

高レベル放射性廃棄物の地層処分における連成現象の地下水流れへの影響

操上広志¹・小林晃²・千々松正和³・大西有三⁴

¹学生会員 工修 京都大学 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
kurikami@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

²正会員 工博 京都大学助教授 農学研究科地域環境科学専攻 (〒606-8502 京都市左京区北白川追分町)

³正会員 工博 ハザマ 技術・環境本部 (〒107-8658 東京都港区北青山2-5-8)

⁴正会員 PhD 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、廃棄体定置後のニア・フィールドでの熱-水-応力連成現象が広域地下水の流れに与える影響を評価することは、処分場の管理において不可欠である。本研究では、ニア・フィールドの連成現象から導かれた平均化テンソルおよび熱流量を用いて広域地下水流れの解析を行うことで、ニア・フィールドとファー・フィールドの連成現象の関係を評価した。

平均化テンソルはニア・フィールドの連成現象の影響で経時的に変化し、広域地下水の地下水移行経路や移行時間も同時に変化することがわかった。さらに処分パネルを通過する地下水流量と地下水移行時間に大きな相関があることから、通過流量が安全評価の補完的手法となることがわかった。

Key Words : high level radioactive waste, geological disposal, coupled analysis, averaged tensor

1. はじめに

ガラス固化された高レベル放射性廃棄物は、人工バリアであるオーバーバック、粘土の緩衝材によって覆われた形で天然バリアである数100メートル深の岩盤に地層処分される。処分場は、処分坑道の集合から成る処分パネルを一つのユニットとし、複数のパネルから構築される¹⁾。処分パネル内では図-1(a)のように、処分坑道に処分孔を一定間隔で掘削し、廃棄体をそれぞれの処分孔に定置する。処分坑道は定置後埋め戻し材により埋め戻される。図は廃棄体縦置き方式であるが、基本的な概念は横置きの場合も同様である。

廃棄体定置直後の処分孔近傍(ニア・フィールド)では、締固められたベントナイト主体の緩衝材中に周辺岩盤から地下水が侵入(冠水)し、緩衝材は膨潤する。この時、廃棄体からの熱の影響で緩衝材内には温度勾配が生じることから、間隙水の蒸発、凝縮などが同時に起こり、複雑な物理化学的な相互作用(熱-水-応力連成現象)が生じる。一方、処分パネルの周辺岩盤では処分坑道の掘削に伴って低下していた地下水位が徐々に回復するが、岩盤の透水性が低い場合、緩衝材の高いサクションによって岩盤中

の地下水が引っ張られ、岩盤が不飽和になる可能性がある。岩盤の不飽和化は処分パネル全体の透水性の低下の要因となり、ひいては広域(ファー・フィールド)の地下水流れにも影響を及ぼすと考えられることから、処分パネル近傍の連成現象や透水性の特性を検討することは、広域地下水流れを評価する上でも重要である。また、処分パネルは廃棄体の発熱のため周辺岩盤より高温になることから、地下水温の差による対流の影響の検討も必要である。

これまで、このような廃棄体定置後の緩衝材および周辺岩盤の熱-水-応力連成現象に対して、国内外で室内および原位置で多くの試験が行われている。例えば、釜石旧鉱山の熱負荷試験²⁾(岩手県)やグリムゼル試験場³⁾(スイス)、エスポ島⁴⁾(スウェーデン)などでは廃棄体を模擬したヒーターおよび緩衝材を用いて実規模の連成試験が行われており、緩衝材や周辺岩盤での水分量(または水圧)、温度、応力などが計測されている。しかしながら、これらの試験は長くても20年程度の試験期間に限られているほか、実規模と言っても、廃棄孔1本ないし数本のみであり、より広域的で長期的な連成現象のメカニズムの評価は数値解析に頼らざるを得ない。

高レベル放射性廃棄物の地層処分における連成解

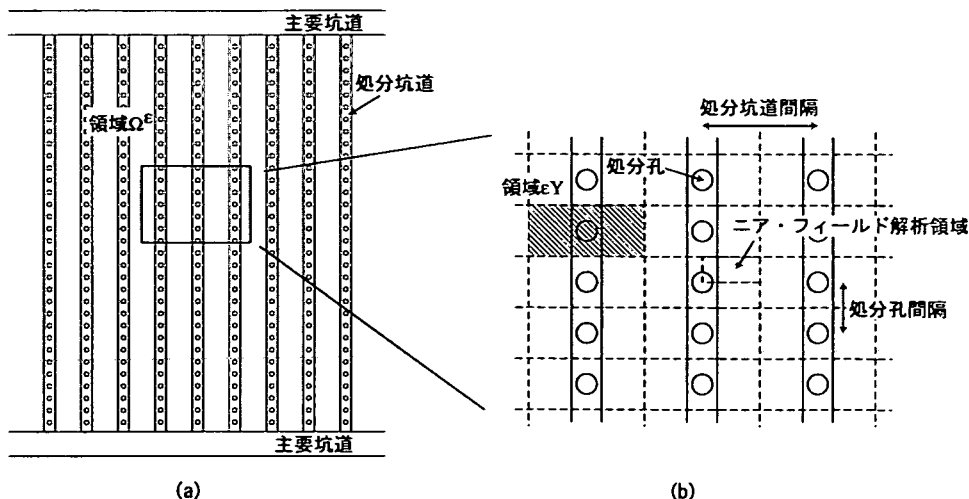


図-1 廃棄体処分パネルの(a)巨視構造と(b)微視構造

析モデルに関しては、国際共同研究プロジェクト「DECOVALEX (International co-operative project for the Development of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation)」^{5),6)}の中で活発な議論が行われている。現在、このプロジェクトの中では、グリムゼル試験場やユッカ・マウンテン⁷⁾(アメリカ)における原位置試験を対象にした解析が行われているが、議論の対象は主に計測値との比較による事後理解であり、長期的挙動の考察は行われていない。本プロジェクトでは原位置試験の解析と平行してベンチマーク試験として、岩盤の透水性や亀裂情報、境界条件に対する感度解析によってニア・フィールドの熱-水-応力連成現象を評価する研究と、岩盤の統計的な亀裂情報から透水係数や弾性係数などをスケール効果と共に定量化し、核種移行時間を評価する研究が行われている。これらのベンチマーク試験で、ニア・フィールドの連成現象とファー・フィールドの連成現象に対して研究が進められているが、両スケールの相関についてはほとんど議論されていない。

そこで、本研究ではニア・フィールドとファー・フィールドの連成現象の相互作用に着目する。それぞれのスケールの連成モデルを構築し、その掛け橋として平均化した処分パネルの透水性、熱伝導性およびニア・フィールドから発生する熱量を用いる。すなわち、ニア・フィールドの熱-水-応力連成解析からパネル全体の平均化透水係数、平均化熱伝導率および発熱量を求め、ファー・フィールドの熱-水連成解析へ受け渡す。一方、ファー・フィールドからニア・フィールドへの影響は解析の煩雑さのため省略したが、ニア・フィールドの連成現象は境界

条件依存することから、このプロセスは今後の課題としている。また、ファー・フィールドでは応力(変形挙動)の影響は小さいことから無視できると考えられるが、一方、地下水温分布は広域地下水流れにおいて重要な役割を果たす^{8,9)}ため、熱-水連成現象として扱っている。

2. ファー・フィールドの連成現象

処分パネルを含む地下水流動系を評価するために、熱-水連成現象として定式化する。ただし、地下水面の変動のような不飽和域との境界の動きは全体の地下水流動場に対して十分小さいため、飽和領域のみを対象とする。熱対流を考慮した広域地下水流れの支配方程式は、以下のようになる¹⁰⁾。

$$\left[k_{ij} \left\{ h_j - \left(1 - \frac{\rho'}{\rho_w} \right) z_j \right\} \right]_j = 0 \quad (1)$$

ここで、 h は全水頭、 ρ' は水の密度、 ρ_w は水の基準密度である。 k_{ij} は透水係数テンソルで、固有透過度テンソル K_{ij} を用いて、次式のように与えられる。上付の l は液相を表す。

$$k_{ij} = \frac{\rho' g K_{ij}}{\mu} \quad (2)$$

ただし、 g は重力加速度、 μ は水の粘性係数である。

一方、熱エネルギー保存式は以下のように与えられる。

$$\frac{\partial\{(\rho c)_m T\}}{\partial t} + (\rho' c' v_i T - \lambda_{ij} T_{,j})_{,i} + Q^h = 0 \quad (3)$$

ここで、 T は温度、 $(\rho c)_m$ は固相と液相の間の熱的平衡が瞬時に生じると仮定したときの比熱、 v_i はダルシー流速ベクトル、 λ_{ij} は熱伝導率テンソル、 Q^h は単位体積単位時間当りの発熱量である。

ところで、処分パネルにおいて廃棄体は図-1(a)に示すように等間隔に配置されることを基本的な概念としている。前述の式(1)および(3)を解くためには、処分パネルに対応する領域の透水係数テンソル、熱伝導率テンソル(平均化テンソルと定義する)および発熱量を表現する必要がある。平均化テンソルや発熱量は、図-1(b)のような個々の廃棄体近傍(ニア・フィールド)の性質に支配されることから、次章で示すようなニア・フィールドの連成現象を詳細に評価しておくことが必要となる。本論文における平均化テンソルの求め方は第4章で示す。

3. ニア・フィールドの連成現象

ニア・フィールドには廃棄体、緩衝材、埋め戻し材および周辺岩盤が含まれる。廃棄体埋め立て直後、緩衝材は不飽和であり、周辺地下水の浸潤に伴い膨潤する。同時に廃棄体の発熱により廃棄体付近では乾燥収縮が生じると予想される。また、緩衝材の飽和度の変化に伴い熱伝導率や比熱が変化し、温度分布も水分移動の影響を受ける。このような現象を再現するため、ニア・フィールドの評価は熱-水-応力連成解析によって行う。

高レベル放射性廃棄物の地層処分における連成現象の解析モデルは、国内では千々松ら¹¹⁾によって行われてきている。このモデルはOhnishi et al.¹²⁾によって開発された岩盤の熱-水-応力連成モデルを緩衝材に拡張したもので、不飽和粘土中の水分移動¹³⁾および温度勾配による水分移動¹⁴⁾を考慮している。本章では、この連成解析モデルの支配方程式を示し、ニア・フィールドを対象に解析を行い、透水係数および熱伝導率の分布とその特性を検討する。

(1) 運動量保存式

運動量保存式は、静的条件を仮定すると、以下の力のつりあい条件式となる。

$$\sigma_{ij,j} + f_i = 0 \quad (4)$$

ここで、 σ_{ij} は全応力テンソル、 f_i は外力ベクトルを示す。外力が一定のとき上式を増分形に書き直すと、以下ようになる。ただし、 Δ は増分を表す。

$$\Delta\sigma_{ij,j} = 0 \quad (5)$$

(2) 水の質量保存式

水の質量保存式は、以下のように記述される。

$$\frac{\partial\theta\rho^l}{\partial t} + (q_i^l + q_i^v)_{,i} + Q = 0 \quad (6)$$

ここで、 θ は体積含水率、 ρ^l は間隙水の密度、 q_i は流束ベクトル、 Q は湧き出し、 t は時間である。上付の l は液体を、 v は蒸気を示す。

(3) エネルギー保存式

エネルギー保存式は、以下のように記述される。

$$\frac{\partial\{(\rho c)_m T\}}{\partial t} + q_{i,j}^h + Q^h = 0 \quad (7)$$

ここで、 $(\rho c)_m$ は比熱、 T は温度、 q_i^h は熱流束ベクトル、 Q^h は発熱である。

(4) 構成条件

a) 力学的構成条件

全応力の増分は、飽和領域において、

$$\Delta\sigma_{ij} = \frac{1}{2}C_{ijkl}(\Delta u_{k,l} + \Delta u_{l,k}) + \Delta p\delta_{ij} - \beta\Delta T\delta_{ij} \quad (8)$$

と表される。ただし、 C_{ijkl} は弾性係数テンソル、 u_i は変位ベクトル、 p は間隙水圧、 β は熱応力に関するパラメータ、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタである。一方、緩衝材の不飽和領域における全応力は、以下のように与えられる。

$$\Delta\sigma_{ij} = \frac{1}{2}C_{ijkl}(\Delta u_{k,l} + \Delta u_{l,k}) - \Delta\sigma_{sw}\delta_{ij} - \beta\Delta T\delta_{ij} \quad (9)$$

ここで、 σ_{sw} は膨潤応力である。ベントナイトでは不飽和領域において間隙水圧に比べ、膨潤圧が非常

に大きいため、上式のように間隙水圧項の代わりに膨潤応力の項が表れる。膨潤応力の増分 $\Delta\sigma_{sw}$ は、以下のように与えられる。

$$\Delta\sigma_{sw} = -F(S_e)\Delta\psi = -F(S_e)\frac{\partial\psi}{\partial h}\Delta h \quad (10)$$

ここで、 S_e は飽和度、 h は全水頭、 ψ はサクションである。関数 F は試験結果とのフィッティングにより求められる。

緩衝材および岩盤の力学的挙動は弾性と仮定した。緩衝材の弾性係数は含水比の関数として与えられているが¹⁵⁾、岩盤はここでは線形としている。

b) 水理学的構成条件

飽和領域における間隙水の移動は、ダルシー則に従うと仮定する。すなわち、

$$q_i^l = -\rho^l \frac{\rho_w g K_{ij}}{\mu} h_{,j} \quad (11)$$

$$q_i^v = 0 \quad (12)$$

ここで、 K_{ij} は固有透過度テンソル、 g は重力加速度、 μ は水の粘性係数である。 ρ_w は水の基準密度である。

一方、緩衝材の不飽和領域における液状水の流速(q)および蒸気の流束(q^v)は、以下のようである。

$$q_i^l = -\rho^l D_\theta \frac{\partial\theta}{\partial\psi} (h_{,j} - z_{,j}) \quad (13)$$

$$q_i^v = -\rho^l D_T T_{,j} \quad (14)$$

ここで、 θ は体積含水率、 D_θ は水分拡散係数、 D_T は温度勾配水分拡散係数である。 D_θ は θ の関数である液状水の拡散に寄与する部分 D_θ と蒸気の拡散に寄与する部分 D_θ^v の二つの成分の和と考えることができる¹⁶⁾。 D_θ および D_T は実験および理論的に求める手法が提案されている¹⁷⁾。

一方、周辺岩盤に対しては、ダルシー則を不飽和領域に拡張した以下の式を適用する。

$$q_i^l = -\rho^l r_k \frac{\rho_w g K_{ij}}{\mu} h_{,j} \quad (15)$$

ここで r_k は比透水係数である。また、水分特性曲線は以下のVan Genuchtenモデル¹⁸⁾を適用する。

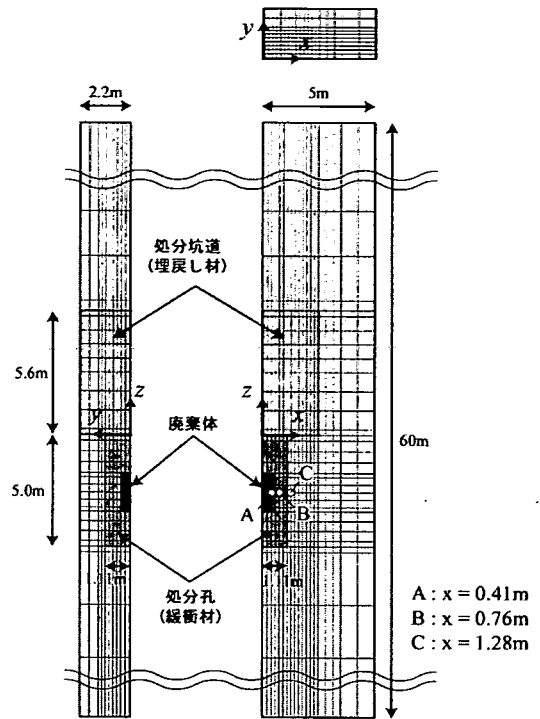


図-2 ニア・フィールドの解析メッシュ

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left\{ 1 + |\alpha\psi|^n \right\}^{-m}, \quad m = 1 - \frac{1}{n} \quad (16)$$

ただし、 θ_s は飽和体積含水率、 θ_r は最小含水量、 α および n はVan Genuchtenパラメータである。

c) 熱的構成条件

熱流束は移流(q^o)、拡散(q^d)、潜熱(q^h)により構成される。

$$q_i^h = q_i^o + q_i^d + q_i^h \quad (17)$$

ここに、

$$q_i^o = \theta\rho^l v_i T \quad (18)$$

$$q_i^d = -\lambda_{ij} T_{,j} \quad (19)$$

$$q_i^h = LD_{\theta^v} \rho_w g \frac{\partial\theta}{\partial\psi} (h_{,j} - z_{,j}) \quad (20)$$

である。ここで、 v_i はダルシー流速ベクトル、 λ_{ij} は平均熱伝導率テンソル、 L は潜熱、 D_{θ^v} は水分拡散係数 D_θ の蒸気に起因する部分である。

表-1 材料物性

		緩衝材(ケイ砂混合体) ³⁾	岩盤
乾燥密度 [g/cm ³]		1.6	2.67
弾性係数 [MPa]		58.74-1.87 w	3.7×10 ⁴
ポアソン比 [-]		0.3	0.25
固有透過度(等方) K [m ²]		4.00×10 ⁻²⁰	Case1 : 1.0×10 ⁻¹⁸ Case2 : 1.0×10 ⁻¹⁶
Van Genuchten パラメータ	θ_s [-]	0.403	5.0×10 ⁻³
	θ_r [-]	0.000	0.000
	α [1/m]	8.0×10 ⁻³	8.0×10 ⁻³
	n [-]	1.6	1.6
比透水係数(Mualem モデル ²⁰⁾ r_k [-]		-	$S_e^{1/2} \left(1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right)^2$
水分拡散係数 [cm ² /s] $D_\theta = \frac{a_1(\theta - \theta_s)}{(\theta - b_1)(b_1 - \theta_s)} + \frac{a_2\theta}{b_2(\theta - b_2)}$	a_1	2.99×10 ⁻⁸ T-3.78×10 ⁻⁷	-
	a_2	-1.50×10 ⁻⁸ T+1.49×10 ⁻⁷	
	b_1	-2.49×10 ⁻³	
	b_2	5.59×10 ⁻⁴ T+3.93×10 ⁻¹	
温度勾配水分拡散係数 D_T [m ² /s/K]		7.0×10 ⁻¹²	-
熱伝導率 λ [W/m/K]		4.44×10 ⁻¹ +1.38×10 ⁻² w +6.14×10 ⁻³ w ² -1.69×10 ⁻⁴ w ³	2.6
比熱 c [kJ/kg/K]		(34.1+4.18w)/(100+w)	9.0×10 ²

w : 含水比, T : 温度 [°C]

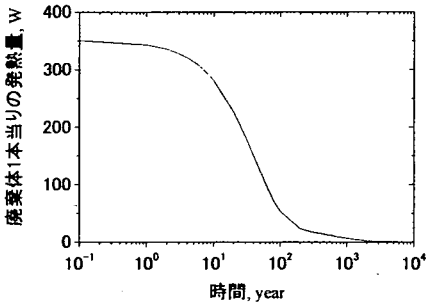


図-3 廃棄体からの熱流量

(5) 数値解析による連成現象の評価

ニア・フィールドの連成現象を評価するために、図-1 (b) の陰付きで示した領域を検討する。前述の支配方程式を有限要素法によって離散化した解析コード^{15),19)}を用いて、数値解析を行う。

図-2に解析領域のモデルを示す。処分坑道間隔は10メートルに、処分孔間隔は4.4メートルとした。これは、硬岩に竖置き方式で処分する際の現在の指針に基づいている¹⁾。領域高さは温度や飽和度がほとんど影響されないように、60メートルに設定した。緩衝材に比べ岩盤は非常に硬いため、膨潤応力などのニア・フィールドの廃棄体定置後の力学現象はこの境界設定にはほとんど影響されない。岩盤は線形弾性体で均質等方とし、主な物性は表-1のように与えた。また、緩衝材はベントナイト-砂混合体¹⁾を想

定した。主な物性を表-1に同時に示す。埋戻し材の物性はここでは緩衝材と同じものとした。岩盤の透水性を変えて2ケースの解析を行った。Case1は岩盤の固有透過度 $1.0 \times 10^{-18} \text{ m}^2$ 、Case2は $1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2$ である。

境界条件は、上下端で水頭および温度を固定し、他の境界で断熱、不透水とした。また、全ての境界をスライド境界とした。これらの設定条件は水平方向に処分孔が一定間隔で配置されるという条件を満足する。解析は廃棄体定置後を想定し、初期条件は岩盤で500メートルの全水頭を与え、緩衝材の含水比14%(飽和度0.57)、埋め戻し材の含水比23%(飽和度0.92)とした。本来、処分坑道および処分孔の掘削に伴い岩盤の水位が低下しているため、廃棄体定置直後は一様な水頭でないが、ここでは広域的な地下水水位低下はないものと仮定する。このように仮定すれば、岩盤は飽和しているため埋戻し後の水位の回復は連成現象に比べて早く、例えばグリムゼル試験場での連成試験³⁾の場合、数100日程度で水位はほぼ回復している。また、ベントナイトはサクシオンが高く、 10^4 メートル程度になることもあることから、岩盤の初期水位の低下の圧力水頭としての割合は小さく、これが解析に与える影響は小さいと考えられるため、本論では岩盤に一様な初期水位を与えた。一方、初期温度は全領域で30°Cとした。廃棄体からの発熱量は放射性崩壊に伴い減少する。ここでは、図-3のように与えた。これは、ガラス固化体の冷却

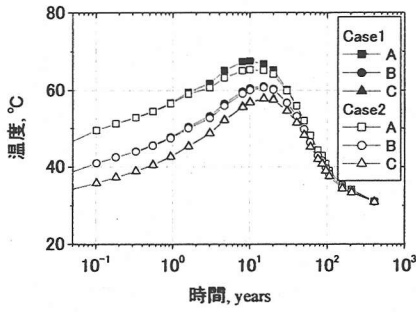


図-4 Case1の観測点における温度の経時変化

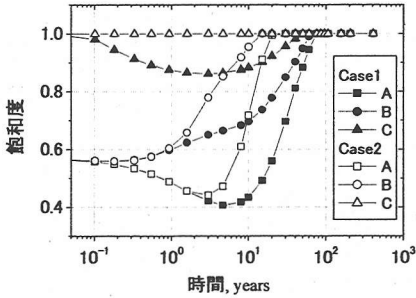


図-5 Case1の観測点における飽和度の経時変化

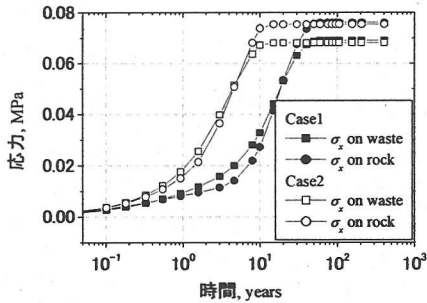


図-6 Case1の廃棄体および周辺岩盤における応力の増分

時間を50年としたときに対応する¹⁾。

図-4, 5はCase1およびCase2の観測点A,B,C(図-2)における温度および飽和度の経時変化を示す。A,Bは緩衝材内の点でAが廃棄体に近い観測点である。Cは岩盤内の緩衝材付近の点である。廃棄体からの熱により温度は上昇し、その後廃棄体の発熱量の低下に伴い低下に向かう。また、緩衝材は周辺岩盤からの地下水の浸潤により飽和されるが、廃棄体付近の観測点Aでは初期において緩衝材の乾燥が見られる。岩盤の透水性が小さいCase1では、岩盤内の観測点Cで初期において飽和しているが、緩衝材のサクシオンにより間隙水が引っ張られ、一時的に不飽和に移行している。岩盤の透水性の大きいCase2では、周辺からの地下水の供給が豊富であるため、不飽和になっていない。

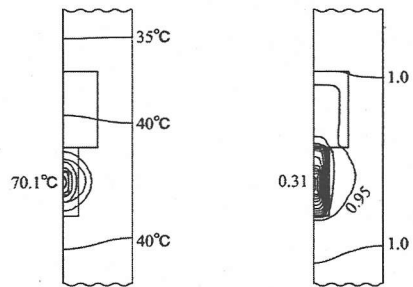
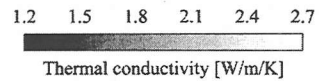
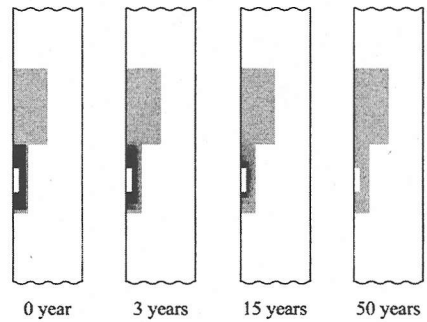
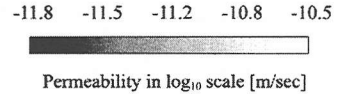
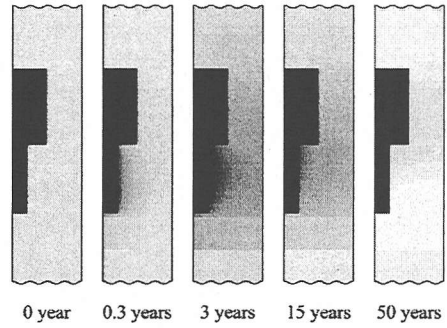


Figure 7 (top): Temperature distribution 3 years Figure 7 (middle): Distribution of saturation degree 3 years

図-7 Case1の(上)透水係数の分布および(中)熱伝導率の分布の経時変化と(下)廃棄体定置3年後の温度分布および飽和度分布

図-6はオーバーパック側面(観測点Aと隣接する要素)および岩盤(観測点Cと隣接する要素)にかかる応力のx方向成分の経時変化を表す。浸潤が早いCase2において応力が早く発生している。これは主に緩衝

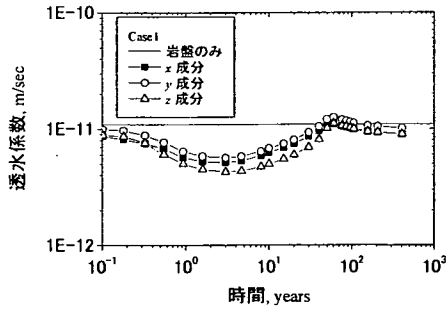


図-8 Case1の平均化透水係数の経時変化

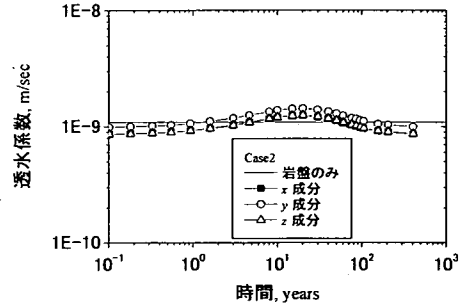


図-9 Case2の平均化透水係数の経時変化

材の浸潤による膨潤応力の影響である。膨潤応力はやや小さい値となったが、これは緩衝材の初期乾燥密度をやや小さく設定したため、膨潤応力が小さくなったことに起因すると考えられる。

図-7はCase1の連成解析によって計算された透水係数の分布および熱伝導率の分布の変化の様子である。(上)は透水係数、(中)は熱伝導率の分布である。緩衝材は飽和に至るまで岩盤に比べて非常に低い透水性を示しているのに対し、岩盤では処分場付近で透水係数が低下し、約3年後にピークを向え再び上昇している。これは、主に岩盤が不飽和になったことに起因している。同図(下)は、3年後の温度分布および飽和度分布を示したものである。岩盤の飽和度の低下は緩衝材の近傍で顕著に確認される。これは、岩盤における透水性の分布と類似しており、飽和度の分布と透水性の分布に強い相関があることを示している。一方、熱伝導率は岩盤部では変化しないが、緩衝材の内部で地下水の浸潤に伴い上昇している様子がわかる。これは熱伝導率の低い間隙空気が熱伝導率の高い水に置き換わったことに起因している。3年後がピークとなっていることは、図-5で、Case1の観測点C(岩盤の緩衝材付近)の飽和度が3年後に最も小さい値を示していることから想像できる。観測点Cにおける不飽和状態は、数十年程度続いており、岩盤の透水性も数十年程度影響を受けると予想される。文献¹⁾によれば、解析条件により1000年間の間、岩盤に不圧が掛かることも予測されている。

4. 連成現象の地下水流れへの影響

(1) 平均化テンソルおよび熱流量のファー・フィールドへの影響

前章で述べたようなニア・フィールドの連成現象が、ファー・フィールドに与える影響の評価は、ニア・フィールドに対応する領域(処分パネル)の平均

化透水係数テンソル、平均化熱伝導率テンソルの特性および処分場からの熱流量による影響を考慮することで表現できる。平均化テンソルの求め方にはミクロな構造の周期性を仮定して均質化テンソルを求める手法(均質化理論^{21),22)}がある。しかし、高レベル放射性廃棄物処分場の場合には水平方向には周期的な構造を仮定できるが、鉛直方向には現在の設計概念(図-1(b))では坑道が一段となっており、周期性を仮定できないため、均質化理論を適用しなかった。そこで、平均化テンソルは各時間の透水係数分布、熱伝導率分布を用い、図-2で示したモデルの x, y, z の各方向に1次元流れとなる動水勾配または温度勾配を与えて式(1)または式(3)を解き、得られた流束を与えた動水勾配または温度勾配で除すことで各方向の平均化透水係数と平均化熱伝導率とした。ただし、ここでは前章のモデル(図-2)のうち、 $-10\text{m} \leq z \leq 10\text{m}$ の範囲のみを対象とする。これは、廃棄体の発熱および緩衝材への浸潤挙動中において、この境界より上下方向では初期値とほとんど変わらない範囲となるためである。それに対応して、ファー・フィールドのモデルにおける処分パネル要素の高さも等しく設定している。

Case1に対する平均化透水係数テンソルの x 方向、 y 方向、 z 方向成分の経時変化を図-8に示す。時間軸は図-4～図-6に対応している。以下の図-9～図-12、図-16、図-17も同様である。透水係数は、全ての方向において一度低下し、その後、上昇した後、再び低下して定常状態に至る。これは、岩盤中の地下水が緩衝材に浸潤し、不飽和になることで透水性が低下し、その後、岩盤が再冠水するにしたがって、回復することを意味している。その後の透水性の上昇は、温度の上昇に伴う透水性の変化で、主に水の粘性係数の低下に依存している。したがって、温度の低下と共に透水性は再び低下している。一方、図-9はCase2に対する平均化透水係数の経時変化を表している。透水係数は、温度の上昇と共に上昇し、そ

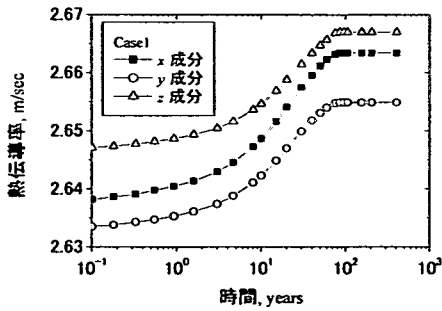


図-10 Case1の平均化熱伝導係数の経時変化

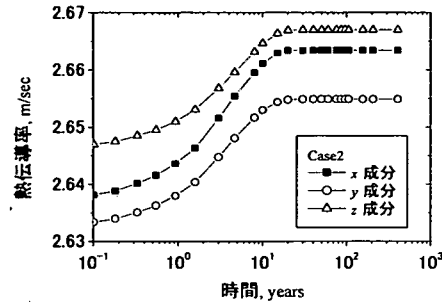


図-11 Case2の平均化熱伝導係数の経時変化

の後温度と共に低下する。ただし、Case1と異なり、透水性の低下は見られない。これは、岩盤が不飽和にならないためである。緩衝材も不飽和状態では飽和状態に比べて透水性は低下するが、緩衝材と岩盤の飽和透水係数は、2から3オーダーも異なるため、緩衝材の浸潤に伴う平均化透水係数テンソルの変化は極めて小さい。

図-10、図-11はCase1、Case2における平均化熱伝導率の経時変化を示している。平均化熱伝導率は、時間と共に上昇している。これは、緩衝材の浸潤に伴う緩衝材の熱伝導率の上昇が主な要因である。したがって、浸潤の早いCase2で平均化熱伝導率の上昇が早く進行している。ただし、変化率は小さく、ニア・フィールドへの影響もほとんどないと考えられる。

また、図-12はCase1のニア・フィールドからz方向に放出される熱流量の経時変化を示したものである。同図には廃棄体の発熱量も示す。廃棄体から放出される熱流量が、緩衝材および周辺岩盤によって緩和されている様子がわかる。この時の上下端からの熱流量はほぼ等しかった。また、Case2もほぼ同じ発熱量が得られた。これは、緩衝材の熱伝導率変化による影響が、熱が岩盤を伝わる間に緩和されるためと考えられる。

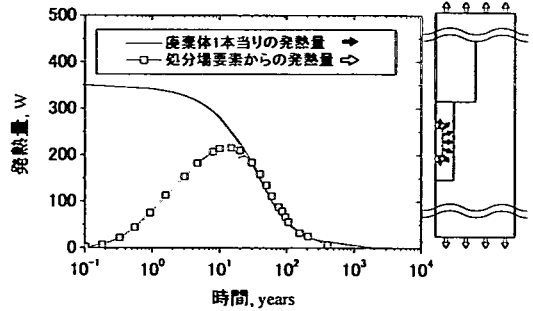


図-12 ニア・フィールドからの放熱熱流量

(2) 連成現象の地下水流れへの影響

前節の平均化テンソルおよび熱流量を用いて、広域地下水流れの解析を行い、ニア・フィールドの連成現象の影響を評価した。ここでは、特にニア・フィールドの連成現象の影響の大きいCase1のみに着目した。

広域地下水の流れは、核種移行問題に対して非常に重要であるが、将来予測のための安全性評価手法は、保守的に最も近い断層までの距離を確保することに留まっている¹⁾。本研究では、DECOVALEX^{3),6)} フェーズIIIのベンチマークテストのモデルに倣い、より広域の地下水流動場を2次元的に図-13のようにモデル化した。処分場は深度500メートルに設置した。この深度は、ニア・フィールド解析の岩盤での初期水頭と等しく設定している。処分パネルは長さ2キロメートルとし、深さは平均化テンソルの評価時にモデル化した値と一致するように20メートルとした。解析モデルにおいて、左端は地下水の分水嶺を、右側は海を想定しており、地形勾配に対応し地下水水面勾配が緩やかに陸から海に続いている。

処分パネルに対応する要素に前節で求めたCase1の平均化テンソルおよび熱流量を経時的に与える。境界条件は、地下水位を図-13に示したように固定し、他は不透水境界とした。底部境界は、文献²³⁾に基づき 0.078W/m^2 の一定熱流量を与え、地下水面を温度を 10°C で固定した。処分場からの発熱量は図-12に示した値を用いた。初期条件は、左記の境界条件のもと、処分場建設前の定常解析による結果を与えた。図-14に廃棄体定置直後および廃棄体定置150年後における温度分布および処分パネルを通過する流線を示した。廃棄体定置直後は地下水温度勾配がほぼ同様であることから流線は温度の影響をほとんど受けないが、150年後には処分場付近での温度上昇により地下水に浮力が生じ、流線に歪みが生じている。図-15は廃棄体定置直後とその150年後における流速分布を用いて、処分パネルを通過する流線の積

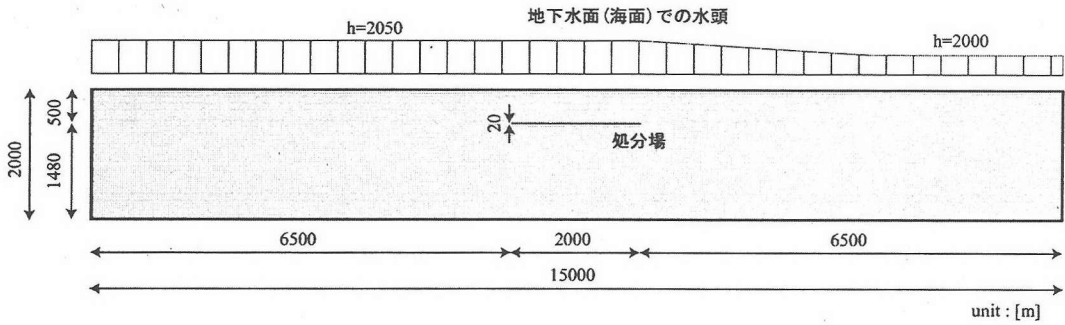


図-13 広域地下水流動場(ファー・フィールド)の解析モデル
廃棄体定置直後

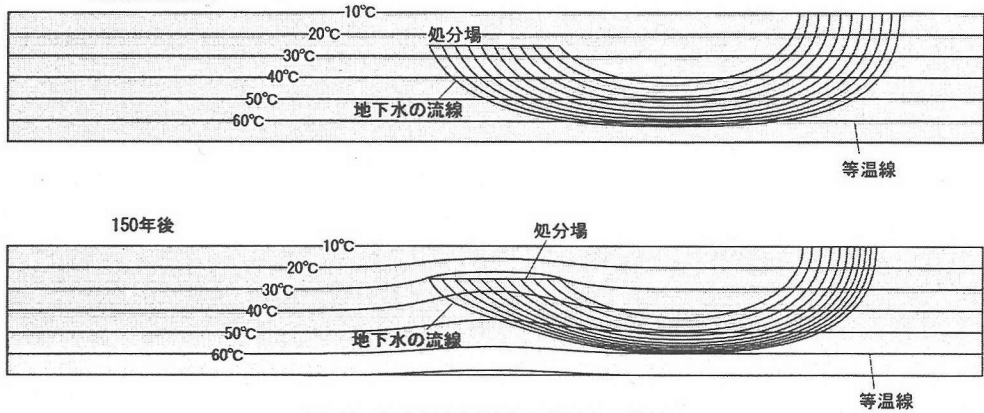


図-14 処分場を通過する地下水の流線

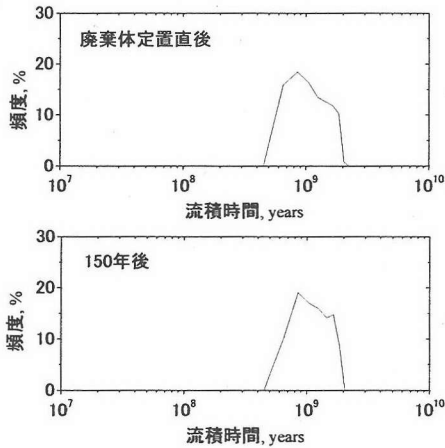


図-15 流線の積算時間の頻度

算時間(流積時間)の頻度を示している。実際に地下水が移行する場合は経時的に流線が変化するため、処分場の状態の違いが広域地下水流れに与える影響の変化に着目するために、この流積時間を用いた。廃棄体定置直後の連成現象の影響の小さい段階に比べ、定置150年後は流積時間の分散が小さくなって

いる。図-16は各時間における流積時間の平均を示す。平均流積時間は、定置10年後程度から上昇し、75年後程度でピークとなり、その後下降しているが、400年経過後においても変化し続けていることから、少なくとも1000年程度はニア・フィールドの連成現象が地下水流れに影響を与えていると考えることができる。ところで、図-17は周辺岩盤から処分パネルに流入する地下水流量の経時変化を示したものである。図-16の平均流積時間と比較すると、良い相関があることがわかる。これは、処分場に流入する地下水流量の変化から、地下水移行時間の変化を予測することができる可能性を示唆している。ただし、流積時間や流入量の傾向や絶対値はファー・フィールドの地質条件などに大きく依存するものであり、ここではニア・フィールドの連成現象の影響を評価するための指標としている。

5. まとめ

高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニア・フィールドの連成現象が広域地下水流れに与える影

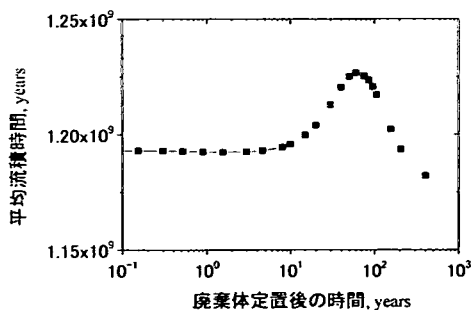


図-16 平均の流積時間の経時変化

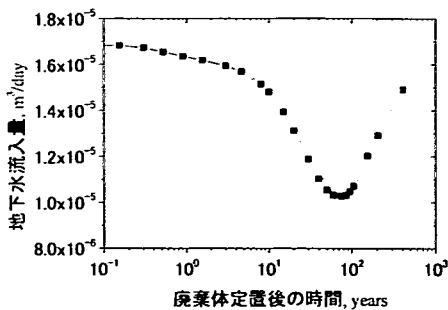


図-17 処分場に流入する地下水流量

響について、両スケールの現象を平均化テンソルおよび熱流量で結びつけることで解析的に評価することができた。本研究で得られた結果は以下のようである。

- 1) 岩盤の透水係数が小さく、緩衝材近傍で不飽和領域が表れる場合は処分パネルの平均化透水係数の変化が大きくなる。
- 2) 平均化熱伝導率は、緩衝材の浸潤と共に大きくなり、やがて一定値に収束するが、変化率は小さく、地下水流れに与える影響も小さい。
- 3) 処分場の発熱量、熱伝導率、透水係数の変化により、天然バリアである広域地下水の流速とその分布が変化する。
- 4) 処分パネルを通過する流量と処分場からの地下水移行時間には大きな相関がある。

特に3)の結果から、処分早期の安全評価を行う際には、処分場の状態の変化を考慮した設計が重要であることがわかる。また、4)の結果から、現在補完的指標の一つとして考えられているバリアを通過する地下水流量が、安全評価の一つの目安となることを示しており、非常に重要な知見が得られた。

これまで、ニア・フィールドにおける評価とファール・フィールドにおける評価をつなげる解釈に関して十分な検討がなされていなかった。平均化テンソルを用いて両スケールを結びつける本手法は、処分場の評価の上で有益な方法である。

参考文献

- 1) 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次とりまとめ—, JNC TN1400 99-020, 1999.
- 2) Chijimatsu, M., Fujita, T., Sugita, Y., Amemiya, K. and Kobayashi, A. : Field experiment, results and THM behavior in the Kamaishi mine experiment, *Int. J. Rock Mech. Min.*, Vol.38, pp.67-78, 2001.
- 3) ENRESA : FEBEX project final report, Publicaciones tecnica 1/2000, 2000.
- 4) SKB : Äspö hard rock laboratory - Annual report 2000, SKB Technical Report TR-01-10, 2001.
- 5) Jing, L., Stephansson, O., Tsang, C-F. and Kautsky, F. : DECOVALEX – Mathematical models of couples T-H-M processes for nuclear waste repositories, Executive Summary for Phases I,II and III, 1996.
- 6) Jing, L., Stephansson, O., Borgesson, L., Chijimatsu, M., Kautsky, F. and Tsang, C-F. : DECOVALEX II project Technical report – Task 2C, SKI report, 99/23, 1999.
- 7) DiBernardo, M., Wagner, R.A., Datta, R.N., Peters, M.T. and Hayes, L.R. : Civilian Radioactive Waste Management System Management and Operating Contractor, Drift Scale Test Progress Report No.1, BAB000000-01717-5700-0004 REV 01, 1998.
- 8) Smith, L. and Chapman, D.S. : On the thermal effects of groundwater flow. I, Regional scale systems, *J. Geophys. Res.*, Vol.88, pp.593-608, 1983.
- 9) 池田光良, 操上広志, 三浦均也 : 地下水温と安定同位体比から推定した十勝平野の地下水流動系, *地下水学会誌*, 第42巻第1号, pp. 3-26, 2000.
- 10) Bear, J. : *Dynamics of fluids in porous media*, American Elsevier, New York, 1972.
- 11) 千々松正和, 谷口航, 鈴木英明, 西垣誠 : 熱-水-応力連成モデルを用いた高レベル放射性廃棄物の地層処分におけるニアフィールド評価, *土木学会論文集*, No.687/III-56, pp. 9-25, 2001.
- 12) Ohnishi, Y., Shibata, H. and Kobayashi, A. : Development of finite element code for the analysis of coupled Thermo-Hydro-Mechanical behaviors of a saturated-unsaturated medium, Proc. of Int. Symp. on Coupled Process Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository, Berkeley, pp. 263-268, 1985.

- 13) Philip, J.R. and de Vries, D.A. : Moisture movement in porous materials under temperature gradient, *Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 38(2), pp. 229-237, 1957.
- 14) de Vries, D.A. and Afgan, N.H. : Heat transfer in soils, heat and mass transfer in the biosphere, *advances in thermal engineering*, 3, John Wiley & Sons Inc., 1975.
- 15) 千々松正和, 谷口航 : 熱-水-応力連成モデルを用いたニアフィールド解析評価, 核燃料サイクル開発機構, JNC, TN8400 99-014, 1999.
- 16) 中野政詩 : 土の物質移動学, 東京大学出版会, 1991.
- 17) 鈴木英明, 千々松正和, 藤田朝雄, 中野政詩 : 不飽和圧縮ベントナイト中の水分移動パラメータに関する考察, 土木学会論文集, No.701/III-58, pp. 107-120, 2002.
- 18) Van Genuchten, M.Th. : A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, *Soil Sci. Am. J.*, Vol.44(5), pp. 892-898, 1980.
- 19) Chijimatsu, M., Fujita, T., Kobayashi, A. and Nakano, M.: Experiment and validation of numerical simulation of coupled thermal, hydraulic and mechanical behaviour in the engineered buffer materials, *Int. J. Num. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.24, pp. 403-424, 2000.
- 20) Mualem, Y. : A conceptual model of hysteresis, *Water Resour. Res.*, Vol.10(3), pp. 514-520, 1976.
- 21) 京谷孝史, 寺田賢二郎 : マルチスケール応力変形解析法とその分布亀裂を含む材料の強度特性評価への適用, 土木学会論文集, No.680/III-55, pp.49-64, 2001.
- 22) Ene, H. I. and Polisevski, D.: *Thermal flow in porous media*, D. Reidel, Dordrecht/Tokyo, 1987.
- 23) 大久保泰邦, 秋田藤夫, 田中明子 : 地温勾配図作成と地下温度構造を求める試み-北海道の例, 日本地熱学会誌, Vol.20, 1, pp. 15-29, 1998.

(2002. 9. 9 受付)

EFFECT OF COUPLING BEHAVIOR ON GROUNDWATER FLOW FOR GEOLOGICAL DISPOSAL OF RADIOACTIVE HIGH LEVEL WASTE

Hiroshi KURIKAMI, Akira KOBAYASHI, Masakazu CHIJIMATSU
and Yuzo OHNISHI

In order to estimate the effects of coupled thermal-hydraulic-mechanical phenomena in near-field for geological disposal of high-level radioactive waste on a vast groundwater flow system, a far-field analysis was simulated based on the results of the simulation of coupled phenomena in near-field using averaged tensor and heat flux.

From the results of the coupled analyses of near-field and far-field it was clarified that groundwater flow system was influenced by coupled phenomena in near-field. Moreover, it can be said that groundwater flux into a disposal tunnel is regarded as a complement to safety assessment of a disposal because it strongly correlates with traveling time of groundwater.