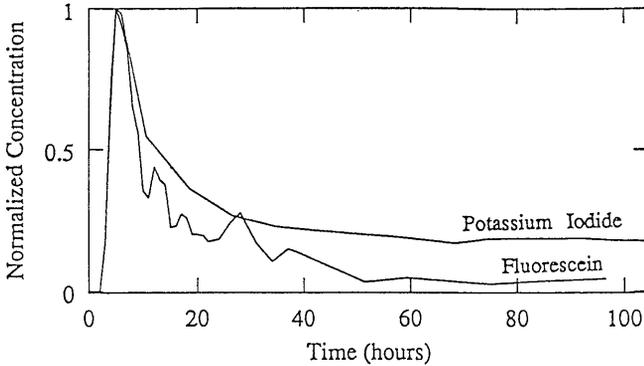


人工トレーサーを利用した熱水系の 化学的調査・評価手法(2)

茂野 博 (地殻熱部)
Hiroshi SHIGENO



第10図 Klamath Falls 地域における KI とフルオレセインを用いた人工トレーサーテストの観測データ (GUDMUNDSSON et al. 1983; HORNE 1986)
6.2. 参照. KI とフルオレセインの観測データについては比較のためにピークの高さを同一に示して表示している。

5. 熱水系における人工トレーサーテストのデータ解析法

熱水系における人工トレーサーテストデータの解析については、4.に述べたトレーサーの質量保存式がその基礎となる。しかし、一般に地熱貯留層内の不均一な透水性の分布に規制された複雑な地熱流体の流れを反映して各観測点において得られるトレーサーの時系列データは第10図に示すように複雑であるため、明快な解析結果を得ることは難しい場合が多い。

ここでは、現在までに試みられている、あるいは近い将来利用される可能性が高いと思われる様々な人工トレーサーデータの解析法を、必ずしも網羅的・体系的ではないが、仮に次のように名付けて説明する。

- (1) 直接的方法
- (2) 統計的方法
- (3) 逆解析法
- (4) 解析的方法 (順解析)
- (5) 半解析的流線法 (順解析)
- (6) 数値シミュレーション法 (順解析)

このうち(2)は大規模な断裂系が発達する巨視的に透水性が不均一な地熱貯留層に対して、(5)は多孔質のあるいは小規模な断裂系が発達する巨視的に透水性が均一な地熱貯留層に対して使用し易い性格の解析法である。(6)は利用範囲が広く今後最も有力になると考えられる解析法であるが、解析には多くのデータと労力・費用を必要

とする。なお、天然放射性核種トレーサーデータ等の解析に用いられるランプドパラメーターモデルに基づくピストン流モデル、完全混合貯留層モデル等による方法 (例えば YURTSEVER, 1983; ZUBER, 1986) はここでは体系的には取り上げなかった。

以下の説明では多くの場合熱水相が卓越する開発された地熱貯留層において還元井と生産井との間に定常的な熱水の流動が存在し、トレーサー物質は非放射性・非反応性・非揮発性であり、地熱流体中におけるトレーサーのバックグラウンド値は無視できることを仮定して議論を簡単にしている。トレーサーの投入方法としては基本的にパルス状の場合を取り扱っており、それ以外の場合には解析前にデータの処理が必要になることが多い。また、生産井で観測されたトレーサーが再度還元井を通じて地熱貯留層に流入する場合等にも、解析前のデータの補正が必要となる。

5.1. 直接的方法

ここで直接的方法としてまとめたものは、人工トレーサーデータのうち観測井におけるトレーサーピークの通過時刻、トレーサーの出現量、トレーサーピークの形状等を用いて、推理あるいは簡単な計算を行い、各種の定性的・定量的な推定を直接的に行うものである。この方法は、以下(1)~(4)に示すように各種の手法を含んでいる。この方法の実施例としては、6.1.で述べる大沼地域のものが参考となる。

- (1) 地熱流体の流速

還元井 (A 投入井) から投入されたトレーサーが十分に離れた生産井 (B 観測井) において明瞭なピークを持って検出される場合には A から B への地熱流体の流動が存在すると考えることができる。この流れの速さ (最小値) は (17) で示される。

$$V \geq \frac{L}{t} \quad (17)$$

ただし V : 流動の速さ

L : 孔井 A-B 間の地下での最短距離

t : トレーサーの投入後トレーサーのピークが観測されるまでの時間

流れの速さが数 m/h よりも速い場合には この流れは基本的に A-B の周囲を結ぶ大きな断層を通路としていと考えられる。なお A から投入されたトレーサーが B において長時間の後に明瞭なピークを持たずに検出される場合には 少なくとも A-B は同一の熱水対流セルの中に位置していると考えられる。

(2) 生産-還元される地熱流体の中で還元-生産の速い循環を行っているものの割合

最初に 還元井と生産井がそれぞれ 1 本ずつの場合を考える。

還元井 (A) から投入されたトレーサーの総量に対する生産井 (B) で検出されたトレーサーの総量の比は再湧出率 (f) と呼ばれ (18) で定義される。

$$f = \frac{M_{out}}{M_{in}} = \frac{\int_{t_0}^{t_e} C(t) \cdot q(t) \cdot v(t) dt}{M_{in}} \quad (18)$$

ただし M_{in} : 還元井 A より投入されたトレーサーの総量

M_{out} : 生産井 B において観測されたトレーサーの総量

$C(t)$: 時間 t において生産井 B で観測されたトレーサーの濃度

$q(t)$: 時間 t において生産井 B で単位時間あたりに生産された熱水の量

$v(t)$: 時間 t における生産井 B における生産熱水の比容積

t_0 : トレーサー投入時刻

t_e : 観測の終了時刻

トレーサーの観測は十分長く行う必要がある。しかし トレーサー濃度の観測値が低下するに従ってその測定精度が低下するために f 値の誤差は大きくなってしまいうので t_e を極端に長くすることは必ずしも好ましくない。

生産されたトレーサーを含む熱水を引続き A より還元する場合には B において同一のトレーサー粒子を再度測定することになるため その補正が必要である。定

常的な状態で B において生産された熱水の全量が A より還元される場合には (19) が成立する (McCABE, 1983; HORNE, 1986)。

$$f = \frac{f_{total}}{1+f_{total}} \quad (19)$$

ただし f_{total} : (18) によって計算された見かけの再湧出率

定常的な条件下において再湧出率 f は 還元井 A より地熱貯留層へ注入される還元熱水のうち 遠方へ流動してしまうものや孔隙中に長時間保持されてしまうものを除いた A-B の周囲で速い移動を行うことにより生産井 B で噴出する熱水の割合を示していると考えられる。

一方 生産井 B において単位時間あたりに生産される熱水と蒸気の合計量に占める再湧出した還元井 A からの還元熱水の割合は混入率 (α) と呼ばれ 定常状態を仮定して (20) で定義される。

$$\alpha = \frac{G_{AB}}{G_B} = f_{AB} \frac{G_A}{G_B} \quad (20)$$

ただし G_B : 生産井 B における単位時間あたりの熱水・蒸気の合計生産量

G_{AB} : G_B の中で還元井 A から注入され再湧出した熱水・蒸気の単位時間あたりの生産量

G_A : 還元井 A における単位時間あたりの熱水の還元量

f_{AB} : 生産井 B における還元井 A からの熱水の再湧出率

複数の還元井と生産井とが存在し定常的な地熱流体の生産-還元が行われている場合には すべての生産井を観測井 ($B_1 \dots B_n$) とし 各々の還元井を投入井 ($A_1 \dots A_m$) とした m 回の独立した人工トレーサーテストを実施することにより 各還元井 (A_i) についての合計再湧出率 ($f_{A_i}^T$) と各生産井 (B_j) についての合計混入率 ($\alpha_{B_j}^T$) を (21) および (22) によって計算することができる。

$$f_{A_i}^T = \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (21)$$

$$\alpha_{B_j}^T = \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} = \sum_{i=1}^m f_{ij} \frac{G_{A_i}}{G_{B_j}} \quad (22)$$

さらに すべての還元井と生産井を含めて定常的な地熱流体の生産-還元が行われている地熱開発システム全体としての平均再湧出率 (f^T) と平均混入率 (α^T) を (23) および (24) によって計算することができる。

$$f^T = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f_{ij} \cdot G_{A_i}}{\sum_{i=1}^m G_{A_i}} \quad (23)$$

$$\alpha^T = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \alpha_{ij} \cdot G_{B_j}}{\sum_{j=1}^n G_{B_j}} \quad (24)$$

もし単位時間あたりの熱水・蒸気の総生産量と総還元量が同一であれば 平均再湧出率と平均混入率とは一致することとなる。

(3) 地熱貯留層中に存在する地熱流量の推定

生産された熱水が還元されている地熱開発システムにおいて還元井 (A) から投入された人工トレーサの生産井 (B) における観測濃度が長時間の後一定と見なせるようになった場合 地熱貯留層内における熱水中のトレーサ濃度が均一化したと見なし 生産に伴う地熱流体の損失 地熱貯留層への地下深部からの地熱流体の流入 地熱貯留層から周辺への地熱流体の流出等は無視できると仮定して (25) により地熱貯留層中に存在する熱水総量の推定を行うことが可能となる (伊東ほか 1978; HORNE, 1986).

$$M_{RW} = \frac{M_{in}}{C_{eq} \cdot v} \quad (25)$$

ただし M_{RW} : 地熱貯留層中に存在する熱水の総量
 M_{in} : 投入されたトレーサの総量
 C_{eq} : 観測されたトレーサの平衡濃度
 v : 生産された熱水の比容積

(4) 地熱流体の流動様式と貯留層の物理パラメータ値の推定

人工トレーサテストにより得られるデータから トレーサの投入井と観測井の間の地熱貯留層における地熱流体の流動様式について定性的な推定を行うことができる (例えば IAEA, 1983). 例えばトレーサが投入井からパルス状に投入された時 トレーサ濃度の観測データは地熱流体が1つの大きな断裂を通じて流動している場合には第9図のベクレ数が大きな曲線に近くなるのに対して 多数の小さな断裂あるいは多孔質媒体中を流動している場合にはベクレ数が小さな曲線に近くなる (後に示す第26図および第27図を参照). このような概念的な地熱流体の流動モデルの作成は 後述するより複雑な方法で解析を行うにあたって重要である.

地熱貯留層の物理パラメータのうち透水係数については 還元井における人工トレーサの投入から生産井におけるトレーサピークの観測までに必要とした時間を用いて計算した地熱流体の流速 各孔井で測定された水頭などより 前述した地熱流体の運動量保存式 (6) を用いて孔井間の概略の平均値を求めることが可能である (伊東ほか 1977). また 地熱流体が還元井と生産井とを結ぶ大きな断裂を通じて流動していると考えられる場合に 前述した地熱貯留層における地熱流体の流速 単位時間あたりの地熱流体の生産量・還元量などのデータを用いて 適当な仮定に基づいて断裂の透水係数 有効幅 生産井の裸孔部に占める有効断裂幅などを計算す

る方法も試みられている (藤井 1982).

5.2. 統計的方法

ROBINSON and TESTER (1984) は 人工トレーサの再湧出率が高い系で有効なデータの統計的解析法として トレーサの滞在時間分布 (RTD) 法を高温岩体中に水圧破砕法により生成した人工熱水系に適用している (6.4. 参照). この方法は大規模な断裂が地熱貯留層になっておりその周囲の透水性が悪い天然の熱水系でも利用が可能であると考えられる.

RTD 関数 $E(t)$ は (26) で定義される. なお この場合還元井 生産井は各1本ずつで それぞれ地熱貯留層を直接貫いており 系外に取り出される蒸気量は無視できると仮定する.

$$E(t) = \frac{Q_{TOR} C(t)}{m_T} \quad (26)$$

ただし $C(t)$: 時間 t において生産井で観測されるトレーサ濃度
 m_T : 投入されたトレーサの総量
 Q_{TOR} : 単位時間あたりの流体の循環量
 t : トレーサの還元井への投入後経過した時間

$E(t)$ は 定常流を仮定して $E(V)$ として (27) で表現される.

$$E(V) = \frac{C(V)}{m_T} \quad (27)$$

ただし $C(V)$: 流体の累積生産量が V の時に生産井で観測されるトレーサ濃度

V : 生産井における流体の累積生産量

単純に解釈すれば $E(V)$ についての統計的な値である $\dot{V} <V> \omega_{1,2}, \sigma^2$ は以下の意味を持つと考えられる.

\dot{V} (モード容積): 横軸に V 縦軸に $E(V)$ を取って観測値をプロットした時に $E(V)$ が最大値となる時の V の値. モード容積は 還元井と生産井の間を直接結ぶ高い透水性を持つ断裂部の体積を示していると考えられる.

$<V>$ (累積平均容積):

$$<V> = \int_0^{\infty} V E(V) dV$$

累積平均容積は透水性の大小を問わず その中を流体が流動する還元井と生産井の間を結ぶ大規模断裂一小規模断裂一孔隙系の合計体積を示していると考えられる.

$\omega_{1,2}$ (1/2モード値幅): 1/2モード値幅は 前述した $\dot{V}, E(V)$ のプロット図において $E(V)$ が最大となる \dot{V} の値の両側で $E(V)$ がその半分の値となる2つの V の

値の差を意味し 前述した高い透水性を持つ断裂についてこれを通過するトレーサーの分散の大きさについての概略の目安となる値である。

σ^2 (容積の分散値) :

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (V - \langle V \rangle)^2 E(V) dV$$

この値は 前述した累積平均容積についてこれを通過するトレーサーの分散の大きさの概略の目安となるものである。

5.3. 逆解析法 (5.4. 参照)

還元井においてスパイク状に投入された人工トレーサーが大きな断裂を通じて流動し生産井で観測される場合第10図に示したように投入後一定の時間を置いてトレーサーが出現し 鋭いピークを形成した後徐々にトレーサー濃度が減少して行くことが多い。逆解析法ではこのようなトレーサー濃度の観測値と流動モデルに基づくトレーサー濃度の理論値との差が最小2乗法等により最も小さくなるように 地熱貯留層に関する物理パラメーター値等を直接算出する。また 上述した観測値と理論値の一致の程度から 想定したトレーサーの流動モデルの適合性を判断する。

FOSSUM and HORNE (1982) は Wairakei 地域において2つの断裂を通じた熱水の流動を想定して 還元井からパルス状-スラッグ状に投入され生産井で観測されたトレーサーを含む熱水が各断裂を流れる量比・速さ 各断裂の幅などを逆解析法により計算することを試みている (6.3. 参照)。

この場合 還元井に投入された単位量のトレーサーが各断裂を通じて生産井から噴出する時のトレーサー濃度の時間変化は 理論式として (28) で表現された。

$$C = \frac{s}{2\sqrt{\pi} \left(\frac{\eta}{uL}\right) \left(\frac{u}{L}\right) t} \exp\left[-\left\{1 - \left(\frac{u}{L}\right) t\right\}^2 / 4\left(\frac{\eta}{uL}\right) \left(\frac{u}{L}\right) t\right] \quad (28)$$

ただし C : 時間 t において生産井で観測されるトレーサー濃度の理論値

s : 還元井に投入されたトレーサーの単位量

u : 熱水の流動の平均速度

L : 還元井-生産井間の距離

η : トレーサーの有効分散係数

t : トレーサーを還元井へ投入した後経過した時間

なお 各断裂を通じて生産井にもたらされたトレーサーの濃度が最大となる時間は (28) から導かれる (29) で求められる。

$$t_{\max} = \left[\left(\frac{u}{L}\right) \left\{ \left(\frac{\eta}{uL}\right)^2 + \left(\frac{\eta}{uL}\right) + 1 \right\}^{1/2} - 1 \right]^{-1} \quad (29)$$

熱水が2つの断裂を通して流動する場合の 生産井におけるトレーサー濃度の時間変化は理論式として (30) で表現された。

$$C = \varepsilon_1 C_1 + \varepsilon_2 C_2 \quad (30)$$

ただし ε : 流量率 ($\varepsilon_1 + \varepsilon_2 = 1$)

生産井におけるトレーサー濃度の観測値 (C_x) と理論値 (C_y) について 以下の R (31) を最小とすることにより各断裂について L/u uL/η および ε が求められた。

$$R = \sum_{i=1}^N (C_{yi} - C_{xi})^2 \quad (31)$$

ただし i : ある時間における

さらに 断裂中におけるトレーサーの分散の原因をトレーサー分散と考えて前述の (15) の関係を用いることにより 適当な分子拡散係数の仮定の基に断裂の幅 (b) も計算された。

その後 JENSEN and HORNE (1983) は 断裂中を流動するトレーサーが周囲の岩石中の孔隙へ拡散し吸着されさらにトレーサーを含む水塊の通過後にトレーサーが逆に断裂中へ拡散してくる効果を含めた逆解析法により 断裂中を流動する熱水の速さ 断裂の幅等を計算する方法を検討している (6.3. 参照)。

断裂に沿って熱水が流れる方向を x とし断裂壁に垂直な方向を y とする時 上述のトレーサーの流動モデルについては (32) (33) が成立すると考えることができる。

$$R \frac{\partial C_f}{\partial t} - \frac{2D_e}{\delta} \frac{\partial C_p}{\partial y} \Big|_{y=0} + U_f \frac{\partial C_f}{\partial x} = 0 \quad (32)$$

$$\frac{\partial C_p}{\partial t} = D_a \frac{\partial^2 C_p}{\partial y^2} \quad (33)$$

ただし C_f : 断裂中のトレーサー濃度

C_p : 孔隙中のトレーサー濃度

U_f : 断裂中の熱水の流動速度

R : トレーサーの遅延係数

D_a : トレーサーの見かけの拡散係数

D_e : トレーサーの有効な拡散係数

δ : 断裂の幅

なお 以下の式が成立する。

$$D_a = \frac{D_e}{K_a \rho_b}$$

$$K_a \rho_b = \phi + (1 - \phi) k \rho_s$$

$$R = \frac{K_a \rho_b}{\phi} = 1 + \frac{k \rho_s}{\phi}$$

ただし $K_{a\rho b}$: トレーサーの定容吸着平衡定数

ϕ : 岩石の孔隙率

k : 岩石のトレーサー吸着係数

ρ_s : 岩石の密度

(32) および (33) の解析解はトレーサーがパルス状に投入された場合 (34) および (35) となる。

$$C_f = 0 \quad (t \leq t_w R) \quad (34)$$

$$C_f = \frac{E\alpha_1\alpha_2}{\sqrt{\pi(\alpha_2 t - 1)^{1.5}}} \exp\left\{-\frac{\alpha_1^2}{(\alpha_2 t - 1)}\right\} \quad (t > t_w R) \quad (35)$$

ただし t_w : 水の滞在時間

E : 標準化のための係数

α_1 : $(De\phi t_w)^{0.5}/\delta$

α_2 : $\frac{1}{t_w R}$

各パラメーター値は 生産井におけるトレーサー濃度の時間変化の観測値 (C_o) と理論値 (C_y) について (31) を最小とすることにより α_1 α_2 の最適値を計算することを通じて推定された。なお この例でも複数の断裂中をトレーサーが流動する場合について (34) および (35) のそれぞれ一次結合によって解析を行うことができる (JENSEN and HORNE, 1983)。

一方 和田・大牟田 (1984) 千田・新堀 (1986) 笠井・猿館 (1986) は 還元井A より投入され生産井B で観測される人工トレーサーの観測値 (C_o) と以下に (36) で示す理論値 (C_y) とをマッチングさせる逆解析的あるいは順解析的な方法を示している。

$$C_B(t) = \frac{fGv \int_0^\infty C(x,t)q(x)dx + C_0q_0}{Q} \quad (36)$$

ただし $C_B(t)$: 時間 t において生産井Bで観測されるトレーサー濃度の理論値

$C(x,t)$: 還元井Aから路線長 x の経路を経て時間 t に生産井Bに流入する熱水中のトレーサー濃度の理論値

$q(x)$: 流量密度関数 $\left(\int_0^\infty q(x)dx = 1\right)$

f : 生産井Bについての還元井Aから投入されたトレーサーの再湧出率

G : 還元井Aにおける単位時間あたりの熱水の還元量

v : 還元井Aにおける熱水の比容積

C_0 : 熱水中のトレーサーのバックグラウンド濃度

Q : 生産井Bにおける単位時間あたりの熱水・蒸気の合計生産量

q_0 : $Q - fGv$

なお (36) では還元井Aと生産井Bとの間の地熱貯留層において還元された熱水は多数の断裂を通路として同一の流速で定常的に流動していることを前提としており $C(x,t)$ については 5.4. の例題に示す1次元の定常的な熱水流動の解析解 (39) $q(x)$ については指数分布関数あるいはガンマ分布関数がいわれている (和田・大牟田 1984)。マッチングにより得られる $q(x)$ は貯留層における断裂の発達程度の指標になると考えられる。

5.4. 解析的方法 (順解析)

4. で述べたトレーサーの質量保存式については 座標系 貯留層内のパラメーター分布 初期条件 境界条件等が非常に簡単な場合について解析的に解かれている。例えば x 方向への1次元の定常的な地熱流体の流動が存在し (37) のトレーサーの保存式が成立すると見なせる場合に (38) の条件でパルス状—スラッグ状あるいは一定濃度連続状のトレーサーの投入が行われる場合には トレーサー濃度の分布の解析解は (39) で表現される (VAN GENUCHTEN and ALVES, 1982; OGATA and BANKS, 1961)。

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} \quad (37)$$

$$\left. \begin{aligned} C(x, 0) &= C_i \\ C(0, t) &= \begin{cases} C_0 & (0 < t \leq t_0) \\ 0 & (t > t_0) \end{cases} \\ \frac{\partial C}{\partial x}(\infty, t) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (38)$$

$$\left. \begin{aligned} C(x, t) &= \begin{cases} C_i + (C_0 - C_i)A(x, t) & (0 < t \leq t_0) \\ C_i + (C_0 - C_i)A(x, t) - C_0A(x, t - t_0) & (t > t_0) \end{cases} \\ A(x, t) &= \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx - Vt}{2(DRt)^{1/2}} \right] \\ &\quad + \frac{1}{2} \exp \left(\frac{Vx}{D} \right) \operatorname{erfc} \left[\frac{Rx + Vt}{2(DRt)^{1/2}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (39)$$

ただし C_0 : 投入されたトレーサーの濃度

C_i : 地熱流体中のトレーサーのバックグラウンド濃度

t : トレーサーの投入開始後の時刻

t_0 : トレーサーの投入終了の時刻

V : 地熱流体の流動の速さ

D : トレーサーの分散係数

R : トレーサーの遅延係数

このような解析解の代表的なものとその適用例については JAVANDEL et al. (1984) などに紹介されているものが参考となる。

解析解を用いる順解析法では、逆解析法とは逆に地熱流体の流動モデルから導かれる解析解に異なるパラメーター値を入れて計算した一群の理論値と観測値とを比較することを通じて、一致の良好なパラメーターの組合せを求める。5.3.の逆解析法で述べた問題に解析解を用いる順解析法を適用することは可能である。しかし前述したように地熱貯留層は一般に不均質であり人工トレーサーテストによって得られるデータは通常単純な時系列データとはならないため、解析解を用いる順解析法の適用は5.3.に述べた解析解を用いる逆解析法の場合と同様に限界がある。

しかし例えば堆積盆地の深部において均質等方的な一定の厚さの地層中に発達する低温の熱水系で、還元井から一定濃度のトレーサーを含む熱水が一定速度連続的に投入されこれを生産井で観測する場合、あるいは透水性の悪い岩石中に存在する大きな断裂を定常状態で熱水が流動しており、これを貫く還元井からパルス状に投入されたトレーサーを同様にこの断裂を貫く生産井で観測する場合など条件が非常に単純な時には、このような解析解を用いる順解析の方法は簡便な手法としてあるいは予察の手法として利用の価値が大きいと思われる。

5.5. 半解析的流線法（順解析）

半解析的流線法は、トレーサーを代表する仮想的なトレーサー粒子群についてその位置の時間変化を流線に沿って追跡計算する方法で、解析の対象となるのは2次元の均質等方媒体中に一様な地熱流体の定常流が存在する地熱貯留層モデルに限られるとともに、トレーサーの分散は無視される。ここでは JAVANDEL et al. (1984) に従ってその方法を概説する。

半解析的方法では、基本的に(40)の複合速度ポテンシャル (W) を分析関数とする。

$$W = \phi + i\psi \quad (40)$$

ただし ϕ : 速度ポテンシャル ($\nabla^2\phi=0$)

ψ : 流れ関数 ($\nabla^2\psi=0$)

ϕ は一般的に(41)で定義される。

$$\phi = Kh + c \quad (41)$$

ただし K : 透水係数

h : 全水頭

c : 定数

この時、任意の方向 x への流量 (q_x) は(42)で与えられる。

$$q_x = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = -K \frac{\partial h}{\partial x} \quad (42)$$

また(43)および(44)が成立する。

$$\frac{\partial\phi}{\partial x} = \frac{\partial\psi}{\partial y} \quad (43)$$

$$\frac{\partial\phi}{\partial y} = -\frac{\partial\psi}{\partial x} \quad (44)$$

広域的に一様な熱水の流れが存在するとともに、地熱貯留層を貫く M 本の還元井と N 本の実産井が存在し2次元の均質等方媒体中に定常流が形成されていると見なせる場合には、複合ポテンシャル、速度ポテンシャル、流れ関数は、それぞれ(45) (46) (47)で表現される。

$$W = -UZe^{-ia} + \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{2\pi b} \ln(Z - Z_j) - \sum_{k=1}^M \frac{Q_k}{2\pi b} \ln(Z - Z_k) + c \quad (45)$$

$$\phi = -U(x\cos\alpha + y\sin\alpha) + \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{2\pi b} \ln\{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2\} - \sum_{k=1}^M \frac{Q_k}{4\pi b} \ln\{(x-x_k)^2 + (y-y_k)^2\} + c_1 \quad (46)$$

$$\psi = U(x\sin\alpha - y\cos\alpha) + \sum_{j=1}^N \frac{Q_j}{2\pi b} \tan^{-1}\left[\frac{y-y_j}{x-x_j}\right] - \sum_{k=1}^M \frac{Q_k}{2\pi b} \tan^{-1}\left[\frac{y-y_k}{x-x_k}\right] + c_2 \quad (47)$$

ただし U : 一様な広域流の速さ

α : 広域流の流動方向と x 軸の正の方向のなす角度

b : 地熱貯留層の厚さ

Q_j : 生産井 j の単位時間あたりの熱水生産量

Q_k : 還元井 k の単位時間あたりの熱水還元量

x_j, y_j : 生産井 j の位置座標

x_k, y_k : 還元井 k の位置座標

c, c_1, c_2 : 境界条件を満たす定数

任意の点 (x, y) における仮想的なトレーサー粒子の流動速度 v の x, y 方向への成分 v_x, v_y はそれぞれ(48) (49)で表される。

$$v_x = \frac{q_x}{nR} = -\frac{1}{nR} \frac{\partial\phi}{\partial x} \quad (48)$$

$$v_y = \frac{q_y}{nR} = -\frac{1}{nR} \frac{\partial\phi}{\partial y} \quad (49)$$

ただし q_x, q_y : 比湧出量の x, y 方向への成分

n : 有効孔隙率

R : トレーサー粒子と水分子との速度比

(トレーサーが非反応性の場合には $R=1$)

仮想的なトレーサー粒子の流れは流線 ($\psi = \text{Const.}$) に沿っており 微小時間 dt の間のトレーサーの移動距離 l の x y 方向への成分は それぞれ (50) (51) で表される。

$$dl_x = v_x dt = \frac{q_x dt}{nR} \tag{50}$$

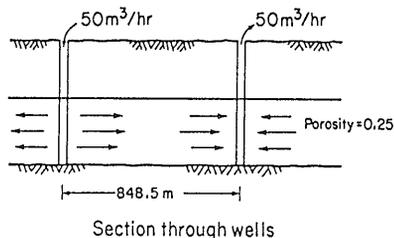
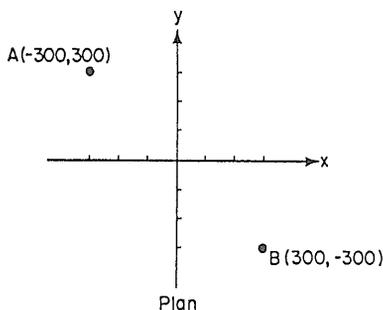
$$dl_y = v_y dt = \frac{q_y dt}{nR} \tag{51}$$

以上の式を用いることにより 前述した地熱貯留層における等水頭ポテンシャル線 流線 各還元井から投入された人工トレーサーの到達面の時間変化等を計算し 平面図として表示することができる。

例えば第11図のように低温の熱水系が厚さ一定で均質等方と見なせる地層 (有効孔隙率0.25) 中に発達しており約 850m 離れた生産井と還元井 1 本づつからそれぞれ連続的に 50m³/h の熱水の採取と還元が行われていて広域的な自然の熱水の流動が存在しない場合を考える。還元井から一定濃度で連続的に投入される非放射性・非反応性トレーサーの地熱貯留層における分布の時間変化は還元井から放射状に流動する仮想的なトレーサー粒子群の運動を上述した式を用いて流線に沿って計算することにより求めることができる。その解析結果を 流線とトレーサーの到達面の時間変化の平面図として第12図にまた生産井におけるトレーサー濃度の観測値の時間変化として第13図に示す。

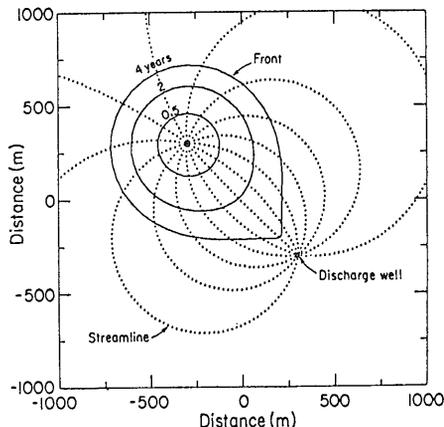
この例について 広域的に一樣な自然の熱水の流動が存在する場合の解析結果の例を 流線とトレーサーの到達面の時間変化の平面図として第14図に示す。なおこの場合トレーサーが通過しない流線については 仮想的なトレーサー粒子を水頭ポテンシャルが高い位置に配置し 上述した式を用いて同様に計算することにより画かれている。

前述したように一般に地熱貯留層は顕著な不均一性を示すため 人工トレーサーテストによって得られた観測値と半解析的流線法によって異なるパラメーター値を用いて計算した一群の理論値とを比較することにより 一致の良好なパラメーター値の組合せを求める順解析的な方法がデータ解析に適用できる範囲は狭いと思われる。しかし 堆積盆地の深部において均質等方的な一定の厚さの地層中に発達する低温の熱水系のような場合には半解析的流線法を用いる順解析的方法是簡便な手法としてあるいは予察的手法として利用の価値が大きいであろう。



第11図 半解析的流線法の例題としての仮想的な地熱貯留層の分布と孔井の配置 (JAVANDEL et al. 1984)

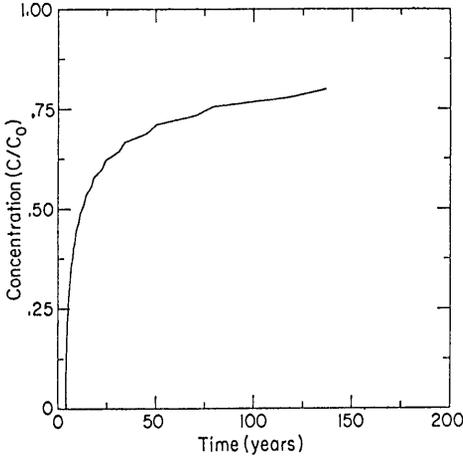
上図は平面図 下図は2本の孔井 (A, B) を結ぶ断面図である。自然状態では熱水の流動は存在しないと仮定している。



第12図 半解析的流線法によって解かれた第11図の例題の流線と人工トレーサーの到達面の時間変化 (JAVANDEL et al., 1984)

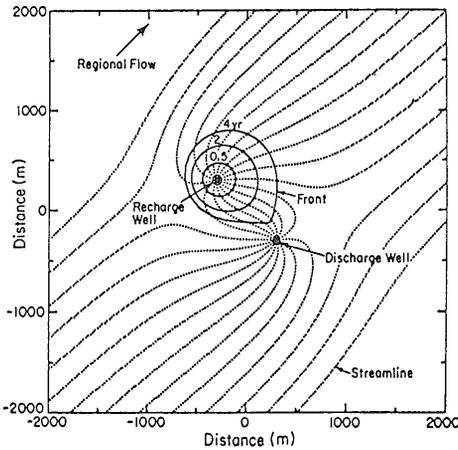
5.6. 数値シミュレーション法 (順解析)

3.4. で述べた分布パラメーターモデルに基づいて 地熱貯留層におけるパラメーター値・物理状態量の分布 地熱流体の質量・エネルギーの移動状況などを数値シミュレーション法によって明らかにする順解析的方法是



第13図 半解析的流線法によって解かれた第11図の例題の生産井におけるトレーサー濃度の時間変化 (JAVANDEL et al. 1984)

トレーサーは一定濃度連続状に投入されたと仮定している。



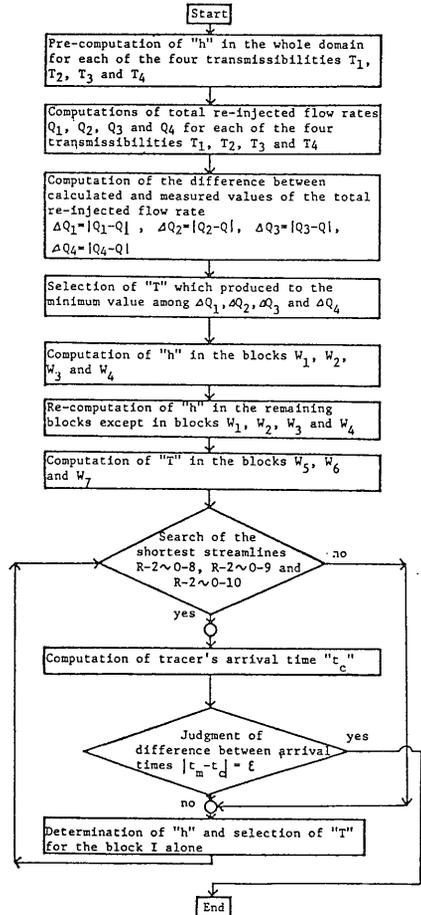
第14図 半解析的流線法によって解かれた第11図の例題で自然状態において広域的な熱水の流動が存在する場合の流線と人工トレーサーの到達面の時間変化 (JAVANDEL et al. 1984)

同様に人工トレーサーテストデータについても適用することが可能なはずである。

この方法の最も大掛なものは、3.4.で述べた地熱貯留層を領域として代表する多数の点における様々な物理パラメーター値の分布 初期条件 境界条件等に基づきこれらの点における質量保存式 エネルギー保存式 運動量保存式にトレーサーの質量保存式を加えたものについて 差分法・有限要素法・モンテカルロ法などにより数値シミュレーションを行う方法である。原理的には

この方法により順解析的に地熱貯留層における地熱流体の質量・エネルギーおよび人工トレーサーの移動・貯留状況等を総合的によりよく把握することが可能になると考えられる。

しかし 従来の人工トレーサーテストデータについては 1) 地熱貯留層全体を平面的に覆うデータが得られている場合が少ないこと 2) 偏在的に分布する大きな断層系に支配されてトレーサーが流動する傾向が顕著なため 流体の質量・エネルギーデータのみを平滑化された場合に比較して多数のモデル化の代表点を必要とし計算が膨大となること 3) 孔井を通じた流体の質量・エネルギーの生産・還元ヒストリーデータに対応する長期的な人工トレーサーの投入・観測テストデータが得られていないことなどをおそらくその原因として 実際にはこのような大規模な数値シミュレーションは実施されて



第15図 分布パラメーターモデルに基づく数値シミュレーションによる人工トレーサーテストデータの解析処理方法の例 (YUHARA and AKIBAYASHI 1983)

いない。

エネルギー保存式が無視できる場合には特に2次元において人工トレーサーデータについての数値シミュレーションは簡略化されて比較的容易となる(例えば KINZELBACH, 1986)。例えば前述した堆積盆地の深部において均質等方的な一定の厚さの地層中に発達する低温の熱水系のような場合には数値シミュレーション法を用いる順解析の方法はかなり簡単になるであろう。

このような方法の1つの例として湯原・秋林(1978) YUHARA and AKIBAYASHI (1983) は生産井—還元井群と断層を含む水平2次元の分布パラメーターモデルに基づいて各生産井・還元井における単位時間あたりの生産・還元流量と水位および還元井から投入された人工

トレーサーの各生産井への到達時間データを用いて数値シミュレーション法(差分法)により2回の順解析的手法を通じて定常状態での水頭ポテンシャル—流線分布透水量係数の分布などを明らかにすることを試みている。この方法の処理の流れ図を第15図に示す。この方法はまず単純化して設定した広域的な地域の水頭分布に基づいて還元量の実測値と理論値との差の絶対値の合計を最小とするように広い地域の概略の透水量係数を求めこれに基づいて水頭分布を調整した後引続いて地熱流体の流動による人工トレーサーの到達時間の観測値と理論値との差が十分小さくなるように生産井周辺の透水量係数と水頭の分布を決定するものである。

最近中国で発見された新鉱床

岸本文男(地質相談所)

Fumio KISHIMOTO

湖南省菜陽県で大型カオリン鉱床を試錐探査で把握

湖南省地質産局417地質隊は菜陽県集賢郷の域内で地質精査・試錐調査によって一つの大型高品質鱗状カオリン鉱床を把握した。同鉱床はジュラ系下部統の風化殻型に属し、鉱石鉱物の結晶度は高く擬六方鱗状を呈し、白度は81.57%に達し、カオリンを平均40%含有し、総鉱量は1,000万tである。

向騎竜(中国地質報 1986.9.1)

湛江市で優秀なカオリン鉱床を発見

広東省地質産局704地質大隊は湛江市郊外の竜頭から遂溪に至る一帯でカオリン鉱床帯を発見し、1985年に第一次評価調査を終了した。その地質鉱量は1,600万tに達する。

江峰 張邦耀(中国地質報 1986.2.10)

湖南省でバナジウム—ウラン鉱床

最近湖南省邵陽市地質調査隊は湖南省新寧県の梁冲家一帯で比較規模の大きいバナジウム—ウラン鉱床を探査・発見した。この鉱床はカンブリア系基底部の薄い粘板岩中に賦存し、鉱床の延長は1.9km、鉱体の厚さは平均1.5m、最大23mに達している。その鉱体の平均品位は V_2O_5 0.722%、最高1.22%であり、ウランを含有し、その品位も稼行基準品位に達している。鉱床への水陸両面の交通は非常に便利である。

嚴欣耀 馬文韜(中国地質報 1987.4.17)

湖南省で超大型石膏鉱床

湖南省地質産局403地質隊は、数年の探査を経て澧—県盆地の西部において鉱量18億トン、地質鉱量49億トンの超大型硬石膏鉱床を把握した。同鉱床は平均 $CaSO_4$ 含有率が73.4%で、埋蔵深度が浅く、採掘は容易である。交通の便は良い。

余沢渺 魏成林(中国地質報 1987.6.26)

金華市で中型螢石鉱床を把握

浙江省冶金地質公司第4隊は浙江省金華市で一つの中型螢石鉱床を発見し、2年半の探査を経て、鉱量が103万tであるという報告書を提出した。

胡雲欣(中国地質報 1986.2.28)

福建省将楽県で大型螢石鉱床

福建省地質産局広域調査3分隊は最近将楽県常口村で大型螢石鉱床を試錐探査し、その産状を把握した。同鉱脈は花崗岩とシルト岩の断層接触帯中に賦存している。主鉱体の延長は480m、平均の厚さが16m、平均の品位がCaF₂で57.96%である。計算によればその地質鉱量は337万t、CaF₂鉱量は195万tである。同鉱床中には2体の富鉱体があり、その平均品位はCaF₂ 65.33%および74.28%で、製鉄のすぐれた溶剤になるべきものである。高品位鉱の地質鉱量は合計173万tに達している。

承文(中国地質報 1987.5.18)