

深部地下水の流動系を把握するためのモデル化領域と その境界条件の設定に関する検討

DISCUSSION FOR SETTING THE MODELING AREA AND BOUNDARY CONDITION IN ORDER TO ASSESS THE GROUNDWATER FLOW SYSTEM IN DEEP UNDERGROUND

稲葉 薫*・三枝博光**・中野勝志*・小出 馨*

Kaoru INABA, Hiromitsu SAEGUSA, Katsushi NAKANO and Kaoru KOIDE

It is important to understand the influence of the topographic features of hinterland such as mountain area on groundwater flow systems which include the recharge and discharge area in order to set the modeling area and boundary condition.

Hydrogeological modeling and groundwater flow simulations in some scales taking account of topographic features of hinterland were performed and the study lead to selection of adequate area that includes groundwater flow system in deep underground. The modeling area and boundary conditions could be set based on the results of this study.

Key Words:hydrogeological modeling, groundwater simulation, local scale,boundary condition

1. はじめに

核燃料サイクル開発機構は、深地層の科学的研究の一環として、広域地下水流動研究¹および超深地層研究所計画²を実施している。これらの研究は、様々な空間スケールにおける地質環境特性の体系的な調査・解析・評価技術の開発を主な目標としている。広域地下水流動研究では、主に、数十 km 四方以上の空間スケール（広域スケール）と数 km 四方程度の空間スケール（ローカスケール）において調査研究を進めている³。これらの空間スケールのうち、ローカスケールは、瑞浪超深地層研究所用地（以下、研究所用地）を囲む、深度 1,000m 程度を通過する地下水の涵養域から流出域までの 1 つの地下水流動系に着目し、地表地質調査や物理探査、試錐調査等を用いた地質環境特性調査に基づく、地下水流動のモデル化・解析・評価を実施するための領域である。また、広域スケールでは、文献情報に基づく、ローカスケールでのモデル化領域や境界条件の設定を目的とした予察的な地下水流動解析を実施するための領域である。

この地下水流動系の規模は、Toth⁴が提案しているように、着目する深度が深くなるほど、広範囲における後背地地形に支配されていると考えられる。一方、地下水流動解析における単純な境界条件を設定するためのモデル化領域を設定する上では、研究対象となる地下水流動系の分水界等を考慮することが望ましい。

以上のことから、本研究では、様々な規模を有する後背地地形が地下水流動場に与える影響を評価するために、複数の広域スケールでの領域において地下水流動解析を実施し、ローカスケールでのモデル化領域および境界条件を適切に設定するための検討を実施した。

* 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

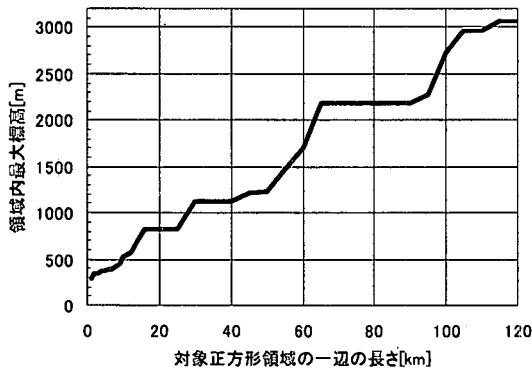
** 正会員 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター

2. 複数の広域スケール領域の設定

広域スケールでのモデル化領域を設定するため、研究所用地を中心とした領域における地形的特徴の抽出を試みた。具体的には以下のような作業を行った。

- ①研究所用地を中心とした正方形領域を設定する。
- ②その領域内の最高標高地点を抽出する。
- ③正方形領域の一辺の長さを x 軸，抽出された最高標高地点の標高を y 軸としてプロットする。

上記の作業の結果を図－1に示す。



図－1 瑞浪超深地層研究所用地を中心とした対象正方形領域の一辺の長さと同領域内最高標高の関係

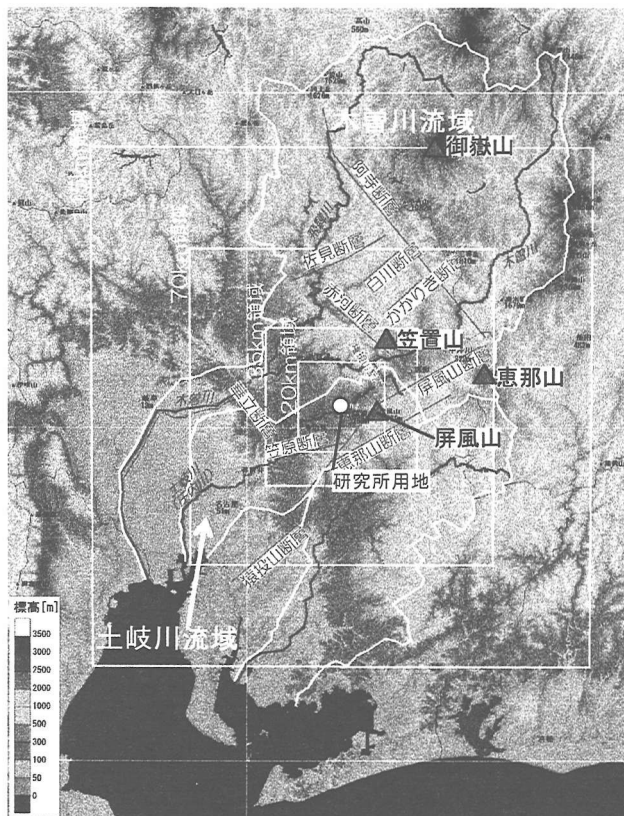
図－1では x の増加に対して y が増加しない領域が認められる。それらは、正方形の一辺の長さが約20kmの時に出現する屏風山(729m)、約35kmの時に出現する笠置山(1,128m)、約70kmの時に出現する恵那山(2,191m)、約115kmの時に出現する御嶽山(3,067m)である。本研究ではこれらの山岳地形を、研究所用地周辺の地下深部の地下水流動方向に影響を与える可能性のある地形と考えた。

以上のことから本研究では、これらの山岳地形が研究所用地周辺の地下水流動へ与える影響を検討するために、図－1において領域の拡大に対して最高標高が変化しない、20km 四方、35km 四方、70km 四方、115km 四方の正方形領域を広域スケールのモデル化領域として設定し、地下水流動解析を実施した。

3. 地質構造のモデル化

前節で述べた後背地地形に加え、広域的な地下水流動場へ影響を与えられ考えられる大規模な不連続構造(断層)をモデル化した。断層は「日本の活断層」⁵を基に、以下の作業により、研究所用地周辺の地下深部の地下水流動方向へ影響を与えると思われる断層を抽出した。

- ①山岳地形の形状から予測される大局的な地下水流動方向(本研究の場合は北東方向から南西方向への流れ)における研究所用地周辺より上流側に分布する断層は、研究所用地周辺の地下水流動方向へ与える影響が大きいと考え、これを抽出した。
- ②大規模断層に隣接する走向がほぼ同じである断層は、大規模断層をモデル化することにより断層が与える広域的な地下水流動方向への影響を考慮できると考え、大規模断層のみを抽出した。
- ③20km 四方のモデルを横断するような規模を持つ断層(長さ20km以上の断層)は、20km 四方のモデルより大きなスケールでの広域地下水流動解析を行う際、広域的な地下水流動へ与える影響が特に大きいと考え、これを抽出した。なお、研究所用地周辺の地下水流動の上流側に位置する、阿寺断層と赤河断層に挟まれた領域に存在する長さ20km未満の断層群が研究所用地周辺の地下水流動へ影響を与える可能性があると考え、この領域に存在する断層については長さ10km以上のものを抽出した。
- ④①～③までの作業により抽出された断層の他、研究所用地に最も近い位置にある権現山断層と華立断層は、研究所用地周辺の地下水流動方向へ影響を与える可能性があると考え、これらを抽出した。



図－2 広域スケールモデル化領域とモデル化する断層

領域は全てのモデルにおいて格子形状が同じになるように考慮してモデルを作成した。

5. 地下水流動解析結果

図－3 に解析結果を用いて描画した，研究所用地を通過する地下水の流線を示す。なお，図－3 中の 7km×10km の領域は，前節で述べた全てのモデルにおいて格子形状が同じになるように考慮した領域を示している。

35km 四方のモデルより広範囲のスケールのモデルにおいては，研究所用地の地下標高-2km 程度より浅い部分を通過する地下水流動系の涵養域が土岐川と木曽川の流域境界付近，標高-2km 程度より深い部分を通過する地下水流動系の涵養域が笠置山周辺もしくは恵那山周辺となっており，特に標高-2km 程度より浅い部分を通過する地下水流動系に関してはモデル間で整合している。

これに対し，20km 四方のモデルにおいては，研究所用地の浅部では，モデル領域東方，すなわち恵那山方面の地下深部からの流動系が認められ，他のモデルとは整合していない。また，より深い部分を通過する地下水の涵養域は 20km 四方のモデル領域内には含まれていない。

つまり 20km 四方のモデルに含まれる後背地地形では研究所用地周辺の深部地下水流動系の評価を行う場合に範囲が不十分であり，広域スケールで研究所周辺の地下水流動を評価する場合は，35km 四方のモデルより広範囲な領域が必要である。

このことから，ローカルスケールでのモデル化領域を設定するための検討材料としては，35km 四方のモデルより広範囲のスケールモデルにおける解析結果を用いることが適切であると考えられる。

図－2 に広域スケールのモデル化領域とモデル化対象の断層を示す。

モデルの深度は，モデル底部の境界条件の影響を受けないように十分に深い深度として，標高-10km までをモデル化領域とした。

モデルの各要素に与える透水性については，断層は低透水性とし，文献⁶から $1 \times 10^{-11} \text{m/s}$ の透水性を与えた。断層以外の母岩については文献情報における花崗岩の平均的な透水係数である $6.5 \times 10^{-7} \text{m/s}$ を与えた。

4. 地下水流動解析

地下水流動解析には差分法解析コード Frac-Affinity⁷を用いた。側方境界条件は地形に応じた静水圧固定境界とし，上部境界は地表面を地下水面とした固定水頭境界とした。底部境界は不透水境界とした。

なお，複数の空間スケールを有するモデル化領域において地下水流動解析を実行する上で，異なるスケールのモデル間でモデル格子の形状や精度等の違いによる解析結果の差異を生じさせないために，研究所用地周辺の 7km×10km の

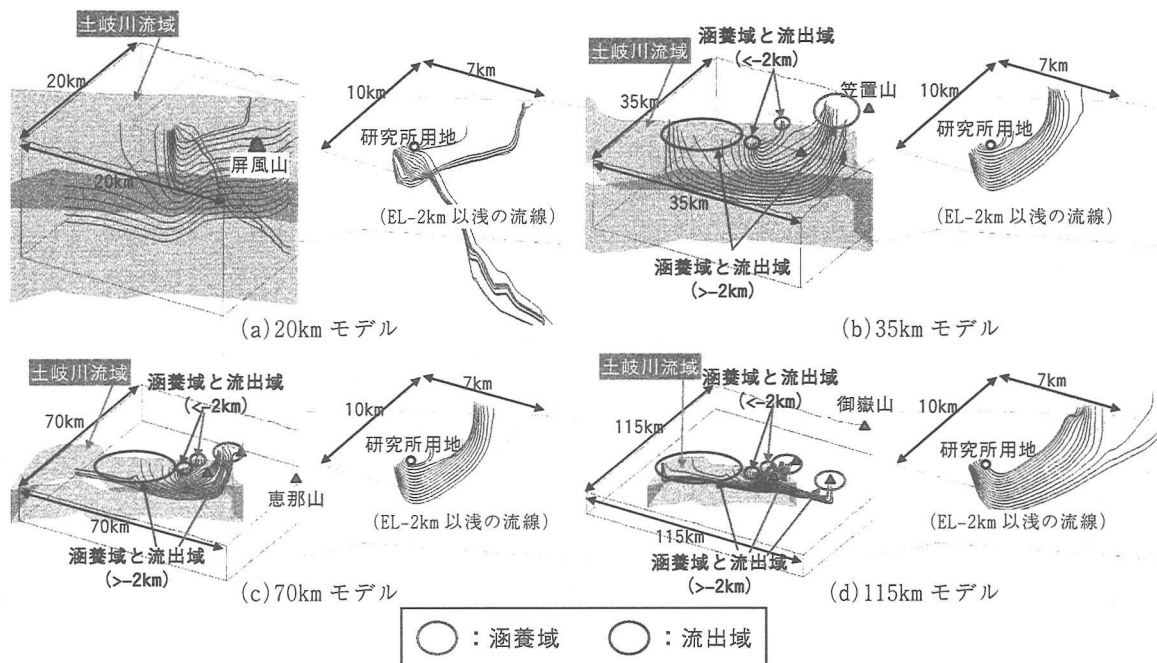


図-3 広域スケール地下水流動解析結果(研究用地を通る地下水の流線)

6. ローカルスケールのモデル化領域の範囲設定

ローカルスケールのモデル化領域の範囲設定に関しては、広域スケールのモデル化・解析結果において、どのモデルにおいても解析結果に差異のない領域、かつ研究用地周辺地下水の涵養域から流出域までを包含する領域を抽出することを念頭に範囲を設定することとした(図-4)。

35km 四方のモデルより広範囲の領域における地下水流動解析結果では、研究用地を通過する地下水のうち、地表から標高-2km までの地下水流動系とそれ以深の地下水流動系で涵養域が異なる。標高-2km より上部を通過する地下水流動系は土岐川流域と木曾川流域の境界付近を涵養域としている。また、流出域は土岐川及びその支流河川である。

このことから、研究用地周辺の地表から標高-2km 程度までの地下水流動系を含む範囲は、土岐川と木曾川の流域境界付近から土岐川までの範囲として設定できる。また、その範囲を抽出した場合、その底部境界条件として不透水境界を設定すれば、広域スケールのモデル化・解析結果から得られた地下水流動とほぼ同等の結果がローカルスケールのモデル化領域のモデル化・解析でも得られると考えられる。

以上のことから、図-5 に示す領域をローカルスケールのモデル化領域として設定した。

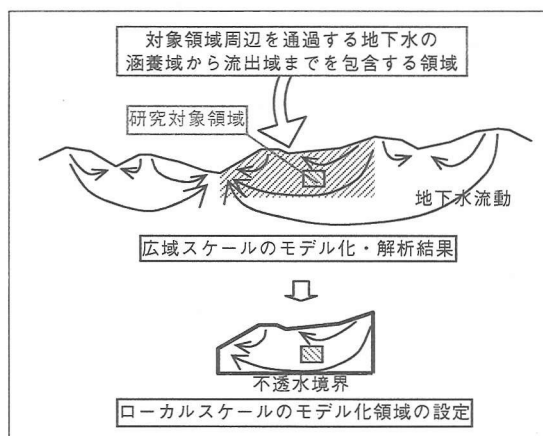


図-4 ローカルスケールのモデル化領域範囲設定の考え方

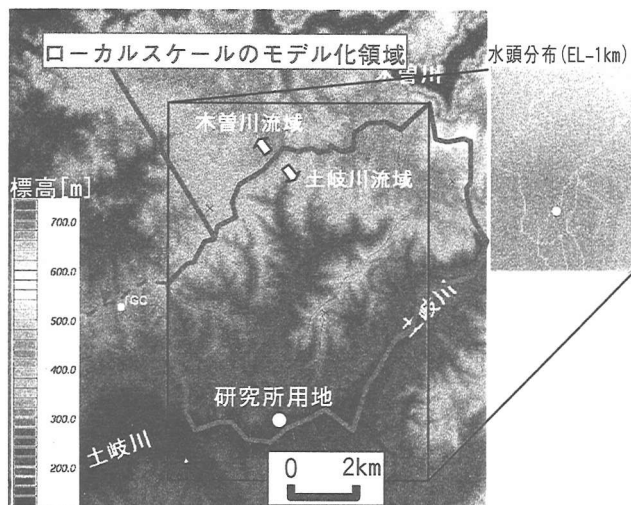


図-5 ローカスケールのモデル化領域

7. ローカスケールのモデル化領域における予察解析及びローカスケールの側方境界条件の設定

前節で述べたように、研究用地周辺を通る標高-2kmより上部の地下水流動系は、土岐川と木曾川の流域境界付近を涵養域とし、土岐川を流出域とする、研究所北方から南方への南北の流動系である。従って、南北方向に対しては図-5で示す領域によって研究用地周辺の地下水流動系の分水界を適切に抽出されたと考えられ、北側および南側の側方境界は不透水境界として設定できると考えられる。

しかしながら、東側及び西側の側方境界条件については、適切な側方境界条件について検討を加える必要があった。

そこで、図-5に示す領域において35km四方のモデルと同様に地形面のみをモデル化し、適切な側方境界条件を検討するための予察的な地下水流動解析（以下、予察解析という）を行った。予察解析では側方境界条件を不透水境界にした場合の解析を行い、35km四方のモデルによる解析結果と比較することにより側方境界条件についての検討を行った。予察解析では深さ方向は標高-2kmまでモデル化し、底部境界は前節から不透水境界とした。図-6に予察解析結果と35km四方のモデルの解析結果を用いて描画した研究用地を通る地下水流線を示す。

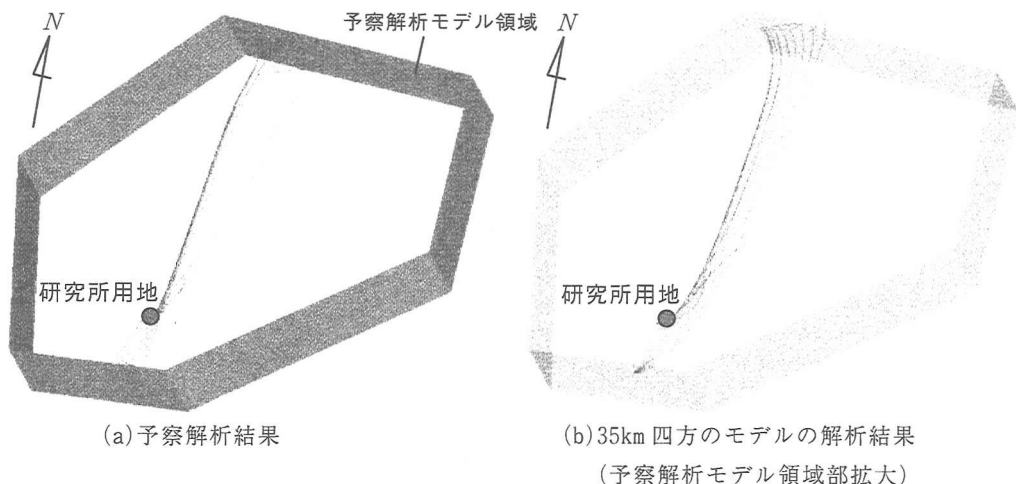


図-6 ローカスケール予察解析結果と35km四方のモデルによる解析結果の比較

図-6から、ローカスケールにおいて側方境界を不透水境界にした場合の地下水流動解析結果と、35km四方のモデルの解析結果では、研究用地周辺の地下水流動系に大きな違いがないことがわかった。

従って、ローカスケールにおいてモデル化・解析を行う場合の領域の側方境界については不透水境界として設定でき、前節で設定した図-5に示すローカスケールの領域内における地下水流動に対しては、東

側及び西側の側方境界条件の影響はないと考えられる。

また、底部境界については、標高-2km程度に不透水境界として境界を設定すれば、研究所用地周辺の深度1,000m程度までの地下水の流動方向については広域スケールのモデル化・解析結果と整合のとれた結果を得られることが確認された。

以上の検討により、ローカスケールにおける境界条件は表-1のように設定できると考えられる。

表-1 ローカスケール領域における境界条件

項目	設定方法
上部境界条件	固定水頭境界あるいは涵養境界
側方境界条件	不透水境界
底部境界条件	不透水境界

8. まとめ

本研究では、ローカスケールでのモデル化領域や境界条件を設定することを目的として、様々な規模を有する後背地地形が地下水流動場に与える影響を評価するために、複数の広域スケールでのモデル化領域において地下水流動解析を実施した。

その結果、35km四方以上の領域に含まれる山岳地形の影響を考慮することにより、研究所用地周辺の深部地下水流動系を評価するためのモデル化領域を設定することができた。このモデル化領域の境界（地下水流動系の分水界）は、土岐川と木曽川の流域境界と土岐川に位置している。以上の結果に基づき、不透水境界といった単純な境界条件を設定することが可能であるローカスケールのモデル化領域を設定することができたと考えられる。このことから、本研究において、対象とする地下水流動を適切に評価するために必要なモデル化領域および境界条件の設定に関する方法論を提示できたと考える。

今後、引き続き検討を実施し、本研究の地下水流動解析結果の妥当性の確認などを行っていく予定である。

参考文献

- ¹ 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，動燃事業団技術資料，PNC 7020 98-001，1997.
- ² 核燃料サイクル開発機構：超深地層研究所 地層科学研究基本計画，サイクル機構技術資料，JNC TN7410 2001-018，2002.
- ³ 核燃料サイクル開発機構：広域地下水流動研究年度計画書（平成14年度），JNC TN7410 2002-004，2002.
- ⁴ Toth：A Theoretical Analysis of Groundwater Flow in Small Drainage Basins, Journal of Geophysical Research, vol.68, No.16, pp.4795-4812, 1963.
- ⁵ 山崎晴雄，西田幸司，岡田篤正，東郷正美：活断層研究会編 日本の活断層，東京大学出版，1980.
- ⁶ 梅田浩司，柳澤孝一，米田茂夫：日本の地盤を対象とした透水係数データベースの作成，地下水学会誌，Vol.37, No.1, pp.69-77, 1994.
- ⁷ 稲葉薫，三枝博光，M.J.White，P.Robinson：地下水流動の予測解析統合システム（GEOMASSシステム）の概要と東濃地域への適用事例，地下水学会誌，第44巻第2号，pp.105-123, 2002.