

[16-D-7]

ITエンジニアのための量子コンピュータ入門

宇津木 健

2018/2/16@ホテル雅叙園東京



**Developers
Summit**

宇津木 健 (ウツギ タケル)

- 2013～ メーカ研究職 (光応用システム)
- 2013～ 量子情報勉強会 (@秋葉原、毎月)
- 2016～ CodeZine 連載 (不定期)
- 2017～ 量子コンピュータアプリ勉強会 (@本郷、ほぼ毎週)

Twitter: @utsugitakeru

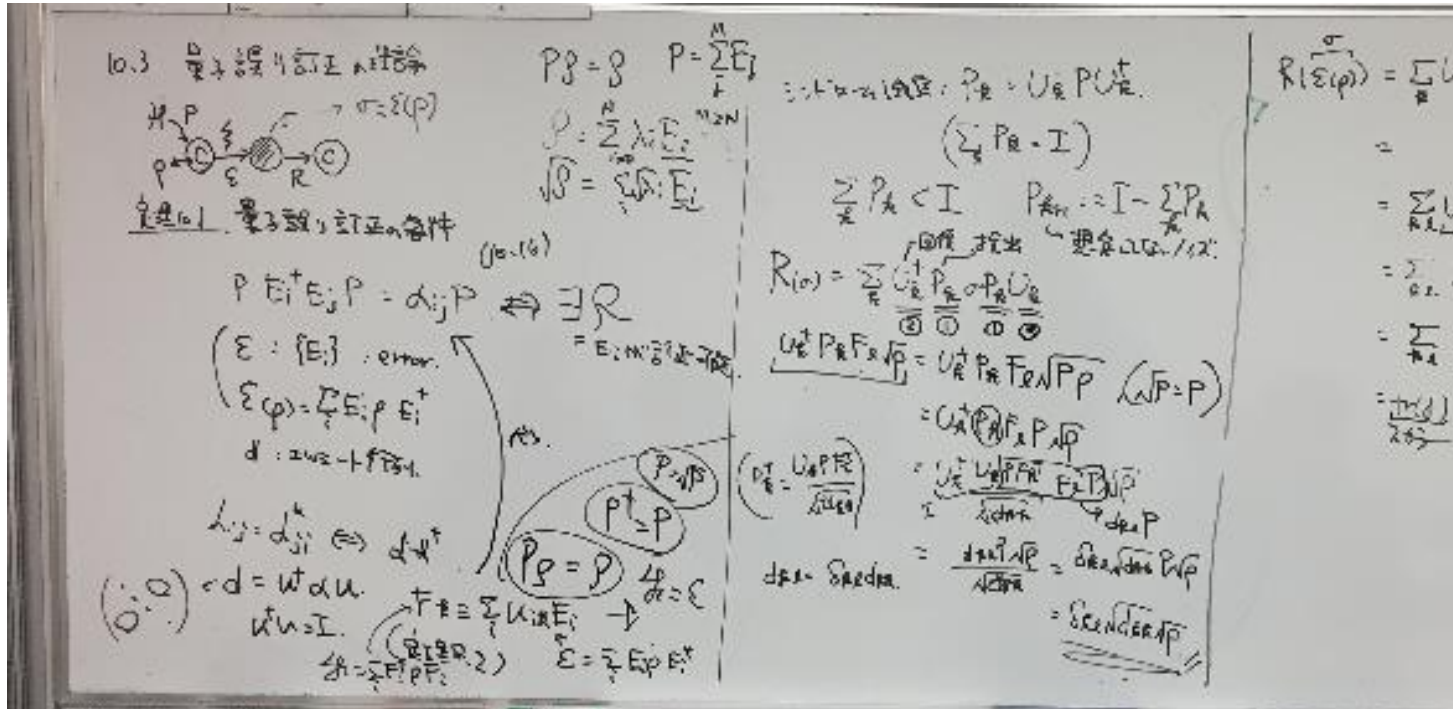
CodeZine



- 第1回：量子アニーリングってなに？
- 第2回：シミュレーテッドアニーリングの実装
- 第3回：日本と海外の量子コンピュータ開発動向
- 第4回：コヒーレントイジングマシンってなに？
- 第5回：今回の内容を…

量子情報勉強会 (@秋葉原、毎月)

- 「ニールセン・チャン」と呼ばれる有名な教科書を読む
- 数式の導出と物理的な解釈を勉強する
- 今は「量子誤り訂正」の章



量子コンピュータを数学的な基礎から知りたい方向け

量子コンピュータアプリ勉強会 (@本郷、ほぼ毎週)

- ベンチャー企業MDRが主催している勉強会
- 量子コンピュータに関するいろいろなことをテーマに調べて発表
- OpenQLプロジェクトなど、懇親も



量子コンピュータ関係で何かしたい方向け

量子コンピュータの最近の話題

- Intel : CESで49量子ビット発表
- IBM : 50量子ビット開発、20量子ビット商用化
- Microsoft : Q#公開
- NEC : 新型量子アニーリングマシンの開発に着手
- 豊田通商とデンソー : 量子アニーリングの実証実験開始
- NICT : 量子耐性暗号LOTUSを開発
- 内閣府 : ImPACTプロジェクトでQNNクラウド公開
- 文部科学省 : 量子科学に300億円/10年
- 経済産業省 : 人財発掘500万円/人

大企業・国家予算の動きが活発化

なぜそんなに注目されているのか？

- IoTとの関連で出て来る
- AI・機械学習との関連で出て来る
- 仮想通貨との関連で出て来る
- 暗号技術との関連で出て来る
- 投資との関連で出て来る
- ImPACTのQNNとの関連で出て来る
- ムーアの法則終焉の関連で出て来る
- ミスコンとの関連で出て来る

これまでの解けなかった問題を高速に計算できる可能性

なぜそんなに注目されているのか？

■大企業が積極的に研究投資しているから。

IBM

- ・ライブラリQISKitの公開
- ・50量子ビットに向けたゲート型開発
- ・IBM Qクラウドサービス
- ・コンテスト実施等

Google

- ・ライブラリOpenFermionの公開
- ・50量子ビットに向けたゲート型開発
- ・量子アニーリングマシン開発
- ・D-Wave、NASAとの共同研究等

Microsoft

- ・VisualStudioで使えるQ#の公開
- ・トポロジカル量子コンピュータの研究等

Intel

- ・49量子ビットゲート型開発
- ・シリコン/スピンによるゲート型開発等

“量子スプレマシー”がキーワード

本日の疑問

大企業がこぞって投資し、国家予算がつぎ込まれ、
注目を集める次世代高速計算機 “量子コンピュータ”

- ・ 本当にそんなものが実現するのだろうか？
- ・ いつ頃実現するのだろうか？
- ・ われわれは今、何をすべきなのだろうか？

本日のメニュー

1. 量子コンピュータってそもそも何か知る
2. 量子コンピュータ開発の現状を把握する
3. われわれに今できることは何かを考える
4. 量子コンピュータのプログラミングについて紹介する
5. 最後に、想いを込めて一句詠む

本日のメニュー

1. 量子コンピュータってそもそも何か知る
2. 量子コンピュータ開発の現状を把握する
3. われわれに今できることは何かを考える
4. 量子コンピュータのプログラミングについて紹介する
5. 最後に、想いを込めて一句詠む

量子コンピュータのざっくりした説明

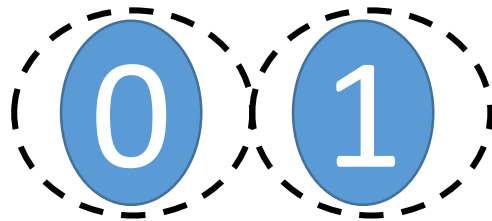
■原理

量子力学

を自在に操って

超並列計算

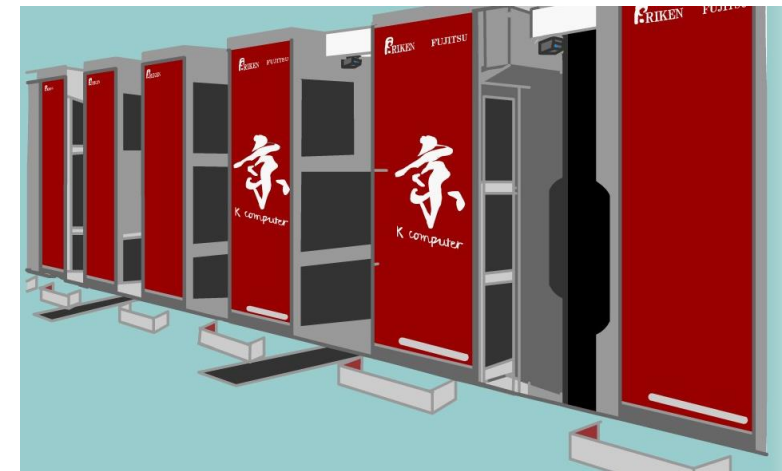
量子ビット



重ね合わせ状態
→確率的に0/1が決まる



古典コンピュータの
限界を突破



<http://www7b.biglobe.ne.jp/~yyyyy/KOBE.html>

※注：通常のコンピュータは「古典コンピュータ」と呼びます。

量子コンピュータのざっくりした説明

■ハードウェアの作り方

超電導回路

ジョセフソン接合を利用した
超電導状態の電気回路チップ

イオントラップ

イオンを電磁場を制御して
トラップし操作

量子ドット

半導体ナノ構造を利用して
量子状態を保持・操作

量子的な光

単一光子、スクイズド光
など非古典光を利用

超電導回路が一步進んでいるが本命かは？

量子コンピュータの定義について

・・・決まった定義は未だないが、だいたいこんな感じ

- ✓ 量子ビット(重ね合わせ状態)が実現されている
- ✓ 量子もつれ(エンタングルメント)が実現されている
- ✓ 古典コンピュータの限界を突破している

現状は、

量子ビットはできてそうだが、
古典コンピュータとどっこい

エンタングルメントもありそうだが
実用的な計算はできない

量子ビットはないが、
量子計算的な考え方に基づいて
設計された古典コンピュータ

・・・みんな頑張っている途中！

量子イジングマシン方式と量子ゲート方式

量子コンピュータ

①量子イジングマシン方式
【量子アナログ計算】

②量子ゲート方式
【量子デジタル計算】

最適化問題に特化した計算機
Isingモデルなどの統計モデルを実装し、
基底状態を求めることで計算
※D-wave, ImPACTが~2000量子ビット

万能量子計算機（量子チューリングマシン）
量子ビットを量子ゲートで操作して計算
エラー訂正を行うことでデジタル計算
※IBM, Google, Intelが~50量子ビット

しらみつぶしの探索が必要な問題に
対して、**近似解**が古典コンピュータ
より高速に（精度よく）求まる。

次元の違う物な
ので比較しない

通常のコンピュータの**上位互換+**
因数分解など、いくつかの問題は
古典コンピュータより高速に解ける。

量子じゃないやつら

- 日立製作所：CMOSアニーリング
(量子コンピュータに匹敵！?)
→専用チップで最適化問題ソルバーを実装

次元の違う物なので比較しない

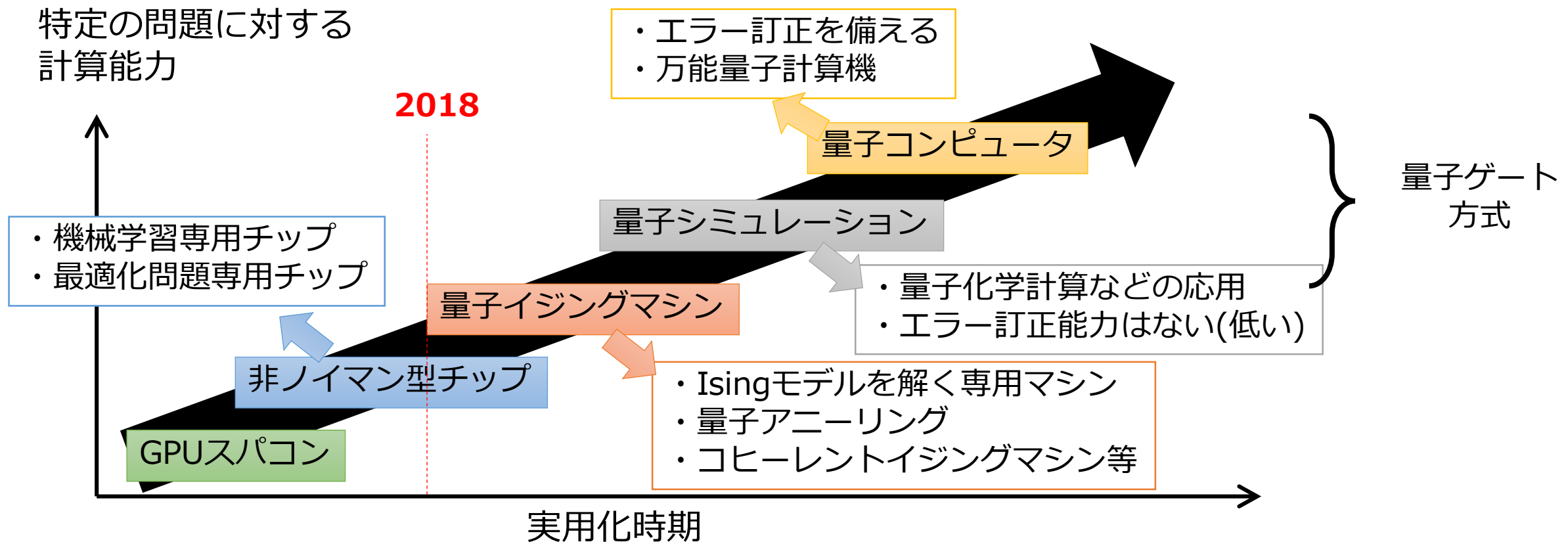
- 富士通：デジタルアニーラ
(量子コンピューティング技術の未来を先取り)
→FPGAで最適化問題ソルバーを実装

その他の非ノイマン型チップが量子コンピュータとの関連で宣伝されることがある

ロードマップ

★本日のポイント★

■古典コンピュータでは解けないタイプの特定の問題を高速に解くマシンの進歩



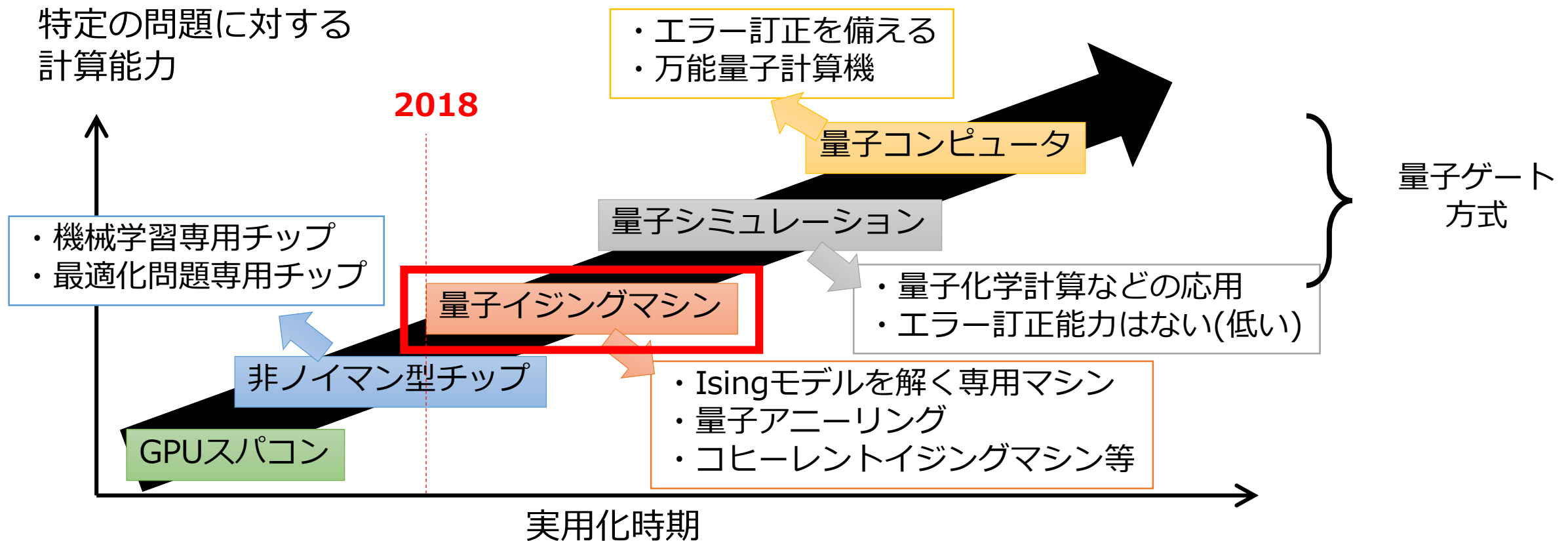
順番を間違えてはいけない。現状できることは何か？

本日のメニュー

1. 量子コンピュータってそもそも何か知る
2. 量子コンピュータ開発の現状を把握する
3. われわれに今できることは何かを考える
4. 量子コンピュータのプログラミングについて紹介する
5. 最後に、想いを込めて一句詠む

ロードマップ

■古典コンピュータでは解けないタイプの特定の問題を高速に解くマシンの進歩



順番を間違えてはいけない。現状できることは何か？

量子イジングマシンとは？

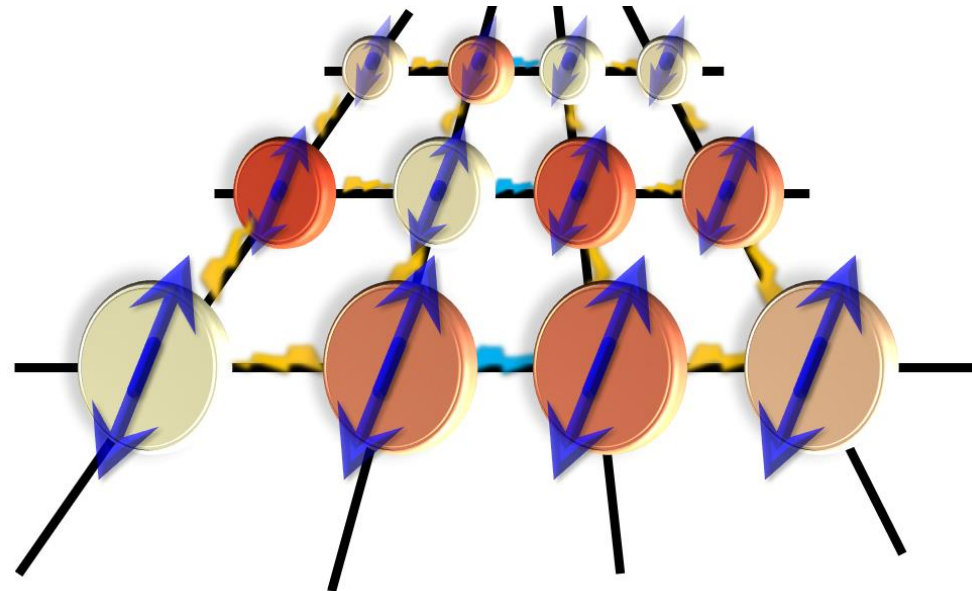
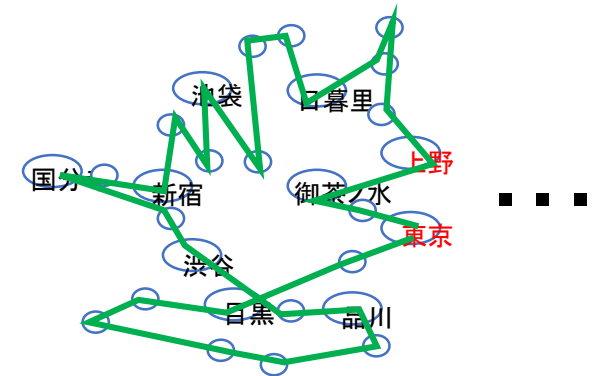
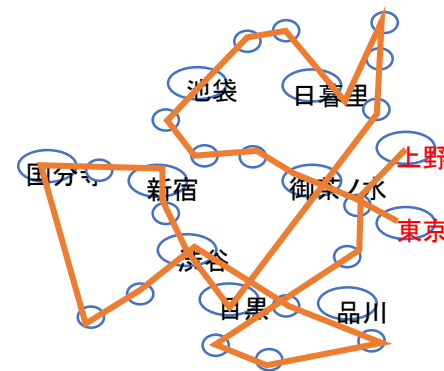
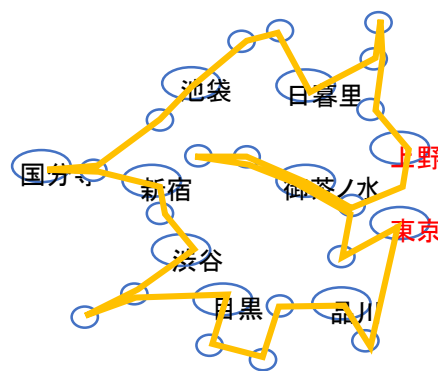
最適化問題



イジングモデルに
マッピング

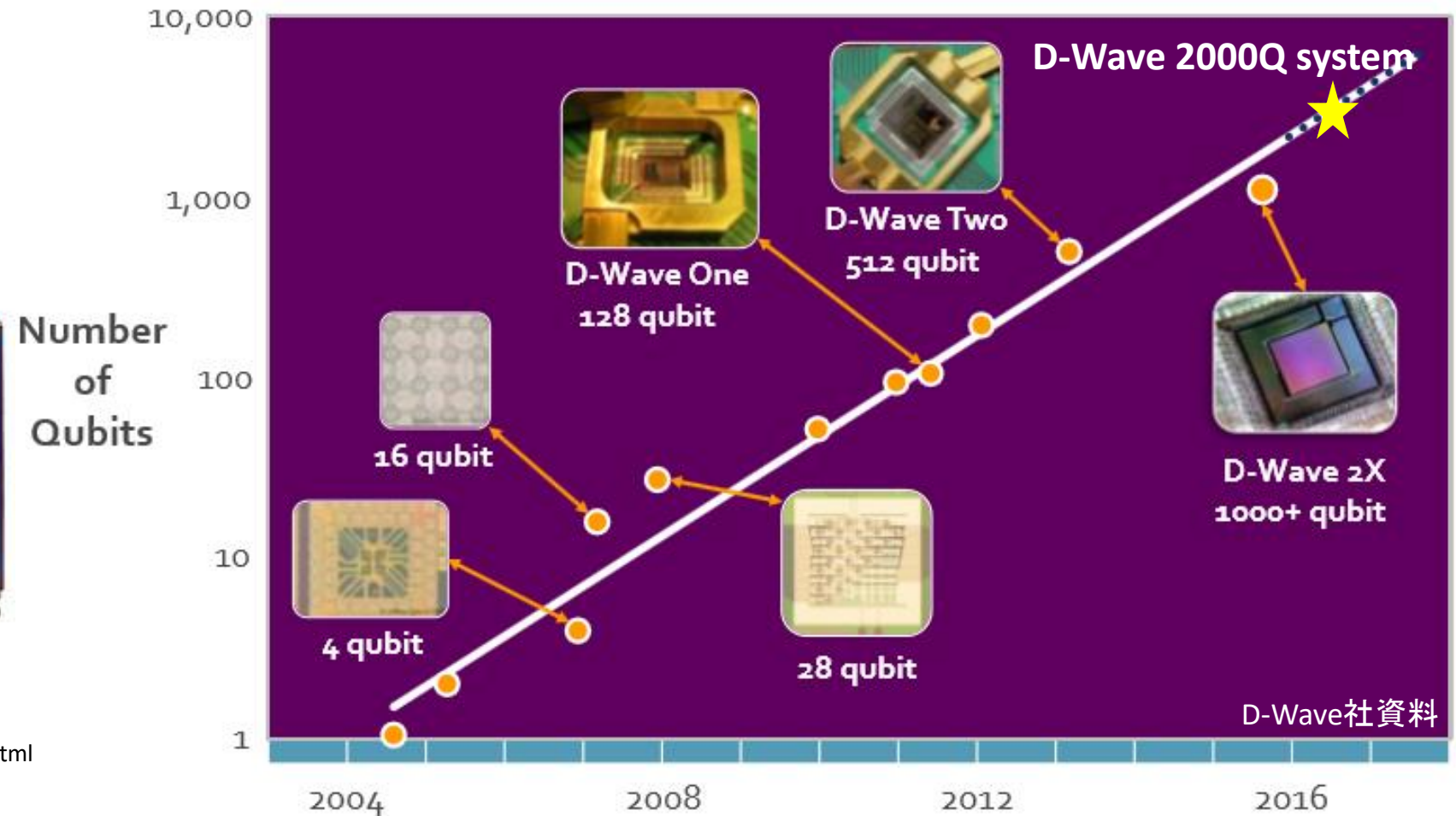


量子イジングマシン
で解く



開発の現状 (アニーリング方式)

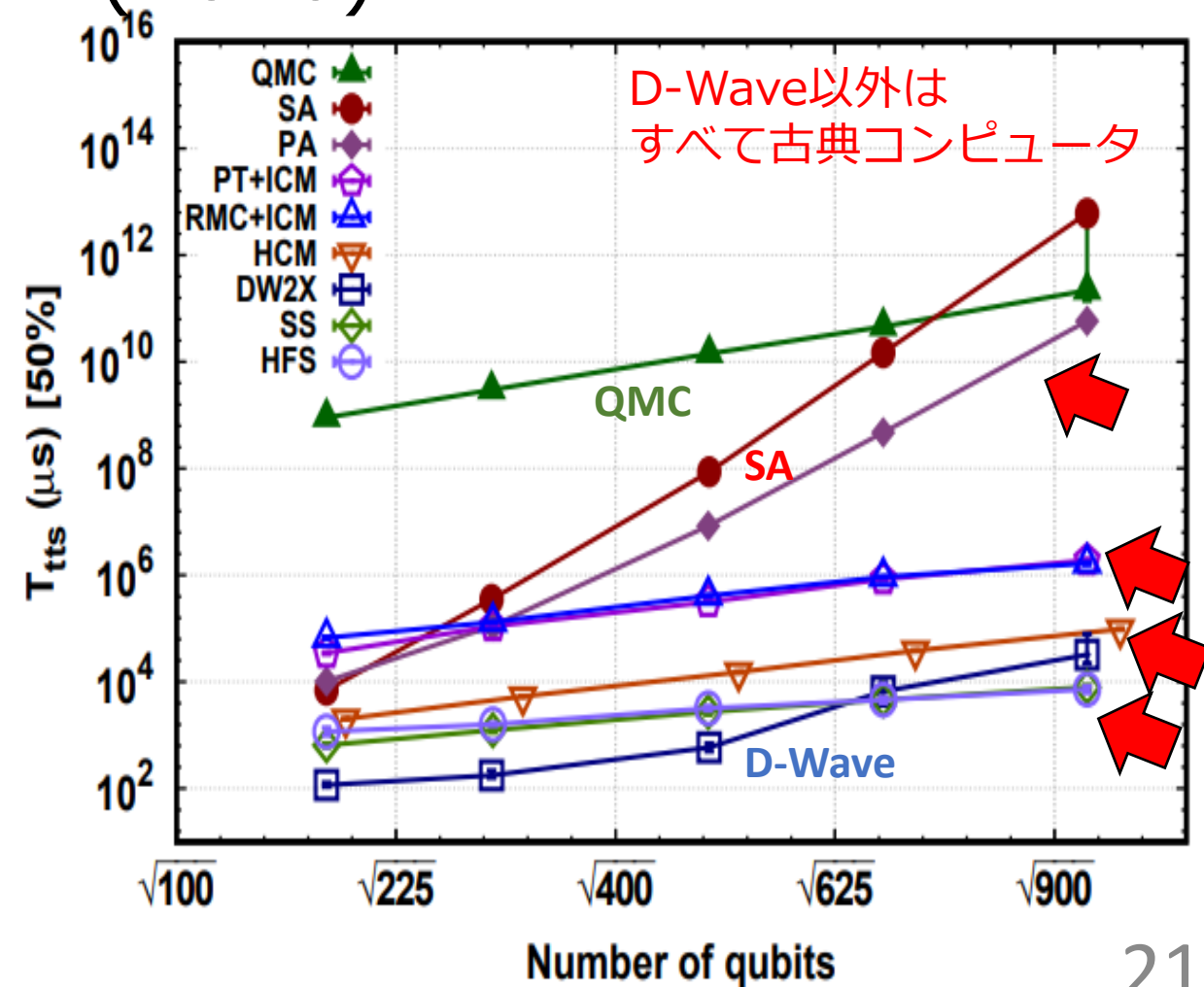
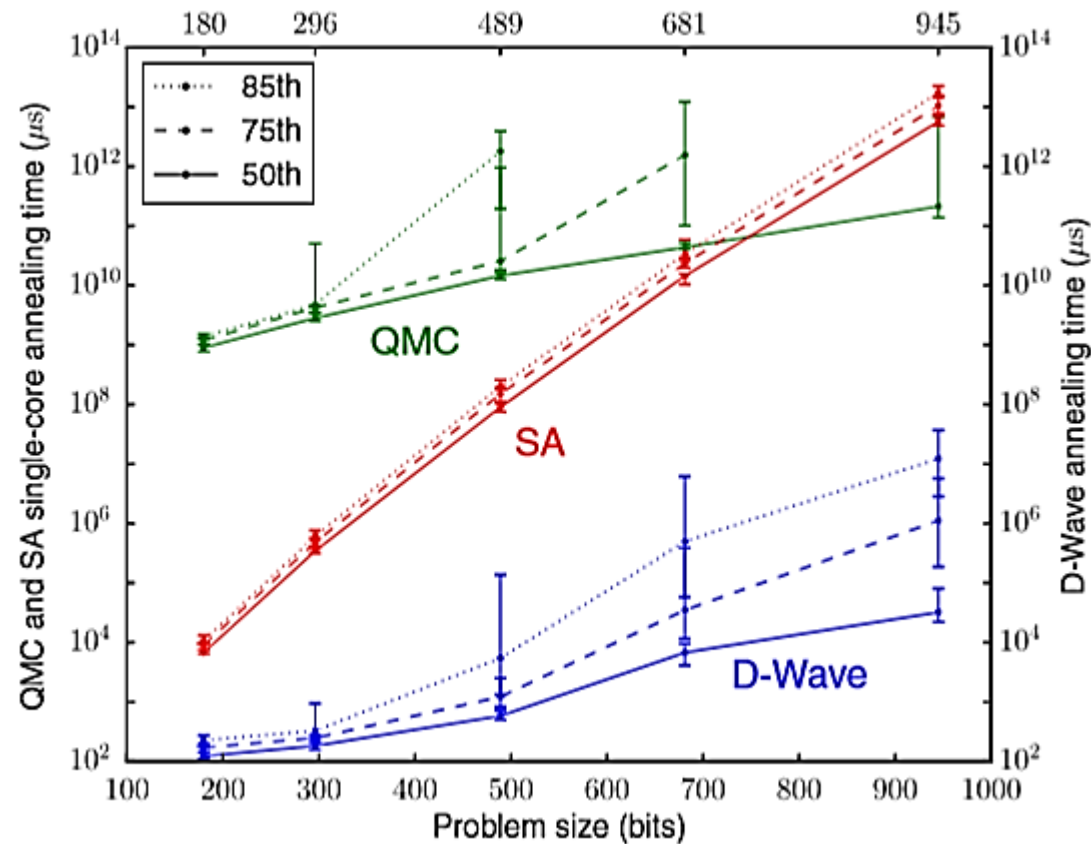
■D-Wave(ハードウェア) + 1QBit(ソフトウェア)



<https://pc.watch.impress.co.jp/docs/news/1040817.html>

1億倍論文とその後

■ Weak-strong cluster problem (2016)

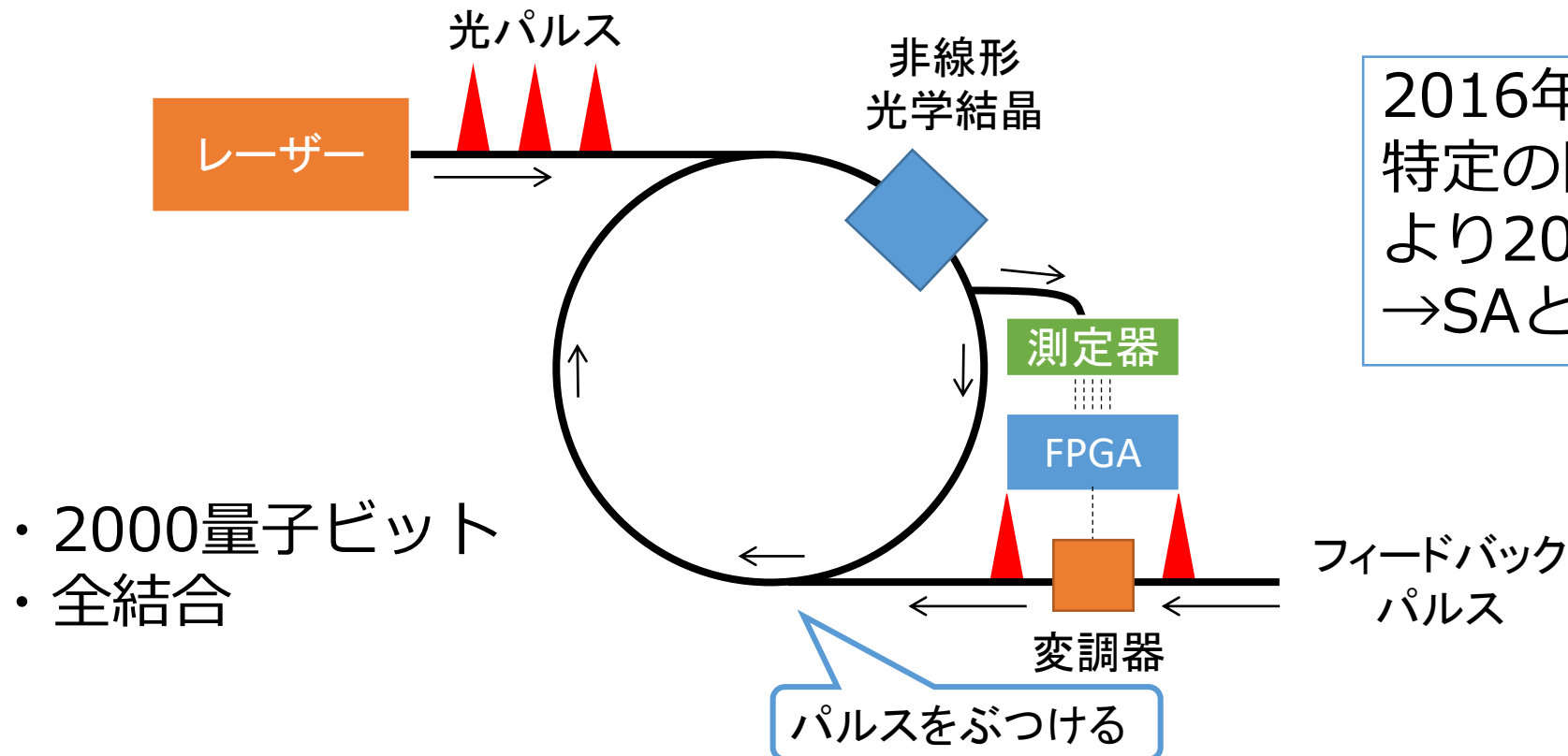


[1] What is the Computational Value of Finite-Range Tunneling? (PRX, 2016)

[2] Strengths and weaknesses of weak-strong cluster problems: A detailed overview of state-of-the-art classical heuristics vs quantum approaches (arXiv:1604.01746v2 2016)

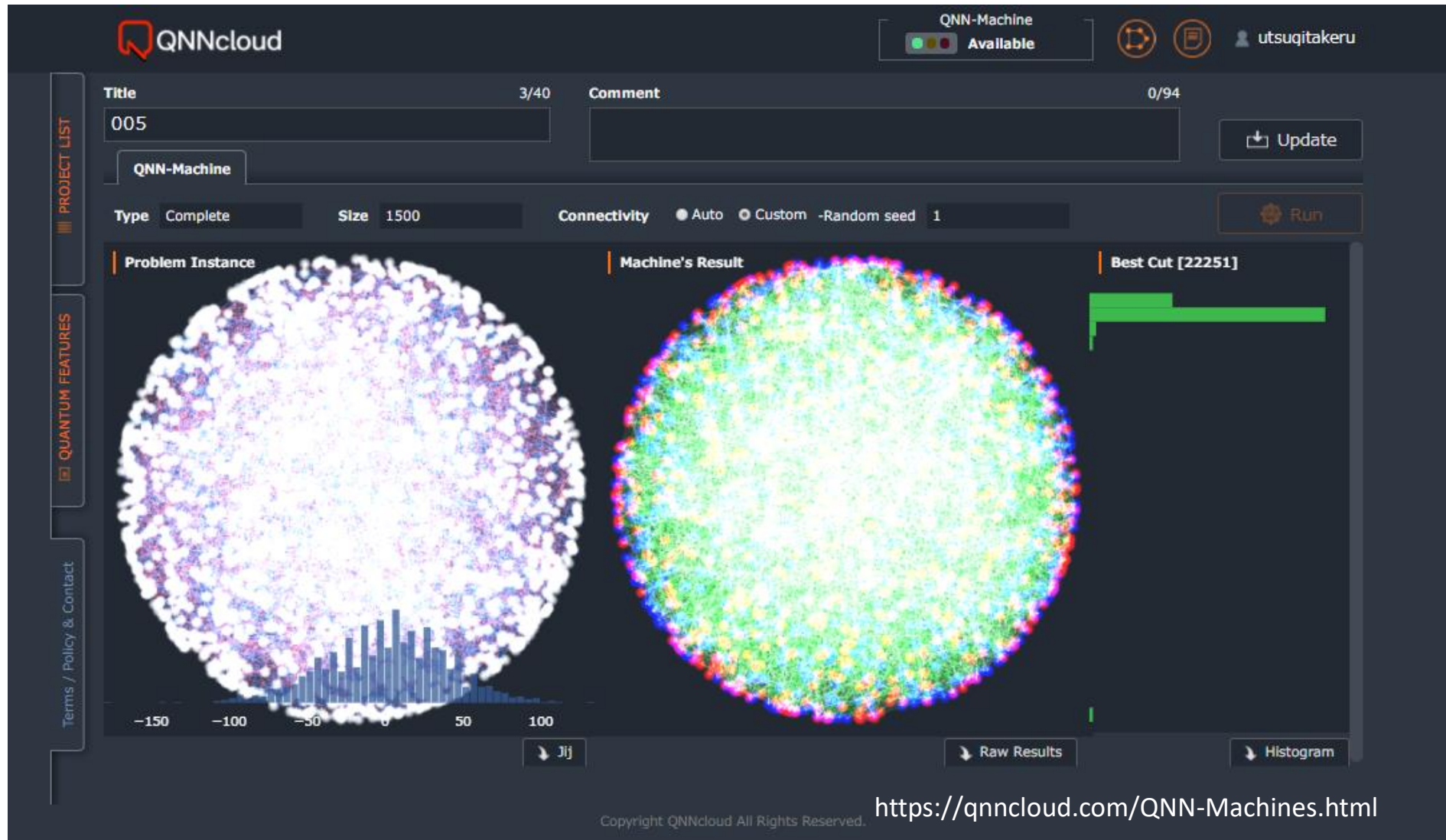
開発の現状（コヒーレントイジングマシン）

■ImPACTプロジェクト



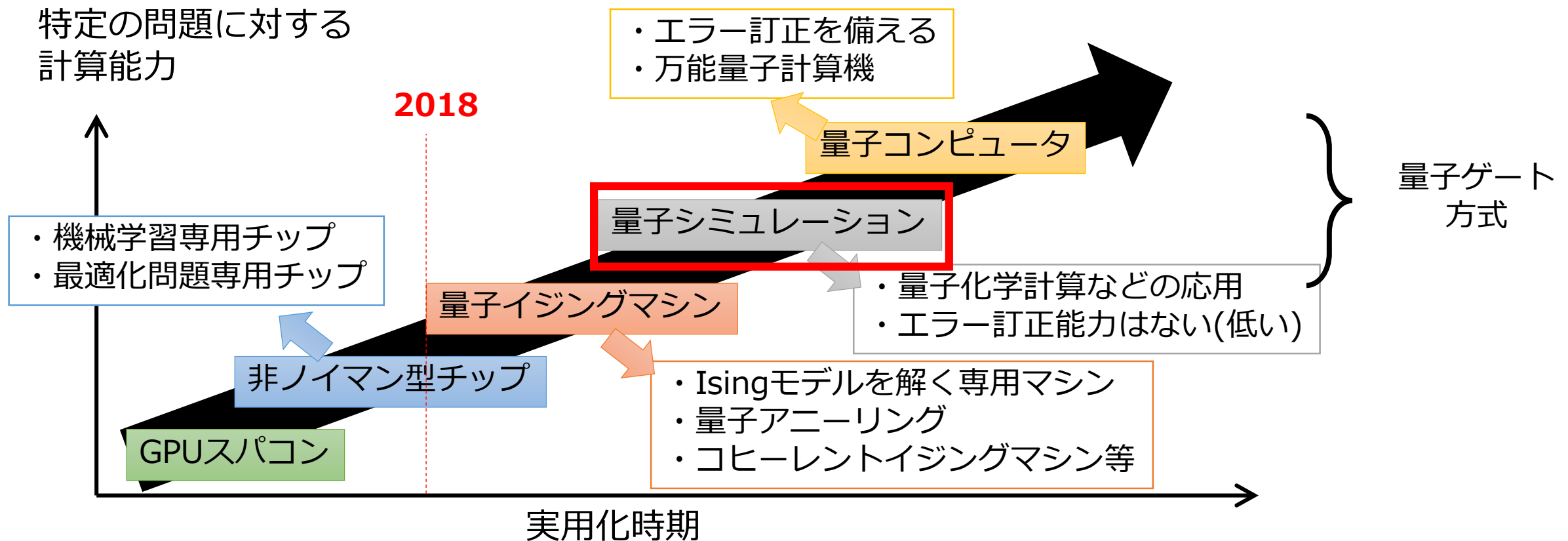
2016年論文
特定の問題で古典コンピュータ
より20倍程度高速
→SAと比較

QNNcloud公開とその後



ロードマップ

■古典コンピュータでは解けないタイプの特定の問題を高速に解くマシンの進歩



順番を間違えてはいけない。現状できることは何か？

量子シミュレーションとは？

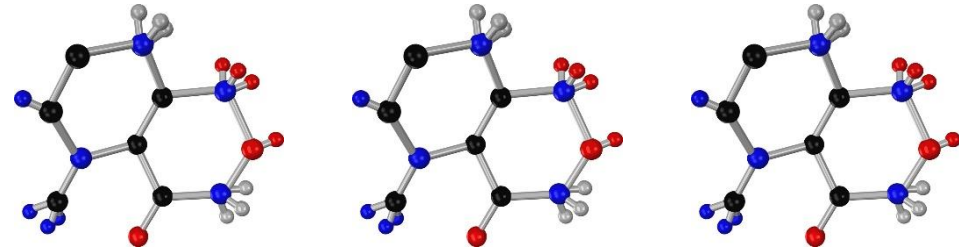
量子力学の諸問題



人工的な量子多体系に
マッピング



量子シミュレータで
解く



ノイズのある量子コンピュータ
(=アナログ量子シミュレータ)

開発の現状（量子シミュレーション）

■量子シミュレータの開発状況（2017）

超電導磁束量子ビット （～2000量子ビット）

D-Wave
Google, MIT等

イジングモデル
磁性体の基底状態探索
（＝量子アニーリング）

原子・イオントラップ （～50量子ビット）

メリーランド大
ハーバード大等

イジングモデル
非平衡相転移研究等

超電導トランズモン （～数量子ビット）

Google
IBM等

分子エネルギー計算
量子古典ハイブリッド
アルゴリズム(VQE)

古典コンピュータで大規模な問題をまともに計算するのは困難
→エラー訂正のない(ノイズのある)量子コンピュータの出番！？

量子スプレマシー

■量子コンピュータ開発の直近のチェックポイント

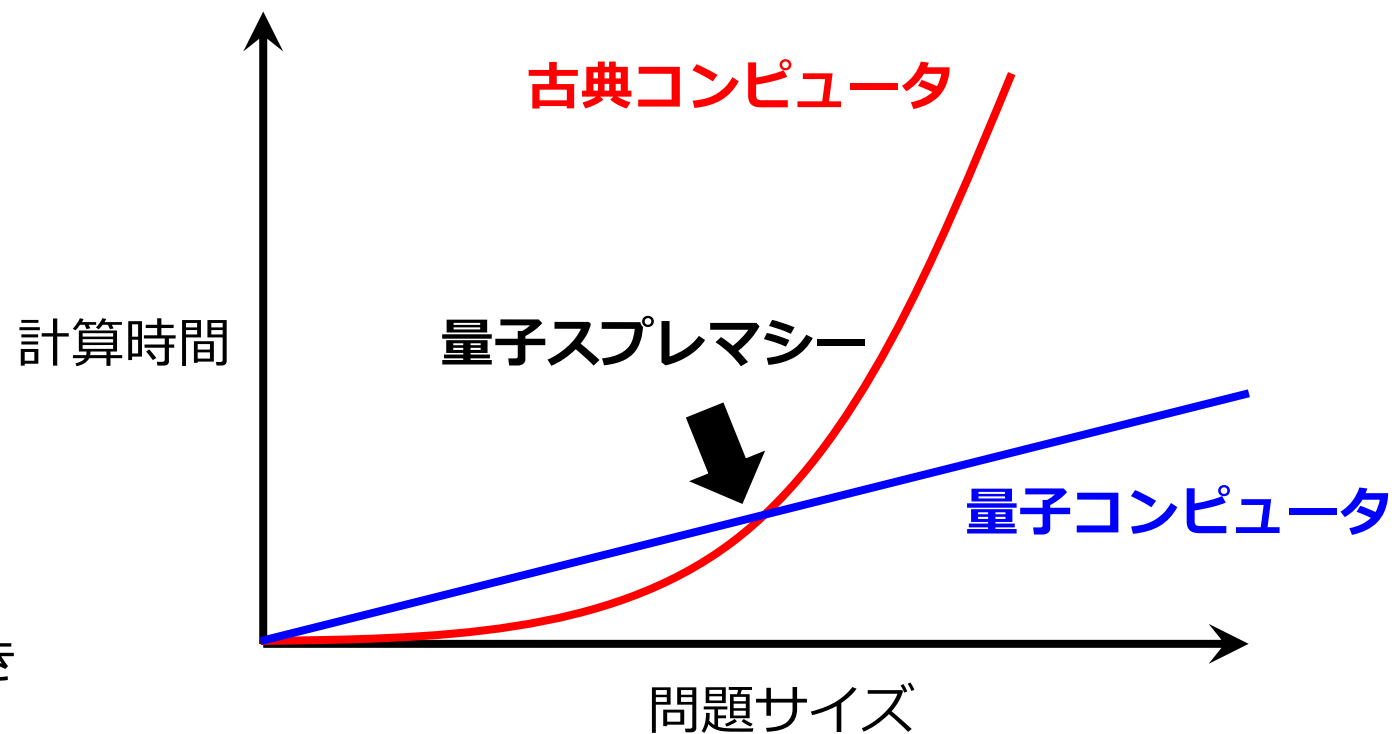
- ・ 比較対象の問題は“なんでもよい”
(実用的でなくても)
- ・ 現在の最高性能の古典コンピュータと比較
- ・ 計算量オーダーで優位性を示す



以後絶対に追いつかれないことを示す！



エラー訂正のないこのマシンで何ができるかを考える！！



ある程度制御可能な50量子ビットが目安とされる

現状の実機で何ができるか？

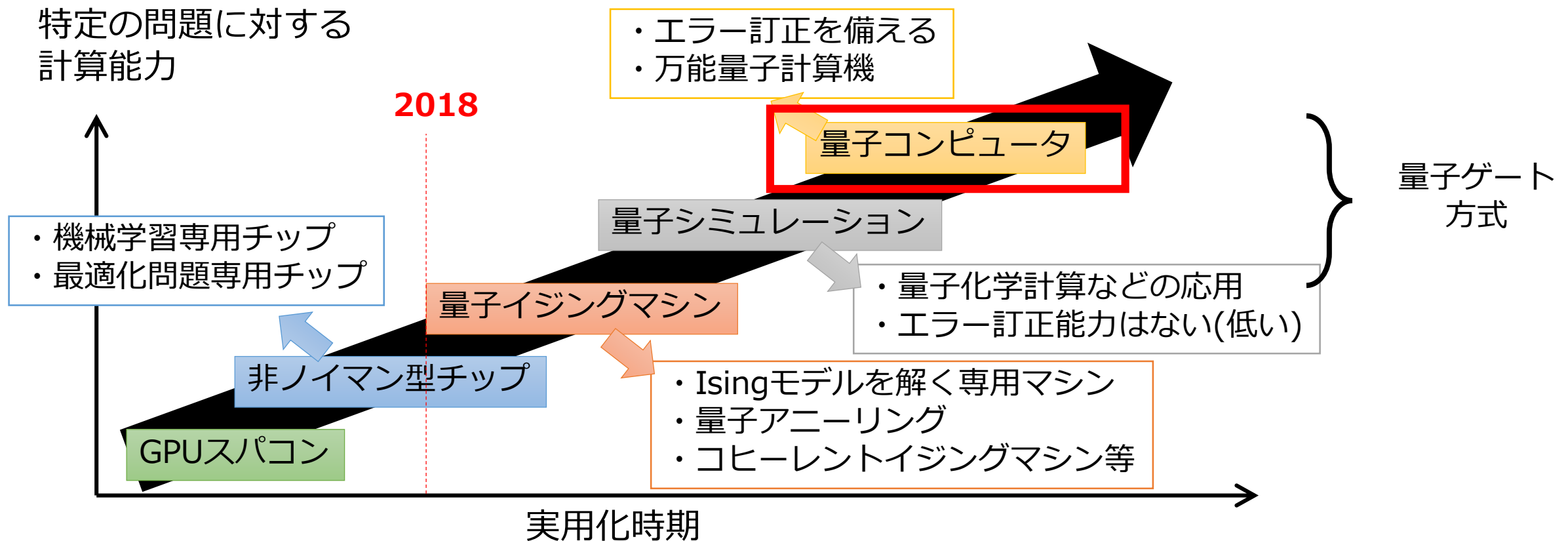
■量子古典ハイブリッドアルゴリズムが注目

- ・ 量子化学計算(VQE)
- ・ 最適化問題(QAOA)
- ・ 機械学習応用(ボルツマンマシン等)

→古典コンピュータを超越して意味を見出せるか？

ロードマップ

■古典コンピュータでは解けないタイプの特定の問題を高速に解くマシンの進歩



順番を間違えてはいけない。現状できることは何か？

開発の現状（誤り耐性量子コンピュータ）

■基本動作の実験検証中

- ・ Google 9量子ビット(1次元配置)でエラー訂正検証（2015）
- ・ IBM 5量子ビット(2次元配置)でエラー訂正検証（2016）

※1%エラーの実機の場合（google 2014年達成）

1論理量子ビットを表すのにおよそ**10000個**の物理量子ビットが必要。

■出来たあかつきには巷で言われる応用が見えて来る

- ・ 構造のないデータベース検索
- ・ 素因数分解（RSA暗号解読）
- ・ 逆行列計算等

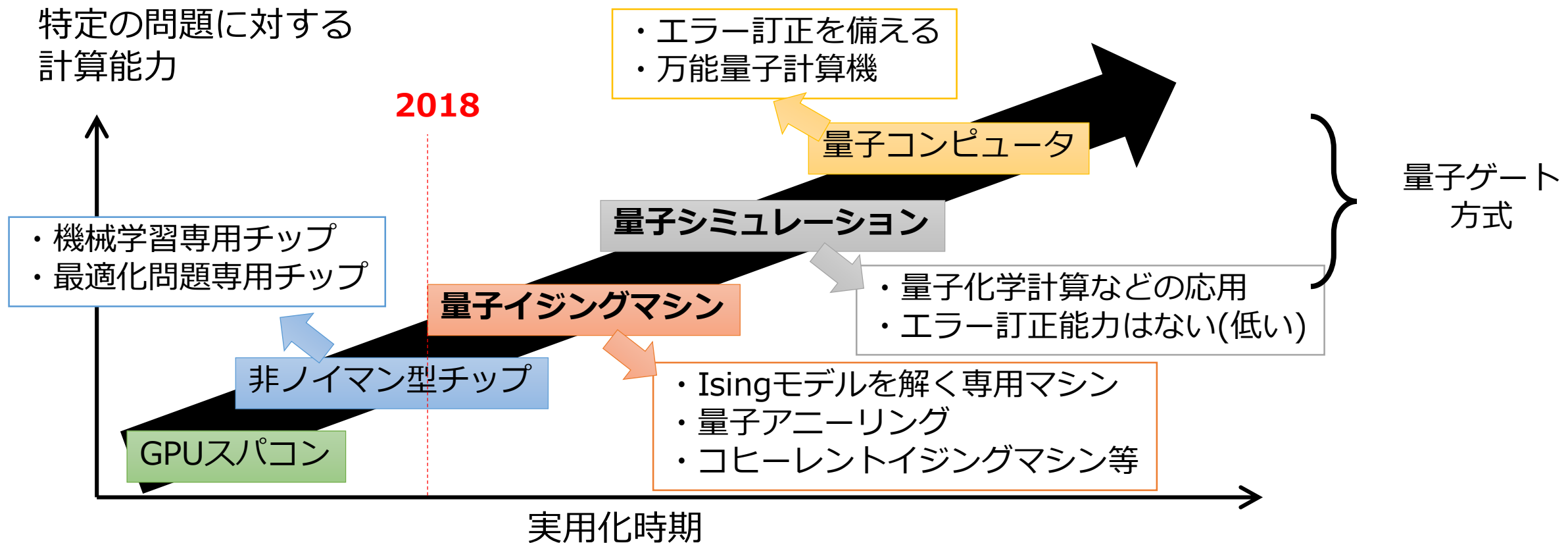
⇒アルゴリズムの圧倒的な高速化

本日のメニュー

1. 量子コンピュータってそもそも何か知る
2. 量子コンピュータ開発の現状を把握する
3. われわれに今できることは何かを考える
4. 量子コンピュータのプログラミングについて紹介する
5. 最後に、想いを込めて一句詠む

量子コンピュータの現状をまとめると

■“順番を間違えてはいけない”



今は、量子イジングマシン・量子シミュレーションの時代

今やるべきことは？

■しがない**開発者**であるわれわれの選択肢

① 量子イジングマシンの応用可能性を探求する

⇒まずはエミュレータ開発、量子アルゴリズム実装

② エラー訂正のない量子コンピュータの応用可能性を探求する

⇒まずはエミュレータ開発、量子アルゴリズム実装

③ 寝て待つ

⇒まずは起きる

本日のメニュー

1. 量子コンピュータってそもそも何か知る
2. 量子コンピュータ開発の現状を把握する
3. われわれに今できることは何かを考える
4. 量子コンピュータのプログラミングについて紹介する
5. 最後に、想いを込めて一句詠む

量子コンピュータのプログラミング

量子イジングマシンによる
最適化問題の例

与信評価を行う
アルゴリズム

イジングモデルに埋め込み

QUBO

(Quadratic unconstrained
binary optimization)

量子モンテカルロ法

量子コンピュータによる
量子化学(分子)計算の例

ハミルトニアンを計算
するアルゴリズム

量子ゲート操作に変換

VQE

(量子固有値変分法ソルバー)

量子ゲート計算
(複素数行列計算)

解きたい問題
(アプリケーション)

問題を量子コンピュータが
解ける形に変換

(量子アルゴリズム)

量子コンピュータチップ
(エミュレータ)

量子イジングマシン関係

■例：QUBOを使って日本地図塗分け (gyu-donさん)



@gyu-don 2017年12月03日に更新

...

量子コンピュータ Advent Calendar 2017 | 3日目

QUBOを使って日本地図の彩色問題やってみた

Python

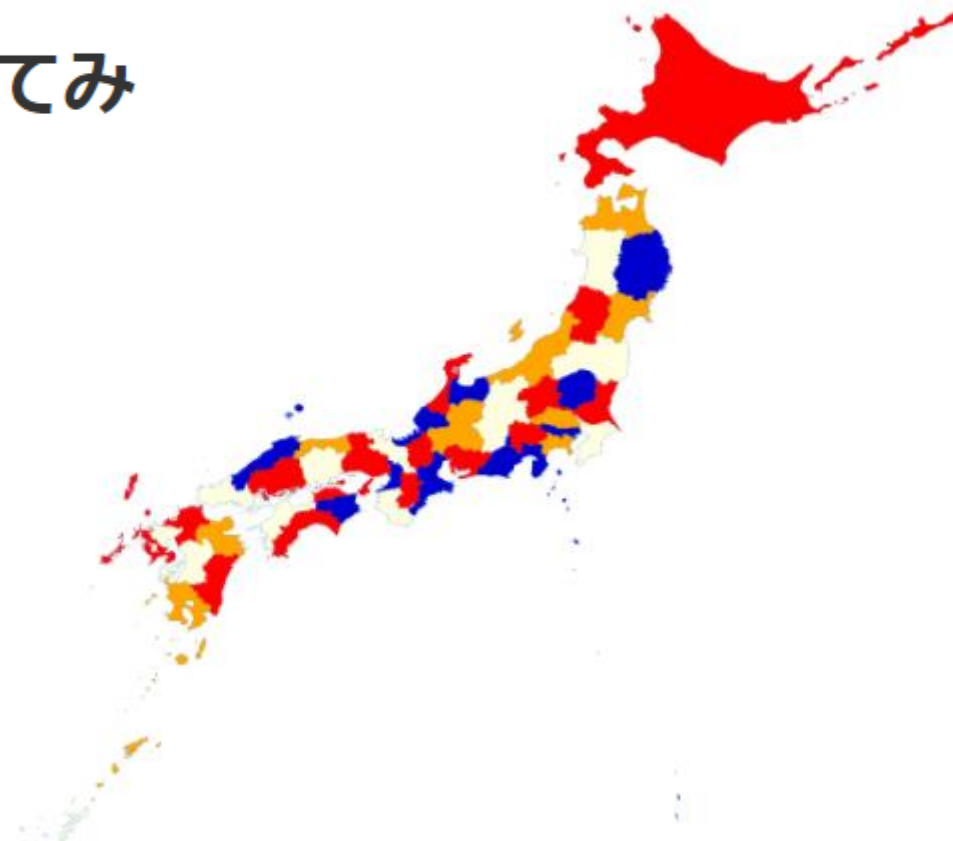
量子コンピュータ

量子アニーリング

qubo

アニーリング

$$Q = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 & \dots \\ 0 & -1 & 1 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & 1 & \dots \\ 0 & 0 & 0 & -1 & \dots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}$$



量子シミュレーション関係

■例：VQEで H_2 の量子化学計算 (IBM QISKit サンプル)

GitHub repository: [QISKit / qiskit-tutorial](#)

Features Business Explore Marketplace Pricing This repository Search Sign in or Sign up

Watch 41 Star 201 Fork 90


Code Issues 9 Pull requests 2 Projects 0 Wiki Insights

Branch: master [qiskit-tutorial / 4_applications / quantum_chemistry.ipynb](#) Find file Copy path

diego-plan9 Re-run version footer for stable cd3e3a8 13 days ago

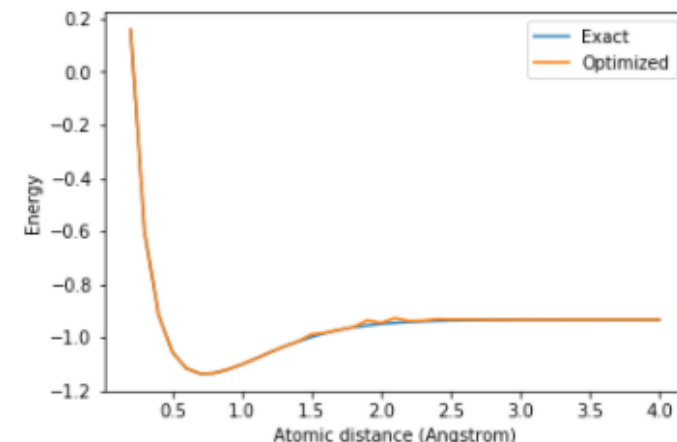
4 contributors

1037 lines (1036 sloc) 80.3 KB Raw Blame History

 **QISKit**

VQE algorithm: Application to quantum chemistry

The latest version of this notebook is available on <https://github.com/QISKit/qiskit-tutorial>.



われわれの使えるツール

名称	主要作成元	特徴	言語/環境
Q#	Microsoft	VisualStudioで使え、アプリケーション開発やコミュニティ形成を目的	Q#
QISKit	IBM	IBM Q クラウド利用想定、中間言語OpenQASM使用	Python
Forest/pyQuil	Rigetti Computing	Rigetti実機クラウド利用想定、Quil使用、QAOAなど最適化もあり	Python
QuTiP	理研等	量子開放系(ノイズのある系)の科学技術計算のためのライブラリ	Python
SymPy (Physics.Quantum)	(OSS)	記号計算を行うためのライブラリSymPy内モジュールQuantum	Python
ProjectQ	ETH Zurich	IBMなど多様なハードを想定、OpenFermion連携も想定	Python
OpenFermion	Google	量子化学計算研究者との懸け橋をめざす	Python
OpenQL	(OSS)	今回宣伝	Python等

OpenQL Projectの宣伝

OpenQL Project

The Open Quantum Library (OpenQL) Project provides Quantum Computer Emulator and various open source libraries for using quantum computing.

About OpenQL Project

OpenQL (Open Quantum Library) is open source software for using quantum computer. OpenQL specifications and libraries based on OpenQL is released based on Apache License 2.0 and hence free for both academic and commercial use.

When you develop programs that operates with a quantum computer, you need tough preparation until you actually operate it. Even if you are super-engineer with skills of traditional classical computers, it will be difficult to predict their behavior, since it is completely different from the current computer. Therefore, as an environment to understand the operation of the quantum computer, the OpenQL project will develop a quantum computer emulator and provide an environment for engineers to learn their programming skills widely.

- ・ 量子コンピュータのエミュレータアプリケーション開発をめざす
- ・ 日本発OSS
- ・ 日本の研究者とも連携
- ・ 2018年勉強会も開催中

本日のメニュー

1. 量子コンピュータってそもそも何か知る
2. 量子コンピュータ開発の現状を把握する
3. われわれに今できることは何かを考える
4. 量子コンピュータのプログラミングについて紹介する
5. 最後に、想いを込めて一句詠む

量子コン

オープンソースで

戦おう

婚活で

「量子」を語る

無反応

memo

クラウド利用可能な量子コンピュータ

- IBM Q
- Rigetti Forest
- QNNcloud

便利サイト

- Quantum algorithm zoo
- Quantum computing report
- 量子コンピュータ Advent Calendar 2017

ITエンジニアのための量子コンピュータ入門



[16-D-7] 宇津木 健