

氏名	かとうしょういち 加藤彰一
授与学位	工学博士
学位授与年月日	昭和61年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第5条第1項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 資源工学専攻
学位論文題目	複素比抵抗法による鉱床探査の基礎的研究
指導教官	東北大学教授 横山 秀吉
論文審査委員	東北大学教授 横山 秀吉 東北大学教授 臼井進之助 東北大学教授 中鉢 憲賢 東北大学助教授 中塚 勝人

## 論文内容要旨

大地の比抵抗に着目し地下の構造や状態を推定する電気探査比抵抗法において、硫化金属鉱物に代表される界面分極性鉱物の分極の影響を加味して鉱床探査を行う複素比抵抗法は近年急速に発達し、各国でその応用が試みられている。この新しい探査法を十分に活用するには、鉱石の界面分極現象や分布状態あるいは鉱体の規模や深度などが地表で観測される見掛複素比抵抗に及ぼす影響を検討し、探査結果を正しく解析することが重要である。

本論文は、鉱体の複素比抵抗と鉱体を構成する鉱物の粒度及び含有率などとの関係、あるいは地表で観測される見掛複素比抵抗と鉱体の位置や深さとの関係を検討したものであり、全7章からなる。

第1章は緒論であり、本研究の概要を述べる。

第2章では、岩石・鉱石の複素比抵抗の測定法について検討する。初めに、岩石・鉱石の複素比抵抗を多重周波数にわたり簡単に測定する方法について議論した結果、(1)単一矩形パルスを入力信号とし、時間領域での分極応答を周波数解析することにより周波数領域へ変換し複素比抵抗を求める方法、(2)ランダム信号を入力信号とし、入力信号のパワースペクトルと、入出力信号のクロススペクトルとから複素比抵抗を求める方法が有効であった。

次に、これら2つの方法によって黒鉱・黄鉱・珪鉱の複素比抵抗を測定し、両方法を比較・検討する。低周波数域の測定においては鉱石の電極電位のドリフトに起因する雑音のため測定精度が悪

くなるが、この点を除くと両方法とも測定結果はほぼ一致し、各鉱石試料の特徴的な複素比抵抗軌跡を得ることができた。この結果から、両方法は鉱石の複素比抵抗測定法として有効な手法であることが確認できた。

さらに、低周波雑音に対する対策として、信号の加算平均化処理についても検討する。その結果、過渡応答信号を加算平均化することにより、商用周波数である 50 Hz のノイズのみならず低周波雑音をも除去することができ、信号の S/N 比の改善ならびに複素比抵抗測定の高精度化が可能となることがわかった。

第 3 章では、鉱物・鉱石試料の界面インピーダンスの測定を行い、分極現象について議論した。複素比抵抗法の基礎である鉱石界面の分極現象は、鉱石界面で起こる電気化学的反応により引き起こされる。したがって、複素比抵抗法の観測結果を解釈する上で、分極現象の起因あるいは反応機構を知っておくことは重要である。以下、第 3 章で得られた結果の概要を示す。

金属硫化鉱石は、方鉛鉱・黄鉄鉱を代表とする単一組成鉱物と黒鉱・黄鉄鉱に代表される混成鉱石とに大別でき、これらの鉱石の間では界面分極現象に大きな差があることが明らかであった。すなわち、混成鉱石は、その界面インピーダンスの絶対値が周波数の平方根に反比例すること及びインピーダンス軌跡が複素平面上で傾き 1 の直線となることなど、ワールブルグインピーダンス特有の性質を示すことから、従来言われていたとおり、混成鉱石の界面インピーダンスはワールブルグインピーダンスが支配的であると考えられ、一方、単一組成鉱物は、そのインピーダンス軌跡が複素平面上で半円の一部となることから、単一組成鉱物の界面インピーダンスは電気二重層容量が支配的であると考えられた。この原因として、単一組成鉱物は電荷移動抵抗が非常に大きくワールブルグインピーダンスが無視できるためと考えた。

次に、これら試料の電極電位を自然電極電位から強制的にずらし界面インピーダンスを測定した。その結果、電極電位が自然電極電位からずれる程、電荷移動抵抗は小さくなった。このことは、自然電極電位下にある単一組成鉱物の界面インピーダンス軌跡が、複素平面上で非常に大きな半円となることを暗示している。また、混成鉱石の測定結果からは、ワールブルグインピーダンスも電極電位に影響され、電極電位が自然電極電位からずれる程ワールブルグインピーダンスが小さくなると推測された。

第 4 章では、溶液飽和した石英砂中に黄鉄鉱粒子が分散している人工混合試料を用い、黄鉄鉱粒子の体積含有率、粒径、孔隙中の溶液比抵抗及び孔隙率が複素比抵抗へ及ぼす影響について調べた。また、複素比抵抗測定結果を Cole-Cole モデル式で表わし各パラメータの特徴を検討した。得られた結果の概要は次の通りである。

まず、位相角に注目するなら、黄鉄鉱粒子の粒径が一定の場合、黄鉄鉱の体積含有率が大きい試料ほど位相角は大きくなる。しかし、このとき IP 効果が極大となる周波数（臨界周波数）はほぼ一定である。この臨界周波数は、黄鉄鉱粒子の粒径及び孔隙水の比抵抗に影響され、粒径が小さい程、孔隙水の比抵抗が低い程、臨界周波数は高くなる。

一方、比抵抗（複素比抵抗の絶対値）に注目するなら、黄鉄鉱粒子粒径がマトリクスである石英粒子粒径より大きい場合、低周波側での試料の比抵抗は黄鉄鉱を含まない試料の比抵抗より高くな

る。このことは、低周波では黄鉄鉱の界面インピーダンスが非常に高く電氣的に絶縁球のように作用することを示している。

以上の結果は、定性的に Wong の理論モデル（電気化学モデル）と良く一致する。この電気化学モデルを用い、本実験結果の定量的な説明を試みた。その結果、位相角の周波数変化について、実験的に求めた曲線の周波数に対する鋭さは、拡散に基礎を置く電気化学モデルと電気二重層容量に基礎を置く Debye モデルとの中間となった。この結果は、鉱染状態にある黄鉄鉱鉱石の IP 応答は単純な拡散支配、あるいは電気二重層支配により定まるものではなく、両者が同時に関与する現象であることを示している。

第 5 章では、隣接する鉱物粒子同士が互いに接触する可能性のある高品位鉱石（鉱物体積含有率 20% 以上）について、その含有量と複素比抵抗との関係を明らかにするため、黄鉄鉱からなる高品位模擬鉱石試料の複素比抵抗を測定する。硫化鉱物を多く含む鉱石は、比抵抗が低いため、直接的な方法では位相角がうまく求まらない。そこで第 5 章では、2 次元水槽モデルに有限要素法及び最小 2 乗法を適用し、水槽水面の電位から水槽中に埋没した鉱石試料の複素比抵抗を推定した。

まず初めに、予備実験として、水槽中に鉱石試料を埋没した系に対し Poisson の方程式に基づく有限要素法が適用できるかどうかを検討した。具体的には、複素比抵抗が既知である鉱石試料を用い、水槽水面で観測された電位に対し有限要素法・最小 2 乗法を適応して試料の複素比抵抗を逆算し、この値と試料の複素比抵抗値とを比較した。その結果、両者は良く一致した。しかし、水面の電位から鉱石試料の複素比抵抗を推定する場合、水槽中の水道水の比抵抗が大きく影響し、この値を的確に与える必要があった。

次に、黄鉄鉱の含有量が異なる数種の高品位模擬鉱石試料の複素比抵抗を求めた。その結果、黄鉄鉱体積含有率 40% の試料が最も大きな IP 異常を示した。黄鉄鉱の含有率がこれ以下の試料については、黄鉄鉱の含有量が多くなるに従い、位相角は大きくなるが、位相角が最大となる周波数は、ほぼ一定であった。この傾向は、鉱染状鉱石試料（低品位鉱石試料）の傾向と一致する。しかし、黄鉄鉱体積含有率 50%（品位としては 100%）の試料は、40% の試料に比べ、位相角の大きさは小さくなり、位相角が最大となる周波数は高周波側に移る。

一方、比抵抗値（複素比抵抗の絶対値）に注目するなら、黄鉄鉱を多く含む試料程、比抵抗値は小さくなる。孔隙率が黄鉄鉱の含有率に依存しない鉱染状鉱石（低品位鉱石）の場合には、低周波側での比抵抗値はほぼ一定であったことを考えると、このことは高品位鉱石の特徴的な点と考えられた。さらに、Cole-Cole モデルを用いて高品位鉱石と低品位鉱石とを比較すると、高品位鉱石の方が、周波数依存定数  $c$  は小さい値を示した。

第 6 章では、水槽実験を通し、鉱体と電極との位置関係が見掛複素比抵抗に及ぼす影響を理論的あるいは実験的に調べた。また、水槽実験の延長として、実際の鉱床坑内において複素比抵抗法試験を実施した結果をも示した。

まず、第 5 章で検討した有限要素法を用い、水槽水面で観測される見掛複素比抵抗を計算した。その結果、見掛複素比抵抗の位相角が最大となる周波数は、鉱体と電極との位置関係に依存せず一定となった。さらに、鉱石試料自体の複素比抵抗と、水槽水面で観測される見掛複素比抵抗を Cole

-Coleモデルで表示したとき、同モデル中に含まれるパラメータのうち周波数依存定数  $c$  は両者間で一致することがわかった。このことは、鉱床探査において周波数依存定数  $c$  が重要なパラメータであることを示している。以上の結果は、2次元水槽モデルを通し、実験的にも確認した。

次に、3次元水槽モデルを使い、水平探査模型実験および垂直探査模型実験を行った。その結果、水平探査模型実験においては電極の中心が、また垂直探査模型実験においては探査深度が、鉱体を模擬した鉱石試料中心に近い程、見掛複素比抵抗の軌跡が描く円弧は大きくなった。しかし、複素比抵抗の位相角が最大となる周波数は、鉱石試料と電極配置との位置関係には依存しなかった。

最後に、小坂鉱山坑内において複素比抵抗法試験を実施した結果について言及した。そのとき得られた見掛複素比抵抗軌跡は、複素平面上で直線となった。これは、Cole-Coleモデル中に含まれるパラメータ  $c$  (周波数依存定数) が小さいことを示唆している。その原因としては、試験を行った黒鉱鉱床が非常に大きな塊状鉱床であること、実際の鉱床は大小さまざまな鉱物粒子の集合体であり粒度分布が非常に広いことなどが原因として考えられた。

第7章は結論である。

以上、本論文は主に金属鉱床探査を目的とする複素比抵抗法に関して、一連の基礎的研究をまとめたものである。本研究の特徴は、界面分極性鉱物の分極現象、粒径、分布状態あるいは鉱床の規模や深度などが、地上で観測される見掛複素比抵抗に及ぼす影響をCole-Coleモデルなどのモデル式を用いて具体的に示したところにある。

## 審査結果の要旨

電気探査比抵抗法において、導電性鉱物界面に生ずる分極の影響を加味して鉱床探査を行う複素比抵抗法は近年急速に発展し、各国でその応用が試みられている。この新しい探査法を十分に活用するためには、地下の鉱石の分布状態や分極現象、鉱体と測定位置の関係などが地表測定で得られる見掛複素比抵抗に及ぼす影響を検討し、探査結果を正しく解析することが重要である。

本論文は、鉱体の複素比抵抗と鉱体を構成する鉱物の粒度及び含有率などとの関係を実験的に把握し、更に地表での測定値と鉱体の位置や広がりとの関係を検討したもので、全編7章よりなる。

第1章は緒論である。

第2章では、岩石・鉱石の複素比抵抗の測定法を検討し、単一矩形波入力電流に対する出力電圧の過渡応答を加算平均し周波数解析する方法が効果的であることを示している。

第3章は、鉱石・水界面の分極現象について検討したものである。自然電極電位の下での交流界面インピーダンス測定の結果、黄鉄鉱や方鉛鉱の単一鉱物の界面インピーダンス軌跡は円弧の一部と見なせることから電気二重層が、また黒鉄鉱などの異種鉱物の混合鉱石のそれは傾きが1の直線に近いことからして反応成分の拡散が分極の主な原因と推定している。

第4章では鉱染型の模擬鉱体として黄鉄鉱と石英の混合物を用い複素比抵抗の周波数特性を検討し、最大位相角を与える周波数は黄鉄鉱の粒子径と間隙水の比抵抗に、位相角は黄鉄鉱含有率に依存することを見出し、複素比抵抗はCole-Coleモデルのパラメータでその特徴を表せる事を示した。これは有用な成果である。

第5章では、黄鉄鉱の含有率の高い鉱石の模擬鉱体について検討している。この種の鉱体は直接測定が困難なため水槽内に二次元鉱体模型を設けて見掛け比抵抗を測定し、これをもとに有限要素法により鉱体の複素比抵抗を推定している。その結果、黄鉄鉱の体積含有率40%までは鉱染型鉱体の特性を示すが、これ以上では別の特性を示すことを見出している。これは重要な知見である。

第6章では、模擬鉱体を用いて水平及び垂直探査の水槽実験を行い、電極と鉱体との位置に関係なく見掛複素比抵抗のCole-Coleモデルにおける周波数依存定数は鉱体の複素比抵抗のそれに一致し、探査上重要な定数であることを明らかにしている。

第7章は結論である。

以上要するに本論文は、複素比抵抗法による鉱床探査に関する基本的諸問題について研究し、見掛複素比抵抗と鉱体の性状との関係について有益な知見を得たもので、資源工学ならびに探査工学に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。