

長期的な地形変化と気候変動による 地下水流動状態の変動性評価手法の構築

尾上博則*1 小坂寛*2 松岡稔幸*3 小松哲也*1 竹内竜史*1 岩月輝希*1 安江健一*4

高レベル放射性廃棄物の地層処分の安全評価は、処分施設閉鎖後、数万年以上に及ぶ時間スケールを対象として実施される。そのため、長期的な自然現象による影響を考慮した地下水の流速や移行時間といった地下水流動状態の長期変動性の評価技術の整備は重要な技術開発課題である。本研究では、長期的な自然現象のうち隆起・侵食による地形変化や気候変動に着目し、それらに対する地下水流動状態の変動性を、複数の定常解析結果に基づく変動係数で評価可能な手法を構築した。岐阜県東濃地域を事例とした評価手法の適用性検討の結果、過去 100 万年間の地形変化や涵養量の変化による影響を受けにくい地下水の滞留域を三次元的な空間分布として推定した。本評価手法を適用することで、地層処分事業の評価対象領域において、地形変化や気候変動に対する地下水流動状態の変動性が小さい領域を定量的かつ空間的に明示することができる。さらに、岐阜県東濃地域における事例検討結果を踏まえて、外挿法を用いた地下水流動状態の変動性の将来予測の基本的な考え方を整理するとともに、将来予測手法の適用方法について考察した。

Keywords: 地層処分, 地下水流動状態, 長期変動性, 長期的な地形変化, 気候変動, 地下水流動解析, 粒子追跡線解析, 変動係数

A safety assessment of the geological disposal of high-level radioactive waste was performed on a time scale of more than tens of thousands of years after disposal facility closure. Accordingly, it was necessary to establish techniques to evaluate the long-term variability in groundwater flow conditions such as groundwater velocity and groundwater travel time under the influence of long-term geological phenomena. This study focused on topographic changes associated with uplift and denudation, as well as climate perturbations. A method was then developed to assess the long-term variability of groundwater flow conditions using the coefficient of variation based on simulated steady-state groundwater flow conditions. The spatial distribution in areas with relatively long residence times, which are not significantly influenced by long-term topographic change or changes in the recharge rate over the past one million years, were estimated through a case study of the Tono area, Central Japan. By applying this evaluation method, it was possible to identify a local area with a low degree of quantitative and spatial variability in groundwater flow conditions associated with regional topographic changes and climate perturbations. Furthermore, based on the results of this case study, the use of the proposed extrapolation method to evaluate the long-term variability in future groundwater flow conditions is described, and the future application of the prediction method is discussed.

Keywords: geological disposal, groundwater flow conditions, long-term variability, long-term topographic change, climate perturbations, groundwater flow simulation, particle tracking analysis, coefficient of variation

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分事業においては、地下深部の地質環境が有する放射性廃棄物を物理的に隔離する機能（以下、隔離機能）と放射性物質の移行を抑制する機能（以下、閉じ込め機能）に基づき、その長期的なリスクの評価を行う[1]。その評価は、放射性物質の半減期を念頭において、処分施設閉鎖後の数万年以上に及ぶ期間を対象として実施されるため、長期にわたる隔離機能および閉じ込め機能の評価が必要となる[1]。とくに、変動帯に位置している日本では、長期的な自然現象が地質環境特性に影響を及ぼすことが懸念される。自然現象のうち、火山・火成活動、地震・断層活動および処分施設の地表への接近が懸念される速度の著しく速い隆起・侵食は、地質環境特性に

著しい影響を与える事象とされており、地層処分事業における文献調査や概要調査の段階で回避するための基本的な考え方が具体的に示されている[2]。一方で、上記よりも速度の遅い隆起・侵食（以下、地形変化）および汎世界的な気候変動の影響は、緩慢ではあるものの累積的かつ広域に及ぶため、それらの影響を回避することは困難であり、地下深部の地下水の流速や移行時間など（以下、地下水流動状態）が変化し、閉じ込め機能に影響を及ぼすことが懸念される。このような地形変化や気候変動に対する地下水流動状態の変動性の評価は重要な課題であるが、その評価手法は整備されていない。

地下水流動状態の変動性を評価する場合には、ボーリング調査で取得した地下水の水質や年代などの地球化学特性情報を用いて、地下水の長期的な滞留域などを推定する。しかし、地層処分事業の評価対象領域は広範囲に及ぶため、点の情報であるボーリング調査のみでは、その滞留域の空間的な広がりには把握できない。そのような広範囲の地下水流動状態を評価するに当たっては、地下水流動の影響因子となる地形、地質・地質構造やそれらの水理特性、涵養量に代表される水文特性などを総合的に考慮することができる地下水流動解析が有効なツールとなる。

そこで、本研究では地下水流動解析を用いて地形変化や気候変動に対する地下水流動状態の変動性を評価するための考え方や手法を構築した。また、岐阜県の東濃地域を事例に推定した過去 100 万年間の地形変化や気候変動条件を用いて地下水流動状態の変動性評価を試行し、地球化学特

Development of Evaluation Method for Variability of Groundwater Flow Conditions associated with long-term topographic change and climate perturbations by Hironori ONOE (onoe.hironori@jaea.go.jp), Hiroshi KOSAKA, Toshiyuki MATSUOKA, Tetsuya KOMATSU, Ryuji TAKEUCHI, Teruki IWATSUKI and Ken-ichi YASUE

*1 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター
Tono Geoscience Center, Japan Atomic Energy Agency
〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内 1-64

*2 西日本技術開発株式会社
West Japan Engineering Consultants, Inc.
〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通 1-1

*3 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター
Horonobe Underground Research Center, Japan Atomic Energy Agency
〒098-3224 北海道天塩郡幌延町字北進 432-2

*4 富山大学大学院 理工学研究部
Graduate School of Science and Engineering for Research, Toyama University
〒930-8555 富山県富山市五福 3190

(Received 29 October 2018; accepted 11 April 2019)

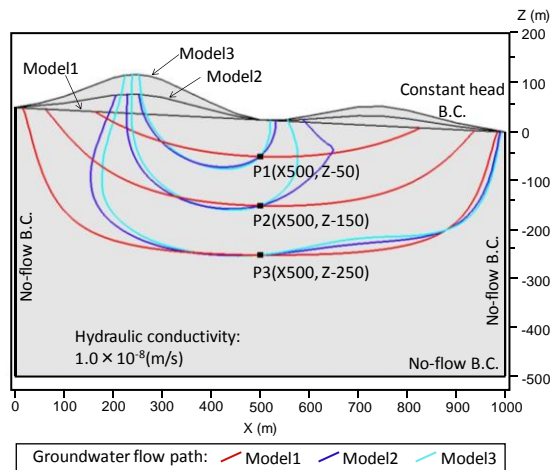


Fig.1 Simulation conditions of two-dimensional model, and result of particle tracking analysis

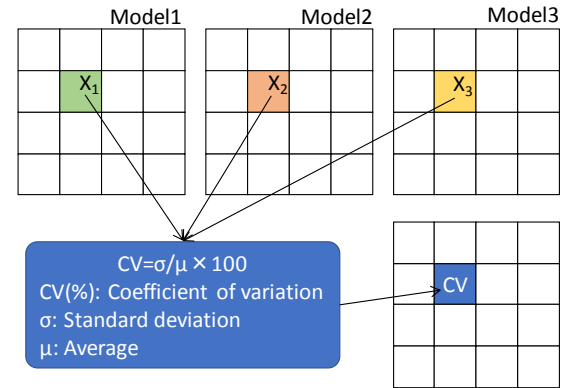


Fig.2 Schematic view of data analysis based on the results of particle tracking analysis

Table 1 Summary of analytical results

		Model1	Model2	Model3	Average	Standard deviation	Coefficient variation (%)
Darcy velocity (m/s)	P1	4.6×10^{-10}	9.4×10^{-10}	1.7×10^{-9}	1.0×10^{-9}	5.0×10^{-10}	48.6
	P2	4.2×10^{-10}	6.6×10^{-10}	8.8×10^{-10}	6.5×10^{-10}	1.9×10^{-10}	29.2
	P3	3.9×10^{-10}	5.7×10^{-10}	7.2×10^{-10}	5.6×10^{-10}	1.3×10^{-10}	24.1
Groundwater travel length from recharge area to designated point (m)	P1	352	328	366	349	16	4.5
	P2	500	425	456	460	31	6.7
	P3	646	595	613	618	21	3.4
Groundwater travel time from recharge area to designated point (year)	P1	23,237	8,630	6,658	12,842	7,395	57.6
	P2	37,211	16,892	13,136	22,413	10,576	47.2
	P3	61,885	41,911	32,359	45,385	12,302	27.1
Groundwater travel length from designated point to discharge area (m)	P1	334	83	78	165	119	72.4
	P2	481	281	213	325	114	34.9
	P3	616	620	624	620	3	0.5
Groundwater travel time from designated point to discharge area (year)	P1	22,217	2,242	1,126	8,528	9,690	113.6
	P2	35,496	32,024	7,361	24,960	12,525	50.2
	P3	56,199	42,159	35,216	44,525	8,728	19.6

性情報との比較を通じて、本研究で構築した地下水流動状態の変動性評価手法の適用性を検討した。さらに、地形変化や気候変動による地下水流動状態の変動性の将来予測手法について検討した。

2 地下水流動状態の変動性評価手法の予備検討

筆者らは、木曽山脈から濃尾平野に至る領域を対象として、過去 150 万年前から現在までの期間における特徴的な地形変化時期の古地形を復元するとともに、復元した地形を用いた定常状態の地下水流動解析（以下、定常解析）を実施し、それらの解析結果を比較することで地形変化による地下水流動状態の変化が評価可能であることを示した [3]。このことから、地形変化や気候変動による地下水流動状態の変動性を評価するに当たっては、必ずしも地下水流動状態の非定常変化を連続的に把握する必要はなく、地形や涵養量といった解析条件が異なる複数の定常解析結果を

用いて評価することができると考えられる。そこで、Fig.1 に示す二次元鉛直モデルを用いて、地下水流動状態の変動性評価の手法について検討した。

2.1 解析条件

地下数百 m における地下水流動状態に関する検討を行うため、二次元鉛直モデルは X 軸方向に 1,000 m、Z 軸方向に 500 m のスケールで構築した (Fig.1)。二次元鉛直モデルの地形や山地の隆起による地形変化といった条件は、3 章で事例研究の対象とした岐阜県東濃地域を参考に設定した。Fig.1 中の Model 1～Model 3 は、地形変化における 3 つの時間断面を示している。最初の時間断面として、なだらかな地形をイメージした Model 1 は、核燃料サイクル機構 [4] に基づき地形勾配 0.05 となる地形面とした。Model 2 および Model 3 に考慮した地形の隆起量は、阿寺断層や恵那山断層の変位量 (0.2～0.4 m/千年) [5, 6] を参考に設定した。具体的には、Model 2 は Model 1 から 10 万年後の地形

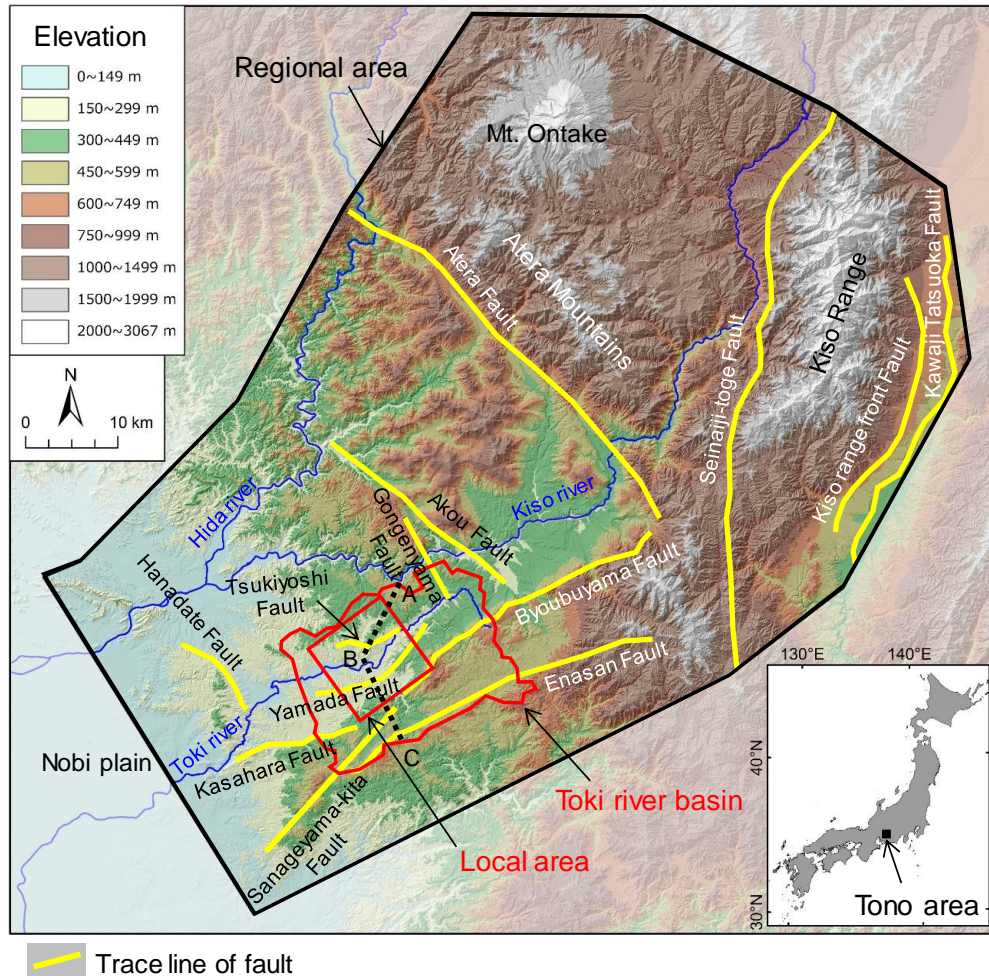


Fig.3 Case study regional setting

であると仮定し、Model 1 を基準に X 軸 250 m 位置には 40 m, 750 m 位置には 20 m の隆起量を与えた。さらに、Model 3 は Model 2 から 10 万年後の地形であると仮定し、Model 2 を基準に X 軸 250 m 位置には 40 m, 750 m 位置には 20 m の隆起量を与えた。また、岩盤の透水性は土岐花崗岩の透水係数[7]を参考として 1.0×10^{-8} m/s を設定した。本研究では、地形変化そのものが地下水流動状態に及ぼす変化に着目して検討を行うため、地形変化に伴って副次的に生じる可能性のある岩盤の物性値の変化は考慮しないこととした。定常解析は飽和条件とし、モデルの上部境界には地表面固定水頭条件を、側方境界および下部境界には水の流入出がない不透水条件を設定した。なお、定常解析は地下水流動解析コードである Frac-Affinity[8]を用いて実施した。

2.2 解析結果の整理方法

Fig.2 に、解析結果の整理方法のイメージ図を示す。地形が異なる 3 つのモデルによる定常解析結果のモデル間の差異を地下水流動状態の変動性として評価する。具体的には、定常解析で得られた地下水圧分布に基づき粒子追跡線解析を実施し、任意に設定する指定点を通過する涵養域から流出域までの地下水移行経路沿いの地下水流動状態を推定する。次に、各モデルにおける同じ指定点での地下水の流速などの差異を地下水流動状態の変動性として定量的に算出

する。一般的には、あるデータが有する差異を示す指標として標準偏差が用いられるが、標準偏差はデータの平均値に伴い大きくなるなどデータの数値に依存する可能性が高いため、平均値が大きく異なるデータを比較する場合には適さない。地下水流動状態は、地表付近と地下深部など場所によって数値がオーダーで異なることが想定されるため、標準偏差を評価指標とすることは適切ではない。一方で、データの標準偏差を平均値で除して算出した変動係数は、データにおける数値の大きさの影響を排除したものであり、データの平均値に対する相対的な差異を評価することができる。そのため、本研究では変動係数を地下水流動状態の変動性の評価指標とした。

2.3 地下水流動状態の変動性評価

モデルの中央部に指定点 (Fig.1 中の P1~P3) を配置し、粒子追跡線解析を実施した。地形変化によって各指定点を通過する地下水の涵養域や流出域が変化することで、その移行経路にも変化が見られる。P1 および P2 ではモデル間で流出域の位置が大きく変化することから下流側の移行経路が影響を顕著に受けている。一方で、P3 から下流側の移行経路には大きな変化は認められない (Fig.1)。

Table 1 に、指定点位置におけるダルシー流速、涵養域から指定点および指定点から流出域までの地下水の移行距離

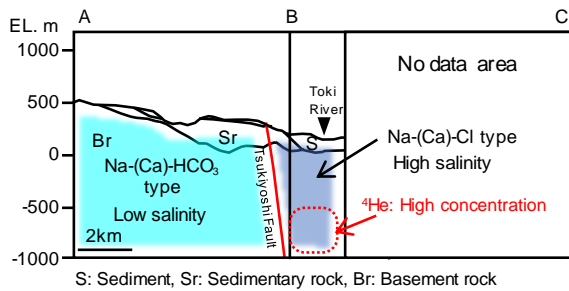


Fig.4 Estimated groundwater chemistry conditions in Local area. Vertical cross section corresponds to the dashed A-B-C line in Fig.3.

と移行時間を整理した。さらに、3 ケースの結果に基づき変動係数を算出した。ダルシー流速をはじめとするすべての項目について、P3 の変動係数が小さいことから、3 地点のうち P3 の地下水流動状態が地形変化の影響を最も受けにくいことがわかる。このことから、地表付近に比べて地下深部のほうが、地形変化による変動を受けにくいことが示唆される。また、指定点から流出域までの地下水の移行時間に着目すると、P1 と P3 の平均値はそれぞれ 8 千年程度と 4 万 5 千年程度と大きく異なるのに対して、標準偏差は両者とも 9 千年程度である。標準偏差を地下水流動状態の変動性の評価指標とした場合、P1 と P3 の移行時間は同程度の変動性を有すると評価されるが、平均値との関係性を考えると、P3 に比べて P1 の変動性が大きいと解釈するべきであり、標準偏差を指標とした評価は適切ではないことがわかる。一方で、変動係数は P1 が 110 % 程度、P3 が 20 % 程度であり、P3 に比べて P1 の変動性が大きいことが評価できている。このことから、地下水流動状態の変動性を適切に評価するためには、標準偏差ではなく変動係数を評価指標とすることの妥当性が示された。

二次元鉛直モデルを用いた検討の結果、複数の定常解析結果を用いて地下水流動状態の変動性を評価可能であることが確認できた。具体的には、地形変化や気候変動で生じることが想定される複数の地形や涵養量などを解析条件とした定常解析と粒子追跡線解析を実施する。さらに、それらの結果に基づき算出した地下水の流速などの差異を変動係数として数値化することで、地形変化や気候変動に対する地下水流動状態の長期的な変動性を定量的に評価できる。

3 実際のデータを用いた地下水流動状態の変動性評価手法の適用性確認

3.1 領域設定

2 章で提示した地下水流動状態の変動性評価手法の適用性を確認する領域を「ローカル領域」とした。また、ローカル領域の長期的な地下水流動状態を推定するための定常解析を実施する領域を「リージョナル領域」とした。評価手法の適用性を検討するといった事例研究を進めるに当たっては、実際の地質環境条件がある程度理解された場所が望ましい。そのため、既往研究[9, 10]によって地下深部の水理地質特性・地球化学特性情報の情報が比較的整備され

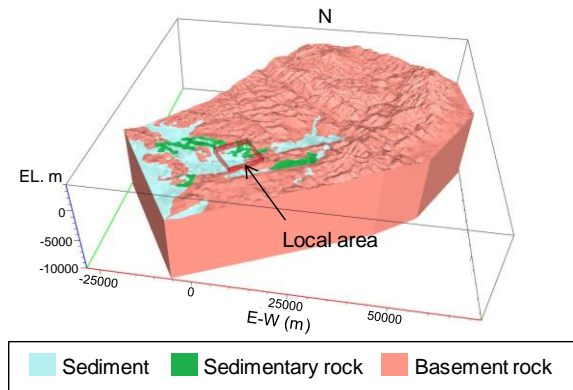


Fig.5 Simplified geological model (0.0Ma)

Table 2 Hydraulic conductivity of hydrogeology

Hydrogeology	Hydraulic conductivity (m/s)
Sediment	1.0×10^{-6}
Sedimentary rock	Horizontal direction: 1.6×10^{-7} Vertical direction: 1.6×10^{-9}
Basement rock	Horizontal direction: 2.8×10^{-8} Vertical direction: 1.0×10^{-7}
Fault	Normal to fault: 1.0×10^{-11} Parallel to fault: 4.0×10^{-7}

ている土岐川中流域の 10 km 四方をローカル領域とし、そのローカル領域を包含する広域をリージョナル領域と設定した (Fig.3)。

リージョナル領域においては、北東側に位置する御嶽山 (標高 3,067 m) や木曽山脈 (標高 2,000~3,000 m) を高標高地点として、全体的に北東から南西に向かって高度を下げ濃尾平野に至る傾動地形をなす。また、御嶽山などの火山を除くと主要な山地は断層を境とした定高性を有するいくつかのブロックに区分される。ローカル領域周辺では、北東から南西に向かって流れる土岐川の南側に、北東から南西方向に延びる逆断層帯 (恵那山-猿投山北断層帯、屏風山断層帯) の活動[11]により標高 600~900 m の山地が形成されている (Fig.3)。

3.2 地球化学特性情報に基づく地下水流動状態の推定

ローカル領域内の地下水流動状態を推定するために、地下水の水質や放射性同位体などの地下水年代に関わる地球化学特性情報を整理した (Fig.4)。ローカル領域周辺における北東から南西方向 (Fig.3 に示す A-B-土岐川断面付近に相当) の地下水流動系に着目すると、月吉断層を境として異なる水質型が形成されている。月吉断層の北側領域 (以下、断層北側領域) においては Na-(Ca)-HCO₃ 型地下水、月吉断層の南側から土岐川付近の領域 (以下、断層南側領域) においては Na-(Ca)-Cl 型地下水が分布している[12] (Fig.4)。断層南側領域では、断層北側領域に比べて地下水の塩化物イオン濃度が高く、標高 -800 m 付近においては海水の 1/10 程度であることが明らかにされてい

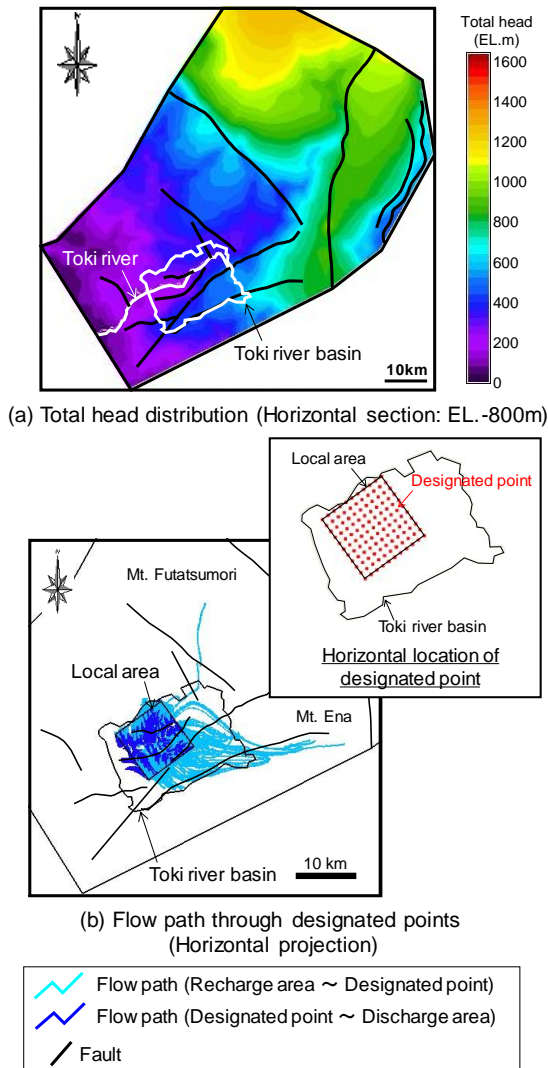


Fig.6 Example of simulation results (0.0Ma)

る[13]。したがって、断層北側領域に比べて断層南側領域では、元々存在していた塩分濃度の高い地下水が、天水由来の淡水で洗い出されにくい地下水流動状態が形成されていると考えられる。

断層北側領域の地下水年代は、地下水中の炭酸水素イオンに含まれる放射性炭素 (^{14}C) 濃度に基づいて数千年から1万数千年と見積もられており[14]、同領域では数千年から数万年代程度の時間スケールで地下水が入れ替わり得る地下水流動状態にあると考えられる。一方、断層南側領域の地下深部では、地下水の滞留時間とともにその濃度が増加する ^4He が高い濃度で観察されている[14] (Fig.4)。また、地下水中の塩化物イオン濃度と放射性塩素同位体、土岐花崗岩中で生成される放射性塩素濃度からは、同領域では百数十万年間にわたって地下水が土岐花崗岩と接していた可能性が示唆されている[15]。これらのことから、断層南側領域の地下深部には地下水年代の古い地下水が分布しており、地球化学的に相対的な地下水の滞留環境にあると推定される。

3.3 解析による地下水流動状態の推定

3.2 では、地球化学特性情報に基づき、断層南側領域に地

下水の滞留域が存在することが推定できたものの、その滞留域の空間的な広がり是不明である。そこで、リージョナル領域の水理地質構造モデルを構築するとともに定常解析および粒子追跡線解析を実施し、地下水の滞留域の三次元分布の推定を試みた。

3.3.1 水理地質構造モデルの構築

水理地質構造モデルは、Fig.3 に示した地形を地表面として構築した。また、本研究で着目する地表から深度 1,000 m 程度までの地下水流動が下部境界条件の影響を受けることのないように、既往研究[3, 16]を参考にして深度方向に標高-10 km までをモデル化の対象とした (Fig.5)。水理地質構造区分は、尾上ほか[3]を参考に透水性のコントラストに着目して、基盤岩、堆積岩および堆積物、ならびに Fig.3 に示した 13 条の断層をモデル化した。各水理地質構造の透水係数は、尾上ほか[7]に基づき設定した (Table 2)。三次元格子の分割は、地形の起伏および水理地質構造の分布形状の再現性、ならびに地下水流動解析の収束性を考慮して設定した。また、境界条件は上部境界面に水の流入出のある浸出条件を設定し、涵養量として 118 mm/年を与えた。涵養量は、東濃地域のアメダスや観測データ[17, 18]を用いて、水収支法により降水量から蒸発散量と河川流出量を差し引くことで推定した。なお、Fig.3 に示した主要河川には、固定水頭条件を設定した。側方境界および下部境界には、水の流入出がない不透水条件を設定した。

3.3.2 解析結果

定常解析は、飽和/不飽和条件で実施した。Fig.6(a)に、定常解析結果の一例として全水頭分布図を示す。リージョナル領域の北部および北東部から西部への地下水流動が大局的な流動傾向である。ローカル領域を含む土岐川流域では、北東部および南部に位置する山地から土岐川に向かう地下水流動が形成されている。

Fig.6(b)に、指定点を通る地下水の涵養域から流出域までの移行経路を示す。粒子追跡線解析の指定点は、ローカル領域内における地表から標高-1 km までの範囲を主な評価対象として設定した。具体的には、ローカル領域内に水平方向に 1 km 間隔で 121 点配置し、それを深度方向には深度-50 m から深度-1,650 m まで 200 m 間隔で 9 深度に配置した (Fig.6(b))。一部の地下水がローカル領域の北側および東側に位置する二ッ森山地や恵那山地を涵養域とするものの、ローカル領域内の地下深部を通過する地下水の主要な涵養域は土岐川流域境界の尾根部であり、主要な流出域は土岐川周辺である。

Fig.6(b)に示した地下水の移行経路沿いの地下水流動状態のうち、全指定点を対象としてダルシー流速による涵養域から指定点までの地下水の移行時間（以下、滞留時間）を抽出し、それらを各指定点の座標情報を用いてスプライン補間することで、ローカル領域内の滞留時間を 3 次元分布として可視化した (Fig.7)。その結果、断層南側領域に相対的に滞留時間の長い領域が分布しており、とくに土岐川の地下深部で最も滞留時間が長い (Fig.7(a))。これは、地球化学特性情報に基づく推定結果と整合しており、解析的な手法によっても断層南側領域が地下水の滞留域であることが示された。仮にダルシー流速による滞留時間が 100 万

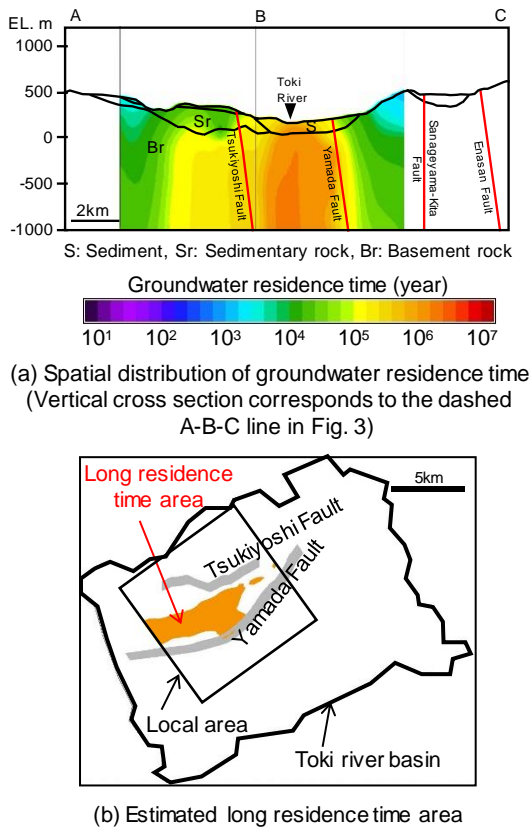


Fig.7 Estimated result of groundwater residence time

年以上の領域を地下水の滞留域とみなすと、その空間的な広がりには Fig.7(b)に示した月吉断層と山田断層帯で囲まれた範囲と推定される。

これらのことから、より信頼性の高い地下水流動状態を推定するためには、地球化学特性情報に基づく推定結果に解析的な推定結果を組み合わせることが有効である。また、地下水流動解析を用いることで地球化学特性情報だけでは推定することが困難な地下水の滞留域の空間分布を三次元的に推定することができる。

3.4 地下水流動状態の長期的な変動性の評価

3.3 では、解析的な手法を用いて地下水の滞留域の空間分布を推定したが、地層処分の観点からは数万年以上に及ぶ時間スケールにおいても、その滞留域が維持されうる環境にあったのかどうかを理解する必要がある。そこで、2章で提示した地下水流動状態の変動性評価手法を用いて、断層南側領域における地下水の滞留域の長期的な変動性を評価した。リージョナル領域における地史や文献情報から古地形の推定が可能と考えられる過去 100 万年間を長期的な変動性の評価期間とした。リージョナル領域において過去 100 万年間に生じた可能性のある地形変化と気候変動の条件を推定し、それらを解析条件とした定常解析および粒子追跡線解析を実施した。

3.4.1 地形変化の条件設定

(1) 復元する古地形ステージ

地下水の駆動力となる動水勾配は、地形の影響を受けることから、地形変化によって地下水流動状態が変化することが想定される。リージョナル領域では、中新世以降現在

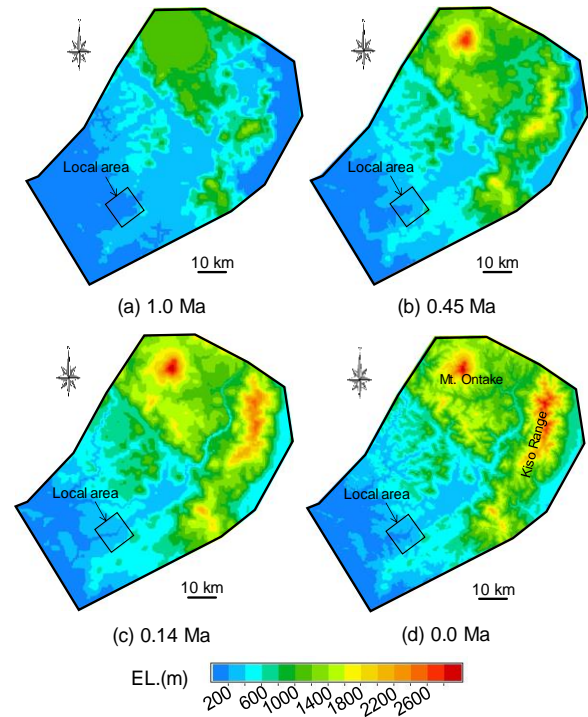


Fig.8 Paleo-topographical model

まで続く濃尾傾動運動[19]という広域的な隆起に加え、断層運動による山地の隆起[20]が生じている。さらに、上記のような地形変化に加えて火山である御嶽山の形成があった。本研究では、森山[20]に示された中部山岳地域における主要山地の隆起開始時期を参照し、リージョナル領域内における地形の発達段階を次の 3 つのステージに区分した。前述したように、濃尾傾動運動によってリージョナル領域は中新世以降、継続して隆起場に位置することから、本研究では過去 100 万年間における領域全体の地殻変動は、大まかには一様継続性（変位の向きの一様性、変位の等速性）が成立していたと仮定して、これらのステージにおける古地形の復元を試みた。

- ・ステージ I) リージョナル領域における山地・盆地の配列が、現在と異なっていたと考えられるステージ。ステージ I は、御嶽山と木曾山脈の形成前の前期更新世であり、その時代を 100 万年前と設定した。
- ・ステージ II) リージョナル領域における山地・盆地の配列は現在と同じだが、ローカル領域を流れる土岐川の流路が現在とは大きく異なっていたと考えられるステージ。御嶽山と木曾山脈が形成された中期更新世であり、土岐川流域の谷中分水界に分布する河成砂礫層の堆積時期である。河成砂礫層の地形面と同程度の高さにある高位河成段丘面の離水時期（約 42~37 万年前以降）[21]を踏まえると、ステージ II は中期更新世であり、その時代を上記の離水時期以前の 45 万年前と設定した。
- ・ステージ III) リージョナル領域における山地・盆地の配列およびローカル領域が位置する土岐川流域の範囲が現在と同じであったが、河谷内の地形的特徴が現在とは異なっていたと考えられるステージ。このステージを特徴づける地形は、1 つ前の寒冷期（約 14 万年前）

Table 3 Estimated result of recharge rate in each stage

Stage	0.0 Ma		0.14 Ma		0.45 Ma	
Climate condition*	IG	G	IG	G	IG	G
Temperature (°C)	13.6	5.6	14.6	5.6	14.6	5.6
Precipitation (mm/y)	1,759	935	1,710	935	1,710	935
River discharge (mm/y)	1,198	637	1,009	610	918	566
Evapotranspiration (mm/y)	443	229	470	229	470	229
Recharge rate (mm/y)	118	69	231	96	322	140

*IG: Interglacial period, G: Glacial period

Table 4 Simulation cases

Simulation case	Topography	Climate condition	Recharge rate (mm/y)
0.0Ma_IG	0.0Ma	Interglacial period	118
0.0Ma_G		Glacial period	69
0.14Ma_IG	0.14Ma	Interglacial period	231
0.14Ma_G		Glacial period	96
0.45Ma_IG	0.45Ma	Interglacial period	322
0.45Ma_G		Glacial period	140
1.0Ma_IG	1.0Ma	Interglacial period	322
1.0Ma_G		Glacial period	140

に形成された中位河成段丘[21]であることから、本ステージの時代を 14 万年前と設定した。

(2) 古地形モデルの作成

3 つのステージの古地形モデルを、地理情報システムを用いて数値化した (Fig.8)。ベースデータには、10 m グリッドの数値標高モデル (以下、DEM) を 100 m グリッドにリサンプリングした DEM を用いた。古地形モデルの作成手順と処理内容については、日本原子力研究開発機構[22]に詳しく記載していることから、ここでは要点のみを記す。

古地形モデルの作成は、リージョナル領域における地史を考慮し、次のように行った。まず、濃尾傾動運動と断層運動による地形の変位量をもつラスターデータ (以下、変位ラスタ) を作成した。次いで、現在の DEM から、変位ラスタを差し引くことで、過去から現在までの隆起量を考慮した古地形モデルを作成した。その後、100 万年前の古地形モデルについては、御嶽山の出現前の地形を考慮した処理を、14 万年前の古地形モデルでは河川の谷埋めを考慮した処理をそれぞれ行った。最後に、すべてのステージの古地形モデルに対して 1 km 方眼での接峰面処理を行い、上記の処理過程で生じた山地や盆地を不自然に開析する谷や地形の不連続なギャップをノイズとして除去した。

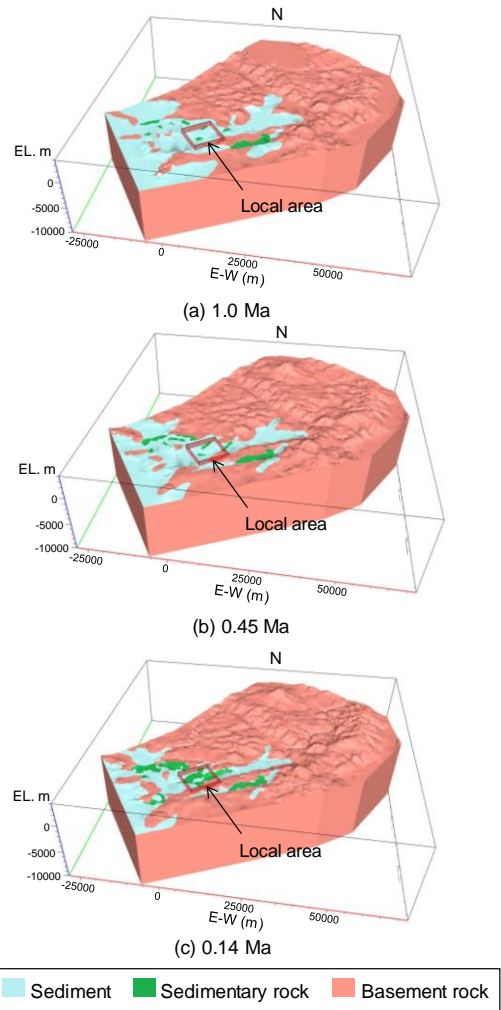


Fig.9 Paleo-geological model

3.4.2 気候変動の条件設定

地表から地下への水の供給量となる涵養量は、地下水位分布に影響を与えるため、涵養量が変化することによって地下水流動状態が変化することが想定される。涵養量は、降水量や蒸発散量、河川流出量といった地表環境条件を用いた水収支法によって推定される[23]。降水量や蒸発散量は気候変動によって変化するとともに、河川流出量は地形変化の影響も受ける。そこで、本研究では涵養量は気候変動だけでなく地形変化の影響を受けて変化するものとした。

100 万年前から現在にかけては、地表環境が大きく異なる大陸氷河の縮小 (温暖期) と拡大 (寒冷期) が周期的に繰り返されている[24]。そこで、現在および過去の 3 つのステージにおいて温暖期・寒冷期を想定し、それぞれの地表環境条件に基づき推定される涵養量を、気候変動によって生じる涵養量の変化と設定した (Table 3)。水収支法を用いた過去の涵養量の推定手順については、日本原子力研究開発機構[25]に詳しく記載していることから、ここでは要点のみを記す。

降水量と蒸発散量は、大まかには気温と正の相関を示すとされている[26]。そのため本研究では、国内外の気象観測データ [17, 27, 28] を用いて降水量と蒸発散量のそれぞれについて気温との相関式を求め、それらの相関式から過去

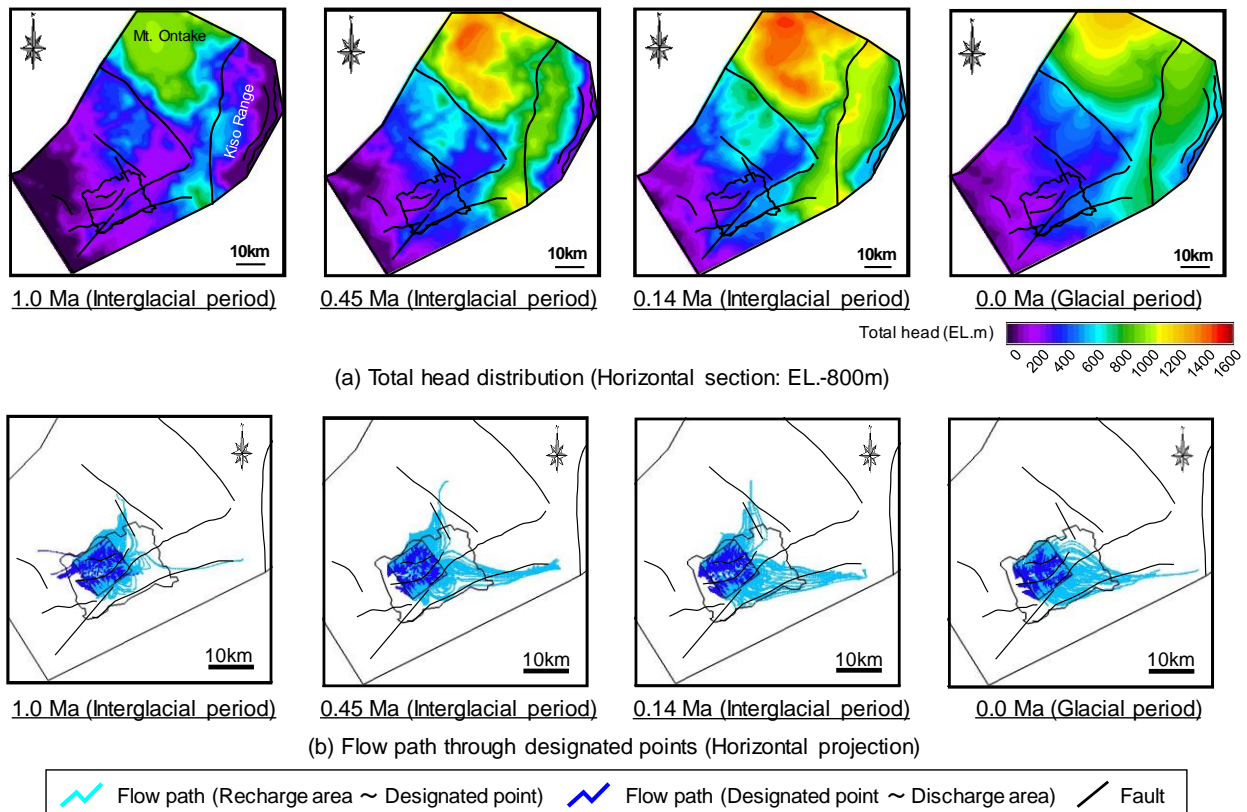


Fig.10 Results of steady-state groundwater flow simulation and particle tracking analysis

の温暖期・寒冷期の推定気温に対する降水量と蒸発散量を算出した。降水量と気温の相関式（指数関数）は、東濃地域の気候条件に近い地域として太平洋沿岸の観測データを基本に、寒冷期の気候条件を補うために北アジアや北アメリカなどの寒冷地の観測データを用いて推定した。また、蒸発散量には気温との正の相関（1次関数）が確認されたものの、そのばらつきが大きかったため、東濃地域での蒸発散量の観測結果[18]付近を通る切片の相関式を用いることとした。なお、佐々木ほか[29]によると、東濃地域の過去30万年間の温暖期と寒冷期の気温差は8~10℃と推定されているため、観測データ[18, 27]から推定される現在の東濃地域の年平均気温を基準として、寒冷期と温暖期の年平均気温を設定した。河川流出量の推定に当たっては、DEMを用いた地形計測および統計量解析による河川流出量の推定手法[30]を適用した。上記手法は、観測所が存在しない流域の河川流出量を推定するものである。本研究では、**Fig.3**に示した土岐川流域を対象として、いくつかに分けた小流域ごとに地形の歪度や尖度、流域の形状比などを計測し、地形の険しさや流域形状などを現在地形の特徴として数値化した。その地形特徴の数値をもとに、小流域ごとの地表水の流れやすさを示す指標（以下、流出指標）を算出し、河川流出量の観測データに基づく流出率との相関関係を求めた。さらに、その相関関係を **Fig.8**に示した各ステージの地形特徴に基づく流出指標に当てはめることで、過去の温暖期・寒冷期の降水量に対する河川流出量を推定した。最後に、降水量から蒸発散量と河川流出量を差し引くことで涵養量を算出した。なお、地形がなだらかな100万年前については、河川の流域分割が困難であり河川流出

量が推定できなかったため、100万年前の涵養量は地形が最も類似している45万年前の値を適用した。

3.4.3 解析ケースおよび解析条件

Table 4に、3.4.1および3.4.2で設定した地形変化と涵養量の変化を組み合わせた解析ケースを示す。解析ケースは、100万年前から現在までの4つの水理地質構造モデルに、温暖期・寒冷期の2パターンの涵養量を境界条件とした8ケースである。

過去の時代の水理地質構造モデルは、3.3.1と同様の方法で構築した（**Fig.9**）。なお、過去の水理地質構造の三次元分布については、明確な設定根拠がないため、古地形の復元に用いた濃尾傾動運動と断層運動による変位量を考慮するとともに、リージョナル領域の地史や地形変化を定性的に解釈することで、古地形との整合性を確保した。

また、100万年前の水理地質構造モデルには、**Fig.6(b)**に示すように粒子追跡線解析の指定点（121点×9深度）を配置した。100万年前以降の水理地質構造モデルについては、各モデルに考慮した地形変化との整合性をとって、各指定点の深度座標を変化させた。具体的には、変位ラスタを用いて各指定点位置の濃尾傾動運動と断層運動による変位量を算出し、その変位量を100万年前の水理地質構造モデルに配置した指定点の深度座標に考慮した。

3.4.4 解析結果

Fig.10に、定常解析結果の一例を示す。各ケースの定常解析結果が、過去100万年間で想定される代表的な地形と気候条件下での地下水流動状態となる。

全水頭分布をみると、過去から現在にかけてリージョナル領域の北部および北東部に位置する御嶽山や木曽山脈な

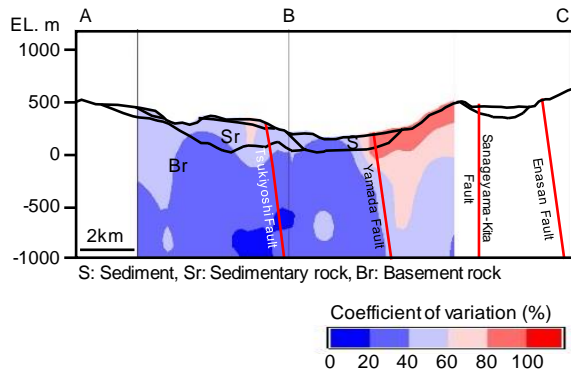


Fig.11 Spatial distribution of coefficient of variation associated with groundwater residence time.
Vertical cross section corresponds to the dashed A-B-C line in Fig.3. Topography distribution shows the data of 0.0Ma model.

どの山地形成に伴い水頭値は全体的に高くなるが、大局的な地下水の流動傾向に大きな変化はない (Fig.10(a)). 14 万年前および 45 万年前では、古地形復元の接断面処理によって細部の谷地形が埋められたことで、山地部では地下水面の位置が全体的に上昇するために現在と比較して水頭値が高い (Fig.6(a), Fig.10(a)). また、寒冷期では温暖期に比べて涵養量が減少することで、リージョナル領域全体の水頭値が低下するが、大局的な地下水の流動傾向に大きな違いはない (Fig.6(a), Fig.10(a)).

地下水の移行経路をみると、地形変化および涵養量の変化に対しては多少の変化があるものの、主要な涵養域および流出域の位置関係に大きな変化は見られない (Fig.6(b), Fig.10(b)). つまり、指定点を通過する地下水の主要な涵養域および流出域は、100 万年前から現在の間には大きく変化せず、涵養域は遠方でも二ツ森山地や恵那山地であり、主要な流出域は土岐川周辺である。したがって、本研究のリージョナル領域は、ローカル領域内を通過する地下水流動系を十分に包含しており、側方および下部の境界条件が、地下水流動状態の長期的な変動性評価に及ぼす影響はない。

3.4.5 地下水の滞留域の長期的な変動性

Table 4 に示した 8 ケースの解析結果に基づき、地下水の滞留時間の変動係数を算出した。この変動係数を指標として、過去 100 万年間の地形変化および涵養量の変化の複合的な事象が、地下水の滞留時間に及ぼす影響を評価する。

各指定点の地下水の滞留時間の変動係数を三次元的に補間して、滞留時間の変動性分布図を作成した (Fig.11)。分布図として整理することで、地下水流動状態の変動性の空間的な変化を可視化することができる。Fig.11 に示す変動係数の空間分布が寒色系の領域ほど、地下水流動状態が地形変化や涵養量の変化による影響を受けにくい領域となる。滞留時間の変動係数の空間分布からは、局所的な違いはあるものの 3.3 で推定した断層南側領域における地下水の滞留域 (Fig.7) が、変動係数が相対的に小さい領域内に存在することがわかる (Fig.11)。つまり、断層南側領域の地下深部は他の領域と比較して滞留時間が長い地下水が分布し、かつ過去 100 万年にわたって、その滞留時間が長い地下水

が維持されうる地下水流動状態が形成されていたと解釈できる。

岐阜県東濃地域を事例とした検討を通じて、地球化学特性情報に基づく地下水の滞留環境の推定結果と、解析による地下水の滞留域の空間分布およびその長期的な変動性の推定結果に矛盾がないことが確認できた。このことから、実際の地質環境条件下においても本研究で構築した地下水流動状態の変動性評価手法が適用できることが示された。また、解析に用いた過去の地形や涵養量の条件設定の考え方や結果の妥当性は直接的に確認できない。しかし、上記に示したとおり、解析による推定結果が地球化学特性情報に基づく推定結果と整合的であったことから、ローカル領域内の地下水流動状態に大きな影響を及ぼしうる主要な地形変化や涵養量の変化を推定できていたと考えられる。

本評価手法を適用することで、地下水の滞留時間だけでなく、地下水流速や流出域までの地下水の移行時間などの長期的な変動性を評価することができると考えられる。地層処分事業の評価対象領域において、地形変化や気候変動に対する地下水流動状態の変動性が小さい領域を明示することができる本評価手法は、数万年以上の時間スケールで地質環境特性の変動性を評価するうえで有効な評価技術となる。

4 地形変化や気候変動による地下水流動状態の変動性の将来予測手法の提案

地層処分事業における自然現象の将来予測においては、過去から現在までの地質環境の変動傾向を明らかにし、この傾向を将来へ外挿する外挿法が有効な手法とされている [1]。この外挿法を適用する場合には、将来予測の前提となる過去から現在までの変動傾向の推定が重要であり、本研究で構築した地下水流動状態の変動性の評価手法が活用できる。さらに、推定した過去から現在までの変動性を将来起こりうるものとみなすことで、地下水流動状態の変動性の概括的な将来予測が可能となる。

ここでは、3 章に示した岐阜県東濃地域を事例とした検討結果を踏まえて、地形変化や気候変動による地下水流動状態の変動性に関わる将来予測の方法論について検討した。Fig.12 に、将来予測のフローを示すとともに、概要を以下に取りまとめる。

- 地形変化については、地形・地質発達史に基づき地形変遷を概念化し、特徴的な時間断面における複数の地形を数値化することで、水理地質構造モデルの上部境界面として反映させる。
- 気候変動については、地表環境の変遷に基づき涵養量の変動幅を定量的に推定し、水理地質構造モデルの境界条件として反映させる。
- 上記の解析条件を組み合わせた複数の定常解析および粒子追跡線解析を実施し、解析結果として得られる地下水の流速や滞留時間などの変動係数を算出する。
- 変動係数を空間分布として可視化し、過去から現在にかけての地下水流動状態の変動性を定量的かつ空間的に推定する。

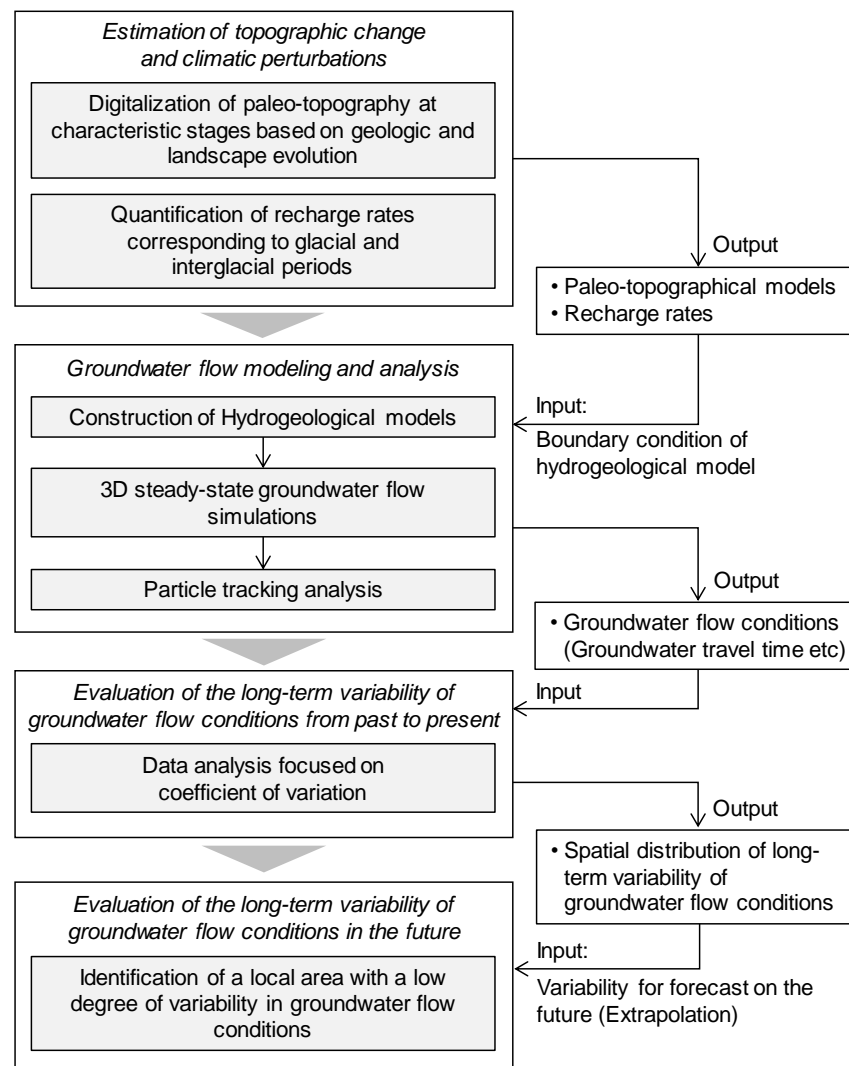


Fig.12 Approach for evaluation of long-term variability of groundwater flow conditions in the future

・上記で推定した過去の変動性を、将来の地形変化や気候変動によって起こりうる将来の変動性とみなして、評価対象領域において地下水流動状態の変動性が小さい領域を明示する。ただし、この変動性が小さい領域は、あくまでも地下水流動状態が影響を受けにくい場所を意味しており、必ずしも地下水の長期的な滞留域といった閉じ込め機能に適した特性を有する領域ではないことに留意する必要がある。

ここでは、外挿法を用いた将来予測手法の基本的な考え方を示したが、過去の変動性を将来の変動性として外挿することができる期間設定については留意が必要である。日本第四紀学会編[31]では、地殻変動の一樣継続性が成立している場合には、過去から現在までの変動傾向を同程度の期間の将来に外挿できることが示唆されている。一方で、梅田ほか[32]ではプレート運動を含む地殻変動の永続性の保証の観点から、外挿法による地質学的現象の将来予測は10万年程度が妥当であると論じられている。岐阜県東濃地域を例にすると、中新世以降現在まで続く濃尾傾動運動によって、リージョナル領域は継続した隆起場にあることから、本研究では過去100万年間は領域全体の大まかな地殻変動は一樣継続性が成立していると仮定して、ローカル領

域内の過去100万年間の地下水流動状態の変動性を推定した。上記の外挿法による将来予測の適用期間の考え方を踏まえると、推定した過去100万年間の地下水流動状態の変動性を将来100万年間の変動性とみなすことには不確実性を伴うが、10万年程度の時間スケールの将来予測には適用可能と考えられる。

また、例えば過去の地形変化を推定する場合には、調査データの量や種類、推定対象領域の地域性などによって、一義的な地形変遷の解釈や概念化ができず、結果としてある時間断面に対して複数の地形が推定される可能性が考えられる。将来の変動性の検討に際しては、このような過去の地形変化や気候変動の推定過程に内在する不確実性をどのように評価するかが重要である。本評価手法では、複数の地形や涵養量を解析ケースの1つとして取り扱うことができるため、上記の不確実性も解析ケースの1部として考慮することができる。したがって、本評価手法は地形変化や気候変動の不確実性も考慮した地下水流動状態の変動性を評価することができる手法の1つと言える。

さらに、地層処分事業では3つの調査段階で地質環境の調査・評価が段階的に実施される[1]。調査の進展に伴い段階的に詳細化されていく地質環境の情報にあわせて、本評

価手法を繰り返し適用し地下水流動状態の変動性を評価していくことで、地下深部の地質環境が有する閉じ込め機能の時間的な変遷も考慮したより現実的なサイト選定が可能となると考えられる。

5 まとめ

本研究では、地質環境特性に影響を及ぼすと考えられる長期的な自然現象のうち地形変化や気候変動に着目し、それらに対する地下水流動状態の変動性を評価するための手法について検討した。その結果、地形変化や気候変動で生じることが想定されるさまざまな地形や気候条件での定常解析結果に基づき算出した変動係数を評価指標とする評価手法を構築した。また、岐阜県東濃地域を事例とした評価手法の適用性検討では、地球化学特性情報に基づき推定した地下水の滞留域について、その空間的な広がりや三次元分布として推定するとともに、その滞留域が過去 100 万年間の地形変化や涵養量の変化による影響を受けにくい場所に存在することを具体的に示した。本研究で構築した評価手法を適用することで、数年以上に及ぶ時間スケールで生じる地形変化や気候変動による地下水流動状態の変動性を定量的かつ空間的に評価することが可能となった。さらに、本評価手法を用いた地下水流動状態の変動性の将来予測の方法論をフローとして提示するとともに、将来予測手法の適用方法について考察した。

本研究で対象とした東濃地域は山間部として位置付けられるため、気候変動に伴う海水準変動の影響が懸念されるなど山間部とは異なる特徴を有する平野部などを事例として本評価手法の適用性を確認することが、今後の課題として挙げられる。

謝辞

本稿の取りまとめに当たっては、日本原子力研究開発機構の笹尾英嗣博士から貴重なご意見を頂いた。匿名の査読者の方々からは、本稿の改善に有益なご指摘を頂いた。ここに記して謝意を表す。

なお、本研究は、経済産業省資源エネルギー庁委託事業「地層処分技術調査等事業（地質環境長期安定性評価確認技術開発）」の成果の一部である。

参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構：地層処分事業の安全確保（2010 年度版） - 確かな技術による安全な地層処分の実現のために - . NUMO-TR-11-01 (2011).
- [2] 総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会 地層処分技術 WG: 最新の科学的知見に基づく地層処分技術の再評価 - 地質環境特性および地質環境の長期安定性について - . 平成 26 年 5 月 (2014).
https://www.meti.go.jp/committee/sougouenergy/denryoku_gas/genshiryoku/chisou_shobun_wg/report_001.pdf
- [3] 尾上博則 他: 過去から現在までの長期的な地形変化が地下水流動特性に与える影響の解析的評価の試み. 日本原子力学会和文論文誌, **8** (1), pp.40-53 (2009).
- [4] 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地層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 1 わが国の地質環境. JNC TN1400 99-021 (1999).
- [5] 地震調査研究推進本部: 地震調査委員会, 阿寺断層帯の長期評価について. 平成 16 年 12 月 8 日 (2004).
http://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/52_atera.pdf (last visited at 31 May 2019).
- [6] 陶土団体研究グループ: 断層境界を伴う多数の基盤ブロックからなる内陸盆地 - 岐阜県多治見市周辺の東海層群堆積盆地の例 - . 地球科学, **53** (4), pp.291-306 (1999).
- [7] 尾上博則 他: 超深地層研究所計画の研究坑道の掘削を伴う研究段階における地下水流動のモデル化・解析. 土木学会論文集 C (地圏工学), **72** (1), pp.13-26 (2016).
- [8] Ohyama, T., Saegusa, H.: GEOMASS System. JAEA-Testing 2008-007 (2008).
- [9] 動力炉・核燃料開発事業団: 広域地下水流動研究基本計画書. PNC TN7020 98-001 (1997).
- [10] 日本原子力研究開発機構: 超深地層研究所 地層科学研究基本計画. JAEA-Review 2015-015 (2015).
- [11] 地震調査研究推進本部: 地震調査委員会, 屏風山・恵那山断層帯及び猿投山断層帯の長期評価について. 平成 16 年 10 月 13 日 (2004).
https://www.jishin.go.jp/main/chousa/katsudansou_pdf/53_54_byobu_ena_sanage.pdf (last visited at 31 May 2019).
- [12] Iwatsuki, T. et al.: Hydrochemical baseline condition of groundwater at the Mizunami underground research laboratory (MIU). *Appl. Geochem.*, **20**, pp.2283-2302 (2005).
- [13] Iwatsuki, T. et al.: Estimation of relative groundwater age in the granite at the Tono research site, central Japan. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, **172**, pp.524-529 (2000).
- [14] 電力中央研究所: 平成 24 年度 地層処分技術調査等事業 (地層処分共通技術調査: 岩盤中地下水移行評価技術高度化開発) - 地下水年代測定技術調査 - 報告書. 平成 25 年 3 月 (2013).
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2012/24-2-2.pdf (last visited at 31 May 2019).
- [15] Metcalfe, R. et al.: Geochemical approaches to understanding a deep groundwater flow system in the Tono area, Gifu-ken, Japan. In: *Groundwater Engineering - Recent Advances: Proceedings of the International Symposium, Okayama, Japan, May 2003*, 1st edn. (Kono, I., Nishigaki, M. and Komatsu, M. ed.), CRC Press, pp.555-561 (2003).
- [16] 稲葉薫, 三枝博光: 深部地下水流動系を抽出するた

- めの後背地地形の影響を考慮した広域地下水流動解析. 地下水学会誌, **47** (1), pp.81-95 (2005).
- [17] 草野友宏 他: 地下水流動特性の長期的変化の推定に用いる表層水理に関する情報の整理. JAEA-Review 2009-079 (2010).
- [18] 上野哲朗, 竹内竜史: 超深地層研究所計画における表層水理観測データ集 - 2014 年度 -. JAEA-Data/Code 2015-031 (2016).
- [19] 桑原徹: 濃尾盆地と傾動地塊運動. 第四紀研究, **7** (4), pp.235-247 (1968).
- [20] 森山昭雄: 中部山岳地域における山地形成の時代性 - 山はいつ高くなったか? -. 変動地形とテクトニクス, 古今書院, 東京, pp.87-109 (1990).
- [21] 田力正好 他: 土岐川 (庄内川) 流域の河成段丘と更新世中期以降の地形発達. 地理学評論, **84** (2), pp.118-130 (2011).
- [22] 日本原子力研究開発機構: 平成 28 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書. 平成 29 年 3 月 (2017).
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2016/28fy_tyoukiantaisei-1.pdf (last visited at 31 May 2019).
- [23] 山本荘毅編: 地下水学用語辞典, 古今書院, 東京 (1986).
- [24] Rohling, E. J. et al.: Sea-level and deep-sea-temperature variability over the past 5.3 million years. Nature, **508**, pp.477-482 (2014).
- [25] 日本原子力研究開発機構: 平成 27 年度 地層処分技術調査等事業 地質環境長期安定性評価確証技術開発報告書. 平成 28 年 3 月 (2016).
https://www.enecho.meti.go.jp/category/electricity_and_gas/nuclear/rw/library/2015/27fy_tyoukiantaisei-1.pdf (last visited at 31 May 2019).
- [26] 登坂博行: 地圏の水環境科学, 東京大学出版会, 東京 (2006).
- [27] 気象庁: 気象統計情報 (online).
<https://www.jma.go.jp/jma/menu/report.html> (last visited at 31 May 2019).
- [28] 国立天文台編: 理科年表 平成 26 年, 丸善出版, 東京 (2013).
- [29] 佐々木俊法 他: 東濃地方内陸小盆地堆積物の分析による過去 30 万年間の古気候変動. 第四紀研究, **45** (4), pp.275-286 (2006).
- [30] 景山宗一郎 他: 北海道下川地域における未観測流域の流出量を考慮した流域水収支の検討. 水文・水資源学会誌, **23** (4), pp.301-311 (2010).
- [31] 日本第四紀学会編: 百年・千年・万年後の日本の自然と人類, 古今書院, 東京 (1987).
- [32] 梅田浩司 他: 地殻変動の一樣継続性と将来予測 - 地層処分の安全評価の視点から -. 地学雑誌, **122** (3), pp.385-397 (2013).