

# 量子アニーリングの理論と応用

田中 宗

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

科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 さきがけ  
「量子の状態制御と機能化」領域

E-mail: [shu.tanaka@aoni.waseda.jp](mailto:shu.tanaka@aoni.waseda.jp)



QUANTUM  
ANNEALING



MACHINE  
LEARNING



# 自己紹介(田中 宗)

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 主任研究員(研究院准教授)  
JSTさきがけ研究者(兼任)  
情報処理推進機構未踏ターゲットプロジェクトマネージャー(兼任)

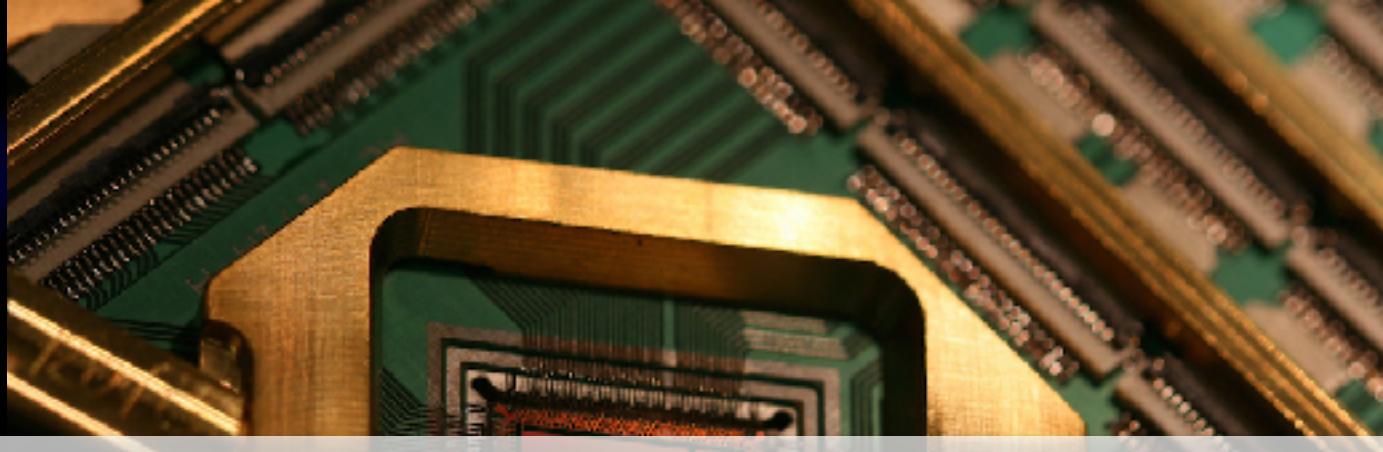
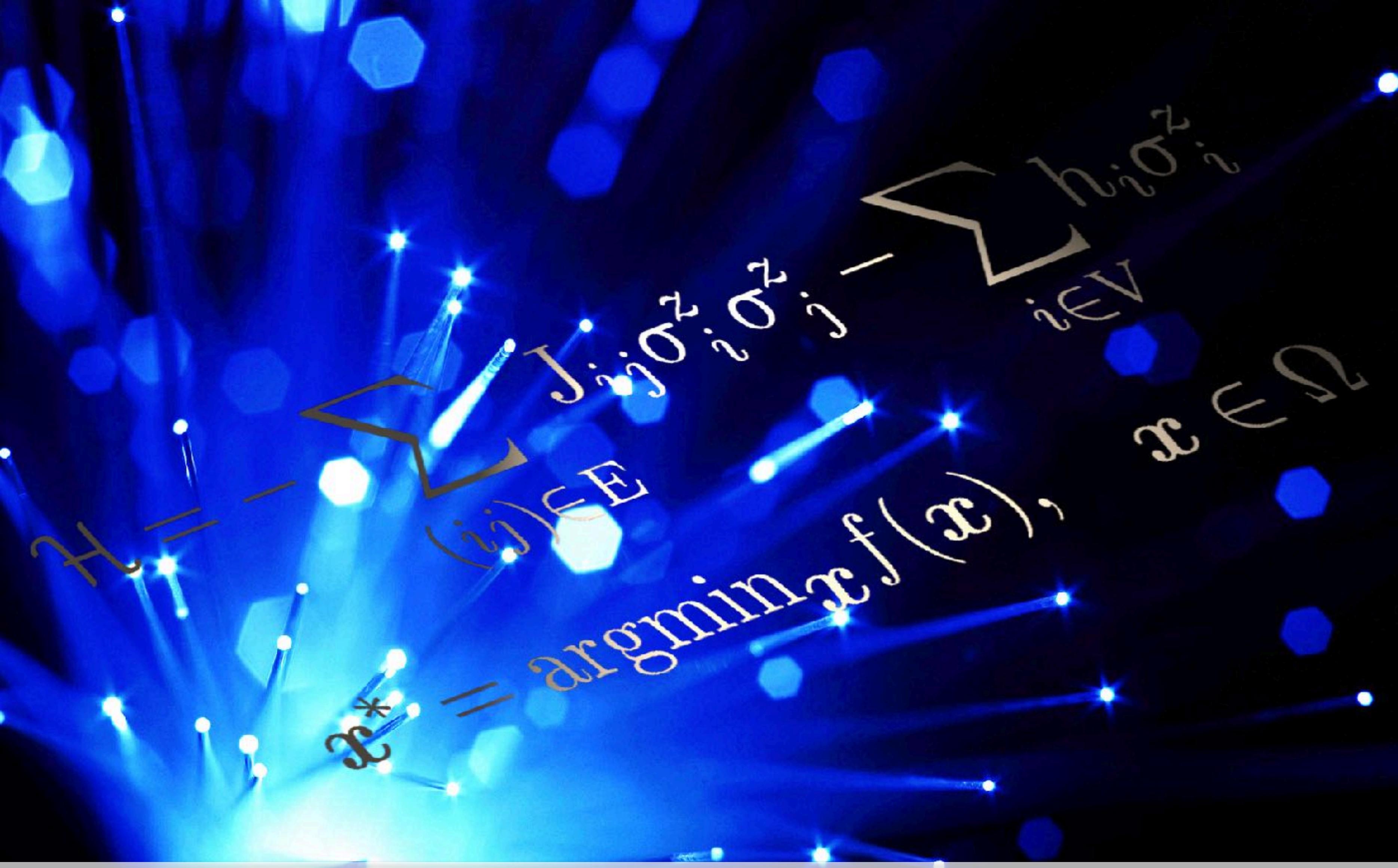
博士(理学)(東京大学、2008年3月)

- ・ 東京工業大学理学部物理学科(西森秀稔研究室) 学部学生
- ・ 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻(宮下精二研究室) 大学院修士課程 & 博士課程
- ・ 東京大学物性研究所(川島直輝研究室) 特任研究員
- ・ 近畿大学量子コンピュータ研究センター(中原幹夫センター長) 博士研究員
- ・ 東京大学大学院理学系研究科化学専攻(大越慎一研究室) 日本学術振興会特別研究員(PD)
- ・ 京都大学基礎物理学研究所(戸塚圭介研究室) 基研特任助教
- ・ 早稲田大学高等研究所 助教
- ・ 物質・材料研究機構量子物性シミュレーショングループ(田村亮研究員) 客員研究員
- ・ 早稲田大学高等研究所 准教授(任期付)

を経て現職



研究キーワードは、量子アニーリング、イジングモデル型情報処理、統計力学、量子情報科学、物性理論



物理学と情報科学の境界領域：量子アニーリングなど、イジングモデル型情報処理  
組合せ最適化処理を高速化する計算技術の研究

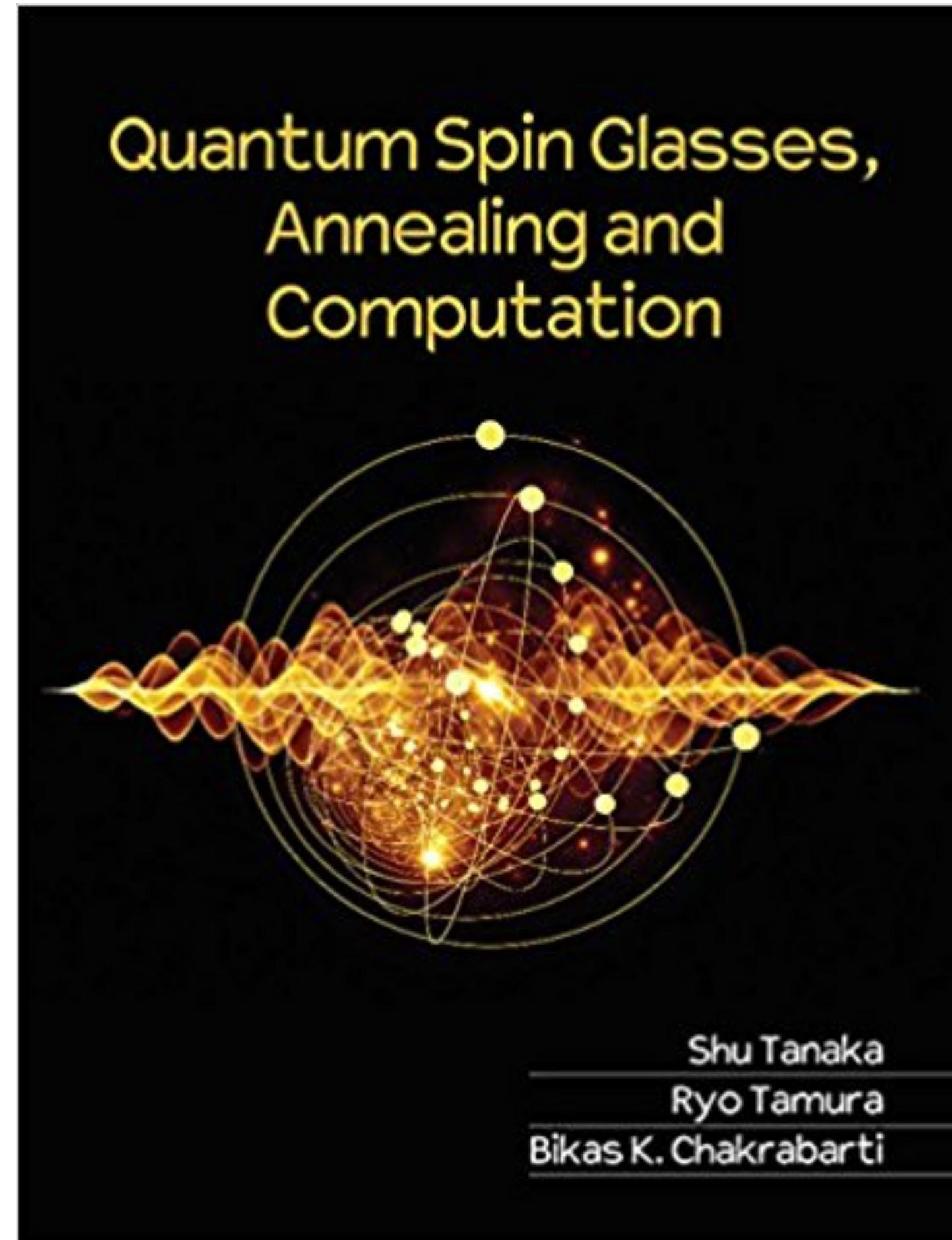
# 参考文献

分かりやすい日本語書籍



西森秀穂、大関真之『量子コンピュータが人工知能を加速する』(日経BP)

英語教科書を執筆しました。



Shu Tanaka, Ryo Tamura, and Bikas K. Chakrabarti,  
“Quantum Spin Glasses, Annealing and Computation” (Cambridge University Press, 2017)

最近発行の日本語教科書



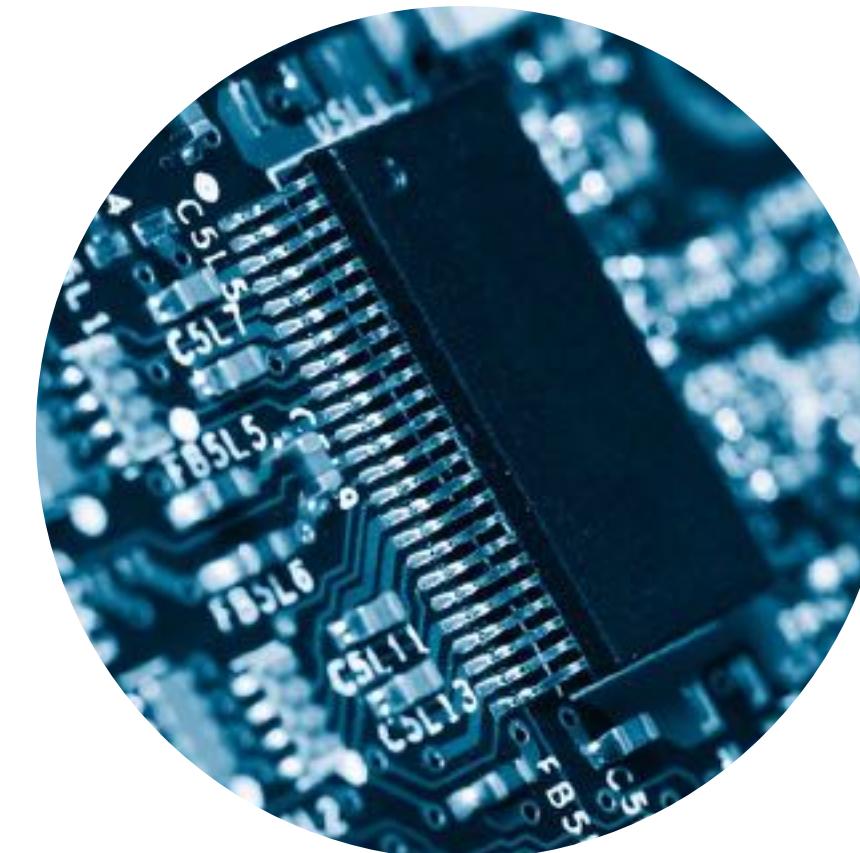
西森秀穂、大関真之『量子アニーリングの基礎』(共立出版)

# 量子アニーリングへの期待

膨大な選択肢から、ベストを探す。

# 様々なシーンに現れる組合せ最適化処理

組合せ最適化処理は、多様な業種に内在。IoT社会における重要性も指摘されている。



## 巡回セールスマニ問題

最小コスト(距離、時間、燃料費等)の経路を発見

## シフト表作成問題

最小コスト(人件費、光熱費等)、最大利益のシフト表を作成

## 配送計画問題

最小コスト(距離、時間、燃料費等)の配送計画を作成

## 集積回路設計問題

最小コスト(部品代、発熱)、最大スペックの集積回路を作成

## 経営戦略立案

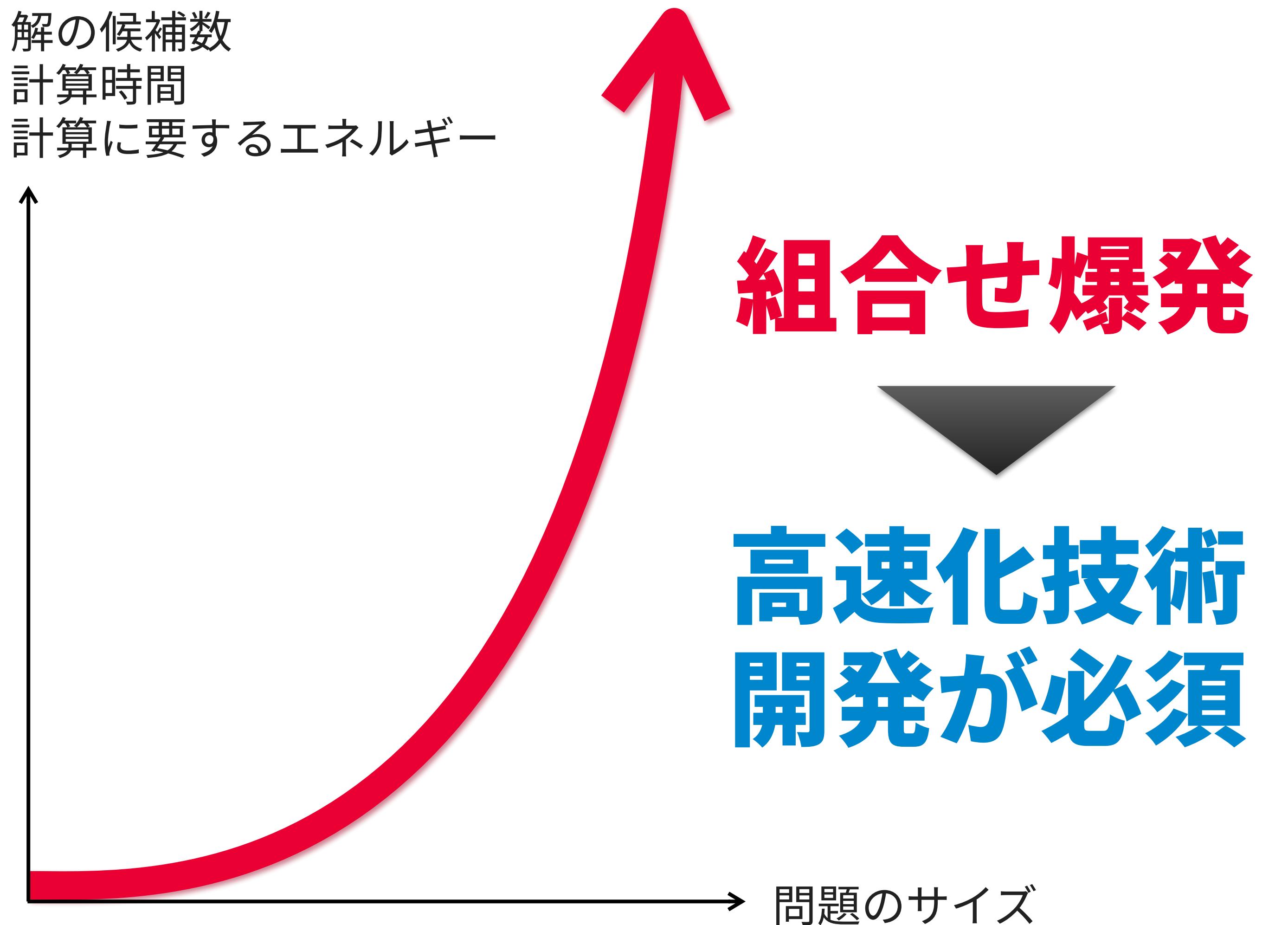
最小コスト(人件費、光熱費)、最大利益を生み出す戦略を作成

一筋縄ではいかないが、避けて通ることはできない

# なぜ、組合せ最適化問題に取り組むか？

膨大な選択肢から、ベストを探す。解の候補数が爆発的に増加。

解の候補数  
計算時間  
計算に要するエネルギー



組合せ最適化問題は、様々な場面に出現。  
高速・高精度に処理できれば、**様々な課題解決に直結**。





最適効率配送ルート探索

ガソリンスタンド出店計画

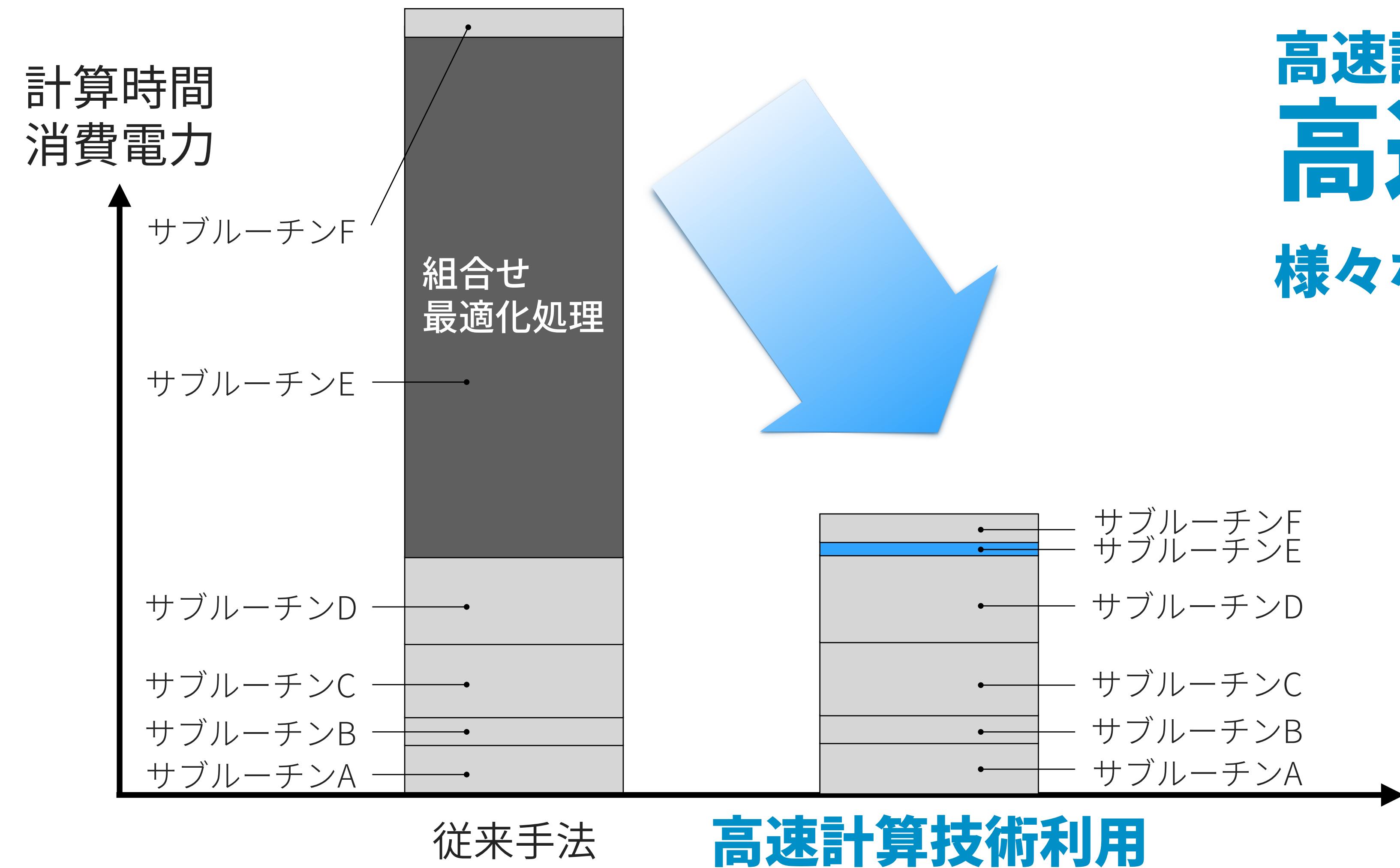
車載機器の機械学習処理

道路埋込機器の機械学習処理

組合せ最適化問題は膨大

# 組合せ最適化処理を高速化する意義

組合せ最適化処理が大きなボトルネックとなっている問題に有効



高速計算技術利用による  
**高速化・省エネ化**  
様々な分野の発展スピードが向上



分類	現在～2020年	2020年～2030年	2030年以降
認識能力関係	<ul style="list-style-type: none"> <li>静止画像・動画像からの一般物体認識が人間レベルに到達</li> <li>3次元情報からの環境認識が人間レベルに到達</li> <li>人間の表情、感情の認識が人間レベルに到達</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原始的シンボルグラウンディング問題の解決を背景に、特定ドメインにおいて、文脈や背景知識を考慮した認識が可能に</li> <li>スマートデータでの学習による認識が可能に</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>特定ドメインに限らず、一般ドメインにおいて、文化や社会的背景などを考慮した認識が可能に（シンボルグラウンディング問題の解決）</li> </ul>
運動能力関係	<ul style="list-style-type: none"> <li>ディープラーニング（DL）と強化学習の融合が進化し、人間が設定した報酬体系の下、高度なゲームなどのタスクの遂行（プランニング）が人間レベルに到達</li> <li>運動に関するプリミティブ、構造（オントロジー）を自動生成する技術の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>スマートデータでの学習により、深い背景知識を必要とするタスクの遂行が人間レベルに到達</li> <li>人間の運動・モノの操作・動画像から概念階層を自動で獲得（運動からの自動的なオントロジー獲得技術の確立）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>文化や社会的背景を必要とするタスクの遂行が人間レベルに到達</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>DL+強化学習の進化により、剛体物マニピュレーション制御のほか、柔軟物マニピュレーション制御を学習</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全マニピュレーション技術の確立</li> <li>ハードの進化とあわせて、さまざまな実用的タスクに対するマニピュレーション技術が確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>マニピュレーション機能がモジュール化され、社会全体で最適化される</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>自律移動しながら3Dマップを生成し、周辺環境を構造化</li> <li>不整地等非構造化環境におけるロコモーション技術が確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>安全ロコモーション技術の確立</li> <li>ハードの進化とあわせて、さまざまな実用的タスクに対するロコモーション技術が確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>移動リユース性が高まることで、より柔軟な環境適応が可能となる</li> </ul>
言語・意味理解	<ul style="list-style-type: none"> <li>画像とテキストを相互変換する原始的シンボルグラウンドィング技術の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>マルチモーダルな情報、運動に関するプリミティブとテキストを相互変換する、より本格的なシンボルグラウンドィング技術の確立</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>人間が持つ多様な表現を理解するためのモデルが確立</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>特定ドメインにおいて、会話が成立するための発話計画を自動で生成</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>原始的シンボルグラウンドィング問題の解決を背景に、新聞等のフォーマルなテキストの分類、情報検索、含意関係認識等が人間レベルに到達</li> <li>原始的シンボルグラウンドィング問題の解決を背景に、特定ドメインの機械翻訳が人間レベルに到達</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>言語分類機能が確立</li> <li>機械翻訳機能が確立</li> <li>音声認識機能が確立</li> </ul>
数値データの処理、人間やシステムのモデル化	<ul style="list-style-type: none"> <li>センサからの大量データの取得・活用が進む（IoT）</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>センサデータにより、社会の部分的最適化が可能に</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>認識能力、運動能力、言語・意味理解能力の向上とあいまって、社会全体の最適化が可能に</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>認知発達モデル、脳の情報処理の研究が加速</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>認知発達モデルが部分的に構築</li> <li>脳の情報処理原理が部分的に解明</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>認識発達モデルが概ね構築</li> <li>脳の情報処理原理が概ね解明</li> </ul>
計算機システム等の必要なハードウェア	<ul style="list-style-type: none"> <li>ワンショット3D計測やハイパースペクトルカメラなどのセンサ</li> <li>省電力高性能小型プロセッサ</li> <li>触覚センサなどセンサ類の高度化</li> <li>高度マニピュレータ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>イジングモデル型デバイス</li> <li>スマートアクチュエータ</li> <li>あらゆるデバイスが超低消費電力駆動</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>人の脳にせまる脳型デバイス</li> </ul>

# 量子アニーリングとは何か？

# 量子アニーリング実装の手順とキーワード

解くべき組合せ最適化問題を用意



イジングモデル(2値変数2次形式)で表現

$$\mathcal{H} = - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z - \sum_{i \in V} h_i \sigma_i^z \quad \sigma_i^z = \pm 1$$



統計力学理論

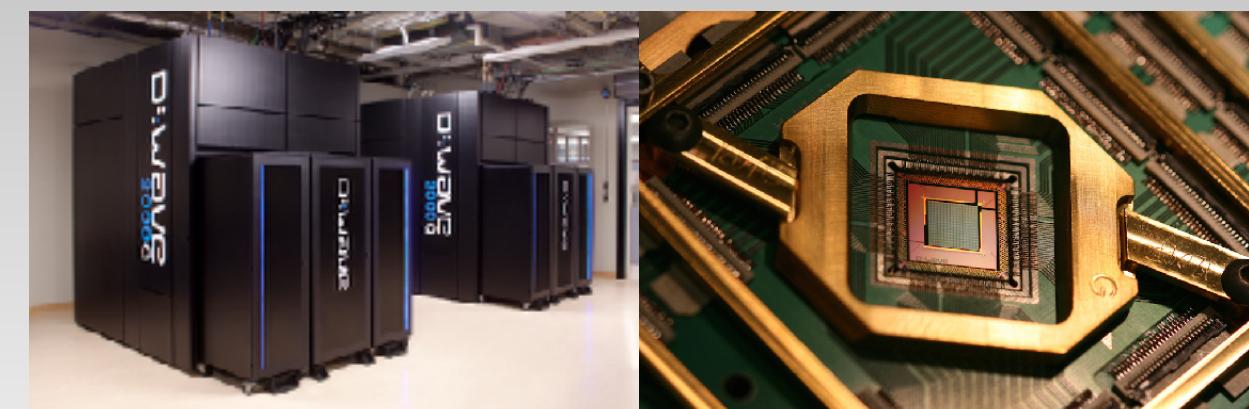


量子並列性



自然計算

量子アニーリングマシンによる自然計算



D-Wave Systems  
webサイトより

測定により解が得られる

組合せ最適化問題における  
膨大なデータ処理の  
理論基盤

量子重ね合わせ状態を  
初期状態とした情報処理

自然現象を用いた計算

物理学を基礎とする  
新しい計算技術

# 組合せ最適化問題の最適解 = イジングモデルの基底状態

最も安定な状態、最もエネルギーが低い状態

イジングモデルの基底状態(最安定状態)を探す方法を作ればよい



多様な業種に内在する  
組合せ最適化処理

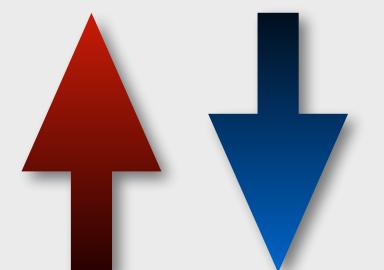
## イジングモデル

$$\mathcal{H} = - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} s_i s_j - \sum_{i \in V} h_i s_i$$

スピノン(ビット)間相互作用

スピノン(ビット)に働く局所磁場(強制力)

$$s_i = \pm 1$$



2値変数2次形式で表現

# イジングモデル

膨大な要素間の相互作用により駆動される現象を取り扱う統計力学模型

$$\mathcal{H} = - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} s_i s_j - \sum_{i \in V} h_i s_i$$

スピン(ビット)間相互作用

スピン(ビット)に働く局所磁場(強制力)

ハミルトニアン  
スピンの状態に応じたエネルギー

スピン変数  
 $s_i = \pm 1$

組合せ最適化問題におけるコスト関数  
各選択肢に応じた実数値



磁石はなぜくっつくか？

組合せ最適化問題の最適解 = イジングモデルの基底状態

最も安定な状態、最もエネルギーが低い状態

# イジングモデル

膨大な要素間の相互作用により駆動される現象を取り扱う統計力学模型

$$\mathcal{H} = - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} s_i s_j - \sum_{i \in V} h_i s_i$$

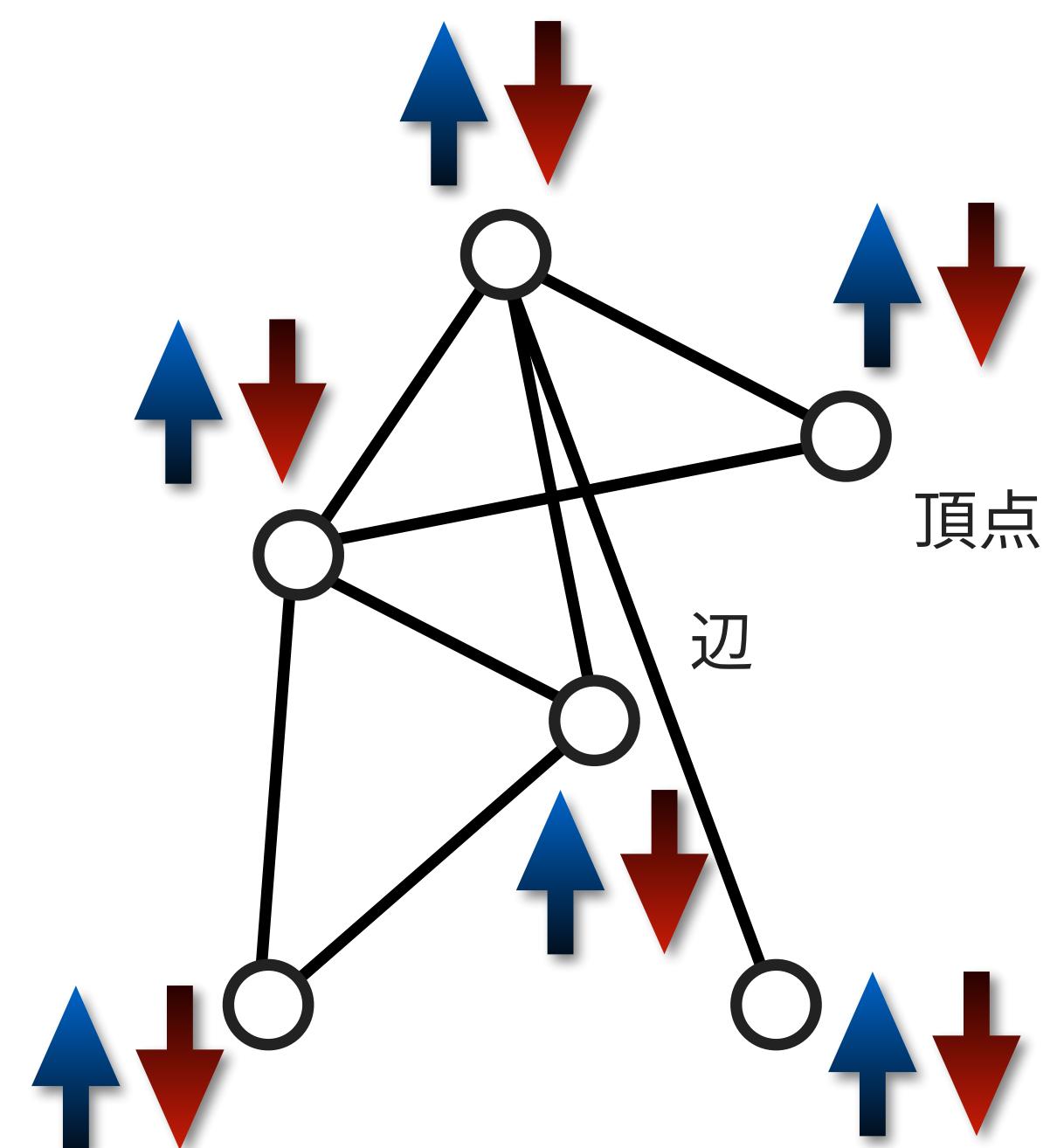
スピン(ビット)間相互作用

スピン(ビット)に働く局所磁場(強制力)

ハミルトニアン  
スピンの状態に応じたエネルギー

スピン変数  
 $s_i = \pm 1$

グラフ  $G = (V, E)$



組合せ最適化問題におけるコスト関数  
各選択肢に応じた実数値

組合せ最適化問題の最適解 = イジングモデルの基底状態

最も安定な状態、最もエネルギーが低い状態

# イジングモデルにおける相互作用と磁場

$$\mathcal{H} = - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} s_i s_j - \sum_{i \in V} h_i s_i$$

$$s_i = \pm 1 \quad \uparrow \downarrow$$

スピン(ビット)間相互作用 スpin(ビット)に働く局所磁場(強制力)

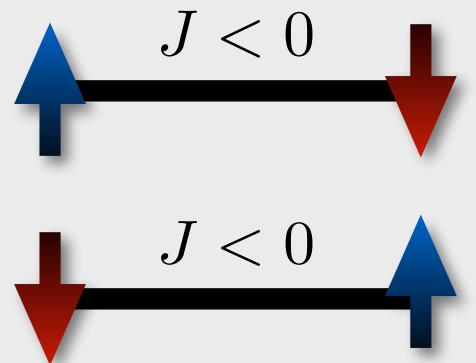
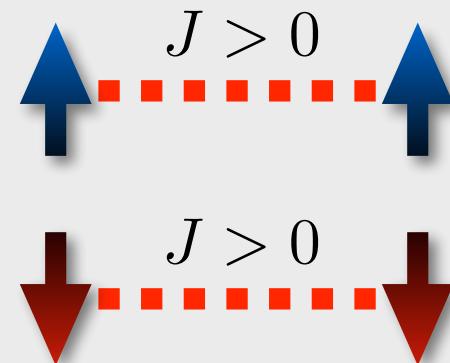
$J_{ij} > 0$  : 強磁性的相互作用  
隣り合うスピンが同じ向きのとき安定

$J_{ij} < 0$  : 反強磁性的相互作用  
隣り合うスpinが反対向きのとき安定

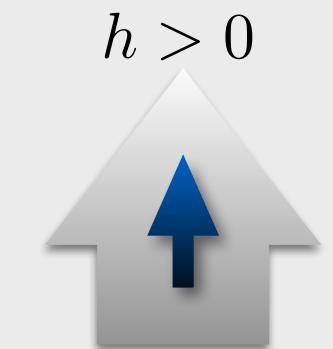
$h_i > 0$  :  $s_i = +1$  のとき安定

$h_i < 0$  :  $s_i = -1$  のとき安定

## 相互作用によるエネルギー利得



## 磁場によるエネルギー利得



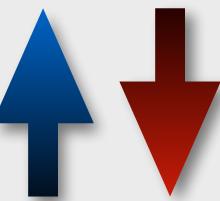
組合せ最適化問題の最適解 = イジングモデルの基底状態

最も安定な状態、最もエネルギーが低い状態

# イジングモデルの基底状態を探す

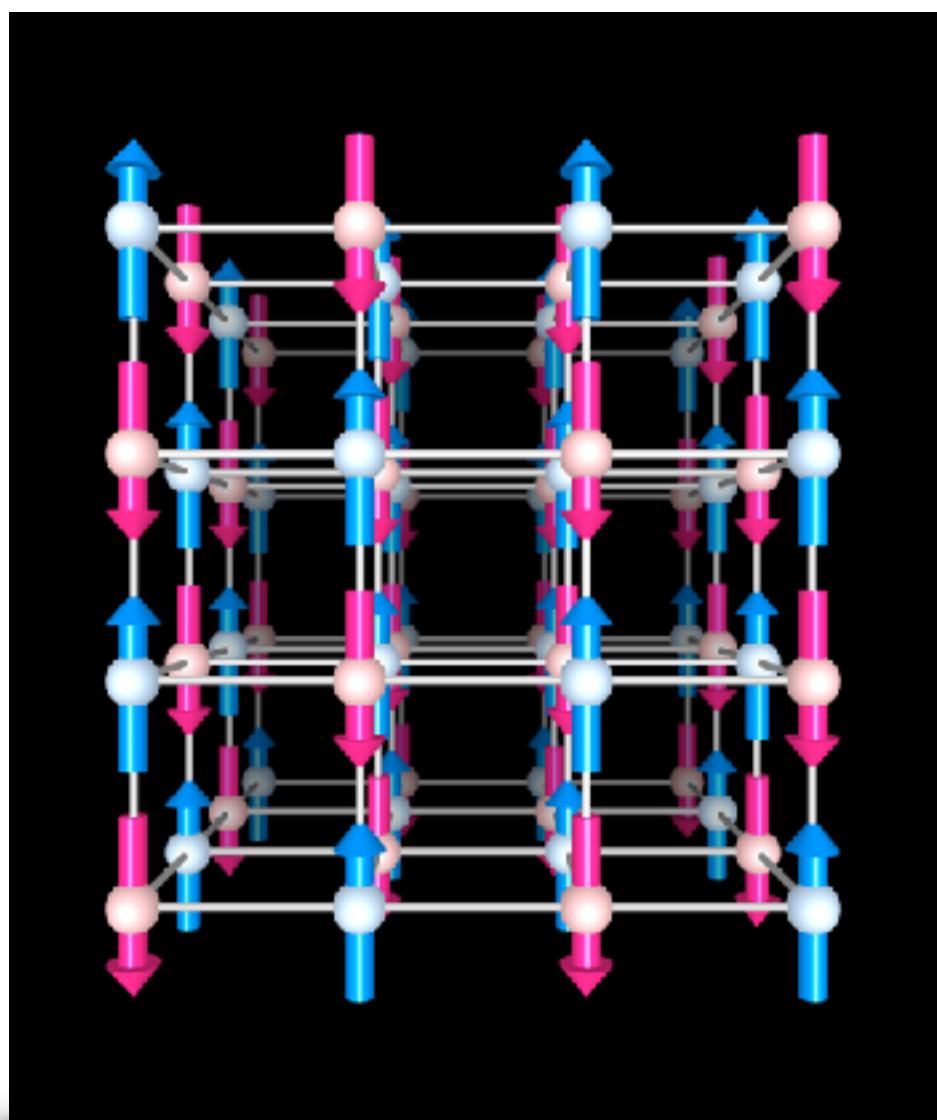
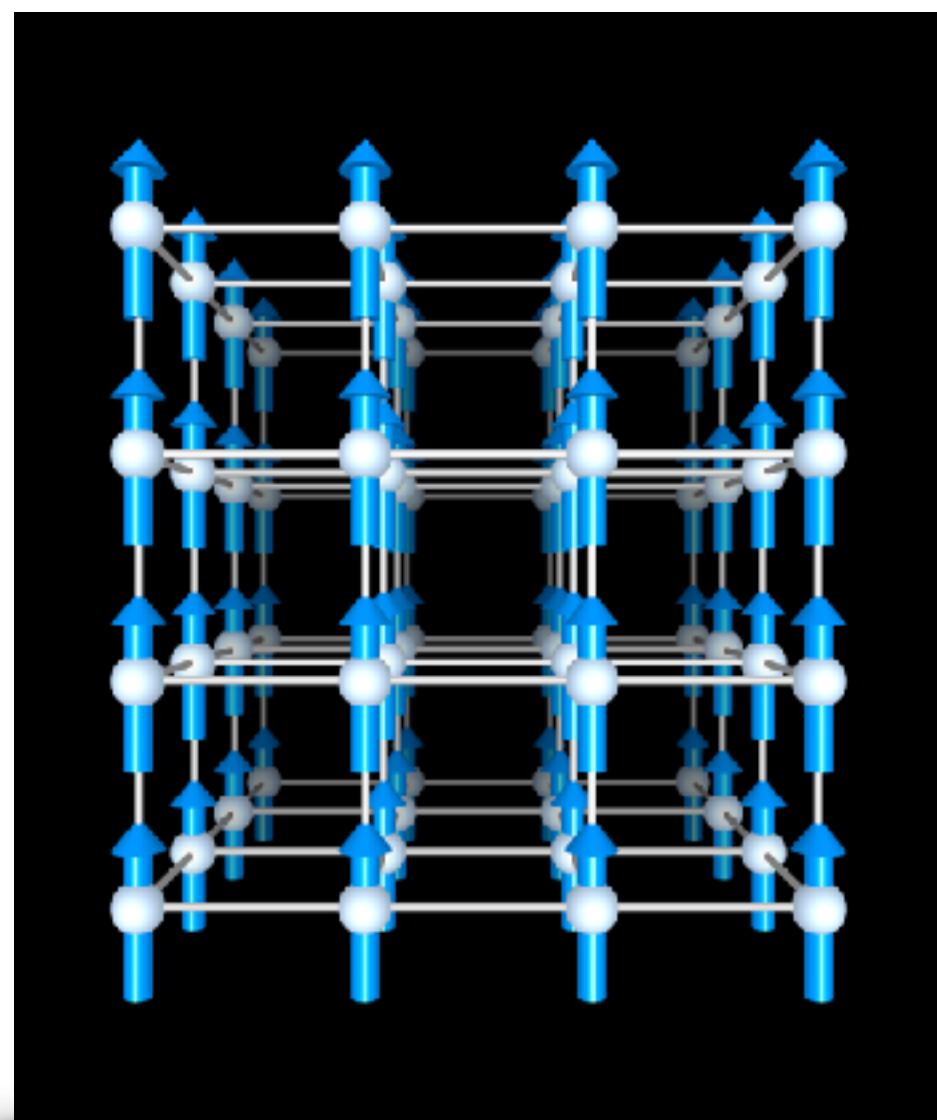
$$\mathcal{H} = - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} s_i s_j - \sum_{i \in V} h_i s_i$$

$$s_i = \pm 1$$

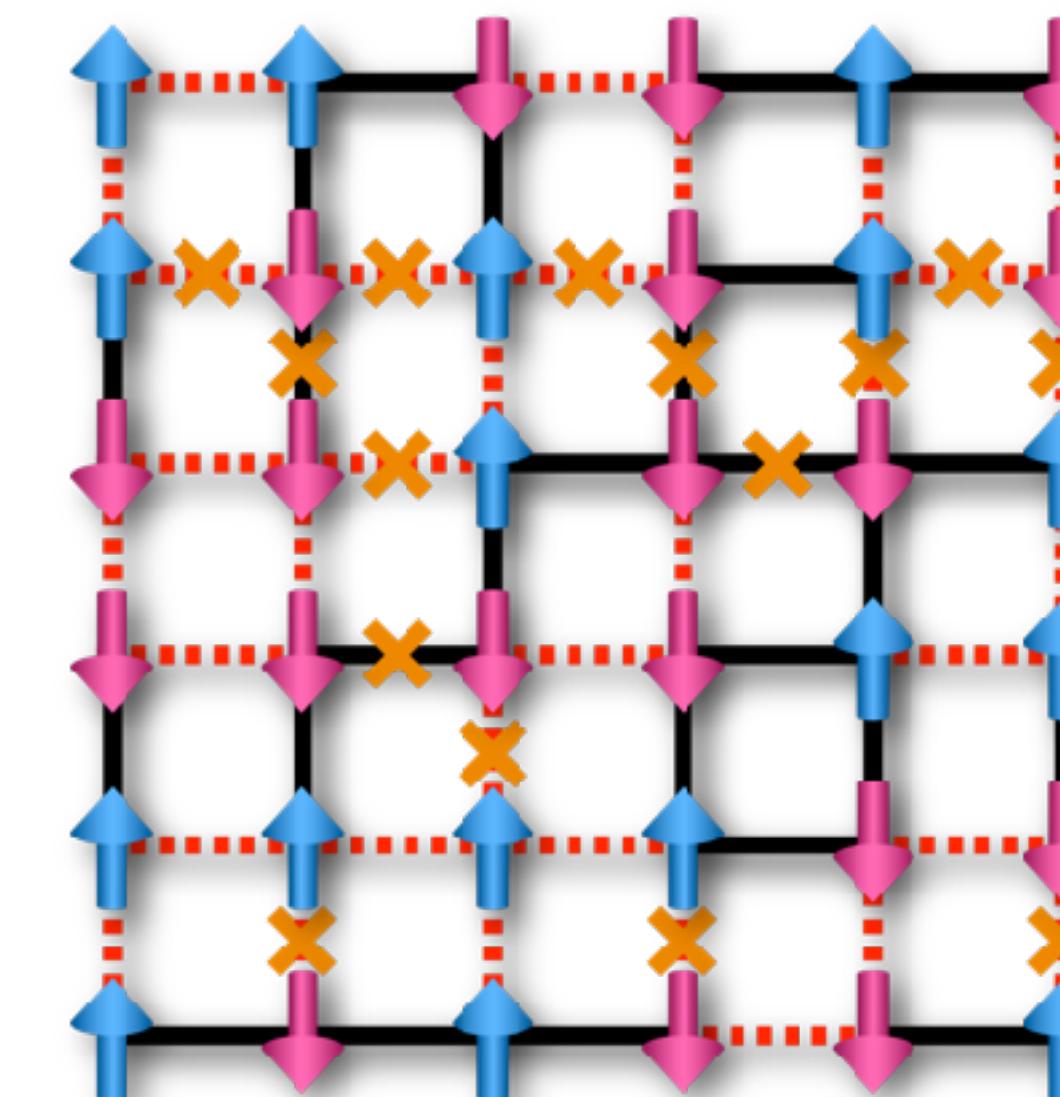


スピン(ビット)間相互作用 スpin(ビット)に働く局所磁場(強制力)

簡単なイジングモデル



難しいイジングモデル



組合せ最適化問題の最適解 = イジングモデルの基底状態

最も安定な状態、最もエネルギーが低い状態

# グラフ分割問題

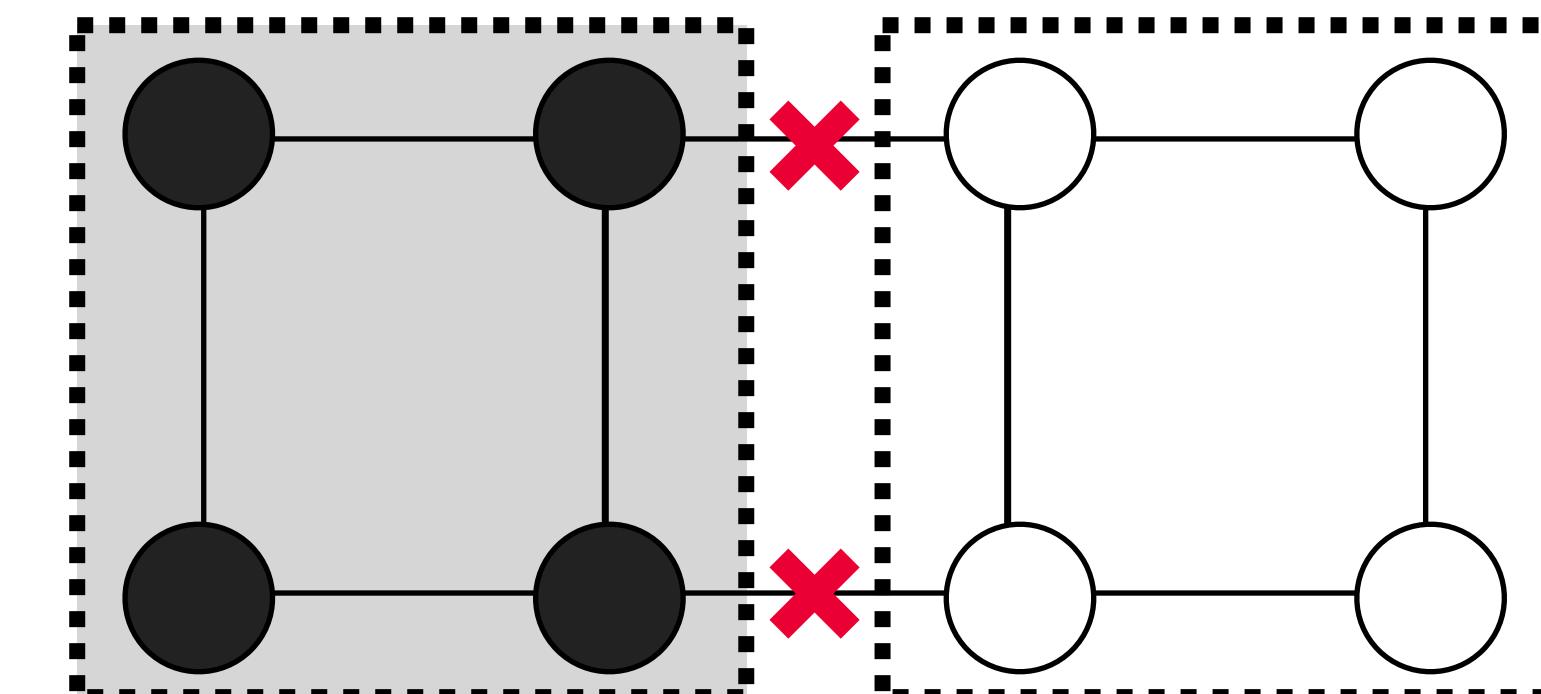
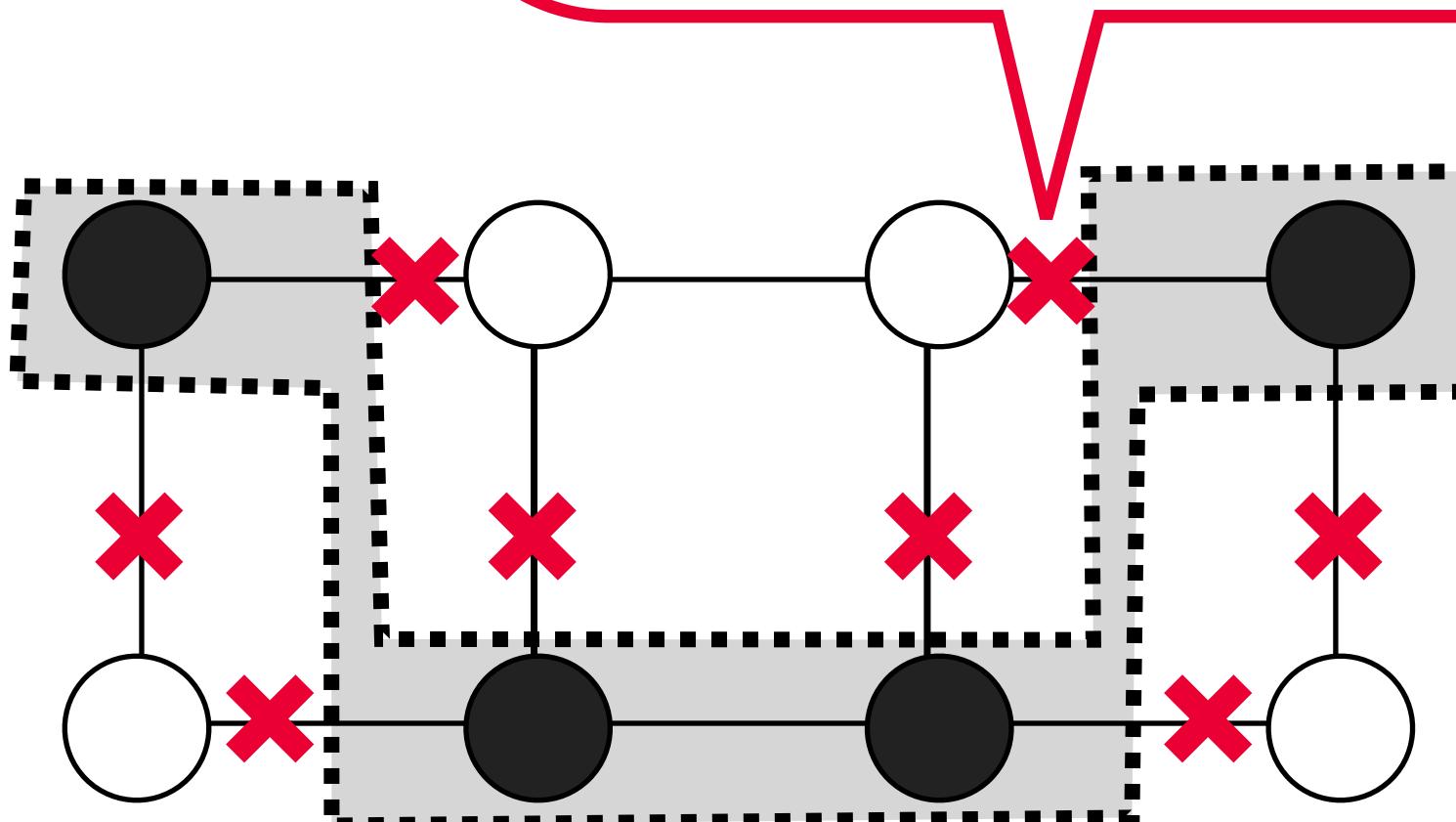
- 無向グラフ  $G = (V, E)$
- 頂点数  $N = |V|$  は偶数。
- 等しい頂点数の、互いに重ならない2つの部分グラフに分割(1つの頂点は片方のグラフのみに所属)。

上記の条件のもと、2つの部分グラフをつなぐエッジの数を最小にする分割方法は？

無向グラフ  $G = (V, E)$

頂点の集合 辺の集合

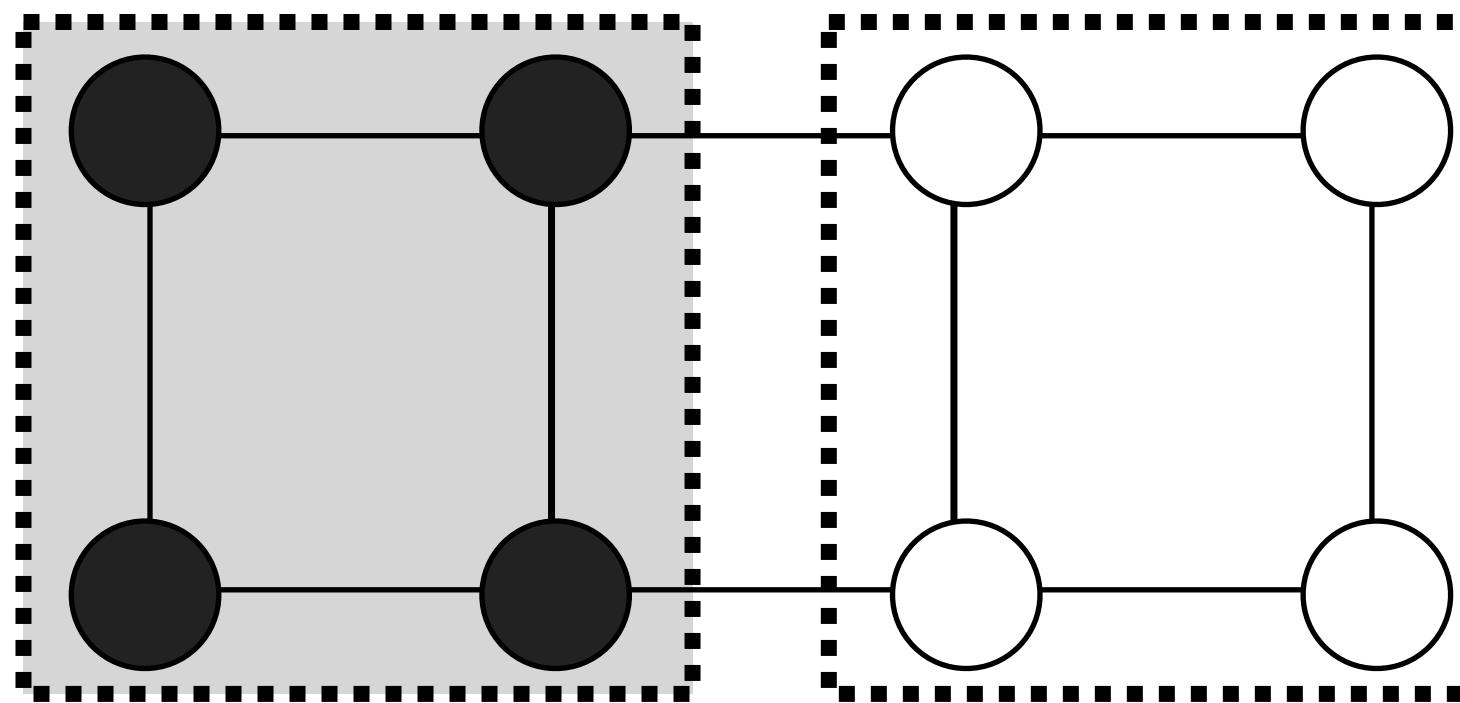
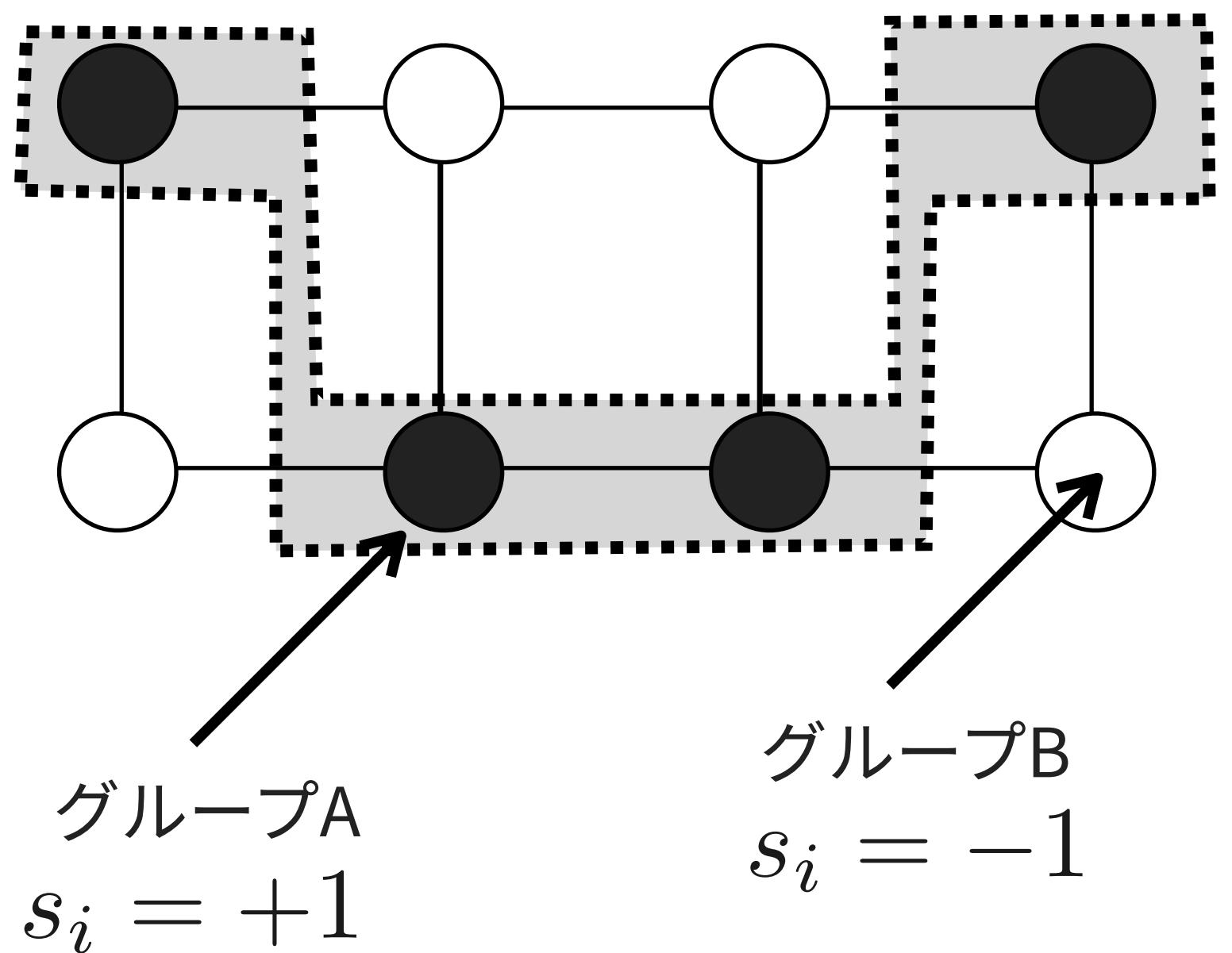
部分グラフを  
つなぐエッジ



# グラフ分割問題

- 無向グラフ  $G = (V, E)$
- 頂点数  $N = |V|$  は偶数。
- 等しい頂点数の、互いに重ならない2つの部分グラフに分割(1つの頂点は片方のグラフのみに所属)。

上記の条件のもと、2つの部分グラフをつなぐエッジの数を最小にする分割方法は？

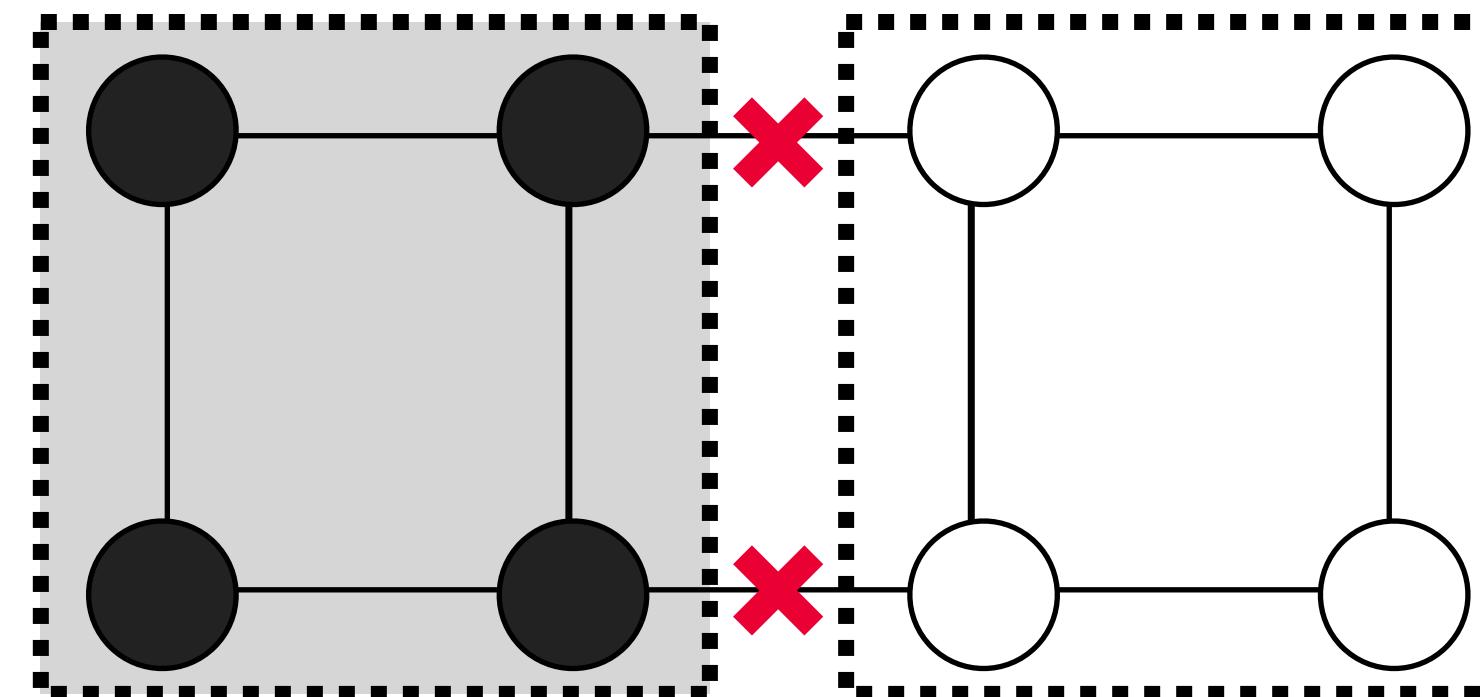
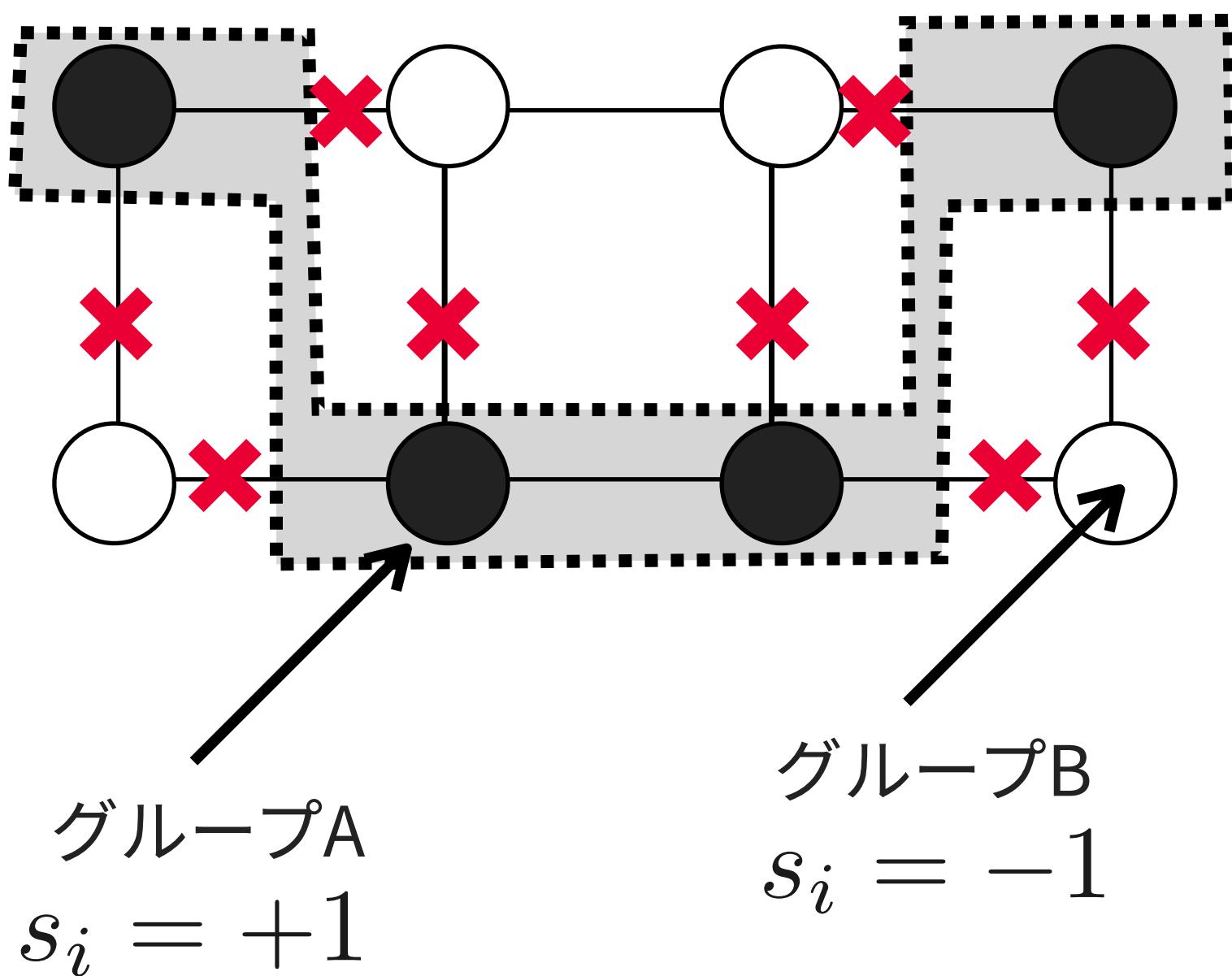


2つの部分グラフが共に等しい頂点数  $\sum_{i \in V} s_i = 0$   
の最小化問題と見ることができる。

# グラフ分割問題

- 無向グラフ  $G = (V, E)$
- 頂点数  $N = |V|$  は偶数。
- 等しい頂点数の、互いに重ならない2つの部分グラフに分割(1つの頂点は片方のグラフのみに所属)。

上記の条件のもと、2つの部分グラフをつなぐエッジの数を最小にする分割方法は？



2つの部分グラフをつなぐエッジの数(×の数)

$$\sum_{(ij) \in E} \frac{1 - s_i s_j}{2}$$

# グラフ分割問題

- 無向グラフ  $G = (V, E)$
- 頂点数  $N = |V|$  は偶数。
- 等しい頂点数の、互いに重ならない2つの部分グラフに分割(1つの頂点は片方のグラフのみに所属)。

上記の条件のもと、2つの部分グラフをつなぐエッジの数を最小にする分割方法は？

$$\mathcal{H} = A \left( \sum_{i \in V} s_i \right)^2 + B \sum_{(i,j) \in E} \frac{1 - s_i s_j}{2} \quad s_i = \pm 1$$

制約等式を  
満たす場合に0

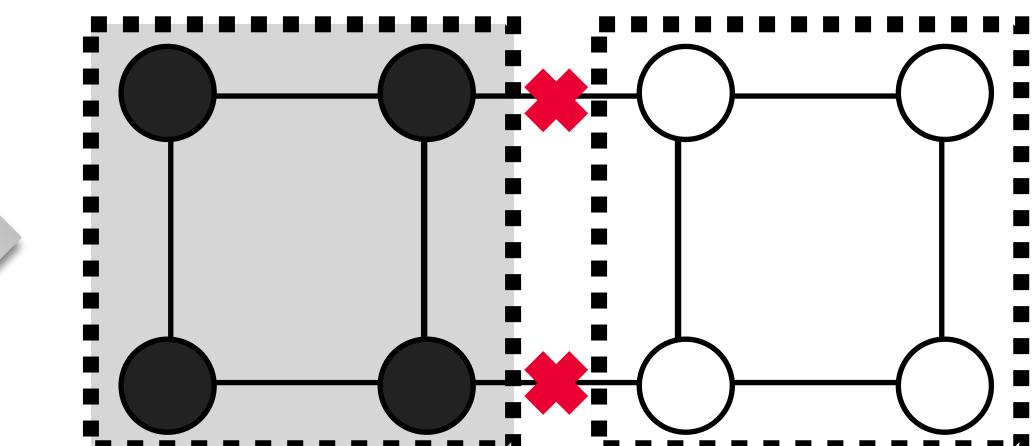
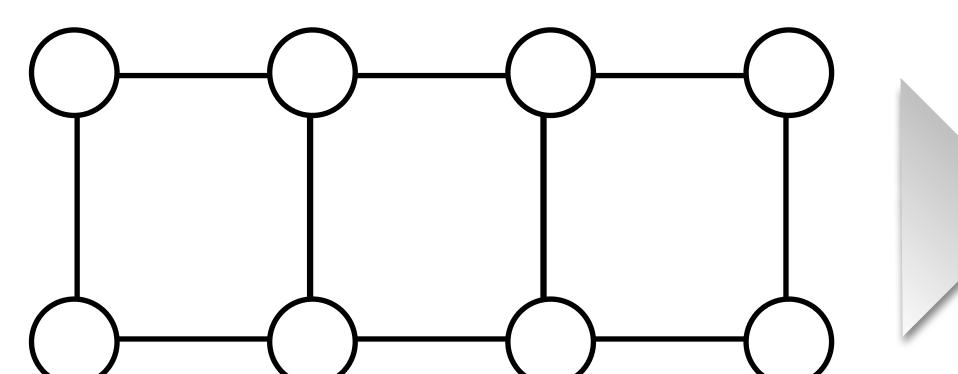


$A > 0$ とすれば  
制約等式を満たす  
場合に安定

- 同じ部分グラフ内は0
- 異なる部分グラフ間は1



$B > 0$ とすれば  
部分グラフ間をつなぐ  
エッジの数が小さい  
場合に安定



# イジングモデルと組合せ最適化問題 (by 共同研究企業エンジニア)

Nextremer Advent Calendar 2016 | 23日目

## 量子アニーリングで組合せ最適化

量子アニーリング 1 最適化 157 Python 10565 量子コンピュータ 14 ML 機械学習 2048

ab\_t 2017年02月03日に更新 12

これはNextremer Advent Calendarの23日目の記事です。

現在、株式会社Nextremerでは早稲田大学の田中宗様と量子アニーリングに関する共同研究を行っております。

[http://qiita.com/ab\\_t/items/8d52096ad0f578aa2224](http://qiita.com/ab_t/items/8d52096ad0f578aa2224)

2017-04  
20 物理のいらない量子アニーリング入門

技術エントリー 分析エントリー

こんにちは、A.I.開発部の太田です。

今回は量子アニーリングの簡単なシミュレータを作ってみたり、実際のD-Waveを使ってみた経験から、物理を専門としない人向けに量子アニーリングについて解説しようと思います。  
(シミュレータのコードはgithubで公開しています。私自身、量子アニーリングについては最近勉強し始めたところなので、色々ご指摘いただけると幸いです。)

さて、私の所属する部署の役割として、機械学習・人工知能関連の技術調査や社内への展開を行っており、その一環として昨年12月に早稲田大学の田中先生をお呼びして開催した量子アニーリング勉強会が社内で大変好評でした。

<http://blog.brainpad.co.jp/entry/2017/04/20/160000>

M メンバー

## ついに出た！量子コンピュータD-Waveを使った非負二値行列因子分解

2017/05/12 Tanahashi

<https://www.rco.recruit.co.jp/career/engineer/blog/dwave03/>

QUANTUM COMPUTING SOLUTIONS

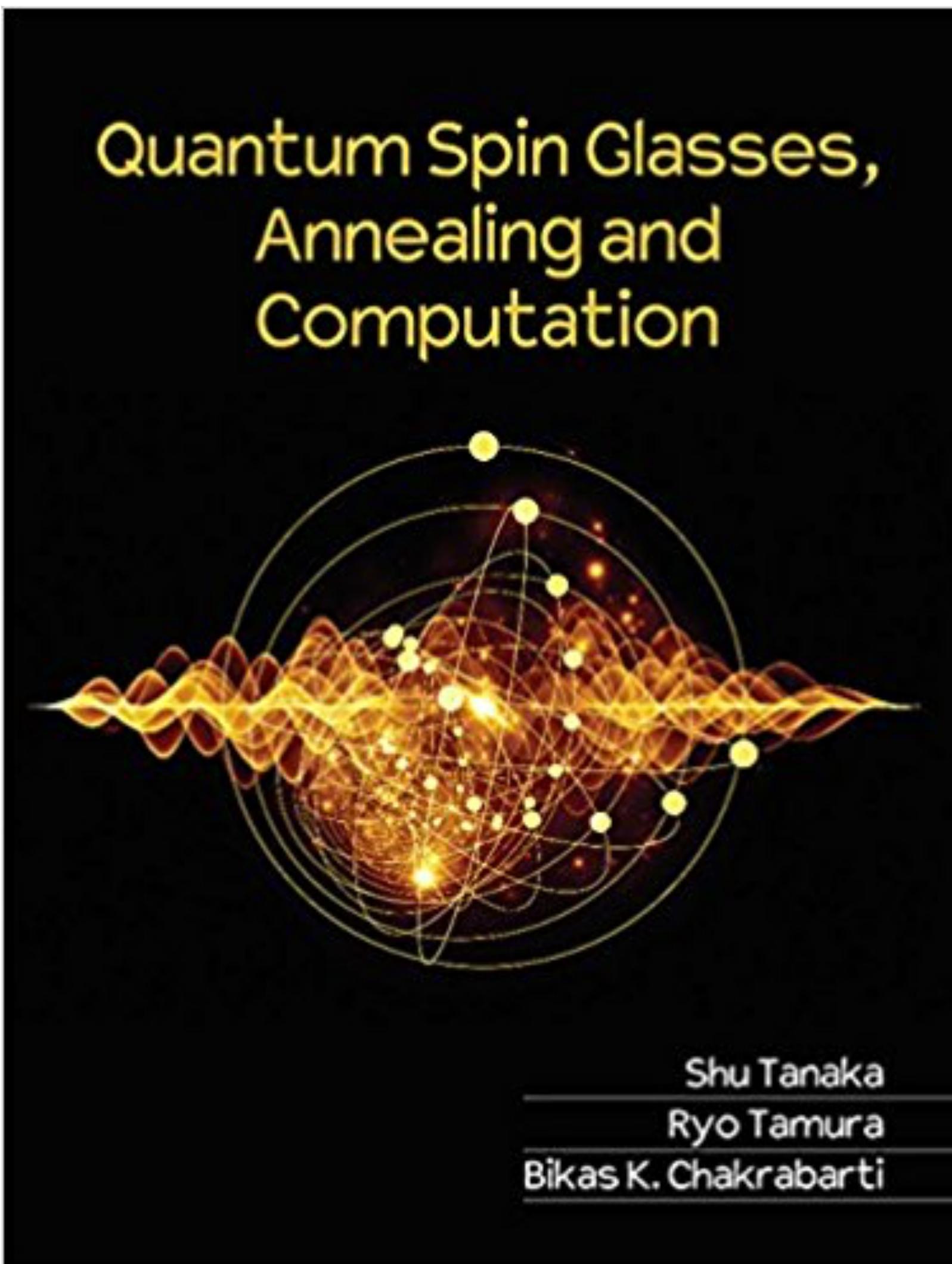
QUANTUM COMPUTER ABOUT CONTACT

## Quantum Computing Information Site

Quantum Computing Information Site (以下「本サイト」) は、高速化ソリューションを提供するフィックスターズの技術者有志が運営する、量子コンピューティングの普及と利用促進を目的とする情報公開と情報交換のためのサイトです。

<https://quantum.fixstars.com>

# イジングモデルと組合せ最適化問題



Quantum Spin Glasses,  
Annealing and  
Computation

frontiers in  
**PHYSICS**

**REVIEW ARTICLE**  
published: 12 February 2014  
doi: 10.3389/fphy.2014.00005



## Ising formulations of many NP problems

**Andrew Lucas\***

*Lyman Laboratory of Physics, Department of Physics, Harvard University, Cambridge, MA, USA*

**Edited by:**

Jacob Biamonte, *ISI Foundation, Italy*

**Reviewed by:**

Mauro Faccin, *ISI Foundation, Italy*

Ryan Babbush, *Harvard University, USA*

Bryan A. O’Gorman, *NASA, USA*

**\*Correspondence:**

Andrew Lucas, *Lyman Laboratory of Physics, Department of Physics, Harvard University, 17 Oxford St., Cambridge, MA 02138, USA*  
e-mail: lucas@fas.harvard.edu

We provide Ising formulations for many NP-complete and NP-hard problems, including all of Karp’s 21 NP-complete problems. This collects and extends mappings to the Ising model from partitioning, covering, and satisfiability. In each case, the required number of spins is at most cubic in the size of the problem. This work may be useful in designing adiabatic quantum optimization algorithms.

**Keywords:** spin glasses, complexity theory, adiabatic quantum computation, NP, algorithms

Shu Tanaka, Ryo Tamura, and Bikas K. Chakrabarti,  
“Quantum Spin Glasses, Annealing and  
Computation” (Cambridge University Press, 2017)

# 量子アニーリング実装の手順とキーワード

解くべき組合せ最適化問題を用意



イジングモデル(2値変数2次形式)で表現

$$\mathcal{H} = - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z - \sum_{i \in V} h_i \sigma_i^z \quad \sigma_i^z = \pm 1$$



統計力学理論

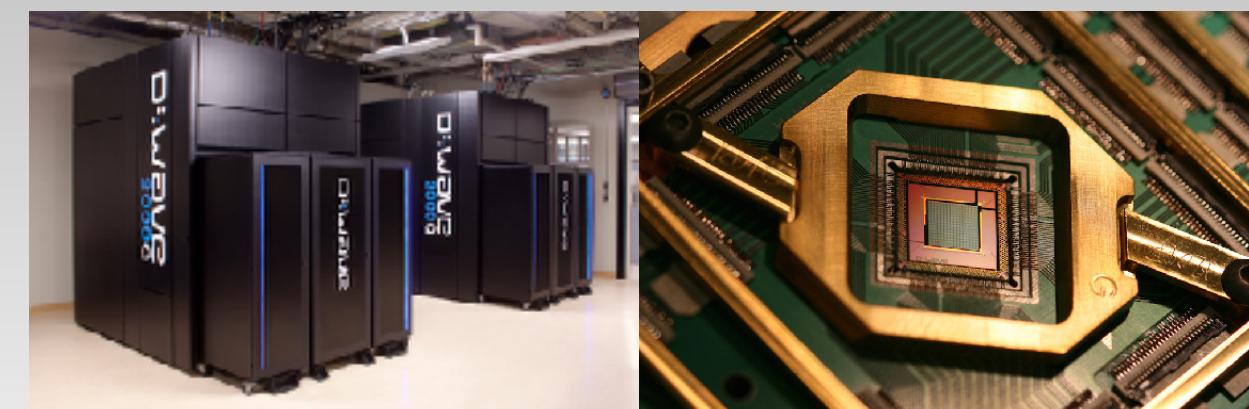


量子並列性



自然計算

量子アニーリングマシンによる自然計算



D-Wave Systems  
webサイトより

測定により解が得られる

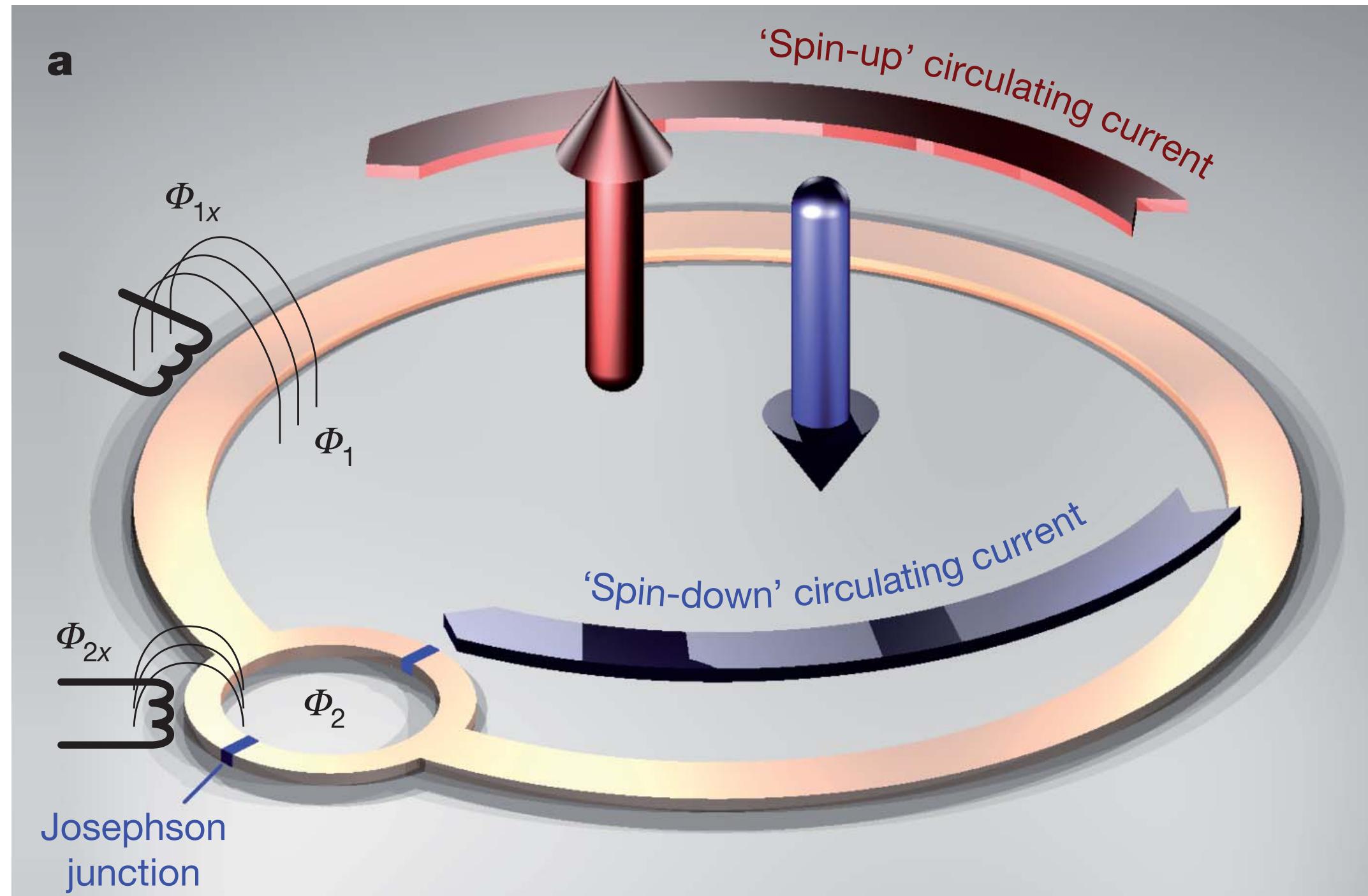
組合せ最適化問題における  
膨大なデータ処理の  
理論基盤

量子重ね合わせ状態を  
初期状態とした情報処理

自然現象を用いた計算

物理学を基礎とする  
新しい計算技術

# D-Waveの超伝導量子ビット



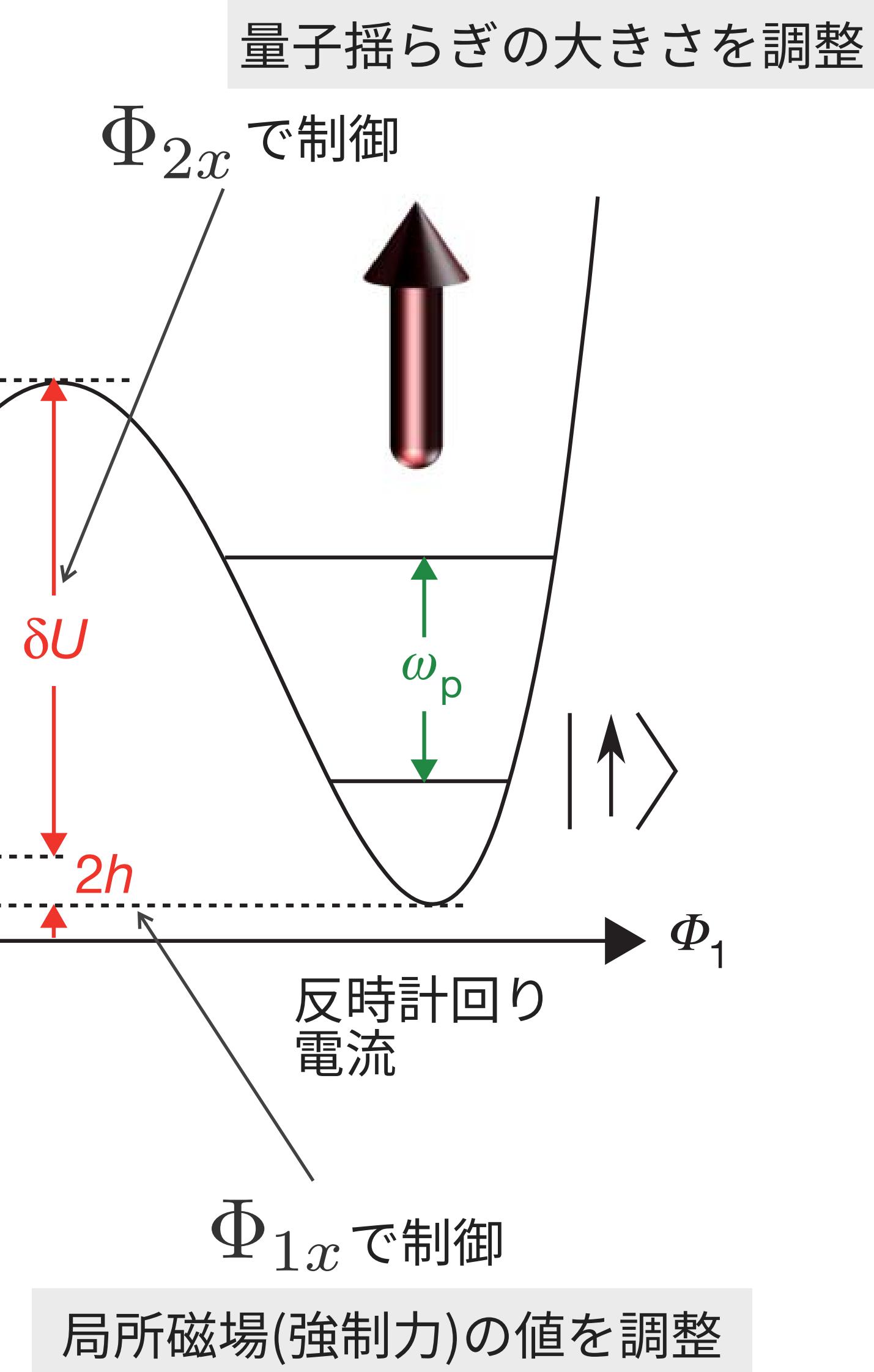
時計回り電流と反時計回り電流の**量子重ね合わせ**状態

$$\alpha | \uparrow \rangle + \beta | \downarrow \rangle$$

$$\hat{\mathcal{H}} = -h\hat{\sigma}^z - \Gamma\hat{\sigma}^x = \begin{pmatrix} -h & -\Gamma \\ -\Gamma & h \end{pmatrix}$$

$\Phi_{1x}$ で制御

$\Phi_{2x}$ で制御



M. W. Johnson et al. Nature Vol. 473, 194 (2011)

# 量子アニーリング実装の手順とキーワード

解くべき組合せ最適化問題を用意



イジングモデル(2値変数2次形式)で表現

$$\mathcal{H} = - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z - \sum_{i \in V} h_i \sigma_i^z \quad \sigma_i^z = \pm 1$$



統計力学理論

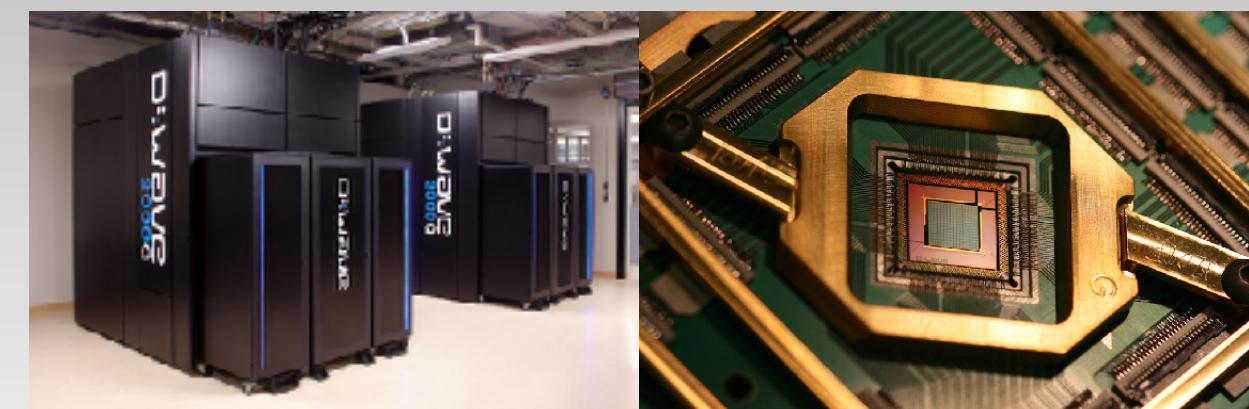


量子並列性



自然計算

量子アニーリングマシンによる自然計算



D-Wave Systems  
webサイトより

測定により解が得られる

組合せ最適化問題における  
膨大なデータ処理の  
理論基盤

量子重ね合わせ状態を  
初期状態とした情報処理

自然現象を用いた計算

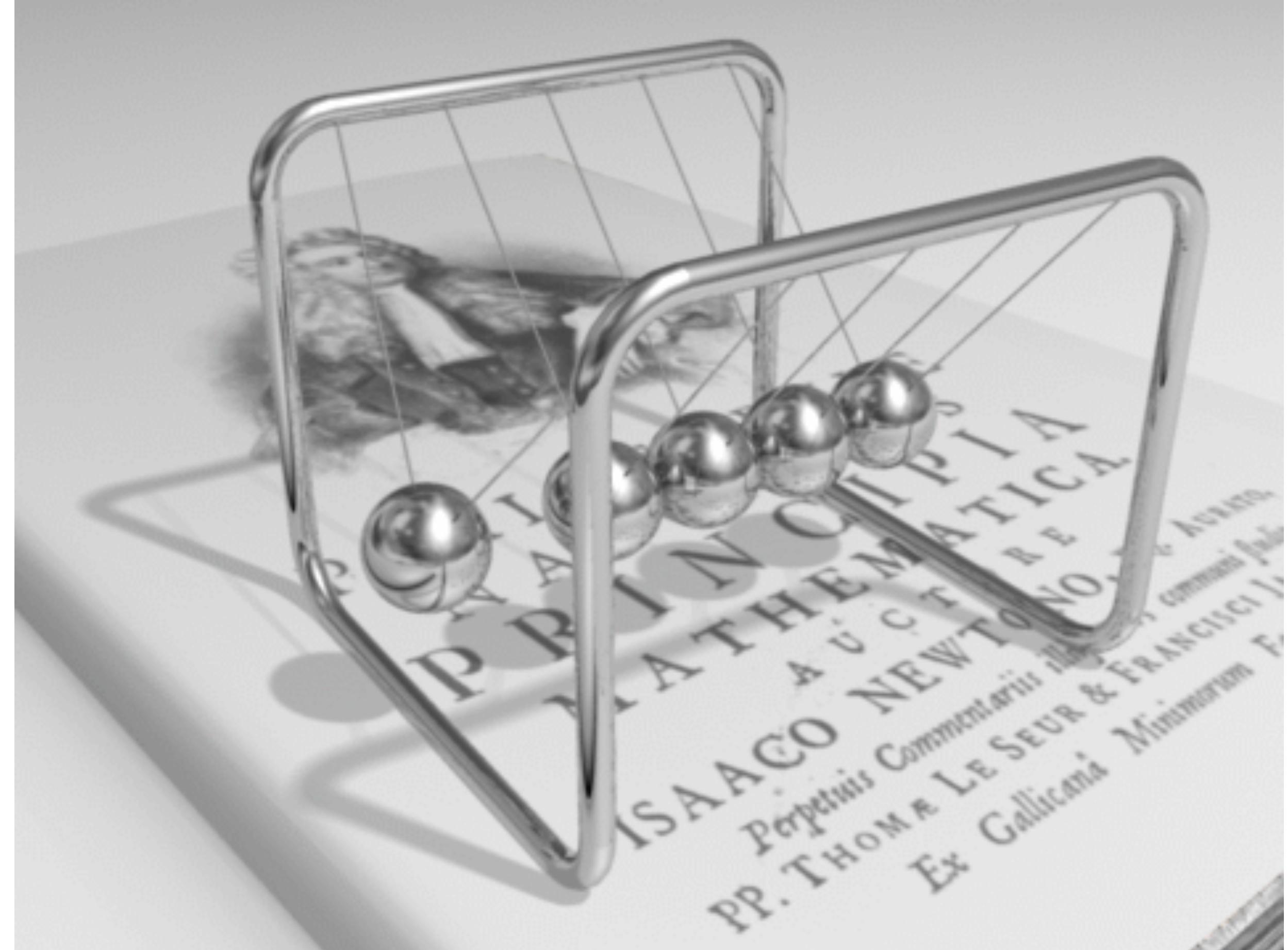
物理学を基礎とする  
新しい計算技術

# 自然現象を記述する言語、物理学

運動方程式を解くと、システムの振る舞いが予言できる。

ニュートンの運動方程式

$$ma = F \rightarrow$$



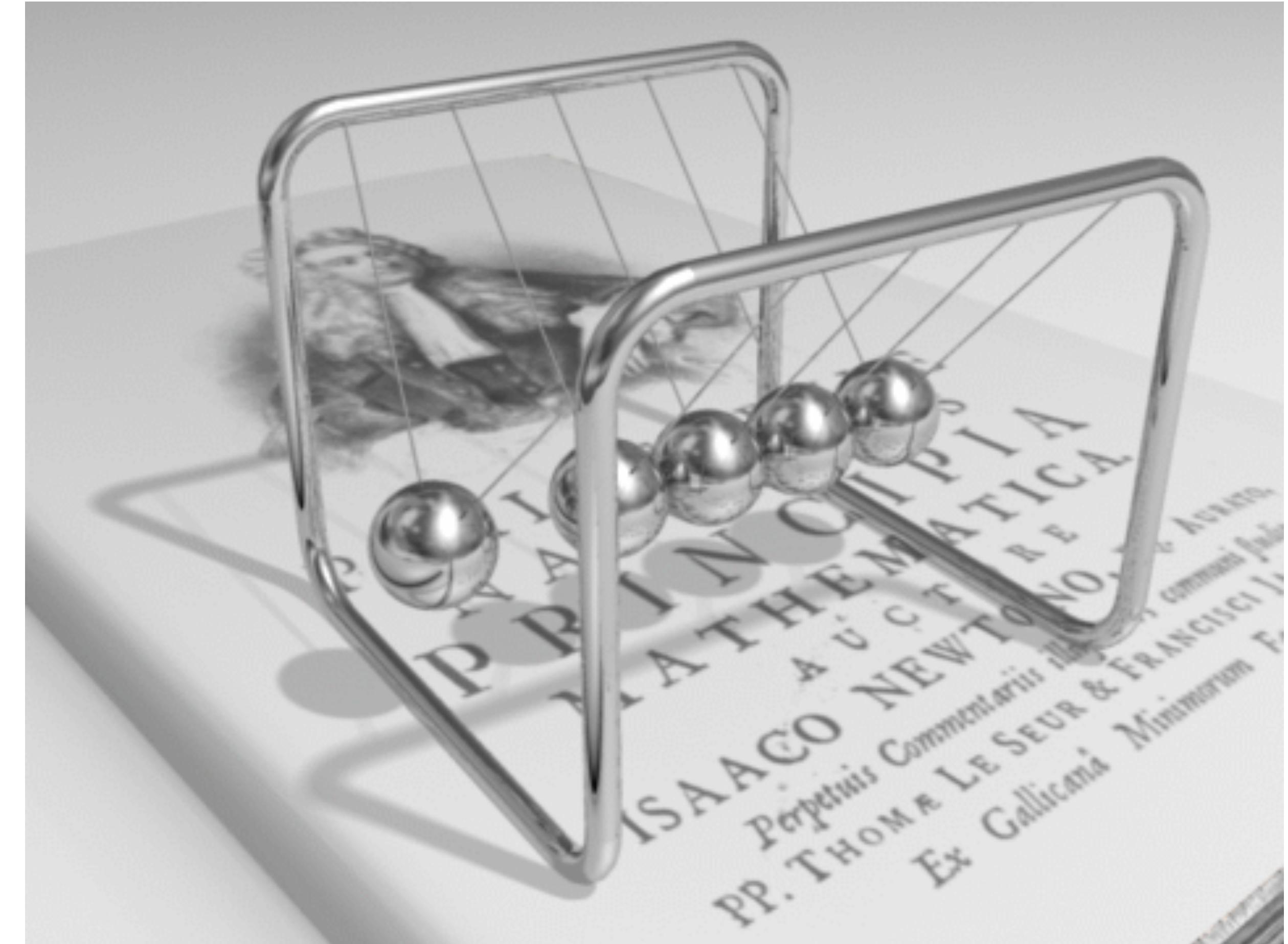
"Newton's cradle" by DemonDeLuxe (Dominique Toussaint)

# 自然現象は、計算

システムの振る舞いが、運動方程式の答えになっている。

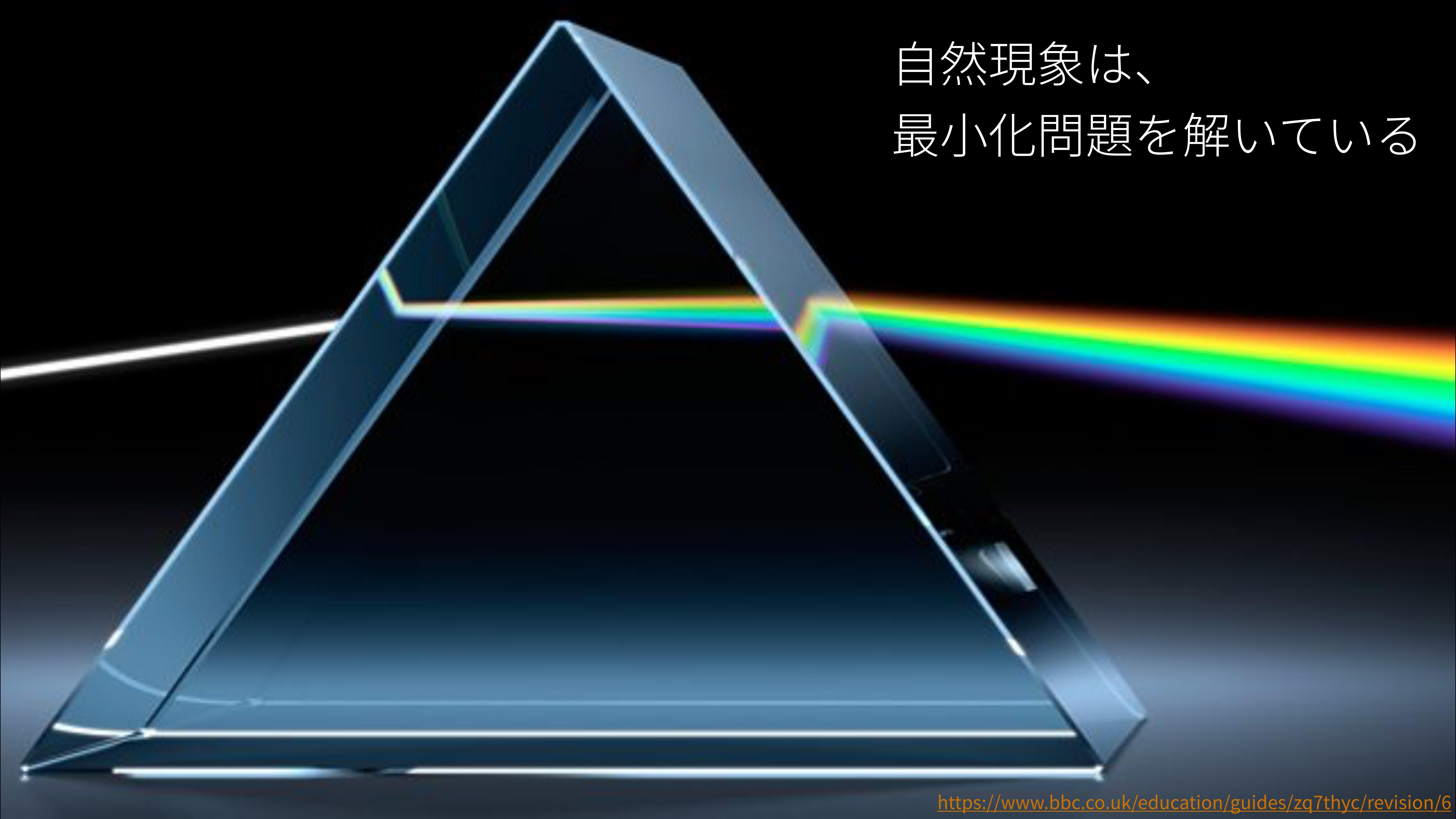
ニュートンの運動方程式

$$ma = F \blacktriangleleft$$



"Newton's cradle" by DemonDeLuxe (Dominique Toussaint)

自然現象は、  
最小化問題を解いている





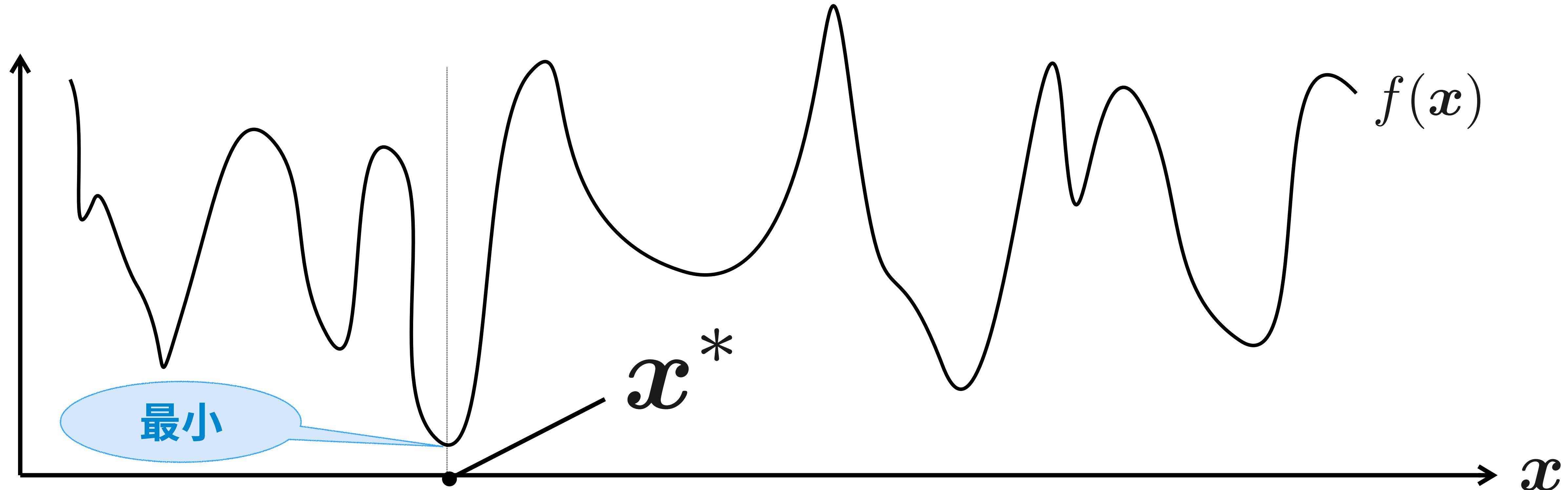
揺らぎを徐々に弱めることにより、組合せ最適化処理を行う方法



# 組合せ最適化問題

離散変数を引数とする実数関数が、最小値を取る条件を探索

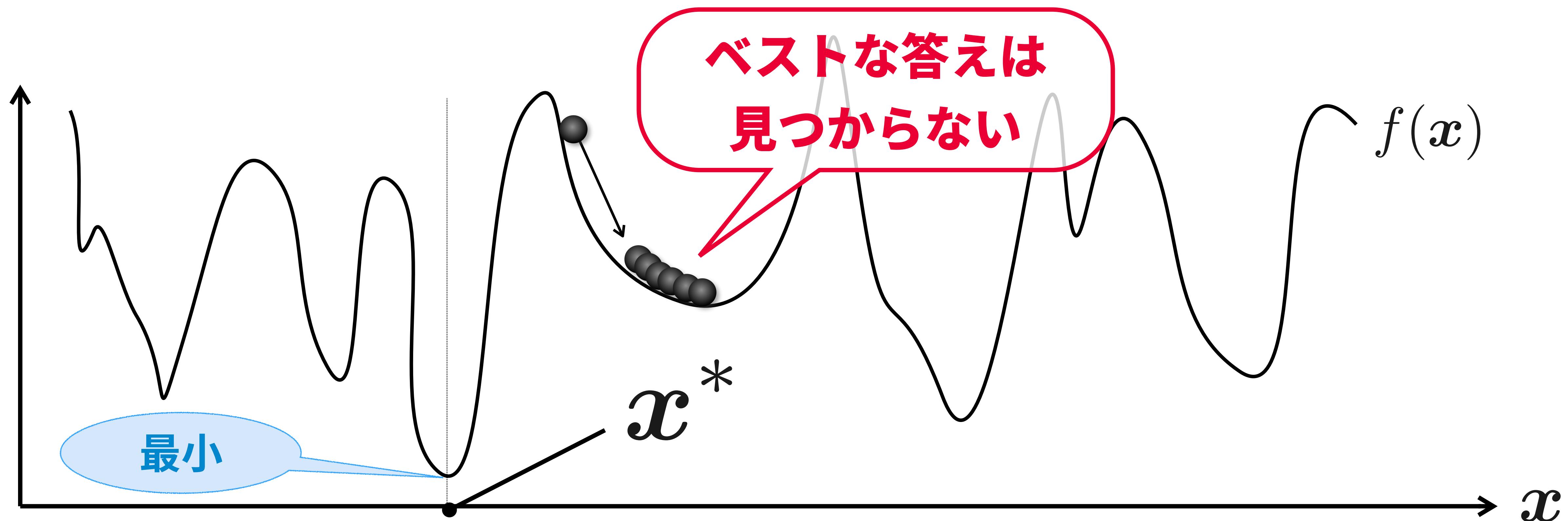
$$x^* = \operatorname{argmin}_x f(x) \quad x = (x_1, \dots, x_N)$$



# 下に向かうだけでは、失敗する

離散変数を引数とする実数関数が、最小値を取る条件を探索

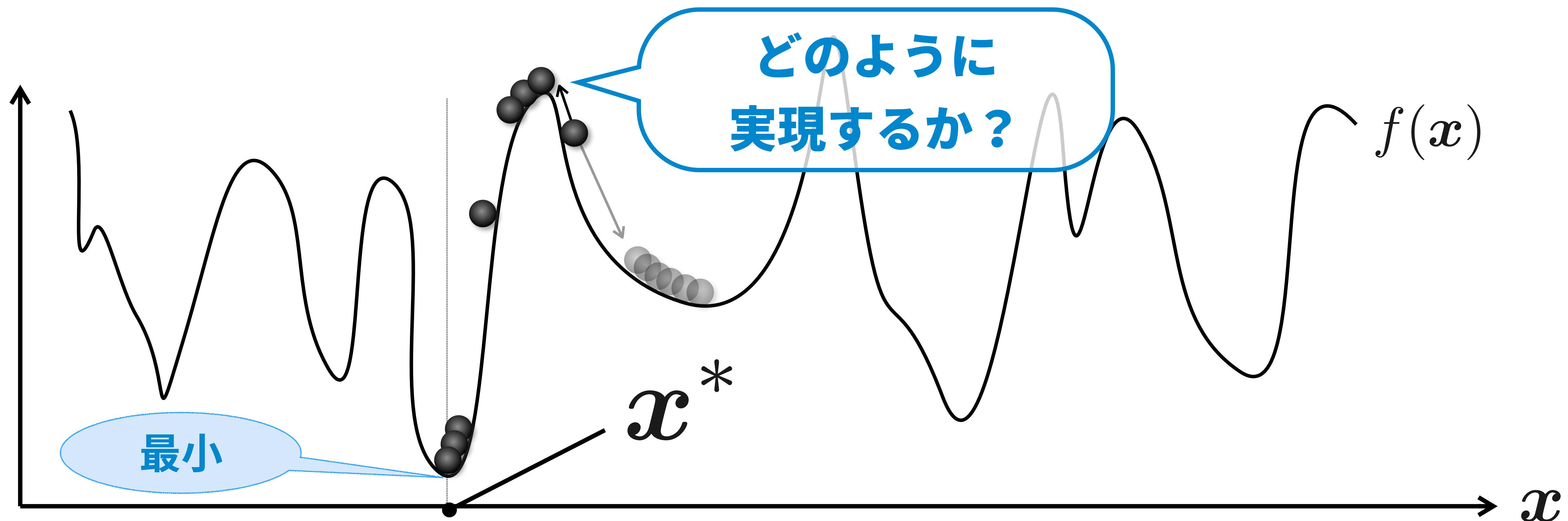
$$x^* = \operatorname{argmin}_x f(x) \quad x = (x_1, \dots, x_N)$$



# 上がるプロセスも、必要

離散変数を引数とする実数関数が、最小値を取る条件を探索

$$x^* = \operatorname{argmin}_x f(x) \quad x = (x_1, \dots, x_N)$$



# 熱ゆらぎ

H<sub>2</sub>O分子の集合体は、温度によって様々な形態を取る。



原子・分子は相互作用や強制力に従い  
安定な構造を自発的に形成する  
ゆらぎ小

低温

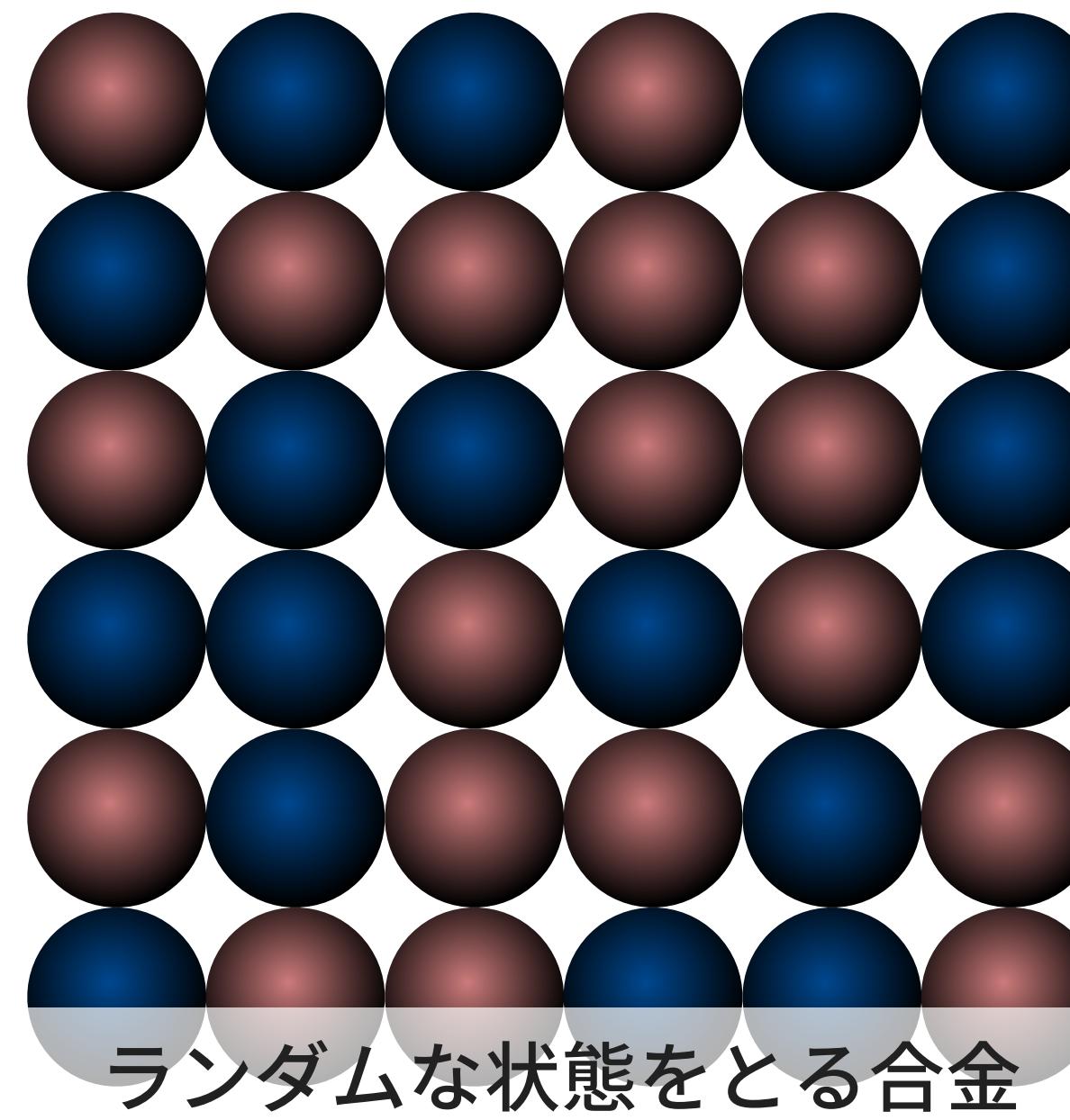
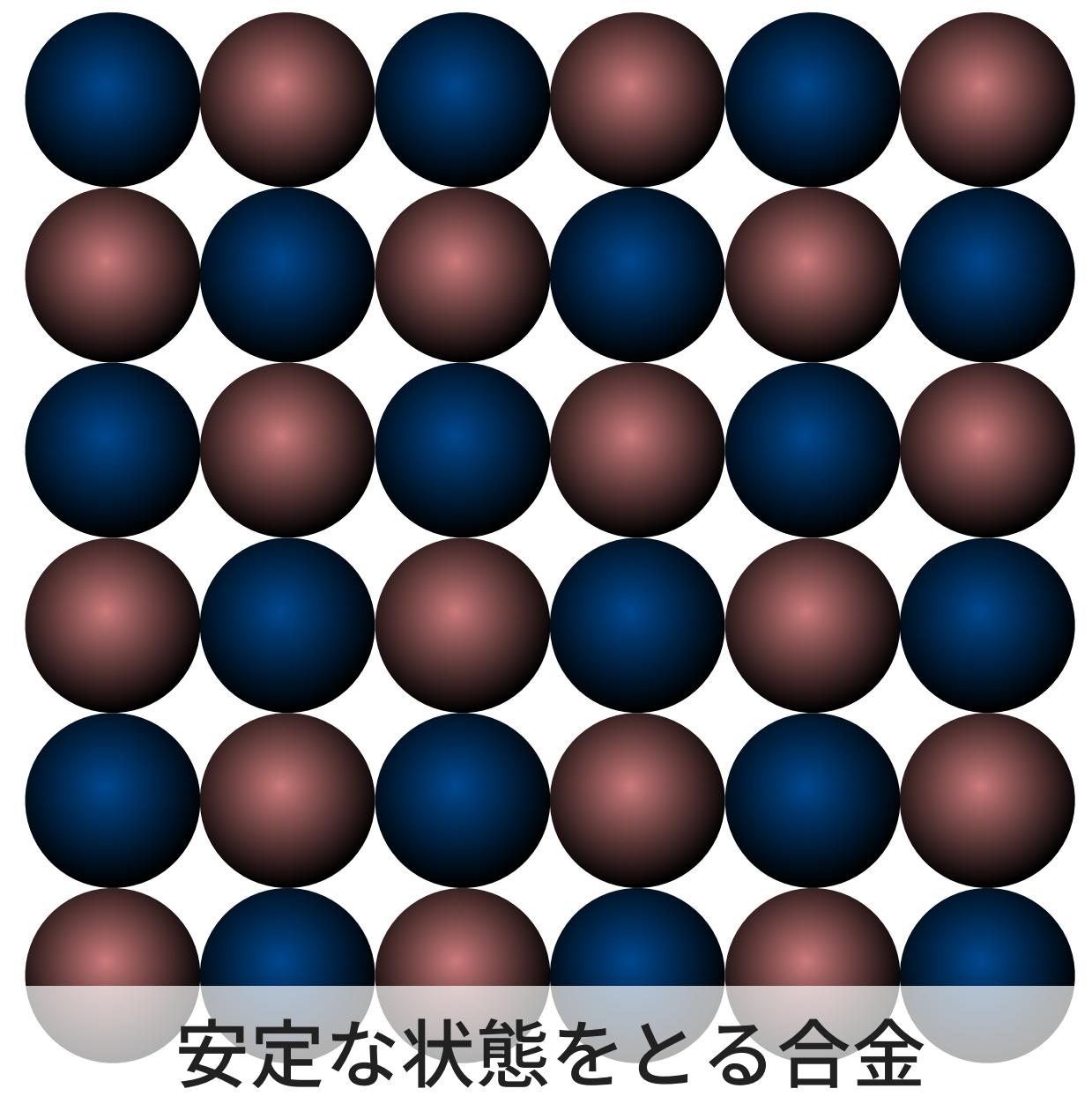
温度

高温

原子・分子は自由に動き回る  
ゆらぎ大

# 熱ゆらぎ

二元合金の安定な構造を作るためには、徐々に冷やす必要がある。



原子・分子は相互作用や強制力に従い  
安定な構造を自発的に形成する  
ゆらぎ小

## アニーリング

原子・分子は自由に動き回る  
ゆらぎ大

低温

温度

高温

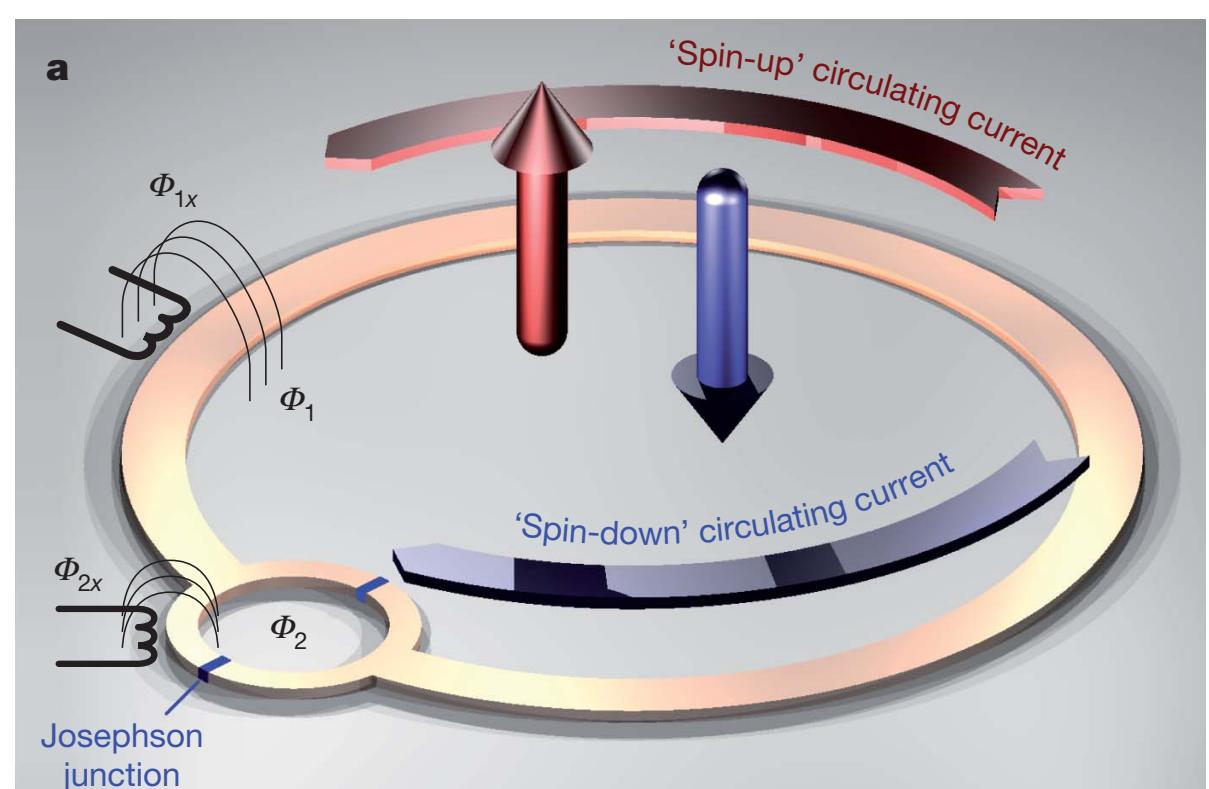
# シミュレーテッドアニーリングと量子アニーリング

量子ゆらぎ効果

## 量子アニーリング

量子効果を徐々に弱める

T. Kadowaki and H. Nishimori,  
Phys. Rev. E, **58**, 5355 (1998).



M. W. Johnson et al. Nature Vol. **473**, 194 (2011)

絶対ゼロ度  
(基底状態)

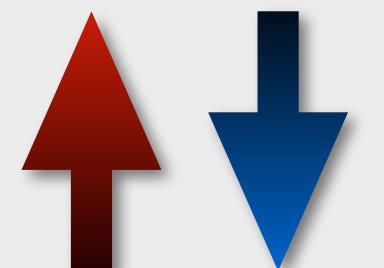
## イジングモデル

$$\mathcal{H} = - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} s_i s_j - \sum_{i \in V} h_i s_i$$

スピン(ビット)間相互作用

スピン(ビット)に働く局所磁場(強制力)

$$s_i = \pm 1$$



シミュレーテッドアニーリング  
温度を徐々に下げる

S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt, and M. P. Vecchi, Science, **220**, 671 (1983).

温度  
(熱ゆらぎ効果)

# 量子アニーリングマシンの実際

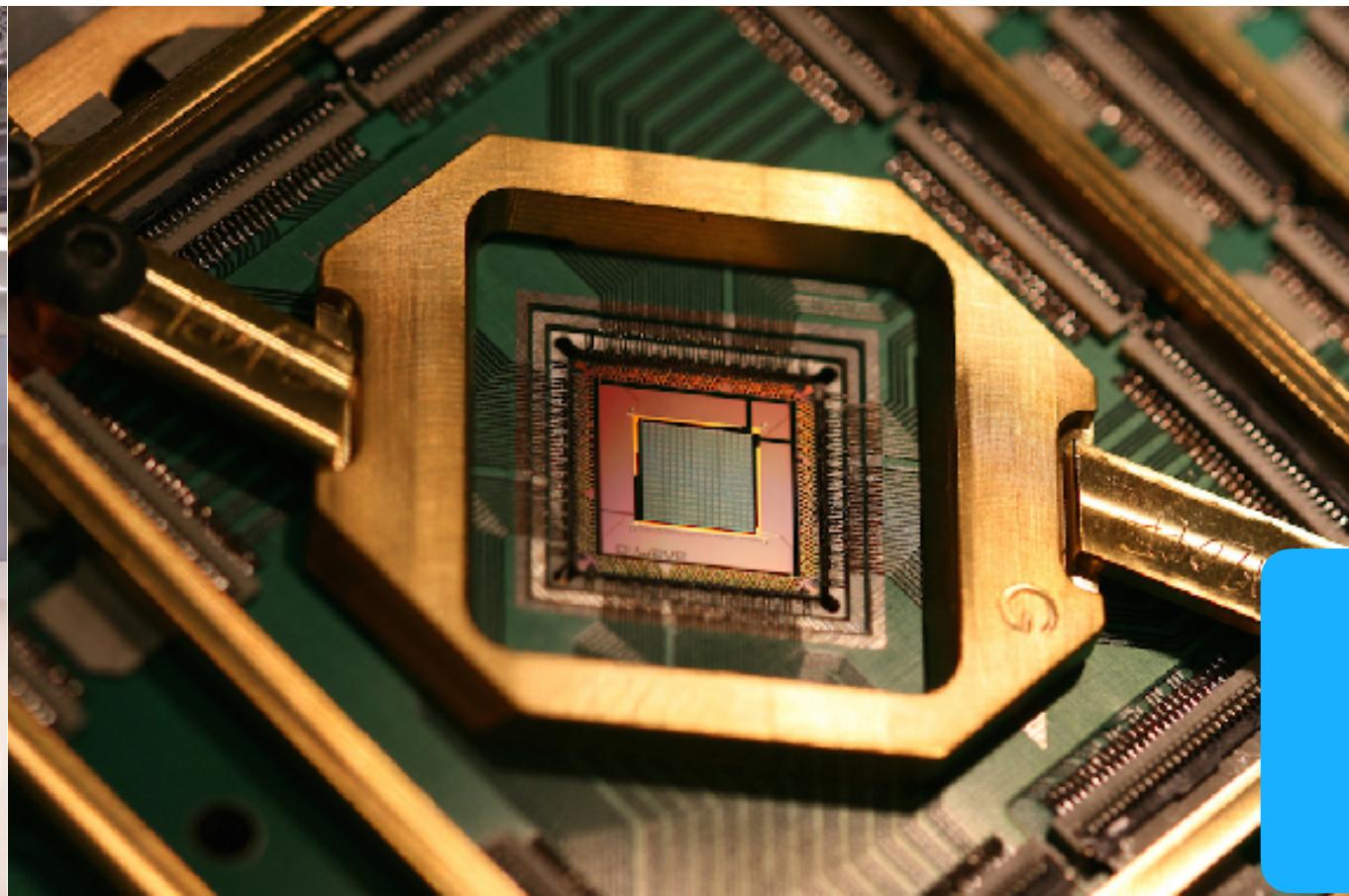
# 量子アニーリングの歴史

## 日本の超伝導エレクトロニクス分野の技術の結晶

Y. Nakamura, Y. A. Pashkin, and J. S. Tsai, *Nature* **398**, 786 (1999).  
M. Hosoya, W. Hioe, J. Casas, R. Kamikawai, Y. Harada, Y. Wada, H. Nakane,  
R. Suda, and E. Goto, *IEEE Trans. on Appl. Supercond.* **1**, 77 (1991).



D-Wave Systems webサイトより



「1億倍速い計算」  
(Google)

様々な研究組織・  
企業による研究が  
活発化

2048  
ビット

1152  
ビット

512ビット

Google他が導入

世界初商用量子ア  
ニーリングマシン  
(D-Wave)

128ビット

門脇・西森(東工大)  
による理論的提案

1998年

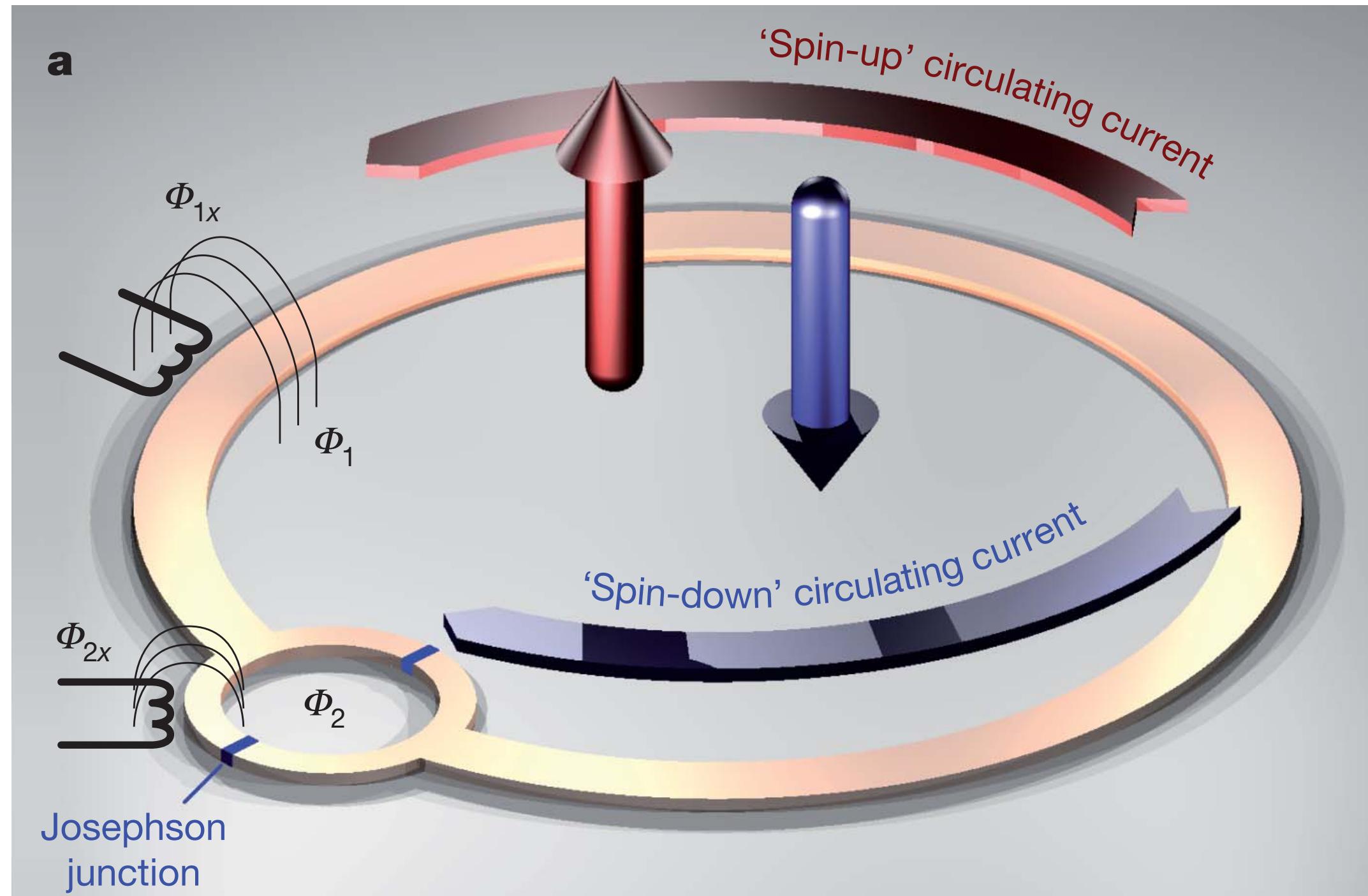
2011年

2013年

2015年

2017年

# D-Waveの超伝導量子ビット



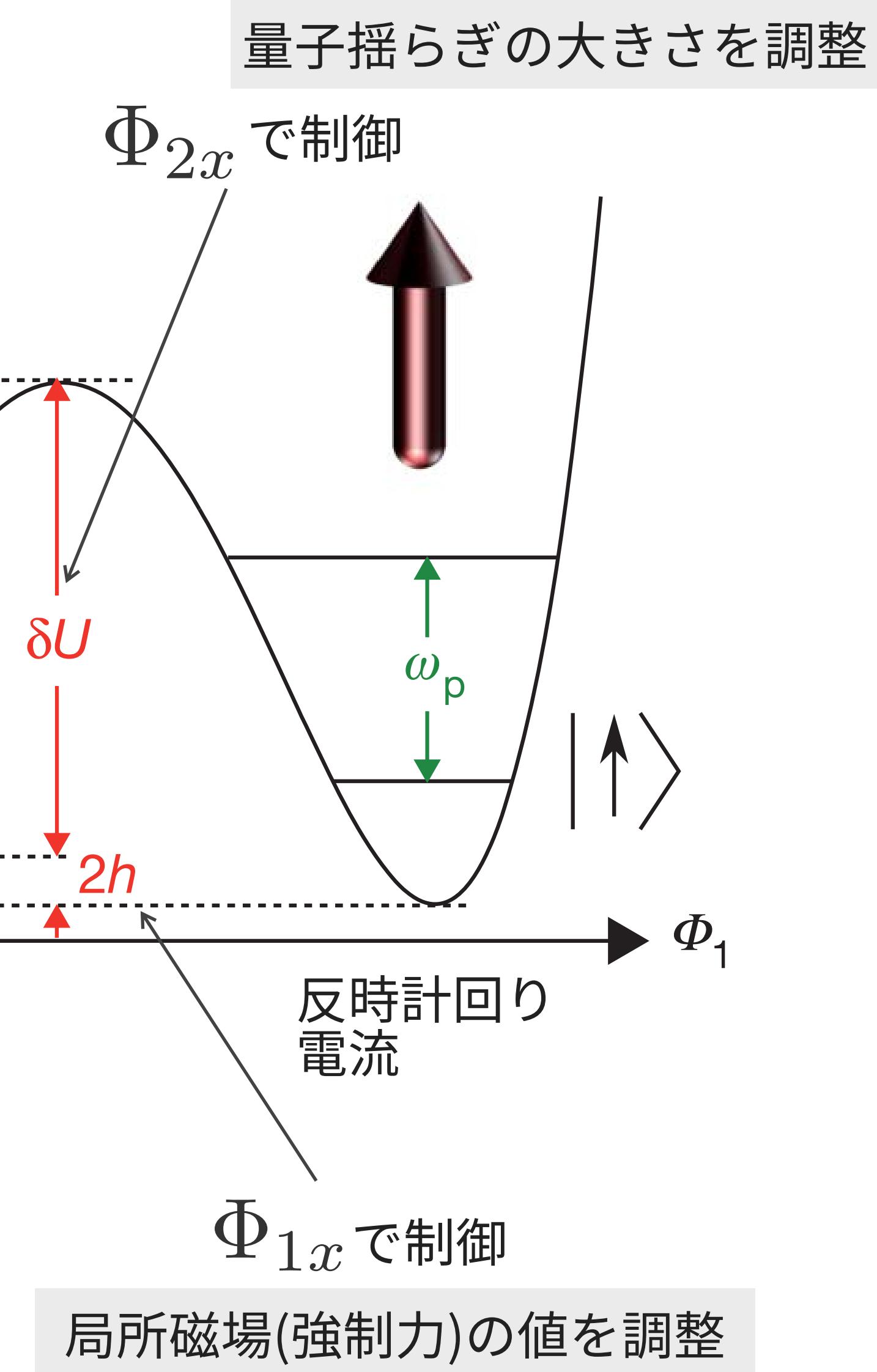
時計回り電流と反時計回り電流の**量子重ね合わせ**状態

$$\alpha | \uparrow \rangle + \beta | \downarrow \rangle$$

$$\hat{\mathcal{H}} = -h\hat{\sigma}^z - \Gamma\hat{\sigma}^x = \begin{pmatrix} -h & -\Gamma \\ -\Gamma & h \end{pmatrix}$$

$\Phi_{1x}$ で制御

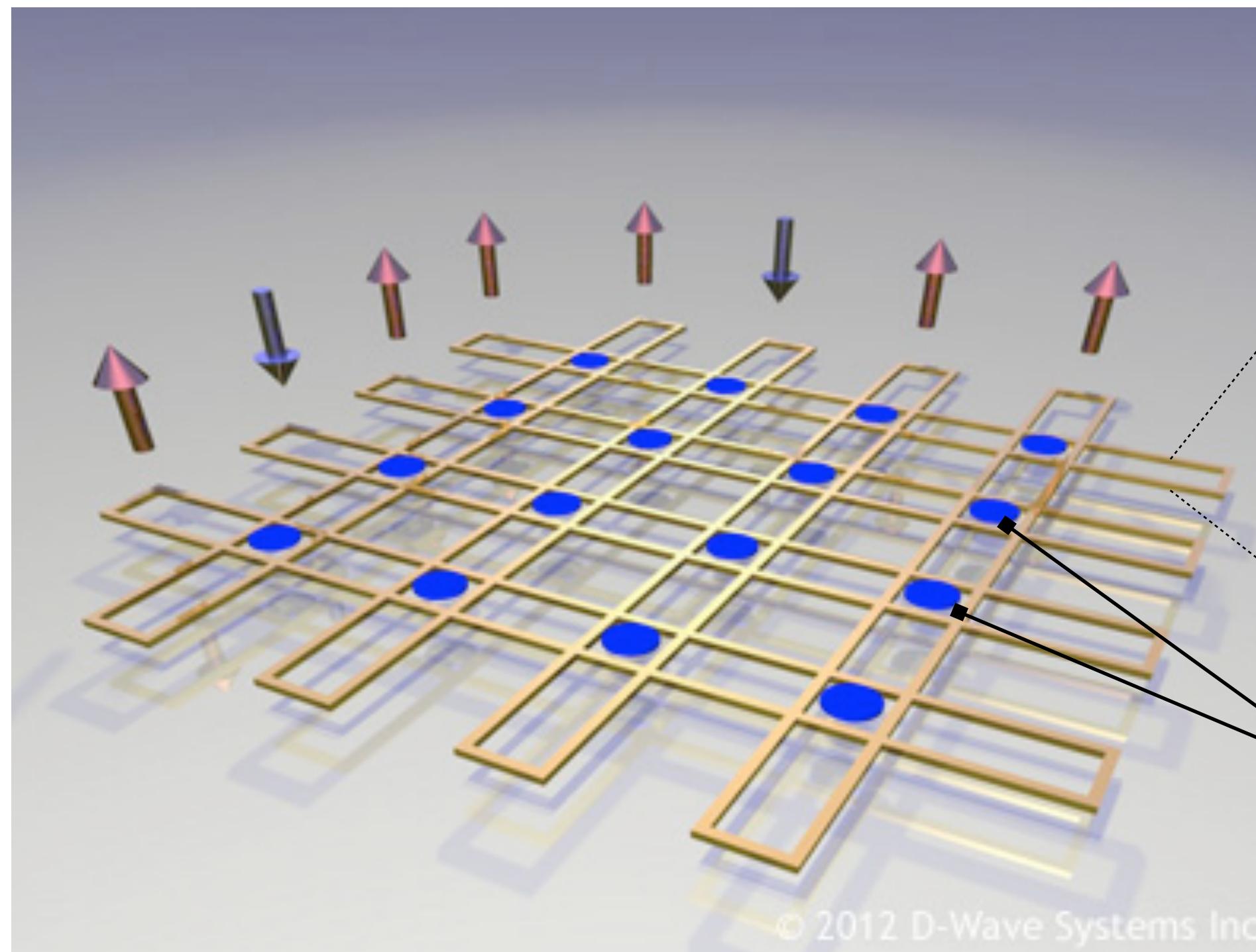
$\Phi_{2x}$ で制御



M. W. Johnson et al. Nature Vol. 473, 194 (2011)

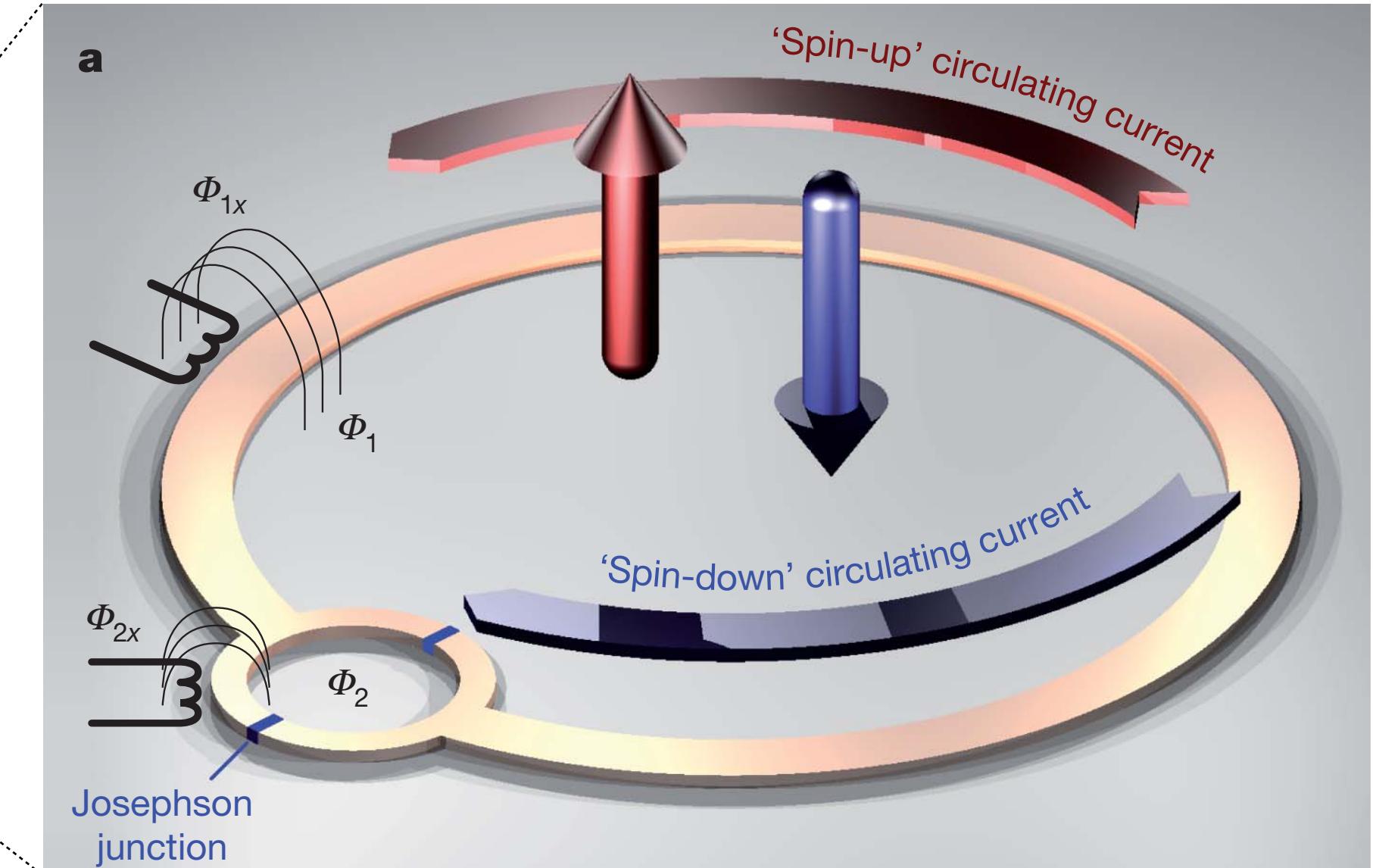
# D-Waveの量子ビットユニット

量子ビット8つで、1ユニット

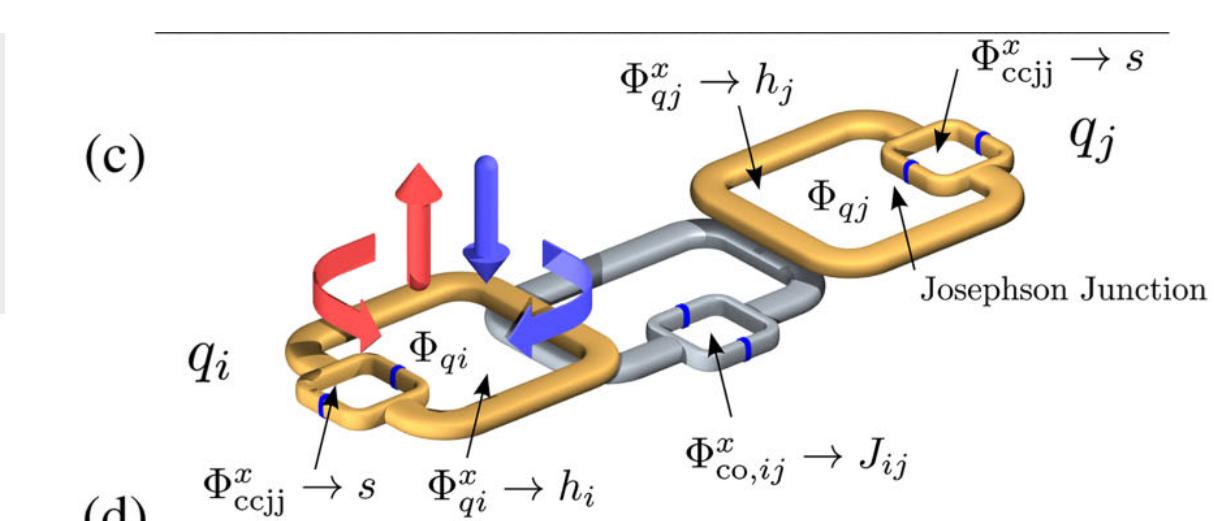


縦横4つの量子ビットが交差

$$\mathcal{H}_{\text{opt}} = \sum_{i,j=1}^N J_{ij} \hat{\sigma}_i^z \hat{\sigma}_j^z + \sum_{i=1}^N h_i \hat{\sigma}_i^z \quad \hat{\sigma}_i^z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$



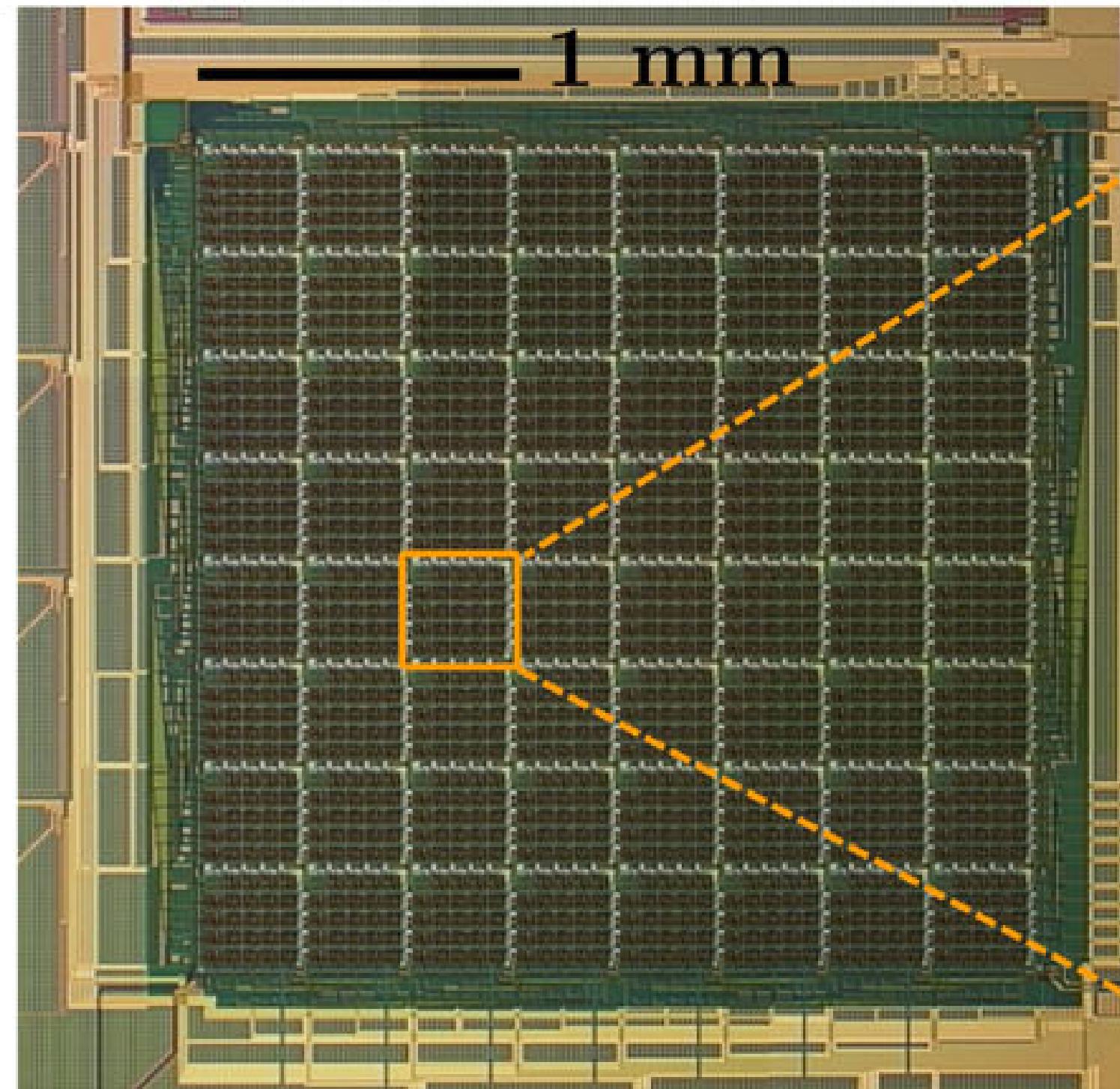
量子ビット間の相互作用  
を調整(coupler)



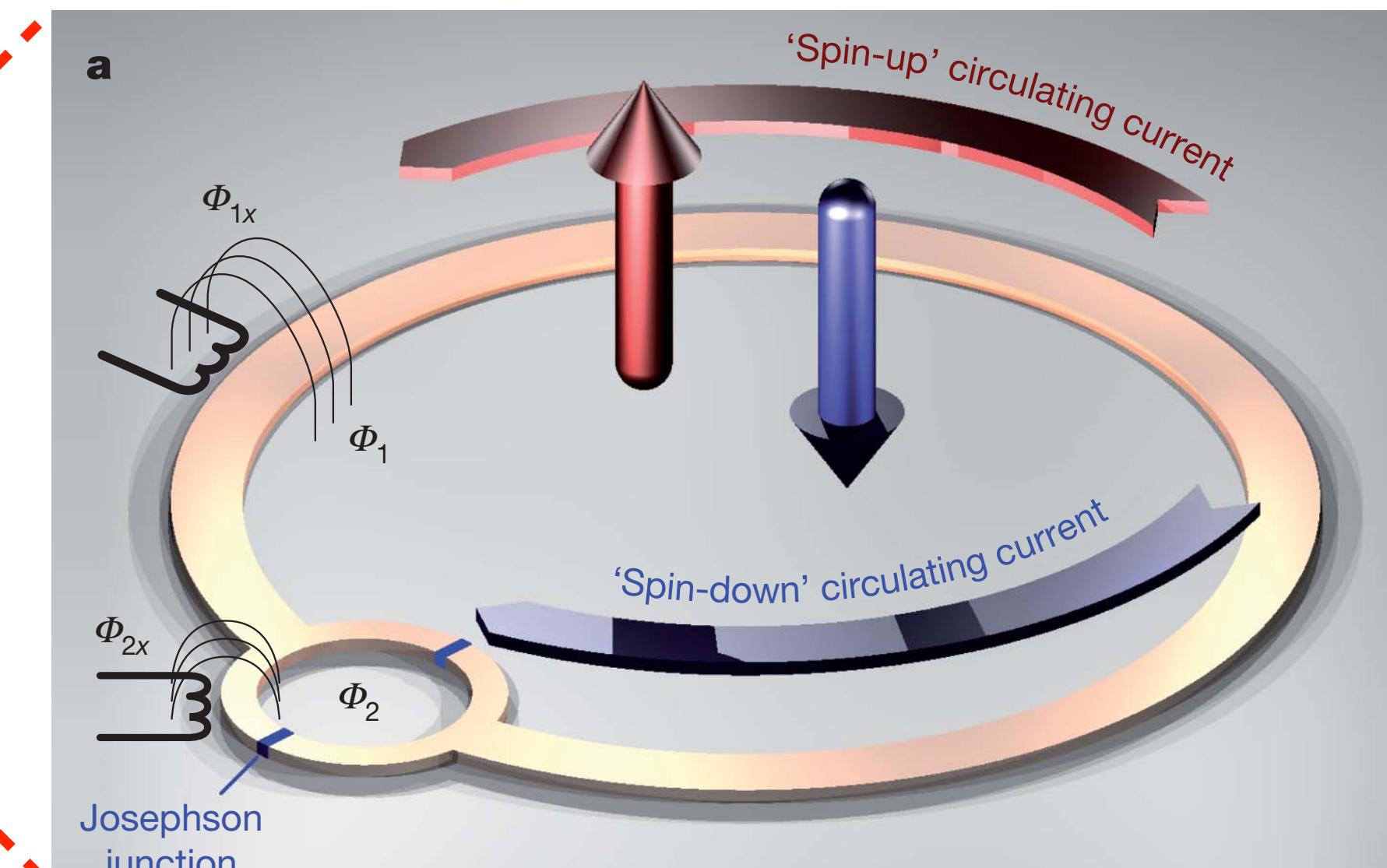
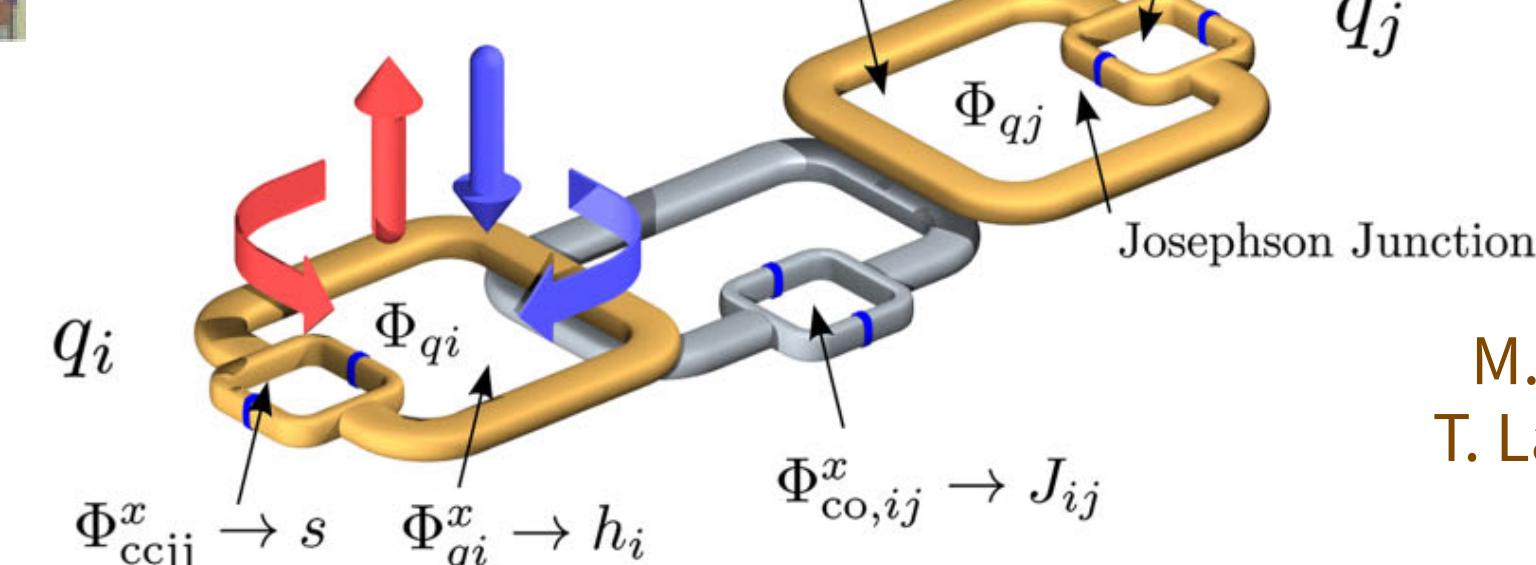
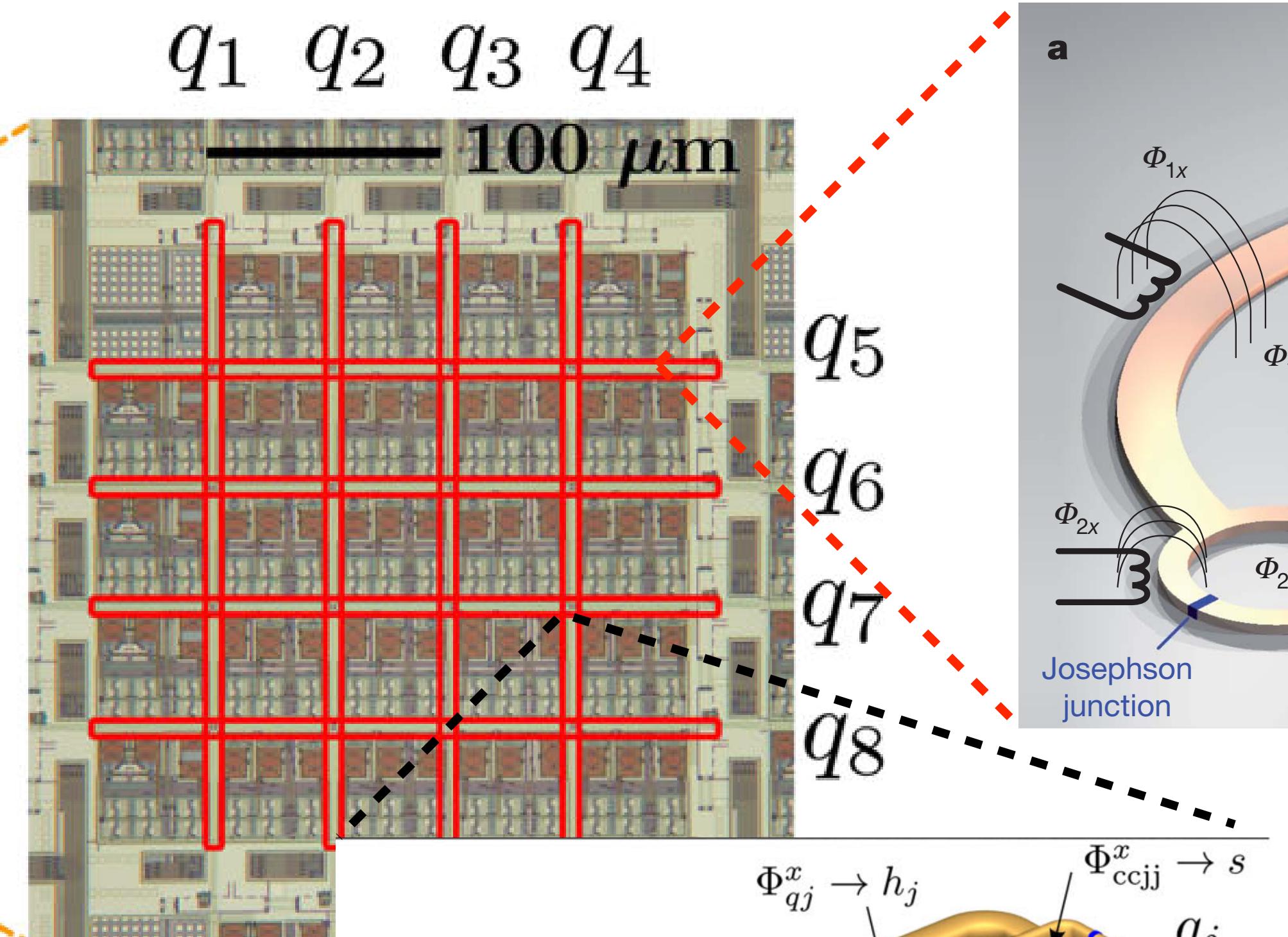
M. W. Johnson et al. Nature Vol. 473, 194 (2011)  
T. Lanting et al. Phys. Rev. X Vol. 4, 021041 (2014)  
D-Wave Systems Inc. webサイトより

# D-Waveの量子ビットネットワーク

2.5mm四方に、512量子ビットを配列(D-Wave Two)



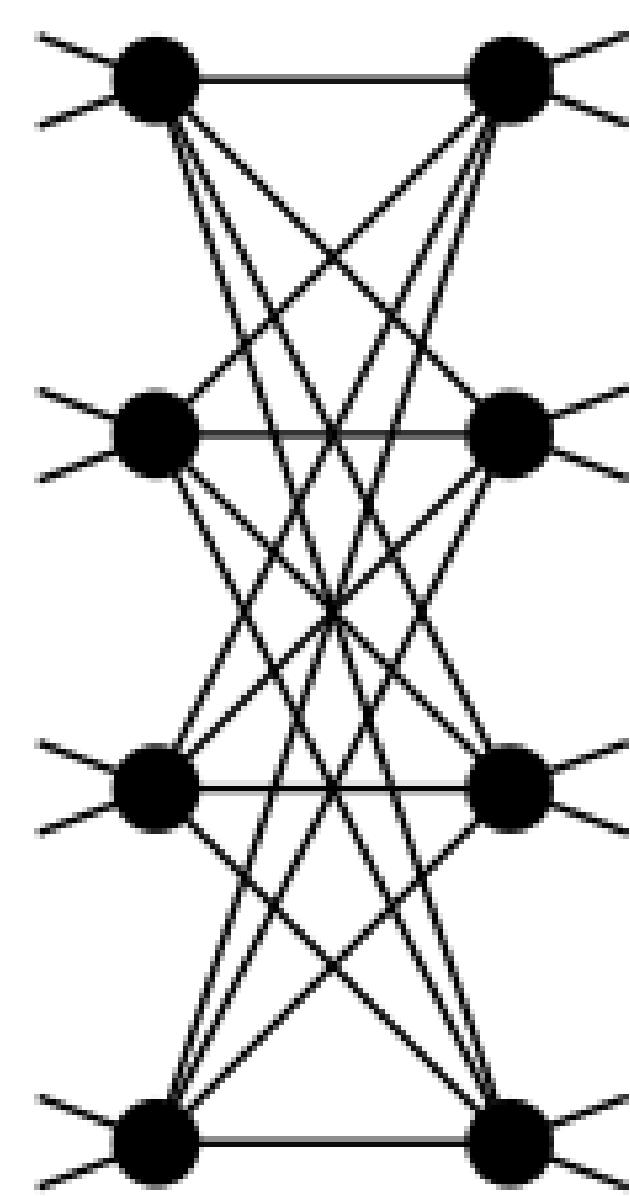
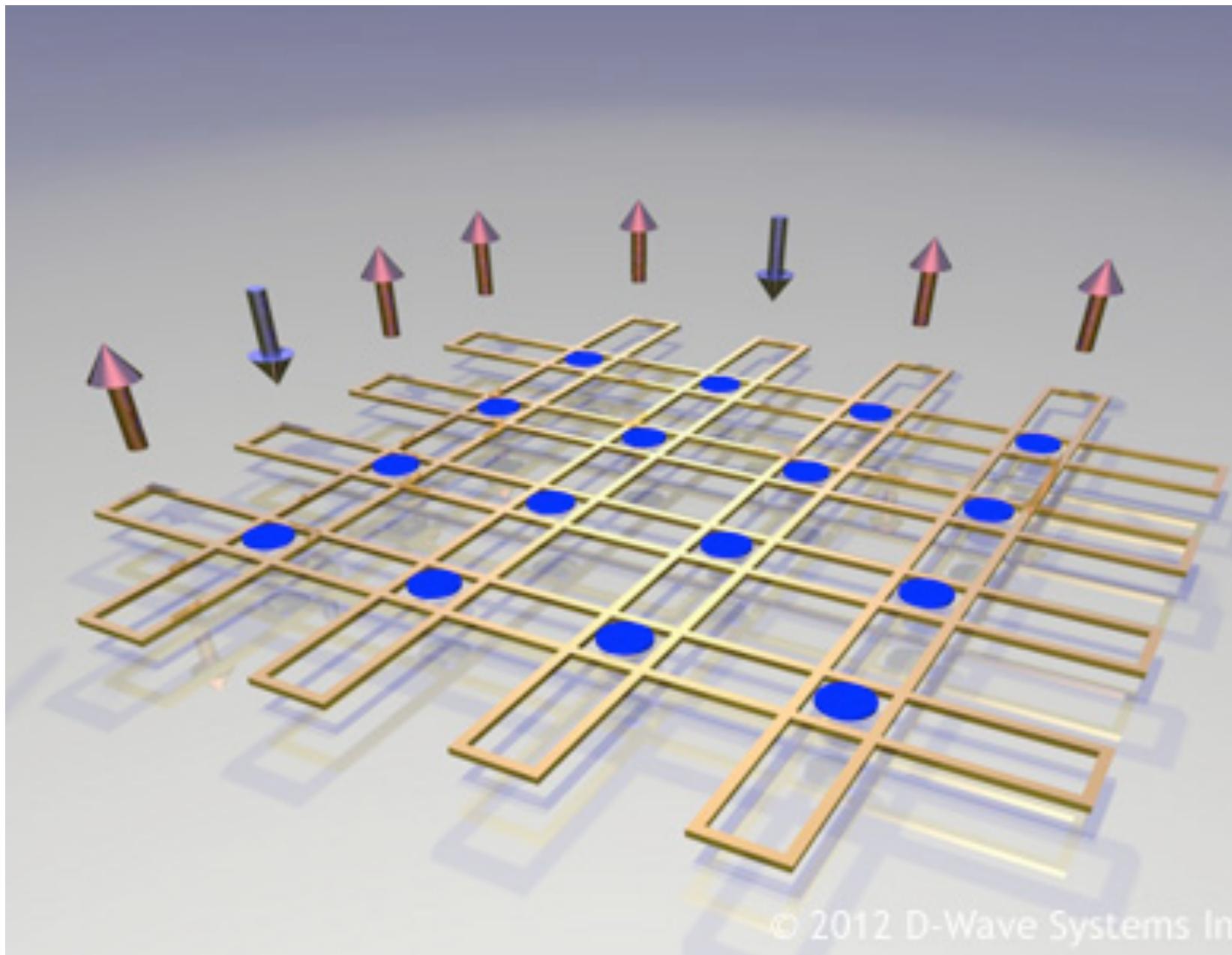
$8 \times 64 = 512$ 量子ビット



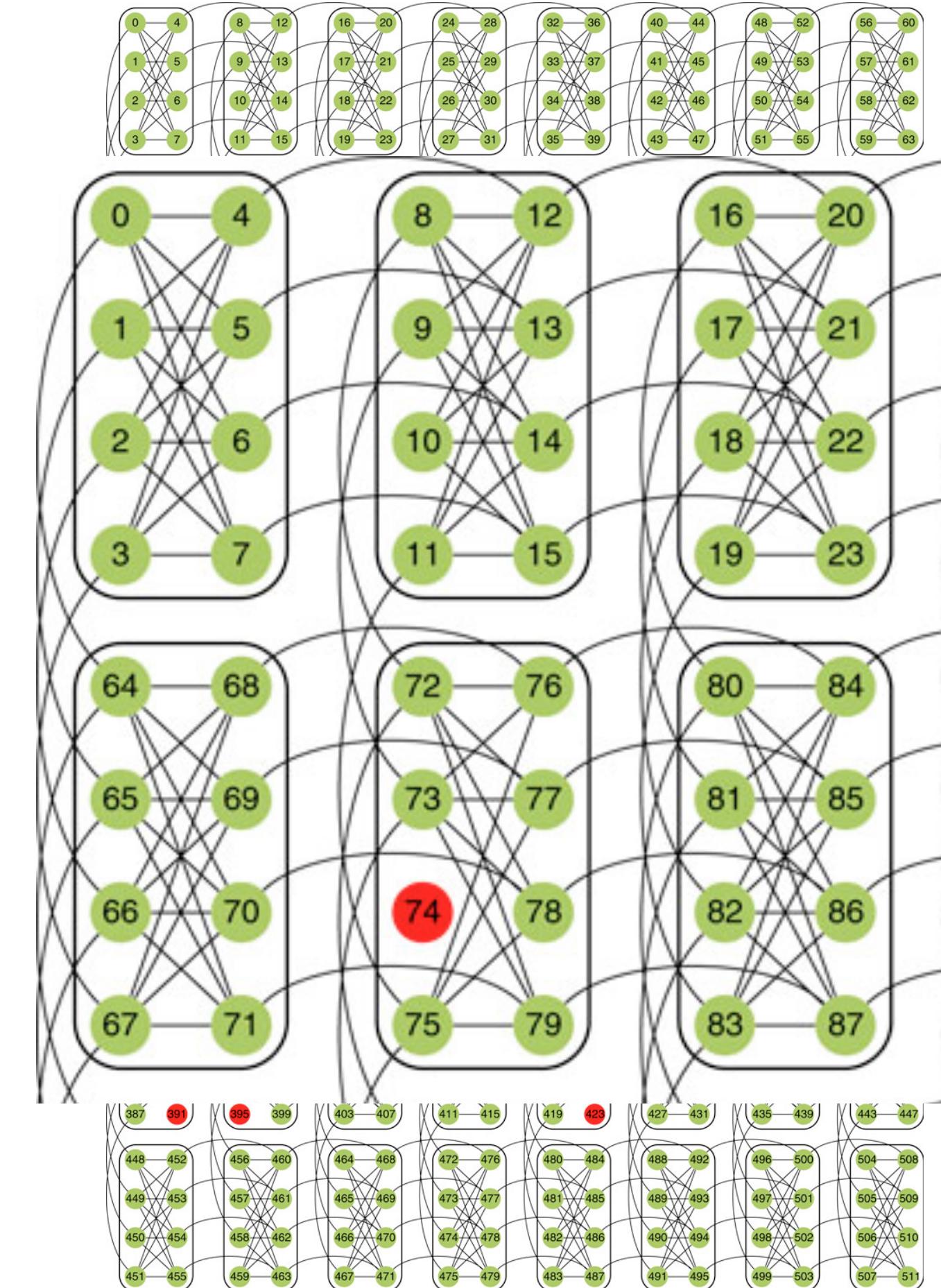
M. W. Johnson et al. Nature Vol. 473, 194 (2011)  
T. Lanting et al. Phys. Rev. X Vol. 4, 021041 (2014)  
D-Wave Systems Inc. webサイトより

# D-Waveの量子ビットネットワーク

## 1ユニット(8量子ビット)



## ユニット間相互作用ネットワーク



D-Wave Systems Inc. webサイトより  
K. L. Pudenz et al. Nature Communications, 5, 3243 (2014)

# D-Waveの量子ビットネットワークへの埋込

対象とする組合せ最適化問題

$$\mathcal{H} = A \left( \sum_{i \in V} s_i \right)^2 + B \sum_{(i,j) \in E} \frac{1 - s_i s_j}{2} \quad s_i = \pm 1$$

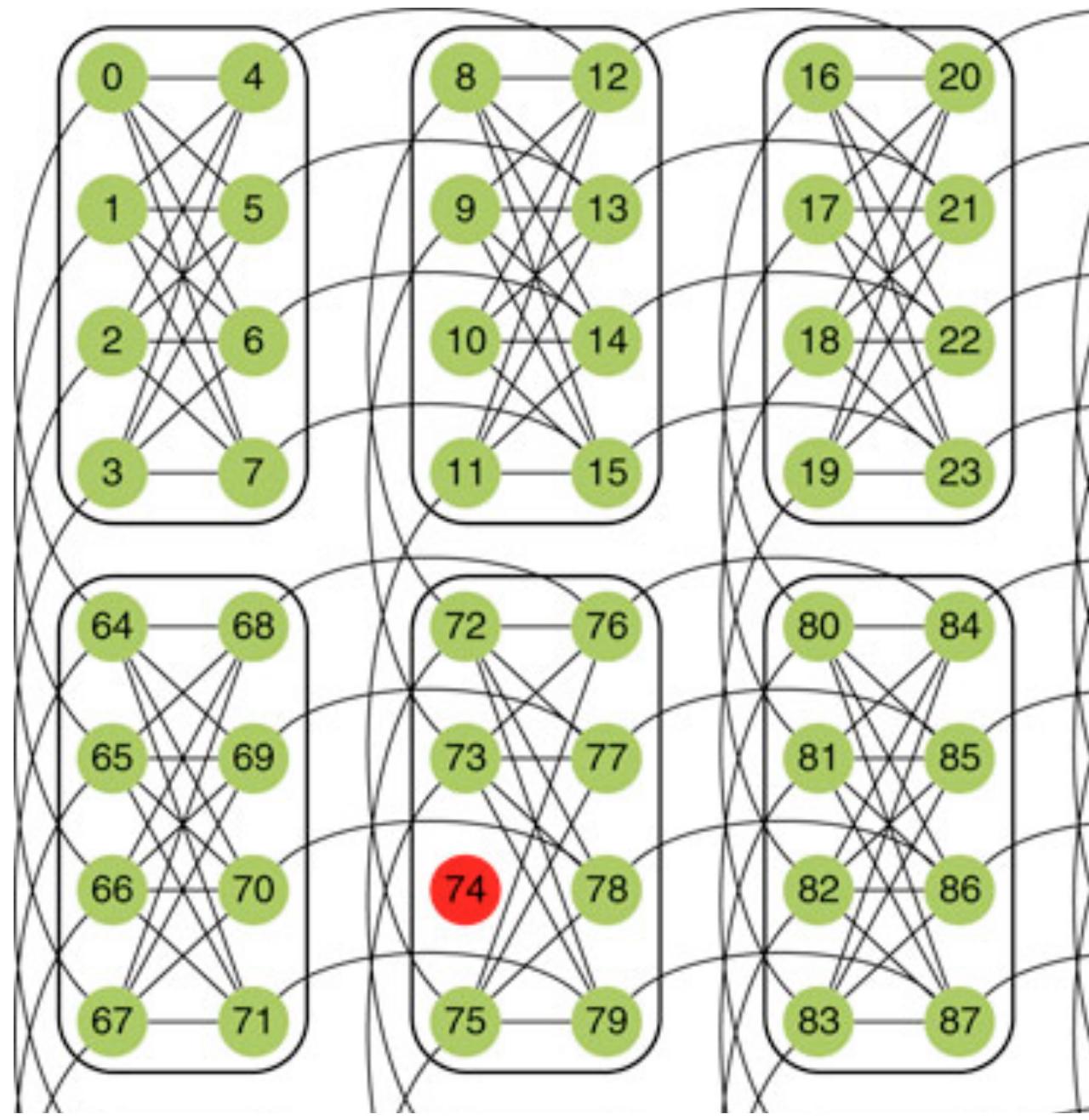
互いに異なる頂点間に相互作用がある

$$\left( \sum_{i \in V} s_i \right)^2 = \left( \sum_{i \in V} s_i \right) \left( \sum_{j \in V} s_j \right) = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} s_i s_j$$

グラフ変換が必要になる(**困難**)

$$G_{\text{logical}} = (V_{\text{logical}}, E_{\text{logical}}) \rightarrow G_{\text{physical}} = (V_{\text{physical}}, E_{\text{physical}})$$

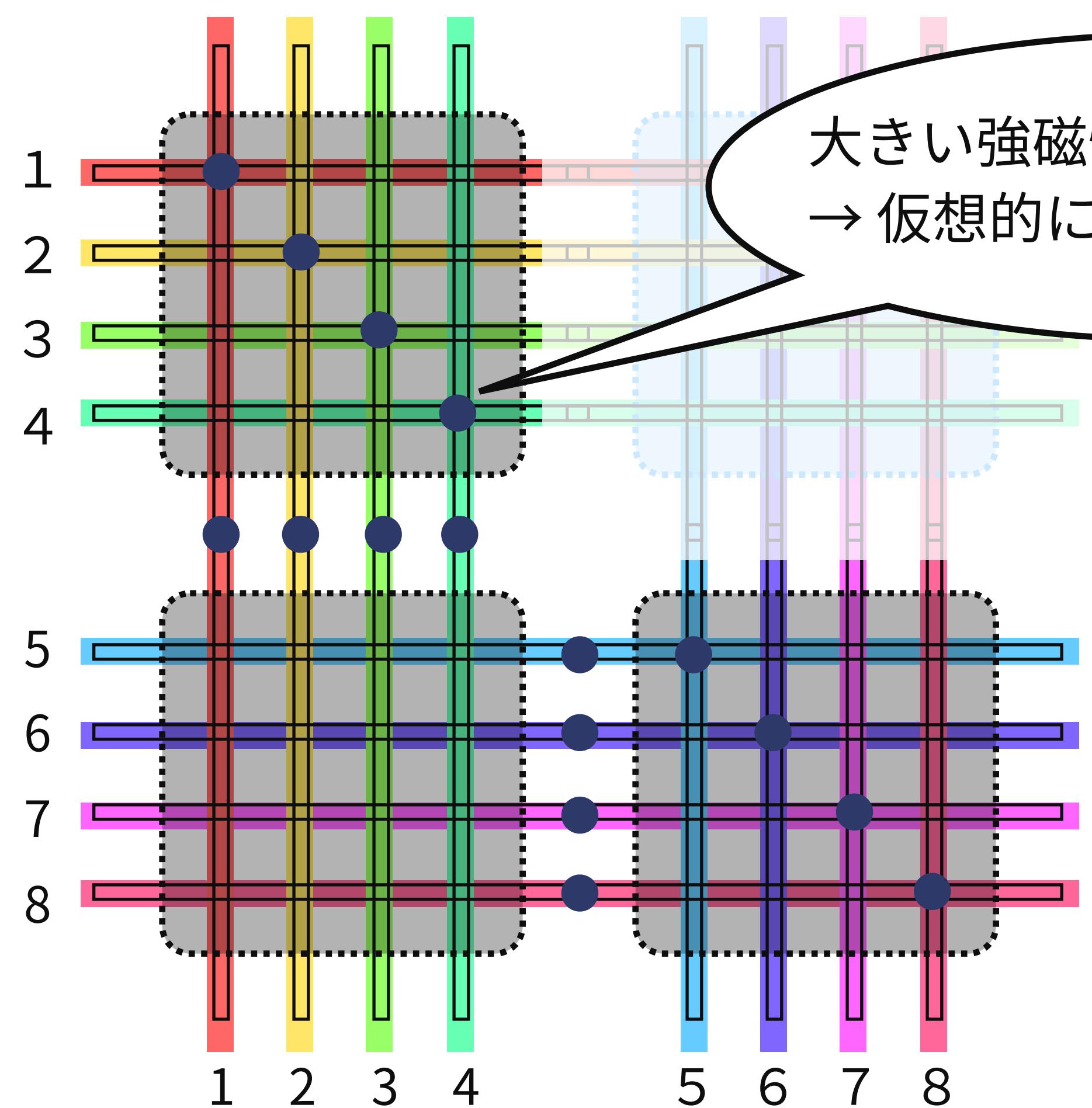
D-Wave の量子ビットネットワーク構造



# D-Waveの量子ビットネットワークへの埋込

## D-Waveの量子ビット間の結合数 < 実際の組合せ最適化問題の相互作用数

例：8つの全結合イジング模型を作る



**2048量子ビット  
(D-Wave 2000Q)**

**64量子ビットの  
全結合イジング模型を  
作成可能**

# D-Waveの詳細

リクルートコミュニケーションズ・D-Wave Systems・早稲田大学高等研究所の共催イベントを2016年5月11日に開催(**D-Wave Systems**による日本初無料イベント)

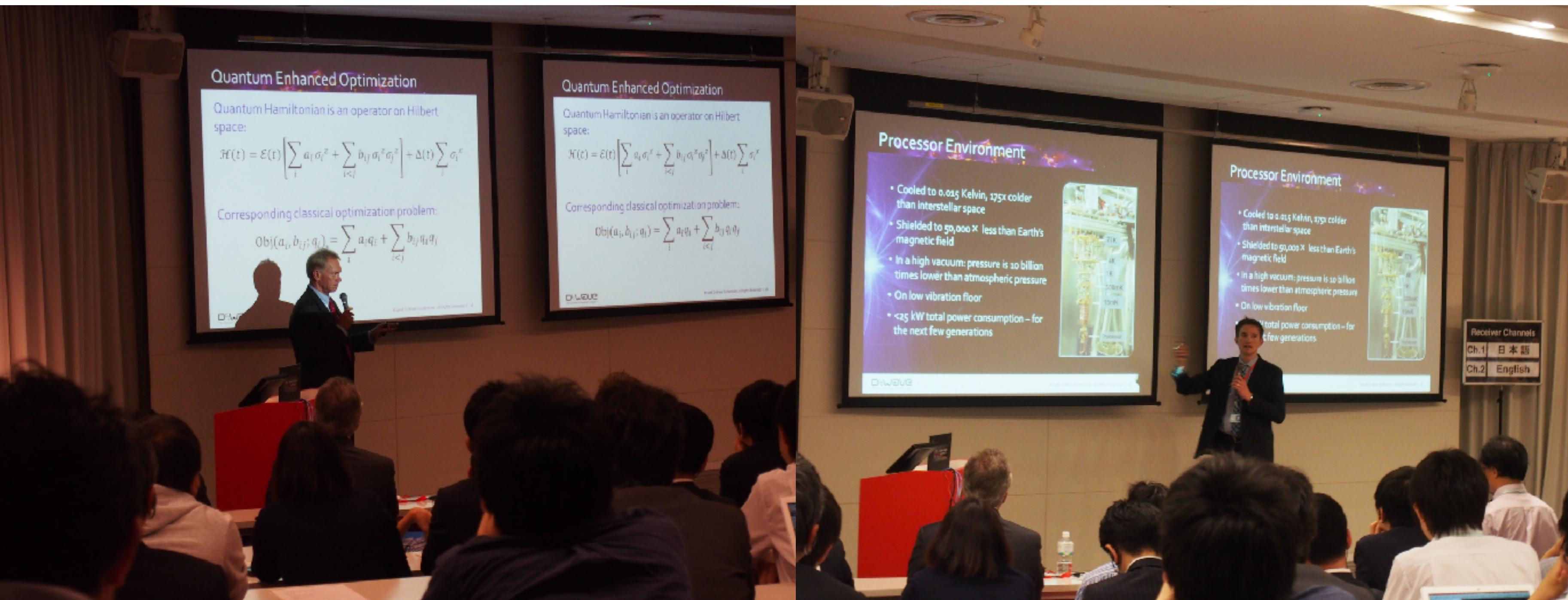
イベント

E

RCO Study Night 「D-Waveが切り開く、量子コンピュータを活用する未来」を開催しました

2016/05/16 stakaya

<https://www.rco.recruit.co.jp/career/engineer/blog/46/>  
に、スライドや講演動画へのリンクがあります



# 量子アニーリングの応用探索

# 量子アニーリング研究開発マップ

## 専用マシン開発

- ・既存マシンの改良
  - 量子ビット数増大
  - コヒーレンス時間向上
  - スケジュール関数のチューニング
- ・多様な量子ゆらぎ導入
  - XX相互作用(量子性強い?)

D-Wave Systems、Google、  
IARPA-QEO、NEDO、NEC

アプリ

ハード

ソフト

## 産業界における課題解決

- ・組合せ最適化処理の抽出
  - ・機械学習への適用
- リクルートコミュニケーションズ、野村HD、Google、フォルクスワーゲン、1QBit、QxBranch etc. (D-Wave 使用)  
デンソー、ブレインパッド、  
Nextremer etc.

## ユーザ支援

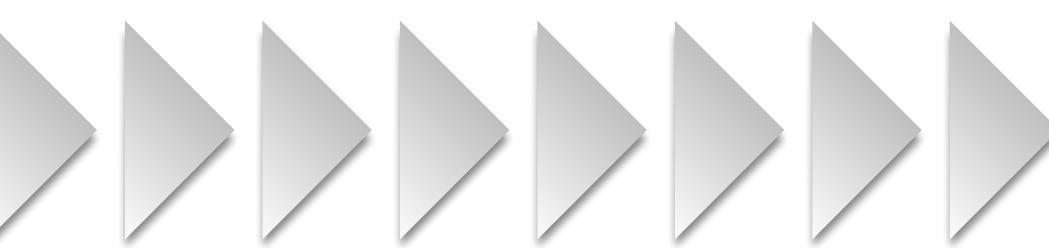
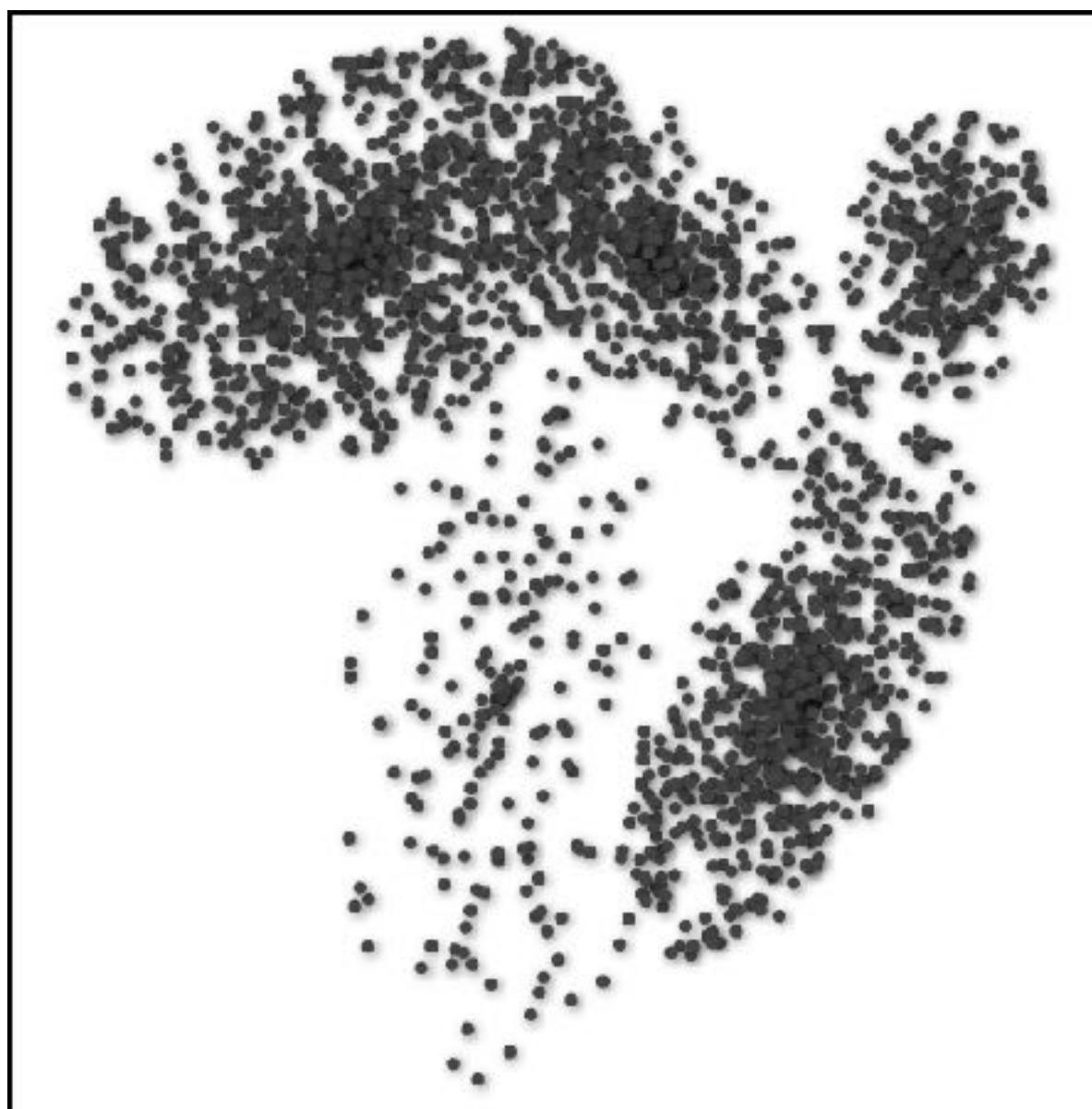
- ・UI整備
- ・高速化支援
- ・コンサルティング

D-Wave Systems、  
1QBit、Fixstars etc.

# 量子アニーリング × 機械学習 (2009-)

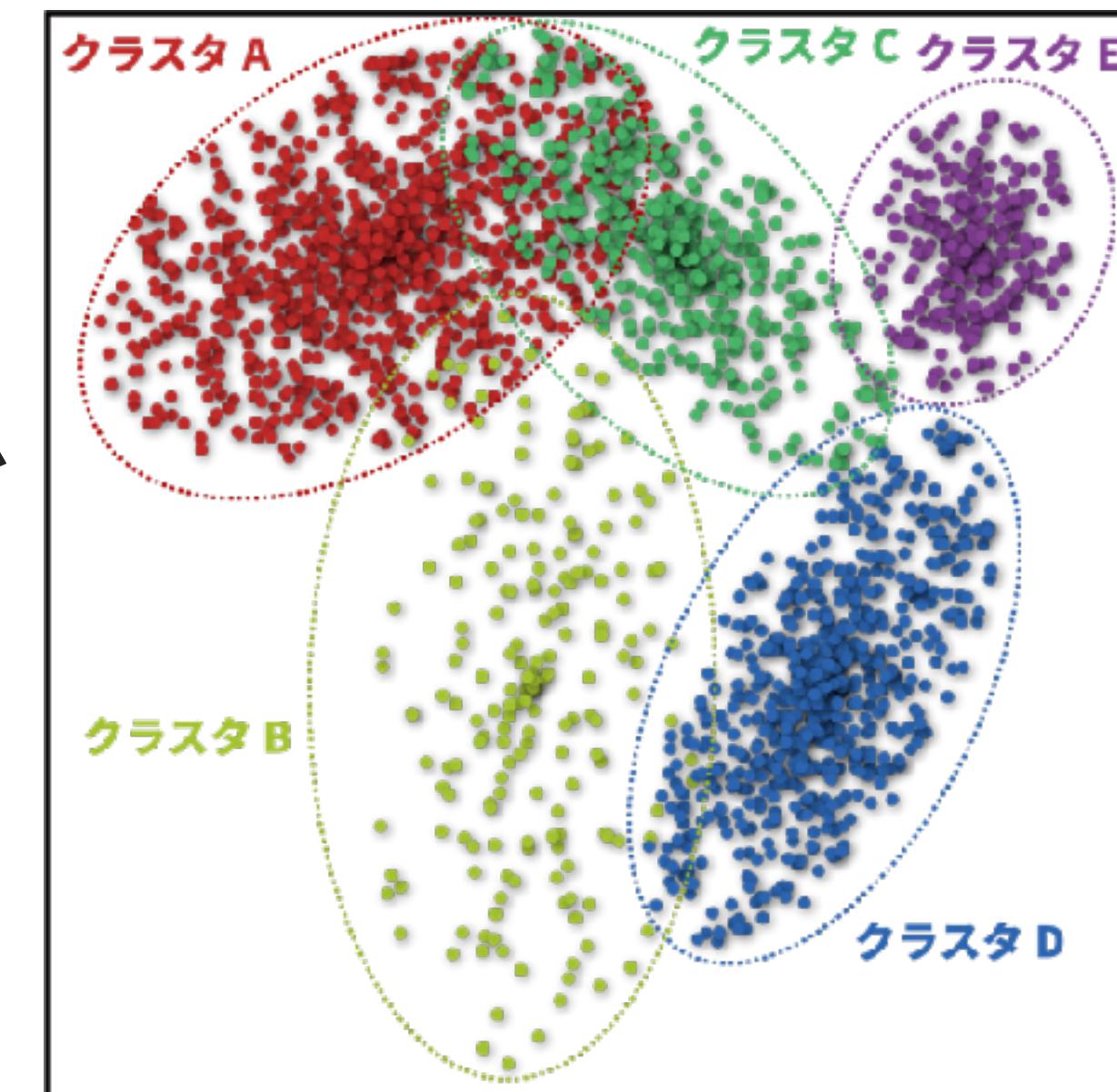
- スパコンで量子アニーリングを実行。並列計算技術を駆使。
- ✗ D-Waveを利用する形式にはなっていない。

処理前：無機質なデータ群



量子アニーリングを  
用いたクラスタリング

処理後：意味によって分類



K. Kurihara, S. Tanaka, and S. Miyashita, UAI2009 (2009)

[http://www.shutanaka.com/papers\\_files/ShuTanaka\\_DEXSMI\\_10.pdf](http://www.shutanaka.com/papers_files/ShuTanaka_DEXSMI_10.pdf)

I. Sato, K. Kurihara, S. Tanaka, H. Nakagawa, and S. Miyashita, UAI2009 (2009)

[https://www.slideshare.net/issei\\_sato/quantum-annealing-fof](https://www.slideshare.net/issei_sato/quantum-annealing-fof)

[https://www.slideshare.net/issei\\_sato/ss-12125104](https://www.slideshare.net/issei_sato/ss-12125104)

I. Sato, S. Tanaka, K. Kurihara, S. Miyashita, and H. Nakagawa, Neurocomputing **121**, 523 (2013)

# 量子アニーリング × 機械学習 (2009-)

## 量子アニーリング技術飛躍の革命(Google, D-Wave Systems)

NIPS 2009 Demonstration: Binary Classification using  
Hardware Implementation of Quantum Annealing

Hartmut Neven  
*Google*

neven@google.com

Marshall Drew-Brook  
*D-Wave Systems Inc.*

marshall@dwavesys.com

William G. Macready  
*D-Wave Systems Inc.*

wgm@dwavesys.com

Vasil S. Denchev  
*Purdue University*

vdenchev@purdue.edu

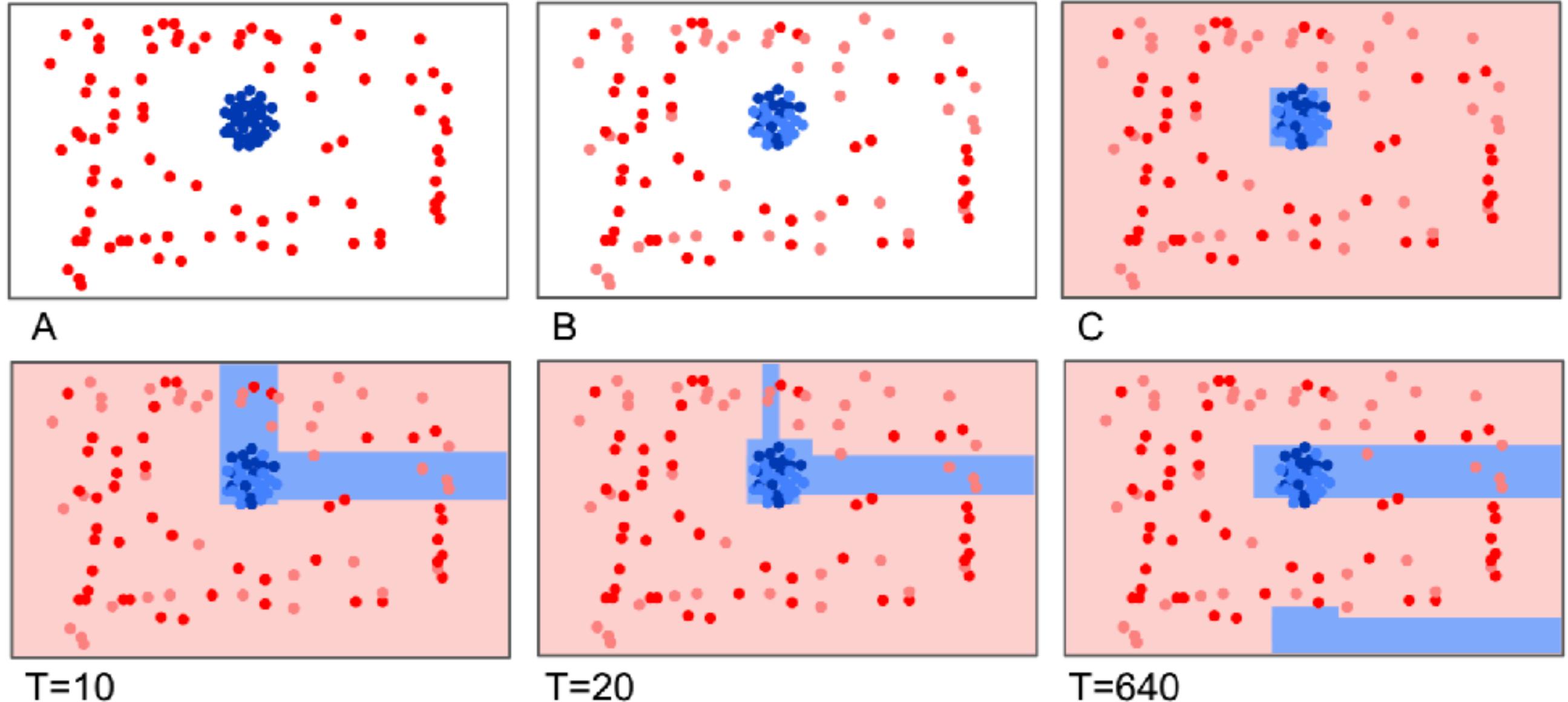
Jiayong Zhang  
*Google*

jiayong@google.com

Geordie Rose  
*D-Wave Systems Inc.*

rose@dwavesys.com

December 7, 2009



in the hardware to realize a quantum annealing algorithm for addressing ISING. Unlike previous studies of quantum annealing [KTM09, SKT<sup>+</sup>09] in machine learning, the process is not simulated in software but embodied in physical quantum dynamics.

[https://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/ja//googleblogs/pdfs/nips\\_demoreport\\_120709\\_research.pdf](https://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/ja//googleblogs/pdfs/nips_demoreport_120709_research.pdf)

# アプリケーション基礎の様々な例

## QBoostを拡張した方法で特徴量選択 (リクルートコミュニケーションズ＆早稲田大学)

QBoostについては、<http://proceedings.mlr.press/v25/neven12/neven12.pdf>

	特徴量A	特徴量B	特徴量C	特徴量D	特徴量E	特徴量F	特徴量G	特徴量H	特徴量I	特徴量J
データ1										
データ2										
データ3										
データ4										

⋮

データ98										
データ99										
データ100										

# アプリケーション基礎の様々な例

## QBoostを用いた森林検出(NASA)

QBoostについては、<http://proceedings.mlr.press/v25/neven12/neven12.pdf>

**PLOS ONE**

RESEARCH ARTICLE

### Deploying a quantum annealing processor to detect tree cover in aerial imagery of California

Edward Boyda<sup>1,2\*</sup>, Saikat Basu<sup>3</sup>, Sangram Ganguly<sup>2,4</sup>, Andrew Michaelis<sup>4,5</sup>, Supratik Mukhopadhyay<sup>3</sup>, Ramakrishna R. Nemani<sup>6</sup>

1 Department of Physics and Astronomy, Saint Mary's College of California, Moraga, CA, United States of America, 2 Bay Area Environmental Research Institute, Moffett Field, CA, United States of America, 3 Department of Computer Science, Louisiana State University, Baton Rouge, LA, United States of America, 4 Earth Science Division, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, United States of America, 5 University Corporation at CSU Monterey Bay, Seaside, CA, United States of America, 6 NASA Advanced Supercomputing Division, NASA Ames Research Center, Moffett Field, CA, United States of America

\* [ekb2@stmarys-ca.edu](mailto:ekb2@stmarys-ca.edu)





**Fig 7. Classification of tree cover by boosted linear-plus-quadratic stumps, from the 508-qubit problem.** Left: A region of broken tree cover outside the town of Blocksburg, CA. Middle: Saint Mary's College of California. Right: The city of Mill Valley, CA.

doi:10.1371/journal.pone.0172505.g007

E. Boyda et al., PLoS ONE 12(2): e0172505.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172505>

# アプリケーション基礎の様々な例

## D-Waveで行列分解(Los Alamos National Lab.)

Nonnegative/binary matrix factorization with a D-Wave quantum annealer

Daniel O'Malley<sup>1</sup>, Velimir V. Vesselinov<sup>1</sup>, Boian S. Alexandrov<sup>2</sup>, and Ludmil B. Alexandrov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Computational Earth Science (EES-16), Los Alamos National Laboratory  
<sup>2</sup>Physics and Chemistry of Materials (T-1), Los Alamos National Laboratory  
<sup>3</sup>Theoretical Biology and Biophysics (T-6), Los Alamos National Laboratory

**Abstract**

D-Wave quantum annealers represent a novel computational architecture and have attracted significant interest [1, 2, 3], but have been used for few real-world computations. Machine learning has been identified as an area where quantum annealing may be useful [4, 5, 6]. Here, we show that the D-Wave 2X can be effectively used as part of an unsupervised machine learning method. This method can be used to analyze large datasets. The D-Wave only limits the number of features that can be extracted from the dataset. We apply this method to learn the features from a set of facial images.



Figure 1: Face image reconstruction using features learned by NBMF. The five-by-seven matrix of images on the right shows the features that were learned. The two images on the left show the original image (top) and the reconstruction (bottom). The reconstruction is obtained by summing the features that are boxed in green. Note that although some of the features appear to be all black, they actually contain facial features are small in magnitude (black corresponds to 0, white corresponds to 1).

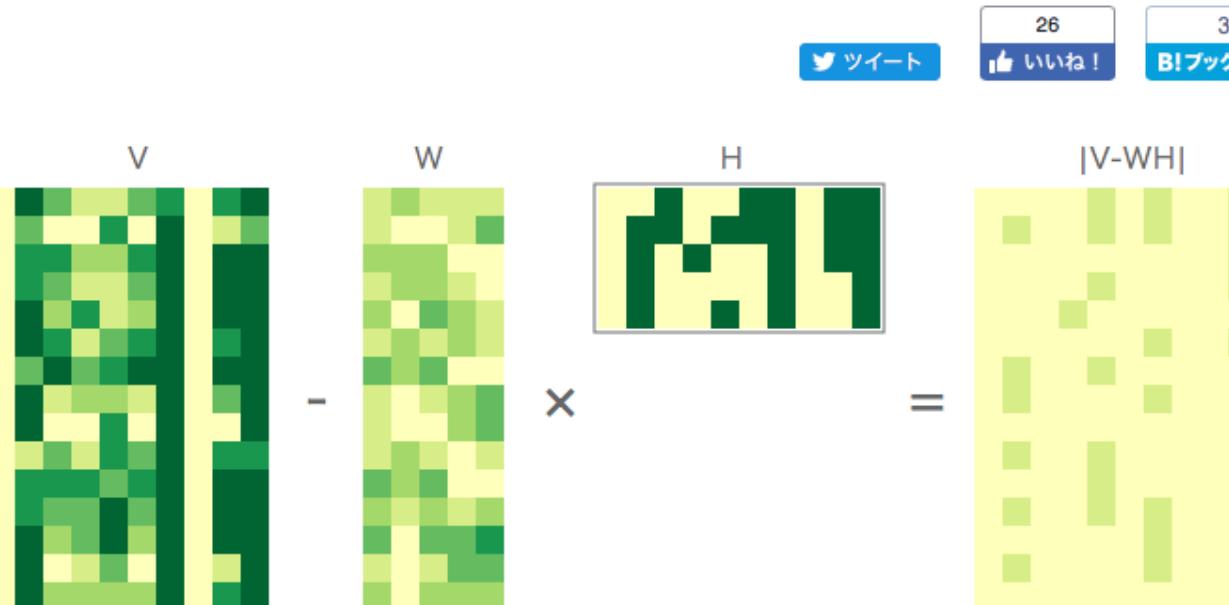
Daniel O'Malley et al., arXiv:1704.01605  
<https://arxiv.org/abs/1704.01605>

# アプリケーション基礎の様々な例

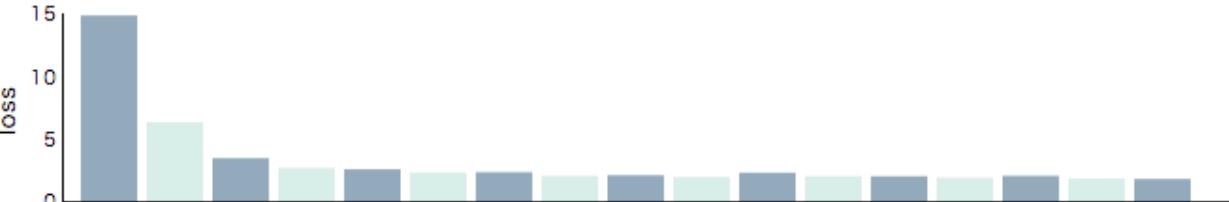
## D-Waveで行列分解(Los Alamos National Lab.)

メンバー  
ついに出た！量子コンピュータD-Waveを使った非  
負二値行列因子分解  
2017/05/12 Tanahashi

ツイート いいね！ ブックマーク



loss



n= 15 m= 10 r= 5 START

アドテクブログ管理者のTanahashiです。本記事では、先日Los Alamos国立研究所(LANL)からArXivに投稿された量子コンピュータD-Waveを用いた非負二値行列因子分解[1]について紹介します。上のデモはこのアルゴリズムをJavaScriptでほぼそのまま実装したもので、アニーリング部分はD-Waveを使う代わりに焼きなまし法で実装しています。LANLは2015年にD-Wave SystemsのD-Wave 2Xを導入しており、アニーリング型量子コンピュータの応用研究を活発に行なっているため、D-Waveユーザとしては是非注目しておきたい研究機関の一つです。

私たちリクルートコミュニケーションズは以前より早稲田大学と量子アニーリングに関する共同研究を進めていましたが、昨年よりD-Wave Systemsと共同研究を開始し、D-Waveを用いた機械学習アルゴリズムの開発やその広告配信への応用に取り組んでいます。また、今年の6月には量子アニーリングに関する世界トップクラスの国際学会 Adiabatic Quantum Computing Conference 2017 が日本で行われ、私たちもD-Waveを用いた機械学習アルゴリズムやレコメンデーション手法について発表する予定です。

より詳細には、共同研究を進めているリクルートコミュニケーションズの棚橋氏による、左記の解説が参考になります。

<https://www.rco.recruit.co.jp/career/engineer/blog/dwave03/>

$$W, H = \arg \min_{W, H} \|V - WH\|_F \quad \text{s.t.} \quad W_{ij} \geq 0, H_{ij} \in \{0, 1\}$$

Hをランダムに初期化

**Input :**  $V, k$

**Output :**  $W, H$

**Until** 収束

// Wに関する最適化

$$W = \arg \min_{X \in R^{n \times r}} \|V - XH\|_F + \alpha \|X\|_F$$

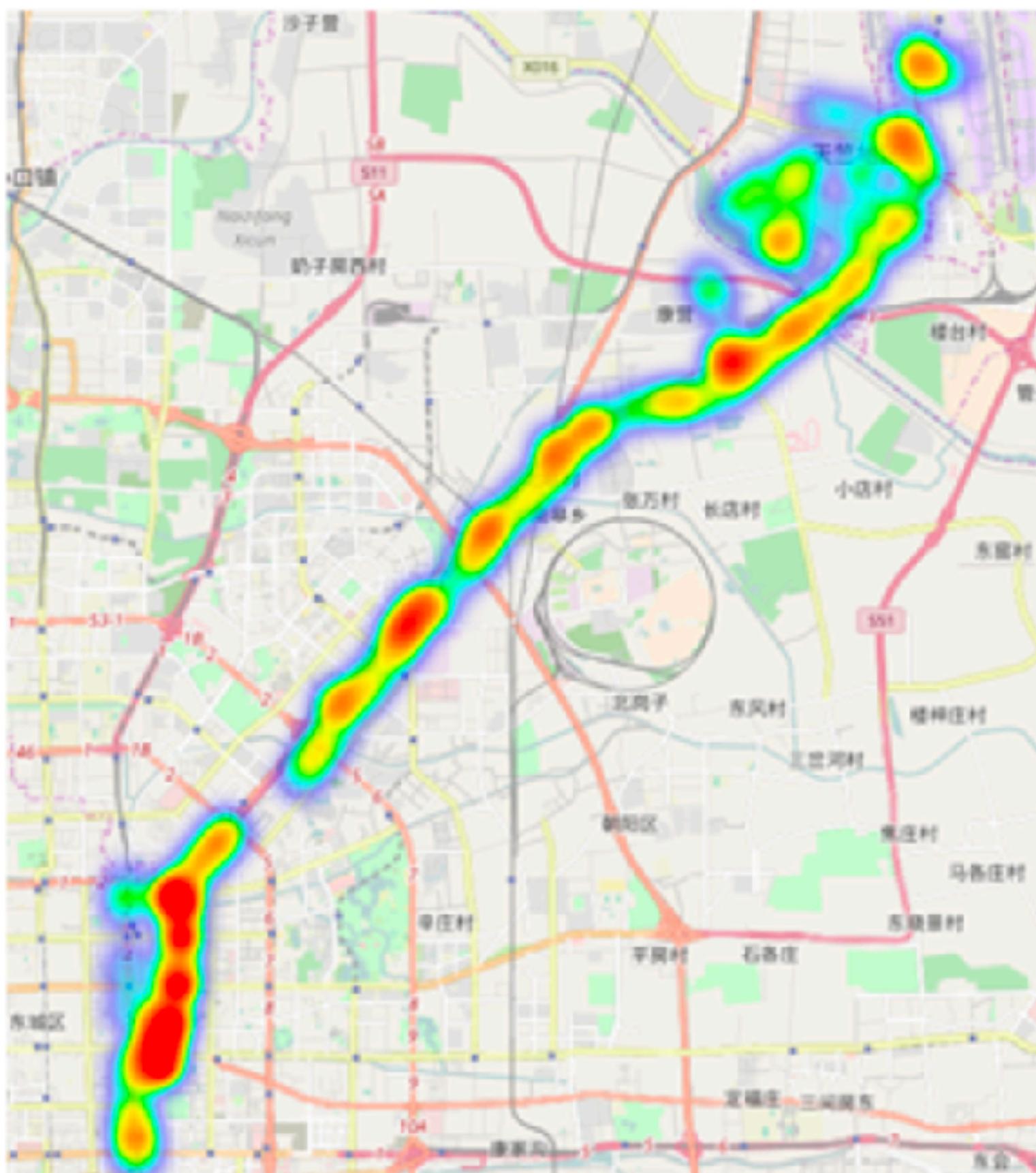
// D-Waveを使ってHに関する最適化を行う

$$H = \arg \min_{X \in \{0,1\}^{r \times m}} \|V - WX\|_F$$

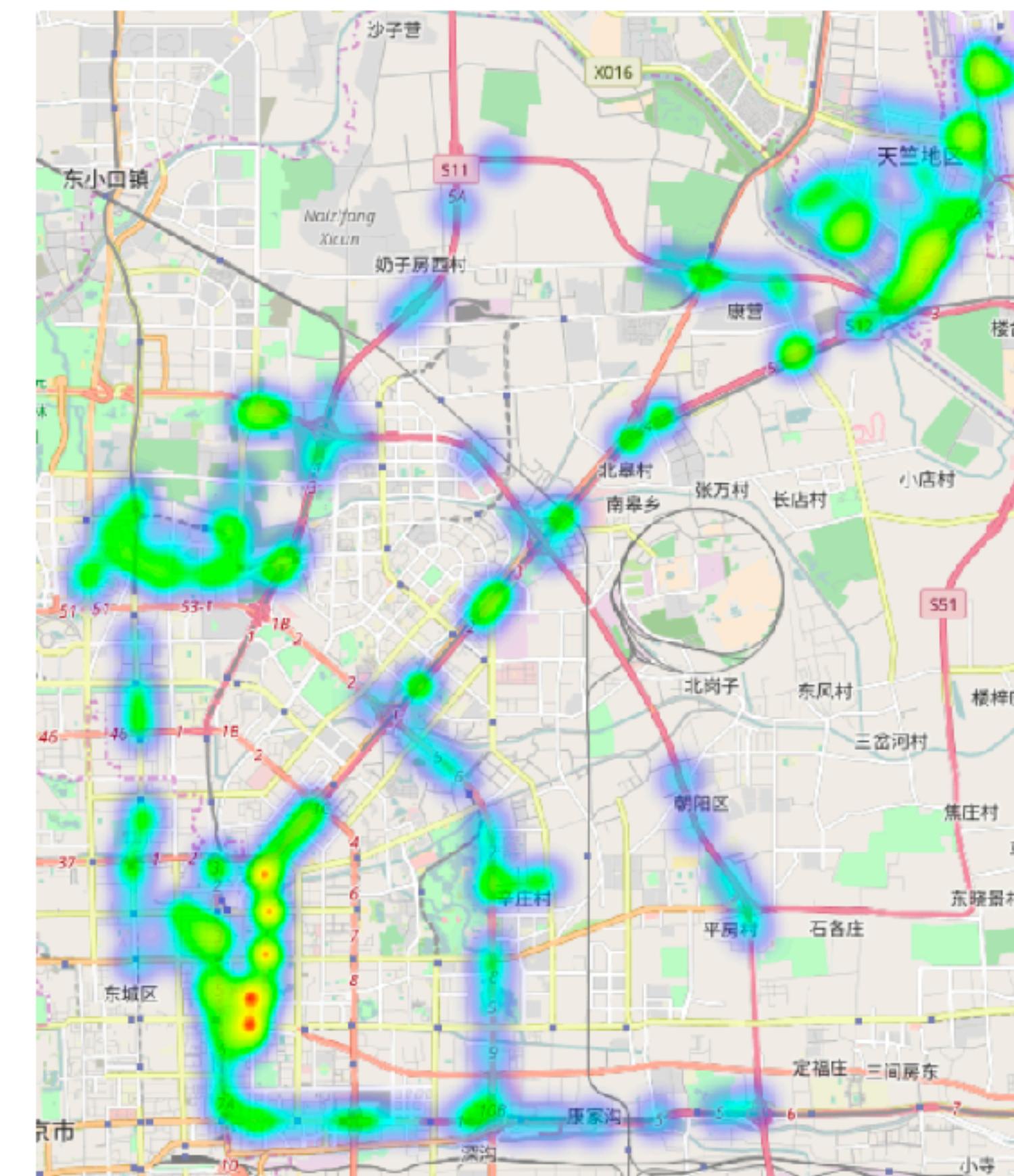
# アプリケーション基礎の様々な例

## D-Waveで渋滞回避ルート提案(Volkswagen)

D-Wave 未使用



D-Wave 使用後



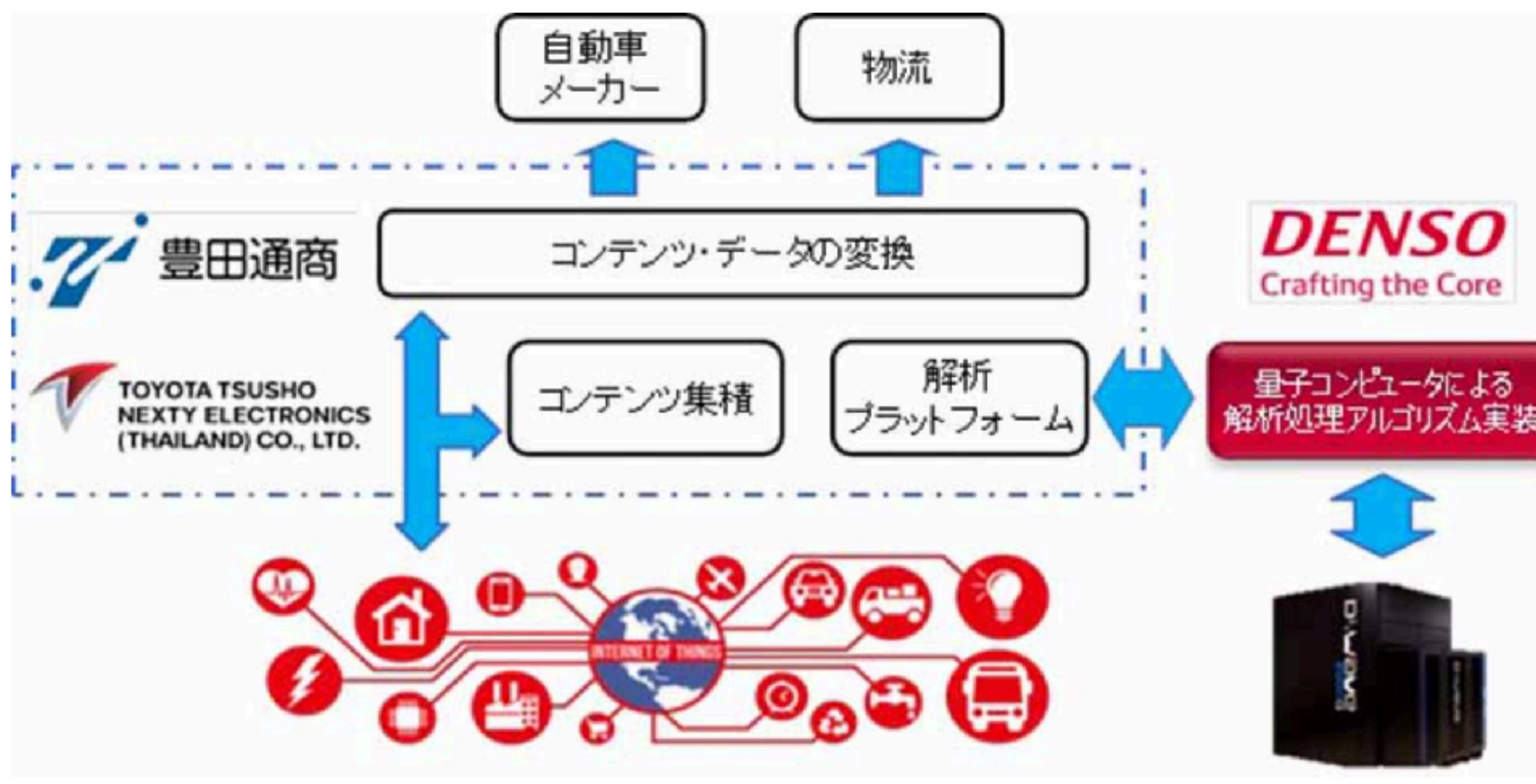
<https://arxiv.org/pdf/1708.01625.pdf>

# アプリケーション基礎の様々な例

世界初の交通系商用アプリケーションを用いた実証実験(DENSO & 豊田通商)

**DENSO**  
Crafting the Core

**TOYOTA TSUSHO**



<http://motorcars.jp/denso-exhibited-at ces-2018-also-demonstrated-quantum-computer-application-demonstration20180107>

# アプリケーション基礎の様々な例

## 量子アニーリングで検討されているアプリケーションの例

アプリケーション	代表的な論文のタイトル
周波数割当	Cognitive Radio Project (1QBit)
素因数分解	Prime Factorization Using Quantum Annealing and Algebraic Geometry (1QBit)
交通流最適化	Traffic flow optimization using a quantum annealer (VW, D-Wave Systems)
与信評価	Optimal Feature Selection in Credit Scoring and Classification Using a Quantum Annealer (1QBit)
画像認識	Image recognition with an adiabatic quantum computer. I. Mapping to quadratic unconstrained binary optimization (D-Wave Systems)
強化学習	Free energy-based reinforcement learning using a quantum processor (1QBit)
投資ポートフォリオ最適化	Solving the Optimal Trading Trajectory Problem Using a Quantum Annealer (1QBit)
為替アービトラージ最適化	Finding optimal arbitrage opportunities using a quantum annealer (1QBit)
たんぱく質折り畳み問題	Finding low-energy conformations of lattice protein models by quantum annealing (Harvard University, D-Wave Systems)
分子類似性問題	Enhancing Quantum Annealing Performance for the Molecular Similarity Problem (1QBit)
衛星画像解析	Deploying a quantum annealing processor to detect tree cover in aerial imagery of California (NASA etc.)
クラスタリング	Quantum Annealing for Clustering (Tokyo University)

略語

1QBit: 1QB Information Technologies)

VW: Volkswagen

<https://codezine.jp/article/detail/10477>

# アプリケーション基礎の様々な例に関する最新情報



Thanks to all our presenters and attendees at last week's D-Wave "Qubits Europe" Users Conference! Many of our presenters agreed to let us post their presentations publicly, so you can see them at [dwavesys.com/qubits-europe-....](https://dwavesys.com/qubits-europe-....) #quantumcomputing

④ 英語から翻訳



2:39 - 2018年4月18日

<https://twitter.com/dwavesys/status/986298152700477446>

<https://www.dwavesys.com/qubits-europe-2018>

フォロー中



QUANTUM COMPUTER ▾ ABOUT CONTACT

Qubits Europe 2018 その1 – D-Waveマシンの進化

量子コンピュータユーザの集い

この度、先日ドイツミュンヘンで行われた、D-Wave社のユーザカンファレンス "QUBITS EUROPE 2018" に参加してきましたので、会の内容や会場の雰囲気を報告させていただきます。



[https://quantum.fixstars.com/introduction\\_to\\_quantum\\_computer/qubits-europe-2018/](https://quantum.fixstars.com/introduction_to_quantum_computer/qubits-europe-2018/)

# 量子アニーリングの未来に向けた、私の取り組み

# 量子アニーリング研究開発マップ

## 専用マシン開発

- ・既存マシンの改良
  - 量子ビット数増大
  - コヒーレンス時間向上
  - スケジュール関数のチューニング
- ・多様な量子ゆらぎ導入
  - XX相互作用(量子性強い?)

D-Wave Systems、Google、  
IARPA-QEO、NEDO、NEC

アプリ

ハード

ソフト

## 産業界における課題解決

- ・組合せ最適化処理の抽出
  - ・機械学習への適用
- リクルートコミュニケーションズ、野村HD、Google、フォルクスワーゲン、1QBit、QxBranch etc. (D-Wave 使用)  
デンソー、ブレインパッド、  
Nextremer etc.

## ユーザ支援

- ・UI整備
- ・高速化支援
- ・コンサルティング

D-Wave Systems、  
1QBit、Fixstars etc.

## 量子アニーリングを用いたデータ分析で、マーケティング・コミュニケーションを最適化させる

早稲田大学は11月20日、[株式会社リクルートコミュニケーションズ](#)（本社所在地：東京都中央区、代表取締役社長：清水淳 以下、リクルートコミュニケーションズ）と、量子アニーリングによるデータ分析手法の開発を目的とした共同研究契約を締結しました。

### 共同研究の目的

リクルートコミュニケーションズは、リクルートグループにおいて、顧客の集客ソリューションからWebマーケティング、メディアの制作・宣伝と言ったマーケティング・コミュニケーションを担っています。特に近年は、広告配信の最適化などマーケティングテクノロジーの技術開発にも注力しており、様々な手法の研究を通じてマーケティング効果の最大化を目指してきました。

このたび、量子アニーリングを用いたデータ分析手法の理論構築及びプログラムの実装や、本手法を実データに適用し考察することで、新しい手法の確立を行い、量子アニーリングの産業への応用を実現することで、マーケティング・コミュニケーションのさらなる最適化を目指します。

### 共同研究におけるそれぞれの役割

本共同研究において、早稲田大学は、本研究に必要となる理論の構築を行います。研究は[早稲田大学高等研究所](#)（研究担当者：高等研究所田中宗助教）が担当します。

また、リクルートコミュニケーションズと早稲田大学が共同して、新手法によるデータ分析の実施、分析結果の評価、検討等を行います。

### Tags

ビジネス, 技術, 研究活動

### Posted

Wed, 25 Nov 2015

[ツイート](#)

[Like](#) [Share](#)

[G+1](#) [G+ 共有](#)

[メールで送信](#)

# 早稲田大学とリクルートコミュニケーションズの共同研究 (2015年11月～)

<http://www.waseda.jp/top/news/35050>

## 量子アニーリングを用いた人工知能の共同研究を開始

早稲田大学高等研究所と人工知能ベンチャーのNextremerが  
量子アニーリングを用いた人工知能の共同研究を開始

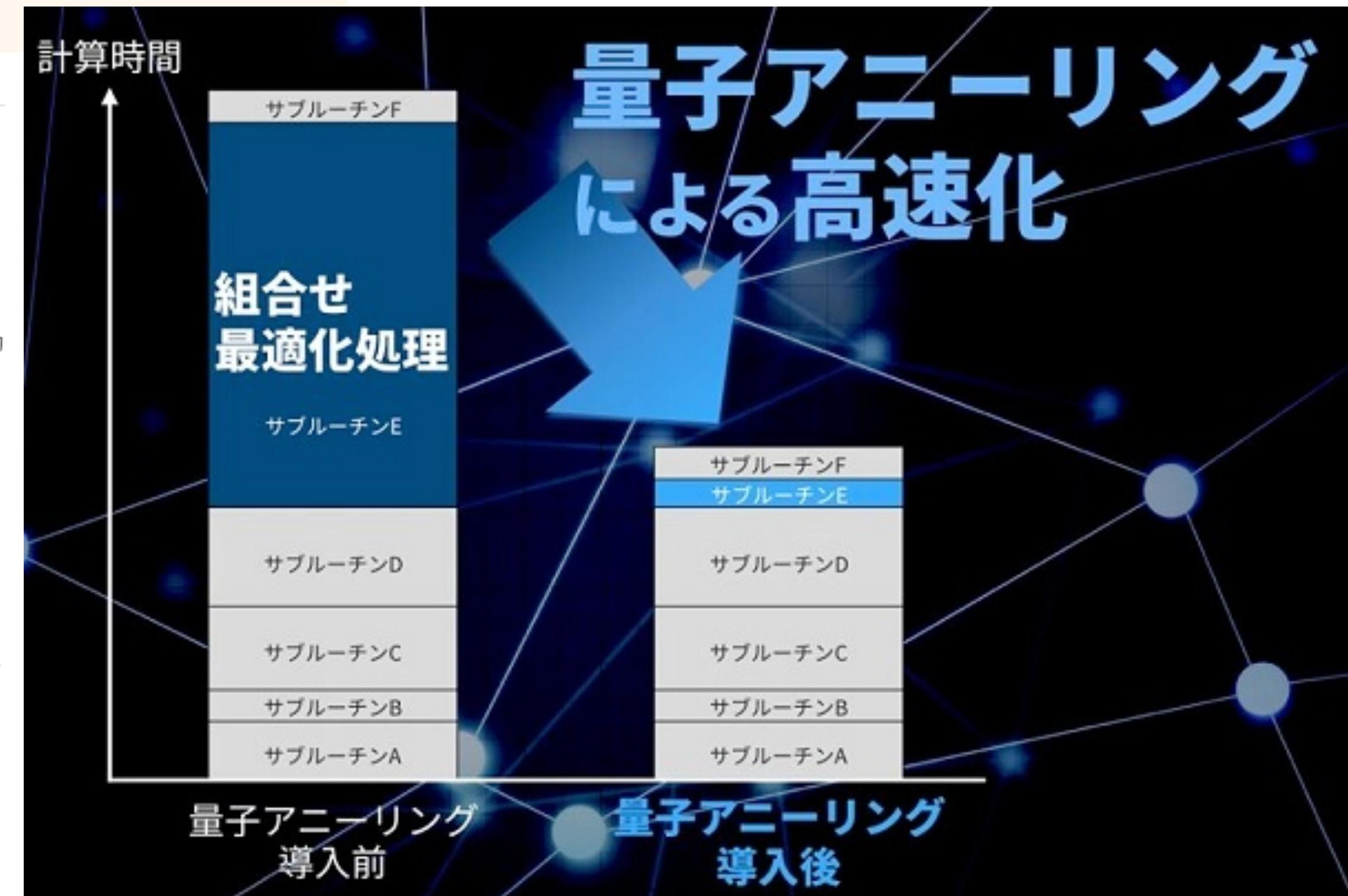
早稲田大学高等研究所（所長：宮島英昭（みやじまひであき） 商学学術院教授）は、人工知能テクノロジーを用いた対話システム開発を手掛ける株式会社Nextremer（代表取締役：向井永浩、以下「Nextremer」）と、量子アニーリング\*を用いた人工知能ソフトウェア開発を目的とした共同研究契約を、11月16日に締結しました。

### 共同研究概要

この度の共同研究は、近年確立されつつある量子アニーリング手法を応用したもので、先端的な人工知能の基礎技術研究の取り組みです。研究は、Nextremerが、アプリケーション開発及びシミュレーション計算を担当し、早稲田大学は技術支援のほか、量子アニーリングの計算適用検討等を担当します。早稲田大学高等研究所では、統計物理学の知見と大規模数値計算の手法を活かし、量子アニーリングをはじめとしたイジングモデル型情報処理の理論研究及び、実問題への応用展開に取り組む田中宗（たなか しゅう）助教が担当します。

研究内容：

- ◆ (1) 対話システムへの応用を目的とする、量子アニーリングを用いた個人の選択の予測
- ◆ (2) 量子アニーリングを用いた深層学習など機械学習の高速化・リソースの削減



# 早稲田大学とNextremerの共同研究 (2016年11月～)

<http://www.waseda.jp/top/news/46400>

# 組合せ最適化処理の高速化に関する共同研究を開始

## 量子コンピューティング周辺技術の普及に寄与

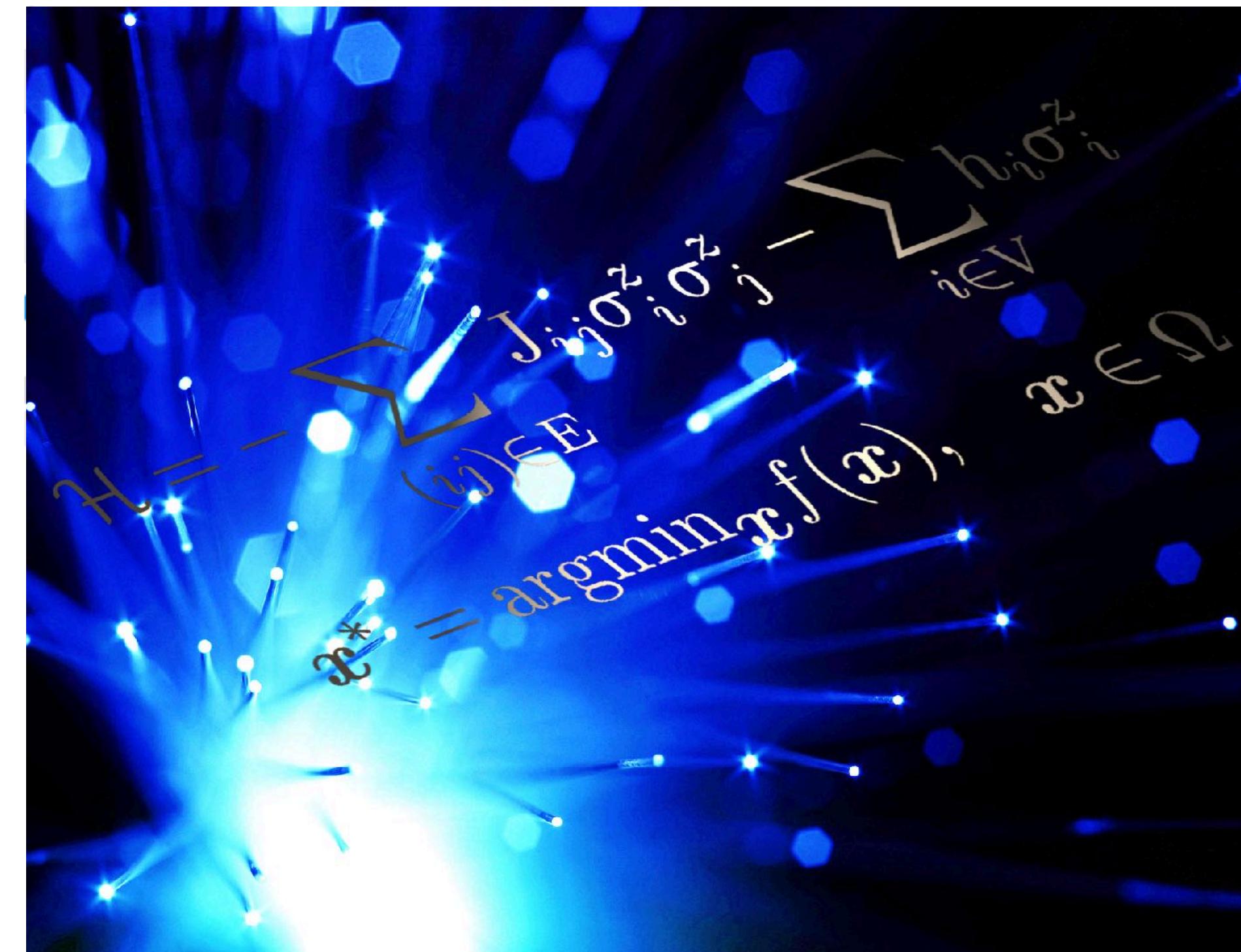
9月26日、[早稲田大学高等研究所](#)（所在地：東京都新宿区、所長：宮島 英昭）と[株式会社フィックススターズ](#)（本社：東京都品川区、代表取締役社長：三木 啓、以下フィックススターズ）は、イジングモデル型情報処理デバイスの高速化に関する理論的研究を目的とした共同研究契約を締結いたしました。

イジングモデルは統計力学模型の一種であり、膨大な選択肢からベストな選択肢を探索する「組合せ最適化問題<sup>注1</sup>」に対する手法として広く利用されています。近年、イジングモデルをハードウェア上に実装し、「組合せ最適化問題」を高速に処理する試みが広まりつつあり、D-Wave Systems Inc. が開発、販売を手掛ける量子アニーリングマシンをはじめとして、商用化も進んでいます。

フィックススターズは、半導体アーキテクチャの構造に合わせた最適化や並列化等に強みを持ち、GPUやFPGAといったアクセラレータを活かした高速化を、その登場間もない頃から提供してきました。加えて、世界に先駆けて量子アニーリングマシンの商用化を実現したD-Wave Systems Inc.と協業し、量子コンピューティングの導入支援等を開始しています。

本研究においてフィックススターズが、量子アニーリングマシンをはじめとするイジングモデル型デバイスを実問題に利用し、アーキテクチャを意識した高速化の検討に取り組みます。また、早稲田大学高等研究所においては、統計物理学の知識と大規模数値計算の手法を活かし、イジングモデル型情報処理の理論研究及び実用化に豊富な実績を持つ、早稲田大学高等研究所の[田中宗准教授](#)（科学技術振興機構さきがけ研究者を兼任）が担当し、当該研究における指導及び理論構築を行います。

注1：膨大な選択肢からベストな選択肢を探索する問題。「巡回セールスマン問題」を例にとると、複数の経由地を通る最短経路を探索する際、候補となる途中経路の組み合わせの数が爆発的に増えてしまう、いわゆる計算量爆発を引き起こす問題である。組合せ最適化問題は様々な産業において内在するため、高速化、高精度化を可能にする技術が求められている。

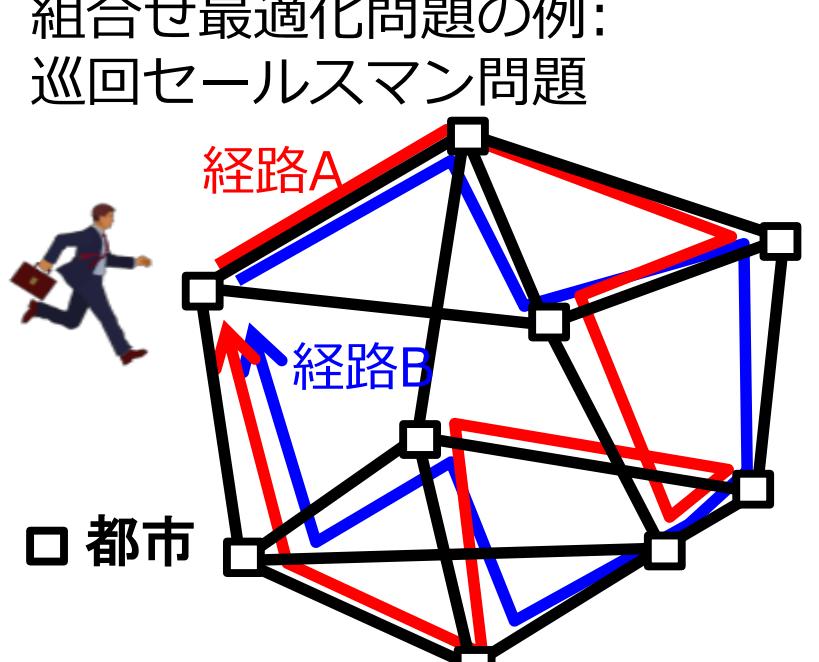


# 早稲田大学とフィックススターズの共同研究 (2017年9月～)

<https://www.waseda.jp/top/news/53975>

# 組合せ最適化処理に向けた革新的アニーリングマシンの研究開発

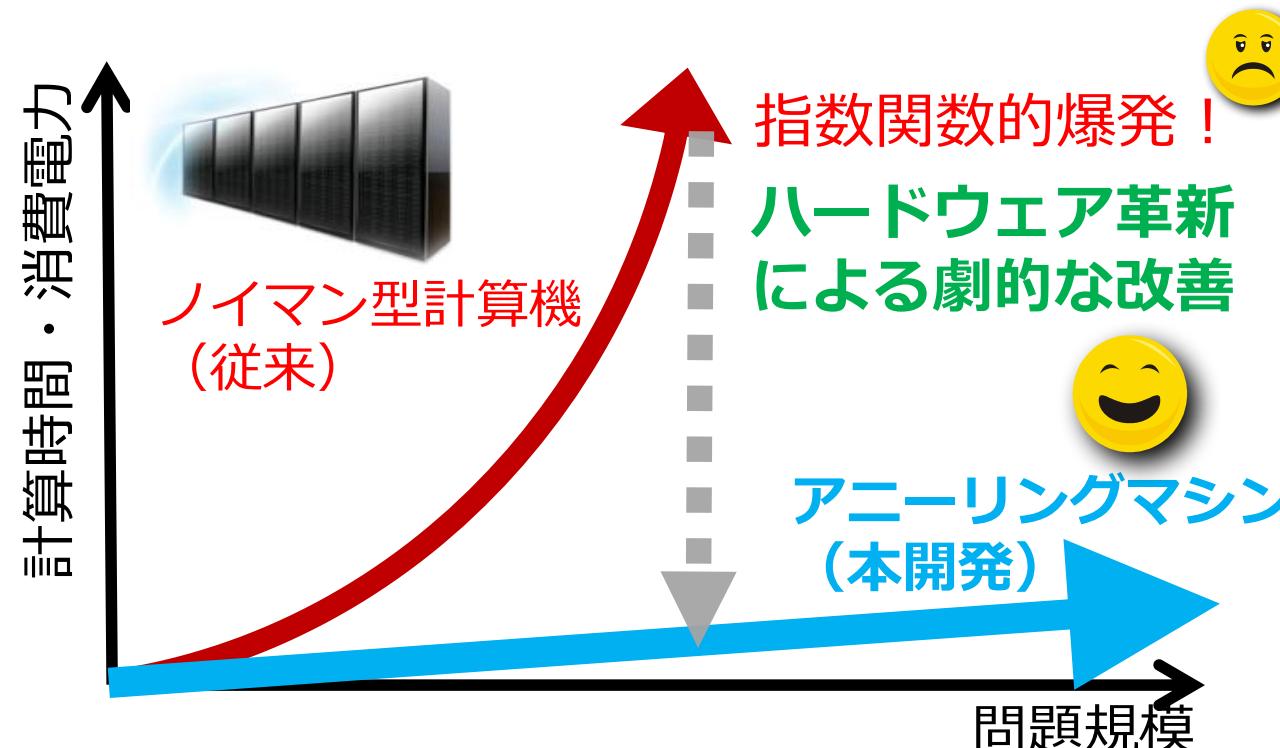
委託予定先	(株)日立製作所、産業技術総合研究所、理化学研究所、情報・システム研究機構、早稲田大学
概要	<p>物流の経路最適化やロボットの動作最適制御など、IoTでのシステムを最適制御するには組合せ最適化問題と呼ばれる問題を解く必要があります。しかし、システムの規模が大きくなると、従来型の計算機では組合せ数が爆発的に増加し答えを求めることが難しくなります。それに対処するため、アニーリングマシンと呼ばれる計算機が提案されています。本プロジェクトでは、CMOSおよび量子アニーリングマシンと呼ばれる2種類のアニーリングマシンについて、実用化に必要な大規模化・高性能化技術の開発に取り組みます。さらに、アニーリングマシンを使用する際に必須となる問題マッピング等の基盤技術の開発を行います。</p>



組合せ最適化問題の例:  
巡回セールスマン問題

都市

経路A  
経路B

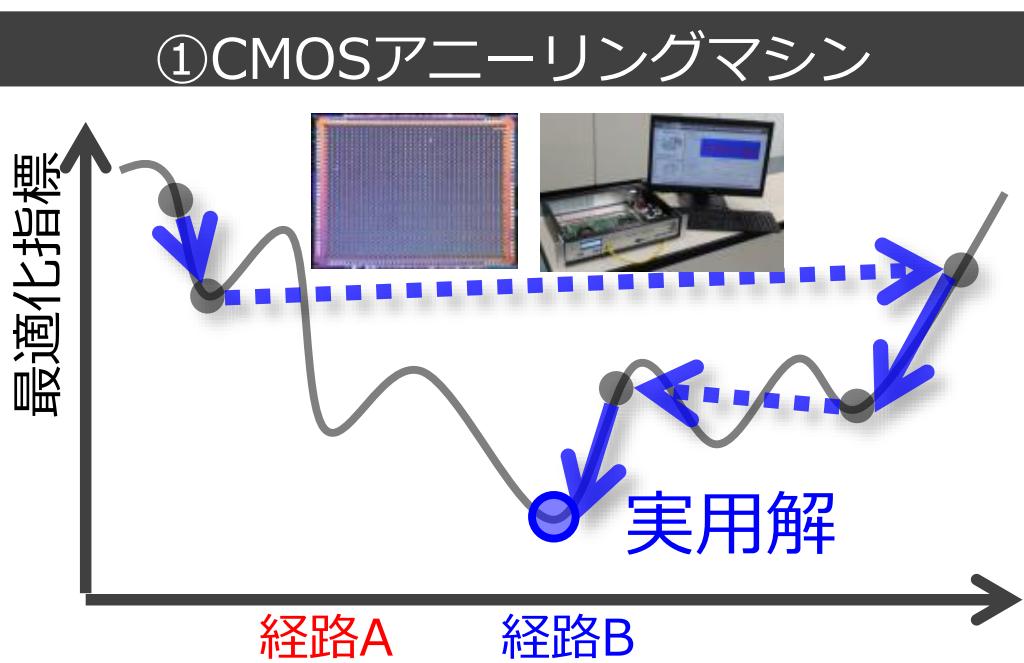


消費電力・計算時間

問題規模

指数関数的爆発！  
ノイマン型計算機（従来）

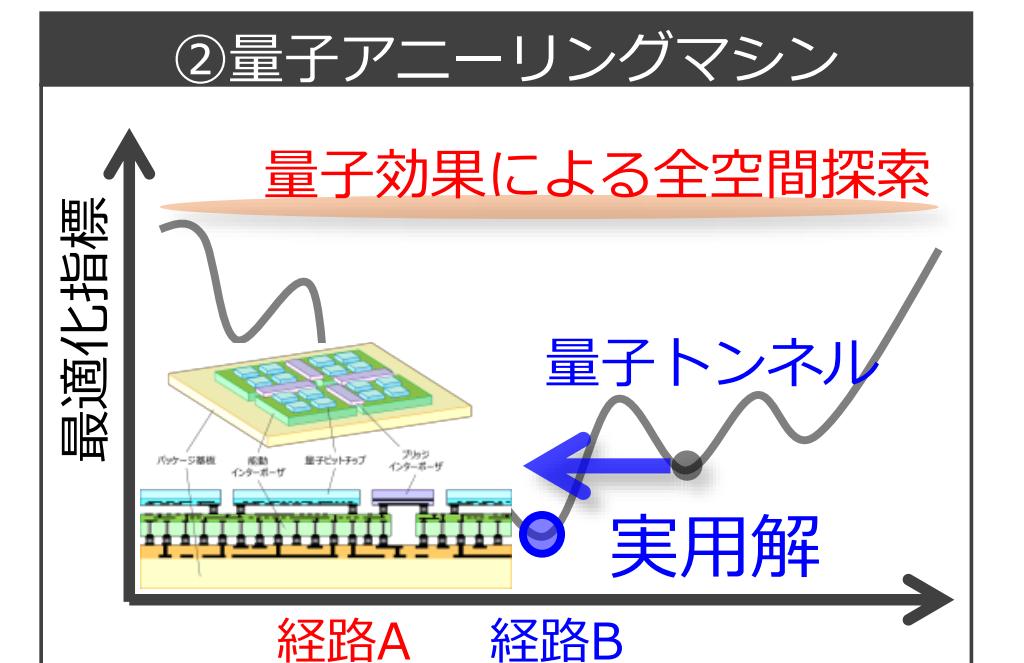
ハードウェア革新による劇的な改善  
アニーリングマシン（本開発）



① CMOSアニーリングマシン

最適化指標

経路A 経路B 実用解



② 量子アニーリングマシン

最適化指標

量子効果による全空間探索  
量子トンネル

経路A 経路B 実用解

③ 共通基盤技術

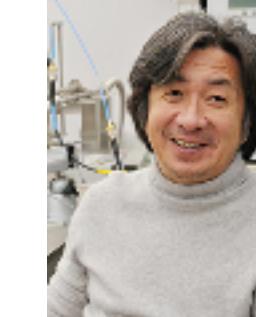
実際の問題をアニーリングマシンにマッピングする技術、等



山岡雅直氏(日立)



川畠史郎氏(産総研)



蔡兆申氏(理研)



河原林健一氏(NII)



小林哲則教授



戸川望教授



寺田晃太朗  
大学院生

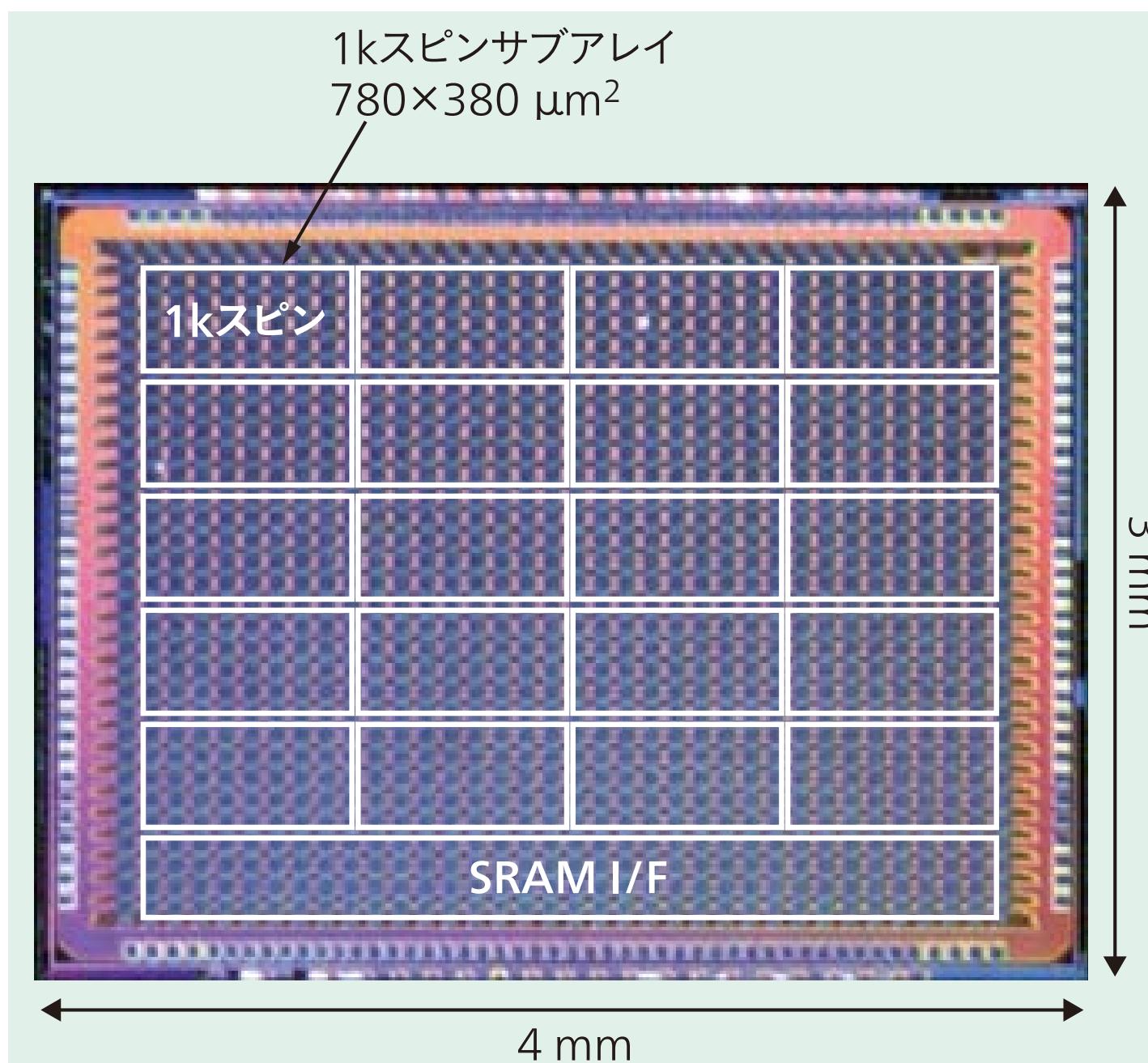
# 日本も、イギング モデル型情報処理 ハードウェア開発 に着手

2016年7月8日 NEDO プレスリリース  
<http://www.nedo.go.jp/content/100790655.pdf>

# 日本発の組合せ最適化専用マシン

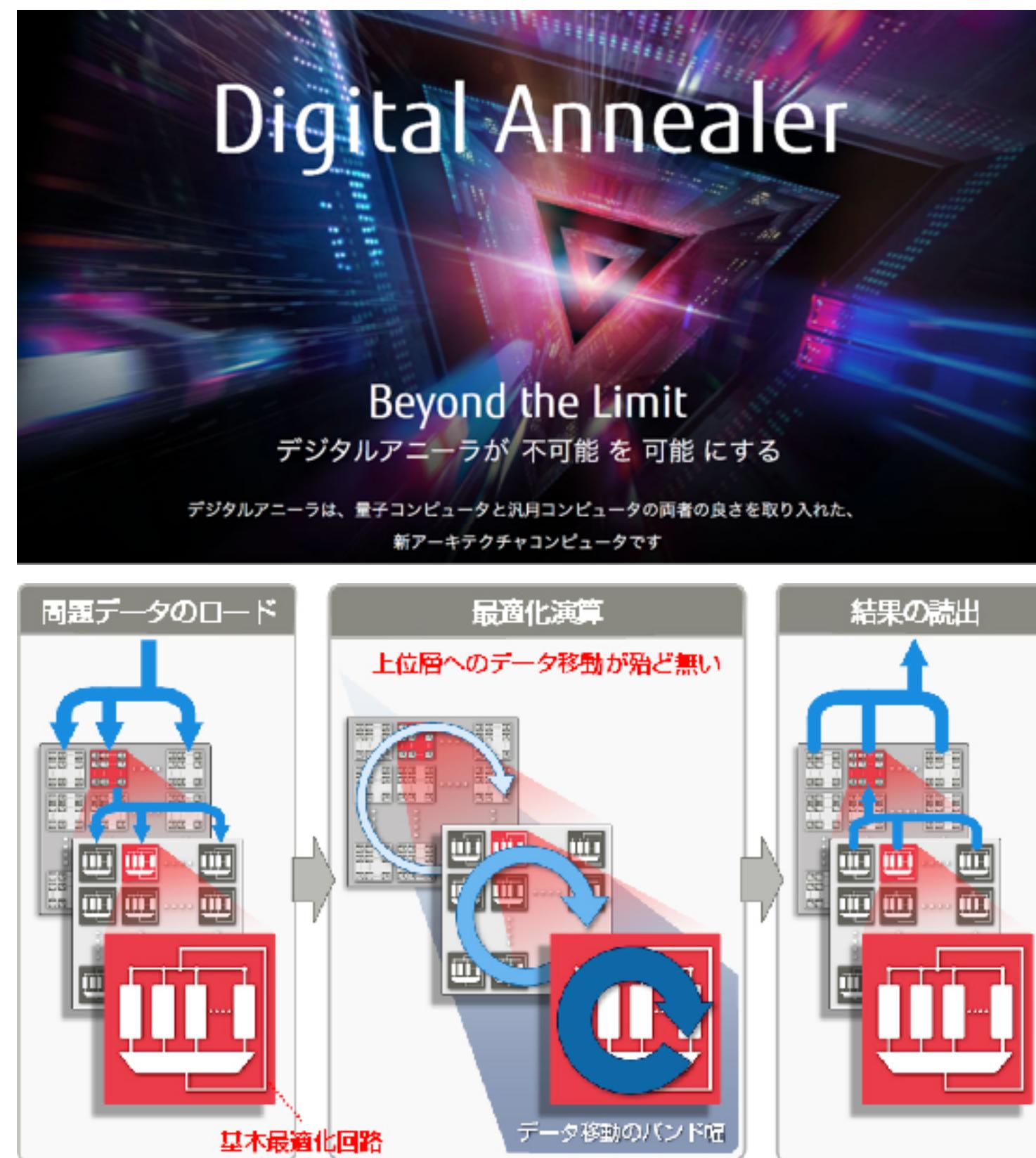
## 新種の組合せ最適化処理マシン(量子アニーリングとは別種)が次々に開発

CMOSアニーリングマシン



山岡ほか、  
日立評論 Vol. 98, No. 06-07, 406-407,  
イノベイティブR&Dレポート pp. 84-89 (2015)  
[http://www.hitachihiyon.com/jp/pdf/2015/06\\_07/2015\\_06\\_07\\_14.pdf](http://www.hitachihiyon.com/jp/pdf/2015/06_07/2015_06_07_14.pdf)

デジタルアニーラ



<http://www.fujitsu.com/jp/digitalannealer/>

コヒーレントイジングマシン



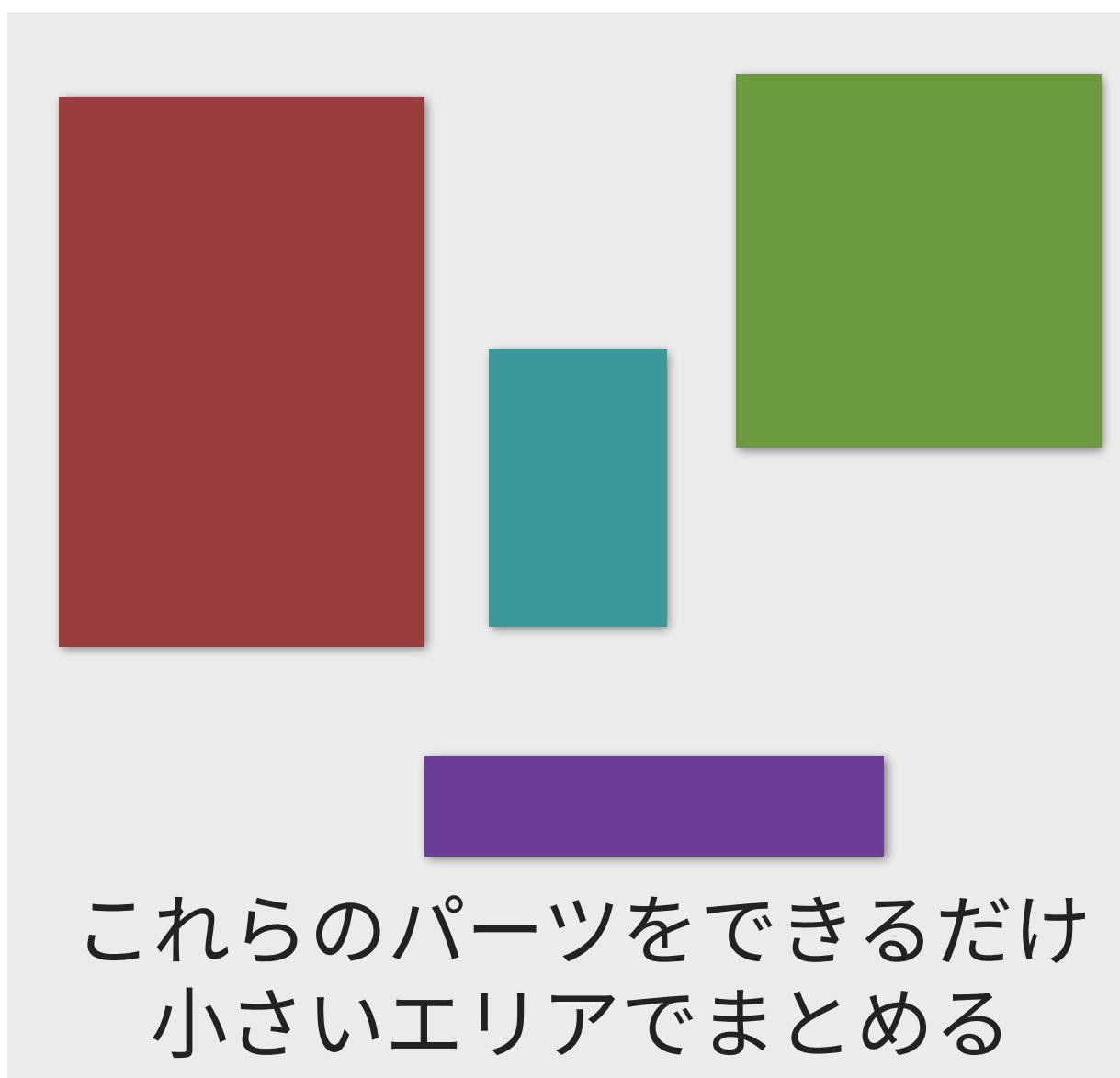
<https://qnncloud.com/>

# 応用探索事例

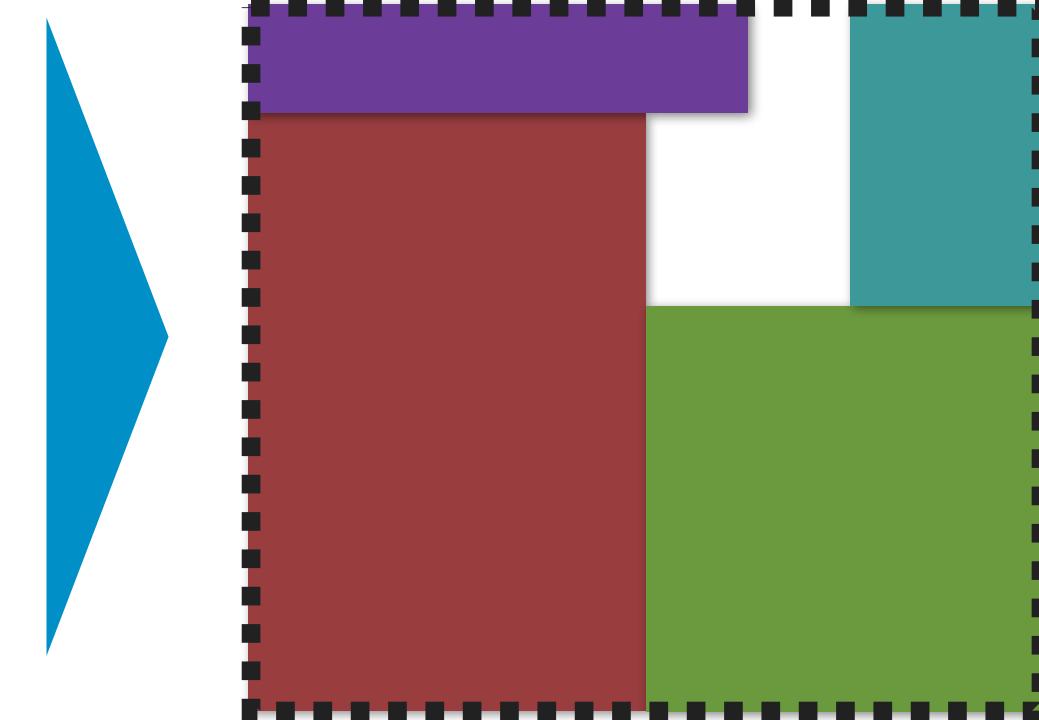
## パッキング問題に対して、アニーリング技術が効果的であることを発見

想定応用例：集積回路設計、荷物の梱包、荷台への荷物配置

K. Terada, D. Oku, S. Kanamaru, S. Tanaka, M. Hayashi, M. Yamaoka, M. Yanagisawa, N. Togawa, 2018 VLSI-DAT Symposium

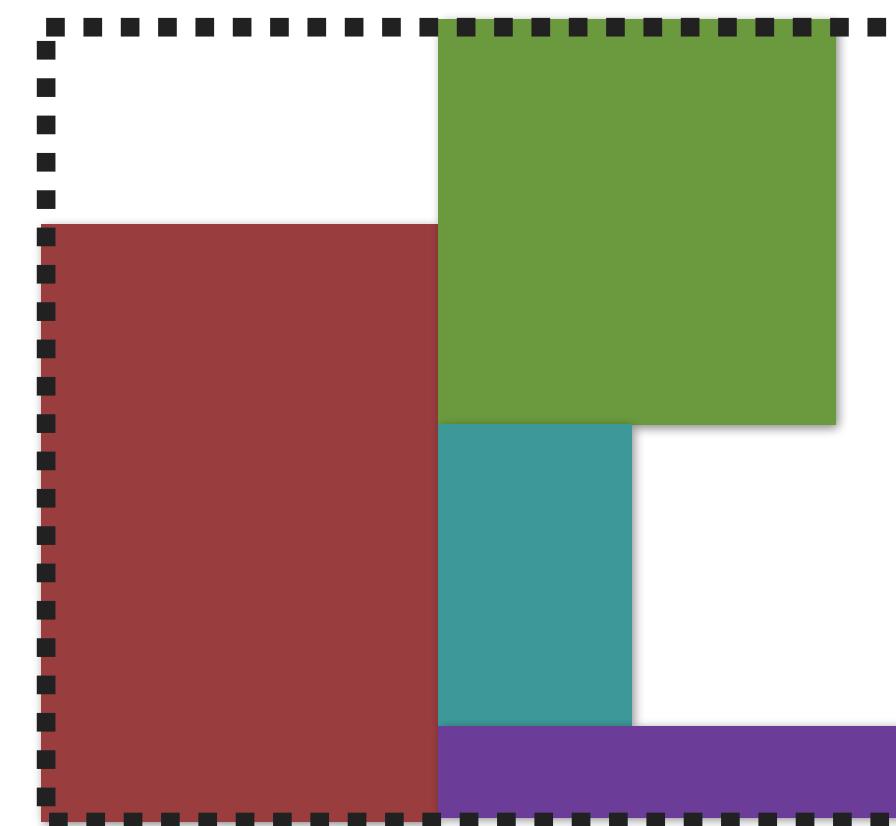


○ 効率の良いまとめ方

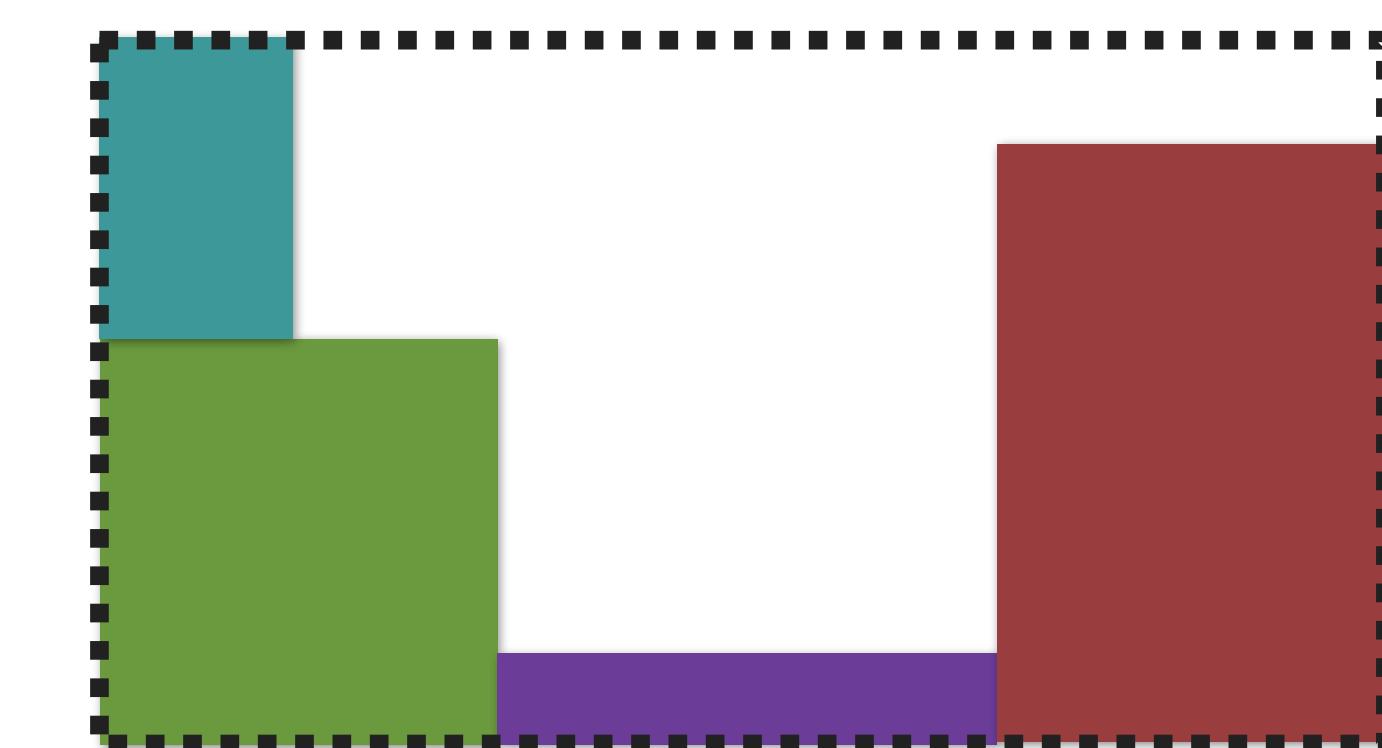


アニーリング技術利用  
で、この答えを速く正  
確に導き出す

✗ 効率の悪いまとめ方



✗ 効率の悪いまとめ方



本研究開発の成果の一部は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) 委託事業  
「IoT推進のための横断技術開発プロジェクト」の結果得られたものです。

# 世界的国際会議AQC2017における発表

カテゴリ	内容	共同研究先企業・研究機関
アドテク 特徴量選択	QAを用いた特徴量選択	リクルートコミュニケーションズ
アドテク 広告配信最適化	QAを用いた広告配信最適化	リクルートコミュニケーションズ
アドテク 情報推薦	QAを用いた情報推薦	リクルートライフスタイル リクルートコミュニケーションズ
自動車関連 最適化	断熱定理の観点から見たQA性能再検討	デンソー、東北大学
物流関連 配送最適化	物流最適化問題に対するQAの性能評価	ブレインパッド
人工知能	自己組織化マップに対するQAの適用法	Nextremer
データ分類	クラスタリングに対するQAの性能評価	物質・材料研究機構
データ分析	特異値分解に対するQAの性能評価	東京理科大学、物質・材料研究機構
スパコン利用	PEZY-SCを用いたQMCによるQAの性能評価	PEZY、MDR、物質・材料研究機構
理論	相転移制御によるQAの性能向上	東北大学

# 人材育成：IPA未踏ターゲット事業

日本発の組合せ最適化処理マシン(量子アニーリングとは別種)を用いた  
新しい応用探索を進める若手育成を行います(PM：田中宗)。



経済産業省

Ministry of Economy, Trade and Industry

ホーム

経済産業省について

お知らせ

政策について

統計

申請・お

◀ お知らせ ▶ ニュースリリース ▶ 2017年度一覧 ▶ 未踏IT人材発掘・育成事業の新たなプログラム「未踏ターゲット」を実施します

▶ English

印刷

未踏IT人材発掘・育成事業の新たなプログラム「未踏ターゲット」を実施します

本件の概要

経済産業省及びIPAは、未踏IT人材発掘・育成事業において、新たな技術分野に挑戦する人材を育成するためのプログラムを平成30年度から実施します。

平成30年度は「次世代（非ノイマン型）計算機」をテーマに、特に国内各社が開発を進める「アニーリングマシン」を活用するソフトウェアの構築に取り組む人材を募集します。今後の産業応用が期待されるハードウェアを使いこなす人材の育成を加速することで、新たな技術・市場を日本から創出することに繋げていきます。

<http://www.meti.go.jp/press/2017/03/20180308004/20180308004.html>

# 量子アニーリングの理論と応用

田中 宗

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  
科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 さきがけ  
「量子の状態制御と機能化」領域

E-mail: [shu.tanaka@aoni.waseda.jp](mailto:shu.tanaka@aoni.waseda.jp)



QUANTUM  
ANNEALING



MACHINE  
LEARNING

