

眼球脈絡膜悪性黒色腫の炭素線治療における GAFchromicEBT3 フィルムを用いた患者 QA 方法の構築と実現可能性について

袖山 梨花子 (量子エレクトロニクス教室)

放射線治療は、外科的手術や化学療法と並び癌に対する治療法の 1 つである。放射線治療ではターゲット組織に対して線量を集中させるとともに、周囲の正常組織に対する線量を最小限にすることが重要である。その中でも近年、ブラッグピークという鋭いピークを形成するという物理学特性から効果的に治療が行える治療法として、粒子線治療や重粒子線治療が注目されている。本研究を行った量子科学技術研究開発機構、放射線医学総合研究所では、主に炭素線治療を行っている。治療では、治療計画装置、治療装置、位置照合装置など様々な装置を用いて照射をおこなっているため、実際の投与線量には一定の不確かさが存在する。放射線治療を行う際には、QA/QC(Quality Assurance : 品質保証/Quality Control : 品質管理)の観点からこの不確かさをガイドラインの基準以下であることを担保することが肝要である。特に QA/QC において、治療で投与される線量の検証は重要な項目である。不確かさの要因は様々あるが、本研究では放射線治療装置に由来する不確かさについて、立案した治療計画が正しくデータ転送され計画通りの線量が行われているかを確認する患者 QA に焦点を当てる。

本研究では線量検証を行うために GAFchromicEBT3 フィルムを用いた。以前患者 QA のための線量測定が行われていたピンポイントチェンバーと比べて、位置分解能が極めて高いことや 2 次元測定が可能なることから、今回フィルムを用いた患者 QA 方法の構築と実現可能性について検証を行う。フィルムを解析する際にスキャンを行うのだが、このスキャン方法を確立することでスキャン自体の不確かさを軽減し線量測定の精度の向上を図る。また、フィルムには LET(Linear Energy Transfer : 線エネルギー付与)依存性が存在することがわかっているためその検証を行う。その上で治療計画通りに照射したフィルムから得られた線量分布と治療計画の比較を行った。

本実験において、スキャン方法の確立を行うことで、確立前は 3~5%存在した誤差を 1%以内に抑えることに成功した。これによりデータのばらつきを抑えることができ、フィルムの LET 依存性について一定の関係性を得られた。この LET 依存性の過小評価を RE(Relative Efficiency)とし、この関係性を図 1 に示す。4Gy において、 $RE_{(LET)} = 1 - 0.047 \times (LET - 13.4)^{0.56}$ の関係性を得た。また、治療計画との比較を行った結果を、縦方向の線量分布を図 2 に、横方向の線量分布を図 3 に示す。この結果において、線量分布の各位置においてフィルムでの線量測定値と治療計画との乖離が 3%以内を許容値とした。この割合が縦方向分布では 65%、横方向分布では 70%であった。この結果としては値としては患者 QA の実現可能性を示すことは不可能であるため、フィルムと治療計画の線量一致の低さは今後の課題である。しかし、この原因を追究し改善できれば、フィルムでの患者 QA は実現可能性であると考ええる。

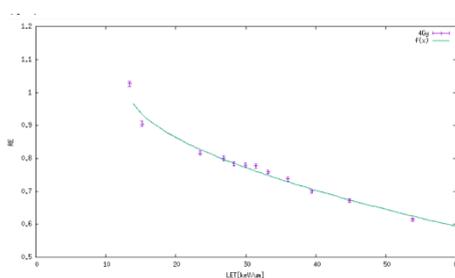


図 1 4Gy における LET と RE の関係

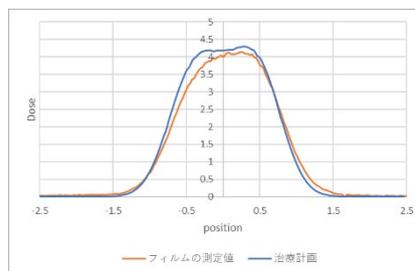


図 2 縦方向線量分布のフィルムの測定値と治療計画の比較

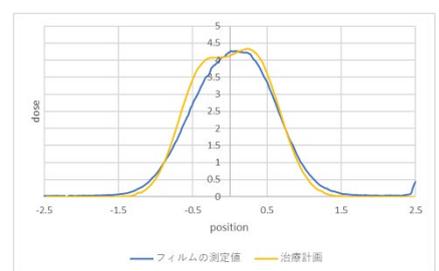


図 3 横方向線量分布のフィルムの測定値と治療計画の比較

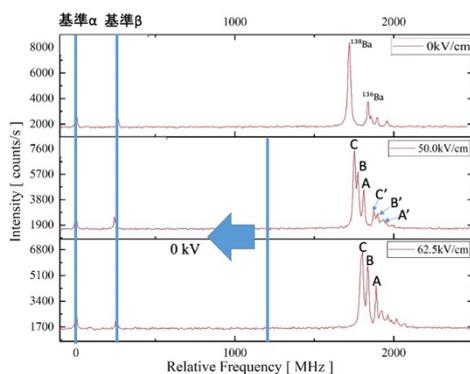
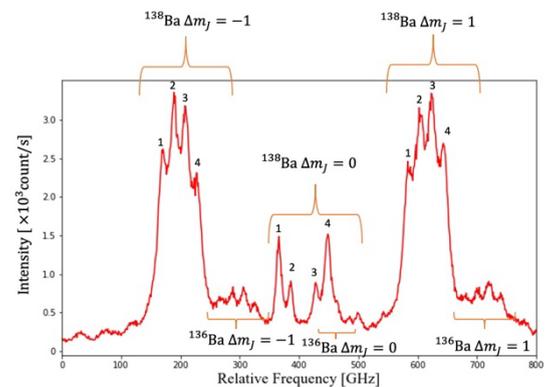
高分解能レーザー分光法を用いた Ba 原子の高励起状態のシュタルク・ゼーマン効果の測定

山口 大和 (量子エレクトロニクス教室)

シュタルク効果は 1913 年に Johannes Stark によって発見された物理効果で、1919 年にノーベル物理学賞を受賞した。ゼーマン効果は 1896 年に Pieter Zeeman によって発見され、1902 年にノーベル賞を受賞した現象である。アルカリ金属原子のシュタルク効果やゼーマン効果の測定は行われているが、最外殻電子が 2 つであるアルカリ土類金属原子ではなかなか進んでいない。最外殻電子が 2 つなので電子配置や電子準位が複雑になっているため、理論的にも実験的にも興味深い。これらの測定から得られる超微細構造、分極率、 g 因子は原子の波動関数に密接に関連し、理論計算の検証をすることができる。従って理論的な研究の発展にも寄与している。近年、パリティ非保存に関する測定や原子の永久電気双極子モーメント (EDM) の探索などにシュタルク効果やゼーマン効果を用いた実験が行われている。そのため高度な分極率や g 因子などの原子の基礎データが必要となっている。

最近、本研究室では Ba 原子に注目して系統的にシュタルク・ゼーマン効果の測定を行なっている。Ba 原子の高励起 $5d6p$ 配位における 3P_J , 3D_J 準位と 3F_2 , 3F_3 , 3F_4 準位については分極率の報告がある。しかし 3F_4 準位についてはデータの正確さに疑問が残る。またランダの g 因子は 3P_J , 3D_J 準位と 3F_2 , 3F_3 , 3F_4 準位について報告があるが $5d6p\ ^1D_2$ については報告がない。

本研究では高分解能原子線レーザー分光により Ba 原子の高励起状態のシュタルク及びゼーマン効果の測定を行った。得られたシュタルク効果の典型的なスペクトルを図 1 に示す。またゼーマン効果の典型的なスペクトルを図 2 に示す。Ba の $6s5d\ ^3D_3 - 5d6p\ ^3F_4$ 遷移では超微細構造とシュタルク効果のスペクトルを、 $6s5d\ ^1D_2 - 5d6p\ ^1D_2$ 遷移では超微細構造とゼーマン効果のスペクトルを観測した。本研究では外部共振器型波長可変半導体レーザーと原子線を用いて高分解能レーザー分光を行い Ba の高励起状態 $5d6p\ ^3F_4$ におけるシュタルク効果と高励起状態 $5d6p\ ^1D_2$ におけるゼーマン効果の研究を行った。シュタルク効果の測定では最大電場 70 kV/cm まで印加し ^{138}Ba と ^{136}Ba のシュタルク分岐とシュタルクシフトを観測した。波長の掃引や電場を変えて測定を行い、上準位 3F_4 のテンソル分極率を $-32.0(11)\text{ kHz}/(\text{kV}/\text{cm})^2$ 、 $6s5d\ ^3D_3 - 5d6p\ ^3F_4$ 遷移のスカラー分極率を $-82.6(13)\text{ kHz}/(\text{kV}/\text{cm})^2$ と決定した。またゼーマン効果の測定では最大磁場 164.7 G まで印加し、 ^{138}Ba のゼーマン分岐を観測した。磁場の大きさを 4 種類設定し測定を行い、下準位のランダの g_J 因子、 $g_J(6s5d\ ^1D_2)$ を $0.948(12)$ と、上準位のランダの g_J 因子、 $g_J(5d6p\ ^1D_2)$ を $0.864(15)$ と決定した。また得られた分極率とランダの g 因子について考察を行った。

図 1 $6s5d\ ^3D_3 - 5d6p\ ^3F_4$ 遷移のシュタルクスペクトル図 2 $6s5d\ ^1D_2 - 5d6p\ ^1D_2$ 遷移のゼーマンスペクトル

ガラスキャピラリーによるデュアルレーザーマイクロビームの生成

森 光正（量子エレクトロニクス教室）

近年、産業や医療の分野でマイクロメートルオーダーのビームの活用が広がっている。医療におけるマイクロビームの利点は照射された位置のピンポイントにのみダメージを与え、周囲の正常細胞の影響を低減できるという利点がある。私たちのグループではテーパ型ガラスキャピラリーを用いた細胞照射方法を提案している。テーパ型ガラスキャピラリーとは先細りになっているガラスの毛細管であり、生物などの分野で注射針やピペットとしてよく用いられている。

私たちのグループはこのキャピラリーにイオンやレーザーを入射させて出口径オーダー(数~数十 μm)のマイクロビームを生成している。すでに行われた研究にはイオンのマイクロビームや照準用の可視光のビームプロファイルやキャピラリーによる **density enhancement** と呼ばれる光密度の向上がある。しかしながら、キャピラリーの形状の対称性や実際に照射する際に照準用マイクロビームが照射用マイクロビームと同じ地点に当たるかどうかの検証は行われていない。したがって、本研究ではキャピラリー内で伝搬原理の異なるイオン・可視光の照射・照準用マルチ量子ビームの生成に向けて「照準用可視光と照射用紫外線のデュアルレーザーマイクロビームの生成と精度の評価」を目的として実験を行った。デュアルレーザービームの生成が可能になれば加速器を必要としないテーブルトップの細胞照射装置を作ること、照準用やレーザービーム単独照射ができる。

本実験では 375 nm の紫外線レーザーと 488 nm 可視光レーザーの 2 本のレーザーをハーフミラーによって同軸化して入射させた。ナイフエッジ法によって求められたビームプロファイルは図 1 である。このときのビームプロファイルの測定からビームの中心と半値全幅を求め、2 つのレーザーの平行度の必要精度は 0.67 mrad 以下であるということがわかった。それぞれの波長のマイクロビーム中心の距離を図 2 に示す。また、キャピラリーの円筒対称性についてもキャピラリーを軸にそって回転させ実験を行った。キャピラリーにゆがみがあった場合、伝搬原理の違うマルチ量子ビーム生成の際、出射されるマイクロビームの特性に悪影響を与える可能性があり、本研究ではヒーターを取り換えることによりキャピラリーのゆがみを最大で、およそ 25% 程度に削減することができた。

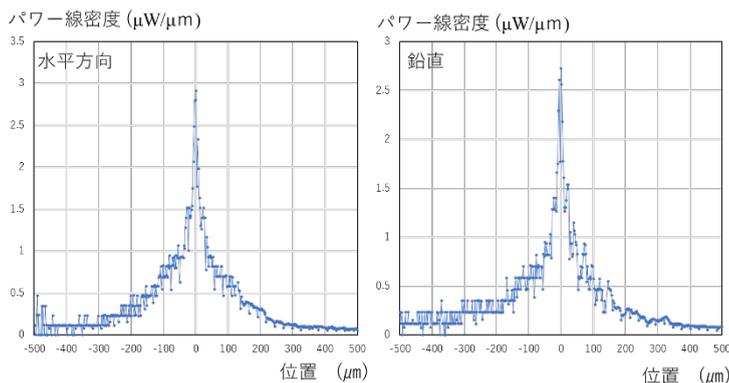


図 1 ナイフエッジ法によるビームプロファイル

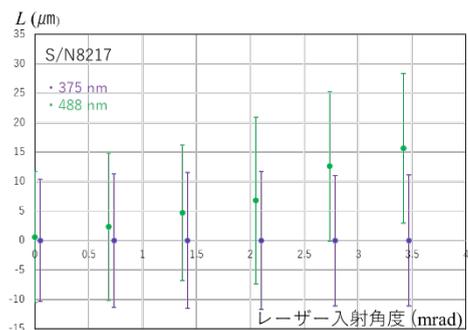


図 2 レーザーの入射角とピーク間の距離・FWHM の関係