

# ビットコインに対するリレーネットワークの影響

大月 魁† 首藤 一幸†† 坂野 遼平††

†, †† 東京工業大学 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

E-mail: †ootuki.k.aa@m.titech.ac.jp

あらまし ビットコインのスループットは、Visa や PayPal といった中央集権的なシステムのスループットに比べて非常に小さいことが知られている。ビットコインがこれらのシステムと同等の処理性能を持つためには、スループット改善は不可欠であり、先行研究によってスループットの改善にはブロック伝搬時間の改善が必要不可欠であることが知られている。リレーネットワークはブロック伝搬時間を改善する手法として注目を集め、また実際に使用されてきた。しかしながらリレーネットワークがどのような影響をもたらすか、その影響の程度がどのくらいであるかは依然として明らかになっていない。とりわけ、個々のノードに対する影響はほとんど調査されていない。そこで本研究では、ビットコインネットワークとその個々のノードに対するリレーネットワークの影響をシミュレーションによって調査した。本研究の大きな貢献の一つは、90%ブロック伝搬時間へのリレーネットワークの影響をはじめて明らかにしたという点である。さらに、本研究はビットコインネットワークに対するリレーネットワークの影響に加えて、リレーネットワーク参加ノードに対しても利益があることを示した。具体的には、リレーネットワーク参加ノードは非参加ノードに比べて著しく孤立ブロックを生成する確率が低いことを明らかにした。

キーワード ビットコイン, ブロックチェーン, リレーネットワーク

## Effects of Relay Networks in Bitcoin

Kai OTSUKI†, Kazuyuki SHUDO††, and Ryohei BANNO††

† Tokyo Institute of Technology, Ookayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan

E-mail: †ootuki.k.aa@m.titech.ac.jp

**Abstract** Bitcoin's throughput falls greatly behind that of centralized systems such as Visa and PayPal. Its throughput must be improved for Bitcoin to handle the comparable number of transactions. It is known that block propagation time improvement is necessary if there is to be substantial improvement in throughput. Relay networks have been attracting attention as a method to improve throughput. However, it is not yet clear what kind of effects relay networks have or how strong these effects are. In particular, the effects on individual nodes have received little attention. Thus, this study aims at investigating the effects of relay networks on the Bitcoin network and its nodes under the current network state in approximately 2019. We simulated a relay network under the current network state because simulation was virtually the only way to obtain data for all the nodes. A major contribution of this study is its investigation of the relay network effect on the 90th percentile of block propagation time; to our knowledge, this is the first such investigation. Moreover, this study shows that relay networks benefit not only the system but also the nodes utilizing them. It was observed that the utilizing nodes were significantly less likely to produce orphan blocks than the non-utilizing nodes. This finding can motivate nodes to utilize relay networks.

**Key words** Bitcoin, Blockchain, Relay network

### 1. はじめに

ブロックチェーン技術は研究界、産業界など多くの場所で注

目されてきた。また 2017 年 12 月 17 日にはビットコインの時価総額は 320 億米ドルを上回るなど経済的にも大きな影響を誇っている。ビットコインをはじめとするブロックチェーン技術は故障耐性を持ち、また不特定多数のノードが参加するネットワークにおいて、特定の管理主体に頼ることなく、台帳情報

(注): This is an unrefereed paper.

を分散管理することを可能にするなど多くの利点を達成した。その一方で依然として多くの課題が残されている。その中で最も大きな課題の一つがトランザクションの承認スループット (TPS) である。これはシステムが単位時間あたりに処理することのできるトランザクション数を表し、システムの処理能力の評価指標の一つである [1]。多くのブロックチェーンシステムのスループットは中央集権的なシステムのそれに比べて非常に小さいものとなっている。例えば、Viza, PayPal といった中央集権的な決済システムのスループットはそれぞれ 1776 TPS, 700 TPS である [2, 3]。もっとも代表的なブロックチェーンシステムであるビットコインのスループットは 7 TPS であり、この値はこれらの中央集権的な決済システムのそれに比べて非常に小さな値である。先行研究によって、スループットを改善するためには、ブロック伝搬時間の改善が必要不可欠であることが知られている。ブロックチェーンにおける伝搬時間の改善方法の一つとしてリレーネットワークが知られている。リレーネットワークは基本的にはブロックチェーンネットワークの外部ネットワークであり、リレーネットワークを利用しているノード間のブロックの伝搬を行う。ビットコインにおいてもいくつかのプロジェクトが存在しており、そのうちのほとんどが実際に利用されている。また先行研究において、リレーネットワークがブロック伝搬時間の改善に大きく貢献していることが示唆されている [4]。

リレーネットワークに関してはいくつか既存の計測が存在する。リレーネットワークの管理者たちがリレーネットワークのデータを公開しているが、彼らのデータは実データであるため、ネットワーク全体の情報を知ることができない。言い換えればこれらの計測はリレーネットワークを構成するサーバーと参加ノードに限られる。またリレーネットワークの計測に関して、いくつかの研究が存在する。Gervais らの研究 [5] では、リレーネットワークの影響が調査されていたが、その参加率は 100% と 0% の二種類しか考慮されていなかった。また、彼らは個々のノードにどのような影響をリレーネットワークがもたらすのかに注目していなかった。我々の先行研究 [6] では、参加率を変えながら、リレーネットワークが個々のノード、ネットワーク全体にもたらす影響を調査していたが、リレーネットワークのモデルがとても単純化されたものであった。またこれらの研究は 2015 年のネットワーク下におけるリレーネットワークの影響を調査していたが、ここ数年の間にもネットワークは大きく進歩しており、最新のネットワーク下での計測が必要である。本研究では、理想的なリレーネットワークがビットコインネットワークに存在した場合にどのような影響を及ぼすのかを調査した。また本研究ではネットワークのパラメタを最新のものに更新したため、最新のネットワーク下における、リレーネットワークの影響を知ることができる。本研究は、最新のネットワーク環境下において、リレーネットワークがビットコインネットワークそして個々の参加ノードにどのような影響を与えるのかを明らかにする。

表 1 パラメタ設定.

Table 1 Parameter settings.

# of nodes	10000
Block interval	10 min
Block size	534 KiB
# of connections	Distribution according to Miller et al. [11]
Geographical Distribution	Distribution according to Gervais et al. [5]
Bandwidth	6 regional bandwidth according to Nagayama et al. [9]
Delay	6 regional delay according to Nagayama et al. [9]

## 2. 実験手法

本研究の目的は個々のノード、ビットコインネットワーク全体に対するリレーネットワークの影響を調査することである。ネットワーク全体や個々のノードに関する情報を得ることが極めて難しい P2P ネットワークにおいて、シミュレーションは現実的かつ最適な方法である。したがって本研究ではシミュレーションを用いて実験を行った。またシミュレーションのためにはリレーネットワークのモデル化が必要であった。そのため本節では、本研究で用いたリレーネットワークのモデルを詳細に示す。また得られたシミュレーションで得られた結果をどのように分析したかについても最後に記述する。

### 2.1 シミュレーション

本研究ではブロックチェーンシミュレータ SimBlock [7] を用いた。このシミュレータは複数の研究 [6, 8, 9] ですでに用いられており、遅延や帯域幅といった値が最新のそれらの値に更新されている [9]。そのため最新のネットワークパラメタにおけるシミュレーションを行うことができた。シミュレーションに関する各パラメタとその設定は表 1 のように設定した。ノード数は [10] から得たデータを基に設定した。その他、ブロック生成間隔、ブロックサイズ、ノードの地理的分布の設定は Gervais ら [5] と同様の設定を行った。また送信帯域幅、受信帯域幅、遅延は Nagayama らの研究 [9] から引用したものであり、2019 年のネットワークの状況を基にパラメタが設定されている。

本実験においては、送信時間はメッセージサイズ、遅延、帯域幅を基に決定される。帯域幅は送信側の送信帯域幅、受信側の受信帯域幅のうち小さいほうが採用される。

またシミュレーションは全ノードのうちリレーネットワークに参加しているノードの割合を示すパラメタ参加率を変化させながら行った。詳細には、100%, 50%, 25%, 12%, 6%, 3%, 2%, 1%そして 0%を参加率として選んだ。それぞれのシミュレーションはブロック高が 1000 になると停止する。

### 2.2 リレーネットワークモデル

本研究はリレーネットワークが理想的に動作した場合のリレーネットワークの影響を調査することを目的としており、シミュレーションのためにはリレーネットワークのモデル化が必要であった。基本的には個々のリレーネットワークは大きく異なっている。具体的にはプロトコル、配置されているサーバの台数、それらのサーバの性能などである。したがって、それらすべてのリレーネットワークの特徴を反映したモデルを作成することは非現実的である。しかしながら、それらのリレーネットワークの理想的な動作は基本的には共通している。理想的に

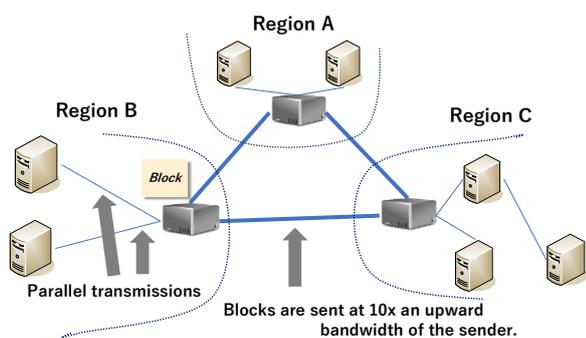


図 1 リレーネットワークモデル.

図 2 The relay network model.

は、リレーネットワークはブロックを参加ノードに三つのステップで送信することを期待される。まず参加ノードはブロックを発見した際に、自分がつながっているリレーサーバにブロックを送信する。二つ目のステップは地域間のブロック送信であり、この通信はリレーサーバ間で行われ、前章で述べた理由により通常の通信よりも高速になっている。最後に、リレーサーバは接続している参加ノードたちにブロックを同時に伝搬させていく。

我々はこのようにリレーネットワークが理想的に挙動した場合を対象としており、図 2 はそれを反映した我々のモデルを示している。このモデルでは、リレーサーバが各地域に配置されており、参加ノードは自分の地域にあるリレーサーバとつながるものとしている。このモデルはリレーサーバ間の通信は通常の通信の 10 倍の送信帯域幅でもって行われると仮定している。これは先に述べたようにリレーサーバ間の通信が通常よりも高速になっているということ帯域幅という形で反映させたものである。またリレーサーバがブロックを受信した際に、それらは並行して同地域の参加ノードたちにブロックを送信できるものとした。なぜならこのモデルはリレーネットワークの理想状態のリレーネットワークを模擬しており、この並行送信は広い帯域幅と負荷分散によって近似されるからだ。

### 2.3 評価指標

本研究はリレーネットワークのビットコインネットワーク全体に対する影響、個々のノードに対する影響の二つを調査した。ネットワークに対する影響を調査するために、50%、90% ブロック伝搬時間と孤立ブロック率を選定した。これらの変数は多くの研究 [4-6, 8, 12, 13] で用いられている重要なパラメータであり、影響を調査するうえで適切パラメータであるといえる。とりわけ、90% ブロック伝搬時間は多くの研究で [4, 13] 調査されている重要なパラメータでありながら、過去のリレーネットワークの影響測定において [5, 6] は考慮されてこなかった。

さらにブロック生成数と孤立ブロック率を調査し、参加ノードと非参加ノードのそれらを比較し、リレーネットワークの個々のノードに対する影響を明らかにする。ブロック生成数は 1 ノード当たりの平均ブロック生成数で定義される。このパラメータは個々のノードにとって重要である。なぜなら、PoW

ブロックチェーンにおいてはノードはマイニング報酬を求めてブロックチェーンネットワークに参加するからだ [14]。もう一方のパラメータは各ノード群における孤立ブロック率であり、全生成ブロックに占める孤立ブロックの割合で定義される。ノードは自分が生成したブロックが孤立ブロックになってしまった場合、マイニング報酬を受け取ることができず、ビットコイン [14] のような多くのブロックチェーンではただ計算資源を無駄にするだけになってしまう。そのためこちらも個々のノードにとっては極めて重要なパラメータといえるだろう。言い換えれば、もし仮にリレーネットワークが孤立ブロックを減少させるとすると、それはノードにとってリレーネットワーク利用する理由となりえるだろう。

## 3. 実験結果

本章では実験結果からリレーネットワークの影響を考察する。大きくネットワーク全体に対する影響と個々のノードに対する影響という二つの観点から分析を行った。それらの結果について順番に見ていく。

### 3.1 ブロック伝搬時間

先行研究によってリレーネットワークがブロック伝搬時間を改善することが示唆されている [4, 6]。本研究は伝搬時間に関して二つのことを観察した。一つ目に本実験においても先行研究と同様に、リレーネットワーク参加ノード、非参加ノード、全ノードのいずれのグループに対してもブロック伝搬時間の改善が見られた。図 3 そして図 4 はそれぞれネットワーク全体の 50%、90% ブロック伝搬時間を図示している。いずれの場合にも参加率の上昇に伴って参加ノード、非参加ノード、全ノードのすべてのノード群に関して、参加率の上昇に比してブロック伝搬時間が改善することが確認できる。例えば、参加率 0% と 3% の場合を比較すると 50%、90% ブロック伝搬時間がそれぞれ 100ms, 200ms 程度改善していることが表 2, 3 からわかる。したがってリレーネットワークはリレーネットワーク参加ノードに加えて非参加ノードと全ノードのブロック伝搬時間も改善することが確認できた。

第二に参加・非参加ノードのグラフの形が類似している点は興味深い観察であり、リレーネットワーク参加ノードと非参加ノードの改善の度合いが参加率の向上に対して同程度あることを示唆していると考えられる。事実、表 2 は参加ノードと非参加ノードの伝搬時間の差が全ての参加率において、800ms から 1000ms 程度の一定の差に保たれていることを示している。また 90% 伝搬時間に関しても同様に 1500 ms から 2000 ms 程度の一定の差が保持されていることが表 2 から知ることができ。しかしながら、改善の率は同程度だとは言え、参加ノードへの伝搬時間は常に非参加ノードのそれよりも良いという事実は述べておく価値があるだろう。

### 3.2 孤立ブロック率

先行研究によってリレーネットワークが孤立ブロック率を減少させることが示唆されている。Gervais ら [5] は、全ノードがリレーネットワークに参加した場合、孤立ブロック率は元の値の 7.5% まで減少したと報告している。表 4 は本実験の結果

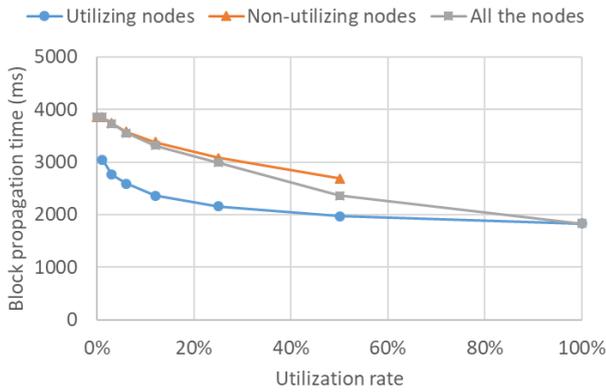


図 3 50%ブロック伝搬時間.

Fig. 3 50th percentile of block propagation times.

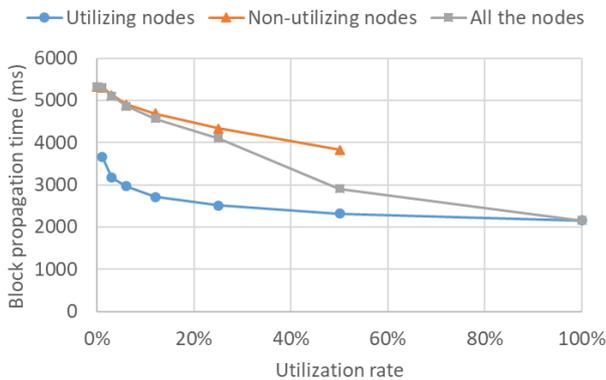


図 4 90%ブロック伝搬時間.

Fig. 4 90th percentile of block propagation times.

表 2 50%ブロック伝搬時間 (msec).

Table 2 50th percentile of block propagation times (msec).

Group	UR <sup>1</sup>							
	0%	1%	3%	6%	12%	25%	50%	100%
Utilizing	N/A	3050	2763	2590	2365	2160	1969	1837
Non-utilizing	3854	3853	3741	3576	3378	3081	2692	N/A
All	3854	3851	3730	3555	3316	2993	2366	1837

<sup>1</sup> utilization rate.

表 3 90%ブロック伝搬時間 (msec).

Table 3 90th percentile of block propagation times (msec).

Group	UR <sup>1</sup>							
	0%	1%	3%	6%	12%	25%	50%	100%
Utilizing	N/A	3660	3171	2972	2719	2511	2318	2154
Non-utilizing	5317	5307	5126	4905	4691	4338	3831	N/A
All	5317	5302	5106	4862	4573	4100	2903	2154

<sup>1</sup> utilization rate.

を示している。ここから、1. 参加率が增大するにしたがって孤立ブロック率の改善の度合いが大きくなっていくこと、2. 全ノードがリレーネットワークに参加した場合、孤立ブロック率が元の値の36%まで改善することを観察した。しかしこの改善の度合いは Gervais ら [5] の実験で得られたデータに比べて小

表 4 孤立ブロック率.

Table 4 Orphan block rate.

Utilization rate	0%	1%	3%	6%	12%	25%	50%	100%
Orphan block rate	0.95	0.93	0.89	0.79	0.76	0.63	0.43	0.34

さいことがわかる。この差に関して二つの理由を考えることができる。

一つ目は、本実験におけるビットコインのノード数は先の研究に比べて非常に大きかったということである。一般的により多くのノードがネットワークに参加するとデータを伝搬させるのにより多くの時間が必要になることが知られている。その結果として孤立ブロックが生じやすかったと思われる。

二つ目に、本研究における孤立ブロックはリレーネットワークを利用しない場合であっても十分に小さいということだ。我々は最新のビットコインのシミュレーションを行ったため、ネットワークは Gervais らの研究に比べて非常に高速になっている。そのためリレーネットワークの及ぼす影響の度合いが小さくなったと考えれる。

### 3.3 マイニング成功率

個々のマイナーへのリレーネットワークの影響を調査するために、マイニング成功数に着目した。本計測においてのみ、マイニング成功数の差を比較するために全ノードのハッシュパワーを一律に設定した。このように設定することでハッシュパワーの影響を抑え、公平にリレーネットワークがマイニング成功率にもたらす影響を計測することができる。その他のパラメータ設定は他のシミュレーションと同様である。

図 5 はリレーネットワーク参加ノードと非参加ノードのマイニング成功数の比較を示している。本実験においては、マイニング成功数の明らかな差は観測することができなかった。実際、参加率に関係なくこれらの値は互いに上回ったり、下回ったりしているように思われる。加えて各参加率における参加・非参加ノード間の値の差に注目してみても、それらは 0.1 以下の小さな差となっている。このような結果となった主な理由は、参加・非参加ノード間のブロック伝搬時間の差が十分でなかったことであると思われる。一般にハッシュパワーとマイニングの開始時間がマイニング成功の大部分を占めていることが知られている。本実験では各ノードのハッシュパワーを一定に設定した。したがってリレーネットワークによってもたらされたブロック伝搬時間の差がマイニング成功率に影響を及ぼすには十分ではなかったと考察することができる。

### 3.4 各ノード群に対する孤立ブロック率

前小節においてリレーネットワークの影響の測定のためにネットワーク全体の孤立ブロックに着目した。ここでは参加ノードと非参加ノードの孤立ブロック率を比較する。その比較が図 6 に示されている。この結果は我々の先行研究 [6] と一致しており、リレーネットワーク参加ノードは非参加ノードに比べて孤立ブロックを生成する確率が極めて小さいことを示している。実際、参加ノードの値は常に非参加ノードのそれよりも小さくなっており、参加率が 1% の場合においては孤立ブロックを一つも生成しなかった。

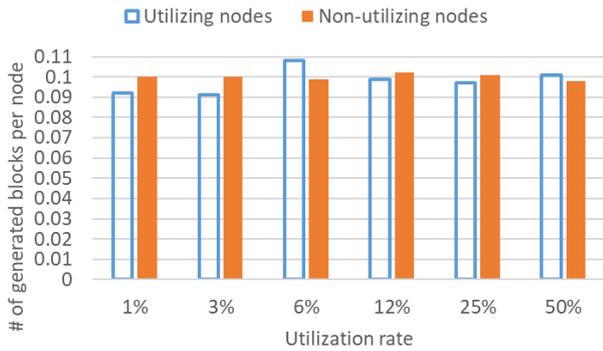


図 5 平均マイニング成功数.

Fig. 5 Average number of discovered blocks.

ここで二つのことを観察することができる。一つ目は参加ノードの孤立ブロックは非参加ノードのそれよりも常に小さく保たれているが、非参加ノードの値も参加率の向上に従って安定して減少している。図 3, 図 4 に示されているような伝搬時間の改善がこれをもたらしていると思われる。

二つ目に、参加ノードの孤立ブロック率は必ずしも参加率の向上に伴って改善していないという点である。この理由の一つとして次のようなことが考えられる。基本的に参加ノードは主に複数の参加ノードが同時にブロックの生成に成功した場合に孤立ブロックを生成している。図 5 は孤立ブロック生成の内訳を示しており、case 1 の確率は case 3 の確率と比べて大きくなっていることがわかる。言い換えれば、参加ノードによる孤立ブロックの多くは参加ノードによるブロックが他の参加ノード生成したブロックとの競争に敗れた際に生み出されている。したがって参加ノード数は少なく、その少数のノード群が同時に複数のブロックを生み出すということが起こりにくい低参加率においては、参加ノードの孤立ブロック率は低くなると考えられる。したがって参加ノードの孤立ブロック率は必ずしも参加率に比して減少しておらず、低参加率の際の値はより高い参加率のそれより小さくなったと考察される。

最後に、参加ノードと非参加ノード間の値の違いがどこから生じているのかを議論する。それらはリレーネットワークの特徴から生じていると考えられる。リレーネットワークは参加ノードたちに同時にブロックを伝播させ、参加ノードが生成されたブロックは他の参加ノードたちに高速に共有されることになる。その結果、二つのことが起こったと考えられる。一つ目は、参加ノードは新たなブロックが発見された際にそれらをすぐに知ることができ、すでに採掘されたブロックのためのハッシュ計算を続ける時間が短かったであろうということだ。もう一つは、参加ノードと非参加ノードが同時にブロックを生成した場合に参加ノードのブロックが勝利する可能性が高かったであるということである。実際、このことは表 6 の case 2 と case 3 の比較から確認することができる。例えば、参加率が 12% の場合には case 2 の確率は case 3 の 7.5 程大きな値になっている。したがってこれら二つのことがこの差を生み出したと考えられる。

表 5 孤立ブロック発生理由の内訳。(%)。

Table 5 A breakdown of orphan blocks (%).

UR <sup>a</sup>	Case			
	case 1 <sup>1</sup>	case 2 <sup>2</sup>	case 3 <sup>3</sup>	case 4 <sup>4</sup>
1%	0.0	3.0	0.0	97.0
3%	3.0	3.0	0.0	94.0
6%	2.0	6.0	1.0	91.0
12%	10.0	14.0	0.0	76.0
25%	13.0	30.0	4.0	53.0
50%	24.0	24.0	4.0	48.0

<sup>a</sup> utilization rate.

<sup>1</sup> the possibility that both an orphan block and the main block are generated by utilizing nodes.

<sup>2</sup> the possibility that an orphan block and the main block are generated by non-utilizing and utilizing nodes, respectively.

<sup>3</sup> the possibility that an orphan block and the main block are generated by utilizing and non-utilizing nodes, respectively.

<sup>4</sup> the possibility that both an orphan block and the main block are generated by non-utilizing nodes.

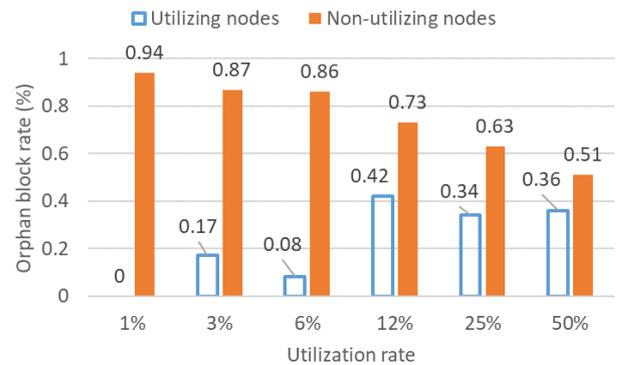


図 6 参加・非参加ノードの孤立ブロック率.

Fig. 6 Orphan block rate of utilizing nodes and non-utilizing nodes.

#### 4. 先行研究

いくつかの先行研究がリレーネットワークの影響を調査している。例えば、Garvais ら [5] はすべてのノードがリレーネットワークに参加した場合に孤立ブロックの減少を確認したことを報告している。しかしながら彼らの研究では個々のノードに対するリレーネットワークの影響は調査しておらず、加えてリレーネットワークの参加率として 0% と 100% の二つのみを考慮していた。我々の先行研究 [6] ではリレーネットワークがネットワーク全体に加えて、個々の参加ノードにも影響を及ぼすことを確認した。しかし先行研究で用いたリレーネットワークのモデルはとても単純化されており、我々の発見したリレーネットワークの影響がより現実的なモデルにおいても保たれるのか調査する必要があった。またこれらの二つの先行研究は 2015 年ごろのネットワークの状態を想定しシミュレーションを行っていた。当時の帯域幅や遅延は現在のそれとは大きく異なっている。そのため、最新のネットワーク環境下におけるリレー

ネットワークの影響測定が必要であった。

## 5. 結 論

本研究では、実際のリレーネットワークをより精密に模擬したモデルを用いて、最新のネットワーク環境下におけるリレーネットワークの影響を調査した。この最新のネットワーク環境下におけるリレーネットワークの影響を調査したという点は我々の大きな貢献の一つである。ネットワーク全体に対する影響に関しては、先行研究で示唆されていたようにリレーネットワークへの参加ノード数の増大によって孤立ブロック、50%ブロック伝搬時間の減少を確認した。加えて、リレーネットワークが90%ブロック伝搬時間を減少させることも確認した。本研究はリレーネットワークの90%ブロック伝搬時間への影響を調査した初めての研究である。またリレーネットワークによる伝搬時間の改善の程度が参加ノード、非参加ノードにおいて同程度であることを観察した。ただし、伝播時間そのものは常に参加ノードが非参加ノードより短かったという事実は述べておく価値があるだろう。

また個々のノードに対する影響に関して、本研究の特質すべき発見の一つは現在の高速なネットワーク環境下においても、参加ノードは非参加ノードに比べて著しく孤立ブロックを生成する確率が低いということだ。本研究そして他の研究が示すようにより多くのノードがリレーネットワークに参加するほど、リレーネットワークがもたらす影響は大きくなる。したがってより多くのノードがリレーネットワークに参加することは望ましいことであると思われる。そして本研究の発見はノードがリレーネットワークに参加する動機の一つを示したといえるかもしれない。マイニング成功率に関しては、リレーネットワークは大きな影響を及ぼさないことを観察した。実際、リレーネットワーク参加、非参加ノード間の平均マイニング成功数の差は非常に小さく、常に0.1程度以下の差であった。

ここで、いくつかの今後の研究の可能性は述べておく価値があるだろう。本研究はリレーネットワークが理想的に動作した場合のそれらの影響を調査した一方で、それらが高負荷時などの理想的に動作しなかった場合の影響は明らかではない。したがって今後の研究としてリレーネットワークが理想的に動作しなかった場合の影響を調査することが考えられるだろう。加えてEthereumなど他のブロックチェーンネットワークに対するリレーネットワークの影響というのも調査する価値があるだろう。

**謝辞** 本研究は(公財)セコム科学技術振興財団 一般研究助成の支援を受けたものです。

## 文 献

- [1] Y. Sompolinsky and A. Zohar, "Secure high-rate transaction processing in bitcoin," in *International Conference on Financial Cryptography and Data Security*. Springer, 2015, pp. 507–527.
- [2] "PayPal reports second quarter 2018 results | paypal, inc." <https://investor.paypal-corp.com/news-releases/news-release-details/paypal-reports-second-quarter-2018-results?ReleaseID=1072972> (accessed Feb. 13, 2020).
- [3] "VisaNet | electronic payments network," <https://usa.visa.com/about-visa/visanet.html> (accessed Feb. 13, 2020).

- [4] T. Neudecker, "Security and anonymity aspects of the network layer of permissionless blockchains," *Ph.D. thesis*.
- [5] A. Gervais, G. O. Karame, K. Wüst, V. Glykantzis, H. Ritzdorf, and S. Capkun, "On the security and performance of proof of work blockchains," in *Proc. ACM CCS 2016*. ACM, 2016, pp. 3–16.
- [6] K. Otsuki, Y. Aoki, R. Banno, and K. Shudo, "Effects of a simple relay network on the bitcoin network," in *Proceedings of the Asian Internet Engineering Conference*. ACM, 2019, pp. 41–46.
- [7] Y. Aoki, K. Otsuki, T. Kaneko, R. Banno, and K. Shudo, "SimBlock: A blockchain network simulator," in *Proc. Cry-Block 2019 (in conj. with INFOCOM 2019)*, 2019.
- [8] Y. Aoki and K. Shudo, "Proximity neighbor selection in blockchain networks," in *2019 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain)*. IEEE, 2019, pp. 52–58.
- [9] R. Nagayama, K. Shudo, and R. Banno, "Simulation of the bitcoin network considering compact block relay and internet improvements," *arXiv preprint arXiv:1912.05208*, 2019.
- [10] "Bitcoin Nodes Distribution - Bitnodes," <https://bitnodes.earn.com/> (accessed Feb. 13, 2020).
- [11] A. Miller, J. Litton, A. Pachulski, N. Gupta, D. Levin, N. Spring, and B. Bhattacharjee, "Discovering bitcoin's public topology and influential nodes," *et al*, 2015.
- [12] C. Decker and R. Wattenhofer, "Information propagation in the Bitcoin network," in *Proc. IEEE P2P 2013*. IEEE, 2013, pp. 1–10.
- [13] K. Croman, C. Decker, I. Eyal, A. E. Gencer, A. Juels, A. Kosba, A. Miller, P. Saxena, E. Shi, E. G. Sirer *et al.*, "On scaling decentralized blockchains," in *International Conference on Financial Cryptography and Data Security*. Springer, 2016, pp. 106–125.
- [14] S. Nakamoto *et al.*, "Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system," 2008.