企画セッション | 部会・連絡会セッション：計算科学技術部会

2022年9月7日(水) 13:00 ~ 14:30 | F会場 E1棟3F 31番教室

[1F_PL] デジタル技術における縮約モデル

座長：鈴木 正昭 (中京大)

[1F_PL01] 構造解析における縮約モデルのデータ同化への応用

*綿引 壮真[1]、大峡 充己[1] (1. 構造計画研)

[1F_PL02] 大規模核融合プラズマ乱流シミュレーションデータの主成分分析

*朝比 祐一[1] (1. JAEA)

[1F_PL03] 炉物理計算に対するROMの適用例

*遠藤 知弘[1] (1. 名大)

計算科学技術部会セッション

デジタル技術における縮約モデル
Application of Reduced Order Model in digital technology

（1）構造解析における縮約モデルのデータ同化への応用

(1) Application of reduced order model in structural analysis to data assimilation

*綿引 壮真[1]，大峡 充己[1]
[1]構造計画研究所

1. はじめに

近年、多くの分野でデジタルツイン、CPS、BIM などのデジタル空間と現実世界の情報を融合する試みが加速している。一方で、デジタル空間と現実世界の間に存在するギャップを埋める方法論は未だ確立していないことから、これらのシステムを重要な意思決定に適用するにはまだ多くの課題がある。また、センシング技術の発展により多くの観測情報がリアルタイムに得られるようになってきているが、観測可能な情報には物理的・経済的な限界がある。さらに、将来の状態を予測するためには何かしらの予測モデルが必要となる。近年では、データから直接予測モデルを構成する機械学習技術が盛んに用いられるようになってきている。しかし、現象をブラックボックスとしてモデル化する機械学習技術は、物理的解釈や信頼性の担保、適切な学習データセットの準備などまだ多くの課題がある。データ同化は、力学などの物理法則に基づく数値シミュレーションに対し観測データを融合することで、高精度に現象やパラメータを推定・予測する技術である。物理法則に基づくシミュレーションをベースとしているため、推定結果に対する物理的な解釈が可能であり、観測データは必ずしも時空間的に密である必要はないという点で機械学習に対して優位である。このデータ同化技術は特に数値気象予報分野で発展してきた方法論であるが、気象以外のさまざまな分野のシミュレーションに対しても適用することが可能であり、近年では工学分野への適用にも広がりを見せている。しかし、計算機環境に制約のある現場で比較的規模の大きなモデルに対してリアルタイムにデータ同化を適用するには計算コストの高さが課題となり、コストの高い数値シミュレーションを代替するような縮約モデル(Reduced Order Model, ROM)を用いた計算コストの削減に需要が高まっている。本講演では、特に構造解析分野におけるデータ駆動型手法に基づく縮約モデルのデータ同化技術への応用に関する取り組みを紹介する。

2. リアルタイムデータ同化システム

2-1. データ同化アルゴリズム

データ同化とは、数値シミュレーションにおける初期・境界条件、モデルパラメータなどの不確かな要素を、観測値を用いて修正する数理統計手法である。データ同化のアルゴリズムは、逐次型と非逐次型に大別することができる。逐次型アルゴリズムは、ある観測データを逐次的に取り込み、その都度シミュレーションのパラメータを更新する。逐次型アルゴリズムとしては、Ensemble Kalman Filter (EnKF) [1)]や Particle Filter (PF)がその代表例として挙げられる。非逐次型アルゴリズムは、ある有限時間区間の観測データをまとめて取り込み、その区間の観測データを良く再現するような初期状態を推定する。非逐次型アルゴリズムは、四次元変分法や Ensemble Smoother (ES) [2)]、Ensemble Smoother with Multiple Data Assimilation (ES-MDA) [3)]が代表例として挙げられる。本講演では、逐次的に状態を推定することができ、シミュレーションモデルとして商用ソフトウェアなどの汎用コードを非侵襲で利用することができる EnKF に着目する。

2-2. データ駆動型縮約モデリング

データ駆動型縮約モデリングは、方程式を陽に用いることなくシミュレーションの入力と結果等のデータセットから直接、入出力の間にある関係性を縮約したモデルを作成する技術である。本講演では、特に固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition, POD) を用いた縮約モデルを利用した例を紹介する。POD では、モデルパラメータを変更したいくつかのシミュレーション結果を各列に並べた行列を特異値分解することでモード分解し、支配的な空間構造を抽出することで次元を縮約する [4)]。さらに、放射状基底関数 (Radial Basis

Function, RBF) 補間を用いて、入力と各モード係数をシームレスに対応させる補間関数を作成することで、入力値に対して高速に結果を出力する POD-RBF による縮約モデルを構築することができる [5)]。

2-3. デジタル画像相関法

デジタル画像相関法 (Digital Image Correlation, DIC) は画像解析を用いて物体の変位やひずみを非接触で計測する技術である [6)]。計測対象箇所にパターン追跡のための模様を塗料やシールなどを用いて付与しておき、カメラで撮影した画像を画像解析することでパターンの変化を物理量に変換する。対象に応じてカメラやレンズ、照明を変更することで、移動体や振動する物体、大変形や破壊などの多様な現象を計測することができる。また、速度や加速度、ひずみ速度や主ひずみなど、一つの計測システムから同期した複数の物理量を同時に面的に取得することができる。DIC を利用することで、データ同化に多くの計測データを取り込むことができることから、データ同化システムの構成自由度や推定精度を向上させることができる

2-4. データ同化システムの例

構造解析の縮約モデルを用いたリアルタイムデータ同化システムの例を図 1 に示す。対象物の計測箇所に画像計測のためのパターンを塗布し、カメラで撮影した画像を DIC で分析することで、表面の変位およびひずみを逐次取得する。図の例ではフォースゲージで入力荷重を取得可能な状況を示しているが、目的に応じて様々なセンサデータを組み合わせて利用できる。事前にパラメータ・入力を変化させた複数の解析結果を用いて POD-RBF による ROM を事前に構築しておき、この ROM と観測データをデータ同化に利用することで、リアルタイムに構造解析モデルのパラメータ推定と、この推定結果のパラメータを用いた予測が可能である。図 1 のシステムでは、データ同化アルゴリズムとして逐次型の EnKF、ROM の構築には POD-RBF を利用し、構造解析のデータセット作成には並列非線形 FEM 構造解析プログラム FrontISTR [7)]を利用した。

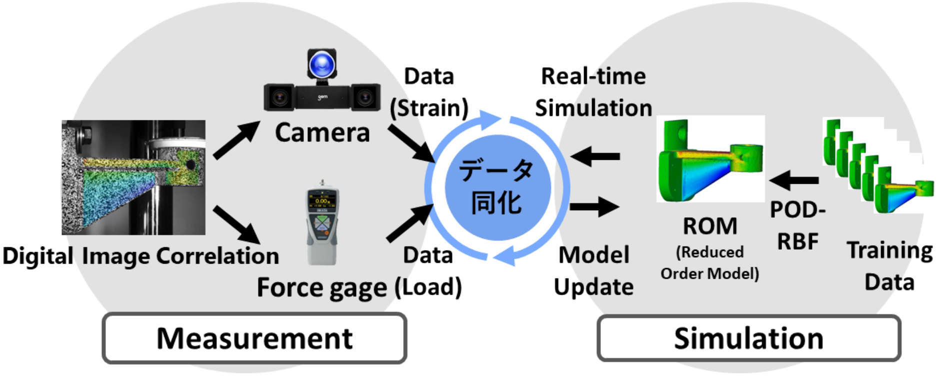

図 1 構造解析モデルの縮約モデルを用いたリアルタイムデータ同化システムの例

参考文献

1) Evensen, G., *The Ensemble Kalman Filter: Theoretical Formulation and Practical Implementation*., Ocean Dynamics 53 (4), pp. 343-367., (2003).

2) van Leeuwen, P. J., Evensen, G., *Data assimilation and inverse methods in terms of a probabilistic formulation*., Monthly Weather Review 124, pp. 2898-2913., (1996).

3) Emerick, A.A., Reynolds, A.C., *Ensemble smoother with multiple data assimilation*, Comput. Geosci Computers & Geosciences 55 (June): pp. 3-15., (2012).

4) Sirovich, L., *Turbulence and the Dynamics of Coherent Structures. I - Coherent Structures*, Quarterly of Applied Mathematics, Vol. 45, No. 3, pp. 561-571, (1987).

5) Ostrowski, Z., R. A. Białecki, and A. J. Kassab., *Solving Inverse Heat Conduction Problems Using Trained POD-RBF Network Inverse Method*., Inverse Problems in Science & Engineering 16 (1), pp. 39-54, (2008).

6) Sutton, M. A., J. J. Orteu, and H. Schreier., *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*, Springer, (2009).

7) 一般社団法人 FrontISTR Commons, “FrontISTR”, 2022 July 13, [Japanese], https://www.frontistr.com/, (cited 2022 August 4).

*Soma Watahiki[1] and Atsuki Oba[2]

[1] Kozo Keikaku Engineering Inc.

2022年秋の大会

計算科学技術部会セッション

デジタル技術における縮約モデル

Application of Reduced Order Model in digital technology

（2）大規模核融合プラズマ乱流シミュレーションデータの主成分分析

(2) Pattern extraction from large scale plasma turbulence simulation data with Principal Component Analysis

*朝比　祐一[1]

[1] 日本原子力研究開発機構

磁場閉じ込め核融合装置の炉心プラズマの閉じ込め性能は乱流輸送によって支配される。高温の炉心プラズマは無衝突性を有するため、非 Maxwell 的な速度分布を示す。そのため、乱流輸送の予測には、第一原理的シミュレーションであるジャイロ運動論的シミュレーションが実験、理論解析問わず幅広く利用される。計算は空間 3 次元、速度 2 次元、時間 1 次元の合計 6 次元空間内で行われ、膨大なシミュレーションデータが生成される 。従来研究では、3 次元空間の流体モーメントなどにおけるパターン形成と乱流輸送との関連性が議論されて来たが、高速粒子研究などからは位相空間内で形成されるパターンと突発的な輸送現象との関連性が示唆されている。しかし 5 次元乱流シミュレーションにおいては、データの大規模性かつ高次元性ゆえどのようなパターンが輸送へ寄与しているか調べるのは困難であった。

本研究では、主成分分析(PCA)による次元削減によって頻出する位相空間内構造の抽出を行った。図 1 は、PCA によって空間 3 次元（径方向r、ポロイダル方向θ、トロイダル方向φ)、速度 2 次元 ($(v_{\parallel}, w)$それぞれ磁力線平行方向、垂直方向速度と対応)、時間 1 次元の合計 6 次元の揺動分布関数時系列データから抽出した位相空間$(\varphi, v_{\parallel}, w)$3 次元の基底の$w=0$ 断面を 16 主成分まで示す。成分 1，2，13，14，15 などはφ 方向に有限の波数を持ち、$v_{\parallel}$方向に対称なバルーニングモードと呼ばれる成分であるとわかった。これらと対応する空間係数(空間 2 次元、時間 1 次元)は、磁場強度分布やバルーニングモードなどプラズマ物理でよく知られた構造と対応していることが明らかとなった。本手法では、可視化困難であった 5 次元の時系列データが、各主成分について 3 次元位相空間構造と 3 次元時空間（空間 2 次元、時間 1 次元）構造が同時に得られていることに注意されたい。

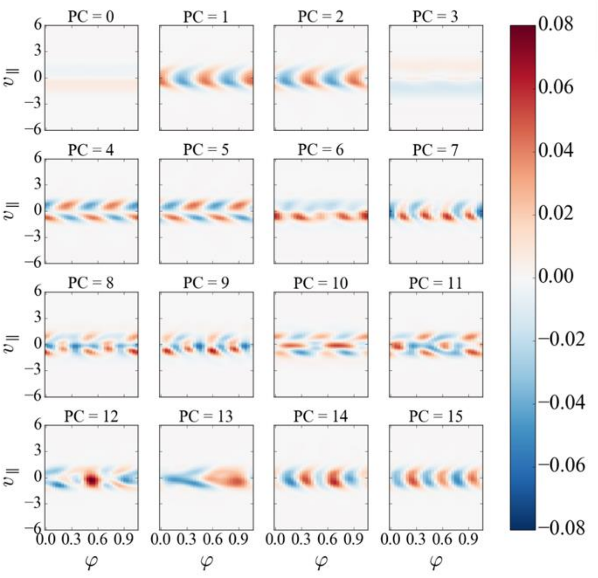

図 1：3 次元位相空間基底の$w=0$ 断面。横軸はトロイダル方向φ、縦軸は磁力線平行速度方向$v_{\parallel}$となる。図上の数字は何番目の主成分かを示す。

講演では、この手法により 10^{12} 程度から $3\text{x}10^{9}$ 程度まで自由度を削減しつつ、データの分散を 83%程度表現できることを示す。また、圧縮したデータから主成分ごとの熱輸送を計算し、どの主成分（つまり位相空間構造）が突発的な熱輸送へ寄与しているかを示す。

*Yuuichi Asahi[1]

[1]Japan Atomic Energy Agency

2022年秋の大会

計算科学技術部会セッション

デジタル技術における縮約モデル
Application of Reduced Order Model in digital technology

(3) 炉物理計算に対するROMの適用例

(3) Application Examples of Reduced Order Model to Reactor Physics Calculation

*遠藤 知弘 [1]
[1] 名古屋大学

1. 緒言

炉物理分野では、ボルツマン輸送方程式に基づくことで体系内を飛び交う中性子の集団的な挙動をモデル化し、中性子実効増倍率k_{eff}や体系内の中性子束(核分裂反応率)の空間分布といった炉心特性を数値計算により予測する。炉物理分野における中性子輸送計算手法のうち、最も正確度の高い数値解法として「連続エネルギーモンテカルロ計算」が挙げられる。ただし、モンテカルロ計算は乱数を利用した確率論的な手法であるため、統計精度が良い数値解を得るためには、極めて多数の中性子を追跡するような高コストな計算を実施せねばならない。また、例えば、実機原子炉の数値解析を燃料ペレット単位で詳細に計算しようと試みた場合、扱うべき情報量のビッグデータ化に加え、対象領域が微細になるほど統計精度が悪化する(領域を通過/領域内で衝突する中性子の頻度が減少する)といった課題にも直面することになる。すなわち、現状の計算機性能をもってしても、実機原子炉を対象とした「連続エネルギーモンテカルロ計算」を用いた詳細な数値解析は、極めて挑戦的な計算とならざるを得ない。

さらに、炉物理計算の分野においては、(i)炉心に装荷する燃料集合体配置の最適化問題、(ii)感度解析(入力パラメータの変化が数値解析結果に与える影響の評価)、(iii)不確かさの定量評価(入力パラメータの不確かさ等に起因した数値解析結果の不確かさ評価)、(iv)データ同化(積分実験データ等の測定結果を融合させた、入力パラメータや数値解析結果の改善)といった取り組みもなされている。これらを実施する際には、高コストな数値解析を多数回実施することは実用的ではないため、低計算コストで実用的に許容される計算精度の数値解析手法の開発・実用化が強く望まれる。

炉物理分野では、その時点で利用可能な計算機性能に応じて、比較的精度良く高速に中性子輸送計算を実施するために、決定論的な数値解析手法(空間メッシュや中性子エネルギー・飛行方向を離散化、あるいは関数展開して数値解を得る手法)において、様々な工夫がなされてきた。このような過去に編み出されてきた工夫は、炉物理計算コードの開発を通じて研究者が培ってきた「工学的知見に基づいた縮約モデル(ROM)」と呼んでもよいかもしれない。本発表では、これまでに開発されてきた炉物理計算特有の「工学的知見に基づいたROM」について概説を行う。さらに、近年、炉物理計算分野において研究開発が取り組まれているROMとして、我々の研究グループにおける研究事例について紹介を行う。

2. 工学的知見に基づいたROM

炉物理計算で解くべきボルツマン輸送方程式は、位置$\vec{r}$、中性子エネルギーE、中性子飛行方向$\vec{\Omega}$、時刻tを変数とした角度中性子束$\psi(\vec{r},E,\vec{\Omega},t)$に関する微積分型方程式である。炉物理計算の特徴として、(a)空間的な非均質性(燃料棒、燃料集合体、炉心)、(b)対象とする中性子エネルギー範囲の広さ($\sim 10^{-5} < E < \sim 10^{6}$ eV)、(c)微視的核反応断面積の入射中性子エネルギー依存性(共鳴断面積、それによる中性子束エネルギースペクトル$\phi(E)$の歪み)、(d)角度中性子束の方向依存性(多峰性、不連続点)、(e)即発中性子寿命と遅発中性子先行核の平均寿命の時間スケールの違い、といった点が挙げられる。従って、各変数それぞれを極めて詳細に離散化(差分化)するような決定論的手法を考えた場合には、計算コストが高すぎて実用的な手法とはならない。このような難問を克服するため、偉大なる先人達は炉物理計算の特徴を巧みに捉え、以下で挙げるような「工学的知見に基づいたROM」を編み出してきた[1]。

多段階計算：最終的に解きたい3次元炉心計算を特に工夫なく詳細に離散化した場合、その計算コストは極めて高くなる。そこで、炉心の幾何形状(燃料棒を格子状に並べた燃料集合体、複数の燃料集合体を配置した炉心)に注目し、①燃料棒単位の1次元 or2次元セル計算→②2次元集合体計算→③3次元炉心計算といった形で、詳細条件で離散化しやすい小規模体系から、粗い条件で離散化した大規模体系へと、段階的に計算を実施する方法論が編み出された。ここで①→②、②→③の計算に移るにあたって「反応率保存」の原理に基づいて、空間均質化およびエネルギー群縮約した実効的な核反応断面積を評価することで、粗く離散化した空間メッシュ・エネルギー群でも精度良い解が得られるように工夫している。なお、②集合体計算において、③3次元炉心計算で現れ得る様々な条件下のベース条件下での核種燃焼計算・ブランチ計算(減速材温度の変化・燃料温度の変化・制御棒有無など)を実施しておき、得られた結果に基づいて「炉心解析用の集合体断面積テーブル」を作成しておく。この断面積テーブルは、3次元炉心計算において各燃料集合体の状態変化を忠実に計算する代わりに、低コストの定数テーブルで再現を試みようとするアプローチであり、炉物理分野における工学的なROMの一例となっている。

等価原理に基づく共鳴計算：①セル計算では、「等価原理」と呼ばれる方法に基づくことで、非均質体系における燃料棒内の中性子束エネルギースペクトル$\phi(E)$を真面目に解く代わりに、その計算と等価な条件となるよう「背景断面積σ_{b}」を与えた簡易式(例：$\phi(E) \propto \left(\sigma_{\mathrm{t},r}(E)+\sigma_{\mathrm{b}}\right)^{-1}E^{-1}$)によって、断面積の共鳴核反応による$\phi(E)$の形状を極めて効率良く推定する方法論が編み出されている。これは計算機性能が低かった時代において、燃料棒内の核種組成や燃料棒セル配置の非均質性が$\phi(E)$に及ぼす効果を「背景断面積σ_{b}」というパラメータを介して縮約したモデルであり、偉大な先人達が考案した「共鳴計算に対する工学的なROM」の先駆けであると言えるだろう。

拡散近似、$\mathbf{SP_3}$近似：③3次元炉心計算において、角度中性子束の飛行方向依存性を考慮した「輸送計算」により数値解を得るには高い計算コストを要する。そこで炉物理計算分野では「拡散近似」が極めて効果的に活用されてきた。拡散近似は、中性子輸送方程式において角度中性子束$\psi(\vec{\Omega})=\psi(\theta,\varphi)$を直交関数(球面調和関数$Y_{lm}(\theta,\varphi)$)で展開し、$l=1$次までの成分までを考慮したROM($P_1$方程式、$\psi(\vec{\Omega}) \approx \left(\phi+3\vec{J}\cdot\vec{\Omega}\right)/4\pi$)に基づいて導出することができる。直交関数展開に基づいたROMの場合、展開次数l,mを多くすることで更なる計算精度向上が見込めるものの、計算コストは高くならざるを得ない。そこで炉物理計算分野では、計算精度と計算コストの両立を図った高度なROMとして、$l=3$次までの角度中性子束展開係数のうち一部のみを考慮したSimplified P_3(SP_3)近似といった巧妙な方法も編み出されており、3次元pin-by-pin炉心計算コードにおいて活用されている。

近代ノード法：③3次元炉心計算では、計算コストを低減しつつ、粗い空間メッシュ(ノード)分割でも離散化誤差を低減できるような数値計算手法として、近代ノード法と呼ばれる一種のROMが開発され活用されている。近代ノード法では、例えば、粗い空間メッシュ内における中性子束空間分布$\psi(\vec{r})$を空間変数に関する多項式や解析式(例：三角関数、指数関数)の足し合わせで巧みに表現することで、離散化誤差の低減を図っている。加えて、拡散近似に基づいた中性子流計算において、集合体不連続因子と呼ばれる画期的なパラメータを導入することで、多段階計算(②2次元集合体計算→③3次元炉心計算)による近似誤差を減らす工夫も編み出されている

一点炉動特性方程式：③3次元炉心計算において、臨界状態($k_{\mathrm{eff}}=1$)の炉心核特性は、k_{eff}固有値方程式の基本モード成分に対応した固有値・固有関数の数値解を求めることにより推定できる。一方、過渡変化時における炉心動特性についても、詳細な3次元炉心計算により予測できなくはないが、さらに多くの計算コストが必要となる。そこで炉物理計算分野では、臨界状態近傍の炉心動特性を高速に推定する手法として、「一点炉動特性方程式」と呼ばれるROMが活用されている。一点炉動特性方程式では、「中性子束の相対的な空間分布やエネルギー分布が、k_{eff}固有値方程式の基本モード形状(過渡変化前の臨界時)と同じである」とみなし、中性子束の大きさ(∝基本モード成分の展開係数)のみが変化する、といったROMにより炉内中性子束分布の時間変化をモデル化している。

一次摂動論に基づいた感度係数評価：入力パラメータの不確かさに起因した不確かさ定量評価やデータ同化による計算精度改善を効率良く実施するためには、感度係数評価(多数ある入力パラメータのうち、

どの入力パラメータが計算結果にどれだけ大きな影響を及ぼすのか評価すること)が重要となる。炉物理計算における入力パラメータとして、微視的核反応断面積などの「核データ」が重要な役割を果たしているが、エネルギー群数~10^2で分割して感度解析を行うことを考えると、膨大な数の核データを 1 つずつに微小変化させて感度係数評価を行う手法(直接摂動法)はあまりに非効率である。そこで炉物理計算分野では、一次摂動論に基づくことで、例えば、k_{eff}の感度係数評価の場合であれば、未摂動条件におけるk_{eff}固有値計算および、その随伴固有値計算を 2 回だけ実施し、核データの変化に対してk_{eff}が線形に変化すると近似した ROM により、核データに対する感度係数を極めて効率良く評価している。

3. 近年の炉物理計算に対する ROM 適用例

過去の炉物理計算分野では、工学的知見に基づいた ROM が活用されており、現在においても効率的かつ有効なアプローチである。計算精度の更なる向上を目指す場合には、ROM により近似誤差を低減できるよう、より詳細な計算手法の開発・採用を目指すこととなる。ただし、計算手法の詳細化は必然的に計算コストの増加を招くため、扱う情報量や計算時間の増加を抑制しつつも高精度な数値解を得られるような打開策が強く望まれる。

近年の炉物理計算分野では、主に他分野(例：流体解析分野)で研究開発がなされている ROM(例：固有直交分解)を、炉物理計算手法として応用する取り組みもなされている。ROM を応用する計算対象に応じて詳細なアルゴリズムは変わることになるが、筆者なりに整理すると、基底展開に基づく ROM 適用の大まかな流れは以下のとおりとなる。

(1) 解くべき対象について、過去に実施した類似の計算条件iで得られた結果(例：中性子束分布ベクトル$\vec{\phi}_i \in \mathbb{R}^{N\times 1}$)を集約するか、あるいは比較的低コストの数値計算手法を用いて様々な条件iで予め計算を実施することで、snapshot データ行列$\mathbf{\Phi} = \left[\vec{\phi}_1 \quad \vec{\phi}_2 \quad \cdots \quad \vec{\phi}_I\right] \in \mathbb{R}^{N\times I}$を準備する。

(2) 解析的な直交関数系(例：三角関数、ルジャンドル多項式、球面調和関数)の代わりに、snapshot データ行列$\mathbf{\Phi}$に対するデータ駆動型アプローチにより、解くべき対象の問題を効率良く展開可能な正規直交基底ベクトル$\vec{u}_k$を求める($k = 1,2,\cdots$)。例えば、行列$\mathbf{\Phi}$を特異値分解(SVD)および低ランク近似することで($\mathbf{\Phi} = \mathbf{U\Sigma V}^{\mathrm{T}} \approx \mathbf{U}_r\mathbf{\Sigma}_r\mathbf{V}_r^{\mathrm{T}}$)、正規直交ベクトル$\vec{u}_k$を$r$列並べた行列$\mathbf{U}_r$を求める。

(3) 解くべき対象の元々の情報量Nよりもrが十分小さければ、別の条件jにおける結果$\vec{\phi}_j$は、r個の展開係数$\vec{\varphi}_j \in \mathbb{R}^{r\times 1}$を用いて、$\vec{\phi}_j \approx \mathbf{U}_r\vec{\varphi}_j$と少ないデータ数で再構成できる。

(4) (3)で述べた基底展開に基づくことで、入力パラメータに対して展開係数$\vec{\varphi}$を関数化/モデル化するか、あるいは、入力パラメータの変化に応じて、縮約された展開係数$\vec{\varphi}$に関する方程式を解くことにより、別の条件jにおける展開係数の数値解$\vec{\varphi}_j$を効率良く求め、$\vec{\phi}_j$を再構成する。

一例として、我々の研究グループにおいて取り組んできた ROM 研究事例について以下で紹介する。

炉定数テーブルの圧縮：pin-by-pin 炉心計算で用いるような燃料棒単位の炉定数(多群微視的断面積など)テーブルに対して、SVD を適用することで基底を求め、その展開係数を状態変数(燃焼度、温度など)に対してモデル化する。これにより、炉定数テーブルのデータ量および再構成コストを削減する[2]。

共鳴計算：燃料棒内における中性子束エネルギースペクトル$\phi(E)$について、超詳細エネルギー群の中性子輸送方程式の数値解を厳密に解く代わりに、各エネルギーg群単位でエネルギーに関する基底$u_{g,k}(E)$で展開し、その展開係数に関する方程式を解くことで、求めたい$\phi(E)$を効率良く再構成する[3], [4]。

炉心計算(固有値計算・動特性計算)：中性子束の空間分布および時間変化$\phi(\vec{r},t)$について、詳細空間メッシュ分割の炉心計算を実施する代わりに、空間変数に関する基底$u_k(\vec{r})$で展開し、その展開係数に関するk_{eff}固有値計算や時間微分方程式を解くことで、低計算コストで精度良く$\phi(\vec{r},t)$を再構成する[5], [6]。さらに、燃料棒単位で非均質な炉心計算を効率良く解く数値解法として、Global/Local 反復解法(詳細空間メッシュ分割の集合体計算(Local 計算)と、粗い空間メッシュの炉心計算(Global 計算)を解が収束するまで繰り返す方法)に対する ROM の応用について、現在研究を進めている[7]。

感度係数評価 : 詳細エネルギー群で分割されたg群の微視的断面積に対する任意核特性(k_{eff}, 反応度係数, 相対出力, 燃焼後の各核種重量など)の感度係数$S(E)$について、膨大な入力パラメータの数だけ直接摂動法を実施する代わりに、$S(E)$をエネルギーに関する基底$u_k(E)$の和で展開した ROM で表現し、その展開係数、すなわち「基底$u_k(E)$方向の感度係数」を少数回の forward 計算により効率良く推定する[8]。

参考文献

[1] D. G. Cacuci (Ed.), *Handbook of Nuclear Engineering*, Springer US, Boston, MA (2010).

[2] M. Yamamoto et al., "Compression of Cross-Section Data Size for High-Resolution Core Analysis Using Dimensionality Reduction Technique," *Nucl. Sci. Eng.*, **195**(1), pp.33–49 (2021).

[3] R. Kondo et al., "A New Resonance Calculation Method Using Energy Expansion Based on a Reduced Order Model," *Nucl. Sci. Eng.*, **195**(7), pp.694–716 (2021).

[4] R. Kondo et al., "Improvements in Computational Efficiency for Resonance Calculation Using Energy Spectrum Expansion Method," *Nucl. Sci. Eng.*, **196**(7), pp.769–791 (2022).

[5] K. Tsujita et al., "Fast Reproduction of Time-Dependent Diffusion Calculations Using the Reduced Order Model Based on the Proper Orthogonal and Singular Value Decompositions," *J. Nucl. Sci. Technol.*, **58**(2), pp. 173–183 (2021).

[6] K. Tsujita et al., "Efficient Reduced Order Model Based on the Proper Orthogonal Decomposition for Time-Dependent MOC Calculations," *J. Nucl. Sci. Techonol.*, DOI:10.1080/00223131.2022.2097963 [to be published].

[7] M. Ito et al. "Neutron Diffusion Calculation in Heterogeneous Geometry Based on Local/Global Iteration Using Proper Orthogonal Decomposition," *Proc. PHYSOR2022*, Pittsburgh, PA, May 15–20, 2022.

[8] R. Katano et al., "Sensitivity Coefficient Evaluation of an Accelerator-Driven System Using ROM-Lasso Method," *Nucl. Sci. Eng.*, DOI:10.1080/00295639.2022.2067447 (2022).

---

*Tomohiro Endo[1]

[1]Nagoya Univ.