



仮想通貨市場は効率的か^{*1}

財務省財務総合政策研究所客員研究員

石田 良

財務省財務総合政策研究所研究員

服部 孝洋

シリーズ
日本経済を考える

82

1. 序説

代表的な仮想通貨^{*2}であるビットコインの運用が開
 始されたのが2009年であることに鑑みると、仮想通
 貨はまだその黎明から10年程度しか経っていない比
 較的新しい技術である。しかし、(1) 2018年20か国
 財務大臣・中央銀行総裁会議声明において仮想通貨に
 言及した声明が発表されたこと、(2) 国内外の銀行
 において銀行発行コイン^{*3}の開発が進められているこ
 と、(3) 仮想通貨の要素技術であるブロック・チェー
 ンをフィンテックやその他分野に応用する取組みが盛
 んになってきていること^{*4}など、既に様々な方面から
 注目を浴びていることもあり、マスメディアでも盛ん
 に報道されていることから、今日では一部技術者だけ
 でなく多くの人にその存在を知られるようになってき
 ている。巷間の注目と軌を一にして、仮想通貨につい
 ての研究も、ビットコインを提唱したサトシ・ナカモ
 トの論文(Nakamoto, 2008)を嚆矢に、情報工学や

決済システムを始めとする種々の分野で進められてき
 ている。しかしながら、仮想通貨市場に関する経済学
 の研究の大宗は、仮想通貨の取引が活発化してから行
 われるようになったものと考えられ、ようやく一昨年
 辺りになってから相次いで発表されるようになってき
 ていることから、そのような研究は一部専門家以外に
 は、まだ十分には知られていない。仮想通貨全般に関
 するサーベイとしては既にBöhme et al. (2015) や
 石田 (2018) などが知られているが、本稿は、足下
 で進みつつある仮想通貨市場に関する研究を、特に仮
 想通貨市場の効率性に照準を合わせることにより紹介
 し、もって時価総額が2千億ドルにも上る^{*5}ともいわ
 れる仮想通貨の市場について、経済学の観点から、よ
 り一層理解を深めることを目的としたい。

経済学およびファイナンスにかかる学術研究におい
 て、市場が効率的であるとする効率的市場仮説につ
 いてはこれまで膨大な検証がなされてきた。シカゴ大
 学のユージン・ファーマ教授は古典的なサーベイ論文

^{*1} 本稿は専ら研究目的で書かれたものである。本稿の意見に係る部分は著者らの個人的見解であり、著者らの所属する組織の見解を表すものではない。ありうべき誤りは全て筆者らに帰する。また本稿は、本稿で紹介する論文の正確性について何ら保証するものではない。本稿につき、コメントをくださった多くの方々に感謝申し上げます。

^{*2} 本稿では、資金決済法における表現に基づき、一貫して「仮想通貨」の表記を用いることとする。もっとも、G20においては、法定通貨であるとの誤解を避けるため、暗号及び分散型台帳等で構成される民間金融資産全体を指し「暗号資産」の用語が用いられるよう整理されたことに留意(三好ほか, 2018)。また、我が国においても、仮想通貨について、(1)「法定通貨ではなく、国家の裏付けはありません」、(2)「価値の変動があります」と整理されていることに留意(政府広報オンライン, 2018/5/18, 「仮想通貨」を利用する前に知ってほしいこと。平成29年4月から、「仮想通貨交換業(仮想通貨交換サービス)」に関する新しい制度が開始されました)。
 なお、直近のG20声明文における該当部分は以下の通り。
 「暗号資産の基礎となるものを含む技術革新は、金融システム及びより広く経済に重要な便益をもたらし得る。しかしながら、暗号資産は消費者及び投資家保護、市場の健全性、脱税、マネーロンダリング、並びにテロ資金供与に関する問題を提起する。暗号資産は、ソブリン通貨の主要な特性を欠いている。暗号資産は、現時点でグローバル金融システムの安定にリスクをもたらしていないが、我々は、引き続き警戒を続ける。我々は、FSB及び基準設定主体からのアップデートを歓迎するとともに、暗号資産の潜在的なリスクを監視し、必要に応じ多国間での対応について評価するための更なる作業を期待する。我々は、FATF基準の実施に関する我々の3月のコミットメントを再確認し、2018年10月に、この基準がどのように暗号資産に適用されるか明確にすることをFATFに求める。」

^{*3} MUFGコイン(三菱UFJ銀行)、J-Coin(みずほ銀行等)、Utility Settlement Coin(UBS等)などが知られている。

^{*4} 証券取引所においてブロック・チェーンの応用が実証実験されたことや、ホンジュラスにおいて土地登記にブロック・チェーンを使う計画があることなどが知られている。最近では世界銀行がブロック・チェーンを用いた債券発行を試みていることが報道されている(Reuters, 2018/8/10, "World Bank taps Australia's CBA for blockchain bond," written by Sonali Paul and edited by Shri Navaratnam).

^{*5} <https://coinmarketcap.com/>に基づく(2018/8/31)。

(Fama, 1970) の中で、「価格が入手可能な情報を『完全に反映している』ような市場を『効率的』である」と定義したが*6、今日の経済学者は市場が完全に効率的であるとは考えていない*7。Grossman & Stiglitz (1980) によって理論的に市場効率性について疑義が呈されて以降（いわゆるグロスマン・スティグリッツのパラドックス*8）、イェール大学のロバート・シラー教授などにより実証的にも様々な形で効率的市場仮説は批判にさらされてきた。いうまでもなく、これまでの研究手法は仮想通貨市場においても適用することが可能であるがゆえ、ここ数年で矢継ぎ早に仮想通貨市場における市場効率性について実証研究がすすめられてきた。

筆者らは、学術研究の知見は政策当局者を始めとする多くの実務家にとって有益であろうと考えている。金融規制などの政策議論を進めるうえで学術研究の成果を無視することはできないほか、特にファイナンスの分野では学術研究が直接ビジネスに直結することも少なくないからである。例えばGriffin & Shams (2018b)*9はブロック・チェーンの膨大なデータを解析した上で2017年のビットコイン市場における価格操縦の可能性を指摘しているが、本研究は仮想通貨業界を始め、アカデミックの世界以外にも注目されることとなった*10。本稿では必ずしも学術研究のトレンドをとらえることが容易ではないことに鑑み、その内容を簡易に提供することを企図している。

本稿の概要は下記の通りである。2節で簡単に仮想通貨について概観し、3節では仮想通貨の効率性にかかる既存研究の紹介を行う。4節では筆者らの研究を紹介する。5節は結語である。

2. 仮想通貨の概要

既存研究の紹介の前に、仮想通貨の概要を掻い摘んで説明する。

仮想通貨は、例えば日本銀行のウェブサイト*11によれば、以下のように定義されている。

「仮想通貨」とは、インターネット上でやりとりできる財産的価値であり、「資金決済に関する法律」において、次の性質をもつものと定義されています。

- (1) 不特定の者に対して、代金の支払い等に使用でき、かつ、法定通貨（日本円や米国ドル等）と相互に交換できる
- (2) 電子的に記録され、移転できる
- (3) 法定通貨または法定通貨建ての資産（プリペイドカード等）ではない

代表的な仮想通貨には、ビットコインやイーサリウム*などがあります。

*本稿内では「イーサリアム」との表現で統一している。

仮想通貨は、SuicaやEdyに代表される*12前払式の「電子マネー」と同列に議論されることもある。しかしながら、SuicaやEdyを始めとする「電子マネー」については、一般的に利用記録を発行主体等が管理するサーバが集中的に記録する仕組みを採用しているのに対して、ビットコインを始めとする多くの仮想通貨については、そのような中央管理機関は存在していない。例えばビットコインに関して述べれば、ブロック・チェーンという仕組みに基づく分散型台帳システムを設けており、セキュリティ機能はマイナーと呼ばれる者が提供するコンピュータの計算能力に依存するというProof-of-Workシステムを採用することにより、

*6) Campbell et al. (1996) を参照。

*7) Ang (2014) や祝迫 (2014) など参照。

*8) グロスマン・スティグリッツのパラドックスとは「すべての市場参加者の私的情報が資産価格に反映されてしまうとすると、市場参加者は私的情報に基づいて収益をあげることができないので、そもそも取引を行わないことになってしまいます。しかし、そうすると私的情報は資産価格に反映されないで、市場は効率的ではなくなってしまう」（祝迫2014, p.3）というパラドックスである。Grossman & Stiglitz (1980) と市場流動性の関係については服部 (2018) を参照のこと。

*9) 同論文の著者らは、米国株価のボラティリティ（変動性）に係る指数であり、投資家の不安心理を象徴する指標としても知られるVIX（通称、恐怖指数）についても、不正に操作されている可能性を指摘したことで知られている（Griffin & Shams, 2018a）。

*10) このような学術研究は、アカデミックや仮想通貨の業界を越えて報道されている（例：Bloomberg, 2018/6/13, "Tether Used to Manipulate Price of Bitcoin During 2017 Peak: New Study," written by Matt Robinson and Matthew Leising; Bloomberg, 2018/6/15, "Cryptocurrency Manipulation Study Is Underwhelming," written by Aaron Brown）。

*11) <https://www.boj.or.jp/announcements/education/oshiete/money/c27.htm/>

*12) http://www.meti.go.jp/policy/it_policy/report/report_01/04/4_1_1.pdfにおいて「電子マネーの利用経験者が利用した電子マネー（複数回答）のうち上位2つを引用。

中央管理機関が存在しなくても決済が行われるような仕組みを築き上げている^{*13}。もっとも、必ずしもどの仮想通貨もこれと同一の仕組みを採用しているわけではなく、仮想通貨によって採用する仕様は異なっており、例え第三者を介さずに契約をスムーズに執行することで注目されているスマートコントラクトの文脈ではイーサリアムなどの仮想通貨が、国際送金の文脈ではリップルなどの仮想通貨が挙げられることがある（小野、2017）。

冒頭で述べたように、仮想通貨自体はまだ黎明から10年程度しか経っていない技術ではあるが、既に2千種類程度の仮想通貨が存在するとの報告^{*14}もあり、近年の価格変動^{*15}などとも相俟って、様々な方面から関心を持たれるようになってきている^{*16}。

3. 既存研究の概要

本節では仮想通貨市場の効率性や、仮想通貨市場における裁定機会の有無に関する既存研究を、種々の観点から紹介する。既存研究では非効率性を指摘する報告がある一方、効率性が増しつつあると主張する研究も少なくない。また、仮想通貨市場について裁定機会の存在を指摘する研究もあるが、最近ではその要因を、資本規制や国境などの制度面等で説明する研究が出てきている。

3.1. 仮想通貨市場の効率性に関する既存研究について

ビットコイン市場の効率性について最初に^{*17}研究した論文はUrquhart（2016）である。同研究は、ビットコイン市場がウィーク型という意味で効率的で

あるかどうかを検証している。この手法はRoberts（1967）によって提唱された情報集合に着目した市場効率性の分類方法であり、ウィーク型の効率性とは過去の情報を用いて将来のリターンを予測できない状況を指す^{*18}。直感的に言えば、市場が効率的であれば過去の情報に基づいて将来を予測できるような状況は投資家の裁定行動によって解消しているので（もし過去で将来のリターンを予測できるのであれば投資家はその情報を十分に利用するはず）、ウィーク型の効率性を検証するためには、過去のデータを用いて将来のリターンを予測可能であるか検証すればよいことになる。Urquhart（2016）は2010年から2016年のデータを用い、6つの統計手法を用いたうえで、ビットコイン市場は非効率であるとしながらも、市場が成熟するにつれて効率性が増しているとしている^{*19}。

その後、Urquhart（2016）を補完し、市場の効率性をサポートする研究が次々と発表される。Nadarajah & Chu（2017）はUrquhart（2016）を補完するため、8つの異なるテストを用いて、Urquhart（2016）と同じ仮説を検証しており、ビットコイン市場は効率的と指摘している。Bariviera（2017）およびTiwari et al.（2018）も、異なる手法を用いることで効率性をサポートする一方、Sensoy（2018）は高頻度データを用いて、ビットコイン市場の効率性が上昇していることを示している。Vidal-Tomas & Ibanez（2018）は金融政策及びビットコインのニュースを用いて、セミストロング型の効率性を検証しており、ビットコインのニュースに対しては効率的であるものの、金融政策のニュースについては影響を受けていないことを報告している。Brauneis & Mestel（2018）は主要73仮想通貨について分析し、流動性^{*20}の高い仮想通貨の効率性は高く、特にビットコイン市場の効率性は高

*13 このように、取引を集中管理する中央管理機関を設けない仕組みを築き上げた思想的背景に、プライバシーを重視し、暗号技術による社会変容を目指すサイファーバンク思想が反映されているとの指摘も存在する（林ほか、2017）。

*14 <https://coinmarketcap.com/>に基づく（2018/8/31）。

*15 仮想通貨の時価総額は、2018/8/31時点では2千億ドル程度と報告されているが、2018年初には一時8千億ドルを超えたとの報告もある（<https://coinmarketcap.com/>に基づく）。

*16 岩井克人教授は貨幣論の観点から仮想通貨を論じている（日経ビジネス、2017）。また、Proof-of-Workシステムに伴う電力消費についてはVries（2018）が論じている。

*17 Tiwari et al.（2018）やWei（2018）は、Urquhart（2016）が最初にこのような分析を行った論文であると指摘している。

*18 ウィーク型以外に、セミストロング型、ストロング型という分類がある。セミストロング型の効率性とは、市場価格にすべての市場参加者に知られている情報が反映されているという考え方であり、ストロング型とは私的情報も含めて市場価格に反映されるという考え方。もっとも、ファイナンスの研究において近年はこの分類を用いることは相対的に減ってきている。これらについてはCampbell et al.（1997）、Ang（2014）などを参照のこと。

*19 同論文では過去の情報でビットコインのリターンが予測できる可能性を示しつつも、データの後半部分を用いるとビットコインのリターンはランダムに近い状況になっていることを指摘している。

*20 流動性は4つの指標により測られている（取引額対数値、turnover ratio（取引額対時価総額比）、Amihudの指標、Corwin and Schultz（2012）により提案されたbid-askの推計値）。流動性指標の詳細は服部（2018）を参照。

いことを示している。Wei (2018) は456種類の仮想通貨を用いて流動性と効率性の関係を分析しており、ビットコインを始めとする流動性の高い仮想通貨は効率性が高い一方、流動性の低い仮想通貨については効率性が低いことを示している。

一方、最近の研究でもビットコイン市場の効率性についてネガティブな意見もある。例えばYonghong et al. (2018) はハースト指数^{*21}を用いて、市場の効率性は時間を経ても向上していないことを報告している。Cheah et al. (2018) は異なるモデルを用いてビットコイン市場の非効率性を指摘している^{*22}。Al-Yahyaee et al. (2018) はビットコイン市場を株式・金・通貨などその他の資産と比較しており、ビットコイン市場はその中で最も効率性が低いとしている。

また、効率的市場仮説では説明のつかない価格の変動性（いわゆるアノマリー）も複数観測されている。たとえば、Liu & Tsyvinski (2018) は3種類の仮想通貨（ビットコイン、イーサリアム、リップル）の価格変動を分析した結果、モメンタム効果を確認した。モメンタム効果とは勝者が勝ち続ける一方、敗者は負け続けるという現象であり、金融市場ではしばしば観察されるアノマリーである^{*23}。Kurihara & Fukushima (2017) は2010/7/17～2016/12/29のビットコイン価格について、曜日効果^{*24}が存在していることを報告している。もっとも、このような曜日効果は分析期間の前半では見られるものの、後半ではほぼ見られなくなっている。

3.2. 仮想通貨市場における裁定機会に関する既存研究について

市場の効率性を検証するため、裁定機会の存在に注目する既存研究も存在する。裁定機会とは、異なる複数の場所での価格差を利用して、リスクなしに利鞘を獲得できる事象のことである。特に三角裁定機会とは、AをBに交換し、BをCに交換し、更にCをAに

交換すると、リスクなしに収益を獲得できるといった事象を指す。まず、Reynolds et al. (2018) は、2013/5/1～2015/12/31のアメリカ東部標準時間11:59～12:01における為替レート及びビットコイン価格を用いたところ、法定通貨間では三角裁定機会が存在しないものの、法定通貨とビットコインの間では三角裁定機会が存在していると報告している^{*25}。また、Makarov & Schoar (2018) は2017/1/1～2018/2/28の種々の仮想通貨取引所におけるビットコインの価格を見ることにより、特に国を跨ぐような取引所間では大きな裁定機会が存在していることを報告している^{*26}。

なお、2016年から2018年にかけて、韓国の仮想通貨取引所におけるビットコイン価格が米国などのビットコイン価格を有意に上回る現象（いわゆるキムチ・プレミアム）が指摘されていた。同じビットコインにもかかわらず取引所で異なるプライスがついていることから一見裁定機会が存在するように見えるものの、Choi et al. (2018) は、キムチ・プレミアムが韓国の資本規制に起因しており、実際には裁定機会が存在しなかった可能性を指摘している^{*27}。Hattori & Ishida (2018) は先物と現物の間の裁定機会の存在に着目した研究であるが、本研究の内容は4節で紹介する。

3.3. 仮想通貨市場におけるバブルにかかる既存研究について

仮想通貨について市場効率性を検証する別の方法はいわゆるバブルの有無を検証する方法である。経済学におけるバブルとは、ファンダメンタルズから価格が乖離する現象として定義されるが、まず仮想通貨価格のファンダメンタルズに注目した研究を紹介する。Ciaian et al. (2015) およびBouoiyour & Selmi (2015) は取引所などの取引がビットコインを保有することの効用を拡大させるとしている。Cheah &

*21) ハースト指数とは、一定期間における価格のレンジ（変動幅）を正規化した（価格の標準偏差で割った）ときに、それが期間の長さの何乗に比例するかを表現した指数。もし、価格の変動がランダム・ウォークであれば、正規化された価格のレンジ（変動幅）の期待値は期間の長さの0.5乗に比例するはずであるが、ハースト指数が0.5を有意に上回る場合は、価格変動にモメンタムがあるものと考えられ、市場の効率性を否定する傍証となる。

*22) 同研究は市場間（cross-market）の価格に焦点を当てており、ビットコイン価格が長期記憶性（Long Memory）を有することを示している。

*23) モメンタムは資産価格を決める上での標準的なファクターとして認識されることが多い。Ang (2014) などを参照。

*24) 同論文によると、日次リターンが週の半ばとそれ以外の日とは有意に異なることが示されている。

*25) 当論文は、2種類の法定通貨とビットコインの計3つの間で、三角裁定機会が存在していると報告している。

*26) 取引所間での裁定機会がなぜ存在するのかについて検討を加えた報道も存在する（Business Insider UK, 2017/11/28, "The 'immature' global bitcoin market is ripe for arbitrage," written by Oscar Williams-Grut）。

*27) 報道でも同様の指摘がされている（Bloomberg, 2018/1/9, "Bitcoin's 43% Arbitrage Trade Is a Lot Tougher Than It Looks," written by Julie Verhage, Whanwoong Choi, and Kyungji Cho）。

Fry (2015) は商品や制度的な裏付けがないビットコインのファンダメンタルズがゼロと有意差が無い可能性を指摘している。Schilling & Uhlig (2018) は仮想通貨の価格の値動きがランダム・ウォークから外れる理由を理論的に示している。Aoyagi & Adachi (2018) はスマートコントラクトを用いれば仮想通貨による取引で低品質の商品を買うことになるリスクを低減できる可能性があることを踏まえて仮想通貨のファンダメンタルズを理論的に導出している。

仮想通貨の価格変動がいわゆるバブルなどに該当するかどうかを検証している論文として、石田 (2018) は上述Cheah & Fry (2015) の他に、Cheung et al. (2015) やFry & Cheah (2016) といった論文を紹介している。足下でも、ビットコインの価格をファンダメンタルズで説明できる部分と説明できない部分に要因分解した上で、後者の発生要因や減失要因などを分析したSu et al. (2018) や、ビットコインの価格をマイナーによるビットコインの生成コストなどを用いて説明したHayes (2018)、ビットコインに加えイーサリアムも分析に加えたCorbet et al. (2018) などの研究が発表されており、価格変動の要因について分析が進められている。

3.4. そのほかの研究の紹介

Liu & Tsyvinski (2018) では、投資家の関心、仮想通貨に関するGoogle (インターネットでの検索サイト) での検索頻度やTwitter (インターネット上でのサービス) での発言頻度などを用いて数値化したうえで、価格変動の間に有意な関係が見られたと報告している。Urquhart (2018) は、googleトレンド (特定のキーワードについて、Googleにおける検索頻度を、時系列的にグラフ化するサービス) を用いることで投資家のビットコインへの関心を定量化したうえで、価格変動の大きさや取引量の大きさは次の日の投資家の関心の大きさに大きな影響を与えるものの、投資家の関心の大きさは次の日の価格変動の大きさや取引量の大きさなどに影響を与えていないことを報告し

ている。

また、仮想通貨を異なるアセットクラスやヘッジツールとしてみる研究も出てきている。たとえば、Corbet et al. (2018) は3つの仮想通貨 (ビットコイン、リップル、ライトコイン) とその他の金融市場の関連性を比較して、仮想通貨市場が比較的隔離された市場であることを示している。Bouri et al. (2017) はビットコインがグローバルの不確実性^{*28} に対するヘッジ効果を持つ可能性を指摘している。Liu (2018) は仮想通貨の間のポートフォリオの分散効果について分析を行っている。

4. 筆者らの研究の紹介 (Hattori & Ishida, 2018)

筆者らの研究は先物市場との関係でビットコイン市場の効率性を検証したものである。先物取引 (futures contract) とは特定の商品を対象として、事前に定められた受渡日に、取引現時点で決めた価格で取引することを約束する金融契約である。将来の取引を事前に確定させるという観点では、先物取引と先渡取引 (forward contract) は、前者が取引所を通じた取引所取引、後者は相対取引であるなど一定の違いがあるものの、本質的に同一の金融取引であるがゆえ、両者の間で裁定取引が行われることにより、似た価格がつくはずである^{*29}。この取引はキャッシュ・アンド・キャリー (cash and carry) などと呼ばれ、為替・商品・債券市場など幅広く検証がなされている。

Hattori & Ishida (2018) は2017年末にシカゴ・オプション取引所 (CBOE)^{*30} がビットコイン先物商品を導入したことに着目し、伝統的な学術手法に則り、ビットコインの先物と現物の間に裁定関係があることを分析している。特に、ビットコイン市場の場合、現物そのものの非効率性が指摘されていることから、先物市場との間にも非効率性が存在する可能性が否定できない。しかし、筆者らの結果は当該先物が導入されて一定期間が経過して以降、現物と先物の間で

*28) 14カ国のVIXのデータを用い、主成分分析より共通ファクターを取り出すことで算出。

*29) 理論的には無リスク金利が非確率的である場合、両者は一致するが、無リスク金利が確率的である場合、両者の間に乖離が生じる。詳細はHull (2014) などを参照のこと。また、特に債券の世界では現物と先物の差をグロス・ベース、先渡と先物の差をネット・ベースと呼ぶ。

*30) 同時期にシカゴ・マーカンタイル取引所 (CME) もビットコイン先物商品を導入したものの、Hattori & Ishida (2018) では売買量の大きさ等の観点でCBOEのみを分析対象としている。

は十分な裁定取引がなされていることを確認した。

筆者らが注目した点は代表的なビットコイン先物が Gemini で取引されるビットコイン価格を以って決済される点である。Gemini とは仮想通貨の取引所の一つであり、Gemini では1日に1回、ニューヨーク時間の16時にオークションを通じてビットコインのプライシングがなされる。そこで、筆者らはイントラデータを用いて、Gemini の入札がある16時の先物価格を取得したうえで、Gemini で取引される価格から標準的なモデルを用いて先渡価格を計算し、先物価格との間に有意な価格差が無いことを検証している^{*31}。図は先物価格と先渡価格を比較したグラフであり、両価格に有意差が無いことが視覚的にも納得できる。

なお、Baur & Dimpfl (2018) も筆者らと同様、日中データ (5分刻みの先物 (CBOE 及び CME) 及び現物価格^{*32}) を用いた分析を行っている。同論文は現物価格が先物価格に先行することを示しており、価格発見機能は先物ではなく現物が担っていると報告している^{*33}。また、ビットコイン市場における日中の動き

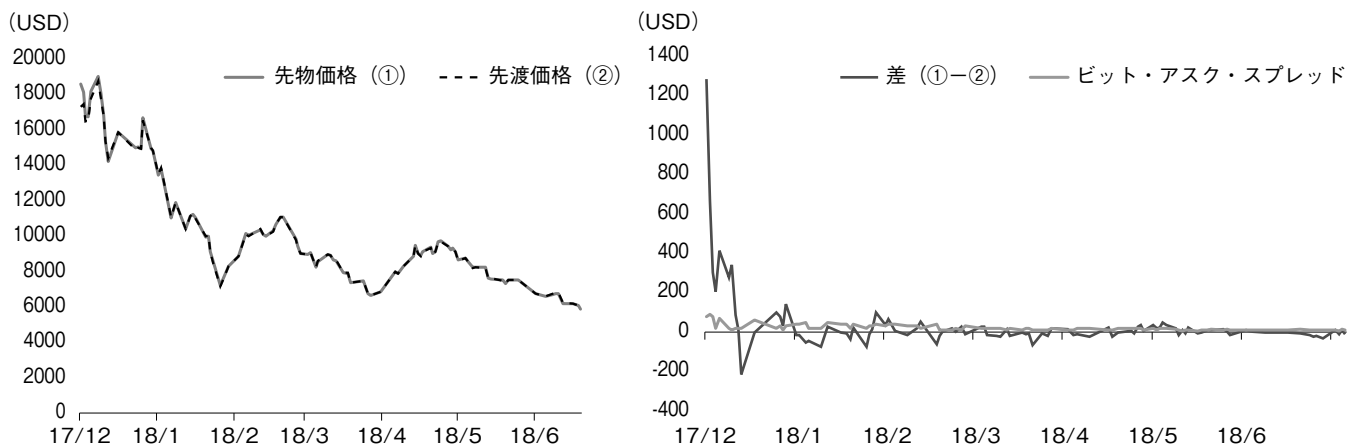
(intraday patterns) にかかる分析も進んでおり、例えば Dyhrberg et al. (2018) はビットコインの日中取引が米国の取引時間と関連性があることを見出しており、個人投資家の取引行動の影響を指摘している。

5. 結語

このように一昨年辺りから仮想通貨市場についての経済学的な分析が相次いで行われるようになってきている。しかしながら、224もの仮想通貨について時系列的な性質を調べた Phillip et al. (2018) および本稿で紹介した Brauneis & Mestel (2018) や Wei (2018) などの例外はあるものの、依然として、仮想通貨の時価総額の半分程度^{*34}を占めるビットコインに関する研究が既存研究の大半を占めており、その他の仮想通貨についての研究は数えるほどであることも事実である。

足下では、仮想通貨の一般均衡モデルを構築し、現在のビットコイン等で用いられている仕組みの非効率性を指摘した上で、効率化を図るための仕組みを理論的に提示した Chiu & Koeppl (2017)^{*35}、マイナー等

図 ビットコインの先物価格と先渡価格



*31) ビットコイン先物は現金決済であり、国債先物などのように現物決済でないため、キャッシュ・アンド・キャリーを考えるうえでクオリティ・オプションの存在を考える必要がない (ビットコイン先物においていわゆる最割安銘柄 (チーベスト) は存在しない)。

*32) Bloomberg から取得。

*33) 同論文は、金融市場では一般的に先物が価格発見機能を担っていることから、この点が金融市場と仮想通貨市場の違いの1つであると述べている。

*34) <https://coinmarketcap.com/> に基づく (2018/8/31)。

*35) ビットコインを始めとする多くの仮想通貨は、二重支払い防止などのセキュリティ機能を、マイナーと呼ばれる者が提供するコンピュータの計算能力 (通称、マイニング行為) に依存しており、その代わりに、マイニング行為を行った者 (コンピュータの計算能力を提供した者) に対する報酬として一定の法則に従って新規に生み出されたビットコインを付与することにより、マイナーに対してマイニング行為を行うインセンティブを与えている (Proof-of-Work システム)。当論文は、Proof-of-Work システムを前提に、マイナーがマイニング行為を行う際のインセンティブ構造 (Incentive compatibility) と二重支払いが行われない条件 (Double spending proof) を定式化した上で、一般均衡モデルを構築し、その上で現実のビットコインがどのくらい効率的であり、更に効率性を上げるためにはどのような仕様変更をしたら良いのかを、理論に基づいて提示している。また、当論文では、マイナーに対する報酬を保有しているコインの量などでウェイト付けするシステム (Proof-of-Stake システム。Proof-of-Work システムの代替システムとして知られている。) についても定式化を行っている。Proof-of-Stake システムの経済学的なメカニズムについては Saleh (2018) も分析している。

のインセンティブを理論的に記述することにより Proof-of-Workシステムに基づく仮想通貨の理論的境界を示したBudish (2018)、ブロック・チェーンのトリレンマ^{*36}を指摘したAbadi & Brunnermeier (2018) など一線の研究者が仮想通貨の研究に着手を始めている。

本稿で紹介したとおり、仮想通貨にかかる研究は統一した見解が得られているとはいえ、研究の蓄積が期待される。仮想通貨市場の効率性についても懐疑的な学術研究も少なからず存在し、たとえば、価格のファンダメンタルズからの乖離の可能性を示唆する研究があるほか、裁定が働いているかどうかについて疑義を呈する研究も少なくない。更に、仮想通貨市場における価格操縦等の可能性を指摘する実証研究があるなど、同市場の効率性については他の市場以上に多面的な評価が必要であろう (Gandal et al., 2018; Griffin & Shams, 2018b)^{*37}。我が国の現状をみると、仮想通貨について全国の消費生活センター等に寄せられる相談件数が急増しているとの報告もある (国民生活センター相談情報部, 2018)^{*38}。仮想通貨そのものの価格決定要因については未だ解明されていない部分が多いなど、今後も仮想通貨市場についてより一層の理解を深める必要がある。

参考文献

- [1]. Abadi, Joseph & Markus K. Brunnermeier (2018) "Blockchain Economics," mimeo.
- [2]. Al-Yahyaee, Khamis Hamed, Walid Mensi, Seong-Min Yoon (2018) "Efficiency, multifractality, and the long-memory property of the bitcoin market : a comparative analysis with stock, currency, and gold markets," *Finance Research Letters* in press.
- [3]. Ang, Andrews (2014) "Asset Management : A Systematic Approach to Factor Investing (Financial Management Association Survey and Synthesis)" Oxford University Press.
- [4]. Aoyagi, Jun & Daisuke Adachi (2018) "Fundamental Values of Cryptocurrencies and Blockchain Technology," SSRN Working Paper https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3132235
- [5]. Bariviera, Aurelio F. (2017) "The inefficiency of Bitcoin revisited : a dynamic approach," *Economics Letters* 161, 1-4.
- [6]. Baur, Dirk G. & Thomas Dimpfl (2018) "Price Discovery in Bitcoin Spot or Futures?" SSRN Working Paper <https://ssrn.com/abstract=3171464>
- [7]. Böhme, Rainer, Nicolas Christin, Benjamin Edelman & Tyler Moore (2015) "Bitcoin : Economics, Technology, and Governance," *Journal of Economic Perspectives* 29 (2) , 213-238.
- [8]. Bouoiyour, Jamal & Refk Selmi (2015) "What Does Bitcoin Look Like?" *Annals of Economics and Finance* 16 (2) , 449-492.
- [9]. Bouri, Elie, Rangan Gupta, Aviral Kumar Tiwari & David Roubaud (2017) "Does Bitcoin hedge global uncertainty? Evidence from wavelet-based quantile-in-quantile regressions," *Finance Research Letters* 23, 87-95.
- [10]. Brauneis, Alexander & Roland Mestel (2018) "Price discovery of cryptocurrencies : Bitcoin and beyond," *Economics Letters* 165, 58-61.
- [11]. Budish, Eric (2018) "The Economic Limits of Bitcoin and the Blockchain," NBER Working Paper No. 24717.
- [12]. Campbell, John Y., Andrew W. Lo, & A. Craig MacKinlay (1996) "The Econometrics of Financial Markets," Princeton University Press.
- [13]. Cheah, Eng-Tuck & John Fry (2015) "Speculative bubbles in Bitcoin markets? An empirical investigation into the fundamental value of Bitcoin," *Economics Letters* 130, 32-36.
- [14]. Cheah, Eng-Tuck, Tapas Mishra, Mamata Parhi & Zhuang Zhang (2018) "Long Memory Interdependency and Inefficiency in Bitcoin Markets," *Economics Letters* 167, 18-25.
- [15]. Cheung, Adrian (Wai-Kong) , Eduardo Roca & Jen-Je Su (2015) "Crypto-currency bubbles : an application of the Phillips-Shi-Yu (2013) methodology on Mt. Gox bitcoin prices," *Applied Economics* 47 (23) , 2348-2358.
- [16]. Chiu, Jonathan & Thorsten V. Koepl (2017) "The Economics of Cryptocurrencies – Bitcoin and Beyond," SSRN Working Paper https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3048124
- [17]. Choi, Kyoung Jin, Alfred Lehar & Ryan Stauffer (2018) "Bitcoin Microstructure and the Kimchi premium," SSRN Working Paper https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3189051
- [18]. Ciaian, Pavel, Miroslava Rajcaniova & d'Artis Kancs (2016) "The economics of Bitcoin price formation," *Applied Economics* 48 (19) , 1799-1815.
- [19]. Corbet, Shaen, Brian Lucey & Larisa Yarovaya (2018) "Datestamping the Bitcoin and Ethereum bubbles," *Finance Research Letters* 26, 81-88.
- [20]. Corbet, Shaen, Andrew Meegan, Charles Larkin, Brian Lucey & Larisa Yarovaya (2018) "Exploring the dynamic relationships between cryptocurrencies and other financial assets," *Economics Letters* 165, 28-34.
- [21]. Corwin, Shane & Paul Schultz (2012) "A Simple Way to Estimate Bid-Ask Spreads from Daily High and Low Prices," *Journal of Finance* 67 (2) , 719-760.
- [22]. Dyhrberg, Anne, Sean Foley & Jiri Svec (2018) "How investible is Bitcoin? Analyzing the liquidity and transaction costs of Bitcoin markets," *Economics Letters* 171, 140-143.
- [23]. Fama, Eugene F. (1970) "Efficient Capital Markets : A Review of Theory and Empirical Work," *Journal of Finance* 25 (2) , 383-417.

*36) ブロック・チェーンは「分散型」「正確性」「コストの効率性」の3つの性質を全て満たすことはできず、仕様上、少なくとも1つの性質は満たされな

いこと。

*37) Gandal et al. (2018) は2013年のビットコイン市場、Griffin & Shams (2018b) は2017年のビットコイン市場について、価格操縦の可能性を示唆している。

*38) 相談件数は2014年度には186件だったところ、2015年度には440件、2016年度には847件、2017年度には2,890件と増加したと報告されている。

- [24]. Fry, John & Eng-Tuck Cheah (2016) "Negative bubbles and shocks in cryptocurrency markets," *International Review of Financial Analysis* 47, 343-352.
- [25]. Gandal, Neil, JT Hamrick, Tyler Moore & Tali Oberman (2018) "Price Manipulation in the Bitcoin Ecosystem," *Journal of Monetary Economics* 95, 86-96.
- [26]. Griffin, John M. & Amin Shams (2018a) "Manipulation in the VIX?" *Review of Financial Studies* 31 (4), 1377-1417.
- [27]. Griffin, John M. & Amin Shams (2018b) "Is Bitcoin Really Un-Tethered?" SSRN Working Paper https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3195066
- [28]. Grossman, Sanford J. & Joseph E. Stiglitz (1980) "On the Impossibility of Informationally Efficient Markets," *American Economic Review* 70 (3), 393-408.
- [29]. Hattori, Takahiro & Ryo Ishida (2018) "Do Investors Arbitrage in the Cryptocurrency Market? Evidence from the Bitcoin Futures Market," SSRN Working Paper https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3209625
- [30]. Hayes, Adams S. (2018) "Bitcoin price and its marginal cost of production : support for a fundamental value," *Applied Economics Letters* in press.
- [31]. Hull, John (2014) "Options, Futures, and Other Derivatives (9th Edition)" Pearson.
- [32]. Kurihara, Yutaka & Akio Fukushima (2017) "The Market Efficiency of Bitcoin : A Weekly Anomaly Perspective," *Journal of Applied Finance & Banking* 7 (3), 57-64.
- [33]. Liu, Weiyi (2018) "Portfolio diversification across cryptocurrencies," *Finance Research Letters*, in press.
- [34]. Liu, Yukun & Aleh Tsyvinski (2018) "Risks and Returns of Cryptocurrency," NBER Working Paper 24877.
- [35]. Makarov, Igor & Antoinette Schoar (2018) "Trading and Arbitrage in Cryptocurrency Markets," SSRN Working Paper <https://ssrn.com/abstract=3171204>
- [36]. Nadarajah, Saralees & Jeffrey Chu (2017) "On the inefficiency of Bitcoin," *Economics Letters* 150, 6-9.
- [37]. Nakamoto, Satoshi (2008) "Bitcoin : A Peer-to-Peer Electronic Cash System."
- [38]. Phillip, Andrew, Jennifer S.K. Chan & Shelton Peiris (2018) "A new look at Cryptocurrencies," *Economics Letters* 163, 6-9.
- [39]. Reynolds, Julia, Leopold Sögner, Martin Wagner & Dominik Wied (2018) "Deviations from Triangular Arbitrage Parity in Foreign Exchange and Bitcoin Markets," SSRN Working Paper <https://ssrn.com/abstract=3148094>
- [40]. Roberts, Harry (1967) "Statistical versus Clinical Prediction of the Stock Market," unpublished manuscript.
- [41]. Saleh, Fahad (2018) "Blockchain Without Waste : Proof-of-Stake," SSRN Working Paper https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3183935
- [42]. Schilling, Linda & Harald Uhlig (2018) "Some simple Bitcoin Economics," Becker Friedman Institute Working Paper 2018-21.
- [43]. Sensoy, Ahmet (2018) "The inefficiency of Bitcoin revisited : A high-frequency analysis with alternative currencies," *Finance Research Letters*, in press.
- [44]. Su, Chi-Wei, Zheng-Zheng Li, Ran Tao & Deng-Kui Si (2018) "Testing for multiple bubbles in bitcoin markets : A generalized sup ADF test," *Japan and the World Economy* 46, 56-63.
- [45]. Tiwari, Aviral Kumar, R.K. Jana, Debojyoti Das & David Roubaud (2018) "Informational efficiency of Bitcoin-An extension," *Economics Letters* 163, 106-109.
- [46]. Urquhart, Andrew (2016) "The inefficiency of Bitcoin," *Economics Letters* 148, 80-82.
- [47]. Urquhart, Andrew (2018) "What causes the attention of Bitcoin?" *Economics Letters* 166, 40-44.
- [48]. Vidal-Tomás, David & Ana Ibañez (2018) "Semi-strong efficiency of Bitcoin," *Finance Research Letters* in press.
- [49]. Vries, Alex de (2018) "Bitcoin's Growing Energy Problem," *Joule* 2 (5), 801-805.
- [50]. Wei, Wang Chun (2018) "Liquidity and market efficiency in cryptocurrencies," *Economics Letters* 168, 21-24.
- [51]. Yonghong, Jiang, He Nie & Weiuhua Ruan (2018) "Time-varying long-term memory in bitcoin market," *Finance Research Letters* 25, 280-284.
- [52]. 石田良 (2018) 「仮想通貨に関する既存研究の整理」ファイナンス4月号, 46-49.
- [53]. 祝迫得夫 (2014) 「ノーベル経済学賞2013年解題ーファーマ、ハンセン、シラー教授の資産価格の実証分析への貢献ー」 Discussion Paper Series A No.599.
- [54]. 小野伸一 (2017) 「通貨の将来と仮想通貨の意義ーデジタル化とブロックチェーンがもたらすものー」経済のプリズム No161, 1-41.
- [55]. 国民生活センター相談情報部 (2018) 「仮想通貨に関する消費者トラブル」国民生活7月号, 9-11.
- [56]. 日経ビジネス (2017) 「仮想通貨は「究極の貨幣」「貨幣論」の岩井克人・国際基督教大学特別招聘教授に聞く」.
- [57]. 服部孝洋 (2018) 「市場流動性の測定ー日本国債市場を中心に」ファイナンス2月号, 67-76.
- [58]. 林達也、島岡政基、砂原秀樹 (2017) 「Web PKI とBitcoin を事例にした基盤技術の普及と信頼の社会受容に関する考察」 Computer Security Symposium、情報処理学会
- [59]. 三好敏之、瀧村晴人、松浦晃弘 (2018) 「G20 ブエノスアイレスの概要」ファイナンス5月号, 14-16.