

東京大学大学院 学生会員 大野 博之
 埼玉大学工学部 正会員 渡辺 邦夫
 東京大学工学部 正会員 浅枝 隆

はじめに

熱源近傍の高透水性割れ目中に設けられた熱源の上部では、プリュームの発生によって特徴づけられる不安定な流れが生じる。⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ 熱源近傍における熱と地下水、さらには物質の溶解・輸送の問題を考えるにあたっては、この不安定流れの性質を明らかにしておく必要がある。しかしながら、従来、割れ目中の熱源近傍の不安定流れについては、ほとんど調べられていない。今回の研究はプリュームの特性として基本的な量である、発生間隔、発生に至る時間、上昇速度などを定量評価するために理論・実験の両面から検討したものである。

1. 実験方法

用いた実験装置については、以前報告⁽⁴⁾したものと同様であり、ここでは簡単に説明するにとどめる。

図-1に用いた実験装置の概略図及び寸法を示す。図に示されるように、二枚の平行アクリル板の間隙を岩盤割れ目と想定している。割れ目内介在物としては、粒径の異なるA・B二種類のガラス玉（A：平均粒径25mm，透水係数440～339cm/s，B：平均粒径1.2mm，透水係数1.58cm/s）を用いてモデル中に充填した。熱は割れ目モデルの下部よりラバーヒーターで与え、熱フラックス F_H 一定の条件を設定した。 F_H はほぼ $1.82 \sim 22.3 \times 10^3 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{s}$ である。割れ目下部で生じる非定常流れは、あらかじめモデル両下端の「注入パイプ」を通してガイドチャンネルに沿って注入しておいたトレーサー（赤インク水溶液）の動きによって観察した。

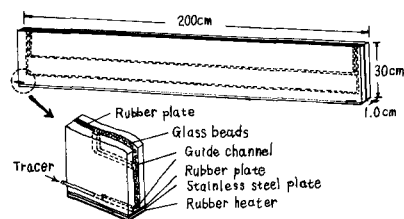


図-1 実験装置概略図と寸法

2. プリューム発生に至る時間(T_v)と発生したプリューム相互の平均間隔(L_v)の定量評価

筆者らの以前の研究により、プリュームの発生は熱源直上に形成される熱伝導層の不安定化によって生じ、また、不安定化の開始は、フラックス型レイリー数 R_{af} を導入することで判定しうることを示した。よって、 T_v 、 L_v については、温度分布が三角形近似で近似しうれば次式で表わされる。

$$T_v = C_1' R_c (\alpha k F_H / (\rho c) k)^{-1} \quad (1)$$

$$L_v = C_2' R_c^{1/2} (\alpha k F_H / (\rho c) k)^{-1/2} \quad (2)$$

ここに、 α ：水の体積熱膨張係数， k ：透水係数， (ρc) ：水の熱容量， k ：水の温度伝導率， R_c ：限界レイリー数($=17.65$)， C_1' 、 C_2' ：比例常数である。上式は水のみのも性質値を用いた表現となっているが、本来は水とガラス玉の平均値を用いるべきである。このため上式を次のように変換する。

$$T_v = C_1 R_c (\alpha k F_H (\rho c) / (\rho c) \lambda^*)^{-1} \quad (3)$$

$$L_v = C_2 R_c^{1/2} (\alpha k F_H (\rho c) / (\rho c) \lambda^*)^{-1/2} \quad (4)$$

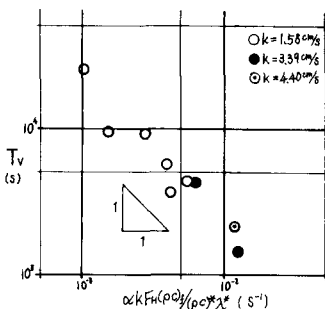


図-2 $T_v - \alpha k F_H (\rho c) / (\rho c) \lambda^*$

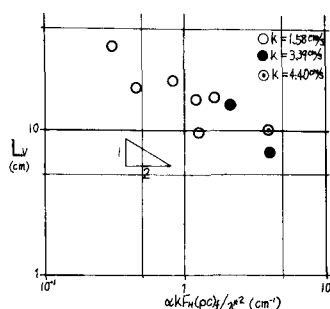


図-3 $L_v - \alpha k F_H (\rho c) / (\rho c) \lambda^*$

ここに、 $(pc)^*$: 水とガラス玉の平均熱容量, λ^* : 水とガラス玉の平均熱伝導率, C_1, C_2 : 比例常数である。

次に、(3)式及び(4)式の妥当性を検討し、さらに式中に含まれる常数 C_1, C_2 を実験的に求めることを試みる。図-2及び図-3は、それぞれ実験における $T_v - \alpha R F_H (PC)^{1/2} / (pc)^{1/2}$ 及び $L_v - \alpha R F_H (PC)^{1/2} / \lambda^*$ の関係を示している。図より、 T_v が $\alpha R F_H (PC)^{1/2} / (pc)^{1/2}$ の-1乗に、 L_v が $\alpha R F_H (PC)^{1/2} / \lambda^*$ の-1/2乗にほぼ比例することが認められ、(3)式及び(4)式の妥当性が示された。また、図より、比例常数を求めると $C_1 \approx 1.32 \sim 1.53$, $C_2 \approx 4.12 \sim 4.24$ となる。

3. プリュームの上昇速度

プリュームは割れ目中に形成された温度差による密度の不均一性(浮力)により上昇する。ここで、プリュームの上昇を定量的に考えてみる。初期においてプリュームは横方向の広がりが微小で、上昇のみと仮定しうる。そこで、多孔質媒体中の流れを、毛細管中の流れと仮定して、ポワジユ則とダルシー則を導入すれば、Alvarado⁵⁾が導いたように、次式が得られる。

$$W_a = (K/\mu) \cdot (dp/dx) \quad \text{----- (5)}$$

ここに、 K : 浸透係数 $(L)^2$ の次元を持つ)、 μ : 粘性係数, dp/dx : 圧力勾配, W_a : みかけの上昇速度である。ここで、(5)式の圧力勾配を浮力差によって置き換えると次式が得られる。

$$W_a = (K/\mu) \cdot (\rho_0 \alpha F_H H g / \lambda^*) \quad \text{----- (6)}$$

ここに、 ρ_0 : 初期温度における水の密度, H : 熱伝導層厚さである。

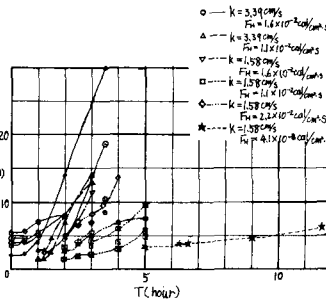


図-4 界面上昇の測定例

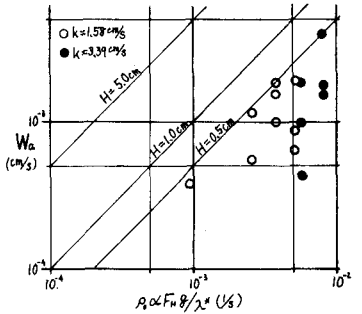


図-5 $W_a - (K/\mu) \cdot (\rho_0 \alpha F_H g / \lambda^*)$

図-4は、トレーサーの界面上昇を示したものである。図に示されるように、①上昇の割合がほぼ一定のもの②横方向への広がりが大きいために上昇の割合が減少しているもの③近くのプリュームを吸収したために上昇の割合が増加しているもの、と様々である。

図-5は、実験における初期の W_a と $(K/\mu) \cdot (\rho_0 \alpha F_H g / \lambda^*)$ の関係を示したものである。ただし、 W_a としてはトレーサー界面上昇速度をとっている。トレーサー界面はモデル下端面より約3cm上である。図中の実線は、 H をそれぞれ50cm, 10cm, 0.5cmでプリュームが発生したと考えた時の理論値である。実験でみられたプリューム発生厚さ H は10~10cmであった。このことは、トレーサーの界面流速の実測値が実際の流速を示さず、実際よりも遅くなっていることを示す。つまり、鉛直一次的な取り扱いが難しいことを示している。しかしながら、最大上昇速度に注目すると、(6)式のようにほぼ1の勾配を持つようにみえる。

4. 結論

今回の研究によって、岩盤割れ目中の熱源直上において発生するプリュームの特性量、特に、プリューム発生に至る時間 T_v や発生したプリューム相互の平均間隔 L_v が割れ目の特性量及び与えた熱量で決定しうることが示された。さらに、プリューム上昇速度の理論的検討の可能性が示された。また、特に、(3)式及び(4)式は基本的にはより小さな透水係数の割れ目にも拡張しえ、実用性が高いと思われる。

参考文献 1)渡辺, 古川, 昭和58年日本応用地質学会研究発表会, PP.23-26, 1983. 2)渡辺, 古川, 第16回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, PP.41-45, 1984. 3)渡辺, 浅枝, 流れの可視化, Vol.4, No.14, PP.155-158, 1984. 4)渡辺, 大野, 浅枝, 第17回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, PP.186-189, 1985. 5)Alvarado & Marsden, Soc. Pet. Eng. J., PP.369-377, Dec. 1979.