

ネットワーク理論にもとづくグローバル生産 ネットワークの脆弱性に関する分析

遠 山 弘 徳

要旨

グローバル・バリューチェーン（GVC）は、各国の生産システム間の相互接続をますます強めており、生産効率を向上させる一方で、供給側からのショックに対する脆弱性をも増大させている。近年の自然災害、パンデミック、そして地政学的紛争の経験は、特定の産業や国で発生した混乱が、世界的に断片化された生産ネットワークを通じていかに波及するかを浮き彫りにした。こうしたショックが供給側（サプライサイド）の性質を持っているにもかかわらず、既存の産業連関分析の多くは、需要主導型のレオンチェフ・モデルに依拠しており、供給制約を捉えるには適切ではなかった。本稿では、ゴーシュ（Ghosh）モデルに基づく供給側の産業連関フレームワークを採用することで、この限界に対処する。さらに、ゴーシュ的な分配係数行列を、産業間における供給フローの相対的な分布を表すものと解釈し、この行列を有向重み付き生産ネットワークへと変換する。このアプローチにより、グローバルな生産ネットワークにおいて、供給ショックの潜在的なボトルネックや増幅器として機能する、構造的に中心的な国や産業を特定する。

Keywords： グローバル・サプライチェーン、供給ショック、ゴーシュ・モデル、ネットワーク中心性、インパルス反応関数

はじめに

伝統的に、ほぼ独立した国家システムとして分析されてきた生産システムは、現代では、グローバルな規模でますます相互に接続されてきている。サプライチェーンはグローバルに地理的に分散した個別の段階に組織されている。空間的に分散された生産システムでは、複数の国の企業が異なる生産段階に属し、多段階的で非線形かつ地理的に境界のない生産経路に沿って中間製品を交換し、最終需要に向けた製品やサービスで完結する世界規模の貿易ネットワークを形成している (e.g., Baldwin, 2016)。

こうしたグローバル・バリューチェーン (GVC) の発展により、多くのグローバル企業は、一方において多くの新興経済を自己の生産ネットワークに組み込み、グローバルな規模での生産効率を高めてきた。それは新興経済の側からみれば、GVCへの参加の機会を与えられ、技術移転や雇用の創出といった機会を与えられるものでもあった。

しかし、他方でGVCは、生産ネットワークがグローバルに分散され組織されるため、ネットワーク上の産業で問題が発生すると、生産ネットワーク全体が機能麻痺に陥るというリスクも同時に高めることとなった。じっさい多くの国が、自然災害やパンデミック等によってGVCの脆弱性を経験してきた。

たとえば、Acemoglu et al. (2012) は特異なミクロ的ショックによって経済全体の変動が惹起される可能性があることを指摘している。生産ネットワークの中心は、そこに何らかの経済的ショックが発生したとき、中心それ自体が起点となり、ネットワークによって結びついた他産業に変動をもたらす可能性がある。あるいはかりにネットワークの周辺的な部門においてショックが発生した場合でも、周辺部門が中心とリンクしている場合、中心をつうじてショックが他の部門に波及して行く (Acemoglu et al., 2012; Carvalho 2014; Cerina et al., 2015; Wu, 2015; McNerney et al., 2021; Georgieva, 2025)。ネットワークの中心は経済的ショックを増幅させる可能性を有する。こうした文脈においては脆弱性は、特定の国・産業が他の国・産業に対して有する依存構造を前提とした上での、他の国・産業の変動に

よってもたらされる潜在的な経済的変動を意味する。それはセクターの絶対的な規模（絶対的な取引額）にもとづくものではなく、技術的依存関係構造から生み出されるボトルネックを意味する¹。

本稿の目的は、グローバル生産ネットワークに焦点をおき、その潜在的な脆弱性を追求することにある。こうした問題に答えるため、第1に、OECD（2023）の国際産業連関表Inter-Country Input-Output（ICIO）を利用し、GVCにおける各国・産業の影響の大きさとその変化を示す。

次いで、ICIOの投入産出表の中間取引行列をネットワークに変換し、産業連関表を単なる行列表としてではなく、ノードとエッジを持つ複雑なネットワークとして捉える（e.g., Cerina et al., 2015; Criscuolo and Timmis, 2018a, b; Aleskerov, et al., 2024; Georgieva, 2025; Ito et al., 2023.）。言い換えれば、これは「物的・技術的な依存関係」の分析から「サプライチェーンのリスク」の分析へとシフトすることを意味する。

以下、本稿は次のように構成される。続く第Ⅰ節においては、産業連関が生産ネットワークの「脆弱性」分析においてどのように利用されてきたかを概観する。次いで、第Ⅱ節では本稿で利用される国際産業連関データについて概観するとともにGVCにおける各国の産業の位置を確認する。Ⅲにおいては国際産業連関表をネットワークに変換し、国際生産ネットワークの中心性を明らかにする。そして最後に、国際生産ネットワークの構造的および動態的脆弱性を明らかにする。

I ネットワーク理論にもとづく供給制約分析

周知のように、産業連関においては最終需要の変化に起因してある産業の生産が変化したとき、上流の投入産業に対する需要が変化して行く。その意味では需要主導型モデルであり、そうした変化の影響の評価にはレオンチェフ（Leontief）モデルが利用されてきた。しかし、2000年代以降、多くの国

1 こうした目的から産業連関のネットワークへの転換にあたっては投入係数や分配係数といったシェアを利用する。これは国・産業の相対的な関係を表現する。

が、自然災害、パンデミックそして戦争に直面し、突然のサプライチェーンの寸断を経験した。その結果、供給制約に直面した際、それが経済全体にどのような影響を及ぼすかが注目されるようになってきている。こうして「サプライサイドの投入・産出モデル」(Miller and Blair, p.543)と呼ばれるゴーシュ (Ghosh) モデルにも注目が集まるようになってきた。

投入産出モデルを災害分析に適用した諸研究に対する体系的な評価 (Galbusera and Giannopoulos, 2018) によれば、災害は供給側ショック (生産停止・インフラ障害) であるにもかかわらず、災害分析ではレオンチェフ・モデル (需要ショック対応) が圧倒的に多く利用されてきたという。この点を指摘した上で、彼らは需要モデルだけでは供給制約²を適切に表現できないと主張し、そこに供給制約を扱えるゴーシュモデルの有用性があると主張している。

本稿では従来のレオンチェフの逆行列にもとづいた需要主導型分析よりも、供給ベースのゴーシュ逆行列を利用する。これによって各国・産業の後方連関と前方連関の連関性の強さを比較し、グローバル・サプライチェーンにおける基幹的な国・産業 (すなわち最も結びつきが強く、その意味で最も「重要」な国・産業) を特定することができる。またこうした指標にもとづき国・産業を空間的なクラスターに分類し、国際比較を行うことも可能となる。

しかし、以上のような産業連関の分析には限界がある。従来の国際産業連関表ベースの分析では、国際的な産業間の「つながり」－波及の程度－は理解できるものの、その「つながり」やその産業の重要性－影響力－を理解するには限界がある。

グローバル経済はたんなる国々・産業の集合としてではなく、複雑に絡み合った一つの巨大なネットワークシステムとして理解される。産業連関－投

2 下田・藤川 (2012) は、レオンチェフ・モデルにくわえ、ゴーシュ・モデルを利用し、東日本大震災によって引き起こされた供給制約が、地域別・業種別に及ぼした間接被害を推計している。佐野・長町 (2022) は、ゴーシュ・モデル－正確には下田・藤川 (2012) のハイブリッド型モデル－を利用し、供給制約が起こったさいの生産、雇用への影響を、産業連関表を用いて推計し、主要10業種の供給制約に伴う雇用者数およびGDPへの影響を示している。

入・産出構造をネットワークに転換することにより、そうした巨大なネットワークシステムを分析することが容易となる。くわえて、さまざまなネットワーク理論のツールを利用することにより、その経済の生産ネットワークにおいてどの部門が潜在的に重要かを把握することができる。

ネットワーク理論にもとづいた産業連関構造を分析した研究としては、とりわけ、Acemoglu, et al., (2012), Carvalho (2014) が注目される。彼らの認識では経済はネットワークであり、その構造がマクロ的な変動の大きさと持続性を決定する。セクター間の投入産出ネットワークの構造、特にその非対称性がミクロレベルの個別的ショック (idiosyncratic shocks) を伝播・増幅させるメカニズムとして働き、マクロ経済全体の変動 (aggregate fluctuations) を生み出すと主張されている。こうした研究は、産業連関へのネットワーク理論からのアプローチが、サプライチェーンに潜在的なリスクを分析するにあたってきわめて有益であることを示唆する。

本稿の課題は、とくに供給側からアジア生産ネットワークの脆弱性がどこに見出されるかを明らかにする点にある。上述のように、供給制約に焦点を当てる場合、供給主導型のゴース・モデルが利用される。産業連関にもとづくゴースの分配係数行列 (distribution coefficient matrix) をネットワークに変換することによって供給制約の文脈においてどの国・産業が高い影響力を有するか、すなわち、どの国・産業が供給のボトルネックとなり、供給ショックをネットワーク全体に連鎖する増幅器になるのかを検討する。同時に、供給元の多様性を検討することによって、供給制約に対するレジリエンスも評価する。

本稿ではこうした研究を踏まえ、ICIOへのネットワーク分析の適用にあたっては、第1に、ICIOを通常のネットワークへと転換、つまり国・産業をノード、投入産出（取引）関係をエッジとする。第2に、転換されたネットワークを各種の中心性指標によってその特徴を描く。同時に、その推移を追跡し、中心性・脆弱性の変化を捉えることを試みる。

このため、第1に、国際産業連関表を利用し2つの連関性指標（後方連関、前方連関）を作成する。その上で両指標によって構成される座標平面に各国・産業をマッピングし、需要の波及と供給の波及の両面においてアジア諸経済・産業がグローバル・サプライチェーンにおいてどのような位置を占めるかを明らかにする。そして第3に、アジア経済のハイテク産業に焦点を置き、その前方・後方連関指標の推移を検討することによってサプライチェーンにおける各国のポジションの変化を追跡する。

II-1-1 国際産業連関表の概要

current million USD	Intermediate use							Final Demand				Output at basic prices			
	country 1		country 2		[...]		country #1		country #2		country #1		country #2		
	Ind1_ind50	Ind1_ind50	Ind1_ind50	Ind1_ind50	Ind1_ind50	Ind1_ind50	Ind1_ind50	Ind1_ind50	Ind1_ind50	Ind1_ind50	Ind1_ind50		Ind1_ind50	Ind1_ind50	Ind1_ind50
country 1	Industry 1 industry50														
country 2	Industry 1 industry50														
[...]															
country 77	Industry 1 industry50														
MR1	Industry 1 industry50														
MR2	Industry 1 industry50														
CN1	Industry 1 industry50														
CN2	Industry 1 industry50														
Taxes less subsidies on intermediate and final products	(TLS)							[TLS]				[...]		(TLS)	
Value added at basic prices	(VA)														
Output at basic prices	(X)														

出所. OECD (2025)

– 16 –

（CN1）と非加工Non-processing（CN2）、またメキシコについてもグローバル製造業Global manufacturing（MX1）と非グローバル製造業Non-global manufacturing（MX2）が追加され、合計85カ国・地域である。また85カ国それぞれが50の産業から構成されている（図1のインデックス名、列名を参照されたい）。

Z（Intermediate use at basic prices）は産業間の中間投入と中間産出を表す（4,250行×4,250列の行列）。行は産出を、列は投入を表現する。当然のことながら、すべての産出が他の産業の投入として使用されるわけではない。産出の一部は、家計の最終消費支出（HFCE：Household Final Consumption Expenditure）、一般政府最終消費（GGFC：General Government Final Consumption）、粗固定資本形成（GFCF：Gross Fixed Capital Formation）など、最終需要（FD：Final Demand）へとまわる。最終需要FD（4,250行×486列の行列）は国別およびその最終消費のカテゴリー別に表現されている。

中間産出と最終需要の合計は、国別・部門別の総産出（X：Output at basic prices）に等しく、これはまた総投入にも等しい。中間投入と総投入の差は粗付加価値であり、これは税金から補助金を差し引いたもの（TLS：Taxes less subsidies on intermediate and final products）と純付加価値（V：Value added at basic prices）に分割される。

II-1-2 レオンチェフモデルとゴースモデルー後方連関・前方連関指標

産業連関モデルの枠組みにおいて、ある特定の部門の生産は経済内の他の部門に2種類の経済効果をもたらす。第1に、レオンチェフモデルにおいては、部門jが生産を増加させると、それは部門j（買い手）が生産の投入のために使用する他の部門iの産出に対して、より多くの需要を生み出すということを意味する。「上流」「下流」という用語を利用すれば、特定の部門jの生産とそれに利用される投入を供給する「上流」の部門iと結びついていることを示す。このために後方連関（backward linkage）という用語が使われる。

第2に、ゴースモデルからみると、部門iの生産の増加は、部門iの生産物を利用する他の部門jに対して供給を追加的に増加させることができる

こと、すなわち部門 i からそれを投入として利用する部門 j に対して供給が増加するということである。特定の部門 i がその産出を販売する「下流」の部門 j と結びついていることを示すために、前方連関 (forward linkage) という用語が用いられる (Miller and Blaire, 2022)。こうした各国・産業の後方連関と前方連関の「関連性」の強さを比較することによってグローバル・サプライチェーンにおける各国・産業のポジションを示すことができる。

以下では、OECDのICIO国際産業連関表を利用し、国境を越えた産業間の関連性を示すために、レオンチェフ逆行列 (Leontief inverse) にもとづく後方連関指標とゴース逆行列 (Ghosh inverse) にもとづく前方連関指標を作成する³。

レオンチェフ逆行列の各要素 l_{ij} は、産業 j に対する最終需要が 1 単位変化したときに、産業 i の総産出額がどの程度変化するかを示す。したがってレオンチェフ逆行列の列和を求めることによって最終需要の 1 単位の変化が経済全体の総生産に与える影響を測ることができる。これが後方連関指標 (Backward linkage) と呼ばれる。

後方連関指標 (Backward Linkage) はレオンチェフ逆行列から計算される。 A を投入係数行列、 I を単位行列とすると、レオンチェフ逆行列は次のように定義される

$$(I - A)^{-1}$$

l_{ij} をレオンチェフ逆行列の要素とすると、後方連関指標はレオンチェフ逆行列の列和でとして定義される:

$$BL_j = \sum_i l_{ij}$$

レオンチェフ逆行列にもとづく後方連関指標はある産業の最終需要による生産の変化が、他の産業の生産を波及的にどれだけ誘発するかを測ることができる。すなわちある産業の生産増加によって、どれだけ上流の産業 (投入

3 後方連関および前方連関指標については Miller and Blair (2022), ch.12 を参照されたい。

財を供給産業）への需要を誘発するかを示す指標である。需要主導型モデル demand-driven modelと呼ばれる（Miller and Blair, 2012）。

前方連関指標（Forward Linkage）はゴーシュ逆行列の行和として計算される。ゴーシュモデルにおける分配係数行列 $\mathbf{B}$ は中間取引額 $\mathbf{Z}$ の各行の要素を部門の総産出 $\mathbf{x}$ で除することで求められる：

$$B = \hat{x}^{-1}Z$$

ここで $\hat{x}^{-1}$ は総産出ベクトル $\mathbf{x}$ の逆数を対角要素に持つ対角行列である。ゴーシュ逆行列は $(i-B^{-1})$ として計算される。ゴーシュ逆行列の要素 g_{ij} をとすると、産業 i の前方連関はゴーシュ逆行列の行和として定義される：

$$FL_i = \sum_j g_{ij}$$

ゴーシュ逆行列の要素 g_{ij} は、産業 i の供給（付加価値）が1単位変化したときに、産業 j の産出額がどの程度変化するかを示す。したがってGhosh逆行列の行和を求めることによって、産業 i の供給（付加価値）が1単位増加したとき、経済全体の生産がどれだけ変化するかを測ることができる。これが前方連関指標と呼ばれる。

ゴーシュ逆行列から求められる前方連関指標は、ある産業の供給が1単位変化したとき、それが他の産業の生産にどれだけ波及するかを測ることができる。言い換えれば、ある産業が供給する財・サービスがどれだけ多くの下流の産業に使われるか・依存されているかを把握することができる。したがってこれはレオンチェフモデルとは対照的に、供給主導型モデルsupply-driven modelと呼ぶことができる（Miller and Blair, 2012）。

II-2 グローバル・サプライチェーンにおける各国の産業の位置

II-2-1 グローバル・サプライチェーンにおける国・産業

II-1-2で示した計算手続きをOECD（2025）のICIOに適用すると、4,250行×4,250列のレオンチェフ投入係数行列とゴーシュ分配係数行列の表が得る。これにもとづきそれぞれの逆行列を求めた上で、後方連関指標はレオンチェフ逆行列の列和として、また前方連関指標はゴーシュ逆行列の行和とし

て計算される⁴。

後方連関および前方連関指標はその値がいくつ以上になれば後方連関性もしくは前方連関性が強いかを判断する絶対的な基準はない。そこでグローバル・サプライチェーンに対する各国・各産業の重要性を比較するという目的に即して、両指標をZスコアによって正規化し、各国・産業の影響力を平均からの乖離の大きさによって評価する。すなわち平均0、標準偏差1に標準化することで当該の産業が「平均より高いのか／低いのか」を相対的に評価する（高瀬, 2022）。

以下では最初に、もっとも最新のOECD, ICIOデータにもとづき2022年時点の前方および後方連関指標を示す。

(1) 2022年のグローバル・サプライチェーンにおけるアジア経済の位置

2022年の国際産業連関表にもとづき後方連関・前方連関指標を作成し、上述のように正規化し、各国・産業を、その2つの指標によって構成される座標平面上にマッピングした。以下の図3は、横軸が後方連関指標、縦軸が前方連関指標によって構成されている。この座標平面上に2019年の産業連関表にもとづく各国・産業の連関指標が表示されている。ドットは85カ国の鉱工業と製造業（ICIOの産業分類コードBとC番）の24産業を表現し、赤のドットはそのうちアジア経済11カ国（中国－中国はCN1とCN2－、香港、日本、韓国、台湾、およびインドネシア、マレーシア、フィリピン、シンガポール、タイ、ベトナム）の鉱工業・製造業を示している。

図2に示された後方連関・前方連関指標は平均ゼロのZスコアによって正規化されている。したがって、プラスの値をもつ場合は、世界の85カ国・24産業の平均よりも連関性が高いことを意味する。この図から理解されるように、アジアの鉱工業・製造業の大半は垂直軸の右側に位置しており、世界の鉱工業・製造の平均よりも高い後方連関性を有する。つまり、アジア経済は世界の他の国に比べて、ある産業の生産が増加すると、上流の投入産業に対してより大きな需要を誘発する。

4 OECD, ICIOのデータからの各種指標の計算にあたってはPython 3.1を利用した。

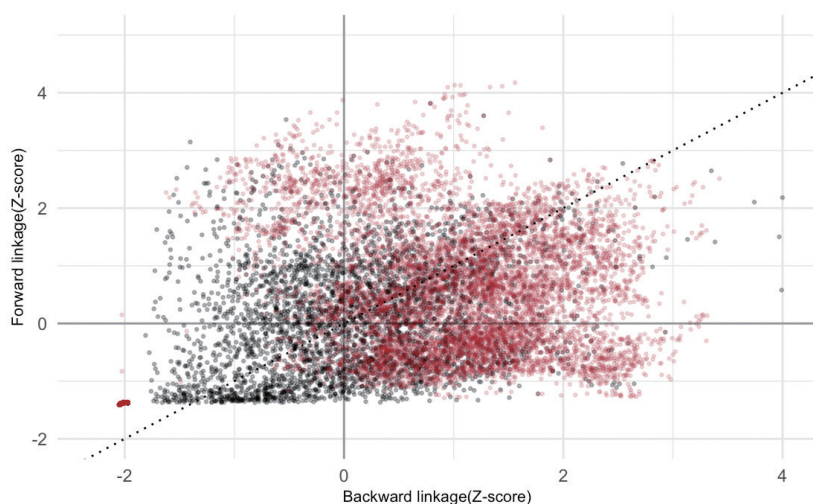


図2 後方連関と前方連関における各国の鉱工業・製造業の位置, 2022年

注. 図には鉱工業と製造業セクターだけが表示されている。ドットは世界の国・産業（85カ国・24産業）、赤いドットはアジア経済のそれを示す。後方連関はレオンチェフ逆行列、前方連関はゴージュ逆行列にもとづいて計算され、両指標ともZスコアによって標準化されている。破線は45度線である。

さらに、多くのアジア経済・産業の多くが第Ⅰ象限に集まっている点も特徴的である。アジア経済の産業（鉱工業・製造業）は後方連関にくわえ、前方連関も高い値を示すことを意味する。したがって赤いドットで表示されたアジア経済・鉱業製造業の多くは上流の投入要素産業の生産を誘発すると同時に、下流産業への重要な供給源でもあることが理解される。

第3に確認される点は、アジア経済・産業においてはGVCから切り離れた孤立型の産業がきわめて少ないということである。これは後方連関、前方連関ともマイナスになる第Ⅲ象限におけるアジア経済・産業（赤いドット）がほとんど観察されないということによって容易に理解される。したがってアジア経済・産業の大半がグローバル・サプライチェーンに組み込まれていると言える。

したがってアジア経済が他の国・産業と比較して前方連関においても後方連関においても相対的に重要であるということを示唆する。かりにアジア経済においてショックが発生したとき、上流へも下流へも伝播する可能性が高い。

そのような場合、アジアの国・産業は需要ショックの伝播者として比較的強い影響力を与える可能性がある。他方、前方連関が特に重要である経済圏に対してはアジア諸国・産業は発生した供給ショックの源泉となりやすい。

Ⅲ ネットワーク分析

これまで国際産業連関表から得た前方・後方連関指標にもとづいてアジアの国・産業がグローバル・サプライチェーンにおいてどのような位置に立つかをみてきた。だが、後方連関、前方連関はそれぞれ、ある産業が上流の産業に与える直接・間接の波及の大きさ、あるいはある特定の産業が下流の産業に与える直接・間接の波及の結果の大きさを要約した指標にすぎない。したがって後方連関・前方連関だけではその影響の波及プロセスを理解するにあたって、ある特定の産業の重要性を評価するにあたって限界がある。そこでIIで検討したように、国際産業連関表にネットワーク分析を適用し、国際生産ネットワークにおいてどの産業が潜在的な脆弱性を抱えるかを検討する。

こうした目的のため、OECDのICIOのデータからゴーシュ型の分配係数行列をネットワークに転換する。その上で、第1に、産業間のつながり、つながりの不均等性および脆弱性の変化等の分析から国際生産ネットワーク全体の特徴を確認する。第2に、国際生産ネットワークにおける各産業の重要性を検討する（中心性の分析）。中心性を明らかにすることによってどの国・どの部門が中心的役割を担っているか、言い換えれば、どの国のどの産業が潜在的な脆弱性を抱えているかを明らかにする。こうした中心性分析をつうじて中心に位置する産業においてショックが発生した場合、経済全体にどの程度の変動が生まれるかを検討することができる。そこで第3に中心に位置する特定の国の産業にショックを与え、ショックが消滅するまでにどの程度の期間を要するか、またどの程度の経済的影響が発生するかということを簡単なシミュレーションをつうじて確認する。

国際産業連関をネットワークに変換するにあたっては、供給制約に焦点を置く本稿の分析課題から、一連の分析にあたってはゴーシュモデルの分配

係数行列を利用する。Adarov（2012）では、中間投入・産出行列をネットワークに変換するさい、取引額そのものが利用されている（cf. Cerina et al., 2015; Criscuolo et al., 2018; Alekerov et al., 2024）。それはネットワークの構造やショックの規模を分析することに力点が置かれているためである。これに対して本稿では、特定の国・産業が他の国・産業への依存関係にあるために発生する潜在的な脆弱性を捉えること、言い換えれば投入・産出の相互依存関係をつうじたショックの波及を評価することを目的とするため、ゴーシュ型の分配係数行列を利用する（cf. Acemoglu et al., 2012; Carvalho, 2014; Xing, 2017; McNerneya, et al. 2021; Chi, et al. 2024）。たとえば、ある産業 j が他の産業 i の投入に強く依存している場合、産業 j は産業 i のショックに対して相対的に脆弱である。そのさいシェア（分配係数）を用いることで、セクターの絶対的な規模に関係なく、技術構造上のボトルネックや連鎖的な破綻リスクを評価できる。

ネットワークの構築にあたっては重みつき有向ネットワークへと変換する。重みはゴーシュ型の分配係数の値である。ネットワークの方向はゴーシュ型モデルを前提とするため、国・産業 i から国・産業 j へとする（cf. Cerina et al., 2015）。

Ⅲ-1 国際生産ネットワークの変化

最初に、ネットワーク密度をつうじて国際生産ネットワークを概観する。ネットワーク密度は、潜在的なエッジ数に対する現実のエッジ数の比率によって定義される。理論的にはすべてのノードの間にリンクを張ることができる。だが、実際にはノード間を結ぶエッジはそれ以下となる。生産ネットワークの文脈で言えば、すべての産業の間に取引関係を考えることができる。しかし、実際にはすべての産業が取引関係を形成することはない。ネットワーク密度は潜在的に可能な取引関係数に対する現実の取引関係数の比である。

以下の図3は各年のネットワーク密度を計算し、1995年から2022年のサンプル期間全体にわたり描いたものである。

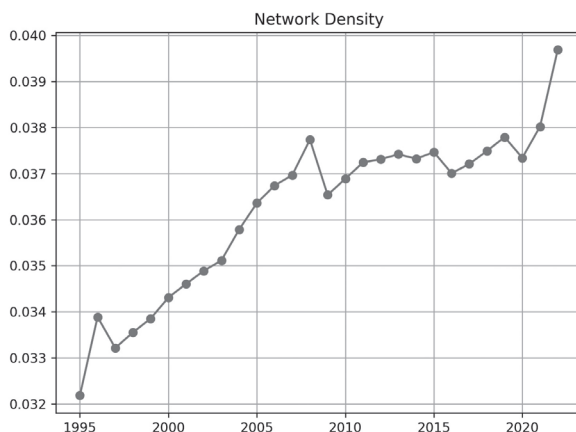


図3 ネットワーク密度の推移, 1995~2022

注. 重み付き有向ネットワークはゴーシュ型分配係数行列をもとに作成.

こうした推移をみると、ネットワーク密度は1995年から2000年代後半にかけて一貫して上昇するものの、4つの後退期を経験していることが確認される。その最初のものは1997~98年のアジア通貨・金融危機およびそれに続くロシアの財政破綻の時期である。第2の後退期は、2008年のリーマンショックの時期である。これを機に生産ネットワークの拡大は停滞し、その影響はその後10年間にも及ぶ。第3に、2015年近辺であり、いわゆるチャイナ・ショック（中国株の下落）に端を発した中国の需要減退が資源輸出に依存する新興国に負の影響を与えた時期である。そして最後に、コロナ・パンデミック期であり、この時期にも取引のつながりが縮小していることが観察される。

長期的には、国際生産ネットワークが拡大していること、すなわち世界の生産ネットワークは非常に緊密なネットワークへと発展してきたことが確認される。しかし、4つの危機の時代にはネットワークの縮小も観察される。とりわけリーマンショック時にはネットワークの形成が低下し、その影響は10年近くにも及ぶことが理解される。したがって国際生産ネットワークは拡大するものの、そこには4度のショックがネットワーク全体に負の影響を与えたことも理解される。この点を確認するために、次に国際生産ネットワー

クの脆弱性を検討することにした。

Ⅲ-2 国際生産ネットワークの脆弱性

国際生産ネットワークの脆弱性を検討するために、生産ネットワークのあるノード（産業）で小さなショックが発生した場合、その影響がネットワーク内で増幅するのか、あるいは減衰するのかを検討することにした。その点を評価するためにゴーシュ分配係数行列から作成された有向重み付き隣接行列の最大固有値（ $\lambda_{\max}$ ）⁵を計算する。以下の図4には各年の最大固有値を描いたものである。

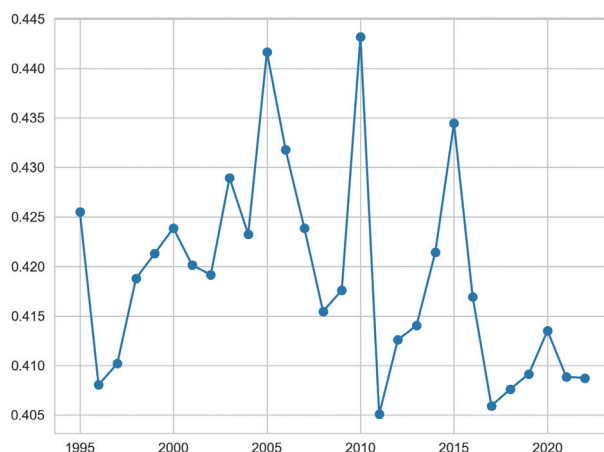


図4 最大固有値（スペクトラム半径）の推移, 1995～2022

注. 最大固有値はゴーシュ型分配係数行列（隣接行列）にもとづき計算。

最大固有値が1を下回る場合（ $\lambda_{\max} < 1$ ），ショックの影響は徐々に小さくなり，システムは安定化する。他方，それが1を上回る場合（ $\lambda_{\max} > 1$ ），ショックの影響が自己増幅的となり，システムが不安定化する。したがって最大固有値は国際生産ネットワークの増幅率であり，脆弱性の指標としても理解できる。ここではこの最大固有値 $\lambda_{\max}$ を観察することによってネット

5 $\lambda_{\max}$ の形式的な定義についてはAppendix Aを参照されたい。

ワーク全体の脆弱性の変化を追跡する。

図4において1995～2022年の $\lambda_{\max}$ の推移をみると、期間をつうじた単純平均は0.42、最大値は0.44、最小値は0.40である。そのかぎりでは増幅率は低い。ネットワーク全体が連鎖的に崩壊するようなシステム的な発散のリスクは低い。だが、2005年、2010年、2015年に見られるスパイクは、ネットワーク内の減衰メカニズムが一時的に弱まったことを示唆している。これは、ショックの累積的な影響度が高まり、負の影響がネットワーク内に長くとどまる「構造的な脆弱性」がこの時期に高まったと解釈できる。

$\lambda_{\max}$ が経済のショック期にスパイクする現象は生産ネットワークが多様で柔軟な状態から特定の太いパスに依存した、遊びのない硬直的な状態に変化したため、行列の結合強度（ $\lambda_{\max}$ ）が一時的に跳ね上がったことを反映していると考えられる。経済的には、ショック時に非効率な取引や補助的な供給ルートが淘汰され、代替困難なインフラや基礎素材といった不可欠な供給ルートへと取引が集中すると考えられる。この供給経路の集中が、行列の結合強度（ $\lambda_{\max}$ ）を一時的に押し上げ、結果としてネットワーク全体の減衰能力を低下させ、ショックに対する脆弱性を高めたと推察される。

Ⅲ-3 国際生産ネットワークにおけるショックの局所化

Ⅲ-3-1 モジュラリティ

脆弱性指標（ $\lambda_{\max}$ ）によって国際生産ネットワーク構造の不安定性を観察してきた。しかし、それはネットワーク全体の評価であり、ネットワーク内部で進行している構造的な疎密の変化や局所的な分断を捉えるには限界がある。例えば、全体としての結合強度が同じであっても、それが一様な繋がりによるものか、あるいは特定の閉鎖的なグループ（コミュニティ）の形成によるもので、経済的レジリエンスの文脈は大きく異なる。ここではさらにそうした変化を捉えるために、ネットワーク内のコミュニティ構造を評価するモジュラリティ概念を導入し、生産ネットワークの多極化や分断の実態を詳細に検討する。

以下の図5はモジュラリティ（Q）の推移を示したものである。モジュラリティとは、グループ内のつながりが密であり、グループ間のつながりが疎

である場合「良い」分割と評価される。言わば、グループ（コミュニティ）分割の「良さ」を測る指標である。より具体的にはモジュラリティはリンクがランダムに張られている場合と比べて、どれだけ内部リンクが密集しているかを計算する。

モジュラリティが高い場合、国・産業ブロック内は密であり、ブロック間は疎だということを意味する。したがってある産業で発生した供給ショックは同一のブロック内では広がるが、他のブロックへと拡散する可能性は低い。すなわち、ショックが局所化される（cf. Joyez, 2026）。

他方、モジュラリティが低い場合、ネットワーク全体が相互に強く連結していることを意味する。したがってある産業で発生したミクロのショックは経済全体に伝播しやすくなる（cf. Acemoglu et al. 2012; Carvalho, 2014）。

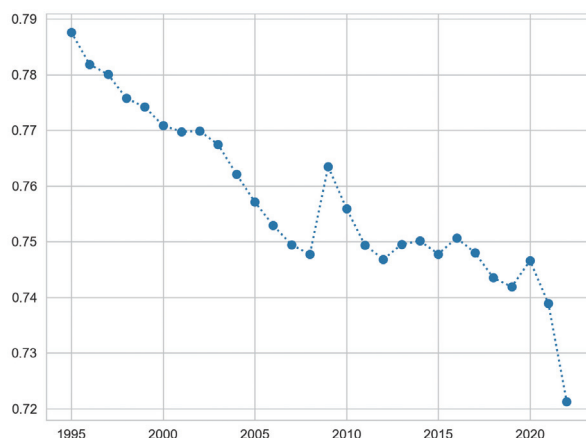


図5 モジュラリティQの推移, 1995～2022年

注. モジュラリティQの計算にあたっては結合の強さだけをみるためにグラフは無向グラフに変換してある。

一般的に、 $Q > 0$ の場合、ランダムな状態よりもグループ内の結合が強い（コミュニティ構造が存在する）と評価され、さらに1に近くなるにつれて、非常に明確なコミュニティ分割ができていると評価される。図5をみると、モジュラリティは長期的には低下している。これは生産ネットワーク内のコミュニティ分割が低下し、境界が曖昧化しつつあることを意味する。言いか

えれば、ネットワーク全体が一体化（あるいは複雑化）の方向へと進化しつつあることを示唆する。

さらに、ゴーシュ型分配係数を基礎とした国際生産ネットワークであることを考慮すれば、ある特定の産業から供給される生産物が、特定の川下産業だけではなく、より広い産業へと分配されるようになったと解釈される。すなわち、ある産業の原材料・中間投入が、より多くの産業へと供給され、供給先産業が多様化される。

しかし、長期的には生産ネットワークの一体化が進んでいるものの、2008年のリーマンショック時には一体化への動きが一時的に逆転し、その後、10年以上にわたり、停滞する。さらに、コロナ・パンデミックの時期にも小さなスパイクが確認される。だが、パンデミック危機を終えると、モジュラリティが急激に低下し、ふたたび生産ネットワークの一体化が強まる。

したがって近年ではモジュラリティ（Q）は低下し、産業間の境界が崩れ、一体化しつつあると言える。だが、それは各国が特定の供給ネットワーク・ブロックに再統合されつつあることを示しているようである。同時に、前項で検討した脆弱性指標（ $\lambda_{\max}$ ）の上昇は、この統合されたネットワークが特定のハブ産業からの供給ショックに対して極めて敏感な構造へと変容したことを示唆している。そこで次に、どの国のどの産業が国際生産ネットワークの中心となっているかを探索することにしたい。

Ⅲ-3-1 中心性概念

ネットワークの中心性を表現する指標としては複数の指標が考案されている。もっとも頻繁に利用される、簡便な中心性指標は、次数中心性である。同指標は多くのノードとつながりをもったノードほど中心的な役割を果たすという考えに基づくものであり、あるノードに接続するエッジの数によって評価される。具体的には、次数中心性はあるノード（国・産業）とつながるエッジの数（重み付きの場合はそのノードに接続されているエッジの重みの合計）によって中心性を評価するものである。

次数中心性指標は直接的な連関のみを捉え、間接的な連関を無視している点、また同じ重みのつながりは等しく重要だと仮定する点が問題点として指

摘されている。実際には、ネットワークにおいては、あるノードが他のノードよりも重要であるケースがある。固有ベクトル中心性はそうしたノードの重要性を考慮したものであり、重要なノードと接続されているノードもまた重要だという考え方を反映した指標である。ノードの中心性は接続先のノードの中心性に依存して内生的に決定される。生産ネットワークの文脈で言えば重要な供給元産業から供給を受けている産業それ自体も重要だということの意味する。この中心性指標によって供給ネットワーク全体において戦略的な位置を占める産業を特定できる。そうした産業は、供給ショックが発生した場合、その影響をネットワーク全体へと増幅・伝播させる起点となりうる（Acemoglu et al., 2012; Alves et al., 2012）。

固有ベクトル中心性は形式的には次のように定義される：

$$x = \lambda^{-1} Ax$$

ここで x は固有ベクトル中心性指標を要素に持つベクトル、 λ は隣接行列 A の最大固有値である。

固有ベクトル中心性にも、有向グラフにおいて欠点がある。他のいずれかのノードからもエッジが入ってこないノード（入次数がゼロのノード）は、その中心性が0となり、さらにそのようなノードからのみエッジを受け取っているノードについても中心性がゼロとなってしまう。この問題を解決するために、すべてのノードに一定の基礎的な中心性を与えた指標がKatz中心性である。Katz中心性は次のように定義される：

$$x = \alpha Ax + \beta I$$

ここで α は減衰パラメータ、 β はすべてのノードに共通に付与される外生的な中心性、 I はすべての要素が1のベクトルである。

固有ベクトル中心性およびKatz中心性指標はいずれも、直接的なつながりだけではなく、間接的な連関も含めた多段階の連関をつうじて決定される。

直接・間接の影響度から中心性を特徴づけるKatz中心性と異なり、媒介中心性はネットワーク内のあるノードが他のノードの間の「仲介」としてどの程度重要かを測る指標である。形式的には、あるノード v の媒介中心性

$C_B(v)$ は以下のように定義される,

$$C_B(v) = \sum_{s \neq v \neq t \in V} \frac{\sigma_{st}(v)}{\sigma_{st}}$$

v はネットワークに含まれる全ノードの集合, σ_{st} はノード s からノード t への最短経路の総数 $\sigma_{st}(v)$ はノード s からノード t への最短経路のうちノード v を通過するものの数, $s \neq v \neq t$ は中心性を計算する対象のノード v は始点 s および終点 t ではないという条件である。

上述のKatz中心性があるノード（産業）の影響力の全体を評価するのに対して、媒介中心性はショックがどこを通過するかを示す指標である。したがって国際生産ネットワークにおいて供給制約の震源地となる構造的な脆弱性産業（ボトルネック）を特定できる。

本稿ではこうした2つの中心性指標を利用し、以下の2つのステップをつうじて生産ネットワークにおいてどの国のどの産業が中心の位置を占め、潜在的な脆弱性を抱える産業となるのかを明らかにする。

第1ステップにおいては、世界生産ネットワークにおいて、各産業ノードのKatz 中心性および媒介中心性を算出し、これらを国別に平均化することで、「影響力の大きい産業」「構造的に媒介的な産業」を平均的に多く抱える国を特定する。第2ステップにおいては、特定された国について産業別中心性を検討し、国レベルの重要性を支える中核産業を明らかにする。

Ⅲ-3-2 どの国・産業がもっとも高い中心性を有するか

どの国・産業が国際生産ネットワークの中心であるかを明らかにするために、最初に、Katz中心性指標の推移を描く。上記のようにKatz中心性は α と β の2つのパラメータに依存するが、計算にあたっては各ノードが有する基礎的な影響度を表現する β については $\beta = 1$ とし、影響度の減衰率 α については収束条件⁶も考慮し、 $\alpha = 1.5$ とした⁷。

6 減衰率 α 、隣接行列 A の最大固有値を $\lambda_{\max}$ としたとき、収束条件は $\alpha < 1/\lambda_{\max}$ となる。

7 パラメータに対する頑健性チェックについてはAppendix Bを参照されたい。

図6においては、アジア経済にくわえ比較のためにドイツとアメリカを加えた9カ国のKatz中心性指標の国別の推移が描かれている。この図?によれば、1990年代において最も中心的な産業の多くはアメリカ、ドイツおよび日本に存在する。だが、2000年代後半には日本経済の産業に代わり、中国経済の産業が中心へと移る。さらに、リーマンショック時にアメリカ経済およびドイツ経済の産業の中心性も低下し、その後、中国経済の産業のKatz中心性指標はコロナ・パンデミック期に至るまで一貫して上昇し続ける。

2010年代以降、国際生産ネットワークの中心が中国経済の産業へと移る。直近の2020年時点の国際生産ネットワークにおいても、直接的影響にくわえて間接の影響力を含めた総合的な影響力から評価した場合、中国経済の産業が依然として中心に位置する。

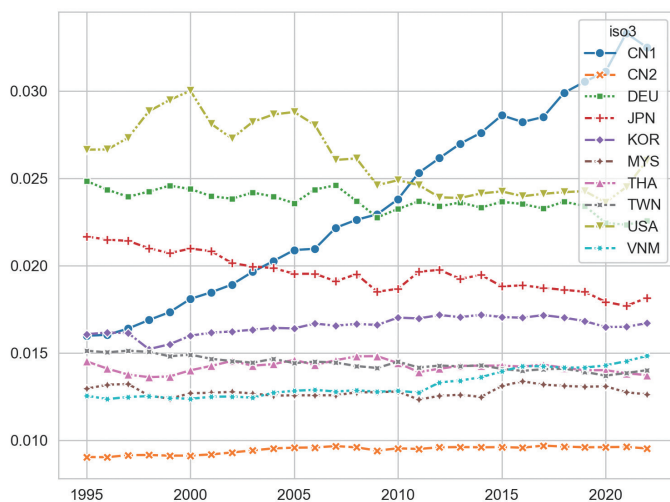


図6 Katz中心性の国別推移：全産業

注. 各国のKatz中心性指標はそれぞれの国のすべての産業のKatz中心性指標を単純平均したものである。ただし、中国（CHN）についてはCN2（Processing）の中心性指標はきわめて低い
ため、CN1（Non-Processing）のみを採用。

次に、各年において産業別媒介中心性を算出し、国別平均を取ることで、世界生産ネットワークにおける各国産業の構造的媒介性を測定⁸する。重要な産業の探索にあたり媒介中心性を利用した場合でも、一方では、Katz中心性指標の動きと同様に、国際的な供給ネットワークにおける中国経済の産業の重要性が浮き彫りになる。したがって中国経済の産業群は、より大規模で密なネットワークの中で多くの最短経路に関与している。

他方で、Katz中心性と異なり、マレーシアの産業の重要性も観察される。1995年から2000年代前半までは最も中心的な国・産業のハブはマレーシアの産業にあった。だが、2000年代後半からは中国経済の産業が中心へと転じ、コロナ期までは国際生産ネットワークにおいて中国経済の産業が中心的な産業となっている。だが、コロナ直後は中国経済の産業の媒介中心性は急速に

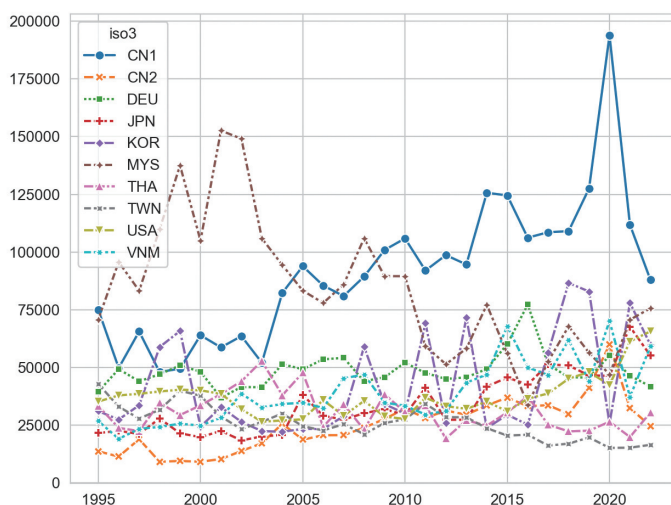


図7 媒介中心性の国別推移

注. 各国の媒介中心性指標はそれぞれの国のすべての産業の媒介中心性指標を単純平均したものである。また媒介中心性の計算にあたっては、ゴーシュ型分配係数の逆数を「距離」として定義してある。

8 媒介的の中心性指標は正規化されていない。このため同中心性指標は経路数の総和であるため絶対値は大きい。本稿では非正規化媒介中心性指標は順位比較にのみ用いる。

低下し、代わって韓国、マレーシア、ベトナムおよび日本経済の産業の媒介中心性が重要性を増している。こうした点から供給先の多様化が発生していることが伺われる（いわゆるサプライ・チェーンの再編）。

世界の生産ネットワークの取引を仲介する産業の多くは2000年代前半まではマレーシアに存在していたが、その後、中国経済の産業にとって代わられる。その後、コロナ・パンデミック期まで世界の取引は中国経済の産業を通過することを示している。とりわけコロナ・パンデミック期には大半の取引が中国の産業に集中する。この時期、潜在的に、脆弱な産業（ボトルネック）は中国の産業に見出される。

したがって長期的には、マレーシア産業群の重要性も指摘されるものの、媒介中心性の観点からみた場合でも、中国の産業が世界の供給ネットワークにおいて中心的な位置を占めていることが理解される。中国経済の産業が異なる地域・産業を結びつける上で、不可欠な中継地点となっている。逆に言えば、中国経済の産業が構造的に脆弱な産業（ボトルネック）となる可能性がある。そうした産業が供給制約の震源地となり、下流の産業に広範囲に影響を与える可能性が指摘される。

以上のように、Katz中心性によって特定経済の産業群の影響力を、また媒介中心性によってその構造的媒介性を検討してきたが、いずれの指標にもとづいても、重要な産業群を抱えるのが中国経済であることが理解される。言い換えれば、中国経済が影響力ある産業（Katz中心性）と構造的に媒介的な産業（媒介中心性）を平均的に多く抱えていることが明らかになった。そこで次に中国経済内部に焦点を移し、国際生産ネットワークにとっての中心の産業を見出すことにしたい。

Ⅲ-3-3 中国経済における中心性の探索—どの産業が高い中心性を有するか⁹

中心性分析にもとづくと、国際的な供給ネットワークにおいて中国の農水産業、鉱工業（産業コードAおよびB）についてはほとんど意味ある結果は得られなかった（同諸産業の媒介中心性指標はゼロである）。そうした産業

9 国別中心性分析の結果にもとづきCN1で計算

は国際的な供給ネットワークにおいてほとんど仲介的な役割を果たしていないようである。しかし、製造業産業（産業コードC）の媒介中心性指標およびKatz中心性指標をみると、国際的な供給ネットワークに対して中国経済の諸産業が中心的な役割を担っている（図6および図7）。そこで以下では製造業産業のKatz中心性指標と媒介中心性指標をプロットし、中国経済においてどの産業が中心的な産業であるかを確認する。

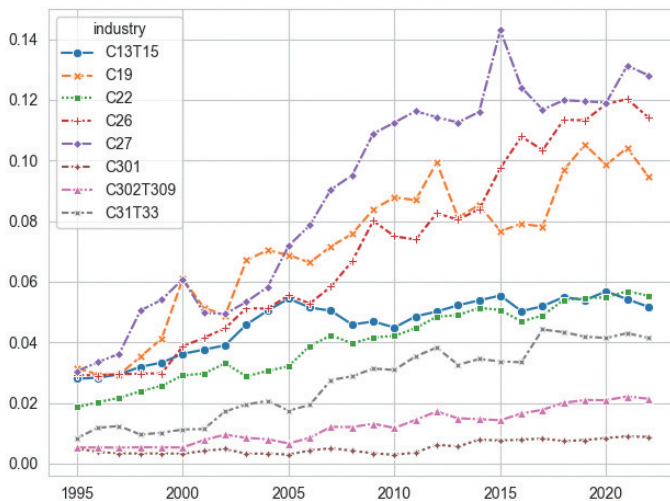


図9 Katz中心性指標 フォーカス産業

注. C13T15（繊維工業、衣服・その他の繊維製品製造業、なめし革・同製品・毛皮製造業）、C19（石油製品・石炭製品製造業）、C22（プラスチック製品製造業、ゴム製品製造業）、C26（コンピューター、電子・光学機器）、C27（電気機器）、C301（船舶製造・修理業、船用機関製造業）、C302T309（航空宇宙・船舶など先端輸送機器）、C31T33（家具・装備品製造業、その他の製造業、機械器具修理業）

図9のKatz中心性の推移をみると、国内産業の中でも、石油製品・石炭製品製造業（C19）、電気機器（C27）、コンピューター、電子・光学機器（C26）産業が、他の産業以上に、国際供給ネットワークに対して強い直接・間接の影響を与えることが理解される。この3つの産業は、とりわけWTO加盟後に上昇し、その後も一貫して上昇している。これは国際生産ネットワークにおいて同産業群の相対的な地位が上昇したことを明瞭に示すものである。したがって同産業に供給ショックが発生した場合、同産業はそ

のショックを国際生産ネットワーク全体に波及させる起点となる可能性が高い。

他方、プラスチック製品製造業、ゴム製品製造業（C22）、繊維工業、衣服・その他の繊維製品製造業、なめし革・同製品・毛皮製造業（C13T15）、および家具・装備品製造業、その他の製造業、機械器具修理業（C31T33）産業のKatz中心性の数値は微増もしくは横ばいである。したがって、こうした伝統的な、労働集約的諸産業は国内の他産業、および他国への諸産業の直接・間接の影響力は低下していることが伺われる。

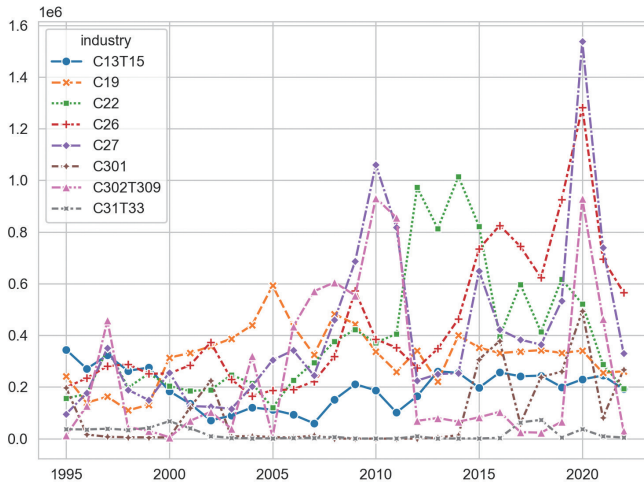


図10 媒介中心性指標 フォーカス産業

注. C13T15（繊維工業、衣服・その他の繊維製品製造業、なめし革・同製品・毛皮製造業）、C19（石油製品・石炭製品製造業）、C22（プラスチック製品製造業、ゴム製品製造業）、C26（コンピューター、電子・光学機器）、C27（電気機器）、C301（船舶製造・修理業、船用機関製造業）、C302T309（航空宇宙・船舶など先端輸送機器）

媒介中心性はKatz中心性のように一貫せず、変動しているが、リーマンショック直後の2010年とコロナ・パンデミック期の2020年にスパイクを見せている。これは危機の時代にとくに中国経済の諸産業が生産ネットワークにおいて他の産業間の最短経路上に頻繁に出現し、中間財が必ず通過する点であり、代替が効かないボトルネックだということを示している。

図10から理解されるように、媒介中心性からも同様に、電気機器産業（C27）、コンピューター、電子・光学機器産業（C26）および航空宇宙・船

舶など先端輸送機器（C302T309）産業が国際生産ネットワークにおいて重要な中心的産業となっている。したがって同産業において何らかのショックが発生した場合、同産業が国際生産ネットワークにおいて供給制約の震源地（ボトルネック）となる可能性がある。

したがって両指標に共通の重要な中心的産業はコンピューター、電子・光学機器（C26）産業と電気機器産業（C27）である。すでに述べたように、Katz中心性はあるノード（産業）の影響力の全体を評価する指標であり、媒介中心性はショックがどこを通過するかを評価する指標である。したがって国際生産ネットワークにおいて供給制約の震源地となる構造的に脆弱な産業は、中国経済のコンピューター、電子・光学機器（C26）と電気機器（C27）産業である。

Ⅳ レジリエンス

Ⅳ-1 ネットワーク構造のレジリエンス

Katz 中心性の分散は、生産ネットワークにおける重要性の集中度を表し、一部産業へのショック集中の可能性を示す。この分散の逆数はネットワーク

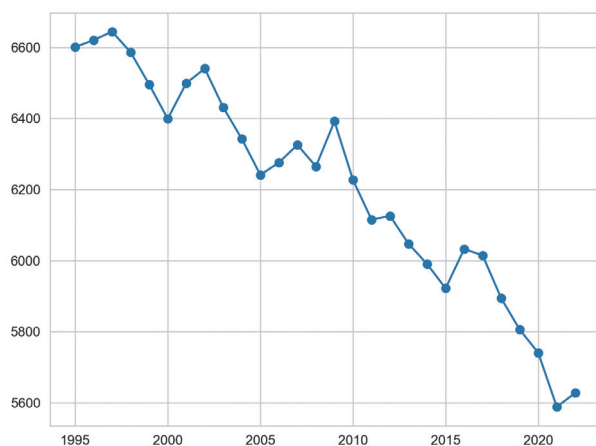


図11 国際生産ネットワーク構造のレジリエンス

注. レジリエンスはKatz中心性の分散の逆数である。

全体がショックを平均化し得る能力—すなわち構造的レジリエンスの指標として解釈される。言い換えれば、ショック伝播における「ハブ依存度」の低さ、すなわちネットワーク全体が、特定産業の障害にどれだけ耐えられるかを示すものであり、Acemoglu et al., (2012) によってマクロ的なレジリエンスとして採用された指標である。

図11において見られるように、ネットワーク全体のレジリエンス指標は長期的に低下している。それは構造的レジリエンスの低下であり、脆弱性の上昇を示す。Katz中心性は多段階の取引経路、間接的依存関係を集約した影響の総和である。したがってその分散が上昇（分散の逆数が低下）することは特定国の特定産業への中間財依存が高まり、ハブ産業の固定化が進みつつあることを示す。経済的には、小さな産業ショックがマクロ変動に変わりやすい経済へと変質しつつあることを意味する。時間の経過とともにショックを平均化できない構造へと移行している。

IV-2 動態的レジリエンス—インパルス反応関数（IRF）

すでに中心性分析によって国際生産ネットワークにおける中国経済の産業の重要性を見出した。Katz中心性は累積的な総効果の結果を理解することはできるが、時間の経過とともに広がる波及効果を見ることはできない。そこでここではそうした産業にショックが発生したとき、インパルス反応関数を利用し、ショックがどれだけ速く消えるか、どの産業が長く影響を保持するかを考察する。

分配係数行列 B の構造的違いが動学的調整過程に与える影響を明らかにするため、本稿では減衰率 λ を最大固有値で正規化せず、年を通じて固定した値を用いてインパルス反応分析を行う。ただし、ここでのインパルス反応関数は現実時間の応答ではなく、単年度の産業ネットワーク構造を固定した下で一時的な供給ショックがどの程度の速度で減衰するかを示す動学的レジリエンス指標である¹⁰。

10 インパルス反応関数の計算手続きについてはAppendix Cを参照されたい。

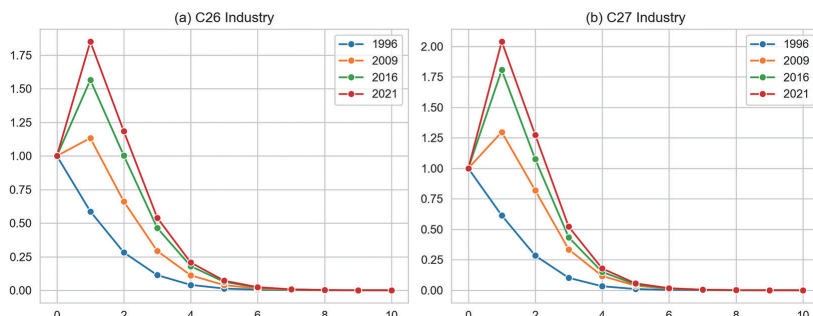


図12 中国のC26産業とC27産業に対する供給ショックのインパルス反応関数

注. セクターC26はコンピュータ・電子・光学製品産業を指し、セクターC27は電気機器産業を指す。本シミュレーションでは、中国のC26（またはC27）セクターから生じた1単位の外生的な供給ショックを想定し、選択した4つの期間におけるグローバルな生産ネットワークを通じた動的な波及プロセスを追跡している。

図7のパネル（a）は、中心的産業であるC26（コンピュータ・電子・光学製品）に供給ショックが加わった際の、ネットワーク全体への累積的な影響を示している。具体的には、供給ショックが時間の経過とともにネットワーク内の全産業へどのように波及し、その後減衰していくかを描写している。1996年時点では、ショック直後から影響は即座に解消し始めていた。それとは対照的に、2009年以降、特に2016年と2021年においては、初期ショックの直後にネットワーク全体の影響が一時的に増幅するという行動変化が観察される。もっとも、いずれの年においても、影響は数期間以内に急速に消失しており、長期的な持続効果は確認されていない。

したがって、ショックの影響が消失するまでに要する期間は4つの時期を通じて同程度であるものの、ショック直後において混乱がネットワーク全体にどのように伝播するかという点については、明確な相違が観察される。

本分析においてもう一つの極めて重要なセクターとして特定された電気機器（C27）産業（図7、パネル（b））についても、同様の結果が観察された。しかし、重要な相違点も浮かび上がっている。このセクターを起点とする供給ショックは、C26産業と比較して、初期段階においてグローバルネットワーク全体により激しく波及する構造となっている。この点において、中国の電気機器セクターにおける混乱は、国際的な生産ネットワーク全体に対し

て、より顕著な即時的ボラティリティ（変動）を引き起こすと言える。

V 結 論

本稿では、グローバル・バリューチェーン（GVC）における構造変化が、国際的な生産ネットワークのアーキテクチャおよび供給ショックの波及プロセスをどのように再編してきたかを検討した。ゴーシュ型の供給主導型ネットワークにカット・セントラリティを適用し、それをインパルス応答分析と統合することで、直接的なつながりだけでは見えてこない、持続的な構造的ボトルネックを特定した。

分析の結果、グローバルな生産ネットワークの重心が中国へと決定的にシフトしていることが明らかになった。特に、コンピュータ・電子・光学製品（C26）および電気機器（C27）セクターは、パラメータの設定にかかわらず、一貫して中心的な地位を占めている。重要なのは、この中心性が経済規模そのものではなく、ネットワーク内での機能的な埋め込み（embeddedness）を反映している点であり、システム上の重要性を形作る上で間接的かつ高次の供給依存関係が果たす役割を浮き彫りにしている。

さらに動学的な分析によれば、現代の生産ネットワークは供給ショックに対して短期的な感受性が高まっている一方で、急速な収束性も示している。これは、レジリエンスの劣化ではなく「変容」を意味している。この意味において、GVCの深化はショックが伝播・吸収されるチャネルを再構成し、より集中度が高まると同時に、より適応力の高いネットワークを生み出したと言える。

これらの知見は、世界経済における構造変化とレジリエンスを評価する際、ネットワークに基づいた動学的な視点を採用することの重要性を強調するものである。より広範には、本研究で構築された枠組みは、将来の混乱が進化し続ける生産アーキテクチャとどのように相互作用するかを評価するための基盤を提供し、産業政策やグローバルなリスク管理に対して重要な示唆を与えるものである。

【参考文献一覧】

- Acemoglu, D., Carvalho, V. M., Ozdaglar, A. and Tahbaz-Salehi, A. (2012) 'The network origins of aggregate fluctuations', *Econometrica*, 80 (5), pp. 1977–2016.
- Aleskerov, F., Cinar, Y., Deseatnicov, I., Sergeeva, E., Tkacherv, D. and Yakuba, V. (2024) 'Network analysis of economic sectors in the world economy', *Working Paper*.
- Baldwin, R. (2016) *The Great Convergence: Information Technology and the New Globalisation*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Carvalho, V. M. (2014) 'From micro to macro via production networks', *Journal of Economic Perspectives*, 28 (4), pp. 23–48.
- Carvalho, V. M., Nirei, M., Saito, Y. U. and Tahbaz-Salehi, A. (2021) 'Supply chain disruptions: Evidence from the Great East Japan earthquake', *The Quarterly Journal of Economics*, 136 (2), pp. 1255–1321.
- Chi, Y., Jing, Z., Liu, Z., and Zhou, X. (2024) 'Risk spillovers in Chinese production network: A supply-side shock perspective', *Humanit Soc Sci Commun*11, 339 (2024). <https://doi.org/10.1057/s41599-024-02834-8>
- Criscuolo, C. and Timmis, J. (2018a) 'GVCs and centrality: mapping key hubs, spokes and the periphery', *OECD Productivity Working Papers*, No. 12, OECD Publishing, Paris.
- Criscuolo, C. and Timmis, J. (2018b) 'GVC centrality and productivity: Are hubs key to firm performance?', *OECD Productivity Working Papers*, No. 14, OECD Publishing, Paris.
- Galbusera, L. and Giannopoulos, G. (2018) 'On input-output economic models in disaster impact assessment', *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 30, pp. 186–198.
- Georgieva, V. (2025) 'Production network features of industrial policy', *IMF Working Paper*, No. 25/23.
- Joyez, C. (2026) 'Connectivity and contagion: How industry networks shape the transmission of shocks in global value chains', *International Economics*, 185, 100666.
- Lamsal, Y. R. (2018) 'Emerging countries and trends in the world trade network: A link analysis approach', *Master's Thesis/Working Paper*.
- McNerney, J., Savoie, C., Coburn, A. S., Farmer, J. D. and Lafond, F. (2022) 'How production networks amplify economic growth', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119 (1).
- Miller, R. E. and Blair, P. D. (2022) *Input-output Analysis: Foundations and*

- Extensions*. 3rd edn. Cambridge: Cambridge University Press.
- OECD (2025) *OECD Inter-Country Input-output Database*. Available at: <http://oe.cd/icio>.
- Oosterhaven, J. (1988) 'On the plausibility of the supply-driven model', *Journal of Regional Science*, 28 (2), pp. 203-217.
- Shimoda, M. and Fujikawa, K. (2012) 'Input-output models and supply constraints caused by the Great East Japan Earthquake' [産業連関分析モデルと東日本大震災による供給制約], *Journal of Applied Input-output Analysis* [産業連関], 20 (2), pp. 106-118.
- Xing, L. (2017) 'Analysis of inter-country input-output table based on citation network', *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 482, pp. 491-506.
- Yamano, N., Alsamawi, A., Webb, C., Cimper, A., Soyigit, S. and Boz, Ç. (2017) 'Global input-output analysis: A network approach', *OECD Science, Technology and Industry Working Papers*.
- Zürcher, C. and Pechansky, R. C. (2023) 'Development of the OECD Inter-Country Input-output Database', *OECD Statistics Working Papers*.
- 伊藤恵子 (2025) 『グローバル化と日本企業－国際収支構造変化とパフォーマンス実証分析』慶應義塾大学出版会.
- 猪俣哲史 (2019) 『グローバル・バリューチェーン』日本経済新聞社.
- 猪俣哲史 (2023) 『グローバル・バリューチェーンの地政学』日本経済新聞社.
- 佐野智樹・長町悠平 (2022) 「供給ショックの生産・雇用への波及に関する分析フレームワークの提案」RIETI Policy Discussion Paper Series 22-P-008.
- 下田充・藤川清史 (2012) 「産業連関分析モデルと東日本大震災による供給制約」『産業連関』Vol. 20, No.2
- 高瀬浩二 (2022) 「産業部門間の連関性指標の概説と地域経済への応用例」『経済研究』27巻2号.

Appendix A. ネットワークの構造的脆弱性の評価

グローバル・バリューチェーンに内在するシステムのリスクを定量化するため、本研究ではネットワークの構造的脆弱性を示す主要な指標としてスペクトル半径 ($\lambda_{\max}$) を採用する。

特定の産業（ノード）で発生した供給ショック（例：原材料の不足）は、その出力を購入する下流の産業へと伝播し、生産ネットワーク全体に連鎖的な影響を及ぼす。初期ショックをベクトル s とすると、このショックがネットワーク全体に波及するプロセスは次のように定式化できる。

$$x = s + sB + sB^2 + sB^3 + \dots = s(I - B)^{-1} \quad (A1)$$

ここで、 B はゴーシュ型の配分係数行列である。 s は各セクターへの直接的な混乱を捉えた初期ショックベクトルであり、 x は生産ネットワークを通じた波及の結果として生じる最終的な累積影響を表す。

この無限級数が安定した有限の値に収束するための必要十分条件は、行列 B のスペクトル半径（最大固有値） $\lambda_{\max}$ が 1 未満であること ($\lambda_{\max} < 1$) である。数学的には、この波及プロセスは行列の累乗によって特徴づけられる。行列 B の固有値を $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ とし、その最大値を $\lambda_{\max}$ とすると、 k ステップ後のショック伝播の状態を示す B^k は、基本的にはスペクトル半径の k 乗によって支配される。

$$B^k \approx \lambda_{\max}^k \mathbf{v} \mathbf{w}^T \quad (A2)$$

ここで、 $\mathbf{v}$ および $\mathbf{w}$ は、それぞれ最大固有値（スペクトル半径）に関連付けられた右固有ベクトルおよび左固有ベクトルである。

したがって、行列 B を繰り返し適用した際のシステムの動学的挙動は、そのスペクトル半径 ($\lambda_{\max}$) によって決定される。

- $\lambda_{\max} < 1$ の場合：ショックの影響は生産工程を伝播するにつれて減衰し、最終的にはゼロに収束する。この場合、ショックはネットワーク内で「消散 (dissipate)」し、システムの安定性が確保される。
- $\lambda_{\max} > 1$ の場合：波及の各段階で影響が拡大し、システム全体の不安定化を招く。これは、ショックがネットワーク内で「増幅 (amplify)」され、発散プロセスに陥ることを意味する。

$\lambda_{\max}$ の算出は、ネットワーク全体の「接続密度（connectivity density）」と「依存の強度（intensity of dependence）」を、単一の包括的な指標へと効果的に凝縮するものである。 $\lambda_{\max}$ の値が1に近づく、あるいは1を超える場合、たとえ局所的で小さな供給障害であっても、それが消散しにくくなっていることを示唆する。このような条件下では、ネットワークの構造的脆弱性が増大し、連鎖的な不全やシステム全体にわたる供給停止のリスクが高まる。

さらに、スペクトル半径はネットワーク内の「中心性の高いノード（ハブ）」の接続強度に強く依存する。 $\lambda_{\max}$ が大きいということは、特定の産業群がシステム全体の安定性の鍵を握っていることを示している。その結果、これらの重要なノードが損なわれた場合、ネットワーク全体が連鎖的な崩壊（chain-reaction collapse）を起こしやすくなり、構造的レジリエンスが著しく欠如していることを意味するのである。

Appendix B. 減衰パラメータに関する頑健性チェック

中心性に基づいた我々の分析結果のロバストネスを検証するため、減衰パラメータ α の異なる値に対して、Katz中心性のランキングがどのように変化するかを検討する。

表B1は、7つの異なるパラメータ値 $\alpha \in \{0.05, 0.1, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0\}$ におけるKatz中心性の上位8産業を示している。なお、これらの値はいずれも収束条件である $\alpha < 1/\lambda_{\max}$ を満たしている。

表B1：異なった α の下でのKatz中心性のトップ産業（2021年のネットワーク）

Rank	$\alpha = 0.05$	$\alpha = 0.1$	$\alpha = 0.5$	$\alpha = 0.7$	$\alpha = 1.0$	$\alpha = 1.5$	$\alpha = 2.0$
1	C19	C19	C19	C19	C27	C27	C27
2	C27	C27	C27	C27	C19	C26	C26
3	C26	C26	C26	C26	C26	C19	C19
4	C22	C22	C22	C22	C22	C22	C13T15
5	C13T15	C13T15	C13T15	C13T15	C13T15	C13T15	C22
6	C31T33	C31T33	C31T33	C31T33	C31T33	C31T33	C31T33
7	C3202T309	C3202T309	C302T309	C302T309	C302T309	C302T309	C302T309
8	C301	C301	C301	C301	C301	C301	C301

$\alpha = 1.5$ をベンチマーク（基準値）とした場合、他の α の値における産業ランキングとのスピアマン順位相関係数は、すべて0.92を上回っており、極めて高い頑健性を示している。この結果は、我々の主要な知見、特に中国のC26およびC27セクターを構造的ボトルネックとして特定したことが、特定の α の選択に起因するものではないことを裏付けるものである。

Appendix C. インパルス反応関数にもとづくシミュレーション

インパルス反応関数（IRF）は、特定の年における固定された産業ネットワーク構造を前提として、一時的な供給ショックが時間の経過とともに減衰する速度を測定する動的なレジリエンス指標である。IRFは、背後にある供給配分構造に従い、瞬間的な供給ショックが生産ネットワークに沿ってどのように減衰していくかを追跡する。

本研究におけるシミュレーションは、以下のステップで進行する：

1. **初期ショック**：選択された中心的産業 k に対して、10%の負の供給ショックを与える。
2. **ゴーシュ型波及**：時間 t における供給制約のベクトルを s_t とする。供給ショックの波及は、ゴーシュ型の配分係数行列 B によって支配される。減衰パラメータ α を導入すると、供給制約の動的な進化は次のように与えられる。

$$s_{t+1} = \lambda B s_t \quad (C1)$$

3. **累積的影響**：波及プロセスを反復することで、IRFは最終的にどの産業が初期ショックの影響を受けるか、およびその累積的な影響の大きさを特定する。

Katz中心性とインパルス反応関数の関連に触れておく。Katz中心性は次のように定義される。

$$c = \sum_{t=0}^{\infty} (\lambda B)^t \mathbf{1} \quad (C2)$$

ここで、 $\mathbf{1}$ はすべての要素が1のベクトルである。

対照的に、IRFは以下の数列として定義される。

$$\{s_t\}_{t=0}^{\infty} \quad (C3)$$

これは、特定の初期ショックに続く供給制約のタイムパス（時間経路）を記述するものである。したがってIRFはKatz中心性の時間分解された形（time-resolved decomposition）と解釈でき、供給ショック・シミュレーションはKatz中心性の定常状態（steady-state）へと収束する。つまり、Katz中心性は、ゴーシュ型配分構造を通じて波及する供給ショックのインパルス応答を、無限の時間地平にわたって集計することで得られる静止解を表しているのである。

この意味において、Katz中心性は生産ネットワークに組み込まれた供給ショックの長期的な累積影響を要約したものであるのに対し、インパルス応答関数（IRF）はそれらが時間とともに推移する動的な調整プロセスを明示的に捉えたものである。

