

イジングマシンにおける ハイブリッドアルゴリズムの基礎と応用

田中 宗

慶應義塾大学理工学部物理情報工学科

慶應義塾大学 サステナブル量子AI研究センター (SQAIセンター)

慶應義塾大学 WPI ヒト生物学－微生物叢－量子計算研究センター (Bio2Q)

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(客員)

情報処理推進機構未踏ターゲット事業(兼任)

shu.tanaka@appi.keio.ac.jp

共同研究者

■ 大規模問題に対するイジングマシン用ハイブリッドアルゴリズム

- 菊池脩太(特任助教), 服部智大(博士課程1年), 網野あかね(修士課程2年), 金井博志(修士2年)
- 門脇さん(デンソー/産総研), 入江さん(デンソー)
- ほか, 複数の企業の皆様

■ 量子コンピューティング×リアル現場

- 住友商事, フィックススターズ, ベルメゾンロジスコの皆様
- Quanmaticのメンバー
- 棚橋さん(リクルート)
- ほか, 複数の企業の皆様

■ 量子アニーリングマシンを用いたブラックボックス最適化の研究

- 関優也(特任講師), 山下将司(卒業生), 福田瞳輝也(修士2年), 中野檀(修士1年), 小川涼(学部4年)
- 津田先生(東大), 田村先生(NIMS/東大), 門脇さん(デンソー/産総研), 入江さん(デンソー)
- ほか, 複数の企業の皆様

■ その他, イジングマシンに関する基礎研究・応用研究

- 日野幹太(修士2年), 阿部哲郎(修士1年), 高橋敬大(修士1年), 池内一樹(修士1年), 岡部理子(学部4年), 小川怜恩(学部4年), 渡辺淳太(学部4年)

■ テンソルネットワーク, ゲート式量子コンピュータ

- 中田百科(博士2年/リクルート), 神田慶樹(学部4年), 大坪優太(卒業生)
- ほか, 複数の企業の皆様

自己紹介:田中 宗(たなか しゅう)

慶應義塾大学 理工学部 物理情報工学科 准教授

慶應義塾大学サステナブル量子AI研究センター センター長

慶應義塾大学ヒト生物学-微生物叢-量子計算研究センター (WPI-Bio2Q) 副拠点長

株式会社Quanmatic CTO (兼任)

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 客員主任研究員(研究院客員准教授)(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)

量子ICTフォーラム 技術担当理事 (業務執行理事)(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(西森秀穏研究室) 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
- 科学技術振興機構さきがけ研究者(兼任)
- 早稲田大学高等研究所 准教授(任期付)
- 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)

を経て現職

内閣府SIP第3期「先進的量子技術基盤の社会課題への応用促進」、NEDO「量子・古典ハイブリッド技術のサイバー・フィジカル開発事業」、JST共創の場「量子ソフトウェアとHPC・シミュレーション技術の共創によるサステナブルAI研究拠点」、JSPS WPI「ヒト生物学-微生物叢-量子計算研究センター」、環境省「地域資源循環を通じた脱炭素化に向けた革新的触媒技術の開発・実証事業」、JST Q-LEAP「量子人材を創出するエコシステムづくり」、JSPS科研費基盤研究(S)「負性インダクタンスと熱ゆらぎを積極利用した複雑な最適化問題を解く量子アニーリング」、NEDO「量子計算及びイジング計算システムの統合型研究開発」、JST CREST「地理空間情報を自在に操るイジング計算機の新展開」、民間企業との共同研究等を通じた量子コンピューティング技術の基礎から応用まで取り組む。

研究キーワードは、量子アニーリング、イジングマシン、統計力学、量子情報科学、物性理論



<https://qforum.org/topics/interview11>



PIVOT公式チャンネル
<https://www.youtube.com/watch?v=qq9Y8KnntKg>

イジングマシンに対して期待されていること

- 量子アニーリングマシンは、多様な場面に内在する組合せ最適化処理を高速・高精度に行うと期待
- IoT社会, Society5.0, DX時代において、組合せ最適化処理の重要度は増加

膨大な選択肢から、制約条件を満たし、ベストな選択肢を探索する（組合せ最適化問題）



イジングマシンの動作の流れ

1

組合せ最適化問題を抽出



2

最適解を探索するように動作



アルゴリズム開発

3

組合せ最適化問題の準最適解



アプリケーション探索

ソフトウェア開発

ハードウェア開発

ソフトウェア開発

アプリケーション探索

ハードウェア

新規物理現象に基づく、
全く新しいハードウェア
のあり方や、あるべき
ハードウェア機能の斬新
な提案

ソフトウェア

物理学的アプローチや、
情報科学的アプローチに
に基づき、量子コンピュー
ティングのポテンシャル
を最大限引き出す、全く
新しい方法の提案

アプリケーション

幅広い研究分野、多様な
産業領域に内在する課題
を解決することを目指
し、量子コンピューティ
ングの使い道を、深いド
メイン知識を有する方々
とともに探索

当研究室の研究活動の一部

アプリケーション探索(量子コンピューティング×応用分野)

広告配信最適化



リクルートとの共同研究

交通・旅行計画最適化



早稲田大学、デンソーとの共同研究

Quantum Transformation (QX)



住友商事との共同研究

触媒化学・表面科学



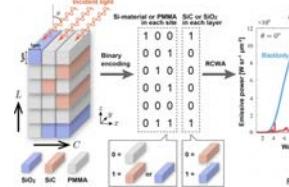
早稲田大学、ENEOS、富士通との
共同研究

集積回路設計最適化



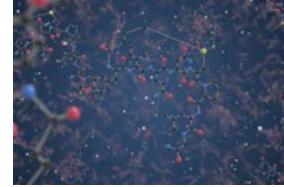
早稲田大学、日立製作所、富士通との
共同研究

メタマテリアル探索最適化



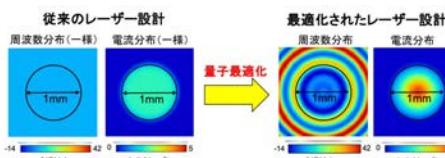
NIMS、東京大学との共同研究

量子マテリアル探索最適化



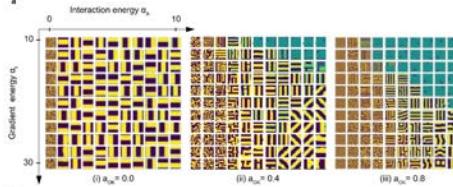
三菱ケミカル、IBM、慶應義塾大学量子コンピュータセンターとの共同研究

フォトニック結晶レーザ最適化



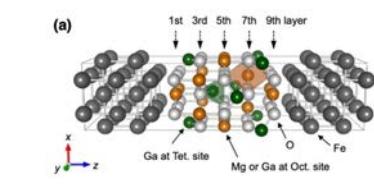
京都大学、早稲田大学との共同研究
(特任講師・関)

複合高分子安定構造探索



村松研究室(機械工学科)との共同研究

スピントロニクス材料



NIMS、TDK、三重大学、大阪大学との
共同研究

ソフトウェア開発の基礎・アルゴリズム開発(量子コンピューティング×情報科学×現代物理学)

大規模問題に対する対応法

デンソー、早稲田大学らとの
共同研究

(特任助教・菊池、D1・服部、M2・網野)

量子・古典ハイブリッド計算

リクルートらとの共同研究
(M2・金井)

AI×量子コンピューティング

デンソー、リクルートらとの共同研究
(特任講師・関、D1・中田、M2・福田、
M1・中野、B4・小川涼)

エネルギー地形変換

JST CRESTなどでの研究
(B4・岡部、B4・神田、B4・渡辺)

誤り率低減法

リクルートとの共同研究
(M2・日野、M1・高橋)

ハードウェア開発の基礎(量子コンピューティング×情報科学×現代物理学)

制約条件充足率の向上法

早稲田大学との共同研究
(B4・小川怜恩)

温度・量子ハイブリッド法

民間企業との共同研究、基盤研究(S)での
研究(M1・阿部)

整数・バイナリ変換

民間企業との共同研究
(特任助教・菊池、D2・上島)

多値変数

産業技術総合研究所との共同研究
(研究員・関)

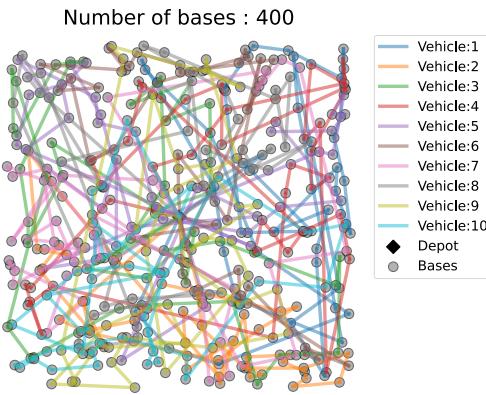
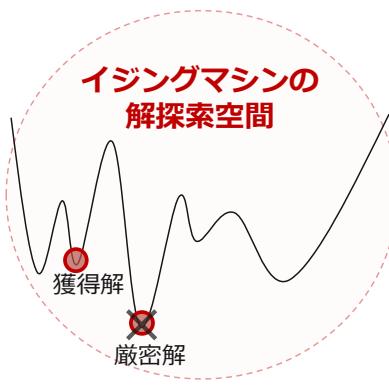
新規状態更新手法

NEDO事業での研究
(M2・網野)

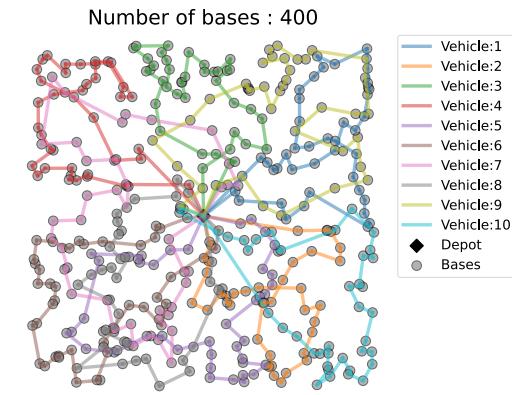
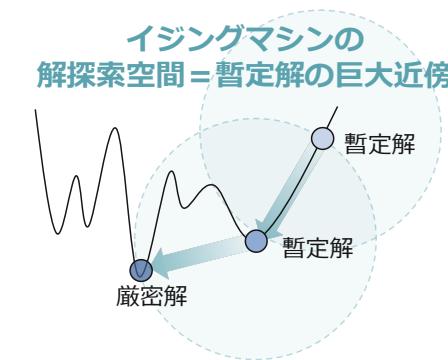
大規模問題に対するイジングマシン用ハイブリッドアルゴリズム

量子コンピューティングと従来コンピューティングの融合アルゴリズム イジングマシン&巨大近傍探索による大規模問題アルゴリズム提案

従来手法（ナイーブにイジングマシンを用いる方法）



巨大近傍探索（古典計算機）+イジングマシン



現場の社会課題のような、複数の制約条件を有する最適化問題では、ナイーブにイジングマシンを用いると、解精度が低くなったり、制約充足解が得られにくくなったりする。

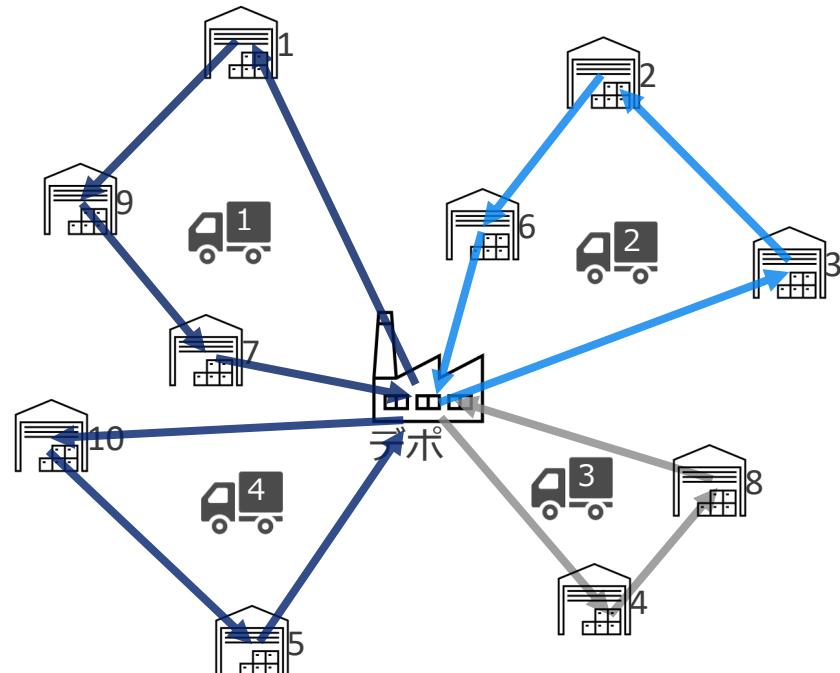
量子・古典ハイブリッド基礎アルゴリズム構築の他の例

- 列生成法(古典計算機向け数理最適化方法)とイジングマシン活用を組み合わせたアルゴリズム
- 大規模問題に対する問題縮小アルゴリズム

問題設定 | 制約条件付き組合せ最適化問題

配送計画問題 (Vehicle Routing Problems : VRP)^[10]

- K 台 の配送車が1箇所のデポから出発し, N 箇所の拠点全てに荷物を配送する.
- 配送は拠点 i を訪問した後, 距離 $l_{i,j}$ だけ離れた地点 j に随時移動する.
- 以下の三つの条件を満たす経路のうち, 最短経路を探索する.
 1. 全ての拠点は必ず一度ずつ, ある一台の配送車によって訪問される.
 2. 任意の配送車は一度に二つ以上の拠点を訪問することはできない.
 3. 任意の配送車はデポから出発し, いくつかの拠点を訪問後, デポに戻る.



問題設定 | 制約条件付き組合せ最適化問題

QUBO

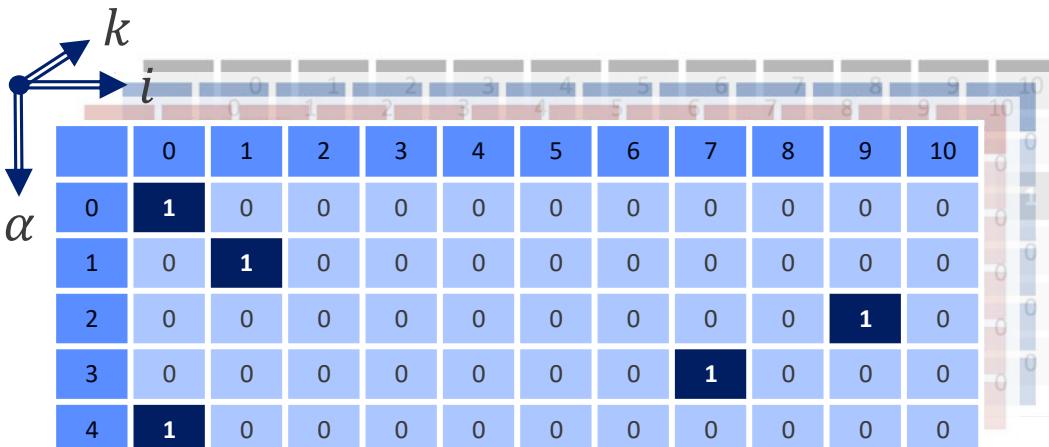
- 配送車 k が α 番目に拠点 i を訪問する場合に $n_{\alpha,i}^k = 1$, 訪問しない場合に $n_{\alpha,i}^k = 0$ となるバイナリ変数 $n_{\alpha,i}^k \in \{0,1\}$.
- 各配送車が拠点間を移動する回数の上限値 S ($[N/K] \leq S \leq N$).

$$\mathcal{H} = \sum_{k=1}^K \sum_{\alpha=0}^S \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^N l_{i,j} n_{\alpha,i}^k n_{\alpha+1,j}^k + \lambda \left(\sum_{i=1}^N \left(\sum_{k=1}^S \sum_{\alpha=0}^N n_{\alpha,i}^k - 1 \right)^2 + \sum_{\alpha=0}^S \sum_{k=1}^K \left(\sum_{i=0}^N n_{\alpha,i}^k - 1 \right)^2 \right)$$

総経路長 One-hot 制約 One-hot 制約

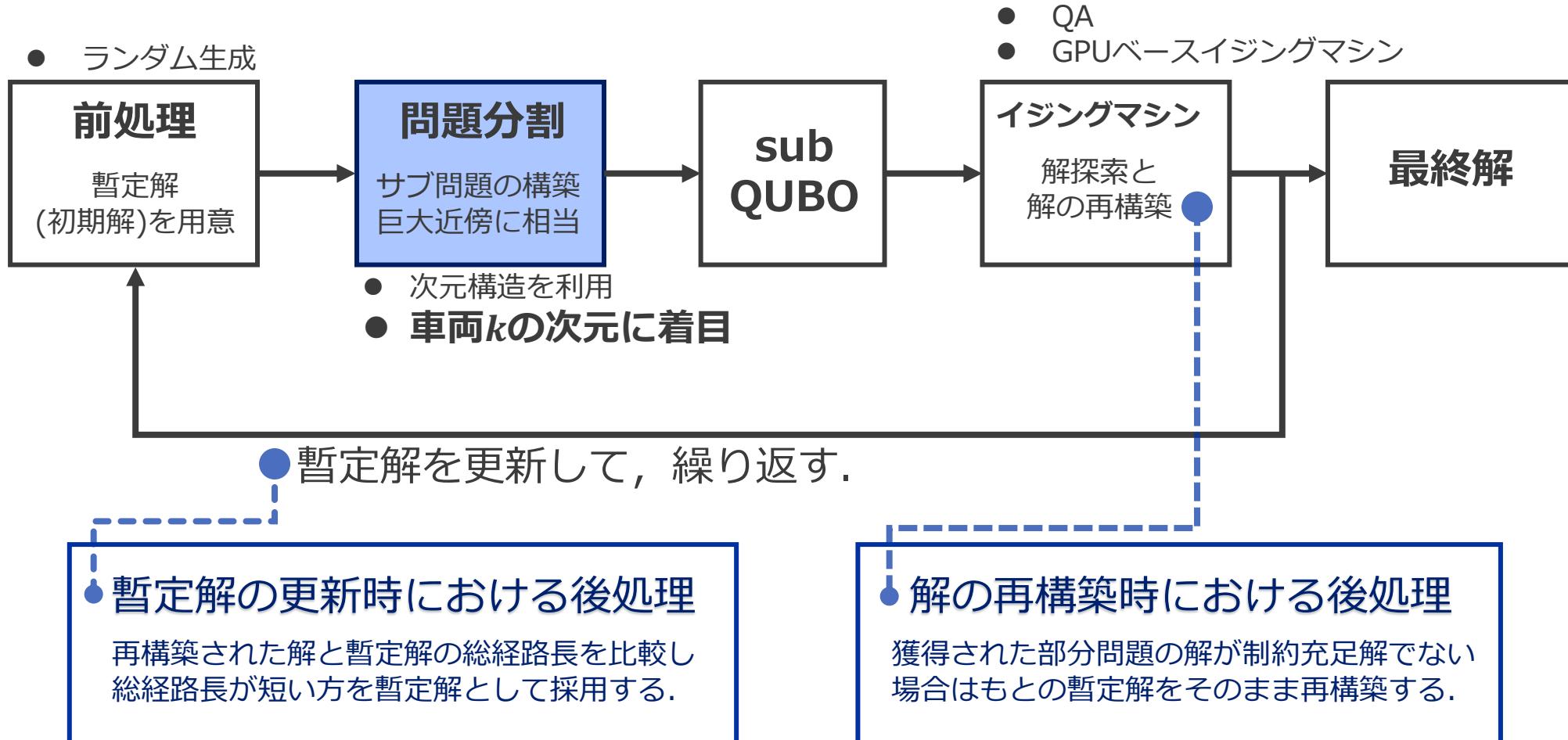
- $n_{0,0}^k = 1 (\forall k)$, $n_{S+1,j}^k = n_{0,j}^k (\forall k, j)$ を満たす.
- ペナルティ係数値は, $\lambda = \max[l_{i,j}]$ とする.

三次元構造をもつバイナリ変数



提案手法 | イジングマシンを用いたLNSアルゴリズム

制約条件付き組合せ最適化問題



提案手法 | イジングマシンを用いたLNSアルゴリズム

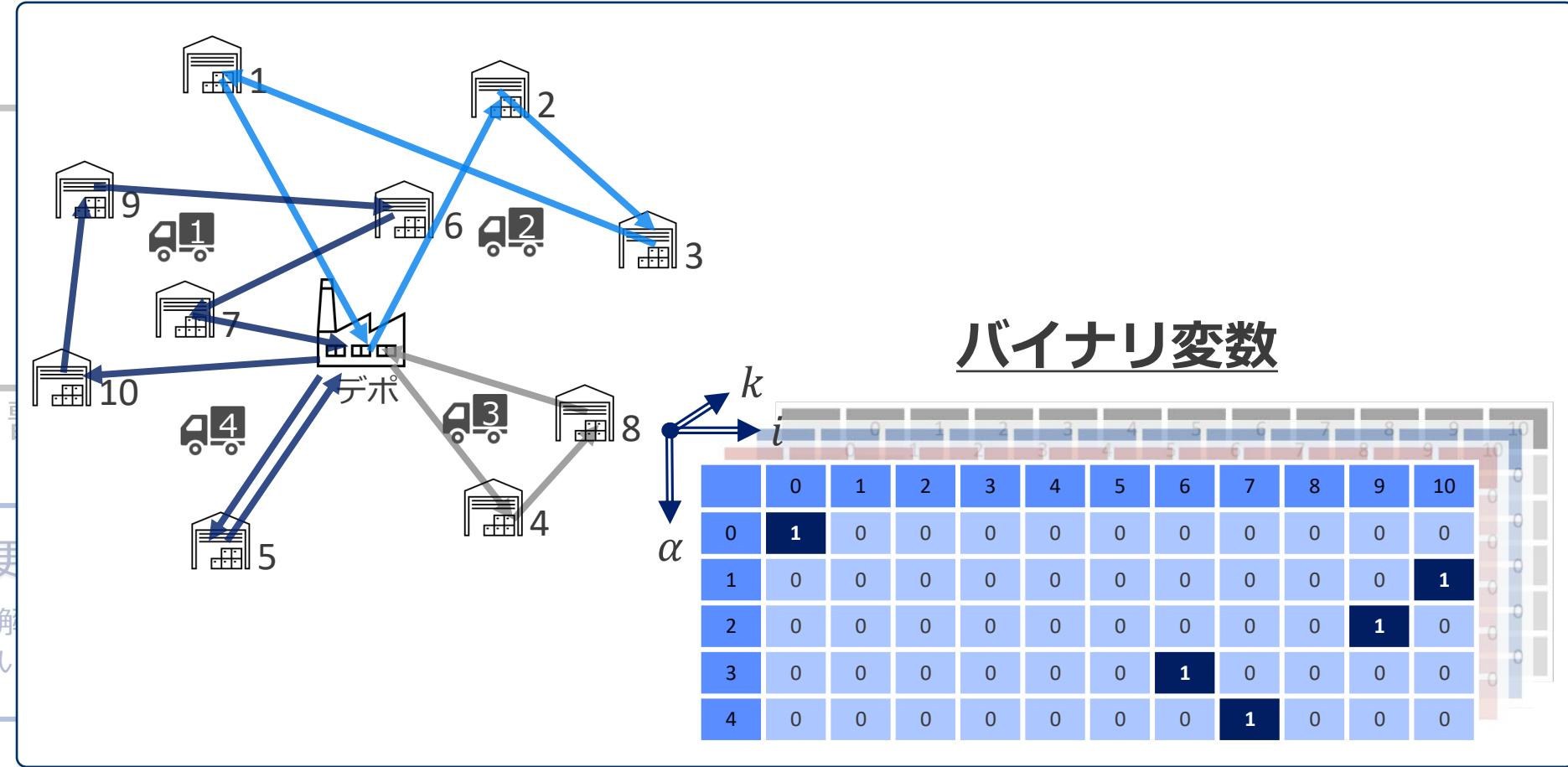
制約条件付き組合せ最適化問題

- ランダム生成

前処理

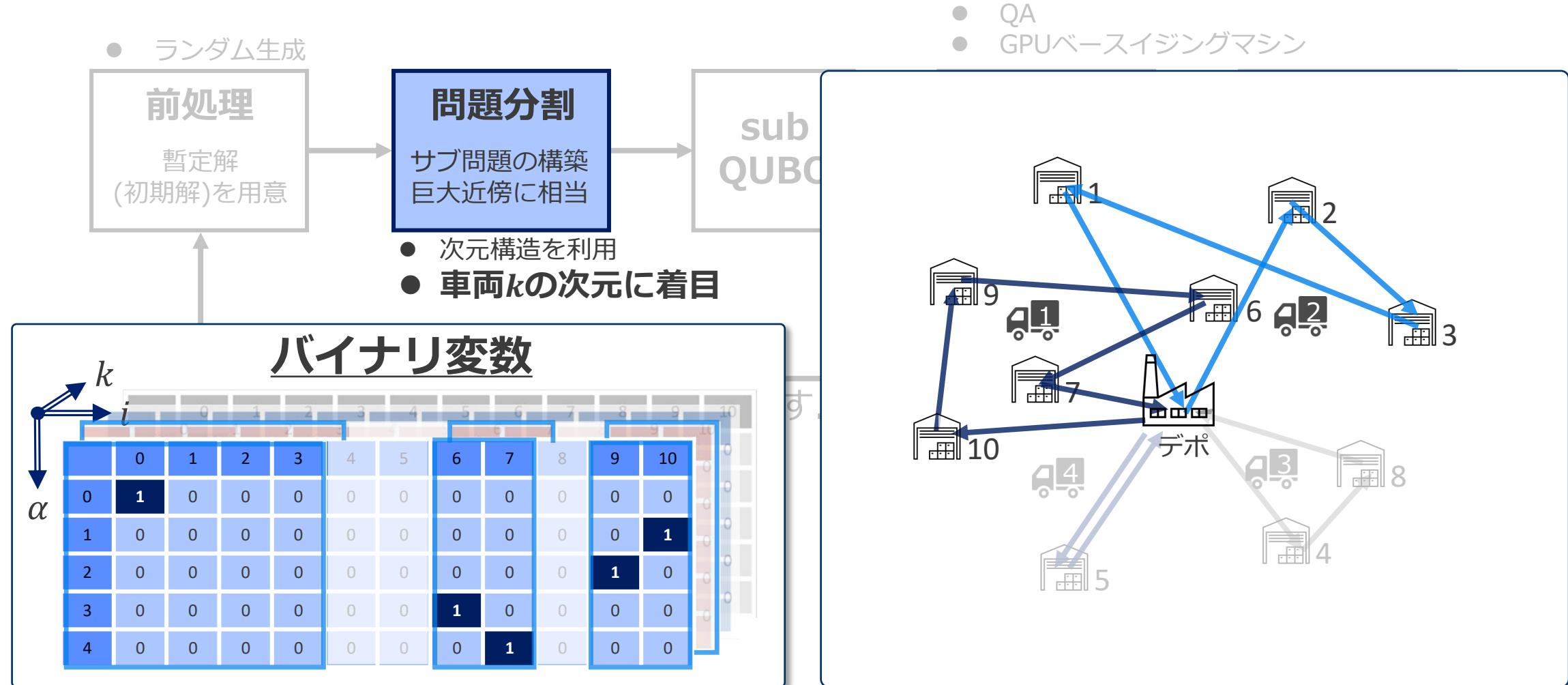
暫定解
(初期解)を用意

暫定解の更
再構築された解
総経路長が短い



提案手法 | イジングマシンを用いたLNSアルゴリズム

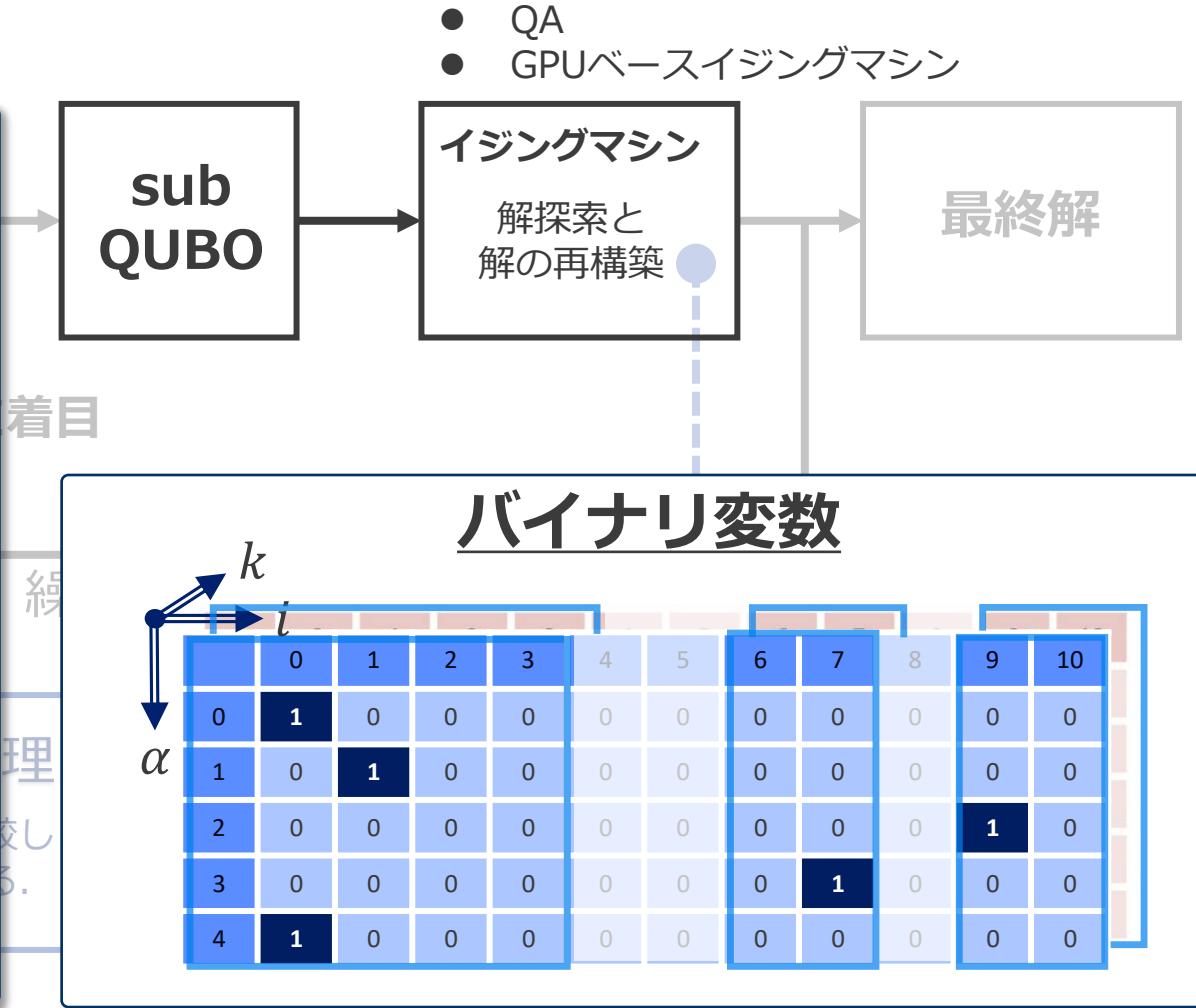
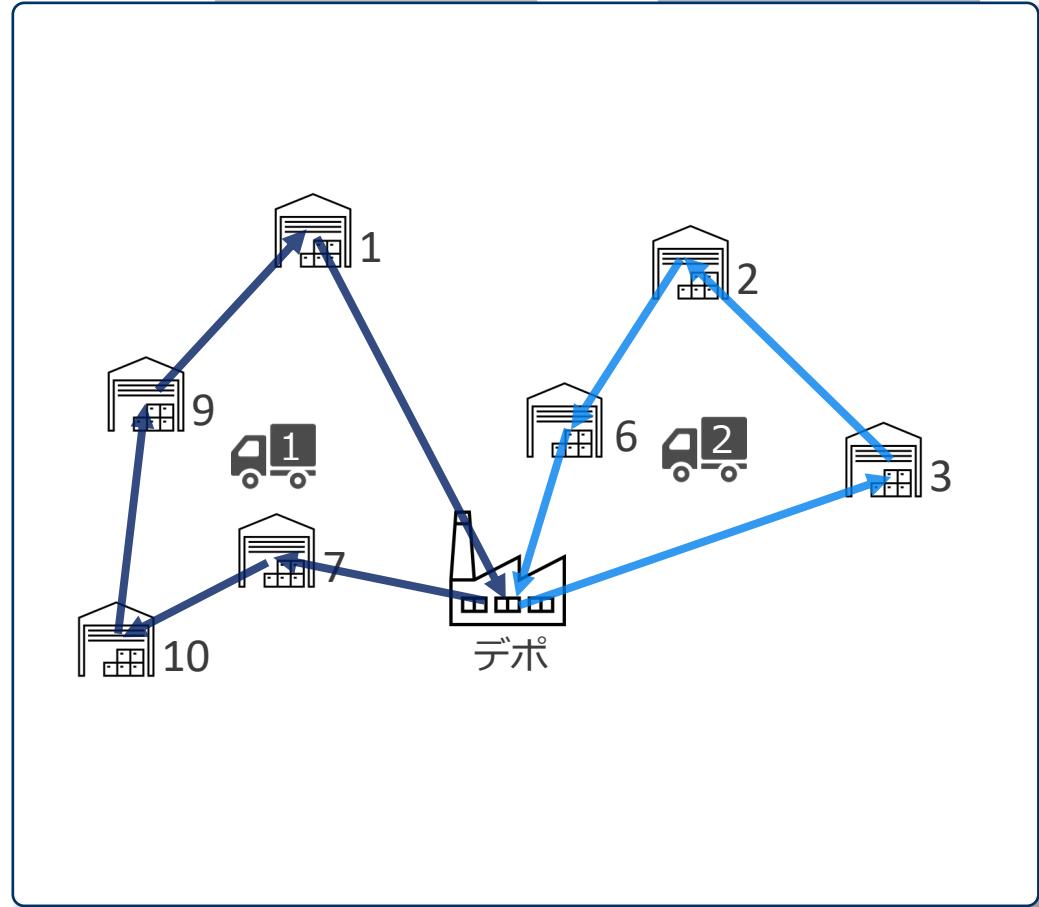
制約条件付き組合せ最適化問題



提案手法 | イジングマシンを用いたLNSアルゴリズム

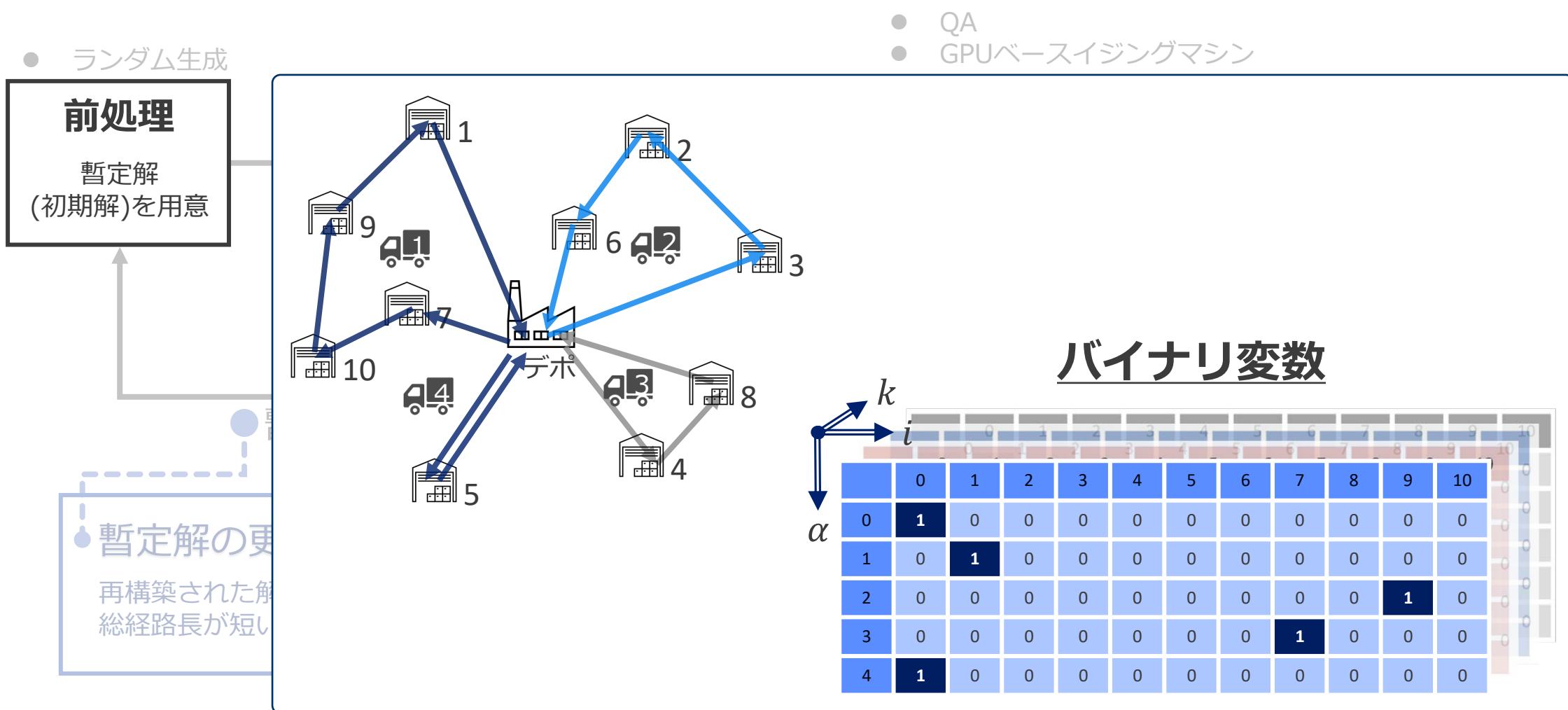
制約条件付き組合せ最適化問題

- ランダム生成



提案手法 | イジングマシンを用いたLNSアルゴリズム

制約条件付き組合せ最適化問題



数値計算結果 | 量子アニーリングマシン

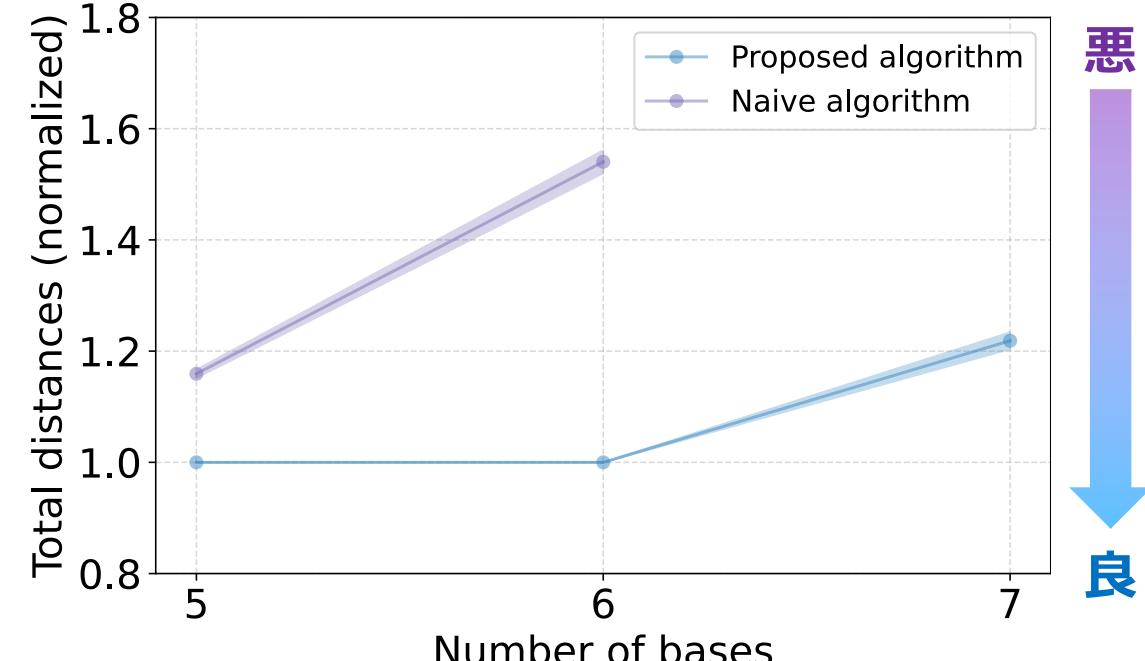
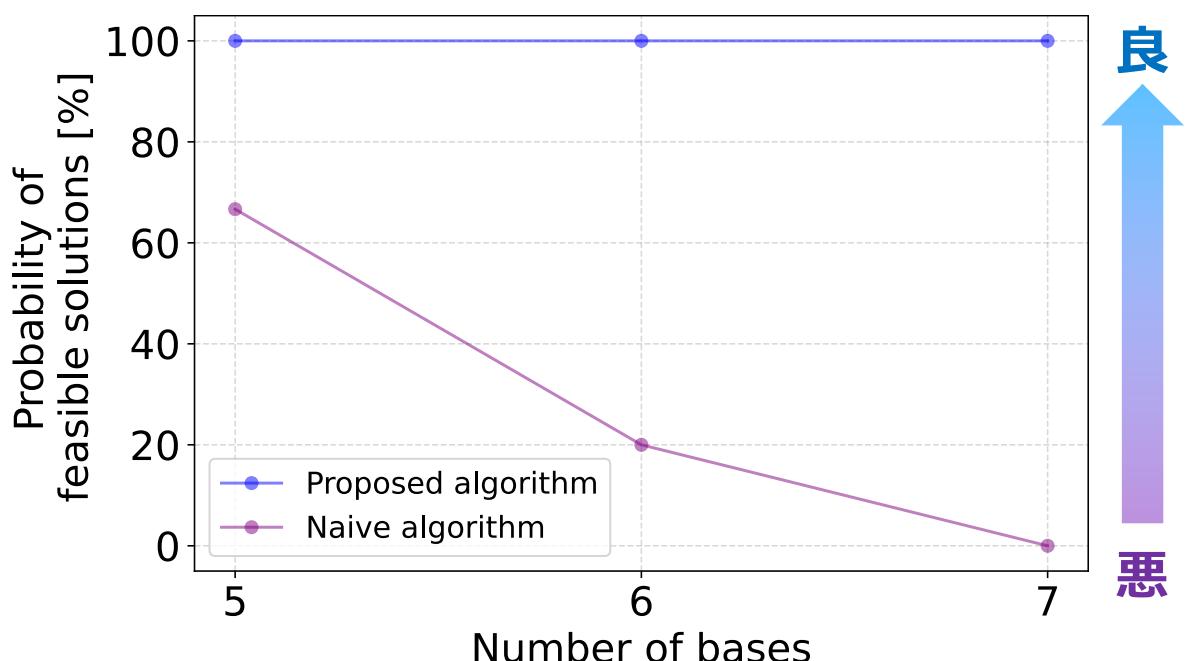
デポ	N	K	K'	S	1回の繰り返し毎の解の出力数	初期解のサンプル数	繰り返し回数	論理(物理)ビット数	アニーリング時間(μs)	イジングマシン	プロセッサ
1	5	3	2	3							
1	6	3	2	3	400	30	100	177 (5627)	20	D-Wave Advantage 4.1 ^[11]	QPU
1	7	3	2	4							

※ デポを中心に置き、各拠点の x 座標、 y 座標を0以上1以下の実数値から一様ランダムに N 個生成。

※ ナイーブアルゴリズムでは、繰り返し回数を1として、アニーリング時間を2000 μsとした。

※ 総経路長はpulpで実装した古典手法で求めた解をもとに規格化。

- ✓ ナイーブアルゴリズムでは、問題規模が大きくなると制約充足解が得られなくなっている。
- ✓ 提案アルゴリズムの方がナイーブアルゴリズムに比べ短い総経路長の解が得られている。



数値計算結果 | GPUベースイジングマシン

M. Yamashita and S. Tanaka,
in preparation.

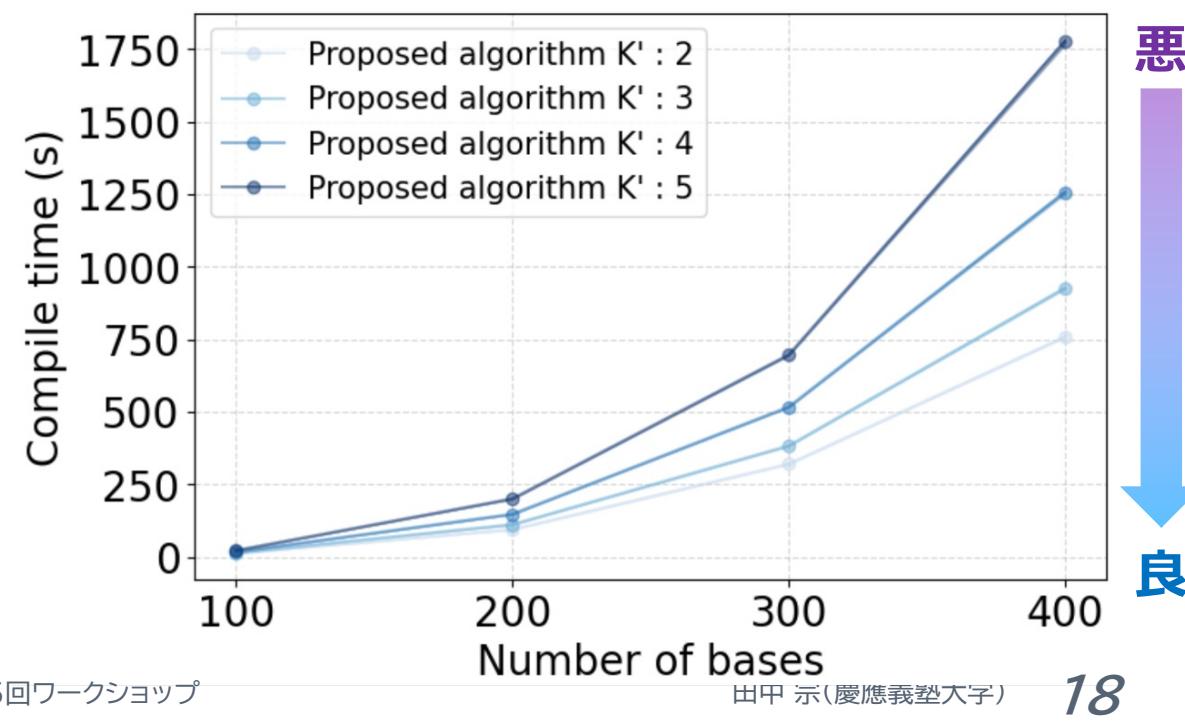
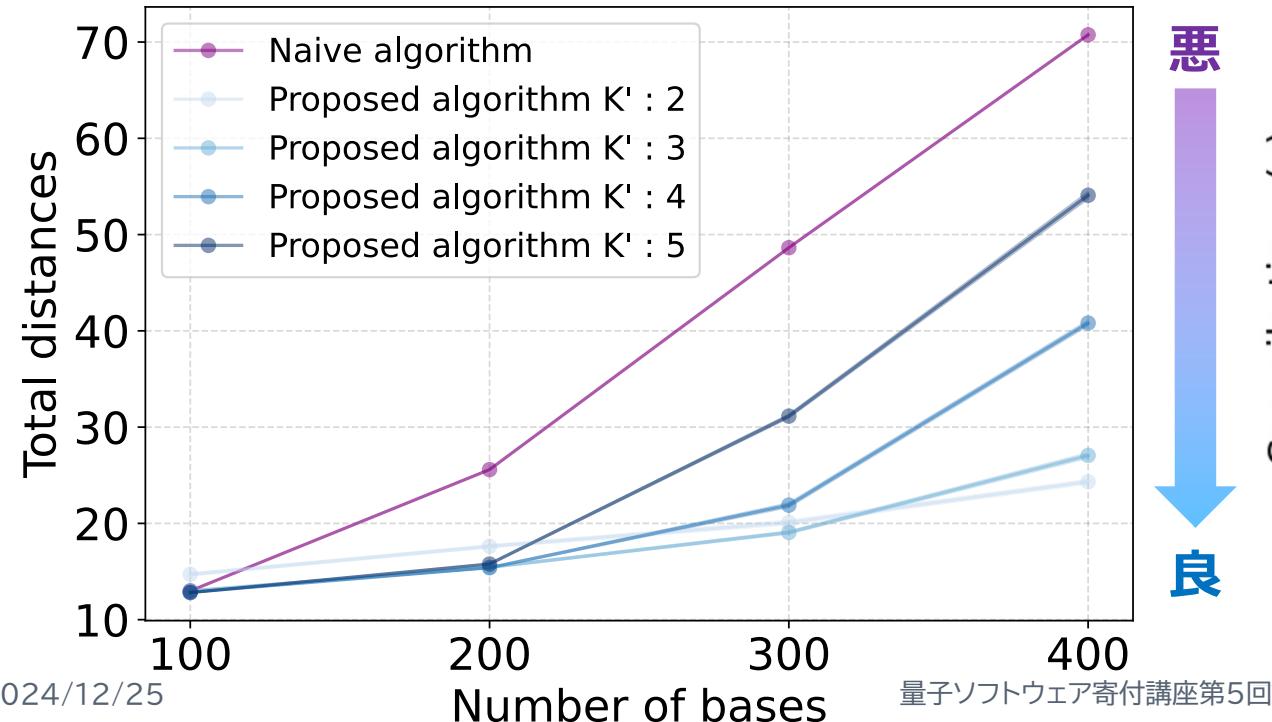
デポ	N	K	K'	S	1回の繰り返し毎の解の出力数	初期解のサンプル数	繰り返し回数	論理 (物理) ビット数	アニーリング時間 (s)	イジングマシン	プロセッサ
1	100	10	2~5	10							
1	200	10	2~5	20							
1	300	10	2~5	30	1	30	60	131,072 (262,144)	10	Fixstars Amplify AE ^[12] (FAAE)	
1	400	10	2~5	40							GPU

※ ナイーブアルゴリズムでは、繰り返し回数を1として、アニーリング時間を600 sとした。

※ デポを中心に置き、各拠点の x 座標、 y 座標を0以上1以下の実数値から一様ランダムに N 個生成。

- ✓ 提案アルゴリズムでナイーブアルゴリズムに比べ短い総経路長の解を獲得。
- ✓ 問題規模が大きくなるにつれて提案アルゴリズムの優位性が増加。

- ✓ 問題規模が大きくなるにつれてコンパイル時間も増加。



数値計算結果 | GPUベースイジングマシン

M. Yamashita and S. Tanaka,
in preparation.

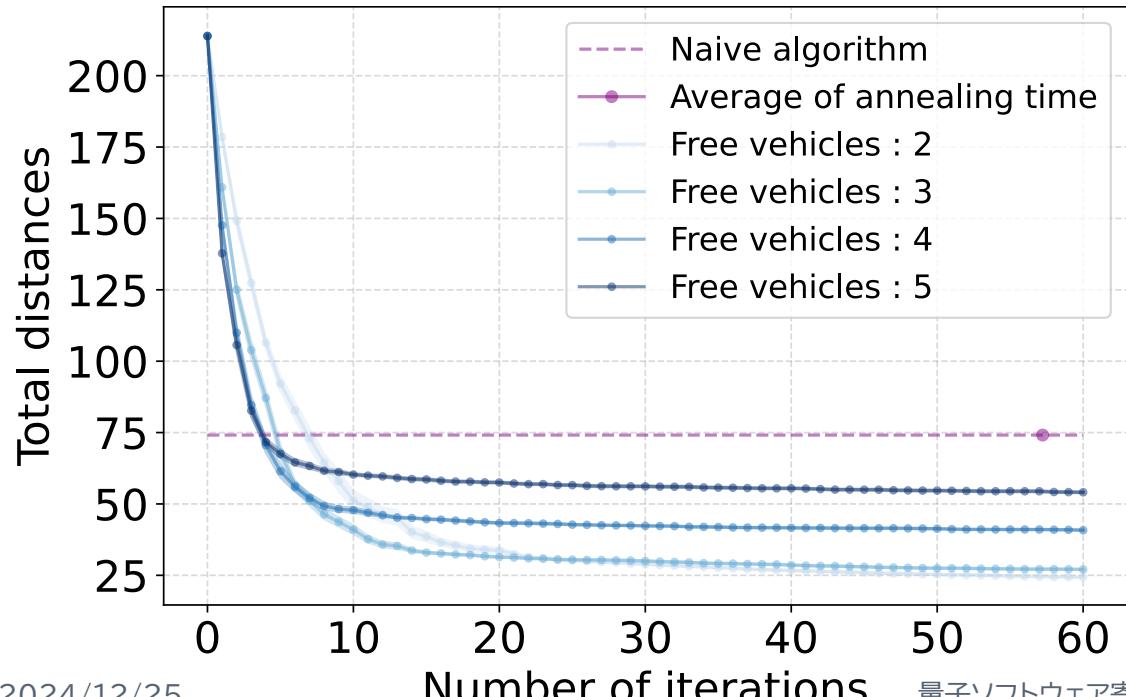
デポ	N	K	K'	S	1回の繰り返し毎の解の出力数	初期解のサンプル数	繰り返し回数	論理 (物理) ビット数	アニーリング時間 (s)	イジングマシン	プロセッサ
1	100	10	2~5	10							
1	200	10	2~5	20							
1	300	10	2~5	30	1	30	60	131,072 (262,144)	10	Fixstars Amplify AE ^[12] (FAAE)	
1	400	10	2~5	40							GPU

※ ナイーブアルゴリズムでは、繰り返し回数を1として、アニーリング時間を600 sとした。

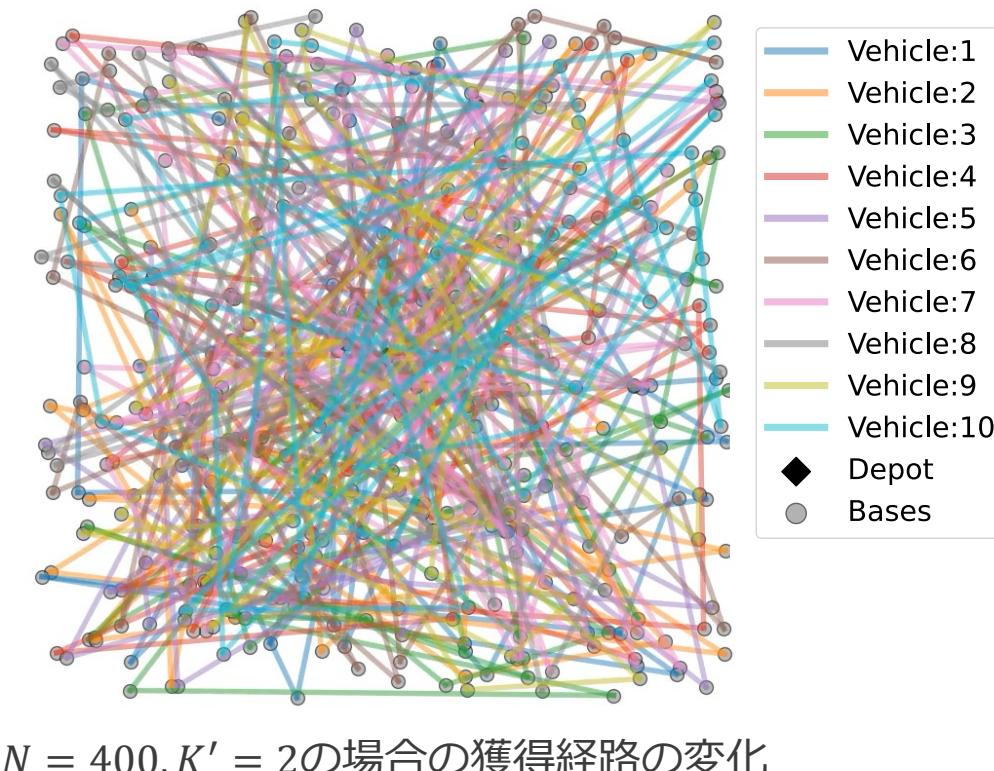
※ デポを中心に置き、各拠点のx座標、y座標を0以上1以下の実数値から一様ランダムに N 個生成。

The number of sequential optimizations:0

- ✓ 非常に少ない繰り返し回数でナイーブアルゴリズムと同程度の経路集合が得られている。

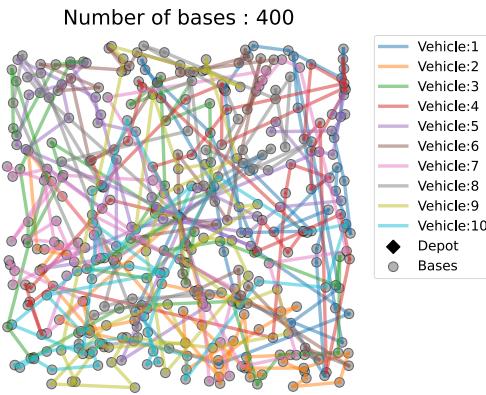
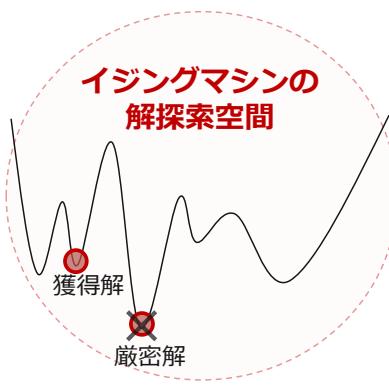


悪
↓
良



量子コンピューティングと従来コンピューティングの融合アルゴリズム イジングマシン&巨大近傍探索による大規模問題アルゴリズム提案

従来手法（ナイーブにイジングマシンを用いる方法）

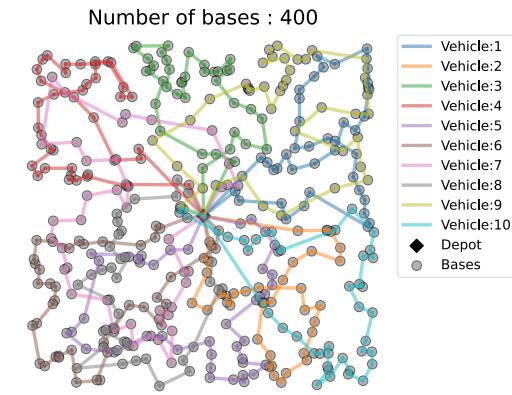
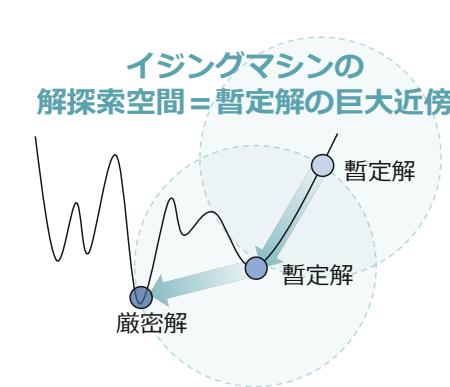


現場の社会課題のような、複数の制約条件を有する最適化問題では、ナイーブにイジングマシンを用いると、解精度が低くなったり、制約充足解が得られにくくなったりする。

量子・古典ハイブリッド基礎アルゴリズム構築の他の例

- 列生成法(古典計算機向け数理最適化方法)とイジングマシン活用を組み合わせたアルゴリズム
- 大規模問題に対する問題縮小アルゴリズム

巨大近傍探索（古典計算機）+イジングマシン



巨大近傍探索の考え方を組み合わせることにより、イジングマシンの性能を引き出すことが可能になる。

列生成法とイジングマシン活用を組み合わせたアルゴリズム

- 様々な業種で必要とされている配送計画問題に対し、列生成法とイジングマシン活用を組み合わせたアルゴリズムを構築し、その評価を行った。

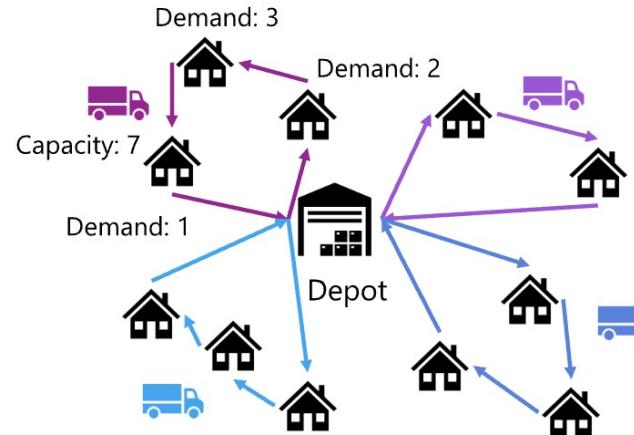


FIGURE 2. The brief image of CVRP. Each vehicle departs from and returns to the depot. Each customer has demand d_i , and the total demand of one single route must not exceed the capacity of each vehicle Q .

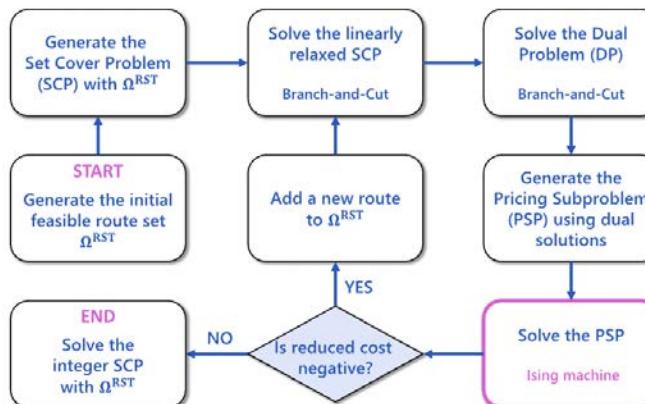


FIGURE 4. A flowchart of column generation. To optimize the set cover problem and the dual problem, we used CBC solver of PuLP. Besides, we applied an Ising machine to the pricing subproblem to speed up and handle this bottleneck.

TABLE 3. The objective value, lower bound, and the number of iterations for CG, Limited CG, and AE. The table lists mean and standard deviations. Best means are indicated in bold.

σ_d	Objective value			Lower bound		The number of iterations	
	CG	Limited CG	AE	CG	Limited CG	CG	Limited CG
0.00	38.54 ± 0.44	38.41 ± 0.15	41.16 ± 1.28	37.02 ± 0.12	36.95 ± 0.09	492.9 ± 24.8	425.6 ± 25.64
2.90	46.37 ± 1.32	45.51 ± 0.82	71.81 ± 4.72	44.51 ± 0.79	43.02 ± 0.60	338.4 ± 26.62	313.0 ± 24.08
9.15	60.95 ± 5.57	57.55 ± 3.67	73.61 ± 2.95	53.46 ± 1.28	51.70 ± 1.36	222.4 ± 24.96	228.1 ± 29.37
13.9	69.03 ± 9.40	71.23 ± 8.88	71.01 ± 4.18	54.29 ± 1.06	53.90 ± 1.15	233.0 ± 33.61	216.3 ± 24.31
27.3	73.31 ± 4.45	75.29 ± 0.00	74.06 ± 6.10	52.95 ± 0.85	51.80 ± 0.66	188.0 ± 22.74	182.7 ± 18.08

- 提案手法が優位であることを示した.
 - イジングマシンと従来型コンピュータのやり取りを多く必要とするアルゴリズムであり, この部分を高速化できるとありがたい.

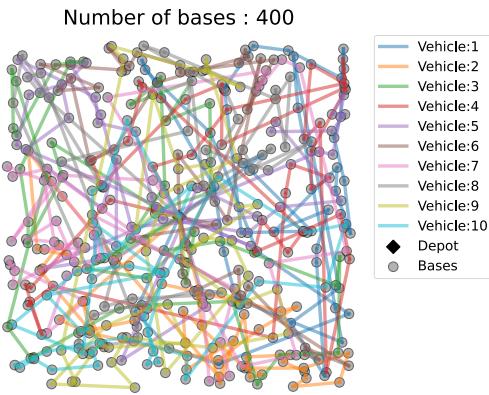
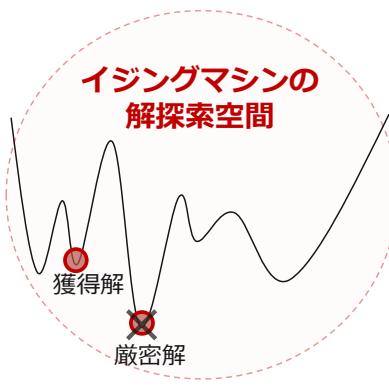
Annealing-Assisted Column Generation for Inequality-Constrained Combinatorial Optimization Problems

Hiroshi Kanai, Masashi Yamashita, Kotaro Tanahashi,
and Shu Tanaka

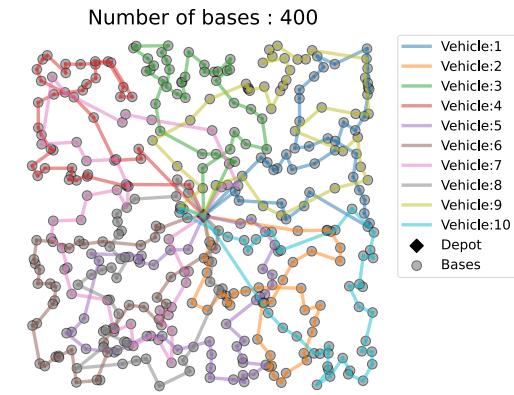
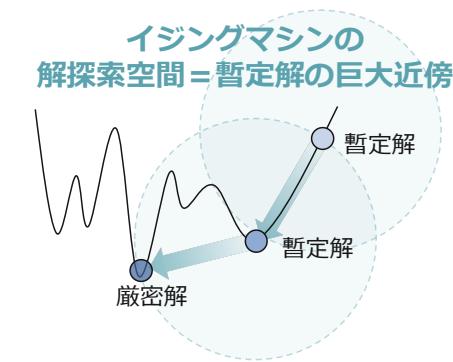
IEEE Access, 12, 157669-157685 (2024). [link]

量子コンピューティングと従来コンピューティングの融合アルゴリズム イジングマシン&巨大近傍探索による大規模問題アルゴリズム提案

従来手法（ナーブにイジングマシンを用いる方法）



巨大近傍探索（古典計算機）+イジングマシン



現場の社会課題のような、複数の制約条件を有する最適化問題では、ナーブにイジングマシンを用いると、解精度が低くなったり、制約充足解が得られにくくなったりする。

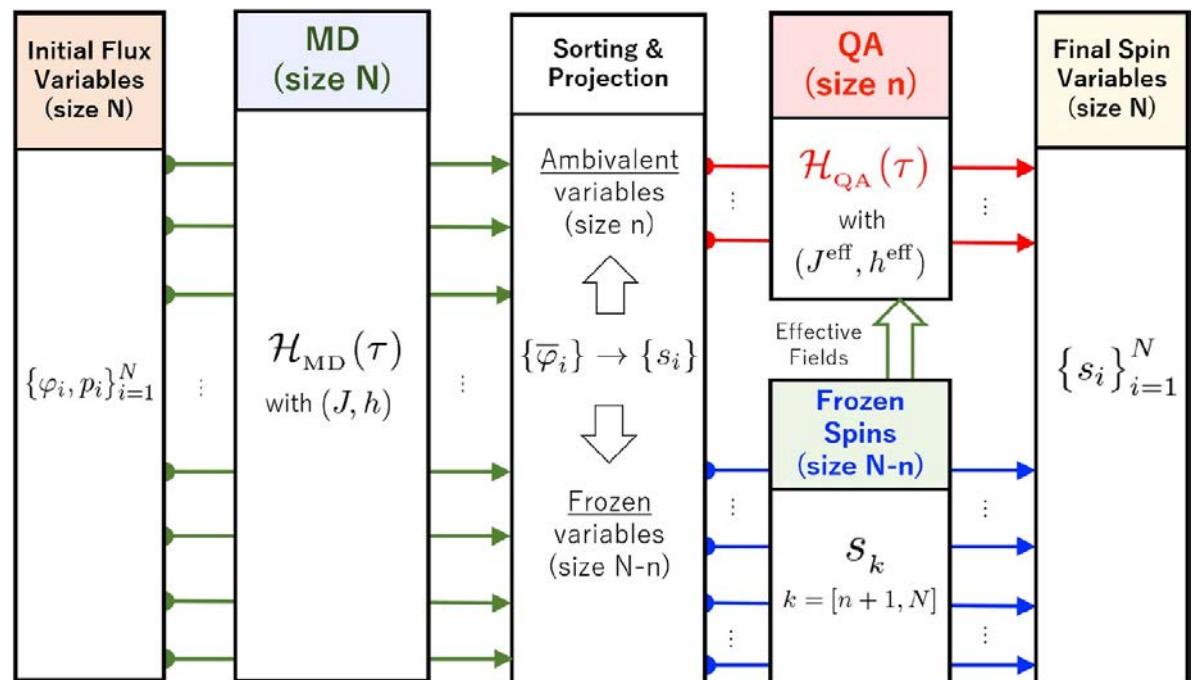
量子・古典ハイブリッド基礎アルゴリズム構築の他の例

- 列生成法(古典計算機向け数理最適化方法)とイジングマシン活用を組み合わせたアルゴリズム
- 大規模問題に対する問題縮小アルゴリズム

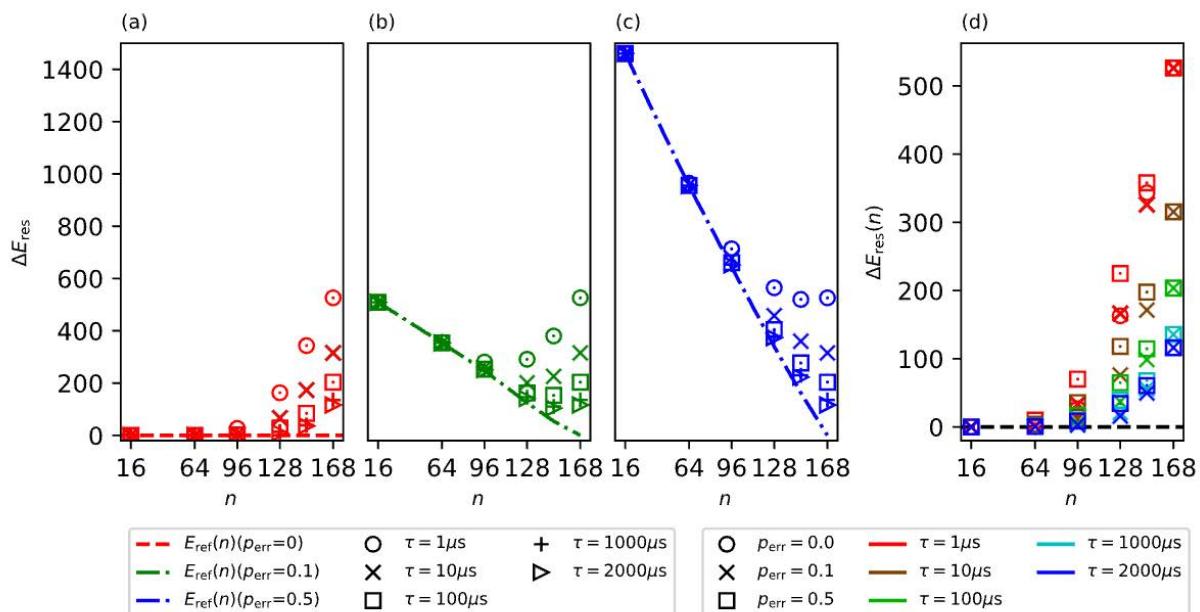
大規模問題に対する問題縮小アルゴリズムの物理特性

- 大規模問題における変数固定に誤りがある場合の残留エネルギーの振る舞いについて、D-Wave実機を用いた実験をもとに解析した。

変数固定手法



D-Waveを用いた実験



H. Irie et al., Scientific Reports 11, 8426 (2021).

T. Hattori et al., Journal of the Physical Society of Japan 94, 013001 (2025).

イジングマシン×リアル現場

イジングマシン × リアル現場



デモ&チュートリアル 製品紹介 リソース セミナー お客様事例 会社紹介 スケジュール最適化

現場で愛されて育つ、量子コンピュータ技術活用

～物流センターにおける従業員最適配置システムの稼働～



住友商事株式会社 物流インフラ事業本部の皆様

Fixstars Amplify webサイト より引用

<https://amplify.fixstars.com/ja/customers/interview/magiQanneal>

住友商事 植田様：

…さらに**最も絶大な成果**として、従業員配置案作成担当者的心的負担の軽減というものがあります。実は配置案作成担当者は、「様々な立場の方からの要望に応えた最適な従業員配置案を作成しなくてはならない」という強いプレッシャーがあり、日々の心的負担はかなり重いものでした。例えば、ある真面目な従業員配置案作成担当者は、現場スタッフの皆さんから受けた様々な要望を逐一メモに取り、帰宅後もその要望に応えようと試行錯誤したり、最適な解を見つけられないのかもしれないということに悩んでいたりしていました。しかし、**magiQanneal**の導入によって、解に対する責任や納得感をシステムが肩代わりすることになつたため、従業員配置案作成担当者の心的負担は随分と軽減されました。

イジングマシン × リアル現場

- 田中宗がCTOを務める量子スタートアップQuanmaticとローム株式会社との取り組み事例では、大規模半導体製造工場におけるリアル現場最適化を実施。



ローム、Quanmatic社と量子技術による製造工程最適化の実証完了
大規模半導体製造工場では世界初^{*}の成果、2024年4月にEDS工程^{*1}で本格導入を目指す

ニュース | 採用 |

製品情報 技術サポート アプリケーション 購入・サポート 企業



ローム、Quanmatic社と量子技術による製造工程最適化の実証完了
大規模半導体製造工場では世界初^{*}の成果、2024年4月にEDS工程^{*1}で本格導入を目指す

*2023年12月5日ローム調べ

2023年12月5日

ローム株式会社（本社：京都市、以下ローム）は、2023年1月より株式会社Quanmatic（クオンマティク、本社：東京都新宿区、以下Quanmatic社）と協働で、半導体製造工程の一部であるEDS工程に量子技術を試験導入し、製造工程における組合せ最適化を目指す実証を進めておりました。このたび生産効率改善において一定の成果が得られ、2024年4月に本格導入を目指すこととなりましたので、お知らせします。なお、半導体製造工場の大規模量産ラインにおいて、量子技術による製造工程の最適化を実証したことは世界初の成果となります。

ローム株式会社 webサイト より引用
https://www.rohm.co.jp/news-detail?news-title=2023-12-05_news&defaultGroupId=false

ローム株式会社 取締役 上席執行役員 CTO 立石 哲夫

「脱炭素社会の実現に向けて、半導体の役割は、ますます大きくなり、その安定供給は社会課題の一つにもなっています。今回、量子技術を用いて、大規模な量産ラインに適したオペレーションシステムを開発できたことは、半導体製造業界にとっても大きな一步で、リアルタイムでの生産オペレーションの最適化を可能とします。現状にとどまらず、幅広い工程へ量子技術やその関連手法の導入を加速し、より全体最適のサプライチェーンを構築することで、安定供給体制の強化を目指してまいります。」

イジングマシンを用いたブラックボックス最適化の研究

Factorization Machine with Quantum Annealing (FMQA)

量子・イジングマシン

組合せ最適化問題を
高速・高精度に解くための技術

高効率な最適化処理に利用

Quantum Annealing



Factorization Machine

機械学習

データからモデルを推定する
技術

最適化問題の自動定式化
に利用

Experiment

シミュレーション・実験

最適化対象のデータ生成

従来の定式化:QUBO表現

イジングマシンの従来の解法では、バイナリ変数の2次式で最適化問題のコスト関数を定式化する必要がある。

$$f(\mathbf{x}) = c + \sum_{i \leq j} Q_{ij} x_i x_j \quad x_i \in \{0, 1\} \quad c \in \mathbb{R} \quad Q_{ij} \in \mathbb{R}$$



組合せ最適化問題のコスト関数のQUBO形式がわからない場合はどうしたら良い？



コスト関数（ハミルトニアン）をデータから推定することで構築する。

Kitai et al., Phys. Rev. Research 2, 013319 (2020). Baptista et al., International Conference on Machine Learning, 462 (2018).

Koshikawa et al., arXiv:2110.00226 (2021).

ブラックボックス最適化問題とその解法

ブラックボックス最適化問題はコスト関数のQUBO定式化が困難な典型例.

ブラックボックス関数を代理モデルで表現する最適化手法が存在する.

典型例 | ブラックボックス最適化問題

Black-box function

$$f(x) = ?$$

- 不明な解析形
- 高い評価コスト

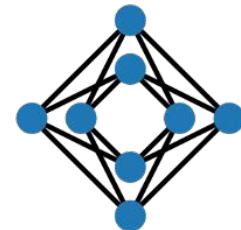


0011011001

Black-box function



Surrogate model



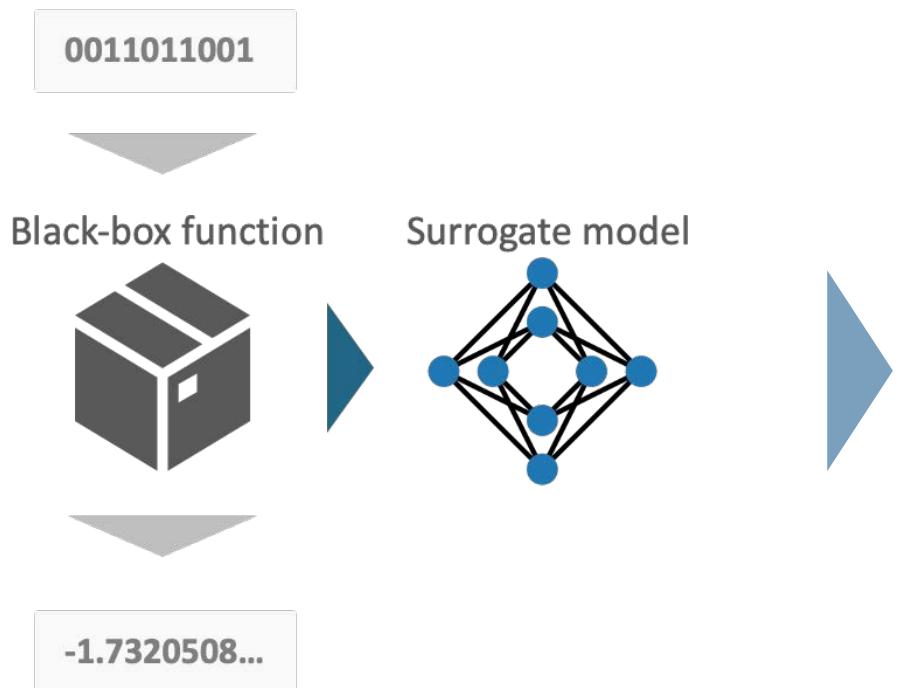
-1.7320508...

ブラックボックス最適化問題とその解法

ブラックボックス最適化問題はコスト関数のQUBO定式化が困難な典型例.

ブラックボックス関数を代理モデルで表現する最適化手法が存在する.

典型例 | ブラックボックス最適化問題



Factorization machine

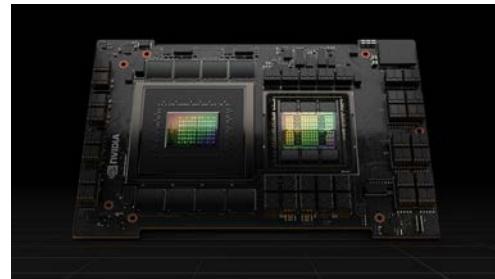
$$y(\mathbf{x}) = w_0 + \sum_{i=1}^n w_i x_i + \sum_{i,j \ (i < j)} \langle \mathbf{v}_i, \mathbf{v}_j \rangle x_i x_j$$

$$w_0, \ \mathbf{w}, \ V = (\mathbf{v}_1, \dots, \mathbf{v}_n) \in \mathbb{R}^{k \times n}$$

- ✓ 関数は入力変数の2次式で陽に与えられる
- ✓ 入力に対する出力を $O(kn)$ の計算量で得られる
- ✓ 学習に要する計算量も $O(kn)$ となる

機械学習と量子最適化の融合

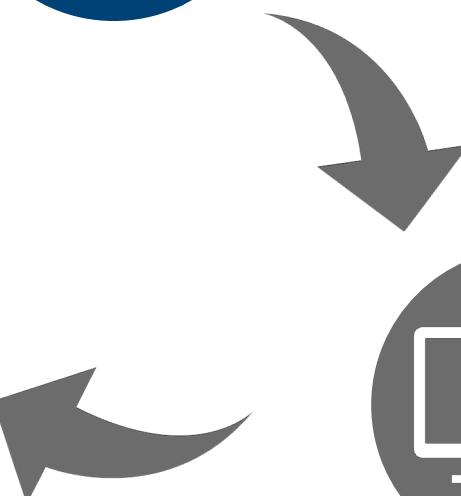
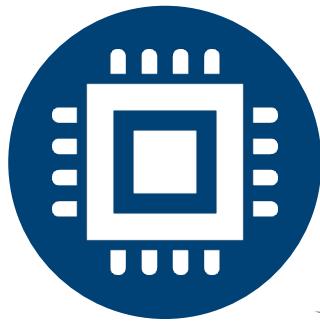
量子最適化技術と機械学習を融合することで**幅広い最適化問題を高速・高精度に処理**する技術を発展させる。量子デバイスとGPUを連携させることで、高効率な最適化処理が実現可能となる。



機械学習

データからモデルを推定する
技術

最適化問題の自動定式化
に利用



量子・イジングマシン

組合せ最適化問題を
高速・高精度に解くための技術
高効率な最適化処理に利用



シミュレーション・実験

最適化対象のデータ生成

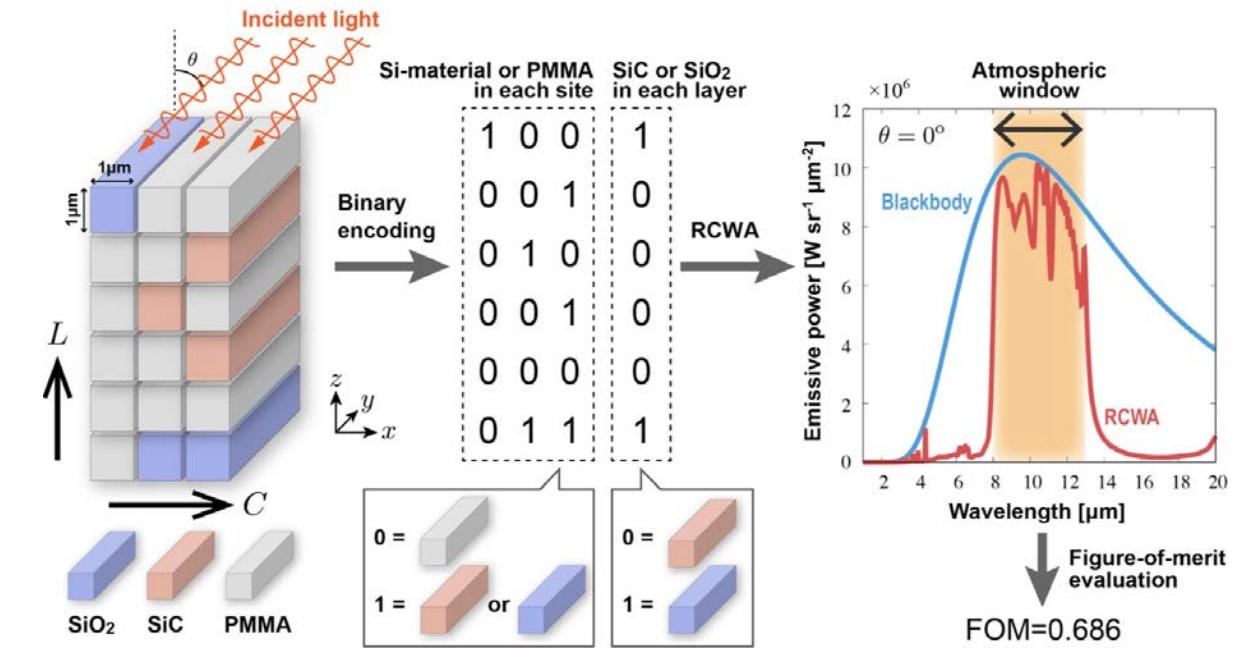
Factorization Machine with Quantum Annealing (FMQA)

現存の課題

- 構造のパターンが膨大にある物質群の中から、高性能な物質構造を探索する必要がある。
- 既存の物質シミュレータを用いて、全ての構造パターンに対して物性計算することは事実上不可能である。

量子アニーリングによる課題解決

- マテリアルズインフォマティクス(材料×AI)に対し、量子アニーリングを利用できる方法を新しく提案。
- 量子アニーリングマシン最新機種D-Wave 2000Qを用いた概念実証を実施。
- 最適構造を見つけるために必要な計算時間が圧倒的に短縮された。
- すでに利用している物性シミュレータをそのまま利用できるため、導入コストは非常に低い。



K. Kitai, J. Guo, S. Ju, S. Tanaka, K. Tsuda, J. Shiomi, R. Tamura,
Phys. Rev. Res. 2, 013319 (2020).

Factorization Machine with Quantum Annealing (FMQA)

Training dataset

Dataset are generated by evaluating a black-box function.

Input =	01010	0.0
	00000	-1.0
	11111	1.0
	11000	0.0

Output =



Constructing surrogate model

Training a machine learning model.

01010	0.2
00000	-0.8
11111	1.1
11000	0.0

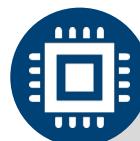
Back prop.



Simulation or experiments

Evaluate the samples obtained by D-Wave machine.

01001	0.1
00000	-1.0
11101	0.9
11010	0.2



Sampling by D-Wave machine

Low energy samples are generated by D-Wave machine.

01001
00000
11101
11010

D-Wave machine

K. Kitai et al., Phys. Rev. Research 2, 013319 (2020)

Y. Seki et al., arXiv:2209.01016 (2022)

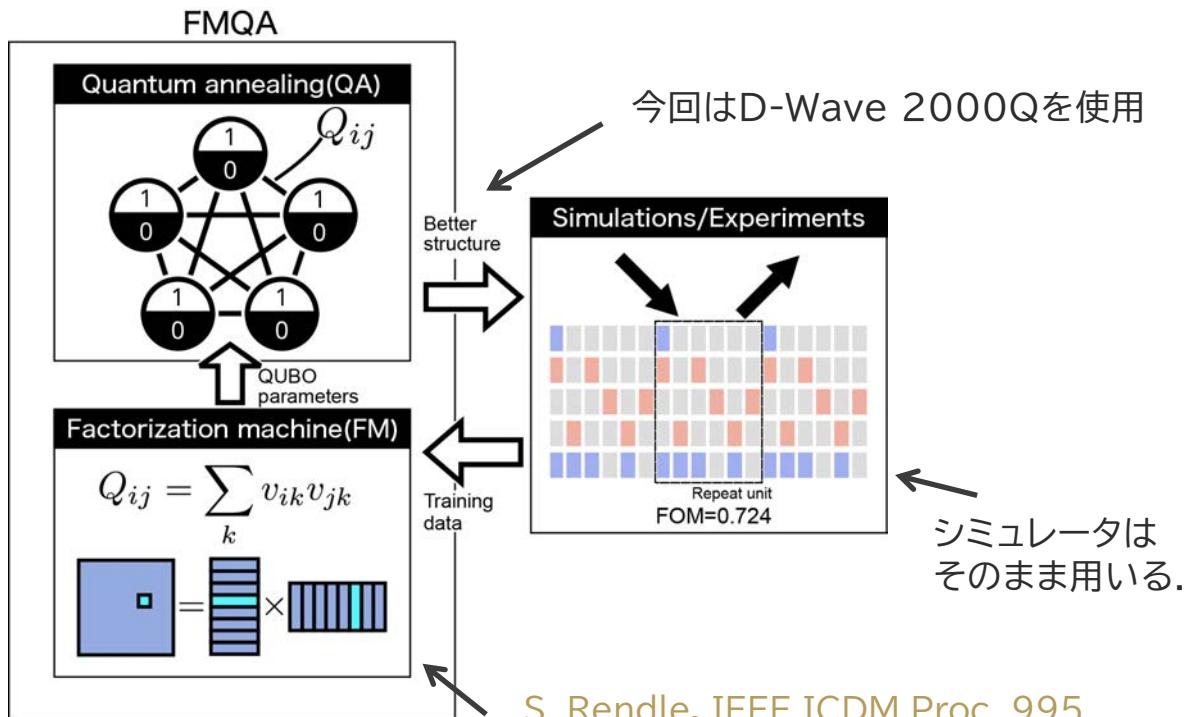
田中, 山下, 関, 日本神経回路学会誌29巻164 (2022)

Factorization Machine with Quantum Annealing (FMQA)

現存の課題

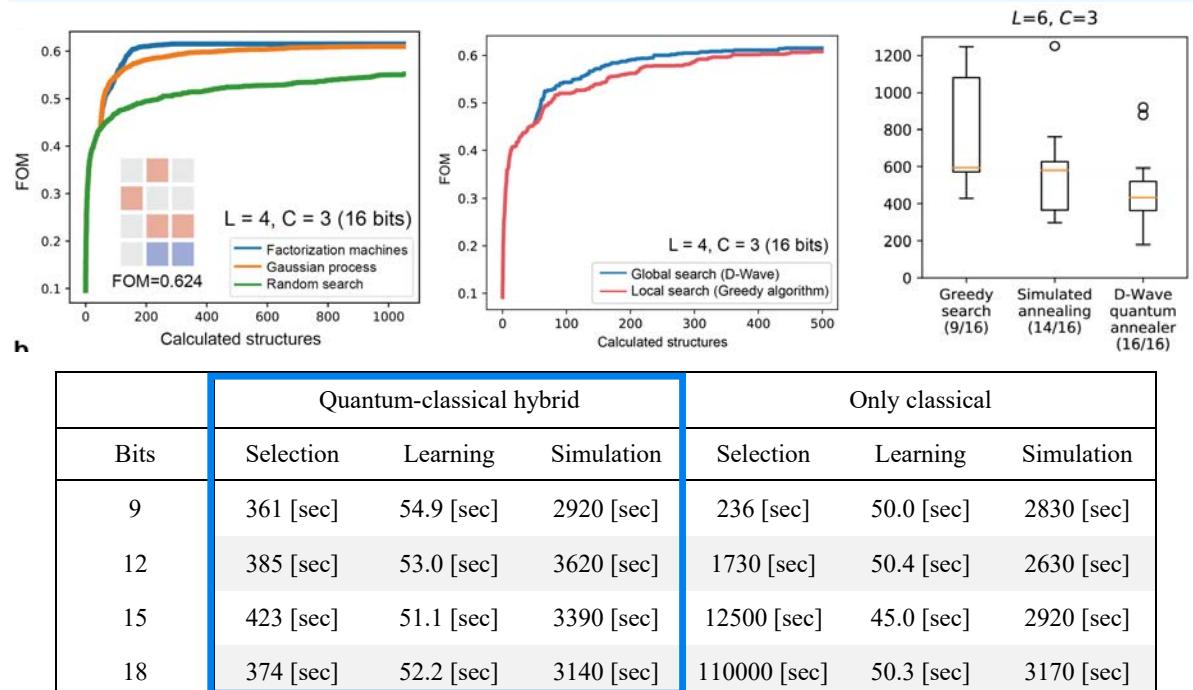
- 構造のパターンが膨大にある物質群の中から、高性能な物質構造を探索する必要がある。
 - 既存の物質シミュレータを用いて、全ての構造パターンに対して物性計算することは事実上不可能である。

「置き換え型」ではなく「アドオン型」



S. Rendle, IEEE ICDM Proc. 995
(2010), ACM Transactions on
Intelligent Systems and Technology,
3, 57 (2012).

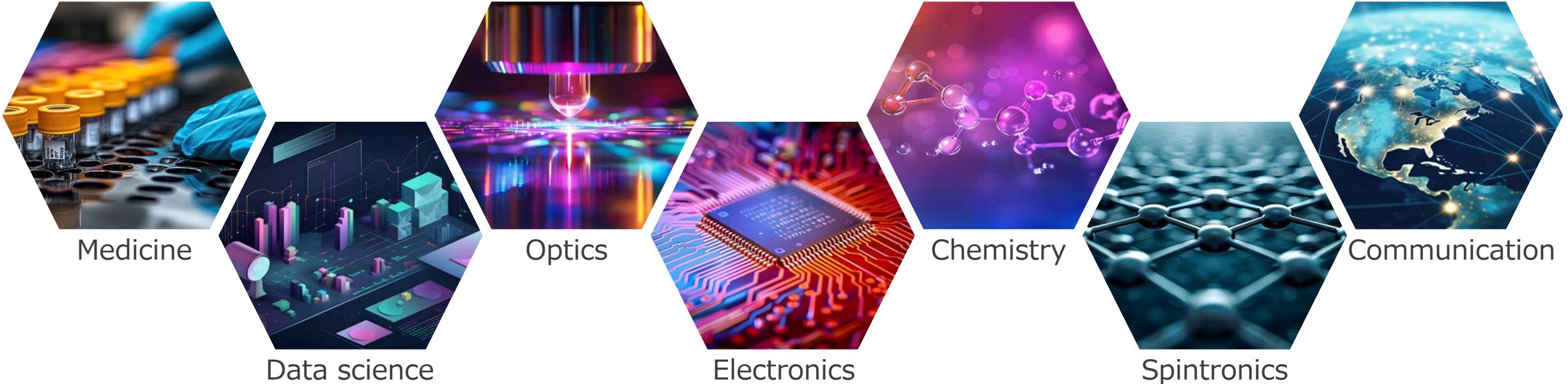
従来手法より優位性あり



K. Kitai, J. Guo, S. Ju, S. Tanaka, K. Tsuda, J. Shiomi, R. Tamura,
Phys. Rev. Res. 2, 013319 (2020).

様々な企業のみなさまとの議論によるニーズ収集

- 計算量や消費電力を抑えるブラックボックス最適化に対する期待が高いことが、様々な業種の企業の皆様との議論から判明した。

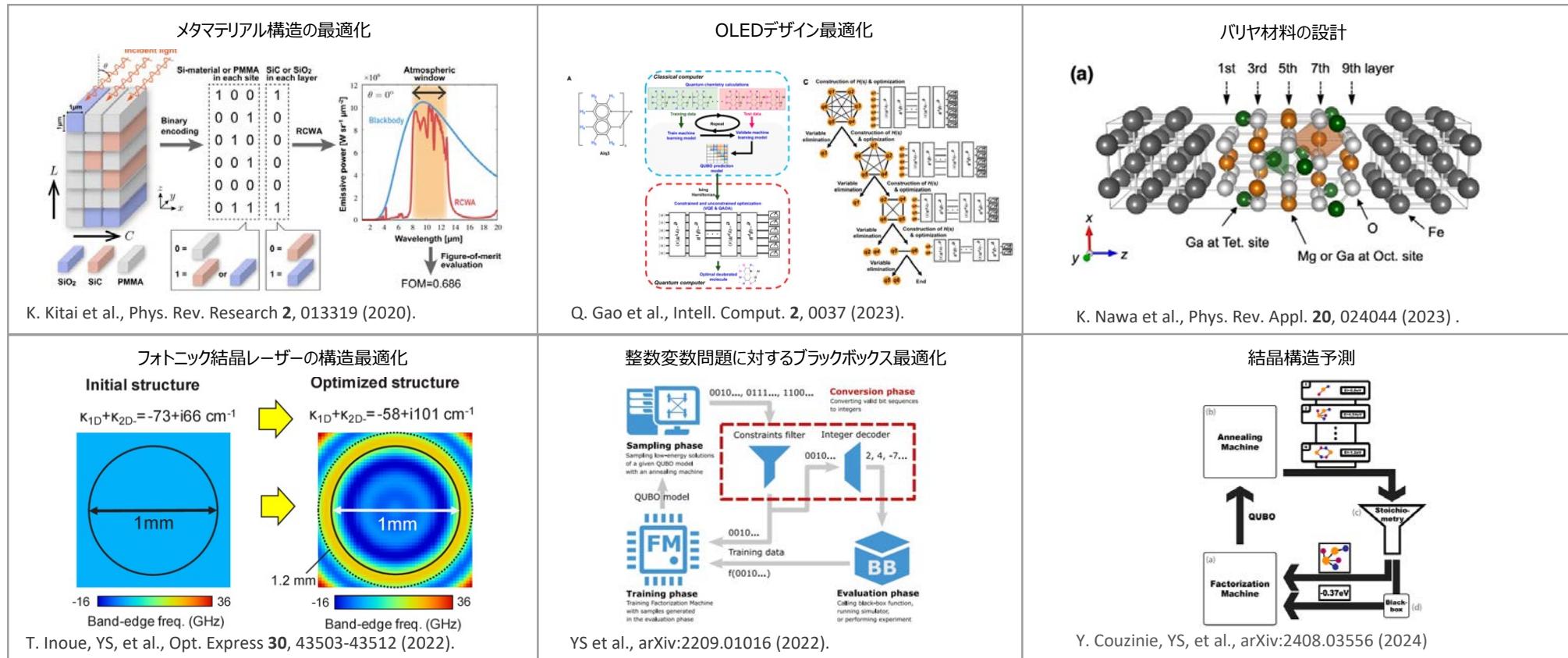


我々がなすべきこと：

- 機械学習と量子最適化の融合による計算手法を、各分野のブラックボックス最適化問題に適用する。
- 当該手法の計算量や消費電力を抑える工夫を創出する。

Factorization Machine with Quantum Annealing (FMQA) の応用

- 量子最適化技術と機械学習を融合したFMQAにより、従来の量子・イジングマシンによる高効率な最適化処理が適用不可能であった**複雑な課題に対する応用**が進められている。
- 従来計算手法と比較し、概ね**1桁程度の計算時間の高速化**が実現された。



Factorization Machine with Quantum Annealing (FMQA) のさらなる解説

日本神経回路学会誌 Vol. 29, No. 4 (2022), 164–173

解説

アニーリングマシンによるブラックボックス最適化

田中 宗, 山下 将司, 関 優也

慶應義塾大学大学院理工学研究科基礎理工学専攻*

Black-box Optimization by Annealing Machines

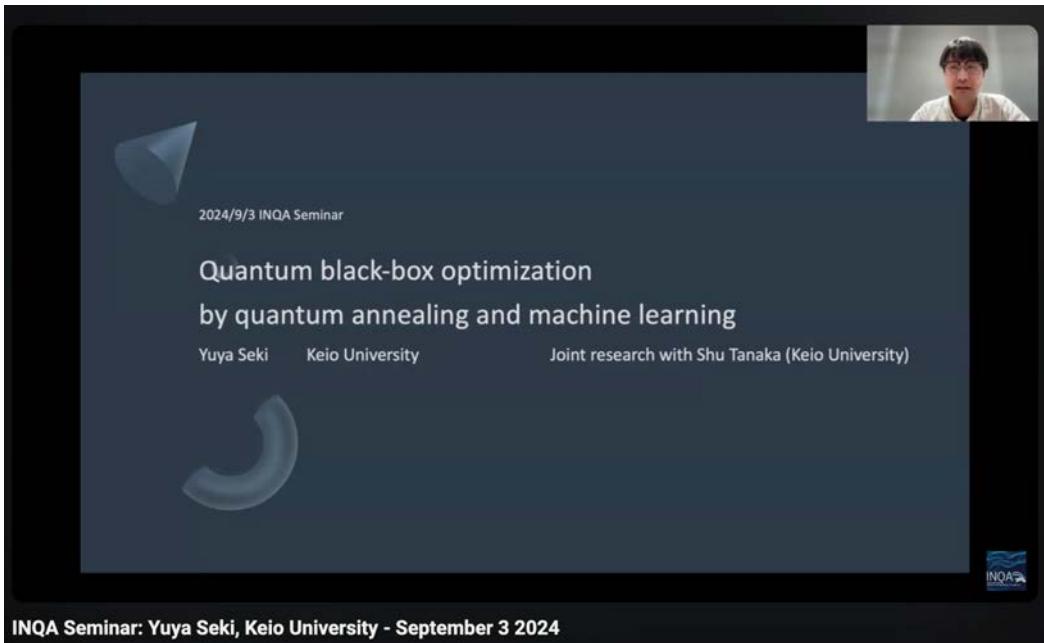
Shu Tanaka, Masashi Yamashita and Yuya Seki

School of Fundamental Science and Technology, Graduate School of Science and Technology, Keio University*

概要

最適化計算の新技術としてアニーリングマシンが注目を集めている。本解説では、アニーリングマシンやブラックボックス最適化の一般論について見てから、アニーリングマシンを用いたブラックボックス最適化の解法ならびに適用事例について紹介する。

田中, 山下, 関, 日本神経回路学会誌, 29, 164 (2022)



<https://www.youtube.com/watch?v=wFb3EMVSnUw>

「INQA yuya seki」でYouTube検索

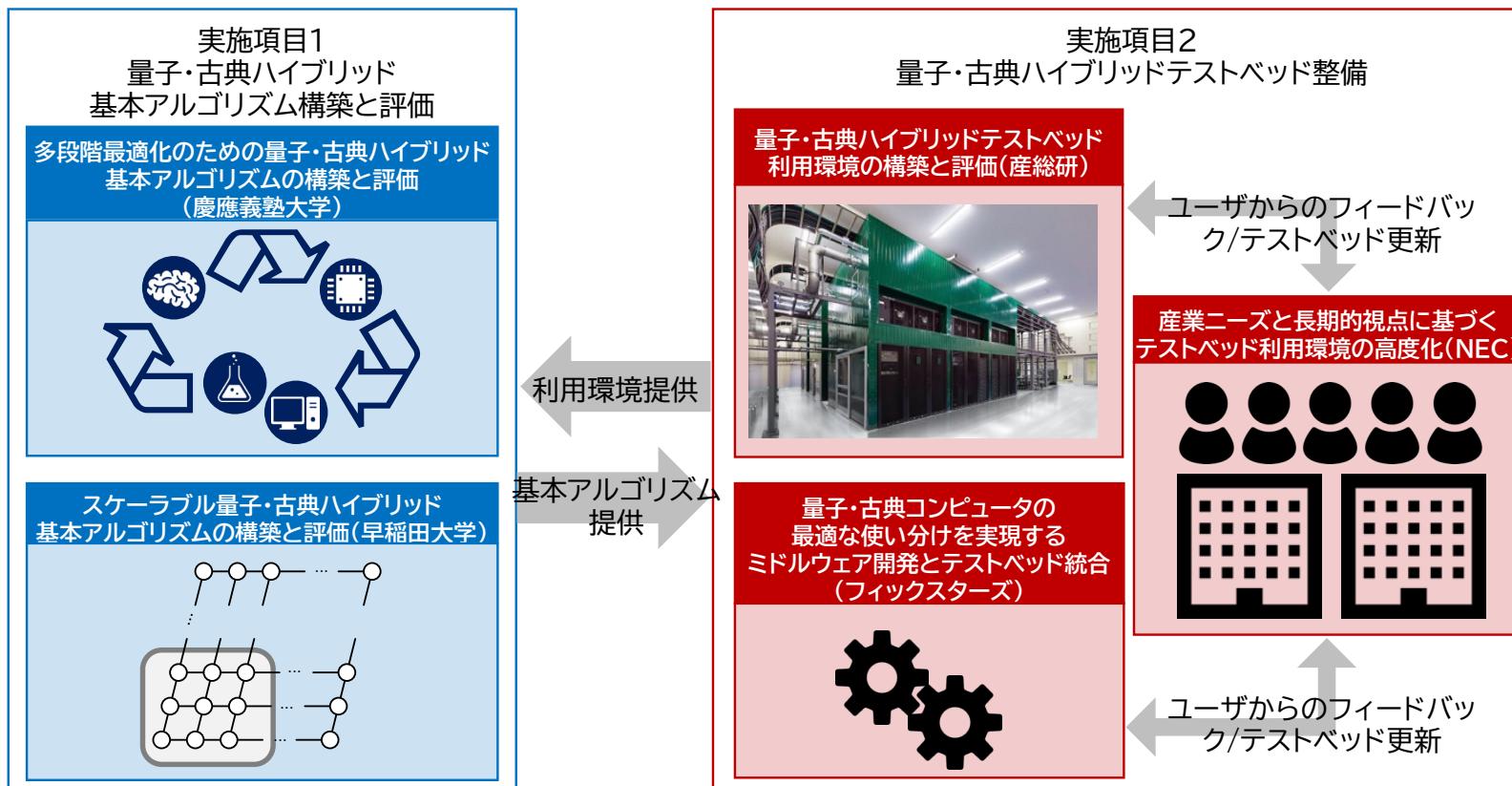
当研究室の関優也特任講師によるセミナー動画があります。

The background of the image is a dynamic concert or party scene. The top half shows a stage with colorful spotlights and confetti falling from above. The bottom half shows a dense crowd of people with their hands raised, illuminated by the bright stage lights.

量子未来社会へ

内閣府SIP3量子プロジェクトの実施体制と目的、計画

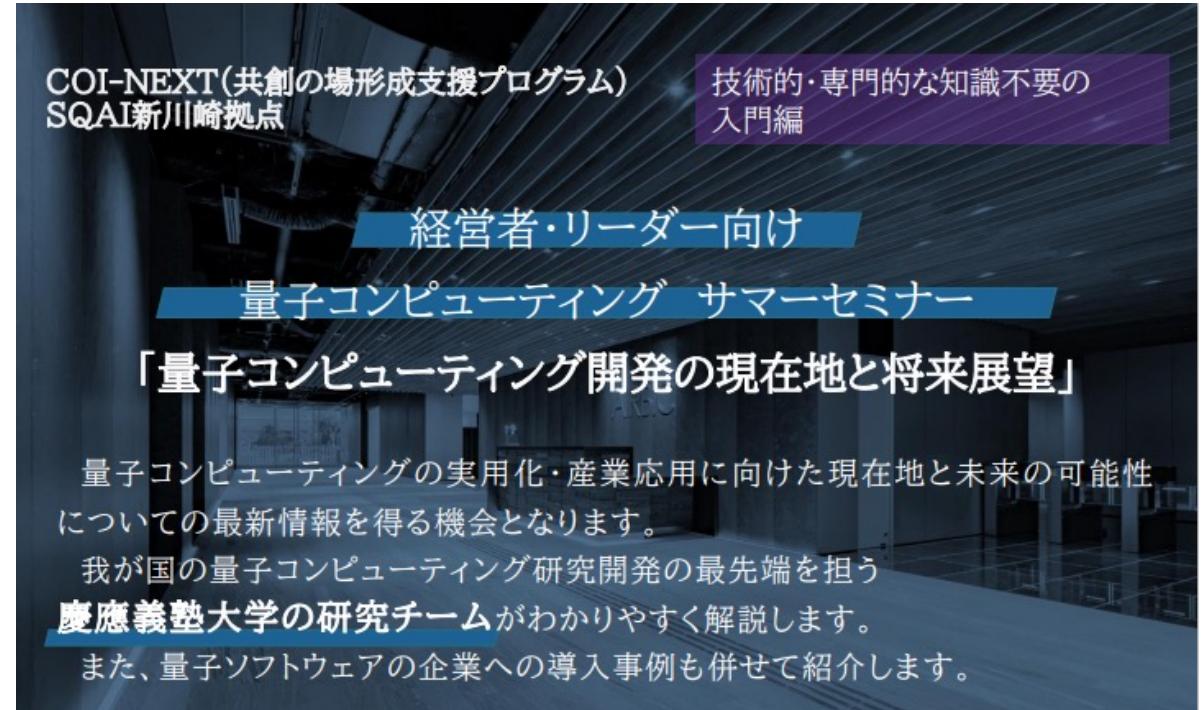
- 量子コンピューティングの社会実装に向けた共通基盤となる、量子・古典ハイブリッド基礎アルゴリズムの構築と、量子・古典ハイブリッドテストベッドの利用環境整備を目的としたプロジェクトです。



- 2025年度中に、様々なユースケース、キラーアプリケーションを開発可能な量子・古典ハイブリッドテストベッドを開発し、**国内のユーザー企業等に向けて運用・提供を開始**します。
- 2027年度末まで(SIP第3期終了時点)に、キラーアプリケーションを複数分野で開発可能な**量子・古典ハイブリッドテストベッド環境整備**を行います。

共創の場形成支援プログラム(COI-NEXT)

量子ソフトウェアとHPC・シミュレーション技術の共創によるサステイナブルAI研究拠点



産学官&地方自治体といった多様なステークホルダーが一丸となって量子未来社会の創生を築く基盤となる場作りにコミットいたします。

情報処理推進機構(IPA)未踏ターゲット事業

IPA 独立行政法人
情報処理推進機構



[トップページ](#) > [デジタル人材の育成](#) > [未踏事業](#) > [未踏ターゲット事業](#) >

2025年度未踏ターゲット事業(量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発分野) >

2025年度未踏ターゲット事業(量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発分野)公募概要

2025年度未踏ターゲット事業(量子コンピューティング技術を活用した
ソフトウェア開発分野)公募概要

公開日：2024年12月2日
デジタル基盤センター
イノベーション部
未踏実施グループ

公募の概要

本公募では、革新的な次世代ITを活用して世の中を抜本的に変えていけるような先進分野について、基礎技術や領域横断的技術革新に取り組む未踏的IT人材（注釈：1）が自らのアイディアや技術力を最大限に活かし将来の経済発展への貢献につなげていけるよう、ターゲット分野に興味を持つ人材からのプロジェクトを募集します。

2025年度は、2024年度に引き続き「量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発」をターゲット分野として取り上げ、プロジェクトの提案を募集します。

応募部門には、量子コンピューティング技術に関する自らのアイディアや技術力を活かしたプロジェクトの提案を募集する「ベーシック部門」と量子コンピューティング技術を活用して「カーボンニュートラルの実現に資する内容」に焦点を当てたプロジェクトの提案を募集する「カーボンニュートラル部門」があります。

（注釈:1） 未踏的IT人材：ITを駆使してイノベーションを創出できる優れたアイデア・技術力をもつ人材を指します。

The screenshot shows a vertical navigation menu on the right side of a web page. At the top is a blue header bar with the text 'デジタル人材の育成' and a right-pointing arrow. Below it is a dropdown menu for '産業サイバーセキュリティ'. The main menu items are '未踏事業' (with a downward arrow) and '未踏ターゲット事業' (with a minus sign). Under '未踏ターゲット事業', there are three collapsed sections: '未踏事業について' (with a right-pointing arrow), '未踏IT人材発掘・育成事業' (with a plus sign), and '未踏アドバンスト事業' (with a plus sign). The bottom section, '未踏ターゲット事業' (with a minus sign), is expanded, showing three collapsed items: '- 未踏ターゲット事業について', '- 2025年度未踏ターゲット事業(リバーコンピューティング技術を活用したソフトウェア開発分野)', and '- 2025年度未踏ターゲット事業(量子コンピューティング技術を活用したソフトウェア開発分野)'. At the very bottom of the menu, there are small links for 'TOP PAGE', 'SEARCH', and 'CLOSE'.

量子コンピューティング向けソフトウェア開発人材育成事業として、2018年度に立ち上りました。これまで、アニーリングマシンやゲート式量子コンピュータに関する数十件のプロジェクトが進められてきました。

過去の採択プロジェクトの情報を参照の上、ご興味ある皆様のご応募をお待ちしております。

<https://www.ipa.go.jp/jinzai/mitou/target/2025/koubo.html>