

卒業論文

金融経済データからの産業連関表を活用した 為替変動の波及効果の分析と可視化

Optimal Strategy Construction

by Parameter Selection

for High Frequency Data Using Inter-Market Analysis

富山県立大学 工学部 情報システム工学科

2120028 戸田 真聡

指導教員 António Oliveira Nzinga René

提出年月: 令和7年(2025年)2月

目次

図一覧	ii
表一覧	iii
記号一覧	iv
第1章 はじめに	1
§ 1.1 本研究の背景	1
§ 1.2 本研究の目的	2
§ 1.3 本論文の概要	2
第2章 産業連関分析による波及効果	3
§ 2.1 産業連関分析と具体例	3
§ 2.2 産業連関表からの波及効果の導出	5
§ 2.3 三角化によるサプライチェーンの抽出	9
第3章 金融経済変数の影響の見える化	12
§ 3.1 為替変動と日経平均株価の関係	12
§ 3.2 金融経済要因の見える化	14
§ 3.3 産業連関表による為替変動時の産業への影響	18
第4章 提案手法	21
§ 4.1 3D グラフによるサプライチェーン構造の可視化	21
§ 4.2 産業連関表による為替変動時の各産業への影響と業種別株価との相関	22
§ 4.3 提案手法のアルゴリズム	24
第5章 数値実験並びに考察	28
§ 5.1 数値実験の概要	28
§ 5.2 実験結果と考察	28
第6章 おわりに	33
謝辞	34
参考文献	35

図一覧

2.1	産業連関表の構造 [2]	4
2.2	経済波及効果のイメージ図 [3]	7
2.3	取引基本表 (概念図) [4]	8
2.4	投入係数表 (概念図) [4]	8
2.5	バイナリ変数行列 X の一部	12
2.6	三角化後の産業部門の順列の一部	12
3.1	直近 1 年のドル円為替レートの推移	13
3.2	直近 1 年の日経平均株価の推移	13
3.3	コロナショック時のドル円為替レートの推移	14
3.4	コロナショック時の日経平均株価の推移	14
3.5	因果グラフの例	16
3.6	有向グラフと無向グラフ	16
3.7	産業連関図 [12]	17
3.8	ヒートマップ [14]	17
3.9	米ドル建て輸出入比率の推移 [16]	19
3.10	為替の影響の概念図 [16]	19
3.11	1 割円安による各産業への影響 [16]	21
3.12	1 割円安の恩恵と負担 [16]	21
4.1	産業部門と輸出・輸入物価指数の対応表	23
5.1	1 割の円安が各産業に及ぼす影響 (2015 年)	29
5.2	1 割の円安が各産業に及ぼす影響 (2020 年)	29
5.3	出力された 3D グラフ	30
5.4	出力されたヒートマップ	31
5.5	サプライチェーン	31
5.6	輸出価格変動の影響	32
5.7	輸入価格変動の影響 (一次波及要因)	32
5.8	輸入価格変動の影響 (投入構造要因)	32

表一覧

4.1 産業関連データと業種別株価データの統合表	23
------------------------------------	----

記号一覧

以下に本論文において用いられる用語と記号の対応表を示す.

用語	記号
時刻	t
インジケータの計算に使用する期間	m
時刻 t の終値	p_t
標準偏差	σ
為替レート	p
過去 m 本の時間足の最高値	p_{max}^m
過去 m 本の時間足の最安値	p_{min}^m
過去 m 本の時間足の終値	p_{fin}^m
過去 m 本の時間足の平均レート	$\bar{p}$
期間中の市場の上昇幅の合計	up_sum
期間中の市場の下落幅の合計	$down_sum$
過去 m 本の時間足の方向性	DM
実質変動幅	TR
時刻 t の高値	h_t
時刻 t の安値	l_t
VAR モデルにもちいる変数の数	n
VAR モデルにおけるラグ変数	ρ
定数ベクトル	$\mathbf{c}$
係数行列	Φ_i
攪乱項	u
t における情報集合	Ω_t
統計量	F
残差平方和	SSR

はじめに

§ 1.1 本研究の背景

近年、金融工学は計算機性能の向上やデータサイエンス手法の進化に伴い、飛躍的な発展を遂げている。その中でも特に著しいトレンドは、1990年代半ばの外国為替証拠金取引自由化以降本格化した外国為替市場の拡大と高度情報化である。コンピューターと情報通信技術に支えられた市場への新規参入障壁の大幅引き下げに伴い、個人投資家を含む参加者がこの巨大市場に急増した。その結果、2022年時点で主要通貨間の平均日次売買高は驚異的な7.5兆ドルに達している [1]。これは現在、外国為替市場の流動性が比類なき水準に高まったことを示していると言えるだろう。

この超流動的市場を支える背景には、銀行をはじめとした公的機関が市場関連データ、四半期ごとの企業業績データ、消費者信頼感指数や失業率等の各種マクロ経済指標、政治的イベントに関するニュース記事やSNSデータなど、関連する膨大かつ多様なデータソースを公開したことがある [2]。それにより、機関や企業を問わずに個人でリアルタイムに経済にかかわるデータを入手・分析できる環境が実現した。また、公開されているデータだけではなく、新聞記事やSNSなどにテキストマイニングを用いることで人々の感情を解析することで感情に関するデータを生成し、為替変動の予測に役立てる研究などもある。

こうした大量の構造化・非構造化データを深層学習をはじめとした機械学習の最新アルゴリズムで処理することで、過去を大きく上回る精度の市場予測が可能になりつつある上、そこから自動売買戦略を抽出する試みも活発化している。例として、2022年にはグレンジャー因果性分析を用いて市場間分析を行い、MetaTrader5を用いて自動売買を行うシステムの研究がされている [3]。

しかしながら、市場変動や関連指標変化の原因解明と体系的理解は必ずしも十分とはいえない状況にある。要因分析についての研究は長年行われているものの、金融政策による影響など個別事例に止まり、要素間相互作用や全体動態のモデル化には至っていない。経済システムを構成する多様な要素(変数)の相互作用や動的挙動をモデル化することは、複雑系としての経済の本質的理解や予測、リスク管理支援において有用であると考えられる。そのため、超流動的外国為替市場と膨大な関連データを最大限に活用しつつ、市場変動や他指標変化の本質的メカニズムを解明すること、またそれを可視化することで直感的理解を支援することは金融工学分野および現代社会において非常に重要であると言えるだろう。

§ 1.2 本研究の目的

§ 1.3 本論文の概要

本論文は次のように構成される.

- 第1章** 本研究の背景と目的について説明する. 背景では金融市場と通信情報の発達による規模の変化やトレードの仕方の変化を述べた後に, 市場の予測を行うために市場内的要因を用いるする方法と他市場が為替市場に与える影響について述べた. 目的は市場の動向を予測するためにそれらの情報を考慮した手法を提案し, どのように有効性を示すかを述べた.
- 第2章** 為替取引に使用される取引プラットフォームや用語の説明についてまとめる. また, 市場の予測に使われる分析手法の例とその最適化に使われるシステムについて述べる.
- 第3章** 市場における時間帯による特徴の変化と為替市場にどのような市場が影響を与えるのかを述べる. また, どのようにそれらを考慮するのかについて述べる.
- 第4章** 提案手法中の Tick データからヒストリカルデータを作成する部分と, その後, 本研究の提案手法の流れについて述べる
- 第5章** 提案手法に基づいて自動売買システムを構築して, 運用テストを行う. そして, 本研究の提案手法によって得られた結果が有意であることを示す.
- 第6章** 本研究で述べている提案手法をまとめて説明する. また, 今後の課題について述べる.

産業連関分析による波及効果

§ 2.1 産業連関分析と具体例

産業連関表は、作成対象年次における国内あるいはある地域内の経済構造を総体的に明らかにするとともに、経済波及効果分析や各種経済指標の基準改定を行うための基礎資料を提供することを目的に作成されていて、一定期間（通常1年間）において、財・サービスが各産業部門間でどのように生産され、販売されたかについて、行列の形で一覧表にとりまとめたものである [1].

ある1つの産業部門は、他の産業部門から原材料や燃料などを購入し、これを加工して別の財・サービスを生産し、さらにそれを別の産業部門に対して販売する。購入した産業部門は、それらを原材料などとして、また別の財・サービスを生産する。このような財・サービスの「購入→生産→販売」という連鎖的なつながりを表したのが産業連関表である。産業連関表の仕組みを利用して、ある産業に新たな需要が発生した場合にどのような形で生産が波及していくのかを計算することができる。

日本では、10府省庁の共同作業による産業連関表を5年ごとに作成されているほか、地域産業連関表、都道府県・市産業連関表、延長産業連関表、国際産業連関表、各種分析用産業連関表など、それぞれの目的に応じた多くの産業連関表が作成され、幅広く利用されている。

産業連関表の構成、特徴について以下に示す。 [2]

産業連関表の全体的な構成

図2.1は産業連関表の全体的な構成を示したものである。表の列見出しには、財・サービスの買い手側の部門が掲げられ、大きく中間需要部門と最終需要部門から成っている。このうち、中間需要部門は、財・サービスの生産部門であり、各部門は生産のために必要な原材料、燃料等のいわゆる中間財の購入（買い手）部門であり、これらを加工（労働、資本等を投入）し生産活動を行っている。また、最終需要部門は、具体的には消費、投資、輸出などで構成され、主として完成品としての消費財、資本財等の買い手である。

一方、表の行見出しには、財・サービスの売り手側の部門が掲げられ、中間投入部門と粗付加価値部門から成っている。このうち、中間投入部門は、中間財としての財・サービスの供給（売り手）部門であり、各部門は、当該部門の財・サービスを各需要に供給している。また、粗付加価値部門は、財・サービスの生産のために必要な労働、資本などの要素費用などで構成される。

産業連関表では、最終需要部門および粗付加価値部門を「外生部門」というのに対し、中間需要部門および中間投入部門を「内生部門」という。

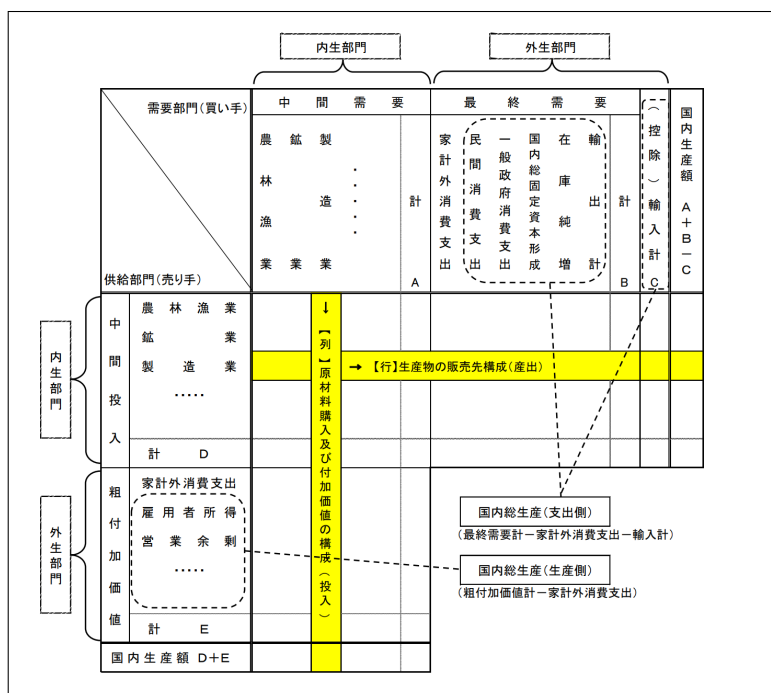


図 2.1: 産業連関表の構造 [2]

投入および産出の構成

産業連関表では、縦方向の計数の並びを「列」という。列には、その部門の財・サービスの生産に当たって用いられた原材料、燃料、労働力などへの支払の内訳（費用構成）が示されていて、この計数を「投入」（input）という。

一方、横方向の計数の並びを「行」という。行には、その部門の財・サービスがどの需要部門でどれだけ用いられたのか、その販売先の内訳（販路構成）が示されていて、この計数を「産出」（output）という。

産業連関表は、各産業部門における財・サービスの投入・産出の構成を示していることから、投入産出表（Input-Output Tables）とも呼ばれている。

産業連関表の特徴

産業連関表は、国民経済計算体系の中で財・サービスの流れ、すなわち実物的なモノのフロー面の実態を明らかにするものとして位置付けられている。1年間に生産された財・サービスの全てが対象とする中間生産物についても、各産業部門別にその生産および取引実態が詳細に記録されていることが大きな特徴となっている。

また、産業連関表では、列方向からみた投入額の計（国内生産額、図 2.1 の D+E）と行方向から見た産出額の計（国内生産額、図 2.1 の A+B-C）とは、定義を同じくする全ての部門について完全に一致していて、この点も大きな特徴となっている。

産業連関表を利用した分析例

産業連関表を利用した分析例には、以下のようなものがある。[5]

1. 経済構造の現状分析（表作成年次の産業構造や経済規模などの分析）

産業連関表には、財・サービスの県内生産額、需要先別販売額（中間需要、消費、投資、移輸出等）および費用構成（中間投入、労働費用、減価償却額等）が、産業部門ごとに詳細に記載されている。これらを係数化することにより、産業間の連結関係、最終需要と生産、移輸出入、付加価値との関係などを把握し、経済構造の特徴を読み取ることが可能となる。

- 経済構造分析

- － 取引基本表による分析
- － 特殊な産業連関表（接続産業連関表、地域間産業連関表）による分析

2. 経済の機能分析

産業連関表から算出される投入係数や逆行列係数などの各種係数により、投資や移輸出などの最終需要の増減が、各財・サービスの生産や移輸入にどのような影響を及ぼすかを計数的に明らかにすることができる。

- 投入係数・逆行列係数による分析

- － 財、サービスの投入割合の変化
- － 影響力係数と感応度係数
- － 生産（粗付加価値、移輸入）誘発額、同誘発係数、同誘発依存度

3. 経済のシミュレーション分析

最終需要と財・サービスの生産水準等の関係を利用し、公共投資やイベント開催などの特定の施策が各産業部門にどのような経済波及効果をもたらすかを分析することができる。そのため、経済についての各種計画や見通しなどを作成する際、客観的資料として利用することができる。

- 各種施策の経済効果

- － 均衡産出高モデル
公共事業、工場立地、イベント開催、観光による経済波及効果など
- － 均衡価格モデル
円高・円安、原油価格の変動による国内価格への影響など
- － 将来予測等の分析・マクロモデル等の利用
将来の経済予測
- － 特定テーマを分析する産業連関表による分析
建設部門分析用産業連関表を使った分析、環境分析用産業連関表を使った炭酸ガス発生量の予測

§ 2.2 産業連関表からの波及効果の導出

2.1 章で紹介したように産業連関表を利用した分析例はいろいろなものがあるが、3. 経済のシミュレーション分析（最終需要と財・サービスの生産水準等の関係を利用し、公共投資

やイベント開催などの特定の施策が各産業部門にどのような経済波及効果をもたらすかの分析)に焦点を当てる。

経済波及効果

ある産業に需要(消費や投資など)が発生したとき、その産業の生産を誘発するとともに、その産業と取引のある他産業にも原材料需要が発生し、さらに他産業に、といったように地域産業全体に次々に波及していくことになる [3]。

- 直接効果

消費額や投資額のうち、県外から調達された財やサービスを除いた県内生産分のこと

- 第1次間接効果

直接効果によって生産が増加した産業で必要となる原材料等を満たすために、新たに発生する生産誘発効果

- 第2次間接効果

直接効果と第1次間接効果で増加した雇用者所得のうち消費にまわされた分により、各産業の商品等が消費されて新たに発生する生産誘発効果

産業連関表を用いて波及効果を導出する際に、必要な2つの係数について以下に示す [4]。

投入係数

「投入係数」とは、各列部門において、1単位の生産を行う際に必要とされる原材料等の単位を示したものであり、取引基本表の中間需要の列部門ごとに、原材料等の投入額を当該列部門の国内生産額で除すことによって得られる係数である。この投入係数を列部門別一覧表にしたものが「投入係数表」である。

国内経済を単純化し、部門1および部門2だけからなるものと仮定した場合、取引基本表は、図2.3のように表すことができる。ただし、次のバランス式が成り立つものとする。

需給バランス式(総需要と総供給の均衡)

$$\begin{cases} x_{11} + x_{12} + F_1 = X_1 \\ x_{21} + x_{22} + F_2 = X_2 \end{cases} \quad (2.1)$$

収支バランス式

$$\begin{cases} x_{11} + x_{21} + V_1 = X_1 \\ x_{12} + x_{22} + V_2 = X_2 \end{cases} \quad (2.2)$$

ここで、[列]部門1が[行]部門1から投入した額 x_{11} を[列]部門1の国内生産額 X_1 で除した値を a_{11} とすれば、 a_{11} は[列]部門1の生産物を1単位生産するために必要な[行]部門1からの投入額を表している。

$$a_{11} = x_{11}/X_1 \quad (2.3)$$

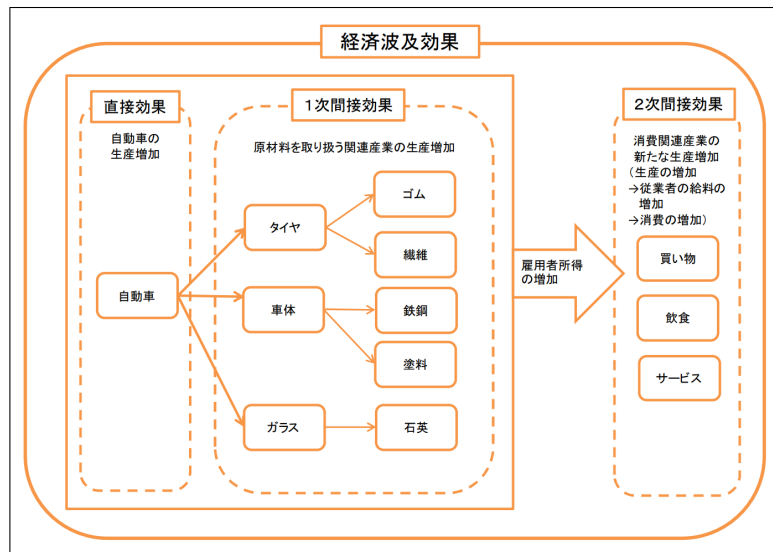


図 2.2: 経済波及効果のイメージ図 [3]

中間投入と同様に、〔列〕部門1の粗付加価値 V_1 をその国内生産額で除して、 $v_1 = \frac{V_1}{X_1}$ と定義できる。以上の計算を〔列〕部門2についても同様に行うことで、図2.4のような投入係数表を求めることができる。

2.3式と同様に a_{21} , a_{12} , a_{22} を計算して2.1式に代入して変形すると、次のような式になる。

$$\begin{cases} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + F_1 = X_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + F_2 = X_2 \end{cases} \quad (2.4)$$

2.4式を行列表記すると、次のようになる。

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

このとき

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = [A] \quad (2.6)$$

を投入係数行列という。

ある部門に対する需要の増加は、その部門が生産を行うに当たって原材料、燃料等を各部門から投入する必要があるため、その部門だけではなく他部門の生産にも影響を及ぼし、それがまた自部門に対する需要となって返ってくるという生産波及効果をもたらす。2.4式は、このような生産波及効果の累積結果を計算し得る仕組みを示したものであり、投入係数を基礎とする産業連関分析の基本となる考え方である。しかし、この考え方には、「投入係数の安定性」という前提が置かれていることが重要である。

	〔列〕 部門 1	〔列〕 部門 2	最終需要	国内 生産額
〔行〕 部門 1	x_{11}	x_{12}	F_1	X_1
〔行〕 部門 2	x_{21}	x_{22}	F_2	X_2
粗付加価値	V_1	V_2		
国内生産額	X_1	X_2		

図 2.3: 取引基本表 (概念図) [4]

	〔列〕 部門 1	〔列〕 部門 2
〔行〕 部門 1	a_{11}	a_{12}
〔行〕 部門 2	a_{21}	a_{22}
粗付加価値	v_1	v_2
国内生産額	1.0	1.0

図 2.4: 投入係数表 (概念図) [4]

投入係数の安定性

1. 生産技術水準の不変性

産業連関分析においては、投入係数によって表される各財・サービスの生産に必要な原材料、燃料等の投入比率は、分析の対象年次と作表の対象年次の間において大きな変化がないという前提が置かれている。

2. 生産規模に関する一定性

産業連関分析においては、各部門に格付けされた企業、事業所の生産規模は、分析の対象年次と作表の対象年次の間において大きな変化がないという前提が置かれている。

逆行列係数

先ほどのような国内経済を単純化した 2 部門の場合であれば計算も容易であるが、実際の部門数は、統合中分類の場合でも 107 あり、その都度 2.4 式のような連立方程式を解くことは現実的ではない。そこで、もし、ある部門に対する最終需要が 1 単位生じた場合、各部門に対してどのような生産波及が生じ、部門別の国内生産額が最終的にはどれだけになるかを、あらかじめ計算しておくことができれば、分析を行う上で非常に便利である。このとき作成されるのが「逆行列係数表」である。

2.5 式の行列表示において

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} = [A] \quad \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \end{bmatrix} = [X] \quad \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{bmatrix} = [F]$$

とすると、

$$AX + F = X \quad (2.7)$$

となる。これを X について解くと、

$$X - AX = F$$

$$(I - A)X = F$$

$$\therefore X = [I - A]^{-1}F \quad (2.8)$$

となる。

ここで I は単位行列, $(I - A)^{-1}$ は $(I - A)$ の逆行列であり,

$$(I - A)^{-1} = \begin{bmatrix} 1 - a_{11} & -a_{12} \\ -a_{21} & 1 - a_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (2.9)$$

この行列の成分を「逆行列係数」と呼ぶ。これを一つの表にまとめたものが、「逆行列係数表」であり、各部門に対する 1 単位の需要増があった場合、究極的に、どの部門の生産がどれだけ誘発されるかを示すものである。逆行列係数を一度計算しておけば、2.4 式の連立方程式をその都度解く必要はなく、ある部門に対する最終需要を与えれば、直ちにその最終需要に対応する各部門の国内生産額を計算することが可能となる。

§ 2.3 三角化によるサプライチェーンの抽出

産業連関表の三角化

公表されている産業連関表は、第 1 次産業から第 3 次産業の順で産業が任意に配列されていて、これらの間の取引データが記載されている。産業の並べ方には特に決まりはなく、任意に配列された産業連関表の取引構造は複雑で、産業連関表を見ただけでは産業構造の特徴を把握することは非常に困難である。そのため、産業構造の特徴をより簡単に把握するため、三角化という手法を用いて産業連関表の再構成を行う。

産業連関表の三角化とは、産業連関表の配列を最終財産業、中間財産業、基礎素材産業の順で並べ替え、産業連関表の対角線下に取引を集めるようにする手法である [6]。産業連関表に三角化を適用すると、複雑に絡み合った産業取引構造から主要なサプライチェーン構造を抽出することができる [7]。サプライチェーンは、原料から製造過程を通じて最終消費者に向かうまでの一連のプロセスのことをいい、三角化を用いてこのようなサプライチェーン構造を抽出することにより、産業の性質や経済構造の変化の分析に役立てている。

産業連関表の三角化による産業構造分析はこれまで多くの研究が行われてきた。呂らの研究では、アジア国際産業連関表によるアジア地域の経済分析の 1 つの手法として、産業連関表の三角化によるハイレザーキー性分析を行っている [8]。この研究では、1995 年表と 2000 年表との違いに注目し、3 つの国を抽出してこれらを 1 つの地域とみなした場合の産業のハイレザーキー性 (原初的な部門から最終的な部門にいたるまでの産業部門間の階層性) の分析を実施している。

三角化の手法

これまでに開発された三角化の手法について以下に示す [9]。

Simpson と Tsukui (1965) や Fukui (1986) などの研究では、産業連関表の三角化を、部門を並べ替えて下三角部分の要素の合計を最大化する最適化問題として定義している。これは、NP 困難問題として知られる組み合わせ最適化問題であり、解決が困難である。 n の値が非常に小さい場合、部門の $n!$ 個の並べ替えをすべて列挙し、その中から最適なソリューション

ンを選択すると、問題を簡単に解決することができる。たとえば、 $n = 5$ の場合、 $n! = 120$ 個の並べ替えを列挙し、最適なソリューションを選択することで、問題を解くことが可能である。しかし、このようなブルートフォースアルゴリズムは、 n の値が非常に小さい場合にのみ機能し、 $n = 50$ などの中程度の部門数の場合、部門の $n!$ 個の並べ替えをすべて列挙し、その中から最適なソリューションを選択することは困難である。

産業連関表の三角化に特化したアルゴリズムがいくつか開発され、文献で提案されている。Simpson と Tsukui (1965), Korte と Oberhofer (1970), Fukui (1986) は、リングシフト順列と呼ばれる産業部門の置換を繰り返すヒューリスティックアルゴリズムを提案した。ただし、これらのアルゴリズムを実行しても必ずしも最適解が得られるとは限らない。中規模サイズの問題の最適解を見つけることができるアルゴリズムも開発されている。Haltia (1992) と Östblom (1997) は、リングシフト順列のないアルゴリズムを提案した。産業連関表の三角化は線形順序付け問題と同等であり、オペレーションズ リサーチの文献では、最適解を生成するためのより効率的なアルゴリズムが提案されている。

産業連関表の三角化は、Grötschel ら (1984a, 1984b) および Chiarini ら (2004) で説明されているように整数計画問題として表現できるため、現在利用可能なソフトウェアに実装されている整数計画問題用の汎用アルゴリズムによって、少なくとも近似的に解決できる。汎用アルゴリズムのほとんどは、特殊アルゴリズムよりも効率が悪いが、汎用アルゴリズムは特殊アルゴリズムとは異なり、制約条件の追加や目的関数の変更など、元の問題が拡張または修正された場合でも適用することが可能である。

整数計画問題による定式化

近藤はいくつかの文献に従って、産業連関表の三角化の定式化を行った [9]。ここでは、その内容についてまとめ、最後に定式化された整数計画問題を解くことによって産業連関表の三角化を行い、得られた結果を載せる。

n 個の産業部門があり、部門間の相互依存関係を表す $n \times n$ の投入係数行列 $A = (A_{ij})$ を三角化することが目標である。

n 個の産業部門を指す自然数の集合を $N = \{1, \dots, n\}$ と定義する。次に、 n 個の産業部門の順列を $\pi = (\pi(1), \dots, \pi(n))$ で表し、産業部門のすべての順列の集合を Π で表す。

任意の順列 $\pi \in \Pi$ が与えられた場合、 $A(\pi) = (A_{ij}(\pi))$ は、産業部門が π に従って順列化された投入係数行列を表す。これは次のように記述される。

$$A_{ij}(\pi) = A_{\pi(i)\pi(j)} \quad (i, j \in N) \quad (2.10)$$

産業連関表の三角化は、組み合わせ最適化問題として定式化される。

$$\begin{aligned} & \text{maximize } l(A(\pi)) \\ & \text{subject to } \pi \in \Pi \end{aligned} \quad (2.11)$$

ここで、 $l(M) = \sum_{i>j} M_{ij}$ は、任意の $n \times n$ 行列 $M = (M_{ij})$ に対して、下三角部分の要素の合計を示す。

次のような $n \times n$ のバイナリ変数行列 $X = (X_{ij})$ を導入する。

$$X_{ij} = 1 \quad \{\pi^{-1}(i) \geq \pi^{-1}(j)\} \quad (i, j \in N) \quad (2.12)$$

ここで, $1\{\cdot\}$ は, 命題 P が真である場合に $1\{P\} = 1$, そうでない場合は $1\{P\} = 0$ となるような指示関数である. 順列 π が与えられた場合, $\pi(p)$ は p 番目の位置にある部門を表し, $\pi^{-1}(s)$ は部門 s が配置されている位置を表す. ここで, 「部門 s 」は元の順序で s 番目の部門を指す.

$X_{ii} = 1$ は $i \in N$ のいずれに対しても成り立ち, 部門 j が順列 π で部門 i に先行する場合は $X_{ij} = 1$, それ以外の場合は $X_{ij} = 0$ となる. 言い換えれば, $X_{ij} = 1$ の場合, A_{ij} は $A(\pi)$ の下三角部分または主対角線上に位置する. したがって, 次の等式が成り立つ.

$$l(A(\pi)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} X_{ij} - \sum_{i=1}^n A_{ii} \quad (2.13)$$

2.10 式で述べた産業連関表の三角化は, 次の整数計画問題として表現できる.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} X_{ij} - \sum_{i=1}^n A_{ii} \\ & \text{subject to} \\ & \quad X_{ii} = 1 \quad (i \in N), \\ & \quad X_{ij} + X_{ji} = 1 \quad (i < j; i, j \in N), \\ & \quad 0 \leq X_{ij} + X_{jk} - X_{ik} \leq 1 \quad (i < j < k; i, j, k \in N), \\ & \quad X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j \in N). \end{aligned} \quad (2.14)$$

または, 次の整数計画問題として表すこともできる.

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n ((A_{ij} - A_{ji})X_{ij} + A_{ji}) \\ & \text{subject to} \\ & \quad 0 \leq X_{ij} + X_{jk} - X_{ik} \leq 1 \quad (i < j < k; i, j, k \in N), \\ & \quad X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i < j; i, j \in N). \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.15 式は 0-1 整数計画問題であり, $\frac{n(n-1)}{2}$ バイナリ変数と $\frac{n(n-1)(n-2)}{3}$ 不等式制約を持つ. 2.15 式に対して最適解が得られた場合, 対応する最適な順列 π は次の式で導出できる.

$$\pi^{-1}(i) = \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (i \in N) \quad (2.16)$$

ここで, $X_{ii} = 1$ ($i \in N$) および $X_{ji} = 1 - X_{ij}$ ($i < j; i, j \in N$) である.

1	1	0	0	1	0	0	0	1	1
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0
1	1	1	0	1	0	0	0	1	1
1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
1	1	1	1	1	1	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
0	1	0	0	1	0	0	0	0	1

図 2.5: バイナリ変数行列 X の一部

Sector	Rank
32 なめし革・毛皮・同製品	1
97 飲食店	2
5 漁業	3
46 特殊産業機械	4
52 民生用電気機器	5
54 電子計算機・同付属装置	6
62 精密機械	7
67 その他の土木建設	8
98 宿泊業	9
57 乗用車	10

図 2.6: 三角化後の産業部門の順列の一部

図 2.5 は, 平成 7-12-17 年接続産業連関表の平成 17 年 102 部門の投入係数行列に対して, 2.15 式による三角化を行い得られたバイナリ変数行列 X の一部である. 図 2.6 は, 得られたバイナリ変数行列に対して, 2.16 式を用いて導出した最適な順列の一部である.

個人サービス部門（宿泊業, 飲食店など）と最終製品製造部門（機械, 電気機器など）が産業部門の順列の上位に位置している. これらの産業部門の製品やサービスは, 主に最終需要部門によって購入されているので, サプライチェーンの下流に位置している. 最終需要部門とは, 最終消費者またはエンドユーザーによる需要を指す部門のことを指し, 生産された製品やサービスを最終的に消費, 利用, または投資として購入する役割を担う.

金融経済変数の影響の見える化

§ 3.1 為替変動と日経平均株価の関係

株価と為替は密接に関係していて 相互作用がたびたび観察され、為替の動きが株価に影響を与える場合もあれば、逆に株価の動きが為替に影響を与えることもある。

為替とは、異なる通貨同士を交換する取引のことを指し、為替レートとは、異なる国の通貨同士の交換比率を表すものである。また、円安とは、日本円の価値が他の通貨に対して下がることを指し、1ドルを買うために必要な円の量が増えることをいう。具体的には1ドル=100円から1ドル=120円になったとき円安になったという。一方、円高とは、日本円の価値が他の通貨に対して上がることを指し、1ドルを買うために必要な円の量が減ることをいう。具体的には1ドル=120円から1ドル=100円になったとき円高になったという。円安・円高のメリットとデメリットや、為替が変動したときその動きに合わせて日経平均株価も変動する理由について以下に示す [10]。

円安・円高のメリットとデメリット

為替相場は常に変動していて、円安になったり、円高になったりするが、円安・円高それぞれにメリットとデメリットが存在する。

円安は、自社の製品を輸出することで利益を得ている輸出企業にとってはメリットとなる。輸出企業にとって円安がメリットである理由は、円安になると日本円での売上が増加するからである。売上が増加することは企業の業績にプラスとなるため、株価も上昇しやすくなる。反対に円高になると、輸出企業にとってデメリットとなる。今までと同じ数分の製品を販売しても日本円での売上は減少し、企業の業績もマイナスとなり、株価も下がりやすくなる。

一方、円高は、海外から製品を輸入して販売している輸入企業にとってメリットとなる。輸入企業にとって円高がメリットである理由は、日本に輸入するためのコストが減少するからである。輸入コストの削減も企業の業績にとってはプラスに働くため、株価も上昇しやすくなる。反対に円安になると輸入企業にとってデメリットとなる。今までと同じ数分の製品を輸入してもコストが増加することになるため、企業の業績はマイナスとなり、株価も下がりやすくなる。

為替変動時に日経平均株価が変動する理由

先ほど述べたように円安・円高は企業のスタイルによって、メリットにもデメリットにもなるが、一般的には自国の通貨の価値が高くなるほど、つまり円高になるほど、株価は上昇

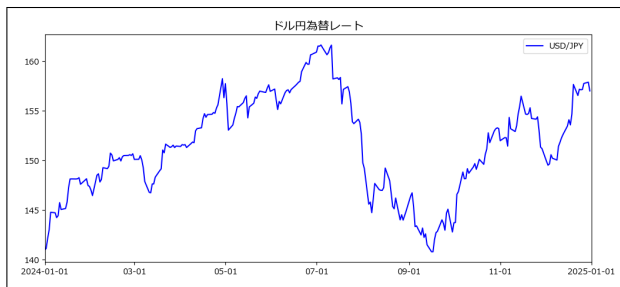


図 3.1: 直近 1 年のドル円為替レートの推移

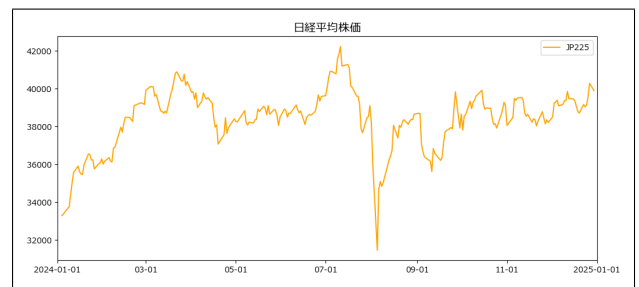


図 3.2: 直近 1 年の日経平均株価の推移

するものと考えられている。しかし日本では、円高になると市場全体が値下がりし、日経平均株価も下落する傾向にある。

一つ目の理由として、日経平均株価の構成銘柄に輸出企業が多く含まれていることが挙げられる。日本の代表的な株価指数が日経平均株価であり、日経平均株価とは、日本経済新聞社が東京証券取引所に上場している銘柄から 225 銘柄を選んでその株価をもとに算出したものである。そのため、日経平均株価は、日本経済の活力を示す指標として捉えることができる。225 の構成銘柄については、毎年 1 回、入れ替えが行われているが、輸出に関わる企業の割合が多くなっているのが特徴で、日本経済を支えているのは、製造業による輸出産業がメインだからである。そのため、構成銘柄に占める輸出企業の割合が大きい日経平均株価は、必然的に円高によるマイナスの影響を受けやすくなる。

二つ目の理由として、外国人投資家が日本株を売ることが挙げられる。現在、日本の株式市場に参加している投資家の半分以上が、海外の年金基金やヘッジファンドなどの外国人投資家である。外国人投資家のほとんどが、自分の証券口座にドルを入れて取引をすることを指す、ドル建てによる取引を行っているので、日本の株価をドルに換算してチェックしている。具体的には、ある銘柄の株価が 10,000 円であるとき、1 ドル = 100 円であれば、その株価をドルに換算すると 100 ドルである。しかし、為替が変動して 1 ドル = 90 円になると、株価 10,000 円のままであったとしても、ドル建てでは 111.11 ドルに値上がりする。すなわち、ドル建てで見た場合、日本の株式市場が変動していなくても円高になるだけで株価は上がる。このことを為替差益といい、円高になると、外国人投資家は利益を確定させるために日本株の売却を行う。株式が売却されると株価は下がり、連動して日経平均株価も下がる。

日経平均株価変動時に為替が変動する理由

次に、為替相場ではなく、日経平均株価が先に動いた場合について述べる。[11] 日経平均株価が先に動き、その後には為替レートが動くのにはいくつか理由がある。

一つ目の理由として、外国人投資家による為替リスク回避の行動が挙げられる。外国人投資家が円建ての日本株式に投資を行う際、為替変動リスクを避けるために、将来円を売って外貨を買い戻す、為替予約を締結する。この為替予約は、通常、投資資産の評価額に対して一定の割合を維持する方針が取られる。そのため、日経平均株価が上昇すると、日本株式の評価額が上がり、外国人投資家が保有する円資産の価値も増加する。そして、評価額に基づくヘッジポジションを調整する必要があるため、追加で円を売って外貨を買い戻す為替予約が行われた結果、円安になる。

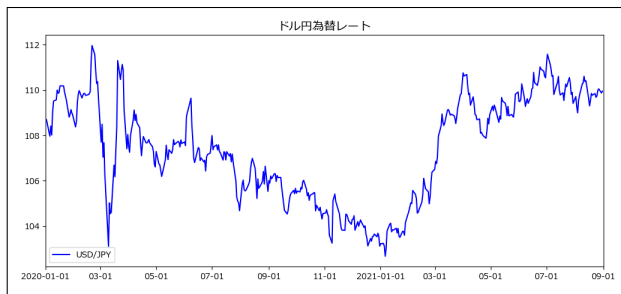


図 3.3: コロナショック時のドル円為替レートの推移

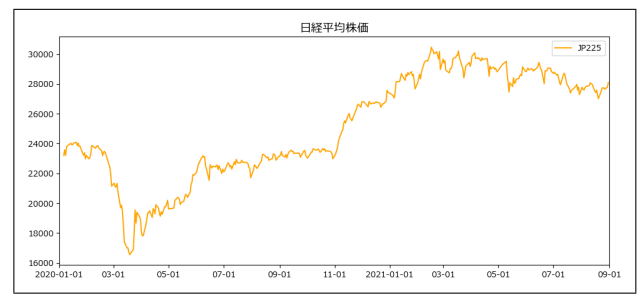


図 3.4: コロナショック時の日経平均株価の推移

二つ目の理由として、リスクオンの際に円安になり、リスクオフの際に円高になるという傾向が確立していることが挙げられる。リスクオンとは、投資家がリスクを取って積極的に投資をする状況を指し、リスクオンの相場では株価が上昇する。一方、リスクオフとは、投資家がリスクを避けて安全資産に資金を移す状況を指し、リスクオフの相場では株価が下落する。現在の市場では、リスクオンの際に株価が上昇し、円安になる傾向があり、逆に、リスクオフの際に株価が下落し、円高になる傾向があるため、大衆心理から、株価が上昇すると円が売られ円安になり、株が下落すると円が買われ円高になる。

コロナショック時の相関関係

図 3.1 は、2024 年 1 月 1 日から 2025 年 1 月 1 日までのドル円為替相場のチャートであり、図 3.2 は、同時期の日経平均株価のチャートである。この二つの図を見ると、今まで述べたように日経平均株価とドル円為替相場との間に、正の相関関係があることが確認できる。

図 3.3 は、2020 年 1 月 1 日から 2021 年 9 月 1 日までのドル円為替相場のチャートであり、図 3.4 は、同時期の日経平均株価のチャートである。この二つの図を見ると、2020 年 3 月のコロナショック以降は、日経平均株価は上昇する一方で、ドル円為替相場は下落し、一時的に負の相関関係があることが確認できる。

この背景としては、まず米国の大規模な金融緩和によって市場に大量の資金が供給された。金融緩和とは、中央銀行が金利を引き下げたり、国債や資産を購入することで市場に大量の資金を供給し、経済を刺激しようとする政策のことである。供給された資金が株式に流れ込み、株高を誘発し、日経平均株価は上昇する一方で、金融緩和で供給過多となったドルが価値を下げ、ドル安が進行し、ドル円為替相場は下落したと考えられる [11]。この負の相関関係は 2020 年 3 月から 12 月まで続き、2021 年以降は再び正の相関関係になっている。

§ 3.2 金融経済要因の見える化

経済は複雑で相互に関連する多くの要素から成り立っているため、その全容を正しく理解することは難しい。経済活動は、企業間の取引ネットワークや株式持合いのネットワーク、さらには国際貿易などを通じた国と国との結びつきから成り立っている。これらのネットワークは常に動いており、一企業や一国の変化が他の主体にどのように波及していくのかを知ることは重要である。

また、金融システム内における資金の動きも複雑なネットワークを形成しており、システム全体としてのリスク把握は難しいのが現状である。そこで、このような経済活動をネットワークの視点からグラフ理論的に表現する手法として、グラフネットワークが注目され始めた。そこで、最近では新たなデータサイエンスの手法としてグラフネットワークが経済分析に活用されつつある。ここではグラフネットワークに焦点を当て、その経済分析における重要性、具体的な応用例について述べる。

グラフ・ネットワーク

グラフネットワークは、複雑なデータ構造を可視化複数個のノードと、それらをつなぐエッジで表現し、これらの要素がどのように作用しているかをネットワークとして視覚化する手法である。グラフ・ネットワークは様々な分野で使用されており、分野によって異なる種類が使われることになる。

そのうちの1つは無向ネットワークであり、これは人間関係や道路などを表すときに用いられる。無向ネットワークの特徴として、エッジに方向がないというものがある。そのため、無向グラフは相互に関係する要素が互いに同程度の影響を持つ場合に使われることが多い。また、もう1つ重要なネットワークとして有向グラフというものがある。有向グラフは無向グラフと異なり、エッジに方向を持っている。そのため因果関係や確率関係などを描画するときに非常に有用であり、様々な分野で注目を集めている。また、重み付きグラフというものもある。重み付きグラフはエッジに影響の大きさを表す値をラベルとしてエッジに付与する。有向グラフに重みをつけたグラフの例として因果グラフがある。因果グラフの簡単な例を図3.4に示す。また、ネットワークには循環することが可能であるネットワークの循環ネットワークと循環することができないネットワークの非循環ネットワークが存在し、循環ネットワークでは特定のノードから出発して他のノードを経由し、最初のノードに戻れるような閉回路になっている。逆に非循環ネットワークでは特定のノードから出発して他のノードに到達する経路が一方方向のみで循環しない形式になっている。

グラフネットワークは経済の分野でも注目を集めており、例えば経済の例でいうと、企業、産業、市場、国家などがノードとして配置され、それらの関係性がエッジで結ぶことができる。これにより、経済の構造や相互関係を直感的に理解することが可能になる。

グラフネットワークの経済分析への応用例として、産業連関図の構築がある。グラフネットワークを用いて産業連関図を構築することで、異なる産業や企業の相互の依存関係を可視化することができる。例えば、自動車産業が鋼鉄産業に依存している場合、これをエッジで結ぶことで製造業界全体のリスクや変動を理解する手助けとなる。これにより、サプライチェーン全体の複雑な構造を理解し、リスクヘッジの方針を検討することができる [22]。産業連関表のイメージを図3.4に示す。経済波及効果の計算は図で示した産業間取引ネットワークの重みを1単位あたりの生産遺必要な投入量に置き換えたネットワークの無限長パスを計算することに対応する。

他の例として、国際経済のネットワーク分析がある。グラフネットワークを用いて国家や地域の経済的な相互関係を分析することで、国際経済のネットワークがどのように形成されているかを理解できる。国際貿易、外国直接投資、金融取引などの要素をノードとして結び、これらのエッジを通じて国家間の経済的な相互依存関係を可視化する。これは、グローバルな金融危機や貿易紛争の影響評価において役立つことがある。

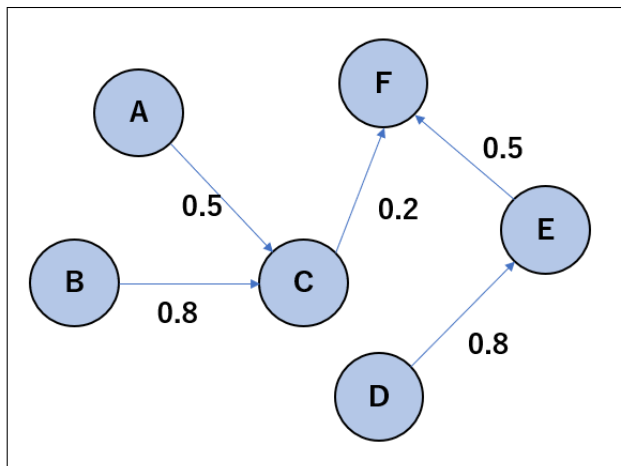


図 3.5: 因果グラフの例

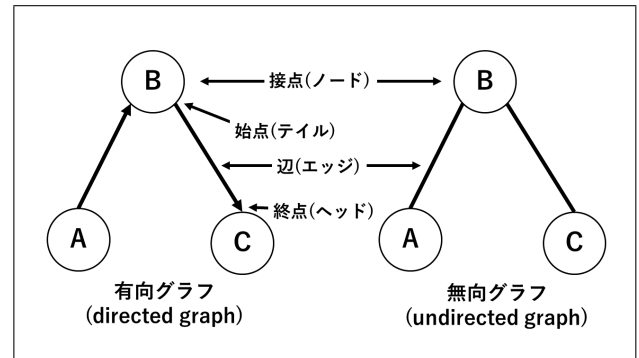


図 3.6: 有向グラフと無向グラフ

また、金融市場の相関関係の解明についてグラフネットワークを用いたものもある。グラフネットワークを用いて金融市場内の企業、投資家、資産クラスの関係性を分析することで、市場の相関関係やリスク伝播のメカニズムを理解することができる。企業の財務データや市場指標がノードとなり、これらのエッジが相関や取引の関係を示すことで、市場の変動がどのようにして異なる要因に影響を与えるかを分析する。これにより、ポートフォリオの構築やリスク管理の向上が期待される。

また、企業間取引ネットワークというものもあり、これではノードを個々の企業、エッジを企業間の取引量や金額など取引関係の強弱を表し、エッジの方向は調達企業から納入企業に向かう線で表す。これは要するに有向グラフネットワークであり、このネットワークから特定企業への取引依存度や重要顧客企業、重要納入企業などを分析することができる。実際の取引データから構築することで、企業の業界内外での立場や影響力を可視化することができ、産業分析の際には非常に重要になってくる。

グラフネットワークによる経済分析は、従来の手法に比べて新しい洞察をもたらすと期待されている。

グラフネットワークによる経済分析は、経済の複雑性に迅速かつ直感的に対応する新しい手法として注目されている。産業連関図の構築や国際経済のネットワーク分析、金融市場の相関関係の解明など、多岐にわたる応用例が存在する。これにより、経済主体や政策立案者が迅速な意思決定を行い、持続可能な発展を促進するための戦略を構築する際に有益な情報を提供することができる。

産業連関表の三角化によって分析した産業構造を 3D グラフを用いて可視化を行う。3D グラフの描画には、3次元での描画に長けている Three.js を用いる。

Three.js

Three.js はウェブブラウザ上で 3 次元コンピュータグラフィックスを描画するための JavaScript ライブラリである。HTML5 の規格に従っており、プラグイン不要で利用することができる。また、WebGL という 3D グラフィックス API をラッピングしており、簡素なコードで 3DCG を描画することができる。

§ 3.3 産業連関表による為替変動時の産業への影響

産業連関表を利用した分析例は、経済構造の現状分析や経済の機能分析、経済のシミュレーション分析など様々なものがある。

日本経済研究センターの小野寺らの研究では、産業連関表を縦方向にみた、費用構成を中心とした収支バランスに基づく均衡価格モデルと呼ばれる分析手法を用いて、対ドル円相場が10%円安に動き、各産業の輸出入価格が米ドル建て契約の割合だけ上昇した場合、各産業に及ぼす影響を産業間の投入産出構造を表す総務相「産業連関表」(2000年、2005年、2015年の3時点)を用いて試算した[16]。

円安の効果

円安の効果は大きく分けて3つある[17]。1つ目は「価格効果」で、外貨建てで取引されている輸出入品について、円安はそれらの製品の円建て価格を押し上げる効果がある。2つ目は「数量効果」で、価格効果によって得られる利益を原資に企業が輸出品の外貨建て価格を引き下げることによって、輸出数量が押し上げられる効果がある。最後は「金融効果」で、海外からの配当等の金融収入額について、円安はその円建て評価額を押し上げる効果がある。このうち2つ目の「数量効果」については、販売価格引き下げの効果が生じるとしても、同業他社との競合の結果として得られるものであり、ある程度の時間を要するとみられる。また、3つ目の「金融効果」についても、海外からの配当等の金融収入の増加分が、貸金や配当、設備投資の増加等の形で国内に波及するには、ある程度の時間が必要と考えられる。一方、1つ目の「価格効果」については、他の2つの効果と比べればラグが小さく、また、輸出価格の押し上げは企業にとってプラスに働く一方で、輸入価格の押し上げはコストを増やす要因としてマイナスに働くことから、その影響は両者の大小関係に左右され、効果が定まっていない。

小野寺らの研究では、価格変動の直接の影響のみを検討し、価格変動による輸出入や国内需要の数量の変化は考慮していない。以下は小野寺らの研究についてまとめたものである[16]。

輸出で多くの利益を稼ぐ日本の産業界からは円高よりも円安を歓迎する声が根強い一方、円安は海外からの原材料などの調達コストを押し上げる要因にもなり、産業によっては恩恵よりも負担が大きい場合もある。

小野寺らの研究の分析の枠組みでは、為替が円安に動いた時の各産業への波及効果の違いを生み出す要因は2つある。1つは各産業の輸出価格と輸入価格がどの程度上昇するか、もう一つは各産業において値上がりした輸入財、およびその輸入財を使って生産された財をどの程度投入しているか、という投入構造であり、そうした財を多く投入する産業では円安のコストが大きくなる。

為替から各産業の輸出入価格への波及

1つ目の波及要因に関しては、対ドル円相場が円安に動いた時に、各産業の輸出入価格が米ドル建て契約の割合だけ上昇すると想定する。たとえば、ある産業の輸出の米ドル建て契約比率が6割であれば、10%の円安・ドル高によって輸出価格は6%上昇する。

輸出	2000年	2005年	2015年	輸入	2000年	2005年	2015年
繊維品	88.2	72.7	79.8	食料品・飼料	76.2	69.7	60.9
化学製品	89.6	74.7	70.5	繊維品	71.0	49.3	40.1
金属・同製品	82.8	83.4	77.4	金属・同製品	83.6	83.2	86.1
一般機器	32.1	32.1	27.7	木材・同製品	100.0	80.1	79.7
電気機器	64.4	53.8	55.6	石油・石炭・天然ガス	100.0	99.7	91.3
輸送用機器	52.1	49.6	48.3	化学製品	63.8	52.4	36.4
輸出計	59.6	53.0	53.3	機械器具	59.3	57.1	59.5
				輸入計	75.6	71.1	71.3

図 3.9: 米ドル建て輸出入比率の推移 [16]

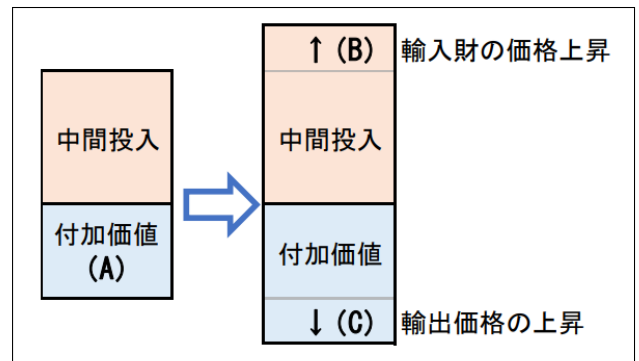


図 3.10: 為替の影響の概念図 [16]

米ドル建て契約の比率は、日本銀行「輸出・輸入物価指数の契約通貨別構成比」の品目別ドル建て比率を使った。主な品目の米ドル建て輸出入比率の推移を図 3.9 に示す。これらの比率を使って各年の 10 %円安による各産業の輸出入価格の上昇率を想定し、それを産業連関表と組み合わせて影響を計算する。

輸入価格変動の影響

輸入価格から国内価格への波及は、輸入品の投入価格の上昇による国産品の価格上昇がさらに他産業へ波及していく完全波及の場合を計算した。非競争輸入型産業連関表で、国産品投入係数行列を A_d 、輸入品投入係数行列を A_{im} とすると、国産品価格ベクトル P_d 、輸入品価格ベクトル P_{im} 、付加価値率ベクトル V との間には、以下の関係が成り立つ。

$$P_d = A'_d \cdot P_d + A'_{im} \cdot P_{im} + V \quad (3.1)$$

(1) 式から

$$\Delta P_d = (I - A'_d)^{-1} \cdot A'_{im} \cdot \Delta P_{im} \quad (3.2)$$

として、輸入価格上昇による国内価格の押し上げ効果を計算した。これらは、コストを増やし付加価値率を圧迫するため、図 3.11、図 3.12 ではマイナスとした。輸入価格変動による各産業の影響は図 3.10 の (B)/(A) に相当する。

輸入価格の上昇は直接的なコスト増（一次波及要因）と、企業間の取引を通じて国内価格に転嫁される間接的なコスト増（投入構造要因）の 2 つの要因で捉えることができる。(1) 式より、一次波及要因を次の式とし、

$$\Delta P_d = A'_{im} \cdot \Delta P_{im} \quad (3.3)$$

投入構造要因は (2) 式から (4) 式を引いたものとする。

輸出価格変動の影響

輸出価格の上昇は、各産業の輸出額を増加させることで、付加価値額を押し上げる効果を持つ。各産業への効果は、以下の式によって算出した。図 3.10 の (C)/(A) に相当する。

$$\text{輸出価格上昇率} \times \frac{\text{輸出額}}{\text{付加価値額}} \quad (3.4)$$

分析結果

図 3.11 は、円安の 2 つ目の波及効果である各産業の投入構造を踏まえて、輸出入に与える最終的な効果を図示したものである。2015 年の全体の効果がマイナスとして大きく出ている石油・石炭製品、ガス・熱供給、電力は、いずれも生産に占める輸入原材料の比率が高く、輸入価格の影響を直接受けやすい（一次波及の割合が大きい）産業であることがわかる。これらの産業への円安の影響を 2000 年と比較すると、全体の効果のマイナスが大きくなっている。この要因として、2000 年当時の原油価格が年平均で 1 バレル 30 ドル程度であったものが、2015 年には 50 ドル近くまで上昇したこと、これに加えて 2011 年の東日本大震災の影響から原子力発電所が軒並み稼働を停止し、代替火力に使う LNG などの化石燃料の輸入額がかさんだことがあげられる。

一方、電子部品、自動車などの加工型の製造業では輸出向けの生産が多く、円安の恩恵を受けやすい産業構造となっている。また、国内からの調達割合も比較的高いため、全体の効果ではプラスの恩恵があるが、もっともそのプラス幅は図 1 でも示したように徐々に縮小している。産業連関表で 2005 年から 2015 年までの輸出額、輸入額の伸びを見ると、加工型の輸出額は年率 0.9 % の伸びにとどまったのに対し、輸入額は年率 4 % 近く伸びている。輸入に比べて輸出が伸び悩んだことで、円安の効果が薄れていることを示している。

加工業種はネットではプラスだがその幅は徐々に縮小、また素材業種と非製造業はマイナスとなるなど、円安メリットが薄れている（nikkeicenter2.）。この背景には貿易収支の黒字が縮小し、2015 年は赤字となったことがある。東日本大震災の影響で原発が軒並み停止し、代替火力用の液化天然ガスなど化石燃料輸入が増加したことが大きい。化石燃料はドル建て輸入比率が高く、ほぼ全面的に輸入に頼るため、これを大量に投入する産業では円安のコストが膨らむ要因になる。また輸出の伸び悩みも円安の国内産業への恩恵を小さくしている。2011 年から 2012 年にかけて日本経済が 1 ドル=70 円台の円高を経験したことでその後、加工業種を中心に製造業の海外現地生産が進んだことなどが関係しているとみられる。

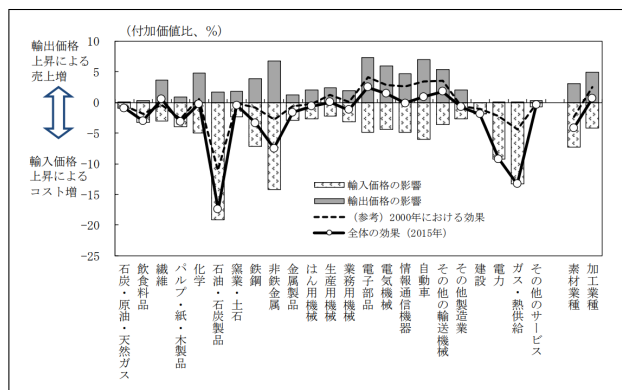


図 3.11: 1 割円安による各産業への影響 [16]

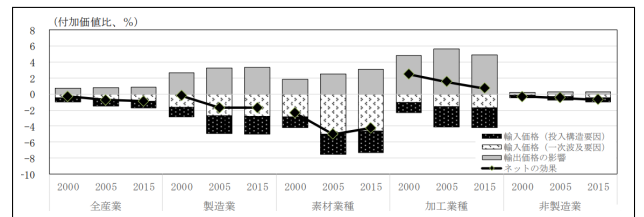


図 3.12: 1 割円安の恩恵と負担 [16]

提案手法

§ 4.1 3D グラフによるサプライチェーン構造の可視化

本研究では産業連関表の三角化によって得られたサプライチェーン構造を可視化することで、利用者が社会的動向を理解しようとすることを支援する。可視化の手法として、ネットワークによるものがある。ネットワークの種類は2次元ネットワークと3次元ネットワークが存在する。

3D グラフによる可視化では、ネットワーク構造を視覚的に理解しやすくすることができることが知られており [18]。また、異常な構造や特異なパターンを素早く発見することができる。Ware らの実験 [19] では、ネットワークを読み取る所要時間と誤り率から 3D グラフの可読性を検証し、結果として3次元可視化が2D 可視化よりも可読性が高かったと述べられている。そのため、本研究では有向重み付き 3D グラフによる因果性の可視化を行うことで変数間の因果性を直感的に素早く正確に理解できるようにする。

産業連関表の三角化によって得られた産業間の関係を csv ファイルに出力し、その csv ファイルから情報を読み取り、自動的に 3D ネットワークを作成するシステムを作成した。

そのためにはまず、産業連関表の三角化によって得られた産業間の関係を csv ファイルに格納する必要がある。これの作成には「pandas」を用いる。「pandas」によって産業連関表の三角化によって得られた産業間の関係をデータフレームに格納し、それをそのまま csv ファイルに出力する。産業連関表の三角化によって得られた産業間の関係を csv ファイルに格納したのが図 4.3 であり、これでは製品やサービスを供給している部門のノードを from 列、製品やサービスの供給を受けている部門を to 列、投入係数を effect 列に入れた形式である。この csv ファイルを読み込み、自動的に 3D グラフネットワークを作成する。

産業連関表の三角化後のバイナリ変数行列は、行列の中身の数値がすべて 0 か 1 であり、ある産業部門が他の産業部門に供給する製品やサービス、および逆に他の産業部門から供給を受ける製品やサービスの流れについては読み取ることができるが、産業部門間の供給量の違いを読み取ることができない。そこで、産業連関表の三角化後のバイナリ変数行列の中身の数値が 1 のところに、産業連関表の投入係数を入れることによって、ある産業部門の国内生産額に占める他の産業部門からの供給の割合を読み取ることができるようにした。

Three.js を用いた 3D グラフ作成

3D グラフの作成には Three.js のモジュールである 3D Force-Directed Graph を用いる。3D Force-Directed Graph グラフでは Json ファイルの形式でデータを与えることができる。先ほど作成された共起語ネットワークを、ノードの名

前と、矢印の元のノードおよび矢印の先のノードを”nodes”および”links”として与えることでグラフの描画に必要な情報を受け渡す。受け渡された情報をもとにグラフを作成する。ここで、3D Force-Directed Graph の初期設定ではグラフのノードは球体になっており、テキストの表示を行うには適しているとは言えない。そこでノードそのものをテキストにする。

§ 4.2 産業連関表による為替変動時の各産業への影響と業種別株価との相関

産業連関表による為替変動時の各産業への影響

3.3 章で述べた日本経済研究センターの小野寺らの研究 [16] を参考に、現時点で一番最新のデータである 2020 年の総務相「産業連関表」の取引基本表 37 部門を用いて、為替変動時の各産業への影響を算出した。小野寺らの研究では、ドル円為替レートが 1 割円安に動いたときに各産業に及ぼす影響を算出しているが、本研究では実際のドル円為替レートのデータを用いて、前日と当日のドル円為替レートの終値の変動率を求めることによって、前日と当日のドル円為替レートの変動が各産業に及ぼす影響を算出している。なお本研究では価格変動の直接の影響のみを検討し、価格変動による輸出入や国内需要の数量の変化は考慮しない。また、分析に用いられる投入係数、逆行列係数は、令和 2 年 (2020 年) 産業連関表作成時の状況を表すもので、その状況が続いているものと仮定する。

取引基本表に関して、輸入をどのように扱うかについては、大別して二つの方式がある。一つは、同じ種類の商品について、国産品と輸入品との区別を行わず、一括して扱うものであり、この方式による取引基本表を「競争輸入型」という。これに対し、同じ種類の商品であっても、国産品と輸入品とを区別して扱う方式を「非競争輸入型」という。

輸入価格変動の影響を求める際に、国産品投入係数行列 A_d と輸入品投入係数行列 A_{im} を求める必要がある。総務相が公開している産業連関表は競争輸入型であるため、「総務相の令和 2 年 (2020 年) 産業連関表 結果の概要」のページにある、「[参考] 計算シート その 2 輸入係数、輸入品投入係数等に関する表」の大分類のエクセルファイルから輸入表を取得し、非競争輸入型に変換した。

また輸入価格変動の影響を求める際に輸入品価格ベクトル P_{im} を、輸出価格変動の影響を求める際に輸出価格の変化率を求める必要がある。各産業の米ドル建て契約の輸出入額のみが対ドル円為替レートの変動によって影響を受けると仮定し、「為替の変動率×米ドル建て比率」として求めた。各産業の米ドル建て契約比率には日本銀行「輸出・輸入物価指数の契約通貨別構成比」の 2023 年 12 月の値を用いたが、部門の内訳が輸出物価指数は 7 部門、輸入物価指数は 10 部門にしか分かれていないので、産業連関表の 37 部門には足りない。そこで簡易的に、比較的近い部門に対応させて用いている。具体的にどのように対応させたかを図 1 に示す。図 1 の () 内の数字は米ドル建て比率の値である。運輸・郵便部門については例外的に、日本銀行「企業向けサービス価格指数」の関連資料にある、契約通貨別構成比の表での「外航貨物輸送」および「外航貨物用船料」の米ドル建て比率の単純平均を用いている。

業種別株価とドル円為替レートのデータ収集

産業連関表(部門)	輸入物価指数	産業連関表(部門)	輸出物価指数
農林漁業, 飲食料品	飲食料品・食料用農産物(56.2)	繊維製品	繊維製品(47.5)
繊維製品	繊維品(36.8)	化学製品	化学製品(56.9)
鉱業, 鉄鋼, 非鉄金属, 金属製品	金属・同製品(79.6)	鉱業, 鉄鋼, 非鉄金属, 金属製品	金属・同製品(79.1)
パルプ・紙・木製品	木材・木製品・林産物(77.1)	はん用機械, 生産用機械, 業務用機械	はん用・生産用・業務用機器(24.8)
電力・ガス・熱供給, 石油・石炭製品	石油・石炭・天然ガス(97.3)	電気機械, 情報通信機器, 電子部品	電気・電子機器(53.6)
化学製品	化学製品(28.1)	輸送機械	輸送用機器(46.5)
はん用機械, 生産用機械, 業務用機械	はん用・生産用・業務用機器(39.3)	窯業・土石製品, その他の製造工業製品	その他の産品・製品(55.7)
電気機械, 情報通信機器, 電子部品	電気・電子機器(68.5)	運輸・郵便	外航貨物輸送(90.0)
輸送機械	輸送用機器(37.8)	対個人サービスなど21部門	輸出計(49.2)
窯業・土石製品, その他の製造工業製品	その他の産品・製品(62.6)		
運輸・郵便	外航貨物輸送, 外航貨物用船料(97.9)		
対個人サービスなど16部門	輸入計(64.4)		

図 4.1: 産業部門と輸出・輸入物価指数の対応表

表 4.1: 産業連関データと業種別株価データの統合表

産業連関表(部門)	株価(業種)	産業連関表(部門)	株価(業種)
農林漁業	水産	鉱業	鉱業
飲食料品	食品	繊維製品	繊維
パルプ・紙・木製品	パルプ・紙	化学製品	化学
石油・石炭製品	石油	プラスチック・ゴム製品	ゴム
窯業・土石製品	窯業	鉄鋼	鉄鋼
非鉄金属, 金属製品	非鉄金属製品	はん用機械, 生産用機械, 業務用機械	機械, 精密機器
電気機械, 電子部品, 情報通信機器	電気機器	輸送機械	輸送用機器, 造船, 自動車
その他の製造工業製品	その他製造	建設	建設
電力・ガス・熱供給	電力, ガス	商業	商社, 小売業
金融・保険	銀行, 証券, 保険, その他金融	不動産	不動産
運輸・郵便	陸運, 海運, 空運, 鉄道, バス, 倉庫	情報通信	通信
医療・福祉	医薬品	対事業所サービス, 対個人サービス	サービス

業種別株価データとドル円為替レートに関しては, Python のライブラリである `yfinance` を用いてデータの収集を行う. `yfinance` は, Yahoo Finance から株価や為替, 主要な株式指数などの情報を取得できる Python ライブラリであり, `Ticker` と呼ばれるモジュールを使って, 株価コードに紐付いた様々な情報にアクセスが出来る. 業種別株価データは, 日経 500 種平均株価の構成銘柄に含まれている企業の株価データを取得し, 業種別に平均をとっている. 日経 500 種平均株価は東京証券取引所のプライム市場, スタンダード市場およびグロース市場上場企業のうち, 500 銘柄を対象に算出され, 225 銘柄を対象とした日経平均株価よりも広範囲の銘柄が含まれるため, 市場全体の動きをより広く反映している. 日経 500 種平均株価の構成銘柄に含まれている企業の株価データを `yfinance` を用いて取得するためには, ティッカーシンボルと呼ばれる株式市場で取引される企業を識別するためのコードが必要である. 各企業のティッカーシンボルについては, 日本経済新聞の Web サイトからスクレイピングを行うことで, 自動的に取得している. 業種別株価データの単位は全て日本円である. また, 時間足については業種別株価とドル円為替レートともに日足のデータを取得している.

産業連関データと業種別株価データを統合したデータセットの作成

産業連関表による為替変動時の各産業への影響と業種別株価との相関係数を求めるには, 産業連関データは 37 部門, 株における業種の区分として 36 業種であり, 産業連関表における部門の分け方と業種別株価における業種の分け方とで違いがあるため, 産業連関データと業種別株価データを統合したデータセットの作成を行う必要がある. 例えば, 産業連関データの輸送機械部門に対応している業種別株価データの業種は, 輸送用機器, 造船, 自動車などまとめる必要があるものについてはまとめて統合を行い, 24 種に統合した.

相関分析とヒートマップによる可視化

産業連関表による為替変動時の各産業への影響と業種別株価との相関係数を求めるために作成した産業連関データと業種別株価データを統合したデータセットに対して、ヒートマップによる相関行列の可視化を行った。ヒートマップによる相関行列の可視化を行うことで、データの特定の特性や関係性を一目で直感的に理解することが可能になる。業種別株価とドル円為替レートとの相関を求めるため、産業連関データと業種別株価データを統合したデータセットにドル円為替レートの終値データを追加した。産業連関表による為替変動時の各産業への影響は、前日と当日のドル円為替レートの終値の変動率から算出しているため、業種別株価とドル円為替レートについても取得した日足データから、前日と当日のそれぞれのデータの終値の変動率を計算し、その値をデータとして用いている。

相関を求める計算は、ピアソンの積率相関係数で行っている。ピアソンの積率相関係数は、二つの量的変数間の直線的な関連性を評価する際に用いられる統計的手法である。この検定は特に、変数が正規分布をしているという仮定の下で有効です例としては、医学分野において、患者の年齢と特定の疾患リスクの間の関係性、心理学におけるストレスレベルと睡眠の質の間の相関、または経済学における教育レベルと年収の関連性など、多岐にわたる研究で利用されます。この検定は、単に相関が存在するかどうかを示すだけでなく、その強さや方向性を定量的に明らかにするために重要です。ピアソンの積率相関係数は次の式で定義されます

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (4.1)$$

- n はデータの総数
- x_i, y_i はそれぞれのデータ点
- $\bar{x}, \bar{y}$ はそれぞれの平均値

§ 4.3 提案手法のアルゴリズム

Step 1: 産業連関表の三角化

総務省のウェブサイトから令和2年(2020年)産業連関表の取引基本表(生産者価格評価)(統合大分類表)を取得する。総務省のウェブサイトからダウンロードできる産業連関表はexcel形式であるから、csvファイル形式に変換し、データフレームに格納する。データフレームに格納された産業連関表に対して投入係数を求め、投入係数表を作成する。作成した投入係数表には 37×37 の投入係数行列が格納されており、その行列に対して整数計画問題を解き、産業連関表の三角化を行う。産業連関表の三角化を行うことによって得られた、バイナリ変数行列と産業部門の最適な順列をそれぞれcsvファイルに保存する。

Step 2: 3D グラフによるサプライチェーン構造の可視化

Step1で作成された産業連関表の三角化後のバイナリ変数行列を用いて、産業間のサプライチェーン構造を3Dグラフによって可視化する。グラフの作成にはThree.jsのモジュールである3D Force-Directed Graphを用いる。

産業連関表の三角化後のバイナリ変数行列から得られた産業部門間の関係を csv ファイルに格納する。3D Force-Directed Graph に産業部門間の関係の情報を送るために、作成された csv ファイルを json ファイル形式に変換する。作成された json ファイルをもとに 3D グラフを描画する。描画されたグラフはマウスをドラッグすることで回転でき、異なる視点からの観察が可能である。またホイールを回転させることでグラフの拡大、縮小を行うことができる。さらに、単語をクリックすることでその単語を中心とした回転に変更することができる。

Step 3: 業種別株価とドル円為替レートのデータ取得

日本経済新聞の Web サイトからスクレイピングを行い、ティッカーシンボルと呼ばれる株式市場で取引される企業を識別するためのコードを取得し、業種別に異なるリストに格納する。業種別に異なるリストに格納されたティッカーシンボルを扱いやすいように、一つのデータフレームに格納する。このとき表 4.1 の産業連関データと業種別株価データの統合表をもとに、特定の業種に関しては業種を統合させ、その統合した業種に対応する企業のティッカーシンボルがわかりやすいようにデータフレームに格納する。Python のライブラリである yfinance を用いて、日経 500 種平均株価の構成銘柄に含まれている企業の株価データとドル円為替レートそれぞれの日足データを取得する。株価データに関しては、データフレームに格納されたティッカーシンボルを用いて、業種ごとに複数の銘柄の株価の終値を取得し、一日ごとのその業種の平均株価を計算し、データフレームに格納する。ドル円為替レートに関しては、日足データから終値を取得し、データフレームに格納する。ドル円為替レートと日経 500 種平均株価それぞれの取引市場の営業日が異なっているなどの理由により、取得できるデータの日付がドル円為替レートと業種別平均株価とで異なっているため、両方とも取得できている日付のデータを抽出し、データフレームに格納するデータフレームに格納されたドル円為替レートと業種別平均株価から、一日ごとのそれぞれのデータの終値の変動率を計算し、データフレームに格納する。

Step 4: 為替変動時の各産業への影響の算出

総務省のウェブサイトから輸入表を取得し、Step1 で取得した取引基本表を競争輸入型から非競争輸入型に変換する。変換した非競争輸入型の取引基本表から、国産品投入係数行列と輸入品投入係数行列を求め、それぞれデータフレームに格納する。また、日本銀行のウェブサイトから企業物価指数 (2020 年基準) 輸出・輸入物価指数の契約通貨別構成比と企業向けサービス価格指数の契約通貨別構成比 (2020 年基準) を取得し、各産業の米ドル建て契約比率をデータフレームに格納する。各産業の米ドル建て契約比率と、Step3 で求めたドル円為替レートの各日付の変動率を用いて、各日の輸出入価格の変動率を求め、データフレームに格納する。そして国産品投入係数行列、輸入品投入係数行列、各日の輸出入価格の変動率を用いて、前日と当日のドル円為替レートの変動による輸出価格変動の影響と輸入価格変動の影響をそれぞれ算出し、足し合わせたものをデータフレームに格納する。最後に表 4.1 の産業連関データと業種別株価データの統合表をもとに、特定の産業部門に関しては算出した結果を足し合わせ、産業部門の統合または削除を行い、新たなデータフレームに格納する。

Step 5: 相関分析と可視化

Step3で作成した一日ごとのドル円為替レートと業種別株価データそれぞれの終値の変動率が格納されたデータフレームと、Step4で作成した産業連関表による為替変動時の各産業への影響の算出結果を一つのデータフレームにまとめて格納する。ピアソンの積率相関係数を用いて、産業連関表による為替変動時の各産業への影響の算出結果と業種別株価、ドル円為替レートそれぞれとの相関を求める。そして求めた相関行列に対してヒートマップによる可視化を行い、画像ファイルとして保存した。ヒートマップの作成には、Pythonのデータ可視化ライブラリである Seaborn を用いる。Seaborn は、特に統計データの可視化に特化していて、データフレーム形式のデータを直接使用してプロットでき、列名をそのまま軸ラベルとして扱うことができる。

数値実験並びに考察

§ 5.1 数値実験の概要

§ 5.2 実験結果と考察

4.2 章で述べた産業連関表による為替変動時の各産業への影響について、仮に1割の円安が起きたときの各産業への影響を、2020年の総務相「産業連関表」の取引基本表37部門を用いて算出した結果を図に示す。

産業連関表を三角化することによって導出したサプライチェーン構造では、鋳業や窯業、鉄鋼などの製造業の素材系業種はサプライチェーンの上流に位置することがわかる。サプライチェーンの上流に位置するということは、通常直接的なコスト増（一次波及要因）の割合のほうが、企業間の取引を通じて国内価格に転嫁される間接的なコスト増（投入構造要因）の割合よりも大きくなると予想できるが、この図の結果では、鋳業や窯業、鉄鋼は製造業の素材系業種であるが、1割の円安によって輸入価格が上昇した場合、企業間の取引を通じて国内価格に転嫁される間接的なコスト増（投入構造要因）の割合が直接的なコスト増（一次波及要因）の割合よりも大きいことがわかる。

この原因として、鋳業や窯業、鉄鋼は、ネットの負担が大きく出ている石油・石炭製品、非鉄金属、電力・ガス・熱供給などの生産に占める輸入原材料の比率が高く、輸入価格の影響を直接受けやすい（一次波及の割合が大きい）産業の製品やサービスを投入していることが考えられる。

4.2 章で述べた産業連関表による為替変動時の各産業への影響と業種別平均株価との相関

1. 左上行列の産業連関表どうしの相関は1割円安時の結果を反映していて、部門ごとに影響の大きさは違うが、マイナスの影響がある部門たちとプラスの影響がある部門たちとでそれぞれ、日々の為替の変動にあわせて同じ動きかたをするため、輸出による売り上げ増によってプラスの影響がある産業は-1に、輸入によるコスト増によってマイナスの影響がある産業は1になる

2. 産業連関表による為替変動時の各産業への影響は、付加価値比の変化がプラス方向であれば収益力を高め、逆にマイナス方向であれば収益力を低下させることを意味する

円安になったとき（ドル円為替レートが上がったとき）、付加価値比の変化がプラス方向である輸送機械、商業、運輸・郵便、電気機械・電子部品・情報通信機器と、それらの産業部門に対応する輸送用機械（統合）、商業（統合）、運輸・郵便（統合）の業種別平均株価との関係は正の相関であり、円安になったとき収益力が高まるので株価も上がると考えられ、この結果は妥当であるといえる。しかし、そのほかの円安になったとき付加価値比の変化がマイナス

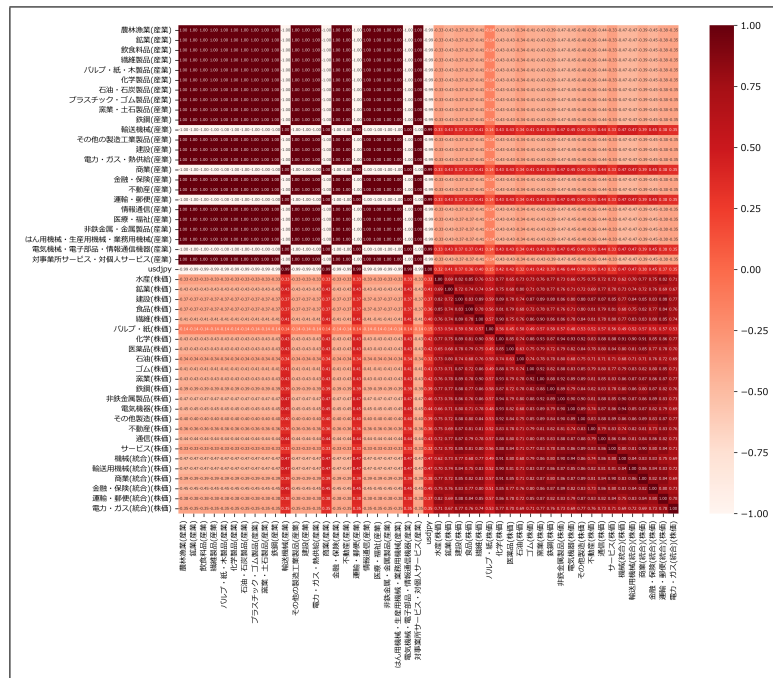


図 5.4: 出力されたヒートマップ

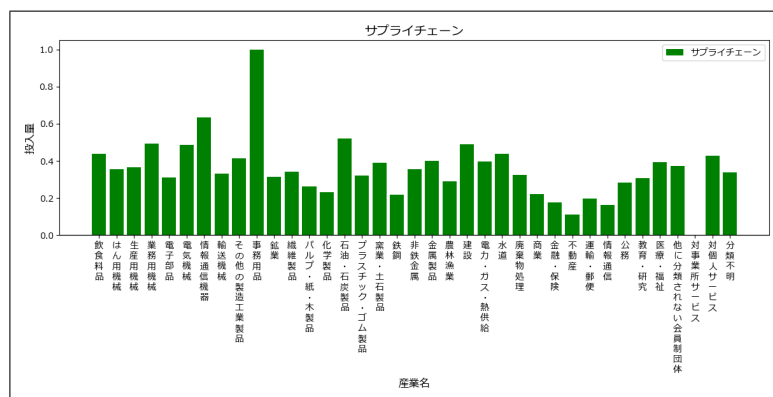


図 5.5: サプライチェーン

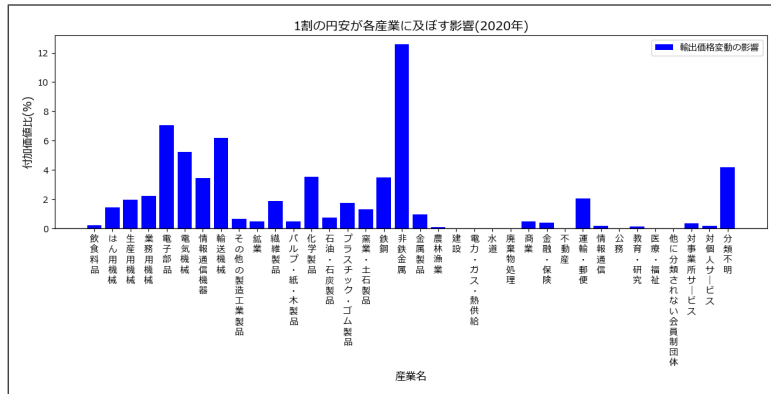


図 5.6: 輸出価格変動の影響

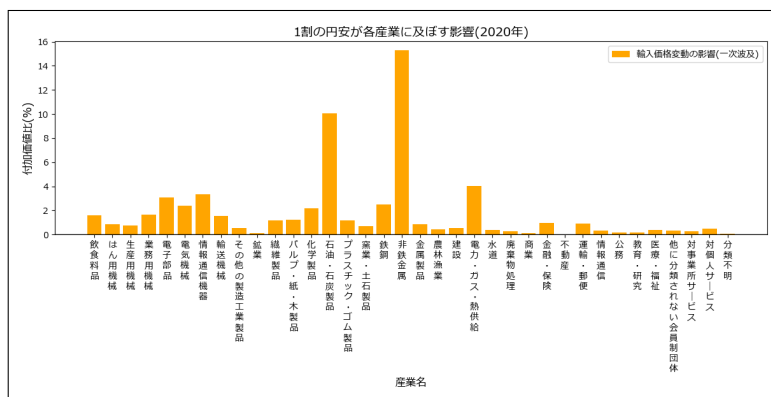


図 5.7: 輸入価格変動の影響 (一次波及要因)

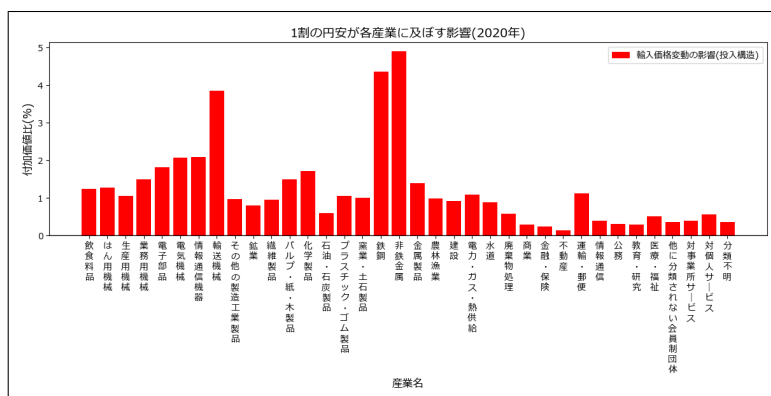


図 5.8: 輸入価格変動の影響 (投入構造要因)

おわりに

謝辞

本研究を遂行するにあたり，多大なご指導と終始懇切丁寧なご鞭撻を賜った富山県立大学工学部電子・情報工学科情報基盤工学講座の奥原浩之教授，António Oliveira Nzinga René 講師に深甚な謝意を表します．最後になりましたが，多大な協力をしていただいた研究室の同輩諸氏に感謝致します．

2025 年 2 月

戸田真聡

参考文献

- [1] 総務相, “産業連関表とは”, 閲覧日 2025-01-09,
- [2] 経済産業省 大臣官房 調査統計グループ 調査分析支援室, “産業連関ハンドブック”,
- [3] 茨城県企画部統計課, “経済波及効果分析の手引き ～産業連関表の活用～”,
- [4] 総務相, “平成 27 年 (2015 年) 産業連関表 -総合解説編-”, 2020 年 1 月
- [5] 兵庫県企画県民部ビジョン局統計課, “平成 27 年 (2015 年) 兵庫県産業連関表 (分析利用編)”, 2020 年 3 月
- [6] 内田陽子, “第 1 章 産業連関表からみたアジアにおける機械産業の国際競争力-日本、韓国、タイを中心に-”, DEIM Forum2018 E5-4
- [7] 情報玉手箱, “経済分析と数理工学”, 閲覧日 2025-01-09,
<https://tamatebako.i.nagoya-u.ac.jp/5592/>
- [8] 呂建軍, 時永祥三, “アジア国際産業連関表の三角化によるハイアラキー性分析”, 経済学研究. 74 (2), pp.121-145, 2007-10-30. 九州大学経済学会
- [9] Yasushi Kondo, “Triangulation of Input–Output Tables Based on Mixed Integer Programs for Inter-temporal and Inter-regional Comparison of Production Structures”, *Journal of Economic Structures* (2014) 3:2
- [10] 山本将弘, “為替が動けば株価はどう動く? 円高と日経平均株価の意外な関係とは”, 閲覧日 2025-01-09,
<https://kabumado.jp/kawase/>
- [11] 鈴木拓也, “日経平均株価とドル円の相関関係と連動する 4 つの理由”, 閲覧日 2025-01-09,
<https://fx-megabank.com/fx-basic/usdjpy-nikkei/>
- [12] 土中哲秀, “グラフネットワークと経済分析”, オペレーションズ・リサーチ 2022 年 7 月号, 2022 年 7 月
- [13] 土橋 喜, “エンゲージメントヒートマップー Moodle ログのデータマイニングによる学習傾向の可視化ー”, 情報教育シンポジウム 2020 年 12 月
- [14] 小松隆行, “教師なし学習を用いた COVID-19 新規感染者数のクラスター分析”, 北海道科学大学研究紀要, 第 50 号, 2022 年
- [15] アンドエンジニア, “Three.js とは? 概要やできることを JavaScript 関連術を含めて解説”, 閲覧日 2025-01-09,
<https://and-engineer.com/articles/ZOWitBIAACMAFtEj>.

- [16] 日本経済研究センター 小野寺敬, 落合勝昭, 田原健吾, “円安メリット薄れる国内産業-原発停止や海外現地生産が背景に-”,
- [17] 三菱UFJリサーチ&コンサルティング 藤田隼平, “コロナ禍の円安は日本経済にプラスに働くか? ～国内産業の収益力が低下し、消費者負担も増加～”,
- [18] 佐々日向子, 伊藤貫之, “ネットワークの3次元可視化と集合可視化の重ね書きの一手法”, DEIM Forum2018 E5-4
- [19] C. Ware and G. Franck, “Evaluating Stereo and Motion Cues for Visualizing Information Nets in Three Dimensions”, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 15, No. 2, pp. 121-140, 1996