



貿易摩擦と世界貿易ネットワーク

清田, 耕造

(Citation)

国民経済雑誌, 223(1):13-28

(Issue Date)

2021-01-10

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/E0042383>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/E0042383>



国民経済雑誌

招待論文

貿易摩擦と世界貿易ネットワーク

清 田 耕 造

国民経済雑誌 第223巻 第1号 抜刷

2021年1月

神戸大学経済経営学会

招 待 論 文

貿易摩擦と世界貿易ネットワーク^{*}

清 田 耕 造^a

英国の EU からの離脱（Brexit）、米中、そして日韓の貿易摩擦と、ここ数年、貿易をめぐる各国間の対立が深刻化しており、世界経済の大きな懸念材料となっている。それでは、このような貿易摩擦の拡大に伴い、世界の貿易ネットワークは大きく変化しているのだろうか。ここで貿易ネットワークとは、国と国を貿易によってつないだ貿易網を意味している。上記の問いに答えるため、本論文は、2000年から2019年までの世界180カ国の二国間貿易ネットワークを分析した。ネットワーク分析に基づく分析の結果、過去20年間を通じて、世界の貿易ネットワークの中心が欧米諸国から中国へと変化しており、直近においてもその傾向に変化がないことが明らかになった。この結果は、少なくとも現時点においては、米中の貿易摩擦が世界貿易における米中の重要性に与える影響が限定的であることを示唆するものである。また、中心性指標の変化から、世界貿易ネットワークの中でも日本の重要性の低下が顕著であることを確認した。さらに、世界の貿易ネットワークが中国へと一極化していることも明らかになった。この結果は、潜在的には、中国の貿易の変化がより多くの国々に影響を及ぼしうることを示すものである。

キーワード 貿易摩擦、二国間貿易、ネットワーク、中心性

1 背 景

英国の EU からの離脱（Brexit）、米中、そして日韓の貿易摩擦と、ここ数年、貿易をめぐる各国間の対立が深刻化しており、世界経済の大きな懸念材料となっている。これに伴い、貿易摩擦の経済的影響についても分析が始められている。例えば Amiti, Redding, and Weinstein (2019) はトランプ政権下の2018年の関税の変化が輸入価格と輸入量に及ぼした影響を推定し、その推定量をもとに実質所得への影響を分析した。部分均衡分析の結果、彼らはこのような関税の変化が米国全体の実質所得の低下につながっており、その規模は一月当たり14億ドルに上ると指摘している。一方, Fajgelbaum, Goldberg, Kennedy, and Khandelwal

a 慶應義塾大学産業研究所・大学院経済学研究科，経済産業研究所，kiyota@sanken.keio.ac.jp

(2020) は部分均衡ではなく一般均衡モデルにより同じ関税率の変化を分析した。関税収入の増加と国内生産者の利得を考慮すると、貿易摩擦は72億ドルの実質所得の低下につながると試算している。しかし、これは米国のGDPの0.04%にすぎず、米国全体で見ると、貿易摩擦の影響が極めて限定的であることを示唆している。また、Head and Mayer (2019) は自動車産業に注目し、多国間分業を考慮した部分均衡モデルを基に、Brexit や北米自由貿易協定廃止など様々なシナリオの影響を分析した。分析の結果、例えばBrexit が合意なき離脱となった場合、英国の消費者余剰は7.4%下落すると試算している。

ここで、各国の貿易関係は貿易を通じたネットワーク、すなわち貿易ネットワークとして捉えられることに注意しよう。標準的な貿易理論に基づけば、関税戦争はお互いの貿易量を縮小する。これは国と国の間の貿易によるつながりを弱めてしまうことを意味している。このため、貿易摩擦によって、貿易のネットワークの中での当該国の重要性が低下することが予想される¹⁾。それでは、近年の貿易摩擦により、世界の貿易ネットワークは大きく変化しているのだろうか。例えば、米中の貿易摩擦の激化により、世界貿易における米中の相対的な重要性は低下し、逆にドイツや日本などの米中以外の国々の重要性を高めることにつながっているのだろうか。

上述のように、貿易摩擦に関する分析は始められているが、貿易ネットワークに注目した分析はまだ皆無であり、これらの疑問に対する答えは必ずしも明らかではない。その一方で、深刻化する貿易摩擦が世界貿易に与える影響について、各国の政策担当者は大きな関心を寄せている²⁾。2020年以降は新型コロナウイルスの感染拡大に伴う経済・貿易の縮小へと関心が移っているが、感染が収束すれば、貿易摩擦は再び大きな問題となる可能性がある。このため、いまここで上記のような疑問を明らかにしておくことには、ある程度の意義があると考えられる。

このような背景に基づき、本論文では、世界各国の二国間貿易データを利用し、近年の貿易摩擦の前後で貿易ネットワークがどのように変化しているのかを分析する。貿易ネットワークの変化を分析するにあたって、本論文ではネットワーク分析の手法を利用する。ネットワーク分析は様々な対象における構成要素間の関係構造を探る方法であり、その分析対象は個人、企業、ウェブページなど多岐に渡っている。ネットワーク分析は国や人間の間関係を点と線に抽象化してとらえるものであり、ネットワークとはこのような国や人間関係の関係構造を指す。ネットワーク分析では、点は頂点 (vertex) (あるいはノード (node)) と呼ばれ、線は辺 (edge) (あるいはリンク (link)) と呼ばれる。ネットワーク分析は人間関係を分析対象とした社会学や頂点と辺の集合で構成されるグラフを分析対象とした数学の分野を中心に発展してきたものだが、近年になって、経済学の分野でも関心が高まってきた³⁾。

ネットワーク分析の手法に基づく貿易ネットワークの研究は、これまでに数多く行われ

てきた。しかし、そのほとんどは社会学や物理学の研究者によるものであり、国際経済学との関連が必ずしも強くなかった (e.g., Smith and White, 1992; Garlaschelli and Loffredo, 2004)。一方、国際経済学においては、二国間貿易のネットワークを表現する試みは Hilgerdt (1943) によって80年近く前に始められていたが、経済学の他の分野と同様に、ネットワーク分析の有用性は近年に至るまで知られていなかった。

二国間貿易のネットワーク分析を経済学的な視点から論じた先駆的な研究の一つが、De Benedictis and Tajoli (2011) である。彼らは1960年から2000年までの113カ国の二国間貿易データを利用し、各国の中心性指標を計算した。分析の結果、貿易のネットワークの中心がヨーロッパから米国へと変化していることを明らかにしている。この研究に続く形で、De Benedictis, Nenci, Santoni, Tajoli, and Vicarelli (2014) や Cingolani, Iapadre, and Tajoli (2018) が視点を変えて国際貿易のネットワーク分析を行っている⁴⁾。このようにネットワーク分析に基づき貿易パターンを分析した例は数多くあるが、貿易摩擦と貿易ネットワークの關係に注目した分析は、筆者が知る限り、まだ行われていない。このため、本論文の分析は学術的にも一定の貢献があると考えられる。

国際貿易をネットワーク分析によって分析する利点として、次の三点が挙げられる。第一に、データが容易に利用可能な点である。国際貿易のネットワーク分析に必要な基本的情報は、二国間の国際貿易のデータである。この二国間の国際貿易のデータは先進国だけでなく開発途上国でも整備されており、国際機関のウェブサイトを通じて容易に入手できる。第二に、速報性が高い点である。貿易データは各国で月ごとに集計が行われており、公表までの期間は一年を経ない。このため、足下の経済状況を把握するのに有効なデータであるといえる。第三に、ネットワーク構造の可視化という点で優れている点である。ネットワーク分析では、グラフ理論に基づき、例えば辺の交差や長さが最小になるような形で可視化が行われている。このため、世界貿易における各国の重要性をより容易に把握することが可能になる。これらの利点を踏まえ、本論文ではこのネットワーク分析の手法を利用し、近年の貿易ネットワークの変化を分析することで、貿易摩擦に直面する国の重要性の変化を明らかにする。

本論文の以下の構成は次の通り。次節では分析手法とデータについて解説する。第三節で分析結果を説明し、最終節で本文を締めくくる。

2 分析手法とデータ

2.1 分析手法

近年の世界各国の貿易ネットワークの変化を分析する上で、本論文ではネットワーク分析の手法を用いる。ネットワーク分析では、各頂点のネットワークにおける重要性を評価する上で、中心性 (centrality) という指標が利用されている。この中心性には頂点間の移動距

離を元に評価した近接中心性 (closeness centrality) や次数 (接続している辺の数) を元に評価した次数中心性 (degree centrality) など、様々な指標が開発されている。しかし、二国間の国際貿易の場合、多くの国が多くの国と直接貿易を行っているため、頂点間の距離や次数に基づく評価は必ずしも適切とは言えない。⁵⁾

国際貿易モデルと中心性指標を理論的に結び付けた研究の一つに Behrens, Lamorgese, Ottaviano, and Tabuchi (2007) がある。そこではボナチッチ中心性 (Bonacich centrality) との関係が議論されているが、ボナチッチ中心性には、有向グラフの場合、固有ベクトルが最大固有値やその固有ベクトルが一意に定まらないことがあるという問題がある。⁶⁾そこで本論文では、ボナチッチ中心性を拡張した PageRank 中心性と呼ばれる中心性指標に注目する。

PageRank 中心性はインターネット上のウェブサイトの重要度を評価する上で開発されたものである、重要度 (中心性) の高い他の頂点との接続に高い評価を与える指標であり、次のように表現される。⁷⁾いま、頂点の数を n 、隣接行列 (グラフにおける頂点間の関係の有無を表す行列) を A で表す。ここで

$$A = (a_{ij}) = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} & \cdots & a_{in} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nj} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

ただし、

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{頂点 } j \text{ から頂点 } i \text{ への辺が有る;} \\ 0 & \text{頂点 } j \text{ から頂点 } i \text{ への辺が無い.} \end{cases} \quad (2)$$

である。⁸⁾

いま、PageRank 中心性を $C_p(i)$ で表すとする、 $C_p(i)$ は次のように表される。

$$C_p(i) = \alpha \sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{C_p(j)}{k_j} + \beta. \quad (3)$$

ここで α と β は分析者の設定する任意の正の定数であり、 k_j は頂点 j の出次数である。⁹⁾慣例的に、 $\alpha=0.85$ 、 $\beta=1$ の値が設定されている。¹⁰⁾また、異なる年の比較を可能にするため、年ごとに PageRank 中心性の総和が 1 となるように調整する。本論文では、この PageRank 中心性の変化を見ることで、世界の貿易ネットワークにおける各国の重要性の変化を確認する。

2.2 データ

分析に利用した貿易データは、2000年から2019年までの IMF の *Direction of Trade Statistics* から入手した。このデータベースは二国間の貿易額 (輸出額や輸入額) を把握した統計

である。分析対象国は世界の約180カ国である。分析にあたって、本論文では¹¹⁾ 二国間の総輸入額（米ドルの名目値）を利用した。このため、輸入額には、製造業製品だけでなく、農産品や鉱産物などの非製造業品も含まれる。

二国間の隣接行列は0と1の二値を取る行列だが、本論文では輸入の有無だけでなく規模も考慮するため、隣接行列に実際の輸入額を用いる。このため、例えば a_{ij} は i 国の j 国からの輸入額を表すことになる。このようにすることで貿易額をウェイトとして分析に反映させることが可能になる。この意味において、本論文の分析は貿易の有無（extensive margin）だけでなく、貿易の規模（intensive margin）も考慮している。

なお、本論文では、各国の重要性（中心性の高さ）はあくまで貿易の規模、すなわち輸入額全体とそのつながりをもとに評価している点に注意して欲しい。例えば、石油や天然ガスなどの天然資源は日本の生活を考える上で重要な財だが、本論文は個々の財の性質までには踏み込んでいない。これは、各国にとって希少な財や資源が異なるためである。また、一部の天然資源は産出国に限られるため、その資源に注目すると中心性がその国に偏ることはほぼ自明だろう。このため、本論文の重要性は、あくまで貿易の一面を指しているにすぎない点に注意が必要である。

3 分 析 結 果

表1は2000年から2019年までの PageRank 中心性の推移をまとめたものである。表はサンプルサイズ（対象となる国の数）、および中心性指標の最小値、四分位、最大値を示している。この表より、中心性指標は期間を通じて大きな変化はなく、安定的に推移していることが確認できる。

表2は PageRank 中心性の順位の推移を上位10カ国についてまとめたものである。紙幅の節約のため、国名は ISO コードで示している、この表の注目すべき点として、次の四点が挙げられる。第一に、2000年から2019年にかけて、上位10カ国は次の12カ国によって占められている点である：ベルギー（BEL）、カナダ（CAN）、中国（CHN）、ドイツ（DEU）、フランス（FRA）、イギリス（GBR）、イタリア（ITA）、日本（JPN）、韓国（KOR）、オランダ（NLD）、ロシア（RUS）、米国（USA）。この結果は、貿易の規模と他国との結びつきという点で、PageRank 中心性で見た場合、これらの12カ国が過去20年に渡って重要な位置にあったことを確認するものである。第二に、2001年以降の上位4カ国は、中国、ドイツ、日本、米国で占められている点である。この結果は、これらの4カ国が世界貿易で特に中心的な位置にあることを示唆するものである。

第三に、これらの順位には変動が見られることである。いわゆる G7 の国々（カナダ、ドイツ、フランス、英国、イタリア、日本、米国）は2000年から2019年にかけて軒並み順位を

表1 PageRank 中心性の推移：全世界

Year	N	Min	p25	p50	p75	Max
2000	179	0.0008	0.0009	0.0014	0.0038	0.1095
2001	179	0.0008	0.0009	0.0013	0.0040	0.1068
2002	180	0.0008	0.0009	0.0013	0.0035	0.0986
2003	181	0.0008	0.0009	0.0013	0.0034	0.0900
2004	181	0.0008	0.0009	0.0013	0.0036	0.0847
2005	183	0.0008	0.0009	0.0014	0.0040	0.0809
2006	183	0.0008	0.0009	0.0013	0.0040	0.0784
2007	183	0.0008	0.0009	0.0013	0.0041	0.0797
2008	183	0.0008	0.0009	0.0014	0.0046	0.0805
2009	183	0.0008	0.0009	0.0014	0.0042	0.0882
2010	183	0.0008	0.0009	0.0014	0.0045	0.0929
2011	183	0.0008	0.0009	0.0014	0.0043	0.0904
2012	183	0.0008	0.0009	0.0014	0.0046	0.0924
2013	183	0.0008	0.0010	0.0014	0.0043	0.0936
2014	183	0.0008	0.0010	0.0014	0.0044	0.0993
2015	183	0.0008	0.0010	0.0014	0.0040	0.1095
2016	183	0.0008	0.0010	0.0013	0.0037	0.1110
2017	183	0.0008	0.0010	0.0014	0.0039	0.1107
2018	183	0.0008	0.0010	0.0014	0.0044	0.1103
2019	183	0.0008	0.0010	0.0014	0.0041	0.1116

出所：IMF (2020) *Direction of Trade Statistics* より筆者作成。

表2 PageRank 中心性の順位の推移：上位10カ国

Year	BEL	CAN	CHN	DEU	FRA	GBR	ITA	JPN	KOR	NLD	RUS	USA
2000		9	5	2	4	6	7	3	10	8		1
2001	10	9	4	2	5	6	7	3		8		1
2002	9	10	4	2	5	6	7	3		8		1
2003	9		3	2	5	6	7	4	10	8		1
2004	10		3	2	5	6	7	4	9	8		1
2005	10		3	2	5	6	7	4	9	8		1
2006			3	2	5	6	7	4	9	8	10	1
2007			1	3	5	8	6	4	9	7	10	2
2008			1	3	5	9	7	4	10	6	8	2
2009			1	3	5	9	7	4	8	6	10	2
2010			1	3	5	9	8	4	7	6	10	2
2011			1	3	5	10	9	4	8	6	7	2
2012			1	3	5	10	9	4	8	7	6	2
2013			1	3	5	9	10	4	7	6	8	2
2014			1	3	5	10	9	4	7	6	8	2
2015			1	3	6	9	8	4	5	7	10	2
2016	10		1	3	5	9	8	4	6	7		2
2017			1	3	6	9	8	4	5	7	10	2
2018			1	3	6	10	8	4	5	7	9	2
2019			1	3	5	10	8	4	7	6	9	2

注：国名はISOコード名で示している。また、空欄は上位10カ国に含まれないことを意味している。

出所：IMF (2020) *Direction of Trade Statistics* より筆者作成。

落としている。特に米国は2006年まで首位の座にあったが、2007年以降は中国にその座を取って代わられている。また、カナダは2003年以降、上位10位の圏外になっており、英国も2000年の6位から2019年には10位と順位を大きく落としている。日本は2002年までの3位から2003年以降は4位に順位を落としている。一方、中国や韓国、ロシアが順位を上げており、特に中国は2000年の5位から2007年には首位に順位を伸ばし、その後、2019年まで首位の座を保ち続けている。また、韓国は2000年の10位から2019年には7位へと順位を伸ばしている。これらの結果は、世界貿易の重要性がG7からそれ以外の国へシフトしていることを示唆している。

第四に、中心性指標の順位をみる限り、貿易摩擦はこのような大きな趨勢を変化させているようには見受けられない点である。例えば、2018年以降、米中の貿易摩擦が激化しているが、両国の順位は2018年前後で変化していない。英国も2008年以降9位と10位の間を行き来しており、近年もその傾向に変化は見られない。韓国の順位は2018年から2019年にかけて5位から7位へと低下しているが、2013年以降、韓国は5位から7位の間を行き来しているため、この下落が日韓の貿易摩擦の影響によるものか、それとも他の要因によるものかは必ずしも定かではない。これらの結果は、貿易摩擦の影響は、少なくともこれまでのところは、世界貿易における各国の重要性を変えるほどには大きくないことを示唆している。

ここで、順位には変化が見られなくても、指標そのものは変化しているのではないかという疑問を持った方もおられるかもしれない。このような疑問に答えるため、これらの上位10カ国について、PageRank 中心性の指標そのものをまとめたのが表3である。この表より、次の三点が確認できる。第一に、米中の貿易摩擦が顕著になった2018年前後において、両国の中心性指標の大きな変化が見られない点である。この結果は、米中の貿易摩擦が世界貿易における米中の重要性に与える影響が限定的であることを示唆している。Fajgelbaum, Goldberg, Kennedy, and Khandelwal (2020) は、米国全体で見ると貿易摩擦の影響は非常に小さいことを確認しているが、本論文の結果は彼らの結果と整合的であると言える。

第二に、2015年以降フランス、オランダ、韓国の PageRank 指標に差が見られないことである。この結果は、これらの国の順位に違いはあるものの、その差がわずかであることを示唆している。表2において、韓国が2018年から2019年にかけて順位を5位から7位へと落としたことを確認したが、これらの国々の順位の変化は中心性指標の微妙な変化によるものであることがわかる。

そして第三に、米国やヨーロッパの先進国と比較すると、日本の指標がやや大きな下落を示している点である。表2で確認したように、日本の順位は2003年以降、4位のまま変化がない。しかし、PageRank 中心性指標は2003年の0.055から2019年には0.035へと0.02ポイント下落している。同じ期間、米国は0.090から0.075へ、ドイツは0.081から0.066へと低下してい

表3 PageRank 中心性の推移：上位10カ国

Year	BEL	CAN	CHN	DEU	FRA	GBR	ITA	JPN	KOR	NLD	RUS	USA
2000		0.027	0.044	0.073	0.044	0.041	0.032	0.062	0.023	0.029		0.110
2001	0.023	0.026	0.047	0.077	0.045	0.041	0.033	0.057		0.030		0.107
2002	0.025	0.023	0.053	0.080	0.045	0.039	0.033	0.056		0.030		0.099
2003	0.025		0.058	0.081	0.044	0.036	0.033	0.055	0.023	0.030		0.090
2004	0.025		0.063	0.080	0.043	0.035	0.032	0.054	0.025	0.030		0.085
2005	0.024		0.069	0.076	0.039	0.032	0.030	0.052	0.026	0.030		0.081
2006			0.074	0.074	0.037	0.030	0.029	0.050	0.028	0.029	0.025	0.078
2007			0.080	0.075	0.036	0.029	0.030	0.049	0.027	0.029	0.025	0.076
2008			0.081	0.072	0.034	0.027	0.028	0.046	0.026	0.029	0.027	0.074
2009			0.088	0.074	0.035	0.026	0.028	0.045	0.027	0.030	0.024	0.076
2010			0.093	0.069	0.032	0.025	0.026	0.046	0.028	0.030	0.025	0.074
2011			0.090	0.068	0.031	0.024	0.026	0.040	0.028	0.029	0.028	0.073
2012			0.092	0.065	0.030	0.024	0.026	0.040	0.027	0.029	0.029	0.074
2013			0.094	0.067	0.031	0.027	0.026	0.036	0.028	0.030	0.028	0.074
2014			0.099	0.068	0.031	0.025	0.026	0.035	0.028	0.029	0.026	0.075
2015			0.109	0.070	0.031	0.025	0.026	0.037	0.031	0.028	0.022	0.078
2016	0.020		0.111	0.071	0.031	0.023	0.026	0.039	0.031	0.028		0.077
2017			0.111	0.069	0.030	0.022	0.026	0.037	0.031	0.029	0.022	0.075
2018			0.110	0.067	0.029	0.023	0.026	0.035	0.029	0.029	0.024	0.074
2019			0.112	0.066	0.029	0.022	0.026	0.035	0.029	0.029	0.023	0.075

注：国名は ISO コード名で示している。また、空欄は上位10カ国に含まれないことを意味している。

出所：IMF (2020) *Direction of Trade Statistics* より筆者作成。

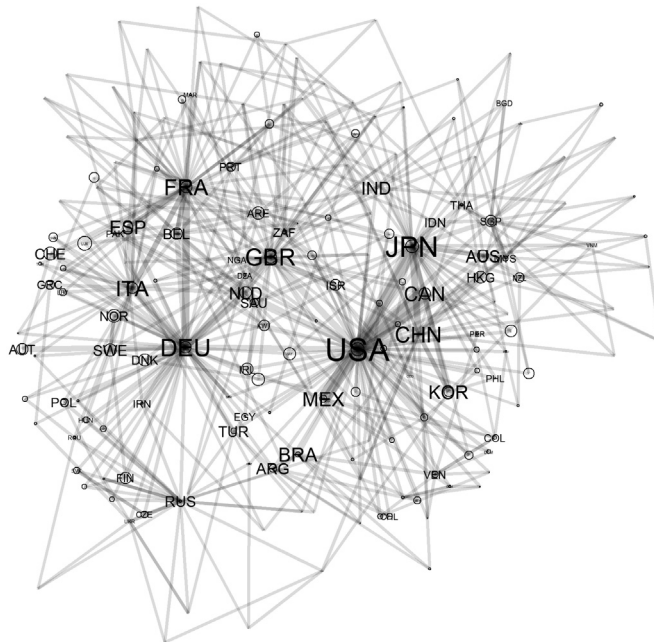
るが、日本の減少幅の0.02ポイントを上回るほどは大きくない。これらの結果は、世界貿易ネットワークの中でも日本の重要性の低下が顕著であることを意味している。

これまでは各国それぞれの中心性指標を見てきた。それでは各国の相互の関係はどのようなになっているのだろうか。図1は、このような疑問に答えるため、2000年と2019年の二国間貿易のネットワークをグラフで表したものである。このグラフの描画には Gransner, Koren, and North (2004) によって考案された stress majorization と呼ばれるアルゴリズムを利用している。このアルゴリズムは力学モデルによるグラフ描画（力指向アルゴリズム）の一つであり、グラフの辺の長さがほぼ等しく、できるだけ交差しない形で、各頂点が配置されている。¹²⁾ このグラフでは、各国の貿易相手国上位3カ国に絞って、二国間関係を示している。¹³⁾ また、各国の ISO コードの大きさは国内総生産（Gross Domestic Product: GDP）の規模を表しており、各点の大きさは一人当たり GDP の大きさを表している。¹⁴⁾ 各国を結ぶ辺の太さは貿易額の大きさに対応している。

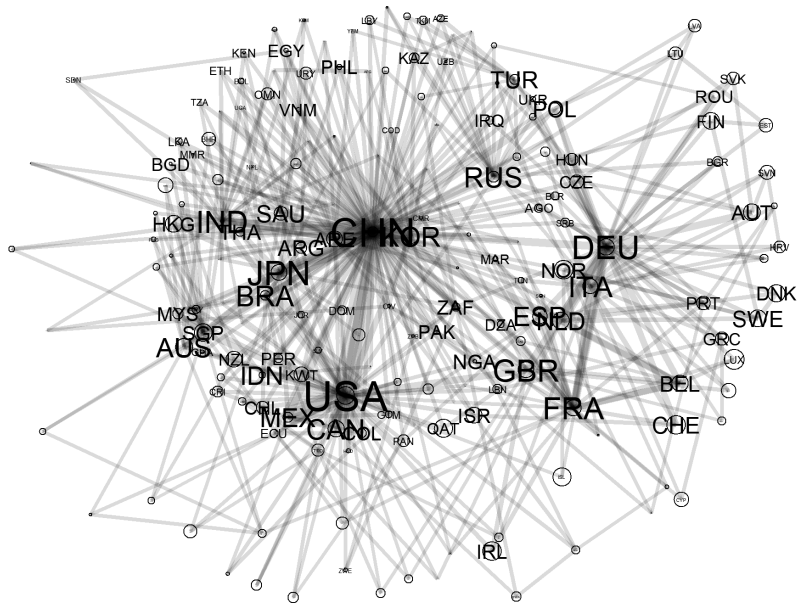
図1より、2000年は、米国とドイツの二カ国を中心とする二つの大きなネットワークが重なっているような形で世界の貿易ネットワークが構築されていることが確認できる。一方、2019年には中国を中心とした一つの巨大なネットワークが構築されつつあり、米国も中国を中心とするネットワークに取り込まれている様子が伺える。また辺の太さから中国と米国の貿易額の大きさも確認できる。これらの図は、世界の貿易の中心が欧米から中国へと一極化

図1 世界貿易のネットワーク

2000年



2019年



注：各国のISOコード名の大きさと頂点の大きさは、それぞれGDPと一人当たりGDPの大きさを反映している。ネットワークは主要貿易相手国3カ国に基づく。

出所：IMF (2020) *Direction of Trade Statistics* より筆者作成。

しており、潜在的には、中国の貿易の変化が多く の国々に影響を及ぼしうることを示すものである。

4 結 論

本論文は、ネットワーク分析に基づき、貿易摩擦と世界の貿易ネットワークの変化を見たものである。2000年から2019年までの世界180カ国の二国間貿易ネットワークを分析した結果、世界の貿易ネットワークの中心が欧米諸国から中国へと変化しており、直近においてもその傾向に変化がないことが明らかになった。この結果は、少なくとも現時点においては、米中の貿易摩擦が世界貿易における米中の重要性に与える影響が限定的であることを示唆するものである。Fajgelbaum, Goldberg, Kennedy, and Khandelwal (2020) は、米国全体で見ると貿易摩擦の影響は非常に小さいことを確認しているが、本論文の結果は彼らの結果と整合的であると言える。また、中心性指標の変化から、世界貿易ネットワークの中でも日本の重要性の低下が顕著であることを確認した。さらに、世界の貿易ネットワークが中国へと一極化していることも明らかになった。この結果は、潜在的には、中国の貿易の変化がより多くの国々に影響を及ぼしうることを確認するものである。

本論文を締めくくるにあたって、本論文の課題について付言しておきたい。第一に、本論文の分析はあくまで記述統計的な分析にとどまっている点である。特に因果関係の特定については、より詳細な分析が必要である。例えば、本論文は世界の貿易ネットワークの中心が欧米諸国から中国へと変化していることを確認したが、このような変化が貿易摩擦を生み出す一因となっているのかもしれない。第二に、本論文の分析は貿易に影響する他の要因のコントロールが不十分な点である。二国間貿易の変化には、貿易摩擦だけでなく、各国の経済規模の変化など様々な要因が考えられる。貿易摩擦の影響を厳密に見極めるためには、その他の様々な要因を考慮したより精緻な分析が必要である。

第三に、本論文は二国間貿易の総額に注目したものであり、個別の財の貿易までは踏み込んでいない点である。貿易摩擦の影響は、全体で見ると小さく収まっているかもしれないが、特定の財の貿易に大きな影響を及ぼしている可能性もある。このような点を明らかにするためには、財レベルでの詳細な分析が必要になってくる。第四に、貿易摩擦が各国の中心性に等しく（比例的に）影響する場合、世界の貿易額が低下していても、中心性指標には変化が現れないかもしれない。そして最後に、分析の期間が2019年までとなっている点である。貿易摩擦の影響は長期的に顕在化してくる可能性もある。ただし、2020年以降は新型コロナウイルスの感染拡大の影響もあり、貿易摩擦の影響を見極めるのが一層困難になる恐れもある。本論文の分析結果を解釈・拡張していく上で、これらの点には注意が必要だろう。これらの課題については、今後の研究を通じて考察・検討していきたい。

補論 A 中心性¹⁵⁾

補論 A では、中心性指標について解説する。中心性とはネットワークにおける各頂点の重要性を評価するための指標である。この重要性は様々な形で定義されており、それに対応する形で様々な中心性指標が開発されている。本節では頻繁に用いられる中心性指標として、1) 次数中心性、2) 近接中心性、3) 固有ベクトル中心性、4) Katz 中心性・PageRank 中心性、5) 媒介中心性の五つの中心性を紹介する。以下では、あるグラフの頂点の数を n 、隣接行列を $A=(a_{ij})$ で表すとする。

補論 A. 1 次数中心性 (Degree centrality)

次数中心性とは、各頂点に接続する辺の数の合計として定義されるものである。ただし、次数の取りうる値の範囲はグラフに含まれる頂点の数によって異なるため、頂点の数の異なるグラフ間では次数中心性を比較することができない。頂点の数の異なるグラフ間での比較も可能にするために、グラフに含まれる頂点の数に関係なく一定の範囲の値を取るよう基準化する必要がある。その基準化にあたって、次数をその理論的な最大値で割るという方法が採用されている。例えば、頂点数 n のグラフでは、理論的な最大値は $n-1$ 、すなわちある点が自身以外のすべての頂点と辺を持つ状態である。このため、いま無向グラフの次数中心性を $C_d(i)$ で表すすると、 $C_d(i)$ は次数中心性は次のように表される。

$$C_d(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n a_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n a_{ji}. \quad (\text{A1})$$

基準化された次数中心性は 0 から 1 の間の値を取り、1 に近づくほど接続する辺の数が多く、中心性が高いと評価される。

一方、有向グラフの場合、辺の数だけでなく、ある頂点から他の頂点へと出ていく出次数 (outdegree) と他の頂点からある頂点に入ってくる入次数 (indegree) が区別される。この出次数と入次数はそれぞれ隣接行列の行和と列和によってとらえられるが、無向グラフと同様の理由で、基準化が必要になる。いま出次数と入次数をそれぞれ $C_{od}(i)$ 、 $C_{id}(i)$ で表すすると、 $C_{od}(i)$ 、 $C_{id}(i)$ はそれぞれ次のように表される。

$$C_{od}(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad \text{and} \quad C_{id}(i) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n a_{ji}. \quad (\text{A2})$$

A. 2 近接中心性 (Closeness centrality)

近接中心性は、他の頂点との距離の近さに基づく指標である。いま、ネットワークにおいて、頂点 i から頂点 j へと移動することを考える。このとき、経路する辺の数が最小になるような経路は最短経路と呼ばれ、そのときの距離は最短距離と呼ばれる。以下では、この最短距離を d_{ij} で表す。例えば、 i と j が直接つながっているなら辺は一つとなるため、 $d_{ij}=1$ である。他の頂点の一つ経由しなければならないなら辺は二つとなり、 $d_{ij}=2$ である。この最小距離の最大値は離心数 (eccentricity) と呼ばれる。また、離心数の最大値は直径 (diameter)、離心数の最小値は半径 (radius)、半径と等しい離心数を持つ頂点はグラフの中心 (center)、最短距離の合計はステイタス (status) と呼ばれる。

近接中心性とは、このステイタスの逆数として定義されるものである。ただし、近接中心性も、次数中心性と同様に、グラフに含まれる頂点数によって取りうる値が変わってくるため、頂点数の異なるグラフの間ではその値を比較することができない。頂点数の異なるグラフ間での比較を可能にするために、近接中心性をその理論的な最大値で割るという基準化が採用されている。例えば、頂点数 n のグラフでは、近接中心性の理論的な最大値は $1/(n-1)$ となる。なぜなら、近接中心性が最大値を取るのは、ステイタスが最小値をとるときであり、ステイタスの最小値は $n-1$ となるためである。近接性はステイタスの逆数として定義されるため、ステイタスの最小値の逆数 $1/(n-1)$ が理論的な最大値となる。基準化された近接中心性を $C_d(i)$ で表すとすると、 $C_d(i)$ は次のように表される。

$$C_d(i) = \frac{n-1}{\sum_{j=1}^n d_{ij}}. \quad (\text{A3})$$

なお、最短距離を利用したこの他の指標に、離心数に基づく離心中心性 (eccentricity centrality) がある。離心中心性はある頂点を中心からどのくらい離れているかを見るものであり、離心中心性を $C_{ec}(i)$ で表すとすると、 $C_{ec}(i)$ は離心数の逆数として次のように表される。

$$C_{ec}(i) = \frac{1}{\max(d_{ij})}. \quad (\text{A4})$$

ここで、離心数の逆数を取っているのは中心に近いほど大きい値を取るようにしているためである。

A. 3 固有ベクトル中心性 (Eigenvector centrality)

ある点の中心性を評価するとき、その頂点の次数に隣接する頂点の中心性を反映させる方法が、固有ベクトル中心性である。いま、ある無向グラフの隣接行列を $A=(a_{ij})$ とし、そこに含まれる頂点の中心性を成分とする列ベクトルを $c=(c_i)$ とする。ある頂点の中心性がそれと隣接する頂点の中心性の和に比例するとすると、頂点 i の中心性 c_i は次のように表される。

$$c_i = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^n a_{ij} c_j. \quad (\text{A5})$$

ここで、 λ は正の値の比例定数である。次数中心性と比べると、他の頂点の中心性 c_j が反映される式になっていることがわかる。この式を行列の形で表すと

$$c = \frac{1}{\lambda} A c \Leftrightarrow \lambda c = A c \quad (\text{A6})$$

となり、 λ が隣接行列 A の固有ベクトルになっていることがわかる。固有ベクトル中心性は比例定数 λ に、この固有ベクトルの中の第一固有ベクトル (最大固有値) を対応させたものである。固有ベクトル中心性を $C_{ev}(i)$ で表すとすると、次のように表される。

$$C_{ev}(i) = \frac{1}{\lambda} \sum_{j=1}^n a_{ij} C_{ev}(j). \quad (\text{A7})$$

ここで λ は隣接行列の最大固有値である。なお、Bonacich (1972) は各頂点の中心性が A の第一固有ベクトルの対応する成分に収束することを示したことから、固有ベクトル中心性はボナチッチ中心性 (Bonacich centrality) とも呼ばれる。

A. 4 Katz 中心性 (Katz centrality) ・ PageRank 中心性 (PageRank centrality)

固有ベクトル中心性は他の頂点の中心性 $C_{ev}(j)$ をウェイトとするため、ある点が中心性が 0 となるような頂点 (i.e., $C_{ev}(j)=0$) と接続していると、その点の中心性も 0 となってしまうことがある。¹⁶⁾ 特に有向グラフで強連結とならない場合、最大固有値が一意に定まらないため、このような問題が生じることになる。¹⁷⁾ このような問題を回避するために考案されたのが、Katz 中心性である。

Katz 中心性は固有値中心性に任意の小さな値を与えることで、この問題に対処しようとするものである。¹⁸⁾ Katz 中心性を $C_k(i)$ で表すとすると、 $C_k(i)$ は次のように表すことができる。

$$C_k(i) = \alpha \sum_{j=1}^n a_{ij} C_k(j) + \beta. \quad (A8)$$

ここで α と β は分析者の設定する任意の正の定数だが、 $\alpha, \beta > 0$ の下で中心性の計算を収束させるためには、 α を最大固有値より小さな値に設定する必要がある、慣例的には、最大固有値に近い値が設定される。また、 β には、通常、1 の値 (i.e., $\beta=1$) が設定される (Newman, 2010)。¹⁹⁾

このように、Katz 中心性は固有ベクトル中心性を改良したものだが、高い中心性を持つ頂点からの接続を高く評価するという特徴は、分析目的によっては必ずしも望ましくないことがある。例えば、ウェブサイトのリンクを考える場合、Yahoo! は無数のウェブサイトにリンクを持っており、その中心性は高いかもしれない。だからといって、Yahoo! から接続があるウェブサイトも中心性が高いとは限らないが、Katz 中心性では、Yahoo! から接続のあるウェブサイトには Yahoo! の高い中心性がそのまま反映されることになる。

このような問題を回避するために考案されたのが、PageRank 中心性である。²⁰⁾ いま PageRank 中心性を $C_p(i)$ で表すとすると、 $C_p(i)$ は次のように表される。

$$C_p(i) = \alpha \sum_{j=1}^n a_{ij} \frac{C_p(j)}{k_j} + \beta. \quad (A9)$$

ここで α と β は分析者の設定する任意の正の定数であり、 k_j は頂点 j の出次数である。²¹⁾ Katz 中心性と PageRank 中心性の違いは、頂点 j からの出次数を k_j によって調整している点にある。なお、Katz 中心性と同様に、PageRank 中心性においても、 α は最大固有値より小さくなくてはならない。慣例的にこの値は $\alpha=0.85$ に設定されているが、この値は必ずしも理論的な根拠に基づくものではない。一方、Katz 中心性と同様に、 β には、通常、1 の値 (i.e., $\beta=1$) が設定されている。

A. 5 媒介中心性 (Betweenness centrality)

一般に、最短経路上にある点は、頂点と頂点をつなぐ上で重要な点と考えられる。そしてより多くの最短経路上にある頂点は、ネットワークを構成する上で重要度が高いと考えることもできる。このような考えに基づき、ある頂点が最短経路上に位置する程度を中心性指標としたのが、媒介中心性である。

いま、媒介中心性を $C_b(i)$ で表すとすると、また、頂点 j と頂点 k の間の最短経路数を g_{jk} 、頂点 j と k の最短距離のうち、頂点 i を通るものの数を $g_{jk}(i)$ とする。このとき、 $C_b(i)$ は次のように表される。

$$C_b(i) = \sum_{j \neq i \neq k} \frac{g_{jk}(i)}{g_{jk}}. \quad (A10)$$

なお、媒介中心性の取りうる範囲もグラフに含まれる頂点数によって変わるため、その最大の値 ($= (n-1)(n-2)$) で割ることで、基準化することができる。

注

- * 本論文の執筆にあたって、科学研究費（JP18H03637, JP19H00598）の支援を得た。記して謝意を表したい。なお、本論文に残る誤りは筆者に帰するものである。
- 1) ネットワーク分析において、各国の重要性は中心性として捉えられる。この中心性については次節、及び補論 A で詳しく説明する。
 - 2) 例えば、International Monetary Fund (IMF) (2019, p. 19) の『世界経済見通し (World Economic Outlook)』では、米中の貿易摩擦が世界貿易の鈍化につながっていると指摘し、深刻な懸念を示している。
 - 3) 例えば、アメリカ経済学会の発行する学術誌 *Journal of Economic Perspectives* の2014年秋号では、ネットワーク分析のシンポジウムが特集されている。また、Graham (2019) は経済学における最近のネットワークデータの分析手法について詳しい解説を行っている。なお、頂点の集合と辺の集合で構成されるグラフに関する数学の理論はグラフ理論と呼ばれている。
 - 4) なお、国内・国際的な企業間ネットワークに関する近年の研究については、Todo (2018) が参考になる。
 - 5) 例えば分析対象となる国が100カ国あり、それぞれの国がそのうち90カ国と貿易を行っている、各国は次数の上では差がなくなる。また、グラフは辺で埋めつくされてしまい、有意義な情報を見出すことが難しくなる。
 - 6) この詳細については補論 A を参照して欲しい。なお、ボナチッチ中心性は固有ベクトル中心性とも呼ばれる。また、有向グラフとは、頂点と頂点の間の関係に向きがあるネットワークを指す。
 - 7) PageRank 中心性、及びその他の主要な中心性については、補論 A で説明する。
 - 8) なお、ある頂点からその頂点自身への辺を考えない場合、隣接行列の対角成分 (a_{ii}) は 0 となる。また、無向グラフの場合、頂点 i から頂点 j への辺があることは、頂点 j から頂点 i への辺があることも意味するため、隣接行列は対称行列となり、 $a_{ij}=a_{ji}$ が成立する。ここで無向グラフとは、頂点と頂点の間の関係に向きがないネットワークを指す。
 - 9) 出次数とは、有向グラフにおいて、ある頂点から他の頂点へと出ていく辺の数を意味している。なお、出次数が 0 の場合は計算ができなくなるため、 $k_j=1$ が設定される。また、すべての出次数が 1 の場合、Katz 中心性と PageRank 中心性の違いは α のみの違いとなる。なお、 $\alpha \in [0, 1)$ であれば、PageRank 中心性は一意に求められることが知られている (Liao, Mariani, Medo, Zhang, and Zhou, 2017)。
 - 10) α はダンピング・ファクターとも呼ばれる。ウェブサイトの重要度を評価する上では、高いダンピング・ファクターは、PageRank 中心性が（リンクされていないウェブサイトの中心性ではなく）リンクされているウェブサイトの中心性により多くのウェイトを置くことを意味している。
 - 11) より厳密には、輸入額は運賃・保険料が含まれた CIF (cost, insurance, and freight) 価格で評価されている。
 - 12) このため、グラフにおける各頂点間（本論文の場合、各国間）の距離は必ずしも両国の関係の近さや遠さを表さない点に注意が必要である。
 - 13) 貿易相手国を 4 カ国以上にする場合、交差する辺が多くなり、ネットワークを見極めることが難しくなる。なお、貿易相手国上位 3 カ国が各国の総貿易額に占めるシェアは、2019年時点で平

- 均49.3%となっている。分析対象を主要貿易相手国3カ国に絞った場合でも、世界貿易の約半分をカバーしていることになる。
- 14) 論文執筆時点(2020年4月時点)で、2019年のGDP、一人当たりGDPのデータが得られなかったため、2019年のグラフには2018年のGDP、一人当たりGDPのデータを利用した。
- 15) 本節の解説はNewman(2010)、及び鈴木(2017)に基づくものである。
- 16) (A7)式より、 i が j 以外の点と辺を持たず、 $C_w(j)=0$ のとき、 i の中心性もゼロとなることがわかる。
- 17) 強連結とは、有向グラフにおいて、グラフに含まれる各点が相互に到達可能であることを意味している。一方、有向グラフにおいて、辺の向きを考えなければ相互に到達可能という場合は弱連結と呼ばれる。なお、無向グラフの場合、強連結と弱連結の区別はない。各点が相互に到達可能である場合は連結と呼ばれる。
- 18) 技術的には、Katz中心性のこの工夫により、グラフは便宜的に強連結と変換されることになる。このため、有向グラフで強連結とならない場合でも、中心性の計算が可能になる。
- 19) このため、Katz中心性の最小値は、通常1になる。
- 20) PageRank中心性はウェブ上の情報検索において、各ウェブページの重要性を評価する上でPage, Brin, Motwani, and Winograd(1999)によって考案された。なお、この著者のうち、Lawrence PageとSergey BrinはGoogle社の創設者である。
- 21) 出次数が0の場合は計算ができなくなるため、 $k_i=1$ が設定される。

参 考 文 献

- Amti, Mary, Stephen J. Redding, and David E. Weinstein (2019) "The Impact of the 2018 Tariffs on Prices and Welfare," *Journal of Economic Perspectives*, 33(4): 187-210.
- Behrens, Kristian, Andrea R. Lamorgese, Gianmarco I. P. Ottaviano, and Takatoshi Tabuchi (2007) "Changes in Transport and Non-transport Costs: Local vs Global Impacts in A Spatial Network," *Regional Science and Urban Economics*, 37(6): 625-648.
- Bonacich, Phillip (1972) "Factoring and Weighting Approaches to Status Scores and Clique Identification," *Journal of Mathematical Sociology*, 2(1): 113-120.
- Cingolani, Isabella, Leilio Iapadre, and Lucia Tajoli (2018) "International Production Networks and the World Trade Structure," *International Economics*, 153: 11-33.
- De Benedictis, Luca and Lucia Tajoli (2011) "The World Trade Network," *The World Economy*, 34(8): 1417-1454.
- De Benedictis, Luca, Silvia Nenci, Gianluca Santoni, Lucia Tajoli, and Claudio Vicarelli (2014) "Network Analysis of World Trade Using the BACI-CEPII Dataset," *Global Economy Journal*, 14(3-4), 1-57.
- Fajgelbaum, Pablo D., Pinelopi K. Goldberg, Patrick J. Kennedy, and Amit K. Khandelwal (2020) "Return to Protectionism," *Quarterly Journal of Economics*, 135(1): 1-55.
- Garlaschelli, Diego and Maria I. Loffredo (2004) "Fitness-Dependent Topological Properties of the World Trade Web," *Physical Review Letters*, 93(18): 188701.
- Graham, Bryan S. (2019) "Network Data," NBER Working Paper, No. 26577, National Bureau of Eco-

- conomic Research (NBER).
- Gransner, Emden R., Yehuda Koren, and Stephen North (2004) “Graph Drawing by Stress Majorization,” in J. Pach (ed.) *Graph Drawing, GD 2004, Lecture Notes in Computer Science*, vol 3383, Berlin: Springer.
- Head, Keith and Thierry Mayer (2019) “Brands in Motion: How Frictions Shape Multi-national Production,” *American Economic Review*, 109(9): 3073–3124.
- Hilgerdt, Folke (1943) “The Case for Multilateral Trade,” *American Economic Review*, 33(1): 393–407.
- International Monetary Fund (IMF) (2019) *World Economic Outlook, October 2019: Global Manufacturing Downturn, Rising Trade Barriers*, Washington, D.C.: IMF.
- International Monetary Fund (IMF) (2020) *Direction of Trade Statistics*, Washington, D.C.: IMF.
- Liao, Hao, Manuel Sebastian Mariani, Matúš Medo, Yi-Cheng Zhang, and Ming-Yang Zhou (2017) “Ranking in Evolving Complex Networks,” *Physics Reports*, 689: 1–54.
- Newman, Mark E. J. (2010) *Networks: An Introduction*, Oxford: Oxford University Press.
- Page, Lawrence, Sergey Brin, Rajeev Motwani, and Terry Winograd (1999) “The PageRank Citation Ranking: Bringing Order to the Web,” Technical Report, Stanford InfoLab.
- Smith, David A. and Douglas R. White (1992) “Structure and Dynamics of the Global Economy: Network Analysis of International Trade, 1965–1980,” *Social Forces*, 70(4): 857–893.
- Todo, Yasuyuki (2018) “Using Randomized Controlled Trials and Network Analysis in International Economics: An Introduction,” *The International Economy*, 21: 1–13.
- 鈴木努 (2017) 『R で学ぶデータサイエンス：ネットワーク分析』, 第2版, 共立出版。