

令和4年4月1日

東北大学電気通信研究所  
科学技術振興機構(JST)

## 大規模な組合せ最適化問題を解く確率的計算技術を開発 ～解収束時間を3桁以上低減し実時間で社会還元できる道を拓く～

### 【発表のポイント】

- 大規模な組合せ最適化問題<sup>注1)</sup>を高速に解く確率的計算<sup>注2)</sup>技術を開発
- 量子アニーリング<sup>注3)</sup>マシンと比較して、約16倍の大規模な組合せ最適化問題を解くことができる技術を、一般的なパソコン(古典コンピュータ)上で実証
- 従来手法と比較して約1,000倍の高速化が可能となり、複雑な社会問題を効率的に処理できる新たな手法として期待

### 【概要】

組合せ最適化問題は、膨大なデータの組合せから最適解を求める問題として知られています。組合せ最適化問題を高速に処理可能な技術として注目されているのがD-Waveなどの量子アニーリングマシンですが、いくつかの難点があり、大規模な組合せ最適化問題を解くことは困難です。東北大学電気通信研究所の鬼沢直哉准教授、羽生貴弘教授、カナダ・マギル大学のWarren J. Gross教授らの共同研究チームは、確率的演算に基づく新たなシミュレーテッドアニーリング<sup>注4)</sup>技術を開発し、量子アニーリングで知られるD-Wave Systems社のマシンと比較して、約16倍の大規模な組合せ最適化問題を解くことに成功しました。

今回開発した確率的計算技術は、一般的なパソコン(古典コンピュータ)で利用可能なアルゴリズムでありながら最適解への収束率を飛躍的に高めることに成功し、極低温動作を必須とする量子アニーリングマシンを実用性で大幅に上回る性能を実証しました。また、決定論的計算<sup>注2)</sup>に基づく従来手法と比較して、約1,000倍高速に組合せ最適化問題を解くことにも成功しました。多くの点で既存のアニーリング技術を大幅に超える性能を示しており、今後の情報処理技術に新たな展開をもたらし得るものと期待されます。

本研究成果は2022年3月30日付で米国の科学誌「IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems」でオンライン公開されました。

## 【詳細な説明】

### 量子アニーリングによる組合せ最適化問題

組合せ最適化問題は、ある課題に対して膨大なデータの組合せから最適解を求める問題として知られています。IoT などにより実世界から収集された膨大かつ多種多様なデータを数値的に解析することで、IT インフラ整備・施設配置問題・ポートフォリオ最適化などの組合せ最適化問題を解くことが可能となり、それによりさまざまな社会問題の解決が期待されています。一方で、これらの組合せ最適化問題はそのほとんどが NP 困難<sup>注5)</sup>であるため、効率良く解く技術への要求が高まっています。

組合せ最適化問題を高速に処理可能な技術として注目されているのが、D-Wave System 社などの量子アニーリングマシンです。現在のコンピュータである古典計算機で動作可能なシミュレーテッドアニーリングと比較して、大規模な問題でも高速に解を求められることが期待されています。一方で量子アニーリングマシンは、その実装に超電導デバイスなどが必要であるため、室温と比べて極めて低い極低温環境が求められます。さらに、デバイス性能の制約から解ける問題が限定的であり、現状、大規模な組合せ最適化問題を解くことは困難です。

### ストカスティック演算<sup>注6)</sup>に基づくシミュレーテッドアニーリング技術

今回、研究グループは、確率的演算として知られるストカスティック演算を駆使することで、量子アニーリングマシンを実用性で超えるシミュレーテッドアニーリング技術を開発しました。組合せ最適化問題は、図1(a)に示すように対象となる問題をエネルギー関数で表現をします。エネルギーの高い初期状態からスタートし、揺らぎ(雑音)によってエネルギーを小さくしていき、最小エネルギーに到達すると最適解を得ることができます。エネルギーは0か1の状態を持つノードの組合せにより表現され、揺らぎによって各ノードの状態が変化することによりエネルギーが変化します。

従来手法では、ノードの内部状態を双曲線関数である  $\tanh$  関数を正確に計算、つまり決定論的計算に基づき実現していましたが、組合せ最適化問題の大規模化に伴い最小エネルギー(最適値)への収束が困難です。今回開発した確率的計算技術では、ノードの内部状態を、0と1からなる確率的ビット列と制限付きアップダウンカウンタ(入力情報0,1によってカウンタの値を+1もしくは-1する機能)で実現することで、統計的に  $\tanh$  関数を近似しました(図1(b))。この統計的近似手法により、最小エネルギーへの収束率を大幅に高めることに成功しました。組合せ最適化問題の典型例の一つであるグラフ同型性判定問題<sup>注7)</sup>をシミュレーション実験した結果、図2に示すように従来手法では収束率が非常に低いのに対して、今回開発した確率的計算技術では高い収束率を実現していることがわかります。

### 高速・高収束シミュレーテッドアニーリング技術のシミュレーション実証

研究チームは開発した確率的計算技術を用いて一般的なパソコン(古典コンピュータ)上でシミュレーション実験を行い、D-Wave System 社の量子アニーリング(QA)マシン

ンである 504-qubit D-wave Two machine と性能比較を行いました。グラフ同型性判定問題を対象に収束率を比較すると、QA ではノード数が増えるにつれて収束率が大幅に低下し、ノード数が 50 以上では最適解を得ることができません。一方で、今回開発した確率的計算技術(Prop)はノード数が増えても高い収束率を維持しており、QA と比較して約 16 倍の大規模な組合せ最適化問題を解くことに成功しました(図3(a))。また、決定論的計算に基づく従来手法(Conv)と比較して、約 1,000 倍の高速化にも成功しました(図 3(b))。そのため、本技術は大規模な組合せ最適化問題を高速に解くことができる技術として期待されます。

また、組合せ最適化問題のもう一つの典型例として知られると最大カット問題<sup>注 8)</sup>を対象にシミュレーション実験を行いました。同一のコンピュータ上でシミュレーション実験を行った結果、今回開発した確率的計算技術は、富士通社のデジタルアニーラなどの既存のシミュレーテッドアニーリング(SA)手法と比較して、約 45 倍に高速化できることを明らかにしました(図 3(c))。

## 意義と今後の展望

社会課題を解決可能な組合せ最適化問題は、その大規模化・複雑化に伴って既存のシミュレーテッドアニーリング及び量子アニーリング手法では計算速度と最適解への収束率に課題を抱えていました。今回、科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業・さきがけ「革新的コンピューティング」領域において開発した計算技術は、確率的計算に基づく統計的近似手法により、大規模な組合せ最適化問題における計算速度と収束率を大幅に改善することに成功しました。その結果、これまで解決が困難だった大規模な社会課題を解決可能にする道を切り拓きました。

今回開発した確率的計算技術はソフトウェアによるシミュレーション実証を行いましたが、この技術は専用ハードウェア化が容易なため、さらなる高速化が可能です。そのため、今後の Society5.0・超スマート社会を支える革新的な計算技術として期待されます。

本研究の一部は、科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業・さきがけ JPMJPR18M5、科学技術振興機構・戦略的創造研究推進事業・CREST JPMJCR19K3、日本学術振興会・科学研究費助成事業・基盤研究(B) JP21H03404 などの支援を受けて行われたものです。

【図面】

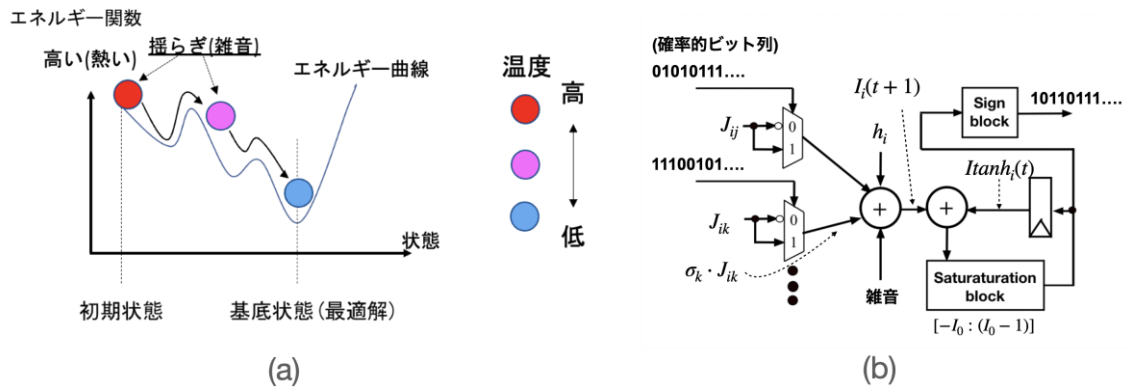


図1 (a)エネルギー関数で表現された組合せ最適化問題のイメージ図。0か1の状態を持つノードの組合せによりエネルギーを表現し、最小エネルギーに到達すると最適解が得られる。(b)今回開発した確率的計算技術に基づくノードの状態の統計的近似手法のブロック図。

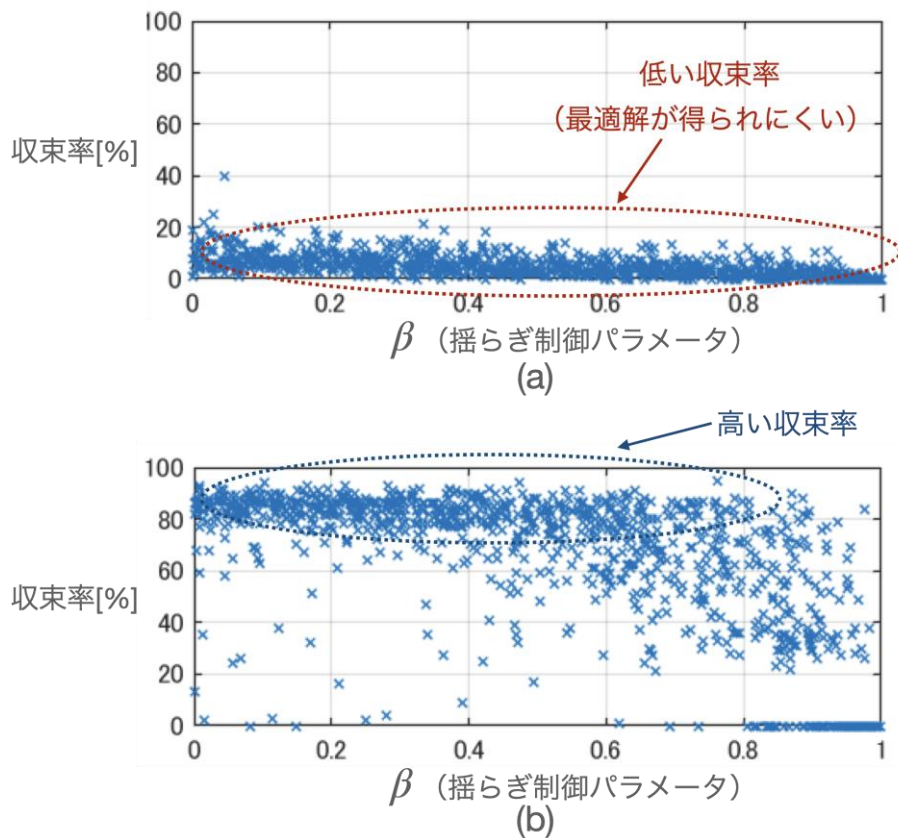


図2 組合せ最適化問題の典型例の一つであるグラフ同型性判定問題における収束率のシミュレーション実験。(a)従来手法では収束率が低いのに対して、(b)今回開発した手法では収束率が大幅に改善。

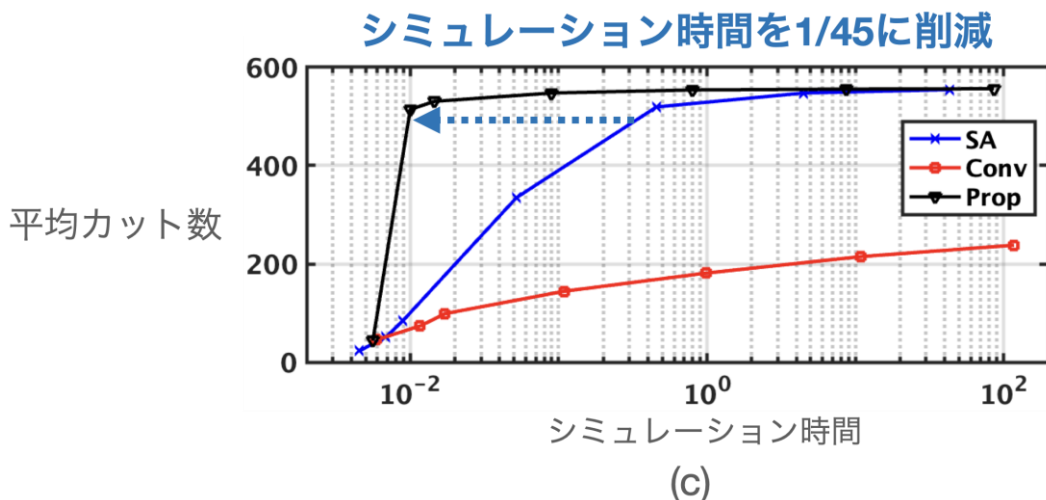
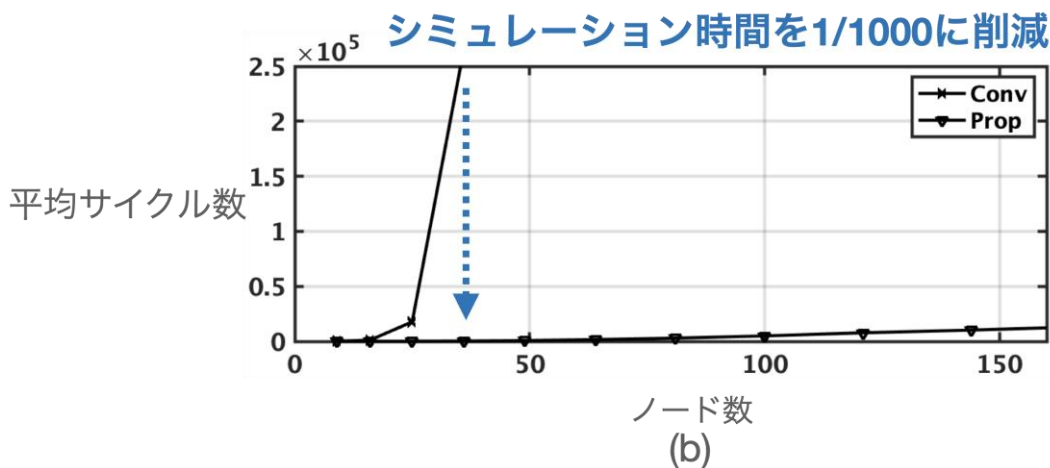
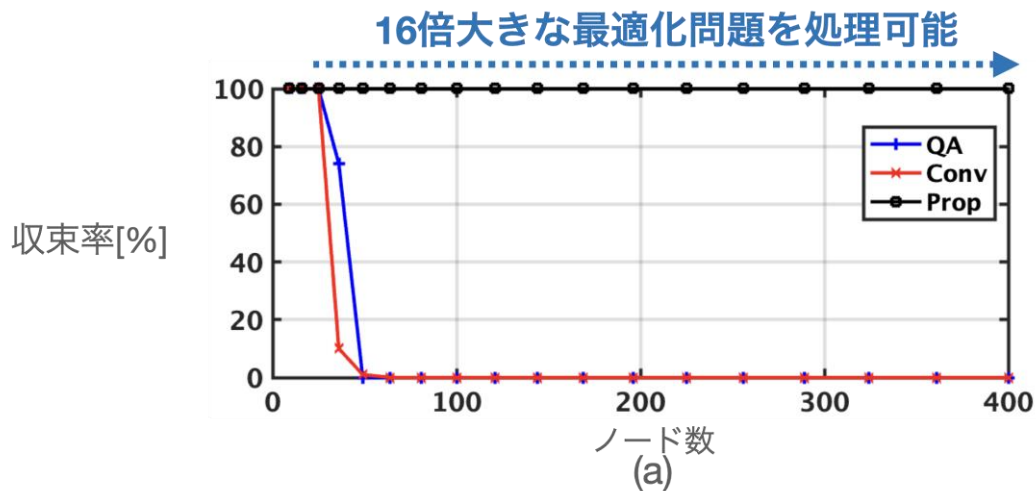


図3 組合せ最適化問題の典型例であるグラフ同型性判定問題及び最大カット問題における性能比較。今回開発した確率的計算技術(Prop)は、(a)量子アニーリング(QA)マシンとして約 16 倍の大規模な組合せ最適化問題を解くことに成功。(b)従来の決定論的計算手法(Conv)と比較して約 1,000 倍の高速化。(c)既存のシミュレーテッド(SA)手法と比較して約 45 倍の高速化。

## 【用語解説】

### 注1) 組合せ最適化問題

ある課題に対して膨大なデータの組合せから最適解を求める問題。具体的な応用は IT インフラ整備・施設配置問題・ポートフォリオ最適化など。

### 注 2) 決定論的計算と確率的計算

現在のコンピュータは、入力情報から出力情報が一意に決まる決定論的計算に基づく。一方で、確率的計算では出力を一意に決定せず、主に統計的な手法に基づく出力を決定する計算技術。

### 注 3) 量子アニーリング

組合せ最適化問題を解くことができる量子コンピューティング技術の一つ。D-Wave Systems 社の量子アニーリングマシンは、極低温で動作する超伝導素子により構成。

### 注 4) シミュレーテッドアニーリング

一般的なパソコン(古典コンピュータ)で動作可能で、組合せ最適化問題を解くことができる計算技術の一つ。

### 注 5) NP 困難

妥当な時間内で厳密に解を求めるのが難しく、近似手法によって解を求める問題。

### 注 6) ストカスティック演算

0 と 1 のビット列を用い、ビット列中の 1 の存在確率により数値表現を行い、統計的な手法に基づき関数の近似計算を行う手法。現在のコンピュータで用いられる 2 値演算方式と比較して、複雑な計算をコンパクトに構成可能。

### 注 7) グラフ同型性判定問題

二つのグラフが同じ構造かどうかを判定する問題。計算量理論の未解決問題として知られている。

### 注 8) 最大カット問題

重み付きグラフのノードを二つのグループに分別する際、グラフをカットしたエッジ(ノード間の枝)の重みの総和を最大化する問題。

## 【論文情報】

N. Onizawa, K. Katsuki, D. Shin, W. J. Gross and T. Hanyu, “Fast-Converging Simulated Annealing for Ising Models Based on Integral Stochastic Computing,” *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*

DOI: 10.1109/TNNLS.2022.3159713

**【問い合わせ先】**

<研究に関すること>

東北大学電気通信研究所 准教授  
担当 鬼沢 直哉  
電話 022-217-5508  
E-mail naoya.onizawa.a7[at]tohoku.ac.jp

<報道に関すること>

東北大学電気通信研究所 総務係  
電話 022-217-5420  
E-mail riec-somu[at]grp.tohoku.ac.jp

科学技術振興機構 広報課  
電話 03-5214-8404  
E-mail jstkoho[at]jst.go.jp

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 戦略研究推進部 ICTグループ  
前田 さち子  
電話 03-3512-3526  
E-mail presto[at]jst.go.jp