

論文審査の結果の要旨

氏名 鈴木隆行

近年、超短パルスレーザー技術の進歩とともに、高強度レーザー場により分子の回転状態を人為的に制御することが可能となってきた。目的とする量子状態を実現するためには、光と物質系との相互作用の機構に基づき光パルスの強度や波形を最適化することが重要な課題となるが、フェムト秒時間領域で対象に即して光パルス波形を自在に制御することは容易ではない。また、光と物質系との相互作用の機構が明かではない場合もある。

本研究は、この問題を解決する新しい試みとして、分子配列度を遺伝的アルゴリズムにより光パルス波形へとフィードバックし、分子配列を最適化する手法を提案し、その開発、実験的検証を行ったものである。

本論文は 6 章からなる。第 1 章は序論で研究の背景と目的が述べられている。第 2 章では、フェムト秒光パルス波形整形の手法、遺伝的アルゴリズムによるパルス波形及び偏光の制御について記述されている。第 3 章は、分子イオン画像計測装置の構成、イオン画像をフィードバック制御に用いるための画像処理技術について述べられている。第 4 章は、直線偏光励起、円偏光励起それぞれの場合について非共鳴双極子相互作用に基づく分子配列の理論が定式化されている。さらに、窒素分子を対象として非断熱分子配列実験を行い、理論予測との比較がなされている。第 5 章では、本研究により開発されたイオン画像フィードバックシステムによる分子配列の最適制御実験について記述されている。併せて、計算機シミュレーションによる実験結果との比較、考察が行われている。第 6 章では、総括と展望が簡潔に述べられている。以下、本研究の主要な結果とその意義について述べる。

1) 光パルス波形整形技術の開発

フェムト秒領域の光パルスの波形制御には、光学的フーリエ変換を用いて周波数領域で光パルスを変調することにより、任意の振幅や位相に整形する技術が一般的に用いられている。学位申請者はまず、このパルス波形整形技術に遺伝的アルゴリズムを導入し、自己探索型の波形最適化技術を構築した。さらに、従来型の強度変調パルスに加えて、光の偏光に注目し単一パルス内で時間変化する楕円率を持つパルスを生成することに成功している。超高速時間領域での偏光状態の制御は、本研究で主題とする非断熱分子配列への応用に加えて、高次高調波発生やアト秒領域での原子、分子ダイナミクスの研究等への広い応用が期待される重要な技術である。

2) 分子イオン画像をフィードバック制御に用いるための技術開発

本研究では、分子の配列度を反映する 2 次元イオン画像データから、分子配列度を示すパラメータを抽出し、最適制御実験のフィードバック信号として利用する。数多くの解候

補の中から最適解を探索する遺伝的アルゴリズムを用いたフィードバックシステムによって、画像処理速度の高速化は本質的に重要である。学位申請者は、得られたイオン画像からイオン由来の信号のみを抽出することでデータ容量を大幅に圧縮することに成功した。さらに、空間的に広がりを持つ輝点に対して慣性モーメントを定義することにより、隣接して飛来するイオンを分離して計数することを発案し、画像取得効率を向上した。この結果、画像取得、処理速度の高速化(>10Hz)を達成し、フィードバックシステムを実現した。

3) 窒素分子の非断熱配列実験への応用

上記によって開発したイオン画像フィードバックシステムを用いて、窒素分子の非断熱配列実験を行い、分子配列の最適制御の実証を行った。さらに最適化の結果得られた光パルスが、ダブルパルスになっていることが示された。この結果を考察するために、計算機シミュレーションを行い、ダブルパルスが分子配列に与える効果を調べた。その結果、回転振動半周期後の非断熱配列では、単一パルスが最も高い分子配列を与えるものの、ダブルパルスの間隔が 100fs 以下の場合には単一パルスと比べても比較的高い分子配列度を与えることが示された。一方、励起直後あるいは回転周期 1 周期後の非断熱分子配列は、125fs の間隔を持つダブルパルス、あるいは 200fs のパルス幅を持つ単一パルスが最大の分子配列度を与えることが示された。この結果から、1) 最適化の結果得られたダブルパルスは局所解の一つである、2) 有限の幅を持つ光パルスが最大の分子配列を与える、との解釈が示された。

以上のように、本研究は分子配列を最適化する新しい手法を提供するとともに、光との相互作用ハミルトニアンが未知の物質系に対して、最適化により得られた光パルス波形の解析から逆にハミルトニアンの特性を調べる手段を提供すると考えられ、高強度レーザー場の物理学、原子分子物理学、さらには分子化学の発展に寄与するものと認められる。

本論文の中核をなす研究内容は指導教員らとの共同研究として学術雑誌に公表ないし公表予定であるが、実験系の構築、制御アルゴリズムの開発、分子配列実験に至る一連の研究は学位申請者が自ら主体となって行ったものであり、学位申請者の寄与は十分であると判断する。

したがって、博士(理学)の学位授与に値するものと認める。