

編者一覧

岸 本 俊 二	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 (1 章, 7 章, 8 章)
田 中 義 人	理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター (9 章, 付録)

執筆者一覧 (執筆順)

櫻 井 吉 晴	高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門 (まえがき)
成 山 展 照	高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門 (2 章, 4 章)
加 藤 昌 弘	産業技術総合研究所 計測標準研究部門 (3 章)
齋 藤 則 生	産業技術総合研究所 計測標準研究部門 (3 章)
伊 藤 真 義	高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門 (5 章)
谷 田 肇	京都大学 産官学連携本部 (5 章)
浮 辺 雅 宏	産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 (6 章)
大久保雅隆	産業技術総合研究所 計測フロンティア研究部門 (6 章)
北 島 義 典	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 (6 章)
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 (10 章)
足 立 純 一	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 (11 章)
彦 坂 泰 正	新潟大学 自然科学系理学部 自然環境科学科 (11 章)
上杉健太郎	高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門 (12 章)
竹 内 晃 久	高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門 (12 章)
星 野 真 人	高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門 (12 章)
山 本 雅 貴	理化学研究所 播磨研究所 放射光科学総合研究センター (13 章)
豊 川 秀 訓	高輝度光科学研究センター 制御・情報部門 (14 章)
兵 藤 一 行	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 (14 章)
工 藤 統 吾	高輝度光科学研究センター 制御・情報部門 (15 章)
田 中 真 伸	高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 (16 章)

まえがき

本書は放射光実験で用いられる検出器の入門書である。実験の現場で用途別に利用されている多くの種類の検出器について、使用者の立場に立ち、動作原理と使用方法についてやさしく説明した実用書である。これから放射光実験を始める研究者・技術者にとっては検出器一般を理解する入門書として、すでに放射光を利用されているユーザーにとっては検出器に関する知識を再確認する再入門書として、放射光実験の専門家にとっては技能向上のための参考書として役立つものと期待している。

放射光は加速度運動する電子群から放出される電磁波である。この電磁波は平行性に優れ、偏光特性を有し、赤外から硬 X 線まで幅広いエネルギー領域をカバーするパルスビームである。日本国内では現在、約 10 の放射光施設が稼働しており、物質科学や生命科学などの基礎研究のみならず、製品開発と直結した応用研究に幅広く利用されている。

この 10 年間で、放射光ユーザーの利用環境は格段に向上した。最先端の放射光実験は依然として専門の知識と技術を必要としているが、測定ツールとして完成した実験手法に関しては自動化が進み、放射光の初心者でも試料をセットするだけでデータを取得することができ、また場合によっては、解析結果がその場で得られるレベルにまで進んでいる。こうした自動化が放射光利用の普及・拡大に貢献している一方で、ユーザーにとっては測定装置のブラック・ボックス化が進み、思わぬ実験ミスや測定効率の低下などの問題も指摘されている。また、研究の分業化が進み、実験者が測定装置の調整をしなくても実験データが得られる状況になっている場合もある。近年、国内における科学技術への期待が高まっていることもあり、実験結果における実験者の責任がより強く求められているが、その一方で、より効率的な測定も求められている。このような背景のもと、実験者全員が測定装置の主要部である検出器について正しい使い方を再確認することは重要であろう。本書ではそのための知識を余すところなく掲載している。

放射光実験に用いられる装置の性能は光源と検出器の両方の性能に大きく依存している。過去 20 年間に、第 3 世代放射光施設の稼働により光源の性能は格段に向上したものの、検出器の性能は光源に追従して向上してきたとは言い難い。さらに、X 線自由電子レーザーの利用が本格的に開始し、エネルギー回収型ライナックなどの放射光光源の計画が進んでいる。今後、測定装置の性能向上に向けた検出器開発がますます重要になってくるであろう。それには、個々のユーザーが検出器の重要性を認識し、次世代検出器開発を理解することが必要不可欠であると思われる。また今後、物質科学や生命科学な

どの研究分野での競争激化はきわめて明らかである。各研究分野における差別化戦略を進めるうえで、既存の検出器の利用から次世代検出器の開発への意識転換が必要であろう。本書が検出器開発の啓蒙書になることを期待したい。

本書は、2008年3月から2010年3月にかけて、日本放射光学会誌「放射光」に計13回掲載された特別企画「検出器シリーズ」をベースに、単行本としての出版を考慮して内容を加筆・修正したものである。特別企画に引き続いて、本書の編集にご尽力いただいた岸本俊二博士、田中義人博士に感謝の意を表したい。また、各章を担当していただいた最先端の現場で活躍されている研究者の方々には、貴重な時間を割いてご執筆いただいたことに感謝申し上げる。さらに、放射光学会現編集幹事の足立伸一博士には、当単行本化事業を厚くご支援いただいた。また、尾嶋正治日本放射光学会長、雨宮慶幸前学会長には、本事業を進めるにあたり温かく見守っていただいた。最後に、本書の刊行にあたり、多大なご努力をいただいた講談社サイエンティフィクの五味研二氏にお礼を申し上げる。

2011年9月

高輝度光科学研究センター

櫻井吉晴

目 次

第Ⅰ部 概論	1
1 放射光利用実験に用いられる検出器の基礎	3
1.1 放射光と放射光利用実験	3
1.1.1 放射光とは	3
1.1.2 放射光利用実験の具体例	4
1.2 検出器の基礎	5
1.2.1 検出のしくみ	5
1.2.2 電荷の収集と増幅	7
1.2.3 検出器システム	9
1.2.4 測定の種類と検出器の性能	10
1.3 放射光利用実験における検出器の選び方	12
第Ⅱ部 光の強度を測る	15
2 電離箱	17
2.1 電離箱の原理と特徴	17
2.2 検出器の構成および実際の測定方法	20
2.2.1 寸法	20
2.2.2 電流測定	21
2.2.3 ガス	22
2.2.4 再結合	23
2.2.5 光子数への換算	24
2.3 応用例	25
2.4 まとめと展望	26

3 シリコンフォトダイオード	28
3.1 シリコンフォトダイオードの原理と特徴	28
3.1.1 概要	28
3.1.2 特徴	29
3.1.3 動作原理	30
3.2 実際の測定方法と測定の際の注意点	32
3.2.1 電流の測定方法	32
3.2.2 感度に影響を与える要素	33
3.2.3 エネルギー依存性に関する注意点	35
3.2.4 放射光利用実験で用いる際の注意点	36
3.3 感度を決定する方法	37
3.3.1 極低温放射計を用いた感度測定	37
3.3.2 多段電極型電離箱を用いた方法	39
3.4 まとめと展望	41
4 フィルム線量計	43
4.1 フィルム線量計の原理と特徴	43
4.2 装置の構成および実際の測定方法	45
4.2.1 ガフクロミックフィルム	45
4.2.2 読み取り	47
4.2.3 校正	48
4.3 利用例	48
4.4 まとめと展望	50

第 III 部 エネルギーを測る 53

5 半導体検出器	55
5.1 半導体検出器の動作原理と特徴	55
5.1.1 動作原理	55
5.1.2 エネルギー分解能	56
5.1.3 検出効率	57

5.1.4	応答関数	57
5.2	検出器の構成および実際の測定方法	60
5.2.1	高純度ゲルマニウム検出器	60
5.2.2	シリコンドリフト検出器	61
5.2.3	検出器の選択	62
5.2.4	取り扱い	63
5.3	測定例および検出器の補正例	64
5.3.1	エネルギースペクトル測定（蛍光 X 線測定, 磁気コンプトン測定）	64
5.3.2	エネルギー弁別計数（蛍光 XAFS 測定）	66
5.4	まとめと展望	69
6	極低温超伝導検出器	71
6.1	極低温超伝導検出器とは	71
6.1.1	超伝導検出器の種類	72
6.1.2	超伝導トンネル接合検出器の原理	73
6.1.3	超伝導トンネル接合検出器の特徴	75
6.2	超伝導検出器を搭載した蛍光収量 XAFS 測定装置	77
6.2.1	測定装置の構成	78
6.2.2	放射光軟 X 線分光で要求される性能	79
6.2.3	超伝導トンネル接合アレイ検出器の検出性能	81
6.3	超伝導検出器による蛍光収量 XAFS 測定例	82
6.4	まとめと展望	83
第 IV 部	光の数を測る	85
7	アバランシェフォトダイオード	87
7.1	アバランシェフォトダイオードの原理と特徴	87
7.2	検出器の構成および測定方法	89
7.2.1	検出器の構成	89
7.2.2	パルス観察と計数率測定	90
7.3	応用例	93
7.3.1	X 線高計数率測定システム	93

7.3.2 時間分光測定への応用例	94
7.4 まとめと展望	95
8 シンチレーション検出器	97
8.1 シンチレーション検出器の原理と特徴	97
8.1.1 概要と原理	97
8.1.2 シンチレーターの特性と検出器の性能	99
8.2 検出器の使用法	100
8.2.1 シンチレーターの選択	100
8.2.2 高電圧印加と X 線ビーム入射による損傷	101
8.3 応用例：YAP (Ce) シンチレーション検出器による計数率測定	101
8.4 まとめと展望	102
 第 V 部 タイミングを測る	 105
9 X 線ストリークカメラ	107
9.1 X 線ストリークカメラの原理と特徴	107
9.1.1 概要と原理	107
9.1.2 分光感度特性	109
9.1.3 時間分解能	110
9.2 検出器の構成および使用法	111
9.2.1 使用法	111
9.2.2 電圧掃引方法の種類	112
9.3 応用例	113
9.4 まとめと展望	115
 10 高速フォトディテクタ	 116
10.1 高速フォトディテクタの概要と原理	116
10.2 使用法	117
10.3 応用例：ピコ秒時間分解 XAFS 測定への応用	118
10.4 まとめと展望	121

11 マイクロチャンネルプレート	122
11.1 マイクロチャンネルプレートの原理と特徴	122
11.2 検出器の構成および実際の測定方法	124
11.2.1 動作方法	124
11.2.2 選定, 入手方法, 取り扱い	127
11.2.3 パルス計測	129
11.2.4 位置検出	130
11.2.5 放射光施設でのタイミング計測	132
11.3 応用例: 同時計測法による“分子座標系光電子角度分布”の測定例	133
11.3.1 角度分解 2 次元敏感光電子-光イオン同時計測	134
11.3.2 多重同時計測運動量画像測定法	135
11.4 まとめと展望	137

第 VI 部 イメージを写す 139

12 CCD 検出器	141
12.1 CCD 検出器の原理と特徴	141
12.1.1 動作原理	142
12.1.2 CCD 撮像素子の種類と特徴	144
12.2 可視光変換型 X 線画像検出器 (間接 X 線カメラ)	147
12.2.1 蛍光面	148
12.2.2 可視光光学系	150
12.3 直接撮像型 X 線画像検出器 (直接 X 線カメラ)	155
12.4 応用例	156
12.4.1 レンズカップル式間接 X 線カメラの使用例	156
12.4.2 直接 X 線カメラの使用例—積分型測定	156
12.4.3 直接 X 線カメラの使用例—エネルギー分解測定	158
12.5 まとめと展望	160

13 イメージングプレート

13.1 イメージングプレートの原理と特徴	163
-----------------------------	-----

13.1.1	概要	163
13.1.2	X線像記録の原理	165
13.1.3	特徴	166
13.2	読み取り装置の構成と測定特性	166
13.2.1	読み出し機構	166
13.2.2	測定特性	168
13.3	応用例	172
13.3.1	タンパク質結晶構造解析	172
13.3.2	粉末回折	176
13.3.3	単結晶解析	177
13.4	まとめと展望	178
14	ピクセルアレイ検出器とフラットパネル検出器	180
14.1	ピクセルアレイ検出器	180
14.1.1	原理と特徴	180
14.1.2	検出器の構成および実際の測定方法	183
14.1.3	応用例	186
14.2	フラットパネル検出器	188
14.2.1	概要	188
14.2.2	種類と特性	188
14.2.3	応用例：放射光による臨床応用例	190
14.3	今後期待される新しい2次元検出器	192
14.3.1	マイクロパターンガス検出器	192
14.3.2	SOIピクセル検出器	193
14.4	まとめと展望	195
第VII部	信号を処理する	197
15	アナログ回路系	199
15.1	アナログ技術の概要と基礎	199
15.2	電流型検出器のためのアナログ回路系	201
15.2.1	電流電圧変換回路	201

15.2.2	電流型検出器における VF 変換器－カウンタ系	201
15.3	パルス型検出器のためのアナログ回路系	202
15.3.1	エネルギー測定を重点に置いた信号処理系	203
15.3.2	タイミング測定に重点を置いた信号処理系	207
15.4	アナログ信号処理のために有用な知識	209
15.4.1	NIM モジュール	209
15.4.2	同軸ケーブルおよびコネクタ	211
15.4.3	装置のインピーダンス	214
15.4.4	ノイズとグラウンド処理	215
15.5	今後に期待される展開	217
16	デジタル回路系	220
16.1	デジタル技術の概要と基礎	220
16.2	アナログ信号のデジタル化技術	222
16.2.1	波形情報のデジタル化	223
16.2.2	パルスの到達時間の測定	225
16.3	デジタル化された信号処理とその高速化	225
16.3.1	FPGA を用いたデジタルシグナルプロセッシング	226
16.3.2	データ圧縮	227
16.3.3	デジタル処理用ツール	228
16.4	処理されたデータの収集・転送について	229
16.4.1	規格の変遷	229
16.4.2	高速化・分散化（多チャンネル化）	232
16.4.3	ネットワークでのデータ収集	234
16.5	まとめと今後の展望	236
付録 A	検出器の特性を表すパラメータ	241
A.1	感度，検出効率など	241
A.2	ダイナミックレンジ，計数率など	242
A.3	空間分解能	242
A.4	エネルギー分解能	242
A.5	時間分解能	243

付録 B 放射光利用実験に関連する単位系と接頭語	244
B.1 SI 単位系	244
B.2 SI 接頭語	245
付録 C 基礎物理定数	246

第 I 部

概論

放射光を利用する実験（以下、放射光利用実験）では、放射光ビームとして得られる赤外線、可視光、紫外線や X 線を検出する「光検出器」と、放射光が照射されることによって試料から放出される電子やイオンをとらえる「粒子線検出器」が使われる。X 線、粒子線の検出器には一般に「放射線検出器」としてよく知られるものも使われるが、放射光利用実験用の検出器には特別な性能が求められる。

たとえば、放射光の「強い光」を測る場合は、光子の数にして 1 秒間に 1 兆個を超える強度の光を調べることがある。逆に、100 秒間のうちに 1 個の光子がくるような非常に「弱い光」や電子線を相手にすることもある。また精密な測定が必要な場合、たとえば光や電子・イオンのエネルギーを 1 兆分の 1 の精度で知りたい、試料から光がやってくるタイミングを 10 億分の 1 秒（1 ns）以下で知りたい場合などもある。

放射光利用実験では、これまで知られていなかったような物質の性質の探索などを目的とする研究が数多く行われる。そのため、強いビームを使って高い空間分解能や高い解像度で鮮明な画像を記録したい、より高速かつ優れた時間分解能で状態変化の様子をとらえたいなど、誰も測定できなかった新たな情報を得たいという要求が次々と生まれる。たとえば、数十 cm×数十 cm の大きさの X 線回折像を μm の精度で、9 桁以上の強度ダイナミックレンジで記録し、しかも 1 秒間に 1,000 枚以上の画像を記録したいような場合もあるかもしれない。こうした要求を満たす検出器の開発は物性研究における新たな成果に結びつくはずである。また、たとえ検出器は既存のものであっても、他の装置との組み合わせによって新たな観測手法が開発されるかもしれない。このような場合、実験者が検出器の使い方をよく理解しているかどうかが重要となる。検出器について、何ができて、何ができないのかを知ることで、どのような検出器が自分の研究に必要なかが見えてくるはずである。また今まで使っていた検出器を見直すことで、自分の実験にふさわしい使い方ができる、あるいは自分の実験にふさわしい他の検出器が見つかるか

もしれない。

第 I 部では、放射光利用実験で用いられる検出器についての基礎的事項の理解から始めたい。そのうえで検出器の全体像がつかめるように解説する。

1

放射光利用実験に用いられる検出器の基礎

ここではまず、放射光について簡単に紹介し、放射光利用実験に用いられる検出器の例およびその役割を説明する。続いて、それぞれの検出のしくみや性能について比較してまとめる。そして、最後に検出器を選定するための検討方法について示す。

1.1 放射光と放射光利用実験

1.1.1 放射光とは

放射光とは加速器によって人工的に作り出す光のことである。通常、電子の加速器が放射光を発生させる光源となる。光の速度近くまで加速された電子が磁場による力を受けて軌道を曲げられると、そのときに電磁波が発生する。これが放射光である。電子が、磁場のN極とS極が対になった偏向電磁石や多くの磁極列を並べた装置（アンジュレーター、ウィグラーと呼ばれる挿入光源）を通過するとき、相対論的效果により狭い角度内に指向性をもって放射光が発生する。リング型の加速器（シンクロトロン）では、電子はひとかたまり（バンチ）になって周回し、放射光は周回平面に沿って水平方向に偏向する。

偏向電磁石やウィグラーから発生する放射光の場合、広い波長分布を有する。アンジュレーターから発生する放射光は、特定の波長で強度のピークをもつ。こうした放射光の波長分布の形、強度は、加速器の電子エネルギー、電子ビームの大きさ、放射光を発生させる電磁石の磁場強度や磁石列周期、周期数などに依存する。取り出される放射光ビームの強度は、現存する放射光施設のビームラインではエネルギーが10 keV前後のX線を例にとると $10^{10} \sim 10^{14}$ photons/sである。加速器では時間の半値幅にして数十～数百psに分布した電子バンチが、300～500 MHz（時間間隔2～3 ns）の高周波電界によって加速されるため、放射光もそのような時間幅と間隔をもつパルス光となって発生する。挿入光源を工夫することで、右回り、左回りの円偏光特性をもたせて発生させることも

1 放射光利用実験に用いられる検出器の基礎

可能である。こうした放射光の特性についての詳細は、文献1を参照していただきたい。この一方で、放射光ビームが試料に入射して散乱したX線や、その瞬間に発生した蛍光X線や光電子なども、パルスとなって検出器に入射することにも注意していただきたい。

1.1.2 放射光利用実験の具体例

最初に放射光利用実験の典型例をあげて、そこで検出器がどのように使われるのかを説明する。

近年、放射光X線を用いたタンパク質の構造解析が世界中の放射光施設で盛んに行われている。図1.1にその実験のスキームを模式的に示した。このような実験では、まずタンパク質分子からなる $10 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度の大きさの結晶にX線ビームを当て、試料の角度を変えながらX線回折による回折斑点の画像を数百枚以上記録する。この際、光源から出射される放射光ビームが所定の位置にきているか、強度がどれくらいかについて確認するために、検出器が必要である。こうした目的で使われる検出器には位置敏感型電離箱などがあり、通常、ビームモニターと呼ばれる。試料の大きさが $100 \mu\text{m}$ 程度であれば、 $10 \mu\text{m}$ 以下の動きを検出したい。このときのX線ビーム強度は $10^{10} \sim 10^{14}$

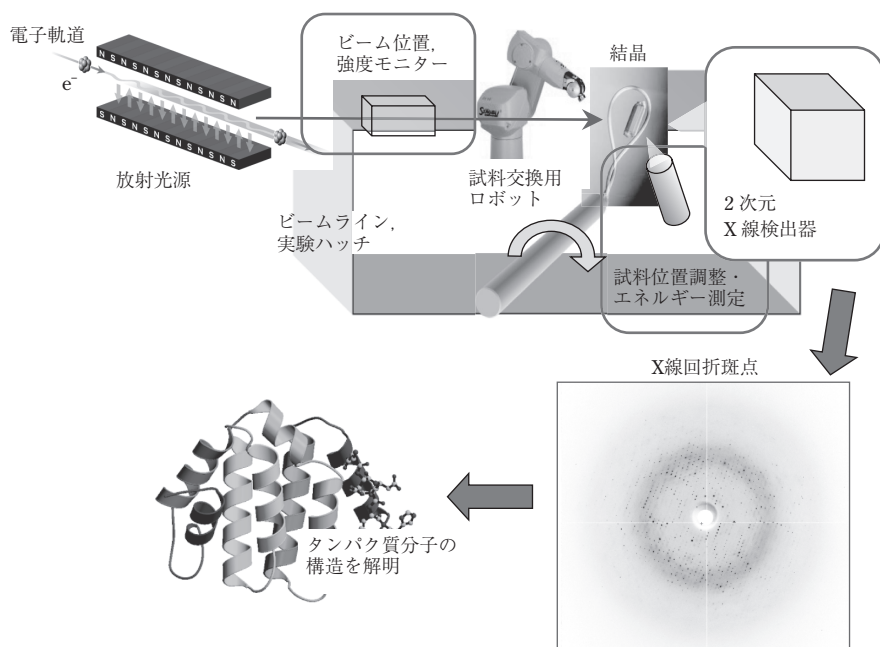


図1.1 放射光X線を用いたタンパク質の構造解析のスキーム。検出器の役割を模式的に示す。

photons/s に達する。試料にビームが当たっていることを確認するために、別の検出器を試料付近に設置する場合がある。ビームのエネルギー、たとえばセレンの K 吸収端付近 (12.6 keV) を、シリコン pin フォトダイオード検出器などにより測定する場合もある。

そして、試料を回転させながら X 線回折の画像を記録することにより試料のタンパク質分子の構造を解明するという重要な役割を CCD (charge coupled device, 電荷結合素子) 検出器やピクセルアレイ検出器などの 2 次元検出器が果たしている。CCD 検出器の場合、画像は数秒ごとに 1 枚得られ、画像の単位となる画素 (ピクセル) サイズは 100 ~ 200 μm 角程度、一辺の画素数は 2,000 ~ 4,000 程度である。一辺の画素数が 2,000 であれば、1 つの画素のデータの大きさを 2 byte として、データサイズは 1 枚の画像あたり約 8 MB となる。

上で紹介した検出器だけでも、さまざまな種類があることに気づくだろう。これらの検出器では、X 線を検出するための物質や反応が異なる。電離箱では、X 線を検出するために気体 (窒素など) との反応を使い、シリコン pin フォトダイオード検出器では固体であるシリコンを検出素子として使う。CCD 検出器の CCD やピクセルアレイ検出器に使われるフォトダイオードアレイもやはりシリコン製である。これらは物質との反応として、原子内殻軌道から真空への電子放出や価電子帯から伝導帯への電子励起を生じる「電離」を利用する。この他に原子や分子の励起とその後の光放出を利用する検出器もある。次節では、放射線を検出するために検出器が利用している反応や検出器の種類について見ていこう。

1.2 検出器の基礎

1.2.1 検出のしくみ

実験における検出器の役割は、計測した光や放射線に関する情報を信号として出力することである。このとき、検出器本体では光・放射線と物質の相互作用を利用した電荷や光の発生と、それを信号とした出力が行われる。そのため検出器は光や放射線を感じる部分 (検出媒体) とそこで生じた「変化」を信号に変える部分からできている。

では、検出器は光や放射線をどのように感じるのだろうか。放射光は電磁波であるので、ここではまず電磁波と物質の相互作用について、すなわち電磁波が物質を構成する原子、つまりプラス電荷をもつ原子核とその周りのマイナス電荷をもつ電子からなる系とどのように相互作用するのかについて考える。電磁波と物質の相互作用は、古典物理学では荷電振動子による電磁波の吸収や散乱として理解されてきたが、量子論によってエネルギー状態が量子化されると、電子軌道状態間のエネルギー励起、吸収という考え方で理解されるようになった。

第 II 部

光の強度を測る

まず、ビームラインへ行き、放射光を使用する場面を想像してみよう。蓄積リングには電流が流れている。白色ビームラインであれば、シャッターを開ければ X 線が出てくるが、単色ビームラインでは、まず使用する光子エネルギーを設定する必要がある。その値をたとえばキーボードで打ち込むと、あらかじめ調整してあるモノクロメータのブラッグ角へとステージが移動し、望みのエネルギーをもつ X 線を取り出せる。挿入光源が入っていれば、この前にギャップ値も設定する。しかし、これだけでは十分でない。二結晶モノクロメータの相対角度を微調整しながら強度を増やして最大値とするか、高調波を減らすため少しずつらした位置にする操作が必要である。これは強度モニターの値を見ながら実行する。こうしたステップを踏んだ後、いよいよ試料への照射となる。しかし、放射光の強さはアンジュレーターギャップや蓄積電流、そしてモノクロメータ結晶など、さまざまな機器の状態によって変動する。したがって、実験中もモニターの値を時々には気にする必要がある。

このように、ユーザーは実験中、モニターの値を見て強度が強いかわかりかを判断する。しかし、それは検出器の信号値であって、X 線の強度そのものではない。X 線の強度とはそもそも何だろうか。光子の個数でもあるし、線量、パワーでも表せそうだが、白色光にはいろいろなエネルギーの光子が混ざっているのでパワーで評価することも多いが、やはり放射光は単色エネルギー光として多く用いられる。ということは、光子の個数が強さを示す一番基本的な量といえるだろう。では、光子の個数はどのようにして測ればよいだろうか。光子の個数を 1 個、2 個と直接数えられれば、最もわかりやすい。しかし、放射光の強度は非常に強く、アンジュレーター光では毎秒 10^{14} 個に達する。現在の計測技術ではそのような X 線を個別のパルスとして弁別することはできない。そこで、代わりにある一定時間に吸収されたエネルギーを積分する。線量、パワーの測定である。そして、検出器応答の逆演算により光子数へと変換する。つまり、放射光強度を測定す

るには、吸収されたエネルギーを測り、それを光子数に換算するための技術を必要とする。

では、吸収されたエネルギーはどうやって測定するのだろうか。放射光は物質と相互作用する際、光電効果とコンプトン効果により物質の電子にエネルギーを与える。電子は次々に電離するが、その電離量は測定できる。上記の強度モニターの信号値は、電離電流値である。電子が電離によって1つのイオン対を生成するのに必要なエネルギー、いわゆる W 値がわかっているので、電離量からエネルギーを算出できる。しかし、放射光の強度は非常に強い。電離量を測り光子数へ換算するには、必要な検出器寸法、印加電圧などの条件を押さえておく必要がある。

光の強度を測る検出器として、第Ⅱ部では電離箱（イオンチェンバー）とフォトダイオードを取り上げる。それぞれ、空気中あるいはシリコン中の電離量を測定する検出器である。絶対測定ができることに加え、堅牢性、安定性、安価という点から放射光施設では定番の検出器である。放射光施設では通常、電離箱に窒素などのガスを流す。また、この二者とは異なるが、線量の分布を簡易に測れる道具として、広範に用いられるガフクロミックフィルムも一緒に取り上げる。ガフクロミックフィルムでは着色により線量がわかる。

2章では10 keV以上の硬X線を対象に電離箱について、3章では十数 eV ~ 10 keV の真空紫外線および軟X線を対象にフォトダイオードについて、4章ではビームプロファイルの記録にも使用されるフィルム線量計について紹介する。

表 光の強度を測る検出器とその特徴

検出器の種類	原理	特徴
電離箱	空気の電離	透過型、耐放射線性、高電圧が必要
フォトダイオード	シリコンの電離	小型、遮光が必要
ガフクロミックフィルム	高分子の着色	積算型、使いきり、校正照射が必要

2

電離箱

電離箱（イオンチェンバー）は、空気などの気体が放射線によって電離することで生成した電荷を、印加した電界により収集する検出器である。これにより放射光の絶対強度がわかる。

2.1 電離箱の原理と特徴

電離箱内では、放射光と気体との相互作用（コンプトン効果、光電効果）により発生した電子が、次々と気体を構成する分子、原子を電離する。その結果生じた電子、正イオンおよび付着電子による負イオンを、電界をかけて収集し、電荷量を測定するのが電離箱である。図 2.1 に気体として空気を使う自由空気電離箱を示す。電荷を測ることにより空気に吸収されたエネルギーがわかるのは、1つのイオン対を生成するのに必要なエネルギー、すなわち W 値が表 2.1 のようにわかっているからである。エネルギーにはよらない定数であり、空気の W 値は 33.97 eV である。電荷量を電子の電荷で割るとイオン対の数が算出され、それに W 値をかけるとエネルギー量がわかる。

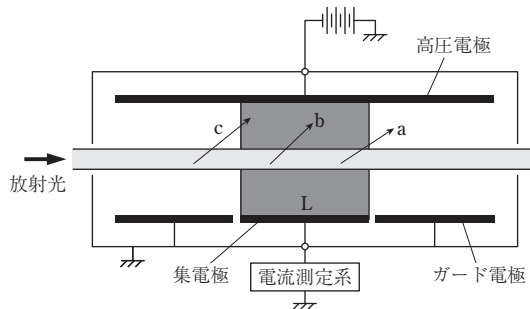


図 2.1 自由空気電離箱の断面。薄い網かけ部分がビーム領域、濃い網かけ部分がイオン収集領域。a, b, c の矢印は発生電子の飛跡を示す。a による電離は一部しか測定されないが、c により補填される。

2 電離箱

表 2.1 各種ガスの電子に対する W 値 (単位 eV)

アルゴン	クリプトン	キセノン	窒素	空気
26.4	24.4	22.1	34.8	33.97

そのため、発生電子の初期エネルギーを測るには、電子のもつエネルギーはすべて空气中で消費させる必要があり、もし、エネルギーをもったまま電子が電極に到達した場合、その分の運動エネルギーは電荷量に変換されない(電子損失)。ビーム軸と電極の間の距離は、発生電子の飛程以上、すなわち空気の場合、光子エネルギーに等しいエネルギーをもつ電子の飛程が目安となる。ビームを真ん中に通すため、その2倍が必要な電極間隔となる。

電極どうしがあまりにも離れてしまうと電界が弱くなるため、いったん生じた陽イオンが再び電子と結合してしまう現象(イオン再結合)が有意に増えてしまう。そうになると、収集すべきイオン、電子が収集されなくなるので、強度を過小評価してしまうことになる。電離イオンの再結合が有意に起きていると、印加電圧を上げるにつれて電離電流も増えるのでわかる。また、電流値は強度に比例しない。すなわち、線形性がなくなる。電流値が一定になる、すなわち、飽和電流値が得られる電圧領域で使うことが必要である(図 2.2)。電極間隔の決定には、電子損失と再結合のバランスをうまくとることが大事である。

ビーム軸方向には、ある長さの範囲で電荷を収集する。結局、収集体積は図 2.1 の濃い網かけ部分のような直方体になる。しかし、ここで疑問をもつ方もいるのではないかと思う。この領域内で発生しても外に出て行く電子(図 2.1 の a)による電離量は一部数え落としになるのではないか。そのとおりであり、その分は数え落としになる。しかし、外で発生した電子の中にこの収集体積内に入ってくるものもあり(図 2.1 の c)、その分は余分になる。自由空気電離箱では、この数え落とし分が余剰分に等しくなるように設

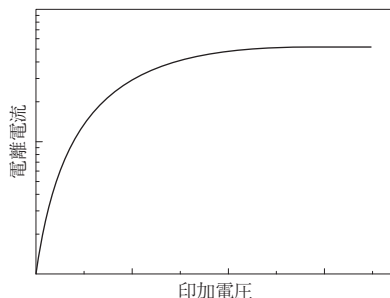


図 2.2 飽和曲線(電圧印加時の電離電流値の変化)。電流値が一定になったとき(イオン再結合が十分小さい)の電圧を測定に用いる。

計され、結果的に図 2.1 の濃い網かけで示した直方体の中で発生した電子による電離を測っていることと等価になっている。その状態を「二次電子平衡」状態という。この状態を達成するには、収集体積前後の空気層を十分な厚さ、すなわち発生する電子数が飽和に達する厚さにすることが必要である。表 2.2 に示す発生電子の最大エネルギーに対応する電子飛程が目安となる。ただし、放射光施設で用いられている電離箱のように集電極が 3.3 cm や 14 cm と飛程より長い場合は、収集体積の中で発生し、中でエネルギーをすべて失う電子（図 2.1 の b）の占める割合がほとんどになり、これほどの厚さをとらなくても大きな影響はない。

表 2.2 空気中における電子の飛程 (20°C, 1 気圧), 質量光子減弱係数および質量エネルギー吸収係数

電子	エネルギー (keV)	10	15	20	30	40	50	60	80	100
	飛程 (cm)	0.239	0.488	0.812	1.66	2.76	4.08	5.60	9.21	13.5
光子	質量減弱係数 (cm ² /g)	5.12	1.614	0.7779	0.3538	0.2485	0.208	0.1875	0.1662	0.1541
	質量エネルギー 吸収係数 (cm ² /g)	4.742	1.334	0.5389	0.1537	0.06833	0.04098	0.03041	0.02407	0.02325

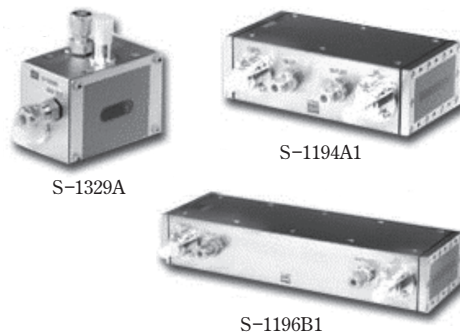


図 2.3 放射光用電離箱 (応用光研工業社製)。信号、高圧印加用コネクタとガス出入口が見える。窓にはカプトンフィルムが貼られている。

2.2 検出器の構成および実際の測定方法

2.2.1 寸法

電離箱は図 2.1 に示すように単純な構造をしており、重要なのは先にも述べたようにその寸法である。放射光の大きな特徴として、(1) 高強度で低エネルギー、(2) 指向性、(3) 偏光、(4) 高繰り返し短パルスといった点があげられるが、このすべてが電離箱の最適な寸法に影響する。(1) の特徴により狭い電極間隔が要求される。(2) によりコリメータや絞りは必要ない。(3) は電極間隔や向き、(4) は再結合特性に影響を与える。

水平面内に直線偏光していると（大半のビームラインがそうである）、発生する光電子は水平面内に放出されやすくなる（図 2.4）。電子は多重散乱により向きが大きく変わるため、初期方向はそれほど影響しないが、それでも気体の場合は影響があるので、上下に電極をセットすることにより再結合を減らすことができる（図 2.5）。逆に、コンプトン電子は垂直方向に放出されやすいが、エネルギーが低く飛程が短いため、問題にならない。

収集電極のビーム方向長さは感度に効いてくる。もちろん長いほど感度が上がるが、空気による減衰が大きくなる。減衰がある場合の電離量の値は、減衰がない場合の値に $[1 - \exp(-\mu x)]/(\mu x)$ を乗じることで算出できる。 μ は空気の線減弱係数（表 2.2 の質量減弱係数に物質の密度を乗じた値）、 x は空気透過距離を表す。電極の横幅は、電子飛程の 2 倍以上あればよい（ビームを真ん中に通すため）。飛程は通常、データとしてまとめられている CSDA（continuous slowing-down approximation, 連続減速近似）飛程を用いる。これは、電子は常にエネルギーを連続的に、平均して失うという仮定をした場合の飛程である。この飛程は、粒子が走った距離、車でいえばトリップメータでカウントさ

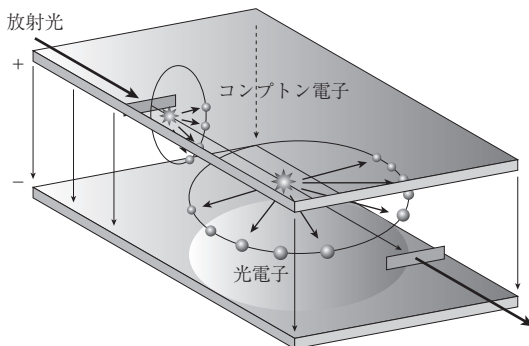


図 2.4 直線偏光入射時（電界面は水平面内に偏っている）の電子放出の様子。光電子は水平前側方向に、コンプトン電子は垂直前方方向に放出されやすい。コンプトン電子のエネルギーはずっと低い。