

不均質場における地下水流動の不確実性評価手法の開発（その2）

- モンテカルロ法との比較検討 -

前田建設工業株式会社 正会員 ○吉野 尚人 正会員 野本 康介 正会員 松井 幹雄
核燃料サイクル開発機構 非会員 澤田 淳 正会員 武部 篤治

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分の安全評価に際しては、水理地質構造モデルを用いた様々な検討に基づいて核種の移行経路情報（移行距離、移行時間など）が求められる。一般に、水理地質構造のモデル化には様々な不確実性が介在する。著者らは、透水係数の不確実性が地下水流動解析結果に与える影響を定量的に評価するため、確率有限要素法による浸透流解析^[1]に基づく特定移行経路における移行距離の不確実性評価手法（以下、確率解析法）の開発を進めてきた^[2]。なお、本研究では透水係数の不確実性を定量化する手法としてクリギング^[3]を用いている。本報では、構築した確率解析法の有効性を検討するために実施したモンテカルロ法による解析手法との比較検討結果について報告する。

2. モンテカルロ法による解析手法

比較対象として採用した解析手法は、クリギングにより推定した透水係数分布とその統計量に対してモンテカルロ法を適用する手法である。クリギングにより推定した未知領域の要素 e の透水係数の期待値とその分散をそれぞれ $E_{k(e)}$ と $\sigma_{k(e)}^2$ とする。例えば、正規乱数 N_n を使用する場合には、要素 e の n 試行回数での透水係数 $k_{(e)}(n)$ は式(1)のようになる。

$$k_{(e)}(n) = E_{k(e)} + N_n \cdot \sigma_{k(e)} \quad (1)$$

求められた透水係数分布を用いて決定論的に浸透流解析を行い、各要素の流速ベクトルを算出するとともに、この流速ベクトルをもとに、ある地点からの移行到達点を粒子追跡法で算出する。これを所定の試行回数繰り返し、移行到達点の不確実性を評価する。一般に、モンテカルロ法では評価指標など（本論では、移行到達点）の期待値や分散が統計的に収束するまでの試行回数を繰り返す必要があり、統計的に有為な数の決定の曖昧さに加えて、試行回数分の浸透流解析を実行する必要があるため計算時間が比較的長くなるといった点が問題となる。

3. 比較解析の諸条件等

比較解析の諸条件を表-1 に示す。比較解析には、岐阜県東濃地域にある超深地層研究所計画用地^[4]のMIU-1号孔～3号孔のデータを使用し、MIU-1号孔～3号孔を含む鉛直2次元断面を解析領域とした。移行開始点はMIU-3号孔の標高0[m]地点とし、移行時間1000年、2000年、3000年の地下水流れ到達点について確率解析法とモンテカルロ法による解析を行った。

4. 解析結果と考察

確率解析法とモンテカルロ法の解析結果を図-1および図-2にそれぞれ示す。なお、確率解析法での地下水流れ到達点分布の表示は標準偏差 σ （=分散^{1/2}）の3倍を軸に持つ楕円で表した。移行経路長は図-3に示すように、両解析法ではほぼ等しい結果となった。両解析法での移行経路長の誤差は、3000年後で約1.4[m]となっていた。このときの移行経路長は約210[m]であることから、移行経路長に対する誤差の割合は約0.7%と極めて小さくなっていることがわかる。移行時間ごとの移行到達点のX方向標準偏差およびY方向標準偏差を図-4と図-5に示す。確率解析法により求められた標準偏差はモンテカルロ法の結果よりも小さくなっており、3000年後では確率解析法により求められた標準偏差はモンテカルロ法により求められた標準偏差の約1/2程度であった。

図-6に両解析法の計算時間を示す。解析にはPC(DeII OPTIPLEX GX260 Pentium(R) 2.40GHz)を使用した。同図より、モンテカルロ法による解析は試行回数の数に応じて解析時間が長くなることがわかる。本検討は2次元平面を対象とした比較的小規模（要素数が約1840）な問題であることから10000回の試行回数まで計算を実施できたが、実際の地質環境への適用を考えた場合には3次元化かつ大規模計算が必要な場合が多い。その場合、2.で述べた計算時間が問題となる。

表-1 比較解析の諸条件

解析対象領域	MIU-1号孔～3号孔 ^[4] を含む鉛直2次元断面
未知領域の透水係数の推定方法	クリギング
要素分割	1要素は約10[m]の正方形。要素総数=1840
水理境界条件	左境界：MIU-1号孔の水頭平均値202.0[m] 右境界：MIU-3号孔の水頭平均値213.9[m] 底面境界：標高-700[m]を不透水
モンテカルロ法の試行回数	10000回
移行開始点	(X, Y) = (236, 0)
移行時間	1000年, 2000年, 3000年

キーワード：不確実性評価，クリギング，確率有限要素法，モンテカルロ法，地層処分

連絡先 〒179-8903 東京都練馬区高松 5-8 J.CITY 電話 03-5372-4743 fax03-5372-4768

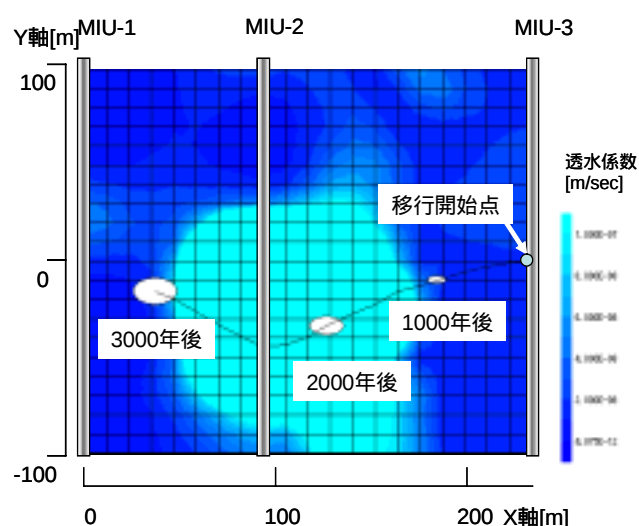


図-1 確率解析法の出力結果

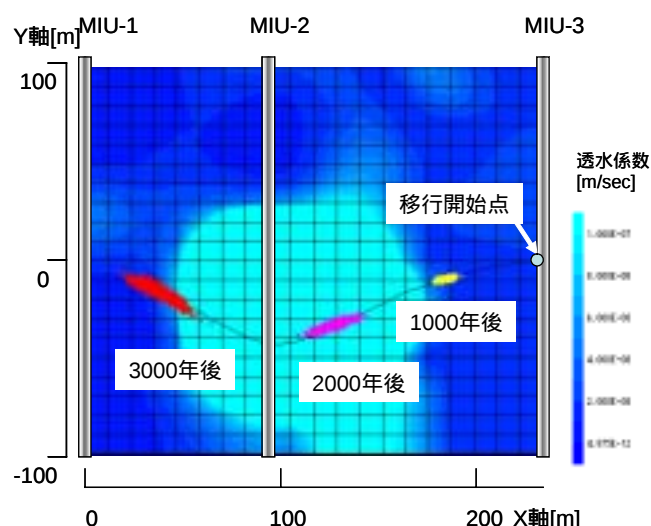


図-2 モンテカルロ法の出力結果

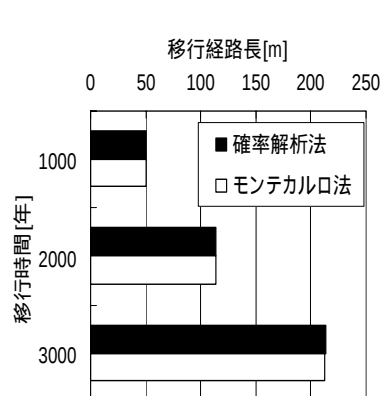


図-3 移行経路長の期待値の比較

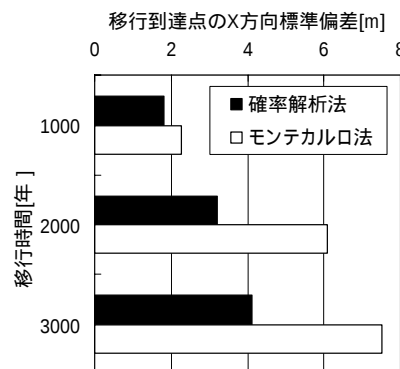


図-4 地下水流れ到達点分布のX方向標準偏差の比較

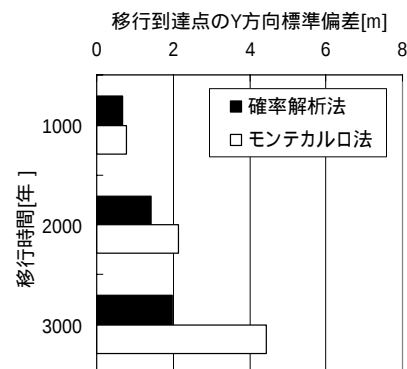


図-5 地下水流れ到達点分布のY方向標準偏差の比較

5. おわりに

本報では、移行経路長、移行到達点の不確実性定量化手法として開発した確率解析法の有効性を検討することを目的に、モンテカルロ法の解析結果との比較を実施した。移行経路長の誤差は小さく、確率解析法はモンテカルロ法とほぼ等しい移行経路長を算出できることが明らかとなった。また、確率解析法により求められた到達点分布の標準偏差は、モンテカルロ法の場合の約 1/2 程度であった。以上より、確率解析法はモンテカルロ法と同程度の解析結果を得ることができ、モンテカルロ法に比べて計算効率が良いことが確認された。今後は、本解析手法の三次元化などの機能拡張を進めるとともに、実際の地質環境データを用いた適用事例を蓄積してゆく必要がある。

・謝辞：本研究を進めるにあたり、核燃料サイクル開発機構東海事業所処分研究部システム解析グループ内田雅氏に貴重なご意見を賜った。末筆ながらここに記し謝意を表する。

・参考文献： [1]嶋田三朗ほか(1990)：“浸透流確率有限要素法”，前田技術研究所報 VOL.30, pp25-34. [2]吉野尚人ほか(2004)，“不均質場における地下水流動の不確実性評価手法の開発 - 特定移行経路における移行距離の不確実性評価 - ”，土木学会第 59 回年次学術講演会，CS1-020,2004. [3]Kriging,D.G.(1952), "A statistical approach to some basic mine valuation problems in the Witwatersrand", Journal of Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa, No.53(3), pp47-64, Disc.,pp64-70. [4]核燃料サイクル開発機構(2001)：“超深地層研究所計画の現状-平成 8 年度～平成 11 年度-”，JNC TN7400 2001-001.

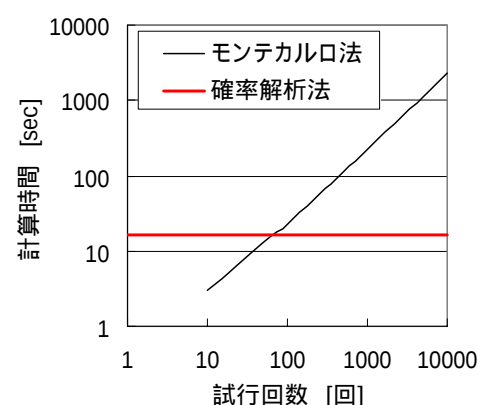


図-6 解析時間の比較