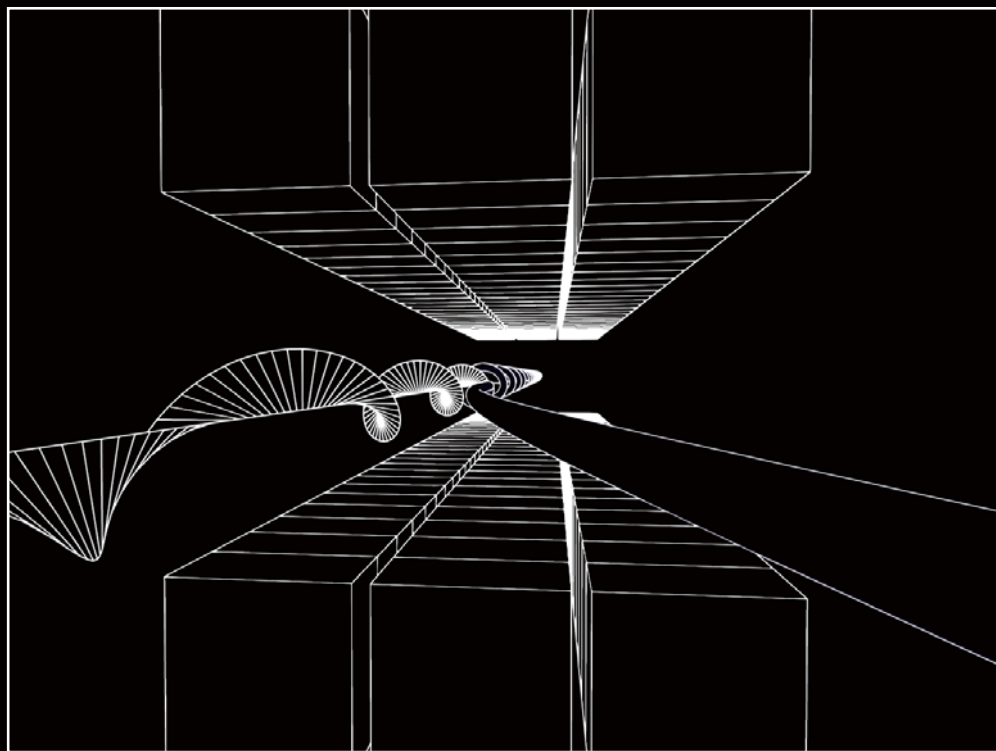


# 放射光ビームライン 光学技術入門

はじめて放射光を使う利用者のために



日本放射光学会

## 巻頭言

放射光ビームライン光学技術は、放射光源の進化とともに変化していく。わが国では、第二世代放射光施設である光子ファクトリーの利用に関連して、いくつかの入門書や参考書が出版され、それらは放射光利用の普及に貢献したのみならず、第三世代放射光施設であるスプリングエイトの施設計画に多大な影響をあたえてきた。スプリングエイトの供用開始以来10年を経過し、この間にビームライン光学技術の新たな進歩があったが、それらを取り込んだ入門書や参考書を作ることが、第三世代放射光利用の一層の普及と、次世代に向けての概念検討のために不可欠であるという認識が広がりつつある。このような状況下で、日本放射光学会誌上に「ビームライン光学技術シリーズ」が掲載されたところ、学会員に留まらず多くの読者の注目するところとなり、単行本としての出版を望む声が寄せられるようになった。今般、それに応じて、学会誌記事をベースとした単行本を発刊することにより、この分野に新たに参入する学生諸君や、彼らを指導する立場にある方々の便に供することとなったことは、この分野で仕事をしてきた者にとって、非常に喜ばしいことである。

単行本にするにあたり、学会誌掲載原稿をより読みやすくするために手を入れるとともに、新たに挿入光源・自由電子レーザーに関わる一章を追加した。また各章に演習問題を追加した。第三世代放射光では、それまでの世代と比較して、より光源と一体的にビームライン光学系を考える必要があり、この傾向は次世代放射光施設の一つであるX線自由電子レーザーでは、ますます加速されることとなろう。光源にあわせて利用を考える時代は去りつつあり、むしろ利用に合わせて光源を考える時代となりつつある。各章の演習は、特に初学者が本で読んだ知識を、現場で使える知識に転換する助けとなることを意図したものである。これらの増強によって、本書の実用的な価値は学会誌掲載記事とくらべて格段に高くなり、設定された価格をはるかに超えるものとなっていると信じている。

本書出版のそもそもの意図が、入門的な解説を中心とするものであ

るため、章によっては最近の急速な進展を追いきれていないところも多々あるかと感じている。これは放射光のような進展の速い分野の入門書の宿命であるが、分野の進展を鳥瞰できるものとして三年ごとに開催される国際会議のプロシーディングスがあるので、興味のある読者は是非ご覧いただきたい。また、各施設のホームページ上には、非常にホットな研究成果が掲載されるので、これも興味のある読者は是非ご覧いただきたい。

最後に、本書の発刊にあたっては、放射光学会若手会員を中心とする第一線で活躍中の著者の皆さんに、素晴らしい原稿をお寄せいただいた。また、それらを纏め上げ編集の労をとった(財)高輝度光科学研究センター・大橋治彦博士と高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所・平野馨一博士に、心から感謝の意を表したい。本書が、多くの研究者、技術者、大学院生の役に立ち、放射光科学の新たな発展の礎となることを希望する。

平成20年11月吉日

理化学研究所・放射光科学総合研究センター  
石川 哲也

## まえがき

本書は日本放射光学会・学会誌「放射光」の特別企画「ビームライン光学技術シリーズ」(2005年Vol.18, No.4から2007年Vol.20, No.4まで全13回)をもとに、新たに編纂されました。この連載シリーズは柳下明元編集委員長のもとで企画され、浅学ではありますが我々が編集を仰せつかりました。柳下元委員長から、シリーズ構成にあたり本書の輪郭がすでに指針として示されていました。ビームラインの光学技術を(1)学生や初心者ユーザーを対象に、(2)物理的基礎を平易な文章で豊富な図を使って解説し、(3)執筆陣は若手とし放射光施設間のバランスを取ることを、という何れ劣らぬ難題でありました。出版を前に改めて編集担当者の力量不足を痛感しているところですが、唯一、果たせた宿題が(4)シリーズを単行本として出版することでありました。日本放射光学会初の単行本としてここに出版の日を迎えることができましたのは、執筆者の並々ならぬ努力と、横山利彦前編集委員長ならびに櫻井吉晴編集委員長、そして何より日本放射光学会の学会誌読者の皆様の温かいご支援の賜物に他なりません。

本書全体の構成にあたり、巻頭言を賜った(独)理化学研究所・石川哲也博士から貴重な助言を授かりました。高エネルギー加速器研究機構・吉村順一博士には原稿を丁寧に通読いただき有益な指摘を多数頂戴いたしました。(財)高輝度光科学研究センターの仙波泰徳博士、竹内智之博士、湯本博勝博士、(独)理化学研究所・初井宇記博士ほか、多くの同僚や諸先輩方から貴重なご意見をお寄せいただき、本文の改定を行いました。表紙のデザインは(財)高輝度光科学研究センター・松下智裕博士によるものです。最後に、日本放射光学会事務局の西野三和子さん、佐藤亜己奈さんのご支援に改めて深く謝意を表します。

(財)高輝度光科学研究センター  
大橋 治彦  
高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所  
平野 馨一

## 著者一覧（五十音順）

- 足立 伸一 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所  
(第12章)
- 雨宮 健太 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所  
(第7章)
- 宇留賀 朋哉 (財) 高輝度光科学研究センター (第8章)
- 大橋 治彦 (財) 高輝度光科学研究センター (第1章, 第14章)
- 大端 通 (財) 高輝度光科学研究センター (第13章)
- 木村 真一 自然科学研究機構・分子科学研究所 (第7章)
- 香村 芳樹 (独) 理化学研究所 (第9章)
- 小菅 隆 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所  
(第3章)
- 後藤 俊治 (財) 高輝度光科学研究センター (第6章)
- 繁政 英治 自然科学研究機構・分子科学研究所 (第5章, 付録)
- 鈴木 基寛 (財) 高輝度光科学研究センター (第10章)
- 高野 秀和 兵庫県立大学 (第9章)
- 高橋 直 (財) 高輝度光科学研究センター (第4章)

- 田中 隆次 (独) 理化学研究所 (第2章)
- 田中 義人 (独) 理化学研究所 (第12章)
- 谷口 真吾 (財) 高輝度光科学研究センター (第3章)
- 成山 展照 (財) 高輝度光科学研究センター (第3章)
- 濁川 和幸 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所  
(第13章)
- 野村 昌治 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所  
(第8章)
- 平野 馨一 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所  
(第1章, 第14章)
- 広野 等子 (財) 高輝度光科学研究センター (第10章)
- 松下 智裕 (財) 高輝度光科学研究センター (第3章)
- 宮内 洋司 高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所  
(第4章)
- 百生 敦 東京大学 (第11章)
- 矢橋 牧名 (独) 理化学研究所 (第5章, 付録)
- 山崎 裕史 (財) 高輝度光科学研究センター (第6章)

(所属は2008年12月現在)

# 目 次

巻頭言	(石川 哲也)	i
まえがき	(大橋 治彦・平野 馨一)	iii
著者一覧 (五十音順)		iv
<b>第1章 はじめに</b>	(大橋 治彦・平野 馨一)	1
1 放射光ビームラインとは何か		2
2 ビームライン光学技術を知る必要性		3
2.1 ユーザーにとってのビームライン		3
2.2 新規ユーザーといえどもビームライン光学技術を知る必要がある		5
2.3 経験豊かなユーザーもビームライン担当者もビームライン光学技術を知る必要がある		6
3 本書の概要		7
3.1 全体構成		7
3.2 光を作るしくみ (第2章)		8
3.3 光を安全に取り出すしくみ (第3章～第4章)		8
3.4 光を加工するしくみ (第5章～第12章)		9
3.4.1 光のエネルギーを切り出す		10
3.4.2 光の形を整形する		10
3.4.3 光のさまざまな性質 (偏光, コヒーレンス, 時間構造) を扱う		11
3.5 光を便利に扱うために (第13章～第14章)		11
4 むすび		12
<b>第2章 光を作る (挿入光源と次世代光源)</b>	(田中 隆次)	
1 はじめに		14
2 なぜ放射光が必要か?		15

2.1 光の明るさとは?		15
2.2 輝度の例: レーザーと電球		16
2.3 高輝度X線源としての放射光		17
2.4 高輝度化への歩み		18
<b>3 光源性能を規定する物理量</b>		18
3.1 6次元位相空間		19
3.2 輝度		19
3.3 フラックス		20
3.4 パワー		21
<b>4 放射光を理解するための基礎知識</b>		21
4.1 光速の壁		22
4.2 光パルスの収縮		23
4.3 光の放出角の変換		25
4.4 フーリエ変換		27
4.4.1 単色平面波とフーリエ変換		27
4.4.2 フーリエ変換と不確定性		28
4.5 光の不確定性		29
4.5.1 時間的不確定性: フーリエ限界		30
4.5.2 空間的不確定性: 回折限界		30
<b>5 偏向磁石放射</b>		31
5.1 指向性		32
5.2 スペクトル		32
<b>6 挿入光源</b>		33
<b>7 アンジュレーター放射</b>		34
7.1 アンジュレーター磁場と相対論的電子の運動		34
7.2 基本波長		35
7.3 光強度の分布関数		36
7.4 発散角と光源サイズ		38
7.5 高次光		39

8 放射光ユーザーのための実用的知識	40
8.1 光子数の見積	41
8.2 電子ビームの構造	42
8.3 実効光源サイズと実効発散角	43
8.4 実効フラックス密度と実効輝度	43
8.5 コヒーレントフラックス	44
8.6 光源特性の例	45
8.7 スペクトル	46
8.8 熱負荷とフラックス	48
8.9 ウィグラーとアンジュレーター	50
9 次世代放射光源	51
9.1 なぜライナック？	52
9.2 エネルギー回収型ライナック	52
9.3 シングルパス自由電子レーザー	54
9.3.1 FELパラメータ	56
9.3.2 バンド幅	57
9.3.3 光源サイズと発散角	57
9.3.4 輝度の簡易計算	58
9.4 従来型光源との比較	59
9.4.1 光源サイズと発散角	60
9.4.2 ピーク輝度と平均輝度	61
9.4.3 スペクトル	62
10 おわりに	63
問題	65
<b>第3章 光を安全に取り出す（インターロック・放射線遮蔽）</b>	
(小菅 隆・松下 智裕・谷口 真吾・成山 展照)	
1 はじめに	66
2 遮蔽	67
2.1 蓄積リングからの放射線と遮蔽方法	67

2.2 ビームシャッター（MBS, BBS, DSS）	69
2.3 ビームストッパー（ガンマストッパー, エンドストッパー）	70
2.4 放射線遮蔽ハッチ	71
3 ビームラインインターロックシステム	72
3.1 システムの構成	73
3.2 ロジックの概要	74
3.3 利用上注意すべきこと	75
4 ビームアバートについて	75
5 おわりに	77
コラム ラダー言語とは	77
問題	80
<b>第4章 光を安全に取り出す（フロントエンド）</b> （高橋 直・宮内 洋司）	
1 はじめに	86
2 フロントエンドとは	86
3 フロントエンドの構成機器と役割	88
3.1 ビーム成形と高熱負荷処理	89
3.2 放射光の導入と遮断	90
3.3 超高真空の維持	92
4 ユーザー実験への影響	94
5 高熱負荷処理技術	96
5.1 トータルパワーとパワー密度	96
5.2 高熱負荷への対処	97
5.3 熱および熱応力解析	99
5.4 熱的限界調査	100
5.5 今後の見通し	101

6 おわりに	102
問題	105

### 第5章 光のエネルギーを切り出す (基礎編) (繁政 英治・矢橋 牧名)

1 はじめに	108
2 光とは何か	109
2.1 種類と性質	109
2.2 屈折と反射	112
3 光の干渉と回折	116
4 分光素子 - 回折格子と完全結晶	119
5 現場で役立つ情報	121
6 おわりに	122
コラム 逆空間における分光素子	123
問題	126

### 第6章 光のエネルギーを切り出す (X線編) (山崎 裕史・後藤 俊治)

1 はじめに	130
2 単位について	131
3 分光の仕組み	132
4 分光結晶の選択	135
5 単色性	137
6 駆動機構	138
7 結晶の冷却	141

8 X線分光器の利用	144
9 おわりに	146
問題	148

### 第7章 光のエネルギーを切り出す (真空紫外・軟X線編)

(雨宮 健太・木村 真一)

1 はじめに	151
2 回折格子を使ってどのようにエネルギーを切り出すか	153
2.1 基本的な分光器	153
2.2 高分解能を実現するための条件と問題点	155
2.3 高フラックスを実現するための条件と問題点	159
2.4 高次光・迷光・偏光	162
(a) 高次光	162
(b) 迷光	163
(c) 偏光	164
3 実際のビームラインおよび分光器の例	165
3.1 前置集光系+入射スリット	165
3.2 分光器	167
(a) 斜入射領域	167
(b) 直入射領域	168
3.3 後置集光系	169
4 おわりに	170
問題	172

### 第8章 光の形を整形する (ミラー編)

(宇留賀 朋哉・野村 昌治)

1 はじめに	176
2 X線の反射の基礎知識	177
2.1 X線の反射とは?	177

2.2	X線の反射率に影響するもの	178
2.3	多層膜を用いたミラー	181
3	ミラーの用途	182
3.1	集光	182
3.2	平行化	182
3.3	高次光除去	183
3.4	軟X線用ミラーの特徴	184
4	集光ミラーのいろいろ	184
4.1	集光ミラーの表面形状	184
4.2	1次元の集光	186
4.3	2次元の集光	187
4.4	高い集光性能をもったミラー	188
5	集光サイズに影響する要因	189
6	硬X線ビームラインにおけるミラーの配置	191
7	どのようなミラーを作ればよいか	191
7.1	ミラーの基本構造	191
7.2	必要な長さ	192
7.3	基板材質の選択	193
7.4	表面の研削・研磨	193
7.5	反射材の選択	194
7.6	ミラー調整機構	194
8	ミラーの性能評価と調整	196
8.1	オフラインでの評価	196
8.2	放射光を用いた評価と調整	197
9	トラブルと対策	198
9.1	ミラー本体	198
9.2	振動	199

9.3	曲げ	199
9.4	経年劣化	200
10	おわりに	200
	問題	202

## 第9章 光の形を整形する（回折・屈折素子編）（高野 秀和・香村 芳樹）

1	はじめに	206
2	光学的に光を集める	207
3	X線領域で利用される集光素子	209
3.1	どのような種類があるか？	209
3.2	フレネルゾーンプレート	211
3.3	屈折レンズ	215
4	X線集光ビームの取り扱い	220
4.1	どのように設計すればよいか	220
4.1.1	集光素子と照明条件のマッチング	220
4.1.2	仮光源の利用と効果	220
4.1.3	目的や使用ビームラインに応じた設計	221
4.2	どのように調整，評価すればよいか	222
4.3	その他の考えるべき点	224
5	今後の展望	226
	問題	230

## 第10章 光の偏光を制御する（鈴木 基寛・広野 等子）

1	はじめに	233
1.1	偏光を使うと何がわかるか	233
2	偏光についての共通事項	235
2.1	偏光状態とその表し方	235

2.1.1 直線偏光	236
2.1.2 円偏光	237
2.1.3 偏光度	238
2.2 偏光光学素子の種類	240
2.2.1 偏光子(検光子)	240
2.2.2 移相子	241
2.3 偏光の作り方—ある偏光状態から別の偏光状態への変換	242
2.3.1 直線偏光から円偏光への変換	242
2.3.2 水平直線偏光から垂直直線偏光への変換	243
2.4 偏光の測り方	243
3 偏光制御の実際	244
3.1 各波長領域での偏光光学素子	244
3.2 偏光光学素子と挿入光源	245
4 軟X線領域での偏光制御	246
4.1 軟X線領域の偏光光学素子	246
4.1.1 軟X線領域の偏光子—反射型多層膜偏光子	246
4.1.2 軟X線領域の移相子—透過型多層膜移相子	246
4.2 放射光実験に必要な偏光の作り方	247
4.2.1 高速偏光スイッチング	248
4.3 軟X線ビームラインを使う場合の注意点	248
5 硬X線領域での偏光制御	249
5.1 硬X線領域の偏光光学素子	249
5.1.1 硬X線領域の偏光子—反射型結晶偏光子	249
5.1.2 硬X線領域の移相子—透過型結晶移相子	250
5.2 ダイヤモンド結晶移相子の利用	254
5.2.1 高速偏光スイッチング	254
5.2.2 移相子制御の実際	255
5.2.3 X線の角度発散やエネルギー幅の影響—最適な結晶厚さ	256
5.2.4 左右円偏光の強度差	258
5.2.5 移相子結晶の同時反射	258
6 おわりに	259
問題	262

第11章 光のコヒーレンスを使う	(百生 敦)
1 はじめに	264
2 コヒーレンス	265
3 X線の位相シフトと伝播	268
4 X線コヒーレンスの制御	271
5 コヒーレンス応用研究	275
5.1 位相イメージング	275
5.2 回折顕微法	277
5.3 スペックル分光	278
5.4 ビーム集光	278
6 おわりに	279
問題	281
第12章 光の時間構造を使う	(足立 伸一・田中 義人)
1 はじめに	283
2 放射光の時間構造(原理)	284
3 放射光の時間構造を利用した測定法	287
4 放射光との同期技術	288
5 放射光を望みの繰り返し周波数に間引く技術	290
6 放射光とレーザーのタイミングをモニターする技術	293
7 単位時間・パルス当りの光子数の見積	294
8 応用例	296
8.1 時間分解回折法による結晶構造のダイナミクス	296
8.2 時間分解3結晶回折法を用いた結晶格子ダイナミクスの研究	296

8.3 時間分解XAFS .....	298
9 おわりに .....	298
問題 .....	301

### 第13章 光を自在に操る制御

(大端 通・濁川 和幸)

1 はじめに .....	303
2 制御システムの役割 .....	304
2.1 制御対象 .....	304
2.2 計算機制御 .....	307
2.3 リモート制御とコラボラトリ .....	310
2.4 標準化された制御システムの存在意義 .....	312
3 KEK-PFにおける制御システムの実際 .....	313
3.1 ビームライン制御の標準化へのKEK-PFにおける取り組み .....	313
3.2 コラボラトリ .....	315
4 SPring-8における制御システムの実際 .....	319
4.1 基本構成 .....	319
4.2 ソフトウェア環境 .....	320
4.3 ビームライン制御の例：挿入光源の独立調整について .....	321
4.4 便利なツールの紹介 .....	322
5 おわりに .....	323
問題 .....	327

### 第14章 ビームラインの統合的理解のために

(平野 馨一・大橋 治彦)

1 はじめに .....	330
2 ビーム強度を見積もる方法 .....	331
2.1 光の強度について .....	332

2.2 ベリリウム窓やグラファイトフィルター等による吸収の影響 .....	333
2.3 ミラーによる影響 .....	334
2.4 2結晶分光器で単色化されたX線の強度 .....	335
3 ビームのサイズと発散を見積もる方法 ～位相空間の話～ .....	337
3.1 位相空間 (phase space) とは .....	337
3.2 位相空間を用いる利点 ～エミッタンスの保存則と輝度の保存～ .....	338
3.3 光源から放射される光のサイズと発散 .....	340
3.3.1 偏向電磁石の場合 .....	340
3.3.2 アンジュレーターの場合 .....	342
3.4 位相空間による光子集団の運動の記述 .....	343
3.4.1 自由空間の伝搬 .....	343
3.4.2 スリットの影響 .....	344
3.4.3 集光素子の効果 .....	344
3.4.4 分光結晶の影響 .....	346
4 ビームラインで得られる光の特性を計算する方法 ～光線追跡プログラムSHADOWとその限界について～ .....	346
5 おわりに .....	348
問題 .....	351

### 演習問題解答

第2章 .....	353
第3章 .....	356
第4章 .....	361
第5章 .....	366
第6章 .....	370
第7章 .....	374
第8章 .....	377

第9章 .....	380
第10章 .....	385
第11章 .....	390
第12章 .....	393
第13章 .....	396
第14章 .....	401
索引 .....	403

付録 (繁政 英治・矢橋 牧名)

# 見本

の割合を調べたり、試料の特異な物性を理解するために構造や電子状態を決定する…等々。

ユーザーがビームラインを知ることは、教習所で車の仕組みを学ぶことと同じです。車を運転したいから教習所に通います。車の仕組みを知りたいからではありません。また仕組みを習ったからといって、車を設計できるようにはなりません。しかし、エンジンやミッションの基本的な動作原理を学ぶことを通して、自分の目的（例えば、高速走行向きか、悪路の走行が可能か、小回りの利く車なのかなど）に合った車種を選ぶ最低限の基礎知識を習得します。また、運転中に異音に気づいて対応できるようになるなど、安全走行に役立つこともある

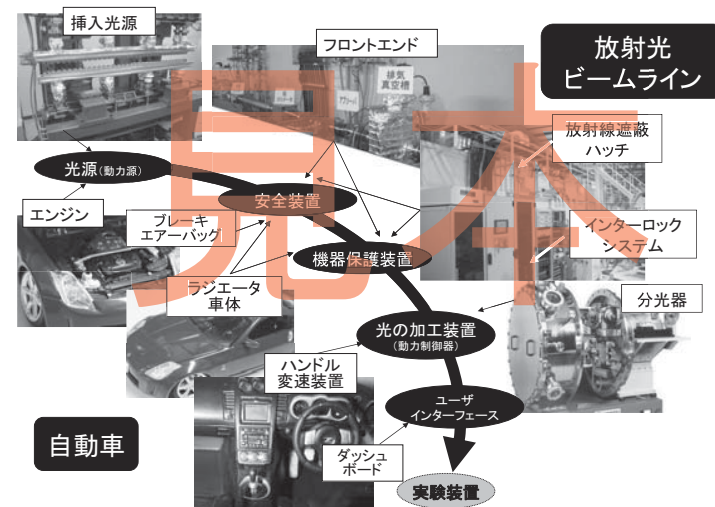


図1.3: 放射光ビームラインを車になぞらえてみると・・・

「ビームライン」を「車」に、「放射光の利用」を「車の運転」に、「実験装置」を「道路」になぞらえてみます。車を運転する目的に色々あるように、放射光の利用目的も多種多様です。車の仕組みを知れば、目的にあった車種を適切に選択できます。車の種類はいろいろありますが、車の構成要素（エンジンの動力でタイヤを回転させ、ブレーキとアクセルで制御する）は基本的に同じです。それと同じように、ビームラインも多種多様に見えますが、その構成要素（光源、遮蔽、制御、各種の光学素子・光学系・・・）は同じです。

## 第2章 光を作る (挿入光源と次世代光源)

### 1 はじめに

本書を手にした方の多くは、「放射光施設」でどのようなことが行われているか、おおよそのイメージはお持ちでしょう。すなわち、ライナック (直線加速器) やシンクロトロン (円形加速器) などの加速器で電子を光速近くまで加速し、これを磁石で曲げたときに発生する光 (シンクロトロン放射光, 以下放射光) を実験ステーションに導き、試料に照射することによって様々な実験が行われています。そして「放射光は非常に明るい」という事実もご存じのことだと思います。それでは、「光が明るい」とはどういうことを意味するのでしょうか?

身近な例として電球を取り上げてみましょう。電球の明るさを示すのはご存じの通り、「ワット数」のような、総出力 (パワー) です。トイレのような狭い空間を照らす場合と、大きめのリビングルームを照らす場合では、必要な明るさは異なりますから、パワーを目安としてそれぞれの目的にあった電球を選択することになります。そしてパワーを明るさの基準とするならば、放射光は他の光源に比べて格段に明るいということはありません。実際、後述する「アンジュレーター」と呼ばれる特殊な装置を使った場合でも、光のパワー自体は高々1kW程度です。すなわち100Wの電球10個分に過ぎず、この例から、放射光の明るさを特徴づけるのはパワーではないことがわかります。

本章ではまず、放射光が必要とされる理由について簡単に解説します。このため、「光の明るさ」について正確な定義付けを行います。これらを踏まえた上で放射光がなぜ「明るい」のかについて定性的な説明を行い、一般的な放射光の特性について解説します。さらに、より「明るい」放射光を作るために考案された「挿入光源」と呼ばれる装置の概略について説明し、得られる放射光の特性について解説します。次に、実際に放射光を利用して実験を行う場合に有用な知識について実例を挙げて解説します。最後に、次世代の放射光源として期待されている「自由電子レーザー」と「エネルギー回収型ライナック」の概略及び放射光の特性について触れることにします。なお、この本では

他にもさまざまな物理量が存在します。ここでは放射光を利用する上で知っておくべき物理量とそれらの関係について解説します。

### 3.1 6次元位相空間

まず最初に、光の明るさを考える上で重要な6次元位相空間という概念について簡単に説明します。図2.1に示すようなシステムで光の強度を測定する仮想実験について考察しましょう。この例では、光源から出た光は1番目のスリットで位置 $(x, y)$ 、2番目のスリットで角度 $(x', y')$ 、プリズムと3番目のスリットで振動数 $\omega$  (換言すると波長 $\lambda$ ) を規定された状態で検出されます。スリットで切り出す際に生じる回折の影響はここでは無視することにします。さて、ある時刻 $t$ において時間幅 $\Delta t$ の間に $N$ 個の光子が検出されたとしましょう。測定時刻や各スリットの位置を変化させることによって、検出される光子数は変化します。すなわち、光子数 $N$ を位置 $(x, y)$ 、角度 $(x', y')$ 、時間 $t$ 、及び振動数 $\omega$ の6つの座標で構成される空間における物理量として記述することができます。この空間のことを6次元位相空間と呼びます。なお6つの座標の内、位置・角度の4つの座標 $(x, y, x', y')$ で構成される空間は4次元位相空間と呼ばれます。

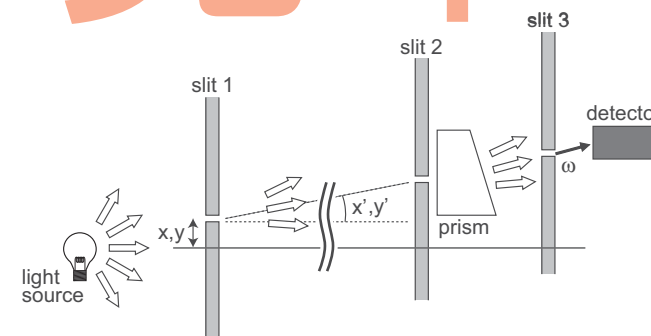


図2.1: 光強度を測定する仮想実験のシステム。

### 3.2 輝度

前節で定義した6次元位相空間における平均光子数密度は

### 9.3 シングルパス自由電子レーザー

もともと自由電子レーザー (Free Electron Laser, 以下FEL) とは、従来のレーザーと同様に、光を閉じこめる光共振器と光を増幅する媒質 (電子ビームとアンジュレーター) から構成される光源のことを指します。FELの模式図を図2.16(a)に示します。アンジュレーターを通過する電子ビームと閉じこめられた光が相互作用することによって、電子ビームに光の波長程度の密度変調 (マイクロバンチ) が作り出され、この結果、電子ビームを構成する各電子から放出される光の電場がコヒーレントに (同位相で) 足し合わされます。通常の放射光では、光の強度はビーム電流すなわちビーム中の電子数に比例しますが、自由電子レーザーではその2乗に比例するため、極めて輝度の高い光を得ることができます。従来のレーザーとは異なり、発振波長はアンジュレーター放射光の基本波長で決まるため、原理的な制約がありません。このため、特に短波長領域においてFELを実現する試みがなされてきましたが、技術的にもっとも困難なのは光共振器で、特に100nm以下では反射率の高いミラーが無いいため、FELに必要な高性能な共振器を構成することは不可能でした。そこで短波長領域においては、光共振器を必要としないFELが検討されてきました。

そもそもレーザーにおける光共振器の役割は、光を反射させて媒質中を往復させることによって増幅率を高めるということであるため、増幅媒質を長くすることによって同じ効果を得ることができます。FELの場合は、図2.16(b)に示すように十分に長いアンジュレーターに電子を入射することにより可能となります。この場合、光は反射されるこ

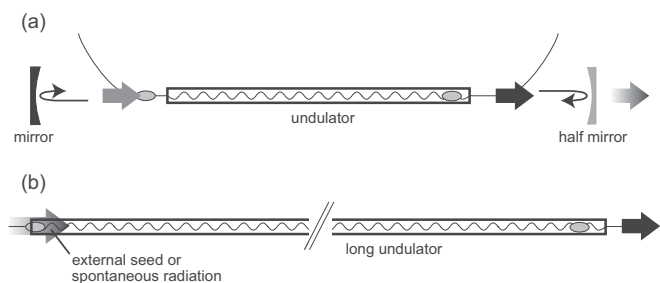


図2.16: FEL 模式図。(a) 共振器型, (b) シングルパス型。

って、施設の建設と加速器のコミッションングが進むにつれて変化していく可能性があることをご了承下さい。

#### 9.4.1 光源サイズと発散角

まず最初に光源サイズと発散角について比較します。SPring-8におけるこれらの値は既に8.3節で計算済みです。またERLについても全く同様に計算できて、水平・垂直方向とも、光源サイズ7.5 $\mu\text{m}$ 、発散角3.5 $\mu\text{rad}$ となります。一方、SASEについては(2.30)と(2.31)から計算できて、水平・垂直方向とも、光源サイズ28 $\mu\text{m}$ 、発散角0.18 $\mu\text{rad}$ となります。

これらの値をわかりやすく比較するため、光源点でのビーム形状 (光源サイズ) と、光源から遠く離れたところでのビーム形状 (発散角) を図2.17に模式的に示しました。SPring-8では垂直方向に光源サイズと発散角が小さい扁平なビームですが、次世代光源では丸い形状のビームが利用できることがわかります。またSASEにおける発散角は極めて小さく、例えば光源から100m離れたところでもビームの大きさは数10 $\mu\text{m}$ という、非常に平行度の高いビームです。

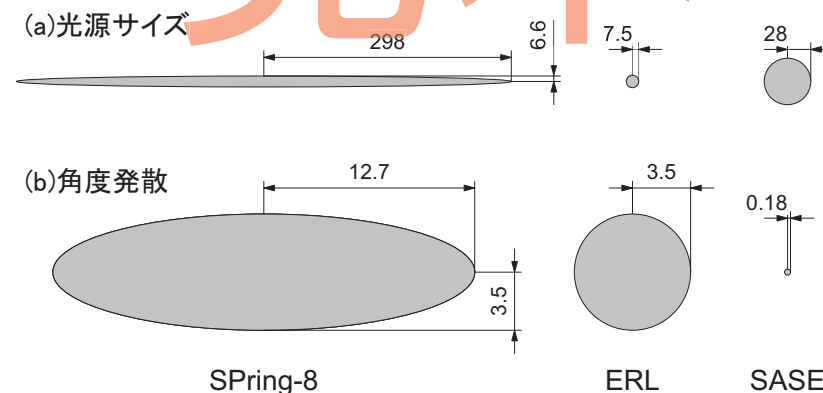


図2.17: 各放射光源における (a) 光源サイズ, (b) 発散角の比較。単位はそれぞれ $\mu\text{m}$  及び $\mu\text{rad}$ 。

軌道の接線上に設けられている放射光取り出し口からの放射線を完全にカバーできる大きさとなっています。モノクロメーター後方の近い場所に設置されますが、これはハッチ後面との距離を取り、ガンマストッパーからの2次放射線を距離で減衰させるためと、モノクロメーターからの放射光散乱線は角度が小さいほど強いのでこれを遮蔽するためです。また、発生する中性子を遮蔽するため、ポリエチレンを抱き合わせたビームラインもあります。

エンドストッパーの厚さはSPring-8の場合、鉛10cmです。これもダイレクトの放射光と小角散乱の放射光を遮蔽します。

## 2.4 放射線遮蔽ハッチ

放射線遮蔽ハッチは、光学機器や実験試料および上記ストッパーなどからの放射光散乱線を遮蔽し、また散乱点に人を近づけない役割を担っています。SPring-8の硬X線ビームラインを例に取ると、放射線遮蔽ハッチは光学ハッチと実験ハッチの二つに分かれています（図3.6）。光学ハッチはハッチ内に白色光を取り込むもので、その内部には分光器やミラーなどの光学機器やガンマストッパーがあります。他方、実験ハッチは単色光を取り込むもので、その内部では単色光を受ける実験試料、大気、ビーム軸最下流のエンドストッパーなどによって散乱線が生じます。

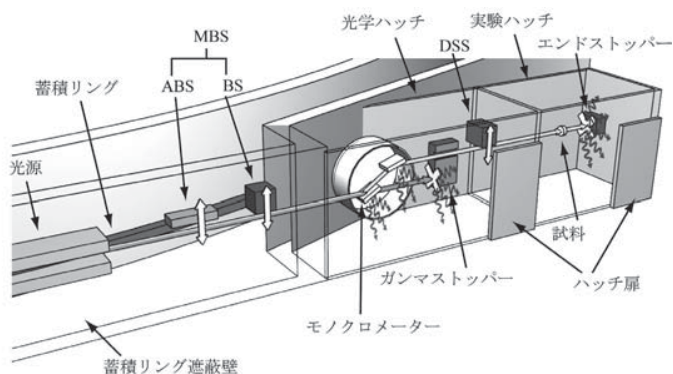


図3.6: SPring-8ビームラインと遮蔽コンポーネント。

## 3 フロントエンドの構成機器と役割

例えばSPring-8では図4.2に示すように、フロントエンドの領域を、蓄積リングの光取り出しポート終端から遮蔽壁直下流のベリリウム窓までの部分と定義しています。

このようにフロントエンドの機器のほとんどは、通常立ち入ることができない遮蔽壁内に設置されているため、信頼性を高めることが重要です。前章でも触れられているように、フロントエンドでの機器故障は、全ユーザーの実験を長時間にわたって止めてしまう場合が多いからです。さらにビームアボートに至らなくても、駆動機器が動かぬといった事態に陥ると、特定のビームラインで実験ができなくなり

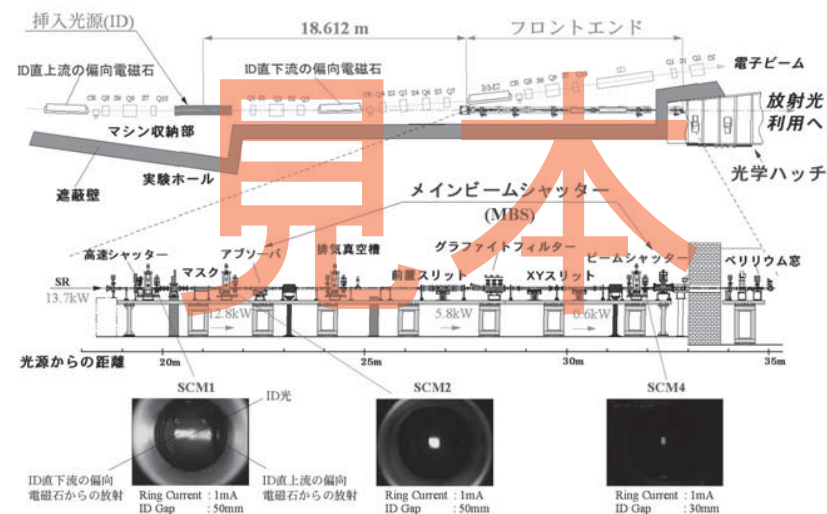


図4.2: SPring-8収納部内の蓄積リングやフロントエンドの模式図と、フロントエンド機器の詳細な配置図。また、BL12XUのビームラインコミッション時に観察されたスクリーンモニターの画像を示す。フロントエンドの高熱負荷機器によってビーム成形が段階的に行われていることを確認できる。

b) ビームラインを川の流りに模して、光源側を上流、実験ステーション側を下流と称す。

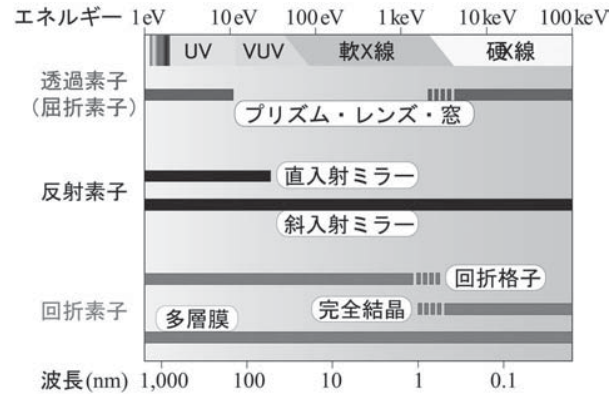
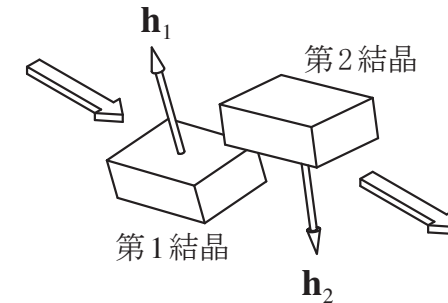


図5.5: 光学素子と波長範囲の対応。

紫外光VUV (Vacuum Ultra Violet) と呼ばれる所以です。VUVから軟X線にかけての領域の光に対しては透明な物質がありませんので、透過型素子は利用できません。しかし、およそ4keV以上の硬X線になると、物質を透過する能力(透過能)が十分に高くなるので、再び透過型素子が使えるようになります。反射型素子のミラーの場合、光エネルギーに対する表面材料の反射率が問題になります。放射光用のミラーの表面には金や白金を薄く蒸着する場合(これをコーティングと呼びます)が多いですが、これら金属の反射率は光の表面に対する入射角と光エネルギーの両方に依存します(第8章参照)。表面に対して垂直に近い角度で入射する直入射配置の場合、30eVより低いエネルギーの光に対しては10%以上の反射率がありますが、それ以上のエネルギーの光に対しては急激に反射率が低下します。現実問題として、直入射配置が実用になるのは40eV以下のエネルギー領域です。ミラーの表面にすれすれの角度で入射する場合を斜入射配置と呼びますが、この場合でも、反射率は入射角とエネルギーに依存します。同じエネルギーの光なら、なるべく表面すれすれに入射すると反射率が高くなります。また、同じ入射角なら、エネルギーが高い光ほど反射率は低くなります。透過能の高い硬X線を反射するミラーの場合、入射光が表面から内部に入らず全て反射する条件(全反射条件)で利用されますが、その

(c) 2結晶が図のように非平行に置かれていた場合、分光X線の進行方向が入射ビームに平行でないことを示せ。



(d) 2結晶が非平行に置かれていた場合、どのような問題が起こるか考察せよ。

- 6.8. シリコンの場合に第1結晶に許容される温度ムラを概算せよ。第1結晶で反射されるX線のエネルギーが相対的に $10^4$ ずれると、分光器からのスループットが低下することを考慮せよ。結晶の平均温度は $20^\circ\text{C}$ 、このときの熱膨張率は $2.55 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ とする。
- 6.9. 放射光の500Wのパワーがすべて、冷却していない $1\text{mm}^3$ のシリコン結晶( $20^\circ\text{C}$ で $2.33\text{mg}$ )で一様に熱に変わるとしたら、どのくらいの時間で融点( $1412^\circ\text{C}$ )に達するか計算せよ。比熱は温度によって変化するが(室温で $0.7\text{J/g}\cdot\text{K}$ 、融点で $1.0\text{J/g}\cdot\text{K}$ )、ここでは一様に $0.85\text{J/g}\cdot\text{K}$ と仮定する。
- 6.10. (a) 結晶の屈折率 $n$ を考慮して、(6.1)式のブラッグ条件を書き改めよ。但し、格子面と結晶表面は平行とする。  
 (b) 波長 $1\text{\AA}$ のX線に対するシリコンの屈折率は1より僅かに小さく、 $n = 1 - \delta$ 、 $\delta = 3.17 \times 10^{-6}$ で与えられる。111反射に対して、屈折率による角度の補正値を求めよ。
- 6.11. 全反射の角度幅(ダーウィン幅)  $\omega$  ["]は分光する波長 $\lambda$  [Å]や反射面

(取り込み角)を $d$ 、集光されるとき光の収束角を $d'$ とすると、 $s'/s = d/d'$ となるということです。例えば図7.3(a)の場合、回折格子上的光の当たっている部分の長さを $l$ とすると、入射光の発散角は $d = l \cos\alpha/r$ 、出射光の収束角は $d' = l \cos\beta/r'$ となり、式(7.3)が理解できます。

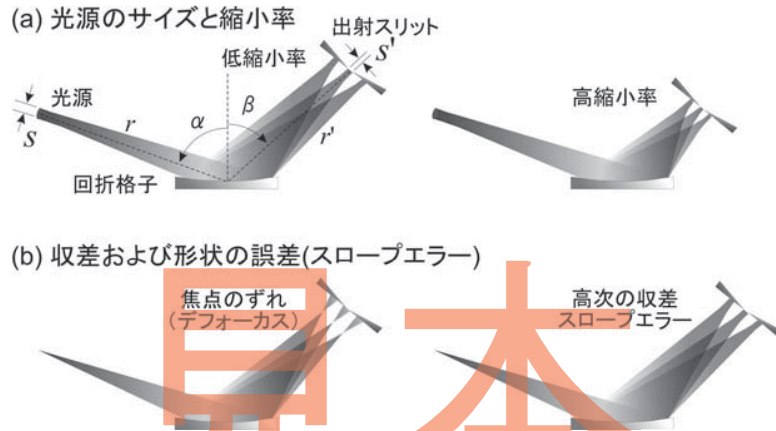


図7.3: (a)光源サイズと縮小率、および(b)収差とスロープエラーの集光に対する影響。

集光に関する次の要素は収差です。例えば点を点に集光するには楕円ミラーが必要ですが、これを球面ミラーで代用した場合、集光された像は広がってしまいます。これを収差と呼びます。入射光の発散角が小さく、光の当たる部分が狭い場合には、球面でも楕円でもさほど違いはありませんが、照射範囲が広がると理想的な形状からのずれが大きくなり、収差が大きくなります。しばしば、収差は光学素子上のある点で反射された光の、到達点における位置のずれが、その光学素子上の位置座標の何次に比例するかで分類されます。この分類に従うと、最も低次の収差は、光学素子の中心から $x$  mmずれたところに当たった光が、出射スリット位置ではスリット中心から $cx$  mmずれたところに到達するというものになります ( $c$ は比例係数)。これは、図7.3(b)に示したような

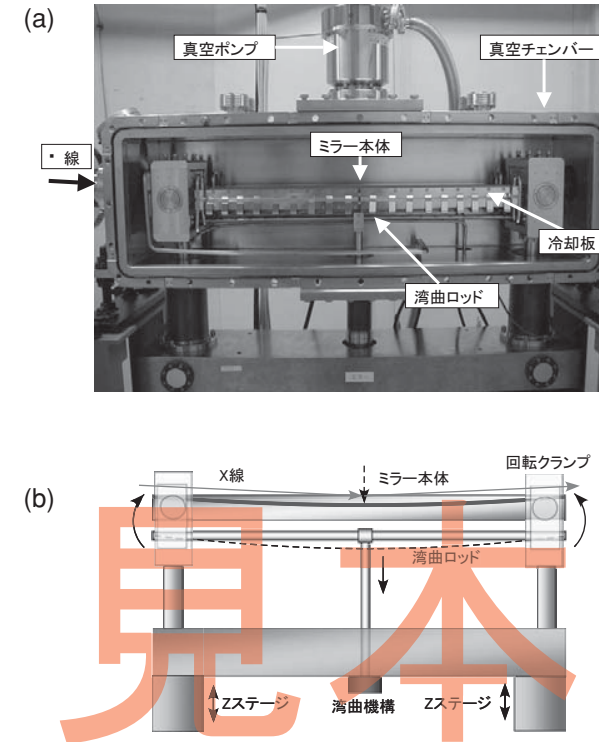


図8.9: (a)偏向電磁石ビームライン用上下偏向ミラー調整機構（ミラー長：1m）と(b)模式図。

くなるため、並進ステージ2軸を用いて行います。例えば、図8.9の調整機構では、2台のZステージを同じ方向に同量移動することによりミラーの高さ調整を行い、反対方向に同量移動することにより傾斜角の調整を行います。

湾曲機構としては円筒面曲げ機構を採用しています。ミラーの両端を挟み込んでいる箱状の回転クランプがミラーの下を通っている湾曲ロッドに連結されており、これを弓状に曲げることでクランプに回転モーメントが与えられます。これによりミラーの両端に等しい曲げモーメントが加わるので、円筒面曲げになります。長さ1mのミラーを曲

	集光素子名	集光サイズ, 焦点距離 (エネルギー)	エネルギー 範囲	収差		
				コマ 収差	色 収差	形状 誤差
回折	 Fresnel Zone Plate	30nm, f=8cm (8keV)[2]	軟 X 線 硬 X 線	小	有	小
	 スパッタースライス製 FZP	0.3μm, f=22cm (12.4keV)[3] 0.5μm, f=90cm (100keV)[4]	8-100keV	小	有	大 →中
	 ブラッグ FZP	2.4μm, f=0.7m (13.3keV)[5]	主に 硬 X 線	小	有	小
	 多層膜ラウエレンズ	16nm f=2.6mm (19.5keV)[6]	主に 硬 X 線	大	有	小
屈折	 プレス製レンズ	1.5μm, f=0.8m (18.4keV)[7] 1.6μm, f=1.3m (15keV)[8]	主に 硬 X 線	小	有	大
	 エッチング製レンズ	47nm×55nm f=1cm, 2cm (21keV)[9]	主に 硬 X 線	小	有	小
全反射	 Kirkpatrick-Baez 型反射鏡	36nm×48nm f=15cm, 25cm (15keV)[10]	軟 X 線 硬 X 線	大	無	小
	 Wolter 型反射鏡	0.7μm, f=35cm (9keV)[11]	<10keV	小	無	大
	 X 線導波管	95nm (10keV)[12]	軟 X 線 硬 X 線	大	無	大

図9.2: X線集光素子の一覧[2]-[12]。

係数AはX線のエネルギー，すなわち波長によって変化しますが，オフセット角 $\Delta\theta$ を波長ごとに最適に調整することにより，結晶移相子は比較的広い範囲のエネルギーで $\lambda/4$ 板や $\lambda/2$ 板として機能します (問題10.7)。このため，XMCDや偏光XAFSなどエネルギー走査を必要とする分光測定にも使われています。

## 5.2 ダイヤモンド結晶移相子の利用

### 5.2.1 高速偏光スイッチング

上で見たように，結晶移相子では，結晶の角度をわずか数十秒変えるだけで円偏光の回転方向 (ヘリシティ) を切り替えることができます。

偏光状態の切り替えに必要とされる動きが小さいため，高速な偏光スイッチングに向いています。また，結晶を周期的に振動させることにより左右の円偏光を交互に (交流的に) 生成することができます。

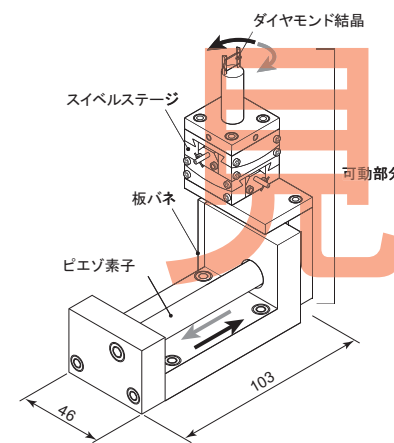


図10.10: ダイヤモンド移相子用の結晶振動台。ピエゾ素子の伸縮が結晶の微小角の回転運動に変換される仕組み。ピエゾ素子に交流電圧をかけて結晶を振動させることで，左右の円偏光の切替を高速 (< 100Hz) に行うことができる。

図10.10に示すのは，高速偏光スイッチングに使われている，ピエゾ素子による移相子結晶ステージです[14][16]。このステージでは板バネを支点とした機構を使って，ピエゾ素子の伸縮を結晶の回転運動に変換しています。オフセット角の振幅は最大 $\pm 190^\circ$ です。最高100Hzで偏光スイッチングを行うことができます。4.2.1節で挿入光源を

i) Pb(Zn,Ti)O<sub>3</sub>などの圧電体に外部電場を印加することによる伸縮を利用した素子。ミクロンオーダーの精密な位置決め等に用いられる。圧電素子ともいう。

## 2 コヒーレンス

一言で波と表現しても、波が波らしく見える場合とそうでない場合があります。穏やかな水面に水滴が落ちると、きれいな円形の波紋ができます。しかし、雨が激しく降っている状況では、水面は波立った状態になります。たくさんの波紋の重ねあわせの結果、特別な規則性は見づらくなります。両者の違いを定量的に表現するためにコヒーレンスの概念が便利です。

コヒーレンスを調べる有名な実験に、ヤングの二重スリットによる干渉縞の観察があります。ヤングの二重スリットについてはこの本の第5章に丁寧に解説されていますが、図11.1に再度模式的に示しました。細い二つのスリットが、微小な距離を隔てて作られており、そこに光が照射されているとします。スリットからは波（光）が広がりながら伝播してゆき、二重スリットから適当な距離だけ離れたスクリーン上で重なり合って干渉縞を形成します。

しかし、干渉縞が観察されるためには条件があります。それは、波面の揃った光で二重スリットが照射されていることです。これが意味するところは、それぞれのスリットを通過する波に相関があるということです。言葉を変えれば、それぞれのスリットを通る波の間に決まった位相関係があるということです。例えば、一方のスリットを波の山（谷）が通過しているとき、他方のスリットで常に波の山（谷）が通過する状況が保証されていればOKです。

二重スリットの代わりに、その位置に二つの光源を置けば干渉縞は観察されるでしょうか？答えはNOです。二つの光源は全く独立に発光しており、それぞれの光源からの光（波）の間には相関が無いからです。

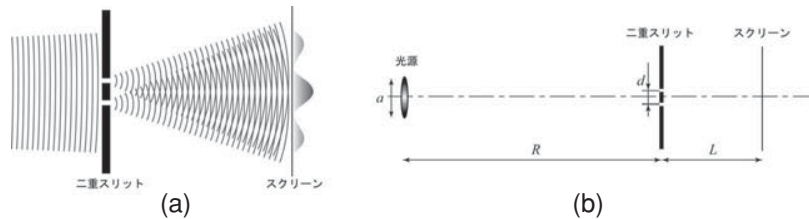


図11.1: ヤングの二重スリット実験。

ーンで運転されている場合（図12.2(c)のような場合）には、電子バンチが連続してRF加速空洞を通過するところでピーク電圧降下の影響が見られます。また、蓄積リング中に数多くのアンジュレーターがあり、その放射パワーが著しく変化した場合も、最大で100ps程度の時間のずれが観測されています。より厳密な時間同期をさせるために、バンチ位相を観測し、測定系にフィードバックをかけるような方法が検討・開発されています。

次に、放射光パルスにピコ秒、フェムト秒のパルスが発生するレーザーを同期させる方法について説明します（図12.4）。超短パルスレーザーとしては、モード同期レーザーが有名です。モード同期レーザーでは、そのレーザーパルス出力の繰り返し周波数がレーザー共振器の長さで決まっています。このレーザーの共振器長に対してフィードバックをかけることによってレーザー光をRF基準信号に同期させるという方法が取られています。たとえばSPring-8では、508.6MHzのRF信号を6分周した84.8MHzの外部同期信号を使ってモード同期チタンサファイアレーザーを発振させています。

試料を励起するためにレーザーを用いる場合には、強いパワーがいること、また励起状態が緩和して元の状態に戻るまでの時間間隔が必

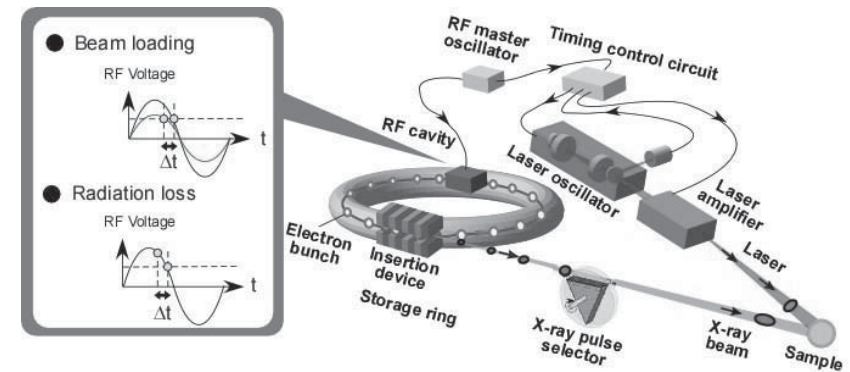
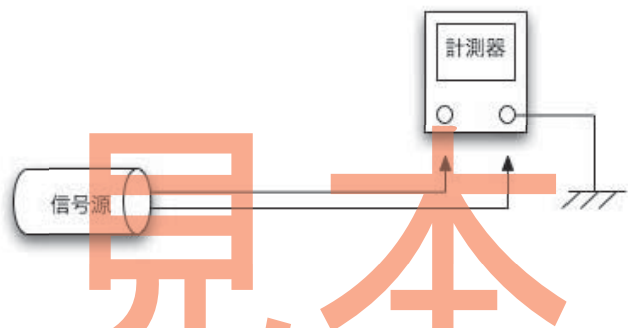


図12.4: レーザー・放射光同期システム。挿入図：バンチ位相の変化の概念図。

- (a) ゲートバルブのステータスをデジタル入出力により取り合う場合、信号レベルや信号ラインをどのように取り扱えば良いか、入出力回路の保護や耐ノイズ性の観点で考察せよ。
- (b) 計算機とシーケンサーの間でRS-232CまたはEthernetを用いた省配線通信を行う場合、回路保護の観点で問題になる可能性が大きいのはどちらか？

13.4. 高精度な計測機器に信号ケーブルを接続する場合の順番とその理由を答えよ。



13.5. 計測／制御システムでは様々な機器と電気的な接続をし、複雑な入出力システムを構築するが、電気回路の保全上注意すべきことを考察せよ。

13.6. 数多くのノイズ源が存在する放射光実験において、高精度計測をする際のケーブル配線として最も適しているものは以下のどれか？ただし、信号ソースとしてDC的な信号を想定する。

- A: ディファレンシャル出力でBNC同軸ケーブルによる信号伝送
- B: シングルエンド出力でBNC同軸ケーブルによる信号伝送
- C: ディファレンシャル出力でシールド付きツイストペアケーブルによる信号伝送
- D: シングルエンド出力でシールド付きツイストペアケーブルによる信号伝送

### 3 ビームのサイズと発散を見積もる方法 ～ 位相空間の話 ～

放射光を使って実験するとき、ビーム強度だけでなく、ビームのサイズや発散に関する情報も必要になります。たとえば回折実験の場合、試料に入射するビームの発散はデータの角度分解能に影響を与えます。また、マイクロビームを使った実験では、試料位置におけるビームサイズがデータの空間分解能を決定します。そこで本節では、ビームのサイズと発散等を見積もる上で役に立つ位相空間の概念について簡単に紹介することにします[13][14]。

#### 3.1 位相空間 (phase space) とは

話を簡単にするため、まず2次元平面内における光子の運動を考えることにします。図14.4(a)はz軸にはほぼ平行に進む光子の軌道を描いたものです。光子はz軸に対してある距離を隔てて、ある傾きを持って進んでいます。このとき光子の位置は $x(z)$ 、傾きは $x'(z) = dx/dz$ と与えられます。位置 $x$ も傾き $x'$ も $z$ の関数ですが、通常 $(z)$ を省略して単に $x, x'$ と記します<sup>\*)</sup>。位相空間は光子の位置 $x$ と傾き $x'$ からなる2次元空間として定義されます。このように定義された空間では、図14.4(b)に示したように、1つの光子の軌道は1個の点で表され、その点は $z$ と共にこの平面内を動いていくことになります。さて、この位相空間を用いると、光子集団の運動を容易に記述することができます。図14.5は $z = z_0$ における多数の光子の軌道についてプロットしたものです。通常、この点の分布は2次元的なガウス分布をしています。スリットなどで人工的にビームを切り出したりするとガウス分布ではなくなります。一般には、点を多数プロットするかわりに、ガウス分布の分散 $\sigma$ に対応する境界を図14.5の

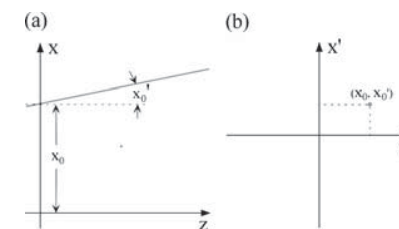


図14.4: (a)z軸にはほぼ平行に進む光子の軌道。(b)光子の軌道の位相空間における表現。

\*) 慣例として、 $x'$ や $\sigma_r$ のようにダッシュが付いているとき、傾きあるいは発散など角度の単位をもつ量を、ダッシュがない記号は、位置あるいはサイズなど長さの単位をもつ量を意味します。

# 索引

あ 行  
I/O (Input/Output) 314  
アクチュエーター 304  
アジマス角 259  
アスペクト比 206, 214  
圧電バイモルフ材 189  
APPLE II型アンジュレーター 248  
At-wavelength表面形状計測法 198  
アバランシェフォトダイオード 287, 293  
アブソーパー 89, 90, 91  
アブレーション 101  
圧縮応力 100  
アプリケーションフレームワーク 309  
ayagiku 322  
Ra 95  
RS-232C 308  
RF  
— 加速空洞 284  
— 基準信号 288  
— の反射異常 75  
— バケツ 285  
rms  
— スロープエラー 189  
アルミナ蛍光板 89  
アルミナ分散強化銅 97  
アンジュレーター 18, 33, 49, 68, 342  
— 磁場 34  
— 放射 34  
ERL (Energy Recovery Linac) 53, 123  
イオンチェンバー 258  
イオンポンプ 92  
Eagle型分光器 168  
Ethernet 308  
位相 113, 145  
— イメージング 275  
— 回折格子 213  
— 型FZP 214  
— 空間 337, 338, 343  
— コントラストイメージング 269  
— 差 236  
— シフト 268, 269, 270  
— 速度 113, 216  
— 楕円 343, 346  
— 敏感検出法 255  
移相子 241, 246, 250  
— 制御 255  
異方性 234  
イメージングプレート 290  
色収差 212  
インターロック 72  
— システム 2, 304  
ウィグラー 33, 49  
Wolter型反射鏡 210  
薄レンズの公式 207  
HIP (Hot Isostatic Pressing) 94  
ADL (Acoustic Delay Line) 93  
APD (Avalanche Photo Diode) 287, 293  
SX-700 168  
SCM (Screen Monitor) 89  
STM (Scanning Tunneling Microscope) 196  
XFEL (X-ray Free Electron Laser) 122  
XMCD (X-ray Magnetic Circular Dichroism) 235  
X線  
— 回折 132  
— 吸収端 180  
— 吸収微細構造 144, 176  
— 屈折レンズ 217, 218  
— 結晶移相子 251  
— 光子相関分光法 278  
— 磁気円二色性 235  
— CCD検出器 290  
— CT 276  
— 集光素子 210  
— 自由電子レーザー 122, 259  
— ストリークカメラ 288  
— 導波管 210  
— パルスセレクター 291, 292  
— 反射率 179  
— ビームライン 67, 130  
— プリズム 216  
— 分光器 144  
— ホログラフィー 276  
XYスリット 87  
エッチング 136

— 製レンズ 210  
エネルギー  
— 回収型ライナック 52, 259  
— 幅 256  
— バンド幅 332  
— 分解能 118, 182  
FEL (Free Electron Laser) 54  
— パラメーター 56  
FCS (Fast Closing Shutter) 93  
FZP (Fresnel Zone Plate) 211, 212, 214  
FZ (Floating Zone)法 136  
エミッタンス  
— の保存則 338, 339  
MCS (Multichannel scaler) 287, 297  
MCP (Micro-Channel Plate) 287  
MBS (Main Beam Shutter) 69, 86, 90  
エレクトロンボルト 132  
遠隔実験 310  
円形加速器 123  
エンコーダー 305  
エンドストップバー 70  
円偏光 237, 242  
— 度 238  
— 変調分光法 255  
凹面回折格子 154  
OSA (Order Selecting Aperture) 213  
オゾンアッシング法 200  
オーバーサンプリング法 277  
オフセット角 252  
off-plane Eagle型分光器 169  
オールメタル 92  
音響パルス 297  
— エコー 296, 297  
オングストローム 131  
か 行  
開口  
— 角 208  
— 瞳 222  
回折 111, 116, 118, 144, 206, 210, 269  
— 限界 30, 31, 188, 208  
— 限界集光 278  
— 顕微法 277  
— 光 212  
— 格子 116, 119, 155  
— 効率 213, 214  
— 素子 206  
回転検光子法 243, 244, 249  
回転楕円面 182, 217  
回転放物面 182  
— ミラー 153  
ガウス関数, 分布 28, 29, 337, 338  
カオス光源 275  
架橋ポリエチレン 89  
拡散板 271, 272  
角度発散 137, 256  
Kirkpatrick-Baez  
— 型反射鏡 187, 210  
— 光学系 166  
— ミラー 187  
ガス制動放射線 67  
可変偏角型分光器 167  
下流シャッター 69, 90  
ガルバノスキャナー 255  
簡易偏光モニター 256  
干渉 112, 116, 132  
間接冷却方式 142  
完全  
— 結晶 116, 119  
— 性 251  
ガンマストップバー 70  
ギア 305  
機械切り 170  
幾何学的集光サイズ 207  
幾何光学 112, 346  
輝度 16, 19, 58, 332  
— の保存 338, 339  
軌道補正 322  
Kinofom型FZP 214  
基本波 90  
基本波長 35  
吸収 333  
球面収差 190, 223  
球面波 113, 153  
共役像 222, 223  
狭義のインターロック 74  
局所遮蔽 72, 89  
曲率半径 185  
キラル構造 234  
空間周波数領域 197  
空間的コヒーレンス 94, 208, 267, 274  
— 長 208  
空間的不確定性 30  
屈折 111, 112, 114, 178, 206, 210

—角 177  
—素子 206  
—波 114  
—率 215, 240  
—レンズ 206, 215  
グラスホッパー 168  
グラフアイト 249  
—フィルター 94, 333, 334  
GlidCop 92, 98  
蛍光  
—X線検出器 258  
—法 258  
計算機制御 307  
形状誤差 158, 210  
計数型検出器 296  
計数率 258  
経年劣化 200  
結晶 241  
—移相子 250  
—格子ダイナミクス 296  
—構造因子 253  
—分光器 151  
結像 211  
—作用 207  
ゲートバルブ 92  
KB  
—光学系 166  
—ミラー 185, 187  
ケーブルダクト 72  
ゲルマニウム 259, 335  
検光子 240, 241  
原子散乱因子 253  
広域リモート制御システム 316  
光学  
—結像 207  
—集光 207  
—ハッチ 71  
光源  
—サイズ 38, 57, 60, 157  
光子 110  
格子定数 134  
格子面 132, 241  
—間隔 133  
高次回折光 212  
高次光 39, 40, 162  
—除去 183  
高次反射 119

高周波加速空洞 284  
光線 347  
—追跡法 346, 347  
高速  
—シャッターシステム 93  
—偏光スイッチング 248, 254  
後置  
—光学系 118  
—集光系 169  
—ミラー 183  
光電効果 218  
高熱負荷 97  
—機器 88, 89, 98  
—処理 89  
—処理技術 96  
降伏点 100  
高密度刻線 119  
古典電子半径 253  
コヒーレンス 259, 264, 265, 275  
—時間 268  
—長 266  
—の破壊 95  
コヒーレント  
—光源 275  
—比 45  
—フラックス 44, 274  
コマ収差 190, 209, 210  
コミッションング 88, 89  
コラボラトリ 310, 315, 316, 318  
collimated plane grating monochromator 167  
コンダクタンス 93  
computed tomography 276  
  
さ 行  
最外輪帯幅 212  
最小作用の原理 217  
再生増幅器 290  
サジタル  
—集光 166  
—シリンダーミラー 186  
—方向 185  
SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) 123  
差動排気 93  
XAFS (X-ray Absorption Fine Structure) 144, 234  
サーボモーター 304  
3結晶回折法 297

散乱 111, 144  
—面 241, 251  
時間的コヒーレンス 267, 268  
—長 208, 268  
時間的不確定性 30  
時間分解  
—回折法 296  
—XAFS 298  
—3結晶回折法 296  
—能 288  
 $\sigma$ 偏光 240, 241  
シーケンサー 73  
指向性 32  
子午線  
—方向 184  
—湾曲ミラー 186  
磁性体 234  
次世代光源 14  
次世代放射光源 51  
CZ (Czochralski)法 136  
実験  
—ステーション 130  
—ハッチ 71  
実効 43  
—輝度 43  
—光源サイズ 43, 340  
—値 97  
—発散角 43, 340  
—フラックス密度 43  
実効的パワー密度 97  
GP-IB (General Purpose Interface Bus) 308  
 $\lambda/4$ 板 (四分の一波長板) 241  
SHADOW 346, 347, 348  
—VUI (Visual User Interface for SHADOW) 347  
斜入射 115  
—型分光器 121  
—干渉縞計測法 197  
—技術 97, 98  
—光学系 248  
—配置 115, 177  
—分光器 166  
—領域 167  
遮蔽 66, 67  
—コンポーネント 71  
—板 213  
—方法 67  
GUI (Graphical User Interface) 314  
自由空間 343  
集光 182, 211  
—サイズ 210  
—素子 209, 344  
—ミラー 184  
収差 157, 210  
収束ビーム 338  
自由電子レーザー 54  
縮小率 156, 157  
出射スリット 153  
小角散乱法 277  
衝撃波遅延管 93  
上下偏向ミラー 187  
—調整機構 195  
焦点 207  
—距離 207, 210  
—深度 209  
シリアルポート 308  
シリコン 134, 335  
真空紫外 151  
—光 114  
—軟X線 2  
シングルパス自由電子レーザー 54  
振動 199  
振幅 144  
—回折格子 213  
—型FZP 214  
垂直直線偏光 237, 243  
垂直偏光 236  
水平直線偏光 237, 243  
—度 238  
水平偏光 236  
水平偏向ミラー 187  
水冷ピンポスト結晶 143  
スクリーンモニター 88, 89  
ステラビリティ 308, 319  
STARS (Simple Transmission and Retrieval System) 309, 314  
ステアリング電磁石 322  
ストリークカメラ 293, 294  
スネルの法則 177, 216  
SuperSINET (Super Science Information Network) 312  
スパッターズスライス製FZP 210  
sputtered-sliced法 215  
スーパーミラー 182

spatial coherence 267  
 スペクトル 32, 46, 48, 62, 112  
 スペクトロスコープ 130  
 スペクトロメーター 130  
 スペックル 272, 278  
 —分光 278  
 スリット 86, 344  
 スループット 120  
 スロープエラー 157, 158, 189  
 制御 303  
 —システム 304, 307, 312, 313, 319  
 前置  
 —光学系 118  
 —集光系 165  
 —ミラー 183  
 制動放射X線 67  
 接触熱コンダクタンス 96  
 瀬谷波岡型分光器 169  
 線形性 258  
 全パワー 87  
 全反射 137, 177, 178, 210  
 —条件 115  
 —領域 137  
 —臨界エネルギー 179, 183  
 —臨界角 177  
 線膨張係数 100  
 走査型トンネル顕微鏡 196  
 走査型白色干渉計 196  
 相対論的電子 22, 23, 26, 34  
 挿入光源 14, 18, 33, 245, 304, 321  
 塑性変形 100  
 ソフトマテリアル 275  
 ゾーンプレート 151

た 行  
 退出シーケンス 74  
 対称反射 253  
 体積発熱技術 98  
 耐放射線性 89  
 ダイヤモンド 134, 250, 335  
 —結晶移相子 254  
 第4世代  
 —光源 259  
 —放射光源 123  
 ダウンストリームシャッター 69  
 楕円筒面  
 —KBミラー 188

—ミラー 185  
 楕円面 182  
 多重散乱 135  
 多層膜 116, 151, 181, 241  
 —ラウエレンズ 210, 215  
 ターボ分子ポンプ 92  
 たわみ量 186  
 単結晶 249  
 タンジェントバー 305  
 単色性 137, 252  
 単色平面波 27  
 弾性散乱 113, 256  
 弾性変形 100  
 弾塑性解析 95, 102  
 ダンプボタン 76  
 蓄積型検出器 290  
 蓄積リング 67, 88, 286  
 チタンゲッターポンプ 92  
 チョクラルスキー法 136  
 中性子 67  
 超高サイクル疲労 101  
 超高真空 92  
 直線  
 —アンジュレーター 242  
 —加速器 123  
 —偏光 233, 236, 242  
 —偏光度 239  
 直入射 115  
 —型分光器 121  
 —領域 168  
 ツインヘリカルアンジュレーター 248  
 DSS (Downstream Shutter) 69  
 TCP/IP (Transmission Control Protocol/Internet Protocol) 314  
 T.120プロトコル 317  
 定偏角型分光器 167  
 データ会議 317  
 Debye-Waller因子 180  
 デフォーカス 168  
 テフロン 89  
 電子線リソグラフィ法 214  
 電磁波 109  
 電子バンチ 266, 286  
 電子ビームのエミッタンス 46, 48  
 電場ベクトル 236  
 伝播 268, 270  
 —長 208

temporal coherence 267  
 電離真空計 92  
 等位相面 269  
 透過  
 —型回折格子 118, 151  
 —型結晶移相子 250  
 —型多層膜移相子 246, 247  
 —率 246, 334  
 同時反射 258  
 DuMond図形 137, 346  
 動力学的回折理論 137, 252  
 トータルパワー 96  
 トータルフラックス 96  
 ドラゴン 168  
 transverse coherence 267  
 トロイダルミラー 166, 187

な 行  
 ナイフエッジスキャン 198, 223, 224  
 軟X線 151  
 2結晶分光器 3, 335  
 二重性 110  
 $\lambda/2$ 板 (二分の一波長板) 241  
 入射  
 —角 161, 240  
 —スリット 165  
 —面 160  
 熱応力 100  
 —解析 98, 99  
 熱解析 100  
 熱間等方圧加工法 94  
 熱衝撃 101  
 熱伝達 97, 99  
 —係数 99  
 熱伝導 99  
 —率 99, 193  
 ネットワーク  
 —システム 311  
 —セキュリティ 311  
 —プロトコル 311  
 —分散型制御システム 311  
 熱負荷 48, 87, 144  
 熱輻射 100  
 熱膨張係数 225  
 Nevot-Croce因子 180, 197

は 行  
 バイトンシール 92  
 $\pi$ 偏光 240, 241  
 バイモルフミラー 189  
 白色光 112  
 パーシャルパワー 87  
 8の字アンジュレーター 248  
 波長  
 —の較正 140  
 —分解能 118  
 発散 337  
 —角 38, 57, 60, 116  
 —ビーム 338  
 ハッチ 68  
 ハーモニック数 284  
 パルスモーター 304  
 パワー 21, 49, 87  
 —密度 48, 96  
 反射 112, 114, 177  
 —型回折格子 151  
 —型結晶偏光子 249  
 —型多層膜偏光子 246  
 —型の偏光子 240  
 —材 194  
 —波 114  
 —幅 250  
 —率 115, 178, 181, 240, 334  
 —率曲線 137  
 バンド幅 16, 57  
 汎用性 319  
 ビエゾ素子 254, 305  
 PLC (Programmable Logic Controller) 73  
 光の自然エミッタンス 31  
 ピーク輝度 61  
 非常停止ボタン 76  
 非対称反射 119  
 左回り円偏光 236  
 引張応力 100  
 非点収差 221  
 BBS (Branch Beam Shutter) 69, 91  
 非偏光 238  
 ビーム  
 —アポート 75, 88  
 —強度 331  
 —サイズ 337  
 —遮断関連機器 90  
 —シャッター 69, 70, 90, 91

—集光 278  
—ストッパー 70  
—成形 89  
—フットプリント 192  
ビームライン 71, 330  
—インターロックシステム 72  
—光学技術 3  
表面粗さ 180, 181  
PINフォトダイオード 293  
ピンポスト水冷 144  
VME (Versa Module Europe) 308  
VLSG (Varied Line Spacing Grating) 168  
フィードフォワード制御 322  
VPN (Virtual Private Network) 316  
VUV (Vacuum Ultra Violet) 115, 151  
—ビームライン 66  
VLAN (Virtual LAN) 316  
フィリングパターン 285, 286  
フィルター 89, 293  
フィンクーリング 143  
phase space 337  
フェルマーの原理 217  
フォトンフラックス 120  
不確定性 28, 29  
複屈折 241  
輻輳 318  
フーコーテスト 222, 223  
LiF 249  
不等刻線間隔回折格子 168  
浮遊帯域融解法 136  
フラウンホーファー回折 188, 221, 227  
—縞 269  
フラックス 20, 48, 49, 68, 332, 335  
—密度 48, 62, 86, 87, 332, 333, 335  
ブラッグ 132  
—FZP 210  
—回折 249  
—角 249  
—条件 133, 215, 246  
—反射 132  
ブランチビームシャッター 70, 91  
フーリエ解析 134  
フーリエ限界 30  
フーリエ変換 27, 28  
—干渉計 151  
プリユースター角 240  
フルブルーフ 74

プレス製レンズ 210  
ブレード回折格子 163  
フレネル  
—回折縞 269, 270  
—キルヒホッフの回折積分 116  
—ゾーンプレート 206, 210, 211  
—の式 334  
プログラマブルロジックコントローラー 73  
ブロープ光 287  
フロントエンド 86, 130, 304, 333  
フロントエンド機器 88  
分解能 16  
分光 132  
—器 2, 108, 118, 130, 153, 165, 167  
—結晶 135, 346  
—素子 118, 119  
分散 113, 337, 338  
平滑度 114  
平均輝度 61  
平均自乗表面粗さ 180  
平行  
—化 182  
—化ミラー 183  
—光線 113  
—度 252  
平面回折格子 154  
平面波 113, 153  
ベーキング 92  
ヘビメタル 90  
ヘリシティ 254  
ベリリウム窓 94, 333, 334  
偏角 167  
偏光 162, 233, 236, 242, 243  
—解消効果 245  
—光学素子 240, 244, 245, 246, 249  
—XAFS 234  
—子 240, 246, 249  
—状態 235, 236  
—スイッチング 248  
—制御 244, 246, 249  
—楕円 236, 237  
—度 238  
—能 241  
—ベクトル 160  
偏向磁石 18  
—放射 31  
—放射光 32

偏向電磁石 68, 242, 332, 333, 340  
—ビームライン 138  
方位角 237  
放射光 15, 17, 21, 67  
—パルス 284  
—ビームライン 2  
放射線 67  
—遮蔽 66  
—遮蔽ハッチ 2, 71  
—対策 89  
放射パワー密度 86, 87  
放物面 182  
—ミラー 153, 154  
保存量 340  
ボックスカー積分器 292  
ボールネジ 305  
ホログラフィック露光法 170  
ポンプ光 287  
ポンプ・ブロープ法 287, 297  
  
ま 行  
マイクロチャンネルプレート 287  
MyDAQ 323  
曲げ 199  
マスク 86  
MADOCA (Message And Database Oriented Control Architecture) 309, 320, 321  
マルチチャンネルスケーラー 287  
右回り円偏光 236  
水の窓 276  
ミュオン 67  
ミラー 176, 182, 191, 192, 196, 198, 334  
—調整機構 194  
無転位化 136  
無偏光 238  
迷光 162, 163  
メインビームシャッター 69  
メカニカルチョッパー 290, 291  
メッセージ配信型システム 314  
モザイク結晶 249  
モード同期チタンサファイアレーザー 289  
モード同期レーザー 289  
モノクロメーター 130  
  
や 行  
ヤングの二重スリット 265  
ヤング率 100

有限要素法 100, 102  
USB 308  
4次元位相空間 19  
予測制御 322  
  
ら 行  
ライナック 52  
ラウエ配置 251  
らせん構造 234  
ラダー言語 73, 77  
lateral coherence 267  
ラミナー回折格子 163  
リウビルの定理 339  
利得 193  
リニアエンコーダー 306  
リボルバー型挿入光源 87  
リモート制御 304, 310  
励起光 287  
ray tracing 346  
レーリーの限界 208  
レンズ収差 209  
6次元位相空間 19, 338  
ロッキングカーブ 137  
ロックインアンプ 248  
ロータリーエンコーダー 306  
ローランド  
—型分光器 158  
—条件 158  
longitudinal coherence 267  
long trace profiler 197  
  
わ 行  
Wadsworth型分光器 169  
WAN (Wide Area Network) 312  
湾曲円錐台ミラー 187

編者略歴

大橋 治彦

1964年生。博士（理学）。

分子科学研究所を経て、1996年より（財）高輝度光科学研究センター。

平野 馨一

1963年生。博士（工学）。

東京大学を経て、1993年より高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所。

放射光ビームライン光学技術入門  
～はじめて放射光を使う利用者のために～

2008年12月24日 発行

定 価 2 5 0 0 円

編 者 大橋 治彦・平野 馨一

発売元 日本放射光学会

発行者 日本放射光学会会長 雨宮 慶幸

発行所 日本放射光学会

〒170-0013東京都豊島区東池袋 2-62-8 ビッグオフィスプラザ507 (有)ワーズ内

TEL. 03-5950-4896 FAX. 03-5950-1292

<http://www.jssrr.jp/> [sales@jssrr.jp](mailto:sales@jssrr.jp)

©日本放射光学会2008 <無断複写，転載を禁ずる>

組版印刷製本 富士ゼロックスクロスワークス株式会社 相生事業所

ISBN978-4-9900547-1-7

Printed in Japan

本書は、日本放射光学会のホームページ<http://www.jssrr.jp/>からお申込みいただけます。

**JSSRR**  
日本放射光学会