

X線極限解析装置の研究開発

I 試験研究の全体計画

1. 研究の趣旨

X線解析は、有機・無機物質の構造解析や反応過程の研究などの広範な研究分野全般において、基本的な研究手段として利用が広がっているが、近年大型のシンクロトロン放射光源が順次稼働し測定に应用されるにつれて、X線解析の応用範囲が爆発的に広がり、測定は精密化の一途を辿っている。しかし単純な強度増強だけでは解決できない問題も多く存在する。極端な場合には、強いX線場によって研究対象である物質自体が大きな変化を受けてしまうこともある。したがって、測定に必要な入射X線を選択する高機能型X線ビーム光学系、目的のシグナルを効率良く捕らえるような優れたエネルギー分解能を持つX線検出系が強く望まれる。同時にシンクロトロン放射光源での実験時間は限られているため、その能力を最大限引き出すためには、実験装置側のビーム光学系、検出系の革新及び総合的な最適化が急務である。

本研究はこの様な研究上の要請をみとすために、第I期において、①高機能型X線ビーム光学系、②エネルギー分解能に優れたX線検出系を実用化するための要素技術の研究を実行する。またこれらの素子を最大限に活用するために、③X線解析の対象及び実験手法の調査研究を行い、第II期において実用化する各素子の緒元を割り出す。

第II期においては、第I期の成果を利用して、実際の実験に即した緒元の達成を行い、X線極限解析装置の試作を行う。

2. 研究概要

本開発研究ではX線極限解析装置の開発とその解析手法の確立のために、まず高機能X線光学素子と高感度X線検出素子の開発から着手し、まずその性能を追求することに全力をそそぐ。

- ① 高機能X線光学素子は、回折格子が作り込まれた非球面ミラーで、X線の集光能力を最大限に高めるものである。
- ② 高感度X線検出器は、超伝導体を利用して達成される優れたエネルギー分解能によって、目的のX線信号を極めて高感度で捕らえるものである。

その後、達成された素子性能を詳細に検討した上で、実用レベルに達したと判断された順に、最適な具体的応用装置を設計し、実現する。目的とする研究対象にわずかに含まれる特定の原子周辺の電気的な構造を吸収端微細構造を用いて解明する場合、酵素などに含まれる金属イオン周

辺で起こる化学反応が代表的な例となる。具体的には以下の研究を行う。

1. X線ホログラム光学素子に関する研究

高機能X線光学素子（X線ホログラム光学素子）は、高次元の複雑形状と高い表面品位を持つ非球面ミラーと、その複雑な曲率を持った表面上に形成された回折格子を併せ持つ新しい光学素子である。その実現には、高強度、高耐久性、低熱変形特性を持つ新素材として、主にSiCセラミックスとCVDによる超緻密な表面コーティングを伴った機能性材料の利用が必要となる。こうした新素材の機能・特性を活かす極限超精密加工プロセスの開発により、極限効率による集光能力と分光能力を持った次世代の光学素子を開発する。多くの実用性を考慮し、最大1m長の非球面ミラーを目標に、その超精密研削加工と超平滑研摩加工、そして微細な回折格子を切削により創成する加工プロセスを実現する。これらの極限加工プロセスを一貫して展開できる6自由度を持った超精密非球面加工機の開発を行い、これをメインフレームとして各加工ステーションを統合したシステム開発を行う。これにより、具体的にX線極限分析用の高機能X線光学素子の開発を行い、その性能評価を行う。

(1) ホログラム光学素子加工技術に関する研究（理化学研究所）

X線ホログラム光学素子の開発のために、最も中心的な役割を占める超精密な非球面研削加工と超微細な回折格子の切削加工技術の確立を行う。光学素子として利用する硬質素材に対して大きく湾曲した非球面加工を行う場合、かなりの除去量を要することが全体の加工速度を律速する結果となる。そこで、強靱なメタルボンダダイヤモンド砥石により素材に非球面形状を付与する高能率研削技術を確立し、次いでその形状誤差を小さくしながら超精密に仕上げの鏡面研削技術を確立する。これらの加工プロセスは、最大1mの非球面ミラーに対応させ、具体的な形状精度としては300mmクラスのミラーに対して0.1 μ m（ミクロン）以下を、表面粗さとして平均2nm（ナノメートル）以下を達成する。このための基本原理として、ELID（エリッド）法による超精密研削プロセスを応用する。複雑な非球面形状を常に正確に創成し、またその表面に微細な回折格子を機械的加工により創成するための極限微細工具の整形方法として、放電によるツールイング技術を応用し、大口径非球面ホログラム光学素子の加工プロセスの総合的な確立を行う。

本開発によるホログラム光学素子加工プロセスを、全体

の加工プロセスの中心に位置付けるための技術的検証，ならびに本プロセスを実現するための加工装置（メインフレーム）の設計を理化学研究所において行い，加工装置の製作を東芝機械㈱において行う。

(2) 非球面の超平滑加工技術に関する研究（埼玉大学工学部）

非球面の鏡面研削加工が施されたX線ミラーに対し，原子オーダーの表面平滑性を得るための加工技術を確立する。具体的には，(1)の超精密研削プロセスにより非球面創成されたミラーの形状に倣って，特殊な形状を有する工具を用いて一定圧力により研摩加工を行い，平均2オングストローム以下の平滑性を達成するための技術的検証を行う。本加工プロセスを実現するための研摩ステーションのコンセプト設計を行うとともに，理化学研究所で設計するメインフレームとドッキングするための仕様の検討を行い装置開発を進める。

(3) 微細表面形状の加工・計測技術に関する研究（独立行政法人産業技術総合研究所）

回折格子付き非球面ミラーについては，その回折格子の微細形状加工および計測・評価手段の開発とそのシステムの製作を行い，(1)の加工システムを中心とするメインフレーム上に搭載する。測定により得られた加工結果の評価データから必要な情報を抽出し，加工機メインフレームへフィードバックすることで，世界最高レベルのミラー形状精度の達成を狙う。

(4) 統合加工システムの開発に関する研究（東芝機械㈱）

上記(1)の加工プロセスを実現する加工装置のメインフレームを中心に，X線ホログラム光学素子の開発のための加工装置を順次製作し，その基本性能・機能の確認と基本動作特性と安定性の把握・調整を進める。上記(2)と(3)の各加工プロセスを実現するための各ユニット/ステーションの統合による装置全体の基本的調整，ならびに加工システム全

体としての基本的な形態・機能を完成させる。加工システムの調整および運転は理化学研究所において，埼玉大学，機械技術研究所の協力の下で行う。

2. 超伝導接合素子に関する研究

高感度X線検出器は超伝導体の物性を電気的に検出する超伝導接合素子とし，単一エネルギー量子の検出と超高精度のエネルギー計測を同時に実現する。超伝導接合素子を設計，作製，評価するシステムを構築し，実用レベルの検出素子の作製プロセスの開発を行う。

(1) 素子の製作及び評価に関する研究（理化学研究所）

超伝導接合素子作製設備，素子評価設備，素子設計設備の整備と運転を行い，素子性能の再現性の高い素子作製技術を確立し，実用レベルのX線検出素子の製作を行う。

(2) 素子の高性能化及び配列に関する研究（独立行政法人産業技術総合研究所）

多数の超伝導接合素子の配列化のための技術開発を行う。また，並行して素子の単接合の基本性能を向上させ，最終的には高性能の接合配列を実現する技術を確立する。

(3) 素子構造材料最適化に関する研究（埼玉大学工学部）

X線検出器としての効率を向上させるために接合を形成する素材や素子構造を検討し，最適なものを選びだすための基礎的な研究を行う。

(4) 信号処理専用回路系に関する研究（理学電機㈱）

多数の接合配列からの出力を効率良く処理するための専用回路系の設計製作を行う。特に大規模な2次元データを処理する能力を持つ信号処理系統の開発を行う。

3. X線極限解析装置の応用に関する総合的研究（理化学研究所）

1., 2.の素子開発研究と並行して，本研究によって実現された高性能素子が新たに開拓する領域を検討した上で，X線極限解析装置の概念設計，及び実際の装置設計及び装置製作作業を行う。

3. 年次計画

研究項目	9年度	10年度	11年度	12年度	13年度
1. X線ホログラム光学素子に関する研究					
(1) ホログラム光学素子加工技術に関する研究	加工技術の開発・構築			メインフレームへの搭載及び試験	素子製作・評価
(2) 非球面の超平滑加工技術に関する研究	非球面平滑化技術の検討			メインフレームへの搭載及び試験	最終評価及び取りまとめ
(3) 微細表面形状の加工・計測技術に関する研究	微細表面形状の加工及び測定技術の開発			メインフレームへの搭載及び試験	最終評価及び取りまとめ
(4) 統合加工システムの開発に関する研究	ベースマシンの製作	加工装置(メインフレーム)の製作	メインフレーム付加工装置の製作		最終評価及び取りまとめ
2. 超伝導接合素子に関する研究					
(1) 素子の製作及び評価に関する研究	専用プロセスライン建設			検出システムの製作	取りまとめ
(2) 素子の高性能化及び配列に関する研究	評価装置建設				
(3) 素子構造材料最適化に関する研究	素子製作技術の研究				
(4) 信号処理専用回路系に関する研究	接合高性能化			接合配列の高性能化	取りまとめ
(1) 素子の高性能化及び配列に関する研究	接合配列化				
(2) 素子構造材料最適化に関する研究	素子構造最適化			素子の高度化	取りまとめ
(3) 素子構造材料最適化に関する研究	素子材質最適化				
(4) 信号処理専用回路系に関する研究	データ処理系基礎研究及び回路設計試作			専用回路の製作及び調整	取りまとめ
(1) 素子の製作及び評価に関する研究	データ処理用回路製作及び調整				
3. X線極限解析装置の応用に関する総合的研究	X線極限解析装置			X線極限解析装置設計・試作	取りまとめ
4. 研究運営	概念設計及び調査研究				
所要経費(合計)	330百万円	330百万円	336百万円	320百万円	233百万円

II 平成13年度における実施体制

研究項目	担当機関	研究担当者
1. X線ホログラム光学素子に関する研究		
(1) ホログラム光学素子加工技術に関する研究	理化学研究所	大森 整
(2) 非球面の超平滑加工技術に関する研究	埼玉大学工学部	河西 敏雄
(3) 微細表面形状の加工・計測技術に関する研究	独立行政法人産業技術総合研究所	服部 光郎
(4) 統合加工システムの開発に関する研究	東芝機械㈱	田中 克敏
2. 超伝導接合素子に関する研究		
(1) 素子の製作及び評価に関する研究	理化学研究所	清水 裕彦
(2) 素子の高性能化及び配列に関する研究	独立行政法人産業技術総合研究所	赤穂 博司
(3) 素子構造材料最適化に関する研究	埼玉大学工学部	高田 進
(4) 信号処理専用回路系に関する研究	理学電機㈱	木野 幸治
3. X線極限解析装置の応用に関する総合的研究	理化学研究所	清水 裕彦
4. 研究運営	理化学研究所	大森 整

Ⅲ 運営委員会

委 員	所 属
○大 森 整	理化学研究所 素形材工学研究室副主任研究員
赤 穂 博 司	独立行政法人産業技術総合研究所 電子デバイス部主任研究官
浅 間 一	理化学研究所 研究基盤技術部技術開発促進室長, 副主任研究員
河 西 敏 雄	埼玉大学 工学部機械工学科教授
木 野 幸 治	理学電機(株) X線研究所副所長
桜 井 仁	理学電機(株) X線研究所
清 水 裕 彦	理化学研究所 情報基盤研究部イメージ情報技術開発室長, 副主任研究員
高 田 進	埼玉大学 工学部電気電子システム工学科教授
田 中 克 敏	東芝機械(株) 工作機械事業本部主席技監
中 川 威 雄	理化学研究所
服 部 光 郎	独立行政法人産業技術総合研究所 生産システム部複合加工研究室長

(注：○は運営委員長)