Jij Inc.

CEO 山城　悠

量子技術イノベーション戦略
戦略見直し検討ワーキンググループ
2021

目次

- Jijの会社紹介
- 数理最適化とその困難
- 最適化クラウドサービス JijZeptの紹介
- なぜJijが量子コンピュータに取り組むか
- 量子コンピュータでの最適化計算について
- 量子コンピュータによるアプリケーションの提供に向けて

株式会社 Jij - 基本情報

会社名　株式会社 Jij (ジェイアイジェイ)

設立　2018年11月
JST-START(大学発新産業創出プログラム)
(東北大学採択) での研究成果により設立

所在地　東京都文京区根津1-4-6 SBビル7F

代表　山城　悠

事業内容　量子技術を用いた最適化アルゴリズムの開発
量子イジングマシン向けのクラウドサービス提供

JijZept

HP　https://www.j-ij.com/ja/

掲載メディア

THE WALL STREET JOURNAL　NIKKEI　TechCrunch

株式会社 Jij - Mission

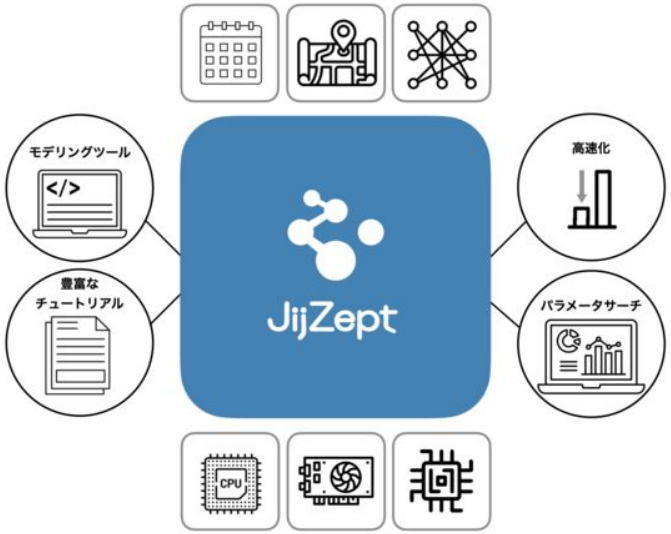
計算困難な課題を解決する

SOLVE INDUSTRY'S COMPUTATIONAL HARD CHALLENGES

Product & Services

JijZept (ジェイアイジェイゼプト)

最先端の量子・イジング計算機を専門知識が無くとも
使えるようにするクラウドサービス



共同研究開発・実証実験

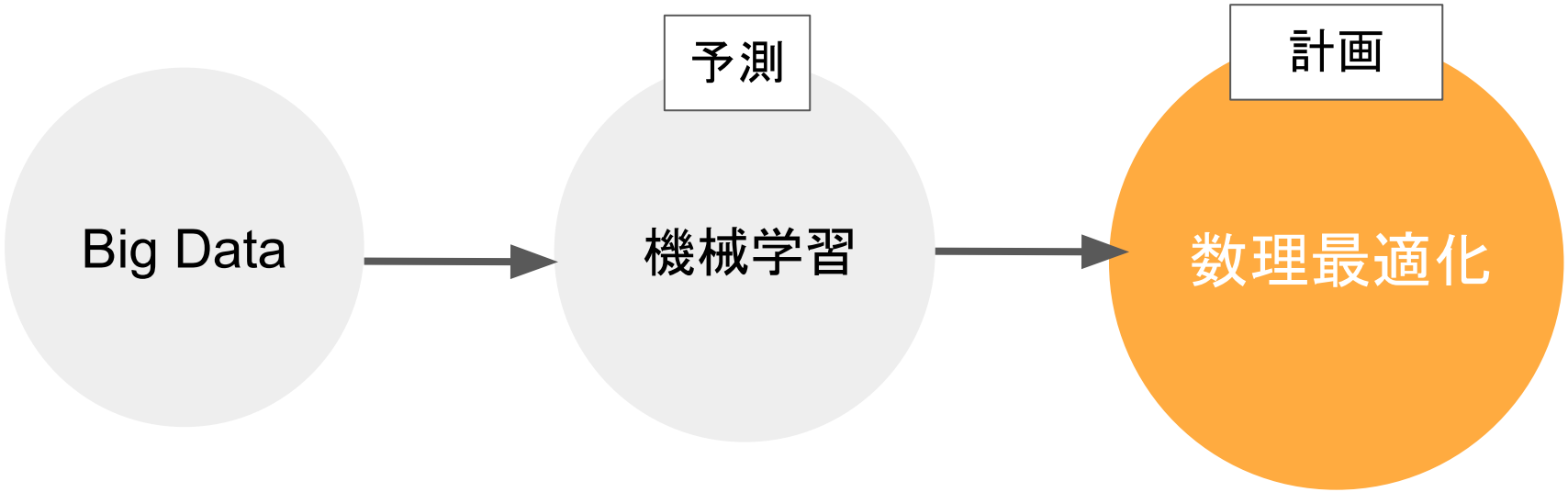
量子アニーリング , イジング計算機の活用のための共同研究開発 .
定式化 , アルゴリズム開発のコンサルティング

事例

- 東邦ガス : エネルギー供給の制御
- 豊田通商 × Microsoft : 信号機制御の最適化
- KDDI × 日立 : 周波数方向の最適化
- ブロードマインド : 保険商品の推薦最適化
- SIer 企業 : シフト最適化
- 他
  MaaS, ネットワーク, ...

数理最適化とは何か？

DXに欠かせない数理最適化



機械学習・AI が発達し
データの分析・予測データの取得ができるようになったからこそ
次のDXとして数理最適化が必要になる

数理最適化

計画
例:
- 配送計画（ルート最適化）
- シフト作成（配置最適化）
- 材料の構造（構造最適化）

. . .

$$\max \sum_{\text{item}} R_{\text{item}}$$

目的関数
例: - 売上の最大化
- 費用の最小化

$$\sum_{\text{item}} f_{\text{item}} \leq C$$

制約条件
例: 予算の上限
運用ルール
…

Solver
- 汎用Solver
- 問題ごとにアルゴリズム実装

株式会社 Jij - Mission

計算困難な課題を解決する

SOLVE INDUSTRY'S COMPUTATIONAL **HARD** CHALLENGES

数理最適化

計画
例:
- 配送計画（ルート最適化）
- シフト作成（配置最適化）
- 材料の構造（構造最適化）
- ...

1. 数式にするのが難しい

$$\max \sum_{\text{item}} R_{\text{item}}$$

目的関数
例: - 売上の最大化
- 費用の最小化

$$\sum_{\text{item}} f_{\text{item}} \leq C$$

制約条件
例: 予算の上限
運用ルール
…

Solver
- 汎用Solver
- 問題ごとにアルゴリズム実装

数理最適化

計画
例:
- 配送計画（ルート最適化）
- シフト作成（配置最適化）
- 材料の構造（構造最適化）

...

$$\max \sum_{\text{item}} R_{\text{item}}$$

目的関数
例: - 売上の最大化
- 費用の最小化

$$\sum_{\text{item}} f_{\text{item}} \leq C$$

制約条件
例: 予算の上限
運用ルール
...

Solver
- 汎用Solver
- **問題ごとにアルゴリズム実装**

2. アルゴリズムの実装・保守が難しい
3. 最適化計算が難しい

量子アニーリング・イジング最適化

イジングモデルにマップして **組合せ最適化問題** を解く技術

1. ビジネス課題

2. 定式化

$$H = \sum_{i,j} J_{ij}\sigma_i\sigma_j + \sum_i h_i\sigma_i$$

計画 (解) を得る

3. 量子アニーリングマシンで最適化問題を解く

D-Wave 2000Q

D-Waveは量子コンピュータではなく、
量子アニーリングに特化した計算機

最適化計算への期待は高い

- Volkswagen : 交通流最適化 (リスボン市でのバス路線最適化)
- DENSO : AGVの最適化など
- 豊田通商 × Jij: 信号機最適化
- BMW × AWS: Quantum Computing Challenge (ターゲットの半分が最適化）
- 楽天のQuEraへの出資: 最適化計算に期待

…

量子アニーリング・イジング最適化

イジングモデルにマップして **組合せ最適化問題** を解く技術

1. ビジネス課題

2. 定式化

$$H = \sum_{i,j} J_{ij}\sigma_i\sigma_j + \sum_i h_i\sigma_i$$

計画 (解) を得る

3. 量子アニーリングマシンで最適化問題を解く

D-Wave 2000Q

D-Waveは量子コンピュータではなく、
量子アニーリングに特化した計算機

量子アニーリング・イジング最適化

イジングモデルにマップして **組合せ最適化問題** を解く技術

1. ビジネス課題

計画 (解) を得る

2. 定式化

$$H = \sum_{i,j} J_{ij}\sigma_i\sigma_j + \sum_i h_i\sigma_i$$

3. 量子アニーリングマシンで最適化問題を解く

D-Wave 2000Q

D-Waveは量子コンピュータではなく、
量子アニーリングに特化した計算機

最適化計算はそんなにはうまくいかない

イジングマシンでの最適化計算は愚直には実用的でない

イジングマシンを利用するには
多くのステップ・経験が必要

実社会アプリケーション

数理モデルの構築

数理モデルの
イジングモデルへの変換

等価に見えてもイジングマシンで
解けるモデルと全く解けないモデルの存在
https://jijtech.hatenablog.com/entry/2020/11/06/004203

モデル・マシンのパラメータの決定

パラメータが適切でないと
良い解を返してくれない

各マシン向けの変換処理

量子・イジングマシン
で最適化計算の実行

汎用的かつ高性能な最適化計算は非常に難しい

CPUなどのコンピュータ

近年汎用ソルバーが非常に発達

組合せ最適化計算に立ち向かうには
適切な”近傍”(解の探し方)の設計が必要

量子コンピュータ

ブラックボックスでも高速化の可能性
（Groverのアルゴリズム O(N^2)）

実用的な高速化を手に入れるには
適切な”近傍”（量子オペレータ）
の設計が必要

最適化計算のためのクラウドサービス

JijZept の解決する課題

量子イジングマシンの活用を専門家が居なくても各社で実施ができるように

JijZept

さまざまなステップをソフトウェアで自動化

実社会アプリケーション

数理モデルの構築

数理モデルの
イジングモデルへの変換

モデル・マシンのパラメータの決定

各マシン向けの変換処理

量子・イジングマシン
で最適化計算の実行

JijZept の解決する課題

JijZept

実社会アプリケーション

数理モデルの構築

数理モデルの
イジングモデルへの変換

モデル・マシンのパラメータの決定

各マシン向けの変換処理

量子・イジングマシン
で最適化計算の実行

JijModeling

```
In [5]: problem = jm.Problem("tsp")
        problem += jm.Sum([{"i": n, "j": n, t: n}], d["i", "j"]*x["i", t]*x["j", (t+1)%n])
        problem += (x["i", :] == 1).forall({"i": n})
        problem += (x[:,  t] == 1).forall({t: n})
        problem
```

$$\min \sum_{i}\sum_{j}\sum_{t} d_{i,j}x_{i,t}x_{j,(t+1) \mod n}$$

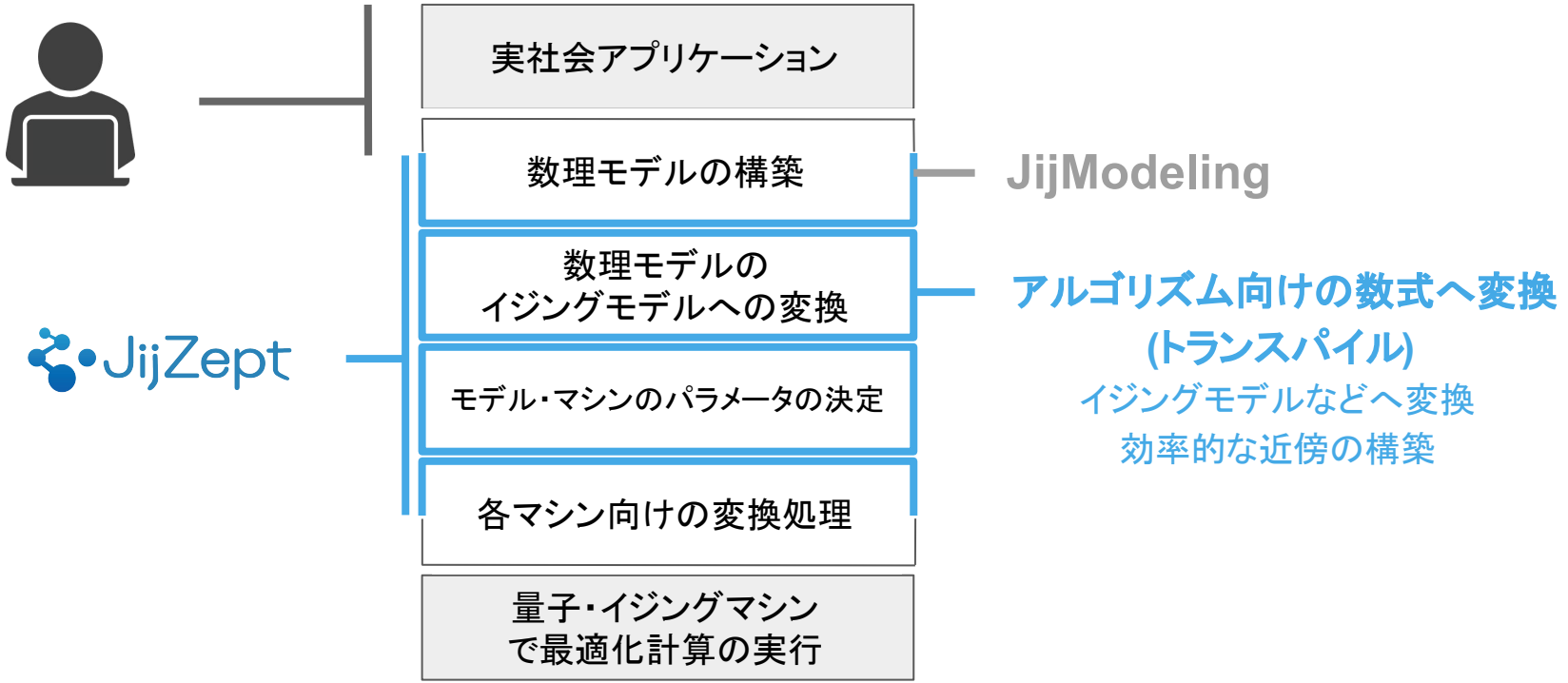
$$\text{s.t.} \sum_{t} x_{i,t} = 1,\ \forall i$$

$$\sum_{i} x_{i,t} = 1, \forall t$$

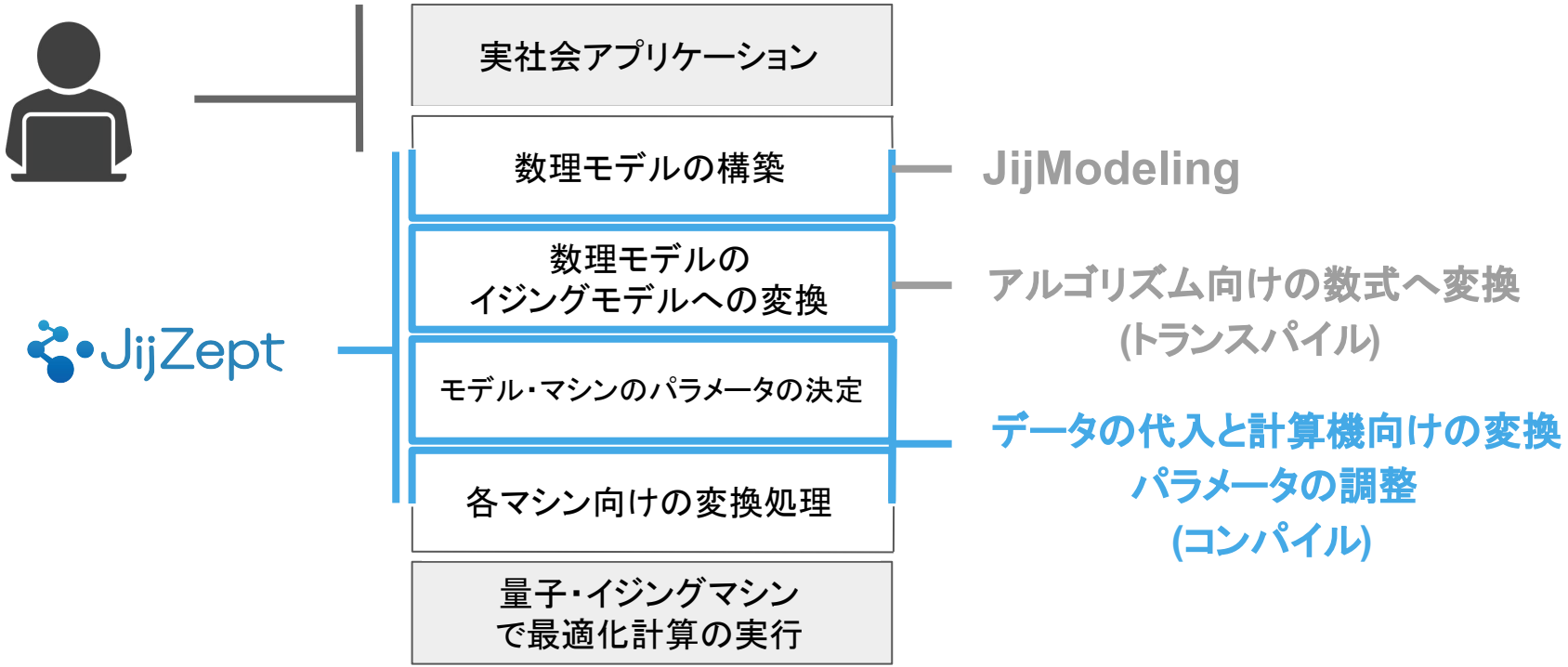
定式化と実装を同時に実現する
扱いやすい数理モデリングツール

近傍の設計やデータフォーマットの高速化に使うための
ユーザーの解きたい問題のメタ情報をうまく保持

JijZept の解決する課題



JijZept の解決する課題



Jijでの3つの技術レイヤー
最適化計算がターゲット

1. 安定して提供できる計算機技術

   CPU, GPU, ...

2. 実証実験を行える・開発者が利用できる計算機技術

   量子アニーリングマシン

   イジングマシン（デジタルアニーラ, SBM, CMOSアニーリング, ...）

3. 基礎研究・ハードウェアの大幅な技術発展が必要

   量子コンピュータ（超伝導, 光, イオントラップ, ...）

Jijでの3つの技術レイヤーにおける取り組み

1. 安定して提供できる計算機技術
   CPU, GPU, ...

2. 実証実験を行える・開発者が利用できる計算機技術
   量子アニーリングマシン
   イジングマシン（デジタルアニーラ , SBM, CMOSアニーリング , ...）

3. 基礎研究・ハードウェアの大幅な技術発展が必要
   量子コンピュータ（超伝導 , 光, イオントラップ , ...）

~2021年
Jijでの取り組み

2019年～

共同研究開発・最適化コンサルティング

OpenJij

イジングマシンシミュレータの開発・公開

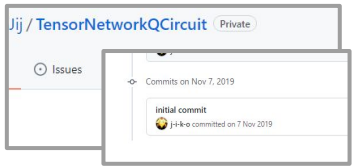
2019年~

テンソルネットワークベース

量子回路シミュレータの開発（社内研究用）

基礎研究

研究ツール開発



Jijでの3つの技術レイヤーにおける取り組み

1. 安定して提供できる計算機技術
   CPU, GPU, ...

2. 実証実験を行える・開発者が利用できる計算機技術
   量子アニーリングマシン
   イジングマシン（デジタルアニーラ , SBM, CMOSアニーリング , ...）

3. 基礎研究・ハードウェアの大幅な技術発展が必要
   量子コンピュータ（超伝導 , 光, イオントラップ , ...）

~2021年

Jijでの取り組み

ソリューション提供
開発環境・ミドルウェアの提供

JijZept 2021~

基礎研究
研究ツール開発

NEDO STS事業 (2021~)

量子・イジング最適化計算基盤
・高速なQUBOコンパイル
・適切な量子項を使った近傍操作
・量子項 (量子回路)
  を出力するコンパイル

量子コンピュータへの期待

量子アニーリングにおける理論研究を生かすのは量子コンピュータ

- 現在の量子アニーリングマシン→ 横磁場量子アニーリング（制限された量子効果） 量子の効果は薄い

  横磁場だけ → 最近少し自由度は増えているがほぼ non-programmable

- 近年研究されている量子アニーリングアルゴリズム→ 様々な量子効果が必要

  STAを使ったアルゴリズム : L. Prielinger, A. Hartmann, Y. Yamashiro, K. Nishimura, W. Lechner, and H. Nishimori Phys. Rev. Research **3**, 013227, 2021

  制約付き最適化問題向けの QA: Itay Hen and Federico M. Spedalieri, Phys. Rev. Applied **5**, 034007, 2016

- 量子アニーリングのハードウェアは実は意外と難しい

  Non-Stoq HamiltonianはD-Waveでも2量子ビット: I. Ozfidan *et al.* Phys. Rev. Applied 13, 034037, 2020

量子アニーリングにおける理論研究を生かすのは量子コンピュータ

- 現在の量子アニーリングマシン→ 横磁場量子アニーリング（制限された量子効果） 量子の効果は薄い

  横磁場だけ → 最近少し自由度は増えているがほぼ non-programmable
- 近年研究されている量子アニーリングアルゴリズム→ 様々な量子効果が必要

  STAを使ったアルゴリズム : L. Prielinger, A. Hartmann, Y. Yamashiro, K. Nishimura, W. Lechner, and H. Nishimori Phys. Rev. Research **3**, 013227, 2021

  制約付き最適化問題向けの QA: Itay Hen and Federico M. Spedalieri, Phys. Rev. Applied **5**, 034007, 2016
- 量子アニーリングのハードウェアは実は意外と難しい

  Non-Stoq HamiltonianはD-Waveでも2量子ビット: I. Ozfidan *et al.* Phys. Rev. Applied 13, 034037, 2020

量子アニーリング（最適化）でも量子コンピュータ（量子ゲート）が必要

量子アニーリングにおける理論研究を生かすのは量子コンピュータ

- 現在の量子アニーリングマシン→ 横磁場量子アニーリング（制限された量子効果） 量子の効果は薄い

  横磁場だけ → 最近少し自由度は増えているがほぼ non-programmable
- 近年研究されている量子アニーリングアルゴリズム→ 様々な量子効果が必要

  STAを使ったアルゴリズム：L. Prielinger, A. Hartmann, Y. Yamashiro, K. Nishimura, W. Lechner, and H. Nishimori Phys. Rev. Research **3**, 013227, 2021

  制約付き最適化問題向けの QA: Itay Hen and Federico M. Spedalieri, Phys. Rev. Applied **5**, 034007, 2016
- 量子アニーリングのハードウェアは実は意外と難しい

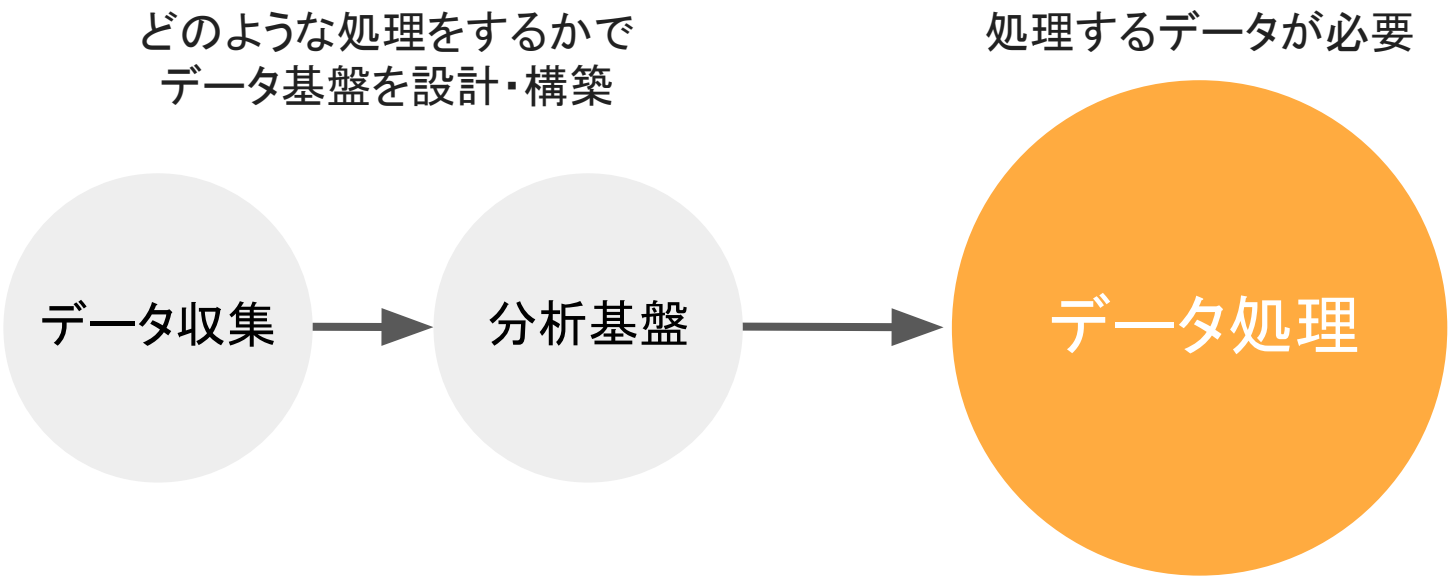
  Non-Stoq HamiltonianはD-Waveでも2量子ビット：I. Ozfidan *et al.* Phys. Rev. Applied 13, 034037, 2020

量子アニーリング（最適化）でも量子コンピュータ（量子ゲート）が必要

量子ハードウェアという文脈において国が主体となる場合は
量子効果を用いないイジングマシンと量子コンピュータに関して明確に区別し、
量子コンピュータのハードウェアに関する研究開発の促進を。

量子コンピュータにどう向き合うか

なぜ新しい技術（量子コンピュータ）に取り組むのか



データ処理の視点から必要なデータ基盤を設計する必要がある

量子コンピュータで最適化計算に関して
大きなブレイクスルーが出るのには時間がかかる

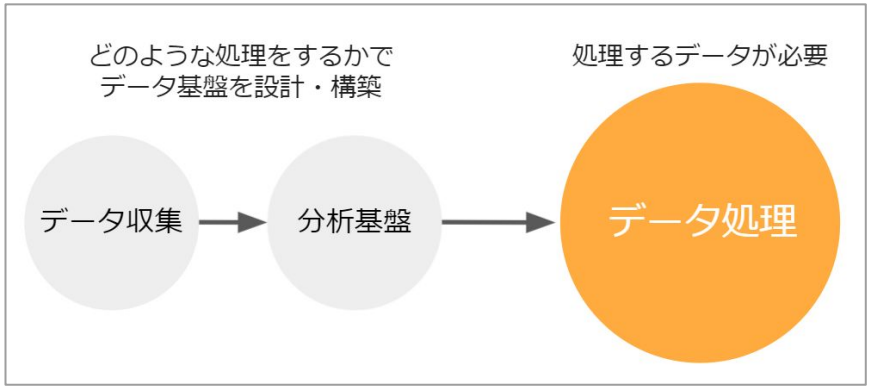
どの計算機技術だとどれくらい事業へメリットがあるか

1. 安定して提供できる計算機技術
   CPU, GPU, ...

2. 実証実験を行える・開発者が利用できる計算機技術
   量子アニーリングマシン
   イジングマシン（デジタルアニーラ, SBM, CMOSアニーリング, ...）

3. 基礎研究・ハードウェアの大幅な技術発展が必要
   量子コンピュータ（超伝導, 光, イオントラップ, ...）

データ処理の視点からどのようなデータ基盤を作るか



最適化計算は現在のコンピュータ技術でも新たな価値を出せることがある
長期視点での研究開発と現在のビジネス課題への取り組みの時間ギャップに注意
ギャップはスタートアップなど専門家との連携で埋めることができる

人材の育成と技術の普及

人材における課題（ソフトウェア）

応用先 × 量子アルゴリズム で初めて価値が生まれるので
両方の知見を持ったプレイヤー（もしくは人材の交流）が必要

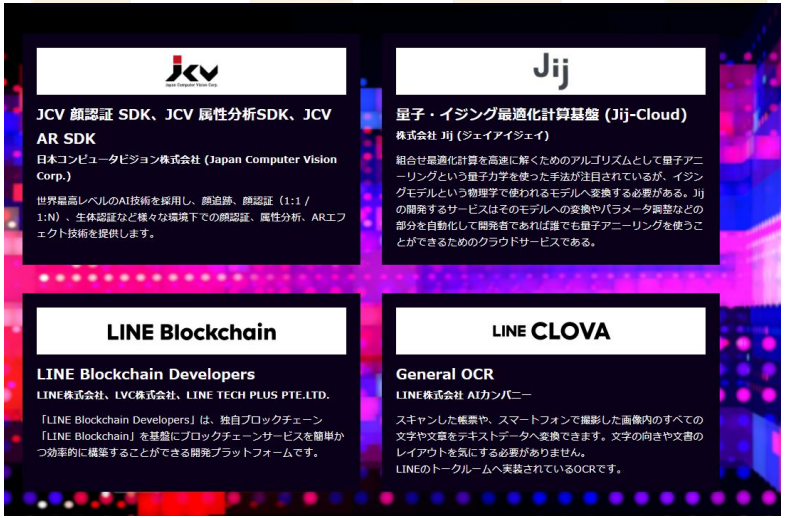
Jijの場合: 社員の専門: 物性物理, 数理最適化, コンピュータサイエンス

より多くの分野に参入してもらえる機会・人材教育が必要

Yahoo HackDay2021

Yahoo JAPANの開催する
大規模なハッカソンイベントに
JijCloud（JijZept）を技術提供しました.

https://hackday.jp/



ふるさと納税

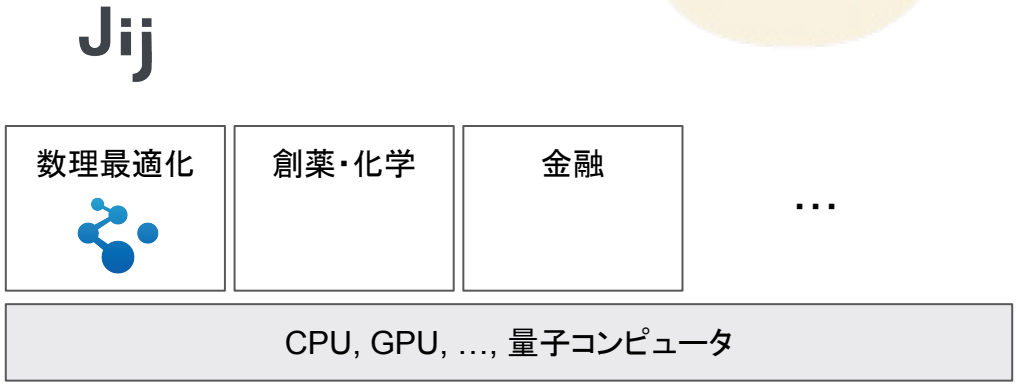
ロボットの制御

量子コンピュータ時代に向けて

量子コンピュータができたときのサービス提供

量子コンピュータが計算機貸出サービスから抜け出すには、
アプリケーション特化型のプラットフォームによるサービス提供が必要

最初の量子コンピュータはアプリ・利用分野においてより細かなチューニングが必要
→ サービスとしての利用を普及させるために
　量子コンピュータをサポートできる垂直型のプラットフォームを各分野で確立



まとめ

- Jijでは開発者とアルゴリズムの間のギャップを埋めることで
  最適化計算を実用化する困難を解消していく

- 量子コンピュータ（量子ゲート）での
  最適化計算にはまだ時間がかかるが期待が大きい分野

- ほかの最適化専用マシンと明確に分けて、
  量子コンピュータのハードウェアの研究開発を進めていく必要性

- 様々な業界との交流で人材の育成とソフトウェア開発への流入を

info@j-ij.com