

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 7 日現在

機関番号：24402

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2020～2021

課題番号：20K20913

研究課題名(和文) プラズマ弾丸が誘電体プレートをトンネリングする現象の解明と応用

研究課題名(英文) A study on the tunneling phenomena of plasma bullets through a dielectric plate and its applications

研究代表者

白藤 立 (Shirafuji, Tatsuru)

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：10235757

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：プラズマ弾丸が誘電体をトンネリングするという現象が、弾丸着弾時の蓄積電荷由来の局所電場によって裏面側に新たなプラズマ弾丸を生成する、というモデルで説明されることを実験的に示した。パルス電圧印加によって弾丸着弾時の電場形成を模擬することで、面発射型プラズマ弾丸の発生が可能であることを実証した。パルス電圧の急峻な立ち上がり特性(約30 MV/s以上)が面発射型プラズマ弾丸の発生に必要であることを明らかにした。プラズマ弾丸のトンネリングや面発射型プラズマ弾丸を応用することにより、従来の大気圧プラズマジェットの単純な照射では実現できなかった骨再生スキャフォールド内部の高速親水化が可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、これまでチューブ状の誘電体が主な研究対象となっていたプラズマ弾丸のトンネリング現象がプレート状の誘電体の場合にも明確に観測されること、その研究成果をもとにして、従来はチューブノズルから射出されていたプラズマ弾丸が平面状の誘電体面からでも射出可能であること、本方式により、従来よりも大体積の低温大気圧プラズマが得られること、を示したことにある。本研究の社会的意義は、上記の現象を巧みに使うことで、従来の大気圧プラズマジェットの照射だけでは不可能であった連続多孔質誘電体(具体的には、骨再生スキャフォールド)の内部の親水化が、高速で実現できることを実証したことにある。

研究成果の概要(英文)：The plasma-bullet transfer across a dielectric can be explained in terms of the local electric field due to accumulated charges provided by a plasma bullet impinging on the dielectric surface. According to this understanding, it has been demonstrated that a surface-launched plasma bullets can be generated. It was also clarified that the steep rising characteristic of the pulse voltage (about 30 MV / s or more) is necessary for the generation of surface-launched plasma bullets. By using mechanisms of plasma-bullet transfer and/or surface-launched plasma bullets, very quick hydrophilic treatments of the inner surfaces of a bone regeneration scaffold, which was not possible by simple irradiation of conventional atmospheric pressure plasma jets, has become possible.

研究分野：プラズマプロセス工学

キーワード：プラズマ弾丸 大気圧プラズマ トンネリング 骨再生スキャフォールド 親水化 大容量

1. 研究開始当初の背景

ヘリウムガスを用いたプラズマ弾丸伝播型の大気圧プラズマジェット(APPJ)を誘電体プレートに照射すると、プレートをトンネルして伝播するかのように、プレートの裏面側にプラズマジェットが現れることがある[1]. このAPPJのトンネル現象は、通常物質輸送型のジェットではあり得ない現象であり、学術的に極めて興味深い現象であるが、あまり深くは研究されていない. 特に、平板をトンネルするプラズマ弾丸については、調べた限りでは、報告例は1例だけであった[2]. また、この現象を使うからこそできる応用に関する報告例もほとんどない. 本研究では、まず、この特異な現象を説明するために申請者が考えた仮説を実験や計算に基づいて検証するとともに、その仮説に基づいて、従来と異なる方法でプラズマ弾丸を生成する方法を探索した. また、この現象は、骨再生スキャフォールドなどの連続多孔質誘電体内壁の親水化を簡便に高速で行う技術に利用できる可能性を秘めており、本研究においてその実用性を検証した.

2. 研究の目的

本研究の目的は、①上記のプラズマ弾丸トンネル現象の基本原理の解明と、②この現象の応用にある. 申請者は、この特異な現象の起源として、プラズマ弾丸が誘電体プレート表面に着弾したときに、着弾面に弾丸由来の電荷が蓄積し、その蓄積電荷によって着弾面近傍に電場が誘起され、その電場によって誘電体プレートの着弾面と反対側の面に新たなプラズマ弾丸が生成される、という仮説を考えている. 本研究の目的①は、実験や計算によってこの仮説を検証することにある. 本研究の目的②は、プラズマ弾丸が有するこの特異な性質を、骨再生スキャフォールドに代表される連続多孔質誘電体の内壁親水化という応用に適用することにある.

3. 研究の方法

(1) 誘電体プレートの静電容量依存性

本研究項目は上記仮説の検証のために行った. 電荷蓄積によって発生する電圧の大きさは、誘電体プレートの静電容量に依存する. そこで本研究では、厚みや誘電率の異なる誘電体プレートを用い、誘電体プレート越しのプラズマ弾丸伝播の可否を系統的に調査した.

(2) 各種条件依存性

裏面側ヘリウム流束の角度、裏面側ヘリウムガス照射距離、裏面側ヘリウムガス流束の太さを可変し、プレートをトンネルした後のプラズマ弾丸伝播の可否や挙動を調査した.

(3) 面発射型プラズマ弾丸の実現

誘電体プレートの反対側にプラズマ弾丸を生成するためのより簡便な手法として、上記仮説に基づき、プラズマ弾丸照射による電荷蓄積を模擬したパルス電圧を誘電体プレートの片面に印加する、という手法を検討した.

(4) 放電ガス種依存性

プラズマ弾丸トンネル現象の放電ガス種依存性を明らかにするとともに、将来の産業応用のために、アルゴンや窒素などの安価なガスでも同様の現象が観測されるのかどうかを検証した.

(5) 骨再生スキャフォールドの親水化への応用

プラズマ弾丸のトンネル現象を応用した技術として、骨再生スキャフォールドに代表される連続多孔質誘電体の内壁の親水化処理への応用可能性を検討した.

4. 研究成果

(1) 誘電体プレートの静電容量依存性

図1は、異なる厚みの誘電体に同一条件のAPPJを照射し、プラズマ弾丸の伝播特性を調べた結果である. 誘電体の厚みが薄いほど、誘電体板越しのプラズマ弾丸伝播が顕著になる. この結果は、誘電体板のキャパシタンスが大きくなるほど、誘電体の厚み方向に分割される電圧が小さくなり、誘電体の裏面側に形成される電場の強度が強くなるためであると説明される. また、これが正しければ、同じ厚みであっても、誘電率の高いプレートをプラズマ弾丸

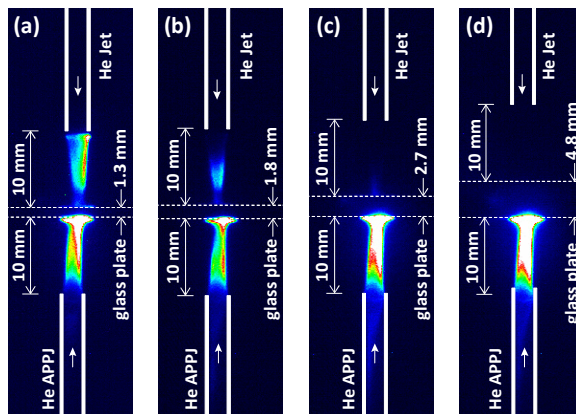


図1. 誘電体板越しの弾丸伝播の誘電体厚依存性.

照射対象にすれば、弾丸の伝播が起りやすくなるはずであるが、確かにそうなることも実証した。

(2) 各種条件依存性

① 裏面側ヘリウム流束の角度依存性

弾丸着弾面の裏面側のヘリウムガスの流束の角度を 0° (裏面と垂直) から 90° (裏面と水平) まで可変し、裏面側のプラズマ弾丸が伝播するかを調査した。その結果、すべての角度において、プラズマ弾丸の伝播が確認された。これは、トンネリング後のプラズマ弾丸の伝播方向をいかなる方向にも人為的に制御できることを意味し、産業応用上重要な特徴と位置付けられる。

② 裏面側ヘリウムガス照射距離依存性

裏面側のヘリウムガスの照射距離を離すと、ある距離で弾丸のトンネル現象が観測されなくなった。裏面側のヘリウムガス純度の空間分布を流体シミュレーションで計算したところ、およそ 99% のヘリウム純度の領域が裏面側プレートと接していることが、トンネル現象に必要なことが分かった。

③ 裏面側ヘリウム流束の太さ依存性

裏面側のヘリウム流束を通常の内径 (約 4 mm) よりも細い内径 ($320 \mu\text{m}$) の中空ファイバーにて形成し、トンネリング後のプラズマ弾丸が細い流路であっても伝播するのかを調査した。その結果、この場合においてもプラズマ弾丸の伝播が確認された。なお、内径 $320 \mu\text{m}$ のチューブのガスコンダクタンスが極めて小さいことから、当該極細チューブ内部でのガスの流れはほとんどない。したがって、この結果は、従来のプラズマ弾丸の伝播と同様に、その流路のガスの流れと無関係に伝播することを示している。これは、理想的にはガスを流す必要がないことを意味し、プロセスによるヘリウムガスの汚染を抑制できるならば、高価なヘリウムガスの垂れ流しを抑制できることを意味している。

(3) 面発射型プラズマ弾丸の実現

面発射型のプラズマ弾丸の生成を検証するための実験として、表 (おもて) 面にヘリウムガスを照射したスライドガラスの裏面に高電圧パルスを印加した。その結果、ヘリウムガスを照射している長さ 20 cm のガラス管内全体にプラズマが生成された。生成されたプラズマを ICCD カメラで撮影し、面発射型プラズマ弾丸が射出されていることを明らかにした (図 2)。また、約 30 MV/s 以上の電圧立ち上がり (dV/dt) を有するパルス電圧印加が、面発射型プラズマ弾丸生成の重要な要件のひとつであることを明らかにした。

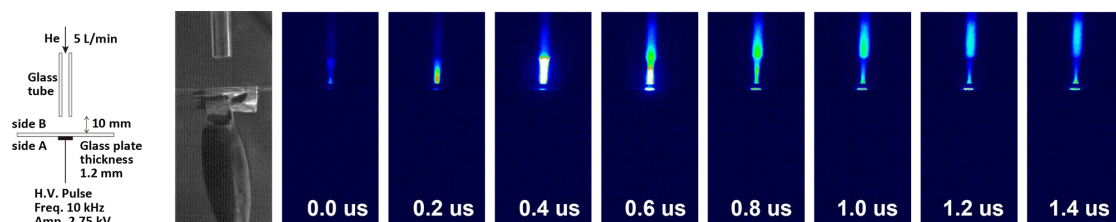


図 2. 面発射型プラズマ弾丸生成の実証.

(4) 放電ガス種依存性

面発射型プラズマ弾丸は、大量のヘリウムガスを垂れ流しする APPJ 照射が不要となることから、高価なヘリウムガスの消費を大幅に削減できる。しかし、容器内への弾丸発射のためには、容器内をヘリウムで満たさなければならないという要件が残っている。そこで、ヘリウムガスをアルゴンガスに変更し、その他の

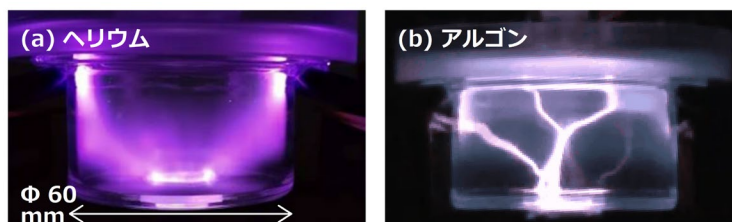


図 3. 面発射型プラズマ弾丸生成のガス種依存性。

(a) ヘリウムガス. (b) アルゴンガス.

条件を同一にして実験を行った。図 3 にその結果を示す。残念ながら、アルゴンガスを用いた場合には、ヘリウムガスを用いたときのような広がったプラズマの生成ができなかった。この違いは、電離係数の E/N 依存性の傾きが、ヘリウムの場合には緩やかであるのに対し、アルゴンの場合には急峻であることに起因していると考えている。今後は、アルゴンとヘリウムの混合比を変えた実験を行い、図 3 のような放電形態の違いが、どの程度の混合比 (つまりどのような電離係

数の E/N (依存性) で起こるのかを学術的に明らかにする。これは、高価なヘリウムガスの使用をどこまで削減できるか、という産業応用の視点からも重要な知見であると考えている。

(5) 骨再生スキャフォールドの親水化への応用

① プラズマ弾丸トンネル現象の応用

骨再生スキャフォールドとは格子状の多孔質誘電体である。これを骨欠損部に埋め込むことで骨再生が加速する。その製造方法として、骨欠損の形状に合わせて任意形状を形成できる 3D プリント技術が注目されている。ただし、その素材が疎水性のポリ乳酸 (PLA) であるため、骨欠損部に埋め込む前に、その内部全体を親水化する処理が必要である。従来は、1 時間ほどかけて NaOH 水溶液に浸漬し、十数時間かけて水でリンスするという方式がとられている。

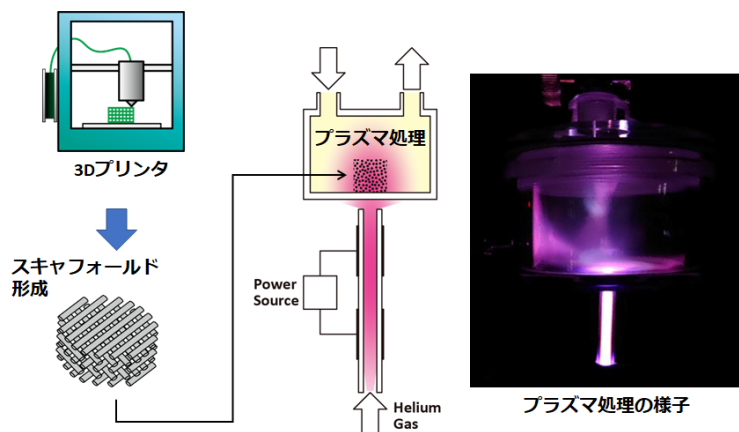


図 4. プラズマ弾丸トンネル現象を利用した骨再生スキャフォールドの親水化プロセスの概念図。

本研究では、プラズマ弾丸が誘電体壁をトンネルする現象を利用して、高速で骨再生スキャフォールドの内部を親水化することを試みた。図 4 にその実験系の概念図を示した。3D プリントで製造した直後の PLA スキャフォールドは、疎水性であるため、水滴 (12 μL) を滴下しても、まったく透水しない。一方、図 4 のプロセスを 5 分間施したスキャフォールドに水滴を滴下すると、約 0.8 秒で完全に透水した。これは、たった 5 分の当該処理によって、スキャフォールド内部が親水化されたことを意味する。

② 面発射型プラズマ弾丸の応用

誘電体プレートの表側に高電圧パルスを印加するだけでも、裏面側からの弾丸発射が可能であることを図 2 で示した。この現象を応用するために、図 4 の APPJ 照射部を高電圧印加電極に置き換えて①と同様の実験を行った。比較のために、単純に APPJ をスキャフォールドに照射する実験も行った。これらの処理後のスキャフォールドの透水レート (親水化度の指標) を図 5 に示す。

従来の APPJ 照射では、十分な親水化ができないだけでなく、スキャフォールドの厚みが厚くなると、親水化度が低下する。これは、処理対象が厚くなると、ガスコンダクタンスが悪くなり、弾丸伝播に必要な高純度ヘリウムガスでスキャフォールド内が満たされにくくなるからである。

一方、面発射型の場合には、高い親水化度を示すとともに、評価した 8 mm の厚みまでは、親水化度は実用レベルを超えていた。これは、容器内 (ならびにその中のスキャフォールド) を強制的に高純度ヘリウムガスで置換したことで、弾丸の伝播に必要な環境がどの場合でも担保されているからである。図 4 の形式でも同様の親水化処理が可能であることは判明しているが、その場合には、スキャフォールドの厚みの増加に伴う処理効率の低下が顕著であった。これは、裏面側で生成されるプラズマの密度や電場強度が、弾丸トンネリングを用いたときよりも、ダイレクトに高電圧パルス電圧を印加したときの方が大きいためであると推測している。

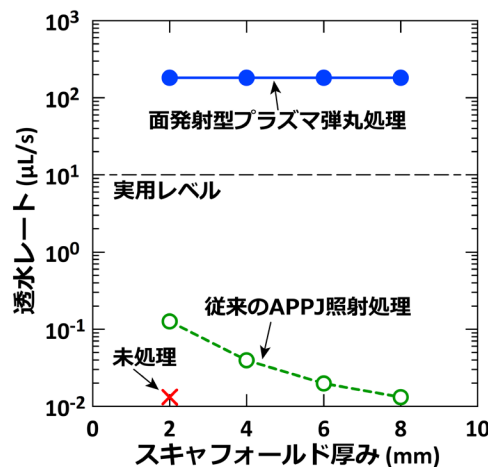


図 5. 面発射型プラズマ弾丸処理と従来の APPJ 処理の比較による骨再生スキャフォールドの親水化度の比較。

<引用文献>

- [1] X. Lu, et al: J. Appl. Phys. 105, 043304 (2009).
- [2] Q. T. Algwari and D. O'Connell: IEEE Trans. Plasma Sci. 39, 2368 (2011).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 白藤 立	4. 巻 73
2. 論文標題 大気圧プラズマ弾丸の伝播による微細多孔体内部の親水化	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 化学工業	6. 最初と最後の頁 49-55
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 3件/うち国際学会 6件）

1. 発表者名 白藤 立
2. 発表標題 プラズマ弾丸の伝播を利用した骨再生スキャフォールドの高速親水化
3. 学会等名 名古屋大学共同利用・共同研究拠点低温プラズマ科学研究センターバイオシステム科学部門研究会（プラズマバイオコンソーシアム2020年度名古屋拠点研究会）（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白藤 立
2. 発表標題 プラズマ弾丸が撃ち抜けば多孔質体は親水化
3. 学会等名 JST新技術説明会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白藤 立, 呉 準席, 濱本 悠希, 的場 諒, 西村 侑大, 洲鎌 亮, 折田 久美, 豊田 宏光
2. 発表標題 誘電体板越しのプラズマ弾丸伝播現象～誘電体板の静電容量の影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第37回年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 白藤 立, 関根 誠, 堀 勝
2. 発表標題 誘電体板越しのプラズマ弾丸伝搬現象とその応用
3. 学会等名 名古屋大学低温プラズマ科学研究センター公開シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ryo Matoba, Yudai Nishimura, Jun-Seok Oh, and Tatsuru Shirafuji
2. 発表標題 Launching plasma bullets from the surface of a dielectric plate
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 14th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yudai Nishimura, Ryo Matoba, Jun-Seok Oh, and Tatsuru Shirafuji
2. 発表標題 Observation of APPJ transfer through a glass plate - Effects of He-jet nozzle distance behind the glass plate irradiated with APPJ
3. 学会等名 13th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 14th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白藤 立
2. 発表標題 プラズマ弾丸による表面処理：「必要な所に活性種を輸送する」から「必要な所で活性種を生成する」に向けて
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白藤 立, 的場 諒, 西村 侑大, 呉 準席
2. 発表標題 誘電体板越しのプラズマ弾丸伝搬: 裏面側の誘電体と He ジェットノズル間の距離依存性
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuru Shirafuji
2. 発表標題 Hydrophilic treatment of a 3D-printed bone-regeneration PLA scaffold using propagation of plasma bullets
3. 学会等名 8th East Asia Joint Symposium on Plasma and Electrostatics Technologies for Environmental Applications (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuru Shirafuji, Yudai Nishimura, Koki Sasaki, and Jun-Seok Oh
2. 発表標題 Hydrophilic treatment of bone-regeneration scaffolds using plasma bullets
3. 学会等名 42nd International Symposium on Dry Process (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白藤 立, 呉 準席
2. 発表標題 面発射型プラズマ弾丸生成への dV/dt の影響
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会第38回年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tatsuru Shirafuji, Yudai Nishimura, Koki Sasaki, and Jun-Seok Oh
2. 発表標題 Influence of voltage polarity on the propagation length of back-surface-launched plasma bullets
3. 学会等名 12th Asia-Pacific International Symposium on the Basics and Applications of Plasma Technology (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白藤 立, 西村 侑大, 佐々木 康希, 呉 準席
2. 発表標題 面発射型プラズマ弾丸による3Dプリント骨再生スキャフォールドの親水化
3. 学会等名 BioMedical Forum 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuru Shirafuji, and Jun-Seok Oh
2. 発表標題 Numerical simulation of surface-launched plasma bullets
3. 学会等名 14th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials / 15th International Conference on Plasma-Nano Technology & Science (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 松本 侑, 佐々木 康希, 西村 侑大, 呉 準席, 白藤 立
2. 発表標題 正負パルス電圧印加時における表面発射型プラズマ弾丸の伝播特性
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室の広報Web http://t-shirafuji.jp/ アウトリーチ活動 第15回女子中高生のための関西科学塾，C日程，2020年10月25日(日) 13:00～15:30，中学生対象，白藤担当 = (C6)「プラズマを用いた医療工学技術を体験してみよう」 新聞掲載 日刊工業新聞 2021年6月9日25面，「多孔体を親水化：再生医療足場材にプラズマが内部伝搬」
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	呉 準席 (Oh Jun-Seok)		
研究協力者	堀 勝 (Hori Masaru)		
研究協力者	関根 誠 (Sekine Makoto)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------