

ニューラルネットワークを用いた地層処分の断層シナリオに対する不確実性解析

木賊尋也*¹ 若杉圭一郎*¹

本研究では、断層帯を構成する領域としてガウジ帯、破砕帯、割れ目帯を想定し、それぞれの特性を考慮した現実的な核種移行モデルを構築した。このモデルを用いて数値解析を行い、得られた結果を教師データとして、ニューラルネットワークによる機械学習を活用し、処分場全体を対象とした断層影響評価が可能な予測式を作成した。さらに、断層シナリオに関する主要な不確実性因子として、断層の規模、発生時刻および発生位置に着目し、これらの不確実性を考慮した多様な組み合わせと予測式を用いて 1,000 ケースの不確実性解析を実施した。その結果、マグニチュードが最大総線量への影響が最も大きいこと、さらには条件に応じて最大総線量への寄与が高い領域が変化することが明らかとなった。このことから、最大総線量を適切に評価するためには、各断層帯領域に位置する廃棄体数を考慮することが重要であることが示唆された。

Keywords: 地層処分, ニューラルネットワーク, 核種移行, 線量評価, 断層帯

In this study, a realistic radionuclide transport model was developed by assuming the fault zone to consist of distinct sub-regions: the gouge zone, the damage zone, and the fracture zone, and by taking into account the specific characteristics of each region. Numerical simulations were conducted using this model, and the results were employed as training data to construct a predictive model through machine learning of the neural network. This predictive model enables fault impact assessments across the entire repository. Furthermore, focusing on major uncertainty factors related to fault scenarios, specifically fault size, occurrence timing, and location, a total of 1,000 uncertainty analysis cases were performed using various combinations of these factors and the developed predictive model. The results revealed that fault magnitude exerts the greatest influence on the maximum total dose, and that the dominant contributing region to the maximum total dose varies depending on the conditions. These findings suggest that, for an appropriate evaluation of the maximum total dose, it is essential to consider the number of waste packages located within each fault zone region.

Keywords: geological disposal, neural network, nuclide transport, dose assessment, fault region

1 緒言

地層処分の実施においては、文献調査、概要調査、精密調査による段階的な地下環境の調査を通じて、長期的に安定な地層が存在するサイトが選定される。これら一連の調査によって断層運動が確認された地域や断層の活動により損傷を受けた地域は、地層処分システムに重大な影響を及ぼす可能性があるため、候補地から除外される。このような選定プロセスにより、断層運動が地層処分システムに影響を及ぼす可能性は低いと考えられている。

しかしながら、地層処分は数十万年以上の超長期の時間スケールを対象とするため、不可避な不確実性を伴う。大坪ら[1]は、このような長期的評価においては、地質そのものが本質的に不確実性を有するため、とりわけ数千年から数百万年という時間スケールにおいては、現在確認されていない断層の形成や既存断層の再活動が生じる可能性を完全に排除することは困難であるとしている。このような断層運動に関する不確実性を考慮すると、地層処分の安全評価においては、調査段階における断層の回避措置が講じられたとしても、地質に固有の本質的な不確実性を踏まえ、将来新たに発生しうる断層運動の影響をあらかじめ評価し、その影響が処分場の安全機能や閉じ込め性能に与える影響を適切に評価しておくことが不可欠である（以下、断層影響評価）。

このため、これまでに断層影響評価に関する複数の研究が行われており、その例として、第2次取りまとめ（以下、

H12）[2]および NUMO 包括的技術報告書（以下、NUMO 報告書）[3]における評価が挙げられる。

H12 の評価では、2,000 m×2,000 m の処分場に断層が対角線上に直撃するシナリオを想定し、これにより断層運動が処分場に与える影響を概略的に評価している。ここで、近年の断層の内部構造に関する研究から、断層帯は破砕の度合いに応じて異なる物理・水理特性を有する複数の領域から構成されることが明らかとなっている[4]。そのため断層内に位置する廃棄体は、その位置する領域の特性によって異なる影響を受けると考えられる。しかしながら、H12 では断層運動により岩盤がずれた境界面（以下、断層面）に位置する廃棄体のみを評価対象としており、断層面以外に位置する廃棄体への断層の影響は考慮されていない。さらに、断層の規模、発生時刻および発生位置といった断層発生に伴う不確実性（以下、これらの因子を「不確実性因子」と呼ぶ）が結果に与える影響を包括的に把握するためには、各不確実性因子の組み合わせを考慮した解析が必要となる。しかし、これらの因子の組み合わせは膨大であり、個別に数値解析を行うには大きな計算負荷を伴う。このような背景から H12 の評価では、断層発生時刻については 1,000 年、1 万年、10 万年の 3 パターンが想定されているものの、断層の発生位置は対角線上の 1 パターンに限定され、断層の規模については考慮されていない。このため、不確実性に関する評価は限定的なものにとどまっている。

一方 NUMO 報告書では、断層帯を構成する複数の領域（破砕の度合いに基づく区分）が考慮されている点で H12 よりも進展が見られるが、不確実性因子に関する体系的かつ定量的な検討は依然として限定的である。

以上のことから、本研究では、断層帯を構成する各領域の特性を反映した核種移行モデルを構築するとともに、各領域に位置する廃棄体の本数を考慮することで、断層帯内の位置に応じた廃棄体の線量への寄与を詳細に評価する。

Uncertainty analysis of fault scenarios in geological disposal using neural networks by Hiroya TOKUSA and Keiichiro WAKASUGI (kwakasugi@tokai.ac.jp)

*1 東海大学

Tokai University

〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 4-1-1

(Received 25 June 2025; accepted 14 November 2025)

また、断層の規模、発生時刻および発生位置といった不確実性因子が総線量の最大値に与える影響を分析することを目的とする。なお、これらの不確実性因子に起因して、断層内に存在する廃棄体本数や発生した断層の位置に応じて断層までの核種の移行距離が変化するため、既往の評価のように廃棄体1体あたりの評価結果に影響を受ける廃棄体数を乗じるというアプローチでは正確な評価ができない。すなわち、処分場に定置される4万体の廃棄体それぞれについて個別に評価を行うことが必要となる。このような大規模かつ多様なシナリオに基づく評価を人力で実施することは、膨大な作業時間や労力を要する。そこで、本研究ではニューラルネットワークを用いた機械学習を導入することで計算コストの効率化を図り、多種多様な断層の影響を考慮した評価を可能とするための手法についても検討する。

2 断層帯の特徴および廃棄体への影響

既往の評価事例[4]を参考に設定した本研究における断層帯の概念図を Fig.1 に、各領域に位置する廃棄体を受けるバリア機能への影響をまとめたものを Table 1 に示す。

断層面の直近には断層ガウジ帯（以下、ガウジ帯）が形成される。ガウジ帯は断層面に隣接する領域であり、とくに強い破碎および粉碎を受けている。また、断層運動に伴う摩擦熱や深部流体の影響による熱水変質により、粘土状の物質に変化した粘土鉱物で構成される[5]。この領域に位置する廃棄体への影響としては、強い断層運動の影響を保守的に見積もり、ガラス固化体が瞬時溶解することを仮定する。また、断層運動によって緩衝材が破壊されることで、緩衝材中の収着・拡散機能が喪失することを想定する。

ガウジ帯の外側には断層破碎帯（以下、破碎帯）が広がる。破碎帯も岩石が破碎された領域であるが、構成される岩石片はガウジ帯に比べて大きく、比較的粗い破碎物から構成される[5]。この領域については、断層による緩衝材の安全機能の喪失に加え、地下水の増加に伴う影響を考慮し、ガラス固化体の溶解速度が増加すると仮定する。これは、地下水の流れが速い環境では、溶解したガラス成分や核種が速やかに移行し、溶解面が常に新しい地下水と接触することで、溶解が促進されるためである。なお、溶解速度の具体的な値は NUMO 報告書を参考に設定している。

さらに破碎帯の外側には、プロセスゾーン（以下、割れ目帯）が存在する。割れ目帯は、固結性を保ちながらも断層運動の影響を受け割れ目の密度が高い領域であるが、人工バリアには直接的な影響を及ぼさないと考えられる。したがってこの領域では、天然バリアの変化、すなわち割れ目の密度の増加による地下水流動の促進を考慮し、透水量係数の増加を仮定する。

NUMO 報告書には、断層帯の各領域における透水係数について、日本全国の地質データに基づく平均値が示されている。これによると、粘土質のガウジ帯は最も透水係数が小さく、最も透水係数が高いのは破碎帯であることが示されている。このため本研究では、新たに断層が発生した場合には、透水性の高い破碎帯に比較的速い地下水流動が生じ、周辺のガウジ帯や割れ目帯からの地下水がこの領域

へ集水される流れを想定した。すなわち、ガウジ帯および破碎帯に位置する廃棄体からの核種は破碎帯を経由して地表へ、割れ目帯に位置する廃棄体からの核種は割れ目帯および破碎帯を経由して地表へ移行すると仮定した。なお、断層運動の影響を受けない領域として健全な母岩を設定し、この領域に位置する廃棄体については人工バリアおよび母岩の安全機能の劣化はないとした。母岩の透水性については、H12 のモデルと同様の透水量係数分布を用いた。ただし、人工バリアを移行した核種は、断層破碎帯へ集水される流れの影響を受けるため母岩および断層破碎帯を経由して地表へ移行すると仮定した。本来であれば、母岩から破碎帯に至る前に割れ目帯を通過する必要があるが、本研究では簡略化のためにこの影響を考慮していない。この仮定は非保守的な結果をもたらす可能性があるが、母岩中での3次元核種の広がり方を考慮すればこの影響は多少緩和されると考えられ、現時点では便宜的な取扱いとした。

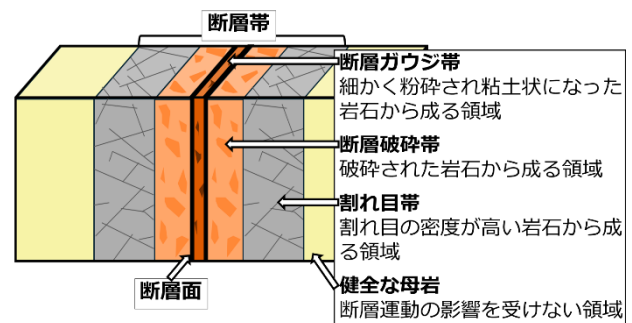


Fig.1 Conceptual model of fault zones

Table 1 Impact of fault activity on the safety functions in each region

	人工バリア	断層 (割れ目帯)	母岩	
断層ガウジ帯に位置する廃棄体	・ガラス固化体：瞬時溶解 ・緩衝材：収着・拡散機能喪失			断層破碎帯を経て生活圏へ移行
断層破碎帯に位置する廃棄体	・ガラス固化体：溶解速度を約200倍(ガラスの寿命360年) ・緩衝材：収着・拡散機能喪失			
割れ目帯に位置する廃棄体	影響なし	透水量係数を2桁増		
健全な母岩に位置する廃棄体	影響なし		影響なし	

3 断層影響評価モデルの設定

本研究では、断層影響評価モデルの設定において、H12のレファレンスケースで採用されている評価体系や各種設定を適用した。具体的には、断層発生前の評価体系については、モデル・データともにすべてH12の設定を採用して解析を行うこととし、断層発生後については、各領域で想定される安全機能の喪失および劣化（Table 1）に応じて、H12のモデルのパラメータを適宜変更して評価を行った。

また、処分場に関しては以下のような設定を行った。

- H12と同様に2,000 m×2,000 mの面積の処分場に4万体の廃棄体が処分される。

- 断層帯は必ず処分場を直撃し、処分場を貫通すると仮定する。
- 廃棄体は前章で定義した 4 つの領域（ガウジ帯、破碎帯、割れ目帯、健全な母岩）のいずれかに位置する。
さらに廃棄体から生活圏までの核種移行経路に関して、本研究では、処分前から既に存在していた断層を「既存断層」、処分後新たに発生した断層を「新生断層」と定義した上で、以下を仮定した。
- 処分後 1,000 年が経過するとオーバーバック（以下、OP）が寿命により損傷し、核種の溶出が始まる。
- 新生断層発生後は、ガウジ帯および破碎帯内のガラス固化体や緩衝材に保持されていた核種は新生断層を経由し、割れ目帯内のガラス固化体や緩衝材に保持されていた核種は割れ目帯および新生断層を経由して、それぞれ生活圏へ移行する。
- 新生断層中の核種移行モデルは、断層破碎帯の地質学的特徴、すなわち破碎物の隙間を通じた地下水や物質の移行を考慮し、破碎帯を多孔質媒体としてモデル化する。

4 ニューラルネットワークを用いた評価手法

ニューラルネットワーク（以下、NN）とは人間の脳の神経回路を模倣して設計された機械学習モデルである。NN は、与えられたデータからパターンを学習し、未知の値を予測することが可能であり、現在では画像認識や音声認識、自然言語処理などさまざまな分野で広く活用されている。

本研究では、結果に影響を与える説明変数と、それによって得られる目的変数のペア（これを「教師データ」と呼ぶ）を用いて予測モデルを構築する「教師あり学習」を採用した。構築された予測モデルに対して、説明変数をサンプリングにより設定し、未知の目的変数の予測を行う。ここでは、不確実性因子を説明変数、断層帯の各領域からの線量を合計して算出した総線量の最大値（以下、最大総線量）を目的変数とした解析手順の構築を試みた。

当初は、各領域の線量を個別に予測し、それらを合計することで最大総線量を算出するというシンプルなアプローチを試行した。しかし、どのような説明変数を用いても、精度の良い予測結果を得ることができなかった。これは、目的変数（最大総線量）を今回対象とした説明変数（不確実性因子）のみから直接予測することに限界があったためと考えられる。そこで、Fig.2 に示すように、最大総線量を構成する要因を「各領域に位置する廃棄体数」と「最大総線量時刻における各領域の廃棄体 1 体あたりの線量」に分け、それぞれ個別に NN を適用した後、得られた結果から最大総線量を算出するアプローチを採用した。なお、「最大総線量時刻における廃棄体 1 体あたりの線量」の予測も同様に説明変数からの予測が困難であったため、まず総線量が最大となる時刻を NN で予測し、その結果を説明変数として用いるという階層的アプローチを導入した。

また、本研究では不確実性因子の一つである断層の規模の設定にあたっては、実際の断層運動の調査に基づいた経験式である松田式[6]を参考にし、マグニチュードを用いて

断層の長さを表現した。この式は、日本で発生した内陸型地震のデータに基づき、断層の長さ L km と地震の規模を示すマグニチュード M との関係を示す経験式である（式(1)）。松田式ではマグニチュードの範囲は $M6.2 \sim 8.0$ とされているが、本研究ではより広範囲な影響評価を目的として、この経験式が $M6.0 \sim 9.0$ においても成立するものと仮定し、この範囲を解析対象とした。

$$\log L = 0.6M - 2.9 \quad (1)$$

L : 断層長さ [km]

M : マグニチュード [-]

断層発生時刻に関しては、適切なサイト選定が行われた場合、少なくとも処分後 1,000 年以内に断層が処分場を直撃する可能性は低いと考えられる。さらに、既往の報告書[7]では、断層運動に伴うせん断力が OP に与える影響を評価する試験が実施されており、その結果、OP がせん断力に対して十分な耐性を有することが確認されている。したがって、仮に OP の健全性が維持される処分後 1,000 年以内に断層運動が生じたとしても、核種の溶出が始まる可能性は低いと予測される。また、既往の研究では、断層発生時刻の上限として 10 万年を設定しているが、本研究ではより広範囲な時間スケールの影響を評価するため、評価対象期間を処分後 1,000 年から 100 万年までに拡張した。

破碎帯および割れ目帯の面積に関しては、まずマグニチュードに基づいて松田式より断層長さを算出し、次に金折の論文[8]にて示された経験式（式(2)および式(3)）を用いてそれぞれの幅を計算した。その後、断層発生位置に基づき処分場内における断層帯の位置を決定し、最終的に各領域の面積を求めた。

$$T = 0.83 \times 10^{-3} L^{1.15} \quad (2)$$

$$P = 1.6 \times 10^{-2} L \quad (3)$$

T : 破碎帯片幅 [m]

P : 割れ目帯片幅 [m]

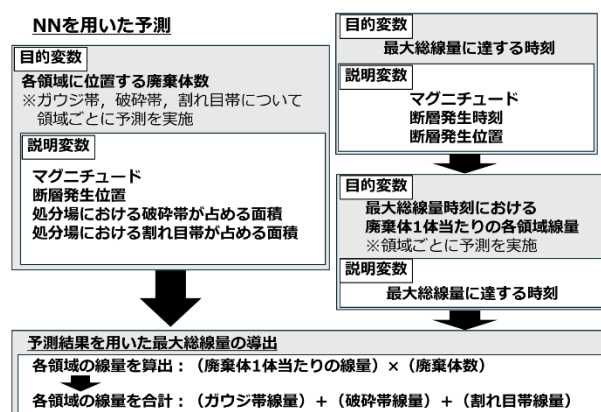


Fig.2 Overall workflow for deriving predictive equation

また、「各領域に位置する廃棄体数」における教師データに関しては、Fig.3 に示すように処分場を 25×25 の計 625 ブロックに分割し、ブロック単位で各領域に位置する廃棄体数を計数し評価に使用した。なお、ガウジ帯は他の領域と比較して幅が非常に狭いため、一本の直線（断層面）として再現し、この直線に接する人工バリアの数をガウジ帯に位置する廃棄体数として、廃棄体単位で正確に計数した。

「最大総線量に達する時刻」および「最大総線量時刻における廃棄体 1 体あたりの線量」における教師データの目的変数に関しては、2, 3 章で定義した条件に基づき、核種移行解析ソフト GoldSim[9]にて解析モデルを構築し、これを利用して得られた結果を用いた。本解析モデルは、人工バリア核種移行モデル、割れ目帯核種移行モデル、母岩核種移行モデル、断層破碎帯核種移行モデルの 4 つのサブモデルから構成されている。廃棄体の位置する領域に応じて、これらのサブモデルを適切に組み合わせることで核種移行解析を実施した。なお、割れ目帯および健全な母岩に位置する廃棄体に関しては、各ブロックの位置に応じて破碎帯までの移行距離が異なる。このため、これら移行距離の違いに起因する移行遅延効果の影響を適切に考慮するために、ブロックごとに移行距離を算出し、それぞれに対応した解析を実施した。

また、これらの解析結果に基づき得られた健全な母岩に位置する廃棄体からの最大総線量は、他の領域に比べて 2 ～3 オーダー程度低く、その影響は非常に小さいと判断された。したがって、健全な母岩に位置する廃棄体からの線量は最大総線量の計算から除外した。なお、健全な母岩に位置する廃棄体からの線量が相対的に高くなるケース（マグニチュードが低く、断層が処分場の端部を直撃するケース）においても、他の領域に比べて依然として十分に低い値であることを確認している。

本研究では、上記の設定条件に基づき、教師データとして 100 ケースを収集した。ここで、教師データの設定にあたっては、説明変数であるマグニチュード、断層発生時刻および断層発生位置のそれぞれについて、本研究で想定した範囲から万遍なくサンプリングを行い、偏りが生じないように 100 ケースを作成した。一般的に、NN を用いた予測においては、教師データの数が多ほど予測精度の向上が期待される。しかし今回、教師データの数を 50 ケースから 100 ケースに増やした場合でも最大総線量の予測誤差の改善はごくわずかであった。このため、本研究では教師データは 100 ケースで妥当であると判断した。

また、誤差の算出方法に関しては、収集した 100 ケースの教師データのうち無作為に抽出した 10 ケースをテストデータとして使用し、数値解析による解析値と予測結果を比較することで評価を行った。

その結果、テストデータにおける誤差は、最大で 15.1% で、平均で 5.4% であった。NN を用いた予測では、入力空間の局所的な情報不足などのさまざまな要因により精度の低い予測結果（外れ値）が生じる可能性がある。さらに、地層処分場の安全評価においては、不確実性が本質的に大きいと、厳密な数値の一致を追求するのではなく、予測結果がおおよそ同じオーダーで整合しているかが重要となる。

これらを踏まえ、平均誤差が約 5% 程度に収まっていることは、構築した NN モデルが最大総線量の予測に対して十分な精度を有していると判断した。また、学習に用いていないケースの一部について GoldSim 解析を実施し、NN モデルの予測値と比較した結果、誤差は数% 程度に収まった。このことから、本研究で構築した NN モデルは未知データに対しても一定の汎化性を示唆する結果が得られている。

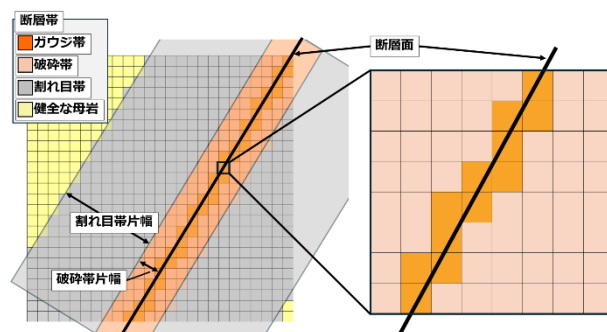


Fig.3 Conceptual diagram of a fault zone occurring in the disposal site (Example)

5 断層影響に関する不確実性解析

本研究では、1,000 ケースのサンプリングデータに対して最大総線量の予測を実施した。サンプリング数の設定に関しては、500 ケースおよび 1,000 ケースの場合で最大総線量の標準偏差を比較した結果、両者に大きな差は見られなかった。したがって、サンプリング数として 1,000 ケースを採用することが妥当であると判断した。本章では、得られた予測結果をもとに、不確実性因子が最大総線量に与える影響、ならびに断層帯の各領域が最大総線量にどのように寄与しているのかについて考察する。

5.1 重回帰分析

各不確実性因子に対して重回帰分析を行い、最大総線量との相関を評価した。なお、重回帰分析を行うにあたり、データの標準化を行った。

また、断層発生位置に関しては、断層が処分場 (2×2 km) を横切る際の交差部分の長さ（以下、「処分場に直撃した断層長さ」）を算出し、このパラメータを説明変数として重回帰分析を行った。各パラメータに対する偏回帰係数を Table 2 に示す。Table 2 より、断層発生時刻は最大総線量との相関はきわめて小さいことがわかる。これは、ほぼすべてのケースで支配核種が Th-229 (Np-237 と放射平衡) となり、長半減期を有する Np-237 が最大総線量を規定する主要因となったためである。すなわち、断層の発生時期が 1,000 年から 100 万年の範囲で変動しても、Np-237 の崩壊量にはほとんど影響せず、さらに断層中の移行遅延効果を考慮したことにより相対的に半減期の短い核種が移行過程で減衰することにより Np-237 の影響度が卓越し、結果として最大総線量に対する断層発生時刻の寄与が小さくなったと考えられる。一方、マグニチュードや処分場に直撃した断層長さといった、廃棄体数に影響を与えるパラメータは最大総線量に対して正の相関を示すことが明らかとなった。

Table 2 Partial regression coefficients of uncertainty factors for the maximum total dose

	マグニチュード	断層発生時刻	処分場に直撃した断層長さ
偏回帰係数	0.814	-0.057	0.461

5.2 最大総線量の上限值に関する考察

ICPR 勧告では、天然現象の影響によるシナリオ（稀頻度シナリオ）において参考とすべき長期間の被ばくの線量のめやす値として $1 \sim 20 \text{ mSv/yr}$ の範囲が示されている。本研究における予測結果に基づく最大総線量の上限値は約 $15 \text{ } \mu\text{Sv/yr}$ であり、このめやす値を超えるケースは存在しなかった。

また、この値は既往の断層影響評価における線量の最大値、すなわち H12 における $1,600 \text{ } \mu\text{Sv/yr}$ や、NUMO 報告書における $100 \text{ } \mu\text{Sv/yr}$ （深成岩類）と比較しても低い結果となっている。これは、H12 では断層中の移行遅延効果が考慮されておらず、人工バリア内で断層の影響を受けた核種が瞬時に生活圏へ移行するという保守的な設定が採用されているのに対し、本研究では、生活圏への直接的な流出経路となる断層（破砕帯）を多孔質媒体としてモデル化し、その移行過程における核種の収着や拡散等の移行遅延効果を考慮した結果、線量が低くなったと考えられる。また NUMO 報告書では、本研究と同様に断層を多孔質媒体としたモデルが採用されているが、パラメータの設定が本研究と比較して保守的である（例えば、本研究では動水勾配が 0.01 であるのに対し、NUMO 報告書では 0.05 など）ことなどが、線量が高くなった要因である。

5.3 マグニチュードと支配領域の関係

マグニチュードに対する最大総線量の予測結果を、最大総線量に最も影響を与えた領域（以下、支配領域）とともにプロットした結果を Fig.4 に示す。また、マグニチュードに対する断層帯各領域のスケールを可視化することを目的として、断層が処分場の対角線上に直撃したケースを想定し、代表的なマグニチュードごとの各領域の面積を例示した図を Fig.5 に示す。

Fig.4 よりマグニチュードの増加に伴い支配領域が破砕帯から割れ目帯、そして再び破砕帯へと変化していることがわかる。M6 付近では断層の規模が小さいため、断層帯が処分場を占める割合が小さい（Fig.5 左図）。この場合、廃棄体への影響が大きく、かつガウジ帯よりも廃棄体数の多い破砕帯が支配領域となるケースが多い。さらにマグニチュードが大きくなるにつれ断層帯が処分場を占める割合が徐々に大きくなり、その結果割れ目帯に位置する廃棄体数が増加することに起因して、割れ目帯が支配領域となる（Fig.5 中央図）。一方、M8 以上では断層帯の規模が処分場と同等あるいは処分場以上のスケールとなり、破砕帯に位置する廃棄体数が増加する（Fig.5 右図）。これにより、割れ目帯が処分場外縁付近に位置するため、この領域内の廃棄体数が減少し、結果として再び支配領域が破砕帯となるケースが増加する。

また、約 M6.7~8.3 の範囲では、最大総線量の変動幅のうち低い側のケースで破砕帯が支配領域となるケースが見られた。これらのケースはいずれも、処分場に直撃した断層長さが 500 m 以下であった。断層が処分場の端部を直撃するような短い長さでは、割れ目帯に位置する廃棄体数の増加が顕著ではなく、このため、M6.7~7.8 の範囲においても一部で支配領域が破砕帯となる傾向が確認された。

以上の結果から、断層の廃棄体への影響は、割れ目帯、破砕帯、ガウジ帯の順で大きくなると仮定したが、最大総線量への影響は必ずしもこの順番で寄与が大きくなるとは限らず、断層の規模や位置に応じて各領域に存在する廃棄体数にも大きく左右されることが示された。

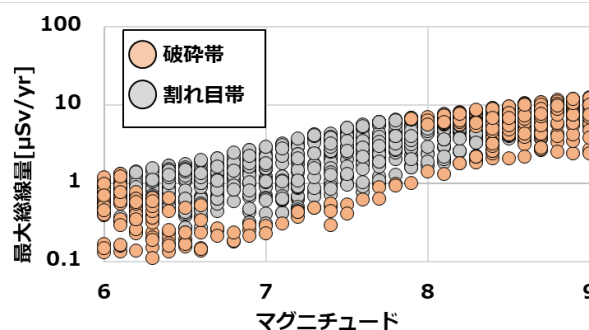


Fig.4 Maximum total dose for magnitude

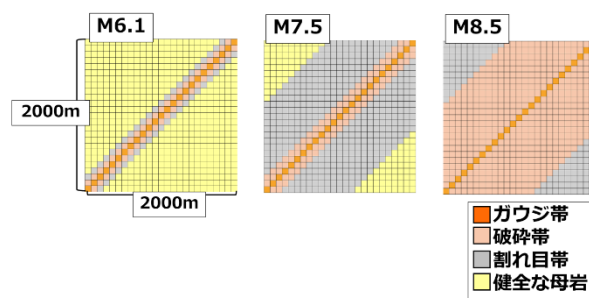


Fig.5 Extent of fault zone for each magnitude

6 結言

本研究では断層帯の各領域の特徴を考慮した核種移行モデルを構築するとともに、NN を用いることにより断層の設定に関する不確実性が最大総線量に与える影響を評価した。本研究により得られた知見は以下のとおりである。

- 従来の断層影響評価では、1 体の廃棄体に対する解析結果に断層の影響を受ける廃棄体本数を乗じて総線量を算出していた。本研究ではこれを見直し、断層の影響度に応じて区分を精緻化し、各区分に対応する核種移行モデルを組み合わせ、実スケール（4 万體）を対象とした評価フレームを構築した。さらに、断層構造についても、破砕帯・割れ目帯・ガウジ帯といった断層の構造的特徴を反映させたモデルを構築し、より現実的な評価を可能とした。
- このような大規模かつ高解像度なモデルに対して、従来の数値解析手法はモデル構築やパラメータ設定が煩雑で

あり、さらにこれを用いて不確実性を考慮した多数のケースを解析することは現実的ではない。本研究では、計算負荷を抑えながら一定の精度を有する解析を実現する手法として NN を活用し、数値解析結果との比較を通じて、おおむね同程度の精度を有する予測式を構築した。

- NNを用いて1,000 ケースのサンプリングデータに対する最大総線量の予測を行った。その結果、ICRP 勧告における稀頻度シナリオのめやす値 (1~20 mSv/yr) を超えるケースはなく、最大でも約 15 μ Sv/yr であった。このような低い値となった要因は、既往の評価で保守的に無視されていた断層中の移行遅延や断層までの移行距離を適切に考慮したためであり、従来の評価が過度に保守的であった可能性が示唆された。
- 上記 1,000 ケースに対する感度解析・重回帰分析の結果、最大総線量はマグニチュードおよび処分場に直撃した断層長さとの正の相関を示すことが確認された。これは、これらのパラメータの増加が断層帯全体に位置する廃棄体数の増加につながるためである。
- 最大総線量への寄与に関しては、断層による廃棄体への影響が最も高いとされるガウジ帯よりも、破碎帯や割れ目帯に存在する廃棄体の方が大きな影響を示すケースが多かった。これは、ガウジ帯の領域の大きさはマグニチュードによらず一定である一方、破碎帯や割れ目帯の領域はマグニチュードの増加とともに大きくなり、それに伴い廃棄体数が増加することに起因する。このことから、最大総線量の評価においては、断層の廃棄体への影響度に加えて断層の規模や位置に応じて各領域に存在する廃棄体数を考慮することが必要であることが示された。

参考文献

- [1] 大坪誠 他: 地層処分の長期安全を評価する際の断層活動における不確実性. 地質学雑誌 **120** (12), pp.423-433 (2014).
- [2] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊3. JNC TN1400 99-023, 核燃料サイクル開発機構 (1999).
- [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—. NUMO-TR20-03, 原子力発電環境整備機構 (2021).
- [4] Aiming L et al.: Spatial variations in damage zone width along strike-slip faults: An example from active faults in southwest Japan. *Journal of structural Geology* **57**, pp.1-15 (2013).
- [5] 大鹿村中央構造線博物館: 断層岩の分類 (online). <https://mtl-muse.com/study/faultrocks/classification/>, (accessed 2024-12-12).
- [6] 松田時彦: 活断層から発生する地震の規模と周期について. 地震 第2輯 **28** (3), pp.269-283 (1975).
- [7] 日本原子力研究開発機構: 平成 25 年度地層処分技術調査等事業処分システム評価確証技術開発報告書. 日本原子力研究開発機構 (2014).
- [8] 金折裕司: 断層の影響はどこまで及んでいるか. 応用地質 **41**(6), pp.323-332 (2001).
- [9] GoldSim Technology Group LLC: *GoldSim Contaminant Transport Module User's Guide*, GoldSim Technology Group LLC (2009).