

地熱熱水を用いたシリカスケールの生成機構と数値パラメータの同定
Study on Silica Deposition of Geothermal Water and Parameter Identification

九州大学 工学部 畑中 耕一郎 神野 健二
生産科学研究所 糸井 龍一 前川 宏明
理学部 横山 拓史 九州電力㈱ 清水 晨

1. まえがき

地熱発電では、地表へ噴出した地熱流体から蒸気を分離しその蒸気を利用して発電を行っている。一方、蒸気を分離した後の熱水は、地熱貯留層の圧力維持あるいは環境保全の為に還元井より地下に還元されている。その際に熱水中に溶存するシリカが地表のパイプラインのみならず地下の熱水流路にまで付着し、地層の透水性を低下させている。そこで、地熱発電所では、シリカスケール生成防止対策の一つとして滞留層を設け、そこでシリカを付着させることによって人工的に熱水中のシリカ濃度を減少させ、その後に熱水を地下に還元している。これによって、スケール生成が軽減されているが、シリカ付着による還元井の熱水還元能力低下は依然として生じており、発電所の維持運営にあたっていまだ重要な問題である。著者らは、熱水中のシリカの付着機構、シリカ付着量と透水係数の関係などの問題点を明らかにする目的で充填層を製作し、これに九州電力㈱大岳地熱発電所の地熱熱水を通水する基礎的実験を実施するとともに、現象の数値モデルについて解析を行っている。これまでは、数値モデルの吸着パラメータを試行錯誤的に与えた数値シミュレーションを実行し数値モデルの妥当性について検討してきたが、本研究ではカルマンフィルターを適用することによりこれらのパラメータを一意的に同定することを試みたので、その結果について報告する。

2. 実験

2.1 実験装置

実験は図-1に示すような定水位試験装置を用いて行った。充填層におけるスケール付着は上部に集中すると考え、付着による差圧変化を詳しく読みとるために、充填層上部ではマンメータを密に配置した。また、流入熱水、流出熱水の温度を測定するため、図に示すような2ヶ所に温度センサを設置している。実験中は流入口、流出口の熱水を採取して各化学成分の分析を行っている。

2.2 実験手順

実験手順は次の通りである。

- ①水で飽和した状態で充填材であるアルミナビーズ（粒径2mm）をつめ、これを実験装置に取り付ける。
- ②充填層に温水を循環させて充填層の温度を熱水と同じ温度に保つ。
- ③熱水を流入させて通水を開始する。
- ④マンメータの読みが落ち着いた時点から水頭、流量の測定を行い、同時に化学分析のための流入熱水、流出熱水を採取する。
- ⑤通水停止後、充填層を装置から取りはずし、充填層の所定の位置のビーズを採取して抑留量を測定する。

3. シリカスケールの生成機構

表-1に実験に用いた大岳地熱熱水の化学分析結果を示す。また、これまでの分

表-1 大岳地熱熱水の化学分析の結果

pH	8
temp(°c)	90
element	(ppm)
SiO ₂ (total)	522
SiO ₂ (Monomer)	496
SiO ₂ (dimer)	26
Li	5.6
Na	1150
K	125
Mg	0.22
Ca	44.8
Cl	1670
SO ₄	188
Al	0.55

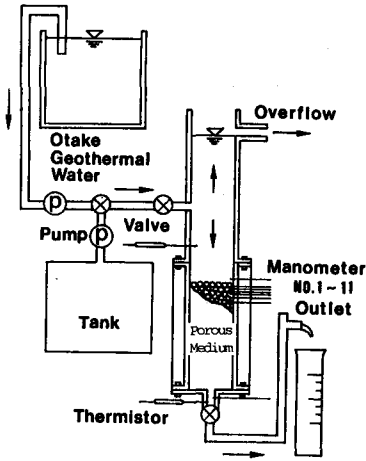


図-1 実験装置の概要

析結果によれば熱水に含まれるケイ酸はほとんどがモノマーであること、充填層内ではケイ酸の重合は起らないこと、したがって実験では大きなケイ酸ポリマーはスケール生成に関与していないことが判っている。また通水後のダイマー濃度が通水前とほとんど変化しないことから、スケール生成反応には大部分モノマーのみが関与する反応であることも明らかになっている。一方、熱水及びスケール中にはSiの他に種々の微量元素(Al、Fe、Mg、Ca、Na、Li、K、等)が含まれているが、その中でもアルミニウムがスケール生成に重要な役割を果していることが報告されている。^{1) 2)}

4. 基礎式

4.1 シリカ濃度の連続式及びアルミニウム濃度の連続式

ろ材表面ではモノマー-シリカの吸着が生じるため熱水中のモノマー-シリカ濃度が減少する。これまでの基礎実験でシリカスケールの生成機構において大岳地熱熱水中のモノマー-シリカは単独で反応して吸着するのではなく、アルミニウムが重要な役割を果していることが明らかになっている。そこで、シリカとアルミニウムとの相互作用による吸着項がモノマー-シリカ単独の一次反応項や分散項に比べて卓越すると考え、モノマー-シリカ濃度の連続式を次のようにおいた。

$$\partial Cs(x,t)/\partial t + u \partial Cs(x,t)/\partial x = -\beta_1 Cs(x,t) Ca(x,t) (1 + \beta_2 Qs(x,t)) \quad (4.1)$$

又、アルミニウムはシリカに比べて濃度は著しく小さく、ろ材1g当りに吸着するスケール中のアルミニウムの重量はシリカの重量に比べて十分小さいため、アルミニウム濃度の連続式を次のように仮定した。

$$\partial Ca(x,t)/\partial t + u \partial Ca(x,t)/\partial x = -\beta_3 Cs(x,t) Ca(x,t) \quad (4.2)$$

ここに、Cs:モノマー-シリカ濃度(mg/l)、Ca:アルミニウム濃度(mg/l)、u:空隙内の実質流速(cm/sec)、Qs:シリカ抑留量(ろ材1g当りのシリカのグラム数;g/g)、 β_1 、 β_2 、 β_3 :吸着パラメータ

4.2 抑留量の増加と空隙率の変化を表す式

σ_m をろ材の比重、 ρ_w を水の密度(g/cm³)、 ϵ_0 を初期空隙率とすると座標軸xの刻み幅 Δx 当りのシリカの抑留量は

$$(1 - \epsilon_0) \Delta x \sigma_m \rho_w Qs(x,t)$$

である。したがって抑留量の時間変化率は

$$\partial \{ (1 - \epsilon_0) \Delta x \sigma_m \rho_w Qs(x,t) \} / \partial t = \Delta x \epsilon (x,t) \beta_1 Cs(x,t) Ca(x,t) (1 + \beta_2 Qs(x,t))$$

すなわち、

$$\{ (1 - \epsilon_0) \sigma_m \rho_w / \epsilon (x,t) \} \partial Qs(x,t) / \partial t = \beta_1 Cs(x,t) Ca(x,t) (1 + \beta_2 Qs(x,t)) \quad (4.3)$$

また空隙率の変化は、

$$\epsilon(x,t) = \epsilon_0 - \{ \sigma_m (1 - \epsilon_0) / \sigma_s (1 - fs) \} Qs(x,t) \quad (4.4)$$

である。ここに、 ϵ :空隙率、 ϵ_0 :初期空隙率、fs:2次空隙率、 σ_s :シリカの比重である。

4.3 抑留量と透水係数の関係式

モノマー-シリカがろ材表面に抑留されるにしたがって充填層の空隙が狭くなり、透水係数が小さくなる。このときの透水係数 $K(x,t)$ と初期透水係数 K_0 (一定)との関係を次のようにKozeny-stein式で与える。³⁾

$$K/K_0 = F(Qs(x,t)),$$

$$F(Qs(x,t)) = \{ \epsilon_0 - \{ (1 - \epsilon_0) \sigma_m / \sigma_s (1 - fs) \} Qs(x,t) \}^3 / \epsilon_0^3 [1 + \{ \sigma_m / \sigma_s (1 - fs) \} Qs(x,t)]^2 \\ \times \{ [\{ \sigma_m / 3 \sigma_s (1 - fs) \} Qs(x,t) + 1/4]^{1/2} + \{ \sigma_m / 3 \sigma_s (1 - fs) \} Qs(x,t) + 1/2 \} \} \quad (4.5)$$

4.4 流れの基礎式

流体の非圧縮条件は、断面平均流速を $U(x,t) = \epsilon(x,t) u(x,t)$ とすると1次元の場合、

$$\partial U(x,t) / \partial x = 0 \quad (4.6)$$

実験により求めた抵抗係数(C_D)とレイノルズ数(Re)の関係式 $C_D = 1284 \times Re^{-0.891}$ より、運動方程式は

$$U = K \cdot (-\partial \phi / \partial x)^{0.902} \quad (4.7)$$

で表わされる。

5. 拡張カルマンフィルタによる吸着パラメータの同定

5.1 問題の定式化

式(4.1)~式(4.7)で全ての状態量を推定しようとすればかなりの計算量になることが考えられる。また、式(4.1)及び(4.2)には非定常項や移流項も含まれている。移流項の差分近似ではこのための離散化誤差が大きく数値計算が非常に困難になる。そこで本報ではこの難点を避けるため、式(4.1)、(4.2)の非定常項が小さいとしてこれを無視する。これは通常、ろ過方程式で用いられている近似である。一方、スケリング現象の物理的な本質は「抑留によって透水係数が低下し、その結果、流量が低下する」点にある。したがって抑留量の時間的変化に注目しておけば大局的な現象を捉えることができるであろう。そこで式(4.3)を改めて次のように書きシステム方程式とする。

$$dQ_s(n,t)/dt=f(\beta_1(t),\beta_2(t),Q_s(n,t))+w(n,t) \tag{5.1}$$

$$f(\beta_1(t),\beta_2(t),Q_s(n,t))=\epsilon(n,t)/(1-\epsilon_n)\sigma_m\rho_w\cdot\beta_1(t)C_s(n,t)Ca(n,t)(1+\beta_2(t)Q_s(n,t))$$

$w(n,t)$:システム雑音、ここに、 n は差分区間の第 n 番目の番号。またパラメータ β_1 、 β_2 、も同定したいから時間の関数としておく。

次に、観測方程式は流量と水頭勾配の観測値を使って次のように与える。

$$Q(m,t)=A i(m,t)^{0.902} K(m,t)+v(m,t)$$

式(3.5)より

$$Q(m,t)=A i(m,t)^{0.902} K_0 F(Q_s(m,t))+v(m,t) \tag{5.2}$$

ここに、 m は観測点の番号、 Q :流量の実測値、 A :断面積、 i :水頭勾配の実測値、 v :観測雑音

5.2 式(5.1)及び(5.2)へのカルマンフィルタの適用

実験により得られる情報量は、流量及び水頭分布であり、これを用いてシステム状態量 Q_s 、未知パラメータ β_1 、 β_2 を同定しなければならない。実際には、スケリング現象で変化するのはシリカ抑留量 Q_s ばかりではなく、シリカ、アルミニウムの濃度分布、水頭分布であるから、これらの計算も同時に行う必要がある。したがって、濃度及び水頭分布についても差分計算を行った。図-2は充填層の差分区間を示している。又、表-2は差分間隔と

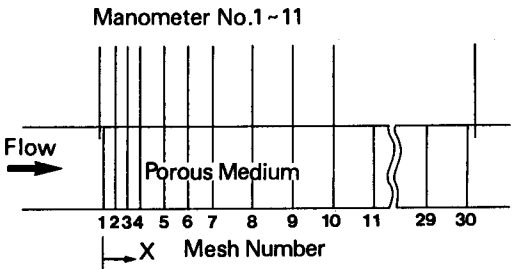


図-2 充填層の差分間隔

距離の値である。充填層上部では差分間隔をマノメータ間隔と等しくとりマノメータNo.10とNo.11の間は20等分した。したがって、カルマンフィルタの計算においては、30個の状態量の予測を行うとともに2個の未知パラメータを同定する。また、水頭の観測点は11点あり10箇所の位置で実測値による水頭勾配が求められる。次に、未知パラメータについては、 β_1 、 β_2 はシリカの濃度減少、抑留を支配するパラメータであり、システム方程式(5.1)にも含まれているのでオンラインで同定することが可能である。しかし、 β_3 は(5.1)式に含まれていなくて、シリカの抑留式にアルミニウム濃度を通して間接的に影響を及ぼすパラメータであるので、これを直接同定することは困難である。そこで、計算を行うにあたり、式(4.1)、(4.2)において、充填層内でのシリカとアルミニウムの吸着状態は同じであると考え $\beta_1=\beta_3$ とした。

5.3 観測行列及びシステム行列

式(5.1)、(5.2)は状態量 $Q_s(n,t)$ とパラメータ β_1 、 β_2 、に関して非線形システムであるから、それぞれの状態量の最適推定値のまわりにTaylor展開す

表-2 x座表と刻み幅Δx

Mesh Number	X(cm)	ΔX(cm)
1	0.00	
2	0.50	0.50
3	1.00	0.50
4	1.50	0.50
5	2.50	1.00
6	3.50	1.00
7	4.50	1.00
8	6.50	2.00
9	8.50	2.00
10	10.50	1.95
11	12.44	.
.	.	.
.	.	1.95
29	47.45	1.95
30	49.40	

ると、次のようなJacobian行列F、及びHを得る。

$$F = \begin{pmatrix} 1 + \Delta t \frac{\partial f}{\partial Qs|_1} & 0 & \cdot & \cdot & 0 & \Delta t \frac{\partial f}{\partial \beta_1|_1} & \Delta t \frac{\partial f}{\partial \beta_1|_1} \\ 0 & 1 + \Delta t \frac{\partial f}{\partial Qs|_2} & \cdot & \cdot & 0 & \Delta t \frac{\partial f}{\partial \beta_1|_2} & \Delta t \frac{\partial f}{\partial \beta_1|_2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & 1 + \Delta t \frac{\partial f}{\partial Qs|_n} & \Delta t \frac{\partial f}{\partial \beta_1|_n} & \Delta t \frac{\partial f}{\partial \beta_2|_n} \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

$$H = \begin{pmatrix} 0.902 & & & & & & \\ Ai(1,t) K_0 \frac{\partial F}{\partial Qs|_1} & 0 & \cdot & \cdot & \cdot & 0 & \cdot & 0 \\ 0 & 0.902 & Ai(2,t) K_0 \frac{\partial F}{\partial Qs|_2} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & 0 & \cdot & \cdot & Ai(m,t) K_0 \frac{\partial F}{\partial Qs|_m} & 0 & \cdot & 0 \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

5.4 近似フィルタアルゴリズム

システム行列、観測行列は実際の観測値に依存するが、時間更新毎に観測値が与えられシステム行列、観測行列が計算されれば式(5.5)~(5.8)に示されるアルゴリズムに従って、逐次状態量 $Qs(n,t)$ 及び未知パラメータ β_1 、 β_2 の最適推定値が決定される。

$$G(t) = P(t|t - \Delta t) H^T(t) [H(t) P(t|t - \Delta t) H^T(t) + R(t)]^{-1} \quad (5.5)$$

$$P(t|t) = [I - G(t) H(t)] P(t|t - \Delta t) \quad (5.6)$$

$$P(t + \Delta t|t) = F(t) P(t|t) F^T(t) + V(t) \quad (5.7)$$

$$Z(t|t) = Z(t|t - \Delta t) + G(t) [Q(t) - Ai(t) K_0 F(Qs(t|t - \Delta t))] \quad (5.8)$$

$$Z(t + \Delta t|t) = \begin{pmatrix} Qs(t + \Delta t|t) \\ \beta_1(t + \Delta t|t) \\ \beta_2(t + \Delta t|t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Qs(t|t) + \Delta t \cdot f(\beta_1(t|t), \beta_2(t|t), Qs(t|t)) \\ \beta_1(t|t) \\ \beta_2(t|t) \end{pmatrix} \quad (5.9)$$

G:カルマンゲイン、P:推定誤差共分散行列、I:単位行列、R:観測雑音の分散行列、V:システム雑音の分散行列、 Δt :時間刻み

6. 計算結果及び考察

表-3は、 β_1 、 β_2 の初期値と観測終了時における最適推定値であり、図-3、図-4は β_1 、 β_2 の経時変化である。これによると、未知パラメータ β_1 、 β_2 の値は、初期値によって収束速度に差異はあるものの、最終的に β_1 は250~350(K ℓ /sec $\cdot$ mg)の間に、 β_2 は300~500の間に収束している。

又、 β_1 と β_2 とは β_1 が大きい値である時は β_2 は小さくなり、 β_1 が小さい値である時は β_2 が大きくなる傾向があり相互に影響を及ぼしあっていると考えられる。

図-5はCase2の観測点1~4でのイノベーションの変化であるが時間が経つにしたがって0に収束してゆく様子がうかがえる。これは状態量 Qs 、抑留パラメータ β_1 、 β_2 が最適値に近づ

表-3 β_1 、 β_2 の初期値と最適推定値

Case	初期値		最適推定値	
	β_1	β_2	β_1	β_2
1	100	1000	247	463
2	400	300	295	446
3	300	1500	327	320
4	200	500	284	491
5	500	500	372	323
6	500	1000	409	253
7	400	500	344	363

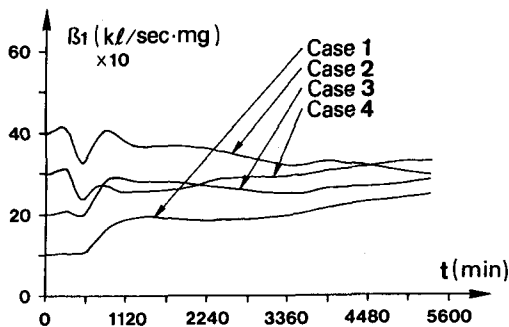


図-3 β_1 の時間変化

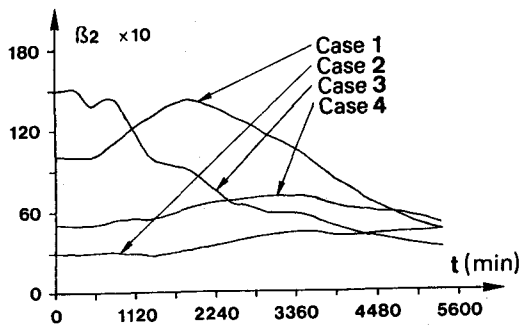


図-4 β_2 の時間変化

いてきていることを示している。そこでカルマンフィルタにより同定した最適パラメータ β_1 、 β_2 の妥当性を確かめるためにCase2において求められた最適パラメータ $\beta_1=295(\text{Kl/sec}\cdot\text{mg})$ 、 $\beta_2=446$ の場合の数値計算を行ってみた。図-6、図-7は実測した流量と水頭分布であるが、計算値と実測値は殆ど一致しており、この β_1 、 β_2 の値が妥当なものであると結論できる。

図-8~図-11はその時のシリカ濃度分布、アルミニウム濃度分布、抑留量分布、透水係数分布の経時変化であるがシリカがろ層上部に集中的に抑留してゆき、ろ層の透水性が低下していく様子がわかる。

7. むすび

以上の結果によりシリカの抑留過程の数値モデルのパラメータの同定と抑留量の予測にカルマンフィルタが適用でき、モデル実験における現象を数学的にシミュレートできることが判った。今後、他の実験例にも適用し本報の妥当性を確認するとともに実際の還元井にも適用しプラントの維持、管理に役立てたい。

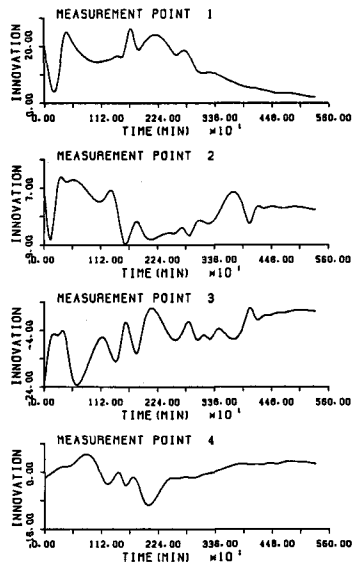


図-5 Case 2 におけるイノベーション

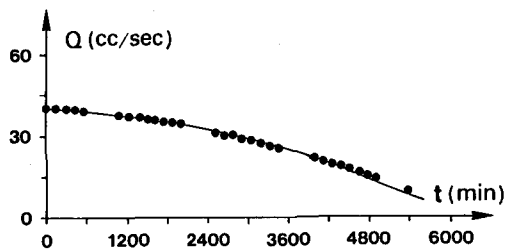


図-6 流量の時間変化

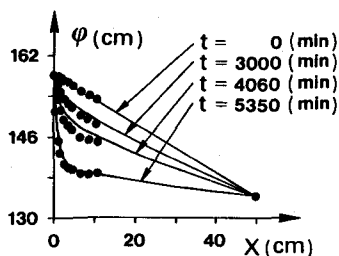


図-7 水頭分布の時間変化

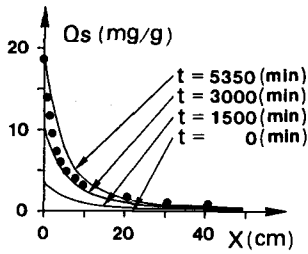


図-8 抑留量分布の時間変化

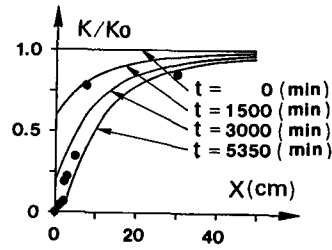


図-9 透水係数分布の時間変化

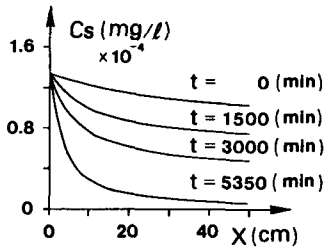


図-10 シリカ濃度分布の時間変化

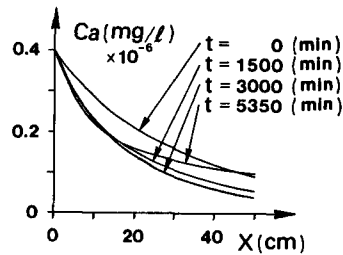


図-11 アルミニウム濃度分布の時間変化

謝辞

本研究を行うにあたり、九州大学工学部 上田年比古教授、生産科学研究所 福田道博助教授、九州電力 火力研究室の方々、並びに新エネルギー開発機構(NEDO)の方々及び本学技官 大石秀人氏、学生 池田典男君に有益な御助言、御助力を頂きました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) Itoi, R., Maekawa, H., Fukuda, M., Jinno, K., Hatanaka, K., Yokoyama, T. & Shimizu, S.: Experimental Study on Silica Deposition in a Porous Media, Geothermal Resources Council, Transactions Vol.8, pp.301~304, 1984.
- 2) Itoi, R., Maekawa, H., Tatuta, K., Fukuda, M., Jinno, K., Hatanaka, K., Nozaki, S., Yokoyama, T., Shimizu, S.: A Mathematical Model of Silica Deposition in a Porous Medium, Geothermal Resources Council, Transaction Vol.9, pp.327~340, 1985.
- 3) 上田年比古、神野健二、安田裕、重藤恵昭:懸濁物質による砂充填層内の目づまりと再揚水による透水係数の回復について、日本地下水学会誌、第25巻、第3章、pp.121~138、1983.