

2025年度第1回計算科学フォーラム
2026年3月19日@Zoom

気象・気候分野における 量子計算活用の可能性

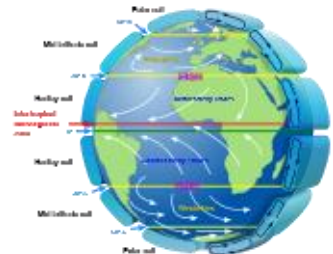
東京大学大学院理学系研究科 博士1年
QunaSysリサーチインターン
上野和雅



QUNASYS

- 気象・気候分野と数値計算
- 量子計算の概要
- 雲の計算と量子計算
- 流体計算と量子計算
- 放射伝達計算と量子計算

科学的疑問



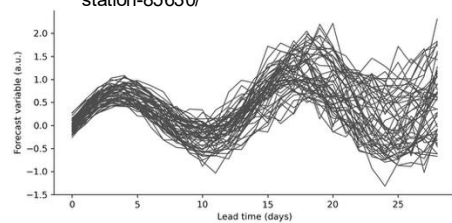
循環の仕方

By Kaidor, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=23902538>



NASA: <https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/typhoon-maysak-from-the-space-station-85630/>

対流の組織化



予測可能性

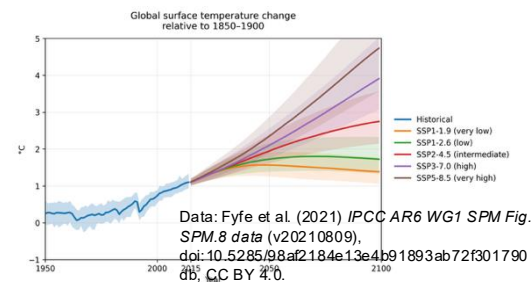


スケール間相互作用

社会的要請



防災



将来予測



エネルギー需給



農業

観測

- 地上観測
- ラジオゾンデ観測
- 衛星観測 etc.

数値モデルを用いた実験

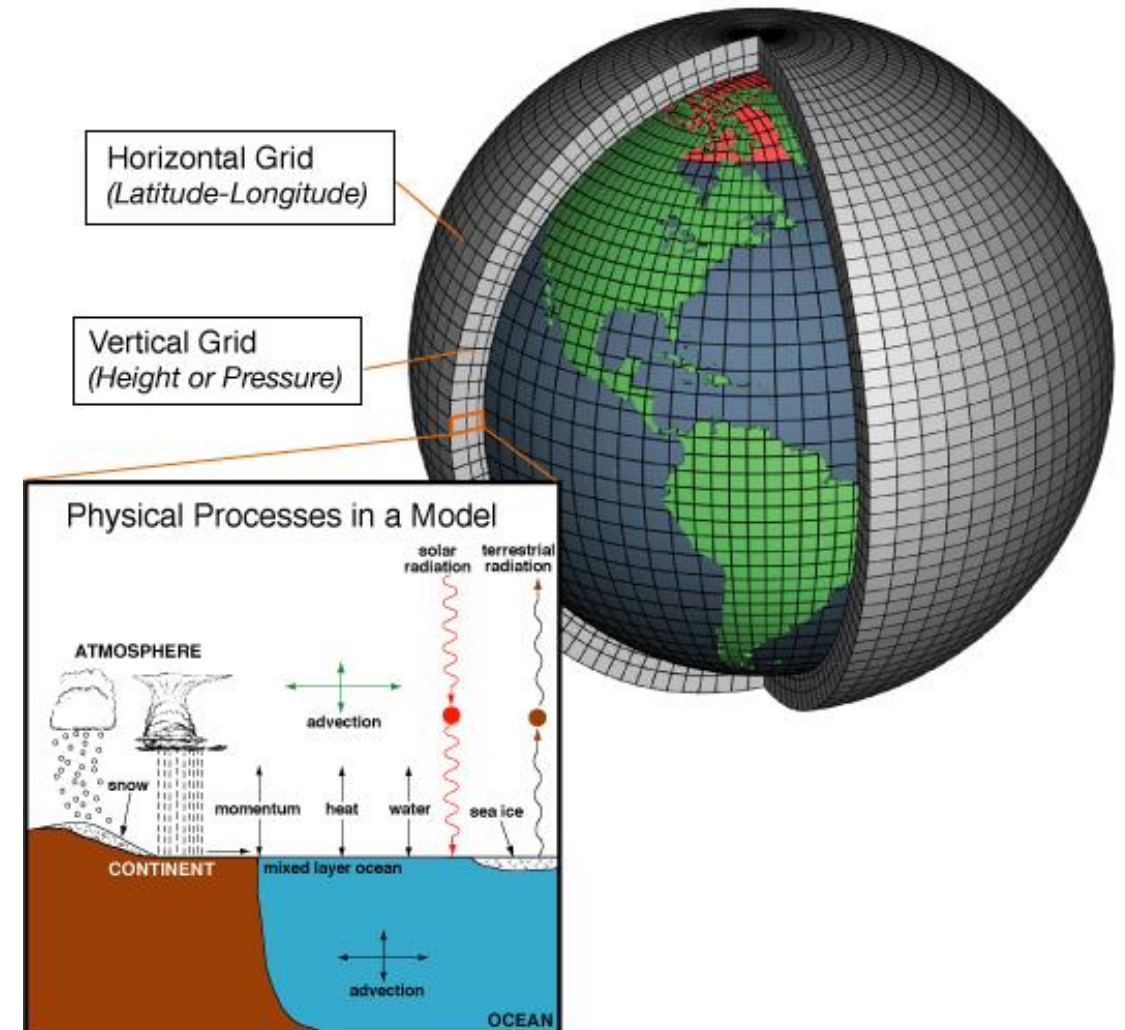
力学過程

- 数値流体力学計算

物理過程

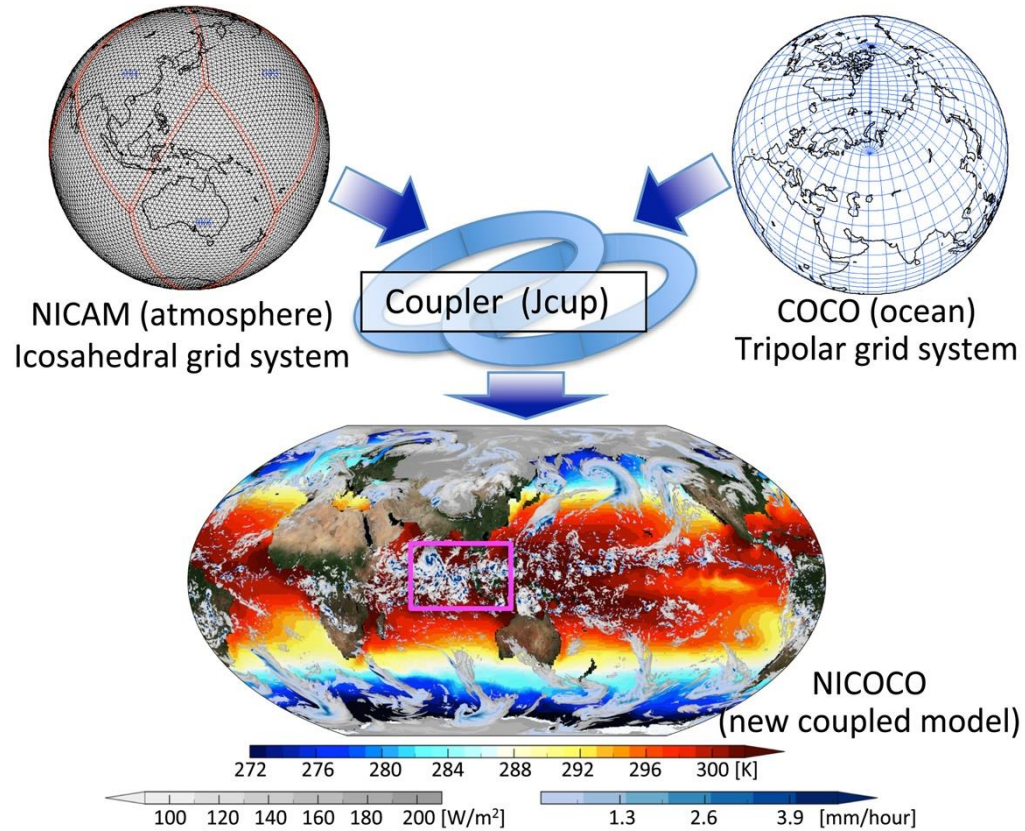
- 放射伝達
- 乱流
- 雲微物理
- 植生 etc.

General Circulation Model (GCM)の概念図



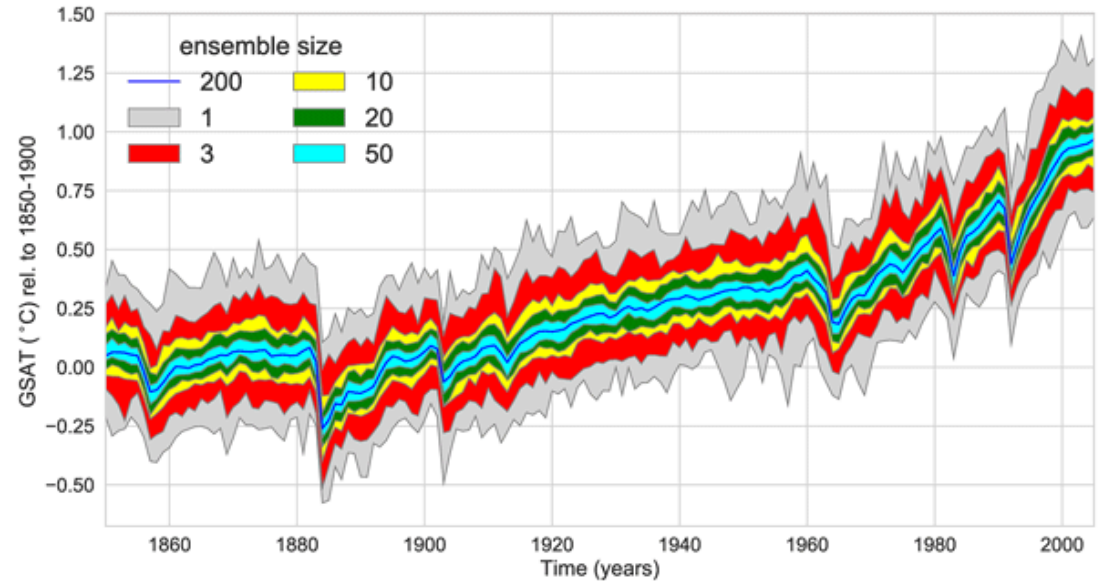
By NOAA - http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/AtmosphericModelSchematic.png, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7263986>

高解像度大気海洋結合モデル



Miyakawa et al. (2017), Geophys. Res. Lett., Fig. 1,
doi:10.1002/2017GL074683.

大規模アンサンブルシミュレーション



Milinski et al. (2020), Earth. Syst. Dyn., Fig. 1,
doi: 10.5194/esd-11-885-2020.

計算機性能の向上とともに精緻化・高度化

- 気象・気候分野と数値計算
- 量子計算の概要
- 雲の計算と量子計算
- 流体計算と量子計算
- 放射伝達計算と量子計算

量子力学の性質を活用する計算

情報の単位

古典計算

ビット

0 or 1

3ビットで8つの状態のうち1つの状態を表せる



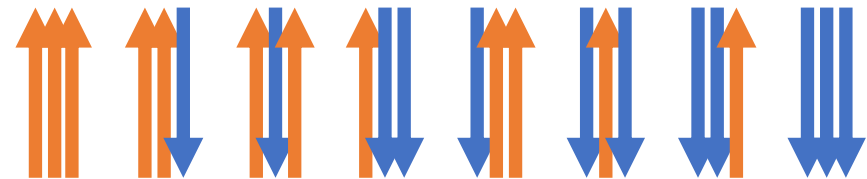
量子計算

量子ビット
(qubits)

0 1

重ね合わせ

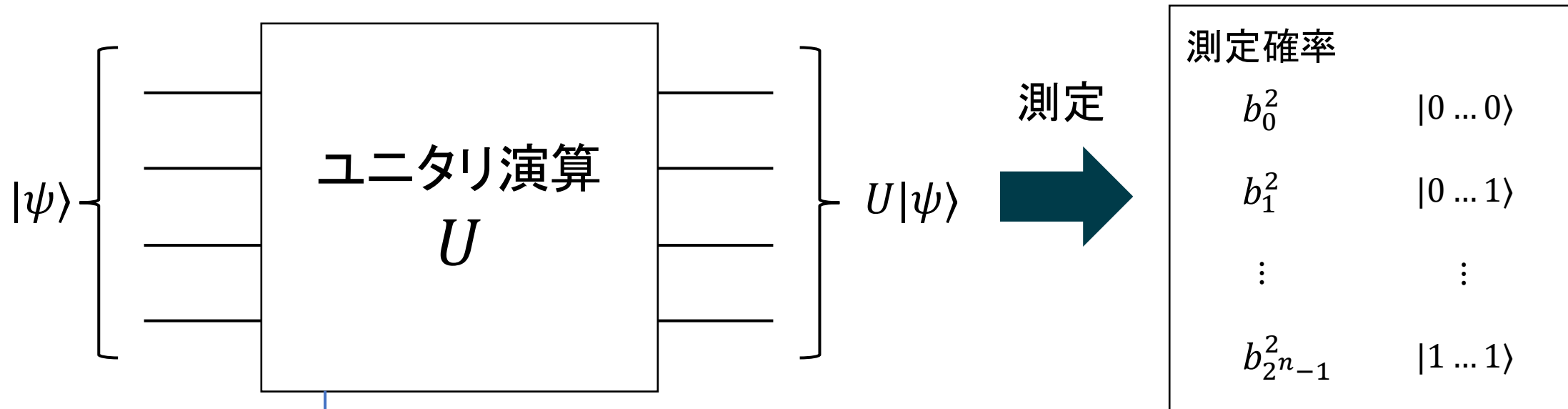
3量子ビットで8つの状態を同時に表せる



状態ベクトルに対する演算

n 量子ビットの量子状態 $|\psi\rangle = a_0|0 \dots 0\rangle + a_1|0 \dots 1\rangle + \dots + a_{2^n-1}|1 \dots 1\rangle$

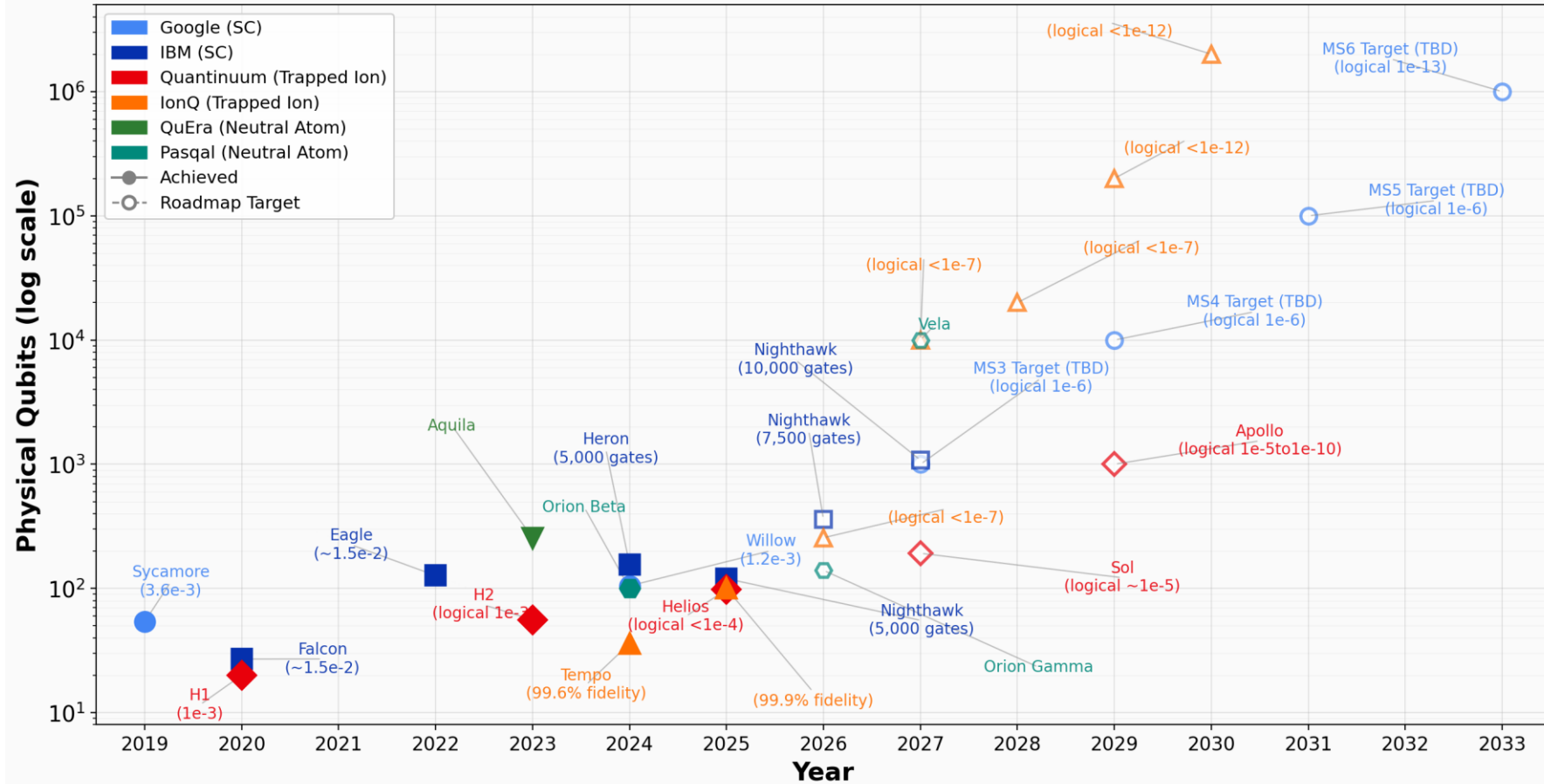
ユニタリ演算 U の作用後 $U|\psi\rangle = b_0|0 \dots 0\rangle + b_1|0 \dots 1\rangle + \dots + b_{2^n-1}|1 \dots 1\rangle$



基本演算に分解して実行

$X, Y, Z, R_X(\theta), R_Y(\theta), R_Z(\theta), \text{SWAP}, T, \text{ etc.}$

Quantum Computing Roadmap: Physical Qubit Count by Vendor



各社のroadmapを参考に作成

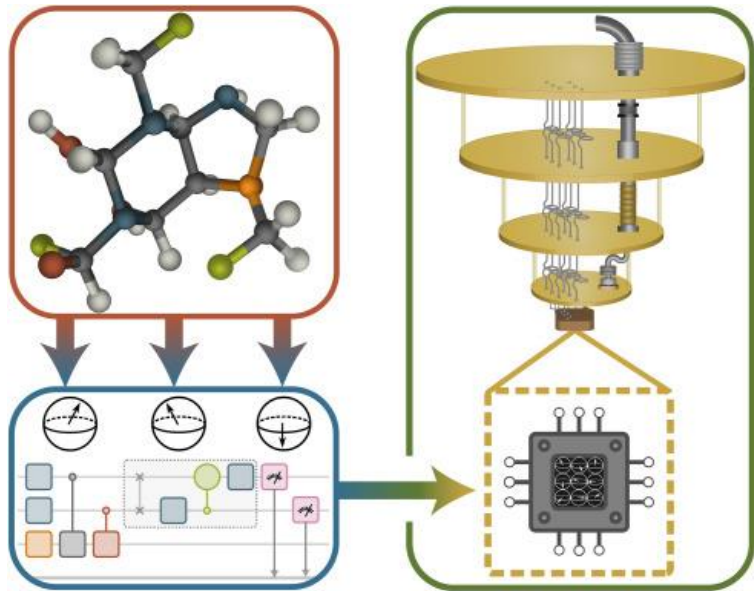
[1] Google: <https://quantumai.google/roadmap> [2] IBM: <https://www.ibm.com/quantum/blog/ibm-quantum-roadmap-2025>

[3] IBM: <https://www.ibm.com/roadmaps/quantum/> [4] Quantinuum: <https://www.quantinuum.com/blog/technical-perspective-by-the-end-of-the-decade-we-will-deliver-universal-fault-tolerant-quantum-computing>

[5] IonQ: <https://www.ionq.com/roadmap> [6] Quera: <https://www.quera.com/aquila>

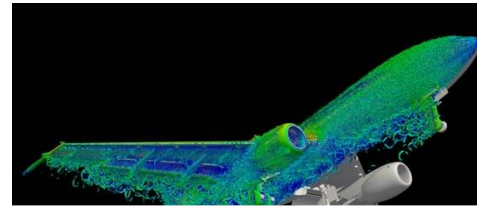
[7] Pasqal: <https://www.pasqal.com/technology/roadmap/>

量子化学計算



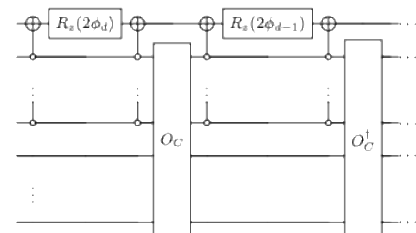
Weidman et al. (2024), Cell Rep Phys Sci., Fig. 1, DOI: 10.1016/j.xcrp.2024.102105

数値流体解析



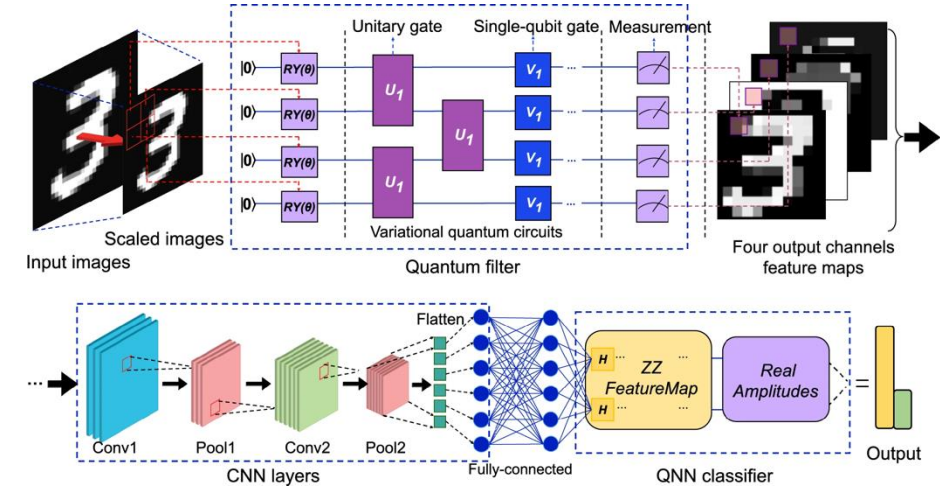
JAXA:
<https://www.jss.jaxa.jp/aircraft/>

線形化 $Ax = b$



量子線形ソルバー

量子機械学習



Long et al. (2025), Sci. Rep., Fig. 3, DOI: 10.1038/s41598-025-13417-1

ゲート深さ・繰り返し回数を抑えつつ、有用な計算が行える対象・方法は？

大規模な計算が必要な気象・気候数値計算において、
量子計算は有益な方法か？ (Tennie and Palmer, 2023)

Tennie and Palmer (2023), *Bulletin of the American
Meteorological Society*, doi: 10.1175/BAMS-D-22-0031.1

研究目的

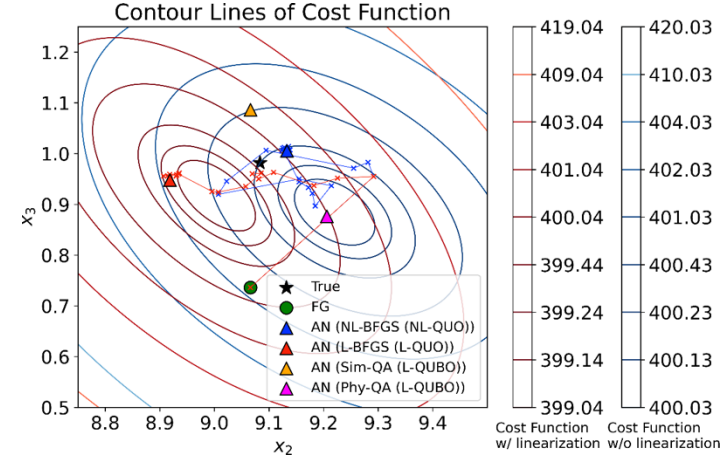
具体的な問題を設定し、量子アルゴリズムを検討し、
気象・気候分野における有効な使い道を探し出す

量子機械学習と組み合わせる方法

図略

Jaderberg et al. (2017),
Phys. Rev. A, Fig. 1,
doi: 10.1103/PhysRevA.
110.052423.

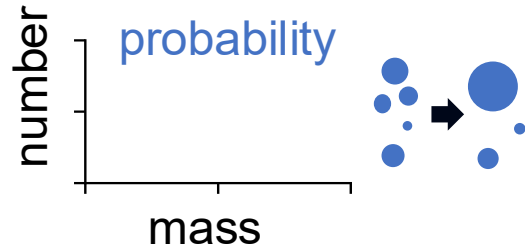
量子アニーリングを用いた最適化



Kotsuki et al. (2024), Nonlin.
Procs. Geophys, Fig. 3,
doi: 10.5194/npg-31-237-
2024.

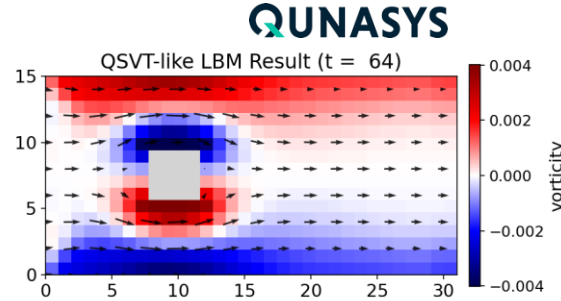
偏微分方程式ソルバーとして用いる方法

雲粒の確率分布の時間発展



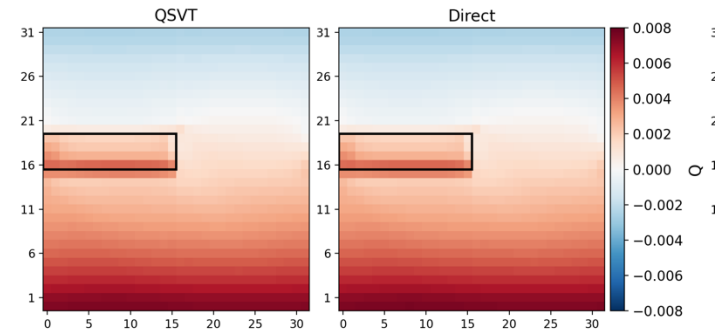
Ueno and Miura (2026)
arXiv preprint: 2603.06353

流体場の時間発展



QunaSys Tech Blog:
[https://tech.qunasys.com/p
osts/lbm_circuit_simulation/](https://tech.qunasys.com/posts/lbm_circuit_simulation/)

放射場の計算



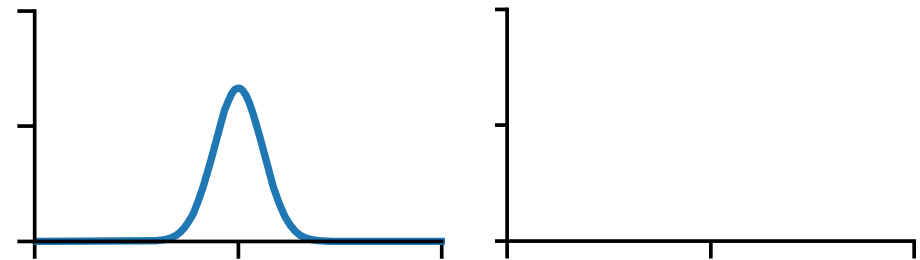
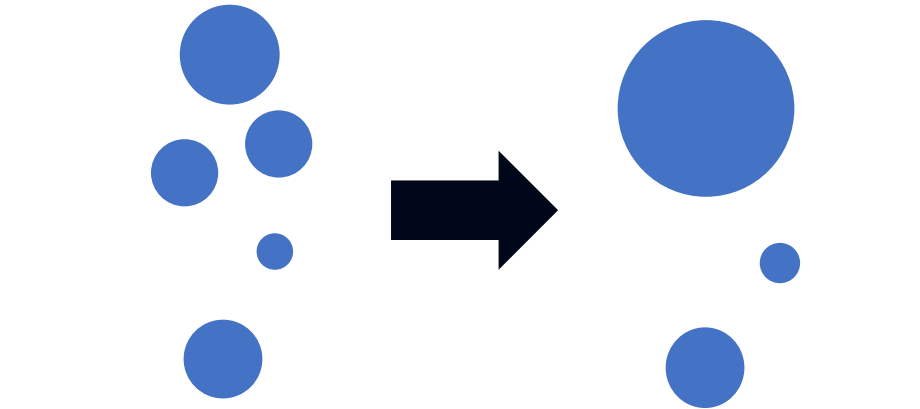
Ueno et al., in prep.

- 気象・気候分野と数値計算
- 量子計算の概要
- 雲の計算と量子計算
- 流体計算と量子計算
- 放射伝達計算と量子計算

[Alfonso (2015), Atmos. Chem. Phys.]

雲粒の衝突併合過程

雲粒の質量分布の確率分布 $P(\vec{n}_\alpha; t)$ の時間発展を計算

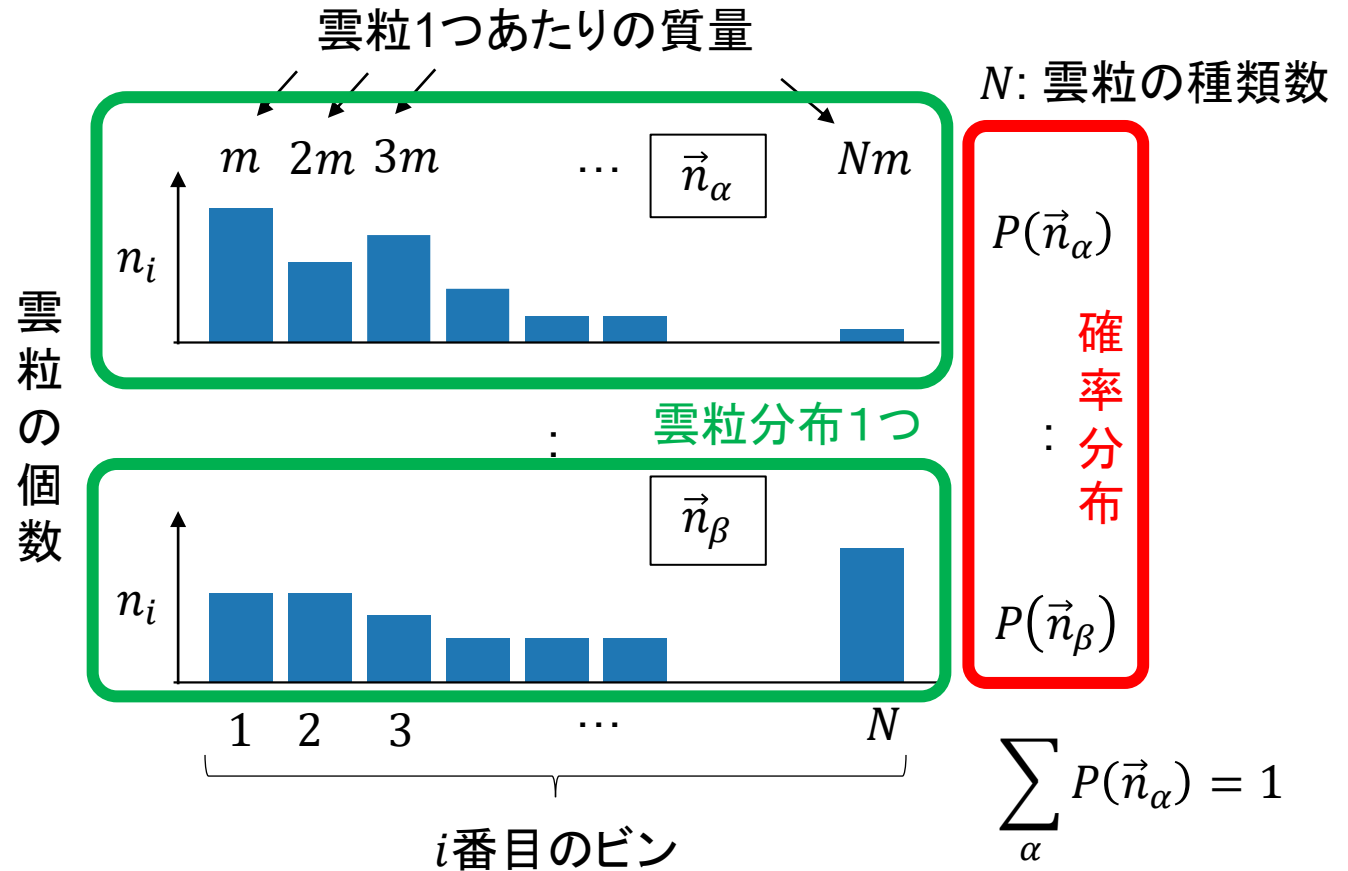


決定論的に計算

分布のばらつきも計算

Stochastic Collection Equation (SCE)での計算

マスター方程式での計算



古典での計算は $N = 40$ まで (Alfonso, 2015)

時間離散化したマスター方程式

$$\begin{aligned}
 & P(\dots, n_i, \dots, n_j, \dots, n_{i+j}, \dots; t + \Delta t) \\
 &= P(\dots, n_i, \dots, n_j, \dots, n_{i+j}, \dots; t) \\
 &+ \Delta t \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N K(i, j) (n_i + 1) (n_j + 1) P(\dots, n_i + 1, \dots, n_j + 1, \dots, n_{i+j} - 1, \dots) \right. \\
 &+ \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} K(i, i) (n_i + 2) (n_i + 1) P(\dots, n_i + 2, \dots, n_{2i} - 1, \dots) \\
 &\left. - \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N K(i, j) n_i n_j P(\bar{n}) - \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} K(i, i) n_i (n_i - 1) P(\bar{n}) \right]
 \end{aligned}$$

}

確率の流入

確率の流出

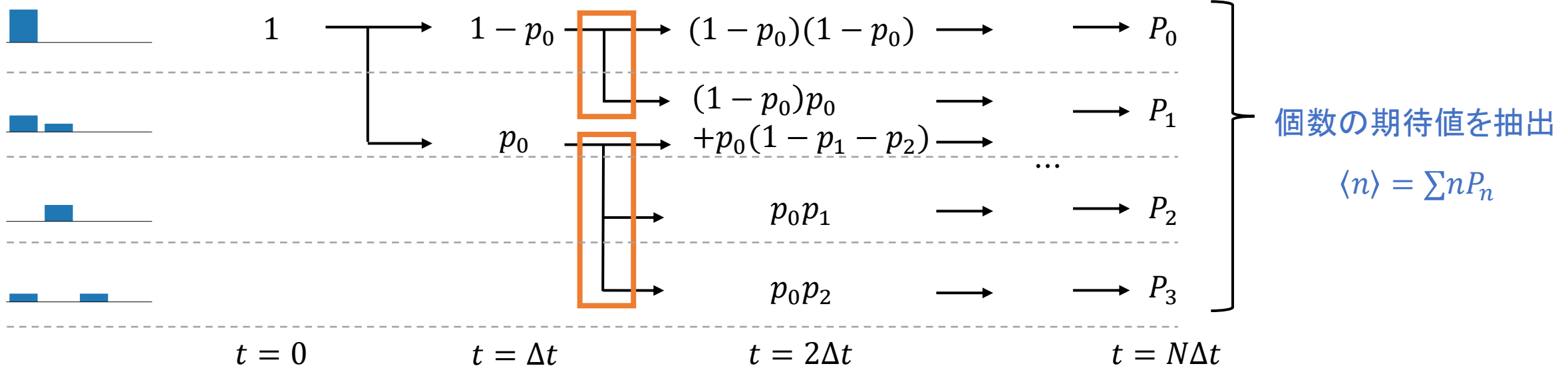
雲粒の質量分布

確率

重ね合わせを利用した並列実行

最終的な確率分布

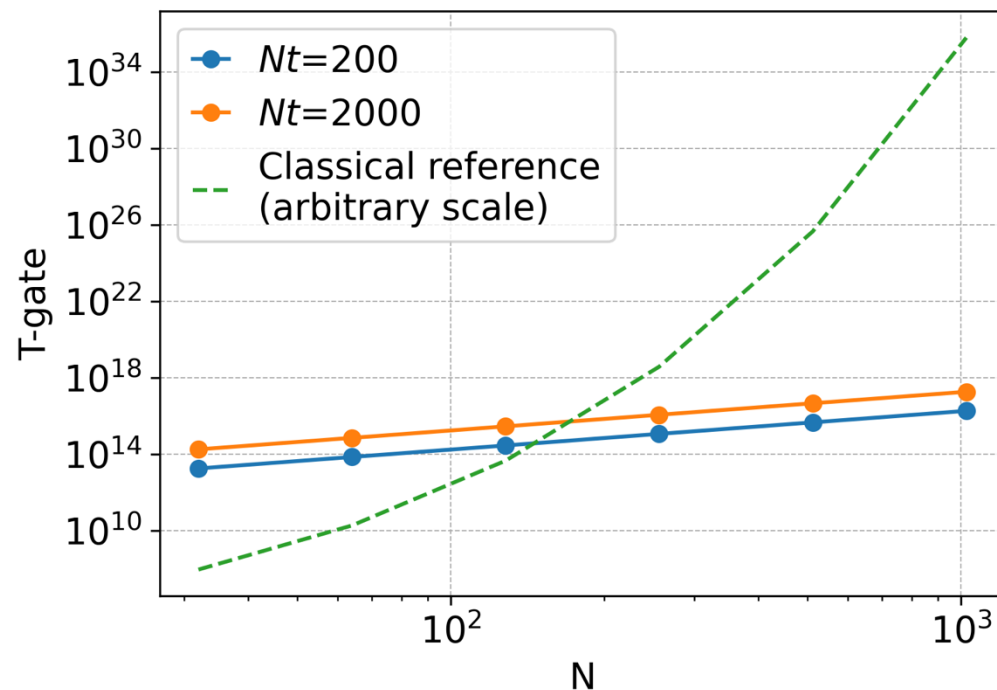
[Ueno and Miura (2026),
arXiv preprint: 2603.06353]



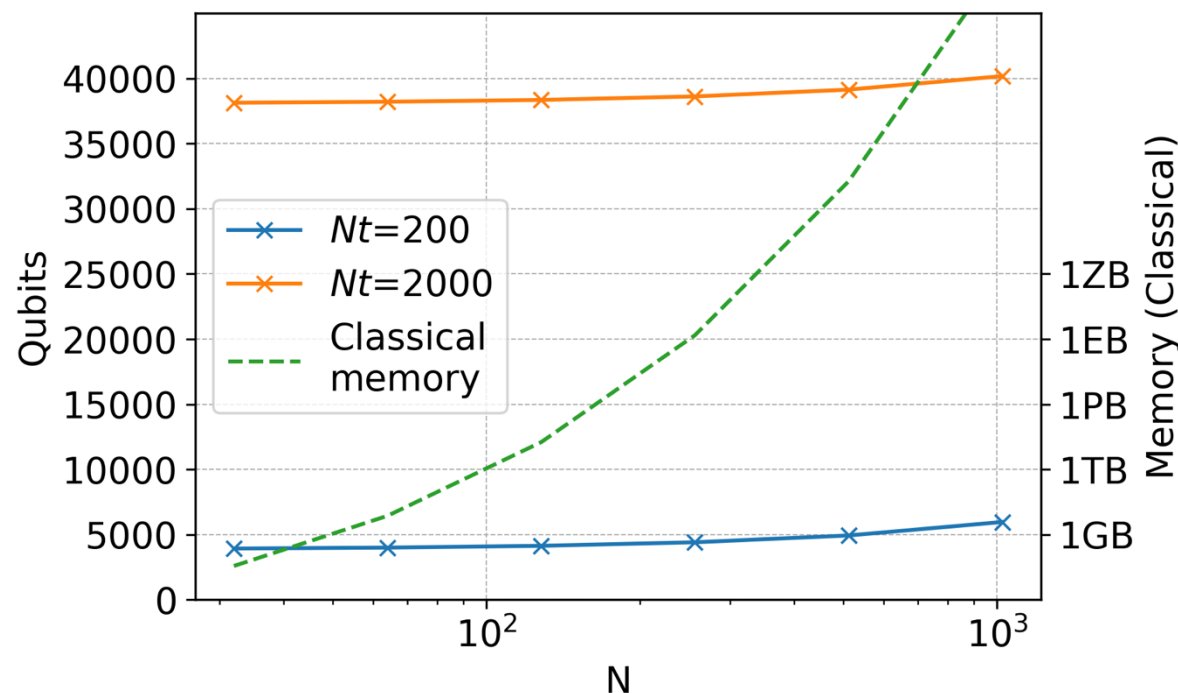
- 1タイムステップごとに確率を配分
- 量子算術と多制御回転ゲートを用いて確率の配分を実行。重ね合わせ状態を利用することで、配分はすべての状態に対して**同時実行**。
金融計算の量子アルゴリズムを参照 (Wang and Kan, 2024)
- 全状態の出力には量子回路の繰り返し実行が必要になるため、**個数の期待値のみ量子振幅推定 (Grover, 1996) を用いて抽出**

[Ueno and Miura (2026),
arXiv preprint: 2603.06353]

Time-like cost: Tゲート数



Space cost: 論理量子ビット数



- 古典計算では状態数に比例したコスト(Nに関して指数的なコスト)がかかるのに対し、量子計算では多項式コストに抑えられる
- ベースで必要となるコストは高い

- 気象・気候分野と数値計算
- 量子計算の概要
- 雲の計算と量子計算
- 流体計算と量子計算
- 放射伝達計算と量子計算

格子ボルツマン法 (LBM)

流体粒子の分布関数 $f_i(x, t)$ の時間発展

$$f_i(\mathbf{r} + \mathbf{c}_i, t + \Delta t) = f_i(\mathbf{r}, t) - \frac{1}{\tau} (f_i(\mathbf{r}, t) - f_i^{eq}(\mathbf{r}, t))$$

※衝突項にBGKモデルを使用

\mathbf{r} : 空間位置、 \mathbf{c}_i : 単位速度ベクトル、
 τ : 緩和時間、 f_i^{eq} : 平衡分布関数

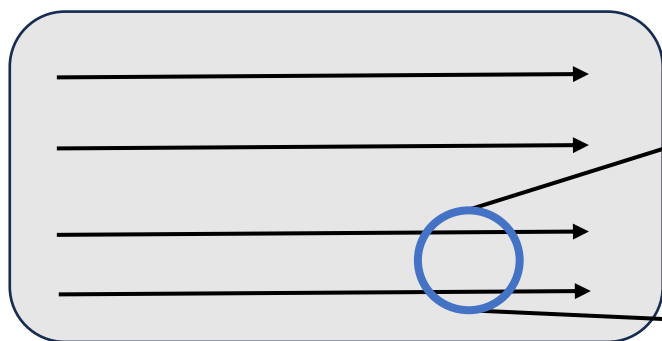
マクロ量と分布関数の関係

密度: $\rho(x, t) = \sum_i f_i(x, t)$

運動量密度: $\rho \mathbf{u}(x, t) = \sum_i f_i(x, t) \mathbf{c}_i$ ※ $\Delta t = \Delta x = 1$,
 音速 $c_s = \frac{1}{\sqrt{3}}$
 の格子単位

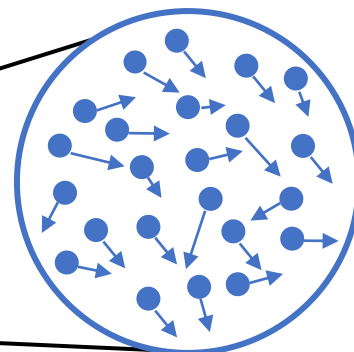
動粘性係数: $\nu = \frac{1}{3} \left(\tau - \frac{1}{2} \right)$

Navier-Stokes方程式



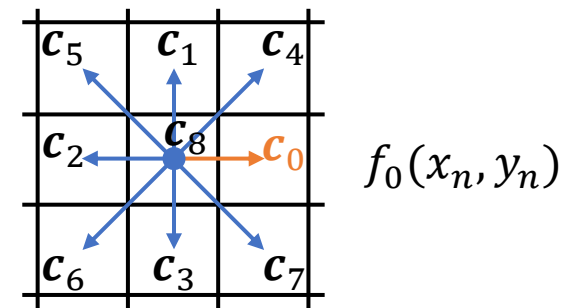
マクロな場の量の時間発展を計算

ボルツマン方程式



流体粒子の分布関数の時間発展を計算

格子ボルツマン法 (LBM)



LBMの格子例(D2Q9)

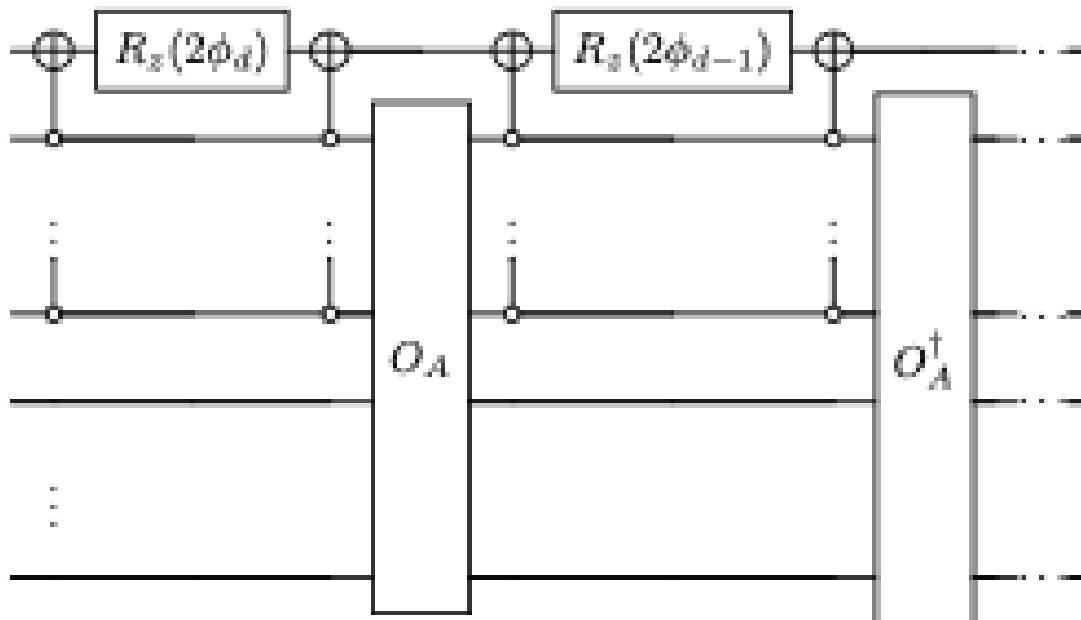
[Low and Chuang (2017), Phys. Rev. Lett.]

線型方程式の計算: 量子特異値変換 (QSVT) を用いた逆行列計算

線型方程式 $A|x\rangle = |b\rangle$

$A = U\Sigma V^\dagger$ と特異値分解した時に、 $|x\rangle \approx Vf_p(\Sigma^{-1})U^\dagger|b\rangle$ として解を求める

$f_p(\Sigma^{-1})$: Σ の逆行列の多項式による近似



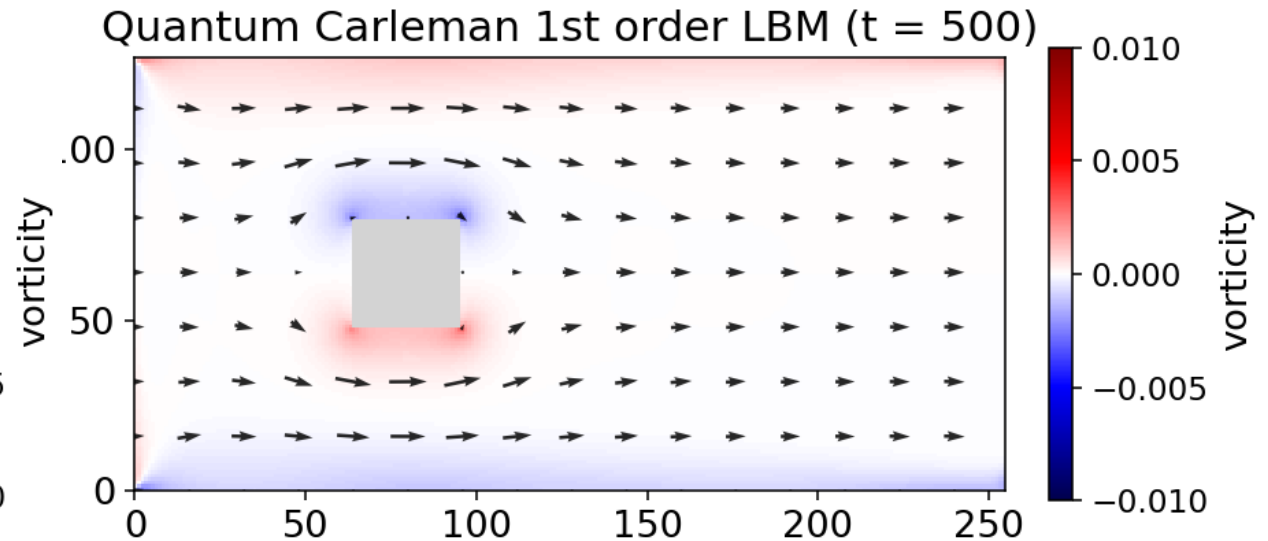
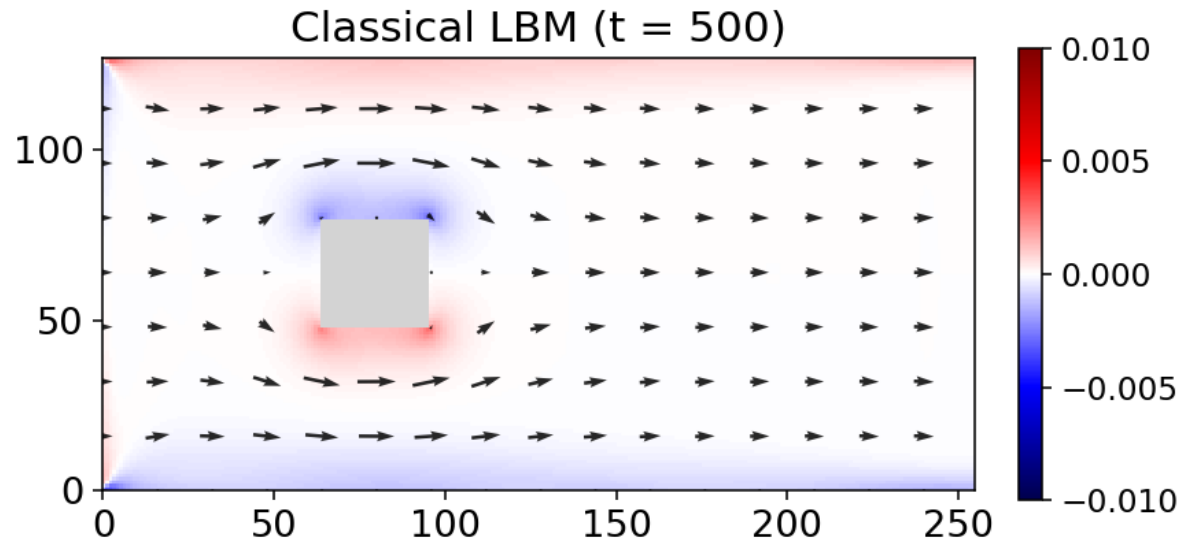
近似多項式の次数 d の分だけ、回転ゲート及び係数行列を量子回路上で表現するためのオラクル(とその逆)を作用

$$d = O(\kappa \log \kappa / \epsilon)$$

κ : 量子回路上で表現されている行列の最小特異値の逆数

ϵ : 誤差

格子ボルツマン法によるシミュレーション

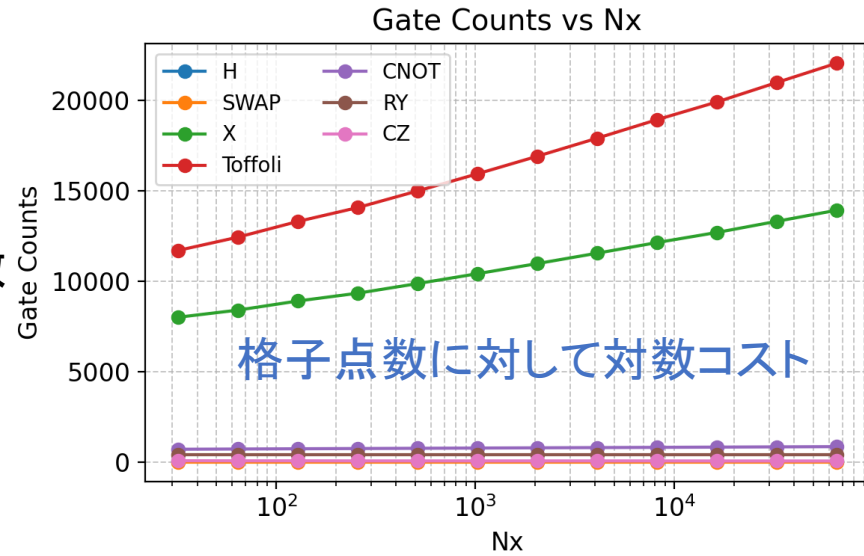


- 計算条件は、 $Re=10$, 流入流速の $Ma=0.01$
- Classicalは非線形項を含む通常の格子ボルツマン法での計算
- Quantumの時間刻みは格子ボルツマンの時間単位の0.2倍(安定に計算するため)
- Quantumは、値オラクル O_{value} で時間1ステップ分の値を埋め込んだ量子回路を状態ベクトルシミュレーションで都度更新して実行
(QURI SDKを通してQulacsを利用、富岳上で512ノードで並列計算)

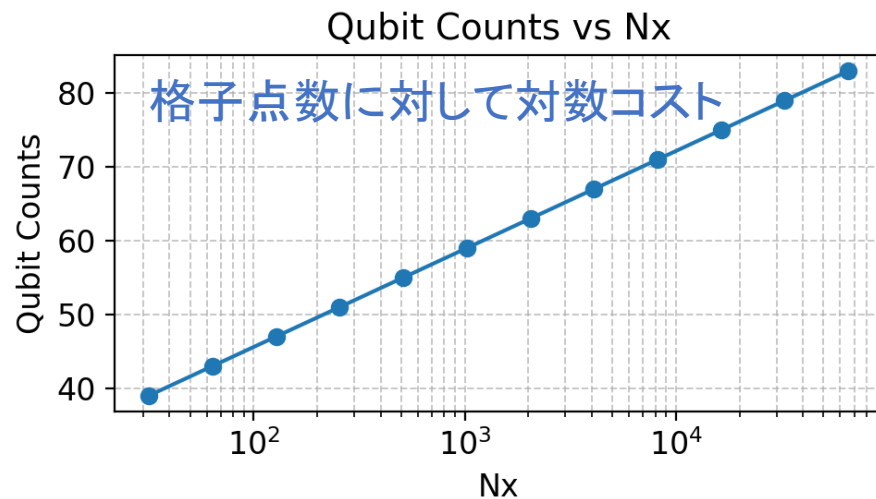
係数行列の量子回路埋め込みオラクル O_A



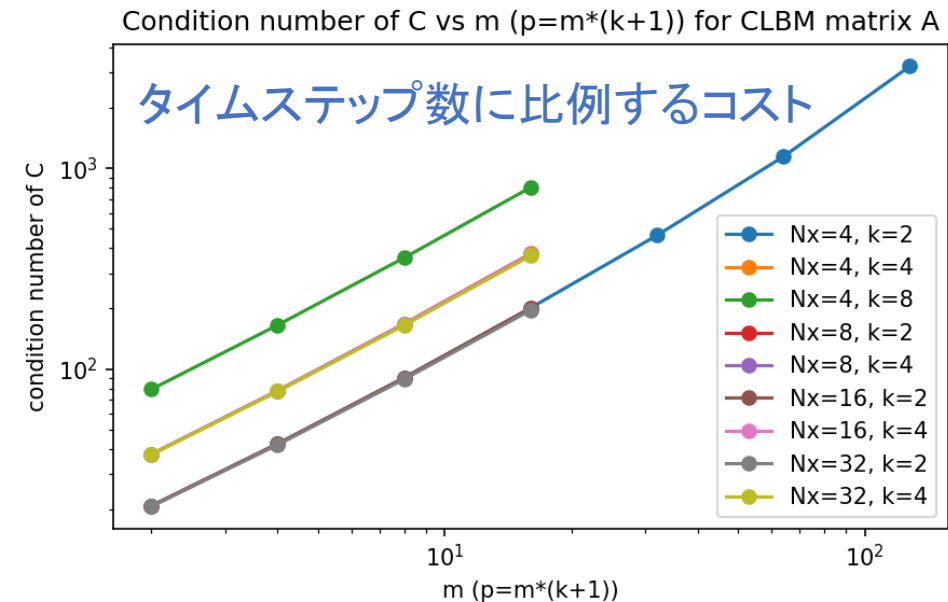
論理ゲート数



論理量子ビット数



Carleman1次のLBMの時間発展行列の条件数



- 気象・気候分野と数値計算
- 量子計算の概要
- 雲の計算と量子計算
- 流体計算と量子計算
- 放射伝達計算と量子計算

定常放射伝達(輻射輸送)方程式

放射輝度 $I_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega})$ の境界値問題

$$\boldsymbol{\Omega} \cdot \nabla I_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}) = \underbrace{-\sigma_{t,\lambda}(\mathbf{r}) I_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega})}_{\text{散乱・吸収による減衰}} + \underbrace{j_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega})}_{\text{放射源}} + \underbrace{\sigma_{s,\lambda}(\mathbf{r}) \int P_\lambda(\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}') I_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega}') d\boldsymbol{\Omega}'}_{\text{散乱による増大}}$$

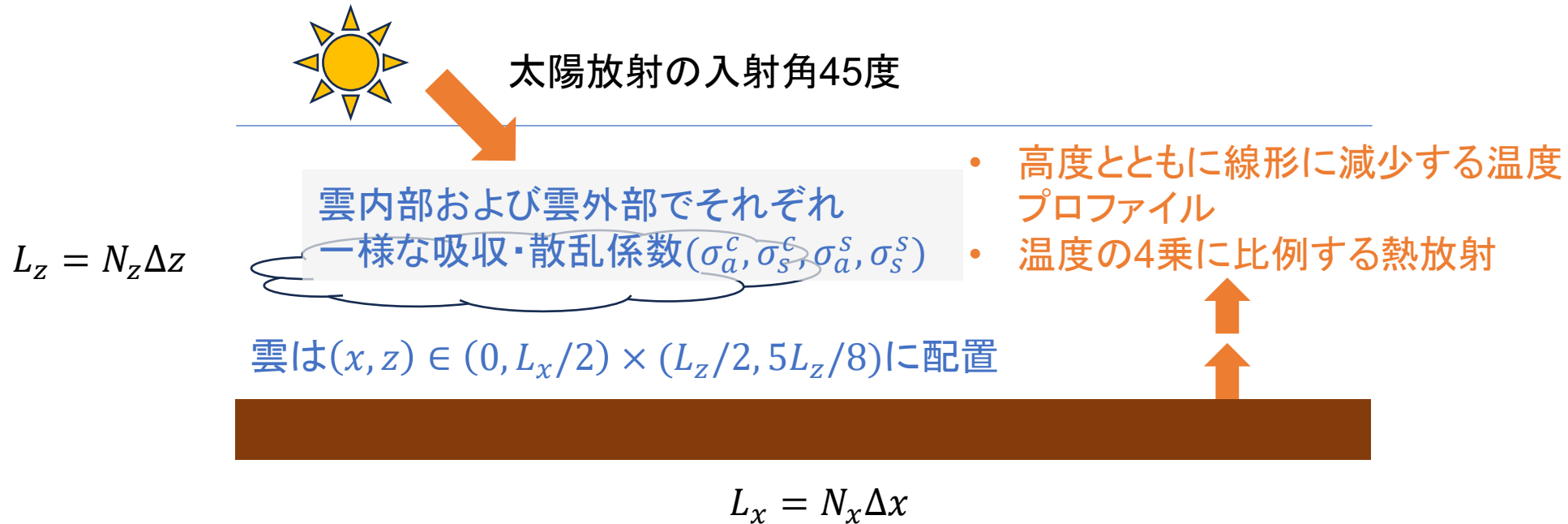
\mathbf{r} : 空間位置、 $\boldsymbol{\Omega}$: 角度方向、 $\sigma_{t,\lambda}$: 全減衰係数、 $j_\lambda(\mathbf{r}, \boldsymbol{\Omega})$: 放射源関数、 $\sigma_{s,\lambda}$: 散乱係数、 $P_\lambda(\boldsymbol{\Omega}, \boldsymbol{\Omega}')$: 散乱位相関数

空間・角度方向に離散化(離散角度法・2次元の場合)

$$\left(\sigma_{t,\lambda,i,k} + \frac{|\mu_x^n|}{\Delta x} + \frac{|\mu_z^n|}{\Delta z} \right) I_{\lambda,i,k}^n - \frac{|\mu_x^n|}{\Delta x} I_{\lambda,i-\text{sgn}(\mu_x^n),k}^n - \frac{|\mu_z^n|}{\Delta z} I_{\lambda,i,k-\text{sgn}(\mu_z^n)}^n - \sigma_{s,\lambda,i,k} \sum_m w^m P_\lambda^{n,m} I_{\lambda,i,k}^m = j_{\lambda,i,k}^n$$

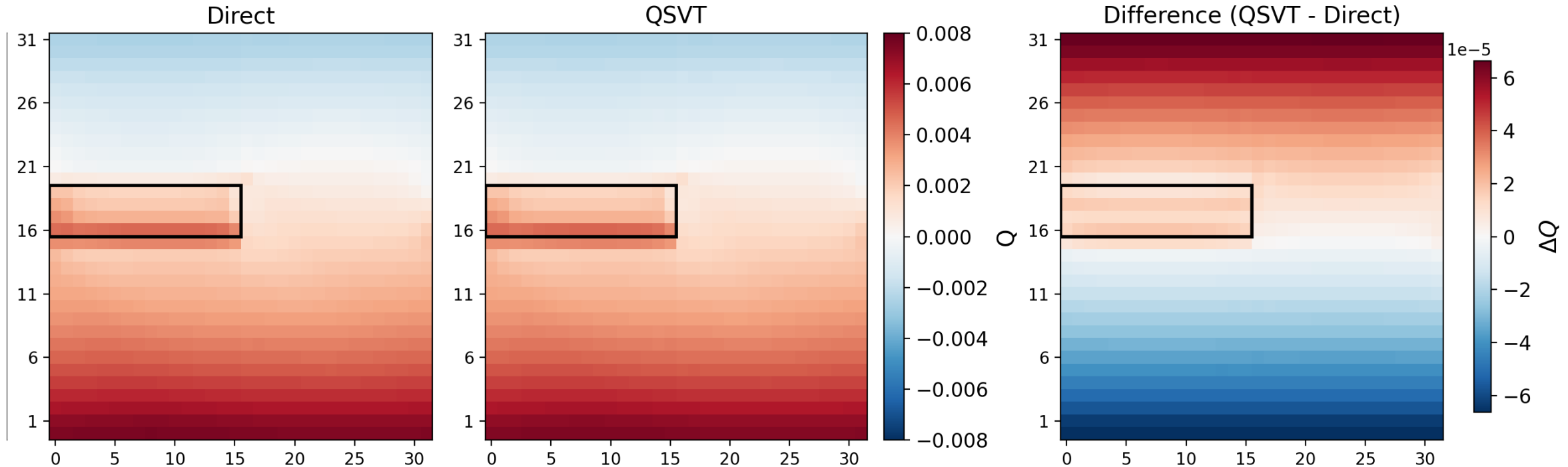
(μ_x^n, μ_z^n) : 方向余弦、 sgn : 符号関数、 (i, k, n) : $(x, z, \text{角度方向})$ のインデックス、 w^m : m 方向の重み

線型方程式 $Ax = b$ に帰着→QSVTを用いた逆行列計算を活用可能



加熱率の計算

Ueno et al., in prep.

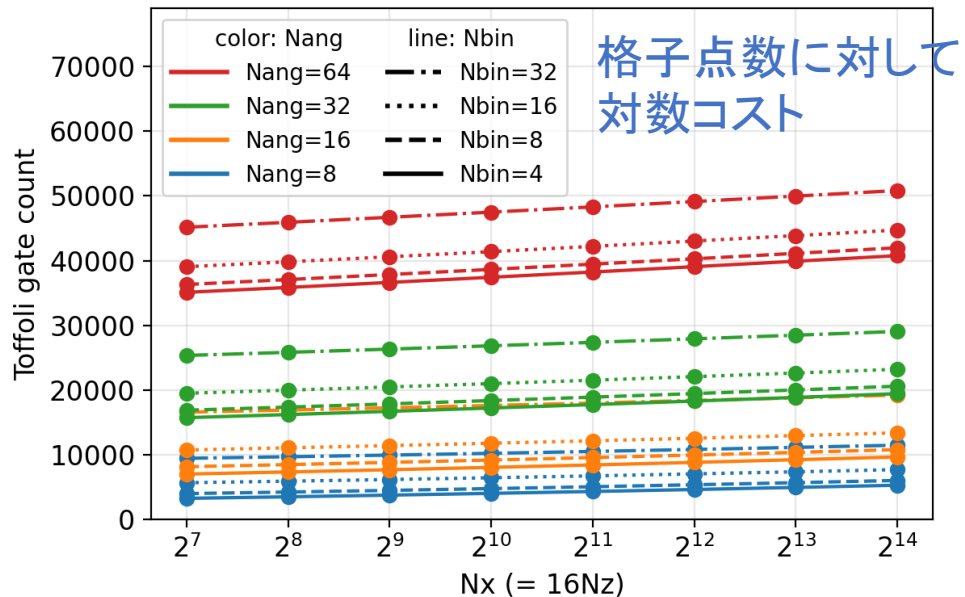


は雲のある領域

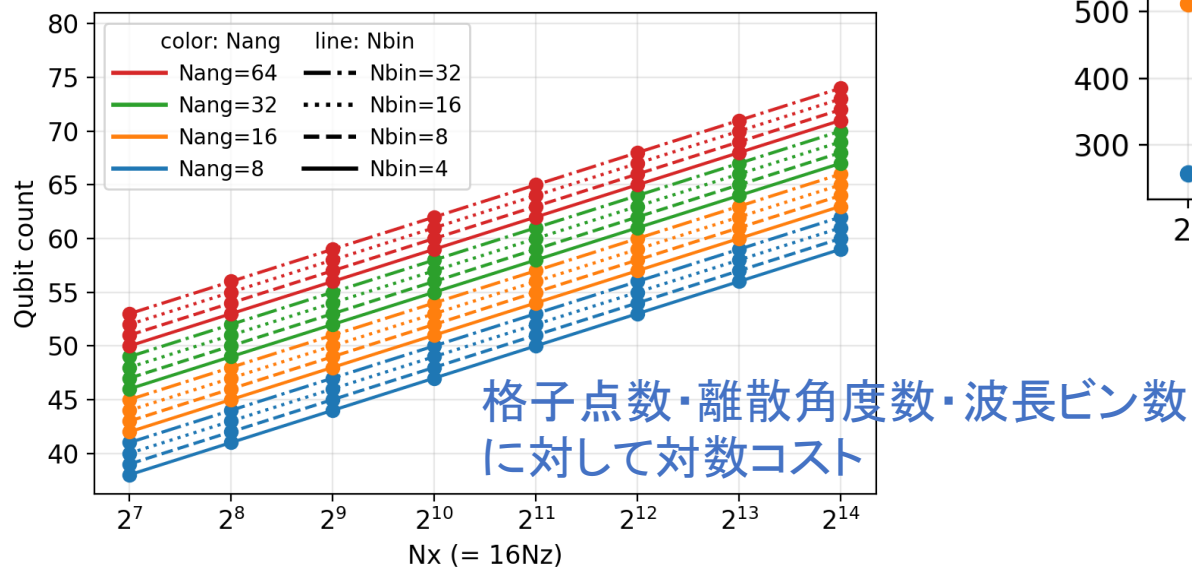
- 放射フラックス $F = \int I_\lambda \Omega d\Omega d\lambda$ として、加熱率 $\dot{Q} = -\nabla \cdot F$ を計算
- $N_{ang} = 16, \kappa = 3000, d = 30001$ として QSVT
- QURI SDK を通じて量子回路を構築し、Qulacs を通じて cuQuantum の状態ベクトルシミュレーションを、東大・筑波大のスパコン Miyabi-G を用いて実行

Ueno et al., in prep.

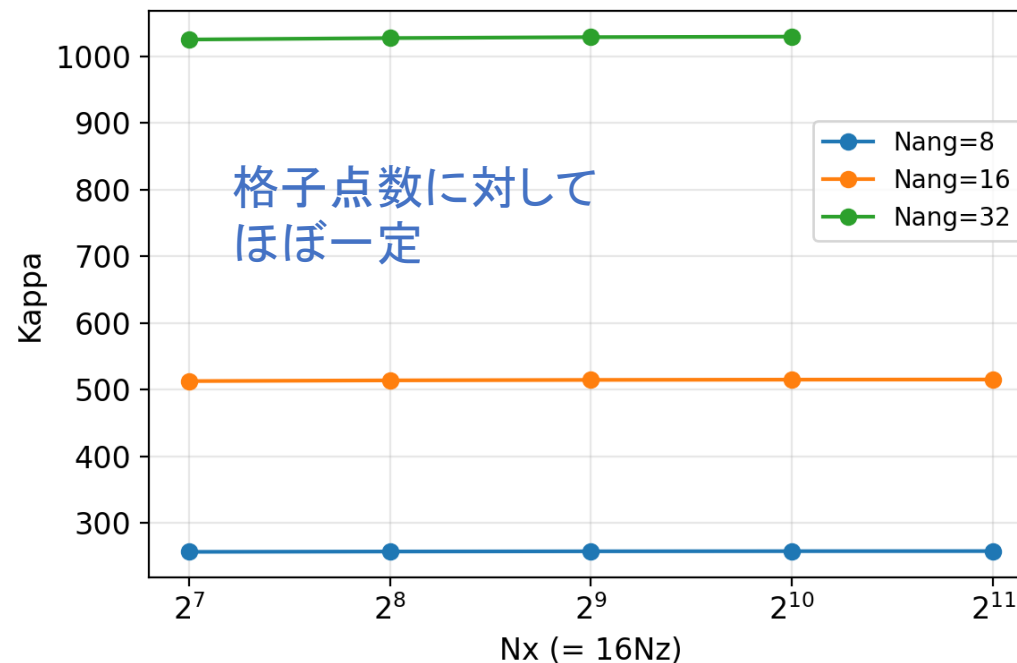
Toffoli
ゲート数



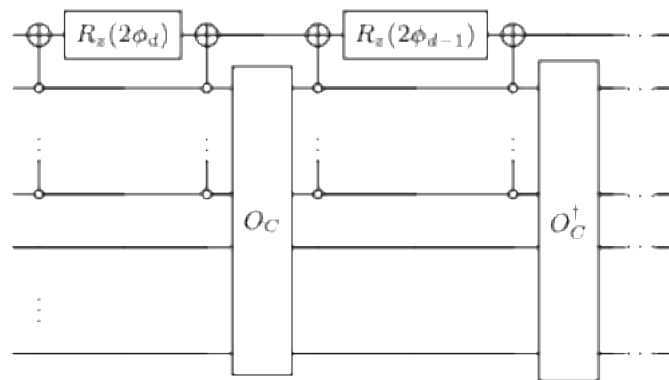
論理量子
ビット数



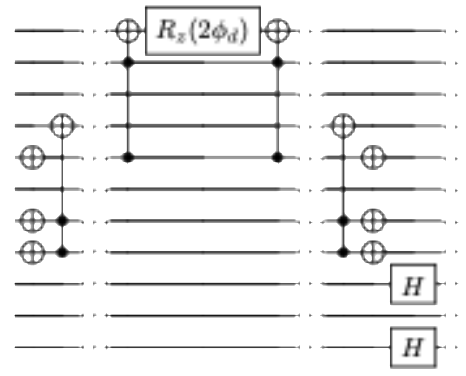
正規化された係数行列の最小特異値の逆数



Pythonベースで量子回路を構築



トランスパイル



状態ベクトル
シミュレーション

Numpy配列

```
array([1.19501018e-01+2.79299726e-12j, 2.03009525e-18-6.31721925e+04j, 1.10294538e-01-1.13018326e-13j, ..., 0.00000000e+00+0.00000000e+00j, 0.00000000e+00+0.00000000e+00j, 0.00000000e+00+0.00000000e+00j], shape=(16777216,))
```

```
class OCDef(UnitarySubDef):
    name = "OC"
    qubit_count = n_Ax + n_k + n_m + n_i + 1 + n_a

    def sub(self, builder: SubBuilder) -> None:
        qs = builder.qubits
        qs_Ax, qs_k, qs_m, qs_i, q_t, q_a = (
            qs[:n_Ax],
            qs[n_Ax : n_Ax + n_k],
            qs[n_Ax + n_k : n_Ax + n_k + n_m],
            qs[n_Ax + n_k + n_m : n_Ax + n_k + n_m + n_i],
            qs[n_Ax + n_k + n_m + n_i],
            qs[-n_a:],
        )
        for q in qs_i:
            builder.add_op(std.H, (q,))
        ...
```

量子ゲート数・量子ビット数

Counter({'TOFFOLI': 3464, 'CNOT': 321, 'X': 255, 'RY': 152, 'CZ': 47, 'H': 10})
Qubits: 38



気象・気候分野と量子計算

- ターゲットを何にするかが非常に重要
 - 雲粒の確率分布の計算: スケーリングは良いが、ベースのコストが非常に高い
 - 流体計算: 時間ステップ数に関して線形なコスト。非線形性が強く卓越するような問題についても工夫が必要
 - 放射伝達計算: 格子点数依存性が量子計算にとって好ましい可能性

将来展望

- 個別具体的な問題に対して、量子計算の活用法を検討していくことが重要
- 量子計算アルゴリズムの検証には大規模計算機が不可欠
- 古典計算・量子計算のハイブリッド活用についても、検討していく必要

謝辞: 本研究は、宇宙航空研究開発機構スーパーコンピュータシステム『JSS3』を利用しました。また、HPCI システム利用研究課題(課題番号: ra250010)を通じて、スーパーコンピュータ「富岳」の計算資源の提供を受け、実施しました。共同研究者である指導教員の三浦裕亮先生、株式会社QunaSysの李泰憲氏、菅野恵太氏、樋口颯人氏、中村幸輝氏に深く感謝申し上げます。