

早稲田大学大学院理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

### **Development of Streamline-Based Simulators for Evaluation of Heavy Oil Recovery by Hot Waterflooding**

(熱水攻法による重質油回収の評価のための  
ストリームライン法シミュレータの構築)

申請者

ウスマン

Usman

環境資源及材料理工学      石油工学

2006 年 12 月

熱水攻法は、特に比重が 10~20°API で、油層条件下の粘性が数 100 cp の重質油を有する油層に対する有効な回収プロセスである。油の回収率は、油層内の圧入流体による掃攻効率と局所的な置換効率に依存する。温度が上昇すると油粘性が低下し、残留油飽和率も低減するので、油相の易動度が増加し、局所的な置換効率が改善される。熱水攻法を成功させるには、圧入流体の流動と置換プロセスを効果的に制御することが必要である。圧入量および圧入温度を最適化し、熱水の圧入・生産井間における非効率な流動を低減することにより、油生産量の最大化を図ることができる。数値油層シミュレーションは流体挙動の定量化のための費用対効果の高い手法である。

熱水攻法における流体流動は温度変化を伴う油水 2 相流であり、質量および熱保存則から導かれる微分方程式で表される。数値シミュレーションでは、一般的にこれらの方程式に完全陰解有限差分法を適用するが、実油層のシミュレーションには過大な計算時間を要する。また、計算精度に対するグリッドの分割数および方向性の影響が大きい。グリッド方向の影響を軽減するために 9 点差分法が導入されているが、特に非均質性または非線形性が強い場合、計算時間が格段に増大する。グリッド分割では、局所的細分 (local refinement) グリッドが実用化されているが、粗グリッドと細グリッドの不規則な結合によって行列式の構造が複雑になり、記憶領域と計算時間の増大につながる。

ストリームライン法モデルは、圧力方程式をグリッド上で解いてストリームラインを求めた後、1次元の流動式を各ストリームラインに沿って解くものである。1次元式の計算はグリッド分割による安定性の影響を受けないので、比較的大きいタイムステップを適用できる。また、ストリームラインの変化がない場合は圧力式の計算間隔を更に大きくできることから、有限差分法モデルに比べて計算時間を大きく削減できる。加えて、ストリームライン法はグリッドの分割数と方向の影響を受けることが少ない。従って、ストリームライン法は水攻法のような等温状態の置換プロセスのシミュレーションには極めて有効であり、商用化も急速に進んでいる。このような経過に基づいて、本研究ではストリームライン法を熱流動の伴う熱攻法プロセスのモデル化に発展させた。

本研究では 3 種の異なる数値アルゴリズムによってストリームライン法に基づく熱水攻法モデル (TESIS と命名) を構築している。本論文は次の 7 章から構成されており、各章の概要は以下の通りである。

第 1 章では、本研究の動機付けと研究課題の提示をしている。高粘性の重質油層における回収率を上げるには熱攻法が不可欠であり、その挙動予測には数値シミュレーションが有効であること、従来の有限差分法モデルでは重質油の置換のように易動度比が大きい場合、数値誤差が大きいことを指摘している。本研究のストリームライン法はグリッド分割の精粗や方向性の影響が小さく、非定常流のモデル化にも有効であることを指摘している。

第2章では、熱攻法プロセスの数値モデル化の現状について述べている。一般的な手法は支配微分方程式に完全陰解有限差分法を適用するもので、熱攻法に伴う急速な物性変化と複雑な流動メカニズムを扱うのに有効である。グリッド分割の精粗およびグリッド方向が計算結果に及ぼす影響を削減するために、多くの研究がなされている。しかし、実際の非均質油層内における熱流体の挙動に対するシミュレーションでは、過大な計算時間を要することから、従来のモデルの実用性に限界がある。現状では、詳細な熱力学現象のモデル化と計算速度とのバランスを考慮した手法は実用化されていない。油層の非均質性と流体の易動度が置換メカニズムにおける支配的な要因である場合、ストリームライン法は有限差分法にかわる実行性のある手法となることを指摘している。

第3章では、まず、多相の熱流体流動における質量および熱量保存則に基づいて、一般的な偏微分方程式を導き、熱攻法プロセスにおける2相流の支配方程式を導出している。加えて、必要な拘束条件と相関式を列記し、非線形方程式の解法としてNewton-Raphson法を適用することを述べている。ストリームライン法における熱流体の流動式では、2種のストリーム関数とtime-of-flight ( $\tau$ )によって、デカルト座標系から流線に沿った座標系への座標変換について述べ、物理的な空間座標( $x, y, z$ )が $\tau$ 座標のみによって表されることを示している。

第4章では、ストリームラインに沿った流束を一定と仮定して、ストリームライン法モデルを構築している。本モデル(TEISIS-1)では、まず、油水各相の質量保存式を加算して得られる圧力式をグリッド系において差分化し、圧力分布を計算する。ここで、岩石・流体の圧縮率および流体密度の熱膨張を考慮している。次に、各ストリームラインに沿って、温度は変化しないとして流動式を水飽和率について解いた後、熱流動式を温度について解いている。

本モデルの適用性を評価するため、熱水攻法における易動度の変化、非安定流動、油層の非均質性の影響、および数値精度について検討している。また、モデルの検証として、商用の有限差分法による熱攻法モデルSTARSの5点および9点差分法の結果と比較して、油生産量、含水率、温度分布、飽和率分布および計算時間について評価している。その結果、ストリームライン法は、熱流動に伴う物理現象のモデル化の精度と計算速度の両面から実用性があり、重質油層における熱攻法プロセスのモデル化に適用できることを確認している。TEISIS-1では有限差分法で見られるグリッド方向の影響がなく、グリッド分割数の影響も小さい。STARS・9点法ではグリッド細分化の効果は強くないが、グリッド数に比例する計算時間の増加度はTEISIS-1の場合よりも大きい。TEISIS-1の結果はSTARS・5点法と9点法の間接的なもので、計算は非常に速いが、精度ではSTARS・9点法に劣ることを確認している。

第5章では、計算精度の改善のために新しいアルゴリズムを提示している。まず、油水成分の各質量保存式をグリッド系で差分化し、連立式を同時に解いて圧

力および水飽和率を求め、圧力分布からストリームラインを計算する。次に、ストリームラインに沿って熱流動式を解いて温度を求める。ここでは、ストリームラインに沿った流束は、圧縮率および熱膨張の影響により、一定ではない。熱流動式の計算では、流束の変動に起因する項はストリームラインに沿った生産または圧入に相当する項として扱うことができる。

本モデル (TESIS-2) の検証のため、非均質な重質油層における 5 点法の 1 パターンおよび 2 パターンを設定し、水攻法および熱水攻法シミュレーションを行い、計算結果を STARS の 5 点および 9 点差分法による結果と比較した。ストリームラインに沿った流束変動の導入により、温度変化のフロントの伝播速度が遅くなり、計算精度が改善される。TESIS-2 におけるグリッド方向およびグリッド数の影響は TESIS-1 の場合と同様である。また、TESIS-2 は非線形性の強い問題には STARS・9 点法よりも有効であることを確認した。TESIS-2 は第 4 章の TESIS-1 に比べて、圧力および水飽和率についての線形化式の規模が大きくなることから、計算効率は TESIS-1 よりも劣るが、STARS に比べるとなお高いことが確認された。

第 6 章では、油水 2 相の移流に加えて、重力、毛細管圧力、および熱伝導による拡散現象をストリームライン法に導入してモデル (TESIS-3) を構築している。解法には演算子分割法を適用して、移流部分と拡散部分を分離する手法を用いている。TESIS-3 による油回収挙動は STARS のものに非常に近い結果が得られている。ただし、TESIS-3 では重力による下方への沈み込み現象の生産挙動への影響が、STARS に比べてより詳細に明らかになっている。計算例によれば、ストリームラインに沿った温度計算のタイムステップは、圧力計算のタイムステップの 1/5 ~ 1 倍が適当である。本モデルの構築により、ストリームライン法と演算子分割法を組み合わせた手法は、油層スケールの置換における熱流体の拡散現象のモデル化に有効であることが確認された。

第 7 章は本論文の主要な結論と今後の課題を纏めて示している。

以上要約すると、本論文は、重質油層における熱水攻法のシミュレーションのために、ストリームライン法は油水 2 相流に伴う熱力学的メカニズムのモデル化と計算速度の両面から有効であることを示した。

近年の油層シミュレーション技術開発における目標の一つは、詳細な地質モデルに対応して、高速計算が可能なシミュレーションモデルの開発である。ストリームライン法は熱流動を含む多相流動式に適用でき、置換計算に対するグリッド方向の影響を削減することができる。また、本研究で実証した熱流動方程式の逐次解法および演算子分割法は、計算時間の削減のために有力な手法であり、ストリームライン法によるシミュレーションの実用性を大きく向上させた。

# 研 究 業 績

種 類 別	題 名	発 表 ・ 発 行 掲 載 誌 名	発 表 ・ 発 行 年 月 日	連 名 者
○ 論文	Streamline simulation of hot water flooding processes in heavy oil reservoirs	Journal of the Japan Petroleum Institute, Vol.50, No.1, pp. 23-33.	2007年1月 (予定)	Usman Arihara, N.
○ 論文	A sequential thermal simulator with streamline for heavy oil recovery simulation	Proceedings of First Heavy Oil Conference, Beijing, China	2006年11月 13日～15日	Usman Arihara, N.
論文	Modeling of gravity effects in streamline-based simulation for thermal recovery	Proceedings of 12th Formation Evaluation Symposium of Japan, Chiba, Japan	2006年10月 4日～5日	Usman Arihara, N. Harada, T.
○ 論文	A Simulator for predicting thermal recovery behavior based on streamline method	Proceedings of SPE International Improved Oil Recovery Conference in Asia Pacific, Kuala Lumpur, Malaysia	2005年12月 5日～6日	Usman Arihara, N.
論文	Application of streamline method to hot water-flooding simulation for heavy oil recovery	Proceedings of SPE Asia Pacific Oil & Gas Conference and Exhibition, Jakarta, Indonesia	2005年4月 5日～7日	Usman Arihara, N.
○ 論文	Development of streamline-based heat transport model for thermal oil-recovery simulation	Journal of the Japan Petroleum Institute, Vol.48, No.1, pp. 9-21	2005年1月	Usman Arihara, N.
講演	重質油層における熱水攻法のためのストリームライン法シミュレーション	第36回石油・石油化学討論会要旨集 鹿児島県、鹿児島市県民交流センター	2006年11月 30日～12月 1日	ウスマン 在原 典男
講演	圧縮性効果を考慮したストリームライン法熱攻法シミュレーションの改良	平成18年度石油技術協会春季講演会要旨集 宮城県、仙台市戦災復興記念館	2006年5月 30日～6月 1日	ウスマン 在原 典男

# 研 究 業 績

種 類 別	題 名	発 表 ・ 発 行 掲 載 誌 名	発 表 ・ 発 行 年 月 日	連 名 者
講演	ストリームライン法による重質油回収のための熱水攻法シミュレーション	平成 17 年度石油技術協会春季講演会要旨集 東京都、国立オリンピック記念青少年総合センター	2005 年 6 月 1 日～2 日	ウスマン 在原 典男
講演	熱水攻法シミュレーションにおけるエネルギー式の解法へのストリームライン法の適用	平成 16 年度石油技術協会春季講演会要旨集 北海道、札幌市産業振興センター	2004 年 6 月 16 日～17 日	ウスマン 在原 典男
その他				
(論文)	A streamtube approach for modeling mass and heat migration for thermal recovery methods	Proceedings of SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition, Melbourne, Australia	2002 年 10 月 8 日～10 日	Usman Arihara, N.
(講演)	縦・横分散を導入したストリームライン法トレーサー流動シミュレーション	平成 16 年度石油技術協会春季講演会要旨集 北海道、札幌市産業振興センター	2004 年 6 月 16 日～17 日	倉又 秀祥 ウスマン 在原 典男
(講演)	ストリームライン法による全テンソル型シミュレーションモデルの構築	平成 15 年度石油技術協会春季講演会要旨集 千葉県、石油公団石油開発技術センター	2003 年 6 月 24 日～25 日	白井 星至 ウスマン 在原 典男
(講演)	ストリームライン法による 2 次元 1 相トレーサーテスト解析モデルの構築	平成 15 年度石油技術協会春季講演会要旨集 千葉県、石油公団石油開発技術センター	2003 年 6 月 24 日～25 日	倉又 秀祥 市川 和俊 ウスマン 在原 典男