

# 303 GHz ミリ波大気放電における衝撃波伝播速度の1次元数値計算 One-Dimensional Numerical Calculations of the Shock Wave Propagation Velocity in a 303 GHz Millimeter-Wave Discharge in Air

神谷亮汰, 福成雅史, 山口裕資, 立松芳典, 斉藤輝雄  
R. Kamiya, M. Fukunari, Y. Yamaguchi, Y. Tatematsu, T. Saito

福井大学 遠赤外領域開発研究センター  
Research Center for Development of Far-Infrared Region, University of Fukui

## 1. はじめに

ミリ波放電はビーミング推進や無線電力伝送等の様々な工学的応用が期待されている。局所的な入射ミリ波の電力密度がガスの電離閾値より低い亜臨界条件におけるミリ波放電の電離波面は、衝撃波を伴いビーム源に向かって進展する<sup>[1]</sup>。しかし、亜臨界条件における電離波面の進展機構は未解明であり、電離機構において重要なミリ波電力の流体へのエネルギー吸収率やプラズマ周辺の流体のふるまいも分かっていない。過去の研究では、303 GHz ミリ波放電のシャドウグラフ法による可視化実験を行い、撮影した写真から衝撃波伝播速度と電離波面進展速度を調べた。そこで本研究では、303 GHz ミリ波放電実験で得られた電離波面進展速度を入力パラメータとする半実験的な1次元数値流体計算を行い、実験と数値計算で得られた衝撃波伝播速度の比較からミリ波電力の流体へのエネルギー吸収率を解析した。

## 2. 数値計算モデル

亜臨界条件における電離波面の進展を再現できる数値モデルは未だ提案されていない。そこで本研究では、支配方程式に嶋田らによって提案されたミリ波の加熱項を含むオイラー方程式を用いた<sup>[2]</sup>。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial E}{\partial x} = S$$

$$Q = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ e \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} \rho u \\ p + \rho u^2 \\ (e + p)u \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ w \end{bmatrix} \quad (1)$$

$t, x$ はそれぞれ時間と位置座標で $x$ 軸は入射ミリ波に平行に取る。 $p, u, \rho$ はそれぞれ流体の圧力、流速、密度である。 $e$ は単位体積当たりの総エネルギーで

$$e = \rho \left( C_v T + \frac{u^2}{2} \right) \quad (2)$$

で表される。ここで、 $C_v, T$ はそれぞれ定積比熱と温度である。ミリ波による加熱項 $w$  [ $W/m^3$ ]は

$$w = \begin{cases} \alpha S_{\text{peak}} & \text{加熱領域} \\ 0 & \text{それ以外} \end{cases} \quad (3)$$

で表される。 $S_{\text{peak}}, \alpha$ はそれぞれ入射ミリ波のピーク電力密度と吸収係数である。加熱領域は加熱幅 $\Delta x$ を定義し、実験で得られた電離波面進展速度で進展

させる。実験と数値計算で得られる定常状態の衝撃波伝播速度を比較し、吸収係数と加熱幅を解析した。

## 3. 数値計算結果

定常状態の衝撃波伝播速度は流体に吸収されたミリ波電力のエネルギー $\alpha \Delta x S_{\text{peak}}$ によって決まるため、吸収係数と加熱幅の積であるミリ波電力の流体へのエネルギー吸収率 $\alpha \Delta x$ を用いると一意に決められると考えられる。吸収率と数値計算で求めた定常状態の衝撃波伝播速度の関係を図1に示す。図1より定常状態の衝撃波伝播速度は加熱幅に関わらず吸収率に依存することが分かった。実験と数値計算で得られた衝撃波伝播速度の比較から、ミリ波電力の流体へのエネルギー吸収率は $0.172 \pm 0.013$ と見積もられた。

## 4. まとめ

本研究では、303 GHz ミリ波放電実験で得られた電離波面進展速度を入力パラメータとする半実験的な1次元数値流体計算を行い、ミリ波電力の流体へのエネルギー吸収率を解析した。図1より定常状態の衝撃波伝播速度は吸収率に依存することが分かった。実験と数値計算で得られた衝撃波伝播速度の比較から、ミリ波電力の流体へのエネルギー吸収率は $0.172 \pm 0.013$ と見積もられた。

[1] M. Fukunari *et al.*, *Scientific Reports*, **9**, 17972, 2019.

[2] 嶋田豊, “マイクロ波支持デトネーションの新理論”, 東京大学修士論文, 2010.

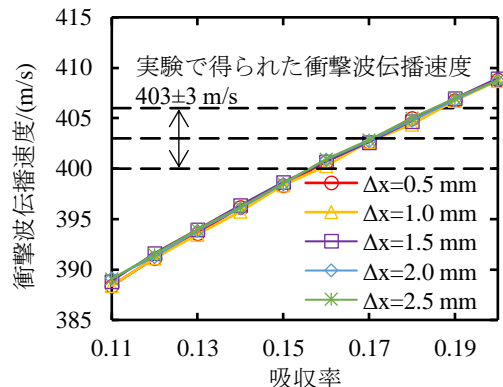


図1 定常状態の衝撃波伝播速度の吸収率依存性