

氏名	たまがわ てつや 玉川 哲也
学位の種類	博士(学術)
学位記番号	学術(環)博第151号
学位授与年月日	平成24年3月27日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院環境科学研究科(博士課程)環境科学専攻
学位論文題目	勇払油・ガス田における断層破碎帯の生産性評価に関する研究
指導教員	東北大学教授 土屋 範芳
論文審査委員	主査 東北大学教授 土屋 範芳 東北大学教授 伊藤 高敏 東北大学教授 橋田 俊之

論文内容要旨

本研究の対象フィールドである勇払油・ガス田は1989年に北海道苫小牧市で発見され、1996年より商業生産を開始した本邦最大級の油・ガス田である。同油・ガス田は、基盤である白亜紀花崗岩類とそれを不整合に覆い古第三系石狩層群に対比される礫岩層内に発達するき裂内に油・ガスを胚胎する天然き裂型基盤岩貯留層として成立している。天然き裂型貯留層の開発において克服すべき課題は幾つかあるが、その中で、炭化水素の流路となるき裂の形成メカニズムの推定は特に重要な課題となっている。そのため、勇払油・ガス田では、坑井掘削時に坑壁比抵抗イメージが計測され、このイメージデータを用いたき裂の検討が精力的に実施されてきた。既往の研究では、油・ガスの坑内への流動に伴う温度アノマリーとそこに観測されるき裂が有する特徴についてまとめられ、その結果、見掛け上開口幅の大きなき裂(メガフラクチャー)が炭化水素の流路となっていることが明らかになった。また、メガフラクチャーの応力状態が検討され、メガフラクチャーの大部分は応力的にせん断条件を満たすき裂、臨界応力き裂であることが示された。つまり、これまでの研究から勇払油・ガス田では、現世応力場で臨界応力状態のき裂が流路として貢献するとする説、臨界応力説が適用できるということが明らかになっている。このような背景のもと残された課題の一つは、貯留層内に臨界応力き裂はどのように分布するか、その空間分布を把握することにある。本研究では、規模の大きな断層と現世応力場の相互作用によって臨界応力き裂の空間的な分布が規制されているという作業仮説のもと研究を進めることとし、三次元地震探鉱データと断層シミュレータを活用した。本研究の目的は、勇払油・ガス田における断層破碎帯の生産性を三次元地震探鉱データによる断層構造の把握と、断層滑りシミュレータによる断層と応力場の相互作用の検討に基づいて評価することにある。

本研究は大きく3つに分けられる。まず、初めに三次元地震探鉱データから詳細な断層構造を抽出す

るために断層面自動抽出処理の最適化に関して検討する。次に、抽出した断層構造と坑井で確認されたき裂情報、応力場を組み合わせ離散き裂ネットワークモデルに基づいて流動モデルを構築し、流動シミュレーションによりモデルの妥当性と限界を評価する。そして流動モデルの限界をもたらしている要因として断層間の力学的相互作用の影響を想定し、断層滑りシミュレーションによりその影響を具体的に評価し、断層破碎帯の生産性に関する概念モデルを提案する。

三次元地震探鉱データに対する断層面自動抽出処理の最適化に関する研究で得られた結論を以下にまとめる。

- ・ AE データおよび坑井データとの対比で断層面自動抽出処理を最適化する手法を提案した。
- ・ 地殻応力場を事前情報として活用すること（抽出する断層の方位を拘束すること）の有効性を示した。
- ・ 処理の最適化により AE データと調和的で、且つ、坑井沿いの開口き裂密度と相関性を有する断層面抽出処理結果が得られた。
- ・ 断層面抽出処理結果によれば勇払で最も高い生産能力を示した坑井は雁行状の臨界応力断層群の一部を掘り抜いたと捉えられる。

断層面抽出処理結果に基づく流動モデルの構築と流動シミュレーションによりモデルの妥当性と限界の評価に関する研究で得られた結論を以下にまとめる。

- ・ 断層面抽出処理結果、坑井のき裂情報および 広域的な応力場によるき裂のせん断滑りによる浸透性の増加を反映した流動モデル構築方法を提案した。
- ・ 流動モデルは低生産坑井と高生産性坑井の 2 本の坑井の生産能力の違いをある程度再現することができた。
- ・ 拘束無の断層面抽出処理結果による流動モデルでは高生産性坑井と低生産性坑井の生産能力の違いは 1 桁弱と見積もられる。
- ・ これに対して拘束有の断層面抽出処理結果による流動モデルでは 1 桁を超える違いが想定される。拘束有の処理結果を用いた方が、観測値により近いより大きな生産能力の違いを再現できることがわかった。
- ・ ただし、実際に観測された 3 桁近い生産能力の違いは再現できていない。

断層滑りシミュレーションによる断層間の力学的相互作用の評価に関する研究で得られた結論を以下にまとめる。

- ・断層滑りシミュレータにより断層滑り分布およびクーロン応力変動分布を評価した。
- ・その結果、計4本の坑井で観測された生産能力の違いを再現するためには、両要素を取り入れた評価の必要性を示した。
- ・勇払油・ガス田の断層破碎帯の生産性に関する概念モデルを提案した。
- ・断層破碎帯の生産性の定量的な評価のためには断層滑り分布およびクーロン応力変動分布を取り入れた二重孔隙モデルの構築が必要と考えられる。

本研究によって得られた主要な成果は以下の通りである。

- ・断層面自動抽出処理を的確に利用するために、AE データおよび坑井データで断層面自動抽出処理結果を最適化する手法を提案した。その中で、地殻応力場に基づいた臨界応力断層の方位を事前情報として活用することの有効性を示した。この手法によって、AE データと調和的で、且つ、坑井沿いの開口き裂密度との定量的な相関性を有する断層面自動抽出処理が得られ、信頼性の高い詳細な断層構造を抽出することができた。
- ・複数の三次元任意形状の断層面を取り扱える実用的な断層滑りシミュレータを導入し、臨界応力断層と臨界応力断層との間の力学的相互作用を考慮した断層滑り分布およびクーロン応力変動分布を実施した。その結果、計4本の坑井で観測された生産能力の違いを再現するためには、両要素を取り入れた評価の必要性を示し、勇払油・ガス田の断層破碎帯の生産性に関する概念モデルを提示した。

本研究で提案した三次元地震探鉱データに対する断層面自動抽出処理の最適化手法および断層破碎帯の生産性に関する概念モデルは、勇払油・ガス田の貯留層き裂システムに関する評価を加速させるブレークスルーとなった。ここで得られた重要な理解は、今後の勇払油・ガス田の開発に大きく貢献するとともに、一般の天然き裂型貯留層の探鉱・評価・開発に新たな指針を与えるであろう。

断層滑り分布:断層面は断層面自動抽出処理の最適化で抽出され、断層滑りシミュレータで各断層の断層滑りを評価した。図中の数値は滑りの相対的な大きさを地震モーメントに基づき評価した結果である。定性的には高い評価の断層ほど断層破砕帯が発達すると想定される。

クーロン応力変動分布:断層滑りシミュレータで断層滑りによる2次的な応力場(クーロン応力の変動)を評価した。クーロン応力の増加域(暖色系領域)では既存のき裂がせん断条件を満たし易くなる。

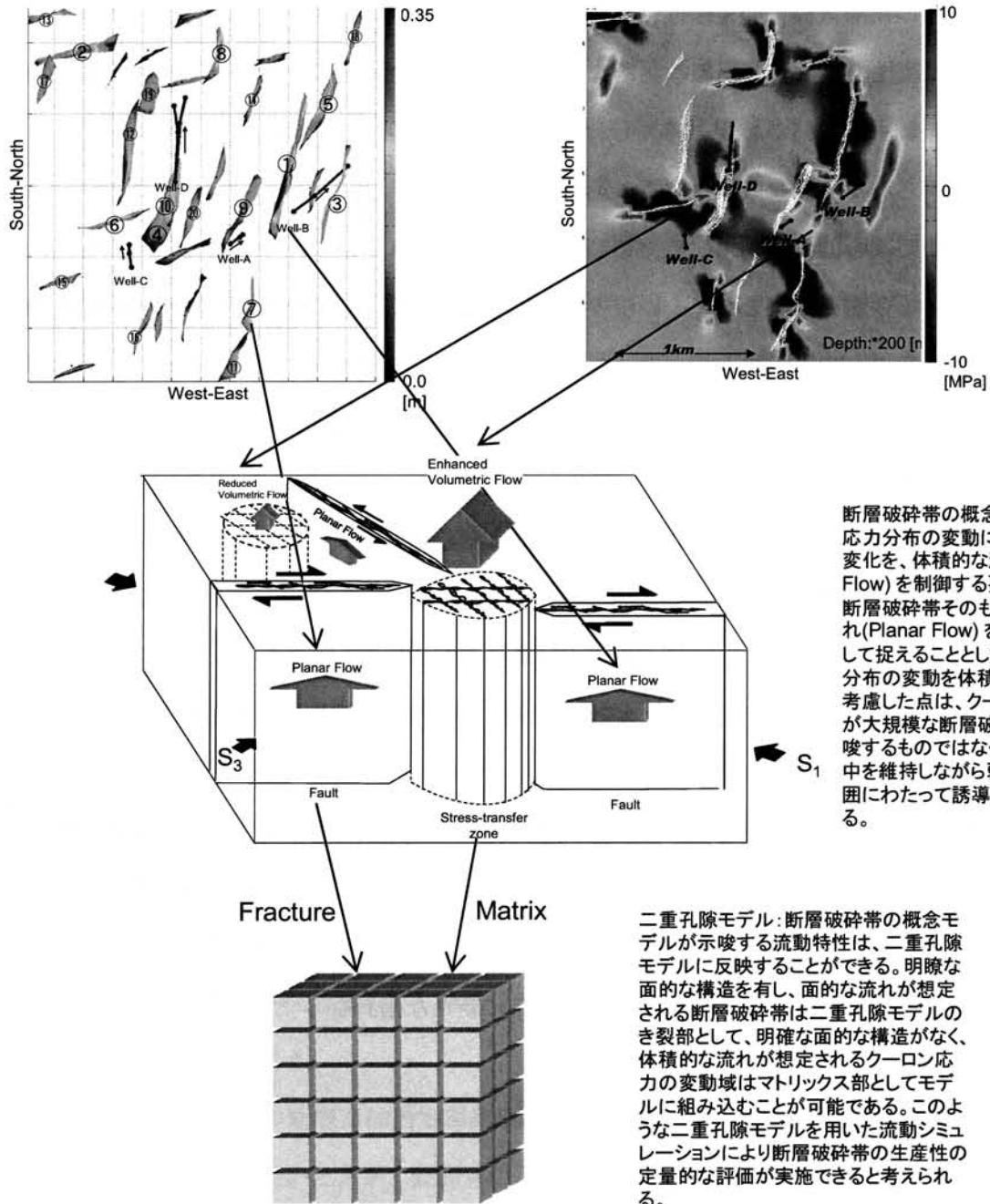


図1：勇払油・ガス田における断層破砕帯の生産性に関する概念モデルと二重孔隙モデルへの組み込み

論文審査結果の要旨

勇払油・ガス田は1989年に北海道苫小牧市に発見され、1996年より商業生産を開始した本邦最大級の油・ガス田である。同油・ガス田は、白亜紀花崗岩類とそれを不整合に覆う礫岩層に発達するき裂に油・ガスを胚胎するき裂型油・ガス田であるが、このようなき裂型貯留層の挙動は複雑で、安定した生産が得られなかったり、また探鉱指針も明確に定められないなどの問題を抱えていた。本研究は、三次元地震探鉱データを基礎にして、勇払油・ガス田き裂型貯留層の新たな概念モデルを提唱し、生産性の評価についてまとめたものであり、全編5章よりなる。第1章は緒論であり、勇払油・ガス貯留層の特徴などをまとめ、本研究の目的を述べている。

第2章は、三次元地震探鉱データから信頼性の高い詳細な断層構造を抽出する方法について述べている。三次元地震探鉱データから断層面を抽出する方法については従来より多くの方法が提唱されているが、本研究では、人工蟻を用いた断層面自動抽出処理システムを採用している。本貯留層ではメガフラクチャーとよばれる開口幅が大きなき裂が高い浸透率を示し、油・ガスの生産に大きく寄与している。このメガフラクチャーは現世の応力場に強く依存し、臨界応力に達していると推定されることから、人工蟻のトレース条件として、現世の地殻応力場に基づく臨界応力断層を事前情報として活用することにより、AEデータと整合性の高い断層面の抽出に成功している。これは、本研究を代表する大きな成果である。

第3章は、離散き裂ネットワークモデルに基づく流動モデルを提案している。勇払油・ガス貯留層では、近傍する孔井でも生産性に大きな差異がある。この理由を解明するために、2章で得られた断層分布を用いて、流体流動の数値計算を行った。その結果、地殻応力による制約条件を付けた断層分布モデルを用いることにより孔井間の生産性の相違をある程度説明することが可能となった。これは重要な成果である。しかしながら、断層の幾何学的分布だけでは、孔井間の著しい生産性の差異を説明することはできなかった。

第4章は、断層面の幾何学的分布を基礎に、断層滑りシミュレーターを用いてクーロン応力（せん断応力と摩擦力との差）の分布を計算し、断層面積と滑り量、地震モーメントなどの関係を導くとともに、断層の格付けを行い、高い生産性を示すゾーンは、クーロン応力の集中帯であることを見いだしている。この結果により、勇払油・ガス貯留層は、格付けの高い断層間に分布するクーロン応力の集中帯に位置する孔井が極めて高い生産性を有することを明らかにしている。これは今後の開発に対してきわめて有効な指針を与えている。

第5章は、結論である。

以上要するに、本論文は、三次元地震探鉱データを基礎にして、地質学的知見、他の物理探査データの結果を総合化して、断層の評価とガス生産性との因果関係を明らかにして、き裂型貯留層の生産性に関する新たな知見を得たもので、資源開発工学ならびに環境科学の発展に資するところが少なくない。

よって、本論文は博士(学術)の学位論文として合格と認める。