

論文提出者氏名：宮城晴英

本論文は3章からなり、第1章は強光子場（強レーザー場）中の原子分子のイオン化に関する研究の背景および当該研究分野の概説、第2章はモデル系に対する理論的解析、第3章は第2章で提案された理論を水素原子へ適用した研究成果が示されている。

本論文で報告されている宮城氏の研究は、強光子場（強レーザー場）中の原子のイオン化機構の理解を一段階深める理論を提出するもので、当該研究分野に重要な貢献をなすものである。

強レーザー場中の原子分子は、直観的な予想が不可能な新奇な現象を数多く示すことが理論的に予言されている。特に高振動数領域のレーザーの場合、レーザー強度が或る閾値を越えると、レーザー強度の増加とともに、直観に反して、イオン化速度が減少するイオン化抑制現象が起こることが知られている。イオン化抑制領域では、強レーザー場により電子波動関数に変形して通常とは異なる性質を持った原子分子の準安定な状態が生成し得るため、新しい物理化学の舞台となることが期待されている。

強レーザー場中の原子分子のイオン化に関する従来の理論研究では、高振動数領域の現象には高振動数近似が、低振動数領域では低振動数の場合にのみ有効な近似方法が用いられ、それぞれの領域の異なるイオン化機構が別々に議論されてきた。中間的な振動数領域で当然予想されるイオン化機構の推移は明らかにされていなかった。

宮城氏は、1電子原子を模したモデル系に対して、近似を用いない精密な数値計算を行い、低振動数領域のトンネルイオン化と高振動数領域のイオン化抑制現象の間の推移の様子を明らかにした。

理論計算は次のような設定および方法で行われている。1個の電子がガウス関数型のポテンシャル井戸に束縛された仮想的原子に円偏光強レーザー場を印可したモデル系を考える。レーザー場が定常であると考え、Floquet理論を用いて、原子のイオン化を強レーザー場中の電子散乱の問題として定式化する。この枠組みでは、原子の束縛電子状態は、レーザーの印可によりイオン化連続状態に埋め込まれた共鳴状態となる。共鳴状態のエネルギー位置と崩壊速度定数を、2通りの方法、すなわち、(1)複素エネルギーに対して散乱状態波動関数をNumerov法にもとづいて算出し、Siegert境界条件が満たされる複素エネルギー値として共鳴エネルギーと崩壊速度を求める方法、および(2)複素スケール法によりSiegert状態の複素エネルギー固有値として求める方法を併用して数値的に得た。

上記の理論計算にもとづき、宮城氏は、レーザー振動数を固定してレーザー強度を増加させたときの共鳴極の複素エネルギー面上での運動軌跡を観察した。低振動数領域ではトンネルイオン化に特徴的なポテンδροモータ・エネルギーシフトが見出され、一方、高振動数領域ではイオン化抑制現象が見られた。すなわち、二つの極限的な場合について、従来の研究と一致する結果が得られた。そして、本研究によって初めて、中間的な振動数領域での共鳴極軌跡が報告された。その結果、低振動数領域で見られる滑らかなポテンδροモータ・エネルギーシフトが、振動数が増加して1光子イオン化閾値に下から近づくと、エネルギーのFloquet閾値で分断され、滑らかなエネルギーシフトが阻害され、そして、あるレーザー強度を限界としてシフトが止まることが見出された。これは、トンネルイオン化描像の破綻を示している。一方、振動数が1光

子イオン化を越えると殆ど直ちに高振動数領域特有のイオン化抑制現象が見られることがわかった。この研究結果により、従来極限的な場合でのみ議論されていたトンネルイオン化およびイオン化抑制現象の適用範囲が初めて明確になった。

また、宮城氏は、イオン化機構を理論的に説明するために、イオン化を強レーザー場中の電子散乱の問題と捉えたときの、電子散乱を支配するポテンシャル関数に着目し、高振動および低振動数両領域それぞれのイオン化機構を統一的に説明した。すなわち、電子波動関数の表示を加速度ゲージに選択して、電子の動径運動を支配するポテンシャル曲線を表示すると、低振動数領域ではポテンシャル障壁が生じ、イオン化過程はこのトンネル透過現象で説明できることを示した。一方、高振動数領域では、ポテンシャル曲線間の交差とそこでの非断熱遷移により、イオン化抑制現象を明快に説明できることを示した。すなわち、一つの理論的枠組で低振動数領域のトンネルイオン化および高振動数領域特有のイオン化抑制現象を統一的に説明することに成功した。また、このような統一的説明は1次元モデルでは不可能で、少なくとも2次元のモデルが必要であることを指摘した。

更に宮城氏は、モデル系で得られた上記の理論的枠組の有効性を実在系において検証するために、強レーザー場中の水素原子のイオン化について研究を行った。強レーザー場中の水素原子に関しては、過去に多くの研究が報告されているが、低振動数あるいは高振動数領域それぞれの特定の現象の知識が断片的に蓄積されていたに過ぎない。宮城氏は系統的で精密な計算により、水素原子についても低振動数および高振動数領域の間のイオン化機構の推移の様子を明らかにした。また、モデル系の研究により確立した電子散乱の動径ポテンシャル曲線によるイオン化機構の説明体系が、水素原子の場合にもそのまま当てはまることを示した。

また、水素原子の研究では、レーザーの偏光の違いも焦点的となっている。高振動数領域におけるイオン化抑制現象では、偏光の違いはほとんど反映されず、円偏光でも直線偏光でも互いに極めて良く似た共鳴極軌跡が得られた。一方、低振動数領域におけるトンネルイオン化描像の適用可能範囲は、偏光の型に大きく依存することが見いだされた。すなわち、直線偏光では、ポテンデロモーティブ・エネルギーシフトの滑らかさは、振動数の増加とともに急速に失われ、また、エネルギーシフトが見られる強度区間も短い。円偏光の場合の方が、1光子イオン化閾値下近傍まで、広い振動数区間かつ広い強度区間で典型的なポテンデロモーティブ・エネルギーシフトが見られる。宮城氏はこの違いを、円偏光と直線偏光レーザー場の時空間の対称性の違いにもとづいて説明した。

イオン化は強レーザー場中の原子分子が示す最も主要な過程である。また、たとえイオン化以外の現象に着目した研究を行う場合でも、イオン化過程が最も主要な競合過程となる。イオン化機構の理解を一段階進めた宮城氏の研究は、強レーザー場中の原子分子物理に対して重要な貢献をなすものである。

また、本論文の第1章で述べられている当該研究分野の概説は、簡潔にして鋭く要点を衝いたものであり、宮城氏の論理的思考力の卓越性および当該研究分野に対する理解の深さを示している。

なお、本論文中の第2章および第3章の一部は、染田清彦氏との共同研究であるが、論文の提出者が主体となって研究を行ったもので、論文提出者の寄与が充分であると判断する。

よって本論文は博士（学術）の学位請求論文として合格と認められる。