

# 量子で金利を予測する

## スワップション価格推定チャレンジ

苦米地凱大

青木幸一

井上裕貴

成田佳奈香

堀江佑太朗

高橋銀河



Q-Bitcoin

金融デリバティブの価格推定は **リスク管理** や **ポートフォリオ最適化** において重要

特にスワップション市場は **金利リスクヘッジ** の中核を担う

2年分の模型データからスワップション価格の推定 (IBM提供)

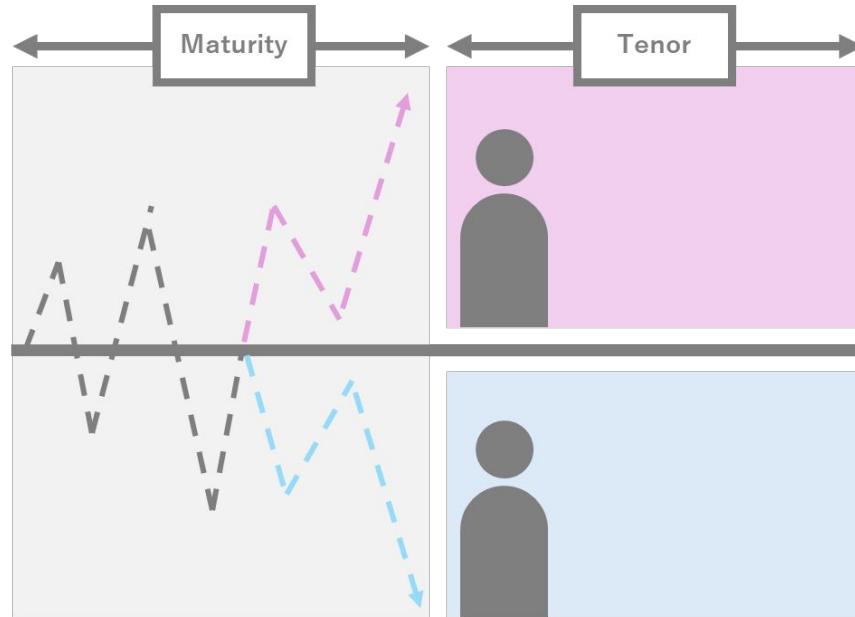
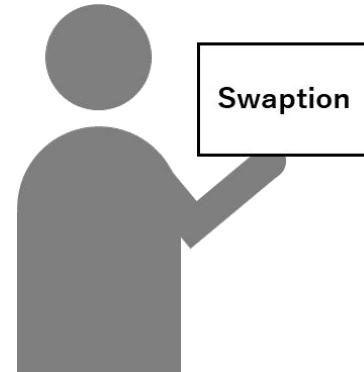
# 量子機械学習を用いて挑戦

## 単純な外挿に打ち勝つ

# 金利スワップションとは

将来のある日から一定の期間だけ固定金利と変動金利を**交換**することを  
swap

**選択**できる権利  
option



# 取り組む課題

データセット

Tenor(期間)/Maturity(満期)ごとのスワップション価格データ  
[2年分 x 224列]

## 1. 欠損値補完

データが5%ほど欠落した欠損部分を補完する

## 2. 未来予測

1日~2週間先の未来を予測する

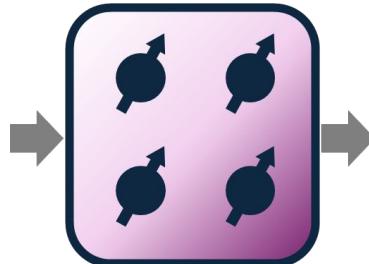
元データ	Tenor : 7; Maturity : 30
欠損	0.330997236
欠損	0.336568345
欠損	0.333799608
欠損	0.337547619
欠損	0.333830411
欠損	0.34497924
未来	0.342325492
未来	NA

# 量子機械学習モデル qubit数 = 6

未来

## 量子リザバー

固定された量子回路である量子リザバーによる量子状態の変化から情報を抽出



欠損

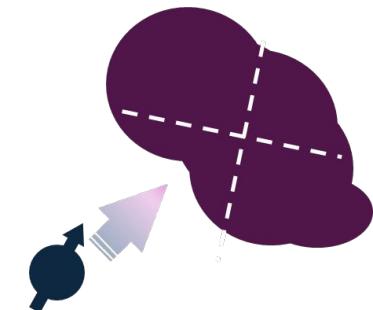
## VQA(変分量子アルゴリズム)

パラメータ付き量子回路を古典計算機を組み合わせて最適化



## 量子カーネル

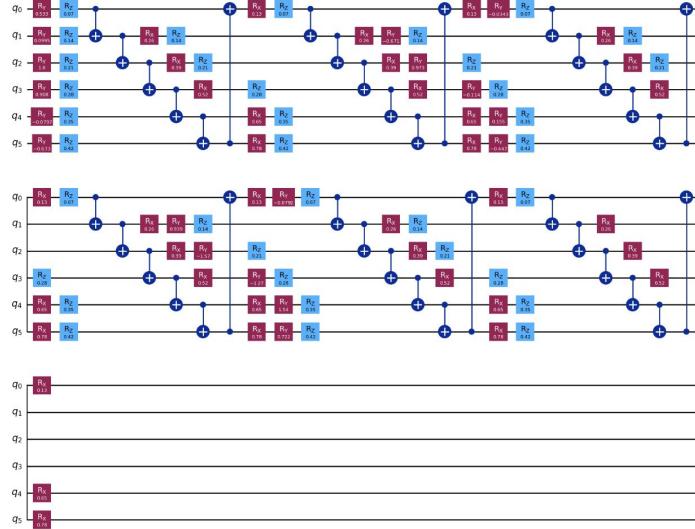
データを高次元ヒルベルト空間の量子状態にマップして線形分離



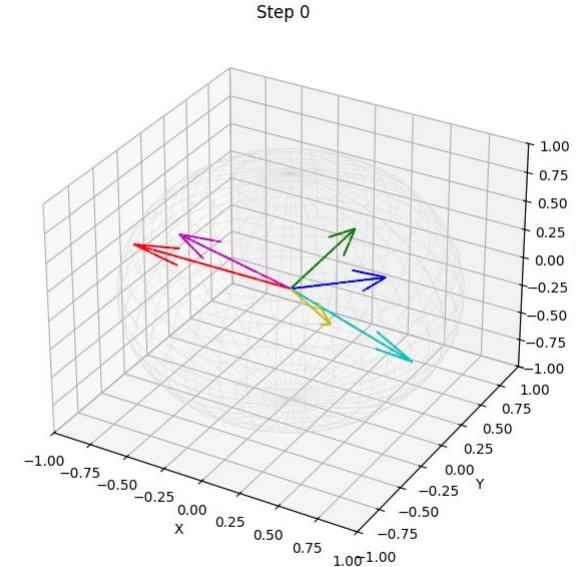
# 量子リザバー

入力で量子状態が変化し、少ない学習で時系列パターンを捉える。

量子回路は不变



各量子ビットのBlochベクトルの時間発展



[1] Maass, W.; et al. *Neural Comput.* 2002, 14 (11), 2531–2560.

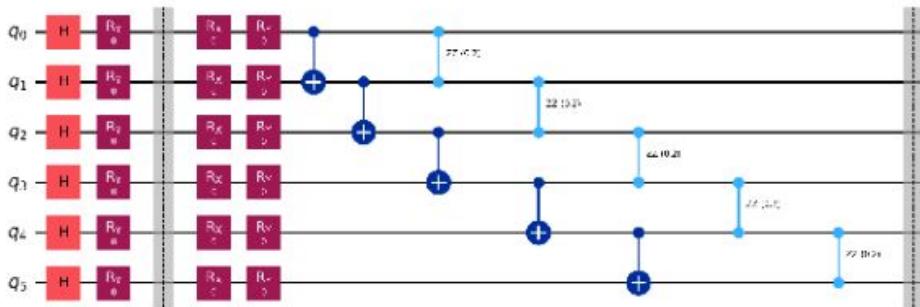
[2] Li, Q.; et al. *arXiv* 2025, arXiv:2505.13933.

# VQA (変分量子アルゴリズム )/量子カーネル法

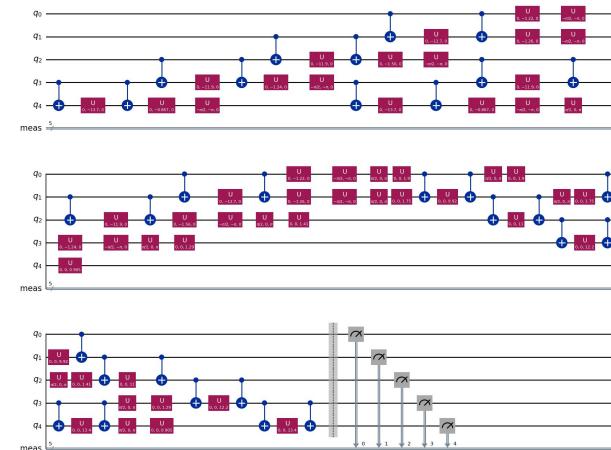
VQA: 量子回路も学習し、古典最適化で更新するハイブリッド学習法。

量子カーネル法 :量子状態に写像して類似度を計算する高次元特徴表現法[1]。

VQA



量子カーネル



[1] Scholten, T.; et al. arXiv 2023, arXiv:2307.04980.

# 行った工夫

## ★重要な金融指標

ボラティリティ平均	$RV_t = r_t^2$ $RV_t^{(w)} = \frac{1}{5} \sum_{i=0}^4 r_{t-i}^2$ $RV_t^{(m)} = \frac{1}{22} \sum_{i=0}^{21} r_{t-i}^2$ $\text{sign}(r_t) \cdot \Delta RV$
尖度	$RQ_t = c \sum_i r_{t-i}^4$ $\left( c = \frac{3}{M} \text{ などで正規化} \right)$
ジャンプ	$J_t = \max(RV_t - BV_t, 0)$
連續性	$BV_t = \frac{\pi}{2} \sum_i  r_{t-i}   r_{t-i-1} $

➡ 特徴量として活用

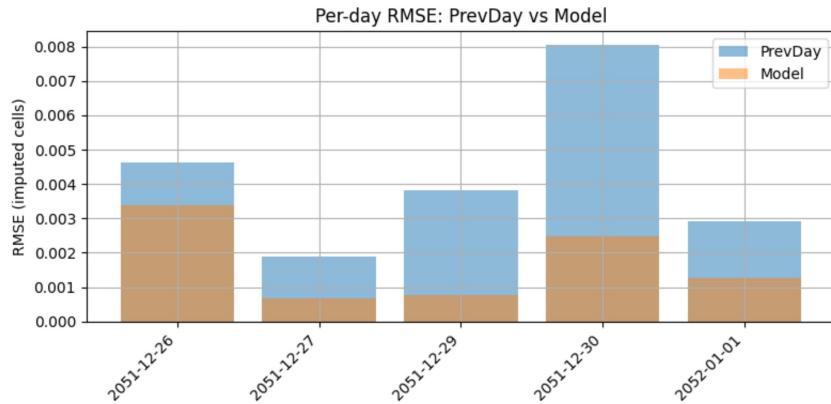
## ★その他のチューニング



# 欠損データ予測 : VQA

## Result

「穴埋め」は線形外挿が便利だが.....



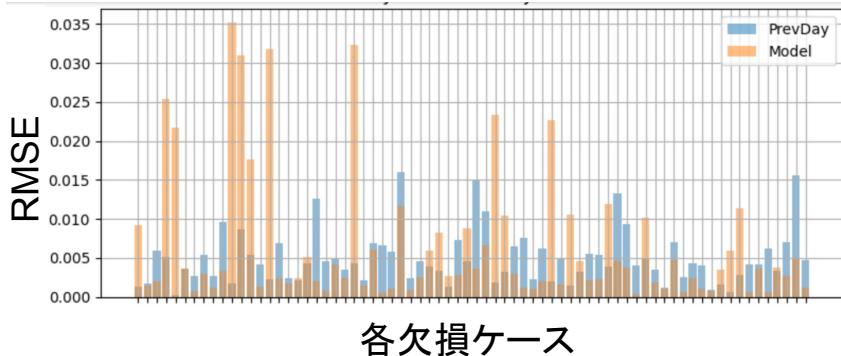
[Model] MSE median	1.67e-06
[PrevDay] MSE median	1.38e-05

線形外挿が便利な欠損予測で  
MSEを1桁減らすことに成功  
分散も6倍以上減少

100.0%の確率で線形外挿に勝利 (15/15)

# 欠損データ予測 : 量子リザバー法

## Result



[Model] MSE median

8.52e-06

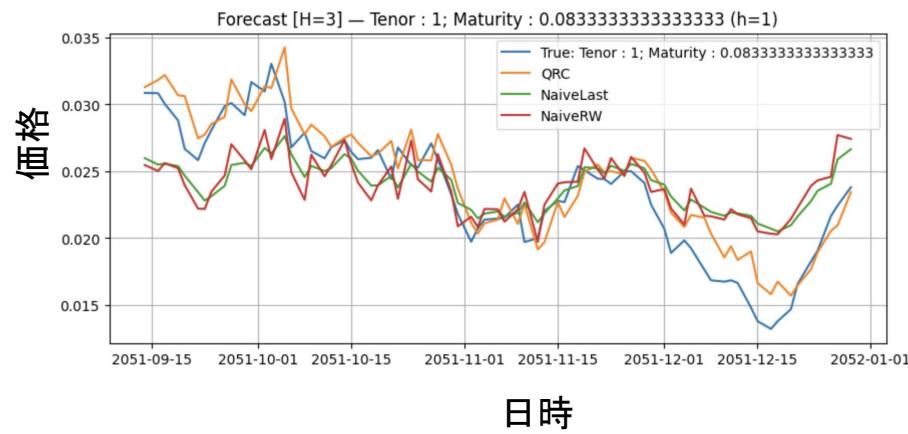
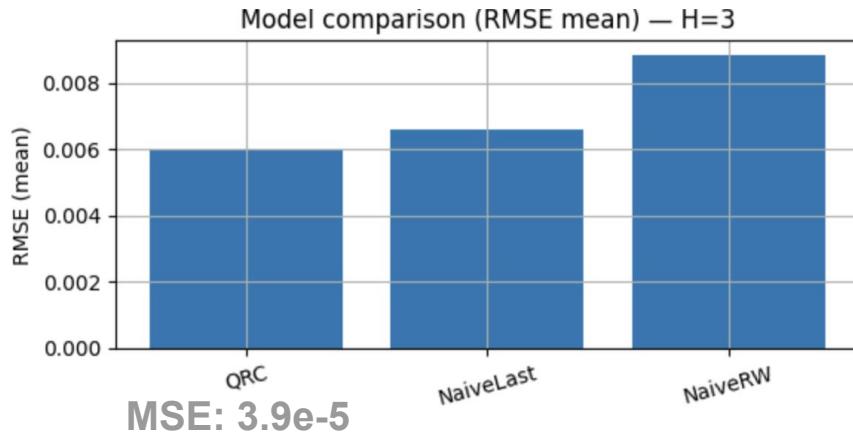
[PrevDay] MSE median

1.793e-05

63.9%の確率で線形外挿に勝利

# 未来予測：量子リザバー法

## Result

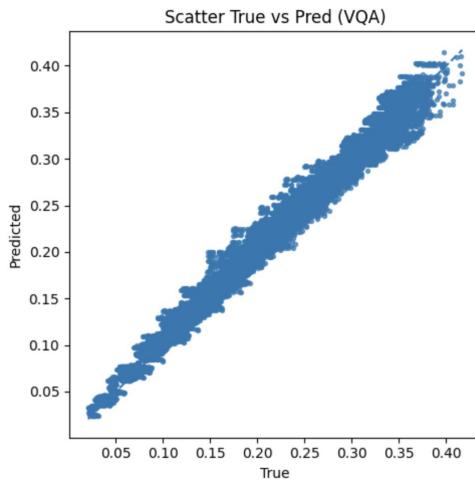
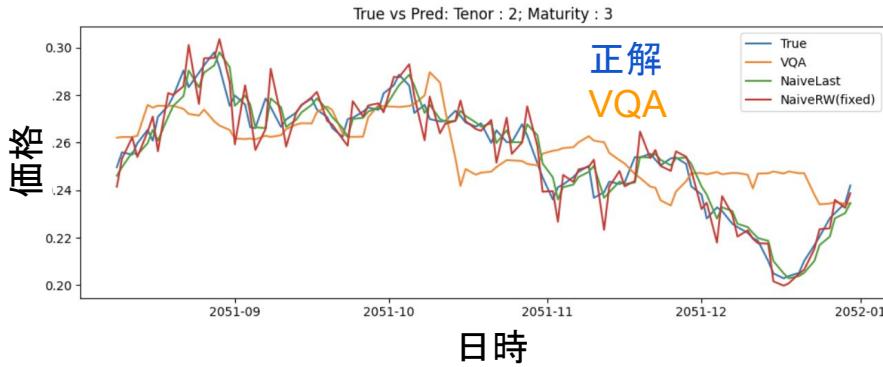


1日後/3日後/1週間後の予測を行い単純な古典アルゴリズム(外挿/無変化)と比較

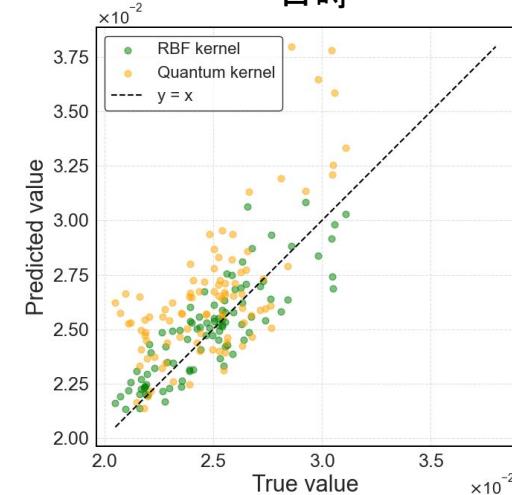
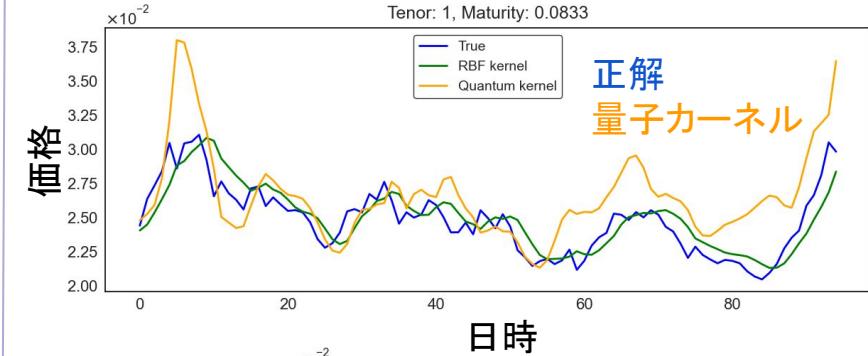
3日後の予測において単純な古典外挿に勝利

# 未来予測

## VQA

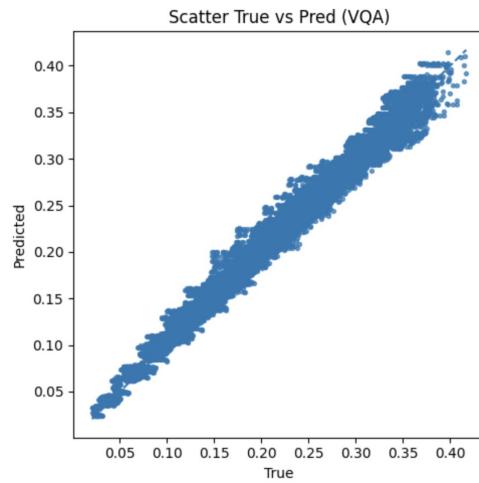
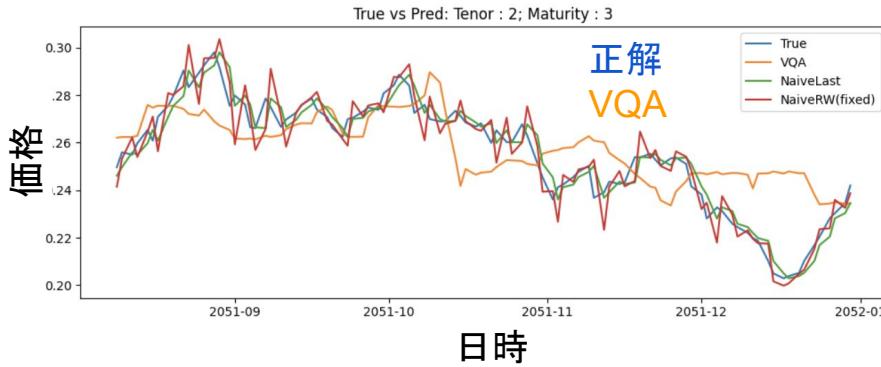


## 量子カーネル

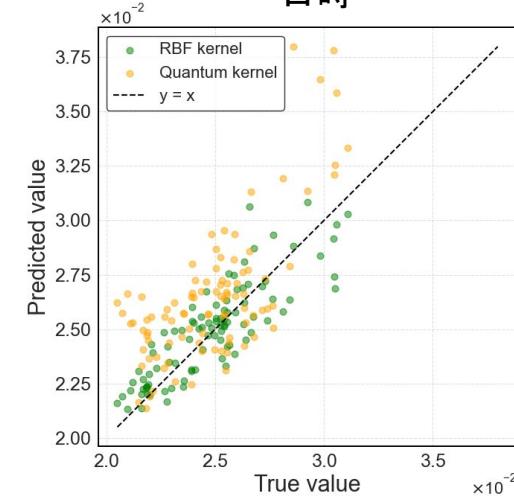
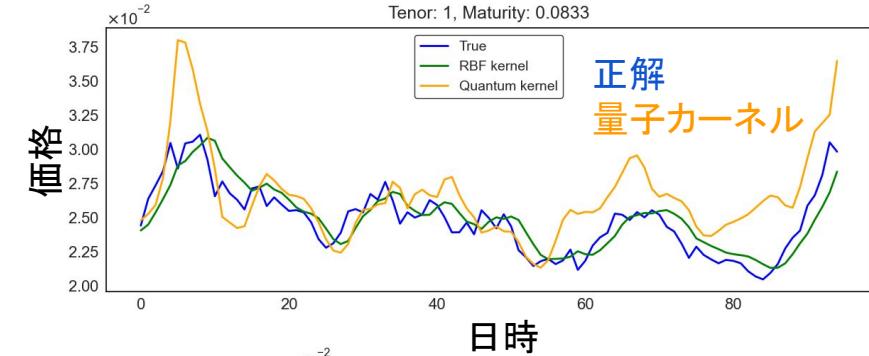


# 未来予測

## VQA

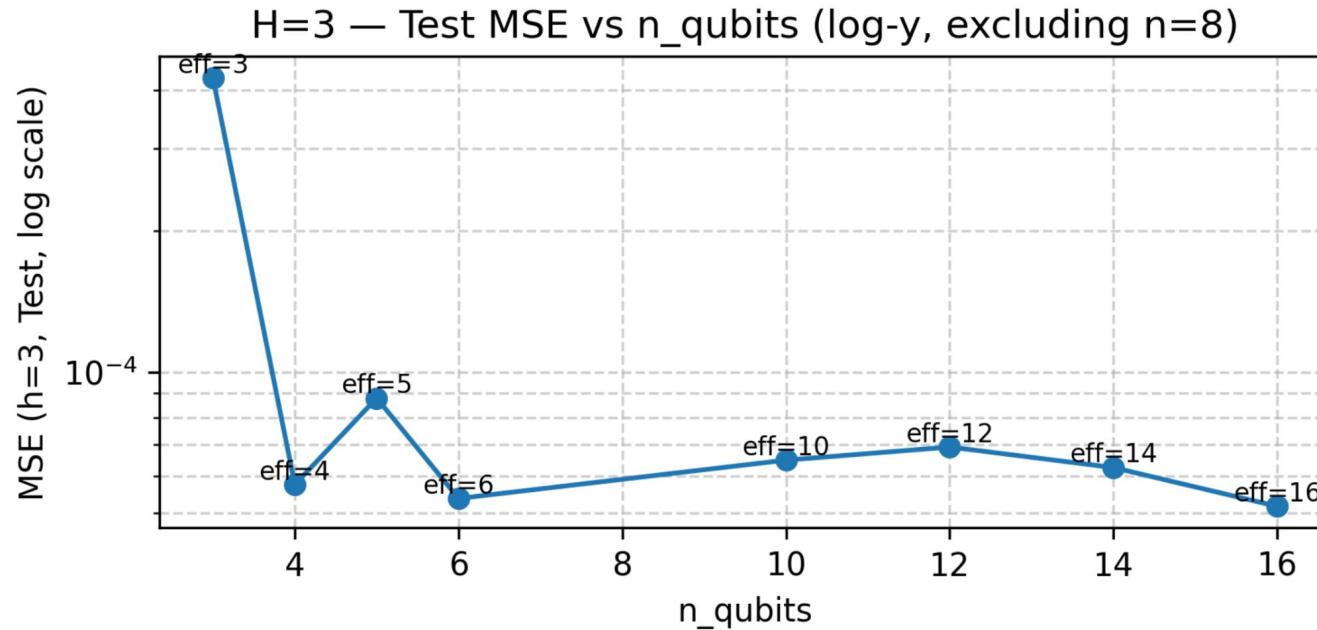


## 量子カーネル



# qubit数を増やしてみる

## Result

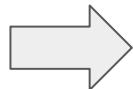


計算量・ノイズの課題はあるが Qubit数を増やすと精度向上の可能性

# 実機で試して感じたこと

1. 計算速度は速い
2. 実機特有のノイズ処理
3. ジョブ待機時間の問題

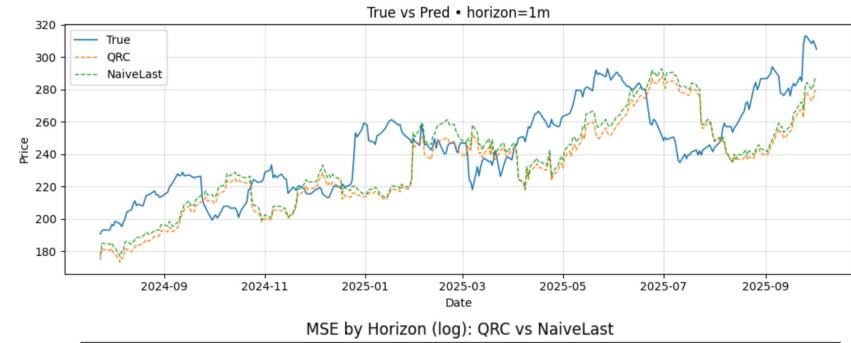
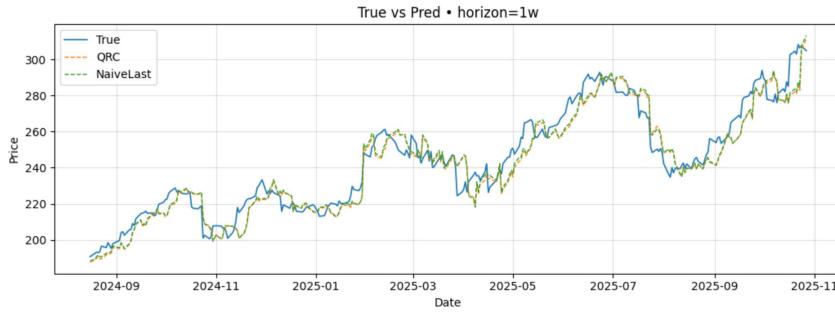
ID	Status	Instance	Mode
d479nmq10n3c7...	Pending	open-instance	Job
d479ajnbjc5s73...	Canceled	open-instance	Job
d478ge210n3c7...	Completed	open-instance	Job
d478cm0jge3c7...	Completed	open-instance	Job
d474p4l5mhvc7...	Completed	open-instance	Job
d474j88jge3c73...	Completed	open-instance	Job
d474gg0jge3c73...	Completed	open-instance	Job
d474d1l10n3c73...	Completed	open-instance	Job
d474c3ojge3c73...	Completed	open-instance	Job
d474b1vbjc5s73...	Completed	open-instance	Job



多くの研究でも依然としてシミュレーション上での評価が中心

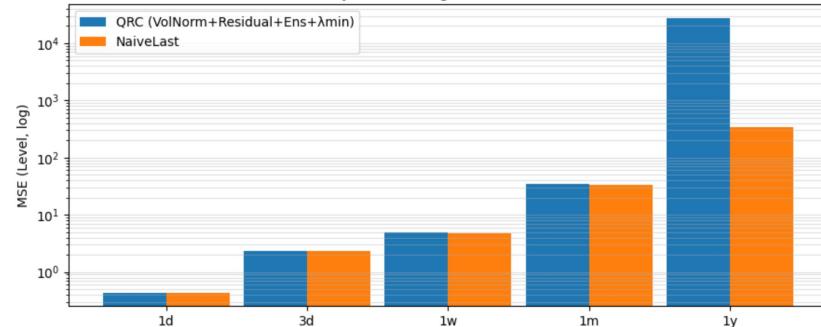
# IBMの株価予測

## Result



## MSEでの比較

- 1d~1mでの予測では 線形外挿と同程度
- 1yでの長期予測はまだ課題あり



現実の株価に対しても線形外挿に近い性能

# まとめ

未来

量子リザバー

時系列データに強い  
→未来予測で最適  
**3日後予測で線形外挿に勝利**

欠損

VQA(変分量子アルゴリズム)

パラメーター学習  
→欠損埋めに強い  
**線形外挿に完全勝利**

量子カーネル

計算時間が長い  
→まだ非現実的

**目標：量子機械学習で単純な線形外挿に打ち勝つ**

→金融ポートフォリオに量子の可能性を見出せた

# Appendix

# PQC(パラメトライズ量子回路)におけるEncoding

PQC(Parametrized Quantum Circuit)はVQAの代表的な手法の一つ

構造:

古典データ → Encoding層 → Ansatz(パラメータ  $\theta$ ) → 測定

二つのEncoding手法

Angle Encoding における状態準備

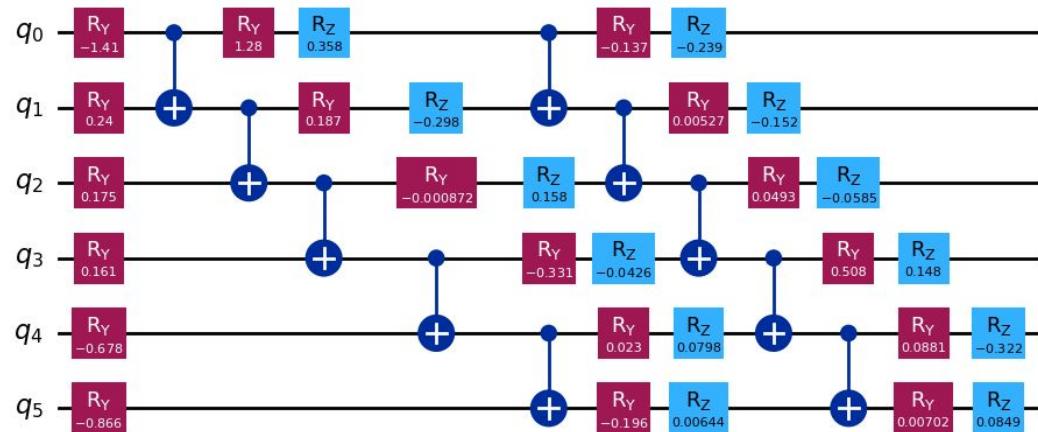
$$|\psi(x, \theta)\rangle = U_{\text{ansatz}}(\theta) \left( \bigotimes_{i=1}^n R_y(x_i) |0\rangle_i \right)$$

Amplitude Encoding における状態準備

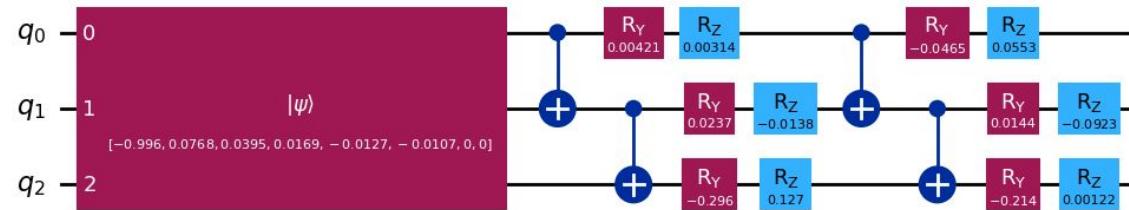
$$|\psi(x, \theta)\rangle = U_{\text{ansatz}}(\theta) \sum_{i=0}^{2^n - 1} x_i |i\rangle$$

# Angle Encoding & Amplitude Encoding 例

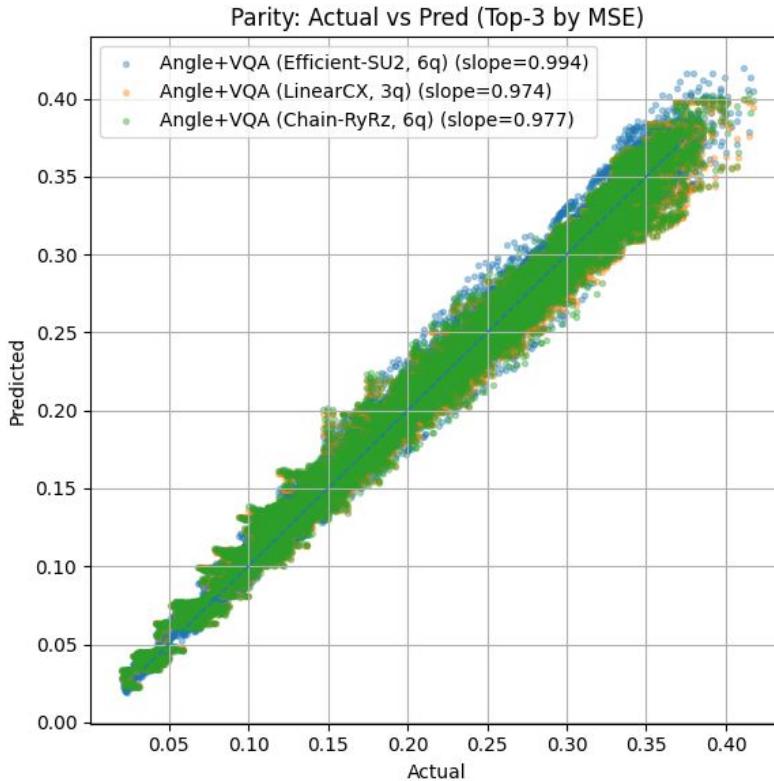
Angle Encoding の量子回路例



Amplitude Encoding の量子回路例



# 異なるqubit数と違うAnsatz方式におけるAngle Encoding



## 3qubit vs 6qubit

- Efficient-SU2

SU(2)ブロックをCzでつなぐ

- Chain-RyRz (一般的)

Ry符号化 & ( R\_z + CNOT )

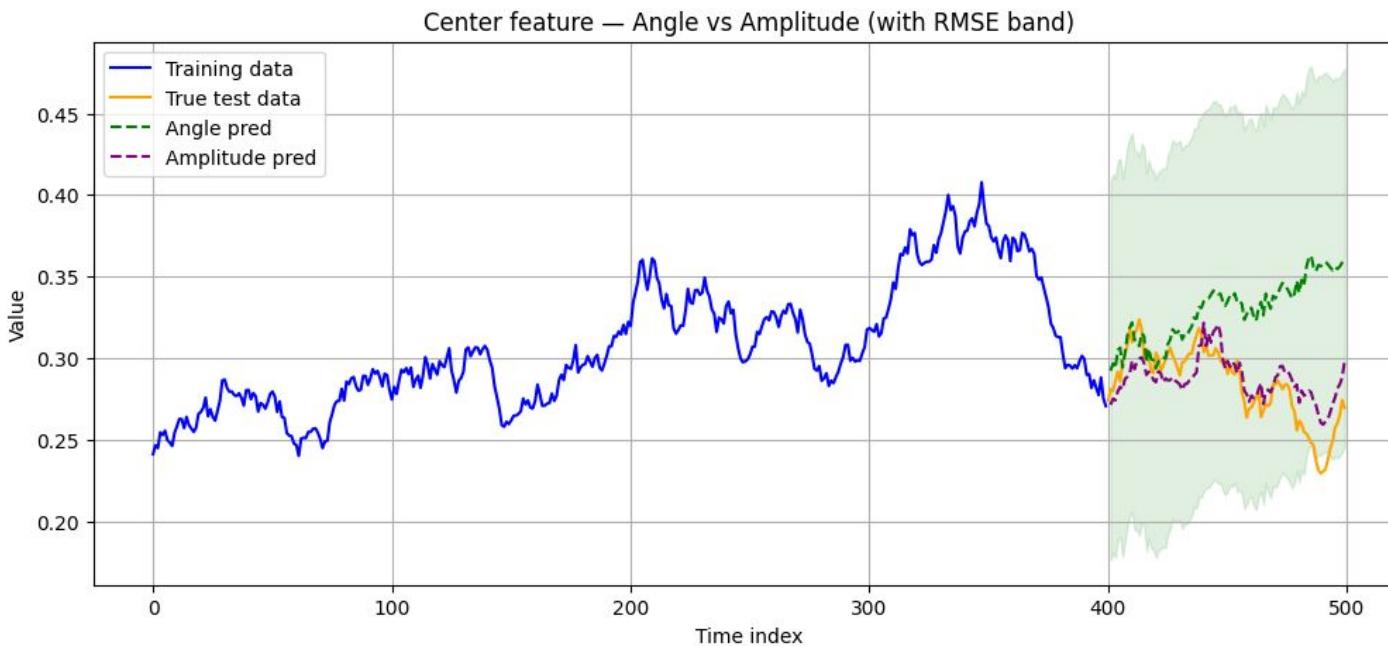
- LinearCX

Rx-Rz + CNOT

# 異なるqubit数とモデルのパラメータ比較 (参考)

	Model	MSE	RMSE	MAE	Bias	Corr	R2	QLIKE
0	Angle+VQA (Chain-RyRz, 3q)	0.000111	0.010518	0.007850	0.000470	0.994013	0.987860	0.002256
1	Angle+VQA (Efficient-SU2, 3q)	0.000113	0.010629	0.008022	-0.000768	0.993815	0.987601	0.001878
2	Angle+VQA (LinearCX, 6q)	0.000114	0.010684	0.007925	0.000377	0.993831	0.987473	0.002318
3	Angle+VQA (LinearCX, 3q)	0.000115	0.010701	0.007938	0.000354	0.993809	0.987434	0.002326
4	Angle+VQA (Chain-RyRz, 6q)	0.000117	0.010799	0.008046	-0.000534	0.993654	0.987202	0.002291
5	Angle+VQA (Efficient-SU2, 6q)	0.000121	0.011020	0.008289	-0.001126	0.993434	0.986675	0.001804
6	QRC (QR2, 3q)	0.000240	0.015481	0.010131	-0.007110	0.989632	0.973701	0.004123
7	Amplitude+VQA (3q)	0.000288	0.016962	0.013369	-0.012535	0.993733	0.968426	0.004635
8	QRC (QR2, 6q)	0.000465	0.021553	0.015602	-0.011589	0.982331	0.949022	0.006429

# Angle Encoding vs Amplitude Encoding

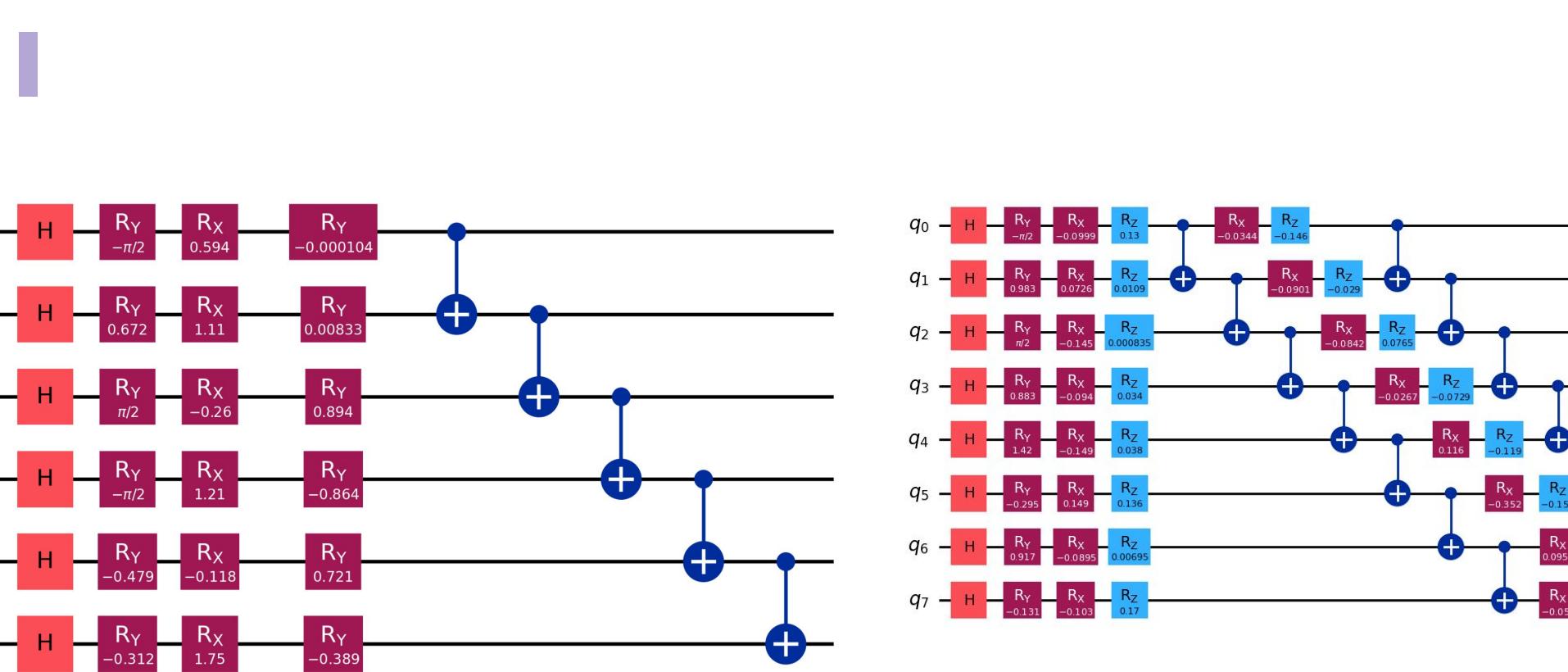


VQAにおけるスワップシ  
測

Angle Encoding (6qu  
Amplitude Encoding(

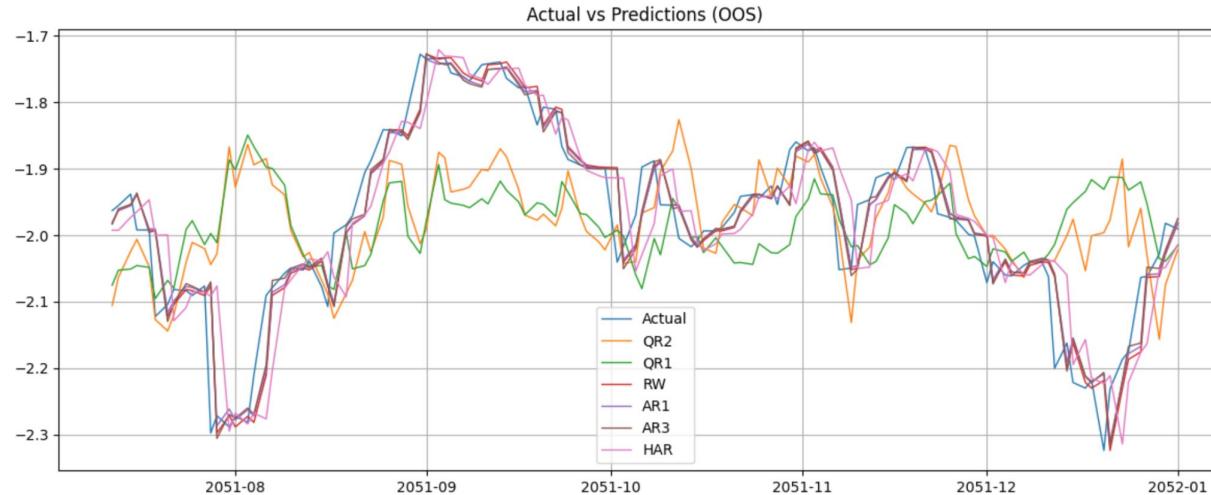
較を行った。

表現力が高い Amplitud  
の方が高い精度を示した  
Amplitude Encodingの  
実装は困難となっ



# 横磁場イジング模型を量子回路に組み込んだ例

あまりうまくはいっていない, 参考: <https://arxiv.org/pdf/2505.13933>



== OOS 指標 (MSE/QLIKE ほか) ==

Model	MSE	RMSE	MAE	Bias	Corr	R2	QLIKE
AR3	0.002292	0.047879	0.030240	-0.001036	0.939692	0.882150	-2.955098
AR1	0.002292	0.047880	0.030035	-0.001006	0.939602	0.882147	-2.955099
RW	0.002343	0.048403	0.030698	-0.000073	0.939779	0.879560	-2.954970
HAR	0.004346	0.065924	0.048350	0.000263	0.885850	0.776583	-2.950925
QR2	0.018304	0.135292	0.102489	-0.001294	0.311199	0.059027	-2.925208
QR1	0.022469	0.149897	0.113956	0.007692	-0.010235	-0.155093	-2.917396

== DM (QR2 vs AR3) : stat=3.200, p=1.372e-03

== MCS(MSE) survivors == ['QR2', 'QR1', 'RW', 'AR1', 'AR3', 'HAR']

# 実機の課題

## 1. 量子ビット数の制約

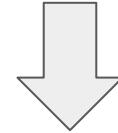
現行の量子プロセッサでは、利用可能な量子ビット数が数十にとどまり、入力次元の削減やエンコーディングの工夫が必要

## 2. ノイズによる出力の不安定性

(実機の結果を踏まえて定量的に評価する予定)

## 3. ジョブ待機時間とアクセス制限

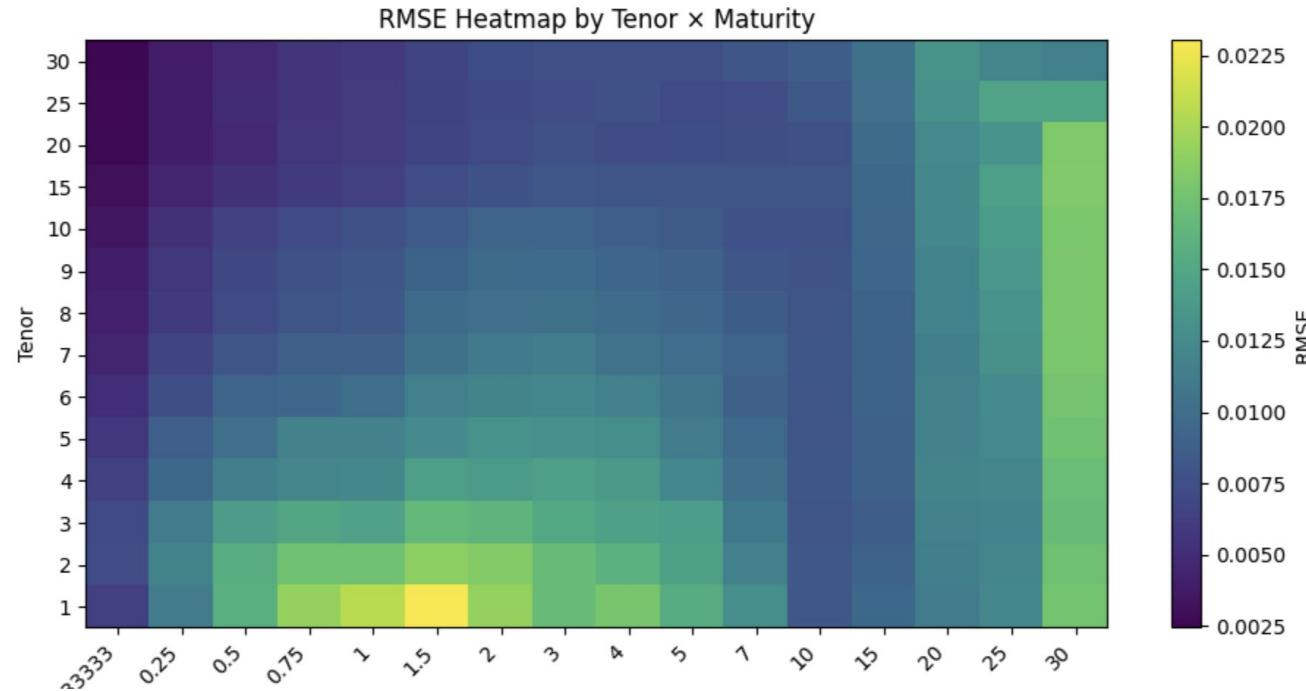
基本的にはクラウド経由で共有されるため、同時に利用できるユーザ数が限られており、自由に計算できない



多くの研究では依然としてシミュレーション上での評価が中心

# RMSEのTenorとMaturity依存性

なめらかに依存



# スワップションとは

将来のある日から一定の期間だけ固定金利と変動金利を**交換**することを**選択**できる権利  
*swap*  
*option*

## 取り組む課題

スワップション価格データに対し

- **欠損値補完**

5%のデータ欠損を補完

- **未来予測**

一定期間先の価格を推定

1日~2週間

