



本件の報道解禁につきましては、令和2年  
10月16日(金)午後6時以降にお願い  
いたします。

令和2年10月15日

量子ランダムウォークのウォーキング・メカニズムを世界で初めて解明  
～Go To Quantum 量子の世界の歩き方～

【本研究成果のポイント】

1. 量子の世界<sup>1</sup>での酔っ払い（量子ランダムウォーク）のウォーキング・メカニズムを不可思議な量子力学<sup>2</sup>原理（波動・粒子二重性）を基に世界で初めて解明することに成功しました。
2. 解明したウォーキング・メカニズムを用いて、量子の世界での酔っ払いの歩行（酔歩）を自由自在に操る方法を発明しました。
3. これは、量子コンピュータ<sup>3</sup>や量子ニューラルネットワーク<sup>4</sup>などの次世代の革新的量子情報処理技術の核心的基盤要素技術を提供します。

【概要】

広島大学の片山春菜大学院生・畠中憲之教授と旭川医科大学の藤井敏之助教の共同研究チームは、革新的量子情報処理技術の基盤要素技術を担う量子ランダムウォークのウォーキング・メカニズムを世界で初めて解明することに成功しました。また、それを用いて量子ランダムウォークを自由自在に操る方法を発見しました。ランダムウォークは、ランダム系の確率過程<sup>5</sup>のモデルの一つで、例えば、コイントスを行い表が出たら右に裏が出たら左に1歩移動させ、酔っ払いの歩行（酔歩）を模倣できます。量子力学が支配するミクロな世界では、酔っ払い（ウォーカー）は波のように振舞い、波の特徴である干渉効果<sup>6</sup>（波の強めあい）により、これまでとは全く異なる様相を示すようになります。しかし、波となったウォーカーのウォーキング・メカニズムは不明でした。今回、コインの表と裏がでる確率が時間的に変化する場合は考察することにより、波の速度がコインの周期的変化に依存することを見出しました。これにより、コインと干渉の関係（ウォーキング・メカニズム）を世界で初めて明らかにしました。さらに、コインを制御することによって、量子ランダムウォークがランダムな性質を保持しつつ自由自在に制御可能であることを明らかにしました。これは、量子コンピュータや量子ニューラルネットワークなどの次世代の革新的量子情報処理技術の核心的基盤要素技術を提供します。本研究の成果は、英国科学誌 Scientific Reports (Nature Publishing) に2020年10月16日午後6時（日本時間）に掲載されます。

【背景】

天候、地震の発生、株価、為替などは特別な規則性がなく、その変動を予想することが困難です。これらの変動の背後には、確率的な起源が存在します。そこで、数理モデルを用いて確率過程をモデル化することで、変動を予想することができるようになります。

ランダムウォークは、確率過程のモデルの一つです。例えば、コイントスを行い、表が出たら右に、裏が出たら左に1歩移動し、移動した先でこれを繰り返します（図1（B）参照）。しばらく繰り返したあとにウォーカーがいる場所の確率分布は、出発した地点が高い確率となる分布に従います（図1（A）参照）。このランダムウォークは、酔っ払いの歩行（酔歩）から、株価の変動まで、様々な不規則性を持つシステム

の確率過程モデルとして使われています。コンピュータサイエンスの分野では、計算アルゴリズムの設計のために使われています。

量子ランダムウォークは、ランダムウォークの量子力学版です。量子力学は、原子や分子などミクロな物理現象を記述する基本的枠組みで、それらの物理現象は、粒子のような性質と同時に波のような性質を併せ持ちます（粒子・波動二重性）。量子ランダムウォークでは、ウォーカーが波のように振舞うため、波の性質である重ね合わせや干渉により、確率分布がランダムウォークと異なり、左右の両端に高い確率を持った分布となります（図1（C）参照）。この特性は、幅広いデータ領域での探索を可能にし、新しい探索アルゴリズムとして量子情報科学の分野で発展してきています。また、ランダムウォークが計算アルゴリズムに用いられるのと同様に、量子ランダムウォークも、量子コンピュータ、量子探索問題、量子アルゴリズムなどへの応用が期待されています。量子アルゴリズムの設計においては、情報を任意に操ることが求められています。しかしながら、量子ランダムウォークは本質的にランダム過程であるため、それを制御することは容易ではありませんでした。

### 【研究成果の内容】

研究チームは、量子ランダムウォークの制御可能性を追求するために、量子ランダムウォークの動きを決めているコインに着目し、その機能解明のためコインの表と裏が出る確率に時間依存性（時間依存コイン）を導入しました。最初に、数値シミュレーションを行い、量子ランダムウォークの軌跡（確率分布が高い位置）が**回帰する新奇量子現象を発見**しました（図2参照）。そして、その軌道の起源を探究するため、ウォーカーの波動性・粒子性の両側面から、どのように軌道が制御されているかというウォーキング・メカニズムの解明に取り組みました（図3参照）。

コインがウォーカーを左右へ移動させることは確かなのですが、コインがどんな物理量に対応しているかが不明でした。その物理量が何かということが本研究における基本的な問いです。そこでまず、ウォーカーの波動性に着目しました。ウォーカーの波（量子的波動）とコインとの関わりを明らかにするために、量子ランダムウォークの波動方程式を基に理論解析を行いました。その結果、数値シミュレーションで得られた回帰現象は、量子ランダムウォーク波の速度がコインの表と裏が出る確率の時間変化に依存して出現することが明らかになりました。つまり、これまで波のどんな物理量にコインに対応しているのかが不明でしたが、今回、全く異なる概念である「**コインと波の速度の等価性**」を明らかにすることができました。これにより、コインが量子波の速度を制御するというウォーキング・メカニズムを解明することができました。さらに、量子ランダムウォークのもう一方の量子性である**粒子性**に着目し、量子ランダムウォーク粒子の力学特性から粒子の速度を求めることで、波動性から求めた結果と同様の結果を得ることができました。

そして、このメカニズムを用いれば、時間依存コインを適切に設計することで、**どんな軌道を持った量子ランダムウォークでも実現可能**であることを発見しました。これにより、課題であった情報をランダムな系においても自由に操ることが可能であることがわかりました。

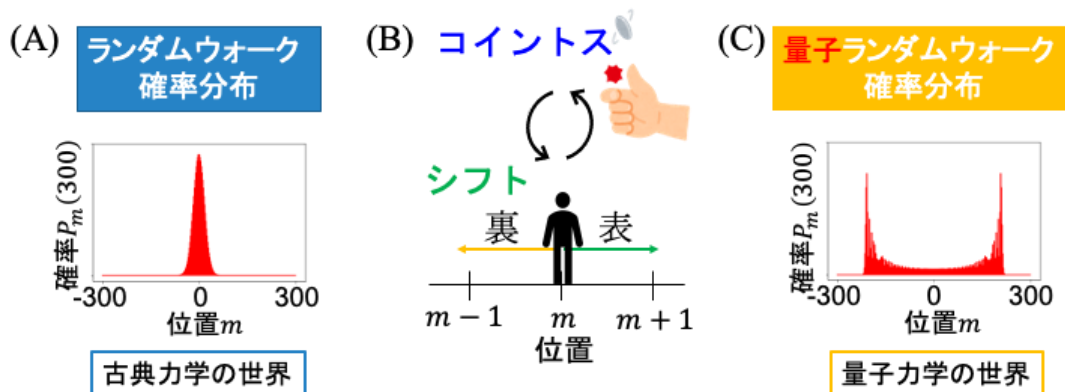
### 【今後の展開】

本研究で明らかになった量子ランダムウォークのウォーキング・メカニズムは、量子ランダムウォークを基盤要素技術とするすべての応用分野、特に量子コンピュータなどの量子情報技術において新しい設計指針となります。また、人工知能を支える量子ニューラルネットワークにおける情報伝達やそこでのデータ探索アルゴリズムなどは本研究成果が応用できる具体的な一例で、ランダム系を背景基盤とする技術において、本成果の利用価値は少なくありません。現代社会は複雑なネットワーク社会となり、それはますますランダムで複雑化していきます。これに対応するために人工知能など新しい考えが生まれていますが、今回の成果は、このような未来の情報化社会に対して新しい対処法を与えているのかもしれない。お掃除に例えると「油の汚れは

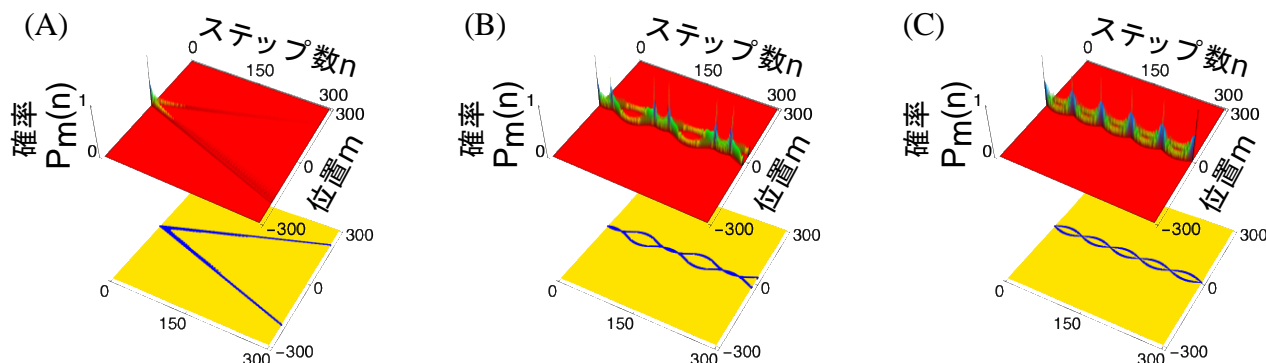
油で落とす」と言いますが、「ランダムはランダムで制する」そんな風に言えるかもしれません。ランダムは一見、秩序の無い荒れた世界に思えますが、中途半端に秩序のある世界に比べて強靱です。なぜなら、その世界では多少乱れても代わり映えないからです。「量子ランダムウォークがランダムな社会を制する」そんな世の中が今後展開されるのかもしれません。今後は、ウォーカーが多数いるシステムにおけるウォーカー同志の相互作用（多体効果）やそれらの間の不思議な量子相関（エンタングルメント）の研究へ展開していく予定です。

### 【参考資料】

【図1】ランダムウォークでは、コインを持った人がコイントスを行い、表が出たら右に一步、裏が出たら左に一步移動します。コイントスと移動（シフト）を何度も繰り返します（B）。例えば、位置0から始めて、これを300回繰り返した後にいる位置の確率分布は（A）のようになります。スタートした位置にいる確率が高いことがわかります。ランダムウォークの確率分布は、このような出発位置付近で高い確率を持つ分布に従うことが知られています。一方、量子の世界に拡張したランダムウォークでは、量子力学の特徴である重ね合わせや干渉効果によって、（C）のように、左右に高い確率が広がっています。

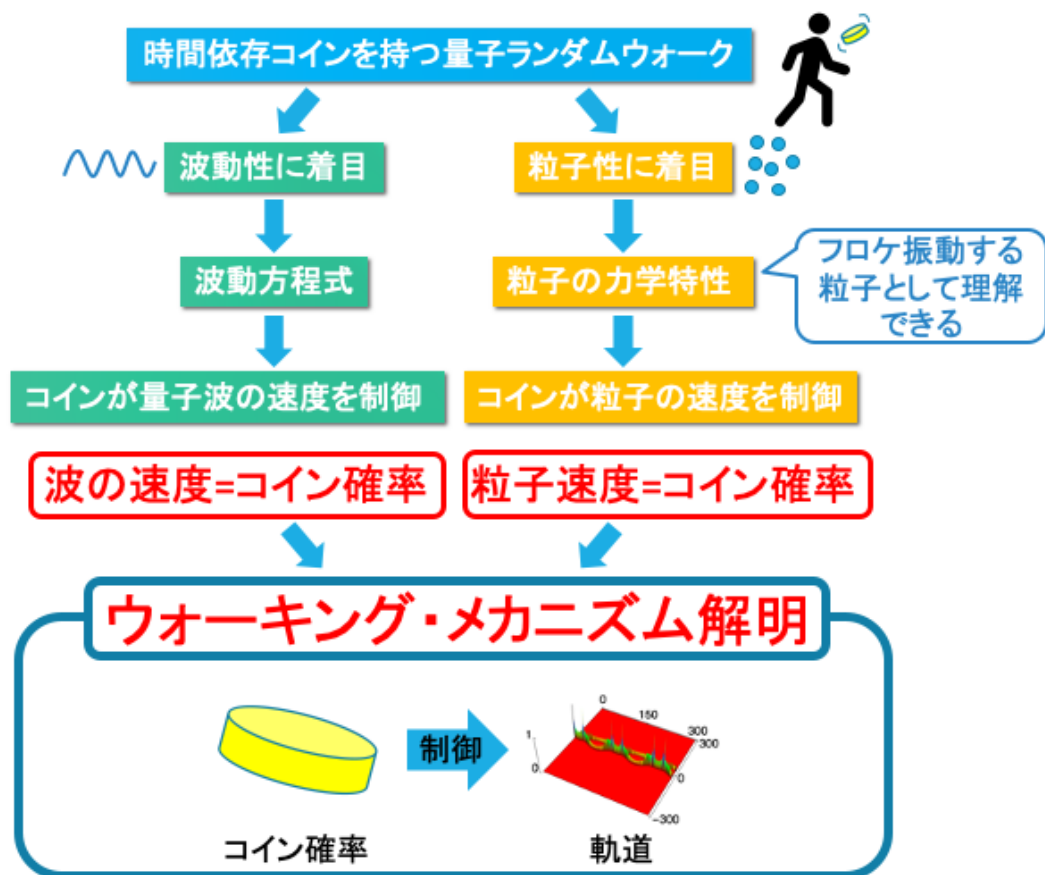


【図2】数値シミュレーションで得た量子ランダムウォークの確率分布の時間変化の様子（上図）とその軌道（下図）を示します。コインの表と裏がでる確率が時間的に変化しない場合は、左右に高い確率が広がり、その軌道は広がっていきます（A）。一方、コインの表と裏がでる確率が時間的に変化する場合は、回帰するような軌道が見られます（B）（C）。その軌道は、コインの時間依存性の違いによって形が異なります。



【図3】本研究では、量子性の両側面である波動性と粒子性を使って、時間依存コインを持つ量子ランダムウォークのウォーキング・メカニズムを解明しました。波動性からは、波動方程式を立てることによって、コインが量子波の速度を制御していることを発見しました。粒子性からは、粒子の力学特性に着目することで、コインが粒子の速度を制御していることを発見しました。結果として、波動性・粒子性の両側面か

ら、コインが量子ランダムウォークの軌道を制御しているというウォーキング・メカニズムを説明しました。



#### 【用語解説】

##### 1. 量子の世界

量子力学が支配する世界。量子とは、原子や電子などとても小さな物質やエネルギーの粒のようなもののことです。量子の世界は、ナノサイズのとても小さな世界です。

##### 2. 量子力学

量子力学は、量子の世界のミクロな物理現象を記述する力学です。量子の世界では、私たちの身の回りの物理現象が従う物理法則（古典力学）は適応することができず、量子力学の法則に従います。そこでは、波の性質と粒子の性質を併せ持つという「波動・粒子二重性」や、同時に複数の状態を取る「状態の重ね合わせ」（忍者の分身の術）という不思議な現象が可能になります。

##### 3. 量子コンピュータ

量子力学を利用した計算機を量子コンピュータと言います。従来のコンピュータでは、回路の電圧を制御して、電圧が低い時は「0」、高い時は「1」のように、0と1を作り出し、それらを使って計算を行なっています。それに対して、量子コンピュータは、量子の特徴である「状態の重ね合わせ」を利用して、「0」「1」の重ね合わせ状態を作ります。これにより、同時に何通りもの計算（超並列計算）を実現し、宇宙の年齢ほどかかる計算をあっという間に計算することが可能になります。

##### 4. 量子ニューラルネットワーク

近年、さまざまなネットワークが複雑化・大規模化し、これらの最適化・効率化が重要な課題となっています。そこで、生物の神経系を模倣した人工ニューラルネットワークが誕生しました。それに量子力学を取り入れ、さらなる躍進が期待される量子ニューラルネットワークが最近注目されています。

5. 確率過程

確率過程は、ランダム性を含むシステムが時間変動する様子を分析するために使用される数理モデルです。

6. 干渉効果

複数の波が重なり合うことによって、新しい波の形ができることです。波の重なり方によって、強めあったり、打ち消しあったりします。

【お問い合わせ先】

大学院先進理工系科学研究科 畠中 憲之 Tel : 082-424-6547 FAX : 082-424-6547 E-mail : noriyuki@hiroshima-u.ac.jp
---

発信枚数：A4版 5枚（本票含む）