

# 量子もつれ状態の生成 に要する深さの考察

チーム:つながろう！心の量子友達

メンバー

大久保拓海、河田直也、木村優太、Tseng YuChih

# 目次

1. IBMによる論文: Big cats
2. N qubitにおける量子もつれ状態
3. Depthを深くしたい
4. シミュレーションの設定
5. 結果
6. 考察
7. 今後の展望

# IBMによる論文: Big cats

Big cats: entanglement in 120 qubits and beyond<sup>[1]</sup>

IBMは2025年10月に120 qubitの量子もつれ状態を作ったことを報告

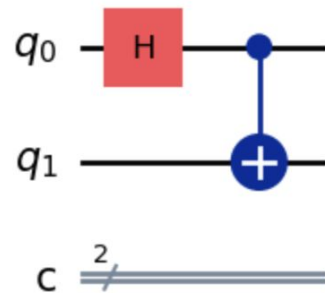
→多くのqubitにおける量子もつれ状態を作ることは量子コンピュータの性能の指標になる

[1]Javadi-Abhari, A., Martiel, S., Seif, A., Takita, M., & Wei, K. X. (2025). Big cats: entanglement in 120 qubits and beyond. *arXiv preprint arXiv:2510.09520*.

# N qubit における量子もつれ状態

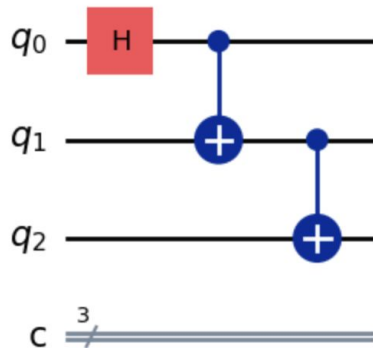
N = 2: ベル状態

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$



N = 3: GHZ状態

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|000\rangle + |111\rangle)$$

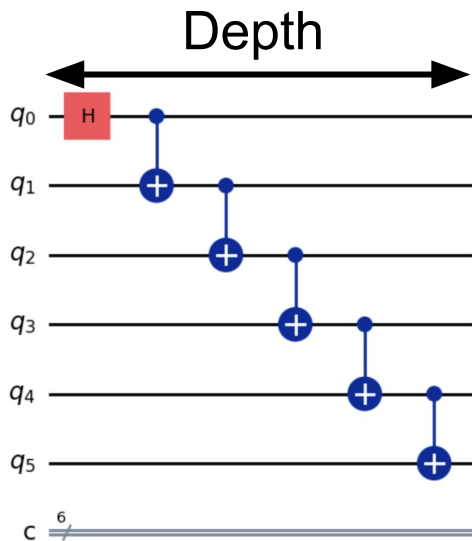


# N qubit における量子もつれ状態

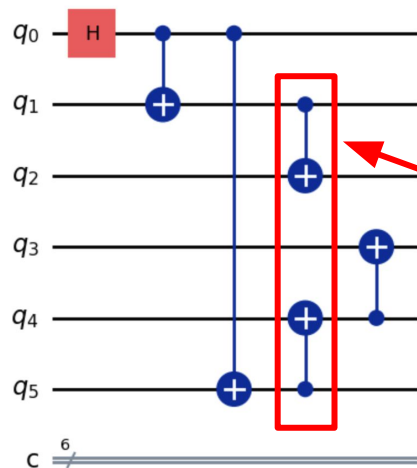
$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|00 \cdots 0\rangle + |11 \cdots 1\rangle)$$

1つのqubitに**Hゲート**をかける  
→**CNOTゲート**を繰り返す  
→**量子もつれ状態 完成**

隣合うqubit  
のみにCNOT



Depth  
が浅くなる

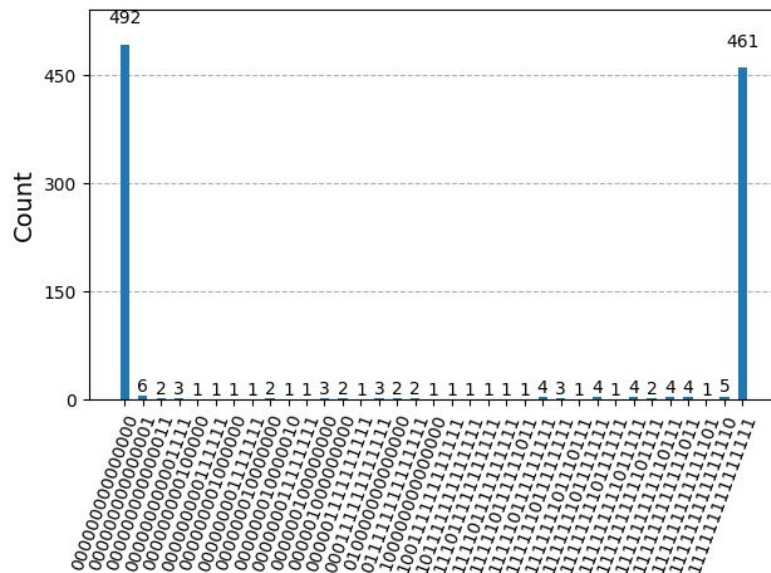
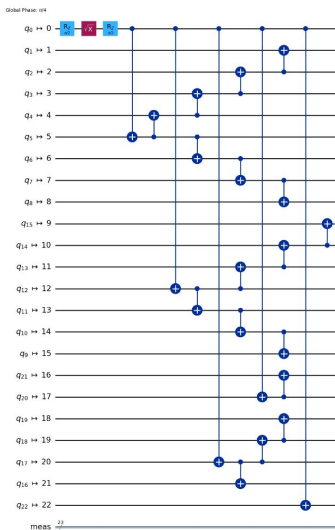


同時並行  
CNOT可能  
→効率的

## Depthが浅くなると...

## 完成した量子もつれ状態の「質」が上がる<sup>[1]</sup>

→  $|00 \dots 0\rangle$   $|11 \dots 1\rangle$  態の割合が少ない状況



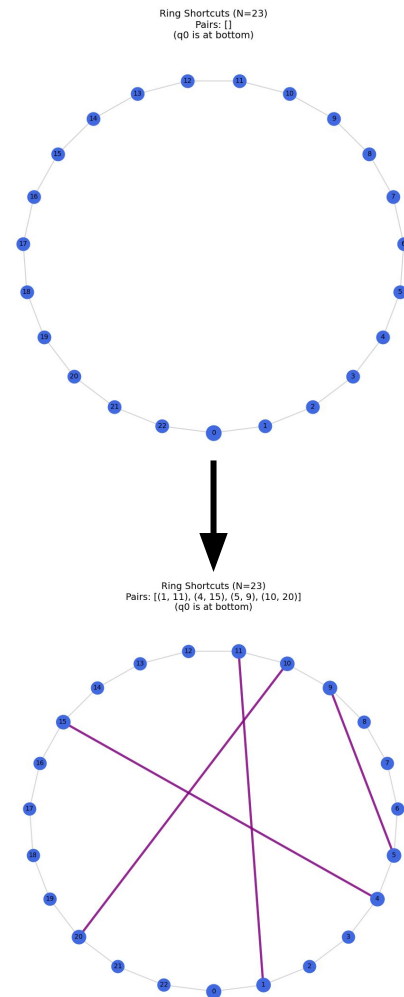
Depthを浅くするためには  
qubit同士のつながりを増やす必要がある



qubit同士のつながりである

「ショートカット」はどう引くべきか？

(結ばれていないqubit同士にはCNOTをかけられない制約がある)



# シミュレーションの設定

1点から引く(Hub形式)

VS

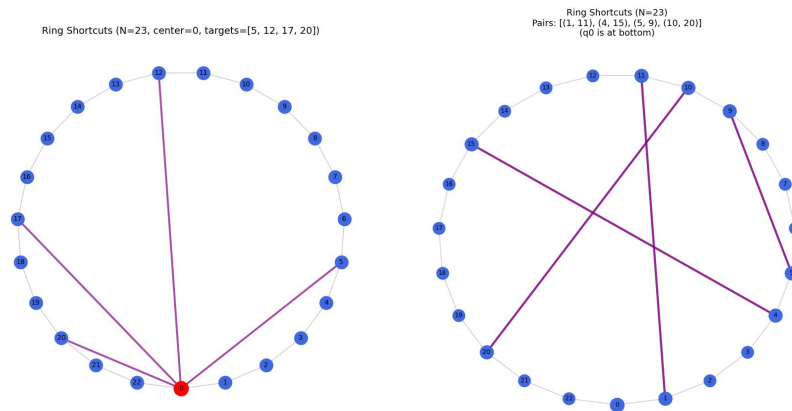
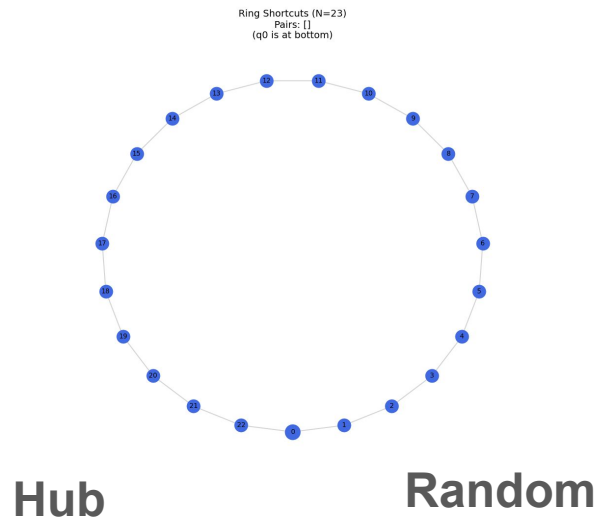
ランダムに2点を選び結ぶ(Random形式)

## 【条件】

500qubitを円形に並べる<sup>[2]</sup>

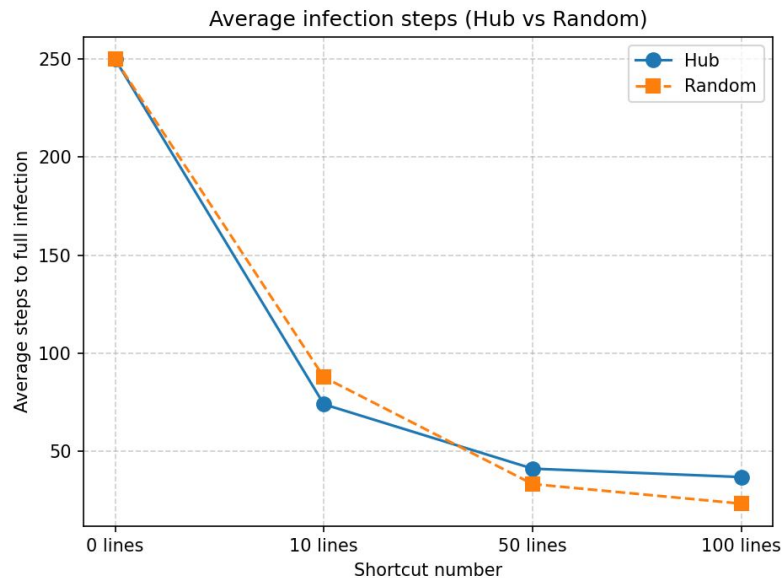
→0,10,50,100本のショートカットを引く

[2]Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *nature*, 393(6684), 440-442.



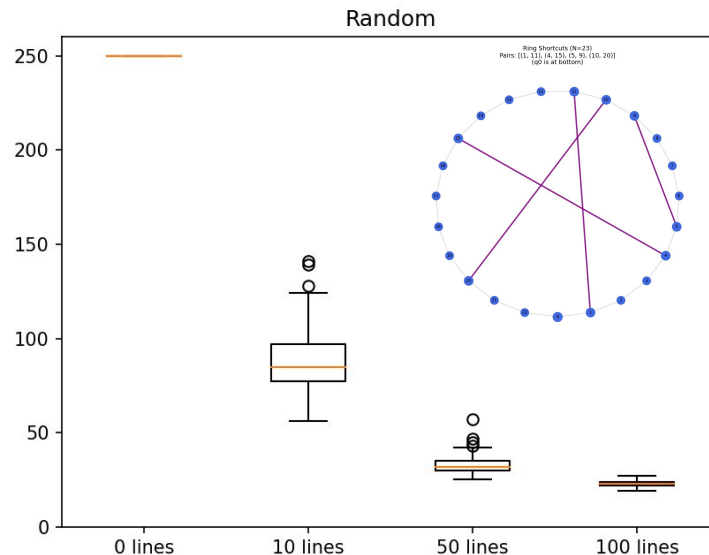
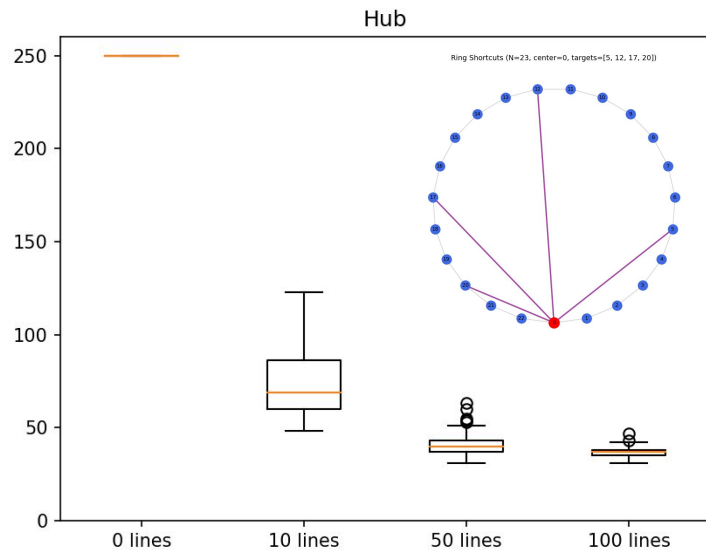


# シミュレーション結果(平均値)



- ショートカットが10本(全体の約2%)でも平均深さが大幅に減少
  - 100本程度でほぼ最小値に収束
- Hub型ネットワークでは0本から10本への平均深さの減少が急速

# シミュレーション結果(分散)



- Random型の分散はRandomと比べて小さい(10本で顕著)

# 考察

## ➤ Random

- Few lines - ショートカットを持つqbitに辿り着くまでに時間がかかる場合がある
- Many lines - すぐにショートカットに辿り着く

## ➤ Hub (HubにHゲートをかける)

- Few lines - すぐにショートカットを使えるので効率的
- Many lines - 働かないqbitの割合が大きくなる

# 今後の展望

多量子における量子もつれ状態を作ることはコンピュータの性能に直結

## 1. 複数Hub構造の検討

中央集中ではなく、複数の小Hubを設けることで、効率と安定性の両立が可能か？

## 2. 回路の深さとの関係

Hub構造がトランスパイル後の回路深さやFidelityにどのように影響するかを確認する？

## 3. 現実の量子デバイス へのマッピング

Heavy-hexなどの結合構造上で、どのようにスモール・ワールド的接続を実現できるか検討する？

# 参考文献

- [1]Javadi-Abhari, A., Martiel, S., Seif, A., Takita, M., & Wei, K. X. (2025). Big cats: entanglement in 120 qubits and beyond. *arXiv preprint arXiv:2510.09520*.
- [2]Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of 'small-world' networks. *nature*, 393(6684), 440-442.