

## 多元的特性計測による血液凝固を促進する低エネルギー大気圧プラズマに関する研究

著者	山田 大将
内容記述	この博士論文は内容の要約のみの公開（または一部非公開）になっています
発行年	2018
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2017
報告番号	12102甲第8539号
URL	<a href="http://hdl.handle.net/2241/00152411">http://hdl.handle.net/2241/00152411</a>

多元的特性計測による血液凝固を促進する  
低エネルギー大気圧プラズマに関する研究

2018年 3月

山田 大将

多元的特性計測による血液凝固を促進する  
低エネルギー大気圧プラズマに関する研究

山田 大将

システム情報工学研究科

筑波大学

2018年 3月

## 概要

低温の大気圧プラズマジェット (Atmospheric-Pressure Plasma Jet “APPJ”) は、対象物への熱ダメージが少なく、作動ガスの流れに沿ってプラズマが生成されるため操作性が良いという特徴から、様々な分野で応用研究が進められている。近年注目されている低温プラズマの医療応用の一つである止血処置では、プラズマ照射により血液の凝固を促進し、形成した凝固物で出血部を塞ぎ止血を行う。既に実用化されているプラズマ止血法では、流れる高周波電流によるジュール熱を用いて血管を焼灼控減することにより止血を行うために、生体組織の熱損傷を伴うことが課題とされている。従来のプラズマ止血法と比べて、低パワー、低イオン温度、低ガス温度、低エネルギー密度であり、特に生体への熱損傷を抑制したプラズマを本研究では低エネルギー大気圧プラズマ (Low-Energy Atmospheric-Pressure Plasma “LEAPP”) と呼ぶ。LEAPP は、国内外のいくつかの研究グループにおいて研究が進められており、用いるプラズマ装置によって血液成分への作用が異なることが報告されている。その中でも、産業技術総合研究所 (産総研) が開発した APPJ タイプの LEAPP は、他と比べて多くの血液成分に対して作用し血液凝固を促進する。この相違は、各プラズマの特性が異なっていることが要因として考えられるが、血液凝固を促進する LEAPP の作用因子や作用メカニズムは明らかにされていない。そこで、プラズマによる血液凝固促進現象のメカニズム解明による、効果的なプラズマ止血機器開発、及び APPJ の応用研究の更なる推進を目指し、産総研が開発した LEAPP が有するプラズマ特性を明らかにすることを本研究の目的とした。プラズマ特性として、APPJ の大きな特徴の一つである「ガス流」とプラズマの相互作用、プラズマ生成現象に関与する「発光伝播」、多くのプラズマ応用において重要となる「活性種」、そして血液凝固促進現象に関与する「血清アルブミン溶液の凝集」について注目した。これらの特性について各種計測器を駆使した多元的特性計測により明らかにし、これまでの報告と比較するとともに、各特性の詳しい解析を行った。

シュリーレン法により、作動ガスとしてヘリウム (He) を用いた LEAPP (He\_LEAPP) のガス流の可視化計測を行った。その結果、既知の現象であるプラズマ生成に伴うガスの乱流化促進を観察した。さらに、外部静電場印加による APPJ のプラズマフレア (生成されたプラズマの発光部) の制御に着目し、既知の現象である電場方向へのフレアの屈曲を観察した。また、この時ガス流が電場方向に曲がり、乱流化も促進されることを見出した。この現象は、外部電場印加により形成されたイオンリッチ領域において、イオンから中性粒子へのマクロな運動量移行が生じたことが要因であると推測し、簡易数値モデル解析を行い、実験と同様の傾向を示す結果を得た。

ICCD カメラにより、He\_LEAPP に対して高時間分解の発光伝播を計測した。その結果、ストリーマの伝播や空間的に連続な発光等の既知の現象を観察した。さらに、プラズマ源-対象物間距離が短い場合は、伝播方向の異なるストリーマが 1 周期ごとに交互に現れる倍周期現象を見出し、この発生要因がストリーマ伝播開始時の残留電荷密度の相違であると考察した。また、ストリーマ後方における縞状の発光 (ストリエーション) を初めて見出した。

発光分光法を用いて気相中活性種の空間分布計測を行い、He\_LEAPP 及び作動ガスとしてアルゴン (Ar) を用いた LEAPP (Ar\_LEAPP) において大気成分由来の活性種及び作動ガス由来の発光を観察した。既存研究と同様に、両プラズマの作動ガス由来の発光以外の相違点は窒素分子イオン ( $N_2^+$ ) の発光の有無であり、Ar\_LEAPP では、全発光領域において観察できないことを確認した。特に、接地銅板を対象物として用いた場合、銅板表面近傍において各活性種の発光強度の急峻な増加が観測されたが、この領域においても  $N_2^+$  の発光は Ar\_LEAPP では確認されないことを見出した。高速電子の存在が想定されるこの強発光領域においても  $N_2^+$  の発光が認められない原因は、空気を巻き込んだ領域における電子温度の低下であり、準安定 He ( $He^m$ ) 粒子によるペニング電離反応が  $N_2^+$  発光の主要過程であると考察した。

プラズマによる血液凝固促進現象における血清タンパク質凝集効果に着目し、作動ガスとして He、He-Ar 混合ガス、Ar を用いた LEAPP による血清アルブミン溶液への照射実験を行った。その結果、He\_LEAPP が最も血清アルブミン溶液の凝集効果が高く、Ar 混合比の高い He-Ar 混合ガスを作動ガスとした場合の LEAPP や Ar\_LEAPP は凝集効果が低いことを明らかにした。このことは、He\_LEAPP の方が Ar\_LEAPP よりも血液凝固促進効果が高い理由として、血清タンパク質に対する凝集効果の違いが関係していることを示唆する。また、照射時のプラズマ特性の比較から、一酸化窒素やヒドロキシラジカルは凝集現象の主要な因子ではないと推定し、さらに、溶液中の  $He^m$  によるペニング電離反応は、タンパク質凝集に不可欠な条件ではないことを示した。さらに、Ar\_LEAPP では瞬時的 ( $\sim 1 \mu s$ ) に多量の荷電粒子が流れ込む点、放電が不安定で周期ごとに電流のピーク値が異なる点、及び粒子の重さの違いに起因したガス流による溶液の振動等が、凝集現象を阻害している可能性を考察した。

本研究では、産総研が開発した LEAPP の特性を多元的に計測し、それが基本的にはこれまでの APPJ に関する特性計測の報告と同様であることを明らかにした。一方で、こうした特性は同じ装置であっても、作動ガスやプラズマ源-対象物間の距離等のプラズマの生成条件等によって大きく変化することを見出した。このことは、血液凝固促進現象を誘起する最適な条件が存在することを示唆する。今後、本研究が明らかにしたプラズマ生成条件の相違による LEAPP の特性の変化について、それらと血液凝固促進効果との相関関係に関する詳細な解析を通して、より効果的なプラズマ止血機器開発や、APPJ の生体応用を進展させる新たな知見の取得へとつなげることが可能であると考えられる。

本論文は、著者が筑波大学大学院システム情報工学研究科構造エネルギー工学専攻博士後期課程(産業技術総合研究所・技術研修生)で行った研究をまとめたものである。

## 目次

### 第1章 序論

#### 1.1 研究背景

##### 1.1.1 プラズマ技術

##### 1.1.2 プラズマの医療応用

###### 1.1.2.1 止血

###### 1.1.2.2 殺菌、創傷治癒、皮膚疾患治療

###### 1.1.2.3 がん治療

#### 1.2 プラズマの特性計測

##### 1.2.1 電気特性

##### 1.2.2 電子の特性

##### 1.2.3 ガス温度

##### 1.2.4 ガス流

##### 1.2.5 発光伝播

##### 1.2.6 活性種

#### 1.3 研究目的

#### 1.4 論文構成

### 第2章 低エネルギー大気圧プラズマ

#### 2.1 LEAPP 装置の概要

#### 2.2 電気特性

##### 2.2.1 実験方法

##### 2.2.2 実験結果

###### 2.2.2.1 He を作動ガスとした場合の LEAPP の電気特性

###### 2.2.2.2 Ar を作動ガスとした場合の LEAPP の電気特性

#### 2.3 照射対象物の違いによるプラズマ特性の変化

##### 2.3.1 実験方法

##### 2.3.2 実験結果

#### 2.4 第2章のまとめ

### 第3章 ガス流の可視化によるガス流とプラズマの相互作用に関する研究

#### 3.1 研究背景及び目的

##### 3.1.1 研究背景

##### 3.1.2 研究目的

#### 3.2 実験方法

##### 3.2.1 計測手法

### 3.2.2 実験系

### 3.2.3 計測画像の解析手法

#### 3.2.3.1 画像処理によるシュリーレン画像のガス流の数値化

#### 3.2.3.2 噴流の解析について

### 3.3 実験結果

#### 3.3.1 LEAPP のガス流のシュリーレン法による可視化実験結果

#### 3.3.2 外部静電場存在下におけるガス流特性

### 3.4 考察

#### 3.4.1 外部電静場印加によるガス流の屈曲現象

#### 3.4.2 プラズマ生成によるガス流の乱流化促進現象

### 3.5 第3章のまとめ

## 第4章 高時間分解画像計測による LEAPP の発光伝播に関する研究

### 4.1 研究背景及び目的

#### 4.1.1 研究背景

#### 4.1.2 研究目的

### 4.2 実験方法

#### 4.2.1 計測手法

#### 4.2.2 実験系

### 4.3 実験結果

#### 4.3.1 $L = 20 \text{ mm}$

#### 4.3.2 $L = 10 \text{ mm}$

#### 4.3.3 $L = 5 \text{ mm}$

### 4.4 考察

### 4.5 第4章のまとめ

## 第5章 発光分光計測による LEAPP が生成する活性種に関する研究

### 5.1 研究背景及び目的

#### 5.1.1 研究背景

#### 5.1.2 研究目的

### 5.2 実験方法

#### 5.2.1 計測手法

#### 5.2.2 実験系

### 5.3 実験結果

#### 5.3.1 He\_LEAPP の発光分光計測

##### 5.3.1.1 照射対象物がない場合

5.3.1.2 照射対象物がある場合

5.3.2 Ar\_LEAPP の発光分光計測

5.3.2.1 照射対象物がない場合

5.3.2.2 照射対象物がある場合

5.4 考察

5.5 第5章のまとめ

## 第6章 LEAPP 照射による血清アルブミン凝集現象に関する研究

6.1 研究背景及び目的

6.1.1 研究背景

6.1.2 研究目的

6.2 実験手法

6.2.1 実験系

6.2.2 計測系

6.3 実験結果

6.3.1 血清アルブミン凝集現象

6.3.2 プラズマの特性

6.4 考察

6.4.1 血清アルブミン溶液凝集現象とプラズマ特性の関係

6.4.2 血清アルブミン溶液凝集現象と血液凝固促進現象との関係

6.5 第6章のまとめ

## 第7章 結論

参考文献

研究業績

謝辞

以下に各章の要約を記す。

## 第1章 序論

止血処置は、外科手術において必要不可欠な処置であり、出血する部位によりいくつかの止血方法が存在する。例えば、毛細血管からの滲み出るような出血に対しては、高周波電気凝固装置等のような熱により血管を焼き潰すことによる止血である焼灼が用いられている。プラズマ技術は、既にこの焼灼止血へと応用され、実用化されている。一方で、毛細血管からの出血に対する止血として、近年では焼灼とは異なり、プラズマ照射により血液凝固を促進し、形成された凝固物で出血部を覆うことによる止血効果についても報告されている。本研究では、このような低パワー、低イオ



ン温度、低ガス温度、低エネルギー密度の全てを満たし、熱損傷を防ぐプラズマについて、低エネルギー大気圧プラズマ (Low-Energy Atmospheric-Pressure Plasma “LEAPP”) と呼ぶ。

プラズマにより誘起される血液凝固促進現象のようなプラズマの生体への作用について、その作用機序の詳細についてはほとんどが明らかにされていない。作用機序の解明を目指した研究が種々行われており、反応性の高い粒子である活性種が重要な役割を担うと考えられ、計測されていることが多い。しかしながら、プラズマには様々な特性があり、これらは同一の放電方法によって生成されていても装置によって異なっていることがあり、活性種だけではない様々な特性の相違が現象の相違へと影響することが考えられる。血液凝固促進現象においても、LEAPP の処置による血液凝固促進という点は同じだが装置の相違による血液成分への作用の相違が報告されている。これは、それぞれの装置が異なる特性を有していることが要因として考えられるが、作用因子や作用機序は不明である。そこで、本研究では、プラズマによる血液凝固促進現象のメカニズム理解による効果的なプラズマ止血機器開発及び大気圧プラズマジェット (Atmospheric-Pressure Plasma Jet “APPJ”) の応用研究への貢献を目指し、多くの血液成分へ作用し血液凝固促進を行うことが現時点 (2018 年 1 月) で唯一見出されている産総研が開発した LEAPP について、様々なプラズマの特性を多元的に計測して明らかにすることを目的とする。特に、APPJ の大きな特徴の一つである「ガス流」とプラズマの相互作用、プラズマ生成等と関わる「発光伝播」、APPJ の多くの応用で重要な役割を担うとされる「活性種」、そして血液成分への作用特性として「血清アルブミンの凝集」に注目した。これらの特性について計測を行い、既存研究との比較を行うと共に、各特性の関係する現象のメカニズム解明のための研究を行う。

本論文では、第 1 章では研究背景としてプラズマ技術やその応用について述べた後、様々なプラズマの特性計測の概要について述べ、本研究の目的と構成について述べる。第 2 章では、本研究の対象である産総研で開発された LEAPP 装置の概要を述べる。第 3 章では、LEAPP のガス流特性に関する実験結果とその考察を述べる。第 4 章では、LEAPP の発光伝播特性に関する実験結果とその考察を述べる。第 5 章では、LEAPP の活性種特性に関する実験結果とその考察を述べる。第 6 章では、LEAPP の血清タンパク質に対する特性に関する実験結果と考察を述べる。最後に第 7 章では、本研究の結論を述べる。

## 第 2 章 低エネルギー大気圧プラズマ

本研究では、プラズマ源として榊田らが開発した LEAPP 装置を用いた。LEAPP 装置は APPJ に分類される。作動ガスとして、ヘリウム (He) 及びアルゴン (Ar) を流量 1.0-2.0 l/min に設定して用いた。それぞれの作動ガスを使用したプラズマを本研究では He\_LEAPP 及び Ar\_LEAPP と呼ぶ。作動ガスは放電部の内径 1.4 mm の石英管を通り、管外面に設置した電極に周波数約 62 kHz の交流高電圧 ( $V_{pp}$ : 数 kV) が印加され、プラズマとなる。LEAPP 装置外部に生成された視認可能なプラズマを本研究ではプラズマフレアと呼び、長さは約 20 mm である。

He\_LEAPP 及び Ar\_LEAPP の電気特性に着目し、接地銅板を照射対象物とした場合の電圧、電流波形データを取得し、実効電圧、実効電流、及び平均パワーを算出した。さらに、プラズマ源-銅板表面間の距離  $L$  を変えた場合の電圧、電流波形等の特性変化を調べた。その結果、両 LEAPP は、プラズマフレアが銅板に接触、非接触の境界である照射距離  $L=15-20\text{ mm}$  を境として、電気特性が大きく変化することが分かった。このことから、接触、非接触の境界でプラズマの状態が大きく変化していることが考えられる。プラズマフレアが銅板に接触する場合は、銅板に流れ込む電流値も増加しており、より荷電粒子密度の高いプラズマ状態となったと考えられる。プラズマフレアが接触する境界から更に距離を近づけることで、実効電流値及びピーク電流値が更に増加した。Ar\_LEAPP については、プラズマフレアが接地銅板に接触する場合、二つの領域に分けることができた。 $7.5 \leq L \leq 15.0\text{ mm}$  においては、大きなピーク電流が流れ瞬時パワーが大きく、電源の負荷が大きくなる。そのため、電圧波形が変動し、この条件では 2 周期毎に同じ波形を繰り返す様相となった。この場合、電流ピーク値も大きい周期と小さい周期が交互に現れた。さらに、長時間特性として 2 ms の周期で電圧・電流のピーク値が変動する現象も生じ、そのため、長時間平均では実効電圧、実効電流、及び平均パワーが  $L \leq 5.0\text{ mm}$  よりも小さい値となった。一方で  $L \leq 5.0\text{ mm}$  においては、電圧と電流の位相差が大きくなったため、電流ピーク時の瞬時パワーが低下するが、高電圧、高電流波形が長時間安定して現れた。波形の安定化に伴い、実効電圧、電流、及び平均パワーが他の場合よりも高い値となった。このように、接地銅板までの距離を変えることで電気特性は大きく変化しており、特に対象物へのプラズマの接触、非接触の差は、プラズマの電気特性に大きな影響を与える要素であるという結果を得た。

照射対象物の違いによるプラズマ特性への影響を調べるために、銅板、純水、そして血清アルブミン溶液を対象物として He\_LEAPP を照射した際のプラズマ特性の計測を行った。発光画像、電気特性、及び発光分光計測を行い、ピーク電流値や発光強度等の詳細は異なるが大きな相違点はなく、概ね同様となる結果を得た。一方で、純水や血清アルブミン溶液を用いた実験では、ガス照射による断面形状の変化が確認された。また、実験時間の経過によって蒸発等による溶液の状態が変化することも考えられるため、以降の第 4 章及び第 5 章では銅板を照射対象物として実験を行うこととした。

### 第 3 章 ガス流の可視化によるガス流とプラズマの相互作用に関する研究

本章では、産総研が開発した LEAPP におけるガス流に関して、シュリーレン法を用いた可視化実験を行った結果について述べた。プラズマ生成がガス流に及ぼす影響を明らかにすること、及び外部静電場印加によるプラズマフレアの制御に着目し、その場合のガス流への影響を明らかにすることを目的に設定し、研究を実施した。その結果、本研究が対象とする LEAPP においては、プラズマ生成によってガスの乱流化が促進し、印加電圧を上昇させることで乱流化が更に促進されるという、従来の APPJ における報告と同様の結果を得た。また、プラズマフレアに外部電場を印加すること

で、プラズマフレアが電場方向に屈曲するという従来の APPJ と同様の結果を観察し、更にガス流も電場方向に屈曲することを初めて見出した。この時、ガスの乱流化も促進されることを初めて見出した。外部電場印加におけるガス流屈曲現象について、外部電場によって形成されたイオンリッチ領域において、局所電場により加速されたイオンが中性粒子と衝突しマクロな運動量移行が生じたことが、ガス流屈曲の要因であると考察した。この点を考慮した簡易モデル計算を行った結果、実験結果と整合性のある計算結果が得られ、本考察の妥当性を確認した。

本研究の成果は、H. Yamada, et al., *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** 01AB08 (2016) にて報告を行っている。

#### 第 4 章 高時間分解画像計測による LEAPP の発光伝播に関する研究

産総研が開発した装置による He を用いた LEAPP に関して、照射距離を変えた時の発光伝播現象の変化、及びストリーションの有無を明らかにすることを目的とした研究を実施した。具体的には、直流電源からの供給電圧を一定とした場合において、照射対象物 (接地銅板) までの照射距離  $L$  の違いによる発光伝播現象の違いについて調べた。

He\_LEAPP プラズマにおいて、 $L = 20$  mm のプラズマフレアが対象物表面に接触しない条件では、正電流時に正ストリーマの伝播が現れた。フレアが対象物に接触する  $L = 10$  mm とした場合には、正電流時に正ストリーマ伝播後、空間的に連続な発光が現れた。これらの正ストリーマ、及び空間的に連続な発光は、これまでの報告と同様の現象である。さらに、照射距離を短くして  $L = 5$  mm とした場合、He\_LEAPP では正電流時に正のストリーマと負のストリーマが 1 周期毎に交互に現れる倍周期現象が生じた。この現象はこれまでに報告がなく、本研究において初めて見出した。電流波形との対応から、この倍周期現象にはストリーマ伝播開始時の残留電荷が関係していると考察した。

He\_LEAPP においてもストリーションが生じることを観察した。この He\_LEAPP では、1 周期内の限られた時間帯に出現するストリーションとして、ストリーマヘッド後方、空間的に連続な発光、及び負電流時の発光伝播の各領域において観察した。特に、ストリーマヘッド後方に現れるストリーションは、本研究で初めて見出した。

#### 第 5 章 発光分光計測による LEAPP が生成する活性種に関する研究

本章では、LEAPP が生成する活性種を特定することを目的として、発光分光法を用いた研究について述べた。特に、He\_LEAPP 及び Ar\_LEAPP に関して、対象物存在下において生成される活性種の相違に着目して実験を実施した。その結果、これまでの報告と同様に、作動ガス由来の活性種からの発光に加えて、大気成分由来の活性種からの発光を観察した。さらに、対象物が存在する場合にはフレア全域での発光強度が増加し、特に対象物表面近傍では急激な発光強度の増加を観察した。これは、第 4 章の発光伝播計測により計測した空間的に連続な発光、及び正電流時の負グロー領域の強い発光のためであると考えられる。He\_LEAPP と Ar\_LEAPP の相違は、作動ガス由来の発光を除くと、窒素分子イオン ( $N_2^+$ ) の発光の有無であった。これは、これまでの報告と同様である。し

かしながら本研究では、Ar\_LEAPP においては対象物の表面近傍においても  $N_2^+$  の発光が観察できないことを初めて見出した。対象物表面近傍の負グロー中では、高速電子による電離、及び励起衝突が生じることが考えられるが、Ar\_LEAPP では対象物表面近傍であっても  $N_2^+$  の発光は観察されない。このことは、 $N_2^+$  が生成され易い作動ガス流中の空気巻き込み量が多い領域では、電子温度が低下して電離、及び励起をすることができないことが要因であると考察した。

本研究の成果は、H. Yamada, et al., *J. Phys. D. Appl. Phys.* **49** 394001 (2016) にて報告を行った。

## 第 6 章 LEAPP 照射による血清アルブミン凝集現象に関する研究

本章では、プラズマによるタンパク質凝集現象のメカニズム解明を目指し、作動ガスの異なる LEAPP を用いてタンパク質溶液への照射実験を実施し、その時の凝集現象及びプラズマ特性を解析することにより、それらの関係について明らかにすることを目的とした。

He\_LEAPP、Ar\_LEAPP、及び He-Ar 混合ガスを作動ガスとした LEAPP (He-Ar10%\_LEAPP、He-Ar50%\_LEAPP) による血清アルブミン溶液への照射実験を行った。その結果、He\_LEAPP、及び He-Ar10%\_LEAPP では、血清アルブミン溶液の凝集効果が高いことが確認された。しかしながら、He-Ar50%\_LEAPP、及び Ar\_LEAPP は凝集効果が低い結果を得た。このことから、He\_LEAPP の方が Ar\_LEAPP よりも血液凝固促進効果が高い理由の一つとして、タンパク質への凝集作用の違いが関係している可能性を示した。

多くのプラズマ応用で重要とされる活性種について、プラズマ特性の比較から、大気中で生成された一酸化窒素分子 (NO) やヒドロキシラジカル (OH) は、血清アルブミン溶液凝集現象の主要な因子ではない可能性が高いことを明らかにした。また、準安定ヘリウム ( $He^m$ ) 粒子による溶液中のペニング電離反応の有無が、凝集現象を左右する決定的要因ではないことを明らかにした。さらに、凝集現象の要因として、荷電粒子の振る舞いについて今後調べることが重要であると考察した。

凝集効果の低い He-Ar50%\_LEAPP 及び Ar\_LEAPP は、荷電粒子の投入が瞬時的 (約 1  $\mu$ s) に行われる点、及び放電が安定しておらず投入する荷電粒子量に周期ごとの大きなばらつきが現れる点が、He\_LEAPP 及び He-Ar10%\_LEAPP とは異なっていた。これらの荷電粒子の振る舞いが、凝集現象を阻害している可能性が考えられる。これらの特性の相違に加えて、Ar は He よりも重いために、溶液に与える流体的な力が大きく、溶液表面の変形、振動が生じており、これらは放電不安定性にもつながっていることが考えられ、安定な凝集を阻害した可能性が考えられる。今後、作動ガス種、流量、印加電圧、周波数、及び照射距離等の放電条件を変更することで電流半値幅を変えた照射実験、もしくは Ar\_LEAPP における安定な放電下での照射実験を行うことにより、凝集現象の阻害要因の特定、及び凝集メカニズムの解明へとつなげることが期待される。

## 第7章 結論

本研究では、産総研が開発した装置による LEAPP の特性を多元的に計測し、基本的にはこれまでの各 APPJ に関する特性計測の報告と同様であること確認した。一方で、こうした特性は、同じ装置であっても作動ガス、及びプラズマ源と対象物間の距離等のプラズマの生成条件によって大きく変化することを明らかにした。このことは、血液凝固促進現象を誘起する最適な条件が存在することを示唆する。

今後、本研究が明らかにしたプラズマ生成条件の相違による LEAPP の特性の変化について、それらと血液凝固促進効果との相関関係に関する詳細な解析を通して、より効果的なプラズマ止血機器の開発、及び APPJ の生体応用を進展させる新たな知見の発見へとつながることが期待される。