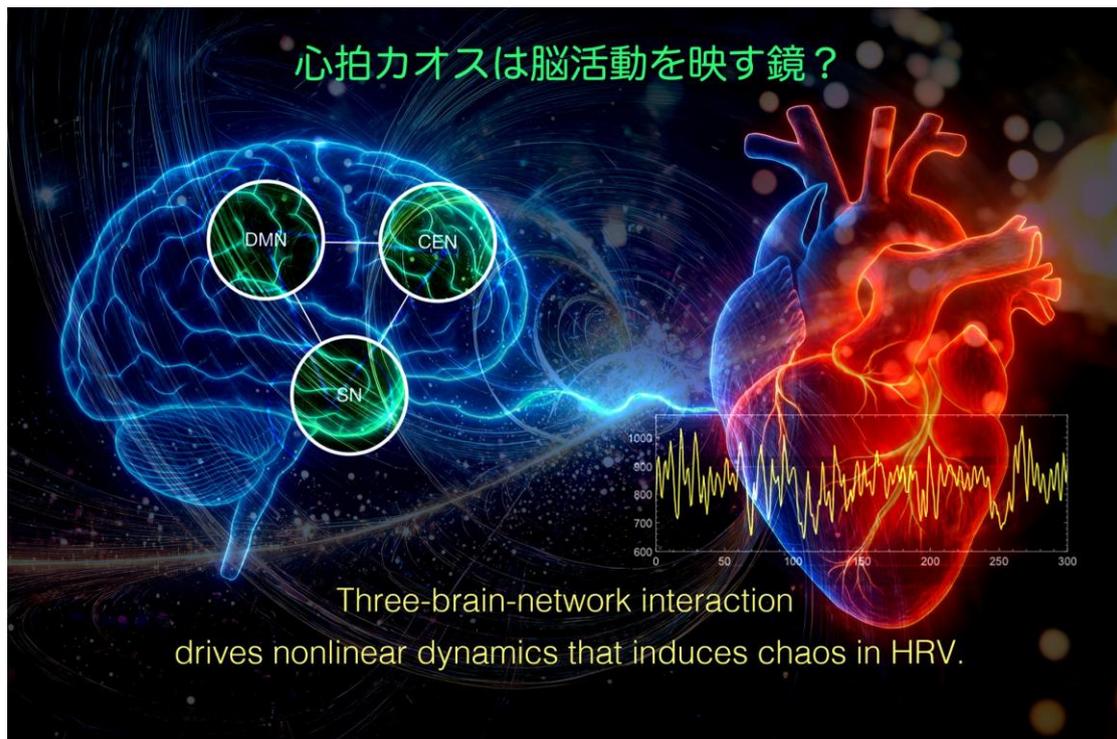


脳の負荷、心拍で可視化

— 心拍のゆらぎのカオス解析から脳活動の影響を示唆 — ストレス評価や心不全の早期兆候検出への応用可能性

概要

京都大学大学院情報学研究科 梅野健 教授、同社会人博士課程学生真尾朋行氏（研究当時東芝情報システム株式会社から京大へ派遣され在学、現在、東芝情報システム株式会社技術統括部）、奥富秀俊氏（東芝情報システム株式会社技術統括部）の研究グループは心拍のゆらぎ（心拍変動）をカオス理論に基づく新しい指標で解析し、心拍のゆらぎの中に脳活動の影響が現れている可能性を示しました。健康な被験者を対象に、安静、立位、認知課題（暗算・パズル）の条件で心拍データを比較したところ、認知課題において、カオス・複雑系指標が有意に増加しました。本成果は、心拍という容易に測定できる生体信号から、脳の負荷や精神状態の影響を間接的に読み取れる可能性を示すものです。将来的にはストレス状態の客観的評価、過労による健康リスクの早期把握、心不全の早期兆候検出などへの応用が期待されます。本研究成果は、2026年3月24日午前10時（ロンドン時間）に、国際学術誌「*Scientific Reports*」にオンライン掲載されました。



Designed by Hidetoshi Okutomi

1. 背景

人間の心臓は規則的に鼓動しているように見えますが、実際には鼓動の間隔はわずかに揺らいでいます。このゆらぎは心拍変動（Heart Rate Variability: HRV）と呼ばれ、自律神経の状態を反映する重要な生理指標として広く研究されています。

一方、従来の心拍変動解析は、主に統計な時間領域指標や周波数領域指標に基づいており、生体システムの持つ**複雑な非線形ダイナミクス**を十分に捉えていない可能性があります。生体は本質的に複雑で非線形なシステムであり、その振る舞いを理解するには、カオス理論や複雑系科学の視点が重要だと考えられます。

本研究グループは、こうした背景のもと、心拍変動をカオス理論に基づいて解析する新しい指標を導入し、脳活動の影響や生体状態の変化をより鋭敏に捉えられないか検討しました。

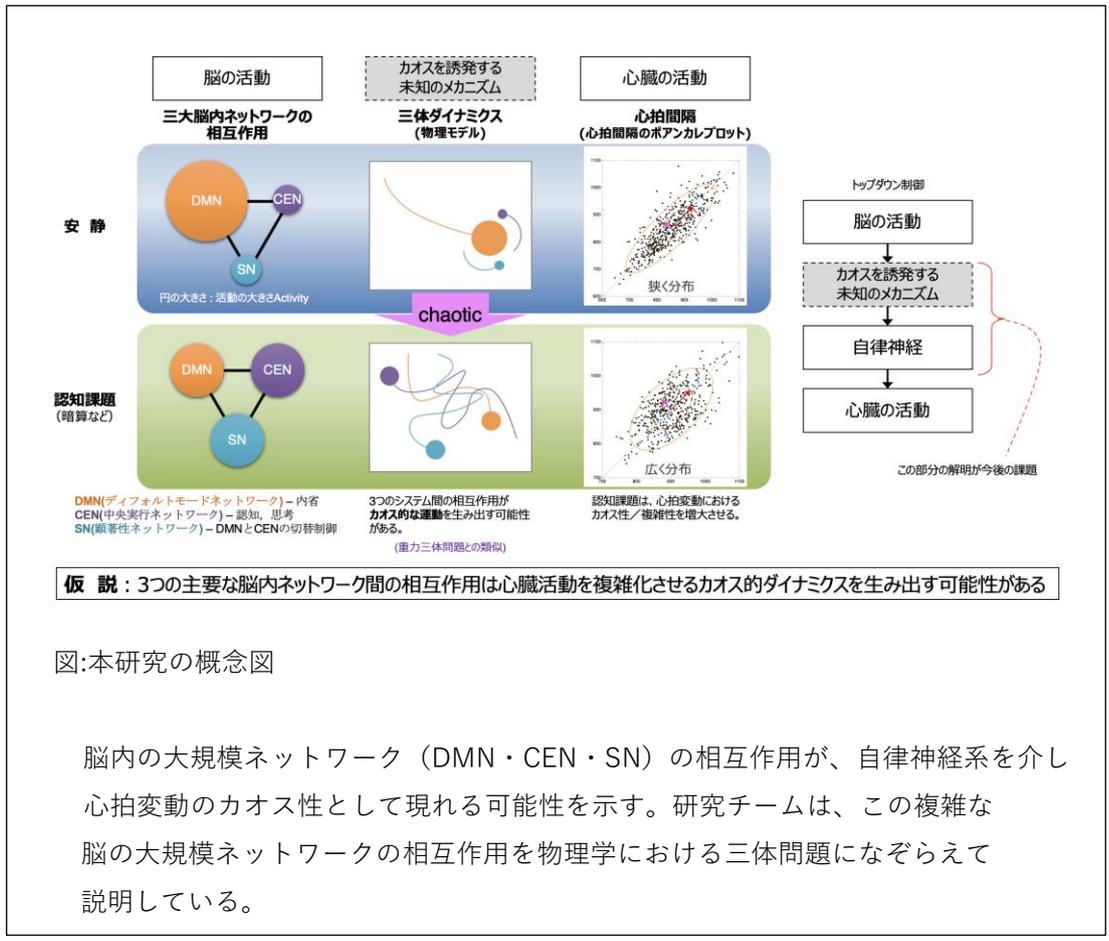
2. 研究手法・成果

本研究では、健康な被験者を対象に、安静状態、立位、認知課題（暗算・パズル）の条件で心拍データを測定しました。認知課題は、脳に負荷がかかる条件として設定しました。解析には、従来の心拍変動指標に加え、エントロピー解析、フラクタル解析、カオス指標などの非線形解析手法を用いました。

その結果、従来の心拍変動指標では認知課題による変化がほとんど見られなかった一方で、**カオス・複雑性指標は認知課題において有意に増加**しました。また、立位ではこれらの指標が低下し、身体負荷と認知負荷で逆の方向の変化を示しました。これにより、心拍のゆらぎが単なるノイズではなく、**脳と身体の相互作用による複雑なダイナミクス**を反映している可能性が示されました。

本研究は、心拍という比較的簡便に取得できる生体信号から、脳状態の影響を間接的に推定できる可能性を示しています。脳活動を直接測定する方法としては fMRI、EEG、MEG などがありますが、これらは大型装置や専門的な計測環境を必要とします。これに対し、心拍は心電計やウェアラブル機器で日常的に測定できるため、将来的に「脳を測らずに脳状態を推定する」技術につながる可能性があります。

さらに本研究では、脳内の大規模ネットワークであるデフォルトモードネットワーク（DMN）、中央実行ネットワーク（CEN）、サリエンスネットワーク（SN）のネットワーク同士の相互作用が、自律神経系を介して心拍変動のカオス性として現れる可能性を示す概念モデルも提示しました。研究チームはこの複雑な相互作用を、物理学における三体問題になぞらえて説明しています。



3. 波及効果、今後の予定

本研究は健康な被験者を対象とした基礎研究ですが、心拍ダイナミクスのカオス性が脳の負荷や精神状態の影響を反映する可能性を示した点に意義があります。精神的な負荷や長期的なストレスは自律神経系に影響を与えることが知られていますが、日常生活の中でストレス状態を客観的に評価する方法は限られています。本研究成果は、将来的にストレス状態の客観的評価、過労による健康リスクの早期把握、メンタルヘルスマonitoringなどへの応用につながる可能性があります。

また、生理学では、健康な生体システムは複雑で柔軟なダイナミクスを持つ一方、疾患や老化が進むと生体信号の変動が単純化することが知られており、これは「複雑性の喪失 (loss of complexity)」と呼ばれます。本研究は、この現象をカオス理論の観点から理解する可能性も示しています。

特に心不全では、心拍変動の低下や自律神経機能の低下が知られています。研究チームは、心不全の進行を生体ダイナミクスの「カオス崩壊」として理解できる可能性を提案しています。ただし、今回の研究は健常者の認知課題実験に基づくものであり、心不全に関する応用は今後の臨床研究による検証が必要です。もし心拍ダイナミクスの変化を早期に捉えられれば、将来的に心不全の早期兆候を評価する新しい指標につながる可能性があります。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は東芝情報システム株式会社との8年間の共同研究(2018-2026)で行われました。本共同研究は今後も継続される予定です。

<用語解説>

心拍変動 (HRV)

心臓の鼓動の間隔のゆらぎ。自律神経の状態を反映する生理指標として用いられる。

カオス指標

時系列データの複雑さや不規則性を、カオス理論や情報理論の観点から評価する指標。本研究では CD(カオス指標)、CD をベースにカオス性をより正確に捉えられる様に修正した ICD (修正カオス尺度) などの指標を用いた。

複雑性の喪失 (loss of complexity)

健康な生体システムが持つ複雑で柔軟な変動性が、老化や疾患によって失われ、より単純な変動へ移る現象。

DMN・CEN・SN

脳内の代表的な大規模ネットワーク。DMN (デフォルトモードネットワーク) は安静時の内的思考、CEN (中央実行ネットワーク) は課題遂行、SN (顕著性ネットワーク) は重要刺激の検出やネットワーク切り替えに関わる。

<研究者のコメント>

「生きている状態とは何か」を捉えることは、科学にとって大きな課題の一つです。心臓と脳がネットワークとしてつながっているという考え方は以前からありましたが、本研究では、心拍変動に見られる“カオス的なゆらぎ”が、その関係を理解する重要な手がかりになる可能性を示しました。今回の成果が示唆するのは、カオスを単なる複雑さとして見るのではなく、生体状態を読み解くための指標として積極的に活用できる可能性です。今後は、ストレスチェックや健康状態の評価といったヘルスケアへの応用に加え、ストレスに起因する心不全などの早期兆候把握につながる可能性についても検証していきたいと考えています。(梅野 健)

人間の内面の状態を直接捉えることは容易ではありませんが、ストレスや疲労などを客観的に評価したいというニーズはますます高まっています。本研究では、ウェアラブルセンサーなどで取得可能な心拍データを解析することで、脳活動の影響を間接的に推定できる可能性を示しました。特に、心拍と脳活動の関係を“カオス”という新しい視点から捉えた点に本研究の独自性があります。今後は、医療やヘルスケア分野への応用を見据え、日常的に心身の状態を把握し、人々の健康維持や安全向上に貢献できる技術へと発展させていきたいと考えています。(真尾朋行)

生命を支える『心臓』と、人間の高次機能を担う『脳』との間に、新たなつながりを示唆する知見が得られたことを大変興味深く感じています。私たちが健康に暮らしていくためには、身体のみならず心の健康も重要ですが、心の状態を客観的に把握する手段はまだ限られています。本研究成果は、心拍のカオス解析に

基づいて心身の状態を知る新しい技術につながる可能性があります。今後は、この仮説を生理学・医学・数理科学のそれぞれの視点から検証し、技術開発を通じて社会に役立つ形へと発展させていきたいと考えています。
(奥富秀俊)

<論文タイトルと著者>

タイトル：Chaotic fluctuations mark the sign of mental activity in task-based heart rate variability
(心拍変動のカオスゆらぎが、脳活動を検出する)

著者：Tomoyuki Mao, Hidetoshi Okutomi and Ken Umeno

掲載誌：Scientific Reports (2026) DOI：10.1038/s41598-026-43385-z