

# 菊池 元太 氏 博士論文審査要旨

## I. 論文の主題と構成

菊池元太氏が提出した博士論文「Toward Discovering Causal Relations from Manufacturing Data: Heteroscedasticity and Variable Groups」は、製造データから因果関係を探索するための新しいアプローチに関する研究を報告する。論文の主な焦点は、非線形性、時間依存性、分散不均一性を持つデータに対する因果探索手法と、変数群間の因果関係を探索するための新しい手法の提案にある。第1章Introductionでは、製造データから因果関係を推測することの重要性と、既存の因果探索手法が直面する課題について述べている。特に、製造データ特有の分散不均一性や変数群の扱いに焦点を当て、これらの問題に対処するための研究の動機を説明する。第2章 Backgroundでは、確率論、統計学の基本概念と、因果構造を表現するためのグラフ理論に関する基本用語を紹介する。第3章 因果モデリングでは、因果関係を数理的にどのように表現するか、特に潜在反応モデルと因果的ベイジアンネットワーク、構造方程式モデルに焦点を当てて説明する。また、因果探索における標準的な仮定についても触れている。第4章 非線形時間系列データに対する因果探索では、非線形性、時間依存性、分散不均一性を持つデータに対する因果探索手法を提案し、数値実験による有効性の検証結果を報告する。この章では、Location-Scale Noise Model (LSNM)を時間系列データに拡張したTime-Series LSNM (TS-LSNM)を提案する。第5章 線形関数関係を越える非線形データにおける変数グループ間の因果探索においては、線形性を仮定しない変数グループ間の因果関係を推測する新しい手法を提案し、その効果を数値実験によって検証する。第6章 実世界の製造データへの適用においては、提案手法を実際の製造プロセスデータに適用し、その結果を既存の手法と比較する。この実験では、提案手法が実世界の問題に対しても有効であることが示される。第7章 結論では、研究の要約および今後の課題について議論する。

## II. 論文の概要

本博士論文は、製造データから因果関係を探索するための新たな手法に関する研究成果を報告している。製造業界において、データから品質改善のための因果関係を特定することは重要であるが、製造データは非線形性、時間依存性、分散不均一性といった複雑な特性を有しており、これらの特性を考慮した因果関係の推測は容易ではない。既存の因果探索手法はこれらの特性を十分に考慮しておらず、また、複数の変数から成る変数グループの扱いについても課題が残されていた。本論文では、分散不均一性を考慮に入れた非線形な因果関係がある場合の時間系列データによる因果探索手法と、線形性を仮定しない変数グループ間の因果関係を推定する新しい手法が提案されている。非線形性、時間依存性、分散不均一性を持つデータに適用可能なTime-Series Location-Scale Noise Model (TS-LSNM) と、変数群間の因果関係を推定する手法が提案され、人工データおよび実際の製造データを用いた数値実験を通じて、既存手法と比較して、これらの手法の有効性が確認された。

### Ⅲ. 論文の評価

本博士論文は製造データに対する統計的因果探索手法を提案するものである。従来の統計的因果探索法は製造データの特性を考慮することに焦点を当てていなかった。提案法は、因果構造を推定するモデルにおいて、非線形構造、時系列構造、および分散不均一の下において、適切にモデリングを行い、因果探索を行うデータ解析法を提案したものである。さらに、変数がグループ単位で因果構造を持つ場合にその因果探索を行うための方法も提案している。提案された手法は、製造データの特性を考慮しつつ、それら特性に関する仮定が適切であれば因果関係をより正確に推定できると期待できるため、データ駆動型の品質改善に寄与することが期待される。理論だけでなく、数値実験による他の手法との比較も行い、提案手法の有効性を示したことも非常に意義がある。実際の現場で得られるデータへの適用も行い、現場の目線からも妥当な因果構造を推定できた。データを駆使した実務的な課題の解決に積極的に取り組んでおり、ディプロマポリシーで定められている通り、現実問題をデータサイエンスの力で解決する方法を提案したものと認めることができる。また、研究テーマである因果探索について十分な理解がされており、類似手法についてもよく調査がされている。そのため、自身の課題に有効かつ独自性のある手法の提案に繋がっていると評価できる。モデルの推定には十分なサイズのデータが必要など、実際の運用面での課題も見受けられたものの、この研究は、製造業界における因果探索の新たな可能性を開くとともに、品質管理やプロセス改善のためのデータ分析に新たな手段を提供すると評価できる。

### Ⅳ. 結論

滋賀大学大学院データサイエンス研究科論文審査基準の各項目に照らし、博士論文として十分な内容であることを確認した。