

称号及び氏名 博士（工学） 杉田 健人

学位授与の日付 2021年3月31日

論文名 「高エネルギーLCS ガンマ線誘起陽電子を用いたバルク物質の
非破壊陽電子消滅測定装置の開発」

論文審査委員 主査 梅澤 憲司

副査 川又 修一

副査 宮丸 広幸

副査 堀 史説

論文要旨

物質中の欠陥はその物質の様々な特性に影響することが知られている。特に構造材料などの大きなサイズの物質では、原子レベルでの欠陥挙動について直接的に評価することは極めて難しい上に、物質を切り出したりすることなく非破壊で内部の原子レベルでの欠陥を検出評価する技術はこれまでに例がない。本研究では、原子空孔などの原子レベルの状態評価が可能な陽電子消滅測定をセンチメートルサイズのものでも非破壊にて検出できるシステムの構築と装置の開発を行った。その方法として、電子と光子の衝突時に起こるレーザーコンプトン散乱（LCS）を利用したガンマビームを用いている。LCS を用いた陽電子の実験研究は大型加速器を使用した例があるが、本研究では GeV オーダーの放射光蓄積リング電子にレーザー光を衝突させて生成する数 10MeV にも及ぶガンマビームを利用した。このような高エネルギーのガンマ線を用いた陽電子消滅物性評価の実験は前例がなく、高エネルギーガンマ線を用いた本実験には次のような利点がある。ターゲットにガンマ線を照射するのみで MeV 級の高速陽電子が発生するため、荷電粒子加速装置を必要とせずコンパクトな装置になる。高速陽電子はそのエネルギーの高さから大気中での減衰がほとんどなく、真空などの特殊環境を必要としない。これらの利点を踏まえた上で、その特徴を活かした新しい陽電子測定技術と装置の開発を目的として装置の構築及び実証実験が実施されている。

本研究の主要な内容は次の通りである。陽電子の生成には 1.022 MeV 以上の光子、すなわち X 線領域の光が必要である。このような光を物質に入射すると、物質内の原子核近傍を通過する際

に光子エネルギーが電子と陽電子に変換され対生成が起こる。そのため、電子と陽電子の換算静止質量に対応するエネルギー以上のエネルギーを光子が有していた場合、対生成電子と陽電子にエネルギー保存される。この原理を利用することで陽電子を生成するシステムを構築している。ここで、MeV 級の陽電子を発生するために必要なエネルギーは数 10 MeV 以上の光子が必要である。本研究では、このような高エネルギー陽電子を発生させるために放射光での蓄積リング電子とレーザー光を使ったガンマビーム技術に着目している。兵庫県立大学の放射光施設 NewSUBARU では一般研究利用が可能な MeV 級光子である LCS ガンマビームラインが利用できるため、このビームラインを利用して実施し、陽電子実験用に LCS ガンマ線の設定調整も行っている。構築したシステムとしては、1)ガンマビームから対生成で発生する高速陽電子を電子と分離して直接試料に入射して陽電子消滅測定する装置、2)ガンマビームを試料に直接入射して試料内で対生成と対消滅を同時に起こして陽電子消滅測定を行う装置 (GiPS) である。1)の高速陽電子装置は、MeV 級エネルギー陽電子を発生させて加速せずに利用するシステムとしては世界初の装置である。また 2)の GiPS はこれまでも研究例はいくつかあるが、いずれも低エネルギー X 線での実験例しかなく、高エネルギーガンマ線を利用した例はない。特に高エネルギー(High Energy)での HE-GiPS は従来法に比べ陽電子の発生効率が高く、試料に対する透過能も高いためバルク材の非破壊検査への有用性が高い。これらの装置の構築と実証実験を行い、実際の金属などのバルク材料内部の欠陥や、密度由来の空隙の違いなどを評価することに成功した。

第 1 章では、陽電子消滅法の材料研究への適用と従来の陽電子線源について述べ、MeV 領域のエネルギーを持つ高速陽電子の利点と、簡便な仕組みで高速陽電子生成-消滅測定を行う本研究の目的を述べており、物質研究や産業利用を前提とした材料評価法としての本手法開発の必要性についても言及している。その方法として高エネルギーガンマ線を利用した高速陽電子装置と HE-GiPS 装置を用途によって使い分けて利用する装置開発の目的を述べている。

第 2 章は一般的な陽電子の説明と陽電子消滅法による物性評価の原理についての解説である。

第 3 章では、ガンマ線を用いた陽電子の発生原理について解説し、特に高エネルギーガンマ線を生成するための方法としてのレーザーコンプトン散乱の原理、その必要条件として実際の放射光施設の蓄積リング内の高エネルギー電子を利用した NewSUBARU での高エネルギーガンマ線の発生条件等を提示している。

第 4 章では構築した高速陽電子生成装置の詳細について解説し、この装置を用いた陽電子発生と対生成電子との分離の実証実験を行い、それらが計算機シミュレーションとよく一致することで 6-8 MeV の高速陽電子を利用したバルク材内部評価が十分可能であることを示した。

第 5 章では、第 4 章で開発した高速陽電子装置での非破壊でのバルク材内部の陽電子消滅実証実験として、鉄やシリコンなどの一般材料を基準試料として測定した結果を示し、その応用として近年実用が進んでいる 3 次元造形法で作成されたチタン合金内部の空隙の有無をホットプレス前後での極微小な密度変化に対応する違いの検出に成功した。さらにこの装置の更なる展開として、高速デジタルオシロスコープを用いた陽電子消滅陽電子寿命測定回路を組み込み、高速陽電子を用いた陽電子消滅測定の実証実験の結果を示した。本実験では、まだまだバックグラウンド放射線の遮蔽改善の必要性の問題点が挙げられたが、測定試料のシリコン内での陽電子消滅を示す成分が抽出され、パルス化していない高速陽電子での寿命スペクトル取得は初となる成果を

得ている。また本章では、高速陽電子の試料への侵入深さの同定を行うため2種類の板材を積層した試料を用いたドップラー拡がり実験とモンテカルロ法によるシミュレーションの比較を行い、8MeV陽電子では5mm程度の深さまで測定できていることを明らかにし、本装置での大気中測定でも数mm深さのその場測定が可能であることを実証した。

第6章ではHE-GiPS装置の概略と実際のドップラー拡がり測定実証実験の結果を示している。この実験では、厚みのあるバルク材として同じ組成合金での密度のわずかに異なる結晶質と非晶質内の原子間空隙に対応する違いを非破壊で評価することに成功している。さらにこの手法では深さに対する情報は得られないが、高速陽電子の測定に比べ数倍以上の高効率で陽電子消滅を計数することで測定時間の大幅な短縮が可能であること、センチメートル以上の厚さの試料でも測定可能であることを実験とシミュレーションにより示し、目的によって高速陽電子とHE-GiPSを使い分けることの実用性を示した。

第7章では第4章から6章までに述べた実験および計算結果をまとめ、本論文の結論と本研究の成果を総括している。

審査結果の要旨

本論文は、物質中の原子レベルでの欠陥評価法の一つである陽電子消滅法を用いてバルク物質内部を非破壊で直接観察するために、高エネルギーガンマビームを応用した従来とは異なる視点での新しい装置システム開発を目的とし、そのための陽電子生成効率の計算、軌道計算を基に新しい装置システムを開発した。作成した装置を用いて具体的にバルク材料内部の状態の違いを実際の侵入深さの詳細を計算との比較により評価し、通常の分析手法では検出困難な数ミリメートル以上の材料内部の電子状態を捉えられることを実証している。その具体的な成果は以下のようなものである。

- ① 陽電子消滅法は電子顕微鏡やX線を用いた構造解析法とは異なり、結晶格子から原子が抜けた空孔などのナノレベルでの空隙の有無、その周囲の電子状態を評価するユニークな手法であるが、放射性同位元素や大型加速器を必要とするため、一般の研究への寄与が難しく広く利用されていない。本研究ではX線利用が一般的な放射光施設での蓄積リング電子にレーザー光を入射するレーザーコンプトン散乱から発生する高エネルギーガンマ線の利用調整から関わりこれを対生成によって陽電子源とすることで、加速せずにMeV級の高速陽電子を直接生成分離して観測した上で、陽電子消滅測定に利用できるシステムを開発しその実効性を示した。
- ② さらに同じ高エネルギーガンマ線を直接被検体に入射させることにより、物質内で陽電子を発生消滅させる汎用的なガンマ線誘起陽電子生成消滅測定(GiPS)システムも合わせて構築した。数10MeVの高エネルギーのガンマビームによるGiPS装置は世界でも例がなく、ガンマ線の高い透過能を利用した数センチメートル以上の物体の非破壊陽電子測定を可能にし、実際に金属材料であるアモルファスや結晶材、実用材などの測定を実施してその有用性を実証した。

以上の成果は、放射光施設でのビームラインを利用した陽電子消滅測定という斬新な発想によるもので、一般利用可能な高エネルギーガンマ線を用いることで、非破壊でバルク物質内部を直接測定するシステムとしての有効性を示した装置を開発している。その装置の構成も極めてシンプルであるた

め多くの研究に発展が期待される。特に物質科学や材料分野に対して、従来評価の困難であった物質内部の非破壊その場測定が可能になったことで、様々な研究への応用の可能性や産業利用にも大いに貢献するものである。また、これらの研究成果によって申請者が今後自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。