

## 脳は予想外の痛みをより強く知覚する

脳が痛みを感じる仕組みを調べるため、仮想現実（VR）の環境を用いて、視覚的な脅威や熱刺激を使った実験を行いました。その結果、脳は予測した痛みが現実とずれているときに、痛みを強く知覚していることが分かりました。特に、予想外の出来事が発生すると、痛みが増幅されることが確認されました。

私たちは、ケガや体の不調のとき、痛みが予想以上に強く感じられることがあります。同じようなケガでも、あまり痛くないと感じることもあります。このように、痛みの感じ方は、予測や思い込みにも大きく左右されます。

脳が痛みを感じる仕組みとして、2つの仮説が提唱されています。1つ目は「推定仮説」で、脳が予測（思い込み）に基づいて痛みの強さを推定するというものです。2つ目は「サプライズ仮説」で、脳が予測と現実のずれ、つまり予測誤差そのものを痛みとして知覚するというものです。本研究では、どちらの仕組みが痛みの知覚を決定しているのかを調べました。仮想現実（VR）の環境を用いて、視覚的な脅威や熱刺激を使った実験を行った結果、脳は予測のずれを痛みとして強く知覚していることが分かり、「サプライズ仮説」がより適切に痛みの知覚メカニズムを説明できることが明らかになりました。また、予想外の出来事が発生すると、痛みが増幅されることが確認されました。

慢性痛を抱える人は、漠然とした痛みへの恐怖や不安を常に感じており、そういった不確実な予想と現実のずれが痛みの強さをさらに増大させている可能性があります。本研究成果は、痛みを軽減するためには、痛みの予測と現実のずれ、すなわち「驚き」を減らすことが重要であることを示唆しています。痛みの感じ方をより深く理解することは、慢性痛や外傷からの回復を助ける新たな治療法の開発につながると期待されます。

研究代表者

システム情報系

井澤 淳 准教授

## 研究の背景

痛みは生命維持のために重要な感覚であり、生存のための警告システムとして機能しています。しかし、実際に知覚される痛みは、単に有害な刺激の強度に依存するだけでなく、内的（例えば予測や感情）および外的要因（運動や視覚の情報）によって大きく変動することが知られています。近年、このような現象はベイズ脳理論<sup>注1</sup>の中で整理され、脳は予測をもとに刺激入力を解釈することで外界の状況をより正しく安定して推定していると考えられています。これまでの研究では、脳はこの過程における推定結果（痛みの推定強度）を実際の痛みとして知覚するという「推定仮説」が提唱されてきました。一方で、この推定仮説に対立するものとして、「サプライズ仮説」も提案されており、この仮説では、脳は予測と推定結果の誤差（驚き）そのものを実際の痛みとして知覚するとされています。しかし、これら2つの仮説のどちらが正しいのかは明らかになっていません。

このような痛みの脳内計算理論を明らかにすることは、痛みの治療にとって極めて重要です。もし「推定仮説」が正しいければ、痛みを過小に予測すれば推定結果も低下するため、鎮痛効果が期待できます。また「サプライズ仮説」が正しいのであれば、痛みの予測が小さくても、不意に強い刺激を受けた場合には非常に大きな痛みを感じてしまうリスクをはらんでいることになります。痛みの治療において、患者をどのような認知や思考に導くべきかを科学的に示すことが、治療効果の向上につながります。そこで本研究では、これら2つの仮説を対比し、どちらが痛みを知覚するメカニズムをより適切に説明できるのかを検証しました。

## 研究内容と成果

本研究では、仮想現実（VR）環境を用いて、視覚的な脅威と熱刺激のタイミングが痛みの強度に与える影響を調査しました。参加者（健常者 23 名：男性 15 名、女性 8 名、平均年齢 21.5 歳）は、VR 内で自らのアバターを操作し、仮想のナイフで自分の腕を刺す動作を行いながら、瞬間的な熱刺激を受け、知覚した痛みの強度を報告しました。この実験では、2つの視覚条件（ナイフが見える「脅威提示」と、ナイフが突然消える「脅威消失」）と、2つのタイミング条件（熱刺激がナイフの動作と同時に与えられる「刺激同時」と、遅れて与えられる「刺激遅延」）を組み合わせました。脳は予測と呈示された熱刺激を統合することで痛みを感じます。実際には、脳が形成している予測は時々刻々と変化する上に、外部からは直接観測できないため、さまざまなタイミングで呈示される熱刺激に対する痛み評価のデータから推定したパラメータをもとにモデルシミュレーションを行うことで、その特徴を定量化しました。これにより、脳がどのように視覚や運動情報（自らの行動）を予測に反映させ、痛みを知覚するかを調べるのが可能になりました。

痛みの予測は脅威消失・刺激遅延条件で最も低下するという考えに基づくと、「推定仮説」が正しいければ、この条件下で痛みは最も小さくなりますが、「サプライズ仮説」が正しい場合には、大きい誤差によって痛みは増加するはずですが。これにより、どちらの仮説が正しいかを検証することができます。実験の結果、脅威消失・遅延条件で痛みの強度が顕著に増加することが確認されたことから、脳は、推定結果ではなく、痛みの予測と推定結果との誤差を痛みとして知覚していることが分かりました。さらに、ベイズ脳理論<sup>注1</sup>を用いたモデルシミュレーションを行ったところ、脳が自ら腕を刺すという行動によっても痛みの予測を更新し、それを視覚情報や熱刺激とリアルタイムで統合しながら痛みを処理するプロセスが明らかになりました（参考図）。

これらの結果から、痛みの知覚は、単なる感覚刺激の反映ではなく、脳が作った予測と現実との差異に強く依存することが初めて実証されました。特に、そのような差異そのものが痛みの知覚を増幅させることは、慢性痛患者に対する治療戦略の改善に寄与する可能性があります。例えば、痛みを予測する習慣や

行動、認知のパターンを変えることで、予測の誤差の頻度や強度を軽減し、痛みを抑える新たな治療法の開発につながると考えられます。

### 今後の展開

本研究は、痛み知覚における「予測と推定の誤差（驚き）」の役割を明らかにし、痛み治療への新たな道筋を提示しました。今後は、慢性痛患者における予測と誤差の関係をさらに詳細に検証し、個別化された治療法の開発を目指します。また、異なる感覚モダリティや病態における痛み予測の変遷を調査し、汎用的な痛み制御モデルの構築に取り組みます。

### 参考図

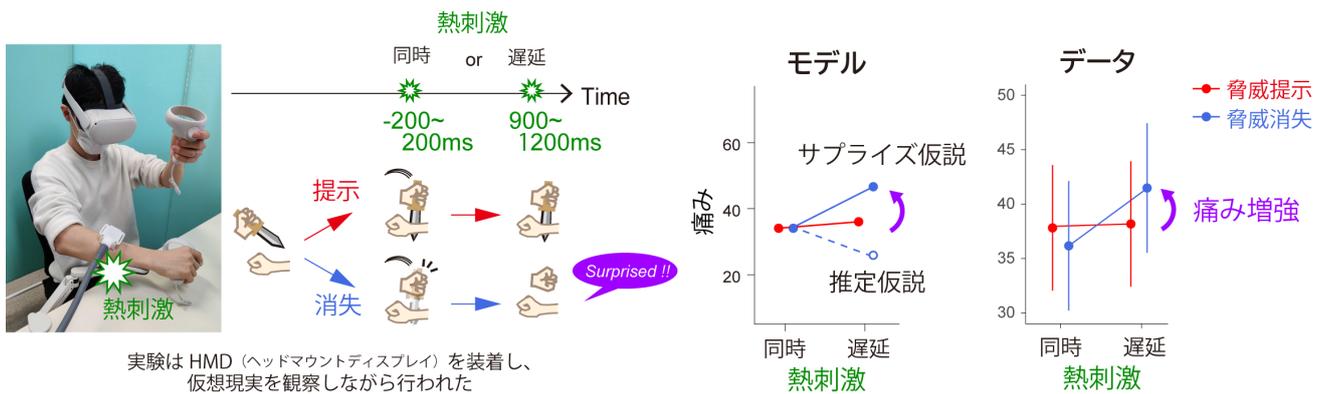


図 本研究の概要

仮想現実（VR）環境で、視覚的脅威が消失し、かつ熱刺激が遅延する条件で痛みが増強され、痛みが予測と推定の誤差（驚き）によって決定されることが明らかになった。

### 用語解説

注1) ベイズ脳理論

脳が外界の情報を確率的に処理し、予測と観測を統合して最適な推定を行う仕組みを説明する理論。本研究では、脳が運動や視覚的脅威によって痛みの予測を更新し、熱刺激を観測した際の予測誤差（ベイズサプライズ）を痛みとして知覚すると考えられる。

### 研究資金

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金(19H05729、23KJ0261)の一環として実施されました。

### 掲載論文

- 【題名】 Bayesian surprise intensifies pain in a novel visual-noxious association.  
(視覚—侵害刺激の特異な連合においてベイズサプライズは痛みを増強させる)
- 【著者名】 石川椋太、小野源太、井澤淳
- 【掲載誌】 Cognition
- 【掲載日】 2025年1月16日
- 【DOI】 10.1016/j.cognition.2025.106064

問合わせ先

【研究に関すること】

井澤淳（いざわ じゅん）

システム情報系 准教授

URL: <https://hebbs.emp.tsukuba.ac.jp/>

【取材・報道に関すること】

筑波大学広報室

TEL: 029-853-2040

E-mail: [kohositu@un.tsukuba.ac.jp](mailto:kohositu@un.tsukuba.ac.jp)