

改訂版

体裁

● A5版

● 613頁

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～

編集者 大橋 治彦 高輝度光科学研究センター
平野 馨一 高エネルギー加速器研究機構



フルカラー



本書の特徴

- 01 放射光ビームラインについて光の発生から光を加工する要素技術ごとに平易に解説。
- 02 具体的な数値例を含む 140 問の演習問題と解答を収録。
- 03 改訂版では、次世代光源や新たな技術展開に伴い内容を刷新、増補版から 179 頁増。
- 04 フルカラーの電子版と印刷版。

- 第1章 はじめに
- 第2章 光を作る（挿入光源・自由電子レーザーなど）
- 第3章 光を安全に取り出す（インターロック・放射線遮蔽）
- 第4章 光を安全に取り出す（フロントエンド）
- 第5章 光のエネルギーを切り出す（基礎編）
- 第6章 光のエネルギーを切り出す（X線編）
- 第7章 光のエネルギーを切り出す（真空紫外・軟X線編）
- 第8章 光の形を整形する（ミラー編）
- 第9章 光の形を整形する（回折・屈折素子編）
- 第10章 光の偏光を制御する
- 第11章 光のコヒーレンスを使う
- 第12章 光の位相情報を回復する
- 第13章 光の時間構造を使う
- 第14章 光を自在に操り記録する
- 第15章 光の回折限界の実現と新たな挑戦
- 第16章 ビームラインの統合的理解のために

- ◆ 発行 日本放射光学会
- ◆ 発売元 BookWay
- ◆ ISBN 978-4-86584-373-6
- ◆ 発刊日 2019年8月

電子版 650円（税別）

印刷版 4,000円（税別）

※電子版は10月以降各種電子書店にて発売。

※電子版はお求めになる電子書店専用アプリやリーダーが必要となり各書店の利用規約が適応されます。数式・図表崩れ防止のためePUB-FIX形式を採用しており、文字図表の個別拡大、検索などの機能は使用できません。

執筆者（執筆順）

大橋治彦……高輝度光科学研究センター
平野馨一……高エネルギー加速器研究機構
田中隆次……理化学研究所
小菅隆……高エネルギー加速器研究機構
松下智裕……高輝度光科学研究センター
成山展照……高輝度光科学研究センター
高橋直……高輝度光科学研究センター
宮内洋司……高エネルギー加速器研究機構
繁政英治……分子科学研究所
矢橋牧名……理化学研究所
山崎裕史……高輝度光科学研究センター

後藤俊治……高輝度光科学研究センター
雨宮健太……高エネルギー加速器研究機構
木村真一……大阪大学
宇留賀朋哉……高輝度光科学研究センター
高野秀和……東北大学
香村芳樹……理化学研究所
竹内晃久……高輝度光科学研究センター
鈴木基寛……高輝度光科学研究センター
広野等子……ボン大学
松田巖……東京大学
百生敦……東北大学

高橋幸生……大阪大学
足立伸一……高エネルギー加速器研究機構
田中義人……兵庫県立大学
大端通……高輝度光科学研究センター
濁川和幸……高エネルギー加速器研究機構
登野健介……高輝度光科学研究センター
城地保昌……高輝度光科学研究センター
三村秀和……東京大学
玉作賢治……理化学研究所
(所属は2019年3月現在)

BookWay

印刷版書籍は全国書店でお取寄せいただけます。
発売元ブックウェイでは大学・官公庁など法人様の各種様式にて対応致しますので
order@bookway.jp までメールでお問合せください。

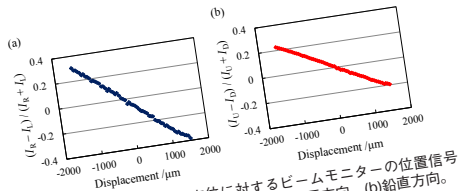


図14.7: XFELビーム位置の変位に対するビームモニター的位置信号出力。光子エネルギーは7keV。(a)水平方向。(b)鉛直方向。

3.3.3 波長モニター

波長モニターでは、ダイヤモンド薄膜からの回折 X 線の強度と回折角を測定し、入射光の中心波長 (光子エネルギー) を求めます。前節のビームモニターと同様、X 線透過率の高い厚さ約 15μm のダイヤモンド薄膜が利用され、非破壊モニターとして機能しています。

図 14.8 に、波長モニターの概念図を示します。回折 X 線の測定には、回折計の 2θ アームに取り付けられた 2 次元検出器が用いられます。ダイヤモンド薄膜は粒径数十ナノメートルの微結晶からなり、粉末 X 線回折像を与えます (図 14.8)。2 次元検出器で記録された回折

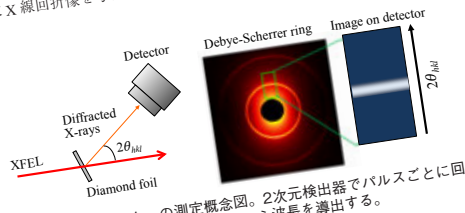


図14.8: 波長モニターの測定概念図。2次元検出器でパルスごとに回折像を記録し、Braggの式から波長を導出する。

第14章
光を用いた極限解析

出器Bを使います (図 15.20(b))。そして、光子1の通り道に試料を置きます。明らかに、片方の検出器だけでは、試料像は得られません。ところが、Aが反応した瞬間に、Bが光子2を検出した場所を調べていくと像を復元できます [35]。

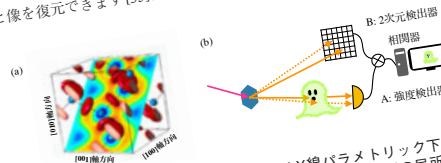


図15.20: 2次の非線形散乱の応用例。(a) X線パラメトリック下方変換で解明した真空紫外光に対するダイヤモンドの局所光学応答。内殻電子 (球部分) と価電子 (円盤部分) で振動の位相が逆転している。分解能 (0.054nm) は真空紫外光の波長 (20.3nm) の380分の1。(b) コストイメージング。片方の検出器だけではイメージングできない。

これまで見てきた非線形散乱過程以外にも、非線形なコンプトン散乱が報告されています [36]。また、非線形なラマン散乱は、自発的なラマン散乱より高感度なため、軽元素の分析で期待されています [37]。

5.3 非線形な吸収過程とその応用

5.3.1 吸収と飽和吸収
X線の散乱と並んで重要な吸収でも非線形な過程が起こります。まず、光電効果を考えます。これを定量的に扱うために、原子の大きさ、つまり吸収断面積 $\sigma(\text{cm}^2)$ を導入します。この原子に光子数が n の断面積が $A(\text{cm}^2)$ の X 線パルス照射します。このとき吸収の起こる確率 $p^{(1)}$ は、

$$p^{(1)} = \sigma \frac{n}{A} \quad (15.11)$$

第15章
光の回折限界の表現と新たな挑戦

Point1 フルカラー

2019年夏に装いも新たに発刊の「改訂版・放射光ビームライン光学技術入門」は、初版や増補版で好評の「はじめて放射光を使う利用者」にわかりやすい記述に加え、図表のカラー化により理解を助けます。

Point2 新たな内容

新たな執筆陣を迎えて、進展の著しい位相回復、回折限界集光、非線形光学、光診断、大量データ処理等に関する説明を追加、書き下ろし解説が満載！

Point3 一歩前へ

利用段階に入った X 線自由電子レーザーはもとより、これから登場する次世代光源の特徴や、X 線光学素子を理解する上で重要な理論的背景など、少し進んだ内容への入門的解説も充実！

Point4 手頃な価格

日本放射光学会の若手研究者・技術者の積極的支援策として、執筆者印税なしの協力のもと、電子版を専門書としては破格の ¥650 にて販売！

あわせて最先端のオンデマンド印刷技術採用により、紙版も全ページフルカラーにてお求めやすい価格設定を実現！

電子版は各種電子書店にて、また紙版は全国書店でお取寄せ可能です。

留意事項

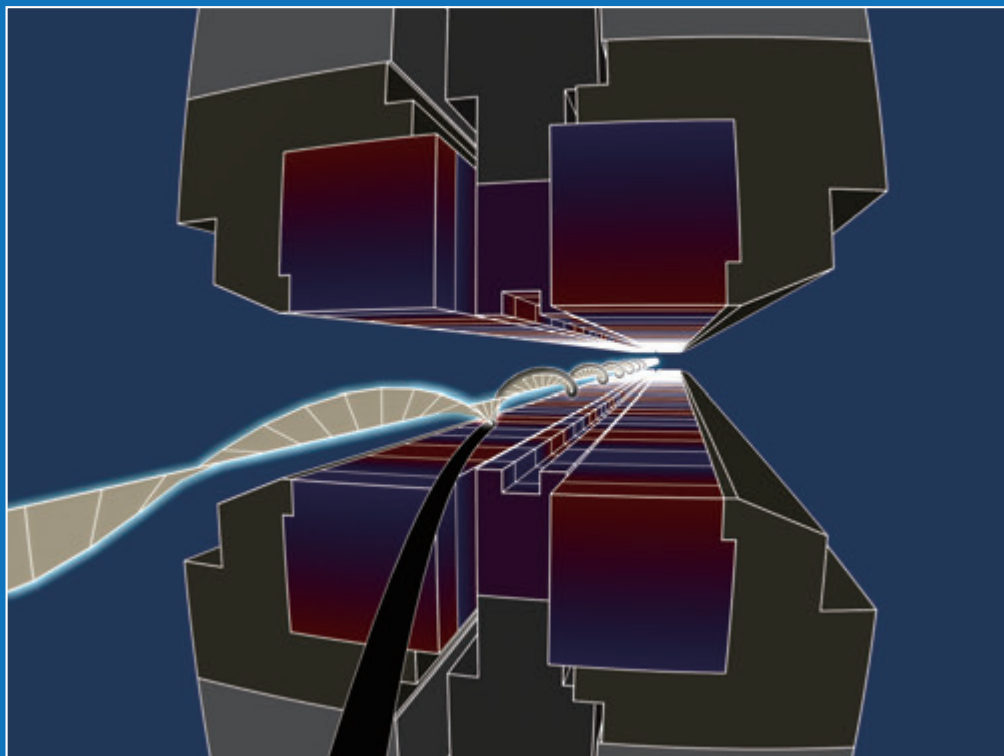
電子書籍は著作権保護されています。お求めになる電子書店専用アプリあるいはリーダーが必要となり、各書店の利用規約が適用されます。ビューワーによる数式、図表の崩れ防止のため、ePUB-FIX形式を採用しています。このフォーマットでは各ページは画像として扱われるため、多くの場合、1) 文字や図・表の個別拡大、2) 文字列のハイライト、3) 追記、4) 検索、5) 辞書の参照、6) 引用などの機能は使用できません。印刷版書籍は書店での店頭在庫販売は行いません。お取寄せ扱いとなります。

★最新のロール紙高速インクジェット印刷によりオフセットモノクロ印刷と同程度のコストで全ページフルカラーにてお届けします。オフセット印刷と比べると写真の印字品質に違いがありますが、カラー図表により理解を助けます。このチランは書籍と同様のインクジェット印刷によるものです。

改訂版

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

電子書籍をご覧になれる方へ

電子書籍は著作権保護されています。

お求めになる電子書店専用のアプリあるいはリーダーが必要となり、各書店の利用規約が適応されます。

ビューワーによる数式、図表の崩れ防止のため、各ページは画像として扱われています。

このため、多くの場合、以下の機能は使用できません。

- 1) 文字検索
- 2) 文字や図・表の個別拡大
- 3) 文字列のハイライト
- 4) 追記
- 5) 辞書の参照
- 6) 引用など

目次からのページジャンプはご利用いただけますが、索引からはリンクはありません。

また、ファイル容量と解像度の制限から、ページの一部を拡大してご覧になると、シャギーが目立つ場合があります。

以上のような制限があることをご了解ください。

表紙：ヘリカルアンジュレーターによる放射光生成のイメージ

裏表紙：1電子による放射光生成のイメージ

デザイン 松下智裕

改訂版

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

大橋治彦・平野馨一 編

日本放射光学会

改訂版の刊行に寄せて

日本放射光学会が刊行した教科書「放射光ビームライン光学技術入門」は、好評の内に世に迎えられ、初版が刊行されてから10年、増補版が刊行されてから5年を経過した。この間、様々な発展があり、この度改訂版が刊行されることになった。

もとより、放射光科学のような進展が急な分野の教科書を、常に最先端レベルに保つことは容易ではない。企画時には最先端であっても、原稿が揃い出版されるころには一部時代遅れになる可能性があることは、先の増補版巻頭言でも指摘したが、定期的に内容を更新する作業が発生するのは、勢いのある研究分野の宿命であろう。今般、改訂版という形でアップデートがなされたが、5年周期程度での改訂は不可欠であろう。

初版刊行以来、本書は初学者が放射光ビームライン光学技術を概観的に学習する際の指針を与えるとともに、中堅以上の研究者・技術者がこの分野の新しい動向を探る際のガイドとなることも目的としてきた。以前の版と同様に、放射光に関係する大学研究室等には必須の書籍となることを期待している。

増補版巻頭言で触れたように、本改訂版では「X線コヒーレンス」の問題があちこちで議論され、また「非線形X線光学」に関連する新たな章が付け加えられた。そこで、次期再改定時にどのようなトピックスが加わるかを予想すると、様々なX線イメージングに関連した光学技術ではないかと考える。これはあくまでも、現状からの解析接続の予想であり、内心では予想が外れ、何か不連続的な大発明が現れることを期待している。

最後に、改訂に当たられた皆様のご努力に感謝するとともに、本書が旧版に増して読者の皆様にご活用いただけることを祈念する。

平成31年4月

理化学研究所・放射光科学研究センター
石川 哲也

改訂版まえがき

日本放射光学会の学会誌に2005年から連載された記事をもとに、単行本初版を2008年に出版し、増補版を2013年に世に送り出したところ、おかげさまをもちまして多くの読者をえて、累計1,600冊余りをもって2016年に完売しました。その後、学会事務局には購入希望が相次ぎ、幹事を中心に様々な検討がなされてきました。

連載から14年、増補版から6年を経ておりますので、執筆当時の「次世代光源」はすでに現実のものとなりましたが、「新たな次世代光源」の開発は続き、回折限界放射光源へのアップグレードが世界各地で盛んに議論され、計画が進み始めています。増補版出版時には世界にわずか2箇所であったX線自由電子レーザー施設も増え、新たな利用研究分野が拓かれつつあります。光源とともにビームライン光学技術にも顕著な技術革新がありました。その進歩を取り入れた入門書は見当たりませんでした。

そこで初心者向けの親しみやすい内容を継承しつつ、ビームライン光学技術の基礎知識と最新の進展を取り入れた改訂版の編集を進めました。電子書籍化を念頭に図のカラー化と大幅な改訂により600頁を超す分量となりましたが、日本放射光学会の積極的若手支援策と広告掲載により、かつてない手頃な価格でお届けできることになりました。電子版とオンデマンド印刷により品切れの心配もありません。

執筆者の皆様には限られた時間の中で貴重な原稿を賜りました。籠島靖編集委員長には刊行にあたりご支援いただきました。改訂版発刊に際し、理化学研究所・石川哲也博士から巻頭言をお寄せいただきました。再び本書をお届けできるのは、ボランティアで原稿を執筆してくださった著者ならびにご協力者の皆様はもとより、日本放射光学会会員のご理解とご支援によるものです。

最後に、編集作業にあたり御尽力いただいた小野高速印刷株式会社と、初版から暖かく見守ってくださった日本放射光学会事務局の佐藤亜己奈さんに深く御礼申し上げます。

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 平野 馨一

改訂版執筆者一覧 (五十音順)

足立 伸一 …… 高エネルギー加速器研究機構 (第13章)

雨宮 健太 …… 高エネルギー加速器研究機構 (第7章)

宇留賀朋哉 …… 高輝度光科学研究センター (第8章)

大橋 治彦 …… 高輝度光科学研究センター (第1章, 第16章)

大端 通 …… 高輝度光科学研究センター (第14章)

木村 真一 …… 大阪大学 (第7章)

香村 芳樹 …… 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 (第3章)

後藤 俊治 …… 高輝度光科学研究センター (第6章)

繁政 英治 …… 分子科学研究所 (第5章, 付録)

城地 保昌 …… 高輝度光科学研究センター (第14章)

鈴木 基寛 …… 高輝度光科学研究センター (第10章)

高野 秀和 …… 東北大学 (第9章)

高橋 直 …… 高輝度光科学研究センター (第4章)

高橋 幸生 …… 大阪大学 (第12章)

- 竹内 晃久 …… 高輝度光科学研究センター (第9章)
- 田中 隆次 …… 理化学研究所 (第2章)
- 田中 義人 …… 兵庫県立大学 (第13章)
- 玉作 賢治 …… 理化学研究所 (第15章)
- 登野 健介 …… 高輝度光科学研究センター (第14章)
- 成山 展照 …… 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 (第14章)
- 平野 馨一 …… 高エネルギー加速器研究機構 (第1章, 第16章)
- 広野 等子 …… ボン大学 (第10章)
- 松下 智裕 …… 高輝度光科学研究センター (第3章, 表紙デザイン)
- 松田 巖 …… 東京大学 (第10章)
- 三村 秀和 …… 東京大学 (第15章)
- 宮内 洋司 …… 高エネルギー加速器研究機構 (第4章)
- 百生 敦 …… 東北大学 (第11章)
- 矢橋 牧名 …… 理化学研究所 (第5章, 付録)
- 山崎 裕史 …… 高輝度光科学研究センター (第6章)
- (所属は2019年3月1日現在)

目 次

第1章 はじめに (大橋 治彦・平野 馨一)

1	はじめに	1
2	ビームラインとは何か	2
3	ビームライン光学技術を知る必要性	4
3.1	ユーザーにとってのビームライン	4
3.2	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
3.3	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	8
3.4	放射光・XFELユーザーでなくてもビームライン光学技術を知るメリットがある	9
4	本書の概要	10
4.1	全体構成	10
4.2	光を作るしくみ(第2章)	10
4.3	光を安全に取り出すしくみ(第3章~第4章)	11
4.4	光を加工するしくみ(第5章~第13章)	12
4.4.1	光のエネルギーを切り出す	12
4.4.2	光の形を整形する	13
4.4.3	光のさまざまな性質(偏光, コヒーレンス, 位相, 時間構造)を扱う	13
4.5	光を操るしくみとその応用例(第14章~第16章)	15
5	おわりに	16

第2章 光を作る(挿入光源・自由電子レーザーなど) (田中 隆次)

1	はじめに	19
2	なぜ放射光が必要か?	20
2.1	光の明るさとは?	20
2.2	輝度の例: レーザーと電球	21
2.3	高輝度X線源としての放射光	23
2.4	高輝度化への歩み	23

3	光源性能を規定する物理量	24
3.1	6次元位相空間	24
3.2	輝度	25
3.3	フラックス	26
3.4	パワー	26
4	放射光を理解するための基礎知識	27
4.1	光速の壁	27
4.2	光パルスの収縮	28
4.3	光の放出角の変換	30
4.4	フーリエ変換	32
4.5	光の不確定性	34
5	偏向磁石放射光	37
5.1	指向性	37
5.2	スペクトル	38
5.3	偏光特性	39
6	挿入光源	39
6.1	光の積算過程による分類	39
6.2	磁気回路による分類	40
6.3	偏光制御手法による分類	41
6.4	真空チェンバーの構造による分類	46
7	アンジュレーター放射光	47
7.1	アンジュレーター磁場と相対論的電子の運動	47
7.2	基本波長	48
7.3	光強度の分布関数	49
7.4	発散角と光源サイズ	51
7.5	高次光	52
8	放射光ユーザーのための実用的知識	54
8.1	光子数の見積	54
8.2	電子ビームの有限分布関数による影響	56
8.3	実効光源サイズと実効発散角	56
8.4	実効フラックス密度と実効輝度	57
8.5	コヒーレントフラックス	58
8.6	光源特性の例	59
8.7	スペクトル	60
8.8	熱負荷とフラックス	62

8.9	放射光の時間構造	63
8.10	ウィグラーとアンジュレーター	64
9	X線自由電子レーザー (XFEL)	66
9.1	なぜライナック?	67
9.2	基本原理	67
9.3	FELの基本原理を定性的に理解するために	69
9.4	SASE型FELとシード型FEL	74
9.5	XFEL光源性能の簡易計算	79
10	回折限界蓄積リング (DLSR)	82
10.1	DLSRとは?	82
10.2	光源性能の比較	83
11	おわりに	88
コラム	放射光源特性の計算手法の進展	89
問題		93

第3章 光を安全に取り出す (インターロック・放射線遮蔽)

(小菅 隆・松下 智裕・成山 展照)

1	はじめに	95
2	遮蔽	96
2.1	蓄積リングからの放射線と遮蔽方法	96
2.2	ビームシャッター (MBS, BBS, DSS)	98
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)	99
2.4	放射線遮蔽ハッチ	100
3	ビームラインインターロックシステム	102
3.1	システムの構成	103
3.2	ロジックの概要	103
3.3	利用上注意すべきこと	104
4	ビームアボートについて	104
5	おわりに	106
コラム	ラダー言語とは	107
問題		110

第4章 光を安全に取り出す (フロントエンド)

(高橋 直・宮内 洋司)

1	はじめに	116
2	フロントエンドとは	116
3	フロントエンドの構成機器と役割	118
3.1	ビーム成形と高熱負荷処理	119
3.2	放射光の導入と遮断	120
3.3	超高真空の維持	122
4	ユーザー実験への影響	124
5	高熱負荷処理技術	126
5.1	トータルパワーとパワー密度	127
5.2	高熱負荷への対処	128
5.3	熱および熱応力解析	129
5.4	熱的限界調査	131
5.5	今後の見通し	132
6	おわりに	133
	問題	136

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	139
2	光とは何か	140
2.1	種類と性質	140
2.2	屈折と反射	143
コラム	入射角 (incident angle) と視射角・照射角 (glazing angle)	147
3	光の干渉と回折	148
4	分光素子 - 回折格子と完全結晶	151
5	現場で役立つ情報	153
6	おわりに	153

コラム 逆空間における分光素子	155
問題	158

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	162
2 X線分光器の概要	163
2.1 結晶によるX線の単色化	164
2.2 結晶の選択	166
2.3 二結晶分光器	169
コラム 高次光の除去	171
コラム 縦跳ね vs. 横跳ね	172
3 熱問題	172
3.1 冷媒	174
3.2 冷却方法	176
4 単色化の仕組み	179
4.1 結晶によるX線の散乱	179
コラム フーリエ級数と逆格子ベクトル	182
コラム デルタ関数	183
4.2 回折条件	184
4.3 ブラッグの法則と単色化	186
コラム 運動学的回折理論の一般的な利用法	187
5 動力的回折理論入門	188
5.1 ラウエの方法の基本方針	188
5.2 電気感受率	192
5.3 回折強度曲線	195
コラム 非対称反射	198
5.4 デュモンド図と波長・角度分布	199
6 高分解能分光器	203
6.1 ブラッグ角が約90°の反射を利用する	203
6.2 複数の結晶を組み合わせる	203

コラム 二結晶分光器の代わりとしてのチャンネルカット	206
7 おわりに	206
問題	210

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	212
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	214
2.1 基本的な分光器	214
2.2 高分解能を実現するための条件と問題点	216
2.3 高フラックスを実現するための条件と問題点	221
2.4 高次光・迷光・偏光	223
2.4.1 高次光	223
2.4.2 迷光	225
2.4.3 偏光	225
3 実際のビームラインおよび分光器の例	227
3.1 前置集光系+入射スリット	227
3.2 分光器	229
3.2.1 斜入射領域	230
3.2.2 直入射領域	231
3.3 後置集光系	232
4 おわりに	233
問題	235

第8章 光の形を整形する (ミラー編) (宇留賀 朋哉)

1 はじめに	239
2 X線の反射の基礎知識	240
2.1 X線の反射とは?	240
2.2 X線の反射率に影響するもの	242
2.3 多層膜を用いたミラー	244
3 ミラーの用途	245

3.1	集光	245
3.2	平行化	245
3.3	高次光除去	246
3.4	軟X線用ミラーの特徴	247
4	集光ミラーのいろいろ	247
4.1	集光ミラーの表面形状	248
4.2	1次元の集光	249
4.3	2次元の集光	250
4.4	高い集光性能をもったミラー	251
5	集光サイズに影響する要因	252
6	硬X線ビームラインにおけるミラーの配置	254
7	どのようなミラーを作ればよいか	255
7.1	ミラーの基本構造	255
7.2	必要な長さ	255
7.3	基板材質の選択	256
7.4	表面の研削・研磨	257
7.5	反射材の選択	257
7.6	ミラー調整機構	258
8	ミラーの性能評価と調整	260
8.1	オフラインでの評価	260
8.2	放射光を用いた評価と調整	261
9	トラブルと対策	262
9.1	ミラー本体	262
9.2	振動	262
9.3	曲げ	263
9.4	経年劣化	263
10	おわりに	264
	問題	266

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・竹内 晃久)

1	はじめに	271
2	光学的に光を集める	272
3	X線領域で利用される集光素子	275
3.1	どのような種類があるか?	275
3.2	フレネルゾーンプレート	275
3.3	ラウエレンズ	282
3.4	屈折レンズ	283
4	X線集光ビームの取り扱い	287
4.1	どのように設計すればよいか	287
4.1.1	集光素子と照明条件のマッチング	287
4.1.2	仮光源の利用と効果	288
4.1.3	目的や使用ビームラインに応じた設計	289
4.2	どのように調整, 評価すればよいか	289
4.3	その他の考えるべき点	294
5	今後の展望	297
	問題	301

第10章 光の偏光を制御する (鈴木 基寛・広野 等子・松田 蔵)

1	はじめに	304
1.1	偏光を使うと何がわかるか	305
1.1.1	直線偏光による測定	305
1.1.2	円偏光による測定	306
2	偏光についての共通事項	309
2.1	偏光状態とその表し方	309
2.1.1	直線偏光	310
2.1.2	円偏光	311
2.1.3	偏光度	311
2.2	偏光光学素子の種類	314
2.2.1	偏光子(検光子)	314
2.2.2	移相子	315
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	316

2.3.1	直線偏光から円偏光への変換	316
2.3.2	水平直線偏光から垂直直線偏光への変換	317
2.4	偏光の測り方	317
3	偏光制御の実際	318
3.1	各波長領域での偏光光学素子	318
3.2	偏光光学素子と挿入光源	319
4	軟X線領域での偏光制御	320
4.1	軟X線領域の偏光光学素子	320
4.1.1	軟X線領域の偏光子—反射型多層膜偏光子	320
4.1.2	軟X線領域の移相子—透過型多層膜移相子	321
4.2	挿入光源による偏光制御	322
4.2.1	高速偏光スイッチング	322
4.3	軟X線ビームラインを使う場合の注意点	324
5	硬X線領域での偏光制御	325
5.1	硬X線領域の偏光光学素子	325
5.1.1	硬X線領域の偏光子—反射型結晶偏光子	325
5.1.2	硬X線領域の移相子—透過型結晶移相子	326
5.2	ダイヤモンド結晶移相子の利用	330
5.2.1	高速偏光スイッチング	330
5.2.2	移相子制御の実際	331
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	332
5.2.4	左右円偏光の強度差	334
5.2.5	移相子結晶の同時反射	335
6	おわりに	336
	問題	340

第11章 光のコヒーレンスを使う (百生 敦)

1	はじめに	343
2	コヒーレンス	344
3	X線の位相シフトと伝播	348
4	X線コヒーレンスの制御	350
5	コヒーレンスの利用	355

5.1	ビーム集光	355
5.2	位相イメージング	356
5.3	スペckル分光	358
6	おわりに	359
	問題	361

第12章 光の位相情報を回復する (高橋 幸生)

1	はじめに	363
2	位相回復問題	364
3	位相回復	366
3.1	位相回復の基本概念	366
3.2	オーバーサンプリング位相回復法	367
3.3	タイコグラフィ位相回復法	369
3.4	コヒーレント回折イメージング	371
4	コヒーレント回折イメージングに必要なビームライン技術	373
4.1	CDI実験に求められるX線のコヒーレンス	373
4.2	CDI実験のビームライン配置例	374
4.3	CDI実験のための2次元検出器	376
5	位相回復計算技術	376
6	位相回復の応用例	377
6.1	金属ナノ粒子の電子密度分布をナノメートル分解能で可視化した例	377
6.2	X線自由電子レーザーを用いて金属ナノ粒子の粒径分布と内部組織を複合的に分析した例	378
6.3	試料が厚くても高分解能でX線イメージを可能にするマルチスライスX線タイコグラフィ法の例	380
6.4	空間分解能50nm以下でX線吸収微細構造(XAFS)を得るタイコグラフィ-XAFS法の例	381
7	おわりに	383
	問題	386

第13章 光の時間構造を使う (足立 伸一・田中 義人)

1	はじめに	387
2	放射光の時間構造(原理)	388
3	放射光の時間構造を利用した測定法	391
4	放射光との同期技術	393
5	放射光を望みの繰り返し周波数に間引く技術	395
6	放射光とレーザーのタイミングをモニターする技術	398
7	繰り返し周波数と単位時間・パルス当りの光子数	399
8	応用例	401
8.1	時間分解回折法による結晶構造のダイナミクス	401
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	402
8.3	時間分解XAFS	403
9	X線自由電子レーザーの時間分解測定への応用	404
10	おわりに	406
	問題	409

第14章 光を自在に操り記録する

(大端 通・濁川 和幸・登野 健介・城地 保昌)

1	はじめに	411
2	光を自在に操るためのビームライン制御システムの考え方	412
2.1	ビームライン制御やデータ収集システムの考え方	412
2.2	ビームラインにおける主な制御対象と留意点	414
2.3	ビームライン機器制御と実験装置制御の類似点と相違点	415
2.4	ビームライン制御のためのフレームワーク	416
2.4.1	EPICS	417
2.4.2	TANGO	418
2.4.3	MADOCAとその発展	418
2.4.4	STARS	420
2.4.5	その他のフレームワーク	422
2.5	ビームライン制御に用いられているデータベース	422
2.6	ビームライン制御の今後	423

3	光を記録するための光診断	
	～ SACLAにおけるビームライン光診断の例	424
3.1	はじめに	424
3.2	光に関する情報を記録し活用するためのモニター	424
3.3	SACLAのXFEL診断システム	425
3.3.1	スクリーンモニター	426
3.3.2	ビームモニター	427
3.3.3	波長モニター	429
3.3.4	ガスモニター	430
3.4	先進的光診断	432
3.4.1	単一パルス高分解能スペクトル計測	432
3.4.2	パルス到達タイミング計測	435
3.4.3	ビーム分割による非破壊診断	437
3.5	光診断の今後	437
4	光を記録するためのデータ収集システム	
	～ SACLAにおけるデータ収集・解析システムの例	438
4.1	はじめに	438
4.2	2次元検出器とデータ量	439
4.3	大量データ解析のための機能	439
4.4	SACLAにおけるDAQ・解析システムの例	440
4.5	利用者はいかにして大容量の実験データにアクセスできるか	445
4.5.1	実験データの取扱方法	
	～メモリ渡し(API)とファイル渡し(HDF5)	445
4.5.2	SACLAにおける実験データアクセスAPIの実例	446
4.6	データ収集・解析システムの今後	449
	問題	452

第15章 光の回折限界の実現と新たな挑戦 (玉作 賢治・三村 秀和)

1	はじめに	456
2	コヒーレントX線とミラー	457
2.1	コヒーレントX線を扱うために	457
	コラム rmsとp-v	458
2.2	平面ミラーによるコヒーレントX線の反射	459
2.3	回折限界集光に求められるミラーの精度	461

2.4	回折限界集光を実現するためのアライメント精度	463
3	ミラーの作製と評価	465
3.1	ミラー設計の例と注意点	465
3.2	高精度X線ミラーの加工法	467
3.3	高精度X線ミラーの表面評価方法	468
3.4	高精度ミラーの作製と反射X線の評価	470
3.5	集光アライメントのための At-wavelength 計測法	471
4	最先端のX線ミラー	474
4.1	集光素子としてのミラー	474
4.1.1	全反射集光ミラー	474
4.1.2	多層膜集光ミラー	474
4.1.3	X線自由電子レーザー用集光ミラー	476
4.2	結像素子としてのミラー	477
4.3	軟X線ミラーの発展	477
5	回折限界集光が拓く新領域	478
5.1	高強度X線と物質の相互作用	478
5.1.1	基本的な相互作用	478
5.1.2	基本的な緩和過程	480
5.1.3	高強度での相互作用へ	482
5.2	非線形な散乱過程とその応用	483
5.2.1	非線形な相互作用	483
5.2.2	和周波発生と位相整合条件	484
5.2.3	パラメトリック下方変換と非古典X線の発生	486
5.3	非線形な吸収過程とその応用	487
5.3.1	吸収と可飽和吸収	487
5.3.2	逐次的な過程と直接過程	489
5.3.3	直接2光子吸収	490
5.3.4	X線非線形光学実験の例	492
5.3.5	分光法	492
5.4	強度変動の影響	494
6	おわりに—新たな挑戦	495
	問題	499

第16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	501
2	ビーム強度を見積もる方法	503
2.1	光の強度について	503
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	505
2.3	ミラーによる影響	506
2.4	二結晶分光器で単色化されたX線の強度	507
3	ビームのサイズと発散を見積もる方法～位相空間の話～	509
3.1	位相空間 (phase space) とは	509
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～	511
3.3	光源から放射される光のサイズと発散	513
3.3.1	偏向電磁石の場合	513
3.3.2	アンジュレーターの場合	515
3.4	位相空間による光子集団の運動の記述	516
3.4.1	自由空間の伝搬	516
3.4.2	スリットの影響	517
3.4.3	集光素子の効果	518
3.4.4	分光結晶の影響	520
4	ビームラインで得られる光の特性を正確に計算する方法	521
4.1	幾何光学に基づく光線追跡プログラム	521
4.1.1	光線追跡プログラムとは	521
4.1.2	SHADOW について	522
4.1.3	SHADOW の使用例と課題	523
4.2	波動光学に基づくシミュレーションソフト	525
4.2.1	波動光学シミュレーションとは	525
4.2.2	Synchrotron Radiation Workshop (SRW) について	525
4.2.3	SRW の利用例と課題	526
4.3	ビームライン光学に関する代表的なソフトウェア	528
4.4	光学シミュレーションの注意点と今後の展開	529
4.4.1	使用上の注意点	529
4.4.2	さらなる発展に向けて	529
5	おわりに	530
	問題	534

演習問題解答

第2章	538
第3章	541
第4章	546
第5章	552
第6章	556
第7章	559
第8章	562
第9章	566
第10章	571
第11章	576
第12章	579
第13章	584
第14章	588
第15章	594
第16章	598
索引	604
広告	
付録 (繁政英治・矢橋牧名)	



第1章

はじめに

1 はじめに

人類が初めて電子シンクロトロンで放射光を観察したのは1947年のことです。その後、放射光源の性能は飛躍的に向上し、それと共に放射光科学は著しい発展を遂げました[1]。2011年には波長0.1nmのX線自由電子レーザーXFEL(X-ray Free Electron Laser)が発振し利用に供され[2]、放射光とX線レーザーは、今や「夢の光」ではなく、現代科学になくてはならないツールの一つとなっています[3]。

これら光源の利用者数は年々増加しつつあり、この傾向はますます強まる一方です。また、利用されている分野を見ると、物理、化学、生物、医学、薬学、農学、地球科学、考古学などと実に多彩です。このように多分野にわたる多数のユーザーが放射光を利用しているわけですが、実際に実験するにあたっては、修得しておくべき基礎知識、あるいは知っているといかに役立つ知識がたくさんあります。例えば、光源、ビームライン、検出器、実験技術やデータ解析法などです。本書ではこれらの中から特に、放射光科学の根幹を支える「光源とビームライン」に光をあててご紹介します。初心者ユーザーや、物理系実験装置に馴染みの薄い分野の学生にも理解できるよう、放射光を使いこなすためのビームライン光学技術の基礎知識をわかりやすく紐解いて行きます。

このように言うと、「ビームライン光学技術は放射光やXFEL施設のスタッフに必要な知識であって、なぜユーザーが知らなければならないのか？」と疑問に思う読者がいるかもしれません。そもそも初心者ユーザーがビームライン光学技術を学んでどんな益があるのでしょうか？

一方、「放射光実験の初心者であっても、研究者ならば自分が使う実験装置の基礎知識を習得しているはずで、釈迦に説法である！」とのお叱りの声が聞こえてきそうです。ところが、使い勝手の向上に伴い、

ビームラインのブラックボックス化が進んでおり、その結果、利用経験が豊富なユーザーであっても、あるいはビームライン担当者といえども、「実験ステーションより少し上流の装置」については理解が及ばず、思わぬ落とし穴に陥る場合があるようです。

放射光ビームライン担当者であるが「放射光と XFEL のビームラインは何が違うの？」という方もいるかもしれません。放射光と XFEL の違いや、それぞれのビームラインについて知る機会は、残念ながら限られているのが実情です。

そこで、最初に、ビームラインとは何かについて、またビームライン光学技術を知る必要性について述べます。後半では、本書の構成をご紹介します、これらをもって序章としたいと思います。

2 ビームラインとは何か

ビームラインとは、「光源で発生させた放射光や XFEL をユーザーの用途に合うよう加工して安全に提供するシステム」です。ビームラインといえば実験手法や試料対象から分類された実験ステーションを思い浮かべるユーザーが多いかもしれません。本書は、ユーザーの視線を上流に転じ、実験ステーションに提供されている光を作り、加工する光学技術と、それらを使う仕組みを主題とします^{a)}。

百聞は一見にしかず。図 1.1(a) と (b) にそれぞれ X 線と、真空紫外・軟 X 線の典型的な放射光ビームラインの写真を示します。同図 (c) には、XFEL ビームラインの例を示します。

図 1.1(a) の X 線ビームラインでは、放射線遮蔽ハッチと呼ばれる鉛と鉄板でできた小屋がまず目に飛び込んできます。X 線のユーザーならば、実験中ハッチに出入りする際、インターロックシステムのボタンを何度も押す一連の操作を行います。これは XFEL の X 線ビームライン (図 1.1(c)) でも同じです。

ところが、図 1.1(b) の真空紫外・軟 X 線ビームラインではインターロックシステムで真空封止バルブを開閉しますが、ハッチはありません

a) 一般に蓄積リングや線形加速器など電子と光が分岐した箇所からをビームラインと呼びます。本書では、ビームラインを特徴づけている光の発生と、光の加工にかかわる箇所を広義にビームラインと捉え解説します。

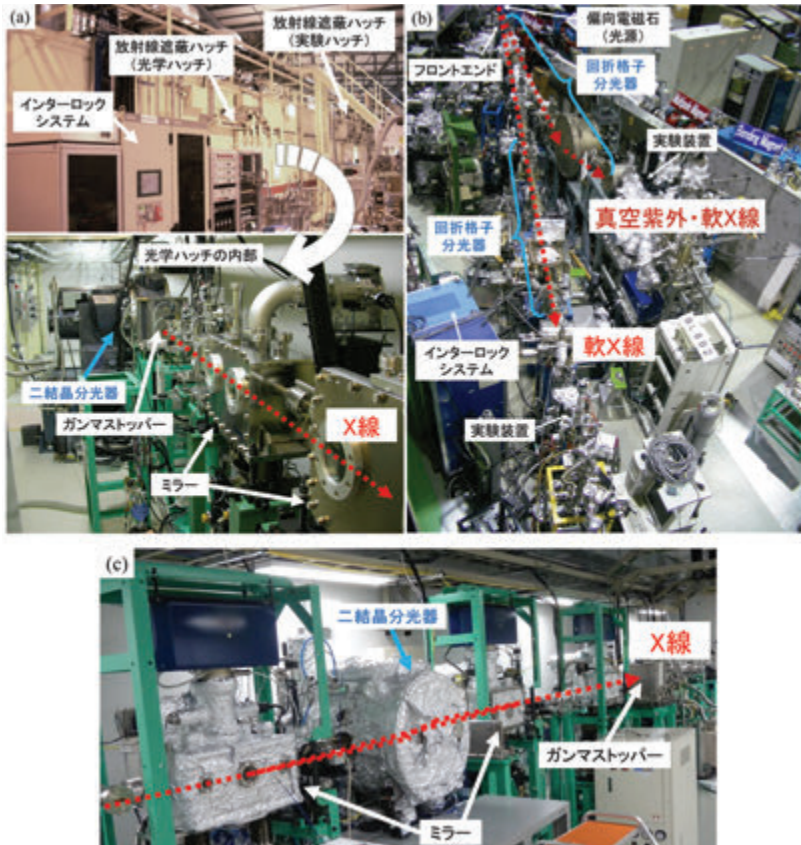


図1.1: (a) 放射光のX線ビームラインの例 (SPring-8 BL19LXU)。放射線遮蔽ハッチとインターロックシステムが並んでいます。光学ハッチの中には二結晶分光器やミラー、ガンマストッパーが設置されています。
 (b) 放射光の軟X線・紫外線ビームラインの例 (UVSOR BL8)。2本の分岐ビームラインの全景で、光源である偏向電磁石から、フロントエンド、回折格子分光器、インターロックシステムそして実験ステーションまでを一望できます。
 (c) XFELのX線ビームラインの例 (SACLA BL3の光学ハッチ内)。放射光のX線ビームラインと同様に二結晶分光器やミラー、ガンマストッパーが設置されています。

索引

あ

- アスペクト比…………… 281, 591
圧縮応力…………… 131, 547
Advanced KBミラー(AKBミラー) …… 277, 464, 477
APPLE型 …… 42, 322
At-wavelength…………… 261, 471, 473
ayagiku …… 422
RF
— 加速空洞…………… 388, 393
— 基準信号…………… 393
— の反射異常…………… 105
— バケット…………… 389
rms …… 458
アルミナ蛍光板…………… 119
アルミナ分散強化銅…………… 129
アンジュレーター… 19, 23, 44-45, 47-48, 54, 59,
61, 64, 70, 72-74, 82, 84, 93, 97, 127,
136, 173, 201, 250, 252, 301, 322, 388,
393, 479, 515, 530, 534, 539, 600
IBF …… 468
Eagle型分光器 …… 231, 232
異常分散…………… 193, 209, 361
位相…………… 13
— イメージング…………… 356
— 回折格子…………… 280
— 回復…………… 14, 358, 363, 366-370, 372,
374, 376-377, 438, 449, 472-473, 475
— 型FZP …… 280
— 空間…………… 24, 25, 58, 90, 502, 509-514,
517, 519-520, 530, 599
— コントラスト…………… 348, 356
— 差…………… 42-43, 193, 310-311, 313,
316-317, 321-322, 327-329, 332-333,
340, 573, 575
— 制御…………… 406
— シフト…………… 293, 348-349, 356, 361,
381, 574, 577
— 整合…………… 484-486
— 速度…………… 144, 284, 302
— 楕円…………… 516, 519-520, 535, 598
— 敏感検出法…………… 331
移相子… 14, 315, 321, 326, 330-331, 335, 341, 342
異方性…………… 305
イメージングプレート…………… 395, 401
色収差…………… 279
インターロック…………… 2, 3, 8, 11, 95-96, 102-107,
116, 123, 153
ウォルター…………… 277, 464, 477, 495
ウイグラー…………… 39-40, 63-66, 525
薄レンズの公式…………… 272
運動学的回折理論…………… 179, 187
ADL (Acoustic Delay Line) …… 123
APD (Avalanche Photo Diode) …… 392, 402
SRW (Synchrotron Radiation Workshop) ……
502, 523, 525-530, 536, 603
SX-700 …… 230
SCM (Screen Monitor) …… 119, 425
XMCD (X-ray Magnetic Circular Dichroism) ……
307-308, 313, 322-323, 330-331, 335-336, 341
X線
— 回折…………… 164-165, 177, 179, 184, 188,
190-192, 364, 378, 386, 401, 416, 429, 448
— 吸収微細構造…………… 239, 381
— 屈折レンズ…………… 283-287, 302-303
— 結晶移相子…………… 327
— 光子相関分光法…………… 358
— 磁気円二色性…………… 307-308
— CCD …… 261, 395
— CT …… 356, 358, 380, 449
— 集光…………… 274, 276, 284, 287-289, 298, 355,
375, 461, 464, 471, 472, 474-475, 478, 499
— ストリークカメラ…………… 392, 398-400

—導波管…………… 297
 —パルスセレクター…………… 395-397, 409
 —反射率…………… 242, 261
 —プリズム…………… 284-285, 302
 —分光器…………… 162-163, 432
 —ペンシルビーム法…………… 471, 473
 —ホログラフィー…………… 357
 XYスリット…………… 117, 119-120, 200
 エッチング…………… 207, 281, 287
 エネルギー
 —幅…60-62, 80, 139, 239, 245, 332, 432, 531
 —バンド幅…………… 400
 —分解能…………… 139, 151, 232, 235, 246,
 250, 254, 400, 413, 493, 502
 FCS (Fast Closing Shutter)…………… 123
 FZP (Fresnel Zone Plate) …… 271, 275-283, 289,
 296, 297, 301-302, 362, 566-567
 FZ (Floating Zone)法…………… 166
 エミッタンス
 —の保存則…………… 511-512
 MCS (Multichannel scaler)…………… 392, 402-403
 MCP (Micro-Channel Plate)…………… 392
 MBS (Main Beam Shutter)… 98-99, 105, 116-117,
 120-121, 124, 131, 505
 EEM (Elastic Emission Machining)……………
 468, 470, 477
 エンドストッパー…………… 97, 99-101
 円偏光…………… 39, 42-45, 116-117, 225,
 305-313, 316-319, 322-336, 341-342, 573, 575
 —度…………… 312-313, 317-318, 324-325, 328,
 333-334, 341-342
 —変調分光法…………… 331
 凹面回折格子…………… 215
 OSA (Order Selecting Aperture)…………… 279-280
 オージェ過程…………… 480
 オゾンアッシング法…………… 263
 オーバーサンプリング位相回復法……………
 367-369, 372-375
 オフセット角…………… 328-333, 341-342, 575
 off-plane Eagle型分光器…………… 231-232
 音響パルス…………… 402-403
 温度因子…………… 194, 209

か

開口
 —角…………… 273
 —瞳…………… 302
 回折
 —強度曲線…………… 195-197
 —限界…………… 8, 11, 13, 15, 36-37, 52, 58,
 60, 81-83, 86, 89, 91, 251, 252,
 269, 273-274, 278-279, 281, 288,
 297, 298, 301, 336, 355, 382, 456,
 461, 463, 464, 467, 469, 472,
 478, 486, 495, 496, 499, 501, 524,
 566-567, 594-595
 —顕微法…………… 358, 526
 —光…………… 148-149, 156, 161, 216,
 229-230, 235, 273, 279-281, 307,
 326, 341, 437
 —格子…………… 3, 12, 147, 149-156, 161,
 212-221, 223-225, 229-233, 235, 247
 —効率…………… 152, 229, 279-282, 566
 —条件…………… 156, 184-187, 196, 216, 217,
 235, 244
 —素子…………… 146-147, 149, 151, 239
 回転検光子法…………… 317-318, 324, 340, 573
 回転楕円面…………… 245, 250, 285, 302, 477, 569
 回転放物面…………… 214-215, 245-246, 250
 ガウス分布…………… 268, 510, 514
 カオス光源…………… 354
 架橋ポリエチレン…………… 119
 拡散板…………… 351-352
 Kirkpatrick-Baez
 —光学系…………… 228
 —ミラー…………… 248, 250-251, 255, 277,
 283, 264, 466, 472, 476, 477, 492, 495, 524
 ガス制動放射線…………… 96
 可変偏角型分光器…………… 231
 可飽和吸収…………… 487-488, 490, 496
 下流シャッター…………… 98-99, 120
 ガルバノスキャナー…………… 331
 干渉…………… 143, 148, 160, 162, 164, 180,
 184, 212, 219, 224-225, 233, 261,
 273, 320, 343, 347, 349, 351, 356, 578
 間接冷却…………… 126, 163, 176-177, 207

- 完全
- 結晶…………… 147, 151-153, 156, 162
 - 性…………… 173, 188, 325-327, 351
 - ガンマストッパー…………… 3, 11, 97, 99-101
 - 幾何学的集光サイズ…………… 274, 288
 - 幾何光学…………… 90-91, 143, 245, 273, 499, 521, 525, 527, 535, 595, 596
 - 輝度…………… 11, 21-26, 39, 57-60, 66, 81-82, 86-87, 90-91, 94, 378, 382, 503, 530, 534, 598
 - の保存…………… 511-513
 - Kinoform型FZP…………… 280-282
 - 基本波長…………… 48, 51-52, 54, 60-62, 68, 70, 72, 77, 81, 84, 93, 515, 539
 - 逆格子ベクトル…………… 168, 181, 182, 184
 - 吸収端…………… 153, 224, 243, 257, 286, 305-307, 321, 324, 341, 356, 381, 431, 479, 488, 492, 577
 - 球面収差…………… 253, 274, 290, 477, 601
 - 球面波…………… 144-145, 148, 214, 233, 275, 290, 291, 349, 365
 - 共役像…………… 277
 - 局所遮蔽…………… 101, 119, 122
 - 曲率半径…………… 173, 219, 230, 233, 248-250, 259, 267, 269, 285, 287, 302-303, 466, 470, 514
 - 禁制反射…………… 168, 485
 - 空間周波数領域…………… 260
 - 空間的コヒーレンス…………… 14, 58-60, 75, 80-81, 83, 85-86, 89, 91, 94, 125, 273, 274, 278, 287-289, 291, 346, 348, 352-353, 356, 386, 456-457, 526, 576, 577
 - 長…………… 274, 278, 287, 288, 346, 352-353, 386, 576-577
 - 空間的不確定性…………… 36
 - 屈折
 - 角…………… 240, 245, 284-285
 - 素子…………… 13, 146, 245
 - 波…………… 145, 356
 - 率…………… 145, 188, 190, 210, 213, 221, 237, 240, 243-244, 267, 271, 283-284, 292, 302, 305, 314-315, 320, 325, 348, 356, 361-362, 366, 475, 484-485, 500, 556, 560, 566, 568, 574, 576, 596
 - レンズ…………… 13, 271, 275, 283-287, 297, 302-303, 477, 501, 526
 - ガラスホッパー…………… 230
 - グラフィット…………… 177, 305, 326, 341
 - フィルター…………… 124, 126, 505, 507-508, 534, 598
 - GlidCop…………… 129, 131-132
 - グレーティング干渉計…………… 472-473, 476
 - クーロン爆発…………… 481
 - 蛍光
 - X線検出器…………… 335, 340
 - 過程…………… 480
 - 法…………… 334
 - 形状誤差…………… 219, 223, 262, 274, 290-291, 457-459, 461-463, 467-468, 470-473
 - 計数型検出器…………… 401
 - 計数率…………… 335, 493
 - 結晶…………… 12, 13, 78, 151, 155-156, 162-182, 184-188, 190-192, 194-208, 210-211, 244-246, 250, 262, 271, 282, 296, 306, 314-315, 318, 325-336, 340-342
 - 移相子…………… 326-328, 330-331, 335
 - 構造因子…………… 364
 - 分光器…………… 3-4, 68, 153-154, 163, 169-172, 198, 200-201, 203-204, 206-207, 210, 212, 239, 340, 353, 373, 412, 415, 425, 432, 456, 500, 502-503, 507-509, 534, 557
 - 結像…………… 272-274, 278, 464, 477, 495
 - KB
 - 光学系…………… 228
 - ミラー…………… 248, 250-251, 255, 283, 464, 466, 472, 476, 477, 492, 495, 524
 - ケーブルダクト…………… 101
 - ゲルマニウム…………… 336, 433, 491, 507-508
 - 検光子…………… 314-315, 317-318, 320, 324-326, 340-341, 573
 - 原子散乱因子…………… 180, 184, 192-193, 576
 - 光学
 - 結像…………… 272
 - 集光…………… 272
 - ハッチ…………… 3-4, 99-101, 120, 239, 295, 425

光源
 ——サイズ…………… 21-23, 36-37, 51-52,
 56-57, 59, 80-81, 85, 217, 220,
 227-228, 235, 249, 253-254,
 273, 345-346, 352, 374, 432,
 454, 456, 476, 499, 538-540, 559, 598
 高次回折光…………… 279
 高次光…………… 13, 52-54, 65, 76, 93, 117,
 168, 171, 223-225, 227, 233, 237,
 246-247, 254, 361, 456, 492, 539
 ——除去…………… 13, 224, 227, 246, 456
 格子定数…………… 151, 167, 174-175, 208, 211,
 329, 334, 336, 341, 557
 格子面…………… 78, 147, 152, 155, 164-166, 168,
 170-171, 178, 186, 191, 195,
 203-205, 208, 210-212, 283,
 314, 326, 329, 335, 454, 485, 556-557
 ——間隔…………… 152, 165, 166, 168, 170, 186,
 203-204, 208, 210, 212, 283,
 454, 556
 高周波加速空洞…………… 388, 410, 586
 光線…………… 142-144, 147, 159, 222, 232,
 250, 272, 278, 291, 518, 521, 525
 ——追跡法…………… 16, 459, 502, 512, 521-524, 529
 高速
 ——偏光切替, スイッチング…………… 44-45,
 322, 330, 336
 後置
 ——光学系…………… 150-151, 156
 ——集光系…………… 214, 231-232, 250
 ——ミラー…………… 246, 254, 256
 光電効果…………… 141, 286, 479, 480-482,
 487, 491, 493, 542
 高熱負荷…………… 119-120, 126-129, 131-132, 546
 降伏点…………… 131, 547
 高分解能分光器…………… 203, 205
 ゴーストイメージング…………… 486-487
 古典電子半径…………… 194, 284
 コヒーレンス
 ——長…………… 274, 278, 287, 288, 298,
 345-350, 352-353, 355, 357,
 373, 374, 386, 567, 576-578, 580
 ——の破壊…………… 125

コヒーレント
 ——回折イメージング 14, 371, 373, 386, 582
 ——光源…………… 354
 ——比…………… 59, 85, 94, 540
 ——フラックス…………… 58, 354, 383, 449
 コマ取差…………… 253, 274, 477
 コミッシュニング…………… 118-119, 526
 collimated plane grating monochromator …… 230
 コンダクタンス…………… 123, 126, 549
 コンプトン散乱…………… 110, 286, 479, 487, 492
 さ
 最外輪帯幅…………… 278-279, 281, 362
 最小作用の原理…………… 302
 再生増幅器…………… 394, 585
 サジタル
 ——集光…………… 229, 236
 ——シリンダーミラー…………… 249-250, 256, 262
 ——方向…………… 248, 269
 SASE (Self-Amplified Spontaneous Emission) ……
 11, 74-75, 77-80, 83-88, 154,
 404-407, 424, 432, 438
 差動排気…………… 123, 125
 XAFS (X-ray Absorption Fine Structure) ……
 239, 243, 245-246, 254, 257, 313,
 330-331, 335, 337, 381-382, 401, 403, 477
 3結晶回折法…………… 402
 散乱
 ——面…………… 314, 326-327, 466, 485
 時間的コヒーレンス…………… 14, 58, 75, 77, 78, 274,
 298, 346-348, 353, 355, 386, 406,
 496, 567, 576, 578
 ——長…………… 274, 347-348, 386, 567, 576, 578
 時間的不確定性…………… 35
 時間分解
 ——回折法…………… 401
 ——XAFS…………… 403
 ——3結晶回折法…………… 402
 σ 偏光…………… 195, 199, 314-315, 326-328,
 340, 571
 シーケンサー…………… 103, 107-108, 111, 453
 指向性…………… 12, 22-23, 31, 37, 38, 97, 159,

	186, 230, 554		301, 477, 495, 568, 601
子午線		収束ビーム	535
— 方向	248-250, 255, 267, 269, 563	出射スリット	214, 216-217, 219-221, 225, 228-233, 235, 559
— 湾曲ミラー	249-250, 252	衝撃波遅延管	123
自然エミッタンス	37, 59, 82-83, 91, 93, 538	上下偏向ミラー	250, 254, 258, 263
実効		焦点	
— 輝度	57-58, 60, 598	— 距離	245, 249, 251, 272, 278-279, 285, 287-289, 297, 301-302, 433, 466, 519, 566-567, 577
— 光源サイズ	56-57, 59	— 深度	274, 292-293, 301, 566
— 発散角	56-58, 513	衝突電離	481-482, 491-492
— フラックス密度	57-58, 60	シリコン	126, 162, 166-168, 171, 173-177, 179, 188, 193-194, 196-197, 199, 203, 207-210, 257, 286, 293, 326-327, 334, 352, 427, 433, 457, 482, 507-508
実効的パワー密度	127	真空紫外	4, 95, 122, 126, 154-155, 318, 387, 496, 505
$\lambda/4$ 板 (四分の一波長板)	315	— 光	35, 146, 487
SHADOW	502, 522-525, 527-529, 535, 601	— 軟X線	2, 13, 76, 152, 212-213
— Ovi	523, 535	振動	220, 262-263, 289-291, 294-296, 301, 309, 311, 314, 318, 330-331, 353, 483-484, 487, 553, 567, 574, 603
— VUI	523	振幅	
斜入射		— 回折格子	280
— 型分光器	153	— 型FZP	280
— 干渉縞計測法	260	垂直直線偏光	310, 312, 316-317, 329, 332
— 技術	128-129	垂直偏光	42-43, 45, 309, 340
— 光学系	227, 324, 341	水平直線偏光	225, 310, 312-313, 316-318, 322, 327, 329, 334, 340, 571
— 配置	146, 240, 245, 253	— 度	312-313, 317-318, 340
— 分光器	228, 237	水平偏光	39, 42-43, 45, 309, 340
— 領域	153, 227, 229-230	水平偏向ミラー	250, 254, 256
遮蔽		スクリーンモニター	118-119, 425-427
— 板	279-281, 293	STARS (Simple Transmission and Retrieval System)	416, 420-421
— 方法	96	ステッチング干渉計	469
集光		ストリークカメラ	392-393, 395, 398-400
— サイズ	245, 247, 251-254, 261, 263, 264, 271, 273, 274, 276-279, 281-283, 286-289, 291-294, 296-298, 301-302, 355, 362, 461-462, 474, 478, 495, 496, 499, 522, 566-567, 570, 577-578, 595-596	ストレル比	461, 500
— 素子	13, 231, 245, 271, 275-277, 282, 287, 288-291, 296-297, 355, 381, 474, 477, 518-520	スネルの法則	240, 284, 556, 562
— ミラー	230, 245, 247-248, 250-252, 254, 261, 264, 269, 461, 463, 469, 470, 474, 475-476, 496, 499, 501, 563, 601	スーパーミラー	245
収差	218, 221, 228-231, 235, 247, 250, 252-253, 274, 279, 288, 290-291,	スペクトロメーター	432-433, 454

- スペックル…………… 290-291, 350-352, 596
 —分光…………… 358, 526
 スリット…………… 24-26, 36, 51, 62-63, 65, 93, 117,
 119-120, 137-138, 142-143, 148-150,
 160-161, 173, 200-201, 214, 216, 217,
 219-221, 225, 227-233, 235, 236,
 246, 251, 255, 269, 288, 301, 303,
 344-346, 349, 352-353, 361, 373,
 374-375, 399, 426, 452, 459, 471,
 495, 505, 510, 517-518, 526, 539,
 548-549, 559, 567-568, 570, 587, 599, 603
 スループット…………… 152, 188, 378, 439
 スロープエラー…………… 218-220, 229, 233-236,
 252-253, 257, 268, 457, 472, 563-564
 制動放射X線…………… 96
 接触熱コンダクタンス…………… 126
 瀬谷波岡型分光器…………… 232
 前置…………… 119, 250
 —集光系…………… 213, 227-228, 231-232
 —ミラー…………… 246, 256, 259
 —光学系…………… 149-150
 全反射…………… 170-171, 174, 192, 196, 213, 222,
 240-246, 275, 277, 282, 297, 302,
 374-375, 377, 474, 477, 573
 —条件…………… 147, 474
 —領域…………… 196-197, 199-204
 —臨界エネルギー… 242-243, 246-247, 257
 —臨界角…………… 241, 247, 267, 297, 462
 線膨張係数…………… 130, 137, 175
 走査型白色干渉計…………… 244, 260
 相対論的電子…………… 28-32, 47-48
 ゾーンプレート…………… 13, 212, 271, 275,
 297, 351, 477-478, 501, 577
 326-328, 330, 332, 334, 336, 341-342,
 426-427, 429, 487, 507-508, 575
 ダウンストリームシャッター…………… 97, 99
 楕円筒面…………… 524, 535, 601-602
 —KBミラー…………… 251
 —ミラー…………… 248, 251-253
 楕円面…………… 245, 249-250, 253, 285, 302, 477, 569
 多重散乱…………… 188, 196, 328
 多層膜…………… 147, 151-152, 206, 212, 244-245,
 277, 281-283, 297, 314-315,
 318, 320-321, 336, 467, 474-475, 500
 たわみ量… 137, 249, 259, 263, 267, 547, 548, 563
 単結晶…………… 166, 188, 205, 325, 326,
 401-402, 454, 507
 タンジェントバー…………… 414
 単色性…………… 21-23, 162-163, 203, 206, 274,
 279, 289, 347
 単色平面波…………… 32-33, 36, 158, 172, 367, 369, 579
 弾性散乱…………… 145, 184, 286, 332, 340,
 456-457, 479, 492, 557, 571, 579
 弾性変形…………… 131
 弾塑性解析…………… 125, 131-133
 ダンプボタン…………… 104-106
 蓄積型検出器…………… 395
 チャンネルカット…………… 205-206
 中性子…………… 96-98, 100
 超高サイクル疲労…………… 132
 超高真空…………… 98, 120, 122, 124-125
 直接冷却…………… 176-178, 207
 直線
 —アンジュレーター…………… 127
 —加速器…………… 67, 154, 406
 —偏光…………… 45, 225, 227, 237, 305-306,
 309-313, 315-319, 322, 325-327,
 329, 332, 334, 336, 340, 560, 571, 573
 —偏光度…………… 312-313, 315, 317, 318,
 340, 573
 直入射…………… 146, 153, 222-223, 226-227,
 229, 231, 546
 —型分光器…………… 153
 —領域…………… 153, 227, 229, 231
 ツインヘリカルアンジュレーター…………… 322
 DSS (Downstream Shutter)…………… 98-99, 120-121

た

- タイコグラフィ位相回復法…………… 369-370, 372,
 374-375, 380, 449
 退出シーケンス…………… 104, 106
 対称反射…………… 173, 195-196, 198-199, 204-205,
 210-211, 556
 体積発熱技術…………… 129
 ダイヤモンド…………… 78, 167-168, 210, 257, 287,

定偏角分光器…………… 230
 Debye-Waller因子…………… 243
 デフォーカス…………… 219, 230-231, 274, 290
 テフロン…………… 119, 122
 デュモンド図…………… 199-200, 520
 デルタ関数…………… 49-50, 181, 183, 196
 電気感受率…………… 190, 192, 194, 556
 電子線リソグラフィ―法…………… 281
 電子バンチ…………… 86, 346, 353, 388, 389
 390, 393, 395
 電子ビームのエミッタンス…………… 60, 91, 93, 298
 伝播…………… 32, 36, 90-91, 241, 302, 343,
 344, 348-349, 356, 363, 365, 380, 403,
 458-460, 471-472
 電離真空計…………… 122
 等位相面…………… 148-150, 348
 透過
 —型回折格子…………… 149-150, 161, 212, 280,
 437, 472
 —型結晶移相子…………… 326, 331, 342
 —型多層膜移相子…………… 321
 —率…………… 27, 188, 224, 237, 271, 286, 303,
 321, 327-328, 334, 364, 369, 425-427,
 429, 435-436, 505-506, 508, 534,
 560-561, 598
 同時反射…………… 152, 335
 動力学的回折理論…………… 13, 187-188, 208, 328
 トータルパワー…………… 127
 トータルフラックス…………… 127
 トムソン散乱…………… 478, 479, 481, 483
 ドラゴン…………… 230
 トロイダルミラー…………… 231, 250, 254, 267, 269

な

ナイフエッジスキャン…………… 261, 292
 二結晶分光器…………… 3, 4, 163, 169, 198, 200,
 201, 203, 204, 206, 373, 412, 415, 425,
 456, 502, 503, 507
 二重性…………… 141, 143
 $\lambda/2$ 板(二分の一波長板)…………… 317, 329, 330
 入射
 —角…………… 56, 60, 146-147, 165, 169, 185,

195, 199, 210, 213, 222, 223-224, 226,
 237, 240-241, 243, 245, 247, 249,
 252, 256, 261, 263, 269, 284, 302,
 305, 314-315, 320-321, 341, 462,
 536, 560, 571, 574, 601, 602
 —スリット…………… 173, 200-201, 227-229,
 231-232, 235-236, 559
 —面…………… 222
 熱応力解析…………… 129
 熱化…………… 482
 熱間等方圧加工法…………… 125
 熱伝達…………… 128, 130, 136, 173, 176-177, 546
 —係数…………… 130, 136, 546
 熱伝導…………… 173, 287
 —率…………… 120, 130, 136, 167,
 174-176, 208, 257, 546
 熱負荷…………… 12, 26, 62-63, 93, 98, 102,
 117-120, 126-129, 131-133, 170,
 178, 201, 203-204, 206, 228, 252,
 256, 287, 296, 546, 549
 熱輻射…………… 130
 Nevot-Croce因子…………… 244

は

π 偏光…………… 325, 327-328, 340-341
 バイモルフミラー…………… 252, 264
 8の字アンジュレーター…………… 322
 波長
 —の較正…………… 201
 —分解能…………… 149, 289
 発散
 —角…………… 21-22, 31, 36, 37, 51-52,
 55-59, 62, 79, 80-81, 84-85,
 148, 159, 218, 220, 228-230,
 332, 334, 341-342, 432-433,
 454, 465, 466, 501, 513, 517,
 519, 534, 538-540, 592, 598
 —ビーム…………… 510, 511, 535, 598
 ハッチ…………… 2-4, 11, 95, 97-101, 103-104,
 106, 109, 111, 115, 120, 153, 239,
 255, 262, 288, 294-296, 375-376,
 413, 425, 465, 542

- ハーモニック数…………… 389, 395
- パラメトリック下方変換…… 483, 486-487, 496
- パワー
 - 密度…………… 62-63, 117, 127, 129, 132, 173, 476, 546
- 反射
 - 型回折格子…………… 212
 - 型結晶偏光子…………… 325
 - 型多層膜偏光子…………… 320
 - 型の偏光子…………… 314, 320, 336
 - 材…………… 242-243, 247, 257, 261-262
 - 波…………… 145, 165, 190, 191-192
 - 幅…………… 171, 174, 200, 326
 - 率…………… 27, 68, 146-147, 152-153, 188, 190, 196, 200, 213, 221-224, 226-227, 233, 242, 246-247, 255-256, 258, 260-262, 314-315, 320-321, 325-326, 435-436, 467, 506, 508, 560
 - 率曲線…………… 506
- バンド幅…………… 21-22, 25, 38, 51, 61-62, 78, 80-81, 88, 400, 430, 465, 491-492
- ビエソ素子…………… 330-332
- PLC (Programmable Logic Controller) …… 103
- ピーク輝度…………… 86-88, 378
- 非常停止ボタン…………… 11, 105-106
- 非対称反射…………… 152, 195, 198, 205
- 左回り円偏光…………… 309, 313, 317
- 引張応力…………… 131
- 非点収差…………… 288
- BBS (Branch Beam Shutter) …… 98-99, 121
- 非偏光…………… 312, 318
- ビーム
 - アポート…………… 103-104, 118, 123-124
 - 強度…………… 503, 512
 - サイズ…………… 12, 56-57, 79, 81, 198, 232, 251, 253, 297, 355, 374, 412, 466, 476, 509, 519
 - シャッター…………… 11, 97-98, 105, 120, 121
 - 集光…………… 355
 - ストッパー…………… 97, 99
 - 成形…………… 118-119
 - フットプリント…………… 255
- 表面粗さ…………… 125, 243-244, 257, 260, 457-458, 468, 475
- PINフォトダイオード…………… 398, 427
- ピンポスト結晶…………… 177-179
- VME (Versa Module Europe)…………… 423
- VLSG (Varied Line Spacing Grating)…………… 230-231, 233
- フィリングパターン…………… 84, 86, 389-390, 392-393, 395
- フィルター…………… 27, 124, 126, 224, 398, 506, 508
- フェルマーの原理…………… 285
- 不確定性…………… 25, 33-36
 - 原理…………… 34, 273, 489
- 複屈折…………… 315, 325-328, 334-335
- 複素振幅…………… 33, 80, 91, 291, 363, 366, 368-369, 525-526
- フーコーテスト…………… 290-292, 295-296
- 不等刻線間隔回折格子…………… 230-231, 233
- 浮遊帯域融解法…………… 166
- フラウンホーファー回折…………… 251, 288, 291, 350
 - 縞…………… 349
- ブラッグ
 - 回折…………… 326, 334, 343, 352, 358
 - 角…………… 166, 168, 170-171, 173, 186-187, 194-197, 199, 203, 205, 314, 325, 327-329, 331-332, 334, 402, 412
 - ケース…………… 191-192, 195, 197
 - 条件…………… 164-166, 168-171, 173, 186-188, 195, 199, 217, 320, 335, 485
 - 反射…………… 147, 164, 168-169, 186, 188, 326, 331-332, 334-335, 403, 484-485, 493
- フラックス…………… 11, 26, 58, 60, 62-64, 78, 82-83, 97, 119-120, 152, 213-214, 221, 223-224, 227-229, 233, 359, 401, 424, 449, 503, 507
 - 密度…………… 26, 54-55, 57-58, 62-63, 81, 87-88, 116-117, 503-504, 507-508
- ブランチビームシャッター…………… 99, 121
- フーリエ級数…………… 182, 190
- フーリエ限界…………… 36, 38, 80, 491
- フーリエ変換…………… 32, 34-36, 38, 49, 50, 53, 155, 212, 288, 291, 365-370, 372, 376
- ブリュースター角…………… 227, 314-315, 320

フールブルーフ…………… 103, 108
 ブレズド回折格子…………… 225
 フレネル
 — 回折縞…………… 349
 — キルヒホッフの回折積分…………… 148, 459
 — ゾーンプレート…………… 271, 275, 351
 — の式…………… 506
 プローブ光…………… 391-392
 フロントエンド…………… 11-12, 98, 104, 116, 163,
 173, 501, 505-506
 分光
 — 器…………… 4, 8, 12-13, 45, 62, 77-78,
 97, 101, 126, 139, 143, 149-150,
 152-154, 162, 163, 172-173, 188, 191,
 200-201, 203-204, 212-214, 217-221,
 223, 225, 227, 233-234, 245-247, 254,
 289, 296, 304, 319, 402, 414-416,
 418, 438, 493, 501, 526
 — 結晶…………… 176, 246, 250, 437, 456, 465
 507, 520, 522, 525
 — 素子…………… 12, 35, 150, 151, 155
 分散…………… 128-129, 143, 191-192, 214-217,
 220, 225, 229-230, 233, 346, 403, 416-417,
 432-433, 444, 465, 494, 510, 514
 平滑度…………… 145
 平均輝度…………… 86
 平均自乗表面粗さ…………… 243
 平行
 — 化…………… 13, 214, 245, 250
 — 化ミラー…………… 230, 246, 248, 250, 254, 262
 — 光線…………… 142-144, 232
 — 度…………… 85, 170, 198, 200, 327
 平面回折格子…………… 153, 215, 230
 平面波…………… 32-33, 36, 79, 144-145, 148-150,
 172, 214, 310, 353, 367, 369, 375
 ベーキング…………… 122
 ヘビイメタル…………… 120
 ヘリシティ…………… 39, 43, 307, 322, 330
 ベリリウム窓…………… 27, 118, 124-126, 296,
 350-351, 358, 456, 505-508
 偏角…………… 229, 230-231
 偏光
 — 解消効果…………… 319

 — 光学素子…………… 41, 304, 314, 318-320, 325-336
 — XAFS…………… 313, 330-331, 335, 337
 — 子…………… 14, 314, 317, 319-320, 325-326, 336
 — 状態…………… 14, 41, 43, 45, 304-305, 307,
 309, 314-316, 318-322, 324,
 326-328, 330, 333, 335-336
 — スイッチング…………… 322, 330, 336
 — 制御…………… 14, 41, 318, 320, 325, 336
 — 楕円…………… 309, 311-312, 318, 324
 — 度…………… 14, 45, 227, 304, 311, 319,
 323-324, 326, 328, 332-334
 — 能…………… 315, 320-321, 325-326
 — ベクトル…………… 222
 偏向磁石…………… 23, 27, 63
 — 放射光…………… 23, 37, 40, 63, 65-66, 82, 89
 偏向電磁石…………… 3, 11, 97, 99, 119, 173, 200,
 225, 250, 253-254, 256, 258-259,
 280, 316, 324, 332, 503-505, 508,
 513, 525
 放射線
 — 遮蔽ハッチ…………… 2-4, 11, 100, 153
 — 対策…………… 119
 放射パワー密度…………… 117
 放物面…………… 245, 246, 249, 285-287
 — ミラー…………… 214-215, 230, 234
 保存量…………… 513
 ボックスカー積分器…………… 397
 ボールネジ…………… 414
 ポンプ・プローブ法…………… 392, 399, 403, 405, 435
 ポンプ光…………… 395
ま
 マイクロチャンネルプレート…………… 392
 MyDAQ…………… 422
 マスク…………… 116-117, 124, 129, 505
 MADOCA (Message And Database Oriented
 Control Architecture)…………… 418, 422, 443
 マルチチャンネルスケーラー…………… 392
 マレシャルの基準…………… 461
 右回り円偏光…………… 43, 309, 313, 316-317
 水の窓…………… 356
 ミューオン…………… 96

ミラー	
—調整機構	258, 259
無偏光	312, 315
迷光	154, 223, 225
メインビームシャッター	97-98, 116
メカニカルチョッパー	395-396
モザイク結晶	325
モード同期レーザー	394
モノクロメーター	99, 100-101

や

ヤングの二重スリット	344
ヤング率	130
有限要素法	130, 132-133
4次元位相空間	25, 58, 90

ら

ライナック	19-20, 67, 82, 86
ラウエ	
—ケース	191, 326
—配置	326
ラダー言語	103, 107
ラマン散乱	479, 481, 487
ラミナー回折格子	224-225
リウビルの定理	511
利得	257
リニアエンコーダー	415
リボルバー型挿入光源	116-117
励起光	391, 496
レーリーの限界	273
レンズ収差	274
6次元位相空間	24-25, 512
ロータリーエンコーダー	415
ロックインアンプ	44, 322, 331, 336
ローランド	
—型分光器	219, 230
—条件	219, 230, 232
long trace profiler	469

わ

Wadsworth型分光器	232
湾曲円錐台ミラー	250

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。

本書の最新情報はこちらをご覧ください。

http://www.jssrr.jp/picture/BLBOOK_UPDATE.pdf

改訂版・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 初版 第1刷発行

2009年4月24日 初版 第2刷発行

2013年3月18日 増補版第1刷発行

2019年8月26日 改訂版第1刷発行

編者 大橋 治彦・平野 馨一

発行者 日本放射光学会

発売元 ブックウェイ

〒670-0933 姫路市平野町62

TEL.079 (222) 5372 FAX.079 (244) 1482

<https://bookway.jp>

©日本放射光学会, 2019 <無断複写, 転載を禁ずる>

組版製本 小野高速印刷株式会社

ISBN978-4-86584-373-6

Printed in Japan

本書は、各種電子書店あるいは印刷版は全国書店にてお取寄せ可能です。

乱丁本・落丁本は送料小社負担でお取り換えいたします。

本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも一切認められておりません。