

機械学習による核種移行解析の効率化

浜本貴史*¹ 吉田美美子*¹ 石田圭輔*¹

原子力発電環境整備機構（以下、NUMO）は地層処分場の閉鎖後安全評価に用いる施設設計等を忠実に反映した三次元モデルを対象とする三次元地下水流動・粒子追跡解析技術について、解析対象領域をニアフィールドスケール（100m×100m×100m）から広域スケール（数十 km×数十 km×数 km）まで拡張した。しかしながら、膨大な計算負荷と膨大なデータの分析が課題となっている。NUMO は、機械学習を適用した解析補完ツールとして、少数の廃棄体の入出力を教師データに、廃棄体全体の移行率の時間変化を低計算負荷で予測評価するツールと、廃棄体の破過曲線をグループ化し有用な情報を抽出するためのツールの開発を開始した。本報告では、パネルスケール（約 1 km×約 1 km×数百 m）の粒子追跡解析をデータセットとした解析補完ツールの開発によって、計算負荷低減と効率的なデータ分析が実現できる見通しを示すとともに、今後の課題を明らかにした。

Keywords: 地層処分, 安全評価, 核種移行解析, 粒子追跡解析, 機械学習, 効率化

1 背景

地層処分場の閉鎖後安全評価では、地質環境と処分場からなる処分システムの空間スケールや、評価対象期間における処分システムの変遷を考慮して、廃棄体から生活圏までの核種の移行挙動を現実的かつ定量的に評価する必要がある。NUMO 包括的技術報告書における閉鎖後安全評価では、ニアフィールドスケールの母岩をモデル化して三次元の核種移行を計算した[1]。解析対象領域を拡張するとともに、地質環境特性の時間変遷を考慮するため、三次元の地下水流動・粒子追跡解析技術とこれを用いた核種移行解析モデルを整備してきた[2]。このモデルでは、計算負荷を低減するため、並列計算に特化した解析コードを導入するとともに、パネルスケールから広域スケールでの各スケールで解像度を変えたモデルを用意し入れ子状に取り扱う解析技術を構築した[2]。

しかしながら、このような計算上の工夫をしてもなお、広域スケールを対象に処分場に埋設する 40,000 体のガラス固化体や異なる TRU 廃棄物からの粒子追跡解析を実施するには膨大な CPU 時間を要する。サイトに応じた多様な地質環境モデルや各種パラメータが有する不確実性、境界条件の多様性や設計オプション等を考慮すると、性能評価では条件を変えた膨大な解析を実施する必要があるため、整備した解析技術を適用することは現実的ではない。さらに、各粒子の移行情報といった出力データの量は膨大であり、廃棄体ごとの破過曲線の違いや粒子の移行経路を人の手で判読して安全評価や設計最適化の観点で有用な情報として整理することは困難かつ非効率である。

これらのことから、NUMO は、解析の計算負荷軽減を目的として、核種移行解析モデルの構築に用いる破過曲線（各廃棄体から評価面に到達する粒子の移行率の時間変化）を目的変数とし、少数の廃棄体の入出力を教師データとした機械学習によって他の廃棄体の破過曲線を推測する予測評価ツールの開発を開始した。また、膨大な核種移行解析の出力データから人が解釈できる有用な情報を抽出すること

を目的として、廃棄体ごとの破過曲線を教師なし機械学習によってグループ化し、グループごとの粒子の移行挙動の特徴の分析と粒子の移行経路の判読を可能とするクラスター分析ツールの開発を開始した。

NUMO は、これらのツール開発を、特定のデータセットを対象に性能を確認しながら、反復的な改善を通じて進めている。本稿では、広域スケールへの拡張や入れ子モデルへの適用を目標とした最初の開発段階として、パネルスケールの粒子追跡解析をデータセットに用いた開発の状況を紹介する。

2 機械学習を利用した解析補完ツールの開発状況

2.1 データセットの作成

処分坑道や主要坑道などを表現したガラス固化体の処分パネル一つを含むパネルスケールをモデル化し、廃棄体から観測面までの非収着性粒子の粒子追跡解析を実施した。対象とした処分パネルは、解析の効率化のため坑道長さを半分、廃棄体本数を四分の一とし、上流側約 100 m、下流・側方約 300 m の母岩を含めたモデルを用いている。母岩や人工バリアのパラメータは包括的技術報告書における深成岩類高レベル放射性廃棄物処分場の設定値[3]を適用した。

このモデルを対象に解析コード PFLOTTRAN[4]を用いて定常状態を想定した地下水流動解析を実施し、圧力水頭分布およびダルシー流速分布を得た。境界条件は、流動方向に垂直な境界面は動水勾配に整合する圧力水頭固定（上流側 36 m、下流側 0 m）とし、流動方向に平行な境界面は不透水とした。次に、地下水流動解析によって得た水理場を対象に、解析コード PARTRIDGE[5]を用いて粒子追跡解析を行い、データセットを得た（図 1）。計算時間を考慮して、1 つの処分パネルからランダムに選定した約半数（878 体の廃棄体を解析対象とし、粒子数は 2,500 個/廃棄体とした。

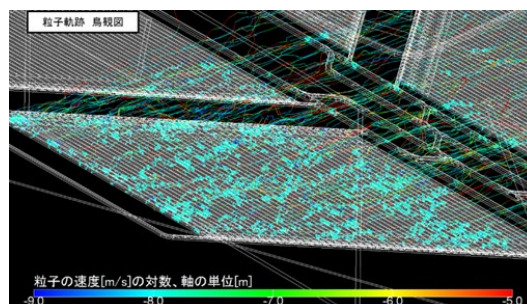


図 1 パネルスケールを対象とした粒子追跡解析結果

Machine learning application for radionuclide migration simulation by Takafumi HAMAMOTO (thamamoto@numo.or.jp), Fumiko YOSHIDA, Keisuke ISHIDA
*1 原子力発電環境整備機構

Nuclear Waste Management Organization of Japan

〒108-0014 東京都港区芝 4 丁目 1 番 23 号三田 NN ビル 2 階

本稿は、日本原子力学会 2025 年秋の大会バックエンド部会セッションにおける講演内容に加筆したものである。

2.2 予測評価ツール

予測評価ツールでは、破過曲線を目的変数とし、亀裂の統計量や廃棄体位置を説明変数とするニューラルネットワークモデルを構築した。2.1 で示したデータセットのうち 700 体の廃棄体を対象とした粒子追跡解析の入出力を教師データとして学習し、残り 178 体の廃棄体の破過曲線を予測した。178 体の廃棄体の平均的な破過曲線を予測したところ、1,000 年以後については、10 万年付近を除き、同程度のオーダーで再現できた (図 2)。しかし、移行開始 10 年から 1,000 年の移行率は精度良く予測できていないことも確認された。

ニューラルネットワークモデルの構築および破過曲線の予測に係る計算負荷は粒子追跡解析の 1%未満であり無視できるため、全廃棄体中の予測対象廃棄体の割合に基づき上記のケースでは約 2 割計算負荷を低減したと求められる。

2.3 クラスタ分析ツール

クラスタ分析ツールでは、廃棄体の定置位置によって粒子の移行挙動が異なることを利用し、破過曲線のピーク時刻やいくつかの特定時刻の移行率を特徴量として、k-means 法を用いて廃棄体を複数のクラスターに分類することができた (図 3(a),(b))。

クラスターの破過曲線を特徴づける属性データの候補を抽出するため、粒子追跡解析の入力パラメータを用いて各クラスターと全廃棄体とを比較する t 検定を行った。その結果、廃棄体近傍に存在する亀裂の半径および透水量係数から求められる統計値 $R^2\sqrt{T}$ (R : 亀裂半径, T : 亀裂透水量係数, $T = b^2$, b は亀裂開口幅)、廃棄体から主要坑道までの距離、廃棄体から観測面までの距離を、破過曲線を特徴づける属性データの候補として抽出した。次に、これらの候補から各クラスターの破過曲線を特徴づける属性データを特定するため、各クラスターの破過曲線の特徴量を対象とした主成分分析を行い、主成分と属性データの相関関係を分析した。各クラスターは第 1 主成分 (PC1) で比較的良好に区別されたため、第 1 主成分が破過曲線を特徴づけると考えられた (図 3(c))。第 1 主成分と t 検定で有意差が認められた属性データ ($R^2\sqrt{T}$, 主要坑道までの距離、観測面までの距離) との相関係数を評価した結果、第 1 主成分と観測面までの距離との相関係数 (-0.6) および主要坑道までの距離との相関係数 (-0.4) から、廃棄体の定置位置が各クラスターの破過曲線を特徴づけると考えられた。一方、 $R^2\sqrt{T}$ との相関係数は -0.1 以上 0.1 以下と求められたため、第 1 主成分との相関はなく、各クラスターの破過曲線に対する亀裂の影響は小さいと考えられた。ただし、これらの傾向は移行率を求める観測面の設定に影響を受けている可能性があるため、観測面を変えて破過曲線の特徴を分析する必要がある。

各クラスターにおける粒子の移行の影響要因を特徴づけるため、粒子の軌跡に対してデータ密度によるクラスター分析アルゴリズムである DBSCAN[6]を適用して粒子の移行経路を分類した。Cluster 0 に対して DBSCAN を適用した結果、Cluster 0 に属する廃棄体から発生した粒子が集中的に移行する領域が、大きな半径と大きな透水量係数をもつ

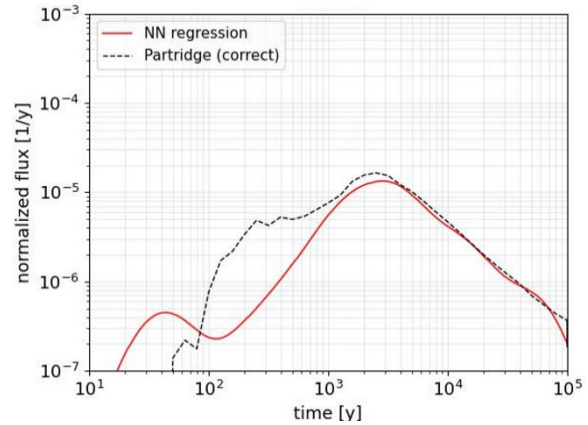


図 2 粒子追跡解析による平均的な粒子の移行率の時間変化と予測評価ツールによる予測結果[7].

(深成岩類高レベル放射性廃棄物処分場の 1 パネル (1/2 スケール) を対象とし、0 年から粒子の移行が開始すると設定)

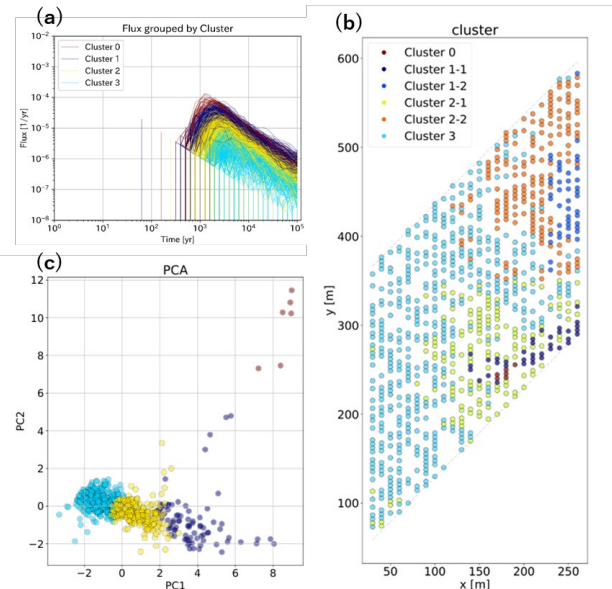


図 3 クラスタ分析ツールによる廃棄体の分類と破過曲線の主成分分析。

((a)各クラスターに属する廃棄体の破過曲線, (b)処分パネル上の廃棄体の分布, (c)主成分分析結果)

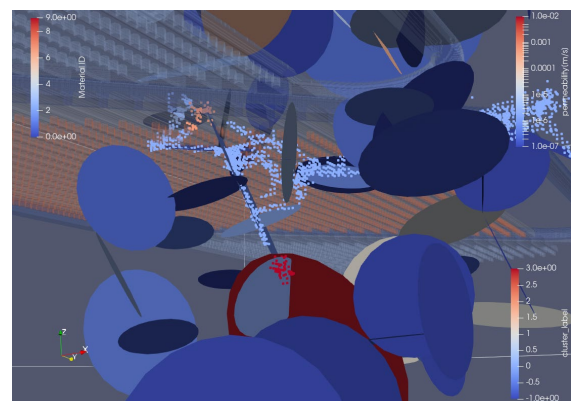


図 4 Cluster 0 から発生した粒子が集中的に移行する領域 (点) と $R^2\sqrt{T}$ の大きな亀裂 (円盤)

亀裂の近傍であることがわかる (図 4)。このように、粒子の集まりやすい主要経路を特定できる可能性が確認できた。

3 結論と今後の計画

パネルスケールを対象とした予測評価ツールの開発を通じて、廃棄体から生活圏までの核種移行解析における計算負荷の低減に対する解決手段として有効である可能性を示した。また、クラスター分析ツールの開発を通じて、大量の廃棄体の破過曲線データから、破過曲線の類似性という観点で廃棄体をグループ化し、破過曲線の特徴づける属性データを特定することで、安全評価や設計最適化の観点で有用な情報を抽出できる可能性を示した。

今後は、これらのツールの精度および解析効率の向上を図るとともに、広域スケールへの拡張や入れ子モデルへの適用を目指してパネルスケールから処分場スケールへと解析スケールの拡張を図る。さらに、クラスター分析ツールにより廃棄体をグループ化し、グループごとに予測評価ツールを適用することで予測精度を向上できる可能性があることから、これらのツールを組み合わせた活用方法について検討を進めていく。

参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—。NUMO-TR-20-03, 原子力発電環境整備機構 (2021)。
- [2] 石田圭輔, 藤崎淳, 三枝博光, 尾上博則: 地層処分システムの空間的不均質性および時間変遷に応じた核種移行評価技術の構築。日本原子力学会 2023 秋の年会, 愛知, 2023 年 9 月 6~8 日, 2D03 (2023)。
- [3] 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現—適切なサイトの選定に向けたセーフティケースの構築—, 付属書 6-14 ニアフィールドスケールにおける三次元地下水流動・粒子追跡解析。NUMO-TR-20-03, 原子力発電環境整備機構 (2021)。
- [4] Lichtner, P. C. et al.: PFLOTRAN User Manual. (2020) <http://documentation.pflotran.org>, (accessed 2025-11-19)。
- [5] 原子力発電環境整備機構: 地層処分技術のための安全評価技術の開発 (II) —核種 移行解析モデルの高度化—。NUMO-TR-10-10, 原子力発電環境整備機構 (2011)。
- [6] Ester, M., et al.: A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise. *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*, AAAI Press, pp. 226–231 (1996)。
- [7] 原子力発電環境整備機構: 技術開発成果概要 2024。NUMO-TR-25-03, 原子力発電環境整備機構 (2025)。