東北大学
TOHOKU UNIVERSITY

Press Release

2026 年 11 月 11 日

報道機関　各位

国立大学法人東北大学

量子力学の不確定性関係をさらに精密に
ーハイゼンベルク・ロバートソン・シュレーディンガーの不確定性関係を超える普遍的かつ最も厳密な限界の導出ー

【発表のポイント】

- 約 100 年前に確立された量子力学の基本法則「ハイゼンベルク・ロバートソン・シュレーディンガーの不確定性関係」を強化し、従来見過ごされていた量子的な寄与を明らかにしました。
- 新しい関係は、あらゆる量子状態と物理量に対して成立し、特に量子ビットでは常に等式となり、不確定性を正確に表します。
- 新たな下限は実験で測定可能な物理量の平均値（期待値）で表され、実際の量子系を用いた検証が可能です。

【概要】

量子力学(注 1)の基本原理である「不確定性関係」(注 2)は、位置と運動量など、2 つの物理量の測定値のばらつきを同時に小さくすることには限界があることを示します。1927 年にハイゼンベルクによって提唱され、その後ロバートソンとシュレーディンガーによって一般化されました。

東北大学大学院情報科学研究科の木村元教授は、芝浦工業大学、信州大学、東京大学、ポーランドのコペルニクス大学との共同研究により、この約 100 年の歴史を持つ不確定性関係を強化することに成功しました。従来の関係では捉えられていなかった、物理量同士の「非可換性」に由来する新たな寄与を発見し、より厳密で普遍的な不確定性関係を数学的に証明しました。

本成果は、量子力学の基本法則への理解を深め、量子情報科学や量子計測などの研究への貢献が期待されます。

本研究成果は、2026 年 9 月 21 日に Nature Portfolio が発行する国際学術誌「npj Quantum Information」に掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景と経緯

ミクロな世界を記述する量子力学では、位置と運動量など、2 つの物理量の測定値のばらつき（不確定性）を、同時にいくらでも小さくできるとは限りません。この性質は、1927 年にハイゼンベルクによって不確定性原理として提唱され、量子力学を象徴する基本原理の一つとなりました。不確定性関係には、大きく分けて 2 つの考え方があります。一つは、ある物理量を測定することによって別の物理量がどの程度乱されるかという、測定の影響に着目した「測定型不確定性関係」です。もう一つは、同じ状態に準備された量子系について、それぞれの物理量を測定したときの結果のばらつきに着目する「準備型不確定性関係」です。今回の研究が対象とするのは、後者の準備型不確定性関係です。この関係は、1929 年にロバートソン、1930 年にシュレーディンガーによって、任意の物理量に対する数学的な不等式として一般化されました。現在では「ロバートソン・シュレーディンガーの不確定性関係」として知られ、量子力学の教科書にも登場する基本的な関係となっています。

この不確定性関係は、約 100 年にわたり量子力学の基礎を支えてきました。しかし、この関係が与えるのは、不確定性の積がどこまで小さくなれるかという下限であり、必ずしも実際の不確定性を正確に表すものではありません。特に、複数の量子状態が確率的に混ざり合った「混合状態」では、従来の関係が与える下限がゼロになってしまい、実際には存在する不確定性の制約を十分に捉えられない場合があります。

こうしたことから、従来の不確定性関係には、まだ捉えられていない量子力学特有の性質が隠されているのではないかという問題が生じます。今回の研究では、この問題に着目し、不確定性の背後にある数学的な構造を詳しく調べました。

研究内容

東北大学大学院情報科学研究科の木村元（きむら げん）教授は、芝浦工業大学の真弓愛菜（まゆみ あいな）氏（研究当時、大学院生）、信州大学の大野博道（おおの ひろみち）教授、東京大学の李宰河（り ちぇは）助教、ポーランドのニコラウス・コペルニクス大学の Dariusz Chruściński（ダリウシュ・フルシチンスキ）教授との共同研究により、従来のロバートソン・シュレーディンガーの不確定性関係に、これまで見過ごされていた新たな量子的な寄与が存在することを明らかにしました(図 1)。

その鍵となったのは、2 つの物理量の「非可換性」(注 3)です。量子力学では、

物理量を表す数学的な演算について、その順序を入れ替えると結果が変わることがあります。この性質は非可換性と呼ばれ、量子力学が古典物理学と本質的に異なる特徴の一つです。従来の不確定性関係にも非可換性の影響は取り入れられていましたが、研究グループは、それだけでは十分に捉えられていない寄与が存在することを発見しました。そして、厳密な数学的解析により、従来の不確定性関係の下限に、この新たな寄与を正の項として加えられることを証明しました。これにより、従来よりも厳密な下限を与える新しい不確定性関係を導出しました。

今回の関係は、あらゆる量子状態と任意の 2 つの物理量に対して成立する普遍的なものです。さらに、この新たな寄与は、量子状態に依存するものの、実験で測定可能な物理量の平均値（期待値）として表されています。そのため、新しい不確定性関係は単なる数学的な不等式にとどまらず、実際の量子系を用いて検証することが可能です。

特に重要なのは、量子コンピュータの基本単位として知られる 2 準位量子系（量子ビット(注 4)）では、この新しい不確定性関係が常に等式となることです（図 2）。通常、不確定性関係は不確定性の積に対する下限を与えるものですが、今回の関係は、量子ビットについては、どのような量子状態と 2 つの物理量の組み合わせに対しても、不確定性の積を正確に表すことができます。これは、量子ビットにおける不確定性を完全に特徴づける結果です。

これらの成果は、約 100 年前に確立された不確定性関係に、これまで十分に捉えられていなかった量子的な寄与が存在することを明らかにし（図 3）、量子力学の基本原理への理解を一段と深めるものです。

今後の展開

不確定性関係は、量子力学の基礎を理解するうえで重要であるだけでなく、量子コンピュータや量子暗号などの量子情報科学(注 5)、さらには高精度な測定を目指す量子メトロジー（量子計測）とも深く関係しています。今回の研究によって、従来の不確定性関係では捉えられていなかった非可換性の寄与が明らかになり、量子状態における不確定性を、これまで以上に厳密に評価できるようになりました。特に、量子ビットにおける厳密な等式は、量子情報処理の基本単位となる量子系の性質を理解するうえで、新たな理論的基盤を与えるものです。

また、今回導出した新しい下限は、実験で測定できる物理量の期待値によって表されているため、実際の量子系を用いた検証が可能です。この特徴は、理論研究と実験研究を結びつけるうえで重要な意味を持ちます。今後、さまざま

な量子系における実験的な検証を進めることによって、新しい不確定性関係の物理的な意味をさらに明らかにできると期待されます。さらに、今回の成果を量子状態の特徴づけや量子情報処理における制約の解析へと発展させることに加え、量子計測の精度限界との関係を明らかにしていくことも重要な研究課題です。本研究は、直ちに量子コンピュータや量子センサーの性能向上を実現するものではありませんが、量子力学の基本法則への理解を深め、次世代量子技術を支える理論研究の発展に貢献することが期待されます。

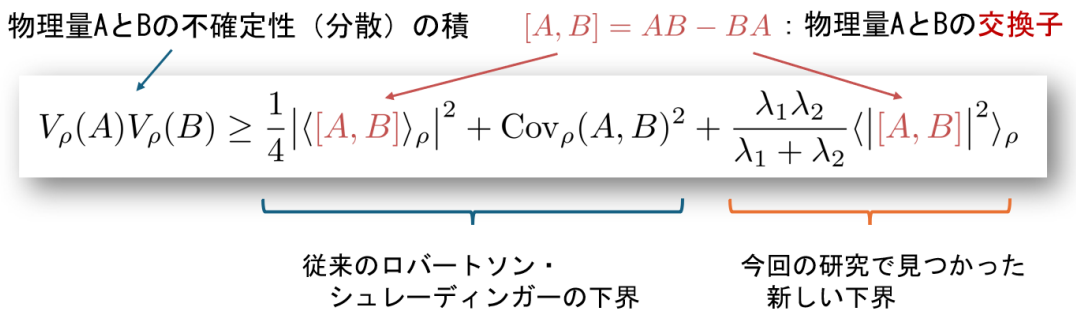


図 1. 新しく見出された不確定性関係。従来のロバートソン・シュレーディンガーの不確定性関係に、これまで捉えられていなかった非可換性に由来する新たな寄与が加わった。

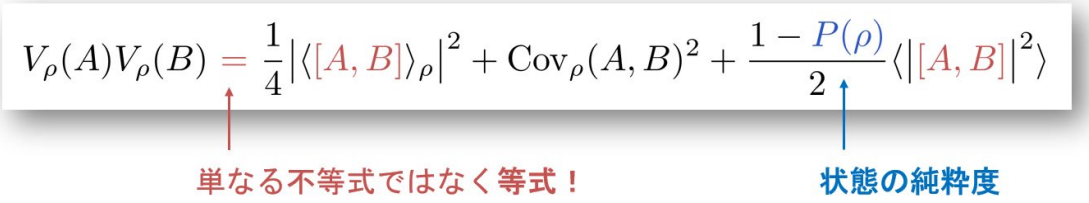


図 2. 新しい不確定性関係は量子ビットでは、不等式ではなく等式となり、不確定性のトレードオフを完全に捉えている。

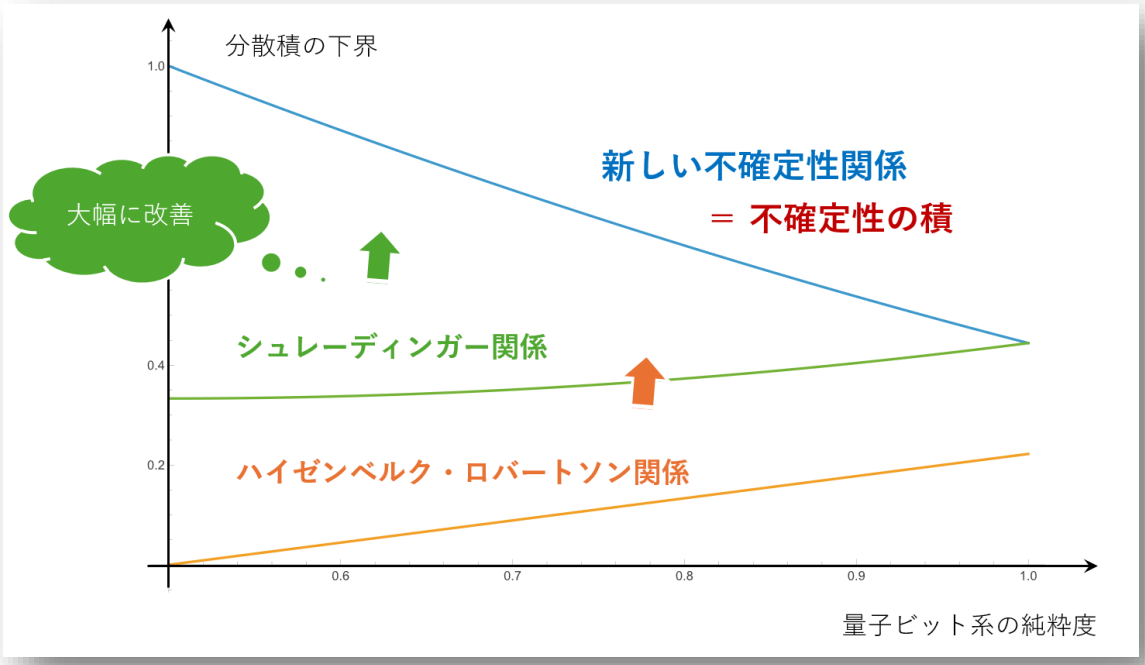


図 3. 量子ビット系における不確定性の下界の比較。横軸は量子状態の純粋度、縦軸はさまざまな物理量の組み合わせに対する不確定性の下界の平均値を表す。純粋度が低くなるほど、従来のロバートソンやシュレーディンガーの不確定性関係に比べて、今回導出した新しい関係がより厳密な下界を与えることがわかる。

【謝辞】 本研究は、科学研究費助成事業（課題番号：24K06873、23K03147、22K13970）、ポーランド国立科学センター（Polish National Science Center）の研究助成（課題番号：2024/55/B/ST2/01781）の支援により行われました。本論文は『東北大学 2026 年度オープンアクセス推進のための APC 支援事業』の支援を受け、Open Access となっています。
（https://www.nature.com/articles/s41534-026-01374-0）

【用語説明】

注1.　量子力学：原子や電子、光などのミクロな世界の物理現象を記述する基本理論である。私たちの日常的な経験とは異なる性質を持ち、物理量の測定結果が確率的に決まることや、複数の状態を重ね合わせられることなどを特徴とする。半導体やレーザーなどの現代技術の基礎となっており、近年では量子コンピュータや量子通信などへの応用も進められている。

注2.　不確定性関係：量子力学において、2 つの物理量の不確定性の間に成り立つ制約を表す関係式である。今回の研究が対象とする準備型不確定性関係は、同じ量子状態について、それぞれの物理量を測定したときの結果のばらつきに関する制約を表す。

注3.　非可換性：物理量を表す数学的な演算について、演算の順序を入れ替えると結果が変わる性質である（AB≠BA）。量子力学の重要な特徴の一つであり、不確定性関係と深く結びついている。

注4.　量子ビット：量子コンピュータにおける情報の基本単位である。古典的なビットが 0 または 1 の値をとるのに対し、量子ビットは 0 と 1 に対応する状態の重ね合わせをとることができる。

注5.　量子情報科学：量子力学の性質を情報の処理や伝達に利用することを研究する分野である。量子コンピュータ、量子暗号、量子テレポーテーションなどが含まれる。

【論文情報】

タイトル：Beyond Robertson–Schrödinger: a general uncertainty relation unveiling hidden noncommutative trade-offs
ロバートソン・シュレーディンガーの不確定性関係を超えて：非可換性に由来する未知のトレードオフを明らかにする新たな一般的不確定性関係
著者：Gen Kimura*, Aina Mayumi, Hiromichi Ohno, Jaeha Lee, Dariusz Chruściński
木村元*、真弓愛菜、大野博道、李宰河、Dariusz Chruściński
*責任著者：東北大学 大学院情報科学研究科 教授 木村 元（きむら げん）
掲載誌：npj Quantum Information
DOI：10.1038/s41534-026-01374-0
URL：https://www.nature.com/articles/s41534-026-01374-0

【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 木村 元（きむら げん）
TEL: 022-795-4600
Email: gkimura@tohoku.ac.jp

（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　小野寺祐美子
TEL: 022-795-4529
Email: koho_is@grp.tohoku.ac.jp