

京都大学	博士 (工学)	氏名	澁谷 奨
論文題目	布田川断層の運動履歴および破碎帯が地下水流動に及ぼす影響の解明に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>日本列島では海溝に沿って海洋プレートが大陸プレートの下に沈み込むことにより直下型地震が多発し、活断層が多く存在している。活断層は直下型地震の発生源となるのに加えて、地下水や流体エネルギー資源の流動に顕著な影響を及ぼす。よって、断層の存在と運動履歴の解明および断層破碎帯の構造的な特性の定量評価は、水資源としての地下水および地熱貯留層内の熱水の流動特性や、温室効果ガスの地中貯留および放射性廃棄物の地層処分における地層の遮蔽特性を定量的に評価するために必要不可欠である。本研究では、阿蘇火山地域にある布田川断層の主断層面を貫通する布田川断層掘削プロジェクトにおいて、岩石試料の地質学的観察、物理検層による岩盤および断層破碎帯の物性評価を行い、断層とその周辺の地質学的特性を検討したうえ、断層破碎帯が地下水流動に及ぼす影響について総合的に考察した。本論文は 7 章からなり、その概要を以下に述べる。</p> <p>第 1 章では、序論として研究の背景と目的を述べている。</p> <p>第 2 章では、阿蘇火山地域および九州の地質学的背景、布田川断層掘削について、既存の研究をレビューしてとりまとめている。2016 年に熊本地震の本震 (Mw 7.0) は、布田川断層が活動したことによって発生した。研究地域には、世界で 2 番目に大規模なカルデラ噴火を起こした阿蘇火山があり、火山岩や火砕流堆積物が広く分布する。また、多くの断層が存在し、断層や火山噴出物に関係する地質学および地質年代学的な研究が数多くある。しかし、これらの研究の多くは地表での調査結果に基づくものであり、布田川断層の運動履歴を明らかにするには地下深部掘削による調査が必要であった。そのため、布田川断層掘削では、熊本地震本震での最大右横ずれ変位 2.2 m が確認された地表地震断層の付近において、本孔 (FDB 孔) およびパイロット孔 (FDP-1 と FDP-2) が掘削された。</p> <p>第 3 章では、布田川断層掘削で得られたコア試料とカッティングス試料を基に、布田川断層を貫通した掘削孔での岩相ユニット区分、物理検層データを基に各岩相の物理特性についてまとめている。それに加えて、本研究では新たにコア試料と孔壁画像の両方を用いてき裂の分布特性を詳細に解析した。その結果、複数の掘削孔で確認された同じ岩相ユニット (下陳礫層と津森層のほぼ水平な地層境界) の出現深度の違いから、現在は右横ずれを示す布田川断層に沿って 200 m 以上の正断層運動を示す鉛直変位の存在を本研究により初めて示した。また、既存の運動学および地質年代学的な研究も参考にすることで、布田川断層は短期間に主に正断層として活動した後、阿蘇カルデラ形成の大規模な火山活動の終息に伴う応力場の変化により、現在の横ずれ優位の断層運動に変化したことを示した。さらに、本孔の深度 461 m の破碎帯が他の破碎帯よりも厚く、高いき裂密度と明瞭な横ずれセンスの条線を有し、比抵抗と P 波速度の両方が明瞭に低下することを明らかにした。これらの地質学的観察と物性評価の結果から、深度 461 m の破碎帯が熊本地震本震で活動したことが示唆された。</p> <p>第 4 章では、本孔の堆積岩と火山岩類に対して物理検層データを用いて深度方向における連続的な間隙率の推定を行った。インタクトな岩石コア試料を用いて間隙率の測定ができるが、き裂等が発達する深度では間隙率が得られない。そこで、既往研究</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	澁谷 奨
<p>の複数の経験式を用いて、堆積岩と火山岩類の両方についてその適応性を検証したうえで、堆積岩に対して岩種と固結度を考慮できる推定式を提案し、その推定結果とコア試料の測定値とを比較して新規提案式が既存の推定式よりよく整合することを示した。連続的な間隙率の深度分布を推定した結果、300～660 m の範囲に高い間隙率を有する地層がほぼ連続的に分布することが判明した。また、火山岩類では推定間隙率と測定間隙率との比較から、推定間隙率がコア測定で評価できないき裂間隙を反映している可能性が高いことが明らかとなった。そのため、火山岩類に存在する断層破碎帯が多くのき裂間隙を含み、地下水の流動経路になる可能性があることを示唆した。</p> <p>第5章では本孔の300 m 以深の大深度深層地下水を対象に行った地下水位観測についてまとめている。300 m 以深には熊本地域の深層地下水帯水層（第2帯水層）よりも古い地層が分布するが、その深度では地下水位の既往の観測結果が見当たらない。本研究では、300 m 以深の地下水動態を明らかにするため、3年間以上の地下水位観測を行った。地下水位は年間を通して降雨の影響を受けており、時期により変動パターンが大きく異なる季節変動を示した。本研究における観測地点では地下水位変動と降水量の観測結果から、熊本地域の主な地下水涵養域の上流側にある阿蘇外輪山地域からの地下水供給が水位変動と関係することが確認され、広域的な活発な地下水流動が示唆された。また、300 m 以深での降雨応答を有する水位変動が確認されたため、第2帯水層が300 m 以深に延伸している可能性が高いことが判明した。</p> <p>第6章では、第3章～第5章の結果を踏まえ、布田川断層の破碎帯が地下水流動に及ぼす影響について総合的に考察した。熊本地震時に活動した主断層面を含む破碎帯内にある火山岩類において、高いき裂密度を有すること（第3章）と、き裂間隙の存在（第4章）が確認されたことから、破碎帯内の岩盤での地下水流動の可能性が示唆された。第5章では、地下水位変動が明瞭な降雨応答を有することが判明し、熊本地域に広く分布するAso-1～Aso-3火砕流堆積物を主とした第2帯水層が300 m 以深の堆積岩層や先阿蘇火山岩類まで続いている可能性があることが示めされた。これらの結果を統合すると、布田川断層の破碎帯が地下水の帯水層をさらに深部へ拡張させる役割を果たし、熊本地域の活発な地下水流動系の形成に強い影響を及ぼしている可能性を示唆した。さらに、これらの水理学的特性と第3章で確認した布田川断層の運動履歴、地質年代学の既往研究の結果を統合して、布田川断層の地質地下水モデルを提案した。</p> <p>本研究は、沈み込み帯においてMw 7規模の直下型地震を引き起こすような活断層に対して、既存のプレートテクトニクスや地質年代学のデータを参考にしながら、地質学的観察と物性評価を行うことで、活断層の運動履歴を明らかにした。さらに、断層破碎帯内における高いき裂間隙率の存在と地下水位の変動特性を明らかにし、断層破碎帯の地下水の流動経路としての役割を示唆した。活断層ならびにその周辺の地質学および水理学的特性評価を行った本研究で得られた知見は、水資源としての地下水やエネルギー資源となる地熱貯留層内の熱水の流動特性、温暖化効果ガスの地中貯留や放射性廃棄物の地層処分などに関連する地下深部環境の評価を行う上で重要な科学的証拠となることが期待される。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

活断層は直下型地震の発生源となるのに加えて、地下水や流体エネルギー資源の流動に顕著な影響を及ぼす。よって、断層の存在と運動履歴の解明および断層破碎帯の構造的な特性の定量評価は、水資源としての地下水および地熱貯留層内の熱水の流動特性や、温室効果ガスの地中貯留および放射性廃棄物の地層処分における地層の遮蔽特性を定量的に評価するために必要不可欠である。本研究では 2016 年に発生した熊本地震本震の震源断層である布田川断層の運動履歴および断層破碎帯が地下水流動に及ぼす影響を解明する目的で、当該断層を貫通する掘削で得られた岩石試料および検層データ等を用いて、地質構造解析を行い、断層破碎帯および周辺地質体の物理特性を評価したとともに、掘削孔内の地下水位観測を行った。得られた主な成果は次の 3 点に要約される。

- (1) 2016 年の熊本地震本震の際に布田川断層は横ずれすべりの挙動を示したが、複数の掘削孔で確認した堆積層のほぼ水平な地層境界における深度の差異から、布田川断層に沿って 200 m 以上にも及ぶ大きな正断層運動の鉛直変位を初めて定量的に特定した。この大きな変位を伴う運動様式の変化は、布田川断層が過去と現在で異なるテクトニック応力環境下にあったことを示唆するものである。既往研究と総合的に検討した結果、布田川断層は阿蘇カルデラ形成を伴う大規模な火山活動が開始した約 26 万年前～約 9 万年前の間に主に正断層として活動した後、その大規模な火山活動の終息に伴う応力場の変化により、現在の横ずれ優位の断層運動に変化したと解釈できた。
- (2) 断層破碎帯と周囲岩盤中の間隙は流体の賦存する空間であり、特にき裂は流体の主要な流路となるが、岩石コア試料の測定では正確な評価が難しい。そこで、堆積岩と火山岩類に対して音波検層データを用いて、複数の既往経験式を検証したうえ、岩質と固結度を考慮できる堆積岩の間隙率推定式を提案し、その有効性を検証した。また、布田川断層を貫通する掘削孔の連続的な間隙率深度分布を推定し、き裂による間隙率の卓越深度区間を特定して断層破碎帯が地下水の流路になり得ることを見出した。
- (3) 熊本地域の地下水動態を明らかにするために、従来の観測深度を大きく超える 300 m 以深にて、3.2 年間にわたり地下水位連続観測を行った。観測された地下水位変動と降水量の比較検討から、地下水位変動が速い降雨応答を有するとともに 10 km 以上離れている阿蘇外輪山地域での地下水涵養と流下が観測地点の水位を支配することが判明した。よって、深度 250 m 付近までとされていた第 2 帯水層が 300 m 以深まで続いており、断層破碎帯が深部の地下水流動系を形成している可能性を明らかにした。

以上、本研究は 2016 年の熊本地震時に活動した布田川断層の運動履歴や断層破碎帯が地下水流動に及ぼす影響に関する新知見を得たとともに、研究手法は地球工学と地球科学の諸分野に対しても参考価値と波及効果もあるため、本論文は当該分野に対し、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 4 年 2 月 16 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

[要旨公開可能日：令和 4 年 3 月 25 日以降](#)