

# 卒業論文

## 金融経済データからの産業連関分析を活用した 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 真聰

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
<b>第1章 はじめに</b>	<b>1</b>
§ 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
<b>第2章 産業連関分析による波及効果</b>	<b>3</b>
§ 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	6
§ 2.3 三角化によるサプライチェーンの抽出	9
<b>第3章 金融経済変数の影響の見える化</b>	<b>12</b>
§ 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	17
<b>第4章 提案手法</b>	<b>21</b>
§ 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
<b>第5章 数値実験並びに考察</b>	<b>28</b>
§ 5.1 数値実験の概要	28
§ 5.2 実験結果と考察	28
<b>第6章 おわりに</b>	<b>32</b>
<b>謝辞</b>	<b>33</b>
<b>参考文献</b>	<b>34</b>

# 図一覧

2.1 産業連関表の構造 [1] . . . . .	4
2.2 経済波及効果のイメージ図 [2] . . . . .	7
2.3 取引基本表(概念図) [3] . . . . .	8
2.4 投入係数表(概念図) [3] . . . . .	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 . . . . .	15
3.6 有向グラフと無向グラフ . . . . .	15
3.7 産業連関図 [9] . . . . .	16
3.8 ヒートマップ [10] . . . . .	16
3.9 米ドル建て輸出入比率の推移 [12] . . . . .	18
3.10 為替の影響の概念図 [12] . . . . .	18
3.11 1割円安による各産業への影響 [12] . . . . .	20
3.12 1割円安の恩恵と負担 [12] . . . . .	20
4.1 輸出・輸入物価指数の契約通貨別構成比(2023/12月時点) . . . . .	23
5.1 1割の円安が各産業に及ぼす影響 . . . . .	29
5.2 出力された3Dグラフ . . . . .	30
5.3 出力されたヒートマップ . . . . .	31

## 表一覽

# 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	$t$
インジケーターの計算に使用する期間	$m$
時刻 $t$ の終値	$p_t$
標準偏差	$\sigma$
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	$\rho$
定数ベクトル	$c$
係数行列	$\Phi_i$
攪乱項	$u$
$t$ における情報集合	$\Omega_t$
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年時点での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ている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言い難い状況にある。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。背景では金融市场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

#### 産業連関表の構造

国民経済を構成する各産業部門は、相互に網の目のように結び付きながら生産活動を行い、最終需要部門に対して必要な財・サービスの供給を行っている。ある一つの産業部門は、他の産業部門から原材料や燃料等を購入（投入）し、これを加工（労働・資本等を投入）し別の財・サービスを生産する。その財・サービスを更に別の産業部門における原材料等として、あるいは家計部門等に最終需要として販売（産出）する。このような「購入－生産－販売」という関係が連鎖的につながり、最終的には各産業部門から消費、投資、輸出などの最終需要部門に対し、必要な財・サービス（国内ではそれ以上加工されない）が供給され、取引は終了する。産業連関表は、このようにして、財・サービスが最終需要部門に至るまで、各産業部門間でどのような投入・産出という取引過程を経て、生産・販売されたものであるかを、一定期間（通常1年間）にわたって記録し、その結果を行列（マトリックス）の形で一覧表に取りまとめたものである。

#### 産業連関表の全体的な構成

産業連関表の全体的な構成を図1を見てみると、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、最終需要部門及び粗付加価値部門を「外生部門」というのに対し、中間需要部門及び中間投入部門を「内生部門」という。これは、外生部門の数値が他の部門とは関係なく独立的に決定されるのに対し、内生部門間の取引は、外生部門の大小によって受動的に決定されるというメカニズムの存在が前提にあるからである。

#### 投入及び産出の構成

		内生部門		外生部門		
		中間需要	最終需要			国内生産額
需要部門(買い手)		農林漁業 鉱業 業 業 業	家計外消費支出 一般政府消費支出 国内総固定資本形成 純増計	在庫出	輸入計	$(A + B - C)$
供給部門(売り手)			A	B	C	
内生部門	中間投入	農林漁業 鉱業 業 業 業 製造業 .....	↓【列】原材料購入及び付加価値の構成(投入)			
外生部門	粗付加価値	家計外消費支出 雇用者所得 営業余剰 .....				
	計	D				
	粗付加価値	家計外消費支出 雇用者所得 営業余剰 .....				
	計	E				
	国内生産額	D+E				
		→【行】生産物の販売先構成(産出)				
		(最終需要計-家計外消費支出-輸入計)				
		(粗付加価値計-家計外消費支出)				

図 2.1: 産業連関表の構造 [1]

産業連関表では、タテ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）が示されており、この計数を産業連関表では、「投入」(input)と呼んでいる。一方、ヨコ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）が示されており、この計数を「産出」(output)と呼んでいる。

以上のように、産業連関表は、各産業部門における財・サービスの投入・产出の構成を示していることから、「投入产出表」(Input-Output Tables (略して I-O 表))とも呼ばれている。

## 投入と产出のバランス

産業連関表では、列方向からみた投入額の計（国内生産額、第1図のD+E）と行方向から見た産出額の計（国内生産額、同図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おり、この点が大きな特徴となっている。タテ・ヨコの各部門の関係は、次のとおりである。1. 総供給=国内生産額+輸入額=中間需要額計+最終需要額計=総需要 2. 国内生産額=中間需要額計+最終需要額計-輸入額=中間投入額計+粗付加価値額計 3. 中間投入額合計=中間需要額合計 4. 粗付加価値額合計=最終需要額合計-輸入額合計なお、1. 及び2. の関係は、各行・列の部門毎に成立するが、3. 及び4. については、産業計（各部門の合計）についてのみ成立する

#### 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及び取引実態が詳細に記録されていることが大きな特色となっている。

## 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。[4]

### 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）及び費用構成（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と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。このため、経済についての各種計画や見通し等を作成する際、客観的資料として利用できる。

- 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 [2].

- 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

### 投入係数による生産波及の測定

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）

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

收支バランス式

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

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。

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

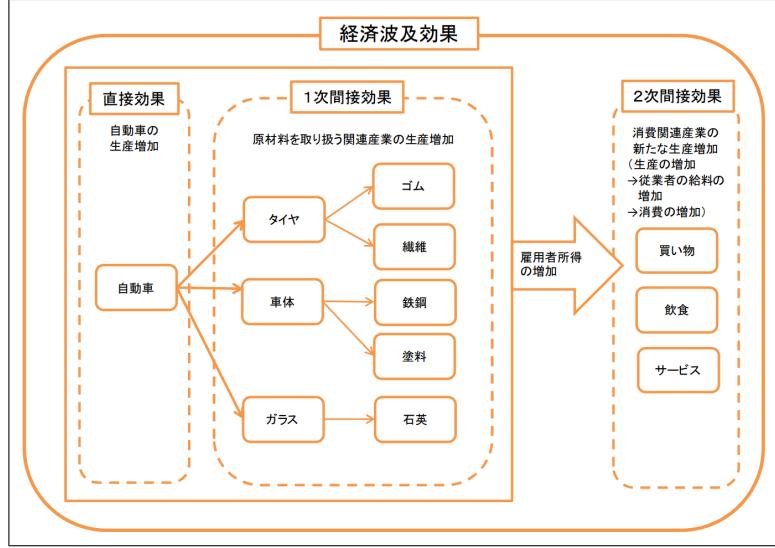


図 2.2: 経済波及効果のイメージ図 [2]

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なうことで, 図 2.4 のような投入係数表を求めることができる.

投入係数表は, 各列部門において, それぞれ 1 単位の生産を行うために必要な原材料等の大きさを表したものであり, 粗付加価値部分を含む投入係数の和は, 各列部門とも 1.0 となる.

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, これが投入係

	[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) [3]

	[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) [3]

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。

## 投入係数の安定性

### 1. 生産技術水準の不变性

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。

## 逆行列係数の意味と計算方法

先ほどの計算式のような2部門だけ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あっても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、

$$AX + F = X \tag{2.7}$$

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おり、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、産業連関表を一見しただけでは産業構造の特徴を把握することは難しい。そこで、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ようとする手法である。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。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アラーキー性分析を行っている。この研究では、1995 年表と 2000 年表との違いに注目していたり、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アラーキー性の分析を実施している。

### 三角化の手法

近藤の論文によると, 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を選択すると, 問題を簡単に解決できる. 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 [6].

## 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 [6]. 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  $\Pi$  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  $\pi$  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.

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

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.

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

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  $\pi$  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  $\pi$  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.

$$\text{maximize } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} X_{ij} - \sum_{i=1}^n A_{ii}$$

subject to

$$X_{ii} = 1 \quad (i \in N), \quad (2.14)$$

$$X_{ij} + X_{ji} = 1 \quad (i < j; i, j \in N),$$

$$0 \leq X_{ij} + X_{jk} - X_{ik} \leq 1 \quad (i < j < k; i, j, k \in N),$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j \in N).$$

または, 次の整数計画問題として表すこともできる.

$$\text{maximize } \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n ((A_{ij} - A_{ji}) X_{ij} + A_{ji})$$

subject to

$$0 \leq X_{ij} + X_{jk} - X_{ik} \leq 1 \quad (i < j < k; i, j, k \in N),$$

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i < j; i, j \in N).$$

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  $\pi$  は次の式で導出できる.

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

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	0	1	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

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.

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おり、相互作用がしばしば観察されます。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ります。株価はさまざまな要因によってが変動しますが、そのひとつに「為替」があります。[7]

#### 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おり、円安になったり、円高になったりします。そして、円安・円高それぞれにメリットとデメリットがあります。

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ります。円安になると日本円での売上が増加します。これが、輸出企業にとって円安がメリットである理由です。売上が増加することは業績にプラスとなるため、株価も上昇しやすくなります。反対に円高になると、同じ台数を販売しても売上は減少。業績にもマイナスとなり、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ります。円高の場合は、日本に輸入するためのコストが減少します。これが、輸入企業にとって円高がメリットである理由です。コスト削減も業績にとってプラスに働くため、株価も上がりやすくなり、反対に円安であれば、同じ商品を輸入してもコストが増加することになるため、デメリットになるというわけです。

#### 円高時に日経平均株価が下がる理由

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りますが、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、株価は上昇するものと考えられています。しかし、こと日本では、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ります。このことから、ドル円為替相場と日経平均株価は正の相関関係があると言える。

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」です。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となります。これは、日本を代表する 225 の銘柄をもとに算出され、日本経済に元気があるかどうかを計る「バロメーター」的な指標といえます。225 の構成銘柄については、

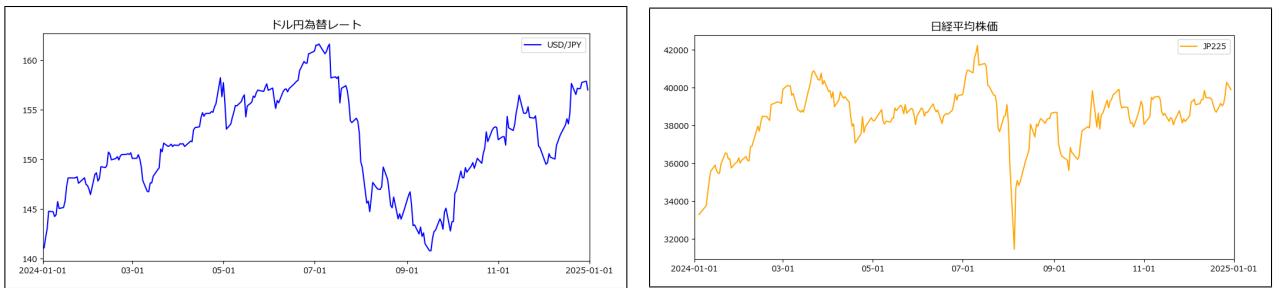


図 3.1: 直近 1 年のドル円為替レートの推移

図 3.2: 直近 1 年の日経平均株価の推移

毎年 1 回、入れ替えが行われているのですが、輸出に関わる企業の割合が多くなっているのが特長です。これは付度でもなんでもなく、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す。つまり、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ということです。

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す。外国人投資家のほとんどが、ドル建てによる取引を行っています。わかりやすく言うと、自分の証券口座にドルを入れて取引をしているということです。つまり、外国人投資家は日本の株価をドルに換算してチェックしているのです。どういうことかと言えば、ある銘柄の株価が 10,000 円だとして、1 ドル = 100 円の時、その株価をドルに換算すると 100 ドルです。しかし為替が変動して 1 ドル = 90 円になると、株価 10,000 円のままだったとしても、ドル建てでは 111.11 ドルに値上がりします。つまりドル建てで見た場合、日本の株式市場が動いていなくも「円高になるだけで株価は上がる」のです。これを「為替差益」と言い、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を売却しようとします。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というわけです。

### 日経平均株価が上がった時に円安になる理由

次に、ドル円為替相場ではなく、日経平均株価が先に動いた場合について述べる。<sup>[8]</sup>

日経平均が先に動き、その後に米ドル円が動くのにはいくつか理由があり、一つ目は外国人投資家の為替ヘッジの動きがあります。通常、外国人投資家は日本株式に投資をする際に、手持ちの外貨を円に換えて（外貨→円）投資をしますが、それと同時に将来円を売って外貨を買い戻すための為替予約を同時に締結するケースもあります。ここで、為替予約の割合を投資資産の評価額に対して一定に保つ方針をとっているため、もし、日経平均が上昇したら、手持ちの円資産が多くなり、追加の円売り外貨買いの為替予約をする必要があるため、それが円安を進ませるってメカニズムです。

また、二つ目の理由としては、リスクオンで円安（リスクオフで円高）というパターンが完成していることが挙げられます。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相場状況の意味であり、株価が上昇します。対義語は、リスクオフで、投資家がリスクを抑えて消極的になる相場状況を意味します。そして、現在はリスクオンで円安（リスクオフで円高）というパターンが完成しており、大衆心理から、株が上昇したら為替でも円が売られ、株が下落したら円が買われやすくなるのです。

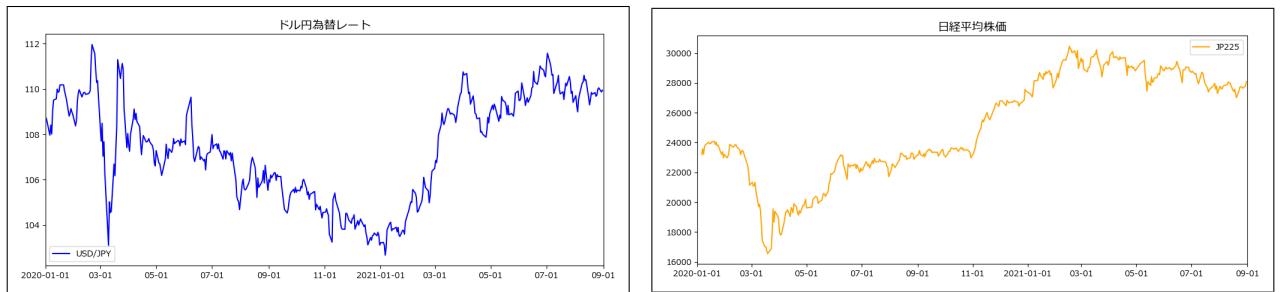


図 3.3: コロナショック時のドル円為替レートの推移

図 3.4: コロナショック時の日経平均株価の推移

### ドル円為替レートと日経平均株価の動きの比較

このように、為替は株価の動向に様々な影響を与えると言われています。そのため、経済ニュースでは必ず株価と為替の情報をセットで伝えますし、為替が大きく動いた際には株価への影響が懸念されます。

では、実際のところはどうなのか。最近5年の株価と為替の推移を見てみましょう。

こうして実際のチャートで確認してみると、確かに株価と為替は連動しやすいものの、「必ず連動する」とは決して言えないことがよくわかります。

当然ですが、為替以外にも株価を動かす要因はたくさんあります。

### コロナショック時の相関関係

日経平均株価とドル円は一般的には正の相関関係がありますが、2020年3月のコロナショック以降は、一時的に負の相関関係がきました。

つまり、日経平均株価は上昇する一方で、ドル円は下落したのです。

この背景としては、米国の大規模な金融緩和でマネーが市場に溢れたことで株高を誘発し、日経平均株価は上昇。

その一方で、緩和状態によるドル安からドル円は下落したと考えられます。[8]

なお、この負の相関現象は2020年3月～12月まで続き、2021年以降は再び正の相関関係になっています。

## § 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

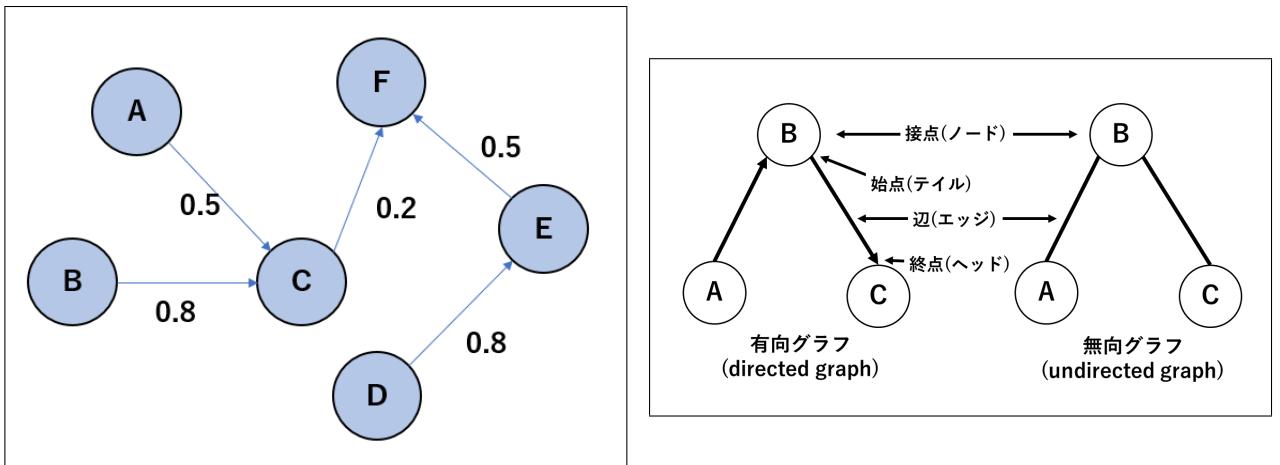


図 3.6: 有向グラフと無向グラフ

図 3.5: 因果グラフの例

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できる。

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

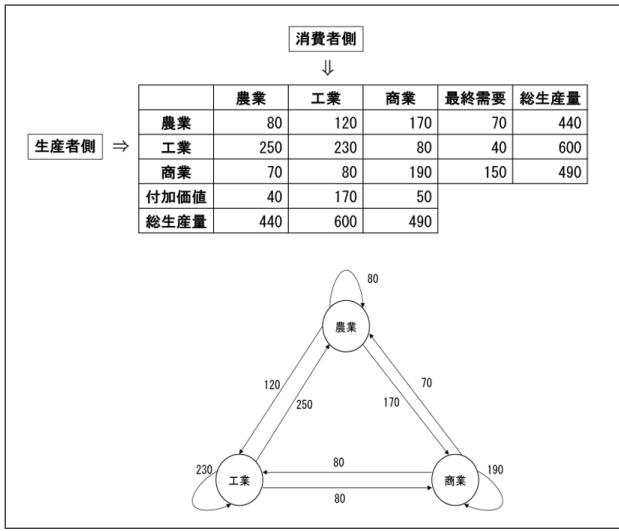


図 3.7: 産業連関図 [9]

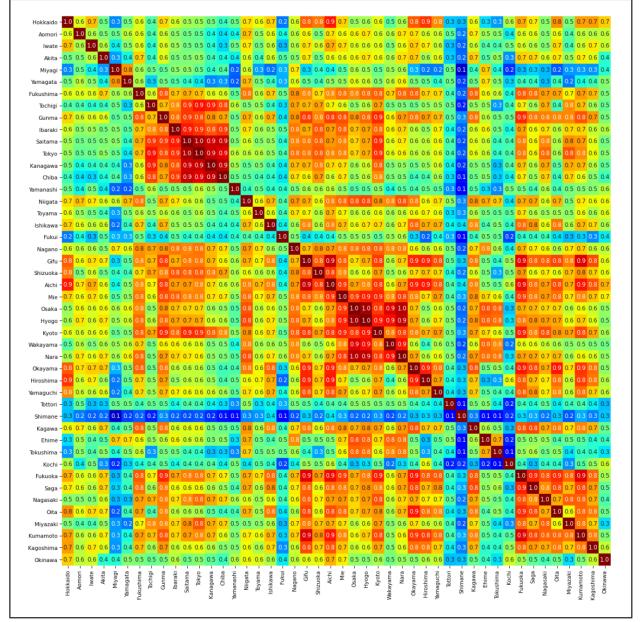


図 3.8: ヒートマップ [10]

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。

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次元コンピュータグラフィックスとは、3次元の立体的な仮想物体を、コンピュータで演算することで平面上に奥行きや質感のある画像を表す手法である。従来は大型計算機が必要であったが、プロセッサの性能向上とGPUの一般化により、物性シミュレーションや3Dゲームなど、さまざまな分野で利用されている[11]。

描画には”3D Force-Directed Graph”というモジュールを用いており、Jsonファイルでデータを与えることで、有向グラフを作成することができる。

### ヒートマップ

ヒートマップはデータの意味や関連性を可視化するために、数値の大小関係を視覚的に表現することを目的に、複数の色の濃淡を使って可視化する手法であり、従来から気温の分布を可視化するなどに使われている。現在では様々な分野において、データの集中度を濃淡のある色で表現する方法として活用されていて、相関行列を可視化する方法として、ヒートマップがよく使用される。

小松の研究では、インターネット上に公開されているCOVID-19（新型コロナウィルス）に関するオープンデータに関して、相関分析とクラスター分析を行い、日本の全都道府県、日本を含むアジア諸国、およびヨーロッパ諸国の新規感染者数の日次データを各々時系列データと捉え、地域間の相関係数を算出し、その値をヒートマップとして表示することによって、さまざまなの知見を得ていた[10]。

## § 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が、日本経済研究センターの小野寺らの研究では、産業連関表をタテ（列）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

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	機械器具	63.8	52.4	36.4
輸出計	59.6	53.0	53.3	輸入計	59.3	57.1	59.5
					75.6	71.1	71.3

図 3.9: 米ドル建て輸出入比率の推移 [12]

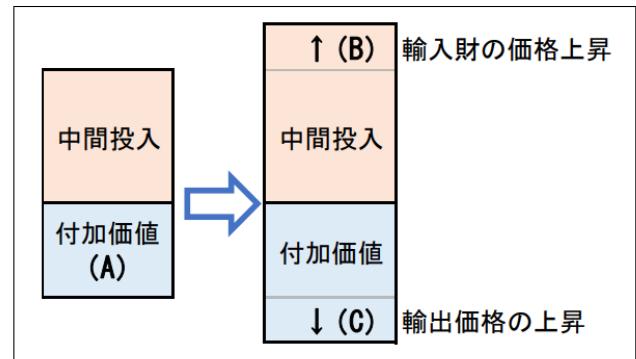


図 3.10: 為替の影響の概念図 [12]

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省「産業連関表」(2000年、2005年、2015年の3時点)を用いて試算した[12]。なお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。

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。

こ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、こ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。

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nikkeicenter3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、以下の関係が成立する。

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

(1) 式から

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

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。輸入価格変動による各産業の影響は図6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、

$$\Delta \mathbf{P}_d = \mathbf{A}'_{im} \cdot \Delta \mathbf{P}_{im} \quad (3.3)$$

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6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nikkeicenter1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年のネットの負担が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、ネットの負担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、国内からの調達の割合も比較的高いため、ネットではプラスの恩恵がある。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2015年から2015年までの輸出額、輸入額の伸びを見ると図nikkeicenter2で示した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、15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

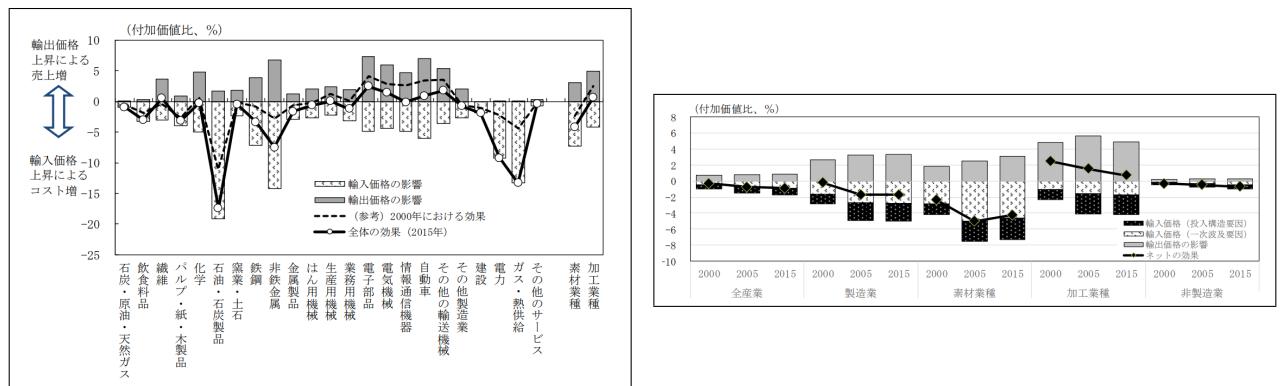


図 3.12: 1割円安の恩恵と負担 [12]

図 3.11: 1割円安による各産業への影響 [12]

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。11年から12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。



## 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などを支援する。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事が知られており [13]。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 [14] 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とした。

#### 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 [12] 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。運輸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

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

	輸出物価指数 Export Price Index						輸入物価指数 Import Price Index				
	円 Yen	外貨 Foreign currencies	米ドル US\$	ユーロ Euro	その他 Others		円 Yen	外貨 Foreign currencies	米ドル US\$	ユーロ Euro	その他 Others
織維品 Textiles (9.2)	32.6	67.4	47.5	6.6	13.2	飲食料品・食料用農水産物 Beverages and foods and agriculture products for food (85.1)	35.3	64.7	56.2	5.7	2.8
化粧製品 Chemical related products (117.5)	34.9	65.1	56.9	4.0	4.2	織維品 Textiles (58.6)	60.6	39.4	36.8	0.8	1.8
金属・同製品 Metals and related products (103.5)	19.1	80.9	79.1	0.9	0.9	金属・同製品 Metals and related products (101.6)	15.9	84.1	79.6	0.0	4.5
はん用・生産用・業務用機器 General purpose, production and business oriented machinery (196.5)	61.3	38.7	24.8	9.9	3.9	木材・木製品・林産物 Lumber, wood products and forest products (16.6)	0.9	99.1	77.1	20.2	1.8
電気・電子機器 Electric and electronic products (210.2)	37.8	62.2	53.6	5.7	2.9	石油・石炭・天然ガス Petroleum, coal and natural gas (213.6)	2.7	97.3	97.3	0.0	0.0
輸送用機器 Transportation equipment (269.9)	28.7	71.3	46.5	12.3	12.6	化粧製品 Chemicals and related products (108.4)	63.8	36.2	28.1	4.6	3.5
その他の製品・製品 Other primary products and manufactured goods (93.2)	36.6	63.4	55.7	3.8	3.8	はん用・生産用・業務用機器 General purpose, production and business oriented machinery (75.9)	52.2	47.8	39.3	6.6	1.9
						電気・電子機器 Electric and electronic products (206.7)	27.7	72.3	68.5	0.3	3.5
						輸送用機器 Transportation equipment (51.2)	52.7	47.3	37.8	5.7	3.8
						その他の製品・製品 Other primary products and manufactured goods (52.2)	26.7	73.3	62.6	2.6	8.0

図 4.1: 輸出・輸入物価指数の契約通貨別構成比(2023/12月時点)

数などの情報を取得できる Python ライブライアリであり, 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まとめて統合を行い, 24 種に統合した.

### ヒートマップによる相関行列の可視化

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

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

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  $37 \times 37$  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.

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, 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. 最後に, 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が各産業に及ぼす影響を算出し, 一日ごとの為替変動による影響の大きさを産業別でデータフレームに格納する.

## Step 5: 相関行列の可視化

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年の総務省「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、鉱業や窯業、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、鉱業や窯業、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、鉱業や窯業、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. 産業連関表どうしの相関は1割円安時と結果を反映しているため、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方向である農林漁業や鉱業などの産業部門と、それらの産業部門に対応する業種別平均株価との関係は負の相関であり、円安になったとき収益力が低下するので株価が下がると考えら

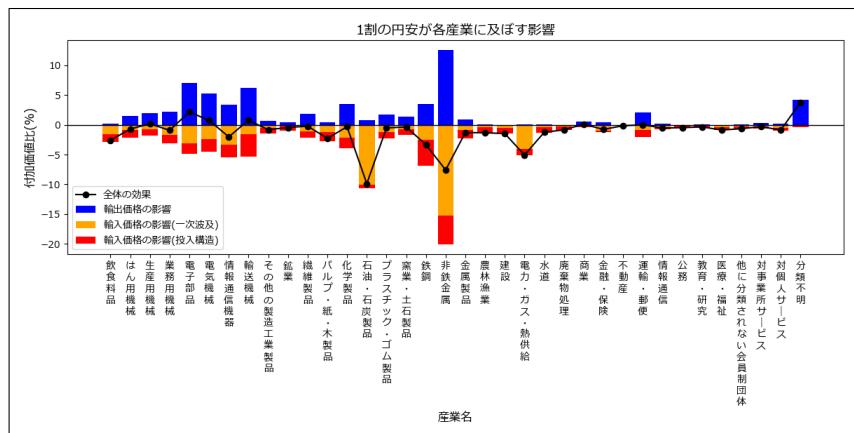


図 5.1: 1割の円安が各産業に及ぼす影響

れ、この結果は妥当とはいえない。

その原因として、日経平均株価は輸出企業が多く含まれていて、為替と株価は正の相関になるという背景があるため、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正の相関がある

3. 株価どうしの相関は基本的に高いが、パルプ・紙と繊維の相関がなぜか他のに比べて高くない

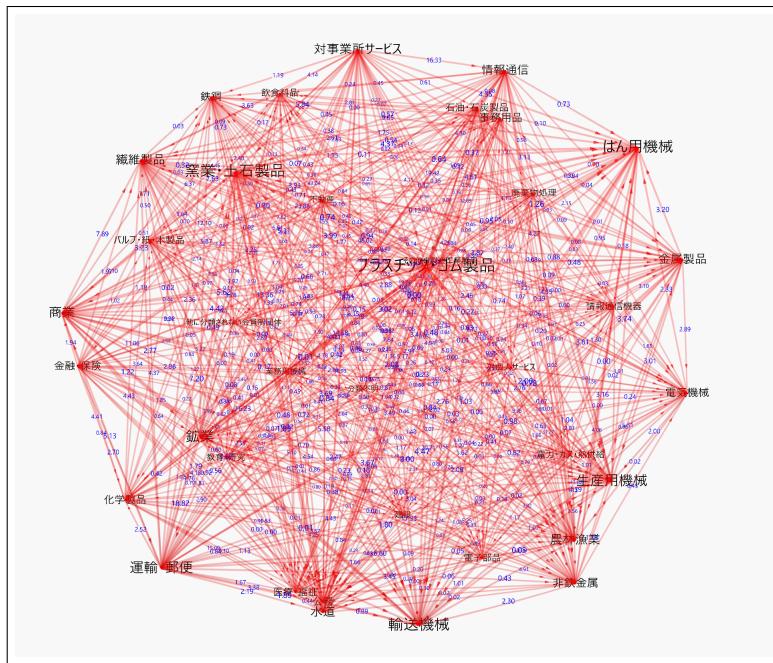


図 5.2: 出力された 3D グラフ

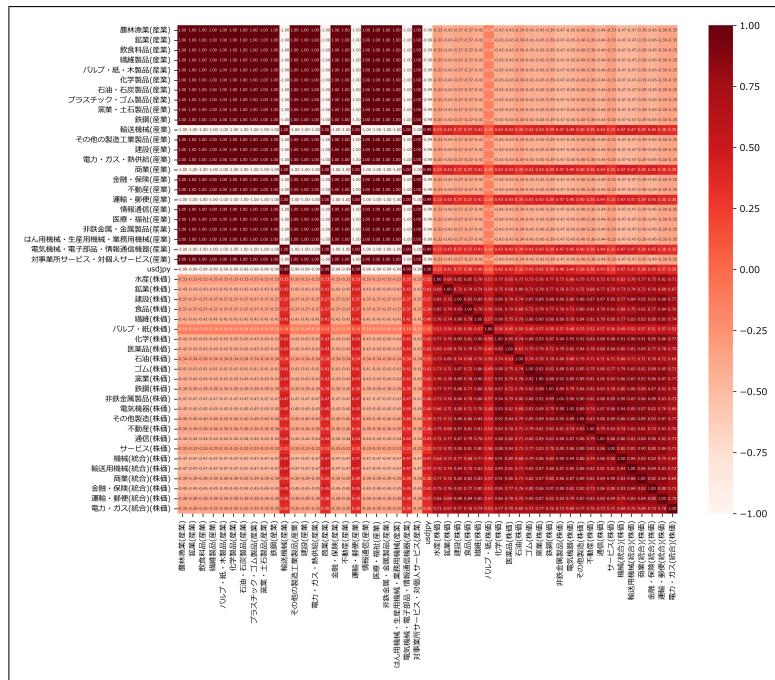


図 5.3: 出力されたヒートマップ

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

戸田真聰



## 参考文献

- [1] 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”,
- [2] 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～”,
- [3] 総務相, “平成 27 年(2015 年) 産業連関表 -総合解説編-”, 2020 年 1 月
- [4] 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
- [5] 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ーキー性分析”, 經濟學研究. 74 (2), pp.121-145, 2007-10-30. 九州大学経済学会
- [6] 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
- [7] 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/>
- [8] 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/usdjp-nikkei/>
- [9] 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
- [10] 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
- [11] 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>.
- [12] 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-”,
- [13] 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
- [14] 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