



平成 21 年度委託業務成果報告書

平成 21 年度科学技術試験研究委託事業

軟 X 線の高速偏光制御による機能性材料の探究と創製

平成 22 年 5 月 28 日

大学共同利用機関法人

高エネルギー加速器研究機構

本報告書は、文部科学省の科学技術試験研究委託事業による委託業務として、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構が実施した平成21年度「軟X線の高速偏光制御による機能性材料の探究と創製」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

本委託業務は、タンデム配置の可変偏光アンジュレータとキッカー電磁石を組み合わせることで、10 Hz 程度の軟X線の高速偏光スイッチング技術を開発し、ロックイン法による円二色性・線二色性シグナル検出精度の飛躍的な向上、および波長分散型の偏光依存軟X線吸収分光法と光電子顕微鏡を組み合わせたりリアルタイム位置分解分光を実現することを目的とする。さらに、新たな指針に基づく新規材料の創成を目指して、スピニエレクトロニクスの基礎研究から実用までをカバーする強相関電子系、希薄磁性半導体、磁性薄膜・多層膜の磁性を解明するとともに、表面動的過程における種々のサイトでの化学種の量と構造をリアルタイム追跡することを目的とする。

このため、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構、国立大学法人東京大学、独立行政法人産業技術総合研究所、および学校法人慶応義塾で共同して業務を行う。

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構では、高速偏光スイッチング技術の開発と、それを用いた微小な円二色性・線二色性シグナル検出技術の開発、およびリアルタイム位置分解分光装置の設計・製作を行う。

2. 平成21年度の実施内容

2.1 実施計画

①可変偏光アンジュレータの開発

本業務の最終的な目標である高速偏光スイッチングを実現するために必要な、可変偏光アンジュレータの製作を、昨年度に引き続いて行う。また、既存の可変偏光アンジュレータ(高速スイッチングはできない)を用いて、円偏光および垂直水平直線偏光を安定に供給するためのノウハウを蓄積するとともに、偏光を利用した測定に供する。

②電子軌道制御技術の開発

本業務の最終的な目標である高速偏光スイッチングを実現するために必要な、電子軌道の高速制御技術を開発するために、キッカー電磁石で電子軌道を変化させることによって、蓄積リング内の電子ビーム軌道に生じる影響を最小限に抑える方法を検討する。また、既存のアンジュレータを用いて、電子軌道を変化させたときの1台のアンジュレータからの光強度の変化を検証し、高速偏光スイッチングに向けたノウハウを蓄積する。

③測定技術の開発

偏光を利用した各種測定装置の開発を行うとともに、参画機関と共同でそれらを用いた利用研究を行う。磁気円二色性および共鳴磁気散乱の測定技術に関しては、主に国立大学法人東京大学が行うスピニエレクトロニクス材料の研究に供するとともに、測定結果をもとに必要に応じて測定装置に改良を施す。波長分散型のX線吸収測定技術に関しては、学校法人慶応義塾大学が行う表面における動的過程のリアルタイム追跡に供するとともに、測定結果をもとに測定装置に必要な改良を施す。

④プロジェクトの総合的推進

プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、ビームタイムの配分に関

する打ち合わせや技術検討会の開催等，参画各機関の連携・調整にあたる。特に，プロジェクト全体の進捗状況を確認しつつ計画の合理化を検討し，必要に応じて調査或いは外部有識者を招聘して意見を聞くなど，プロジェクトの推進に資する。プロジェクトで得られた成果については，国内外において積極的に公表し，最先端の知見を得ることで，今後の展開に資する。

2.2 実施内容

① 可変偏光アンジュレータの開発

[概要] 本業務の最終的な目標である高速偏光スイッチングを実現するために必要な、可変偏光アンジュレータの開発を、昨年度に引き続いて行い、偏光制御を行うための位相制御機構を製作した。また、既存の可変偏光アンジュレータ(高速スイッチングはできない)を用いて、円偏光および直線偏光を安定に供給するためのノウハウを蓄積するとともに、偏光を利用した測定に供した。

(1) 可変偏光アンジュレータの製作

本業務においては、放射光科学研究施設の BL-16 において、2 台の APPLE-II 型可変偏光アンジュレータを直列に配置し、それぞれのアンジュレータで発生される異なる偏光をもった軟 X 線を、交互にビームラインに導くことによって高速偏光制御を実現する予定である(詳細は②に示す)。2 台のアンジュレータのうち上流側の 1 台はすでに設置されているので、本業務においては昨年度に引き続き、これと全く同等のアンジュレータの製作を行った。これらのアンジュレータの基本的な仕様は以下のとおりである。

周期長： 56 mm

周期数： 44

最小ギャップ： 21 mm

最大ギャップ： 150 mm

最大磁場(Kmax)： 3.12(水平直線偏光), 1.98(垂直直線偏光), 2.37(円偏光)

位相調整機構： 4つの磁石列それぞれについて±14 mm

本年度は、アンジュレータの本体のうち、偏光制御に関わる部分(位相制御機構)の製作を行った。昨年度製作した、架台およびギャップ制御機構と組み合わせることで、アンジュレータ本体が完成し(写真 1)、高エネルギー加速器研究機構において納品、検収を行った。

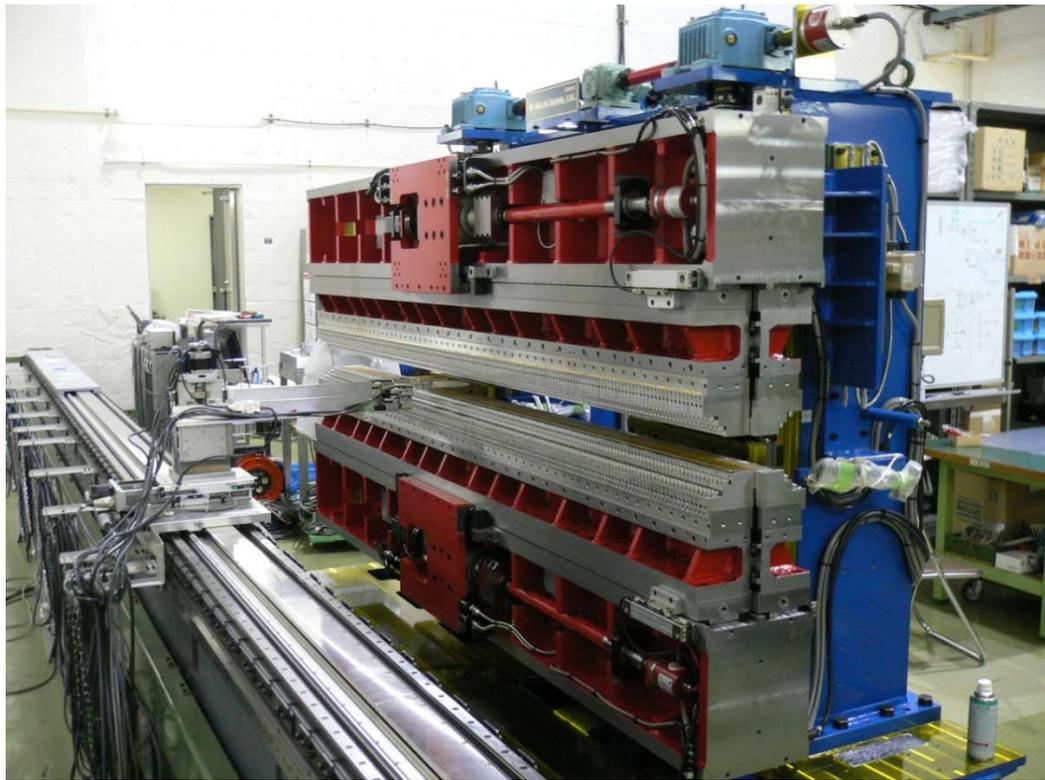


写真1: アンジュレータ本体(架台, ギャップ制御機構, および位相制御機構)

また, 納品されたアンジュレータに対して, 磁場調整を行った(一例として図 1 に水平偏光モードにおける電子軌道のギャップ依存性を示す)。この調整の結果, 本業務で製作したアンジュレータを用いて, すでに設置されているものと同等の性能を有することが確認された。

Comparison of the electron orbit vs. the gap(H&V);U#16-2@Planar mode

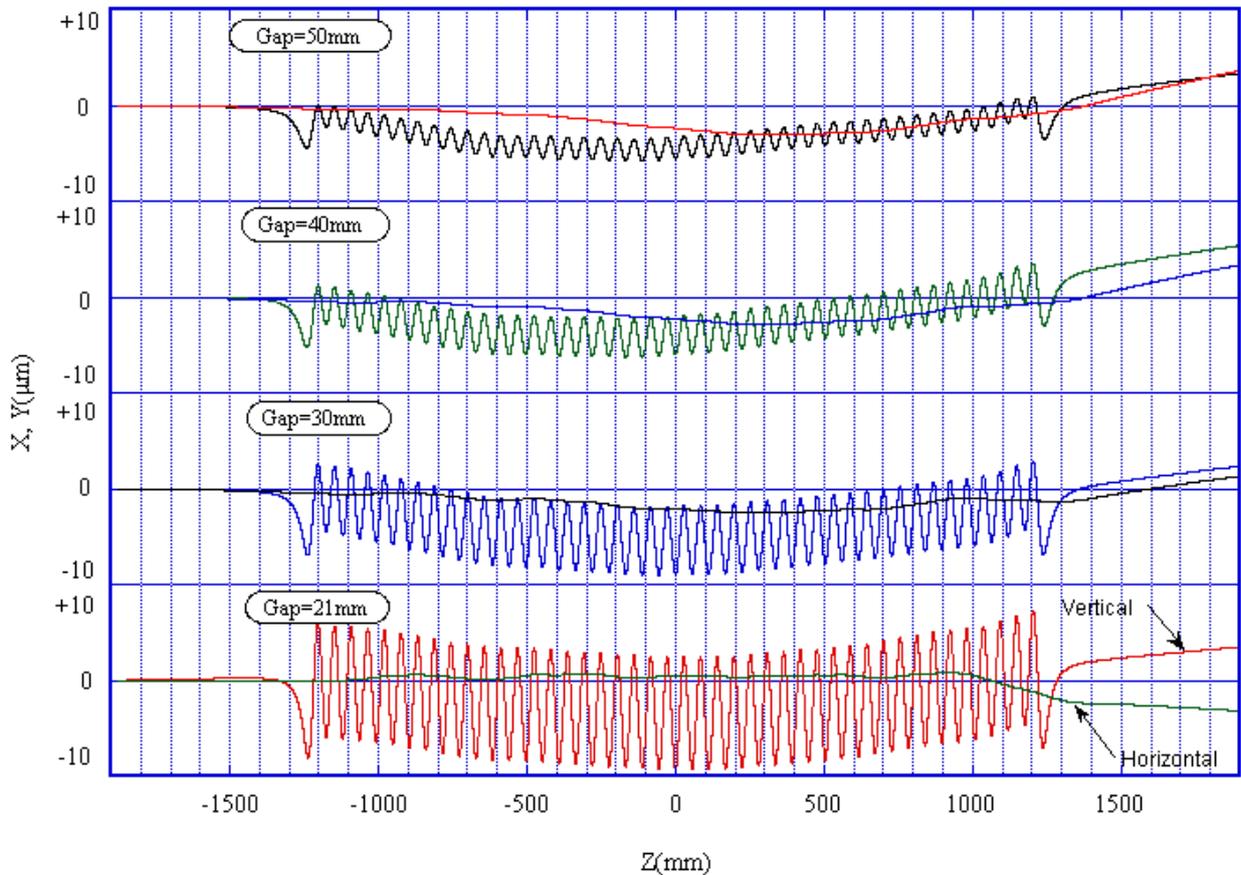


図 1: 磁場調整の結果得られた、水平偏光モードにおける電子軌道のギャップ依存性

(2) 偏光制御技術の開発

高速偏光スイッチングを実現するにはまず、それぞれのアンジュレータからの偏光を自由に制御できることが必須である。そこで昨年度に引き続き、既存の可変偏光アンジュレータを用いて、左右円偏光および水平垂直直線偏光を安定に供給し、かつそれらを自由に切り換えるための技術開発を行った。特に今年度は、1000 eV 以上において、80%以上の円偏光度が得られる楕円偏光モードの追加と、X 線磁気線二色性の測定に極めて有効な、斜め 45 度の直線偏光モードの実現に向けたデータ取得を行った。

BL-16 のアンジュレータから得られる偏光とそのエネルギー範囲の計算値を図 2 に示す。円偏光モード(図 2 左、赤線)においては、297 eV から 1000 eV 程度の範囲で、ほぼ 100% の円偏光度が得られる。一方、楕円偏光モードにおいては、1 次光、3 次光、5 次光を用いることで、図 2 左の紫色で示したように、218 eV から 2500 eV 程度までの楕円偏光が得られ、その円偏光度は緑色で示したようになる。また、水平垂直直線偏光モードでは、図 2 右に示すようになる。

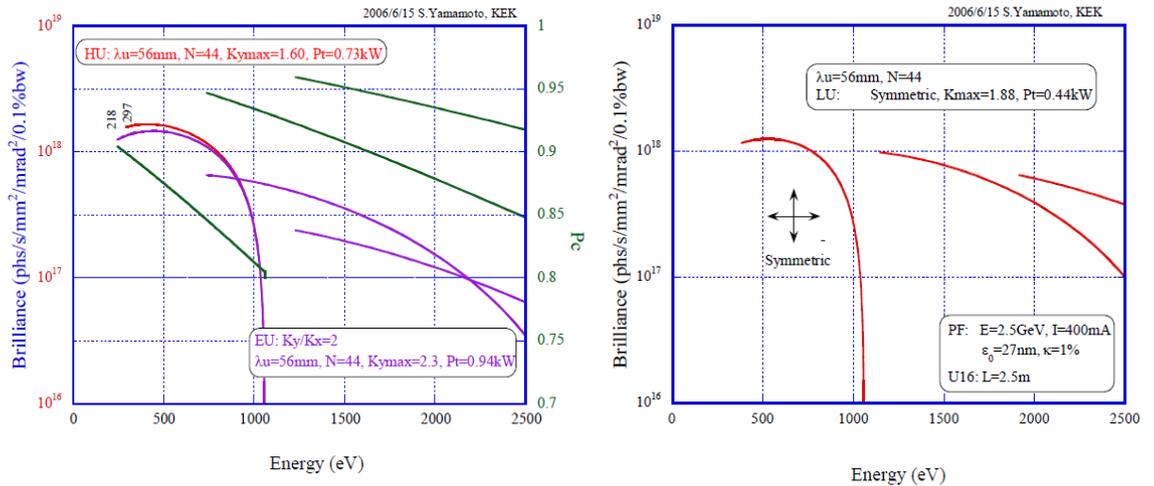


図2: アンジュレータから得られる偏光とそのエネルギー範囲の計算値
 左: 円偏光(赤)および楕円偏光(紫)における輝度と楕円偏光の偏光度(緑)
 右: 直線偏光における輝度

APPLE-II 型アンジュレータにおいては通常、得られる X 線の偏光およびエネルギーを制御するためには、ギャップと位相の両方を制御する必要がある。すなわち、ギャップ駆動に加えて 4 つの磁石列すべてを動かす必要があり、エネルギーを変えるだけで 5 軸の動作が必要になってしまう。さらに、多くのユーザーが同時に実験を行っている放射光科学研究施設においては、そのようなエネルギー、あるいは偏光の変更を行っている間にも電子ビーム軌道の変動は許されない。そのためには偏光の変更の途中も含めたすべての状態に対して補正データを準備する必要があるが、すべての偏光とエネルギーに対してこのような補正データを準備することは容易ではない。そこで我々は、最小ギャップにおいて偏光に応じた位相にセットした状態から、上下の磁石列をそれぞれ組みにしてスライドさせることで、結果的にギャップと位相を調整した場合と同等の磁場が得られることに着目した。このモード(ρ モードと呼ぶ)を用いれば、ある偏光に固定した状態でエネルギーを変えるには上下の磁石列をスライドさせるだけでよく、補正データの取得も圧倒的に短時間でできる。この ρ モードを用いることによって、今年度末までに円偏光、および水平垂直直線偏光モードの利用が、それぞれのモードに対するエネルギー範囲全体にわたって可能になった。

また、この ρ モードを用いることで、エネルギーを固定したままで、直線偏光の偏光面を連続的に回転させることも可能である。これによって斜め 45 度の直線偏光を作り出すことができるが、この場合、右斜め 45 度と左斜め 45 度の直線偏光は全く同等になるため、非常にシグナルが小さい X 線磁気線二色性の測定において極めて有用である。本年度は、この斜め 45 度直線偏光の実現に向けた補正データの測定も行った。

② 電子軌道制御技術の開発

[概要] 本業務の最終的な目標である高速偏光スイッチングを実現するために必要な、電子軌道の高速制御技術を開発するために、キッカー電磁石で電子軌道を変化させることによって、蓄積リング内の電子ビーム軌道に生じる影響を最小限に抑える方法を検討した。その結果、補正電磁石を用いることで、10 Hzにおけるビームの変動を水平30 μm 、垂直5 μm 以下に抑えることに成功した。

(1) システムの概要

偏光スイッチングシステムの概要と、電磁石配置を図3に示す。偏光切り替えシステムは、2台のアンジュレータと、5台のバンプ電磁石から構成される。バンプシステムの上流と下流には、バンプの漏れを補正するためのステアリング電磁石が2台ずつ、計4台並んでいる。

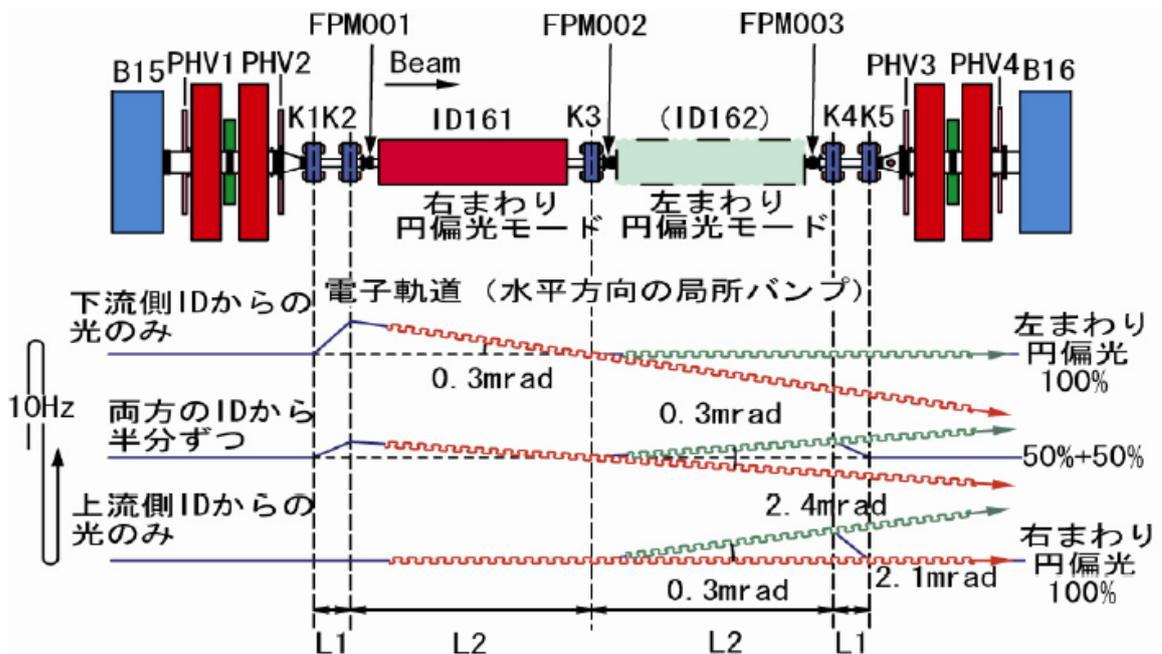


図3: 偏光スイッチングシステムの概略図

このシステムでは、2台のアンジュレータを同一直線状に設置し、電子軌道に交互に角度バンプを作ることにより、2台のアンジュレータからの光を交互にビームラインに届ける。光を遮るためには電子軌道を0.3 mrad傾ける必要があり、幾何学的な配置から電磁石に必要とされる最大蹴り角は2.4 mradとなる。加えて10 Hz以上のスイッチング周波数を可能とするため、電源の容量は5 kw ($\pm 100\text{A}$, $\pm 50\text{V}$)とし、0.5 mmの珪素鋼板を積層して製作してある。電磁石及び電源の主要な性能を表1に示す。偏光のスイッチングは交流的に行われることになっている。電磁石電源は川崎重工製のVMEボード (VMIVME-7750) を用いて電源のON、OFFや電圧、電流モニターを行っており。電流波形の制御にはAgilent製の4chDACモジュール (L4451A) を使用している。

ビームエネルギー	E [GeV]	3
最大蹴り角	θ [mrad]	2.4
最大磁場	B [T]	0.16
磁極垂直ギャップ	h [mm]	21
磁極水平幅	w [mm]	110
鉄芯長	l [mm]	150
コイル巻数	N [turns]	32
インダクタンス(計算値)	L [H]	1.0×10^{-3}
必要最大電流(計算値)	I [A]	83.5
抵抗	R [W]	0.1
周波数	f [Hz]	10
必要最大電圧(計算値)	V [V]	13.7
硅素鋼板厚	t [mm]	0.5

表:1電磁石特性

(2) バンプ軌道のスイッチング

バンプ電磁石、及び、アンジュレータをインストール後、マシンスタディを行った。マシンスタディの目的は、10 Hz以上でバンプをスイッチングするとともに、その際のバンプの漏れを他のビームラインの実験に影響しない範囲に抑えることである。その目安は、ビームサイズの1/10程度の大きさであり、PFリングでは垂直方向に $\pm 15 \mu\text{m}$ 、水平方向に $\pm 5 \mu\text{m}$ である。バンプの調整実験を経て、バンプのスイッチングが成功しているのをバンプの内側にあるBPMを用いて確認した。結果を図4に示す。ビームの位置が0.9 mm、正弦的に変化し、FPM001とFPM003の位相が反対になっていることからバンプのスイッチングに成功していることがわかる。

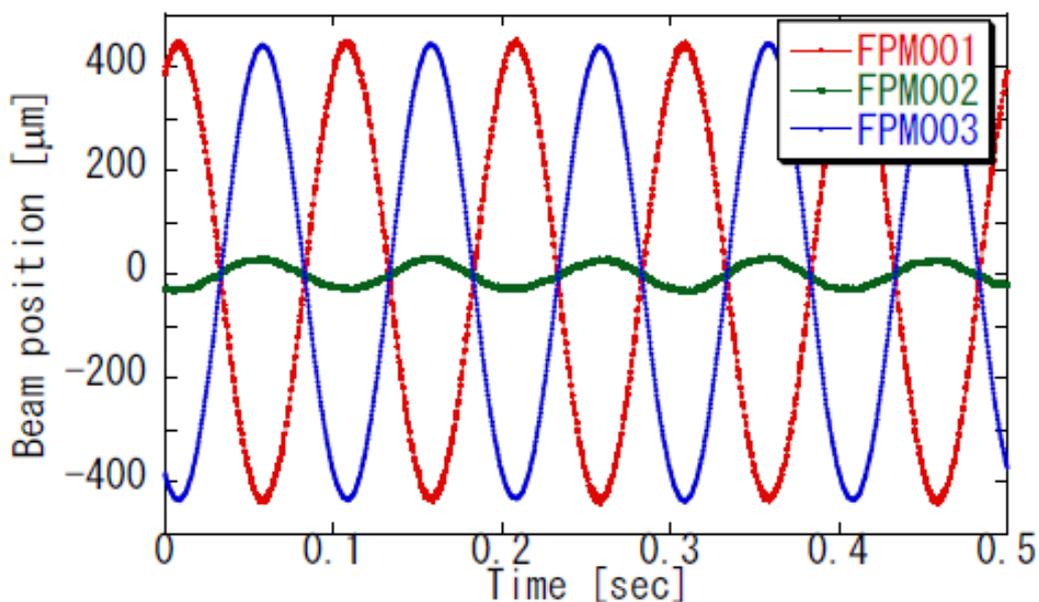


図4: 高速ビーム位置モニター(FPM001-003)を用いて観測した電子ビームの軌道

(3) 低速スイッチング中のバンプの漏れ

次にバンプスイッチングの最中のバンプの外側でのビーム位置を測定しバンプの漏れについて評価した。始めに0.1 Hzでスイッチングしている時のリング一周にわたるビームの振動を測定した。図5にその結果を示す。アンジュレータのギャップを閉じると、Skew4極成分により垂直振動が増大する。またバンプ電磁石の傾きによる振動も存在する。垂直方向にはPHV2, PHV3をバンプ電磁石と同期して励磁してやることで補正を試みた。ステアリング電磁石の蹴り角を調整することで、RMSで2 μm 程度に振動を抑えることができた。

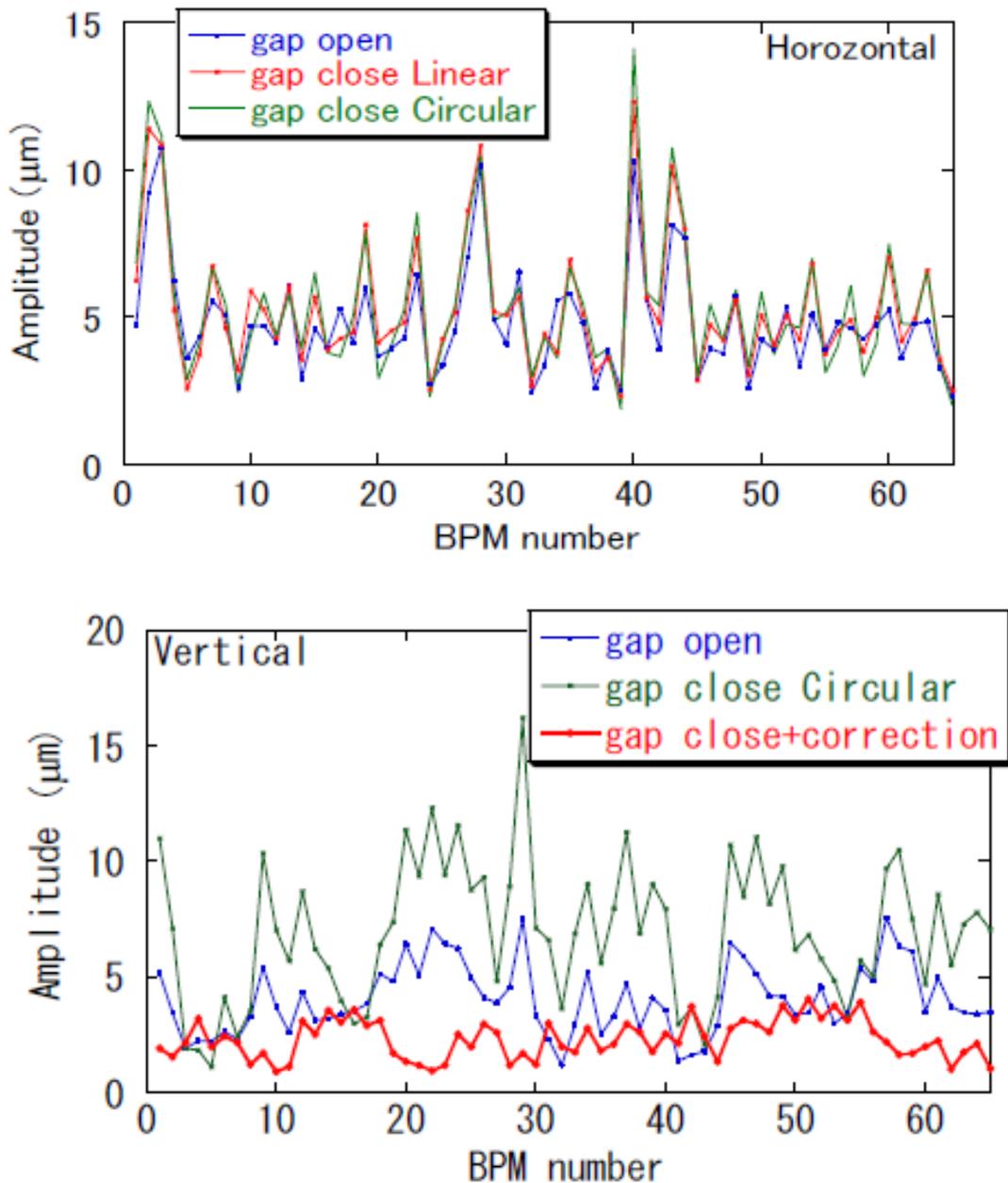


図5: BL-16でのバンプスイッチング中のリング全周におけるビーム位置の変動
上: BL-16をギャップ全開(青), 直線偏光(赤), 円偏光(緑)としたときの水平ビーム位置
下: ギャップ全開(青), 円偏光(緑), 円偏光+軌道補正(赤)に対する垂直ビーム位置

(4) 高速スイッチング中のバンプの漏れ

次に10 Hz以上でスイッチングを行い、PFリングのセル26から、セル4の間の5か所でビーム位置を測定した。図6に水平および垂直方向のビームの振動の振幅を示す。周波数の上昇とともにバンプの漏れが増加していることが分かる。これは電磁石の個体差や渦電流によるものだと考えている。

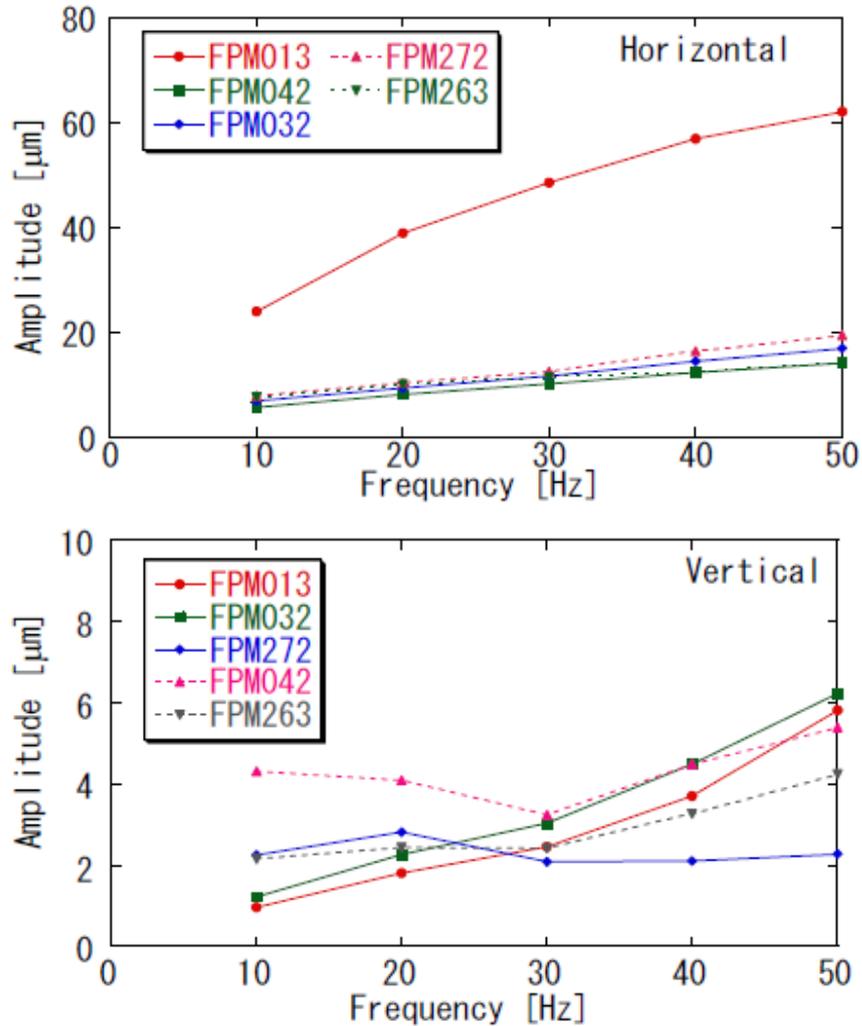


図6: リング内に設置した5台の高速ビーム位置モニターで観測した水平(上)および垂直(下)方向のビーム変動のスイッチング周波数依存性

水平方向のバンプの漏れにより、バンプの外側のビームがスイッチングと同期して振動しており、また、バンプの高さ最大からずれた位相で、バンプの漏れが最大となっているようだったので、PHV2, 3をスイッチング周波数と同じ周波数で励磁し、バンプの外側でのビームの振動が最小となる位相や蹴り角をサーベイした。周波数は50 Hzで行った。図7にステアリング電磁石の位相を変化させた時の、FPM013におけるビーム振動の振幅を示す。これはビームの振動を高速フーリエ変換し、50 Hz成分の絶対値をプロットしたものである。ステアリングの蹴り角に対しても同様のサーベイを行った。その結果PHV2 (上流バンプ) では300度の初期位相で、PHV3 (下流バンプ) では280度の初期位相で漏れが最小となった。

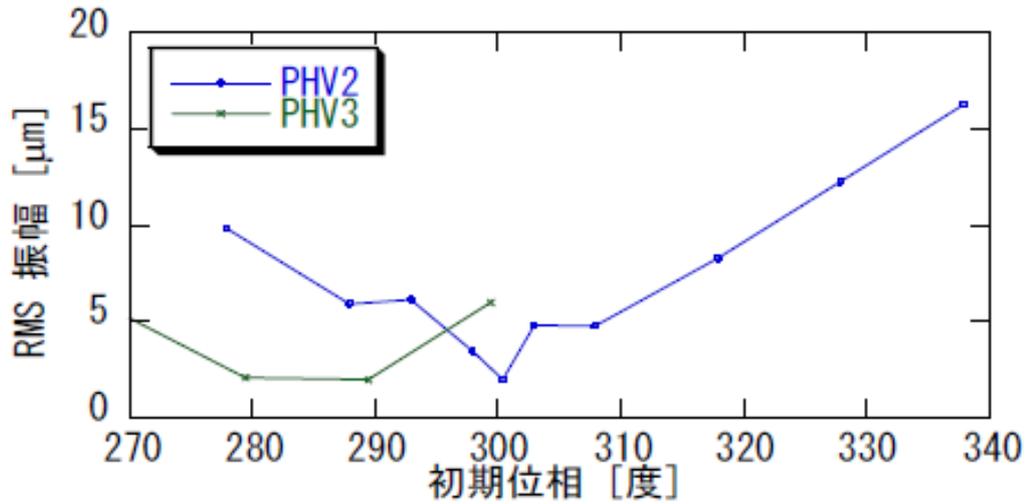


図7: ステアリング電磁石 (PHV2およびPHV3)の位相を変化させた時の、FPM13におけるビーム振動の振幅

その時のビームの様子を図8に示す。FPM13 の位置で、ビームの振動を21 μm に、FPM122 の位置で、17 μm に抑えることができた。この値は目標の $\pm 15 \mu\text{m}$ の範囲である。ただし、ステアリング電磁石を両側1台ずつしか用いていないのでバンプの漏れを完全に補正することはできていない。またそれ以外にもスイッチング周波数の2倍の成分が見えてきているようなので、今後、4台のステアリング電磁石を用いることによって、高調波も含めて制御していく予定である。

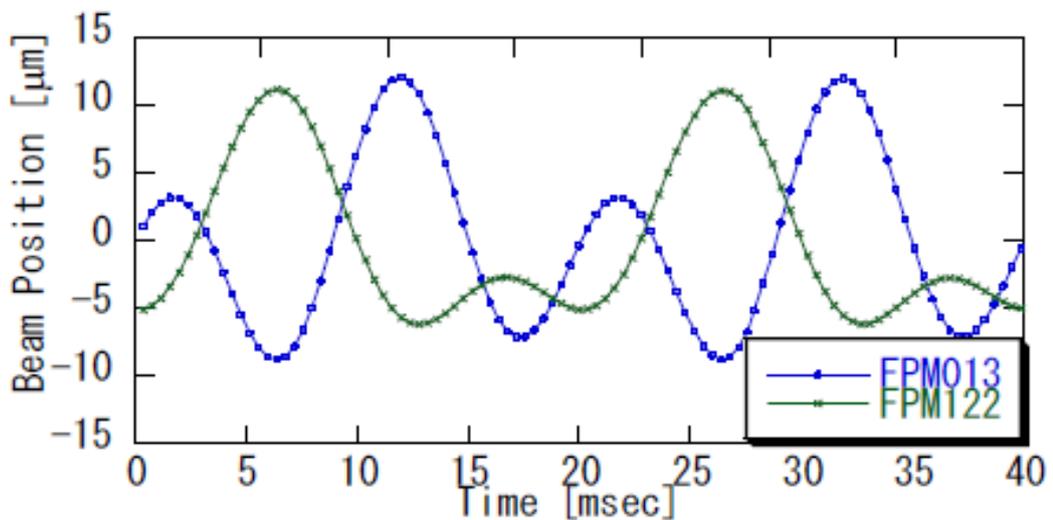


図8: ステアリング電磁石 (PHV2 および PHV3)の位相を、それぞれ最適値に設定した時の、FPM13 および FPM122 におけるビーム振動

③ 測定技術の開発

[概要] 偏光を利用した各種測定装置(軟X線磁気円二色性測定装置, 深さ分解磁気円二色性測定装置, 軟X線共鳴磁気散乱測定装置, および波長分散型X線吸収分光装置)の開発を行うとともに, 参画機関と共同でそれらを用いた利用研究を行った。磁気円二色性および共鳴磁気散乱の測定技術に関しては, 主に国立大学法人東京大学が行うスピントロニクス材料の研究に供するとともに, 実験の経験をもとにサンプルホルダーおよび検出器に改良を施した。波長分散型のX線吸収測定技術に関しては, 学校法人慶應義塾大学が行う表面における動的過程のリアルタイム追跡に供するとともに, 測定結果をもとにデータ取得系に改良を施した。

(1) 実験装置の配置

BL-16のビームライン全体図を図9に示す(下段は拡大図)。このビームラインは2つのブランチを有しており, 平面ミラーMpによって切り替えることができる。それぞれのブランチには複数の実験装置が配置でき, それらのうち本業務に直接関連するのはF1, F2, F3, Fmである。F1には共鳴磁気散乱装置(立ち上げ中)および波長分散型X線吸収分光装置(稼働中), F2には配置・角度依存磁気円二色性装置(稼働中), F3には深さ分解磁気円二色性装置(稼働中), そしてFmでは3次元顕微磁気円二色性装置(立ち上げ中)が設置されている。

ブランチラインの切り替えは制御コンピュータより誰でも簡単に行うことができ, 2, 3分しか要しないので, これらの実験装置の立ち上げおよび利用実験を並行して行うことで, 実験の効率を高めている。以下, それぞれの装置について本年度の成果を報告する。

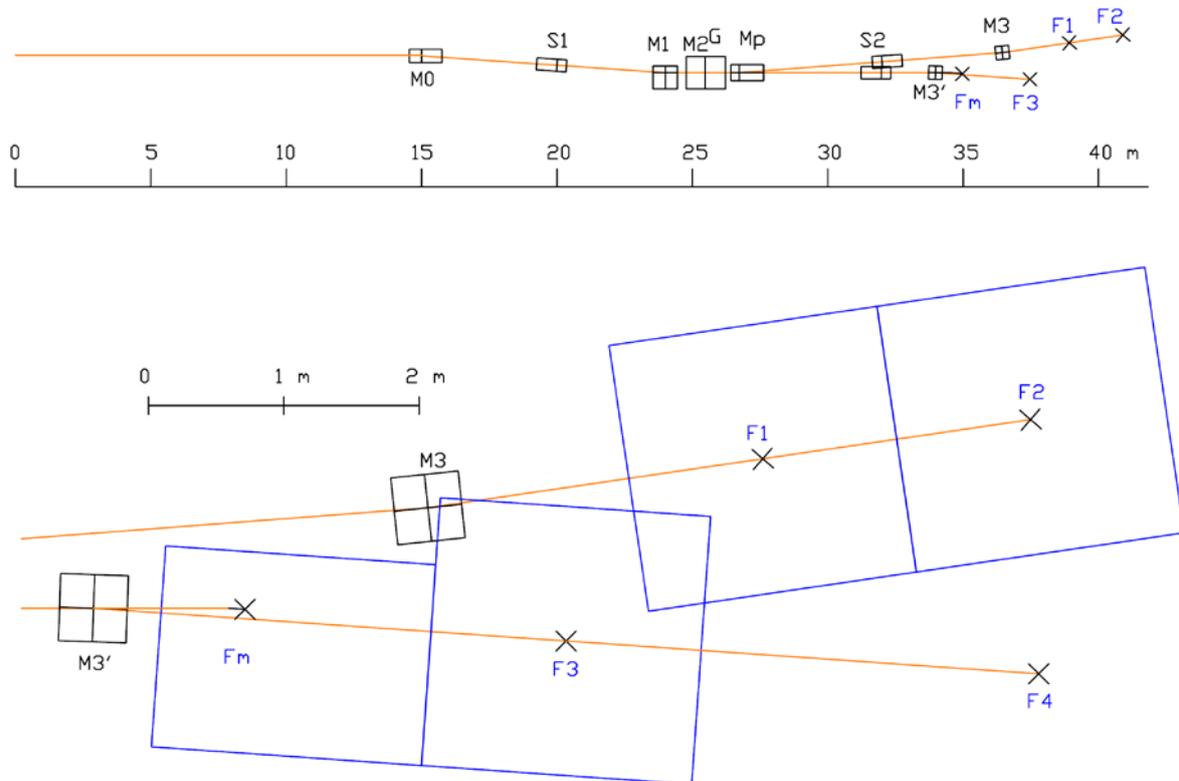


図9: BL-16の全体図(上)および実験装置付近の拡大図(下)

(2) 配置・角度依存磁気円二色性装置

本装置は高磁場・低温下で X 線磁気円二色性 (XMCD) を測定することによって、磁性体のスピンおよび軌道磁気モーメントを、元素選択的かつ定量的に決定することができるものである。さらに本装置の最大の特色として、図 10 左のように X 線の入射方向と磁場が平行な Longitudinal 配置とそれらが直交する Transverse 配置の違い(配置依存)および試料の回転による入射角の違い(角度依存)を測定できることである。

本年度は昨年度に引き続き、装置を F2 ポートに常設した状態で、軟 X 線円偏光を用いた実験を行った。右下に装置をビームラインに接続した状態の写真を示す。特に本年度は、装置の改良として以下の 2 点を行った。

- (a) 試料ホルダーをねじ止め式とし、より確実に試料の冷却が行えるようにした。
- (b) 従来の電子収量法に加えて蛍光収量法の測定を行えるようにした。これによって、より表面鈍感な測定が可能になり、表面の影響の少ないデータが得られるようになった。

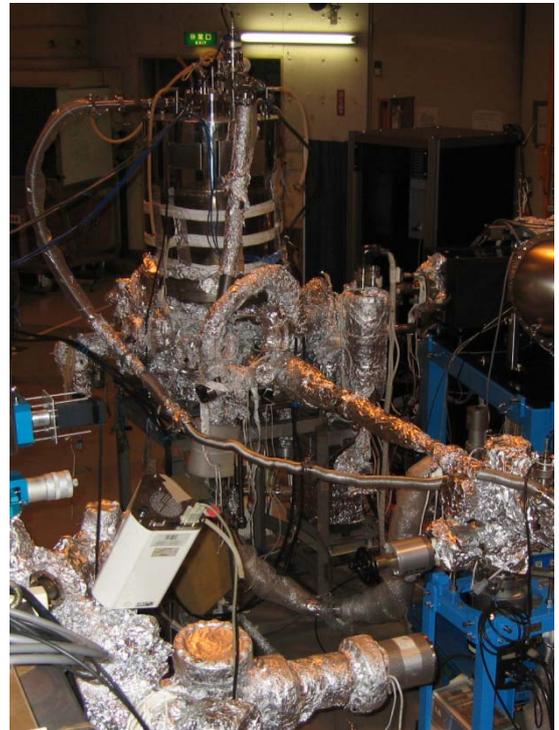
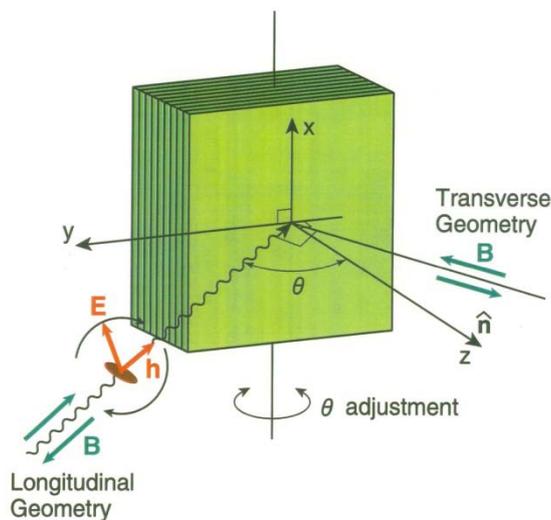


図 10: 配置・角度依存 XMCD 測定の様式図(左)および装置の写真(右)

本装置を用いて測定した XMCD スペクトルの一例を次に示す。測定はすべて、軟 X 線のビームと磁場の方向が平行な、Longitudinal 配置で行った。印加磁場の大きさは ± 3 T、試料の温度は室温 (300 K) である。図 11(a) は様々な厚さの試料に対して測定した Mn の吸収スペクトルであるが、試料が薄い場合(例えば 1 ML)には明らかに形状が異なっており、界面におけるマンガン酸化物の存在を強く示唆している。図 11(b) (c) は磁気円二色性(左右円偏光の差をとったもの)であるが、薄い試料では強度が大幅に減少しており、ここでも界面におけるマンガン酸化物の存在が強く示唆される。

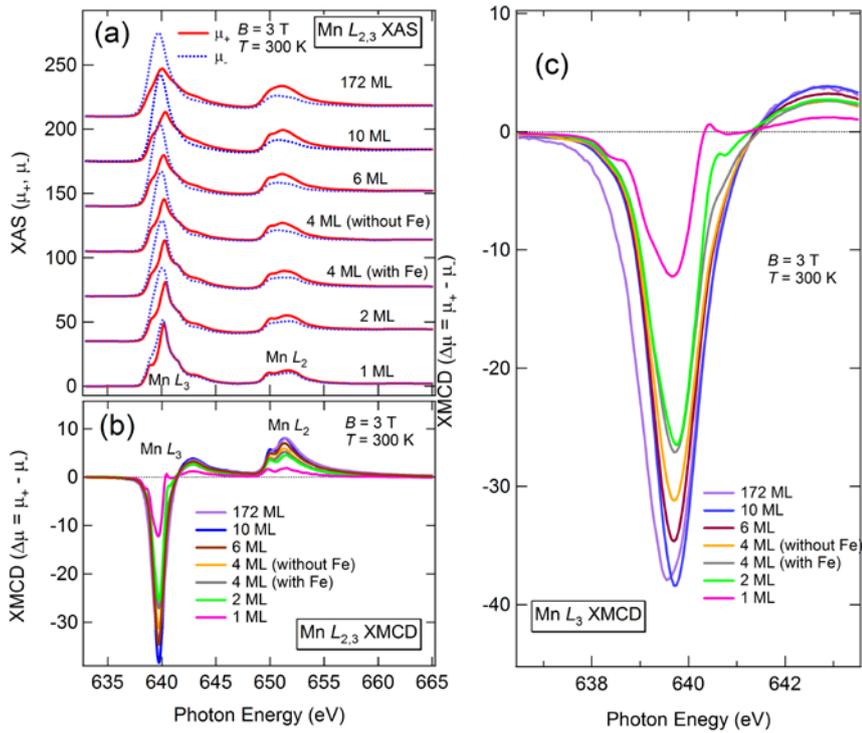


図 11: 様々な厚さの試料に対して測定した Mn の吸収スペクトル (a) および XMCD 差スペクトル (b, c)

次に、同じ試料について測定した Co のスペクトルを図 12 に示す。この場合には Mn とは異なり試料の厚さによってそれほど大きな違いは見られない。つまり、この試料は界面において Mn のみが選択的に酸化されていることがわかる。

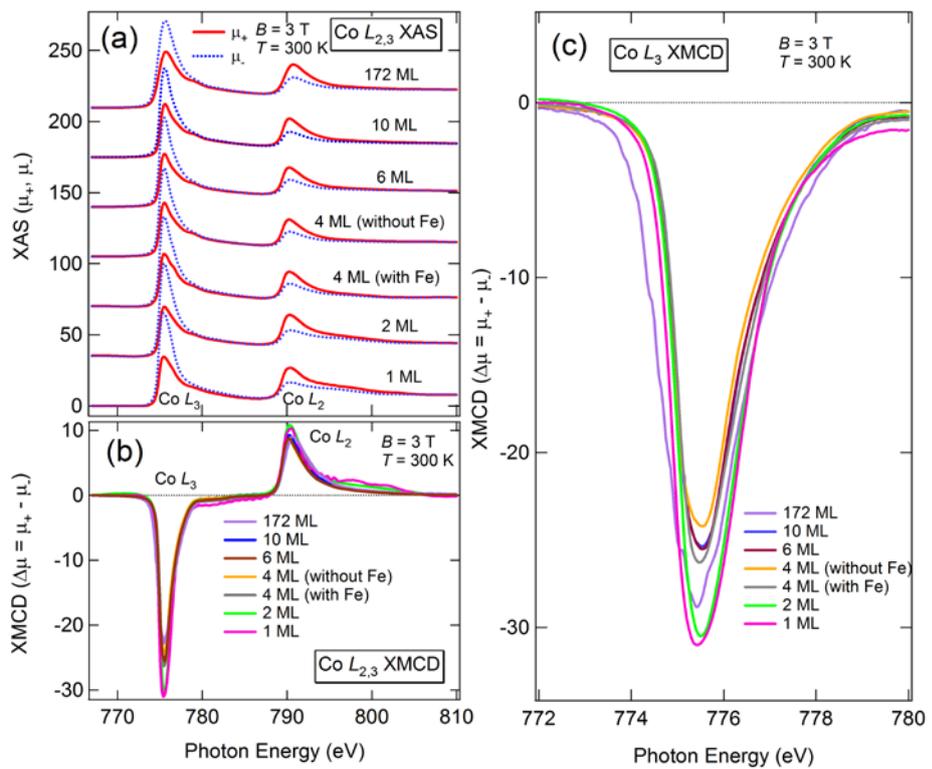


図 12: 様々な厚さの試料に対して測定した Mn の吸収スペクトル (a) および XMCD 差スペクトル (b, c)

(3) 深さ分解磁気円二色性装置

本装置は図 13 に示すように、XMCD 測定の際に、X 線の吸収に伴って放出される電子を角度分解して取り込み、電子の出射角 (θ_d) によってその実効的な脱出深度 (検出深度; probing depth) が異なることを利用して、さまざまな検出深度を持つ XMCD スペクトルを一度に得るものである。これを解析することによって、試料の化学的、磁気的状態の深さ方向の情報を得ることができる。なお、本装置は比較的簡便なために常設の必要はなく、通常は F3 ポートにおいて、他の装置と入れ替えてビームを利用している。本装置は昨年度すでに立ち上げを終了しているので、本年度は主に Au/Co/Au や Ni/Cu といった磁性薄膜についての実験を行った。また、この実験手法を偏光スイッチングと組み合わせるためには、高速で応答する角度分解型の電子検出器が必須となるので、そのための検討も行った。

本装置を BL-16 に設置した際の写真を写真 2 に示す。この真空チャンバーの中に上述の角度分解型の電子検出器が組み込まれている。また、装置は超高真空に対応しているが、試料によっては超高真空が必要のない場合も多く、その時はビームラインに接続して数時間で測定を開始することができる。超高真空が必要な試料の場合にはベーキングを行うが、いずれにしても BL-16 はブランチラインを有するため、そのような時間はもう一方のラインで実験を行うことができる。

本装置を用いて測定した、0/Ni (5.5 ML)/Cu (001) 薄膜に対する深さ分解 XMCD スペクトルを図 14 に示す。図 14 (a) において上にいくほど表面敏感なデータであるが、図 14 (b) に示した拡大図から以下のことがわかる。

- 852 eV 付近のピーク強度が表面敏感になるほど強くなる。
- 858 eV 付近の強度が表面敏感になるほど弱くなる。
- 869 eV 付近のピークの高エネルギー側の肩が、表面敏感になるほど強くなる。
- 873 eV 付近の強度が表面敏感になるほど弱くなる。

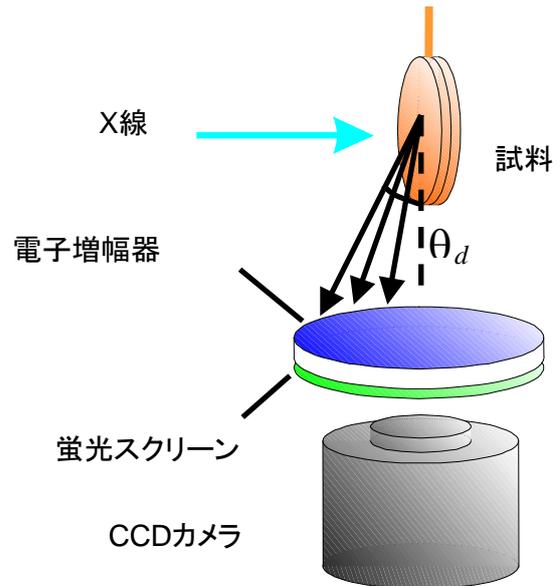


図 13: 深さ分解 XMCD 測定の様式図



写真 2: 深さ分解 XMCD 測定装置

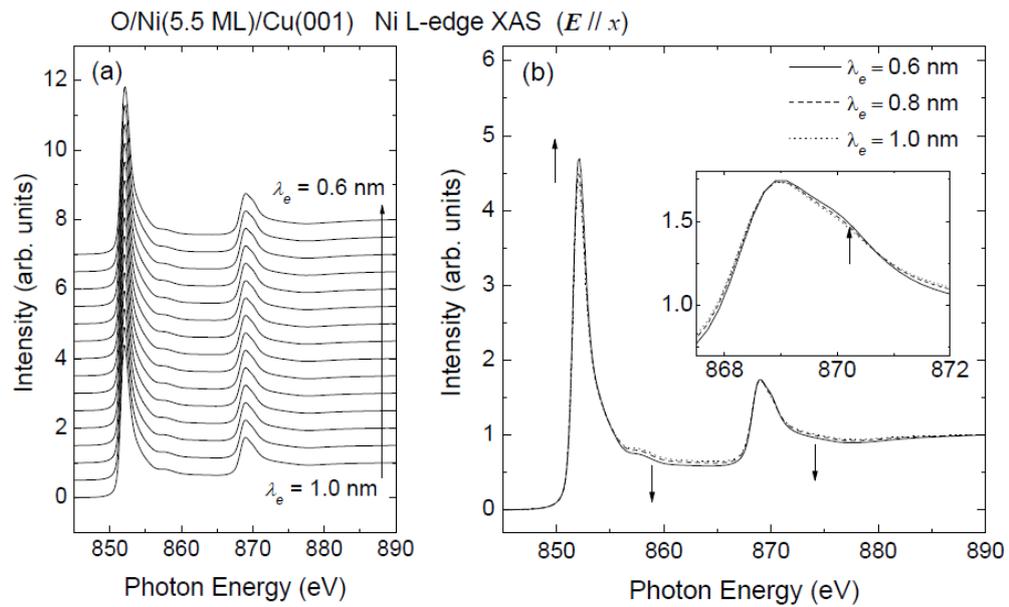


図 14: O/Ni/Cu(001) に対する X 線吸収スペクトルの検出深度 (λ_e) 依存性 (a) および代表的な検出深度 (0.6, 0.8 および 1.0 nm) に対するデータの拡大図

こうして得られた一連のデータを解析することで、同じ Ni 薄膜の中でも、表面層の吸収スペクトルと内部層のスペクトルを分離することができる。スペクトル分離の結果を図 15 に示す。図 15 (a) と (b) はそれぞれ、水平直線偏光と垂直直線偏光に対応する。いずれの場合にも表面層のスペクトルは内部層と大きく異なっており、しかもこれは NiO のスペクトルに非常に似ている。一方で内部層のスペクトルは通常の Ni 薄膜のものと類似しており、この結果から、O/Ni/Cu(001) において、表面の Ni は酸化物に近い状態になっていることが明確に示された。

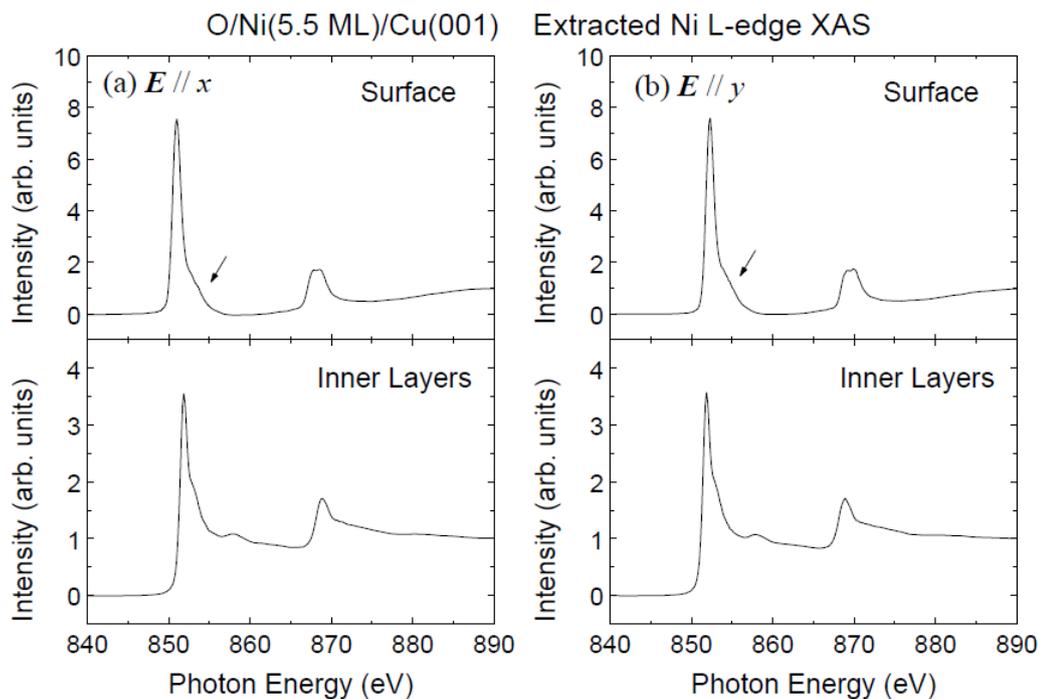


図 15: 水平偏光 (a) および垂直偏光 (b) に対する表面と内部層の X 線吸収スペクトル

(4) 共鳴磁気散乱装置

本装置は図 16 に示すように、試料に軟 X 線を入射し、そこから散乱されてくる軟 X 線の方向と強度から、試料の nm オーダーの周期的構造についての情報を得るものである。この際、軟 X 線のエネルギーを特定の元素の吸収端に合わせる(共鳴させる)ことによって、元素選択性が得られる。また、本装置は、試料に対して 0.2 T 程度までの磁場を印加し、アンジュレータからの円偏光軟 X 線と組み合わせることによって、磁気的な周期構造を明らかにすることができるのが大きな特長である。

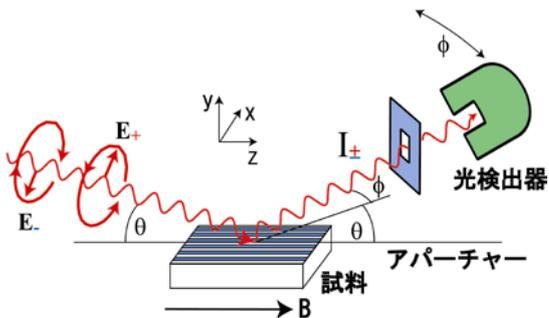


図 16: 共鳴磁気散乱測定の様式図

装置の写真を写真 3 に示す。試料および光検出器は、ともに回転導入機によって真空外から回転されることが可能である。また、装置内には永久磁石が組み込まれており、間隔を変えることによって最大 0.2 T 程度までの磁場を試料に印加することができる。本装置は現在、F1 ポートにおいてのちに述べる波長分散型 X 線吸収分光装置と交代で立ち上げを行っている。

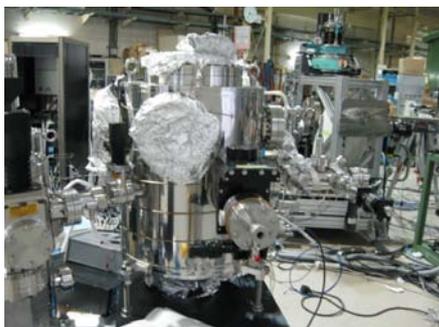


写真 3: 共鳴磁気散乱装置

立ち上げの一環として、Co/Pt 多層膜に対して Co L 吸収端付近で測定した共鳴磁気散乱スペクトルを図 17 に示す。円偏光の反転によって明確にスペクトル強度の差が観測されており、試料の周期的な磁気構造を検出できていることがわかる。

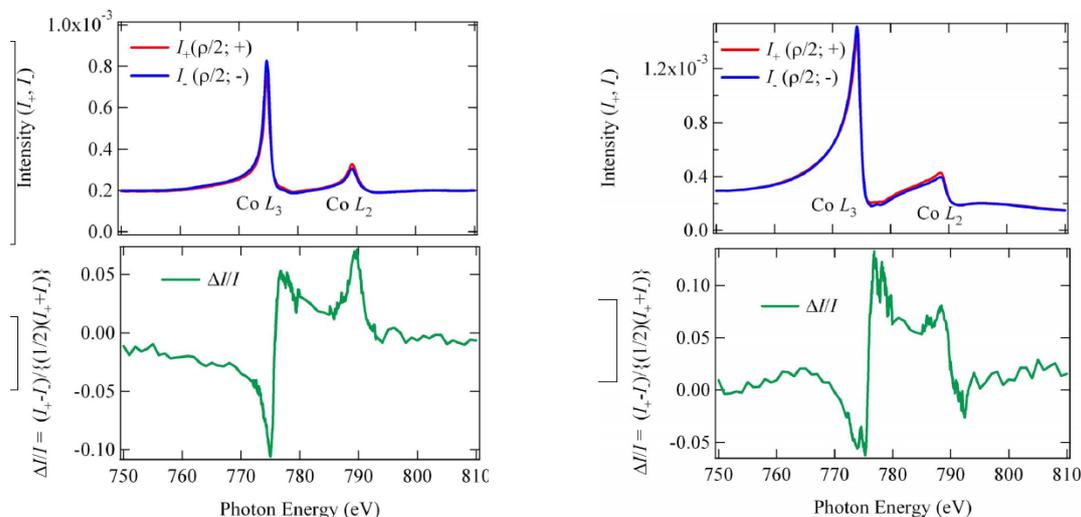


図 17: Co L 吸収端付近で 0 次反射光(a)および一回折光(b)で測定した共鳴磁気散乱スペクトル

(5) 波長分散型 X 線吸収分光装置

本装置は図 18 に示すように、試料上に位置によって波長の異なる(波長分散した)軟 X 線を照射し、試料上のそれぞれの位置における X 線の吸収に伴って放出される電子を、位置分解して一度に取り込むことによって、波長掃引をすることなく、X 線吸収スペクトルを一度に測定

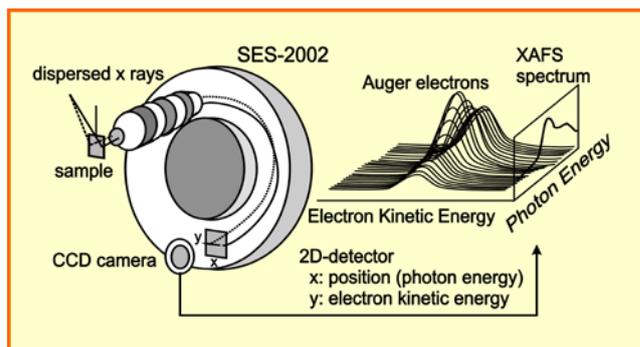


図 18: 波長分散型 XAFS 測定の様式図

するものである。このような波長分散型の測定法を用いることによって、測定時間を大幅に短縮でき、表面化学反応のような高速現象をリアルタイムで観測することが可能になる。なお、本装置は BL-16 の F1 ポートにおいて昨年度中に立ち上げを完了し、現在は共鳴磁気散乱装置と交代で実験を行っている。

図 19 に、この装置を用いて測定した、Pt 表面における CO 酸化反応中の酸素 K 吸収端のスペクトルを示す。測定時間は 1 スペクトルあたり 33 ms であり、真のビデオレート達成している。図 19 は 5 種類の異なる温度での測定結果であり、温度の上昇にしたがって反応速度も上昇しているが、33 ms という高速測定のおかげで、全ての温度に対して定量的な解析ができるレベルで反応の追跡を行うことができた。なお、詳細な解析結果については、表面における動的過程のリアルタイム追跡を担当している慶應義塾大学の成果報告書に記載する。

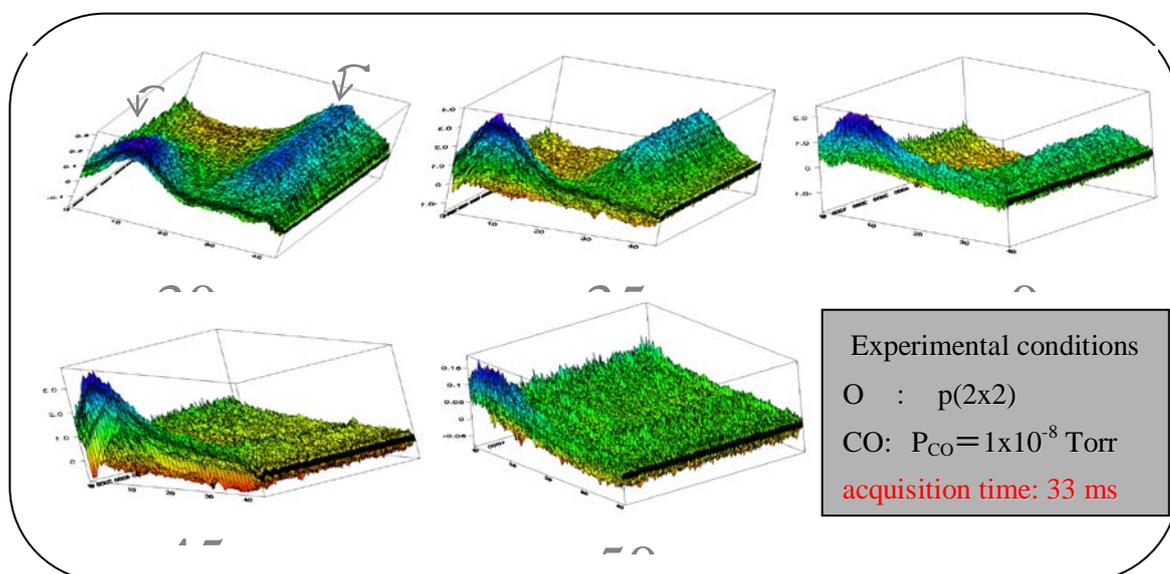


図 19: Pt 表面における CO 酸化反応中に測定した酸素 K 吸収端 X 線吸収スペクトル

(6) 三次元顕微磁気円二色性装置

本装置は、(3)で述べた深さ分解 XMCD 技法に、微小 X 線ビームを組み合わせることによって、3 次元的な顕微分光を実現するものである(図 20)。これによって、面内方向には数 μm 、深さ方向には原子層レベルの分解能の達成を目指している。

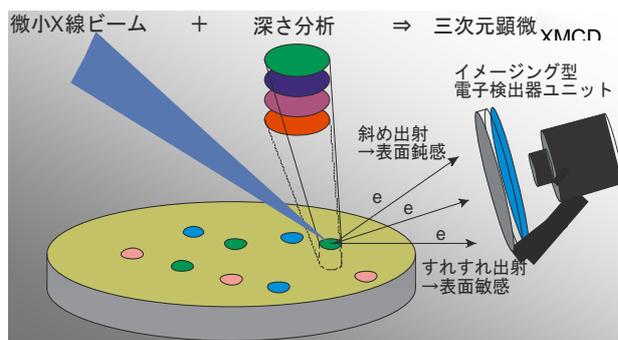


図 20: 三次元顕微 XMCD 測定の様式図

この手法にはマイクロビームが必須であるため、BL-16 では専用ポート(Fm)

を設置し、マイクロビーム光学系と深さ分解 XMCD 用検出器を常備している。本年度は、引き続き装置の立ち上げを行うとともに、数 μm のビームサイズと深さ分解 XMCD を組み合わせることで、三次元顕微 XMCD の実験を行った。

図 21 左に、Fe(0-2.5 ML)/Ni(6 ML)/Cu(100) 薄膜に対して、マイクロビームの照射位置を変えながら測定した XMCD ピーク強度を示す。ここで、Fe は位置によって厚さの異なる、いわゆる wedge 状に蒸着しており、マイクロビームの照射位置を選ぶことで、Fe の厚さを精密に制御することができる。図 21 左のデータは、3 つの異なる入射角で測定したものであるが、この結果から、Fe の厚さが 0-0.5 ML 程度では面内磁化、0.5-1.6 ML 程度では面直磁化、さらにそれ以上では再び面内磁化であることがわかる。また、これらの相転移は、決して単純な面内と面直の往復ではなく、面内方向での回転も含めた複雑な挙動を示している。このような試料に対して、特定の Fe 厚さを選んで測定した深さ分解 XMCD スペクトルの一例を図 21 右に示す。この図は Ni の表面層(Fe と接している部分)と内部層を分離して示しているが、スペクトル形状が明らかに異なっており、Fe の蒸着によって Ni 表面に大きな電子状態の変化が起こったことがわかる。

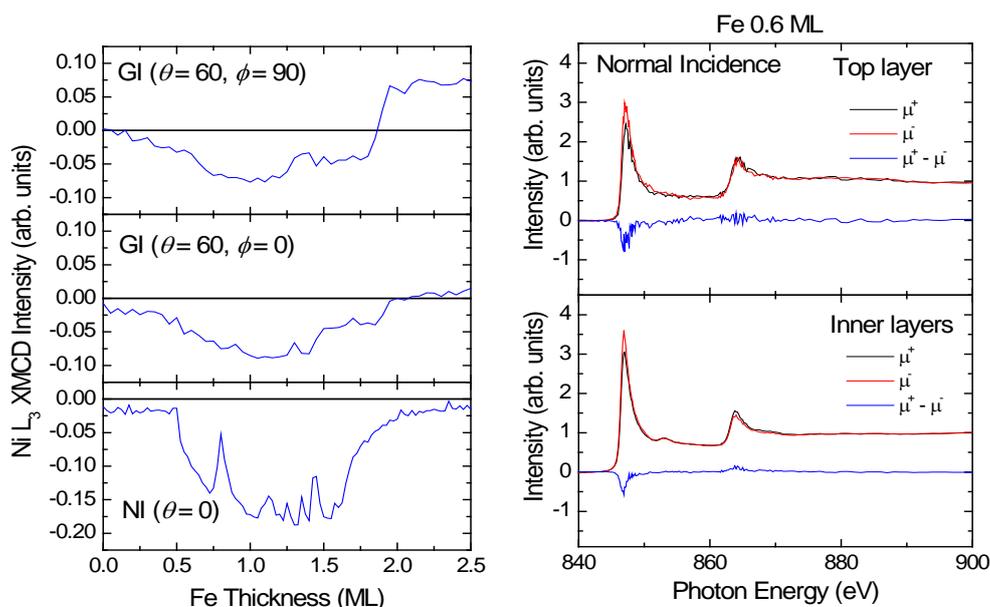


図 21: Fe(0-2.5 ML)/Ni(6 ML)/Cu(100) 薄膜にする Ni L 吸収端 XMCD 強度の位置(Fe 膜厚)依存性(左)、および Fe 0.6 ML に対する、Ni L 吸収端 XMCD スペクトルの表面および内部層成分(右)

④ プロジェクトの総合的推進

[概要] プロジェクト全体の連携を密としつつ円滑に運営していくため、チームタイムの配分に関する打ち合わせや技術検討会の開催等、参画各機関の連携・調整にあたった。特に本プロジェクトの根幹となるアンジュレータを用いた偏光制御技術に関しては、フォトンファクトリーの各運転期間の開始に合わせて技術検討のための会合を行い、技術開発の経過と予定を議論した。プロジェクトで得られた成果については、学会や研究会などで積極的に公表した。

(1) 偏光制御技術の開発に関する打ち合わせ

本プロジェクトにおいて根幹となるのは、可変偏光アンジュレータの開発と電子軌道の制御による偏光スイッチングシステムの開発である。そこで以下のように高エネルギー加速器研究機構内のメンバーによる技術打ち合わせを行い、技術開発の現状と方針について議論を行った。

2009年6月18日

楯円偏光モードの追加，直線偏光の回転について

2009年12月10日

斜め45度直線偏光の追加，PCによるアンジュレータの制御

(2) 検出器の開発に関する打ち合わせ

本プロジェクトにおいては、偏光スイッチングシステム自体だけでなく、高速のスイッチングに対応した検出器の開発が必須である。そこで以下のように高エネルギー加速器研究機構内のメンバーによる技術打ち合わせを行い、技術開発の現状と方針について議論を行った。

2009年8月10日

検出器の選択，配線の検討，信号検出エレクトロニクスの構築

2010年1月27日

検出器制御ソフトウェアおよび偏光スイッチングとの同期

(3) 参画機関との打ち合わせ

本年度の参画機関である東京大学および慶応義塾大学と、チームタイムの配分や実験装置の開発に関して打ち合わせを行った。

2009年7月15日

波長分散型XAFS法のデータ解析に関して

2009年8月10日

2009年度後期のチームタイム配分に関して

2009年9月9日

XMCD装置の開発に関して

2009年10月8日，11月16日

スピントロニクス材料に対する研究計画に関して

2010年1月15日

放射光科学研究施設におけるS2型実験課題の申請に関して

2010年2月1日

次年度の予算に関して

2010年2月19日

2010年度前期のビームタイム配分に関して

(4) 実験手法の開発

BL-16において開発を行っている実験手法について、高エネルギー加速器研究機構内のメンバーおよび参画機関のメンバーによる実験の際に生じた問題点をフィードバックし、実験装置に必要な改良を施した。

(5) 研究会等の開催

本プロジェクトの成果を公表するとともに、今後の研究目標についての議論を行うために、研究会等を開催した。

2009年11月17日

物構研シンポジウム(エポカルつくば)において、以下のセッションを開催

【スピントロニクス材料 ―次世代デバイスの開発を目指して―】

量子ビーム基盤技術開発プログラム：軟X線の高速偏光制御による機能性材料の探求と創製

2010年2月25日

文部科学省「量子ビーム基盤技術開発プログラム」シンポジウム(コンファレンススクエア エムプラス)を開催

2.3 成果の外部への発表

学会等における口頭・ポスター発表

発表した成果（発表題目、口頭・ポスター発表の別）	発表者氏名	発表した場所（学会等名）	発表した時期	国内・外の別
FAST LOCAL BUMP SYSTEM FOR HELICITY SWITCHING AT THE PHOTON FACTORY, ポスター	S. Matsuba, K. Harada, Y. Kobayashi, T. Miyajima, S. Nagahashi, M. Shimada T. Obina R. Takai	Particle Accelerator Conference 2009	2009年5月	国外
STATUS OF LOCAL BUMP SYSTEM FOR FAST POLARIZATION SWITCHING, ポスター	松葉俊哉	第6回加速器学会年会	2009年8月	国内
Depth profiling of magnetic and atomic structures of ultrathin films by depth-resolved XMCD and XAFS techniques with a sub-nm depth resolution, 口頭	K. Amemiya	The 14th International Conference on X-ray Absorption Fine Structure (XAFS14)	2009年8月	国外
Surface antiferromagnetic coupling of Fe/Cu(001) induced by NO adsorption studied by means of depth-resolved XMCD method, 口頭	H. Abe, M. Sakamaki, K. Amemiya	The 14th International Conference on X-ray Absorption Fine Structure (XAFS14)	2009年8月	国外
深さ分解 XAFS 法:着想から実現, 発展, そして将来へ, 口頭	雨宮健太	XAFS 討論会	2009年9月	国内
磁性薄膜における原子構造と磁気異方性の対応(1): Co/Ru(0001), 口頭	雨宮健太, 宮脇淳, 酒巻真粧子, 阿部仁, 佐古恵理香	日本物理学会秋季大会	2009年9月	国内
NO 等の吸着による Fe/Cu(001)の表面磁性変化とその構造, 口頭	阿部仁, 酒巻真粧子, 雨宮健太, 近藤寛	日本物理学会秋季大会	2009年9月	国内
MgO バリアと界面を形成するハーフメタル Co ₂ MnGe 超薄膜の軟 X 線磁気円二色性, 口頭	小出常晴, 朝倉大輔, 片岡隆史, 山崎陽, 坂本勇太, 藤森淳, 平智幸, 石川貴之, 山本眞史	日本物理学会秋季大会	2009年9月	国内

直交偏光 2 ビームを空間的に振る偏光変調 CD/LD 測定法の原理と最適条件, 口頭	小出常晴	日本物理学会秋季大会	2009 年 9 月	国内
Commissioning of a Soft X-ray Beamline PF-BL-16A with a Variable-Included-Angle Varied-Line-Spacing Grating Monochromator, ポスター	K. Amemiya	The 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI09)	2009 年 9 月	国外
Construction and Operation of a New Polarizing Undulator (U#16-1) at the Photon Factory, ポスター	K. Tsuchiya	The 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation (SRI09)	2009 年 9 月	国外
Fast switching of circular polarization using APPLE-II type undulator, 口頭	K. Amemiya	Asia/Oceania Forum for Synchrotron Radiation Research	2009 年 12 月	国外
軟 X 線可変偏光ビームライン PF-BL-16A における利用実験の現状と今後の展開, ポスター	雨宮健太, 伊藤健二, 小出常晴, 小野寛太, 久保田正人, 隅井良平, 朝倉大輔, 酒巻真粧子	第 23 回日本放射光学会年会	2010 年 1 月	国内
高速偏光スイッチング用バンブシステムの進捗状況, ポスター	松葉俊哉, 原田健太郎, 小林幸則, 長橋進也, 帯名崇, 宮島司, 高井良太, 島田美帆	第 23 回日本放射光学会年会	2010 年 1 月	国内
深さ分解 XMCD 法を用いた Fe/Ni/Cu(100) 薄膜の表面・界面磁気構造の観察, ポスター	雨宮健太, 酒巻真粧子	第 57 回応用物理学関係連合講演会	2010 年 3 月	国内
深さ分解 XMCD 法で見る Au/Co/Au(111) 薄膜の界面磁性, ポスター	酒巻真粧子, 雨宮健太	第 57 回応用物理学関係連合講演会	2010 年 3 月	国内
軟 X 線 XMCD で見るナノスケールの磁性, 口頭	雨宮健太	日本物理学会第 65 回年次大会	2010 年 3 月	国内
深さ分解 XAFS 法による Co/Au(111) 薄膜の磁気異方性の研究, 口頭	酒巻真粧子, 雨宮健太	日本物理学会第 65 回年次大会	2010 年 3 月	国内

学会誌・雑誌等における論文掲載

掲載した論文（発表題目）	発表者氏名	発表した場所（学会誌・雑誌等名）	発表した時期	国内・外 の別
Depth profiling of magnetic and atomic structures of ultrathin films by depth-resolved XMCD and XAFS techniques with a sub-nm depth resolution	K. Amemiya, J. Miyawaki, H. Abe, E. O. Sako, and M. Sakamaki	J. Phys.: Conf. Ser. 190, 012108	2009年11月	国外
Surface antiferromagnetic coupling of Fe/Cu(001) induced by NO adsorption studied by means of depth-resolved XMCD method	H. Abe, M. Sakamaki, and K. Amemiya	J. Phys.: Conf. Ser. 190, 012109	2009年11月	国外

Commissioning of a Soft X-ray Beamline PF-BL-16A with a Variable-Included-Angle Varied-Line-Spacing Grating Monochromator	K. Amemiya, A. Toyoshima, T. Kikuchi, T. Kosuge, K. Nigorikawa, R. Sumii, and K. Ito	AIP Conf. Proc. (in press)	2010年	国外
マイクロビームを用いた X 線磁気円二色性による磁性薄膜研究法の開発と展望	雨宮健太	J. Vac. Soc. Jpn. 52, 606	2009年11月	国内

2.4 活動（運営委員会等の活動等）

2009年6月18日 プロジェクト会議

高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設 実験準備棟2F輪講室
アンジュレータ開発の進捗状況の確認，今後の予定に関して

2009年8月10日 プロジェクト会議

高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設 実験準備棟2F輪講室
検出器開発の進捗状況の確認，今後の予定に関して

2009年12月10日 プロジェクト会議

高エネルギー加速器研究機構 放射光科学研究施設 実験準備棟2F輪講室
アンジュレータ開発の進捗状況の確認，今後の予定，次年度の予算に関して

2010年1月27日 プロジェクト会議

高エネルギー加速器研究機構 先端計測開発棟 208
検出器開発の進捗状況の確認，今後の予定に，次年度の予算に関して

2.5 実施体制

平成21年度に於ける実施体制

研究項目	担当機関等	研究担当者
① 可変偏光アンジュレータの開発 (1) アンジュレータグループの統括 (2) 可変偏光アンジュレータの開発	物質構造科学研究所 加速器研究施設 加速器研究施設 加速器研究施設	○山本樹 土屋公央 青戸智裕 塩屋達郎
② 電子軌道制御技術の開発 (1) 電子軌道制御グループの統括 (2) 電子軌道の高速制御法の開発	加速器研究施設 加速器研究施設 加速器研究施設 加速器研究施設 加速器研究施設 加速器研究施設 加速器研究施設	○小林幸則 帯名崇 原田健太郎 宮島司 上田明 長橋進也 島田美帆
③ 測定技術の開発 (1) 測定技術グループの統括 (2) 測定装置の開発 (3) ビームラインの開発	物質構造科学研究所 物質構造科学研究所 物質構造科学研究所 物質構造科学研究所 物質構造科学研究所 物質構造科学研究所 物質構造科学研究所 物質構造科学研究所	○小出常晴 小野寛太 久保田正人 隅井良平 酒巻真粧子 伊藤健二 豊島章雄 菊地貴司
④ プロジェクトの総合的推進	物質構造科学研究所	◎雨宮健太