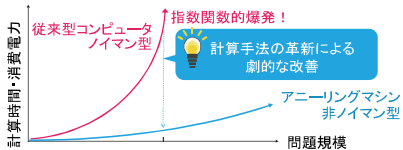


# 組合せ最適化処理に向けた 革新的アニーリングマシンの研究開発

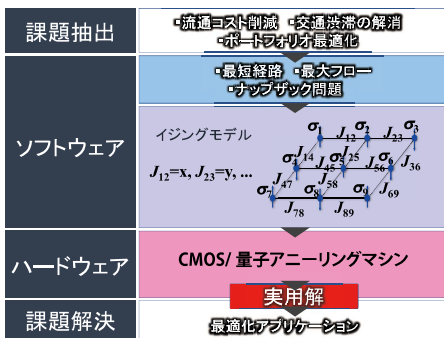
委託先 株式会社日立製作所、国立研究開発法人 産業技術総合研究所、国立研究開発法人 理化学研究所、大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構、早稲田大学

本プロジェクトにおいては、IoT (Internet of Things) 社会において今後益々重要となる組合せ最適化問題を、高効率で処理する「アニーリングマシン(イジングモデル型コンピュータ)」の基盤技術の研究開発に当たりました。本技術及び最適化計算プラットフォームがIoT社会で普及することにより、物流、金融、医療、交通などのありとあらゆる産業分野に対して計り知れない波及効果が見込まれます。

## アニーリングマシンのインパクト



## 最適化による課題解決のフロー

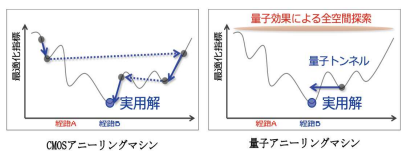


## 体験型クラウドサービス

<https://annealing-cloud.com/>

当プロジェクトの成果であるAnnealing Cloud Webでは誰もが無料で、社会課題のイジングモデル化とアニーリングマシンによる最適化を体験することができます。

## CMOS/量子スピンによる基底状態探索



### 実世界のネットワークのマッピングに関する研究

(担当: 大学共同利用機関法人 情報・システム研究機構 国立情報学研究所)

実社会のネットワークをどのようにマップするか?

- Bad news!
  - ネットワークサイズnに対してn<sup>2</sup>個のチップが必要! (n=1M → 1兆個のスピンの!)
  - D-Waveとの共通課題! 世界的研究課題!
- Developed technology!
  - ソーシャルネットワーク、WEBなどを日立CMOSアーキテクチャである「キンググラフ」への埋め込みを開発!
  - 現行計算機とのハイブリッドも視野へ!

現行フォンノイマン型計算機とアニーリングマシンの比較

■ ベンチマーク問題であるMAX-CUT問題に対して、以下の性能比較を行った

- (理論保証のない) ヒュリスティックベースのアルゴリズム (SAの高速アルゴリズム)
- (理論保証のある) 最速の近似アルゴリズム (SDP: 半正定値計画法)

s	vertices	edges
100	40,000	212,698
200	160,000	875,206
300	360,000	1,972,808
400	640,000	3,510,408
500	1,000,000	5,488,008
600	1,440,000	7,905,608
700	1,960,000	10,769,208
800	2,560,000	14,060,808
900	3,240,000	17,798,408
1,000	4,000,000	21,976,008

### 革新的アニーリングマシンにおける共通基盤に関する研究開発

(担当: 学校法人早稲田大学)

CMOSアニーリングマシンに対するアルゴリズム構築・性能評価

- 様々な組合せ最適化問題をスケラブルな疎結合アニーリングマシンを用いて解法可能にする埋め込みアルゴリズムを構築

超伝導量子アニーリングマシンに対するアルゴリズム構築・性能評価

- 量子アニーリングのボトルネック要因の一つである「量子1次相転移」を回避するアルゴリズムを構築
- 量子駆動ハミルトニアン形式ならびに係数を変えることにより、エネルギーギャップが指数関数的に閉じちゃう量子1次相転移を回避し得ることを発見

革新的アニーリングマシンのIoT分野における応用探索

- 集積回路設計、荷物の梱包、スマート工場、ロボティクス等、IoT分野の重要領域に関連する組合せ最適化問題のアニーリングマシン適用のための定式化ならびに計算効率を調査

これらのパーツをできる限りコンパクトに詰め込んだ場合

交差させずに部品間の配線を配置

### 大規模CMOSアニーリングマシンの開発

(担当: 株式会社日立製作所)

■ 2018年の2チップ接続試験に続き、2020年、上下左右・斜め方向のチップ間インターフェースを備えた9チップ接続可能チップを作成、アニーリング動作を確認。無制限に拡張する可能性を示した

2枚チップ間接続 (2018)

8方向接続チップ (2020)

9チップ接続ボード動作検証

ISSCC2021 Processor session および Demo session にて発表

最大カット問題を高速に解くことを実証

### 超伝導アニーリングマシンの研究開発

(担当: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所)

■ 超伝導量子アニーリングマシンの設計・製造 評価の基盤技術を開発し、超伝導量子アニーリングマシンの製造と極低温における動作に成功 (横国大との連携)。

超伝導量子アニーリングマシンチップ

動作温度10mK # of count

国際会議ISS2020とAQ2021にて発表

掛け算・因数分解問題を高精度で解くことを実証

### 超伝導アニーリングマシンの研究開発

(担当: 国立大学法人 横浜国立大学 委託先)

産総研の超伝導磁束量子ビット間の可変結合器の開発

→ 解きたい問題の量子アニーリング回路へのマッピング

強結合可変結合器 シングモイド可変結合器 結合特性実験結果

超伝導量子アニーリングの動作点の最尤推定による最適化

入力電流最適化 NORゲート動作

### 新原理量子アニーリング機械の研究開発

(担当: 国立研究開発法人 理化学研究所)

■ 超伝導量子ビット・共振器の超強結合を利用した、全結合アニーラーアーキテクチャを開発 (2018-19年) ■ 要素技術としての、量子ビット・共振器間超強結合、共振器-共振器間超強結合を実証。論文3編、国際学会6件

量子ビット-共振器超強結合回路とスペクトル (2019)

共振器-共振器超強結合回路とスペクトル

回転波近似の破れを観測 (2020)

作成した8量子ビット全結合チップ(左)と提案アーキテクチャ(右)

### 超伝導量子コヒーレントイジングマシンの研究開発

(担当: 国立研究開発法人 理化学研究所)

■ 広帯域高利得超伝導パラメトリック増幅器を開発し、リング共振器における時分割パルスモード発振とフィードバック制御への展望を得た

伝搬型ジョセフソン接合パラメトリック増幅器 (JTJWPA)

インピーダンス整合反射型ジョセフソン接合パラメトリック増幅器

新提案のインピーダンス整合方式により1GHz以上の広帯域動作実証 標準量子限界に迫る低雑音特性確認

四光波混合型JTJWPA動作実証 三光波混合型JTJWPA設計-製作 広帯域高利得応答シミュレーション

### 事業者からのメッセージ

- 最適化に関心をお持ちの企業と協創します。
- アニーリングマシンを使った業務改善等に興味のある方はご連絡ください。
- 一緒に社会課題解決に向けて技術革新を起こしませんか。

株式会社日立製作所  
山岡雅直  
TEL: 080-5935-4121  
E-mail: masanao.yamaoka.na@hitachi.com

この成果は、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) の委託業務 (JPNP16007) の結果得られたものです。