

博士学位論文

マイクロチャネルプレートの走査電子顕微鏡への応用
と事業化に向けた検討

Application and Commercialization of Microchannel Plates for
Scanning Electron Microscopy

2026年3月

光産業創成大学院大学

光産業創成研究科

柳原 悠人



要旨

マイクロチャネルプレート(MCP)の走査電子顕微鏡への応用と事業化に向けた検討

マイクロチャネルプレート(MCP)は、暗視装置、質量分析装置、X線光電子分光装置(XPS)などで広く用いられてきた代表的な電子増倍素子であり、多様な計測装置において光や電子などの微弱な信号を扱うための基盤要素である。一方、走査電子顕微鏡(SEM)での採用例は限られている。1-3 kVの低加速SEMでは、50 eV-1 keV程度の低エネルギー反射電子が形状と材質の双方に敏感な情報を含む。しかし、Si フォトダイオード(Si-PD)はこの帯域にほとんど感度がなく、低エネルギー反射電子を十分に取り出せない。本研究の目的は、著者の所属企業におけるMCP事業の売上を伸ばし、事業を拡大するための基盤を作ることである。そのために、MCPを用いたSEM検出系を構成し、低エネルギー反射電子および電子放出方向の情報を扱えるかを示すとともに、その事業化条件を明らかにする。

第1章では、MCPの構造と増倍原理を概説し、主な応用分野における位置づけと市場の概況を整理した。SEM分野が装置市場規模に比してMCPの採用例が限られる未開拓領域であることを示したうえで、本研究の目的、研究課題、および章構成を述べた。

第2章では、所属企業のMCP事業の状況と応用分野を整理した。暗視装置やXPSではMCPがすでに標準検出素子として定着している一方、SEM分野は装置市場としての規模に比べてMCPの採用例が少なく、新規用途としての余地が大きいことを示した。この検討と質量分析装置向け検出器の試作・評価結果を踏まえ、低加速SEM用検出モジュールを本研究の主対象とした。

第3章では、SEM装置の構造と像形成の仕組みを概説した。1-3 kVの低加速電圧では二次電子と低エネルギー反射電子が混在し、切り分けが課題となることを整理した。さらに、既存検出器の制約を踏まえ、低エネルギー反射電子を取得し、角度とエネルギーの寄与を分けて評価するための検出要件を示した。

第4章では、電界放出型走査電子顕微鏡(FE-SEM)に実装可能な倒立型MCP検出器を設計・試作した。MCP前段のバイアスグリッド電位を段階的に変化させて像を取得できる構成とした。3段グリッドを含む全体厚さは約5 mmとした。低加速条件において、MCPが低エネルギー反射電子成分を検出できるかを確認するため、1 kVの加速電圧条件で、ステンレス(SUS)球を用いてMCP像とSi-PD像を同一幾何で比較した。その結果、Si-PDでは感度がない条件でもMCPは十分な信号を検出できることがわかった。また、グリッド電位を変化させることで、二次電子像、低エネルギー反射電子像、高エネルギー反射電子像を、同一視野・同一ビーム条件のまま取得できることを確認した。加速電圧2 kVの条件でAl/Siウォーターマーク試料を観察した。低エネルギー反射電子像で薄膜下のウォーターマーク模様が観察される一方、同一条件の二次電子像および高エネルギー反射電子像では同じ模様を判別しにくいことを確認した。

第5章では、試料からの電子放出方向の違いが像に与える影響を確認するため、複数のMCPを正十二面体状フレームに配置した角度分解検出系を設計・試作した。試料直上1面・斜め上2面・斜め下1面の計4面に検出器を配置し、異なる方向からの信号を取得できるようにした。15 kVの加速電圧条件で、放出方向が異なると、凸凹コントラスト、組成コントラスト、三次元形状コントラストが変化することを像として示した。実験の都合上、複数チャンネルの信号を完全に同時に読み出したわけではないなどの制約は残るが、MCPを多面配置することで「どの方向から来た電子が像に影響しているか」を検討するためのデータが得られた。

第6章では、装置メーカーとの面談や営業担当者を通じたヒアリング、市場調査データをもとに、SEM 向け MCP 検出モジュールを事業化するための技術要件とビジネス条件を整理した。寿命（ライフ）、メンテナンスサイクル、電源・アンプを含めた一体モジュールとしての扱いやすさが主要な課題であり、高電圧電源とアンプを含む共通コアモジュールを各社 SEM に取り付け治具で適合させる構成を提案した。また、対象機種の出荷台数とオプション付加率を仮定した売上シナリオを示し、MCP モジュールが事業ポートフォリオの中で意味を持つために必要な導入規模の指標を示した。

第7章では、本研究で得られた知見を総括し、SEM 用途における MCP の位置づけと MCP 事業全体への波及効果、今後の課題と展望について述べた。

以上より、本研究は、MCP を用いた SEM 検出系が、低エネルギー反射電子と放出方向の情報を実機レベルで扱えることを示し、事業化に向けてクリアすべき条件と進むべき評価ステップを具体化した。

Summary

Application and Commercialization of Microchannel Plates for Scanning Electron Microscopy

Microchannel plates (MCPs) are representative electron multiplication devices that have been widely used in night-vision systems, mass spectrometers, and X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) instruments, and they constitute a fundamental component for handling weak signals such as light and electrons in a variety of measurement systems. In contrast, the adoption of MCPs in scanning electron microscopy (SEM) has been limited. In low-voltage SEM at 1-3 kV, low-energy backscattered electrons in the range of approximately 50 eV to 1 keV contain information that is sensitive to both surface topography and material composition. However, silicon photodiodes (Si-PDs) have almost no sensitivity in this energy range and therefore cannot sufficiently extract low-energy backscattered electrons. The purpose of this study is to increase sales and expand the MCP business of the company to which the author belongs, and to establish a foundation for such expansion. To this end, an SEM detection system based on MCPs was developed to demonstrate whether low-energy backscattered electrons and electron emission-direction information can be handled, and to clarify the requirements for commercialization.

In Chapter 1, the structure and electron-multiplication principle of the MCP are outlined, and its positioning in major application fields as well as an overview of the market are summarized. It is also shown that, despite the large scale of the SEM instrument market, the adoption of MCPs in SEM remains limited and thus represents an underexplored application area. Based on this background, the objective of this study, the research questions, and the overall structure of the dissertation are described.

In Chapter 2, the MCP business and its application fields at the author's company were reviewed. The review indicates that MCPs are already established as standard detectors in night-vision devices and XPS, whereas their adoption in SEM remains limited despite the large SEM instrument market, leaving significant opportunity for MCPs as a new application. Based on this analysis, as well as the prototyping and evaluation of detectors for mass spectrometry, low-voltage SEM detection modules were selected as the primary focus of this work.

In Chapter 3, the basic configuration of the SEM system and the mechanism of image formation are overviewed. Under low-voltage conditions at 1-3 kV, secondary electrons and low-energy backscattered electrons are mixed, and separating their contributions is identified as a key challenge. Furthermore, considering the limitations of conventional detectors, the detection requirements are defined to acquire low-energy backscattered electrons and to evaluate the respective contributions of angle and energy separately.

In Chapter 4, an inverted-type MCP detector assembly that can be implemented in a field-emission scanning electron microscope (FE-SEM) was designed and fabricated.

A bias grid was placed in front of the MCP, and the system was configured so that images could be acquired by stepping only the grid potential. The total thickness, including a three-stage grid, was approximately 5 mm.

To verify whether the MCP can detect the low-energy backscattered-electron component under low-voltage conditions, at an accelerating voltage of 1 kV, MCP images were compared with Si-PD images under identical geometry using a stainless-steel (SUS) sphere. The results showed that the MCP provided sufficient signal at 1 kV, where the Si-PD exhibited essentially no sensitivity. By changing the grid potential, three types of images—secondary-electron images, low-energy backscattered-electron images, and high-energy backscattered-electron images—could be acquired within the same field of view and with the same beam conditions, demonstrating that low-energy backscattered electrons can be treated as an independent source of image information in a practical SEM environment. In addition, an Al/Si watermark specimen was observed at an accelerating voltage of 2 kV. The watermark pattern beneath the thin film was clearly visible in the low-energy backscattered-electron image, whereas it was difficult to identify in the secondary-electron image and in the high-energy backscattered-electron image acquired under the same conditions.

In Chapter 5, to examine how differences in electron emission direction affect SEM images, an angle-resolved detection system was designed and prototyped by mounting multiple MCPs on a dodecahedral frame. A rippled Cu surface, a Cu-Al eutectic microstructure, and a stainless-steel sphere were used as specimens. Detectors were arranged on four faces (one face directly above the specimen, two faces obliquely above, and one face obliquely below) to acquire signals from different directions. At an accelerating voltage of 15 kV, the images showed that topographic, compositional, and three-dimensional shape contrast vary with emission direction. Although some limitations remain—e.g., due to cabling constraints, multiple channels were not read out fully simultaneously—the multi-face MCP configuration provided data that enable discussion of which emission directions contribute to the observed image-contrast components.

In Chapter 6, interviews with instrument manufacturers, information gathered through sales representatives, and market-research data were used to organize the technical requirements and business conditions for commercializing MCP detection modules for SEM. The main challenges were lifetime (service life), maintenance cycle, and the ease of handling multichannel readout. To address these issues, a configuration was proposed in which a common core module incorporating the high-voltage power supply and amplifier(s) is adapted to each manufacturer's SEM using model-specific mounting fixtures. In addition, revenue scenarios were presented by assuming shipment volumes of target SEM models and option-attachment rates, and a benchmark was provided for the adoption scale required for MCP modules to become a meaningful business line within the overall MCP portfolio.

In Chapter 7, the findings obtained in this study were summarized, and the position of MCPs in SEM applications, their impact on the overall MCP business, and future challenges and prospects were discussed.

In summary, this study demonstrated, at the level of practical SEM implementation, that an MCP-based detection system can acquire low-energy backscattered-electron information and electron emission-direction information. In addition, the study clarified the conditions to be satisfied and the evaluation steps required for commercialization of MCP-based SEM modules.

目次

第1章 序論	1
1.1 マイクロチャネルプレートとは.....	1
1.2 MCP の主要応用分野とその市場.....	2
1.3 MCP 事業の用途別構成.....	6
1.4 本研究が対象とする低加速 SEM 用途と検出課題.....	8
1.4.1 MCP を用いた SEM 検出に関する先行研究の整理.....	9
1.4.2 市販 SEM における MCP 採用例 (Agilent/Keysight 8500/8500B)	10
1.4.3 本論文のアプローチ.....	10
1.5 本研究の目的と研究課題.....	12
1.6 本論文の構成	13
第1章の参考文献	15
第2章 MCP 技術と用途探索の経緯.....	17
2.1 MCP 技術の歴史的背景と応用分野.....	17
2.2 MCP 素子の構造と製造プロセス.....	19
2.3 MCP 素子の動作パラメータと基本特性.....	23
2.4 MCP アセンブリ/検出器としての構造と役割.....	25
2.5 用途探索の枠組み.....	27
2.5.1 質量分析分野における用途探索：既存事業の延長としての検討.....	27
2.5.2 SEM 分野における用途探索：未利用エネルギー領域を対象とした新規検出器の検 討	30
2.5.3 本論文で SEM にフォーカスする理由.....	32
第2章の参考文献	33
第3章 SEM における検出系の課題と設計要件.....	35
3.1 SEM 装置の概要と像形成の基本.....	35
3.1.1 SEM の基本構成と像形成.....	35

3.1.2	検出方式：インレンズとアウトレンズ	37
3.1.3	アクセプタンスとアクセプタンスマップ	38
3.1.4	観察パラメータ	38
3.1.5	低加速観察の利点と課題	38
3.2	低加速 SEM で角度・エネルギー情報を分けるための検出条件	40
3.2.1	低加速観察での課題	40
3.2.2	既存インレンズ/アウトレンズ検出器の構造・動作原理と課題	40
3.2.3	検出系に求められる仕様	42
3.3	課題に対するアプローチ：MCP によるアウトレンズ検出	42
3.3.1	MCP を採用する理由	42
3.3.2	基本構成（薄型 MCP アセンブリと前段グリッドの組合せ）	42
3.3.3	想定される利点と検証項目	43
	第 3 章の参考文献	44
	第 4 章 倒立型検出器による低加速条件における BSE 像の取得と SE/BSE の分離	45
4.1	本章の目的	45
4.2	倒立型検出器の構成	45
4.2.1	検出器構造	45
4.2.2	倒立型 MCP 検出器の設計上の工夫：薄型化, 高電圧配線と漏れ電場対策	47
4.2.3	マルチアノード倒立型 MCP 検出器の試作	49
4.2.4	エネルギー帯域の定義	49
4.3	検出器出力特性の比較	50
4.3.1	測定方法	50
4.3.2	測定結果	50
4.4	SUS 球による評価	52
4.4.1	グリッド電圧依存性と SE/BSE 成分の分離	52
4.4.2	低加速条件における BSE 像の取得	55
4.5	Al/Si ウォーターマーク試料薄膜下構造の観察	56

4.5.1	試料構造と像の比較.....	56
4.5.2	低エネルギーBSE像の位置づけ.....	57
4.6	まとめと研究課題1,2への回答.....	58
	第4章の参考文献.....	60
第5章	正十二面体MCP検出器による角度・エネルギー分解.....	61
5.1	本章の目的.....	61
5.2	正十二面体MCP検出器の構成.....	61
5.2.1	検出器フレームとMCP配置.....	61
5.2.2	検出器ユニットと配線.....	63
5.2.3	観察条件と試料.....	65
5.3	Cuの凸凹像.....	67
5.4	Cu-Al共晶像.....	68
5.5	SUS球の3次元観察.....	70
5.6	まとめと研究課題3への回答.....	72
	第5章の参考文献.....	74
第6章	研究成果の実装方針と提供形態.....	75
6.1	本章のねらい.....	75
6.2	研究成果の発信と装置メーカーとの接点.....	77
6.3	市場環境と顧客セグメントの整理.....	78
6.3.1	3C分析.....	78
6.3.2	SWOT分析.....	82
6.3.3	ビジネスモデル.....	84
6.4	MCPモジュールの構成と展開方針.....	88
6.4.1	基本コンセプト：低加速専用オプションとしての「共通コア」.....	88
6.4.2	評価用モジュール（試験導入フェーズ）.....	88
6.4.3	量産オプションモジュール（本格導入フェーズ）.....	89
6.4.4	展開ステップのイメージ.....	89

6.4.5	ロードマップによる展開計画の共有.....	90
6.5	売上シナリオと研究課題4への回答.....	90
6.5.1	MCP事業ポートフォリオの中での位置づけ.....	90
6.5.2	導入台数を想定した売上シナリオ.....	91
6.5.3	まとめと研究課題4の回答.....	92
	第6章の参考文献.....	93
	第7章 本研究の総括と今後の展望.....	94
7.1	本研究の目的の整理.....	94
7.2	目的と研究課題1~4に対するまとめ.....	94
7.2.1	研究課題1:低エネルギー反射電子の検出.....	94
7.2.2	研究課題2:グリッド電圧差分像による帯域分離.....	94
7.2.3	研究課題3:角度・エネルギー分解観察の可能性.....	95
7.2.4	研究課題4:事業化・モジュール化の成立条件.....	95
7.2.5	目的に対するまとめ.....	95
7.3	SEM技術としての意義.....	96
7.4	MCP事業へのインパクトと売上シナリオの位置づけ.....	97
7.5	本研究の実施体制と共同研究枠組みの意義.....	97
7.6	本研究の限界と今後の課題.....	98
7.7	本研究の総括.....	99
	研究業績.....	100
	謝辞.....	102

図表目次

図 1	MCP の断面構造とチャンネル内での電子増倍機構	2
図 2	MCP 製造メーカー上位 5 社の所在地	2
図 3	XPS の測定原理と検出部の構造	5
図 4	光学顕微鏡と電子顕微鏡の構造及び造形性原理の比較	5
図 5	製品階層と単価の関係を示す概念図	7
図 6	本研究で採用したアプローチ (3 段階) の全体像	11
図 7	本論文の構成と三つのプロセスの対応	14
図 8	イメージインテンシファイアの構造と動作原理	18
図 9	ストリーク管の動作原理	18
図 10	従来 MCP (左) と ALD-MCP (右) の構造比較	18
図 11	MCP の製造プロセスフロー	19
図 12	プリフォーム作製～ファイバーの整列	21
図 13	インゴットの作成, スライス, 研磨～酸処理	21
図 14	還元処理	22
図 15	電極蒸着	22
図 16	MCP ゲインの電圧依存性 (模式図)	24
図 17	MCP のエネルギー感度特性	24
図 18	蛍光面, 高速応答型, マルチアノード型の MCP アセンブリ	26
図 19	低真空対応 MCP アセンブリにおける Triode 構造	26
図 20	MCP とアバランシェダイオードを組み合わせたハイブリッド検出器の構造	26
図 21	QMG220 を改造して構築した測定系	28
図 22	真空度を変更したときのダーク電流と動作電圧の関係	29
図 23	SEM における電子エネルギースペクトル	31
図 24	FSED (噴水型二次電子検出器) の概念図	31
図 25	一般的な SEM 模式図	35
図 26	試料から放出される電子のエネルギースペクトル模式図	36

図 27	SEM 観察時に試料から放出される電子	36
図 28	インレンズ検出系の例	37
図 29	アウトレンズ検出系の例	37
図 30	アクセプタンスマップ概念図	38
図 31	高加速観察と低加速観察の比較	39
図 32	ET 検出器の構造	40
図 33	Si-PD の構造	41
図 34	1ch シリコンフォトダイオード(左)と 4 分割シリコンフォトダイオード(右)	41
図 35	Si-PD と置き換える MCP アセンブリ模式図	43
図 36	倒立型検出器の構成概略図と外観写真	46
図 37	倒立型検出器の厚さ	46
図 38	FE-SEM SU7000(日立ハイテック製)	47
図 39	F2223-21SH 外形寸法図	48
図 40	SU7000 で倒立型検出器を動作させるためのセットアップ	48
図 41	シングルアノード倒立型(左)と二分割マルチアノード倒立型(右)	49
図 42	検出器出力特性比較測定	50
図 43	加速電圧に対する検出器出力強度の変化	51
図 44	SUS 球外観写真	52
図 45	加速電圧 5 kV での SUS 球像比較 (a)-(c)MCP, (d)ET 検出器, (e)Si-PD	53
図 46	グリッド電圧 V_g を変化させて取得した SEM 像と対応するエネルギーを示したスペクトル	54
図 47	低エネルギー BSE のみの像と処理に使用した像	54
図 48	SE のみの像と処理に使用した像	55
図 49	倒立型検出器+画像差分で得られるエネルギー像	55
図 50	加速電圧 15 kV 及び 1 kV で取得した SUS 球像	56
図 51	Al/Si ウォーターマーク試料	57
図 52	Al/Si ウォーターマーク試料の SEM 観察像の比較(加速電圧 2 kV)	58
図 53	各エネルギー電子像が見ている深さ位置(概念図)	58

図 54	正十二面体 MCP 検出器の外観・寸法図.....	62
図 55	Up 及び Down 検出器(グリッド未実装).....	63
図 56	32 ピンフィードスルーと各ピンへのアサイン情報.....	63
図 57	多検出器対応アンプ.....	64
図 58	Top0, Up1, Up2 に配線を行った際の様子(左:真空側,右:大気側).....	64
図 59	イオンミリング研磨した Cu 試料.....	65
図 60	Cu-Al 共晶試料.....	65
図 61	針ホルダに取り付けられた SUS 球.....	66
図 62	各検出器による Cu 試料 SEM 像とラインプロファイル.....	67
図 63	Top0, Up1, Up2 検出器で撮影した Cu-Al 共晶像.....	69
図 64	Cu-Al 像でラインプロファイルを取得した箇所と位置毎のラインプロファイル	69
図 65	Cu-Al 材料境界での一次電子入射時の電子拡がり (模式図).....	70
図 66	各検出器で得られた SUS 球像.....	71
図 67	製品・情報の流れの概念図.....	76
図 68	本研究で構築した「ユーザー・装置メーカー・所属企業」の関係と情報の流れ	76
図 69	本研究成果の発信と装置メーカーとの接点構築.....	78
図 70	試作初期のアンプ構成で取得した MCP 像 (倒立型検出器).....	81
図 71	3C 分析結果.....	82
図 72	SWOT 分析結果.....	84
図 73	リーンキャンバス.....	87
図 74	リーンキャンバスに基づくビジネスモデル模式図.....	87
図 75	著者が作成したロードマップ.....	90

第1章 序論

1.1 マイクロチャネルプレートとは

微弱な光や電子などの信号を高感度に検出する技術は、多様な計測機器の性能を左右する基盤要素である。これらの計測機器では検出感度やダイナミックレンジ¹を確保するために電子増倍素子が用いられ、マイクロチャネルプレート (Microchannel Plate: MCP) はその代表例の一つである。

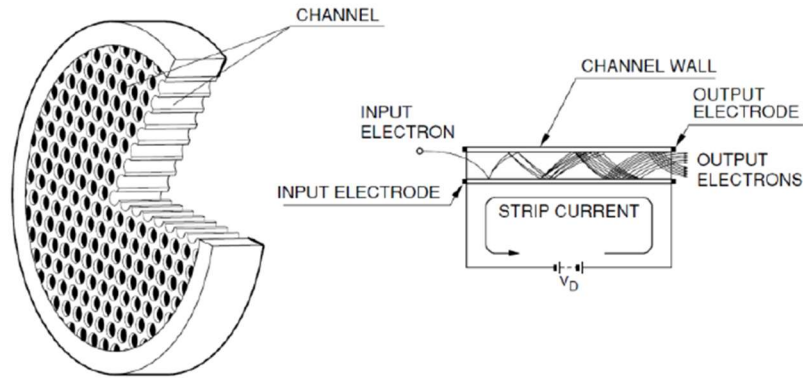
MCP は、ガラス基板に多数のチャネルと呼ばれる細孔を形成され、その内壁に抵抗層と二次電子放出層を設けた板状の電子増倍素子である。図 1 に示すように、MCP に入射した電子やイオンは、チャネル内壁で二次電子を連続的に生じさせながら増倍され、チャネル出口で電流として取り出される。外形は円板型や矩形型などがあり、チャネル径や有効面積のバリエーションを通じて、さまざまな装置に適用されている。MCP 素子の特性は、チャネル径、長さ/径比 (L/D)、表面抵抗、バイアス角などによって決まる。これらにより、増倍率、時間応答、雑音特性などが用途ごとに最適化される [1, 2]。

また、MCP は数百 eV 程度の低エネルギー電子に対しても感度を持ち得る [1, 2]。本研究で検討する走査電子顕微鏡 (Scanning Electron Microscope: SEM) への応用においては、加速電圧を 1~3 kV 程度に下げた場合の、比較的低いエネルギーの電子信号をとらえやすいという特徴がある。一般的な SEM で主流となっている光電子増倍管 (Photomultiplier Tube: PMT) や半導体の検出器と比べて、異なる情報を得られる可能性がある。

実際の製品では、MCP 素子は単体ではなく、複数の MCP、アノード電極、保持機構、真空フランジなどを一体化した「MCP アセンブリ」として実装されている。MCP は、欧米や日本の数社 (Exosens (Photonis ブランド)、浜松ホトニクス、Incom など) によって製造・販売されており、暗視装置、質量分析計、X 線光電子分光装置 (X-ray Photoelectron Spectroscopy: XPS) などの検出系に広く利用されている [2-7]。近年の市場調査レポートによれば、世界の MCP 市場は 2018 年時点で約 7,013 万 USD と推計されており、2019-2025 年には年平均約 9 %程度の成長が見込まれている [8]。また、収益ベースで見ると、Exosens (Photonis ブランド)、浜松ホトニクス、Incom、Baspik、North Night Vision などの上位 5 社で世界市場の約 7 割を占めており、MCP の供給構造は少数の専門メーカーに集中的である [8]。図 2 に上位 5 社の所在地を示す。

著者が所属する浜松ホトニクスでは、円板型・矩形型など多様な形状の MCP 素子ラインナップに加え、低真空動作、時間分解計測、多チャネル読み出しなど、用途に応じたアセンブリ設計・製造技術を有しており、MCP 事業における重要な強みとなっている。

¹ ダイナミックレンジとは、検出器が線形性を保って信号を取得できる最小値から最大値までの範囲を指す。



THBV3_1001EA

図 1 MCP の断面構造とチャンネル内での電子増倍機構

出典：浜松ホトニクス株式会社, 技術資料『MCP アセンブリ (MCP ASSEMBLY)』 (TMCP9002J03, 2011 年 3 月), p. 2, 図 1

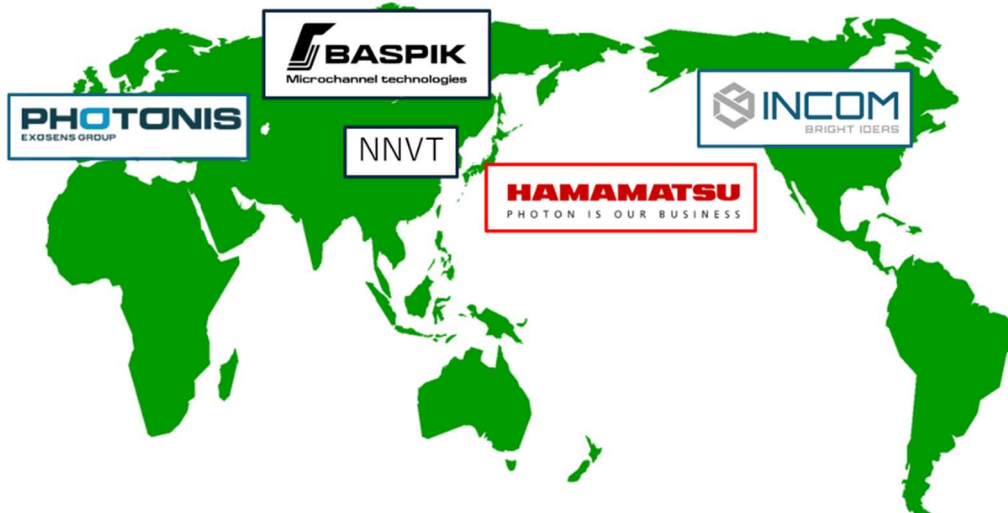


図 2 MCP 製造メーカー上位 5 社の所在地

1.2 MCP の主要応用分野とその市場

MCP が用いられる代表的な装置として、暗視装置、質量分析装置、XPS、電子顕微鏡が挙げられる。それぞれについて「装置市場の規模・成長性」と「その中での MCP の位置づけ」の二つの観点から整理する。装置市場の規模や成長率は、外部の市場調査データに基づき表 1 にまとめる。また、ここでいう装置市場は暗視装置や質量分析装置など装置全体の市場を指し、その内部で用いられる部品としての MCP の売上とは区別して扱う。

表 1 MCP が使用される装置市場の規模や成長率

市場	市場規模（代表値）※1	年平均成長率（CAGR） （概略）※2	出典
暗視装置市場	約 70～80 億ドル (2023 年時点・世界全体)	約 8～12 % (主に 2023-2030/2032 年予測のレンジ)	[9-11]
質量分析装置市場	約 55～65 億ドル (2023～2024 年時点・世界全体)	約 6～8 % (主に 2023-2030/2032 年予測のレンジ)	[12-15]
X 線光電子分光装置 市場	約 6～8 億ドル (2023～2024 年時点・世界全体)	約 4～7 % (主に 2024-2030/2035 年予測のレンジ)	[16-18]
電子顕微鏡市場	約 40～55 億ドル (2023～2024 年時点・世界全体)	約 8～10 % (主に 2024-2030/2034 年予測のレンジ)	[19-23]

※1 「市場規模（代表値）」は、各レポートの最新年近傍の値をもとにした概算レンジである。

※2 「CAGR（概略）」は、各社レポートが提示する予測期間（～2030/2032/2034/2035 年など）の下限～上限をとった概略値である。

（注）各値は複数の公開市場調査レポートの値を参考に、著者がレンジとして再整理した概算値である。定義（装置のみ/サービス・消耗品を含むか、サブセグメントの範囲など）の違いにより、レポート間で数値にばらつきがある。

暗視装置は、低照度環境下で人や物体を観察するための装置である。レンズで集めた微弱な光は光電陰極により電子に変換される。高電圧で加速後にイメージインテンシファイア² (Image Intensifier: II) で増倍され、肉眼で観察可能な明るさの像として表示される。初期に実用化された第一世代イメージインテンシファイアでは、光電陰極からの電子像を静電レンズで蛍光面に結像させる構成が用いられた。内部電子増倍機構を持たないことから、増倍率や解像度などの点で性能に限界があった[24]。一方、イメージインテンシファイアの電子増倍部に MCP を用いる構成は、第二世代以降の暗視装置で広く採用されている[24]。暗視装置の装置市場については、イメージインテンシファイア市場の出荷量および売上が 2015 年から 2024 年にかけて増加傾向にあることが市場調査データから示されており、防衛・監視分野を中心に今後も一定の需要が継続すると見込まれている。

質量分析装置は、試料をイオン化し、質量電荷比に応じてイオンを分離・検出する分析装置である。質量分析の方式には四重極型、飛行時間型 (Time-Of-Flight Mass Spectrometry: TOF-MS)³、磁場偏向型など複数の構成があり、いずれの場合も最終段でイオンを電子信号として読み出す検出器が必要となる。質量分析装置の装置市場は、ライフサイエンス、医薬、半導体プロセスなどにおける分析需要の拡大を背景に比較的高い成長が見込まれており、MCP はイオン検出器の主要な選択肢の一つとして利用されている[2, 6, 7]。

XPS は、固体表面に X 線を照射し、放出される光電子のエネルギー分布を測定することで、元素組成や化学状態を評価する表面分析装置である。図 3 に XPS の原理図を示す。エネルギー分析器の出口で電子を検出する素子として MCP が広く用いられており、XPS 分野では MCP ベースの検出器が標準的な構成となっている。XPS の装置市場は、材料開発や表面分析分野で安定した需要を有し、大きな伸びはないものの堅調に推移していると報告されている。このように、XPS では MCP の採用比率が既に高く、暗視装置と同様に、装置構成の面から MCP の採用比率を大きく変える余地は限定的である[3-5]。

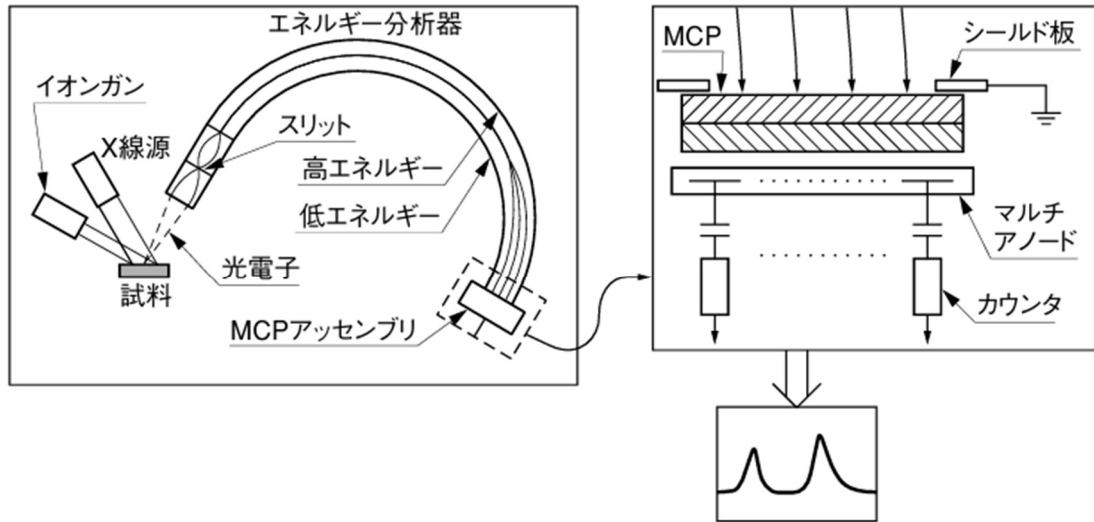
電子顕微鏡は、集束電子線を試料に照射し、発生する二次電子 (Secondary Electrons: SE) や反射電子 (Backscattered Electrons: BSE, 後方散乱電子) などを検出して微細構造を観察する装置の総称である。図 4 で示すように、電子顕微鏡は、透過型電子顕微鏡 (Transmission Electron Microscope: TEM) と SEM に大別されるが、ここでは SEM について説明する。一般的な SEM では、50eV までの SE 検出にはエバーハート・ソーンリー (Everhart-Thornley detector: ET) 型検出器、50eV 以上の BSE 検出にはシリコンフォトダイオード (Silicon Photodiode: Si-PD) が主に用いられており、MCP は研究用途の特殊な装置を除くと、汎用 SEM の検出器として広く普及しているとは言い難い。SEM の装置市場は、汎用観察用途に加え、半導体デバイスや電子部品検査などの分野で一定の成長が見込まれている。装置としての規模と成長性の点では MCP にとって魅力的な応用分野である一方で、現時点での MCP 採用比率は低い。

以上のように、暗視装置、質量分析装置、XPS、電子顕微鏡のいずれの装置分野も、一定の規模と成長性を有しており、今後も MCP を用いた検出器が継続的に利用されることが見込まれる。その一方で、暗視装置と XPS では MCP が既に主要な検出素子として定着しており、MCP の採用比率を大きく変える余地は比較的小さい。質量分析装置についても、低真空動作 MCP アセンブ

² 入力光を光電陰極で電子像に変換し、電子を増倍した後に蛍光面で可視像として出力する像増倍素子。

³ イオンの飛行時間が質量電荷比に依存することを利用して分離・測定する方式。

リのような新たな構成が導入されているものの、装置全体の中で MCP の比率を大きく変えること自体は容易ではない。これに対して電子顕微鏡、とくに SEM 分野では、装置市場の規模に比べて MCP の採用例がごく限られており、MCP にとって新たな用途を開拓しうる余地の可能性がある。本論文では、この「SEM における未開拓領域」に着目し、低加速 SEM 用 MCP 検出モジュールの検討を通じて、MCP 事業の新たな用途と高付加価値化の可能性を探る。



TMCP0098JA

図3 XPSの測定原理と検出部の構造

出典：浜松ホトニクス株式会社, 技術資料『MCP アセンブリ (MCP ASSEMBLY)』 (TMCP9002J03, 2011年3月), p. 21, 図 48

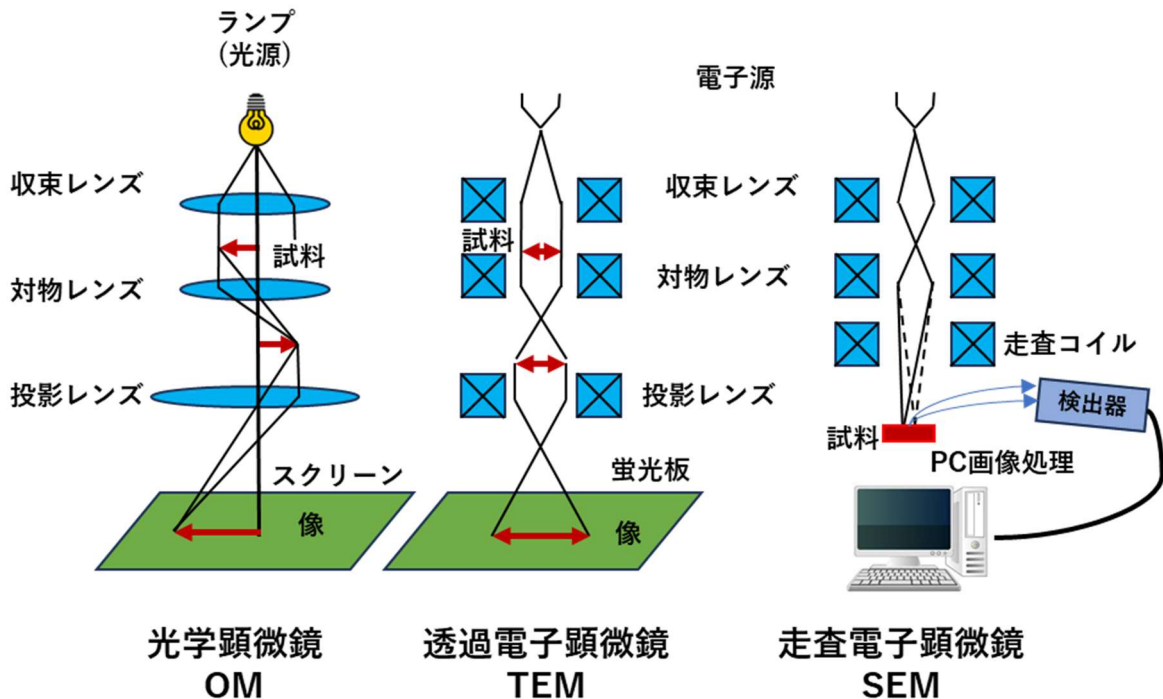


図4 光学顕微鏡と電子顕微鏡の構造及び造形性原理の比較

1.3 MCP 事業の用途別構成

暗視装置では第2世代以降のイメージンテンシファイアの電子増倍部としてMCPが広く採用されており、XPSでもエネルギー分析器出口の電子検出部としてMCPベースの検出器が事実上の標準構成となっている。これら二つの分野では、装置構成の観点から見るとMCPの採用比率はすでに高く、今後も一定の需要は見込まれるものの、「MCPをまったく新しい用途として導入する」という意味での伸長余地は比較的小さいと考えられる。

質量分析装置の分野でも、とくにTOF-MSにおいて、イオン検出部の有力な選択肢としてMCP検出器が広く用いられてきた。高速応答性や位置分解能を活かした検出器構成が実用化されており、装置の質量分解能や感度の向上に寄与している。一方で、質量分析装置全体の中でMCPが担う役割はイオン検出部という限られた部分に集中しており、検出原理そのものが急速に他方式へ置き換わる兆候は現時点では大きくない。したがって、質量分析分野は、MCP素子や検出器アセンブリの改良による高付加価値化の余地はあるものの、用途の枠組み自体を大きく変えるような新市場の候補とは言い難い。

これに対して電子顕微鏡、特にSEMでは状況が異なる。一般的なSEMでは、SEの検出にはET検出器、BSEの検出にはSi-PDが主流である。MCPは研究用途の採用例はあるものの、汎用SEMの検出器として広く普及しているとは言い難い。電子顕微鏡市場全体は半導体デバイスや材料評価の需要拡大を背景に一定の成長が見込まれているにもかかわらず、SEMにおける検出器構成はSi-PDなどを中心とした枠組みが長く続いている。つまり、「装置市場としては成熟しつつあるが、MCPにとっては未開拓領域が大きい分野」と位置づけられる。

MCPを装置に組み込む際の供給レベルは、図5に模式的に示すように、「MCP素子そのもの」、複数枚のMCPとアノード電極、保持機構、真空フランジなどを一体化した「検出器アセンブリ」、さらに高電圧電源や前置増幅器まで含めた「検出モジュール」の三段階に整理できる。素子単体の供給は装置側の自由度が高い反面、高電圧設計や信号処理回路の設計負担が装置メーカー側に残るため、MCPが一般的でない分野では採用のハードルが高い。一方、検出モジュールとして提供すれば、機械的インターフェースや高電圧の取り回しを含めて一体で設計でき、装置メーカーは既存検出器と置き換えて評価するだけでよいという利点がある。モジュールは素子単体やアセンブリに比べて付加価値を上乗せした価格設定が可能であり、1台あたりの売上への寄与も大きくなる。

本論文では、こうした技術面とビジネス面の両方の理由から、SEM観察を対象とするMCP検出モジュールを事業化単位とみなし、検出性能と収益性の双方を評価対象とする。

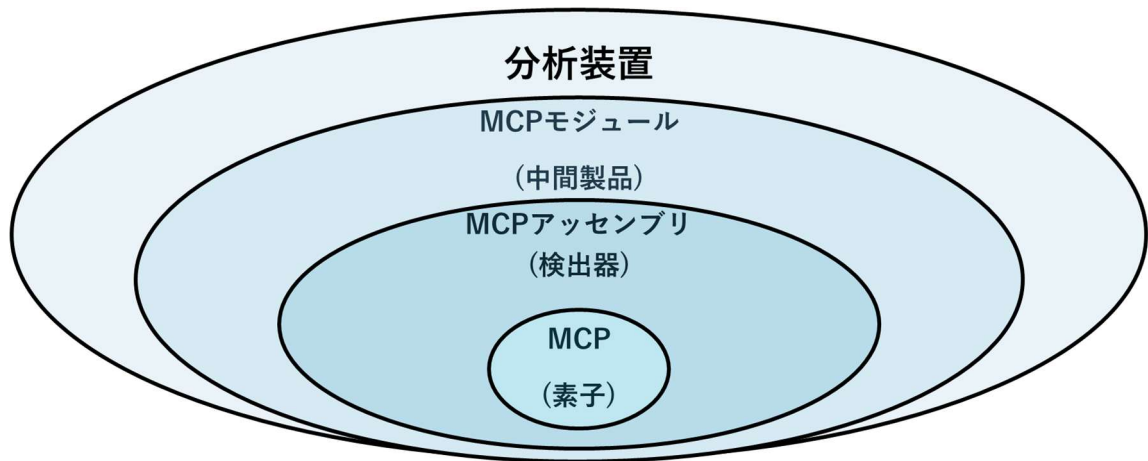


図 5 製品階層と単価の関係を示す概念図。

MCP 素子を中心に, アセンブリ, モジュール, 分析装置へと階層が広がり, 外側に行くほど単価が高くなることを模式的に示す。

1.4 本研究が対象とする低加速 SEM 用途と検出課題

前節までに、MCP 事業の用途別構成と供給形態を整理し、その中でも SEM 分野が MCP の売り上げ拡大の重点対象となる理由を述べた。SEM は装置市場として一定の規模と成長性を持つ [25, 26]。一方で、低加速観察に固有の検出上の課題を抱えていることから、技術面・事業面の両方で検討すべき点が残されている。本節では、このうち低加速 SEM における検出課題に焦点を当て、従来の検出器構成とその限界を整理する。

近年の SEM では、加速電圧を 1-3 kV 程度に下げた低加速観察が広く用いられている。低加速観察は、試料の帯電や損傷を抑えつつ、表面近傍の情報を強調できるという利点があり、半導体デバイスや微細構造材料の評価で重要な役割を果たしている。一方で、像の主な信号となる SE と BSE が混ざり、さらに検出器の配置や特性に由来するバイアスが重なるため、コントラストの解釈が難しいという問題もある。本論文では、これらの用途で用いられる低加速観察を主な対象として、検出課題を整理する。

1-3 kV の低加速 SEM では、アウトレンズ BSE 検出器である Si-PD は、およそ 1 keV 以下のエネルギーをもつ BSE を像信号として取り出しにくい。そのため、加速電圧を下げることで新たに生じる、低いエネルギーの BSE の成分は、像信号として取り出されにくい。低加速で観察していても、本来は加速電圧を下げることで得られるはずの低いエネルギーの BSE 成分は、Si-PD の感度特性により像信号として取り出しにくい [27-29]。

従来の SEM では、必要に応じて検出器や加速電圧、視野を切り替えることで、形状コントラストと材料コントラストを読み分けてきた。SE の検出には ET 検出器、BSE の検出には Si-PD を用いる。しかし、ET 検出器は広いエネルギー範囲の電子を拾い、検出器の配置やシールド形状に応じて方向バイアスがかかる。Si-PD は 1 keV 以下の BSE にはほとんど感度を持たない。このため、同一観察条件下で、SE と低エネルギーの BSE、高エネルギー側の BSE の寄与を分けて観察することは難しく、少なくとも一般的な検出器構成（ET 検出器と Si-PD）では、同一観察条件下でこれらの寄与を分離して扱うことは容易ではない。近年では、インレンズ検出器などにより、低加速条件でも BSE をエネルギー選別して観察する手法が提案・実用化されつつある [30, 31]。一方で、装置構成や条件設定に強く依存するため、同一視野・同一ビーム条件のまま、エネルギーと放出方向の違いを分けて扱うことは容易ではない。

一方で、MCP は歴史的に見て、SEM 用途でまったく使われてこなかったわけではない [32-35]。しかし、汎用 SEM の標準的な検出器として広く普及しているとは言いがたい。高電圧電源や駆動回路を装置側で用意する必要があること、明るい視野や連続照射条件での寿命・耐久性への懸念があったこと、素子およびアセンブリとしてのコストが半導体検出器などに比べて高くなりやすいことなどが、採用を妨げる要因となってきたと考えられる。一般的な汎用 SEM では、SE 用の ET 検出器と BSE 用の Si-PD が広く用いられている [36]。一方で、MCP を電子検出器として採用した市販機の例として、Agilent/Keysight 8500/8500B が報告されている (1.4.2)。

1.4.1 MCP を用いた SEM 検出に関する先行研究の整理

文献 32 (Hill and Gopinath, 1977) は, 試料とシンチレータ⁴の間にチャネルプレートマルチプライヤ⁵ (Channel Plate Multiplier: CPM) を配置し, エミッシブモード⁶での SE 信号を増加させる構成を示し, 従来のシンチレータ検出器と比較して信号対雑音比 (S/N) が改善したと報告している。

文献 33 (Russell and Mancuso, 1985) は, IC メトロロジ⁷や電圧コントラスト⁸を目的として, 低加速 (0.5-5.0 keV) ・短い作動距離(ワーキングディスタンス, Working Distance: WD) 条件で対称な信号取得を実現するため, 入射電子線軸上に同心円状 (annular disc) の MCP 検出器を最終ポールピースに取り付け, 試料面から約 6 mm の位置に配置した構成を報告している。同論文では, ET 検出器が低電圧・短作動距離で性能が低下し非対称像を生じ得るのに対し, MCP は SE 像・BSE 像の双方で有効であること, BSE 像を 600 eV の一次エネルギーで取得できること, および量産環境での使用経験から汚染による劣化が顕在化しにくく信頼性が高いことを述べている。

文献 34 (Helbig et al., 1987) は, MCP が 10^5 - 10^6 個のチャネル電子増倍器からなるコンパクトアレイであり, 利得が 10^6 を超えること, 約 10^8 電子/秒の計数が可能であることを示し, SE および BSE の像形成において MCP 検出器が ET 検出器と比較して有用であることを, 電子線軸に同軸配置できることを述べている。

文献 35 (Postek et al., 1990) は, 高効率 MCP 検出器と増幅システム (MCP 検出器, ビデオアンプ, 高圧電源, 制御ユニットの 4 要素) からなる検出系を提案し, 高加速・低加速の両条件で効率的に動作すること, SE・BSE の両検出モードが可能であること, 検出器本体が厚さ約 3.5 mm, 直径 25.4 mm と薄型であることを報告している。

以上の文献 32-35 は, MCP を単一の検出器として SEM に実装し, 主として低加速条件における信号増倍や検出効率の改善を目的とした構成例である。一方, 本研究は, バイアスグリッド (ハイパスフィルタ) によるエネルギー選別と差分処理の組合せ, および正十二面体フレームに複数 MCP を配置する構成により, 同一観察条件のもとで受理方向 (角度) とエネルギーの情報扱うことを目的としている。

本研究との違いは次の 3 点である。

⁴ 入射粒子のエネルギーを光 (発光) に変換する材料 (部材) 。

⁵ MCP を電子増倍器として用いた検出素子/検出器の呼称。文献によっては MCP 素子そのものを指して CPM と呼ぶ場合もある。

⁶ 試料から放出された電子 (主に SE など) を検出対象とし, チャネルプレート (MCP/CPM) で増倍して信号として取り出す検出モード。

⁷ 集積回路 (IC) の寸法・形状・欠陥などを評価するための計測・検査。

⁸ 試料表面の電位差や帯電状態の違いに起因して, 像の明暗が変化するコントラスト。

(1) 文献 32-35 は、MCP で信号を増やし、検出しやすくすることを主な狙いとしている。これに対し本研究は、同じ視野・同じ条件のまま、SE と BSE が混ざった信号を分けて見られるかを狙う。

(2) 文献 32-35 は検出器が 1 つであり、電子がどの方向から来たかの違いを分けて扱うことは狙っていない。これに対し本研究は、方向の違いが像にどう影響するかを分けて見られるかを狙う。

(3) 文献 32-35 は SEM への実装例を示すことが中心である。これに対し本研究は、後付けで評価できる形を前提にし、モジュールとして成り立つ条件もあわせて整理する。

以上より、文献 32-35 は MCP の有効性を示している一方で、SE/BSE の混在や方向の違いを、同じ条件のまま分けて扱う考え方までは示していない。

1.4.2 市販 SEM における MCP 採用例 (Agilent/Keysight 8500/8500B)

市販 SEM で MCP を検出器として使った実装例として、Agilent/Keysight 8500 と 8500B が報告されている。この製品では、四分割 MCP の差分信号で起伏情報を強調する用途が示されている [37, 38]。一方で 8500B はメーカー公式情報で販売・サポート終了となっており、販売完了が告知されている [39]。本論文で確認した主要メーカー公開資料の範囲では、現在販売されている市販の汎用 SEM の仕様として、MCP を検出器として採用する例は確認されなかった。さらに、販売台数や市場占有率など、事業規模を数値で示す情報も公開資料からは確認できない。本節では採用例の内容を整理するにとどめ、販売規模などの定量評価は行わない。これは、公開情報から販売台数や市場占有率を把握できないためである。

1.4.3 本論文のアプローチ

市販 SEM における MCP の採用例は、検出器を装置内部に組込み、差分信号により起伏情報を強調する用途を示したものである。これに対し本研究は、後付けの検出モジュールとして MCP 検出系を構成し、低加速 SEM 固有の検出課題に対して段階的に検討を進める。さらに、これらの性能評価と、モジュールとして成立させるための条件をあわせて検討対象とする。

本論文では、このような背景を踏まえたうえで、低加速 SEM における検出課題に対して MCP を段階的に適用する、という考え方をとる。

第 1 の段階では、既存の電界放出型走査電子顕微鏡 (Field-Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM) で Si-PD が設置される位置に MCP 検出器を実装し、従来の Si-PD 検出器と同じ位置関係で像を取得する。これにより、1-3 kV の加速電圧条件で、1 keV 未満の BSE を含む信号を MCP がどの程度拾えるのか、Si-PD 像と比較して低加速特有の情報がどのように現れるのかを評価する。

ここで、第 1 の段階を含めて低加速 SEM に MCP を適用する際に整理すべき点を二つ挙げる。

第一に、0~50 eV 程度の SE 成分と、数百 eV から 1 keV 程度の低エネルギー-BSE 成分が、同一観察条件のもとで一つの信号として観測されることである。第二に、BSE がどの方向に放出されたかによって検出器に入射する電子数が大きく変わり、測定される信号が放出方向に強く依存することである。既存の MCP を用いた SEM の先行研究でも、試料のごく近くに MCP を配置した結果、SE が含まれた像となり、エネルギー帯や放出方向の違いを分けて評価することが難しかったことが指摘されている。本研究では、この二つの点に対して、(a) グリッド電極により

入射エネルギー帯を切り替える方法と、(b) 検出器を多面配置して異なる方向からの信号を個別に読み出す方法を組み合わせて対応する。

第 2 の段階では、同一視野・同一ビーム条件のまま、グリッド電位の切り替えで得た複数の MCP 像の差分から SE, 低エネルギー-BSE, 高エネルギー-BSE を切り分け、エネルギーごとに見分けられるかを確認する。MCP 前段にグリッド電極を配置し、負電位印加により低エネルギー電子を反発させる性質を利用して、グリッド電圧を 0 V, 弱い負電位, 強い負電位と段階的に変えた像を取得し、差分処理を行う。

BSE の放出は、試料表面の傾きや凹凸、材質に強く依存し、ある方向から見ると明るく見えるが、別の方向からは暗く見えるといった現象が生じることが知られている。BSE の角度分布と検出器配置の関係については、例えば Goldstein ら[27]や Reimer ら[28]の SEM 教科書で詳しく整理されており、従来の SEM でも試料の周囲に BSE 検出器を複数配置し、和信号・差信号をとることで、「形状に敏感な信号」と「材質に敏感な信号」を作り分ける手法が広く用いられてきた。

第 3 の段階では、試料からの BSE を異なる方向から同時に受けたときに、方向（角度）の違いに応じた像を同時に取得できるかどうかを確認する。MCP を多面体状に配置した検出系（十二面体検出器）を用いて、試料からの BSE を異なる方向から同時に受けることを試みる。各面の MCP に前述のグリッド構成を組み合わせ、グリッド電位を切り替えた条件で得られる像の違いもあわせて確認する。

以上のように、本論文では、SEM における検出の課題、とりわけ低加速条件で顕在化する課題と、MCP がこれまで抱えてきた制約を踏まえたうえで、次の 3 段階のアプローチを順に検討する。(i) MCP 検出器を用いて、1 keV 未満の比較的低いエネルギーの BSE 成分をどこまで取り出せるかを評価すること、(ii) 試料近傍に配置したグリッド電極の電圧を切り替え、同じ視野・同じ条件のまま信号のエネルギー帯を実用上切り分けられるかを確かめること、(iii) MCP を多面体状に配置した検出系により、BSE の来る方向の違いを組み、加速条件に限らず観察できるかを検討することである。図 6 に 3 段階のアプローチを示す。これらの技術的な検証で得られた知見を統合し、MCP 検出器を装置メーカー向けの検出モジュールとしてどのような形で提供し得るか、その成立条件と展開の考え方を整理することが、本研究の狙いである。

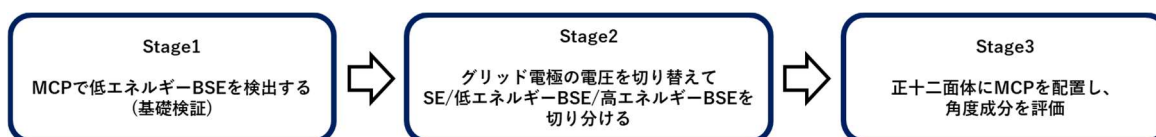


図 6 本研究で採用したアプローチ (3 段階) の全体像

1.5 本研究の目的と研究課題

本研究の目的は、著者の所属企業における MCP 事業の売上を伸ばし、事業を拡大するための基盤をつくることである。そのための技術的・事業的な手段として、所属企業が保有する MCP 技術を核とし、MCP 事業における新市場の創出と、高付加価値な検出モジュールの実現に向けた具体的な道筋を示すことを目指す。この目的に対して、本論文では次の 4 つの研究課題を設定する。

・研究課題 1 (技術検証：低エネルギー反射電子の検出)

1-3 kV の低加速 SEM において、アウトレンズ BSE 検出器である Si-PD は、およそ 1 keV 以下の BSE に対する感度がほとんどない。そのため、その成分が像にはほとんど現れてこない。この条件で、MCP 検出器を用いることで、従来の検出器では像信号として取り出しにくかった低エネルギー-BSE を、像情報として取り扱えるかを明らかにする。とくに、1-3 kV の加速電圧条件で、Si-PD 像では見えていなかった情報が、MCP 像ではどの程度強調されるかを評価する。

・研究課題 2 (帯域分離手法の検証：グリッド電圧差分像)

試料近傍に配置したグリッド電極の電位を変化させて得られる複数条件の MCP 像から、SE、低エネルギー-BSE、高エネルギー-BSE の寄与を、同じ視野・同じビーム条件のまま分離できるかどうかを検証する。あわせて、グリッド電圧を切り替えて得られる像の差分によって、材料コントラストや形状コントラストの解釈にどのような追加情報が得られるかを整理し、「エネルギー帯を切り分けて見られること」が成立するかを評価する。

・研究課題 3 (角度・エネルギー分解観察の可能性)

正十二面体フレームに複数の MCP を配置した検出系をアウトレンズ SEM に搭載し、代表的な試料に対して複数方向の SE 像・BSE 像を取得できるか確認する。各 MCP の前段に設けたバイアスグリッドの電位を切り替えたときに、グリッド条件の違いに応じた SE 像・BSE 像が得られるかもあわせて確認する。

・研究課題 4 (事業化・モジュール化の成立条件)

第 4 章および第 5 章で得られた検出実験の結果を前提として、MCP 検出器を装置メーカー向け検出モジュールとして提供する場合に想定される技術要件 (性能、信頼性、安全性、インターフェースなど) とビジネス上の条件 (価格帯、導入ステップ、ターゲット市場など) を整理する。また、評価用モジュールから製品モジュールへ展開するための段階的な評価プロセスと、MCP モジュールの採用数増加を仮定した売上規模の試算を行い、本モジュールが MCP 事業の拡大に寄与し得る条件を検討する。

これら 4 つの課題のうち、研究課題 1~3 は、「どの用途・観察条件で MCP の物理的な特性が既存検出器とは異なる像情報として現れるか」を評価するための技術的検討に対応している。特に、SEM を主な用途領域として位置づけ、1-3 kV の低加速条件において、低エネルギー-BSE や放出方向に起因する信号の違いを、具体的な観察例に基づいて確認する。一方、研究課題 4 は、その結果を踏まえて、MCP 検出器を装置メーカー向けの検出モジュールとして位置づける際の製品構成、価格帯、導入ステップなど、事業化・モジュール化を検討するうえでの条件を整理する課題である。本論文全体としては、(1) 用途領域の選定、(2) MCP を用いた検出系で従来の主

流検出方式とは異なる像情報が得られる条件の検討, (3) 事業化・製品化の成立条件の整理, という三つの観点を, これらの研究課題を通じて相互に関連づけながら議論する。

1.6 本論文の構成

本論文は, 前節までに述べた三つの観点——(1) 用途領域の選定, (2) 「MCP でなければ得られない情報」の実証, (3) 事業化・製品化の成立条件の整理——に対応するように構成される。図 7 に, 本論文の章構成と三つのプロセスの対応関係を模式的に示す。第 2 章～第 6 章の位置づけは次のとおりである。

第 2 章では, 所属企業における MCP 事業の状況を概観し, 質量分析装置および SEM を候補とした用途探索の過程を整理する。質量分析分野での検討がどのような理由で行き詰まり, なぜ SEM 分野に焦点を移したのかを, 市場環境および技術的観点から明らかにする。

第 3 章では, SEM の装置原理と像形成メカニズムを概説し, SE・BSE のエネルギー分布・角度分布を踏まえて, ET 検出器および Si-PD 検出器がもつ構造的な限界を整理する。特に, 低加速 SEM における検出課題と MCP 適用の必然性を示す。

第 4 章では, SEM 上方検出系に組み込む倒立型 MCP 検出器アセンブリの設計・試作・評価結果を示す。従来の Si-PD 検出器と比較しながら, 1-3 kV の加速電圧条件で, Si-PD では像信号として取り出しにくい低いエネルギーの BSE 成分を, 像として取り出せるか, またグリッド電圧制御によるエネルギー帯の違いが像コントラストにどのような違いをもたらすかを明らかにする。

第 5 章では, 複数の MCP 検出器を正十二面体状に配置した検出系を用いて, 入射角度とエネルギーに依存する応答を分解して取得する手法を検討する。BSE の来る方向とエネルギーの違いが SEM 像のコントラストにどのように関わっているかを, 角度分布・エネルギー分布の観点から検証する。

第 6 章では, 装置メーカーとの対話や社内検討結果を踏まえ, MCP 検出器をモジュールとして提供する際の技術要求とビジネス上の条件を整理し, ロードマップと評価用モジュールの提供形態を示す。

第 7 章では, 本研究で得られた知見を総括し, SEM 用途における MCP の位置づけと MCP 事業全体への波及効果, 今後の課題と展望について述べる。以上の構成により, 本論文は, MCP というデバイス技術を出発点としつつ, 応用先の選定, 物理的な情報価値の実証, 事業化条件の整理までを一貫したストーリーとして示すことを目指す。

プロセス/章	第2章 用途探索	第3章 像形成と課題	第4章 倒立型 MCP	第5章 十二面体 MCP	第6章 事業化枠組み
用途探索	●	●	○	○	
情報価値の実証		○	●	●	○
事業化条件の整理			○	○	●

●：その章の主たる役割

○：部分的に関連する

図7 本論文の構成と三つのプロセスの対応

横軸に第2～第6章, 縦軸に「用途探索」「情報価値の実証」「事業化条件の整理」を置き, 各章がどのプロセスを主として担うかを色分けした図

第 1 章の参考文献

1. J. L. Wiza, "Microchannel plate detectors," *Nuclear Instruments and Methods*, 162, 587–601 (1979).
2. T. Gys, "Micro-channel plates and vacuum detectors," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 787, 254–260 (2015).
3. D. Briggs and M. P. Seah (eds.), *Practical Surface Analysis, Vol. 1: Auger and X-ray Photoelectron Spectroscopy*, 2nd ed., Wiley, 1990.
4. P. van der Heide, *X-ray Photoelectron Spectroscopy: An Introduction to Principles and Practices*, Wiley, 2011.
5. Kratos Analytical, "AXIS Supra+ XPS system," Product brochure/specification, accessed 6 Dec 2025.
6. J. T. Watson and O. D. Sparkman, *Introduction to Mass Spectrometry: Instrumentation, Applications and Strategies for Data Interpretation*, 4th ed., Wiley, 2007.
7. H. Kobayashi, T. Hondo, N. Imaoka, M. Suyama, and M. Toyoda, "Development of novel ion detector that combines a microchannel plate with an avalanche diode," *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **971**, 164110 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.nima.2020.164110>
8. QYResearch, *Global Micro-channel Plate (MCP) Market Research Report 2019*
9. Grand View Research, *Night Vision Device Market Size, Share & Trends Report, 2024*.
10. Global Market Insights, *Night Vision Device Market, 2024*.
11. MarketsandMarkets, *Night Vision System Market, 2025*.
12. Grand View Research, *Mass Spectrometry Market Size, Share & Trends Report, 2024*.
13. Global Market Insights, *Mass Spectrometry Market, 2023*.
14. MarketsandMarkets, *Mass Spectrometry Market, 2024*.
15. SNS Insider, *Mass Spectrometry Market, 2024*.
16. Grand View Research, *X-ray Photoelectron Spectroscopy Market, 2024*.
17. Future Market Insights, *XPS Market, 2024*.
18. Market Research Future, *XPS Market, 2024*.
19. Grand View Research, *Electron Microscopes Market, 2024*.
20. Market.us, *Electron Microscope Market, 2023*.
21. Towards Healthcare, *Electron Microscopy Market, 2025*.
22. Precedence Research, *Electron Microscopy Market, 2025*.
23. Strategic Market Research, *Electron Microscopy Market, 2025*.
24. H. P. Montoro, "Image Intensification: The Technology of Night Vision," *Photonics Spectra* (2005).
25. Grand View Research, "Scanning Electron Microscopes Market Size Report, 2030," (accessed 2025-12-28).
26. IMARC Group, "Scanning Electron Microscopes Market Size & Forecast 2025–2033," (accessed 2025-12-28).

27. J. I. Goldstein, D. E. Newbury, J. R. Michael, et al., *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, 4th ed., Springer, 2018.
28. L. Reimer and H. Kohl, *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*, 2nd ed., Springer, 2008.
29. O. C. Wells, R. J. Savoy, and P. J. Bailey, "Backscattered Electron (BSE) Imaging in the Scanning Electron Microscope (SEM) – Measurement of Surface Layer Mass-Thickness," *Scanning Electron Microscopy*, **1982**(1), Article 25, 287–298 (1982).
30. Carl Zeiss Microscopy GmbH, "ZEISS Energy-selective Backscattered (EsB) Detector — Enhanced resolution and visibility of sub-surface information," brochure code EN_43_012_007 (2020).
31. T. Radlička, M. Unčovský, and M. Oral, "In lens BSE detector with energy filtering," *Ultramicroscopy* **189**, 102–108 (2018). <https://doi.org/10.1016/j.ultramic.2018.03.015>
32. M. S. Hill and A. Gopinath, "Channel plate multiplier as an emissive mode detector in the SEM," *Rev. Sci. Instrum.* **48**, 806–808 (1977).
33. P. E. Russell and J. F. Mancuso, "Microchannel plate detector for low voltage scanning electron microscopes," *J. Microsc.* **140**, 323–330 (1985).
34. H. F. Helbig, R. D. Rydgren, and L. Kotorman, "Channel plate detection in low energy scanning electron microscopy," *Scanning Microsc.* **1**, 1491–1499 (1987).
35. M. T. Postek, W. J. Keery, and N. V. Frederick, "Low-profile high-efficiency microchannel-plate detector system for scanning electron microscopy applications," *Rev. Sci. Instrum.* **61**, 1648–1657 (1990).
36. L. Reimer, "Electron signal and detector strategy," in *Electron Beam Interactions with Solids for Microscopy, Microanalysis & Microlithography*, pp. 299–310 (Scanning Electron Microscopy, Chicago, 1984).
37. Keysight Technologies, "Keysight Technologies 8500 FE-SEM: Compact System for Low-Voltage, High-Performance Imaging, Data Sheet 5990-6183," 4 pp. (2014).
38. Keysight Technologies, "8500B Field-Emission Scanning Electron Microscope — Data Sheet 5992-0147," 4 pp. (2015).
39. Keysight Technologies, "U9320B 8500B Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) [Obsolete]," <https://www.keysight.com/jp/ja/product/U9320B/8500b-field-emission-scanning-electron-microscope-fesem.html> (閲覧日 : 2025-12-28) .

第2章 MCP 技術と用途探索の経緯

2.1 MCP 技術の歴史的背景と応用分野

MCP は、1960 年代に米 RCA 社などで開発された電子増倍素子である。多数の微細ガラスチャネルを並列に束ね、その内壁で二次電子放出を繰り返すことで、入射電子やイオンを高感度に検出できる点が特徴である。従来のディスクリット型電子増倍管が「電極列で一列に増倍する」構造であったのに対し、MCP は面内に多数の増倍チャネルを並べた「二次元の電子増倍スクリーン」として動作する。この構造により、高い増倍率と空間分解能を同時に得られることから、低照度観察や位置分解検出を必要とする装置で広く用いられてきた[1-4]。

歴史的には、第2世代以降のイメージンテンシファイア管に MCP が組み込まれたことが、応用の大きな広がり の 起 点 とな った。暗視装置では、入射フォトン を 光電面 で 電子 に 変換 し、MCP で 増倍 した の ち 蛍 光 スク リ ー ン で 再 び 光 に 変 える 構 成 が 標 準 的 に 用 い ら れ て い る。この方式は、夜間監視や暗視カメラ、天体観測など、極めて低い光量を扱う分野で事実上の基本技術となっており、「暗いものを見えるようにする」デバイスとしての MCP の役割を確立してきた[2-4]。図 8 にイメージンテンシファイアの動作原理を示す。

一方、分析・計測分野では、MCP はイオンや電子の検出素子として利用されてきた。TOF-MS では、飛行時間に応じて到来するイオンをナノ秒以下の時間分解で検出する必要があり、サブナノ秒オーダーの立ち上がり時間を持つ MCP 検出器が広く用いられている。二次イオン質量分析 (Secondary Ion Mass Spectrometry: SIMS) や MALDI イメージング (Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Imaging Mass Spectrometry: MALDI-IMS または MALDI-MSI) では、MCP と位置感度アノードを組み合わせることで、イオンの空間分布を二次元像として取得する手法が確立している。また、オージェ電子分光 (Auger Electron Spectroscopy: AES) や XPS などの表面分析装置においても、エネルギー分析器と組み合わせた電子検出器として MCP が用いられ、特定エネルギー・角度の電子を高効率に検出する役割を担っている[1-5]。

さらに、超高速光計測の分野では、ストリークカメラや MCP 内蔵光電子増倍管 (MCP-Based Photomultiplier Tube: MCP-PMT) において MCP が中核部品として機能している。ストリークカメラでは、光を電子に変換した後、時間軸に展開された電子像を MCP で増倍することで、ピコ秒～サブピコ秒領域の時間分解能を実現している[4, 6, 7]。図 9 にストリークカメラ⁹に内蔵されるストリーク管の動作原理を示す。MCP-PMT は、チェレンコフ光検出や陽電子放出断層撮影 (Positron emission tomography: PET) などで数十ピコ秒レベルのタイミング分解能が要求される用途に用いられ、MCP の高速応答性が活かされている[2, 4, 5, 6]。このように、MCP は「低光量」「高速」「位置分解」といった要求が重なる場面で選択されてきたデバイスである。

近年では、従来の鉛含有ガラスを用いた MCP に加え、環境規制への対応や寿命向上を目的として、鉛フリーガラスや原子層堆積 (Atomic Layer Deposition : ALD) による抵抗層・二次電子放出層形成を用いた新しい MCP が開発されている。図 10 に従来の MCP と ALD-MCP の構造の違い

⁹ 入射光を光電変換した電子を掃引電場で時間方向に偏向し、時間情報を位置情報に変換して記録する時間分解計測装置

いを示す。これらの技術により、MCP のタイミング特性や耐入射電荷量の改善が報告されており、MCP は現在も進化を続けるデバイスである[8-10]。

本研究で対象とする MCP は、以上のような歴史的・技術的背景の上に位置づけられる。暗視装置や質量分析装置などでは確立した用途が存在する一方で、SEM 分野での利用は研究用途の特殊な用途に限られている。本章では、MCP 素子の構造・製造プロセスとそれに由来する特性を概観したうえで、用途探索の経緯を整理し、本研究の焦点を質量分析分野と SEM 分野のいずれに定めるかに至ったプロセスを示す。

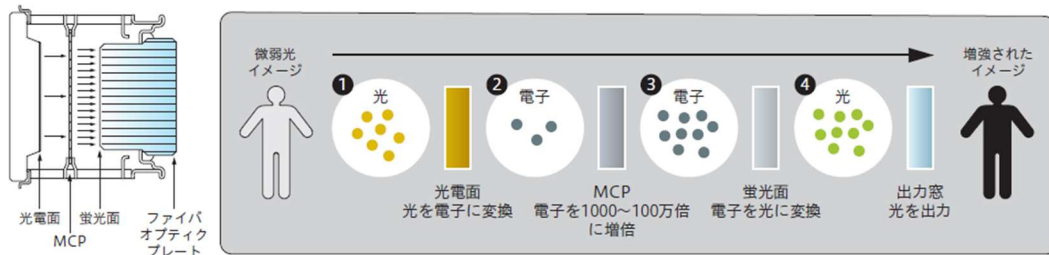


図 8 イメージインテンシファアの構造と動作原理

出典：浜松ホトニクス株式会社『イメージインテンシファア (Image intensifier)』カタログ (Cat. No. TII 0007J06, 2025 年 8 月), p. 3

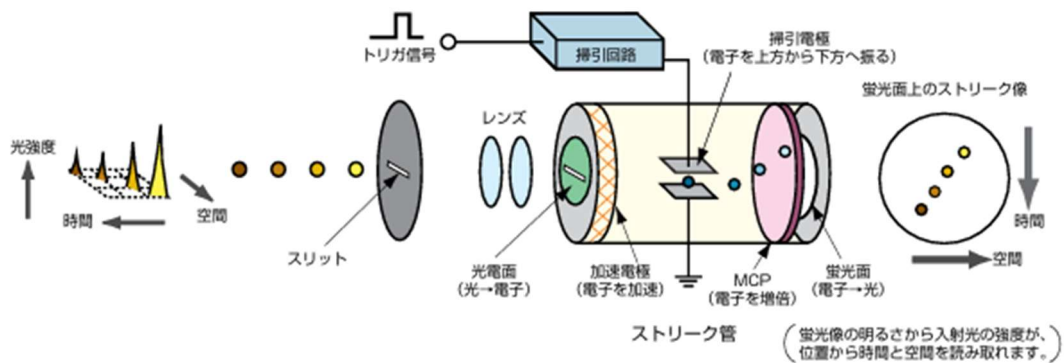


図 9 ストリーク管の動作原理

出典：浜松ホトニクス株式会社『ストリークカメラ ハンドブック』 (Cat. No. SHSS0006J01, 2008 年 2 月), p. 3

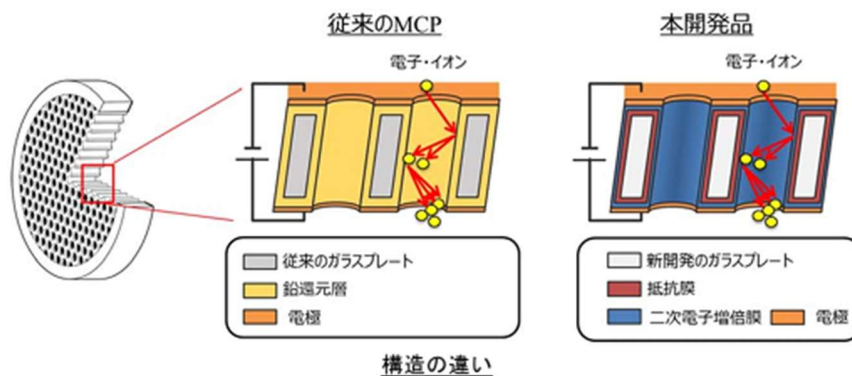


図 10 従来 MCP(左)と ALD-MCP(右)の構造比較

出典：浜松ホトニクス株式会社, ニュースリリース「RoHS 指令の規制物質不使用/低ノイズ, 高ゲインの高性能 MCP を開発」 (2020 年 9 月 30 日), p. 2

2.2 MCP 素子の構造と製造プロセス

MCP は本研究で扱う「検出器」の中核となる構成要素である。本節では、アセンブリ化される前段階の MCP 素子そのものについて、構造と製造プロセスの観点から整理する。

典型的な MCP 素子は、内径数 μm 程度のチャンネルが数十万～数千万本程度、板厚方向に貫通した構造を持つ。チャンネルは通常、板面に対して数度程度のバイアス角をもって傾けて配置され、一度チャンネル壁に衝突した電子がそのまま入口側へ戻りにくいよう設計されている。チャンネル長さとお径の比 (L/D)、チャンネル間ピッチ、開口率 (Open Area Ratio: OAR)、バイアス角といった幾何パラメータの組合せにより、増倍率、時間応答、ノイズ特性などが用途に応じて調整される [1-3]。

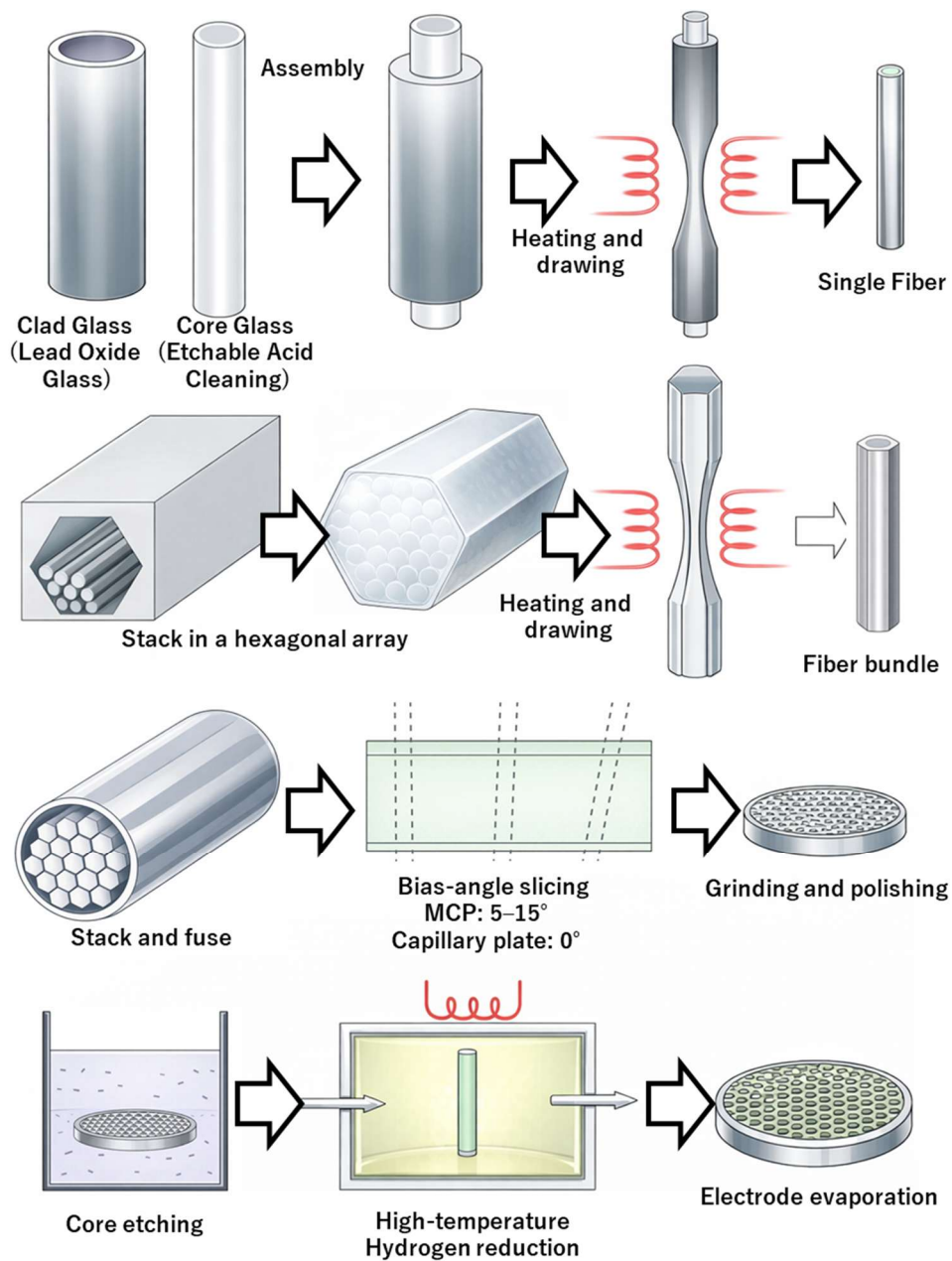


図 11 MCP の製造プロセスフロー

図 11 に MCP 製造プロセスの全体の流れを示す。代表的な製造プロセスは、ガラスプリフォームの作製、ファイババンドル(インゴット)の焼成・スライス、選択エッチングによるチャンネル形成、チャンネル内壁の抵抗層・二次電子放出層の形成、電極形成と仕上げ、という一連のステップから構成される。

まず、導電性を持たせたコアガラスと機械的支持を担うクラッドガラスからなるロッドを作製し、これを繰り返し引き伸ばし・束ねることで、多数の細径ガラスファイバを含むプリフォームを得る。この段階で、チャンネルの配列やバンドル全体の外形寸法がおおまかに決まる(図 12)。

次に、束ねたファイバを加熱・融着して一体化し、所望のチャンネル径・配列を有するガラスバンドルとする。これをプレート厚さに応じた長さのスライスし、両面を研磨することで、チャンネルが貫通した多孔質ガラス板を得る。その後、酸処理などによりコアガラス部分を選択的に溶解除去することでチャンネル孔が形成され、この工程でチャンネル径、チャンネル間ピッチ、開口率がほぼ決まる。(図 13)

チャンネル内壁には、ガラス組成の制御や熱処理・還元処理・金属酸化物の析出といった後処理により、抵抗層と二次電子放出層が形成される。これにより、チャンネル全体として均一な表面抵抗(典型的には $10^7 \sim 10^9 \Omega$ 程度)と安定した二次電子放出特性が付与される。表面抵抗が小さすぎると暗電流やノイズ電流が増大し、大きすぎるとチャンネルの電位回復が遅れて高レート動作が難しくなるため、この工程は増倍率と寿命を両立させるうえで重要である(

図 14)。

最後に、プレート両面に金属薄膜などの電極層を形成し、高電圧を印加できるようにする(図 15)。外形加工や面精度の調整、抵抗値・増倍率・暗電流といった素子単体の特性評価を経て、MCP 素子として完成する。このように、MCP の製造プロセスは、各工程がチャンネル径、L/D、比抵抗、開口率といった幾何・電気パラメータに直結しており、本研究で扱うエネルギー感度や寿命特性も、これら素子レベルの設計選択に強く依存している。

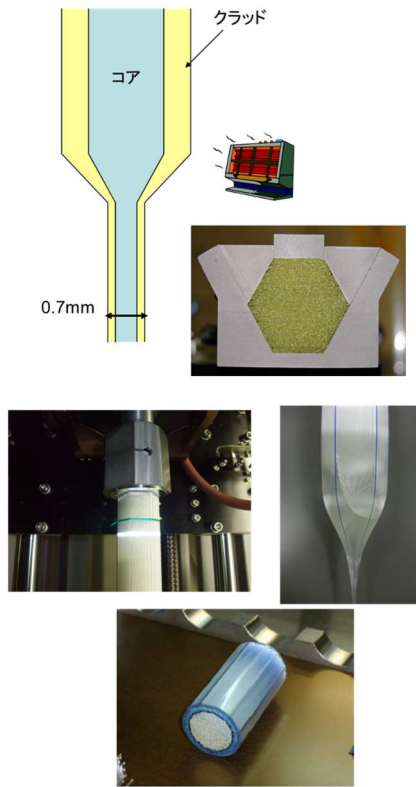


図 12 プリフォーム作製～ファイバーの整列

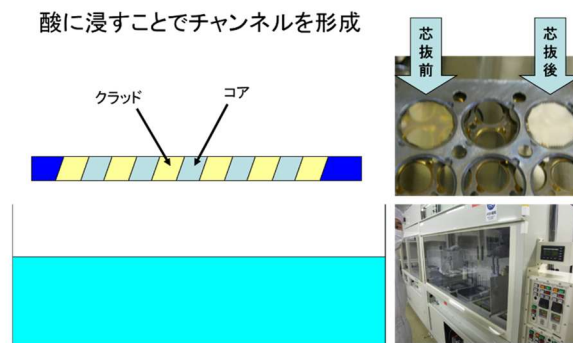
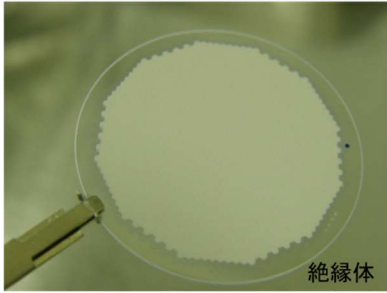
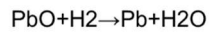


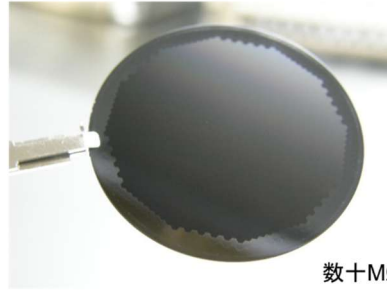
図 13 インゴットの作成, スライス, 研磨～酸処理



水素雰囲気中で還元



絶縁体



数十MΩ

図 14 還元処理

電極(インコネル)を蒸着

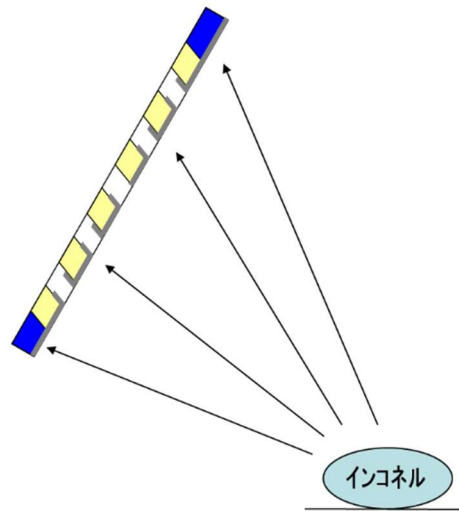
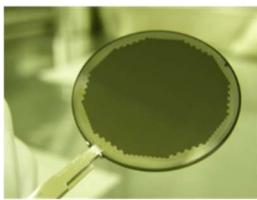


図 15 電極蒸着

2.3 MCP 素子の動作パラメータと基本特性

MCP 素子の動作は、各チャンネル内での二次電子放出と、それに対する電界加速による雪崩増倍率に支配される。本節では、本研究に関する素子レベルの基本特性として、印加電圧と増倍率、エネルギー感度特性、時間応答、位置感度、寿命とイオンフィードバックについて概説する。

図 16 に MCP ゲインの電圧依存性を示す。印加電圧と増倍率について、1 枚の MCP にはおおよそ 1 kV 程度の電圧が印加されることが多く、チャンネル長さや表面抵抗の設定に応じて $10^2 \sim 10^4$ 程度の電流増倍率が得られる。2 枚を反対向きに直列接続したシェブロン構成では、最大約 2 kV の印加により $10^5 \sim 10^6$ 程度の増倍率が得られ、高感度検出が可能となる[1, 2, 3, 4]。増倍率は印加電圧に対して指数関数的に変化するため、動作点の設定と電源安定性が重要である。

図 17 に MCP のエネルギー感度特性を示す。エネルギー感度特性については、チャンネル内壁への入射エネルギーが低すぎるとチャンネル内に十分侵入できず、高すぎるとチャンネル入口を通り抜けてしまうため、MCP の検出効率には数百 eV～1 keV 程度にピークを持つ特性が現れる[10, 11]。これは、50 eV 以下の SE 成分と、加速電圧近傍の高エネルギー-BSE 成分の中間に位置する帯域に対して高い感度を持ち得ることを意味しており、本研究で対象とする低エネルギー-BSE の検出にとって本質的な特徴である。

時間応答の面では、チャンネル長と電子の通過時間によって、サブナノ秒～数ナノ秒オーダーの高速パルス応答が得られる。適切なアノード構造と組み合わせることで、TOF-MS やストリーク計測に必要な時間分解能を実現できる[2, 4, 6, 7]。この性質は本研究の SEM 応用では直接用いていないものの、MCP が「高速検出器」として質量分析分野で広く用いられてきた理由の一つである。

位置感度については、チャンネルが面内にほぼ均一に並んでいるため、入射位置と出力位置の対応を保持しながら増倍が行われる。位置分解能はチャンネル径・ピッチ、アノード構造、読み出し回路により決まり、MCP 素子単体としては「二次元の電子増倍スクリーン」として機能する[1, 4]。

寿命とイオンフィードバックに関して、長時間動作や高出力電流条件では、チャンネル内のガス残留や逆行するイオンによって二次電子放出面が劣化し、増倍率が低下する。一般に、許容される総出力電荷量 (coulomb per cm^2) を管理することで寿命を保証する[2, 3, 9]。一方で、後述するアセンブリ構造の工夫により、イオンフィードバックを抑制してある程度低い真空度でも動作させる試みも行われている。本研究の事業化検討においては、この寿命特性が重要な設計条件となる。

このように、MCP 素子は、印加電圧と増倍率、エネルギー感度、中間エネルギー帯への感度、時間応答、位置感度、寿命といった複数の特性を併せ持つ電子増倍スクリーンである。本研究ではこのうち、とくに「数百 eV～1 keV 付近の電子に対する感度」と「寿命・真空度依存性」に着目し、SEM における未利用電子帯域へのアクセスと、実際の装置への組み込み可能性の両面から検討する。

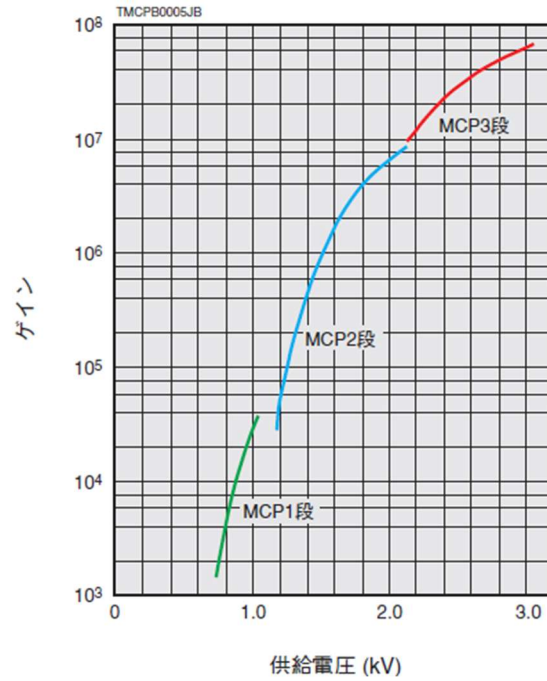


図 16 MCP ゲインの電圧依存性 (模式図)

出典：浜松ホトニクス株式会社『MCP アセンブリ (MCP ASSEMBLY)』(資料番号：TMCP0003J05, 2021 年 12 月), p. 2

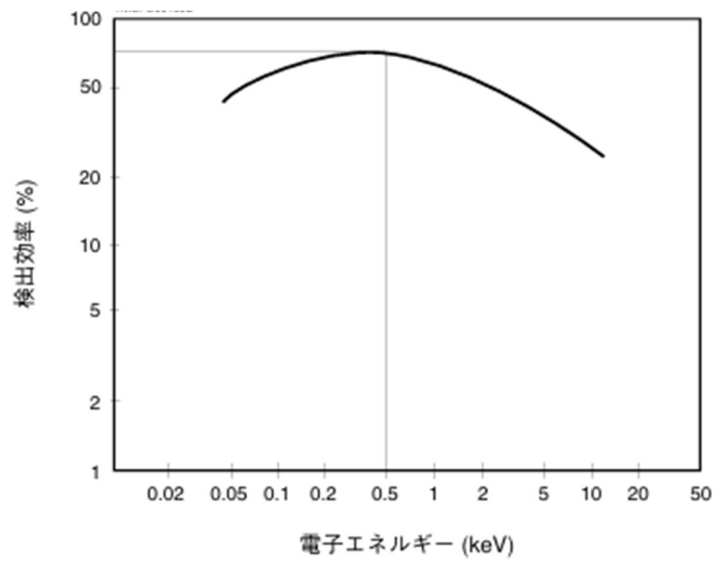


図 17 MCP のエネルギー感度特性

出典：浜松ホトニクス株式会社, 技術資料『MCP アセンブリ (MCP ASSEMBLY)』(TMCP9002J03, 2011 年 3 月), p. 9, 図 14

2.4 MCP アセンブリ/検出器としての構造と役割

本研究で実際に SEM に組み込むのは、MCP 素子そのものではなく、MCP 素子を機械構造・電極・アノード・真空インターフェースと一体化した MCP アセンブリ（検出器）である。本論文では、以降「MCP=素子」、「MCP アセンブリ=検出器」と用語を分けて使い、素子レベルと検出器レベルの議論を区別する。

一般的な MCP アセンブリは、1 枚または複数枚の MCP 素子（シングル、シェブロン、Z 構成など）、入力側・出力側電極および必要に応じたバイアス電極、単一もしくは多分割のアノード、真空フランジや保持機構、電氣的フィードスルー、電界形成用のシールド電極などから構成される [1-4]。これらを組み合わせることで、検出対象や装置構成に応じた検出器特性を実現する。図 18 に MCP アセンブリの一例を示す。

アセンブリ化の第一のポイントは、MCP 素子が持つ高速応答性を損なわずに外部回路へ信号を取り出すことである。インピーダンス整合された出力ポートや適切な終端抵抗を用いることで、サブナノ秒～ナノ秒領域のパルス波形を歪みなく伝送できるようになり、TOF-MS 向けの検出器ではこのようなパルス波形成技術が実用化されている。

第二のポイントは、アノード構造を工夫することで、多チャンネル・位置分解検出器として機能させられることである。アノードをピクセル状・ストリップ状に分割し、それぞれの出力を読み出すことで二次元の位置情報を得ることができる。X 線・オージェイメージングなどでは、MCP と位置感度アノード（マルチアノード、ストリップアノード、抵抗体アノードなど）を組み合わせた検出器が用いられており、MCP が二次元検出器として機能している代表例となっている。

第三のポイントは、電極配置や電位分布を工夫することで、要求される真空度の範囲を拡張できることである。MCP 出力側にメッシュ電極を追加し、イオン捕集用電極と信号読み出し電極を分けた三電極構造などを用いることで、1 Pa 程度の低真空域でもイオンフィードバックや放電を抑えつつ動作させるアセンブリが報告されている [12, 13]。図 19 にその構造を示す。このような低真空動作型アセンブリは、可搬型質量分析装置など真空系の制約が厳しい用途で有効であり、本研究における質量分析分野での用途探索の出発点にもなっている。

第四のポイントとして、MCP 出力をアバランシェダイオードと組み合わせたハイブリッド構成が挙げられる。MCP 側で微弱信号を高感度に検出し、半導体検出器側で高光量・高電荷領域を受け持つことで、一つの検出系で広いダイナミックレンジをカバーすることができる [14]。図 20 に構造を示す。

このように、MCP 素子（デバイス）と MCP アセンブリ（検出器）は明確に役割が異なり、前者がチャンネル構造そのものに由来する増幅・エネルギー感度・時間応答といった基本特性を担うのに対し、後者は真空中での機械的支持、高電圧印加、信号読み出し方式の選択を通じて、用途に応じた検出器特性を実現する。本研究で対象とする SEM 応用は、こうしたアセンブリ技術の延長として、「SEM 試料室という限られた空間・電界条件の中で」、「MCP の中間エネルギー帯への感度と入射方向応答性を活かしつつ」、「既存検出器との置き換えや併用が可能な検出器アセンブリを設計する」という課題設定に立脚している。

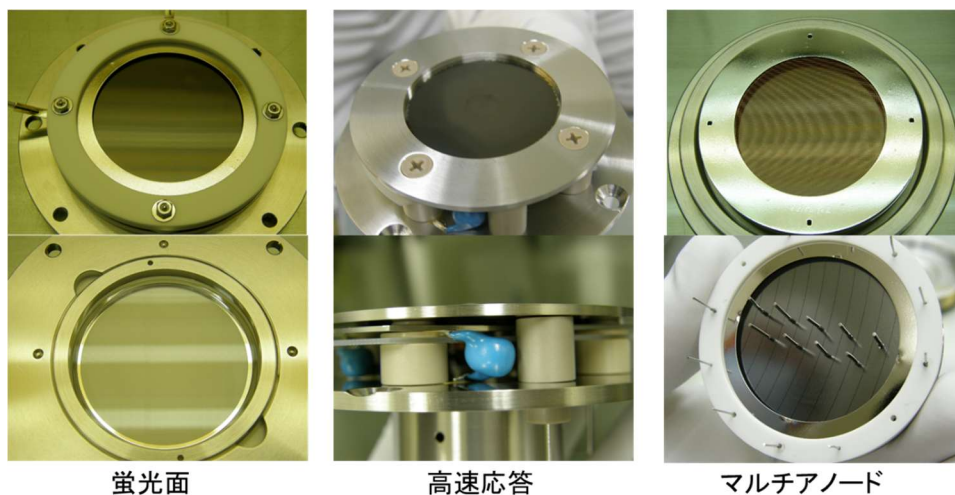


図 18 蛍光面, 高速応答型, マルチアノード型の MCP アセンブリ

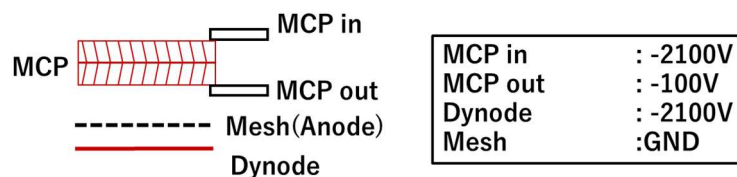


図 19 低真空対応 MCP アセンブリにおける Triode 構造

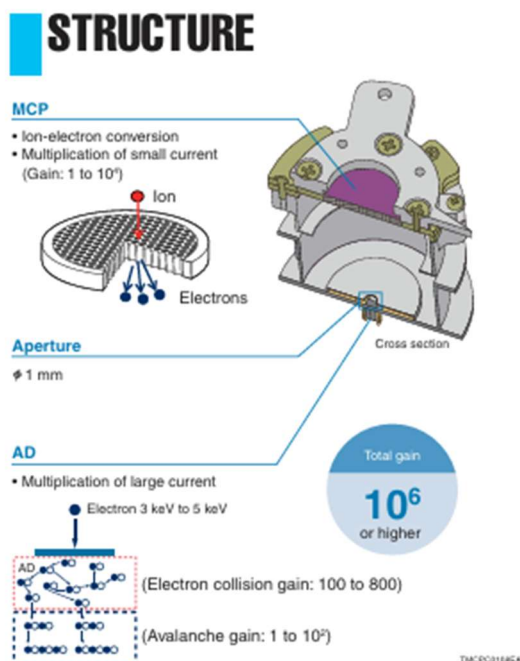


図 20 MCP とアバランシェダイオードを組み合わせたハイブリッド検出器の構造

出典：浜松ホトニクス株式会社『MCP ASSEMBLY MIGHTION® (F14845-11)』製品資料 (TMCP1045E01, 2019年9月), p. 1

2.5 用途探索の枠組み

本節では、前節までに整理した MCP 技術の背景と特性を受けて、著者が本研究のなかで検討した応用分野の候補とその位置づけを整理する。ここでは、MCP を「どの市場で、どのような価値提案とともに位置づけるか」という事業の視点から、用途探索の経緯を俯瞰する。

著者は当初、MCP を用いた新規用途の候補として、おおまかに次の二つの方向性を想定していた。第一に、所属企業で既に開発・製品化が進められていた低真空対応 MCP 検出器を核とし、可搬型質量分析計へ展開する方向である。第二に、MCP のエネルギー感度特性に着目し、SEM の検出系に適用することで、従来の検出器では十分に扱われてこなかったエネルギーへの新たな情報チャンネルとして活用する方向である。

2.5.1 では前者の質量分析分野における検討とその限界を、2.5.2 では後者の SEM 分野における着眼点と先行研究との関係を、2.5.3 ではこれら二本柱の比較を踏まえて本論文が SEM に焦点を定めるに至った理由をそれぞれ述べる。

2.5.1 質量分析分野における用途探索：既存事業の延長としての検討

著者の所属企業では、従来より MCP アセンブリの設計・開発を行っている。著者もその業務に携わっていた。

近年は約 1 Pa 程度の低真空下でも動作可能な MCP 検出器が開発・製品化されていた。一般的な MCP アセンブリが 10^{-4} Pa 台以下の高真空を前提としているのに対し、本検出器は電極構成を工夫することで低真空域でのゲイン低下や放電を抑制した構造を持ち、既に一部の可搬型質量分析装置に採用されている。

著者はこの「低真空対応 MCP」を起点として質量分析分野での用途拡大を検討した。具体的には、残留ガス分析 (Residual Gas Analysis: RGA) 用途への適用可能性を評価した。RGA は、真空チャンバー内のガス組成をオンラインで監視する装置であり、多くの場合、四重極質量分析計とチャンネルエレクトロンマルチプライヤ (Channel Electron Multiplier: CEM) などの検出器から構成される [5]。

適用可能性の判断をするための実験を、光産業創成大学院大学構内に設置されていた PrismaPlus QMG220 (Pfeiffer Vacuum 製) を用いておこなった。既設の CEM を低真空対応 MCP アセンブリに置き換えられるようにした。従来の CEM と MCP を同一チャンバー内で比較できるようにする構成を用意し、同一ガス環境下で両者の出力を比較できる試験系を構成した [15]。

図 21 に実際に構築した測定系を示す。

測定系概要

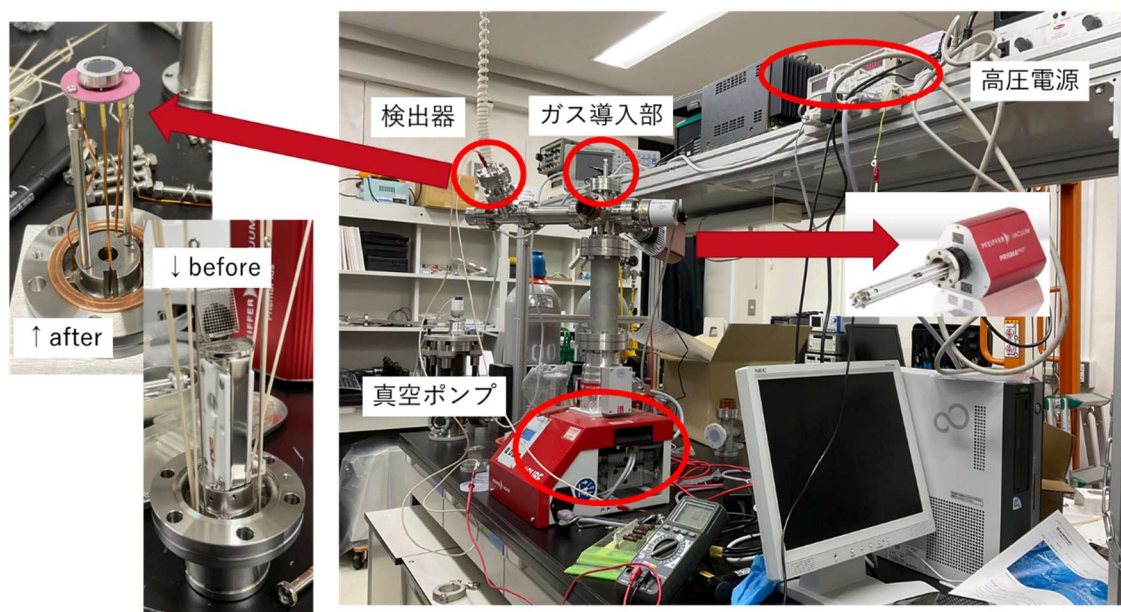


図 21 QMG220 を改造して構築した測定系

まず、高真空から低真空までチャンバー圧力を変化させながら、MCP アセンブリのダーク電流と質量スペクトルのベースライン変化を測定した。その結果、 10^{-4} Pa オーダーの高真空では、代表的な質量ピーク (m/z^{10} 28 など) に対して CEM と同等以上の応答が得られ、MCP アセンブリは RGA 用途でも十分な感度を示すことが確認された。一方で、圧力を $10^{-3} \sim 10^{-2}$ Pa、さらに $10^{-1} \sim 1$ Pa 程度まで低くすると、MCP アセンブリのベースライン電流が顕著に増大し、数 Pa 付近ではそれまで観測できていたピークがベースラインに埋もれてしまうことが分かった。

この要因を切り分けるため、専用の真空チャンバーに MCP アセンブリを設置し、到達圧力約 6.3×10^{-5} Pa から 1 Pa まで真空度を段階的に変化させながら、検出器電圧 V_{assy} とダーク電流の関係を測定した。図 22 に測定結果を示す。真空度が悪化するにつれてダーク電流が立ち上がる電圧が低電圧側にシフトし、1 Pa では $V_{\text{assy}} \approx 1.9 \sim 2.0$ kV 付近から数十 μA レベルの電流が流れ始めることが確認された。一方で、MCP ストリップ電流には大きな変化が見られず、異常電流は主として出力側のリークあるいは放電様の挙動によると解釈された。フィードスルーを SHV コネクタ付き高耐圧品に変更した場合でも同様の傾向が再現され、ブリーダ抵抗値や真空計由来の影響、導入ガス種の違いなども検討したが、低真空条件でのベースライン上昇を根本的に抑制するには至らなかった。

¹⁰ イオンの質量を電荷数で割った値（質量電荷比）であり、質量分析ではこの値に基づいてイオン種を識別する。

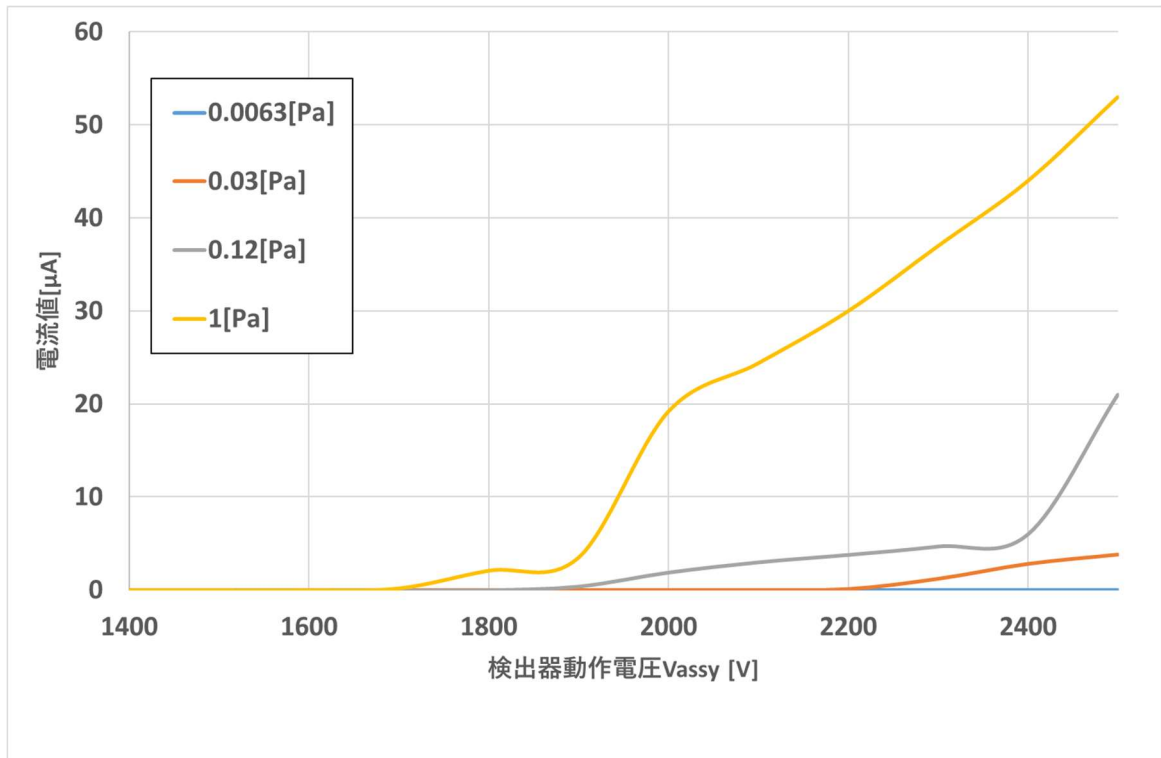


図 22 真空度を変更したときのダーク電流と動作電圧の関係

並行して、著者は可搬型質量分析装置の先行製品動向を調査した。その結果、リニアイオントラップ方式¹¹を用いた BaySpec 社 Portability™/Continuity™のように、10~20 kg クラスで ppb~ppt¹² レベルの検出限界を有する装置や、トロイダルイオントラップ¹³を用いたポータブルガスクロマトグラフ質量分析計 (Gas Chromatography-Mass Spectrometry: GC/MS)¹⁴ (GUARDION™) のように、14~15 kg クラスで数分オーダーの分析とバッテリー駆動を両立したシステムが既に市場に存在することが分かった [16, 17]。これらと比較すると、著者が構成した RGA システムはリアルタイム性を重視した構成ではあったものの、デスクトップ級の真空装置と外部電源を前提としており、小型化・可搬性の面で明確な優位性を示す構成とは言い難かった [18]。

以上より、RGA を含む質量分析分野において低真空対応 MCP 検出器を適用した場合、高真空側では一部ピークで CEM より高い応答が得られる一方、 10^{-2} ~1 Pa 程度の低真空域ではダーク電流とベースライン増大により有効なダイナミックレンジが制約されること、また装置全体とし

¹¹ 線形 (棒状) 電極で形成した電場によりイオンを捕捉し、捕捉したイオンを順次放出して質量分析を行う方式。

¹² ppb (10^{-9}) や ppt (10^{-12}) は微量濃度を表す指標であり、検出感度 (検出限界) の水準を示す際によく用いられる。

¹³ 環状 (トーラス) 形状の捕捉空間をもつイオントラップ方式であり、電極配置の工夫によりコンパクト化や捕捉容量の確保を狙った実装として用いられる。

¹⁴ ガスクロマトグラフ (GC) で成分を時間的に分離し、その後に質量分析計 (MS) で各成分の質量分析を行う分析装置。

でも既存の可搬型質量分析計・GC/MS と比較して決定的な差別化要因を提示しにくいことが明らかになった。著者はこれらの結果から、質量分析分野での検討は低真空対応 MCP というシーズの検証として一定の役割を果たしたものの、本論文の主題として継続するには至らないと判断し、以降は SEM 分野に焦点を移すこととした。

2.5.2 SEM 分野における用途探索：未利用エネルギー領域を対象とした新規検出器の検討

一方、SEM 分野での用途探索は、出発点において質量分析分野とは発想が異なる。MCP は電子検出に対する感度がおよそ 300~800 eV で最も高く、数 keV 以下の加速電圧における BSE や SE の直接検出に適した検出器であることが報告されている [11, 19]。このエネルギー帯は、従来の SEM 用検出器がカバーしてこなかった領域と重なる。

一般的な ET 検出器は、数十 eV 以下の SE 成分に高い感度を持つ一方、数百 eV 以上の電子に対する感度は低い。これに対して、シリコンフォトダイオード型 BSE 検出器は、加速電圧近傍の高エネルギー BSE に主として感度を持ち、1 keV 程度の BSE エネルギーに対する感度は高くない [20-24]。SEM における電子放出スペクトルは、50 eV 以下の SE の山と、加速電圧近傍の BSE の山からなることが知られており、その中間領域には従来の検出器では十分に取り出されてこなかった電子成分が存在している [20, 21, 23]。図 23 に SEM での観察時に試料から放出される電子エネルギースペクトルを示す。

このような状況に対して、先行研究では、試料ステージ周辺に MCP とバイアスグリッドを配置した噴水型二次電子検出器 (Fountain-type Secondary Electron Detector: FSED) が提案されている [25-28]。図 24 に FSED の概念図を示す。FSED では、試料近傍においた MCP の前段にグリッド電極を設け、グリッド電位を掃引しながら信号変化を測定することで、局所的な SE エネルギースペクトルを取得できることが報告されている。また、特定のエネルギー帯に対応するグリッド電位を選んで像化することで、エネルギー選別 SEM 像を得る手法も示されている。

ただし、FSED を含む MCP ベースの SEM 検出器はいずれも、特定の研究目的に向けた専用検出器として導入されたものであり、汎用 SEM の標準検出系として広く普及しているわけではない。市販の汎用 SEM においては、依然として ET 検出器による SE 検出と、シリコンフォトダイオード型検出器による BSE 検出を中心に構成されており、MCP の採用例は限定的である。

著者は、MCP のエネルギー感度特性と SEM における電子放出スペクトル構造を踏まえ、SE と BSE の二つの山の間に位置する「谷間」のエネルギー成分を「これまで像情報として十分に取り出しにくかった第三の情報チャンネル」として捉えた。この成分を、本論文では便宜的に「低エネルギー BSE」と呼び、MCP を用いて選択的に検出することで、新たな SEM 像コントラストや材料情報が得られる可能性があると考えた。

この着想の妥当性を確認するため、著者は筑波大学・関口教授へのヒアリングを行い、既存の検出器では十分に観察されていないエネルギー帯の電子が、試料凹凸や界面に特徴的なコントラストを与える可能性について意見交換を行った。関口教授らの研究では、低加速条件での SE/BSE 像の振る舞いを詳細に解析することで、従来の SE/BSE 分類では整理しきれないコントラスト成分の存在が示されており、MCP を用いたエネルギー選択的検出が新たな情報チャンネルとなり得ることが示唆されている [25, 27, 28]。

以上の背景から、SEM 分野での用途探索は、質量分析分野とは異なり、MCP のエネルギー感度特性と SEM 側の「谷間」のエネルギー領域とを結びつけることで、「低エネルギー BSE を第三の

情報チャンネルとして位置づける新しい検出器概念」を提案する試みとして位置づけられる。本論文ではこの観点に基づき、MCP を用いた SEM 検出系の構成と評価を主要な検討対象とする。

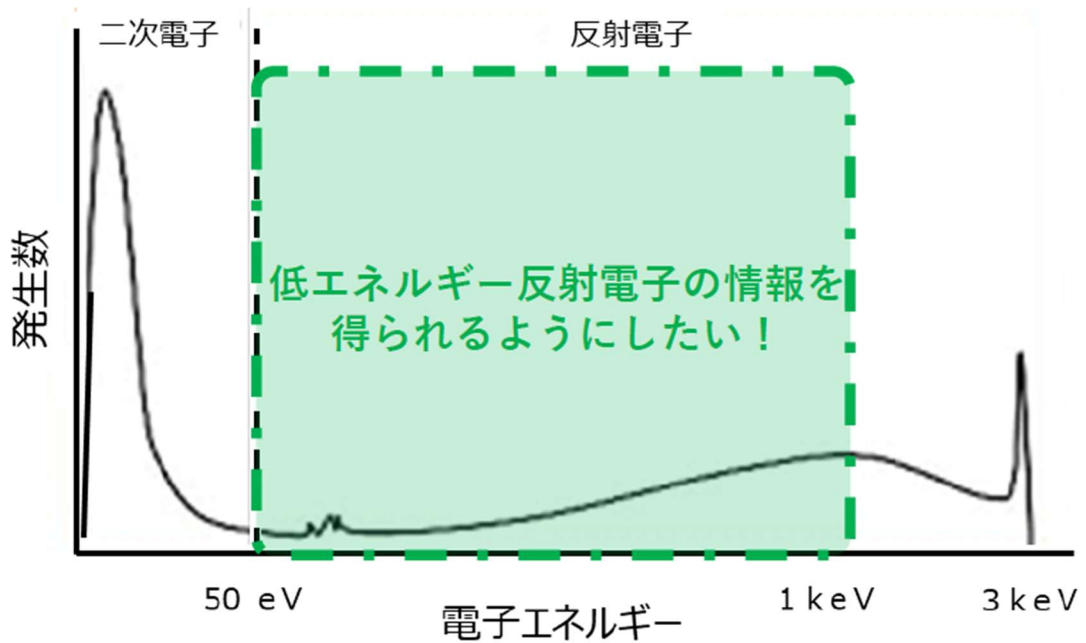


図 23 SEM における電子エネルギースペクトル

本図は SEM に関する一般的な理解に基づき、Goldstein et al., *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, 4th ed., Springer (2018), Fig. 3.17 を参考に筆者が独自に作成したものである（縮尺には対応しない）。図中の緑枠は、本研究において低エネルギー反射電子の情報取得を目標とするエネルギー範囲を示す。

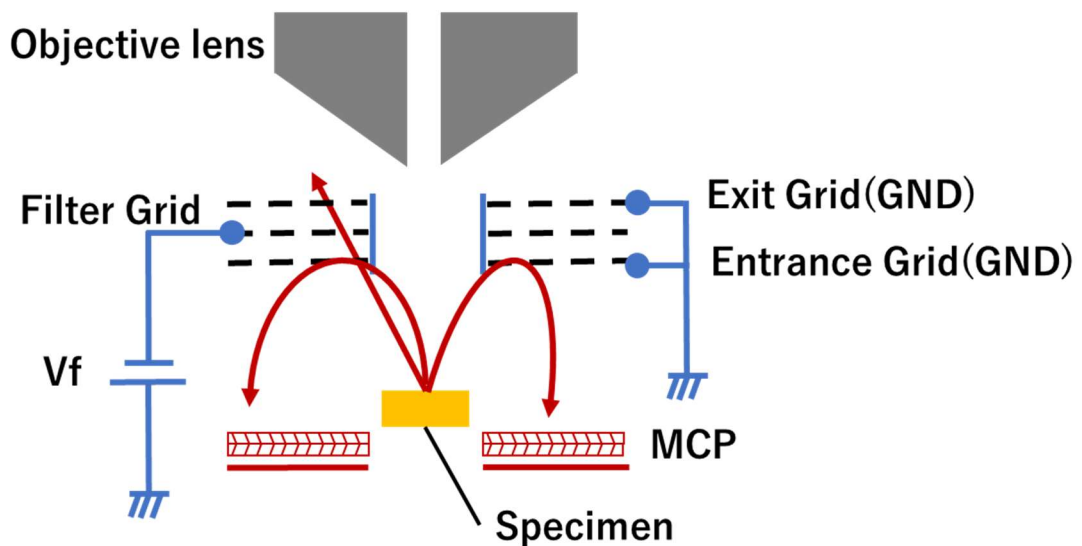


図 24 FSED（噴水型二次電子検出器）の概念図

2.5.3 本論文で SEM にフォーカスする理由

著者は当初, MCP を用いた用途探索の候補として, 低真空対応 MCP イオン検出器を核とする質量分析分野と, 低エネルギー-BSE を対象とした SEM 分野の二本柱を想定していた。質量分析分野については, 低真空対応 MCP 検出器を残留ガス分析計に組み込んだ比較実験や, 専用チャンバーを用いたダーク電流評価, ポータブル質量分析装置・GC/MS の先行製品との比較検討を通じて, 低真空域ではダーク電流・ベースラインの増大により有効なダイナミックレンジが制約されること, 装置全体としても既存製品に対して決定的な差別化要因を提示しにくいことが明らかになった。これらの結果から, 質量分析分野における検討は, 低真空対応 MCP というシーズ発信の用途探索として一定の役割を果たした段階で, 本研究の主題としてはクローズすることとした。

一方, SEM 分野での検討は, MCP のエネルギー感度特性と, 従来の ET 検出器やシリコンフォトダイオード型検出器では取り出されてこなかった低エネルギー-BSE 帯との対応づけに立脚している。ここでは, 単に MCP を既存検出器の代替として用いるのではなく, 「SE と高エネルギー-BSE の間に位置する成分を, MCP を用いてどこまで拾い上げ, どのような像が得られるか」を検証する。

第2章の参考文献

1. J. L. Wiza, “Microchannel plate detectors,” *Nucl. Instrum. Methods* 162, 587–601 (1979).
2. T. Gys, “Micro-channel plates and vacuum detectors,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 787, 254–260 (2015).
3. Hamamatsu Photonics K.K., “Microchannel plate (MCP),” technical information TMCP1046E.
4. A. S. Tremsin, “Unique capabilities and applications of microchannel plate detectors,” *Radiat. Meas.* 130, 106228 (2020).
5. Hakuto Co., Ltd., “Key devices for mass spectrometry”.
6. Hamamatsu Photonics K.K., *Photomultiplier Tubes: Basics and Applications*, 4th ed. (Hamamatsu, 2017), Chap. 10 “MCP-PMTs”.
7. I. Yamazaki, N. Tamai, H. Kume, H. Tsuchiya, and K. Oba, “Microchannel - plate photomultiplier applicability to the time - correlated photon - counting method,” *Rev. Sci. Instrum.* 56, 1187–1194 (1985). <https://doi.org/10.1063/1.1138027>
8. C. D. Ertley, O. H. W. Siegmund, J. Hull, *et al.*, “Performance studies of atomic layer deposited microchannel plate electron multipliers,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 912, 138–142 (2018).
9. W. Cao, W. Chen, W. Sun, *et al.*, “High-sensitivity and long-life microchannel plate processed by atomic layer deposition,” *Nanoscale Res. Lett.* 14, 153 (2019).
10. D. Miehl, *et al.*, “Lifetime and performance of the very latest microchannel-plate photomultipliers,” *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A* 1049, 168047 (2023).
11. A. Apponi, F. Pandolfi, I. Rago, G. Cavoto, C. Mariani, and A. Ruocco, “Absolute efficiency of a two-stage microchannel plate for electrons in the 30–900 eV energy range,” *Meas. Sci. Technol.* 33, 025102 (2022).
12. Hamamatsu Photonics K.K., “MCP (microchannel plate) assembly F14844,” product information, accessed 6 Dec 2025.
13. Hamamatsu Photonics K.K., “Our triode MCP assembly is a breakthrough that delivers high gain (multiplication factor) even at low vacuum levels,” *Photonics and the Fight Against Covid-19*, News 2020 Vol.1 (R&D Interview).
14. Hamamatsu Photonics K.K., “MCP assembly F14845-11 (MIGHTION),” product information, accessed 6 Dec 2025.
15. Pfeiffer Vacuum GmbH, PrismaPlus® QMG 220 Compact Mass Spectrometer, Data Sheet QMG 220 / PrismaPlus™, Pfeiffer Vacuum (approx. 2010s).
16. BaySpec Inc., *Portable Mass Spectrometers Portability™ and Continuity™ – Product Brochure / Portable Mass Spectrometry System*, BaySpec (2017 以降).
17. Torion Technologies Inc. / Smiths Detection, *Torion GUARDION-7 Portable GC–Toroidal Ion Trap Mass Spectrometer (GC-TMS) – Technical Information / Evaluation Reports*, Torion / NFSTC .
18. J. A. Contreras *et al.*, “Hand-portable gas chromatograph-toroidal ion trap mass

- spectrometer (GC-TMS) for detection of hazardous compounds,” *J. Am. Soc. Mass Spectrom.* **19**, 1425–1434 (2008).
19. A. Müller, N. Djurić, G. H. Dunn, and D. S. Belić, “Absolute detection efficiencies of microchannel plates for 0.1–2.3 keV electrons and 2.1–4.4 keV Mg⁺ ions,” *Rev. Sci. Instrum.* **57**, 349–353 (1986).
 20. J. I. Goldstein et al., *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, 4th ed. (Springer, 2018).
 21. L. Reimer, *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*, 2nd ed. (Springer, 1998).
 22. T. E. Everhart and R. F. M. Thornley, “Wide-band detector for micro-microampere low-energy electron currents,” *J. Sci. Instrum.* **37**, 246–248 (1960).
 23. JEOL Ltd., “Secondary electrons and backscattered electrons,” *JEOL SEM Terminology*, online glossary, accessed 6 Dec 2025.
 24. K. Kumagai and T. Sekiguchi, “Sharing of secondary electrons by in-lens and out-lens detectors in low-voltage scanning electron microscope equipped with immersion lens,” *Ultramicroscopy* **109**(4), 368–372 (2009).
 25. K. Sekiguchi et al., “SEM observation of p–n junction in semiconductors using fountain secondary electron detector,” *Surf. Interface Anal.* **48**, 1097–1102 (2016).
 26. T. Agemura, H. Iwai, and T. Sekiguchi, “Development of fountain detectors for spectroscopy of secondary electrons in SEM,” *Phys. Status Solidi C* **14**, 1700057 (2017).
 27. T. Agemura, 「走査電子顕微鏡の検出系評価と噴水型二次電子検出器の開発」, 筑波大学博士論文 (2018).
 28. T. Sekiguchi, T. Agemura, and H. Iwai, 「噴水検出器による半導体 pn 接合のエネルギー分解二次電子像」, 2018 年日本表面真空学会学術講演会・表面科学学術講演会要旨集, 1Bp08, p.10 (2018).

第3章 SEMにおける検出系の課題と設計要件

第2章では、「低エネルギーBSE」が既存検出器では像情報として取り出しにくいことを確認した。1-3 kVの低加速SEMでは、Si-PDは、1 keV以下のBSEに対する感度がほとんどない。

本章の目的は、低加速観察で必要となる検出系の設計要件を明らかにすることである。そのために、SEMの装置と像形成の仕組み、ならびに検出配置と検出器の構造・動作原理を説明する。

まず、SEMの装置構成と観察パラメータを概観し、SE・BSEのエネルギー分布・角度分布とアクセプタンスの関係を整理する。ついで、既存インレンズ/アウトレンズ検出器が低エネルギーBSE帯の検出にどのような制約をもつかを示す。そのうえで、低エネルギーBSE帯を、同一視野・同一幾何のまま取得するための要件をまとめ、MCPによるアウトレンズ検出方式へとつなげる。

3.1 SEM装置の概要と像形成の基本

3.1.1 SEMの基本構成と像形成

SEMは、電子源、収束レンズ系、走査コイル、検出器で構成される。SEMは細く絞った電子プローブを試料表面上で走査し、各画素位置で発生する信号を読み出して画像化する。図25に一般的なSEM構成図を示す。図26と図27に示すように、電子ビームを試料に照射することで様々なエネルギーの電子やX線が放出される。SEMで用いられる観察信号はSEとBSEである。SEは表面数ナノメートルから放出される低エネルギー電子で、表面形状の起伏に敏感である。BSEは試料中で散乱されて表面から出射する電子で、組成や密度の違いを反映する[1-4]。

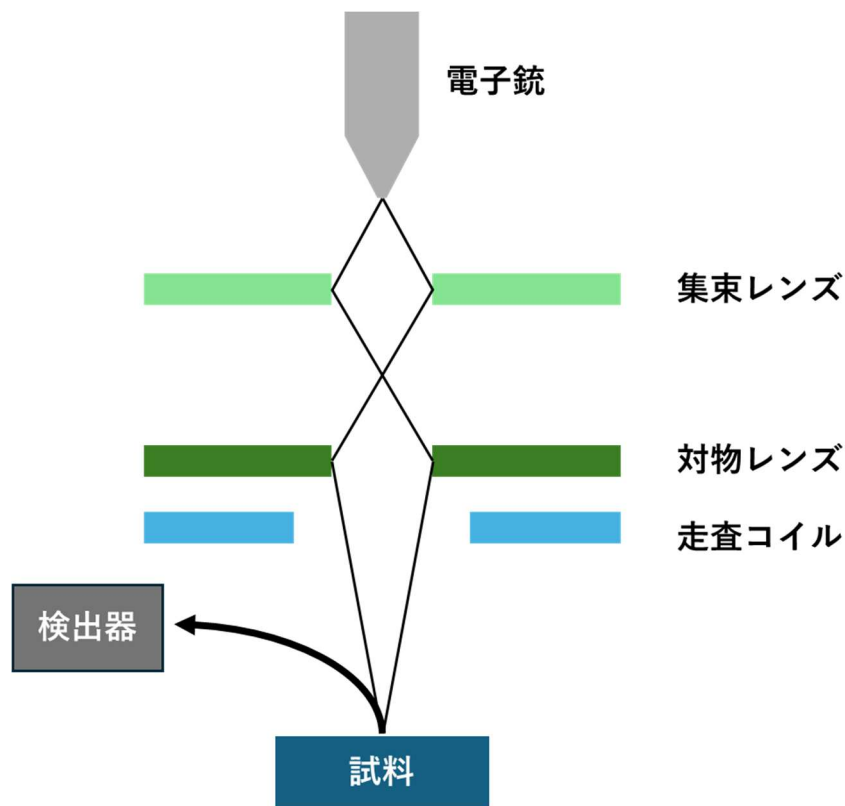


図 25 一般的な SEM 模式図

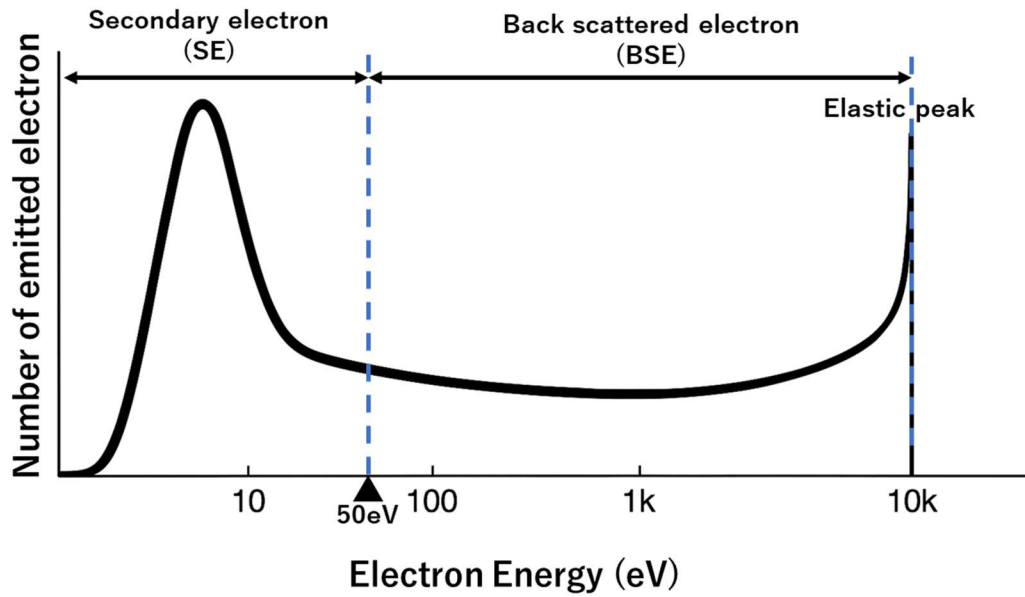


図 26 試料から放出される電子のエネルギースペクトル模式図

(一次電子のエネルギーが 10 keV の場合)

本図は SEM に関する一般的な理解に基づき, Goldstein et al., *Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanalysis*, 4th ed., Springer (2018), Fig. 3.17 を参考に筆者が独自に作成したものである (縮尺には対応しない)。

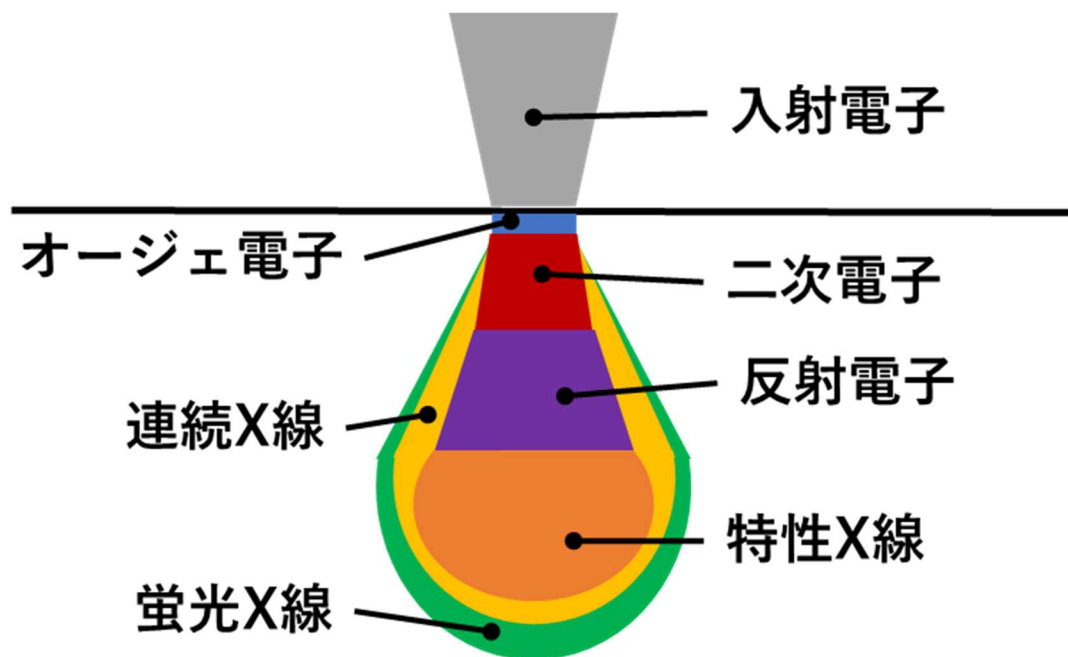


図 27 SEM 観察時に試料から放出される電子

3.1.2 検出方式：インレンズとアウトレンズ

信号電子の検出方式は大きくインレンズ型とアウトレンズ型に分かれる。図 28 に示すように、インレンズ型は対物レンズの内部に検出器を置く方式である。強いレンズ電場(または磁場)が試料からの電子を引き込み、短い作動距離で操作できるため高分解能を得やすい。一方で、どの角度・どのエネルギーの電子が検出されるかはレンズ設計に依存し、ユーザーが外部から把握・制御しにくい。また、角度・エネルギーの異なる電子が装置内部で混ざりやすく、実効的な選別条件を明示しにくい。

アウトレンズ型は対物レンズ外に検出器を置く方式で、代表例は ET 検出器と Si-PD である。図 29 にアウトレンズ検出系を示す。ET 検出器は正電位のコレクタ電極で電子を引き込み、電子をシンチレータで光に変換して PMT で読み出す。試料から離れた位置に置くことができるが、設置位置の依存性が大きい。Si-PD は 1keV 以上の BSE に感度がある。薄型であり、試料と対物レンズの間に挿入して使用される。

3.2 でインレンズ/ET/Si-PD の原理と制約を確認する。

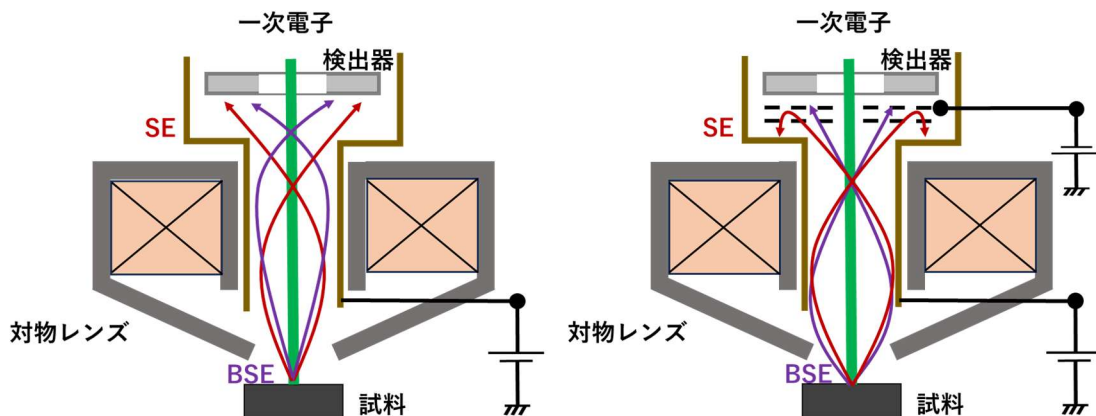


図 28 インレンズ検出系の例

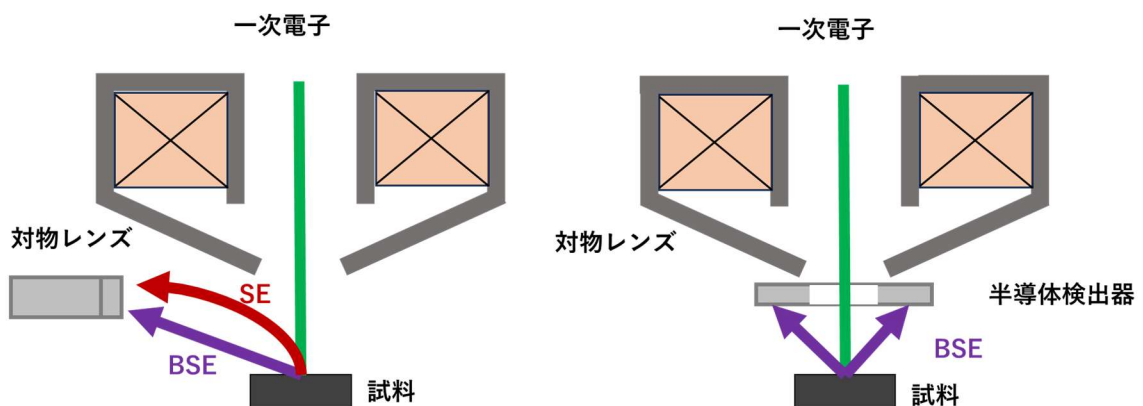


図 29 アウトレンズ検出系の例

3.1.3 アクセプタンスとアクセプタンスマップ

アクセプタンスとは、試料から放出された電子のうち、どの放出角度とエネルギーの電子が検出器に到達して信号に寄与するかを指す。装置の幾何配置と電位条件、レンズ電場や遮蔽の影響で、この範囲が決まる[1, 2]。

アクセプタンスマップは、エネルギーと放出角を軸に取って表示される。図 30 にアクセプタンスマップの概念図を示す。

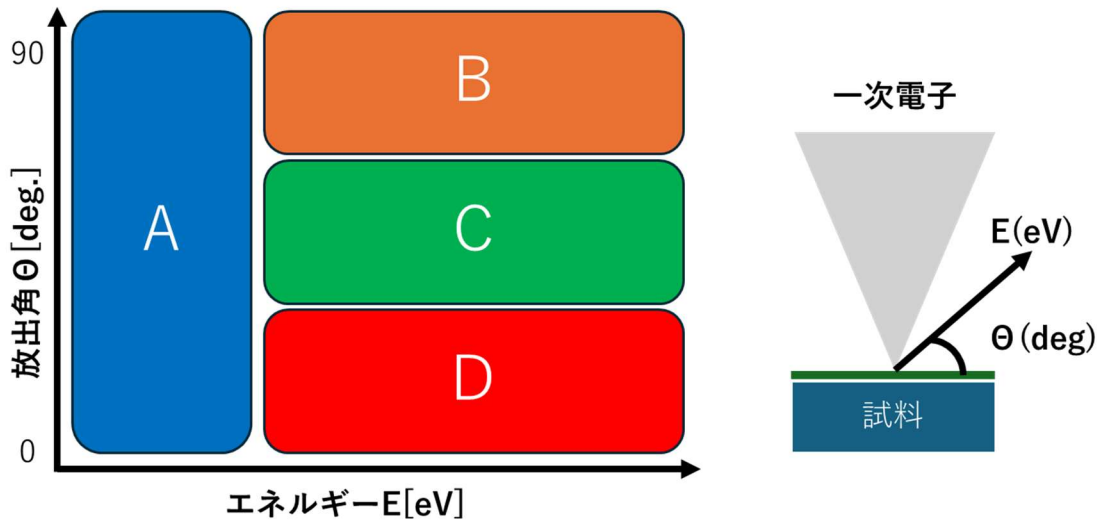


図 30 アクセプタンスマップ概念図

3.1.4 観察パラメータ

SEM の代表的なパラメータを以下に示す。実際の SEM 観察では、観察対象や目的に応じて、様々な条件を調整する必要がある。

- 加速電圧 (V_{acc})
一次電子の入射エネルギーを決める。加速電圧が高いほど電子が試料内で散乱される領域が増え、BSE の脱出深さが深くなる。加速電圧が低いほど表面の情報が多くなり、帯電・損傷を抑えやすいが、BSE の寄与は小さくなる。
- ワーキングディスタンス (作動距離, working distance: WD)
対物レンズ下端と試料表面の距離。分解能 (プローブ径) や、検出器が電子を受け取れる角度範囲 (検出角/検出立体角) に効くため重要である。WD を短くすると分解能は上がる一方、アウトレンズ検出器の信号は小さくなる。
- プローブ電流 (I_p) / ドウェルタイム (画素あたりの滞在時間)
1 画素に入る電子数を決め、S/N やコントラストに影響する。本論の条件比較では、 I_p とドウェル時間を一定にそろえる。

3.1.5 低加速観察の利点と課題

低加速観察 (おおむね 1~3 kV) にはいくつかの利点がある。帯電や損傷を抑えやすく、電子の相互作用体積が小さいため、表面近くの情報に敏感になる。微細な凹凸や浅い組成差を抜き出すことができる。樹脂や有機材料、微細配線など、帯電や損傷に弱い試料も観察しやすく、導電コートを避けたい場合にも適している[5, 6]。

一方で、低加速では SE (0~50 eV) と低エネルギー-BSE (50 eV~1 keV) の寄与が相対的に高くなる。信号は弱く、S/N 比が下がりやすい。さらに、検出系のアクセプタンスがこの帯域を十分にカバーしていない場合、取りこぼしが生じる。インレンズ検出では検出条件がレンズ設

計に強く依存し、外部から把握しにくいいため、角度情報とエネルギー情報が混ざりやすい。アウトレンズ検出は幾何条件を明示しやすいが、従来の多くは低エネルギーBSE帯の検出ができない。図 31 に高加速観察と低加速観察を比較したものを示す。結果として、同一視野で角度とエネルギーの寄与を切り分けて評価するには、50 eV~1 keV の低エネルギーBSE帯域を検出できる方式が必要になる [2, 5, 6]。

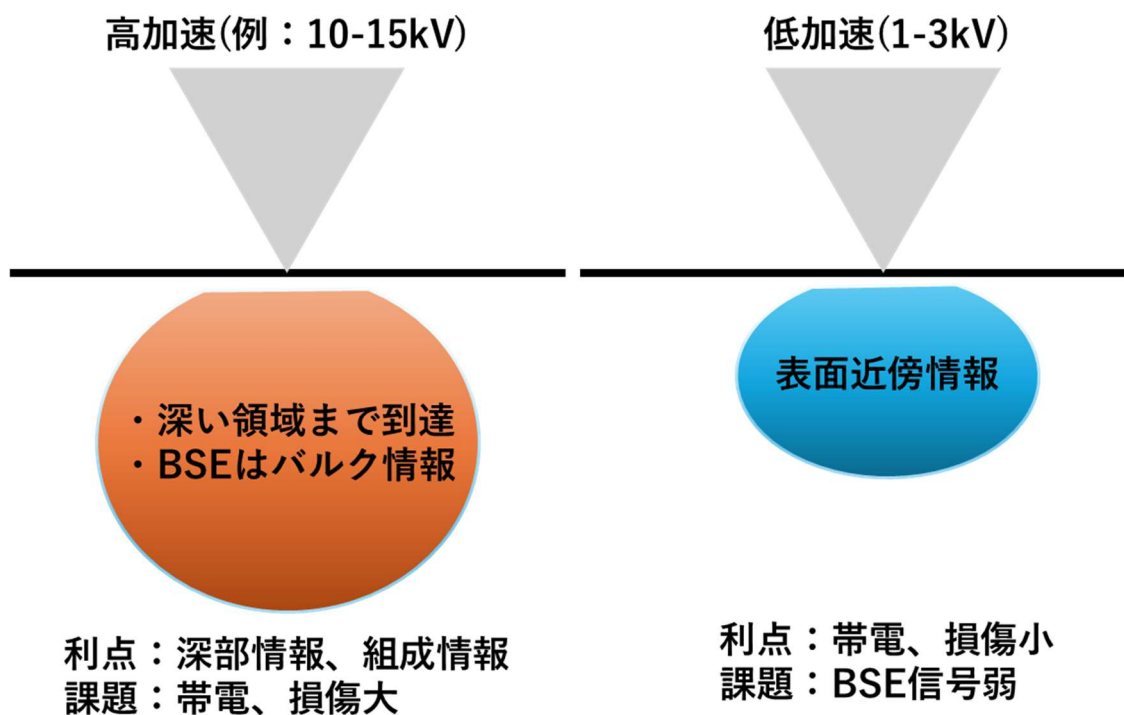


図 31 高加速観察と低加速観察の比較

3.2 低加速 SEM で角度・エネルギー情報を分けるための検出条件

3.2.1 低加速観察での課題

低加速観察（加速電圧 1-3 kV）では、試料から戻る電子のうち 0-50 eV の SE と 50 eV-1 keV の低エネルギー-BSE の寄与が相対的に大きくなる。この二つが同一視野で混在すると、像コントラストの由来（形状由来か組成・散乱履歴由来か）の判別が難しくなる。像解釈を安定させるには、同一視野・同一幾何（配置・電位）を保ったまま、SE と低エネルギー-BSE を切り分けて取得できることが望ましい。

現状の一般的な検出系では、この切り分けが十分に達成されていない。これは、既存検出器の構造や動作原理に起因する。

3.2.2 既存インレンズ/アウトレンズ検出器の構造・動作原理と課題

3.2.2.1 インレンズ検出器

インレンズ検出は、対物レンズ内の電磁場で電子を取り込み、レンズ内またはその近傍で検出する方式である。作動距離を短くでき、空間分解能に有利という長所がある。

一方で、どの角度・どのエネルギーの電子が取り込まれるかはレンズ電場に強く依存する。実効の検出角・検出エネルギーはユーザー側で独立に規定・固定することが難しい。SE と BSE, BSE 内のエネルギー成分が混在しても、その比率を外部から同一幾何のまま制御する手段を持たない。角度・エネルギーごとの寄与を読み分けるには不向きである [1, 2, 7]。

3.2.2.2 アウトレンズ ET 検出器

ET 検出器は、コレクタ電極で電子を引き込み、高電位のシンチレータに加速して衝突させ、生じた発光を光電子増倍管で電気信号に変換する [2, 8]。コレクタ電極は試料から数 cm は離れている。SE を含む強い信号が得られる点が長所である。図 32 に ET 検出器の構造を示す。

ET 検出器は前段にエネルギー弁別機構を持たない。コレクタ電位を変えると電場分布と取り込み条件が同時に変化し、同じ検出幾何を保ったままエネルギー帯域だけを切り替えて検出できない。さらに、シンチレータや光学部材は高電位を必要とするため、試料に十分近づけにくい。

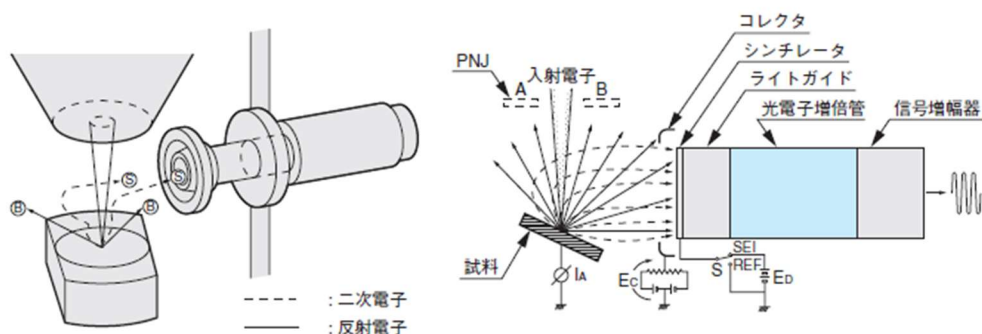


図 32 ET 検出器の構造

出典：浜松ホトニクス株式会社 編集委員会『光電子増倍管—その基礎と応用—』第 4 版（平成 29 年 4 月 1 日）、TOTH9001J04, 図 14-17

3.2.2.3 アウトレンズ Si-PD 検出器

Si-PD は、入射した電子が pn 接合の空乏層で電子・正孔を生成し、それを電流として読み出す固体検出器である。図 33 に Si-PD の構造を示す。薄型で実装が容易なため、アウトレンズ上方の限られたスペースにも収めやすく、短作動距離に適合しやすいという長所がある。

短所は、1 keV 以下の電子に対する感度がほとんどないことである[9]。低エネルギー電子はシリコン内での到達深さが浅く、表面近傍の不感層やパッシベーション層で損失される。その結果、低加速観察では BSE 信号が小さく、S/N 比とコントラストが悪くなる。さらに、素子単体には角度やエネルギーの選別機構がなく、同じ幾何条件のまま帯域だけを切り替えることはできない。図 34 に示すように、セグメント化によって検出範囲を限定することが可能である[10]。

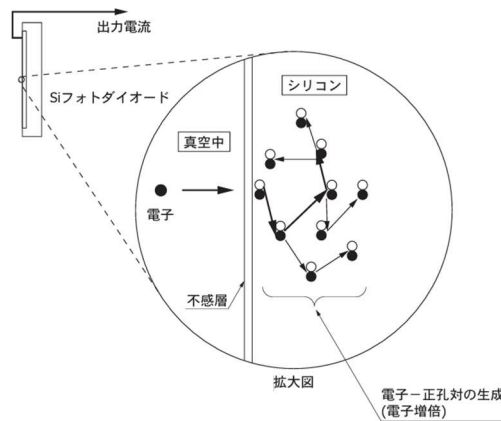


図 33 Si-PD の構造

出典：浜松ホトニクス株式会社『電子線検出用 Si フォトダイオード S11141-10 / S11142-10』製品資料 (Cat. No. KSPD1083J01, 2014 年 11 月), p. 3 より抜粋。

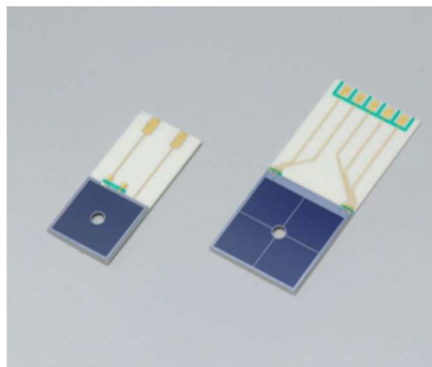


図 34 1ch シリコンフォトダイオード(左)と 4 分割シリコンフォトダイオード(右)

出典：浜松ホトニクス株式会社『電子線検出用 Si フォトダイオード S11141-10 / S11142-10』製品資料 (Cat. No. KSPD1083J01, 2014 年 11 月), p. 1 より抜粋。

3.2.3 検出系に求められる仕様

低加速観察で角度とエネルギーの情報を分けて読み取る新しい検出器の目標を以下に設定する。ここで整理する条件は、1-3 kV の低加速 SEM で、同じ視野・同じ観察条件のまま角度とエネルギーの情報を分けて読み取るために、アウトレンズ BSE 検出系に求められる要件である。主なポイントは次の 3 つにまとめられる。

1. 低エネルギー-BSE を同じ幾何条件で取得できること
2. 位置・角度・エネルギーの影響を分けて評価できること
3. 短い作動距離にも対応できること

現状の検出方式には問題がある。インレンズ検出は設計に依存していて選別の自由度が低く、ET 検出器は近接配置や選別性に制約がある。さらに、Si-PD は 1 keV 以下の低エネルギー BSE に対する感度がほとんどなく、この帯域の寄与を安定して読み出すには適していない。このため、これら 3 つの条件を満たす新しいアウトレンズ検出方式が必要になる。

3.3 課題に対するアプローチ：MCP によるアウトレンズ検出

3.3.1 MCP を採用する理由

既存のアウトレンズ検出器では、低加速観察で鍵となる 50 eV~1 keV の BSE を十分に扱えない。Si-PD は素子構造上、1 keV 以下の低エネルギー-BSE に対する感度が十分ではない。ET は取り込み量を確保できても帯域が選べないため、同一検出条件のまま低エネルギー成分だけを取り出すことが難しい。

MCP は数百 eV 近傍で感度が高い。低エネルギー側にも応答するため、低エネルギー-BSE を拾いやすい[11, 12]。さらに SE にも応答するため、「必要に応じて SE を抑え、低エネルギー-BSE を選ぶ」という拡張が、前段にフィルタを設ければ可能になる。すなわち、『低エネルギー-BSE を同じ幾何条件で取得できること』と『位置・角度・エネルギーの影響を分けて評価できること』いう 3.2 で示した要求仕様に、MCP は適合する。

本研究では、この MCP とグリッドを組合せた構成をアウトレンズ位置に組み込む。Si-PD とほぼ同じ位置に薄型 MCP アセンブリを配置し、グリッド電位だけを変えてエネルギー下限を制御する構成を用いる。これにより、3.2.3 で整理した条件 (1) 低エネルギー-BSE を同一幾何条件で取得すること、(2) エネルギー成分を分けて評価すること、(3) 短い作動距離との両立、を同時に満たすことを目指す。

3.3.2 基本構成（薄型 MCP アセンブリと前段グリッドの組合せ）

本研究では、Si-PD と同位置に設置できる MCP アセンブリを設計し、前面にバイアスグリッドを付加する。グリッドに負電位 V_g を与えると、閾値未満の低エネルギー側電子が遮断され、ハイパス動作によって入射帯域を設定できる。グリッド電位 V_g で切り替え、同一視野・同一検出条件で得た像で差分をとることで、SE、低エネルギー-BSE、高エネルギー-BSE の寄与を読み分ける。

薄型化は短い WD との両立に不可欠である。また、遮蔽構造と適切な配線設計により、高電圧部の漏れ電場を低減し、像の再現性と検出条件の一貫性を維持する。図 35 に模式図を示す。

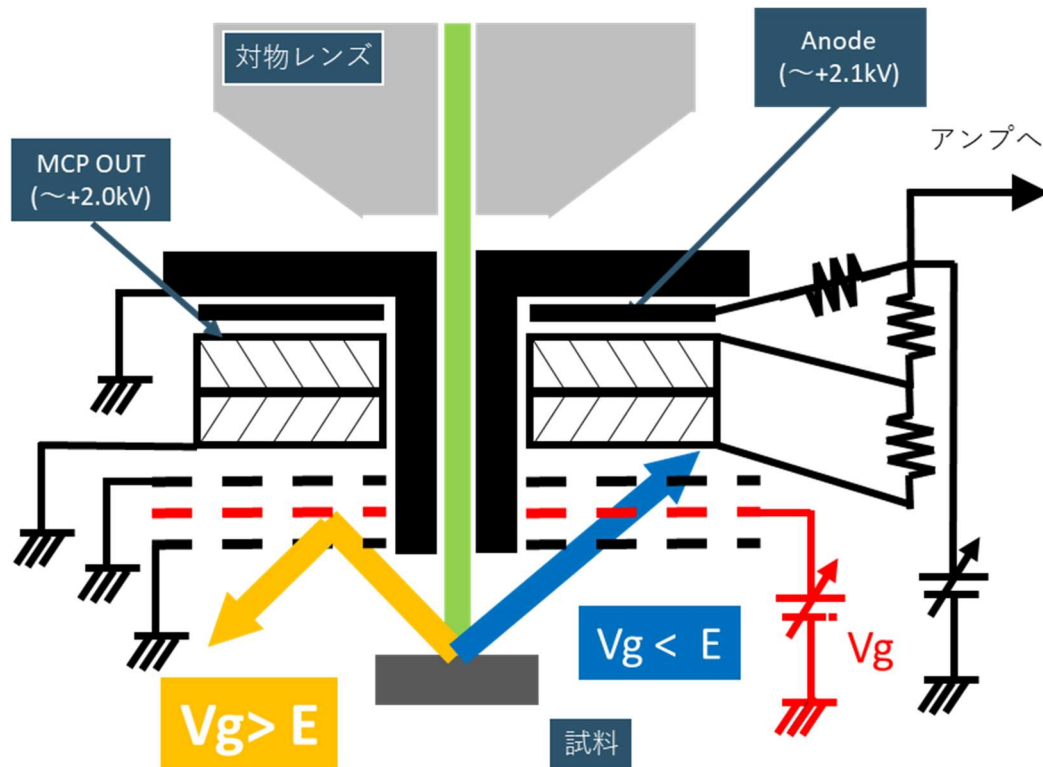


図 35 Si-PD と置き換える MCP アセンブリ模式図

3.3.3 想定される利点と検証項目

本構成では、低加速 SEM で重要となる低エネルギーBSE を確保し、グリッド電圧でエネルギー閾値を変えながら、同一条件で取得した複数像から各帯域の寄与を読み分けることを狙う。その要点として、(i) 低エネルギーBSE を取得できること、(ii) 閾値を電圧で切り替えられること、(iii) 同一条件の複数像に基づいて帯域寄与を判別できること、の3点を示す。MCP はSE にも感度を持つため、一つの検出器でSE とBSE の双方を観察でき、必要に応じてSE を抑えて低エネルギーBSE を強調できる点も実装上の利点である。

検証では、低加速条件での信号強度・S/N・コントラストなどを評価する。同一視野で段階取得した像を用いる差分・組み合わせ手順の具体は第4章で示す。角度選別については、後続の第5章(多面配置)で扱い、エネルギーと角度の情報を段階的に統合する。

本章では、低加速観察で角度・エネルギー情報を読み分けるために必要な要件を整理し、既存検出系で満たし切れていない点を示した。その上で、MCP アセンブリとグリッドを組み合わせ、同一検出条件のもとでエネルギー帯を切り替えて評価する方針を示した。次章では、この構成に基づく取得手順と結果を示し、Si-PD との比較を含めて有効性を検証する。

第3章の参考文献

1. J. I. Goldstein et al., *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, 4th ed., Springer (2018).
2. L. Reimer, *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*, 2nd ed., Springer (1998).
3. JEOL Ltd., “Secondary electrons and backscattered electrons,” JEOL SEM Terminology, online glossary, accessed 6 Dec 2025.
4. O. C. Wells, “Backscattered electron image (BSI) in the scanning electron microscope,” *Scanning Electron Microsc.* 1, 747–771 (1977).
5. J. B. Pawley, “Low voltage scanning electron microscopy,” *J. Microsc.* 136, 45–68 (1984).
6. D. C. Joy and C. S. Joy, “Low voltage scanning electron microscopy,” *Micron* 27, 247–263 (1996).
7. K. Kumagai and T. Sekiguchi, “Sharing of secondary electrons by in-lens and out-lens detectors in low-voltage scanning electron microscope equipped with immersion lens,” *Ultramicroscopy* 109(4), 368–372 (2009).
8. T. E. Everhart and R. F. M. Thornley, “Wide-band detector for micro-microampere low-energy electron currents,” *J. Sci. Instrum.* 37, 246–248 (1960).
9. A. Šakić, L. K. Nanver, T. L. M. Scholtes, C. Th. H. Heerkens, G. van Veen, K. Kooijman, and P. Vogelsang, “Silicon photodiodes for high-efficiency low-energy electron detection,” *Proc. ESSDERC*, pp. 102–105 (2010).
10. A. B. Munden and D. E. Y. Walker, “A silicon detector for the Stereoscan SEM,” *J. Phys. E: Sci. Instrum.* 6, 916–920 (1973).
11. A. Apponi et al., “Absolute efficiency of a two-stage microchannel plate for electrons in the 30–900 eV energy range,” *Meas. Sci. Technol.* 33, 025102 (2022).
12. A. Müller et al., “Absolute detection efficiencies of microchannel plates for 0.1–2.3 keV electrons and 2.1–4.4 keV Mg⁺ ions,” *Rev. Sci. Instrum.* 57, 349–353 (1986).

第4章 倒立型検出器による低加速条件における BSE 像の取得と SE/BSE の分離

4.1 本章の目的

この章では, MCP 検出器を実機 SEM に取り付け, ①低加速条件で BSE 検出器として使用できるかを確認する。加速電圧 1-3 kV で Si-PD 検出器と比較し, 得られる信号量と像の違いを評価する。

次に, MCP 前段のグリッド電極をハイパスフィルターとして用い, 異なる条件で取得した像どうしを引き算する。その結果として, ②SE 像と BSE 像を分離できるかを確認する。以上により, 第1章で述べた, MCP を用いることで従来の Si-PD では得られていなかった検出を実機 SEM で検証する。

4.2 倒立型検出器の構成

4.2.1 検出器構造

本研究で試作した MCP 検出器の外観と構成概略を図 36 に示す。この検出器は, 試料の上側に設置されて下向きで BSE を受ける。そのため, 以降はこの検出器を「倒立型検出器」と呼ぶ。図 37 に示すように, 検出器全体の厚さは約 5 mm である。有効 MCP 直径は $\phi 20$ mm, 中心ホール直径は $\phi 6$ mm である。中心部 $\phi 8$ mm はデッドエリアとなっている。

MCP の入射面側には, ハイパスフィルターとして機能するグリッド構造を設けた。フィルター一部は三枚のグリッドから成り, 中央の G2 にバイアス電圧 V_g を印加し, 上下の G1 および G3 は接地 (GND) する構成である。G2 に負電圧 V_g を印加すると, エネルギーが V_g 未満の電子は反射され, それ以上のエネルギーを持つ電子のみが MCP に入射する。G1 および G3 は, このバイアス電位が周囲空間に広がることを抑えるシールドとして機能する。

SEM は Schottky 電界放出型 SEM SU7000 (日立ハイテク製) を用いた。図 38 に外観を示す。倒立型検出器は従来の Si-PD 型アウトレンズ BSE 検出器と同位置に配置した。WD は 12 mm。この配置により, 試料から放出された電子のうち天頂角 $18^\circ \sim 40^\circ$ の成分が MCP に入射して像を形成する。

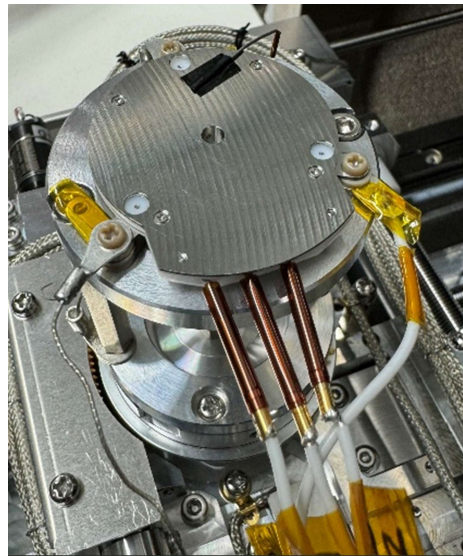
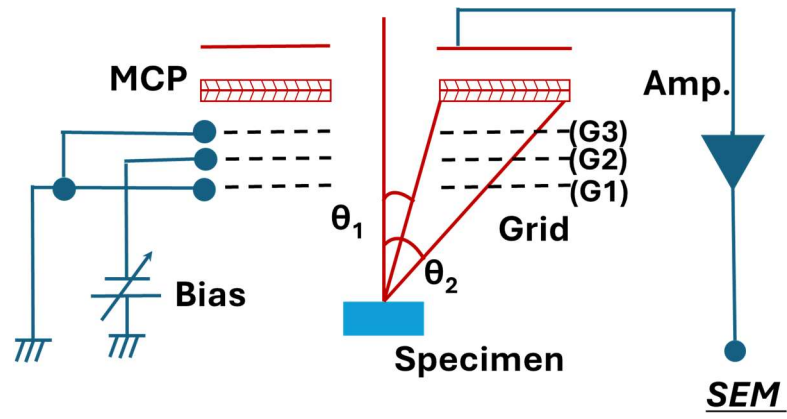


図 36 倒立型検出器の構成概略図と外観写真



図 37 倒立型検出器の厚さ



図 38 FE-SEM SU7000(日立ハイテク製)

4.2.2 倒立型 MCP 検出器の設計上の工夫：薄型化,高電圧配線と漏れ電場対策

倒立型検出器の設計では、「Si-PD と同位置に収まること」と、「グリッド電圧で検出できるエネルギー閾値を切り替えることができること」という二つの条件を同時に満たす必要があった。所属企業には, SEM 用 MCP アセンブリ F2223-21SH があり, 本研究ではこれを比較対象とした。に示すように, F2223-21SH はグリッド 1 段構成で, 全体厚さは 8.6 mm である。これに対して, 本研究で設計した倒立型 MCP 検出器は, グリッドを 3 段としつつ, 全体厚さを約 5 mm とした。従来品より約 3.6 mm 薄く, 同じ配置でより短い WD をとることができる。さらに, グリッド電圧を変化させることでエネルギー弁別を行うことができる構成とした。

高電圧印加に伴う漏れ電場を抑えるため, MCP 電極およびアノードへの高電圧配線は, チャンバー内で局所的な強電界や放電が生じないようにした。検出器各部分で適切に GND 電位をとった。高電圧部以外をできるだけ等電位に保つことで, 試料から放出された電子の飛行経路に電場勾配が加わらないようにした。本検出器は, 試料近傍のコレクタ電極に正電位を印加して電子を引き込む ET 検出器 [1] とは異なり, 試料空間に強い引き込み電場を形成しない構成としている。そのため, 試料から出た電子を, そのままの軌道で MCP に導くことができる。

図 40 に SU7000 で倒立型検出器を動作させるためのセットアップを示す。SU7000 は標準では MCP 用の高電圧電源や読み出しアンプを備えていない。そのため, 本研究では MCP 用とグリッド用の 2 系統の高電圧電源を試料室外に用意し, 真空外に配置した電流入力型アンプでアノード信号を増幅する構成とした。検出器からの配線は, 試料室内 (真空チャンバー) から専用に作製した高耐圧フィードスルーを介して真空外に引き出し, 外部の高電圧電源およびアンプ

に接続した。アンプの出力は SU7000 の外部信号入力端子(AUX 端子)に入力し, 外部信号として処理することで MCP 信号を SEM 像として取得した。運用の中で, アンプの設定が像のコントラストやノイズに影響すること, フィードスルーに耐圧不良が生じ得ることが分かった。高電圧絶縁と信号処理系を含めて検出器全体を一つの系として設計する必要があることを認識した。この経験から, 高電圧電源・アンプ・検出器をひとまとまりの検出モジュールとして構成する考え方に至り, 第 6 章で述べる評価用 MCP 検出モジュールの検討につながった。これらの薄型化, 高電圧配線と遮蔽構造, 漏れ電場対策, 外部電源・アンプとの接続方法に関する検討は, 本検出器の設計において著者が中心となって実施した内容である。

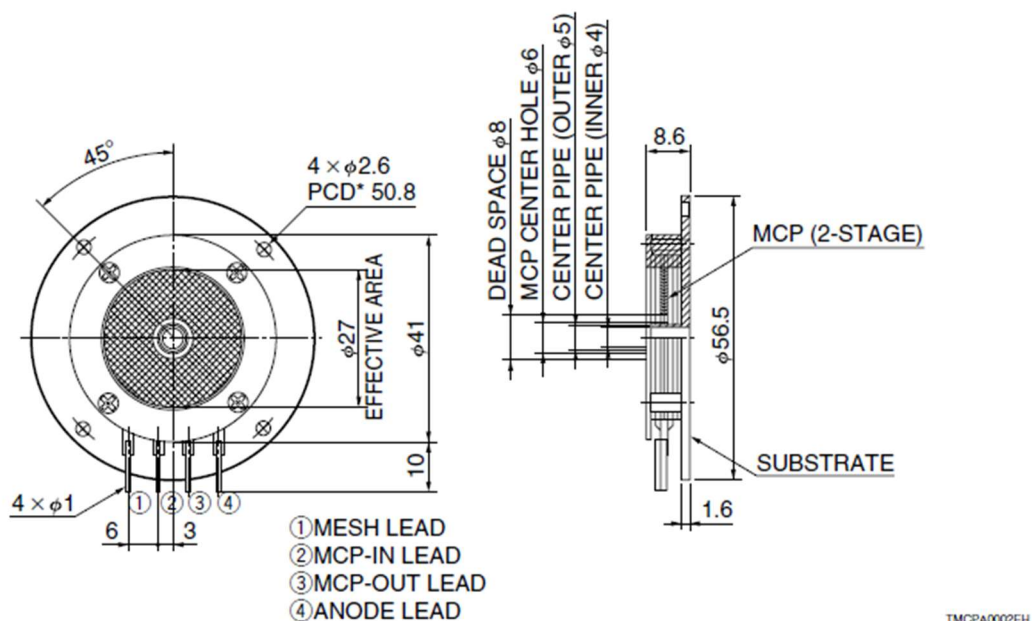


図 39 F2223-21SH 外形寸法図

出典：浜松ホトニクス株式会社『MCP ASSEMBLY F2223-21SH』製品資料 (TMCP1001E04, 2015 年 5 月), p. 2 より抜粋。



図 40 SU7000 で倒立型検出器を動作させるためのセットアップ

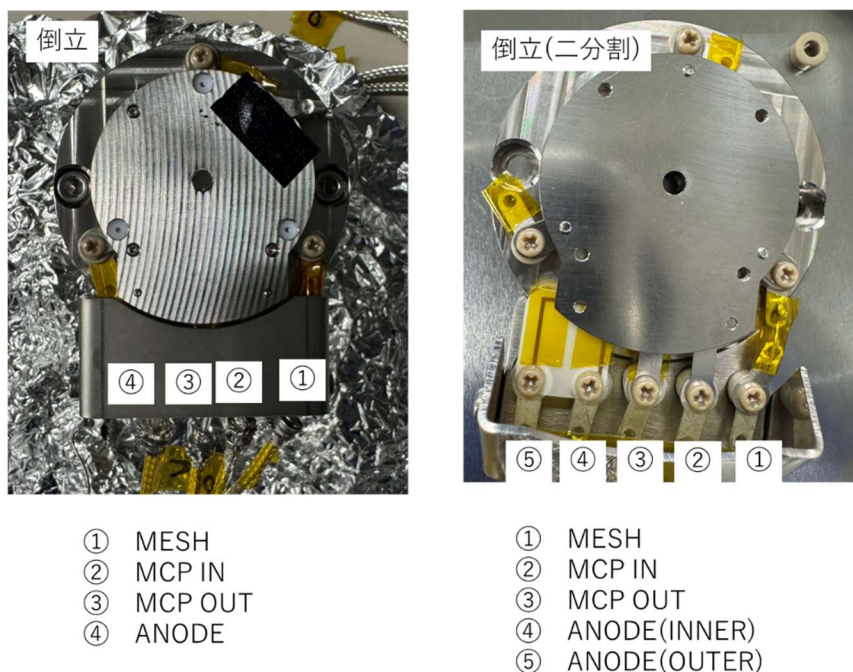


図 41 シングルアノード倒立型(左)と二分割マルチアノード倒立型(右)

4.2.3 マルチアノード倒立型 MCP 検出器の試作

本研究では、倒立型 MCP 検出器の派生構成として、同心円状に二つのアノードを配置したマルチアノード型倒立検出器も試作した。図 41 に外観写真を示す。基本構造は倒立型検出器と同一であり、MCP の前段グリッド構成や高電圧印加方法は共通である。アノード部のみを中心側アノードと外周側アノードの二つに同心円状に分割し、それぞれから独立に信号を読み出せる構成とした。これにより、MCP 出口面上での入射位置を中心側/外周側の二領域に分けて読み出す、位置分解検出を意図した構成として設計した。

この検出器については、試作後に基礎的な動作確認と信号読み出しの評価を行ったが、本論文で他の検出器と同列に比較・議論できるレベルの結果には至っていない。そのため、本章では構造の概要と設計意図の紹介にとどめ、位置分解能を含む詳細な性能評価及び応用に関する検討は本論文では扱わない。

4.2.4 エネルギー帯域の定義

本研究では、電子のエネルギー帯域を次のように定義する。

- $E < 50 \text{ eV}$: 二次電子 (SE)
- $50 \text{ eV} < E < 1000 \text{ eV}$: 低エネルギー反射電子 (低エネルギーBSE)
- $1000 \text{ eV} < E$: 高エネルギー反射電子 (高エネルギーBSE)

前段グリッドに負電圧 V_g を印加することで、エネルギーが V_g 未満の電子を遮断するハイパスフィルターとして動作する。したがって、 V_g の設定により、 $0\text{-}50 \text{ eV}$ の SE 帯域、 $50 \text{ eV}\text{-}1 \text{ keV}$ の低エネルギーBSE 帯域、 1 keV 以上の高エネルギーBSE 帯域の成分比を制御し、同一視野・同一受理条件のもとでエネルギー帯域を切り替えることができる。

4.3 検出器出力特性の比較

MCP 検出器が低加速条件で BSE 検出器として十分な信号を得られるかどうかを確認する。Si-PD と MCP の検出器出力特性について、ファラデーカップを用いて比較した結果を示す。

4.3.1 測定方法

一次電子ビームをファラデーカップに入射させて電流値を測定し、同じビーム条件で検出器に直接入射させたときの出力信号を記録した。加速電圧 0.1-15 kV の範囲で測定した。SEM のビーム電流は 0.8 nA とした。図 42 に測定概念図を示す。

4.3.2 測定結果

図 43 に、加速電圧と検出器出力の関係を示す。縦軸・横軸とも対数スケールで表示した。Si-PD および MCP それぞれの入力/出力比は加速電圧 1 kV における値で規格化している。

Si-PD では、加速電圧の上昇に伴い出力が比例して増加し、低加速領域では出力が小さかった。これは、Si-PD が入射電子エネルギーに比例した電荷を生成するため、エネルギーの低い電子では生成電荷が小さくなることによる。この結果は参考文献[2]の結果と一致する。

MCP では、0.1-15 kV の範囲で出力がほぼ一定であり、1 kV における値に対して大きな変動は見られなかった。MCP は 500 eV 付近に検出感度のピークを持ち、100 eV 程度の電子も検出できることを確認した。この結果についても参考文献[3, 4]の結果と一致する。

この比較から、Si-PD の信号は BSE の総エネルギー量を反映し、MCP の信号は BSE の数を反映するという違いが確認できる。

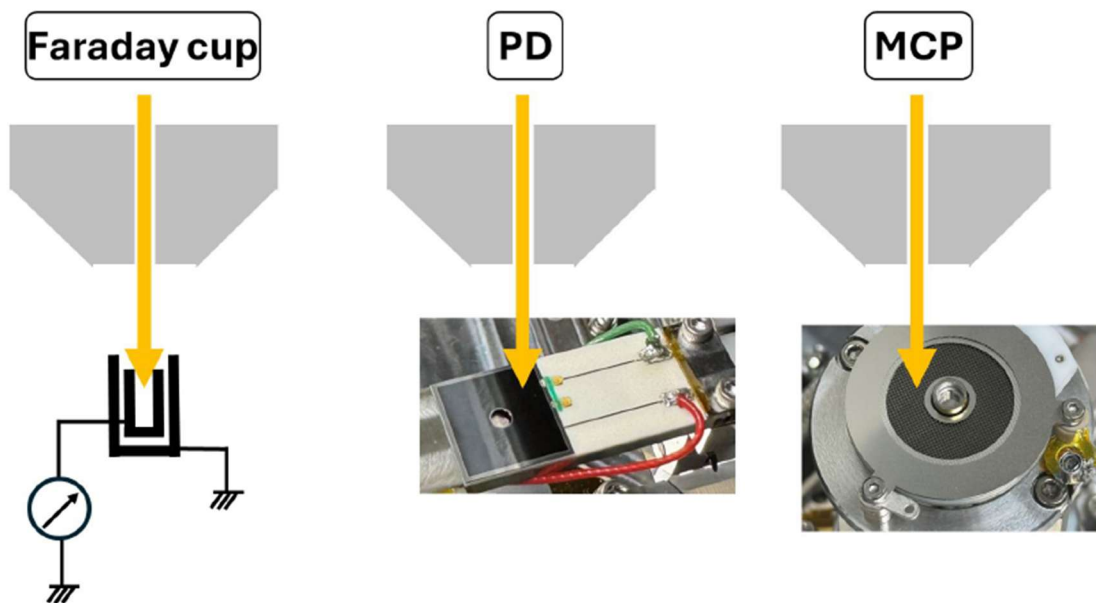


図 42 検出器出力特性比較測定

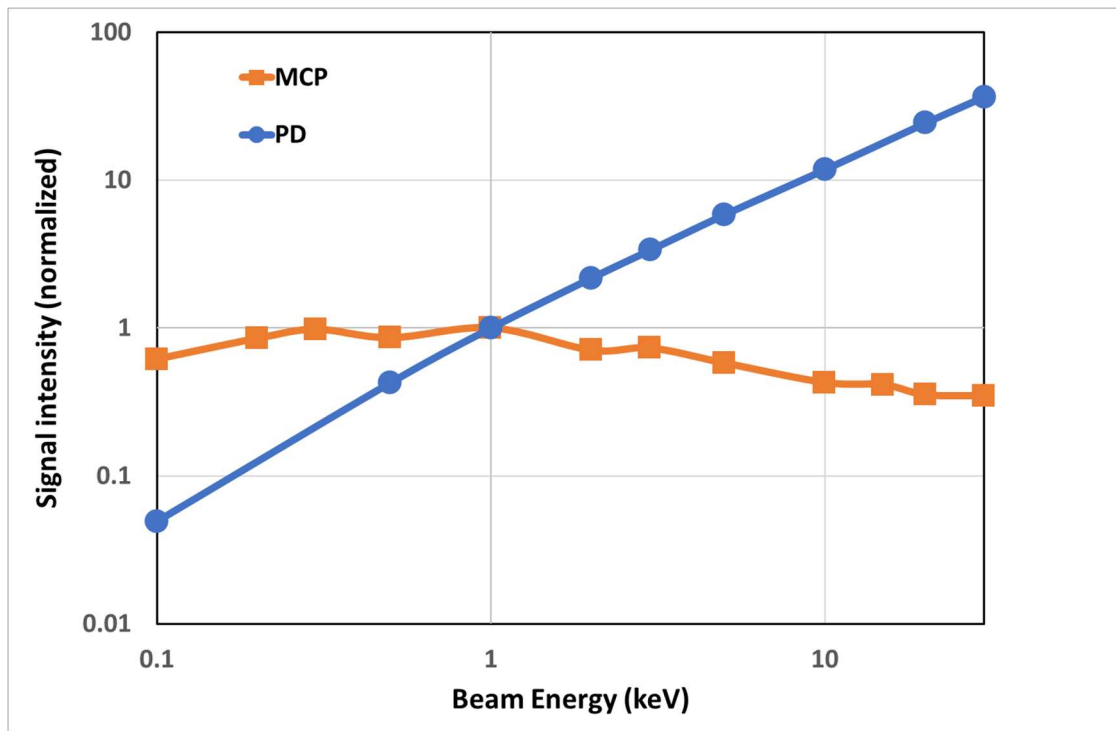


図 43 加速電圧に対する検出器出力強度の変化

4.4 SUS 球による評価



図 44 SUS 球外観写真

ステンレス (SUS) 球試料を用いて、MCP 検出器のグリッド電圧依存性と、低加速条件における BSE 像取得性能を評価した。共同研究 G 内では検出器評価のための標準試料として使用している。

4.4.1 グリッド電圧依存性と SE/BSE 成分の分離

SEM 像の評価には、図 44 に示すような直径 0.5 mm の SUS 球を試料に用いた。本試験で用いた SUS 球は市販品 (UXCELL/部品番号 : a19090600ux0415.jp) である。加速電圧を 5 kV とし、MCP ($V_g=0$ V, -50 V, -1000 V), アウトレンズ SE 検出器 (ET 検出器), アウトレンズ BSE 検出器 (Si-PD) を用いて像を取得した。各像に対して直線プロファイルを設定し、球エッジ部と中央部の輝度分布を比較した。

さらに、加速電圧 3 kV において、グリッド電圧 V_g を 0 V (条件 A), -50 V (条件 B), -1000 V (条件 C) としたときに取得した MCP 像を用いて、画像差分 A-B および B-C を計算した。

図 45 に加速電圧 5 kV における SUS 球像とその輝度プロファイルを示す。ET 像では、SUS 球のエッジ部が明るく写り、プロファイルにおいてもエッジ位置にピークが現れる。 $V_g=0$ V の MCP 像も同様にエッジ部が明るく、プロファイルでエッジ位置のピークが確認される。この結果から、 $V_g=0$ V 条件の MCP 像には SE 成分が含まれていることが分かる。

一方、 $V_g=-50$ V 条件では輝度プロファイルが変化し、Si-PD 像のプロファイルに近づく。したがって、本検出系で取得される MCP 像に含まれる信号成分は、試料近傍に配置したグリッド電極の電位条件 V_g によって変化する。 V_g を切り替えることで、同一視野・同一ビーム条件のまま取得した像同士を比較できることから、グリッド電位は取得像の信号成分を制御するためのパラメータである。

Si-PD 像では、球中央付近に幅の広いピークを持つ輝度分布が得られ、エッジ部のコントラストは小さい。 $V_g=-50$ V および $V_g=-1000$ V の MCP 像の輝度分布は、Si-PD 像と似た形状を示す。 $V_g=0$ V の MCP 像ではエッジ部が明るく写り、輝度プロファイルにおいてもエッジ位置にピークが現れる。一方、 $V_g=-50$ V および $V_g=-1000$ V の条件では、エッジ位置のピークは小さくなり、球中央付近に幅の広いピークを持つ形状となる。さらに、 $V_g=-1000$ V の条件では、輝度分布は Si-PD 像により近い形状を示す。

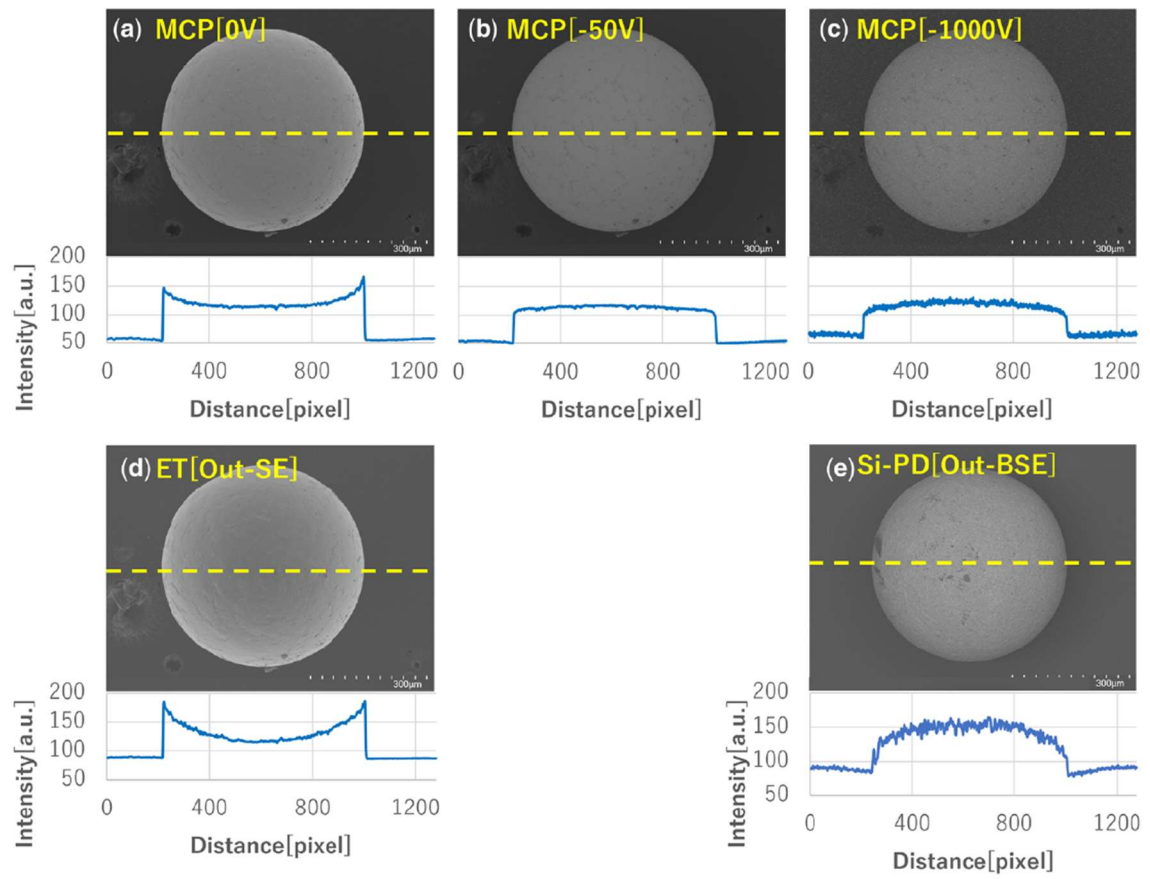


図 45 加速電圧 5 kV での SUS 球像比較 (a)-(c)MCP, (d)ET 検出器, (e)Si-PD

次に、加速電圧 3 kV で取得した MCP 像について、条件 A~C の差分像 A-B, B-C を求めた。図 46 に条件 A~C に対応する SUS 球像を示す。

B-C ($V_g = -50$ V 像 - $V_g = -1000$ V 像) は、50 eV から 3 keV の電子成分から 1 keV 以上の高エネルギー-BSE 成分を差し引いた像に対応し、1 keV 未満の低エネルギー-BSE 成分のみの像となる。図 47 に低エネルギー-BSE のみの像を示す。A-B ($V_g = 0$ V 像 - $V_g = -50$ V 像) は、SE と BSE の両成分を含む像から BSE 成分を引いた像に対応し、0-50 eV の SE 成分のみの像となる。図 48 に SE のみの像を示す。

これらの結果から、図 49 に示すように、ひとつの検出器で様々な情報が得られることがわかった。倒立型検出器では、グリッド電圧制御と画像差分を組み合わせることで、同一受理条件のもとで SE 像、低エネルギー-BSE 像、高エネルギー-BSE 像を構成できることが確認できる。

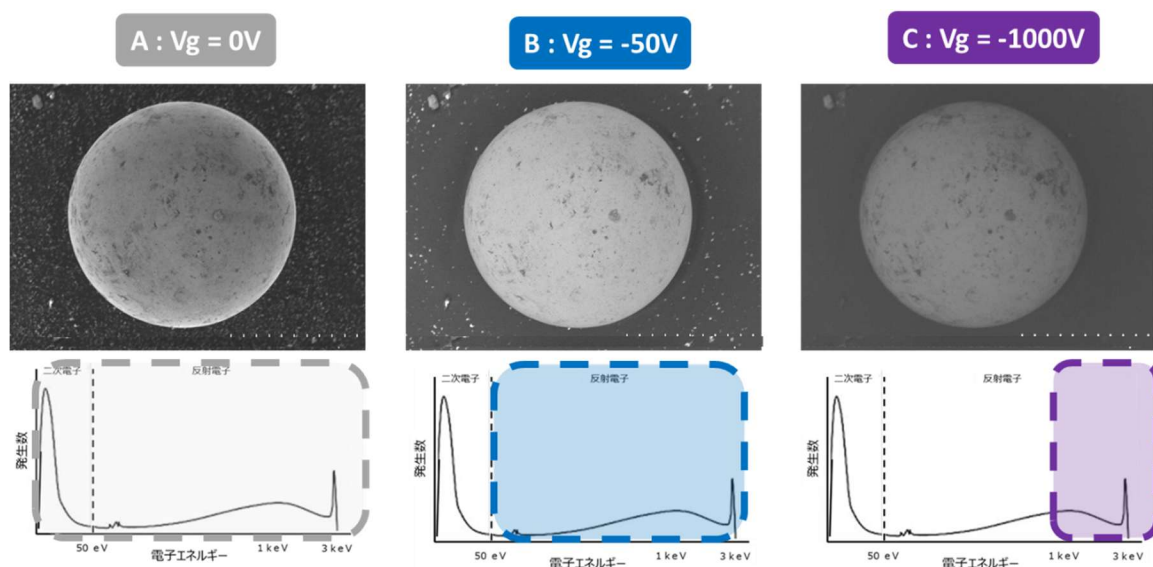


図 46 グリッド電圧 V_g を変化させて取得した SEM 像と対応するエネルギーを示したスペクトル

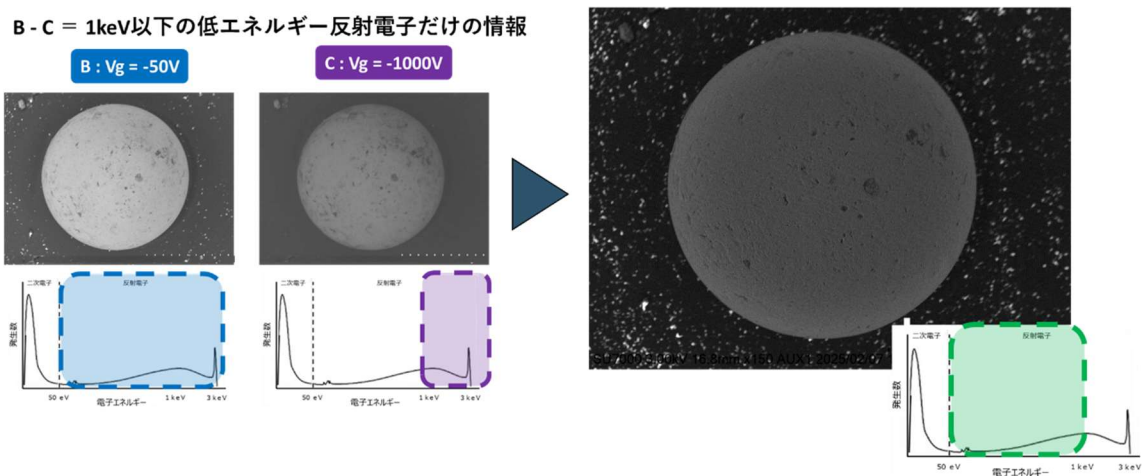


図 47 低エネルギー-BSE のみの像と処理に使用した像

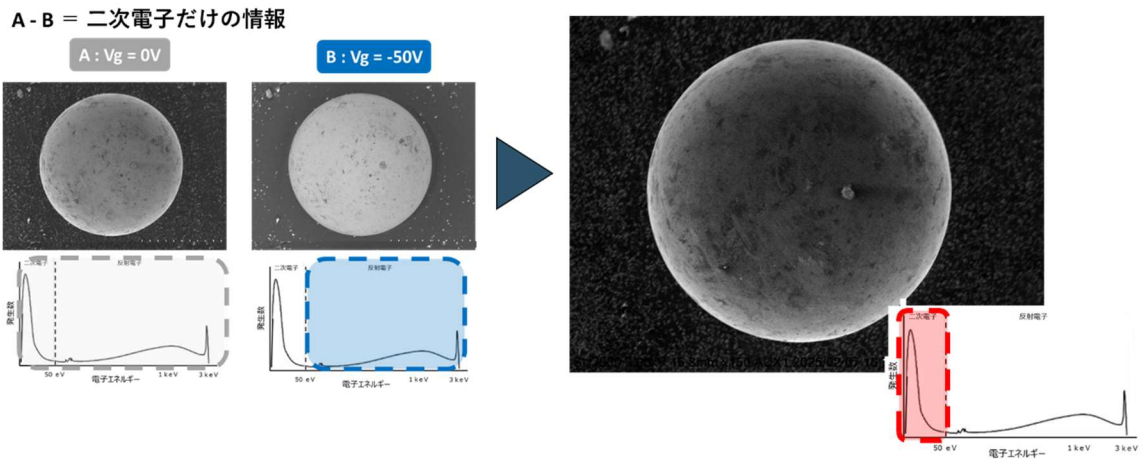


図 48 SE のみの像と処理に使用した像

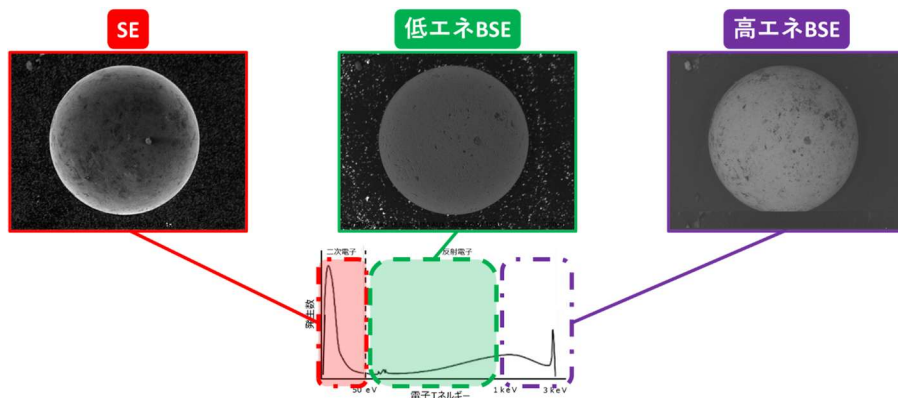


図 49 倒立型検出器+画像差分で得られるエネルギー像

4.4.2 低加速条件における BSE 像の取得

低加速条件における BSE 像取得性能を評価するため、加速電圧を 15 kV および 1 kV とし、SUS 球について MCP ($V_g = -50 V$) 像と Si-PD 像を取得した。MCP のグリッド電圧を $-50 V$ とすることで SE 成分を遮断し、BSE 成分の寄与が大きい像を比較対象とした。

図 50 に、加速電圧 15 kV および 1 kV で取得した SUS 球像を示す。15 kV では、MCP 像と Si-PD 像のいずれにおいても、SUS 球の形状が観察できる。1 kV では、Si-PD 像は暗くコントラストの低い像となり、球の輪郭が不明瞭である。低加速条件では一次電子の試料内到達距離が短く、表層近傍での相互作用が支配的となることが知られている [5]。1 kV の低加速条件では、Si-PD の検出信号(出力振幅)が小さくなり、像コントラストが低下したと解釈できる。

同じ 1 kV 条件で取得した MCP ($V_g = -50 V$) 像では、SUS 球の輪郭と表面の濃淡を確認できる信号が得られている。検出器出力特性の結果 (4.3) と合わせると、低加速条件において Si-PD 像では信号振幅が小さく像が不明瞭となる。一方で、MCP 検出器では BSE 像として形状情報を取得できることが分かる。

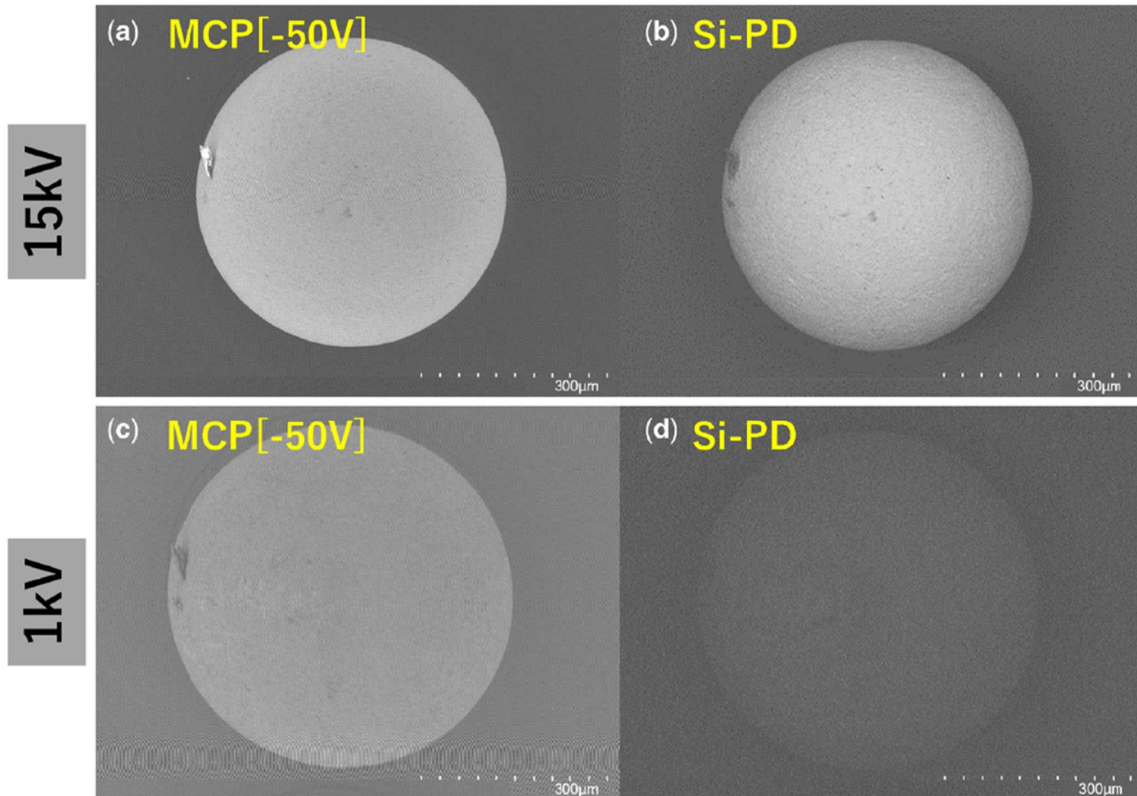


図 50 加速電圧 15 kV 及び 1 kV で取得した SUS 球像

4.5 Al/Si ウォーターマーク試料薄膜下構造の観察

次に、薄膜中に存在する構造の観察例として、Al/Si ウォーターマーク試料[6, 7]を用いた結果を示す。薄膜の下に埋もれた欠陥をどの程度まで観察できるかを確かめるため、半導体プロセスで問題となる欠陥の一つである「ウォーターマーク」を模した試料を用いた。ウォーターマークは、実際のデバイス製造においても洗浄・乾燥工程などで発生しうる欠陥であり、本研究で検証する検出手法のターゲットを具体的にイメージしやすい試料である。

4.5.1 試料構造と像の比較

Si 基板上にウォーターマークを意図的に発生させ、その上に Al 薄膜を成膜して、試料を作製した。に試料の断面図と外観写真を図 51 示す。

試料は次の手順で作製した。水道水で洗浄したビーカーに採取した水道水を Si ウエハ上に滴下し、実験室内で電球下にて乾燥させた。その後、膜厚 30 nm の Al を蒸着した。Al 蒸着には、一般的な蒸着器（筑波大学 数理物質系所有）を用いた。

ウォーターマークの模様は水道水中の不純物に由来するものである。配置には、意図したパターンはない。Si ウエハ上の数か所に水滴をランダムに滴下した。水滴の縁に形成されるウォーターマークに Al を成膜したものを観察対象とした。ウォーターマークは Al 成膜前に Si ウエハ上に形成されているため、Al 成膜後には Al/Si 界面近傍に位置する構造となる。

加速電圧を 2 kV とし、倒立型検出器のグリッド電圧制御を用いて SE 像、低エネルギー-BSE 像、高エネルギー-BSE 像を取得した。倍率は 250 倍とした。

この結果は、低エネルギーBSE像が、Al 薄膜下部あるいは界面近傍の構造に対して高い感度を持つことを示している。SE 像は Al 膜表面近傍の情報を、高エネルギーBSE 像は Al 膜内部の情報を主に反映する。一方、低エネルギーBSE 像は薄膜下および界面近傍の情報を強く反映している。

図 52 に、取得した Al/Si ウォーターマーク試料の像を示す。低エネルギーBSE 像では、Al 薄膜下に対応するウォーターマークの模様が明瞭に観察される。一方、同一条件のSE 像および高エネルギーBSE 像では、ウォーターマークに対応する情報は少ない。そのため、模様の判別が難しい。

4.5.2 低エネルギーBSE 像の位置づけ

図 53 は、SE, 低エネルギーBSE, 高エネルギーBSE の各像が、主にどの深さの情報を見ているかを示した概念図である。この図は、図 52 に示した観察結果(加速電圧 2 kV)を位置づけるために示す。SE は表面近傍から脱出するため主に Al 膜表面の情報を反映する[1, 8]。高エネルギーBSE は SE より深い領域から脱出するため Al 膜内部の情報を含む[5]。低エネルギーBSE は Al 薄膜下および界面近傍の情報を強く反映している帯域であり、薄膜下や界面に存在する構造の可視化に適している。

Al/Si ウォーターマーク試料に対する観察結果は、低エネルギーBSE 像が、薄膜下や界面近傍に存在する構造を可視化にて有効であることを示している。これは、研究課題 2 で問うた「帯域分離によってどのような追加情報が得られるか」に対する一つの回答であり、低エネルギーBSE 帯域が新たな像情報を提供することの可能性を示した例である。

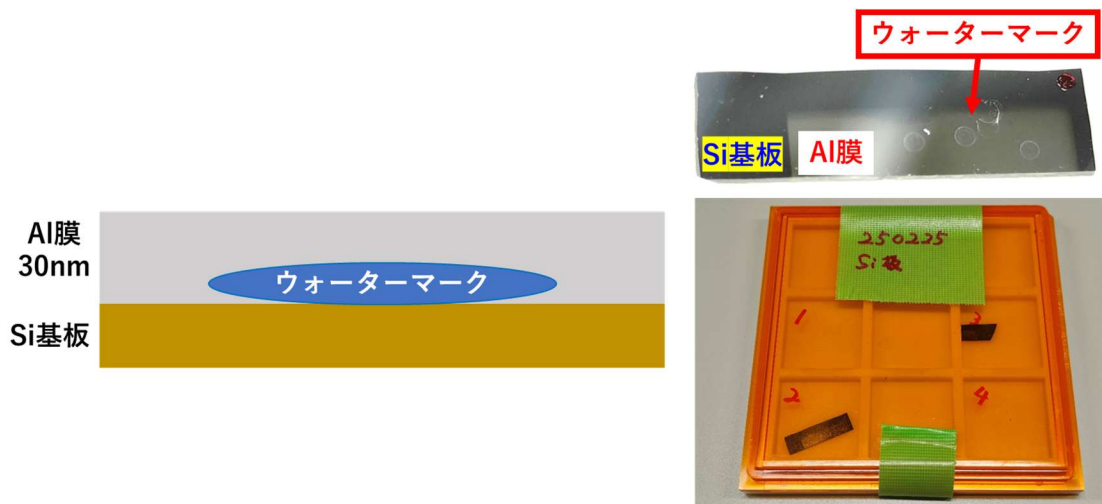


図 51 Al/Si ウォーターマーク試料

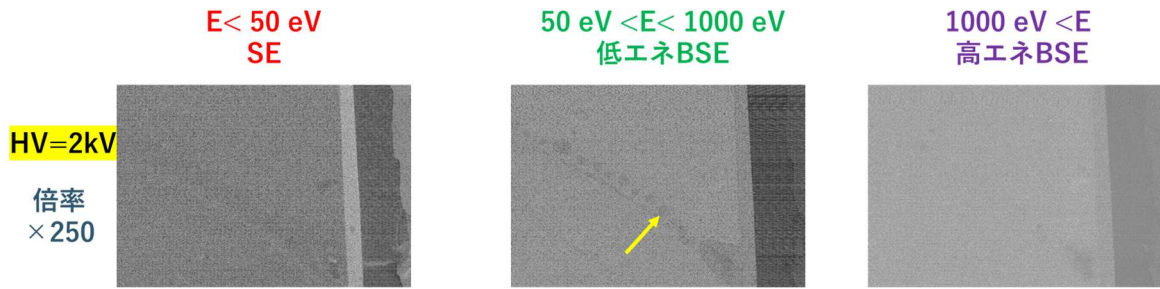


図 52 Al/Si ウォーターマーク試料の SEM 観察像の比較(加速電圧 2 kV)

(図中矢印はウォーターマークに対応する位置を示す)

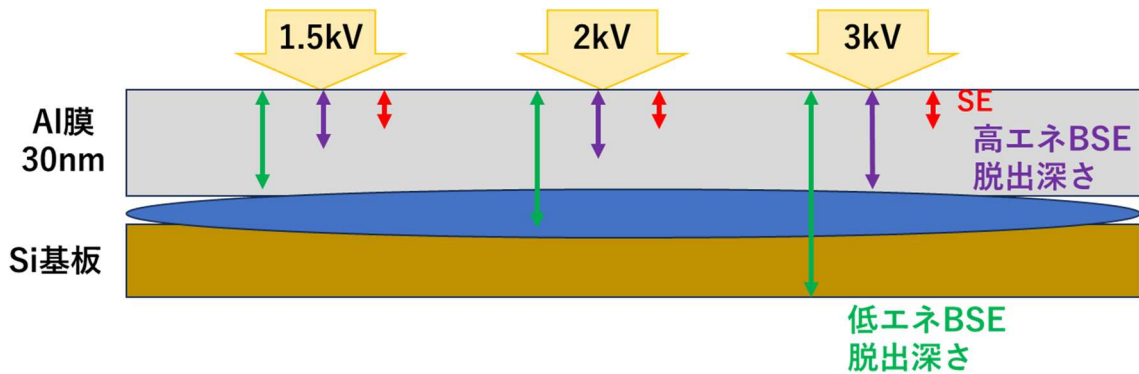


図 53 各エネルギー電子像が見ている深さ位置(概念図)

4.6 まとめと研究課題 1,2 への回答

本章では、低加速 SEM において低エネルギー-BSE を扱うことを目的として、薄型 MCP 検出器を試作し、Si-PD との出力特性の比較、SUS 球試料を用いたグリッド電圧依存性および低加速条件での像形成、Al/Si ウォーターマーク試料を用いた薄膜構造の観察を行った。出力特性の比較では、Si-PD の出力が加速電圧とともに増加し低加速領域で小さくなるのに対し、MCP の出力が 0.1-15 kV の範囲でほぼ一定であり、100 eV 程度の電子も検出できることを示した。SUS 球の評価では、グリッド電圧を変えて取得した MCP 像と差分像から、SE 成分のみの像と低エネルギー-BSE 成分のみの像を構成できることを示した。同じ配置条件のもとで SE、低エネルギー-BSE、高エネルギー-BSE に対応する像を得られることを確認した。また、1 kV 条件で Si-PD 像が暗くコントラストの低い像となること、一方、MCP 像では SUS 球の輪郭と濃淡が確認できることを示した。Al/Si ウォーターマーク試料については、低エネルギー-BSE 像でウォーターマークの様子が観察され、同一条件の SE 像および高エネルギー-BSE 像では同じ模様を判別しにくいことを確認した。

第 1 章 1.5 で設定した研究課題との関係で整理する。研究課題 1 (低加速 SEM における低エネルギー-BSE の検出) については、MCP 検出器の出力特性が低加速条件でも維持されること、1 kV 条件で SUS 球の BSE 像を取得できること、および Al/Si ウォーターマーク試料の低エネルギー-BSE 像で模様が観察されることを確認した。以上より、本章で扱った条件の範囲において、Si-PD では得られにくい 1 keV 以下の BSE 成分を含む像情報を取得できることを示した。研究課題 2 (グリッド電圧差分像による帯域分離) については、複数のグリッド電圧条件で取得した MCP 像とその差分から、SE 帯域と低エネルギー-BSE 帯域に対応する像を同一受理条件で

構成できること, および低エネルギーBSE 像がウォーターマーク試料に対して SE 像や高エネルギーBSE 像とは異なるコントラストを与えることを示し, エネルギー帯域ごとに像情報が異なることを具体的な実験結果として示した。

第4章の参考文献

1. J. I. Goldstein, D. E. Newbury, D. C. Joy, C. E. Lyman, P. Echlin, E. Lifshin, L. Sawyer, and J. R. Michael, *Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis*, 4th ed. (Springer, New York, 2018).
2. A. Šakić, S. Bošković, M. Jakšić, S. Petrović, and N. Skukan, “Versatile silicon photodiode detector technology for scanning electron microscopy with high efficiency sub-5 keV electron detection,” *Ultramicroscopy* 182, 50–58 (2017).
3. P. E. Russell, “Microchannel plates as specialized scanning electron microscopy detectors,” *J. Microsc.* 134, 293–304 (1984).
4. H. F. Helbig, R. D. Rydgren, and L. Kotorman, “Channel plate detection in low energy scanning electron microscopy,” *Ultramicroscopy* 23, 311–320 (1987).
5. K. Kanaya and S. Okayama, “Penetration and energy-loss theory of electrons in solid targets,” *J. Phys. D: Appl. Phys.* 5, 43–58 (1972).
6. H. Namba, T. Orii, H. Ohno, and G. W. Gale, “Insights into watermark formation and control,” *Solid State Phenom.* 103–104, 83–86 (2005).
7. K. Miya, T. Kishimoto, and A. Izumi, “Effective rinse aiming at water-mark-free drying for single-spin wet cleaning process,” *Solid State Phenom.* 103–104, 79–82 (2005).
8. L. Reimer, *Image Formation in Low-Voltage Scanning Electron Microscopy* (SPIE Press, Bellingham, 1993).

第5章 正十二面体 MCP 検出器による角度・エネルギー分解

5.1 本章の目的

本章では、正十二面体 MCP 検出器を実機 SEM に搭載して動作させる。代表的な試料について取得した像を提示し、検出器の配置およびエネルギーの違いが、SEM 像に与える影響を示すことを目的とする。

全立体角を正十二面体フレームで分割し、各面に小型 MCP を配置し、試料から放出される電子を複数方向から検出することができる構成を用いる。各 MCP の前段には放出電子のハイパスフィルタとして働くグリッドを配置し、グリッド電位を切り替えることでエネルギーの異なる信号を取得できるようにした。本章でいうエネルギー分解とは、バイアスグリッド電位を切り替えることにより、放出電子をエネルギー閾値で区分し、SE 帯および BSE 帯の像を取得して比較することを指す。

アウトレンズ型 SEM に本検出系を取り付け、Cu の波打ち表面、Cu-Al 共晶、SUS 球を試料として、加速電圧 15 kV 条件で取得した像を提示する。方向成分およびエネルギーの違いが観察結果に与える影響を示す。

5.2 正十二面体 MCP 検出器の構成

5.2.1 検出器フレームと MCP 配置

図 54 に、正十二面体 MCP 検出器の概略図と写真を示す。MCP は、一辺 20 mm の正十二面体フレームの各面に最大 12 個まで設置できる。それぞれを Top0, Up1~Up5, Down6~10, Bottom11 と名付けた。MCP には浜松ホトニクス製の MCP を用いた。Top0 の有効径は $\phi 20$ mm, センターホール径は $\phi 6$ mm (デッドエリアは $\phi 8$ mm) である。Up, Down の MCP 有効径は $\phi 15$ mm である。Bottom については構想のみであるが、実際に作製する際は Top0 と向かい合う面に設置される。その際、MCP は Top0 と同一のものを使用する。

各 MCP の信号入力側前段には、3 枚のバイアスグリッドからなるハイパスフィルタを配置した。MCP 面は試料中心から 26 mm の距離にあり、検出器の立体角は Top0 が 0.35, その他の面が 0.24 となる。12 面すべてに MCP を配置した場合の合計立体角は 2.99 であり、全立体角の約 24 %に相当する。

本章で示す実験では、Top0, Up1, Up2, Down6 の 4 面に MCP を搭載して使用した。SEM 本体の ET 検出器も使用できるようにするため、他の面には MCP を設置していない。電子ビームの入射方向を天頂とすると、各検出器の中心方向 (θ , ϕ) は表 2 に示すとおりである。試料は正十二面体フレームの中心に配置する。試料をフレーム中心に配置することで、各検出面までの距離および幾何条件 (立体角・視線方向) を揃え、検出方向 (θ , ϕ) の違いに基づく信号差を同一条件下で相対比較することができる。

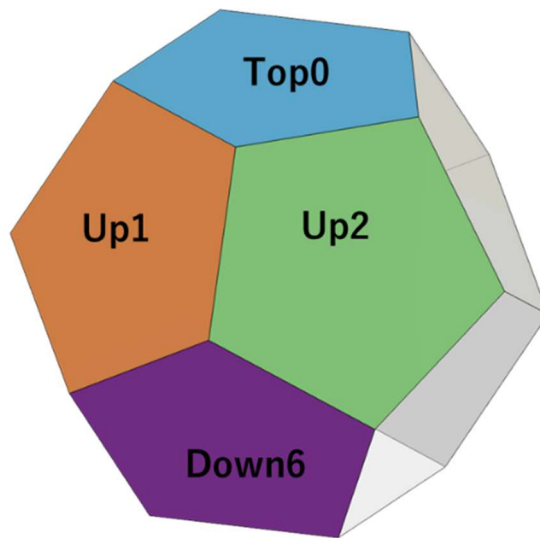
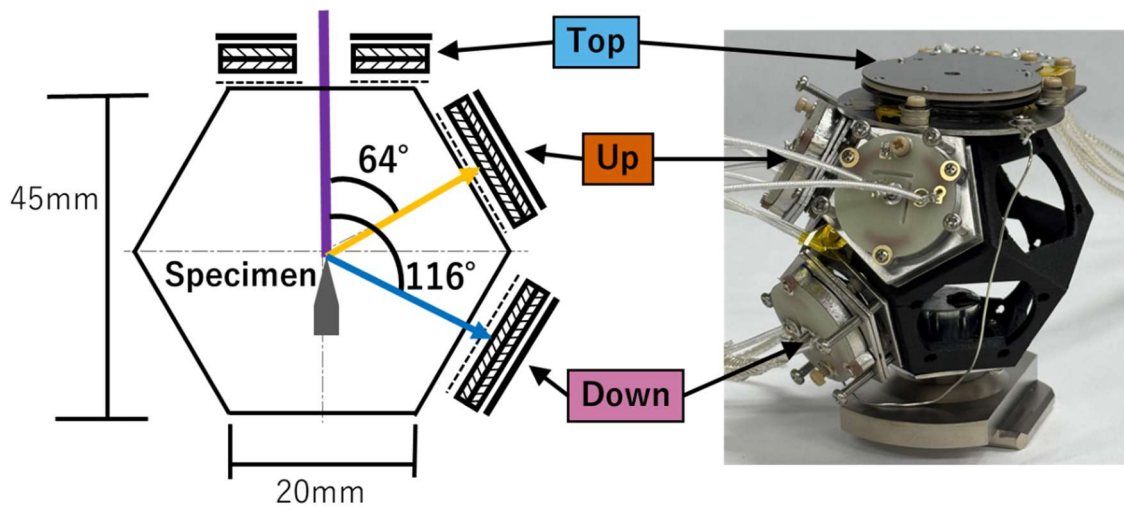


図 54 正十二面体 MCP 検出器の外観・寸法図

表 2 Top0, Up1, Up2, Down6 の θ , ϕ

Detector	Θ	Φ	Solid Angle[sr]
Top0	0°	0°	0.34
Up1	64°	0°	0.25
Up2	64°	72°	0.25
Down6	116°	36°	0.25

5.2.2 検出器ユニットと配線

Top0 検出器には、第 4 章で使用した倒立型検出器をそのまま使用した。当初は正十二面体専用の Top 検出器を新たに作製する案も検討した。第 4 章で動作確認を行い、安定して動作していた倒立型 MCP 検出器を Top0 として用いた[1]。

Up および Down 側の検出器は、正五角形フレーム上に MCP を実装する構成の新規設計とした。外観写真を図 55 に示す。同一形状の基板を用いることで複数台を製作しやすい構造とし、正十二面体フレームの各面に搭載できるようにした。これらの検出器についても、高電圧部の遮蔽とアースの取り方は、第 4 章 4.2.2 の倒立型 MCP 検出器と同じ方針とし、試料空間への漏れ電場を抑えることを設計条件とした。また、本検出器は放出電子を大きく偏向させる電子光学系を介さないため、放出角・エネルギー依存の議論を幾何条件に基づいて行える。

複数の MCP 検出器を同時に動作させる構成を検討するため、図 56 に示すような 32 ピンの多ピン高耐圧フィードスルーを用意した。各ピンには、グリッドメッシュ (Mesh : $\pm HV$) , MCP 入力 (MCPin : GND) , MCP 出力 (MCPout : +HV) , アノード (Anode : +HV) を割り当て、最大 5 台分の MCP 検出器を配線できるように検討を進めた。検出アンプについても、最大 6 台配線を行うことができるよう、図 57 に示すような改良を共同研究 G 内で施した。図中で番号が振られているコネクタに各検出器の端子が接続することが可能になっている。実際に図 58 に示すような形で、3 つの検出器の配線を同時に行った。動作確認まで行うことができたが、残念ながら一部に耐圧不良が確認されたため、実用には至っていない。

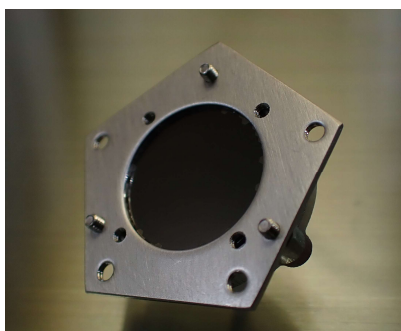
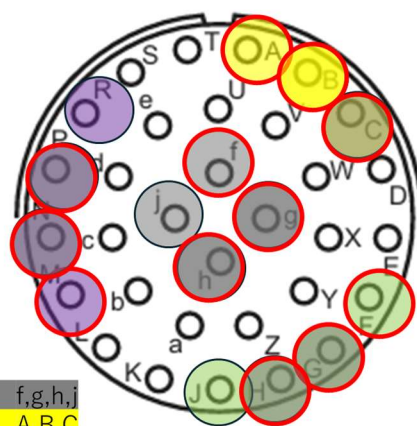
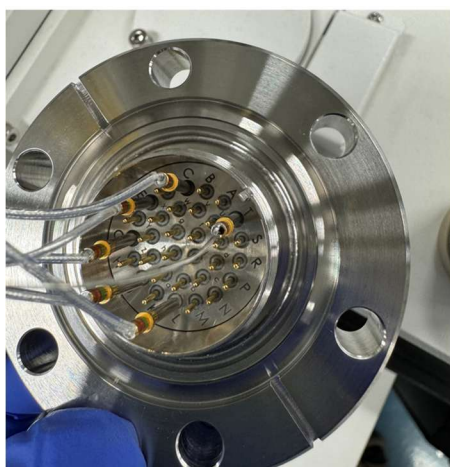


図 55 Up 及び Down 検出器(グリッド未実装)



- | | |
|-----------|------------|
| ① GND | f, g, h, j |
| ② MESH | A, B, C |
| ③ MCP OUT | F, G, H |
| ④ Anode | M, N, P |

図 56 32 ピンフィードスルーと各ピンへのアサイン情報



図 57 多検出器対応アンプ

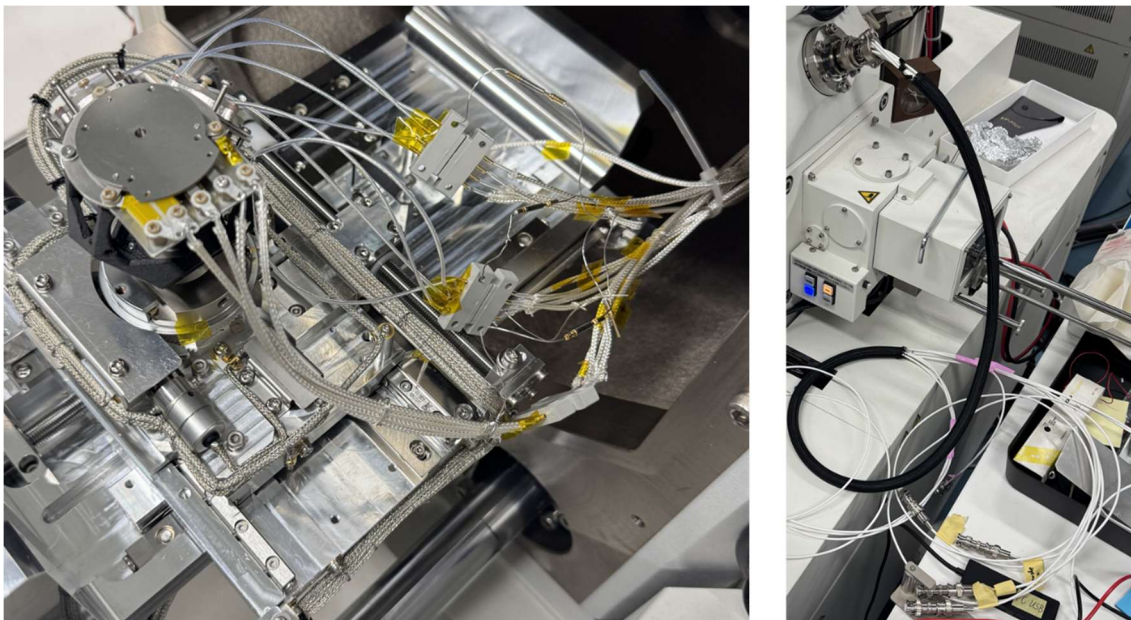


図 58 Top0, Up1, Up2 に配線を行った際の様子(左：真空側, 右：大気側)

5.2.3 観察条件と試料

観察に用いた SEM は、第 4 章と同じ FE-SEM : SU7000 である。外部高電圧電源および読み出しアンプの基本構成も、第 4 章 4.2 で述べたものと同一である。本章では、正十二面体 MCP 検出器を SU7000 の試料室内に取り付け、Top0, Up1, Up2, Down6 の MCP からの信号を外部アンプ経由で取得した。

観察条件は、加速電圧 15 kV、ビーム電流 1 nA、WD=37 mm とした。SUS 球試料は針状ホルダ上に搭載したため、WD=27 mm で観察した。バイアスグリッド V_g には 0 V、-50 V、-1000 V を印加してハイパスフィルタ像を取得した。本章では、 $V_g=0$ V 像 - $V_g=-50$ V 像を SE 像、 $V_g=-1000$ V 像を BSE 像とする。 $V_g=-50$ V 条件では 50 eV 未満の電子が遮断されるため、(0 V)-(-50 V) 差分を SE 像として扱う。 $V_g=-1000$ V 条件では 1000 eV 未満が遮断されるため、1000 eV 以上の BSE 像として扱う。

今回観察した試料は次の 3 つである。Cu の波打ち表面は、Cu 板を断面イオンミリングで研削したものであり、カーテン効果により周期 10 μm 、振幅 0.3 μm の波が形成され、最大傾斜角は $\pm 11^\circ$ である (図 59)。Cu-Al 共晶組織 (以下、Cu-Al 共晶) は、Cu 板と Al 板を貼り合わせて熱処理した試料であり、Cu と Al が迷路状に入り組んでいる (図 60)。SUS 球試料は直径 0.5 mm の球を針状ホルダに搭載したものであり、ホルダの影が観察視野に入らないように配置した (図 61) [2]。

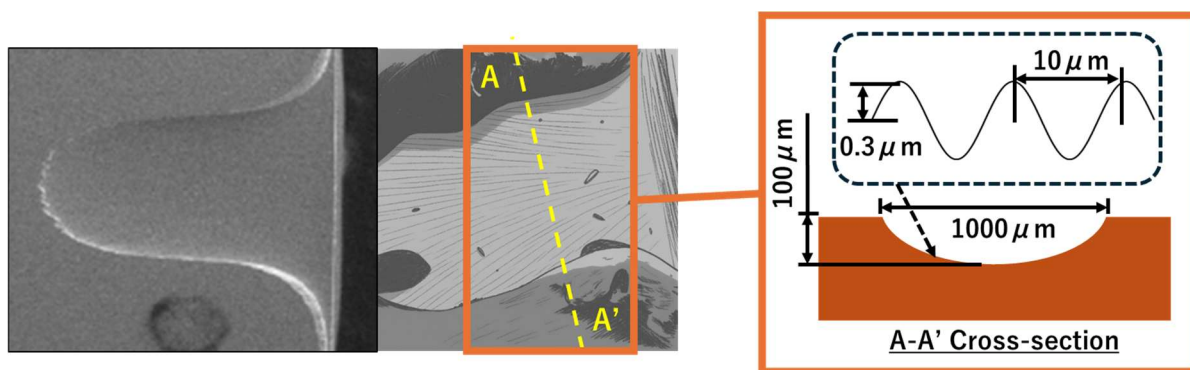


図 59 イオンミリング研磨した Cu 試料

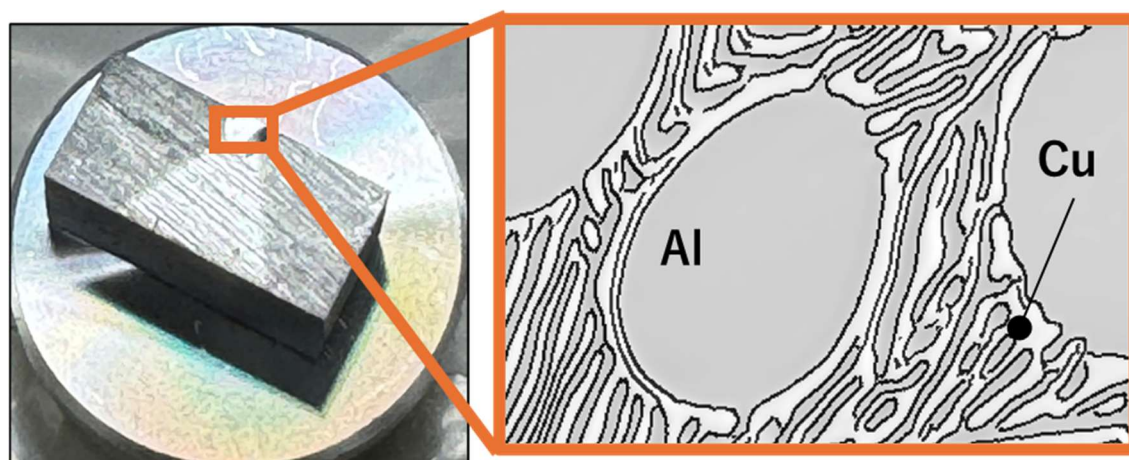


図 60 Cu-Al 共晶試料



図 61 針ホルダに取り付けられた SUS 球

5.3 Cu の凸凹像

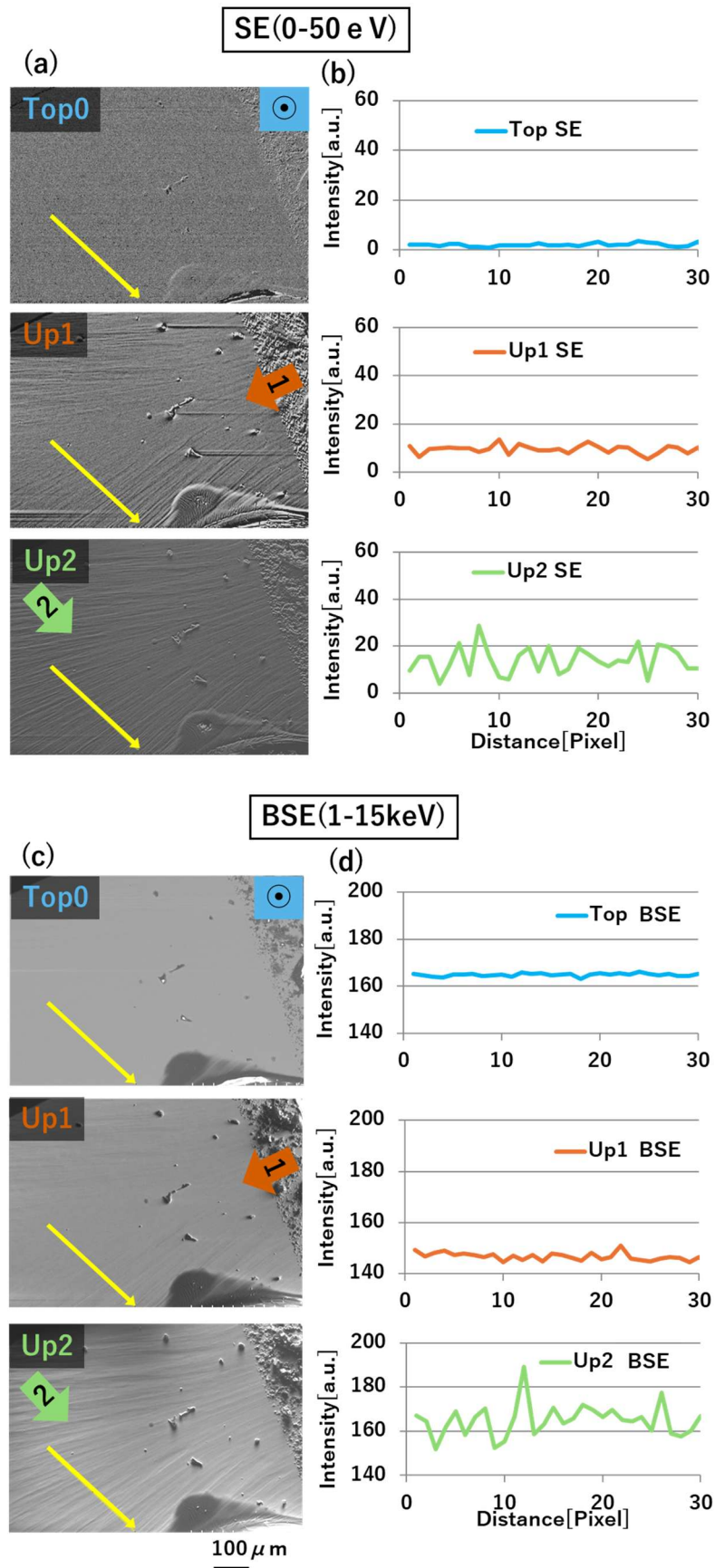


図 62 各検出器による Cu 試料 SEM 像とラインプロファイル

図 62 に Top0, Up1, Up2 検出器で撮影した Cu の Ar イオンビーム研削面を示す。ビームは右側 2 時の方向 (Up1 検出器の方向) から照射しているため、波の山と谷はこの方向に延びている。(a) が SE 像, (c) が BSE 像である。Top0 では SE, BSE ともに研削面は一樣な明るさであり、明るさの違いを除いては大きな特徴がない。一方、Up1 では、SE 像には表面の波打ちに対応した筋が弱く見えているものの、BSE では波打ちは見えず、ただ表面上の異物が黒く見えるだけである。Up2 では、SE, BSE 像ともに表面の波打ちに対応する筋がはっきり見えている。また、表面付着物の白黒コントラストが強調されている。また、Up1 の SE 像では表面異物の右側、即ちビームスキャンの方向に伸びた筋が見える。これは BSE 像では観察されない。また、Top0 や Up2 でも検出されない。ビームスキャン方向と検出器の方向が近いときに SE 像に帯電ノイズが出てしまうと考えられる。

まとめると、表面法線方向に出た SE, BSE は表面の波打ちには鈍感であり、斜め方向に出た SE, BSE は筋に垂直な方向で凸凹を大きく反映し、筋に平行な方向では SE に弱く強弱が見えるだけである。これより、SE 像の方が凸凹に高感度であるものの、凸凹の方向性を反映しているのは BSE 像であることが言える。これは、図 62 中に (b) と (d) で示したラインプロファイルからも明確にわかる。

5.4 Cu-Al 共晶像

図 63 に Top0, Up1, Up2 検出器で撮影した Cu-Al 共晶像を示す。BSE 像では、3 つの検出器像ともに、Cu が明るく、Al が暗い。Up1, Up2 では Top0 に比べ、Cu と Al の輪郭が強調されている。この様子を見るために、図 64 に①②③の線を引き、BSE 像の強度変化を図 64 に図示した。Top0 では①②③ともに、Cu の山も Al の谷も左右対称で、輪郭は強調されていない。一方 Up1 では、①③において右側が強調されている。即ち、Cu の山の強度は上がり、Al の谷の強度は下がっている。②では左右ほぼ対称である。Up2 では、②③において Cu 山の左側の強度が上がり、Al 谷の強度が下がっている。これらは Reimer の教科書[3, 4]に議論されているが、一次電子が試料に入射した後、弾性・非弾性散乱を繰り返して、Cu と Al の領域で非対称に拡がり、検出器の方向で BSE 収量が異なってしまうためである。この様子を図 65 に示す。

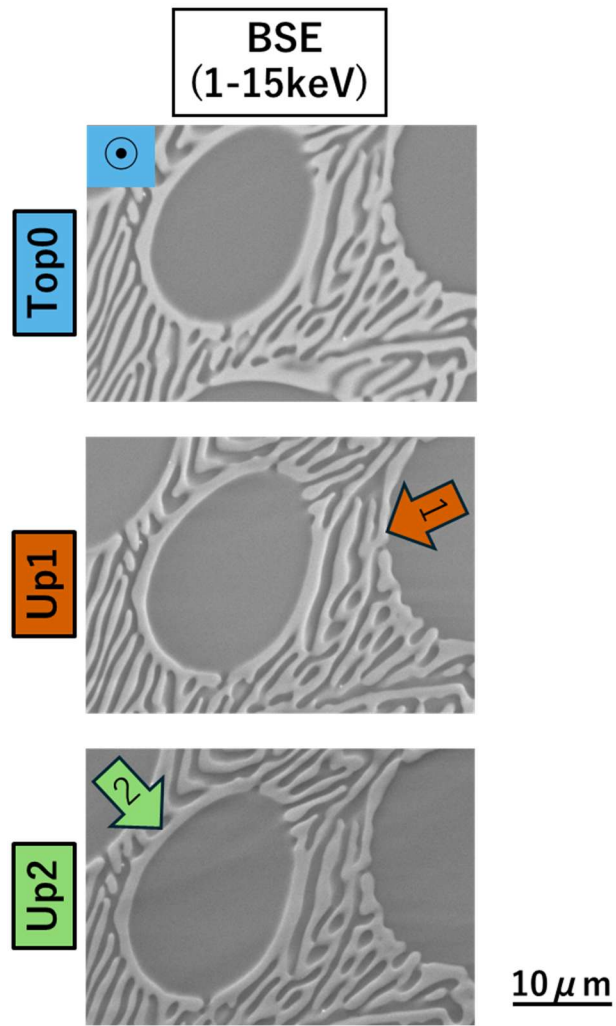


図 63 Top0, Up1, Up2 検出器で撮影した Cu-Al 共晶像

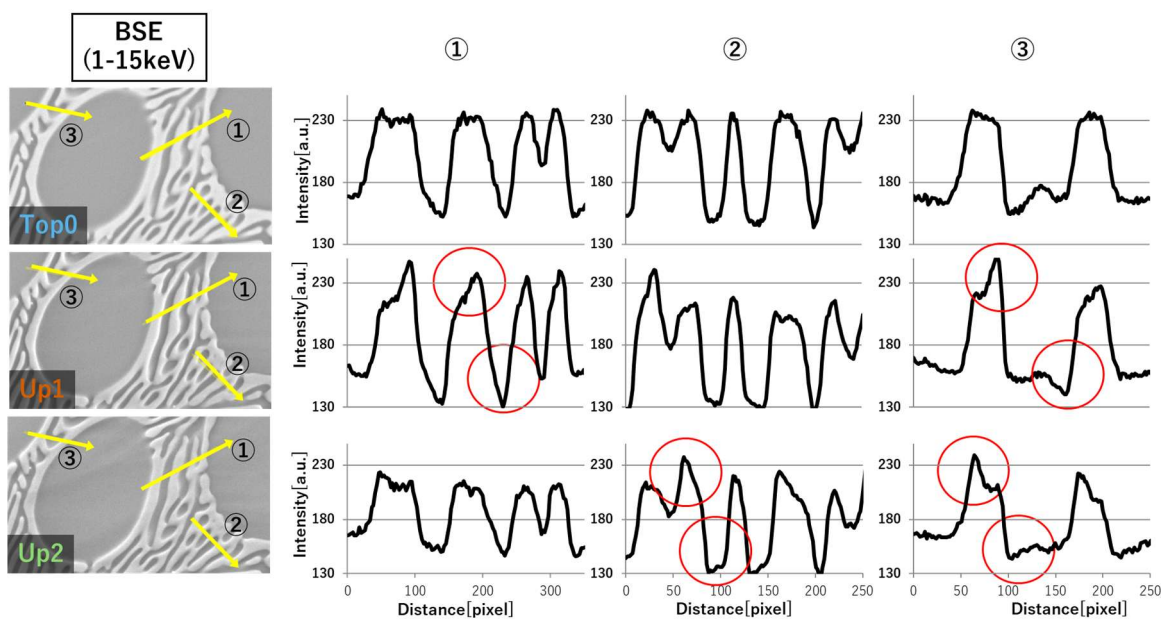


図 64 Cu-Al 像でラインプロファイルを取得した箇所と位置毎のラインプロファイル

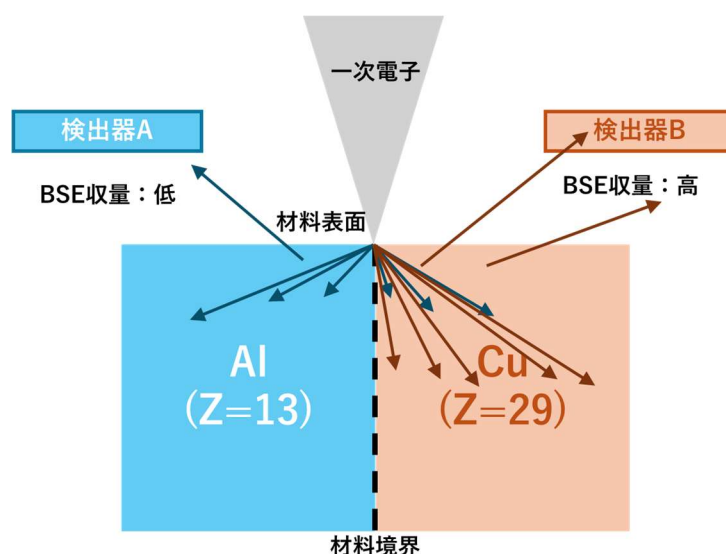


図 65 Cu-Al 材料境界での一次電子入射時の電子拡がり（模式図）

境界により拡がり是非対称となり、検出器の位置・向きに応じて反射電子（BSE）収量に変化する。

5.5 SUS 球の 3 次元観察

図 66 に Top0, Up2, Down6 検出器で撮影した SUS 球の SE 像と BSE 像を示す。Top0 では SE 像は球全体が一様に明るく、BSE 像では中心付近が明るく外側に行くほど暗くなっている。SE 像が一様なのは、エッジ効果 ($\propto 1/\cos \theta$) と放出角依存性 ($\propto \cos \theta$) が相殺するためである。また、BSE 像の分布は放出角依存性 ($\propto \cos \theta$) に因っている。これらは参考文献[5]の結果と一致する。Up2 では、SE 像・BSE 像ともに検出器の方向に明るさの中心が寄っていて、いわゆる照明効果を反映している。強度分布は BSE 像のほうが SE 像より際立っている。Down6 ではこの特徴がより著しくなっている。また、SE 像は球全体がほんのり明るい、これは迷電子、いわゆる SE3 に起因すると考えている [5, 6]。BSE 像で検出器側の縁（円周部分）が明るいのは、BSE の強度の極大が 2θ 方向にあることを反映している。

Down 検出器は平坦なバルク試料の観察には使えないが、薄膜試料や立体的な試料の観察には力を発揮すると考えている。3 次元ナノ構造やウイルスなどの立体構造への応用が期待される。

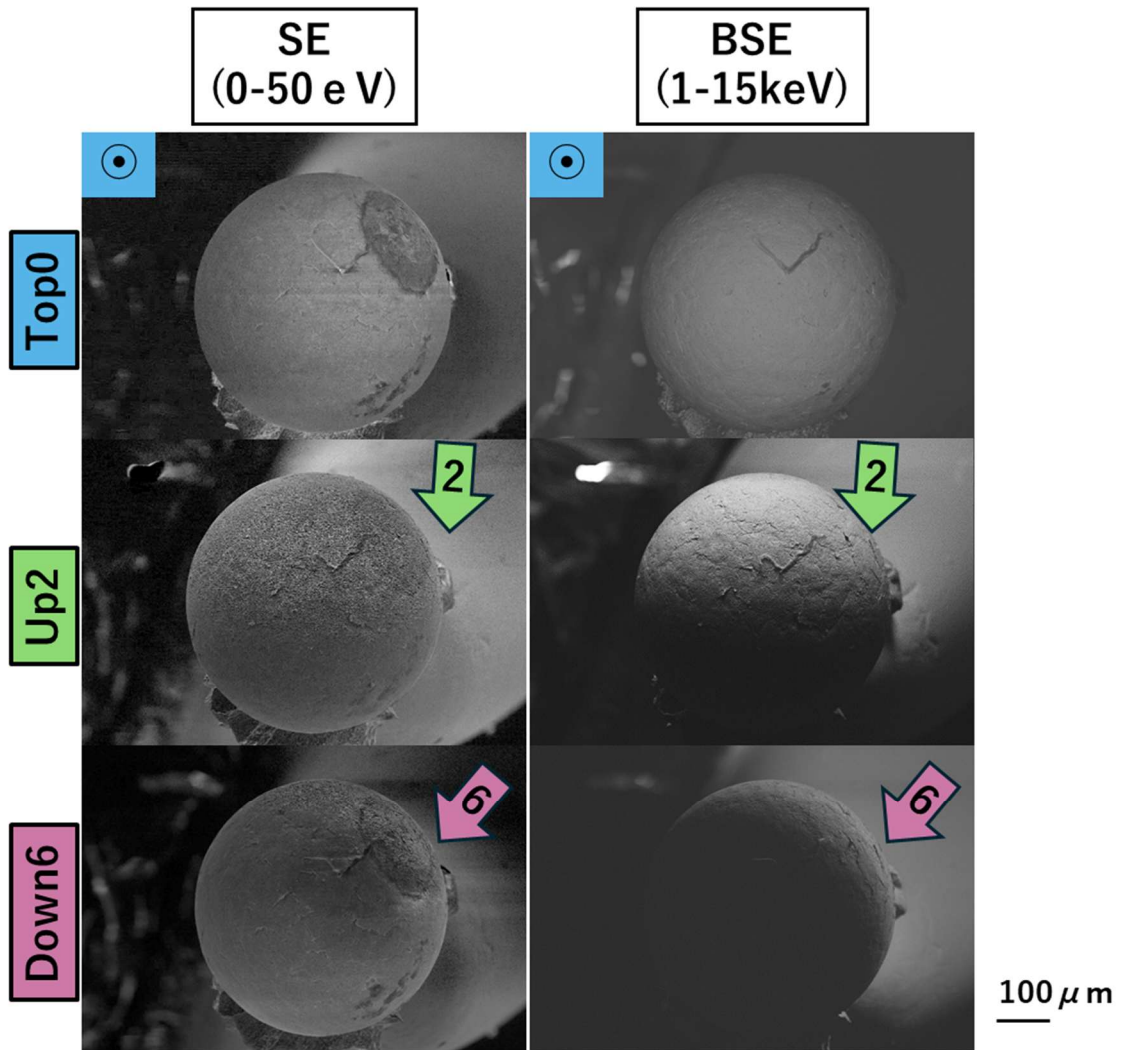


図 66 各検出器で得られた SUS 球像

5.6 まとめと研究課題3への回答

本章では、正十二面体フレームに複数のMCPを配置し、各MCPの前段に三段のバイアスグリッドを設けた検出系をアウトレンズSEMに搭載し、その構成と実験結果を示した。加速電圧15 kVの条件でグリッド電圧を切り替えて取得した像の差分からSE像とBSE像を構成した。Cuの波打ち表面、Cu-Al共晶、SUS球を対象として、複数方向のMCPで得られた像コントラストの違いを比較した。

Cuの波打ち表面については、Top0検出器ではSE像・BSE像ともに表面はほぼ一様な明るさであり、表面の波打ちに対する感度は低かった。一方、Up1、Up2など斜め方向の検出器では、SE像・BSE像ともに波の筋に対応した強度変化が現れ、凸凹に対応したコントラストが得られることを示した。Cu-Al共晶では、いずれの検出方向でもBSE像においてCuが明るくAlが暗いコントラストが得られた。さらに、検出方向によってCu-Al界面の輪郭の強調のされ方が異なることを、ラインプロファイルを用いて示した。SUS球では、Top0検出器のBSE像の強度分布が放出角依存性($\propto \cos \theta$)に対応すること、斜め方向の検出器で照明効果に対応した明るさの偏りが現れること、Down側検出器ではこの傾向がより顕著になることを示した。

正十二面体MCP検出器を用いてBSEの放出方向差(角度差)を評価した一方で、低加速条件(例:1-3 kV)での角度分解評価はできなかった。これは、低加速観察で要求される短いWD条件に対し、本章で用いた正十二面体フレームの寸法、および検出器形状・配置が対応できなかったためである。本章の実験はWD=27-37 mmの条件で実施しており、第4章の条件(WD=12mm)よりも長いWDとなっている。低加速対応には、短WDに合わせたフレーム外形、信号検出部寸法を含む検出器仕様の再検討、および取付方法(特にTop0検出器をフレーム内に設置する方式等)の再設計が前提条件となる。本章の結果は角度分解評価の有効性を示すものであり、低加速条件への適用は今後の検討課題である。

研究課題3(正十二面体MCP検出器による多方向・多グリッド条件での信号取得)との関係で整理すると、本章では、多方向・多グリッド条件でSE像・BSE像を取得できることを示した。

多面体MCPによる角度分解の有効性については、代表的な三つの試料で実験的に確認できた。検出方向を変えるだけで、凹凸の強調のされ方、組成界面の輪郭の見え方、三次元形状からのBSE強度分布が明確に変化し、検出方向の違いが像コントラストとして現れることを像で示した。

エネルギー情報との組み合わせについては、グリッド電位を用いてSE・BSEの二つのエネルギーウィンドウを定義し、すべての検出方向で共通の条件を適用した。これにより、角度の違いを主な変数としつつ、「SE像」と「BSE像」を同じ放出方向で比較でき、SEとBSEの役割分担やBSEの放出方向依存を整理しやすくなった。精密なエネルギー分解には至っていないものの、角度・エネルギーの両面から像の成り立ちを眺めるという目的には十分な情報が得られている。

将来の検出モジュール設計への示唆という観点では、三つの試料が別々の側面を示した。波打ち試料からは、凹凸の向きを読み分けるための検出角の選び方、Cu-Al共晶試料からは、界面近傍でのBSE強度分布を利用した組成境界の強調方法、SUS球からは、三次元形状の角度分布を捉えるための上方・斜め・下方検出の役割が見えてきた。これらの知見を組み合わせ

せれば、「どの角度帯を受ける検出器をどこに置くか」,「どのエネルギー帯を強調するフィルタ条件を採るか」といった具体的な設計指針に落とし込むことができる。

以上を踏まえると,正十二面体MCP検出器は本章で扱った条件(加速電圧15 kV)では,SEM像の成り立ちを角度とエネルギーの両面から理解するための実験手段として有効である。また,本章の結果は,高機能検出モジュールや新しい観察モードを構想するうえでの基礎データを与える。一方で,1-3 kVの低加速条件での角度・エネルギー分解の評価は未実施であり,この条件で同様の有効性が得られるかは現時点では結論できない。低加速条件で検証するには,所要の幾何条件を確保したうえで,本章と同じ手順を再現し,妥当性を確認する必要がある。今後,多面の同時読み出しやエネルギー閾値の多段化を進めれば,より詳細な放出角度・エネルギーマップを構成できる。また,4章で扱った低加速観察とも接続した検出系設計へと発展させることができる。

第 5 章の参考文献

1. Y. Yanagihara, Y. Yao, H. Yamamoto, and T. Sekiguchi, “Detection of low-energy backscattered electron in scanning electron microscopy using microchannel plate detector,” *Microscopy*, doi:10.1093/jmicro/dfaf033 (2025).
2. T. Sekiguchi, Y. Yao, R. Sonoda, and Y. Sohda, “Acceptance characterization of electron detector in SEM using stainless steel sphere,” *Microscopy* 74, 79–85 (2024).
3. L. Reimer, *Scanning Electron Microscopy: Physics of Image Formation and Microanalysis*, 2nd ed. (Springer, Berlin, 1998).
4. L. Reimer, *Image Formation in Low-Voltage Scanning Electron Microscopy* (SPIE, Washington, 1993).
5. K. Kumagai and T. Sekiguchi, “Sharing of secondary electrons by in-lens and out-lens detector in low-voltage scanning electron microscope equipped with immersion lens,” *Ultramicroscopy* 109, 368–372 (2009).
6. T. Sekiguchi and H. Iwai, “Low-pass secondary electron detector for outlens scanning electron microscope,” *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 088001 (2015).

第6章 研究成果の実装方針と提供形態

6.1 本章のねらい

所属企業は、検出器・光センサなどのデバイスを、装置メーカーに組み込んでもらうことで売上を得る B to B 型のビジネスを基本としている。最終的なユーザーは研究者や技術者である。一方、製品を直接納める相手は装置メーカーである。したがって、ユーザーとの距離が一段階ある構造になっている(図 67)。

近年は、開発部門のエンジニアが装置ユーザーと直接話す機会が減っている。そのため、製品がどの観察・測定に使われ、どの場面で困られているのかが見えにくい。その結果、「何をどのように改良すればユーザーの役に立つのか」という開発の方向性を描きにくいという課題がある。

著者はこのギャップを小さくしたいと考えた。本研究では、SEM ユーザーである関口教授らとの共同研究を通じて、「ユーザーが本当に得たいもの」を起点に検出モジュールを検討してきた。低加速 SEM で不足している情報を整理し、そのギャップに対して MCP 検出器がどこまで貢献できるかを、第3章～第5章で順に検証している。

共同研究で得られた結果は、国内外の学会で発表し、装置メーカー側と対話するきっかけとした。国内の汎用 SEM メーカーへのヒアリングでは、MCP 検出モジュール採用に最低限必要と考える性能・信頼性・インターフェースを確認した。あわせて、評価用モジュールとして現実的な形態について意見を得た。また、欧州向け営業拠点では、成果紹介をもとにプロモーションが行われ、海外の大手 SEM メーカーからも「評価してみたい」という関心表明が得られている(図 68)。

本章では、これらの共同研究の結果と国内外の装置メーカーから得られた一次情報をもとに、MCP 検出器を SEM 用検出モジュールとして事業化する際の条件を整理する。まず、想定するモジュール構成と提供価値を明確にする。つぎに、装置メーカーから見た技術要件・導入条件をまとめる。さらに、ターゲットとする装置・メーカー像と導入ステップ、売上シナリオを検討する。研究課題4で掲げた「事業化・モジュール化の成立条件」に対する答えを示すことを目指す。なお、本章で扱う内容には内部情報も含まれる。したがって、博士論文として公開できる範囲に留める。

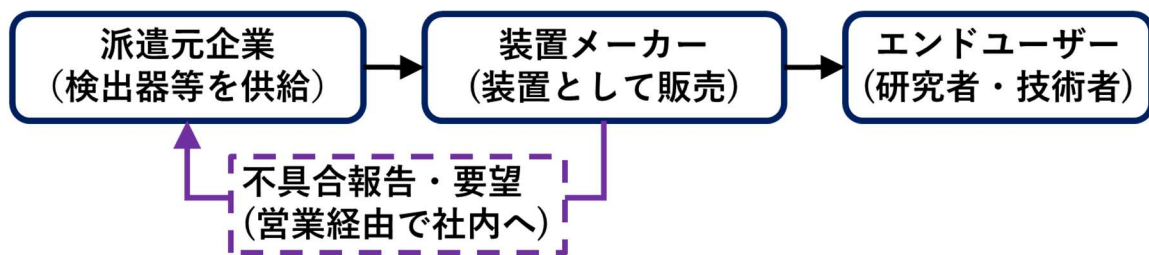


図 67 製品・情報の流れの概念図

従来の所属企業のビジネス構造では、検出器・光センサは装置メーカーを通じてエンドユーザーに届けられる。ユーザーの困りごとや要望は営業ルートを経由して間接的にフィードバックされる。したがって、開発現場からはユーザーとの距離が一段階ある構造となっている。

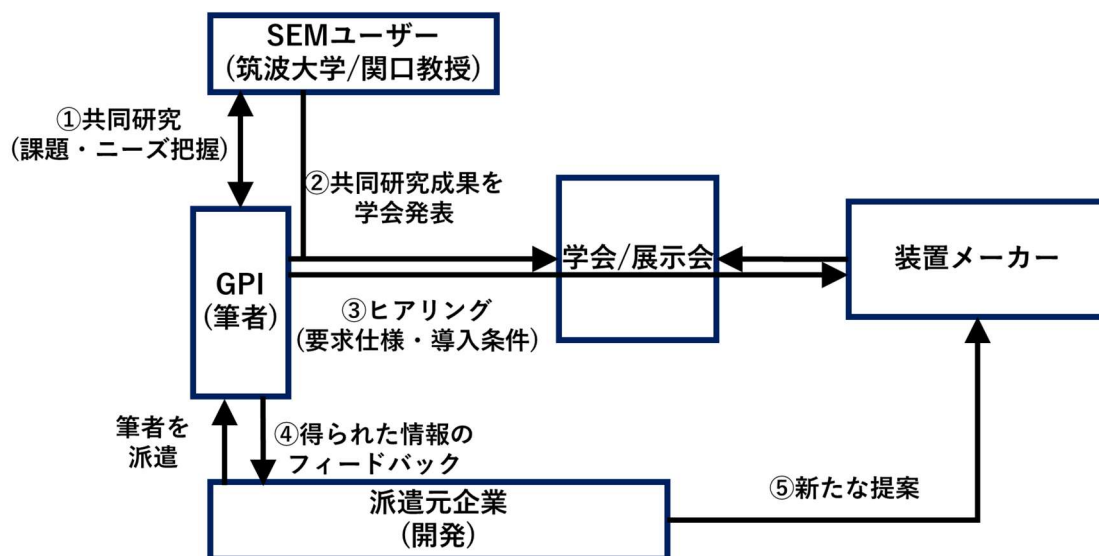


図 68 本研究で構築した「ユーザー・装置メーカー・所属企業」の関係と情報の流れ

6.2 研究成果の発信と装置メーカーとの接点

本研究の成果は学会発表を通じて公開した。低加速条件での MCP 像と従来 BSE 像の比較, グリッド電圧を変えて得られる像の差分処理により, SE 成分と BSE 成分を分けて見られることを, 国内外で報告した。これにより, 装置メーカーに対して, MCP 検出器が提供し得る情報を, 実例に基づいて説明できるようになった。

国内では学会発表をきっかけに, 装置メーカーの担当者と継続的に議論し, 「装置に組み込む場合の懸念点」「必要な性能・寿命」などの意見得た(表 3)。所属企業の営業担当者も, 研究成果を基に装置メーカーとの接点構築を支援した。

海外では現地法人が学会発表資料を用いて装置メーカーに紹介し, 研究ラインで試してみたい」「既存検出器の位置に置いて評価したい」といった具体的な要望が得られている。(図 69)。

表 3 国内装置メーカーへのヒアリングから得られた主な要求事項

観点	主な内容
低加速での実用性	1 kV 前後でも従来とは異なるコントラストを安定して得られるか
寿命・メンテナンス	使用時間・条件とゲイン変動の関係, 他の消耗部品と同程度の交換サイクルか
導入負担	既存上方 BSE 検出器の位置に少ない改造で置き換えられるか, 高圧配線も含めて組み込みやすいか
供給形態	高圧電源・アンプを含めた一体供給 (推奨構成をセットで提供してほしい)

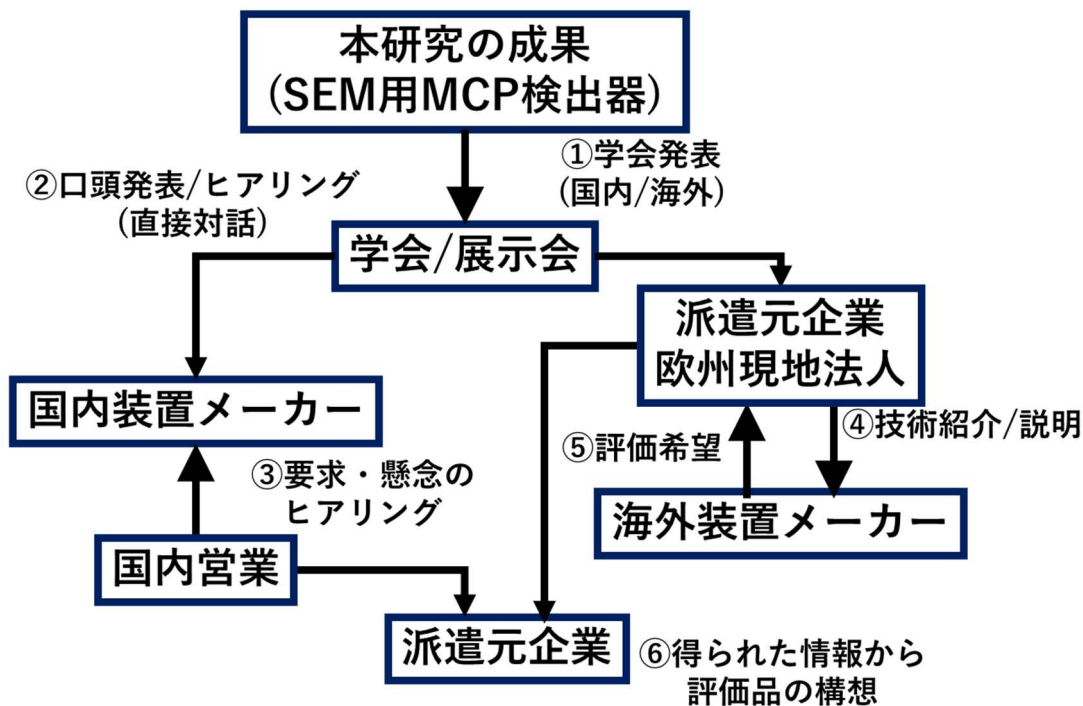


図 69 本研究成果の発信と装置メーカーとの接点構築

また、所属企業自身も半導体デバイスのメーカーであり、社内にも SEM や集束イオンビーム走査電子顕微鏡 (Focused Ion Beam-Scanning Electron Microscope: FIB-SEM) を日常的に用いるユーザーが存在する。とくに、半導体製品を扱う固体事業部の品質保証部は、不良品解析や故障解析を専門とする部門であり、汎用 SEM に加えて FIB-SEM や各種観察装置を多数保有している。著者は本研究の途中経過を同部門の管理職および担当者に説明し、「不良解析で金属配線の下地や界面の情報を見たい」「膜厚が比較的厚い膜でも有効に使えるか確認したい」「不具合箇所のおおよその位置が分かれば、FIB で削る範囲を絞り込めて効率化につながる」「Al 以外の金属や多層膜も観察できるとありがたい」といった、半導体故障解析の現場からの具体的なニーズを聞き取ることができた。これらのニーズは、本論文で検討した検出器構成だけでは直ちに解決できるものではないが、将来的に MCP 検出器の観察シーンをどのような方向へ拡張し得るかを考えるうえで、社内ユーザーから得られた重要なインプットである。

このように、学会発表と営業活動を組み合わせることで、国内外の装置メーカーから、MCP 検出モジュールに対する期待と懸念を直接聞き取ることができた。次に、そこで挙げた主要要求事項を整理する。

6.3 市場環境と顧客セグメントの整理

MCP モジュールを事業として成立させるため、顧客に対して提供できる価値を整理する。まず 3C 分析[1]により顧客 (Customer)、自社 (Company)、競合 (Competitor) を俯瞰する。つぎに SWOT 分析とリークキャンバス[2]を用いて、強み・弱みと機会・脅威を整理し、本研究で想定するビジネスモデルの骨格を示す。

6.3.1 3C 分析

本研究は、MCP モジュールを装置メーカー向けの検出モジュールとして提供することを想定している。その成立条件を整理するため、(i) 装置メーカーと最終ユーザーの要求、(ii) 自社の提供範囲 (素子・アセンブリ・周辺回路等)、(iii) 比較対象となる既存検出器と「導

入しない」選択肢を、同一枠組みで整理する。そこで本節では、3C 分析により、顧客 (Customer)、自社 (Company)、競合 (Competitor) の関係を俯瞰し、次節以降の SWOT 分析とビジネスモデル整理の前提を明確化する。

(1) Customer : 誰に対して何を出そうとしているか

直接の顧客は、汎用 FE-SEM や分析 SEM を製造・販売する装置メーカーである。国内には汎用機・分析機を広く展開するメーカー群があり、海外にも、とくに欧州を中心に、低加速観察や多検出器構成を積極的に採り入れているメーカーが存在する。いずれも既存の SE/BSE 検出器を前提としつつ、「低加速で新しい情報が取れる検出モジュール」を差別化要素として検討し始めている。

最終的なユーザーは、大学・研究機関や材料評価・半導体関連企業など、SEM を実際に使う側である。特に薄膜や多層配線を扱うユーザーは、「試料をあまり傷つけずに観察したい」「薄膜の下や界面がどうなっているかを知りたい」「FIB で断面を切る前に当たりをつけたい」といったニーズを持つ。MCP モジュールは装置メーカーを通して、こうしたニーズに応えることを狙う。

国内装置メーカーとの対話からは、おおむね次のような関心・条件が示されている。

- 低加速での BSE 像が、実用になるか
(1 kV 前後でも安定にコントラストが得られるか)
- 寿命とメンテナンスサイクルの目安
(使用時間とゲイン変動, 交換サイクルの考え方)
- 導入負担の小ささ
(既存の BSE 検出器の位置への置換, 配線を含む組込み容易性)
- 電源・アンプを含めた一体供給
(推奨構成をセットで提供してほしい)

海外の装置メーカーからは、「まずは研究ラインで試してみたい」「既存の検出器の位置に置いて評価したい」といった声があり、小型で配線が少なく既存環境に組み合わせやすいことが重視されている。

(2) Company : 所属企業側の立ち位置

所属企業は、各種検出デバイスを製造・販売する B to B のメーカーであり、装置メーカーに部品・モジュールを供給することを基本とするビジネスモデルをとっている。MCP 素子については、自社内で設計・製造を行い、質量分析や暗視装置、XPS などの用途向けに長年供給してきた実績がある。一方で、SEM 用途には実績が少なく、事業ポートフォリオの中では新規領域にあたる。

技術面の特徴としては、次のような点が挙げられる。

- MCP 素子を自社で製造できること
- 環境規制を見据えた鉛フリーALD-MCP を中長期的な方向性として検討していること
- 高圧電源や光検出器用アンプなど、周辺回路の技術を社内・グループ内に持ち、将来的に「MCP+電源+アンプ」を一体のモジュールとして設計できる余地があること

これらのうち、とくに信号処理系（アンプ）は像の見え方に影響する要素であり、評価段階からモジュール設計の中核として扱う必要がある。

試作初期の評価では、現行とは異なるアンプで MCP 像を取得していた。この条件では、MCP 像の右側に暗い影が現れるなど、明暗の引きずりが見られる場合があった（図 70）。このような像は見え方として望ましくなく、「MCP の特性」として解釈されると誤解を招く可能性がある。

その後、筑波大学側で作製されたアンプを用いて検出系を構成し、像取得と評価を進めている。これらの経験から、SEM 用途の MCP 検出器は素子・アセンブリ単体ではなく、信号処理系（アンプ）を含めた系として像品質を評価し、装置メーカーに提示することが重要であると認識した。今後、装置メーカー向けに提供する検出モジュールとして成立させるためには、これらの信号処理系を含めた設計・評価手法を自社側でも再現できる形にし、一体モジュールとして提示できることが重要になる。

ビジネス面では、次のような条件がある。

- MCP 素子自体は他の検出デバイスに比べて高価であり、数量が極端に増えない限り素子単価は下がりにくい
- 一方で、アセンブリに用いる機械加工部品や基板はロット数に応じて単価が下がるため、モジュール原価は設計と数量次第で調整余地が大きい
- 社内では特注品への対応負荷が問題となっており、「装置ごとに全く別の専用アセンブリを作る」ことには慎重である。検出器と電源・アンプをある程度共通化し、取付治具のみを装置ごとに変える構成が望ましい

本研究で検討している倒立型 MCP 検出モジュールは、MCP アセンブリに加え、高圧電源、アンプを組み合わせ、初期評価段階では 1 セットあたり 200～250 万円程度の販売価格を目安としている。ここから、数量と設計の共通化に応じて原価低減を図り、最終的には既存 BSE 検出器に対して妥当なプレミアムに収まる価格帯を狙う。なお、社内には Si-PD や PMT、シンチレータといった競合デバイスも存在し、MCP は用途・数量ともにマイノリティな位置にある。そのため、「売上への貢献がどこまで見込めるか」を明確に示さないと、リソース配分の面で優先順位を上げにくい。本研究は、SEM 用途に対して「MCP でなければ出せない情報」と「事業として見合う規模感」をあわせて示すことを目指している。

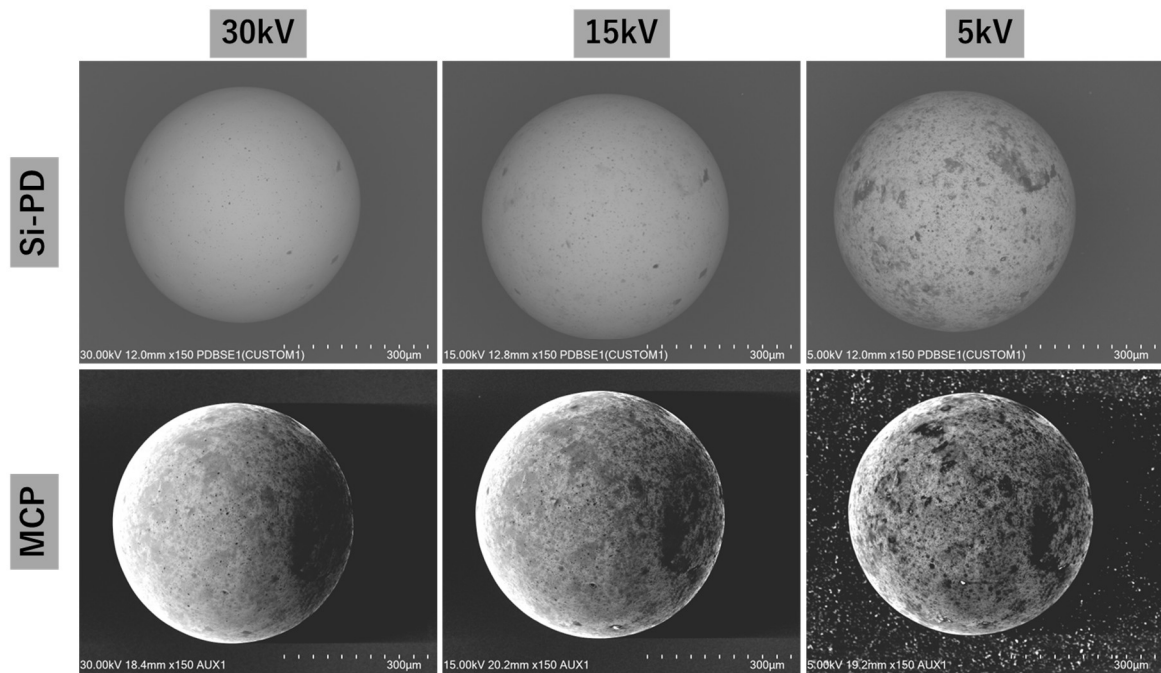


図 70 試作初期のアンプ構成で取得した MCP 像（倒立型検出器）

上段は Si-PD、下段は MCP で取得した SEM 像を示す。左から加速電圧 30 kV、15 kV、5 kV である。倍率はいずれも×150、スケールバーは 300 µm。取得日：MCP 像 2023 年 11 月 27 日、Si-PD 像 2023 年 11 月 28 日。

(3) Competitor：何と比べられるのか

競合と見なすべき対象は、用途と供給レベルによって大きく三つに分けられる。

第一は、既存の BSE 検出器である。Si-PD を用いた半導体検出器や、シンチレータと PMT を組合せた ET 検出器は、寿命、耐環境性、安全設計、コストの面で実績があり、装置メーカー側の設計・サービス体制も確立している。装置によってはエネルギーフィルタや多分割 PD を用いた高機能 BSE 検出器も導入されている。これらに対して MCP 検出モジュールは、「同じことができる安価な代替品」ではなく、「既存検出器では感度がほとんどない低エネルギー情報を追加するオプション」として位置づける必要がある。

第二は、「今のままで特に困っていない」という判断そのものだ。実務上は「既存の BSE 検出器で十分」「新しい検出器を載せるほどのニーズが見えない」という状態も強い競合になる。このため、薄膜下欠陥や多層膜など「現行装置では見えないが、現場では問題になっている領域」での有効性を、具体的な事例とともに蓄積していくことが重要になる。

第三は、MCP 素子そのものを供給する他社メーカーである。素子単体の価格・性能では複数社比較が前提となる。一方、本章で対象とするのは電源・アンプ・機構部を含めた SEM 向け検出モジュールとしての提供形態であり、装置メーカーの比較対象は主として既存 BSE 検出器と「導入しない」という選択肢になる。所属企業内にも Si-PD や PMT を SEM 向けに供給する部門があり、「社外の競合」に加えて「社内の競合」も存在することは、用途と規模の優先順位を考えるうえでの前提条件となる。3C 分析を行った結果を図 71 に示す。

3C 分析より、直接顧客は装置メーカーであり、最終ユーザーの「埋もれた情報を得たい」という要求に応えることが、本モジュールの提供価値の中心となる。一方で装置メーカーの比較対象は、既存の BSE 検出器だけでなく、「導入しない（現状で十分）」という判断そのものも含

まれる。したがって、薄膜下欠陥や多層膜など「現行装置では見えにくい現場では問題になっている領域」での有効性を、具体例として蓄積していくことが重要な前提条件となる。



図 71 3C 分析結果

6.3.2 SWOT 分析

3C 分析で整理した内容を、強み (Strength) , 弱み (Weakness) , 機会 (Opportunity) , 脅威 (Threat) の 4 項目に再整理する。3C 分析で得た情報を、内部要因 (強み・弱み) と外部要因 (機会・脅威) に分けて整理することで、事業化における優先課題と差別化の核を明確化する。

Strength (強み)

- MCP が低エネルギーBSE に高い感度を持ち、低エネルギーBSE を含む BSE を効率よく検出できる。
- グリッド電圧の切り替えと画像差分により、SE, 低エネルギーBSE, 高エネルギーBSE を、同一視野・同一条件のまま切り分けられる。
- サブナノ秒オーダーの高速応答性を持ち、将来的に高速スキャンや時間分解観察への展開が見込める。
- MCP 素子からアセンブリ、高圧電源、アンプまでを自社内で一体設計できるポテンシャルを持ち、モジュール化の自由度が高い。
- 質量分析や暗視装置など、他用途での MCP 実績があり、製造・品質管理・アセンブリ設計のノウハウを流用できる。

MCP の強みは、1 keV 以下の低エネルギー電子に対して感度を持つ点にある。本研究では、1-3 kV の低加速条件において、MCP が低エネルギーBSE を検出できることを示した。また、グリッド電圧の切り替えと画像差分により、SE/低エネルギーBSE/高エネルギーBSE を同一視野・同一条件のまま切り分けられることを確認した。一方で、薄膜下構造に関する情報が得られることを一般化できたわけではない。得られた示唆は特定の試料・観察条件に基づく。

これらの特性が実際の装置用途として有効かどうかを見極めるため、本研究では装置メーカーとの面談に加え、装置ユーザーとして材料評価に携わる社内事業部の技術者からもヒアリングを行い、実用上求められる情報や評価観点の整理を進めた。本文中では十分に示すことができなかった点については、今後、ユーザーからのインプットを得ながら、観察条件の妥当性と有効性を検証していく必要がある。

Weakness (弱み)

- SEM 用途での寿命データがまだ少なく、「どの条件でどのくらい持つか」を具体的な数字で示しにくい。

- MCP 素子の単価が Si-PD などに比べて高く、モジュールとしても初期段階では高価格になりやすい。
- 高電圧を用いる構成であるため、実装時に考慮すべき事項が多い。
- 社内では特注品への対応負荷が課題となっており、装置ごとに大きく仕様が異なるアセンブリには対応しづらい。
- エンドユーザーと開発者が直接対話する機会が限られており、「どの試料・どの観察でどの程度役に立つか」の具体例がまだ十分ではない。
- 社内に Si-PD や PMT といった代替デバイスを扱う部門があり、リソース配分の面で不利になりやすい。

Opportunity (機会)

- 汎用 SEM でも低加速観察や多検出器構成へのニーズが高まり、「新しいコントラスト」が差別化要素として注目されている。
- 半導体デバイスや多層薄膜の分野では、FIB で削る前に「どこを重点的に見るか」の手がかりを与える非破壊観察手段への関心が高い。
- 国内外の装置メーカーから、「まず研究ラインで試してみたい」という反応が得られており、評価用モジュールを入口とした協業の余地がある。
- MCP 用高圧電源やアンプをモジュール化できれば、SEM 以外の用途にも横展開でき、MCP 事業全体の付加価値向上につながる。
- 鉛フリーALD-MCP の検討は、将来の環境規制強化に対して先手を打てる要素となり、「環境対応型の新世代検出モジュール」としての位置づけを取り得る。

Threat (脅威)

- 既存の BSE 検出器が改良され、低加速での性能が向上していけば、「MCP でなければならぬ」領域は狭まる可能性がある。
- 他社による MCP 製品や、他方式のエネルギー選択型検出器が別ルートで採用されるリスクがある。
- MCP の寿命や価格に関するネガティブなイメージが強すぎると、実際の性能にかかわらず採用の入口に立てないおそれがある。
- 社内リソースや製造キャパシティに限りがあるなかで、特注対応が増えすぎると既存事業への悪影響が出る可能性がある。

以上より、MCP 検出モジュールを成立させるためには、「低エネルギー-BSE の情報価値」を具体的な利用シーンと結びつけて示すことが重要である。同時に、寿命・安全性・コストへの懸念を、評価用モジュールと、標準化された構成により段階的に低減する必要がある。SWOT 分析した結果を図 72 に示す。

SWOT 分析の整理結果を踏まえ、次節では、顧客・価値・チャンネル・収益の整合を確認するため、リーンキャンバスとしてビジネスモデルを具体化する。

内部要因	外部要因
Strength (強み) <ul style="list-style-type: none"> ・ low-E BSE感度 ・ グリッドでSE/BSE切替可 ・ MCP～電源を自社一貫設計 	Opportunity (機会) <ul style="list-style-type: none"> ・ 低加速観察ニーズの高まり ・ 薄膜下／多層膜解析ニーズ ・ 評価用モジュールへの関心
Weakness (弱み) <ul style="list-style-type: none"> ・ 寿命データ不足 ・ 素子コストが高い ・ 高電圧・安全設計のハードル 	Threat (脅威) <ul style="list-style-type: none"> ・ 既存BSE検出器の改良 ・ 他社MCP・代替検出器 ・ 「MCPは寿命が短い」という印象

図 72 SWOT 分析結果

6.3.3 ビジネスモデル

MCP モジュールのビジネスモデルを、リーンキャンパスの形で整理する。ここでは、「誰のどんな問題に対して」「どのようなモジュールを」「どのチャネルで」「どのような前提で事業化するか」を一枚で対応付け、評価段階から量産段階へ移行するための要点を明確にする。

(1) 顧客セグメント (Customer Segments)

- 直接の顧客：汎用 FE-SEM や分析 SEM を製造・販売する装置メーカー。低加速観察や多検出器構成を重視し、新しい検出モジュールによる差別化の可能性を探っている層。
- 間接的な顧客：大学・研究機関、材料評価・半導体関連企業などの SEM ユーザー。試料ダメージを抑えた観察、薄膜下・界面の情報、FIB 加工前の当たり付けといったニーズを持つ。

(2) 解決したい問題 (Problem)

- 1-3 kV の低加速 SEM で、BSE 検出器が 1 keV 以下の BSE にはほとんど感度を持たず、低加速観察のメリットを十分に活かしきれていない。
- 薄膜下欠陥や界面欠陥の評価で、現状は FIB による断面作製など破壊的な手段に頼らざるを得ず、「どこを切るべきか」の手がかりが乏しい。
- B to B のビジネス構造の中で、検出器メーカーの開発者とユーザーが直接対話する機会が少なく、「ユーザーが本当に欲しい性能や使い方」を起点にモジュール設計を進めにくい。

(3) 提供価値 (Unique Value Proposition)

MCP モジュールが提供する価値は、「低加速 SEM において、従来の BSE 検出器では十分に拾えていなかった低エネルギーBSE 帯の情報を、装置側の改造を最小限に抑えながら追加できること」である。具体的には、MCP の低エネルギー電子に対する高い感度と高速応答性を活かし、検出器を追加するだけで、「低エネルギー成分を強調した像」や「グリッド電圧差分を用いた成分ごとの像」を取得できるようにする。装置メーカーにとっては、「既存検出器の単純な置き換え」ではなく、「低加速観察向けの追加オプション」として新しい観察モードを提供できる点が価値となる。

(4) ソリューション (Solution)

- MCP 検出アセンブリ
MCP の 2 枚直列構成を基本とし, In/Out 電極, アノード電極, 絶縁部材, シールド板, グリッド電極を一体化したアセンブリとする。既存の BSE 検出器と同等の位置に取り付けられるよう, フランジ・ホルダを設計する。
- 電源・アンプを含むモジュール化
MCP 用高圧電源と信号読み出し用アンプを組み合わせ, 「電源・アンプ込みで接続すればすぐ使える」構成を目指す。将来的には, SEM 以外の用途にも展開可能な汎用 MCP 用電源モジュールとすることを視野に入れる。
- グリッド電圧制御と画像処理の基本レシピ
グリッド電圧の条件を切り替えて得た像から, 画像差分により SE 像, 低エネルギー-BSE 像, 高エネルギー BSE 像を構成する基本的な手順をセットで提供し, 評価段階から試しやすくする。

初期段階では装置メーカー向け評価モジュールとして提供し, 実機への組み込み・試験運用を通じて, 寿命・安全性・メンテナンス性に関する条件を詰める。そのうえで, 量産機種オプション検出モジュールとしての形に落とし込むことを目標とする。

(5) チャンネル (Channels)

- 国内：既存の営業体制を通じて, 汎用・分析 SEM を扱うメーカーの開発部門・企画部門に提案する。大学・研究機関との共同研究で得られたデータや学会発表資料を用い, 「ユーザーの声」と「実測データ」をセットにして説明する。
- 海外：現地法人のセールスが, 国際学会でのポスター発表資料などを用いて欧州メーカー等に紹介する。まずは研究ラインでの評価を入口とし, 評価モジュールの導入から量産機種への展開を狙う。

いずれも, 「学会発表で関心を得る」→「評価モジュール導入」→「量産機種オプション採用」という段階的な流れを基本とする。

(6) 収益の流れ (Revenue Streams)

- 評価用モジュールの販売
MCP アセンブリ, 電源やアンプなどを含む評価キットとして, 1 セットあたり 200~250 万円程度を想定する。少量多品種の段階では, 技術検証パッケージとしての位置づけになる。
- 量産機種へのオプション採用
量産機種にオプション検出モジュールとして組み込まれた場合には, 年間出荷台数とオプション付加率に応じて, モジュール単価×台数分の売上が継続的に見込まれる。

将来的には, 汎用の MCP 用高圧電源やアンプを別用途にも展開し, 「検出モジュール一式」だけでなく「電源モジュール単体」からの収益も追加で狙う。

(7) コスト構造 (Cost Structure)

- MCP 素子コスト：他の検出デバイスに比べて高価であり, 数量を極端に増やさなければ単価は下がりにくい。
- アセンブリ・機械部品・基板コスト：ロット数に応じて単価が大きく変わり, 評価段階と量産段階でコスト構造が大きく異なる。

- 電源・アンプ・ケーブル類：専用電源・アンプを自社ラインナップとする場合には、開発費を含む初期投資が必要になる。
- 開発・サポート工数：装置ごとのインターフェース合わせ、安全設計の検討、評価段階での技術サポートなど、人件費に相当する部分。

全体として、「MCP 素子は数量であり安くない一方、アセンブリと周辺機構は数量で大きく変わる」という性質を前提に、評価段階と量産段階で価格戦略を変える必要がある。

(8) 主要指標 (Key Metrics)

- 評価用モジュールを導入した装置メーカー数
- 評価完了まで到達した案件数とフィードバック結果
- 量産機種での採用モデル数とオプション付加率
- MCP 事業全体に占める SEM 用途の売上構成比
- フィールドで確認された寿命データ（使用時間・照射条件とゲイン変動の関係）

これらの指標を追うことで、「どの段階がボトルネックか」「どの市場セグメントが有望か」を確認しながら、モジュール仕様やターゲット市場を調整していく。

(9) 独自性・優位性 (Unfair Advantage)

- MCP 素子・アセンブリの設計・製造に関する長年のノウハウと、他用途での実績を持つこと。
- 実機 SEM による低エネルギーBSE 検出の検証結果を、装置ユーザーと共同で蓄積しており、「どういう試料で役に立つか」を実測データとして示せること。
- 社内に Si-PD や PMT などの競合デバイスもあるが、それらと補完関係にある「低加速専用オプション」としてポジショニングできる余地があること。
- 学会発表や国際会議を通じて、国内外の装置メーカーと直接対話できるチャンネルを既に確保していること。

これらは、他社が同様の MCP モジュールを一から立ち上げる場合と比べたときの優位性として働くと考えられる。

ビジネスモデルを整理するために作成したリーンキャンバスをに、リーンキャンバスに基づくビジネスモデル模式図を図 74 に示す。リーンキャンバスにより、本研究が想定する提供形態は、装置メーカーを直接顧客としつつ、早期導入ユーザーの試作評価を通じて有効性を具体例として蓄積し、導入機種数の拡大とオプション採用につなげる構造である。成立性を評価する指標として、導入機種数、評価用モジュールの出荷台数、オプション付加率、およびフィールドで確認された寿命データ(使用時間・照射条件とゲイン変動の関係)を主要指標として設定する。

課題	解決策	独自の価値提供	圧倒的な優位性	顧客セグメント
<ul style="list-style-type: none"> ● 低加速で情報活かさない ● 薄膜下欠陥でFIB頼り 	<ul style="list-style-type: none"> ● MCPモジュール+手順提供 ● 電源/アンプ一体モジュール 	<ul style="list-style-type: none"> ● 低加速で中間E帯情報追加 ● 最小改造で追加オプション 	<ul style="list-style-type: none"> ● MCPノウハウと実測データ ● 検出器メーカーとして複数の選択肢ある 	<ul style="list-style-type: none"> ● 汎用/分析SEM ● 半導体/材料ユーザ
			主要指数	
	<ul style="list-style-type: none"> ● 導入メーカー数 ● 採用機種数/オプ率 		<ul style="list-style-type: none"> ● 学会/論文 ● 国内営業/現地法人 	
コスト構造		収益の流れ		
<ul style="list-style-type: none"> ● MCP素子/アセンブリ ● 電源/アンプ/サポート 		<ul style="list-style-type: none"> ● 評価用モジュール売上 ● 量産機種オプション 		

図 73 リーンキャンバス

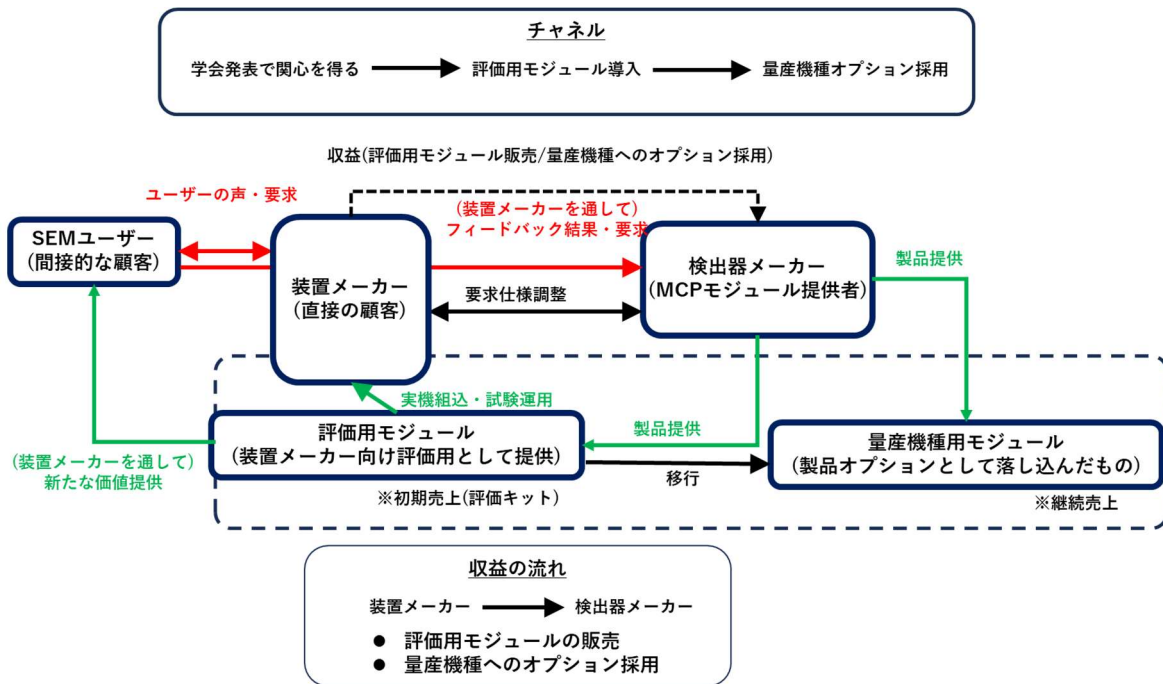


図 74 リーンキャンバスに基づくビジネスモデル模式図

6.4 MCP モジュールの構成と展開方針

これまで整理した市場環境と顧客ニーズ、自社のコスト構造や運用条件を踏まえ、MCP 検出モジュールの位置づけと提供形態、および評価段階から量産段階への展開方針をまとめる。ポイントは、①モジュールの位置づけ、②一体化範囲、③評価フェーズと量産フェーズの仕様切替である。

6.4.1 基本コンセプト：低加速専用オプションとしての「共通コア」

本研究で想定する MCP 検出モジュールは、「低加速 SEM における低エネルギー電子情報を付加する専用オプション」として位置づける。既存の BSE 検出器を単純に置き換えるのではなく、以下の機能を追加する役割を担う。

- 低エネルギーBSE を含む低エネルギー電子に対する高い感度
- グリッド電圧と画像差分による SE/低エネルギーBSE/高エネルギーBSE の切り分け
- 高速応答性を活かした将来的な高速スキャンへの展開

構造面では、MCP アセンブリ、高電圧電源、アンプを「共通コア」としてまとめ、装置ごとに変化しやすい要素（取付治具、一部インターフェース）のみを変更する方針を採る。これにより、装置ごとの特注品の乱立を避けつつ、数量効果による原価低減を図る。また、電源・アンプを共通化することで、質量分析など SEM 以外の用途への横展開も可能になる。

6.4.2 評価用モジュール（試験導入フェーズ）

装置メーカー側の最初の関心は、「低エネルギーBSE が有用な像情報をもたらすか」と「寿命や安全性を含む運用上の感触がどうか」を確認することである。そのため最初のステップでは、評価用MCP検出モジュールを、装置メーカーが最小限の負担で導入できる形で提供することを想定する。

- 構成
 - 倒立型 MCP アセンブリ（BSE 検出器位置に収まる厚み）
 - 専用高電圧電源ユニット
 - 信号アンプユニット
 - 接続ケーブル、簡易インターフェース
- 導入のイメージ
 - 既存の BSE 検出器を取り外し、同じ位置に MCP 検出ヘッドを取り付ける
 - 電源・アンプは独立ユニットとして据置き、既存の信号取出ラインに接続する
 - グリッド電圧条件と画像差分の「基本レシピ」を添付し、評価観察にすぐ使える状態で提供する

このフェーズでは、モジュールの単価は高めになる代わりに、装置メーカー側の設計工数とリスクを最小限に抑えることを優先する。寿命やメンテナンスサイクル、高速応答性、耐環境性能なども、評価用モジュールを通じて実データを蓄積し、許容範囲を詰める。

海外メーカー向けには、既存環境に導入しやすい「アセンブリ中心」の評価形態も想定する。たとえば既存の検出器フレームと互換性のある形状であれば、装置側の読み出し系をそのまま活用できる。この場合は、導入のハードルを下げられる。

6.4.3 量産オプションモジュール（本格導入フェーズ）

評価フェーズで技術的な有効性と運用面の条件が確認できた場合、次の段階として量産機種オプションモジュールとして組み込むことを想定する。このフェーズでは、装置メーカーの製品設計・サービス体制に組み込めるような形でまとめることが重要になる。

量産フェーズの方針は次の通りである。

- コア構成の固定
 - MCPアセンブリの機械寸法と配線仕様を1～2種類に絞り、汎用FE-SEM全体で共通化できるようにする
 - 高電圧電源・アンプは、他用途のMCPにも流用できる共通ユニットとし、必要に応じて仕様をレベルで区別する
- ライフとメンテナンスの「約束事」を明文化
 - 代表的な運転条件におけるゲイン変動のデータから、「この条件ならおおむね〇〇時間程度」「電子銃フィラメントと同じサイクルで交換」といった運用目安を整理する
 - 一般的なメンテナンス手順と組み合わせた場合の注意事項をマニュアル化する
- 価格帯
 - 共通化の効果を踏まえ、1モジュールあたりの原価構造を整理する。
 - 年間10台規模と50台規模での原価差を見積もり、装置メーカーとの協議の中で価格階層を設定する

量産オプションを定着させるには、「低エネルギーBSEの情報価値」だけでなく、「交換サイクル」「サービスマニュアル」「信頼性」が既存検出器と同程度に整っていることが重要求められる。評価フェーズで得られた実績を反映しつつ、MCPならではの注意点を最小限に抑えた構成に落とし込むことが事業化条件となる。

6.4.4 展開ステップのイメージ

MCPモジュールの展開は、大きく三段階で捉えることができる。

1. 共同研究ラインでの検証
既に導入実績のあるFE-SEM（例：SU7000）を用いて、大学・研究機関との共同研究の中で低エネルギー電子像への有効性を検証し、代表的な利用シーンを事例として蓄積する。
2. 装置メーカーの評価ラインへの導入
国内外の装置メーカーに対して評価用モジュールを提供し、研究ライン/試験機を使って、ライフ、安全性、既存検出器との比較を行ってもらおう。ここで得られるフィードバックが、モジュール仕様の最終調整と量産構成の設計に直結する。
3. 量産機種へのオプション採用と用途展開
汎用FE-SEMの特定機種からオプションとして採用され、十分な数が出るようになれば、半導体SEMや他種電子光学装置への展開も視野に入る。MCP用高電圧電源・アンプを共通化しておけば、SEM以外のMCP用途にも同じモジュールを応用できる。

このように、「共通コアを持った評価用モジュール」から出発し、「標準化された量産オプションモジュール」へと段階的に切り替えていくことが、技術リスクと事業リスクを抑えながらMCP検出モジュールを立ち上げるための基本的なシナリオになる。

6.4.5 ロードマップによる展開計画の共有

本研究の終盤では、検出モジュールの立ち上げに関わる関係者間で進め方の見通しを共有するために、図 75 に示すロードマップを作成した。

このロードマップは、光産業創成大学院大学（The Graduate School for the Creation of New Photonics Industries: GPI）在学期間を通じた評価・検証のステップを時系列で並べたものである。社内関係部門や海外現地法人と、「どの時期にどのレベルの試作・評価結果を用意するか」「どの段階で装置メーカーとの議論に入るか」の認識をそろえるツールとして用いた。なお、図中のイベントは詳細計画を厳密に規定するものではなく、MCP 検出モジュール立ち上げに向けたフェーズ構成を可視化することを目的にしている。

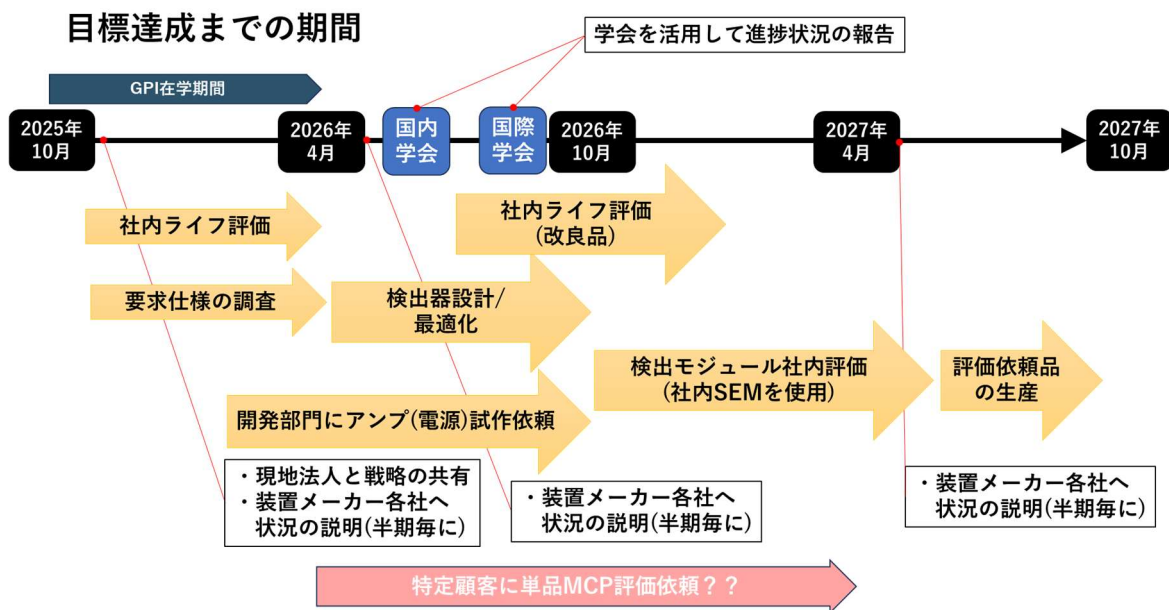


図 75 著者が作成したロードマップ

6.5 売上シナリオと研究課題 4 への回答

MCP モジュールが MCP 事業全体に与え得るインパクトを、簡単な売上シナリオとして整理し、研究課題 4 に対する答えをまとめる。

6.5.1 MCP 事業ポートフォリオの中での位置づけ

現状の MCP 事業は、質量分析、暗視装置など、歴史の長い用途が売上の大部分を占めており、SEM 向けはほぼゼロに近い位置づけである。ここに SEM 用途が加わる場合、汎用 FE-SEM や分析 SEM に搭載される BSE オプションとして年間数十～数百台規模が見込まれる。さらに、半導体 SEM やパッケージング検査向け SEM に後付けモジュールとして導入される分が加われば、さらに上乘せが期待できる。

MCP 素子は用途ごとにサイズ・仕様が分かれているため、SEM 用の素子・アセンブリが一定の数量を持てば、既存用途とは別の「柱」として扱える可能性がある。売上構成比のイメージとしては、現状(MS, 用途 A, 用途 B が大半, SEM 用はごく一部)を起点に、導入の進み方に応じて段階が想定できる。

- シナリオ 1 (慎重) : 国内メーカー1 社+海外メーカー1 社で評価採用, MCP 事業全体に対する SEM 用の構成比が数 %程度
- シナリオ 2 (中庸) : 主要汎用 SEM メーカー2~3 社でオプション採用, 構成比が 1 割前後
- シナリオ 3 (積極) : 汎用 SEM と半導体 SEM の両方で複数社採用, 構成比が 2 割前後

重要なのは絶対額そのものというより, SEM 用途が MCP 事業ポートフォリオの中で無視できない割合に達するかどうかである。この水準を超えれば, 社内における MCP モジュールの優先順位を引き上げやすくなり, 評価・量産化に向けた投資判断やリソース配分にもつなげやすくなる。

6.5.2 導入台数を想定した売上シナリオ

導入の規模感を把握するために, 簡単な前提を置いた試算を示す。

- 対象となる汎用/分析 SEM の年間出荷台数 : N 台
 - そのうち, 低加速観察を重視し, 新しい BSE オプションへの関心が高い機種割合 : p
 - その中で MCP モジュールをオプションとして選ぶ割合 (オプション付加率) : q
- とおく。このとき, 1 年間に出荷される MCP モジュールの台数は,

$$\text{モジュール台数} \simeq N \times p \times q$$

となる。

量産フェーズの年間売上は, モジュール 1 台あたりの売上を R_{prod} とすれば,

$$\text{年間売上} \simeq (N \times p \times q) \times R_{\text{prod}}$$

と見積もれる。評価フェーズの売上は, 評価用モジュール価格と導入セット数の和として別途扱えばよい。

数字のイメージを持ちやすくするため例を示す。仮に,

- 対象機種の出荷台数 $N = 1,000$ 台/年
- そのうち低エネルギー BSE に関心の高い機種割合 $p = 0.3$ (全体の 3 割)
- その中で MCP オプションを選ぶ割合 $q = 0.2$ (5 台に 1 台がオプション付き)

とすると,

$$1,000 \times 0.3 \times 0.2 = 60 \text{ 台/年}$$

となり, 年間出荷台数はおよそ 60 台となる。N を数百~千数百台, p を 2~3 割, q を 1~2 割程度と見なすと, 概ね「年間数十~百数十台」のレンジになる。

この程度の規模であれば, MCP 用素子・アセンブリの製造ラインを大きくひっ迫させることなく, 「既存用途に対して, 新しい用途向けの 1 本の柱」として事業計画に組み込むことができる。

一方で, オプション付加率 q が 1 割を大きく下回る場合は, 装置メーカーにとっても「ニッチオプション」にとどまり, 社内のリソース配分上も優先順位を上げにくい。したがって, 事業

としては、「少なくとも特定機種で1~2割程度のオプション付加率を達成できる条件を整えること」が一つの目安になる。

本論文では、低エネルギー電子計測関連の事業化における規模感の目安として、年商2億円程度（評価フェーズと量産フェーズの合算）を想定する。ここで、R_prod を 200~250 万円/台と仮定すると、年商2億円に対応する年間出荷台数は80~100台/年（= 2億円 ÷ (200~250万円)）となる。

6.5.3 まとめと研究課題4の回答

研究課題4では、「MCPを用いたSEM検出モジュールを事業として成立させるために、どのようなモジュール構成とビジネスの条件が必要か」を問うた。本章で整理した技術結果、顧客ニーズ、および事業ポートフォリオ上の条件を踏まえると、必要な条件は次の三点にまとめられる。

第一に、技術・性能面の条件として、従来検出器では低感度の低エネルギーBSEに対し、新しい像情報を提示できることが必要である。グリッド電圧と画像差分を組み合わせることでSE/低エネルギーBSE/高エネルギーBSEの寄与を同一条件のまま切り分けられることが、MCPを採用する理由となる。加えて、代表的な運転条件に対する寿命データと交換サイクルの目安を示せること、高速応答性を将来の高速スキャン・時間分解観察へと拡張し得ることも、採用に関わる重要な要素である。

第二に、モジュール設計と運用面の条件として、MCPアセンブリ、高圧電源、アンプから成る共通コアを用意し、装置ごとには取付治具とインターフェースのみを変更する構成とすることが重要である。評価段階では、検出ヘッドと電源・アンプに加え、基本的な観察レシピを含むワンパッケージを準備し、「まず試してみる」までのハードルを下げる必要がある。量産オプションとしては、寿命・信頼性・サービス手順を既存BSE検出器と同水準に揃え、特別な扱いをしなくても運用できる検出ユニットとして成立させることが求められる。特注対応は最小限にとどめ、共通化された構成で原価と価格をコントロールできることも条件となる。

第三に、市場・ビジネス面の条件として、主な顧客セグメントを汎用/分析SEMメーカーと位置づけ、薄膜下欠陥や低加速観察を重視するユーザー層に向けた価値提案を用意する必要がある。学会発表や共同研究を通じて、装置ユーザーと装置メーカーの双方からフィードバックを得るチャンネルを維持しつつ、少なくとも特定機種で1~2割程度のオプション付加率を達成できる見込みを示すことが重要である。これにより、SEM用途がMCP事業全体の中で無視できない売上構成比に達する可能性を示し、社内資源の配分判断につなげることができる。

以上より、MCP検出モジュールを事業として成立させるためには、「低エネルギーBSEからの追加情報」と「共通コアモジュールとして供給できる形に落とし込むこと」、さらに「導入台数とオプション付加率の見込みを伴う事業条件を示すこと」が必要である。これらが揃えば、SEM用途は既存用途とは異なる一本の柱としてMCP事業に組み込むことが可能になると考えられる。

第 6 章の参考文献

1. K. Ohmae, *The Mind of the Strategist: The Art of Japanese Business* (McGraw-Hill, New York, 1982).
2. A. Maurya, *Running Lean: Iterate from Plan A to a Plan That Works* (O'Reilly Media, Sebastopol, CA, 2012).

第7章 本研究の総括と今後の展望

7.1 本研究の目的の整理

本研究の目的は、著者の所属企業における MCP 事業の売上を伸ばし、事業を拡大するための基盤をつくることである。そのための技術的・事業的な手段として、所属企業が保有する MCP 技術を核とし、MCP 事業における新市場の創出と、高付加価値な検出モジュールの実現に向けた具体的な道筋を示すことを目指した。

この目的を達成するために、本論文では、(1) 用途領域の選定、(2) 「MCP を用いることで、従来の主流検出方式では実質的に取り出せていなかった像情報をどこまで引き出せるか」の実証、(3) 事業化・製品化の成立条件の整理、という三つの観点を互いに関連づけながら検討した。具体的には、研究課題 1~4 として、低エネルギーBSE の検出、グリッド電圧差分像による帯域分離、角度・エネルギー分解観察の可能性、および検出モジュールとしての事業化条件を順に検証した。

その結果、まず (1) 用途領域については、第3章および第4章の検証を通じて、1-3 kV の低加速 SEM において MCP 検出器が有効に機能し、アウトレンズ BSE 検出器では像情報として取り出しにくい低エネルギーBSE を検出できることを示した。これにより、MCP 事業の新たな展開先として「低加速 SEM 向け検出モジュール」が具体的な候補となり得ることを確認した。(2) MCP を用いることで、従来の主流検出方式では像情報として取り出せなかった成分をどこまで引き出せるかの実証については、エネルギー帯および放出方向を操作しながら SE/BSE コントラストを読み分ける枠組みを提示し、低エネルギーBSE と放出方向が形状・材質・三次元形状の解釈に有用であることを実験的に示した。(3) 事業化・製品化の成立条件については、第6章で示した通り、ライフ、高電圧安全性、WD、インターフェース仕様といった技術要件と、導入ステップや売上シナリオを対応づけることで、MCP 検出モジュールが事業ポートフォリオの中でどの程度の位置を占め得るかを見積もり、現時点でのギャップと今後補うべき条件を明らかにした。

以下では、これらの結果を研究課題 1~4 ごとに整理し、本研究が技術面と事業面の双方に対してどのような知見を与えたかをまとめる。

7.2 目的と研究課題 1~4 に対するまとめ

7.2.1 研究課題 1：低エネルギー反射電子の検出

低加速 SEM において、Si-PD ではほとんど感度を持たないエネルギー帯を、MCP 検出器で拾えるかを検討した。同一装置・同一観察条件のもとで、Si-PD と MCP を同じ幾何配置で比較した結果、MCP 像では Si-PD 像に比べて、とくに低加速条件で像強度とコントラストが得られることが確認された。像強度やラインプロファイルに基づく比較から、この差は、MCP が数百 eV 近傍の低エネルギーBSE 成分に感度を持つことに起因していると解釈できる。低エネルギーBSE を、実機 SEM の中で Si-PD 像とは異なる「追加の情報源」として扱える見通しを示せた点が、研究課題 1 に対する本研究の答えである。

7.2.2 研究課題 2：グリッド電圧差分像による帯域分離

MCP 前段に設置したグリッド電極の電位を切り替え、複数の条件で取得した像の差分から、SE、低エネルギーBSE、高エネルギーBSE の寄与を分離できるかを検討した。観察した試料に対して、

グリッド電位の変化に伴うコントラストの変化が一貫しており、「SE 像」「低エネルギーBSE 像」「高エネルギーBSE 像」という三つの像モードを使い分けられることを確認した。

一方で、グリッド電位と電子エネルギーとの対応を実測に基づいて較正していない。この「電位-エネルギー対応のキャリブレーション」が、研究課題 2 に残る明確な課題である。

7.2.3 研究課題 3：角度・エネルギー分解観察の可能性

正十二面体フレームに複数の MCP を配置し、試料から放出される電子を異なる方位角で受ける検出系を構成した。Cu の波打ち表面、Cu-Al 共晶、SUS 球といった試料に対して、試料直上・斜め上・斜め下といった方向ごとに SE 像・BSE 像を取得した。その結果、凹凸コントラスト、組成コントラスト、三次元形状コントラストが、放出方向によって変化する様子を示した。ここでの角度分解の評価は、試料をフレーム中心に配置して幾何条件を揃え、複数方向の信号を相対比較している。

ただし、課題も残る。1-3 kV の低加速条件での角度分解評価は実施できていない。低加速観察で要求される短 WD に対し、正十二面体フレームの寸法と検出器配置が対応できていなかった。フレーム外形は既存 MCP の信号検出部寸法に合わせて作製したため、小型化ができなかった。さらに、Top0 検出器をフレーム上に搭載した結果、対物レンズ側クリアランスの支配要因となり、WD を短くできなかった。したがって低加速条件で検証するには、短 WD に合わせて①フレーム外形・開口、②信号検出部寸法を含む検出器仕様、③取付方法（特に Top0 をフレーム内に設置する方法等）を再設計する必要がある。あわせて、所要の検出配置（試料直上・斜め上・斜め下）を満たす幾何条件を確保することが前提となる。これは正十二面体検出器が高加速専用であることを意味しない。低加速に適した幾何条件を満たす設計に再構成したうえで、低加速条件で妥当性を確認する必要がある。

また実験の都合上、複数チャンネルの信号を完全に同時に読み出したわけではない。大気開放を伴う配線切り替えによって検出器を選択しているため、厳密な同時計測ではない。複数面を同時に読み出す制約が残っている。

以上をふまえ、次の課題は、低加速観察条件で同一手順を再現し、角度分解像の妥当性を検証することである。

7.2.4 研究課題 4：事業化・モジュール化の成立条件

MCP 検出系を装置メーカー向けの検出モジュールとして提供する際の条件については、技術面とビジネス面の両方から検討した。装置メーカーとの面談や海外現地法人を通じたヒアリングからは、寿命（ライフ）、メンテナンスサイクル、電源・アンプを含めた一体モジュールとしての扱いやすさ、といった要求が繰り返し示された。これらを踏まえて、MCP アセンブリ、高電圧電源、アンプを共通コアとし、取付治具とインターフェースのみを装置ごとに変えるモジュール構成と、評価用モジュールから量産オプションへと段階的に展開する売上シナリオを整理した。ライフの不確実性やオプション付加率の感度を踏まえると、現時点で「事業として十分な確度で成立する」とは断言できないが。一方で、どの条件が満たされれば MCP モジュールが事業ポートフォリオの柱になり得るか、その成立条件を具体的に整理できた。これを研究課題 4 に対する成果と位置づける。

7.2.5 目的に対するまとめ

本研究の目的は、著者の所属企業における MCP 事業の売上を伸ばし、事業を拡大するための基盤を作ることである。この目的に対し、所属企業が有する MCP 技術を核とし、SEM 用途における

新市場の創出と、高付加価値な検出モジュール実現に向けた具体的な道筋を示すことを目指した。

本論文では、この道筋を技術面と事業面の両方から具体化するために、研究課題 1~4 を設定した。研究課題 1~3 では、低加速条件を含む実機 SEM の観察結果に基づき、従来の検出器では像として扱いにくかった低エネルギー-BSE や、放出方向の違いに起因するコントラストの変化を、像として利用できることを示した。

その結果、低加速条件を含む観察例に基づき、従来の検出器では像信号として取り出しにくい成分や、放出方向の違いに起因するコントラストの変化を、像として扱えることを示した。また、グリッド条件と検出方向を組み合わせることで、像コントラストが角度とエネルギーにどの様に依存するかを整理して示した。また、グリッド条件と検出方向を揃えて比較することで、SE/BSE の役割分担やコントラストの成り立ちを、角度とエネルギーから説明できる形にした。一方で、電位とエネルギーの対応の較正、低加速条件での角度分解評価、複数面の同時読み出しは未達であり、定量性と再現性を高めるうえでの課題として残った。

研究課題 4 では、第 4 章・第 5 章で得た知見と、残された課題を踏まえ、装置メーカー向け検出モジュールとして提供する際に必要となる技術要件とビジネス上の条件を示した。さらに、評価用モジュールから導入拡大に至るステップを想定し、どの条件が満たされれば MCP モジュールが事業拡大に寄与し得るかを明確にした。

以上より本論文は、SEM を対象に、用途の選定から像情報の価値の実証、さらに事業化・製品化に必要な条件の提示までを一続きに示した。これにより、著者の所属企業における MCP 事業の売上を伸ばし、事業を拡大するための基盤をつくるという目的に対して、技術面と事業面の両方からの進め方を具体化できた。

7.3 SEM 技術としての意義

本研究で構築した MCP 検出系は、SEM における像情報の扱い方にいくつかの視点を与える。

第一に、低エネルギー-BSE を実機 SEM の中で意識的に取り出し、Si-PD で像信号として取り出しにくいエネルギー成分を像として利用できることを示した点である。低加速観察では、この帯域が形状と材質の両方に敏感な情報源になるが、既存のアウトレンズ検出器では取りこぼされていた。本研究の結果は、この帯域を「ノイズではなく、意味のある信号」として扱うための実装レベルの選択肢を提示したものと位置づけられる。

第二に、グリッド電圧差分像と多面 MCP 検出器を通じて、エネルギーと放出方向を操作しながら像を読み解くためのフレームを示した点である。凸凹や組成、三次元形状に対して、どの方向・どのエネルギーの電子がどのようなコントラストになるのかを、実測像として示せたことは、これまで教科書的に説明されてきた SE/BSE の概念を、より具体的な像データと結びつける一歩になる。角度・エネルギー分解観察は、将来的には高機能なインレンズ検出器やハイブリッド検出系の設計指針にもなり得る。

第三に、MCP の高速応答性とモジュール構成は、将来の高速スキャンや時間分解観察との親和性を持つ。今回の研究では時間分解計測までは扱っていないが、サブナノ秒応答という特長は、空間分解能の議論とは別の軸で SEM の観察モードを拡張できる余地を示している。これらの点を総合すると、本研究は「既存 SEM の枠組みの中に、角度とエネルギーをより露わにした検出の考え方を持ち込む試み」として位置づけられる。

7.4 MCP 事業へのインパクトと売上シナリオの位置づけ

MCP は、質量分析、暗視装置など既存用途で実績を持ちながら、SEM 用途ではこれまでほとんど売上に寄与していない。SEM 向け MCP モジュールが新たな事業の柱として成立するためには、装置メーカー数社でのオプション採用と、特定機種における一定以上のオプション付加率が必要になる。本研究で整理した売上シナリオは、対象機種の年間出荷台数、低エネルギー電子検出に関心を持つ機種の割合、MCP オプションの付加率といったパラメータを用いて、年間数十～百数十台の導入であれば「既存用途の中に新しい柱を加える」規模に到達し得ることを示したものである。

一方で、ライフの不確実性や、研究用途中心であるがゆえの市場規模の制約を考えると、短期的に大きな売上を期待するのは現実的ではない。むしろ本研究の位置づけは、「MCP モジュールが事業ポートフォリオの中でどういう条件を満たせば意味を持つのか」を可視化したことにある。年間数台～十数台レベルでも、評価用モジュールとして実機に組み込まれれば、寿命データや実サンプルでの有効性が蓄積され、継続するか撤退するかの判断材料になる。売上シナリオは、その判断を行うための一つのフレームとして機能する。

7.5 本研究の実施体制と共同研究枠組みの意義

本研究は、所属企業、GPI、筑波大学および装置メーカーの複数の枠組みにより遂行された。著者は所属企業に在籍したまま GPI の博士後期課程に所属し、SEM 用 MCP 検出モジュール（倒立型 MCP 検出器および多面配置 MCP 検出器）の構造設計・試作、社内での基礎評価、筑波大学との技術調整を担当した。GPI は、本研究全体の企画立案とマネジメントを担い、所属企業と大学・装置メーカーとの間で研究テーマ設定、契約手続き、成果の取りまとめを行った。

実機 SEM を用いた評価は、筑波大学数理物質系・関口研究室に設置された汎用 SEMSU7000（日立ハイテク製）で実施した。関口研究室は、SU7000 の日常運用、試料作製、観察条件の設計と最適化を担当し、著者は MCP 検出モジュールの試料室内への組み込みおよび高電圧配線の設計・調整、動作確認を行った。倒立型 MCP 検出器と多面配置 MCP 検出器は、こうして構築した評価系に組み込んで用いており、第 4 章および第 5 章で示す結果はいずれもこの SU7000 を用いた共同実験で取得したデータである。

これらの研究活動は、(1) 筑波大学と GPI との共同研究契約、(2) GPI と所属企業との受託研究契約、(3) 筑波大学・GPI・装置メーカー間の SU7000 転貸借契約、の三つの契約関係に基づいている。共同研究契約では、MCP を用いた新しい SEM 検出モジュールの構想と像取得実験を大学側の研究テーマとして位置づけ、受託研究契約では、所属企業の MCP 技術シーズを大学側で検証し、事業化の可能性を検討することを目的としている。転貸借契約は、装置の改造範囲や安全管理の責任分担を定め、大学と企業の双方が安心して共同研究を進められる枠組みを提供している。

このような体制により、所属企業は自社では用意しにくい装置環境と評価リソースを獲得し、大学側は産業用 MCP 素子・アセンブリを用いて応用上の課題に即した研究を進めることができた。本論文で扱う検出モジュールの検討は、産学および装置メーカーの三者が連携した共同研究の具体的事例である。

本研究で示した技術的・事業的な成果は、以上の共同研究枠組みがあって初めて実現したものである。実機 SEM を用いた評価では、筑波大学数理物質系・関口研究室に設置された汎用 FE-SEM SU7000（日立ハイテク製）を中核として、著者が試作した MCP 検出器アセンブリを組み

込み、関口研究室の共同研究メンバーとともに観察条件の最適化や運用手順の整備を行った。第4章および第5章で示したグリッド電圧差分像と多面検出系のデータは、いずれもこの評価系を用いた共同実験の成果であり、単に装置を貸与された場合に比べて、ユーザー側の視点を取り入れた試料選定や像の解釈ができた点に特徴がある。

一方、事業化・モジュール化の検討に関しては、所属企業内外の関係者との対話が重要な役割を果たした。国内外の装置メーカーについては、国内営業担当や欧州現地法人が共同研究での成果による学会発表を手がかりに技術者・製品企画担当との接点を広げ、MCP 検出モジュールに対して最低限求める性能・信頼性・インターフェース条件を聞き取った。また、半導体製品を扱う固体事業部・品質保証部に対しては、著者自身が研究内容を説明し、「金属配線の下地や界面の情報を見たい」「数百 nm～数 μm 程度の厚膜でも有効に使えるか確認したい」「不良解析でFIBで削る範囲を絞り込めれば効率化につながる」「多層膜も観察したい」といった社内ユーザーの具体的なニーズを把握した。こうした外部の装置メーカーと社内ユーザーの双方から得られた情報に基づいて、第6章で整理した評価用モジュール像と売上シナリオの前提条件を、より現実的なものとして設定することができた。

以上をまとめると、研究課題1および2は主として(2)「MCPを用いることで、従来の主流検出方式では実質的に取り出せていなかった像情報をどこまで引き出せるか」の検証に対応しており、研究課題3は、同じ(2)の観点を将来的な角度・エネルギー分解観察へ拡張する試みである。また、研究課題4は、(1)用途領域の選定と(3)事業化・製品化の成立条件の整理に対応している。すなわち、本論文で設定した三つの観点は、研究課題1～4として具体化され、第3章～第6章の検討を通じて相互に結びつけられた形で答えが与えられたと言える。

7.6 本研究の限界と今後の課題

本研究にはいくつかの明確な限界がある。

第一に、MCPの寿命(ライフ)に関する定量的なデータが不足している点である。実機によるSEM環境下におけるライフ評価はまだ行えておらず、「どの条件でどの程度まで使えるのか」を示すことができていない。この課題は、進むにせよ退くにせよ避けて通れず、評価用モジュールを用いた長期試験と実機でのフィードバックが必要となる。

第二に、多チャンネル同時読み出しとWDの制約がある。正十二面体検出器では複数面にMCPを配置したものの、大気開放を伴う配線切り替えによってチャンネルを選択しており、厳密な意味での多方向同時計測には至っていない。WDも比較的長く、観察できる試料は低倍率のものに限られる。この点を改善するには、フィードスルー構造の再設計と多チャンネル読み出し系の導入が不可欠である。

第三に、「MCPならではの効果が顕著に現れる試料・観察シーン」を十分に掘り当てられていない。凸凹、組成、三次元形状といった基本的な試料では、角度やエネルギーによるコントラスト変化を示すことができたが、実務上の課題に直結するようなサンプル(例えば半導体デバイスの特定の不良モードなど)で、「MCPでなければ得られない手がかり」をはっきり示すところまでは到達していない。ここは装置メーカーやユーザーとの共同研究を通じて、どのような観察課題にMCPを当てるべきかを見極める必要がある。

第四に、低加速条件と正十二面体検出器との橋渡しが道半ばである。低エネルギーBSEの価値は1-3 kVの低加速観察で特に高いと考えられる一方、本研究の十二面体検出は15 kVでの評

価にとどまっている。角度分解観察の枠組みを低加速条件にまで拡張し、エネルギー・角度の両軸を統合したアクセプタンスマップとして整理することが、今後の重要な課題となる。

7.7 本研究の総括

本研究は、MCP を用いた SEM 検出器の構成とその事業化可能性について、技術とビジネスの両面から検討を行った。低エネルギーBSE に対する高い感度と、グリッド電圧差分像、多面配置による角度分解観察を組み合わせることで、「像のどの部分に、どのエネルギー・どの方向の電子が効いているか」を意識しながら SEM 像を解釈するための枠組みを提示した。また、装置メーカーとの対話に基づき、MCP 検出モジュールが事業として成立するために必要な技術要件と売上規模の目安を整理し、現時点でのギャップと今後埋めるべき課題を明らかにした。

MCP が SEM にとって持つ意味を一言で表すと、「データサイエンス時代において、これまで取りこぼされていた電子情報を拾い上げるための一つの選択肢」であると言える。マテリアルインフォマティクスに象徴されるように、今後は観察データそのものが解析や設計の基盤となる場面が増えていく。そのとき、エネルギーと角度の情報をできるだけ失わずに検出・記録できることは、大きな価値を持つ。本研究で示した MCP 検出系は、寿命や実装の課題を抱えつつも、「情報をこぼさずに受ける」方向への一步を具体的な装置構成として示した試みである。

現時点で、MCP モジュールが直ちに大きな収益の柱になるとは言い難い。ただし、成立条件（寿命、導入台数、オプション付加率等）を数値とシナリオとして整理できた点は、今後の投資判断に資する成果である。今後は、ALD-MCP を含む寿命評価と実サンプルでの検証を積み重ね、装置メーカーやユーザーとともに「MCP で何を見たいのか」を掘り下げ、要求仕様をより具体化していく必要がある。以上より、本研究は、MCP を用いた低加速 SEM 検出系が、低エネルギーBSE と放出方向の情報を実機レベルで扱う有効な手段となり得ることを示すとともに、その事業化に必要な条件と導入に向けたプロセスを明確化した。

研究業績

【査読付き論文】

Y. Yanagihara, Y. Yao, H. Yamamoto, and T. Sekiguchi,

“Detection of low-energy backscattered electron in scanning electron microscopy using microchannel plate detector,”

Microscopy, **75**(1), 70-73 (2026). <https://doi.org/10.1093/jmicro/dfaf033>

Y. Yanagihara, Y. Yao, K. Kumagai, and T. Sekiguchi,

“Development of dodecahedron type MCP detector for SEM toward full energy range and solid angle electron detection,”

Microscopy, Advance article (2026). <https://doi.org/10.1093/jmicro/dfag008>

【学会発表・講演】

柳原 悠人, 内藤 康秀,

「A Proposal of Low Vacuum Operable MCPs Applied to Portable Mass Spectrometers」, 日本質量分析学会 第71回質量分析総合討論会, ポスター発表 (3P-39), 2023年.

柳原 悠人, 姚 遠昭, 関口 隆史,

「MCP 検出器により得られた反射電子像の特徴 (Characteristics of backscattered electron images taken by MCP detector)」, 日本顕微鏡学会 第80回学術講演会, 口頭発表, 2024年.

柳原 悠人, 姚 遠昭, 山本 隼大, 関口 隆史,

「MCP を用いた SEM の反射電子検出器 (Backscattered Electron Detector Using Microchannel Plate)」, 2025年 第72回応用物理学会春季学術講演会, 口頭発表, 2025年.

柳原 悠人, 熊谷 和博, 姚 遠昭, 関口 隆史,

「正十二面体に配置した検出器の開発」, 日本顕微鏡学会 第81回学術講演会, ポスター発表, 2025年.

柳原 悠人, 姚 遠昭, 山本 隼大, 関口 隆史,

「低エネルギーに感度のある MCP 反射電子検出器の開発と応用 (Development and application of backscattered electron detectors using MCPs

sensitive to low energy) 」 ,
日本顕微鏡学会 第 81 回学術講演会, 招待講演, 2025 年.

Yuto Yanagihara, Yuanzhao Yao, Hayata Yamamoto, Takashi Sekiguchi,
“Development of High Pass Electron Detector for Low-energy Backscattered Electron
in SEM,”
Microscopy & Microanalysis 2025 (M&M 2025), Poster presentation, 2025 年, Salt Lake
City, USA.

柳原 悠人, 熊谷 和博, 姚 遠昭, 関口 隆史,
「SEM 用全方位 SE/BSE 検出器の開発
(Development of SE/BSE Detector arranged in a Dodecahedron) 」 ,
2025 年 第 86 回応用物理学会秋季学術講演会, 口頭発表, 2025 年.

【特許】

2024 年 出願 1 件 (出願番号 2024-083885)

謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々から多大なるご指導とご支援を賜りました。ここに深く感謝申し上げます。

まず、指導教員として終始あたたかいご指導を賜りました光産業創成大学院大学 石井勝弘副学長に厚く御礼申し上げます。紆余曲折あった私のことを見捨てることなく、最後まで見届けていただけたことに深く感謝しております。博士論文執筆にあたっては的確なご指導をいただけたことで論文としての完成度を高めることができました。

筑波大学 関口隆史教授にも深く感謝申し上げます。関口先生は共同研究のパートナーとしてだけでなく、学位審査委員にも入っていただきました。突然やってきた私のことを迎えていただけただけでなく、その後の共同研究では筑波大学の学生と同じように厳しくもあたたかいご指導をいただきました。関口先生と再会できていなければ、私は研究を続けることはできませんでした。

本研究は多くの共同研究者との議論と協力によって進められました。特に、本研究の実験及び議論、シミュレーションを通じて多大な協力をいただいた筑波大学 姚遠昭助教には、研究面のみならず精神的にも大きな支えとなってくださいました。共著者として研究に携わっていただいた熊谷和博博士には SEM に関する専門的な知見や議論だけでなく、多くの示唆をいただきました。ここに心より感謝申し上げます。また、日本顕微鏡学会 SEM の物理学分科会の皆様には、研究活動を通じて多くのご助言と交流の機会をいただきました。

本研究の遂行にあたり必要となった契約の締結および更新については、筑波大学 伊藤雅英教授、株式会社日立ハイテク 太田洋也氏、松永宗一郎氏にご協力をいただきました。ここに深く感謝申し上げます。筑波大学 関口早田研究室の早田康成教授、塔村和子様をはじめとする皆様には、学外からの訪問者である私にいつも優しく接していただきました。筑波大学での研究活動を充実したものとすることができたのは皆様のおかげです。心より感謝申し上げます。

学位審査の主査をお受けくださった光産業創成大学院大学 内藤康秀准教授ならびに審査委員をお受けくださった沖原伸一朗准教授には丁寧なご指導とご助言をいただきました。深く感謝申し上げます。頂いたご指摘により本論文の内容を高めることができました。

光産業創成大学院大学 増田靖教授、瀧口義浩前学長、江田英雄前教授(現広島工業大学教授)、姜理恵前准教授(現城西大学教授)には、研究内容を変更するにあたって多くの重要な助言をいただきました。そのおかげで研究を最後まで全うすることができました。

光産業創成大学院大学 藤田和久副学長、長谷川和男教授、横田浩章准教授、花山良平准教授、森芳孝准教授、林寧生助教をはじめとする先生方には、博士研究に関してご指導ご鞭撻をいただきました。深く感謝申し上げます。

学生生活において多大なるご支援をいただいた光産業創成大学院大学事務局の皆様に深く感謝いたします。

博士研究の機会を与えてくださいました、光産業創成大学院大学 晝間明理事長ならびに伊藤博康学長に深く感謝申し上げます。派遣元企業である浜松ホトニクス株式会社 加藤久喜副社長、上野和夫事業部長、鈴木孝治部長、岡田知幸部長主幹、酒井拓也部門長ならびに在職中に多大なるご支援を賜りました高林敏雄元部長に深く感謝申し上げます。

また本学 OB でもある林雅宏博士, 松井信二郎博士には本学入学前から現在に至るまで, 多くの助言をいただきました。お二人の姿を目標に今日まで研究に取り組んでまいりました。

最後に, 家を空けることが多い私を支え, 研究に専念できる環境を整えてくれた妻 加奈子, 長女 ありす, 長男 昂に深く感謝いたします。