

店頭デリバティブ取引市場に関する 取引ネットワーク構造解析について

川井 大輔*, 長谷川 正樹†, 八木 里紗‡

2021年7月7日

概要

2008年に生じた金融危機をきっかけに、2009年のG20ピッツバーグ・サミットにおいて「店頭デリバティブ契約は、取引情報蓄積機関に報告されるべきである」とされたことを受け、平時のモニタリングを強化し、金融危機時における迅速・適切な対応を可能とすることを目的に、各国で店頭デリバティブ取引の明細データに関する取引報告制度が導入された。

本邦においても、2013年以降、金融商品取引業者等及び金融商品取引清算機関等の店頭デリバティブ取引市場参加者を対象として、店頭デリバティブに係る取引明細データ報告制度の運用を開始し、金融庁において報告対象者から取引データ（trade repository data:TR データ）の報告を受けている。

本稿では、当該制度に基づき報告された明細データから、市場取引について知見を得るべく、店頭デリバティブ取引市場について取引ネットワークを再現し、グラフ理論に基づき取引ネットワークの構造解析を行った。その結果、本邦の店頭デリバティブ取引市場においては、ネットワーク指標に着目すると、全商品市場に共通してスモールワールド性や疎なネットワーク構造といった性質が見られる一方で、外国為替を裏付け資産とする店頭デリバティブ市場でのみ市場取引のハブとなって取引を行うコアプレーヤーがクラスタリング係数に関して市場全体の平均より大きな値を持つ等、裏付けとなる資産の商品区分によってコアプレーヤーの市場に対する関わり方が相対的に異なる可能性があることが分かった。これらの知見をもとに、各市場の制度的差異を念頭に置きつつ取引ネットワーク構造について考察を行い、店頭デリバティブ取引市場に関するモニタリング高度化の方向性、今後の分析の精緻化に向けた課題等について議論する。また、本稿では解析対象とした店頭デリバティブ取引情報に関して、報告制度上の制約から重複して報告されている一部取引に関する重複排除処理の必要性など今後の研究にむけたデータクレンジング等の課題に関しても整理を行った。

1 店頭デリバティブ取引情報報告制度の概要

店頭デリバティブ取引情報の保存・報告に関して、FSBにおいてもG20ピッツバーグ合意 [1] に沿って、「OTC derivatives should be reported to trade repositories」の考え方の下で議論されており、その他の複数の事項とともに、店頭デリバティブ取引市場改革の主要な取組事項になって

* 本稿の執筆にあたっては、吉野直行金融研究センター長及び中島淳一総合政策局長をはじめとする多くの金融庁スタッフに有益なご意見をいただいたほか、本稿の英語版の作成においては総合政策局の廣瀬恵子氏に多大なご協力をいただいた。また、日本銀行スタッフにも、講演等の機会を通じて有益な知見をいただいた。なお、本稿の内容と意見は筆者個人に属するものであり、所属する組織の公式見解を示すものではない。

* 総合政策局 前情報化統括室専門官

† 企画市場局 市場課係長

‡ 企画市場局 市場課係長

いる。

また、FSB のレポート [2] では、「各規制当局は、店頭デリバティブ取引情報（TR データ）を分析結果等の公表も含め、幅広い課題への対応に利用している。また、データの協調も含めて、取組を行っている各国が取組の継続を進めていく」とされており、「店頭デリバティブ取引市場のリスク評価に向けて、国際的なデータ共有に対する障壁の削減にも取り組むべき」と指摘している。日本においても、G20 及び FSB の取組方針に沿った形で、システミック・リスクの低減や店頭デリバティブ取引市場に係る透明性の向上を図るため 2010 年の金融商品取引法改正に際して、取引情報の報告・保存制度を導入している。本稿では、報告義務の課せられた各金融機関等より報告された店頭デリバティブ取引情報（TR データ）をもとに、本邦店頭デリバティブ取引市場について解析を行い、その取引ネットワーク構造について考察する。

1.1 日本における店頭デリバティブ取引情報報告制度

金融商品取引法（以下、法という）第 156 条の 63 及び法第 156 条の 64 は、金融商品取引清算機関等^{*1}及び金融商品取引業者等^{*2}に対して、取引情報の保存・報告を行うことを義務付けている。前者が報告を求められている店頭デリバティブ取引情報を「清算集中等取引情報^{*3}」、後者に報告を求められている店頭デリバティブ取引情報が「取引情報^{*4}」として定義がされている。

ここで、法第 156 条の 63 により規定される清算集中等取引情報の具体的な内容については店頭デリバティブ取引等の規制に関する内閣府令（以下、府令という）に委任されており^{*5}、また、法第 156 条の 64 により規定される取引情報の具体的な内容についても府令に委任され、府令第 6 条において、以下に掲げる取引^{*6}が具体的な報告対象とされている。

- 法第 2 条第 22 項第 1 号及び第 2 号に掲げる取引^{*7}：先渡取引及び指標先渡取引
- 法第 2 条第 22 項第 3 号及び第 4 号に掲げる取引^{*8}：オプション取引及び指標オプション取引
- 法第 2 条第 22 項第 5 号に掲げる取引：スワップ取引
- 法第 2 条第 22 項第 6 号に掲げる取引^{*9}：クレジット・デリバティブ取引

なお、府令第 6 条第 2 項の規定により、国、地方自治体、日本銀行、外国政府その他の特定の者、金融庁長官が指定する国際機関、当該取引を行う金融商品取引業者等の親会社等、子会社又は親会社等の子会社等（当該金融商品取引業者等を除く）が行う取引については、取引情報の保存報告制度の対象外とされている。

*1 金融商品取引清算機関又は外国金融商品取引清算機関をいう。

*2 金融商品取引業者又は登録金融機関をいう。

*3 法第 156 条の 63 参照

*4 法第 156 条の 64 参照、2020 年改正金融商品取引法の施行後は「非清算集中等取引情報」と呼称

*5 府令第 3 条において、府令第 6 条第 1 項各号に定める取引（法第 156 条の 62 各号に掲げる取引を除き、法第 2 条第 22 項第 2 号、第 4 号及び第 5 号に掲げる取引にあっては、同条第 25 項第 2 号、第 3 号又は第 4 号（同項第 2 号及び第 3 号に係る部分に限る）に掲げる金融指標に係るものを除く）が具体的な報告対象とされている。

*6 法第 156 条の 62 各号に掲げる取引を除き、法第 2 条第 22 項第 2 号、第 4 号及び第 5 号に掲げる取引にあっては、同条第 25 項第 2 号、第 3 号又は第 4 号（同項第 2 号及び第 3 号に係る部分に限る）に掲げる金融指標に係るものを除く。

*7 約定の日から受渡しの日までの期間が 2 営業日以内のものを除く。

*8 権利行使期間が 2 営業日以内のものを除く。

*9 同号イに掲げる事由を同号に規定する事由とするものに限る。

我が国における店頭デリバティブ取引情報の報告対象者範囲に関しては、府令第2条において、金融商品取引業者等のうち、取引情報作成対象業者^{*10}が指定されており、当該業者が行う店頭デリバティブ取引について、取引情報の保存・報告制度の対象として定められている。

また、現時点における金融庁への報告ルートに関しては、取引情報蓄積機関^{*11}等を用いる方法（間接報告）と、直接金融庁に報告する方法（直接報告）が認められているところであるが、情報通信技術の進展により、店頭デリバティブ取引情報報告制度について、より信頼性の高い形での収集・保存が可能となったことを受け、当局又は取引情報蓄積機関の選択制となっている報告先を取引情報蓄積機関に一本化する内容を含む改正法案 [3] が 2020 年通常国会に提出され、成立した。当該改正により、多様化するデリバティブ取引報告データの分析の高度化や利活用を促進し、市場の透明性向上による投資者保護の拡充を図ることが可能になるとされている。現在、上記の金融商品取引法改正（2020 年）を受けた、関連府令等の策定が進められているところである^{*12}。また、金融庁においては、制度をより効果的なものとするため、日本銀行との間で取引情報の共有を開始している [5]。

1.2 海外の金融規制当局における店頭デリバティブ取引情報（TR データ）の活用に向けた取組み・議論について

1.2.1 香港

香港における店頭デリバティブ取引情報（TR データ）に関する取組として、Hong Kong Trade Repository（HKTR）が取引情報蓄積機関として、取引情報の報告を受けている。HKTR は、HKMA に設置された組織であり、下記 a regulatory regime for the OTC derivatives markets（OTC Regulatory Regime）[6] に基づき、店頭デリバティブ取引情報（TR データ）の報告を受けている。なお、報告義務者は、HKTR の会員となる必要がある。

香港における店頭デリバティブ取引に関する制度としては、香港政府、Securities & Futures Commission of Hong Kong（SFC、香港証券先物委員会）、Hong Kong Monetary Authority（HKMA、香港金融管理局）が OTC Regulatory Regime のもと、the Securities and Futures Ordinance（SFO）を構築。SFO は、the Securities and Futures（Amendment）Ordinance 2014 により二段階で実効化され、最終的にはすべての主要アセットクラス（金利、通貨、エクイティ、クレジット、コモディティを含む）の店頭デリバティブ取引情報（TR データ）の報告が義務化されている。

報告対象者は、

1. Authorized Institutions（“AIs”）
2. Approved Money Brokers（“AMBs”）licensed and regulated by the HKMA under the Banking Ordinance

^{*10} 第一種金融商品取引業を行う金融商品取引業者又は登録金融機関である銀行、株式会社商工組合中央金庫、株式会社日本政策投資銀行、全国を地区とする信用金庫連合会、農林中央金庫若しくは保険会社をいう。以下同じ。

^{*11} 2010 年の金融商品取引法改正において、法上の枠組みとして、かかる取引情報蓄積機関の指定制度を創設し、当局から指定を受けた国内の取引情報蓄積機関を「取引情報蓄積機関」、当局から告示指定を受けた外国の取引情報蓄積機関を「指定外国取引情報蓄積機関」と定義している（法第 156 条の 64 第 3 項）。当局の指定に係る取引情報蓄積機関に対して取引情報の保存・報告を義務付けることにより、当局が取引情報蓄積機関から情報を取得することを可能としている。また、指定に係る取引情報蓄積機関を利用する金融機関等については、取引情報の保存・報告義務を免除することとしている。この枠組みにより、上記の間接報告が可能となっている。現在、我が国では、DTCC データ・リポジトリ・ジャパン（DDRJ）が、金融庁から取引情報蓄積機関として指定を受け、業務を行っている。

^{*12} 2020 年 12 月 25 日からパブリックコメントを開始 [4]

3. Licensed Corporations (“LCs”), recognised clearing houses (“RCHs”)
4. Automated trading services - central counterparty (“ATS-CCP”) licensed and regulated by the SFC under the SFO

とされている*13。データ公表については、市場の透明性向上を目的として、2つのレポート [7,8] をウェブ公表している*14。

1.2.2 国際的な取引情報の共有に向けた議論 (FSB)

本項冒頭でも記載したとおり、FSB においても各国の店頭デリバティブ情報をクロスボーダーでの共有を通じた世界規模での実態把握、監督の実効性の向上に向けて、共有枠組みの構築や共有に向けた障害への対応を進めていく必要に関して、議論が進められている。

2 本解析の位置づけ・意義

国際的な協力のもと、店頭デリバティブ取引市場の実態を把握し、適切な監督制度を構築する中で、金融庁においても、店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) について、より高度な分析の試行とノウハウの蓄積を進めることは、日本の店頭デリバティブ取引市場の実態把握、モニタリングへの効果的な応用、市場の発展に資する情報に関する公表を通じた市場の透明性向上などに寄与するものである。加えて、FSB におけるクロスボーダーでの店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) に関する国際連携の議論や他の当局の先進的な取組を踏まえると、日本においても店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) の分析手法に関する知見を蓄積していくことは、協力を推進する上で重要である。上記にむけて、本稿では、金融庁が収集した店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) の分析を試行し、現時点で得られる知見の整理とともに、更なる深度・精度ある分析に向けた課題を明確化する。

さらに、店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) の分析にとどまらず、社会におけるデータ利活用の促進については政府機関においても取組を進めていくべきもの*15であり、店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) に関する分析について蓄積したノウハウに関しては、他の計表データ等の金融監督上のデータ分析に応用できる要素も存在すると考えられ、そういった観点からも本解析は意義があるものである。

3 データセット

本稿で解析するデータセットは、2018年4月1日から2020年3月31日までに金融庁に報告された取引情報作成対象者が行った店頭デリバティブ取引のフローに関するデータである。このデータには、各取引について、取引当事者をはじめ、取引の想定元本、裏付けとなる商品区分、商品種別及び約定日といった取引の詳細に関するデータが記載されている。

本解析では、クレジット (CD)、株式 (EQ)、外国為替 (FX) 及び金利 (IR) の各商品を裏付けとする各店頭デリバティブ取引について比較しつつ解析を行った。各裏付け商品に対する店頭デ

*13 一定の条件を満たした “AIs”、“AMBs”、“LCs” は制度の適用除外となる制度も別途存在

*14 公表データが含む取引は、金利スワップ取引、為替先渡取引、為替先物等の金利・通貨に係るデリバティブ取引全般

*15 これまでの日本における店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) の分析結果の公表としては、年次 (平成 26 年～) での取引高・残高の合計に関する情報が公表されている [9]。

リバティブ取引の代表例は表1の通り。

表1 各裏付け商品に対する店頭デリバティブ取引の代表例

商品区分	代表例
クレジット (CD)	クレジットデフォルトスワップ (CDS)
株式 (EQ)	株式・株価指数を裏付け資産としたオプション取引
外国為替 (FX)	通貨オプション取引
金利 (IR)	金利スワップオプション取引

各商品区分を裏付け商品とする店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) の報告件数は表2の通りである。

表2 各期間ごとに報告された店頭デリバティブ取引件数 (件)

	クレジット	株式	外国為替	金利
2018年4月1日-6月30日	11,513	11,497	206,877	291,509
2018年7月1日-9月30日	9,968	12,323	281,263	271,073
2018年10月1日-12月31日	9,829	11,361	245,845	318,254
2019年1月1日-3月31日	12,600	9,368	245,949	356,890
2019年4月1日-6月30日	16,473	6,863	206,049	278,419
2019年7月1日-9月30日	12,881	29,556	218,397	758,452
2019年10月1日-12月31日	9,353	30,327	148,579	662,955
2020年1月1日-3月31日	12,820	26,484	283,081	558,387
合計	95,437	137,779	2,060,154	3,495,939

これより、本邦店頭デリバティブ取引市場では金利商品を裏付け商品とした店頭デリバティブ取引市場の取引件数が最も多く、次いで外国為替、株式、クレジットと続く傾向が一貫してみられることが分かる。

本稿ではこのデータを基にして、金融モニタリング及び金融制度企画上有用な店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) の分析手法について検討する。

なお、報告義務が課された市場参加者同士の取引に関する報告は法令上両当事者からなされることとなっており、当該事項はこれらの当事者の取引を重複して計上することにつながってしまい、解析結果に影響を与えうる。従って、この両側報告問題を解決することが望ましいが、取引情報を突き合わせることは、現時点で蓄積された分析ノウハウでは、技術的困難があり、本稿では補正を行わない。

4 取引ネットワークグラフの構築

本稿解析は、店頭デリバティブ取引情報（TR データ）をもとに店頭デリバティブ取引市場の取引ネットワーク構造を明らかにすることを目的としており、グラフ理論に基づいた解析を行う。そこで、解析に用いるために、各取引情報に記載されている取引当事者2者の情報をもとに、取引ネットワークの構築を行う。

取引ネットワークのグラフを構築するにあたって、各取引参加者間の結びつきを示す辺（エッジ）にウェイトを設定する。本稿で目的とする解析は、上記のとおり店頭デリバティブ取引市場の取引ネットワーク構造を明らかにすることであるから、より市場にとって重要な結びつきに大きなウェイトを与えることが合理的である。市場に大きな影響を与える取引の典型的な指標としては想定元本の大きさがあり、それは店頭デリバティブ取引情報（TR データ）の各取引明細に記録されている。従って、本解析では、想定元本の大きさを基にして各辺に

$$w_{uv} \equiv \frac{\sum_{\alpha} v_{uv}^{\alpha}}{\sum_{u,v \in V} \sum_{\alpha} v_{uv}^{\alpha}} \quad (1)$$

によってウェイト w_{uv} を定義する。ここで、 V は取引ネットワークに含まれる市場参加者の集合、 u, v は各取引参加者であり、 v_{uv}^{α} は取引参加者 u と v が行った α 番目の取引の想定元本の大きさを表す。すなわち、各取引市場の全想定元本中に各市場参加者の組み合わせが占める想定元本の割合によってウェイトを設定している。

なお、本解析は Python3.8 で行い、Numpy 等の数値解析ライブラリ [10–12] を利用している。

ここで、各市場参加者について、想定元本と取引件数の和が大きいものから順番に並べ、市場全体に占める比率について累積分布を図示すると図1のとおりである。なお、本解析では、事業会社として当事者が報告されたもの^{*16}については1者として扱い、その想定元本及び取引件数は店頭デリバティブ取引情報（TR データ）として報告された取引のうち、事業会社と分類される参加者が行ったものの総和としている。図1より、いずれの市場においても、過半数の取引件数と想定元本が参加者数として上位10%の市場参加者によって占められており、特に外国為替（FX）と金利（IR）については80%以上と非常に寡占度の高い市場となっていることが分かる。ただし、金利（IR）については清算集中機関を利用することが求められているという制度的要因による可能性がある点に留意が必要である。また、クレジット（CD）の立ち上がりを除き、想定元本の累積分布曲線は取引件数の累積分布曲線よりも上にあり、いずれも想定元本の寡占度は取引件数に比較して大きいことを示している。これは、各市場において主要なプレーヤーは1取引当たりの想定元本も大きくなることを表している。このような寡占度の高い市場構造では、主要なプレーヤーによって多くの取引が実行されることから規模の経済性が望める一方で市場取引に関する情報の非対称性が大きくなり市場取引の阻害要因となりうる。本稿では考察しないが、上記のような寡占的な市場構造のメリットとデメリットを定量化し、市場の効率化の観点から現状の構造が店頭デリバティブ市場によって望ましいのか検討することは有益であると思われる。

なお、店頭デリバティブ取引情報（TR データ）には、取引の性質として、新規取引（New）、既存取引の修正（Modify）、取引の取消（Cancel）といった区別が記載されているが、既存取引を削除

^{*16} 事業会社に関しては、報告金融機関の相手方となるが報告の際のタグ付けとして、個社としてタグ付けされる場合と事業会社と一括りにタグ付けされる場合がある。

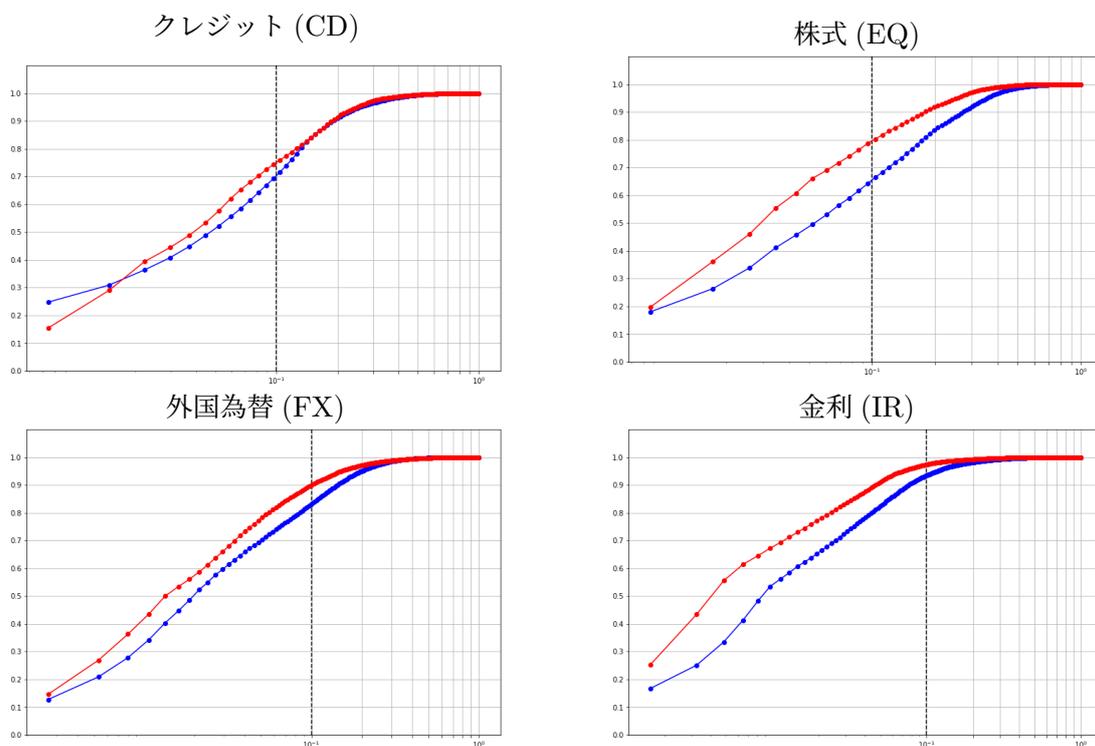


図1 各市場参加者の取引件数と想定元本の累積分布。左上の図はクレジット (CD)、右上の図は株式 (EQ)、左下の図は外国為替 (FX)、右下の図は金利 (IR) をそれぞれ示す。青の線は取引件数の累積分布、赤の線は想定元本の累積分布を表し、黒の点線は全市場参加者のうち上位10%の地点を示す

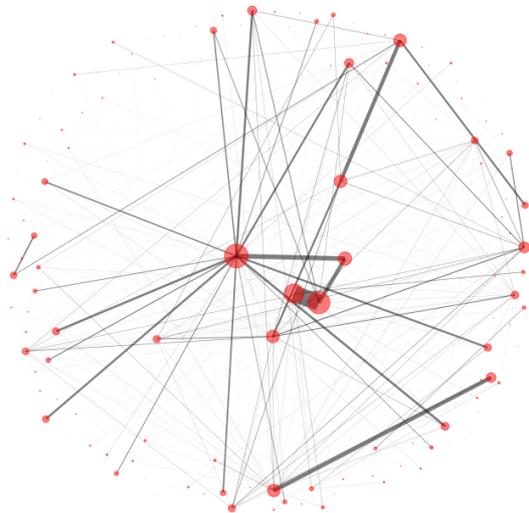
したのち改めて新規取引を約定するなど、実質的に既存取引の修正に当たる取引が分割して報告されているケースがあるが、各取引の実態に沿ってデータ全体を精度高くクレンジングすることは、現時点では困難であるため取引の性質は考慮せず集計し、分析を行っている。この点は今後分析を精緻化していく上での課題である。

また、取引の想定元本が過大である等、著しく他の取引と乖離した数件の取引や、店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) の情報から取引当事者が判然としない数件の取引についても、取引ネットワーク^{*17}構築の際に除外している。このようにして構築した、各商品を裏付けとする店頭デリバティブ取引市場の取引ネットワーク^{*18}は図2のとおりである。

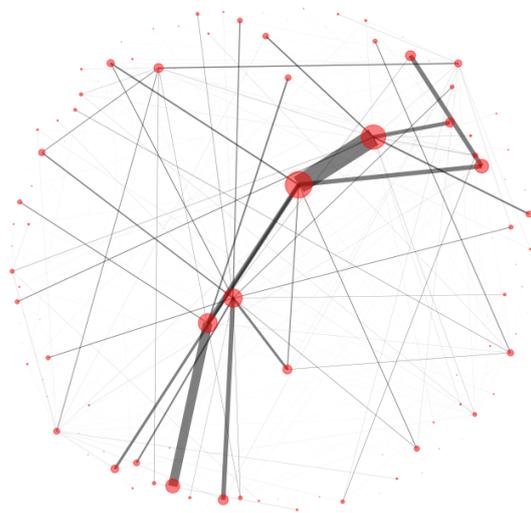
*17 Fruchterman-Reingold force-directed アルゴリズム [13] に基づきネットワーク図を構成

*18 市場全体の取引規模と関係なく一定の大きさのネットワーク図として表示している。

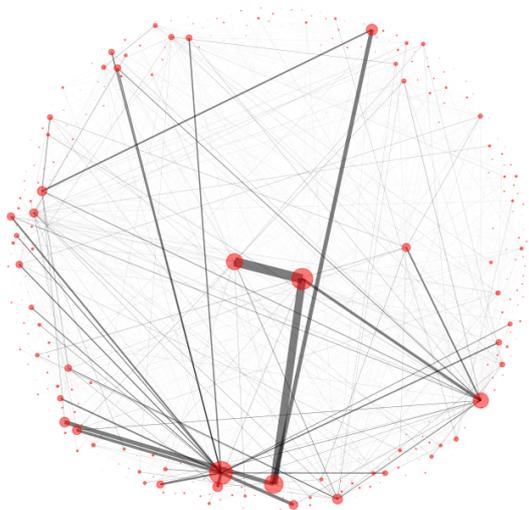
クレジット (CD)



株式 (EQ)



外国為替 (FX)



金利 (IR)

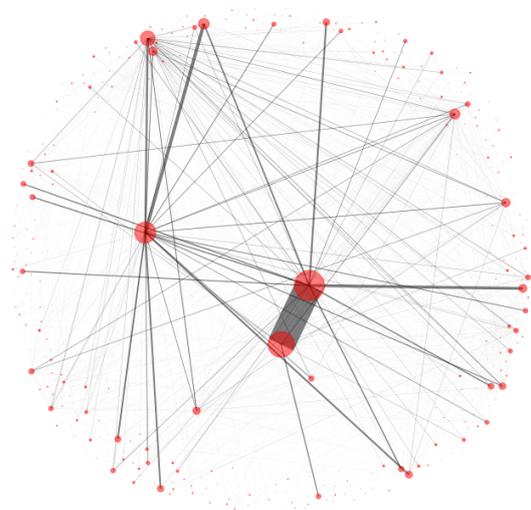


図2 各市場の取引ネットワーク。左上の図はクレジット (CD)、右上の図は株式 (EQ)、左下の図は外国為替 (FX)、右下の図は金利 (IR) をそれぞれ示す。各ノードの大きさは取引参加者が占める想定元本の和に比例する。各エッジの太さは両端の市場参加者間で行われた取引の想定元本の和を反映している。

5 店頭デリバティブ取引ネットワークにおけるネットワーク特徴量の解析等

本解析では、グラフ理論に基づき、(1) 前述の2年間全期間のフローデータから構築した取引ネットワークに対する解析と、(2) 報告された日を基準として6営業日毎に走査的に区分した期間を対象とした解析を行った。本章では、これらの解析の結果について記載する^{*19}。

5.1 解析期間全体における店頭デリバティブ取引市場のネットワーク構造について

図2を見ると、各市場ともに多くの市場参加者と取引を行い、いわば中核的な役割を果たしている参加者がいることが窺える。そこで、これらの参加者の取引状況について注視すべく、本解析ではこのような市場で中核的な役割を果たす市場参加者（以下、コアプレーヤーという）を当事者となった取引想定元本の総和が市場全体での想定元本総和に占める割合が5%以上である市場参加者と定義した。この定義に基づく、各市場のコアプレーヤー数は表3のとおりである。

表3 各市場のコアプレーヤー数

	クレジット (CD)	株式 (EQ)	外国為替 (FX)	金利 (IR)
コアプレーヤー数 (社)	4	6	5	4

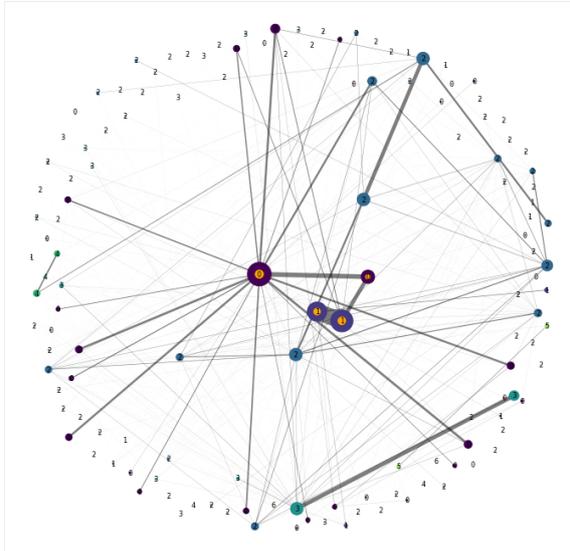
更に、構築した各市場の取引ネットワークについて、ノードの部分集合（クラスター）の繋がり
の緊密さに関する指標であるモジュラリティ（modularity）を基に、モジュラリティ最大化に基づ
くコミュニティ分割 [14,15] ^{*20}を行うと、図3の通りとなる。

これより、図2で各市場多くの取引相手を持つプレーヤーはコアプレーヤーと区別され、多くの
コアプレーヤーは異なるコミュニティに属する傾向があることが分かる。このことは、それぞれ市
場の中に各コアプレーヤーが自身を中心として緊密につながる部分取引ネットワークを持ってお
り、各コアプレーヤーを中心とした部分取引ネットワークもコア/辺縁構造をなす場合が多いこと
を示唆している。この結果は各コアプレーヤーが市場取引のハブとして市場取引に参加し流動性確
保に寄与していることを示す一方で、各市場参加者の取引動向に関する情報がコアプレーヤーに集
約されやすい市場構造になっていることも表している。従って、このような市場構造に関して、定
量的な分析を含め、様々な観点からの研究の更なる進展が期待される。

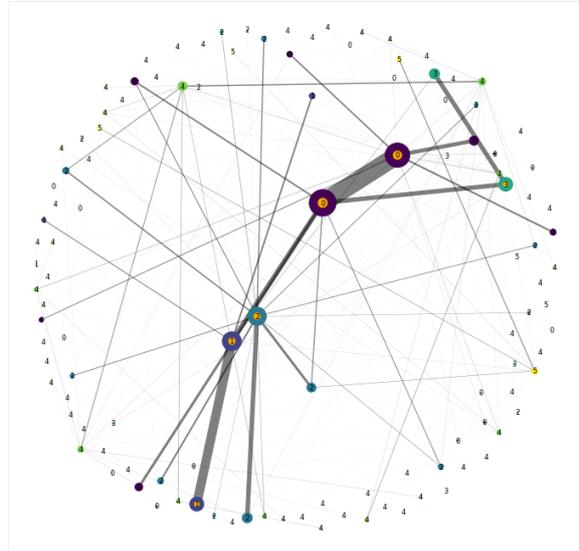
^{*19} 本項解析は、あくまでテストケースとしての分析であり、データクレンジング手法等の精緻化・高度化が今後必要である点に留意

^{*20} ランダムグラフを基準として頂点の部分集合（クラスター）内に含まれる辺の数を評価し、グラフ全体としてモジュラリティが最大になるようクラスターに分割する手法。一般に、モジュラリティが最大となるようグラフの分割を行うと、各クラスターが互いに密につながった頂点同士で構成される。モジュラリティの定義は [14] を参照

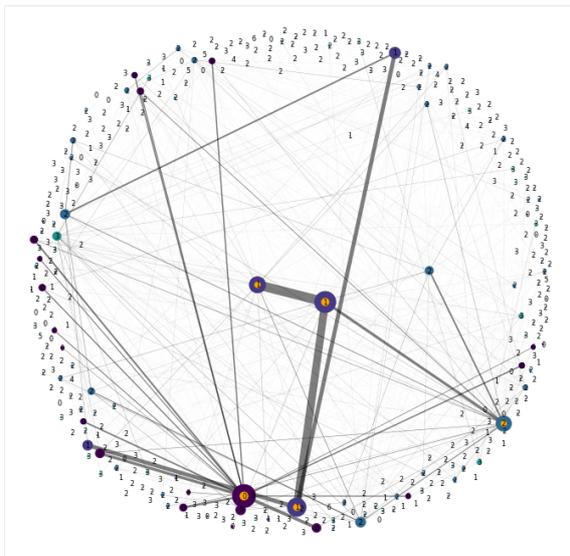
クレジット (CD)



株式 (EQ)



外国為替 (FX)



金利 (IR)

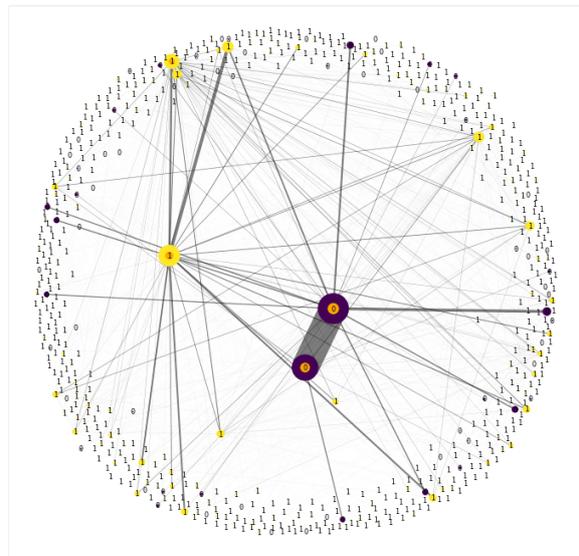


図3 各市場の取引ネットワーク。左上の図はクレジット (CD)、右上の図は株式 (EQ)、左下の図は外国為替 (FX)、右下の図は金利 (IR) をそれぞれ示す。各ノードの大きさは取引参加者が占める想定元本の和に比例する。各エッジの太さは両端の市場参加者間で行われた取引の想定元本の和を反映している。各頂点のうち、内部にオレンジ色の丸を含むものはコアプレイヤーであることを示す。各頂点の色 (コアプレイヤーにあっては外側の色) は各頂点が属するコミュニティを示す。

これらの取引ネットワークのグラフについて、各指標^{*21*22}を計算すると表4のとおりとなる。

表4 各店頭デリバティブ取引市場に対するネットワーク指標

	クレジット	株式	外国為替	金利
市場参加者数	135	116	374	619
エッジ本数	377	276	1,252	2,380
平均次数	5.581	4.759	6.695	7.690
平均最短距離 (ウェイト考慮せず)	2.662	2.727	2.761	2.669
ネットワーク密度	4.168%	4.138%	1.795%	1.244%

これを見ると、市場参加者数やエッジ本数は各裏付け商品区分ごとに大きく異なるにも関わらず、平均最短距離についてはいずれの市場でも非常に近く3未満という小さい値を取ることが分かる。これは、金融機関同士の取引ネットワークにおいて報告されているスモールワールド性が店頭デリバティブ取引市場にも当てはまることを示している [16]。また、ネットワーク密度については、クレジット (CD)、株式 (EQ) は他の商品区分と比較して密^{*23}ではあるが、いずれも非常に小さい値であり、店頭デリバティブ取引市場の取引ネットワークはいずれも疎であることが分かる。この結果は、各市場参加者に特定の取引相手と集中的に取引を行う傾向があることを示す一方で、各市場参加者同士はネットワーク構造上近接していることを示すものであり、前述のネットワーク図で見られたハブ/辺縁構造と一致するものである。

ここで、改めて想定元本と取引件数の累積分布曲線を考え、コアプレーヤーがどこに位置するかをプロットすると図4のとおりとなる。これを見ると、コアプレーヤーには取引件数についてその他の市場参加者よりも少ない者も存在し、想定元本の寡占度が必ずしも取引件数の多さに直接結びつかないことを示している。

このネットワーク構造についてより詳細に把握するため、中心性とクラスタリング係数を計算する。本解析では、中心性の指標として重みづけグラフに対する媒介中心性 [17-20]、近接中心性 [21, 22]、次数中心性、固有ベクトル中心性 [23, 24] 及びクラスタリング係数 [25-27] を計算した。媒介中心性はネットワーク中に存在する2者の最短経路の中にどれだけ計算対象の市場参加者が含まれているかを表す指標であり、各市場参加者が取引市場内でどれだけハブとして機能しているかを表す。また、近接中心性は計算対象の市場参加者とネットワーク上で繋がっているその他の

*21 平均最短距離 L は、取引ネットワークにおいて適当に選択した2社を結ぶために仲介が必要な最小限の市場参加者数を表す。

$$L = \sum_{u,v} \frac{d(u,v)}{n(n-1)} \quad (2)$$

ここで、 $d(u,v)$ は u と v を結ぶ最短経路の距離であり、 n は市場参加者数である。

*22 ネットワーク密度 D は、各市場参加者同士が取引ネットワークにおいてどの程度結びついているか、すなわち取引ネットワークの疎密さについて表す。

$$D = \frac{E}{nC_2} \quad (3)$$

ここで、 E は取引ネットワークに含まれる辺の数を表す。

*23 取引ネットワークとしての規模は図上は表現されておらず、全ての商品で一定のネットワーク図の大きさとしていることに注意

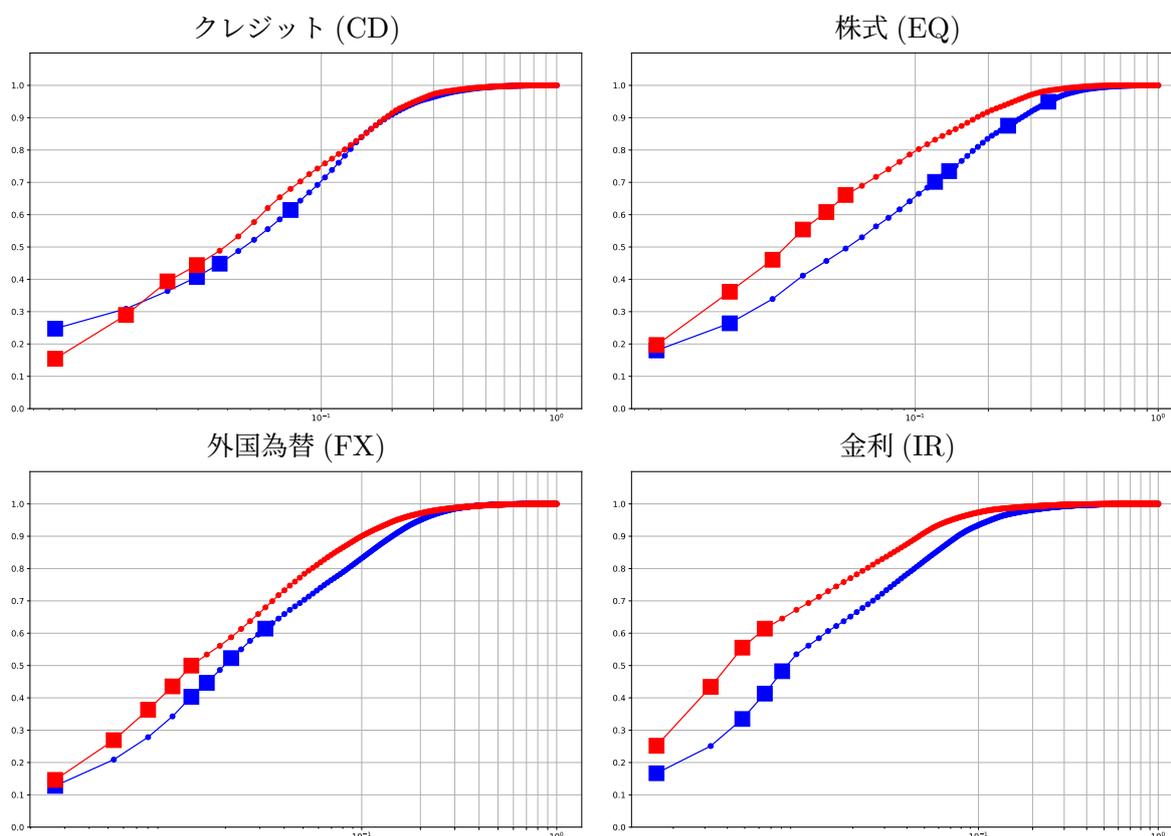


図4 各市場参加者の取引件数と想定元本の累積分布。左上の図はクレジット (CD)、右上の図は株式 (EQ)、左下の図は外国為替 (FX)、右下の図は金利 (IR) をそれぞれ示す。青の線は取引件数の累積分布、赤の線は想定元本の累積分布を表す。各市場について■の点はコアプレイヤーであることを示す。

市場参加者の最短距離の和の逆数に比例する指標であり、各市場参加者が取引市場内でどれだけ他者とネットワーク構造上近い位置にいるかを表す。次数中心性は各市場参加者が持つエッジの数を市場参加者数で規格化したものであり、各市場参加者がどれだけ多くの取引相手を持つかを表す。固有ベクトル中心性は、各市場参加者に対する隣接行列の最大固有値に対する固有ベクトルで与えられる中心性指標であり、より多くの市場参加者、中でも市場に大きな影響を持つ参加者と取引を行う市場参加者が大きな値を持つ。最後に、クラスタリング係数は、各市場参加者がネットワーク内でどれだけ局所的に緊密に他者と結びついているかを表す指標であり、多くの店頭デリバティブ取引を特定の市場参加者グループで行っていると、そのグループに含まれる各市場参加者は高い値を持つ。

値の大きい順に並べると、表5のようになる。これより、いずれも中心性指標においてもコアプレイヤーの値は大きく、中心性の観点からは市場の中で中核的な位置を占めていることが示唆されている。中でも媒介中心性、近接中心性及び固有ベクトル中心性に関して上位にコアプレイヤーが多く位置していることから、各取引市場において各コアプレイヤー同士が繋がりがつハブとして機能しており、各市場の中心に位置していることが推察される。また、クラスタリング係数が低いことから、コアプレイヤーは特定の市場参加者グループ内で取引を集中的に行っているというよりは、ハブ/辺縁構造のハブとして機能していることが示唆される。

表5 各中心性指標及びクラスタリング係数上位5社の属性

	媒介中心性				近接中心性			
	クレジット	株式	外国為替	金利	クレジット	株式	外国為替	金利
1	その他	コア	コア	コア	その他	コア	コア	コア
2	コア	コア	コア	コア	その他	その他	コア	コア
3	その他	その他	その他	その他	コア	コア	コア	その他
4	その他	その他	コア	その他	その他	コア	コア	コア
5	その他	コア	コア	コア	その他	その他	その他	コア

	次数中心性			
	クレジット	株式	外国為替	金利
1	その他	その他	コア	その他
2	その他	その他	コア	その他
3	その他	その他	その他	その他
4	コア	その他	コア	コア
5	その他	コア	その他	その他

	固有ベクトル中心性				クラスタリング係数			
	クレジット	株式	外国為替	金利	クレジット	株式	外国為替	金利
1	コア	コア	コア	コア	その他	その他	その他	その他
2	その他	コア	コア	コア	その他	その他	その他	その他
3	コア	コア	コア	その他	その他	その他	その他	その他
4	コア	コア	その他	その他	その他	その他	その他	その他
5	その他	その他	その他	その他	その他	コア	その他	その他

特に、媒介中心性とクラスタリング係数について図示すると、図5のとおりとなる。これを見ると、コアプレーヤーは他の市場参加者に比べて大きな媒介中心性の値を示し、市場取引の仲介役として非常に大きな役割を果たしていることが見てとれる。一方で、クラスタリング係数についてはコアプレーヤー以外の市場参加者に非常に大きな値を持つものがあることが見てとれ、このことは一部関係性の深い先で取引を集中的に行っている市場参加者がいることを示している。

5.2 6 営業日間に行われた取引に基づく市場ネットワーク構造に関する解析

前節で行った解析は、今回分析対象とした全てのフローデータをもとに取引ネットワークを作成し、それに対する各指標を計算していた。上記解析によって、取引ネットワークはいずれも疎である一方で、各市場参加者同士の平均距離は小さい値となり、スモールワールド性がみられる可能性が明らかになった。本節では、より詳細に市場取引の実態を解析するべく、報告事項に含まれる報

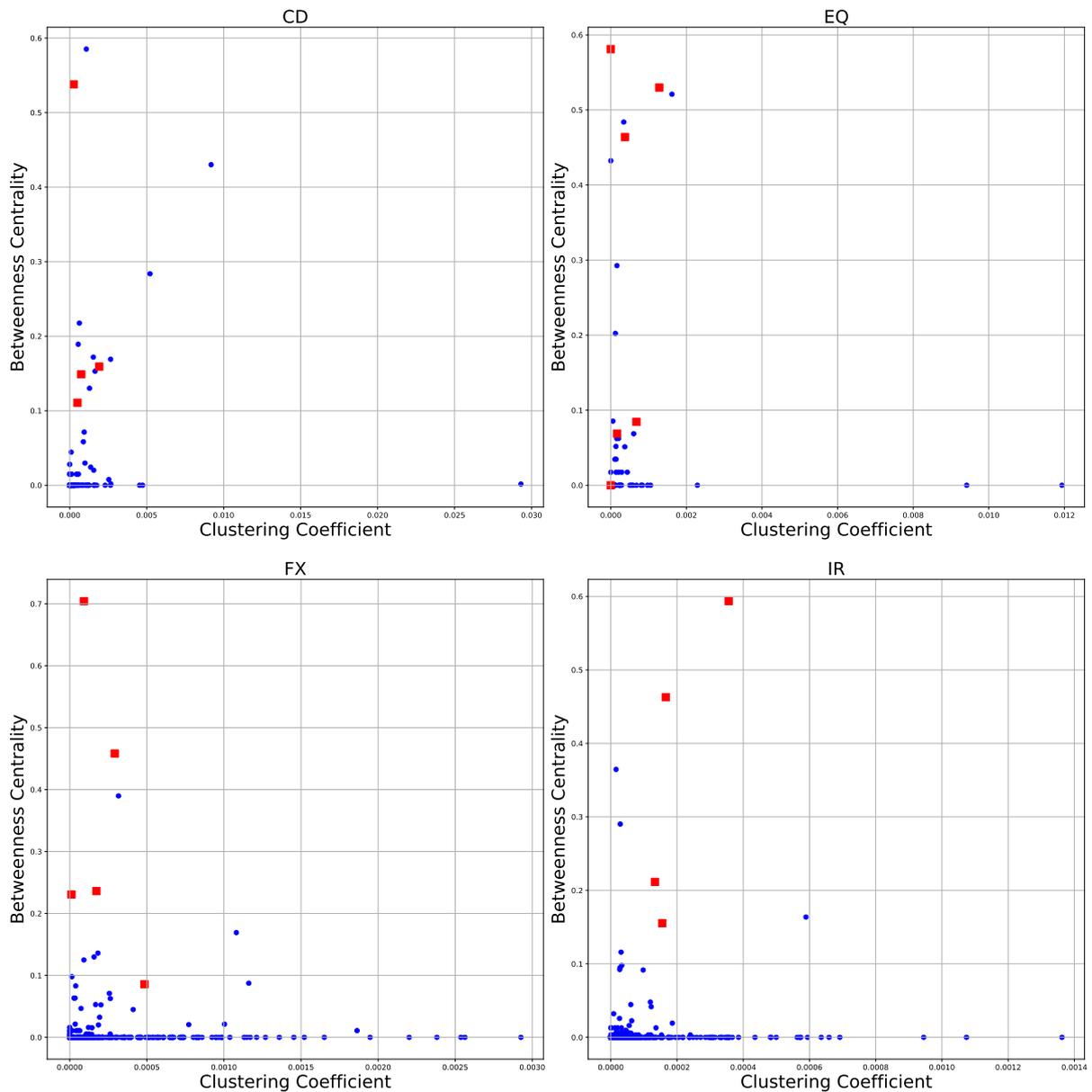


図5 各市場における媒介中心性とクラスタリング係数。左上の図はクレジット (CD)、右上の図は株式 (EQ)、左下の図は外国為替 (FX)、右下の図は金利 (IR) をそれぞれ示す。X 軸がクラスタリング係数であり、Y 軸は媒介中心性を表す。コアプレーヤーについては赤い四角で表し、それ以外の市場参加者は青い丸で表している。

告基準日を用いて6営業日ごと^{*24}に明細データを分割し、時系列に沿った解析を行った。

店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) について、2年間の解析期間に含まれる報告日を1日ずつ移動しつつ、解析期間内の各6営業日 (報告基準日のデータを使用) ごとに、取引ネットワークを構築する。このようにして、取引ネットワークのグラフを作成すると、図6のとおりである。

^{*24} 日曜日を報告基準日とする報告は存在しないため、6営業日ごとの和を取ることで各1週間の期間に含まれる取引を基としたネットワーク構造を構築している。

なお、ここで各グラフ中のエッジのウェイト w^{w_i} は

$$w_{uv}^{\alpha,i} \equiv \frac{\sum_{\alpha} v_{uv}^{\alpha,i}}{\sum_{u,v \in V} \sum_{\alpha} v_{uv}^{\alpha,i}} \quad (4)$$

によって定義している。ここで $v_{uv}^{\alpha,i}$ は報告日 i から 6 営業日以内に含まれる市場参加者 u と v の間で行われた α 番目の取引の想定元本である。すなわち、報告日 i から 6 営業日以内に含まれる店頭デリバティブ取引に占める各市場参加者の組み合わせの想定元本の割合によってウェイトを定義している。

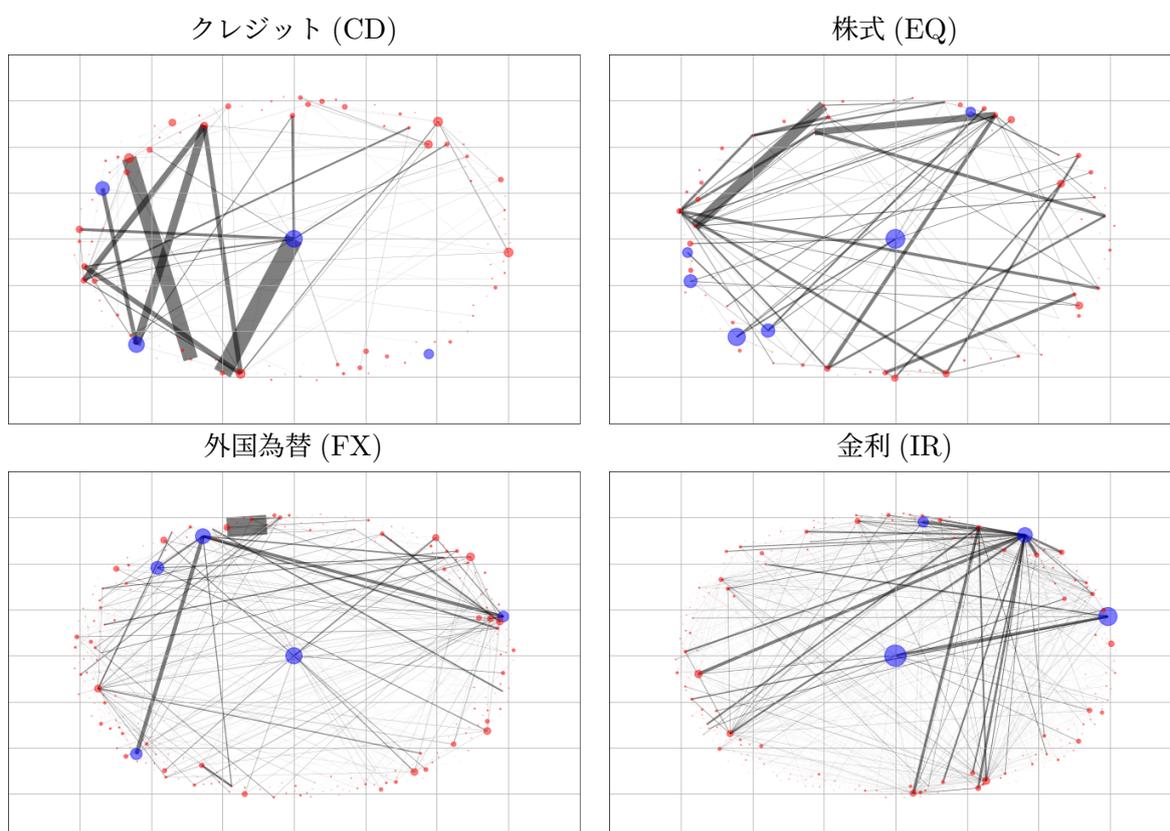
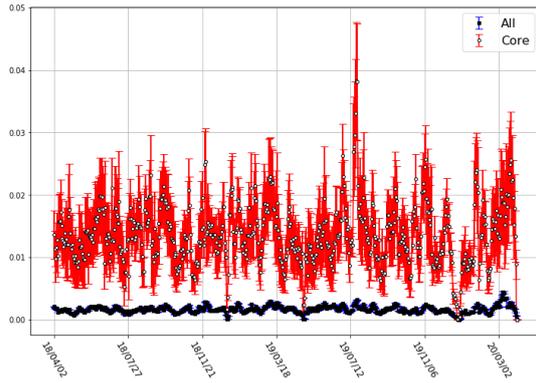


図 6 取引ネットワークのグラフ。左上の図はクレジット (CD)、右上の図は株式 (EQ)、左下の図は外国為替 (FX)、右下の図は金利 (IR) をそれぞれ示す。青でプロットされたノードはコアプレーヤーを表し、赤でプロットされたノードはそれ以外の市場参加者を表す。

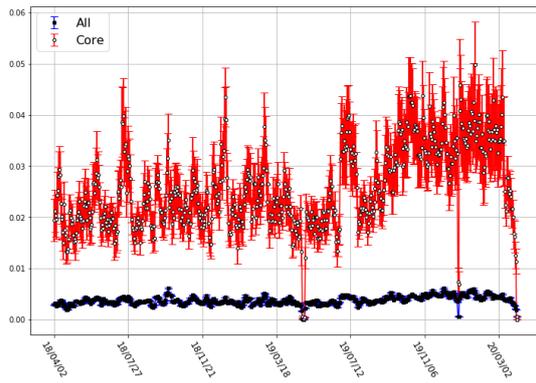
図 6 を見ると、コアプレーヤーが多くの取引に関わっている一方で、一部それ以外の市場参加者も 1 週間 (6 営業日) 中に行われた取引想定元本の大きな比率を占めており、市場取引に一定の寄与をしていることが推察される。

これについて定量的に解析するために、各報告基準日の取引ネットワークについて媒介中心性とクラスタリング係数について計算を行う。これらの指標それぞれを時系列に沿って図示すると図 7 のとおりである。図 7 から、各市場ともにコアプレーヤーは全体平均と比較して相対的に大きな媒介中心性の値をとることが分かる。このことは、本解析において想定元本を基準に設定したコアプレーヤーは市場取引の中核的な市場参加者として役割をになっていることを示す。一方で、クラスタリング係数については、クレジット (CD)、株式 (EQ) 及び金利 (IR) の取引市場では大きな差は

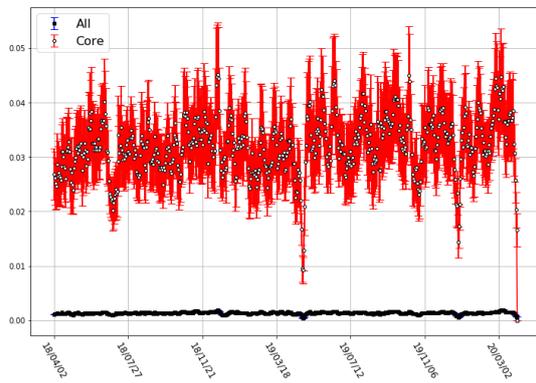
クレジット (CD)



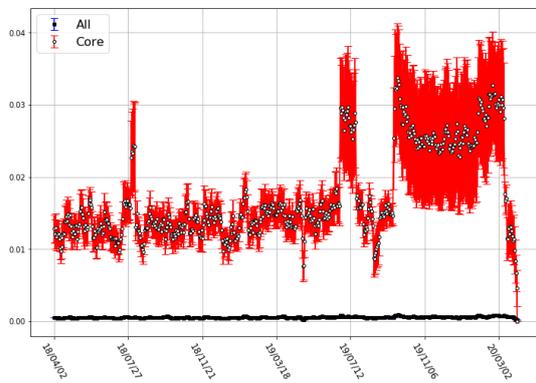
株式 (EQ)



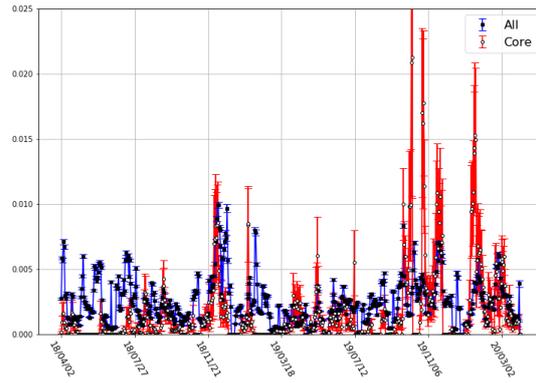
外国為替 (FX)



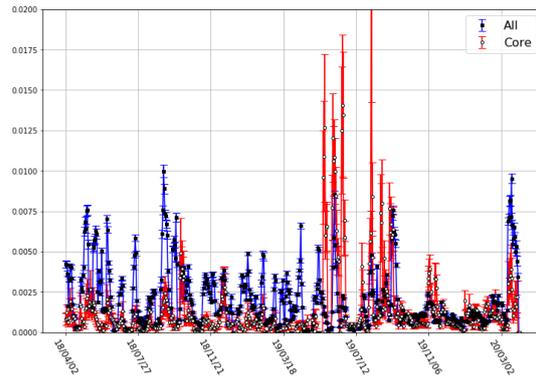
金利 (IR)



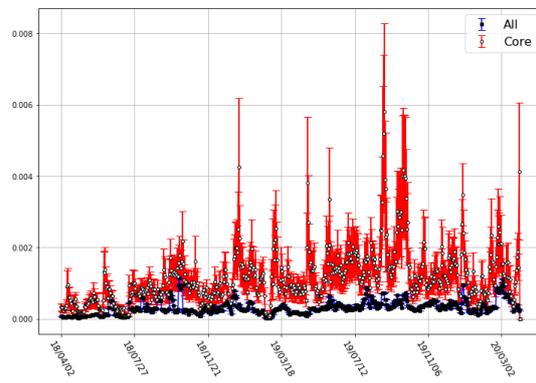
クレジット (CD)



株式 (EQ)



外国為替 (FX)



金利 (IR)

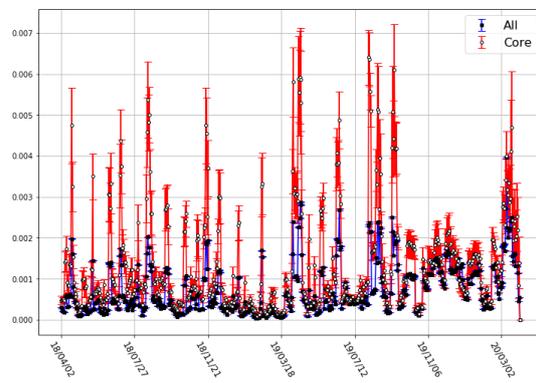


図7 各報告基準日の取引ネットワークに関する媒介中心性 (各商品区分ともに左図) とクラスタリング係数 (各商品区分ともに右図)。赤の線はコアプレーヤーに関する平均を表し、青の線は全市場参加者に関する平均を表す。

コアプレーヤー平均と全体平均の間に見られないが、外国為替 (FX) については期間を通して全体平均よりも大きな値を持つことが見て取れる。これは、より短期間での取引構造を見ると、コアプレーヤーがクラスターを形成し、その中で多額の取引を行っている可能性を示唆している。本節と前節と比較した場合、取引ネットワーク構造の分析に用いる店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) の期間長による結果の差異に関しては、長期的に見ればコアプレーヤーが多く市場参加者と取引を行っておりクラスター的な構造は見られないものの、より各営業日の取引実態に近い取引ネットワーク構造を分析すると、クラスター構造等が見られる場合もあることを示唆している。

5.3 6 営業日間に行われた取引に基づく取引ネットワーク構造に関するスケールリング則について

市場取引件数の分布を考察するため、以下の取引相手数 (次数) ごとの市場参加者数の累積分布関数を考える。

$$S(x) = \text{Avg}_i \int_x^\infty I_i(x') dx' \quad (5)$$

ここで、 $I_i(x)$ は報告基準日 i における、取引相手数 (次数) x の市場参加者数を表す関数であり、 Avg_i は報告基準日に関する平均を表す。ここで、実社会に存在するネットワークには、各ネットワーク参加者の次数分布がべき関数 $f(x) = ax^{-b}$ ($a, b \in \mathbb{R}$) の関数形で記述される性質 (スケールフリー性) [28, 29] をもつものが存在することが知られており、金融機関間の取引ネットワークでは次数分布が上記のべき関数型と指数関数型 $f(x) = ae^{-bx}$ の中間に位置する場合があることが先行研究で報告されている [30, 31]。本稿では、べき関数 $f(x) = ax^{-b}$ によって、低次数領域 ($x \approx 0 \sim 10^2$) と高次数領域 ($x \approx 10^4 \sim 10^5$) それぞれについて区分し $S(x)$ を近似した。 $S(x)$ と近似曲線を図示すると、図 8 のとおりとなる。

この結果から、いずれの市場においても低次数領域では、 x の次数 b は $0.35 \sim 0.50$ と小さい値で近似される。一方、高次数領域では、 $b \approx 1.3 \sim 2.0$ と大きな値となり、取引相手数 (次数の) 減少がより急速になることが分かる。 $S(x)$ が $S(x) = ax^{-b}$ のべき関数型で与えられるとき、分布関数は $S(x)$ の x に関する微分で与えられることから $I_i(x) = abx^{-b-1}$ と記述できる。従って、上記の累積分布関数 $S(x)$ に関する近似結果から、低取引件数領域と高取引件数領域ではそれぞれ分布関数のべき指数 $b+1$ は $1.3 \sim 1.5$ 、 $2.4 \sim 3.0$ と近似される。このように取引相手数 (次数) が大きくなった時に分布関数のべき指数が大きくなるのは、取引実行に必要なリソースの制限等様々な要因から、このスケールの取引先数の取引を一週間当たりに行える市場参加者が少ない等の事情が作用していると思われる。

6 考察

本解析では、2018 年 4 月 1 日から 2020 年 3 月 31 日までの 2 年間の間に金融庁に報告された店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) について解析を行った。店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) から構築した取引ネットワークでは、市場参加者数が大きく異なるにもかかわらず、各市場参加者間の平均最短距離はいずれも 3 以下であり、店頭デリバティブ取引市場においてもスモールワールド性が存在することが推察される。また、いずれの取引ネットワークにおいても、ネットワーク密度は小さく、店頭デリバティブ取引市場の取引ネットワークは疎であることが示唆され

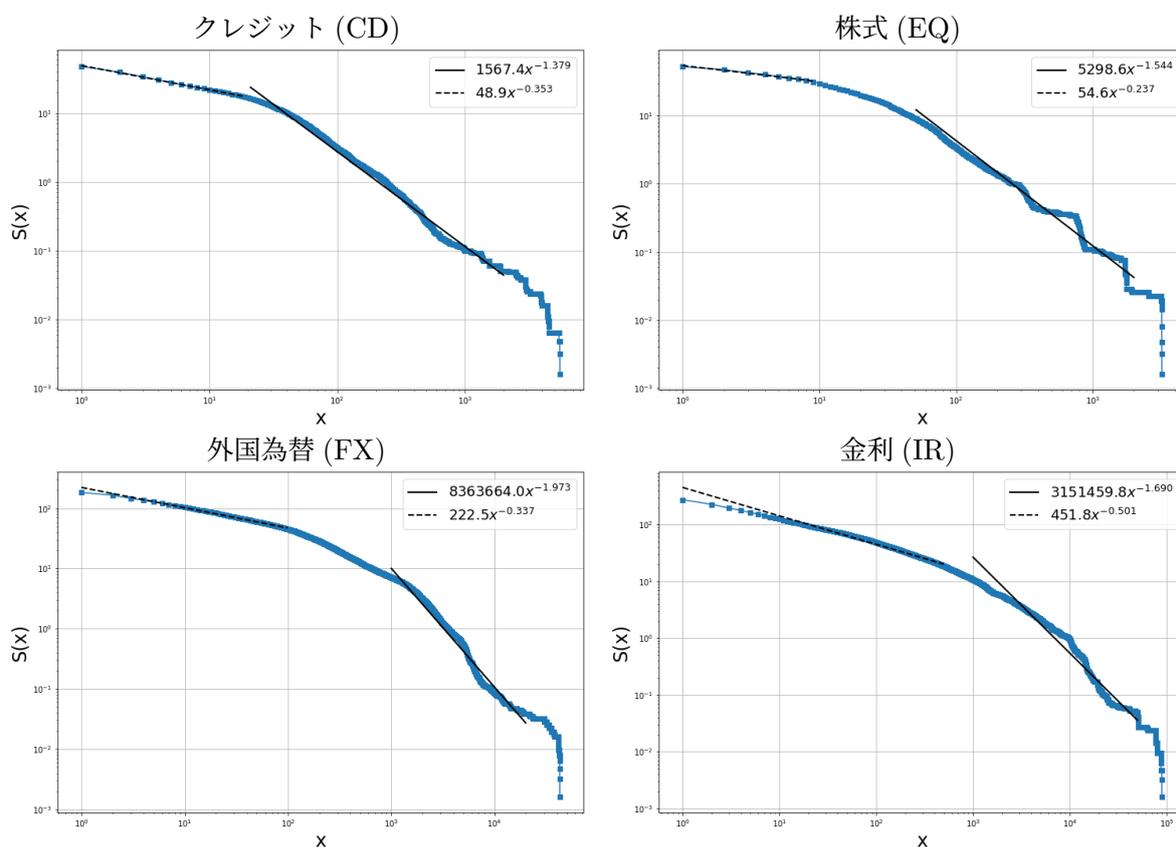


図8 各取引件数に対する市場参加者の累積分布関数。左上の図はクレジット (CD)、右上の図は株式 (EQ)、左下の図は外国為替 (FX)、右下の図は金利 (IR) をそれぞれ示す。各市場の図に追加している直線は各取引件数区間に対して $f(x) = ax^{-b}$ によって近似した結果を表す (縦軸と横軸ともにグラフ上は log スケールであることに注意)。

た。加えて、本稿では、取引ネットワーク解析においてコアプレーヤーを想定元本に基づいて定義したが、当該定義によるコアプレーヤーは多くの市場参加者と取引を行っており、モジュラリティ最大化に基づくコミュニティ分割では、それぞれ異なるコミュニティに属することが多いことが示唆され、コアプレーヤーを中心とする部分ネットワーク構造が存在する可能性を示した。さらに、複数のネットワーク中心性指標及びクラスター係数について計算を行い、コアプレーヤーとその他のプレーヤーについて比較したが、いずれの中心性指標についてもコアプレーヤーは上位に位置する傾向があり、取引ネットワークのハブとしての機能においても中心として機能していることが推察される。6営業日単位での取引ネットワークの解析では、コアプレーヤーの媒介中心性は解析期間全体を通して全体平均よりも大きく、想定元本を基準として今回設定したコアプレーヤーは取引仲介に重要な役割を担っていることを示唆する結果となった。本解析では次数分布がべき関数で近似できる可能性を示したが、次数分布がべき関数型で書かれるネットワーク構造には、そのような関数形で記述可能となるシナリオが複数提案されており [32–40]、今後店頭デリバティブ取引市場をより解析する上で有用となりうる。これまでに本稿で分析した各店頭デリバティブ取引市場のネットワーク構造の傾向について、表6にまとめる。本稿解析はあくまでテストケースとしての分析ではあるが、今後の研究の参考となることを期待する。

表6 本稿分析における各店頭デリバティブ取引市場の傾向

	クレジット (CD)	株式 (EQ)	外国為替 (FX)	金利 (IR)
全解析期間ネットワーク構造				
ネットワーク密度	疎	疎	疎	疎
スモールワールド性	有	有	有	有
市場寡占度 (上位 10% 社の市場シェア)				
- 取引件数ベース	70%	65%	80%	90%
- 想定元本ベース	75%	80%	90%	95%
6 営業日ごとのネットワーク構造				
コアプレーヤーの媒介中心性	全体平均より高	全体平均より高	全体平均より高	全体平均より高
コアプレーヤーの クラスタリング係数	全体平均	全体平均	全体平均より高	全体平均
分布関数のべき指数				
- 低次数領域 (次数 $\approx 0 \sim 10^2$)	1.35	1.24	1.33	1.50
- 高次数領域 (次数 $\approx 10^4 \sim 10^5$)	2.38	2.54	2.97	2.69

ただし、本解析については、法律上報告義務の課せられた市場参加者の両方から1取引について報告された場合の補正処理は今後の課題として残されている。報告義務を課せられた市場参加者は相対的に市場への影響力が大きい先が多く含まれることから、コアプレーヤー及びそれに準じる市場参加者の取引件数や想定元本を過大に見積もっている可能性がある。その影響で、各係数の値が変動する可能性があり、本稿の結果を解釈する上でこの点に留意することが必要となる。

7 将来の課題

本稿で行った店頭デリバティブ取引市場の解析では、店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) について当該市場構造に関する指標を計算し、そこから得られる知見について考察した。しかし、今後より店頭デリバティブ取引市場の市場構造について理解を深め、将来的な金融制度への提案を行う上で重要となる以下の点については本稿では深く検討できておらず、今後の研究によってより知見を深めることが望まれる。

1. 店頭デリバティブ取引情報 (TR データ) のクレンジング精緻化

本稿では、解析上の困難性から報告義務が課された市場参加者同士の取引に関する両側報告の問題について補正を行っていない。この点を補正することによって、市場への影響度の大きい市場参加者が行う取引の取引件数及び想定元本が減少することが予想される。この補正によって、本稿で得られた結果がどの程度影響を受けるのか検討することが望まれる。

2. 寡占的市場構造の影響

4章及び5章でコアプレーヤーを中心とする主要な市場参加者に取引件数や想定元本が偏った構造が見られたが、このような市場構造は規模の経済性が見込める一方で情報の非対称性が市場取引に大きなデメリットとなる可能性がある。この点について、店頭デリバティブ取引に関する様々な観点からの研究の充実が期待される。

3. 各市場参加者の市場取引への影響

5.2章で考察した各6営業日ごとの取引構造では、コアプレーヤー以外の取引参加者も市場取引に大きな影響を与えていることが見て取れた。この影響について本稿では詳しく解析を

行っておらず、各市場参加者の市場取引に対する影響についてのより詳細な定量的評価が望まれる。

4. 市場構造の動的な変化について

本稿では主に2年間の店頭デリバティブ取引情報（TR データ）の蓄積から、平時における市場構造の静的な特徴について解析を行った。しかし、市場に大きな影響を与える事態が発生した際にどのように市場構造が変化するかについて明らかにすることも金融制度を検討するうえで重要な課題である。昨年より続くコロナウィルスの感染拡大による市場構造の変化等、突発的かつ影響の大きな事態の前後に焦点を絞り、その時間軸の中でどのような変化が市場に見られるのかを検討することが望まれる。

8 まとめ

本稿では、法に基づき金融庁に報告された店頭デリバティブ取引情報（TR データ）を分析対象として、店頭デリバティブ取引市場の取引ネットワーク構造に関する解析を試行した。店頭デリバティブ取引情報に関する保存・報告制度は、リーマンショックを契機として、店頭デリバティブ取引市場の実態把握・透明性向上を目的に制度整備されたものであるところ、取引ネットワークの把握による市場の透明性向上・市場構造の深度ある分析に向けた試行結果・分析ノウハウを、今回の解析によって得ることができた。例として、本稿解析で中心的に用いた媒介中心性は、取引ネットワークにおいて各市場参加者がどれだけハブとして機能しているかを表す指標であり、各市場参加者に何らかのトラブルが発生した場合に他者に影響を与える度合いについて知見を得られる可能性がある。さらに、クラスタリング係数等のネットワーク指標やコミュニティ分割の手法の金融監督分野における有用性の検証等を含め、各取引市場の取引ネットワークの構造を解析することによって得られる視点が今後の金融行政にどう活かせるかについてノウハウを蓄積することは重要であると思われる。

上記のように、取引に関する明細データの解析を試行し、市場ネットワークに関する知見・分析ノウハウを蓄積することは、将来的な金融モニタリングひいては金融規制の企画等への応用を検討するうえでも重要であり、金融庁として引き続き店頭デリバティブ取引情報（TR データ）の蓄積及び解析を続けるとともに、職員のデータ分析スキル等の底上げを図っていくことが重要となる。

参考文献

- [1] 外務省. (2009). LEADERS' STATEMENT THE PITTSBURGH SUMMIT. Mofa.go.jp. Retrieved 13 June 2021, from https://www.mofa.go.jp/policy/economy/g20_summit/2009-2/statement.pdf.
- [2] FSB. (2008). FSB publishes reports on implementation of OTC derivatives reforms and removal of legal barriers. Fsb.org. Retrieved 13 June 2021, from <https://www.fsb.org/2018/11/fsb-publishes-reports-on-implementation-of-otc-derivatives-reforms-and-removal-of-legal-barriers/>.
- [3] 金融庁. (2020). 金融サービスの利用者の利便の向上及び保護を図るための金融商品の販売等に関する法律等の一部を改正する法律案要綱. Fsa.go.jp. Retrieved 13 June 2021, from

- <https://www.fsa.go.jp/common/diet/201/01/youkou.pdf>.
- [4] 金融庁. (2020). 令和2年金融商品取引法改正に係る内閣府令・告示案の公表について. Fsa.go.jp. Retrieved 13 June 2021, from <https://www.fsa.go.jp/news/r2/sonota/20201225-3/20201225-3.html>.
 - [5] 金融庁. (2019). 日本銀行との店頭デリバティブ取引情報の共有について. Fsa.go.jp. Retrieved 13 June 2021, from <https://www.fsa.go.jp/status/otcreport/derivative.boj.html>.
 - [6] HKMA. (2019). Hong Kong Monetary Authority - Over-the-Counter Derivatives Trade Repository. Hong Kong Monetary Authority. Retrieved 13 June 2021, from <https://www.hkma.gov.hk/eng/key-functions/international-financial-centre/financial-market-infrastructure/over-the-counter-derivatives-trade-repository/>.
 - [7] HKMA. (2015). A first analysis of derivatives data in the Hong Kong Trade Repository. Hkma.gov.hk. Retrieved 14 June 2021, from <https://www.hkma.gov.hk/media/eng/publication-and-research/quarterly-bulletin/qb201506/fa.pdf>.
 - [8] Understanding Foreign Exchange Derivatives Using Trade Repository Data: The Non-deliverable Forward Market'. Hkma.gov.hk. (2018). Retrieved 14 June 2021, from <https://www.hkma.gov.hk/media/eng/publication-and-research/quarterly-bulletin/qb201803/fa2.pdf>.
 - [9] 金融庁. 店頭デリバティブ取引規制関連：金融庁. Fsa.go.jp. Retrieved 14 June 2021, from <https://www.fsa.go.jp/policy/derivative/index.html>.
 - [10] Harris, C., Millman, K., van der Walt, S., Gommers, R., Virtanen, P., & Cournapeau, D. et al. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357-362. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2649-2>
 - [11] Hagberg, Aric, Swart, Pieter, & S Chult, Daniel. Exploring network structure, dynamics, and function using networkx. United States.
 - [12] Hunter, J. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing In Science & Engineering*, 9(3), 90-95. <https://doi.org/10.1109/mcse.2007.55>
 - [13] Fruchterman, T., & Reingold, E. (1991). Graph drawing by force-directed placement. *Software: Practice And Experience*, 21(11), 1129-1164. <https://doi.org/10.1002/spe.4380211102>
 - [14] Newman, M. (2006). Modularity and community structure in networks. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences*, 103(23), 8577-8582. <https://doi.org/10.1073/pnas.0601602103>
 - [15] Blondel, V., Guillaume, J., Lambiotte, R., & Lefebvre, E. (2008). Fast unfolding of communities in large networks. *Journal Of Statistical Mechanics: Theory And Experiment*, 2008(10), P10008. <https://doi.org/10.1088/1742-5468/2008/10/p10008>
 - [16] Iori, G., & Mantegna, R. (2018). Empirical Analyses of Networks in Finance. *Handbook Of Computational Economics*, 637-685. <https://doi.org/10.1016/bs.hescom.2018.02.005>
 - [17] Brandes, U. (2001). A faster algorithm for betweenness centrality*. *The Journal Of Mathematical Sociology*, 25(2), 163-177. <https://doi.org/10.1080/0022250x.2001.9990249>
 - [18] Freeman, L. (1977). A Set of Measures of Centrality Based on Betweenness. *Sociometry*,

- 40(1), 35. <https://doi.org/10.2307/3033543>
- [19] Brandes, U. (2008). On variants of shortest-path betweenness centrality and their generic computation. *Social Networks*, 30(2), 136-145. <https://doi.org/10.1016/j.socnet.2007.11.001>
- [20] BRANDES, U., & PICH, C. (2007). CENTRALITY ESTIMATION IN LARGE NETWORKS. *International Journal Of Bifurcation And Chaos*, 17(07), 2303-2318. <https://doi.org/10.1142/s0218127407018403>
- [21] Freeman, L. (1978). Centrality in social networks conceptual clarification. *Social Networks*, 1(3), 215-239. [https://doi.org/10.1016/0378-8733\(78\)90021-7](https://doi.org/10.1016/0378-8733(78)90021-7)
- [22] Wasserman, S., & Faust, K. (1994). *Social network analysis: methods and applications*. Cambridge University Press.
- [23] Bonacich, P. (1987). Power and Centrality: A Family of Measures. *American Journal Of Sociology*, 92(5), 1170-1182. <https://doi.org/10.1086/228631>
- [24] Newman, M. (2010). *Networks: An Introduction*. Oxford University Press. USA, 2010, pp. 169.
- [25] Saramäki, J., Kivelä, M., Onnela, J., Kaski, K., & Kertész, J. (2007). Generalizations of the clustering coefficient to weighted complex networks. *Physical Review E*, 75(2). <https://doi.org/10.1103/physreve.75.027105>
- [26] Onnela, J., Saramäki, J., Kertész, J., & Kaski, K. (2005). Intensity and coherence of motifs in weighted complex networks. *Physical Review E*, 71(6). <https://doi.org/10.1103/physreve.71.065103>
- [27] Fagiolo, G. (2007). Clustering in complex directed networks. *Physical Review E*, 76(2). <https://doi.org/10.1103/physreve.76.026107>
- [28] Albert, R., Jeong, H., & Barabási, A. (1999). Diameter of the World-Wide Web. *Nature*, 401(6749), 130-131. <https://doi.org/10.1038/43601>
- [29] Barabási, A., & Albert, R. (1999). Emergence of Scaling in Random Networks. *Science*, 286(5439), 509-512. <https://doi.org/10.1126/science.286.5439.509>
- [30] 今久保 圭 & 副島 豊. (2008), コール市場の資金取引ネットワーク, 日本銀行. 金融研究第 27 卷別冊第 2 号 (2008 年 11 月発行).
- [31] Iori, G., De Masi, G., Precup, O., Gabbi, G., & Caldarelli, G. (2008). A network analysis of the Italian overnight money market. *Journal Of Economic Dynamics And Control*, 32(1), 259-278. <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2007.01.032>
- [32] Amara, L., Scala, A., Barthelemy, M., & Stanley, H. (2011). Classes of small-world networks. *The Structure And Dynamics Of Networks*, 207-210. <https://doi.org/10.1515/9781400841356.207>
- [33] Barabási, A., & Bonabeau, E. (2003). Scale-Free Networks. *Scientific American*, 288(5), 60-69. Retrieved June 14, 2021, from <http://www.jstor.org/stable/26060284>
- [34] Krapivsky, P., Redner, S., & Leyvraz, F. (2000). Connectivity of Growing Random Networks. *Physical Review Letters*, 85(21), 4629-4632. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.85.4629>
- [35] Dorogovtsev, S., & Mendes, J. (2000). Scaling behaviour of developing and decaying

- networks. *Europhysics Letters (EPL)*, 52(1), 33-39. <https://doi.org/10.1209/epl/i2000-00400-0>
- [36] Dorogovtsev, S., & Mendes, J. (2000). Evolution of networks with aging of sites. *Physical Review E*, 62(2), 1842-1845. <https://doi.org/10.1103/physreve.62.1842>
- [37] Dorogovtsev, S., Mendes, J., & Samukhin, A. (2000). Structure of Growing Networks with Preferential Linking. *Physical Review Letters*, 85(21), 4633-4636. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.85.4633>
- [38] Albert, R., & Barabási, A. (2000). Topology of Evolving Networks: Local Events and Universality. *Physical Review Letters*, 85(24), 5234-5237. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.85.5234>
- [39] Kumar, R., Raghavan, P., Rajagopalan, S., Sivakumar, D., Tompkins, A., & Upfal, E. (2000). The Web as a graph. *Proceedings Of The Nineteenth ACM SIGMOD-SIGACT-SIGART Symposium On Principles Of Database Systems - PODS '00*. <https://doi.org/10.1145/335168.335170>
- [40] Kumar, R., Raghavan, P., Rajagopalan, S., Sivakumar, D., Tomkins, A., & Upfal, E. Stochastic models for the Web graph. *Proceedings 41St Annual Symposium On Foundations Of Computer Science*. <https://doi.org/10.1109/sfcs.2000.892065>