

## 学位論文題名

Study on Advanced Simulation of  
Petroleum Generation and Migration

(石油の生成移動シミュレーションの高度化に関する研究)

## 学位論文内容の要旨

石油探鉱では、主に物理探査、露頭や坑井から得られるデータや情報に基づき、堆積盆地では過去に何が起こったかを理解する帰納法的アプローチが取られて来た。そして石油が貯留している可能性が高いトラップを見出し、試掘が行われてきたが、現在でも発見確率は約 30%程度に留まっている。これは油ガス田の成立には、地質構造、帽岩、貯留岩や根源岩などの複数の要素が存在し、さらに石油の生成・移動・集積などの過程が起こらなければならないため、特に後者は、過去のある時点に起こり、その現象の全体像を現在取得できるデータから解明することに限界があるためである。

そこで石油探鉱でも、帰納法と逆のコンピューターシミュレーションに代表される演繹法的アプローチの適用が始められた。1970年代から石油根源岩の熟成評価に適用され、その後、コンピューター技術の発達とともにより複雑なモデルが考案され、また当初一次元モデルであったものは、その後、二次元・三次元モデルへと進化した。多次元化にともない石油の生成に加え、その移動モデルも付加された。石油の移動は、泥質岩である根源岩から砂岩や炭酸塩岩までの一次移動(排出)と砂岩や炭酸塩岩内を移動しトラップに至る二次移動に分けられるが、後者は、既に地下水学や油層工学分野で現象解明が行われており、多相流のダルシー則モデルが適用された。このモデルには相対浸透率の概念が採用されており、油やガスの飽和率(孔隙中の含有率)が増加するとその流動性が高まるモデルである。また一次移動(排出)についても、当初は二次移動と同様のモデルが採用されたが、根源岩タイプによる排出効率の違いが再現できない、多次元石油生成移動シミュレーションで実際の油ガス分布が再現できないという問題が生じていた。

そこで本研究では、まずこの石油一次移動(排出)モデルの高度化を目指すこととした。まず二次移動が起こる粗流な砂岩や炭酸塩岩と、一次移動(排出)が起こる細粒な泥質岩では岩石物性が異なる可能性があることから、石油移動モデルに採用された相対浸透率について検討を行った。浸透率が高い試料の場合、実験室で岩石試料に油、ガスおよび水を注入し、浸み出して来る流量の測定により相対浸透率を実測することが可能である。そこで粒度や粘土鉱物含有量が異なる様々な砂岩 21 試料について相対浸透率を実測し、その変化について検討したところ、特に不動水含有量が系統的に変化することが判明した。つまり岩石が細粒になるほど、また粘土鉱物含有量が増えるほど不動水含有量が増えるという関係を見出した。これは岩石粒子表面にはある厚さの不動水が存在しており、細粒になってもその厚さが余り変わらないことを示唆している。細粒になるまた粘土鉱物含有量が増えることは、いずれも岩石の(絶対)浸透率を下げる方向に働くことから、不動水含有量をこの(絶対)浸透率の関数で与える相対浸透率モデルを作成し、石油排出モデルに組み込んだ。そしてこの新しいモ

デルを用いれば、Pepper (1991)が世界のいろいろな根源岩の分析結果を元に見積もった排出効率を再現できることがわかった。

一方で石炭については、Pepper (1991)が分析・算出した排出効率より高く計算されていた。石炭組織には相当量のピチュメンが含まれていることがわかっており、このことを考慮すると、一次移動（排出）モデルには石油吸着現象を取り込む必要性が生じた。そこで実際にどれくらいの量の石油が石炭に吸着されるのかを確認するため、室内実験を行った。実験では、様々な炭化度を持つ石炭試料を粉碎し、目的とする石油成分および溶媒とともにオートクレーブ中に入れ、各石油成分濃度の時間変化量を測定した。各石油成分濃度の減少量が石炭試料に吸着したものと判断し、実験結果を解析して最大吸着量を見積もった。この結果、石炭試料には最大100~200mgHC/gTOCの石油が吸着することを見出した。Pepper (1991)の石炭試料については、200mgHC/gTOCの石油吸着能力を与えることで、実際の排出効率を模擬できることが判明した。

石油の生成移動モデル、特に石油の一次移動（排出）の高度化を図り、多次元シミュレーションでの実際の石油の集積を評価する下地が整った。但し、これら評価では、様々な入力データを揃える必要があり、その精度も結果を大きく左右する。その中で特に敏感なのは根源岩に関するデータである。通常これらは、坑井などで採取される岩石試料の分析により評価可能であるが、実際に石油を生成した根源岩は堆積盆地の深部に存在しており、同じ層準の試料は採取できるものの、まさに該当する試料を採取できる機会は少ない。そこで本研究では、より容易に入手できる石油試料そのものから、根源岩に関する詳細な情報を詳細に推測する方法を検討した。

まず原油試料について、タンデム型ガスクロ質量分析装置(GC-MS-MS)を導入し、微量なC<sub>30</sub>ステラン等を分離・同定・定量できる技術を確認した。また根源岩の時代が判明している海成原油や東南アジア産の湖成原油を広く分析し、これらに含まれる特定のバイオマーカーを分離・同定した。逆にこれら特定のバイオマーカーを見出すことで、原油試料が由来した根源岩タイプが詳細に決定できることになった。次にコンデンセート試料からの根源岩推定法の検討を行った。コンデンセートは、地下で気体であるが地表で液化する軽質炭化水素であるが、炭素数の多いバイオマーカーは熱分解されており含まれていない。そこで本研究ではダイヤモンドイド化合物に着目した。これはダイヤモンドに似た立体構造を持つ炭化水素であり、熱分解に強いためコンデンセートに濃集している。この化合物による根源岩タイプ推定法については研究例がほとんどなく、そこで根源岩タイプが明らかな原油・コンデンセート25試料を収集し、ダイヤモンドイド化合物を分析した。その結果、各根源岩タイプで熟成度の上昇にともないその含有量が増加する傾向が見られた。そこで熟成度指標であるメチルアダマンタン比(Chen et al., 1996)に対して、ダイヤモンドイド化合物含有量をクロスプロットし詳細に検討した。この結果、メチルアダマンタン比の増加にともない含有量が増加し、さらに炭酸塩岩、湖成、海成、河川成~デルタ成と、堆積環境への粘土鉱物供給量が多くなるにつれて、各増加トレンドが高含有量側にシフトすることが判明した、このことはダイヤモンドイド化合物が形成される際に、粘土鉱物が触媒として働くことを示唆しており、またこのダイヤグラムによりコンデンセートの根源岩タイプを判定できることになった。

以上のような、石油の生成移動シミュレーションの高度化を行い、実際にベトナム北部のソンホン盆地に適用した。その結果、従来坑井で確認されていた中新世のガス指向の河川成~デルタ成根源岩に加え、原油・コンデンセート試料から盆地中心部に油指向の湖成根源岩が発達する可能性が示唆された。堆積盆地発達史を勘案し漸新世に湖成根源岩が発達しているとし、多次元ベースンモデリングを実施したところ、湖成根源岩の油生成時期は、従来探鉱されて来たトラップタイプの形成時期に先行していることが判明し、これがソンホン盆地で油発見が少ない理由であることと結論付けられた。これに対し、より古い時期に形成されたトラップタイプには、これら油が

集積している可能性が示唆され、重要な探鉱指針を与える結果となった。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 鈴 木 徳 行

副 査 教 授 西 弘 嗣

副 査 准教授 山 本 正 伸 (環境科学院)

副 査 講 師 沢 田 健

学 位 論 文 題 名

## Study on Advanced Simulation of Petroleum Generation and Migration

(石油の生成移動シミュレーションの高度化に関する研究)

地下深部における石油炭化水素の移動は、石油を生成する根源岩から排出され多孔質の地層に達する過程(一次移動)と多孔質の地層を移動し石油が集積するまでの過程(二次移動)に分けられる。これらには多相流のダルシー則や相対浸透率の概念が採用され、数値シミュレーションが行われてきた。しかし、一次移動では根源岩タイプ(粘土質岩、石灰岩、石炭質堆積岩などの違い)による排出効率の違いを、石油生成移動の数値シミュレーションによって適切に再現できないという問題があった。

本論文は、このような現況にある石油炭化水素の一次移動モデルを高度に再構築し、その信頼度を飛躍的に高めることを目的として行われたものである。まず二次移動が起こる粗粒な砂岩や石灰岩と、一次移動が起こる細粒な泥質岩では岩石物性が異なるので、多くの移動モデルで採用されている相対浸透率について検討を行った。粒度や粘土鉱物含有量が異なる様々な試料について相対浸透率を実測し、その変化について検討したところ、岩石が細粒になるほど、また粘土鉱物含有量が増えるほど不動水含有量が増えるという関係を見出した。これは岩石粒子表面にある厚さの不動水が存在しており、細粒になってもその厚さが余り変わらないことを示唆している。細粒になり粘土鉱物含有量が増えることは、いずれも岩石の(絶対)浸透率を下げる方向に働くことから、不動水含有量を(絶対)浸透率の関数で与える相対浸透率モデルを構築し、泥質根源岩や石灰質根源岩の排出効率を適切に再現することに成功した。一方、石炭質根源岩における一次移動(排出)モデルには石油吸着現象を取り込む必要性が生じた。石炭質石油根源岩の吸着特性を確認するため、各種室内実験を行った結果、石炭には単位炭素重量あたり最大 100~200mgHC/gTOC の石油炭化水素が吸着されることを明らかにした。これを石油排出モデルに組み込むことにより、排出効率を効果的に再現できることが明らかになった。

さらに、本論文では入手できるわずかな石油試料から、その根源岩に関する詳細な情報を推測する方法についても検討し、より確からしい石油炭化水素の生成・移動・集積のシミュレーションを実現するための実際的アプローチについても詳細な研究が行われている。タンデム型ガスクロマトグラフィー質量分析装置(GC-MS-MS)を導入し、微量な各種バイオマーカーを分離・同定・定量し、原油の根源岩タイプを推定する方法を

確立した。また、本論文では、コンデンセートの根源岩を推定する新しい方法の検討も行われている。コンデンセートは地下で気体であるが地表で液化する軽質炭化水素であり、炭素数の多いバイオマーカーは熱分解されており含まれていない。本論文は石油や根源岩有機物の熱分解過程で生成し熱的に安定であるダイヤモンドイドに着目した。その結果、原油中のダイヤモンドイドの濃度と組成から石油根源岩タイプ、特に根源岩の岩相を推定できることを明らかにした。以上の成果をベトナム北部のソンホン堆積盆地に適用し、産出原油のバイオマーカー・ダイヤモンドイド分析と数値シミュレーションによって石油天然ガスの生成・移動・集積の予測が効果的に実践できることが示された。

これを要するに、著者は、地下深部に存在する石油・天然ガス分布の予測法に関して新知見を得たものであり、石油炭化水素資源の開発に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（理学）の学位を授与される資格あるものと認める。