

クリスチャンセン フィルター法による 2 重空隙多孔媒体中の 熱対流に関する研究

Study on Hydro-thermal Convection in Double Porosity Porous
Media by Christiansen Filter.

埼玉大学工学部 正会員・佐藤 邦 明
三菱金属中央研究所 " 佐々木 康 夫
福井大学工学部 " 福原 輝 幸
熊谷組原子力開発室 " 伊 藤 洋

1. はじめに

飽和多孔媒体中で熱源が与えられた場合、そこでは自然対流が伝熱を伴って発生する。この現象については従来大変興味をもたれ、いくつか簡単な条件の場合の解析や実験が行なわれており、基本的な事がかなり判っていると言える。^{1),2)}しかし、実際の地下帯水層や岩盤にこれらの成果を応用しようとする、境界条件が複雑であったり、多孔媒体が異方性をもつことが多く、解析解が得られないこと、性質がよく判らない点も加わって研究の余地がある。また、数値解析法についてもより実用性をもつ解析が浸透流、伝熱、物質輸送といったことを含む連成条件下で開発されねばならない。最近、特に地下水現象の総合的な連成解析法が技術問題の多様化に伴って要求される動向にある。こういった背景にあって、本研究は二重空隙をもつ多孔媒体中における熱源近傍の伝熱と自然対流の様式さらに性質を中心にクリスチャンセン フィルター法（透明多孔媒体における流体挙動を光効果を利用して実験する方法）を用いて実験的に明らかにしようとしたものであり、二種類の多孔媒体によって自然対流の発生と成長過程を対象として研究を進めた。また、実験結果は数値解析法を新しくFLIC法（Fluid in Cell method）により開発し、実験と数値解析を比較・検討して現象の究明に供した。今回の研究成果はまだ十分とはいえないまでもいくつか興味のもてる結果を得たので報告する。

2. 実験とその方法

実験装置は図-1 のようであり、装置本体は(a) 図のように、長さ0.28m、高さ0.28m、厚さ0.011mの多孔体充てん槽である。この充てん槽も多孔体も共に透明であり、一様均質粒径のガラス球と方形多孔体の格子配列の二種類が充てんされる。

この多孔体充てん槽の下端は中央0.05mの部分熱源と全体熱源の二種類の熱源が設定される。熱源には別の定温槽から一定温度の水が供給され、常に境界温度が一定に保たれるようになっている。

測定は多孔媒体充てん槽に薄く塗布された色素の対流による運動を光効果によってビデオカメラで測定することと多孔媒体中の温度測定である。測定システムは図-1 (b) のようであり、ビデオカメラによる測定結果は

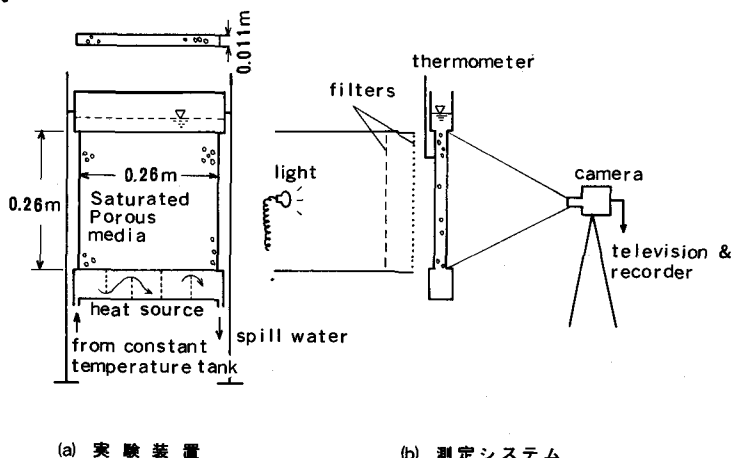


図-1 実験装置のシステムと実験方法

記録された後でテレビ画像として再生することによって解析が進められる。実験中の対流運動は光源の方向、強さをうまく調整すると、大変鮮明に得られ、この実験法は極めて有効である。表-1には実験ケースと多孔媒体の物性・水理特性がまとめてかかげてある。また、ガラス球と水の等価熱伝導率は $0.690 \sim 0.804$ kcal/m.h.°C、等価熱容量は $0.653 \sim 0.704 \times 10^{-3}$ kcal/m³・°Cである。

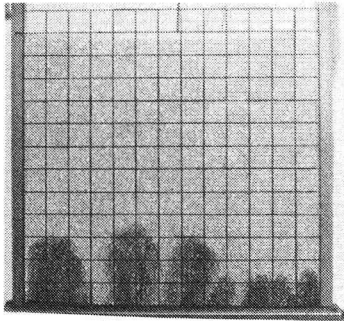
表-1 実験条件と物性値

		Exp.	初期温度 Ti °C	境界温度 To °C	粒 径 (mm)	空 隙 率 (%)	初期温度における 透水係数 (m/s)	等価熱伝導率 (kcal/m・h・°C)	等価熱容量 (kcal/m ³ ・°C)
均質多孔媒体	全体熱源	1	14.0	44.4	3.81	41.4	1.01×10^{-2}	0.690	($\times 10^{-3}$) 0.704
		3	12.5	42.3	0.11	31.6	8.17×10^{-6}	0.736	0.658
		5	12.5	43.8	1.27	36.1	5.89×10^{-3}	0.699	0.653
	部分熱源	2	14.0	45.4	3.81	41.4	1.01×10^{-2}	0.690	0.704
		4	10.9	40.4	1.27	36.1	5.89×10^{-3}	0.699	0.653
二重多孔隙媒体	全体熱源	6	13.0	35.0	多孔ブロック寸法 (mm) 50×50×11	多孔ブロックの値 43.1	多孔ブロックの値 8.17×10^{-4}	多孔ブロックの値 0.804	多孔ブロックの値 0.697

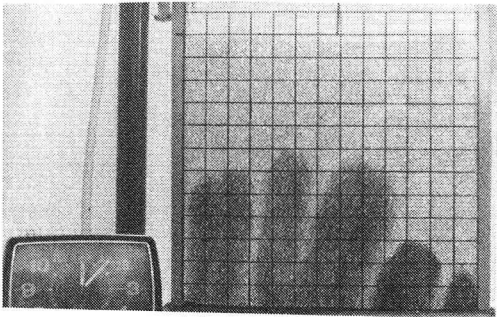
実験手順は、初めに多孔媒体を充てんした後、少しづつ気泡の混入しないように下部から水を満たし、付属のヘッドタンクで透水係数を測定する。ついで、下部熱源を設定し、光源調節をした後に熱源に温水を循環させて加熱する。予めサーミスターをそう入してあるので温度を計測しつつビデオカメラと別のカメラの2台で対流の経時変化を撮影する。多孔媒体の伝熱物性は別に測定しておく。

3. 実験結果とその性質

実験結果の中でトレーサーの対流による経時変化を写真1～6に示す。写真-1, 2は一樣均質多孔媒体における実験開始後3分と7分におけるthermal plumeの形成、成長過程であり、比較的安定した発生が見られ、従来いわれているように規則的配列になって観測される。この多孔媒体における境界温度が違う場合についての他の実験結果も同様の傾向をとるが、多孔媒体の粒径が小さいと発生時間や規模が小さく、ある程度以下の粒径では数十時間経過してもthermal plumeは発生せず、伝導による熱輸送が支配的になる。写真2, 3は多孔媒体下端の境界熱源を中央部にのみ与えた場合のthermal plumeであり、発生は熱源近傍でキノコ状に見られ、時間と共に成長して上方に拡大して行く。しかし、時間と共に両側に下向流が発生し多孔媒体の全体でゆっくりとした循環流が生じるようになる。この傾向は部分熱源の場合も共通した性質であるが、thermal plumeそのものが不安定であり、形状は必ずしも同じではない。さらに、写真5, 6は空隙系が局所的異方性をもつ場合におけるものであり、透水性の大きい格子間隙部分に集中的に自然対流が発生し、成長と共に空隙系をおおうようになることが判る。

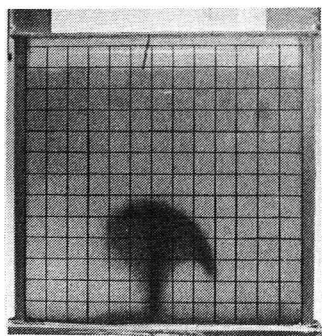


(a) 3.0 分経過

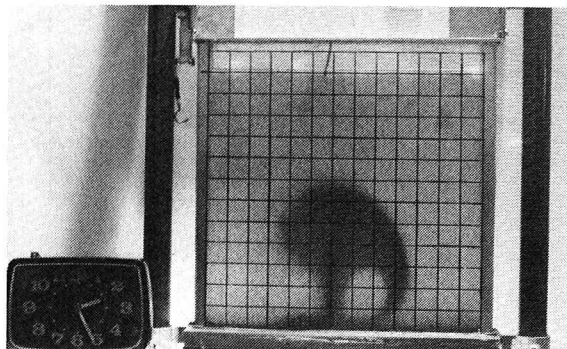


(b) 7.0 分経過

写真-1 均質多孔媒体の一樣熱源の自然対流 (E x p - 1)

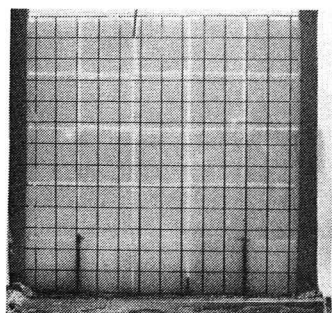


(a) 1時間27分経過

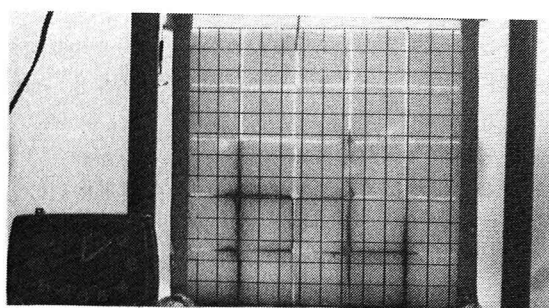


(b) 2時間25分経過

写真-2 均質多孔媒体の局部熱源の自然対流 (Exp-4)



(a) 4.0 分経過



(b) 8分45秒経過

写真-3 二重空隙系多孔体の自然対流 (下部熱源) (Exp-6)

つぎに、これらの実験結果によって得られる水理特性を調べるためにいくつか無次元量間の関係を調べることにする。図-2はExp-1の条件で得られた複数のサーマルプリュームの上昇高さの経時変化であり、時間の経過に伴い一様に上昇している。今の実験では5個のプリュームが観察されている。図-3, 4はそれぞれExp-2, 4に対するマッシュルーム(あるいはハート形状)形状の局部熱源による単一プリュームの最大幅 b と高さ h の経時変化を示している。幅 b の成長より高さ h のそれが時間と共に大きくなることが判る。

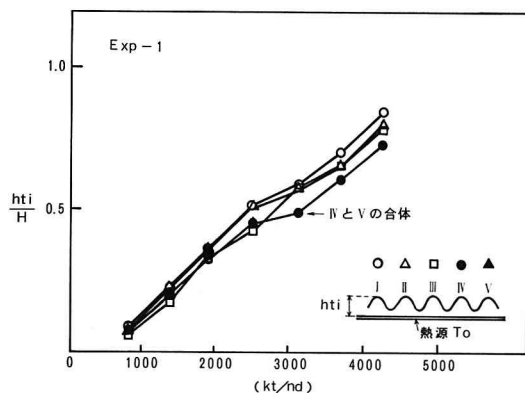


図-2 $h_i/H \sim kt/nd$ の関係

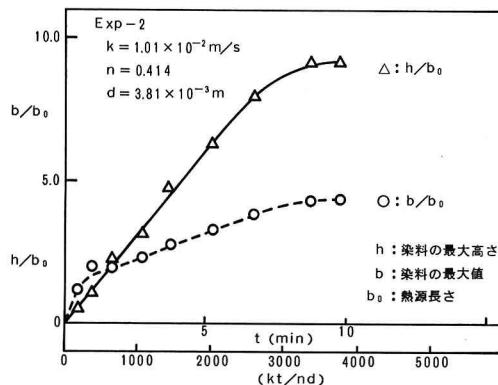


図-3 Exp-2 の $b/b_0, h/b_0 \sim kt/nd$ の関係

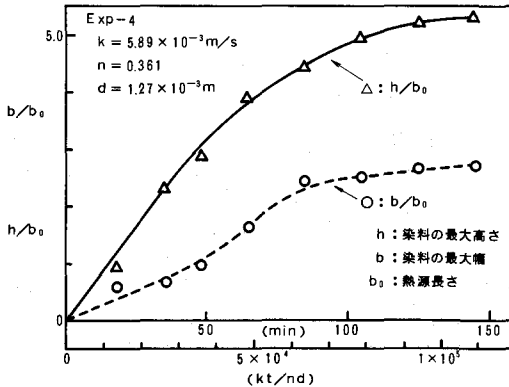


図-4 Exp-4の $b/b_0, h/b_0 \sim kt/nd$ の関係

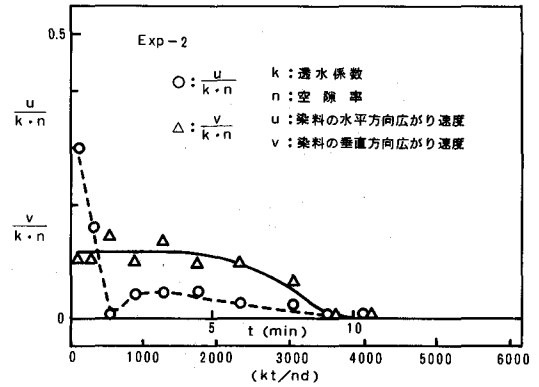


図-5 Exp-2の $u/kn, v/kn \sim kt/nd$ の関係

図-5はExp-2の水平及び鉛直染料拡がり平均速度の経時変化であって、水平拡がり速度は初期に大きいのが急激に減少し、その後は鉛直流速が大きくなり、やがて減衰する。

4. 自然対流と伝熱の数値シミュレーション解析

一様多孔媒体における比較的単純な条件下における場合を除いて複雑な境界条件や異方性のある多孔媒体中の自然対流・伝熱は解析的に解くことが難しいため、数値解析によって解析せざるを得ないことになる^{3),4)}。ここでは実験で行なったような条件におけるものを含めて、いくつか基本的な自然対流について数値シミュレーションを試みて実験結果と対比しながら自然対流・伝熱の性質及び数値解析の妥当性を検討することにする。

自然対流と伝熱の解析における支配方程式は、

$$\text{div } \mathbf{V} = 0, \quad (1) \quad \mathbf{V} = -k/\mu (\text{grad } p + \rho \mathbf{g}), \quad (2)$$

$$(\rho c)^* \partial T / \partial t = k^* \text{div} (\text{grad } T) - (\rho c)_f \mathbf{V} \text{grad } T, \quad (3) \quad \rho_i = \rho [1 - \beta (T - T_i)], \quad (4)$$

である。ここに、 $\mathbf{V}$: 流速ベクトル、 k : 浸透係数、 μ : 流体の粘性係数、 p : 圧力、 ρ : 流体密度、 $\mathbf{g}$: 重力加速度、 $(\rho c)^*$: 多孔体・流体の等価熱容量、 T : 温度、 k^* : 等価熱伝導率、 $(\rho c)_f$: 流体の熱容量、 β : 流体の体積膨張率、 i : ある基準状態の値を示す。

解析に当たって式(1)～(4)を図-7, 9のような対象領域で解いて流速、温度の分布の時間推移を知ろうとするものである。

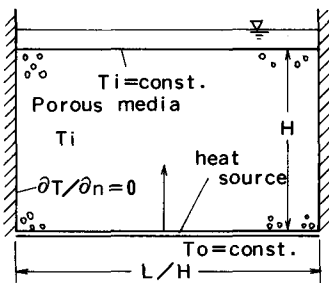


図-6 解析条件と記号の説明

解析の方法は変化FLIC法による。この解析法は、基本的には差分解析であるが、移流の取扱はラグランジュの見方で進め、要素セル内ではオイラー的計算を進める。式(1)～(4)に注目すると、初め飽和多孔媒体中の流体は静止の状態にあり、境界熱源で温度が与えられると、式(3)の移流項を無視した伝導のみが生じ、やがて熱源近傍が伝導によって暖められ、式(4)の密度変化となって表われる。この流体密度変化が式(2)によって流れを生じせしめ、その流れは式(1)を満足しなければならないから、流速場が形成されこの流速分布が計算できることになる。次の時点からはこの流速場に従って式(3)が移流項を含めて計算され、式(4),(2),(1)によって解析が進められることになり、時間経過に

伴う温度分布と流速分布が順次求まるわけである。
 つぎに、この現象を支配する無次元量として

$$Gr = \beta k H (T_o - T_i) / \nu \quad , \quad Pr = (\rho c)^\ast \nu / k^\ast \quad Ra = Gr \cdot Pr \quad , \quad (5)$$

を定義しておく。ここに、 Gr ：グラスホフ数、 Pr ：プラントル数、 Ra ：レイリー数、 k ：浸透係数とする。

解析結果による多孔媒体内の自然対流ベクトル分布及び温度分布に注目したものが図-7～10である。図-7，8はExp-2の条件におけるものであり、図-9～10はExp-6の熱源近傍の部分モデルの解析結果である。図-7(a),(b)は対流ベクトルの1分，5分後の状況であり、実験で観察されたようにマッシュルーム状に自然体流が成長し、対流場全体でも非常に弱い対流を形成していることが判る。また、時間と共に対流速度そのものも大きくなる。本論には示していないが、解析では十分時間が経過すると場全体の対流系へ成長する。しかし、図-8(a),(b)に示した温度分布は熱伝導と熱拡散の効果が加わって比較的安定した分布をとっている。

つぎに、図-9(a),(b)は二重空隙系多孔体の間隙と多孔ブロックの局部対流の解析結果であり、初期にきれつ帯内で対流が発生し、しだいに成長する。一方、多孔ブロック内でも非常に弱い対流が存在する。この場合の温度分布が図-10(a),(b)に示されているが、きれつ内対流の孤立性のためきれつ内と多孔ブロック内で別々に分布を形成する傾向がある。

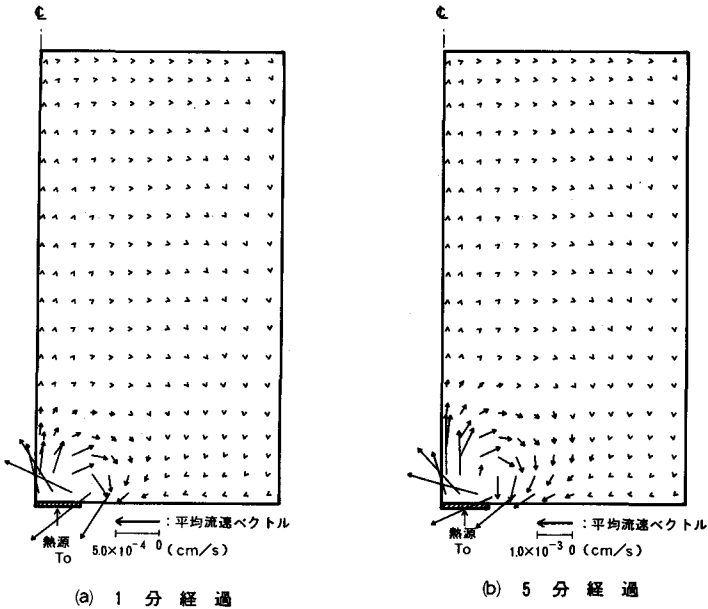


図-7 Exp-2の対流速ベクトル

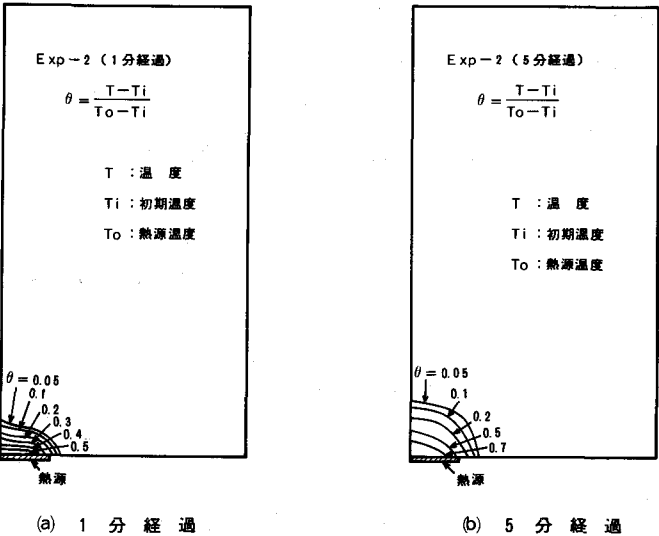


図-8 Exp-2の無次元温度分布

5. むすび

一様物質多孔媒体と二重空隙多孔媒体における自然対流・伝熱について鉛直2次元多孔媒体の光効果によって実験を行ない対流発生、成長及び伝熱特性を明らかにした。それによると、全体熱源の場合には複数のサーマルプルームが一様に上昇し、局所熱源の場合には単一のサーマルプルームが上昇する。また、2重空隙多孔媒体の場合には間隙を中心に対流が成長し、水平間隙にも対流が侵入することが判った。

ついで、自然対流と伝熱の数値シミュレーションを試み、実験結果と対比しながらそれらの性質を調べたが、それらによると、自然対流の発生、成長について解析結果が実験のそれをうまく説明すること、さらに、空隙系に局所異方性がある場合には非常に不安定であるために対流の発生は必ずしも実験と同じとはいえず局所的な対流の成長は不規則となることが判った。

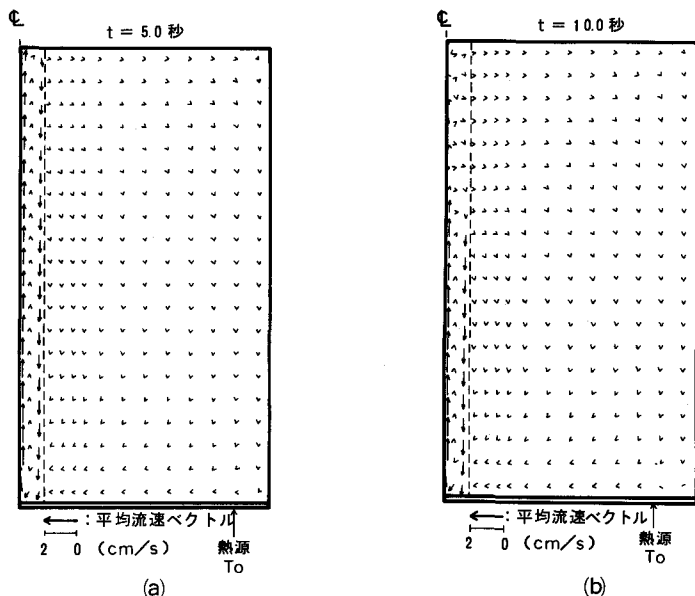


図-9 Exp-6に対応する流速ベクトル

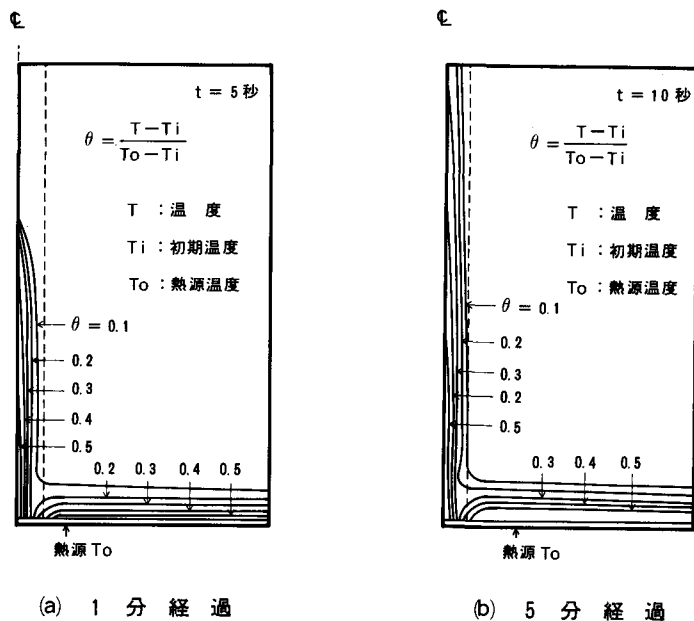


図-10, 図-9に対応する無次元温度

参考文献

- 1) M. Combarous et al: Hydro-thermal convection in saturated porous media, Advances. Hy. Dy. V. T. chow, 1979
- 2) R. A. Wooding: An experiment on free thermal convection of water in saturated permeable material, J. Fluid Mech. vol. 3, 1958
- 3) 湯原浩三他: 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: 地下空洞の伝熱に関する研究: 土木学会論文集, 383/II-4, 1985