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（１）
－VR 空間上での津波避難の事例－

橋本雄一*・塩崎大輔・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 (1)
- A Case Study of Tsunami Evacuation in Virtual Reality -

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

Abstract: This study integrated geographic information science (GIS) and neuroscience to investigate cognitive mechanisms underlying evacuation decision-making. Participants attempted to evacuate in a virtual space, and their neural activity was visualized using GIS-based technology. Results revealed significant differences in spatial cognition-related brain activation between individuals who evacuated successfully and those who did not. From a neuroscientific perspective, the findings emphasize the importance of evacuation strategies that involve not only moving away from the coast but also seeking higher ground. These insights highlight the need to incorporate such behaviorally informed strategies into disaster prevention literacy education and training programs.

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

防災リテラシー向上のため災害時避難に関する多くの研究が行われてきた（橋本編，2023）．その中で，Lindell and Perry（2012）が指摘するように，避難行動の意思決定を解明することは重要な課題である．これまで行動に関する意思決定の研究では，地理学や地理情報科学と，脳神経科学とで異なるアプローチがとられてきた．Downs（1970）の模式図を用いると（図 1），地理学や地理情報科学では右側の環境が対象とされ，たとえば Shiozaki and Hashimoto（2024）では，観察された現実世界での避難移動に対し，聞き取り調査やアンケート調査などで意思決定を明らかにする研究等が行われた．それに対して，脳神経科学では図左側の個人が対象とされ，Takubo ほか（2024）のように，テキストによる状況説明で脳神経活動を観察することにより意思決定を解明する試みが行われた．これら 2 つの立場は，お互いを補完し合うものであるが，技術的な問題などにより十分な研究が行われてきたとは言えない．

そこで本研究は，これら 2 種類のアプローチを融合させ，現実世界の避難行動における意思決定を，脳神経活動から明らかにすることを目的とする．さらに，結果として得られた知識を防災リテラシー教育に結び付けるための検討を行う．ただし，fMRI（機能的磁気共鳴画像法）

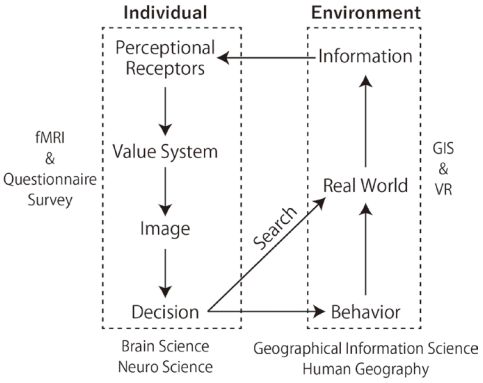


図 1　本研究における空間認識

Downs（1970）により作成．

を用いる脳神経活動の観測は実験施設内でしか行えないため，現実世界に準ずるものとして VR 空間での避難を研究対象とする．

研究方法は以下の通りである（図 2）．まず，塩崎・橋本（2018）で構築した VR 空間での疑似津波避難訓練システムを参考に，fMRI に対応した新たなシステムを構築する．次に，このシステムで被験者に疑似避難を行ってもらい，その際の脳神経活動データを収集する．なお，脳神経活動の測定実験に関しては，東北大学スマート・エイジング学際重点研究センターMRI 研究倫理委員会に研究計画書及び実験概要書を提出し，認可を得て実施さ

*　正会員　北海道大学 大学院文学研究院（Hokkaido University）
〒060-0810　北海道札幌市北区北 10 条西 7 丁目　E-mail：you@let.hokudai.ac.jp
**　正会員　星槎道都大学（Seisa Dohto University）
***　非会員　東北工業大学（Tohoku Institute of Technology）
****　非会員　東北大学（Tohoku University）

れた．さらに，撮像されたスキャンデータに対し，Statistical Parametric Mapping（SPM12）を用いて脳機能画像解析を行う．続いて，そのデータに関し，VR 空間上の位置データを付加し，避難成功者と失敗者に分けて空間分析を行うことで，脳神経活動の空間特性の差異を把握する．最後に，得られた結果を防災リテラシー向上のための教育に結び付けるための検討を行う．

２．VR 疑似避難訓練システムの構築

本研究では，被験者に VR の仮想空間で避難を行ってもらうため，塩﨑・橋本（2018）を参考に新たな VR 疑似避難訓練システム（VET システム）を構築する．実験のフェーズ 1 で被験者は，訓練内容と VR 空間内での自分の置かれた状況の説明を受ける．フェーズ 2 では，VR 空間内では地震が発生し，大津波警報が音声で流れる．フェーズ 3 で，被験者は VR 空間上で避難移動を行う．

このシステムでは，停止地点であるノードと，それらを繋ぐリンクが設定されている（図 2）．ノード接続情報から進行可能な方向に経路選択アイコンが表示されるため，被験者は．このアイコンを選択して次のノードに移動する．なお，各ノードにおける景観は 360 度画像で表現されるため，被験者は任意の方向を見てから避難経路の選択を行える．

この実験の対象地域は，北海道函館市の観光名所であり，函館港付近に位置する金森倉庫の周辺である．この付近は，2021 年に公表された日本海溝・千島海溝沿いの巨大地震による津波浸水想定によると 5～10m の津波が到来する危険性がある（図 3）．実験では，疑似避難訓練では被験者が，金森倉庫を出発して津波浸水領域外に到達すると終了となる（図 4）．



図 2　開発中の VET システムにおけるノードとリンク

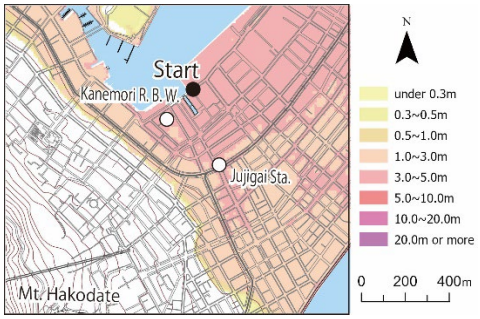


図 3　研究対象地域の津波浸水想定

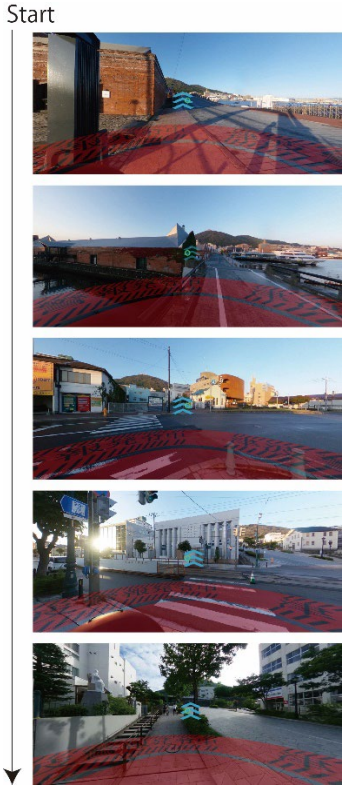


図 4　VR 空間上での避難移動

３．fMRI での脳神経活動の解析

本研究は，VET システムでの避難中において，避難方向を決定する際の脳神経活動を fMRI で把握する．その際に，fMRI での撮像に避難行動ログを一致させるため，撮像と操作のタイミングも記録する．なお，イベントの開始や終了に関しては，fMRI の信号を基に自動で制御するようにし，被験者はフェーズ 3 の疑似避難行動時の視点切り替えと移動操作のみを行うようにする．

測定装置に入る被験者は体が固定されており，マウス操作ができない．そこで，1～9 の数字を入力できるデバイスを用意し，これらのキーに右回転，左回転，進路決定のためのボタンを割り当てて，被験者に操作してもらう（図 5）．また，装置内にはモニターやデバイスなどを設置できないため，被験者はバイザー型の鏡で反射させたモニターを見て避難する．

fMRI を利用した脳神経活動の解析は，被験者が作業をしている状態（Task 状態）と，作業をせず安静にしてい



図 5　実験で使用したモニターとデバイス

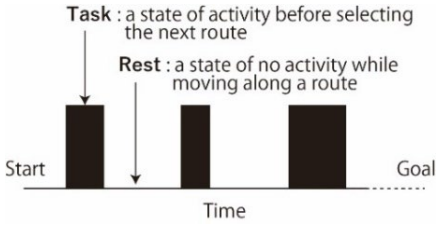


図 6　Task 状態と Rest 状態

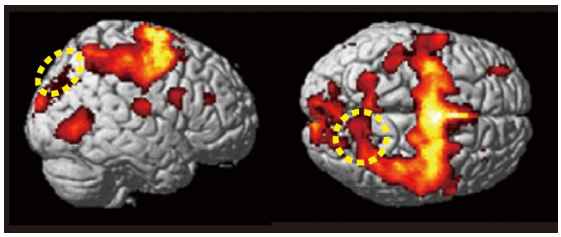


図 7　脳の活性化状態の例

破線の内側は右上頭頂小葉のおおよその位置.

る状態（Rest 状態）を比較して，活性化している脳部位を特定する（図 6）．この実験では，経路選択後にノード間を移動する動画 10 秒とブラック画面 5 秒を設定し，この 15 秒を Rest 状態とする．

疑似避難訓練では，570 秒間の実験中に 2 秒間隔で撮像する．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う．なお，今回はテストケースとして一般線形モデル解析（GLM 解析）を用いる．ここでは，脳神経活動に対する fMRI 信号の遅延を考慮した上で，Task 状態において Rest 状態と比べて統計的有意に活動が上昇した領域を抽出する．

実験は 2024 年 3 月 29 日・30 日に東北大学において 8 名の被験者で行われた．まず，被験者には事前に実験趣旨と実験概要，fMRI に係る重要事項を説明し，最終的に許諾を得た．さらに，システムの操作説明を行い，操作確認を行った上で実験を開始した．

実験では，函館山に向かった避難の成功者は 4 名，市街地に留まった失敗者は 4 名であった。成功者は，いずれかのタイミングで函館山を認識し，高台を目指す行動を取った．失敗者は，函館山とは逆方向に移動し，経路選択時間を要する場面が見られた．実験終了後に行った聞き取り調査とアンケート調査から，これら被験者は「津波避難ビルを探した」「途中で現在地を見失った」「さらに海から離れようとした」など成功者とは異なる意思決定が行われていた．

４．fMRI での脳神経活動の解析

全参加者を対象とした 1st-level 解析の結果，活性化が認められた部位には右上頭頂小葉（R.SPL）が含まれていた（図 7）。ここは空間認知や空間定位に関係する重要な部位である（Wolpert et al., 1998; Andersen and Buneo, 2002）．そこで本研究では，この部位を事例とした。

なお，得られたデータでは Rest 状態の Bold（血中酸素レベル依存性）信号の値が被験者間で異なり，単純な比較が困難であった．そのため 1 つのノードで測定された Bold 信号の最大値と最小値の差を活性化の指標として用いた（図 8）．作業では，GIS でノードごとに Bold 信号の最大値と最小値の差を入力し，脳神経活動の活性化の変

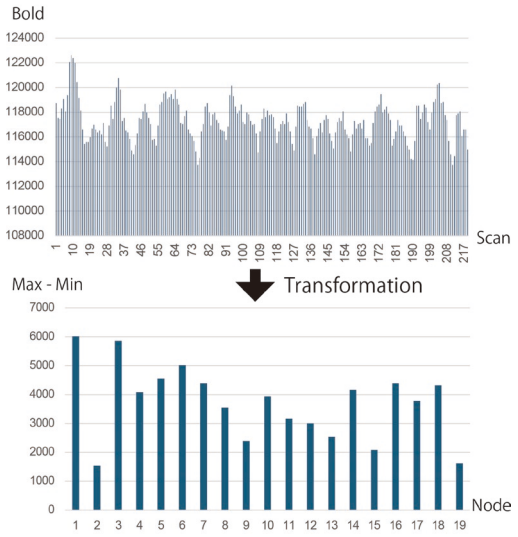


図 8　各ノードにおける Bold 信号データの変換

化に関する空間解析を行った．

まず，任意の被験者のデータに関し，逆距離加重法（IDW）で内挿を行うと，移動の前半で海から遠ざかるときには値が大きく，その後，右折して山に向かう移動では値が小さくなった（図 9）．ただし，ノードごとに，細かい脳神経活動が反映されて値の増減が著しいため，移動全体を網羅する大きな傾向の把握には不向きであった．

次に，同じ被験者に対しクリギング（Kriging）で内挿を行うと，避難移動の前半と後半おける値の差が，逆距離加重法よりも明確になり，結果の煩雑性が減少した．なお，ここではデータが小数であるため経験ベイズクリギング（EBK）を手法として採用した．

ここで被験者を成功者と失敗者の 2 グループに分け，経験ベイズクリギングにより避難移動に伴う活性化の変化傾向を見た（図 10）．その結果，成功者のグループは，スタートから終了まで高い値が維持されており，移動全体で右上頭頂小葉の活動が維持されていた．それに対して，失敗者のグループは，スタート直後には高い値を示すものの，海から離れるにつれて低下する傾向が見られた．その後，このグループでは，再び右上頭頂小葉の活動が高まり，これは聞き取り調査およびアンケート調査の結果から，自身の現在地や避難方向が分からなくなって，新たに避難先を探そうとしたものと推察される．

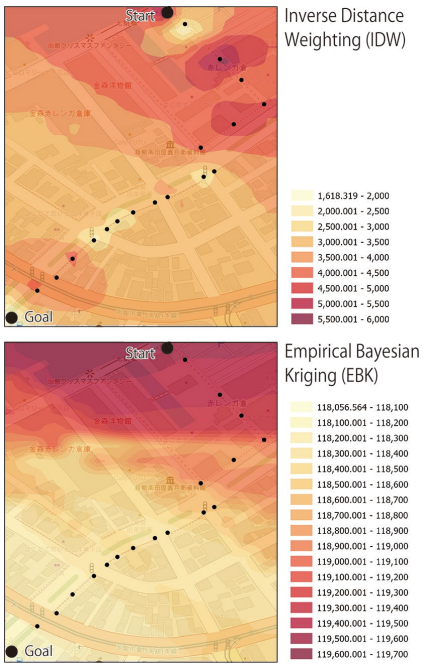


図 9　脳の活性化状態の空間分布

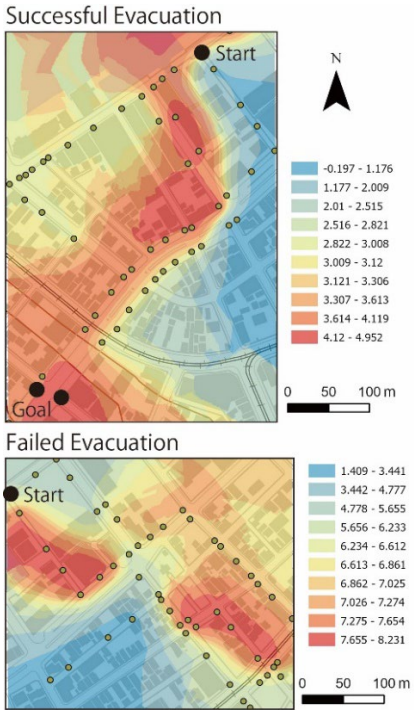


図 10　避難成功者と失敗者の脳の活性化状態

５．おわりに

本研究は，地理学や地理情報科学と脳神経科学のアプローチを融合させ，現実世界の避難行動における意思決定を，脳神経活動から明らかにした．そのために，本研究は，VR 空間での災害時避難移動を行い，その過程における脳神経活動のデータを収集して，GIS で結果の可視化を行った．その結果，避難の成功者と失敗者の間に，空間認知に関係する部位の活動が異なっており，「海から離れることだけでなく，標高の高い目的地を探す」という避難時の姿勢の大切さを，脳神経科学の立場からも明らかにできた．このような知見を防災リテラシー教育の指導内容や方法に結び付けることが重要である．

今回の事例とした上頭頂小葉の他にも空間認知に関する脳の部位が存在する．災害時避難における，これら部位の活動を明らかにするだけでなく，部位間での脳神経ネットワークなどについて研究を進めることにより，さらに避難時に重要となる脳神経活動を特定し，それによる知見を防災リテラシー向上のための教育に繋げたい．

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

小久保美子（2018）物語を読むときの脳活動―イメージしにくい説明的な文章を読むときの脳活動とのちがいを通して―．「全国大学国語教育学会国語科教育研究：大会研究発表要旨集」，135，199-202.

塩﨑大輔.橋本雄一（2018）WebVR を用いた疑似津波避難訓練システムの開発．「研究報告情報システムと社会環境（IS）」,2018-IS-146(4), 2018.

橋本雄一編（2023）『「地理総合」と GIS 教育：基礎・実践・評価』，古今書院.

Andersen, R. A., and Buneo, C. A. (2002) Intentional maps in posterior parietal cortex. *Annual Review of Neuroscience*, **25**, 189–220.

Downs, R. M. (1970) Geographic space perception: past approaches and future prospects. In Board, C., Chorley, R. J., Haggett, P. and Stoddart, D.R., eds. *Progress in Geography: International Reviews of Current Research: Volume 2*, Edward Arnold, 65-108.

Lindell, M. K. and Perry, R. W. (2012) The protective action decision model: Theoretical modifications and additional evidence. *Risk Analysis*, 32(4), 616–632.

Shiozaki,D. and Hashimoto, Y. (2024) System Development for Tsunami Evacuation Drill Using ICT and Tsunami Inundation Simulation Data. *Journal of Disaster Research*, 19(1), 72-80.

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), 81-93.

Wolpert,D. M., Goodbody, S. J. and Husain, M. (1998) Maintaining internal representations: the role of the human superior parietal lobe. *Nature Neuroscience*, 1(6), 529–533.