

# 気候・海水準変動が地下水流動に与える影響 に関する解析的検討

## —北海道 幌延地域を例として—

今井 久\*・塩崎 功\*\*・山下 亮\*\*

操上広志\*\*\*・新里忠史\*\*\*・安江健一\*\*\*・前川恵輔\*\*\*

地質環境の長期的な変動が地下水流動に与える影響の理解の一環として、海水準および涵養量の変動に着目して、北海道幌延地域を対象に、同地域の地下水流動特性や地下水に含まれる塩分濃度分布に関する解析的検討を実施した。この結果、海水準変動の影響としては、海水準が低下した場合には、陸部の地下水位も低下し、塩分濃度の洗い出し範囲が拡大することなどが確認された。涵養量の変動による地下水流動への影響については、氷期における涵養量の減少を考慮した地下水流動解析を実施し、氷期においては地下水位が低下するとともに、塩分濃度の変化は比較的小さいことが推定された。

キーワード：地下水流動，高レベル放射性廃棄物地層処分，海水準，涵養量

### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における安全評価は、万年オーダーの長期にわたる期間を対象としている。こうした長期間で影響が顕在化する隆起・侵食や気候・海水準変動などの天然現象は、安全評価において重要となる地下深部の地下水流動や水質分布などに影響を与えることが考えられる。それゆえ、安全評価手法の信頼性を向上する観点においては、天然現象の長期的な変動が地質環境に与える影響を検討することが重要である。

そこで本論では、天然現象が地質環境に与える影響を理解するための一環として、気候・海水準変動が地下水流動に与える影響を、北海道幌延地域を事例として解析的に検討する。同地域では、(独)日本原子力研究開発機構が、地層処分技術の確立を目指した研究開発として、現地での調査研究を実施している。

### 2. 地質環境の変化と地下水流動

#### 2.1 地質環境の変化と地下水流動

幌延地域のような沿岸域に隣接した高緯度地の地下水流動に影響すると考えられる天然現象のイメージを図-1に示す。これら天然現象の地下水流動への影響としては、気候変化に伴う降水量や蒸発散量の変化、特に氷期における凍土の形成に伴う涵養量の変化、海水準変動による沿岸域での水理ポテンシャルの変化のほか、隆起・沈降、侵食・堆積、断層・褶曲活動などによる地層の透水性や、間隙水圧の変化が想定される。

#### 2.2 海水準と涵養量の変化

気候・海水準変動の影響を地下水流動解析において考慮する際に必要な情報は、海水準変動の周期や振幅、気候変化に伴う涵養量の変化である。地球の気候は地球の

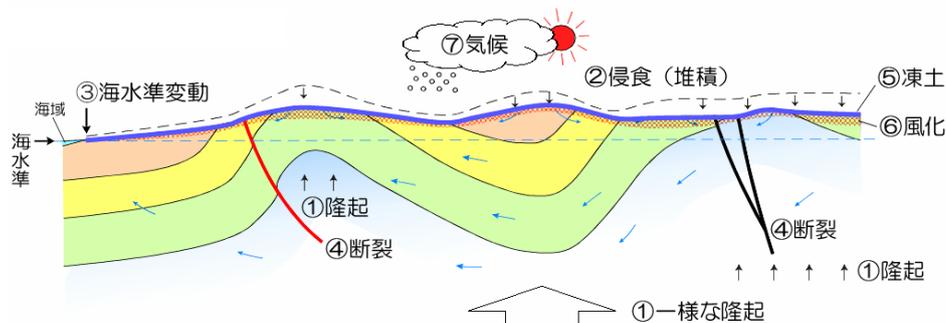


図-1 沿岸域に隣接した高緯度地を想定した天然事象の諸要因と地下水流動のイメージ

\* 技術研究所 \*\* 原子力部 \*\*\* (独) 日本原子力研究開発機構

軌道変動に基づく太陽放射量の年代変化により氷期，間氷期を周期的に繰り返しており，氷期には高緯度地方を中心に氷床に覆われ，氷床が拡大した分だけ海面は低下する。

図-2に第四紀の海洋酸素同位体とそれに基づく海面変化を示す<sup>1)</sup>。海水準は最近 50 万年程度においては，約 12 万年周期で変動し，変動幅は 100m程度となっている。また，最終氷期における永久凍土の分布層厚は幌延地域においてはおおむね 60m 程度と推定されており<sup>2)</sup>，地表からの涵養量は大きく減少すると推定される。

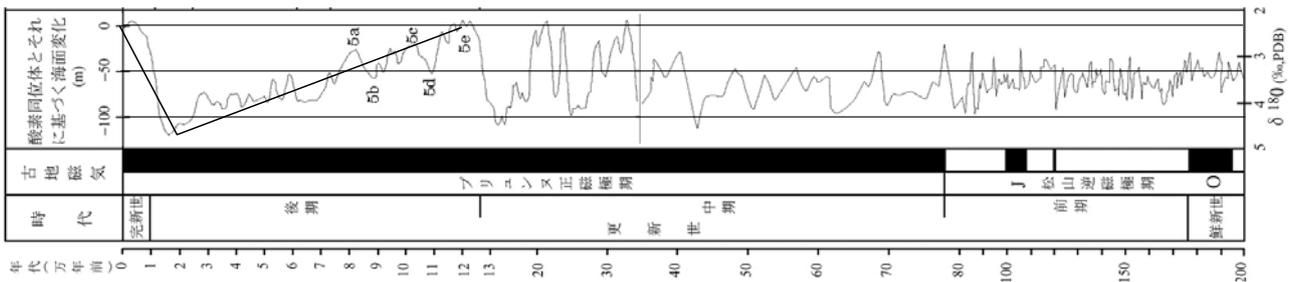


図-2 第四紀の海洋酸素同位体とそれに基づく海面変化<sup>1)</sup>

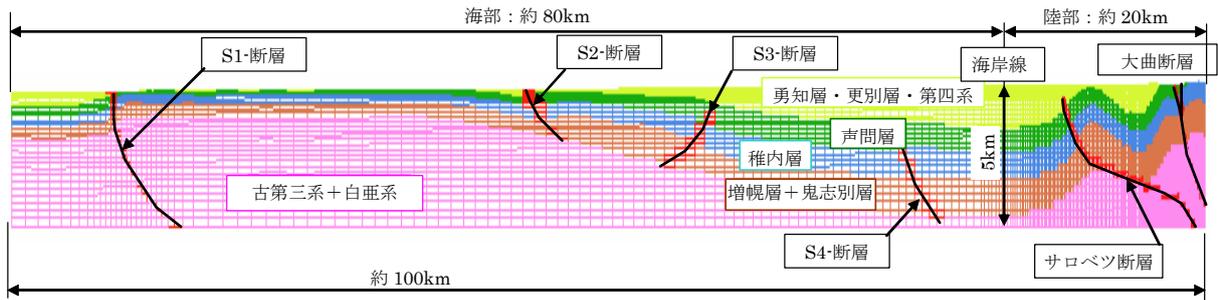


図-3 幌延深地層研究施設付近から沖合に向かう鉛直2次元断面モデル

表-1 適用した透水係数と間隙率

No	地質	透水係数(m/s)		間隙率(%)	
		case1	case2	case1	case2
		均質1	深度依存透水断層	均質1	地質区分
1	古第三系+白亜系	1.0E-07	1.0E-11	20	50
2	増幌層+鬼志別層	1.0E-07	5.0E-10	30	50
3	稚内層	1.0E-07	Depth_Wk	40	50
4	声間層	1.0E-07	Depth_Kt	60	50
5	勇知層・更別層・第四系	1.0E-07	Depth_Yt	60	50
6	大曲断層	1.0E-07	1.0E-07	50	50
7	サロベツ断層	1.0E-07	1.0E-07	50	50
8	S1-断層	1.0E-07	1.0E-07	50	50
9	S2-断層	1.0E-07	1.0E-07	50	50
10	S3-断層	1.0E-07	1.0E-07	50	50
11	S4-断層	1.0E-07	1.0E-07	50	50
12	表層(地表より10m程度)	1.0E-07	1.0E-06	60	50

※表中の Depth\_Yt , Depth\_Kt , Depth\_Wk は各層の深度依存性モデルを示す。  
 透水係数 k (m/s), 深度 Z(m)とするとそれぞれ次式で表される。また上下限を設定した。  
 Depth\_Yt :  $\log_{10}(k) = -0.0034Z - 8.3665$  [上限:  $1 \times 10^{-8}$  m/s, 下限:  $1 \times 10^{-11}$  m/s]  
 Depth\_Kt :  $\log_{10}(k) = -0.0039Z - 7.5935$  [上限:  $1 \times 10^{-7}$  m/s, 下限:  $1 \times 10^{-11}$  m/s]  
 Depth\_Wk :  $\log_{10}(k) = -0.0061Z - 5.5626$  [上限:  $1 \times 10^{-6}$  m/s, 下限:  $1 \times 10^{-11}$  m/s]

検討対象領域は、幌延深地層研究所から天塩川河口付近を通して沖合に向かう鉛直2次元断面で、およそ東西100km×深度5kmである(図-3)。これは、過去に実施した広域地下水流動3次元解析<sup>4)</sup>で得られた流動経路を含む断面である。氷期における海水準は現時点から最大で約120m程度低下すると考えられることから、海底面が現在の海水準より120m深くなる箇所(現在の海岸線から沖合約80km)までを解析領域として設定した。

解析ケースは、透水係数が全ての領域で一定と仮定した均質なモデル(case1)と、地質構造と現地で計測された透水係数・間隙率を反映させたモデル(case2)の2ケースを設定した。なお、後者の物性値は操上ほか<sup>4)</sup>に基づいて設定しており、稚内層、声間層、勇知層の透水係数には深度依存性を与え、断層は高透水性を仮定している。また、間隙率は、case1では一律50%、case2は稚内層と声間層に関してはコア試験結果を参考に設定し、増幌層と鬼土別層、古第三紀層と白亜紀層は上位層からそれぞれ10%小さくすると仮定して設定した。比貯留係数は $1 \times 10^{-5} \text{m}^{-1}$ と仮定し、全地質区分に対し同じ値を適用した。分散長は縦分散長 $\alpha_L = 100 \text{m}$ 、横分散長 $\alpha_T = 20 \text{m}$ とした。設定した透水係数、間隙率を表-1に示す。

### 3.2 境界条件・初期条件

地下水流動解析の境界条件を図-4(a)に示す。海水準変動によって海域の水位固定箇所と涵養量設定箇所に違いが生じる。海水準変動は既往の解析事例(例えば、登坂<sup>5)6)</sup>)を参考に現在を最海進時と仮定し、12万年サイクルで変動するモデル(図-5(a))とした。気候変化に伴う涵養量変化の定量的な情報はないため、長期変動周期として12万年のうち10万年間は地表が凍土となり涵養が無くなるという単純な条件(図-5(b))とした。

物質移動解析の境界条件を図-4(b)に示す。海進、海退に伴い沿岸海底部は境界条件が変化する。モデル側部、底部は不透水境界でゼロフラックスとした。陸域表面では濃度 $C=0$ 、海域では正規化した海水濃度 $C=1.0$ を設定した。地下水流動解析の初期条件は現在の初期条件に涵養量を与えた条件での定常解析結果のポテンシャル分布(図-6)を設定し、物質移行解析の初期条件は全領域に濃度 $C=1.0$ を設定した。

### 4. 解析結果

解析は12万年を5サイクル、60万年間を対象に実施

した。解析ケースはcase1, case2に対して、それぞれa)涵養量変化・海水準一定、b)涵養量・海水準変化、c)涵養量一定・海水準変化の3種類の境界条件を適用し、6ケースについて計算した。

解析結果として各ケースのポテンシャルや塩分濃度の分布、代表点のポテンシャルの経時変化、粒子追跡法による地下水流動経路、滞留時間に関する結果を示す。

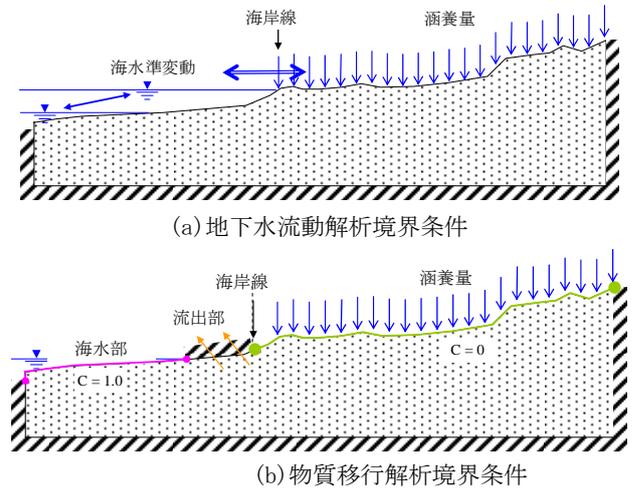


図-4 解析境界条件

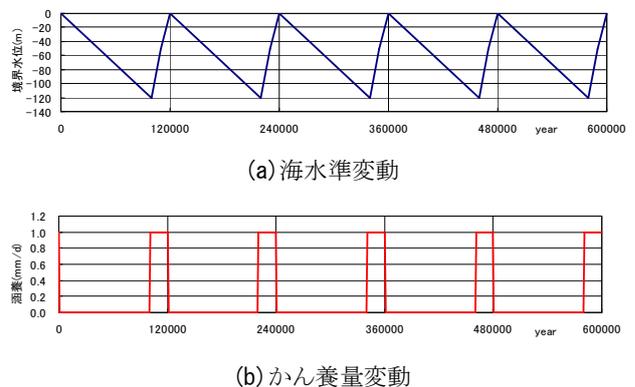
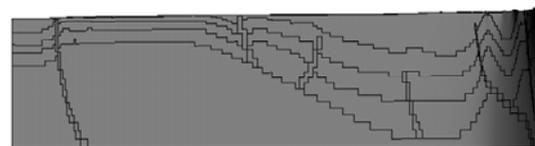
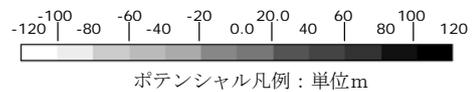
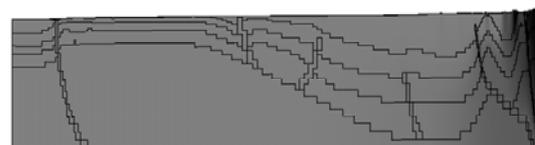


図-5 海水準とかん養量変動



(a) case1



(b) case2

図-6 初期条件(ポテンシャル分布)

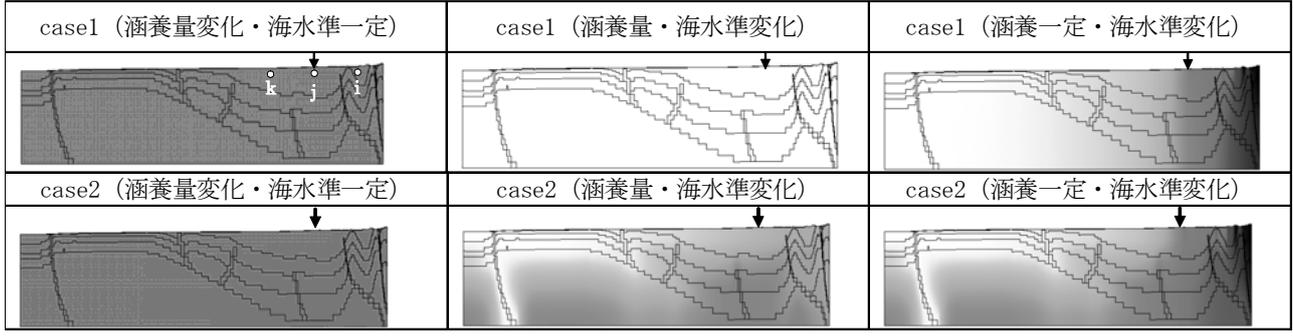
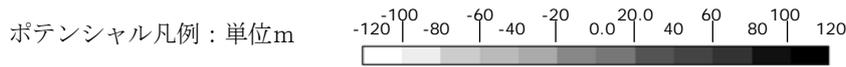


図-7 ポテンシャル分布 (10 万年後 (最海退時) 図中矢印は現在の海岸線位置)

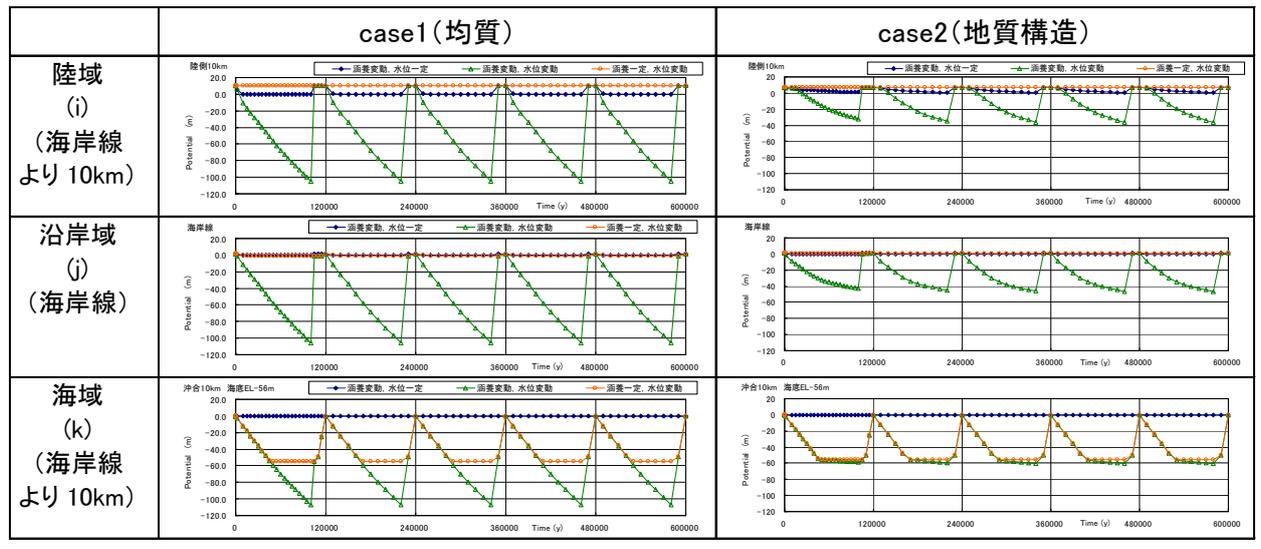


図-8 代表点のポテンシャルの経時変化

#### 4.1 ポテンシャルの分布と経時変化

10 万年後 (氷期, 最海退時) における解析領域全体のポテンシャル分布を図-7に示す。図中の折れ線は地層区分, 断層を示す。上部の矢印は現在の海岸線位置を示す。コンタの濃色部はポテンシャルの高いことを示す。図-8に海岸線 (図-7の j 点) と海岸線を挟む陸側 10km (i 点), 海側 10km (k 点) の標高-250m 地点におけるポテンシャルの経時変化を示す。これらの結果は以下のようにまとめられる。

- ・氷期に涵養量の減少や海水準低下が生じるとポテンシャルも低下する。涵養量・海水準変化のケースでは陸域で 100m あまりポテンシャルが低下する。
- ・涵養量一定・海水準変化のケースでは陸域から海側への流れが常に存在することになる。
- ・case1 と case2 の比較, case2 内部でのポテンシャル分布から, 涵養量と海水準変動への応答に対し透水係数が影響していることが認められる。case2 では透水係数の低い深部でポテンシャルの応答が遅く, 相対的に透水係数の大きい断層部では応答が速い傾

- ・ポテンシャルの経時変化 (図-8) は 12 万年サイクルで各ケースとも変動し, 前サイクルの影響はほとんど受けていない。
- ・海水準低下に伴うポテンシャルの低下量は, 透水係数の大きい case1 で case2 よりも大きく, 透水係数の圧力伝搬への寄与を示している。
- ・涵養量一定・海水準変化のケースでは, 海水準低下に対して涵養による水の供給でポテンシャル低下を抑制する効果があることが海域の経時変化からわかる。
- ・海域では海水準変動の影響が大きく, 沿岸・陸域では海水準変動だけ, あるいは涵養量変化だけではポテンシャルへの影響は小さく, 両者の影響を考慮した条件でポテンシャルへの影響は大きくなる。
- ・涵養量一定・海水準変化条件において, 海域における海水準低下に伴うポテンシャル低下の抑制効果は case1 のほうが case2 よりも大きい。これは涵養量と透水係数のコントラストに起因すると考えられる。

## 4.2 塩分濃度

図-9に最終サイクルの最海退時である58万年時点での塩分濃度分布と流向分布を示す。これは最も淡水化が進んだときに該当する。ただし、海岸付近のみを拡大している。図中、各要素に流向ベクトルを示しているが、識別を容易にするため代表的流向を大きく示した。海水濃度を赤色、淡水を青色で示している。この結果は以下のことを示している。

- ・透水係数の高い箇所での淡水化が速やかに生じる。
- ・海水準低下に際して、海域でも涵養に伴う天水侵入により淡水化部分が生じるが、淡水化部分はあまり深部まで及ばない。case1, case2ともに涵養変動・水位変動条件のケースで海底部が天水涵養による淡水部が見られるが淡水侵入部は地表から100m程度と比較的浅部に限られる。この原因として陸から海への広域的

な流れが影響していると考えられる。

- ・今回の解析では塩水の密度を考慮していないが、上記傾向は密度を考慮するとより強まると考えられる。
- ・case1の涵養量一定・海水準変化の条件では、海域における深部まで淡水化しているが、これも陸域からの天水起源の地下水が移動したものであり、水位低下で露出した海底部への天水涵養による寄与は小さいと考えられる。

## 4.3 粒子追跡法による地下水流動経路と滞留時間

計算で得られた非定常の流速を利用して粒子追跡計算を実施し、着目点からの流出経路(図-10)と所要時間(図-11, case2)を計算し、所要時間と流出までの距離から平均流速を求めた(図-12)。ここでは涵養量・

塩分濃度(海水濃度C=1.0で正規化)凡例: 0 0.1 0.2 0.30 0.4 0.5 0.6 0.7 0.8 0.9 1.0

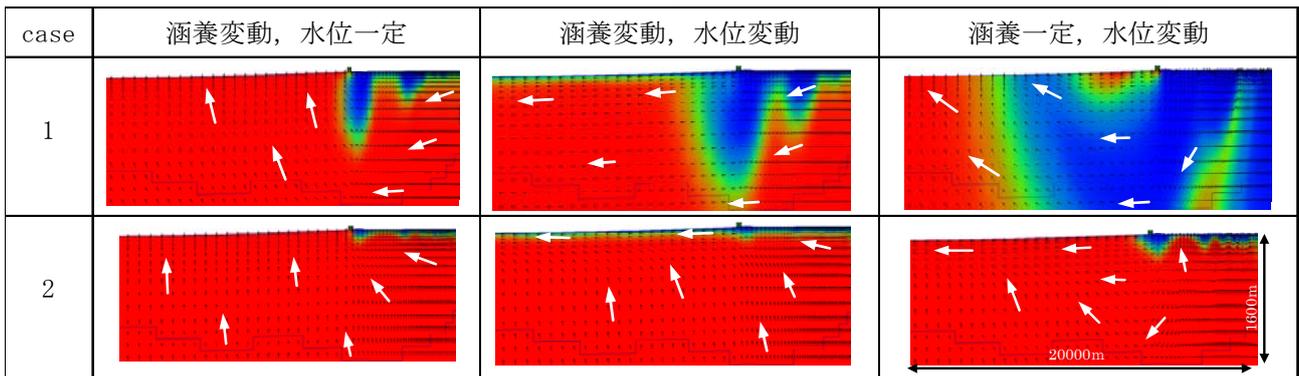


図-9 塩分濃度分布の経時変化(58万年, 最海退時)(図中の突起は海岸線位置)

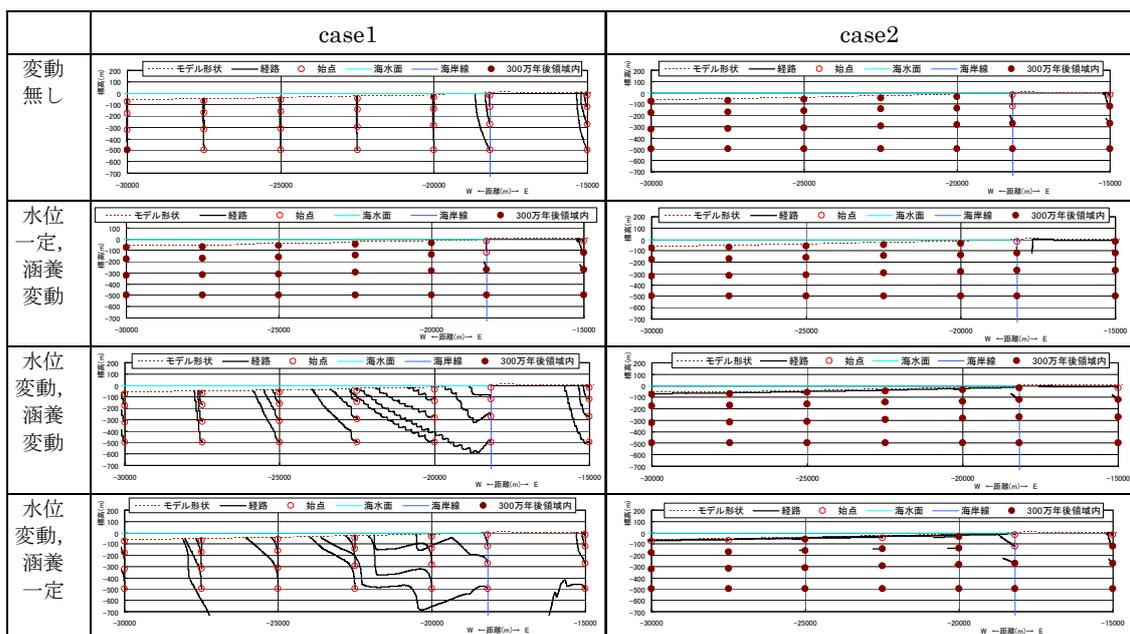


図-10 地下水流動経路の一例

海水準とも一定の、定常の地下水流動解析を基本ケースとし、3種類の変動ケースと比較している。粒子が解析領域外に出た場合はその時点で計算を終了した。60万年以降でも解析領域内にある場合は、5サイクル目の流速を繰り返し適用し、最長300万年まで計算した。図-10で○は始点を示し、●は300万年以降も領域内に留まる着目点(始点位置)を示す。この結果から以下のことがわかる。

- ・海水準変動の影響を受けて流動経路が上下に変動する

ケースがある。(図-10, case1)

- ・ case1, case2ともに、水位一定・涵養変動の境界条件では海岸から海域の粒子はほとんど移動しない。また、陸域の粒子は境界条件にかかわらず地表へと流出する傾向がある。
- ・ 現地の透水係数計測値を反映させた case2 では、各ケースとも粒子はほとんど移動しない。
- ・ 涵養量一定・海水準変化の境界条件が、3種類の境界条件設定のなかで最も移動しやすい。

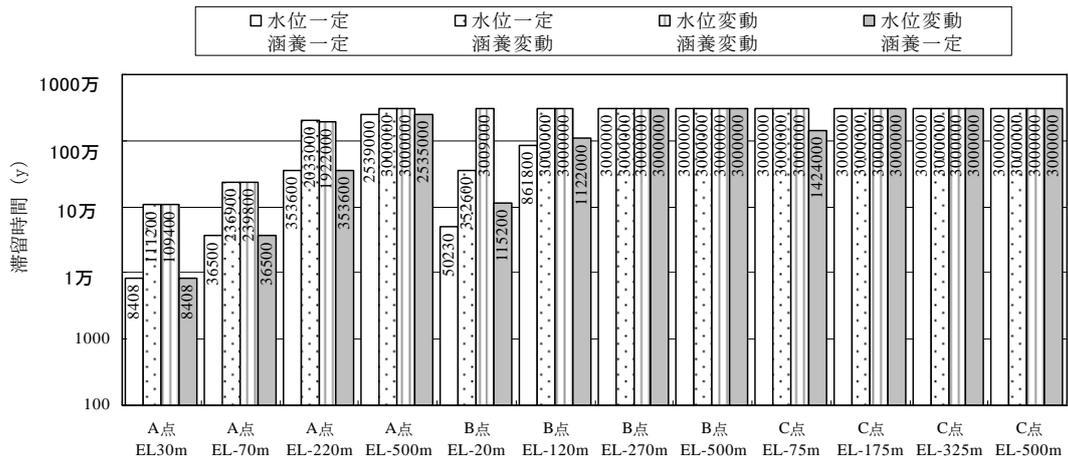


図-11 各着目点から解析領域外までの所要時間(y) (case2, A, B, C点は図-12に示す)

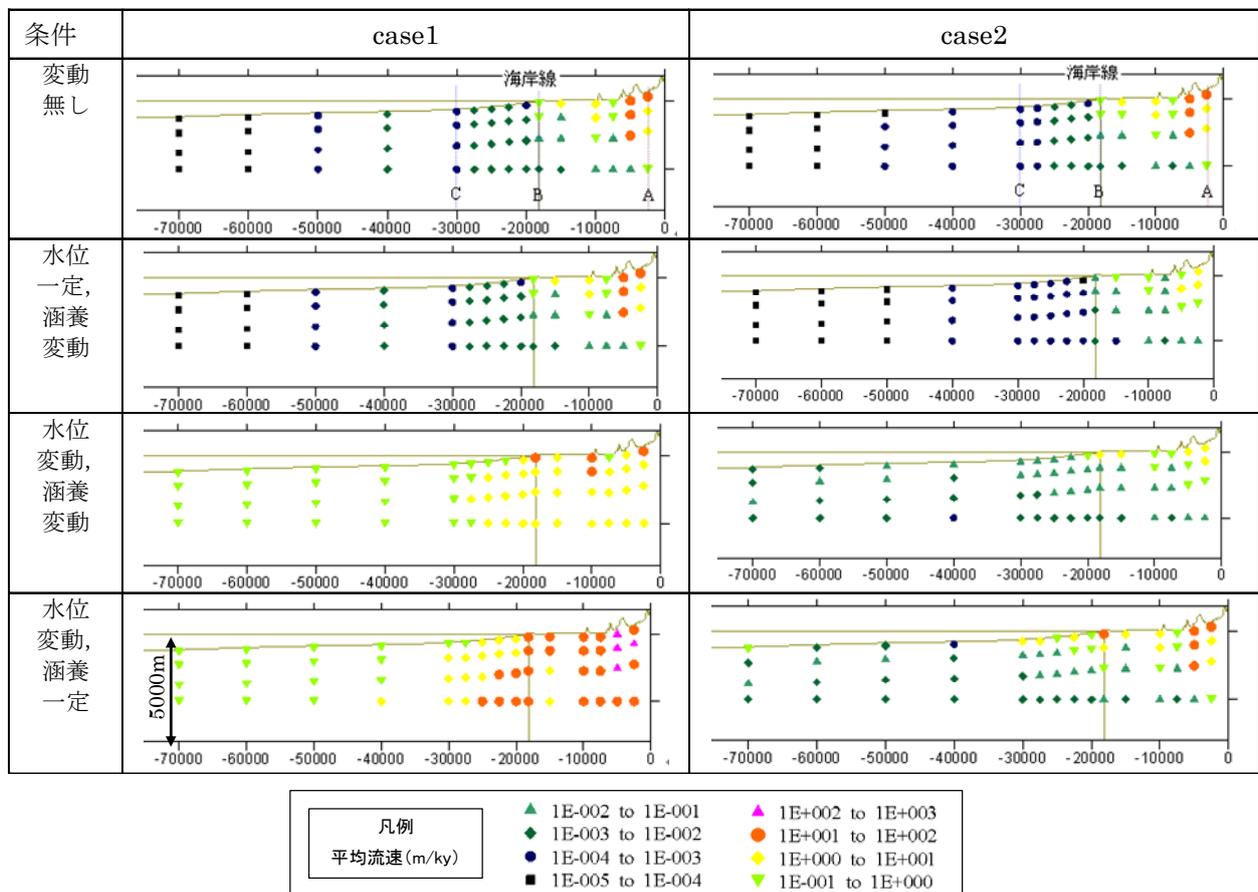


図-12 各着目点から解析領域外までの所要時間から算定した平均流速

- ・ A 点（陸域）では、海水準変動の影響を受けず涵養量の影響が大きい。B 点（沿岸域）では海水準と涵養量の影響を受けるが特に涵養量の影響が大きい。C 点（海域）は全て滞留時間 300 万年以上である。
- ・ A 点, B 点ともに滞留時間は基本ケースに較べ大きくなっている。
- ・ 図-12 に示す均質な場合 (case1) の平均流速は、海水準変動により粒子の移動速度が大きくなる。
- ・ 一方, case2 の現地調査結果を反映させた透水係数条件では、変動を考慮した場合のほうが粒子の移動速度が小さくなる。

## 5. まとめ

本論では、地下水流動に影響を及ぼすと考えられる天然現象のうち、気候・海水準変動に着目して、幌延地域を事例とした地下水流動および物質移動の感度解析を実施した。その結果、涵養量や海水準の変化はともに地下水流動や塩分濃度分布の経時的な変化をもたらし、その影響の大きさは透水係数分布や着目する場所によって異なることがわかった。

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、少なくとも万年オーダーの長期にわたる期間を評価する必要がある。今後は氷期に向かうことから現在よりも海水準が低下すると考えられる。幌延地域のように標高が低く緩やかな地形を有す地域では、海水準変動が地下水流動に与える影響は比較的大きいと考えられる。また、氷期には凍土が形成され、涵養量が著しく低下する可能性がある。さらに、幌延の塩水系地下水は堆積時に閉じ込められた海水の可能性が指摘されており、地下水年代や濃度分布と海水準変動や隆起などの天然現象が深く関係していると想定される。

本論では、気候・海水準変動のみを考慮したが、今後は隆起・沈降、侵食・堆積、断層活動などを考慮した解析を行う予定である。

## 謝辞

天然現象の長期的な変遷を整理・モデル化する際、北海道大学平川一臣教授に貴重な情報やご教示を頂いた。ここに記して謝意を表します。

## あとがき

本稿は、(独)日本原子力研究開発機構からの委託研究成果のうち、2007 年 1 月に開催された日本地下水学会主催「地下水流動解析とモデル化に関するシンポジウム」に発表した内容を編集したものである。

## 参考文献

- 1) 小池一之・町田 洋 編 (2001) : 日本の海成段丘アトラス, 東京大学出版会
- 2) 松末和之・藤原 治・末吉哲雄 (1999) : 日本列島における最終氷期最寒冷期の気候, サイクル機構技報, No. 6
- 3) 菱谷智幸・西垣 誠・橋本 学 (1999) : 物質移動を伴う密度依存地下水流の 3 次元数値解析手法に関する研究, 土木学会論文集, No. 638/III-49, pp. 59-69.
- 4) 操上広志・竹内竜史・瀬尾昭治 (2005) : 幌延深地層研究計画における地下水流動解析 (研究報告), JNC TN5400 2005-003.
- 5) 登坂博行 (2002) : 地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討 (その 1) - 静的境界条件下における検討 -, 応用地質, 第 43 巻, 第 5 号, pp. 293-305.
- 6) 登坂博行 (2002) : 地質時間にわたる淡塩漸移帯の形成過程と形態変化に関する数値解析的検討 (その 2) - 動的境界条件下における検討 -, 応用地質, 第 43 巻, 第 5 号, pp. 306-315.

---

## The Effects of Long Term Evolution of Geological Environment on Groundwater Flow A Case Study on Horonobe Area

Hisashi IMAI, Isao SHIOZAKI, Ryo YAMASHITA,  
Hiroshi KURIKAMI, Tadafumi NIIZATO, Kenichi YASUE and Keisuke MAEKAWA

Analytical study on the effects of sealevel and recharge rate changes on characteristics of groundwater flow in Horonobe area was carried out. As the result, it was understood that decline of sealevel induces the drawdown of groundwater level and evolution of the area where saline-water flushed. As the precipitation is considered to have been very small in the glacial periods, the numerical results showed that the groundwater movement as well as saline concentration change was relatively small.