

放射性廃棄物の深層岩盤処分に伴う崩壊熱による
自然対流の発生・成長に関する基礎的研究
Fundamental Study on Generation and Growth of Natural Convection
around Disposal Canister by Decay Heat of Radioactive Nuclides Waste.

熊谷組 原子力開発室 正員 ○伊藤 洋 Y.Ito
埼玉大学 工 学 部 正員 佐藤 邦明 K.Sato
熊谷組 原子力開発室 正員 西山 勝栄 K.Nishiyama
熊谷組 原子力開発室 正員 清水 昭男 T.Shimizu

1. はじめに

原子力の有効利用・開発を進めている各国において、放射性廃棄物処分の問題はきわめて重要である。特に高レベル廃棄物は放射能レベルが高く、長寿命核種や崩壊熱を伴うものなどを含むので処分に当って問題も多い。¹⁾ 高レベル放射性廃棄物の深層岩盤処分法を確立するうえで、核種崩壊熱による自然対流・サーマルブリュームの発生・成長過程の現象解明は、地下水熱汚染、熱応力、緩衝材の腐食のみならず核種の移行経路の究明においても大切な課題の一つとなっている。従来、この種の研究は地熱の分野で扱われてきた経緯はあるが、ここで対象とするような岩盤地山内に人工有限熱源が置かれたときの自然対流・サーマルブリュームの発生・成長過程については、実験的に相似性を満足することが難しいことや解析も容易でないことも加わって今日十分な議論はなされているとはいえない。

本論は、こういった背景にあって有限熱源周辺の自然対流現象に着目して、均質地山と亀裂帯を有する不均質地山における対流・サーマルブリュームの発生条件とその成長過程を基礎的に究明することを目的に、既に著者らが提案している変形FLIC法を応用・発展させて数値実験を試み、検討を加える。いくつかの新しい知見が得られたのでここに報告する。

2. 基礎式と解析モデル、条件

等方均質地山と亀裂帯を有する不均質地山を対象にして岩盤二次元モデルを図-1のように設定する。熱源は岩盤地山底面中央に水平に置き ($l/H = 0.8$, $T_0 = \text{const.} < 100^\circ\text{C}$)、地表面は同時に自由水面であって初期状態では静水圧分であるとする。また、熱的境界条件としては地表面は熱伝達境界であり、それ以外は断熱・不透水境界とする。このようなモデルを用いて、熱源周辺の伝熱現象を地下水対流と伝熱帯の形成過程の点から基礎的に調べることにする。伝熱解析は、問題をできるだけ単純化することと、実際の処分キャニスターは中間冷却期間を置き温度レベルは 100°C 以下となることを考え合せ次のような仮定を設ける。(1) 流れはダルシー則に従う、(2) Boussinesq近似を採用する、(3) 固・液相間の温度差はない、(4) 流体の温度は沸点点以下であり相変化はない、(5) 流体の・粘性係数および地山の熱物性・透水係数の温度依存性はない。したがって、熱・自然対流場の支配方程式は次のように書くことができる。

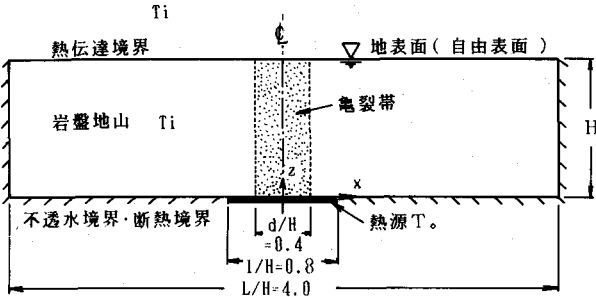


図-1 岩盤地山モデル

$$\operatorname{div} V = 0 \quad (1)$$

$$V = -K/\mu (\operatorname{grad} p + \rho g) \quad (2)$$

$$(\rho c)^* \partial T / \partial t = \kappa^* \operatorname{div} (\operatorname{grad} T) - (\rho c)_l V \operatorname{grad} T \quad (3)$$

$$\rho = \rho_i (1 - \beta (T - T_i)) \quad (4)$$

ここに、 V ：平均流速ベクトル、 K ：固有浸透係数、 μ ：流体の粘性係数、 p ：圧力、 ρ ：流体の密度、 g ：重力加速度、 $(\rho c)^*$ ：地山の等価熱容量、 T ：温度、 t ：時間、 κ^* ：地山の等価熱伝導率、 $(\rho c)_l$ ：流体の熱容量、 β ：流体の体積膨張率、で添字 i は初期状態での値であることを示している。

表-1に解析条件を示している。地山規模は

$H = 100 \text{ m}$ 、 $L/H = 4.0$ で、熱源の幅、温度は各々 $\ell/H = 0.8$ 、 $T_o - T_i = 20 \sim 80^\circ \text{C}$ ととり、岩盤地山・亀裂帯の透水・熱物性値は実際の地山で取り得る範囲ものものとしている。表中、 ν ：流体の動粘性係数、 n ：空隙率で、添字 r は岩盤地山、 f は亀裂帯の値であることを示している。一方、 Gr 数と Pr 数を統合した自然対流の原動力を表す無次元量である Ra 数を次のように定義すると、均質岩盤地山 (case A) で $Ra = 1.0 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^2$ 、不均質岩盤地山 (case B) で $Ra = 8.0 \times 10^{-2} \sim 4.24 \times 10^1$ ということになる。

$$Ra = Gr \cdot Pr, \quad Gr = \beta k H (T_o - T_i) / \nu$$

$$\bar{k} = (d/L) k_f + (L-d)/L \cdot k_r$$

$$Pr = (\rho c)^* \cdot \nu / \kappa^*$$

$$(\bar{\rho c})^* = (d/L) (\rho c)_f^* + (L-d)/L \cdot (\rho c)_r^* \quad (5)$$

$$\bar{\kappa}^* = (d/L) \kappa_f^* + (L-d)/L \cdot \kappa_r^*$$

$$\nu = \mu / \rho_i, \quad k = K \rho_i g / \mu$$

ここで、透水係数 $\bar{k}$ 、熱容量 $(\bar{\rho c})^*$ 、熱伝導率 $\bar{\kappa}^*$ は地山を並列モデルと考えてその等価値をとることとする。

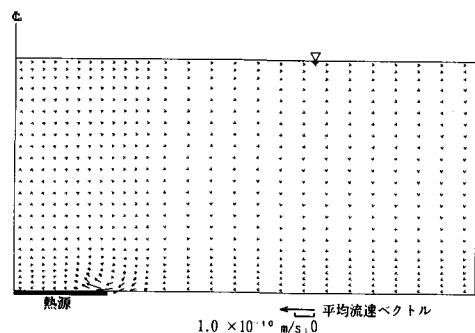
解析は、基礎式(1)、(2)は有限要素法、式(3)は変形 F L I C 法⁴⁾によるが、ある時刻において流速 V と温度 T を同時に収束させるまでくり返し計算を行い次の時間ステップへ移行するといった手順をとる。地山は軸対称であるから半断面をモデル化し、要素は三角形で要素数、節点数は各々 1248、675 とする。

3. 解析結果とその考察

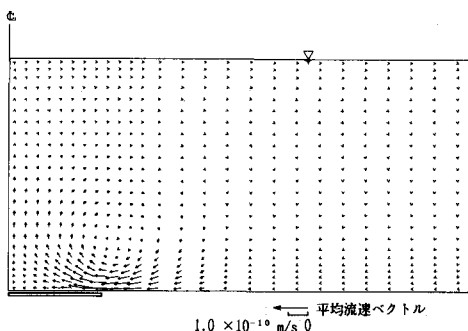
解析は、表-1に示した条件に従って行いが、まずその結果より代表的なものを提示して熱・自然対流の発生・成長過程の基本的性質を吟味し、ついでそれらの発生長条件の定量評価を試みることにする。

表-1 解析条件

	ケース	透水係数 k (m/s)		Rayleigh 数 Ra	諸物性値
		岩盤地山 (kr)	亀裂帯 (kf)		
均質地山 (case A)	Run-1	1.0×10^{-10}	—	1.0×10^{-4}	岩盤地山 $\kappa_r^* = 2.2 \text{ W/mK}$ $(\rho c)_r^* = 2.2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ $(\rho c)_f^* = 4.2 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ $n_r = 10\%$ $\beta = 5.0 \times 10^{-4} \text{ 1/}^\circ\text{C}$ $\nu = 5.0 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ $H = 100 \text{ m}$ $\alpha = 12 \text{ W/m}^2\text{K}$
	" 2	"		4.0×10^{-4}	
	" 3	1.0×10^{-8}		4.0×10^{-3}	
	" 4	1.0×10^{-6}		4.0×10^0	
	" 5	1.0×10^{-4}		1.0×10^2	
	" 6	"		4.0×10^2	
不均質地山 (case B)	Run-I	1.0×10^{-8}	1.0×10^{-7}	8.0×10^{-2}	亀裂帯 $\kappa_f^* = 1.7 \text{ W/mK}$ $(\rho c)_f^* = 3.0 \text{ MJ/m}^3\text{K}$ $n_f = 30\%$
	" II		1.0×10^{-6}	4.62×10^{-1}	
	" III		1.0×10^{-5}	4.24×10^0	
	" IV		1.0×10^{-4}	4.24×10^1	

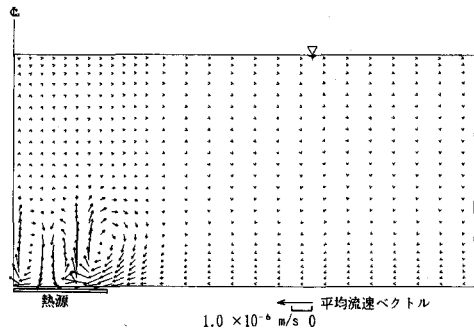


(a) 1年後

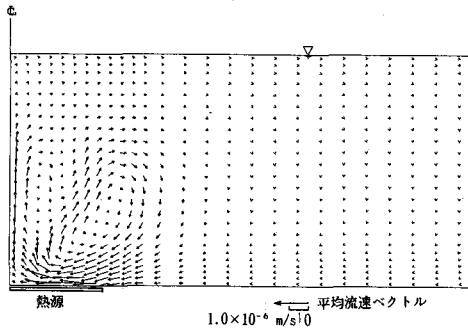


(b) 10年後

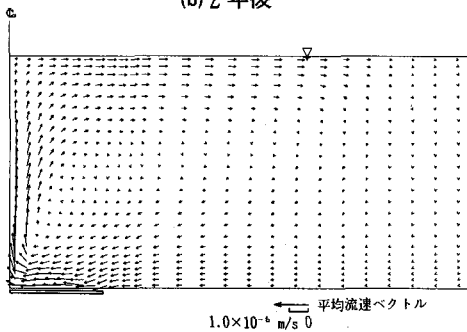
図-2 Run-3における自然対流の発生と成長



(a) 1年後

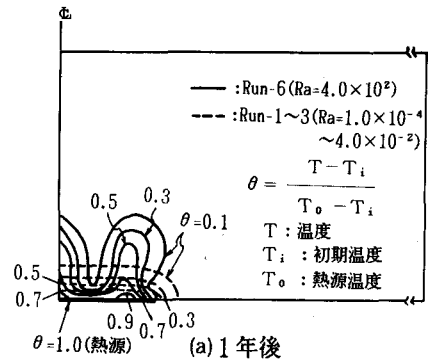


(b) 2年後

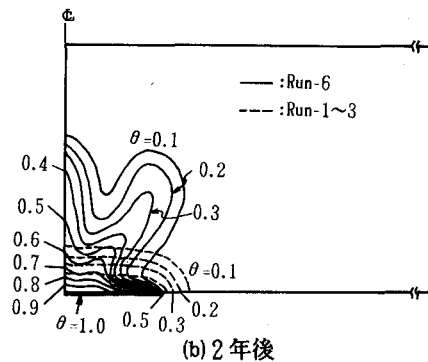


(c) 10年後

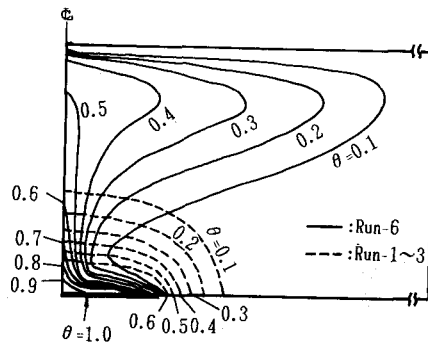
図-3 Run-6における自然対流の発生と成長



(a) 1年後



(b) 2年後



(c) 10年後

図-4 Run-1~3, 6に対応する無次元温度 θ の分布

3.1 自然対流の発生と成長過程

(1) 均質地山の場合

解析は、 Ra 数が $1.0 \times 10^{-4} \sim 4.0 \times 10^2$ と広い範囲にわたって行われたが、ここでは代表的結果として Run 3 ($Ra = 4.0 \times 10^{-2}$) と Run 6 ($Ra = 4.0 \times 10^2$) における流況と無次元温度分布の経時変化を提示しその性質を吟味する。まず、図-2 は Run 3 における対流速ベクトル分布を (a) 1 年後および (b) 10 年後について示したものである。1 年後では、熱源右端上に中心をもつ 1 つの弱い対流が形成され 10 年後には対流中心が上昇するものと同じ対流がそのまま成長して 1 つの対流系となっており。この場合の対流形成は、熱源端部から発生・成長する 1 つの対流系であり比較的単純である。次に Run 6 のそれを示した図-3 に目を向けると、Run 3 のときとは異なった様相を呈しており、(a) 1 年後の対流は複雑であり 3 つの小対流が発生している。それが 2 年後になると小対流は成長し、歪んではい

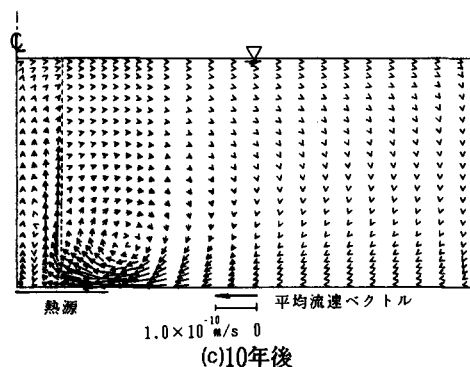
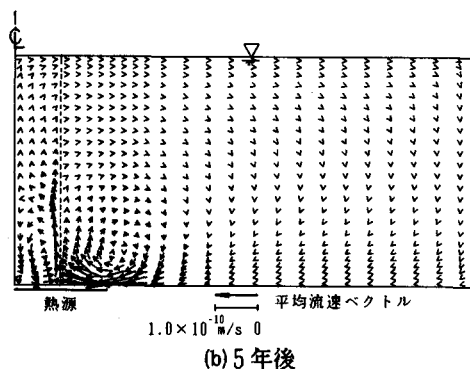
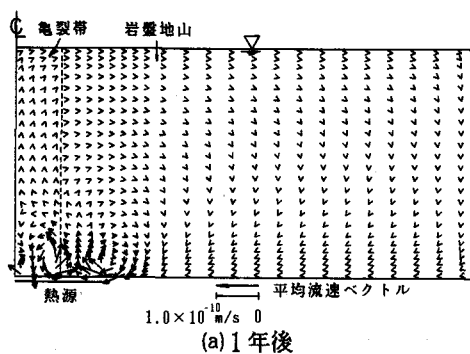


図-5 Run - Iにおける自然対流の発生と成長

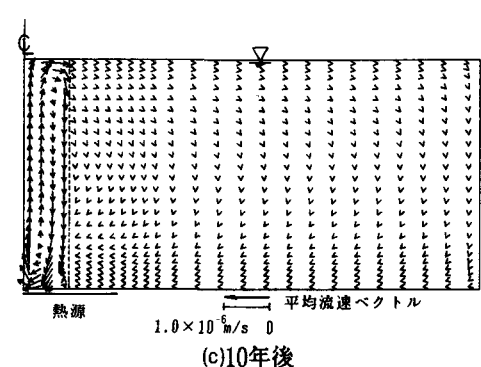
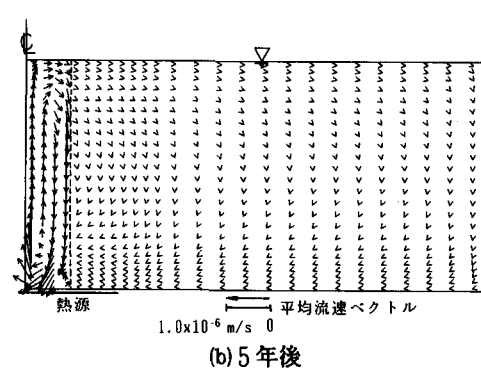
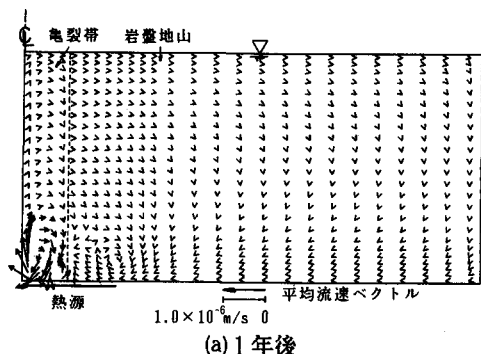


図-6 Run - IVにおける自然対流の発生と成長

るが1つの大対流系に合併しつつ (c) 10年後になると完全な1つの単純な大対流となっている。ただ、この場合と Run 3を比べると、対流中心が高く上昇流および地表面近くの左から右への流速が大きいといった違いがある。

つぎに、これらの場合の伝熱帯の形成・サーマルブリュームの発生・成長過程に目を転じ、地山の無次元温度 θ の分布の経時変化を示した図-4に着目する。図中の破線は Run 3および Run 1, 2の θ 分布を同時に示し、実線は Run 6のそれである。まず、Run 1~3の θ 分布は完全に一致した形となっているがこれは伝熱形態が伝導支配となって対流の影響は表れていないことを示している。Run 6の場合は (a) 1年後にはサーマルブリュームの発生が認められ、しだいにそれらが合併しつつ上昇しさらに地表面に沿って右側へ大きく広がっていることがわかる。結局、Run 1~3程度の Ra 数では伝導支配となるため、ブリュームの発生はなく対流も安定したものとなるが、Run 6のように Ra 数が大きくなって、サーマル

ブリュームの発生・成長と対流形成が相互に強く依存するときは、微妙な変化が増長して複雑な対流発生・成長過程を経て定常的には1つの大対流系となることが明確にされた。

(2) 不均質地山の場合

亀裂帯の透水性は岩盤地山に比べて、 $k_f/k_r = 10 \sim 10^4$ という値をとるが、岩盤地山は $Ra(r) = 4.0 \times 10^{-2}$ であり上述の結果からすると伝導支配である。こういった設定条件において、亀裂帯が地山全体の自然対流・伝熱帯の形成にどういった影響を及ぼすかについて基礎的に検討する。まず、図-5はRun I ($k_f/k_r = 10$)における対流速ベクトル分布を示したものである。1年後では岩盤地山と亀裂帯に各々別の中心をもつ同程度の小対流が発生している。5年後になるとそれぞれの領域で成長するが岩盤地山の方が若干強いものとなってくる。10年後になると対流系は1つにまとまり、岩盤地山内の熱源端部に中心をもつ大対流が形成される。また、このとき亀裂帯内の岩盤地山との境界付近で上昇流が大きくなるといった特徴がみられる。つぎに、亀裂帯の透水性がかなり大きい場合のRun IVにおけるそれを示したのが図-6である。このときは初期より亀裂帯内での対流が卓越したものとなり、岩盤地山内には非常に弱い対流が一旦は形成されるが、10年後には完全に統合されて亀裂帯内に中心をもつ1つの対流系に支配されることになる。亀裂帯の透水性の違いによって、対流の発生・成長過程が大きく異なり、最終的な大対流の中心位置も変わるといった注目すべき現象が認められる。

一方、図-7はRun I～IIIに対応する無次元温度 θ の分布である。図中の破線はRun I～III、実線はRun IIIのそれである。Run I～IIIの θ 分布は一致しており、伝熱形態は伝導支配となっているが、Run IVでは亀裂帯内で伝熱帯の卓越した成長が認められ、10年後にはそれが地表面にまで達している。また、このとき亀裂帯付近の岩盤地山においても、低温伝熱帯($\theta \approx 0.1$)は大きく成長しているものの亀裂帯境界付近の高温伝熱帯($\theta > 0.3$)は逆に下に凸となって周辺のそれより低くなるといった特徴が認められる。これは、亀裂帯内に形成された対流系の下降流により、伝熱帯の成長が抑えられたものと考え得る。

3.2 自然対流・サマルブリュームの発生条件

ここでは、得られたすべての結果から自然対流・サマルブリュームの発生条件について定量評価を試みる。まず、自然対流について調べるため、対流の代表無次元量である Ra 数に対し、流速場および伝熱場を代表する無次元量として10年後における Pe 数を次のように定義してそれらの関係を示したものが図-5である。

$Pe = Re \cdot Pr$, $Re = u_m d / \nu$ (u_m : 最大流速, d : u_m をもつ地山の空隙率に等しい空隙体積を m 単位で表し、その体積と等価な円管直径) ----- (6)

これより、ある程度成長した対流系ではサマルブリュームの発生の有無によらず(後述) Pe 数と Ra 数には強い相関($Pe \approx 10^{-4}$)があるといった興味ある結果が認められる。図中の■印は不均質地山のそ

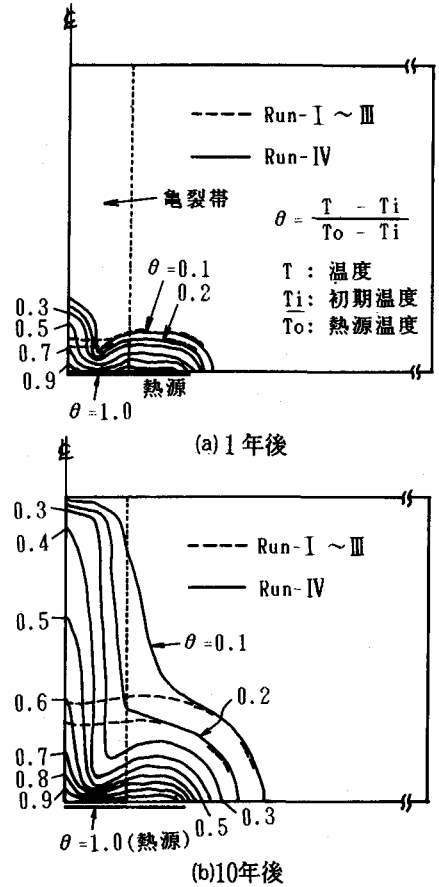


図-7 Run I～III, IVに対する無次元温度 θ の分布

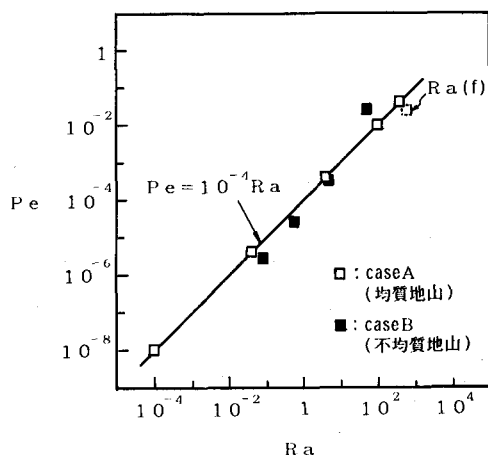


図-8 ペクレ数 (Pe) とレイリー数 (Ra) の関係

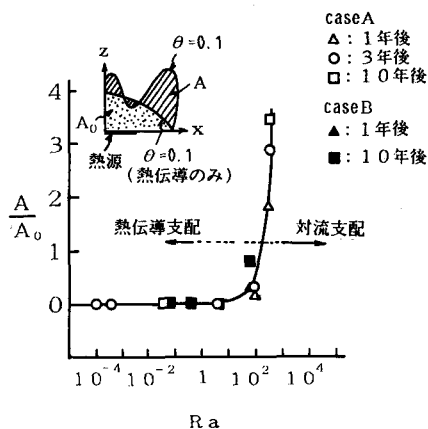


図-9 A/A_0 と Ra 数の関係

れであるが、式 (5) の定義によって既ね均質地山のそれと整合している。ただ、RunIV ($Ra = 4.24 \times 10^1$) に対する Pe 数が $10^{-4}Ra$ より若干大きな値となっているが、このときは完全に亀裂帯内対流支配であり等価平均値をとった式 (5) との差異が生じたものと考え得る。ちなみに、RunIV を亀裂帯内の Ra 数で表せばうまく一致する。

つぎに、サーマルブリュームの発生条件については、サーマルブリューム発生による伝熱帯の歪みの代表無次元量として、無次元温度 $\theta = 0.1$ の等温線と伝導のみによる $\theta = 0.1$ との差の面積 A (図-9 左上参照) を伝導のみによる $\theta > 0.1$ の面積で除した比 A/A_0 を考える。図-9 は A/A_0 と Ra 数の関係を示したものである。ここで、 $A/A_0 \approx 0$ であれば伝熱形態は伝導支配であるが、 $A/A_0 > 0$ となって増大すると対流伝熱の影響が表れサーマルブリュームの発生が有ることになる。同図より、Ra 数が 1 以下であれば伝導支配であり、それが 1 を超えると徐々に対流伝熱の影響が表れ 10^2 以上になると急増することがわかる。つまり、Ra 数が少なくとも 1 以上にならないとサーマルブリュームの発生する可能性は小さいわけで、これは良好な均質岩盤地山では考えにくい値となる。

4. むすび

高レベル放射性廃棄物の地層処分を対象にして、核種の残留崩壊熱に起因する地山内での自然対流・サーマルブリュームの発生・成長の基本特性について吟味するため、均質・不均質な水平帯水層モデルを用いた数値実験を試み、新しく導入した等価 Ra 数を用いて諸現象との関係を整理した。その結果、最大対流速はサーマルブリュームの発生の有無によらず Ra 数と強い相関があることがわかった。ただし、サーマルブリュームの発生があるときの対流は、いくつかの小対流発生から 1 つの大対流へと複雑な成長過程をたどる。また、不均質な場合は、亀裂帯の透水性によって対流の発生・成長過程が大きく異なることが認められた。一方、サーマルブリュームの発生は、均質・不均質によらず Ra 数が 10^2 以上にならないと顕著に表れないことが示唆された。

参考文献

- 1) たとえば天沼 倅: 放射性廃棄物の処理・処分、原子力工業、Vol.29、No.4.
- 2) M. Combarrous et al.: Hydro-thermal convection in saturated porous media, Advances in Hydrosience, edited by Ven Te Chow, Vol.10, Academic Press, 1975.
- 3) 湯原浩三ほか: 開いた地熱貯留層内の対流に関する研究 (I)、日本地熱学会誌、Vol.1, NO.2, 1979.
- 4) 佐藤邦明・伊藤洋: 地下空洞周辺の伝熱に関する研究、土木学会論文集、第363号、1985.