

2026年5月8日(金)

第3回 Quantum CAE研究会 @ 産業技術総合研究所G-QuAT

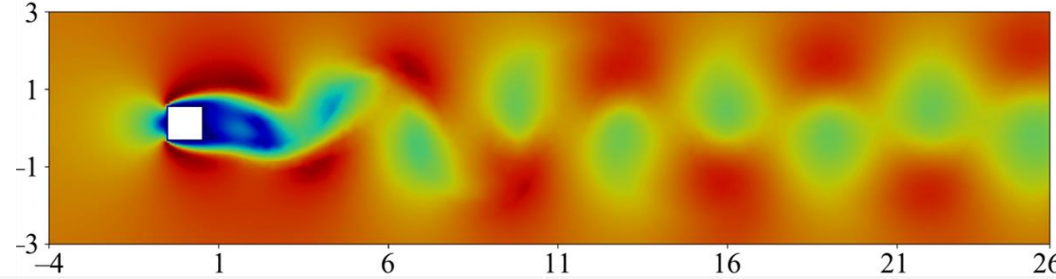
量子HPC連携による CAE解析の高速化

宮下 繁虎 | Shigetora Miyashita

ソフトバンク株式会社 技術統括 プロダクトR&D本部
量子技術統括部 量子情報技術部 基盤研究課

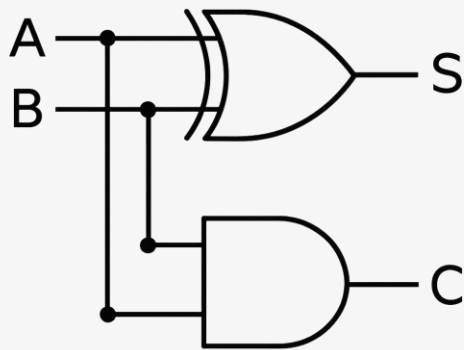
コンピュータを活用して製品設計や開発プロセスを支援

偏微分方程式による物理現象の記述 [1]



HPC

□ 基本素子：論理回路

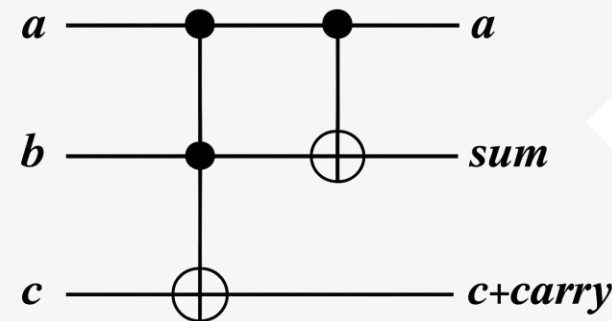


浮動小数点演算
・ FLOPS [2]

- [1] C Xia, et al., *Journal of Fluid Mechanics*, vol. **981**, p. A17, (2024)
[2] IEEE Computer Society, IEEE STD 754-2019. IEEE. 1–84, (2019).

量子計算機

□ 基本素子：論理量子回路



量子論理演算

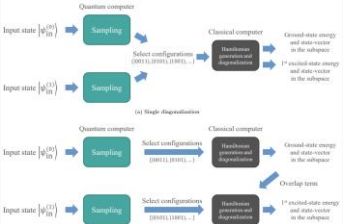
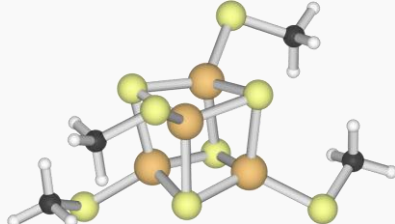
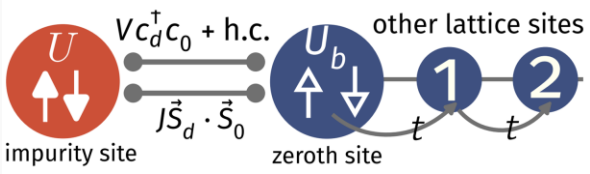
・ QLOPS [3]

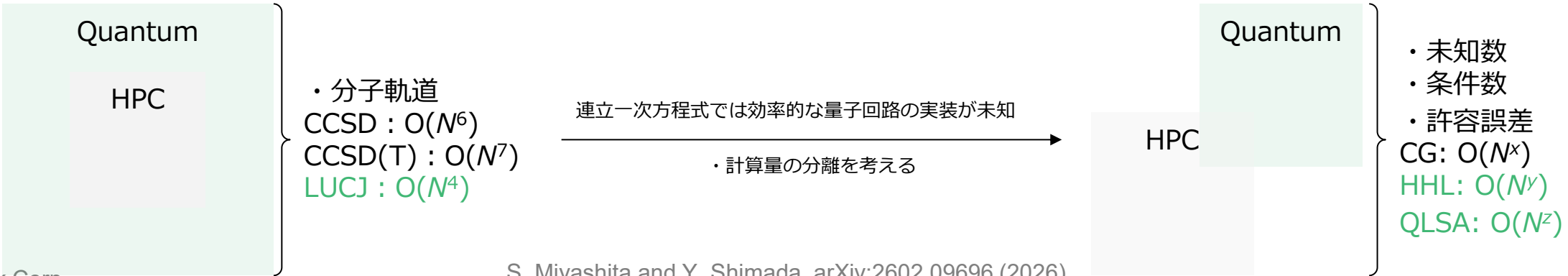
問題のクラスによって量子
優位性を発揮

実行速度は実現方式・アー
キテクチャに依存 [4]

- [3] L. Kong, F. Zhang, and J. Chen, *ACM Trans. Quantum Comput.*, **7**(2), 14, (2026).
[4] Y. Akahoshi, et al., *PRX Quantum* **5**, 010337 (2024).

試行関数を用いて大規模な量子状態を生成し、ベクトル空間を取得

	QSCI [5]	SQD [6]	SKQD [7]
初期状態	任意	制限開殻Hartree-Fock法	励起状態の線形結合
演算子	任意	局所行列Jastrow CC法 (LCUJ)	時間発展演算子
対象	分子系  [5] K. Kanno, et al., arXiv:2302.11320 (2024).	分子系  [6] J. Robledo-Moreno, et al., <i>Sci. Adv.</i> 11, eadu9991(2025).	アンダーソン不純物模型 [8]  [7] J. Yu, et al., arXiv:2501.09702 (2025). [8] A. Mukherjee et al., <i>New J. Phys.</i> 25, 113011 (2023).



古典・量子アルゴリズムの漸近計算量は異なる性質を持つ

共役勾配法（CG）： 苦手 得意

$$\mathcal{T}_{\text{CG}} = \mathcal{O} \left(N \sqrt{\kappa} \log \varepsilon^{-1} \right)$$

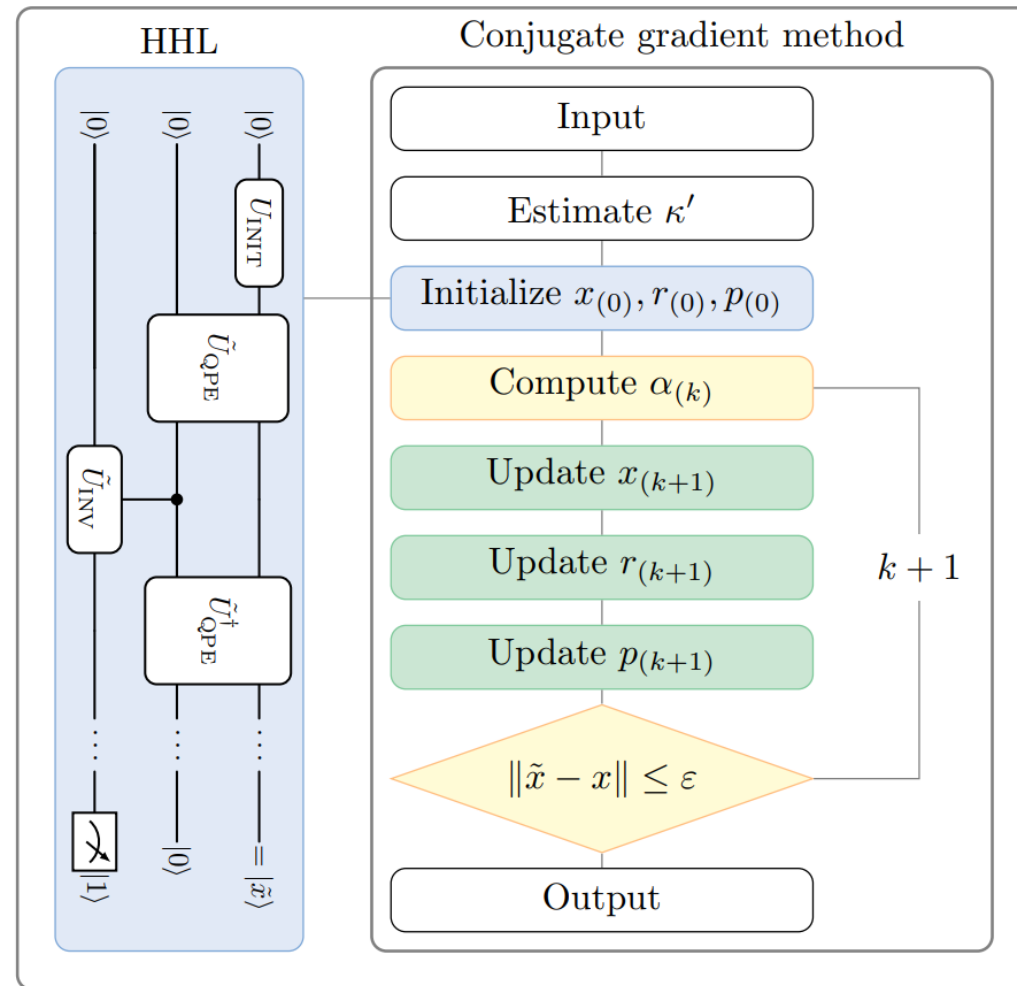
HHLアルゴリズム：

$$\mathcal{G}_{\text{HHL}} = \mathcal{O} \left(\log N \kappa^2 \varepsilon^{-1} \right)$$

κ は条件数（最大固有値と最小固有値の比）

→ 条件数 κ を最適化

Quantum-accelerated conjugate gradient method

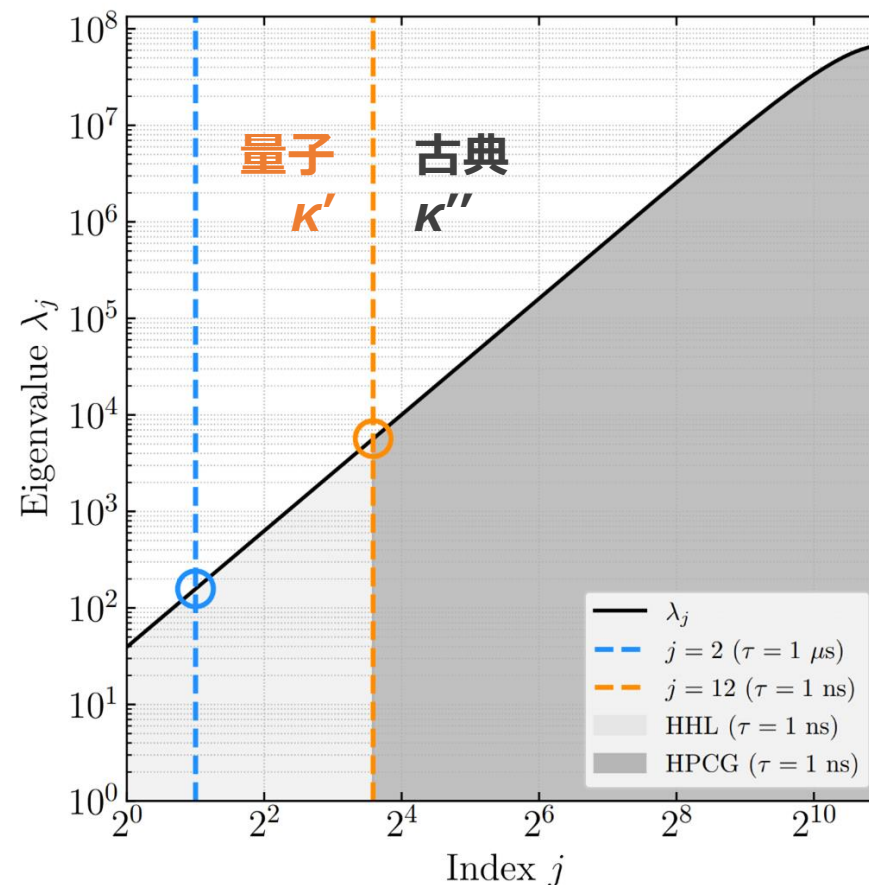
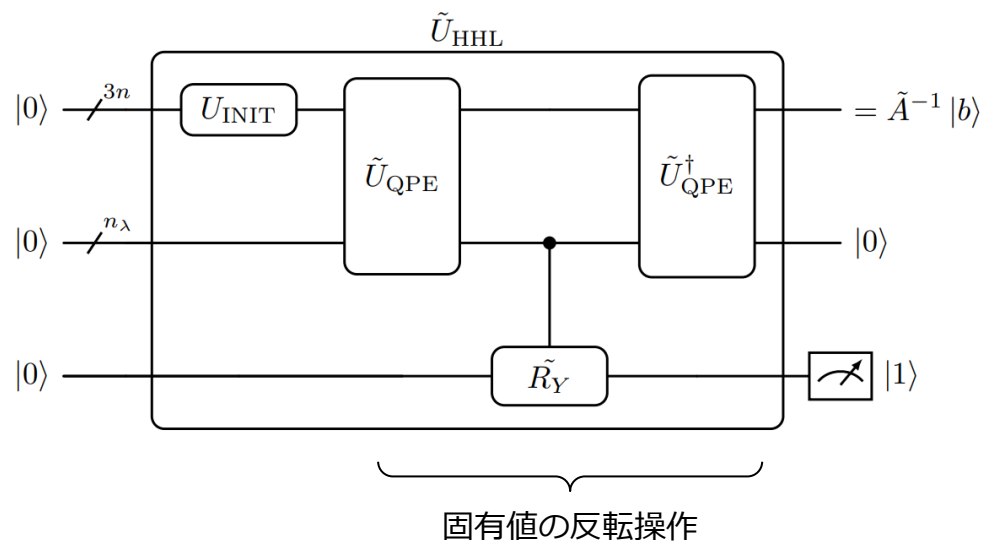


HHLアルゴリズムにおいて条件数は量子位相推定サブルーチンの固有値幅に対応

HHLの実装（振幅増幅は除く）：

$$Ax = b \quad x = A^{-1} b$$

➡ b ベクトルを A 行列の固有空間に射影



CG法は線形方程式を二次関数の最小化問題に帰着し、解を探索

問題設定： $\|x - x_{(k)}\|_A^2 := (x - x_{(k)})^T A (x - x_{(k)})$

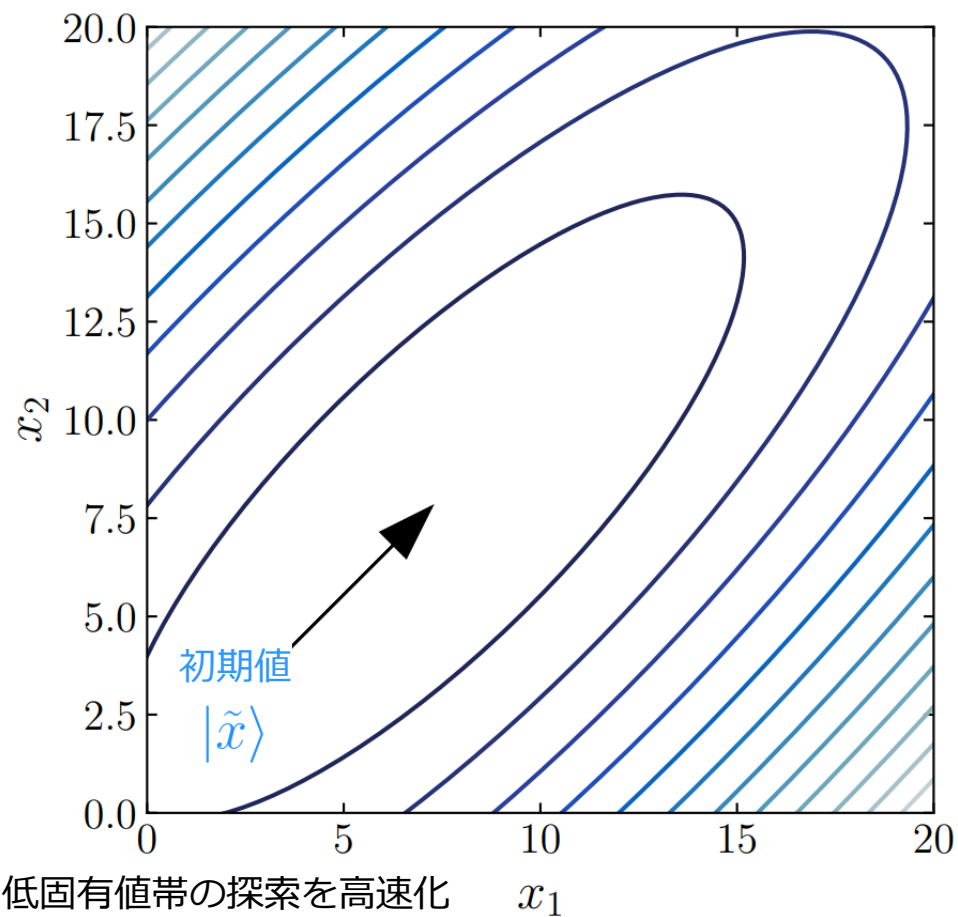
・CG法による解き方

探索方向
の決定

```

$$\begin{aligned} r_{(0)} &= b - Ax_{(0)} \\ p_{(0)} &= r_{(0)} \\ k &= 0 \\ \textbf{while } &\textit{not close enough to solution} \textbf{ do} \\ &\alpha_{(k)} = \frac{(r_{(k)})^T r_{(k)}}{(p_{(k)})^T A p_{(k)}} \\ &x_{(k+1)} = x_{(k)} + \alpha_{(k)} p_{(k)} \\ &r_{(k+1)} = r_{(k)} - \alpha_{(k)} A p_{(k)} \\ &p_{(k+1)} = r_{(k+1)} + \frac{(r_{(k+1)})^T r_{(k+1)}}{(r_{(k)})^T r_{(k)}} p_{(k)} \\ &k = k + 1 \\ \textbf{end} \end{aligned}$$

```



量子コンピュータ上であらかじめ初期値を計算しておき、HPC上での反復計算を高速化

量子加速共役勾配法（QACG）

Algorithm 1: Quantum-accelerated conjugate gradients (QACG)

Input: Hermitian matrix $A \in \mathbb{C}^{n \times n}$, right-hand side $b \in \mathbb{C}^n$, tolerance ε , quantum condition number κ'

Output: Approximate solution $x_{(k)}$ to $Ax = b$

Perform HHL with quantum condition number κ' , prepare a quantum state proportional to $\tilde{A}^{-1}|b\rangle$, and use it to initialize the classical iterate:

$$|\tilde{x}\rangle = \frac{\tilde{A}^{-1}|b\rangle}{\|\tilde{A}^{-1}|b\rangle\|}, \quad x_{(0)} = \text{ClassicalDecode}(|\tilde{x}\rangle).$$

量子

$$r_{(0)} = b - Ax_{(0)}$$

$$p_{(0)} = r_{(0)}$$

$$k = 0$$

while not close enough to solution **do**

$$\alpha_{(k)} = \frac{(r_{(k)})^T r_{(k)}}{(p_{(k)})^T A p_{(k)}}$$

$$x_{(k+1)} = x_{(k)} + \alpha_{(k)} p_{(k)}$$

$$r_{(k+1)} = r_{(k)} - \alpha_{(k)} A p_{(k)}$$

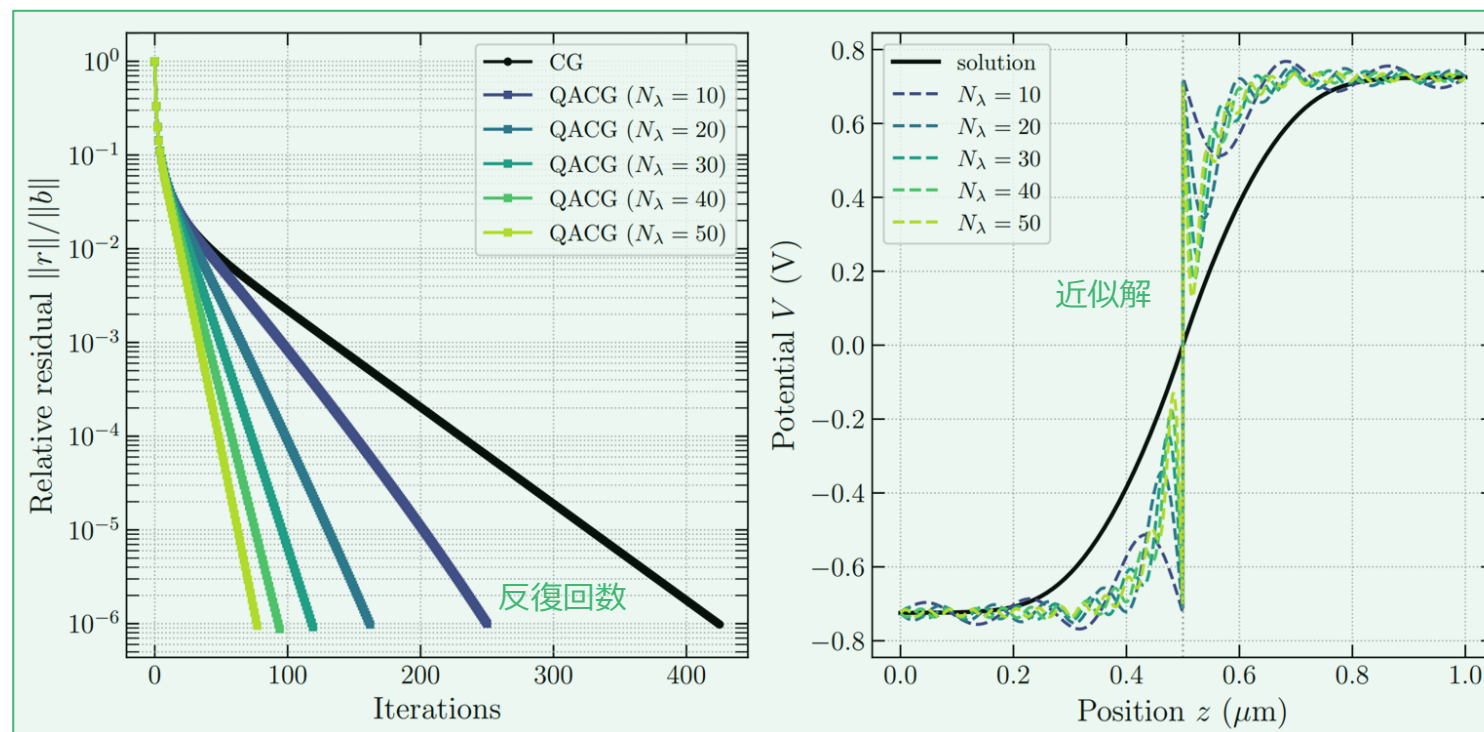
$$p_{(k+1)} = r_{(k+1)} + \frac{(r_{(k+1)})^T r_{(k+1)}}{(r_{(k)})^T r_{(k)}} p_{(k)}$$

$$k = k + 1$$

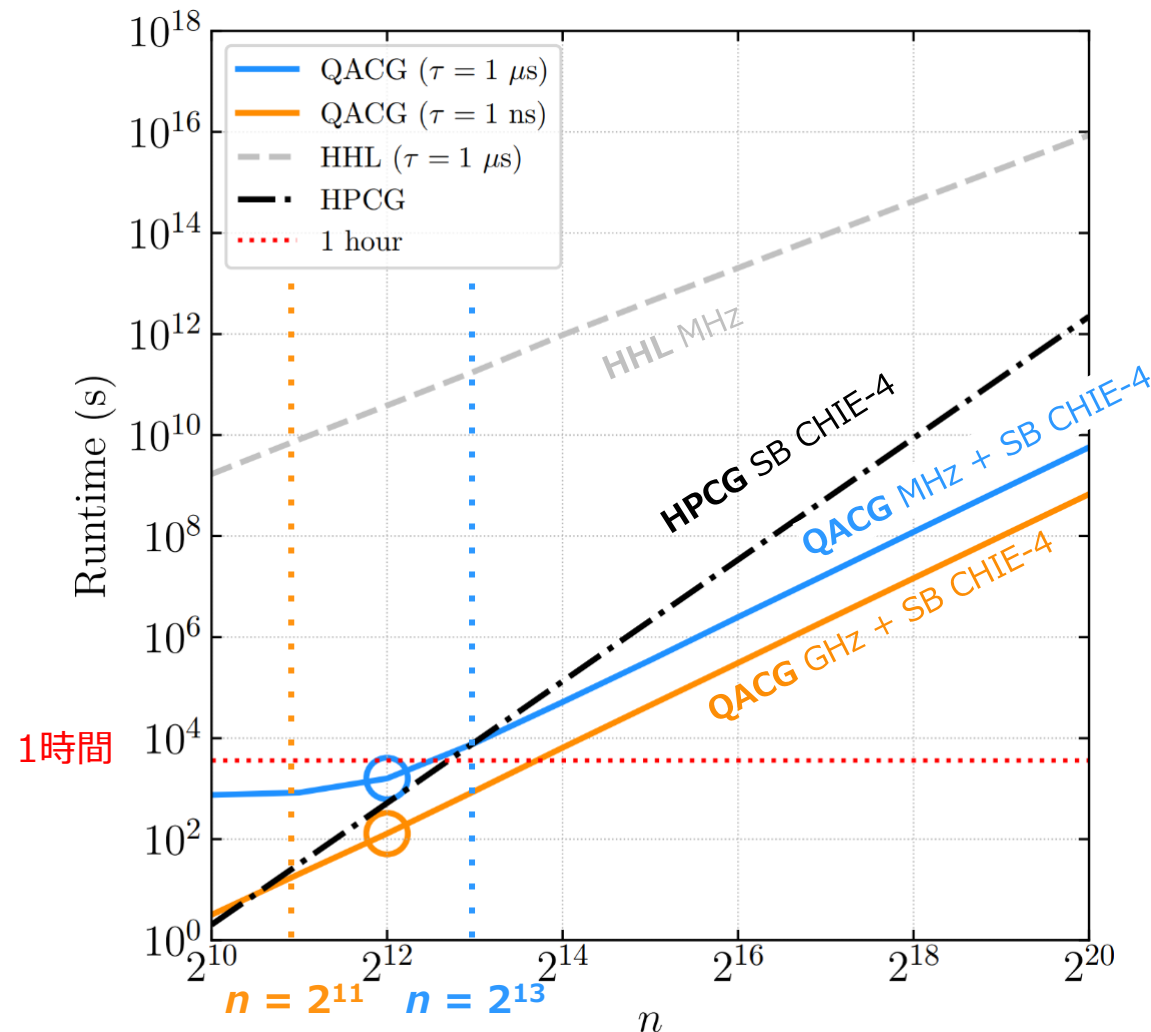
end

HPC

1次元TCADシミュレーションの例（pn接合）



低固有値のみを量子計算の対象とすることで、既存手法に対して実行時間を大幅に削減



3次元ポアソン方程式

$$-\Delta u(x) = f(x)$$

- ・有限差分法
- ・周期的境界条件

量子HPC基盤

- ・STARアーキテクチャモデル
 - 符号距離 $d = 7$
 - RUS 試行回数 $r = 2$
- ・HPC模型 (SoftBank CHIE-4)
 - $1\% \times 3760.55$ [Tflop/s]

論理量子ビット数と論理ゲート数の推定

中～高固有値領域をHPCにオフロードすることで量子加速に要求されるリソースを削減

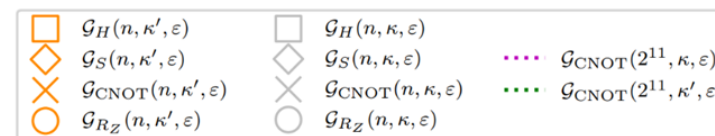
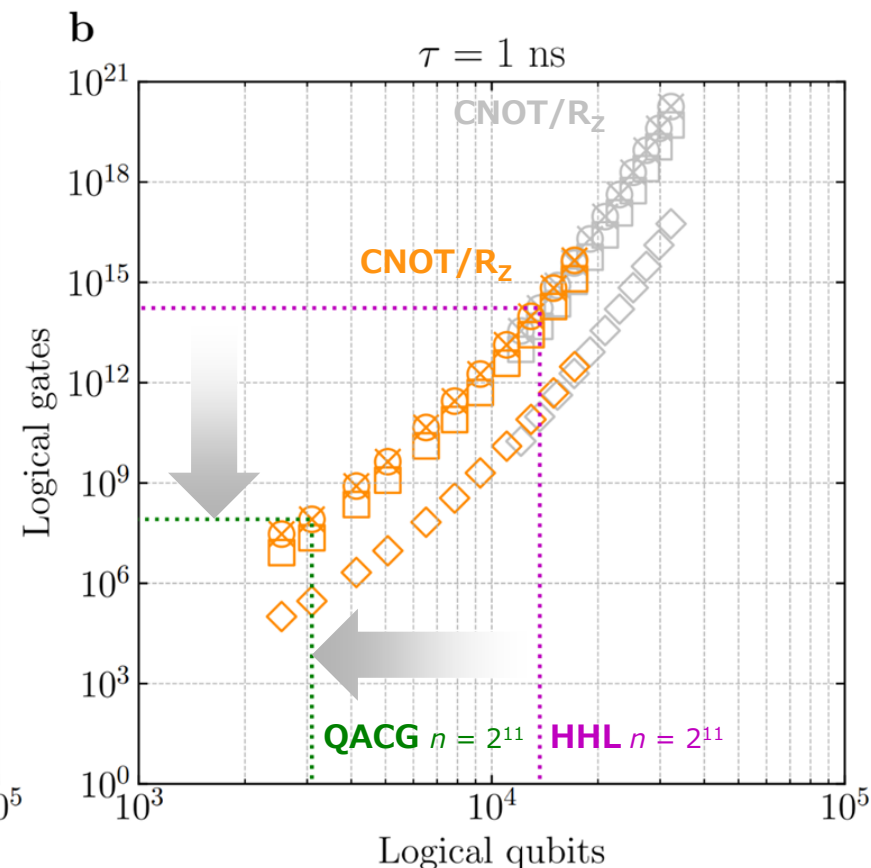
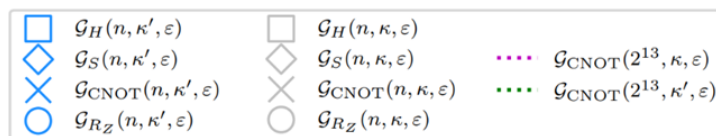
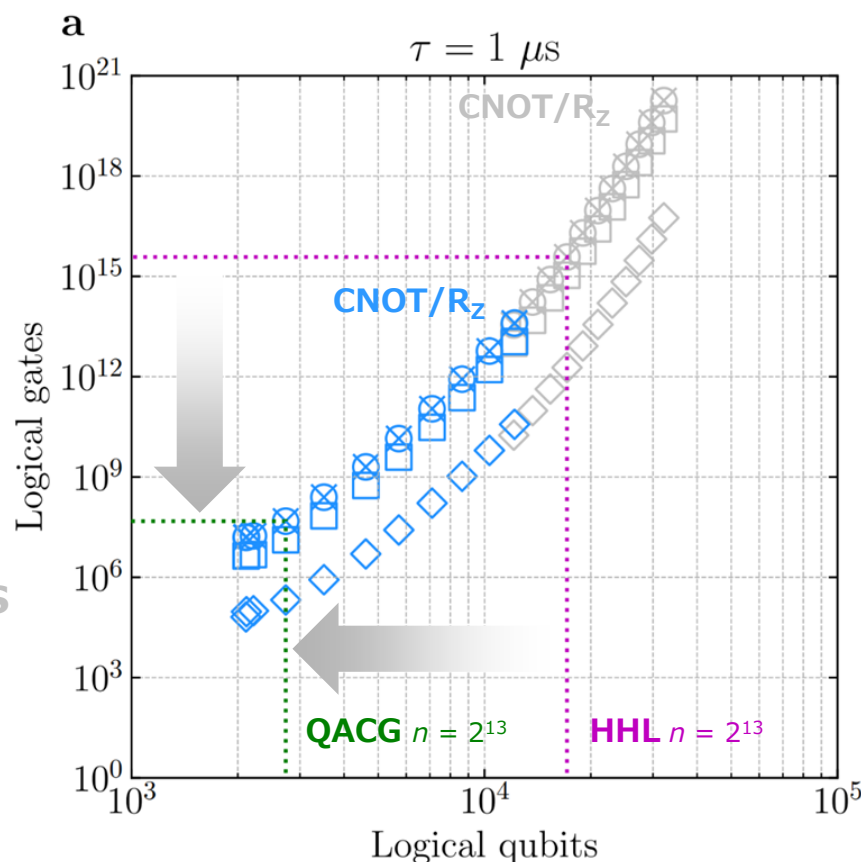
論理量子ビット数
 1.7×10^4 qubits

▼
 2.7×10^3 qubits

論理ゲート数
 3.8×10^{15} CNOTs

▼
 4.8×10^7 CNOTs

+読出しコスト



量子加速の達成には量子ビット数の削減や読出しアルゴリズムの検討が必要

量子加速共役勾配法 (QACG)

- ・ 3次元Poisson方程式の量子加速に必要な計算資源

- 論理量子ビット数

1.7×10^4 から 2.7×10^3 qubits に

- 論理ゲート数

3.8×10^{15} から 4.8×10^7 CNOTs に

- HPCの計算基盤

CHIE-4 (ソフトバンクのAI計算基盤)

- 読出しコスト

展望1) 条件数に対する量子ビット数の削減

- ・ 逆行列計算に要求される計算資源の削減

[9] Y. L. Terashima, et al., arXiv:2512.09623 (2025).

展望2) End-to-Endアルゴリズムの実装

- ・ 読出しアルゴリズムの検討 (Fourier級数展開/テンソルネットワーク)

[10] X. Huang, et al., arXiv:2507.20599 (2025).

[11] K. Miyamoto and H. Ueda, *Quantum Inf. Process.*, **22**, 239 (2023).

