

論文 / 著書情報  
Article / Book Information

|                   |                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 題目(和文)            | 大気圧プラズマ生成ガスの気流および温度の活用に関する研究                                                                                                                                                                     |
| Title(English)    |                                                                                                                                                                                                  |
| 著者(和文)            | 太田高志                                                                                                                                                                                             |
| Author(English)   | Takashi Ohta                                                                                                                                                                                     |
| 出典(和文)            | 学位:博士(工学),<br>学位授与機関:東京工業大学,<br>報告番号:甲第12497号,<br>授与年月日:2023年6月30日,<br>学位の種別:課程博士,<br>審査員:沖野 晃俊,中村 健太郎,徳田 崇,佐藤 千明,田原 麻梨江,近藤 科江,<br>千葉 光一                                                         |
| Citation(English) | Degree:Doctor (Engineering),<br>Conferring organization: Tokyo Institute of Technology,<br>Report number:甲第12497号,<br>Conferred date:2023/6/30,<br>Degree Type:Course doctor,<br>Examiner:,,,,,, |
| 学位種別(和文)          | 博士論文                                                                                                                                                                                             |
| Category(English) | Doctoral Thesis                                                                                                                                                                                  |
| 種別(和文)            | 審査の要旨                                                                                                                                                                                            |
| Type(English)     | Exam Summary                                                                                                                                                                                     |

(博士課程)

# 論文審査の要旨及び審査員

| 報告番号            | 甲第  | 号     | 学位申請者氏名 | 太田高志 |       |                  |
|-----------------|-----|-------|---------|------|-------|------------------|
| 論文審査<br><br>審査員 |     | 氏 名   | 職 名     |      | 氏 名   | 職 名              |
|                 | 主査  | 沖野晃俊  | 准教授     |      | 田原麻梨江 | 准教授              |
|                 | 審査員 | 中村健太郎 | 教授      | 審査員  | 近藤科江  | 奈良工業高等専門学校<br>校長 |
|                 |     | 徳田崇   | 教授      |      | 千葉光一  | 関西学院大学 教授        |
|                 |     | 佐藤千明  | 教授      |      |       |                  |

## 論文審査の要旨（2000 字程度）

本論文は「大気圧プラズマ生成ガスの気流および温度の活用に関する研究」と題し、プラズマを生成するガス気流およびガス温度の重要性を考慮した大気圧プラズマ応用装置を開発し、単一細胞分析と物質の表面処理に応用した結果をまとめたもので、6 章構成で日本語で記述されている。

第 1 章「緒言」では、医療や産業分野で広く利用されている高温および低温の大気圧プラズマの応用例およびその問題点について記述している。単一細胞分析への応用では、分析感度向上のために細胞を含んだ液滴を加熱してからプラズマに導入するが、細胞が破裂して信号が分裂する問題がある事、物質の表面処理への応用では、プラズマ中の活性種が時間的に急激に減少するため、遠距離表面の処理が困難である問題がある事などを述べている。そして、これらの克服のためには、プラズマの生成ガスの気流とガス温度を考慮した装置設計が必要である事を指摘している。

第 2 章「単一細胞分析用ドロプレット試料導入装置の評価」では、一つの細胞中の微量元素分析するためのプラズマ装置の分析精度の評価を行っている。現在のところ、元素の濃度や絶対量が保証された細胞の標準物質が存在しないため、人工のマイクロ粒子を擬似的な細胞標準物質として用いる事を提案し、粒子の選定と分析実験を行っている。使用するマイクロ粒子は直径がヒト細胞に近い直径 2～5  $\mu\text{m}$  程度であり、体積の偏差が少ないこと、含有元素や熱分解特性がヒト細胞に近いことを条件として探索を行い、市販の磁性ラテックス粒子を選定している。この粒子は酸化鉄の含有量(質量分率)が 4.8%と保証されているため、一粒子中の鉄の質量信号強度を測定し、装置由来のばらつきの評価を行った結果、開発したドロプレット ICP 質量分析装置由来の相対標準偏差は 39%であると評価している。

第 3 章「ドロプレット試料用脱溶媒装置の開発」では、単一細胞中の微量元素を高感度に分析する事を目的として、プラズマへの導入前に細胞を内包するドロプレットの溶媒を除去する脱溶媒装置の開発について記述している。従来の脱溶媒装置はヒーターによる高温加熱を用いていたため細胞が破裂して質量信号が分裂し、細胞由来の信号の SN 比が低下するという問題があった。そこで、細胞を低温で長時間加熱するため脱溶媒装置加熱部の経路長を従来の 200 mm から 300 mm に延長させ、細胞が破裂せず、高い質量信号強度が得られるガス温度とガス流速を詳細に調べている。また、細胞をプラズマに導入するための T 字管の製作にあたっては、ガス流の流体解析を用いた粒子追跡を行っている。その結果、キャリアガス流量を 0.10 L/min、アディショナルガス流量を 1.9 L/min に設定することで、最も効率よく細胞をプラズマ中に導入できる事を明らかにしている。この装置を用いて単細胞藻類の単一細胞質量分析を行った結果、細胞を破裂させることなくプラズマに導入することに成功し、単細胞藻類 1 個中に平均約 57 fg 含まれるマグネシウムなどの質量信号を検出している。さらに、単一の HeLa および U2OS 細胞の分析を行った結果、加熱温度 90℃、キャリアガス流量 0.10 mL/min の条件で細胞の破裂が生じないことを確認し、単一細胞中のナトリウム、カルシウム、カリウムなどの発光分光分析および質量分析に成功している。

第 4 章「赤外線を用いたドロプレット試料用脱溶媒装置の開発」では、ドロプレット試料中の細胞破裂を防ぎつつ高速に脱溶媒するため、ドロプレットが飛行する石英ガラス管の外部から赤外線を照射する、高速かつガスを加熱しない脱溶媒装置の開発について記述している。発光長 140 mm の赤外線ランプからの赤外線を反射集光光学系を用いてドロプレットの飛行経路上に集光した結果、550 W のランプ電気出力では、150 Hz で射出されたドロプレットの脱溶媒を完了できることを蛍光顕微鏡で確認している。このとき、石英ガラス管内のキャリアガス温度は 70℃程度であり、ガスを 100℃以上に加熱することなくドロプレットの溶媒を気化除去できること示している。さらに、1,000 W のランプ電気出力では、540 Hz で射出されたドロプレットの脱溶媒が可能であるとしている。

第 5 章「遠隔表面処理のための超音速パルスプラズマジェットの開発」では、プラズマ装置から遠距離の表面処理や高速の表面処理を実現するため、超音速のパルスプラズマジェット装置を製作して基礎特性の測定と表面処理の実験を行っている。開発した装置では、低速のプラズマ生成用ガスを放電部に供給することで高密度プラズマを生成する事を確認している。次に、高圧のガスを電磁バルブで開閉することで、高密度プラズマ外部に高速のガス流としてパルスのように噴出させる。このため、高密度のプラズマ中で生成される短寿命の活性種を遠方の処理対象に到達させる事ができるとしている。プラズマの噴出速度を調べるため、シュリーレン法を用いていくつかのガス種のパルスプラズマジェットの流速を測定した結果、全てのガス種でマッハ数 1.6～1.7 の超音速流を確認している。この装置を用いて銅板の親水化処理を行った結果、20 mm 以上離れた表面の処理にはヘリウムプラズマが、数 mm の位置での処理には窒素プラズマが有効である事などを示している。

第 6 章「結論」では、本論文で得られた成果を総括するとともに、大気圧プラズマの各種応用の展望を記述している。以上を要するに、本論文は、大気圧プラズマ装置におけるプラズマ生成ガスの気流および温度の重要性についてまとめたもので、工学上ならびに工業上貢献するところが大きい。よって本論文は博士(工学)の学位論文として十分な価値があるものと認められる。

