

令和 4 年 6 月 19 日現在

機関番号：24506

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22032

研究課題名(和文)暗号通貨の大規模データに基づく決済ネットワークの構造とダイナミクスの数理的な解明

研究課題名(英文) Understanding the Network Structure and Dynamics of Cryptoasset's Transactions at a Global Scale

研究代表者

藤原 義久 (Fujiwara, Yoshi)

兵庫県立大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：50358892

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：代表的な暗号資産であるビットコインのブロックチェーンから、アドレス間から推定されるユーザー間決済を再構成した。そして、ユーザーをノード、決済の流れを向きのあるリンクとするグラフ構造を決済ネットワークとして定義して、その構造と時間変化を複雑ネットワーク科学の手法を用いて解析した。

その結果、通貨の流れにおける上流・下流、強連結成分とその周辺の構造に関して、ホッジ分解という代数的トポロジーの手法により、通貨の需要と供給の全体ならびに局所構造を明らかにした。また、機械学習の非負値行列分解ならびにそのベイズ推定という手法を確立して、主要な通貨の流れを同定して、重要ユーザーの活動を解明した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

通貨の本質は信用取引を記録するための帳簿(ledger)である。すべての経済活動は信用(credit)を基盤とするから、通貨の流れと取引価格の決定についての研究は、信用取引としての決済システムという社会基盤として極めて重要である。これまで、通貨の流れを把握するということさえ、そのデータの入手困難さのため、ほぼ不可能であった。

本研究は、ビットコインを代表とする暗号通貨を対象として、それら決済および取引価格の大規模なデータを収集して、その詳細な情報に基づいて、ユーザー間の通貨流通の全体像、すなわち決済ネットワークの構造とその時間的な変化、ならびに取引価格のダイナミクスを解明する研究を行った。

研究成果の概要(英文)：This study concerns about transactions recorded in the largest cryptoasset of Bitcoin's blockchain. Based on the estimation of users from wallets (addresses) in the blockchain, we define a crypto flow network comprising users as nodes and transactions as edges, and analyzed the network structure and its temporal change by using complex network analysis. As a result, by using an algebraic topology of Hodge decomposition, we clarified each user's location related to demand and supply of the crypto and the network structure, regarding the upstream/downstream flow and the strongly connected component. In addition, by applying a machine learning method of non-negative matrix factorization in the framework of Bayesian estimation, we revealed big players' activities in the principal components of crypto flow.

研究分野：経済物理、ネットワーク科学、データ科学

キーワード：暗号資産 ブロックチェーン 決済システム 複雑ネットワーク 代数的トポロジー

## 1. 研究開始当初の背景

本報告書の時点で暗号資産(crypto asset)とよばれるビットコインを代表とする取引システムは、研究開始当初は暗号通貨(crypto currency)ともよばれていた。円やドルなどの法定通貨を含む従来の通貨はその発行と決済を可能にするための中央集権的管理が必要である。これに対し、暗号資産はこうした中央集権的管理によらない分散的システムによる新しい情報技術、すなわちブロックチェーンとよばれる改竄や二重支払いなどを防ぐことを可能にする技術に依拠している。ブロックチェーン技術は開発から今日まで 10 年以上にわたって現実に破綻していない。当初は通貨として少なからず流通していたが、現在は資産運用として投機の対象になることが主流となっているといえるだろう。また、大多数の利用者が取引所や交換所といった大きな会社のサービスを利用しているため、大きな金額や高い頻度の取引はそれらの会社の取引活動としてブロックチェーンに記録されてきているといえるだろう。

- 暗号資産のすべての取引データはブロックチェーンに累積して記録されているため、過去に行われた膨大な数の取引をすべて追跡することが可能である。暗号資産は研究開発当初から急速な進歩を遂げており、例えばビットコインの時価総額は当初の段階ですでに 8 兆円、発行アドレスは 1 千万を超えていると推定されていた。
- 一方、暗号通貨は従来の通貨と取引市場を通じて取引されており、その取引価格も代表的な市場からデータを取得することができる。よく知られているように、大きな暴騰や暴落を繰り返してきており、資産価格の変動が社会に与える影響は極めて大きく、当初から現在までそれは続いている。
- それに加えて、暗号資産を発行するためのマイニングには高速かつ巨大な並列計算が用いられるため、そのエネルギー消費も大きな社会問題となってきた。

以上の背景の下、研究の目的・方法・成果について以下に述べる。

## 2. 研究の目的

本研究は、ビットコインを代表とする暗号通貨を対象として、それら決済および取引価格の大規模なデータを収集して、その詳細な情報に基づいて、ユーザー間の通貨流通の全体像、すなわち決済ネットワークの構造とその時間的な変化、ならびに取引価格のダイナミクスを解明する。通貨の流れをここまでマイクロなレベルで詳細に研究することはこれまで不可能であったが、本研究により通貨としての暗号通貨の共通性や特殊性を数理的に究明するものである。

通貨の本質は信用取引を記録するための帳簿(ledger)である。すべての経済活動は信用(credit)を基盤とするから、通貨の流れと取引価格の決定についての研究は、信用取引としての決済システムという社会基盤として極めて重要である。これまで、通貨の流れを把握するということさえ、そのデータの入手困難さのため、ほぼ不可能であった。ところが、まったく新しい技術による暗号通貨が近年世界中で利用されており、これまでほぼ不可能であった通貨の流れや価格市場を大規模なデータに基づいて詳細に研究するための端緒が得られつつある。この萌芽的な研究には、従来の分野分析的なアプローチではなく、暗号通貨の大規模データベース構築のための情報科学ならびに計算科学、決済の膨大な関係性を明らかにする複雑ネットワーク科学、特に通貨の流れの新しい数理的な解析手法などを含む分野横断的な共同研究が必要である。

## 3. 研究の方法

### (1) 暗号通貨の大規模データベースの構築

暗号資産のすべての決済データはブロックチェーンに累積して記録されており、過去に行われた膨大な数のすべての決済を追跡するための大規模データベースを最新時点まで更新した。同一の取引において複数入力したことがある場合には、ユーザーが使用したアドレスからユーザーを同定することができる。その同定に関するデータベースも更新し、それを研究に利用した。

暗号資産データの更新では、2021 年夏までの全取引データから、20 億近くの取引に出現した 8.6 億のアドレスからその 60 パーセント以上に対応する 7 千万のユーザーを同定することに成功し(図 1)、その結果を共有しながら研究を遂行した。

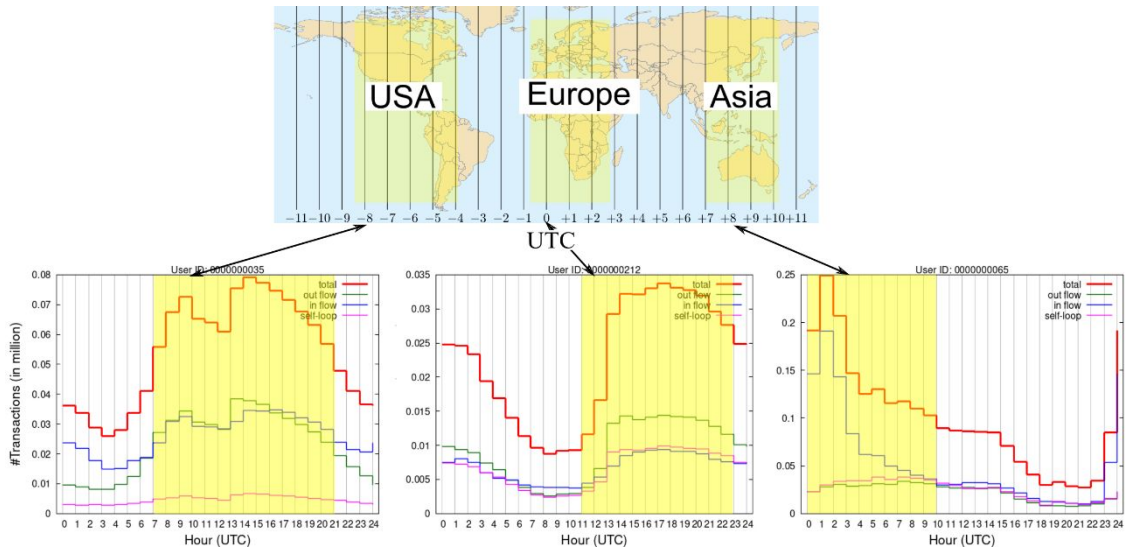


図 1

( 2 ) 決済ネットワークの構造と変化の数理的な解析

収集したデータに基づき、アドレス間から推定されるユーザー間決済を再構成した。このために、ユーザーをノード、決済の流れを向きのあるリンクとするグラフ構造を決済ネットワークとして定義して、その構造と時間変化を複雑ネットワーク科学の手法を用いて解析した。その結果、通貨の流れにおける上流・下流、強連結成分とその周辺の構造、いわゆる「蝶ネクタイ」の構造（図 2）に関して、Helmholtz-Hodge-Kodaira 分解という代数的トポロジーの手法を応用して、通貨の需要と供給の全体ならびに局所構造を明らかにすることができた（図 3）。また、機械学習の解析手法である非負値行列分解（Non-negative Matrix Factorization, NMF）ならびにそのベイズ推定という手法を確立して、主要な通貨の流れの因子を同定、重要ユーザーの活動を明らかにすることに成功した。

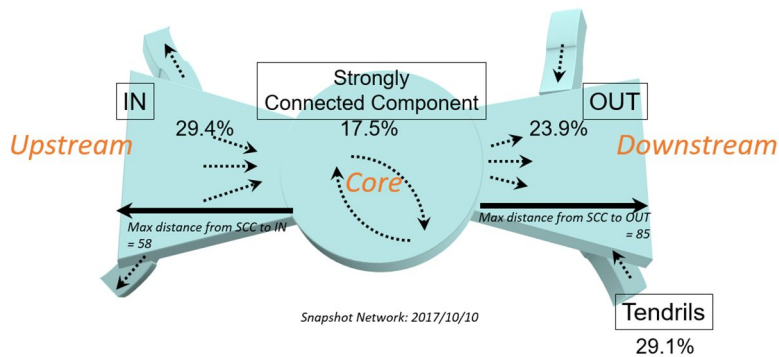


図 2

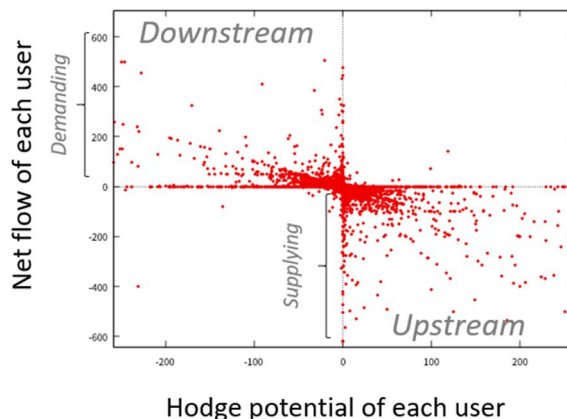


図 3

#### 4 . 研究成果

##### 国際会議共催

藤原・青山が京都大学総合生存学館、理化学研究所 iTHEMS らと共催で国際会議『Blockchain in Kyoto 2021』という暗号資産に関する国際会議を開催した(日程:2021年2月17-18日、場所:京都大学百周年時計台記念館)。欧米を含む招待講演者10名、一般講演者13名、登録参加者200名超と大変な盛況であった。その論文集を以下の査読付学術雑誌で発表した。

・Proceedings of Blockchain in Kyoto 2021 (BCK21), JPS Conference Proceedings, vol.36 (2021). ISBN: 978-4-89027-149-8 <<https://journals.jps.jp/doi/book/10.7566/BCK21>>

##### 出版論文(研究代表者を含むものからの抜粋)

・Yoshi Fujiwara and Rubaiyat Islam (2021), "Bitcoin's Crypto Flow Network", JPS Conference Proceedings, vol.36, no.011002.

・Yoshi Fujiwara and Rubaiyat Islam (2020), "Hodge Decomposition of Bitcoin Money Flow", Advanced Studies on Financial Technologies and Cryptocurrency Markets, Springer Nature Singapore Pte Ltd., pp.117-137

・Rubaiyat Islam, Yoshi Fujiwara, Shinya Kawata, and Hiwon Yoon, "Unfolding identity of financial institutions in bitcoin blockchain by weekly pattern of network flows", Evolutionary and Institutional Economics Review, in press (published on 22 July 2020)

##### 学位論文

・Rubaiyat Islam, "Crypto-currency Flow among Bitcoin Users: De-anonymization and Dynamics of Persistently-Active Big Players by Network Analysis", Ph.D. Thesis (指導教員:藤原義久、兵庫県立大学、2021年3月)

その他、国際会議など発表多数

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Rubaiyat Islam, Yoshi Fujiwara, Shinya Kawata, Hiwon Yoon	4. 巻 18
2. 論文標題 Unfolding identity of financial institutions in bitcoin blockchain by weekly pattern of network flows	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Evolutionary and Institutional Economics Review	6. 最初と最後の頁 pp.131?157
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s40844-020-00184-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yoshi Fujiwara, Rubaiyat Islam	4. 巻 NA
2. 論文標題 Hodge Decomposition of Bitcoin Money Flow	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advanced Studies of Financial Technologies and Cryptocurrency Markets	6. 最初と最後の頁 pp.117-137
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/978-981-15-4498-9_7	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuji Fujita, Yuichi Kichikawa, Yoshi Fujiwara, Wataru Souma, Hiroshi Iyetomi	4. 巻 4
2. 論文標題 Local bow-tie structure of the web	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Network Science	6. 最初と最後の頁 Article No.15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41109-019-0127-2	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuichi Kichikawa, Hiroshi Iyetomi, Takashi Iino, Hiroyasu Inoue	4. 巻 4
2. 論文標題 Community structure based on circular flow in a large-scale transaction network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Network Science	6. 最初と最後の頁 Article No.92
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41109-019-0202-8	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuichi Kichikawa, Hiroshi Iyetomi, Hideaki Aoyama, Yoshi Fujiwara, and Hiroshi Yoshikawa	4. 巻 15
2. 論文標題 Interindustry linkages of prices -- Analysis of Japan's deflation	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PloS ONE	6. 最初と最後の頁 e0228026
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1371/journal.pone.0228026	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計5件(うち招待講演 0件/うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Yoshi Fujiwara
2. 発表標題 Bitcoin's Crypto Flow Network
3. 学会等名 International Conference Blockchain in Kyoto 2021, Kyoto University (February 17-18, 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshi Fujiwara
2. 発表標題 Hodge decomposition of Bitcoin money flow among big players
3. 学会等名 University Blockchain Research Initiative (UBRI) Conference, October 2019 (Berkeley, USA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinya Kawata, Yoshi Fujiwara, and Hiwon Yoon
2. 発表標題 Influence of News in Crypto-asset Markets
3. 学会等名 University Blockchain Research Initiative (UBRI) Conference, October 2019 (Berkeley, USA) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshi Fujiwara
2. 発表標題 Hodge decomposition of Bitcoin money flow among big players
3. 学会等名 The 8th International Conference on Complex Networks and their Applications, Lisbon (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroyasu Inoue
2. 発表標題 Disaster and Countermeasure: Simulation on Nation-Wide Supply Chain Data
3. 学会等名 The B.E.S.T. Workshop and a Satellite Meeting to the NetSci-X 2020, Complex Systems in Finance and Economy, Kyoto (国際学会)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	日高 義将 (Yoshimasa Hidaka)  (00425604)	国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器科学研究センター・専任研究員  (82401)	
研究分担者	初田 哲男 (Tetsuo Hatsuda)  (20192700)	国立研究開発法人理化学研究所・数理創造プログラム・プログラムディレクター  (82401)	
研究分担者	井上 寛康 (Hiroyasu Inoue)  (60418499)	兵庫県立大学・シミュレーション学研究科・准教授  (24506)	

## 6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	土居 孝寛  (Takahiro Doi)  (50804910)	大阪大学・核物理研究センター・特任助教（常勤）    (14401)	

## 7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 Blockchain in Kyoto 2021	開催年 2021年～2021年
------------------------------------	--------------------

## 8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------