

研究代表者	東北大学・工学研究科・教授
	金子 俊郎 (かねこ としろう) 研究者番号:30312599
研究課題 情報	課題番号: 22H04947 研究期間: 2022年度~2026年度 キーワード: 気液界面プラズマ、低次元界面液体、時空間ダイナミクス、活性種制御合成

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

低温大気圧放電プラズマの発明以来、非熱的に生成される化学反応性が高く、寿命が短いラジカルの利用が低温大気圧下で実現可能となり、これまで20年以上に亘り、大気圧放電プラズマによる医療科学、植物科学、環境科学との融合分野が急速に発展している。細胞やタンパク質等の生体分子を扱う場合には、細胞等を含んだ液体にプラズマを照射することで生成される活性種を用いており、特に寿命が1秒以下の短寿命活性種が重要であることが世界中で報告されている。しかしながら、多種多様な活性種が混在するプラズマが照射された液体は、プラズマ生成条件・外部環境等の作用因子の変動や未知の反応過程等の未知因子の影響が計り知れず、必要な活性種を完全には生成・制御できていないのが現状である。

プラズマと液相の界面（プラズマ気液界面）は、従来の固相、液相、気相に次ぐ第4状態のプラズマが関与する新しい界面である（図1）。液相バルク域での反応生成物の完全制御のためには、図2に示すように、気相・液相バルク域間に存在するμmスケールの界面層が未知因子であり、この界面層の理解が極めて重要である。しかしながら、この界面層は、実験的にも理論的にも研究されていない「ミッシングリンク」となっている。

本研究では、このミッシングリンクを埋めるべく、プラズマ気液界面層で相互作用する活性種、電荷、電界、気流、液体形状のダイナミクスを時空間分解計測し、界面層での特異な化学反応過程を明らかにし、液相バルク域での反応生成物としての活性種の完全制御合成を実現する。

●低次元界面液体を用いたプラズマ気液界面研究

これまでのプラズマ気液界面研究は、プラズマとバルク液体の2次元界面を対象としており、極めて大きなマルチスケール時空間分解計測およびモデル化が困難であった。従って本研究では、図3に示すように、プラズマと接触する界面の分布が軸対称で1次元となる液柱、球対称で0次元となる液滴に着目し、これらの液体を「低次元界面液体」と定義した。この低次元界面液体を用いることで不安定性や蒸発による形状変化が単純化されモデル化が可能となり、比表面積が増大することで界面層での現象が顕著になる。さらに液柱・液滴に供給する活性種、電荷、気流を特色ある独立制御を実現することで、初めて電荷・気流、液体形状変化、界面反応の三要素の相互作用を検証でき、プラズマ気液界面層の時空間ダイナミクスを明らかにできる。

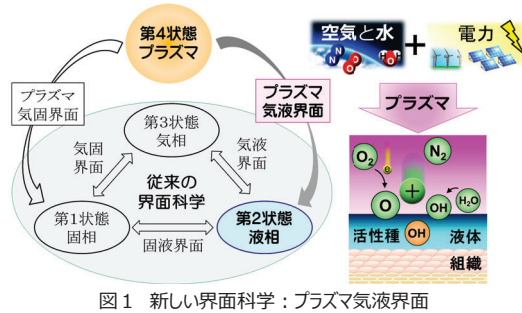


図1 新しい界面科学：プラズマ気液界面

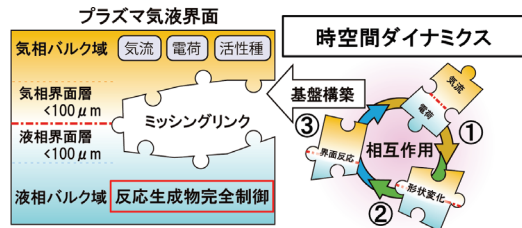


図2 プラズマ気液界面層の重要性

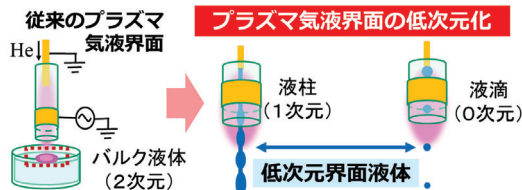


図3 低次元界面液体を用いたプラズマ気液界面研究

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●実施する技術的・学術的課題

本研究では、プラズマと低次元界面液体との界面層における、電荷・気流、液体形状変化が相互作用する特異的な界面反応を解明し、プラズマ照射液体内の反応生成物の完全制御の学術基盤を構築することを目的とする。

- ①低次元界面液体へのプラズマ生成活性種・電荷独立制御供給(図4)
液柱流導入装置と単一微量液滴導入装置を製作する。これらの液体に『電荷制御プラズマ』と『活性種制御プラズマ』を接触させた、新たな電荷と活性種の独立制御法を確立する。
- ②プラズマ気液界面における各種計測(図4)
【気相：流速計測】蛍光ポリマー粒子を用いたマイクロPIVシステムにより流速計測を行う。
【気相：電界計測】電界誘導二次高調波生成法(EFISH法)による電界の時空間分布計測と、パルスマイクロプラズマアレイ(μPA)でのプラズマ中の電界変化を観測する。
【液相：形状計測】シャドー法によるハイスピードカメラを用いた液柱・液滴計測を行い、液面不安定性の発達や液滴変形のリアルタイム計測を行う。
【液相：電荷・電位計測】直流電場による液滴分離、導電性容器に流れる電流計測等によって液滴の帯電量分布を明らかにする。また、静電プローブにより液面電位ならびに帯電量を計測する。
【液相：活性種計測】液滴では、化学プローブにて長寿命活性種を定量し、選択的化学プローブと反応させることで短寿命活性種を計測する。液柱流では、高速液流導入プラズマ+化学プローブ衝突混合システムにおいて、液流断面濃度の時間推移を計測する。
- ③プラズマ気液界面における統合シミュレーション
界面反応・帯電モデルを実験結果を基に構築し、プラズマにより帯電し界面反応により液柱・液滴表面に生成・局在した短寿命活性種を輸送する液柱流・液滴挙動のシミュレーションを行う(図5)。
- ④時空間ダイナミクスの解明と活性種完全制御合成
プラズマ気液界面層での電荷・気流、液体形状変化との相互作用を介した界面反応ダイナミクスを解明し、その成果をもとに、界面層での革新的な化学反応プロセスを確立し、液相バルク域での活性種完全制御合成技術を実現する。

その結果、必要とする活性種のみを選択的に使えることで、医療、農業、環境、材料等の多くの分野での応用展開が可能となり、その波及効果は極めて大きい。

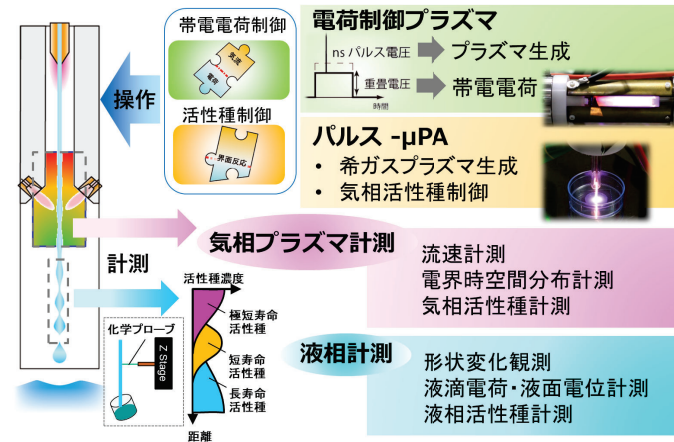


図4 低次元界面液体への電荷・活性種制御供給とプラズマ気液界面計測



図5 液柱流・液滴挙動のシミュレーション