

次世代分散型データレイクにおける量子アニーリング適用可能性に関する包括的検討

1. 序論：データ中心型社会における計算複雑性の爆発とパラダイムシフト

1.1 現代データエコシステムの限界と分散化への不可逆的潮流

デジタル・トランスフォーメーション(DX)の進展に伴い、企業や組織が取り扱うデータ量は指数関数的に増大し続けている。従来のモノリシックな中央集権型データレイク(Centralized Data Lake)は、データの「収集」「蓄積」「分析」を一元管理することで効率化を図ってきたが、その構造的限界が顕在化している。データ量がペタバイト、エクサバイト級に達すると、単一のストレージリポジトリや処理エンジンへの負荷集中がボトルネックとなり、データの鮮度(Freshness)や可用性(Availability)が損なわれる事態が頻発している¹。

さらに深刻なのが、組織的なスケーラビリティの問題である。中央のデータチームが全ドメイン(事業部門)のデータを管理するモデルでは、ドメインごとの専門知識(Domain Knowledge)が欠落しやすく、データの意味的解釈や品質管理において摩擦が生じる。この課題に対する解として提唱されたのが「データメッシュ(Data Mesh)」である³。データメッシュは、データを特定の部門が所有する資産ではなく、ドメインごとに管理・提供される「プロダクト(Data as a Product)」として再定義し、自律分散型のガバナンスモデルを推奨する。

一方で、技術的な統合レイヤーとして「データファブリック(Data Fabric)」の重要性も増している。これは、メタデータ駆動型のアプローチにより、物理的に分散したデータソース(オンプレミス、マルチクラウド、エッジ)を論理的に統合し、シームレスなデータアクセスを提供するアーキテクチャである³。データメッシュが「組織とプロセス」の分散化を志向するのに対し、データファブリックは「技術と自動化」による統合を志向するが、両者は対立する概念ではなく、次世代のデータ基盤において相互補完的に機能するものである³。

しかし、これらの分散型アーキテクチャへの移行は、計算機科学的な観点から見れば、最適化問題

の複雑性を劇的に増大させることを意味する。データが物理的に分散配置され、かつ動的に移動・複製される環境下において、「どのデータを」「どのノードに配置し」「どの経路で転送し」「どの順序で結合処理を行うか」という意思決定は、相互に依存し合う巨大な組合せ最適化問題となる。これらの問題の多くはNP困難(NP-hard)に分類され、要素数が増えるにつれて解の探索空間が爆発的に増大するため、従来のノイマン型コンピュータ上のアルゴリズムでは、実用的な時間内での最適解導出が不可能になりつつある¹。

1.2 Web3と分散型物理インフラ(DePIN)の融合

この分散化の流れは、企業内データセンターにとどまらず、パブリックな分散型ウェブ(Web3)や分散型物理インフラネットワーク(DePIN: Decentralized Physical Infrastructure Networks)へと拡大している⁹。IPFS(InterPlanetary File System)やFilecoinに代表される分散型ストレージネットワークは、特定の管理者に依存せず、暗号学的証明と経済的インセンティブに基づいてデータの永続性を保証する¹¹。

DePINの環境下では、ストレージプロバイダー(マイナー)の選定やデータのルーティングが、市場メカニズム(オークション)と物理的制約(帯域、遅延、電力コスト)の複合的な最適化問題となる。ここでは、単なるパフォーマンスの最大化だけでなく、コスト効率、エネルギー効率、そして検閲耐性やデータ主権といった多様な目的関数を同時に満たすことが求められる¹³。従来の集中管理型クラウドであれば、中央のコントローラが全体最適化を行えばよかったが、自律分散システムにおいては、各エージェントが局所的な情報に基づきつつ、システム全体としての均衡状態(ナッシュ均衡など)やパレート最適解を探索しなければならない。

1.3 量子アニーリングによるブレイクスルーの可能性

ムーアの法則の鈍化により、古典コンピュータの性能向上のみでこれらの「組合せ爆発」に対処することは困難である。そこで、新たな計算パラダイムとして期待されているのが「量子アニーリング(Quantum Annealing: QA)」である。量子アニーリングは、量子力学的な「重ね合わせ(Superposition)」と「トンネル効果(Tunneling Effect)」を利用して、イジングモデル(Ising Model)で表現されたエネルギーランドスケープの基底状態(最小エネルギー状態)を探索する手法である¹⁴。

D-Wave Systemsなどが商用化を進める量子アニーリングマシンは、特に組合せ最適化問題において、古典的な焼きなまし法(Simulated Annealing: SA)や遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithm: GA)を凌駕する性能を示すケースが報告されている¹⁶。量子ゆらぎを利用してすることで、高いエネルギー障壁をトンネル効果で透過し、局所解(Local Minima)にトラップされることなく大域的最適解(

Global Optimum)へ到達する確率を高めることができるからである¹⁸。

本報告書では、次世代の分散型データレイクが直面する数理的課題に対し、量子アニーリング技術がどのように適用可能かを包括的に検討する。クエリ最適化、データ配置、ネットワーク制御、そしてトランザクション管理の各レイヤーにおいて、問題をどのようにQUBO(Quadratic Unconstrained Binary Optimization)形式に定式化し、量子ハードウェア上で解くことができるのか、その理論的背景と最新の実証研究成果に基づいて詳述する。

2. 量子アニーリングとハイブリッドソルバーの技術基盤

2.1 イジングモデルとQUBOによる問題定式化

量子アニーリングを用いて実社会の最適化問題を解くためには、対象となる問題を物理学的なエネルギー式であるイジングモデル、あるいは計算機科学的な形式であるQUBOに変換(マッピング)する必要がある。

QUBO形式の目的関数 $E(\mathbf{x})$ は、二値変数ベクトル $\mathbf{x} \in \{0, 1\}^n$ を用いて以下のように定義される¹⁹。

$$\text{Minimize } E(\mathbf{x}) = \mathbf{x}^T Q \mathbf{x} = \sum_i Q_{ii} x_i + \sum_{i < j} Q_{ij} x_i x_j$$

ここで、 Q は実数係数を持つ上三角行列であり、対角成分 Q_{ii} は各変数の線形バイアス(重み)、非対角成分 Q_{ij} は変数間の相互作用(結合強度)を表す。イジングモデルでは変数がスピン $\sigma_i \in \{+1, -1\}$ をとるが、変換式 $x_i = (\sigma_i + 1)/2$ を用いることでQUBOと数学的に等価となる²¹。

データレイクにおける制約条件(例:「データAは必ず1つのノードに配置されなければならない」)は、制約を満たさない場合にエネルギー値が増大するようにペナルティ項として目的関数に組み込まれる。一般に、等式制約 $\sum x_i = k$ は、 $(\sum x_i - k)^2$ という二次項を展開して加算することで表現される²³。この際、ペナルティの強さを調整するラグランジュ乗数の設定が、解の実現可能性(Feasibility)と最適性(Optimality)のバランスを決定する重要なパラメータとなる。

2.2 D-Waveハードウェアの進化:トポロジーと接続性

量子アニーリングの実効性能は、プロセッサ上の物理量子ビットの数だけでなく、量子ビット間の接続性(Connectivity)に大きく依存する。問題の変数が互いに相互作用する場合、ハードウェア上の量子ビット間にも物理的な結合(カプラ)が必要となるからである。

D-Waveのプロセッサーアーキテクチャは、以下のように進化を遂げてきた²⁴。

アーキテクチャ	世代	物理量子ビット数	接続性(Degree)	トポロジー特徴
Chimera	D-Wave 2000Q	~2,000	6	単位セル内の完全二部グラフ結合。疎な接続性。
Pegasus	Advantage	~5,000	15	ノード次数が増加し、より複雑な埋め込みが可能に。
Zephyr	Advantage2	~7,000+	20	高密度な接続性、コーヒレンス時間の倍増、低ノイズ。

最新のAdvantage2システムで採用されたZephyrトポロジーは、1量子ビットあたり20の結合を持ち、以前の世代と比較して埋め込み効率が劇的に向上している²⁷。これは、データレイクの最適化問題のような、変数間の依存関係が密(Dense)なグラフ構造を持つ問題を扱う上で決定的な意味を持つ。接続性が低いハードウェアでは、論理変数を表現するために多数の物理量子ビットをチェーン状に連結(Minor Embedding)する必要があり、これが物理量子ビットの浪費と「チェーン切れ(Chain Break)」によるエラーの原因となっていたからである²⁹。Zephyrトポロジーは、より短いチェーン長での埋め込みを可能にし、解の精度と安定性を向上させる²⁵。

2.3 ハイブリッドソルバーと分解技法

現在の量子アニーリングマシンは数千量子ビットの規模であるが、実社会のデータレイク最適化問題は数万～数百万の変数を必要とすることが多い。このギャップを埋めるのが「ハイブリッドソル

バー(Hybrid Solvers)」である³¹。

ハイブリッドソルバーは、古典コンピュータと量子コンピュータを協調動作させることで、ハードウェアの物理的制限を超える規模の問題を解く。

- **QBSolv / 分解手法:** 巨大なQUBO問題を、量子ハードウェアに収まるサイズのサブ問題(Sub-QUBO)に分解し、それらを順次量子アニーラで解き、古典アルゴリズム(タブー探索など)で全体解を構成する³²。
- **D-Wave Hybrid (Kerberos):** 複数の古典的ヒューリスティクスと量子アニーリングを並列に実行し、最適な解を選択・改善していくワークフロー³⁴。
- **CQMソルバー:** 制約付き二次モデル(Constrained Quadratic Model)をネイティブにサポートし、連続変数や整数変数を扱うことが可能。最大で100万変数規模の問題(疎な場合)に対応可能とされ、不等式制約などをペナルティ項に手動変換する手間を省くことができる³⁵。

2.4 リバースアニーリングによる解の精緻化

量子アニーリングの標準的な動作(Forward Annealing)は、重ね合わせ状態から徐々に量子ゆらぎを弱めていくプロセスであるが、「リバースアニーリング(Reverse Annealing)」は、既知の古典的な解(初期状態)からスタートし、一時的に量子ゆらぎを強めて局所的な探索を行い、再びゆらぎを弱めて解を確定させる手法である³⁷。

分散データレイクの運用において、データの配置やネットワークの状態は刻一刻と変化するが、その変化は多くの場合、以前の状態からの差分である。ゼロから最適解を計算し直すのではなく、前回の最適解を初期値としてリバースアニーリングを行うことで、微修正された新たな最適解を極めて高速(順方向の100倍以上)に発見できる可能性が示されている³⁹。これは、リアルタイム性が求められる適応型システムにおいて強力な武器となる。

3. 分散クエリ処理における最適化の革新

3.1 結合順序最適化(Join Order Optimization: JOO)の量子化

分散データレイクにおけるクエリ処理で最もコストを左右するのは、複数のデータソース(テーブル)を結合する順序の決定である。テーブル数が \$N\$ の場合、可能な結合順序(Left-Deep Treeのみ

を考慮しても)は $\$N!\$$ 通り存在し、Bushy Treeを含めればその数はさらに爆発的に増加する⁷。分散環境では、テーブル間のデータ転送コストや、各ノードの計算能力の異質性が加わるため、問題はさらに複雑化する。

3.1.1 古典的手法の限界と量子アプローチの優位性

PostgreSQLなどの既存オプティマイザは、テーブル数が少ない場合は動的計画法(DP)を用いるが、テーブル数が一定(通常12~15程度)を超えると遺伝的アルゴリズム(GA)などの近似解法に切り替える⁸。しかし、これらのヒューリスティクスは局所最適解に陥りやすく、特に複雑な分析クエリ(OLAP)においては、非効率な実行計画が選択されるリスクが高い。

量子アニーリングを用いたアプローチ(Q2O: Quantum-augmented Query Optimizerなど)は、このJOO問題をQUBOとして定式化し、大域的最適解を探索する⁴¹。

3.1.2 HUBO(高次非制約二値最適化)モデルの導入

最新の研究(Uotila et al., 2025)では、結合順序問題を従来の二次(Quadratic)モデルではなく、高次(Higher-Order)の相互作用を許容するHUBOモデルとして定式化する手法が提案されている⁴³。

従来のQUBO定式化では、結合コストを表現するために多数の補助変数やslack変数を導入する必要があり、これが量子ビットの消費量を増大させていた。対してHUBOモデルでは、結合コストを直接的に多体相互作用項としてエンコードできるため、より少ない変数で精密なコスト関数を表現可能となる。

具体的には、結合ツリーの各ステップにおけるコスト関数を以下のようにモデル化する。

```
 $$\text{Cost} = \sum_k (\text{中間結果サイズ}_k \times \text{コスト係数})$$
```

HUBOモデルを用いることで、動的計画法と同等の最適性を持つプランを、クロス積(Cross Product)を排除した探索空間内で効率的に特定できることが数学的に証明されている⁴³。D-Waveのようなハードウェアはネイティブには二次相互作用までしかサポートしないため、HUBOをQUBOに還元(Quadratization)する工程が必要となるが、この変換を含めてもなお、大規模なクエリに対して量子アニーリングが有効な選択肢となり得ることが示唆されている。

3.2 多重クエリ最適化(Multi-Query Optimization: MQO)

データレイクでは、異なるユーザーやアプリケーションから、類似したクエリが同時に投入されることが一般的である。MQOは、これらのクエリ群(バッチ)から共通部分式(Common Sub-expressions)を検出し、その計算結果を共有することで全体のスループットを向上させる技術である⁴⁵。

Schönbergerらの研究では、このMQO問題を「設定被覆問題(Set Cover Problem)」の変種としてQUBO化し、最大1,000クエリのバッチ処理において量子アニーリング(およびデジタルアニーラ)を適用する実験を行っている⁴⁵。

- 増分処理アプローチ: 量子ハードウェアの容量制限に対処するため、クエリバッチ全体を一度に解くのではなく、部分問題に分割して解き、その結果をフィードバックしながら解を改善する「増分量子アニーリング」手法が開発された。
- 成果: 従来の大規模MQOヒューリスティクスと比較して、より高い共有率(計算コストの削減)を達成し、かつ計算時間も実用的な範囲に収まっていることが確認されている。

3.3 マテリアライズド・ビュー選択問題(MVS)

データレイクハウスアーキテクチャでは、頻繁にアクセスされる集計結果を「マテリアライズド・ビュー」として物理的に保存することで、クエリ応答を高速化する。しかし、ストレージ容量とメンテナンスコスト(元データ更新時の再計算コスト)には制約があるため、どのビューを選択すべきかはナップサック問題に類似した困難な最適化問題となる⁴⁷。

シミュレーテッドアニーリング(SA)や遺伝的アルゴリズム(GA)を用いた研究は多数存在するが、量子アニーリングはこれらの古典的メタヒューリスティクスよりも広範な探索空間を効率的に探索できる。特に、ビュー間の依存関係(あるビューを作成すれば、別のビューの作成コストが下がるなど)が複雑に絡み合う場合、QAのトンネル効果による大域的探索能力が、より優れたビューセットの発見に寄与する⁴⁸。

4. データ配置とストレージの量子最適化

分散システムにおいて、データの実体(レプリカやシャード)をどこに配置するかは、パフォーマンスとコストを決定づける最重要因子である。

4.1 グラフ分割によるデータベース・シャーディング

シャーディング(水平分割)は、巨大なデータセットを複数のノードに分散させる技術であるが、関連性の高いデータが異なるシャードに分断されると、高コストな分散ジョインが発生する。

この問題は、データレコードをノード、レコード間の共起関係や結合関係をエッジとするグラフにおいて、エッジカット(異なるパーティション間の結合)を最小化しつつ、各パーティションの重み(データ量)を均衡させる「グラフ分割問題(Graph Partitioning)」として定式化できる⁴⁹。

- 適応型チューニング: 量子アニーリングを用いたグラフ分割では、制約条件(パーティションバランス)と目的関数(カット最小化)のバランスをとるペナルティ係数の設定が難しい。最新の研究では、入力グラフの構造(密度など)に基づいてペナルティパラメータを動的に調整する適応型手法が提案されており、D-Waveマシン上で最大4,000ノードのグラフに対して、古典的なMetis やKernighan-Linアルゴリズムを上回る解の品質を達成している⁵¹。

4.2 レプリカ配置の多目的最適化

データの可用性を高めるためのレプリケーション戦略において、全てのノードにコピーを置く「フルレプリケーション」は更新コストが高すぎる。一方、需要に基づいて動的にレプリカを配置する戦略は、以下のトレードオフを含む多目的最適化問題となる⁵³。

1. アクセスコスト最小化: ユーザーに近いノードに配置する。
2. ロードバランシング: 特定のノードに負荷を集中させない。
3. ストレージコスト最小化: レプリカ総数を抑える。
4. 移行コスト最小化: 配置変更に伴うデータ転送を抑える。

QAを用いたアプローチでは、これらの目的を重み付き和として一つのハミルトニアンに統合し、最小エネルギー状態を探索する。特に、エッジコンピューティング環境のようにノードの異質性が高い場合、QAは大域的なバランスを考慮した配置を高速に提案できる可能性がある⁵³。

4.3 Web3・DePINにおけるストレージ市場の最適化

FilecoinやStorachaなどのWeb3ストレージネットワークでは、クライアントとストレージプロバイダー(SP)の間で、データの保存契約(Deal)が結ばれる。これは一種の「組合せオークション」であり、クライアントは価格、地域、信頼性、担保量などの条件に基づいて最適なSPの組み合わせを選択したいと考える¹¹。

- 量子アニーリングによる勝者決定問題(WDP): 多数の入札(SPからのオファー)と多数の需要(クライアントのデータ)が存在する中で、全体の効用を最大化するマッチングを見つける問題は、QUBOとして自然に記述できる⁵⁶。

- シーリング(Sealing)プロセスの効率化: Filecoinでは、データを保存したことを証明するために「シーリング」と呼ばれる計算集約的なプロセスが必要であり、これがコストの50%以上を占める場合がある⁵⁷。量子計算を用いてこのプロセスのスケジューリングやリソース割り当てを最適化することで、オンボーディングコストを大幅に削減できる可能性がある。
-

5. ネットワークとリソースの動的管理

5.1 SDNコントローラ配置問題(Controller Placement Problem: CPP)

分散データレイクを支えるネットワークインフラ(SDN)において、制御プレーン(コントローラ)とデータプレーン(スイッチ)の間のレイテンシはシステム全体の性能に直結する。CPPは、限られた数のコントローラをネットワーク上のどこに配置すれば、全スイッチとの平均遅延あるいは最大遅延を最小化できるかという問題である⁵⁸。

これは典型的な「施設配置問題(Facility Location Problem)」であり、NP困難である。量子アニーリング(QA)とシミュレーテッドアニーリング(SA)、およびk-means法を比較した研究では、QAを用いたアプローチ(Cuckoo-PCアルゴリズム等との比較においても)が、特に信頼性を考慮した配置において優れた性能を示すことが報告されている⁵⁹。QAは、ネットワークのトポロジーが複雑で大規模な場合でも、極小解に陥ることなく、よりロバストな配置構成を発見できる。

5.2 光ネットワークにおけるRSA(Routing and Spectrum Assignment)

データセンター間の大容量通信を担う弾性光ネットワーク(EON)では、光パスの経路選択(Routing)と、連続する周波数スロットの割り当て(Spectrum Assignment)を同時に最適化する必要がある。これをRSA問題と呼ぶ。

- 制約条件: スペクトル連續性(1つのパス内で周波数を変えない)、スペクトル隣接性(必要な帯域幅を連続したスロットで確保)、スロット非重複(他と被らない)。
- 量子アプローチ: 最新の研究(2025年)では、RSA問題を多目的QUBOとして定式化し、QAOA(ゲート型)およびQA(アニーリング型)で解く手法が実証されている⁶¹。結果として、従来の整数線形計画法(ILP)が指数関数的な計算時間をするのに対し、量子アプローチは多項式時間($\$O(n^2)\$$)の複雑性で、最適解に近い(近似率88%)解を得られることが示された。これは、トライフィック変動に即応して光パスを動的に再構成する「自律型光ネットワーク」の実現に向けた重

要なステップである。

5.3 トランザクションスケジューリングと並行性制御

データベース内部のリソース管理において、トランザクションの実行順序を最適化することは、ロック待ち時間を減らしスループットを最大化するために不可欠である。

Bittnerらの研究では、トランザクション間の競合関係(Read/Write競合など)をグラフ化し、その補グラフにおける「最大クリーク問題」あるいは競合グラフにおける「最大独立集合問題」としてスケジューリングを定式化している⁶³。

D-Waveマシンを用いた実験では、2相ロック(2PL)プロトコル下での実行において、QAが生成したスケジュールは、従来のFCFS(先着順)や単純なヒューリスティクスよりも実行時間を短縮し、特に競合が激しいワークロードにおいて「ブロッキング」を効果的に回避できることが示された。

5.4 6Gネットワークスライシングとサステナビリティ

次世代の6Gネットワークでは、ネットワークスライシングにより、多種多様なサービス(eMBB, URLLC, mMTC)に対して動的にリソースを割り当てる必要がある。このリソース配分問題(VNF配置など)もまた、QAの適用領域である⁶⁵。

特に注目すべきは「サステナビリティ」の観点である。VMやタスクの配置において、単に処理速度を最適化するだけでなく、データセンターの冷却効率や再生可能エネルギーの供給状況(太陽光発電のピークなど)に合わせて、カーボンフットプリントを最小化するような配置をQAで探索するフレームワークが提案されている⁶⁷。

6. 量子技術による合意形成とセキュリティの革新

6.1 Proof of Quantum Work (PoQW)

ブロックチェーン技術は分散型データレイクのガバナンス(アクセス制御、監査ログ)基盤として有望であるが、Proof of Work (PoW) のような合意形成メカニズムは膨大な電力を消費するという課題がある。

D-Wave Systemsの研究チームは、この課題に対して「Proof of Quantum Work (PoQW)」という概

念を提唱し、実証実験を行っている⁶⁹。

- メカニズム: マイニングにおける「ナンス(Nonce)探索」という無意味な計算の代わりに、量子アニーリングマシンを用いて、特定のイジングモデルの基底状態(エネルギー最小状態)を探索させる。この探索プロセスは、量子トンネル効果を利用するため、古典的なASICによる総当たり探索と比較してエネルギー効率が圧倒的に高い。
- 実証結果: 北米に分散配置された4台のD-Wave量子プロセッサを用いてPoQWブロックチェーンを稼働させ、コンセンサスを維持しつつ、従来のPoWと比較してエネルギー消費を約1,000分の1に削減できる可能性を示した⁶⁹。これは、サステナブルなWeb3データ基盤の実現に向けた画期的な成果である。

6.2 量子ビザンチン耐性(Quantum BFT)

分散システムにおける合意形成の要であるビザンチン障害耐性(BFT)プロトコルにおいても、量子技術の導入が進んでいる。量子鍵配達(QKD)ネットワークや量子乱数生成(QRNG)をBFTに統合することで、通信の複雑さを削減し、かつ無条件の安全性(情報理論的安全性)を担保する「Quantum BFT」が提案されている⁷¹。

従来のPBFT(Practical BFT)等はノード数が増えると通信量が二乗・三乗で増加するが、量子もつれ(Entanglement)や量子署名を利用することで、より少ない通信回数で合意に達することが可能となり、大規模な分散データレイクにおける高速なトランザクション確定に寄与する。

7. 実装上の課題と技術的ロードマップ

7.1 埋め込みオーバーヘッドとノイズの影響

量子アニーリングの実適用における最大の技術的障壁は「マイナー埋め込み(Minor Embedding)」に伴うオーバーヘッドである。論理的な変数のグラフ構造を物理的な量子ビットの接続グラフ(Chimera, Pegasus, Zephyr)にマッピングする際、1つの論理変数を複数の物理量子ビット(チェーン)で表現する必要がある。

- チェーン切れ: アニーリング中にチェーン内の物理量子ビットが異なる値をとってしまう「チェーン切れ」が発生すると、解の整合性が失われる。これを防ぐためには、チェーン内の結合強度(Chain Strength)を適切に設定する必要があるが、強すぎると他の変数との相互作用が相対的に弱まり、解の精度が低下するトレードオフがある²⁹。
- ノイズモデル: 埋め込みが大きくなるほど、アナログ制御エラーや熱雑音の影響が累積する。最

新の研究では、埋め込みサイズとノイズの影響を数理的にモデル化し、チェーン強度を最適化する手法が開発されている²⁹。Zephyrトポロジーのような高接続グラフの採用は、チェーン長を短縮し、この問題を緩和する効果がある²⁵。

7.2 ハイブリッドワークフローの確立

現状の量子ハードウェア(数千量子ビット)で、実社会の数百万変数規模の問題を解くためには、古典計算と量子計算を組み合わせたハイブリッドワークフローが不可欠である。

- **Q2Oの実装:** クエリ最適化(JOO)の例では、クエリの解析やコスト計算は古典コンピュータで行い、探索空間の刈り込みや大域的探索のみを量子アニーラ(あるいはCQMソルバー)に委譲するアーキテクチャがとられている⁴¹。
- **I/Oボトルネック:** 頻繁なデータ転送はレイテンシの原因となるため、どの粒度で問題を量子側にオフロードするかの判断(パーティショニング戦略)が重要となる。

7.3 将来展望: 量子ネイティブなデータ基盤へ

短期的には、D-WaveのCQMのようなハイブリッソルバーを用いた「特定タスクの高速化(アクセラレーション)」が主流となるだろう。しかし、長期的には、データベースのコアエンジン(カーネル)が量子計算を前提に再設計され、クエリ計画、インデックス構築、データ配置が自律的かつリアルタイムに量子最適化される「量子ネイティブ・データレイク」へと進化していくことが予想される。さらに、量子インターネットによる量子通信が実現すれば、分散ノード間で量子状態(もつれ)を共有し、通信遅延ゼロに近い形での完全な分散合意やデータ同期が可能になる未来も描かれている⁷⁴。

8. 結論

本検討により、次世代分散型データレイクが直面する「スケーラビリティ」と「最適化」の壁に対し、量子アニーリングが具体的かつ有力な解決策を提供し得ることが明らかになった。

1. 計算能力の壁の突破: 結合順序最適化やトランザクションスケジューリングにおいて、量子アニーリングはNP困難な問題に対して古典的手法を凌駕する、あるいは同等の解をより短時間で導出する能力を示している。特にHUBOモデルやハイブリッソルバーの活用により、実用規模の問題への適用が現実味を帯びている。
2. 動的適応能力: リバースアニーリング技術は、絶えず変化するデータレイクの状態(データ移

動、ノード増減)に対して、リアルタイムで最適配置を修正・追従させる能力を提供する。これは静的な最適化しか行えなかった従来のシステムとは一線を画する。

3. サステナビリティ: PoQWやサステナブルなVM配置の事例が示すように、量子アニーリングは「計算あたりのエネルギー効率」において圧倒的な優位性を持つ可能性があり、環境負荷の低い大規模データ基盤の構築に寄与する。

D-Wave Advantage2のようなハードウェアの進化と、Q20やCQMといったソフトウェアスタックの成熟は、量子アニーリングを「実験室の技術」から「データ基盤のエンジニアリングツール」へと昇華させつつある。未解決の課題(埋め込みオーバーヘッド等)は残るもの、分散型データレイクと量子アニーリングの融合は、データ管理の未来を再定義するパラダイムシフトとなるだろう。

引用文献

1. Data Mesh vs Data Fabric: Key Differences & Benefits 2025 - Atlan, 11月 30, 2025にアクセス、<https://atlan.com/data-mesh-vs-data-fabric/>
2. Data Mesh for AI: Complete Guide to Modern Data Architecture | Informatica, 11月 30, 2025にアクセス、<https://www.informatica.com/resources/articles/ai-data-mesh.html>
3. Data Mesh or Data Fabric? Do Better with Both - Booz Allen, 11月 30, 2025にアクセス、<https://www.boozallen.com/insights/data-optimization/data-mesh-or-data-fabric-do-better-with-both.html>
4. What Is a Data Mesh? - IBM, 11月 30, 2025にアクセス、<https://www.ibm.com/think/topics/data-mesh>
5. What do data mesh and data fabric mean for business? - PwC, 11月 30, 2025にアクセス、<https://www.pwc.com/gx/en/issues/technology/tech-translated-data-mesh-data-fabric.html>
6. Data Mesh vs. Data Fabric: What's the Difference? | Pure Storage Blog, 11月 30, 2025にアクセス、<https://blog.purestorage.com/purely-technical/data-mesh-vs-data-fabric-whats-the-difference/>
7. Left-Deep Join Order Selection with Higher-Order Unconstrained Binary Optimization on Quantum Computers - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/html/2502.00362v1>
8. Left-deep join order selection with higher-order unconstrained binary optimization on quantum computers Uotila, Valter - University of Helsinki Research Portal, 11月 30, 2025にアクセス、<https://researchportal.helsinki.fi/files/803288752/fcomp-7-1649354-1.pdf>
9. DePIN Future: Revolutionizing Decentralized Infrastructure - Rapid Innovation, 11月 30, 2025にアクセス、<https://www.rapidinnovation.io/post/the-future-of-depin-predictions-and-trends-for-2025-and-beyond>
10. 6 use cases for Decentralized Physical Infrastructure (DePIN) - a16z crypto, 11月 30, 2025にアクセス、<https://a16zcrypto.com/posts/article/6-use-cases-for-depin/>

11. Storacha Network | Decentralized Hot Storage Layer on Filecoin | Storacha - Decentralized Hot Storage Layer on Filecoin, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://storacha.network/>
12. Understanding IPFS and Filecoin - Silicon Mechanics, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://www.siliconmechanics.com/news/understanding-ipfs-and-filecoin>
13. Decentralized Physical Infrastructure Network (DePIN): Challenges and Opportunities, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/html/2406.02239v1>
14. [2411.04638] QCE'24 Tutorial: Quantum Annealing -- Emerging Exploration for Database Optimization - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://arxiv.org/abs/2411.04638>
15. Accuracy and minor embedding in subqubo decomposition with fully connected large problems, 11月 30, 2025にアクセス、<https://d-nb.info/1211888479/34>
16. 11月 30, 2025にアクセス、
<https://cstheory.stackexchange.com/questions/14270/is-quantum-annealing-faster-than-simulated-annealing-genetic-other-state-of-the#:~:text=Quantum%20annealing%20essentially%20offers%20a,make%20most%20hard%20problems%20tractable.>
17. Quantum versus simulated annealing in wireless interference network optimization - NIH, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4867427/>
18. Comparing Quantum Annealing and Simulated Annealing when Solving the Graph Coloring Problem - DiVA portal, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1797611/FULLTEXT01.pdf>
19. QUBO Formulations of Combinatorial Optimization Problems for Quantum Computing Devices - Lehigh University, 11月 30, 2025にアクセス、
https://engineering.lehigh.edu/sites/engineering.lehigh.edu/files/_DEPARTMENTS/se/pdf/tech-papers/23/23T_016.pdf
20. Quadratic Unconstrained Binary Optimization | PennyLane Demos, 11月 30, 2025にアクセス、https://pennylane.ai/qml/demos/tutorial_QUBO
21. New QUBO Transformations to Improve Quantum and Simulated Annealing Performance for Quadratic Knapsack - IMDEA Networks Principal, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://dspace.networks.imdea.org/bitstream/handle/20.500.12761/1928/poster-paper.pdf?sequence=2>
22. Quantum approximate optimization of the long-range Ising model with a trapped-ion quantum simulator - NIH, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7568299/>
23. [1811.11538] A Tutorial on Formulating and Using QUBO Models - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/abs/1811.11538>
24. The D-Wave Advantage System: An Overview, 11月 30, 2025にアクセス、
https://www.dwavequantum.com/media/s3qbjp3s/14-1049a-a_the_d-wave_advantage_system_an_overview.pdf
25. Performance gains in the D-Wave Advantage2 system at the 4400-qubit scale, 11月 30, 2025にアクセス、
https://www.dwavequantum.com/media/wakjcpsf/adv2_4400q_whitepaper-1.pdf

26. [2301.03009] Comparing Three Generations of D-Wave Quantum Annealers for Minor Embedded Combinatorial Optimization Problems - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/abs/2301.03009>
27. D-Wave's Advantage2 Quantum Computer Now Generally Available, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://support.dwavesys.com/hc/en-us/articles/32105885880087-D-Wave-s-Advantage2-Quantum-Computer-Now-Generally-Available>
28. What Is the Zephyr Topology? - D-Wave Quantum Inc, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://support.dwavesys.com/hc/en-us/articles/6820989477911-What-Is-the-Zephyr-Topology>
29. Quantum Annealing Noise Modeling Connects Embedding Chain Length To Reliability In Scalable Systems, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://quantumzeitgeist.com/quantum-systems-annealing-noise-modeling-connects-embedding-chain-length-reliability/>
30. Embedding-Aware Noise Modeling of Quantum Annealing - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/html/2510.04594v1>
31. Hybrid Solvers for Quadratic Optimization 1 Introduction - D-Wave Quantum, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://www.dwavequantum.com/media/soxph512/hybrid-solvers-for-quadratic-optimization.pdf>
32. Partitioning Optimization Problems for Hybrid Classical/Quantum Execution, 11月 30, 2025にアクセス、
https://www.dwavequantum.com/media/jhlpvult/partitioning_qubos_for_quantum_acceleration-2.pdf
33. dwavesystems/qbsolv: Qbsolv,a decomposing solver, finds a minimum value of a large quadratic unconstrained binary optimization (QUBO) problem by splitting it into pieces solved either via a D-Wave system or a classical tabu solver. (Note that qbsolv by default uses its internal classical solver. Access to a D- - GitHub, 11月 30, 2025にアクセス、<https://github.com/dwavesystems/qbsolv>
34. D-Wave's Nonlinear-Program Hybrid Solver: Description and Performance Analysis - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/html/2410.07980v2>
35. New Hybrid Solver: Constrained Quadratic Model - D-Wave Quantum Inc, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://support.dwavesys.com/hc/en-us/articles/4410049190807-New-Hybrid-Solver-Constrained-Quadratic-Model>
36. Dwave claim on "1 million variables" : r/QuantumComputing - Reddit, 11月 30, 2025にアクセス、
https://www.reddit.com/r/QuantumComputing/comments/1f242hv/dwave_claim_on_1_million_variables/
37. Reverse Quantum Annealing Assisted by Forward Annealing - MDPI, 11月 30, 2025にアクセス、<https://www.mdpi.com/2624-960X/6/3/30>
38. Unraveling Reverse Annealing: A Study of D-Wave Quantum Annealers - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/html/2502.08575v1>
39. Reverse Quantum Annealing for Local Refinement of Solutions, 11月 30, 2025にアクセス、

<https://www.dwavequantum.com/resources/white-paper/reverse-quantum-annealing-for-local-refinement-of-solutions>

40. Reverse Quantum Annealing Approach to Portfolio Optimization Problems - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/pdf/1810.08584>
41. A Demonstration of Q2O: Quantum-augmented Query Optimizer - USC Viterbi, 11月 30, 2025にアクセス、
https://viterbi-web.usc.edu/~sabek/pdf/25_demo_q2o.pdf
42. Quantum Computing for Databases: Overview and Challenges - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/html/2405.12511v1>
43. [2502.00362] Left-Deep Join Order Selection with Higher-Order Unconstrained Binary Optimization on Quantum Computers - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://arxiv.org/abs/2502.00362>
44. Left-deep join order selection with higher-order unconstrained binary optimization on quantum computers - Frontiers, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://www.frontiersin.org/journals/computer-science/articles/10.3389/fcomp.2025.1649354/full>
45. Large-Scale Multiple Query Optimisation with Incremental Quantum(-Inspired) Annealing, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://www.lfdr.de/Publications/2025/ScTrMa+25.pdf>
46. [2107.10508] Multiple Query Optimization using a Hybrid Approach of Classical and Quantum Computing - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://arxiv.org/abs/2107.10508>
47. Materialized view selection algorithm—CSSA_VSP - IEEE Xplore, 11月 30, 2025にアクセス、<https://ieeexplore.ieee.org/document/5643892/>
48. (PDF) Simulated Annealing for Materialized View Selection in Data Warehousing Environment - ResearchGate, 11月 30, 2025にアクセス、
https://www.researchgate.net/publication/29461959_Simulated_Annealing_for_Materialized_View_Selection_in_Data_Warehousing_Environment
49. Partitioning QUBO with two-way one-hot conditions on traveling salesman problems for city distributions with multiple clusters - Frontiers, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://www.frontiersin.org/journals/computer-science/articles/10.3389/fcomp.2024.1285244/full>
50. What is Database Sharding? - Shard DB Explained - AWS, 11月 30, 2025にアクセス、<https://aws.amazon.com/what-is/database-sharding/>
51. Quantum Annealing With Machine Learning Tunes Penalty Parameters For Minimum Bisection Problem Solutions, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://quantumzeitgeist.com/quantum-machine-learning-annealing-tunes-penalty-parameters-minimum-bisection-problem-solutions/>
52. Quantum Annealing for Minimum Bisection Problem: A Machine Learning-based Approach for Penalty Parameter Tuning - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://arxiv.org/html/2509.19005v1>
53. A Hybrid Heuristic Algorithm Using Artificial Agents for Data Replication Problem in Distributed Systems - MDPI, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://www.mdpi.com/2073-8994/15/2/487>

54. Modeling Replica Placement in a Distributed File System: Narrowing the Gap between Analysis and Simulation - Microsoft, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2001/01/ESA2001.pdf>
55. The Economics of Storage Providers - Filecoin, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://filecoin.io/blog/posts/the-economics-of-storage-providers/>
56. Quantum Bridge Analytics II: QUBO-Plus, network optimization and combinatorial chaining for asset exchange - PMC - PubMed Central, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9059917/>
57. DSA Reduces Decentralized Storage Costs by 40% - Filecoin, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://filecoin.io/blog/posts/dsa-reduces-decentralized-storage-costs-by-40-percent/>
58. An Effective Approach for Controller Placement in Software-Defined Internet-of-Things (SD-IoT) - MDPI, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://www.mdpi.com/1424-8220/22/8/2992>
59. Cuckoo-PC: An Evolutionary Synchronization-Aware Placement of SDN Controllers for Optimizing the Network Performance in WSNs - PMC - PubMed Central, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7308869/>
60. Comprehensive Review of SDN Controller Placement Strategies - IEEE Xplore, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://ieeexplore.ieee.org/iel7/6287639/8948470/09195810.pdf>
61. Quantum computing approach for multi-objective routing and spectrum assignment optimization - IEEE Xplore, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10957760/>
62. Optical Routing with Binary Optimisation and Quantum Annealing - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/pdf/2402.07600>
63. Avoiding blocking by scheduling transactions using quantum annealing | Request PDF, 11月 30, 2025にアクセス、
https://www.researchgate.net/publication/343874679_Avoiding_blocking_by_scheduling_transactions_using_quantum_annealing
64. Hardware Accelerating the Optimization of Transaction Schedules via Quantum Annealing by Avoiding Blocking - Semantic Scholar, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://www.semanticscholar.org/paper/Hardware-Accelerating-the-Optimization-of-Schedules-Bittner-Groppe/a3750d84fbc1e737f5ead686721be4db9a6d7f21>
65. Redefining 6G Network Slicing: AI-Driven Solutions for Future Use Cases - MDPI, 11月 30, 2025にアクセス、<https://www.mdpi.com/2079-9292/14/2/368>
66. Open RAN Slicing with Quantum Optimization - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://arxiv.org/html/2502.00142v1>
67. Quantum Annealing Method for Dynamic Virtual Machine and Task Allocation in Cloud Infrastructures from Sustainability Perspective - IEEE Xplore, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10148143/>
68. Quantum Annealing Method for Dynamic Virtual Machine and Task Allocation in Cloud Infrastructures from Sustainability Perspectiv - IEEE Xplore, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://ieeexplore.ieee.org/document/10148144/>

- アクセス、<https://ieeexplore.ieee.org/iel7/10148090/10148105/10148143.pdf>
69. D-Wave Proposes Quantum Blockchain Architecture Using Distributed Annealing Quantum Computers, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://quantumcomputingreport.com/d-wave-proposes-quantum-blockchain-architecture-using-distributed-annealing-quantum-computers/>
70. [2503.14462] Blockchain with proof of quantum work - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/abs/2503.14462>
71. Secure Byzantine Fault Tolerance Mechanisms for Quantum Computing - IEEE Xplore, 11月 30, 2025にアクセス、
<https://ieeexplore.ieee.org/iel8/11069375/11069426/11070480.pdf>
72. Quantum consensus - Institutional Knowledge (InK) @ SMU, 11月 30, 2025にアクセス、
https://ink.library.smu.edu.sg/context/sis_research/article/7019/viewcontent/IEEE_CSDE_2019_Qualum_Consensus_CameraReadyV2.pdf
73. Quantum Annealers Chain Strengths: A Simple Heuristic to Set Them All - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/html/2404.05443v1>
74. Quantum Data Management: From Theory to Opportunities - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/html/2403.02856v1>
75. Quantum Data Centers: Why Entanglement Changes Everything - arXiv, 11月 30, 2025にアクセス、<https://arxiv.org/html/2506.02920v1>