自然水理系の流体・熱移動統合モデリングの試み その1. 流体・熱移動の新しい定式化と実験的検討*

登坂博行**・伊藤 彰***・田中将希****・岩井 卓*****

Integrated Numerical Modeling of Surface-Subsurface-Coupled, 2-Phase Fluid/Heat Flow in Limnological System No.1 New Type of Modeling and Experimental Study

Hiroyuki TOSAKA**, Akira ITOH***, Masaki TANAKA**** and Taku IWAI*****

Abstract

This paper describes the comprehensive modeling method of fluid and heat flows in the hydrological system. Based upon the concept that the hydrological system is composed of the air-water 2-phase fluids, and the rock phase, various natural processes are modeled including surface/subsurface 2-phase mass transfer, heat exchanges between fluid phases, between fluid and solid phases, and sensible/latent heat exchanges on the ground surface. A field-oriented numerical simulator is developed, in which a set of governing equations is solved for different variables on the surface and in subsurface regions, respectively. Results of an experimental study are presented, in which transient formulation of heat exchange between fluid/solid phases is examined through matching of the observation and calculated performances.

Key Words: hydrological system, fluid and heat flows, surface/subsurface flows, fluid/solid heat exchange

* 一部の内容は、平成9年度、平成10年度日本応用地質学会研究発表会(札幌、名古屋)にて発表。

** 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻

Department of Geosystem Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo

*** 間組 Hazama Corporation

**** 大林組 Obayashi Corporation

***** 出光エンジニアリング Idemitsu Engineering Co., Ltd. (現在 東京大学大学院博士課程)

要 旨

著者らは、自然水理系における流体流動と熱移動現象を統合的に取り扱うモデル化手法の開発を試みた。本論では、水理系を2成分2相流体と固相岩石の作る系として一般化し、地表および地下における流体流動、地下における流体と岩石の熱交換、地表・地下における流体同士の熱交換、太陽輻射の影響、顕熱・潜熱移動を考慮したモデル化を行っている。特に、流体と岩石の熱交換に関しては、非定常熱伝導の理論解を利用することで、割れ目系媒体と多孔質媒体の双方への適用を図っている。以上の現象を含む系の支配方程式を、地表と地下では異なる未知量の組み合わせで解きながら実用的スケールで水理現象を追跡できるシミュレーションプログラムの開発を行った。また、岩石・流体熱交換の定式化の妥当性を検討するため、割れ目系媒体を模した実験室実験を行い、測定結果と計算結果の良好一致を見出した。

キーワード：自然水理系、流体・熱移動、地表流・地下水流、熱交換

1. はじめに

図1は、われわれの生活圏を乗せた地殻の断面模式図であり、地表や地下に起こる水文・水理現象、および人間活動を網羅的に図示したつもりである。この図に表されている全体系をここでは自然水理系と呼ぶことにする。この系では、地下の岩石圏はほぼ静止しており、その上や中を水や空

気などの流体が動き様々な現象が生じている。特に、人間活動の拡大により自然界に起こる流れも複雑となり、生活・産業の廃棄物などによる環境汚染問題や、大規模な人工施設による周辺水理環境影響評価、長期の環境変化予測なども要求されるようになってきている。著者らは、図1のような場において、その地質・物性を的確に反映し自然水理現象に追従できる数値シミュレーション技

図1 自然水理系における流体と熱の移動の概念図

Fig. 1 A conceptual figure of fluid/heat movement in natural hydrological system

術の研究を行っており、既に地表流+地下3相流(空気+水+他の物質)の系での3次元非定常解析の手法に関し報告している(登坂、1996a、1996b、山石、1998)。既報のものは等温状態を仮定したもので、一般的な水理解析ではそれで十分適用性があると考えられるが、系内の熱的挙動を捉えることが必要となる場合も多い。例えば、図1に示してあるように、熱源を地下に持つ地熱・温泉地域での地下水系の流動は、割れ目系媒体を通る熱水を扱わねばならないし、領域内の温度差による対流なども無視できないことになる。また、ダムなどの人工水理施設の建設により放流量や放流水温が自然河川の状態から変化する結果、周辺水理系、特に下流側水利用(表流水や地下水)、がどのような影響を受けるかを的確に評価することが必要な場合もある。更には、揮発性有機溶剤などによる地下水汚染を考える上でも地表、地下浅部の温度条件を無視するわけにはいかない。

従来から、地下水解析や貯留層解析の分野では熱・流体の移動を扱ったものは多数あり、特に地熱貯留層の解析では蒸気・熱水系のモデルがごく

一般的に使われている。ここで著者らが報告する手法は、蒸気が問題となるような高温状態を扱うものではなく、熱水として扱える範囲の温度条件での自然水理の挙動をモデル化したものである。このモデルでは、陸水系の流動(河川などの地表流れと地下水流れ)を空気・水2相流れとして結合し、流体が上記の流動様式の枠組みの中で動きながら、大気圏、岩石圏との非定常熱交換、流体相互のミキシングを起こす様子を表現している。

以下に、定式化した流体・熱移動モデルの詳細を記述すると共に、一部、実験で検討した結果を示す。尚、実際のフィールドシミュレーションに適用し、観測値とのマッチングにより妥当性の検証を行った結果に関しては、別報の予定である。

2. 陸水系の流体・熱収支の表現

従来の地下水解析(飽和不飽和解析など)では水のみの流れが取り扱われてきたわけであるが、自然水理系には空気などの流体もありそれを含めることが望ましい(登坂ら、1996a)。なるべく自然

図2 地表・地下の流体と熱の移動の詳細模式図

Fig. 2 An sectional view of fluid/heat processes on and under ground surface

に表現するためには、陸域は、流体としての空気と水、および固体としての岩石により構成される系として一般化することが必要である。その上で、相互のインターアクションを考え、重要なものに関し物理・数学的定式化をすべきであろう。ここでは、以上の立場に立ち、地表と地下で起こる流体・熱移動現象のモデル化を考える。

2.1 流体・熱移動現象モデル化の基本的仮定

図1を拡大し、より詳細にしたものが図2であり、自然水理系での流体・熱の移動を模式的に描いてある。ここでは、図2のイメージを物理モデル化するため、以下のような基本的な仮定をおくことにする。

- (1) 自然水理系は2成分2相の流体(空気と水)と土壌・岩石の固相により構成される系である。ただし、水が氷・雪、或いは蒸気などに相変化することまでは考慮しない。
- (2) 地表面より上の空間では大気層が存在し、その圧力条件を地表・地下水流れに反映する。気象解析ではないので大気圏の空気の流れを解くことはしない。
- (3) 地表面では外系(大気圏)からの降水とそれに伴う熱の入力、および太陽輻射、水面・地表面で顕熱、潜熱が移動する。
- (4) 降水の一部は地表面を流動し河川などを形成すると共に、地下浸透して地下水系を構成する。地下水位より上の地下浅部では空気と水により構成される2相帯(不飽和帯)が存在し、そこでの流動は2相ダルシー則に従うものとする。地表水の流動は開水路流れの運動方程式の拡散波近似およびManning型摩擦則により表現されるものとする。
- (5) 地表では大気温度と水の温度は異なる。水温は、地表水と地下水のミキシング、降水温度、太陽の輻射、水面からの蒸発、大気との熱伝達、地下岩石との熱伝達により形成されるものとする。
- (6) 地下では流体と岩石が熱交換を行うが、即座には熱平衡は達成されず過渡過程を伴うものとする。即ち、流体温度と岩石温度は異なり、両者は接触を通じてある程度長い時間の後同一温度になって行く。

2.2 流体移動表現

ここでは、まず質量としての流体の流動の表現形式を記述する。熱の移動は次節に述べる。

2.2.1 地下2相ダルシー型流体流動

土壌・岩石中の水、空気の流動は次のダルシー則により記述される。

$$m_p = -\rho_p A \frac{K k_w}{\mu_p} \nabla \Psi_p \quad (1)$$

ここで、添え字 p は相(水相 w か気相 a のどちらか)を表し、 m 、 ρ 、 A 、 K 、 k 、 μ 、 Ψ はそれぞれ質量流量 [kg/s]、密度 [kg/m^3]、流路面積 [m^2]、絶対浸透率 [m^2]、相対浸透率 [-]、粘性係数 [$Pa \cdot s$]、相ポテンシャル [Pa]、を表す。さらに、次の関係式が与えられる。

$$\begin{aligned} \Psi_w &= P_w - \rho_w g Z, \\ \Psi_a &= P_a - \rho_a g Z, \\ P_w &= P_a - P_{caw}, \\ S_w + S_a &= 1 \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 P_w 、 P_a は各相の圧力、 g は重力加速度、 Z は深度(下向きを正)、 P_{caw} は空気-水系の毛管圧力、 S_w 、 S_a は各相の飽和率でその和が常に1と定義されている。また、流体密度、粘性係数は温度、圧力の関数、相対浸透率は飽和率の関数、相ポテンシャルは圧力、温度、飽和率の関数である。

2.2.2 河川・地表流動

河川・地表流動の近似モデルとして最も一般的なものは運動波近似モデルであり、これは開水路の勾配を駆動力として考慮した単一斜面の流れの近似モデルである。

$$|v| = \frac{1}{n} R^{2/3} |a|^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 v [m/s] は平均流速、 n はマンニングの粗度係数 [$m^{-1/3} \cdot s$]、 R 径深 [m]、 a は流路勾配 [-] である。径深は水流の断面積と壁面接触長さとの比で、幅 W の矩形水路を水深 h の水流が流れている場合には

$$R = \frac{Wh}{W+2h} \quad (4)$$

となる。しかし、登坂ら(1996a)が指摘している

ように、運動波近似では、河道あるいは複数斜面を流下する連続的な水の流れは表現できない。これに対し、拡散波近似では地表勾配と水深勾配を考慮するため、よりスムーズな流れが表現できる。

$$|v| = \frac{1}{n} R^{2/3} \left| a - \frac{\partial h}{\partial x} \right|^{1/2} \quad (5)$$

上式はこの形でも解けるが若干扱いにくい形をしている。著者らは、地表勾配(流路勾配)が水深勾配に比し、一般的に卓越的であることを考慮して上式の近似式を2相流れの枠組みで解く手法を提案し適用している。詳細は登坂ら(1996a)を参照願いたい。最終的に、2相流れと同形式に変換した時、(1)式の浸透率、相対浸透率、断面積、毛管圧力に相当するものは、

$$K = \frac{\mu_w}{\rho_w g n} \left| a \right|^{1/2} \left(\frac{WH}{2H+W} \right)^{2/3} \quad (6)$$

$$k_r = S_w^{5/3} \left(\frac{2H+W}{2S_w H+W} \right)^{2/3} \quad (7)$$

$$A = WH \quad (8)$$

$$P_{cgs} = \rho_w g H (0.5 - S_w) \quad (9)$$

となる。ここで、 W 、 H は地上に配置した差分格子の幅と高さである。

以上より、地下の2相流れと地表の流れを同時に取り扱うことができる。

2.2.3 地表・地下の流体流動方程式

上式と質量保存則から以下の支配方程式が導かれる。

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \left(\rho_w \frac{K k_{rw}}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) - \rho_w q_{ws} &= \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi S_w) \\ \nabla \cdot \left(\rho_a \frac{K k_{ra}}{\mu_a} \nabla \Psi_a \right) - \rho_a q_{as} &= \frac{\partial}{\partial t} (\rho_a \phi S_a) \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、添え字 S は標準状態(地上状態)の温度、圧力条件を表し、 q 、 ϕ はそれぞれ流体の生産・圧入量(地表での降雨・蒸発散を含む)、間隙率を表す。(10)式を解くためには、更に(2)の補助的関係式が必要となる。強圧縮性流体を含む2相流れを数値的に解く方法としては有限差分法(或いは有限体積法)が適用され、技術的には既に確立

されている(例えば、Aziz and Settari, 1983)ので詳細は省略する。

2.3 地下における流体と岩石の熱交換モデル

2.3.1 流体と岩石の熱交換

地下での岩石と流体の熱交換の様子を図3を使いながら考えてみる。図3(a)は割れ目系媒体、図3(b)は一般の多孔質媒体である。図3(a)の場合、流体の流路は割れ目に限られ、流体と岩石は割れ目面を通して熱交換を行い、両者が同一の温度に達するためにはある程度時間を要すると考えられる。また、図3(b)のような一般多孔質媒体では、流体は岩石粒子と近接して存在し、両者の温度はかなり速やかに同一化するであろう。地下における流体と岩石の温度は一般に同一のものとして定式化されることが多いが、以上の図3(a)、(b)の両方を表現するためには、流体温度と固相温度を独立で異なると考えた方が一般性がある。

そこで、このような温度非平衡状態から平衡状態までを表現するため、次の様な拡散方程式の理論解を援用して定式化する(平岡ら、1992)。今、フィールドでの数値解析のために使用されるようなある程度大きな格子を考える。ある時間ステップの計算開始時点($t=0$ とする)で、格子内にある温度 T_0 の岩石と温度 T_f の流体が完全接触したと仮定し、接触以降の岩石内の温度変化は次のような非定常熱伝導式により表現されるものとする。

$$\begin{aligned} \lambda_r \frac{\partial^2 T_r}{\partial x^2} &= \rho_r C_r \frac{\partial T_r}{\partial t} \quad (0 < x < \infty, 0 < t < \infty) \\ T_r(0, t) &= T_f \quad (t > 0) \\ T_r(\infty, t) &= T_0 \quad (t > 0) \\ T_r(x, 0) &= T_0 \quad (x > 0) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 $T_r(x, t)$ 、 λ_r 、 ρ_r 、 C_r は位置 x 、時間 t における固相温度[K]、岩石の熱伝導率 [$J \cdot K^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$]、固相密度 [kg/m^3]、固相比熱 [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$] である。図3(c)には、岩石中の温度変化の概念図を示した。この時、任意の時間 t における、岩石中の温度分布は次のようになる。

$$\frac{T_r - T_0}{T_f - T_0} = 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{2} \sqrt{\frac{\rho_r C_r}{\lambda_r t}} \right) \quad (12)$$

ここで、

図3 岩石と流体の熱交換の概念図

Fig. 3 A conceptual figure of rock-fluid heat exchange

(a) fractured rock, (b) porous media, (c) transient heat conduction, and (d) difference of contact area depending on the fracture directions

$$\text{erf}(X) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^X e^{-\xi^2} d\xi \quad (13)$$

である。接触面 $x=0$ における流体から岩石への熱流束 $q_{f \rightarrow r} [J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ は次式となる。

$$q_{f \rightarrow r} = -\lambda_r \frac{\partial T_r}{\partial x} \Big|_{x=0} = \sqrt{\frac{\lambda_r \rho_r C_r}{\pi t}} (T_f - T_{r0}) \quad (14)$$

ここで、 $t=0$, Δt (Δt は計算上の時間刻み) の平均熱流束は次のように書くことができる。

$$f_{f \rightarrow r} = \frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} q_{f \rightarrow r} dt = 2\sqrt{\frac{\lambda_r \rho_r C_r}{\pi \Delta t}} (T_f - T_{r0}) \quad (15)$$

尚、数値計算上、右辺に出てくる温度は、一つ前の時間ステップでの値、或いは計算の安定性などの理由で反復段階での最新の値を用いることになる。また、実際には、上式に接触面積が乗じられ移動熱量が計算される。割れ目系岩盤の場合には、格子内の形を仮定すれば接触面積が計算できる。例えば、図3(d)のように格子(大きさ Δx , Δy , Δz) の断面に存在する場合には接触面積(割れ目両面)は $2\Delta x \Delta z$ 、 $x-y$ 面にあれば $2\Delta x \Delta y$ に比例するような形で見積もるわけである。これは非常に単純化された話で、フィールドでの複雑な割れ目系の場合にはそう簡単には行かないが、接触面積に相当するようなものを場に応じて与えることになる。

多孔質媒体の場合には、図3(b)の様に流体と岩石が密に接触する状態が考えられ、式(11)の境界条件は不適当となる。しかし、解である(15)式に大きな接触面積(多孔質媒体中の全表面積に相当するような大きな値)を与えることで固相と流体相の瞬時温度平衡や若干の平衡の遅れを表現でき、実用的には多孔質媒体中の熱交換表現にも対応することができる。

2.3.2 地下熱移動の支配方程式

以上の熱交換を組み込んだ地下流体(空気+水)および岩石の熱収支方程式は以下のように書ける。

$$\begin{aligned} \text{流体: } & \nabla \cdot \left(\rho_w \frac{K k_{rw} H_w}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) \\ & + \nabla \cdot \left(\rho_a \frac{K k_{ra} H_a}{\mu_a} \nabla \Psi_a \right) - \rho_w s q_{ws} H_w \\ & - \rho_a s q_{as} H_a + \nabla \cdot (\lambda_f \nabla T_f) - c f_{f \rightarrow r} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi S_w U_w + \rho_a \phi S_a U_a) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \text{岩石: } & \nabla \cdot (\lambda_r \nabla T_r) + c f_{f \rightarrow r} \\ & = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_r (1 - \phi) U_r) \end{aligned} \quad (17)$$

ここで、 H_p , U_p , λ_p , λ_r はそれぞれ、エンタルピー $[J \cdot kg^{-1}]$ 、内部エネルギー $[J \cdot kg^{-1}]$ 、流体の熱伝導率 $[J \cdot K^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$ 、岩石の熱伝導率 $[J \cdot K^{-1} \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}]$ 、 $c f_{f \rightarrow r}$ は流体と岩石熱交換量 (c は微分方程式

に表記する時の単位あわせの係数)である。流体の熱収支式の左辺第1項は水の移流による熱の収支、第2項は空気の移流による熱収支、第3項および第4項は流体の生産・圧入による熱の出入り、第5項は流体自身が熱伝導により伝える熱の収支、第6項は岩石との熱交換量である。右辺は格子内に存在する流体の保持する熱量の時間変化率を表している。岩石の熱収支式の左辺第1項は岩石自身が伝導により運ぶ熱量の収支、第2項は流体との熱交換量、右辺は固相のもつ熱量の時間変化率である。

2.4 地表における熱移動の取り扱い

図4のように、地表水の温度は複数のプロセスのミキシングの結果出来上がる(西沢、1966)。気象要素としては正味放射量、顕熱交換量、潜熱交換量があり、これに地下水、岩盤の温度、表流水の温度、気温、降雨温度が加わる。このような熱の交換系を次のように考える。

2.4.1 水面・地表面熱収支

一般に、水面・地表面熱収支は、図4に示したように、日射により地表面や地表水が受け取る単位面積当たりの熱量 $[J \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ は、正味放射量 R_N 、顕熱交換量 H (地表・水面から大気が正)、潜熱交換量 LE (水面から大気層への蒸発)に分けて考えると次式となる。

$$Q = R_N - H - LE \quad (18)$$

この中で、正味放射量および潜熱移動量は算定しにくい量で、かなり複雑な式がいくつも提案されているものの、気象条件は詳しくは記録されていないから、フィールドスケールでは式の妥当性や誤差等に関して論じることが難しい。ここでは数式化は考えず、必要に応じて、気象データなどから平均的な値を入力することとする。また、顕熱移動は、地表付近の乱流状態の大気(風)により運ばれる熱量で、乱流拡散係数や大気温度勾配を使った定式化(塚本ら、1992)が考えられている。ここでは、そのようなモデルをより大まかに平均化したもの、即ち、観測されている平均的な気温と地表面(地表水)との温度差に比例した熱交換が起こる、とする以下の第一近似的モデルを採用した。これは熱伝達係数の中に乱流拡散効果な

図4 地表付近の流体の熱収支

Fig. 4 A schematic explanation of heat balance for water on ground surface

どが一括して丸め込まれている、と考えたものであり、より物理的・現象論的定式化に関しては、ここでは議論をしない。

$$H = \alpha (T_{w0} - T_{g0}) \quad (19)$$

ここで、 α 、 T_{w0} 、 T_{g0} はそれぞれ大気と水面との熱伝達係数 $[J \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}]$ 、地表格子の水温、地表格子の気温(大気温)である。なお、降雨による熱の入力もあるが、それは熱の生産・圧入項にて取り扱う。

2.4.2 地表と地下の流体相・固相間熱移動量

既に述べたように、地下では流体と岩石が非定常熱伝導に基づく熱交換を行うものとしたが、これは、格子分割された一つの格子内に流体と岩石が共存する場合のものである。地表面では事情が異なる。即ち、地表格子には岩石は存在しないため、地表格子にある水、空気はその下の格子の流体相と固相(土壌・岩石)との間で熱交換を行うことになる。流体相同士の熱移動は(16)式の第5項に含められているが、異なる格子間での流体相と固相との熱交換は入っていない。この熱交換は、地表水と半無限領域と考えられる地下岩石との完全接触に伴う熱伝導と考え、熱流束 G を以下の式より算定する。

$$G = 2\sqrt{\frac{\lambda_r \rho_r C_r}{\pi \Delta t}} (T_{f0} - T_n) \quad (20)$$

ここで、 T_{f0} は地表格子の水温、 T_n はその下の格子の固相温度である。地表格子で河川のような水

面を有する場所以外は、気温と水温がほぼ同じであり、 T_0 として常に水温を使う。

2.4.3 地表熱移動の支配方程式

$$\begin{aligned} & \nabla \cdot \left(\rho_w \frac{K k_r H_w}{\mu_w} \nabla \Psi_w \right) \\ & + \nabla \cdot (\lambda_w \nabla T_w) - \rho_w q_{ws} H_w + c f_w \\ & = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \phi S_w U_w) \\ & \nabla \cdot \left(\rho_a \frac{K k_r H_a}{\mu_a} \nabla \Psi_a \right) \\ & + \nabla \cdot (\lambda_a \nabla T_a) - \rho_a q_{as} H_a + c f_a \\ & = \frac{\partial}{\partial t} (\rho_a \phi S_a U_a) \end{aligned} \quad (21)$$

ここで、 c は微分方程式に埋め込んで表現する時必要となる単位調節のための係数である。左辺第一項は地表および地下水の流れに乗った移流による熱の収支、第二項は流体自身の伝導熱量(一般には非常に小さい)の収支、第三項は生産・圧入に伴う熱の収支で降雨による熱の入力も含めたもの、第四項は、図4にあるように地表付近に特有の熱の収支を表し次式となる。

$$f_w = R_N - H - LE - G, \quad f_a = H + LE \quad (22)$$

また、右辺は各流体の内部エネルギーの時間変化率を表している。

2.5 数値解法の概要

前節までで、地下・地表につき質量保存関係から2式、熱収支から2式、計4式が得られた。これらの式を、地表では空気相圧力、水飽和率、空気相温度(大気温度)、水相温度、即ち(P_a , S_w , T_w , T_a)に関して解き、地下では空気相圧力、水飽和率、流体温度、岩石温度(P_a , S_w , T_f , T_r)を未知数として解く。既に述べたように、地表も地下も流動方程式の形は基本的部分は同じであり、すべてが非線形の方方程式である。図5には、実際の解析における地表付近の格子システムと未知量を示してあり、第1層は定圧大気層、第2層は地表流・河川流・湖沼などを表現する格子(河床が掘り込まれた河川では第3層以下にとる場合もある)、第3層以下は地下岩石圏に相当する。図6には、解析の流れをまとめてフローチャートとして示した。現実的なフィールド規模のシミュレーションに耐えるために以下のような手法を採用している。

- (1) 全ての式は残差形(左辺-右辺)とし、各格子に対する4つの方程式を同時完全陰的に差分展開を行い、ニュートン法により反復的に解

図5 数値解析における格子分割と未知数の様子

Fig. 5 The overall features of numerical treatment

く。

- (2) 行列方程式を安定かつ迅速に解くため前処理付き共役残差法を採用する。
- (3) 差分展開にあたり、地形・地層表現の柔軟性を確保するため、不規則格子を使い、格子間のトランスミッシビリティの補正を行う。
- (4) 降雨記録、気温、河川流入量、流入温度など連続的な入力、揚水など人工的な生産の入力、建設工事など人間による場の改変の入力、などがなるべくスムーズに行えるようにプログラミングされている(山石ら、1998)。

図6 数値解法のフローチャート

Fig. 6 A flow chart of the numerical solution

3. 地下熱移動モデルの実験的検討

前章では、地表・地下2相流体流動および熱移動の支配方程式について述べたが、ここでは、流体・岩石熱交換モデルの現象追従性をチェックするため、割れ目系媒体を想定した模型実験を行った結果を述べる。この実験は単純な条件下のものであり、一般的適用性は議論できないが、少なくとも、ここで採用した熱交換モデルの基本的妥当性を示すものと考えている。

3.1 実験の目的及び方法

割れ目系媒体の模型として、図7に示したように、直径50mm、長さ300mmの円柱型のアクリル樹脂の中心に内径5mmの穴を貫通させたものを用いた。流体入り口からアクリル樹脂が円錐型にくりぬかれており、この部分にも熱水がたまり、入り口側の面全体が熱されるようになっている。温度計測用の熱電対は、円柱型のアクリル樹脂内部に、入り口から70mm、140mm、中心から6mm、15mmの地点に計4つ、円錐型の流体入り口に1つ、流体出口付近に1つ、全部で6つ設置されており、データ取り込み装置によって各部の温度が記録される。定水位水槽には、定水位装置、ヒーター、攪拌装置が取り付けられており、一定の水位を保ち、水温を約50℃に保つことができるようになっている。熱水は、供試体に入る直前にウォーターバス内で再度温度制御される。熱水の流量計測は、供試体出口から流出流体を電子式天秤に導き、熱水の累積重量が記録されるようになっている。また、供試体全体を厚い発泡スチロールで覆い、外部との断熱を行った。

3.2 実験の結果

実験では、供試体を常温に保ち、その内部温度が一様になったことを確認してから、一定流量を保つように約50℃の熱水を流し、実験を開始する。以後、温度分布の時間的・空間的推移を捉えるため、各部温度および熱水流量を10秒間隔で計測する。また、ウォーターバス内の温度も一定時間毎に計測する。流量は一つのケースでは一定とし、8.4~25.7g/minの間で変化させ計5ケース(各ケースの計測時間は180分~350分)を行った。以上の実験

から得られた各計測点の温度変化の様子の一例を図8に示した。この図は、平均流量 11g/min (流速 0.93cm/s)の条件のものであり、温水は入口から出口まで約30秒間にわたりアクリルと熱交換を

行っていることになる。図中、入口水温(ch6)に対し、出口水温(ch5)がまず追従し、ch4、ch3、ch2、ch1の順番で温度上昇が観測され、実験結果は定性的な予想と整合的である。

図7 実験装置の概要

Fig. 7 An illustration of the experimental apparatus

図8 実験装置各観測点水温の計測結果と計算結果の比較

Fig. 8 Comparison of observed and calculated performances of temperature

3.3 数値シミュレーションによる検討

開発したシミュレータのパフォーマンスチェック、特に流体、岩石熱交換モデルの検討のため、以上の実験から得られた結果と数値解析結果の比較を行った。数値解析上は、円柱の一部を切り出した扇形の柱体を、熱水の流路方向に30、供試体の半径方向に10分割した2次元グリッドを用いた(図9)。流れ方向の分割は、測定点と対応するように、注入側から流路方向に150mm程度までを細かくすると共に、各格子の体積は中心からの距離に応じた円筒体積となるように設定した。また、境界条件、初期条件を実験に合わせ、熱伝導率、比熱などは理科年表などから一般的な値を引用して使用した。実際に用いた値を表1に示す。アクリルは浸透率は無いのとし、間隙率は、数値計算上、0にはできないので、非常に小

表1 実験の再現シミュレーションに使用した物性パラメータ

Table 1 Physical properties used in the numerical simulation

流体物性	水	アクリル
密度($kg \cdot m^{-3}$)	1000	1190
熱伝導率($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	0.56	0.21
比熱($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	4200	1470

図9 実験供試体の格子分割

Fig. 9 Discretized model of the experimental apparatus for numerical reproduction

さな値を与えた。

計算では、図8のch6の測定温度記録および流量(11.0g/min)を既知として入力し、他の観測点の温度変化をシミュレータにより計算し、結果を測定値と比較した。図8に測定値と計算値(ch2、ch4、ch5に相当する点のもの)を同時に示している。実験開始から早い時期では観測値と計算値の立ち上がりになぜか差が見られるが、これは実験開始後、流量が徐々に増加し安定するまで20分程度かかるのに対し、計算では安定時の流量を与えているため、計算の方が早めに温度上昇が起こるものと考えられる。全体として、観測値と計算値の描くカーブはよく一致しており、マッチングのために境界条件やパラメータの大きな変更は必要が無かったことから、流路を流れる温水と固相との熱交換に関しては、ほぼ妥当なモデル化がなされているようである。以上から、開発したシミュレータの熱交換モデルは、ここでの模型実験に関する限り測定結果に追従することが示された。

4. まとめ

自然水理系の流体・熱移動モデルの構築を目指し、新たな定式化と実験的検討を行った。その結果は、以下のようにまとめられる。

- (1) 自然水理系を2成分2相流体と固相岩石の作る系として一般化し、地表および地下における流体流動、熱移動を表現した。特に、地下における流体と岩石の熱交換、および地表における熱交換を非定常熱伝導の理論解を利用して定式化した。
- (2) 得られた式を地表では気相圧力、水飽和率、水相温度、気相温度について、地下では気相圧力、水飽和率、流体温度(水相と気相)、固相温度について解き、実用的スケールでのシミュレーションを実行できるプログラムの開発を行った。
- (3) 岩石・流体熱交換の定式化の妥当性を検討するため、割れ目系媒体を模した実験室実験を行い、測定結果と計算結果の良好一致を見出した。

ここで示した定式化は、基本的に自然スケールの現象をより定量的に捉えようとしたものであ

り、その適用性はフィールドでの観測値をどれだけ再現或いは予測できるか、によって判断すべきものであろう。著者らは、既にフィールドデータによる3次元シミュレーションを通じて、観測された地表水温や地下水温の季節変化や日変化が、ここで論じたモデルによりかなり良く追跡可能であることを確かめている。その詳細については別報する予定である。

参考文献

- 塚本良則編(1992)：森林水文学、文永堂出版、54-78p.
登坂博行、小島圭二、三木章生、千野剛司(1996a)：地表流と地下水流を結合した3次元陸水シミュレーション手法の開発、地下水学会誌、第38巻第4号、253-267.
登坂博行、伊藤一誠、蝦原雅之、稲葉薫、伊藤 彰、小島圭二(1996b)：多成分多相型移流拡散モデルによる包括的な地下水汚染解析、地下水学会誌、第38巻第3号、167-180.
西沢利榮(1966)：地表面における顕熱伝達係数、資源研彙報、No.66、9-14.
平岡正勝、田中幹也(1971)：移動現象論、朝倉書店、118-120p.
山石 毅、小林 仁、谷藤吉郎、岡本明夫、登坂博行、小島圭二(1998)：地下石油備蓄基地建設に伴う水文・水理挙動の数値シミュレーション、地下水学会誌、第40巻第2号、167-183.
Aziz K. and Settari A.(1983)：Petroleum Reservoir Simulation, Elsevier Applied Science Publishers, 303-405p.
(受付：1998年9月17日、受理：1999年5月27日)