

## 論文審査の結果の要旨

論文提出者名 岡田 謙介

多次元尺度構成法は、複数の対象間の類似度もしくは非類似度データを入力とし、多次元連続体上に対象を位置づける多変量解析の手法である。歴史的には、多次元尺度構成法は心理学的尺度構成法に関する研究から生まれた経緯がある。心的現象の多くは物理的現象と異なり量的に取り扱うための方法が自明でないが、これを量的に取り扱うことを可能にする方法の体系が心理学的尺度構成法である。多次元尺度構成法は、1次元の尺度構成法の多次元データへの拡張として半世紀ほど前に確立した。本論文ではこうした歴史に鑑み、主に心理学および社会科学分野への適用を念頭に入れた多次元尺度構成法のいくつかの現代的拡張を提案している。

本論文でなされた多次元尺度構成法の拡張は、いずれもベイズ推定を用いたものであることに特色がある。ベイズ推定は事前確率とデータから得られた尤度とを組み合わせることで未知母数の事後推定を行う方法論であり、理論的美しさと実用性を兼ね備え近年注目を集めている。ベイズ推定では多くの場合実行困難な高次の積分計算が頻出するが、本論文ではマルコフ連鎖モンテカルロ法に基づく数値的方法によりこの問題を解決している。

本論文は5章より構成される。第1章では多次元尺度構成法の歴史と特徴、および先行研究でのベイズ推定による多次元尺度構成法モデルが説明されている。以降、ベイズ推定による多次元尺度構成法の拡張として、Minkowski 距離を扱うモデル(第2章)、多次元展開法モデル(第3章)、および確認的モデル(第4章)の提案とその評価について述べられている。また第5章ではこの手法を応用研究者が手軽に実行するためのフリーソフトウェアが開発について説明されている。第6章では全体をまとめ、全体的討論を行っている。

第2章では、Minkowski 距離を扱うためのベイズ推定による多次元尺度構成法の拡張が提案された。心理学には Minkowski 距離を用いて心理的空間をモデリングする長い研究の歴史がある。この分野で長らく使われてきた方法論は、Minkowski 指数の値を網羅的に設定して分析を繰り返し、ストレス、すなわち観測された非類似度とモデル距離との二乗誤差を標準化した指標がもっとも小さくなる Minkowski 指数の値を求めることであった。本論文では、まずこの枠組みの中で新しい最適化法を用いた再分析を行い、既存の研究でストレスが最小化できていなかったこと、新しい最適化法を用いれば理論的に導かれるストレスの等値性が確認されることを示した。続いて、ベイズ推定による Minkowski 指数の推定という新たな枠組みの研究をおこなった。これについては1本の先行研究があったが、シミュレーション研究により先行研究の方法では推定値に大きなバイアスを生じていることが示された。そこで、ベイズ推定による多次元尺度構成法モデルを Minkowski 距離へと

拡張することにより、安定した推定のできる方法が提案された。この方法は、シミュレーション研究および実データ解析でよい性質を示した。

第3章では、ベイズ推定による多次元展開法の手法が提案された。展開法は典型的には複数の評定者が複数の対象について評定を行ったデータに対して、評定者と対象の双方を低次元の同じ空間上に布置する統計手法である。この展開法のモデルは、欠測を含む多次元尺度構成法モデルとして再定義できる。本論文ではこのことを利用し、データ拡大法（data augmentation method）のアルゴリズムを用いて欠損値を処理することで、ベイズ推定による多次元展開法を実現する方法が提案された。シミュレーション研究により提案手法は正しく布置座標の復元ができることが示された。また、既存の多次元展開法手法との比較を行ったところ、点推定値の精度は既存の方法と同等もしくはそれ以上であり、かつ提案手法では推定誤差も正確に推定できる利点があることが示された。

第4章では、ベイズ推定による確認的多次元尺度構成法が提案された。統計手法は探索的方法と確認的方法とに大別することができるが、心理学研究において多次元尺度構成法と並んでよく使われる因子分析と比較すると、多次元尺度構成法では確認的手法が未整備であった。そこで本論文では、ベイズ推定を利用して距離行列に構造がある場合の確認的多次元尺度構成法モデルが提案された。ベイズ比を用いることでモデルが評価され、これにより構造を定量的に評価することが可能になった。シミュレーション研究により本提案手法が正しくモデル構造を判定することが示され、また多特性・多評定者データへの適用例が示された。

第5章では、R言語を用いたベイズ推定による多次元尺度構成法の分析を行うためのプログラムの開発と公開について述べられている。優れた統計学的方法論が提案されてもソフトウェアの不在のために実際の分析では使われないという例は多いが、本章の成果により応用研究者は無償でベイズ推定による多次元尺度構成法による分析を行うことができる。

本論文はベイズ推定による多次元尺度構成法という新しいテーマに取り組み、複数の有用な拡張を行った優れた研究報告であると言える。各章はベイズ推定による多次元尺度構成法の拡張という点では共通するが、実際に扱った問題やモデルは各章ごとに異なり、各章それぞれがその独自性を持つものとなっている。現在、計算機能力は飛躍的向上を続けており、数値的方法を用いたベイズ的方法論は今後ますます有用性が高まっていくと期待されるが、実際に応用研究者が使うことのできるソフトウェアの開発・公開を行い、実際の問題解決のために利用できるようにした点も高く評価できる。

これらの成果により、本論文は博士（学位）の学位に値するものであると審査員全員が判定した。なお、第2章の研究は *New Trends in Psychometrics*、第5章の研究は *Applied Psychological Measurement* 誌にそれぞれ掲載されている。