

## まえがき

本書は、確率と統計の基礎を修めた学部上級以上の学生や社会人向けに、主にカルマンフィルタを用いた時系列解析の方法論と、統計解析ソフトウェア R を用いたデータ解析の実践的な指南を与えたものである。ほとんどの企業が売上高の増減要因を分析して将来の見込みを立てるように、巷には時系列データを分析して予測する状況が溢れ返っている。その様々な時系列分析のニーズに応えられる柔軟な時系列モデルの枠組みとして状態空間モデルがあり、状態空間モデルの推定をコンピュータで高速に与える計算手法がカルマンフィルタである。

カルマンフィルタは元来、工学分野における動的システム制御の手法として、カルマン (Kalman) の論文 [13] で提案されたものであった。その後、統計分野における時系列解析手法としてのカルマンフィルタの有用性が見出され、現在に至るまで様々な派生形が生まれるとともに、その応用範囲を拡大してきた。これまで最も普及してきた実用的な時系列モデルとしては ARIMA モデルが挙げられるが、データの多様化と大容量化によって従来の ARIMA モデルでは対応できない整数型やバイナリ型の時系列、相関をもつ複数の時系列、非線形な挙動をする時系列などを扱う状況が出現し、より発展性のある状態空間モデルの出番が増えるようになった。

本書における状態空間モデルおよびカルマンフィルタの解説の流れと記法は、主に文献 [9] に沿って書かれているが、その内容は本書の目的に照らして必要最小限へと抑えているため、関連情報や理論の詳細は文献 [9] および本書の本文中に挙げた引用文献を参照されたい。カルマンフィルタの文献は洋書・和書問わず多数の良書が発刊されているが、本書の特色は多種多様な時系列に対応できるよう豊富な解析例と具体的な解析コードの例示に全体の約 3 分の 1 を注いだ点にある。他にも文献 [4] では手法の詳細

細を省く代わりに解析例が丁寧かつ平易に解説されており、その解析にはクーブマンらが開発したC言語のライブラリが用いられている。本書で示す解析コードは、統計解析を行う者にとって馴染みのあるフリーの統計解析ソフトRで記述しており、特にカルマンフィルタでの解析に関してはRのKFASパッケージを用い、利用上の留意事項まで詳しい解説を与えた。なお、文献[19]ではもう一つのとても有用なカルマンフィルタのRパッケージであるd1mによる解析例が多数示されているが、パッケージKFASを用いる主な利点として、非定常モデルの初期化に厳密な尤度を与えられ赤池情報量規準によるモデル選択が扱えること、カウントやバイナリデータなどの正規分布以外から生成された観測データを扱えることの二つが挙げられる。本書では、誰でもデータをとれる体重計測記録や、企業などの月次販売額の推移、日々の火災件数に、満期の異なる金利といった様々な身近なデータに対する解析例を示すことで、読者の方にも状態空間モデルとカルマンフィルタの応用を拡げてもらうことを狙いとしている。

本書の構成は以下のとおりである。まず第1章では事前準備として多変量の確率分布と時系列の基礎知識および代表的な時系列モデルについて解説する。第2章以降では状態空間モデルが導入され、第2章では最も基本的な状態空間モデルであるローカルレベルモデルを、第3章では線形モデルと正規（ガウス）分布を仮定した状態空間モデルを扱い、それらの解析手法としてカルマンフィルタを導入する。続く第4章では、第3章のモデルに対して観測分布を正規分布以外へと拡張した非ガウス状態空間モデルと、その解析手法を扱う。解析手法にはインポートランス・サンプリングと呼ばれるモンテカルロ法が用いられるが、そこでもカルマンフィルタの繰り返し適用がベースとなっている。最後の第5章では、非線形かつ非ガウスな状態空間モデルの一般形を扱い、その解析手法として粒子フィルタを紹介する。図1に示すように、第2章から第5章に進むに連れて、扱うモデルがより一般化されていく流れをとっている。なお、本書では扱わないが、他にも非線形なガウス状態空間モデルを扱う手法として、拡張カルマンフィルタや無香カルマンフィルタなどが提案されており、それらについては例えば文献[14, 2]を参照されたい。

	第2章	第3章	第4章	第5章
モデルと 包含関係	ローカル レベルモデル	線形 ガウス 状態空間モデル	線形 非ガウス 状態空間モデル	非線形 非ガウス 状態空間モデル
解析手法	カルマンフィルタ		インポートランス ・サンプリング	粒子フィルタ

図 1 本書の各章で扱うモデルと解析手法.

最後に、本書の執筆機会をくださった慶應義塾大学の渡辺美智子先生ならびに編集委員の方々、執筆途中の段階から内容を確認し意見をくださった東京工業大学の叶開氏、高橋宏典氏、そして、本書を担当された共立出版の諸氏に深く感謝の意を表する。

2016年7月

野村俊一