

氏名	舟木 泰智
博士の専攻分野の名称	博士（工学）
学位記号番号	博理工甲第910号
学位授与年月日	平成25年3月22日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	堆積岩中の主要な物質移動経路の識別方法に関する基礎的研究
論文審査委員	委員長 教授 渡邊 邦夫 委員 教授 桑野 二郎 委員 准教授 小口 千明 委員 准教授 長田 昌彦 委員 常務取締役 加藤 進（株地球科学総合研究所）

論文の内容の要旨

地下深部の地層中に発達する割れ目がどの程度地層中の主要な物質の移動経路として機能しているかを把握することは、二酸化炭素の地下貯留、放射性廃棄物の地層処分等における地下水の流れや物質の移動に関するモデル化や数値解析を行う上で重要な基盤情報となる。本研究では、特に固結度の低い新第三紀堆積岩中に発達する割れ目がどの程度地層中の主要な物質の移動経路として機能しているかを大深度のボーリング掘削時におこなう種々の調査・分析から把握する手法を構築することを目的として、2つのアプローチにより研究を進めた。

第一に、ボーリングコアの岩相・割れ目の観察、超音波型孔壁画像検層および流体電気伝導度検層から、ボーリング孔における割れ目の分布と地下水の流入箇所（FP）との対応関係を明らかにし、堆積岩中の発達する割れ目がどの程度地層中の主要な物質の移動経路として機能しているかを検討した。

その結果、調査対象の地層である声間層（珪藻質泥岩；オパール A 帯）の割れ目は稚内層（珪質泥岩；オパール CT 帯）のそれよりも開口性と連続性・連結性に乏しく、割れ目がほとんど主要な水みちとして機能していないこと、稚内層の割れ目はある程度の連続性・連結性を有し（少なくとも声間層のそれより連続性・連結性に富み）、割れ目が主要な水みちとして機能しており、声間層は多孔質媒体として、稚内層は声間層と比べ亀裂性媒体としての性質が強いことがわかった。

調査に使用した超音波型孔壁画像検層は、ボーリング孔内が泥水であっても 1mm 以上の幅を有する割れ目を検出することができた。ボーリングコア観察と超音波型孔壁画像検層で検出した割れ目の対比から割れ目の開口性を把握し、この結果と流体電気伝導度検層から抽出した FP との対応関係から割れ目の連続性・連結性を明らかにすることで、堆積岩中に発達する主要な移動経路として機能している割れ目の分布を定量的に把握できる見通しを得た。

第二に、ボーリングコアを用いたヘッドスペースガス分析により、堆積岩中に分布する炭化水素ガスの分子組成および炭素同位体組成（ $\delta^{13}\text{C}$ ）の分布を把握し、この分布と岩相・割れ目の形成および発達過程との関係から新第三紀堆積岩中の炭化水素ガスの生成・移動・集積プロセスについて検討した。

その結果、声間層（珪藻質泥岩；オパール A 帯）および稚内層（珪質泥岩；オパール CT 帯）に分布する炭化水素ガスは、主として微生物起源のメタンからなることがわかった。また、隆起・侵食時以降に形成した割れ目が発達する層準の近傍では、メタン濃度の低下、メタンの炭素同位体比の重い値への変動が確認されることから、生成した微生物起源のメタンは割れ目を經由して移動・放出（脱ガス）した可能性が高いことがわかった。

稚内層（珪質泥岩；オパール CT 帯）では、特異的に熱分解起源ガスと考えられる炭化水素ガスが認められる層準が存在した。これは、オパール CT と石英との続成変換面のシール能力が低下し、下位の層準で生成した熱分解起源ガスが同層準に移動・混入してきたことによるものと考えられた。この稚内層（珪質泥岩；オパール CT 帯）で熱分解起源ガスが認められた層準は、大曲断層近傍で掘削したボーリングのみであるため、大曲断層が深部からの熱分解起源ガスの移動経路として機能している可能性が示唆される。ボーリングコアの採取深度の間隔を密にすることで、ヘッドスペースガス分析から堆積岩中に分布する炭化水素ガスの分子組成および $\delta^{13}\text{C}$ の詳細な深度分布を把握することができた。この分布と岩相・割れ目の形成および発達過程との関係から堆積岩中の炭化水素ガスの生成・移動・集積のプロセスを明らかにすることで、地下深部からの主要な物質の移動経路や長期的に高い閉じ込め能力を有した地層の検出できる見通しを得た。

本論文で検討した 2 つのアプローチは、いずれも地下深部の堆積岩中に発達する割れ目がどの程度地層中の主要な物質の移動経路として機能しているかを把握する上で重要な基礎情報を取得できることから、堆積岩を対象とした処分施設の建設の際のボーリング調査時に適用を検討すべきである。

論文の審査結果の要旨

本論文は、堆積岩中の地下水及び物質の移動経路となる割れ目の特性について多くの調査法を用いて研究した成果を纏めた物である。とくに調査法の中で、堆積岩中の炭化水素ガスの組成や炭素同位体を用いた手法は、従来、深度数百メートル程度の岩盤では用いられていない新規性の高いものである。

地下深部の地層中に発達する割れ目がどの程度地層中の主要な物質の移動経路として機能しているかを把握することは、二酸化炭素の地下貯留、放射性廃棄物の地層処分等における地下水の流れや物質の移動に関するモデル化や数値解析を行う上で重要な基礎情報となる。本研究では、特に固結度の低い新第三紀堆積岩中に発達する割れ目がどの程度地層中の主要な物質の移動経路として機能しているかを調べた。論文は、本研究成果を5章に分けて論述している。

第1章では研究の背景と取り扱う問題点について整理している。この中で、堆積岩中の放射性廃棄物処分の安全性評価の重要性を述べ、廃棄物の隔離性能を評価する上で岩盤中の割れ目を長期に移動する地下水と物質流動特性を研究することが大事である事を論述している。

第2章では、本研究で対象とした北海道幌延地域の地質について記述している。その中で、大曲断層に代表される高透水割れ目の把握が大事である事を記述している。

第3章では、対象地域の流動経路となる割れ目系の特性の研究について論述している。まず、ボーリングコアの岩相・割れ目の観察、超音波型孔壁画像検層および流体電気伝導度検層から、ボーリング孔における割れ目の分布と地下水の流出入箇所（FP）との対応関係を明らかにし、堆積岩中の発達する割れ目がどの程度、地層中の主要な物質の移動経路として機能しているかを詳細に調べた。

その結果、調査対象の地層である声間層（珪藻質泥岩；オパール A 帯）の割れ目は稚内層（珪質泥岩；オパール CT 帯）のそれよりも開口性と連続性・連結性に乏しく、割れ目がほとんど主要な水みちとして機能していないこと、稚内層の割れ目はある程度の連続性・連結性を有し（少なくとも声間層のそれより連続性・連結性に富み）、割れ目が主要な水みちとして機能しており、声間層は多孔質媒体として、稚内層は声間層と比べ亀裂性媒体としての性質が強いことを明らかにした。

今回の調査では、超音波型孔壁画像検層を併せて用いた。ボーリングコア観察とこの超音波型孔壁画像検層で検出した割れ目の対比から割れ目の開口性を把握した。また、この結果と流体電気伝導度検層から抽出した FP との対応関係から割れ目の連続性・連結性を明らかにした。これらを併せて、堆積岩中に発達する主要な移動経路として機能している割れ目の特性を把握し、本研究で用いた種々の調査法が岩盤内の地下水・物質移動経路評価では必要である事を明示した。

第4章では、数千年以上の長期の地下水・物質移動現象の解明に炭化水素ガス組成や炭素同位体情報を用いる研究成果を取りまとめている。まず、ボーリングコアを用いたヘッドスペースガス分析により、堆積岩中に含有される炭化水素ガスの分子組成および炭素同位体組成（ $\delta^{13}\text{C}$ ）の分布を把握し、この分布と第3章で明らかにした岩相・割れ目の形成および発達過程との関係から新第三紀堆積岩中の炭化水素ガスの生成・移動・集積プロセスについて検討した。その結果、声間層（珪藻質泥岩；オパール A 帯）および稚内層（珪質泥岩；オパール CT 帯）に分布する炭化水素ガスは、主として微生物起源のメタンからなることがわかった。また、隆起・侵食時以降に形成した割れ目が発達する層準の近傍では、メタン濃度の低下とメタンの炭素同位体比の重い値への変動が確認されることから、生成した微生物起源のメタンは割れ目を經由して移動・放出（脱ガス）したことが明らかとなった。

稚内層（珪質泥岩；オパール CT 帯）では、特異的に熱分解起源ガスと考えられる炭化水素ガスが認められる層準が存在した。これは、オパール CT と石英との続成変換面のシール能力が低下し、下位の層準で生

成した熱分解起源ガスが同層準に移動・混入してきたことによるものである。この稚内層（珪質泥岩; オパール CT 帯）で熱分解起源ガスが認められた層準は、大曲断層近傍で掘削したボーリングのみであるため、大曲断層が深部からの熱分解起源ガスの移動経路として機能している事を明らかにした。ボーリングコアの採取深度の間隔を密にすることで、ヘッドスペースガス分析から堆積岩中に分布する炭化水素ガスの分子組成および $\delta^{13}\text{C}$ の詳細な深度分布を把握することができた。この分布と岩相・割れ目の形成および発達過程との関係から堆積岩中の炭化水素ガスの生成・移動・集積のプロセスを調べることで、地下深部からの主要な地下水・物質の移動経路の性質が把握できる事を明らかにした。

第5章は本論文の纏めである。その中で、堆積岩を対象とした放射性廃棄物処分施設の安全性評価では、本研究でその有効性が明らかとなった総合的に用いる事と、炭化水素ガスの分析が必要である事を提案している。

本論文は、天然ガス分析という新しい調査法を用いて得られた結果と、多くの丹念な調査から明らかとなった岩盤及び岩盤内割れ目系の地質的性質を総合して、北海道幌延地域の堆積岩内の長期の地下水・物質移動特性を明らかにしたものである。本研究で提案され用いられた考え方や総合的手法は他地域にも広く適用できる。また、割れ目系の連続性評価、地下水・物質の流動場としての断層の性質、天然ガスの性質など新知見も多い。本研究に関しては、日本の学術誌の査読論文として2編（応用地質、地学雑誌）、国際学術誌に査読論文として1編（J. Structural Geology: IP: 1.830）に掲載された。これらを総合的に考慮し、博士論文に十分と評価した。