

〔研究〕

電子蓄積リングNIJI- 号の偏光アンジュレータおよびその光学系の偏光特性

Polarization Characteristics of Polarizing Undulator and its Optical System in the Electron Storage Ring NIJI-

部 洋 司 小 貫 英 雄
H. SHITOMI H. ONUKI

Polarization characteristics of undulator radiation transmitted through quartz windows at beam ports were measured when the polarizing undulator generated linearly or circularly polarized radiation, respectively. It seemed that the birefringence on the quartz window caused by the optical distortion considerably affected the polarization status of undulator radiation transmitted through it. The birefringence of the quartz window was improved by trying to eliminate its optical distortion. The polarization characteristics of synchrotron radiation generated from edge part of bending magnet were also investigated.

§1 緒 言

紫外・真空紫外線領域における直線偏光や円偏光は、特に基礎科学分野において盛んに用いられている。偏光は光の重要な性質の一つであり、一軸性単結晶などの方向性を持った物質の直線偏光二色性や、生体分子のようなキラルな分子の円二色性など基礎物性を調べる上で重要な測定手段を与えてくれるものである。さらに最近では、直線偏光紫外線照射による液晶分子の光配向制御¹⁾や、遠紫外・真空紫外線の円偏光照射による光学活性物質の絶対不斉合成の試み²⁾などの「偏光利用技術」が注目されており、実用化に向けて研究が行われ始めている。「偏光状態」そのものについては歴史が古いのであるが、特に短波長の領域では良質な偏光光源が少なく、研究方法もかなり限定されていたのが実情である。ゆえに、近年のこのような動きに伴い、短波長の偏光放射はその重要性が以前にも増して高まっており、高性能の偏光光源に対する要望も多い。

まず、偏光に起因した変化を引き起こすのに十分高強度な放射源が必要になるし、より精密な解析を

行ったり、実用化に向けた条件探索等を念頭に置いた場合、高偏光度で波長純度の高い放射源が望まれるであろう。短波長域の偏光光源として代表的なものとしては、1) シンクロトロン放射(偏向電磁石からの放射)、2) XeランプやHgランプと、グラン・テーラプリズムなどの偏光子の組合せ、3) エキシマレーザーや各種レーザーの高次高調波の利用、などが挙げられるが、これらはいずれも、単色性・光強度・偏光度・使用可能波長が限定されるなどの問題を含んでいる。そのような中、ウイグラやアンジュレータといった挿入型光源が新しい偏光光源として注目され、「第三世代シンクロトロン放射源」と呼ばれ盛んに利用・開発研究が行われてきた。

小貫らにより1986年に提案され³⁾1987年に実用化された⁴⁾直交遅延磁場型(小貫型)偏光アンジュレータ(以下、本稿では「偏光アンジュレータ」と略称する。)は、準単色・高輝度・波長可変という、それまでの挿入型光源のもつ特性に加え、直交した2組の磁石列の位相を変化させることによる偏光状態可変という、従来にない優れた特性を有する画期的な偏光光源であり、先に述べた偏光利用技術に対して非

KEY WORDS : Polarizing Undulator, Synchrotron Radiation, Circular Polarization, Polarimetry, Birefringence

常に有用な光源であるといえる。現在、電総研では電子蓄積リングTERASには4周期の偏光アンジュレータが、また小型電子蓄積リングNIJI-号には15周期のそれが挿入されており、その特性を活かして、これまで 1) 光学活性物質の絶対不斉合成²⁾, 2) 磁気円二色性スペクトルの測定⁵⁾, 3) 遠紫外領域での円二色性スペクトルの測定⁶⁾, 4) 円偏光放射のマイクロビーム化による円偏光顕微鏡の開発⁷⁾, 5) 液晶の光配向の研究¹⁾ など、偏光を用いた様々な研究が展開されてきた。このような研究を高精度に行なうためには、偏光アンジュレータの放射特性を評価しておくことが必要不可欠であり、とりわけ偏光状態について定量的な評価がなされていることが重要である^{8,9)}。

さらに、産業応用などの実用的な側面を考えると、真空中での放射利用は装置系が複雑になるため、可能な限り空気中での利用が望まれるであろう。一例として、アンジュレータ放射のビームライン上に合成石英やフッ化マグネシウムなどの窓材を取り付けたビームポートを設置し、窓材を通過した放射を利用する方式がある。このような場合には、アンジュレータ放射そのものに関する特性評価と同時に実際に照射もしくは分析が行われる状態での放射特性についても併せて評価を行う必要がある。これは窓材に限った事ではなく、何らかの光学系を介

してアンジュレータ放射を利用する場合には各々の光学系が固有の偏光特性を有しているので、その結果として取り出される放射の特性を評価する事は、放射光の高度利用化において非常に重要である。

このような観点に基づき、本研究では電子蓄積リングNIJI-号に挿入された15周期偏光アンジュレータからの放射と照射実験用に設置された石英窓を透過した放射の持つ特性について定量的評価を行い、光学系が持つ偏光特性が放射に及ぼす影響について考察した。

§2 アンジュレータ放射の偏光特性の評価⁹⁾

電子蓄積リングNIJI-号の概略を Fig.1 に示す。電子ビームの軌道は、4つの偏向電磁石によりレストラック型となっている。この軌道の直線部に Fig.1 に示すように、偏光アンジュレータが設置されている。

この偏光アンジュレータで得られる放射のスペクトル及び偏光特性に関しては、波長 250 nm において評価され、既に報告が成されている⁹⁾。その報告より、偏光アンジュレータからの円偏光放射スペクトルと円偏光度に関する測定結果を Fig.2 に示す。これは、電子エネルギー: 227 MeV, 磁場パラメータK: 0.57, 2組の磁石列の位相差: $\pi/2$ の配置(円偏光配置)にて測

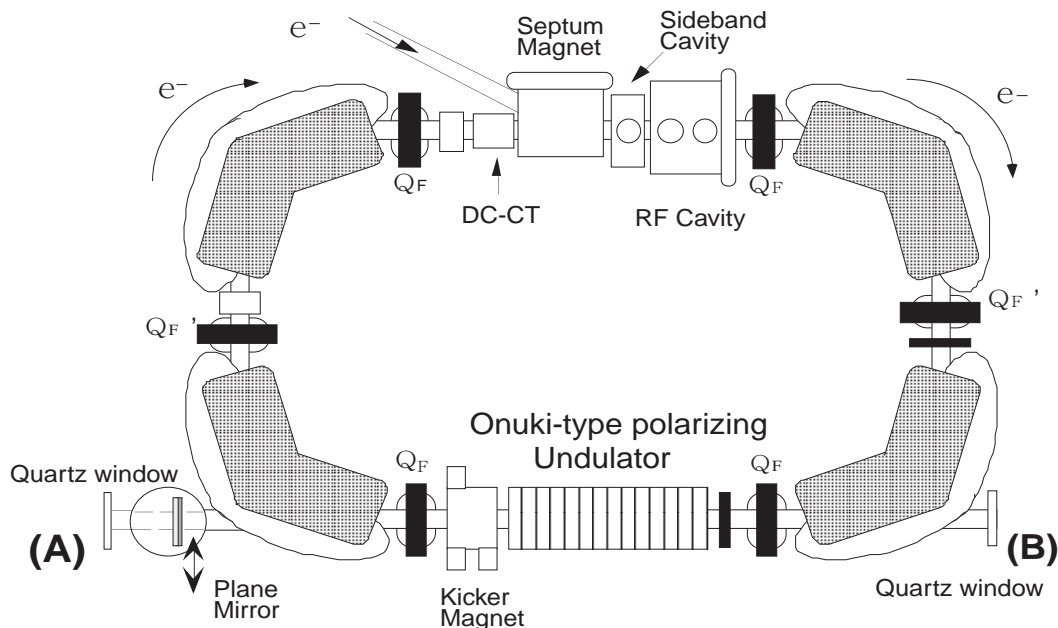


Fig.1 Schematic view of the electron-storage ring NIJI- at medium-energy experimental room. In this work, polarization characteristics of polarizing undulator radiation transmitted through the quartz window were measured at window (A) and (B), respectively.

定を行ったものである。また、計算によって導かれた放射スペクトルとその円偏光度の理論値についても併せて示す。理論スペクトルでは半値幅：約7%であるが、実際の放射では、ビームエミッタンスの影響により長波長側に放射が延び、約10%の単色性となっている。円偏光度については、ピーク波長付近において測定の不確かさ数%以内で、ほぼ100%の円偏光であり、理論値とも良い一致を示している。同様に、2組の磁石列の位相差が0の配置（直線偏光配置）の場合、発生する放射はほぼ100%の直線偏光であった。このことから、偏光アンジュレータは、磁石列間の位相差を規定することで、高精度に偏光状態を制御できることが分かる。

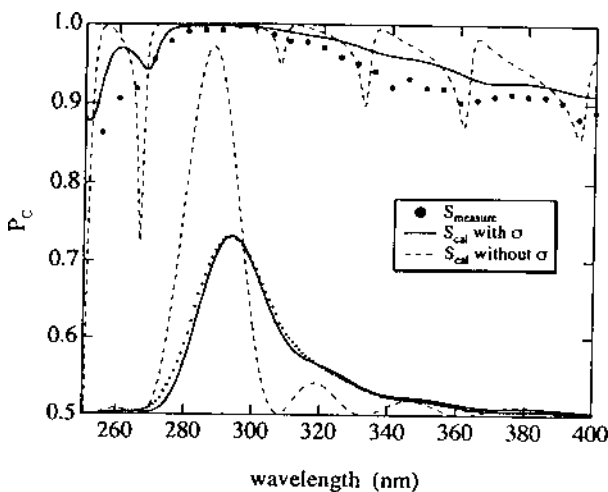


Fig.2 Spectra of the first harmonic radiation with $E = 227$ MeV, $K=0.57$ and $\alpha=\pi/2$. Closed circles show the measured degree of circular polarization P_c and the radiation spectra. The solid and broken lines show the calculated spectra with and without beam emittance effect, respectively⁹⁾.

§3 石英ガラスの窓を透過したアンジュレータ放射の偏光特性の評価

3.1 測定系

現在、電子蓄積リングNIJI- 号には偏光アンジュレータ用のビームラインが計4種類整備されている。本研究では、その中の2つのビームポート：(A)と(B)にある照射実験用の窓について、各々の窓を透過した後のアンジュレータ放射の偏光特性について評価した。両者とも窓材としては合成石英ガラスが使用されている（以下、「石英窓」と略称する）。(A)はアンジュレータからの放射の方向に相対して設置されているものであり、(B)はアンジュレータ放射をアルミ平面鏡で 0° 方向へ正反射させた位置に設置されている。アンジュレータの中心からの距離は、(A)が395 cm、(B)が930 cmである。当所の偏光アンジュレータは磁石列の位相差： α を $-\pi/2$ から $\pi/2$ の範囲で設定することができる。前章の結果より、 $\alpha = 0$ の時は、ほぼ100%の鉛直方向の直線偏光（図中ではLPLと略記）を発生し、 $\pm \pi/2$ の時は、ほぼ100%の円偏光を発生する。磁石列の配置の定義によるが、以後本稿においては、 $\alpha = \pi/2$ の場合を左円偏光（図中ではLeft-CPLと略記）、 $\alpha = -\pi/2$ の場合を右円偏光（図中ではRight-CPLと略記）と呼ぶこととする。直線偏光、左円偏光、右円偏光の各々のアンジュレータ放射を発生する場合において、(A)、(B)各々の石英窓を透過した放射の偏光度を測定した。

Fig.3 に偏光度測定の概略を示す。偏光度の測定は、4mmのアーチャーで規定されたアンジュレー

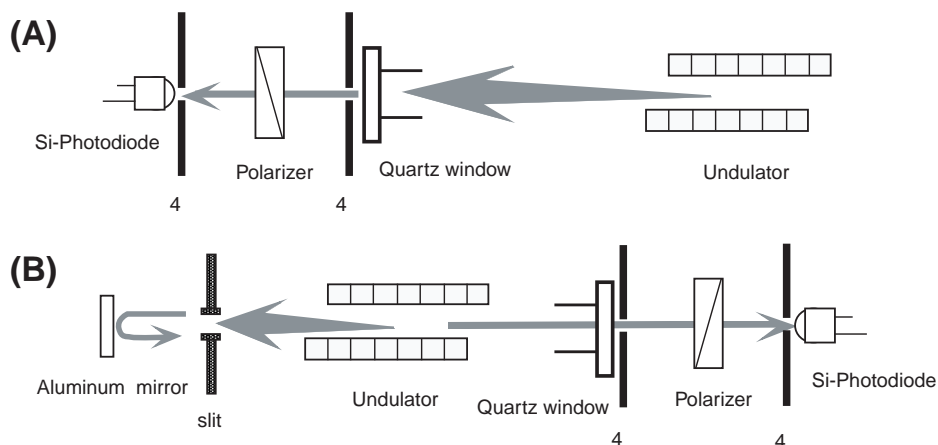


Fig.3 Optical systems for the polarimetry of undulator radiation transmitted through each quartz window.

タ放射の中心部分について、偏光子を透過した光強度を偏光子の偏光面方向を回転させながら測定することで行った。測定はアンジュレータ放射の中心波長：365 nmの設定（電子のエネルギー：208 MeV，磁場パラメータ K ：0.655）で行い、偏光子としては、グラン・テイラープリズム（Melles Griot製：03-PTA-003）を用いた。検出器はシリコンフォトダイオード（浜松ホトニクス社製：S1337-1010-BQ）を用いた。

3.2 偏光度の測定

Fig.4 は (A) において石英窓を透過したアンジュレータ放射の強度を偏光子の偏光面の角度を 10° 刻みで変化させて測定したものである。光強度は各々の測定に於ける最大値を 1 として規格化して表している。偏光面の角度は、軌道面に対して垂直な方向を 0° とし、放射に対して対向した方向から見て反時計回りに角度を変化させている。

まず、直線偏光が透過した場合については、その偏光特性はほとんど変わっておらず、約 96% の直線偏光度を示した。これに対し円偏光では、アンジュレータ放射そのものの偏光特性から予想されるものとはかなり異なった挙動が見られた。

左円偏光については、透過した光は楕円偏光を示した。これは、長軸方向が直線偏光に対して約 -70° 傾き、長軸方向と短軸方向の強度比（円偏光度の目安となる量）はおよそ $1:0.75$ という状態であった。右円偏光についても、透過光は楕円偏光であった。

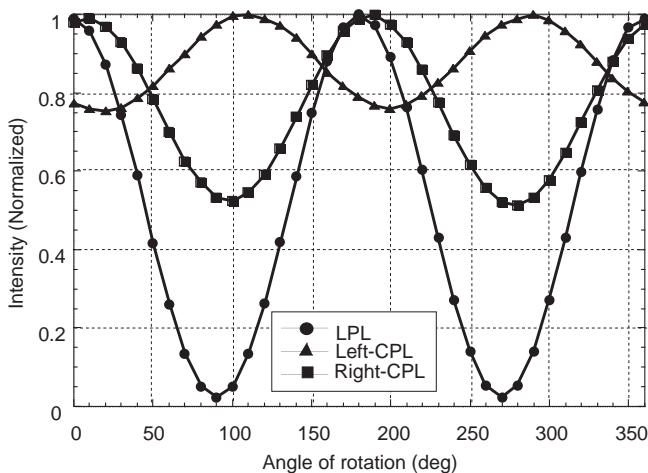


Fig.4 The relationship between the angle of rotation and the intensity of undulator radiation transmitted through the polarizer at the point A.

しかし、左円偏光の場合と比較すると長軸方向の傾きが約 10° と左・右円偏光間での対称性が見られず、さらに強度比も長軸：短軸 $1:0.52$ であり、円偏光度にかなりの差が見られた。

同様に、(B) において測定した結果を Fig.5 に示す。直線偏光については、こちらも (A) と同様に直線偏光度：約 94% と、その偏光特性はほとんど変わっていない。円偏光についても同様に楕円偏光となって観測された。しかしながら、(A) の場合と異なり、長軸方向のずれは左円偏光で約 -45° 、右円偏光で約 $+45^\circ$ と対称的であり、偏光度についても同程度であった。円偏光度自体は、長軸：短軸 $1:0.40$ であることから (A) よりも更につぶれた楕円偏光であると推測される。

このように、各石英窓を透過したアンジュレータ放射は非常に複雑な偏光特性を有していることが分かった。これは主に石英窓板の応力歪みによって生ずる複屈折が原因であると考えられる。比較的対称性のよい (B) の場合については、アンジュレータ放射の直線偏光面方向（鉛直方向か水平方向）に沿って大きな歪みが入っていると考えることで実験結果を説明することができる。この歪み方向が複屈折の位相軸となり、左右円偏光が透過した場合に、約 45° 長軸が傾いた楕円偏光に変換される。直線偏光に関しては、位相軸と偏光方向が一致しているため、他の方向への歪みが対称的で打ち消されるか若しくは殆ど無ければ、偏光状態は変化しないことになる。

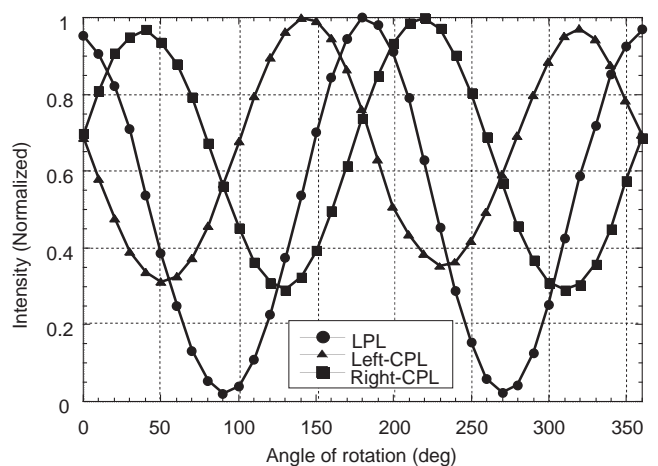


Fig.5 The relationship between the angle of rotation and the intensity of undulator radiation transmitted through the polarizer at the point B.

これに対して、(A) の場合については窓の歪みの対称性が良くないものと思われる。このため、左右の円偏光に対する挙動に大きな差異が見られたのであろう。さらに円偏光度を考慮すると、その複屈折の大きさは(B) よりも小さなものであることが予想される。しかしながら、このモデルでは直線偏光が殆ど変化しないという結果を説明することは困難であり、非常に複雑な歪みの機構があるものと考えられるが、その他の要因についてもさらに検証が必要である。

§ 4 偏光特性に関する考察とその対策

4.1 偏向電磁石部からの放射の偏光特性

このような複雑な偏光特性の要因として、アンジュレータ放射以外の成分、具体的には偏向電磁石からの放射による影響が考えられる。(A) に向かうアンジュレータのビームライン上には若干であるが偏向電磁石のエッジ部付近が重なっており、そこからのシンクロトロン放射がアンジュレータ放射中に混在した状態となっている。実際、偏光アンジュレータの磁石列間のギャップを広げていくと、アンジュレータ放射の強度が減少する(波長もブルーシフトする)とともに偏向電磁石からの放射のプロファイルが明瞭に浮き上がってくる。その放射形状は、アンジュレータ放射のほぼ中心位置付近から扇形状に広がっていくものであった。偏向電磁石からの放射は軌道面内については、ほぼ100%の水平方向の直線偏光(偏光面はアンジュレータ放射の場合と直交)であると言われているが、偏向電磁石のエッジ部付近からの放射についてその偏光特性を測定した報告はない。この放射はアンジュレータ放射の中心部にもかかっているため、これが(A)における偏光特性に影響を及ぼしている可能性がある。この点に着目して、偏向電磁石のエッジ部付近からの放射の偏光度を測定した。測定は、偏光アンジュレータの磁石列のギャップを最大限まで広げ(現在は80mm~204mmでギャップ距離可変)、アンジュレータ放射がほとんど発生していない状態で行った。電子のエネルギーは先の測定時と同様に208 MeVに設定した。

Fig.6にアンジュレータ放射の中心位置座標を $x=0$ mmとした場合の、偏向電磁石からのシンクロトロン放

射の偏光度を、石英窓の直後で、 $x=0$ mm, 5 mm, 10 mmの各位置で測定した結果を示す。いずれの場合も水平方向で透過率最大を示しているが、その挙動は一様ではない。 $x=0$ mmでは、鉛直方向の成分もかなり強く、軌道面上の放射であるにも拘らず楕円偏光を示した。 $x=5$ mm, 10 mmとなるにつれて、直線偏光になっていき、軌道面内の偏向電磁石からの一般的な放射パターンに近づいていく傾向が見られた。エッジ部分からの放射($x=0$ mmに対応)における偏光特性は主に、そこでの磁場の振舞に因るものと考えられる。エッジ部分はその構造上、磁場の(電子ビームの進行方向に向かって水平方向の)左右の対称性が崩れている。これは、電子ビームの収束のために水平面に対して磁場を非対称にしている(エッジフォーカス)ことに起因するもので、これにより鉛直方向に電子が振動するため偏光特性が変わってくるものと考えられる。また電磁石外側への漏洩磁束の影響も考えられる。このような理由から、エッジ部分からの放射は一般的な軌道面上での放射特性とは大きく異なる性質を有していると思われる。そして、中心から外側の放射ほど、エッジ部分の非対称性の影響は小さくなるので、通常の偏向電磁石の軌道面上の放射と同様な振舞になると結論した。

このように、偏向電磁石のエッジ部分からの放射は特異な偏光特性を有していることが分かったのであるが、この放射の影響で先の照射用の石英窓:(A)に対するアンジュレータ放射の振舞の全てを説明することは難しい。それは、1) Fig.6に示したエッジ部分からの楕円偏光放射の長軸方向は軌道面方向にあ

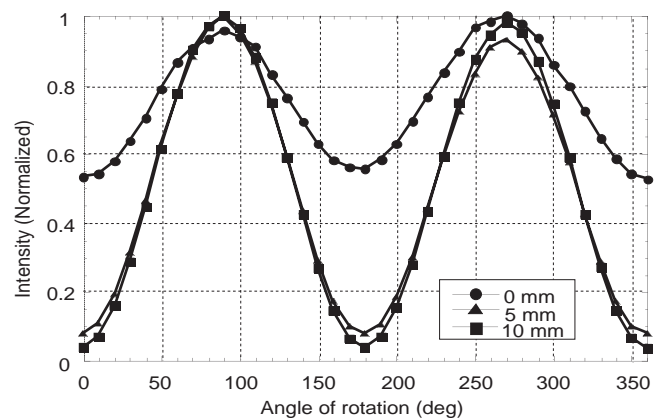


Fig.6 The relationship between the angle of rotation and the intensity of radiation from the bending magnet transmitted through the polarizer.

る事や、2) 実際には、アンジュレータ放射の強度に対してエッジ部分からの放射は約 1/10 の強度しかない、という事実が、Fig.4 に示した複雑な偏光特性と直接的には結びつかないからである。しかしながら、高精度に放射特性を評価する際には、このような特異な放射の影響に十分に注意することは必要であると言えよう。

4.2 偏光状態の改善

これまで示してきたように、照射用の石英窓を通した場合、アンジュレータ放射は非常に複雑な偏光特性を持つことが明らかとなったのであるが、冒頭に述べた様な各種偏光利用技術の発展のためには、高い直線・円偏光度をもった光を効率よく取り出せることが必要になってくる。光源自体の偏光度が高くても、光学系の影響を補正する技術がなければ、偏光光源を十分に活かすことは出来ない。偏光アンジュレータに代表される各種偏光光源の高度化と共に、光学系の偏光特性の精密評価、そしてその補正技術の確立が今後の課題になると思われる。

今回、我々は比較的簡便な補正方法として、石英窓の歪みを補正する方式についてその効果を検証した。石英窓の歪みを引き起こす原因としてフランジの締め付けによる歪みが考えられる。石英窓と一体となっているフランジをビームポートに取り付ける場合、フランジを締め付けた際にかかる力が均等ではないために結果として、窓に歪みとして伝達されてしまうものと考えられる。この歪みをあらかじめ調節しておくことによって偏光特性は改善されるものと期待される。我々は、ニップルの一方に合成石英窓付きフランジ (Quartz optopass port : QVP-150) を取り付け、1/4 波長板により円偏光とした He-Ne レーザ光 (632.8 nm, 2 mW) を入射し、その透過光の偏光度を測定しながら、透過光が円偏光を保つように窓付きフランジのニップルへの締め付け具合を調整することを試みた。このように窓の歪みを予め調整しておき、ニップルのもう一方をビームポートに取り付けられれば、取り付けの際に新たに歪みが生じることも無いので、偏光特性の良い状態が具現されると予想される。

このようにして調整を施した石英窓をビームポート (A) に取り付けて、直線偏光、左円偏光、右円偏

光のアンジュレータ放射に対する偏光特性を測定した結果を Fig.7 に示す。非常に複雑な偏光特性を示した調整前の結果 (Fig. 4) と比較すると、顕著な差が見られる。直線偏光では、他の場合と同様に偏光状態はほとんど変わらず、約 98% の直線偏光度を示した。左・右円偏光については円偏光度の飛躍的な改善は見られなかったが、透過した光は左右対称な長軸：短軸 1 : 0.75 の楕円偏光となっていた。これは、フランジの締め付けによる調節によって窓材の複屈折の状態は変化したが、依然、鉛直軸方向に複屈折の遅延軸が残っていることを示している。以上より、窓材の歪みを調節することによってある程度まで偏光特性を解消することができることが分かったが、このような方法によって完全に複屈折をなくすることは困難であると思われる。さらに、窓材が製造される過程において、様々な要因により各個体に固有の複屈折が生じることも予想される。これらの考察から、偏光放射光の利用に際しては、個体差も念頭に置いた良質の窓材の選択や、応力歪みの適切な調節等によって、窓材のもつ偏光特性を最小にする事と併せて、各種光学系における偏光特性の測定を行い、偏光に関する種々のパラメータを定量的に評価し、偏光状態の補正を可能にすることが必要不可欠であると言えよう。

一例として、フランスの放射光施設：LURE では、高速での偏光切替えの可能性を持った電磁石アンジュレータの開発と、超高分解能真空紫外分光光学

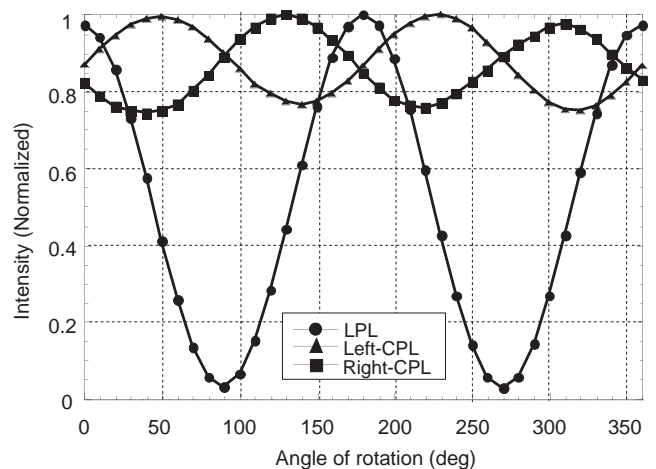


Fig.7 The relationship between the angle of rotation and the intensity of undulator radiation transmitted through the polarizer at the point A. (After modification of the quartz window.)

系を備えたビームラインの開発を行っている。ここでは、ビームライン内の光学系による複雑な偏光特性の変化について定量的評価を行い、それらの特性を考慮した上でアンジュレータから発生する偏光状態を微妙に変えることで、目的とする偏光状態を光学系上で具現する方式を取っている¹⁰⁾。たとえば、円偏光を試料に照射したい場合には、アンジュレータは楕円偏光を発生するように位相を調整し、光学系を通過した最終形が完全な円偏光となるようにする、という具合である。

この例に見られるような、各種光学系上におけるアンジュレータ放射の偏光特性に関する定量的なデータと、それに伴う偏光補正技術の確立が、今後偏光利用技術が発展していくために必要な課題であると言えよう。

§ 5 まとめ

偏光アンジュレータからの放射の偏光特性および照射実験用の石英窓を透過した際の放射の偏光特性を各々評価した。偏光アンジュレータからの放射は非常に高い直線・円偏光度を有しており、偏光可変という特性とあわせて、新しい偏光利用技術への応用が期待される。また石英窓には、主に歪みに起因すると思われる複雑な偏光特性がある事が分かった。

偏光アンジュレータの優れた特性を最大限に活かすためには、アンジュレータ放射を効率よく、かつ偏光特性を損なわない形で取り出す技術の確立が必要不可欠である。そのためには、アンジュレータ放射の高度化とともに、介在する光学系のもつ偏光特性の定量的評価が極めて重要であると言える。今後、ますます偏光を利用した技術開発が進んでいくものと思われる。その更なる発展のためには、光学系の偏光特性の評価をより広い波長領域でより精密に行い、深い知見を得ておくことが必要であり、本研究で示したような偏光特性に関する基礎データの蓄積が重要になってくるであろう。

謝 辞

本研究を行うにあたり、電子蓄積リングの利用に際して数々の御協力を頂きました、電総研量子放射部リニアックグループの方々に感謝いたします。特に、千脇光國氏には、NIJI - 号への電子入射に際し多大な御支援を頂きました。この場をお借りして感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) H. Shitomi, T. Ibuki, S. Matsumoto and H. Onuki : Jpn. J. Appl. Phys. **38** (1999) Suppl. 38-1 176.
- 2) Y. Inoue, H. Tsuneishi, T. Hakushi, K. Yagi, K. Awazu and H. Onuki : Chem. Commun. (1996) 2627.
- 3) H. Onuki : Nucl. Instrum. Methods. **A246** (1986) 94.
- 4) H. Onuki, N. Saito and T. Saito : Appl. Phys. Lett. **52** (1988) 173.
- 5) K. Yagi, M. Yuri and H. Onuki : Rev. Sci. Instrum. **66** (1995) 1592.
- 6) T. Yamada, H. Onuki, M. Yuri and S. Ishizaka : J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena **80** (1996) 501.
- 7) T. Yamada, M. Yuri, H. Onuki and S. Ishizaka : to be published in Jpn. J. Appl. Phys. (2000).
- 8) K. Yagi, H. Onuki, S. Sugiyama and T. Yamazaki : Rev. Sci. Instrum. **63** (1992) 396.
- 9) M. Yuri, K. Yagi, T. Yamada and H. Onuki : J. Electron Spectroscopy and Related Phenomena **80** (1996) 425.
- 10) L. Nahon, M. Corlier, P. Peaupardin, F. Marteau, O. Marcouille, P. Brunelle, C. Alcaraz and P. Thiry : Nucl. Instrum. Methods. **A396** (1997) 237.

(1999.11.26受付)