

博士課程用 (甲)

(様式4)

学位論文の内容の要旨

池田 裕子 印

(学位論文のタイトル)

Development of 3D clinostat synchronized irradiation systems to analyze the combined effects on radiation under simulated microgravity for space biosciences

(宇宙生物学にむけた疑似微小重力下の放射線に対する複合影響を解析するための3Dクリノスタット同期照射システムの開発)

(学位論文の要旨)

序論：

宇宙空間は、微小重力環境と重粒子線を含む様々な線質の宇宙放射線が飛び交う特殊な環境である。長期宇宙滞在における人類の健康リスクを正しく評価し、管理するためには、微小重力下の放射線に対する複合影響について明らかにする必要がある。しかしながら、宇宙実験を繰り返し実施することは困難であるため、微小重力と放射線の複合影響をはじめ、多くの事象が未解明のままである。

本研究では、微小重力下の放射線に対する複合影響を明らかにすることを目的として、装置開発をすすめた。疑似微小重力は、搭載試料が重力刺激を受ける前に、直交する2軸により3次元回転させて重力方向を連続的に変化させることで、重力影響をキャンセルする3Dクリノスタットを用いた。疑似微小重力環境の下、インキュベータの外で、搭載試料が水平に位置したときのみ炭素線もしくはX線を同期照射することが可能なシステムを新規開発し、性能評価を行った。

材料と方法：

疑似微小重力放射線同期照射システムは、(1) 3Dクリノスタット、(2) 試料ステージ、(3) コントローラー、(4) 炭素線同期照射システム、または(5) 高速シャッターによるX線同期照射システムで構成した。密閉培養容器DCC (Chiyoda Co., Kanagawa) の特殊形状に合わせて、試料ホルダー (Konno Co., Tokyo) を作製し、温度制御能を測定した。さらに、ライブイメージングを用いて、ヒト正常線維芽細胞 1BR-hTERTの増殖速度の比較による生物学的検証と、ガフクロミックフィルムの色調変化を指標に、照射試料における線量分布の均一性について物理学的検証を行った。

結果：

3Dクリノスタット (Advanced Engineering Services Co. Ltd., Ibaraki) を用いて、群馬大学における重粒子線がん治療の炭素線加速器 (290 MeV/n, Linear Energy Transfer (LET) = 50 keV/ μ m) および呼吸同期照射システムを組合せて、炭素線同期照射システムを開発した。さらに、同じ3Dクリノスタットと制御プログラムを用いて、X線 (MultiRad225: 200 kV, 14.6 mA, Faxitron Bioptics, LLC, AZ, USA) の同期照射を可能とするため、新たに高速シャッター (Accelerator Engineering Co., Chiba) を作製した。また、3Dクリノスタットの対照装置として、1G環境の静置試料台 (AES) を作製した。回転および静置の両システムにおい

て、3Dクリノスタットの回転センサーの情報から、搭載試料が水平に位置したときのみ同期照射（1分おきに0.2秒照射）することを可能にした。加えて、試料への均一な熱伝導と安定的な温度制御も実現した。3Dクリノスタット上で回転した細胞と静置試料台上の細胞を経時的に約2日間モニタリングしたところ、細胞増殖や接着性について両者に大きな変化は見られなかった。さらに、ガフクロミックフィルムの色調変化から、回転試料および静置試料ともに照射野内に試料が十分に含まれ、両者とも線量分布の均一性に優れており、有意な差がないことが分かった。3Dクリノスタットと静置試料台上のガフクロミックフィルムに炭素線1 Gyを照射した場合、校正曲線から算出した線量の差は回転と静置間で5%以下の誤差であり、正確な照射ができることが明らかになった。また、X線を1 Gy照射した場合でも、回転と静置間の線量の差は1%以下であったため、同期照射の精度に問題はないことが証明された。

考察：

現段階での本装置の制限は、1分ごとのパルス照射であるが、実際の宇宙環境も極めて低い線量率であり、パルス照射環境と言える。また、現時点では線質の異なる放射線を同時に同期照射することはできないが、疑似微小重力環境下において高LETの炭素線と低LETのX線の結果を比較することが可能である。

まとめ：

地上において大気条件下で適切な温度を保ちながら、疑似微小重力環境の下、正確に放射線照射可能な3Dクリノスタット炭素線およびX線同期照射システムを新規開発した。今後、本システムを用いて、微小重力下の放射線に対する複合影響を解析することで、放射線の効果は増強もしくは抑制されるのか、それとも変化しないのか等、宇宙実験の結果を検証できるだけでなく、新たな知見を取得するための有効なツールとして宇宙生物学での貢献が期待される。