

学位論文要旨

所属専攻 複合新領域科学 専攻

氏名 山下 智彦

論文題名

高繰り返しパルス放電を用いた金属被覆プラスチックからの金属剥離技術の開発

要 旨

携帯電話やデジタルカメラ等の小型家電には、鉄、アルミ、貴金属、レアメタル等の有用金属が多く含まれているため、使用済み廃棄物の山は都市鉱山とも呼ばれている。わが国ではこれらの有用金属等の資源が乏しいことから、小型家電のリサイクルが社会的に重要視されており、家電リサイクル法や小型家電リサイクル法等の制定によって小型家電等のリサイクルが推進されている。しかしながら、未だに十分な有用資源の回収がなされていない状況にある。その原因は金属含有量が少ないプリント基板等の複合材料のリサイクルが進んでいないことにある。小型家電には回路を構成するための電子素子が実装されている。これらの電子素子は比較的多くの量の有用金属を含んでいるためリサイクルが進んでおり、様々なリサイクル技術も開発されている。一方、電子素子を実装するためのプリント基板は金属含有量が少ないために従来技術では採算が合わず、リサイクルは進んでいない。また、プリント基板はプラスチックなどの基板に金属めっきを施した金属被覆プラスチックであり、広い面を処理しなければならないので従来技術を超える新たな技術を導入しなければリサイクルは困難とされている。今後、資源の少ないわが国では有用資源の回収率を高めることは重要であり、金属含有量が少ない複合材料でも採算の合うリサイクル技術の開発が求められている。従来、製錬前処理として機械による粉碎や剥離液・溶解液による処理等の大掛かりな設備が用いられている。プリント基板等のリサイクルの場合も前処理が必要であるが、前処理は少エネルギー・低コストでなければならない。

本研究では、金属被覆プラスチックをリサイクルするための新たな技術として、パルス放電を用いた金属剥離技術を導入する。金属被覆プラスチックの例として、極めて薄い金属がプラスチックによって挟まれた構造を持つ金属含有量の少ない光ディスク (CD-R, CD-ROM, DVD-R) を用いた。CD-R は透明なプラスチック基板、記録層、金属層、保護層、CD-ROM は CD-R の構成から記録層を除いた構成となっている。一方、DVD-R は金属層や記録層が 2 枚の同じ厚みのプラスチック基板によって挟まれた構造となっている。本実

験では、対象上に設置された円環状電極に高電圧パルスを印加することでプラスチック基板と金属（Ag, Al）に分離する。各ディスクにおける分離特性は次の通りである。

#### （１）CD-R/ROM の分離特性

高電圧パルスのショット数増加に伴い、プラスチック基板から徐々に金属層と保護層が剥離される。剥離のプロセスは次のようになることを明らかにした。1ショット目では、両電極と金属層の間で保護層を貫通する絶縁破壊が発生する。貫通破壊後、金属層に電流が流れ込み加熱されて液化・気化・プラズマ化し、またそれに伴う衝撃波によって金属層及び保護層が剥離される。それ以降のショットでは、電極と孤立した金属層の間で放電が発生し、同様に金属層の液化・気化・プラズマ化及びそれに伴う衝撃波によって剥離処理が進行する。1ショット目の放電の発光スペクトルを取得した結果、金属層のスペクトルが観測されたため、電極と金属層の間に位置する保護層の貫通破壊が発生していることが明らかとなった。したがって、1ショット目の10 kV程度の放電開始電圧は表面の保護層の絶縁破壊電圧に対応する。また、ショット数増加に伴う処理の進行によって放電長が長くなり、それに応じて放電開始電圧も増加することをモデル電極によって正確に評価した。最終的に対象上の反射層はほとんど剥離されるため、円環状電極間で沿面フラッシュオーバーが発生する。ショット数に対する放電開始電圧依存性の結果から、円環状電極を用いて剥離処理するためには80 kV以上の最大出力電圧を有するパルスパワー発生器が必要となることを明らかにした。また、1枚のCD-Rの剥離処理を終えるまでの総ショット数と処理に必要な総エネルギーの充電エネルギー依存性を明らかにした。この結果から、充電エネルギーが大きいほど処理にかかる回数は少なくて良いが、必要な総エネルギーは大きくなることが明らかとなった。CD-RとCD-ROMでは処理に必要なショット数に違いはない。

#### （２）DVD-R の分離特性

DVD-Rは剥離処理を行う前に手作業によって2枚のプラスチックに分離する前処理を行い、金属層が露出した状態であるプラスチックに剥離処理を施した。高電圧パルスのショット数増加に伴い、プラスチック基板から徐々に金属層が剥離される。DVD-Rの発光箇所はCD-R/ROMの発光に比べて多く確認されたが発光領域は狭い。露出した金属上に電極を設置することによって電流が分散するためであると考えられる。電流密度が低いため金属層が液化・気化・プラズマ化されにくく、剥離の進行度も遅いことが明らかとなった。1ショット目における放電開始電圧もCD-R/ROMの場合よりも低い値となる。

このように金属層の分離には金属層加熱による液化・気化・プラズマ化とそれに伴い発生した衝撃波が関与していることが明らかとなった。したがって、高速度フレーミングカメラによる放電の時間分解観測及びシュリーレン法とシャドウグラフ法による衝撃波の時間分解観測を実施した。得られた結果は次の通りである。

### (3) 放電の時間分解観測

第1段階(1ショット目)では、両電極と金属層の間で保護層の貫通破壊が発生した後、その箇所を中心に徐々に扇状に広がる放電が確認された。扇状の発光は電流がピークに達するまで進展を続け、その後は徐々に弱まり最終的には消滅する。扇状放電が発生した部分の周囲の金属層及び保護層はプラスチック基板から剥離される。第2段階(2ショット目以降)では、未剥離領域内で扇状に広がる発光と未剥離領域の界面に沿って広がる発光が確認された。第3段階(高電圧電極周辺剥離後)では、電極と未剥離領域との間で沿面フラッシュオーバーが発生し、放電の先端から未剥離領域に広がっていくことが明らかとなった。

### (4) 衝撃波の時間分解観測

得られたシュリーレン画像から、電極と金属層の間に生じる放電と稀に保護層上で電極間に生じる放電を波源として衝撃波が発生していることが明らかとなった。剥離後の表面の状態から沿面放電を波源とする衝撃波は剥離には寄与していないことが明らかとなった。電極と金属層間の放電から発生した衝撃波は対象近傍でマッハ5を示し、シャドウグラフ法によって得られた画像から金属層と絶縁層の破片が衝撃波に追従するようにして飛散する様子が確認された。したがって、電極と金属層の間に生じる放電によって発生した衝撃波が金属剥離に寄与していることが明らかとなった。

最後に、パルスパワーを用いた分離処理技術を導入するために最適な電極構造や小型で高繰り返し性を有するパルスパワー電源の設計、処理面積の評価法などを検討した。得られた結果は次の通りである。光ディスクと電極の間にギャップを設けることで、全光ディスクにおいて15ショットで約90%、25ショットで約99%の処理率を達成できることが明らかとなった。しかしながら、電極間距離が長いこと最終的には約90kVの電圧が必要となる。本研究ではこれらの結果を踏まえ、最大蓄積エネルギー5J/pulse、最大電圧90kV以上、高繰り返し性(150pps)を有する小型パルスパワー発生装置を作製した。金属剥離処理への適用試験を実施した結果、約130ショットの印加によって剥離処理が完了することが明らかとなり、1枚の光ディスクを処理するためにかかる時間は1秒以下である。さらに、画像処理ソフトウェアImage Jを用いて得られた剥離面積値と電子天秤によって測定した剥離量の相関を調査した。2つの方法の間に大きな違いはなく、特に20ショットまでは剥離面積値と剥離量は重なるように推移する。2つの方法で定量測定することで得られた除去面積と除去質量の関係から、除去の90%までの範囲で強い相関が得られたため、画像処理ソフトウェアImage Jを用いることで除去の進行を即座に推定でき、産業における除去評価用途に実用的であることが明らかとなった。

以上より、光ディスクを対象に実験を行った結果、剥離処理を適用可能であることや金属剥離機構等について明らかにした。本研究を通じて得られたこれらの詳細な機構は、今後の金属被覆プラスチックからの金属剥離技術の開発に役立つことが期待できる。