

# 量子コンピュータの概説と動向

## ～量子コンピューティング時代を見据えて～

---

株式会社日本総合研究所

先端技術ラボ

2020年7月14日

## お問い合わせ

- 本レポートは、作成日時時点で弊社が信頼出来ると考えた資料に基づき作成したものです。情報の正確性・完全性・有用性・安全性等について一切保証するものではありません。また、実際の技術動向等は、経済情勢等の変化により本レポートの内容と大きく異なる可能性もあります。ご了承ください。

本件に関するお問い合わせ、ご確認は下記までお願いいたします。

**株式会社日本総合研究所 先端技術ラボ**

101360-advanced\_tech@ml.jri.co.jp

北野 健太 エキスパート／シニア・リサーチャー kitano.kenta@jri.co.jp  
間瀬 英之 リサーチャー mase.hideyuki@jri.co.jp

株式会社

**日本総合研究所**

東京本社

〒141-0022  
東京都品川区東五反田2丁目18番1号  
大崎フォレストビルディング

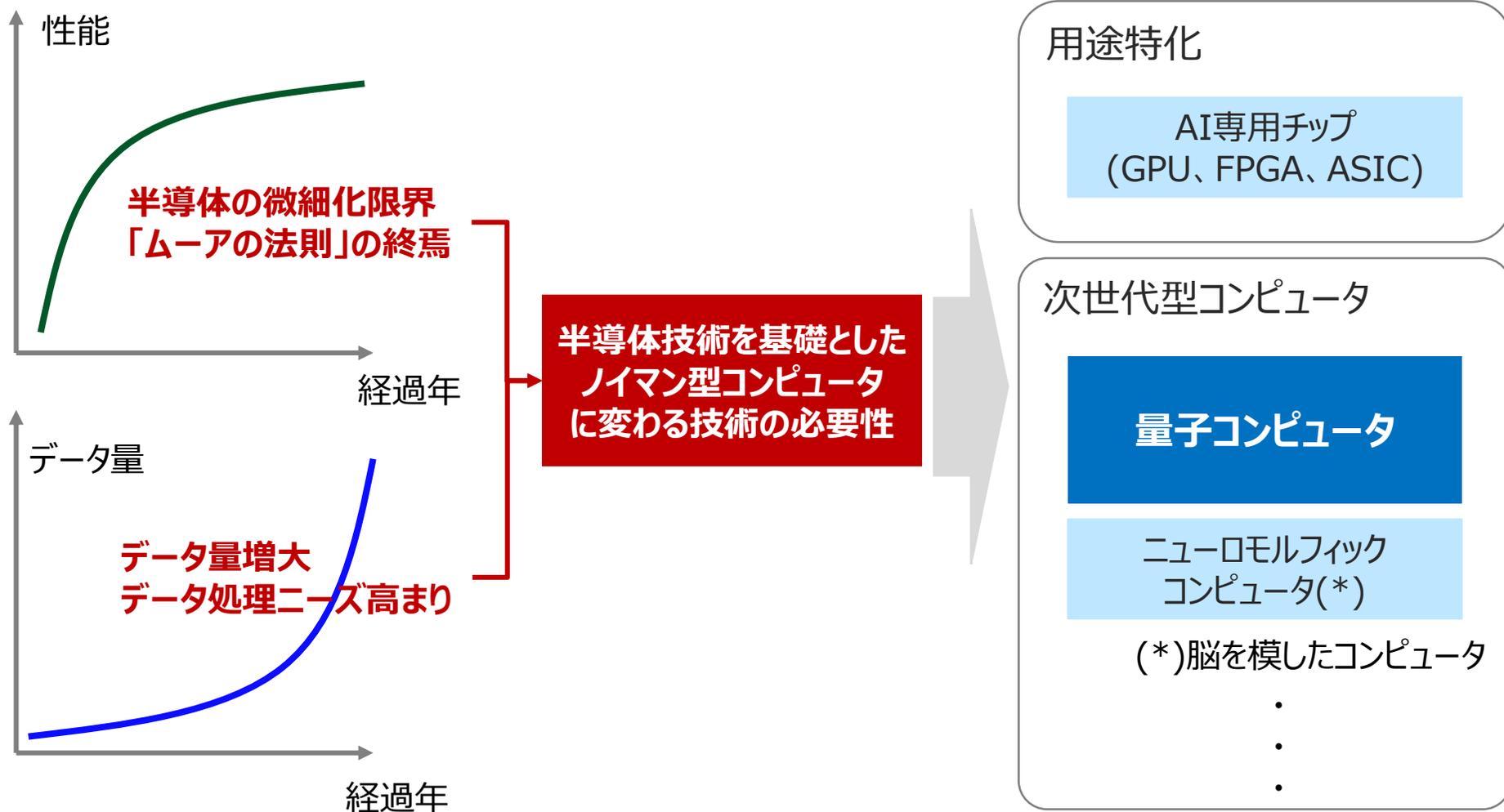
本資料の著作権は株式会社日本総合研究所に帰属します。

# 0. 目次

章	題名	頁
第1章 技術解説	1. 背景／量子コンピュータの必要性	4-30
	2. 量子コンピュータへの期待	
	3. 量子コンピュータの動作原理	
	4. 高速計算の仕組み（量子干渉）	
	5. 「量子」および利用している特性の例	
	6. 量子コンピュータの構成／使われ方	
	7. 量子コンピュータの分類	
	8. 量子コンピュータの解法手順	
	9. 量子ゲート方式の活用手順	
	10. 量子アニーリングとは？	
	11. 量子アニーリング方式の活用手順	
12. ソフトウェアと開発フレームワーク		
第2章 市場動向・活用動向	1. 主要国の政策動向	31-57
	2. ビジネスインパクト（市場予測／利用形態）	
	3. 主なスタートアップ企業	
	4. 量子コンピュータにおけるエコシステム	
	5. コンソーシアム	
	6. 量子コンピュータへの取組み①～⑥	
第3章 展望・考察	1. 現状の課題と展望 - 【汎用型】量子ゲート方式 -	58-63
	2. 現状の課題と展望 - 【特化型】量子アニーリング方式 -	
	3. 量子コンピュータの展望	
	4. 量子コンピュータ活用における役割分担と必要な人材・スキル	
	5. 量子コンピュータ活用に向けて	

# 1. 背景／量子コンピュータの必要性

- 「ムーアの法則」の終焉、データ処理のニーズがより一層高まっている事などを受けて、  
新たな原理を用いた次世代型コンピュータへの期待が高まり、世界中で量子コンピュータの開発が加速



## 2. 量子コンピュータへの期待

- Googleは、量子論理ゲートで構成される「Sycamore」という名前の新しい54量子ビットのプロセッサを開発（1量子ビットは正しく動作せず、結果53量子ビットで稼働確認）
- スパコンでは1万年かかる「ランダム量子回路サンプリング」と呼ばれる計算タスクを200秒で計算したと発表

# Google量子超越性 1万年 → 200秒

\*量子超越性：量子回路を古典コンピュータでシミュレーションできなくなること。スパコンでは解けないが量子コンピュータでは解けることを示せば良く、実用的ではない問題でも構わない。



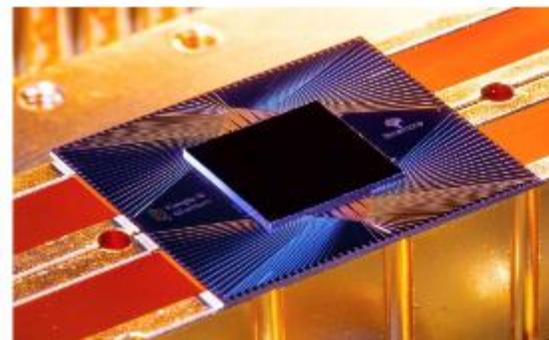
出所：Google Japan Blog「プログラム可能な超電導プロセッサを使用した量子超越性」  
 ( <https://japan.googleblog.com/2019/10/quantum-supremacy-using-programmable.html> )

NEWS · 23 OCTOBER 2019

## Hello quantum world! Google publishes landmark quantum supremacy claim

The company says that its quantum computer is the first to perform a calculation that would be practically impossible for a classical machine.

Elizabeth Gibney



The Sycamore chip is composed of 54 qubits, each made of superconducting loops. Credit: Frank Liscio

PDF version

RELATED ARTICLES

Beyond quantum supremacy

Quantum gold rush: the private funding pouring into quantum start-ups

Physicists propose football-pitch-sized quantum computer

Keep quantum computing

出所：Nature.com「Hello quantum world! Google publishes landmark quantum supremacy claim」  
 ( <https://www.nature.com/articles/d41586-019-03213-z?sf222056689=1> )

第1章 技術解説

【参考1】量子コンピュータの進化の歴史

- コンピュータは、「単」の時代（単独・一極集中・単数）から「多」の時代（並列・クラウド・多様）へ変化
- 量子コンピュータは、CPUの並列性から量子力学的な重ね合わせ状態という新たな並列性を利用した、「多」の時代のコンピュータ

1950                  1960                  1970                  1980                  1990                  2000                                  2010                                  2020

「単」の時代（単独・一極集中・単数）

「多」の時代（並列・クラウド・多様）

<電子計算機が誕生 & 大型計算機が大活躍>

<性能アップのため並列計算が必須に & スマートフォンの進化>

ENIAC

- 最初の汎用電子計算機
- 演算回数 5,000/秒

Cray-1

- 最初のベクトル型スパコン
- ピーク性能160MFLOPS

地球シミュレータ

- NECのスーパーコンピュータ
- ピーク性能41TFLOPS

Google App Engine/AWS

- インターネットなどのネットワークを介して、サービスを提供

iPhone Xs

- 演算回数 5兆/秒
- ENIACの10億倍

1927

1946

1964

1976

2002

2008

2018

2011

2019

微分解析機

- 円盤の回転を積分に変換して微分方程式を解く専用機

System/360

- 商用メインフレームの始まり
- 後発のIBMをメインフレームの巨人へ

量子コンピュータ



出所：D-Wave社 HP (\*1)

D-Wave

- 世界初の量子アニーリング方式量子コンピュータ商用化



出所：IBM社 THINK BLOG JAPAN  
「IBM Qが目指す「量子コンピュータがある近未来」(\*2)

IBM Q

- 世界初の量子ゲート方式量子コンピュータ商用化

<量子力学的な重ね合わせ状態という新たな並列性の利用>

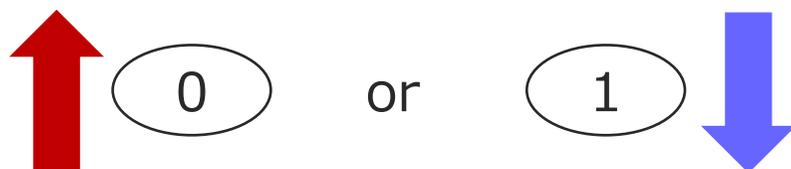
(\*1) <http://dwavejapan.com/system/>

(\*2) <https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/ibmq-future-with-quantum-computer/>

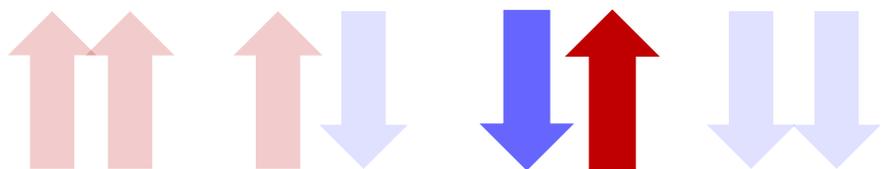
### 3. 量子コンピュータの動作原理

- 量子コンピュータとは、量子力学の原理を情報処理に応用したコンピュータ
- 従来の古典ビット0か1かではなく、0と1の「重ね合わせ状態」も持つ量子ビットにより実現される

#### 従来の古典ビット



Nビットの場合、 $2^N$ の組み合わせの中の1パターンしか表現出来ない

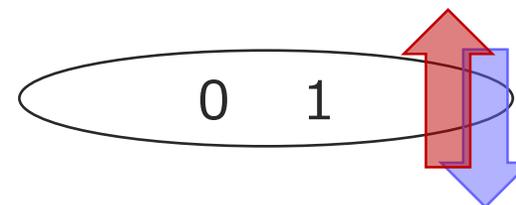


**全ての組み合わせを逐次計算**

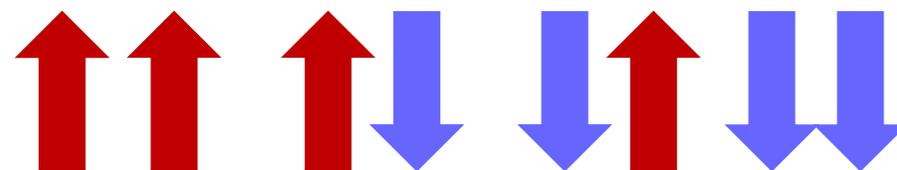
1回の計算×組み合わせ数

※組み合わせ数が膨大になると時間がかかる

#### 量子ビット



Nビットの場合、 $2^N$ の組み合わせを同時に表現



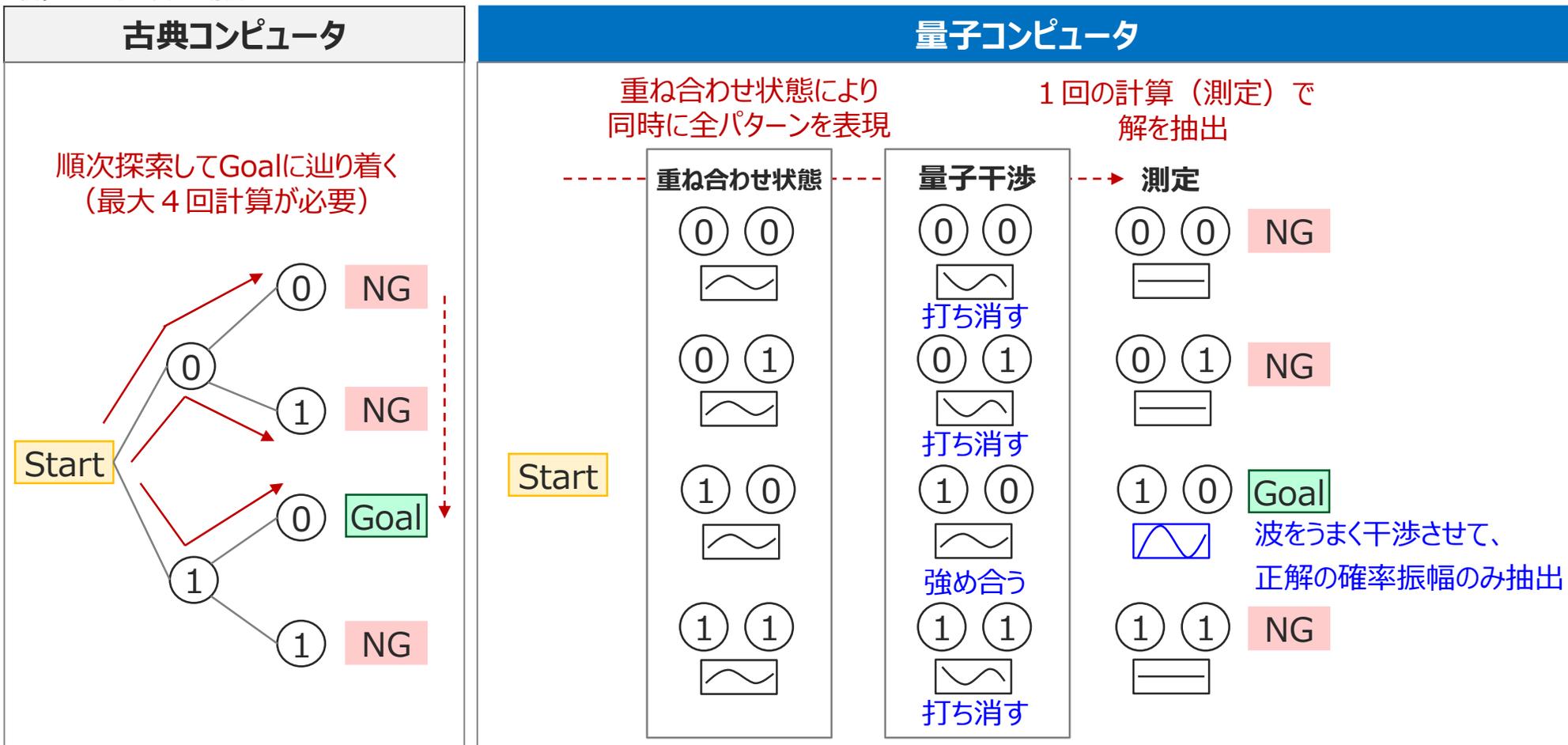
**全ての組み合わせから  
確率的に答えが一つに決まる**

正しい答えが出る確率を高めておいて、  
何回か試行し、確からしい答えを探す

## 4. 高速計算の仕組み（量子干渉）

- 量子の特徴である波動性を利用して、波をうまく干渉させて**正解の確率振幅を高めつつ、不正解の確率振幅を低下させる（打ち消す）**ことで、**効率的に解を抽出する**（\*量子干渉という）
- 量子コンピュータは同時に多数の状態を表現できるため、量子干渉を巧みに用いることで高速計算を実現

例) 2量子ビットの場合



## 【参考2】量子コンピュータの向き・不向き

- 膨大な組み合わせの中から良さそうな答えを確率的に出してもらえれば有用、というケース
- 厳密に計算を行う処理には、向いていないと考えられる

### 向いている例

#### 創薬



薬として働く分子を膨大な組み合わせから選ぶ

#### AI



機械学習(AI)はそもそも確率的動作、性能向上、学習効率化など

### 向いてない例

#### 給与計算など



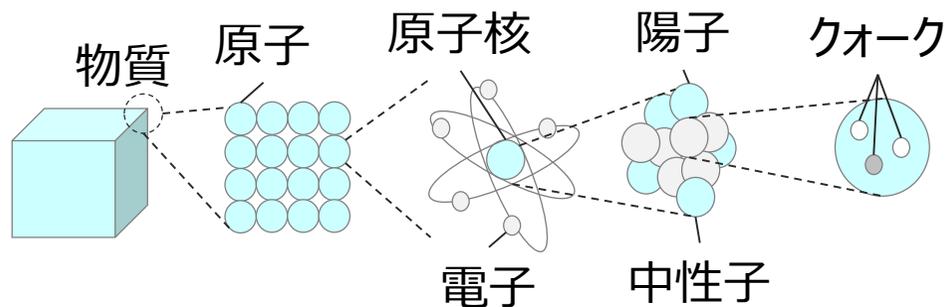
厳密に計算したい、計算毎に異なる答えが出ては困る

## 5. 「量子」および利用している特性の例

○ 量子が備える「重ね合わせ」、「量子もつれ」などの特性を利用して実現

### 量子／量子力学

- 「量子」とは、原子以下の極小の物質やエネルギー単位の総称

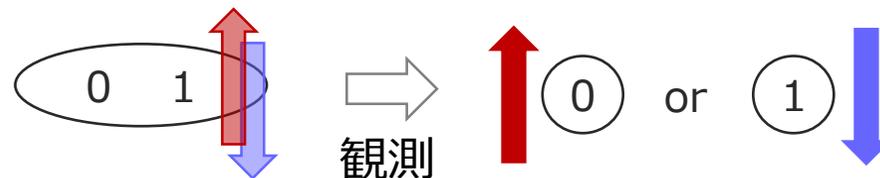


量子

通常の世界とは異なる物理法則が働く

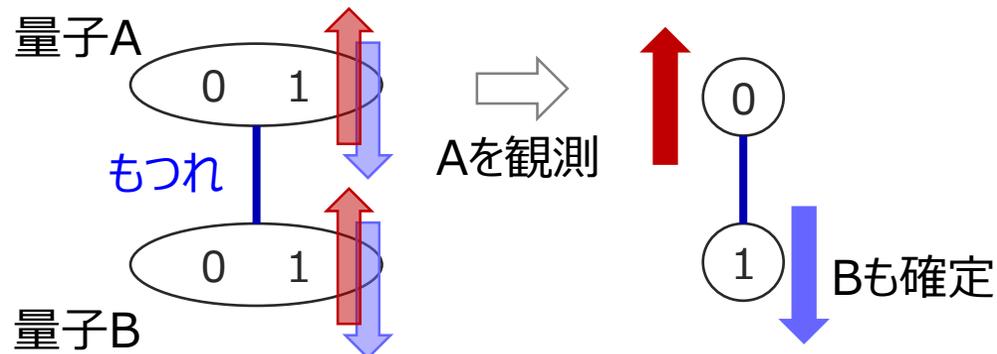
### 量子の重ね合わせ

- 量子は、粒子と波の性質を同時に持つ
- 観測していないときは波の性質、観測すれば粒子 (状態が一意に確定する)



### 量子もつれ(エンタングルメント)

- 2個以上の重ね合わせ状態にある量子が相関を持つ
- うち1つを観測すると、直ちに他方も状態が確定する



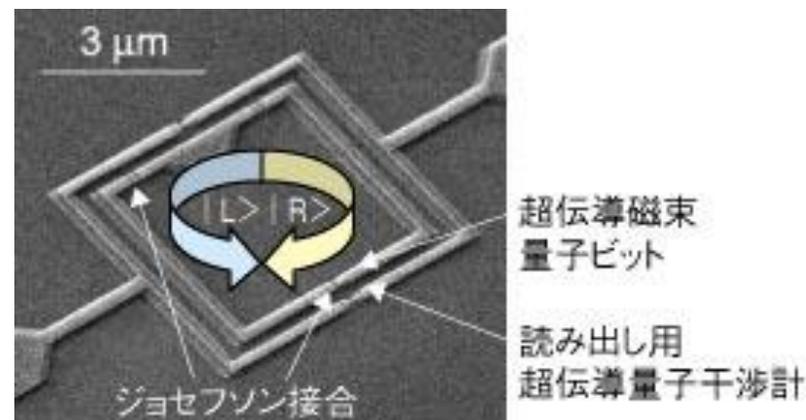
## 【参考3】主な量子ビットと原理

- 量子ビットをどの物質で表現するかは、様々方式が存在
- 集積化による規模拡大が期待できる「超電導」が主流。コヒーレンス時間が長い「イオントラップ」も注目

	超電導	イオントラップ	光子
原理	ジョセフソン接合 (磁束型/電荷型 /位相型)	イオンの エネルギー準位	光子の偏光状態
材料	Al/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al	Yb、Caイオン	光/光学装置
現在のビット数	53	160	18
コヒーレンス時間 (重ね合わせ状態を 維持できる時間)	100 μs	15 s	0.15 ms
スケール性	良好	やや難	やや難
冷却	必要 (mK)	不要	不要
長所	集積化で有利	コヒーレンス 時間が長い	外部の攪乱に強い
短所	希釈冷凍機が 必要	ゲート操作が 低速	一部の操作が 確率的
主要プレーヤ	・IBM ・Google ・Rigetti ・D-wave	・ION Q	・XANADU ・PsiQ ・東京大学 (古澤 研)

### 量子ビットの表現 (例: 超伝導・磁束型)

- 超伝導は、特定の金属などを冷却することで電気抵抗が0になる現象で、電流が減衰せずに流れ続けられる
- 外部からマイクロ波を照射し、電流を制御可能
- 電流により発生する磁場エネルギーを測定し、ビットを表現



出所: NTT研究開発この一年<2005年報>「ジョセフソン量子ビットの多光子ラビ振動を観測 (NTT物性科学基礎研究所) ( <https://www.ntt.co.jp/RD/OFIS/active/2005pdf/hot/ct/08.html> )

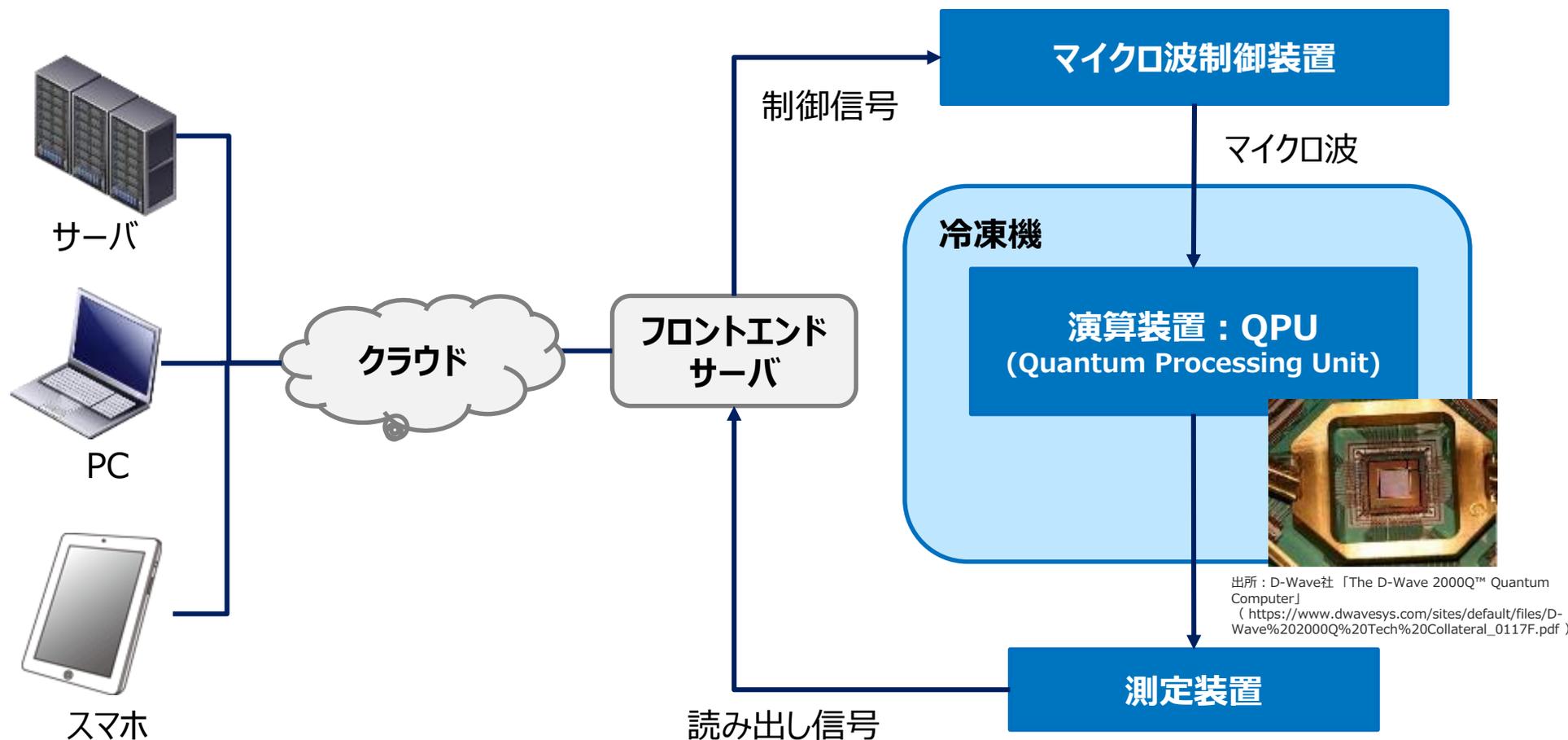
※ジョセフソン接合: 2つの超伝導体を極めて薄い絶縁膜を介して接触させた構造。電流のエネルギー間隔に歪みを生じさせることで、ビットの読み出しを容易にする

## 6. 量子コンピュータの構成／使い方

- 基本的に、量子コンピュータには演算装置のみ。通常の古典コンピュータと併用、使い分けが原則
- 巨大な冷却装置を必要とすることから、たいていはクラウド経由で利用する

【古典コンピュータ】

【量子コンピュータ】



## 【参考4】スーパーコンピュータとの比較

- 量子コンピュータはスーパーコンピュータに近い位置づけ（シミュレーション用途が主）になると思慮
- 通常の古典コンピュータやスーパーコンピュータを完全に代替するものではなく、併用される想定

### スーパーコンピュータとの主な違い

	スーパーコンピュータ	量子コンピュータ
<b>目的</b>	高度な数値計算やデータ処理のすべて	限られた目的に大きな力を発揮
<b>演算単位</b>	0 or 1 (ビット)	0 and 1 (量子ビット)
<b>計算方法</b>	すべての入力に対して 毎回計算	重ねあわせ状態を利用して一括計算
<b>強み</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 既存技術を活用</li> <li>• 汎用性の高さ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 特定のタスク、問題を高速に処理できる</li> <li>• 電力消費量が少ない (超電導技術を使う場合)</li> </ul>
<b>弱み</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 消費電力が大きい</li> <li>• 微細加工技術の限界</li> <li>• 入力数が増えると、計算コストが増加</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 製造や制御が難しい (量子状態の維持が困難)</li> </ul>
<b>見通し</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 今後も使い続けられるが、性能向上の度合いは、鈍化する可能性有り</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 限られた問題に対して実用化が進展、高速化が期待されている</li> </ul>

参考：東工大理学院 物理学系の西森秀稔教授による量子コンピュータに関するプレスセミナー資料を基に加筆修正（2017/12/12）

### スーパーコンピュータの主な用途

- 主に、気象予測、災害予測や創薬、構造解析など再現困難なコンピュータシミュレーションに活用
- 基礎研究からものづくりまで、あらゆる研究開発において必須のツールとなっている

分野	概要	国内取組例
<b>気象予測・災害予測</b>	防災、減災に資する地球変動予測	海洋研究開発機構
<b>医療・創薬</b>	創薬、薬の人体への作用予測	理化学研究所
<b>分子シミュレーション</b>	新物質、エネルギーの創成	東京大学物性研究所、分子科学研究所
<b>ものづくり</b>	革新技術の創出等、次世代ものづくりへの活用（流体制御、大型プラントの耐震設計等のシミュレーション）	東京大学生産技術研究所、日本原子力研究開発機構、宇宙航空研究開発機構
<b>構造解析</b>	物質と宇宙の起源と構造解析	筑波大学計算科学研究センター、高エネルギー加速器研究機構

参考：理化学研究所 計算科学研究センターHPを基に作成  
<https://www.r-ccs.riken.jp/jp/fugaku/target>

## 7. 量子コンピュータの分類

- 汎用型は実用化までには**10年以上必要**。幅広い用途への活用が期待されインパクト大
- **特化型**と呼ばれる量子コンピュータが先行。組み合わせ最適化問題の高速化が期待

	汎用型	特化型
解ける問題	汎用 ※量子アルゴリズムが確立されている 問題のみ高速化可能	組み合わせ最適化問題
業務適用	実用化まで 10年以上	実用化に向けた 取組み多数
規模 (商用化)	53量子ビット (IBM) 	2,048量子ビット (D-Wave) 
	出所：IBM社 公式HP Blog「HP量子優位性時代の到来の鍵となる量子ボリュームとは？」 ( <a href="https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/power-quantum-device/">https://www.ibm.com/blogs/think/jp-ja/power-quantum-device/</a> )	出所：D-Wave社 公式HP ( <a href="http://dwavejapan.com/system/">http://dwavejapan.com/system/</a> )

## 【参考5】量子コンピュータの分類（詳細版）

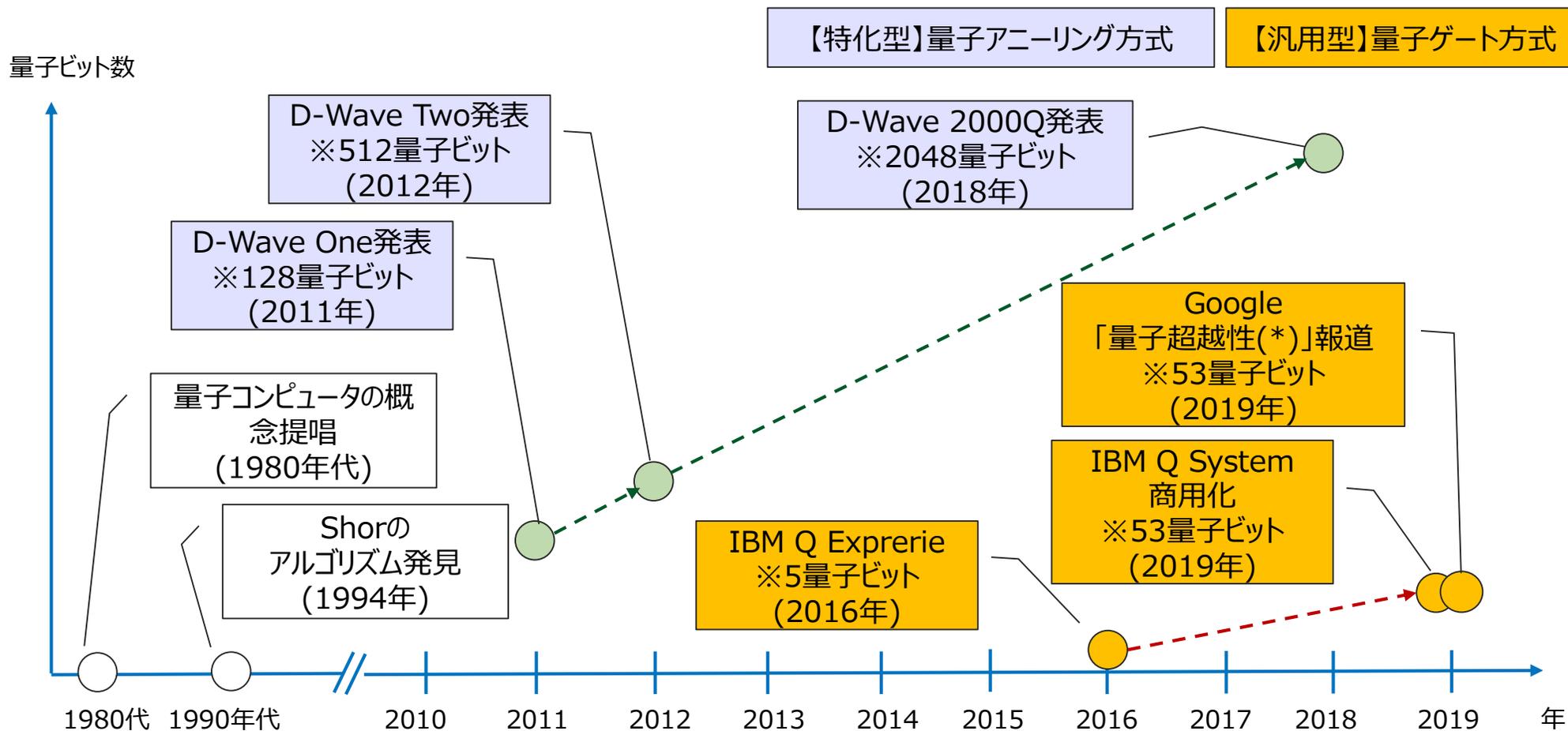
- 汎用的に計算を行う「汎用型」と組み合わせ最適化専用の「特化型」に大別
- 特化型であるイジングモデル方式には、古典コンピュータ(従来の半導体技術)で実現するものも存在

	量子コンピュータ			古典コンピュータ
方式	【汎用型】 量子ゲート方式	【特化型】イジングモデル方式		
		量子アニーリング方式	レーザー ネットワーク方式	シミュレーション方式 (量子インスパイアド方式)
適用領域	汎用的な計算を実現	組み合わせ最適化問題に特化		
環境	極低温／超高真空(*)		常温／常圧	常温／常圧
ハード	超電導量子回路(*)		光パラメトリック発振器	従来の半導体
主な推進組織	IBM/Google/ Microsoft/Intel/ Alibaba/Q-Leap	D-Wave/QEC/ NEC/NEDO	NTT/NII (国立情報学研究所) /量子人工脳	富士通/日立/ 東芝/NEC
規模 (商用化)	53ビット (IBM)	2,048ビット (D-Wave Systems)	2,000ビット (NTT&NII共同開発)	8,192ビット以上

(\*)主流の方式

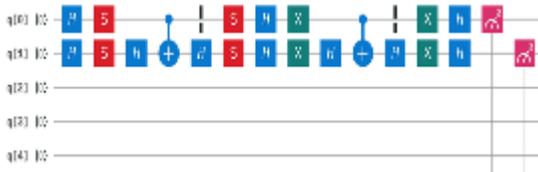
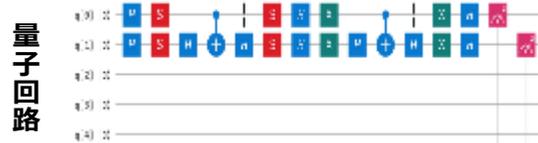
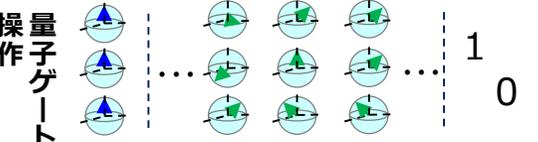
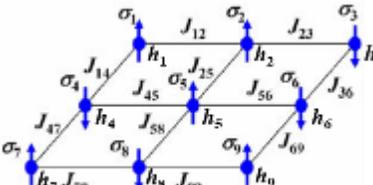
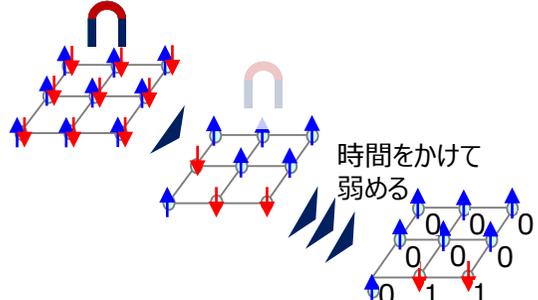
# 【参考6】量子コンピュータの変遷

- 量子コンピュータの概念が提案されたのが1980年代
- 2011年D-Waveの特化型の量子アニーリングマシン製品化を皮切りに注目度が高まり



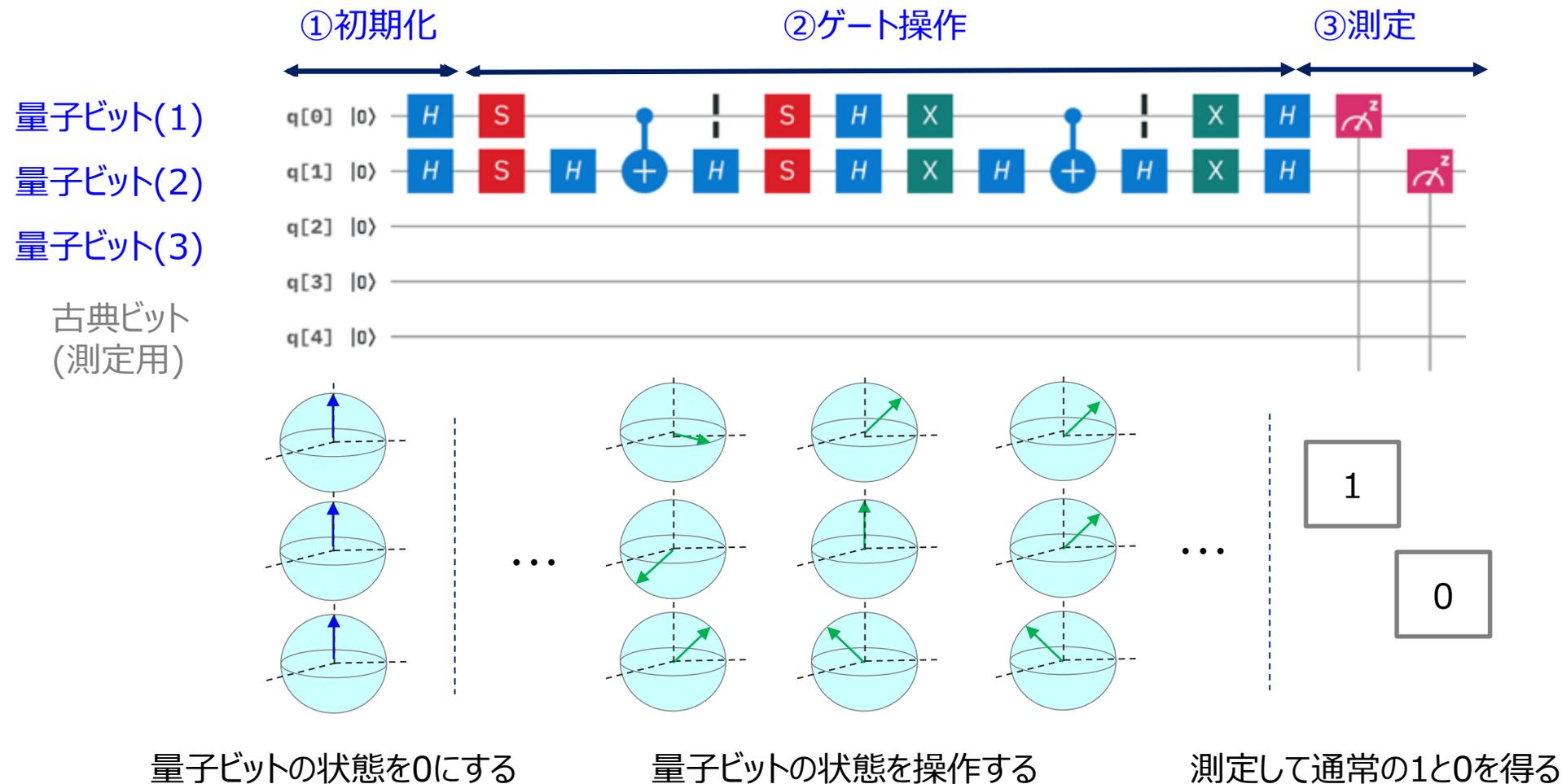
# 8. 量子コンピュータの解法手順

○ 量子が持つ性質を利用している点は共通だが、量子ゲート方式と量子アニーリング方式では課題解決に対するアプローチや実装方法は大きく異なる

	課題	設計	プログラミング	計算	測定										
量子ゲート方式	課題・テーマの抽出	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子アルゴリズムを検討</li> </ul> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">量子アルゴリズム</th> </tr> <tr> <th>名称</th> <th>内容</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Grover</td> <td>ある目的のデータを効率的に探すためのアルゴリズム</td> </tr> <tr> <td>Shor</td> <td>素因数分解・離散対数問題を解くアルゴリズム</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td>...</td> </tr> </tbody> </table>	量子アルゴリズム		名称	内容	Grover	ある目的のデータを効率的に探すためのアルゴリズム	Shor	素因数分解・離散対数問題を解くアルゴリズム	...	...	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子コンピュータに対して量子ゲートを適切に配置し、量子回路を作成</li> </ul> <p>量子回路</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ビットに対して色々な変換操作を行う(量子ゲート操作)</li> </ul> <p>量子回路</p>  <p>量子ゲート</p> 	計算結果の読み出し
量子アルゴリズム															
名称	内容														
Grover	ある目的のデータを効率的に探すためのアルゴリズム														
Shor	素因数分解・離散対数問題を解くアルゴリズム														
...	...														
量子アニーリング方式	<ul style="list-style-type: none"> <li>イジングモデル(またはQUBO)を定式化し、ハミルトニアン(エネルギー) <math>H(\sigma)</math> を得る</li> </ul> <p>イジングモデル <math>H(\sigma)</math></p> $H(\sigma) = - \sum_{i < j} J_{ij} \sigma_i \sigma_j - \sum_{i=1}^N h_i \sigma_i$ <p> <math>\sigma</math>: 変数の組 <math>\{\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_N\}</math>  <math>N</math>: スピンの数 (整数)                      各 <math>\sigma_i</math>: イジングスピン (<math>\{1, -1\}</math> を取る変数)  <math>J_{ij}</math>: スピン間の相互作用  <math>h_i</math>: 局所磁場                 </p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>定式化したモデルの各変数間の結合強度(<math>J_{ij}</math>)と各変数の重み付け(<math>h_i</math>)を量子コンピュータに設定</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>磁場を印加し、時間をかけて弱めると、ハミルトニアンを最小化する解が返る</li> </ul> <p>横磁場</p> 												

# 【参考7】量子ゲート方式のプログラミングと計算

- 量子ゲート(回路)を適切に配置して問題を解く
- 量子ビットを①初期化、②ゲート操作、③測定、の3ステップで演算する



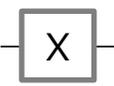
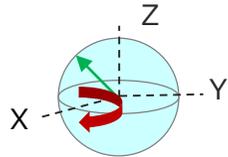
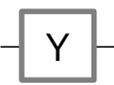
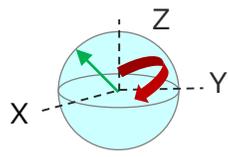
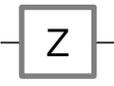
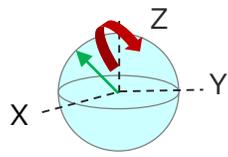
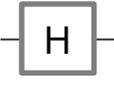
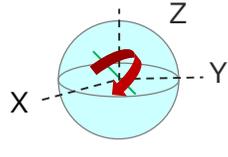
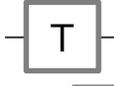
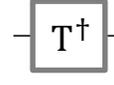
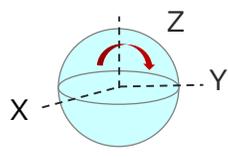
量子ビットの状態を0にする

量子ビットの状態を操作する

測定して通常の1と0を得る

## 【参考8】量子ゲート操作の例

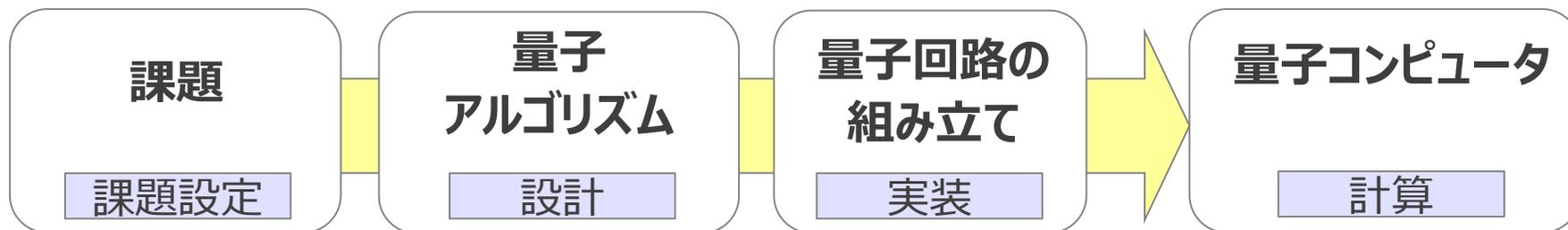
- 古典コンピュータにおける論理回路のように、量子ビットを操作する量子ゲート(回路)が存在する
- 実現したいことに合わせて、これらをうまく組み合わせる

名称		記号	概要	
パウリゲート	Xゲート		<ul style="list-style-type: none"> <li>• ブロッホ球上のX軸で180度反転</li> <li>• ビットを反転させる (0を1に変換)</li> </ul>	
	Yゲート		<ul style="list-style-type: none"> <li>• ブロッホ球上のY軸で180度反転</li> <li>• ビット・位相を反転させる</li> </ul>	
	Zゲート		<ul style="list-style-type: none"> <li>• ブロッホ球上のZ軸で180度反転</li> <li>• 位相を反転させる</li> </ul>	
アマダールゲート (Hゲート)			<ul style="list-style-type: none"> <li>• ブロッホ球を斜めに横切る軸に沿って、180度反転</li> <li>• 重ね合わせ状態を作る</li> </ul>	
位相シフトゲート (Tゲート、 $T^\dagger$ ゲート)		 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ブロッホ球のZ軸で<math>n/4</math>回転 (45度回転)</li> <li>• <math>T^\dagger</math>は逆方向の<math>-n/4</math>回転</li> <li>• 波動の計算に利用</li> </ul>	

\*ブロッホ球：量子状態を単位球面上に表す表記法

## 9. 量子ゲート方式の活用手順

○ 課題解決が可能な量子アルゴリズムの発見と、そのアルゴリズムの実装可否が活用において重要



課題・テーマ抽出

基幹パーツとなる量子アルゴリズムを検討

量子回路を作成

量子ゲートマシンで計算が実行される

概要・イメージ

量子アルゴリズム	
名称	内容
Grover	ある目的のデータを効率的に探すためのアルゴリズム
Shor	素因数分解・離散対数問題を解くアルゴリズム
...	...

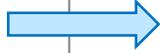


主な課題

- ・ユースケース不足
- ・発見されている実用的な量子アルゴリズムが少ない
- ・量子ビット不足により実装可能な処理が限定的
- ・エラー耐性が無く、重ね合わせ状態が崩れる
- ・実装ノウハウを持った人材の不足

## 【参考9】代表的な量子アルゴリズム

- 量子コンピュータでも通常の古典コンピュータと同様にアルゴリズムを作り、演算を行うことが可能
- 量子コンピュータの性能が古典コンピュータを上回るには、問題に対して適切な量子アルゴリズムが必要  
 ※量子アルゴリズムだからといって、必ず古典コンピュータのアルゴリズムより高速とは限らない

名称	発表年	内容	計算量	
			単純計算	量子アルゴリズム
Shor (ショア)	1994	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 素因数分解・離散対数問題を解くアルゴリズム (離散フーリエ変換を改良した量子フーリエ変換により実現)</li> </ul>	$2^{O(N^{1/3})}$ (例) N=100 約170億回	$O(N^3)$ (例) N=100 3.9万回
				
Grover (グロバー)	1996	<ul style="list-style-type: none"> <li>• データを効率的に探すためのアルゴリズム (振幅増幅法と呼ばれる拡散変換により正解の振幅を高める)</li> </ul>	$O(N)$ (例) N=1億 1億回	$O(\sqrt{N})$ (例) N=1億 1万回
				
HHL (Harrow-Hassidim-Lloyd)	2009	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 疎行列の連立一次方程式を高速に解くことのできるアルゴリズム</li> </ul> ※疎行列：要素の多くが0の行列 $(Ax=b \rightarrow x=A^{-1}b)$	$O(N)$ (例) N=1億 1億回	$O(\log N)$ (例) N=1億 8回
				

## 【参考10】暗号解読に関する見解

- 量子コンピュータによる暗号解読は、早くても2030年以降との見方が有力
- 一足早く、NISTでは、耐量子暗号の研究開発に取り組んでいる

### 脅威となる暗号の種類

- 公開鍵方式暗号の2種が脅威となる

暗号方式	安全性根拠	耐量子性	
公開鍵暗号	RSA暗号	素因数分解	×
	楕円曲線暗号	離散対数問題	×
	準同型暗号	最短格子問題	○
共通鍵暗号	DES、AES等	—	○

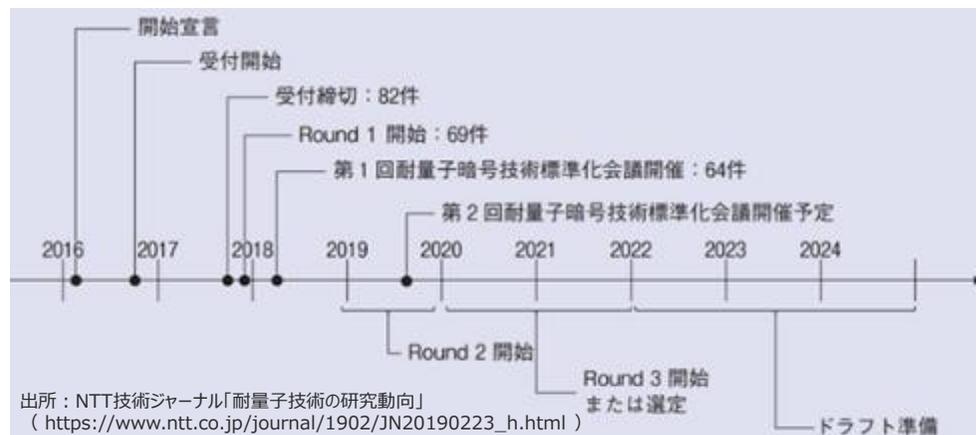
### 脅威となる時期

- RSA暗号は、200万量子ビットが完成すれば、8時間で解読可能（Googleの見解）
- IBM Qのロードマップは、毎年倍にする計画（計画通り開発が進めば、2036年には200万量子ビット達成）

### 【参考】耐量子暗号の候補と概況

- 候補とされているものは、格子暗号、多変数公開鍵暗号、符号暗号、同種写像暗号など
- 米国標準技術研究所（NIST）を中心に、耐量子暗号の標準化プロジェクトが進行
- 2019年1月から、Round 2 が開始。26件の候補の安全性が検証中。2022年以降にドラフト版の標準化が示される計画

### 【参考】NISTの取組み



第1章 技術解説

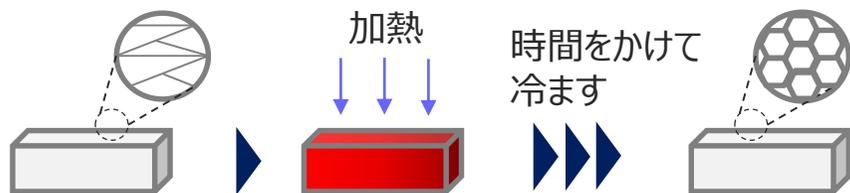
10. 量子アニーリングとは？

- 特化型（量子アニーリング方式）は、量子の性質を利用して、組み合わせ最適化問題を解くもの
- 「イジングモデル」と呼ばれるモデルに問題を設定して、量子コンピュータで解く

由来／処理イメージ

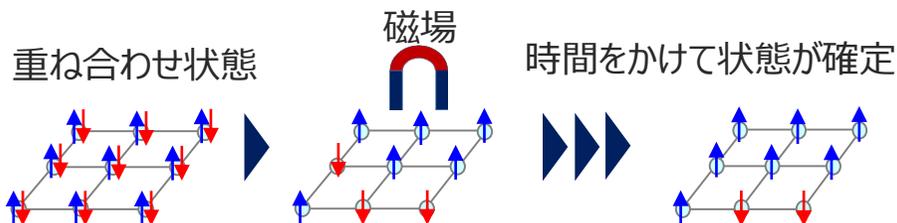
焼きなましのイメージ

金属中の欠陥が消滅し、ひずみのない等方的な結晶になる

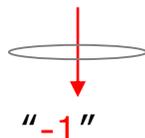
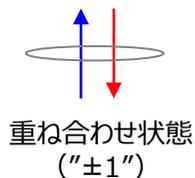
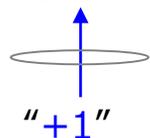


量子アニーリングのイメージ

各スピンの状態が安定していき、各スピンの向きが確定する



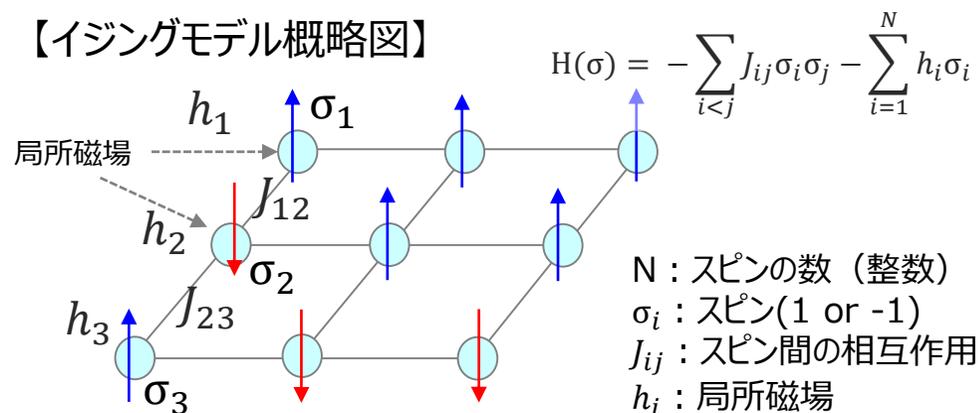
※スピン(=量子ビット)



イジングモデル

- 「イジングモデル」は、上向き、または、下向きのスピンから構成され、隣接するスピン間の相互作用および外部から与えられた磁場の力によって状態が変化
- 最終的に、ハミルトニアン(系全体のエネルギーのこと)が最小の状態ですピンは収束

【イジングモデル概略図】



【QUBO(Quadratic unconstrained binary optimization)】

・イジングモデルは{1,-1}で表現するが、QUBO H(q)は{0,1}で表現

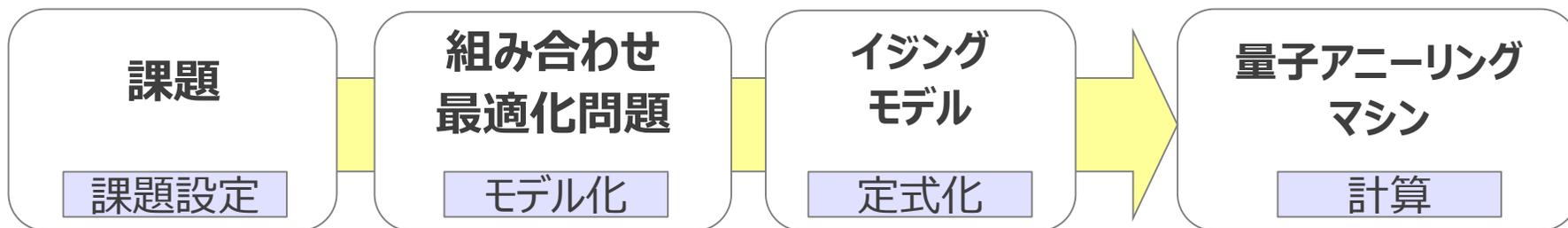
$$H(q) = - \sum_{i < j} Q_{ij} q_i q_j$$

$q_i$  : {0, 1}を取る変数  
 $q_i = \frac{\sigma_i + 1}{2}$  の関係

第1章 技術解説

1.1. 量子アニーリング方式の活用手順

- 問題をイジングモデル（またはQUBO）に落とし込み、量子アニーリングマシンへパラメータを入力
- エネルギーが最小となる組み合わせが結果として得られる



リスク分散のため  
「正」「負」相関のある  
資産ペアを探す

組み合わせ最適化問題  
としてモデル化

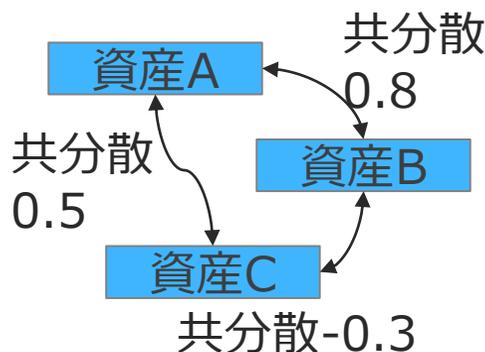
イジングモデルへ定式化

量子コンピュータに  
パラメータ (h, J) を投入

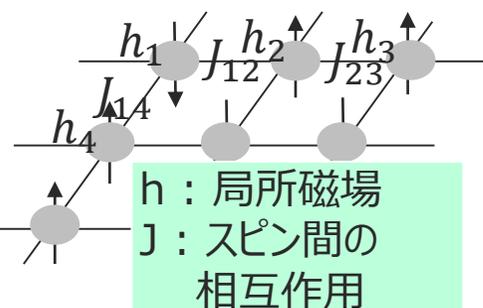


$$H(\sigma) = -\sum_{i<j} J_{ij}\sigma_i\sigma_j - \sum_{i=1}^N h_i\sigma_i$$

（例）ポートフォリオ最適化



		資産		
		A	B	C
資産	A	1	0.8	0.5
	B	0.8	1	-0.3
	C	0.5	-0.3	1



エネルギー (H) が  
最小となる組み合わせ  
を出力

【参考 1 1】具体例：ナップサック問題

課題設定

・ナップサックの中に幾つかの品物を詰め込み、品物の総価値を最大にする問題

クッキー	バームクーヘン	ポテトチップス	ゼリー
100円	120円	110円	110円
110ml	150ml	120ml	120ml
せんべい	チョコレート	キャンディー	ガム
70円	80円	40円	30円
100ml	90ml	40ml	30ml

なるべく高い金額を詰めるには？



300mlの袋

モデル化・定式化

- ・ $\sigma_i = 1$ : 「お菓子 i を入れる」、 $\sigma_i = 0$ : 「お菓子 i を入れない」と決める (\*QUBO形式)
- ・入れたお菓子の合計金額と容量を $\sigma$ の式で表し、金額はより多く、容量は300のとき、小さくなる式を立てる

金額 $H_1$	$H_1 = -(100円 \times \sigma_1 + 120円 \times \sigma_2 + 110円 \times \sigma_3 + 110円 \times \sigma_4 + 70円 \times \sigma_5 + 80円 \times \sigma_6 + 40円 \times \sigma_7 + 30円 \times \sigma_8)$
----------	--

容量 $H_2$	$H_2 = (300ml - (110ml \times \sigma_1 + 150ml \times \sigma_2 + 120ml \times \sigma_3 + 120ml \times \sigma_4 + 100ml \times \sigma_5 + 90ml \times \sigma_6 + 40ml \times \sigma_7 + 30ml \times \sigma_8))^2$
----------	--

入力

・ハミルトニアン  $H (= H_1 + H_2)$  を展開して得られる係数データ $Q_{ij}$ の配列を量子アニーリングマシンに入力して計算

$$H(q) = H_1 + H_2 = [\sigma_1 \quad \cdots \quad \sigma_8] \begin{bmatrix} \sigma_1 & & & & & & & \\ -54000 & \cdots & 6600 & & & & & \\ \vdots & \ddots & \vdots & & & & & \\ 0 & \cdots & -1730 & & & & & \\ & & & \sigma_8 & & & & \end{bmatrix} + 9000$$

入力

計算・出力

エネルギーが最小の状態に収束

クッキー	バームクーヘン	ポテトチップス	ゼリー
100円	120円	110円	110円
110ml	150ml	120ml	120ml
せんべい	チョコレート	キャンディー	ガム
70円	80円	40円	30円
100ml	90ml	40ml	30ml

$H (= H_1 + H_2)$  を最小化する $\sigma_i$ の組み合わせが得られる

$$\sigma = (1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1)$$

ユーザ企業が関与

提供ベンダー

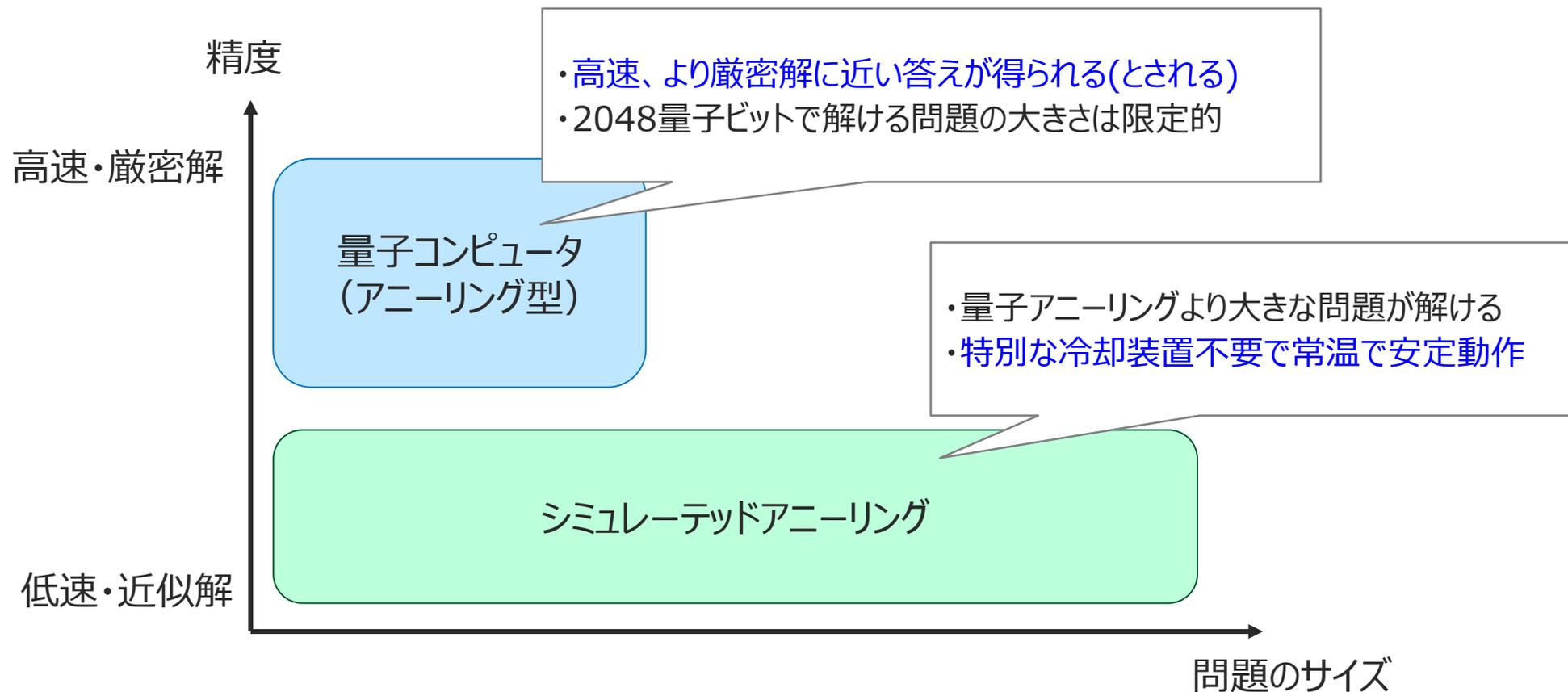
**【参考 1 2】特化型（イジングモデル方式）の製品スペック**

	【特化型】イジングモデル方式						
	量子アニーリング		シミュレーション				レーザー
	D-Wave	NEC	富士通	日立	TOSHIBA	NEC	NTT
製品名	D-Wave 2000Q	未公開	デジタルアニーラ	CMOSアニーリング	シミュレーテッド分岐マシン	アニーリングマシン (SX-Aurora TSUBASA)	コヒーレントイジングマシン
ステータス	商用化	研究開発中	商用化	2020年度商用化予定	商用化	商用化	研究開発中
実装方式	超電導回路	超電導回路	ASIC	FPGA GPU	HWに非依存	ベクトル計算機	レーザー + FPGA
規模 (変数の数)	2,048	未公開	8,192	100,000	100,000	100,000	2,000
結合の仕方	隣接結合	未公開	全結合	全結合	全結合	全結合	全結合

参考：各社公開情報を基に日本総合研究所作成（2020/7/13時点）

## 【参考13】特化型（イジングモデル方式）の比較

- イジングモデルは様々な方式が存在。ターゲット領域が異なるとされるが、正確に比較した成果は少ない
- マシン毎に得意不得意あり、解きたい課題を明確にしたうえで、試行錯誤による見極めが必要な状況



## 【参考14】費用対効果

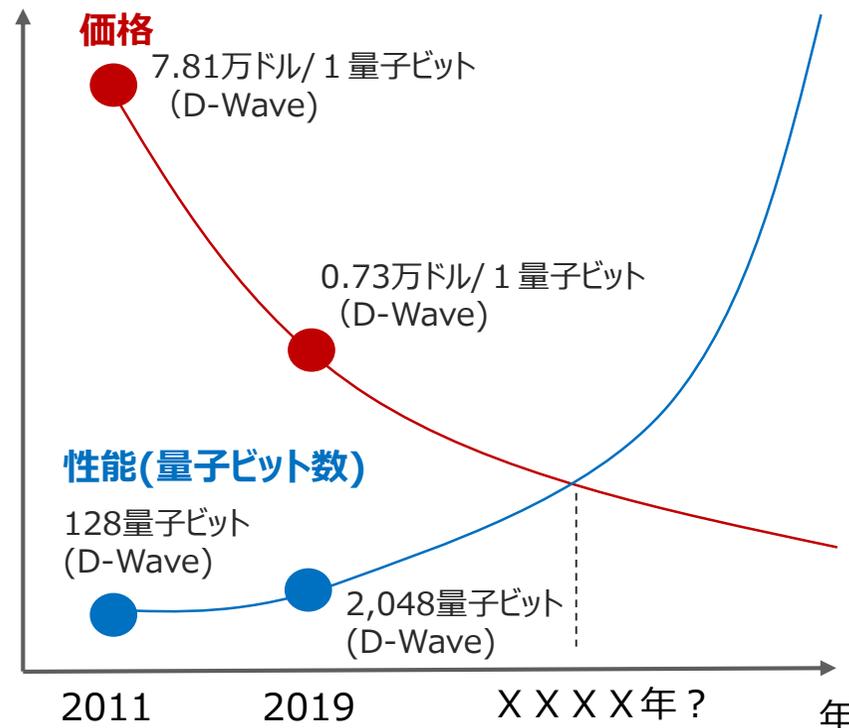
○ 年々、量子コンピュータの利用にかかるコストは低減しているものの、量子コンピュータを活用したときの効果が不透明。効果が期待できるユースケース発掘が必要

### D-WAVE製品の価格推移

- 最新のD-WAVE2000Qは、1,500万ドル(約17億円)
- 量子ビットあたりの価格は安くなってきている
- クラウドでの利用も可能に

製品	提供方法 (提供年)	量子 ビット数	価格	1量子 ビットあたり
D-WAVE One	筐体 (2011)	128	1,000万ドル/台	7.81万ドル
D-WAVE Two	筐体 (2013)	512	1,500万ドル/台	2.93万ドル
D-Wave 2000Q	筐体 (2018)	2,048	1,500万ドル/台	0.73万ドル
	クラウド (2019) *サービス名「Leap」	2,048	2,700ドル/時間 (約30万円)	-

### 価格/費用対効果のイメージ



参考：公開情報を基に日本総合研究所作成

## 第1章 技術解説

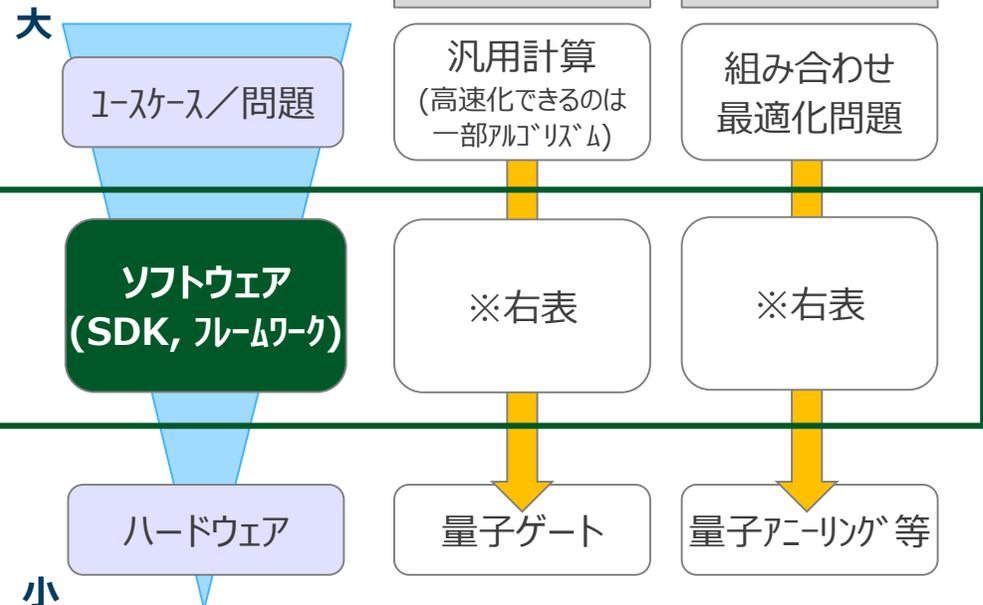
# 1.2. ソフトウェアと開発フレームワーク

- 量子コンピュータ(ハードウェア)を操るための、ソフトウェア開発も活発化
- 量子コンピュータソフトの開発フレームワークが各社から発表

### 量子コンピュータの構成要素

- ・ユースケースや問題を、最終的に量子コンピュータで効果的に処理できる形に変換されることで、思うような結果を得られる
- ・ユーザーが扱うには、ハードウェアの進展だけでなく、ソフトウェアの充実、ユースケースや問題設定が重要

### ユーザーの関与度



### ソフトウェア開発フレームワーク/開発キット

SDK	提供ベンダー	対応する量子コンピュータ	プログラミング言語	量子プログラミング言語	提供開始
1QBit SDK	1QBit	イジングモデル	Python	N/A	2016年 現在非公開
D-Wave Ocean	D-Wave	イジングモデル	Python	N/A	2017年
Forest	Rigetti	量子ゲート	Python	Quil	2017年
QISKit	IBM	量子ゲート	Python	Open QASM	2017年
QDK	Microsoft	量子ゲート	Q#	Q#	2017年
Cirq	Google	量子ゲート	Python	Cirq	2018年
Blueqat	MDR	量子ゲート/イジングモデル	Python	N/A	2018年

# 1章 まとめ

- 量子コンピュータとは、**量子力学の原理を情報処理にうまく応用したコンピュータ**
- 既存のコンピュータでは時間がかかる**特定の問題解決に大きな効果を発揮すると期待**  
(すべてのコンピュータが量子コンピュータに置き換わるわけではない)
- 量子コンピュータは「**汎用型**」、「**特化型**」の大きく**2種に分類**
  - **汎用型**：幅広い用途への活用が期待されインパクト大  
エラー訂正や規模拡大が課題。実用化には時間が必要  
量子アルゴリズムの開発、実装がポイント
  - **特化型**：組み合わせ最適化に特化。実用化に近い  
イジングモデルへの定式化が実装のポイント

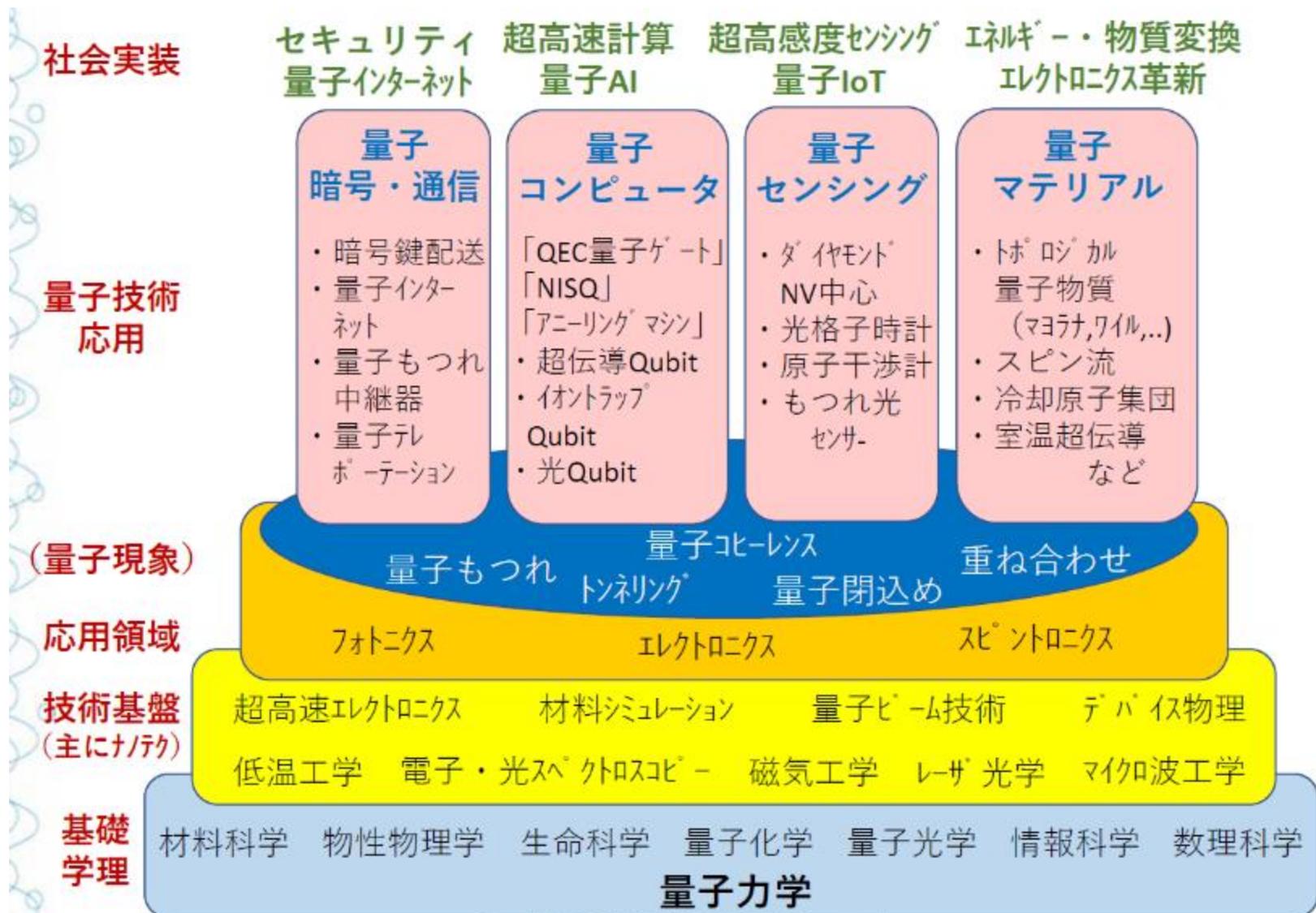
## 第2章 市場動向・活用動向

### 1. 主要国の政策動向

- 米中EUは、量子コンピュータを**国家戦略上の重要技術と位置付け**、戦略策定、研究開発投資の拡充、拠点の生成等を急速に展開
- 日本は、**基礎理論等に優位性を有するものの**、戦略的な方向性や世界的な研究拠点等が少ないことから、現在は**国を挙げて戦略を策定・推進中**

	政策動向	予算額
 米国	「量子情報科学の国家戦略概要」(2018.9) 「国家量子イニシアティブ法」(2018.12)	「国家量子イニシアティブプログラム」 <b>1,400億円/5年</b>
 中国	「科学技術イノベーション第13次5ヶ年計画」 (2016-20)	「国家重点研究計画」「量子情報科学国家実験室」 <b>1,200億円/5年</b>
 EU	「Quantum Manifesto」(2016.5)	「Quantum Technology Flagship」 <b>1,250億円/10年</b>
 日本	「量子技術イノベーション戦略」(2020.1)	「NEDO」「Q-LEAP」 <b>200-300億円/10年</b> → <b>2020年度 230億円/1年を要求</b>

【参考15】量子技術イノベーション戦略



Copyright © 2019 CRDS All Rights Reserved.

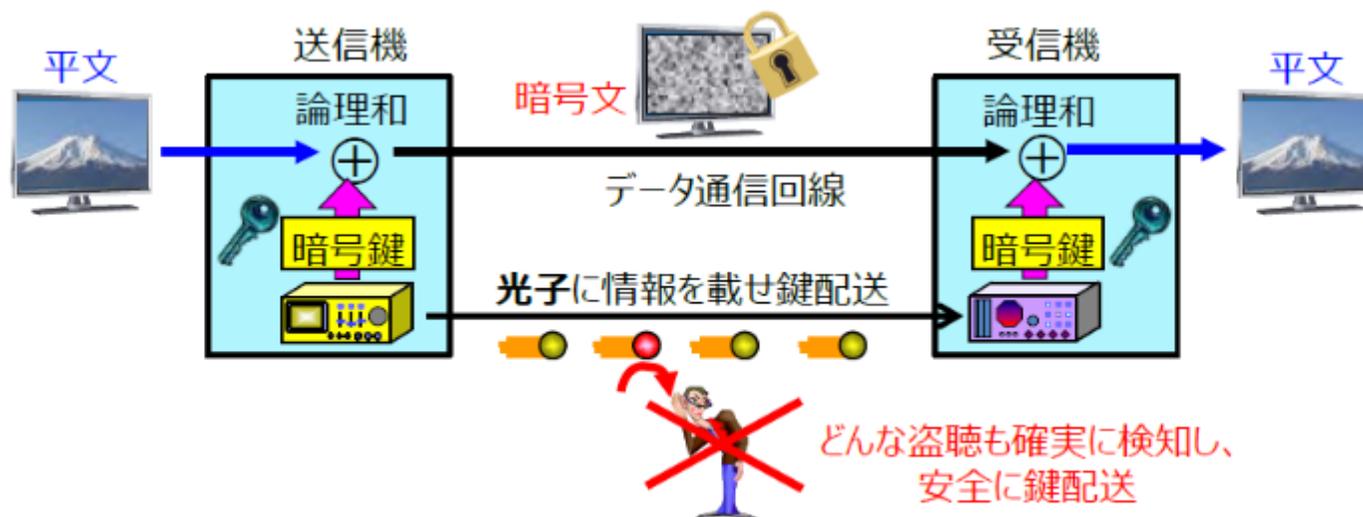
## 【参考16】量子暗号

- 量子コンピュータ時代のセキュリティ技術
- 背景として、「量子コンピュータ」時代の到来や既存暗号通信技術の危殆化（RSA等の既存暗号通信技術が量子コンピュータを使うと短時間で破られる可能性）がある

### 量子暗号

- 光子に、暗号化や解読に使う「鍵」の情報をのせて送る。光子は誰かが不正に読み取ろうとすると状態が変化し、この兆候を検知することによって漏洩の危険性を取り除き、安全性を保てるとされている

(※) 光子：光の粒子。物理学における素粒子の一つであり、「光量子」とも呼ばれる

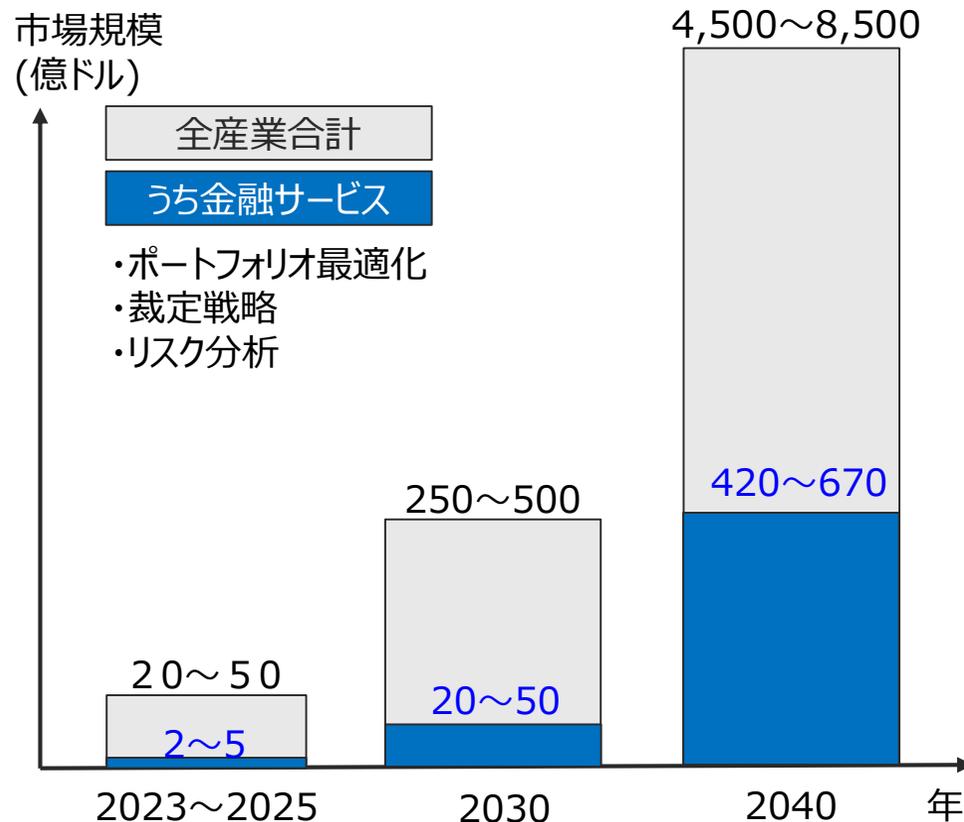


出所：首相官邸ホームページ、有識者会議「量子技術イノベーション」（2019年3月29日） 情報通信研究機構 未来ICT研究所「量子通信・量子暗号の動向と展望」  
 ( [https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu\\_innovation/dai1/siryou4-5.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu_innovation/dai1/siryou4-5.pdf) )

## 2. ビジネスインパクト（市場予測／利用形態）

- 市場規模は、2025年頃に50億ドル、2030年頃には500億ドルに達すると予想（うち金融は10%程度）
- 限られた分野において、主にクラウド経由で古典コンピュータ等と併用されるような利用形態になると思慮

### 市場予測



参考：Boston Consulting Group「Where Will Quantum Computers Create Value—and When?」  
(<https://www.bcg.com/publications/2019/quantum-computers-create-value-when.aspx>)

### 利用形態

古典コンピュータで問題なく  
処理できる汎用計算



- ・四則演算
- ・画像処理 etc

量子コンピュータが  
効果を発揮する問題



- ・創薬、分子シミュレーション
- ・ポートフォリオ管理
- ・大規模経路探索 etc

主にクラウド経由で提供



古典コンピュータ



古典 + 量子コンピュータ併用

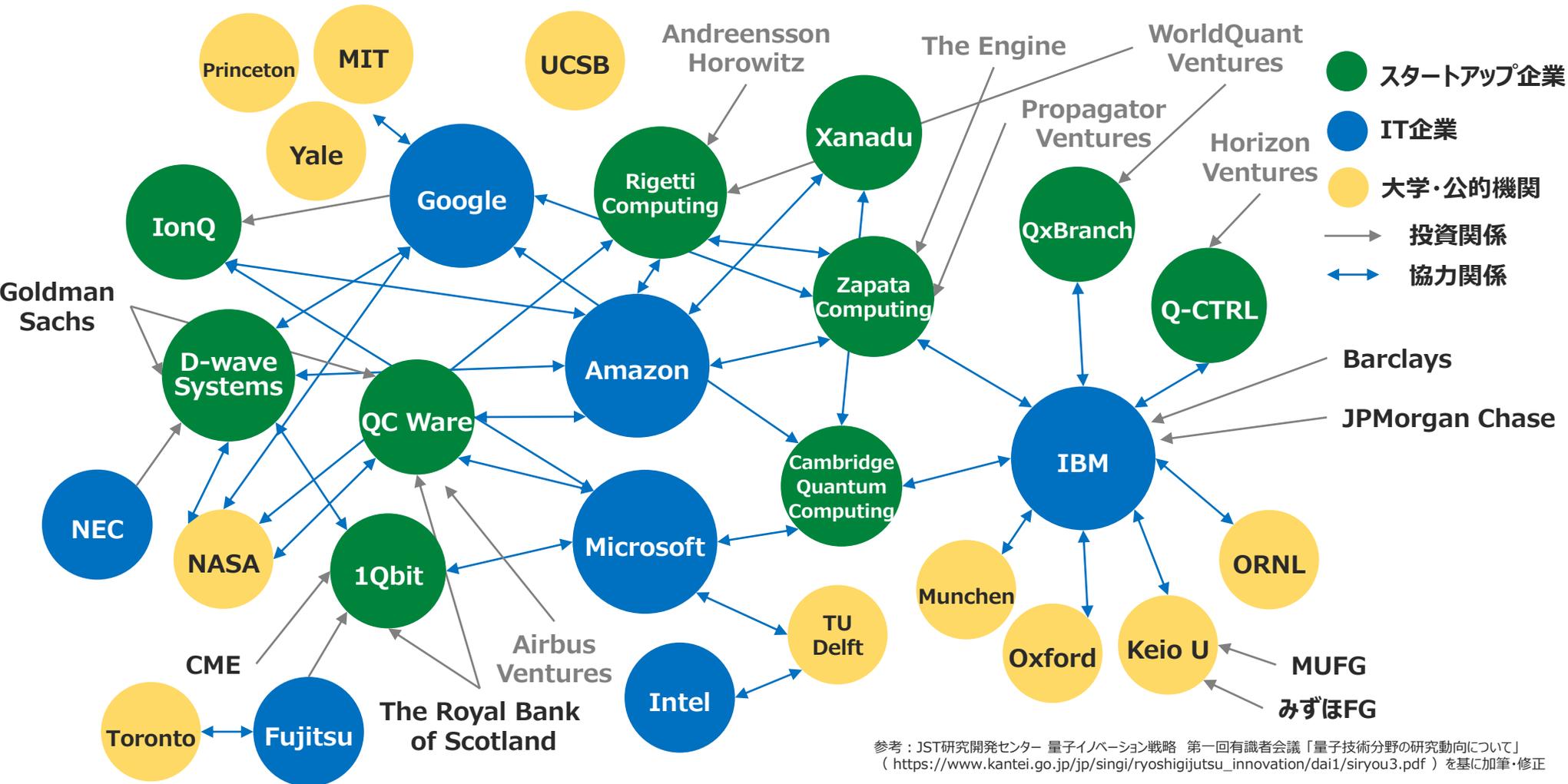
出所：D-Wave社 公式HP  
(<http://dwavejapan.com/system/>)

### 3. 主なスタートアップ企業

企業名	国名	開発レイヤ	総調達額	概要
D-wave Systems	カナダ (バーナビー)	ハードウェア/ ソフトウェア	222億円	商用可能な量子コンピュータのハードウェアを開発
Rigetti Computing	米国 (バークレー)	ハードウェア/ ソフトウェア	127億円	量子コンピュータと通常のコンピュータの両方を同じクラウド上で提供しているのが同社の特徴
1Qbit	カナダ (バンクーバー)	ソフトウェア	36億円	量子コンピュータアプリ開発とコンサルティング事業を展開。もともとアニーリングだが、最近は量子化学にも力を入れている
Zapata Computing	米国 (ボストン)	ソフトウェア	33億円	量子化学のトップスターを抱える注目のベンチャー。機械学習から量子化学から全てにおいて高レベルなアプリケーションを量産
Xanadu	カナダ (トロント)	ハードウェア/ ソフトウェア	33億円	フォトン（光子）を利用した常温動作のハードウェアを研究開発
Cambridge Quantum Computing	イギリス (ケンブリッジ)	ソフトウェア	24億円	量子コンピュータ向けのシステムやOS開発などを行っている老舗ベンチャー
IonQ	米国 (カレッジ・パーク)	ハードウェア/ ソフトウェア	21億円	イオントラップ型の量子コンピュータを研究開発
Q-CTRL	オーストラリア (シドニー)	ソフトウェア	19億円	ソフトウェアでハードウェアのエラーをコントロールするミドルウェアの提供
QxBranh	米国 (ワシントンD.C.)	ソフトウェア	9億円	セキュリティやデータ処理を中心とする比較的初期からある量子コンピュータアプリメーカー
QC Ware	米国 (パロアルト)	ソフトウェア	7億円	クラウドやアプリケーション経由でソリューションを提供するベンチャー。カンファレンスも有名

# 4. 量子コンピュータにおけるエコシステム

- 量子コンピュータ関連のスタートアップ企業への投資は北米企業を中心に活発化
- IT企業や大学・公的機関との協力・連携も進み、エコシステムの形成が進んでいる



参考：JST研究開発センター 量子イノベーション戦略 第一回有識者会議「量子技術分野の研究動向について」  
( [https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu\\_innovation/dai1/siryou3.pdf](https://www.kantei.go.jp/jp/singi/ryoshigijutsu_innovation/dai1/siryou3.pdf) ) を基に加筆・修正

## 第2章 市場動向・事例

### 5. コンソーシアム

- 日本の産学研究による量子コンピュータの活用研究は世界的にみて最先端であり、東北大学や慶應義塾大学、早稲田大学などが産業応用のユースケース開発を牽引
- 北米ではオークリッジ国立研究所、NASAなどがD-Waveを共同利用するコンソーシアムを主催

	東北大学 田中/大関研究室 T-QARD	早稲田大学 グリーン・ コンピューティング・シス テム研究機構	IBM Q Network Hub @慶應義塾大学	大阪大学	モバイル コンピューティング推進 コンソーシアム	オークリッジ 国立研究所	USRA Quantum Computing AI Lab
国	日本				米国		
方式	量子アニーリング方式		量子ゲート方式		量子アニーリング方式/量子ゲート方式		
主な 取組み	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子アニーリング (D-Wave)活用研究</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>各種イジングマシンに対応するソフトウェア開発、応用探索</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IBM Q (ゲート式量子コンピュータ) への実装方法をアドバイス</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子技術 (ゲート式量子コンピュータ、量子暗号、量子計測・センシング等)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>情報交換と実用化へ向けた取組み</li> <li>実用化に向けたツール整備推進</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>D-WAVE 2000Q をコンソーシアムメンバー共用し、研究開発を実施</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NASAが導入したD-WAVE 2000Q をコンソーシアムメンバーが共用し、研究開発を実施</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>産学連携</li> <li>量子アニーリング活用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>産官学連携</li> <li>イジングマシン各種活用</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>産学連携</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>アカデミア中心</li> </ul>			
実績	<ul style="list-style-type: none"> <li>世界初の実用化へ目途</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NEDOの量子コンピュータ事業3件全てに参加</li> <li>国際的学会AQCの実績多数 (35件の論文発表)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IBM Qを活用した産学共同研究で世界初論文発表(2019年6月)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子技術の世界最大級研究拠点</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>2019年9月19日、参画企業9社とユースケース開発実証実験開始</li> </ul>	(非公表)	
主な 企業・ 団体	<ul style="list-style-type: none"> <li>デンソー、京セラなど約12の企業・大学が参画</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>NEC、産総研、豊田通商など約20の企業・大学が参画</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>IBM Q NetworkへはMUFU、みずほ、三菱ケミカルなど、参加組織数は世界で100以上</li> </ul>	(非公表)	<ul style="list-style-type: none"> <li>NEC、日立、富士通など約36の企業が参画</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>MEMPHIS大学、東北大学、理研など約14の企業・大学が参画</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Carnegie Mellon University、Standard Chartered、QC Wareなど約20の企業・大学が参画</li> </ul>

# 【参考17】IBM Q Network

- CES2020において、米IBMは「IBM Q System」をクラウド利用可能にするネットワーク「IBM Q Network」への参加組織数が100を超えたことを発表
- 日本では、慶應義塾大学（2018年）を拠点として、量子金融や量子AI、量子化学など量子コンピュータの活用を研究

## CES2020

- CES2020（2020年1月）にて、Delta AirlineがIBM Q Networkに参画することを発表
- また、2017年から始まり、2019年1月時点で42企業・機関だったが、CES2020時点ではFortune500の企業や新興企業、政府、大学などを含めて参加組織数が100を超えたと発表

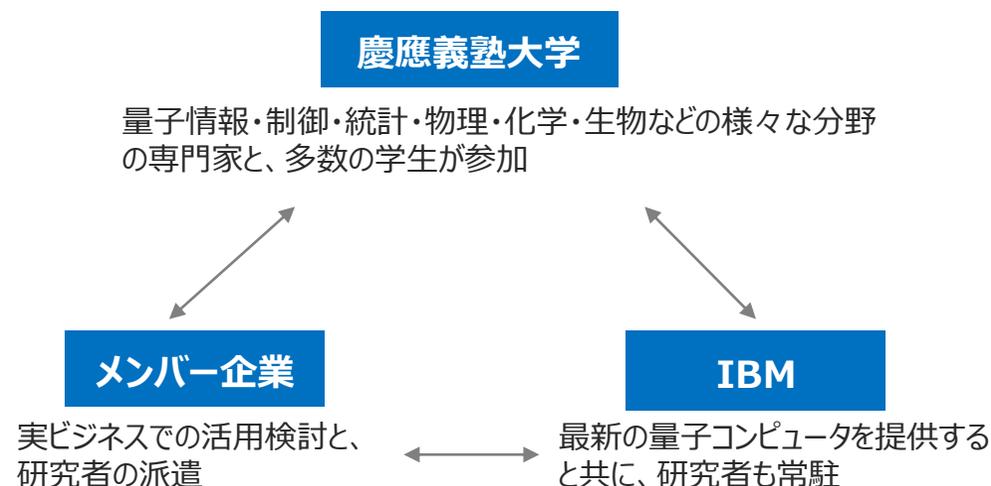
## IBM Q Network Hub @ Keio University

- 2018年5月より、メンバー企業、慶應義塾大学、IBMの三者で協業し、実用的な量子アプリケーションの開発を目指す
- デリバティブやリスク計算等の金融業務、AI（機械学習）、分子のシミュレーション等の化学計算への活用のほか、量子回路と実機を結ぶソフトウェアの研究等に取り組む

### IBM Q Network 主な企業・組織（青字：日本企業・機関）

<b>Hubs</b>	オークリッジ国立研究所/オックスフォード大学/メルボルン大学/Los Alamos国立研究所/CSIS/慶應大学	
<b>Industry Partners</b>	JP Morgan Chase & Co./ExxonMobil/Goldman Sachs/Samsung/Accenture/JSR Corporation/Daimler/Woodside	
<b>Member</b>	<b>Members</b>	Barclays/Wells Fargo/MUFG/みずほ/三菱ケミカル/Honda/日立金属/長瀬産業/Delta Airline
	<b>Startups</b>	QC Ware/Grid/Quemix/CQC/1QBit/Zapata/Q-CTRL/MDR/Quasys/QuantiFi/Quantum Benchmark/Strange Works/Jos Quantum
	<b>Academic Partners</b>	MIT/EDX.org/Virginia Tech/Harvard/Boston University/東京大学/U.Chicago/ETH Zurich

### <体制図>



## 6. 量子コンピュータへの取組み

- 【特化型】イジングモデル方式（含む、量子アニーリング方式）を活用した組み合わせ最適化を解く問題を中心に取組みが進展

	取組み状況		
	取組発表	机上・理論検証（公開ペーパー有）	実証実験
金融	⑥ *コールセンター要員シフト作成 (SMFG) @資産運用、暗号、リスク計算 (MUFG) †ポートフォリオ最適化 (RBS、J.P.Morgan) †AI活用、暗号、リスク計算 (みずほ)	④ *ポートフォリオ最適化 (1Qbit) ⑤ *AIで株価予想 (野村アセットマネジメント) *リバースストレステスト (HSBC) †AIでオプション計算 (IBM)	-
製造	*倉庫オペレーション改善 (日立、さくらインターネット) *生産計画最適化 (富士通)	*ロボットアーム操作 (BMW) *自動車のキャリブレーションテスト (AISIN AW) *グラフィック (LOCKHEED MARTIN) *フォルトツリー解析 (AIRBUS)	① *無人搬送車経路最適化 (DENSO) *工場内ピックアップルート最適化 (富士通) *生産計画最適化 (NEC)
情報	-	*広告入札最適化 (リクルートコミュニケーションズ) *航空写真からの樹木判定 (NASA) *行列因子分解 (Los Alamos)	② *ホテルリコメンド最適化 (リクルートコミュニケーションズ)
交通	-	*マルチモーダルシェア (DENSO) ③ *北京の交通量最適化 (Volkswagen)	*バンコクの交通量最適化 (デンソー、豊田通商)
化学	*分子類似性による創薬 (富士通) †リチウム電池開発 (三菱ケミカル、JSR)	*フラグメント分子軌道法 (京セラ) *ヒトαシヌクレインの凝集 (Peptone) *量子分子動力法シミュレーション (Los Alamos国立研究所) @材料開発：分子構造予測 (OTI Lumionics Inc)	-

【凡例】 \*：【特化型】イジングモデル方式での取組み †：【汎用型】量子ゲート方式での取組み @：両方式での取組み

## 6. ①工場内の無人搬送車の経路最適化（DENSO）

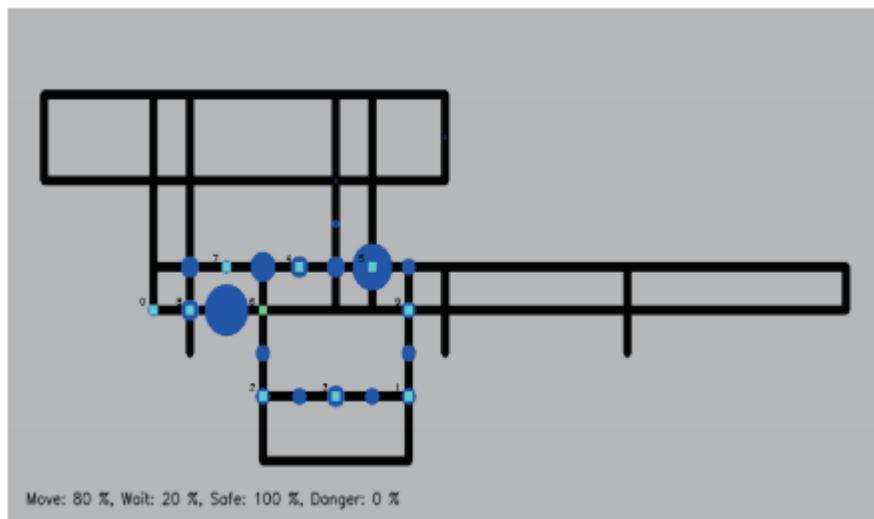
- 工場内では部品を運ぶために多数のAGV（無人搬送車）を利用。従来は事故の防止を最優先として、**交差点にAGVが同時に進入することを禁止していたため、渋滞が発生**
- 工場内のAGVの運行ルートについて、D-Wave2000Qでリアルタイムに最適化し、**渋滞を緩和**



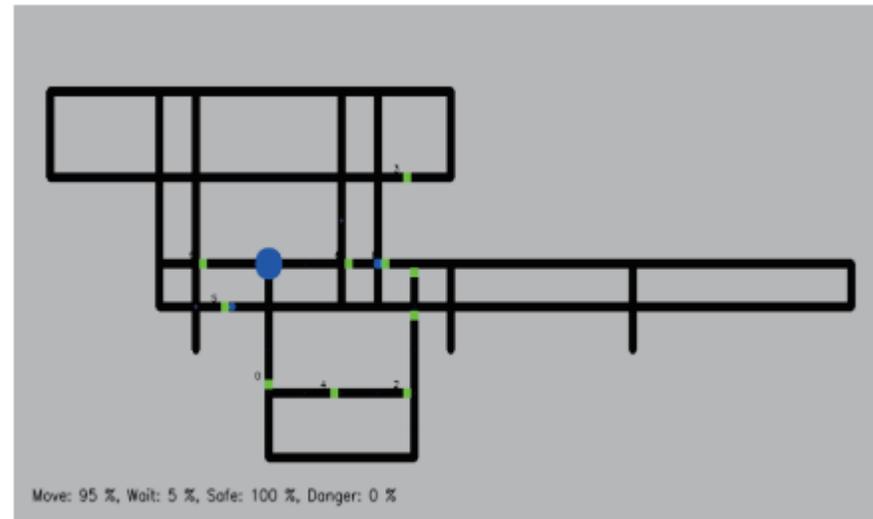
## 6. ①工場内の無人搬送車の経路最適化 (DENSO)

- 個々のAGV（無人搬送車）単位ではなく、リアルタイムにAGV全体の挙動が最適になるように、各AGVのルート選択を変数として、QUBO形式に定式化し、D-Wave 2000Qで最適化
- 結果として、AGVの稼働時間が15%向上（稼働率80% ⇒ 95%）

- 四角の点がAGV（10台）で、黒い線に沿って、AGVが走る
- 途中で、他のAGVと同じタイミングで交差点に進入してしまうと、ぶつかる可能性がある（青い円が交差点での待ち時間を表している）
- 従来は、どちらのAGVを優先すべきか、あらかじめ決められたルールベースに基づいて決定していた



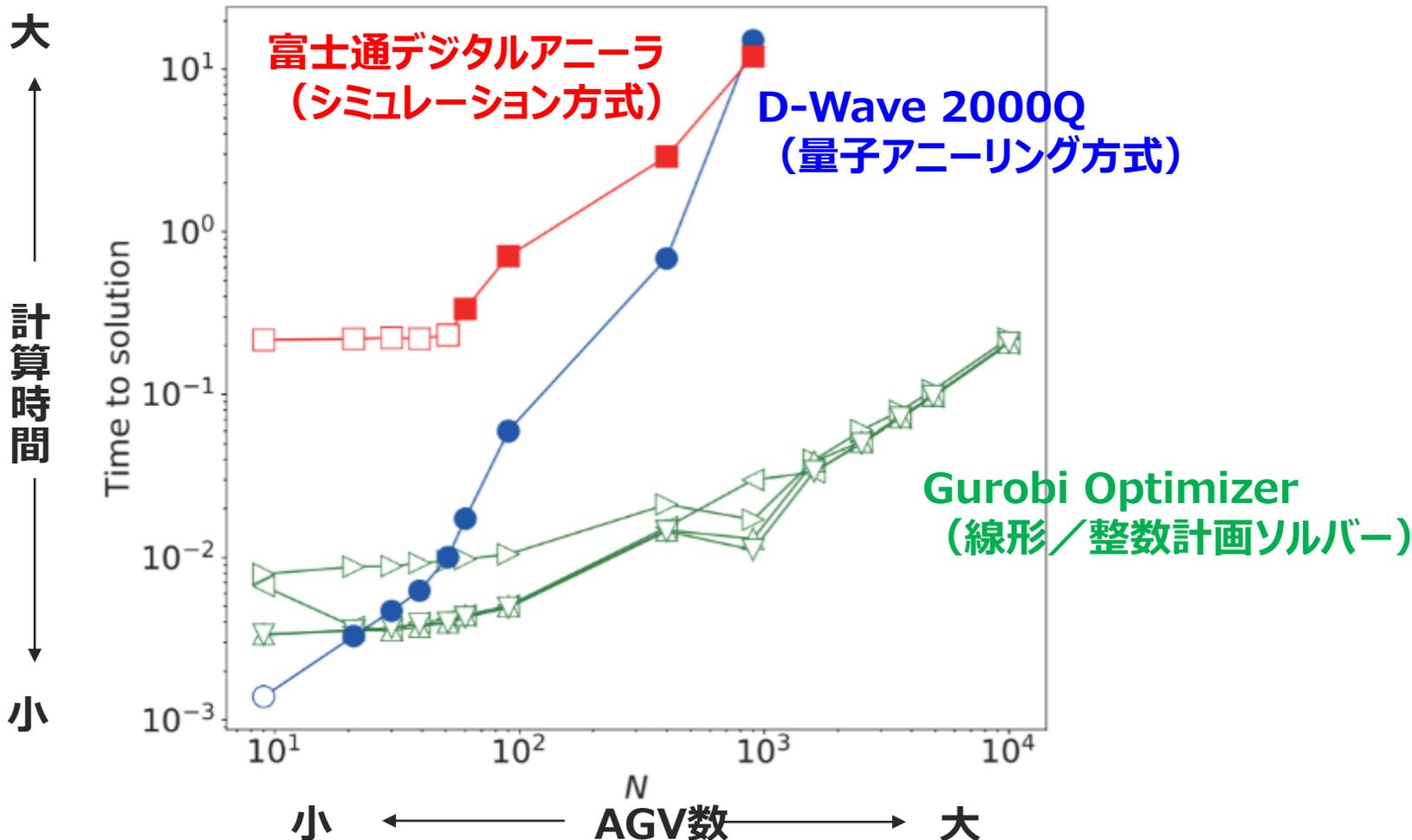
ルールベース（稼働率80%）



D-Wave 2000Q（稼働率95%）

## 6. ①工場内の無人搬送車の経路最適化 (DENSO) - 比較結果

- D-WAVEと既存コンピュータとの比較結果。台数が少なければ、D-Waveが速い
- 対応できる量子ビット数の増加、古典・量子のハイブリット型コンピュータの開発・進展が必要と思慮



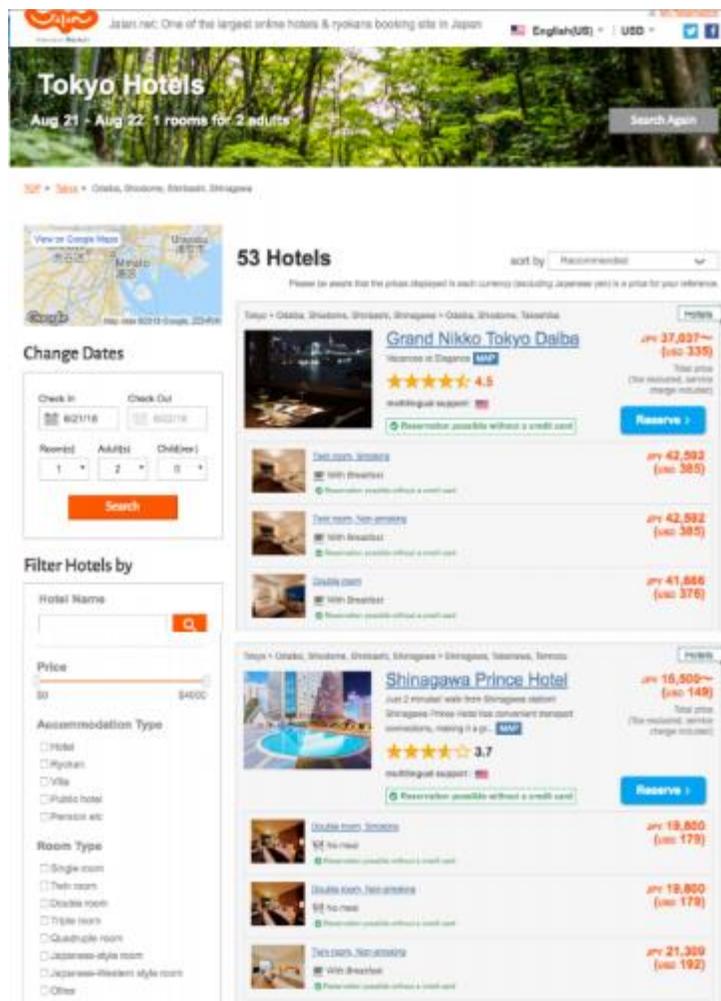
# 【参考18】工場 × 量子コンピュータの未来

- 工場のなかは最適化したい問題が多い
- 工場の世界で量子コンピュータ技術の導入が進めば、工場以外へのシステムへの広がりもありうる

最適化箇所	量子コンピュータで起こり得る世界の変化
<b>工場のなかのライン内</b>	多機能なロボットが製造物に応じて、臨機応変に仕事を分け合い、生産速度を向上
	設備や部品の配置が最適化され、人・モノの流れを高速化
	製品全体で仕様を満足するような部品の組み合わせ選定で、廃棄部品を低減
<b>工場全体 (複数ライン+工場内物流)</b>	設備故障や生産遅れなど状況に応じて製造の流れを変えることで、製造遅れを低減
	積み荷の順序を最適化することで、搬送車の台数削減や作業効率を向上
<b>工場外を含めたサプライチェーン (工場+工場外物流)</b>	複数の工場を跨いだ搬送や生産スケジュールの最適化で物流コストや中間在庫を低減
<b>人</b>	突発休や体調不良などの状況に対応した人員配置の最適化で、製造遅れを低減
	世界中の知識を活用して瞬時に異常を発見

## 6. ②ホテルリコメンド順番最適化（リクルートコミュニケーションズ）

- ホテル予約サイトの「じゃらん」における、ホテルを表示する順番の最適化を量子コンピュータで実施



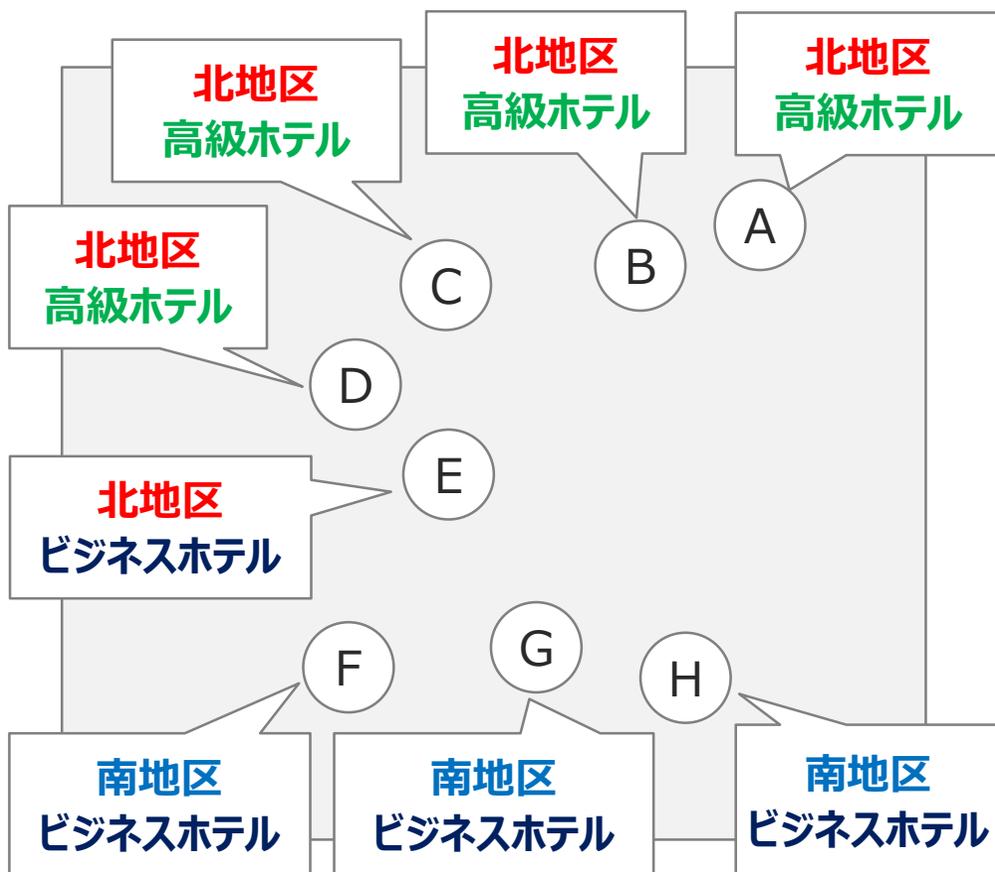
The screenshot shows the Japan Inn website interface for searching hotels in Tokyo. The search criteria are for August 21-22 for 2 adults. The results are sorted by recommendation. The first hotel listed is Grand Nikko Tokyo Daiba, and the second is Shinagawa Prince Hotel. The interface includes various filters and a map of the area.

リスト1番目のホテル

リスト2番目のホテル

## 6. ②ホテルリコメンド順番最適化（リクルートコミュニケーションズ）

- ホテル予約サイトの「じゃらん」において、D-Wave 2000Qでホテルを表示する順番の最適化を行い、売上増加の可能性を確認
- 人気の高さと多様性を両立するような表現方法を開発



### 検索結果 (おすすめ度)

1. Cホテル, 北地区, 高級ホテル
2. Bホテル, 北地区, 高級ホテル
3. Aホテル, 北地区, 高級ホテル
4. Dホテル, 北地区, 高級ホテル
5. Eホテル, 北地区, ビジネスホテル
6. Hホテル, 南地区, ビジネスホテル
7. Fホテル, 南地区, ビジネスホテル
8. Gホテル, 南地区, ビジネスホテル

### 検索結果 (おすすめ度 + 多様性)

1. Bホテル, 北地区, 高級ホテル
2. Gホテル, 南地区, ビジネスホテル
3. Aホテル, 北地区, 高級ホテル
4. Eホテル, 北地区, ビジネスホテル
5. Hホテル, 南地区, ビジネスホテル
6. Cホテル, 北地区, 高級ホテル
7. Fホテル, 南地区, ビジネスホテル
8. Dホテル, 北地区, 高級ホテル

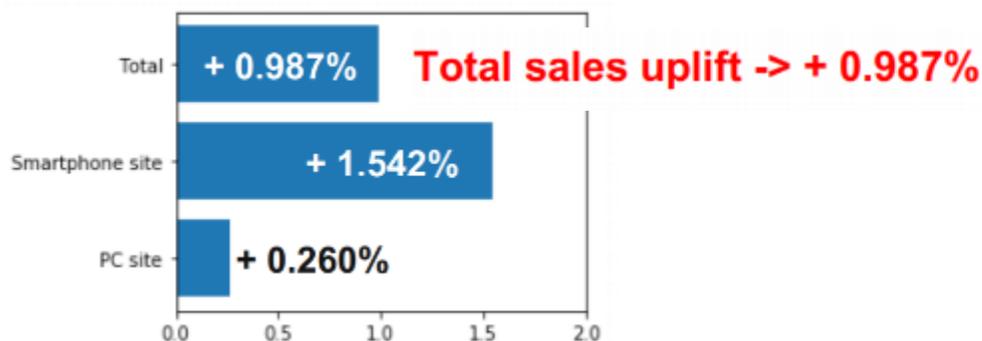
## 6. ②ホテルリコメンド順番最適化 (リクルートコミュニケーションズ)

- 売上が良くなりつつ、多様性を持った順番になるように定式化を行い、8つのホテルの並べ替えて、ABテストを実施。1ヶ月のテストで売上が1%向上
- ホテル4つから8つの並べ替えであれば、D-Waveマシンの方が計算が速い

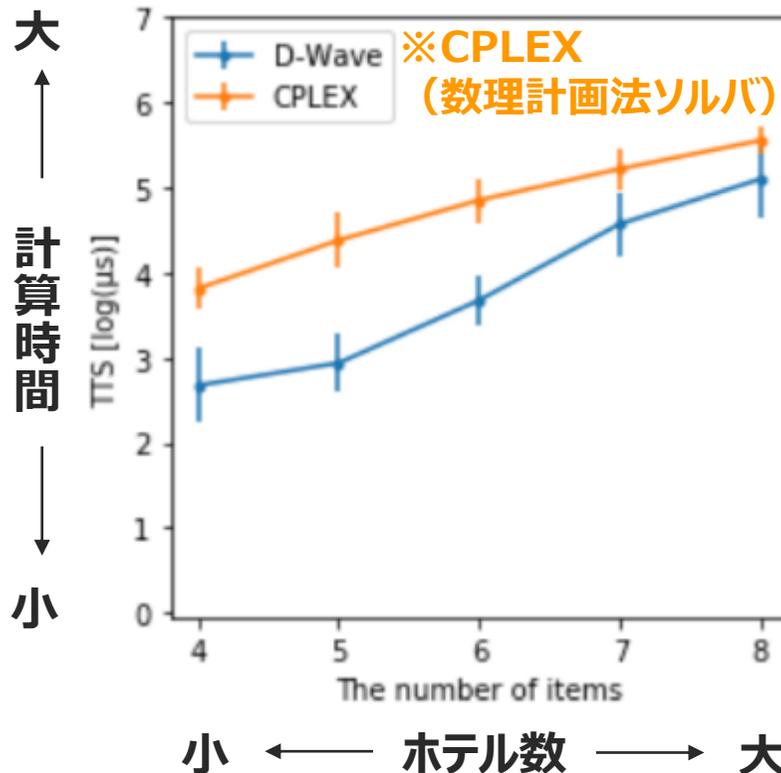
### QUBO形式

$$\begin{aligned} &\text{minimize} && -\sum_{i \in I} \sum_{j \in J} s_{ij} x_{ij} + w \sum_{i \in I} \sum_{v \in I} \sum_{j \in J} \sum_{j' \in J} f_{iv} d_{jj'} x_{ij} x_{iv} \\ &&& + M \left( \sum_{i \in I} \left( \sum_{j \in J} x_{ij} - 1 \right)^2 + \sum_{j \in J} \left( \sum_{i \in I} x_{ij} - 1 \right)^2 \right) \\ &\text{subject to} && x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad i \in I, \quad j \in J. \end{aligned}$$

### ABテスト結果

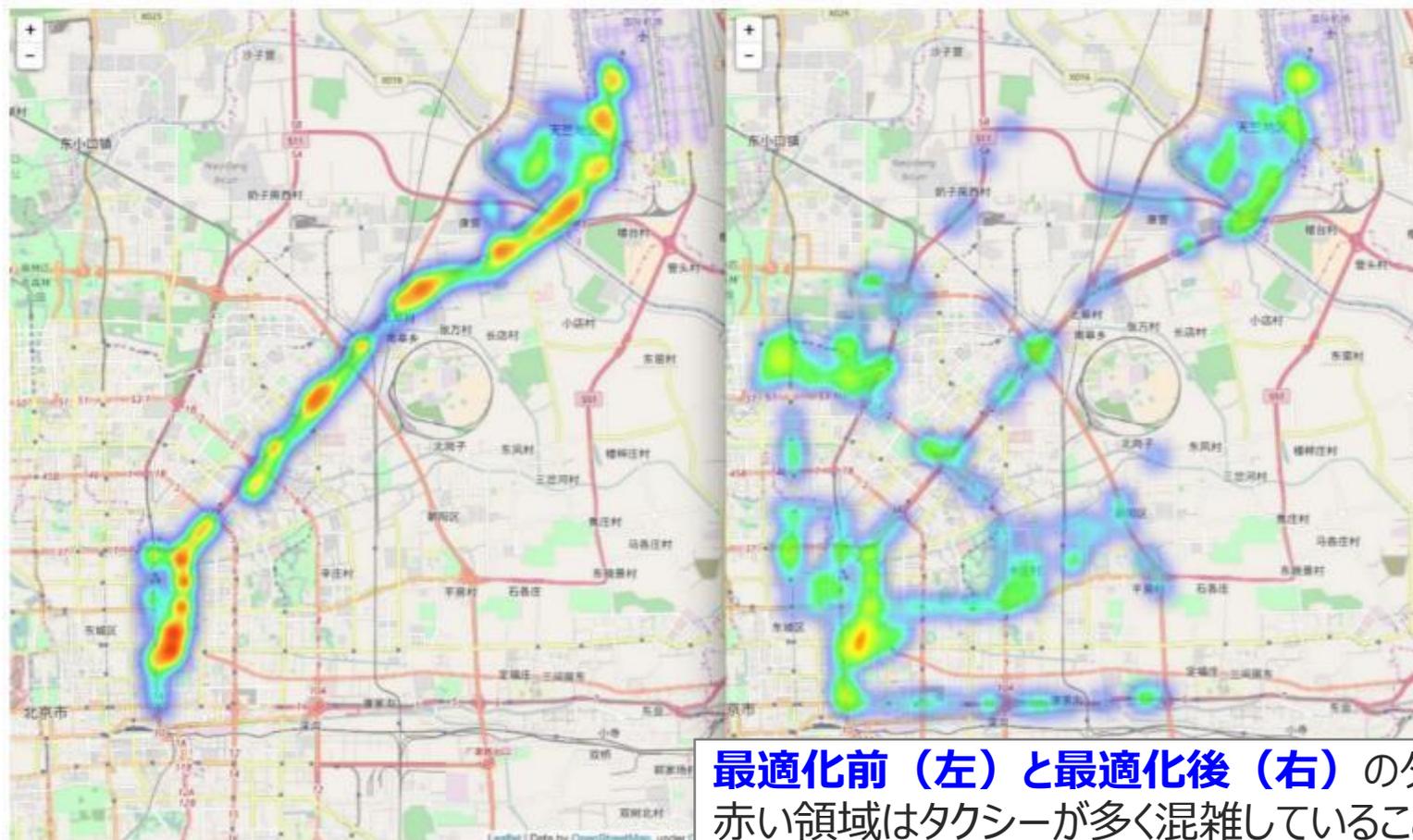


### 計算時間の比較



## 6. ③北京市の交通量最適化 (Volkswagen)

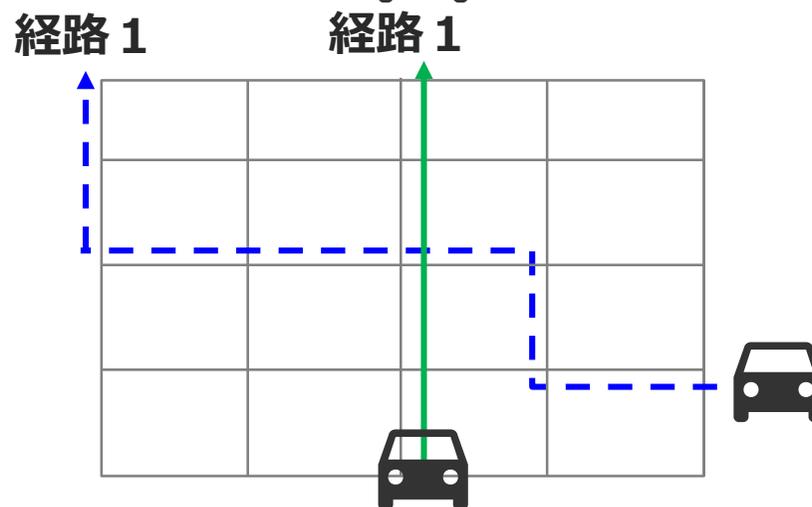
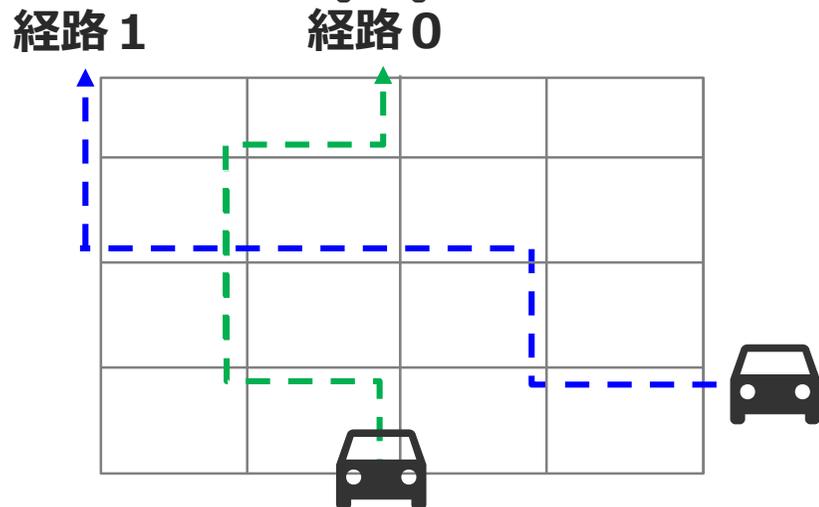
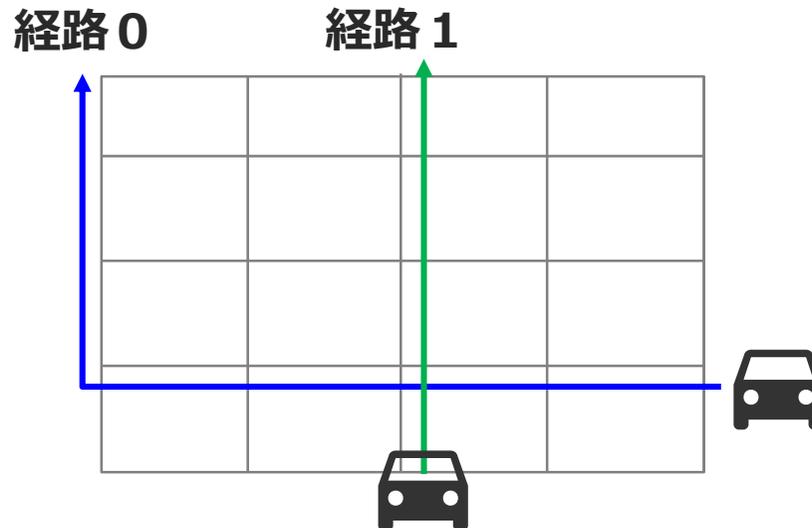
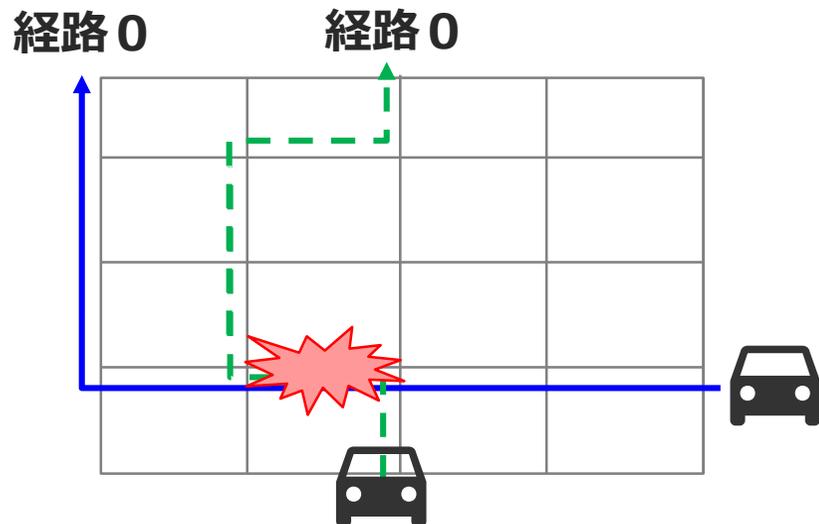
- 北京市空港に向かうタクシーの経路最適化・渋滞回避にD-Waveを利用したシミュレーションを実施
- タクシーがどの経路を選択するかを変数として、混雑度を最小にするように定式化
- タクシー418台と3経路の最適化問題を解いた。最適化後は交差点で3方向に分散して誘導





# 【参考19】経路 × 量子コンピュータ (2)

- 一番渋滞が起きない組み合わせ ⇒ 経路が重なるパターン (左上) 以外
- 古典コンピュータでは愚直やると4回計算 ⇒ 量子コンピュータでは1回計算



## 6. ③北京市の交通量最適化 (Volkswagen) - 最適化手順

- 「古典」は古典的な普通のコンピュータによる処理、「量子」は量子アニーリングを使う処理を表す
- 今回使用したハードウェアはD-Wave2X QPU(1,152qubit)であるが、変数の数が  $418 \times 3$  ルート = 1,254個 になるのでbit数が足りない
- そこで、(\*) qbsolvというライブラリを用いて、問題を分割して逐次最適化を実施  
(\*) D-Waveによって提案された「大規模な組み合わせ最適化問題に対する問題分割ソルバー」

### 最適化手順

1. 古典：地図と車のGPSデータを用意
2. 古典：混雑が行っているルート进行を特定
3. 古典：それぞれの車に対して、代替のルートを決定
4. 古典：混雑の最小化をQUBOの形に定式化
5. 古典と量子のハイブリット：QUBOの解を見つける  
(混雑が解消されるような代替のルートを見つける)
6. 古典：車のルートを再配置
7. 混雑が解消するまで、2.~6.を行う

## 6. ③北京市の交通量最適化 (Volkswagen) - 定式化

- この問題 = 混雑を最小化する問題。つまり、混雑を表す式 (目的関数) を作る必要がある
- 混雑を表す指標として、「同じ道路を何台の車が使用するか」を使用
- 目的関数をQUBOの行列形式へ変形

### 混雑を最小化する目的関数

- 0-1変数を定義すると、最小化する目的関数は以下で表現

$$q_{ij} = \begin{cases} 1 & (\text{車}i\text{がルート}j\text{を通るとき}) \\ 0 & (\text{それ以外}) \end{cases} \quad \rightarrow \quad \text{Obj} = \sum_{s \in S} \text{cost}(s) + \lambda \sum_i \left( \sum_j q_{ij} - 1 \right)^2$$

(※) 第一項はコスト関数 (道路を通る車の台数の二乗の和)、第二項はペナルティ関数 (それぞれの車は唯一のルートしか取れないという制約)

### QUBOの行列形式へ変形

$$F = (Q_{11} \quad Q_{12} \quad Q_{13} \quad Q_{21} \quad Q_{22} \quad Q_{23}) \begin{pmatrix} 1-K & 2+2K & 2K & 2 & 2 & 0 \\ & 1-K & 2K & 2 & 2 & 0 \\ & & -K & 0 & 0 & 0 \\ & & & 1-K & 2+2K & 2K \\ & & & & 1-K & 2K \\ & & & & & -K \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Q_{11} \\ Q_{12} \\ Q_{13} \\ Q_{21} \\ Q_{22} \\ Q_{23} \end{pmatrix}$$

(※) 2 cars with 3 route options on a 2 x 2 grid



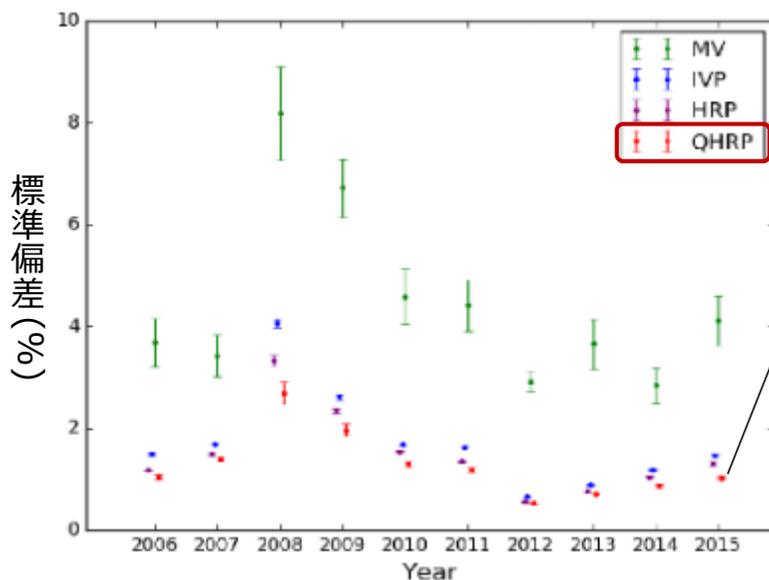
**【参考20】金融 × 量子コンピュータ**

○ 多くの計算量を必要とする領域での活用が見込まれている

適用領域		主な適用例
市場系・ リスク系	資産運用・ ポートフォリオ最適化	リスクとリターンのバランスをとりつつ最適な運用方法を算出
	リスク評価	現状長時間を要するシミュレーションを短時間に完了
	デリバティブ価格評価	プライスを高速かつ正確に算出
AI	AIの活用業務 (信用スコア、株価予測…)	機械学習の速度向上により適用範囲拡大
	レコメンデーション	多数のデータをもとに個別顧客にあわせた「おすすめ」を提示
業務効率化		シフト最適化、現金配送ルート等、複数選択肢のあるプロセス最適化
経済予測		複数変数を利用したモデル解析の精度向上
暗号化技術		暗号を高速で解読可能

## 6. ④ポートフォリオ最適化 (1QBit)

- ポートフォリオでは、リスクを抑えつつリターンが最大になるように、様々な金融商品に関する組み合わせを最適化することが有効かつ重要
  - 量子コンピュータのソフトウェア開発企業1Qbit社は、ポートフォリオ最適化を行う手法の1つである階層リスクパリティ法 (HRP) (\*1) を量子アニーリングで解けるように定式化した量子版リスクパリティ法 (QHRP) を開発
  - 従来 (MV法 (\*2) など) より、ボラティリティ (価格の変動性) を最小化するような銘柄の組み合わせを実現
- ・ 商品先物取引 (CTA) とダウ平均株 (DJIA) でバックテストを実施
  - ・ CTAに対してはQHRPは従来手法よりもボラティリティを下げ、リスクの低いポートフォリオを構成可能なことを確認



← 提案手法

CTAによるバックテストでの  
QHRP(赤)と従来手法の比較

グラフの下にある方がより最適なポートフォリオ

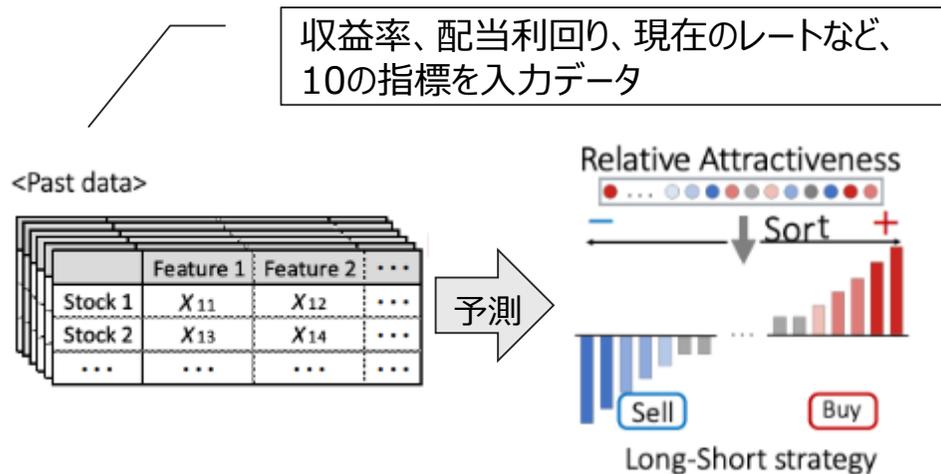
(\*1) 階層リスクパリティ法 : グラフ理論と機械学習を適用して、共分散行列に含まれる情報に基づいた多様なポートフォリオを構築する手法  
(Marcos López de Prado. Building diversified portfolios that outperform out-of-sample. Journal of Portfolio Management, 2016.)

(\*2) MV法 : minimum-variance optimization(最小分散ポートフォリオ)

## 6. ⑤株式のポジション予想 (野村アセットマネジメント)

- 制限ボルツマンマシンでの学習の一部である標本取り出し(サンプリング)において、D-Wave 2000Qを利用
- 株式ロング/ショート戦略(\*)における相対的なパフォーマンスを予測するもの  
(\* )期待値に従い、割高な株式は「空売り」、割安な株式は「買い」ポジションを構築する
- D-Wave 2000Qでサンプリングを行い、制限ボルツマンマシンでの学習を効率化
- TOPIX500を使ったバックテストにて、+1.35%のパフォーマンスを得た

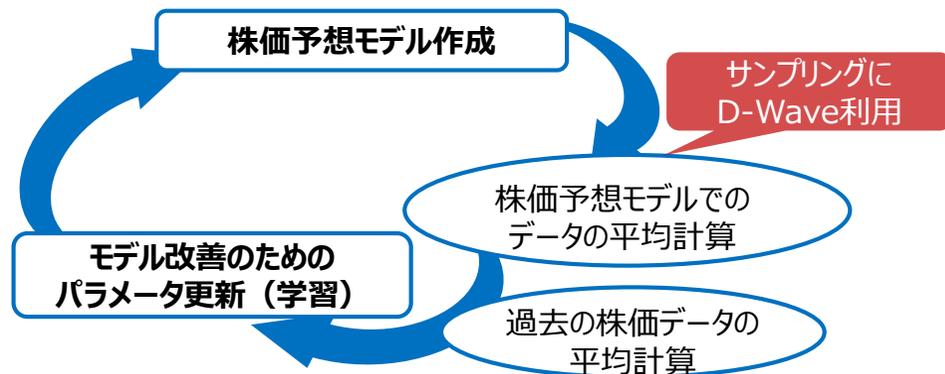
### 取組イメージ図



TOPIX500銘柄の1ヶ月間のパフォーマンスを予測。予測結果に応じたロング/ショートのポジションを取る

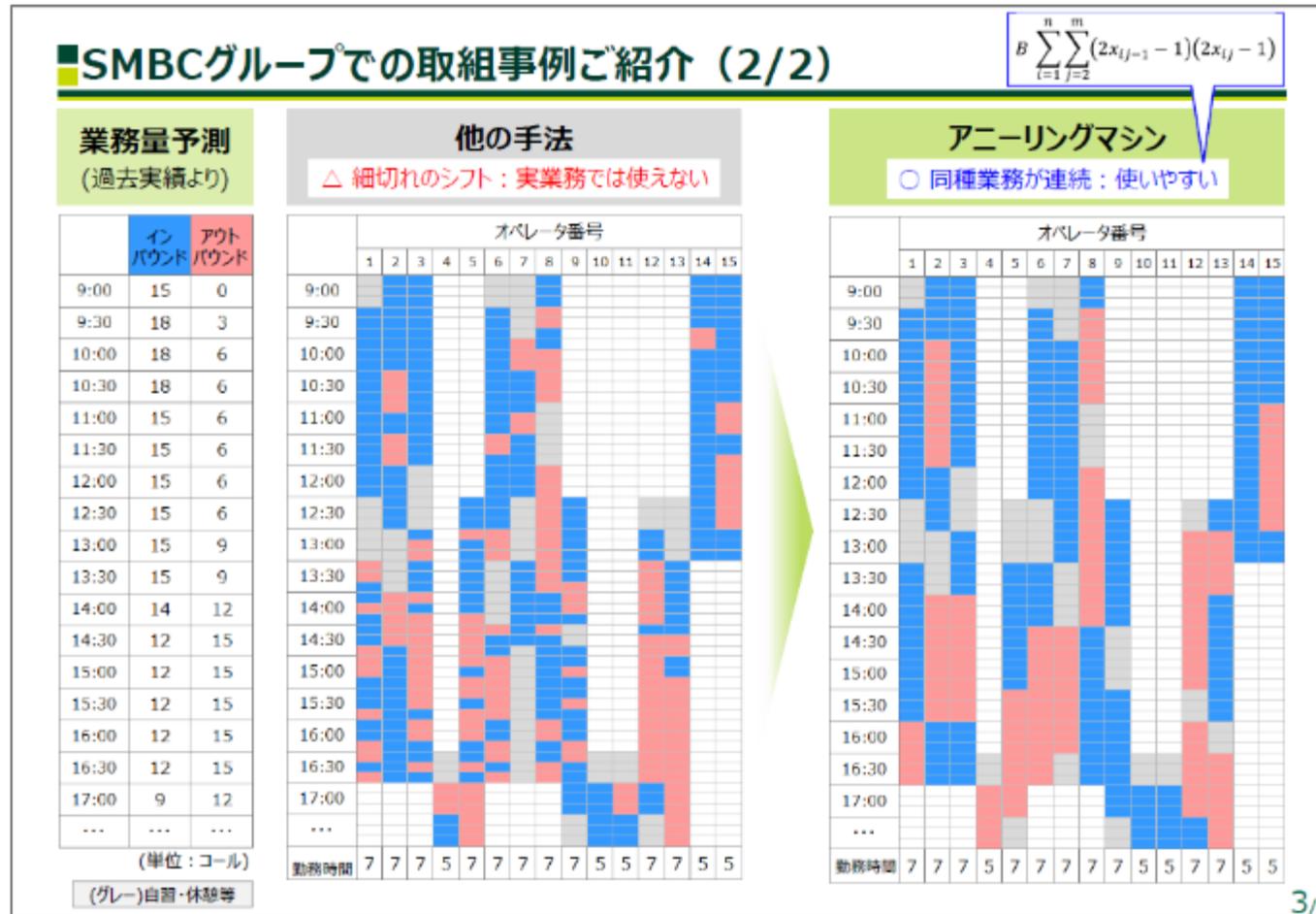
### 制限ボルツマンマシンの学習の進め方

- ・学習パラメータ更新の際にデータの平均を求める必要がある
- ・厳密に平均を求めるにはすべてのデータが必要だが、データ数が多すぎて現実的には不可能。そのため、サンプリングにより一部の標本を取り出し近似的に平均を求める
- ・量子アニーリングのサンプリングによって得られた標本を使うとモデルの平均がより正確に早く得られる (10マイクロ秒/回)



## 6. ⑥コールセンター要員シフト作成 (SMFG)

- 各要員の同種業務をなるべく連続させる等の制約条件を定式化し、業務量の予測に応じた柔軟・最適なコールセンター要員のシフト作成をアニーリングマシンで実行・評価
- アニーリングマシンを用いることで、実務でも使い易い解が得られた (現状は時間をかけて人手でシフト作成)



## 2章 まとめ

### <市場動向>

- **量子コンピュータは、国家戦略上の重要技術と位置付けられ、各国は戦略策定、研究開発投資の拡充等を急速に展開**
- **IT企業や大学・公的機関が協力・連携し、量子コンピュータの開発、活用を推進**

### <活用動向>

- **【特化型】イジングモデル方式を活用した組み合わせ最適化を解く問題を中心に取組みが進展**
- **量子ゲート方式は、まだ実用段階までは時間を要する状況。暫くは、ノイズを含む小中規模の量子コンピュータNISQの開発が進む**

# 1. 現状の課題と展望 – 【汎用型】量子ゲート方式 –

- 量子ゲート方式は、まだ実用段階までは時間を要する状況。現実問題を扱えるよう量子ビット数を増やすこと、重ね合わせ状態が壊れる量子エラーを訂正する技術の研究開発が必要

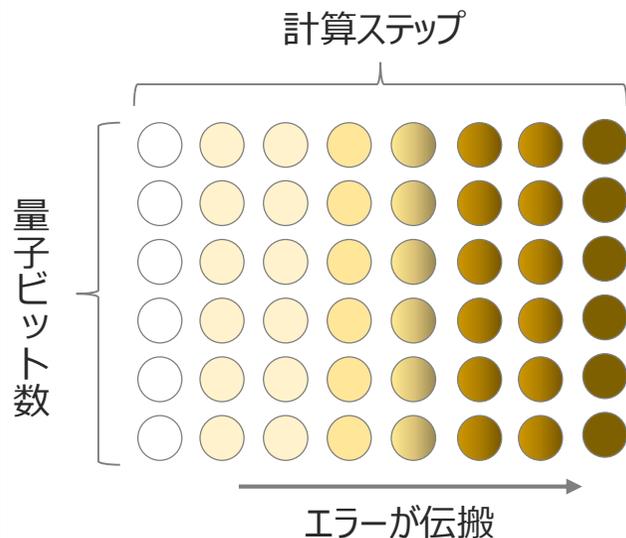
		現状と課題	展望
量子ゲート方式	全体	<ul style="list-style-type: none"> <li>基礎研究段階</li> <li>量子ビット数とエラー率の改善が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子エラー耐性万能量子コンピュータを目指す中で、ノイズを含む小中規模の量子コンピュータ NISQ (次頁) の開発が進む</li> </ul>
	アプリケーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>ハードウェア制約 (量子ビット数など) により、ビジネスに適用できる段階では無い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>ノイズを含む (誤り訂正機能を持たない)、小中規模 (~数百量子ビット) の量子コンピュータ NISQ 用の量子アルゴリズム (VQEやQAOA等) の開発・実装</li> </ul>
	ソフトウェア	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子アセンブリや量子ビット操作など、低レイヤでのプログラミング</li> <li>ソフトウェア・ライブラリ開発はハードウェア・クラウド企業 (Microsoft / Google / IBM) がリード</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子力学の高い知見を必要としなくても、開発できるソフトウェア環境が整備 (高級言語、ミドルウェア、コンパイラ整備など)</li> </ul>
	ハードウェア	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ビット数の不足 (IBM : 53量子ビット)</li> <li>量子エラー訂正技術が未確立なため、高エラー率 (IBM Q : 5-10%)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ビット数の拡大 (数年後に、100-200量子ビットに拡大) ※Googleグループの研究ではRSA2048の解読には、2,000万量子ビット必要。実現は20年以上先</li> </ul>

# 【参考21】NISQ (Noisy intermediate-scale quantum computing)

- 量子ゲートは入力にノイズが乗ると、波のように伝搬していき、回路の中のノイズが増大（エラーが伝搬）
- NISQ (Noisy intermediate-scale quantum computing) は、ノイズを含む（誤り訂正機能を持たない）、小中規模（～数百量子ビット）の量子コンピュータ

## エラー伝搬

- 古典コンピュータの論理回路は、入力の電圧が揺らいでも出力電圧は必ず一定の値が出るため、ノイズが出力側に伝搬しない
- 量子コンピュータは入出力の状態がアナログのため、入りにノイズが乗ると、波のように伝搬していき、回路の中のノイズがどんどん増える（エラーが伝搬）

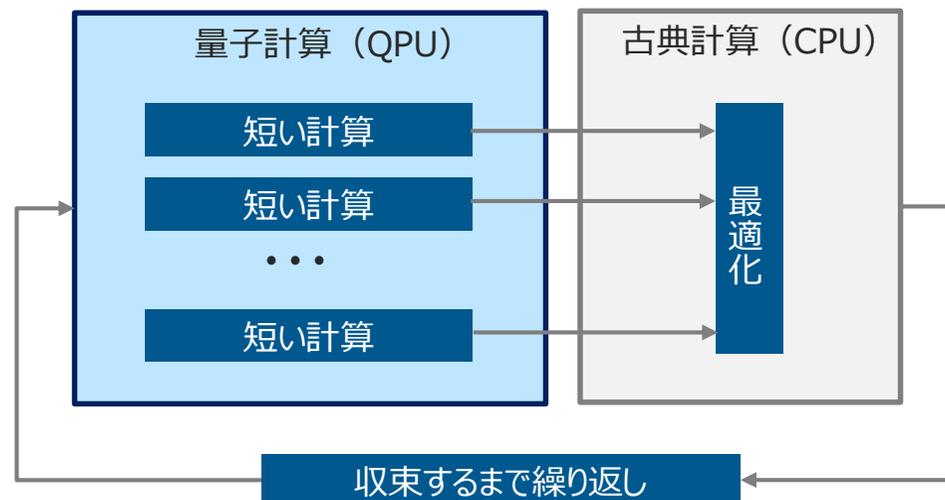


## NISQ概要

- NISQはノイズを含む（誤り訂正機能を持たない）、小中規模（～数百量子ビット）の量子コンピュータ。これであれば数年以内の実用化が可能とされている
- NISQは誤り訂正機能がないので限られた量子アルゴリズム（VQEやQAOA等）しか実行できないものの、現在の古典コンピュータを凌駕する性能を発揮すると期待されている

例) VQE (量子変分: Variational Quantum Eigensolver)

- 量子計算部分を短くしてエラーの発生を抑え、古典コンピュータで最適化を繰り返しながら計算を行う（量子変分計算）



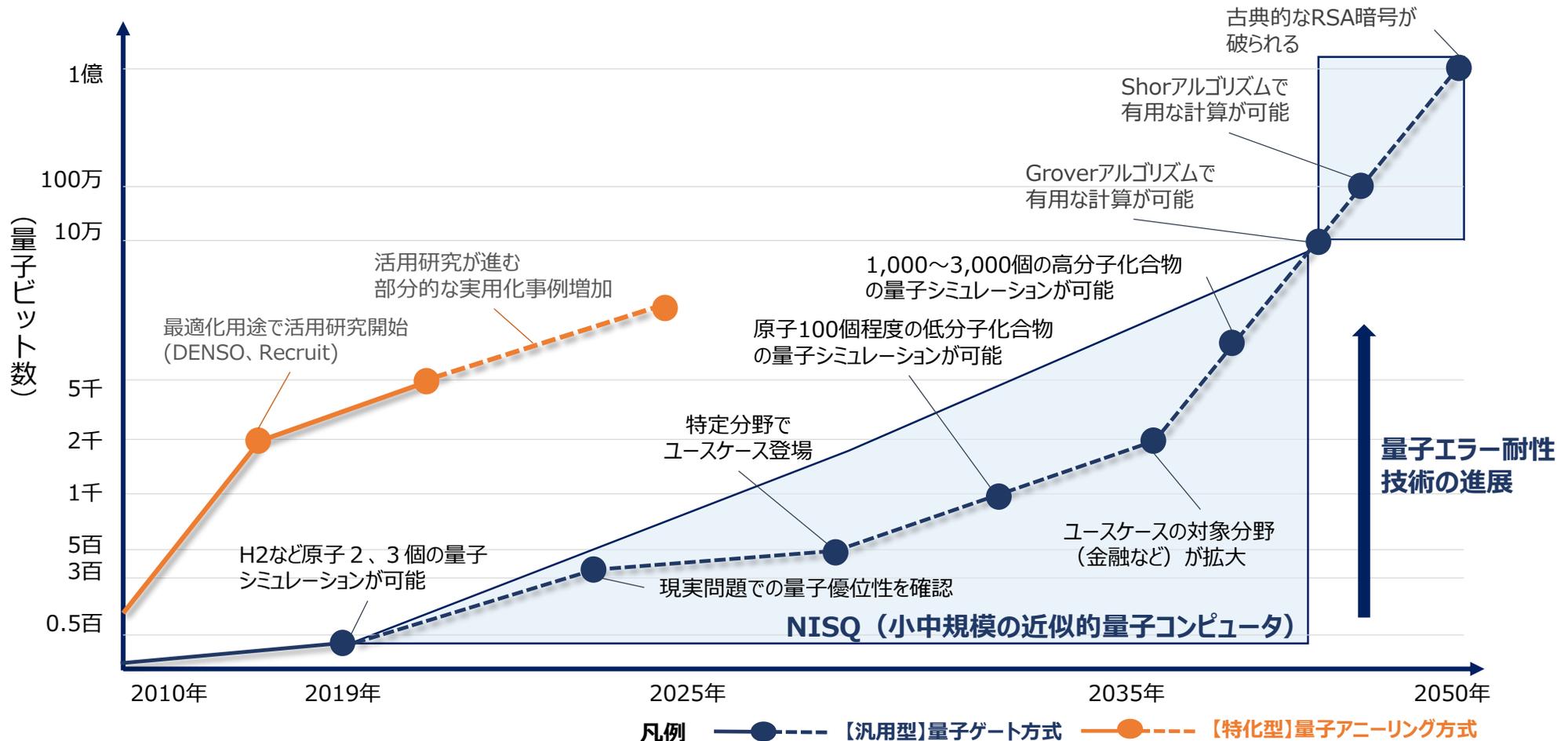
## 2. 現状の課題と展望 – 【特化型】量子アニーリング方式 –

○ 量子アニーリング方式は実用段階に近いが、既存技術と比較した利点や活用方法の明確化が必要

		現状と課題	展望
量子アニーリング方式	全体	<ul style="list-style-type: none"> <li>応用研究段階</li> <li>どういう問題・課題に量子コンピュータが活用できるか探索中</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>多くの実証実験やコミュニティ等の進展により、定式化ノウハウが蓄積・共有</li> <li>実用化例が出始める</li> </ul>
	アプリケーション	<ul style="list-style-type: none"> <li>組み合わせ最適化問題の定式化が難しい（公表化事例が少ない）</li> <li>ハードウェア制約により、解ける問題の規模が限定的（解の精度、速度が古典コンピュータより速いとは限らない）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>理論検証、実証実験などにより、定式化ノウハウが蓄積・共有</li> <li>量子コンピュータが有用な分野／問題の見極めが進む</li> </ul>
	ソフトウェア	<ul style="list-style-type: none"> <li>ソフトウェア・ライブラリ開発は進むが、組み合わせ最適化の定式化の知識がないとプログラミングは容易ではない</li> <li>大規模問題を分割するアルゴリズムが発展途上のため、精度が良くない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>出現頻度の高い問題であれば、ユーザーインターフェースからの入力でも最適化問題が解けるようになる（量子力学の高い知見がなくても、実行できる）</li> <li>問題分割のアルゴリズムの開発が進み、大規模な問題でも量子コンピュータの優位性が示される</li> </ul>
	ハードウェア	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ビット数の不足（D-Wave：2,048量子ビット）</li> <li>コヒーレンス時間や結合に制限があるため、最適解が必ずしも得られるわけではない</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ビットの増大（次世代D-Wave:約5,000量子ビット）</li> <li>コヒーレンス時間の増大するマシンが実現されたり、結合の工夫がされるため、より最適解が得られやすくなる</li> </ul>

### 3. 量子コンピュータの展望

- 量子ゲート方式は当面の間、量子エラーを前提として、その影響を受けない小中規模の近似的量子コンピュータ NISQの研究開発が進む
- 量子アニーリング方式は活用研究が進み、部分的な実用化例が出始めると予想



第3章 展望・考察

# 4. 量子コンピュータ活用における役割分担と必要な人材・スキル

- 量子コンピュータの活用には、数学や物理学、情報系などの専門的なスキル・知識を持った人材、ビジネスの課題に詳しい人材など、様々な分野の知識やスキル、経験を持った人材が必要

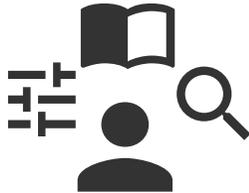
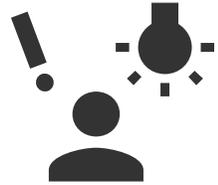
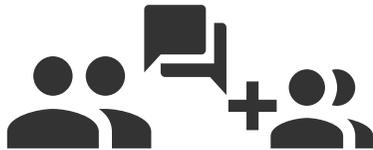
	課題	設計	プログラミング	計算	測定
役割分担		ユーザ企業 (システム部門含む)		ベンダー企業	
量子ゲート方式 〔汎用型〕	課題・テーマを抽出できる人材 有望なユースケースの調査	必要な量子アルゴリズムを検討できる人材	量子回路の作成し、実装できる人材	ハードウェアを設計・制御できる人材	
		<ul style="list-style-type: none"> <li>量子アルゴリズム調査・理解 (量子力学、量子情報、ホロニクス・リサーチ、課題に詳しいなど)</li> <li>量子アルゴリズム開発 (量子力学、量子情報、ホロニクス・リサーチなど)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ソフトウェア実装 (量子力学、量子情報、プログラミングスキルなど)</li> <li>量子ソフトウェア開発・実装 (量子力学、量子情報、プログラミングスキルなど)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ハードウェアの開発 (量子力学、量子情報、統計力学、電子工学、材料科学、コンピュータ科学など)</li> </ul>	
アニーリング方式 〔特化型〕量子		イジングモデルに定式化できる人材	イジングモデルを実装できる人材		
		<ul style="list-style-type: none"> <li>定式化する知識・ノウハウ (量子力学、統計力学、ホロニクス・リサーチ、課題に詳しいなど)</li> <li>最適化アルゴリズム開発 (量子力学、統計力学、ホロニクス・リサーチなど)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>量子ソフトウェア実装 (量子力学、統計力学、プログラミングスキルなど)</li> <li>量子ソフトウェア開発・実装 (量子力学、統計力学、プログラミングスキルなど)</li> </ul>		

ユーザ企業（システム部門含む）の役割と必要なスキル

ベンダー企業の役割と必要なスキル

## 5. 量子コンピュータ活用に向けて

1. 量子コンピュータ技術は進歩しており、量子アニーリング方式は実用化に向けた取組みが活発化（量子ゲート方式は実用化までは時間を要する見込み）
2. 量子コンピュータ活用に向けては、ビジネス課題を量子コンピュータで解ける問題に定式化する知識・ノウハウの蓄積や有用なユースケースの探索等が必要
3. 量子コンピュータの専門家と連携しながら、これらの知見を積み上げていくことが重要

	活用に向けたアクション	実施者	概要
量子ゲート方式 〔汎用型〕	量子アルゴリズムの調査 	システム部門 調査・理解	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 特定の問題に対する高速計算を実現するには、量子の性質を活用した量子コンピュータ向けに考えられた「量子アルゴリズム」が不可欠</li> <li>• そのため、迅速な活用のためには、代表的な量子アルゴリズムや新規アルゴリズムの調査・理解、最新動向や活用例を情報収集しておくことが重要</li> <li>• しかしながら、ハードウェア制約により、実用化までは10～30年近くの時間を要する見込み</li> </ul>
量子アニーリング方式 〔特化型〕	有用なユースケースの調査 	ユーザ部門 ↑ 情報提供 システム部門 定点観測	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 実用化に向けた取組みが活発化している状況。今後、数年間のうちに有用なユースケースが登場する可能性は高い</li> <li>• コンソーシアムやカンファレンス、コミュニティ等を通して、組み合わせ最適化問題における金融の有用なユースケース例についての最新動向や活用事例を定点観測し、自社に還元・蓄積しておくことが重要</li> </ul>
	理論検証・実証実験による知識・ノウハウの蓄積 	ユーザ部門 システム部門  共同検証 ベンダー企業	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 組み合わせ最適化問題を定式化する取組みは行われているが、その知識やノウハウの蓄積、ソフトウェア開発は発展途上</li> <li>• 有用なユースケースをすぐにでも採用・実装できるように、ベンダー企業や大学・研究機関等と共同で、理論検証や実証実験を行い、その知識とノウハウを積み重ねておくことが重要</li> </ul>