

産業構造の特性に関するネットワーク分析*

小林 幹
宮川幸三
王 在喆

1. はじめに

産業連関表に基づいて経済発展と産業構造の変化について分析する枠組みは、1930年代に初めて Wassily Leontief によって構築され、その後、様々な分析手法が開発されてきた。Leontief (1963) では、産業別の需給構造および貿易構造を、スカイラインを模した1枚の図として描き、各国のスカイラインの形状と経済発展段階の関係について分析している。また尾崎 (1980) では、各商品の生産技術を単位構造系 (ユニット・ストラクチュア) と呼ぶマトリックスとして表現し、その形象が長期にわたって安定的であったことなどを示している。近年でも様々な場面で適用されているこれらの分析手法は、産業構造や技術構造を1枚の図で示し、それについて定性的な分析を行うものであった。

これに対して本研究は、複雑な産業構造を定量的に分析することを試みるものである。産業連関表において描写される産業部門間の複雑な取引関係を産業構造であると考えれば、産業構造を1つの複雑ネットワークとしてとらえることがで

* 本研究は、立正大学データサイエンスセンターの研究プロジェクト「産業構造のネットワーク分析」の研究成果の一部をまとめたものである。また本研究については、平成29年度立正大学経済研究所研究助成および令和2年度立正大学研究推進・地域連携センター支援費 (第3種) の助成を受けた。ここに記して謝意を表す。

きる。本稿では、このような視点にもとづき、既存の産業連関データにネットワーク分析の手法を適用して産業構造の特性を客観的な指標から分析している。

数学や物理の分野においてネットワークに関する研究は古くから盛んに行われており、ネットワークに関する多くの理論が構築されている (Berge, 1973; Wilson, 2010)。ネットワークとは、点 (ノードと呼ぶ) を辺 (リンクと呼ぶ) で結んだ図形のことである。リンクに方向が定まっているネットワークを有向ネットワーク、方向が定まっていないネットワークを無向ネットワークとよぶ。また、各リンクに線の太さなどの量が対応づいているときその量を重みといい、重みが対応づけられているネットワークを重み付きネットワーク、重みが対応づけられていないネットワークを重みなしネットワークという。ネットワーク理論は様々な分野に適用可能であり、多くの応用研究が行われている (Strogatz, 2001; Jeong, 2000)。例えば、ノードを人、リンクを 2 人の間の人間関係として社会をネットワークとして表現することで、人と人の繋がりで構成されている社会の構造をネットワーク理論により解析することが可能となる。社会構造に関する研究は、従来定性的に議論されることがほとんどであったが、ネットワーク理論を用いることにより定量的な議論が可能となり研究の方向性が大幅に広がった。本稿では、産業部門をノード、部門間の取引をリンクとして産業連関表をネットワーク表現する。使用したデータは、2007 年日中国際産業連関表であり、当時の日本と中国という発展段階の異なる 2 国の経済を比較分析することにより、経済発展段階と生産ネットワークの特性の関係性について考察している。

以下では、第 2 節において、産業連関表を用いたこれまでの産業構造分析およびネットワーク分析を概観する。第 3 節では、本研究における分析手法の詳細を述べ、第 4 節でその結果を明らかにする。第 5 節では、本研究のまとめとして、分析結果をあらためて概観するとともに今後の課題を示している。

2. 先行研究

2.1. 産業連関表による産業構造分析

経済成長や経済発展と産業構造変化との関係について、産業別の生産額構成比

および就業者数構成比に関する経験則としてのペティ・クラークの法則がよく知られている。しかし、ペティ・クラークの法則は産業別の生産規模や労働人口規模についての相対関係の変化に関する内容のみを扱うものであり、産業部門間の相互作用を考慮していない。これに対し、1930年代にWassily Leontiefが考案した産業連関表および産業連関分析では、原材料やエネルギーなどの中間財を明示的に取り扱うことによって、産業部門間の中間財取引によって規定される複雑な関係性そのものを産業構造として扱うことを可能にした。これは言い換えれば、産業ごとの規模に加えて、産業部門間の中間財取引を通じた相互依存関係の変化をも分析対象に含むことを意味している。このことは、産業別の生産規模比率のみに着目し、産業構造変化の結果のみを考察するペティ・クラークの法則とは大きく異なる点である¹。

産業連関表を用いた産業構造分析の1つの手法として、スカイライン分析がある。スカイライン分析では、1国もしくは1地域の貿易構造に着目し、貿易構造と産業構造とはコインの表と裏の関係にあるといった考え方に基づいて、貿易構造と産業構造を表す1枚の図を描く。この図がスカイラインを模していることから、この分析手法はスカイライン分析と呼ばれている。

スカイライン分析は、Leontief (1963) においてはじめて発表された分析方法であり、以降様々な国や地域を対象として分析が行われている²。経済成長ないし経済発展と産業構造変化の仕組みについて分析を行う場合、最終財の生産額や輸出入額の変化のみならず、中間財をも視野に入れて考えることは必要不可欠である。スカイライン分析では、各産業部門の生産に及ぼす国内需要と輸出・輸入との直接的、間接的な経済効果が考慮された上で、各産業部門の自給率が測定され、各産業部門の自給率に基づいてあたかもスカイラインのように見える起伏する屈

¹ 産業連関表および産業連関分析の詳細については、新飯田 (1992)、Miller & Blair (2009)、環太平洋産業連関分析学会編 (2010)などを参照のこと。

² 他の国や地域を対象とした近年のスカイライン分析の事例としては、王 (2009)、中野 (2013)、Kobayashi & Yokoyama (2015)、居城他 (2016)などがある。また、スカイライン分析の手法自体を拡張する研究もおこなわれている (宮川, 2005; 藤原, 2017など)。

折線が描かれる。それがスカイライン・チャートである。そのスカイライン・チャートを眺めることにより、産業部門別の自給率のみならず、他国(他地域)経済に対する交易依存の度合いを俯瞰することができる³。

Leontief (1963) では、スカイライン・チャートから得られる観察事実を次のようにまとめている。経済の規模が大きくなればなるほど、また成長すればするほど、産業構造はますます完成した形状となるため、その経済のスカイラインは平坦であり、産業部門別の自給率が自給線 100% ラインを少し上回っている。このことは、多くの部門において国内(自地域内)生産が自国(自地域)内の需要を上回っており、移輸入に頼っている部門が少ないことを意味している。このような観察事実は経済の成長ないし発展が成熟していることを反映している。しかし、もしスカイライン・チャートの起伏が激しい形状になっていれば、その経済は未だに発展途上にあり、国内(自地域内)生産できない財が多く、それらは他国(他地域)からの移輸入に頼るしかないことを反映している。

このように Leontief は、スカイライン・チャートに示される屈折線の形状、つまりスカイラインの凹凸と高さを観察することによって、経済の発展段階と産業構造・貿易構造との系統的な関係を見出すことを試みていたといえる。

スカイライン分析と同様に、産業連関表に基づく構造を図として描くことによって分析を行う手法として、尾崎(1980)による「単位構造系」(ユニット・ストラクチュア)がある。単位構造系は特定商品を1単位生産するために必要となるすべての産業部門間の取引を表しており、商品の生産技術そのものを意味している。もし特定の商品に対して最終需要が1単位発生したとすれば、当該部門はその需要を満たすために商品を生産しなければならない。この生産過程においては、生産要素である労働や資本はもとより、部品や原材料、エネルギーなどの中間財に対する需要も発生する。さらにそれらの中間財を生産するために、多くの部門が生産を行う必要がある。このような全ての生産活動を含んだ究極的な中間財取引こそが、その商品の生産に関わる技術構造を表しており、それが「単位構造系」

³ スカイライン分析の方法については、尾崎(1980)、尾崎(2004)第17章などに詳しい説明がある。

である。

投入係数行列と単位構造系の行列との区別について次のように付け加えることができる。投入係数とは、各部門がそれぞれの生産物を生産するために使用する中間財投入額をその部門の国内生産額で除したものである。したがって投入係数行列は、各部門が1単位の商品を生産する際に直接的に必要な中間財・サービスの集合体を成しており、産業連関分析の出発点にもなっている。投入係数行列の列ベクトルは、各部門固有の商品生産技術そのものを示していると理解できる。これに対して単位構造系は、ある商品の生産に際して直接的に必要な中間財投入（投入係数行列の各列ベクトル）だけでなく、その中間財を生産する際に必要となる間接的な中間投入の全てを含み、それを部門間取引の行列として表現している。1つの商品について1つの単位構造系の行列が存在することになる。したがって単位構造系は、特定商品の生産に関わる経済全体の技術構造を示していると理解できる。

尾崎(1980)では、日本の1965年・70年・75年の産業連関表を用いて自動車やセメント、一般機械、鉄・粗鋼の単位構造系を図示し、観測期間において急激な経済成長・発展が達成されたにも関わらず、単位構造系の形象は安定的であったことから、経済体系の基底に技術関係に基づく基本構造が存在したと結論付けている⁴。

ここでとりあげた2つの分析手法は、いずれも産業連関表において描かれる複雑な構造を1枚の図として描き、それを分析することによって経済発展と産業構造変化の関係性について考察したものであった。これに対して本研究は、産業連関表が描く産業部門間取引を複雑ネットワークとして捉え、2つの先行研究と同様の分析目的のもとで新たな分析手法を適用し、産業構造の特性を明らかにするものである。

上述のスカイライン分析や単位構造系は、産業構造の形象を分かりやすく可視化したものであり、それぞれのグラフから複雑な産業構造の特徴をある程度把握

⁴ 単位構造系は、その後も様々な研究で用いられている。とくに近年行われた研究としては、Nakano & Washizu (2018)、藤岡 (2019) などがある。

することはできる。しかしこれらは主観的な観点からの分析にとどまっており、客観的な指標に基づいて産業構造の特性を定量的に分析することは行われていない。もしも産業構造の特徴を客観的に捉えようとするならば、その特徴を表す的確な数値指標を示すことが必要不可欠であろう。産業構造の特徴を表す適切な指標を求めることができれば、経済成長ないし経済発展と産業構造変化のパターンを類型化することも可能となる。そこで本稿では、産業連関表における産業部門をノード、部門間取引をリンクとしてネットワーク分析の手法を適用し、グラフの特徴量や次数分布等を求めることによって客観的指標による産業構造分析を試みている。

2.2. 産業連関表を用いたネットワーク分析

本研究と同様に、産業部門をノード、部門間取引をリンクとみなして産業連関表にネットワーク分析を適用した先行研究は、数多く存在する。Blöchl, et al. (2011) は、自部門投入を含む産業連関表データに適用できる中心性の指標としてランダムウォークに基づく Vertex Centralities を定義し、世界各国のデータを分析している。また Xing (2017) は、WIOD (World Input-Output Tables) にネットワーク分析の手法を適用し、世界経済の競争状態について分析している。同じ WIOD を用いた研究としては、Zhang, Wang, & Yan (2021) がある。ここでは、従来のネットワーク分析指標であるページランク (PR) に基づいて、経済学的な意味を考えた重み付きのページランク (WPR) を新たに提案し、WIOD に適用している。この他に、上野・斉藤・沖本 (2016) では、日本の平成 17 年産業連関表に最小全域木 (Minimum Spanning Tree: MST) の手法を適用し、主要な取引を可視化することを試みている。

これら先行研究の多くは、産業連関表における取引額や生産額そのもの、あるいは取引額を指数化した値をウェイトとして重み付きネットワーク分析を行うものであった。これに対し本研究は、部門間取引による付加価値額の発生に着目し、経済全体の付加価値額 (≒ GDP) の発生メカニズムをネットワーク分析の手法によって解析するものである。この点は、本研究独自の視点であるといえる。

一方で先行研究のいくつかでは、産業連関表を有向グラフとして扱って分析を

行っていた。本稿では、無向グラフとしての取り扱いにとどまっており、有向グラフを前提とした分析手法の開発は、今後の課題の1つである。

また分析目的という観点からいえば、本研究は、経済発展と産業構造の関係性に着目し、発展段階の異なる日本と中国という2国を対象としてネットワーク構造の比較を行うものである。この点も、本節で取り上げた先行研究とは異なる本研究の特色である。

3. 分析手法

3.1. 産業連関表の処理

本節ではまず、ネットワーク分析の対象となる隣接行列を産業連関表から求める方法を示す。産業連関表における行方向のバランスを以下のようにあらわす。

$$X = AX + C + In + E - M \quad (1)$$

A は投入係数行列 (n 行 n 列)、 X , C , In , E , M はそれぞれ、国内生産額、民間・政府消費支出、固定資本形成、輸出、輸入を表すベクトル (n 行 1 列)である。これを X について解けば、以下が得られる。

$$X = (I - (I - \hat{M})A)^{-1} ((I - \hat{M})(C + In) + E) \quad (2)$$

I は単位行列であり、 $(I - (I - \hat{M})A)^{-1}$ はレオンチェフ逆行列である。また \hat{M} は、輸入係数を対角成分とする対角行列であり、 $M = \hat{M}(AX + C + In)$ が成り立つ⁵。(2)式より、 X を以下のようにあらわすことができる。

$$X = B(I - \hat{M})C + B(I - \hat{M})In + BE = X_C + X_{In} + X_E \quad (3)$$

⁵ ここでは輸入係数を、各部門の中間需要と民間・政府最終消費および固定資本形成の合計に対する輸入額の比率として定義している。

ただし、 $B = (I - (I - \hat{M})A)^{-1}$ である。これによって国内生産額ベクトル X は、民間・政府消費支出向けの生産 X_C 、固定資本形成向けの生産 X_{In} 、輸出向けの生産 X_E という3要素に分解される。ここで X_C 、 X_{In} 、 X_E の各ベクトルの成分を対角成分とする対角行列をそれぞれ \hat{X}_C 、 \hat{X}_{In} 、 \hat{X}_E とすれば、民間・政府消費支出向け、固定資本形成向け、輸出向けそれぞれの国産中間財取引額行列 x_C 、 x_{In} 、 x_E を以下のようにあらわすことができる。

$$x_k = (I - \hat{M})A\hat{X}_k \quad (k = C, In, E) \quad (4)$$

x_k は n 行 n 列からなる行列であり、その i 行 j 列成分は、項目 k の最終需要を満たすために j 部門が購入した i 部門の国産中間財の金額（生産者価格評価）を表している。

ここで、各部門の国内生産額に占める粗付加価値額の比率によって定義される付加価値係数を対角成分とする対角行列を \hat{V} とすれば、民間・政府消費支出向け、固定資本形成向け、輸出向けそれぞれの国産中間財取引によって発生した粗付加価値額を表す行列 v_C 、 v_{In} 、 v_E を以下のようにあらわすことができる。

$$v_k = \hat{V}x_k \quad (k = C, In, E) \quad (5)$$

v_k は n 行 n 列からなる行列であり、その i 行 j 列成分は、 i 部門の国産中間財を j 部門が購入したことによって生み出された粗付加価値額を表している。 v_k は、付加価値概念で評価した最終需要項目別の生産構造を表すネットワークそのものであり、本稿ではこれを対象としてネットワーク分析を行う。ただし本稿における分析では生産のネットワークを無向グラフとして扱うため v_C 、 v_{In} 、 v_E の成分 v_{ij}^C 、 v_{ij}^{In} 、 v_{ij}^E に関して以下の処理を行う⁶。

⁶ ただし、自部門投入額が0となるように処理した表を用いて分析を行っているため、 $v_{ii}^k = 0$ である。

$$v_{ij}^{k*} = v_{ij}^k + v_{ji}^k \quad (i=1, \dots, n, j=1, \dots, n, k=C, In, E) \quad (6)$$

v_{ij}^{C*} , v_{ij}^{In*} , v_{ij}^{E*} を成分とする行列を v_C^* , v_{In}^* , v_E^* とすれば、これらを隣接行列として生産構造のネットワークを重み付きの無向グラフとして表すことができる。 v_{ij}^{k*} は、i部門とj部門の取引によって生み出された付加価値総額を意味し、これがグラフの各リンクの重みとなる。また各産業部門がノードに該当する。

ただし v_C^* , v_{In}^* , v_E^* は、中間財の取引によって生み出された付加価値のみを含んでおり、消費・投資・輸出といった最終需要部門との取引によって生み出された付加価値を含んでいない。最終需要部門によって直接的に生み出された部門別粗付加価値額ベクトル V_C , V_{In} , V_E は、それぞれ以下のようにあらわされる。

$$V_C = \hat{V}(I - \hat{M})C, \quad V_{In} = \hat{V}(I - \hat{M})In, \quad V_E = \hat{V}E \quad (7)$$

V_C , V_{In} , V_E は、n行1列のベクトルである。本稿の分析では、行列 v_k^* のn+1行目およびn+1列目に V_k (添え字のtは転置を表す)および V_k を付け足した(n+1)行(n+1)列の行列を隣接行列としてネットワーク分析を行う⁷。これにより、最終需要部門である「民間・政府消費支出」部門、「固定資本形成」部門、「輸出」部門もノードの1つを形成することになる。

なお v_C^* , v_{In}^* , v_E^* , V_C , V_{In} , V_E の全成分の合計は、経済全体の付加価値額合計に一致することになる。従って、本稿で行うネットワーク分析は、経済全体の付加価値を最終需要項目別に分解し、更に部門別の詳細な取引にまで分解したう

⁷ 実際の分析に際しては、各成分の大きさ(リンクの重み)が経済全体の付加価値総額の0.01%を下回る場合は0として計算を行っている。2007年日中表で言えば、部門間取引で生み出される付加価値額が日本については約4.2億ドル、中国については約3.5億ドルを下回る場合、両部門では取引がなかったものとして取り扱っていることになる。この処理によって、閾値を設けないケースの付加価値額合計のうち、日本の民間・政府最終消費では約4%分、固定資本形成では約10%分、輸出では14%分、中国の民間・政府最終消費では約8%分、固定資本形成では約9%分、輸出では11%分の発生付加価値額が分析対象から除かれることになる。

えで、その生産ネットワークの構造を分析するものであるといえる。本稿の分析では、2007 年日中国際産業連関表⁸を用いて日本および中国のそれぞれについて隣接行列を求めている。

3.2. ネットワーク分析の手法

本節では、産業連関表のネットワーク解析で用いられるネットワーク特徴量について述べる。本研究では、場合に応じて、重みなしと重み付きの指標を使い分けて解析する。重みを考える場合は、3.1 で述べた通り、部門 i の中間財を部門 j が購入することにより生み出される付加価値額と部門 j の中間財を部門 i が購入することによって生み出される付加価値額を足したものを部門 i と部門 j の間のリンクの重みとする。よって、産業連関表のネットワーク解析においてはリンクに方向性がないので、考えているネットワークは無向ネットワークとなる。以下の表は、本研究で用いられるネットワーク特徴量の説明である。

⁸ 2007 年日中国際産業連関表は、日本の経済産業省と中国の国家統計局の共同プロジェクトとして作成された表である。詳細については、経済産業省ホームページ (<https://www.meti.go.jp/statistics/tyo/kokusio/nittyuu/2007nen/gaiyou.html>, 最終アクセス日: 2021 年 5 月 25 日) を参照のこと。

ネットワーク特徴量	説明
次数, 平均次数, 次数分布 (重みなし)	あるノードにおけるリンクの数を, そのノードの次数という. そして, 全てのノードにわたり次数を平均したものをネットワークの平均次数, ある次数を持ったノードがいくつ存在するかをヒストグラムをネットワークの次数分布という.
次数 (重み付き)	あるノードにおけるリンクの重みの総和をそのノードの重み付き次数という. ネットワークの平均次数や, 次数分布についてもこの重み付き次数を用いて計算する. ただし本稿では, 生産規模の異なる日本と中国の比較を可能にするため, 重み付き次数を各国の付加価値総額で割った値を使用している.
最短経路距離 (重みなし)	ノード i からノード j へ行くために通らなければならない最小のリンクの数をノード i からノード j への最短経路距離という. 最短経路距離に対応するルートを最短経路という.
最短経路距離 (重み付き)	ノード i からノード j へのルートにおいて, 通るリンクの重みの合計が最小となるルートの重みの総和を重み付き最短経路距離という.
平均パス長	任意のノード対の最短経路距離を全てのノード対に対して平均したものをネットワークの平均パス長という.
ネットワーク直径	全てのノード対の最短経路距離のうち最も距離が長いものをネットワーク直径という.
密度 (重みなし)	ネットワークにおける全てのノード同士が完全に繋がっているとした場合のリンク数と, 実際のネットワークにおけるリンク数の比率を密度という. つまり, リンクがどれくらい詰まっているかを表す指標である.
モジュラリティ (重みなし)	重みなしネットワークをいくつかの部分ネットワークへ分割するとき, その与えられた分割の質を表す量をモジュラリティと呼ぶ. 値が大きいほど質の高い分割を意味する. 質が高い分割とは, 分割された部分ネットワーク内のノード間は密に繋がっており, 異なる部分ネットワーク間は疎に繋がっている状態をいう. (Newman, 2004)
モジュラリティ (重み付き)	重み付きネットワークをいくつかの部分ネットワークへ分割するとき, その与えられた分割の質を表す量を重み付きモジュラリティと呼ぶ. 値が大きいほど質の高い分割を意味する. 質が高い分割とは, 分割された部分ネットワーク内の重みの総和は大きく, 異なる部分ネットワーク間のリンクの重みの総和は小さい状態をいう. (Newman, 2004)
クラスタリング係数	ネットワークにおけるノードとリンクで作られる図形の中で, どれくらい三角形の図形が存在するかを示す量をクラスタリング係数という. つまり, 任意のノードの隣接ノード同士にどれくらいリンクが張られているかを示す量である.
媒介中心性 (重みなし)	任意のノードが, それ以外の2つのノードの組み合わせを結ぶ最短経路上に存在する割合を示す量を媒介中心性という.

4. 分析結果

表1は、2007年日中国際産業連関表(77部門表)に基づき日中それぞれについて、ネットワーク解析ソフト Gephi を用いてネットワーク分析を行った結果をまとめたものである⁹。「民間・政府消費支出」、「固定資本形成」、「輸出」の各最終需要項目についての隣接行列の分析結果に加え、3つの隣接行列を集計した最終需要全体についての分析結果を掲載している。

まず明らかな点として、全ての最終需要項目について、中国の「ノード数」および「リンク数」が日本を上回っている。本稿では、脚注7で示したように、付加価値総額の一定割合で閾値を定め、それを下回る少額の取引を除いて分析しているため、少額の取引のみを行っている部門は分析対象に含まれない。従ってここでの「リンク数」は、閾値以上の付加価値を生み出した取引の数であり、それらの取引を行った産業部門の数が「ノード数」に対応する。もともと日中で同じ部門数のデータを用いているにも関わらず、中国のノード数やリンク数が日本を上回っていることから、日本では特定部門に取引が集中している一方、中国では多くの部門で満遍なく一定規模以上の取引が行われていることがわかる。

また全ての最終需要項目について、中国の「モジュラリティ(重み付き)」の結果が日本のそれを大きく上回っている。モジュラリティは、ネットワークの分割可能性を表していることから、この結果は、中国の生産構造において複数の部分ネットワークが併存していたことを示唆している。「モジュラリティ(重み付き)」に基づいて、実際にコミュニティ分割を行った結果のコミュニティの数を表しているのが「コミュニティ数」である。全ての最終需要項目について、中国のコミュニティ数が日本を上回っており、中国では質の異なる複数の生産ネットワークが検出されている。ここで2007年時点の中国经济を概観すれば、東部沿海地域と内陸部の大きな経済格差が問題視されていた。この点から言えば、中国におけるモジュラリティの大きさおよびコミュニティ数の多さは、生産のネットワークが

⁹ Gephi については、<https://gephi.org> (最終アクセス日: 2021年5月31日) を参照のこと。

表 1. ネットワーク分析結果

部門	民間・政府消費支出 v_c^*		固定資本形成 v_m^*	
	日本	中国	日本	中国
平均次数 (重みなし)	10.406	11.233	7.200	10.317
平均次数 (重み付き)	0.018	0.010	0.007	0.009
ネットワーク直径	4.000	4.000	4.000	4.000
グラフ密度	0.153	0.156	0.147	0.166
モジュラリティ (重みなし)	0.218	0.244	0.230	0.184
モジュラリティ (重み付き)	0.022	0.127	0.104	0.212
コミュニティ数	3	4	4	6
平均クラスタリング係数	0.698	0.668	0.672	0.612
平均パス長	2.064	2.040	2.096	2.146
ノード数	69	73	50	63
リンク数	359	410	180	325

部門	輸出 v_E^*		最終需要計	
	日本	中国	日本	中国
平均次数 (重みなし)	8.583	11.507	16.179	21.949
平均次数 (重み付き)	0.006	0.007	0.025	0.024
ネットワーク直径	4.000	4.000	4.000	3.000
グラフ密度	0.183	0.169	0.210	0.281
モジュラリティ (重みなし)	0.158	0.173	0.190	0.142
モジュラリティ (重み付き)	0.054	0.164	0.257	0.338
コミュニティ数	3	5	—	—
平均クラスタリング係数	0.769	0.716	0.712	0.724
平均パス長	1.994	2.026	1.940	1.759
ノード数	48	69	78	79
リンク数	206	397	631	867

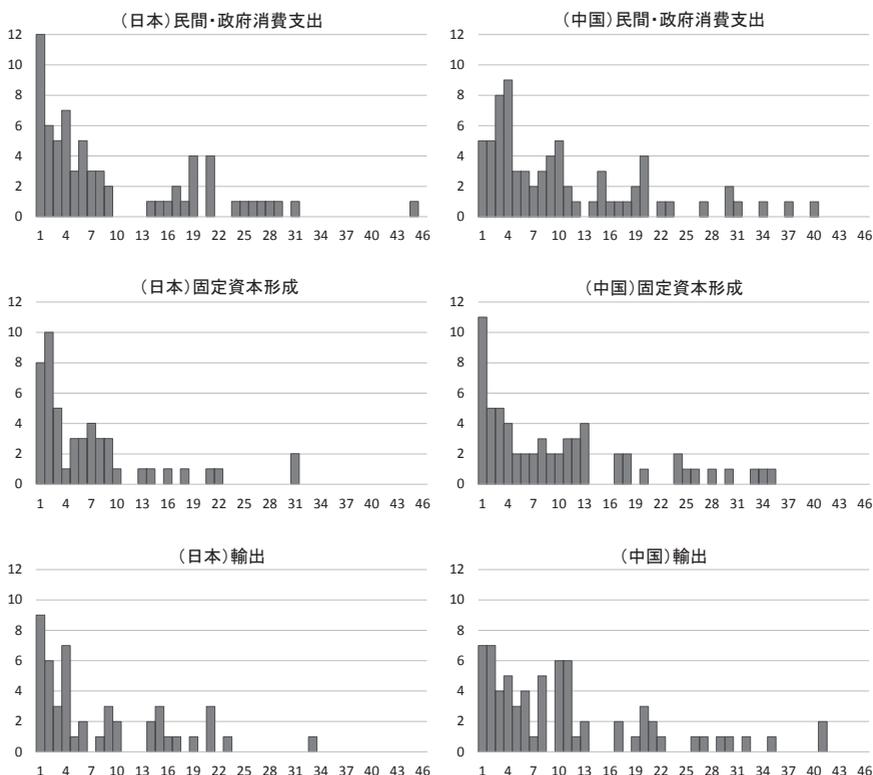
※各国付加価値総額の0.01%を下回る部門間取引は除いた分析結果

地域ごとに分断されていたことを意味する可能性がある。モジュラリティの値やコミュニティ数が、生産ネットワークの分断や地域格差を検出する指標となりえるかについては、今後様々な国・地域のデータを用いてさらなる検証が必要である。

その他の指標については、日中間で一貫した傾向はみられず、両国の生産ネットワークは非常に似通った特性を持っていることが明らかとなった。国や発展段

階が異なってもネットワークの特性値の多くにそれほど大きな差はない、という点も、今回明らかになった重要な結果の1つである。これについても、今後は発展段階の異なる様々な国や地域を対象とした分析を行い、検証することが必要である。

続いて図1および図2は、部門別の度数分布を描いたものである。図1は部門間取引によって発生した付加価値額の大きさを考慮せず、取引の数そのものを度数とした場合の分布を、図2は発生した付加価値額の大きさを考慮し、各ノード

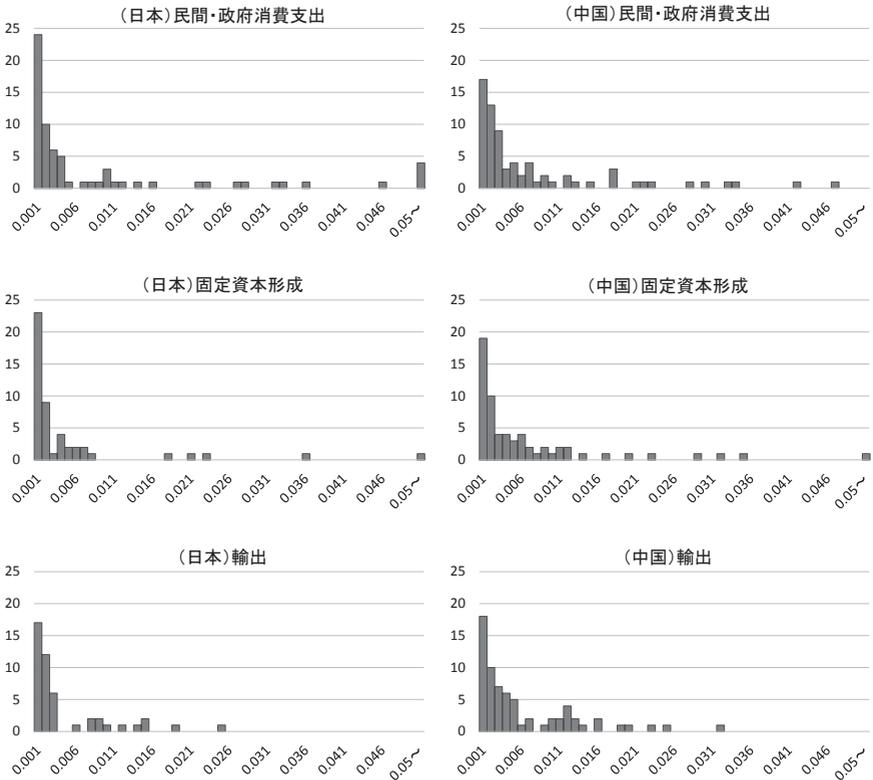


※横軸：度数 (重みなし)，縦軸：部門数

図1. 度数分布 (重みなし)

の付加価値額を各国の付加価値総額で割った値を次数とした場合の重み付き分布を表している。横軸が次数に対応し、縦軸は部門数に対応している。

図1の結果をみれば、日中両国の全ての最終需要項目について、多くの部門で次数が小さい一方でいくつかの限られた部門で次数が大きい。日本と中国を比較すれば、特に「民間・政府最終消費」と「輸出」において、日本では次数の小さい部門が中国に比較して多く、次数の大きい部門が比較的少ない。この結果は、前述の「日本では特定部門に取引が集中している一方、中国では多くの部門で満



※横軸：次数（重み付き），縦軸：部門数

図2. 次数分布（重み付き）

遍なく一定規模以上の取引が行われている」という結果と整合的である。

図 2 をみれば、図 1 以上に多くの部門が小さい次数に集中しており、いずれもべき分布に近い形状となっている。一方で、杉山らは、企業間の取引ネットワークにおける次数分布はべき指数 2.06 のべき分布になっていると報告している(杉山他, 2005)。産業連関表は数多く存在する企業間の取引総和の結果としての表れであると考え、産業連関表におけるネットワークの次数分布もべき的になっているのは自然なことと考えられる。これは、異なるべき指数を持つべき分布を個々に持つ独立な確率変数の和は変数の個数が無限大の極限でべき分布に収束するという極限定理からも支持される結果であると思われる(Shintani, 2018)。また、日本と中国との差は図 1 のケースに比較して小さく、一方で「民間・政府消費支出」と「固定資本形成」では次数の高い部門がいくつか存在するのに対し、「輸出」では次数の高い部門が存在しないことをみれば、国の違いよりもむしろ最終需要項目の違いによってネットワークの次数分布が特徴付けられていることがわかる。

図 3, 図 4, 図 5 は、日中それぞれの生産ネットワークを最終需要項目別に図示したものである。図中のリンクの太さは、発生する付加価値額の大きさに対応しており、リンクが太いほど発生する付加価値額が大きいことを表している。なお部門の名称は、図の見やすさを重視して一部省略して表記している。図 3 の「消費」は「民間・政府消費支出」部門を、図 4 の「投資」は「固定資本形成」部門を表している。

まず図 3 の「民間・政府消費支出」のネットワークをみれば、図 4 の「固定資本形成」や図 5 の「輸出」に比較して、日本と中国の生産ネットワークが類似した形状をしていることがわかる。両国ともにほとんどの産業部門が満遍なく登場しており、サービス部門を中心に太いリンクが描かれている。ただし日本においては、「不動産」「商業」「医療・保険・社会保障・介護」の 3 部門と「民間・政府消費支出」部門との直接取引が著しく太いリンクで描かれているのに対し、中国では、これら 3 部門以外にも「公務・公共サービス」や「農業」「教育」といった部門とも直接取引が大きく、日本の生産ネットワークでは付加価値の発生が特定部門に集中しているといえる。

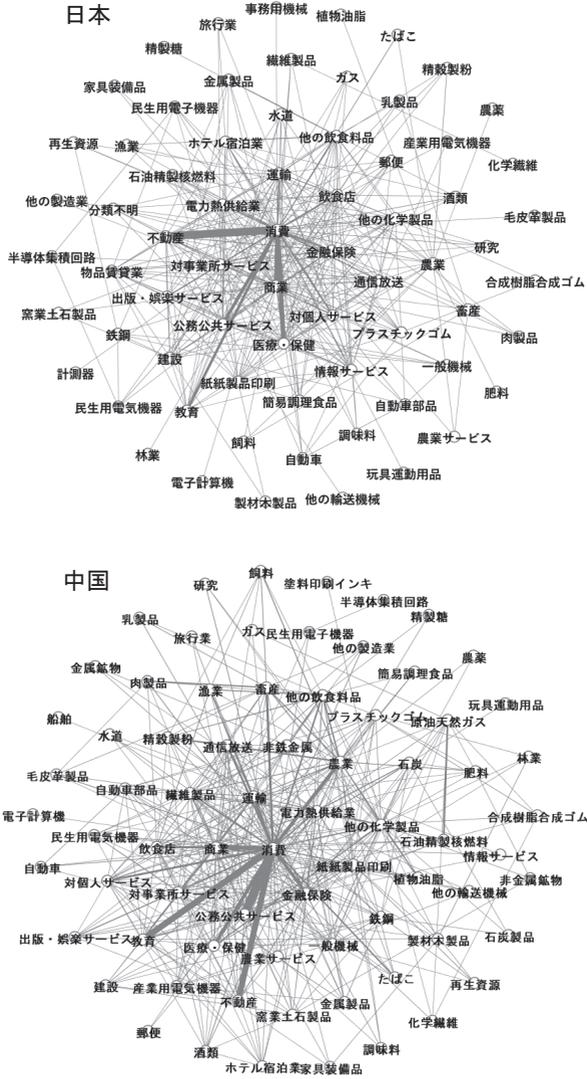


図 3. 民間・政府最終消費ネットワーク図

図4の「固定資本形成」のネットワークをみれば、まず、登場するノード数やリンク数が日中両国ともに図3の「民間・政府消費支出」のネットワークに比較して少なく、その内容も大きく異なっている。この結果からは、日本と中国という国の違い以上に、最終需要項目の違いがネットワーク構造の違いに影響を与えているようにみえる。この点は、最終需要項目別に生産ネットワークを分析することの意義を示す結果である。日中のネットワークを比較すれば、まず日中ともに「固定資本形成」部門と「建設」部門を結ぶリンクのみが極めて太く描かれており、この部門間取引に付加価値の発生が集中しているという意味で類似した構造を持っている。一方両者の違いとしては、リンク数や複雑さをあげることができる。中国の生産ネットワークでは、リンク数が日本のそれに比して著しく多く、部門間の複雑な関係が描かれている。

続いて図5の「輸出」のネットワークをみれば、日本と中国で大きく異なった形状をしている。中国のノード数やリンク数が日本のそれを大きく上回っており、中国においてより複雑な生産ネットワークが形成されている点は、「固定資本形成」のネットワークにおいてみられた結果と同じである。また日本においては、「自動車」「自動車部品」「輸出」の3部門において三角形が形成されている点や、「一般機械」「半導体・集積回路・その他電子部品」と「輸出」部門をつなぐリンクも太いものになっており、自動車産業をはじめとする限られた製造業主体の輸出構造をみることができる。一方中国では、「輸出」と「繊維製品」を結ぶリンクが極めて太く、これら2部門に「農業」を加えた三角形が形成されている点、日本のネットワークには登場しない「原油・天然ガス」と「石油精製・核燃料」部門が太い線で結ばれている点など、製造業だけでなく農林水産業や鉱業も含んだより複雑な生産ネットワークが形成されていることがわかる。

日中の「民間・政府消費支出」の生産ネットワークが類似した形状を持っているという結果は、発展段階が異なっても家計消費の品目構成や部門ごと商品ごとの生産技術（投入係数）に大きな違いがなかったことを意味するものである。これに対して「輸出」については、発展段階の違いによって輸出品目の構成が大きく異なる可能性が高く、それによって生産ネットワークも異なった形状をしていたと解釈できる。この点は、各国経済の産業構造や生産ネットワークの特性を

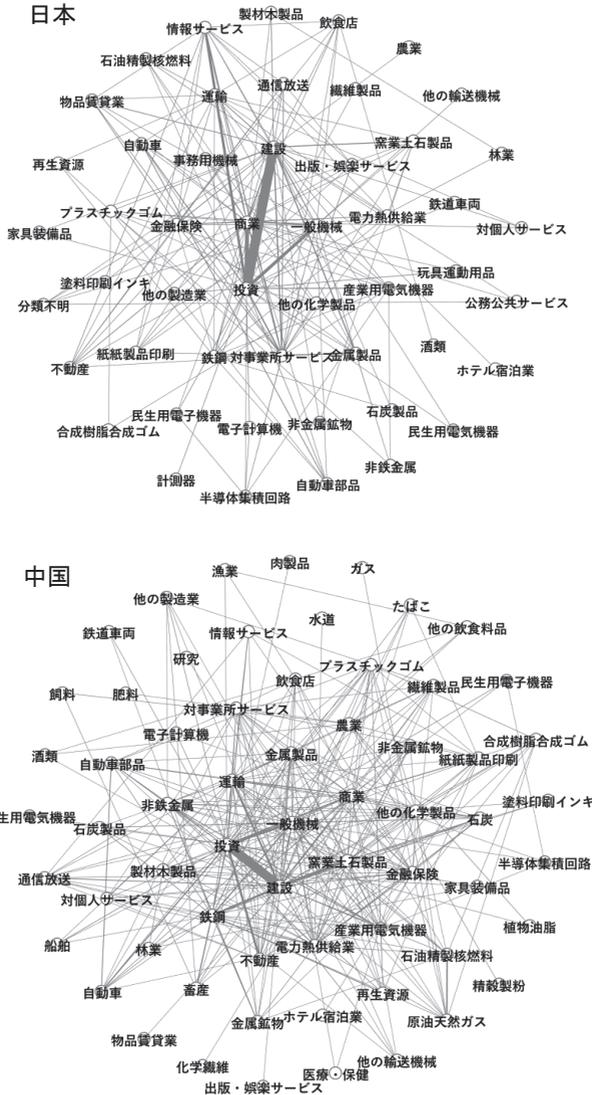


図 4. 固定資本形成ネットワーク図

表 2. 次数 (重みなし)

順位	民間・政府消費支出			
	日本		中国	
第 1 位	商業	45	商業	40
第 2 位	その他の対事業所サービス	31	運輸	37
第 3 位	運輸	29	その他の化学製品	34
第 4 位	飲食店	28	電力・熱供給業	31
第 5 位	公務・公共サービス	27	農業	30

順位	固定資本形成			
	日本		中国	
第 1 位	建設	31	一般機械	35
第 2 位	商業	31	建設	34
第 3 位	その他の対事業所サービス	22	運輸	33
第 4 位	一般機械	21	商業	30
第 5 位	運輸	18	電力・熱供給業	28

順位	輸出			
	日本		中国	
第 1 位	商業	33	商業	41
第 2 位	運輸	23	運輸	41
第 3 位	半導体 集積回路 その他電子部品	21	その他の化学製品	35
第 4 位	金融・保険	21	電力・熱供給業	32
第 5 位	その他の対事業所サービス	21	金融・保険	30

分析する際に、「輸出」について分析することが重要であることを示唆しているといえる。

また「固定資本形成」や「輸出」のネットワークに関して、分析時点においては経済発展段階が低かったと考えられる中国において、むしろ日本よりも複雑な生産ネットワークが形成されていたという結果は、経済発展に伴って産業構造が

複雑化するといった見方¹⁰とは矛盾するものであり注目に値する。なぜ中国の「固定資本形成」や「輸出」においてこのような複雑なネットワークが形成されたのか、という点については、地域別の視点なども取り入れながら今後さらなる検証を行う必要がある。

表 2, 表 3, 表 4 は、付加価値額を考慮しない重みなし次数, 付加価値額を考慮した重みあり次数, 媒介中心性という 3 つの指標の大きさに応じて部門別に順位をつけ、それぞれの上位 5 部門を表示したものである。

表 2 の重みなし次数において日中で同じ部門があげられているケースに着目すれば、まず全ての最終需要項目について、日中ともに「商業」「運輸」部門が上位 5 位以内に含まれている。それ以外に、「固定資本形成」における「建設」「一般機械」部門、輸出における「金融・保険」部門が日中で共通の部門となっている。

国別の結果をみれば、日本側では「対事業所サービス」が全ての最終需要項目に含まれているほか、「公務・公共サービス」や前出の「金融・保険」など、サービス部門が主体となっている。この点はサービス化が進んだ日本の産業構造の特色である。一方中国では、「電力・熱供給業」が全ての最終需要項目にあげられているとともに、「その他の化学製品」「一般機械」「建設」など、日本側では見られなかった部門が含まれている。

これに対し表 3 の重み付き次数の結果は、表 2 の結果とは大きく異なっている。表 2 には出現していなかった部門として、日本側では「不動産」「医療・保健・社会保障・介護」「情報サービス」「自動車」が、中国側では、「公務・公共サービス」「教育」「不動産」「鉄鋼」「窯業・土石製品」「繊維製品」が新たに出現している。これらは、取引先の数はいずれも多くなかったものの、各部門が産み出した

¹⁰ 中兼 (1999) では、経済発展と産業構造変化の法則としてペティ・クラークの法則に次いでよく知られているホフマンの法則 (経済発展に伴って製造業内の中心が消費財工業から生産財工業に移るという法則) に関連し、『一国の産業構造が複雑になり、迂回生産の程度が高まれば高まるほど、生産財工業の比重は高まるであろう。』(p. 83) と述べている。生産財工業の比重が高まれば中間財取引は活発化すると考えられるため、ホフマン法則を前提とすれば、経済発展とともに生産ネットワークも複雑化することが予想される。

表3. 次数(重み付き)部門別順位

順位	民間・政府消費支出			
	日本		中国	
第1位	不動産	0.135	公務・公共サービス	0.046
第2位	商業	0.093	農業	0.042
第3位	医療・保健・社会保障・介護	0.081	商業	0.034
第4位	公務・公共サービス	0.059	教育	0.032
第5位	金融・保険	0.046	不動産	0.030

順位	固定資本形成			
	日本		中国	
第1位	建設	0.076	建設	0.105
第2位	商業	0.035	一般機械	0.035
第3位	一般機械	0.023	鉄鋼	0.032
第4位	その他の対事業所サービス	0.020	窯業・土石製品	0.029
第5位	情報サービス	0.018	運輸	0.022

順位	輸出			
	日本		中国	
第1位	商業	0.025	繊維製品	0.031
第2位	一般機械	0.018	商業	0.025
第3位	自動車	0.015	運輸	0.022
第4位	運輸	0.014	鉄鋼	0.019
第5位	半導体 集積回路 その他電子部品	0.014	一般機械	0.018

付加価値額が大きかった部門である。日本側では「自動車」部門以外の全てがサービス部門である一方、中国側では半分がサービス部門、半分が製造業部門という結果であった。

表4の媒介中心性については、表2や表3の次数の順位とはまた異なった結果が得られた。例えば、日本の「民間・政府消費支出」のネットワークや中国の「固定資本形成」のネットワークの上位に「農業」部門が出現している点は、次数分

表 4. 媒介中心性部門別順位

順位	民間・政府消費支出			
	日本		中国	
第 1 位	商業	0.183	その他の化学製品	0.137
第 2 位	農業	0.101	商業	0.097
第 3 位	その他の対事業所サービス	0.057	運輸	0.076
第 4 位	公務・公共サービス	0.043	農業	0.065
第 5 位	その他の飲食料品	0.040	電力・熱供給業	0.051

順位	固定資本形成			
	日本		中国	
第 1 位	建設	0.291	建設	0.165
第 2 位	商業	0.197	一般機械	0.117
第 3 位	その他の対事業所サービス	0.060	農業	0.099
第 4 位	一般機械	0.058	運輸	0.073
第 5 位	運輸	0.045	商業	0.061

順位	輸出			
	日本		中国	
第 1 位	商業	0.162	その他の化学製品	0.141
第 2 位	金融・保険	0.104	農業	0.119
第 3 位	鉄鋼	0.059	商業	0.107
第 4 位	運輸	0.056	運輸	0.085
第 5 位	飲食店	0.043	電力・熱供給業	0.062

布の結果にはない特徴である。ただし媒介中心性は、2 部門間の最短経路上に当該部門が存在する割合を表しているが、その最短経路が経済学的にどのような意味を持っているのか、という点については検討が必要である。一般的なネットワーク分析の手法や指標は、必ずしも経済学的な観点から作られたものではなく、経済分析としての意味を持たないものもあることを考えれば、今後は経済分析に適した新たなネットワーク分析手法や指標を開発することが望まれる。

5. 結語

本稿では、2007年日中国際産業連関表にネットワーク分析の手法を適用し、日本および中国の最終需要項目別の生産ネットワークについて比較分析を行った。

2007年時点の日本経済と中国経済では、発展段階や所得水準が大きく異なっており、それゆえに生産ネットワークも大きく異なる構造を持っていることが予想された。しかし、ネットワークの特性値や次数分布、ネットワーク自体の形状等を分析した結果、日中の生産ネットワークには類似した部分が多くあることが明らかとなった。このことは、経済発展段階が異なっても一国経済の基底にある生産ネットワークの特性は安定していることを意味するものであり、これは尾崎(1980)の帰結とも整合的なものであった。

ただし、いくつかの点では、各国独自の特性を見出すこともできた。1つに、中国の生産ネットワークに登場するノード数やリンク数が日本に比較して多く、中国においてより複雑なネットワーク構造が形成されていたことである。直観的には、発展段階の高い経済ほど生産ネットワークが複雑化し、ノード数やリンク数も増加するように思えるが、逆の結果が得られたことは注目すべき点である。中国では、ノード数やリンク数と合わせて重み付きモジュラリティの値も高いことから、一国経済に大きな地域格差を内包しているため、発展段階の高い経済と低い経済の生産ネットワークが併存していることによりこのような結果が得られた可能性がある。この点については、今後地域別の産業連関表を用いた分析や、実際にネットワークの分割を試みるなどして検証を続ける必要がある。

また日本と中国で大きく異なっていた点として、「輸出」に関する生産ネットワークをあげることができる。経済発展段階や所得水準が変化してもその品目構成が大きく変化することのない「民間・政府消費支出」や「固定資本形成」に比較して、「輸出」は、各国の要素賦存比率や賃金率の違いによって品目構成が大きく変わる可能性があり、そのことが日中間の生産ネットワークの違いを生み出したと考えられる。この点からいえば、本稿の分析結果は、各国産業構造の特色を明らかにするために「輸出」の生産ネットワークに着目する必要があることを示

唆するものであった。

本稿は、極めて基礎的なネットワーク分析の手法を日本と中国という 2 国のみ
の経済に適用したものであり、残された課題も多い。ここで用いたネットワー
ク分析の手法は、もともと経済分析を目的としたものでないことから、結果につ
いての経済学的な解釈を与えることが困難なものもあった。今後は、本稿の分析結
果を踏まえ、より高度なネットワーク分析手法を多くの国・地域に適用すると
ともに、経済学的に解釈可能な新たな分析手法や、産業構造の特性を表すのに適
した指標の開発に取り組む予定である。

【参考文献】

- Berge, C. (1973). *Graphs and hypergraphs*. North-Holland Mathematical Library, vol. 6.
- Blöchl, F., Theis, F. J., Vega-Redondo, F., & Fisher, E. O. N. (2011). Vertex centralities in input-output networks reveal the structure of modern economies. *Physical Review E*, 83 (4), 046127.
- Jeong, H., Tombor, B., Albert, R., Oltvai, Z. N., & Barabási, A. L. (2000). The large-scale organization of metabolic networks. *Nature*, 407 (6804), 651–654.
- Kobayashi, S., & Yokoyama, S. (2015). Comparison of Development Options in an Erosion-Prone Reservoir Area: A Case of Wonogiri, Central Java, Indonesia. *The Japanese Journal of Rural Economics*, 17, 76–81.
- Leontief, Wassily (1963). The Structure of Development. *Scientific American*, Vol. 209, No. 3, 148–167.
- Miller, R. E., & Blair, P. D. (2009). *Input-output analysis: foundations and extensions*. Cambridge university press.
- Nakano, S., & Washizu, A. (2018). Induced effects of smart food/agri-systems in Japan: towards a structural analysis of information technology. *Telecommunications Policy*, 42 (10), 824–835.
- Newman, M. E. (2004). Fast algorithm for detecting community structure in networks. *Physical review E*, 69 (6), 066133.
- Shintani, M., & Umeno, K. (2018). Super Generalized Central Limit Theorem—Limit Distributions for Sums of Non-identical Random Variables with Power

- Laws—, *Journal of the Physical Society of Japan*, 87 (4), 043003.
- Strogatz, S. H. (2001). Exploring complex networks. *Nature*, 410 (6825), 268–276.
- Wilson, R. J. (2010). *Introduction to Graph Theory*, 5th Edn London.
- Xing, L. (2017). Analysis of inter-country input-output table based on citation network: How to measure the competition and collaboration between industrial sectors on the global value chain. *PloS one*, 12 (9), e0184055.
- Zhang, P., Wang, T., & Yan, J. (2021). PageRank centrality and algorithms for weighted, directed networks with applications to World Input-Output Tables. *arXiv preprint arXiv:2104.02764*.
- 居城琢, 大島啓, & 星山卓満. (2016). 「みなとみらい 21 産業連関表の作成と分析」『横浜国際社会科学研究所』, 21 (3), 39.
- 上野雄史, 斉藤和巳, & 沖本まどか. (2016). 「ネットワーク分析を用いた産業連関表の可視化による主要取引関係の抽出」『行動計量学』, 43 (2), 197–205.
- 王在喆. (2009). 『中国経済の地域構造』, 慶應義塾大学出版会.
- 尾崎巖. (1980). 「経済発展の構造分析 (三): 経済の基本的構造の決定」『三田学会雑誌』, 73 (5), 720–66.
- 尾崎巖. (2004). 『日本の産業構造』, 慶應義塾大学出版会
- 環太平洋産業連関分析学会編. (2010). 『産業連関分析ハンドブック』(穴戸駿太郎 監修), 東洋経済新報社.
- 杉山浩平, 本田治, 大崎博之, & 今瀬眞. (2005). 「ネットワーク分析手法を用いた企業間の取引関係ネットワーク分析」『電子情報通信学会技術研究報告』, (IN2005–28), 83–88.
- 中兼和津次. (1999). 『中国経済発展論』, 有斐閣.
- 中野幸紀. (2013). 「EU 経済のスカイライン・チャート分析」『総合政策研究』, (43), 33–53.
- 新飯田宏. (1992). 『産業連関分析入門』, 東洋経済新報社.
- 藤岡明房. (2019). 「産業連関表の単位構造分析の一般化」『経済学季報』, 68 (4), 113–138.
- 藤原丈史. (2017). 「スカイラインチャートの拡張による多地域間産業連関表の多次元可視化手法の開発」『東京情報大学研究論集』, 21, 5–14.
- 宮川幸三. (2005). 「スカイラインチャートによる産業構造分析の新たな視点」『産業連関』, 13 (2), 54–66.