2025 年 11 月 10 日

報道機関　各位

国立大学法人東北大学

伝統的手法 MEM の性能限界を明らかに
—50 年以上用いられてきた信号推定手法の脆弱性を発見—

【発表のポイント】

- 自然科学、社会科学で広く用いられる最大エントロピー法（Maximum Entropy Method, MEM）(注1) の性能限界を理論的に解明しました。
- MEM においてわずかな仮定の違いが復元精度を急激に崩壊させる「相転移現象」が存在することを初めて明らかにしました。
- 信号処理や天文学、計算物理学、量子化学、言語学等に広く応用されてきたMEMの限界を示し、今後のデータ復元技術の設計指針になると期待されます。

【概要】

信号処理の代表的手法である最大エントロピー法（MEM）は、限られたノイズの多い観測から元の信号を再構成するため、地震波解析や天体観測、量子化学計算、言語学や経済学に至るまで広範な分野で利用されてきました。

東北大学大学院情報科学研究科の人見将特任助教（研究）と大関真之教授らの研究グループは、MEMの信号を復元する性能を理論的に解析し、本研究により、MEMは仮定するデフォルトモデル (注2) が実際のデータ分布と少し異なるだけで、復元性能が急激に悪化する場合があることが示されました。これは、物理学で知られる相転移 (注3) と同様の現象であり、データ解析における復元結果について信頼性に対する根本的な問いを突きつけます。

さらに、信号復元の新たな手法として近年注目されるL1ノルム最小化 (注4)（スパース推定）との復元性能の比較により、従来のMEMが必ずしも最適ではなく、新手法が優れる場合があることも確認しました。これは古典的手法の再検証を理論的に実践し、「新規手法の設計」を系統的に実施する方法論を象徴する成果です。

本研究成果は、2025年10月23日にPhysical Review Research に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

最大エントロピー法は、観測データに欠損やノイズが含まれていて、情報が不十分な状況でも合理的な推定を可能にする点で強力なツールとされ、地震波解析、天文学的観測、量子化学計算、さらには社会科学や言語学に至るまで幅広く利用されてきました。しかし、その結果は「デフォルトモデル」と呼ばれる観測者の持つ事前情報を用いた信号に対する仮定に依存するという弱点が長年知られており、未知の構造を持つような対象には課題の残る手法でした。

今回の取り組み

本研究では、2021 年のノーベル物理学賞の受賞対象ともなった複雑な問題を相手に有効な手法である物理学由来のレプリカ法を用いることで、一般的な MEM の再構成性能を数理的に解析しました。その結果、デフォルトモデルと実際の信号の分布がわずかに異なるだけで、復元精度が連続的に低下するのではなく、ある臨界点を境に復元が突然崩壊する「相転移現象」が起こることを示しました。さらに、近年注目されるスパース推定手法（L1 ノルム最小化）と比較したところ、MEM は広い条件下で劣る場合があることも判明しました。これは、長年「万能」とされてきた MEM に対し、その適用範囲に厳密な限界が存在することを突きつける成果です。

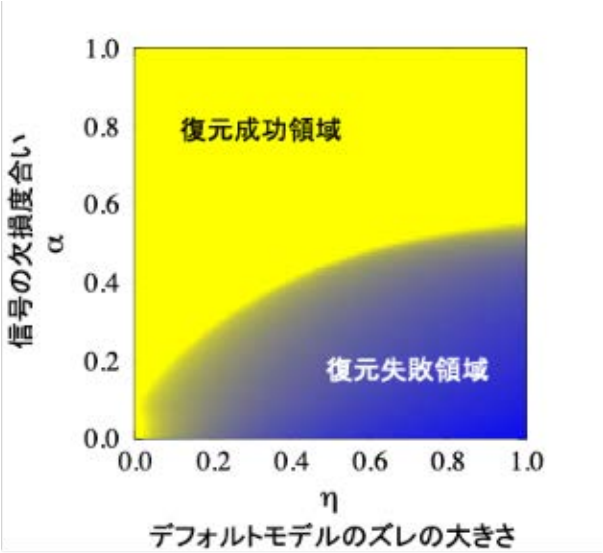

図　信号復元性能の相図。デフォルトモデルのズレに対して、復元成功領域と失敗領域の間に境界（相転移点）が存在

今後の展開

今回の成果は、情報復元の問題を「相転移を伴う物理現象」として捉える研究の方向性を拓くものです。この結果は、MEM が使用されているあらゆる分野に対して起こりうる「再構成失敗」の一般的な可能性を提示しています。よってこの知見は、地震予測や医用画像解析、宇宙観測、通信技術など、多様な分野でのデータ解析に対して、過去の結果を再度見直すべきであるという警鐘を鳴らすとともに、条件の範囲にある分析結果についてはその有効性を担保するという点で、信頼性向上に直結し、社会的にも大きな意義を持つと期待されます。

【謝辞】

本研究は内閣府 BRIDGE「量子プロダクト事業化推進プラットフォーム構築事業」および内閣府 SIP「量子コンピュータを活用した新事業を共創する研究開発基盤」による支援を受けて実施された研究です。

【用語説明】

注1.　最大エントロピー法

欠損やノイズによって観測データが限られている場合に、その観測情報と事前の仮定（デフォルトモデル）をもとに、できるだけ偏りのない推定を行う手法です。エントロピー（不確かさの尺度）を最大化する原理に基づき、地震波解析、天文学、量子化学など幅広い分野で用いられてきました。

注2.　デフォルトモデル

最大エントロピー法で推定を行う際に「信号が本来どのような分布をしているか」という事前の仮定を表すものです。一般には正規分布や、観測対象である現象に対するモデルによる予測が用いられます。デフォルトモデルが実際のデータ分布と大きく異なると、復元結果が誤った方向に偏ってしまうため、その選び方が解析の信頼性に直結します。

注3.　相転移現象

物理学で、水が氷や蒸気に変わるように、ある条件を境に状態が急激に変わる現象を指します。本研究では、復元の成功と失敗が「境界」を持って分かれることを意味し、わずかな条件の変化が突然の性能崩壊につながることを示します。

注4.　L1 ノルム最小化

「信号は多くの成分がゼロで、一部だけが重要」という“スパース性”を仮定し、その情報を利用して復元を行う手法です。近年、圧縮センシングや機械学習で注目されており、デフォルトモデルを必要としないため、MEM と

比べて優れた性能を示す場合があります。

【論文情報】

タイトル：Typical reconstruction limit and phase transition of maximum entropy method
著者：Masaru Hitomi* and Masayuki Ohzeki
*責任著者：東北大学大学院情報科学研究科　特任助教　人見将
掲載誌：Physical Review Research
DOI : https://doi.org/10.1103/bg58-lpt2
URL : https://journals.aps.org/prresearch/abstract/10.1103/bg58-lpt2

【問い合わせ先】
（研究に関すること）
東北大学大学院情報科学研究科
教授　大関 真之
Email :mohzeki@tohoku.ac.jp
TEL: 022-795-5899

（報道に関すること）
東北大学大学院情報科学研究科
広報室　鹿野 絵里
Email: koho_is@grp.tohoku.ac.jp
TEL: 022-795-4529