

**TOSHIBA**

# 量子インスパイアド古典アルゴリズム

後藤 隼人

(株) 東芝 研究開発センター

Machine Learning @ AWS Loft Tokyo

#8 量子コンピュータ × 機械学習

2019.11.20

# Contents

01 イジングマシンと機械学習

02 量子分岐マシン

03 シミュレーテッド分岐マシン

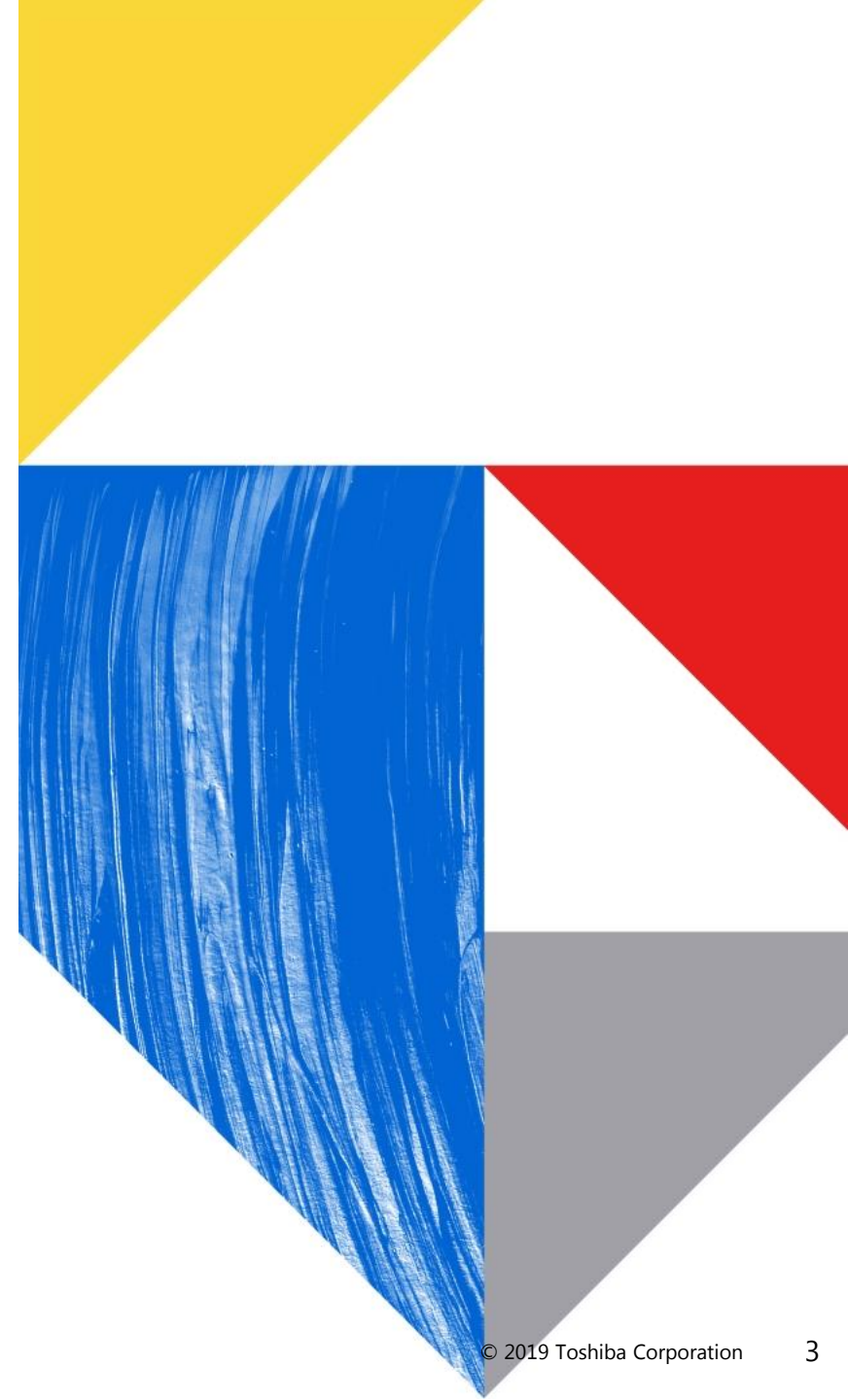
04 まとめ

**PCやGPUで誰でも使えるイジングマシン**



# 01

## イジングマシンと機械学習



## 様々な組合せ最適化問題をイジング問題に変換し、イジングマシンで解く



組合せ最適化問題



数学的なマッピング

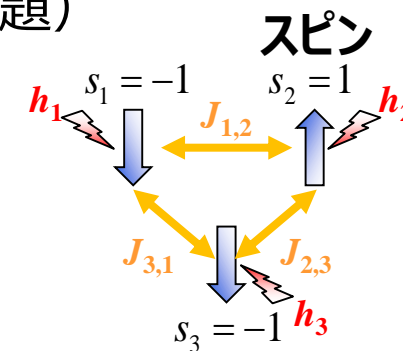
イジング問題 (NP困難問題)

イジングモデルのエネルギーを最小化する

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i,j} J_{i,j} s_i s_j + \sum_i h_i s_i$$



イジングマシン 様々な実装方式がある



## イジングマシンは機械学習の高度化に役立つと期待される

機械学習 ≡ 最適化問題

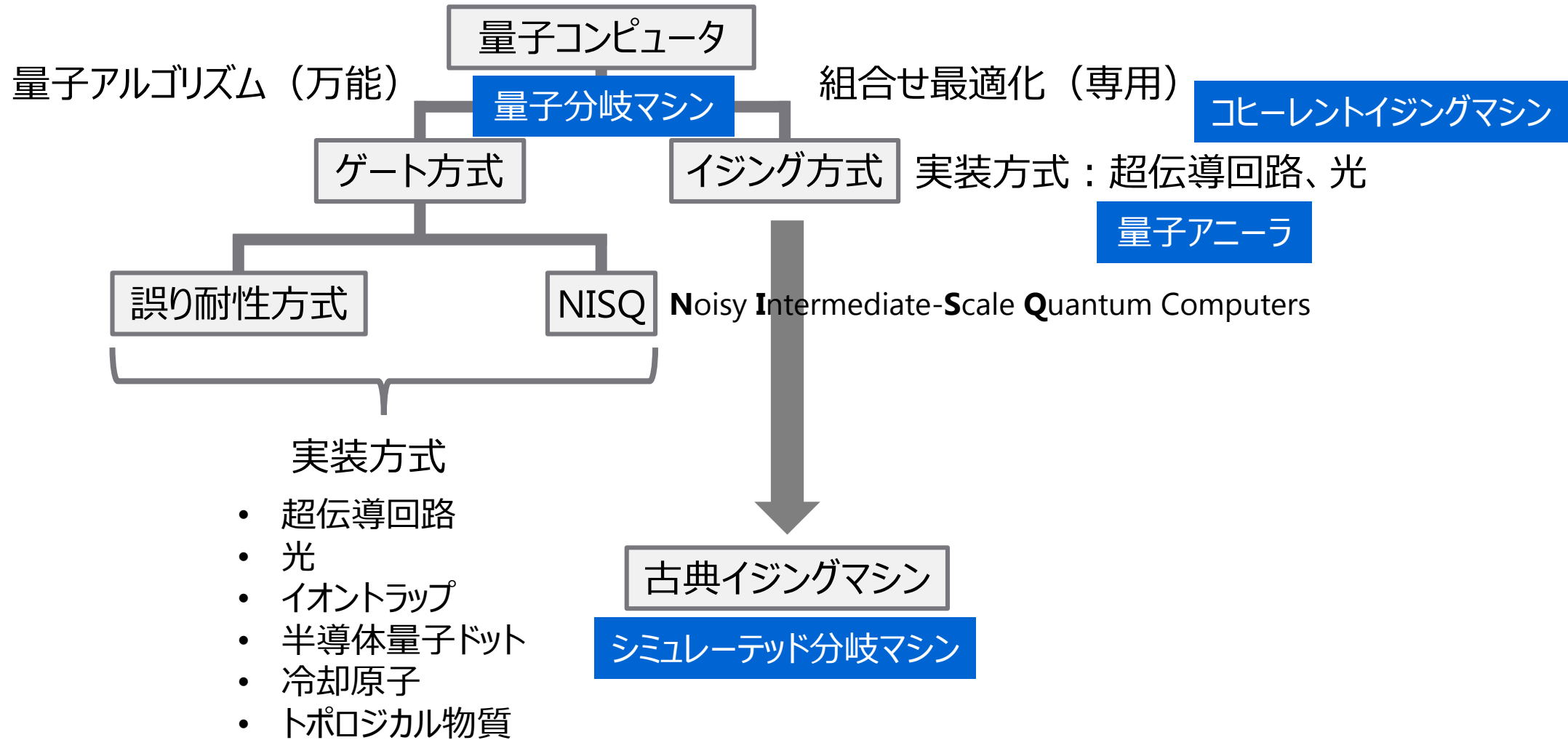


イジングマシンは機械学習に役立つはず  
例：AdaBoost → QBoost



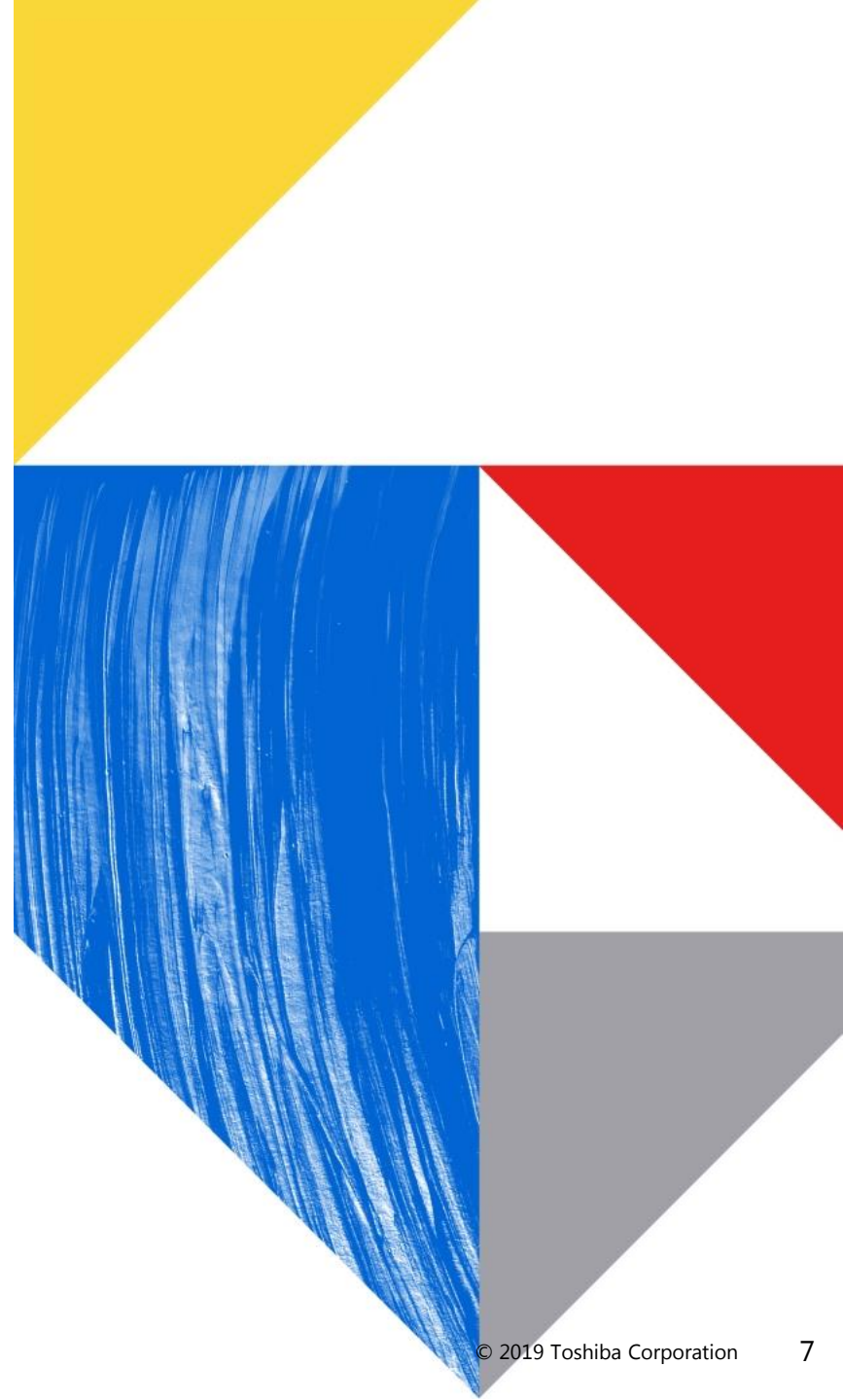
2013年、GoogleとNASAがD-Wave Systemsの**量子アニーラ**を購入し、**量子人工知能**研究所を設立。

# イジングマシンと量子コンピュータの関係



# 02

## 量子分岐マシン



# コヒーレントイジングマシン (Coherent Ising Machine, CIM)

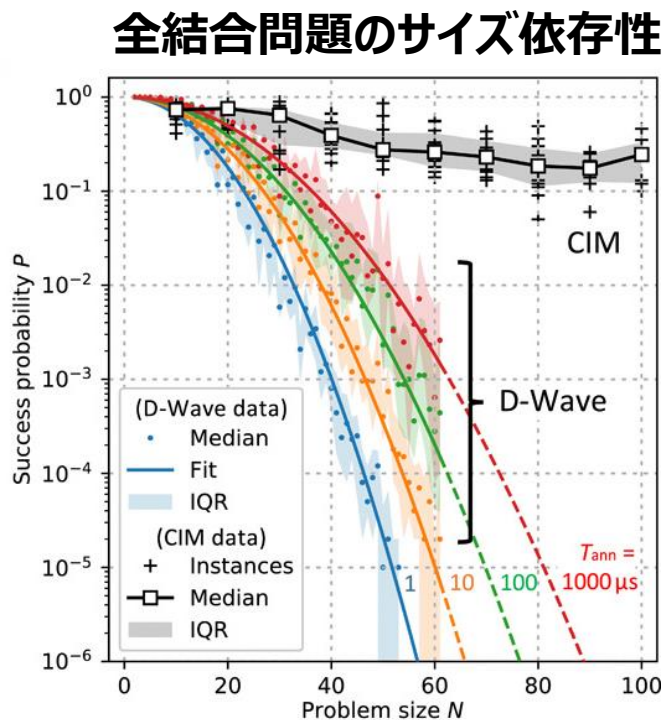
## CIMは全結合問題で量子アニーラやCPUに勝る高速イジングマシン

量子アニーラ

これは量子超越性？

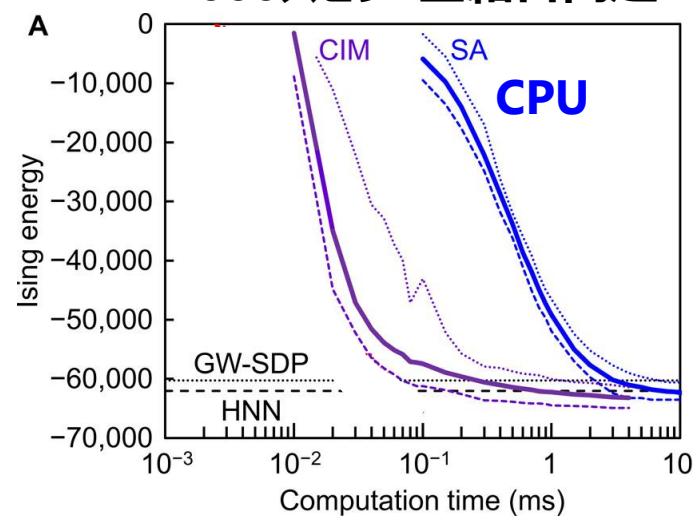
CIM

超伝導回路  
2000スピン  
隣接結合



Hamerly et al.,  
Sci. Adv. **5**, eaau0823 (2019)

2000スピン・全結合問題\*



Inagaki et al.,  
Science **354**, 603 (2016)

レーザー  
2000スピン  
全結合

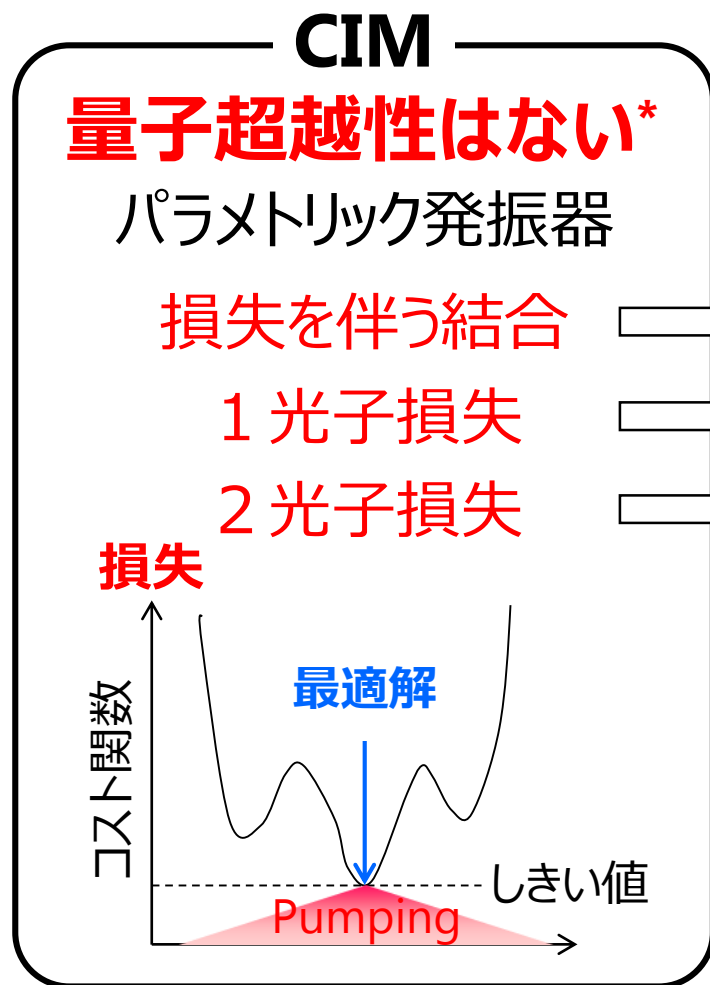
\*Goto, Tatsumura, Dixon, Science Advances **5**, eaav2372 (2019)



# 量子分岐マシン (Quantum bifurcation Machine, QbM) の発見

## QbMはCIMから損失を消し去ることで得られた量子コンピュータ

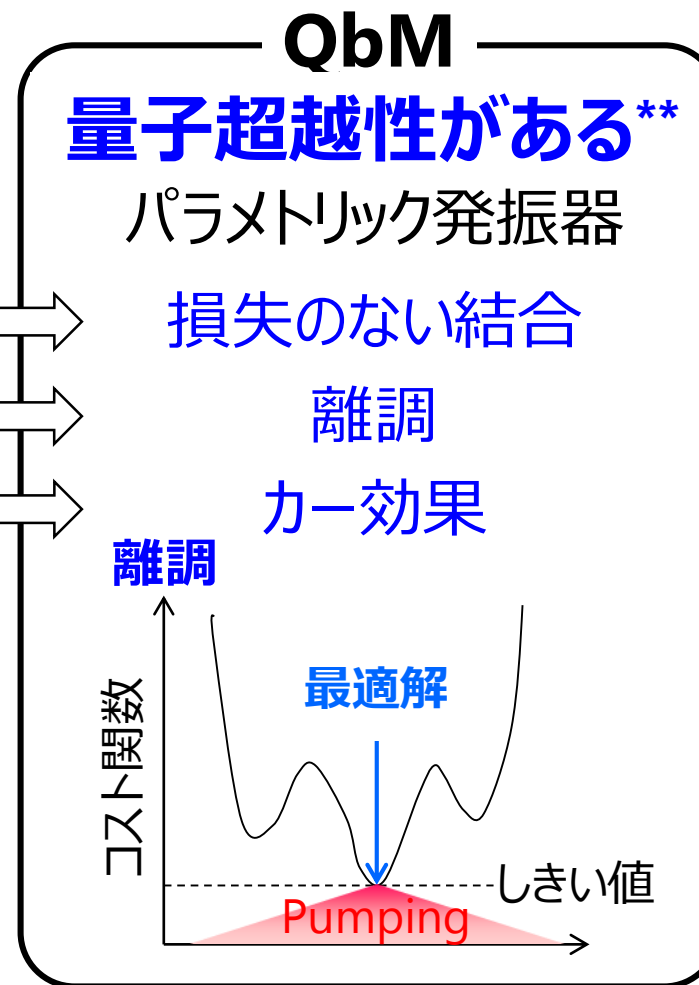
\*私見



2015

損失なし

劇的な  
性能向上



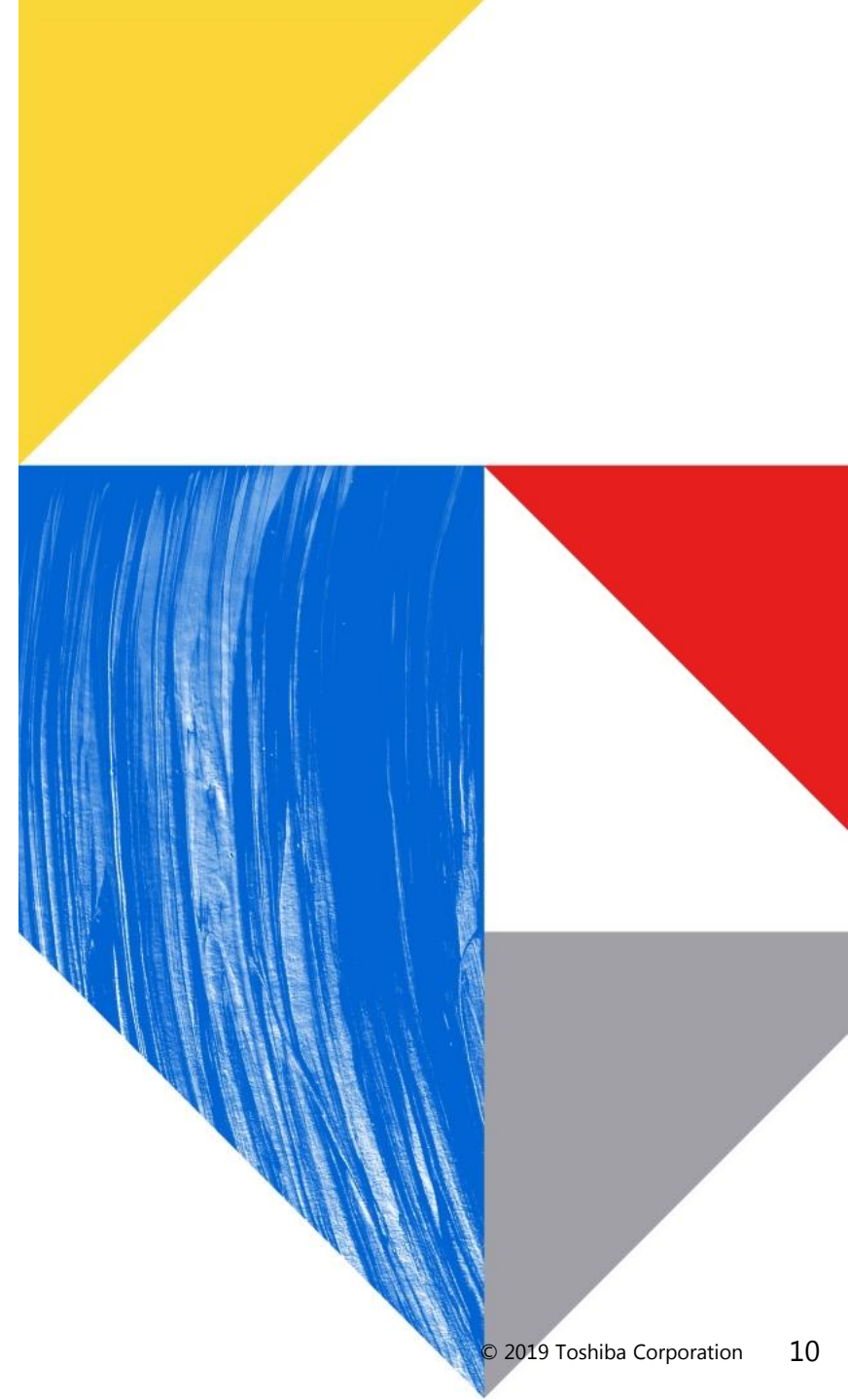
\*\*万能ゲートが実現可能

A. Marandi et al., Nat. Photon. **8**, 937(2014)

HG, Sci. Rep. **6**, 21686 (2016)

# 03

## シミュレーテッド分岐マシン



# 古典分岐マシン (Classical bifurcation Machine, CbM) の価値を発見

## CbMは大規模シミュレーションが可能

KPOネットワークのハミルトニアン

$$H = \sum_{i=1}^N \left[ \hbar \frac{K}{2} a_i^{\dagger 2} a_i^2 - \hbar \frac{p}{2} (a_i^{\dagger 2} + a_i^2) + \hbar \Delta_i a_i^{\dagger} a_i \right] - \hbar \frac{\xi_0}{2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N J_{i,j} (a_i^{\dagger} a_j + a_j^{\dagger} a_i)$$

量子分岐マシン

シュレディンガー方程式

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi\rangle = H |\psi\rangle$$

現在の計算機でシミュレート不可能

古典分岐マシン

ハミルトンの運動方程式

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \quad \frac{dp_i}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x_i}$$
$$(a_i = x_i + ip_i)$$

現在の計算機でシミュレート可能

VS

# シミュレーテッド分岐アルゴリズム (Simulated Bifurcation, SB) とその特長

SBは高い並列性を有し、GPUやFPGAを用いて高速なイジングマシンを実現可能

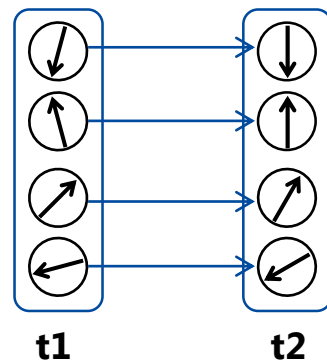


SB 
$$\begin{cases} x_i(t+dt) = x_i(t) + \Delta y_i dt \\ y_i(t+dt) = y_i(t) + \left[ -x_i(t+dt) \left( Kx_i(t+dt)^2 - p + \Delta \right) + \xi_0 \sum_{j=1}^N J_{i,j} x_j(t+dt) \right] dt \end{cases}$$

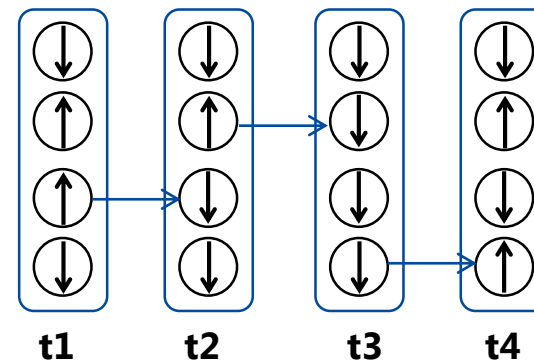
Simulated bifurcation (SB)

Simulated annealing (SA)

並列更新



逐次更新



## FPGA版SBMはCIMよりも約10倍高速な上、実用面で圧倒的に優位

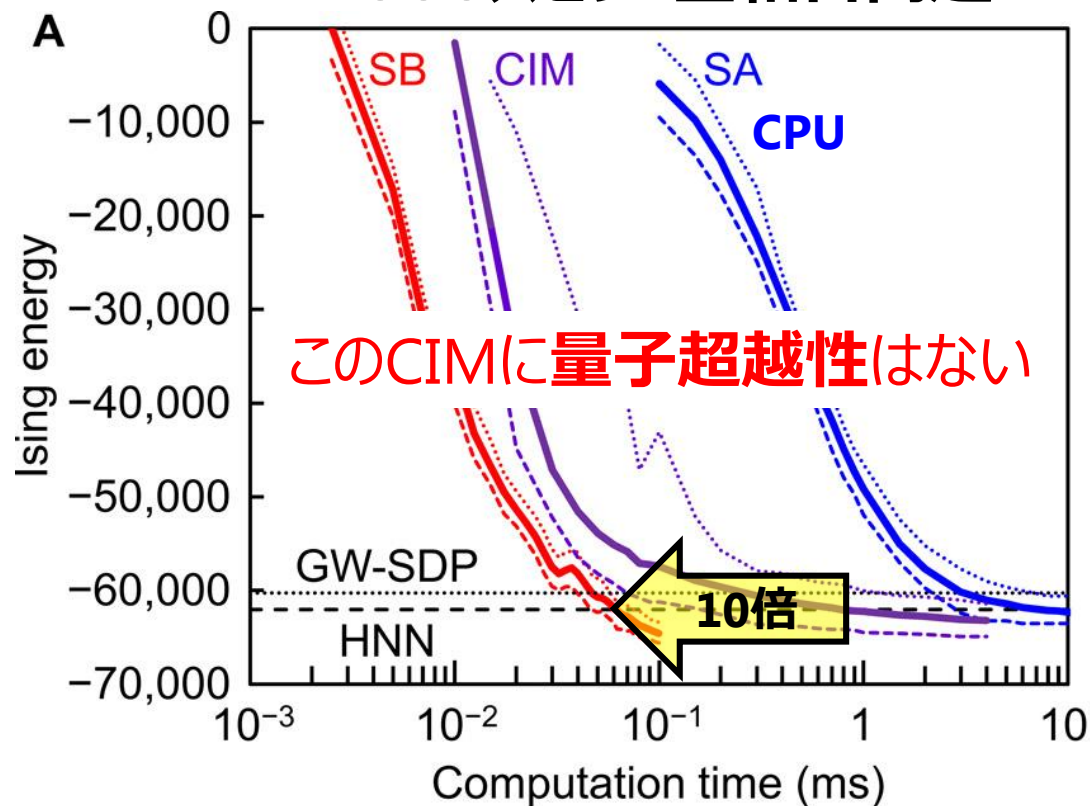
### シミュレーテッド分岐マシン



**40W**

- ✓ 速度
- ✓ 電力
- ✓ サイズ
- ✓ 安定性

### 2000スピン・全結合問題



### コヒーレントイジングマシン



Inagaki et al., Science **354**, 603 (2016)

\*\*Coherent Ising Machine

Goto, Tatsumura, Dixon, Science Advances **5**, eaav2372 (2019)

## SBMは現在の量子イジングマシンでは扱えない大規模な問題を解ける

**高速**

**SBアルゴリズム**




**4000スピン\*\***

**FPGA**

\*\*Tatsumura, Dixon, Goto, FPL2019

**大規模**

**SBアルゴリズム**



**10万スピン**

**GPUクラスタ**

Goto, Tatsumura, Dixon, Science Advances **5**, eaav2372 (2019)

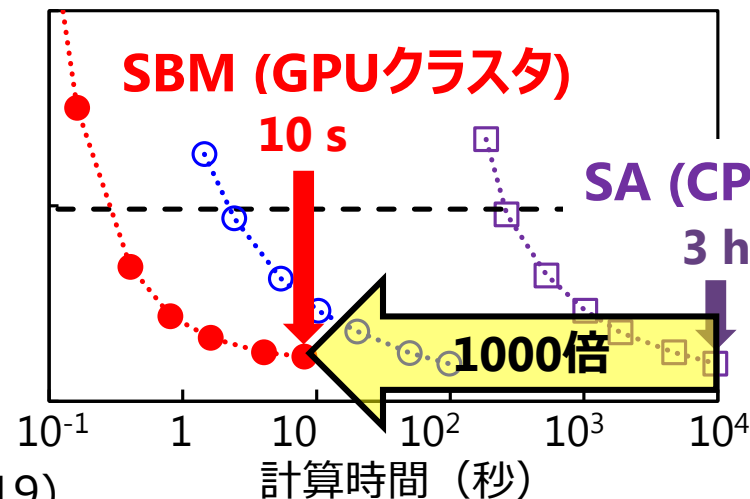
コヒーレントイジングマシン

2000スピン

量子アニーラ

2000スピン

10万スピン・全結合問題

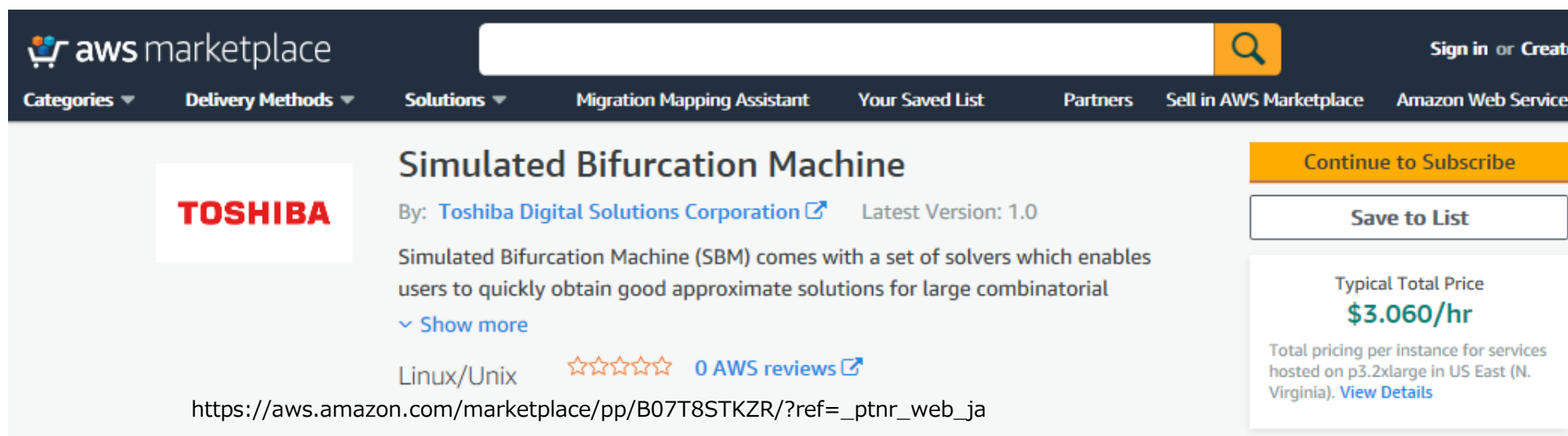


\*\*\*Isakov et al.,  
Comput. Phys. Commun.  
**192**, 265 (2015)

## AWSでクラウドサービス公開(2019/7/17~)



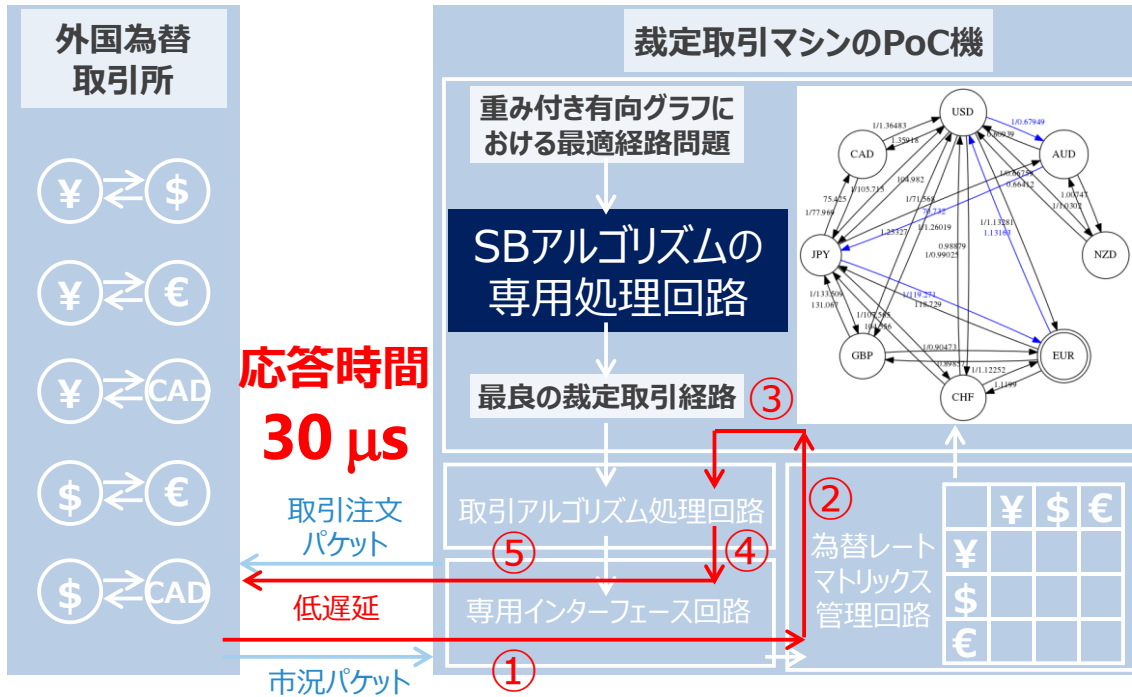
<https://www.toshiba-sol.co.jp/news/detail/20190717.htm> 東芝デジタルソリューションズ株式会社



# 実用化へ向けた試み2：金融応用向けに2つのPoC\*を発表

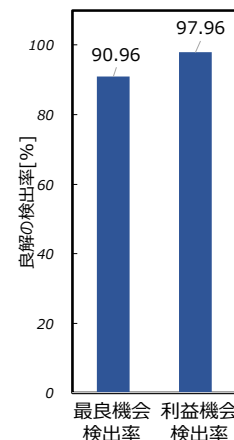
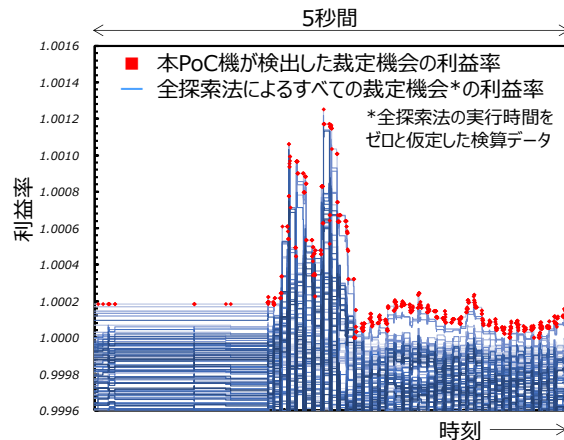
\*Proof of Concept

## SBM\*\*ベース超高速裁定取引マシン



## SBM\*\*によるパッシブファンドのポートフォリオ最適化

TOPIX2000銘柄に連動するポートフォリオを500銘柄で作成

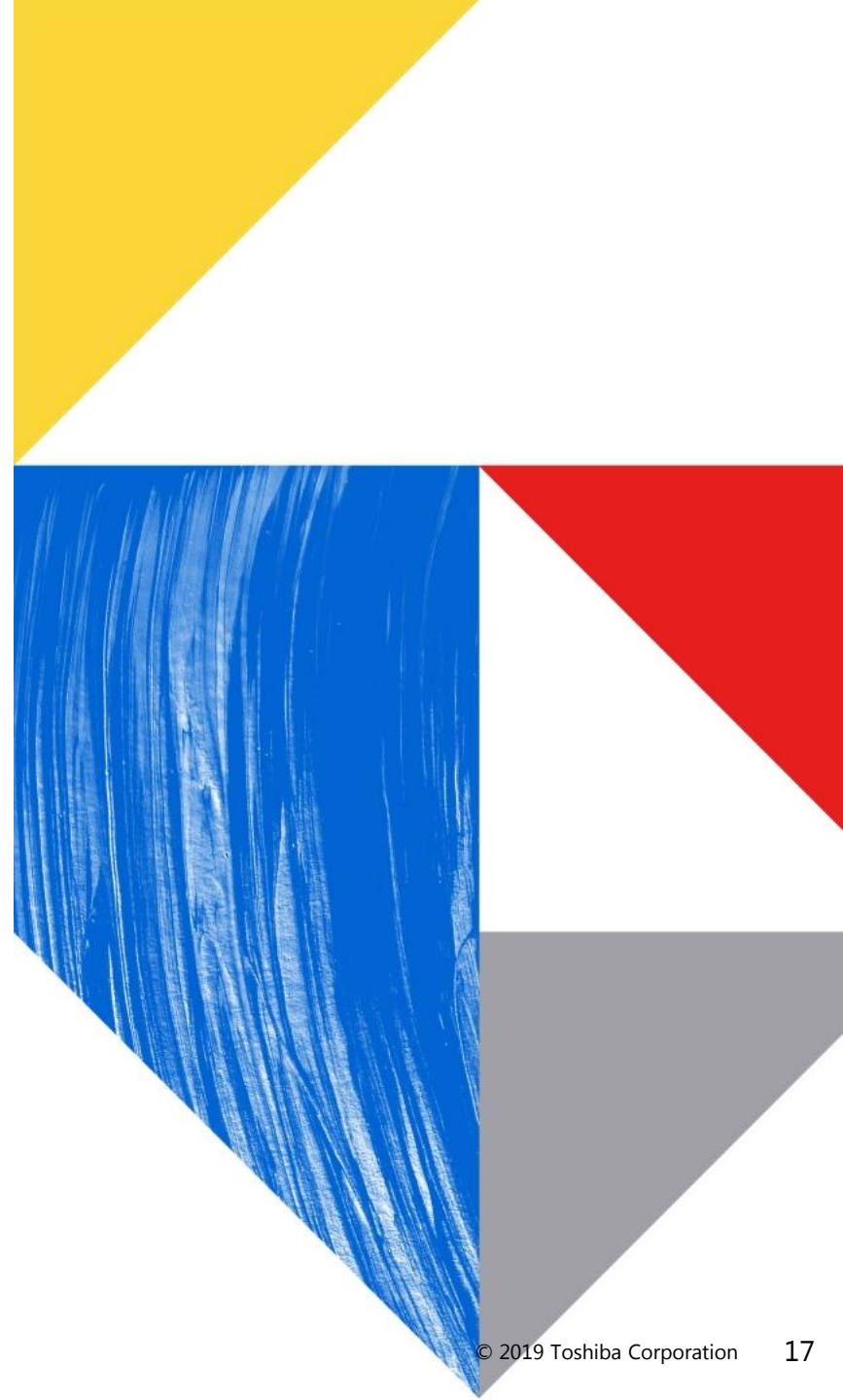


\*\*Simulated Bifurcation Machine



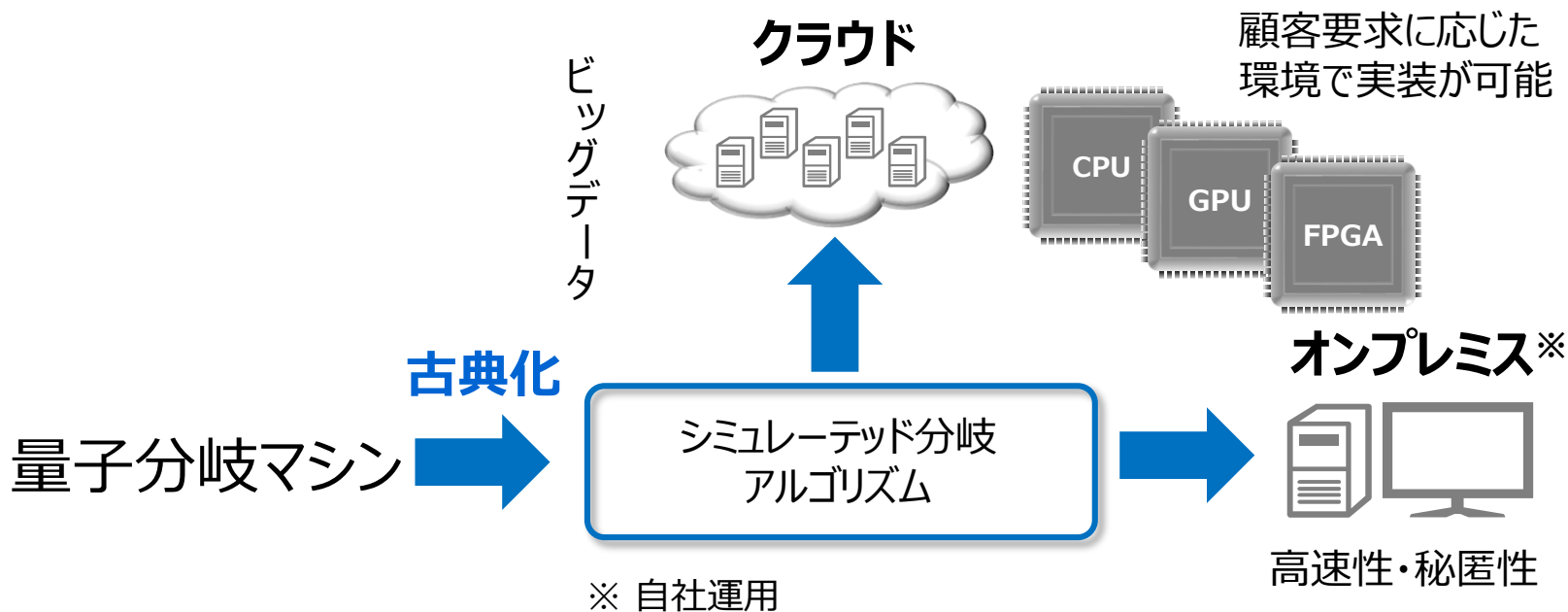
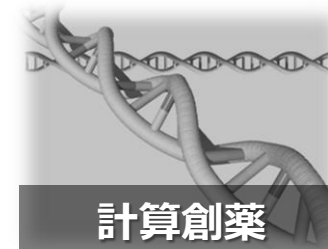
# 04

まとめ



# シミュレーテッド分岐マシン (SBM\*) は量子計算から生まれた 高速かつ大規模な組合せ最適化を可能にする古典計算機

\*Simulated Bifurcation Machine



**TOSHIBA**