

# 重イオンビーム照射で生じる二次電子の平衡状態のプラズマ生成、がん治療機構への影響

森林 健悟

量研

重イオンビーム照射で生じる二次電子の熱平衡がプラズマ生成や局所領域の線量に及ぼす影響を研究し、重イオンビーム癌治療の治療機構を解明することを目指す。重イオンビーム照射で生成するプラズマは局所領域の線量を大きくし、癌細胞を殺傷する割合を増加させ、高い癌治療効果をもたらすと評価されている。このプラズマ影響の定量評価するため、シミュレーション研究を行っていた[1]。以前のシミュレーション研究[1]では重イオン照射では、イオンの軌道付近に強電場が生成し、遅い二次電子が入射イオンの軌道付近に束縛され、プラズマが生成するとの結果を得た。一方、二次電子の運動は数フェムト秒で平衡状態になるという結果も得ている[1]。本研究では、二次電子が平衡状態になるのはプラズマ生成の前なのか後なのかなどを様々な二次電子の初期エネルギー分布関数を用いて議論する。

図1に(a)初期電子エネルギー分布関数 $f(E_e) = -AE_e^2 + 1, \exp(-B/E_e)$ の場合の(b)及び(c)照射後4 fsでの電子エネルギー分布、(d)トラックポテンシャルからの二次電子の脱出確率( $P$ )をイオン衝突電離の平均自由行程( $\tau$ )の関数として示した。ここで、 $E_e$ は二次電子のエネルギーを表す。(b)及び(c)の電子エネルギー分布はイオン衝突電離断面積が $10^{-15}\text{cm}^2$ の場合を取り扱ったが、4.3 eVのマクスエル分布で表すことができ、熱平衡化していることがわかる。さらに、電場からの脱出確率は先のシミュレーション[1]とほぼ同じになった。このことは熱平衡になってからプラズマ生成することを示唆している。

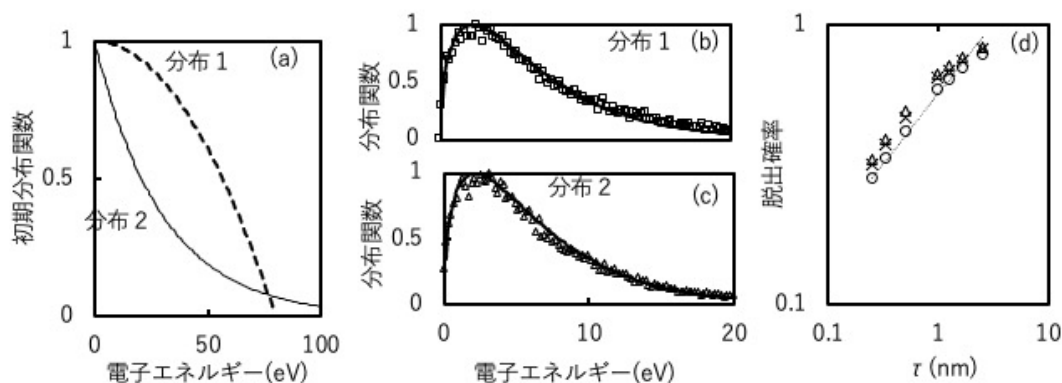


図1 (a)疑似的な二次電子の初期エネルギー分布[分布1: $-AE_e^2 + 1$ 、分布2: $\exp(-B/E_e)$ ]、(b) (c) それぞれ、分布関数1、2の場合の照射後4 fsでのエネルギー分布関数、太線: 4.3 eVのマクスエル分布、(d) $P$  vs.  $\tau$ 、 $\Delta$ : 分布1、 $\times$ : 分布2、 $\circ$ : 重イオンビームの実際のシミュレーションの結果、波線:  $(\tau)^{1/2}$ の関数。

[1] K. Moribayashi, J. J. Appl. Phys. **59** SH0801 (2020).