

# 量子リソース理論



高木 隆司

東京大学大学院総合文化研究科  
ryujitakagi@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

量子情報科学の重要な目標の一つは、量子系が持つ特性と、それによって可能になる情報処理などの操作的タスクの性能との関係を定量的に理解することである。特に、最近の技術革新により量子効果が主要な役割を果たす小規模なシステムへのアクセスが可能になったことから、量子現象に関する正確な定量的記述は、理論的な関心だけでなく、実際の観点でもますます重要になってきている。

そのような量子的である系に特徴的な量（量子特徴量）の定量的な解析を可能にする枠組みとして、量子リソース理論は発展してきた。これは、与えられた操作の組み合わせによって自由に生成できない貴重なものを、「リソース」として扱い、それらの定量化と操作を体系的に扱う枠組みである。

量子リソースの代表的な例として、量子エンタングルメントが挙げられる。物理的に離れた場所に存在している二者それぞれが局所的な量子操作および古典情報通信しかできない場合、エンタングルメントはこの与えられた操作によって生成することができない量、つまりリソースとなる。この操作的設定は自然にエンタングルメントの「量」を測る物差しを与え、定量化されたエンタングルメントを見ることで、例えば**エンタングルメント蒸留**といったタスクの性能を、可能な状態操作との関係から情報理論的に議論することができる。

量子リソース理論の一般的枠組みは、エンタングルメントの解析で得られた知見を他の物理的設定に拡張することを可能にする。例えば熱力学において、自由エネルギーを等温環境下で無制限に生成する操作は熱力学第二法則により禁じられており、

その意味で自由エネルギーはこの設定においてリソース量と捉えられる。ここで、熱力学において根本的な「仕事の取り出し」をリソース蒸留タスクと捉えると、この性能を情報理論的な指標を用いて特徴づけることができる。そしてこの性能が、エンタングルメント蒸留の性能の特徴づけと深い関係を持つことを見ることができる。

また別の例として、量子計算の設定にも適用できる。特に、量子誤り訂正符号上で量子計算を行う時に容易に実行できる**クリフォード演算**を元にしたリソース理論を考えることで、量子計算において重要な**マジック状態蒸留**や、非クリフォード演算の変換といった問題に、非自明な制限を与えることができる。

このようにリソース理論は、それぞれの設定において重要となる操作的制限を明らかにするという実際の側面とともに、一見関連がなさそうな異なる物理的設定の間に操作的な観点から新たな関係を見出すことを可能にし、それぞれの量子特徴量に新しい理解と解析方法を与えるという基礎的な重要性も持ち合わせている。近年では、いくつかの設定を具体的に比較することを超えて、一般の設定において普遍的に成り立つ関係を見出す「一般リソース理論」も発展しており、どれが任意のリソースにも成り立つ一般的な性質であり、どれが個別の設定にしか成り立たないそのリソース特有の性質なのかといった理解も進んでいる。また、**量子状態識別問題**や**量子仮説検定問題**などの情報理論において根本的な問題と量子リソースとの関係も明らかになってきており、基礎と応用の両面から今後更なる発展が期待される。

## 用語解説

**エンタングルメント蒸留：**  
与えられたエンタングル状態から、局所量子操作および古典通信を用いて元の状態より小さいサイズの最大エンタングル状態を抜き出す操作のこと。

**クリフォード演算：**  
パウリ演算子をパウリ演算子に移すような量子ゲート等で構成される量子操作の部分集合のこと。

**マジック状態蒸留：**  
クリフォード演算のみで作ることのできない状態をマジック状態と呼び、特に万能量子計算を実現する上で有用な純粋マジック状態を、クリフォード演算と与えられたマジック状態から抜き出す操作をマジック状態蒸留と呼ぶ。

**量子状態識別問題：**  
複数の量子状態の候補の中から一つ量子状態が与えられるという約束のもと、実際に与えられた状態がどれなのかを量子測定により推定するタスクのこと。

**量子仮説検定問題：**  
二つの量子状態間の量子状態問題において、特にそれぞれを帰無仮説と対立仮説と捉え、第一種誤り確率（帰無仮説に対応する状態が与えられた時にそうでないと推定してしまう確率）を小さく保ちながら第二種誤り確率（対立仮説に対応する状態が与えられた時にそうでないと推定してしまう確率）をどこまで小さくできるかという問題。