

# イジングモデルに基づく端末間通信ペアの最適化の検討

森 翔平<sup>1,a)</sup> 関口 頌一郎<sup>1</sup> 西村 敏<sup>1</sup> 山本 正男<sup>1</sup>

**概要：** イベント会場や避難所などの多数の端末が接続する環境において、安定的にコンテンツ配信を行う配信方式の検討を進めている。これまでに、コンテンツデータをマルチキャストにより端末に対して一斉配信し、配信経路で発生したパケットロスを端末間通信により補完する方式を開発した。端末間通信を構成するペアとして単に距離の近い端末同士を選択すると、互いの損失パケットを十分に補完し合うことができるとは限らないため、パケットロスを効果的に補完する端末ペアを選択する必要がある。本稿では、組合せ最適化問題に特化した計算技術であるイジングマシンによる求解が可能なイジングモデルに基づいて、端末間通信ペアを選択するアルゴリズムを提案する。数値シミュレーションを実施し、損失パケットの補完率を最大化する端末間通信ペアが選択されることから、提案アルゴリズムの妥当性を確認した。

**キーワード：** イジングモデル, 量子アニーリング, 組合せ最適化, 端末間通信

## A Study of Device-to-Device Pairing Optimization Based on Ising Model

SHOHEI MORI<sup>1,a)</sup> SHOICHIRO SEKIGUCHI<sup>1</sup> SATOSHI NISHIMURA<sup>1</sup> MASAO YAMAMOTO<sup>1</sup>

**Abstract:** In this study, we propose an algorithm for stable content distribution to many terminal devices in congested networks such as event venues and evacuation areas. In the architecture, contents data are distributed to terminal devices using multicast routing protocol, and when packet loss occurs, the lost packet is recovered by device-to-device (D2D) communications between terminal devices. However, a D2D pair that is established between nearby terminal devices cannot necessarily recover the lost packet with each other sufficiently. To overcome this problem, we propose an algorithm for selecting appropriate D2D pairs such that lost packets are effectively recovered. This algorithm is based on the Ising model optimization, which can be solved by an Ising machine specializing in combinatorial optimization problems. Numerical simulations show that our algorithm selects appropriate D2D pairs such that the recovery rate of lost packets is maximized and verify our algorithm.

**Keywords:** Ising model, Quantum annealing, Combinatorial optimization, Device-to-device communication

### 1. はじめに

インターネットトラフィックは年々増加しており、特にビデオストリーミングやビデオ会議等の機会の拡大に伴い、動画トラフィックの割合が高まっている [1]。4K/8K や AR/VR の普及によりコンテンツあたりのデータ量が増加していることから、動画トラフィックの影響は今後さらに顕

著になると予想される。また、イベント会場や避難所などのユーザのアクセスが集中する環境では、ネットワークの輻輳が発生しやすく、視聴品質の低下を招く要因となる。NHK では、そうした環境においても、必要とする情報を確実に届けることや、モバイル端末で簡単かつ快適にコンテンツを視聴できることを目指した技術の研究開発に取り組んでいる。

その研究開発の一環として、多数の端末が接続する環境においても安定的にコンテンツ配信を行う配信方式や、大容量コンテンツを効率的に配信する方式の検討を進めて

<sup>1</sup> NHK 放送技術研究所  
NHK Science & Technology Research Laboratories,  
Setagaya, Tokyo 157-8510, Japan

<sup>a)</sup> mori.s-hc@nhk.or.jp

いる [2], [3], [4]. これまでに, コンテンツをマルチキャストにより端末に一斉配信し, 配信経路で発生したパケットロスを基地局を介さずに端末同士で直接通信する端末間 (Device-to-Device: D2D) 通信により互いの損失パケットを補完する方式を開発した. 端末間通信は, ネットワークトラヒックのオフロードや, 再送制御を行わないマルチキャスト配信の信頼性を向上させる手段として注目されている [5], [6], [7]. しかしながら, 単に距離の近い端末同士では互いの損失パケットを十分に補完し合うことができるとは限らないため, パケットロスを効果的に補完する端末ペアを選択する必要がある.

本稿では, 多数の端末が存在する状況においても, マルチキャストで発生した損失パケットを効果的に補完できる端末間通信ペアの最適化アルゴリズムを提案する. 最適化問題の記述には, 制約なし二次形式二値変数最適化 (Quadratic Unconstrained Binary Optimization: QUBO) を利用する. QUBO 問題は一般に NP (Non-deterministic Polynomial time) 困難であり, 問題サイズが大きくなると組合せの全列挙を基にした求解は困難となるが, 組合せ最適化問題に特化した新しい計算技術であるイジングマシンに関する研究開発が近年盛んに行われており [8], イジングマシンによって QUBO 問題を効率的に求解することが期待されている.

本稿の構成は以下の通りである. 2 節では, 端末間通信を用いたコンテンツ配信を概説し, 端末間通信を構成するペアの選択を組合せ最適化問題として定式化する. 3 節では, 定式化した最適化問題を, イジングマシンによる求解が可能な QUBO 表現に帰着させる. そして 4 節では, 数値シミュレーションを実施し, 提案アルゴリズムによって損失パケットの補完率を最大化する端末間通信ペアが選択されることを確認する.

## 数学的表記

$\mathbf{B}, \mathbf{B}^n$  はそれぞれ  $\{0, 1\}$  の二値からなる集合,  $\{0, 1\}$  の二値からなる  $n$  次元ベクトルの集合を表す.  $\mathbf{N}$  は自然数の集合を表す.  $\mathbf{R}^{n \times m}$  は  $n \times m$  次元実行列の集合を表す.  $\bar{b}$  は  $b \in \mathbf{B}^n$  の要素ごとの論理否定を表し,  $b \wedge b'$  は  $b, b' \in \mathbf{B}^n$  の要素ごとの論理積を表す.  $|S|$  は集合  $S$  の要素数を表す.

## 2. 問題設定

### 2.1 端末間通信を用いたコンテンツ配信

筆者らが開発した端末間通信を用いたコンテンツ配信の概要を図 1 に示す. コンテンツ配信サーバに格納されているコンテンツデータを, 基地局やアクセスポイントを通じて IP マルチキャストにより端末に一斉配信する. IP マルチキャストは, 経路上のルータやスイッチで IP パケットを複製し, 受信を希望する複数の受信端末に送信する技術である [9]. 一対多の大規模配信を効率的に行うことが

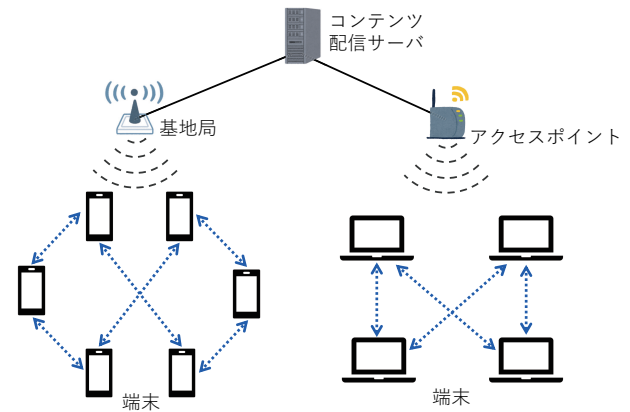


図 1 端末間通信を用いたコンテンツ配信

Fig. 1 Schematic diagram of content distribution using D2D communication.

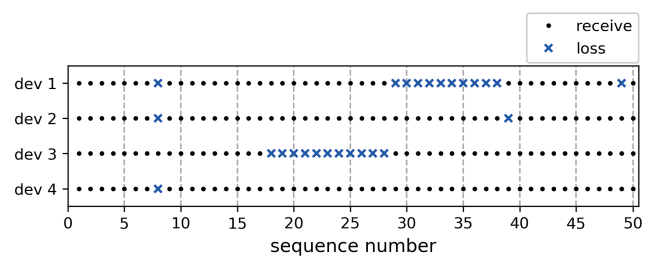


図 2 Wi-Fi マルチキャストで発生するパケットロスの例

Fig. 2 Example of packet loss that occurs on Wi-Fi multicast.

できるが, パケットの到達は保証されず, IP マルチキャスト自体にはパケットロスが発生した場合に損失パケットを回復する仕組みが備わっていない. 本方式では, パケットロスが発生した場合には端末間通信により互いの損失パケットを補完する. なお, 実際のコンテンツ配信には誤り訂正や配信サーバへの再送要求などと併用する必要があるが, 本稿では端末間通信による補完に限定する. このとき, パケットロスはランダムに発生するのではなく, 端末ごとのパケットロスの発生パターンに何らかの傾向があることを仮定する. 例えば, Wi-Fi アクセスポイントからスマートフォン端末に対して, Wi-Fi マルチキャストを用いて実施した配信実験におけるパケット受信状況の実測データを図 2 に示す. 黒色の  $\bullet$  印がパケット受信に成功, 青色の  $\times$  印がパケットロスが発生したシーケンス番号を表しており, IP パケットを 10 ms の間隔で送信した際のシーケンス番号が 0 ~ 50 までの区間を抜き出している. 図より, 10 パケット以上が連続するバースト的なロスや, 複数端末に対する同一シーケンス番号のロスが発生している様子がわかる. このように, 無線区間で発生したパケットロスの場合, 端末の位置や電波干渉などによってパケットロスの発生パターンが異なる. こうした状況では, できる限りパケットロス状況が異なるペアで端末間通信を構成することによって, ある端末の損失パケットをペアとなる端末が保有する確率を向上させることができると考えられる.

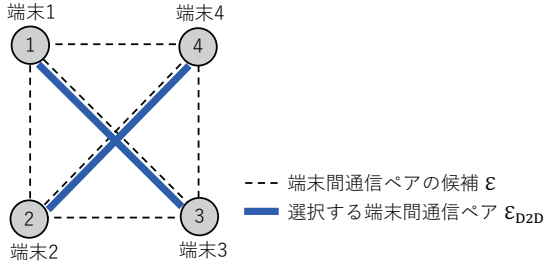


図 3 端末間通信ペアを表すネットワークグラフ

Fig. 3 Network graph to illustrate D2D pairing.

端末間通信ペアを決定するために、各端末で受信動作時のパケットロス状況を記録する受信状況レポートを用いる。この受信状況レポートに基づいて、パケットロス状況ができる限り異なる端末間通信ペアの組合せ、すなわち端末間通信によって補完可能な損失パケット数を最大化する端末間通信ペアの組合せを選択する。このことは、端末間通信による補完を用いた端末全体としてのパケットロス率を最小化することを意味する。ただし、端末間通信に伴う端末の消費電力や処理負荷を考慮すると、通信相手となる端末の台数（接続台数）が少ないことが望ましい。

以上に述べた前提条件をふまえ、接続台数に制約条件を課した上で、端末間通信によって補完可能な損失パケット数を最大化するペアを選択する組合せ最適化問題として定式化する。ただし、問題規模が大きい場合には上記の組合せ最適化問題を組合せの全列挙を基にして求解することは困難である。そこで、イジングマシンによる効率的な求解が期待される QUBO 問題に帰着させる。

## 2.2 定式化

端末間通信を構成するペアの組合せを選択する問題は、図 3 に示すように端末を無向グラフの頂点、端末間通信ペアの候補を無向グラフの辺と捉えることで、最適部分グラフを選択する問題と見なすことができる。ここで、端末の集合を  $\mathcal{V}$  とし、端末数を  $|\mathcal{V}| = n_{\text{dev}} \in \mathbf{N}$  とする。また、端末  $i, j \in \mathcal{V}$  間の端末間通信ペアの候補  $(i, j)$  の集合を  $\mathcal{E}$  とし、最適化により候補の中から選択する端末間通信ペアの集合を  $\mathcal{E}_{\text{D2D}}$  とする。ただし、 $(i, j) = (j, i)$  である。必ずしも完全グラフである必要はなく、端末の位置や接続するアクセスポイントなどに応じて端末間通信ペアの候補とする辺をもつ任意の単純グラフとする。端末間通信ペアの候補数は、完全グラフであるときに最大の辺数  $|\mathcal{E}| = n_{\text{dev}}(n_{\text{dev}} - 1)/2$  となる。例えば、端末数が  $n_{\text{dev}} = 4$  のときのグラフを図 3 に示す。図中において、黒色の波線が端末間通信ペアの候補  $\mathcal{E}$  であり、青色の実線が最適化により選択する端末間通信ペア  $\mathcal{E}_{\text{D2D}}$  の一例である。

端末  $i$  と端末間通信ペアの候補となる端末の集合、および選択する端末間通信ペアの集合（隣接する頂点集合である近傍に相当 [10]）を、それぞれ  $\mathcal{N}(i), \mathcal{N}_{\text{D2D}}(i)$  とし、

$$\mathcal{N}(i) := \{j \mid (i, j) \in \mathcal{E}\} \quad (1)$$

$$\mathcal{N}_{\text{D2D}}(i) := \{j \mid (i, j) \in \mathcal{E}_{\text{D2D}}\} \quad (2)$$

で表されるとする。このとき、 $|\mathcal{N}(i)|, |\mathcal{N}_{\text{D2D}}(i)|$  はそれぞれ、端末間通信ペアの候補および選択する端末間通信ペアにおける端末  $i$  に接続する台数（頂点に接続する辺数である次数に相当 [10]）である。よって、1 端末あたりの接続台数が、ある台数  $n_{\text{D2D}} \in \mathbf{N}$  と等しい、あるいはそれ以下となるような制約条件は、

$$|\mathcal{N}_{\text{D2D}}(i)| = n_{\text{D2D}}, \forall i \in \mathcal{V} \quad (3)$$

$$|\mathcal{N}_{\text{D2D}}(i)| \leq n_{\text{D2D}}, \forall i \in \mathcal{V} \quad (4)$$

と表される。

端末  $i$  が生成する受信状況レポートを  $r_i \in \mathbf{B}^{n_r}$  とする。ただし、 $n_r \in \mathbf{N}$  は、受信状況レポートのサイズである。ある一定間隔でパケットの受信を計測し、パケットの受信に失敗したとき 0、パケットの受信に成功したとき 1 を記録する。例えば、レポートサイズが  $n_r = 10$  であるとき、 $r_i = [1 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1]^T$  などと表される。端末はコンテンツ配信サーバからコンテンツデータを受信している間、定期的に受信状況レポートを生成する。

1 端末あたりの接続台数が  $n_{\text{D2D}}$  台であるとき、端末間通信によって補完可能な損失パケット数の全端末の合計を  $R^{\#n_{\text{D2D}}}$  とすると、

$$R^{\#n_{\text{D2D}}} = \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{n=1}^{n_{\text{D2D}}} (-1)^{n-1} P^{\#n}(i) \quad (5)$$

と表される。ただし、

$$P^{\#n}(i) = \sum_{j_1, \dots, j_n \in \mathcal{N}_{\text{D2D}}(i)} \|\bar{r}_i \wedge r_{j_1} \wedge \dots \wedge r_{j_n}\|_0 \quad (6)$$

であり、 $\|\cdot\|_0$  は L0 ノルム（非零要素の個数）を表す。式 (5), (6) より、 $R^{\#n_{\text{D2D}}}$  は  $n_{\text{D2D}} = 1, 2$  のとき

$$R^{\#1} = \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j \in \mathcal{N}_{\text{D2D}}(i)} \|\bar{r}_i \wedge r_j\|_0 \quad (7)$$

$$R^{\#2} = \sum_{i \in \mathcal{V}} \left( \sum_{j \in \mathcal{N}_{\text{D2D}}(i)} \|\bar{r}_i \wedge r_j\|_0 - \sum_{j, k \in \mathcal{N}_{\text{D2D}}(i)} \|\bar{r}_i \wedge r_j \wedge r_k\|_0 \right) \quad (8)$$

となる。ここで、 $\|\bar{r}_i \wedge r_j\|_0$  は端末  $j$  から補完可能な端末  $i$  の損失パケット数であり、 $\|\bar{r}_i \wedge r_j \wedge r_k\|_0$  は端末  $j, k$  両方から冗長に補完可能な端末  $i$  の損失パケット数である。端末  $i$  が端末  $j, k$  と端末間通信を構成するとき、 $\|\bar{r}_i \wedge r_j\|_0$  と  $\|\bar{r}_i \wedge r_k\|_0$  の和から  $\|\bar{r}_i \wedge r_j \wedge r_k\|_0$  を引くことで、端末  $i$  が端末  $j$  または  $k$  から補完可能な正味のパケット数を算出することができる。 $n_{\text{D2D}} \geq 3$  についても同様に拡張可能である。

以上より、1 端末あたりの接続台数に関する式 (3) の等式制約または式 (4) の不等式制約のもとで、式 (5) で表される端末間通信によって補完可能な損失パケット数を最大化する端末間通信ペアの組合せを選択する問題は、それぞれ、次の最適化問題として定式化される。

#### 問題 1 (端末間通信ペアの等式制約つき最適化)

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{D2D}^* = \arg \max_{\mathcal{E}_{D2D} \subseteq \mathcal{E}} R^{\#n_{D2D}} \\ \text{s.t. } |\mathcal{N}_{D2D}(i)| = n_{D2D}, \quad \forall i \in \mathcal{V} \end{aligned}$$

#### 問題 2 (端末間通信ペアの不等式制約つき最適化)

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_{D2D}^* = \arg \max_{\mathcal{E}_{D2D} \subseteq \mathcal{E}} R^{\#n_{D2D}} \\ \text{s.t. } |\mathcal{N}_{D2D}(i)| \leq n_{D2D}, \quad \forall i \in \mathcal{V} \end{aligned}$$

### 3. QUBO 問題への帰着

#### 3.1 決定変数の定義

端末  $i, j \in \mathcal{V}$  間の端末間通信  $(i, j) \in \mathcal{E}$  を構成するかどうかを表す二値変数を  $x_{i,j} \in \mathbf{B}$  とする。2.2 項で述べた通り、 $x_{i,j}$  の個数すなわち端末間通信ペアの候補数は、完全グラフであるときには  $|\mathcal{E}| = n_{\text{dev}}(n_{\text{dev}} - 1)/2$  となる。ただし、 $x_{i,j}$  は端末  $i, j$  間の端末間通信を構成する場合に 1 を、しない場合に 0 をとり、 $x_{i,j} = x_{j,i}$  である。問題 1 と問題 2 で求めるべき  $\mathcal{E}_{D2D}$  は、 $\mathcal{E}$  のうち端末間通信  $(i, j) \in \mathcal{E}$  を構成する要素のみを抽出した部分集合であり、

$$\mathcal{E}_{D2D} = \{ (i, j) \in \mathcal{E} \mid x_{i,j} = 1 \} \quad (9)$$

と表される。

#### 3.2 目的関数

問題 1 と問題 2 の目的関数を QUBO 表現に変換する。本稿では、 $n_{D2D} = 2$  の場合について記述する。式 (8) を  $x_{i,j}$  を用いて QUBO 表現に変換すると、

$$\begin{aligned} H_o &= -\frac{R^{\#2}}{n_r} \\ &= -\frac{1}{n_r} \sum_{i \in \mathcal{V}} \left( \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \|\bar{r}_i \wedge r_j\|_0 x_{i,j} \right. \\ &\quad \left. - \sum_{j,k \in \mathcal{N}(i)} \|\bar{r}_i \wedge r_j \wedge r_k\|_0 x_{i,j} x_{i,k} \right) \\ &= -\sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} (Q_{i,j}^{\#1} + Q_{j,i}^{\#1}) x_{i,j} \\ &\quad + \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j,k \in \mathcal{N}(i)} Q_{i;j,k}^{\#2} x_{i,j} x_{i,k} \end{aligned} \quad (10)$$

が得られる。ただし、

$$Q_{i,j}^{\#1} := \frac{1}{n_r} \|\bar{r}_i \wedge r_j\|_0 \quad (11)$$

$$Q_{i;j,k}^{\#2} := \frac{1}{n_r} \|\bar{r}_i \wedge r_j \wedge r_k\|_0 \quad (12)$$

とおいた。また、受信状況レポートのサイズ  $n_r$  は  $Q_{i,j}^{\#1}, Q_{i;j,k}^{\#2}$  の最大値を 1 にするための正規化定数として用いている。

なお、 $n_{D2D} \geq 3$  の場合には、二値変数の積が三次以上である HOBO (Higher Order Binary Optimization) となり、イジングマシンでは求解が困難である。そこで、文献 [11] の手法などを用いて HOBO から QUBO へ変換し低次元化することによって、イジングマシンを用いた求解が可能となる。

#### 3.3 接続台数に関する等式制約のための制約関数

式 (3) で表される問題 1 の制約条件を QUBO 表現に変換する。1 端末あたりの接続台数が  $n_{D2D}$  に等しくなる条件を、二値変数  $x_{i,j}$  を用いて表現すると、

$$|\mathcal{N}_{D2D}(i)| = \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} x_{i,j} = n_{D2D}, \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (13)$$

となる。よって、式 (13) を QUBO 表現に変換すると、

$$\begin{aligned} H_{ce} &= \sum_{i \in \mathcal{V}} \left( n_{D2D} - \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} x_{i,j} \right)^2 \\ &= n_{\text{dev}} n_{D2D}^2 + \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} (2 - 4n_{D2D}) x_{i,j} \\ &\quad + \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j,k \in \mathcal{N}(i)} 2 x_{i,j} x_{i,k} \end{aligned} \quad (14)$$

が得られる。

#### 3.4 接続台数に関する不等式制約のための制約関数

式 (4) で表される問題 2 の制約条件を QUBO 表現に変換する。1 端末あたりの接続台数が  $n_{D2D}$  以下となる条件を、二値変数  $x_{i,j}$  を用いて表現すると、

$$|\mathcal{N}_{D2D}(i)| \leq \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} x_{i,j} = n_{D2D}, \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (15)$$

となる。文献 [12] を参考にして、端末  $i$  の接続台数を表現するための補助変数  $y_i^{\#n} \in \mathbf{B}$  ( $n \in \{0, 1, \dots, n_{D2D}\}, i \in \mathcal{V}$ ) を導入する。ただし、 $y_i^{\#n}$  は端末  $i$  の接続台数が  $n$  台であるときに 1 を、そうでないときに 0 をとる二値変数である。これにより  $n_{\text{dev}}(n_{D2D} + 1)$  個分の二値変数を追加する。このとき、式 (15) を QUBO 表現に変換すると、

$$\begin{aligned} H_{ci} &= \sum_{i \in \mathcal{V}} \left[ \left( 1 - \sum_{n=0}^{n_{D2D}} y_i^{\#n} \right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left( \sum_{n=0}^{n_{D2D}} n y_i^{\#n} - \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} x_{i,j} \right)^2 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= n_{\text{dev}} + \left[ \sum_{(i,j) \in \mathcal{E}} 2x_{i,j} + \sum_{i \in \mathcal{V}} \sum_{j,k \in \mathcal{N}(i)} 2x_{i,j} x_{i,k} \right] \\
 &+ \sum_{i \in \mathcal{V}} \left[ - \sum_{j \in \mathcal{N}(i)} \sum_{n=0}^{n_{\text{D2D}}} 2n y_i^{\#n} x_{i,j} \right. \\
 &+ \sum_{n=0}^{n_{\text{D2D}}} (n^2 - 1) y_i^{\#n} \\
 &\left. + \sum_{n < m} 2(nm + 1) y_i^{\#n} y_i^{\#m} \right] \quad (16)
 \end{aligned}$$

が得られる。

### 3.5 QUBO 問題

以上より、問題 1 と問題 2 は QUBO 問題に帰着され、それぞれ次の最適化問題として定式化される。

#### 問題 3 (端末間通信ペアの等式制約つき最適化)

$$x^* = \arg \min_x H_o + \lambda_{\text{ce}} H_{\text{ce}}$$

#### 問題 4 (端末間通信ペアの不等式制約つき最適化)

$$x^* = \arg \min_{x,y} H_o + \lambda_{\text{ci}} H_{\text{ci}}$$

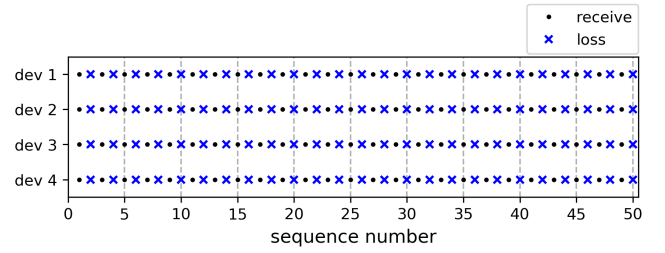
問題 3 と問題 4 において、 $\lambda_{\text{ce}}, \lambda_{\text{ci}}$  は目的関数と制約関数の重みを調節するチューニングパラメータである。

## 4. 数値シミュレーションによる評価

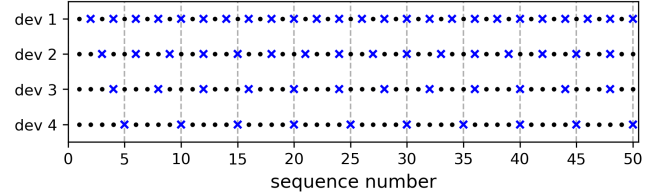
### 4.1 シミュレーション概要

提案アルゴリズムによって損失パケットの補完率を最大化する端末間通信ペアが選択されることを検証した。今回の検証においては、パケットロスが発生した場合に誤り訂正や配信サーバへの再送要求は行わないものとし、端末間通信による補完の効果のみを評価した。シミュレーション条件は以下の通りである。端末数は  $n_{\text{dev}} = 4, 10$  の二通り、1 端末あたりの接続台数は  $n_{\text{D2D}} = 1, 2$  の二通りとした。各端末が生成する受信状況レポートのサイズは  $n_r = 100$  とした。パケットロスは、1) 各端末共通で 2 の倍数のシーケンス番号が損失パケット、2) 端末  $i \in \{1, 2, 3, 4\}$  に対して  $i+1$  の倍数のシーケンス番号が損失パケット、の二通りのパターンで与えた。パケットロスパターン 1, 2 で与えた場合の受信状況レポートをそれぞれ図 4(a), (b) に示す。黒色の ● 印がパケット受信に成功、青色の × 印がパケットロスを発生させたシーケンス番号を表しており、図にはシーケンス番号が 0 ~ 50 までの区間を抜き出している。

次に、端末数  $n_{\text{dev}} = 4$  の場合について、QUBO 表現を導出する。端末集合  $\mathcal{V}$  と端末間通信候補のペアの集合  $\mathcal{E}$  はそれぞれ、



(a) パケットロスパターン 1



(b) パケットロスパターン 2

図 4 受信状況レポート ( $n_{\text{dev}} = 4$ )

Fig. 4 Reports on packet reception status ( $n_{\text{dev}} = 4$ ).

$$\mathcal{V} = \{1, 2, 3, 4\} \quad (17)$$

$$\mathcal{E} = \{(1, 2), (1, 3), (2, 3), (1, 4), (2, 4), (3, 4)\} \quad (18)$$

と表される。このとき、式 (10) の  $H_o$ 、式 (14) の  $H_{\text{ce}}$ 、式 (16) の  $H_{\text{ci}}$  を、QUBO 行列を用いて、

$$H_o = x^\top Q_o x \quad (19)$$

$$H_{\text{ce}} = x^\top Q_{\text{ce}} x + n_{\text{dev}} n_{\text{D2D}}^2 \quad (20)$$

$$H_{\text{ci}} = \begin{bmatrix} x^\top & y^\top \end{bmatrix} Q_{\text{ci}} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + n_{\text{dev}} \quad (21)$$

とおくと、 $Q_o, Q_{\text{ce}}, Q_{\text{ci}}$  は次ページ上部の式 (24), (25), (26) で表される。ただし、各行列の空欄で示した下三角部分の成分は 0 であり、 $x, y$  はそれぞれ、

$$x = [x_{1,2} \ x_{1,3} \ x_{2,3} \ x_{1,4} \ x_{2,4} \ x_{3,4}]^\top \in \mathbf{B}^6 \quad (22)$$

$$y = [y_1^{\#0} \ y_1^{\#1} \ y_1^{\#2} \ y_2^{\#0} \ y_2^{\#1} \ \dots \ y_4^{\#2}]^\top \in \mathbf{B}^{12} \quad (23)$$

である。なお、端末数  $n_{\text{dev}}$  および 1 端末あたりの接続台数  $n_{\text{D2D}}$  が上記以外であるときについても同様に QUBO 行列が導出できる。

接続台数に関して等式制約を課した端末間通信ペアの最適化については問題 3 を求解し、接続台数に関して不等式制約を課した端末間通信ペアの最適化については問題 4 を求解した。なお、チューニングパラメータは、 $\lambda_{\text{ce}} = 0.1, \lambda_{\text{ci}} = 0.5$  とした。求解には PyQUBO[13] を用いて、シミュレーテッドアニーリングを実行した。それぞれのシミュレーション条件に対して計算回数を 1000 回とし、解の発生回数をカウントした。

### 4.2 端末間通信ペアの等式制約つき最適化

まず、端末数が  $n_{\text{dev}} = 4$  であり、1 端末あたりの接続台数が  $n_{\text{D2D}} = 1$  である場合について述べる。パケット



$$Q_o = \begin{bmatrix} -Q_{1,2}^{\#1} - Q_{2,1}^{\#1} & Q_{1,2,3}^{\#2} & Q_{2,1,3}^{\#2} & Q_{1,2,4}^{\#2} & Q_{2,1,4}^{\#2} & 0 \\ -Q_{1,3}^{\#1} - Q_{3,1}^{\#1} & Q_{3,1,2}^{\#2} & Q_{1,3,4}^{\#2} & 0 & 0 & Q_{3,1,4}^{\#2} \\ -Q_{2,3}^{\#1} - Q_{3,2}^{\#1} & 0 & -Q_{1,4}^{\#1} - Q_{4,1}^{\#1} & Q_{2,3,4}^{\#2} & Q_{4,1,2}^{\#2} & Q_{3,2,4}^{\#2} \\ -Q_{1,4}^{\#1} - Q_{4,1}^{\#1} & Q_{4,1,2}^{\#2} & -Q_{2,4}^{\#1} - Q_{4,2}^{\#1} & Q_{4,2,3}^{\#2} & -Q_{3,4}^{\#1} - Q_{3,4}^{\#1} & Q_{4,2,3}^{\#2} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{6 \times 6} \quad (24)$$

$$Q_{ce} = \begin{bmatrix} 2 - 4n_{D2D} & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 \\ & 2 - 4n_{D2D} & 2 & 2 & 0 & 2 \\ & & 2 - 4n_{D2D} & 0 & 2 & 2 \\ & & & 2 - 4n_{D2D} & 2 & 2 \\ & & & & 2 - 4n_{D2D} & 2 \\ & & & & & 2 - 4n_{D2D} \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{6 \times 6} \quad (25)$$

$$Q_{ci} = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 2 & 2 & 2 & 0 & 0 & -2 & -4 & 0 & -2 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & 2 & 2 & 2 & 0 & 2 & 0 & -2 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -4 & 0 & 0 & 0 \\ & & 2 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -4 & 0 & -2 & -4 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 2 & 2 & 2 & 0 & -2 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -4 \\ & & & & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -4 \\ & & & & & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -2 & -4 & 0 & -2 & -4 \\ \hline & & & & & & -1 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & -1 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & -1 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & 0 & 6 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & 3 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & & & & -1 & 2 & 2 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & 0 & 6 \\ & & & & & & & & & & & & & & & & & 3 \end{bmatrix} \in \mathbf{R}^{18 \times 18} \quad (26)$$

ロスがパターン 1（各端末共通のペケットロス）であるときの解の発生頻度、およびペケットロスがパターン 2（端末ごとに異なるペケットロス）であるときの解の発生頻度を図 5(a), (b) に示す。それぞれの図は二軸グラフであり、第一軸（青色の棒グラフ）が解の発生頻度の割合、第二軸（黒色の折れ線グラフ）が問題 3 の最小化対象である  $H_o + \lambda_{ce} H_{ce}$  のコストを全組合せで列挙したものである。横軸は式 (22) の決定変数  $x \in \mathbf{B}^6$  を全組合せで列挙したものであり、Dirac のブラケット記法

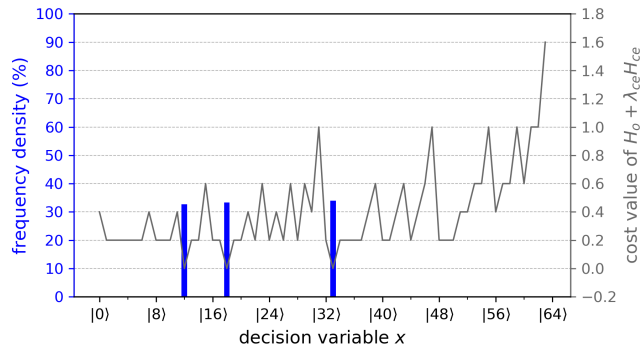
$$x = |x_{1,2} + 2x_{1,3} + 2^2x_{2,3} + 2^3x_{1,4} + 2^4x_{2,4} + 2^5x_{3,4}\rangle$$

を用いて表現している。また、発生頻度の高い解に相当する端末間通信ペアのネットワークグラフを、ペケットロスパターン 1, 2 それぞれ図 6(a), (b) に示す。併せて、解の発生回数と、端末間通信による各端末のペケット受信率の増加量を記載している。

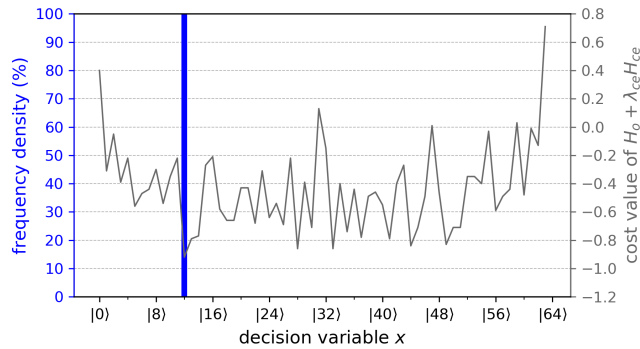
各端末に対して等しいペケットロスを与えるパターン 1 においては、図 5(a) より、1 端末あたりの接続台数が 1 台である  $|12\rangle, |18\rangle, |33\rangle$  が約 33% ずつ発生していることが

読み取れる。また、図 6(a) より、各端末の損失ペケットが等しいため、ペケット受信率は 50% のままである。一方、 $x = |12\rangle, |18\rangle, |33\rangle$  を式 (19), (20) に代入すると、いずれも  $H_o = 0, H_{ce} = 0$  を満たす。このことから、提案アルゴリズムにより求解される最小値が、第二軸で示した全列挙により算出した最小値  $H_o + \lambda_{ce} H_{ce} = 0$  と一致することが確認できる。次に、各端末に対して異なるペケットロスを与えるパターン 2 においては、図 5(b) より、端末 1 と 4 および端末 2 と 3 をペアとする  $|12\rangle$  が選択されることが読み取れる。また、図 6(b) より、全端末平均のペケット受信率が 68% から 91% まで 23% 改善されることがわかる。一方、 $x = |12\rangle$  を式 (19) に代入すると  $H_o = 0.92$  となり、端末 4 台平均のペケット受信率の増加量は  $H_o/4 = 23\%$  と一致することが確認できる。

続いて、端末数が  $n_{dev} = 10$  であり、1 端末あたりの接続台数が  $n_{D2D} = 1$  である場合について述べる。ペケットロスはパターン 2（端末ごとに異なるペケットロス）とした。決定変数は  $x \in \mathbf{B}^{45}$  である。発生頻度の上位三通りの端末間通信ペアのネットワークグラフと併せて、解の発



(a) パケットロスパターン 1



(b) パケットロスパターン 2

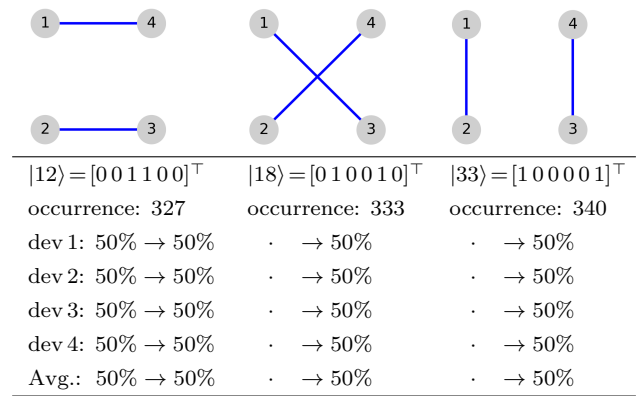
図 5 解の発生頻度 ( $n_{\text{dev}} = 4, n_{\text{D2D}} = 1$ )

Fig. 5 Frequency density of solutions ( $n_{\text{dev}} = 4, n_{\text{D2D}} = 1$ ).

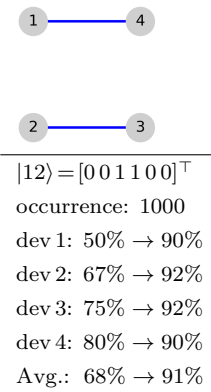
生回数とパケット受信率の増加量を図 7 に示す。図より、1 端末あたりの接続台数を 1 台とする制約条件が満足されていることがわかる。また、全端末合計のパケット受信率が高くなる端末間通信ペアの解の発生頻度が多くなっており、全端末のパケット受信率が 95% 以上まで改善されていることがわかる。なお、端末間通信による損失パケットの補完のみでは受信率が不十分な場合には、誤り訂正や配信サーバへの再送要求と併用する必要があると考えられる。

#### 4.3 端末間通信ペアの不等式制約つき最適化

端末数が  $n_{\text{dev}} = 4$  であり、1 端末あたりの接続台数が  $n_{\text{D2D}} \leq 2$  である場合について述べる。パケットロスパターン 2 (端末ごとに異なるパケットロス) とした。決定変数は  $x \in \mathbf{B}^6$  であり、補助変数は  $y \in \mathbf{B}^{12}$  である。発生頻度の上位六通りの端末間通信ペアのネットワークグラフと併せて、解の発生回数とパケット受信率の増加量を図 8 に示す。図より、1 端末あたりの接続台数を 2 台以下とする制約条件が満足されていることや、全端末のパケット受信率が高くなる端末間通信ペアの解の発生頻度が多くなることが読み取れる。特に、1 端末あたりの接続台数が、 $|51\rangle, |30\rangle, |45\rangle$  では 2 台となっており、 $|28\rangle, |44\rangle, |49\rangle$  では 1 台または 2 台となっている。当然ながら接続台数が少ないとパケット受信率の増加量は小さくなる傾向があるが、制約条件が適切に機能していることが確認できる。



(a) パケットロスパターン 1



(b) パケットロスパターン 2

図 6 端末間通信ペアとパケット受信率 ( $n_{\text{dev}} = 4, n_{\text{D2D}} = 1$ )

Fig. 6 Selected D2D pair and packet reception rate ( $n_{\text{dev}} = 4, n_{\text{D2D}} = 1$ ).

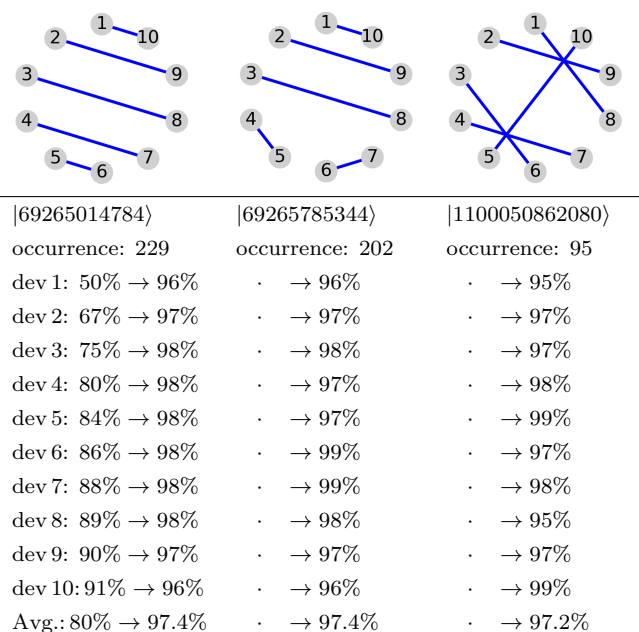


図 7 端末間通信ペアとパケット受信率 ( $n_{\text{dev}} = 10, n_{\text{D2D}} = 1$ )

Fig. 7 Selected D2D pair and packet reception rate ( $n_{\text{dev}} = 10, n_{\text{D2D}} = 1$ ).

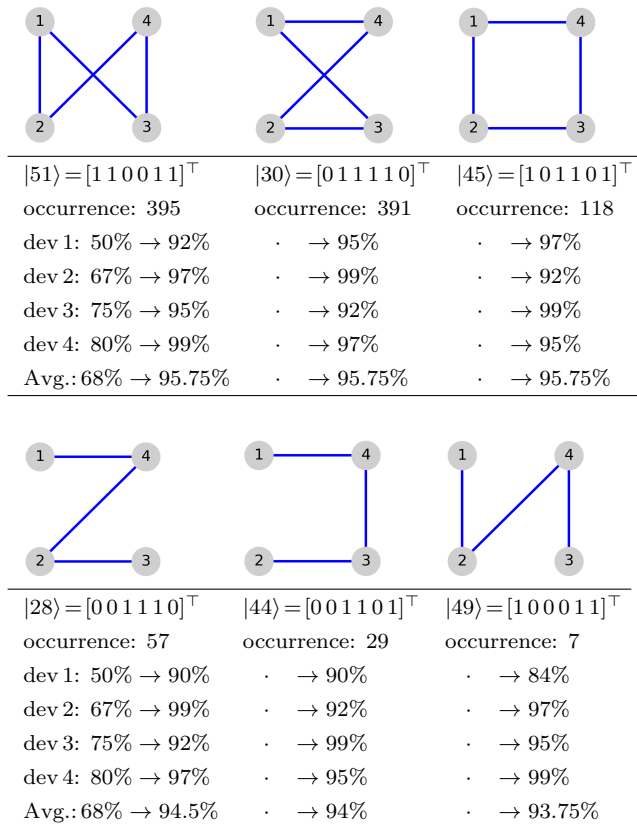


図 8 端末間通信ペアとパケット受信率 ( $n_{\text{dev}} = 4, n_{\text{D2D}} \leq 2$ )

Fig. 8 Selected D2D pair and packet reception rate  
( $n_{\text{dev}} = 4, n_{\text{D2D}} \leq 2$ ).

今回の問題設定では、接続台数を増やせばパケット受信率が向上するため、設定した接続台数の上限  $n_{\text{D2D}}$  で各端末が端末間通信ペアが選択される。ただし、端末間通信に伴う消費電力や処理負荷を考慮すると、端末の処理性能やパケット受信率の増加量に応じて端末間通信を構成しないことを許容するなどの工夫が考えられる。

## 5. おわりに

本稿では、イベント会場や避難所などの多数の端末が接続する環境において、マルチキャストで発生した損失パケットを効果的に補完できる端末間通信ペアの最適化アルゴリズムを提案した。コンテンツをマルチキャストにより端末に一斉配信し、配信経路で発生したパケットロスを端末間通信により補完する場合、単に距離の近い端末同士では互いの損失パケットを十分に補完し合うことができるとは限らない。そこで、パケットロスを効果的に補完する端末ペアを選択する組合せ最適化問題を、イジングマシンによる求解が可能な QUBO 問題に帰着させた。数値シミュレーションを実施し、損失パケットの補完率を最大化する端末間通信ペアが選択されることから、提案アルゴリズムの妥当性を確認した。これより、本提案アルゴリズムがコンテンツの効率的な大規模同時配信を実現するために有用であると考えられる。

今回の数値シミュレーションにおいては、人為的に発生させたパケットロスパターンに対して検証を行ったが、実測データを用いた検証を行う予定である。また、端末の受信状況は時々刻々と変化するため、将来の受信状況の変動を考慮した端末間通信ペアの決定方法についても検討する予定である。

## 参考文献

- [1] Cisco: Cisco Visual Networking Index (VNI): 予測とトレンド、2017~2022 年ホワイトペーパー (online), 入手先 (<https://www.cisco.com/c/ja-jp/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/white-paper-c11-741490.html>) (参照 2020-09-01).
- [2] 森, 関口, 杜, 西村, 山本, 中尾: 効率的な同時コンテンツ配信のための Software-Defined Multicast の実機による実装と評価, 信学技報, Vol. 119, No. 460, NS2019-221, pp. 241-246 (2020).
- [3] 関口, 森, 杜, 西村, 山本, 中尾: 効率的な同時コンテンツ配信のための Software-Defined Multicast のシミュレーションによる評価, 信学技報, Vol. 119, No. 460, NS2019-222, pp. 247-251 (2020).
- [4] 福留, 黒住, 西村: WebRTC を用いた端末間パケット補完による高信頼性マルチキャストの検討, 信学技報, Vol. 119, No. 323, CS2019-70, pp. 1-6 (2019).
- [5] Asadi, A., Wang, Q., and Mancuso, V.: A survey on device-to-device communication in cellular networks, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 16, No. 4, pp. 1801-1819 (2014).
- [6] Militano, L., Condoluci, M., Araniti, G., Molinaro, A., Iera, A., and Fitzek, F. H.: Wi-Fi cooperation or D2D-based multicast content distribution in LTE-A: A comparative analysis, *Proc. IEEE International Conference on Communications Workshops*, pp. 296-301 (2014).
- [7] Siris, V. A., and Dimopoulos, D.: Multi-source mobile video streaming with proactive caching and D2D communication, *Proc. IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, pp. 1-6 (2015).
- [8] 田中宗: イジングマシン技術の研究開発動向, モバイルコンピューティング推進コンソーシアム技術解説書「拡大する量子コンピューティング その社会実装ポテンシャル」, pp. 3-8 (online), 入手先 (<https://www.mcpc-jp.org/news/pdf/20200325-potential.pdf>) (参照 2020-09-01).
- [9] 井上武: IP Multicast, 電子情報通信学会知識ベース「知識の森」, 3 群 3 編 5 章 (online), 入手先 ([http://www.ieice-hbkb.org/files/03/03gun\\_03hen\\_05.pdf](http://www.ieice-hbkb.org/files/03/03gun_03hen_05.pdf)) (参照 2020-09-01).
- [10] 高橋俊彦: グラフ理論, 電子情報通信学会知識ベース「知識の森」, 12 群 2 編 3 章 (online), 入手先 ([http://www.ieice-hbkb.org/files/12/12gun\\_02hen\\_03.pdf](http://www.ieice-hbkb.org/files/12/12gun_02hen_03.pdf)) (参照 2020-09-01).
- [11] Ishikawa, H.: Transformation of general binary MRF minimization to the first-order case, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 33, No. 6, pp. 1234-1249 (2010).
- [12] Lucas, A.: Ising formulations of many NP problems, *Frontiers in Physics*, Vol. 2, No. 5 (2014).
- [13] Tanahashi, K., Takayanagi, S., Motohashi, T., and Tanaka, S.: Application of ising machines and a software development for ising machines, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 88, No. 6, pp. 061010-1-10 (2019).