

2019年7月18日

# 量子コンピュータの 実用化に貢献する 量子ビット間の結合回路

情報通信研究機構

未来ICT研究所 フロンティア創造総合研究室

主任研究員 吉原文樹

# 内容

- 量子コンピュータとは
  - 必要な部分をかいつまんで
  
- 量子ビット間の結合回路
  - 可変結合の重要性
  
- 超伝導量子コンピュータにおける可変磁気結合法
  - 従来技術の紹介
  - 従来技術の課題、新技術でどのように解決したか

# 量子コンピュータ

- 量子力学特有の現象を用いて量子ゲート演算・量子シミュレーションが実行可能
- Google, IBM等のIT分野の世界的企業、Rigettiコンピューティング社(米国)等のスタートアップ企業が研究開発

# 素因数分解

□ある程度の規模の量子コンピュータができれば、現在のスーパーコンピュータでは現実的な計算時間で解けない問題を解ける。

■ 掛け算:  $53 \times 380957 = ?$

■ 素因数分解:  $20190721 = A \times B$  (A, Bは1以外の自然数)

難易度: 掛け算 <<<<<<< 素因数分解

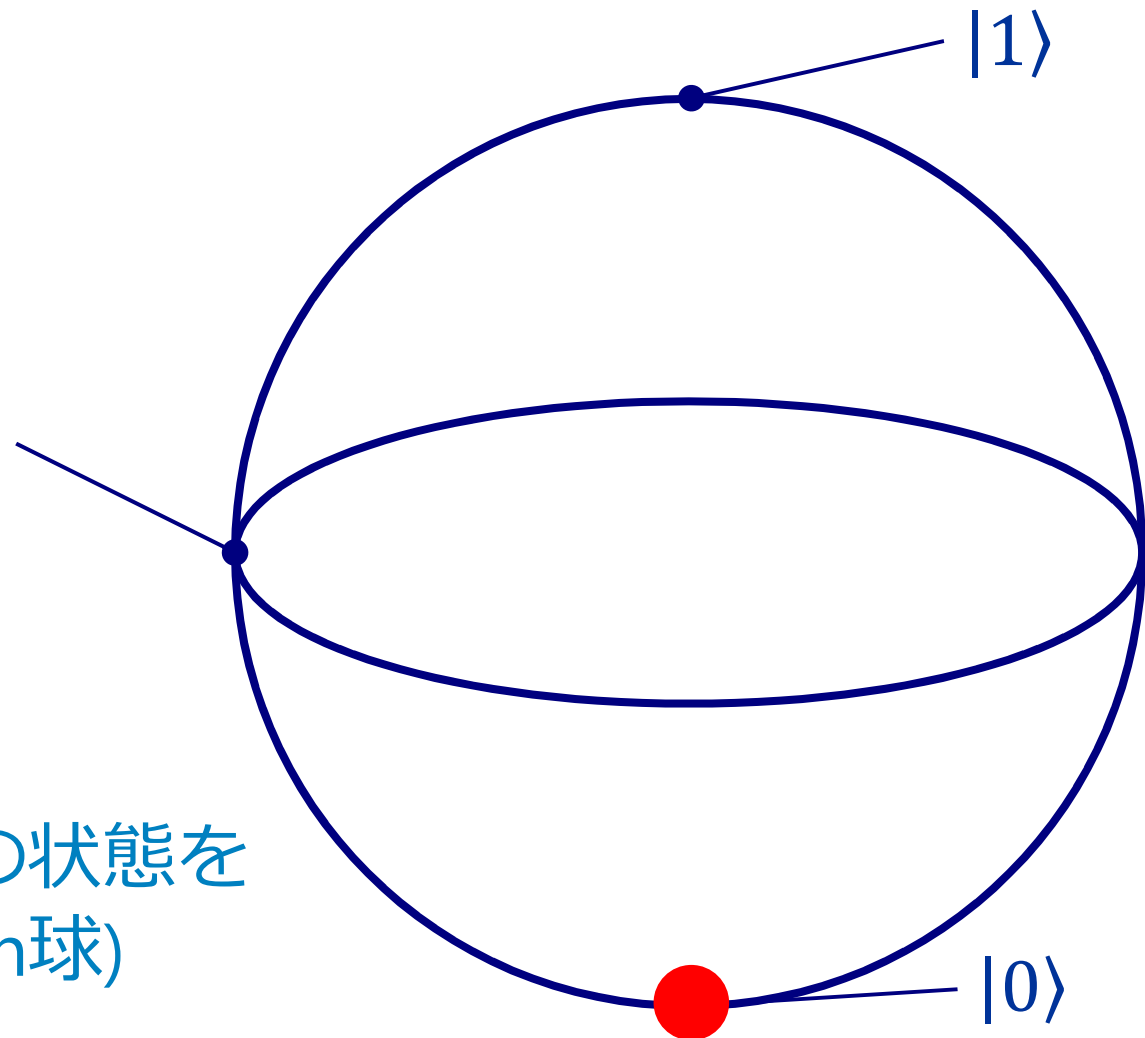
□公開鍵暗号の一つであるRSA暗号の安全性根拠

# 量子ビット

- $|0\rangle$ 状態と $|1\rangle$ 状態との重ねあわせ状態をとることができる。

$$\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

量子ビットの状態を表す球 (Bloch球)



# 二つの量子ビット

□量子ビットが二つ以上あるともつれ合い状態を生成することができる。

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

二つの量子ビットの状態が、両方とも $|0\rangle$ という状態と両方とも $|1\rangle$ だという状態の重ね合わせ

お互いの量子ビットの状態が、もう一つの量子ビットの状態によって決まっている

二つの量子ビット間に大きな相関がある状態

# 量子演算

- 重ね合わせ状態、もつれ合い状態をうまく使って演算を行う。
  
- 万能量子ビットゲート操作のセット
  - 任意の1量子ビットゲート操作
  - 特定の2量子ビットゲート操作 (CNOT: 制御NOT)
  
- 現在のコンピュータにおけるNAND論理の完全性に対応
  - NANDゲートだけでコンピュータが出来る

# 量子コンピュータ実現の鍵

いかにして、万能量子ビットゲート操作のセットを構成する

- 任意の1量子ビットゲート操作
- 特定の2量子ビットゲート操作 (CNOT: 制御NOT)

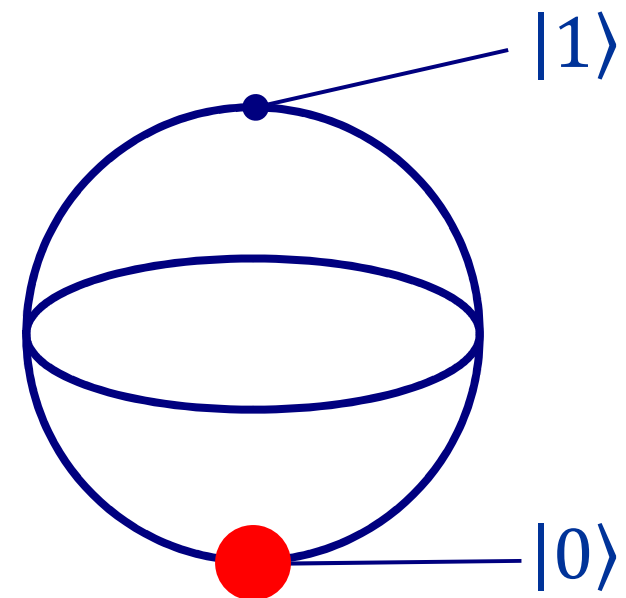
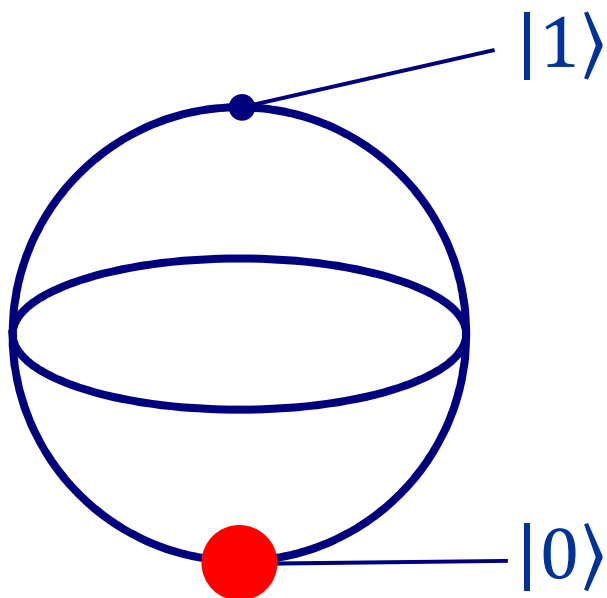
を高精度に行えるか。



# 二量子ビット系

□1量子ビットゲート操作: 球上の点の移動

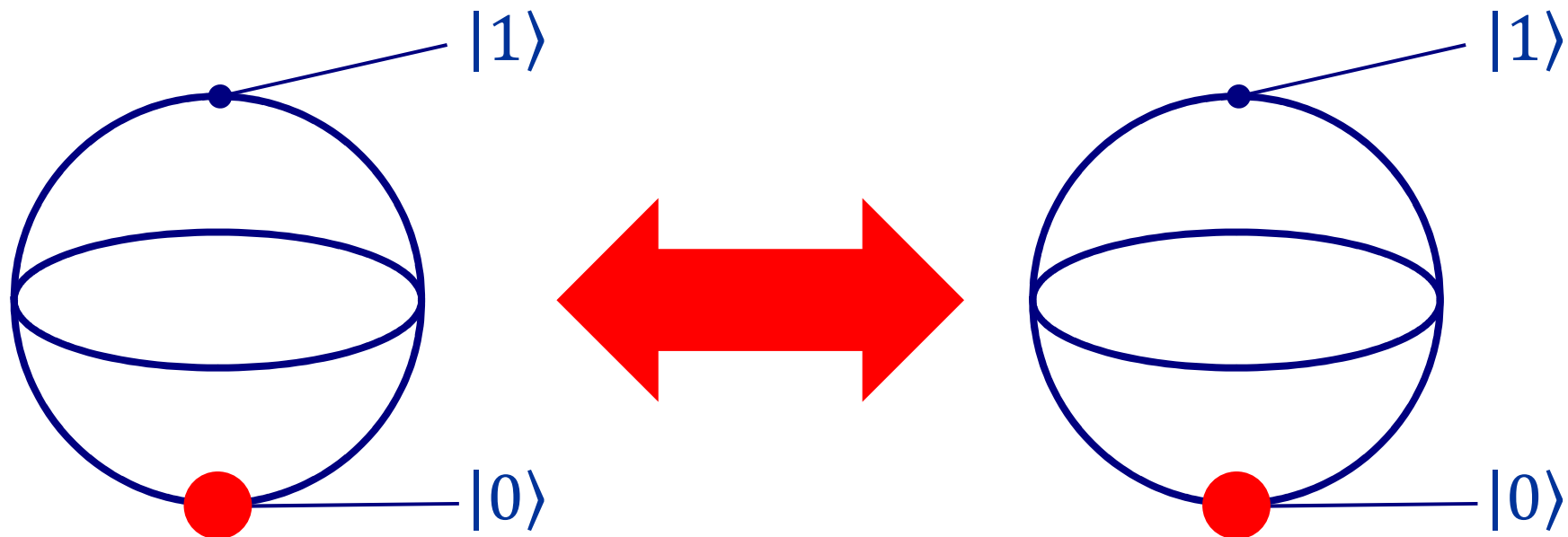
□2量子ビットゲート操作: 量子ビット間の結合が必要



# 二量子ビット系

□1量子ビットゲート操作: 球上の点の移動

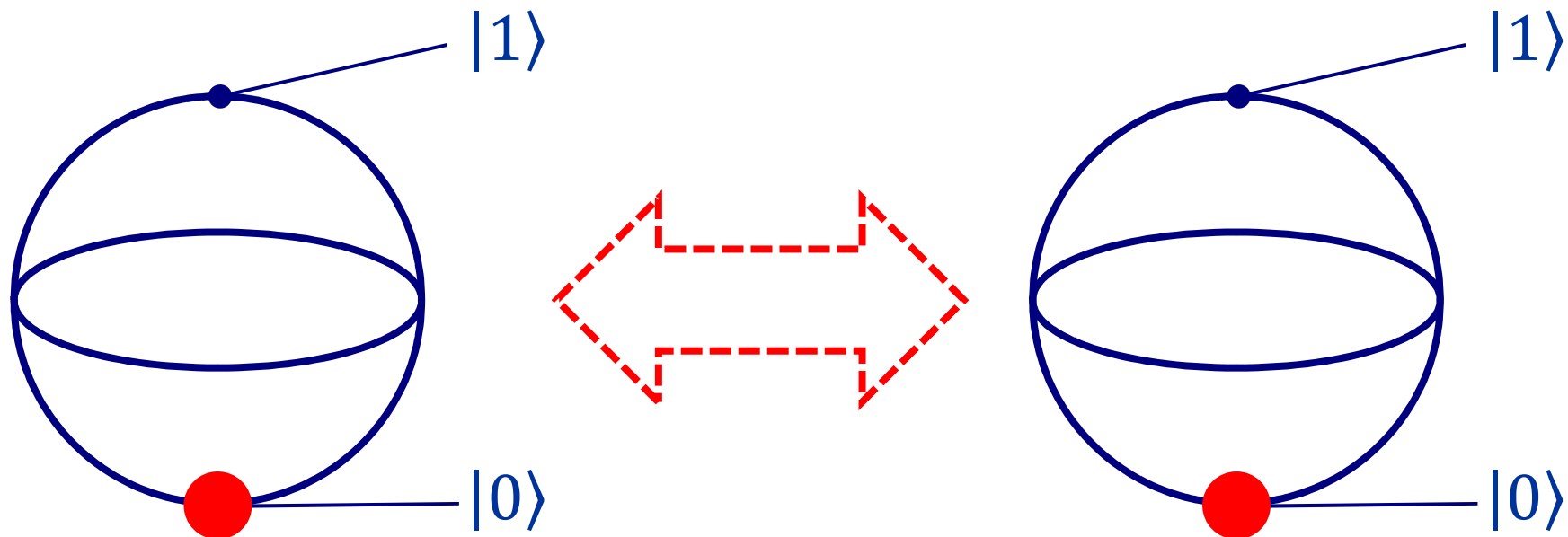
□2量子ビットゲート操作: 量子ビット間の結合が必要



# 二量子ビット系

□1量子ビットゲート操作: 球上の点の移動、量子ビット間の結合はゼロ

□2量子ビットゲート操作: 量子ビット間の結合が必要



可変結合が必要

# 超伝導量子コンピュータ

## □超伝導回路

- 量子ビット
- 結合部
- 制御部
- 測定部

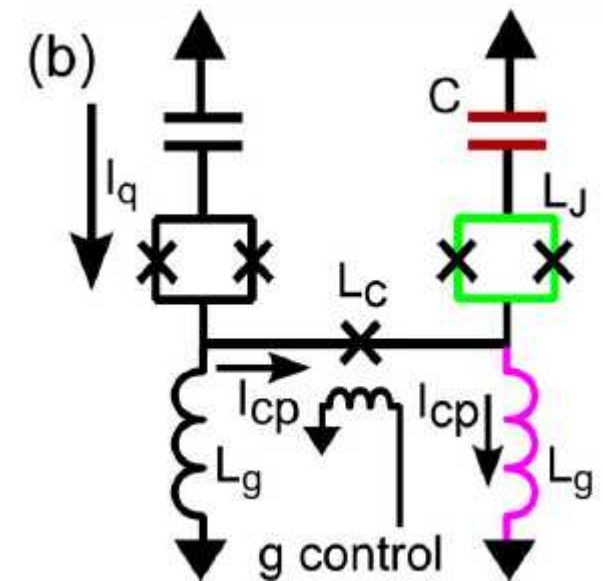
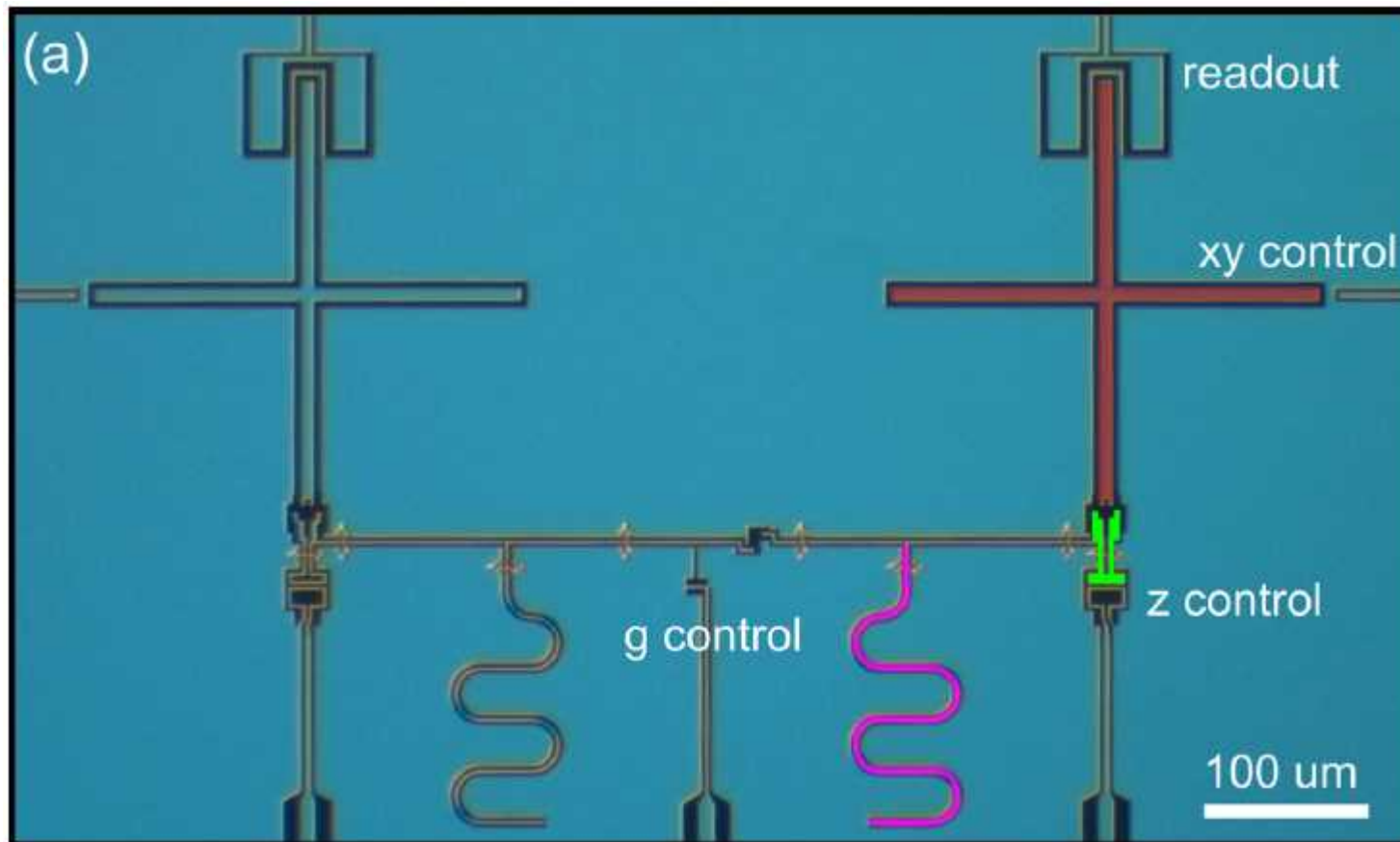
## □マイクロ波回路 (1 - 15 GHz)

## □希釈冷凍機を用いて極低温 (数10 mK) に冷却

- 超伝導状態を維持
- ノイズを減らす

# googleの例

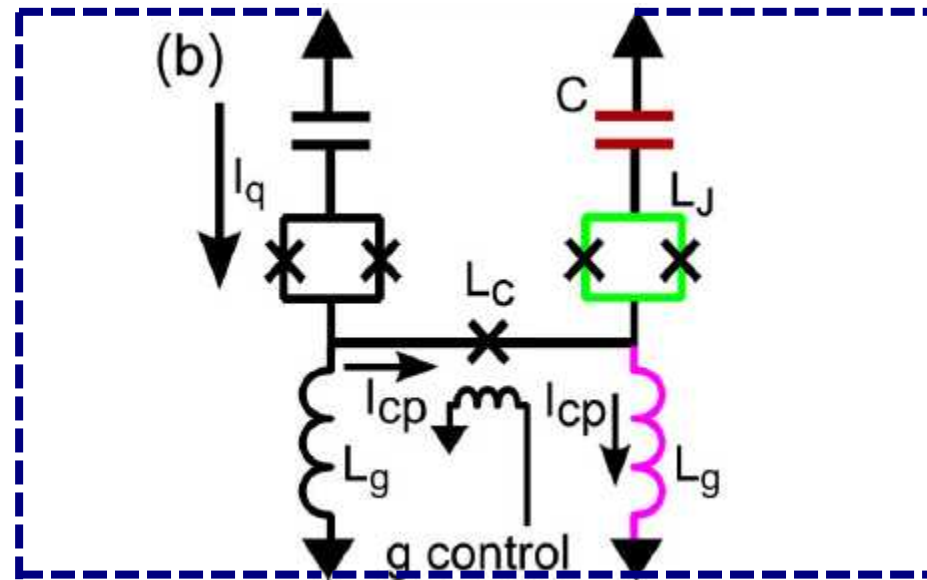
- 二つの量子ビットと一つの可変結合器(可変磁気結合回路)



Y. Chen et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 220502 (2014).

# googleの例

- 二つの量子ビットと一つの可変磁気結合回路



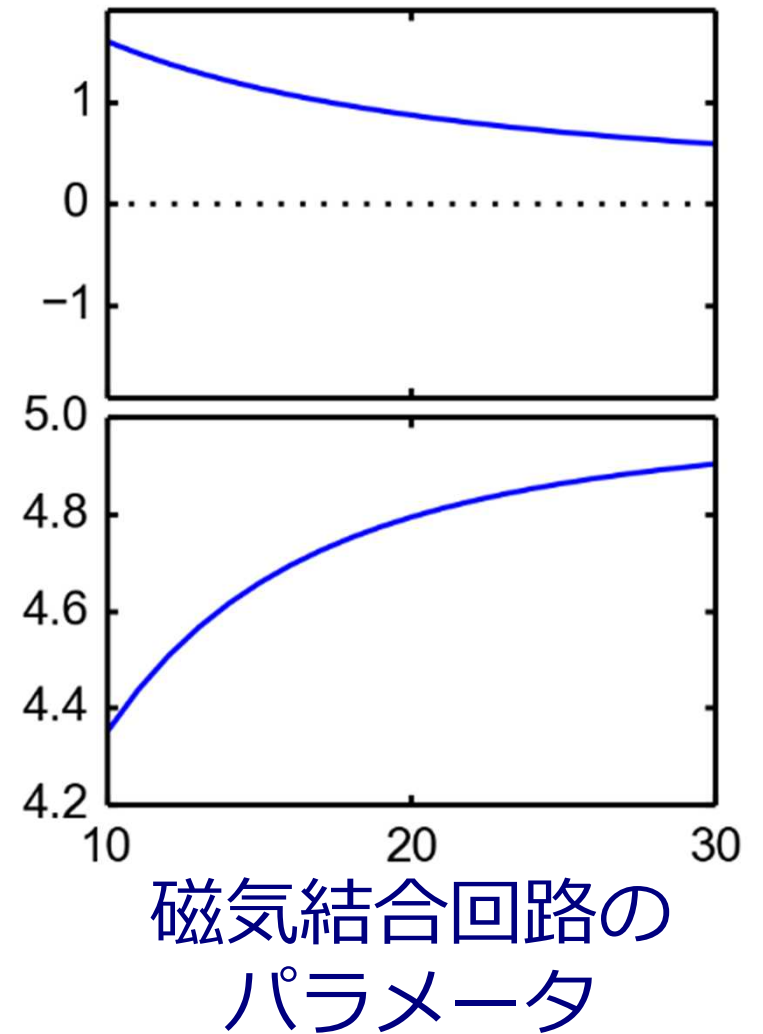
量子ビット1 可変磁気結合回路 量子ビット2

今回の新技術は可変磁気結合回路の改良版

# 結合強度と量子ビットのエネルギー

- 量子ビット間の結合の強さとともに、量子ビットのエネルギーも変ってしまう

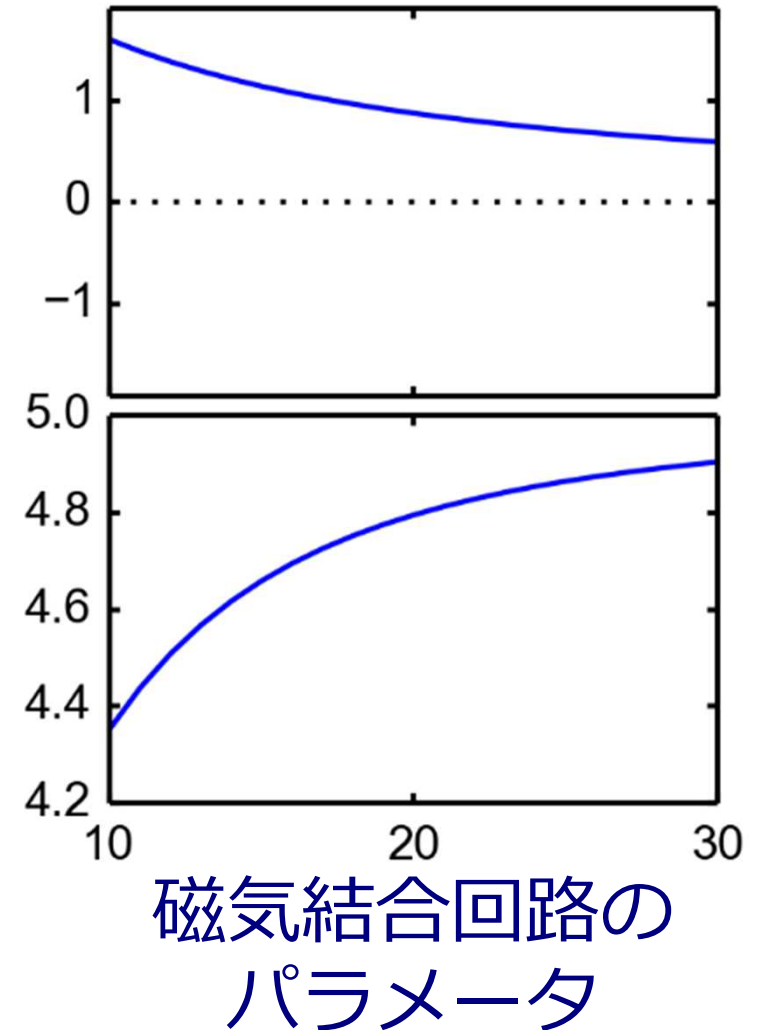
量子ビット間の結合の強さ  
量子ビットのエネルギー



# エネルギー変化の補償

- 量子ビット間の結合の強さとともに、量子ビットのエネルギーも変ってしまう
- ならば、量子ビットのエネルギー変化を補償してやろう

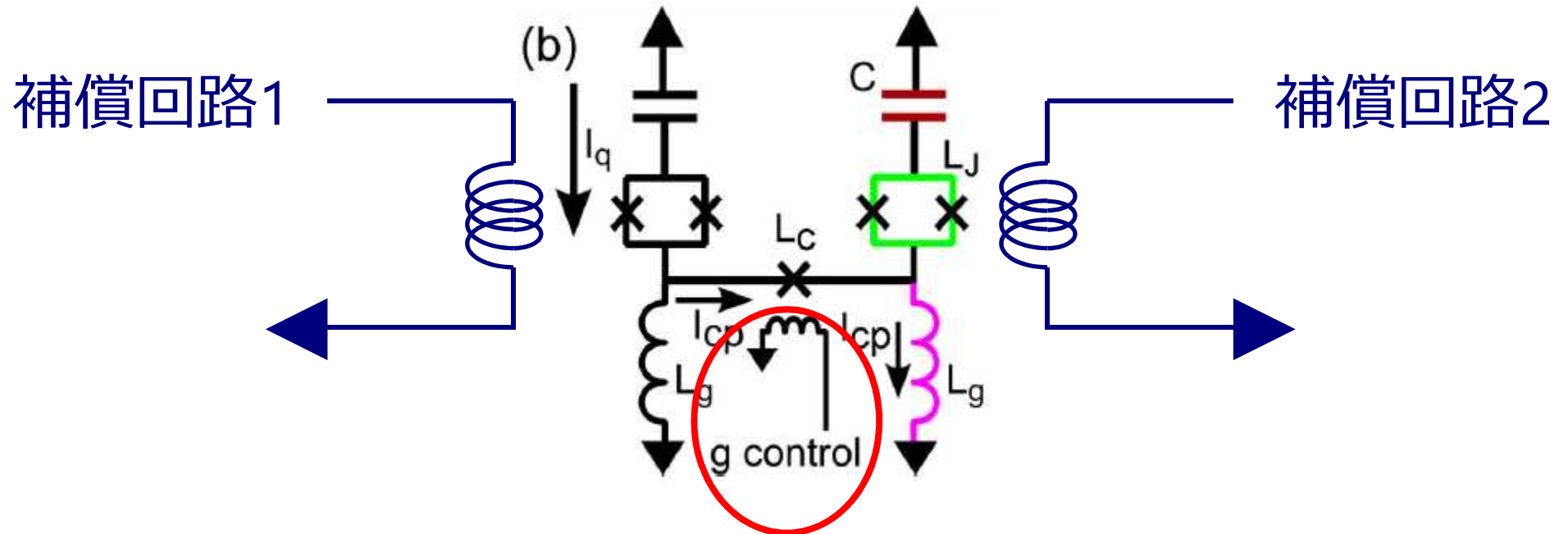
量子ビット間の結合の強さ  
量子ビットのエネルギー





# 補償回路の導入

- g control回路で量子ビット間の結合強度と量子ビットのエネルギーを変化
- 量子ビットのエネルギー変化の補償



# 吉原はどうしたか？

- 量子ビット間の結合の強さのみを変化させたい
- 量子ビット間の結合の強さとともに、量子ビットのエネルギーも変ってしまう

量子ビット間の結合の強さのみを変化させられる  
可変磁気結合回路およびその制御法を考案した

2019年4月に出願、2020年秋に公開

補償回路を導入するのと結果は同じなのでは？

# google vs 吉原

	google	吉原
概要	量子ビット間の結合強度に加え、量子ビットのエネルギーが変化	量子ビット間の結合強度のみを変化させられる
補償回路	必要	不要
回路全体の複雑さ	補償回路が二系統必要	結合回路自体が少し複雑
結合強度の高速制御	三系統(結合回路 + 二系統の補償回路)の同時制御を行うため、困難	結合回路のみを制御すればよいため、 <b>可能</b>

# 従来技術とその問題点

既にgoogleらによる可変磁気結合回路があるが、

- 量子ビット間の結合の強さとともに、量子ビットのエネルギーも変わってしまう。
- そのため、量子ビットのエネルギー変化を補償するための回路を導入
- 1 ns以下の高速動作は困難

といった問題があり、改善の余地があった。

# 新技術の特徴・従来技術 との比較

- 量子ビット間の結合の強さのみを変化させられる可変磁気結合回路およびその制御法
- 従来技術では必要であった量子ビットのエネルギー変化を補償するための回路が不要
- 1 ns以下の高速動作が可能

# 新技術のインパクト

- 量子ビット間の結合強度を変化させる必要がある2量子ビットゲート操作が高速かつ正確に出来る。
- 量子コンピュータの実用化に貢献できる。

# 量子アニーリングマシン

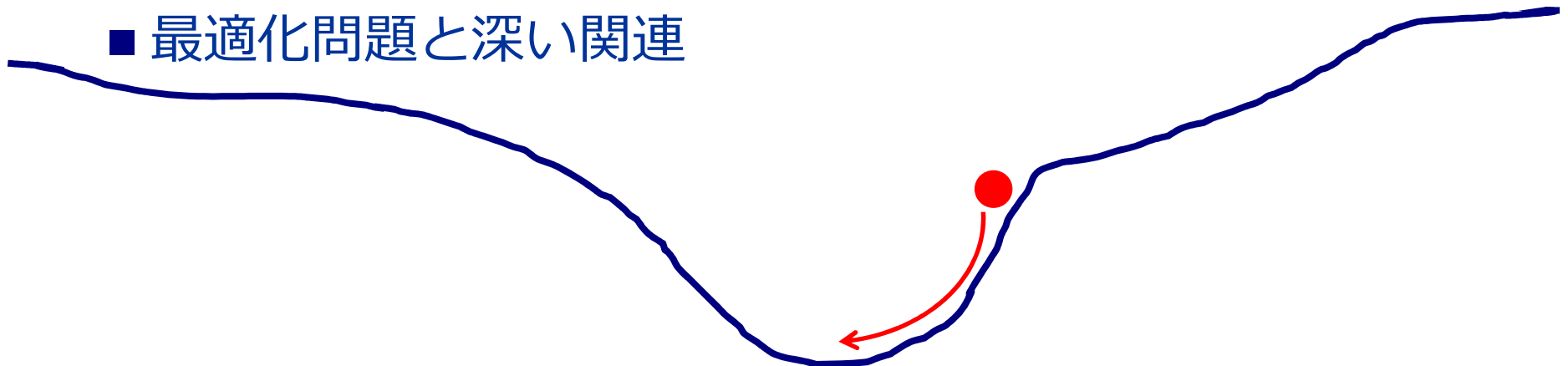
□ D-wave システムズ社 (カナダ)

□ アニーリング = 焼なまし

- 金属を熱してからゆっくり冷ますことで、格子欠陥やひずみが少ない安定した構造を得る手法

□ アニーリングマシン

- 関数の最小値を探索する計算機
- 最適化問題と深い関連



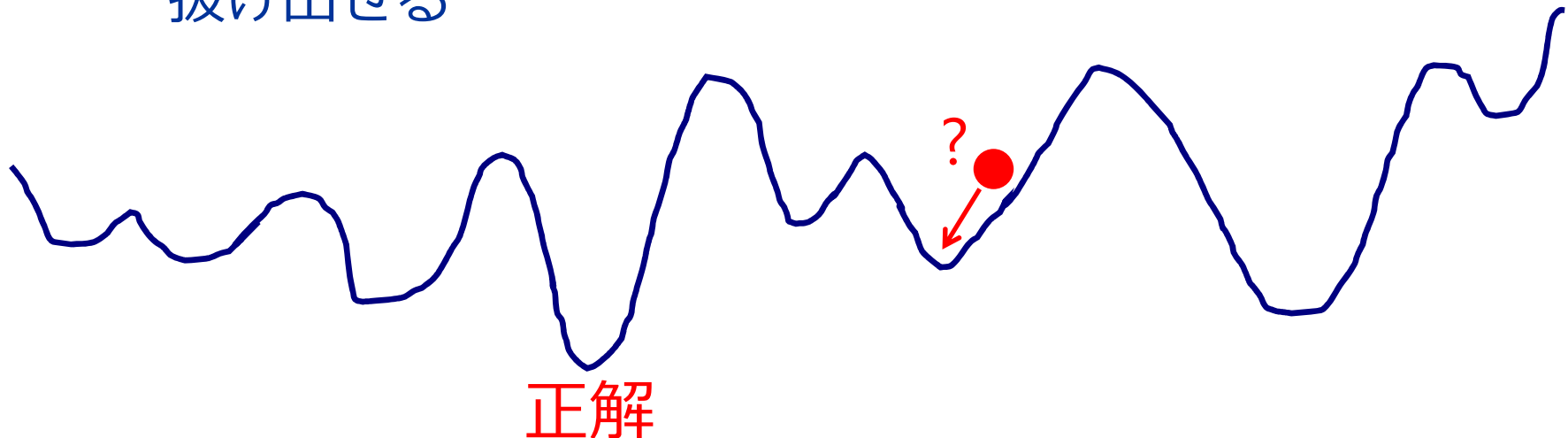
# 量子アニーリングマシン

## □アニーリングマシン

- 運動エネルギーを与えることにより、正解でない谷から抜け出せる

## □量子アニーリングマシン

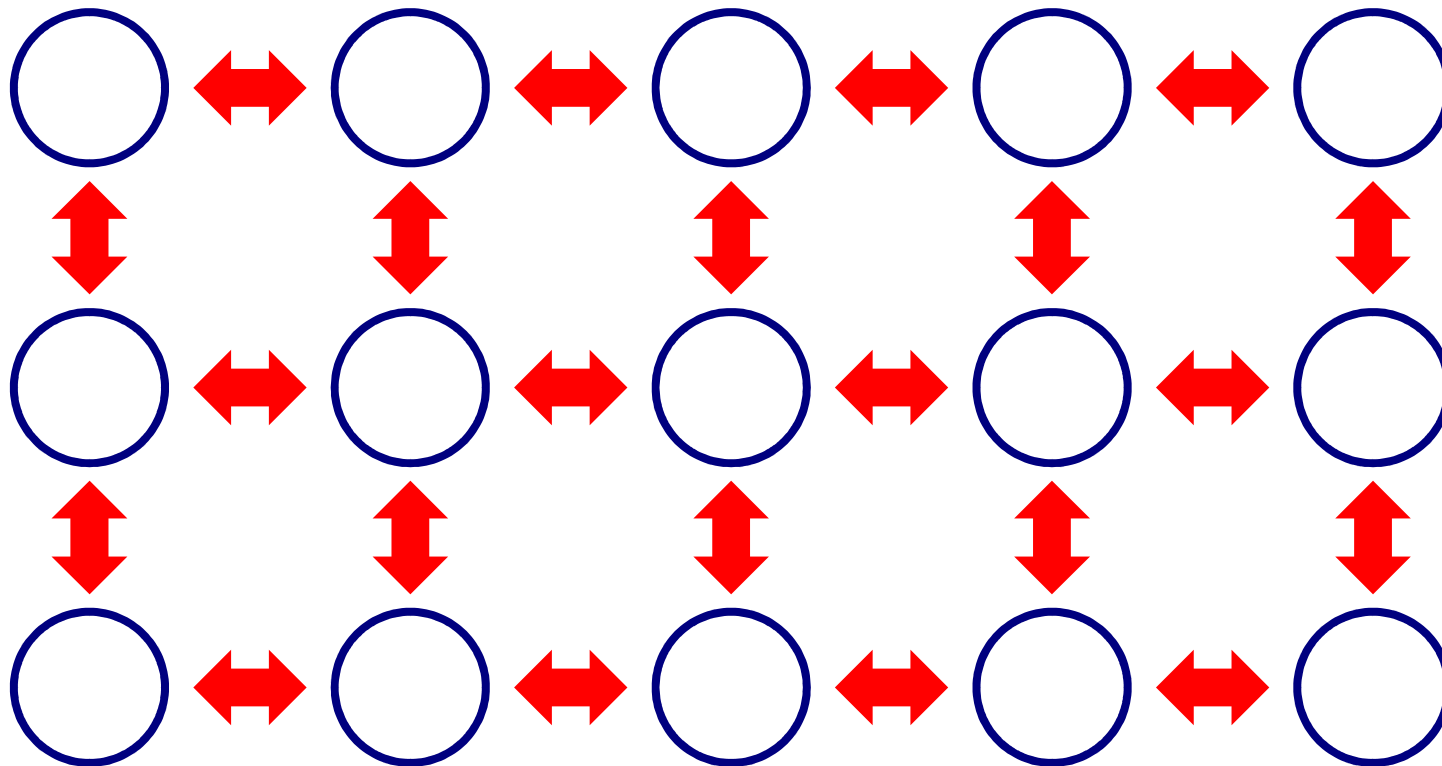
- 量子力学特有のトンネル効果により、正解でない谷から抜け出せる





# 量子アニーリングマシン の構成

- 量子ビット間の結合強度を変化させる  
必要あり ←新技術の出番あり



# 想定される用途

- 超伝導量子コンピュータ、超伝導アニーリングマシン
  
- 超伝導回路の中で可変磁気結合要素として汎用的に機能
  - 超伝導量子ビット
  - 超伝導共振回路
  - 超伝導導波路
  
- 光子検出器、単一光子源、増幅回路

# 実用化に向けた課題

- 回路図上で練ったアイデアをいかに実際の回路で実現するか
- 現在、可変磁気結合回路を設計中
- 想定どおりの性能が発揮されるかどうか、原理実証実験が必要
- 早ければ、一、二年でプロトタイプが完成

# 企業のみなさまへの期待

## □ 可変磁気結合回路の使い道

- 超伝導回路限定です。
- 「こういうものに使えるのでは」というアイデアがございましたら、お話いただければありがたいです。

## □ 超伝導量子コンピュータ、超伝導アニーリングマシンの研究開発・共同研究

- 本技術を使ってみませんか？

# 本技術に関する知的財産権

- 発明の名称: 可変磁気結合回路、及び回路制御方法
- 出願番号: 特願2019-080292
- 出願人: 国立研究開発法人 情報通信研究機構
- 発明者: 吉原 文樹 (100%)

# お問い合わせ先

情報通信研究機構

イノベーション推進部門

技術移転コーディネータ

三和 祐一

TEL: 042-327-6950

FAX: 042-327-6659

e-mail: [ippo@ml.nict.go.jp](mailto:ippo@ml.nict.go.jp)