

第4章 ランプトパラメータモデルによる生産 - 還元メカニズムの解析

4.1 緒言

本章では，地化学モニタリングの結果を解析し，還元流体の生産井への還流のメカニズムを明らかにした。この貯留層の挙動を再現するために，化学成分および流体質量に関する質量保存則，並びに岩盤と流体に関するエネルギー保存則を考慮し，別々の気水分離系からくる化学組成が異なる二種類の分離熱水と蒸気復水の三者が生産領域へ還流するランプトパラメータモデルを開発した。これにより各生産井に対してそれぞれの還元流体が生産井へ還流する割合，並びに各生産井が貯留層内に支配している生産タンクの容量の推定を試みた。

なお，本章で使用する記号を以下に示す。

c	specific heat [kJ/(kg·K)]
[C]	chemical concentration [mg/kg] or isotopic composition [‰]
f	mass fraction of reinjection fluid returning to total of the reinjection fluid (returning ratio)
h	time increment [s]
M	flow rate [kg/s]
m	mass fraction of reinjection fluid returning to the production fluid (mixing ratio)
NS	nomalized sum of square of residuals
R	radius of tank [m]
[T]	temperature [°C]
V	volume of production tank [m ³]
W	fluid mass in production tank [kg] ratio of thermal properties of rock and fluid, defined in equation (4.9) density [kg/m ³] porosity in reservoir rock
[subscripts]	
best_fit	calculated at best fit

c	steam condensate
calc	calculated
ij	injection
meas	measured
n	increment of time step
p	production
r	rock
rg	recharge
rt	return of reinjection fluid
w	separated water
1	R1
2	R2
3	R3

4.2 生産 - 還元系統の概要

澄川発電所における生産 - 還元系統を図 4.1 に示す。7本の生産井に対して7本の分離熱水用の還元井および3本の蒸気復水用の還元井からなる。A基地には、4本の生産井があるがこのうち S-4 坑以外は熱水の噴出を伴わない蒸気優勢の生産井である。従って、S-4 坑の分離熱水がB基地の3本の還元井に還元されていると見なせる。B基地生産井 SB-1 坑の分離熱水は、他の分離熱水と混合されずE基地の還元井 SE-3 坑へ還元される。C基地には、生産井が2坑井ありそれぞれの生産流体はセパレータで合流し、D基地の3本の還元井に輸送される。発電所で生成される蒸気復水は、D基地の SD-2 坑とE基地の2坑井に輸送されるが、量的にはほとんどE基地にて処理されている。

4.3 地化学モニタリング

(1) 地化学モニタリング結果

澄川地域で相対的に低いエンタルピーを示す代表的な生産井 SB-1 坑、S-4 坑および SC-1 坑のシリカ温度、総流量での Cl 濃度、SO₄濃度、および水素同位体組成の経年変化を図 4.2 に示す。

SB-1 坑

SB-1 坑は、試運転の一時期噴気が行われたが、その後しばらくの間停止状態であった。再噴気は 1996 年 7 月に始まり現在に至る。噴出流量は、蒸気が約 5kg/s および熱水が約 15kg/s と澄川地域の中では噴出流量は少ない。

シリカ温度は、再噴気直後には 245 付近であったが経年的に低下し、1999 年 5 月には 225 まで低下する。Cl 濃度は、増減を繰り返し、大局的に横這の傾向を示す。この Cl 濃度の増減のパターンは、夏季に増加し冬季に低下するという周期性をもつ。

D も Cl 濃度の変化と同様に季節変動するが、Cl 濃度が高い時に D が低くなる特性を示す。SO₄濃度は当初横這の傾向を示すが、1998 年半ばより突然増加しその後横這となる。

S-4 坑

S-4 坑の蒸気流量は約 10kg/s で、熱水流量は約 30kg/s である。シリカ温度は噴気開始から 10 ヶ月間は 260～265 の間で安定しているが、その後緩やかに低下し続け 1999 年 5 月現在で 235 となる。Cl 濃度は、噴気開始より 6 ヶ月間は低下傾向を示し、その後増加と緩やかな低下を繰り返しながら増加する。この Cl 濃度の増減パターンは、SB-1 坑のそれと同様の傾向を示す。1997 年の後半からこの季節変動は緩慢となる。D は、噴気開始当初は運転前データと同様に低い値である。その後 1995 年 5 月に急上昇し増減を繰り返しながら概ね緩やかな低下傾向を示す。同位体組成の増減のパターンは、SB-1 坑と同様に Cl 濃度の増減と逆相関を示す。SO₄濃度は、噴気開始当初 50mg/kg と低い値であったが、その後半年の間に急上昇し 100mg/kg 以上となりその後概ね横這となる。

SC-1 坑

SC-1 坑の噴出流量は、蒸気が約 35kg/s および熱水が約 90kg/s と澄川地域では最も多い坑井である。シリカ温度の低下は、前述した 2 坑井に比較し緩慢であり、約 4 年半で 10 の低下しか認められず、1998 年後半からは横這となる。Cl 濃度は、噴気開始当初は時間経過に伴い低下するが、噴気開始から約 1 年半後上昇に転じ、直線的な増加の後 1998 年後半から再び低下傾向を示す。SO₄濃度においても 1998 年後半からの変化は、Cl 濃度と同様の傾向が見られる。一方 D は、噴気開始以降緩やかに上

昇を続ける。本坑井では、S-4 坑および SB-1 坑流体に見られた Cl 濃度および D の周期変動は認められない。

(2) Cl 濃度と SO₄濃度の関係

還元流体はその一部が生産流体として再湧出し、噴出流体は、還元の影響を受けていない初成貯留層流体と還元流体との混合によりそれぞれのエンドメンバーを結ぶライン（混合ライン）上に沿った変化が生じると予想される。図 4.3 には、運転開始後の S-4 坑、SB-1 坑および SC-1 坑、また B 基地、D 基地および E 基地に還元される熱水の Cl 濃度と SO₄濃度の関係を示す。S-4 坑および SC-1 坑は、ともに噴気開始当初には Line A の付近に位置している。同ラインは高 Cl-低 SO₄の深部流体と低 Cl-高 SO₄の浅層熱水の希釈ラインと推定されている。その後時間経過に伴い S-4 坑は Line B に沿って、また SC-1 坑は Line C に沿って、Cl 濃度が高くなる方へ移動する。前者の移動方向の延長上には B 基地熱水および D 基地熱水の間隔的な領域が位置しており、後者のそれは D 基地熱水の領域を示している。このように Cl 濃度と SO₄濃度の関係から、S-4 坑および SC-1 坑の噴出流体は、それぞれ異なる還元領域からの熱水の影響を受けていることが示唆される。一方、SB-1 坑は、S-4 坑および SC-1 坑に比べ変化が小さく経時的なトレンドは明瞭ではない。

4.4 蒸気復水の化学的及び同位体的性質

登川地域の代表的な生産流体、還元される分離熱水および蒸気復水の Cl 濃度と D の関係を図 4.4 に示す。蒸気復水は Cl 濃度がゼロで、D が前二者に比べて高い。これは、Cl 成分は気相に分配されないこと、並びに沸騰・凝縮による同位体分別の結果である。即ち気水分離の際の同位体分別係数は温度の関数として与えられ、温度が低いほど液相と気相の同位体組成の差は大きくなる。蒸気復水は、復水器の中で約 40（約 0.1bar）の条件で生成され、その後冷却塔で半分以上は蒸発して大気へ逸散する。このため蒸気復水の水素および酸素同位体組成は、貯留層流体および分離熱水と比べ著しく高い値をもつ。蒸気卓越型貯留層において蒸気復水を還元し生産ゾーンへ還元した場合、噴出蒸気の水素・酸素同位体組成が上昇することが、D'Amore et al.(1987) および Klein and Eneedy(1989)により報告されている。このような蒸気復水の化学的および同位体的性質は、トレーサとして注目される。

また、蒸気復水の還元流量は季節変動を伴う。冷却塔での蒸発量は気温および湿度に左右され、冬季ほど少なく、夏季ほど多い。これを反映し蒸気復水還元量は、図 4.5 に示されるように冬季に増大し夏季に減少するという季節変動を生じる。

以上の結果より、還元された蒸気復水が一定の割合で生産領域へ還流した場合、蒸気復水量の季節変動の影響を受けて生産流体の Cl 濃度および同位体組成はお互い逆相関を持って周期変動を生じることが推定される。

4.5 トレーサテスト結果

還元流体の生産領域への還流の程度を定量的に把握するため、1999年5月にトレーサテストが実施された(図 2.15)。その時には、分離熱水を還元している代表的な還元井 SD-4 坑には KBr の、一方蒸気復水を還元している代表的な還元井 SE-2 坑には KI のトレーサをそれぞれ同時に投入し、生産井でモニタリングを開始した。SB-1 坑では、I は S-4 坑同様に明瞭なピークが 9 日後に認められたが、Br については明瞭なピークを示さないまま 4 か月過ぎに最大値が観測された。S-4 坑では、Br および I とともにそれぞれ明瞭なピークが投入から約 10 日後に認められた。SC-1 坑では、Br は 10 日過ぎに再湧出が始まり約 1 ヶ月後にピークが現れるが、I は 14 日後に再湧出を始めバックグラウンドから約 2 倍に増えた後一定の値を示している。Cl 濃度および D で季節変動を伴う SB-1 坑および S-4 坑で I の再湧出が多く、これらの季節変動が認められない SC-1 坑でその再湧出が少ないことは、季節変動が蒸気復水の還流によってもたらされることを支持している。

4.6 ランプトパラメータモデルの構築

(1) ランプトパラメータモデルの作成

従来ランプトパラメータモデルは対象地熱地域全体を単一の貯留層として扱うモデルとして使用されている (Malate and O'Sullivan, 1991; 茂野ほか, 1992; 窪田・松葉谷, 1998)。澄川地域では、前述のとおり SB-1 坑、S-4 坑および SC-1 坑の地化学温度および化学成分はそれぞれ異なる値をもつ。従って、本研究では貯留層の中に生産井毎の個別の生産タンクがあると見なし、各坑井 (SB-1 坑、S-4 坑および SC-1 坑) を対象としてそれぞれランプトパラメータモデルを適用し解析を行なった。図 4.6 にその生産 - 還元を表現するランプトパラメータモデルを示す。本モデルにより還元さ

れた分離熱水および蒸気復水が、生産タンクへ還流する割合、並びに各生産井が貯留層内に支配する生産タンクの容量を推定する。今回作成されたモデルの基本概念は以下のとおりである。

各生産井が、貯留層中に支配する空間を生産タンク (Production Tank) と定義する。生産タンクでは、系外からの流体の流入、還元された蒸気復水および分離熱水の還流、および生産井を通して地上への流出がある。

還元温度および流体地化学性状の違いより、還元流体の還元領域を R1, R2 および R3 の3つの区域に分割する (図 4.7 にその位置を示す)。ここで、R1, R2 および R3 には、それぞれ E 基地 (蒸気復水)、B 基地 (分離熱水) および D 基地 (分離熱水) に対応する。なお、蒸気復水は D 基地 SD-2 坑にも少量還元された。しかし、この量は E 基地への還元量に比べわずかであり、かつ間欠的なため、蒸気復水還元区域 (R1) は E 基地のみとして扱った。また SE-3 坑のインジェクションポイントは B 基地還元区域に接近しているため、E 基地還元井 SE-3 坑を R2 に含めて取り扱った。

蒸気復水および2つの分離熱水は全量還元されその一部が生産タンクへ戻る。総還元流量に対する各生産タンクに戻る還流量の割合を還流率と定義する。これは、還元区域毎に独立する。

生産タンク内の流体質量は解析期間内で一定とする。解析対象とする期間は4年未満と短く、その間には各坑井の生産流量に大きな変化は認められない。従って、生産タンク内の流体質量を一定としても差し支えない。

生産タンクは熱水単相とする。解析対象とした S-4 坑、SB-1 坑および SC-1 坑は生産エンタルピーとシリカ温度の比較から若干過剰エンタルピーの特徴をもつが、二相領域はごく坑井近傍に限られるとしてこの影響を無視した。

(2) 数学モデル

上述の仮定に基づき、生産タンク内の流体の化学組成、同位体組成および温度に関する数学モデルを作成した。

化学成分および流体に関する質量保存の式

生産タンク内の化学成分濃度の時間変化率は、生産タンクに流入する流体と流出す

る流体の成分濃度と流量で定まり、以下の質量保存則で表される。

$$\frac{d[C]_p}{dt}W = [C]_{rg}M_{rg} + [C]_{rt1}M_{rt1} + [C]_{rt2}M_{rt2} + [C]_{rt3}M_{rt3} - [C]_pM_p \quad (4.1)$$

ここで、 $[C]_{rg}$ 、 $[C]_{rt1}$ 、 $[C]_{rt2}$ 、 $[C]_{rt3}$ および $[C]_p$ は、それぞれ系外から流入する流体、還流する蒸気復水、2つの分離熱水および生産流体の化学成分濃度である。また、 M_{rg} 、 M_{rt1} 、 M_{rt2} 、 M_{rt3} および M_p は、それぞれ系外から流入する流体、還流する蒸気復水、2つの還元熱水および生産流体の質量流量を示す。Wは生産タンクの流体質量である。

前述の生産タンクの質量が一定という仮定により、生産タンクに流入および流出する流体流量は以下の質量保存則が成り立つ。

$$M_{rg} + M_{rt1} + M_{rt2} + M_{rt3} - M_p = 0 \quad (4.2)$$

生産タンクへ流入する各流体の流量（それぞれ M_{rt1} 、 M_{rt2} 、 M_{rt3} および M_{rg} ）は、式(4.2)とそれぞれの還元流量、生産流量、および還流率を用いて以下のように表される。

$$M_{rt1} = f_1 M_{ij1} \quad (4.3)$$

$$M_{rt2} = f_2 M_{ij2} \quad (4.4)$$

$$M_{rt3} = f_3 M_{ij3} \quad (4.5)$$

$$M_{rg} = M_p - (f_1 M_{ij1} + f_2 M_{ij2} + f_3 M_{ij3}) \quad (4.6)$$

ここで、 f_1 、 f_2 および f_3 はそれぞれ R1、R2 および R3 の還流率を、 M_{ij1} 、 M_{ij2} および M_{ij3} はそれぞれ R1、R2 および R3 の還元流量を示す。式(4.3)～(4.6)を式(4.1)へ代入し、単位時間ステップ幅 $h(=t_{n+1}-t_n)$ を用いて式(4.1)の左辺の微分項を差分展開すると、時間ステップ(n)の噴出流体の化学成分濃度 $[C]_{p,n}$ を用いて次の時間ステップ(n+1)の噴出流体の化学成分濃度 $[C]_{p,n+1}$ は、次式により表される。

$$[C]_{p,n+1} = [C]_{p,n} + \frac{h}{W} \left[[C]_{rg} \{ M_{p,n} - (f_1 M_{ij1,n} + f_2 M_{ij2,n} + f_3 M_{ij3,n}) \} + [C]_{rt1,n} f_1 M_{ij1,n} \right. \\ \left. + [C]_{rt2,n} f_2 M_{ij2,n} + [C]_{rt3,n} f_3 M_{ij3,n} - [C]_{p,n} M_{p,n} \right] \quad (4.7)$$

ここで、対象となる化学成分としては、Cl濃度、 SO_4 濃度および Dを用いた。このうち SO_4 成分は反応性成分であるが、以下の理由より非反応性成分として扱った。澄川地域の地熱流体は、貯留層中で硬石膏に関し飽和している（第3章に詳述）。これは、地熱流体中の SO_4 成分は硬石膏の沈殿溶解反応に左右されていることを示している。しかしながら、同地域の地熱流体の Ca と SO_4 の量比は、後者が前者より10倍以上高いので、硬石膏の沈殿溶解反応が起こっても SO_4 濃度にはあまり影響を与えな

い。このことは、前述の生産流体の Cl 濃度と SO₄濃度の関係 (図 4.3) から支持される

エネルギー保存の式

エネルギー保存の式は、生産タンク内の流体と岩石が保有するエネルギーの総和の時間変化率が、生産領域に流入・流出する各流体の流量、比熱と温度の積の和に等しいと表される。

$$V \left\{ (1-f) r_r c_r + f r_p c_p \right\} \frac{d[T]_p}{dt} = [T]_{rg} M_{rg} c_{rg} + [T]_c M_{rt1} c_c + [T]_w (M_{rt2} + M_{rt1}) c_w - [T]_p M_p c_p \quad (4.8)$$

ここで、 V は生産タンクの容積、 f は生産タンクの岩石の孔隙率、 r_r および r_p はそれぞれ生産タンク内の岩石および流体の密度を、 c_r 、 c_p 、 c_w および c_c はそれぞれ生産タンク内の岩石、流体、還元される分離熱水および蒸気復水の比熱を、 $[T]_p$ 、 $[T]_{rg}$ 、 $[T]_w$ および $[T]_c$ はそれぞれ生産タンク内の流体、系外から流入する流体、還元される分離熱水および蒸気復水の各温度を示す。

生産タンクの容積 V は、生産タンクの流体質量、孔隙率および流体密度を用いて次式で表される。

$$V = \frac{W}{f r_p} \quad (4.9)$$

また、岩石と流体の熱容量の比を b と置くと、

$$= \frac{(1-f) r_r c_r}{f r_p c_p} \quad (4.10)$$

と表される。

化学成分に関する質量保存の式と同様に、式(4.2)～(4.6)および式(4.9)～(4.10)を式(4.8)へ代入し、式(4.8)の左辺の微分項を単位時間ステップ幅 $h(=t_{n+1}-t_n)$ で差分展開すると、時間ステップ(n)の生産タンク内の温度 $[T]_{p,n}$ を用いて次の時間ステップ(n+1)の生産タンク内の温度 $[T]_{p,n+1}$ は、次式により表される。

$$[T]_{p,n+1} = [T]_{p,n} + \frac{h}{W(1+b)} \left[[T]_{rg} \left\{ M_{p,n} - (f_1 M_{ij1n} + f_2 M_{ij2n} + f_3 M_{ij3n}) \right\} \frac{c_{rg}}{c_{p,n}} + [T]_c f_1 M_{ij1n} \frac{c_c}{c_{p,n}} \right]$$

$$+[T]_w (f_2 M_{ij2,n} + f_3 M_{ij3,n}) \frac{c_w}{c_{p,n}} - [T]_{p,n} M_{p,n}] \quad (4.11)$$

(3) 入力変数と未知変数

計算に必要な入力変数を表 4.1 に示す。入力変数の決定方法は以下に示すとおりである。

各坑井に対する生産タンクの温度，化学組成および同位体組成の初期値は，Cl 濃度が上昇する直前の実測値を用いた。ここで，生産タンクの温度はシリカ温度で代用した。本地域のシリカ温度は，Ueda et al.(1991)より概ね貯留層温度を示すと報告されている。

生産タンクへ系外から流入する流体の温度，化学組成および同位体組成は，還元の影響が現れる前のデータの平均値を求めこれを用い，解析期間内では一定とした。なお，SB-1 坑の D は，還元の影響が現れる前のデータは取得されていないので，運転開始前のデータを Ueda et al.(1991)より引用した。

分離熱水および蒸気復水のそれぞれの還元温度を，実測データに基づき 150 および 40 と設定した。

岩石の密度および比熱は，生産井フィードポイント深度付近から得られたコアの物性試験結果に基づいた。

生産タンク内の温度は，時間とともに変化する。従って，その流体の密度および比熱は，その温度に対応した値を与えた。

還元された流体が生産タンクに還流する時間は，単位時間ステップ以内であり，時間的遅れはないものとする。トレーサテストの結果も参照し単位時間ステップ幅は，2,628,000sec (約 1 ヶ月) とした。

各生産井の生産流量，各還元領域の還元流量，および各還元流体の化学組成および同位体組成は，実測データを用いた。

以上のことから，式(4.7)および式(4.11)における未知変数は，生産領域の流体質量 (W)，孔隙率 ()，各還元区域 (R1,R2, R3) の還流率 (f₁, f₂, f₃) の計 5 つとなる。これらの未知変数は，実測された Cl 濃度，SO₄ 濃度，D および温度の経年変化と計算値との整合を図ることにより決定される。ここでは，4 つの拘束条件に対して実測値と計算値との残差二乗の総和が最小になる時の 5 つの未知変

数の組み合わせを最適解（最小二乗解）として抽出した。

4.7 計算結果

SB-1坑, SC-1坑およびS-4坑の解析結果を実測値とともにそれぞれ図4.8～図4.10に, また決定された生産タンクの流体質量(W), 孔隙率(), それぞれの還流率(f_1 , f_2 , f_3)を表4.2に示す。

(1) SB-1坑

SB-1坑は, 再噴気以降より化学成分の季節変動が認められている1996年7月から1999年5月までを解析期間として計算を行なった。Cl濃度およびDの季節変動は, 計算値と実測値とは概ね整合しているが, 季節変動の振幅は, 計算値より実測値の方が若干大きい。実測された季節変動の周期が計算結果と一致することは, 蒸気復水が1ヶ月以内で生産領域へ戻っていることを意味している。一方SO₄濃度は, 実測値の季節変動がやや不明瞭であるのに対し, 計算値のそれは明瞭に現れている。また, 解析初期と末期とは実測値からのずれが大きくなる。温度の経年的低下の傾向は, 計算結果が実測値とよく整合している。これらの最良のマッチング結果から得られた未知変数の値は, $W=7.3 \times 10^7 \text{kg}$, $\epsilon=0.006$, $f_1=0.13$, $f_2=0.13$, $f_3=0.01$ である。

(2) SC-1坑

SC-1坑は, 1995年12月頃から化学成分の濃度増加が生じ, 掃坑工事後の1998年10月より低下の傾向に転じた。従って, ここでは1995年12月から1998年9月までを解析期間として計算を行なった。Cl濃度, SO₄濃度, Dおよび温度の各変化とも計算値と実測値とは良く整合している。これらの最良のマッチング結果から得られた未知変数の値は, $W=5.6 \times 10^9 \text{kg}$, $\epsilon=0.015$, $f_1=0.00$, $f_2=0.00$, $f_3=0.85$ である。SC-1坑では化学組成の季節変動は認められておらず, このことは蒸気復水の還流率がゼロという解析結果とも調和する。

(3) S-4坑

S-4坑では, 1995年5月以降よりCl濃度の増加が始まった。この時期より1999年5月までを解析期間とした。しかしながら, 当初の解析結果は季節変動の増減が十

分再現されず，全体として整合性が良くないものとなった。この解析期間の間には，SB-1 坑の再噴気（1996 年 7 月）および SD-4 坑の還元開始（1996 年 10 月）という生産 - 還元システムに変化が生じていることから，解析期間を前半（1995 年 5 月～1996 年 11 月）と後半（1996 年 12 月～1999 年 5 月）に分けて再解析を行なった。図 4.10[A]及び[B]にそれぞれの結果を分けて示す。図 4.10[A]は，前半の期間を対象に解析を実施し（実線），そこで得られた未知変数を用いて後半の期間を計算した結果（破線）を併せて示す。解析対象とする前半の期間では実測値と計算値は概ね整合するが，解析対象外の後半では計算結果は実測値とのずれが大きくなる（特に D と温度）。後半のみを解析対象とした場合（図 4.10 [B]）は，実測値と計算値は概ね整合した結果が得られた。得られた未知変数の値は， W ， f_1 ， f_2 および f_3 は前半から後半にかけて， W が $1.5 \times 10^8 \text{kg}$ から $4.4 \times 10^8 \text{kg}$ へ， f_1 が 0.14 から 0.11， f_2 が 0.59 から 0.33， f_3 が 0.03 から 0.08 にそれぞれ変化しており，中でも W と f_2 の変化が大きい。これは，生産 - 還元システムの変化により流体質量と還流率が変わったことを意味する。一方は，岩石固有のパラメータであり，生産 - 還元状況の変化に依存しない。解析の結果， λ は前半から後半にかけて 0.009 から 0.019 へ変化が見られる。これは， W が前半から後半にかけて約 3 倍に増加しており，式(4.9)から明らかのように生産タンク容量の増大に伴い λ も変化したと解釈される。

(4) 感度解析

解析から得られた未知変数の妥当性（許容範囲，誤差等）を調べるために感度解析を実施した。感度解析では，実測値と未知変数を最適解を中心に变化させたときの計算値との残差二乗和をそれが最小となった時の値で規格化し，その値に基づき解の分布特性を調べた。規格化された残差二乗和は，次式で表される。

$$NS = \frac{S([C]_{meas} - [C]_{calc})^2}{S([C]_{meas} - [C]_{best_fit})^2} \quad (4.12)$$

ここで， NS は規格化された残差二乗和， $[C]_{meas}$ は実測値， $[C]_{calc}$ は計算値， $[C]_{best_fit}$ は最小二乗解が得られた時の計算値である。従って， NS は最適解の時は最小の値（= 1）をとり，整合性が悪いほど高い値を示す。

4 つの未知変数 W ， f_1 ， f_2 および f_3 のうち任意に 2 つを自由変数とし，他の 2 つは最小二乗解の時の値をとり NS の分布特性を調べた。その代表例として S-4（前半）

についての結果を図 4.11 に示す。

NS の分布特性は、還流率のみの組合わせの場合と生産領域の流体質量と還流率の組合わせの場合とでは異なるパターンを示した。前者では、二次元分布は比較的単純な同心円状の形を呈し、 f_1 - f_2 および f_1 - f_3 の組合わせと比べ f_2 - f_3 の組合わせの方が同心円は偏平となる。これは、3種類の還元流体の化学組成および同位体組成の違いを反映している。即ち、蒸気復水と分離熱水は化学組成および同位体組成がお互い著しく異なるためこれらの相関性が低くなるのに対し、2種類の分離熱水はお互い類似するため相関性が高くなることによる。一方、流体質量と還流率の組み合わせでは、同心円状の NS 分布は最適解の近傍のみに限られる。このような NS の分布から解析された最適値の許容範囲は、還流率で概ね ± 0.05 、流体質量では概ね 1/2 ~ 2 倍と評価される。

坑井毎に NS の分布特性を図 4.12 に示す。ここでは、4つの未知変数を最小二乗解に固定し、残りの1つを自由変数として NS の変化を調べた。 f_1 、 f_2 および f_3 では、最小二乗解周辺の NS の値は、SB-1 坑で最も変化率が高く、S-4 坑、SC-1 坑と順に低くなる。変化率が高いことは、最適解の許容範囲が狭いこと、即ちその妥当性が高いことを意味している。化学成分の変化は、SB-1 坑で季節変動が明瞭に観測され、S-4 坑、SC-1 坑と順にこの傾向が弱まる。本モデルでは、季節変動がより明瞭な坑井ほど得られた最適解の妥当性が高くなることが判明した。

4.8 考察

(1) トレーサテストとの比較

本研究により得られた還流率とトレーサテストより得られた再湧出率について比較検討する。還流率も再湧出率もどちらも還元流量に対する還流並びに再湧出した割合を示すが、両者の違いは、前者が還元領域全体を対象としているのに対し、後者は1つの還元井を対象としていることである。前述したトレーサテストで用いた2本の還元井は、ともに対象とする還元領域、即ち SE-2 坑は R1 区域で、また SD-4 坑は R3 区域で最も還元量が多い還元井である（それぞれ全体の 60%および 75%）。従って、ここで開発されたモデルが貯留層の物理化学変化を的確に示すならば、得られた還流率の値はトレーサテストから得られた再湧出率と概ね一致すると予想される。

トレーサテストは 1999 年 5 月に実施された。これは本研究での解析対象期間の後に

あたる。従って、S-4 坑では後半の解析結果に基づいて議論する。SB-1 坑では SE-2 坑からの再湧出率が 9%であるのに対し、 f_1 が 13%、また、SD-4 坑からの再湧出率が 1%であるのに対し、 f_3 が 1%と両者は概ね一致する。S-4 坑においても、SE-2 坑からの再湧出率が 18%であるのに対し、 f_1 が 11%、また、SD-4 坑からの再湧出率が 5%であるのに対し、 f_3 が 8%と両者は似た値を示す。従って、ランプトパラメータモデルは、トレーサテストの結果と概ね整合することが立証された。一方、SC-1 坑では、SE-2 坑からの再湧出率が 9%であるのに対し、 f_1 が 0%、また、SD-4 坑からの再湧出率が 21%であるのに対し、 f_3 が 85%と両者には大きなずれが認められる。この理由として、今回の解析期間終了以降に化学組成の変化パターンが増加傾向から低下或いは横這の傾向に変わっており、トレーサテストの期間には SC-1 坑への還流状況が大きく変化したことが考えられる。

(2) 還元流体の生産領域への還流

還元領域から生産領域への還元流体の還流の度合いは、その時の生産 - 還元状況を反映した貯留層の圧力分布に規制される。前述のとおり SB-1 坑の再噴気および SD-4 坑の還元開始により、S-4 坑における還流率 f_2 が低下するのは、圧力分布の変化に伴う挙動と解釈される。即ち、S-4 坑において SB-1 坑の再噴気により R2 区域からの還流率が低下するのは、実際の坑井の位置関係からみても調和的である。

各坑井に対する還流率および各還元区域での還流率の合計を、SB-1 坑の再噴気および SD-4 坑の還元開始の前後でどのように変化しているかを図 4.13 に示す。還元区域全体では、R3 区域からの還流率が前半後半とも約 9 割と高い。そのほとんどが SC-1 坑へ戻っている。R2 区域からの還流は、前半 59%から後半 46%へと低下しており、S-4 坑への還流が低下したことを反映している。蒸気復水を還元している R1 区域からの還流は、前半 14%から後半 24%へと増加する。これは SB-1 坑の再噴気が原因と考えられる。R1 区域は各生産領域から最も離れて位置し、還流率も他の還元区域からのそれと比べ相対的に低い。以上の解析結果は、坑井の配置状況とも整合する。

得られた還流率に基づき、生産流体に対する還流された還元流体の割合（以下混入率と呼ぶ）を次式により計算した。

$$m_i = \frac{f_i M_{iji}}{M_p} \quad (4.13)$$

ここで、 m_i は混入率を示す。各生産井の各還元区域およびそれらの合計の混入率を図 4.14 に示す。還流率は前述のとおり各還元区域により違いが見られたが、混入率の総計は、生産井毎の差異は小さくいずれも 59~77%の範囲に収まる。このように混入率が高いことは、還元流体が十分再利用されていることを意味している。しかしながら、各還元区域からの寄与の程度は、各生産井において明瞭な差異が認められる。SB-1 坑では R1 と R2 からの、S-4 坑では R2 からの、SC-1 坑では R3 からの還元流体の寄与が相対的に高い。

(3) 生産タンクの容量

本研究により得られた生産タンクの流体質量(W)と孔隙率(ϕ)から各坑井の生産タンクの容量を推定した。各坑井の ϕ は、0.6~1.9%の範囲と評価された(表 4.2)。ここでは、便宜上生産タンクの形状を、直径と高さが等しい円柱と仮定した。生産タンクの容量、即ち系外からの流入流体と還元流体が混合する場を円柱というタンクに見立て、生産タンクの容量を坑井毎に比較検討した。円柱の半径は、流体質量、孔隙率および流体密度より次式により求められる。

$$R = \left(\frac{W}{2pfr_p} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.14)$$

ここで、 R は円柱の半径、 ρ_p は解析期間の平均温度に相当する水の密度を示す。式(4.14)より求められる各坑井の生産タンクの半径 R を表 4.2 に示す。 R は、SB-1 坑で約 130m、S-4 坑の前半で約 150m、後半で 170m、SC-1 坑で 420mとなる。このうち SC-1 坑の R は最も大きく、その範囲は R3 区域に接近する。このことは SC-1 坑で R3 の還流率が高いことと矛盾しない。

(4) 還元流体によるエネルギー回収

本モデルでは、生産タンク内が還元流体が岩盤から熱の寄与を受ける所謂熱交換の場としている。エネルギー収支は、生産領域内の岩盤と流体の熱エネルギー、初期温度に近い温度をもつ系外からのリチャージ、および還元温度をもつ還元流体の流入による熱供給のみで表され、還元流体が生産領域へ流入する前に岩盤から受ける熱伝導は考慮されていない。このような単純なモデルで貯留層内の物理化学変化の挙動を説

明できたことは、還元流体の生産領域への還流の時間が短く、その途中で岩盤からの熱の寄与を受けていないことを示唆している。解析された生産タンク内の流体質量(W)を解析期間内の平均生産流量(Mp)で除することにより平均滞留時間が求められる。この結果、平均滞留時間が短いSB-1坑(46日)、S-4坑(前半)(36日)、およびS-4坑(後半)(130日)と、これが長いSC-1坑(536日)に明瞭に分かれることが明らかになった。これは、生産タンクの容量が比較的小さいSB-1坑およびS-4坑では、運転開始以降経年的な温度低下が顕著に認められているのに対し、この拡がり広いSC-1坑では、温度低下が前2坑井より緩慢であるという事実とも矛盾しない。貯留層管理の観点からは、還元流体が岩盤から十分な熱供給を受けて生産領域へ戻るような生産-還元システムの変更が必要となる。

4.9 結言

澄川地熱地域の地化学モニタリングデータを用いて貯留層の物理化学変化を再現するランプトパラメータモデルを作成し、各生産井の還元流体の還流する割合、並びに貯留層中に支配する生産タンクの容量を推定した。その結果以下の結論を得た。

蒸気復水をトレーサとしたランプトパラメータモデルにより各生産井の還流状況並びに生産タンクの容量を推定した。解析により化学成分の季節変動は十分再現され、実測値と整合する結果が得られた。化学成分の季節変動が認められる坑井では、蒸気復水の還流率が相対的に高く、これが認められない坑井ではその還流率が低い。これは、トレーサテストの結果とも整合する。

各還元区域からの還流率には、明瞭な違いが認められた。R3区域からは約9割の還元熱水が各生産領域へ還流しているのに対し、蒸気復水の還元区域(R1)の還流率は約2~3割と相対的に低い。また、S-4坑では、生産井および還元井の追加に伴い還流率および生産タンクの容量が変化していることが判明した。

生産タンクの容量が小さい坑井では、還元流体が再噴出するまでの平均滞留時間は短く、岩盤との熱交換が行われている空間が狭いため温度低下が発生している。一方、これが大きい坑井では平均滞留時間も長く、還元流体と岩盤との熱交換が比較的広範囲に行われていて温度低下は緩慢である。

感度解析の結果、評価された未知変数の最適値の許容範囲は、還流率で概ね ± 0.05 ($\pm 5\%$)、流体質量で概ね1/2~2倍と評価された。これらは坑井毎に若干変化し、

本モデルでは季節変動が明瞭な坑井ほど得られた最適解の妥当性が高いことがわかった。

このように蒸気復水の化学的性質は、貯留層流体および還元熱水と異なるため自然トレーサとして重要な役割を果たす。今回開発されたモデルは、貯留層管理を行う上で還元流体の生産領域への還流の程度、並びに個々の坑井の生産に關与する影響範囲を推定するための客観性を有した簡便なツールとなる。