

## データ同化を用いた原子炉熱流動挙動の数値解析

石垣将宏<sup>1)</sup>, 廣瀬意育<sup>2)</sup>, 永井亨<sup>3)</sup><sup>1)</sup>福井大学, <sup>2)</sup>日本原子力研究開発機構, <sup>3)</sup>名古屋大学

原子炉は、核燃料を装填する原子炉圧力容器および原子炉圧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、原子炉圧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。申請者らは、2021 年度に採択された研究課題「原子炉熱流動挙動シミュレーションのデータ同化解析」において、原子炉を模擬した容器内での熱流動挙動に対し、データ同化手法の 1 種である局所アンサンブル変換カルマンフィルター (Local Ensemble Transform Kalman Filter: LETKF) を適用した解析を行い、初期条件・境界条件の誤差の影響はデータ同化により緩和され、真値とほぼ同様の解析結果が得られることを明らかにした。これまでの解析は実際の原子炉 (実機) に対して非常に小規模な体系での検証であった。実機スケールの大型容器内での熱流動解析に対するデータ同化を考えたとき、多数の観測データを用いることは現実的には困難であり、高精度な解析を実現する上で、必要となる観測データの配置およびデータ点数を明らかにすることは重要な課題の 1 つである。そこで本研究では、原子炉を模擬した大型容器内の熱流動挙動に対しデータ同化解析を実施し、観測データの配置およびデータ点数に関する感度解析を行い、高精度な解析を実現するために必要となる観測データに関する条件について検証することを目的とする。

本研究では、大型格納容器実験装置 CIGAM 内の熱流動挙動の CFD 解析に対し、データ同化を適用した。図 1 に本研究の解析対象である CIGMA 装置の概観を示す。CIGMA 装置は直径 2.5m、高さ 11m の円筒形の試験部を有する。この円筒試験部内に空気・ヘリウムによる密度成層を形成した条件での外面冷却時の挙動を解析対象とする。初期にヘリウムの体積分率 39%、温度約 400K の層を上部に形成する。容器上部壁面を 300K、下部壁面を 400K にし、自然対流を発生させる。この条件下でのシミュレーションをデータ同化における真値とする。一方、真値に対し、誤差を有する境界条件 (上部壁面 303K、下部壁面 404K) でのシミュレーションをベースケースとする。ベースケースのシミュレーションに対し、データ同化手法の 1 つである LETKF を適用する。観測データは温度およびヘリウムの質量分率の値とした。観測点は、水平断面内で放射状に配置した面を複数高さで設定した。水平面内で 1 点, 9 点, 17 点有するものをそれぞれ c1, c9, c17 とし、高さ方向に 5 断面, 6 断面, 13 断面設定したものを z5, z6, z13 と表示する。本研究では、c9-z13, c17-z13, c17-z6, c5-z6, c1-z5 の組み合わせによる配置でのデータ同化を行った。冷却開始時刻を 0 秒とし、510 秒以降のシミュレーションデータに対し、2.5 秒おきにデータ同化を適用した。数値シミュレーションには CFD コード

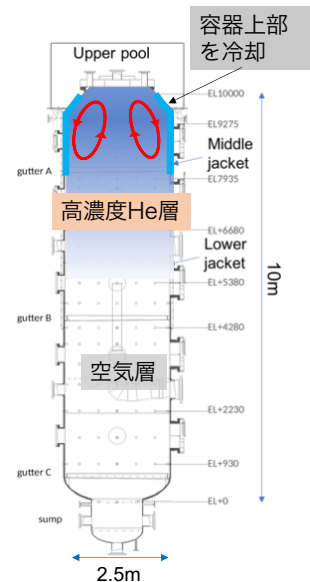


図 1 解析対象

OpenFOAM を使用した。計算には不老のクラウドシステム 2 ノード (160 コア) を使用し、2.5 秒分の OpenFOAM の計算をアンサンブルメンバーの個数 (本研究では 20) 分実行するのに、4200 秒を要した。またデータ同化の行列計算には 2900 秒を要した。

図 2 に真値およびデータ同化による解析値の平均自乗誤差 (RMSE) の変化を示す。同程度の観測点数の c9-z13, c17-z6 配置で、c17-z6 の RMSE が大きいことから、高さ方向の観測点数を増加させることが解析精度の向上には必要であることが示唆される。また容器内の観測点数を 5 点とした c1-z5 配置においても、ベースケースよりも RMSE を減少させることができた。図 3 に容器内の温度分布を示す。(a)(b)(c) はそれぞれ、真値、ベースケース、c1-z5 配置の観測を用いたデータ同化を適用した結果である。データ同化を適用することで、真値の温度分布で見られる上部の低温部分を再現できている。

以上から、大型格納容器実験装置 CIGMA 内の熱対流挙動の解析に対して、5 点程度の比較的少数の観測点数で、温度・ガス濃度の解析精度の向上が可能であることが明らかになった。

2022 年度以下の発表を行った。

1. M. Ishigaki, Y. Hirose, S. Abe, T. Nagai, T. Watanabe, Estimation of Flow Field in Natural Convection with Density Stratification by Local Ensemble Transform Kalman Filter, *Fluids*, Vol. 7, No. 7, 237, 2022 (査読付き論文)
2. 石垣, 廣瀬, 安部, 永井, 渡辺, 「大型格納容器実験装置 CIGMA 内熱流動解析へのデータ同化の適用—観測データの配置に関する検討—」日本原子力学会 2022 年秋の大会 (口頭発表)

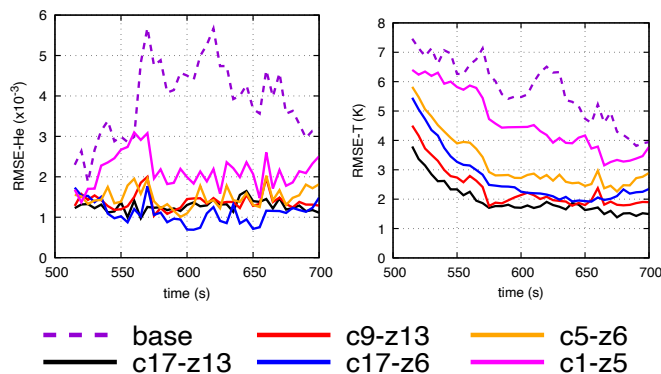


図 2 ヘリウム質量分率 (左図) および温度 (右図) の平均自乗誤差 (RMSE) の変化

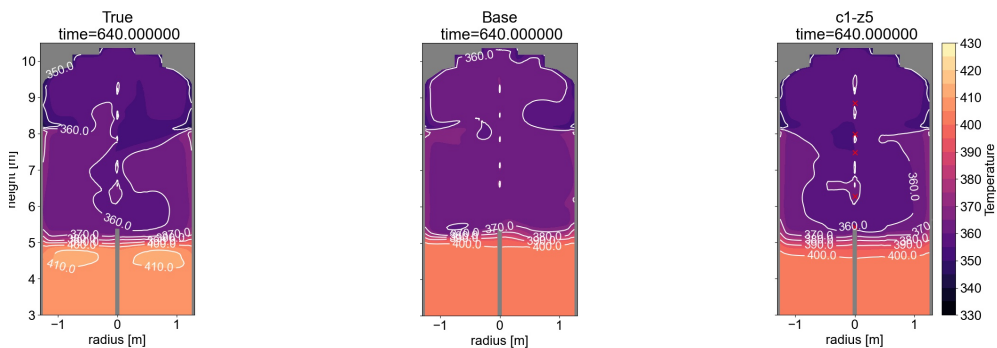


図 3 容器内温度分布の比較。(a) 真値, (b) データ同化なし (ベースケースの結果), (c) c1-z5 配置の観測を用いたデータ同化結果。赤い X は観測点の位置を示している。