

卒業論文

金融経済要因の波及効果を考慮した 投資ストラテジー構築による 自動売買への適用

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: 2022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	3
第2章 産業連関分析	4
§ 2.1 データセットについて	4
§ 2.2 分析の流れ	9
§ 2.3 応用例	17
第3章 三角化	19
§ 3.1 三角化の意味	19
§ 3.2 整数計画問題	22
§ 3.3 上三角行列からのネットワーク構造の描画	25
第4章 提案手法	29
§ 4.1 産業連関表による為替変動時の各産業への影響と株価との相関	29
§ 4.2 3D グラフによるサプライチェーン構造の可視化	31
§ 4.3 提案手法のアルゴリズム	32
第5章 数値実験並びに考察	37
§ 5.1 数値実験の概要	37
§ 5.2 実験結果と考察	40
第6章 おわりに	45
謝辞	46
参考文献	47

図一覧

2.1	産業連関表の構造 (引用 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 より)	5
2.2	取引基本表	9
2.3	投入係数表	9
2.4	経済波及のイメージ (宮崎県総合政策部統計調査課 あなたにもできる産業 連関分析～簡易分析ファイルによる事例分析～から引用	10
4.1	輸出・輸入物価指数の契約通貨別構成比 (2023/12 月時点)	30
4.2	為替の影響の概念図 (円安時)	30
4.3	データ取得の流れ	33
4.4	提案手法の流れ	33
5.1	インジケータ最適化の様子	38
5.2	市場の動きと因果性及び相関	38
5.3	FX のみの所持金推移	41
5.4	FX と他市場のみの所持金推移	41
5.5	提案手法の所持金推移	41

表一覧

2.1	取引基本表(ひな型1)(島根間 経済波及効果推計の考え方 ～均衡産出高モデルの詳細～から引用	11
2.2	取引基本表(ひな型2)(島根間 経済波及効果推計の考え方 ～均衡産出高モデルの詳細～から引用	13
4.1	産業関連データと株価データの統合表	31
5.1	各取引手法の評価指標	42
5.2	FX のみの7日目の取引の検定	43
5.3	FX と他市場の2日目の取引の検定	43
5.4	FX と他市場の7日目の取引の検定	43

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

1996年の外国為替証拠金取引（Foreign Exchanger: FX）の完全自由化によりFXが誕生してから、年々金融市場の規模は拡大している。通信情報技術の発達及び金融工学の進歩は、取引単位の小口化と取引手数料の低下により金融市場への参加者を増やし、取引の簡易化と高速化により金融市場全体の流動性を高めた。この2点は本来の資産クラスを超えた取引も容易にした。このことは外国為替市場においてもさらなる流動性と市場への参加者をもたらし、元々巨大であった外国為替市場はより一層巨大な市場へと変貌した [1]。

通信情報技術の発達がもたらしたのは外国為替市場の規模拡大だけでなくトレーダーにも変化をもたらし、コンピュータが誕生する以前や、今ほど性能がない時代はトレーダーの経験や勘といった自身の判断で取引を行う裁量トレードといった取引手法が主であった。コンピュータが誕生した当初は単純なシステムトレードを行うだけであったが、コンピュータの性能向上によりそれらを駆使することで自動的にルールに従いトレードを行うといったことも行われるようになった [2]。また昨今では人口知能を導入することで価格の予測、戦略を獲得するという研究もおこなわれている [3]。

市場の予測を身近で行う例として投資があげられる。従来の投資の判断基準として用いられているのが金融市場の要因のみによって得られた分析結果であり、そこで用いられる分析は、過去の市場の動きから指標を算出して未来の市場の動向を予測するものである。

予測に用いられる指標は、直近の市場のデータから一定の値を導出し、その値をもとに今後の市場の値動きを予測することを目的としている。また、指標を単独でもちいて予測を行うことももちろんできるが、それらを複数組み合わせることでより正確な予測を行うことも進められている。また投資を行う上で、このような金融市場のメカニズムを利用して判断することが一般的である。従来の投資の判断基準として用いられているのが金融市場の要因のみによって得られた分析結果である。

市場内の要因を分析するだけでなく他市場からの影響と市場の変動との関連を分析する研究も出てきているように様々な手法を用いて市場の予測を行おうとする研究が行われている。各企業が出している四季報や政治情勢などの市場外的要因も考慮して予測を行う研究もある。市場の変動要因は何であるかについて検証することで市場の変動要因間の相互関係を明らかにするといったような研究も行われている [4]。

実際にFXの歴史を振り返ってみると1985年のプラザ合意以降に発生した急激な円高進行の局面では、ほぼ並行して原油価格の大幅な低下が進行していた。これらは原油価格低下の影響による好ましくない円高という側面を持つことが知られている [5]。

§ 1.2 本研究の目的

従来の投資の判断基準として用いられているのが金融市場の要因によって得られた分析結果である。そこで用いられる分析は、過去の市場の動きから指標を算出して未来の市場の動向を予測するようなものであり [6]、現在の市場の動きに合わないことがある。これらのように市場から得られる情報をもとに価格の変動や動きのサイクルを分析して将来の市場を分析する手法をテクニカル分析といい、各国が発表する経済指標や経済ニュースや、経済に影響を与えうる要人の発言などを分析して将来の市場を予測することをファンダメンタルズ分析という [7]。このように市場の規模が拡大するに伴い分析手法にも様々なものが誕生した [8]。その中には為替市場が他の市場に与える影響を分析する研究や、他の市場が為替市場にどのような影響を与えるかを調べている研究は存在するものの、為替市場においてそれらの情報を考慮して売買をする研究が少ないように見受けられる。

そのため本研究では、市場に対しての分析を行うとともに、他市場が為替市場に与える影響を取引の際に考慮することで市場内の要因から得られる分析結果のみならず、そこからでは予測できないような変動にも対応ができるような手法を提案する。またこれまでの研究では市場分析をする際に用いられる時間足と呼ばれる一定期間における市場における値動きを表したデータが一つに固定されていた。市場には時間帯における値動きに一定の特徴が存在するためプログラムで自動で使用する時間足データを選択し各時間帯に適したデータを使用する手法を組み込む。

この目的を達成するために、市場を分析するとともに、他市場が為替市場に与える影響を調査し、自動売買するにあたりその影響も考慮するために必要な仕組みを考える。本研究では、時系列解析における代表的なモデルであるベクトル自己回帰モデル (Vector Autoregressive Model: VAR) において、複数間の時系列間の因果関係を同定するグレンジャー因果性検定を用いた為替の自動売買のための分析手法の提案を行う。

まず、為替の取引プラットフォームからリアルタイムの高頻度データを取得し、そのデータを蓄積することで分析に使うヒストリカルデータを作成する。その後、作成された各ヒストリカルデータにおいて分析に用いるインジケータの評価値が最も高くなるようなパラメータを抽出し、各ヒストリカルデータによって求められた評価値を比較することで最良のヒストリカルデータを使用して市場に対する売り買いの判断を行う。他市場に対しても同様の分析をすることでその市場に対する売り買いの判断を行う。並行して他市場から為替市場間をグレンジャー因果性検定することで取引の際に使用する他市場のデータを選択し実際に取引をする際に活用することで市場内の要因と市場外の影響を考慮した市場予測システムを作成する。

提案手法によって構築されたシステムの有効性を検証する必要がある。そのために本研究では提案手法を基にした自動売買システムを構築する他にも自動売買システムを作成する。提案手法以外の自動売買システムでは本研究における提案手法を組み込まずシステムを構築する。提案手法により自動売買を行うシステムと同期間動かして最終的な取引結果を比較、さらに有効か検証することで実際に提案手法が有意なものであるかを示す。本研究では作成した自動売買システムをもちいて、実際にデモ口座を使ったリアルタイム取引を行う。

§ 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の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

§ 2.1 データセットについて

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第1図でみると、表頭には、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、表側には、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（すなわち、第1図の右及び下の突出した部分）を「外生部門」（exogenous sector）というのに対し、中間需要部門及び中間投入部門（同図中央の方形部分）を「内生部門」（endogenous sector）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。なお、産業連関表のサイズ（部門数）は、例えば、平成27年表では、行509×列391部門や統合小分類187部門というように、内生部門の行及び列の部門数によって表す。

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。

産業連関表の作成目的

産業連関表（取引基本表）は、約行 500 × 列 400 の部門について、行方向では中間需要を含めたマクロ需給バランス表、列方向では中間投入を含めた生産技術的マクロ経営（収支）バランス表となっている。また、内生部門（中間投入・中間需要）をみれば狭義の生産技術構造あるいは経済循環を、最終需要部門や粗付加価値部門をみれば部門別所得・支出勘定の情報等を得ることができる。それに加えて、付帯表等を通し、雇用表、固定資本マトリックス、物量表等の統計も提供するなど、一つの統計表でこれだけ多くのマクロ数量情報を供給しうるものは他になく、まさに「経済構造（経済循環）に関する情報の宝庫」と称される所以ともなっている。これら極めて膨大な統計値については、各種一次統計を収集、整理、加工等の後推計されることとなるが、実施主体や、対象（企業・事業所）、調査方法、目的、調査時期等性格が異なる各種統計の相互の整合性をとりつつ推計が行われる。言い換えれば、各種一次統計が産業連関表としてまとめ上げられた時点で、これらが同じ性格を有することとなり、お互いに整合性の取れたものとなる訳であり、この意味で、産業連関表は「各種一次統計の規準化」という機能を有しているとも言えよう。この結果、一次統計段階では難しい部門（商品、産業）間の各種比較が、産業連関表を利用することで可能となる。なお、産業連関表の作成は、一定のルールに基づく産業連関表の部門分類に従って国民経済を一つの統計表にまとめ上げるという性格を有することから、その作成を通じ一次統計の不備・不足する部分が明らかにされ、当該部分を含めた統計の整備・改善が進められることが期待される。このような意味で、二次統計である産業連関表が、その作成を通じ、我が国統計体系の整備に関するフィードバック機能を有してきたとも言える。実世界の各種産業は、互いに各産業との取引関係を有しながら生産活動を営むという、複雑な相互依存関係を通じつながっている。すなわち、ある部門に生まれた経済活動への刺激は、直接・間接、更に間接の間接といったように、他の部門にも影響を及ぼしている。こうした波及効果（究極的な影響）がどの程度の大きさになるかを数量的に計測してくれるのが、経済の循環を一つの表としてまとめ上げた産業連関表であり、この種の分析を通常「産業連関分析」と称している。このように、経済波及効果等の計量的測定を可能とすることも、産業連関表の持つ大きな特徴である。

2 産業連関表の利活用産業連関表は、多種多様な統計資料を用いて様々な産業部門を網羅する形で作成されており、取引額の数値をそのまま読み取ることによって、対象年次の産業構造や産業部門間の相互関係などの経済構造を総合的に把握することができるほか、取引額から求められる各種係数を用いて経済波及効果等の分析ができるなど、経済政策等における重要な基礎資料として用いられている。また、内閣府が作成する「国民経済計算」（統計法（平成 19 年法律第 53 号）第 2 条第 4 項第 2 号に規定する「基幹統計」）の基準改定時における不可欠な資料としても利用されている。産業連関表は、このような利活用の重要性を踏まえ、国民経済計算と同様、「基幹統計」として指定されている。

3 産業連関表の作成体制・作成周期我が国の行政機関における産業連関表の歴史は、昭和 26 年（1951 年）を対象とした表が複数の機関において、個別に作成されたことを始ま

りとするが、昭和 30 年（1955 年）を対象とした表以降は、関係府省庁の共同事業により、政府として統一的な産業連関表を作成している。現在は、総務省、内閣府、金融庁、財務省、文部科学省、厚生労働省、農林水産省、経済産業省、国土交通省及び環境省の 10 府省庁による共同事業として作成している。そして、関係府省庁の共同事業により初めて作成した昭和 30 年（1955 年）産業連関表以降、西暦の末尾が 0 又は 5 の年を対象に作成することを原則としてきたが、前々回作成した産業連関表は、重要な基礎資料となる経済センサス - 活動調査が平成 23 年（2011 年）を対象年次として実施されたことを受け、平成 23 年（2011 年）を対象とする表として作成した。今回は、同調査が令和 2 年（2020 年）を対象年次として実施されたため、原則どおり、令和 2 年（2020 年）を対象とする表として作成した。

産業連関表は、作成対象年次における我が国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しており、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（マトリックス）の形で一覧表にとりまとめたものです。

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します。購入した産業部門は、それらを原材料等として、また、別の財・サービスを生産します。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す。

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ういう形で生産が波及していくのかを計算することができます。

現在、わが国では、10 府省庁の共同作業による産業連関表（全国を対象としていることから「全国表」ともいう）を 5 年ごとに作成しているほか、地域産業連関表（日本を 9 つの地域に分割した各地域を対象に、経済産業省が 5 年ごとに作成）、都道府県・市産業連関表（都道府県・市を対象に、都道府県・市がおおむね 5 年ごとに作成）、延長産業連関表（全国表をベンチマークとして直近の産業構造を推計したもので、経済産業省が毎年作成）、国際産業連関表（国際間取引を詳細に記述したもので、経済産業省やアジア経済研究所が作成）、各種分析用産業連関表（分析目的に応じて各機関が作成）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、各界、各層に幅広く利用されています。

産業連関表は、1936 年アメリカの経済学者 W.W. レオンチェフ博士によって考案され、産業連関分析による経済予測等について、精度の高さと有用性が認められたことから、広く世界で使われるようになりました。彼は、その功績により 1973 年にノーベル経済学賞を受賞しました。

わが国における産業連関表は、経済審議庁（現内閣府）と通商産業省（現経済産業省）がそれぞれ独自に試算表として作成した、昭和 26 年を対象年次とするものが最初となります。

その後、関係府省において統一的な産業連関表を作成することが望ましいとする統計審議会の答申が行われたことを受けて、昭和 30 年表からは、行政管理庁（現総務省）、経済企画庁（現内閣府）、農林省（現農林水産省）、通商産業省（現経済産業省）及び建設省（現国土交通省）の 5 省庁と集計・製表を担当する総理府統計局（現総務省統計局）を加え

た6省庁により、本格的に共同事業体制による作成作業が開始されました。

それ以降、参加府省庁は順次拡大し、現在は10府省庁による共同作業によって産業連関表が作成されています。

産業連関表では、タテ方向の計数の並びを「列」といいます。各列では、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、産業連関表では、これを「投入」（input）といいます。一方、ヨコ方向の計数の並びを「行」といいます。各行では、その部門で生産された財・サービスの販売先の内訳（販路構成）が示されており、産業連関表では、これを「産出」（output）といいます。このため、産業連関表は、「投入産出表」（Input-Output Tables、略してI-O表）とも呼ばれています。

「産業連関表」として作成される統計表には、様々なものがありますが、その中核となるのが「取引基本表」であり、他の統計表は、取引基本表に基づいて作成されています。そのため、取引基本表を指して「産業連関表」と呼称することもあります（図1は、取引基本表の概念図を示したものとなります。）。そこで、ここでは、取引基本表と主要係数表である投入係数表及び逆行列係数表の関係について、具体的な数値例で説明します。

取引基本表

「取引基本表」は、産業相互間や産業と最終需要（家計など）との間で取引された財・サービスの金額を行列形式で表示したものです。例えば、表1の場合、A産業をタテ（列）に見ると、原材料等の中間投入としてA産業から30億円、B産業から60億円購入し、210億円の粗付加価値が加わることで300億円の生産が行われたことを示しています。一方、A産業をヨコ（行）に見ると、生産額300億円のうち、中間需要としてA産業に30億円、B産業に150億円販売（産出）され、残る120億円が最終需要として販売されたことを示しています。なお、取引基本表は、各部門とも、タテの合計（投入額合計）とヨコの合計（産出額合計）が一致するように作成しています。表1では、A産業については300億円、B産業については500億円で、タテ・ヨコともに一致していることがわかります。

投入係数表

「投入係数」とは、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部門の生産額で除して得た係数のことをいいます。例えば、表1のA産業について投入係数を求めると、各投入額をA産業の生産額300億円で除したものとなり、表2のとおり、A産業が0.1、B産業が0.2、粗付加価値が0.7となります。

つまり、投入係数とは、ある産業において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、これを使用することにより、取引基本表では金額で表されている産業間の取引関係を比率として見る事が可能になります。そして、この投入係数を列部門別に一覧表にしたものが「投入係数表」であり、表1から算出される投入係数表は、表2のようなものとなります。

逆行列係数表

「逆行列係数」とは、ある部門に対して新たな最終需要（以下「新規需要」といいます。）が1単位発生した場合に、当該部門の生産のために必要とされる（中間投入される）財・サービスの需要を通して、各部門の生産がどれだけ発生するか、つまり、直接・間接の生

(単位:億円)					
		中間需要		最終需要	生産額
		A産業	B産業		
中間投入	A産業	30	150	120	300
	B産業	60	250	190	500
	粗付加価値	210	100		
生産額		300	500		

図 2.2: 取引基本表

	A産業	B産業
A産業	0.1 $\left[= \frac{30}{300} \right]$	0.3 $\left[= \frac{150}{500} \right]$
B産業	0.2 $\left[= \frac{60}{300} \right]$	0.5 $\left[= \frac{250}{500} \right]$
粗付加価値	0.7 $\left[= \frac{210}{300} \right]$	0.2 $\left[= \frac{100}{500} \right]$
計	1.0 $\left[= \frac{300}{300} \right]$	1.0 $\left[= \frac{500}{500} \right]$

図 2.3: 投入係数表

産波及の大きさを示す係数であり、その算出方法を踏まえ、数学上の用語を用いて、このように呼称されています。

例えば、図 2 のとおり、A 産業で生産する財・サービスに新規需要が 1 単位発生した場合、A 産業の生産そのものを 1 単位増加させる必要があるとは言ってもありませんが（直接効果）、そのためには A 産業における生産活動で用いられる原材料の投入を増加させる必要があります、A 産業には 0.1、B 産業には 0.2 の生産増が発生します（間接効果（第 1 次））。そして、この A 産業 0.1 及び B 産業 0.2 の生産増のために用いられる原材料について、更なる生産の増加が必要となり（間接効果（第 2 次））、このような投入係数を介した波及が続いていくことになります。そして、この究極的な大きさの総和が逆行列係数に相当し、これを産業別に一覧表にしたものが「逆行列係数表」（表 3）となります。

このように、逆行列係数表は、特定部門の生産を 1 単位行うために、直接・間接に必要なとされる各部門の生産増加の水準が、最終的にどのくらいになるかを算出した表であることから、この表の列和は、当該部門に新規需要が 1 単位発生したときの産業全体への波及効果の合計に相当します。表 3 の例でいえば、A 産業に新規需要が 1 単位発生した場合、産業全体で 1.795 の波及効果を生じさせることを表していることになります。

§ 2.2 分析の流れ

産業連関表を使った分析

産業連関表を見ることによって、「経済構造」がわかることについては前章で説明しましたが、産業連関表はもっと他のことにも利用できます。前述の自動車産業のように、ある産業に需要が発生すると、それを満たすためにいろいろな産業に生産が波及していきますが、産業連関表には、各産業の生産活動における費用構成や販路構成が示されていますので、いわゆる「経済波及効果」の計算をすることができます。しかしながら、経済波及効果の大きさを計算するには、金額表示された統計表のままでではできないので、産業連関表を加工して表をいくつか作成する必要があります。それが、「投入係数表」や「逆行列係数表」などといった係数表です。産業連関表を加工してできた「投入係数表」や「逆行列係数表」などを利用して、経済波及効果などを測定することを、「産業連関分析」といいます。

産業連関表分析は、次の 5 つの表を使って行います。1. 産業連関表 2. 投入係数表 3. 逆行列係数表 4. 雇用表（付帯表） 5. 就業（雇用）係数表 1 から 3 の表は、1 が基礎となって

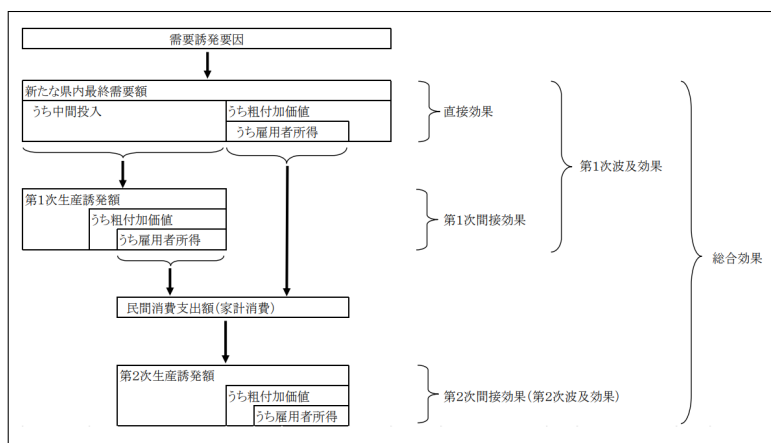


図 2.4: 経済波及のイメージ（宮崎県総合政策部統計調査課 あなたにもできる産業連関分析～簡易分析ファイルによる事例分析～から引用）

2が導かれ、2をもとに3が計算されます。1が経済の「かたち」（構造）を表し、2と3が経済の「はたらき」（機能）を分析するのに利用されます。4の雇用表は、産業連関表の各部門の生産活動に投入された従業者（就業者）数を示した表で、この表をもとに5が計算され、雇用への波及分析に使われます。

（1）経済波及効果とは経済波及とは、ある産業に対して生じた最終需要がその産業の生産を誘発するとともに、それにより次々と各産業の生産をも誘発していくことをいい、その生産誘発額は直接効果、第1次間接効果、第2次間接効果の3段階に分けて計算を行います。1. 直接効果消費や投資などの最終需要により生じる最初の生産増加額。2. 第1次間接効果新たな生産（直接効果）により生じた原材料等の投入によって県内各産業部門で誘発された生産額。直接効果と第1次間接効果をあわせて第1次波及効果といいます。3. 第2次間接効果第1次波及効果（直接効果及び第1次間接効果）に伴って発生した雇用者所得が新たな消費需要（民間消費支出）にまわり、それにより誘発された生産額。第2次間接効果を第2次波及効果ともいいます。4. 総合効果第1次波及効果と第2次間接効果の合計額。

第2次間接効果以降も、この効果は、雇用者所得 → 消費増 → 生産誘発 → 雇用者所得のサイクルで第3次、第4次と計算がゼロに収束するまで繰り返されますが、一般的には第2次間接効果までを分析対象としています。

需給均衡式と投入係数

一般に経済波及効果というと、産業連関表における均衡産出高モデルのことを言います。モデル式で表しますと、取引基本表を2部門で表すと表1のようになります。このとき、需給と収支は次の均衡式で表せる。

需給均衡式（総需要と総供給の均衡）

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

表 2.1: 取引基本表 (ひな型 1) (島根間 経済波及効果推計の考え方 ～均衡産出高モデルの詳細～から引用)

	産業 1	産業 2	最終需要	県内生産額
産業 1	x_{11}	x_{12}	F_1	X_1
産業 2	x_{21}	x_{22}	F_2	X_2
粗付加価値	V_1	V_2		
県内生産額	X_1	X_2		

収支均衡式

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

「投入係数」とは、各産業が 1 単位の生産を行うために使用した原材料、燃料等の大きさを示したものである。これは、各産業における原材料、燃料等の投入額を、その産業の県内生産額で除したものであり、生産原単位に相当するものである。投入係数を産業別に計算して一覧表にしたものが、「投入係数表」である。ここで、産業 1 が産業 1 から投入した額 x_{11} を産業 1 の県内生産額 X_1 で除した値を a_{11} とすれば、 a_{11} は産業 1 の生産物を 1 単位生産するために必要な産業 1 からの投入額を表す。

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

同様に、 $a_{21} = x_{21}/X_1$ は産業 1 がその生産物を 1 単位生産するために産業 2 から投入した原材料等の額を表している。中間投入と同様に、各部門の発生付加価値 V_1 をその県内生産額で除して $v_1 = V_1/X_1$ を定義できる。この場合、付加価値 V_1 が、産業 1 の労働や資本など本源的生産要素の投入を意味するから、 v_1 はそれら生産要素の投入原単位を示していると考えることができる。以上の手続きを産業 2 (表 1 の第 2 列) についても同様に行うと、表 2 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、各産業においてそれぞれ 1 単位の生産を行うために必要な原材料等の大きさを示したものであり、いわば生産の原単位表とも言うべきものである。各産業で付加価値部分まで含む投入係数の和は、定義的に 1.0 となる。

投入係数を用いた需給均衡式

投入係数を用いて需給均衡式を表現すると、投入産出構造が明確になり、見通しがよくなる。

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

2 式に 1 式を代入すると、

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

これを行列表記すると、

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

ここで

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

とおくと3は、

$$AX + F = X \quad (2.6)$$

と表せる。Aを投入係数行列という。3式（または4式）にみられるとおり、最終需要と県内生産額との間には、一定の関

係が存在しており、その関係を規定しているのが「投入係数」ということになる。最終需要の増分 ΔF とそれに対応する生産額の増分 ΔX を考えると需給均衡式は、

$$A(X + \Delta X) + (F + \Delta F) = X + \Delta X \quad (2.7)$$

となる。増分だけを見ると元の需給均衡式と同じであるから、需要の増分に対する生産の増分は元の3式（または4式）の需給均衡式で与えられる。3式の連立方程式の最終需要 F_1 及び F_2 に具体的な数字を与えれば、この連立方程式を解くことによって、産業1及び産業2の県内生産額の水準を計算することができる。このような方法を均衡産出高モデルという。これは次のようにも理解することができる。ある産業部門に対する需要の増加は、その産業部門が生産を行うに当たって原材料、燃料等を各産業から投入する必要があるため、その産業部門だけでなく他産業にも影響を及ぼし、それがまた自部門に対する需要となって跳ね返ってくるという生産波及効果をもたらす。3式は、このような生産波及効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、この考え方は、次に述べるような投入係数の安定性という前提が置かれていることを忘れてはならない。投入係数が常に変動しているとすれば、最終需要と県内生産額との間に一義的な関係を求めることができないからである。

投入係数は、端的に言えば、ある特定の年次において採用されていた生産技術を反映したものであり、生産技術が変化すれば、当然投入係数が変化することも考えられる。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、分析の対象となる期間においては大きな変化がないという前提が置かれている。また、各産業部門は、それぞれ生産規模の異なる企業、事業所群で構成されているが、同一商品を生産していたとしても、生産規模が異なれば、当然に生産技術水準の相違、規模の経済性などにより、投入係数が異なったものとなることも考えられる。しか

表 2.2: 取引基本表 (ひな型 2) (島根間 経済波及効果推計の考え方 ～均衡産出高モデルの詳細～から引用)

	産業 1	産業 2	最終需要	移輸入	県内生産額
産業 1	x_{11}	x_{12}	F_1	$-M_1$	X_1
産業 2	x_{21}	x_{22}	F_2	$-M_2$	X_2
粗付加価値	V_1	V_2			
県内生産額	X_1	X_2			

し、産業連関表は、作成の対象となった年次の経済構造を反映して作成されたものであり、産業連関分析においては、各産業部門に格付けされた企業、事業所の生産規模は、分析の対象となる期間においては大きな変化がないという前提が置かれている。

ある産業部門に一定の最終需要が発生した場合に、それが各産業に対して直接・間接にどのような影響を及ぼすかを分析するのが、産業連関分析の最も重要な分析の一つであり、需給均衡の連立方程式を解くことによって生産波及効果を計算できることは、前述したとおりである。今、仮に産業 1 及び産業 2 だけの県経済を考えた場合、2 で述べたように、最終需要が与えられれば、3 式のような連立方程式を解くことによって、産業 1 及び産業 2 の県内生産額の水準を計算することができる。しかし、このように 2 つの部門だけであれば計算も容易であるが、実際には部門の数は、統合大分類でも 39 (平成 17 年表では 36 部門) あり、その都度 3 式のような連立方程式を解くことは实际的ではなく、分析を行うことが事実上不可能になる。連立方程式の解は逆行列を用いて表されるので、あらかじめ「逆行列係数表」を作成しておけば、分析を行う上で便利である。また、逆行列係数表は、もし、ある産業部門に対する最終需要が 1 単位生じた場合、各産業部門に対してどのような生産波及が生じ、産業部門別の県内生産額が最終的にどれだけになるかを表す。

逆行列係数表について移輸入の扱いに依じていくつかの型があり、本県は (1) 競争輸入型 $(I - A)^{-1}$ 型と (2) 競争輸入型 $[I - (I - M^A)A]^{-1}$ 型の 2 つの型を公表している。

移輸入を明示した取引基本表のひな型は表 3 のように表現することができる。表 3 をよこみにみると中間需要 (x_{ij})、最終需要 (F_i) とともに移輸入分を含んだ供給となっているので、移輸入分をマイナス表示することにより、たてとよこのバランスをとっている。

投入係数に移輸入分が含まれるということは、最終需要によってもたらされる波及効果のすべてが、県内生産の誘発という形で現れるものではなく、その一部は移輸入を誘発するということを意味する。逆にいえば県内生産誘発を正確に求めるためには、移輸入誘発分を控除しておかなければならないため、移輸入品の投入をおり込んだ逆行列を作成する必要がある。

(2) 競争輸入型 $[I - (I - M^A)A]^{-1}$ 型この逆行列は、移輸入品の投入比率が中間需要、最終需要を問わずすべての部門について同一であり、生産波及効果が移輸入割合に応じて県外に流出するという前提で求められるものである。一般的にこの型の方が、前者よりも広く利用されている。基本モデル (ひな型 2) の需給バランス式は上記 5 と同様に次のように表される。

$$\begin{cases} a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + F_1 - M_1 = X_1 \\ a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + F_2 - M_2 = X_2 \end{cases} \quad (2.8)$$

これを行列表示すると、

$$AX + F - M = X \quad (2.9)$$

となる

競争輸入型 $[I - (I - M^A)A]^{-1}$ 型では県内最終需要と移輸出で波及効果が異なるので、最終需要 F を県内最終需要 Y と移輸出 E とに分離して、

$$F = Y + E \quad (2.10)$$

と表す。これを前記式に代入し、需給バランス式を次のように表す。

$$AX + Y + E - M = X \quad (2.11)$$

移輸出については、単なる通過取引は計上しないこととして表が作られている。従って、移輸出には、移輸入品は含まれないことと同一の移輸入品は同一の投入比率であることを仮定すると、移輸入係数 m_1 及び m_2 は次のように定義される。

$$\begin{cases} m_1 = M_1 / (a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + Y_1) \\ m_2 = M_2 / (a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + Y_2) \end{cases} \quad (2.12)$$

即ち、 m_1 は商品 1 の県内需要に占める移輸入品の割合（移輸入率）を表し、 $1 - m_1$ が商品 1 の自給率を表す。 m_2 についても同様である。また、移輸入係数の定義式を変形すると、以下のとおりとなる。

$$\begin{cases} M_1 = m_1(a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + Y_1) \\ M_2 = m_2(a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + Y_2) \end{cases} \quad (2.13)$$

移輸入係数 m_i を対角要素とし、非対角要素を 0 とする対角行列を $\hat{M}$ とすれば、次のように表せる。

$$\hat{M} = \begin{pmatrix} m_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & m_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & m_n \end{pmatrix}$$

これを用いて移輸入Mを表すと

$$M = \hat{M}(AX + Y) \quad (2.14)$$

これを8式に代入し変形すると、

$$\begin{aligned} AX + Y + E - \hat{M}(AX + Y) &= X \\ AX + Y + E - \hat{M}AX - \hat{M}Y &= X \\ X - AX + \hat{M}AX &= Y - \hat{M}Y + E \\ (I - A + \hat{M}A)X &= (I - \hat{M})Y + E \\ \left[I - (I - \hat{M})A \right] X &= (I - \hat{M})Y + E \\ \therefore X &= \left[I - (I - \hat{M})A \right]^{-1} \left[(I - \hat{M})Y + E \right] \end{aligned} \quad (2.15)$$

となり、県内最終需要Yと移輸出Eを与えることにより、県内生産額Xを求めることができる。

ここで、 $(I - \hat{M})A$ は、移輸入品の投入比率が中間需要、最終需要を問わずすべての部門について同一であると仮定した場合の県産品の投入係数を示し、また $(I - \hat{M})Y$ は、同様の仮定の下で県産品に対する県内最終需要を表している。言い換えれば、品目ごと（行別）の移輸入比率（移輸入係数）がすべての産出部門に同一と仮定した時の「競争輸入型」モデルである。

9式を次のように展開したとき、

$$X = \left[I - (I - \hat{M})A \right]^{-1} (I - \hat{M})Y + \left[I - (I - \hat{M})A \right]^{-1} E$$

第1項は県内最終需要による効果、第2項は移輸出による効果である。最終需要Yとして、民間最終需要、政府最終需要等々、最終需要を各項目別に与えたとき、それに対応した生産額を求めることができる。最終需要として民間最終需要Y_Cを与えれば、

$$X_C = \left[I - (I - \hat{M})A \right]^{-1} (I - \hat{M})Y_C$$

最終需要として輸出Eを与えれば、

$$X_E = \left[I - (I - \hat{M})A \right]^{-1} E$$

である。

分析上の注意点

投入係数や逆行列係数などを用いることにより行う産業連関分析は、産業連関表の利活用上の大きな柱である。しかし、その際には、次のような前提があることにも留意しなければならない。1 投入係数の安定性産業連関分析は、本章第1節3の説明のとおり、投入係数の安定性を前提として行われるものである。しかし、実際には、分析の対象とする年次が作表の対象となった年次から離れるに従って投入係数が変化している可能性が高くなることに留意する必要がある。また、作表年次の生産規模に対して極端に異なる規模の生産、需要等が生じた場合には、規模の経済性効果により投入構造が変化している可能性が考えられることから、分析結果への慎重な解釈、対応等が望まれる。なお、「投入係数の安定性」とは、過去の表との比較の観点で述べているものではなく、「過去の年次の産業連関表と投入構造が同様であること」という意味ではない。産業連関表の作成は、あくまで作成年次のデータを用いて行うものであり、推計の結果として、過去に作成した産業連関表から投入構造に変化が生じていても、それ自体は問題ではない。2 その他の留意点前記1で記載した投入係数の安定性のほか、産業連関分析を行うに当たっては、以下のような留意点がある。(1) 発生した最終需要の源泉は問わない波及分析は、与件データとして需要額を与えることから始まるが、その需要額が何によってもたらされたかは考慮しない。家計を例にとると、一部の支出が増加した場合は、所得に変化がなければ、他の支出が減少する。その減少は、いわばマイナスの経済波及効果をもたらしているといえる。もし、貯蓄を取り崩して消費を続けたとしても、貯蓄の減少は投資の減少を通じて、マイナスの経済波及効果をもたらす可能性がある。産業連関分析は、あくまで生産・分配・支出の循環の一部分を切り取った分析であり、その他の部分は、変化がないことが前提となっている。(2) 波及の中断等次に掲げるような場合には、波及の中断等により、短期的には、分析結果ほどの波及が生じないことがある。ア 需要が生じたとしても、部門ごとに当該需要に応えられるだけの生産能力が常にあるとは限らない。発生した需要が生産能力を超えている場合、実際には、波及の中断が生じる場合がある。イ 需要が生じて、過剰在庫を抱えている部門においては、過剰在庫の放出で対応することが考えられ、その場合には、期待する程の波及効果が生じない可能性がある。ウ 需要の増加による雇用者数の誘発についても、現状の人員の範囲で時間外勤務の増加で対応した場合、雇用増には結びつかない場合がある。(3) 仮設部門等による影響取引基本表の内生部門は、アクティビティ・ベースに基づき、部門分類を設定しているが、その中には独立したひとつの産業部門とは考えられないものの、取引基本表作成上の便宜から、「仮設部門」を設けている。これにより、その分だけ中間投入率が大きくなるため、波及効果もその分大きくなる。(4) 波及効果が達成される時期産業連関分析において、波及効果がいつの時点で達成されるかは明確にされない

ある産業に対して生じた最終需要はその産業の生産を誘発するとともに、他産業の生産も誘発し、次々と影響が広がっていきます。これを経済波及効果といいます。経済波及効果はよく水面に投げ入れた石によって広がる波紋に例えられます。これは投げ込まれた石（需要）によって、波（他産業への生産の誘発）が起こり、その波がだんだんと弱まりながら、広がっていく様子に似ているためです。経済波及効果は直接効果、第一次波及効果、第二次波及効果の3段階に分けて計算します。

直接効果とは最初の需要額のうち、どれだけ県内で調達されたかという額で、今回の場合は建設業に100億円となります。直接効果により生産が増加すると、その産業で必要とする財やサービスの生産が誘発されます。誘発された各産業における生産増加の総額が第

1次波及効果です。第2次波及効果は、直接効果と第1次波及効果で生まれた雇用者所得の増加によって、新たに誘発された消費の増加に伴う生産の増加額のことをいいます。

このように、経済波及効果は、単にいくら県内での需要が増加したかというものではなく、それに伴う原材料の生産や雇用者の消費から生み出される生産も含んでいます。この効果は第2次波及と同様、3次、4次という具合に、理論的には波及が続くことが考えられますが、波及が進むと波及額も小さくなり、在庫取り崩し等による中断も考えられることから、経済波及効果の測定は一般的に第2次波及効果程度で留め置くことが妥当とされます。

§ 2.3 応用例

産業連関表の利用

以上のように産業連関表は、これをそのまま読み取るだけでも、表の対象年次の産業構造や産業部門間の相互依存関係など国民経済の構造を相対的に把握・分析することができる。また、産業連関表では、タテとヨコの合計額が一致・バランスしているので、ある部門に変化が生じた場合はいったんバランスを崩すこととなるが、究極的には、他部門への波及を通じ新しいバランス状態を生むこととなる。このように、経済活動相互間の全体的な関連をあらかじめ念頭に置かなければ解決できない問題に対し効果的な分析方法を提供することにより、各種変化（例えば政策の変更等）による経済波及効果のシミュレーションや、相互に整合性が取れた将来の経済構造の全体像を推定するといった予測分析等にも幅広く応用できる。主な利用方法を挙げると、次のとおりである。〔経済構造の分析〕産業連関表には、各財・サービスの国内生産額、需要先別販売額（中間需要、消費、投資、輸出等）及び費用構成（中間投入、労働費用（雇用者所得）、減価償却費（資本減耗引当）等）が、産業部門ごとに詳細に掲載されている。これらの計数により、例えば産業別投入構造や雇用者所得比率、各最終需要項目の商品構成や商品別の輸入比率など、経済構造の特徴を読み取ることができる。〔経済の予測〕産業連関表から投入係数、逆行列係数などの各種係数が計算されるが、これらの係数により、投資や輸出の増加などの最終需要の変化が財・サービスの生産や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。これは、経済に関する各種計画や見通しの作成の際に広く用いられる方法である。〔経済政策の効果測定〕経済の予測と同様に、最終需要と財・サービスの生産水準との関係を利用し、特定の経済政策が各産業部門にどのような影響をもたらすかを分析することができる。財政支出や減税実施の波及効果の測定、公共投資の経済効果の測定などを行うことが可能である。〔他の経済統計の基準値〕我が国の産業連関表は、原則5年毎に様々な統計資料を用いて総合的に作成されており、その結果は各種の経済統計において基準値として利用されている。例えば、内閣府の「国民経済計算」の推計においては、原則5年毎の基準改定に当たり、産業連関表が重要な基礎統計として活用されている。また、産業連関表の部門別付加価値額や中間需要額を利用し、「第3次産業活動指数」（経済産業省）や「企業向けサービス価格指数」（日本銀行）などの作成のためのウェイトが計算されている。さらに、毎年作成されている産業連関表の延長産業連関表（経済産業省）も、原則5年毎の産業連関表をベースに、その後の経済構造の変化を加味し、推計されているものである。

県内でパソコン需要が増加した場合の経済波及効果

新型コロナウイルスの感染拡大が懸念される中、在宅勤務やオンライン会議などＩＣＴの活用が急速に進展しています。また、教育現場では、子どもの学びを止めない、教育格差を生じさせないためにＩＣＴを活用した教育の早期実現が求められています。そこで、今回は、県内の小・中学校の児童・生徒及び県立高等学校・県立中等教育学校の生徒等に一人一台のパソコンを配布した場合の経済波及効果を試算してみましょう。

今回の事例では、パソコン１台あたり６万円とし、県内の児童・生徒等（約２０万人）にパソコンを配布することによって、県内で情報通信機器の需要が１２０億円（６万円×２０万人＝１２０億円）増加したと仮定します。

結果表シートを見ると、生産誘発額の直接効果は１４.１億円、一次波及効果は３.９億円、二次波及効果は３.５億円となり、それらを合計した総合効果は２１.５億円となりました。総合効果を直接効果で割った効果倍率は１.５３倍です。生産誘発額の内数としての粗付加価値誘発額をみると、直接効果は８.８億円、一次波及効果は２.２億円、二次波及効果は２.３億円となり、それらを合計した総合効果は１３.３億円となりました。また、粗付加価値誘発額の内数としての雇用者所得誘発額をみると、直接効果は５.２億円、一次波及効果は１億円、二次波及効果は０.８億円となり、それらを合計した総合効果は６.９億円となりました。さらに、就業誘発者数は、直接効果は１８５人、一次波及効果は２６人、二次波及効果は２７人となり、それらを合計した総合効果は２３８人となりました。

キャンペーン実施に伴う来県者の観光消費による経済波及効果

群馬県には草津、伊香保などの温泉地をはじめとして、自然・食・歴史を巡り、季節に応じて様々なことが体験できる観光資源がたくさんあります。多くの観光客が来県すれば、宿泊費や交通費、お土産代などの県内需要の増加をもたらし、県経済の活性化につながります。そこで、今回は、観光客が増加した場合の経済波及効果を試算してみましょう。

今回は、あるキャンペーンを実施し、県内の宿泊施設に２００,０００人が宿泊したと仮定します。「観光客増加」ファイルを使用して推計しますが、今回のように観光客数しか分からない場合の推計のほかに、消費支出額からも分析が可能です。来場者へのアンケートなどで、どんなものに支出したのか支出項目や金額などが分かれば、さらに実態に即した経済波及効果を分析することができます。

結果表シートを見ると、生産誘発額の直接効果は５,８５９.４百万円、一次波及効果は１,８０５.２百万円、二次波及効果は１,２０１.９百万円となり、それらを合計した総合効果は８,８６６.４百万円となりました。総合効果を直接効果で割った効果倍率は１.５１倍です。生産誘発額の内数としての粗付加価値誘発額をみると、直接効果は３,０７６.１百万円、一次波及効果は９９５.８百万円、二次波及効果は７９４.２百万円となり、それらを合計した総合効果は４,８６６.２百万円となりました。

また、粗付加価値誘発額の内数としての雇用者所得誘発額をみると、直接効果は１,６０４.５百万円、一次波及効果は４８９.２百万円、二次波及効果は２７５.５百万円となり、それらを合計した総合効果は２,３６９.２百万円となりました。さらに、就業誘発者数は、直接効果は８７２人、一次波及効果は１５５人、二次波及効果は９２人となり、それらを合計した総合効果は１,１１９人となりました。このように、観光客の消費支出も県内経済に影響を与えています。このツールは、各種観光イベントを実施する際の効果予測、あるいは実施後に効果を検証する際に使用することができます。また、今回は観光消費推計シートを使用しましたが、入

力表シートには品目の例示もありますので、支出額が分かれば直接入力表シートから入力することも可能です

以上2つの事例を紹介しましたが、この経済波及効果の測定にあたって最も重要なことは、最終需要額の設定です。誰が、どのようなことに、どれだけ消費したかを正確に把握することが、結果に大きく反映されます。

イベント等の波及効果を測定する際には、予算や類似イベントの資料、その他関連する統計資料、参加者に対してのアンケート・ヒアリングといったデータ収集をすることで、より精度の高い波及効果分析の結果を得ることができます。

三角化

§ 3.1 三角化の意味

産業連関分析を提案したレオンチェフは、産業連関表から経済構造を分析するために三角化と呼ばれる手法を提案しました [4]。三角化とは、行列の各行各列を並び替えることによって上三角成分を最大化させる並び順を求めることを指します。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、すなわちハイアラーキー性 (hierarchical property) を見出すことが、産業連関表の三角化の目的である

産業連関表を並び替えることによりその国の経済を分析する方法は、古くから存在している。産業連関表の創始者であるレオンティエフ (: Leontief) は、投入産出表を三角化することは産業間の取引の内部構造を解明するのに役立つと指摘し、実際に米国と欧州の 17 か国の産業連関表を同じ産業分類の順に並び替えた表を相互に比較すると、連関構造が非常に類似していることを実証している [1]。

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ます。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ます。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ます

国家または地域経済の産業構造を理解することは、経済学における中心的な課題の 1 つです。産業連関表 (IOT) の三角測量は、経済の生産構造を理解するために使用できます。複数の産業連関表の時系列および地域間の比較は、国際貿易、経済成長、経済における産業間の関係に関する興味深く重要な問題に対処してきました。最適化問題を解くことによって得られるセクター順位間の順位相関係数は、生産構造間の類似性を定量化するために使用されてきました。

国家または地域経済の生産構造全体は、国家および地域経済のさまざまな部門に関する広範な数値データで構成される投入産出表 (IOT) を通じて表すことができます。経済の産業構造を理解することは経済学における中心的な課題の 1 つであるため、IOT にアーカイブされた情報を要約して視覚化する定量的な方法は不可欠です。

IOT の三角測量は、データの要約と分析を容易にするそのような方法の 1 つです。この論文では、経済の生産構造を調べ、時系列および地域間の比較を行うために、混合整数計画 (MIP) に基づいて IOT を三角測量する新しい方法を提案します。

元の形式の IOT における第 1 次、第 2 次、および第 3 次セクターは、伝統的に前述の順序で配置されています。十分に詳細なセクター分類の IOT には多くのゼロ要素があり、

ほとんどのセクターが限られた数のセクターからの製品入力が必要とするため、疎行列になります。したがって、製造度に基づいてセクターを並び替えることにより、IOT を三角形に分割することができます。つまり、上側の三角形部分のほとんどの要素がゼロであることを意味します。三角形の配置は、産業技術の専門知識に基づいて相対的な製造度が明確に定義されているセクターの場合、かなり簡単です。たとえば、自動車セクターの次に自動車部品セクターが三角形の表に表示されます。これは、自動車は部品よりも製造度が高いためです。ただし、一部のセクター間の相対的な製造度は、必ずしも明確に定義されているとは限りません。このような場合でも、たとえば最適化問題を解くことで、IOT を近似的に三角形に分割できます。このように三角形に分割された IOT 内のセクターの順序は、自動車セクターと自動車部品セクターの関係から類推して、製造度の降順として解釈できます。この論文では、最適化問題に基づく新しい三角形分割方法を提案します。レオンチェフ (1963、p. 151) は、IOT の三角測量の歴史を、1940 年代後半の米国空軍のプロジェクト スクープにおけるマーシャル K. ウッド、ジョージ D. ダンジグ、および彼らの同僚による研究にまで遡らせています。セクターを再配置する彼らの当初の動機は、線形方程式の連立を解くための計算負荷を軽減することでした。しかし、彼らはまた、三角形に分割された IOT が、それが表す経済の構造的特徴を明らかにすることも発見しました。さらに、三角測量の現在の主な用途は、経済の生産構造を分析するためのツールとして機能することです。これは、三角測量の最適化問題を解くことは、線形方程式の連立を解くよりもはるかにコンピューター集約的なタスクであるためです。Korte と Oberhofer (1970、第 6 節) がまとめたように、実用的な経済的意思決定に貢献する三角測量 IOT の主な用途には、経済の生産構造の研究、さまざまな経済を比較するための手段としての使用、経済に影響を与えるセクターの調査などがある。

産業連関表を並び替えて三角化を行う利点として、次のようなことがあげられている

(1) 取引関係を単純化できる 大規模な産業連関表を一度に分析することは難しいが、取引関係にだけ注目すると、その構造を相対的に単純化することができる。この大きな理由となっているものが、産業連関表として提供される行列それ自体におけるスパース性 (Sparsity, 行列の要素にゼロが多いこと) である。確かに産業連関表は表示される場合には大きな行列ではあるが、実際に提供されるデータは、どの産業とどの産業に取引があるかを示すデータだけであり、これを行列上に配置しなおして、表示形式を得ている。七たがって、もともとある産業と関連する産業は、全部の産業分類の中では、極めて少数であることが分かっており、この関係を直接利用することにより産業の間の関連性を単純化している。(2) 産業の上位部門と下位部門の区分 産業連関表を三角化することにより、最終需要に与える影響を産業ごとにその初期段階のもの、すなわち下位部門と、最終需要に近いもの、すなわち上位部門とに区別することができる。上位に存在する産業部門は、より基本的な産業であるとも言える。

公表されている産業連関表は、第 1 次産業から第 3 次産業に向かう順序に産業が並べられて、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いので、このままでは産業間の関連性が分からない。産業連関表の三角化とは、産業連関表の行および列に対して適当な並び替えを行って、部門の配列を変更し主対角線上の左下の要素の和を最大にすることを意味する。しかし部門の数が多くなると、並び替えのための組み合わせの数が極めて膨大となるので、何らかの数理的な手段が必要となる。その方法

の詳細は後述するが、この並び替えによりどの産業部門がより多くの他の産業部門に影響を及ぼすかを測定することができる。すなわち、産業連関表の配列を最終財産業、中間財産業、基礎素材産業の順序に並び替えることにより、産業連関表の主対角線上の下に取引を集中させる方法である。産業連関表を三角化することにより、産業間の取引構造を明らかにすることができると同時に、国際比較をすることにより類似性および独自性を見出すことができる。特に、国の経済がある発展段階に到達すると三角化された産業連関表は一定の形を持つことが指摘されている。産業連関表は財の技術構造の相互依存性を観測するのが目的であるので、技術係数である投入産出表を用いることが多い。しかし、投入産出表を用いた三角化では取引そのものの大きさ、すなわち国の経済におけるそれぞれの産業の重要性を考慮していないことになる。そのため、多くの分析では投入産出表と同時に取引額表も三角化を行い、これらの2つを相互比較することにより考察を行っている。

三角化の目的は、供給関係の強さに基づいて産業を並べ替え、階層的な順序を明らかにすることです。これにより、次のような構造が浮かび上がります：

上位の産業他の産業に対して供給を多く行う基幹産業。多くの場合、原材料産業や一次産業が該当します（例：農業、鉱業、鉄鋼業）。

中間の産業上位の産業から供給を受け、それを加工して下位の産業に供給する中間財産業（例：製造業、食品加工業）。

下位の産業最終需要（消費者や輸出）に近い位置にある産業（例：サービス業、小売業）。

この階層的な順序付けにより、産業間の依存関係が可視化され、どの産業が基幹のか、どの産業が最終需要に依存しているかが一目でわかるようになります。

分析結果が明確になる理由供給チェーンの視覚化

原材料産業から最終需要産業までの一連の流れが整理されるため、どの産業が経済のボトルネックになるかを特定可能。例：鉄鋼業が供給を停止すると、自動車産業や建設業が停滞する。基幹産業の発見

他産業への供給量が多い産業を特定することで、経済全体への影響が大きい基幹産業を明らかにできる。例：半導体産業が多くの製造業に供給を行うため、基幹産業と判断。産業構造の効率性の検証

三角化後の行列の形状を分析することで、ある産業が効率的に供給を行えているかを判断。例：上位に位置する産業が過剰に集中している場合、供給網が脆弱になる。政策立案への活用

三角化結果を基に、基幹産業や中間財産業への投資優先度を決める。例：中間財の供給不足が下位産業の成長を阻害している場合、中間財産業への投資を検討。具体例での説明例として、以下の簡易的な供給関係を考えます：

鉄鋼業 → 自動車産業 → 小売業 → 消費者この関係を三角化すると、次のような順序に再配置されます：

鉄鋼業（上位：他産業への供給が多い）自動車産業（中位：原材料を利用し加工する）小売業（下位：最終消費に近い）この結果から、以下のことがわかります：

鉄鋼業が基幹産業であり、停止すると流れ全体が止まる。自動車産業が中間財を通じて複数産業と関わる重要な中間産業である。

ADF 検定の流れ

1. 分析するデータの性質を考え帰無仮説、対立仮説のモデルの選択を行う。
 - データがトレンドを含まず、期待値が0である場合は、帰無仮説と対立仮説のモデルには定数項を含めない。
 - データがトレンドを含まないが、期待値が0でない場合は、対立仮説のモデルに定数項を含める。
 - データがトレンドを含む場合、帰無仮説のモデルには定数項を含め、対立仮説のモデルには定数項とトレンド項を含める。
2. 対立仮説の最小二乗回帰で推定する。
3. 検定統計量 τ_ρ や τ_t の値を計算する。
4. 各統計量を対応する DF 検定の棄却点と比較し、統計量の方が小さければ、単位根の帰無仮説を棄却する。
5. 帰無仮説が棄却されなければ、差分系列を用いて、もう一度単位根検定を行う。

§ 3.2 整数計画問題

産 i 業連関表の三角化の方法論は最初にチェネリーら (Chenery and Watanabe) により導入され、これ以降原初的な部門から最終的な部門にいたるまでの階層性、いわゆるハイレバーキー性を分析する手段として用いられている図 [4]。このうち、厳密な計算を回避した近似的な手法がコルチら (Korte and Oberhofer) により与えられている [7]—[91]。この方法の基本は、隣接する 2 つの部門を入れ換えることにより、産業連関表の下半分取引の大部分が集中するように変換する手順を用いることである。更に、このコルチらの手法を拡張したものとして福井により準最適な三角化の方法論がある [12]

産業連関表の三角性の概念は、Chenery と Watanabe (1958) によって初めて導入され、一次生産から最終生産までのセクターの階層構造の類似性を国間で比較するための尺度として広く使用されています。近似三角測量の計算に関して、Korte と Oberhofer (1970) は、隣接する 2 つの産業グループの交換から導かれる順列定理を提示しました。この論文では、彼らの順列定理を 3 つの産業グループ間の順列定理に拡張および修正し (セクション 2)、産業間取引表のセクターの準最適な順序を計算するアルゴリズムを提示します

Simpson and Tsukui (1965) や Fukui (1986) などのほとんどの研究では、IOT の三角形分割を、セクター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ます。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、解決が困難です (Karp 1972; Charon and Hudry 2007)。セクターが n 個ある場合、 $n!$ 個の実行可能なソリューションが提供されます。

n の値が非常に小さい場合、セクターの $n!$ 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ます。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と、問題が解決される可能性があります。

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、 $n = 50$ などの中程度のセクター数 ($n! \approx 3.0 \times 10^{64}$) の場合でも、その適用に

は問題があります。

三角測量問題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ます。Simpson と Tsukui (1965)、Korte と Oberhofer (1970)、Fukui (1986) は、リングシフト順列と呼ばれるセクター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ました。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りません。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ます。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ました。三角測量問題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ます (Grötschel ら 1984a、Laguna ら 1999、Mitchell と Borchers 2000、Chiarini ら 2004、Pintea ら 2009)。Mitchell と Borchers (2000) は、250 個のオブジェクトまたはセクターを持つ線形順序付け問題の正確な解が得られることを指摘しています。

三角測量問題は、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 (IP) 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 IP 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ます。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と言えます。しかし、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できます。本論文では、三角測量問題の IP 表現を利用して、複数の経済の生産構造を比較します。

n 個の産業セクターがあり、セクター間の相互依存関係を表す $n \times n$ 行列 $A = (A_{ij})$ を三角分割することが目標であるとしします。この行列についてはここでは詳しく説明せず、このセクションでは単に IOT と呼びます。次のセクションでは、この側面についてさらに詳しく説明します。

n 個のセクターを指す自然数の集合を $N = \{1, \dots, n\}$ と定義します。次に、 n 個のセクターの順列を $\pi = (\pi(1), \dots, \pi(n))$ で表し、セクターのすべての順列の集合を Π で表します。

任意の順列 $\pi \in \Pi$ が与えられた場合、 $A(\pi) = (A_{ij}(\pi))$ は、セクターが π に従って順列化された IOT を表します。これは次のように記述されます

$$A_{ij}(\pi) = A_{\pi(i)\pi(j)} \quad (i, j \in N) \quad (3.1)$$

三角測量問題は、組み合わせ最適化問題として定式化されます

$$\begin{aligned} & \text{maximize } l(A(\pi)) \\ & \text{subject to } \pi \in \Pi \end{aligned} \quad (3.2)$$

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します。

文献 (例えば、Fukui 1986) では、IOT がどの程度三角形に分割されているかを表すために、線形度と呼ばれる指標が使用されています。IOT が与えられた場合、順列 π の線形度は次のように定義されます。

$$\lambda(A(\pi)) = \frac{\sum_{i>j} A_{ij}(\pi)}{\sum_{i \neq j} A_{ij}(\pi)} = \frac{l(A(\pi))}{\sum_{i \neq j} A_{ij}} \quad (3.3)$$

分子は、(2) で記述される三角測量問題の目的関数と同じです。分母は、すべての非対角要素の合計です。三角測量問題の目的関数 $A(\pi)$ を最大化する順列 π は、分母が π に依存しないため、線形性の度合い $\lambda(A(\pi))$ も最大化することに注意してください。

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

$$X_{ij} = 1 \quad \{\pi^{-1}(i) \geq \pi^{-1}(j)\} \quad (i, j \in N) \quad (3.4)$$

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す。順列 π が与えられた場合、 $\pi(p)$ は p 番目の位置にあるセクターを表し、 $\pi^{-1}(s)$ はセクター s が配置されている位置を表します。ここで、「セクター s 」は元の順序で s 番目のセクターを指します。 $X_{ii} = 1$ はすべての $i \in N$ について、 $X_{ij} = 1$ は順列 π でセクター j がセクター i に先行する場合、 $X_{ij} = 1$ は、そうでない場合は $X_{ij} = 0$ であることに注意してください。言い換えると、 $X_{ij} = 1$ の場合、 A_{ij} は $A(\pi)$ の下三角部分または主対角線上にあります。したがって、次の等式が成り立ちます。

$$l(A(\pi)) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} X_{ij} - \sum_{i=1}^n A_{ii} \quad (3.5)$$

(2) で述べた三角測量問題は、次の IP として表現できることが知られている (deCani 1969; Grötschel et al. 1984a; Chiarini et al. 2004)

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} X_{ij} - \sum_{i=1}^n A_{ii} \\ & \text{subject to} \\ & \quad X_{ii} = 1 \quad (i \in N), \\ & \quad X_{ij} + X_{ji} = 1 \quad (i < j; i, j \in N), \\ & \quad 0 \leq X_{ij} + X_{jk} - X_{ik} \leq 1 \quad (i < j < k; i, j, k \in N), \\ & \quad X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i, j \in N). \end{aligned} \quad (3.6)$$

または、次の IP として表すこともできます。

$$\begin{aligned} & \text{maximize} \quad \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n ((A_{ij} - A_{ji})X_{ij} + A_{ji}) \\ & \text{subject to} \\ & \quad 0 \leq X_{ij} + X_{jk} - X_{ik} \leq 1 \quad (i < j < k; i, j, k \in N), \\ & \quad X_{ij} \in \{0, 1\} \quad (i < j; i, j \in N). \end{aligned} \quad (3.7)$$

最後の表現は、 $\{0, 1\}$ プログラムであり、 $\frac{n(n-1)}{2}$ バイナリ変数と $\frac{n(n-1)(n-2)}{3}$ 不等式制約を持ちます。

(7) 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ます。

$$\pi^{-1}(i) = \sum_{j=1}^n X_{ij} \quad (i \in N) \quad (3.8)$$

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

論文と同じように、1995-2000-2005 年日本産業連関表の 2005 年の投入係数行列に対して、(7) を用いて三角化した。これらの投入係数行列に加えて、分析の堅牢性を確認するために、投入係数行列の「トリミング」バージョンも使用しました。トリミングされた投入係数行列は、Simpson と Tsukui (1965) に従って、 $A_{ij} < 1/n$ ($i, j \in N$) の場合に $A_{ij} = 0$ に設定して作成されました。通常、要素が大きいほど正確に推定される可能性が高く、要素が小さいほどノイズが多く含まれる可能性があります。トリミングされた行列は、セクター間の重要な相互依存関係を強調したり、生産構造の特徴を浮き彫りにしたりすることが期待されます。

結果を下に示す

§ 3.3 上三角行列からのネットワーク構造の描画

産業連関表はある種のネットワークとして表すことができます。産業連関表はその経済システムの構造を表していると思ふことができます。産業構造がどうなっているのかを解析する手段として、そのネットワーク構造に注目して分析するといった取り組みが古くから行われています。

産業連関分析分野で知られている三角化は、数理工学分野においては最小重みフィードバック辺集合問題と呼ばれ、Galey and Jonson の本にも載っており、典型的な組合せ最適化問題として知られています [6]。最小重みフィードバック辺集合問題は、重み付き有向グラフ G が与えられて、 G から S に属する辺を削除したグラフが有向無閉路グラフ (DAG) になるような最小の辺部分集合を見つける問題です。産業連関表に照らし合わせてみると、DAG のソースに近い頂点（産業）がサプライチェーンの上流、シンクに近い頂点が下流に対応します。残った部分は最大の DAG となっているので、主要なサプライチェーンを抜き出したことに対応します。図 2 の例では、最終製品が自動車となるサプライチェーンが DAG として表現されています。

産業連関分析は、経済活動に伴う CO2 などの環境汚染物質を効率的に抑制したり、排出責任の所在を明らかにするために取引を通じた排出物質の流れを分析することにも利用されています。その一つとして、産業間協力による効率的な排出削減を行うために、産業連関表を重み付きグラフとして表し、グラフクラスターリングを適用することによって産業間の関係を分析する試みも行われています [7,8]。また、取引ネットワーク上の波及経路に注目し、サプライチェーン全体を見たときにどのようなパスや取引、産業が環境負荷を与えているのか、もしくはどのような国が“間接的”に取引相手として重要なのか等を産業連関理論を用いて解析するといった研究も行われています [9]。図 3 は、ネットワーク理論と産業

連関分析を用いて、米国の最終需要によって発生したCO₂に対する高環境負荷ネットワークを抽出・可視化したものになります。このように産業構造をネットワークとしてみることで、様々な見通しが良くなったりすることも多くあります。

2章2節でも述べた通り、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用されることが多い。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単位あたりの生産に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。

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。将来的には、この手法が進化し、経済分析における新たな次元を切り開くことが期待されている。

共起語ネットワークを3Dグラフと2Dグラフによって可視化を行う。3Dグラフと2Dグラフにはそれぞれメリットデメリットが存在する。

3Dグラフのメリット、デメリット

- 単語の共起関係を3次元で表現できるため2Dグラフに比べて表現できる情報量が多い。
- 情報量の多さや3次元空間であることから、視認性が2Dグラフに比べて悪い

これらのことを踏まえ、3Dグラフと2Dグラフの両方で共起語ネットワークを表示できるようにした。3Dグラフの作成にはThree.js、2Dグラフの作成にはpyvisを用いた。pyvisにおけるNetworkでも3Dグラフを描画することができるが画面が固定になっており、ノードの数が増えると要素が絡み合っ見づらいグラフになってしまう。そのため、3Dグラフの描画には、3次元での描画にたけている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 [?].

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。

pyvis

pyvis の Network は、Python の可視化ライブラリであり、ネットワークやグラフの作成と可視化に特化している。ネットワークグラフを作成した後 html ファイルとして出力することができ、出力された html には JavaScript が含まれているため自由な操作が可能である。このライブラリを用いることで、ノードやエッジを持つデータを簡単に可視化することができる。

Network は、インタラクティブなグラフ表示を行うことができ、ユーザーのマウス操作やタッチ操作によってグラフを探索したり、ノードやエッジの情報を表示したりすることができる。またノードやエッジの色やサイズなどの変更も容易であり、グラフの見た目の変更を自由に行える。さらに、NetworkX など別のライブラリで作成したグラフを pyvis で読み込んで出力することもできる [?].

共起分析による出力を可視化することで、単語同士のつながりを視覚的かつ直観的に理解することができるようになる。言葉での発想だけでなく、視覚的な情報や空間的な情報を用いて発想が行えると考える。共起分析の可視化によって情報の理解と分析を促進することを目的とする。

提案手法

§ 4.1 産業連関表による為替変動時の各産業への影響と株価との相関

産業連関表による為替変動時の各産業への影響

日本経済研究センターの小野寺らの研究を参考に、為替変動時の各産業への影響を算出した。なお本稿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。

2020年の総務相「産業連関表」の取引基本表37部門を用いた。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を用いて、非競争輸入型に変換した。

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、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、日銀「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」の米ドルの比率の単純平均を用いている。

例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。

$$P_d = A'_d \cdot P_d + A'_{im} \cdot P_{im} + V \quad (4.1)$$

(1) 式から

$$\Delta P_d = (I - A'_d)^{-1} \cdot A'_{im} \cdot \Delta P_{im} \quad (4.2)$$

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 出 物 価 指 数						輸 入 物 価 指 数				
	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
繊維品 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
化学製品 Chemicals and related products (117.5)	34.9	65.1	56.9	4.0	4.2	繊維品 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 and 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	化学製品 Chemicals and related products (108.4)	63.8	36.2	28.1	4.6	3.5
その他産品・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
						その他産品・製品 Other primary products and manufactured goods (82.3)	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)

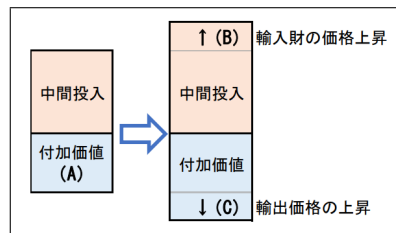


図 4.2: 為替の影響の概念図（円安時）

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、

$$\Delta P_d = A'_{im} \cdot \Delta P_{im} \quad (4.3)$$

投入構造要因は(2)式から(4)式を引いたものとする。

また、輸出価格変動の影響については、以下の式を用いて算出した。図6の(C)/(A)に相当する。

$$\text{輸出価格上昇率} \times \frac{\text{輸出額}}{\text{付加価値額}} \quad (4.4)$$

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

表 4.1: 産業連関データと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

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。全ての株価の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。

相関係数を求める式を書く

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を求める際に、

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変動率から算出しているため、業種別株価についても前日と当日の株価の変動率をデータとして用いている。

§ 4.2 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 [22]。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 [23] 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。

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。さらに、3Dグラフにおけるノード間の線には共起元の単語から共起先の単語への矢印を描画しているが、ノード間の距離が広いと矢印による識別が難しくなる。そこで矢印の方向方向に向かって流動的なアニメーションを追加している。他にも、読み込まれたグラフのカメラ操作はグラフの中心を軸に360度回転することができるが、ノードの場所によってはあまり詳細に表示できない場合がある。そのためノードをクリックすることでそのノードを中心とする回転に変更でき、そのノードを中心としてノードの付近を見渡すことができる。

§ 4.3 提案手法のアルゴリズム

ここまで紹介した時系列間データ間の関係を分析するグレンジャー因果性検定やFXにおける市場の時間帯による特徴、また取引に適した時間足データを使用することや、複数の時間足を見ることで多角的に市場を観察する方法が存在するなどのことがらを組み合わせることで本研究の提案手法を作成していく。本研究に用いる市場間の因果と相関、時間足の選択を活用した自動売買システムのアルゴリズムについてまとめる（図4.3、図4.4参照）。

Step 1: データ取得とヒストリカルデータ作成

Pythonを用いてMT5からTickデータを取得してくる。Tickデータはバックテストに必要なヒストリカルデータの作成に不可欠なので、実際に今回のようなバックテストを用い

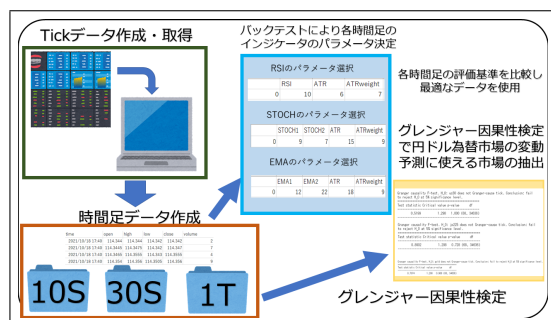


図 4.3: データ取得の流れ

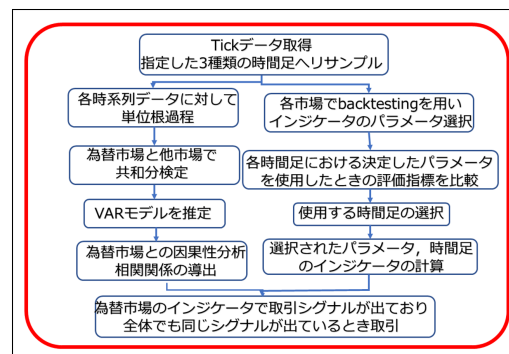


図 4.4: 提案手法の流れ

て自動売買プログラムが本当に有効なのか確認するために自動売買システムで取引を行う前に、Tick データは事前に集め始める。自動売買プログラムを稼働している間は常に MT5 から Tick データを取得するが、保存は一つ前のデータから秒数の部分が変更したタイミングだけ行う。MT5 から送られてくる Tick データは二種類存在し、それが Ask と Bid である。Bid が売時の価格であり、Ask は買うときの価格を表している。トレーダ目線で考えると Bid が売値、Ask が買値である。しかしバックテストにこれらのデータをそれぞれ用いるためにはそれぞれに対してヒストリカルデータを作成し、売りと買いで分けてバックテストをする必要がある。しかし売りと買いで分けてバックテストをすると現在のパソコンでは処理に時間がかかる、今回の研究では Bid と Ask の Tick データの平均をとることで Tick データとする。

保存したデータフレームには価格の値は1つだけであるが、インジケータの計算に使用するデータセットはある期間の市場の値動きを表す OHLC 型もしくは OHLCV 型である必要があるため、データフレームの中身を指定時間ごとにリサンプリングすることで、OHLCV 型に変換したデータフレームを作成したのちに CSV ファイルに保存する。OHLCV 型のデータに保存されるのは一定期間の始値 (Open)、最高値 (High)、最安値 (Low)、終値 (Close)、Volume である。10 秒、30 秒、1 分の 3 種類の時間のリサンプリングを行い、csv ファイルに保存する。

また MT5 は様々な取引を行うことができる。株式取引であったり、貴金属取引も MT5 では取引が行える。そのため為替同様にそれらの金融市場に関しても Python を用いることで Tick データが取得できるので、円ドル為替市場と同じように、Tick データを取得したらそれから同様の時間足のヒストリカルデータ作成を行う。

Step 2: インジケータのパラメータ最適化

作成したヒストリカルデータを用いてインジケータのパラメータの最適化を行う。インジケータの計算に関しては Python に TA-Lib と呼ばれる必要な期間の OHLCV データを用意することができていれば、インジケータを計算することができるライブラリがある。今回使用するインジケータ以外にも複数のインジケータの計算を行うことができる。しかしトレンドラインに関しては TA-Lib で計算できないので、計算過程のプログラムなどは自分で作成したものを使用する。バックテストにはヒストリカルデータの最新のデータから 1200 個のデータを使用する。Backtesting.py ではより多くのデータを用いてシミュレーションを行えるが今回の提案手法はリアルタイムのデータを用いて市場の動きを予測するので、あ

まりにも過去のデータを含んでしまうと直近の市場において最適なパラメータ及び時間足が変わってくる可能性があるため 1200 個とした。最適化には Backtesting.py というライブラリを使用し、各インジケータの計算に必要な期間、利確と損切りの幅、取引に使用する ATR の期間のパラメータを最適化する。バックテストの設定は初期所持金 100,000 円、手数料 0.2pips に設定してバックテストを行い最適なパラメータを決定する。最適化を各時間足に対して行うことでバックテストにより導出されるバックテストが終了した際の所持金をを比較し、最も値が大きい時間足を使用する。これによりリアルタイムにおける最適な時間足の選択がなされる。

最適化が終了したら最適な時間足におけるパラメータを CSV ファイルに保存する。インジケータの最適化を行うプログラムは今回使用する全てのインジケータごとに用意し、それぞれのインジケータごとに最適化が終わり次第新しいパラメータを更新していく。これらの流れを円ドル為替市場だけでなく、自動売買に用いる全ての市場で行う。またこの最適な時間足の導出、最適なパラメータの選択は自動売買プログラムを稼働している間常に動かして、市場のリアルタイムの変動に対応できるようにしておく。

Step 3: 円ドル為替市場に対するグレンジャー因果性検定

各市場の指定した時間足のリサンプリングデータから Close のデータを取り出す。それらのデータに対して 3 章で記したように、円ドル為替市場、日経平均株価、ニューヨーク・ダウ＝ジョーンズ平均株価、金、原油、銅、英ポンド円為替市場、イギリス株価指数 100、ユーロ円為替市場の 10 変数を用いて単位根検定、共和分検定を行い変数の中から、円ドル為替市場と共和分の関係にない変数を用いて VAR モデルを推定する。この時使用するのは statsmodels と呼ばれる Python のライブラリであり、今回行う単位根検定、共和分検定、グレンジャー因果性検定の他にも記述的な統計や統計モデルの推定や推論を含む統計計算を行うことができるものである。VAR モデルを推定した後、グレンジャー因果性検定に使用できる市場のデータのみで検定を行う。それらから実際に円ドル為替市場に対してグレンジャー因果性を持つ市場を確認出来たら市場データを用いて円ドル為替市場とその市場とで相関を求める。

データ分析を行うために各市場におけるヒストリカルデータの値から Close の値だけで作成したデータフレームを作成する。このとき使用するヒストリカルデータはリアルタイムにおけるプログラムにおいて最適と判断された時間足のヒストリカルデータである。このデータを用いて分析を行っていく。グレンジャー因果性の有無、相関係数を実際に取引を行うプログラムで使用するために CSV ファイルに保存する。

Step 4: 最適なパラメータ、グレンジャー因果性を用いての売買選択

step2 で抽出された最適なパラメータを用いて現在の市場に売買シグナルが出ているかを確認する。これらの処理は円ドル為替市場以外の全ての市場においても行う。それぞれの市場の各インジケータが売りのシグナルを出している場合は -1、買いのシグナルが出ている場合は 1、売買シグナルが出ていない場合は 0 を csv ファイルに保存する。その csv ファイルを取引プログラムが読み込むことによって図??のように相関に基づいて分けていく。円ドル為替市場の場合はシグナル通りの売買をしてよいが、他市場において相関がマイナスの場合、グレンジャー因果性を用いた市場においてシグナルが出た方と逆の売買をしない

と円ドル為替市場の変動に対応できないと考えるため、他市場に出ているシグナルの逆のシグナルとして数えなくてははいけない。そのようにして売買シグナルを分けたうえで円ドル為替市場に出ているシグナルとその他の市場が示すシグナルが同じでありかつ数が一定の値を上回った場合その円ドル為替市場に出ているルールを選択する。

Step1, Step2, Step3, Step4 は今回の自動売買プログラムを動かしている間、常にバックグラウンドで稼働するようにする。そうすることによって Step1 ではリアルタイムの市場の情報を常に取得することができ、Step2 ではリアルタイムの市場に適したインジケータなどのパラメータ選択、更新を行うことができる。Step3, 4 ではリアルタイムの市場間のグレンジャー因果性を常に測ることで、自動売買プログラムの取引において関係ない市場の情報が考慮されないようにしている。

Step 5: 最適ルールでの自動売買

ルールにより選択された売買シグナルがリアルタイムの市場でも出ていて、かつ最適なパラメータを用いて計算された ATR が上昇している場合、市場はこれからの変動があり取引を行っても利確か損切りの幅まで市場の値動きがこれから起こると予測できるので利益を上げることができると判断としてルールに則って自動売買を行う。しかし既に MT5 にて保有しているポジションがある場合注文オーダーは MT5 に送信せず、取引を行わないようにする。反対のポジションを保有できる取引のことを両建て取引と呼ぶがこれは一つのポジションしか持たない取引に比べてコストがかかることと、実際のトレーダの中にも使用する人が少ないといわれているからである。例えば両方のポジションを保有すると、取引業者などによってはそれぞれのスワップポイントが異なるため、その差額を払う必要があるからである。また取引をする際にスプレッドが通常の取引よりもかかるため、今回のように短期足による判断を行い、利確と損切りの幅もそこまで大きくない場合、取引回数が多くなることが予想されるので今回はポジションは一つしか保有しないということにした。またシグナルが更新される度にモニターに図 4.4 のような条件によって分けられたシグナルと計算に使用したヒストリカルデータの Close の値の推移がグラフとして表示されるようにする。取引は MT5 のデモ口座を使用して行う。ヒストリカルデータと最適なパラメータから計算したインジケータの値を利用して、売買タイミングになったら Python を用いて売買オーダーを送る。売買オーダーを送る際には、バックテストを行った際と同じ条件になるように設定し、エントリー後に利確と損切りの幅に達したら決済を行う。

数値実験並びに考察

§ 5.1 数値実験の概要

数値本研究では、4.3 節で説明したように、データ取得とヒストリカルデータ作成、インジケーターのパラメータ最適化、円ドル為替市場に対するグレンジャー因果性検定、最適な時間足の選択、グレンジャー因果性と最適な時間足をを用いてのルール選択、最適ルールでの自動売買の5つの工程がある。

まず、Python を用いて MT5 から Tick データ収集する。Tick データは取得した Tick データの秒の部分が変わっていたらデータフレーム保存していく。今回は収集した Tick データの中から時間、価格、ボリュームを抜き出して保存している。

価格は BID と ASK の2種類があるが、Backtesting.py ではそれぞれにヒストリカルデータを作り、バックテストをする必要があるが、本研究では売買の選択をするにあたって実際の市場とバックテストに使用するデータとの違いを最小にするためにそれぞれの平均値を使うことで1つのヒストリカルデータとしている。その後、保存した Tick データを指定した時間足でリサンプリングし、CSV ファイルに保存する。

ヒストリカルデータを作成後、各インジケーターのパラメータ最適化を行う。Backtesting.py に用いるためのヒストリカルデータは最新のデータから 1200 個のデータを使用した。Backtesting.py で使用できるヒストリカルデータは 1200 より大きいと直近の市場の最適なパラメータを求めるにあたり、あまりにも過去の時間のデータを含んでしまうと直近の市場では最適なパラメータ出ない可能性もあるので今回は使用するデータの数を 1200 個とした。インジケーターの最適化はそれぞれインジケータごとに別々のプログラムで実行し、それぞれ最適化が完了するごとに最適なパラメータを更新していく。最適化には Backtesting.py を、それぞれのインジケーターの計算には TA-Lib を使用している。トレンドラインに関しては TA-Lib で計算ができないのでプログラムを作成して計算を行った。今回使用したインジケーターは以下の7つである。

1. EMA
2. ボリンジャーバンド
3. MACD
4. RSI
5. ストキャスティクス
6. DMI
7. テンドライン

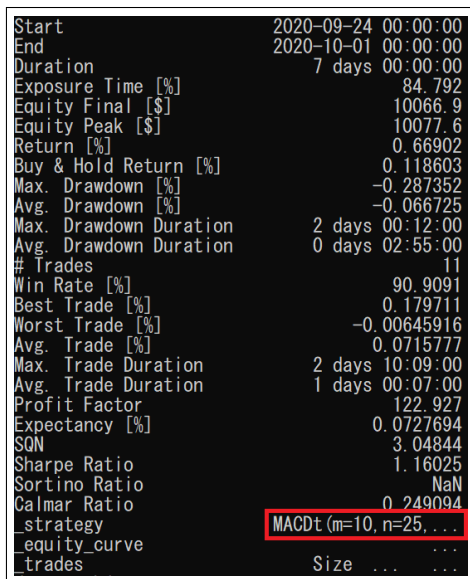


図 5.1: インジケータ最適化の様子

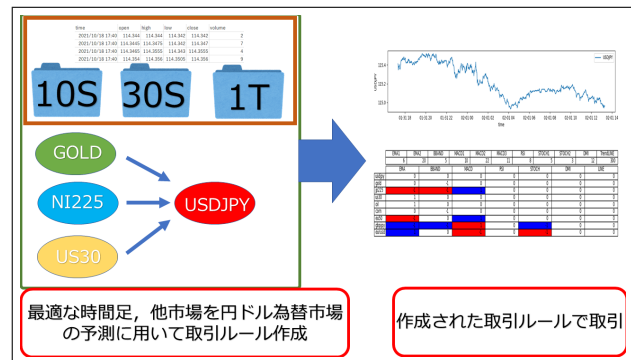


図 5.2: 市場の動きと因果性及び相関

全てのインジケータの売買ルールで、オーダー時の利確と損切り幅も backtesting.py で最適化された値を用いる。利確の幅はバックテストによって求められた幅を追加している。最適化する際の幅は、一般的に使われている期間から飛び幅 2 ずつで、前後 3 つずつ入るように設定している。

今回は初期所持金 100,000 円、手数料 0.2pips に設定してバックテストを行い、最適なパラメータを決定する。また、評価指標のうち Equity Final が最大になるように最適化を行う。最適化が完了したら、得られたパラメータをインジケータごとに別々の CSV ファイルに保存する。最適化している様子は図 5.1 に示す。

また作成された OHLCV データを使用して、円ドル為替市場と日経平均株価、ニューヨーク・ダウ＝ジョーンズ平均株価、金、原油、銅、英ポンド円為替市場、イギリス株価指数 100、ユーロ円為替市場とのグレンジャー因果性を調査する。各市場の OHLCV データの Close の値を使用する。最初に単位根検定を行う、その後共和分検定を行う。共和分検定によって円ドル為替市場に対して共和分の関係が認められない市場データに対してグレンジャー因果性検定を行う。同時に円ドル為替市場とその他の市場との相関を求める。求められた因果性の有無と相関の値は csv ファイルに保存される。

得られた最適なパラメータをリアルタイムで動いている市場に適用して市場に対して売買のシグナルが出ているかを確認する。この時円ドル為替市場のみならず、日経平均株価や原油などの他の市場に対しても同様のことを行う。売りのシグナルが出ている場合は -1、買いのシグナルが出ている場合は 1、売買シグナルが出ていない場合は 0 を csv ファイルに保存する。

売買シグナルがまとめられた csv ファイルとグレンジャー因果性と相関係数が保存されている csv ファイルを使用することで、売買シグナルを相関と因果性の有無について分けていく。円ドル為替市場はシグナル通りの売り買いと判断し、他市場においては因果性が有り、相関係数が -0.6 以下の時シグナルとは逆の売買と判断する。因果性が有り、相関係数が 0.6 以上の時シグナル通りの売り買いと判断する。またプログラムは更新ごとに図 5.2 のよ

うに円ドル市場のグラフと、市場間のグレンジャー因果性と相関が分かるように表示する
そこで円ドル為替市場に出ている売買シグナルと同様のシグナルがグレンジャー因果性を持つ他市場を含めて逆の売買シグナルより多い場合取引を行う.. 実際に MT5 に取引する際に送信するデータは以下のものになる.

1. エントリーする銘柄
2. ロット数
3. エントリーする価格
4. 利確幅
5. 損切り幅
6. 利確幅に追加する幅
7. スリップページ

今回は銘柄は USDJPY, ロット数は 0.1, スリップページは 20 で設定している. 価格はそのときの最新の Tick データを取得し, 売りでエントリーする際には BID の価格で, 買いでエントリーする際には ASK の値を使用する. 利確と損切りの幅は最適化されたものを使用する. 今回はバックテストの際にスプレッドを 0.2pips に設定した. ただし, 利確幅は一般に損切り幅よりもスプレッドの値分とバックテストで得られた幅を追加する.

売買オーダーを送ったら注文に入れたら価格に対して利確と損切りが決定され, 指値か逆指値に価格が到達するまでポジションが保持され, どちらかの値に価格が達した際に保有しているポジションを決済することで取引が終了となる. またポジションを MT5 で持っているときはプログラムで注文のエントリー条件を満たしている場合でも MT5 にはオーダーを送らないようにしている. これは実際のトレードにおいても同一のポジション内で買いポジションと売りポジションを同時に保有する両建て取引が推奨されていないからである. 両建ては経済合理性を欠く取引なため, デメリットが存在する. 第一に買いポジション, 売りポジションの片方のみで取引を行うよりコストがかかる. 例えば両方のポジションを保有すると, 取引業者などによってはそれぞれのスワップポイントが異なるため, その差額を払う必要があるからである. そのため長期的にポジションを保有するとトータルでのコストが大きくなる. また取引を行う際にかかるスプレッドが通常よりかかるため, 取引回数が多ければ多いほど最終的な収支に影響が出る.

新規に注文を行う際, 取引数量に応じて必要証拠金が必要となるため証拠金の余裕がない状態では希望の数量を発注できない場合がある. 市場が急激な変動をするとスプレッドが拡大するしてしまうため, 両建て取引は市場の変動による影響が大きくなることもデメリットである. こういったことから今回の提案手法においてはポジションを複数保有しないように, より多くのトレーダーと状況が重なるようにした.

また提案手法の有効性を示すため, 円ドル市場のインジケータのみを用いた取引手法 (FX のみ), 円ドル市場とその他の金融市場のインジケータを用いた取引手法 (FX と他市場のみ), 提案手法の 3 つの取引手法を同期間動かして最終的に比較できる評価指標の比較, また各取引を検定にかけることで実際に提案手法は有効性があるかということを判断する.

§ 5.2 実験結果と考察

今回の実験による結果はFXのみの取引手法が取引回数が268回、勝率が49%、収支が-4135円、FXと他市場のみを用いた取引手法は取引回数が162回、勝率が39%、収支が-2621円となり、提案手法は取引回数が240回、勝率が52%、収支が+8265円となった。

図5.3, 5.4, 5.5は期間中の取引プログラムの自動取引による所持金の推移を表している。FXのみの取引手法はプログラム実行当初、大きく利益を上げることができたが徐々に所持金が減っていき最終的にマイナスの収支という結果になってしまった。FXと他市場を用いた取引手法は期間中大きく利益を上げることができず、常に最初の所持金である100000円を下回るといった結果になった。提案手法は期間当初と期間の終わりごろに利益を下げる結果となってしまったが、それ以外の期間では安定して所持金を増やすことができていたため取引に関しては安定して利益を出すということが分かる結果となった。

また取引における所持金を含めた評価指標は表5.1のようになった。評価指標の一つであるプロフィットファクター（Profit Factor: PF）とは総利益が総損失の何倍かを表したもののになっており、総利益を総損失で割った商で求めることができる。総利益が総損失を上回っている場合、PFは1以上となる。提案手法は1.1という値が出ている一方、FXのみの取引手法及びFXと他市場を用いた取引手法は1以下の値が求められておりグラフから見てわかるように総利益が総損失以下だということが示されている。モデル1がPFの値が1を超えているため、今回と同じような期間を同様のプログラムで動かした場合、損失の1.1倍の利益を今後動かしたとしても出すことができると考えることができる。

リカバリーファクター（Recovery Factor: RF）はリスクリターン率とも呼ばれる評価指標であり、損失に対してどの程度の利益が期待できるかという自動売買プログラムの潜在的な見込みを示す評価指標である。リカバリーファクターの値が大きいほど、より少ないリスクでより大きな利益が得られる可能性が高いということもできる。RFは純利益を最大ドローダウンで割った商で求めることができる。提案手法は2.04という結果になったので提案手法による自動売買プログラムを今後の市場において動かし続けても利益が期待できる一方、FXのみの取引手法とFXと他市場を用いた取引手法はマイナスとなってしまう今後においても利益の見込みがないことがこの指標から分かる。今回のように短い期間のみのシステムの稼働は実際に長期間運用した場合、マイナスになる可能性も含まれているため短期間の稼働で得られたリカバリーファクターの値は長期間動かしたと仮定したときに結果を想像するための一助となるような評価指標である。RFの値を見ると今回の提案手法による自動売買プログラムは今回よりも長い期間動かしたとしても利益が見込めることを示している。

期待値（Expectancy: EXP）は総損益を総取引数で割った商で求められる評価指標であり、1回のトレードで期待できる損益額を表す。トレードに要する時間によって数値の水準は変わり、1回のトレードに長時間費やすような場合は数値は大きくなり、今回のように1回のトレード時間がそこまでかからない場合小さくなる。モデルを比較すると提案手法は1回のトレードで+34の収支が見込めることが分かり、それ以外の二つの手法では1回トレードをするごとに収支がマイナスになることが予想されることが数値より分かる。今回の提案手法は取引回数を見てもわかるように一つのポジションを保持している時間は長くなく、複数の取引を行うことにおいて利益を挙げることが目的としたシステムのため一回のトレードで+125を期待できるのはシステムが最適なトレードを行えているためであると考えられる。

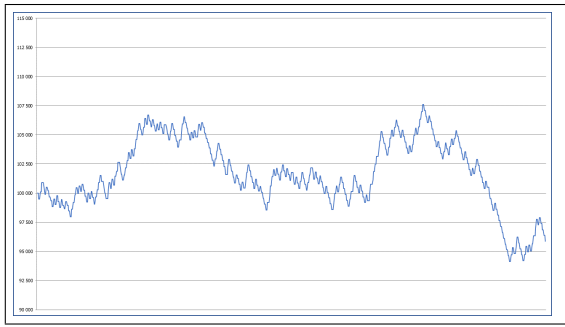


図 5.3: FX のみの所持金推移

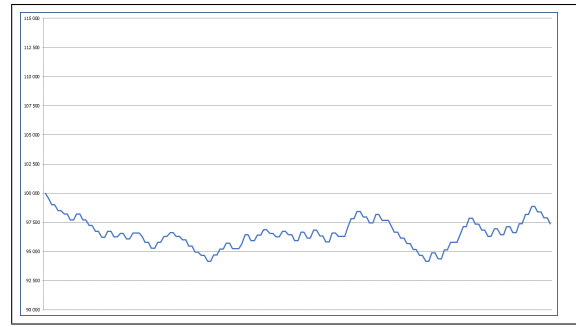


図 5.4: FX と他市場のみの所持金推移

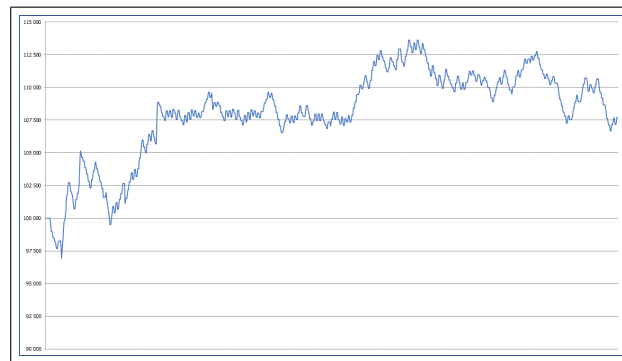


図 5.5: 提案手法の所持金推移

これらの指標から今回の市場間の影響を考慮して最適な時間足を選択するという取引手法は利益を出す取引手法を選択できているということを考えることができる。また利大損小を狙ったことによって一回の取引でプラスの場合とマイナスの場合を比較するとプラスの場合の方が決済時と注文したときとの価格に差があるため利確と損切りの幅を違うことにしたのがプラスに働いていると考えられる。しかし一方で利確に追加する幅が大きくて、損切りの幅と同じ利確幅であったら取引がプラスで決済出来たという場面がわずかに存在した。このことからバックテストにて利確に追加する値をもう少し小さいものにした方が良くとも考えられた。バックテストにおける最適な利確幅に追加する幅を決定する値をもう少し細かく設定してもよいと考えられる。

また今回は使用するインジケータ7個のうちオシレータ系と呼ばれる種類のものが4個使われていた。オシレータ系の特徴として基本的に逆張りで売買シグナルが出るというものがある。トレンド系は基本的に順張りの取引の売買シグナルが出るといった特徴がある。モデル1の所持金の推移において、一か所大きくマイナスとなっているがこれは価格が長めに上昇のトレンドを見せたときであり、オシレータ系のインジケータの多くが逆張りで売りのシグナルを出してしまっていた。結果いるところがあととして長期的に形成されたトレンドに対しては提案手法では利益をあげるのが他の相場に比べて難しいことが考えられる。オシレータ系とトレンド系にはそれぞれのメリット、デメリットが存在するため組み合わせを変えた方が成績が上がると考えた。またインジケータの組み合わせに関しても今回のように複数用意したものの中から、その時一番利益が出せる組み合わせのものを選択して売買に用いることができたならさらにシステムが改善されるのではないかと考える。

表 5.1: 各取引手法の評価指標

	収支	PF	RF	EXP
FXのみ	-4135 円	0.96	-0.71	-16.18
FX と他市場	-2621 円	0.89	-0.45	-15.43
提案手法	+8265 円	1.1	2.04	34.44

次に提案手法とその他の取引手法との有意差を調べるため期間中における一日ごとの取引結果で F 検定, t 検定を用いて検定した. 提案手法と FX のみの取引手法とで検定を行った. 有意差を示せるのはプログラムを動かしていた 8 日間のうち 1 日という結果になった. 有意差を示すことができたのは 7 日目における取引であり, F 検定の有意水準 5% で p 値が 0.371 となり等分散性が採択されたので 2 標本における母集団が等分散と仮定した場合の t 検定を行った. t 検定をしたところ表 5.2 のように統計量 t が有意水準 5% に両側検定における臨界値より大きく p 値が 0.022261 となり有意差が見られた.

また提案手法と FX と他市場を用いた取引手法とで検定を行った場合, 期間中における有意差を示せる日数は 2 日間となった. 有意差が示せたのは 2 日目と 7 日目だった. 2 日目における取引に対する検定は, F 検定の有意水準 5% で p 値が 0.0312147 となり等分散性が棄却されたので 2 標本における母集団が等分散でないと仮定した場合の t 検定を行った. 表 5.3 のように t 検定をしたところ統計量 t が有意水準 5% に両側検定における臨界値より大きく p 値が 0.0259848 となり有意差が見られた. 7 日目における取引に対する検定は, F 検定の有意水準 5% で p 値が 0.48 となり等分散性が採択されたので 2 標本における母集団が等分散と仮定した場合の t 検定を行った. 表 5.4 のように t 検定をしたところ統計量 t の絶対値が有意水準 5% に両側検定における臨界値より大きく p 値が 0.008958 となり有意差が見られた.

有意差が示せなかった日であっても取引結果は提案手法の方が良かったこと, さらに全体を通した収支や評価指標から見ても提案手法の方が他の二つの取引手法に対して良い結果を得ていることから今回の提案手法は時間足を選択しない手法と比較して最適な取引ルールを構築して取引を行うことができる自動売買プログラムであるということが言える.

時間足を選択しない手法は 1 分足のヒストリカルデータのみを参照して各インジケータの計算, 最適なパラメータの導出, 市場間の関係を測っている. 3.3 節で書いたように時間足は取引においてとても重要な物である. 検定結果からも一つの時間足を用いて取引を行うより複数の時間足データで市場の売買判断を行う方が良いということが分かる. しかし, 今回の実験において使用した時間足が 10 秒, 30 秒, 1 分と種類が多くなかったため, より多くの種類の時間足を用意してその中から最適なものを選ぶことができるようになればより良い成績になるのではないかと考える. 特に今回の実験においてはリアルタイムの市場の動きを表す Tick データを使用していたこともあり, 短期の時間足を使用することでリアルタイム市場の動きを把握, さらに将来の市場の予測を行っていたが 15 分足や 30 分足さらにはそれよりも長い長期の時間足データを見ることで市場に形成された強いトレンドなどにも対応できるのではと考える. また今回はヒストリカルデータ作成に用いる Tick データに対して Ask と Bid の平均の Tick を取るようにしていたが, 売りのシグナルを考えるなら Bid の Tick を用いてインジケータなどの計算に使用し買いのシグナルを考えるなら Ask の Tick を用いて判断することができれば市場と同じ状況でバックテストを行って成績が向

表 5.2: FX のみの 7 日目の取引の検定

	提案手法	FX のみ
平均	139.474	-150
分散	278194.4	244066.66
観測数	57	25
プールされた分散	267956.1	
仮説平均との差異	0	
自由度	80	
t	2.3311	
$P(F_i=f)$ 片側	0.01131	
F 境界値片側	1.664125	
$P(F_i=f)$ 両側	0.022261	
F 境界値両側	1.990063	

表 5.3: FX と他市場の 2 日目の取引の検定

	提案手法	FX と他市場
平均	155.588	-153.871
分散	401837.52	203177.85
観測数	34	31
仮説平均との差異	0	
自由度	63	
t	2.283047	
$P(F_i=f)$ 片側	0.0029924	
F 境界値片側	1.6706489	
$P(F_i=f)$ 両側	0.0259848	
F 境界値両側	2.0002978	

表 5.4: FX と他市場の 7 日目の取引の検定

	FX と他市場	提案手法
平均	-141.556	139.473
分散	281099.8	278194.36
観測数	45	57
仮説平均との差異	0	
自由度	100	
t	-2.66579	
$P(F_i=f)$ 片側	0.004479	
F 境界値片側	1.660234	
$P(F_i=f)$ 両側	0.008958	
F 境界値両側	1.983972	

上すると考える。

検定結果から他の市場を考慮した自動売買プログラムの方が有意性があることが分かる。このことから提案手法は他市場を考慮することにより市場内の要因のみならず市場外における円ドル市場の変動にも対応できるということが分かる。また時間足を選択できることによりマルチタイムフレーム分析のようなことが可能になり、一つの時間足データを利用して市場の将来の値動きの予測を行ったり、取引ルールを獲得するといった自動売買プログラムより有効な手法であることが分かる。今回の実験は約 2 日の間プログラムを動かしたので、長期的にプログラムを動作させた場合今回のように提案手法において十分な利益を確保しつつ自動で取引が行えるのかが分からないが、各評価指標の値を考えると長期的にシステムを運用しても安定して成果を挙げることはできると考えられる。

おわりに

今回の研究ではグレンジャー因果性分析を使用して他市場が円ドル為替市場に対してグレンジャー因果性を持つのかを確認した。さらにそれらの市場間の関係を考慮することで、円ドル為替市場の過去データを使用したインジケータからでは予測できない市場の値動きにも対応して取引を行う自動売買プログラムを作成した。またその時間帯に最適な短期の時間足を自動的にプログラムが選択することで裁量トレードで行うような並行して複数の時間足の流れを見るマルチフレーム分析をした取引ができるようにした。

今回の実験による結果は円ドル市場のインジケータのみを用いた取引手法が取引回数が268回、勝率が49%、収支が-4135円、円ドル市場とその他の金融市場のインジケータを用いた取引手法は取引回数が162回、勝率が39%、収支が-2621円となり、提案手法は取引回数が240回、勝率が52%、収支が+8265円となった。

提案手法の有効性を示すために、提案手法と円ドル市場のインジケータのみを用いる取引手法と円ドル市場と他の金融市場のインジケータを用いる取引手法を同時に動かすことで得られた結果に対して検定を行った。有意差を示せるのはプログラムを動かしていた8日間のうち1日という結果になった。有意差を示すことができたのは7日目における取引であり、t検定をしたところ統計量tが有意水準5%に両側検定における臨界値より大きくp値が0.022261となり有意差が見られた。

また提案手法とFXと他市場を用いた取引手法とで検定を行った場合、期間中における有意差を示せる日数は2日間となった。有意差が示せたのは2日目と7日目だった。2日目における取引に対する検定は、t検定をしたところ統計量tが有意水準5%に両側検定における臨界値より大きくp値が0.0259848となり有意差が見られた。7日目における取引に対する検定は、t検定をしたところ統計量tの絶対値が有意水準5%に両側検定における臨界値より大きくp値が0.008958となり有意差が見られた。

今後の課題として、10市場においてそれぞれ7個のインジケータを動かし、最適なパラメータを求めていたので使用していたパソコンの処理が重くなったりなどの様子が見受けられた。今後さらに動かすプログラムの数を増やすとなるとパソコンでは処理できないかもしれない。さらに処理が重くなることによって本実験の特徴であるリアルタイム性が損なわれてしまうかもしれない。従ってどうリアルタイム性を損なうことなく提案手法の性能向上を図るか、さらに今回の提案手法は選択できる時間足が3種のみで全部が短期足での実装となったので、さらに多くの時間足を用意することで長期の時間足を選択肢に含めた場合、取引の成果が大きくなるのか現在の時間足のヒストリカルデータにさらなる時間足を追加することである。

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．またシステム作成や数値実験にご助力頂きました富山県立大学電子・情報工学科3年生の高田知樹氏に謝意を表します．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．

2022年2月

木下 大輔

参考文献

- [1] 高橋和秀, “先物外国為替市場の予測性についての一考察”, 関西学院商学研究, Vol. 62, pp. 95-116, Mar. 2010.
- [2] 松井藤五郎, 後藤卓 “強化学習を用いた金融市場取引戦略の獲得と分析”, 人工知能学会誌, Vol. 24, No. 3, pp. 400-407, Dec 1994.
- [3] 温井慧, 高木徹, “AI を用いた FX システムトレードの提案”, 経営情報学会 全国研究発表大会要旨集, pp. 1-30, Oct. 2019.
- [4] 内藤友紀, “2008～09 年の日本における株式価格の下落について : VAR モデルによる要因分析”, 関西大学経済論集, Vol. 60, No. 1, pp. 1-18, Jun. 2010.
- [5] 祝迫得夫, 中田勇人 “原油価格, 為替レートショックと日本経済”, 小特集: 輸出と日本経済, Vol. 66, No. 4, Oct. 2015.
- [6] 矢島美寛, “時系列解析における長期記憶モデルについて”, 応用統計学, Vol. 23, No. 1, 1996.
- [7] 加納隆, “為替レートのランダムウォークネスとファンダメンタルズ: 動学的確率的一般均衡分析からの視点”, 平成 24 年度金融調査研究会報告書, Jul. 2013.
- [8] 内田純平, 穴田一 “売買シグナルの強弱を考慮した Genetic Network Programming による外国為替取引戦略”, 人工知能学会全国大会論文集第 34 回全国大会, 2020.
- [9] “FX 用語集 初心者にもわかる FX 投資”, <https://fx-square.com/backtest/>. 閲覧日 2021.12.25.
- [10] 王亜騰, アランニャ・クラウド, 狩野均 “多目的 GA で獲得した非劣解集合の多数決戦略に基づく外国為替取引手法”, 情報処理学会研究報告, Vol. 26, pp. 1-6, Dec. 2016.
- [11] SUKIMA TIME FX “5 分でわかる!トレンド系インジケータとオシレーター系インジケータの違い!どっちがいいの?おすすめは?”, <https://sukimatimefx.com/indicator-type/>. 閲覧日 2021.10.18.
- [12] “【FX 用語】バックテストとは?言葉の意味とその重要性について”, <https://fx-square.com/backtest/>. 閲覧日 2021.12.25.
- [13] 平林明憲, “遺伝的アルゴリズムによる外国為替取引手法の最適化”, 人工知能学会全国大会論文集 第 22 回全国大会, pp. 282-282, 2008.
- [14] 茂木快治 “混合頻度ベクトル自己回帰モデルとグレンジャー因果性検定”, 日本統計学会誌, Vol. 50, No. 1, pp. 1-14, Sep. 2020.
- [15] 得田雅章 “構造 VAR モデルによる金融政策効果の一考察”, 滋賀大学経済学部研究年報, Vol. 14, 2007.

- [16] 蟹澤啓輔, “金融政策が企業の設備投資に与える影響”, 商学研究論集, Vol. 45, pp. 33-47, Sep. 2016.
- [17] 福島豊, “日本のマクロ変数の単位根検定”, 日本銀行金融研究所 [金融研究], Vol. 13, No. 4, Dec 1994.
- [18] 宮崎慧 星野崇, “階層ベイズ動的モデルによるブランドスイッチングの分析: グレンジャー因果性検定の利用”, マーケティング・サイエンス, Vol. 21, No. 1, pp. 11-35, 2013.
- [19] 沖本竜義, “経済・ファイナンスデータの計量時系列”, 朝倉書店, 2010.
- [20] “【FX 用語】東京時間, 欧州時間, ニューヨーク時間の相場の特徴”, <https://fx-expertner.com/fxsyuhou/9223/>. 閲覧日 2021.11.13.
- [21] 岩崎有基, 松下光範 “予想材料に基づく為替の動向情報分析を目的としたニュース記事分類手法”, 人工知能学会第二種研究会資料, Vol. 20, pp. 1-8, 2020.
- [22] 渡部敏明 “ボラティリティ変動モデルの発展と株式収益率データへの応用”, 現代ファイナンス, No. 3, pp. 15-41, Mar. 1998.
- [23] Badarch Tsesrenehimed, “進化計算を用いた外国為替取引手法-逆トレンドと決済タイミングによる拡張-”, 東京大学学位論文, Mar. 2011.
- [24] 外為どっとコムマネ育, “FX で有利なポジションを狙える MTF(マルチタイムフレーム) 分析”, <https://www.gaitame.com/media/entry/2020/05/19/160137>. 閲覧日 2021.12.27.
- [25] “MT5 (メタトレーダー 5) のバックテストの方法 — OANDA FX/CFD Lab education (オANDA ラボ) ”, https://www.oanda.jp/lab-education/blog_mt5/auto_trading/mt5backtest/, 閲覧日 2021.12.25.