火攻法に関する基礎的研究 (第4報)

——火攻法実験並びにその結果と シミュレーション結果との比較——

榎本 兵治*・洪 承燮**
田中 正三*・千田 侑*

(昭和62年3月9日受付, 62年7月10日受理)

A Preliminary Investigation of In-Situ Combustion for the Enhanced Oil Recovery (Part 4)—Combustion Tube Tests and Comparison of Theoretical and Experimental Results—

By

Heiji ENOMOTO, HONG Cheng-Xie, Shozo TANAKA and Tadashi CHIDA

Abstract: Combustion tube experiments were carried out to investigate the basic behavior of fireflooding as an EOR method. And it was found that the vaporization-condensation mechanism was important to accumulate oil for making oil banks and oil banks formed moved toward the exit (production well).

As to the production, three stages would be seen. These are (1) the production of oil movable at a liquid state, (2) production of oil from the oil bank formed by means of fireflooding mechanism mentioned above, and (3) little production of oil after the production of oil bank. When the oil is at the residual oil saturation in the reservoir, no oil production at the first stage would be expected.

Adequacy of the simulator developed in the present study and described in the last paper was examined in detail by means of comparing results obtained both theoretically and experimentally. And it was shown that the simulator was preferable.

1. はしがき

火攻法においては、化学反応、熱移動、物質移動および相変化などのプロセスが相互に影響し、そして原油が多成分の混合物であるということが現象をさらに複雑にしている。このため油層内の流動挙動や排油機構について解析するにはシミュレーション研究が必要であり、幾多の研究^{1)~9)}がなされてきた。

筆者らも原油の多成分性の取り扱いに特徴をもつシミュレータを開発し、第2報¹⁰⁾においてはその考え方とパラメータの測定について、また第3報¹¹⁾ではその数学モデルについて報告した。本報では、小規模燃焼管による火攻法実験の結果、実験結果とシミュレーション計算結果との比較によるシミュレータの妥当性の検討、並び

に火攻法の排油挙動の解析結果について報告する。

2. 燃焼管による火攻法実験

2.1 実験装置

実験装置は大きく3つの部分に分けられる。すなわち、燃焼管、制御部および測定部である。装置全体の配置の概要を図1に示した。

2.1.1 燃焼管

燃焼管は火攻法実験装置の主要部で、内径50 mm、長さ60 mm、肉厚1 mmのステンレス管に砂を詰め、その空間を原油、水および空気などで満たしたものである。実験はこの燃焼管内の原油の採取を目的として行った。

燃焼管には、図2に示すように、油層内の温度測定用に50 mm間隔で合計11本のCA熱電対(φ0.5 mm)が挿入されている。また管壁からの熱損失をなくすため、燃焼管の両端25 mmを残して全体を11個のヒータ線で覆

* 東北大学工学部

** 東北大学工学部研究生 (現吉林油田研究院)

い、燃焼管中心部と管外側の温度差を検出して各々のヒータを独立に調節した。これらの熱電対は各ヒータ帯5 cmの中央で、管外壁温度検出用熱電対はヒータ線と管外壁との間に設置されている。また管内の温度検出用熱電対には上記の油層内の温度測定用熱電対を兼用した。

着火は入口より15 mmのところへ設けたイグナイタで行った。イグナイタは $\phi 0.8$ mmのカンタル線を直径約10 mm、長さ30 mmのコイル状に巻いたものである。このイグナイタはスライダックによって手で調節し、コイルのすぐ後ろに設けた着火確認用熱電対が450°Cを保つようにした。またその通電時間は、着火を確実にするため、No. 1 熱電対が400°Cの温度を示す時間を目安にした。

燃焼管の両端には各々4本のボルトが固定されてお

図1 燃焼管実験装置概要

図2 熱電対並びに断熱用ヒータ設置位置の詳細

り、ステンレス製の蓋をそれにナットで固定し、密閉した。またそれぞれの蓋には2個ずつの穴が開けてあり、油、水あるいは空気の圧入、その圧力の測定および油の採取などに用いた。

なお燃焼管は縦に設置し、上部から圧入して下部から採取する方法で使用した。

2.1.2 制御部

燃焼用空気にはコンプレッサによる圧縮空気を3段のミストセパレータによって油ミストを除去して用い、流量は定流量制御弁により一定に保った。なおこの制御弁は一次側もしくは二次側の圧力を一定に保持した場合に定流量制御を行う弁であり、本実験では一次側の圧力を一定に保持する方法で用いた。したがって、制御弁の二次側となる燃焼管入口の圧力は燃焼管内の流動抵抗によって変化した。

また燃焼管の断熱制御は、前述のように燃焼管内外の温度差を検出し、各ヒータごとに個々に行った。

2.1.3 計測部

空気の圧入圧力は歪ゲージ方式の小型圧力変換器を用いて計測した。圧力変換器は圧入圧力にあわせ、最大測定圧力が0.5、2.5および10 kg/cm²のものを適宜選択して用いた。

燃焼管内の温度は多点温度記録計により常時観測、記録した。この記録計はフルスケールを任意に設定できるが、本実験ではフルスケールを700°Cとして用いた。

2.2 実験に用いた砂並びに原油

本実験で油層に使用した砂は、川鉄鉱業(株)栃木鉱業所産の珪砂(商品名:日光珪砂浮選砂6号)である。その粒度分布を図3に示した。100 meshより粗粒のものが98%以上の比較的粗いものである。またこの砂は、化学分析結果¹⁰⁾によれば、SiO₂が95%の高品質の珪砂である。

また原油には帝国石油(株)の石名坂原油を用いた。この原油は比重が0.945、粘度208 cP at 70°Fの重質原油である。火攻法において油層内で燃焼するのは蒸留と熱分解による残留物が主となるので、その量の少ない軽質油

に対して火攻法は適さない。したがって、実験を行うに十分な流動性を持ち、かつ火攻法を適用するに十分な重質油として石名坂原油を選んだ。

2.3 実験の手順

実験の準備は燃焼管の砂詰め作業から始まる。砂充填が終了すると燃焼管を水平に設置し、絶対浸透率の測定を行う。その後原油を圧入する。

次に水-油の相対浸透率を測定する場合は、水を圧入し、非定常法で求める。この場合、測定後原油を再圧入し、油層を初期の状態に戻しておく。

このようにして初期状態が得られたら空気を圧入し、着火させて火攻法の実験を行うが、本実験ではまず空気を徐々に圧入し、火攻法実験に必要な空気量まで流量を増加させていき、空気圧入によって油がほぼ流出しなくなった状態でイグナイタをONにして火攻法実験をスタートさせた。これは、(1)空気押しをしないで空気圧入と同時に着火させると、温度の上昇による液体の気化に伴って圧力が急上昇し、装置の使用圧力限界を超えてしま

う危険性があること、および(2)火攻法で採取された油と空気の圧力によって採取された油を区別しようとしたこと、などによる。

油層に着火し、火攻法実験が開始したら、空気圧入圧力、燃焼管内の温度、単位時間当たりの油と水の採取流量を測定する。流量はメスシリンダを用いて測定した。

2.4 実験結果並びに考察

2.4.1 温度変化

火攻法の挙動を解析するのに、温度の変化は最も重要なパラメータの1つである。それは、フィールドでの火攻法の適用を考えた場合、着火後安定した燃焼帯が形成され、順次進行して行くことがまず火攻法の実施の条件であるからである。この燃焼帯の挙動は、測定した温度の変化により判断される。着火後燃焼反応が可能な程度の高温度帯が空気の流れ方向に沿って一定の速度で進むようならば安定した燃焼帯が形成されたと判断されるし、逆に着火後最高温度が次第に低下し、燃焼反応を維持することが不可能な温度にまで下がるようならば、火攻法の実施が不可能と判断される。

本実験では空気の連続圧入により、着火後燃焼帯が順次前進し、実験に成功したと判断される結果が得られた。1例として空気圧入量が $7.7\text{cm}^3/\text{s}$ ($14.1\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{h}$) の場合の油層内の温度変化を図4に示した。図中に示した時間は No. 1 から順に各熱電対が最高温度を示した時間で、各温度曲線はこれらの時間におけるものである。図から明らかなように、着火後燃焼帯の温度は徐々に上昇し、No. 7 の位置で最高温度 510°C になった後逆に低下しはじめるが、No. 9 熱電対の位置 (入口より 45cm) までは 500°C 前後の温度を保っている。しかしそれ以後は燃焼帯の温度が低下しはじめ、No. 11 の熱電対では 400°C まで上昇しなかった。またこれとともに燃焼帯の進行速度

図3 珪砂の粒度分布

図4 温度分布の測定例 (空気流量 $7.7\text{cm}^3/\text{s}$ の場合)

図5 産油量の変化 (空気流量 $7.7\text{cm}^3/\text{s}$ の場合)

も $5\text{ cm}/55\text{ 分}$ から $5\text{ cm}/100\text{ 分}$ まで低下したが、これは装置の末端効果が現れたものと考えられる。実験終了後油層内の状況を観察した結果では、燃焼管の両端の入口と出口のみにわずか (2 mm 程度の厚さ) のコークス状に固まった砂層が残っていた。

2.4.2 産油量

結果の1例を図5に示した。これは同じく空気圧入量が $7.7\text{cm}^3/\text{s}$ の場合である。

産油量は経済的に火攻法が見合うか否かの問題に直接影響を与える重要な因子である。図に示すように、実験結果では初期の産油速度が低く、また最後も低くなっている。それは、着火させ、燃焼を開始した初期の段階では、それ以前の空気押しにより容易に流動可能な油はすでに流出してしまい、油層は油が流動し難い状態、すなわち残留油飽和率に近い状態になっているためと考えられる。また実験の最後では、後述する火攻法の排油機構によって、液体として流動可能になった油は流出してしまい、最後に残った油が油蒸気として流出するからである。

火攻法により採取された油は 176cm^3 で、これは空気押し残留油の 88.4% にあたる。空気押しを含めると、生産された油量は 363cm^3 で、採取率は 94.0% に達した。すなわち、燃料として消費した油はわずか 23cm^3 で、油層中の初期油のわずか 6% である。このことは、火攻法が油採取法として極めて効果的であることを示している。

2.4.3 空気圧入圧力の変化

空気の入圧圧力の変化の1例を図6に示した。これも空気圧入量が $7.7\text{cm}^3/\text{s}$ の場合である。

空気圧入圧力は、着火からおよそ 150 分 で最大になっている。その理由は次のように考えられる。すなわち、着火後油と水が温度の上昇によって気化し、その蒸気が移動して前方の低温部で凝縮し、油や水が溜まった状

図6 空気圧入圧力の変化 (空気流量 $7.7\text{cm}^3/\text{s}$ の場合)

態、すなわち油バンクおよび水バンクが形成される。ここでは油や水の飽和率が増加して流動可能な状態になっているが、油や水の飽和率が増加したため気体の飽和率が減少し、気体は逆に流れにくい状態になる。このため圧力が増加する。その後熱の移動により燃焼管全体の温度が上昇して油の粘度が低下し、また飽和率の変化で有効浸透率も変化して易動度が増加するため、さらには油の流出が開始するため、圧力は減少しはじめる。流出が進むと油層内の液体の割合が次第に少なくなるので、圧入圧力が初期の圧入圧力以下まで下がるようになるものと考えられる。

2.4.4 空気圧入量の影響

表1に異なる空気圧入量で行った5回の実験の条件と結果の一部をまとめて示した。このうち、油の採取率、燃料の消費率、燃焼帯の温度、燃焼帯の進行速度並びに最大空気圧入圧力へ及ぼす空気圧入量の影響を示したのが図7である。以下、これらの特徴について述べる。

(i) 油の採取率

採取率は空気圧入量が $1.3\text{cm}^3/\text{s}$ (実験 No. 1) と $10.9\text{cm}^3/\text{s}$ (実験 No. 5) の場合、すなわち本実験で空気流量の最小と最大の場合に採取率が低下している。

実験 No. 1 の場合、No. 8 熱電対が最高温度を記録した

表 1 実験条件並びに実験結果

実験番号	1	2	3	4	5
空気圧入量(cm^3/s)	1.3	4.2	5.6	7.7	10.9
孔隙率(%)	38	38	38	38	38
絶対浸透率(d)	9.6	9.1	8.0	8.7	10.3
初期油量(cm^3)	386	382	391	386	378
初期油飽和率(%)	86.2	85.3	87.1	86.2	84.4
空気押しによる累計産油量(cm^3)	206	175	202	187	185
空気押しによる採取率(%)	53.4	45.8	51.7	48.4	48.9
着火直前の残留油量(cm^3)	180	207	189	199	193
着火直前の油飽和率(%)	40.2	46.2	42.2	44.4	43.1
火攻法による累計産油量(cm^3)	149	186	165	176	154
着火直前油に対しての火攻法による採取率(%)	82.7	89.9	87.3	88.4	79.8
初期油に対しての火攻法による採取率(%)	38.6	47.1	42.2	45.6	40.7
総採取率(%)	92.0	94.5	93.9	94.0	89.7
火攻法終了後の油飽和率(%)	4.8	0	0	0	0
着火直前の油量に対しての燃料消費率(%)	5.4	10.1	12.7	11.6	20.2
初期油に対しての燃料消費率(%)	2.5	4.5	6.1	6.0	10.3
燃焼帯の平均温度($^{\circ}\text{C}$)	372	446	439	478	475
燃焼帯の平均進行速度(cm/h)	2.9	3.5	4.2	4.6	4.8
最大空気圧入圧力(kg/cm^2)	1.7	2.0	1.8	2.1	2.5

後油層内温度は急速に低下し、燃焼帯が消滅してしまった。実験終了後燃焼管内を観察した結果、出口部約 5 cm の部分には油が液状で残っており、5 cm～15 cm の間および入口部 5 cm の部分にコークス化した油による固結層が形成されていた。前述のように、他の空気量での実験においてもわずかながら燃焼管の両端に固結層が残っており、これは、実験装置両端で熱損失により反応が十分に進まなかったためと推定した。実験 No. 1 の場合は他の場合に比べて空気量が極端に少なく、安定した燃焼帯を形成するための限界に近い条件にあったと考えられ、このため装置両端からの熱損失の影響が強く現れたものと推察される。図 4 にみられるように、実験 No. 4 の場合にも実験装置出口への熱損失の影響が出口約 15 cm の部分に現れており、これは実験で固結層が形成された部分とはほぼ一致する。

実験 No. 5 で採取率が低下しているのは、空気量の増加により燃料として消費されたものが多くなったためと考えられる。実験後の燃焼管内の観察でも、燃焼が良好な条件で行われたことが確認された。

(ii) 燃料消費率

図 7 空気圧入量が火攻法の挙動に及ぼす影響

燃料消費率は、空気圧入量の増加とともに増加する傾向にある。

上記のように、空気圧入量が 1.3 cm^3/s の場合は油層内に油が残っており、分析の結果その量は初期油量の 5.5 % であることが分かった。したがってこの場合の燃料消費率は初期油量から採取された油量と残油量を差し引いたものとした。その他の空気圧入量の場合には考慮するほどの残油は認められず、採取された油以外はすべて燃焼したものとした。火攻法では、掃攻率を 100 % とすると、実験 No. 1 のような不成功と考えられる場合を除き、燃料消費率は油採取率と表裏一体の関係にある。

(iii) 燃焼帯の平均温度並びに燃焼帯の平均進行速度

燃焼帯の平均速度は空気圧入量の増加により高くなる傾向がある。また燃焼帯の進行速度も、空気圧入量とともに増加する傾向にある。これは、空気圧入量が増加すると燃料消費量が増し、燃料消費量が増せば燃焼帯の温度が上昇し、温度が上昇すれば反応速度が増すので燃焼帯の進行速度が増すというように、相互に関係した現象である。

(iv) 最大空気圧入圧力

最大空気圧入圧力とは、一定流量で空気を圧入する際圧入圧力が最大となったときの空気の圧入圧力のことで、これは当然のこととして空気圧入量の増加により増加する。しかし No. 1 と No. 5 の実験で空気圧入量はおよ

そ10倍も異なるが、最大圧入圧力は1.5倍にしか増加していない。これは、圧力の上昇により空気の体積が減少するので、体積流量は質量流量ほど増加しないことなどがその理由と考えられる。

2.5 火攻法における排油機構

火攻法はいわゆる熱攻法の1つで、燃焼熱によって高粘性の油の粘度を低下させて流動性を増し、これによって採取率を向上させる方法と言われている。例えばAPIの経験式で示されるように油の粘度は温度の上昇により急激に低下し、また本実験の結果から明らかなように温度は燃焼帯で500℃にまで上昇する。したがって粘度の低下による流動性改善効果も期待される。

しかし図4に示したように、燃焼帯前方で温度は急激に低下し、温度の上昇による油の粘度の低下範囲は油層の一部に限定される。また図5に示すように産油速度が最大になるのは経過時間が240分の頃であるが、このときのNo.10熱電対より下流の油層温度は初期状態のままである。本実験での油層の長さは60cmであるが、フィールドでの火攻法を考えると、生産井と空気圧入井の間隔は少なくとも何十メートルということになるので、油層長さに対する油の粘度低下域の割合は極めて小さいであろう。

したがって、火攻法における排油機構として、他の機構が作用していると考えられる。2.4.3項で火攻法における流動機構として、まず油バンクや水バンクが形成され、これらのバンクが拡大しながら下流へと流動していくことを指摘したが、後述のシミュレーション研究の結果、原油の蒸発・凝縮作用が油バンクを形成する油の集積機構として大きな役割を果たしていることが明らかになった。特に本実験の場合のように初期の油飽和率が低く、残留油飽和率に近い状態にある場合には、液相としての油の流動性が小さいので、蒸発した油が気体として流動し、前方の低温区域で凝縮することによって油バンクの形成が始まること以外の油の集積機構は考え難い。蒸発・凝縮現象は圧力によって大きく影響を受けるが、本研究で対象とした数十気圧程度の圧力範囲では、火攻法における排油機構として、原油の蒸発・凝縮作用が大きな役割を果たしているものと考えられる。

図5に示したように、火攻法の生産期間は3期に大別される。これを上記の排油機構にしたがって補足説明すると以下になる。すなわち、(1)油層内に存在する流動可能な油の産出期、(2)火攻法の排油機構によって形成された油バンクが生産井に到達し、高生産が続く期間、および(3)最後に残った油が油蒸気として流出する期間、である。水攻法などが実施され、油層内の油が残留油飽和率の状態にある場合には(1)の期間での産油はな

く、この期間は油バンクの形成期となる。油バンクが流出口に達すると第2期に入り、火攻法による油の生産はこの期に集中する。第3期は火攻法特有の産油期であるが、産油量が少ないため、火攻法による油採取の対象にはならず、実際のフィールドでの生産は第2期で終りとなる。

3. 火攻法実験結果とシミュレーション結果の比較

3.1 シミュレータと計算条件の概要

本研究で開発したシミュレータの特徴は、(1)原油の多成分性のモデル化、および(2)ガス相成分の計算上の取り扱い、の2点にある。(1)は排油挙動に大きく影響を与え、(2)は計算の高速化と安定化に貢献する。シミュレータの詳細については前報^{10,11)}を参照頂くことにし、ここではシミュレータによる計算結果と前述の実験結果との対比により、シミュレータの妥当性を検討する。

計算は、空気圧入量7.7cm³/sの実験の場合について行った。計算の条件は以下のものである。

燃焼管長さ: 0.6m

燃焼管断面積: $1.96 \times 10^{-3} \text{ m}^2$

孔隙率: 38%

絶対浸透率: $8.39 \times 10^{-12} \text{ m}^2$ (8.5 Darcy)

初期の油飽和率: 46%

初期の水飽和率: 14%

初期の空気圧入圧力: $1.275 \times 10^5 \text{ Pa}$ (1.3 kg/cm²)

初期の油層温度: 293.15K

空気圧入量: $7.7 \times 10^{-6} \text{ Nm}^3/\text{s}$

原油の比重量: 945kg/m³

岩石の圧縮係数: $7.25 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$

水の圧縮係数: $5.0 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$

原油の圧縮係数: $8.072 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$

岩石の比熱: $2.35 \times 10^6 \text{ J/(m}^3 \cdot \text{K)}$

水の比熱: $4.18 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$

原油の比熱: $2.01 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$

酸素、窒素、CO₂の比熱: 837 J/(kg·K)

水の熱膨張係数: $4.0 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

原油の熱膨張係数: $6.12 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$

岩石 ($\phi=40\%$) の熱伝導率: $0.4 \text{ J/(m} \cdot \text{s} \cdot \text{K)}$

なお、壁面からの熱損失は無いものとしたが、燃焼管両端からの熱損失については、両端に温度が初期温度と等しくかつ一定であるブロックを仮定し、その熱伝導率が入口については最初のブロックの $\frac{1}{4}$ 、出口については最後のブロックの $\frac{1}{4}$ と仮定した。また着火のためのイグナイタについては、最初のブロックに外部から熱エネルギーを供給することによってシミュレートすることに

図8 計算による燃焼管内の温度分布

図9 No. 2 および No. 7 熱電対が最高温度を示したときの温度分布の比較

し、その与え方は水の蒸発が終るまでは25W、その後20Wに減少させ、450℃に達したらその温度を保つようにした。

3.2 シミュレーション結果並びにその結果と実験結果の比較

3.2.1 温度分布と燃焼帯の進行速度

各熱電対が最高温度になったときの油層内の温度分布の計算結果を図8に示した。これは図4に示した実験結果に対応するもので、全体としては良好な一致がみられる。しかし細部については幾つかの異なる状況がみられる。これをNo. 2とNo. 7の熱電対が最高温度となったときを例にとって示したのが図9である。この両者について実験値と計算値を比較してみると、両熱電対の前後の位置で差がみられる。

まず両熱電対の入口(上流)側についてであるが、No. 2熱電対では実験値が計算値よりも高い。これは着火のために外部から与えたエネルギーの大きさが計算で正しく入力されていないためと考えられる。またNo. 7熱電対については逆に実験値が低くなっているが、本実験では燃焼管の外部ヒータを5台のコントローラで制御しており、No. 7の位置へ燃焼面が到達した時点で外部ヒータはNo. 6～No. 10のみが通電・制御されていて、No. 1～No. 5の熱電対の位置では断熱条件が満たされておらず、このため計算値より低くなったと考えられる。

他方熱電対の出口(下流)側についてみると、両熱電対の場合とも実験値のほうが高い温度となっている。またこの差は燃焼面の進行(あるいは時間の経過)とともに拡大し、No. 7に燃焼面が到達した時点でのNo. 9熱電

図10 各熱電対位置での最高温度の比較

図11 各熱電対位置に燃焼帯が到達するまでの時間の比較

対の温度差は 250°C にもなっている。この原因としては幾つかのものが挙げられるが、その主なものとして断熱用ヒータの影響が考えられる。本実験では図2に示したように 5 cm 幅を断熱用加熱帯とし、各加熱帯の中央で測温している。この 5 cm 幅というのは他の研究者の装置に比べて狭くなっている⁹⁾が、燃焼帯が通過するにおよそ1時間もかかる幅であり、決して十分に狭いとは言えない。また燃焼面の前後での温度勾配は下流側で大きく、上流側で小さい。したがって、総合的には断熱用ヒータで燃焼管を加熱している可能性がある。LIN ら⁹⁾も同様の装置で実験を行い、本研究と同様の現象を観測しているが、この現象はシミュレーション計算で油層の熱伝導率を大きくすることによって説明できなかったと述べている。

図10に各熱電対の位置での最高温度の比較を示した。装置両端を除くと極めて良い一致を示している。また図11には各熱電対の位置が最高温度を示すまでの時間を示した。ここでも良好な一致がみられる。またこの図から燃焼帯の進行速度が読みとれるが、燃焼帯の進行速度はほぼ一定である。これは、図10に示したように、本実験

の大部分で燃焼帯の温度が一定であることに関連する。

3.2.2 産油量

図12に、産油量の計算結果を実験結果とともに示した。両者は一致した傾向を示している。120分から360分の間で実験値が大きくなっているが、これは前項で述べたように、燃焼帯前方の温度は実験の場合のほうが高く、このため粘度が低下して流動性が増したためと考えられる。

表2に油採収率と燃料消費率の比較を示した。計算結果は実験結果と良く一致している。計算による燃料消費率が実験の場合より小さいにもかかわらず、図10に示したように、燃焼帯の最高温度は計算値のほうが高い。これは、前述のように実験で既燃焼帯が断熱状態になっておらず、熱損失の影響が現れたものと考えられる。

3.2.3 空気圧入圧力

実験と計算による空気圧入圧力の比較を図13に示した。全体としては良く一致しているが、比較的大きな相違が初期の圧力変化にみられる。

図4と図8あるいは9をみると、初期には実測温度のほうが計算値よりも高い。これは着火のために外部より

図12 累計産油量の比較

表2 採取率と燃料消費率の実験結果と計算結果の比較

	累計産油量 (cm³)	採取率 (%)	燃料消費量 (cm³)	燃料消費率 (%)
実験	176	88.4	23	11.6
計算	184	89.3	22	10.7

与えたエネルギーが計算で正しく入力されなかったことと、入口側の熱損失を過大に見積ったことなどによる影響と考えられる。したがって図にみられる初期の相違は、上記のように着火エネルギーの取り扱いの差によるものであって、本質的なものではないと考えられる。

また一般に火攻法のシミュレーションでは、気化・凝縮の取り扱いが気相と液相の平衡関係によっている。本モデルでも同様の取り扱いをした。しかしこのような取り扱いでは、気化・凝縮の変化が急激に生ずる場合、酸素や窒素などその他のガス成分のモル分率が急変して、全体として圧力の上昇が低く見積られることがある。したがってこれが原因となって、実験と計算で圧力のピーク値に差が生じたことも考えられる。また、筆者らの最近の研究で、油は粘度が原油と大きく異なるエマルジョン（原油の粘度約200cPに対してエマルジョンのそれは水分量により異なるが、最大1,200cP）として流出していることが明らかとなってきたが、モデルではこの影響が考慮されていず、これによる差も考えられる。LINら⁹⁾も空気圧入圧力の実験値と計算値の比較を行っており、そこでも計算圧力のピーク値が低くなっているが、その原因については触れていない。

以上述べたように、計算結果は定性的には火攻法の圧入圧力挙動を十分に説明し、また定量的には初期の一部

図13 空気圧入圧力の比較

において相違が認められるものの、それ以外では十分な一致がみられる。したがって圧入圧力の観点からも、本モデルは火攻法シミュレータとして十分なものと考えられる。

3.2.4 本シミュレータの妥当性

火攻法に関する研究は、その重要性の認識の深まりとともに多くなってきた。その中でも理論研究は大型計算機の進歩により、近年急速に多くなってきている。しかし理論結果と実験結果を直接比較検討した報告は少ない。このことは、火攻法の現象が極めて複雑であって、その理論研究は火攻法の全般にわたって定量的検討を可能とする域に達していないことを示唆していると考えられる。

ここで強調しておきたいことは、以上述べた本研究の理論計算では、計算に必要なパラメータのほとんどすべてについて実験式や経験式、あるいは実測値を用い、いわゆるフィッティングパラメータとなり得るものは着火のために外部より与えたエネルギーと、燃焼管の両端からの熱損失のみであるということである。しかし、最も新しいLINら⁹⁾の研究においても、火攻法シミュレー

ジョンの最重要部である蒸発・凝縮の平衡係数、燃焼反応およびユークス生成反応をフィッティングパラメータにしているなど、真の意味での実験による理論の妥当性の検討は皆無とも言える状況である。

すでに検討したように、本研究で開発したモデルによる理論計算結果と実験結果は良い一致を示した。したがって本研究で開発したシミュレータは火攻法をシミュレートするに十分なものと考えられる。

4. 燃焼管内の挙動の解析

火攻法の実験では測定可能なパラメータが制限されるので、実験結果のみに基づいて燃焼管内の挙動を解析するのは困難である。特に油バンクおよび水バンクについての直接の情報を得るのは極めて難しい。そこでシミュレーションによる計算結果から、油バンクの挙動を主に燃焼管内の挙動解析を行った。

図14に油層内の油と水の飽和率の分布を示した。この図からまず分かることは、火攻法の実施により燃焼管内に2つの油バンクが形成されることである。すなわち、図14の(I)に示したように、油相と水相が共存する区域に大きな油バンク(これを油バンク(1)と呼ぶ)が形成され、また燃焼帯の近くで水相が消滅し油相のみが存在する区域にもう1つの小バンク(これを油バンク(2)と呼ぶ)が存在する。油バンクが形成されるのは気化・凝縮

による油の集積と油の流動による排出との競合関係により、バンクが2つに分かれるのは、水相が存在する場合としない場合で残留油飽和率が異なるためである。すなわち、水相が存在する場合には流れによる残留油飽和率は油相—水相間の残留油飽和率であるが、水相が消滅すると油層は油相とガス相のみとなるので、そこでの残留油飽和率は水相が共存していたときより大きくなる。このため水相が存在しないところの油は流れにくく、バンクを形成する。これは火攻法に特有な挙動である。

またこのバンク(2)の油飽和率は火攻法の進行とともに低下するが、これは以下のように説明される。まず、図14の(I)と(II)を比較してみると、水相の消滅から油相の消滅までの時間が、火攻法実施の経過時間とともに長くなるのがわかる。その時間差が大きくなるほど、水相の消滅後燃焼するまでに気化により運ばれる油量が多くなる。したがって油バンク(2)は時間の経過とともにその油飽和率が低下するものと考えられる。

また油バンク(1)についてみると、火攻法開始後30分ではNo.3と4付近にごく狭い幅のバンクが形成されているのみであるが、火攻法の進行とともにこの幅が広がり、150分ではNo.6からNo.11の範囲に拡大している。しかもそこでの油飽和率はほとんど変化していない。この現象は以下のように説明される。すなわち、火攻法の進行に伴って気化・凝縮による油の移動量が増加するので油バンクの飽和率は上昇するが、飽和率が高くなると相対浸透率が大きくなって液体として流動する油量も増加するので、この均衡のとれたところで油飽和率が定まる。そしてバンクの油飽和率はほぼ一定となり、火攻法の進行とともにその幅が拡大するものと考えられる。

前述の火攻法における排油機構の考察において、実験結果から、温度の上昇による原油の粘度の低下が火攻法の主たる排油機構でないことを指摘したが、図14にもこの考えを支持する結果が示されている。ここで経過時間150分の場合を例にとって述べると、前述のように150分ではNo.6～No.11の範囲に油バンクが形成され、正に油バンクが出口に到達しようとしている。一方同図(III)をみると、No.6の位置の温度は40℃で、No.8より下流の温度は初期温度20℃のままである。このような状態では、温度上昇による油の粘度低下が主たる排油機構であるとするのは無理であろう。

しかし、火攻法の排油機構を、油を集積してバンクを形成する油の集積機構と、形成されたバンクが流動して油を排出する排出機構に区分して考察すると、後者への油の粘度の影響は極めて大であるので、燃焼熱の利用方法によっては温度上昇による油の粘度低下が主たる排油機構になることもありえよう。

図14 燃焼管内の飽和率と温度の分布

5. あとがき

本研究は火攻法に関する基礎的研究で、本報では小規模燃焼管による火攻法実験の結果、実験結果とシミュレーション計算結果との比較によるシミュレータの妥当性の検討、並びに火攻法の排油機構について述べた。これらについて結果を一言でまとめれば以下ようになる。

- (1) 火攻法は極めて採取効率の良い方法である。
- (2) 本研究で開発したシミュレータはほぼ妥当なものである。
- (3) 火攻法では油の蒸発・凝縮による油の移動機構が油バンクの形成に重要な役割を果たしている。

謝 辞

本研究に御援助頂いた帝国石油株式会社に謝意を表します。また東北大学工学部資源工学科横山秀吉教授並びに同化学工学科只木楨力教授には本研究の全般にわたり御教示頂いた。さらに同資源工学科学生池野元大司君(現石油資源開発(株))、前角繁之君(現石油公団)、小野寺正志君(現帝国石油(株))、三上潤君(現石油資源開発(株))には火攻法の実験で協力頂いた、ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) CHU, C., 1964: The Vaporization-Condensation Phenomenon in Linear Heat Wave, *SPEJ*, June, 85-95.
- 2) GOTTFRIED, B.S., 1965: A Mathematical Model of Thermal Oil Recovery in Linear Systems, *SPEJ*, Sept., 196-210.
- 3) GRABOWSKI, J.W. and AZIZ, K., 1977: A Preliminary Investigation of In-Situ Combustion

by the Method of Collation, The Oil Sands of Canada-Venezuela 1977, *CIM Special*, Vol.17, 462-471.

- 4) CROOKSTON, R.B., CULHAM, W.E. and COHEN, W.H., 1979: A Numerical Simulation Model for Thermal Recovery Processes, *SPEJ*, Feb., 37-58.
- 5) YOUNGREN, G.K., 1980: Development and Applications of In-Situ Combustion Reservoir Simulator, *SPEJ*, Feb., 39-51.
- 6) HIRAKAWA, S. and MIWA, M., 1984: In-Situ Combustion Simulation for Enhanced Oil Recovery, 石技誌, 49(2), 75-86.
- 7) COATS, K.H., 1980: In-Situ Combustion Model, *SPEJ*, Dec., 533-554.
- 8) LASAKI, G.O., MARTEL, R. and FAHY, L.J., 1985: Numerical Simulation of Combined Reverse Combustion and Steamflooding for Oil Recovery in a Utah Tar Sand, *SPEJ*, April, 227-234.
- 9) LIN, C.Y., CHEN, W.H. and CULHAM, W.E., 1985: Numerical Simulation of Combustion Tube Experiments and the Associated Kinetics of In-Situ Combustion Processes, *SPEJ*, Dec., 657-666.
- 10) 榎本・洪・田中・千田, 1986: 火攻法に関する基礎的研究(第2報)―原油の燃焼速度並びに原油の多成分性に関するパラメータの測定―, 石技誌, 51(5), 377-385.
- 11) 榎本・洪・田中・千田, 1987: 火攻法に関する基礎的研究(第3報)―改良4相7成分モデルの開発―, 石技誌, 52(1), 12-21.