

博士学位請求論文要旨

# 時系列分解および最大独立集合問題を 活用した投資戦略に関する研究

一橋大学大学院経営管理研究科  
経営管理専攻  
金融戦略・経営財務プログラム  
ID17F004 中山 純

## 本論文の構成

本論文の構成は以下のとおり。

### 第1章 序論

- 1.1 研究の目的と背景
- 1.2 各研究の位置付けと要旨
- 1.2 本論文の構成

### 第2章 時系列分解のインデックス・トラッキング・ポートフォリオ構築への応用

- 2.1 はじめに
- 2.2 使用したデータ
- 2.3 時系列分解と類似度検出
- 2.4 インデックス・トラッキング・ポートフォリオの構築手法
- 2.5 シミュレーション結果と議論
- 2.5 まとめ

### 第3章 ニュースと国内株式市場動向の関係性に関する探索的データ解析

- 3.1 はじめに
- 3.2 使用したデータ
- 3.3 探索的データ解析
- 3.4 ニュースデータの投資戦略への応用
- 3.5 まとめ

### 第4章 最大独立集合問題の解に基づくポートフォリオ構築

- 4.1 はじめに
- 4.2 使用したデータと投資対象
- 4.3 MIS によるポートフォリオ構築
- 4.4 MIS ポートフォリオのパフォーマンス

#### 4.5 まとめ

第5章 結論と今後の課題

付録A 第2章の補足

付録B 第3章の補足

付録C 第4章の補足

## 研究の目的と背景

本研究の目的は、資産運用における投資戦略の開発・運用のプロセスで直面する課題に対して、実務上現実的な実証分析を実施し実現可能な戦略を立案することで、有効な解決法についての方向性を提示することである。具体的には、インデックス運用における明示的・非明示的な取引コスト発生等による連動性低下や、投資の意思決定において個別ニュースが株式市場に与える影響の検証、ポートフォリオ構築実務における離散的な銘柄選択手法の開発、という3つの課題を採り上げる。

低コストに広範な銘柄への分散投資が可能な投資手法としてインデックス運用が幅広い投資家の資産運用にとって重要な存在となる中、ベンチマークへの連動を目指すインデックス・トラッキングの運用実務において、連動性のクオリティが年々注目されるようになってきている。背景としては、信託報酬や取引コスト等の構造的なパフォーマンス劣化要因や、ベンチマーク変更時の過度な売買集中に伴う売買インパクト等による非明示的なコストの存在があると考えられる。インデックス運用において、ポートフォリオとベンチマークのパフォーマンス差で表される超過リターンの標準偏差で計算されるトラッキング・エラーは、当然、最も重要な指標の一つである。インデックス・ファンドとしてのパフォーマンス評価は、各月、各営業日だけでなく、各取引において発生したポートフォリオの超過リターンについて、それがベンチマークとの構成比差によるものか、それとも取引コストに起因するものなのか、各要因を分解して厳密に分析することで運用実績を評価する。このような精細なパフォーマンス分析を実施することで、長期に渡り投資家へ再現性の高いインデックス運用のパフォーマンスを提供することが可能になると言える。本研究で注目する連動性のクオリティとは、トラッキング・エラーの水準で単純に評価したものではなく、当該期間全体での超過リターン水準においても厳密な意味でベストな取引手法を選択できたか否か、という意味での連動性のクオリティのことを指す。

インデックス運用におけるトラッキング・エラー発生要因として、ポートフォリオとベンチマークの構成比差にならぶ代表的な要因として、ポートフォリオの

構成比率をベンチマークの構成比率に合わせるために実施する売買に関わる<sup>1</sup>取引コストがあげられる。ベンチマークのパフォーマンスに考慮されていない取引コストは、インデックス・ファンドのパフォーマンスが純粋に劣後する要因となる。具体的には、売買金額にかかる取引手数料だけでなく、売買した銘柄数にかかる手数料や外国資産の保管費用等もファンドが支払う必要がある広義な取引コストと言える。取引コストに関して、ファンドを途中解約する投資家が、その後の安定したファンド運用の継続のために解約金額の一定比率をファンドに支払う信託財産留保額という仕組みがある。これにより投資家の解約のフローに伴うファンドの取引コストが軽減されることで同一ファンドに投資する投資家の間でより公平なパフォーマンスを実現するための仕組みと言えるが、信託財産留保額は流動性の低い資産を含む、例えば新興国の資産に投資を行うファンドのみに定められているのが現状で、より大きな純資産の先進国資産に投資するファンド等には原則定められていない。また、信託財産留保額が定められていたとしても、当該ファンドに投資を開始する際の取引、つまり、投資家の設定フローに対応する取引コストの軽減策は準備されていない。

インデックス運用のポートフォリオ構築手法としてはベンチマークの構成比率にポートフォリオのそれを概ね一致させる完全法が一般的な手法であるが、ベンチマーク指数のメソドロジーが開示されている透明性の高いインデックス運用において、指数の構成銘柄や各銘柄の構成比率が変更される際、完全法を採用する大半のインデックス・ファンドは、原則、同一の投資行動を取る。これは、日本銀行による買付で巨大な純資産に成長し、株式市場において明確なインパクトを与え得る存在となった国内株式ETF銘柄群についても同様と言える。このような背景もあり、影響力のある投資主体から膨大な金額の注文が集中することで、特定の銘柄群に対して大きな売買インパクトが掛けられる懸念が指摘される。インデックス・ファンドが機械的にベンチマークとの構成銘柄差異を最小化する取引を実行するようなポートフォリオ・リバランスを行う限り、上記の売買インパクト、つまり、非明示的な取引コストは、不可避である。

このような資産運用の実務上、問題となり得る取引コストを軽減できる可能性がある運用手法を開発することは、特にインデックス・トラッキングのクオリティを向上させる上で有意義と考える。本研究では、取引コストの低減等を含む連動性のクオリティ向上を目指して、一般的な完全法ではなく、非完全法でのインデックス・トラッキング・ポートフォリオ構築の開発に挑戦している。非完全法では、ポートフォリオ保有銘柄数をベンチマークよりも少ない銘柄数で運用することに

---

<sup>1</sup>インデックス運用が連動することを目標とするベンチマークは、定期的に、もしくは、適宜、構成銘柄や構成比率の変更が行われるため、インデックス・ファンドの連動性を保つためにベンチマークの変更タイミングにあわせてポートフォリオ保有銘柄を売買する必要がある

なり、保有銘柄数、あるいは、売買銘柄数の低下が取引コストを低減させ、トラッキング・パフォーマンス向上に繋がる可能性があると考えている。

非完全法のインデックス・トラッキング・ポートフォリオに採用する銘柄として重視する基準として、本研究では価格変動の類似性に注目している。Focardi and Fabozzi[1] は、ベンチマーク構成銘柄間の類似性に注目し、階層的クラスタリングを用いて類似性の高い構成銘柄でクラスターを形成することでインデックス・トラッキング・ポートフォリオ採用銘柄を選定する手法を提案した。そこで、Dose and Cincotti[2] が階層的クラスタリングを用いる Focardi and Fabozzi[1] の手法を S&P 500 に連動することを目指すポートフォリオ構築に適用し、そのパフォーマンスを評価している。これらの先行研究においてはベンチマーク構成銘柄間の類似性に注目しているが、本研究では、ベンチマークと構成銘柄の類似性をインデックス・トラッキングにおける連動性の源泉と考え、時系列分解により抽出したトレンドのユークリッド距離により計測した類似度を基に採用銘柄を選出している。つまり、連動対象と似たような値動きをすることが期待される銘柄に投資することにより、少ない銘柄数でベンチマークへの連動性を確保しようと考えている点が先行研究との主な相違点と言える。

本研究独自の類似性の活用により構築したインデックス・トラッキング・ポートフォリオのパフォーマンスを評価し、当手法のトラッキング・エラー発生要因を検証したところ、直近データ上ベンチマークに対する価格変動の類似性が高かった銘柄において、ポートフォリオ採用後に期待していた類似性が消失し、大きな超過リターンを発生させていることが分かった。このような事象は、投資戦略において out-of-sample の実現パフォーマンスでは当然発生し得ることであるが、運用実務上、ベンチマークから乖離し続けトラッキング・エラーを発生させる銘柄をそのまま放置するわけにはいかない。そこで、価格や出来高といった定量的な情報だけではなく、非構造化データと呼ばれるニュース等のテキスト情報を活用することで保有銘柄の価格変動における異常を速やかに検知することができると考え、これが下記にあげた本研究の課題の 2 つ目のモチベーションの一つとなっている。もしこれが可能となれば、当該銘柄を速やかにポートフォリオから除外することで連動性悪化の軽減が期待できるパフォーマンス改善策の一つになると考えている。

近年、テキスト情報を用いたニュース指標と株式市場の関係性の検証に関する研究が行われる中、個別ニュースが個別銘柄の株価動向に与える影響やニュース種別毎の市場動向等を調査している研究は少ない。このような背景により、本研究で採り上げる 3 つの課題のうち 2 点目としては、投資の意思決定において個別ニュースが株式市場に与える影響を高解像度に検証する、という点をあげている。多くの先行研究で行われたような個別ニュース内容を深く検証せずに機械的な処

理に基づいた分析ではなく、個別のニュースデータに焦点を当てた探索的なアプローチを採用し、市場動向への影響が大きいニュース種別やニュース配信時刻に応じた出来高変化の傾向等、より効果的なテキスト情報の応用の可能性を探っている。ニュースが個別銘柄の動向に与える影響を把握することは、上記にあげたインデックス運用においてトラッキング・エラーを生じさせる可能性が高い異常な振る舞いを行う銘柄を検知するといった活用方法だけでなく、株式市場において投資の意思決定の伴う投資戦略の実行全般において有用と考えられる。

本研究で採り上げる3つ目の課題は、ポートフォリオ構築実務における離散的な銘柄選択手法の開発という、ポートフォリオ構築手法そのものに関するものである。本研究で採り上げたインデックス・トラッキング・ポートフォリオの構築においては、完全法や平均分散アプローチに基づくポートフォリオ最適化等の既存手法に対して、時系列分解アプローチによる新しいポートフォリオ構築手法を提案した。現状、運用現場において構成ウェイトを連続変数として捉えるポートフォリオ構築手法が主体的であり、取引ロットの影響までを加味して離散的にポートフォリオ採用銘柄を選定するポートフォリオ構築は原則行われていない。例えば、現在単位株が100株に設定されている国内株式を投資対象とする場合、特に比較的小さな純資産のファンドにおいては、ある銘柄をポートフォリオに採用するか否か、は取引ロットを含めた採用銘柄の組み合わせにおいて決定されるのが理想的と考えられる。当該銘柄を採用するかどうかでポートフォリオの特性値が変化する可能性がある値嵩株の選択において、この効果は特に顕著であると言える。

ポートフォリオ構築において投資すべき銘柄の組み合わせを離散的に捉えたポートフォリオ構築を行うのに適した手法として、組み合わせ最適化の応用が考えられる。組合せ最適化を用いることで、膨大な数の選択肢の中で、制約を満たした最も良い解を探索することが可能で、近年、組合せ最適化問題の中のひとつの手法である最大独立集合問題をポートフォリオ構築に応用する研究が行われている。最大独立集合問題とは、グラフ理論においてノード間をつなぐエッジが存在しないノード群を独立集合と呼び、独立集合のうちノード数が最大のものを言う<sup>2</sup>。本研究では、最大独立集合問題の解に基づき採用銘柄を選定することで、相関係数が設定した閾値よりも低い銘柄のみで構成されたポートフォリオを構築し、代表的な株式指数との比較を含むパフォーマンス検証を実施している。つまり、離散的なポートフォリオ銘柄選択手法の開発を目指し、様々な銘柄採用基準が考えられる中で相関係数にのみ注目することで、互いの相関が低い銘柄のみで構築されたポートフォリオのパフォーマンスを検証した。上記にあげたインデックス・トラッ

---

<sup>2</sup> グラフ理論において、ノードとは節点のことで本研究では各個別銘柄のことを指す。また、エッジとは各ノード間の辺のことで、本研究では銘柄間の相関係数が設定した閾値以上の場合にエッジが引かれ、相関係数が閾値未満の場合エッジなしとしている

キング・ポートフォリオ構築は時系列データとしての類似性を連動性の源泉と捉えている一方、この最大独立集合問題の解に基づく手法は類似性の低い銘柄群でポートフォリオ構築を行っているが、どちらも価格系列の類似性を活かす手法という点は同じである。本研究は当手法の特徴を議論するとともに、ポートフォリオ構築の新たな手法として離散的な銘柄選択の今後の可能性を提示している。

## 各研究の位置付けと貢献

各研究は第2章から第4章までの3つの研究で構成される。各章は上記にあげた投資戦略の開発・運用の実務における3つの課題に対応し、それぞれ解決策の一つやその方向性を示している。

### 第2章 時系列分解のインデックス・トラッキング・ポートフォリオ構築への応用

インデックス運用における明示的・非明示的な取引コスト発生等による連動性低下という、幅広い投資家にとって重要な存在となりつつある低コストな市場指数連動ビークルの構造的な課題に対して、第2章は、ベンチマークよりも少ない銘柄数のポートフォリオでベンチマークに対する一定の連動性を保つことを目指すインデックス・トラッキング・ポートフォリオのパフォーマンスを検証している。保有銘柄数を削減することで、明示的な取引コストの影響を軽減しつつ、指数リバランス時に機械的なポートフォリオ調整を行うインデックス・ファンドによる売買インパクトを避けられる可能性がある新たなインデックス・トラッキング・ポートフォリオ構築手法を検証している。本研究では、時系列分解により検出したベンチマークと類似性が高い銘柄を採用したポートフォリオでベンチマークへの連動を目指している。先行研究で検証された階層的クラスタリングを用いた手法との比較において相対的に高い連動性を示すポートフォリオ構築手法を提案している。この新たな手法は、インデックス・トラッキング手法の中で取引コストの影響が大きい完全法の課題を克服する手法の選択肢の一つとなり得る分析結果と考える。

### 第3章 ニュースと国内株式市場動向の関係性に関する探索的データ解析

第3章では、ニュースと国内株式市場動向の関係性に関する探索的データ解析により、個別ニュースが株式市場に与える影響を解明することを目指している。種別毎のニュース配信後の株価変動や出来高の変化を詳細に分析することで、個別ニュース等のテキスト情報と株式市場の関係性についていくつかの興味深い発見

をしている。例えば、株式分割を実施するという資本異動発表後、当該銘柄は安定的に TOPIX をアウトパフォームする傾向があるが、取引時間中の発表においては発表日当日に買い材料として消化されるかのような大きな取引が発生するのに対して、取引時間外に発表された場合は翌営業日以降数営業日にかけて取引量が増加することが分かった。さらに、テキスト情報の株式市場に対する有用性を確認するため、個別ニュース毎に付与されたポジティブ/ネガティブを表すスコアを用いてニュース指標を作成し、これを投資シグナルとして活用する実現性の高い投資戦略を提案している。当投資戦略はシミュレーション期間全体では、作成したニュース指標は投資戦略のシグナルとしての有効性は示したものの、2020 年 2 月のコロナ禍発生以降のパフォーマンスは明確に低下した。コロナショック以後の期間でニュース指標の有効性が低下した要因として、コロナ禍での取材環境の変化等を背景に、各ニュースの文字数の画一化等、ニュースそのものが質的に変化した可能性があると考えられる結果となった。

#### 第 4 章 最大独立集合問題の解に基づくポートフォリオ構築

膨大な組み合わせの中から最適な銘柄群を選択するという、ポートフォリオ構築の実務において有用性のある離散的な銘柄選択手法の開発を目指して、第 4 章では、最大独立集合問題の解に基づいて採用銘柄を選定することで互いに低相関な銘柄のみで構成されたポートフォリオを構築し、代表的な株式指数との比較を含むパフォーマンス検証を実施した。本研究のシミュレーション実証分析は、従来手法では実務上、非現実的な計算時間を要する組み合わせ最適化問題を高速に解くことが可能な東芝の Simulated Bifurcation Machine を用いて最大独立集合問題を解くことにより実現したと言える。最大独立集合問題の解に基づき銘柄選定したポートフォリオは、その特性上小型株にティルトする傾向があり、これが主要な株式指数をアウトパフォームした主な要因となっていることが分かった。ポートフォリオ構築における銘柄選定において様々な銘柄採用基準が考えられる中、この手法は銘柄間の相関係数のみに着目することでポートフォリオ採用銘柄を選択していると言え、離散的な銘柄選択の今後の可能性を示していると考ええる。

## 参考文献

- [1] Focardi, S. M., and Fabozzi, F. J. (2004), “A methodology for index tracking based on time-series clustering”, *Quantitative Finance*, 4(4), 417–425.
- [2] Dose, C., and Cincotti, S. (2005), “Clustering of financial time series with application to index and enhanced index tracking portfolio”, *Physica A*, 355, 145–151.