佐賀 LS と軟 X 線イメージング

佐賀県鳥栖市の北部丘陵地帯に、第三世代光源としては世界最小規模の 1.4 GeV 放射光用電子加速・蓄積リングをもつ佐賀県立九州シンクロtron光研究センターの建設が進んでいる。蓄積リングの直線部には、アンジュレーターやウイグラーなどの挿入光源の設置が計画されている。このアンジュレーターからの放射光は軟 X 線領域をカバーし、集光素子を用いることによって、35 nm 程度の空間分解能での軟 X 線イメージング研究が提案されている。

安 本 正 人
近 浦 吉 則
石 黒 英 治

1. はじめに

佐賀県鳥栖市の北部丘陵地帯に、平成 16 年度に運用開始を目指した「佐賀県立九州シンクロtron光研究センター（佐賀 LS）」の施設建設が進んでいる¹⁾。佐賀 LS は、佐賀県が出資した（財）佐賀県地域産業支援センターが運営しており、1.4 GeV 加速・蓄積リング、262 MeV 線形加速器、20 本の放射光ビームラインが設置される予定である。この放射光リングは、1990 年代前半から運転が徐々に開始されたいわゆる第三世代光源であり、この世代の光源としては世界最小規模である。

現在のところ、偏向電磁石からの放射光を利用するビームラインが先行して設置されることが計画されているが、リングには 6 カ所の直線部があることから、将来的には挿入光源を設置することを前提としている。これら挿入光源からの放射光は、偏向電磁石からの放射光に比べて高輝度光であることから、微小領域における高感度分析などへの利用が期待できる。また、リングへの電子入射時以外の時間に、入射器リニアックの一部を赤外自由電子レーザー（IR-FEL）としての利用や陽電子源としての利用研究も検討されている²⁾。この IR-FEL を含めると、この施設は 0.063 eV～34 keV までの広いエネルギー範囲をカバーする高輝度光源施設といえる。

また、この放射光リングはエミッタンスが $\sim 25.5 \text{ nm rad}^{-1}$ という低エミッタンスモードでの電子蓄積が予定さ

れている。とくに、最近の放射光リングの低エミッタンス化の流れの中で、直線部での電子ビームの分散関数（ディスパージョン）に有限の値をもたせることによって、ビームサイズやビームエミッタンスを減少させ、高輝度リングとなるように設計されている¹⁾。このモードでの放射光は、電子ビームの進行方向に高い指向性をもち、コヒーレント光となっていることから、集光素子を用いることによって、マイクロビームにすることが可能である。筆者らは、その特徴を活かした「軟 X 線イメージング」研究を提案している。この軟 X 線イメージングは、軽元素を主構成元素とする高分子、バイオ・医療分野における利用研究が可能である。本解説においては、佐賀 LS 放射光施設や軟 X 線イメージング研究の概要について述べる。

2. 佐賀 LS

佐賀 LS の 1.4 GeV 加速・蓄積リングは、周長 75.6 m で、挿入光源を設置する 6 カ所の直線部（2.5 m×5 カ所、1.6 m×1 カ所）があり、放射光の取り出しポートは偏向部からと直線部からを含めて計 20 カ所が計画されている中型放射光施設である。図 1 に佐賀 LS 施設の平面図を示す。表 1 におもなパラメーター（目標値）を示す。現在稼働中の代表的な中型放射光施設としては、表 2 に示すとおり、海外においては MAX-II（スウェーデン）、ALS（米国）、BESSY-II（ドイツ）などで、国内においては UV-

YASUMOTO, Masato (左) (独)産業技術総合研究所光技術研究部門 (305-8568 つくば市梅園 1-1-1 つくば中央第 2)・主任研究員、工学博士。1990 年 京都大学大学院工学研究科修士課程修了。専門は自由電子レーザー応用研究、X 線マイクロビーム研究。
CHIKURA, Yoshinori (中) 九州工業大学大学院工学研究科機能システム創成工学専攻 (804-8550 北九州市戸畑区仙水町 1-1)・教授、工学博士。1973 年 東京工業大学大学院理工学研究科博士課程修了。専門は放射光科学。
ISHIGURO, Eiji (右) 琉球大学教育学部 (903-0213 沖縄県西原町千原 1)・教授、理学博士。1967 年 大阪市立大学大学院工学研究科修士課程修了。専門は光学、分光学。
Saga LS and Soft X-Ray Imaging

図1 佐賀県立九州シンクロtron光研究センター(平面図)

表1 佐賀LSのパラメーター

電子ビームエネルギー	0.2~1.4 GeV
ビーム電流, ライフタイム	300 mA & 5 h at 1.4 GeV
周長	75.6 m
ラティス	DB(A)×8 (eight fold symmetry)
直線部	2.93 m×8
エミッタンス (nm rad ⁻¹)	15 [35 (7.5-T Wiggler)]
チューン (ν_x, ν_y)	6.796, 1.825 [6.796, 1.825]
Momentum compaction	0.008074
エネルギー広がり	0.000672 [0.00079]
放射ロス (keV)	106 [123]
RF 周波数 (MHz)	499.8
RF パワー & field	90 kW & 500 kV
Harmonic number	126
バンチ長 (mm)	8.8 [10.35]
直線部でのビームサイズ (coupling=0.01) at $\eta=0.62$	σ_x (mm)=580 [680], σ_y (mm)=34 [52]
入射エネルギー (MeV)	262
偏向電磁石, 数, 角, 磁場強度	11.250 edge focusing, 16, 3.2 m, 1.459 T

表2 佐賀LSと稼働中の代表的な中型放射光源の仕様

施設	エネルギー (GeV)	周長 (m)	エミッタンス (nm rad ⁻¹)	挿入光源 (数)
佐賀 SL	1.4	75.6	25.5~46	6
New-SUBARU (姫工大)	1.5	118.7	67	4
PF (高エネ研)	2.5	187	27	11
ANKA (ドイツ)	2.5	110.4	40	
BESSY-II (ドイツ)	1.9	240	5	14
SLS (スイス)	2.4	288	3	9
ELETTRA (イタリア)	2.35	259.2	7	
PLS (韓国)	2.5	280.56	18.9	10
ALS (米国)	2.1	196.8	3.4	
CAMD (米国)	1.5	55.2	200	1
MAX-II (スエーデン)	1.5	90	8.8	6
TLS (台湾)	1.5	120	19.2	5
LNLS (ブラジル)	1.37	93.2	99.8

図2 アンジュレーターと偏向電磁石からのシンクロtron光の光束

SOR (分子研), New-SUBARU (姫工大) などがある。佐賀LSの装置としての特徴は、リング周長に比べて電子ビームのエミッタンスが小さいことにある。

佐賀LSの挿入光源としては、Undulator (アンジュレーター) や3極超伝導 Wiggler (ウイグラー) が計画されている。軟X線イメージング研究には、光源としてアンジュレーターを用いることが重要である。このアンジュレーターからの1次光が、water window と呼ばれる領域 (280~530 eV) をカバーするために、周期長で3.5 cm, 周期数で64, K 値で0.01~1.5まで変えることができる構造を設計した。3.5 cm-アンジュレーターは図2に示すとおり、偏向電磁石よりも4桁近くの高フラックスが期待できる。さらに、このアンジュレーターの高次光を用いれば、2 keV までのX線をカバーすることができる³⁾。また、円偏光放射が得られる可変偏光アンジュレーターも磁気円二色性(MCD)研究や絶対不斉合成研究などを進める上で非常に魅力的である⁴⁾。

また、佐賀LSの1.4 GeV 蓄積リングにおいて ~30 keV の硬X線領域までの高エネルギー高輝度X線を用いた研究(アンジオグラフィーなど)を行うためには、7.5 T 超伝導ウイグラーを設置することが有効である。中小型規模リングの中では産総研において10 T 超伝導ウイグラー⁵⁾、CAMD (LSU) において7 T 超伝導ウイグラーが稼動した実績がある。

佐賀LSの電子入射器は、6本の加速管で構成した262 MeVのリニアックである。蓄積リングのライフタイムが5時間であることから、リング入射時以外のときに、リニアックの1本の加速管を、通常1 μ s, 1 Hz で運転するのに対して、マクロパルス長9 μ s, 10 Hz の運転モードとすることによって、自由電子レーザー装置(FEL装置)として利用することが可能である。FEL装置は直列に2台設置し、阪大FEL施設ですでに実証されているように、赤外

用アンジュレーター、ホールカップル型光共振器によって構成する2色型FEL装置とすることによって、4~10 μm 、8~20 μm の赤外領域を波長可変できる⁶⁾。この波長のレーザー光は、半導体応用や生命科学などの分野での利用研究が期待できる。

3. 軟X線イメージング

3.1 軟X線イメージング（軟X線顕微鏡）

X線イメージングは、プローブとしてX線を用いることによって他のプローブ（たとえば電子やイオン）イメージングに比べて、高透過性・高空間分解能性・非破壊性という特徴をもっている。とくに、軟X線領域(<1 keV)は軽元素の吸収端が集中しているので、生命科学（ライフサイエンス）、材料科学（高分子科学）、医療応用、環境科学などの各分野での応用が期待できる。X線顕微鏡については、総説⁷⁾や最近の国際会議のProceedings⁸⁾などを参照されたい。

軟X線領域の中でもwater window領域(280~560 eV)には、炭素、窒素、酸素のK吸収端があるので、このエネルギー帯のX線を分光学的に用いることによって、各元素のマイクロ(μ)-XAFSを測定することが可能である。この μ -XAFSは、吸収端イメージングを測定することによって、着目した原子付近の局所構造解析を行うことができる。

軟X線イメージングの方法は走査法、結像法、投影法、密着法など多くの方法があるが、よく用いられているのは(1)走査法(Scanning X-ray Microscope; SXM): 集光したX線を走査し、試料から得られる情報をマッピングすることによってイメージを得る、と(2)結像法(Imaging X-ray Microscope; IXM): 集光したX線を試料に透過させ、得られたX線を拡大結像することによってイメージを得る、の2種類である。前者は、後者に比べてエネルギー分解能を高めることが容易であることを用いた研究が進んでいる。一方、後者は一時に全視野をとらえることができることから、時間分解測定において有利である。

3.2 佐賀LSにおける軟X線イメージングビームライン

佐賀LSでは、応用範囲の広い走査型軟X線イメージング用のビームラインが提案されている。佐賀LSの1.4 GeVリングの中で2.5 mの直線部分に真空封じ型アンジュレーターを設置し、1次光としてwater-window領域をカバーする。アンジュレーターの仕様を表3に示す。X線の集光面に試料を置き、2次元に走査することによって、各波長における吸収イメージが測定できる走査型軟X線イメージングビームラインが提案されている。したがって、すでに、この種のビームラインがユーザー開放されている米国のALSでは、多相系高分子固体について測定が

表3 軟X線イメージング用アンジュレーターパラメーター

タイプ	Halbach or helical
周期長	3.5 cm
周期数	64
K	0.1~1.5
B	0.03~0.46 T

M1, M2: 球面ミラー、G: 不等間隔平面回折格子、S: スリット、S': スリット、ZP: ゾーンプレート

図3 軟X線イメージング用ビームラインの構成図

図4 軟X線イメージングビームラインのエネルギー分解能

行われ、吸収端前後の波長による顕微画像などが得られている⁹⁾。また、その他の研究テーマとしては、光電子顕微鏡を利用した研究や偏光特性を利用した磁気円二色性研究なども提案されている。

軟X線イメージングビームラインの構成図を図3に示す。ビームラインのおもな構成としては、上流から光源（アンジュレーター）、不等間隔回折格子分光器、エンドステーション（集光素子、試料、検出器）から構成される。分光器内の回折格子から出口スリット(S, S')までの距離(A)に対するX線のエネルギーとエネルギー分解能の関係を図4に示す。

また、X線集光素子としては高分解能ゾーンプレート(ZP)を用いることによって、試料面における最小集光ビームサイズは、50 nmを目標としている。このビームライン

で得られる X 線は、試料面でエネルギー分解能 ($E/\delta E$) が 1,000~3,000, 集光ビーム強度が 10^9 photons s^{-1} 以上得られることがわかった。

4. おわりに

佐賀 LS は九州初の放射光施設であるだけでなく、佐賀県鳥栖市という北部九州の交通の要衝という地の利を活かし、アジアワイドの開発研究交流拠点となることが期待されている。そのために、放射光施設での計画段階から「佐賀県シンクロトロン光応用研究施設利用研究フォーラム」が組織され、新産業創造、地域産業の高度化に向けて、さまざまな利用研究テーマが提案され、それがすでに設備設計に盛り込まれている¹⁰⁾。20 本ある放射光取り出しポートのうち、すでに 3 本の県有ビームラインの建設が決定されている。また、佐賀 LS に提案した挿入光源を設置することによって、0.063 eV~34 keV の広範囲なエネルギー領域で高輝度放射光を利用することが可能となる。とくに、undulator による高輝度光利用と FEL による赤外レーザー光利用は、佐賀 LS の大きな特徴となることが期待できる。

海外の研究施設においては、すでに軟 X 線イメージング研究は産業応用段階にまで進んでいるにもかかわらず、国内には常設の走査型軟 X 線顕微鏡ラインがないために、研究が立ち遅れている状況にある（結像型軟 X 線顕微鏡ラインは立命館大学 SR センターにある）。第三世代光源

である佐賀 LS にこのビームラインが設置されることによって、研究が大いに進展することが期待できる。これらの研究を進めるために、佐賀県シンクロトロン光研究施設利用研究フォーラム内には「マイクロビーム研究会」が組織されている。この研究会では、ビームラインの設計だけでなく、ユーザーグループの組織化や各種セミナー、シンポジウムなどを開催している。

謝 辞 本報告をまとめるのに、木原 裕先生（関西医科大学医学部物理学教室）・竹本邦子先生（関西医科大学医学部物理学教室）・上條長生先生（関西医科大学医学部物理学教室）・富増多喜夫先生（佐賀県地域産業支援センター）のご指導を受けましたので、謝意を表したいと思います。

文 献

- 1) T. Tomimasu, *et al.*: IEEE Proc. PAC '03, Portland, May 12-16, 2003
- 2) 富増ら：佐賀シンクロトロン光施設（2002 年），第 1 回九州放射光医学利用シンポジウム（2002.1），九州大学，pp. 57-62
- 3) M. Yasumoto, *et al.*: *J. Phys. IV France*, **104**, 63 (2003)
- 4) 小貫ら：放射光，**7**(2), 99 (1994)
- 5) S. Sugiyama, *et al.*: *J. Synchrotron Rad.*, **5**, 437 (1998)
- 6) M. Yasumoto, *et al.*: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **41** (Suppl. No. 1), 44-48 (2002)
- 7) J. Kirz, *et al.*: *Q. Rev. Biophys.*, **28**, 33 (1995)
- 8) 例えば，*J. Phys. IV France*, **104** (2003)
- 9) T. Warwick, *et al.*: *Rev. Sci. Instrum.*, **69**, 2964 (1998)
- 10) <http://www.pref.saga.jp/syoukou/kougyou/synchrotron/index.htm>