

## 第四回社会人向け講座

# 『イジングマシンの特徴とビジネス活用メリット』

2023年9月13日

日本電気株式会社

量子コンピューティング統括部

千嶋 博

# \Orchestrating a brighter world

NECは、安全・安心・公平・効率という社会価値を創造し、  
誰もが人間性を十分に発揮できる持続可能な社会の実現を目指します。

# 自己紹介



NEC

コーポレート事業開発部門

量子コンピューティング統括部 シニアプロフェッショナル

## 千嶋 博

2016年 内閣府総合科学技術・イノベーション会議に  
政策企画調査官として出向

量子コンピューティング技術の推進に携わる

2018年 NECシステムプラットフォーム研究所に復帰

量子アニーリングマシンのアプリケーション探索に従事

2020年より現職

アニーリング手法のプラットフォームやソリューションの  
事業化を推進。自社工場の生産工程段取り最適化への量子  
アニーリング技術の適用検証を始め、数多くのお客様課題  
への量子アニーリング技術の適用を推進。

## 目次

1. 量子アニーリング技術の位置づけ
  2. ユースケース紹介
  3. 最適化業務のデジタル化がもたらす効果
  4. NECが提供しているサービス
- Q&A

# 量子アニーリング技術の位置づけ

# 量子コンピューティング技術の分類

## 量子コンピューティング

(量子の振る舞いを取り入れたものを含む広義)

**量子ゲート方式**  
従来コンピュータのビットを  
量子ビットに置き換え計算する手法

**アニーリング方式 等**  
イジングモデルを物理法則などを利用して解く  
組合せ最適化問題に特化した手法

量子(イオントラップ)

量子(超伝導)

量子(超伝導)

疑似量子(デジタル回路、NTTのみ光回路)

Quantum

IonQ

NEC

IBM

Google

理研

D-Wave

NEC

NEC

日立

富士通

東芝

NTT

2040年の実用化を  
目指し研究開発中  
(MOONSHOT  
プログラム)

商用サービス  
を展開。  
NECと協業

NEDOの支援を  
受け、素子を  
開発中



2021年9月よりベクトル  
コンピュータベースのオン  
プレ提供開始。11月から  
サービス提供を開始



※NEC調べ(紙面の都合上、必ずしも全ての研究機関を網羅しているわけではありません)

# 量子アニーリングマシンへの期待

組合せが膨大で、これまでのコンピュータでは現実的な時間で解くことが難しかった「組合せ最適化問題」の求解に量子コンピュータが期待されています。

条件が多く組合せが膨大な  
シフトの作成

2024年問題

管理職が1人以上出勤

五連続勤務禁止

月1日以上  
計画休暇取得



## 代表的な問題

人員スケジューリング最適化

スキルや仕事のマッチング

配車スケジュール最適化

どのトラックが何をいつ運ぶか計画

配送ルート最適化

納期を満たし、時間/コストが最小となる配送計画

荷積み最適化

重量/大きさが異なる荷物を効率的に積込む

生産計画最適化

納期を満たし、作業/コスト効率が良い計画

金融ポートフォリオ

最適なポートフォリオの高速な解析

# 量子アニーリングの位置づけ: AIとの使い分け

どちらも、従来の計算手法ではデジタル化が難しかった領域をカバー

AI(機械学習)

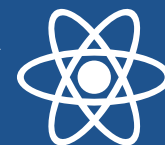


## 機序が複雑、不明な問題

大量の過去データが必要  
要素となる事象は説明できなくともよい

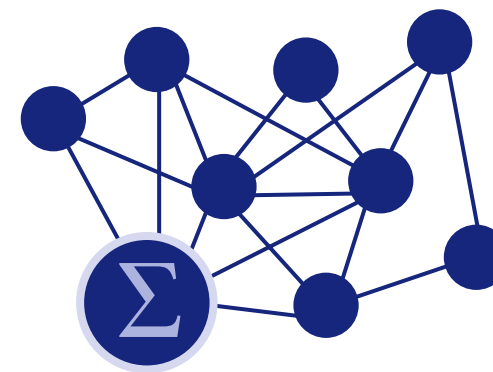


量子アニーリング



## 組み合わせ数が膨大な問題

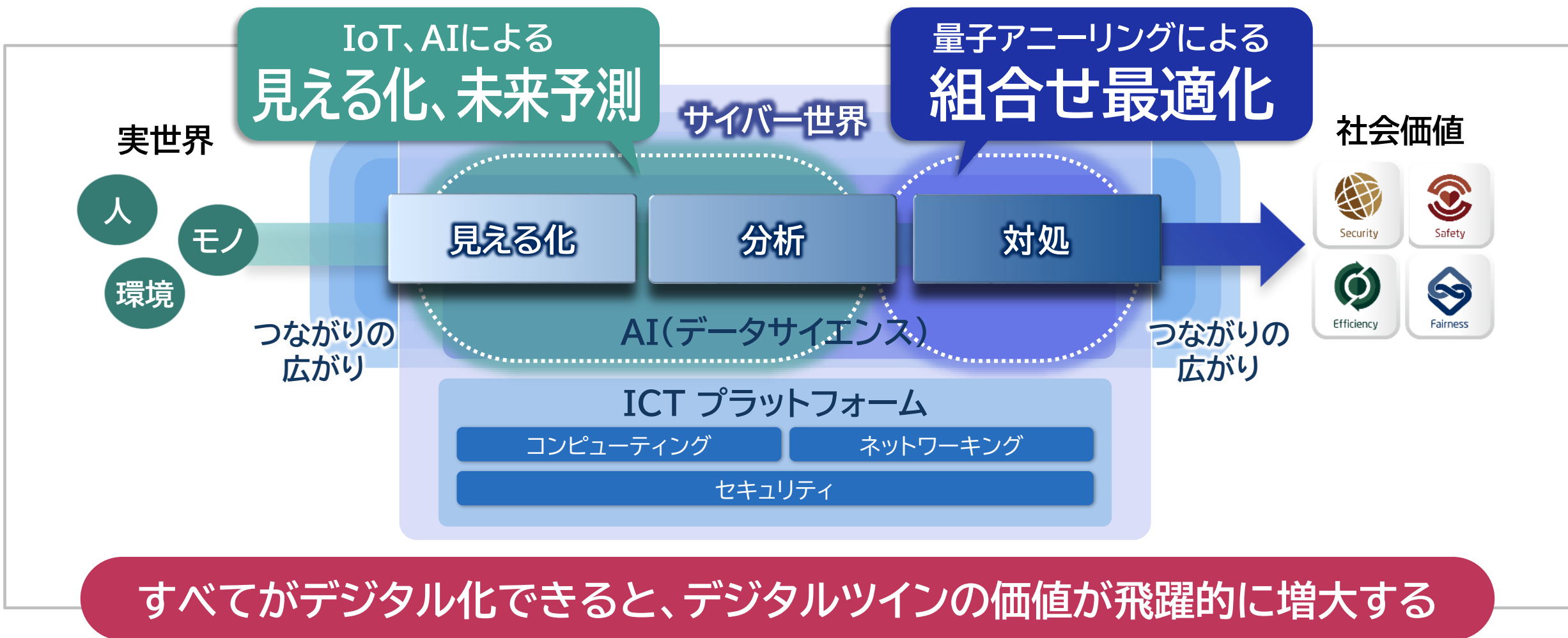
過去データがなくともよい  
要素となる事象は説明できる





# 量子アニーリングの位置づけ: AIとの連携

AIが過去データから近い未来を予測。この予測からどのようにアクションするか、実行計画を作るところに現れる「組み合わせ最適化」問題を量子アニーリングが解く

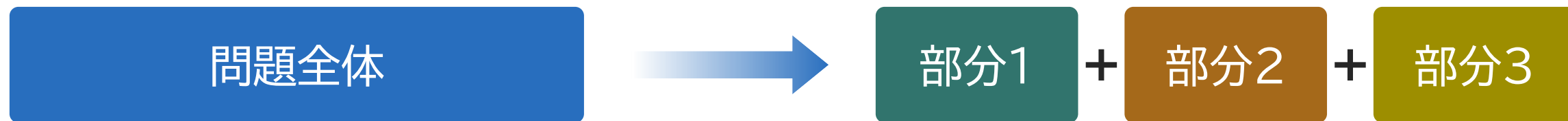


# 実証検証にあたり顕在化する課題

AIや数理最適化技術など既存技術との使い分けが重要

## ◆ 多くの社会課題は複合的

### ■ 部分問題に切り分け



### ■ 切り分けた部分毎に最適なソルバを選択

- AI(機械学習) or 最適化ソルバ  
過去データの有無や要素の説明可否によって適材適所
- 数理最適化 or 量子アニーリング or その他のソルバ  
モデルを表す式のタイプによって適材適所



# 数理最適化ソルバとの使い分け(1/2)

## モデル化について

	数理最適化ソルバ	量子アニーリング
次数	基本1次	基本2次※1
式の形	等式、不等式	等式（不等式は補助変数を用いるなどして対応）
決定変数	連続値、離散値	離散値（連続値は離散化して対応）
制約条件の扱い	制約条件を利用して解を絞り込む（制約条件式が多いと計算時間がかかる）	制約条件は目的項の一つとして取扱う（罰金法）※2

※1 次数については、一般に補助変数を用いた次数下げテクニックを用いて、高次の式に対応することが可能だが、量子アニーリングの方が高次の問題に比較的強い。また、数理最適化ソルバでも凸型であれば2次式を効率的に扱うことができるものがある。

※2 量子アニーリングによっては、制約条件を最適化プロセスで用いることで、求解効率を上げているものもある。

# 数理最適化ソルバとの使い分け(2/2)

解の性質、精度、品質、速度等について

	数理最適化ソルバ	量子アニーリング
再現性	毎回同じ解が得られる	解くたびに異なる解が得られる。※3式に含まれる重みパラメータを調整することで、解の傾向を調整することも可能
品質保証	解ける問題では厳密解が得られる	絶対的な解の品質保証はできない。ただし、解の検算や比較は容易に実装可
解が無い場合	「解無し」になる。この場合、モデルを見直し、制約条件を緩めて次善の解を求めることが多い。	なるべく制約や目的を満たす次善の解を出力
最適化処理時間	問題の規模による。制約条件の数が大きくなると計算時間が長くなる。計算時間を指定して打ち切って途中の解を得ることは可能。	問題の規模による。制約条件の数には影響されにくい。計算時間を指定することができるものもある。

※3 量子アニーリングの解の再現性について、どちらが好適かはアプリケーションによる。

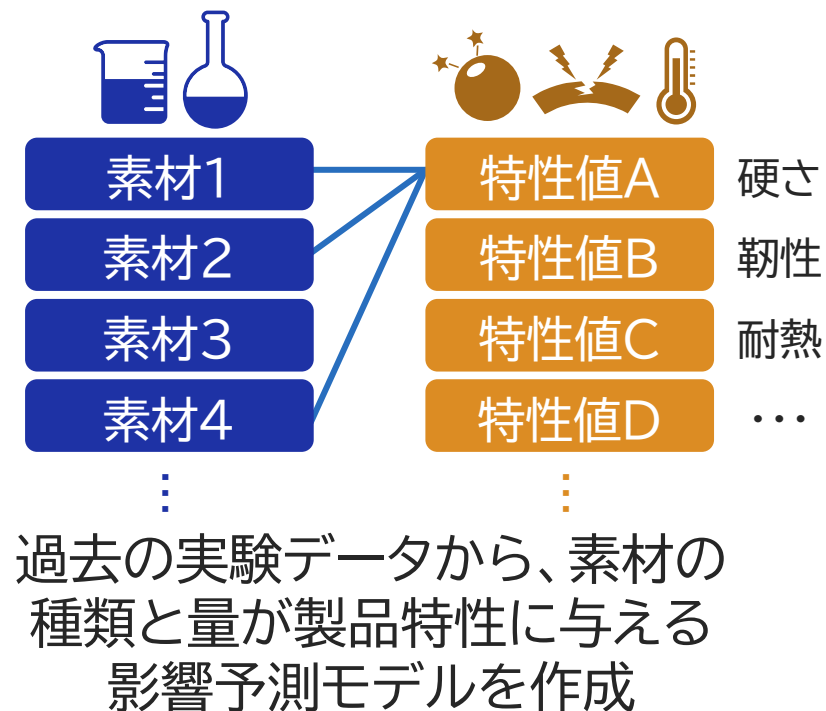
# 従来ソルバとの使い分け(詳細)

# 量子アニーリングと従来ソルバ どちらでも解ける場合の使い分け

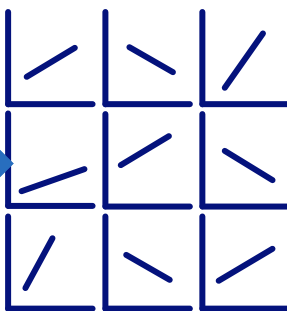
- ◆ 要件によって使い分ける例1（解のバリエーション）
- ◆ 要件によって使い分ける例2（解が無い場合の振る舞い）
- ◆ 制約条件の変化によって使い分ける例
  - 制約条件の質の変化
  - 制約条件の量の変化

# 要件によって使い分ける例1 (解のバリエーション) 新材料レシピ提案

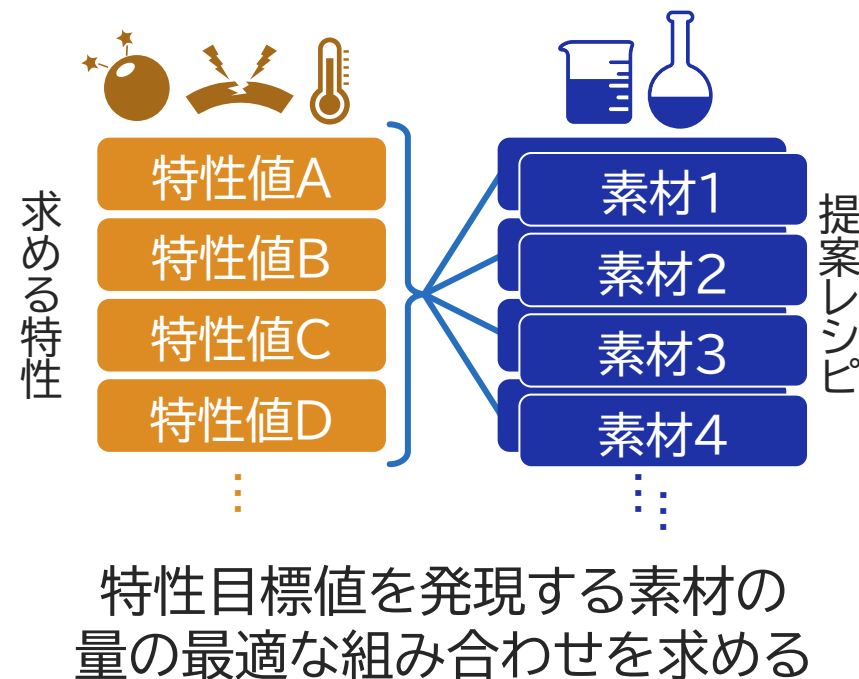
## ①AIで予測モデル作成



予測モデル = 目的関数



## ②量子コンピューティングで逆問題



数理最適化ソルバ: 100点の解が必要な場合

量子アニーリング: 100点の解周辺の複数の解が必要な場合

# 要件によって使い分ける例1 (解のバリエーション) 解が無い場合の振る舞い

- ◆ 実社会課題は、問題設定に誤りが混入する場合もある。必ず制約条件を全て満たす解が存在するとは限らない。
  - 入力データの誤りや、想定外の入力パターンにより、制約条件が満たせないとき、

- 解が存在しないことを証明することで、データ誤りを示唆し、直ちに再入力を促すようなケースは数理最適化ソルバがよい
  - パズルの例だと、ヒントの数を一つ変更(=入力エラー)する。  
⇒ **解が存在しなくなったことが直ちにわかる**

```
Solver:  
- Status: warning  
Return code: 0  
Message: Model was proven to be infeasible.
```

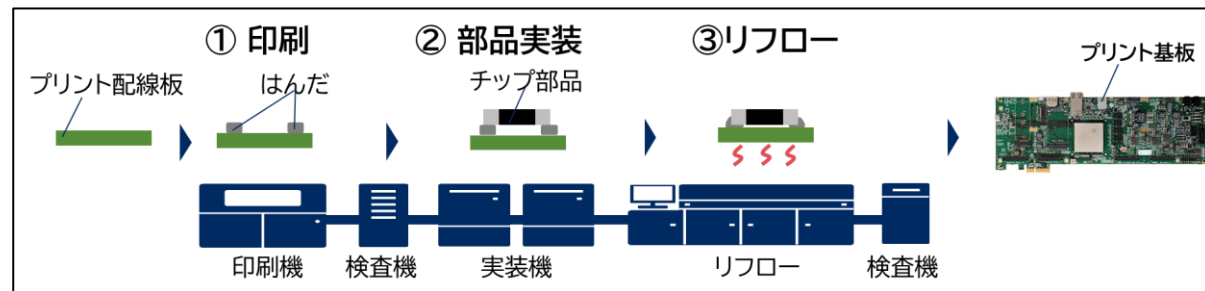
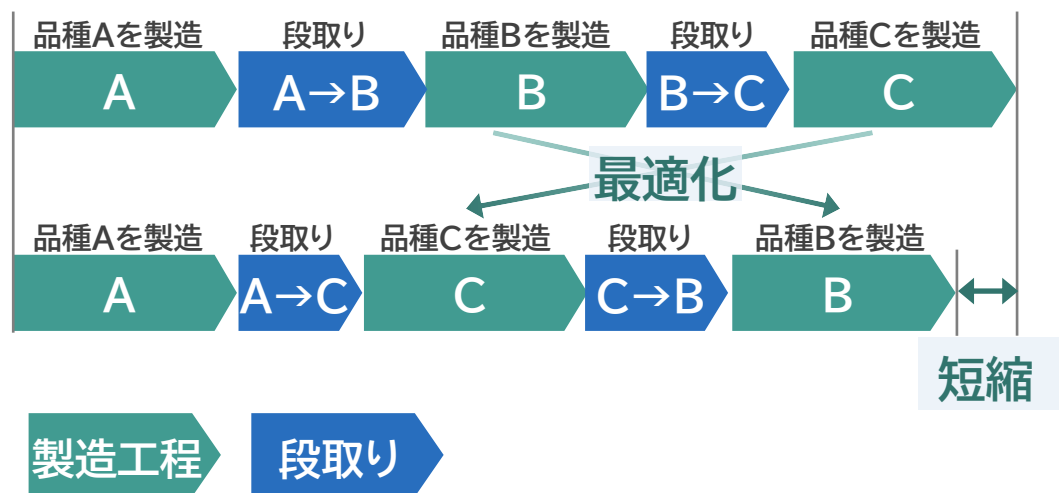
- 制約条件を全て満たさなくとも、次善の解でもよいから、なんらかの解が必要な場合は量子アニーリングがよい
  - パズルの例だと、何か所か正しくない解になっているが、  
**なんの絵が描かれているのはわかる**





# 制約条件の変化によって使い分ける例 生産計画最適化

- ◆ 生産する品種が切り替わるたびに発生する「段取り時間」を最小化する生産順番を求めたい



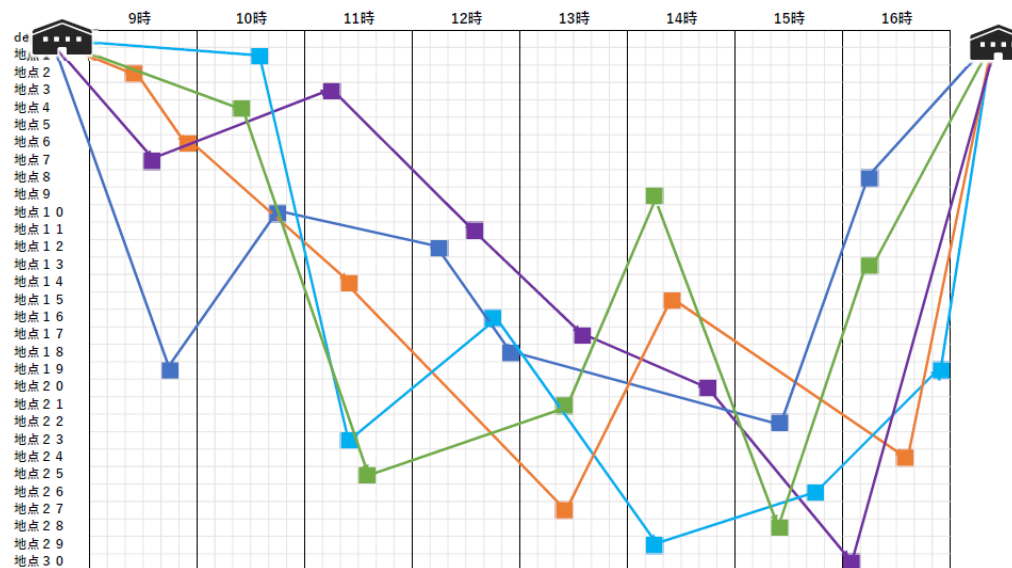
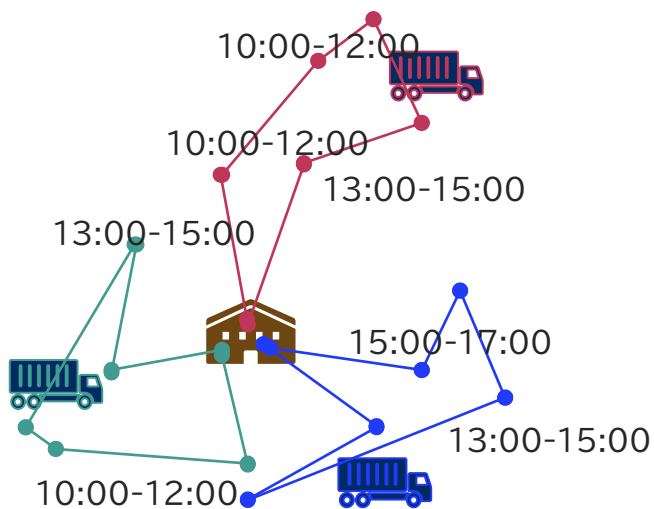
コンピュータ基板製造ラインの場合：  
特殊な制約条件を追加する必要がある  
「基板の表(裏)より裏(表)を先に加工しなければならない」

シンプルな問題はTSP専用ソルバが速くて正確

専用ソルバで対応していない制約条件が一つでもあると、専用ソルバでは解けなくなる  
⇒ 量子アニーリングで対応

# 制約条件の変化によって使い分ける例 時間枠指定付き配送計画問題

◆ 配達時間指定のある荷物を複数台のトラックで手分けして効率よく配達したい



	量子アニーリング	数理最適化ソルバ
16地点、2台、24時分割 768変数、制約条件数:4万個	1.2秒	0.8秒
50地点、4台、48時分割 9600変数、制約条件数:318万個	17秒	6分10秒
200地点、14台、48時分割 134400変数、制約条件数:193M個	12分33秒	-

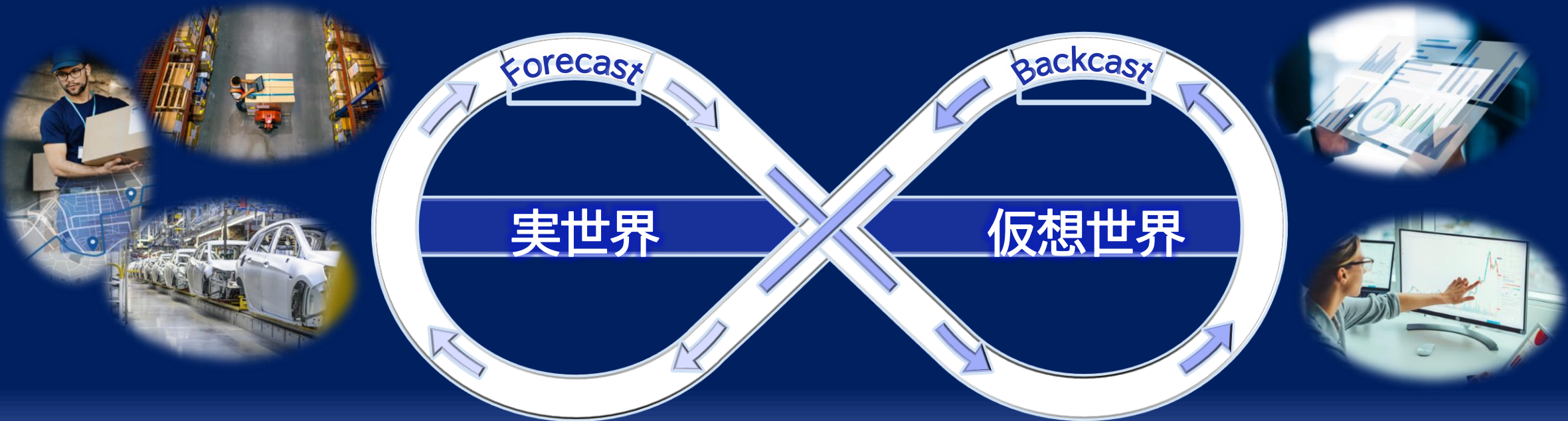
規模が小さいうちは数理最適化ソルバ優位

制約条件が100万個を超えたあたりで量子アニーリング優位へ

# 最適化業務のデジタル化がもたらす効果とは

# 現場業務デジタル化から経営判断支援へ

- ◆ リアルの状況変化に追従して最適アクションを選択することで、現場の負担軽減
- ◆ 経営リソース配分の仮説検証が可能になることで、経営支援としての新たな価値へ



## 繋がるデジタルツインでリアルタイムな最適化

事故渋滞、緊急オーダー等、リアルな状況変化にも最適なアクション選択→属人性の排除、スキルフリー化

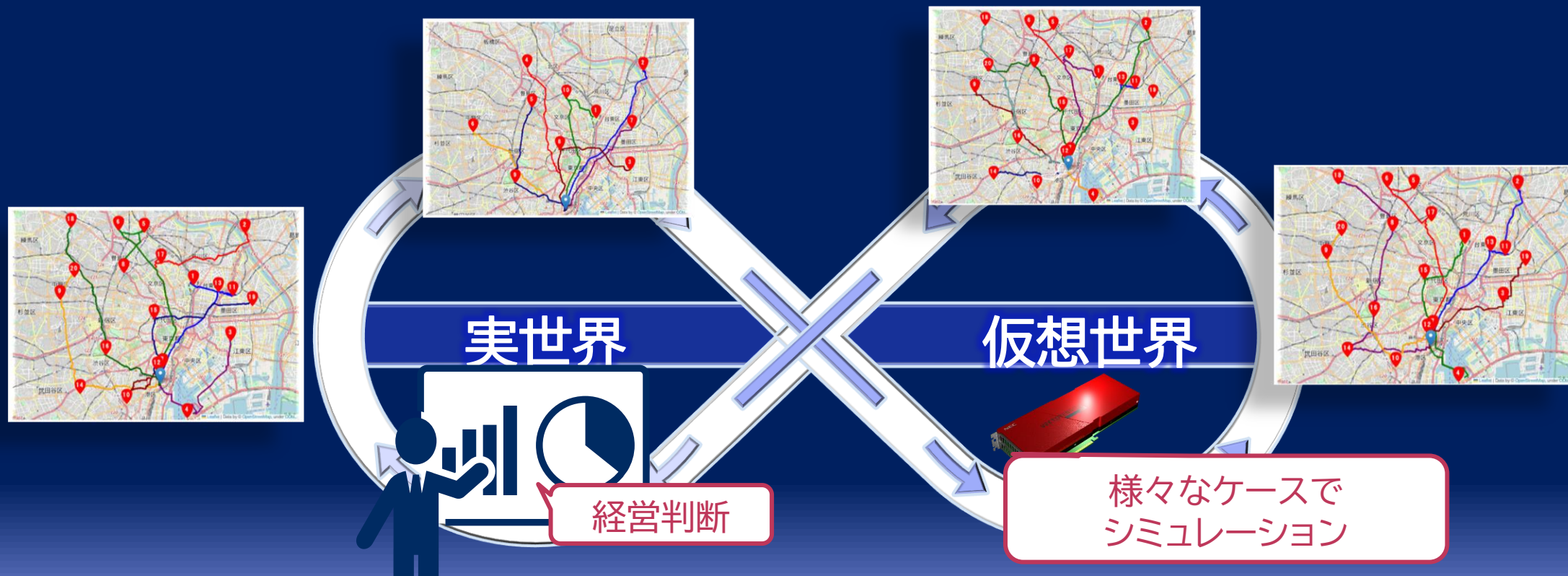


## 経営判断支援

荷量が増えたら？トラック業者を変えても大丈夫？  
ヒトモノカネ、経営リソース配分の仮説検証が可能に

# よりよいデジタルツインが生み出す新たな価値

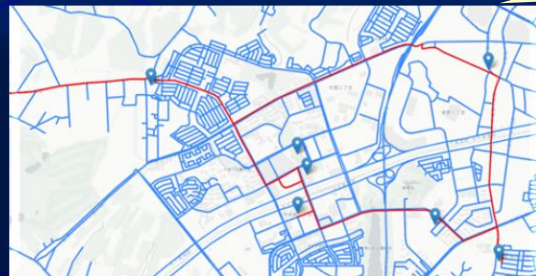
case: 2024年問題。配送業務の見直し。



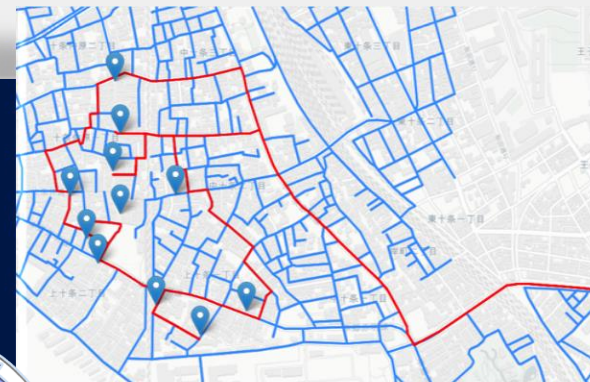
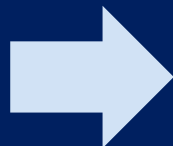
ヒトモノカネ 経営リソースの見直しを精緻なシミュレーション結果をもとに検討できる経営ツールとしての価値

# デジタルツインでさらなる価値を

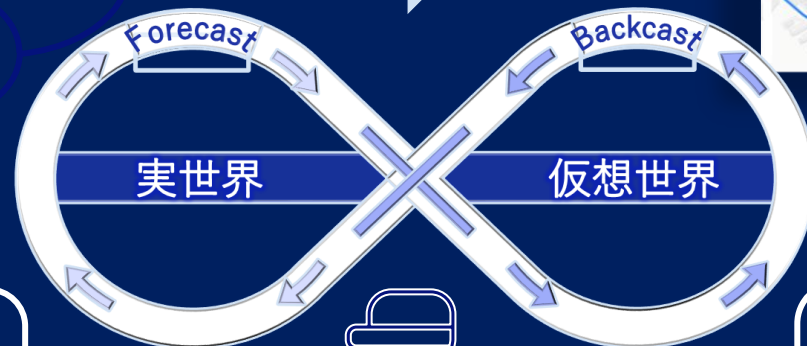
case: 配送の平準化



無駄



平準化と午後分の  
売上増も  
見込める！



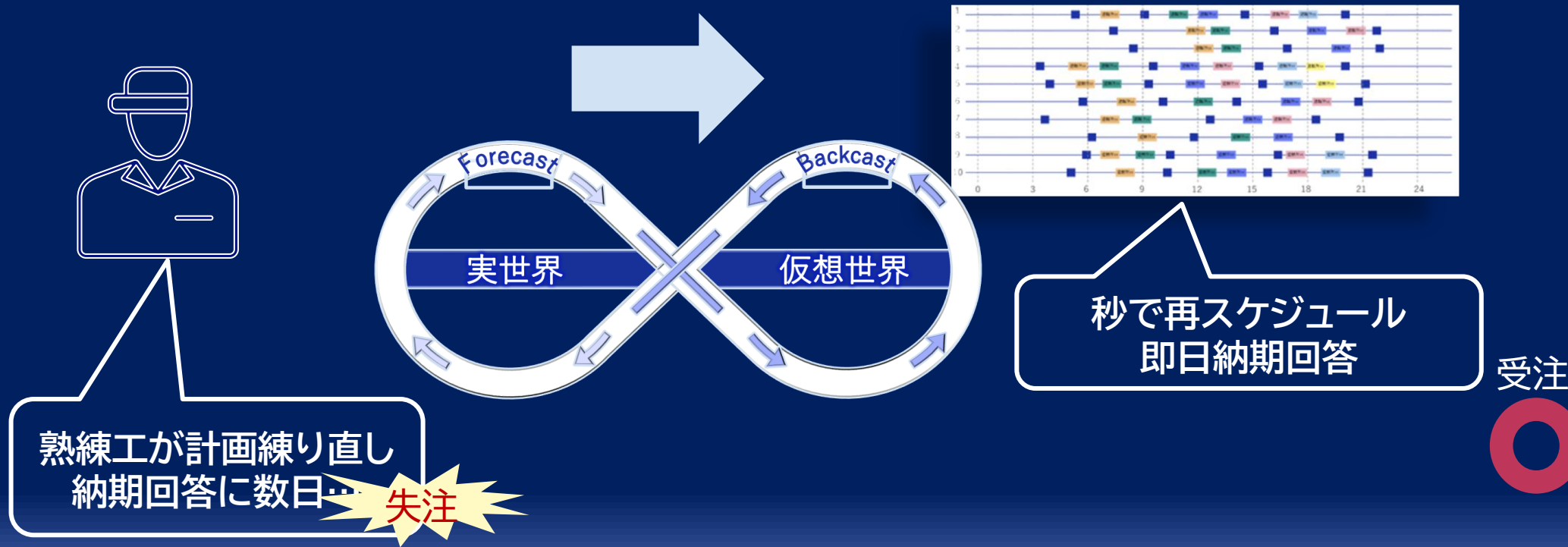
午前中に配送が  
集中して午後トラック  
余ってるなあ

午前配送を午後に回すとコス  
トがxx%減らせる！  
→午後配送料を下げよう！

現状の無駄を減らしコストダウンを図るだけでなく、  
新しい配送料金体系をシミュレーションで検証し事業拡大！

# よりよいデジタルツインが生み出す新たな価値

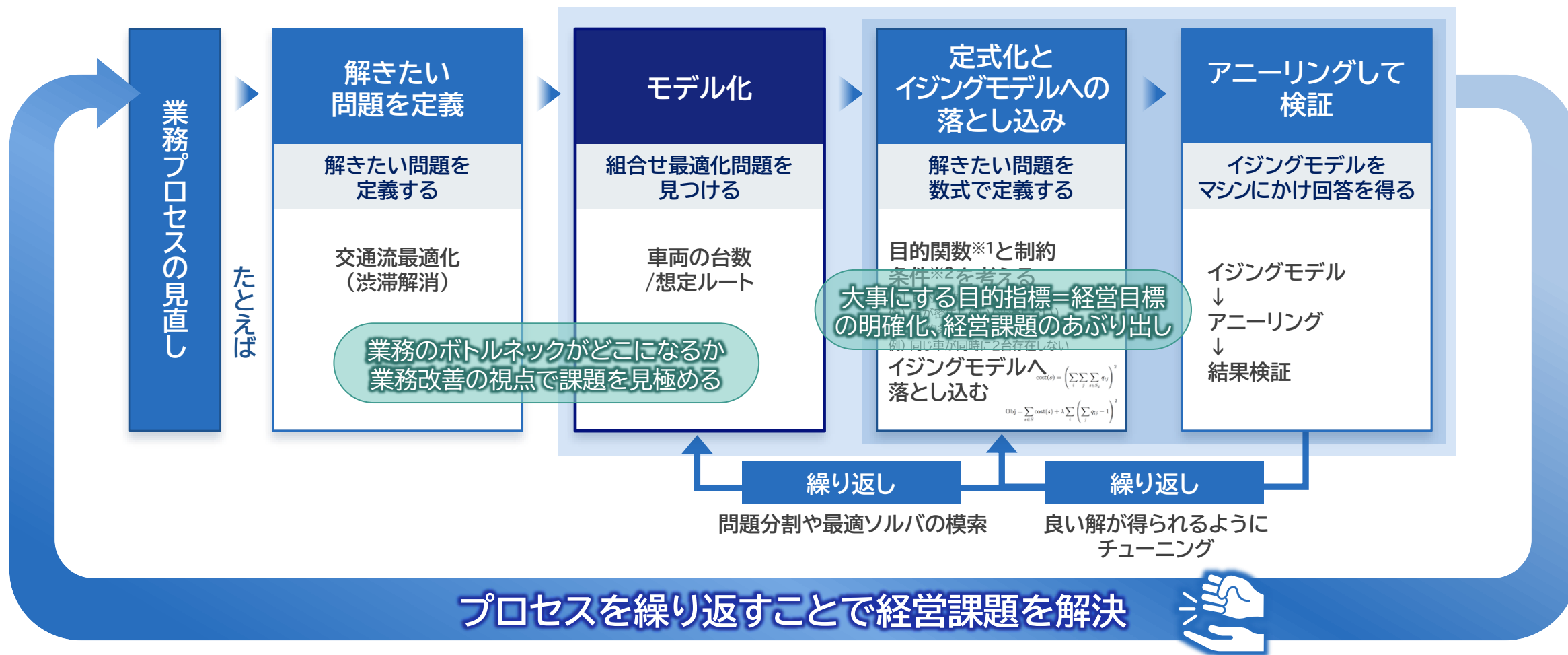
case:工場に急ぎのオーダー依頼が入った



熟練工の人件費削減(cost cut)のみならず、  
機会損失の削減 (make money)という価値を生み出す

# 量子アニーリング技術を活用した業務課題解決のステップ

以下プロセスを繰り返すことで現場課題の解決から経営課題の解決へと繋げていく



(参考) [1708.01625] Traffic flow optimization using a quantum annealer : <https://arxiv.org/abs/1708.01625>



# NECが提供しているサービス

# NECの提供サービス

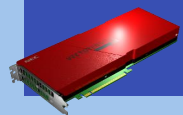
お客様のご要望とニーズに応じて様々なサービスメニューをご用意しています

オンプレミス

クラウドサービス

## NEC Vector Annealingサービス

NECのベクトルプロセッサ(高速行列計算・高速メモリアクセス)と、  
独自アニーリングアルゴリズムにより  
大規模アニーリング最適化の高速処理を実現



## Leap Quantum Cloud Service

D-Waveの  
Leap Quantum Cloud  
Serviceを、NECによる  
日本語サポート含めて提供

## 量子コンピューティング 適用サービス

お客様の業務課題に対して  
技術検証などトータルにサポート

業務課題抽出  
テーマ検討

最適化方式検討  
仮説設定

定式化・机上検証  
プロトタイプ開発

現場適用検証  
チューンアップ

## 量子コンピューティング 教育サービス

お客様のDX化や  
AI活用を加速する  
量子コンピューティング  
人材育成を支援

### 基礎編

量子コンピューティングとは何か、  
どのような課題が解決できるのか、  
短時間で学べるプログラム

### 実践編

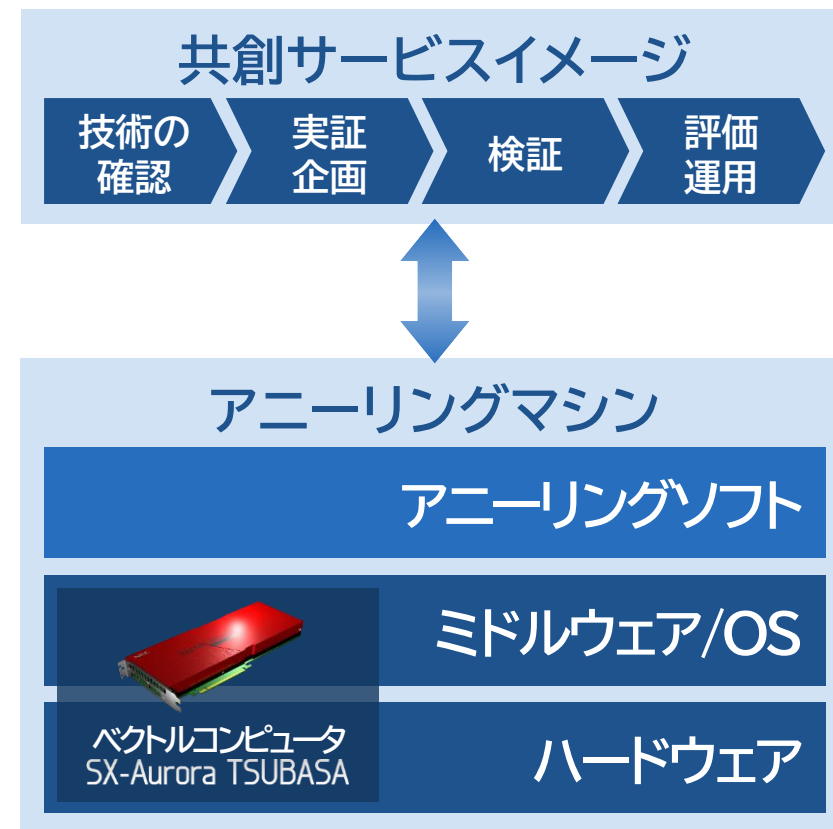
量子アニーリングによる  
課題解決のプログラミングスキルを  
獲得できるサービス

# NEC Vector Annealing サービス

ベクトルコンピュータを利用した  
高性能シミュレーテッドアニーリングマシンのクラウドサービスを提供

## アニーリングマシンの特徴

- アニーリング処理に適した独自開発のアルゴリズムとベクトルコンピュータ※1により超高速に処理
- 従来のシミュレーテッド・アニーリングシステム比**300倍以上**※2
- **30万量子ビット相当**の大規模な組合せ最適化問題に対応
- ビッグデータ/AIソフトウェアと連携したアプリケーションを容易に開発可能
- より多くの業務に適用いただけるよう、用途に応じたサービスを月額固定料金でご提供
  - ・国内業界最安値となる月額25万円で利用できるスタンダードプランと、月額125万円で利用できるプロフェッショナルプランの2種を提供



プレスリリース:[https://jpn.nec.com/press/202109/20210901\\_01.html](https://jpn.nec.com/press/202109/20210901_01.html)

※1:スーパーコンピュータとして商品化済みのSX-Aurora TSUBASAを利用

※2:NEC調べ。100都市巡回セールスマン問題において従来アルゴリズム(シミュレーテッドアニーリング)をXeonプロセッサで実行した場合と比較

# 量子コンピューティング適用サービス

目的  
1

実際の業務に適用して、  
技術開発及び有効性を検証する

目的  
2

人材育成

- ◆ お客様の業務課題に対し、お客様と共同して取り組む
- ◆ D-Wave社の量子アニーリング、ベクトルコンピュータを用いたSimulated Annealing(SA)など、技術サポートをトータルに提供

量子アニーリングの業務適用に向け、トータルにサポート

業務課題提出  
テーマ検討

最適化方式検討  
仮説設定

定式化・机上検証  
プロトタイプ開発

現場適用検証  
チューンアップ

# 量子コンピューティング教育サービス

企業のDX化やAI活用を加速する量子コンピューティング人材育成を支援

## 基礎編

量子コンピューティングとは何か、  
どのような課題が解決できるのか、  
短時間で学べるプログラム

受講対象: 企画、DX推進者  
研修期間: 半日  
開催形式: オンライン型  
前提知識: 不要

量子アニーリングの基本的な特徴と、  
製造/物流/金融をはじめとした、  
さまざまな産業におけるユースケースを  
分かりやすく解説します。

## 実践編

量子アニーリングによる  
課題解決のプログラミングスキルを  
獲得できるサービス

受講対象: システムエンジニア  
研修期間: 2日  
開催形式: 集合型  
前提知識: アニーリングの基本的な特徴 &  
Pythonの基本構文を理解している

量子アニーリングのプログラミング方法を、  
座学と実機による演習形式で学びます。  
お客様の実際の課題にアニーリングマシンを  
適用した実例を用いて実践します。

# おわりに

- ・組合せ最適化問題は、日常生活な様々な場面にあります。
- ・これらの問題解決に量子コンピューティング技術が使われだしています。
- ・さらに詳しく知りたい方、検討については、NECまでぜひご相談ください。

ご相談・お問い合わせ先

[optimization@aiqc.jp.nec.com](mailto:optimization@aiqc.jp.nec.com)

※量子コンピューティングに関するNECの取り組みについてこちらでご紹介しています  
[https://jpn.nec.com/quantum\\_annealing/index.html](https://jpn.nec.com/quantum_annealing/index.html)

\ Orchestrating a brighter world

**NEC**