

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

大凱地米苔

一幸木青

貴裕上井

香奈佳田

朗太堀江

河銀橋高



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

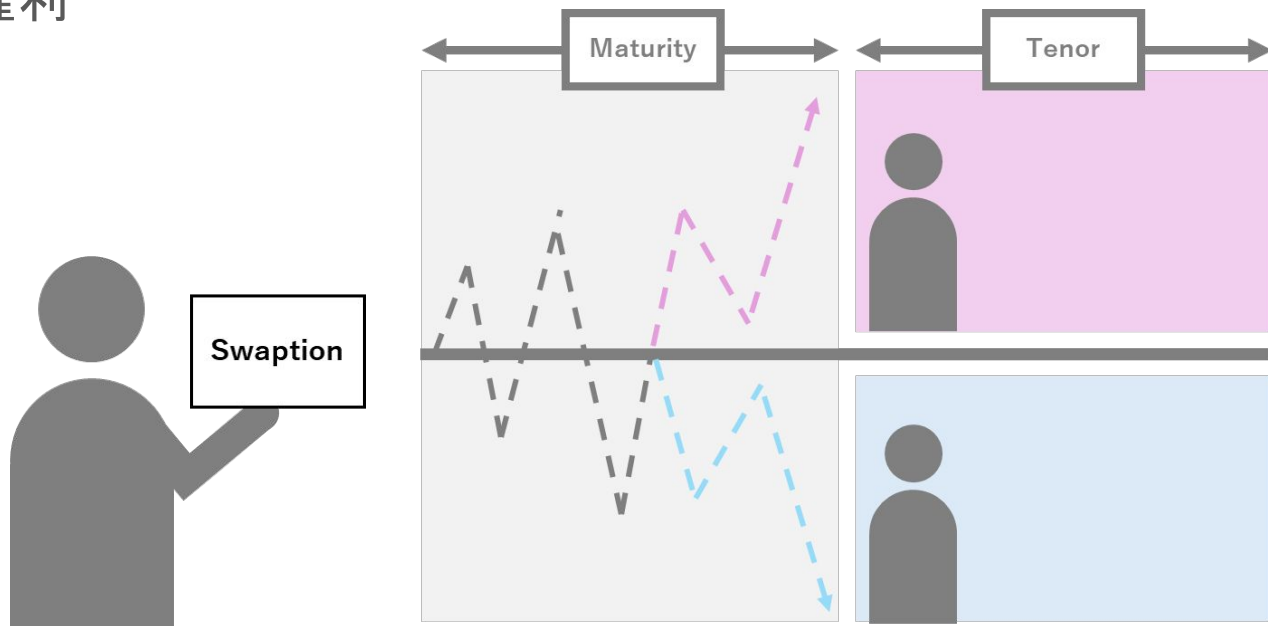
2年分のモデルデータからスワップション価格の推定 (IBM提供)

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

欠損

未来

Tenor : 7; Maturity : 30

0.330997236

0.336568345

0.333799608

0.337547619

0.333830411

0.34497924

0.342325492

NA

NA

NA

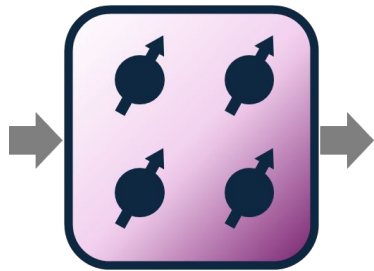
NA

量子機械学習モデル qubit数 = 6

未来

量子リザーバー

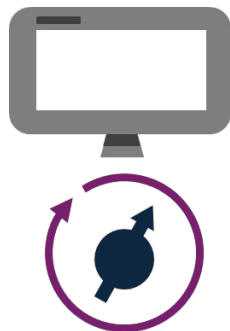
固定された量子回路である量子リザーバーによる量子状態の変化から情報を抽出



欠損

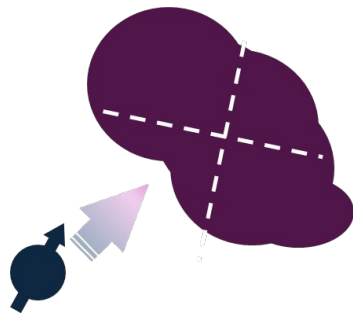
VQA(変分量子アルゴリズム)

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

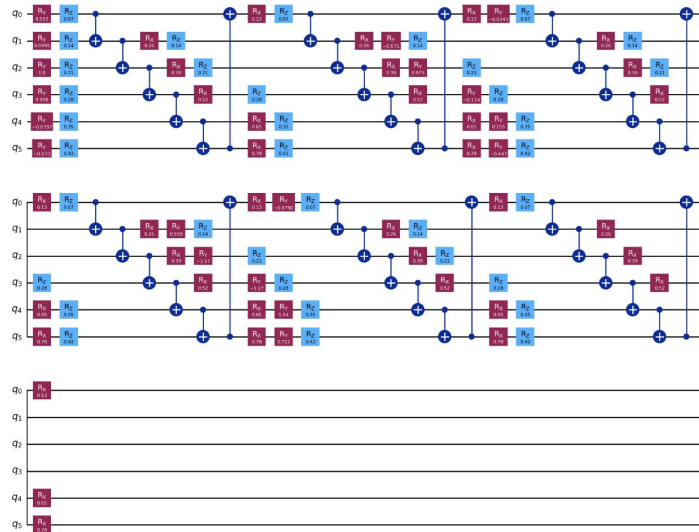
データを高次元ヒルベルト空間の量子状態にマップして線形分離



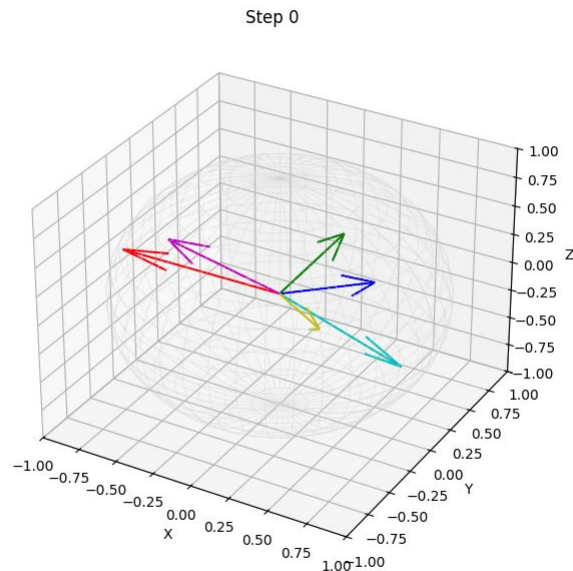
量子リザーバー

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。

量子回路は不変



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.

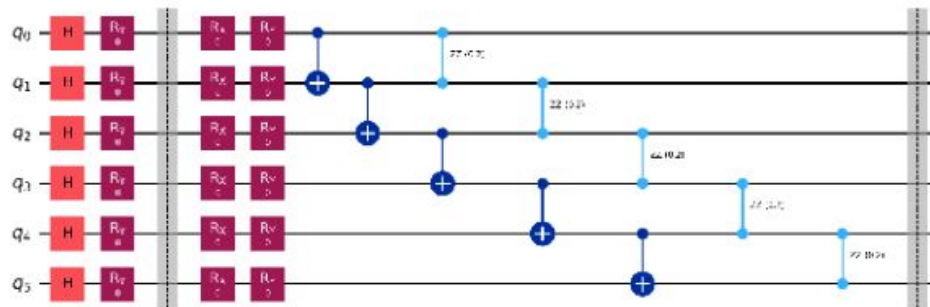
[2] Li, Q.; et al. *arXiv* **2025**, arXiv:2505.13933.

VQA (変分量子アルゴリズム) / 量子カーネル法

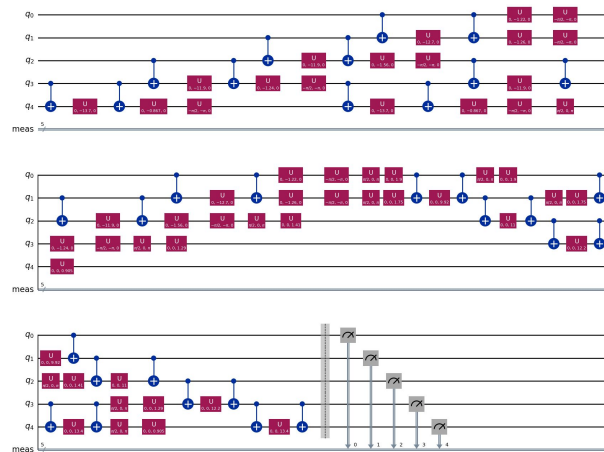
VQA: 量子回路も学習し、古典最適化で更新するハイブリッド学習法。

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



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	$J_t = \max(RV_t - BV_t, 0)$
連続性	$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

Qubit数

回路パラメタ

正規化

重みづけ

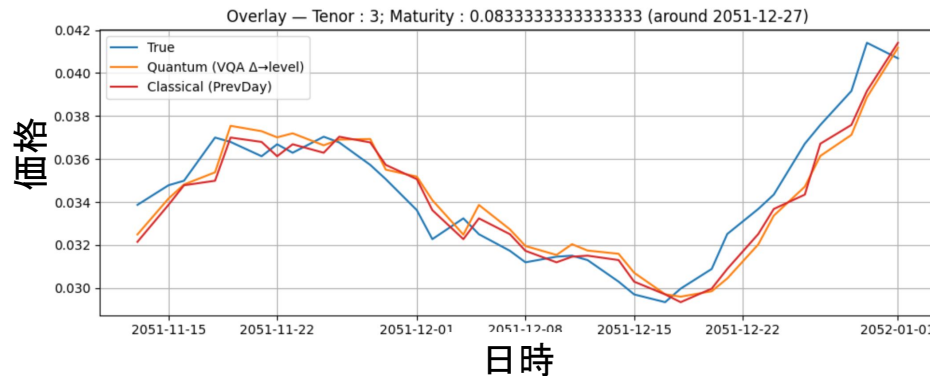
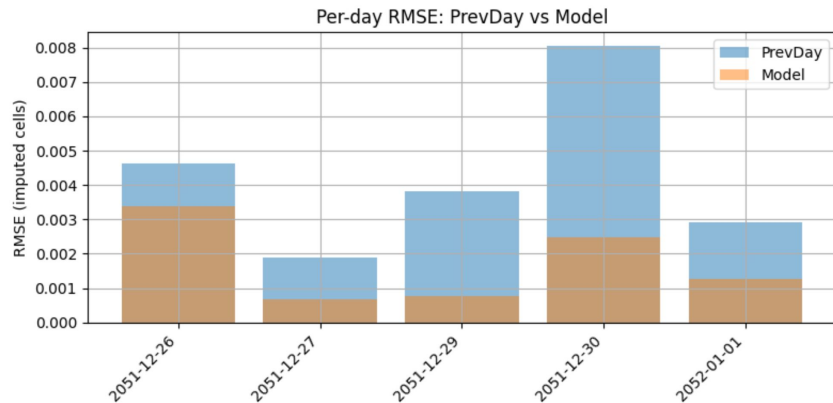
差分の利用

etc.

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

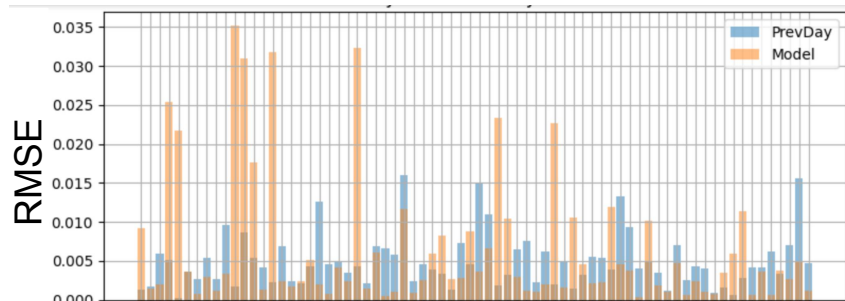
1.38e-05

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

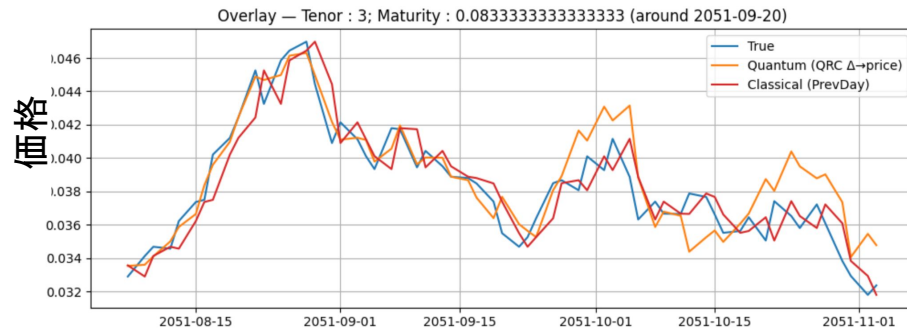
100.0%の確率で線形外挿に勝利 (15/15)

欠損データ予測：量子リザーバー法

Result



各欠損ケース



日時

[Model] MSE median

8.52e-06

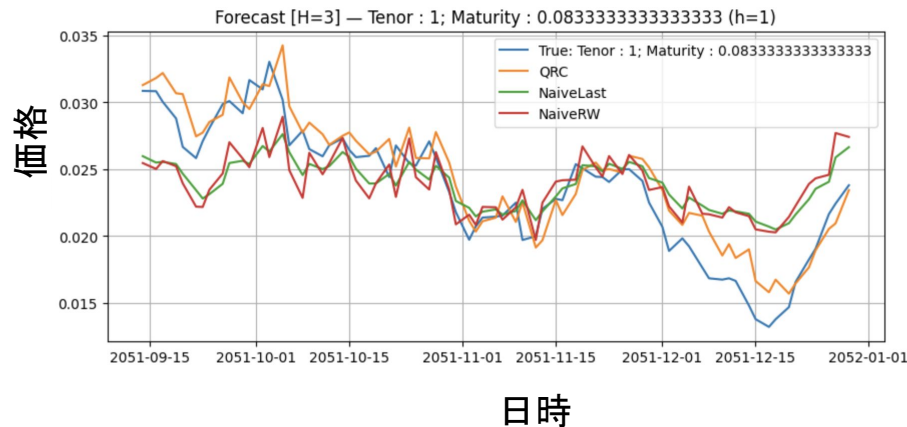
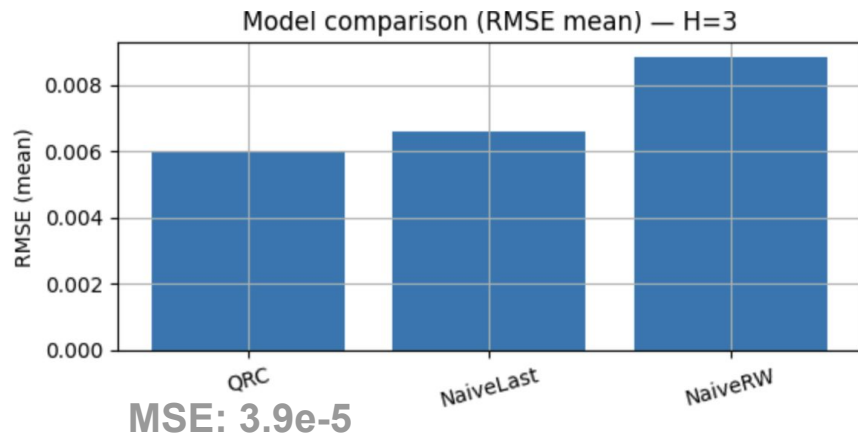
[PrevDay] MSE median

1.793e-05

63.9%の確率で線形外挿に勝利

未来予測：量子リザーバー法

Result

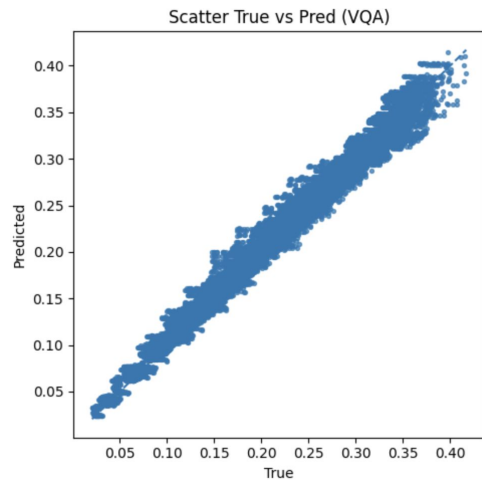
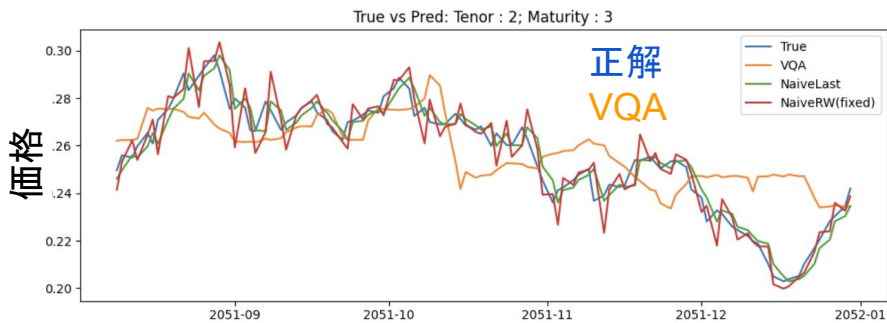


1日後/3日後/1週間後の予測を行い単純な古典アルゴリズム (外挿/無変化)と比較

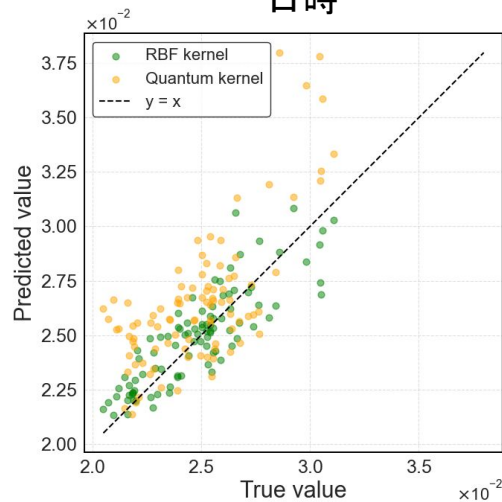
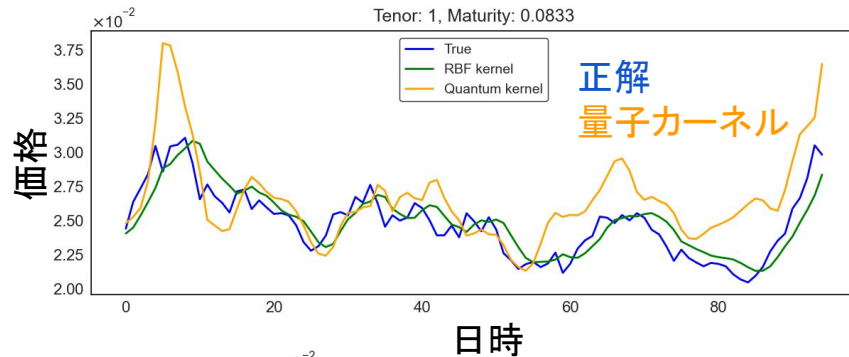
3日後の予測において単純な古典外挿に勝利

未来予測

VQA

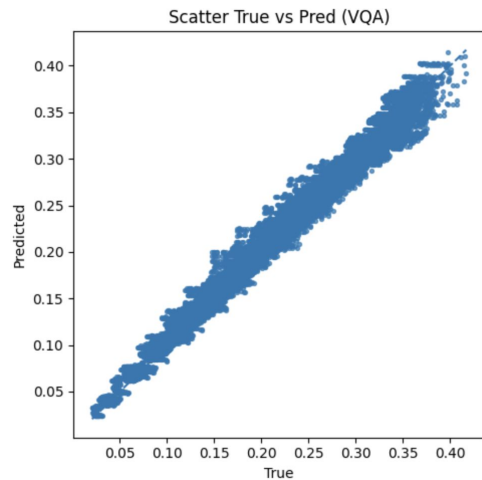
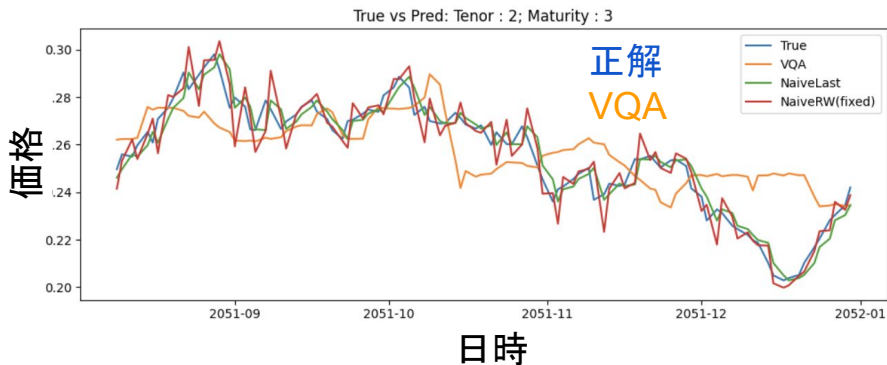


量子カーネル

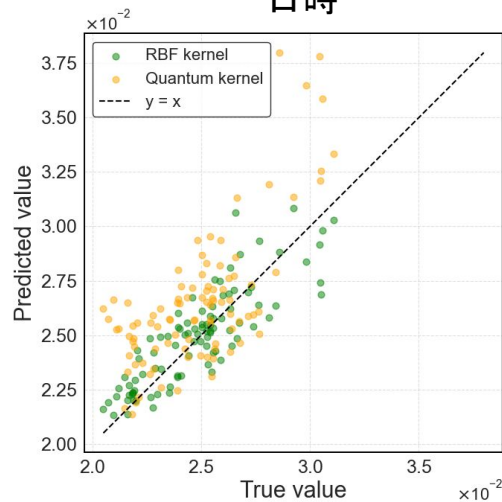
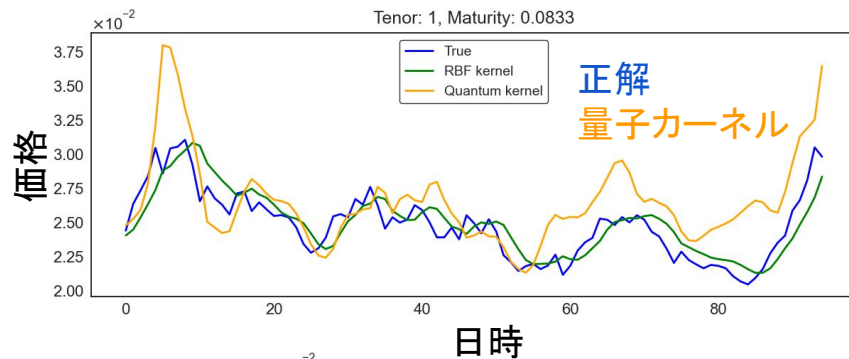


未来予測

VQA

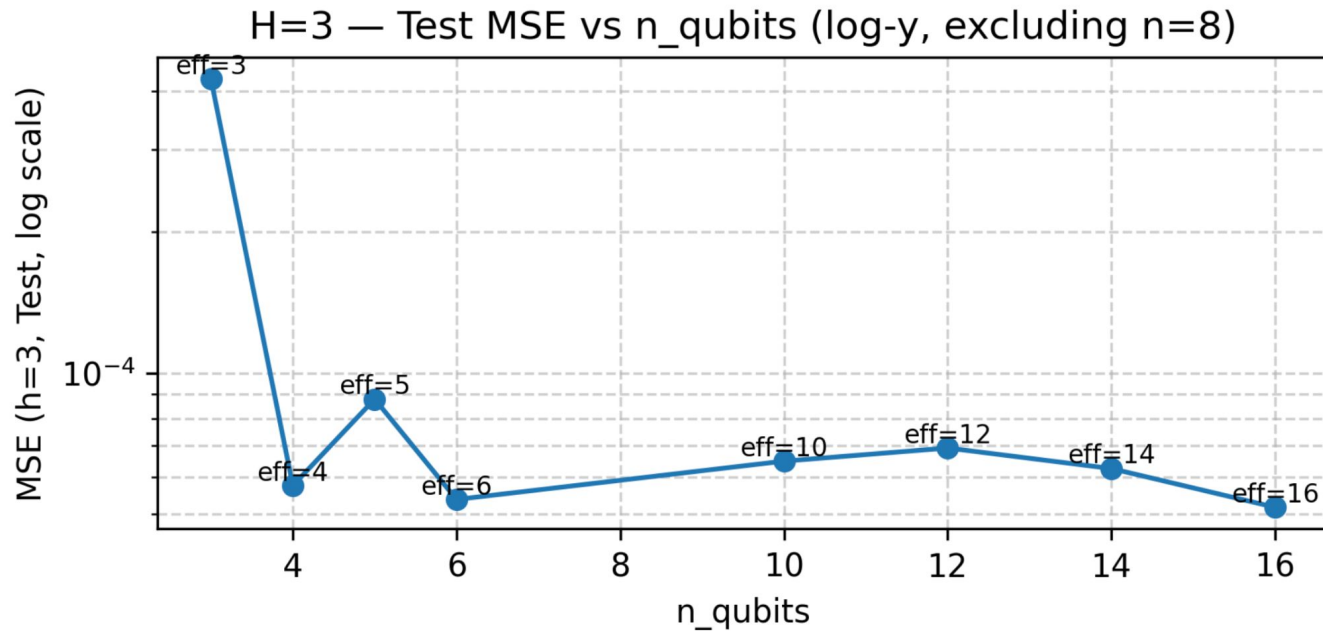


量子カーネル



qubit数を増やしてみる

Result

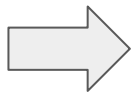


計算量・ノイズの課題はあるが Qubit数を増やすと精度向上の可能性

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

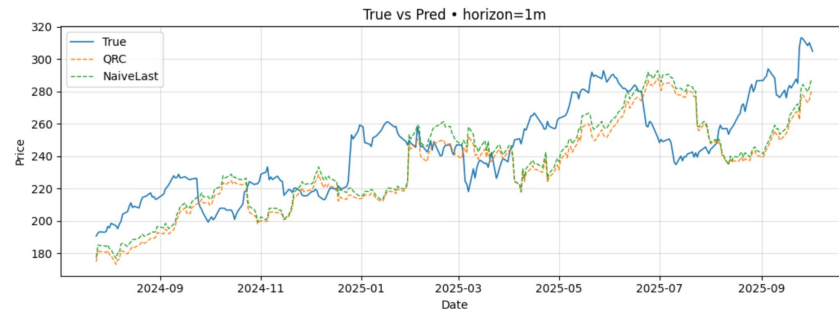
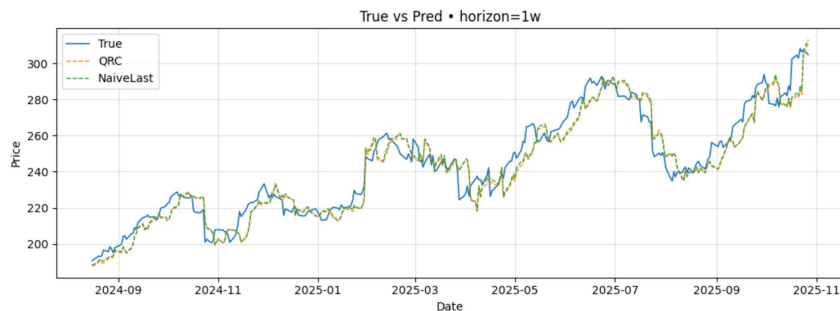
<input type="checkbox"/>	ID	Status	Instance	Mode
<input type="checkbox"/>	d479nmq10n3c7...	○ Pending	open-instance	Job
<input type="checkbox"/>	d479ajnbjc5s73...	⊗ Canceled	open-instance	Job
<input type="checkbox"/>	d478ge210n3c7...	✔ Completed	open-instance	Job
<input type="checkbox"/>	d478cm0jge3c7...	✔ Completed	open-instance	Job
<input type="checkbox"/>	d474p4l5mhvc7...	✔ Completed	open-instance	Job
<input type="checkbox"/>	d474j88jge3c73...	✔ Completed	open-instance	Job
<input type="checkbox"/>	d474gg0jge3c73...	✔ Completed	open-instance	Job
<input type="checkbox"/>	d474d1i10n3c73...	✔ Completed	open-instance	Job
<input type="checkbox"/>	d474c3ojge3c73...	✔ Completed	open-instance	Job
<input type="checkbox"/>	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

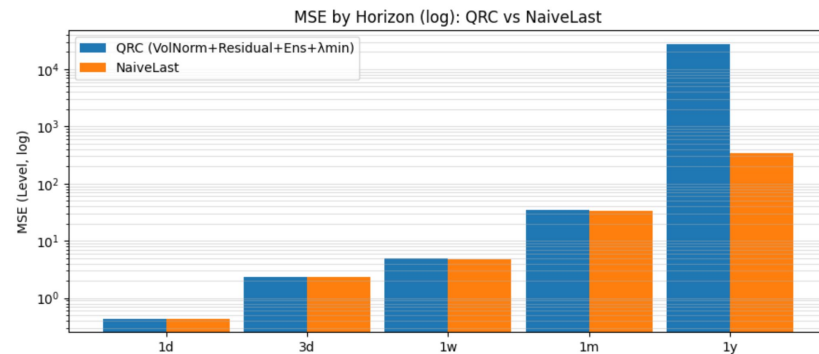
IBMの株価予測

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

量子リザーバー

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 θ) → 測定

二つの Encoding 手法

Angle Encoding における状態準備

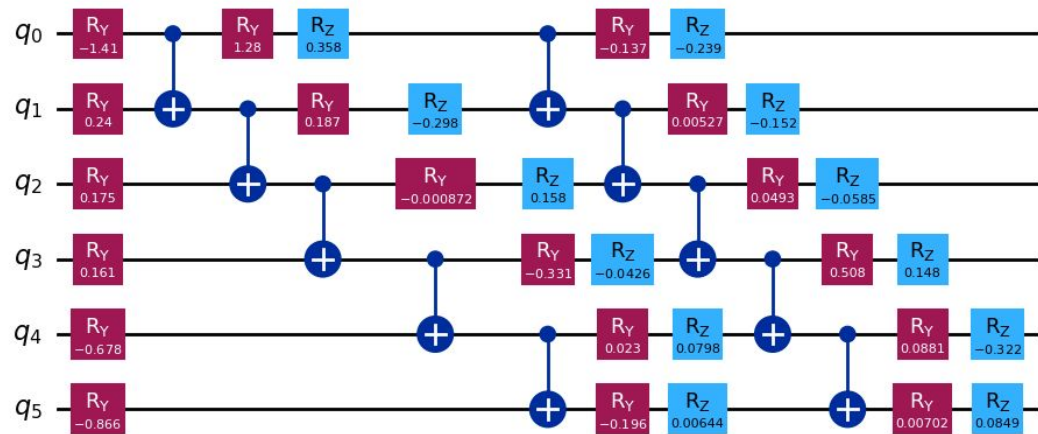
$$|\psi(x, \theta)\rangle = U_{\text{ansatz}}(\theta) \left(\bigotimes_{i=1}^n R_y(x_i) |0\rangle_i \right)$$

Amplitude Encoding における状態準備

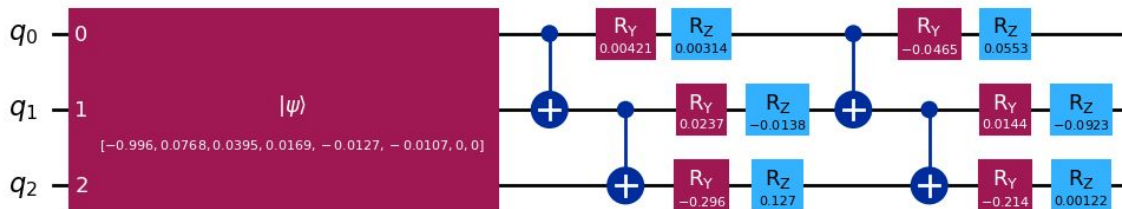
$$|\psi(x, \theta)\rangle = U_{\text{ansatz}}(\theta) \sum_{i=0}^{2^n-1} x_i |i\rangle$$

Angle Encoding & Amplitude Encoding 例

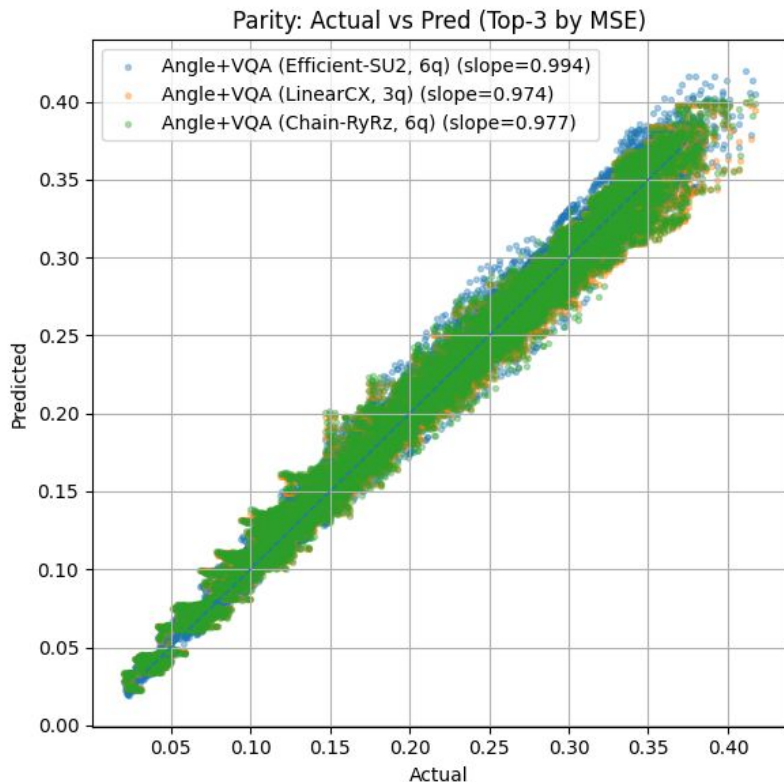
Angle Encoding の量子回路例



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



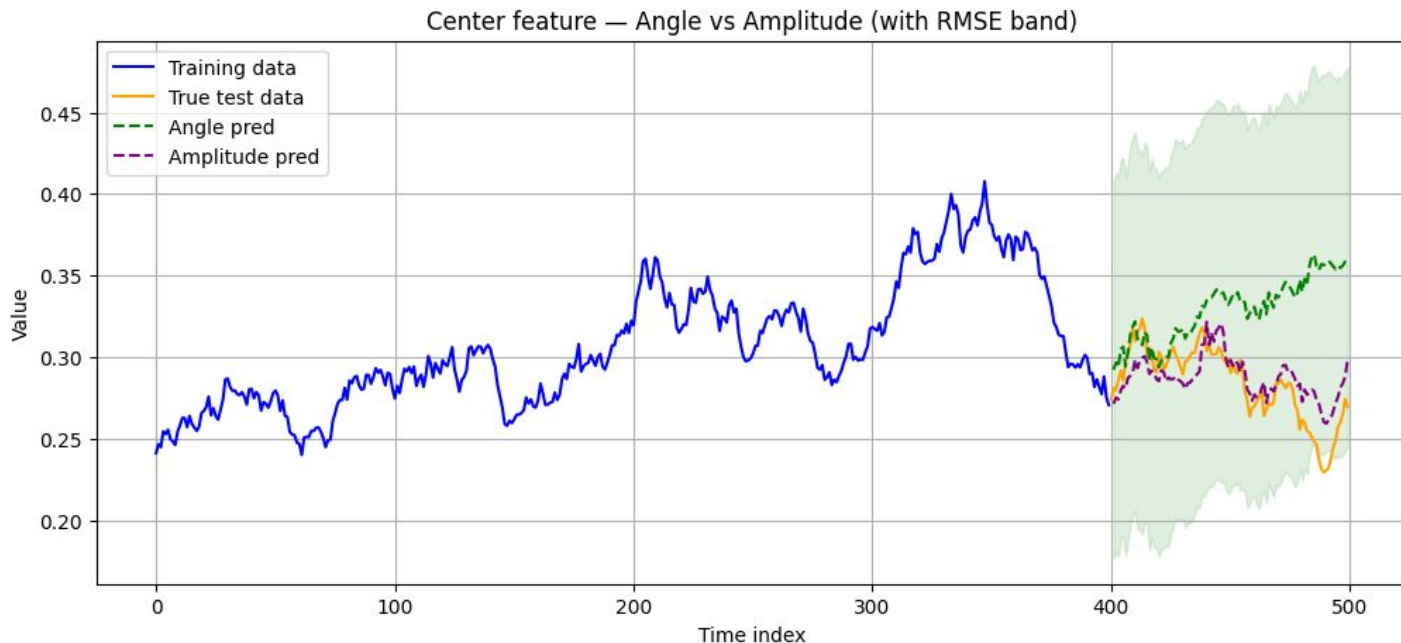
3qubit vs 6qubit

- 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

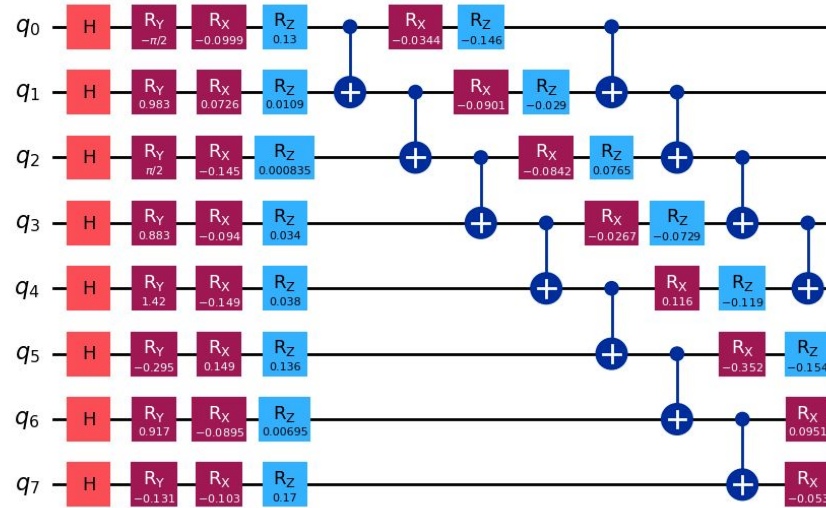
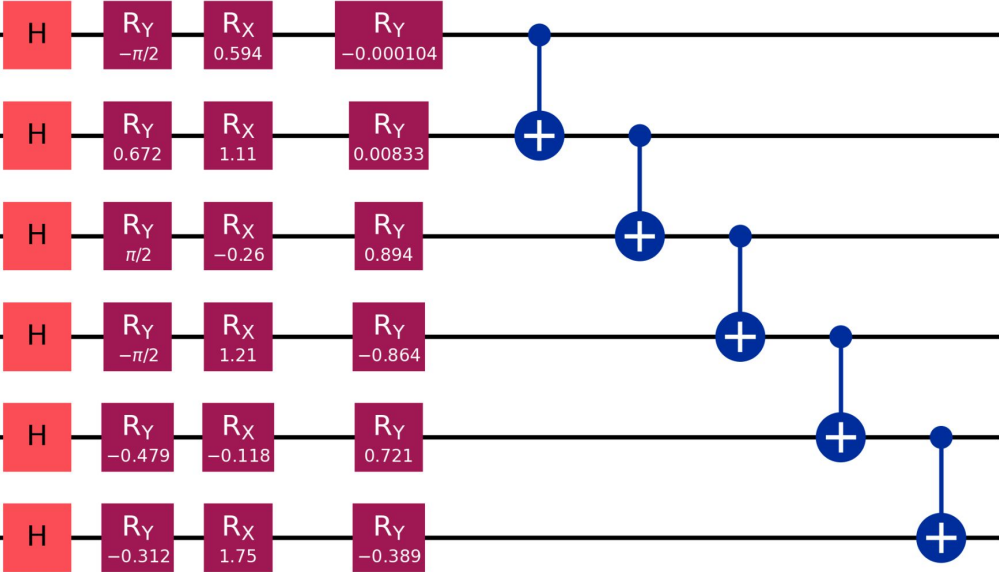
Angle Encoding vs Amplitude Encoding



VQAにおけるスワップシ
測

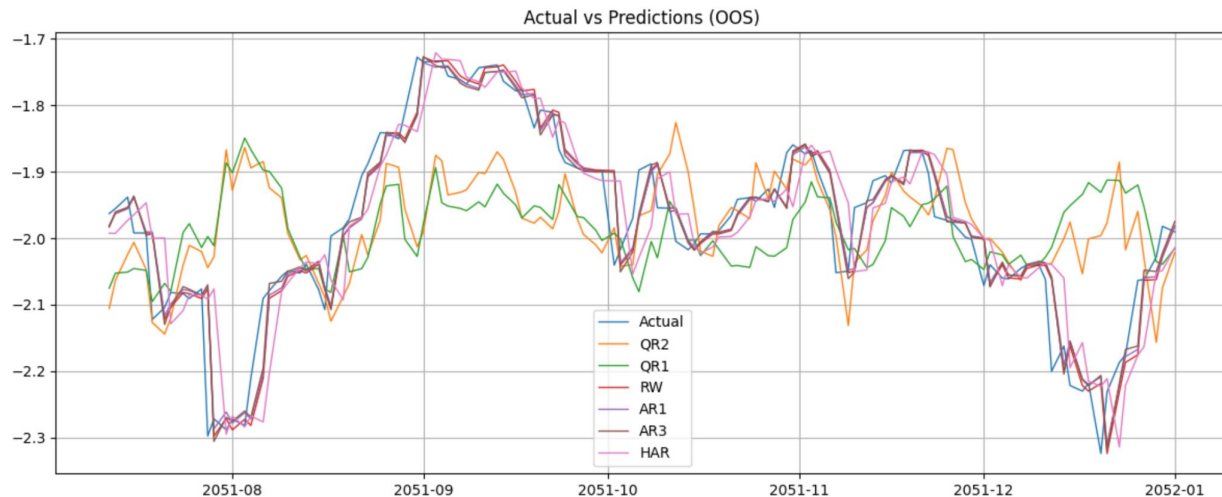
Angle Encoding (6qu
Amplitude Encoding(
較を行った。

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てい



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

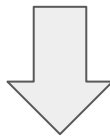
現行の量子プロセッサでは、利用可能な量子ビット数が数十にとどまり、入力次元の削減やエンコーディングの工夫が必要

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

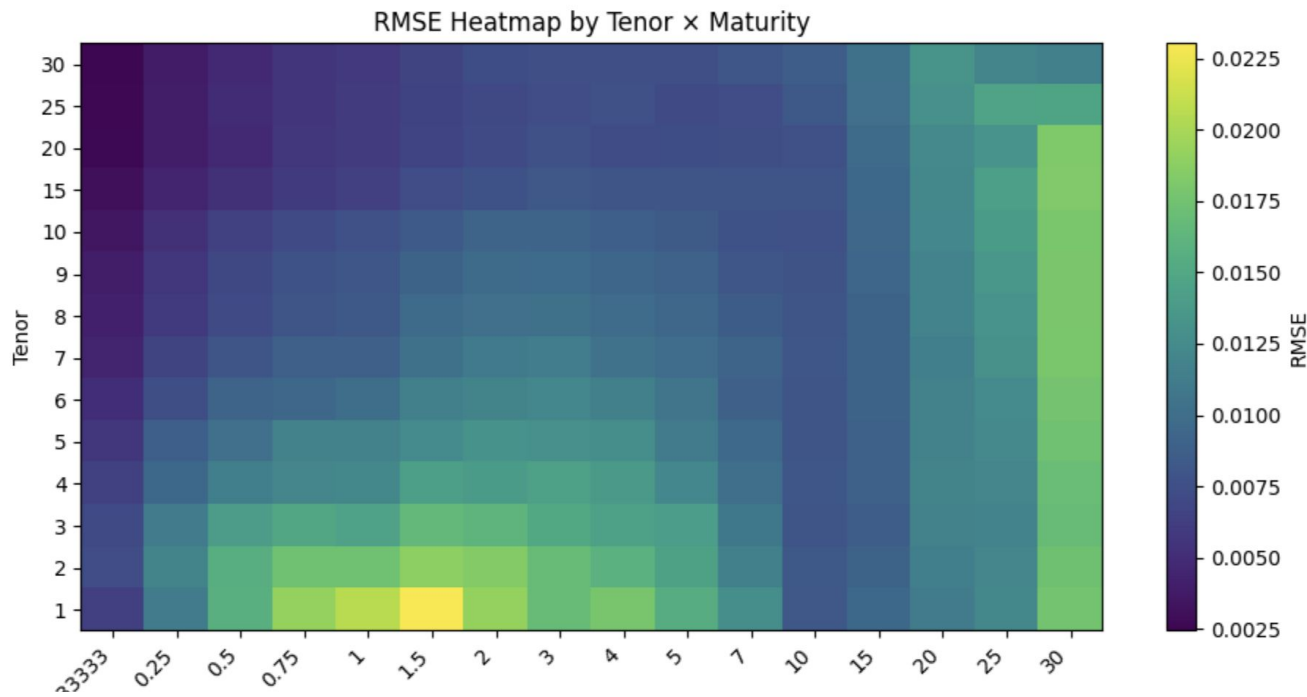
基本的にはクラウド経由で共有されるため、同時に利用できるユーザ数が限られており、自由に計算できない



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

