

量子コンピュータ・量子アニーリングマシンの最先端と物性研究への展開

Recent development of quantum computer and quantum annealing machine, and its application to condensed matter physics

産業技術総合研究所 川畑史郎

National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Shiro Kawabata

E-mail: s-kawabata@aist.go.jp

現在、量子コンピュータ及び量子アニーリングマシンの実用化に向けてハードウェア開発が世界規模ですすめられている。IBM社は2022年に、433量子ビットの超伝導量子コンピュータ Osprey を発表した。Ospreyは、3次元実装やフレキシブル高密度配線などの、最先端エレクトロニクス技術を駆使して製造されている。また同年、QuEra社は、289量子ビットの（組合せ最適化問題専用）中性原子量子コンピュータを実現し、AWS社のクラウドサービス Amazon Braket において実機 Aquila へのアクセスを有償提供している。一方、2011年に超伝導量子アニーリングマシンの製品化に成功した D-Wave Systems 社は、2023年以降に7600量子ビット級の超伝導量子アニーリングマシンを出荷する予定である。

量子コンピュータ及び量子アニーリングマシンのキラーアプリケーション候補の一つが物性シミュレーションである。物性シミュレーションにおいては、複雑に相互作用する多体電子系の基底状態を計算する必要がある。しかし、古典コンピュータを用いて物性シミュレーションを行う場合、自由度が大きくなると計算量が指数関数的に爆発する。そのため、高速な物性シミュレーション技術として量子コンピュータと量子アニーリングマシンに大きな期待が寄せられている。

その一方で、多くの物性系のハミルトニアン (k 局所ハミルトニアン) に対して、基底状態を計算する問題は QMA 完全と呼ばれる（量子コンピュータをもってしても高速に解くことが困難な）複雑性クラスに属することが Kitaev らによって示されている。また、量子アニーリングについては、古典ベストアルゴリズムに対する量子優位性は不明であり、量子優位性があったとしても指数爆発は避けられないと考えられている。ところが、中規模量子コンピュータ (NISQ) と量子アニーリングマシンのハードウェア技術が急激に進歩したことで、量子多体系、量子スピン系、トポロジカル物質などの物性シミュレーションに NISQ と量子アニーリングマシンを利用する研究が最近盛んに行われるようになってきた。

本講演においては、量子コンピュータ及び量子アニーリングマシンハードウェアの研究開発最新動向と産総研における取り組みについて紹介を行う。また、量子コンピュータ及び量子アニーリングマシンの物性シミュレーションや量子化学計算への適応事例（横磁場イジング模型、Fermi-Hubbard 模型、トポロジカル物質など）についても紹介を行い、物性研究における量子ハードウェアの有用性や限界についても議論を行う。

本講演で発表した研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務 (JPNP16007) の結果得られたものである。