

京都大学	博士（工学）	氏名	岸 本 将 英
論文題目	リモートセンシング資源探査の高精度化に向けた反射スペクトル分離法の開発と ハイパースペクトル画像による有効性検証		
(論文内容の要旨)			
本論文は世界的な人口増加や経済発展，および脱炭素社会の実現に向けた再生可能エネルギー技術の普及に伴い急増する金属資源需要に対し，新規鉱床の発見が困難になりつつある現状において広域探査技術の向上のために，HISUIやEnMAPなどの最新のハイパースペクトルセンサを用いたリモートセンシング画像解析技術の高度化を試みたものである。具体的には可視・反射赤外域における反射スペクトル情報に着目し，鉱物混合画素のスペクトル分離精度を向上させる新たな解析手法を開発・検証した。室内実験レベルでの基礎的な検討から実際の衛星画像を用いた手法の改良，さらには世界有数の銅鉱床地域への実践的な適用までを段階的に実施することで，資源探査プロセスの効率化と高精度化に資する新たな知見を得ることを本研究の目的とした。 本論文は全6章からなり，各章の概要は以下のとおりである。 第1章は緒論であり，本研究の背景となる金属資源需要の増加と探査の課題，本研究に関連する従来のリモートセンシング技術の成果，および本研究の目的と概要を示した。 第2章では，本研究の理論的基盤となる電磁波解析およびリモートセンシングの基礎理論について概説した。マクスウェル方程式や放射伝達方程式に基づく電磁波と物質の相互作用，特に可視・反射赤外域における鉱物の吸収特性の原理を要約した。また，本研究で比較対象や対象鉱物の同定に用いるX線回折分析（XRD）とX線による化学組成分析法である蛍光X線分析（XRF）の原理，衛星画像の大気補正やノイズ除去などの前処理法，および本研究で用いたスペクトル分離法についても詳述し，本研究による解析法の妥当性や結果の信頼性を議論するために必要な理論的根拠を明確にした。 第3章では室内実験データを用いて，鉱物の混合状態におけるスペクトル分離精度の向上に関する基礎的な検討を行った。資源探査や防災分野で重要となる粘土鉱物（モンモリロナイト）と炭酸塩鉱物（方解石）の混合試料を対象に，分光光度計で測定した反射スペクトルを用いて解析を行った。従来の線形スペクトル分離法（FCLS等）では，測定条件の違いによるスケーリング効果や鉱物の化学組成変化による非線形性の影響を受けやすいという課題があった。そこで本研究では，スペクトルの対数変換と連続体除去を組み合わせたLCR（Log and Continuum Removal）処理と，機械学習に基づく特徴量選択（正則化線形判別分析：RLDA等）を融合した新たなスペクトル分離法を提案した。検証の結果，提案手法はスケーリング効果や鉱物の化学的多様性に頑健であり，特徴的な吸収波長を適切に選択することで，含有率の推定精度を約2倍高められることを明らかにした。 第4章では提案手法を実際の地球観測衛星データへ適用・拡張するため，地表面鉱物分布が詳細に把握されている米国ネバダ州Cuprite地区を対象に検証を行った。第3章の手法では端成分が既知である必要があったが，実際の広域探査では地表面構成物質が未知であることが多い。この課題を解決するため，LCRモデル（LCRM）による非線形性の低減，および大規模スペクトルライブラリからの半自動的な端成分選択を可能にするスパース回帰（SUnSALおよびCLSUnSAL）を組み合わせ，新たなスパーススペクトル分離法（LCRM-SUnSALおよびLCRM-CLSUnSAL）を開発した。日本の最新ハイパースペクトルセンサHISUIを含む複数の衛星・航空機データ（HISUI, AVIRIS, Hyperion）およ			

京都大学	博士（工学）	氏名	岸 本 将 英
びマルチスペクトルデータ（WorldView-3）に適用した結果，提案手法はマルチスペクトル画像と比較して1.6倍以上の高い識別精度を示し，ハイパースペクトルデータの優位性を実証した。また，スケールング効果や系統誤差の影響を効果的に抑制しながら明礬石，カオリナイト，方解石等の主要な変質鉱物の分布を従来法の約1.5倍の識別精度でマッピングできることが確かめられた。 第5章では世界的な銅産出地域であるチリの斑岩銅鉱床ベルト（Chuquicamata, Escondida, El Salvador鉱山）を対象に，EnMAP衛星画像を用いた鉱物分布解析を実施した。第4章で有効性を確認した非線形混合モデルとスパーススペクトル分離を組み合わせた手法（LCRM-SUnSAL法）を適用し，鉱床の成因に関連する変質分帯（カリ，フィリック，粘土化，プロピライト変質帯）を構成する主要鉱物の詳細な分布マッピングを行った。解析の結果，Chuquicamataのオープンピット中心付近における白雲母の顕著な分布やその周辺部における針鉄鉱の分布が確認されるなど，既往の地質モデルと整合的な結果が得られた。また各鉱山に共通して，特に白雲母とカオリンに関しては高い精度で抽出できることを確認できた。これらにより，直接的な鉱石の検出が困難な場合でも，変質鉱物の存在比率分布図を作成することで熱水変質帯構造を把握し，深部に潜頭化する新規鉱床の有望地を絞り込める可能性が示された。 第6章は結論で，本論文で得られた成果を総括した。また今後の課題として，対象鉱物の反射特性や混合状態に応じた推定精度の検証および類似スペクトルの分離限界の評価，低反射率鉱物解析における耐ノイズ性の向上，および他の画像データや物理・地球化学探査と統合した多角的な資源探査システムの構築の必要性について述べた。 以上，本研究による特徴量選択やスパースモデリングを導入したハイパースペクトルデータ解析手法に関する知見は，リモートセンシングを用いた資源探査プロセスの高度化，およびハイパースペクトル衛星・航空機・ドローン画像の利用促進やデータ解釈の向上に貢献できる可能性がある。			