

経済価値ベースのリスク管理のための保険数理モデルの非線型拡張の研究

メタデータ	言語: Japanese 出版者: 明治大学科学技術研究所 公開日: 2024-11-29 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 松山,直樹 メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/10291/0002000880

経済価値ベースのリスク管理のための保険数理モデルの非線型拡張の研究
総合数理学部 松山直樹

School of Interdisciplinary Mathematical Sciences
Naoki Matsuyama

2025年に保険業界に導入予定の新しいソルベンシーマージン規制では、保険契約の将来キャッシュフローの現在推定をイールドカーブ (YC) で割り引いた現在価値+リスクマージンで与えられる市場整合的な経済価値評価が必要になる。本研究では第二の柱と呼ばれる経済価値ベースの内部管理に用いる保険数理モデルを扱う。特に生命保険では保険期間が超長期に及ぶため、死亡率に代表される保険キャッシュフローの超長期予測と観測不能年限へのYCの超長期外挿が重要な論点となるが、従来の保険数理モデルは強い仮定に基づくパラメトリックモデルで、解釈可能性に優れるものの線型性が強く超長期に適用した場合には非現実的な結果をもたらす問題点があった。本研究ではニューラルネットワーク (NN) を用いて既存の保険数理モデルを非線型拡張し、テストデータ上の高い推定精度と現実的な超長期出力結果を得るとともに、NNの弱点である解釈可能性問題の克服を目指した。

1. 死亡率モデルのNNによる非線型拡張

代表的な死亡率予測モデルである Lee-Carter (LC) モデルは、複数年の年齢別対数死亡率データを特異値分解 (SVD) して得られる時系列成分×年齢成分の双線型項と平均水準を表す年齢成分の和で表現されるモデルであり、解釈可能性に優れるが、時系列成分に自己回帰モデルを適用し外挿することで将来予測を得る二段階推定になることと、双線型構造による表現能力の限界が課題であり、その結果、長期予測に用いた場合には過剰な死亡率低下を招くことが知られている。LCモデルのNN拡張の既存研究としてはSVDを自己符号化器に置き換えた二段階推定モデル、畳み込みNN (CNN) を用いた一段階推定モデルなどがあるが、NNは高い予測性能が得られる反面で一段階推定と解釈可能性の両立が課題であり、形状安定性の観点で超長期予測への適用も難しかった。これらの課題の一つの解決策として提案されたのが変分自己符号化器VAEによるLCモデルの拡張 (Miyata & Matsuyama, 2022) であり、高い予測性能とともにLC型の解釈可能性を備え、HMDデータを用いた50年超長期予測 (図1) においても

過度な死亡率低下を防ぎ現実的な結果 (濃色部) が得られた。

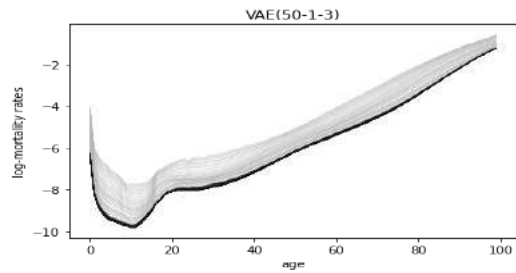


図1：対数死亡率50年予測 (日本・男性)

全死因死亡率については一定の解決が得られたものの、死因別死亡率について死因間の依存性を反映したモデルで優れた予測精度を得ることのハードルは高く、最近になって精度面にフォーカスしたデータ主導型アプローチとしてテンソル分解を用いるADAPTモデルがZhang et al. (2023)により提案された。ADAPTは罰則付き正準ポリアディック分解の計算コストを抑制する工夫を施したアルゴリズムであり、死因別死亡率のテンソルデータMからランク数R個の死因成分uと年齢成分vと時系列成分wを次式によって得る。第二項が正則化のための罰則項である。(詳細は原論文参照)

$$\underset{u, v, w}{\text{minimize}} \left| \log M - \sum_{r=1}^R d_r \cdot u_r \circ v_r \circ w_r \right| + \sum_{r=1}^R (\lambda_u |\tilde{D}_r^u u_r|_1 + \lambda_v |\tilde{D}_r^v v_r|_1 + \lambda_w |\tilde{D}_r^w w_r|_1).$$

この将来予測はR個の時系列成分に自己回帰モデルを当てはめる二段階推定になる。ADAPTは優れた予測性能を得るためにランク数Rは1より大きくならざるを得ず、それが解釈性の妨げになっておりZhang et al. (2023)でも第一成分に解釈を与えることしかできていない。第一成分ではLCと同様に医療技術進歩と解釈できる単調減少な時系列成分が得られるが、三重線型形式であるため感応度の年齢パターンは死因に依らず同じという表現能力の限界がある。また、年齢成分ランク数Rに応じた多次元の時系列モデルによる将来予測は形状安定性を欠きやすい弱点を持つ。これらの弱点に対応し、死因別のLC型の解釈性を獲得するために、テンソル処理に適したCNNを用い、1次元潜在層を持つ畳み込み自己符

号化器 (CAE) にテンソル分解を置き換えたモデルを構築した (図 2)。

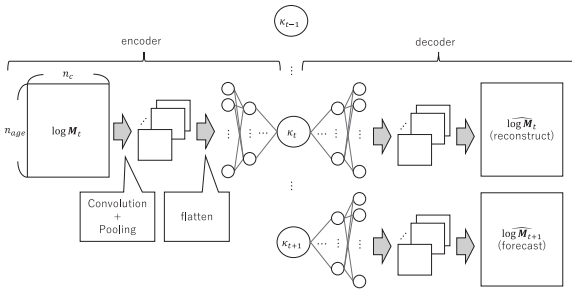


図 2 : CAE モデルのアーキテクチャ

ここで 1 次元潜在層により与えられる単一の時系列成分 k は LC や ADAPT 第一成分と同様に医療技術の進歩と解釈でき、これに対する死因別の年齢感度も得られることからほぼ完全な死因別の LC 型解釈可能性を有している。WHO の 5 歳区分データの ICD10 対応分を非零の 8 死因に圧縮したものを用いたところ、潜在層の単純化を NN の表現力でカバーできテストデータ上で ADAPT を上回る予測性能を得た。ADAPT に比して CAE の死因別死亡率の予測の形状安定性が優れており、それらを全死因に再構成した 50 年予測結果 (濃色部) もより自然な結果が得られた (図 3 : 左 CAE、右 ADAPT)。

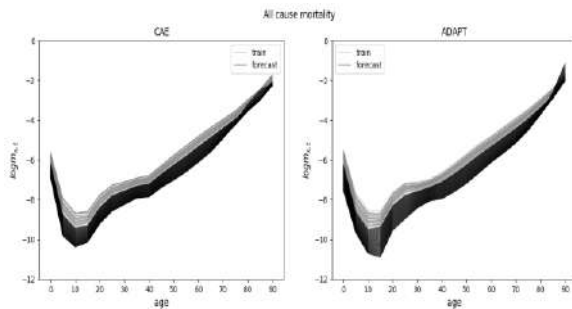


図 3 : 50 年予測 CAE vs ADAPT (日本・男性)

2. YC 外挿モデルの NN による非線型拡張
死亡率モデルもさることながら経済価値に重大な影響を与えるのが YC 外挿モデルである。既存の YC 外挿モデルには仮定主導型とパラメトリック型に分類される。仮定主導型では、仮定される究極フォワードレート UFR への 60 年での収斂を仮定する Smith-Wilson 法が知られているが、安定性は高いものの外挿部分の自然な YC ダイナミクスが失われるため、超長期年限の平行ヘッジを想定するような金利リスク管理とは矛盾する。パラメトリック型では 4 変数の Nelson-Siegel (NS) モデルが代表的で、 t 年スポットレート $r(t)$ は次式で与えられる。

$$r(t) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1 - \exp(-\frac{t}{\lambda})}{\frac{t}{\lambda}} \right) + \beta_2 \left(\frac{1 - \exp(-\frac{t}{\lambda})}{\frac{t}{\lambda}} - \exp(-\frac{t}{\lambda}) \right)$$

この NS モデルの変数を 6 に増やし表現力を高めた Svensson (Sv) モデルも知られている。これらのパラメトリックモデルは観測可能年限のデータでパラメータを推定したあと t に外挿したい年限を代入することで YC がえられる手軽さがあるが、モデルの表現能力に限界があり、外挿値の安定性を欠く問題も指摘されてきた。本研究では仮定主導型でもパラメトリック型でもない第三のアプローチとして、再帰型 NN を用い非線型表現能力の高い新たな YC 外挿モデルの開発に取り組んだ。この NN モデルは NS や Sv よりもテストデータ上で高い推定精度が得られ、観測値 (黒丸) から見て NN モデル (実線) は最も自然な外挿結果を得られた (図 4)。外挿結果の 20 日間の変動性についても NN (菱形) は観測値 (黒丸) に最も近い水準となった (図 5)。

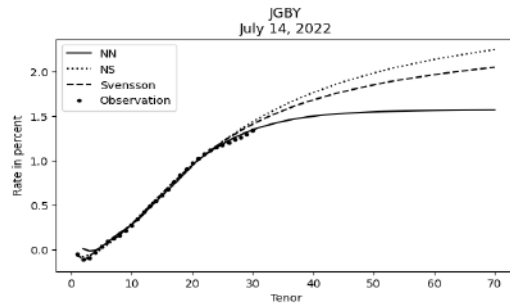


図 4 : 日本国債 YC 外挿結果比較

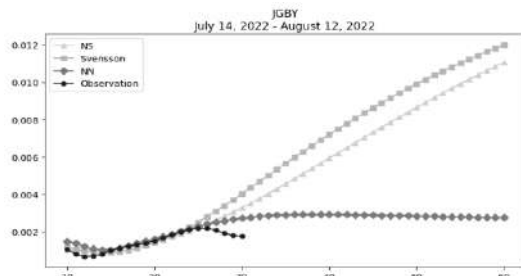


図 5 : 日本国債 YC 外挿変動性比較

なお解釈性に関しても、この NN はバックプロパゲーションによる入力感度分析が可能である。(モデルの詳細は査読論文として近日中に公開予定)

3. まとめ

本研究を通じて、超長期の市場整合的モデリングが求められる経済価値のリスク管理において、NN モデルの持つ非線型表現能力の有用性が示された。

参考文献

Miyata & Matsuyama (2022) Extending the Lee-Carter model with variational autoencoder; a fusion of neural network and Bayesian approach, ASB
Zhang et al. (2023) Cause-of-death mortality forecasting using adaptive penalized tensor decomposition, IME