

非熱平衡プラズマの発生時間の占有比率による電子及びイオン温度計測 Measurement of Electron and Ion Temperatures by Duty Ratio of Plasma Generation Period in Non-Thermal Equilibrium Plasma

山家清之, 佐藤順樹
YAMBE Kiyoyuki, SATO Junki

新潟大学
Niigata University

近年、大気圧非熱平衡プラズマは様々な分野において応用研究が盛んに行われている。プラズマを対象物に対して当てることによって、熱的作用や化学的作用がもたらされ、その作用の度合はプラズマの密度と温度に依存するため、定量的評価には密度と温度の計測が重要となる。プラズマの密度と電子温度を計測する手法は様々な方法が確立されている。一方、大気圧や高気圧においては、イオンが自由に動くことができないため、既存のイオン温度を計測する方法が利用できない。したがって、イオンの動きに依存しない、イオン温度を計測する手法の開発が必要となってくる。対象となる非熱平衡プラズマでは、電子及びイオン温度が異なることや、プラズマの発生時間が極めて短いことが、計測及び解析において、どのように考慮し処理するかが課題となってくる。プラズマの発生時間が短いことに対しては、高速分解能を持つ計測機器を用意することで解決する。しかし、この計測機器の分解能が低速であっても、その特性を利用することによって、プラズマの発生時間と観測時間の占有比率を考慮することによって、電子温度の計測が可能であることを明らかにしている。この計測解析手法においては、プラズマの温度に対して、高温と低温が求まることが示された。計測解析手法から導出される高温はおおよそ1万Kを示すことから、電子温度を示すことが明らかであったが、低温は数千Kであったため、何の温度を示すのかは不明であった。一方、熱電対を用いたプラズマの温度計測において、数百Kの室温より若干高い温度が示されたため、熱電対によって計測される温度は、作動ガスの温度であることが明らかとなった。したがって、この計測解析手法によって導出される低温は、イオン温度を示すことが予想された。そこで本研究では、先に開発した計測解析手法を拡張して、イオン温度の導出方法を確立することを目的としている。

プラズマは石英管を流れるガス中に発生する。電子は電磁圧力とガスの動圧力によってバランスし動くが、イオンは電磁圧力によって動くことができないためガスの流れに沿って動くことになる。石英管の側面からプラズマを観測する場合、観測領域において、電子は高速(数十km/s)に流れていくのに対して、イオンは低速(数m/s)に流れていくことになる。加えて、プラズマ密度の緩和時間は電子温度の緩和時間に比べて極めて長いことが知られている。したがって、プラズマが間欠的に発生する場合、プラズマが発生する期間では電子が存在するが、プラズマが発生しない期間ではイオンが観測されることになる。以上のことから、計測機器による観測時間(露光時間)において求まる時間平均された温度 $\langle T \rangle$ は、プラズマの発生時間 t_p 及び発生周期 f 、電子 T_e 及びイオン温度 T_i から、次式によって表される。

$$\langle T \rangle = T_e t_p f + T_i (1 - t_p f)$$

電子及びイオン温度の占有比率によって時間平均温度は変化することになる。プラズマの発生時間は発生周期に対して変化するので、時間平均温度を発生時間で割り、発生周期に対する依存性を求めた結果を図1に示す。図中の線形比例する領域から、線の切片としてイオン温度は0.041 eV、線の傾きから電子温度は0.96 eVと導出される。

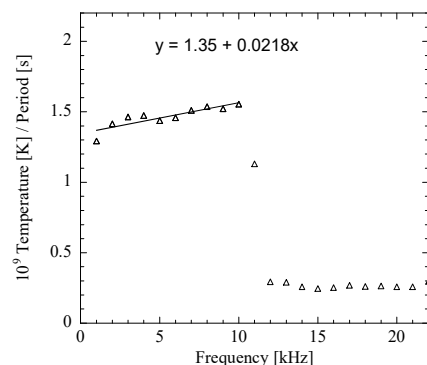


図1 時間平均温度の周波数依存性