

## 論文内容の要旨

論文題目 Measurement and Control of Femtosecond Electron Pulse  
フェムト秒電子パルス計測・制御

氏名 渡部 貴宏

加速器の分野では従来から極短電子パルス生成・計測実験が行われてきた。これは、電子パルスを利用して高速な過渡現象を解析する際に、電子パルスの時間幅が過渡現象解析の時間分解能を決める大きな要因の1つであるためである。当施設（東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設・電子ライナック）でも20年前より極短電子パルスの発生に従事し、現在パルス幅は200フェムト秒領域にまで達した。更にプラズマカソードと呼ばれる新たな生成手法による10フェムト秒オーダーのパルス発生実験も進行している。これらの極短電子パルスは通常はストリークカメラにより計測がなされてきたが、現在発生できる最短パルス幅（240フェムト秒）はその時間分解能（200フェムト秒）に近づき、プラズマカソードによって発生された10フェムト秒パルスはストリークカメラの時間分解能を大きく越えることになる。以上のような背景から、ストリークカメラに替わる高時間分解能な計測法の確立は必須である。よって、本研究ではフェムト秒電子パルスの計測法の構築および信頼性評価を行った。まずはフェムト秒ストリークカメラに用いられる結像系の改善を通して当カメラによるフェムト秒パルスの正確な計測について考察した。次に、遠赤外マイケルソン干渉計およびポリクロメータを用い、コヒーレント放射の解析によるパルス波形の導出を行い、ストリークカメラとの比較を行った。更に、インコヒーレント放射の統計的な処理を通してパルス幅の解析手法について考察した。また、高速な過渡現象解析の時間分解能を決定するもう一つの大きな要因、つまり同期制御システムの構築も行った。極短電子パルスをフェムト秒レーザーと高精度に同期させ、その精度を評価した。

以下に本論文で得られた研究成果を示す。

#### (1) フェムト秒ストリークカメラの改善および特性評価

ストリークカメラの計測において、色収差および光量が計測の時間分解能に与える影響について詳細に検討した。ストリークカメラを用いて電子パルス幅を計測する場合、電子が発する放射の可視光成分（インコヒーレント成分）を計測することになる。当研究施設では以前より空気中および Xe ガス中で発せられるチェレンコフ光を用いてきたが、チェレンコフ光は可視光成分全てを含む広いスペクトルを持つ。従って、チェレンコフ光をレンズ光学系で転送・集光すると色収差が生じ、パルス幅の伸長に繋がる。今までは、パルス伸長の抑制はバンドパスフィルタにより行われてきた。本研究ではストリークカメラ内のレンズ結像系を反射結像系に置換し、更に発光点からストリークカメラまでの像転送もレンズ光学系から反射光学系に変更することで色収差の影響を消去した。その結果、バンドパスフィルタによる光量の極端な減少という問題は回避され、計測が容易になった。また、光量の影響についてはパルス幅が既知で安定しているレーザーを用いた。その結果、ストリークカメラにとって計測範囲内の（飽和していない）光量であっても、空間電荷効果の影響は存在することを確認した。

以上のような結果から、ストリークカメラの性能（時間分解能の公称値 200fs）を精度良く達成するための知見が得られた。

#### (2) 遠赤外マイケルソン干渉計による計測システムの構築および精度評価

ピコ秒以下の電子パルスを計測するために最適化されたマイケルソン干渉計を設計・製作し、これを用いてサブピコ秒およびピコ秒の電子パルスを計測した。本手法では、電子パルスがアルミ箔などの誘電体中を通過する際に発せられる遷移放射の遠赤外成分（コヒーレント成分）の自己相関からパルス幅を導出する。自己相関からスペクトルを解析し、これと1電子の放射するスペクトルとを比較することで、パルス幅が導出できる。

実験においては、650fs および 1.8ps の2種類のパルスを用い、ストリークカメラでも計測して両者の結果を比較した。その結果、20%以内の誤差で両者が一致する結果を得た。また、これらの一致が得られるためには電荷量計測、横方向パルス分布測定および光学アライメントが精度良く行われることが必須条件であることを指摘した。半値幅 650fs の電子パルスを用いて実験的にこれらの影響を調べた結果、電荷量が5%の誤差で計測されるとパルス幅の誤差 100fs を生み、電子パルスの横方向分布を考慮しない時も 100fs 長く計測されてしまうことを示した。光学アライメントの影響に関しては、放射体（アルミ箔）の角度を1度ずらただけで解析不能になる可能性も示唆した。

また、誘電体の近傍を通過する際に発せられる回折放射も計測に用いられ、遷移放射と同様、計測に利用可能であることを確認し、非破壊計測が可能であることを示した。

### (3) 10チャンネルポリクロメータによる計測および精度評価

10チャンネルポリクロメータ（東北大学・近藤泰洋氏製作）を用いてパルス幅の計測を行った。当装置ではコヒーレント放射のスペクトルを直接計測するため、パルス幅の導出がショット毎にできるという長所を持つ。一方、10チャンネルという情報量の少なさ、および遠赤外光を扱う困難さから、パルス幅の導出・性能評価は過去にほとんど例がなかった。

実験では、ストリークカメラおよびマイケルソン干渉計でも同時に計測を行った。その結果、3者が20%の誤差で一致する結果を取得し、シングルショット計測が可能であることを示した。ただし、上記(2)で指摘されたような誤差要因は依然注意が必要であり、やはり10チャンネルという情報量の少なさが検討課題であることも判明した。

### (4) フラクチュエーション法による計測

フラクチュエーション法を用いた計測について実験および数値解析を行い、その特徴について議論した。本手法は上記2手法と異なり、インコヒーレント放射に理論上含まれる統計的揺らぎ（ノイズ）を用いて計測を行う。揺らぎには時間領域の揺らぎ（パルス全体の光量の揺らぎ）と周波数領域の揺らぎ（スペクトルの揺らぎ）があり、それぞれからパルス幅を導出することができる。

35MeVライナックおよび18MeVライナックで発生されるパルスを用いて揺らぎの測定を行った。その結果、ストリークカメラでは1.5ps、1.0psと計測されたパルスは、フラクチュエーション法ではそれぞれ30ps、4.5psと解析された。この不一致は電子パルスの横方向分布の影響であると考えられる。つまり、横方向分布が有意に大きい場合、空間コヒーレンスの影響が無視できなくなり、揺らぎが抑制されてしまうことが予想され、この効果を2次元・3次元コードで確認した。計算では電子に横方向分布および角度分布を持たせ、これにより揺らぎの変化を観測した。その結果、予想通りに横方向分布・角度分布の増大に従って揺らぎが抑制された。したがって、本手法はエミッタンスの小さな加速器にとって有効であることが判明した。

### (5) 放射を用いた計測法に関する理論的考察

上記(1)~(4)で示された4手法について理論的にまとめた。4手法は、それぞれ使用する放射も異なり、計測原理も独立に発展してきた。しかし、放射を用いているという点で共通性がある。そこで、コヒーレント/インコヒーレントの両放射を含む理論を展開し、4手法を総括的に理解するための知見を与えた。具体的には、放射電場の1次相関に着目し、コヒーレント放射を用いた計測手法は自己1次相関関数、インコヒーレント放射を用いた

手法は2次相関関数であると解釈することで、理論体系が構築できることを示した。これにより、コヒーレント放射ではパルス幅と周波数の相対関係の1次相関、インコヒーレント放射ではパルス幅と周波数幅の相対関係の2次相関が重要であることが明確になった。

#### (6) フェムト秒電子・レーザー高精度同期システムの構築

フェムト秒電子・レーザーパルス高精度同期システムを構築し、その性能評価を通してシステム向上を図った。まず、初期同期システムを構築した。この時の時間ジッターは3.7ps (rms) であり、研究の結果、電子ライナックにおいてはクライストロン、レーザーにおいてはオシレータが支配的なジッター源であることが判明した。そこで、新たなクライストロンおよび受動モード同期オシレータを導入した。最終的には、330fs (rms、ただし長時間ドリフトを除く) という良好な結果を得ることができ、同時に同期制御における重要な知見を得ることができた。

以上の研究成果に示す通り、4手法の総合的な評価を通してフェムト秒電子パルス計測手法に関する重要な知見を得た。その結果、フェムト秒ストリークカメラの計測範囲内ではやはりストリークカメラが最も有用な装置であると結論づけた。しかしながら、ストリークカメラには明確な計測限界(200fs)があり、これを越えるような範囲では干渉計やポリクロメータが有望である。フラクチュエーション法もエミッタンスの小さい加速器においては有望であると考えられる。また、本論の冒頭で述べた通り、ストリークカメラの計測範囲内であっても代替的な計測手法の開発の要求は強く、その意味でも重要な知見を得ることができた。これらの手法を理論的に総括したことも得られた知見の一つである。

更に、極短パルスを同期制御するシステムの構築も行われ、現在このシステムは実際の応用実験に用いられている。