井戸局所流動を加味し粒子・流体相の熱的相互作用を 考慮した熱・塩分漏出野外実験とシミュレーション*

横山孝男(山形大工)**・東浦將夫(防災科研)***

Field Experiment of Heat and Salt-Propagation Coupled with the Two-Phase Simulation Code with Practical Well Functions*

Takao YOKOYAMA** and Masao HIGASHIURA***

Abstract

For the practical analysis combined with infiltration from surfaces, we have established the simulation code composed of multi-layered and heterogeneous properties system in transient three dimensions with two-phase treatment. Field experiments are accompanied and in accordance with the simulation (Yokoyama et al., 1997a). Further practical consideration, however, should be stressed on well functions, which locally characterize flow and propagation-field around wells. Though well capability could be analyzed in finer grid system, it requires tremendous nodal points. Instead, in this paper sub-division system is laid on the normal-main grid system in order to save the number of nodal points.

According to the two-phase treatment (Yokoyama et al., 1997b), soil properties such as porosity, particle-sizes, etc. are important to forecast the propagation of heat/solute materials. We have dug the additional row of wells in the shallow aquifer and located within several meters with expectation of isotropy. Heat propagation is mainly tested repeatedly then salt-solute propagation is added. Break-through curves not only in depth but also by wells are observed satisfactorily with attenuation and time-lag. Then these experimental date got agreement with this numerical values.

* 日本地下水学会1997年春季講演会講演

** 山形大学工学部機械システム工学科
Dept. of Mechanical Systems Engineering Yamagata University

*** 科学技術庁防災科学技術研究所長岡雪氷防災実験研究所
Nagaoka Institute of Snow and Ice Studies National Research Institute for Earth Science and Disaster Prevention,
Science and Technology Agency

Potentiality of this simulation code is just used in this experiment on injection wells. Influences by observation wells as to flow- and heat-field are resulted in little significance experimentally and numerically. Variations in penetration among layers from wells, however, is analyzed clearly.

Key Words: ATEs, Well flow, Two-phase, Multi-layer, Field experiment

要 旨

地表浸透を伴う場合の実用解析を目ざして多層・異方性系における3次元2相シミュレーションモデルを開発し、野外実験とも満足すべき一致を見た(Yokoyama et al., 1997a)。更なる実用性向上のためには、局所性の強い流れと伝播場を生じさす井戸機能を広域解析の中に付加することと考える。井戸機能はより密な分割により考慮可能であるが、途方もない節点数を必要とする。それに替えて本論文では通常の主グリッド系に井戸近辺の特殊領域を解析するための2次分割系を導入する。

2相取扱い(Yokoyama et al., 1997b)では、空隙率、粒子径などの土質が熱／物質輸送に支配的である。本実験では、層序の均質性のもと浅層地下水層内で数m以内に1列の井戸群を新たに掘削し、主に熱伝播実験を繰返しその他塩分伝播も付け加えた。各井戸の深度毎応答曲線が減衰と時間遅れを伴った満足な形で得られ、井戸機能を取り入れた数値解と一致した。

本シミュレーションコードの機能は一部が使われたにすぎない。観測井は単に存在するだけなのでその影響は実験及び解析の両面からほとんど見られないことが判明した。しかし本シミュレーションにおける潜在機能は今後の井戸解析において一連の重要な知見、例えばどこからどれだけ汚染物質が浸透するのか、或いはまた難透水層下への沈み込みへのキャリアーになり得るか、などの知見を与えるものである。

キーワード：帯水層蓄熱、井戸流水、2相、多層、野外実験

1. 緒言

帯水層蓄熱、ATESの担い手と目されてきた被圧帯水層に関する研究は既に膨大な量と質に達するが、自由地下水層に関しても最近では着実な進展がある。ここでは自由地下水面の変動に応じて流動・熱輸送領域そのものが変動したり、地表面からの不飽和浸透になるため流体・粒子間非定常伝熱が顕著になるなど、実施のし易さはあっても解析が困難である。また蓄熱効率もそれ程期待できない難点があった。最近になってエネルギー危機

が再認識され浅層での蓄熱に関する可能性が再び模索されはじめている。研究面においては難点の不飽和浸透と2相解析について一連の成果が得られてきた。藤縄(1995)はそれらを鉛直2次元の解析に適用して農林省北陸農政局が行った福井県三里浜野外試験を解析している。

著者らは広域3次元の実用シミュレーションを念頭に置き、地表涵養も含めたすべての系を対象に、実験と解析を進めて来た。自由地下水系に関しては不飽和浸透それ自身は簡略化してむしろ2相間、つまり流体相・粒子相間の非平衡伝熱性、

例えば流体相温度波のみが先走りするなどに焦点を当て鉛直 2 次元の室内実験を足がかりに、不飽和浸透はもちろんのこと飽和浸透でも条件によっては非平衡熱伝播が進展することを明らかにした。そのさい粒子内部への非定常熱浸透も考慮し、例えば温度波の進展から自然流速を評価する場合は思わぬ過大評価に繋がることなどを示している (Yokoyama et al., 1997b)。

農林省東北農政局が設置した秋田県八竜町の試験場では、約 500m² の古砂丘畑地からの平均 23℃ で約 1 ヶ月間に渡る計 7700m³ の地表浸透とその後の 4 ヶ月に及ぶ蓄熱期間を通した一連の実験に加えて、3 次元 2 相非定常解析モデルを適用して、不飽和帯から自由地下水面を貫いた系全体を含む数値解析の検証を行った (Yokoyama et al., 1997a)。

地下水の熱・物質輸送に関する基礎研究は市街地の環境汚染にも大きく絡んで来る。そこでは地表浸透に加えて井戸からの汚染や井戸を媒介とした異層間拡散など井戸の存在が影響を及ぼしているものの具体的に井戸を明示的に考慮した解析、特に広域シミュレーションの中に局所解析を含めたもの、は見当らない。本研究では既存の実験場 (Higashiura & Yokoyama 1994) に新たに別系統の井戸群を設け温・冷水による熱伝播中心の実験を行う一方、塩水による濃度伝播実験で補完し、井戸機能を具備する解析を付加した数値解析との比較検討を行い、広域フィールドにあって井戸近傍の局所性に強く依存する伝播問題にも適用可能なシミュレーションコードの開発と検証を行うものである。

2. 理論解析

粒子径が小さい砂層の場合には構わないが、礫層の場合には瞬時に流体と粒子が熱平衡に達しない場合が考えられ、又、物質伝播においても粒子相との脱吸着は大きな因子である。更に地表面からの不飽和浸透や自由地下水面の変動挙動では流体相と粒子相との相互作用が大きなファクターであることは言うまでも無い。

本解析では上記難点を克服するため流体相・粒子相の 2 相モデルをベースとし、飽和帯での(飽和)透水係数に温度依存性、水平・鉛直方向間異

方性、層毎の不均一性を持たせた多層構造を許し、自由地下水面における流れの接続条件は、不飽和帯からの重力排水が地下水面に流入する連続条件、熱輸送接続条件については流体相での熱伝導連続性及び熱移流項の連続性、粒子相については、熱伝導の連続性でスムーズな接続を可能にしている。当面の間、自由地下水面からの蒸発は考えない。有効飽和度 Se が仮にゼロになっても、流体相からの熱流は界面で途絶えるものの粒子相を介しては行なわれる。しかし一旦不飽和浸透を行なった場合には飽和度はゼロには中々戻らず、移流項を含めたフラックスの継続は残り、それらはそのまま考慮する。

飽和帯における水平方向 x 、 y 、鉛直方向 z のダルシー流速 u 、 v 、 w は

$$u = -K_h \frac{\partial h_0}{\partial x}, v = -K_h \frac{\partial h_0}{\partial y},$$

$$w = -K_v \left(\frac{\partial h_0}{\partial z} - 1 + \frac{\rho}{\rho_0} \right) \quad (1)$$

$$h \equiv \frac{p}{g\rho} + z, h_0 \equiv \frac{p}{g\rho_0} + z \quad (2)$$

で与え、 K_h 、 K_v は温度依存水平、垂直方向透水係数、 p はその点に加わる水圧、 h はピエゾ水頭である。 h を標準状態 15℃・1 気圧に換算したものを h_0 とする。次式は便宜上の基準面から計った自由地下水面高さ $\bar{h}$ を使ったいわゆる自由地下帯水層に対する連続の式である。これは、自由地下水面の考慮に用いる。

$$\epsilon \frac{\partial \bar{h}}{\partial t} = \frac{\partial (\bar{h}u)}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{h}v)}{\partial y} + w \quad (3)$$

ここで ϵ は空隙率である。

これに対し基準面以下の層に対しては被圧モデルを適用する。即ち貯留係数を単位厚さに換算したものを S_0 として次式の連続の式を適用する。

$$S_0 \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \quad (4)$$

式(1)が示すように流れ場についてはブシネスク近似を採用しており、浮力効果も考慮している。飽和帯の熱輸送方程式は各相について以下のように与える。

流体相

$$\frac{\partial \theta_f}{\partial t}(c\rho)_f \varepsilon = \varepsilon D \nabla^2 \theta_f - (c\rho)_f \nabla v \cdot \nabla \theta_f - ns\alpha(\theta_f - \theta_p) \quad (5)$$

粒子相

$$\frac{\partial \theta_p}{\partial t}(c\rho)_p(1-\varepsilon) = (1-\varepsilon)\lambda_p r_p \nabla^2 \theta_p - ns\alpha(\theta_p - \theta_f) \quad (6)$$

ここで r_p は粒子相母材熱伝導率に対する修正係数で、 λ_p を粒子組成材の熱伝導率とすれば粒子接触は僅かなものに限られるので一般的には $r_p \ll 1$ と考えられる。添字 f、p は流体相、粒子相を表し、 θ 、 $c\rho$ は温度及び単位体積当りの比熱である。D、n、s、 α は熱分散率、単位体積当りの粒子数、粒子1個当りの表面積(球)、粒子・流体間熱伝達率とする。但し粒子・空隙径の分布性(Yokoyama et al., 1991)は導入せず ε と n それに平均粒子径 a に次の単純関係を持たせた。

$$n \frac{4}{3} \pi \left(\frac{a}{2}\right)^3 = (1-\varepsilon) \quad (7)$$

従って単位体積当りの粒子・流体間伝熱面積 ns は

$$ns = n \cdot 4\pi \left(\frac{a}{2}\right)^2 = 6 \frac{1-\varepsilon}{a} \quad (8)$$

で与える。

3. 数値解析

3.1 実質中心差分となる風上差分

支配方程式を前進差分法で展開する。移流項については風上差分の形式をとりながら実質は中心差分となる等価中心差分(Yokoyama et al., 1997b)を適用する。この手法によれば実質の中心差分により比較的小さな数値分散に抑えながら、風上差分の自由な空間分割巾を享受できる。特に本研究のように広域対象領域中に密な局所分割域を持つ非定常3次元シミュレーションの場合には極めて有効な展開である。

3.2 井戸と周辺帯水層との流れ場

井戸近辺の強い局所性を広域対象の粗分割が内包するために、それら要素周辺を図1のような細分割に再構成する。半径 $rw(\ell)$ 、 ℓ は井戸番号、の井戸は周長を合せた形で、辺長 $2\pi \cdot rw(\ell)$ の正方形井戸に置換する。(●)印の細密真節点では節点値を求めるのに対して、(△)印仮節点はその周囲に配置され、節点値は面内挿により近似する。井戸管内鉛直方向流動抵抗は充填層に比べ小さいので無視し、井戸内は高さに依らず一様な水位ポテンシャル hm を持つとする。図2には、例えば地表面下から、砂層 [$\ell 1$]、粘土層 [$\ell 2$]、砂礫層(粘土混り) [$\ell 3$]、腐植土層 [$\ell 4$]、砂礫層 [$\ell 5$] それに火山灰層 [$\ell 6$] の6層を貫いた井戸で、ほぼ全ストレーナー施工で、揚水口は $\ell 5$ 層上部にある場合を示す。現時刻における水位場から井戸内各垂直要素毎に帯水層との差引き流入量 $QI_{\ell,k} \text{ m}^3/\text{s}$ を求める。井戸孔底でよく見られる閉塞条件を使って、深部より順次井戸内鉛直流 $w_{\ell,k} \text{ m/s}$ を求める。但し揚水口をその要素が含む場合は揚水量 $QO_{\ell} \text{ m}^3/\text{s}$ を差引く、即ち、

$$w_{\ell,k} = [QI_{\ell,k} - QO_{\ell}] / [2w\ell s(\ell)]^2 - w_{\ell,k-1} \quad (9)$$

ここで $w_{\ell,k-1}$ は、井戸孔底の場合はゼロである。これらを考慮することにより井戸と地層間で活発な流れを形成したり、閉塞性を持つに至ったり、或いは井戸を介した異層間伝播発生などの、机上実験が可能となる。例えば上下帯水層は粘土を挟んでいてその間では熱/汚染物質が漏れないはずであるが、上下層へ貫通している井戸によって、例えば休止井戸であれ、人為的バイパスが形成されキャリヤ性熱伝播/汚染発症が考えられる。最終的に井戸水面部に至る。最終計算要素の水面部では差引流入量に見合う分だけ次の時間ステップでの井戸水位上昇分につながるとして水収支を完了する。以上によって各地層毎の動水位が求められ、井戸誘発による地層間鉛直方向の流れも机上実験可能である。もちろんストレーナーの部分施行が考えられる。これら流動形態に基づいて最終的に井戸近傍温度/濃度伝播が計算される。

図1 井戸周辺の細密分割

Fig. 1 Subgridding around the main mesh

図2 井戸機能構造

Fig. 2 Well functional structure

3.3 自由地下水界面を含む鉛直分割構成

図3に鉛直方向の分割指針を示す。自由地下水界面の上下動巾を gap とし、その上層部に不飽和帯要素群、下部に飽和帯群を設ける構成で、透水係数は各鉛直要素番号 k 毎に異方性も含めて属性を与える。主な境界条件として、周囲は水位、伝播種ポテンシャル一定、地表面は不飽和浸透可、底面は不透壁・伝播種場対称で図4に示す通りである。初期条件として、自然地下水流賦存による水位場、伝播種場は任意指定可である。

3.4 純非定常と実質非定常解析

本数値解は物性値の温度依存性を考慮した流れと伝播種輸送の連立3次元非定常解析であるが、刻み時間は飽和帯の流れ場解析における貯留係数が律速し、 10^{-5} s 程度と厳しく、これではEWSや高速の64ビットパソコンでも手に負えない。付随

して温度／濃度場の桁落ちも激しい。飽和帯の最上部が自由地下水界面を形成するので、それを薄い自由地下水部として非定常水位場解析を行う場合の刻み時間は比較的緩い。例えば秒単位である。即ち、表層はゆっくりと変動する。両者の特質を生かし、表層水理は非定常計算し、内部は表層水位場をその都度境界水位として扱った逐次近似法により定常水位場で求める事を併用する。これを以後擬似非定常法と呼ぶことにし、これによって本質的の差を与えないで且つ高速の非定常計算を進める事が可能となる。熱輸送場即ち伝播種輸送については常に純非定常計算である。水位場に関する疑似非定常法は必要に応じ使用するが、井戸を明示的に考慮した広域解析を行った場合純非定常方式では極めて小さい刻み時間に引きずられ温度／濃度伝播で桁落ちが顕著な場合が生じる。この時も疑似非定常法での大きい許容刻み時間により桁落ち無しの計算が可能となる。

図3 多層構造と鉛直分割法

Fig. 3 Vertical gridding in multi-layers

图4 境界、初期条件

Fig. 4 Boundary and initial condition

4. 実験

4.1 実験施設

実験施設は科学技術庁防災研究所新庄雪氷研究支所にあり、図5に示す井戸配置である。井戸1、3、6、は口径150mm×深さ10m、井戸2、4、5、7は65mm×10mの仕様となっており、野外モデル実験専用施設である。写真1に示すように、いずれの井戸削屑柱状図からも10m以浅の砂礫層が確認できるが、僅かな距離にも拘らず地質に差違が認められ水平方向に一様な一組の層序ではない。水温測定は孔井内に設置したシース熱電対により集中観測し、電導度は孔井毎のセンサーを手動上下しての測定である。実験用温水は互いに干渉のない別の収水井戸より採水し、ヒートポンプにより加熱もしくは雪氷との混合により冷却し、およそ35℃もしくは0℃、つまり自然地下水温より+20℃強及び-13℃以内で供試水とした。濃度拡散用塩水は予め1500ℓのポリタンク内で食塩を45kg溶解し所定の食塩水濃度0.5mol/ℓにして行なった。

図5 井戸配置

Fig. 5 Well location

4.2 温度伝播実験

表1に井戸1からの温水涵養に伴う一連の温度／濃度波伝播実験の諸元を示す。図6に実験1に

写真1 掘削時地質断面、地表面下2-3m 井戸4付近

Photo 1 Geological composition 2-3m below around well 4, at digging

表1 実験諸元

Table 1 Conditions of experiments

実験番号	1	2	3	4	5	6	7
実験種類	温水長	温水短	塩冷瞬	塩冷瞬	塩冷長	塩長	塩長
地下水初期温度 [°C]	13.5	13.2	11.8	11.8	11.5	12.5	13.0
涵養水温度 [°C]	34.5	24.4	0.0	0.0	4.6	12.5	13.0
涵養量 [m ³]	10.4	11.3	0.515	1.36	1.44	1.46	1.49
涵養時間 [min]	300	135	6.5	7.5	71	58	66
涵養速度 [m ³ /min]	0.035	0.084	0.079	0.181	0.020	0.025	0.023
涵養水伝導度 10 ⁶ /(Ωcm)	0.078	0.080	45.5	41.1	38.8	38.0	38.1

おける涵養井(井戸1)内各深度における水温変化を示す。涵養管出口深度が7.5mであることとその近辺が最も透水性に富むため、深度6から8mまでの熱電対は直ちに反応し、涵養温度34.5℃にはほぼ一致しているが、深度9m以深では立ち上がりが極めて遅く深度10mでは立ち上らない。一つの理由として涵養水温が高いため下降しにくいこと

(浮力効果)、その他孔底に泥が溜っているため、孔底からの浸透は阻害されていることが考えられる。しかし前者については逆に涵養水を沈み易くした実験3、4、5における塩冷水涵養でも同様に底部での反応は鈍かった。すなわち、図7に実験3における塩冷水の瞬間涵養に伴う井戸内反応を示す。0℃の塩冷水0.52m³を6分で井戸1より

図6 実験1における涵養井戸深度別温度応答
Fig. 6 Response at injection well by depth at Exp.1

図7 塩冷水涵養実験3における涵養井戸温度経時変化
Fig. 7 Response of injection well temperature at Exp.3

涵養した場合すなわち、浮力効果はなくむしろ多少の慣性効果が期待される場合でも深度 9m、10m での温度降下および応答は鈍く、涵養停止後の初期温への復帰も緩慢である。

この鉛直方向差異は総ての井戸で同様であった。次に深度 8m 測点での涵養に伴う井戸別経時変化をまとめたのが図 8 である。室内の模型実験のごとく(横山 他、1977)、涵養井(w1)から遠ざかるに連れ、反応の遅れ、温度応答曲線の滑らかさ、到達温度低下の顕在化が見られる。300分以降では涵養停止と共に急激な温度低下となるが、いずれも井戸 1 に近いほど著しく、変温域は井戸 4、5 まででそれを境に温度応答は鈍くかつほとんど無くなっている。実験 2 はほぼ同量の涵養量を約 1/2 の時間、つまり 135 分で処理したもので、涵養強度の差違による変化を調べた。図 9 ではそれぞれの総涵養量に対する累計涵養量との比で経過時間としている。その結果、涵養強度が強い実験 2 がよりシャープな立ち上がりとなっている事が示される。涵養強度が弱い場合、マイクロな

熱分散が顕著となり薄まった形で広範囲の低密度蓄熱塊形成へとつながる事がわかる。

4.3 塩分濃度分散

食塩 45kg を 1500ℓ の淡水で割って 0.5mol/ℓ の塩水を作り、同じように井戸 1 から表 1 の諸元で涵養した。温度と同じく深さ 7～8m における各井戸濃度応答をまとめたのが図 10 である。各井戸毎の濃度から電気伝導度への換算係数を正確に同定できなかったため温度伝播のように実験条件を整えることはできなかった。しかしながら距離と方向が隔たるに連れ濃度応答の遅れと減衰が、定性的には温度応答と同様に確かめられた。

5. 実験に対する数値解析

5.1 解析モデル構成

写真 1 に示したように僅かな距離とはいえ様な地質構造とはなっていない。そこで比較的妥当な近似層序を最終的に想定した。図 11 に示すよう

図 8 実験 1 涵養及び停止後の水温経過

Fig. 8 Temperature responses at wells, Exp.1

図9 実験1「e1_」と実験2「e2_」の比較
Fig. 9 Comparison of Exp.1 with Exp.2

図10 井戸毎の濃度応答の遅れと減衰、実験6
Fig. 10 Solute propagation by Exp.6

図11 井戸仕様概要と実験場近似層序

Fig. 11 Well configuration and approximated geological column

に、層序は3層(上、中、下)に分け、中間は高く、上・下は低い透水性の組合せである。平均粒子径も上・下を小さく、中間を大なる想定とした。これに関する基本分割は20x30(水平分割)x16(垂直分割)で、これに井戸近辺の再分割、約50/井戸x7井戸、が加わる。写真1から分かるように実際には砂と礫の混合なのできっぱりと区別するのは難しいが、この辺一帯は元河床なので単純に考えて透水係数が大きければ粒子径も大きいとみなしたわけである。この写真からは空隙を埋め尽くす小砂利や砂(中には粘土も)が見られ、空隙率は単一球最密充填時の0.36よりは遥かに小さい値が想定される。種々試した結果、0.1弱と想定した。物性値はごく普通のものを採用している。例えば、熱分散率 D は 10 W/mK に、熱伝達率 α は $10 \text{ W/m}^2\text{K}$ 程度としている。粒子径は数センチ程

度なのでこれ以下の熱伝達率でなければ流体・粒子間温度差は問題とならない(Yokoyama et al., 1997b)。この熱伝達率は低めの評価である。自然地下水位勾配は7井戸間の水位差からほぼ真南方向へ $1 \text{ m}/100 \text{ m}$ 程度の降下と評価した。しかしながら想定される最も厳しい条件下でもダルシー流の限界レイノルズ数を越える自然流速には到っていない。

5.2 温度伝播に関する実験と数値解の比較

井戸4における実測値に対する数値解(曲線)では図12に示すように井戸底部の不動性や、浅い深度における立ち遅れも再現されたが、数値解全体としての温度波応答が幾分遅い。実際には認知されにくい良透水層や水道(みずみち)の存在を暗示させる。

図12 実験2 井戸4における温度応答と数値解との比較

Fig. 12 Comparison of the simulation at well 4 with the Exp. 2

全ての井戸中心部7～8m深での数値解との比較をまとめたのが図13で、実験による温度応答特性が井戸仕様を考慮した本数値解によりおよそ捉えられたことが分かる。w2による立ち上り当初の僅かな窪みは図11に示す層序と物性の温度依存性にもとづく地下水流動経路の変動と差違により到達地下水に微妙なタイムラグが発生することによる温度伝播擾乱の影響である。多層不均質異方性における2相モデルとは言え、地質の局所性を逐一取り込んだ由ではないので実験値に完全に追従することは難しい(井戸5)が、その点を配慮すれば十分実用に耐えうるものであると判断する。

5.3 井戸構造内包解析と従来解析との比較

井戸構造を取り入れ局所熱流動を考慮した本数値解、太い実線に対し、涵養井だけを井戸仕様とした数値解、点線との対比を図14に示す。今回は井戸としての機能は涵養井だけであり観測井近傍は井戸特有の機能からは離れ出来るだけ外乱を与えない状況で使われた。したがって涵養井だけの井戸仕様導入だけで極めて有効であったことがわ

かる。これに対し井戸機能が働く涵養井では井戸解析無しの従来方式では恣意的湧き出し強さの配分がどうしても避けられず解析の不自然さがぬぐいきれない。同じ事は揚水井についても言える。これまで、熱投入や回収におけるシミュレーションはそのほとんどが暗黙的井戸、つまり要素に吸い込みや湧き出しを与える方式であるため、不完全で恣意的な操作を拭いきれず、全体の運用をシミュレートする上での大きな弱点でもあった。井戸局所解析が可能になったことでどの部位からどれだけ浸透(取水)出来るかがストレーナー有無と合わせて予測可能となり、帯水層汚染の引き金ともなり得る井戸を介した異層間汚染にも直ちに適用可能である。

6. 結論

実際の野外井戸群による温度伝播実験によりその様子が自然地下水の挙動と共に明らかになり、本数値解とも良い一致を見た。本数値解法は、3次元2相(流体と粒子相)化により土質の種々特性

図13 温度波伝播実験2と数値解との比較(深度7-8m)
Fig. 13 Comparison of Exp.2 with the simulation at 7-8m depth

図14 数値解同士の比較
Fig. 14 Comparison of the well configured simulation code with conventional one

を反映し得るだけでなく、地表からの不飽和浸透、井戸涵養・揚水を伴う自由地下水及び被圧系を包含する実3次元系でかつ不均質・異方性を持つ複合層で適用可能である。

濃度伝播に関してはこれからの追試験が必要であるが、井戸仕様内包はどこからどれほどの浸透・吸い込みがあるかや、予想外の効果、例えば異なる帯水層間結合伝播などの考慮に対してもその効用が発揮されるものと期待される。

参考文献

藤縄克之(1995)：飽和・不飽和多孔体中の熱移動とヒステリシスを伴う浸透流の連成解析、地下水学会誌、37-3、175-192

横山孝男・梅宮弘道・佐々木隆・森 優・村越哲雄(1977)：周期法による帯水層の蓄熱利用を目指したモデル実験と数値解法、冷凍、vol.52-602、1079-1092

Higashiura, M. & Yokoyama, T. (1994) : Experimental and Theoretical Study on Heat Mechanism of Ground Water Flow, Procs. of Artificial Recharge of GROUND WATER II, 688-697

Yokoyama, T., Higashiura, M., Katsuragi, K. (1991) : Distributed Channel-Flow and Thermal Dispersion through Porous Media, Procs. of 5th International Conference on Thermal Energy Storage, Scheveningen, The Netherlands, Vol 4-5, 1-7

Yokoyama, T., Suzuki, Y., Asano, M., Takahashi, T., Ichida, M. (1997a) : Temperature Propagation in Unconfined Aquifer Coupled With Three Dimensional Two-Phase Analysis in Multiple Layers, Procs. Of 7th International Conference on Thermal Energy Storage Megastock 1997, Vol.2, 691-696

Yokoyama, T., Higashiura, M., Hirose, K., Iida, T. (1997b) : Treatment of Transient Heat Transfer among Fluids and Particles in Free Aquifers, JSME Int. Journal Series B, Vol.40, No.3, 415-421

(受付：1997年8月5日、受理：1997年12月26日)

記号表

英字

a	m	粒子径
$c\rho$	J/m^3K	単位体積当りの比熱
D	W/mK	熱分散率
g	m/s^2	重力加速度
gap	m	自由地下水面変動巾
h	m	水頭
K	m/s	透水係数
n	$1/m^3$	単位体積当りの粒子数
$QI_{\ell,k}$	m^3/s	井戸、深さ要素 k における周囲帯水層からの差引流入量
QO_{ℓ}	m^3/s	井戸における揚水量
r_c	—	粒子間接触率
rw	m	井戸半径
s	m^2	粒子表面積
S_h	$1/m$	単位厚さ当りの貯溜係数
t	s	時間座標
(u,v,w)	m/s	ダルシー流速
ww	m/s	井戸内鉛直流速
(x,y,z)	m	デカルト座標系、
$2wls$	m	$\equiv \pi/2 \cdot rw$ 、等価矩形井戸辺長

ギリシャ文字

α	W/m^2K	熱伝達率
ε	—	空隙率
θ	$^{\circ}C$	温度
λ	W/mK	熱伝導率
ρ	kg/m^3	密度

添字

f	流体相
h	水平方向
k	垂直方向要素番号
l	井戸番号
o	標準状態
p	粒子相
v	垂直方向