

第1回量子ソフトウェア社会人講座

量子回路と量子アルゴリズムの基礎、量子デバイス開発の現状

量子コンピュータの動作原理と研究開発状況

2022年 2月 28日

日本電気株式会社 システムプラットフォーム研究所

白根 昌之

本日の講演内容

1. 量子コンピュータの動作原理
2. 様々な量子ビット
3. アニーリングマシンの使い方

1. 量子コンピュータの動作原理

量子技術とは？

量子の持つ特異な性質や振る舞いの物理法則を利用し、
計算、通信、計測などを行う技術の総称

社会
実装

新素材・プロセス開発

暗号解読

量子インターネット

高精度時計

量子認証

新薬開発

物流最適化

金融最適化

安全な暗号鍵配送

脳磁・心磁計測

量子コンピューティング

量子通信・量子暗号

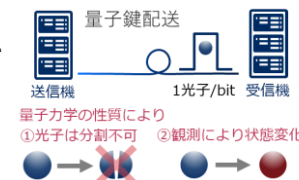
量子センシング

技術

計算の単位「量子ビット」
が0でもあり1でもある
「重ね合わせ」という
状態を活用し、**超高速・超並列処理**を
実現(限定用途の量子アニーリング方式や汎用の量子ゲート方式がある)



量子の位置と速度を同時に正確
に決定することは出来ないという
「不確定原理」を利用し、**盗聴
の完全な検知**を可能にする量子
暗号と、光通信
の雑音限界を越え
る量子通信技術



量子状態が環境
変化に影響され
やすいことを
逆にとり、
**時間や物理量(磁気・温度等)
の微小な変化**を計測



劇的な質的变化をもたらす技術として世界各国が注目

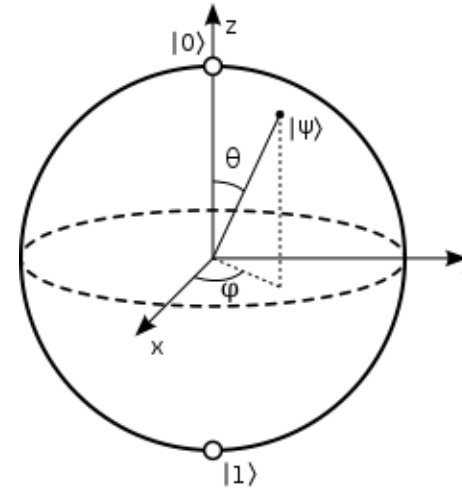
量子ビットとその実現方法

従来コンピュータでは電圧等で0と1を表現。一方で量子コンピュータでは量子重ね合わせが利用できる「量子ビット」を用いて高速処理を実行

古典ビット



量子ビット



ブロッホ球上で古典ビットは北極・南極の2点のみ。量子ビットでは球面上の任意の点を表せる。

$$\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$$

ただし $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$

- ◆ 量子ビットの候補
「0」「1」の状態をとれるものであればよい。
例えば 超伝導、イオントラップ、シリコン、光..
後ほど詳細を説明します

量子コンピューティング技術の分類

量子コンピューティング技術 (量子の振る舞いを取り入れたものを含む広義)

ゲート方式

従来のコンピュータのビットを量子ビットで置き換え
現状、誤り訂正機能無し／計算規模小(NISQ*)

量子
(イオントラップ)

光量子

量子(超伝導)

Honeywell

IonQ

中国科学
技術大学

IBM

Google

理研
東大

NEC

誤り耐性型

アニーリング方式

イジングモデルを物理の法則等を利用して解く、
組合せ最適化などに特化

量子(超伝導)

デジタル回路(NTTのみ光回路)

産総研

D-wave

NEC

NEC

日立

富士通

東芝

NTT

理想的には誤り耐性型が望まれるが、
当面はNISQの利用が続く

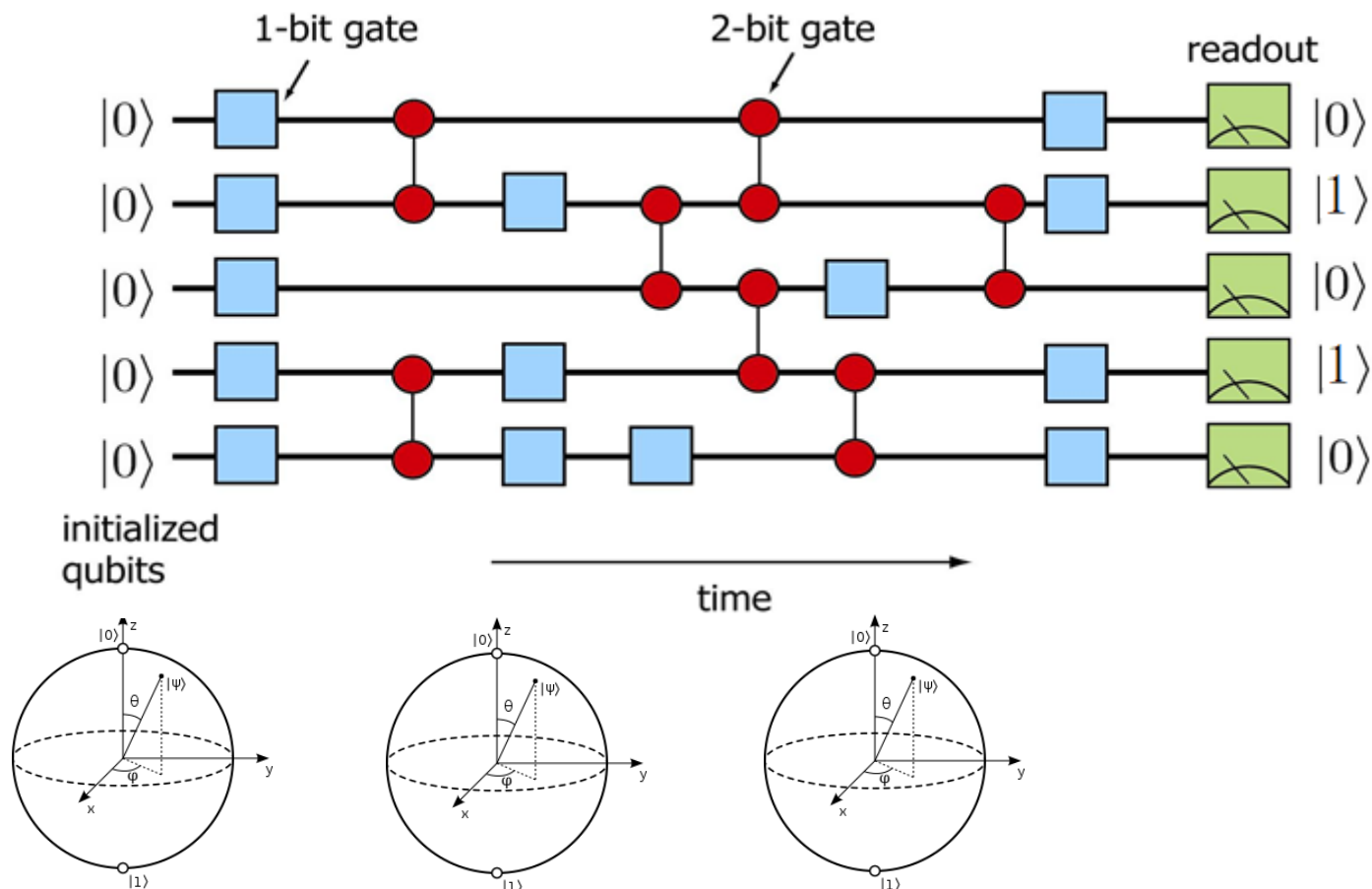
*) Noisy Intermediate-Scale Quantum computer

(注) NECの調査による。全ての研究開発機関を網羅しているわけではありません。

ゲート方式の動作原理

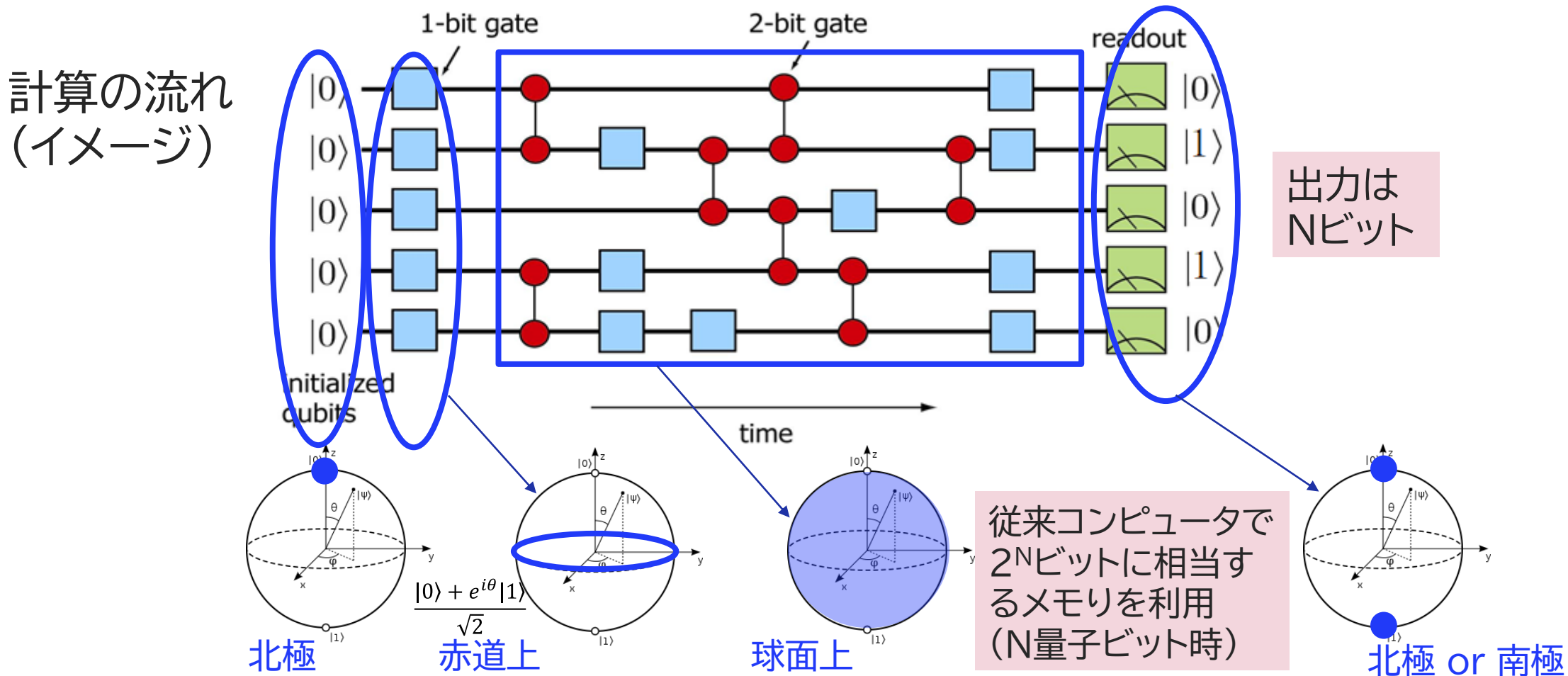
量子ビットに対して様々なビット操作(数学的には行列演算)を行うことにより
所望の演算をする方式で、目的に応じたアルゴリズムが存在

計算の流れ
(イメージ)



ゲート方式の動作原理

量子ビットに対して様々なビット操作(数学的には行列演算)を行うことにより
所望の演算をする方式で、目的に応じたアルゴリズムが存在



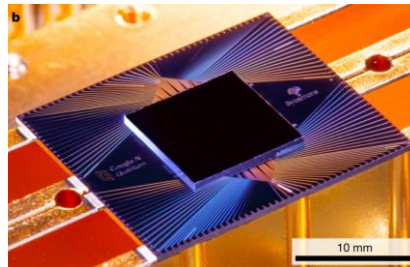
ゲート方式のホットなトピックス： 量子超越性の実証

◆ 量子超越性とは？

古典計算機を用いて妥当な時間内に処理できない問題が量子計算機で処理できることを実証すること。対象となる処理に実用性があるかどうかは問わない

◆ Google 出展: Nature 574, 505-510 (2019)

- 超伝導53量子ビットマシン「**Sycamore**」で「**ランダム量子回路サンプリング**」処理を実行
- 誤り訂正機能がないため1回の計算で正答を出せず、200秒で100万回計算し平均化
- IBMスパコンSummit(当時性能No.1)で計算すると1万年かかるとGoogleは試算→ IBMは2日半で計算できると反論



◆ 中国科学技術大学 出展: Science 370, 1460-1463(2020)

- 光子76量子ビットマシン「**九章**」で「**ガウシアンボゾンサンプリング**」処理を実行
- 「九章」では統計をとり200秒で解が求まるが、スパコン「富岳」は6億年かかると試算



<https://www.afpbb.com/articles/-/3319754>

ゲート方式のアルゴリズム例

◆ 誤り耐性型

アルゴリズム	アプリ・問題
Shorのアルゴリズム	因数分解による暗号解読
Groversのアルゴリズム	探索問題、組合せ最適化
デジタル量子シミュレーション	新薬・新素材開発 (量子化学計算)
HHLアルゴリズム	ポートフォリオ高速最適化
量子推薦システム	推薦
トポロジカルデータ分析	データ分析
量子深層学習	制限ボルツマンマシンの ネットワーク学習

◆ NISQ

アルゴリズム	アプリ・問題
量子近似最適化 (QAOA)	組合せ最適化、教師なし機械 学習
変分量子固有値ソルバ (VQE)	新薬・新素材開発 (量子化学計算)
量子回路学習(QCL)	教師あり機械学習
量子ニューラルネット ワーク(QNN)	教師あり機械学習

QAOA: Quantum Approximate Optimization Algorithm
VQE: Variational Quantum Eigensolver
QCL: Quantum Circuit Learning
QNN: Quantum Neural Network

誤り耐性型の実現は10年以上先と言われており、
産業化観点では今使えるNISQアプリの探索が急務

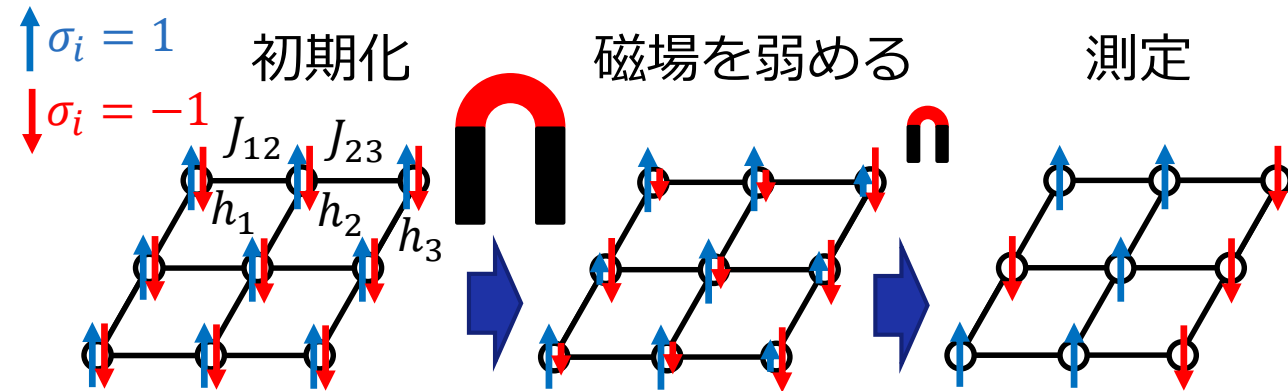
戦略プロポーザル: みんなの量子コンピューター(CRDS-FY2018-SP-04) 表2.3を参照

アニーリング方式の動作原理

解きたい問題をイジングモデルに変換。強い磁場で初期化後、徐々に弱め、コスト関数(H)の最小エネルギー状態(最適解)に近づく

イジングモデル
のコスト関数

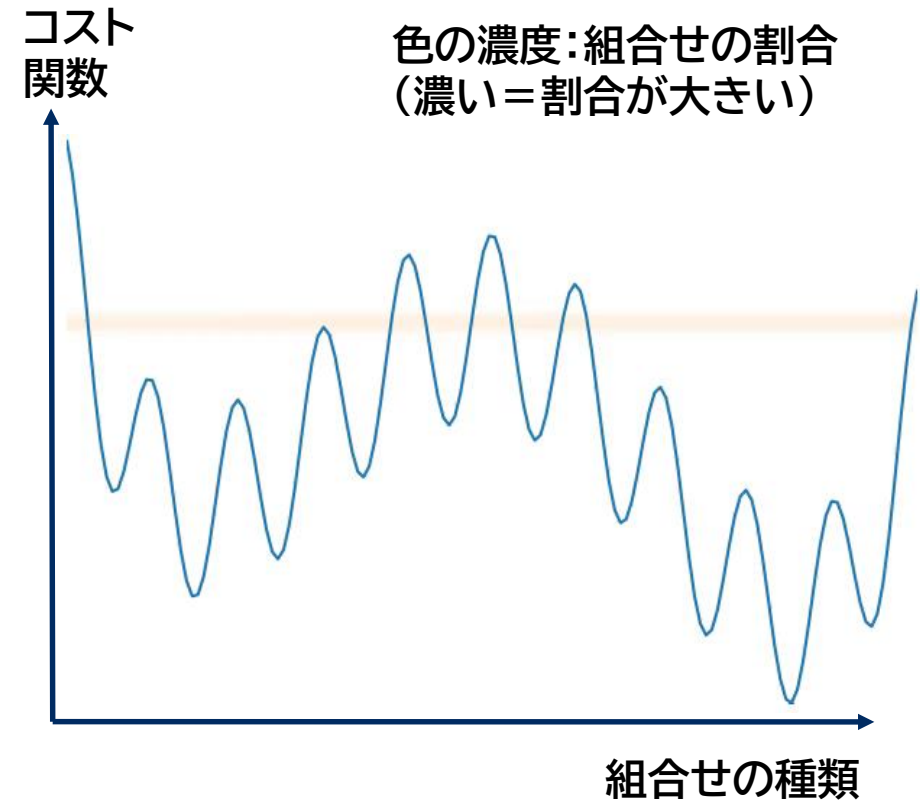
$$H = - \sum_{i < j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_i h_i \sigma_i$$



量子効果を”ゆっくり弱めて”最小コストの組合せを見つける
コストが低い＝より良い組合せ

量子効果

強い(前半): それぞれの組合せを均等に扱う
弱い(後半): 数少ない組合せのみを扱う



<https://www.smapip.is.tohoku.ac.jp/>
東北大学・田中研究室のサイトより

NISQとアニーリング方式の比較

NISQとアニーリング方式のアプリケーション領域は多くが重なっている

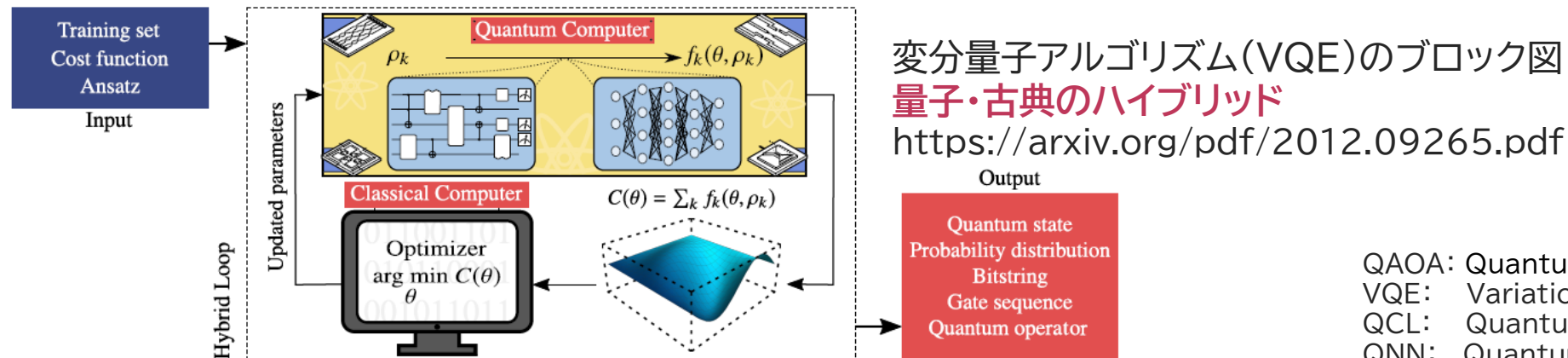
NISQ

QAOA	組合せ最適化
VQE	量子化学計算
QCL/QNN	教師あり機械学習

アニーリング方式

組合せ最適化

ボルツマンサンプリング(機械学習)



従来コンピュータが苦手とする部分を補うのが量子コンピュータ

QAOA: Quantum Approximate Optimization Algorithm
VQE: Variational Quantum Eigensolver
QCL: Quantum Circuit Learning
QNN: Quantum Neural Network

2. 様々な量子ビット

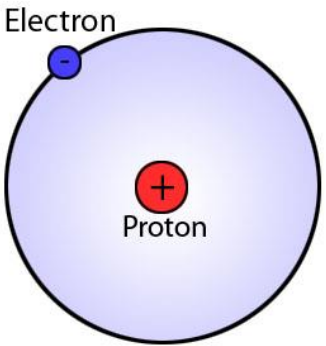
量子ビット Quantum bit (qubit)

- ◆ 量子ビットは量子コンピュータの基本ユニット
- ◆ 量子ビットはプロセッサとメモリ両方の機能を持つ
- ◆ 量子力学的な2準位を利用

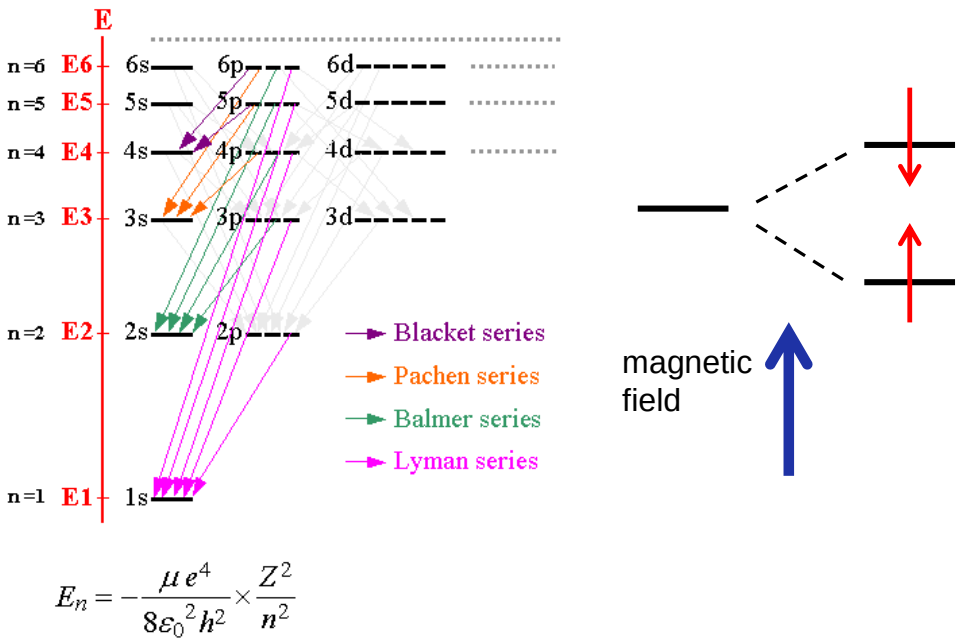
候補

- 超伝導
- イオントラップ
- シリコン
- 光

例1:水素原子



例2:磁場下での電子系

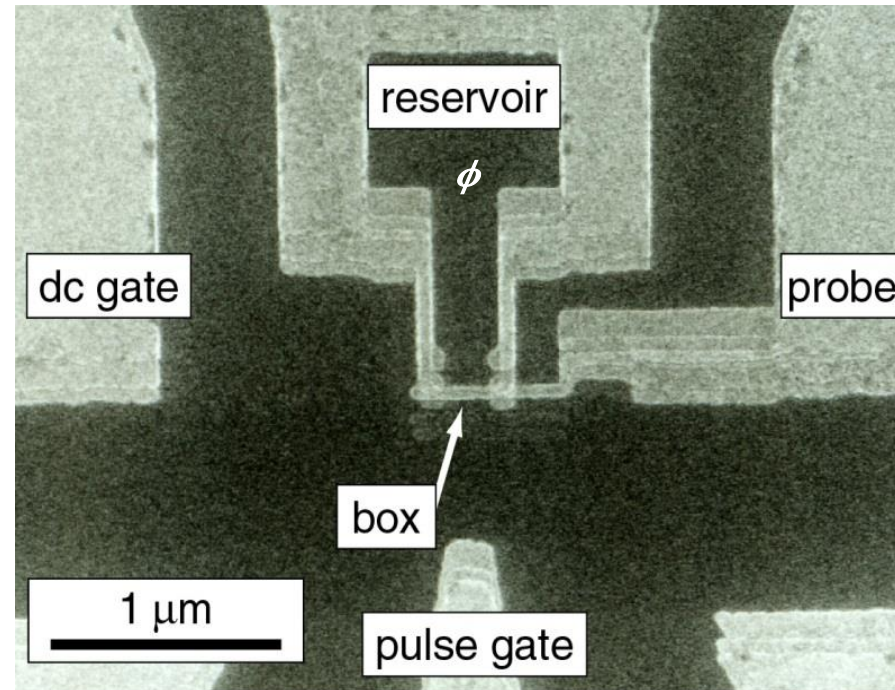


$$E_n = -\frac{\mu e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \times \frac{Z^2}{n^2}$$

<http://dueysew.blog.fc2.com/blog-category-5.html>

超伝導量子ビット

1999年にNECが世界で初めて実現



材料系 $\text{Al}/\text{Al}_2\text{O}_3$

Y. Nakamura et al., "Coherent control of macroscopic *quantum* state in a Cooper-pair box", *Nature* 398, 786-788 (1999)

超伝導量子ビット 利点/欠点

◆ 利点

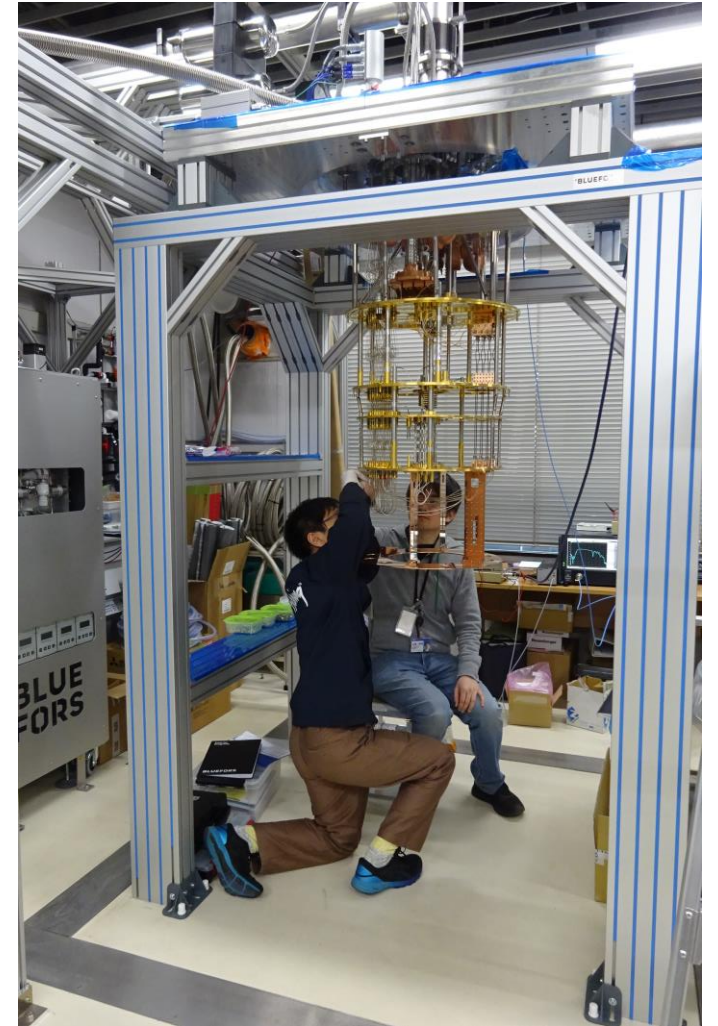
- 固体素子のため集積化に向く、量子ビット数が多い
ゲート型では127ビット(2021、IBM)
アニーリング型では> 5,000ビット(2021、D-wave社)

◆ 欠点

- 極低温(10mK)を実現するため大型装置が必要

超伝導量子ビットの研究開発をしている機関

Google, IBM, Rigetti Computing, Quantum Circuits, Northrop Grumman, Raytheon BBN Technology, NEC, U-Tokyo, RIKEN...

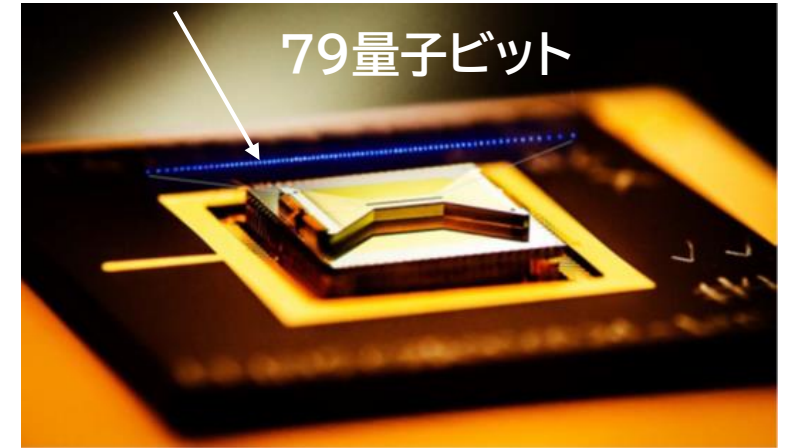


NEC実験室の風景

イオントラップ量子ビット

- ◆ 空間上に浮かせたイオンを量子ビットして利用する
- ◆ 冷凍機は不要
- ◆ 環境との相互作用がほとんどないので量子性保持時間（コヒーレンス時間）は数分にもなる（参考：超伝導だと最大でも数百マイクロ秒）
- ◆ 超伝導よりも計算時間はかかる

イオントラップ



[https://ionq.com/
Nat. Comm. 10, 5464 \(2019\).](https://ionq.com/Nat.Comm.10,5464(2019).)

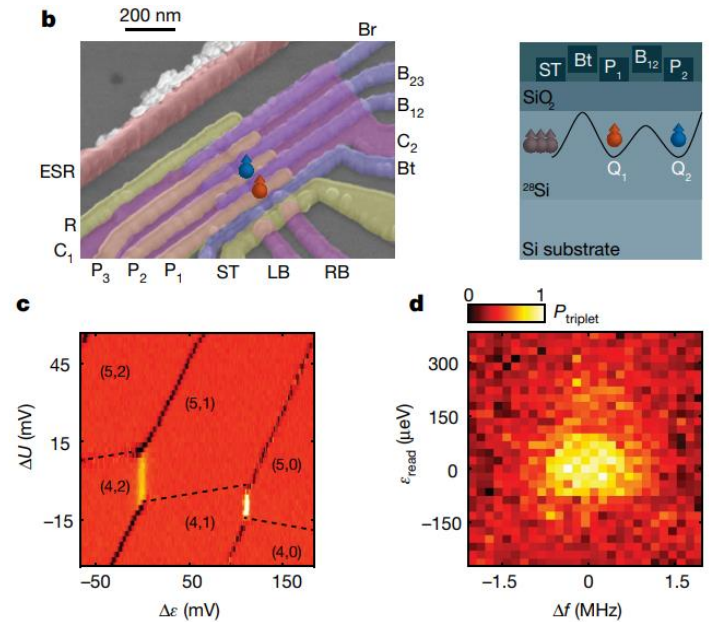
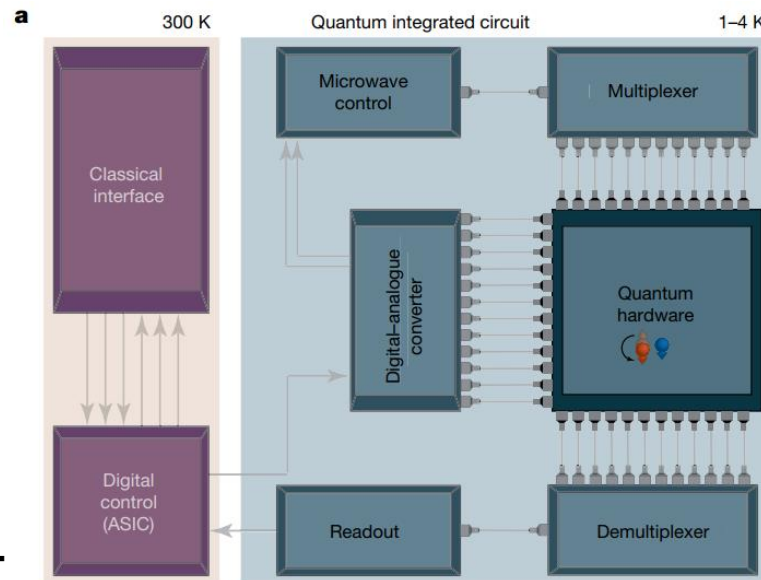
研究機関:
IonQ, Honeywell ….

シリコン量子ビット

- シリコンをベースとする技術
- CMOSの製造技術を利用できる
- 動作温度は1K~数K。もし ^4He の気化温度(4.2K)より高い温度で動作すると冷却装置の負担を低減できる(超伝導は0.01Kまで冷やさなければならない)
- ただし、動作した量子ビット数は少ない(~2ビット).

Intel, Silicon Quantum Computing, Hitachi ...

Intel
Nature 580, 355–359 (2020).

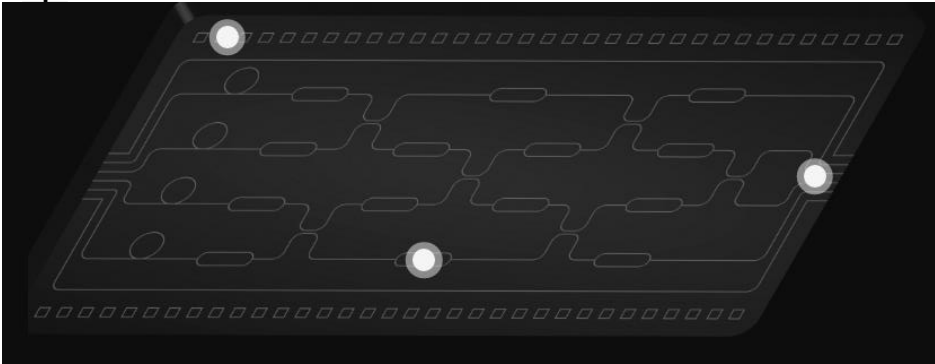


光量子ビット

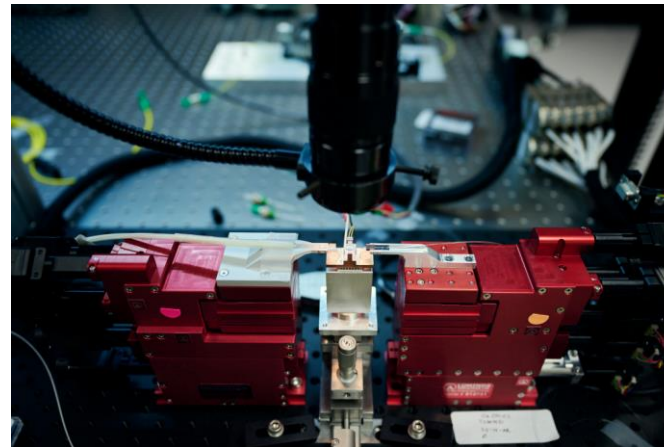
- 光子の偏光や位相状態を利用
- 室温での動作
- 長距離を飛ばすことができる(他の量子ビットには無い特長)...量子暗号通信との親和性
- ゲート動作(演算)の実現が難しい...光同士での非線形な相互作用が難しい
- 最大量子ビット数は~76

Research Institutes:

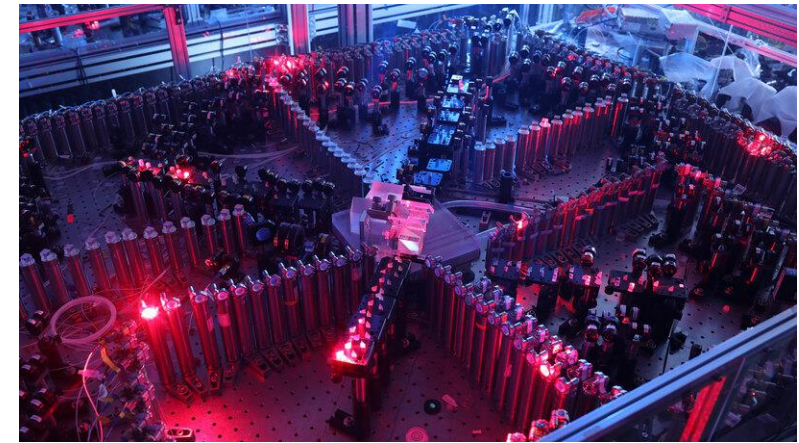
XANADU, PsiQuntum, NTT, 中国科学技術大学



Waveguide-type Qubit (XANADU)
<https://www.xanadu.ai/hardware>



中国科学技術大学

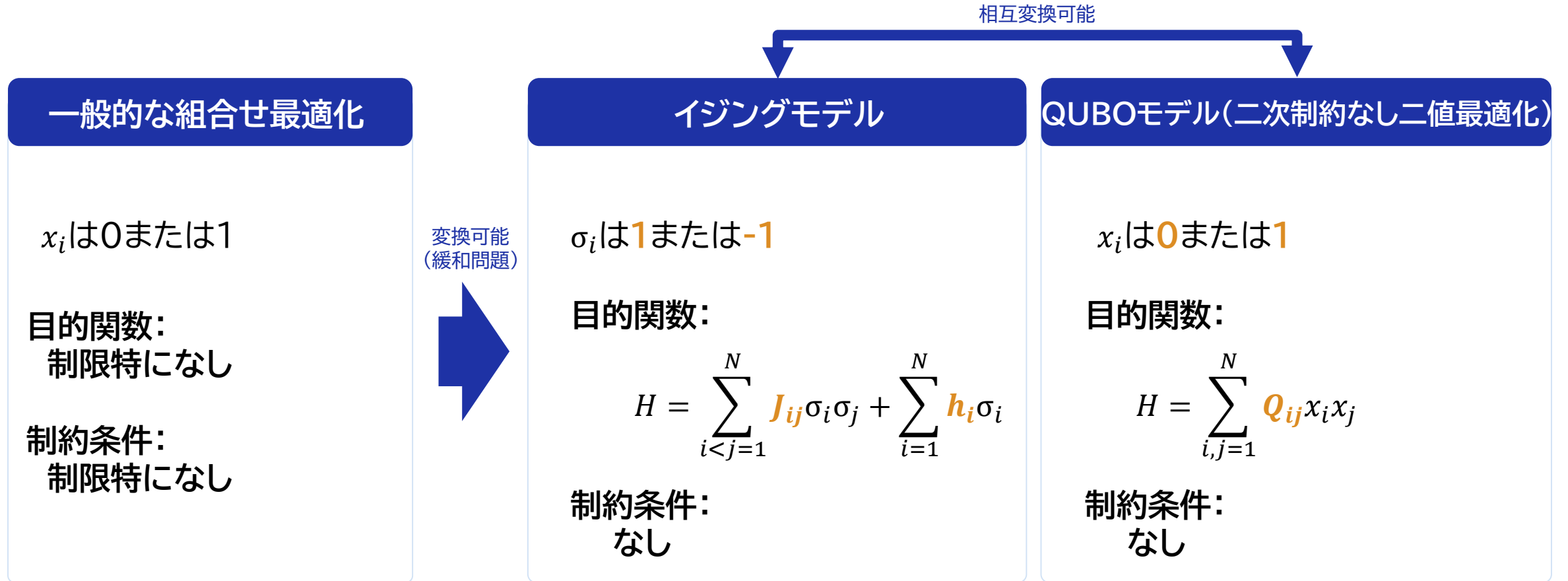


<https://www.afpbb.com/articles/-/3319754>

3. アニールリングマシンの使い方

数式での表現方法

◆ アニーリングマシンを利用するための表現方法



組合せ最適化問題の表現

◆ QUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization)

■ 最近のアニーリングにおける組合せ最適化問題の標準形式

$$H = \sum_{i,j} Q_{ij} x_i x_j \quad x_i = 0, 1$$

- H: コスト関数
- Q_{ij} : 行列Qのij成分

■ Q が与えられたときに H を最小にする x の組合せを見つける

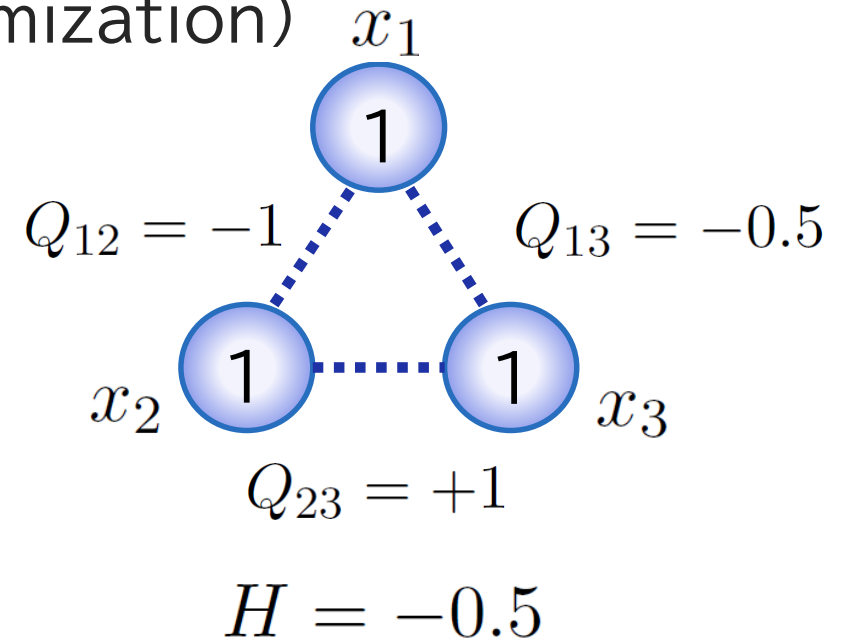
- 組合せ最適化問題の一般化
- 「与えられた値以下の H になる x が存在するかどうか」はNP完全問題

F. Barahona, J. Phys. A 15, 3241 (1982).

■ イジング形式と等価

■ 解きたい組合せ最適化問題をQUBOに書き換える作業が必要

A. Lucas, Frontiers in Physics 2, 2296 (2014).



地図彩色問題をQUBOで表す

◆ 地図中の隣同士の領域を異なる色で塗り！

- 組合せ最適化問題として：色の組合せのうち隣同士が異なる色になる組合せをみつけよ

◆ 関東地方の四色塗り分け

- 赤、緑、青、黄

- 組合せの例：

{茨城: 赤, 栃木: 緑, 群馬: 青, 埼玉: 黄, 千葉: 青, 東京: 緑, 神奈川: 黄}



赤 : 0, 緑 : 1, 青 : 2, 黄 : 3

[0, 1, 2, 3, 2, 1, 3]



[(1, 0, 0, 0), (0, 1, 0, 0), (0, 0, 1, 0), (0, 0, 0, 1), (0, 0, 1, 0), (0, 1, 0, 0), (0, 0, 0, 1)]

(One-hot encoding)

28ビット利用、()内の4ビットのうち1になるのは1ビットのみ



地図彩色問題をQUBOで表す

◆ QUBOで表す（地図中の隣同士を異なる色で塗れ）

■ 県 p を色 c で塗る： $x_{pc} = 1$

塗らない： $x_{pc} = 0$

■ 赤、緑、青、黄を $c = 0, 1, 2, 3$ とする

- 右図で茨城県（ $p = 0$ ）は $x_{00} = 1, x_{01} = x_{02} = x_{03} = 0$

$$H = \sum_{i,j} Q_{ij} x_i x_j$$

◆ H を作る指針

■ 以下をみたすような H にする

A) 隣同士が異なる色だと H が小さくなる

B) 各県は一色で塗ると H が小さくなる

- $x_{00} = x_{01} = 1, x_{02} = x_{03} = 0$ などでは H が大きく

ルールに違反する組合せにはペナルティ(大きなコスト)を課す



地図彩色問題をQUBOで表す

◆ H を作る（地図中の隣同士を異なる色で塗れ）

■ 県 p を色 c で塗る： $x_{pc} = 1$

塗らない： $x_{pc} = 0$

A) 隣同士が異なる色だと H が小さくなる

B) 各県は一色で塗ると H が小さくなる

• $x_{00} = x_{01} = 1, x_{02} = x_{03} = 0$ などでは H が大きく

隣同士が同じ色 c になるときだけ1、他は0

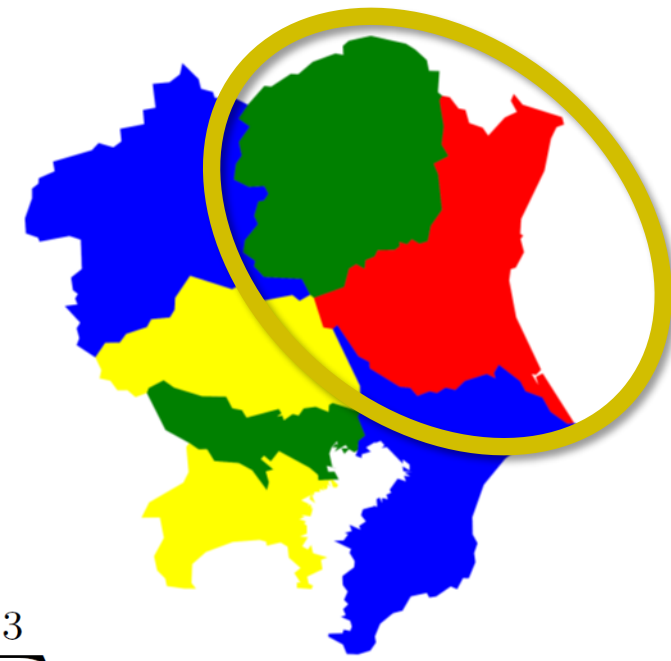
$$H = \sum_{\langle p_1, p_2 \rangle} \sum_{c=0}^3 x_{p_1 c} x_{p_2 c}$$

隣同士のペア

栃木	茨城
$x_{10} = 0$	$x_{00} = 1$
$x_{11} = 1$	$x_{01} = 0$
$x_{12} = 0$	$x_{02} = 0$
$x_{13} = 0$	$x_{03} = 0$

$$\sum_{c=0}^3 x_{0c} x_{1c} = 0$$

$$H = \sum_{i,j} Q_{ij} x_i x_j$$



地図彩色問題をQUBOで表す

◆ H を作る（地図中の隣同士を異なる色で塗れ）

■ 県 p を色 c で塗る： $x_{pc} = 1$

塗らない： $x_{pc} = 0$

A) 隣同士が異なる色だと H が小さくなる

B) 各県は一色で塗ると H が小さくなる

- $x_{00} = x_{01} = 1, x_{02} = x_{03} = 0$ などでは H が大きく

隣同士が同じ色 c になるときだけ1、他は0

$$H = \sum_{\langle p_1, p_2 \rangle} \sum_{c=0}^3 x_{p_1 c} x_{p_2 c}$$

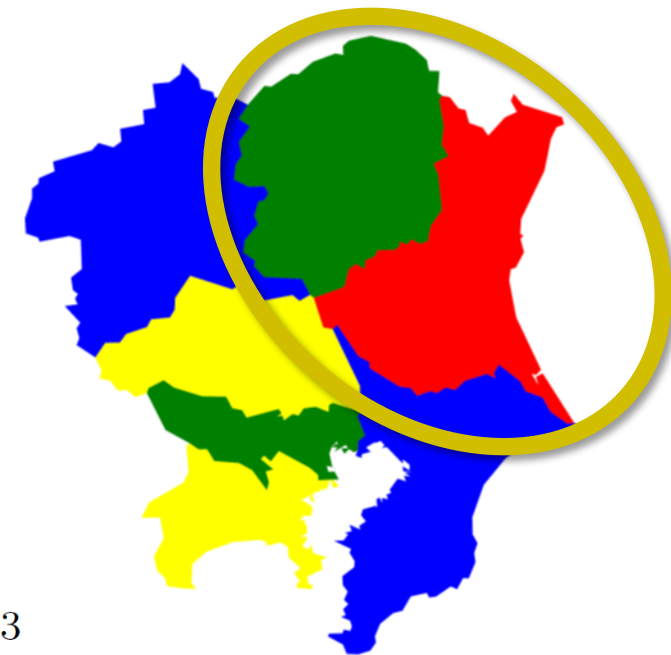
隣同士のペア

もしも同じ色だと...

栃木	茨城
$x_{10} = 1$	$x_{00} = 1$
$x_{11} = 0$	$x_{01} = 0$
$x_{12} = 0$	$x_{02} = 0$
$x_{13} = 0$	$x_{03} = 0$

$$\sum_{c=0}^3 x_{0c} x_{1c} = 1$$

$$H = \sum_{i,j} Q_{ij} x_i x_j$$



地図彩色問題をQUBOで表す

◆ H を作る（地図中の隣同士を異なる色で塗れ）

■ 県 p を色 c で塗る： $x_{pc} = 1$

塗らない： $x_{pc} = 0$

A) 隣同士が異なる色だと H が小さくなる

B) 各県は一色で塗ると H が小さくなる

- $x_{00} = x_{01} = 1, x_{02} = x_{03} = 0$ などでは H が大きく

隣同士が同じ色 c になるときだけ1、他は0

$$H = \sum_{\langle p_1, p_2 \rangle} \sum_{c=0}^3 x_{p_1 c} x_{p_2 c} +$$

隣同士のペア

$$\sum_{p=0}^7 \left(\sum_{c=0}^3 x_{pc} - 1 \right)^2$$

県が一色のときだけ0、他は正の値

$$H = \sum_{i,j} Q_{ij} x_i x_j$$

茨城

$$\begin{aligned} x_{00} &= 1 \\ x_{01} &= 0 \\ x_{02} &= 0 \\ x_{03} &= 0 \end{aligned}$$


$$\left(\sum_{c=0}^3 x_{pc} - 1 \right)^2 = 0$$

地図彩色問題をQUBOで表す

◆ H を作る（地図中の隣同士を異なる色で塗れ）

■ 県 p を色 c で塗る： $x_{pc} = 1$

塗らない： $x_{pc} = 0$

A) 隣同士が異なる色だと H が小さくなる

B) 各県は一色で塗ると H が小さくなる

- $x_{00} = x_{01} = 1, x_{02} = x_{03} = 0$ などでは H が大きく

隣同士が同じ色 c になるときだけ1、他は0

$$H = \sum_{\langle p_1, p_2 \rangle} \sum_{c=0}^3 x_{p_1 c} x_{p_2 c} +$$

隣同士のペア

$$\sum_{p=0}^7 \left(\sum_{c=0}^3 x_{pc} - 1 \right)^2$$

県が一色のときだけ0、他は正の値

$$H = \sum_{i,j} Q_{ij} x_i x_j$$

もしも1色
以外だと...

茨城
$x_{00} = 1$
$x_{01} = 0$
$x_{02} = 0$
$x_{03} = 1$



地図彩色問題をQUBOで表す

◆ H を作る（地図中の隣同士を異なる色で塗れ）

■ 県 p を色 c で塗る： $x_{pc} = 1$

塗らない： $x_{pc} = 0$

A) 隣同士が異なる色だと H が小さくなる

B) 各県は一色で塗ると H が小さくなる

- $x_{00} = x_{01} = 1, x_{02} = x_{03} = 0$ などでは H が大きく

隣同士が同じ色 c になるときだけ1、他は0

$$H = \sum_{\langle p_1, p_2 \rangle} \sum_{c=0}^3 x_{p_1 c} x_{p_2 c} +$$

隣同士のペア

$$\sum_{p=0}^7 \left(\sum_{c=0}^3 x_{pc} - 1 \right)^2$$

県が一色のときだけ0、他は正の値

$$H = \sum_{i,j} Q_{ij} x_i x_j$$

もしも1色
以外だと...

茨城

$$\begin{aligned} x_{00} &= 0 \\ x_{01} &= 0 \\ x_{02} &= 0 \\ x_{03} &= 0 \end{aligned}$$

$$\left(\sum_{c=0}^3 x_{pc} - 1 \right)^2 = 1$$



地図彩色問題をQUBOで表す

◆ H を作る（地図中の隣同士を異なる色で塗り）

■ 県 p を色 c で塗る： $x_{pc} = 1$

塗らない： $x_{pc} = 0$

A) 隣同士が異なる色だと H が小さくなる

B) 各県は一色で塗ると H が小さくなる

- $x_{00} = x_{01} = 1, x_{02} = x_{03} = 0$ などでは H が大きく

隣同士が同じ色 c になるときだけ1、他は0

$$H = A \times \sum_{\langle p_1, p_2 \rangle} \sum_{c=0}^3 x_{p_1 c} x_{p_2 c} + B \times \sum_{p=0}^7 \left(\sum_{c=0}^3 x_{pc} - 1 \right)^2$$

隣同士のペア

県が一色のときだけ0、他は正の値

ソフトウェアが
やってくれる

$$H = \sum_{i,j} Q_{ij} x_i x_j$$



生産計画が複雑化する多品種少量生産への対応(NECの成果)

- ◆ 多品種少量生産時代には、複雑化する生産計画立案への対応が競争力に

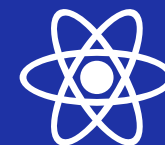
AI(機械学習)



何をどれだけ
作るべきか



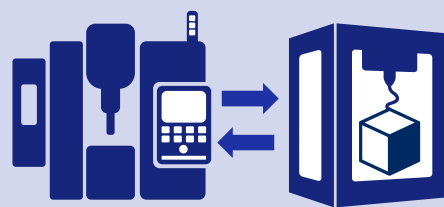
アニーリング



どの順番で製品を加工すべきか
いつ、どのような手順で作るか
設備、人員等 をどう配備するか

組合せ最適化問題

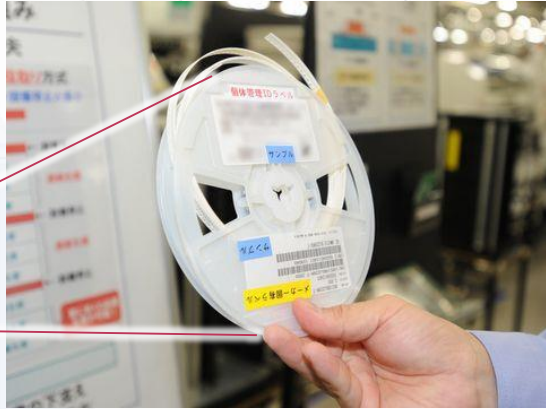
3Dプリンタ/レーザー加工装置/表面実装装置など、
様々な製品を加工できる汎用加工装置の進化



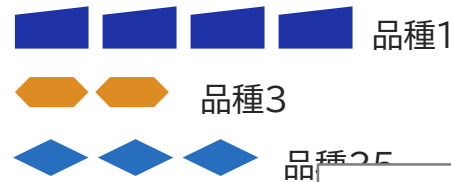
加工する製品の切り替えにかかる時間
(段取り替えロス)の最小化が課題
どの製品からどの製品に切り替えるか
によって、ロス時間が異なる

生産計画最適化:NEC関連会社工場における生産計画立案事例

◆ SMT(表面実装)ラインの最適化に適用



当日締め切り



翌日締め切り



...

n日後締め切り



例

締め切り日が異なる数百品種のオーダーに対して
当日の最適な生産計画(製造順)を立案

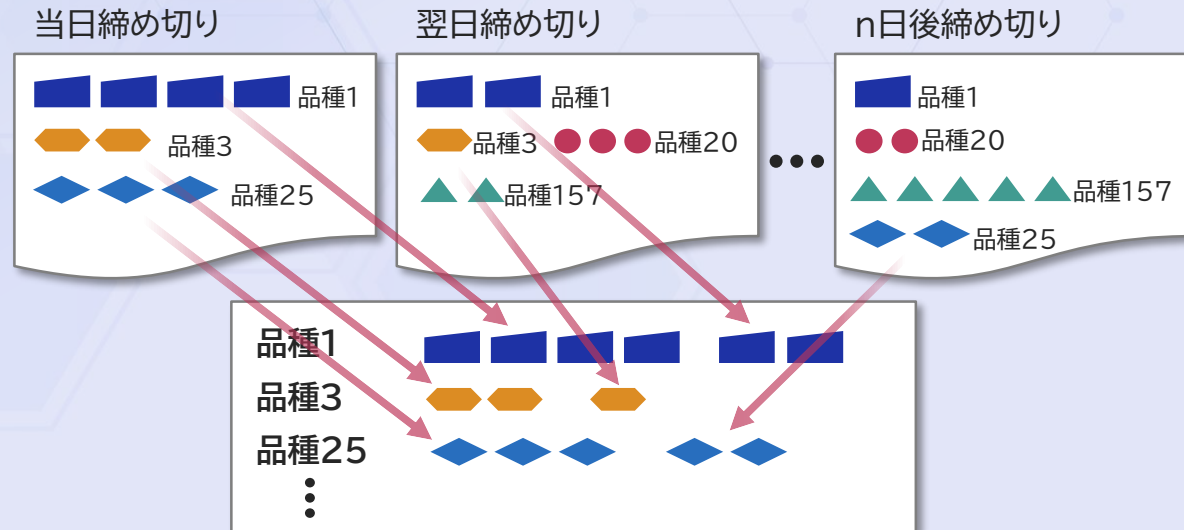
- 生産する品種が切り替わるたびに発生する「段取り替え時間」を最小化したい
- 品種は10程度のグループに分類されており、同じグループの品種を連続的に生産すると効率がよい
- 当日締め切りのオーダーは必ず生産する

生産計画最適化：結果

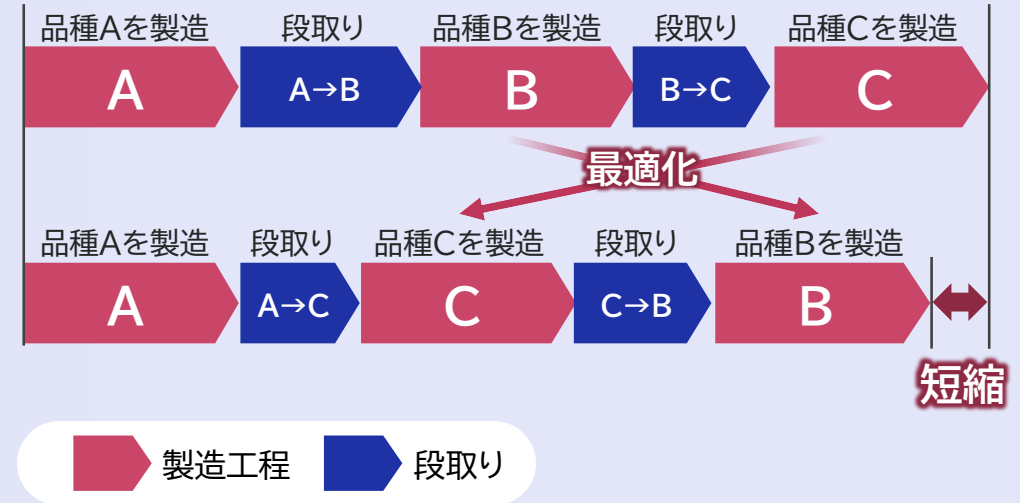
匠の技のデジタル化

https://jpn.nec.com/press/202003/20200317_01.html

●当日製造する品種の選択イメージ



●製造順序最適化イメージ



人による計画立案



- 熟練工でも1時間、新人では半日
 - ・ 熟練工の不足、後継者育成問題
 - ・ システム化・アルゴリズム化が困難

アニーリングマシンによる計画立案

- 最適化にかかる時間は数秒
 - ・ 熟練工より、数パーセント無駄の少ない計画立案が可能であることを検証

\Orchestrating a brighter world

NEC