

埼玉大学 工学部 渡 辺 邦 夫

〇 佐々木 泰

東京大学 工学部 浅 枝 隆

はじめに

広域岩盤中の熱と地下水の流れは、浸透流基礎式とブーシネスク近似に基づくエネルギー輸送式などを連立させ、数値シミュレーションすることができる。しかし、熱源近傍においては、流体運動の不安定性に起因して大変複雑な流れが生じ、現状では解析できない。そのため、まず流れの性質を調べる基礎研究が不可欠である。筆者ら^{1),2)}は粒状多孔体で充填された割れ目モデル中の、熱源近傍の現象を調べてきた。今回、開口した割れ目をヘルシウセルによりモデル化し、その中の熱による流れの性質を実験的に研究した。その結果、熱源近傍に生ずる非定常な流れがある程度明らかになったので報告する。

1 実験装置と実験手順

用いた実験装置は、前回報告したもの¹⁾と基本的には同じであり、図-1 (a) に示すように、長さ200 cm、高さ30 cm、厚さ1 cmの2枚の亚克力板を2 mmの間隔で並べ、ヘルシウセルを作っている。さらに、後側の亚克力板内側に、1 mmの薄い亚克力板をはりつけ、間隙を1 mmとしている。この間隙を開口割れ目のモデルと考える。モデル内の水深は任意に変えうるが、今回は主に30 cmに設定し、上面は自由水面としている。熱は底面よりラバーヒーターを用いて間隙内の水および亚克力板双方に均質に与え、スライダックスで熱フラックスを調節する。与え得る熱フラックスの範囲は、ほぼ $2.5 \times 10^{-2} \text{ cal/cm}^2/\text{s}$ までである。割れ目モデル内の温度分布は、図-1 中に示されるように、モデル中央の

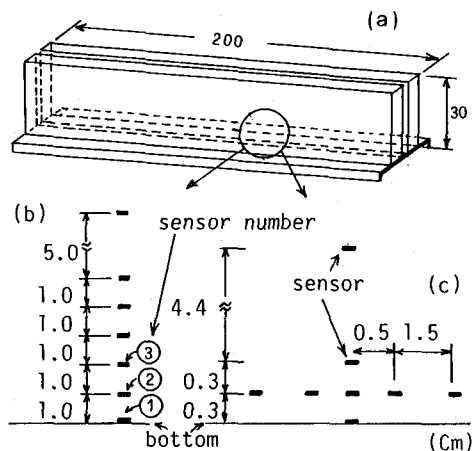


図-1 実験装置模式図と温度センサー配置図

下部に7本のサーミスターセンサーを配置して測定する。センサー配置パターンの2例を図-1 (b)、(c) に示す。これらのセンサーは径約1 mm長さ3 mm程度の小さいものであり、ヘルシウセル内側にはりつけられた薄亚克力板を一部くり抜きはめこまれている。そのため、流れに与える影響は少ないものと考えられる。これらのセンサー配置により、熱源近傍の温度分布をかなり詳しく調べることができる。また、熱により作られた流れは、実験前もしくは実験中に、モデル底部にウォーターブルー溶液を投入し、それをトレーサーとして観察した。

2 非定常流れの性質と温度変化

実験で与えた熱フラックスの範囲は $4.0 \times 10^{-3} \sim 1.6 \times 10^{-2} \text{ cal/cm}^2/\text{s}$ であったが、この条件内では共通して特徴的な流れの非定常変化がみられた。その変化をわかり易く模式的に示したものが、図-2 (a)、(b) である。(a) は、実験前に、モデル底面に薄いトレーサーの層がつくられている場合の、トレーサーの動きを

示しており、一方 (b) は、流れの場を概念的にベクトル図で示したものである。各々特徴的な5段階（以下、それぞれP-1～P-5と記す）の状態を示している。先ず熱を与えはじめてから T_v 時間後に平均間隔 L_v で上昇流が生じ、トレーサー層の1部を持ち上げる（P-1）。本論文では、この上昇流を初期プリュームと呼んでいる。この初期プリュームは成長をつづけ、P-2の状態に至り小さな対流を形成する。これら対流の高さは発生初期では一定である。その後多くの小さな対流のうちのいくつかがとくに大きく成長し（P-3）、やがて隣り合う対流をまきこんでスケールの大きな対流を形成する（P-4、P-5）。この段階に至って、プリュームの発生場所に大変特徴的な傾向があらわれる。図に示したように、プリュームは、スケールの大きな対流の下降流域からのみ生じ、その結果形成された小さな対流は、大きな対流による底面に沿う水平流にのって上昇流域へと移動し、急速に上方に運ばれる。下降流域でプリュームが発生し易いことは、最近、Chen ら³⁾が、限界レイリー数の低下の観点から理論的に論じているが、実験的にはまだほとんど明らか

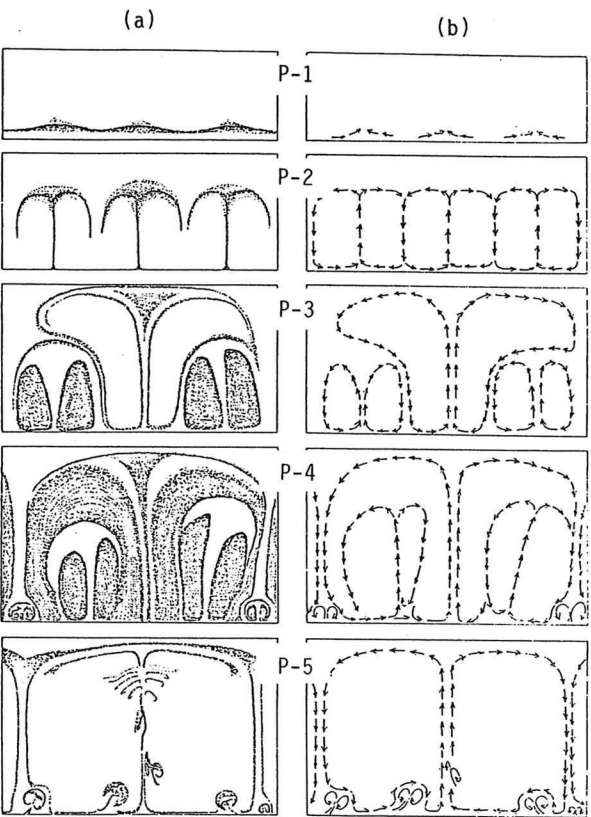


図-2 流れの場の非定常変化の模式図

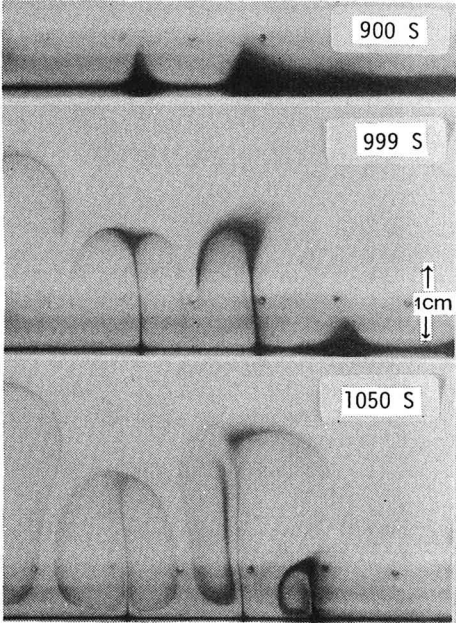


図-3 初期プリュームの発生と発達

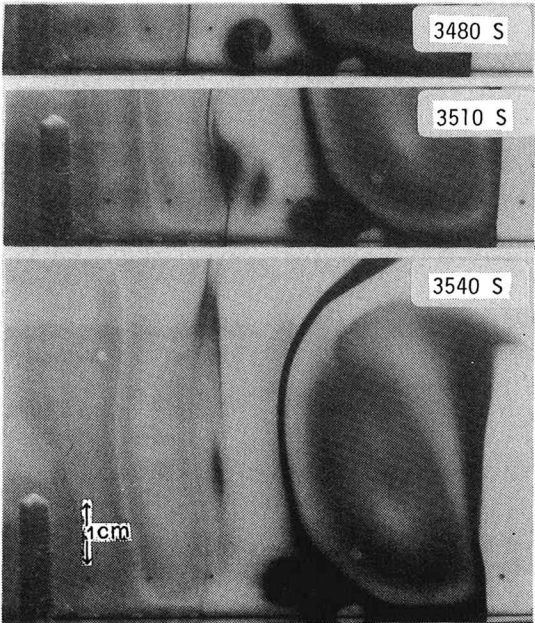


図-4 対流下降流域からのプリュームの発生と移動

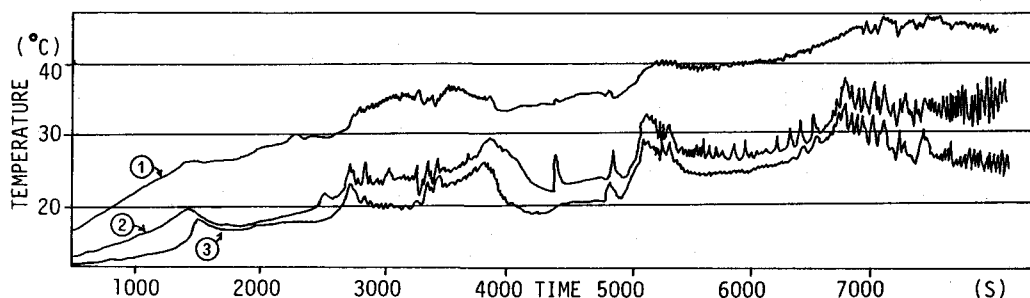


図-5 モデル内温度の非定常変化の例

にされていない興味深い性質である。図-3, 4に、図-2各段階のなかで、初期ブリュームの発生と発達 (P-1~P-2) および、対流下降流域からのブリュームの発生と移動の例をそれぞれ写真で示す。これらの実験における熱フラックスはそれぞれ、 1.3×10^{-2} 、 1.2×10^{-2} cal/cm²/s である。実験開始後の時間については、図中に各々示してある。

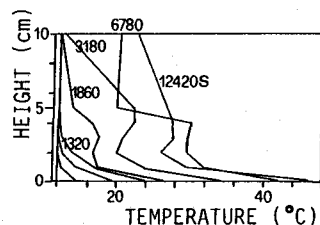


図-6 鉛直温度分布の変化

つぎに、モデル内の熱源近傍の温度変化について代表的な例を図-5に示す。この例におけるセンサー配置パターンおよびセンサー番号は、図-1 (b) に対応している。この実験は熱フラックス 1.3×10^{-2} cal/cm²/s でおこなった。図中1500s付近にみられる最初の温度急変点は、初期ブリュームの発生に対応している。

その後の温度低下は、ブリュームによって作られた対流 (図-2, P-2) の下降域に入ったことによるものである。ひきつづき底面より熱フラックスが与えられるため、徐々に温度が上昇してゆく。約2700sより、とくにNo1センサー温度が短周期で大きく変動する。これは、図-2のP-4, P-5段階に至り、スケールの大きな対流の下降域から上昇流域に向かう小対流が次々と通過することによるものである。約3600sより、短周期の温度変動がみられなくなり、温度が全体に低下して来る。これはセンサーが、大きな対流の下降流域の中心になり、発生、移動するブリューム小対流の背後になったことによるものである。約5200sより、再び著しい温度変動がみられはじめる。これは再び、小対流の通過域に入ったことによる。この温度変化からわかるように、スケールの大きな対流下降流域、ブリュームの発生位置は一定せず、わずかも移動している。この一因として、対流の結合や近接する対流の影響が考えられる。

図-6に、鉛直温度分布の変化例を示す。この熱フラックス条件は、図-5と同じである。1860sで温度分布がそれ以前の熱伝導型の分布から外れ、底面直上を除いて、温度が徐々に平均化していく状態が認められる。これは、ブリュームの発生と対流の形成、発達によるものである。

3 初期ブリュームの発生時間と発生間隔

前回報告した^{1), 2)} 充填割れ目モデルと同様、初期ブリュームの発生時間 (Tv), 発生間隔 (Lv) は、限界レイリー数の考えに基づけば、以下の式であらわしう。

$$Tv = C_1 (\alpha k Fh / \rho c \kappa^2)^{-1} = C_1 A^{-1} \quad \text{----- (1)}$$

$$Lv = C_2 (\alpha k Fh / \rho c \kappa)^{-1/2} = C_2 B^{-1/2} \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 C_1 , C_2 は定数、 α は水の体積膨張係数、 Fh は熱フラックス、 c は水比熱、 ρ は水密度、 κ は水の

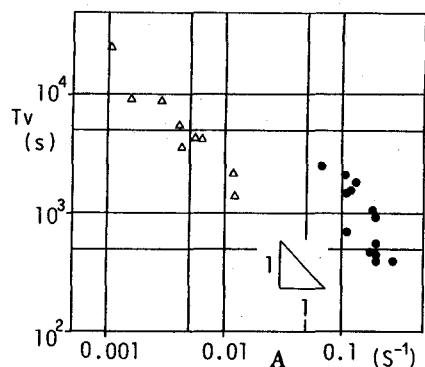


図-7 発生時間 T_v の実験結果

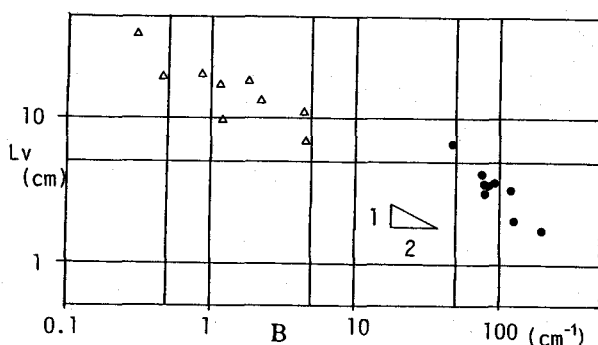


図-8 発生間隔 L_v の実験結果

温度伝導率である。これら定数値として、間隙の小さい割れ目モデルの場合、水の値のみを用いて良いか、水と割れ目壁面を形成する岩盤（モデルではアクリル板）との熱のやり取りをいかに評価すれば良いかなどはまだ問題の残るところである。とくに割れ目間隙が小さくなると大きく影響すると思われる。しかし（１），（２）式は現象を整理するには簡単で便利であると考え、まずこれらの式の妥当性を調べる。図-7，8に実験で得られた値を●で示す。各々の図中、Δは以前報告した充填割れ目モデルの結果である。充填モデルの場合、熱伝導係数や比熱などは水と充填物との平均値を用いるため、レイリー数の定義式がやや異なる²⁾。したがって充填割れ目の場合の横軸は、少し表現が変わっている。しかし、ほとんど同列に検討することができる。まず図-7から、 T_v と $\alpha k F h / \rho c \kappa^2$ との関係は、充填割れ目の場合に比べやや上方にプロットされ、全体に散らばりが大きい。ほぼ-1の勾配を持つ直線にのるといえる。値の散らばりは、実験的にプリュームの発生時間を推定することが難しいことによるものである。一方、図-8は L_v と $\alpha k F h / \rho c \kappa$ との関係を示す。 L_v は T_v に比べ測定が容易であり、値のバラツキは少ない。ほぼ今回の値は理論式どおり-1/2の勾配を持つ直線で表現しうるといえる。 L_v も、 T_v と同様充填割れ目モデルの結果に比べ、さほど顕著ではないがやや上方にプロットされる。充填割れ目モデルと開口割れ目モデルとの差異は、前述したように、物理定数として水の値のみ用いて良いかや、発生時間の測定の精度の問題もあるが基本的には、Parkら⁴⁾が異種流体のヘルショウセル内流れの界面不安定に関して論じているように、モデルの違いによる限界レイリー数の相違に起因すると考えられる。

4 結論

今回、ヘルショウセルを開口割れ目モデルと考え、熱源近傍に生ずる非定常流れの特性を調べた。その結果、プリュームの発生形態、スケールの大きな対流とプリューム発生位置との関係が明らかとなった。この性質は、今後熱源近傍における物質移動を考えたり、今後の現地測定結果を評価する上で基礎的といえる。また、本研究では初期プリュームの発生時間、発生間隔について論じ、まだ問題もあるがほぼ理論式に合致した結果を示すことを明らかにした。

参考文献

- 1) 渡辺邦夫、大野博之、浅枝隆 (1984)、第17回岩盤力学シンポジウム論文集、PP. 186-190。
- 2) 大野博之、渡辺邦夫、浅枝隆 (1985)、土木学会年譜、3部、PP. 753-754。
- 3) Chen, K., Chen, M. M., Sohn, C. W (1983), J. F. M., vol. 132, PP. 49-64.
- 4) Park, C. W., Homsy, G. M. (1984), J. F. M., vol. 139, PP. 291-308.

(83) Experimental study on thermal plumes generated in an open fracture

Kunio Watanabe*

Tai Sasaki**

Takashi Asaeda***

Abstract

Although thermally induced flow of groundwater in fractured rock mass is being studied by many previous authors, the flow behavior at the near field of a heat source is not still clarified. The flow induced above a heated boundary is characterised by the successive generation of plumes from thin conductive layer formed just above the boundary. The study reported here is intended to make clear the nature of plumes in a open fracture vertically developing from a horizontal plane heat source.

Hele-Shaw cell that is mainly composed of two acrylic plates of 200cm wide, 30cm high and 1.5cm thick is used as a model of an open fracture. Interstice of 1.0mm wide between these two plates is filled with distilled water. Heat is electrically supplied from bottom of the cell by a rubber heater plate. For insulation, plates of polystyren foam of 3.0cm thick are mounded on both sides and top of the cell. Before experimental run, thin layer of tracer (Water-blue) is prepared immediately above the bottom with the aim to visualize the flow induced. Temperature distribution in this cell is automatically measured by the use of seven resistance thermometers burried in the hind wall of the cell.

It is clearly found that the pattern of transient change of flow can be devided into following three stages.

- (1) Conductive layer of several cm high is firstly formed above the heated bottom.
- (2) After T_v seconds from the start of experiment, many initial plumes are generated at almost regular intervals of L_v cm. Each plume forms a small convection.
- (3) Some small convections are combined in each other to make a large convection. Plumes are generated only at the downward-flow region in this large convection and are transported toward the upward-flow region by the horizontal flow along the bottom. In this stage, thin conductive layer of several mm high may exist just the heated boundary.

In addition to these results, it is found that the T_v and the L_v values can be well estimated from heat flux supplid and physical properties of water such as density, specific heat and so on.

* Associate Professor, Faculty of Engineering, Saitama University.

** Student, Faculty of Engineering, Saitama University.

*** Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Tokyo.