解説

量子アニーリングの基礎と応用事例[†]

田中 宗^{*1 *2}

1. はじめに

組合せ最適化問題を高速かつ高精度に処理できると期待されている計算技術が昨今、注目を集めている。組合せ最適化問題は、膨大な選択肢から最適な選択肢を探索する問題のことを指す。ここで選択肢の最適性は、コスト関数と呼ばれる実関数をもとに評価する。コスト関数が小さい解がより最適であるということになる。

組合せ最適化問題は、選択肢の個数は問題の規模が大きくなるにつれて指数関数的に増大するため、解の候補一つずつに対してコスト関数を計算し、それを比較することによってコスト関数最小の解を選び出すことは事実上困難である。そのため、コスト関数が最小となる解を力ずくで探すのではなく、簡単な方法で可能な限りコスト関数が小さくなる解を得る方法の開発が喫緊の課題であり、これまでも精力的な研究開発が進められてきた。

また組合せ最適化問題は様々な学問領域や産業領域において内在するため、高速かつ高精度に処理できる計算技術の開発が強く求められている。そのような中、量子アニーリングと呼ばれる計算技術が最近注目を集めている。量子アニーリングは1998年に門脇と西森によって提案された[1, 2]。この計算技術は自然現象を用いた計算であるナチュラルコンピューティングの一つであり、その基礎には物理学の概念が潜んでいる。量子アニーリング提案当時は、純粋な物理学理論として報告された。その後2011年にD-Wave Systems社により、超伝導エレクトロニクス分野で培われた技術を用いた世界初の商用量子アニーリングマシンD-Waveが発表されたことにより、量子アニー

図1 量子アニーリングの流れ

リングが計算技術として注目を集めるようになった。この当時は128個の超伝導量子ビットが搭載された小規模のものであったが、その後2013年、2015年、2017年にそれぞれ新しい量子アニーリングが開発され、超伝導量子ビット数はそれぞれ512個、1152個、2048個と増えてきた。2年で約2倍程度の超伝導量子ビット数の増加がなされ、着実に進化を遂げていると言える。

量子アニーリングマシンを用いて組合せ最適化問題を処理するには、図1で示す手順で行う。第一段階で解くべき組合せ最適化問題を用意する。通常の情報処理において、組合せ最適化問題が明示的に現れていない場合がある。従って、一連の情報処理の中において、量子アニーリングで解くべき組合せ最適化問題を抽出する必要がある。実際に産業利用を考える場合においては、この第一段階が重要である。次に第二段階として、第一段階で用意した組合せ最適化問題をイジングモデルに変換する（イジングモデルについては2節で詳細を説明する）。量子アニーリングマシンが、イジングモデルと呼ばれる統計力学モデルを元に動作することから、この段階が必要になる。次に第三段階として、量子揺らぎを強く導入し量子重ね合わせ状態を実現させる。その後、量子揺らぎを徐々に弱める。この部分については3節で述べる。最後に第四段階と

[†] Basics and Applications of Quantum Annealing
Shu TANAKA

^{*1} 早稲田大学高等研究所
Waseda Institute of Advanced Study, Waseda University

^{*2} 科学技術振興機構さきがけ
PRESTO, Japan Science and Technology Agency (JST)

して、超伝導量子ビットを測定することにより、最終的に得られた解を得る。以上が量子アニーリングマシンを用いて組合せ最適化問題を処理する流れとなる。

第三段階について少し補足を加える。組合せ最適化問題を処理するためによく用いられる計算技術として、シミュレーテッドアニーリングと呼ばれる方法がある。これは温度を表現する効果を導入し、組合せ最適化問題の処理を行うものである。はじめに高い温度を導入しランダムな状態を実現させ、その後、温度を徐々に下げていく。温度は熱揺らぎを表現するパラメータであるため、シミュレーテッドアニーリングは熱揺らぎを徐々に弱めていく方法である。このことから、量子アニーリングはシミュレーテッドアニーリングの類似方法と見ることができる。

本解説論文では、最近注目が目覚ましい計算技術である量子アニーリングについて、物理学を専門としない読者を対象に説明する。2節では、組合せ最適化問題とイジングモデルと呼ばれる統計力学モデルの関係について述べる。3節では、量子アニーリングマシンの動作概要について、特に図1の第三段階を中心に説明する。4節では、量子アニーリングマシンを使った最近の研究開発動向について代表的なものを紹介し、5節では、量子アニーリングやその周辺技術の現状の課題と今後の展望について俯瞰する。

2. 組合せ最適化問題とイジングモデル

1節で述べたように、組合せ最適化問題は膨大な選択肢から最適な選択枝を選び出す問題である。具体的には、与えられた条件（制約条件） $\mathbf{X}$ に属する離散変数の組 $\mathbf{x}$ を引数とした実数関数 $f(\mathbf{x})$ を最小にする $\mathbf{x}^*$ を求める問題として定式化される。

$$\mathbf{x}^* = \arg \min_{\mathbf{x}} f(\mathbf{x}), \quad (\mathbf{x} \in \mathbf{X}). \quad (1)$$

典型的な組合せ最適化問題として、巡回セールスマン問題が挙げられる。巡回セールスマン問題は、 N 個の場所が与えられたとき、全ての場所を一度ずつ通過して元の場所に戻る経路のうち、経路長が最も短いものを求めよ、という問題である。ここで与えられた条件（制約条件） $\mathbf{X}$ は、全ての場所を一度ずつ通過し元の場所に戻る経路の集合を表し、 $f(\mathbf{x})$ は経路 $\mathbf{x}$ の経路長を表す。また、解の候補となる経路は N に対して指数関数的に増大する。典型的な組合せ最適化問題としては、数分割問題やナップサック問題なども挙げられる。いずれの場合も上記のように表現できる。

1節で述べたように、量子アニーリングマシンを用いて組合せ最適化問題を処理する場合には、イジングモデルと呼ばれる統計力学モデルに変換する必要がある。

ここでイジングモデルについて紹介する。イジングモデルは磁性体の統計力学的性質を表現する最もシンプルなモデルである。イジングモデルは無向グラフ $G = (V, E)$ 上で定義されるモデルである。全ての頂点 $i \in V$ に ± 1 を取る二値変数 s_i を導入する。この変数 s_i をスピンと呼ぶ。また全ての頂点 $i \in V$ に強制力 h_i 、全ての辺 $(ij) \in E$ に相互作用 J_{ij} を導入する。ただしここで h_i 及び J_{ij} は実数である。このとき、以下の式でイジングモデルのエネルギー関数が与えられる。

$$E(\mathbf{s}) = - \sum_{i \in V} h_i s_i - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} s_i s_j. \quad (2)$$

ただしここで、 $\mathbf{s}$ は全てのスピンの状態、すなわち $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_{|V|})$ を表す。 $|V|$ は無向グラフ G 上の頂点の個数を表す。 $E(\mathbf{s})$ は、それぞれの頂点 i に存在するスピン s_i の値が決まった時のエネルギーの値を返す関数と見ることができる。物理学において、エネルギーが最も低い状態が安定状態であるという原理が存在する。従ってイジングモデルと先ほどの組合せ最適化問題は関連付けることが可能である。すなわち、全てのスピンの状態 $\mathbf{s}$ が決まった時のエネルギー値 $E(\mathbf{s})$ と、選択枝 $\mathbf{x}$ を定めた時のコスト関数の値 $f(\mathbf{x})$ とを結びつけることが可能である。実際、よく知られた組合せ最適化問題の多くはイジングモデルで表現できることが[3]で解説されている。

s_i は ± 1 を取る二値変数であるが、 $0, 1$ を取る二値変数 c_i で表したほうが見通しが良い場合がある。そのときには、次の変換：

$$c_i = \frac{1 + s_i}{2} \quad (3)$$

を施せば、エネルギー関数を

$$E(\mathbf{c}) = - \sum_{i \in V} a_i c_i - \sum_{(ij) \in E} b_{ij} c_i c_j \quad (4)$$

と表すことができる。ただしここで a_i 及び b_{ij} は実数である。この形をQUBO (Quadratic Unconstrained Binary Optimization) と呼ぶことがある。

2.1 数分割問題をイジングモデルで表現

組合せ最適化問題の典型例の一つである数分割問題を例に、組合せ最適化問題をイジングモデルで表現する方法について見ていく。数分割問題は N 個の数値 $n_1, n_2, \dots, n_N$ が与えられた時、この数値を二つのグループに割り当てる。このとき全ての数値はどちらかのグループに必ず割り当てられるとする。それぞれのグループに属する数値の和の差が最も小さくなる場合はどのような分割方法か、という問題である。この問

題を式で表すと、

$$\tilde{f}(\mathcal{A}) = \left| \sum_{i \in \mathcal{A}} n_i - \sum_{i \in \bar{\mathcal{A}}} n_i \right| \quad (5)$$

で与えられる。右辺第一項はグループ $\mathcal{A}$ に割り当てられた数値の和を、右辺第二項は別のグループに割り当てられた数値の和を表す。この $f(\mathcal{A})$ を最小にする割り当て方法を見つけよ、という問題である。この問題は

$$f(\mathcal{A}) = \left(\sum_{i \in \mathcal{A}} n_i - \sum_{i \in \bar{\mathcal{A}}} n_i \right)^2 \quad (6)$$

を最小化する割り当て方法を見つけよ、という問題と等価であるため、以下、この問題を考える。

この組合せ最適化問題を先ほどのイジングモデルを用いて表現することを考える。 s_i なる ± 1 を取る二値変数を導入する。 $s_i = +1$ は、 i がグループ $\mathcal{A}$ に含まれることを意味し、 $s_i = -1$ は i がグループ $\mathcal{A}$ に含まれないことを表す。これを導入すると、先ほどの最小化したい関数は次のようなエネルギー関数で表現することができる。

$$E(\mathbf{s}) = \left(\sum_{i=1}^N n_i s_i \right)^2 \quad (7)$$

$$= \sum_{i < j} 2n_i n_j s_i s_j + \sum_{i=1}^N n_i^2. \quad (8)$$

これを最小化する $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_N)$ を求めることは、グループ $\mathcal{A}$ をどのように決めると等価である。

3. 量子アニーリングマシンの動作概要

2節で、図1の第二段階を説明した。次に、図1の第三段階について説明する。実際の量子アニーリングマシンの動作概要を述べる前に、理想的な状況を考えて量子アニーリングの基礎について説明する。

天下り的であるが、以下の行列を定義する。

$$\sigma^x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad \sigma^z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

これらをパウリ行列と呼ぶ。 σ^z は対角行列で、対角成分には s_i の値が入っていることに注目されたい。 σ^z を使って、式(2)を以下の行列で表現し直す。

$$\mathcal{H}_c = - \sum_{i \in V} h_i \sigma_i^z - \sum_{(ij) \in E} J_{ij} \sigma_i^z \sigma_j^z, \quad (10)$$

ただしここで、 σ_i^z 及び $\sigma_i^z \sigma_j^z$ は以下のように、クロネッカーの直積記号を省略した記法であることに注意。

$$\sigma_i^z = \underbrace{I \otimes I \otimes \dots \otimes \sigma^z}_{i-1} \otimes \underbrace{I \otimes \dots \otimes I}_{|V|-i}, \quad (11)$$

$$\sigma_i^z \sigma_j^z = \underbrace{I \otimes I \otimes \dots \otimes \sigma^z}_{i-1} \otimes \underbrace{I \otimes \dots \otimes I}_{j-i-1} \otimes \sigma^z \otimes \underbrace{I \otimes \dots \otimes I}_{|V|-j} \quad (12)$$

である。ここで I は 2×2 の単位行列、

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (13)$$

である。従って $\mathcal{H}_c$ は、 $2^{|V|} \times 2^{|V|}$ の対角行列である。ここで $\mathcal{H}_c$ を古典ハミルトニアンと呼ぶことにする。 $\mathcal{H}_c$ の対角要素には、式(2)の値が入っている。これは以下のように分かる。 σ^z の基底として、下記の二つを導入する。

$$\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (14)$$

前者は $s = +1$ に、後者は $s = -1$ に対応する。従って $\mathcal{H}_c$ の対角成分は上から順に $\mathbf{s} = (+1, \dots, +1), \dots, \mathbf{s} = (-1, \dots, -1)$ のときの式(2)の値が入る。

次に行列 σ^x について考える。そのために行列の非可換性について簡単に紹介する。行列の非可換性とは、正方行列 A, B があるとき、一般に $AB \neq BA$ であることを指す。ちなみに行列が可換 ($AB = BA$) であることと同時対角化可能であることは同値である。量子アニーリングでは、 $\mathcal{H}_c$ と非可換な行列を量子揺らぎとして導入する。一つの導入方法として、

$$\mathcal{H}_q = - \sum_{i \in V} \sigma_i^x \quad (15)$$

とする方法がよく用いられる。ここで $\mathcal{H}_q$ を量子ハミルトニアンと呼ぶことにする。ただしここで先程と同様に、 σ_i^x はクロネッカーの直積を省略した形になっており、

$$\sigma_i^x = \underbrace{I \otimes I \otimes \dots \otimes \sigma^x}_{i-1} \otimes \underbrace{I \otimes \dots \otimes I}_{|V|-i} \quad (16)$$

である。ここで簡単な計算から、 $\mathcal{H}_q$ の最小固有値は $-|V|$ であり、最小固有値に属する（規格化された）固有ベクトルは

$$\frac{1}{\sqrt{2^{|V|}}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

であることが分かる。

図2 量子アニーリングにおける式 (19) のスケジュール

さて、図1の第三段階の説明に移る。まずはじめに、系の初期波動関数を式 (17) と用意する。すなわち、

$$|\Psi(t=0)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^{|V|}}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \quad (18)$$

である。ここで $|\Psi(t=0)\rangle$ は $t=0$ の波動関数を表す。次に、以下のハミルトニアンを考える。

$$\mathcal{H}(t) = A(t)\mathcal{H}_c + B(t)\mathcal{H}_q, \quad (0 \leq t \leq \tau). \quad (19)$$

ただしここで $A(t)$ 及び $B(t)$ はそれぞれ $0 \leq t \leq \tau$ で定義される関数である。 $A(t)$ は 0 から 1 への単調増加関数、 $B(t)$ は 1 から 0 の単調減少関数である (図2)。ここで導入したハミルトニアンを用いて、シュレディンガー方程式と呼ばれる以下の連立微分方程式を解く。すなわち、

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\Psi(t)\rangle = \mathcal{H}(t) |\Psi(t)\rangle, \quad (0 \leq t \leq \tau). \quad (20)$$

ここで初期状態として式 (18) を用いる。最終時刻 ($t = \tau$) に得られた状態を測定することにより、一回の上記操作につき、式 (2) の s に対応する一つの状態が得られる。上記が量子アニーリングの理論的基礎である。

理想的な量子アニーリングマシンでは、シュレディンガー方程式を解くという行為は自然現象に置き換えられる。ここで理想的と述べたのは、実際の量子アニーリングマシンは絶対零度ではなく、かつ外界との相互作用が存在するためであり、極限状況を考えた場合にのみ、上で考えたシュレディンガー方程式を解いていることに相当することに注意が必要である。

我々が量子アニーリングマシンを用いて組合せ最適化問題を解く際には、図1における第二段階で得られた式 (2) における無向グラフ $G = (V, E)$ および、そのグラフで定義される J_{ij}, h_i を入力することにより解が得られる。実際には複数回のアニーリングを実行し、

複数の解を出した上で、最も良い解を選び出すという情報処理を行う必要がある。量子アニーリングマシンが出力した解を式 (2) に代入し、エネルギー値を求め、そのエネルギー値が最も小さい値になる解を最も良い解とする。

4. 量子アニーリングマシンを使った最近の研究開発動向

量子アニーリング提案当初は理論物理学的側面の強い研究であったが、最近では量子アニーリングマシンを用いた研究開発が盛んである。特に産業界における研究開発が盛んに進んでいるが、現段階はあくまで、量子アニーリングの計算技術のポテンシャルを探るためのフィージビリティスタディとしての要素が強いことに注意が必要である。以下に代表的な研究事例について紹介する。

量子アニーリングは組合せ最適化問題を高速かつ高精度に処理すると期待される計算技術であると述べた。この可能性に動機づけられ、機械学習分野への応用が検討されてきた。機械学習に内在する最小化問題のうち、イジングモデルへの変換が可能な部分について、量子アニーリングマシンで処理し、残りの部分は通常の計算手法で処理するという流れである。量子アニーリングマシンを用いることを想定せず、古典コンピュータを用い、量子モンテカルロ法と呼ばれるアルゴリズムを用いて量子アニーリングを実装し、それを機械学習へ適用した研究は 2009 年に栗原ら [4] や 2013 年に佐藤ら [5] によって提案されている。また、古典コンピュータを用いることを前提とし、変分ベイズ法に対して量子アニーリングを適用した研究は 2009 年に佐藤ら [6] によって報告されている。2011 年に商用量子アニーリングマシンが登場してから、量子アニーリングマシンを使うことを前提とした機械学習の研究が進められている。最も代表的な研究の一つとして、Neven らによる QBoost の提案が挙げられる [7]。QBoost は、機械学習で従来検討されてきた Boosting における最小化問題の部分をイジングモデルに置き換えることにより、量子アニーリングマシンに対応させることを可能にした。この QBoost を用いた比較的新しい研究として、NASA による航空写真からの森林検出が挙げられる [8]。

更に、ロスアラモス国立研究所からは量子アニーリングマシンを用いた非負二値行列因子分解の方法が提案された [9]。これは $n \times m$ 行列 V を $n \times r$ 行列 W と $r \times m$ 次元の行列 H とに分解する方法であり、論文 [9] で報告された研究では、 W は非負行列、すなわち $W_{ij} \geq 0$ ($\forall i, j$) であり、 $H_{ij} \in \{0, 1\}$ ($\forall i, j$) であるバイ

ナリ行列である。このとき、以下の最小化問題を解くことに帰着される。

$$\{W^*, H^*\} = \arg \min_{W, H} \|V - WH\|_F \quad (21)$$

ただしここで H はバイナリ行列であることから、イジングモデルの形になり、量子アニーリングマシンで解くことができる問題である。また最近では、Volkswagen と D-Wave Systems とが共同で、量子アニーリングマシンを用いた交通流最適化に対する研究を報告している [10]。

また、古典コンピュータを用いて実行可能な各種アルゴリズムによる計算量と量子アニーリングマシンの計算量の比較に関する理論的研究は殆ど無いのが現状である。そのため、量子アニーリングマシンを用いた実問題適用の研究は始まったばかりであり、かつ、量子アニーリングマシンが実際に有用かどうかを具体的な問題を通じて見定めている段階であるといえる。

5. おわりに

本解説では、物理学の前提知識を必ずしも要求しない記述で量子アニーリングの基礎、そして量子アニーリングマシンを使った最近の研究開発動向について紹介した。より詳細には、レビュー論文 [11] や書籍 [12, 13] を参照されたい。また最新の研究開発動向については、国際会議 *Adiabatic Quantum Computing Conference 2017 (AQC2017)* [14] にて紹介されている。

最後に、量子アニーリングについて現在指摘されている課題について述べる。

- 現存の量子アニーリングマシンは、超伝導量子ビット間の相互作用ネットワークは疎結合である。一方、組合せ最適化問題は一般に密結合ネットワークの問題となる。組合せ最適化問題を表現するネットワークから量子アニーリングマシンの相互作用ネットワークへ変換する方法（グラフ埋込と呼ぶ）の高速アルゴリズムを開発する必要がある。
- 現在は個別の具体的な問題を通じて、量子アニーリングの計算時間を見積もっている。どのような問題に対して量子アニーリングが有効なのかを見定める必要がある。
- 量子アニーリングにおいて、量子揺らぎ効果が果たす役割については現段階で未解明である。理論物理学的な研究が必要である。
- 量子揺らぎを導入する方法には様々な方法がある。新しいタイプの量子揺らぎを導入する方法を検討する必要がある。

また最近、量子アニーリングでは無いが、イジングモデルを用いた計算技術が提案されている。CMOSを用いた CMOS アニーリングマシン [15] や、FPGA実装によるデジタルアニーラ [16]、光パルスを用いたコヒーレントイジングマシン [17, 18] などが挙げられる。これらは全て、2 節で紹介した方法を通じ、組合せ最適化問題をイジングモデルで表現し、イジングモデルの安定状態を探索する計算技術である。これらの計算技術と量子アニーリングとの共通点と相違点について理論物理学的に捉え直すことは大事な課題である。

参考文献

- [1] T. Kadowaki and H. Nishimori: “Quantum annealing in the transverse Ising model,” *Physical Review E*, Vol.58, pp. 5355-5363, 1998.
- [2] T. Kadowaki: “Study of Optimization Problems by Quantum Annealing,” arXiv:quant-ph/0205020, 2002.
- [3] A. Lucas: “Ising formulations of many NP problems,” *Frontiers in Physics*, Vol.2, Id:5, 2014.
- [4] K. Kurihara, S. Tanaka, and S. Miyashita: “Quantum annealing for clustering,” *Proc. of the 25th Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI2009)*, 2009.
- [5] I. Sato, S. Tanaka, K. Kurihara, S. Miyashita, and H. Nakagawa: “Quantum annealing for Dirichlet process mixture models with applications to network clustering,” *Neurocomputing*, Vol.121, pp. 523-531, 2013.
- [6] I. Sato, K. Kurihara, S. Tanaka, H. Nakagawa, and S. Miyashita: “Quantum annealing for variational Bayes inference,” *Proc. of the 25th Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI2009)*, 2009.
- [7] H. Neven, V. S. Denchev, M. Drew-Brook, J. Zhang, W. G. Macready, and G. Rose: “NIPS 2009 Demonstration: Binary Classification using Hardware Implementation of Quantum Annealing,” https://static.googleusercontent.com/media/www.google.com/ja/googleblogs/pdfs/nips_demo-report_120709_research.pdf, 2009.
- [8] E. Boyda, S. Basu, S. Ganguly, A. Michaelis, S. Mukhopadhyay, and R. R. Nemani: “Deploying a quantum annealing processor to detect tree cover in aerial imagery of California,” *PLOS ONE*, 12 e0172505–1-22, 2017.
- [9] D. O’Malley, V. V. Vesselinov, B. S. Alexandrov, and L. B. Alexandrov: “Nonnegative/binary matrix factorization with a D-Wave quantum annealer,” arXiv:1704.01605, 2017.
- [10] F. Neukart, D. V. Dollen, G. Compostella, C. Seidel, S. Yarkoni, and B. Parney: “Traffic flow optimization using a quantum annealer,” arXiv:1708.01625v2, 2017.
- [11] A. Das and B. K. Chakrabarti: “Colloquium: Quantum annealing and analog quantum computation,” *Review of Modern Physics*, Vol.80, pp. 1061-1081, 2008.
- [12] S. Suzuki, J. Inoue, and B. K. Chakrabarti: *Quantum Ising Phases and Transitions in Transverse Ising Mod-*

els, Springer, 2013.

- [13] S. Tanaka, R. Tamura, and B. K. Chakrabarti: *Quantum Spin Glasses, Annealing and Computation*, Cambridge University Press, 2017.
- [14] <http://www.smapip.is.tohoku.ac.jp/~aqc2017/> [accessed Jan. 20, 2018]
- [15] M. Yamaoka, C. Yoshimura, M. Hayashi, T. Okuyama, H. Aoki, and H. Mizuno: “A 20k-Spin Ising Chip to Solve Combinatorial Optimization Problems With CMOS Annealing,” *IEEE J. of Solid-State Circuits*, Vol.51, pp. 303-309, 2016.
- [16] S. Matsubara, H. Tamura, M. Takatsu, D. Yoo, B. Vatankhahghadim, H. Yamasaki, T. Miyazawa, S. Tsukamoto, Y. Watanabe, K. Takemoto, and A. Sheikholeslami: “Ising-Model Optimizer with Parallel-Trial Bit-Sieve Engine,” *CISIS 2017, Advances in Intelligent Systems and Computing*, Vol.611, pp. 432-438, Springer, 2018.
- [17] T. Inagaki, Y. Haribara, K. Igarashi, T. Sonobe, S. Tamate, T. Honjo, A. Marandi, P. L. McMahon, T. Umeki, K. Enbutsu, O. Tadanaga, H. Takenouchi, K. Aihara, K. Kawarabayashi, K. Inoue, S. Utsunomiya, and H. Takesue: “A coherent Ising machine for 2000-node optimization problems,” *Science*, Vol.354, pp. 603-606, 2016.
- [18] P. L. McMahon, A. Marandi, Y. Haribara, R. Hamerly, C. Langrock, S. Tamate, T. Inagaki, H. Takesue, S. Utsunomiya, K. Aihara, R. L. Byer, M. M. Fejer, H. Mabuchi, and Y. Yamamoto: “A fully programmable 100-spin coherent Ising machine with all-to-all connections,” *Science*, Vol.354, pp. 614-617, 2016.

(2017 年 12 月 21 日 受付)

[問い合わせ先]

〒169-8050 東京都新宿区西早稲田 1-6-1

早稲田大学高等研究所

田中 宗

TEL: 03-5286-8447

E-mail: shu.tanaka@aoni.waseda.jp

—— 著 者 紹 介 ——

たなか しゅう
田中 宗 [非会員]

2003 年東京工業大学理学部物理学
科卒業。2005 年東京大学大学院理
学系研究科物理学専攻修士課程修
了。2008 年東京大学大学院理学系
研究科物理学専攻博士課程修了。
2008 年東京大学物性研究所特任研
究員, 2010 年近畿大学総合理工学研
究科量子コンピュータ研究センター
博士研究員, 2011 年日本学術振興
会特別研究員 (PD), 2014 年京都大
学基礎物理学研究所基研特任助教,
2015 年早稲田大学高等研究所助教,
2017 年早稲田大学高等研究所准教
授, 現在に至る。2016 年 10 月より
科学技術振興機構 さきがけ研究者
を兼任。博士 (理学)。量子アニー
リング, 統計力学, 物性物理学の研
究に従事。日本物理学会正会員。