

プロセス番号置換による 通信回数の削減と 量子回路分割への適用

理化学研究所 計算科学研究センター

量子HPC連携プラットフォーム部門

量子計算シミュレーション技術開発ユニット

青木 尚登

新技術の概要

状態ベクトル法という量子コンピュータシミュレータの並列処理での**律速処理である通信の回数を**プロセス番号置換により**減らす**技術

【技術1】 状態ベクトル法量子コンピュータシミュレータの並列処理において、プロセス番号の置換（対応表を持つこと）をする。

【効果1】 ゲート処理での律速処理であるプロセス間の膨大なデータ通信について、条件を満たす場合にはバイパスでき、通信回数削減により大幅な処理時間短縮となる。

【技術2】 同じく通信回数を削減する回路分割に本技術を適用する。

【効果2】 回路分割方法の条件が緩和され、通信回数削減により大幅な処理時間短縮となる。

量子コンピュータの種類

量子コンピュータ

アニーリング型

実機

疑似量子

ゲート型

実機



シミュレータ

状態ベクトル法
テンサーネット
...

量子コンピュータの種類



量子コンピュータの評価基準

1 量子ビット数

計算規模を決める指標

- 量子状態を保つことができる容量
- 大きいほど大規模な問題を扱える
- 方式比較で最も注目されやすい指標

2 ノイズ耐性

計算の正確さに関わる指標

- いわゆる「計算間違い」の起きにくさ
- 高いほど安定して正確な計算ができる
- 実機性能や誤り訂正研究に重要

3 トポロジー

量子ビット接続の柔軟性

- 複数量子ビットゲートの接続条件に関わる
- 自由度が高いほど回路設計がしやすい
- ハードウェアごとの得意・不得意を左右

各方式の位置づけ

方式		量子ビット数	ノイズ耐性	トポロジー
実機		～★★★	～★★★	～★★★
シミュ	状態ベクトル法	★	★★★★	★★★★
	テンサーネット	★★	★★	★

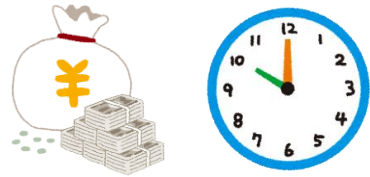
なぜ状態ベクトル法が必要なのか

実機の制限事項

実機の性能限界

- ☒ Number of Qubits
- ☐ Noise Tolerance
- ☐ Topology

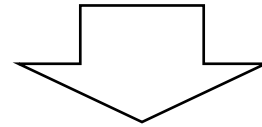
コスト（金銭、時間）



原理上の制約



観測を行うと
量子状態が壊れる



シミュレータが必要な理由

ユーザーの開発環境

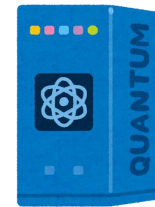


実機利用前の
小規模検証に



量子状態の
調査も可能

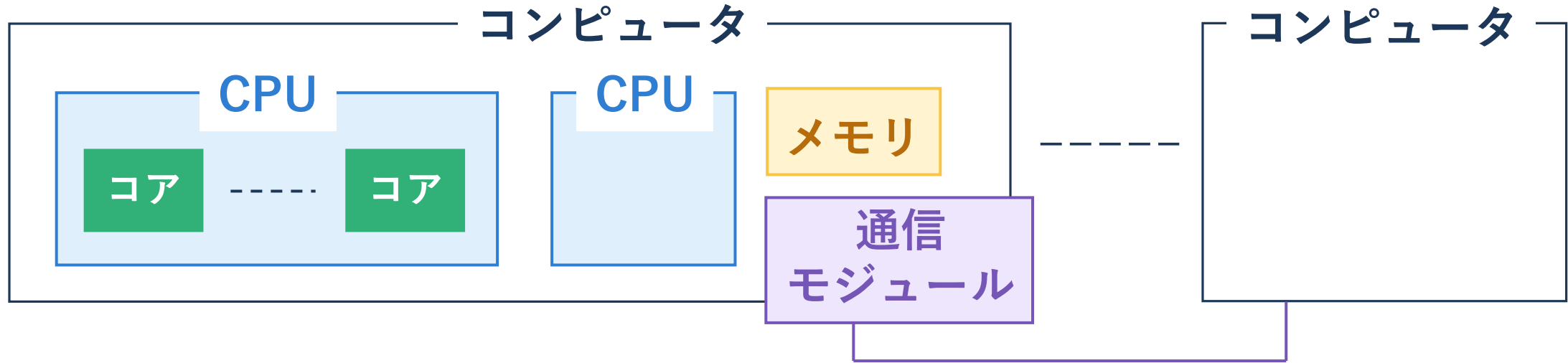
実機の動作検証



- ☒ Item A
- ☒ Item B
- ☐ Item C

実機研究開
発のツール
になる

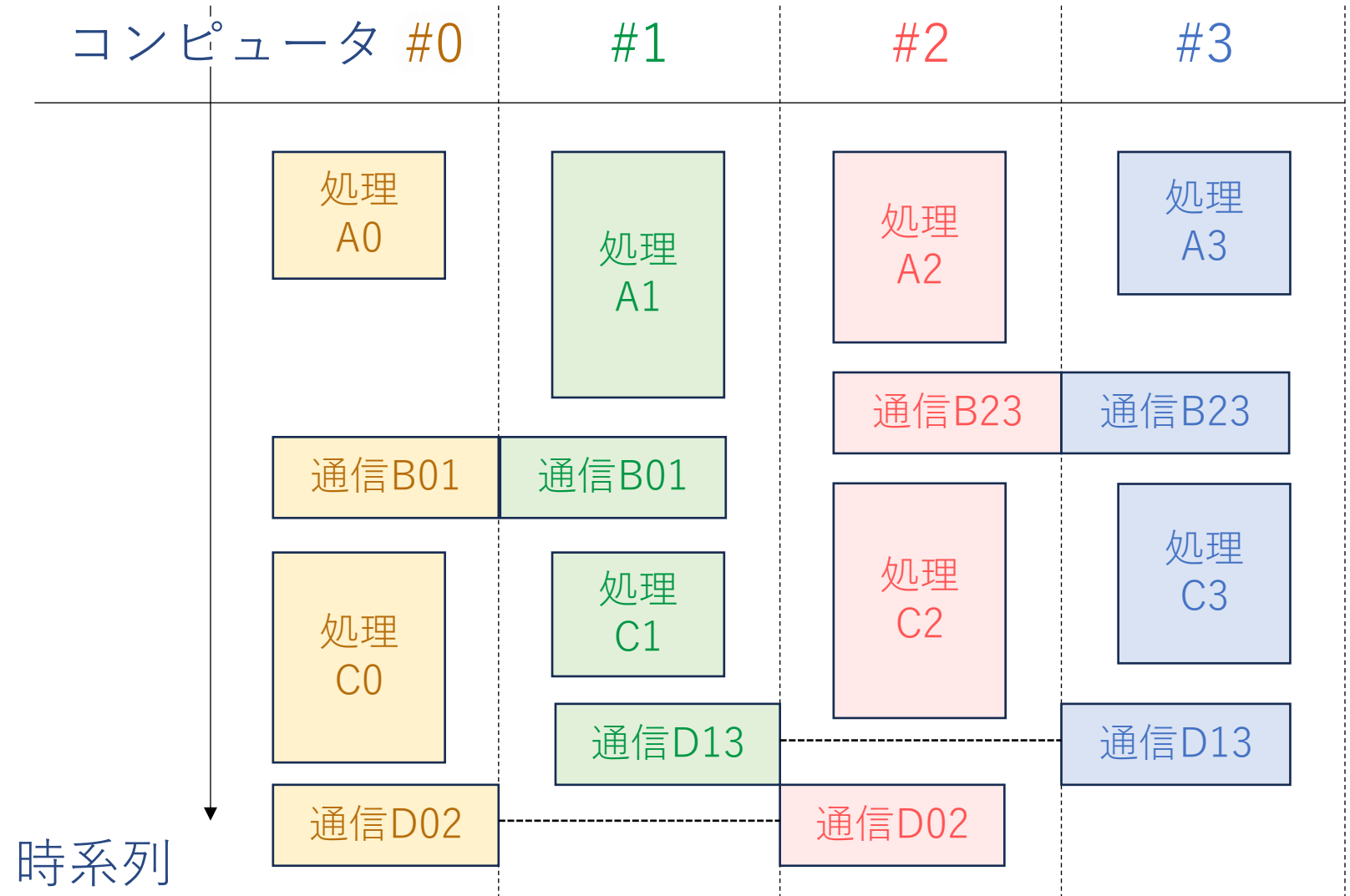
現代の古典計算機



部位	機能
CPU	Central Processing Unit. 主に計算を担当
コア	CPU内のコアがそれぞれ独立して処理を進める
メモリ	データを保持でき、CPUから読み書きできる
通信モジュール	他のコンピュータとの通信

並列コンピューティング

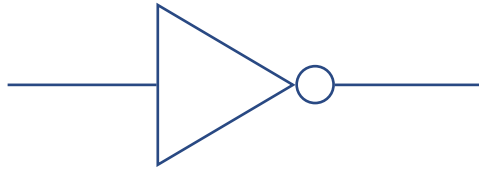
独立に処理を進める部分と、通信を行う部分がある。



古典計算機と量子計算機

古典

NOTゲート



入力	出力
0	1
1	0

量子

NOTゲート



入力	出力
$ 0\rangle$	$ 1\rangle$
$ 1\rangle$	$ 0\rangle$
$a 0\rangle + b 1\rangle$	$b 0\rangle + a 1\rangle$

量子状態と状態ベクトル

量子状態

$$a|0\rangle + b|1\rangle$$

1量子ビット

$$a|00\rangle + b|01\rangle + c|10\rangle + d|11\rangle$$

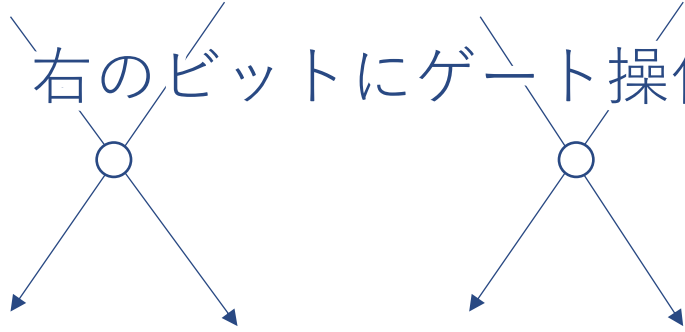
2量子ビット

この、 a, b, c, d を状態ベクトルと呼び、メモリに格納する

量子ゲートによる状態ベクトルの変化

$$a|00\rangle + b|01\rangle + c|10\rangle + d|11\rangle$$

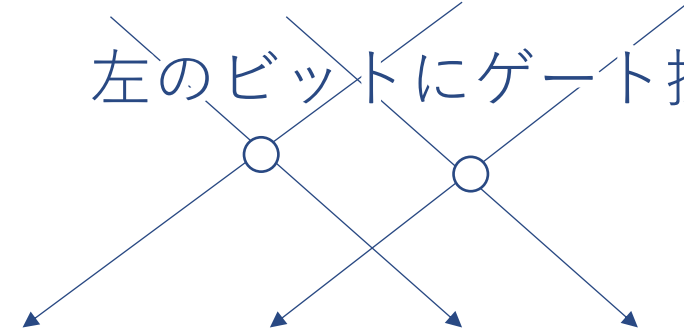
右のビットにゲート操作



$$a'|00\rangle + b'|01\rangle + c'|10\rangle + d'|11\rangle$$

$$a|00\rangle + b|01\rangle + c|10\rangle + d|11\rangle$$

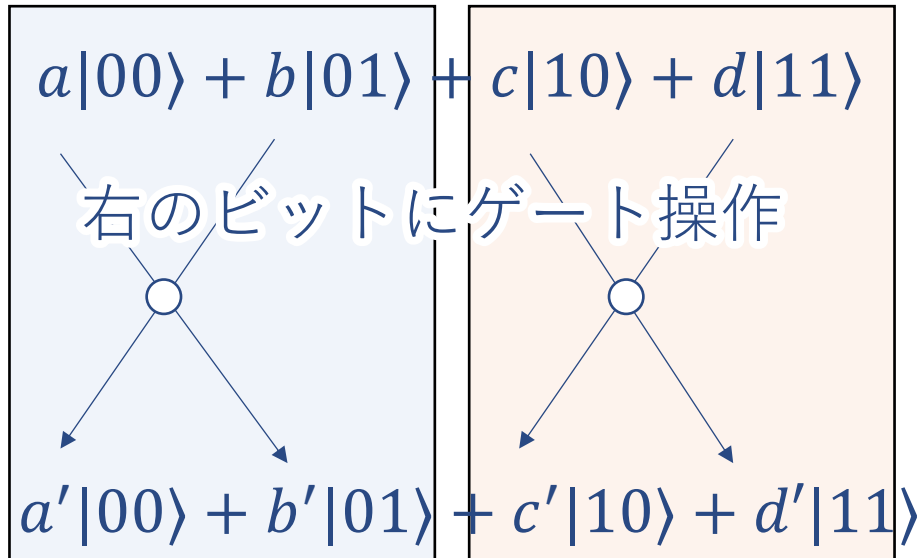
左のビットにゲート操作



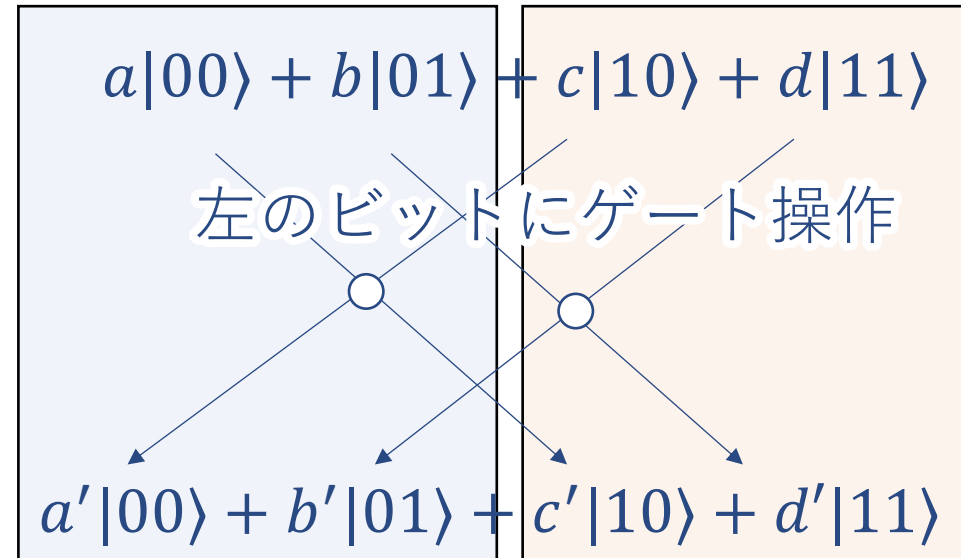
$$a'|00\rangle + b'|01\rangle + c'|10\rangle + d'|11\rangle$$

並列処理ではどうなるか

状態ベクトルを $(a, b), (c, d)$ と分担して並列処理する場合



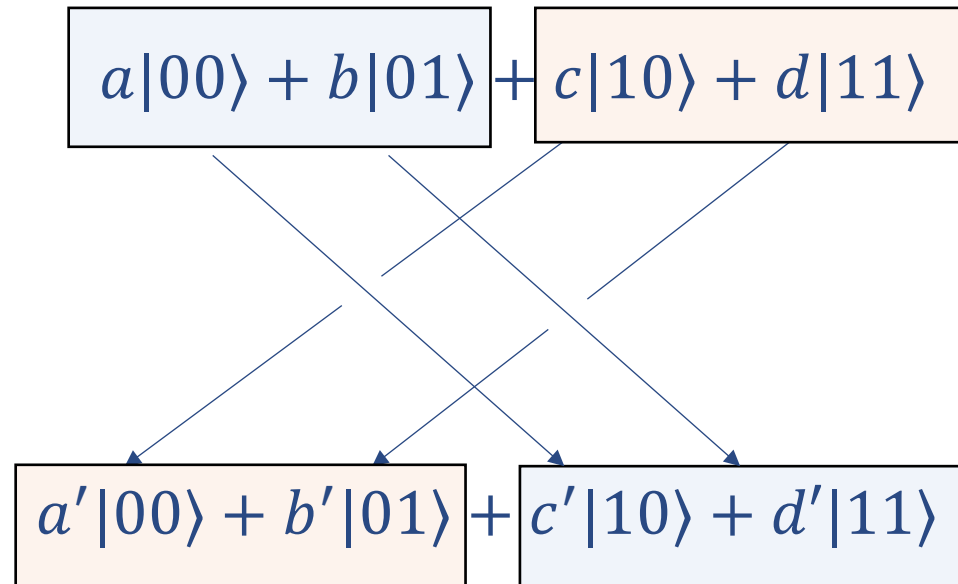
この場合、データ通信は必要ない



通信が必要
通信量が膨大であるため、
これが処理の律速となる

新技術: プロセス番号置換

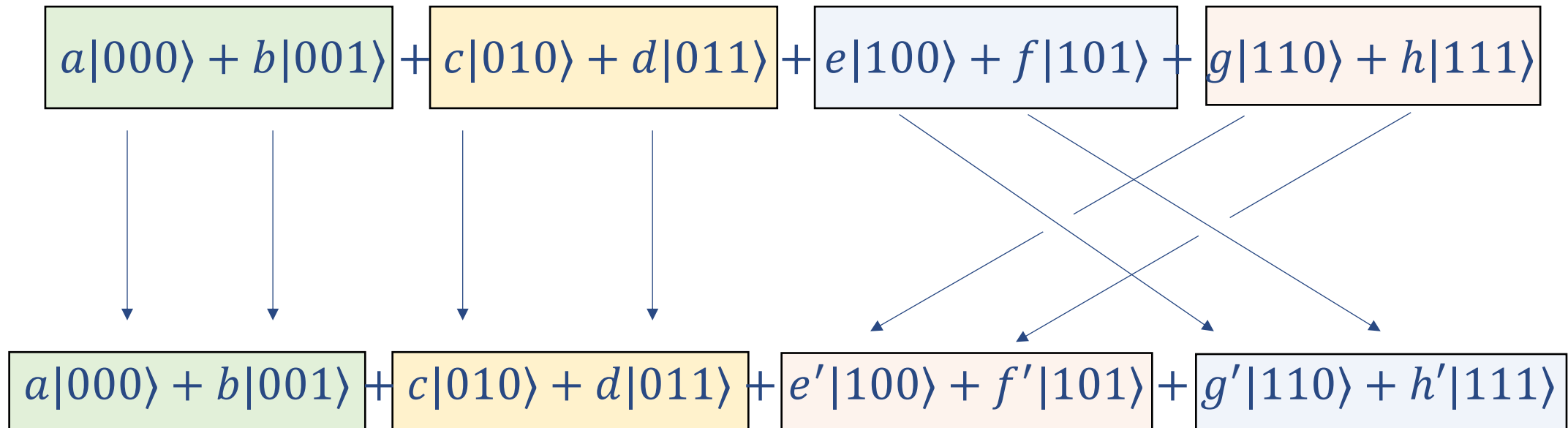
NOTゲートを左のビットに作用する場合



通信が不要になる

他のゲートの例

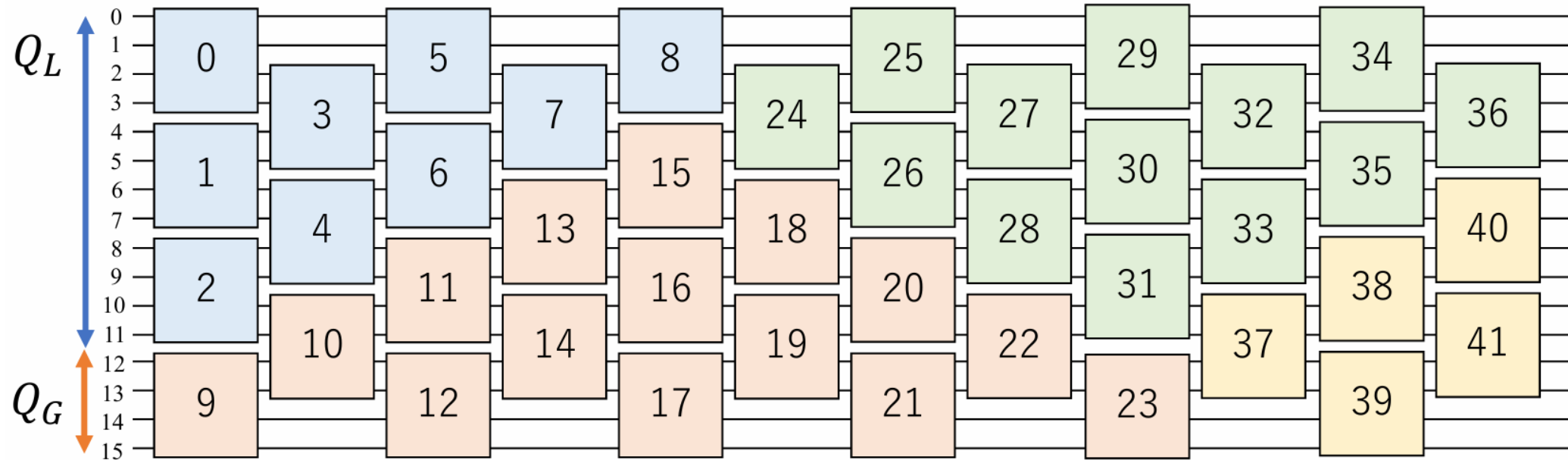
(CNOTゲート)



他にもプロセス番号置換が使える量子ゲートがある（詳細は割愛）

回路分割への適用

回路分割: 量子ゲートの処理順を適宜変更し、通信回数を削減する技術
プロセス番号置換は処理順変更の条件を緩和できるので、さらなる通信回数削減につながる



出典: Y. Teranishi et al., “Lazy Qubit Reordering for Accelerating Parallel State-Vector-based Quantum Circuit Simulation,” ACM Transactions on Quantum Computing, vol. 6, no. 4, Article 26, 2025. DOI: 10.1145/3748261. © ACM.
Fig. 9.

想定される用途

本技術は基本的には状態ベクトルシミュレータの性能を強化する技術

シミュレータが必要な理由

ユーザーの開発環境

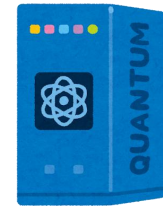


実機利用前の
小規模検証に



量子状態の
調査も可能

実機の動作検証

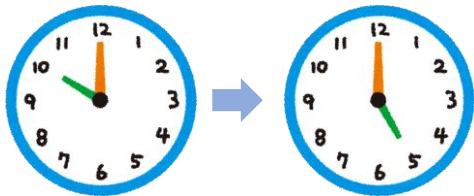


- ☒ Item A
- ☒ Item B
- ☐ Item C

実機研究開
発のツール
になる

本技術が役に立つ場面

大規模化と処理時間短縮



本技術により処理時間短縮し、従来よりも大規模なシミュレーションが可能になる

本技術に関する知的財産権

- 発明の名称 : 情報処理装置、情報処理方法及び
情報処理プログラム
- 出願番号 : 特願2026-006271
- 出願人 : 理化学研究所
- 発明者 : 青木 尚登、吉岡 直樹、伊藤 伸泰

この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（N E D O）の委託業務（JPNP20017）の結果得られたものです。

お問い合わせ先

株式会社理研イノベーション
ライセンス部

license-contact@innovation-riken.jp

TEL : 048-235-9308 (代表)

新技術説明会

New Technology Presentation Meetings!

