout
2. ATWS (Anticipated Transient Without Scram)
3. Turbine first stage failure
4. Reactor water level unknown

それぞれのシナリオに関して超小型NIRS装置を装着し通常と同じように異常対応操作を行ってもらった。例としてシナリオ1を行った際の4名の運転員の脳血流の全体的な変動パターンを図3に示す。

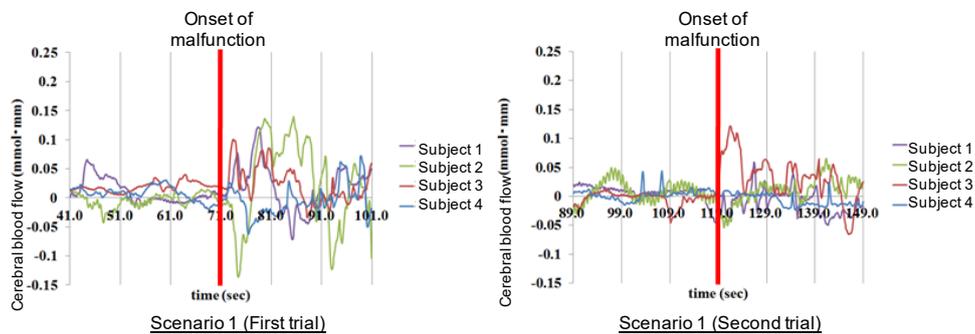


図3 異常事象対応時の全体的な血流変化のパターン

赤いラインが異常事象が発生し警報が鳴り出す時間を示している。警報が鳴る前、計器監視を行っている時は比較的脳血流は安定しているが、初警報が鳴った後に大きく変動していることが示されており1回目、2回目共に、各被験者が初警報に反応したことで脳活動に大きな変化が現れたことが推定される。更に詳細に分析を行うために、それぞれの過渡事象発生から静定までの間で、キーとなる操作を同定し時間帯の分割を行い、それぞれの時間帯において期待される運転員間の相互作用をあきらかにした。例えば、シナリオ1(全電源喪失)に関しては表1に示すようにキーとなる事象を定め時間帯を規定した。そして、それぞれの時間帯において、どのペアの運転員間に関係性が深いかについて、訓練シナリオの内容と事象の進展を考慮して検討し決定した。次にそれぞれの時間帯にそれぞれの運転員のペアに関して優位な脳活動の相関が観測されたか否かを推定した。相関の計算にはベースラインの変化をキャンセルし変化の方向性に関するパターンの共通性を評価できるDistance Correlationを用いた。

図4に全電源喪失シナリオにおける結果の例を示す。グレーでハッチングされたイベントは、その運転員ペア間に関係性が期待される時間帯、○印は実際に脳活動相関が観測されたことを示している。イベント番号1のスクラム発生や、イベント番号14の未臨界の確認等、全オペレータに影響を及ぼすイベント発生

時には、多くの被験者間で強い脳活動相関を示した。このシナリオ1では非常用DGが3機ともトリップしてしまうため、発電機を操作するタービンオペレータに大きな負担があったと考えられる。グラフでは、当直長とタービンオペレータ、タービンオペレータと原子炉オペレータ間で強い脳活動相関を示す箇所が多く存在したため、これらの中でコミュニケーションをよく行い操作にあたっていたと考えられる。

表1 シナリオ1（全電源喪失）に関する主要事象

1. 外部電源喪失により原子炉スクラムが発生する。
2. 非常用ディーゼル発電機（Diesel Generator: DG）（A）が故障する。
3. 原子炉水位が低くなり、自動的に主蒸気隔離弁（Main Steam Isolation Valve: MSIV）が閉じる。
4. 非常用DG（H）が故障する。
5. 非常用DG（B）が故障し、全交流電源喪失となる。
6. 非常用DG（H）の手動起動を試みるが、失敗に終わる。
7. 非常用DG3機の現場確認を依頼する。
8. 制御棒全挿入を確認する。
9. 現場より非常用DG（A）の故障原因の報告が入る。
10. 現場より、原子炉水位低によって自動作動した原子炉隔離時冷却系（Reactor Core Isolation Cooling system: RCIC）に異常がないことが報告される。
11. 電源復旧の目途が立たないため、RCICで水位保持を行う。
12. 非常用DG（A）の起動準備が完了し、起動する。
13. 各系統を次々と再起動し、冷却を再開する。
14. 未臨界を確認し、様子を見る。

表2 期待される関係性の大きさと脳活動相関の有無の関係

		シナリオ1のイベント番号													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
被 験 者 組 合 せ	当直長 - タービン	○	○				○		○		○		○		○
	当直長 - 原子炉	○		○			○			○			○		○
	当直長 - 補機	○											○		○
	タービン - 原子炉	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○		○
	タービン - 補機	○							○	○		○			
	原子炉 - 補機							○							○

高い統計的有意性を持って脳活動相関と運転員間の関係性の深さをあきらかにするまでには至っていないが、脳活動相関を運転員のチーム活動評価の一つの可能性になり得ることと示せたと考えている。

3. 結言

本稿では、原子力プラントに関係した脳活動の評価の可能性について述べた。計測デバイスの発展によりより簡便にそして高い信頼性で脳活動が測定できる可能性が出てきている。脳活動計測に関しては個人的な反応の違いが大きく、その評価結果の扱いに関しては十分な考慮が必要であるが、人間の認知的状況の一部をより直接的に推定できる可能性があるという意味で、今後の研究の進展が期待される。

参考文献：

- [1]三浦直樹, 渡邊丈夫, 高橋 信, 川島隆太, 北村正晴, 機能的磁気共鳴画像を用いた計器操作作業時の脳活動解析, ヒューマンインタフェース学会論文誌, 7, 2(2005), 21-28.
- [2] S.M.Hadi Hosseini, Yoko Mano, Maryam Rostami, Makoto Takahashi, Motoaki Sugiura and Ryuta Kawashima. Decoding what one likes or dislikes from single-trial fNIRS measurements, NeuroReport, 22, 6(2011), 269-273.
- [3] Makoto Takahashi, Fumiyasu Shirai, Ryuta Kawashima and Kazukiyo Ueda, Experimental Study on Team Coordination of Npp Plant Operators based on the Simultaneous NIRS Measurements, Proc. of HMIT&NPIC 2017(San Francisco, CA, June 11-15, 2017), pp.1226-1233(2017).

*Makoto Takahashi¹

¹Tohoku Univ.