災害時避難の意思決定を理解するための GIS と脳神経科学の統合（Ⅱ）
－VR 及び fMRI を用いた避難行動中の脳神経活動に関する空間分析－

塩崎大輔*・橋本雄一・三浦直樹***・榊浩平****・白濱幸弘****・杉浦元亮****

Integrating GIS and Neuroscience to Understand Evacuation Decisions During Disasters #2
- Spatial Analysis of Cranial Nerve Activity During Evacuation Behavior Using VR and fMRI -

Daisuke SHIOZAKI*, Yuichi HASHIMOTO**, Naoki MIURA***,
Kohei SAKAKI****, Sachihiro SHIRAHAMA****, Motoaki SUGIURA****

Abstract: This study combined a VR evacuation system with fMRI to examine neural activity during simulated evacuation using geospatial analysis. Participants either completed evacuation toward Mt. Hakodate or remained in downtown areas. fMRI showed activation in the thalamus and visual cortex, but no significant group differences. Correlation analysis revealed stable amygdala–hippocampus coupling in successful participants, whereas unsuccessful participants exhibited dominant amygdala–thalamus coupling and unstable hippocampal links. Spatial analysis indicated that adaptive evacuation relied on amygdala–hippocampus–thalamus integration, while sensory-dependent networks led to indecision. These findings suggest neural mechanisms underlying disaster-related decision-making.

Keywords: 機能的磁気共鳴画像法（fMRI），仮想現実（VR），地理情報システム（GIS），津波避難（Tsunami evacuation），脳神経活動（Cranial nerve activity）

１．はじめに

日本では東日本大震災以降，巨大地震やそれに伴う津波災害への危機意識が高まり，国から個人に至るまで多様な防災・減災対策が議論されてきた．2024 年 1 月 1 日の令和 5 年奥能登地震では，東日本大震災以来となる大津波警報が発表され，実際に到達した津波が能登半島に被害をもたらした．さらに 2025 年 7 月 30 日には，ロシア・カムチャッカ半島沖地震に伴う津波により，北海道から紀伊半島にかけて広範囲で津波警報が発令された．

今後も南海トラフ巨大地震や日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震による大津波が懸念されている．特に北海道の千島海溝沿いの巨大地震に関する被害想定では，最悪の場合 10 万人規模の犠牲が生じると推計されており，対策は急務となっている．

こうした状況を背景に，令和 7 年度から内閣官房では防災庁設置準備アドバイザー会議が開催され，防災庁創設に向けた議論が進められている．令和 7 年 6 月の報告書では，防災・減災分野におけるデジタル技術活用の重要性が強調され，防災教育・啓発や地域人材育成の推進に加え，実践的な行動を促すための ICT の活用が提言されている．

特に，ICT 技術を活用すれば将来の災害を想定し，避難行動をシミュレーションすることが可能となる．塩崎・橋本（2018 ほか）は VR 技術を用いて函館市の沿岸部を 360 度画像で再現し，疑似避難実験を実施した．その結果，参加者が避難開始直後に「山へ向かう」「内陸へ進む」「海から離れる」といった異なる行動を選択するなど，意思決定の違いが明らかになった．ただし，こうした意思決定がどのような仕組みで生じるのかについては，議論の余地が残されている．

こうした災害時の行動を理解するため，本研究は行動を制御する脳メカニズムに着目した．例えば，Takubo ら（2024）は津波避難シミュレーション実験を通じて，リスクを過度に吟味する態度（risk-scrutinizing attitude）が，適切な避難行動を妨げる可能性があると指摘している．このことは，避難行動の遅れを説明する心理的メカニ

* 正会員 星槎道都大学 （Seisa Dohto University）
〒061-1196 北海道北広島市中の沢 149 番地 E-mail：shiozaki-daisuke@seisa.dohto.ac.jp
** 正会員 北海道大学 大学院文学研究院（Hokkaido University）
*** 非会員 東北工業大学 （Tohoku Institute of Technology）
**** 非会員 東北大学 （Tohoku University）

ズムの一端を明らかにした.

藤見（2020）は，二重過程理論や扁桃体の役割など心理学・神経科学の知見をもとに，災害時の行動を解説し,防災教育における行動デザインの重要性を報告した．その中で VR などを用いた防災・減災に関する行動政策の効果を実験的に検証する手法の開発は,今後の大きな課題であると指摘した.

そこで本研究は，先行研究にて開発された VR 疑似避難訓練システムを機能的磁気共鳴画像法（fMRI）で使用可能とするように改修し疑似避難実験を行うことによって,疑似避難行動中の脳神経活動データを収集し，GIS を用いて分析することを目的とする.

２．実験方法

本研究では脳神経活動測定のために fMRI を用いる.fMRI は血中の酸素濃度酸素レベル（BOLD）を測定することで,脳神経活動を画像化する手法である．脳神経活動データの収集には fMRI の他に，脳は脳波検査（EEG）や近赤外分光法（NIRS）などが挙げられる．この EEG や NIRS はミリ秒単位でデータを収集する時間分解能力が高い利点があるが,主に大脳といった外郭部の分析に強みがある．対して fMRI は偏桃体や視床，海馬といった中枢部分の空間分解能力が高くなるが,BOLD 値の変化にタイムラグが生じるため,時間分解度は相対的に低くなる．今回は，特に空間認知にも重要な役割を果たすと考えられる,脳中枢の活動を測定するため，fMRI での解析を採用した.

この fMRI を用いて本研究は,まず fMRI に最適化されたシステムを用いて,疑似避難実験を行い,疑似避難行動中の脳活動を測定する．次に，脳活動データを解析し,疑似避難行動中に活性化した脳部位を把握する．さらに，取得された脳活動データを空間データに変換し，空間分析を試みる.

３．疑似避難行動結果

今回の実験では 8 名の参加者を対象とした疑似避難訓練を行い,訓練中参加者の脳神経活動を fMRI で測定する実験を行った.実験エリアは,既存研究との比較検討も考慮し,北海道函館市金森倉庫周辺とした．なお本実験は東北大学スマート・エイジング学際重点研究センターMRI 倫理委員会に研究計画書及び実験概要書を提出し,審査を経て実施された.実験に伴い,fMRI による疑似避難訓練を 570 秒間・2 秒間隔で撮像し，全参加者で問題なく取得できた.

参加者の行動ログを見ていくと，8 名中 7 名が開始地点付近で海から離れ，1 名のみが海沿いを移動する避難行動を取った.海から離れる行動を取った 7 名は，大通り交差点に出たところで，3 名が函館山方面に向かい，4 名が内陸に向かって海から離れ続ける行動を取った.大通りを函館山方面に向かうと函館山と山を登る坂を視認することができるため,この 3 名は函館山を視認してから,ほとんど迷いが見られないような早い経路選択判断を行った.

それに対して，内陸部で滞留したグループは,実験時間が進むにつれて滞留時間が長くなった.この結果をもとに,函館山に向かったグループを避難成功者,市街地で滞留したグループを避難失敗者として分類し，分析を進めていく.

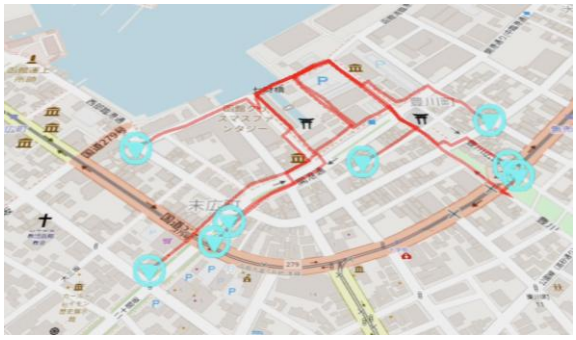


図 1　避難開始約 7 分後の疑似避難行動軌跡

４．疑似避難実験中の脳活動解析結果

撮像されたスキャンデータの脳機能画像解析には,Statistical Parametric Mapping（SPM12）を用いて統計モデリングと推論を行った.今回はテストケースとして一般線形モデル解析（GLM 解析）を行った，ここで得られた被験者全員のコントラスト画像を用いて，　2ndLevel－1 サンプル T 検定解析では，特に視床周辺や視覚野といった,脳中枢部の活発な活動が見られた.成功グループと失敗グループに分けて解析した 2 サンプル T 検定では，それぞれの被験者数（n＝4）が少なく，現状において有意な活動差は得られなかった.

次に，1 サンプル T 検定で活動が認められた左視床に加え,先行研究で指摘された感情を制御する偏桃体の中で右偏桃体,さらに記憶を司る海馬の中で右海馬を対象とし,相関関係から機能結合を見ていく.

被験者 8 名を成功群と失敗群に分けて脳領域間の機能的結合を比較した．その結果，群間で以下の傾向が見られた．まず，偏桃体-海馬間の結合について,成功群の全被験者で安定して正の相

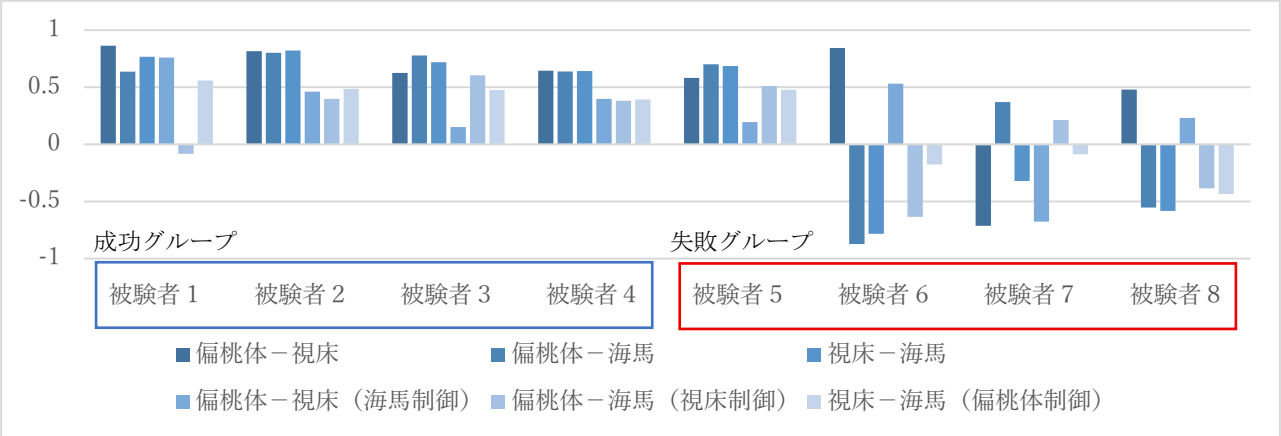


図 2　右偏桃体 - 右海馬 - 視床の相関関係

関が観察された．一方，失敗群では一部被験者で強い負の相関が見られ，群としては不安定であった．

次に，偏桃体-視床間の結合について，失敗群の全被験者で一貫して強い正の相関が観察された．一方，成功群では多くの被験者で正の相関を示したが，被験者 7 では強い負の相関が見られたため，群平均としては中程度にとどまった．

最後に，視床-海馬間の結合については，成功群で全体的に正の相関が多く観察されたのに対し，失敗群では一部被験者で強い負の相関が見られ，群としての安定性に欠けていた．

以上の結果から，成功群では偏桃体-海馬間の協調的結合が一貫して見られ，失敗群では偏桃体-視床間の結合が優勢である一方，海馬を含む結合は不安定であったという違いが傾向として見られた．これは，疑似避難行動の成否が「情動と記憶の協調」か「情動と感覚中継の優位性」によって分かれる可能性を示唆するものと考えられる．ただし，群それぞれの被験者数が少ないため，有意性に課題が残った．

５．脳活動データを用いた空間解析

ここでは，先に述べた 3 部位の脳活動データを地理空間データに変換し，解析を進める．VR 疑似避難訓練システムでは，各ノードに位置座標が紐づけられている．各ノードの脳活動データにこの位置情報を紐づけることによって空間解析を可能とする．

まず，各ノード情報から漁網グリッドを作成し，200m の検索半径を設定する．次に検索範囲内の脳活動データから 3 部位の偏相関を計算し，空間的に脳活動を解析する．対象とする値は，各被験者のノード毎の BOLD 値における最大値と最小値の差を取り値とした．

なお，ここで留意しなければならないのが，この空間解析については位置情報を基準として解析しており，時間同期を考慮していない．そのためここで示す偏相関は，先の章で述べたような，脳の機能結合を表現するものではなく，空間的な局所的偏相関を計算したものである．

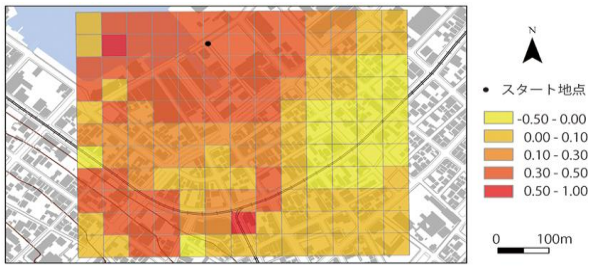
スタート地点周辺に関しては，偏桃体 - 海馬（制御変数・視床：AH_T），偏桃体 - 視床（制御変数・海馬：AT_H），海馬 - 視床（制御変数・偏桃体：HT_A），全ての偏相関において，比較的高い相関関係を示した．

これを成功・失敗グループに分けると，成功グループは AH-T が全体的に高く，AT_H 及び HT_A では，局所的に値が低くなった．この低くなっている場所は函館山とその坂が視認できる場所と一致する．

逆に失敗グループでは，全く別の傾向が見られた．AH_T は実験後半で低い値を示しており，AT_H と HT_A は実験後半に高い値となった．この後半部分とは，成功グループが海や山といった地形的特徴が見られるのに対して，失敗グループは周りを構造物に囲まれ，非常に迷いやすい場所となっている．特に偏桃体-視床や海馬-視床の直結的な依存が空間的に拡散しており，空間的に柔軟な統合の欠如，すなわち感覚依存的で画一的なネットワークが行動の失敗に結びついた可能性を示している．

６．おわりに

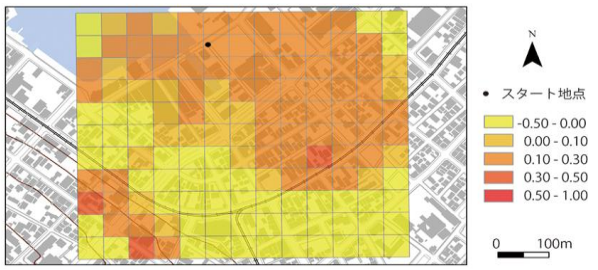
本研究は，VR 疑似避難訓練システムを fMRI で使用可能とするように改修し，疑似避難実験を行うことによって，疑似避難行動中の脳神経活動データを収集，地理空間情報と GIS を用いて分析することを目的とした．



a)　偏桃体 - 海馬（視床制御：AH_T）



b)　偏桃体 - 視床（海馬制御：AT_H）



c)　海馬 - 視床（偏桃体制御：HT_A）

図 3　被験者ノード毎の BOLD 値相関

疑似避難実験では，開始地点付近では多くの参加者が海から離れる行動を示したが，その後の分岐で一部は函館山方面を目指し，残りは市街地に滞留した．この時の脳活動を，解析した結果，全体として視床や視覚野など中枢部の活動が認められたが，群間比較では有意な差は得られなかった．

右偏桃体・右海馬・左視床の 3 領域を対象に相関を見た結果，成功群では偏桃体-海馬間の協調的結合が一貫して見られ，失敗群では偏桃体-視床間の結合が優勢である一方，海馬を含む結合は不安定であったという違いが傾向として見られた．

さらに，脳活動データを位置情報に基づいて空間解析したところ，成功グループは海馬 - 偏桃体（視床統制）が全体的に高く，偏桃体 - 視床や海馬 - 視床は局所的に低下していた．その位置は函館山や坂道の視認地点と重なり，空間的手掛かりが記憶と情動の統合を促したと考えられる．

これに対し失敗グループは，後半の市街地で海馬 - 偏桃体の結合が低下し，偏桃体 - 視床および海馬 - 視床の直結的な結合が広がっていた．つまり，感覚依存的かつ均質的なネットワークが優勢となり，地形的手掛かりを十分に利用できず，迷いや滞留につながった可能性がある．

以上のように，偏桃体・海馬・視床の統合的活動が，柔軟かつ適応的な避難行動に影響することが示唆された．本研究が行った空間統計的アプローチは，脳の機能結合そのものを直接示すものではないが，避難の成否に対応する空間局所的な依存を可視化し，防災行動における脳神経活動の理解に関する新たな知見を加えるものと思われる．今後は，脳の部位間での脳神経ネットワークについても明確化した上で，得られた知見を防災リテラシー向上に活用することが課題である．

謝辞

本研究は，文部科学省建議研究「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第 3 次）」，JSPS 科研費（基盤研究 B）「地理空間情報の要素技術で最適化した防災リテラシー向上のための地理教育方法論の構築」（代表者：橋本雄一，課題番号 25K00551）における成果の一部である．また本研究は，東北大学災害科学国際研究所レジリエンス共創センターの助成により一部支援されたものである．

参考文献

内閣府“日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震の解説ページ”．https://www.bousai.go.jp/jishin/nihonkaiko_chishima/kaisetsu/index1.html (参照 2025-8-21).

内閣官房“防災庁設置準備アドバイザー会議　報告書”．https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/bousaichou_preparation/pdf/adobaizakaigi_houkoku.pdf (参照 2025-8-21).

塩﨑大輔・橋本雄一（2018）WebVR を用いた疑似避難訓練システムの開発．「情報処理学会情報システムと社会環境研究会研究報告」，IS-146(4)，pp.1-6.

藤見俊夫（2020）心や脳のメカニズムを防災行動につなげるアイデア．「消防防災の科学」，139 号, pp.2–7.

Takubo, M., Sugiura, M., Ishibashi, R., Miura, N. and Tanabe-Ishibashi, A. (2024) A Risk-Scrutinizing Attitude is Independent of Risk-Sensitive Attitude and May Hamper a Proper Protective Response: A Tsunami Simulation Experiment. Journal of Disaster Research, 19(1), pp.81-93.