

# Bayesian Factorization Machines を用いた確率量子アニーリングによる分散型再生可能エネルギーシステムの最適化 —脱炭素社会に向けた再エネ不確実下の量子確率最適化手法の提案—

## 1. 背景

カーボンニュートラルの実現に向けて再生可能エネルギーの導入が拡大する一方、再生可能エネルギーの導入は、天候による予測需要量の不確実性に加え、予測発電量の不確実性が生じるため、安定な電力需給の運用がますます難しくなる。特に新電力のような小規模小売事業者は、需要家の数が少なく自社で所有する電源がない、もしくは小規模であるため、不確実性の影響をいっそう受けやすい。従って、予測のズレにより生じるインバランス費用（リコース）を確率（シナリオ）モデルとして考慮する電力需給計画（確率計画法）が重要である。確率計画法は、各シナリオについてリコースを計算する必要があり、シナリオ各々のリコース変数（第二段階決定変数）を必要とする。しかし、不確実性を確率モデルとして正確に表現するには、多数のシナリオが必要であり、決定変数数がシナリオに依存して非常に大きくなる。そのため、実務で要求される時間内で、不確実性を正確に考慮した電力需給計画を立案することは困難である。

## 2. 目的

本プロジェクトの目的は、電力需給計画における多数シナリオ確率計画の計算困難性を緩和しつつ、不確実性を適切に考慮した実用的な意思決定を可能にする新しい量子最適化ソフトウェア手法を開発することである。具体的には、ブラックボックス最適化手法 FMQA をベイズ的に拡張した BFMQA (Bayesian Factorization Machines with Quantum Annealing) を開発し、少数シナリオ学習（軽量）で多数シナリオ評価（高精度）を分離した反復枠組みにより、多数シナリオ最適化に相当する解へ近づくことを目指した。

## 3. ソフトウェア開発内容

本プロジェクトでは、分散型再生可能エネルギーシステム（新電力の需給計画）における不確実性を考慮した最適化を対象として、量子アニーリングを活用したソフトウェアを開発した。まず、対象問題を新電力の需給計画として設定し、ゲートクロー

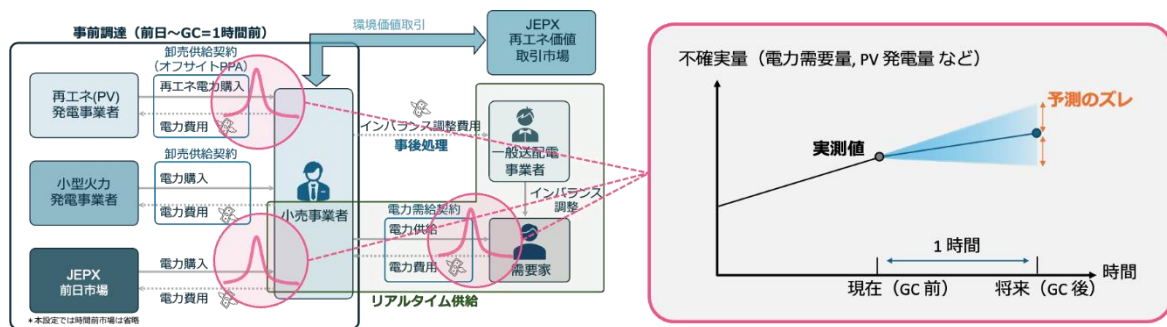


図 1：新電力の電力需給概要図

ズ (GC) 前に決定する第一段階の計画と、GC 後の需要・PV 発電量等の予測誤差に対する調整 (リコース) を第二段階問題として扱う二段階確率計画法として定式化した (図 1)。

次に、ブラックボックス最適化の既存手法である FMQA を拡張し、Factorization Machines の学習をベイズ化した BFM (Bayesian Factorization Machines) を用いることで、事後分布から複数の QUBO を生成し並列探索を可能にする BFMQA を実装した。これにより、点推定ベースの探索で生じやすい局所停滞を抑えつつ、探索初期の多様性確保と後半の収束性の両立を狙った (図 2)。

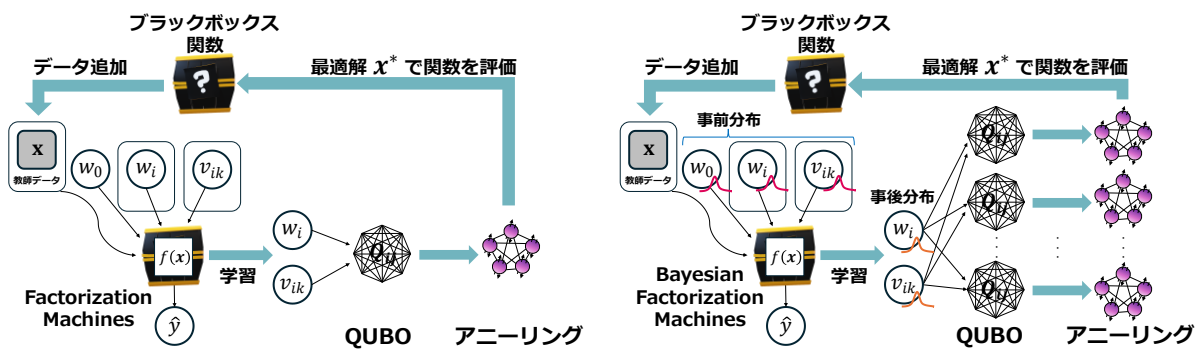


図 2 : FMQA と BFMQA のブラックボックス最適化フロー

実装した BFMQA の基本性能を確認するため、Sphere 関数/Ackley 関数/Rastrigin 関数を用いたベンチマーク評価を行った。特に Rastrigin 関数のような強多峰性問題では、FMQA と比較して BFMQA が局所解への停滞を回避しやすく、QUBO 数 (並列探索数) を増やすことで収束が安定・早期化する傾向を確認した (図 3)。この結果は、提案手法が探索多様性を活かして難しいブラックボックス最適化問題に有効に機能することを示している。

さらに、電力需給計画への適用にあたっては、計算負荷の大きい多数シナリオ確率

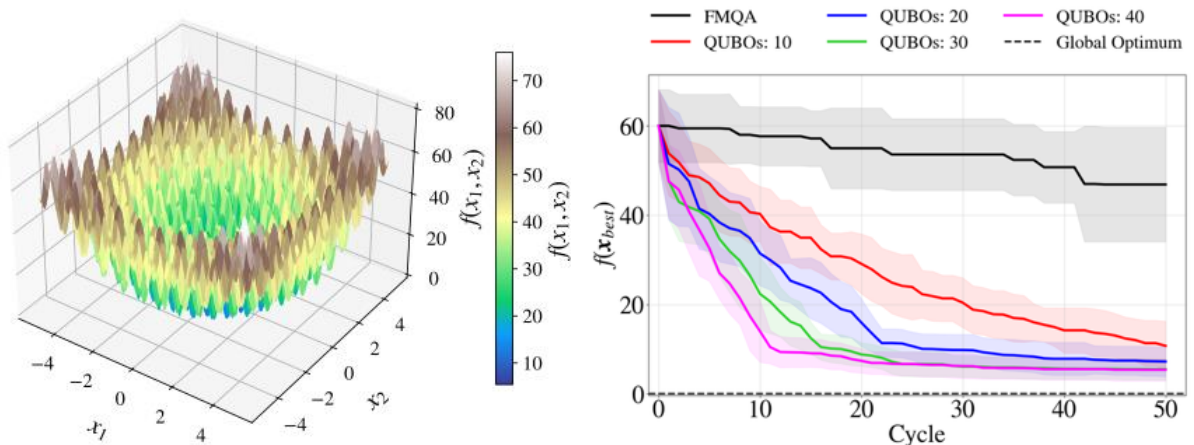


図 3 : Rastrigin 関数の概形と (左) と FMQA と BFMQA の収束過程 (右)

計画を直接最適化するのではなく、少数シナリオで学習し、多数シナリオで候補解評価する反復フローを実装した。具体的には、少数シナリオで学習データを生成・BFMを更新し、事後分布から生成した複数 QUBO に対して SA/QA を実行して候補解を得る。その後、第一段階決定変数を固定した多数シナリオ評価により候補解の優劣を判定し、最良候補を次サイクルの学習へ反映する構成とした (図 4)。この設計により、

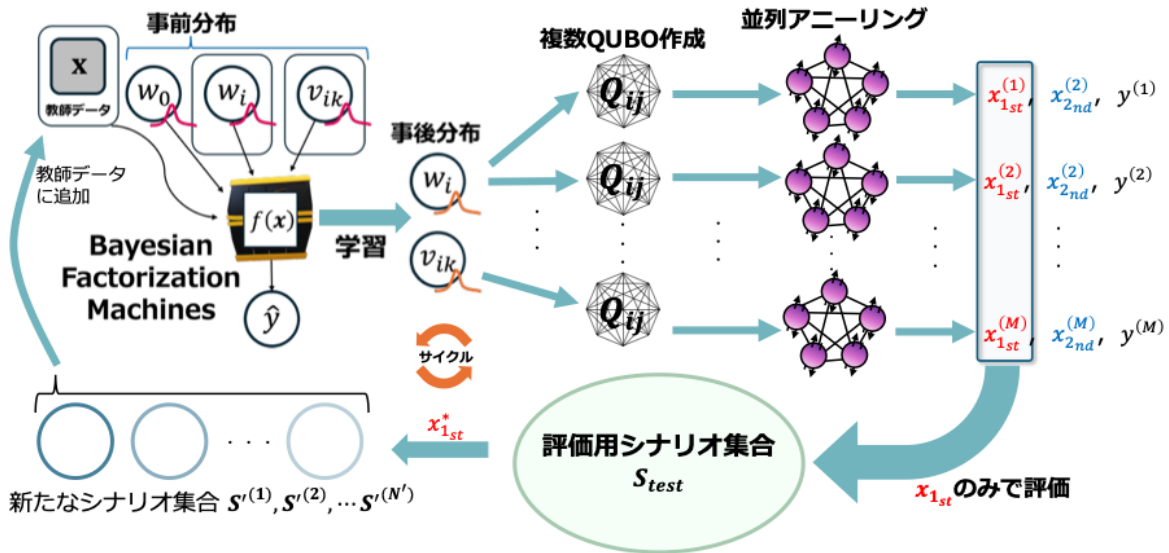


図 4：BFMQA による確率計画法フロー

計算量を抑えながら多数シナリオに相当する解へ段階的に近づけるソフトウェア実行フローを構築した。

実問題での評価では、天候条件 (晴れ/曇り/雨) および安定/不安定条件を設定し、PV 発電不確実性の構造が異なる複数ケースで検証を行った。その結果、不確実性が大きい条件においても、BFMQA は少数シナリオ学習 + 多数シナリオ評価の枠組みのもとで、期待コストを多数シナリオ RP の参照解に段階的に近づける挙動を示した。また、QUBO 数を増やすことで収束のばらつきが抑制され、より早期に参照解近傍へ到達する傾向が確認された (図 5)。

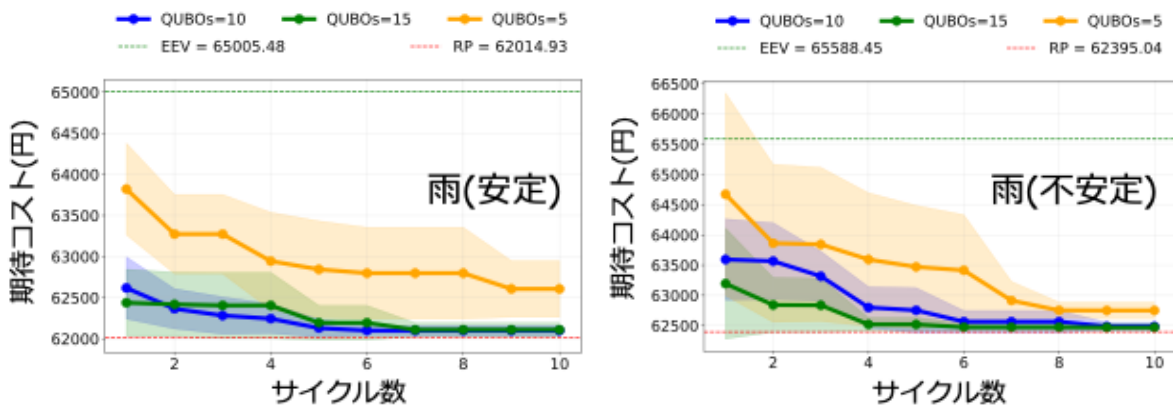


図 5：天気条件別の BFMQA による期待コスト推移 (代表例)

#### 4. 新規性・優位性

本成果の新規性は、ブラックボックス最適化手法 FMQA を、Factorization Machines のベイズ推定化によって拡張し、事後分布から複数の QUBO を生成して並列探索する BFMQA を提案・実装した点にある。従来の FMQA が点推定ベースで単一の近似モデルに依存しやすいのに対し、BFMQA ではモデル不確実性を探索に反映できるため、探索初期の多様性を確保しやすく、局所解への停滞を抑えながら探索を進められる。

また、優位性はアルゴリズム面だけでなく、実問題への適用設計にもある。電力需給計画のような多数シナリオ確率計画を直接最適化すると計算負荷が大きくなるのに対し、本成果では少数シナリオで学習し、多数シナリオで評価する反復フローを採用した。これにより、不確実性を考慮した解の品質を維持しつつ、計算量を抑えた実用的な運用枠組みを示した点が優位である。

さらに、ベンチマーク関数（特に多峰性の強い条件）において、BFMQA は FMQA と比較して収束の安定化や局所停滞回避の傾向を示しており、QUBO 数（並列探索数）を増やすことで性能改善が見込める拡張性も確認された。加えて、電力需給計画への適用でも、期待コストを多数シナリオ RP の参照解に段階的に近づける挙動を示しており、理論的な提案にとどまらず、実問題での有効性まで検証できている点が本成果の強みである。

#### 5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

想定ユーザーは、ブラックボックス最適化、量子アニーリング、確率最適化の分野に携わる研究開発者であり、実務者としては、新電力があげられる。本提案手法により、新電力には需要や PV 発電量の予測誤差が大きい状況でも、要求される計算時間内で、不確実性を考慮したより良い需給計画を立案できる可能性がある。

社会的インパクトとしては、再エネ比率の上昇に伴って大きくなる需給運用の不確実性に対し、計画精度の向上と調整コストの抑制に寄与する可能性がある。これにより、インバランス費用の低減、需給逼迫時の運用安定化、再エネ活用の促進といった効果が期待される。また、本成果の考え方は、電力分野に限らず、需要変動や供給不確実性を伴う物流・生産計画・インフラ運用など、多数シナリオを扱う他分野の最適化問題への展開も期待できる。

#### 6. 氏名（所属）

伊藤 悠哉（電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻）

黒岩 太平（電気通信大学大学院情報理工学研究科基盤理工学専攻）

（参考）関連 URL

<https://github.com/yuy4ito-oss/bfmqa-demo>