

世界が注目!?

量子コンピュータの最先端と未来

2019年8月29-30日

JST研究開発戦略センター

システム・情報科学技術ユニット 嶋田 義皓



国立研究開発法人 科学技術振興機構 研究開発戦略センター
Center for Research and Development Strategy Japan Science and Technology Agency

量子革命2.0

100年続くイノベーション

量子ICT？

量子情報

量子状態の精密制御と
量子性の積極利用

量子物性

新しい量子状態・
機能の創成

量子技術1.0

量子力学に従う トンネル効果
電子の制御 エネルギー準位

半導体技術

光通信

ICT

量子センサー

量子暗号・ 量子通信

量子コン ピューター

量子シミュ レーション

量子マテリアル

トポロジカル物質

相補性

猫状態

量子テレポーテーション

ホログラフィー原理

複製不可能定理

ベル不等式

マクロ量子現象

量子相制御

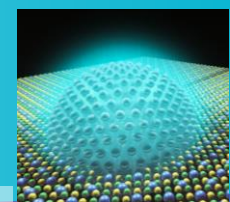
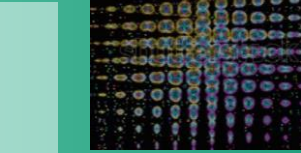
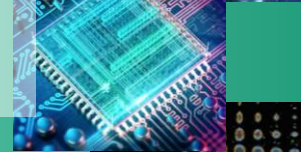
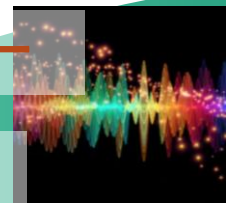
量子もつれ

EPR相関

量子干渉

不確定性原理

バンド構造



コンピューティングの革新への期待

応用のトレンド

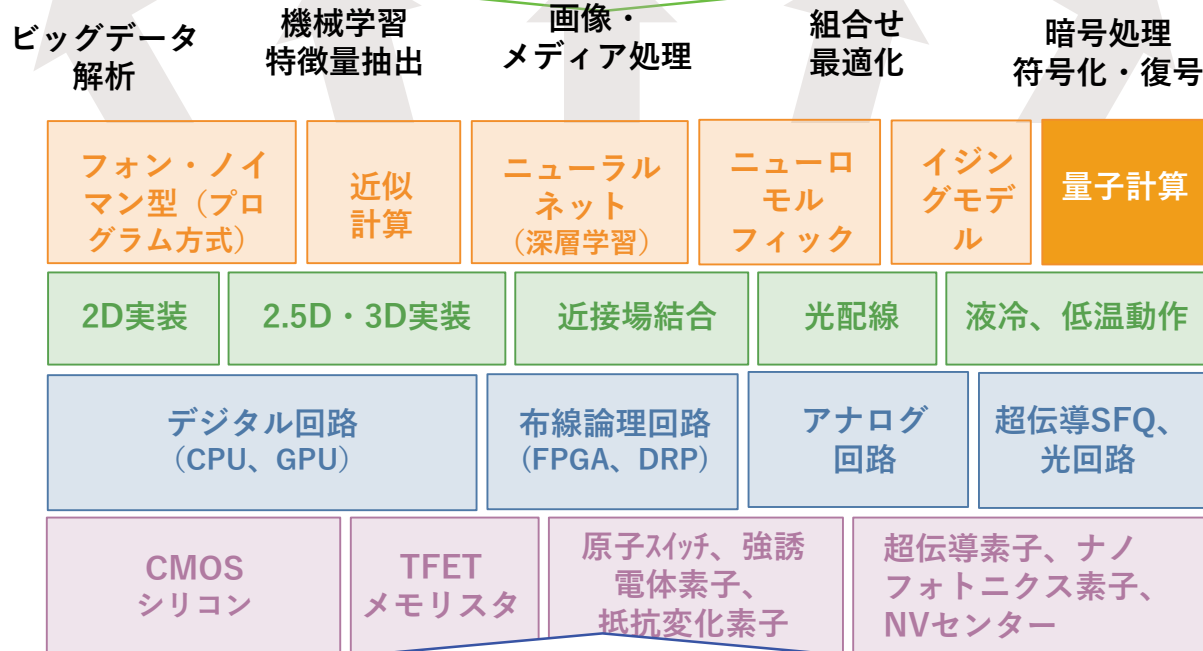
Society5.0



SDGs

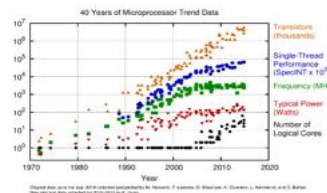
革新的 コンピュー ティング

新計算原理 & 計算機 システム



ムーアの法則の終焉

技術のトレンド



新デバイス、
非フォンノイマン

政府の期待

政府R&D投資競争が加熱。米中競争は「New Space Race」と呼ばれるほど

アメリカ



> 1400億円
/5年

《政策目標》

- ・ 米国の科学的リーダーシップ
- ・ 国家安全保障
- ・ 経済的競争性の確保

《関連文書》

- ・ 量子情報科学の国家戦略概要 (2018.9)
- ・ 国家量子イニシアティブ法 (2018.12)

欧州



> 1250億円
/10年

《政策目標》

- ・ 長期の富の創出
- ・ 安全保障
- ・ 産業創出

《関連文書》

- ・ 量子マニフェスト (2016.5)

イギリス



> 450億円
/5年

《政策目標》

- ・ 量子技術分野での主導的地位の確立
- ・ 通信、医療、安全保障などの世界市場の形成

《関連文書》

- ・ 国家量子技術プログラム (2014.12)

ドイツ



> 860億円
/4年

《政策目標》

- ・ 量子技術開発の促進
- ・ 応用・市場化で第二の量子革命

《関連文書》

- ・ 量子技術の基本計画
- ・ 量子技術－基本から市場へ (2018.9)

中国



> 1200億円
/5年

《政策目標》

- ・ 国家の科学技術力の強化
- ・ 産業競争力の確保
- ・ 国家安全保障

《関連文書》

- ・ 科学技術イノベーション第13次五カ年計画 (2016)

量子コンピュータの計算原理

特定の問題で効率的に正答確率を高める方法（＝アルゴリズム）が知られている

0. 初期化

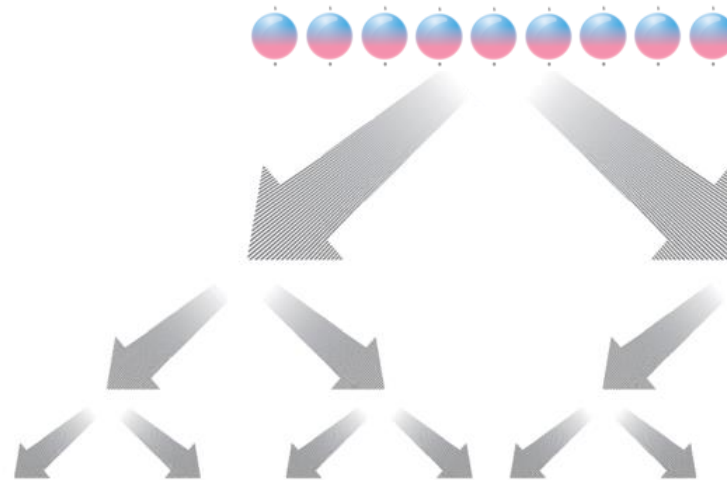
指数的規模の組み合わせの超並列処理



2^N 通りの状態の
重ね合わせ

1. 超並列処理

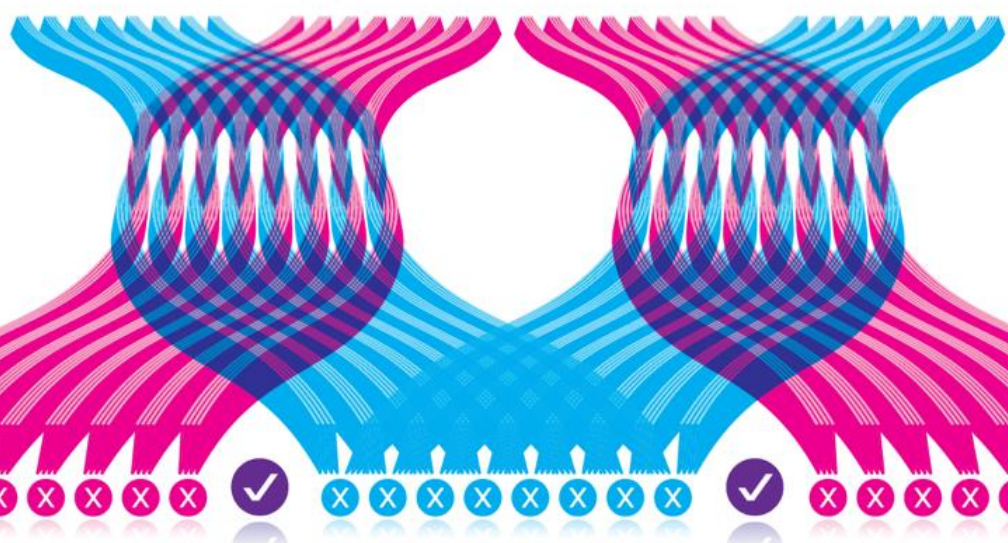
重ね合わせ状態に対する量子ゲート操作



1つ1つの確率は
指数的に小さい

2. 確率の波の干渉

正答確率の増幅
(それ以外の答えの削減)



3. 測定

量子ビットの状態を測定し
結果を取り出す



http://seedmagazine.com/content/article/cribsheet_15_quantum_computing/

様々な量子アルゴリズム

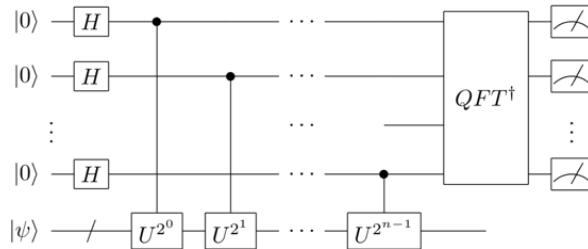
多数の提案があるが、多くは小規模量子コンピュータでは十分な性能が出ない

アルゴリズム	サブルーチン	量子加速	データ
レジェンド			
ショアの素因数分解 [Shor, 1994]	PEA	指数	古典
グローバー検索 [Grover, 1996]	G	二次	量子
線形連立方程式 [Harrow+, 2009]	HHL	指数	量子
教師なし機械学習			
K-medians [Aimeur+, 2013]	G	二次	古典
階層的クラスタリング [Aimeur+, 2013]	G	二次	古典
K-means [Lloyd+, 2013]	(G)	指数	量子
主成分分析 [Lloyd+, 2013]	HHL	指数	量子
教師あり機械学習			
NN [Narayanan+, 2000]	G		古典
SVM [Anguita+, 2003]/[Rebentrost+, 2013]	G/HHL	二次/指数	古典/量子
近傍法 [Wiebe, 2014]	G	二次	古典
回帰 [Bisio+, 2010]	-		量子
ブースティング [Neven+, 2009]	-	二次	古典

量子回路の例：重要サブルーチン

多数の量子アルゴリズムで利用される頻出サブルーチン

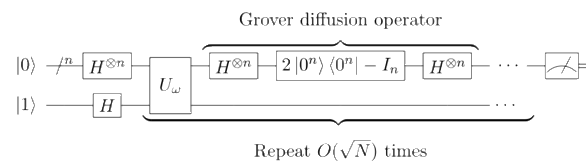
位相推定(PEA)



ユニタリー行列の固有値を求め
補助量子ビットに二進小数で
書き込む（固有値の二進小数
表示n桁がn個の補助量子
ビットに書き込まれる）

素因数分解
量子化学計算

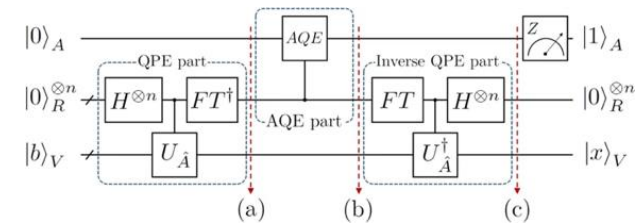
グローバー検索



N要素の未整序データベース
の中から探索を行う（欲しい
答えの固有状態をマーキングし、
振幅増幅反転の繰り返しに
よって正答率を上げる）

検索
組み合わせ最適化
クラスタリング

HHL*



逆行列や行列積の演算を高速
に行う（行列の固有値を位相
推定で並列的に求め、それぞ
れの固有ベクトルを固有値で割
る。行列積も同様）

*Harrow-Hassidim-
Lloyd

連立方程式
主成分分析・回帰
サポートベクタマシン

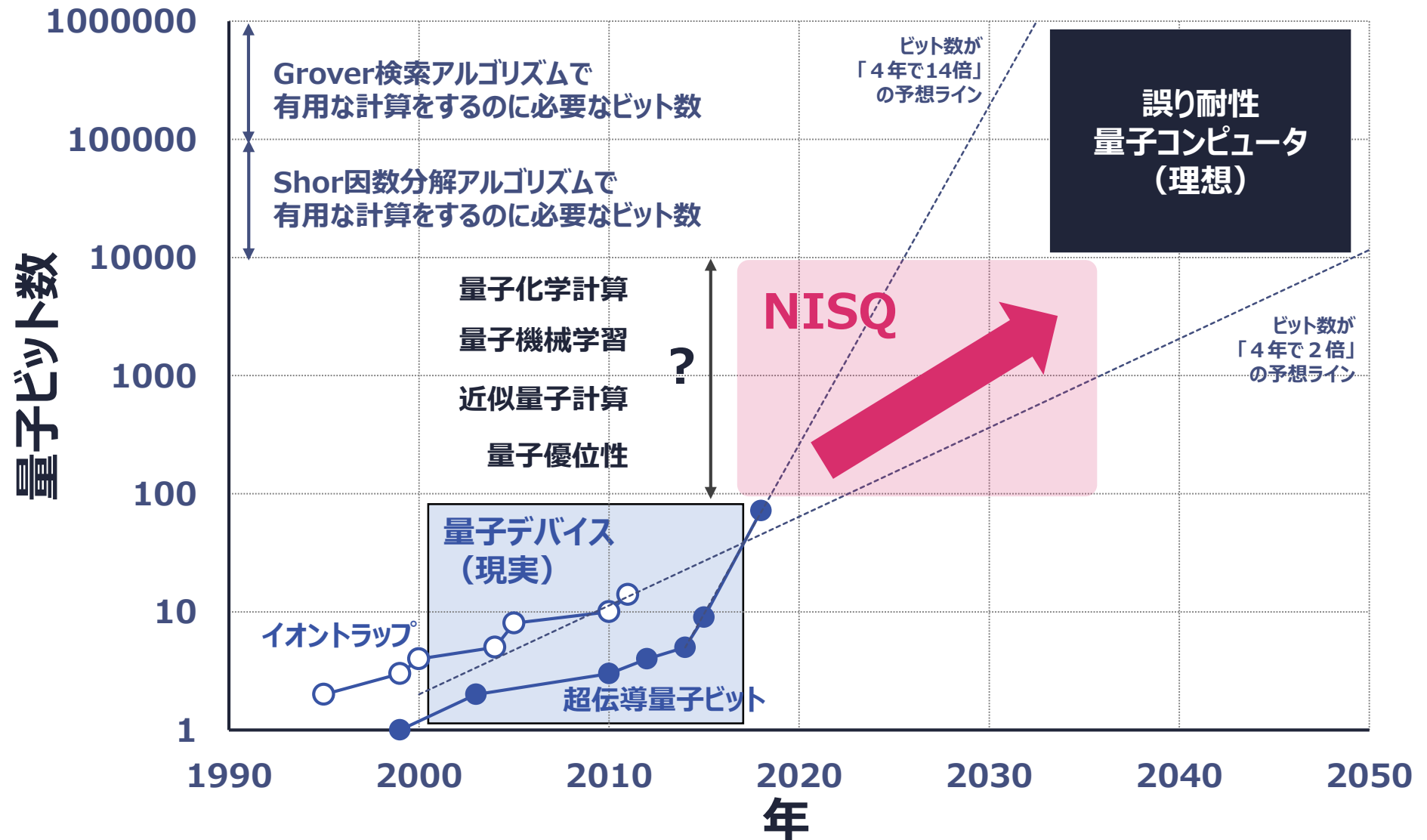
量子ソフトウェア開発環境

量子回路を書く。コンパイラは未成熟。バックエンドは実機orシミュレータ（ローカル/クラウド）

	作成元	言語	バックエンド
Qiskit	IBM	Python	実機 シミュレータ
Forest	Rigetti	Python	実機 シミュレータ
ProjectQ	ETH Zurich	Python	シミュレータ
QDK	Microsoft	Q# (C# / Python)	シミュレータ
Cirq	Google	Python	シミュレータ
ScaffCC	EPiQC	Scaffold	シミュレータ
blueqat	MDR	Python	シミュレータ
Qulacs	QunaSys	Python	シミュレータ

ハードウェア・ソフトウェアのギャップ

ハードウェアとソフトウェアの間に3～5桁程のギャップがある



Fred Chong, "Quantum Computing is Getting Real" Computer Architecture Today, ACM SIGARCH

Copyright © 2019 CRDS All Rights Reserved.

NISQ時代

計算機としての性能は限定的だが、古典シミュレーション困難な量子デバイスが実現

Noisy

ノイズあり

量子誤り訂正が不十分で、エラー率が高い。

Intermediate-Scale

中規模スケールの

50～100量子ビット程度

Quantum device

量子デバイス



John Preskill
(CalTech)



何かには使えそう。

限られたハードウェア資源を活かすソフトウェア

John Preskill, “Quantum Computing in the NISQ era and beyond”, Quantum 2, 79 (2018).

量子コンピュータアーキテクチャ

現在の量子コンピュータはさながら1950年代のコンピュータのような状況

1950年代の コンピュータ	現代の コンピュータ	20XX年 量子コンピュータ？	
アルゴリズム	アルゴリズム	アルゴリズム (古典 + 量子ハイブリッド)	
	プログラミング言語 (高級言語)	プログラミング言語 (高級言語)	
	コンパイラ	コンパイラ	量子コンパイラ
	アーキテクチャ (メモリ、算術演算、制御命令、 通信)	アーキテクチャ (メモリ、算術演算、制御命令、 通信)	量子アーキテクチャ (システム制御、接続トポロジ、 通信、量子ビット、量子ゲート)
	HWビルディングブロック (ゲート、ビット)	HWビルディングブロック (ゲート、ビット)	
アセンブリ言語 低レベルプログラム	VLSI回路	VLSI回路	誤り訂正符号 制御信号
リレー回路 配線 (ワイヤー)	半導体トランジスタ 配線	半導体トランジスタ 配線	量子基盤技術 (超伝導、イオン etc.)

F. T. Chong et. al, Nature 549, 180 (2017).

研究開発課題

アルゴリズム
(古典 + 量子ハイブリッド)

プログラミング言語
(高級言語)

コンパイラ

アーキテクチャ
(制御コンパイラ、QECコンパイラ
を含む)

古典ハードウェア制御系

量子コンピュータユニット

① 量子計算アルゴリズムの 開発・実装・実証

新アルゴリズム・新サブルーチン、量子優位性の
実証、量子inspiredアルゴリズム

② 量子ソフトウェア研究開発

シミュレータ、言語・コンパイラ、API、DSL、ライ
ブラリ、リソース推定、最適化・デバッグ、検証
(QCVV)

③ 量子情報処理システムの アーキテクチャ研究開発

量子ISA、マイクロアーキテクチャ、量子HDL、
制御ファームウェア、量子誤り訂正、制御系、量
子・古典インターフェイス

CRDS戦略プロポーザル「みんなの量子コンピューター～情報・数理・電子工学と拓く新しい量子アプリ～」(2018)

応用・キラーアプリ

量子コンピュータにしか解けない問題を探ることが重要

量子化学・量子多体系

問題設定がそもそも量子力学で定式化されているので、量子計算のほうが効率的なはず。

(例)

- ・高精度の物性予測、分子・材料設計
- ・反応・ダイナミクスのシミュレーション

機械学習・最適化

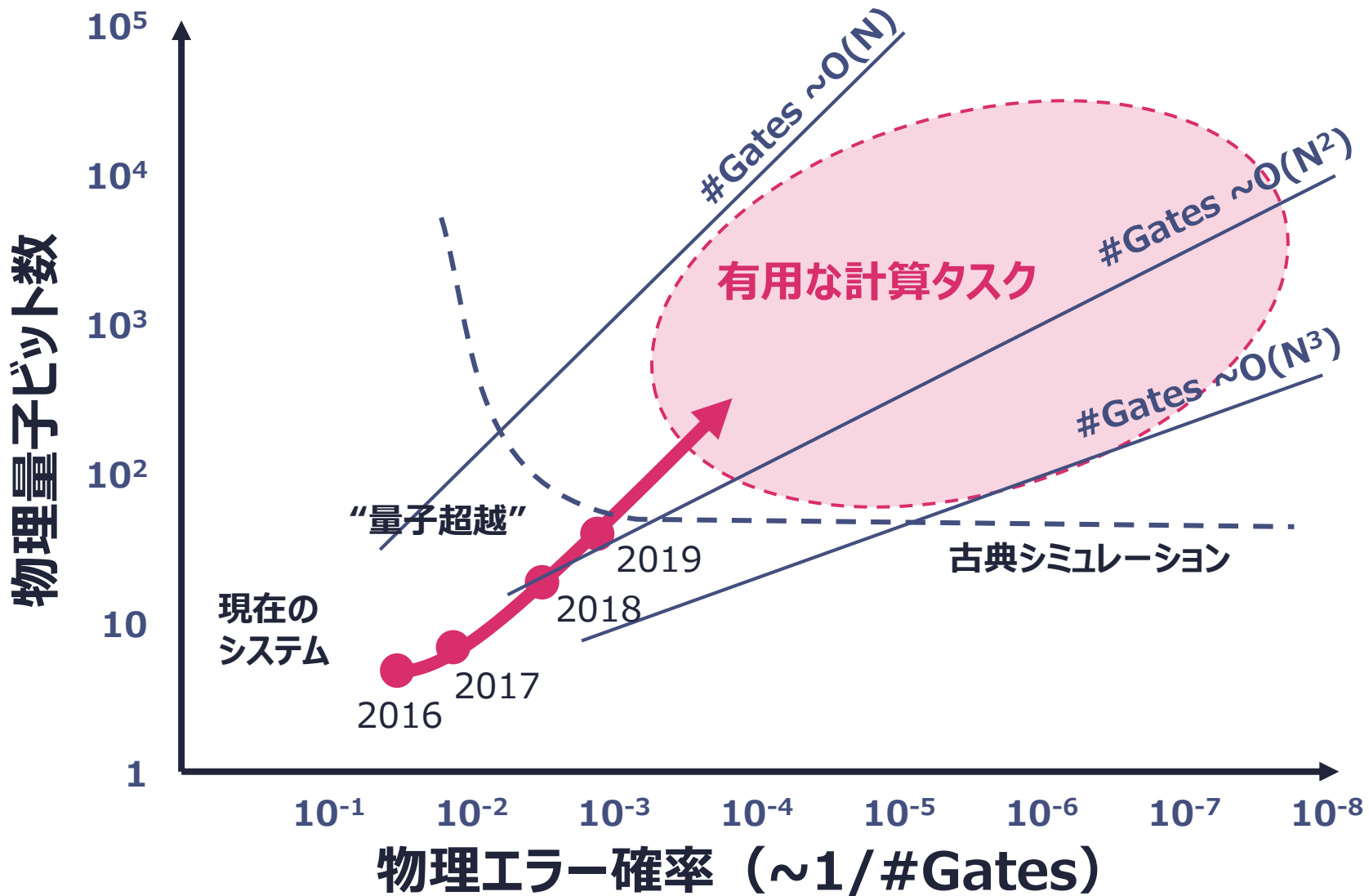
問題設定は量子と無関係だが、線形代数の構造や高次元の表現能力を上手に利用できそう。

(例)

- ・巨大な行列の固有値・特異値
- ・サンプリング
- ・主成分分析、クラスタリング、分類、SVM etc...

今後の展望

end-to-endのベンチマークや複数の性能指標で技術進歩を適切にモニタすることが重要



“Next Steps in Quantum Computing: Computer Science’s Role”, CCC, (2018).