

京都大学	博士（工学）	氏名	水谷 滋樹
論文題目	我が国の断裂型地熱貯留層形成およびその地球物理学的探査手法の研究		
<p>（論文内容の要旨）</p> <p>本論文は、我が国の地熱開発の現状と、開発が進まない理由としての物理探査およびそのデータの解釈に関する技術的な問題点、その現状を打破するために必要な対策をまとめた内容の論文であり、全7章から構成される。</p> <p>第1章は緒論である。先ず本章で、世界第3位の地熱資源ポテンシャルを有しながら、2012年現在でその2.3%の利用に留まっている我が国の地熱開発の現状について述べている。4枚のプレート間の相互作用により、多くが圧縮テクトニクス場におかれた我が国における地熱貯留層形成を理解するには、地質的形態や構造形成プロセス、そして地熱資源を賦存する地下構造の解明が重要である。それらのデータの解釈技術を含む物理探査技術の導入が、開発に係る技術的リスクの軽減につながることから、今後の地熱資源利用の鍵になることを議論している。</p> <p>第2章では、緒論で述べた地熱調査の現状と問題点についての根拠となる議論を行なっている。まず地熱流体・熱源・貯留層などの地熱資源開発の対象となる熱水系の地下構造や、我が国に散見される高傾斜開放型断裂系に係る先行研究の成果について述べている。その後、プレート運動による圧縮場であっても、横ずれ断層に伴う陥没型の盆地構造（Pull Apart Basin）やフラワー構造などによる局所的な張力場が形成され、この局所的な張力場の中に高傾斜開放型断裂系が発達することを議論している。高温地熱系形成に必要な地熱流体（いわゆる熱水）に加え、地熱流体の地殻内部における対流と熱伝達を高傾斜開放型断裂系が担うこと、そしてその中にいわゆる断裂型地熱貯留層が形成される必要があることを指摘している。また、高温地熱系の時間的安定性が担保される条件として、熱水変質成分の蓄積などにより閉鎖されることなく高傾斜開放型断裂系が維持されるためにはプレート運動による安定的な地殻変動の進行が必要であるとしている。こうした地熱資源賦存の特性に着目することで、物理探査のデータでは埋没しがちな貯留層の位置を同定することができるとし、「断裂型地熱貯留層は、安定的な圧縮応力場下で形成される高傾斜開放型断裂系から発達し、その構造解明に、物理探査手法を適用が有用である」との仮説を立てている。</p> <p>第3章では、石油天然ガス・金属鉱物資源機構が新たに取得および解釈した地熱資源賦存地域の反射法地震探査結果の再解釈を行なっている。学位申請者の新たな解釈により、地熱資源賦存地域における地震反射断面の地質的特徴を、これまでより詳細に掌握することに成功している。反射法地震探査の実施された日本の3地熱地域の例から、一般的に多くの地熱資源賦存地域に認められる圧縮応力場において、横ずれ断層の発達や貫入岩体による局所的な張力場形成に伴うネガティブフラワー構造や高傾斜断裂系の発達により、断裂型地熱貯留層形成が進行したことが示唆された。地熱賦存地域のある険しい地表条件や複雑な地下地質構造などにより良質なデータの取得が難しいとされる山岳部における反射法地震探査は、地熱資源開発業界では費用対効果に加え、探査データを適切に解釈できる経験豊富な人材がいないことからその採用を躊躇する傾向がある。しかし、高品質のデータさえ得られればその断裂帯解釈は比較的容易であると考</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	水谷 滋樹
------	---------	----	-------

えられる。本章の議論で、反射法地震探査を基に、周辺の地質図・概況や他の物理探査手法による結果などとの統合的な解釈は、各地熱地域の地質学的評価や地質構造形成史の推察に至る重要なステップであることを明らかにした。

第4章では、起伏が大きい山岳地域に偏在する地熱資源賦存地域において、地表起伏の影響を軽減し、高解像度な浅部岩石特性を捉えることを目的とした重磁力総合解析について議論している。断裂型地熱貯留層へと発達する可能性がある高傾斜開放型断裂系とその走向を、低飛行高度・高取得密度にて取得の HeliFALCON™ 空中重力偏差探査と HELITEM 時間領域電磁気探査データから推定する手法を検討した。具体的には、ポアソンの関係式に基づく Moving Window Correlation (MWC) 解析法をベースとした両データ間の相関性解析により地表凹凸の影響を軽減し、「岩脈法」に基づき、地表に露出する岩体のみならず、伏在する貫入岩体や火道の平面的分布を詳細に掌握する手法である。従来、取得データが疎らであり、相関性解析の信頼性が低いとの制約により適用が難しかった MWC 解析法を、低飛行高度・高取得密度空中物理探査の導入により解決することが可能であると結論付けている。前章にて得られた知見である地熱資源賦存地域における高傾斜開放型断裂系における安定的圧縮応力場下の地質学的構造形成との整合性の可否を検討している。

第5章では、第3および4章の議論を受け、商業的開発に最適な高エンタルピーな地熱系形成には、熱獲得と熱対流が活発な断裂型地熱貯留層に発達する高傾斜開放型断裂系の存在が必要であるとの観点から、地質学的・地熱学的諸現象の出現に、安定的な圧縮応力場下に形成される横ずれ断層による張力場が果たす役割およびこうした断裂系の基底面へのマグマの水平貫入につながるメカニズムを議論し、地熱系資源地質概念モデルを構築するとともに仮説を検証している。

第6章では、地熱資源地質的評価分野における低飛行高度・高取得密度空中物理探査データについての旧来の解析法の問題点を指摘し、それに対処する新たな重力偏差・極磁力相関性解析法および「岩脈法」を加味した評価法など、斬新性・有用性・発展性について議論し、主に地表にて測定 of 物理探査や坑井掘削を集中的に実施することで、地熱資源探査に資することができる結論付け、この分野の研究の将来に一石を投じている。

第7章（結言）では、全体の議論を総括し、結論を述べている。

氏名	水谷 滋樹
----	-------

(論文審査の結果の要旨)

世界第3位の地熱資源ポテンシャルを有する我が国は、4つのプレートに囲まれた極めて活動的テクトニクス場に位置する。そのテクトニックな環境は基本的に圧縮場であり、地熱の源となるマグマの上昇に適しているわけではないにも関わらず、活発な火山活動やそれに伴う地熱地帯の形成が散見される。そこで「我が国の場合、安定的圧縮応力場下で形成される高傾斜開放型断裂系に発達する断裂型地熱貯留層が一般的であり、その構造解明に物理探査手法の適用が有用である」との仮説を立て、既存のデータを活用し解析を行い、以下の成果を得た。

1. 弾性波反射法探査の実施された地域の地下では、横ずれ断層の発達や貫入岩体による局所的な張力場形成に伴うネガティブフラワー構造が認められた。高傾斜断裂系の発達により、断裂型地熱貯留層形成が進行したことが示唆される。

2. 弾性波反射法探査の実施が困難である急峻な地形を有する山岳地帯で行われたヘリコプターなどを用いた空中磁気測量や空中重力探査の結果からは、反射法地震探査結果同様に、圧縮応力場内に断層運動により局所的に形成された張力場状の地下構造が認められた。我が国の断裂型地熱貯留層の構造解明に低飛行高度・高取得密度空中物理探査手法の適用が有意であることを示している。

3. 弾性波反射法探査および空中物理探査双方が行われた地熱地帯では、どちらか片方の場合に比較し、詳細な地下構造の議論が可能である。

少なくとも探査の実施された地域が、現在安定的な圧縮応力場下にあり、そしてこれらの地域に地溝型帯状の構造や横ずれ断層に伴う正断層など局所的な張力場に形成された高傾斜開放型断裂系の地下構造が認められることを見出し、上述の仮説を検証した。本論文は、未探査の地熱地域の調査に当たり、地熱資源賦存地域における地質学的構造の作業仮説の提唱およびその検討手段としての物理探査の重要性を指摘する内容を有しており、学術の発展および今後の地熱開発に寄与するところが少なくない。

以上の結果、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5年1月20日論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、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。