

原子炉熱流動挙動シミュレーションのデータ同化解析

福井大学 石垣将宏, 渡辺正

名古屋大学 永井亨

原子炉は、核燃料を装填する原子炉压力容器および原子炉压力容器を取り囲む原子炉格納容器を有している。核燃料が溶融する過酷事故時においては、原子炉压力容器内で水素が発生し、それが原子炉格納容器へ漏洩し、水素爆発が発生する可能性が生じる。また原子炉格納容器内で水素が局所的に分布する可能性がある。そのため、原子炉内の熱流動挙動の安全評価においては、原子炉格納容器内全体におけるガス挙動を数値シミュレーションにより高精度に予測する必要がある。高精度な数値シミュレーションのためには、各物理量のばらつきを考慮した現実的な初期条件および境界条件を設定する必要があるが、そのような条件を適用するのは一般的に困難である。ここで観測データおよびシミュレーションデータを用いたデータ同化をシミュレーションに適用することで、より現実に近い初期条件・境界条件が得られ、解析の精度を向上させられる可能性がある。しかし、これまで原子炉格納容器内の熱流動シミュレーションに対して、データ同化を行った例はなく、その性能および適用可能性については明らかになっていない。そこで、本研究では原子炉格納容器内の熱流動シミュレーションに対して、データ同化の適用性および解析の高精度化について検証することを研究目的とする。

はじめに、予備的検討として、境界温度の差により駆動される自然対流挙動に対するデータ同化解析を実施した。データ同化解析のため、アンサンブルカルマンフィルターの1つであるアンサンブル変換カルマンフィルター (ETKF) の解析コードを実装した。温度のみを観測データとして与えたデータ同化解析により、速度および温度分布を高精度に再現することができた。この解析では、真値の温度の境界条件に対して、乱数を与えることでデータ同化解析での温度境界条件を作成したが、真値の温度境界条件をデータ同化により再現するためには非常に多くの観測データが必要であることが分かった。

ETKF のアルゴリズムは並列化を適用することが困難なアルゴリズムとして一般的に知られている。そこで、並列化が容易である局所アンサンブル変換カルマンフィルター (LETKF) のアルゴリズムを用いたデータ同化解析コードを別途実装した。熱流動挙動の解析コードである OpenFOAM のシミュレーションデータに対して、LETKF によるデータ同化解析を行った。解析対象を、原子炉格納容器内の流動で重要な挙動の1つである密度成層中の自然対流とした。具体的には、水素 (ヘリウムで模擬) が発生し、それが容器上部に蓄積し、ヘリウム・空気による密度成層が生じ、さらに外面から容器の冷却を行った際の自然対流挙動である。ただし、ここではデータ同化の基礎的な検討として、図1に示す高さ1mスケールの円筒容器内のガス挙動を解析した。以下、その解析条件および結果について述べる。



図1 解析対象

外面冷却を開始する直前での、真値となるシミュレーションデータにおけるヘリウムの質量分率の分布を tanh 関数により近似する。この tanh 関数により求めた分布を用いて、データ同化のためのベース計算の初期ヘリウム分布を設定する。また、外面冷却開始直前、真値のシミュレーションデータの温度が 400K から 415K 程度の分布を有するのに対し、ベース計算の初期温度を 410K で一様とした。これらの初期条件を用いて、外面冷却の挙動をシミュレーションした結果をベース計算のデータとする。ここで、真値に対し誤差を有する条件での計算結果であるベース計算のデータを LETKF によるデータ同化の初期アンサンブル

ルとして用いた。

図 2 に真値およびデータ同化による解析値の root mean square error (RMSE) の変化を示す。観測値として温度およびヘリウム質量分率を用いた場合 (Obs T, Y_{He})、温度のみを用いた場合 (Obs T)、ヘリウム質量分率のみを用いた場合 (Obs Y_{He})、データ同化を適用しない場合 (no DA, ベース計算の結果) を比較した。データ同化を適用しない場合、RMSE の値は時間経過とともに増大する傾向を示す。観測値として、温度・ヘリウム質量分率の両方を用いた場合は誤差が減少している。それに対し、温度、ヘリウム質量分率のいずれか一方のみを用いた場合には観測しなかった物理量の誤差がデータ同化を適用しなかった場合と同程度に増大している。特にヘリウム質量分率のみを観測に用いた場合、温度の誤差が大きく増加することが分かった。図 3 に容器内の温度分布を示す。(a)(b)(c) はそれぞれ、真値、データ同化を適用しなかった結果、温度・ヘリウム質量分率を観測に用いたデータ同化を適用した結果である。データ同化を適用しなかった場合、真値と大きく異なる分布となった。一方、データ同化を適用した場合は、真値とほぼ同様の温度分布を再現することができた。

過酷事故時の原子炉内熱流動挙動で重要となる密度成層中の熱対流挙動について、データ同化により数値シミュレーションの精度を向上させることができた。今回評価した体系は実際の原子炉のスケールに対し、非常に小さいため、今後、より大規模な体系でのデータ同化の評価を行っていく必要がある。

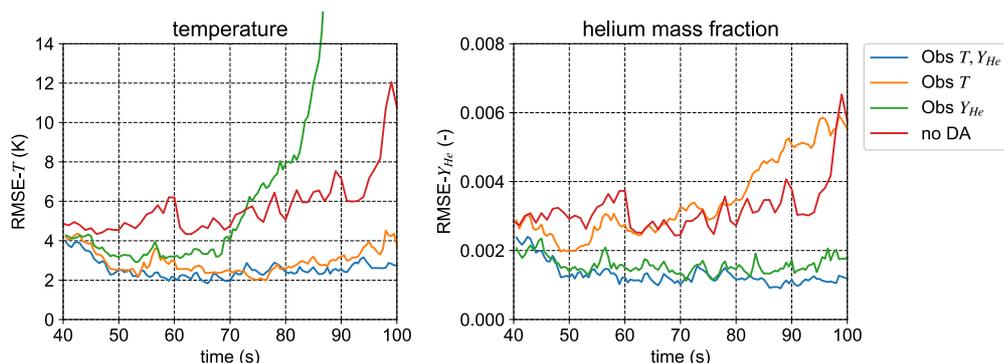


図 2 温度およびヘリウム質量分率の平均自乗誤差の変化

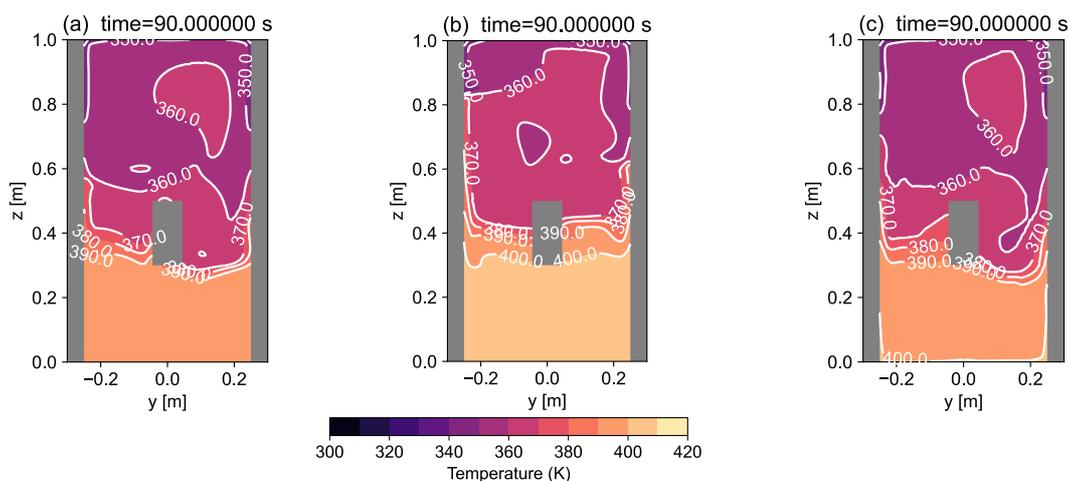


図 3 容器内温度分布の比較。(a) 真値, (b) データ同化なし (ベース解析の結果), (c) 観測に温度およびヘリウム質量分率を用いたデータ同化を適用した結果