



Title	Structural equation modeling for diffusion processes based on high-frequency data
Author(s)	草野, 彰吾
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101734
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名（草野彰吾）	
論文題名	Structural equation modeling for diffusion processes based on high-frequency data (高頻度データに基づく拡散過程に対する構造方程式モデリング)
論文内容の要旨	
<p>構造方程式モデリング(SEM)は潜在変数と呼ばれる実際に観測することのできない変数間の関係を調べるための統計的手法である。本論文では、高頻度データに基づいてSEMを実行できるように、連続時間確率過程の一種である拡散過程に対するSEMを定式化し、パラメータの推定量、適合度検定のための検定統計量、情報量規準を提案し、その数学的正当化を行っている。</p> <p>i.i.d. モデル(独立同一分布に従うモデル)におけるSEMでは、パラメータ推定の方法として最尤法が、適合度検定の方法として尤度比検定がよく用いられる。一方で、拡散過程モデルの場合、尤度を厳密に求めることができないため、最尤法や尤度比検定を使用することができない。そこで、本研究では擬似尤度を用いたパラメータ推定の方法を考え、提案した推定量が一致性および漸近正規性をもつことを示した。また、擬似尤度比を用いた適合度検定を提案し、提案した検定統計量が帰無仮説の下、カイ二乗分布に分布収束すること、および検定の一致性を証明した。さらに、パラメータのスペース推定量、スペース推定量を用いた適合度検定も提案し、その漸近的性質を示した。</p> <p>SEMは検証的な分析法であるため、モデルに関する十分な理論や仮説が必要不可欠である。一方で、候補となるモデルが複数個存在し、その中から最適なモデルを選択したい状況がある。i.i.d. モデルの場合、赤池情報量規準(AIC)やベイズ情報量規準(BIC)などの情報量規準によって、最適なモデルを推定するのが一般的である。しかし、上述のとおり拡散過程モデルでは尤度を明示的に表現することができないので、AICやBICをそのまま使うことができない。そこで、擬似尤度に基づいて拡散過程に対するSEMの擬似赤池情報量規準、擬似ベイズ情報量規準を提案し、その数学的正当化を行った。</p> <p>最後に、数値シミュレーションを行い、提案した推定量、検定統計量、情報量規準の漸近挙動を確認した。</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

	氏　名　(　草野彰吾　)	
	(職)	氏　名
論文審査担当者	主　查　　教　授	内田 雅之
	副　查　　教　授	鈴木 譲
	副　查　　教　授	杉本 知之

論文審査の結果の要旨

構造方程式モデリング(SEM)は、直接観測できない潜在変数を導入し、潜在変数や観測変数の間の因果関係を分析するために広く用いられる統計解析法である。しかしながら高頻度時系列データに基づくSEMに関する研究はあまり多くない状況である。その理由の一つとして、高頻度時系列データ解析において用いられる確率微分方程式モデルでは明示的な尤度関数の導出が困難である点が挙げられる。本論文では、確率微分方程式で定義される拡散過程に基づいたSEMの定式化およびその数学的正当化を行った。具体的には、連続時間確率過程における擬似尤度解析を駆使して、次の成果を得た。(i)観測過程(高頻度時系列データ)を利用して、因子負荷量(因子から観測変数へのパス係数)や因子共分散に関するパラメータの擬似尤度関数を構成し、擬似最尤推定量(QMLE)を導出した。また、適合度検定のために擬似尤度関数に基づいた検定統計量を提案し、QMLEの漸近正規性や、帰無仮説の下で検定統計量がカイ二乗分布に分布収束すること、および検定の一貫性を証明した。(ii)真値がゼロであるパラメータを多数含むスペースSEMを定式化し、スペース推定量やそれにに基づく検定統計量を提案した。また提案した統計量の漸近的性質を示した。(iii)複数の構造方程式モデルから最適なモデルを選択するために、擬似赤池情報量規準(QAIC)や擬似ベイズ情報量規準(QBIC)を構築した。QAICについては、期待平均対数尤度に対する漸近不偏性を示し、QBICに関しては周辺尤度の近似の正当性およびモデル選択の一貫性を証明した。QAICの漸近不偏性およびQBICにおける周辺尤度の近似のために、擬似尤度関数を用いた統計的確率場における大偏差不等式を導出した。(iv)提案した推定量、検定統計量、QAIC、QBICの漸近挙動を数値シミュレーションによって検証した。

上述の通り、拡散過程に基づくSEMの構築およびその数学的正当化は顕著な学術的貢献であり、博士（理学）の学位論文として価値のあるものと認める。