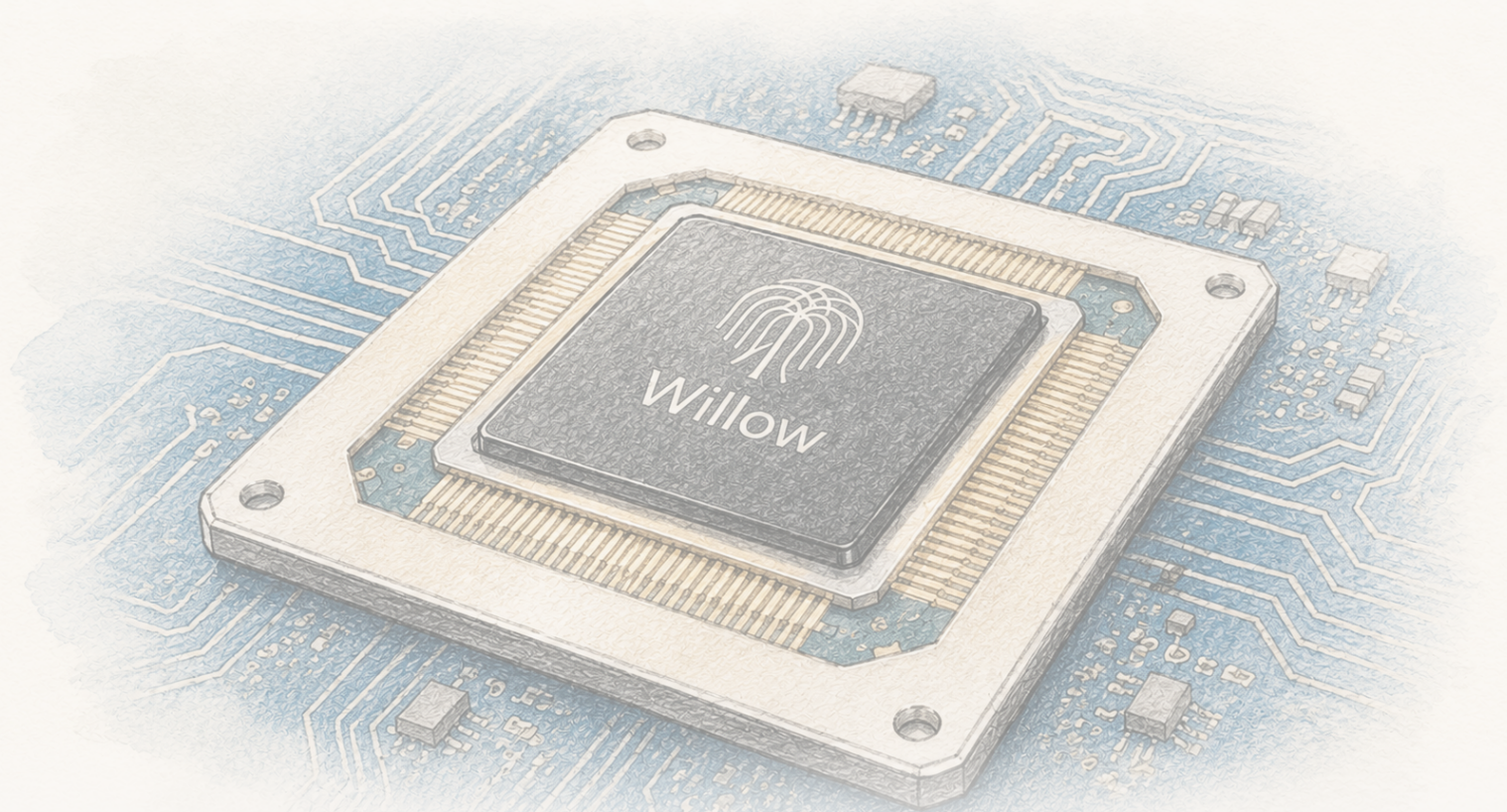




The CLEAN PAPER

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

量子メモリは大きくするほど、ついに性能が上がった—本当の節目と、それがまだ量子コンピュータではないこと

Google Quantum AI は、表面符号による量子メモリがしきい値を下回って動作しうること、初めてきれいに示した。符号を距離 3 から 5、7 へと大きくするにつれて論理誤り率は指数関数的に減少し (2 段階ごとに約 2.14 倍)、最大の 101 量子ビットの距離 7 メモリは、誤り訂正がリアルタイムで動くなか、最良の物理量子ビットよりも長く持ちこたえた—損益分岐点を超えたのである。これは長らく求められてきた工学上の節目だ。同時にこれは、メモリとして働く 1 個の論理量子ビットにすぎず、その誤り率は実際のアルゴリズムが必要とする水準にはなお遠く、論理演算は一つも行われておらず、著者たちが指摘する説明のつかない誤りの下限を抱え、何桁にもわたるスケールアップを前に控えている。一つのしきい値が越えられたのであって、コンピュータが実現されたのではない。

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Vera Rubin · Edited by Michele Renda · Figures by Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: Quantum error correction below the surface code threshold, Google Quantum AI and Collaborators, Nature 638, 920 (2025) · DOI: 10.1038/s41586-024-08449-y

曲線が正しい向きに曲がった瞬間

30年にわたり、量子誤り訂正は、これまで一度もきれいに果たされたことのない約束の上に成り立ってきた。理論はこう述べる。1単位の量子情報—1個の論理量子ビット—を、ノイズの多い多数の物理量子ビットに分散させ、その物理量子ビットが十分に良質でありさえすれば、それをさらに増やすほど論理量子ビットはより良くなるはずであり、符号が大きくなるにつれて誤りは指数関数的に減っていく、というものだ。問題は「もし」の部分にある。臨界的なノイズのしきい値を下回っていれば、量子ビットを増やすことは役に立つ。しかしそれを上回っていれば、量子ビットを増やしても、ただノイズが増えるだけだ。これまでの実験はすべて、この線の誤った側にとどまっていたか、その傾向をきれいに示すことができなかった。符号を大きくすると、良くなるどころか悪くなっていたのである。

2024年12月、Google Quantum AIは、もう一方の領域を初めて明確に実証したと報告した。最新世代の超伝導プロセッサである Willow の上に、研究チームは符号距離 3、5、7 の表面符号メモリを構築し、符号を大きくするたびに論理誤り率が下がっていくのを観測した。距離が2段階上がるごとに、その低減率は $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ だった。最大のものは 101 量子ビットの距離 7 メモリで、訂正 1 サイクルあたり $0.143\% \pm 0.003\%$ の誤り率で 1 個の論理量子ビットを保持した。そして—見出しの中の見出しとも言うべき点だが—それは自らを構成する最良の物理量子ビットよりも長く、 2.4 ± 0.3 倍の長さで生き延びた。これは「損益分岐点を超える (beyond breakeven)」と呼ばれる状態であり、誤り訂正という仕組み全体が、このハードウェア上で初めて「元を取った」事例である。

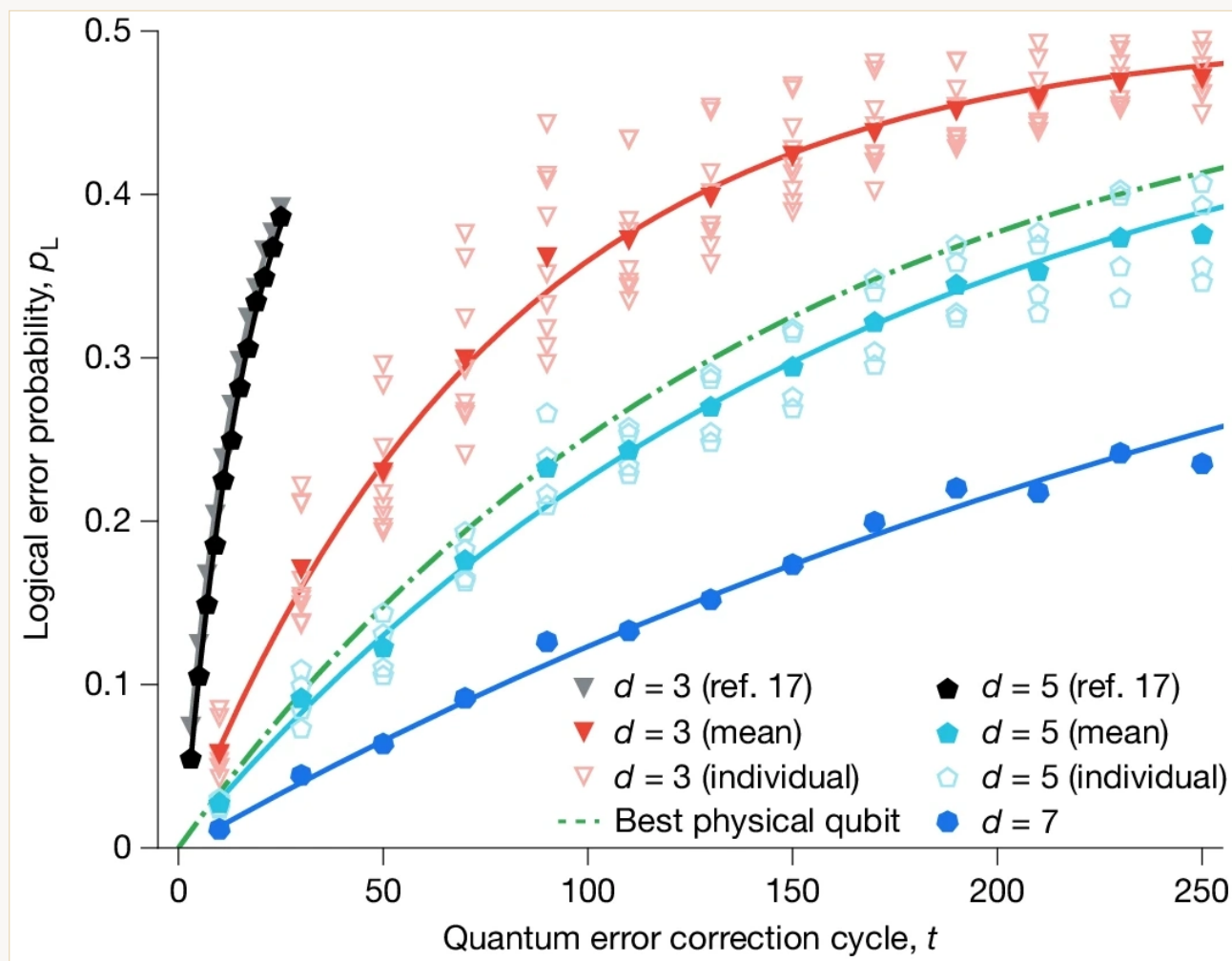
これは正真正銘の節目であり、それがどのような種類のものかを正確に述べておく価値がある。これは、スケールアップが今や正しい向きに進むことの証明である。これは動作する量子コンピュータではなく、論文もそう主張してはいない。

「表面符号」「距離」「しきい値を下回る」とは何か

論理量子ビットとは、多数の物理量子ビットにまたがって符号化された、保護された1単位の量子情報のことである。**表面符号 (surface code)**とは、その符号化を2次元格子の上で行う一つの方法で、そこでは余分に配置された「測定用」量子ビットが、蓄えられた情報を乱すことなく絶えず誤りをチェックしている。符号の**距離 d** は物理的な距離ではない。それは、符号に気づかれずに論理量子ビットを壊してしまえる、うまく配置された誤りの最小個数のことである。 d が大きいほど、より大きく頑健なパッチ (区画) となる。より多くの物理量子ビット (おおよそ $2d^2 - 1$ 個) を使い、同時に起きる誤りをより多く、最大で $(d - 1)/2$ 個まで訂正できる。したがって、ここで試された3つのサイズ、すなわち距離 3、5、7 は、それぞれ同時に起きる誤りを 1 個、2 個、3 個訂正し、物理量子ビットをおおよそ 17 個、49 個、97 個使う。Google が構築した距離 7 のメモリは 101 個を使っており、この教科書的な最小値をわずかに上回っている。

「**しきい値を下回る (below threshold)**」というのが決定的に重要な言い回しだ。誤り訂正が役に立つのは、物理的な誤り率が臨界値を下回っている場合に限られる。そのとき、距離を1段階増やすごとに論理誤り率は指数関数的に抑えられる。この抑制の度合いを表すのが**抑制係数 Λ** である。 $\Lambda > 1$ は符号を大きくすることが役に立つことを意味し、 Λ が大きいほど良い。Google が報告した値は $\Lambda \approx 2.14$ で、これは距離が2段階増えるごとに論理誤り率がおおよそ半分になったことを意味する。この Λ が 1 を余裕をもって上回っていること、それがこの

成果の核心である。



距離 3、5、7 の各メモリ (上から下へ) について、訂正のサイクルを重ねるにつれて論理誤りがどのように蓄積していくかを示している。注目すべきは緑の破線 — チップ上で最良の単一物理量子ビットを表す線だ。距離 7 のメモリ (青、いちばん下) は、その線よりもゆっくりと誤りを蓄積する。つまり符号化された量子ビットは、それを構成する最良の物理量子ビットよりも長く持ちこたえる — 2.4 倍の長さで、「損益分岐点を越えた」のである。これは寿命に関する結果である。しきい値を下回ることによる抑制そのもの (符号が距離 3 から 5、7 へと大きくなるときの $\Lambda = 2.14$) は、本文中の数値に示されている。

Google Quantum AI and Collaborators / Nature CC BY-NC-ND 4.0

著者たちが行ったこと

- 2 枚の Willow チップの上に表面符号メモリを構築した。1 枚は、スケーリング試験を担った距離 3、5、7 の符号を動かす 105 量子ビットのプロセッサ (その最大のものが、101 量子ビット・データ量子ビット 49 個の距離 7 メモリ) であり、もう 1 枚は、リアルタイムデコーダを備えた距離 5 のメモリと、高距離の反復符号を動かす 72 量子ビットのプロセッサである。

- 符号距離を 3 から 5、7 へと増やすにつれて 1 サイクルあたりの論理誤りがどう変化するかを測定し、抑制係数 Λ を求めた。
- 論理量子ビットの寿命を、同じチップ上で最良の個々の物理量子ビットと比較し、「損益分岐点 (ブレイクイーブン)」に達しているかを検証した。
- 距離 5 の符号を、**リアルタイムデコーダ** — 誤りチェックが生成されるのと同じ速さでそれを解釈する古典的なハードウェア — とともに最大 100 万サイクルにわたって動かし、誤り訂正が装置の速度に追いつけることを示した。
- より単純な**反復符号**を距離 29 まで押し広げ、性能の下限を決めている、稀で根深い誤りの発生源を探った。

分かったこと

- **符号はしきい値を下回っている**。1 サイクルあたりの論理誤りは、距離が 2 ずつ増えるごとに $\Lambda = 2.14 \pm 0.02$ という係数で減少した — きれいな指数関数的抑制であり、理論が約束しながら、どのプロセッサも決定的には示せていなかったふるまいである。
- **距離 7 のメモリは 1 サイクルあたり $0.143\% \pm 0.003\%$ の誤り率に達し**、最良の物理量子ビットよりも **2.4 ± 0.3 倍長く持ちこたえた** — 損益分岐点を超えたのである。
- **リアルタイムでの復号は速度に追いついた**。デコーダの遅延は距離 5 で平均 63 マイクロ秒であり、これに対しサイクル時間は 1.1 マイクロ秒だった。この状態が 100 万サイクルにわたって保たれた — 誤り訂正は、事後の分析としてだけでなく、リアルタイムで動いていたのである。
- **稀で根深い誤りの発生源が残っている**。反復符号の試験では、性能は最終的に、およそ **1 時間に 1 回** (3×10^9 サイクルに約 1 回) 起きる相関のある誤りのバースト (集中的な発生) によって制限された。これが 10^{-10} 付近の誤りの下限を生んでおり、その起源は**まだ解明されていない**と著者たちは述べている。

この研究からは言えないこと

- これは計算を行う量子コンピュータではない。これは量子メモリであり、1 個の論理量子ビットを蓄えて保護する。論理量子ビット間の論理演算 (ゲート) は行わず、いかなるアルゴリズムも実行しない。
- これは、有用な機械まであと量子ビット 1 個、という段階ではない。距離 7 の論理量子ビットは約 101 個の物理量子ビットを費やす。1 サイクルあたり 0.1% という誤り率は、実際のアルゴリズムが必要とするおよそ 10^{-6} から 10^{-10} には依然としてはるかに及ばない。その差を埋めるには、はるかに大きな距離へと押し進める — 論理量子ビット 1 個あたりの物理量子ビットをさらに大幅に増やす — 必要があり、しかも有用なアルゴリズムには一度に数千個の論理量子ビットが必要となる。そのための物理量子ビットの見積もりは数百万個に達する。
- 「**スケールさせれば**」という条件が、**大きな意味を担っている**。論文自身の結論は、この装置の性能はスケールさせれば大規模なアルゴリズムの要件を満たしうる、というものだ。1 個の論理量子ビットで傾向が正しいことを示すのは、スケールした機械を実際に作ったことと同じではない。そして、その傾向がはるかに大きなサイズまで保たれる保証は、ここには何もない。
- **説明のつかない誤りの下限は、現に残された問題である**。反復符号の性能に上限を課している

相関のあるバーストは、著者たちの言葉によれば、予想を桁違いに上回る大きさであり、解明されるまでは、より大規模な誤り耐性のある応用を妨げるだろう — きっぱりと述べられた未解決の欠陥であって、解決済みの細部ではない。

- これは、**暗号の解読や、有用なタスクにおける「量子超越性」**については、何も語っていない。それらには、完全な誤り耐性を備えた機械が必要であり、今回の成果はその礎石ではあっても、その実証ではない。

証拠をどう評価するか

- **中心的な主張は堅実で重要である。** 3つの符号距離にわたるきれいな指数関数的抑制を伴うしきい値以下の動作、それに損益分岐点を超える寿命と、実際に機能するリアルタイムデコーダー — これはまさに、この分野が到達しようとしてきた組み合わせであり、しかも推論ではなく直接に実証されている。これは誇大宣伝の産物ではなく、第一線の研究グループによる本物の工学的成果である。
- **著者たちは、その適用範囲について慎重である。** 彼らはこれをしきい値以下のメモリと位置づけ、説明のつかない相関誤りの下限を自ら明示し、将来については目立つ「スケールさせれば」という条件つきで慎重に語っている。行き過ぎがあるとすれば、それは周辺の報道の側であり、「誤り訂正されたメモリ量子ビットは、大きくするほど良くなった」という事実を、「量子コンピューティングはもう実現した」へと切り上げてしまっている。
- **正直に言えば、その位置づけは、きれいに踏み出された基礎的な一歩である。** 1個の論理量子ビットが、冗長性を加えることがついに役立つほど十分に保護された — とはいえ、スケールアップ、論理ゲート、そして説明のつかない誤りという、長く、困難で、いまだ保証されていない道のりが、なお前方に控えている。

なぜ重要か

誤り耐性のある量子コンピューティングには、いつも「鶏が先か卵が先か」という趣があった。有用となるような機械は、どの物理量子ビットにも到達できない誤り率を必要とする。そしてその解決策 — 誤り訂正 — が働くのは、ハードウェアがすでにしきい値を下回るほど十分に良質である場合に限られるからだ。その線を、たとえ一度でも、たった1個の論理量子ビットの上でも越えることは、問いを「そもそもこれは可能なのか?」から「どこまで、どれだけ速くスケールできるのか?」へと変える。これは現実的で意味のある転換であり、この成果が注目に値する理由である。

しかし、この成果を信頼に足るものにしてしているのと同じ慎重さこそが、その周囲で語られる物語を抑えるべきものだ。これはうまく据えられた基礎の、最初の一つのレンガである。それは建物ではないし、それを据えた人々こそ、真っ先にそう言っている。今後数年にわたって量子コンピューティングを追ううえで正しい姿勢は、まさにこの地味な曲線を見ることだ。すなわち、符号が大きくなっても抑制係数が保たれるかどうか、論理メモリと同じくらいきれいに論理ゲートが実現できるかどうか、そしてあの謎めいた「1時間に1回」の誤りが、いつか説明されるかどうか、である。

要点

Google Quantum AI は、表面符号による量子メモリがしきい値を下回って動作しうることを、初めてきれいに示した。符号を距離 3 から 5、7 へと大きくするにつれて論理誤り率は指数関数的に減少し (2 段階ごとに約 2.14 倍)、最大の 101 量子ビットの距離 7 メモリは、その誤り訂正がリアルタイムで動くなか、最良の物理量子ビットよりも長く持ちこたえた — 損益分岐点を超えたのである。これは、量子コンピュータの工学における、正真正銘の、長らく求められてきた節目である。同時にこれは、メモリとして働く 1 個の論理量子ビットにすぎず、その誤り率は実際のアルゴリズムが求める水準にはなお遠く、論理演算は一つも行われておらず、著者たち自身が指摘する説明のつかない誤りの下限を抱え、何桁にもわたるスケーリングの道のりが前方に控えている。現実の一つのしきい値が越えられたのであって、量子コンピュータが実現されたのではない。

出典

Google Quantum AI and Collaborators, Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 638, 920 (2025)

<https://doi.org/10.1038/s41586-024-08449-y>

Author Correction: Quantum error correction below the surface code threshold, Nature 653, E5 (2026) — corrects a Fig. 3a axis label and legend keys; does not affect the below-threshold (Fig. 1) results

<https://www.nature.com/articles/s41586-026-10559-8>