

博士学位論文

定量位相顕微鏡の事業化に向けた技術開発とビジネス戦略

Technological Development and Business Strategy Formulation for
Commercialization of Quantitative Phase Microscopy

光産業創成大学院大学

光産業創成研究科

鈴木 那津輝

2022年3月

要旨

定量位相顕微鏡の事業化に向けた技術開発とビジネス戦略

本論文は、光学機器メーカーに所属する筆者による定量位相顕微鏡(Quantitative Phase Microscopy、以下 QPM)の事業化に向けて行った技術開発とビジネス戦略をまとめたものである。QPM は、光干渉計測技術を用いた顕微鏡であり、測定サンプルの光学厚さをナノメートルオーダーで取得することができる。所属企業の研究所で開発された QPM 技術を筆者の所属事業部に技術移転を行い、試作機開発と市場調査を開始したところ、「光学調整や操作に熟練した技術が必要なため、広く普及させることが難しい」、「所属企業が目指すべき明確な市場のニーズが把握できていない」、「競合他社が数多く存在する」という 3 つの問題点が明らかになった。これらの問題点を解決するために本研究の 3 つの目的として、「装置の使いやすさと安定性を向上させるための自動化技術の開発」、「所属企業が目指すべき市場ニーズを明らかにし、そのニーズに適合した QPM の開発」、「QPM 事業の競争優位性を高めるためのビジネス戦略の立案」を設定した。

第 2 章では、光干渉計測技術の基礎について論じ、さらに所属企業の研究所における QPM 技術の研究開発内容を説明する。

第 3 章では、QPM の使いやすさと安定性を向上させるための自動化技術開発として、QPM の光学系に焦点可変レンズ(Focus tunable lens、以下 FTL)を導入することで、コヒーレンスゲートと幾何学的フォーカス位置を分離する新たな提案手法について述べる。従来の QPM ではフォーカス調整のたびに参照光路の光路長の再調整が必要であったが、提案手法では、FTL によってフォーカス移動しても常に干渉縞が得られるため、光路長の再調整なしに自由にフォーカス位置を変更することが可能になり、装置の使いやすさが向上した。FTL を用いることで $-200 \sim +300 \mu\text{m}$ の範囲のフォーカススキャンを可能とし、その応答速度は 10 ms 程度であった。

第 4 章では、所属企業が目指すべき市場ニーズを明らかにし、そのニーズに適合した QPM を開発するため、半導体外観検査装置のシステムインテグレーターである企業 A と実施した試作機開発について述べる。想定顧客ニーズを開発事項に反映させるため、企業 A から半導体外観検査装置に対する QPM の要求仕様についてヒアリングした。要求事項は、「顕微鏡鏡筒と QPM 光学系の分離」、「カメラの最大フレームレートでの高速撮像」、「撮像した画像のリアルタイム処理」、「光学調整機構の電動化」の 4 つであった。1 つ目の要求に対し

では、干渉計のみを分離した QPM ユニットを開発して対応した。2つ目の要求に関しては、 piezoアクチュエーターによる位相シフトの高速化手法を開発し、1秒間に160回の高速な位相シフトを達成することで対応した。3つ目の要求に対しては、画像処理プログラムをマルチスレッド化し、撮像に対してリアルタイムで画像処理を可能にすることで対応した。最後の要求に対しては、自動化技術の開発として、光学系の調整機構をステッピングモーターによって電動化し、高画質な位相画像の取得に必要な不可欠である干渉縞コントラストの最適化が容易に実施できるようにすることで対応した。

QPM 事業の競争優位性を高めるためには、顧客ターゲットを絞り込み、ポジショニングを明確にしたうえで、独自のビジネス戦略を構築する必要がある。第5章では、この目的に対して、ハーマン・サイモン氏が提唱した「隠れたチャンピオン」の基本戦略に基づき、ターゲット市場の絞り込み、ポジショニング分析、バリューチェーン分析を行った。そして、これらの一連の分析結果の考察を通じて、所属企業の QPM におけるビジネスモデルを作成した。具体的なビジネスモデルの内容は、干渉計のコア部である QPM ユニットをパートナー企業である半導体外観検査装置のシステムインテグレーターに販売し、パートナー企業から QPM ユニットを搭載した検査システムをエンドユーザーに販売するというものである。このビジネスモデルにおける価値提案は、半導体ウエハー・チップに対するナノメートルオーダーの欠陥・キズ検査の低コスト化である。そして、QPM ユニットの独自の強みは、コア技術である QPM の製品設計技術と製造技術に注力することで製品品質を高めていくことだと確認した。

第6章では、本論文の総括を行い、今後の展望を述べた。3つの研究目的の達成によって、QPM 事業の立ち上げに対しての第一歩を踏み出すことができた結論付けた。今後の展望として、立案したビジネス戦略を実行に移し、QPM 事業の収益化を達成するためにパートナー企業と共同開発を進めている工業向け QPM ユニットの製品化に注力する。そして、さらなる事業成長のため、QPM をバイオ分野へ展開することで製品群の拡大を目指していく。

Abstract

Technological Development and Business Strategy Formulation for Commercialization of Quantitative Phase Microscopy

This thesis describes the technological development and business strategy formulation for the commercialization of Quantitative Phase Microscopy (QPM), performed by the author who works for an optical equipment manufacturer. QPM is a microscopy technique that uses optical interferometry to measure the optical thickness of a sample at the nanometer scale. The development of an initial QPM prototype and market research identified the following three problems for QPM commercialization: (1) the difficulty in optical adjustment and operation, (2) obscurity in market needs, and (3) the presence of a large number of competitors. To address these problems, the following three objectives were set: (1) to develop an automated measurement system with improved usability and stability, (2) to identify the market needs and develop a QPM prototype that meets the identified needs, and (3) to formulate a business strategy to gain a competitive advantage in the QPM business.

Chapter 2 describes the fundamentals of the optical interference technique and explains the research and development of QPM technology in our company.

Chapter 3 describes the development of automated measurement technology and measures for improving the usability and robustness of QPM. A new optical system for QPM was also proposed. In the system, coherence gating and geometric focusing are independently controlled by introducing a Focus Tunable Lens (FTL). In conventional QPM, the optical path length on the reference side needs to be readjusted whenever the focus is adjusted. By using the proposed method, the FTL changes the focal position without readjustment of the optical path length, keeping the contrast of the interference fringes high. In this setup, the FTL was able to scan a range of -200 to $+300$ μm , and the response time of the focus scan was about 10 ms.

Chapter 4 describes the development of a QPM prototype in collaboration with Company A (a system integrator for semiconductor inspection) to identify the market needs and develop a QPM apparatus that meets those needs. The author interviewed Company A about the QPM requirements for semiconductor inspection equipment in

order to reflect the expected customer needs in the development items. The requirements of company A are: (1) separation of the microscope body from the QPM optical system, (2) high-speed imaging at the maximum frame rate of the camera, (3) real-time processing of captured images, and (4) motorization of the optical adjustment mechanism. To satisfy the first requirement, we developed a QPM unit consisting of only the interferometer. To satisfy the second requirement, we developed a high-speed phase shift method using piezoelectric actuators, which is capable of acquiring phase-shifted images at 160 fps. To meet the third requirement, we adopted multi-threaded image processing to enable real-time image processing of the captured image. To meet the last requirement, we automated the interference fringe contrast optimization by introducing a stepping motor, which enabled easy acquisition of high-quality phase images.

Chapter 5 describes the formulation of a business strategy to gain a competitive advantage in the QPM business. Based on the basic strategy of the "Hidden champion" proposed by Herman Simon, the author conducted target market selection, positioning analysis, and value chain analysis. The author then formulated a business model by integrating the results obtained by these analyses. The business model is as follows: the company the author works for should provide QPM units to semiconductor inspection equipment manufacturers, and then the manufacturers should sell inspection systems equipped with the QPM unit to end-users. The value proposition is a reduction in cost for the inspection of nanometer-order defects and scratches on semiconductor wafers and chips. Then, it was confirmed that the company the author works for should enhance the quality of their QPM products by focusing on improving the product design and manufacturing new products.

Chapter 6 summarizes the above contents and discusses the prospects of the QPM commercialization. By achieving the three objectives above, the author concluded that the first step has been taken toward the launch of the QPM business. The author will be dedicated to the commercialization of QPM units for semiconductor inspection according to the business strategy formulated in this study. To further grow the QPM business, QPM products will be extended to biological fields.

目次

第1章	序論	1
1.1	研究背景.....	1
1.1.1	所属部署のビジネス状況.....	1
1.1.2	新規事業候補の探索.....	3
1.2	QPMの事業化における問題点.....	4
1.3	本研究の目的.....	8
1.4	本論文の構成.....	8
第2章	光干渉計測技術の基礎とこれまでのQPMの研究開発	10
2.1	はじめに.....	10
2.2	光干渉計測技術の概要.....	10
2.3	定量位相イメージング手法.....	11
2.3.1	位相シフト法.....	11
2.3.2	フーリエ変換法.....	12
2.3.3	白色干渉法.....	13
2.4	所属企業でのQPMの開発.....	14
2.5	まとめ.....	16
第3章	バイオ向けQPMのフォーカススキャン機構の開発	17
3.1	はじめに.....	17
3.2	実験のセットアップ.....	19
3.2.1	ダイナミックフォーカス低コヒーレンス・リニク干渉計のセットアップ.....	19
3.2.2	画像取得方法.....	22
3.3	サンプル測定結果.....	24
3.3.1	ポリスチレンビーズのQPI撮像.....	24
3.3.2	MCF-7細胞のQPI撮像.....	26
3.4	まとめ.....	27
第4章	工業向けQPMの開発	29
4.1	はじめに.....	29
4.2	工業向け試作機開発における要求事項と解決策.....	29
4.3	工業向けQPMユニット試作機の開発.....	31
4.3.1	顕微鏡鏡筒と分離したQPMユニットの開発.....	31
4.3.2	piezoアクチュエーターによる位相シフトの高速化.....	32

4.3.3	位相計算を含むリアルタイム画像処理.....	35
4.3.4	ステッピングモーターステージによる干渉縞コントラストの電動調整.....	36
4.4	各種サンプル測定結果.....	37
4.5	まとめ.....	40
第5章	ビジネス戦略の立案.....	42
5.1	はじめに.....	42
5.2	隠れたチャンピオンと GNT 企業.....	43
5.3	隠れたチャンピオンの戦略.....	45
5.4	所属企業における戦略の構築.....	48
5.4.1	ターゲット市場の絞り込み.....	48
5.4.2	ポジショニング分析.....	51
5.4.3	バリューチェーン分析.....	53
5.5	ビジネスモデルの整理.....	54
5.6	まとめ.....	56
第6章	結論.....	58
6.1	本研究のまとめ.....	58
6.2	本研究の結論.....	59
6.3	今後の展望.....	61
参考文献	62
謝辞	68
研究業績	69

図表目次

図 1.1	SD 事業の協業パートナー	2
図 1.2	SD 事業の売上高と世界半導体製造装置市場(WWSEMS)の比較.....	2
図 1.3	SD 事業の SWOT 分析	4
図 1.4	(a)QPM 試作機の外観、(b)生細胞の光学厚さ画像.....	5
図 1.5	(a)フラッグシップ機の外観、(b)テストターゲットの高さプロファイル画像.....	6
図 1.6	QPM 技術の競合製品の一例	7
図 1.7	本論文の構成.....	9
図 2.1	マイケルソン干渉計の概略図とテストターゲットの干渉画像	10
図 2.2	位相シフト法の概略図	11
図 2.3	フーリエ変換法の概略図.....	13
図 2.4	白色干渉法の概略図.....	14
図 3.1	QPM 試作機における光学調整の概略図.....	18
図 3.2	(a) リニク干渉計を用いた定量位相イメージングシステムの概略図 PZT：ピ エゾアクチュエーター、Obj：対物レンズ、BS：ビームスプリッター、RM： 参照ミラー、FTL：焦点可変レンズ、(b) 撮像システムの写真、(c)物体光路の 概略図、(d) 参照光路の概略図	20
図 3.3	従来手法と提案手法における干渉縞コントラストの比較	21
図 3.4	(a) 対物レンズの光軸方向の移動量に応じた干渉縞コントラスト、(b) 参照光 路の光路長の光軸方向の移動量に応じた干渉縞コントラスト	22
図 3.5	位相ずれ量の FFT スペクトル.....	23
図 3.6	フォーカス移動、位相シフト、CMOS 露光時間のタイミングチャート	24
図 3.7	ポリスチレンビーズの定量位相イメージング.....	25
図 3.8	MCF-7 細胞の定量位相イメージング.....	26
図 3.9	図 3.8(a-c)の白線に沿った OT の断面プロファイルの比較	27
図 4.1	(a) QPM ユニットを搭載した顕微鏡システムの概略図、(b) 顕微鏡システム の写真 PZT：ピエゾアクチュエーター、Obj：対物レンズ、BS：ビームスプ リッター、RM：参照ミラー、BPF：バンドパスフィルター	32
図 4.2	高速位相シフト時の位相変調波形.....	33
図 4.3	テストターゲットの位相画像	34
図 4.4	背景補正の有無における測定値の標準偏差	35
図 4.5	並列処理による干渉画像の撮像、画像処理、画像出力に関する概略図.....	36
図 4.6	テストターゲットの干渉縞のコントラスト	37
図 4.7	(a)テストターゲットの干渉画像、(b)高さプロファイル画像.....	38
図 4.8	位相画像からエミュレートした(a)位相コントラスト像、(b)微分干渉画像	38

図 4.9	市販 CCD の高さプロファイル画像.....	39
図 4.10	化合物半導体ウエハーの高さプロファイル画像.....	39
図 5.1	3つの基本戦略.....	42
図 5.2	ドイツと日本の貿易収支推移の比較.....	44
図 5.3	隠れたチャンピオンにおける競争優位マトリックス.....	47
図 5.4	光学式半導体外観検査装置の市場規模.....	49
図 5.5	従来技術と QPM の性能比較.....	50
図 5.6	光干渉計測手法のポジショニング.....	52
図 5.7	QPM ユニットと市販干渉計のバリューチェーン.....	53
図 5.8	工業向け QPM ユニットのビジネスモデルキャンバス.....	56

第1章 序論

1.1 研究背景

1.1.1 所属部署のビジネス状況

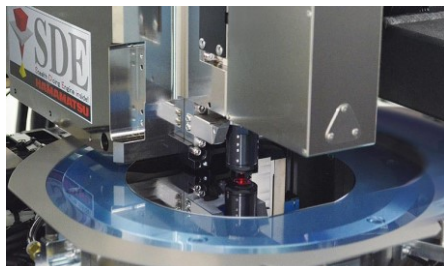
筆者は光関連の電子部品・機器メーカーの技術者であり、筆者の所属部署では、長期的な成長を目的として、多角化によって新規事業の立ち上げを行い、新たな収益源を生み出すことが喫緊の課題となっていた。まず、所属部署の既存事業のビジネス状況から説明を始める。

筆者の所属部署は、ステルスダイシング (Stealth Dicing, 以下 SD) 事業をもとに立ち上げられ、現在は SD 事業のみを展開している。SD 技術とは、ウエハーに対して透過波長のパルスレーザーを用いて、ウエハー内部を加工することに特徴を持ったダイシング手法である[1]。SD 技術は従来のブレードダイシングに比べて非接触で加工できるため、処理速度が速い、パーティクルレス、完全ドライプロセス、切削ロスがないなどの多くの利点を有している[2]。SD 事業は、2002 年から開発が始まり、2004 年 12 月にシリコンウエハー向けの最初の製品が発売された[3]。発売当初は、完全ドライプロセスの特徴から特にパーティクルの影響を受けやすい MEMS 向けを中心に SD 技術が採用された。その後、加工スループットの高速化要求の高まりから、LED や Memory 向けに SD 技術の導入が進んだ。このように所属部署では市場動向に合わせたイノベーションを継続してきた結果、2019 年には SD 事業は、30 億円程度売上高を持つ事業に成長している[4]。

SD 事業では、SD エンジンと呼ばれるレーザー加工光学系、観察系を搭載した光学モジュールを製造している。SD エンジンは、パートナー企業に OEM 供給され、その後パートナー企業にて半導体製造装置に SD エンジンを搭載し、エンドユーザーへ販売、もしくはパートナー企業の社内生産設備となる。また、SD エンジンの OEM 供給に付随して、SD 技術に関する特許ポートフォリオがパートナー企業にライセンスされる。図 1.1 に SD 事業のパートナー企業を示す。2022 年現在、浜松ホトニクス株式会社で製造された SD エンジンは、株式会社ディスコ、西進商事株式会社、日亜化学工業株式会社の 3 社のパートナー企業へ提供されている[5], [6]。

ステルスダイシングエンジン

レーザー加工光学系、観察系を搭載した光学モジュール



HAMAMATSU
PHOTON IS OUR BUSINESS

光学モジュールと
ライセンスの提供



パートナー企業



DISCO

SEISHIN

NICHIA

図 1.1 SD 事業の協業パートナー

SD 事業の売上高は、製品発売から 2019 年までの間、順調に拡大している。図 1.2 に SD 事業の売上高比率と世界半導体製造装置市場(以下、WWSEMS)の推移を示す。横軸は所属企業の決算期、縦軸の左軸は所属企業の 2019 年 9 月期の売上高を基準とした比率、右軸は WWSEMS[7]を示している。SD 事業の売上高は WWSEMS と連動しており、半導体市場規模の拡大とともに成長していることがわかる。2010 年からの 3 年間のみ売上高が拡大している理由は、高輝度 LED 市場向けの SD エンジンの販売が一時的に増加したためである。

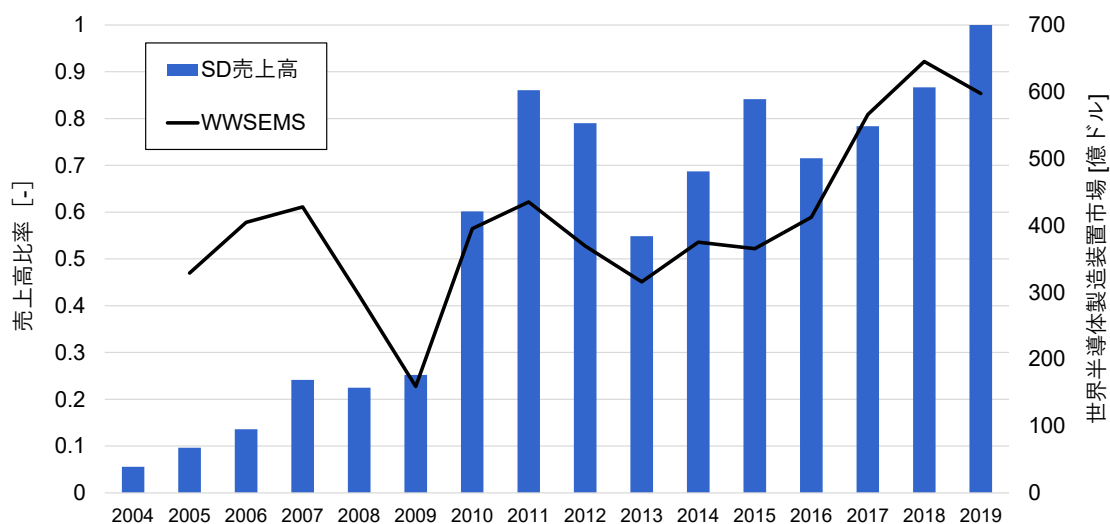


図 1.2 SD 事業の売上高と世界半導体製造装置市場(WWSEMS)の比較

出所：WWSEMS [7]を引用し筆者作成

SD 事業は右肩上がりに売上高が伸びているものの、所属部署の製品群はダイニング市場向けの SD エンジンのみであり、外部環境に対して経営リスクが高い状況にあった。実際には、生産設備投資と需要ピークのタイミングのズレと半導体不況が重なり、減価償却費が利益を圧迫することで部署の経営が厳しくなる場面があった。さらには、SD 事業は立ち上げから 15 年以上経過しており、製品ライフサイクルの成長期に位置している。そのため、SD 事業が成熟期に入る前に新たな事業を立ち上げるべきタイミングである。このような背景から、所属部署では長期的な成長を目的として、多角化によって新たな収益源を生み出す新規事業候補の探索を開始した。

1.1.2 新規事業候補の探索

多角化を進めることは経営資源を分散させることであり、短期的にはコストの上昇が避けられない。そのため、可能な限り多角化に伴うリスクを低減するためには、既存事業で培ってきた強みを新規事業へ適用することが重要である。加えて、既存事業と新規事業がシナジー効果を得られることが望ましい。

そこで、SD 事業で培ってきた強みを分析するために SWOT 分析を実施した。SWOT 分析とは、目標を達成するために意思決定を必要としている組織や個人が、事業を取り巻く重要な要因を 2 軸に分けて分析し、事業環境の変化に対応した経営資源の最適活用を図る経営戦略手法の 1 つである[8]。具体的には内部環境要因として強みと弱み、外部環境要因として機会と脅威に分類する。SD 事業の環境分析を実施した結果を図 1.3 に示す。既存事業の強みは 2 つある。1 つ目は SD エンジンの開発によって培った複数の光学素子、機構部品、制御回路を統合する光学モジュールの設計技術を保有していることである。2 つ目は SD エンジンという光学モジュールを複数のパートナー企業に提供するビジネスモデルを経験し、それに成功していることである。弱みについては、既存事業は設備投資が多く、固定費が高いことから、高コスト体質である。機会については、2022 年現在、半導体製品の需要はコロナ禍を背景に増加しており、今後も継続した成長が予想されている。最後の脅威については、1 つ目は SD 技術が今後デバイスの構造変化に対応できない可能性があること。2 つ目は、製品プロダクトサイクルの成長期に位置していることからコピーメーカーや競合技術が台頭する可能性があることである。SWOT 分析の結果から、SD 事業の強みは、光学モジュール設計技術を保有していること、光学モジュールをパートナー企業へ提供するビジネスモデルに成功していることだと分かった。したがって、この 2 つの強みを新規事業候補の方向性とするのが望ましいといえる。

	プラス要因	マイナス要因
内部環境	強み (Strengths) <ul style="list-style-type: none"> 光学モジュールの設計技術を保有 光学モジュールをパートナー企業に提供するビジネスモデルに成功 	弱み (Weakness) <ul style="list-style-type: none"> 高コスト体質 (高い固定費比率)
外部環境	機会 (Opportunities) <ul style="list-style-type: none"> 半導体市場の成長トレンドは継続 	脅威 (Threats) <ul style="list-style-type: none"> デバイス構造の変化 コピーメーカー、競合技術の台頭

図 1.3 SD 事業の SWOT 分析

新たな製品群を早期に事業化するために、SWOT 分析で明らかになった SD 事業の強みと親和性が高い技術を所属企業の研究所の技術シーズの中から探索した。研究所の研究・開発テーマは約 30 テーマが存在し、テラヘルツ量子カスケードレーザー、高出力レーザー、次世代蛍光顕微鏡技術、3次元像フローサイトメーター技術、定量位相顕微鏡、光マンモグラフィ、有機デバイス(OLED)などがあった[9]。これらの技術シーズから光学モジュール設計技術を適用することでき、かつ基礎研究が完了し、応用研究されているシーズを選択した。その結果、光干渉計測技術の一種である定量位相顕微鏡(Quantitative Phase Microscopy, 以下、QPM)が新規事業候補となった。QPM は単一の光学コンポーネントではなく、複数の光学素子、機構部品、制御回路が統合された光学モジュールである。既存事業は、レーザー加工用の光学モジュールを製造しているが、SD エンジンの開発チームは、光学モジュールのカスタマイズ設計を得意としており、これらの設計技術とノウハウを QPM の製品開発に活用できる可能性が高いと判断した。その上で、QPM を光学モジュールとしてパートナー企業に提供し、パートナー企業にて顕微鏡システムを構築するビジネスモデルを想定した。研究所では、QPM はバイオ向けの応用を中心に研究開発が行われていたが、筆者の所属する事業部へ QPM を技術移転する際には、早期の製品化を実現するために工業向けへの応用も検討することとなった。なぜならば、SD 事業で構築した半導体分野のネットワークを QPM 事業にも活用できるためである。

1.2 QPM の事業化における問題点

QPM とは、光干渉計測技術を用いて測定対象からの反射光や透明物体を透過した光の位相情報を定量的に得ることのできる顕微鏡である。QPM は、従来の明視野観察や位相差観察、微分干渉観察では得られなかった定量的な位相情報を取得することができるため、ナノ

メートルオーダーの細胞や組織の厚さの変化、物体表面の微小な高さの欠陥を可視化することができる。水平分解能は顕微鏡の対物レンズの性能と同等であるが、垂直分解能は干渉計測により、観察波長の 500 分の 1 程度の分解能が得られる。図 1.4(a)に研究所で開発された試作機を示す。試作機の外形寸法は 200 mm×200 mm×400 mm であり、装置重量が 4.5 kg、消費電力 10 W の小型で軽量なシステムである。干渉計測は、振動や温度変化といった外乱ノイズによって測定結果が大きく影響される問題がある。本試作機は、振動の影響をキャンセルする光路長安定化機構が備わっており、除振台不要で測定ができる[10]。図 1.4(b)に示した生細胞のイメージング結果では、透明である細胞が光学厚さの違いによって可視化され、細胞内部の微細構造が見えている。連続的に撮像することで動的な細胞の形状変化を捉えることも可能である。

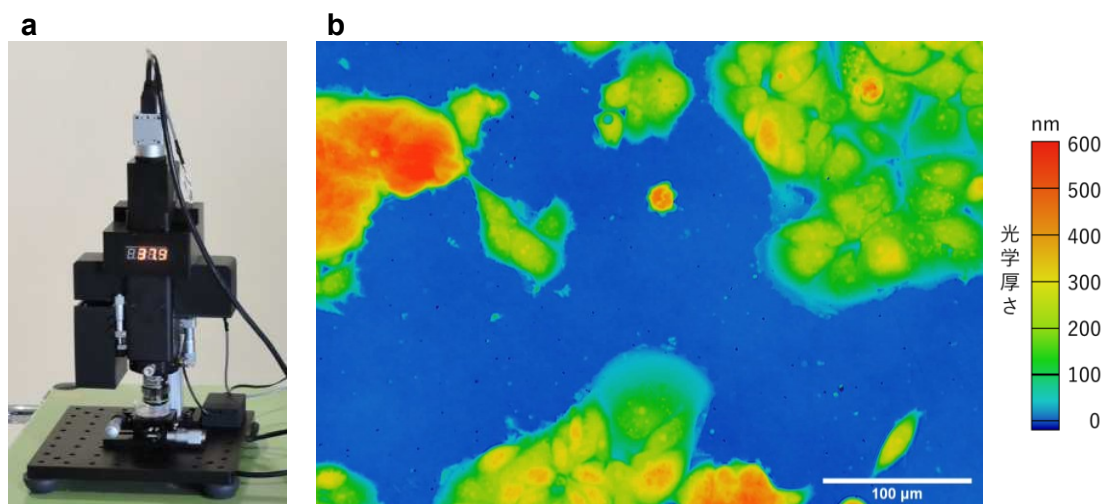


図 1.4 (a)QPM 試作機の外観、(b)生細胞の光学厚さ画像

研究所で開発された QPM 試作機を事業部に技術移転を行い、事業部で試作機開発を開始した。まず、研究所の試作機の基本構成はそのままに光学性能を向上するための改良設計を実施し、「フラッグシップ機」と呼ばれる試作機を開発した。具体的には、光学部品の取付精度の向上、CMOS カメラの素子サイズを 2/3 インチから 1.1 インチへ変更、照明光学系を改善した。その結果、フラッグシップ機では、観察視野の拡大と高画質化を達成した。図 1.5(a)にフラッグシップ機の外観を示す。フラッグシップ機では、顕微鏡鏡筒と干渉光学系を分離し、QPM のコア部である干渉光学系の改良設計を容易にした。図 1.5(b)にフラッグシップ機によるテストターゲット(ネガティブ 1951 USAF ターゲット)の高さプロファイル画像を示す。測定条件は、倍率 10 倍、光学分解能 1 μm 、視野 13.8 mm × 10.3 mm であった。測定結果より、画像にはノイズなどの画像劣化はなく、高画質な測定結果が得られた。また、工業サンプルの測定にも QPM を適用できることを確認した。

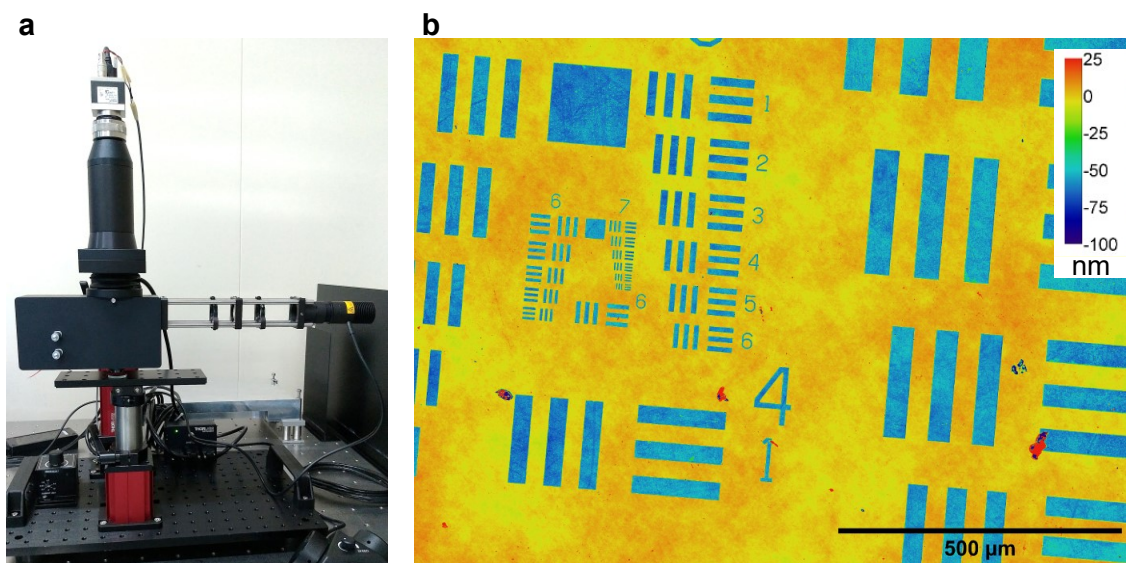


図 1.5 (a)フラッグシップ機の外観、(b)テストターゲットの高さプロファイル画像

フラッグシップ機を開発し、事業部でテスト測定の実施や操作性の確認をすることで、装置の問題が明らかになった。QPM は干渉計であるため、サンプルを測定する際には、サンプルに合わせた光学調整が必要となる。この光学調整は、研究所の試作機と同様にフラッグシップ機でも手動ステージによって行われていた。干渉計の光学調整は、干渉計の仕組みを熟知している必要があり、手動ステージを用いる方法では、誰にでも直感的に操作することはできなかった。

次に製品化に向けて想定顧客を絞り込むために、研究所の QPM 開発メンバーに過去の開発案件についてヒアリングを実施した。研究所では 2003 年から QPM の研究開発を開始し、ニーズ探索のために試作機を用いて複数の共同研究を実施していた。しかしながら、具体的なニーズが見つからず、開発の方向性を定めることができていなかった。その結果、試作機にどのような機能を搭載するべきか不明な状況であった。また、研究所ではマーケティングのために試作機を想定顧客に貸与するためのチャンネルを持ち合わせていなかった。外部からの問い合わせは、会社ホームページ経由のみであり、十分なマーケティングが実施出来ていなかったとのことであった。

さらに、QPM 技術に関連した市場調査を実施したところ、QPM 技術と同様に光干渉計測技術を応用した複数の装置が製品化されており、多くの競合他社が存在することが判明した。図 1.6 に主な競合他社の製品について示す。工業向け、バイオ向けにそれぞれ製品化されており、様々なアプリケーションに対しての適用が進められている。工業向けには、主に半導体ウエハー、光学部品の表面形状計測に用いられており、世界市場規模は 180 億円

程度である[11]。また、バイオ向けには、非染色での形状、体積の測定、蛍光観察との組み合わせによるマルチモーダル測定に利用されており、幹細胞やニューロサイエンスの研究に使用されている。バイオ向けの世界市場規模は20億円程度である[12]。



図 1.6 QPM 技術の競合製品の一例

事業部でのフラッグシップ機開発、市場調査をしていく段階で明らかになった問題点を以下の3つにまとめる。

問題点1：試作機は操作が難しく、熟練者でなければ使いこなせない。

開発された試作機は、光学調整は容易ではなく、干渉計の構造を熟知している技術者でないと操作が難しかった。加えて、試作機は、研究向けのチャンピオンデータを取得することを前提としているため、高性能ではあるが、撮影の条件設定が難しく、幅広い条件で撮像することに対応していなかった。市場に広く受け入れられるためには、誰にでも簡単に操作できる設計にすることが望ましい。

問題点2：所属企業が目指すべき市場ニーズが明らかになっていない。

QPMは2003年から研究所で研究開発が進められ、ニーズ探索も行われたものの、具体的なニーズが見つかっていない。そのため、製品化するために必要な市場ニーズが明確になっていないことから、実際にどのような機能を製品に搭載すべきであるかが不明な状況であった。また、研究所では具体的なニーズを調査する手段が限られていた。

問題点3：市場には多くの競合他社が参入しており、独自のビジネス戦略が描けていない。

QPM技術と同様に光干渉計測技術を応用した装置は、様々なメーカーから発売されてお

り、研究開発や産業での活用が進んでいる。そのため、単純に汎用的な計測装置として QPM を製品化した場合には、競合他社との差別化は困難である。したがって、独自性のあるビジネス戦略の構築が必要であった。

1.3 本研究の目的

本研究の大目的は QPM 事業の立ち上げである。前節に示した3つの問題点を解決するための研究目的を以下の3つに設定した。

研究目的1：装置の使いやすさと安定性を向上させるための自動化技術を開発する。

干渉光学の調整を容易にして、誰にでも使える装置にするために新規の光学系を提案する。そのため、QPM の光学調整機構を電動化し、様々な測定サンプルに対して簡単に使用できる装置を開発する。

研究目的2：所属企業が目指すべき市場ニーズを明らかにし、そのニーズに適合した仕様の QPM を開発する。

QPM を製品化するためには、顧客ニーズや特定のアプリケーションに対して適合した開発が必要である。そのため、想定顧客と製品化を前提とした共同開発を実施して、想定顧客の具体的なニーズに基づいた試作機を開発する。

研究目的3：QPM 事業の競争優位性を高めるビジネス戦略を立案する。

QPM 事業が競合他社に対して競争優位性を高めていくためには、顧客ターゲットを絞り込み、ポジショニングを明確にしたうえで、独自の戦略を構築する必要がある。そのため、所属企業の強みを生かしたビジネス戦略を立案する。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を図 1.7 に示す。本論文は以下の6章で構成される。

第1章では、序論として本研究の背景、目的、構成を述べた。

第2章では、光干渉計測技術の基礎について説明し、所属企業における QPM の過去の開発、QPM の技術的な課題を提示する。

第3章では、バイオ向け QPM の使いやすさ向上のための開発として、細胞の深さ方向のスキャンを高速化した試作機開発について述べる。

第4章では、製品化を念頭に置いた工業向け QPM の試作機開発について述べる。共同開

発先からの要求事項に基づく試作機開発について述べる。

第5章では、QPM 事業の競争優位性を高めるために立案したビジネス戦略について述べる。

第6章では、本研究の振り返り、本研究の結論、今後の展望について述べる。

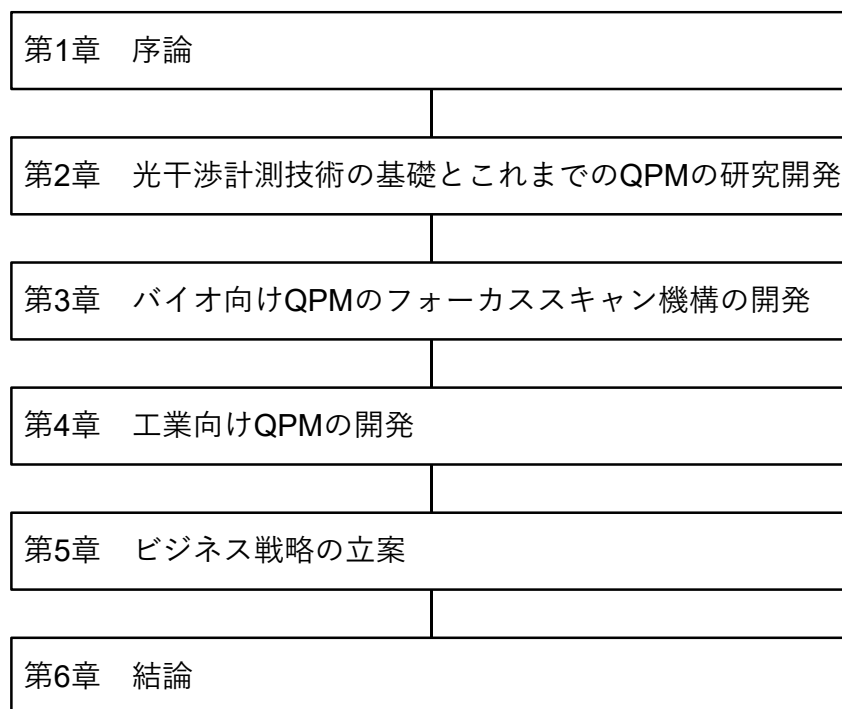


図 1.7 本論文の構成

第2章 光干渉計測技術の基礎とこれまでの QPM の研究開発

2.1 はじめに

本章では、QPM に関連した光干渉計測技術の概要、定量位相イメージング手法について述べる。次に、所属企業でこれまでに実施された QPM の研究開発内容について説明し、最後に所属企業における QPM の技術的な課題をまとめる。

2.2 光干渉計測技術の概要

光の干渉を用いた計測技術は、非接触、かつ計測時間が高速であり、ナノメートルオーダーの分解能が得られるという利点から、研究開発や産業の多くの場面で利用されている。干渉とは、2つ以上の波が重なることで、強め合ったり弱めあったりして、新しい波形が生成される現象のことである。光干渉を用いることで、表面形状、屈折率などを測定できる。

干渉計の中でも最も一般的な干渉計は、マイケルソン干渉計、あるいはトワイマン・グリーン干渉計と呼ばれている [13]。マイケルソン干渉計の概略図とテストターゲットの干渉画像を図 2.1 に示す。光源からの光はビームスプリッターによって2つの光路に分けられ、物体側と参照ミラーに向かう。次に光は物体表面と参照ミラーで反射し、ビームスプリッターで再び合成される。最後に2つの光が干渉して干渉縞が発生し、これを光検出器によって検出する。この干渉縞をカメラなどで取得することで干渉画像が得られる。特に LED などの低コヒーレンス光源を用いる場合には、可干渉距離が短いため、物体光路と参照光路の距離を可干渉距離以下に一致させる必要がある。

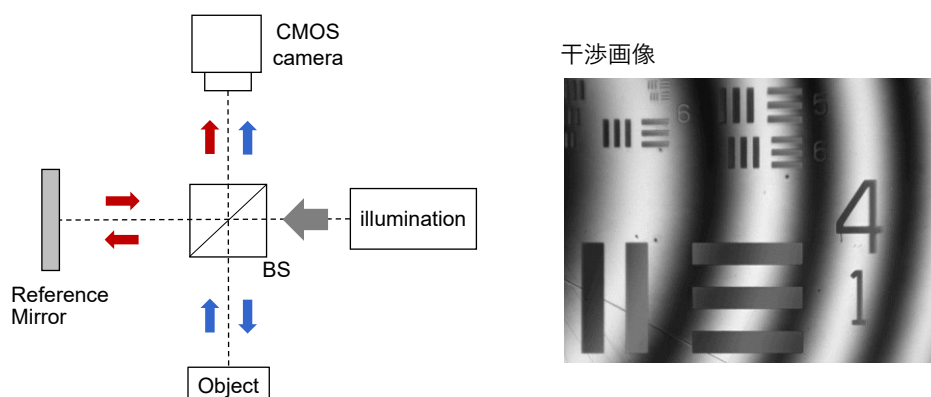


図 2.1 マイケルソン干渉計の概略図とテストターゲットの干渉画像

ここで物体光強度 I_{obj} 、参照光強度を I_{ref} 、参照光と物体光の位相差を $\varphi_{obj}(x, y)$ とすると

観察される干渉強度 $I(x,y)$ は

$$I(x,y) = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos[\varphi_{obj}(x,y)] \quad (2.1)$$

と表される。光干渉計測では、干渉縞を何らかの方法で解析して、式(2.1)の位相 $\varphi_{obj}(x,y)$ を求める。

2.3 定量位相イメージング手法

位相に感度のある干渉計測手法を用いることで、被検物の表面形状や光学的厚さを定量的に顕微イメージングする手法は、デジタルホログラフィ顕微鏡(DHM: Digital Holography Microscope)、定量位相顕微鏡(QPM: Quantitative Phase Microscope)あるいは定量位相イメージング(QPI: Quantitative Phase Imaging)と呼ばれ、現在までに様々な方式が考案されている[14], [15]。本節では、代表的な位相解析手法である、位相シフト法、フーリエ変換法の原理について述べる。また、これらの関連技術の白色干渉法の原理について述べる。

2.3.1 位相シフト法

位相シフト法では、干渉計の参照ミラーをピエゾアクチュエーター(PZT)によって動かし、既知の光路長差を変化させた時に得られる 3 枚以上の干渉縞から位相を計算する。図 2.2 に位相シフト法の概略図を示す。最も一般的な手法として 4 点位相シフト法が知られている[16]。4 点位相シフト法では、等間隔に参照ミラーを $\lambda/8$ ずつ移動し、4 枚の干渉縞を取得する。 $\lambda/8$ の移動は、参照光の $\pi/2$ の位相変調に対応する。以下に 4 枚の干渉縞は対応した式(2.2)、(2.3)、(2.4)、(2.5)を示す。

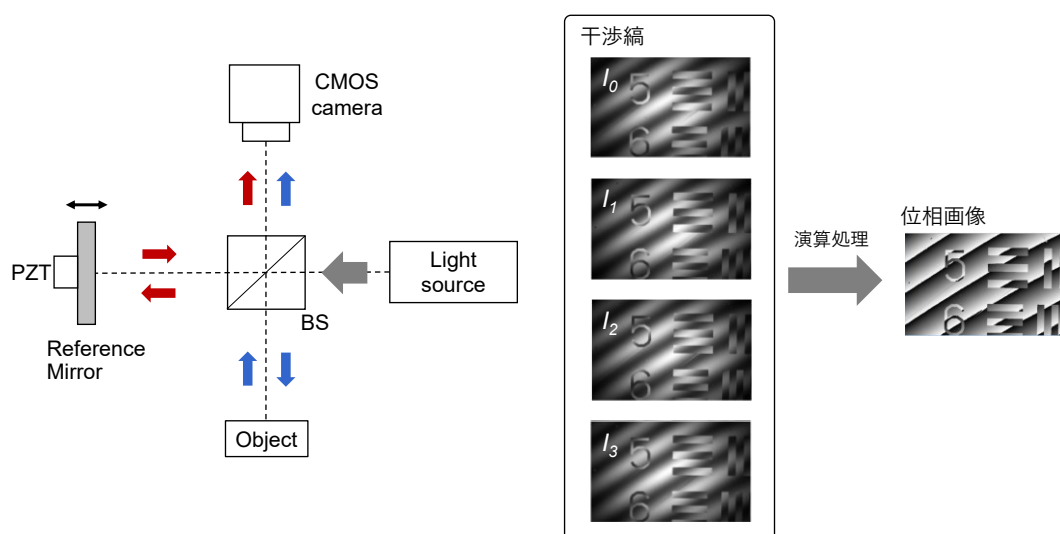


図 2.2 位相シフト法の概略図

$$I_0 = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos \varphi \quad (2.2)$$

$$I_1 = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos(\varphi + \pi/2) = I_{obj} + I_{ref} - 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \sin \varphi \quad (2.3)$$

$$I_2 = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos(\varphi + \pi) = I_{obj} + I_{ref} - 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos \varphi \quad (2.4)$$

$$I_3 = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos(\varphi + 3\pi/2) = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \sin \varphi \quad (2.5)$$

これら4つの式によって、以下の式(2.6)のように位相が計算できる。

$$\varphi = \tan^{-1}[(I_3 - I_1)/(I_0 - I_2)] \quad (2.6)$$

位相シフト法は、水平分解能の劣化が無く、高画質な位相画像が取得できることが特徴である。一方、複数枚の画像取得が必要なため、移動物体の測定には適していない。

2.3.2 フーリエ変換法

フーリエ変換法とは、参照ミラーを傾け、もとの干渉縞にキャリア縞に与えて、1枚の干渉縞からフーリエ変換して位相を計算する手法である[17]。図2.3にフーリエ変換法の概略図を示す。図2.1のマイケルソン干渉計の参照ミラーに微小の傾きを与えると空間キャリア周波 f_{x0}, f_{y0} を持った、干渉強度である空間キャリア縞パターンとして

$$I(x, y) = I_{obj} + I_{ref} + 2\sqrt{I_{obj}I_{ref}} \cos[2\pi(f_{x0}x + f_{y0}y) + \varphi_{obj}(x, y)] \quad (2.7)$$

を得ることができる。

次に式(2.7)の空間キャリア縞パターンを2次元フーリエ変換すると、式(2.7)の右辺の第1項、第2項である非干渉成分と第3項である干渉成分のスペクトルに分かれる。干渉成分の正の周波数をフィルターによって取り出し、キャリア周波数を取り除くために原点位置に移動する。この成分を逆フーリエ変換すると、複素振幅 $u(x, y)$ が以下の式(2.8)ように得られる。

$$u(x, y) = \sqrt{I_{obj}I_{ref}} \exp[i\varphi_{obj}(x, y)] \quad (2.8)$$

したがって、位相 $\varphi_{obj}(x, y)$ は複素振幅の実部と虚部の値から、式(2.9)のように求めることができる。

$$\varphi = \tan^{-1}\{\text{Im}[u(x, y)]/\text{Re}[u(x, y)]\} \quad (2.9)$$

このようにフーリエ変換法は、一枚の画像から位相を計算できるため、高速測定に適している。しかしながら、この手法は、測定対象面の凹凸の空間周波数がキャリア縞の周波数よ

り十分低いという前提のもとに導出されている。そのため、キャリア周波数を取り除く際のフィルタリング処理で測定対象面の高周波成分が失われ、水平分解能が低下するという問題がある [18]。

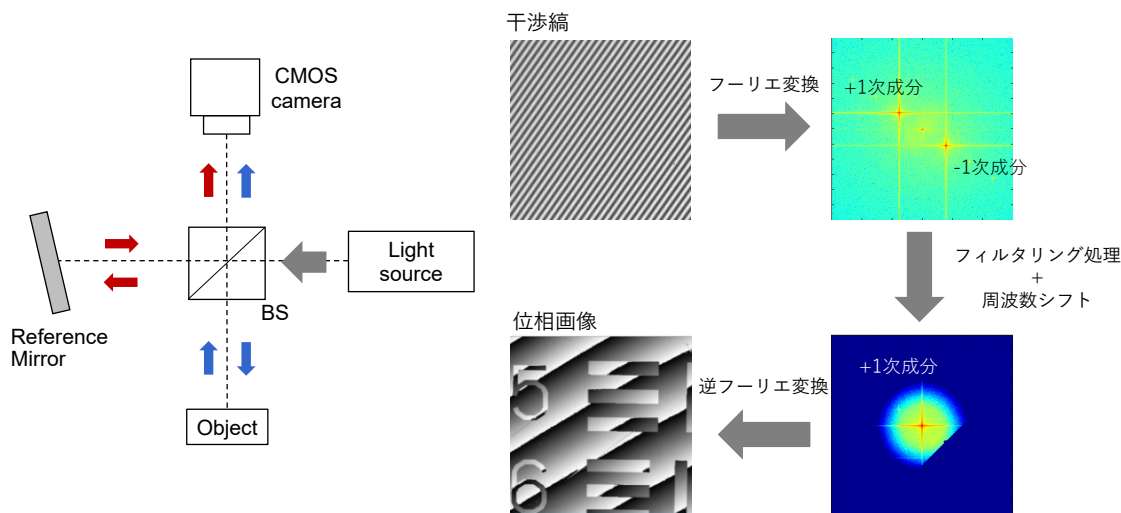


図 2.3 フーリエ変換法の概略図

2.3.3 白色干渉法

白色干渉法とは、ハロゲンランプや白色 LED などの広帯域の低コヒーレンス光源を用いて、測定面に対応する干渉強度が最大になる位置を取得し、物体の三次元形状を計測する手法である [19]。図 2.4 に白色干渉法の概略図を示す。光学系は位相シフト法とよく似ている。低コヒーレンス光源を用いて、参照ミラーを PZT によって移動することで、干渉波形であるインターフェログラムが得られる。このインターフェログラムから参照光路と物体光路の光路長差が 0 になる位置を正確に求めることができる。インターフェログラムのピーク位置が試料表面の高さに対応しているため、カメラの各画素におけるインターフェログラムのピーク値を記録することで、物体表面の三次元形状を一括して求めることができる。白色干渉計は低コヒーレンス光源を使用しているため、レーザー光源で発生するスペックルノイズが生じず、画像の劣化が起こらない。本研究で開発する QPM においてもこの利点から低コヒーレンス光源を採用している。一方、白色干渉法の欠点としては、干渉信号の生成範囲が機械的な走査範囲に依存するため、計測時間が比較的長いことである。

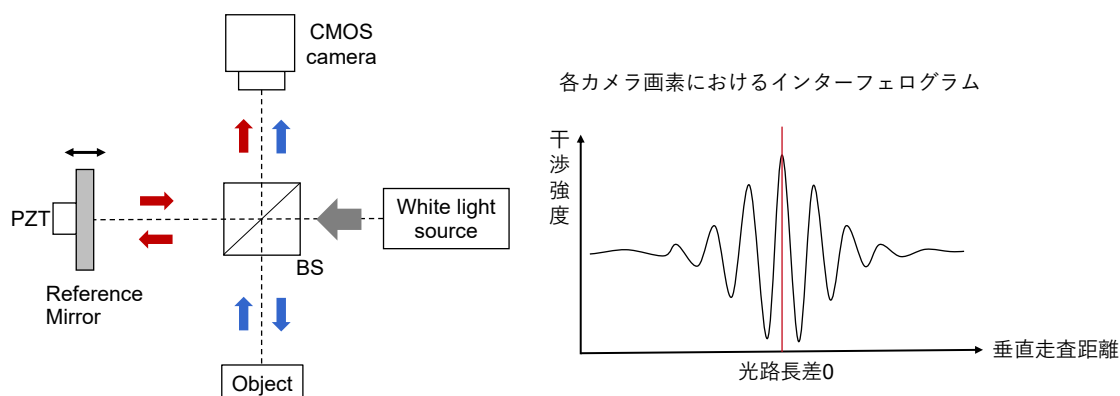


図 2.4 白色干渉法の概略図

2.4 所属企業での QPM の開発

本節では、所属企業における QPM の研究開発と過去の事業化検討について述べる。

所属企業での QPM の研究開発は、2003 年に研究所に所属する研究者がマサチューセッツ工科大学に派遣され、所属企業に QPM の基礎技術を持ち帰ることをきっかけに始まった。その基礎技術をもとに、マイケルソン干渉計の派生形であるリニク干渉計を用いた反射型 QPM[20]、さらにはマッハツェンダー干渉計を用いた透過型 QPM[21]が開発された。所属企業の QPM の特徴としては、画像劣化の原因となる振動や温度変化といった環境ノイズによる干渉縞のぶれを低減するために、干渉信号の一部をフォトダイオードで検知してフィードバック回路を用いることで、物体光路と参照光路の光路長が一定になるように光路長を制御する機構が搭載されていたことである。この機構によって環境ノイズに起因する光路長の変位量は、制御前と比べて 1/10 以下に抑制されている[22]。QPM はこのフィードバック回路を用いることで、特別な除振台を使用せずに干渉縞を安定的に撮像することができた。

研究所の QPM が開発されてからは、QPM の非染色イメージングという特徴を生かして、バイオ向けのアプリケーション探索のために複数の共同研究が実施された。細胞膜[23]、[24]や幹細胞[25]の観察、光免疫治療によるがん細胞の破壊[26]、[27]など、アプリケーションごとに機能を最適化した装置開発を進められた。

研究所では、通常の明視野観察や蛍光観察では見えない微細構造の観察を目標にして QPM を開発していたため、高画質で高分解能の位相画像を取得に特化した方式を採用していた。研究所で開発された QPM 試作機には以下の 3 つの特徴があった。

1. 光源は低コヒーレント光源である LED を採用し、レーザー照明特有のスペckルノイズや固定パターン状のバックグラウンドノイズといった画質の劣化要因が生じない。
2. 物体光路と参照光路を分離した 2 光束干渉計を採用し、自己干渉型干渉計で発生する特有のハロー上のアーチファクトが発生しない。
3. 位相シフト法を採用することで明視野観察と同等の水平分解能を確保している。

一方、低コヒーレンス光源を用いていることから可干渉距離が数十 μm 程度と短く、干渉光学系の調整は非常にシビアであった。そのため、実際の運用においては、測定サンプルが変わるたびに光路長の初期調整と参照ミラーのフォーカス調整が必要であった。加えて、生物サンプルの場合、顕微鏡の Z 軸ステージを用いてフォーカス調整すると、物体光路の光路長が変わるため、フォーカスを変えるたびに参照光路の光路長を再調整する必要があった。QPM 試作機では、これらの調整は手動ステージで行われており、熟練した研究者以外が活用することはできていなかった。このように、QPM 試作機は、調整方法にノウハウが必要な装置であったため、装置としての手離れが悪い状況であった。それゆえ、実際のユーザーであり、干渉計に熟知していないバイオ研究者が QPM を単独で使いこなすことは困難であり、QPM の操作に熟練した研究者が案件ごとにサポートをしなくてはならないと状況であった。

最後に、研究所の QPM 研究成果の事業化検討について説明する。これまでに事業化検討は 2 回実施されたが結果としては断念している。1 回目の事業化検討は、2006 年に本学の修了生である池田氏によって行われた。池田氏は、ホログラフィック技術の事業化のために浜松ホトニクス株式会社からスピンオフして、パイフォトニクス株式会社を設立した。設立した会社では、測定機器である QPM と照明機器である LED 照明装置の事業化開発が行われた。前者の QPM は、将来的な市場規模は大きいものの、事業として展開するにはとても時間がかかり、数年での黒字化は困難であると判断されたため開発は中断された。後者の照明機器は、ホロライトと呼ばれる製品が開発され、短期間に様々な用途向けへ製品化され、事業化が達成された[28]。2 回目の事業化検討は所属企業によって実施された。所属企業は 2010~2013 年の NEDO プロジェクト[29]に参加し、幹細胞の品質管理に対するアプリケーションを開発した。しかしながら、その当時は幹細胞の培養に関する周辺技術で未成熟であることが判明し、製品化を断念した。この 2 回の事業化検討が示すことは、QPM は干渉計装置として、システムやモジュールとしての開発が必要であり、分野によっては干渉計以外の周辺技術の開発も必要になる場合があるということである。そのため、早期に事業を立ち上げていくためには、市場ターゲットの絞り込みによって、独自のビジネス戦略の構築が必

要であるといえる。

2.5 まとめ

本章では、はじめに QPM に関連した光干渉計測技術の概要、次に位相解析手法である定量位相イメージング手法について述べた。最後に、所属企業の研究所で実施された QPM の研究開発内容と過去の事業化検討について説明した。研究所の QPM 試作機は、水平分解能に劣化が無く、ノイズのない高画質な位相情報を取得できる装置であったが、光学系の調整は手動であり、その調整には一定のノウハウが必要であったため、使いやすい装置とは言えなかった。そのため、QPM を事業化するための技術的課題は、装置の使いやすさと安定性を向上させるための光学調整機構の自動化技術の開発である。また、過去の事業化検討の結果から、QPM 事業を早期に立ち上げていくためには、技術開発と並行して、市場ターゲットの絞り込みにより、独自のビジネス戦略の構築が必要である。

第3章 バイオ向け QPM のフォーカススキャン機構の開発

3.1 はじめに

細胞生物学における定量位相イメージング(Quantitative Phase Imaging、以下 QPI)は、光路差の空間的なマッピングを定量的に得るためのイメージング技術であり、生きた細胞の構造とダイナミクスをラベルフリー、非侵襲、前処理不要で可視化することができる[30]。その応用としては、生細胞の体積変化の測定、細胞や組織における屈折率の不均一性の可視化、細胞のアポトーシスによる収縮、生細胞の細胞膜や核膜の膜変動などが挙げられる[14], [23], [31]-[36]。

QPI が細胞生物学分野に広く普及するためには、その使いやすさは重要である。所属企業の QPM 試作機は、第 2 章で説明した低コヒーレンス光源と位相シフト法を採用しており、空間解像度の劣化が発生せず、高い定量性が得られる。一方、干渉縞を得るための光路長調整がシビアであること、振動などの環境ノイズに影響を受けやすいといった問題点がある。そのため、QPM 試作機を普及させるためには、装置の使いやすさを大幅に改善する必要がある。

図 3.1 に QPM 試作機における光学調整の概略図を示す。細胞を観察する場合、工業サンプルと異なり、フォーカス面は任意の位置にあるため、サンプルのフォーカス調整をすると物体側の光路長が変化する。LED などの低コヒーレンス光源を使用する場合、波長帯域幅による可干渉距離が $50\ \mu\text{m}$ 以下と狭い。そのため、フォーカス調整によって物体側と参照側の光路長差が可干渉距離を超えると、参照側の光路長の再調整が必要となる。つまり、焦点深度を超えて細胞や生体サンプルに対してフォーカス移動を行うためには、フォーカス調整後に光路長調整を毎回実施する必要であり、QPM 試作機は使いやすい装置とはいえなかった。

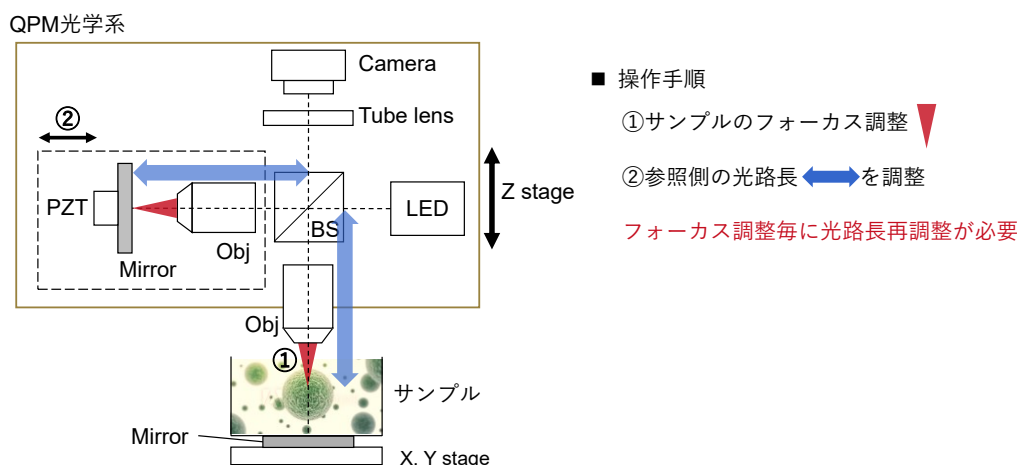


図 3.1 QPM 試作機における光学調整の概略図

前述のとおり、QPI において低コヒーレンス光源を用いて、焦点深度を超えて細胞や生体サンプルに対してフォーカス移動を行うには、光路長とフォーカス条件を同時に調整する必要がある。これまで研究では、タイムドメイン OCT (TD-OCT) の研究において、高精度のアクチュエーターを用いることで光路長とフォーカス条件の調整が行われた[37]。また、スペクトルドメイン OCT (SD-OCT) や波長掃引光源 OCT (SS-OCT) の研究では、参照光路のみに焦点可変レンズ (Focus tunable lens, 以下、FTL) を導入して、高速な焦点移動と高い横方向の解像度を両立させている。しかしながら、この構成は参照光路と物体光路の光路長差が大きく、低コヒーレンス光源を用いるシステムには適用することはできない[38]–[40]。低コヒーレンス光源を用いたフォーカススキャンの成功例としては、Spatial Light Interference Tomography (SLIT) と呼ばれるコモンパス技術がある[41]。SLIT では、コモンパス干渉計であるため、物体光路と参照光路が常に一致しており、Z スキャン時には光路長の再調整が必要なかった。

本章では、コンパクトなリニク干渉計をベースとした QPM に費用対効果の高い FTL を導入することで、コヒーレンスゲートと幾何学的なフォーカスを切り離し、高速なダイナミックフォーカスを実現する新たな光学系を提案する。これまで TD-OCT で報告されていた構成とは異なり、サンプルディッシュの下にミラーを配置した独自のサンプル構成によって、FTL のみでフォーカススキャンを実現した。また、QPM では、2 光束干渉計を用いているため、画像の空間的な低周波成分が維持され、ハローのない画像が得られた。実験では、ポリスチレンビーズと生細胞の測定において、FTL を用いた QPI のフォーカス調整を実証した。本章の提案方法を用いることで、これまで必要になっていたフォーカス調整に伴う光路長調整は不要になる。

3.2 実験のセットアップ

3.2.1 ダイナミックフォーカス低コヒーレンス・リニク干渉計のセットアップ

コンパクトな QPI システムを構築するために、反射型のリニク干渉計を採用した。リニク干渉計とは、マイケルソン干渉計において参照側と物体側に同じ波面収差を持つ対物レンズを使用する干渉計である[42]。図 3.2(a)、(b)はリニク干渉計を用いた定量位相イメージングシステムの概略図と撮像システムの写真である。サンプルチャンバーの下に「サンプルミラー」と呼ばれるミラーが配置されている。照明はスペックルノイズのない画像を得るために、LED (Cree, XQ-E、中心波長=528 nm) を用いたケーラー照明を構築した。また、光路長の調整を容易にするために照明部にバンドパスフィルター (Thorlabs、FL532-3、半値幅 3 nm) を挿入した。バンドパスフィルターを適用した光源の波長帯域幅から算出した時間的コヒーレンス長は大気中で 42 μm であった。

ケーラー照明からの光は、ビームスプリッターで分割され、参照ミラーとサンプルミラーで反射し、再び合成されて FTL を通過した後、結像レンズ (シグマ光機、DLB-25.4-200PM、 $f=200\text{mm}$) によって、CMOS カメラ (IDS Imaging Development Systems、UI-3080CP-M-GL Rev.2) の撮像面上に干渉縞を形成した。また、光路長のバランスをとるために物体光路と参照光路には同一の対物レンズ (オリンパス、LUCPLFLN 20X、 $\text{NA}=0.45$) を使用した。サンプルチャンバーを含む物体光路と参照光路の間の収差を一致させるために、参照ミラーにガラス製の補償板を接着した。

物体光路と参照光路の光路長が等しく、参照ミラーとサンプルミラーが光学的に共役である場合、可視度の高い干渉縞を得ることができる。この条件は、光学系の 2 つの自由度、すなわち、参照ミラーの光軸方向の位置と参照対物レンズの位置によって満たすことができる。また、CMOS カメラの共役面である観察面を調整するために、結像レンズとビームスプリッターの間に FTL (Optotune、EL-16-40-TC-VIS-5D) を設置することで 3 つ目の自由度を導入している。FTL の焦点距離を変化させることで、物体光路と参照光路の光路長を一定に保ったまま、CMOS カメラと共役な観察面を光軸に沿って前後に移動させることができる。つまり、コヒーレンスゲートと幾何学的フォーカスを切り離すことができる。そのため、FTL を用いたフォーカススキャンは、干渉縞のコントラストは変化しない。FTL によるフォーカススキャン範囲は、観察倍率やセットアップによって異なるが、本セットアップでは -200 ~ +300 μm の範囲のスキャンが可能であった。また、フォーカススキャンの応答時間は 10 ms 程度であった。

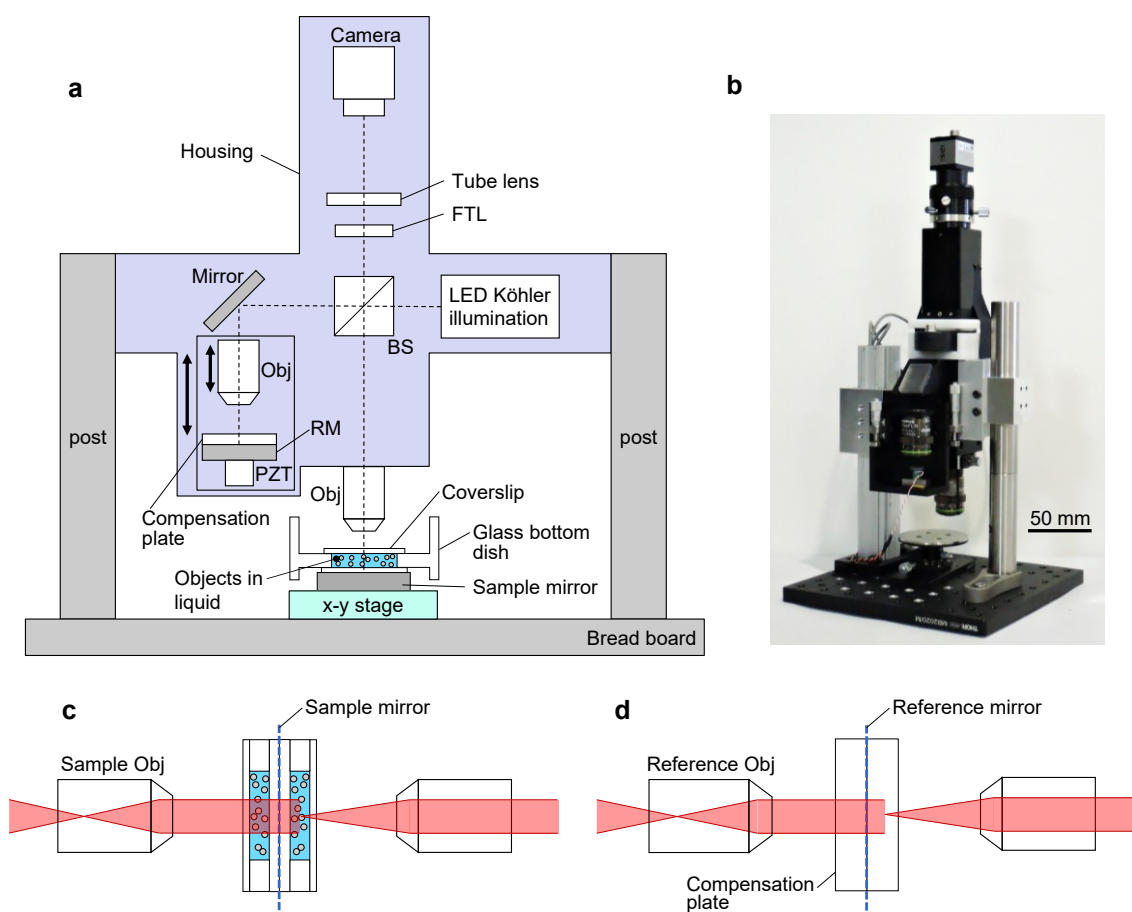


図 3.2 (a) リニク干渉計を用いた定量位相イメージングシステムの概略図 PZT：ピエゾアクチュエーター、Obj：対物レンズ、BS：ビームスプリッター、RM：参照ミラー、FTL：焦点可変レンズ、(b) 撮像システムの写真、(c)物体光路の概略図、(d) 参照光路の概略図

出所：[43]から許可を得て引用 © The Optical Society

物体光路と参照光路の詳細を図 3.2(c) および(d) に示す。試料は、ガラスボトムディッシュに満たされた溶液（ゼラチン溶液または培養液）に浸され、その上にカバースリッパを置いた。さらにガラスボトムディッシュの底面の下にサンプルミラーを設置した。物体光路側では、照明光はカバースリッパ、サンプル、ガラスボトムディッシュを通過し、ミラーで反射される。つまり、ミラーで反射した光でサンプルを照明しているので、反射型の顕微鏡となっている。一方、参照光路側では、照明光は補償板を通過し、ミラーで反射される。この方法の利点は、ガラスボトムディッシュなどのサンプルチャンバーの下にミラーを置くだけで、透過型顕微鏡と同じように透明なサンプルを観察できることである。

図 3.3 に従来手法と提案手法による干渉縞コントラストの比較を示す。サンプルにはテス

トターゲットを用いた。2つの手法により、ジャストフォーカス位置とその前後位置での画像を比較した。従来手法では、フォーカス位置が変化に伴って物体光路の光路長が変化するため、干渉縞のコントラストが低下する。一方、提案手法では、FTL によってフォーカス位置を変化させているため、光路長は変化することがない。その結果、テストターゲットの像は干渉縞のコントラストはほとんど変化していない。したがって、提案手法を用いることで細胞や生体サンプルの任意の位置のフォーカスを移動させても、干渉縞コントラストが保持される。

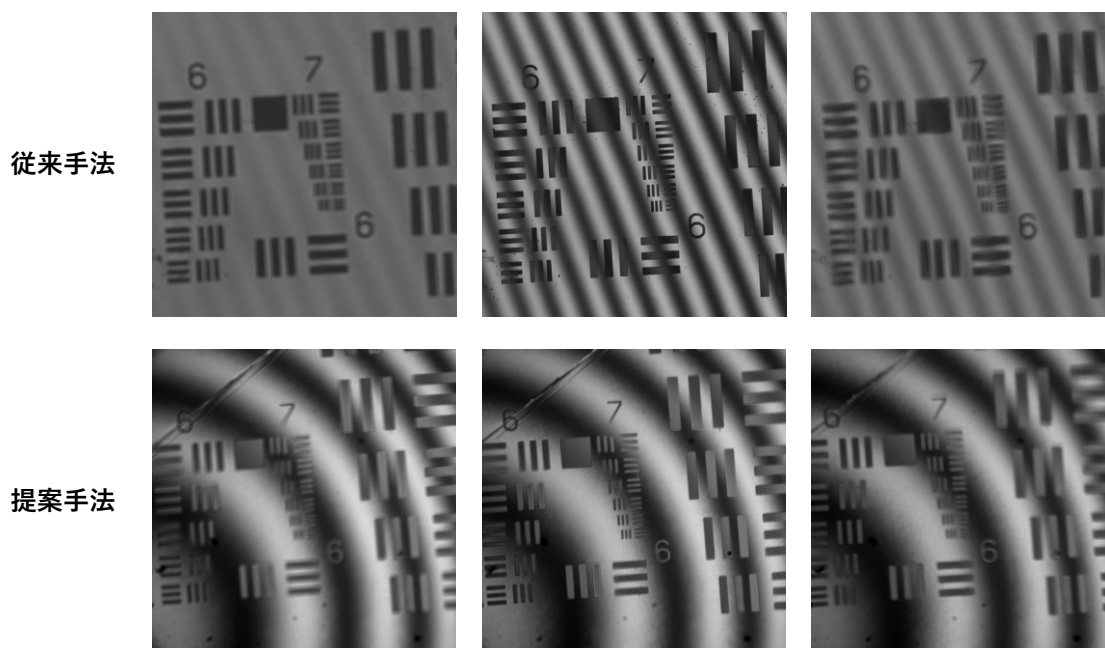


図 3.3 従来手法と提案手法における干渉縞コントラストの比較

2 光束干渉計におけるコヒーレンスゲートは、時間的にも空間的にも作用している[44]。ハロゲンランプや LED などの空間的な低コヒーレント光源は、空間的なコヒーレンスの効果が時間的なコヒーレンスの効果よりも支配的である[45]-[47]。まず、空間的コヒーレンスゲートを測定した。光路長を一定に保ったまま、参照側の対物レンズを光軸に沿って平行移動して測定した干渉縞の可視度のプロットを図 3.4 (a) に示す。可視度のピークは対物レンズのジャストフォーカス位置に対応する。空間的コヒーレンスゲートの半値幅は、バンドパスフィルターを使用した場合と使用しない場合で、それぞれ $32\ \mu\text{m}$ と $25\ \mu\text{m}$ であった。次に、時間的コヒーレンスゲートを測定した。参照光路の光路長を光軸に沿って平行移動させて、測定した干渉縞の可視度を図 3.4 (b) に示す。時間的コヒーレンスゲートの半値幅は、バンドパスフィルターを使用した場合と使用しない場合は、それぞれ $46\ \mu\text{m}$ 、 $16\ \mu\text{m}$ であった。したがって、バンドパスフィルターによる波長帯域幅の制限は、時間的コヒーレン

スゲートよりも空間的コヒーレンスゲートへの影響は小さいといえる。この結果は、空間的に低コヒーレント光源を用いた干渉計において、物体光路にのみに FTL を実装しても干渉縞のフォーカススキャンがうまくいかないことを説明している。

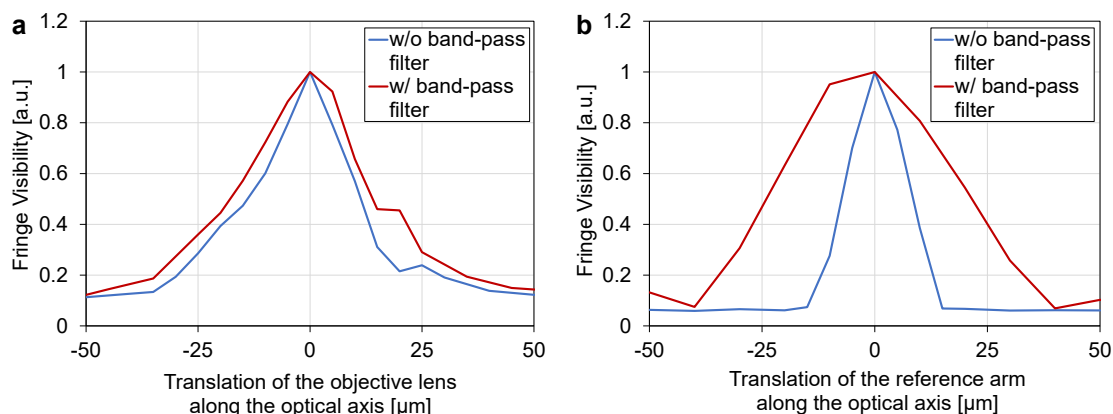


図 3.4 (a) 対物レンズの光軸方向の移動量に応じた干渉縞コントラスト、(b) 参照光路の光路長の光軸方向の移動量に応じた干渉縞コントラスト

出所：[43]から許可を得て引用 © The Optical Society

3.2.2 画像取得方法

本装置では、サンプルを一度透過した光の位相変化を測定する。従来のリ尼克・マイケルソン干渉計がダブルパス構成であるのに対し、本装置はシングルエンド構成である。そのため、サンプルミラーに入射した照明光はサンプルを通過し、サンプルミラーから戻ってきた光はサンプルを照明する。そのため、入射光による波面の変調は、焦点から遠く離れたところで起こり、結果として得られる干渉画像には影響を与えない。つまり、サンプルによる波面変調に起因する位相遅れ φ は、光学厚さ(Optical thickness、以下 OT)と関連しており、次式で表される。

$$OT(x, y) = \lambda \cdot \varphi(x, y) / 2\pi \quad (3.1)$$

ここで、 λ は光源の中心波長である。

干渉画像は、 piezoelectric actuator (PZT) のよって、時間的な位相シフトによって取得する。位相計算は、次式のように記述される 4 点位相シフト法を採用した[16]。

$$\varphi(x, y) = \tan^{-1}[(I_3(x, y) - I_1(x, y)) / (I_0(x, y) - I_2(x, y))] \quad (3.2)$$

位相シフト法では、機械的な振動や温度変化などの環境ノイズ、PZT のヒステリシスによるわずかな位相変化が位相の測定誤差につながる[48]。このような位相誤差を低減するた

めに顕微鏡の保持機構を従来の方法から変更した。一般的に、顕微鏡本体は Z 軸ステージに対して片持ち構造で保持されている。本研究では、従来の保持機構に起因する振動を低減するために、顕微鏡本体を 2 本の柱で保持する両持ち構造を採用した。顕微鏡の保持機構の違いによる振動影響を評価するため、高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform、以下 FFT)を用いて、振動の周波数成分に対する位相ずれ量を解析した。位相ずれ量が大きさは振動の大きさと比例している。片持ち構造と両持ち構造における位相ずれ量の FFT スペクトルを図 3.5 に示す。青線と赤線は、それぞれ片持ち構造と両持ち構造のデータを示している。FFT による振動の解析結果から、両持ち構造は片持ち構造に対して、10Hz 以上の振動ノイズが低減している。両持ち構造の採用によって、振動影響が抑制され、除振台がない環境でもノイズの少ない QPI 撮像が可能になった。

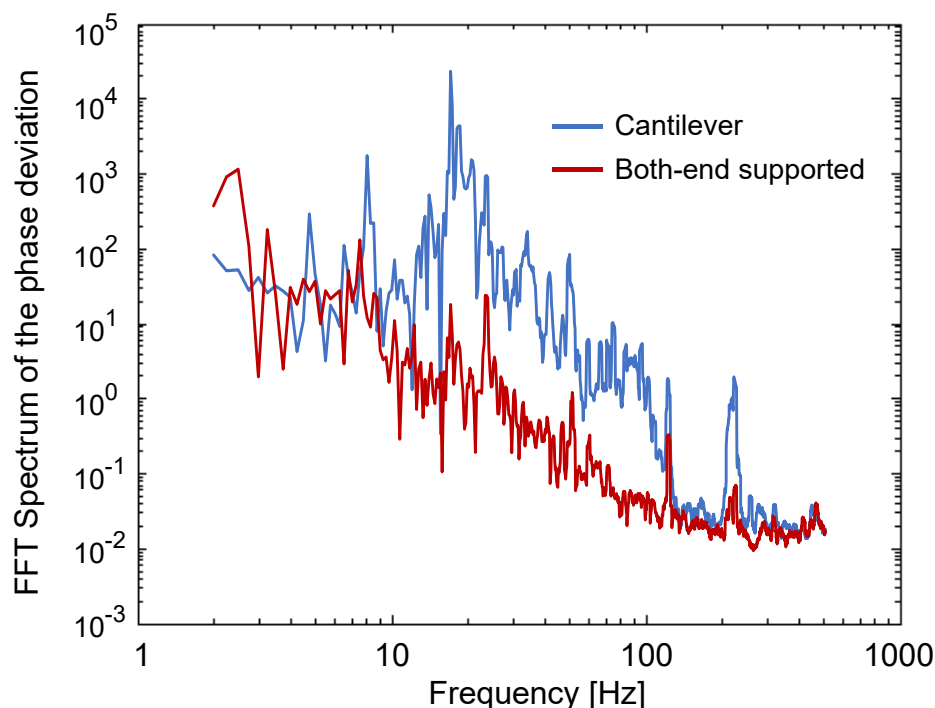


図 3.5 位相ずれ量の FFT スペクトル

青線は片持ち構造、赤線は両持ち構造の位相変動の FFT 示す。

出所：[43]から許可を得て引用 © The Optical Society

次に、FTL によるフォーカス移動、PZT による位相シフト、カメラの露光のタイミングチャートを図 3.6 に示す。実験では、露光時間は 10 ms、各位相シフトの時間間隔は 50 ms とした。フォーカス移動は、原点から 3 回目の位相シフト完了した後の 50 ms 後に行った。つまり、1 つのフォーカス面で必要な測定時間は 250 ms であった。フォーカス移動は常に

Z 軸に対して上向きの動作であり、フォーカススキャンの 1 サイクル後にフォーカス位置は FTL によって初期位置に戻った。

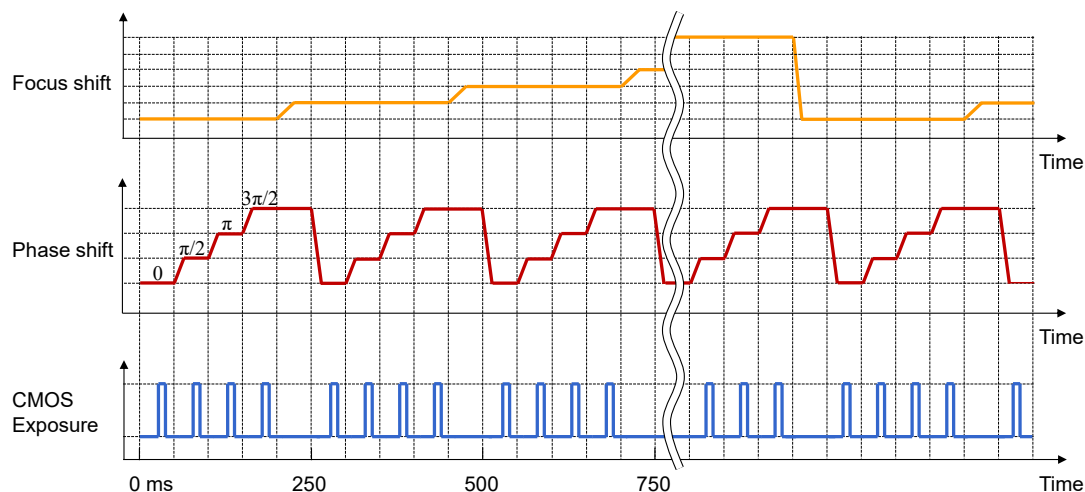


図 3.6 フォーカス移動、位相シフト、CMOS 露光時間のタイミングチャート

出所：[43]から許可を得て引用 © The Optical Society

式(3.2)で算出した位相分布に対して、位相アンラップと背景補正の処理を行った。背景の歪みは、第 6 成分までのゼルニケ多項式の加重和を減算することで補正した[49]。背景補正のための係数は、大まかに推定された背景ピクセルの補正された位相の平均二乗誤差を最小化するために最小二乗法によって決定された。

3.3 サンプル測定結果

3.3.1 ポリスチレンビーズの QPI 撮像

FTL によるフォーカス調整機能を確認するために、ポリスチレンビーズの観察を行った。ポリスチレンビーズ (Polysciences, Catalog No.17154-10) は直径 $1 \mu\text{m}$ であり、10 wt% のゼラチン溶液に分散させた。フォーカス面の走査は $0.88 \mu\text{m}$ のピッチで行い、合計 36 枚のスライスを取得した ($Z = 0 - 30.8 \mu\text{m}$)。

図 3.7(a)および(b)に同一の Z スキャン操作で、2つの異なるフォーカス面 ($Z=7.92 \mu\text{m}$, $15.84 \mu\text{m}$) におけるビーズの光学厚さ(OT)画像を示す。各フォーカス面において、ノイズ等の画像劣化は発生することなく、フォーカスが一致したビーズのみが観察された。 $Z=15.84 \mu\text{m}$ で最もフォーカスが一致したビーズの測定画像と OT 分布をそれぞれ、図 3.7(c)と(d)に示す。ビーズの形状から期待される OT は次のように与えられる。

$$OT(x, y) = \sqrt{d^2 - 4(x^2 + y^2)} \cdot (n_0 - n_s) \quad [-d/4 \leq x^2 + y^2 \leq -d/4] \quad (3.3)$$

ここで、 n_0 はビーズの屈折率($n=1.599$ 、 $\lambda = 532 \text{ nm}$) [50]、 n_s はゼラチン溶液の屈折率($n = 1.35$)、 d はビーズの既知の直径 ($1 \mu\text{m}$) である。図 3.7(d)に示すように、実測結果は予測されたビーズの OT 分布とほぼ一致した。また、OT の実測値では、ビーズの周縁部で徐々に広がっていく様子が見られた。この理由は、ビーズの直径 $1 \mu\text{m}$ に対して光学系の水平分解能の理論値は $0.72 \mu\text{m}$ であり、分解能が十分ではないことから測定値は回折限界の影響を受けていたためである。

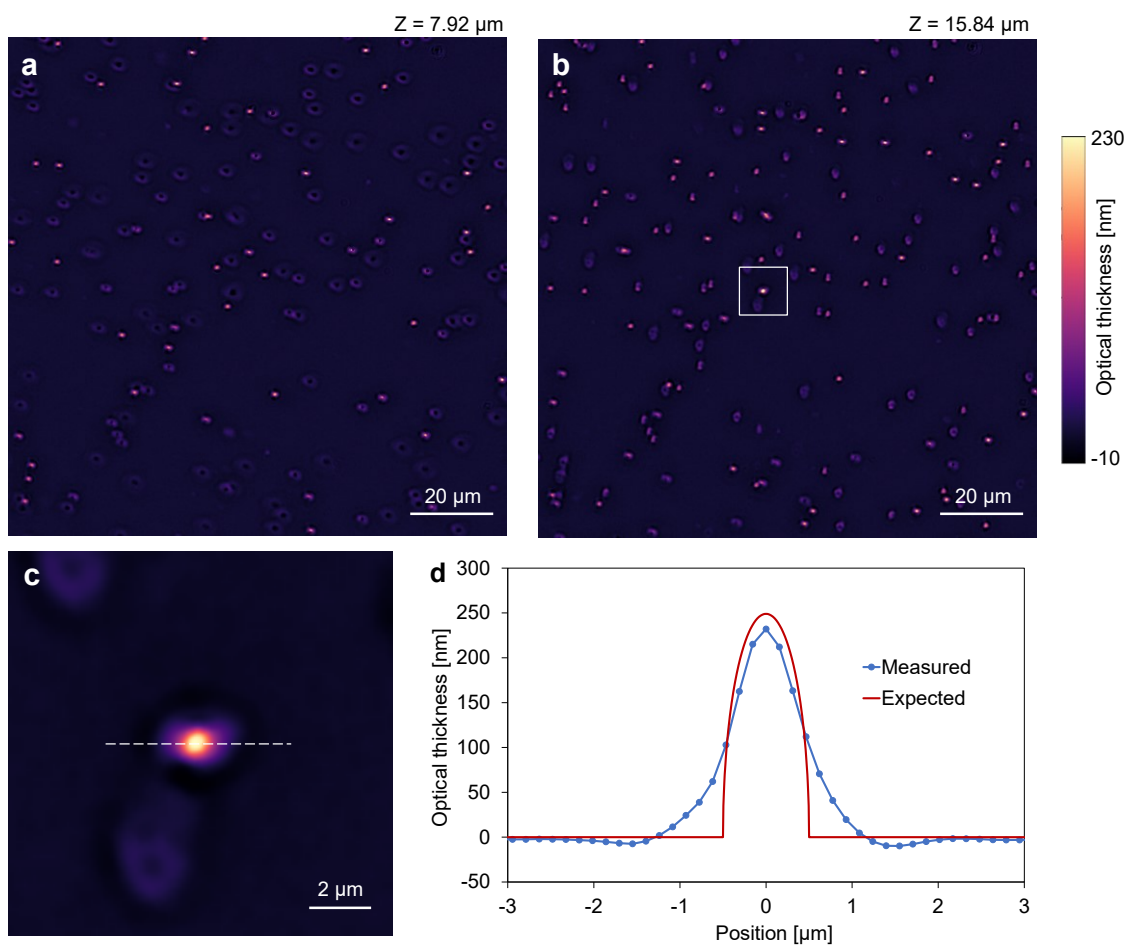


図 3.7 ポリスチレンビーズの定量位相イメージング

(a), (b) 異なるフォーカス面 ($Z=7.92 \mu\text{m}$, $15.84 \mu\text{m}$) の OT 画像、(c) $Z = 15.84 \mu\text{m}$ で最もフォーカスが一致したビーズの OT 画像 白のダッシュラインは(d)で可視化された断面を示す。(d) OT 断面プロファイルの実測値と予測値

出所：[43]から許可を得て引用 © The Optical Society

3.3.2 MCF-7 細胞の QPI 撮像

生細胞の異なるフォーカス面での定量位相イメージングを実証するために、MCF-7 細胞（ヒト乳がん細胞由来）をイメージングした。測定の前日に、ガラスボトムディッシュ（松浪硝子工業、D11130H）上で細胞を受動的に培養し、測定時には細胞はほぼコンフルエント（培養容器の接着面が培養細胞で完全に覆われている）な状態になっていた。測定中は、サンプルを培養液に浸し、温度を 37°C に保った状態で測定を行った。フォーカススキャンは、 $1.76\ \mu\text{m}$ のピッチで行い、合計 8 スライスを取得した。この 8 スライスの取得には $2\ \text{s}$ ($250\ \text{ms} \times 8$) を要した。タイムラプス撮影では、このフォーカススキャンのサイクルを $5\ \text{s}$ 間隔で繰り返した。1 回の Z スキャンが終了してから次の Z スキャンを開始するまでの待ち時間は $3\ \text{s}$ であった。

図 3.8(a), (b), (c) に異なるフォーカス位置 ($Z = 1.76\ \mu\text{m}$, $7.04\ \mu\text{m}$, $12.32\ \mu\text{m}$) における OT 画像を示す。図 3.8 (b) は最もフォーカスが一致している画像であり、図 3.8(a) と (c) はわずかにフォーカスがずれている画像である。次に図 3.8 (b) でベストフォーカスが得られたことを確認するため、図 3.8(a), (b), (c) の白線に沿った OT の断面プロファイルを図 3.9 に示す。この結果より、 $Z = 7.04\ \mu\text{m}$ の OT の断面形状は、細胞内粒子のコントラストが最も高くなっており、図 3.8 (b) はベストフォーカスであることを確認した。

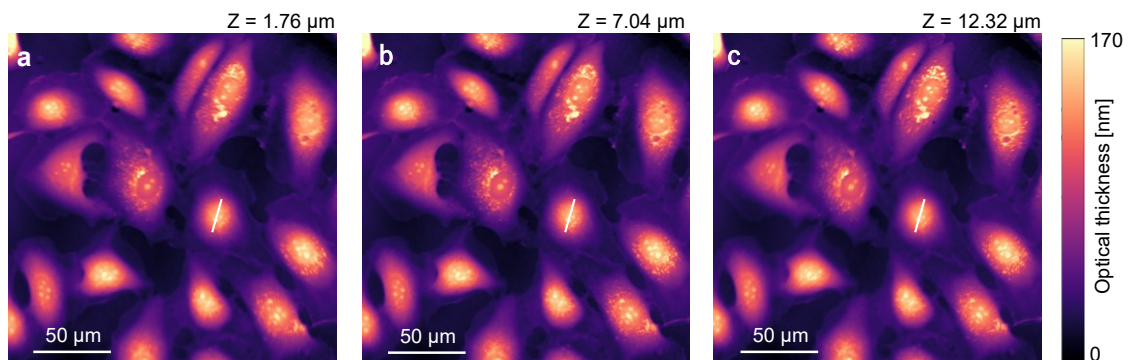


図 3.8 MCF-7 細胞の定量位相イメージング

(a-c)異なるフォーカス面の OT 画像 白線は図 3.9 で示す断面プロファイルの位置

出所：[43]から許可を得て引用 © The Optical Society

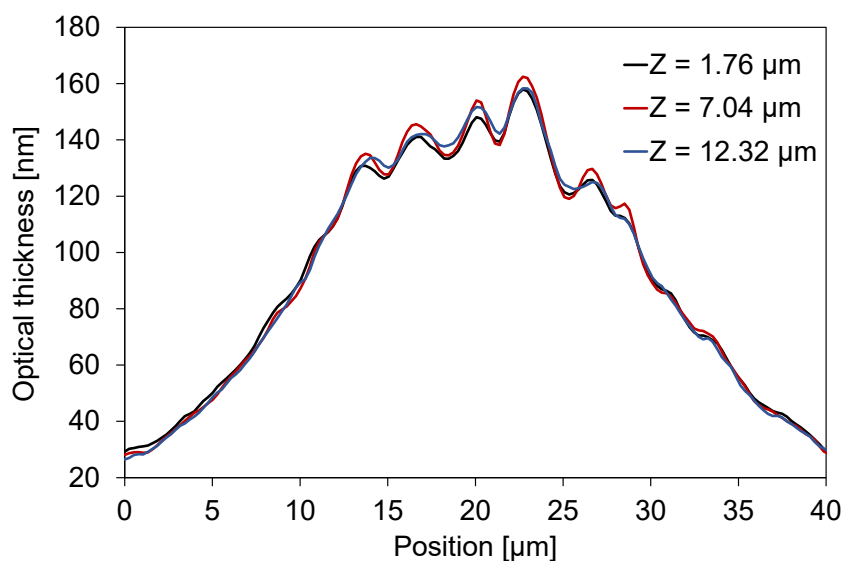


図 3.9 図 3.8(a-c)の白線に沿った OT の断面プロファイルの比較

出所：[43]から許可を得て引用 © The Optical Society

3.4 まとめ

本章では、バイオ向け QPM のフォーカススキャン機構に開発し、新しい手法を提案した。従来、低コヒーレンス干渉計では、細胞に対してフォーカス調整をすると物体光路の光路長が変化するため、フォーカス調整時には参照光路の光路長の再調整が必要であり、装置は使いにくいものであった。そこで、本研究では、低コヒーレンス・リニク干渉計である QPM と FTL を組み合わせて、電氣的にフォーカス調整が可能なコンパクトなシングルエンド QPM を構築した。FTL の導入によって、コヒーレンスゲートと幾何学的フォーカスを切り離すことができたため、フォーカス位置を任意に調整しても、光路長の再調整は不要になった。本セットアップでは FTL によって、 $-200 \sim +300 \mu\text{m}$ の範囲のスキャンが可能であった。また、フォーカススキャンの応答時間は 10 ms 程度であった。さらに QPI システムの保持機構に両持ち構造を適用することで、振動ノイズを低減し、除振台なしの環境で高品質な位相画像の生成を実現した。

構築した QPI システムを用いて、ビーズと生細胞の QPI のフォーカス調整を実証した。ビーズの観察では、ジャストフォーカスのビーズの光学厚さ(OT)について、理論値と予測値が概ね一致した。また、生細胞である MCF-7 細胞のイメージングでは、細胞のジャストフォーカス位置は、細胞内粒子のコントラストが最も高くなっていることを確認した。

現在の光学系では、FTL が対物レンズと結像レンズの間に配置されているため、フォー

カスの移動に伴って倍率が若干変化する。そのため、今後の開発では、FTL をテレセントリックに配置することで、観察倍率の変化を抑制する予定である。

QPI における FTL によるダイナミックフォーカスは、付着細胞だけでなく、異なる高さに分布する浮遊細胞の観察にも適用できる。また、この提案手法は、機械的な電動ステージや高価なピエゾステージを必要としないため、小型で安価な QPI システムの構築に貢献している。本提案手法に関しては特許出願済みであり、今後は、QPI システムを浮遊細胞の大量にスクリーニングするための自動セルイメージャーへの応用も視野に入れて開発を進める。

第4章 工業向け QPM の開発

4.1 はじめに

本章では、製品化を念頭に置いた工業向け QPM の試作機開発について述べる。QPM はこれまで主にバイオ向けに開発が進められていたが、第 2 章で述べた通り、バイオ向けアプリケーションでは、ターゲット市場の形成と周辺技術の開発に時間を要するため、早期の事業化は難しい。そこで、所属部署でつながりがある半導体向けの検査に QPM の応用を検討することとなった。QPM の製品化を達成するためには、アプリケーションに必要とされる要求仕様を満たす必要がある。つまり、技術シーズと顧客ニーズの統合を進めていく必要がある。このような背景から、半導体外観検査装置のシステムインテグレーターである企業 A と共同開発を開始し、想定顧客のニーズの調査に基づく QPM の試作機開発を実施した。

4.2 工業向け試作機開発における要求事項と解決策

想定顧客ニーズを開発事項に反映させるため、企業 A から半導体検査装置に対する要求仕様についてのヒアリングを実施した。そのヒアリング結果から、企業 A からの要求事項とその解決策をまとめたものを表 4.1 に示す。4 つの要求事項について、以下にそれぞれ説明する。

表 4.1 工業向け QPM の要求事項と解決策

要求事項	解決策
顕微鏡鏡筒と QPM 光学系の分離	干渉計のみを QPM ユニットとして分離する
カメラの最大フレームレート での高速撮像	ピエゾアクチュエーター用いた位相シフトを 高速化する
撮像した画像のリアルタイム 画像処理	画像処理をマルチスレッド化する
光学調整機構の電動化	ステッピングモーターによって調整機構を電動化し 干渉縞コントラスト調整を自動化する

1つ目の要求は、顕微鏡鏡筒と QPM 光学系を分離であった。この理由は、企業 A の開発資産である顕微鏡鏡筒、それに付随する照明系、観察系、制御系をそのまま使用することが望ましいためであった。第 2 章で示した通り、研究所から事業部へ技術移転時に作製した QPM 試作機であるフラッグシップ機においても、同様に顕微鏡鏡筒と QPM を分離して設計していた。この設計を本開発にも適用し、企業 A には、「QPM ユニット」として、装置提供することとなった。

2つ目の要求は、カメラの最大フレームレートでの高速撮像であった。この理由は、半導体検査装置における検査速度の高速化は、製品の生産性に直結するためである。大量生産される半導体デバイスの製造コストは、製造プロセスと検査プロセスのスループットの合計で決まるため、検査速度は可能な限り高速化したいという要求があった。所属企業の QPM は、位相解析手法に 4 点位相シフト法[16]を採用しているため、4 枚の干渉画像の取得が必要である。したがって、1 つの位相画像を得るためには 4 枚の干渉画像を測定が必要であり、実際の測定速度はカメラのフレームレートの 1/4 に制限される。そこで本開発では、ピエゾアクチュエーター(PZT)による位相シフト速度をカメラのフレームレートと同等以上に向上することで、干渉画像の高速撮像を目指した。

3つ目の要求は、撮像した画像のリアルタイム処理である。2つ目の要求にあるように撮像側を高速化しても、位相計算を含む画像処理の速度がカメラの撮像速度に追いつかなければ、全体の検査スループットの向上に寄与できない。そこで、これまでシングルスレッドで実施していた画像処理を高速化するためにマルチスレッド化を目指した。

最後の要求は、光学調整機構の電動化である。これは第 2 章のフラッグシップ機の開発でも課題となっていた事項である。企業 A との共同開発では、企業 A の開発環境のもとで顕微鏡鏡筒と QPM ユニットの接続を行い、企業 A が想定顧客から提供されたサンプルをデモ測定し、QPM の適用可能性を調査する。そのため、企業 A が単独で QPM ユニットの初期調整やサンプルに合わせた光学調整を実施して、最適条件で測定することが必要になる。そこで本開発では、QPM ユニットの調整ステージにステッピングモーターを導入し、画像処理による干渉縞コントラストの自動調整を目指した。

以上の 4 つの要求事項を抽象化すると、QPM ユニットに求められているニーズは、装置のカスタム設計対応、高速な測定スループットの実現、装置の安定稼働であった。本開発では、各要求事項に対して、バイオ向けの QPM 開発で培ってきた要素技術と既存事業の強みである光学モジュール技術を組み合わせることで、工業向けの QPM ユニットの開発を進めた。

4.3 工業向け QPM ユニット試作機の開発

4.3.1 顕微鏡鏡筒と分離した QPM ユニットの開発

前節の課題に基づいて要素開発を行い、顕微鏡鏡筒に取り付け可能な QPM ユニットの開発した。図 4.1(a)、(b)に QPM ユニットの搭載した顕微鏡システムの概略図とその写真を示す。顕微鏡システムは、顕微鏡鏡筒（シグマ光機、OUCI-3）と QPM ユニットで構成されている。QPM ユニットには位相シフトを行うための PZT、光路長調整のためのステッピングモーターステージ、それらの制御回路(マイコン、PZT ドライバー、モータードライバー)と干渉光学系が統合されている。照明部は、顕微鏡鏡筒を一部改良して、開口絞りと視野絞りを有するケーラー照明を搭載した。光源にはスペックルノイズのない均一な照明とするため、LED (Thorlabs、M490L4、中心波長=490 nm) を使用した。また、光路長調整を容易にするためにバンドパスフィルター(シグマ光機、VPFHT-25C-4880、半値幅 2.65 nm) を用いた。物体光路と参照光路の光路長を一致させるために同一の対物レンズ（オリンパス、MPLFLN10X、NA=0.3）を使用した。照明からの観察光は、ビームスプリッターで分割され、サンプルと参照ミラーで反射された後、再び合成され、結像レンズによって CMOS カメラ(IDS Imaging Development Systems、UI-3080CP-M-GL Rev.2)の撮像面上に干渉縞を形成した。カメラ、制御回路は PC に接続することで、撮像タイミング、露光時間、ステッピングモーターによる光路長調整が可能になっている。QPM ユニットの外形寸法は 210 mm×90 mm×65 mm であり、重量が 2.0 kg であった。また、除振台を使用しない環境に顕微鏡システムを設置した。

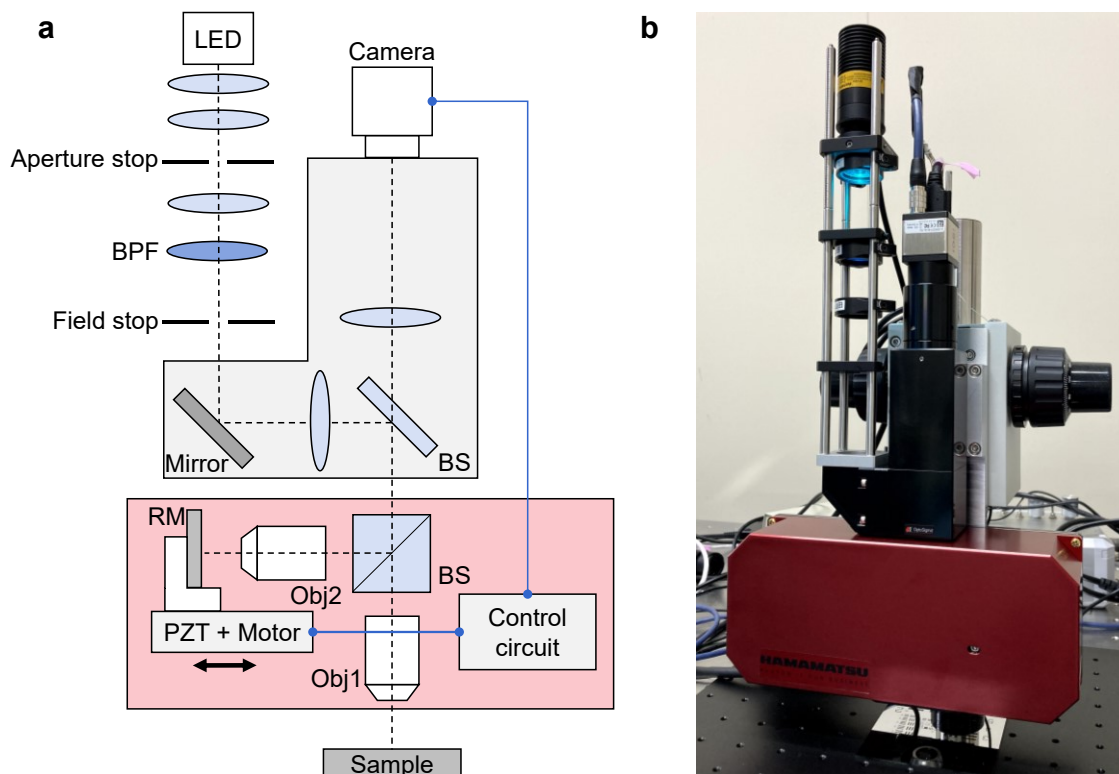


図 4.1 (a) QPM ユニートを搭載した顕微鏡システムの概略図、(b) 顕微鏡システムの写真 PZT： piezoelectric actuator、Obj：対物レンズ、BS：ビームスプリッター、RM：参照ミラー、BPF：バンドパスフィルター

4.3.2 ピエゾアクチュエーターによる位相シフトの高速化

干渉画像を可能な限り高速に撮像するためには、カメラのフレームレートに対して PZT による参照ミラーの位相シフトタイミングを同等以上に高速化する必要がある。本研究では、PZT を保持するための与圧および PZT ドライバーを最適化することで位相シフトの高速化を実施した。

位相シフトを高速化したときの位相変調波形を図 4.2 に示す。カメラフレームレートが 160 fps であるときを想定して位相シフトを行った。そのため、位相シフトは 1 秒間に 160 回実施している。位相変調波形の取得は、カメラの ROI(関心領域：Region of Interest)を 2000 ピクセル×16 ピクセルに変更し、1500 fps のサンプリングレートで干渉画像を撮影した。位相シフト法は 4 点位相シフト法を用いているため、原点の位相から $\pi/2$ の位相シフトを 3 回行い、その次の位相シフトで原点に戻っている。160 fps の干渉画像を取得する場合、1 フレーム当たりの時間は 6.25 ms となるため、位相計算に必要となる 4 枚の干渉画像

の取得時間は合計で 25 ms となる。取得した位相変調波形から 4 点位相シフトが達成されていることを確認した。しかしながら、位相シフトのステップ間の位相間隔が均一でないこと、各位相ステップにおいて位相値が変動していることが確認された。この2つの問題については、位相計算時に補正することが可能であるが、よりノイズの少ない位相画像を得るためには、事前に補正することが望ましい。

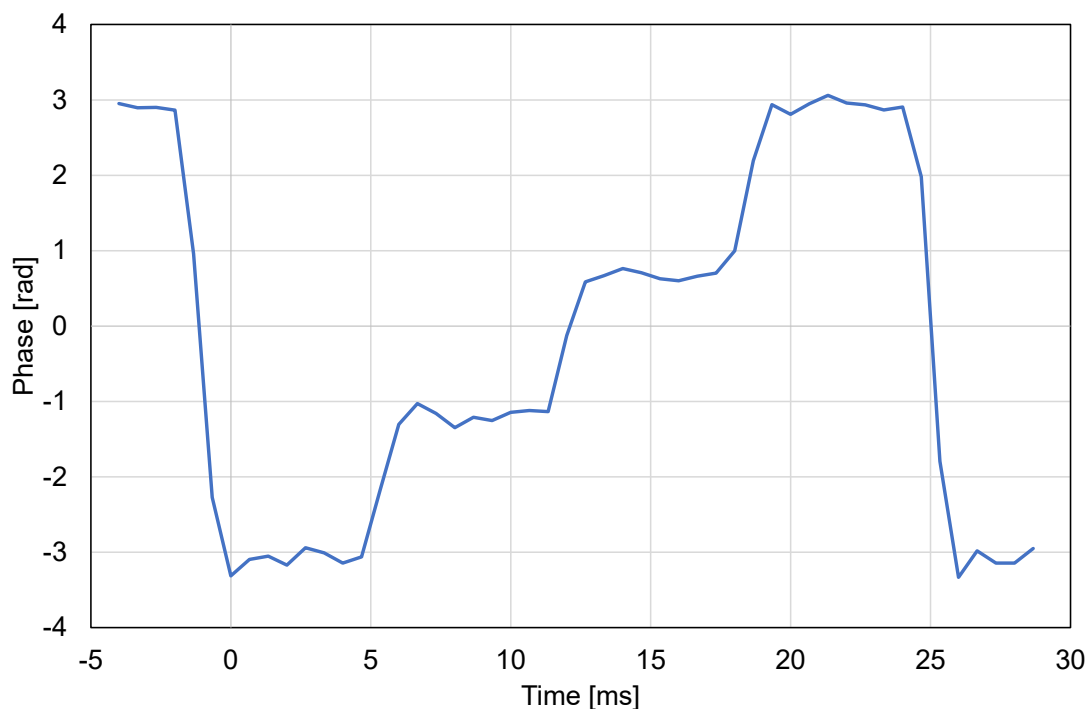


図 4.2 高速位相シフト時の位相変調波形

位相シフト法では、振動などの環境ノイズや PZT のヒステリシスに起因して、不均一な位相ステップ、ステップ内の位相値の変動が発生し、計算された位相画像に縞模様のノイズが生じることが報告されている[48]。そのため、本研究では、位相計算時に縞模様を打ち消すパターンを推定して背景補正を行った。図 4.3 に背景補正無し・有りのテストターゲットの位相画像を示す。図 4.3(a)では、背景補正をしていないため、位相画像に縦方向の縞模様ノイズが発生している。一方、図 4.3(b)では、背景補正によって縞模様が無くなり、均一な背景が得られている。

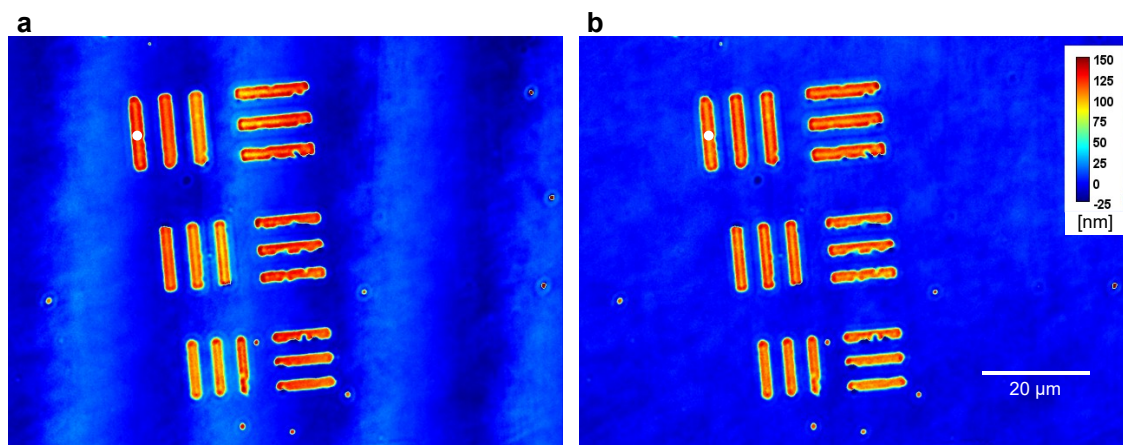


図 4.3 テストターゲットの位相画像 (a)背景補正無し、(b)背景補正有り
白丸は図 4.4 の標準偏差の測定位置

次に高速位相シフトを用いたときの繰り返し精度を計算した。繰り返し精度とは、同一の条件のもと、同一の対象物の定点を繰り返し測定したときの値のバラつきを表す。この値が小さいほど繰り返し精度が高く、測定値のバラつきが少ない測定ができる。本研究における繰り返し精度は、任意の位置における高さの標準偏差によって評価した。測定位置は、図 4.3 の白丸であり、高さは平均値で 100.0 nm であった。図 4.4 に背景補正の有無における測定値の標準偏差を示す。横軸は位相計算の平均化回数である。例えば、平均化回数が 2 の場合は、時系列の 4 枚の干渉画像の 1 セットとし、計 2 セット使用して、それぞれのセットで位相計算を行った後に平均化処理を行う。縦軸は測定値の標準偏差であり、測定値の繰り返し精度を表している。結果より、背景補正の有無に関わらず、平均化回数が増加すると標準偏差は減少するため、繰り返し精度が向上することを確認した。また、背景補正有りの場合は、背景補正無しの場合と比べると、測定値の標準偏差が 2 倍以上改善している。つまり、背景補正と平均化処理を併用することでさらに繰り返し精度を向上させることができる。特に平均化回数を 4 回にすることで繰り返し精度は 1 nm 以下となった。しかしながら、平均化回数の増加は、繰り返し精度と測定時間のトレードオフになる。そのため、半導体検査向けの高速撮像においては、平均化処理はせずに背景補正のみを適用することが望ましいといえる。

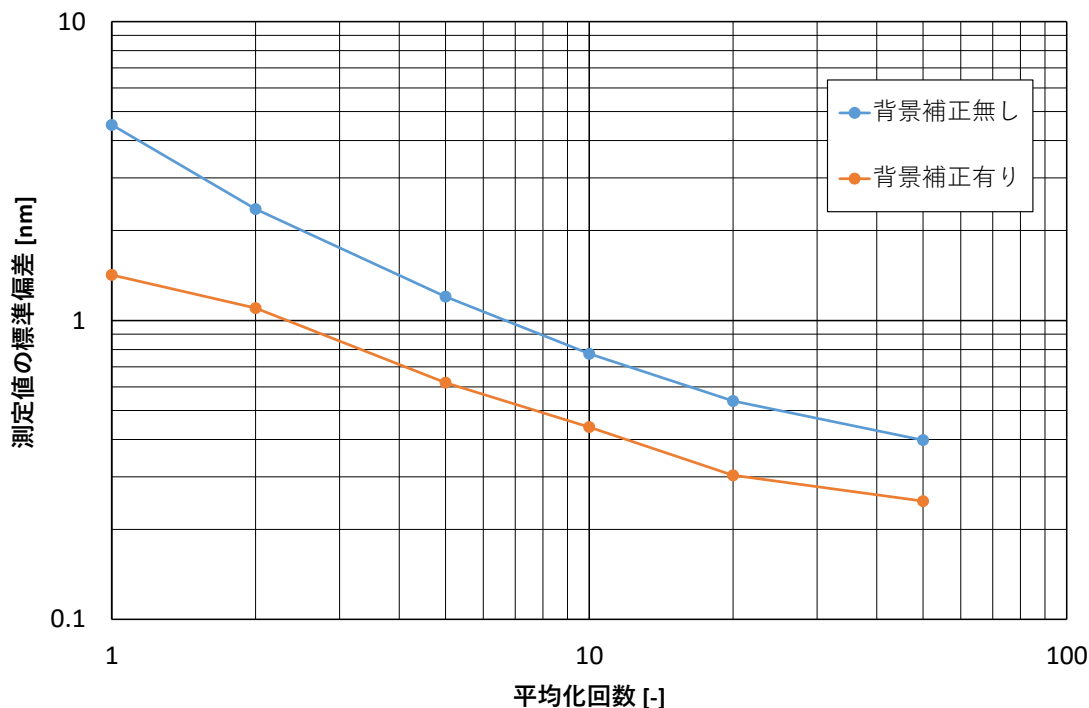


図 4.4 背景補正の有無における測定値の標準偏差

4.3.3 位相計算を含むリアルタイム画像処理

前項では画像取得の高速化を実施したが、測定シーケンスの全体の高速化のためには、画像取得の後に実施する位相計算を含む画像処理の高速化も必要である。本項では、画像処理の高速化をマルチスレッド処理によって実現した内容を述べる。

並列処理によって干渉画像の撮像、画像処理、画像出力を行うプロセスについての概略図を図 4.5 に示す。カメラフレームレートが 160 fps の場合、前述の通り、4 枚の画像取得には 25 ms 必要である。4 枚の干渉画像の画像処理時間は、シングルスレッドで 75 ms を要していた。このとき、次の 4 枚の画像セットは 25 ms 後に受信するが画像処理が終了していないため、処理待ちが発生する。次に図 4.5 で示すような 4 つのスレッドで並列処理を行う場合を考える。このとき、最初の 4 枚の画像はスレッド 1 に送られ、時刻 100 ms の時点で画像処理が完了する。スレッド 1 の画像処理の実行中にも、カメラからの画像は送られてくるため、次の 4 枚の画像セットはスレッド 2 に送られて処理が行われ、時刻 125 ms の時点で出力される。以下、同様にスレッド 3、スレッド 4 でも処理が進む。5 セット目の 4 枚の画像（時刻 100~125 ms で撮像）は、そのときまでに処理を終えているスレッド 1 に送られる。このような並列処理は「パイプライン処理」と呼ばれている。

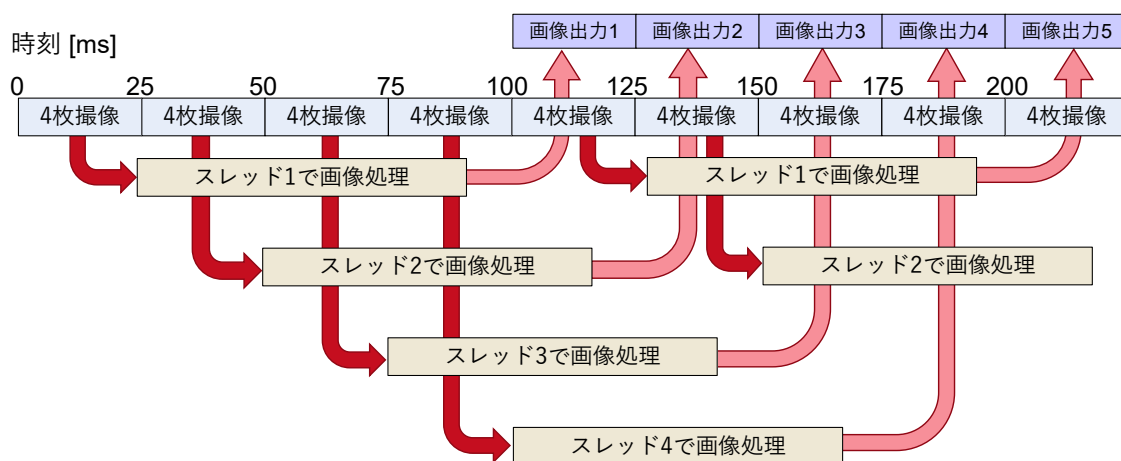


図 4.5 並列処理による干渉画像の撮像、画像処理、画像出力に関する概略図

画像処理をマルチスレッド化の効果を確認したところ、6 コア・12 スレッド(Intel、i7-9750H)のノート PC を用いることで、2M ピクセルの 160 fps の干渉画像に対して、リアルタイムで 40 fps の位相画像の出力を実現した。

4.3.4 ステッピングモーターステージによる干渉縞コントラストの電動調整

QPM ユニットでは光源に LED を採用しているため、空間的・時間的コヒーレンス長が短い。そのため、コントラストの高い干渉縞を得るためには、物体光路と参照光路のフォーカス条件および光路長を一致させる必要がある。干渉縞のコントラストは、位相画像の品質に大きく影響するため、可能な限り干渉縞コントラストを高くすることが望ましい。干渉縞のコントラストの調整が必要になるタイミングは、装置設置時、装置の再稼働時、ガラス越しのサンプル観察を行うときなどが想定される。本開発では、時間的コヒーレンス長の調整については、バンドパスフィルターを導入することで、光源の波長帯域を制限し、光路長の調整マージンを拡大した。また、空間的コヒーレンス長については、参照ミラーを保持するステージに小型のステッピングモーターを導入し、フォーカス条件の調整を電動化した。ステッピングモーターによってフォーカス条件を変更し、干渉縞コントラストが最大になる位置を画像処理によって求めるアルゴリズムを開発した。テストターゲットを用いて干渉縞コントラストを最適化した例を図 4.6 に示す。フォーカス条件の調整前の図 4.6(a)では、干渉縞コントラストは低いですが、フォーカス条件の調整後の図 4.6(b)では、干渉縞のコントラストが改善している。

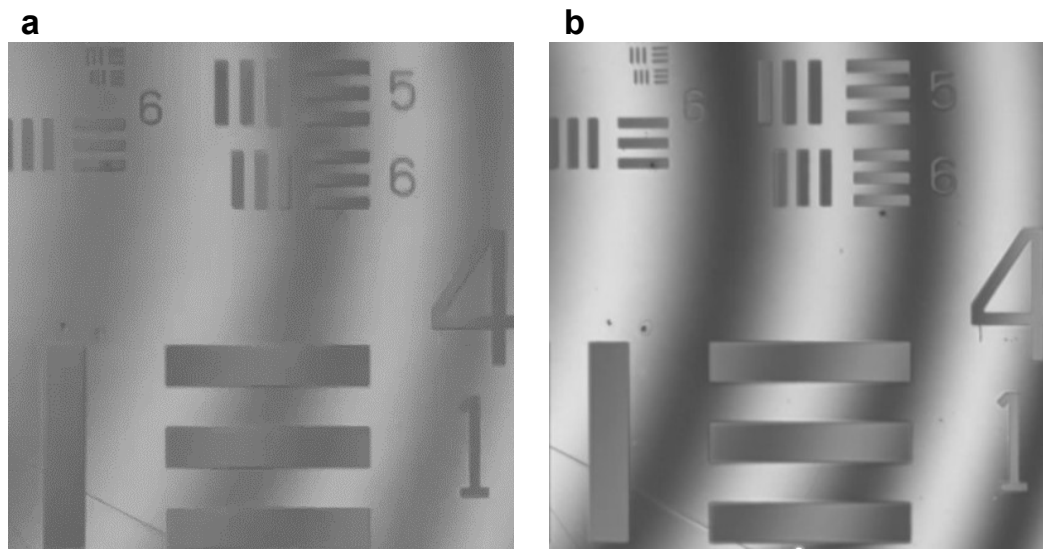


図 4.6 テストターゲットの干渉縞のコントラスト
 (a)フォーカス条件の調整前、(b)フォーカス条件の調整後

4.4 各種サンプル測定結果

QPM ユニットの性能を確認するためにテストターゲットの測定を実施した。図 4.7 に干渉画像(干渉強度画像)と 4 枚の干渉画像から計算された高さプロファイル画像を示す。位相画像は、位相計算後に位相アンラップし、背景補正後に高さ情報へ変換した。高さプロファイル画像は、背景歪みや振動の影響がない高画質な画像であり、ナノメートルオーダーの高さ分解能が得られている。次に位相画像からエミュレートした位相コントラスト画像と微分干渉画像を図 4.8 に示す。こちらの画像も高画質であり、従来の顕微鏡と同等の画像が得られている。

また、半導体デバイス・ウエハーする QPM ユニットの適用性について評価した。図 4.9 に市販 CCD 素子、図 4.10 に化合物半導体ウエハーの高さプロファイル画像をそれぞれ示す。CCD 素子では、デバイスパターンのナノメートルオーダーの高さの違いを可視化することができる。化合物半導体ウエハーの測定例ではウエハー外周部に向かって存在するウエハーの反りとナノメートルオーダーの微細な欠陥を同時に可視化した。

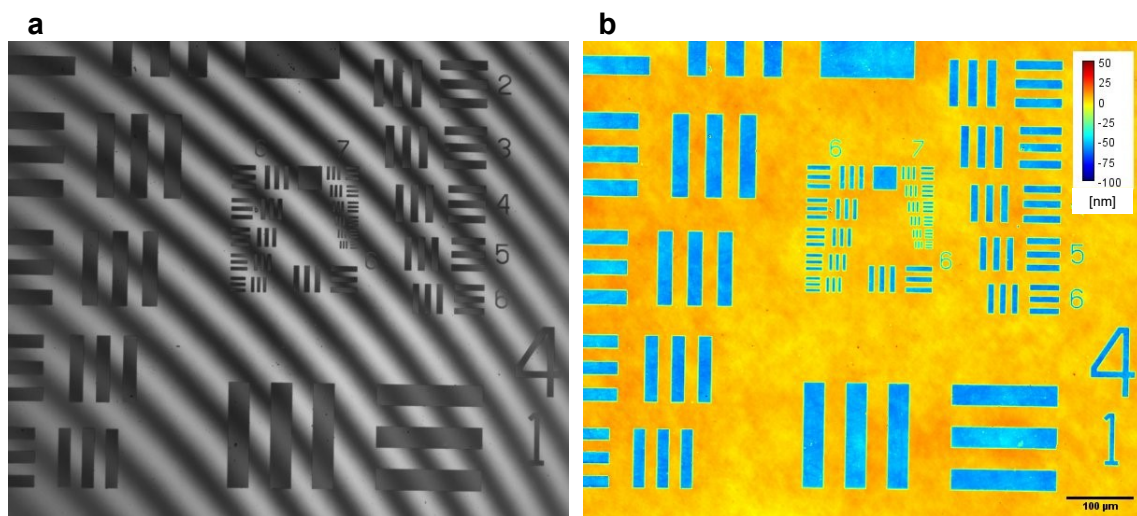


図 4.7 (a)テストターゲットの干渉画像、(b)高さプロファイル画像

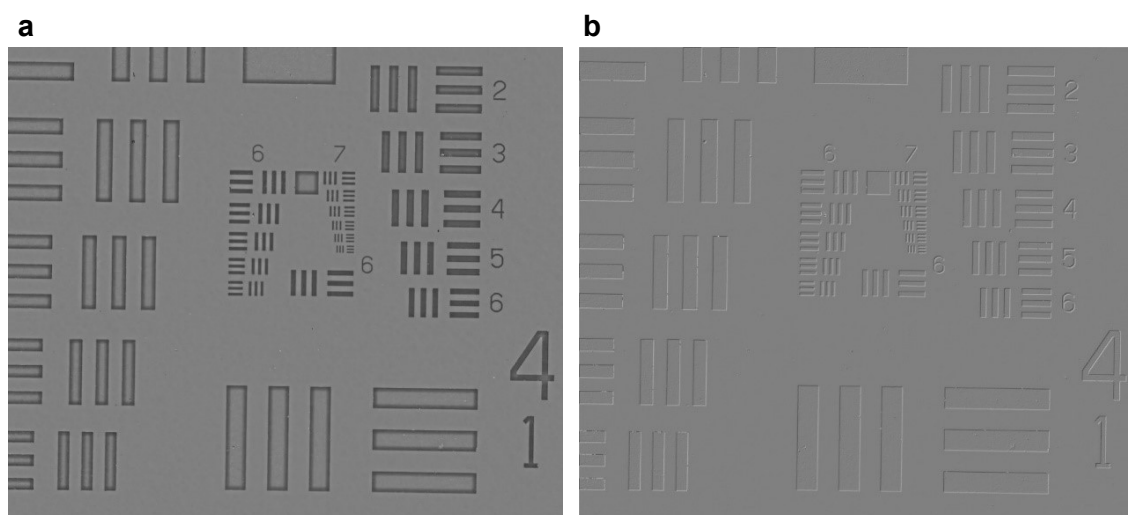


図 4.8 位相画像からエミュレートした(a)位相コントラスト像、(b)微分干渉画像

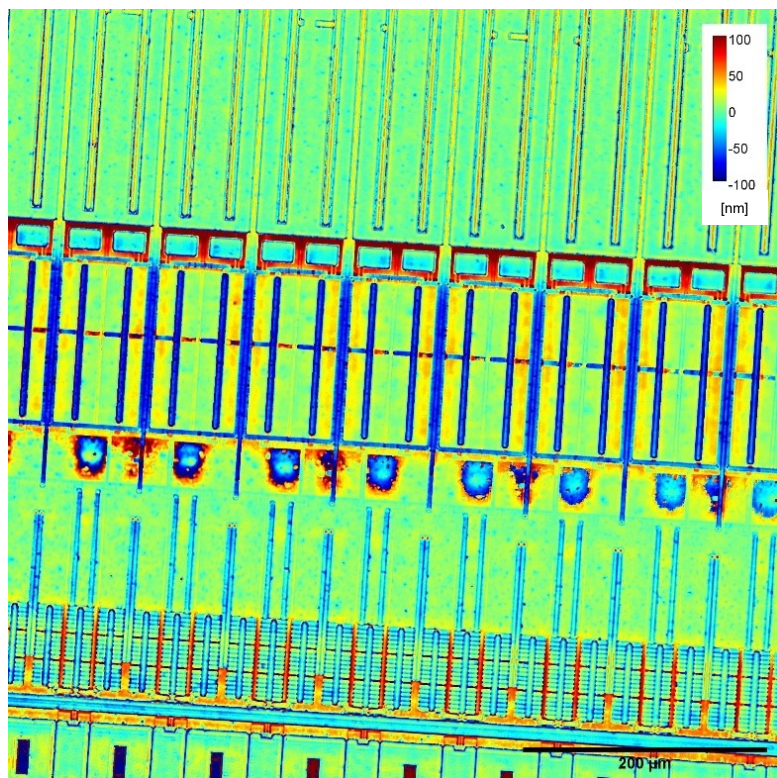


図 4.9 市販 CCD の高さプロファイル画像

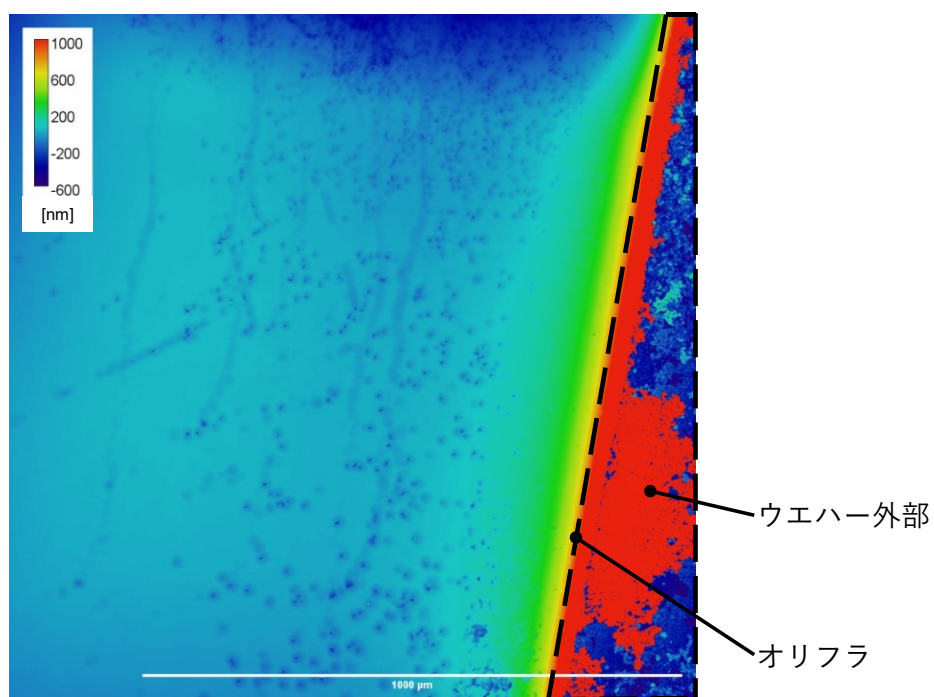


図 4.10 化合物半導体ウエハーの高さプロファイル画像

4.5 まとめ

製品化を念頭に置いた工業向け QPM を開発するため、半導体外観検査装置のシステムインテグレーターである企業 A と共同開発を開始し、想定顧客のニーズの調査に基づく QPM の試作機開発を実施した。企業 A からは、半導体外観検査装置向けに QPM を導入するための具体的なニーズである 4 つの要求事項が示された。それらの要求事項に対して技術開発を行い、QPM ユニットの開発が達成された。

1 つ目の要求事項は、顕微鏡鏡筒と QPM 光学系の分離であった。理由は、企業 A の開発資産である顕微鏡鏡筒、それに付随する照明系、観察系、制御システムをそのまま使用するためであった。そのため、QPM のコア部である干渉光学系を「QPM ユニット」として開発した。QPM ユニットには位相シフト用の PZT、光学調整用のステッピングモータステージ、それらの制御回路(マイコン、PZT ドライバー、モータードライバー)と干渉光学系が統合された。この QPM ユニットと顕微鏡筐体と組み合わせることで、ユーザーの開発資産を生かしたままに QPM を用いた定量位相イメージングが実施できるようになった。

2 つ目の要求事項は、カメラの最大フレームレートでの高速撮像であった。理由は半導体デバイスの検査工程のコスト低減である。QPM ユニットは位相解析手法に位相シフト法を採用しており、4 枚の画像取得を必要とするため、この位相シフトを高速化することで高速撮像に対応した。PZT の保持機構の与圧および PZT ドライバーを最適化することで位相シフトの高速化を実施した。この結果、干渉画像の取得フレームレートは、160 fps に高速化し、1 視野の撮像時間は 25 ms に短縮することができた。また、本研究で取得した位相シフトの変調波形は、位相シフトのステップ間の位相間隔が均一でないこと、位相値が変動していることが確認された。このような不均一な位相ステップ、ステップ内の位相値の変動は PZT のヒステリシス、振動などの環境ノイズによって発生し、計算された位相画像に縞模様のノイズが生じる。そのため、本研究では、縞模様を打ち消すパターンを推定して背景補正を行うことで、縞模様のノイズを低減した。繰り返し精度は背景補正を適用することで、背景補正無しの場合と比較して、2 倍以上の改善が見られた。

3 つ目の要求事項は、撮像した干渉画像のリアルタイム処理であった。カメラで干渉画像を高速撮像しても、位相計算を含む画像処理の速度がカメラの撮像速度に追いつかなければ、全体の測定スループットの向上に寄与できない。そこで、これまでシングルスレッドで実施していた画像処理をマルチスレッド化して、画像処理を高速化した。この画像処理のマルチスレッド化によって、160 fps の干渉画像の取得に対応して、リアルタイムに 40 fps で位相画像が出力できるようになった。2022 年現在、サーバー向けではなく、メインストリ

ーム向けでも 10 コア以上の CPU を搭載した PC が入手できるため、CMOS センサーの画素数が多く、高速転送可能なカメラを用いても、リアルタイムでの位相出力が可能になると考えられる。

最後の要求事項は、光学調整機構の電動化であった。これは第2章のフラッグシップ機の開発でも課題となった事項であった。企業 A が単独で QPM ユニットの初期調整やサンプルに合わせた光学調整を実施して、最適な条件で測定するためには、光学調整の電動化が必要不可欠であった。そこで本開発では、QPM ユニット内部の調整ステージにステッピングモーターを導入し、画像処理によって、干渉縞のコントラストを自動調整する機構を開発した。従来の問題であった低コヒーレンス光源を用いた干渉計の調整の難しさは、この光学調整の電動化によって解消された。そのため、QPM ユニットでは、干渉計の使いやすさと安定性を向上できたといえる。

テストターゲットや半導体デバイスの画像測定結果から、QPM ユニットを用いて、高画質の位相画像が撮像できることを確認した。現在、共同開発先の企業 A とテスト測定と製品化に向けた開発を継続して実施しており、より高速で安定な撮像を可能にする QPM ユニットの製品化を進めている。

第5章 ビジネス戦略の立案

5.1 はじめに

本章では、定量位相顕微鏡ユニット(以下、QPM ユニット)に関して、競争優位性を高めるためのビジネス戦略を立案する。本研究は QPM の事業化を大目的としているが、複数の競合他社から光干渉計測技術を応用した製品が発売されている。そのため、QPM ユニットの顧客ターゲットを絞り、ポジショニングを明確にしたうえで、独自の戦略を構築にする必要がある。

競争における基本戦略として、マイケル・ポーター氏により 3 つの基本戦略が提唱されている[51]。図 5.1 に 3 つの基本戦略を示す。「競争優位」と「戦略ターゲット」の 2 軸から構成されており、コストリーダーシップ戦略、差別化戦略、集中戦略の 3 つに分けられる。また、集中戦略は、「コスト集中戦略」、「差別化集中戦略」に分けることができる。それぞれの基本戦略は、有効な戦略が最低限持たなくてはならない、最も基本的なレベルの一貫性を反映している。集中は、企業が対象とする顧客とそのニーズの広さ(狭さ)を指している。企業は差別化を図ることでプレミアム価格を要求できる。また、コストリーダーシップによって、低い相対的価格で提供することができる[52]。

		競争優位	
		他社よりも低コスト	差別化
戦略ターゲット	広い	コスト・リーダーシップ戦略	差別化戦略
	狭い	コスト集中戦略	差別化集中戦略

集中戦略

図 5.1 3つの基本戦略

出所：参考文献[51]をもとに筆者が作成

所属企業は、光関連の電子部品・機器メーカーであり、競争力の高い独自製品を有する研究開発型の企業である。光電子増倍管、光半導体素子、各種光源といった高性能デバイス、それらを応用したシステム製品などの様々な製品を医用、産業機、分析機、計測、学術研究など幅広い分野に供給している。また、技術的に差別化した製品を開発し、複数のニッチ市場でシェアを高めることで競争優位性を高めている。特に、高感度光センサーの一種である光電子増倍管のシェアは90%以上に達している。所属企業はニッチ市場でのビジネスを得意とする企業であり、光技術を追求し、多角化により業容の拡大してきた。つまり、3つの基本戦略のうちの差別化集中戦略を取っている。加えて、所属企業はハーマン・サイモン氏が2009年に発表した「隠れたチャンピオン」の1社に選ばれている[53]。隠れたチャンピオンとは、無名企業ではあるが、差別化集中戦略によって高度に専門化され、世界市場でもリーダーとなっている企業群である。

所属企業が選ばれている隠れたチャンピオンの基本戦略をQPMのビジネス戦略に応用することで事業化の成功率を高められると考える。そこで本章では、次節に説明する隠れたチャンピオンの基本戦略を考察し、QPM事業に適用すべき戦略を整理する。次にいくつかのフレームワークを用いてQPMユニットのターゲット市場を明らかにし、既存製品と比較した際のポジショニングと強みを明示する。具体的にはポジショニング分析によって競合他社の位置関係を明確にし、バリューチェーン分析によってQPM事業の強みをどこに置くべきか検討する。最後に、一連の考察を踏まえて、ビジネスモデルキャンバスを用いてQPMユニットのビジネスモデルの全体像を把握し、ビジネス戦略としてまとめる。

5.2 隠れたチャンピオンとGNT企業

ニッチ市場で高い競争力を持った企業は、隠れたチャンピオンと呼ばれている。隠れたチャンピオンは、ハーマン・サイモン氏によって提唱された概念である。隠れたチャンピオンとは、比較的規模は小さく、一般的な知名度は低いが、ある分野において非常に優れた実績、極めて高い市場シェアを持つ企業のことを指している。隠れたチャンピオンの多くは、バリューチェーンの後背地で活動し、最終的な製品やサービスではもはや認識できない機械、構成要素、あるいはプロセスを提供している。その結果、各社の独特なアイデンティティや独自性を最終製品から伺い知ることはできない。

隠れたチャンピオンの中には、隠れたままでいることを希望する企業も多くいる。その理由は、無名なままで思慮深い戦略を隠したいからである。メディアや研究機関に取り上げられないことで、自社の事業に集中できるメリットがある。しかしながら、隠れたチャンピオ

ンが直接顧客に知られていないという意味ではない。実際には、大半の隠れたチャンピオンは自分たちの市場や顧客の間で非常に強いブランド名を確立している。多くの場合、競合他社からのベンチマークの対象になっている。

隠れたチャンピオンの具体的な定義は、世界市場において3位以内、またはその企業が位置している大陸のトップであり、収益は50億ドル以下、一般にはほとんど無名な企業である[54]。選定された世界中の2746社の「隠れたチャンピオン」のうち、ドイツ企業が1307社であり、全体の47%を占めている。一方、日本企業は200社程度であり、ドイツ企業の6分の1にすぎない。

ドイツと日本の隠れたチャンピオンの企業数の差異は、日本企業のグローバル化の遅れを表している。1990年から2020年のドイツと日本の貿易収支推移の比較を図5.2に示す。ドイツの貿易収支は、2000年を境に大きく伸びている。2020年のドイツの貿易収支は中国に続いて2位である。対照的に日本の貿易収支は、1990年から横ばいであり、2005年から低下している。サイモン氏はドイツと日本の貿易収支の差異の理由として、ドイツは世界市場で活躍している隠れたチャンピオンが多いためであると述べている。

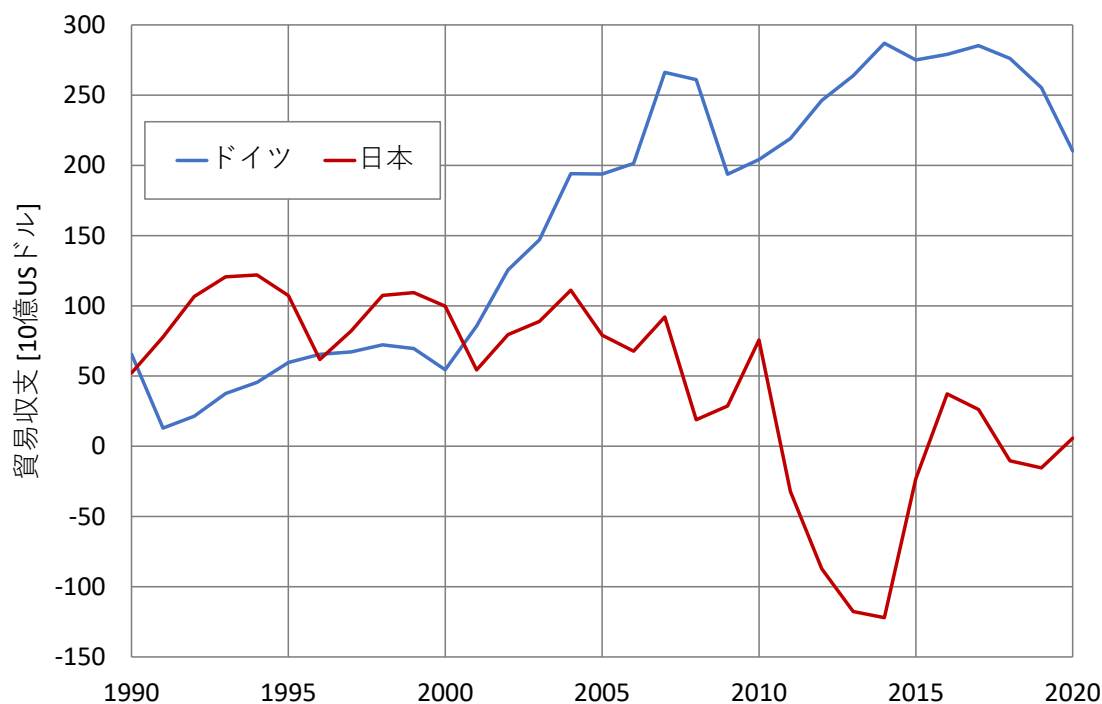


図 5.2 ドイツと日本の貿易収支推移の比較

出所：国連貿易開発会議データ[55]

隠れたチャンピオンを派生させた概念として、経済産業省が2014年に考案したグローバル・ニッチトップ(以下、GNT)企業100選¹という支援制度がある。GNT企業100選は、選定企業の知名度向上と海外展開を支援する制度であり、日本の中小企業のグローバル化を支援するものである。GNT企業の定義は、大企業では世界市場の規模が100~1000億円程度であって、製品・サービスの20%以上の世界シェアである。また、中堅企業、中小企業では製品・サービスの10%以上の世界シェアである。ここでいうGNT企業は、将来性の高い企業のさらなる成長の支援を前提にしているため、隠れたチャンピオンと比較して市場シェアの規模は小さい。

そのほかに細谷裕二氏によるGNT企業の定義がある。その定義は、ニッチトップ製品(競合他社が国内に少ない独自の製品)を複数保有し、そのうちの少なくとも1つは海外市場でもシェアを確保している企業である[56]。

5.3 隠れたチャンピオンの戦略

本節では、隠れたチャンピオンの戦略と競争優位の因子について整理する。ニッチ戦略をとっている企業が隠れたチャンピオンとして成長するために最も重要なことは、野心的な目標と従業員の意思を結集させるリーダーシップである。隠れたチャンピオンは、市場制覇と成長に関して、極めて野心的な目標を掲げている。そして、リーダーシップの発動によって、従業員のエネルギーを結集させて、市場の制覇に向けて足並みを揃えている。ここでいうリーダーシップとは、最高であるために力を発揮して、世界市場リーダーを目指して世界中の従業員を奮起させるということである。

隠れたチャンピオンの3つの基本戦略を表5.1に示す。隠れたチャンピオンの基本戦略は、集中戦略、グローバル化戦略、ソフトな多角化戦略である。

¹ 経済産業省の支援制度であるGNT企業100選の目的は、選定作業に必要な資料収集・分析を行うことで、GNT企業が直面する課題(通商問題、異業種連携、再編等)を洗い出すとともに、こうした業を掘り起こし、認定も含めて支援していく制度を新たに創設し、最終的には、中長期的にGNT企業を輸出の担い手として育成し、GNTを目指す企業が、その考え方を参考にできるようにすることで、我が国の産業発展の底上げをはかることである。

表 5.1 隠れたチャンピオンの3つの基本戦略

戦略	内容	効果
集中戦略	市場を意識的に狭く定義し、その市場の中で No.1 を目指し、強い地位を築く。	独自のバリューチェーンを深化させ、優位性と独自性を兼ね備えた製品ができあがる。
グローバル化戦略	製品とノウハウの専門性にグローバルな販売・マーケティングを組み合わせて、市場を拡大する。	狭い市場をグローバル化することで有力な成長の動力源となる。集中戦略のリスク低減にもなる。
ソフトな多角化	コア市場の利益を他市場・製品に投資し、成長率を増加させる。	将来の売上成長、既存の能力やノウハウのさらなる開発ができる

出所：参考文献[53]をもとに筆者が作成

集中戦略では、自社の市場を狭く定義し、その市場で強い地位を築いていくことが目的である。狭く、深く、対象市場の顧客ニーズとそれを達成するための技術開発に集中することで独自の製品が作られる。独自製品のために独自のバリューチェーンを深化させ、優位性と独自性を兼ね備えた最終製品を生産する工程、技術、部品を作りあげる。独自性と優位性は、コア・コンピタンスとして社内で創り出される。一方、隠れたチャンピオン企業はコア・コンピタンス以外の業務は、大企業以上に外注している。つまり、隠れたチャンピオン企業の戦略の特徴は、コア・コンピタンス分野は徹底的に自社開発して、それ以外の業務は積極的に外注していることである。そのほかの集中戦略の効果としては、No.1 を目指すという明確な目標によって、メンバーの一体化、意思決定スピードの加速、営業活動が効率化される。

2つ目の戦略はグローバル化戦略である。集中戦略だけでは、売上の増加には限度があり、さらには単一市場依存によるリスクが高まる。そこで、集中戦略にグローバル化戦略を組み合わせることでリスク低減と同時に市場拡大を目指す。製品とノウハウの専門性に、グローバルな販売・マーケティングを組み合わせれば、市場は拡大し、十分な規模の経済の実現に寄与する。この戦略の成功基盤は、同じ業界の顧客が国にまたがって、同様のニーズを有していることである。同じ地域で異なる市場に参入するよりも、狭く定義した市場を異なる地域に拡大させることで、より多くのニーズを深堀できる。

3つ目の戦略はソフトな多角化である。高い市場シェアと狭い市場という組み合わせは、

成長を制限し、ある時点で投資機会が限定されてしまう事実がある。このような状況で継続的な成長の道として有望な戦略がソフトな多角化である。ソフトとは、新しい事業単位が技術と市場の面で既存事業に留まっていることを意味する。その動機は2つあり、1つは成長率の低いコア市場の利益を他市場に再投資して、利益率を向上させることである。もう1つの動機は、既存の能力やノウハウをさらに開発することである。新しい事業単位でも、No.1を取るためには再び市場を狭く定義して、焦点を明確に決めることが必要である。この方法をとれば、隠れたチャンピオンの強みを新市場に効果的に移転し、将来の成長へ道を切り開くことが可能になる。

次に隠れたチャンピオンの競争優位性をもたらす要素について述べる。サイモン氏が隠れたチャンピオンへのアンケート調査で作成した競争優位マトリックスを図5.3に示す。

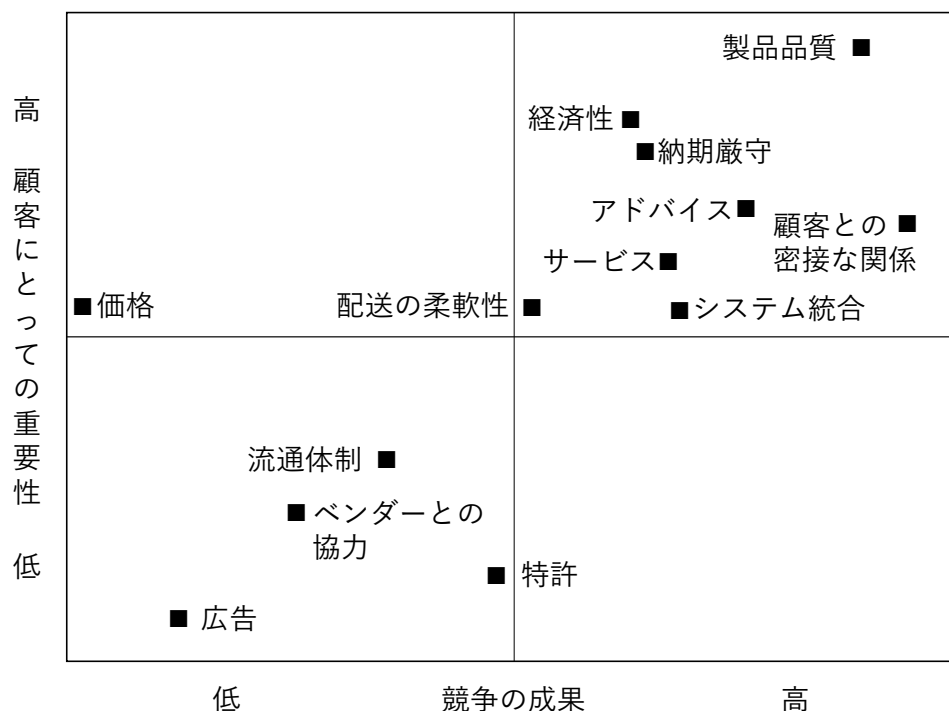


図 5.3 隠れたチャンピオンにおける競争優位マトリックス

出所：参考文献[53]をもとに筆者が作成

競争優位マトリックスとは、「顧客にとっての重要性」と「相対的な競争の成果」という2つの観点をむすびつけたものである。顧客にとっての重要性は縦軸、競争の成果は横軸で示される。顧客にとっては上半分が重要なことであり、右に行くほど競争の成果に効果的に働く。また、それぞれの項目の位置は、アンケートによる平均値を示しており、特定の企業

のものではない。隠れたチャンピオンは複数の戦略的な競争優位を持っていることが分かる。特に顧客にとっての重要性と競争の成果がともに高い項目は、製品品質、経済性、納期厳守、アドバイス(顧客に対する提案)、サービス、顧客との密接な関係、システム統合である。これらの項目は、集中戦略を成り立たせる要素といった見方もできる。特に顧客と密接な関係を構築し、顧客ニーズに基づいてハード、ソフト、サービスを統合した専用のシステムとして、製品提供することは、強力な競争優位につながると考えられる。一方、残りの特性については、競争の成果がどれも弱い。例えば、価格の位置は、顧客にとってはある程度重要であるものの、競争には優位に働かないということである。

これまでに示した隠れたチャンピオンの戦略をまとめると次のとおりである。①No.1を目指すための狭く・深く定義された市場に特化した集中戦略、②狭い市場での売上を拡大するためのグローバル化戦略、③コア市場の技術・ノウハウを他市場に展開し、さらに能力を高めるためのソフトな多角化戦略、加えて、④ハード、ソフト、サービスを統合したシステムでの製品提供である。これらの基本戦略を QPM ユニットの戦略構築に適用する。

5.4 所属企業における戦略の構築

5.4.1 ターゲット市場の絞り込み

QPM ユニットの事業がニッチャーを極めて、隠れたチャンピオンになるためには、No.1 になりうる市場、製品領域を絞り込むことが必要である。そこで企業 A との共同開発の実施、既存事業の SD 事業での経験から、ターゲット市場は、半導体外観検査市場とした。

ターゲット市場である半導体外観検査市場の市場規模を図 5.4 に示す。市場規模の範囲は、パターン付きウエハーに対する光学式の欠陥検査装置に限定している。ここでインラインは自動測定装置、オフラインは卓上検査装置をそれぞれ示している。2020 年の実績では 400 億円程度の市場であり、2023 年の予測では 600 億円程度に成長している。つまり、3 年で 1.5 倍程度に市場規模が大きく成長していることがわかる。特にインラインは年平均成長率(CAGR)が 18 %であり、さらなる市場規模の拡大が期待される。半導体外観検査の目的は、歩留まりの向上と製造プロセスの品質管理であるが、このように市場規模が拡大している理由は 2 つある。1 つ目は、外観検査工程の AI 導入・自動化によるコスト低減のトレンドが加速していることである。2 つ目は、2 次元微細化技術の性能向上の限界が近づいている背景から、3 次元積層半導体デバイスの市場拡大による、ウエハーやアドバンスパッケージの外観検査の需要が増加していることである。このように半導体外観検査装置の市場は拡大しており、ビジネス機会が高まっていることがわかる。しかしながら、競合他社におい

でもこの外部環境の変化は同様である。そのため、QPMユニットが狙う市場をより狭く定義する必要がある。

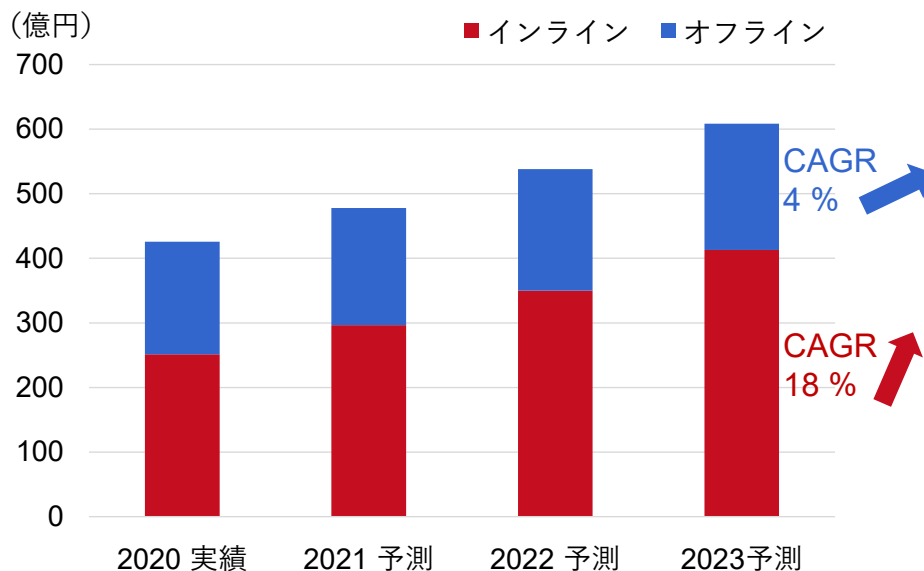


図 5.4 光学式半導体外観検査装置の市場規模

出所：世界半導体製造装置・試験/検査装置市場年鑑 2020[57]、GLOBAL 3D OPTICAL SURFACE PROFILERS (PROFILOMETERS) SALES MARKET REPORT 2021[11]をもとに筆者が作成

次に QPM ユニットのターゲット市場を技術的な視点から絞り込みを行う。半導体外観検査装置として用いられる従来技術と QPM の性能比較について図 5.5 に示す。各技術の水平分解能と垂直分解能、及び各技術の性能を星取表にまとめている。比較対象は、自動光学検査装置(Automated Optical Inspection: AOI)、共焦点レーザー顕微鏡、白色干渉顕微鏡、QPM である。

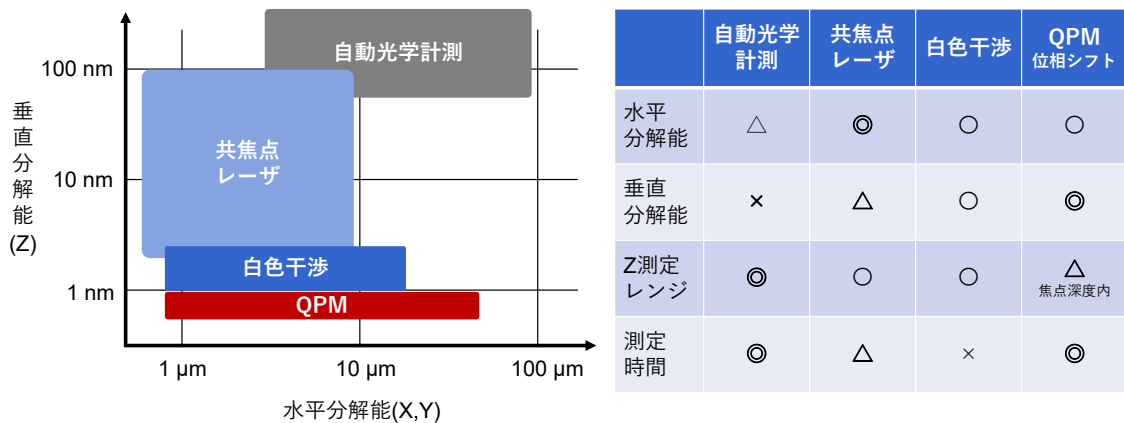


図 5.5 従来技術と QPM の性能比較

自動光学検査装置は、主に明視野観察でサンプルを測定する方法である。主にプリント基板や液晶ディスプレイの検査工程で用いられている。明視野観察が用いられ、水平分解能は通常スループットを優先して低倍率のレンズが用いられるため、10 μm 程度である。一方、垂直方向の寸法を測定するために傾斜面から複数カメラによつての撮像が行われる。そのため、垂直方向の測定レンジは広いものの、垂直分解能は最大で 1 μm 程度である。また、カメラを用いた撮像であるため、高スループット測定が可能であり、1 視野当たり 10 ms 以下での撮像が可能である [58]。

共焦点レーザー顕微鏡は、サンプルに対してガルバノスキャナー等でレーザーをスキャンし、光電子増倍管やフォトダイオードなどの受光素子で信号を検出し、面情報へ変換する手法である。受光素子の前にピンホールを設けることで、サンプル面と共役関係(共焦点となる位置)にあるレーザー光のみを信号として取り込むことで、水平方向と垂直方向の両方で高分解能のデータが取得できる。加えて、波長の短い青色レーザーを用いることで分解能を向上している。サンプルを Z 方向に移動しながら連続的に画像を取り込むことで、位置の異なる複数の焦点深度の浅い断層画像を取得しながら、各画素で焦点が合った際のピーク輝度およびピーク位置情報を記録する。そのため、得られた 2 次元画像を積層することで 3 次元形状を取得することができ、垂直方向の測定レンジは数 mm 程度である。また、垂直分解能は、対物レンズの開口数に依存するため、高倍レンズでは 2 nm 程度であるが、低倍レンズを使用した場合は 100 nm 程度の分解能となる。一方、測定時間は、視野のスキャン範囲とトレードオフであり、1000×1000 の測定点の場合は、60 ms 程度の時間が必要である。そのため、広視野で高速測定が必要な用途には不向きであり、高分解能の測定が必要なアプリケーションに適した手法である [59]。

白色干渉顕微鏡は、光源に白色光を用いた光干渉計測である。広帯域の低コヒーレンス光源を用いて、測定面に対応する干渉強度が最大になる位置を取得し、垂直方向にスキャンして物体の3次元形状を測定する手法である。垂直方向の測定レンジは、共焦点レーザー顕微鏡と同じく、数 mm 程度である。水平分解能は明視野観察と同等であり、垂直分解能は対物レンズの倍率によらず 1 nm と一定である。そのため、広視野に対して高い垂直分解能を得るアプリケーションに適している。一方、垂直方向のスキャンはメカニカルステージを用いることから、測定時間は一般的に 3 秒程度を要する[60]。

所属企業の QPM ユニットは、位相シフトを用いた光干渉方式である。水平分解能は、明視野観察と比べて劣化することなく同等であり、対物レンズの倍率に関係なく、1 nm 程度の高い垂直分解能が得られる。しかしながら、垂直方向の測定レンジは、対物レンズの焦点深度内に限られるため、凹凸の大きいサンプルには不向きである。測定速度については、位相計算するために 4 枚の画像取得が必要であるが、高速なフレームレートのカメラを用いることで 25 ms 程度での画像取得が可能である。

従来技術と QPM の性能比較の結果、QPM ユニットは、ナノメートルオーダーの高い垂直分解能が必要であり、かつ広視野で高速な測定に適していることが分かった。そのため、比較的凹凸の少ないサンプルである半導体ウエハーやチップの欠陥やキズといった表面欠陥の検査を対象とすることが望ましいといえる。

5.4.2 ポジショニング分析

本節では、前節で絞り込んだターゲット市場に対して、競合の光干渉計測手法と比較して QPM ユニットが相対的にどのようなポジションにあり、どのような優位性があるのかを明らかにする。半導体外観検査において、特に重要になる項目は、測定速度、測定対象に合わせたカスタマイズ性、経済性の指標となる価格である。これら 3 つの水準によって作成した光干渉計測手法のポジショニングを図 5.6 に示す。比較対象は、市販品の代表例であるレーザー干渉計、干渉対物レンズを使った方法、QPM ユニットである。

	レーザー干渉計	干渉用対物レンズ +ピエゾステージ	QPMユニット
測定速度	高	低	高
カスタマイズの 自由度	低	高	高
価格帯	高	低	中
外観	 Source: Zygo	 Source: Nikon Source: THK Precision	 所属企業の検証機

図 5.6 光干渉計測手法のポジショニング

レーザー干渉計は、QPM と同様に光の干渉を利用して表面形状を解析する装置である。測定速度は、1 視野について 25 ms 以下で取得することが可能であり、高速な測定を実現している。しかし、スタンドアローンの卓上機であり、カスタマイズを想定した設計ではない。また、様々な方式の干渉計が市販されているが、価格は 2000 万円以上と高額なものが多い。

安価な手法としては、干渉対物用レンズとピエゾステージを用いて干渉画像を測定する方法がある。干渉対物レンズには、2 光束干渉用レンズとして、マイケルソン型、ミロー型、リニク型がある。これらの対物レンズを用いて、ピエゾステージによってサンプルの Z 軸方向に走査することで干渉画像を取得する。測定には位相シフト法を用いる場合、市販のピエゾステージでは、位相シフト法に必要な複数画像を取得に数秒の時間を要する。そのため、この手法は高速撮像には不向きである。一方、ここで使用する部品は、顕微鏡に追加することを前提としているため、組み合わせは自由であり、カスタマイズ性は高い。また、価格は干渉用対物レンズとピエゾステージの合計で 100 万円程度であり、比較的安価である。

QPM ユニットの、前項で述べた通り、高速測定が可能であり、1 視野あたり 25 ms 程度の測定速度である。また、QPM ユニットの、第 4 章で示した通り、干渉光学系のコア部であり、顧客仕様に応じたカスタマイズ可能である。価格帯は、QPM ユニットのハードウェアと位相計算ソフトウェアのパッケージで 500 万円以下を想定している。パートナー企業に QPM ユニットの OEM 提供し、パートナー企業で検査システムを構築することでト

タルコストの低減を目指している。

光干渉計測手法のポジショニングを整理することで、QPM ユニットは、レーザー干渉計、干渉対物レンズ方式に対して、カスタム設計を前提としており、パートナー企業との協業によって、高速測定装置を提供することに優位性があることを確認した。

5.4.3 バリューチェーン分析

本節では、QPM ユニットのバリューチェーン分析を行い、独自の強みをどこに置くべきであるかを検討する。ここで、同業他社が干渉計を搭載した検査システムとして製品提供する場合と所属企業が QPM ユニットをパートナー企業に提供し、パートナー企業が検査システムを構築して製品とする場合の2つのパターンについてのバリューチェーン分析を行う。

隠れたチャンピオンの基本戦略でもある集中戦略において、ターゲット市場のシェア拡大を狙うためには、独自のバリューチェーンを深化させ、独自性と優位性を兼ね備えた最終製品を生産する工程、技術、部品を作りあげることが必要である。バリューチェーンとは、マイケル・ポーター氏によって提唱されたフレームワークであり、企業を戦略的に意味のある活動に分解するツールである。自社と同業他社のバリューチェーンを比較することで、自社の競争優位の源泉、つまり価格の引き上げ、またはコストの低下をもたらす特定の活動に焦点をあて、明確にすることができる[52]。

干渉計を搭載した検査システムを販売する場合と QPM ユニットとパートナー企業へ展開する場合の2つのバリューチェーン分析を行った。バリューチェーン分析の結果を図 5.7 に示す。装置が最終製品として消費者であるエンドユーザーに販売されるまでに5つの主要活動を定義した。その活動は、製品設計、製造、物流、販売・マーケティング、メンテナンスである。



図 5.7 QPM ユニットと市販干渉計のバリューチェーン

最初に、干渉計を搭載した検査システムを販売する場合は、すべてのバリューチェーンの活動を自社もしくは自社に近いところで実施する必要がある。つまり、主要活動は、垂直統合型となる。垂直統合では、バリューチェーン全体の間接コストを抑え、利益のすべてを享受できる。また、商品コンセプトに沿った開発・部品製造・組立を一貫して行えるため、製品の完成度が高くなる。さらに、ブランドや品質・納期なども統制・管理できるため、商品価値も高まりやすい。製造ノウハウを組み込んだ干渉計を搭載した検査システムを自社開発し、開発から製造・販売までの活動をすべて自前で行うことで、高収益性をもたらす可能性がある。このような垂直統合では、技術やアイデアが企業内に蓄積され、機密となるノウハウが社外に漏れるリスクも小さくなるため、企業の競争力をより長く保つことができる。しかしながら、垂直統合は、初期設備投資や固定費などの負担が大きくなりやすい。また、投資回収の期間が長くなることから、競争や市場ニーズが大きく変化した場合の対応が難しくなる。

次に、QPM ユニットの場合は、パートナー企業にカスタム設計した QPM ユニットを OEM 提供する。所属企業は QPM ユニットの製品設計と製造を担当する。一方、検査装置として必要となる搬送系やシステム制御の開発は、パートナー企業が担当する。つまり、所属企業は、コア技術である干渉計の製品設計と製造のみに注力することができる。QPM ユニットを搭載した検査装置の製造と物流はパートナー企業が担当する。販売とマーケティングに関しては、パートナー企業と所属企業が協業して市場開拓、市場浸透を進める。一方、メンテナンスは所属企業が担当することで顧客ニーズを直接得る機会を作り、製品設計にフィードバックする。さらには、所属企業が複数のパートナー企業と協業することで市場の拡大とニーズの深堀の両立が可能になる。

バリューチェーン分析により、QPM ユニットの独自の強みは、コア技術である QPM の製品設計と製造へ注力によって、製品品質を高めていくことだと確認した。また、マーケティングとメンテナンスも所属企業が担当することで、製品設計に顧客ニーズをフィードバックすることが可能になり、さらに製品品質が高まっていく。加えて、複数のパートナー企業との協業によって、QPM ユニットの市場の拡大とニーズの深堀が可能になる。

5.5 ビジネスモデルの整理

隠れたチャンピオンの基本戦略、前節までに実施したフレームワークの分析結果をビジネスモデルとしてまとめる。本節では、ビジネスモデルキャンバスを用いてビジネスモデルの全体像を確認する。ビジネスモデルキャンバスとは、アレックス・オスターワルダー氏と

イヴ・ピニユール氏によって開発された、ビジネスモデルを理解するためのフレームワークである[61]。新しいビジネスモデルを開発するときや既存のビジネスモデルを分析するときには全体像を可視化して考えるために活用されている。ビジネスモデルキャンバスによって、ビジネスに重要な9つの要素の関係を図式化でき、ビジネスの全体像や事業構造を理解しやすくなる。9つの要素とは、顧客セグメント (CS)、顧客関係 (CR)、チャネル (CH)、価値提案 (VP)、主要活動 (KA)、リソース (KR)、パートナー (KP)、コスト構造 (CS)、収益の流れ (RS)であり、それぞれ相関関係にある。

前述の基本戦略と分析結果に基づいて作成したビジネスモデルキャンバスを図 5.8 に示す。QPM ユニットの価値提案は、半導体ウエハー・チップに対するナノメートルオーダーの欠陥・キズ検査の低コスト化である。パートナーは、半導体外観検査に精通したシステムインテグレーターであり、パートナーは QPM ユニットを搭載した検査装置を製造する。顧客セグメントは、エンドユーザーである半導体デバイスメーカーである。価値を提供するために必要となるリソースは、QPM に関する特許権、技術者、製造設備である。主要活動は QPM ユニットの製品設計と製造、マーケティング、メンテナンスであり、所属企業はこの項目に注力し、半導体ウエハー・チップの外観検査の市場を深堀していく。また、あくまでも市場開拓は、パートナー企業と協業して行うものであり、この協業によって顧客との関係を深め、市場からの本質的なニーズを抽出し、製品設計にフィードバックさせる。コストは主要活動である製品設計、製造、マーケティング、メンテナンスに付随するものである。特に QPM ユニットは、コアとなる干渉光学系のみを製造するため、比較的少ない設備投資で対応可能である。収益は、QPM ユニットの OEM 販売やメンテナンスであるサービス提供から得る。

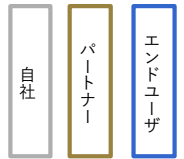
<p>KP パートナー</p> <p>半導体外観検査装置のシステムインテグレーター</p> <p>バリューチェーン</p> 	<p>KA 主要活動</p> <p>QPMユニットの製品設計・製造</p>	<p>VP 価値提案</p> <p>半導体ウエハ・チップに対するナノメートルオーダーの欠陥・キズ検査の低コスト化</p>	<p>CR 顧客との関係</p> <p>共同で市場開拓</p>	<p>CS 顧客セグメント</p> <p>半導体デバイスメーカー</p>
<p>C\$ コスト構造</p> <p>製品設計/製造コスト マーケティング/販売コスト メンテナンスコスト</p>	<p>KR リソース</p> <p>特許権、技術者 製造設備</p>		<p>CH チャンネル</p> <p>パートナーとの協業</p>	

図 5.8 工業向け QPM ユニットのビジネスモデルキャンバス

QPM 事業の早期立ち上げと収益化のため、まずは工業向け QPM ユニットの事業を立ち上げに注力する。その中で、作成したビジネスモデルを仮説検証し、アップデートすることでビジネスモデルを確立する。その後、事業が軌道に乗った後に、グローバル化戦略とソフトな多角化戦略によって、さらなる事業成長を目指す。具体的には、所属企業の海外現地法人からの製品展開、バイオ分野への展開を将来的に目指す。

5.6 まとめ

本章では、工業向け QPM ユニットに関して、半導体検査装置市場での競争優位性を高めるためのビジネス戦略を立案するために、隠れたチャンピオンの基本戦略と複数のフレームワーク分析を実施した。最終的に本章で示した戦略と分析内容をビジネスモデルキャンバスのフレームワークに落とし込み、ビジネスモデルとしてまとめた。

隠れたチャンピオンの戦略は次の4つから構成されている。①No.1を目指すための狭く・深く定義された市場に特化した集中戦略、②狭い市場での売上を拡大するためのグローバル化戦略、③コア市場の技術・ノウハウを他市場に展開し、さらに能力を高めるためのソフトな多角化戦略、④ハード、ソフト、サービスを統合したシステムでの製品提供である。これらの基本戦略を QPM ユニットの戦略構築に適用した。

工業向け QPM ユニットの事業がニッチャーを極めて、隠れたチャンピオンになるためには、No.1 になりうる市場を明らかにし、ポジショニングを決める必要がある。そこで QPM の技術的な観点からの適正の見定めとポジショニング分析を実施した。その結果、QPM ユ

ニットのターゲット市場は、半導体外観検査市場における、凹凸の少ない半導体ウエハー・チップの欠陥や傷の検査とした。また、QPM ユニットのポジショニングは、高速測定を特徴とした干渉計測装置をカスタム設計し、それをパートナー企業へ OEM 提供することに優位性があることを確認した。

集中戦略において、ターゲット市場でシェアを拡大するためには、独自のバリューチェーンを深化させ、独自性と優位性を兼ね備えた最終製品を作りあげることが必要である。そこで、バリューチェーン分析により、QPM ユニットの独自の強みは、コア技術である QPM の製品設計と製造へ注力することによって、製品品質を高めていくことだと確信するに至った。また、マーケティングとメンテナンスも所属企業が担当し、製品設計に顧客ニーズをフィードバックすることで、さらに製品品質が高まっていくことも確認した。加えて、複数のパートナー企業との協業によって、QPM ユニットの市場の拡大とニーズの深掘が可能になると考えた。

最終的に本章で示した戦略と分析内容をビジネスモデルキャンパスのフレームワークを用いて、ビジネスモデルとしてまとめた。QPM 事業の早期立ち上げと収益化のため、立案したビジネスモデルを活用しながら、まずは工業向け QPM ユニットの事業立ち上げに注力する。具体的には第4章で述べたA社との製品開発、他のパートナー企業の協業を進めていく。その後、事業が軌道に乗った後に、隠れたチャンピオンの基本戦略であるグローバル化戦略とソフトな多角化戦略によって、さらなる事業成長を目指す。具体的には、所属企業の海外現地法人からの製品展開、バイオ分野への展開を将来的に行い、QPM 事業を既存事業に続く新たな収益源の柱として成長させていく。

第6章 結論

6.1 本研究のまとめ

本論文では、所属企業の QPM の事業化に向けて、QPM の使いやすさと安定性の向上のための技術開発、顧客ニーズに適合した装置開発、及び QPM 事業の競争優位性を高めるためのビジネス戦略の立案を行った。

第1章では、研究背景と研究目的を説明した。所属部署では、長期的な成長を目的として、多角化によって新規事業の立ち上げを行い、新たな収益源を生み出すことが喫緊の課題となっていた。そのため、最初に既存事業の SWOT 分析を行い、既存事業の強みを明らかにした。次に新たな製品群を早期に事業化するために、SWOT 分析で明らかになった既存事業の強みと親和性が高い技術を所属企業の研究所が有している技術シーズの中から探索した。その結果、QPM が新事業の候補となり、既存事業の知見である設計技術・ノウハウを QPM の製品開発に活用して、事業化を進めることとなった。研究所で開発された QPM 試作機を筆者の所属部署である事業部に技術移転を行い、事業部で試作機開発を開始した。研究所の試作機をもとにハードの改良設計を行い、光学性能を改善した「フラッグシップ機」と呼ばれる試作機を開発した。フラッグシップ機を用いて、測定の実施や操作性の確認をすると、高画質な測定画像が得られたものの、干渉計特有の光学調整の操作性に問題があることが明らかになった。理由は、所属部署の QPM は、低コヒーレンス光源を用いた 2 光束干渉計であり、光学調整は容易ではなく、干渉計の構造を熟知している技術者でないと操作が難しかったためである。また、QPM の製品化に向けて、社内外の市場情報を調査したところ、所属企業が目指すべき明確な市場のニーズが把握できていないこと、さらには QPM と同様に光干渉計測技術を応用した装置が複数リリースされており、多くの競合他社が存在することが判明した。上記の背景から、本研究の目的を以下の 3 つに設定した。

- 装置の使いやすさと安定性を向上させるための自動化技術の開発
- 所属企業が目指すべき市場ニーズを明らかにし、そのニーズに適合した QPM の開発
- QPM 事業の競争優位性を高めるためのビジネス戦略の立案

第2章では、QPM に関連した光干渉計測技術の概要、次に位相解析手法である定量位相イメージング手法について述べた。最後に、所属企業の研究所で実施された QPM の研究開発内容と事業化検討について説明した。研究所の QPM 試作機は、明視野観察や蛍光観察では見えない微細構造を見ることを目標にしていたため、高画質で高分解能の位相画像を取

得に特化した方式を採用していた。そのため、水平分解能に劣化が無く、ノイズのない高画質な位相情報を取得できる装置であった。しかしながら、光学調整が容易ではなく、調整には一定のノウハウが必要であったため、使いやすい装置とは言えなかった。また、QPMは過去にバイオ向けに事業化検討が2回実施されたが、事業化に時間がかかること、周辺技術が未成熟であったことから、事業化が見送られたことを説明した。

第3章では、バイオ向けQPMのフォーカススキャン機構の開発について述べた。従来、低コヒーレンス干渉計では、細胞のフォーカス調整をすると物体光路の光路長が変化するため、フォーカス調整時には参照光路の光路長の再調整が必要であり、装置は使いにくいものであった。そこで、本研究では、低コヒーレンス・リニク干渉計であるQPMと焦点可変レンズ(FTL)を組み合わせ、電氣的にフォーカス調整が可能なコンパクトな光学系を新規に提案した。FTLの導入によって、コヒーレンスゲートと幾何学的フォーカスを切り離すことができたため、フォーカス位置を調整しても、光路長の再調整は不要になった。本セットアップでは $-200 \sim +300 \mu\text{m}$ の範囲のスキャンが可能であった。また、フォーカススキャンの応答時間は10ms程度であった。さらに顕微鏡筐体の保持機構に両持ち構造を適用することで、振動ノイズを低減し、除振台なしの環境で高品質な位相画像の生成を実現した。

第4章では、製品化を念頭に置いた工業向けQPMを開発するため、半導体外観検査装置のシステムインテグレーターである企業Aと共同開発を開始し、顧客のニーズの調査に基づくQPMの試作機開発を実施した。企業Aからは、半導体外観検査装置向けにQPMを導入するための具体的なニーズである4つの要求事項が示された。4つの要求事項である、QPM光学系の分離、高速撮像のための位相シフト機構の高速化、位相画像を出力するための画像処理の高速化、光学調整機構の電動化についてそれぞれの開発を実施した。開発したQPMユニットを用いた工業サンプルの撮像結果から、高画質でノイズのない位相画像が得られることを確認した。

第5章では、工業向けQPMユニットに関して、半導体検査装置市場での競争優位を高めるためのビジネス戦略を立案するために、隠れたチャンピオンの基本戦略に基づき、複数のフレームワーク分析を実施した。最終的に一連のフレームワーク分析による考察結果をビジネスモデルキャンバスのフレームワークに落とし込み、QPM事業のビジネスモデルとしてまとめた。

6.2 本研究の結論

本研究の大目的はQPM事業の立ち上げである。第1章に示した3つの研究目的を以下

に示す。

研究目的1：装置の使いやすさと安定性を向上させるための自動化技術を開発する。

干渉光学の調整を容易にして、誰にでも使える装置にするために新規の光学系を提案する。そのため、QPMの光学調整機構を電動化し、様々な測定サンプルに対して簡単に使用できる装置を開発する。

研究目的2：所属企業が目指すべき市場ニーズを明らかにし、そのニーズに適合した仕様のQPMを開発する。

QPMを製品化するためには、顧客ニーズや特定のアプリケーションに対して適合した開発が必要である。そのため、想定顧客と製品化を前提とした共同開発を実施して、想定顧客の具体的なニーズに基づいた試作機を開発する。

研究目的3：QPM事業の競争優位性を高めるビジネス戦略を立案する。

QPM事業が競合他社に対して競争優位性を高めていくためには、顧客ターゲットを絞り込み、ポジショニングを明確にしたうえで、独自の戦略を構築する必要がある。そのため、所属企業の強みを生かしたビジネス戦略を立案する。

研究目的1については、第3章では、バイオ向けQPMに焦点可変レンズ(FTL)を導入した新たな光学系を提案し、コヒーレンスゲートと幾何学的フォーカス位置を分離することで、低コヒーレンス干渉計においても、FTLを用いることでフォーカス位置を自由に調整できるようになった。また、第4章では、工業向けQPMの光路長調整機構をステッピングモーターによって電動化し、画像処理を用いることで干渉縞コントラストの最適化が容易になった。これらの2つの技術開発によって、誰にでも簡単に使うことができるQPM装置を開発した。

研究目的2については、第4章では、企業Aと共同開発を行い、QPMを半導体外観検査装置に適用するための顧客ニーズをヒアリングし、それぞれの課題に対して、技術開発を行うことで企業Aの要求事項を達成した工業向けQPMユニットが開発された。

研究目的3について、第5章では、工業向けQPMユニットの製品化に向けて、QPMユニットの競争優位性を高めるためのビジネス戦略を立案した。所属企業もその1つとして選ばれている「隠れたチャンピオン」の基本戦略に基づき、いくつかのフレームワーク分析を行った。最終的に一連のフレームワーク分析の考察結果をビジネスモデルキャンバスによって整理し、QPM事業のビジネス戦略を示した。

以上の3つの研究目的の達成によって、本研究の大目的であるQPM事業への立ち上げに対して、その第一歩を踏み出すことができた結論付ける。

6.3 今後の展望

立案したビジネス戦略を実行に移し、QPM事業の早期立ち上げと収益化を達成するために、パートナー企業と共同開発を進めている半導体外観検査向けのQPMユニットの製品化に注力する。工業向けQPMユニットの競争優位性を高めていくためには、パートナー企業との関係構築が重要である。パートナー企業とともに市場ニーズを深掘し、独自のバリューチェーンを構築することで新たな価値を創造する。そして、事業が軌道に乗った後に、隠れたチャンピオンの基本戦略であるグローバル化戦略とソフトな多角化戦略によって、さらなる事業成長を進める。具体的には、所属企業の海外現地法人からの製品展開、バイオ分野への展開によって製品群の拡大を目指す。

参考文献

- [1] M. Kumagai, N. Uchiyama, E. Ohmura, R. Sugiura, K. Atsumi, and K. Fukumitsu, “Advanced Dicing Technology for Semiconductor Wafer—Stealth Dicing,” *IEEE Trans. Semicond. Manuf.*, vol. 20, no. 3, pp. 259–265, 2007, doi: 10.1109/TSM.2007.901849.
- [2] N. Suzuki, T. Nakamura, Y. Kondo, S. Tominaga, K. Atsumi, and T. Ohba, “Damage-Less Singulation of Ultra-Thin Wafers using Stealth Dicing,” in *2020 IEEE 70th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*, 2020, pp. 1043–1049, doi: 10.1109/ECTC32862.2020.00169.
- [3] 渥美一弘, 内山直己, 栗田典夫, 福満憲志, 福世文嗣, and 久野耕司, “レーザー集光性能を高めたステルスダイシング装置,” 一般社団法人 機械振興協会, 2012.
<http://www.jspmi.or.jp/system/file/3/1101/n10-5.pdf> (accessed Oct. 07, 2021).
- [4] 浜松ホトニクス株式会社 Web, “浜松ホトニクス株式会社 2019年9月期決算説明会,” 2019. https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ir/191113_se.pdf (accessed Oct. 07, 2021).
- [5] 浜松ホトニクス株式会社 Web, “SDアライアンスパートナー.”
https://sd.hamamatsu.com/jp/ja/alliance_partners/index.html (accessed Oct. 07, 2021).
- [6] 浜松ホトニクス株式会社 Web, “浜松ホトニクスと日亜化学工業 協業体制の構築で合意.” https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/news/2017_10_11.pdf (accessed Oct. 07, 2021).
- [7] SEMI web, “2019年世界半導体製造装置販売額.” <https://www.semi.org/jp/node/jp-85651>.
- [8] 井原久光, テキスト経営学. ミネルヴァ書房, 2008.
- [9] 浜松ホトニクス株式会社 Web, “最新の研究・開発テーマの紹介.”
<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/our-company/research-and-development/index.html> (accessed Jan. 06, 2022).
- [10] 山内豊彦, 山田秀直, and 上田之雄, “定量位相顕微鏡の小型化と各種応用計測：空気定盤不要な卓上二光束干渉顕微鏡（特集 デジタルホログラフィの"いま"をみつめる）,” 光アライアンス / 光アライアンス編集委員会, pp. 26–29, 2017.
- [11] 360ResearchReports, “GLOBAL 3D OPTICAL SURFACE PROFILERS (PROFILOMETERS) SALES MARKET REPORT 2021.”

<https://www.360researchreports.com/global-3d-optical-surface-profilers-profilometers-sales-market-17387831> (accessed Jan. 20, 2022).

- [12] MarketResearch.com, “Global Imaging Flow Cytometry Industry Research Report Growth Trends and Competitive Analysis 2021-2027.”
<https://www.marketresearch.com/QYResearch-Group-v3531/Global-Imaging-Flow-Cytometry-Research-30377262/> (accessed Jan. 20, 2022).
- [13] D. Malacara, “Twyman–Green Interferometer,” *Optical Shop Testing*. Wiley, pp. 46–96, Jun. 08, 2007, doi: <https://doi.org/10.1002/9780470135976.ch2>.
- [14] M. K. Kim, “Principles and techniques of digital holographic microscopy,” *SPIE Rev.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–51, Apr. 2010, doi: 10.1117/6.0000006.
- [15] M. Mir, B. Bhaduri, R. Wang, R. Zhu, and G. Popescu, “Quantitative Phase Imaging,” *Progress in Optics*, vol. 57, pp. 133–217, Jul. 01, 2012, doi: 10.1016/B978-0-44-459422-8.00003-5.
- [16] H. Schreiber and J. H. Bruning, “Phase Shifting Interferometry,” in *Optical Shop Testing*, 3rd ed., D. Malacara, Ed. Wiley, 2007, pp. 547–666.
- [17] M. Takeda, H. Ina, and S. Kobayashi, “Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry,” *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 72, no. 1, pp. 156–160, 1982, doi: 10.1364/JOSA.72.000156.
- [18] 加藤純一, “実時間干渉じま解析とその応用,” 精密工学会誌, vol. 64, no. 9, pp. 1289–1293, 1998, doi: 10.2493/jjspe.64.1289.
- [19] 佐藤世智, 栗原徹, and 安藤繁, “白色光干渉と時間相関イメージセンサを用いる微小構造体の振動振幅位相分布の実時間観測システム,” 電気学会論文誌E (センサ・マイクロマシン部門誌), vol. 130, no. 1, pp. 17–24, 2010, doi: 10.1541/ieejsmas.130.17.
- [20] H. Iwai *et al.*, “Quantitative phase imaging using actively stabilized phase-shifting low-coherence interferometry,” *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 20, pp. 2399–2401, 2004, doi: 10.1364/OL.29.002399.
- [21] T. Ikeda, G. Popescu, R. R. Dasari, and M. S. Feld, “Hilbert phase microscopy for investigating fast dynamics in transparent systems,” *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 10, pp. 1165–1167, 2005, doi: 10.1364/OL.30.001165.
- [22] T. Yamauchi, H. Yamada, K. Goto, H. Matsui, O. Yasuhiko, and Y. Ueda, “Transportable and vibration-free full-field low-coherent quantitative phase microscope,” in *Proc.SPIE*,

Feb. 2018, vol. 10503, doi: 10.1117/12.2289473.

- [23] T. Yamauchi, H. Iwai, M. Miwa, and Y. Yamashita, “Low-coherent quantitative phase microscope for nanometer-scale measurement of living cells morphology,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 16, pp. 12227–12238, 2008, doi: 10.1364/OE.16.012227.
- [24] T. Yamauchi, N. Sugiyama, T. Sakurai, H. Iwai, and Y. Yamashita, “Label-free classification of cell types by imaging of cell membrane fluctuations using low-coherent full-field quantitative phase microscopy,” in *Proc.SPIE*, Feb. 2010, vol. 7570, doi: 10.1117/12.841008.
- [25] T. Yamauchi *et al.*, “Three-dimensional morphological imaging of human induced pluripotent stem cells by using low-coherence quantitative phase microscopy,” in *Proc.SPIE*, Mar. 2014, vol. 8947, doi: 10.1117/12.2037106.
- [26] M. Ogawa *et al.*, “Immunogenic cancer cell death selectively induced by near infrared photoimmunotherapy initiates host tumor immunity,” *Oncotarget; Vol 8, No 6*, 2017, [Online]. Available: <https://www.oncotarget.com/article/14425/text/>.
- [27] F. Ogata *et al.*, “Dynamic changes in the cell membrane on three dimensional low coherent quantitative phase microscopy (3D LC-QPM) after treatment with the near infrared photoimmunotherapy,” *Oncotarget; Vol 8, No 61*, 2017, [Online]. Available: <https://www.oncotarget.com/article/22223/text/>.
- [28] 池田貴裕, “ホログラフィー応用の事業化開発とその要因－起業実践を通じた光産業創成の追究－,” 光産業創成大学院大学 博士論文, 2009.
- [29] NEDO web, “NEDO 成果報告書.” https://www.nedo.go.jp/library/seika/shosai_201408/20140000000312.html.
- [30] G. Popescu, *Quantitative Phase Imaging of Cells and Tissues*. New York: McGraw-Hill Education, 2011.
- [31] N. T. Shaked, L. L. Satterwhite, N. Bursac, and A. Wax, “Whole-cell-analysis of live cardiomyocytes using wide-field interferometric phase microscopy,” *Biomed. Opt. Express*, vol. 1, no. 2, pp. 706–719, 2010, doi: 10.1364/BOE.1.000706.
- [32] M. Mir *et al.*, “Optical measurement of cycle-dependent cell growth,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, vol. 108, no. 32, pp. 13124–13129, 2011, doi: 10.1073/pnas.1100506108.
- [33] Y. Ozaki *et al.*, “Label-free classification of cells based on supervised machine learning of subcellular structures,” *PLoS One*, vol. 14, no. 1, p. e0211347, Jan. 2019, [Online].

Available: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211347>.

- [34] A. Chatterjee, J. A. Cerna Sanchez, T. Yamauchi, V. Taupin, J. Couvrette, and A. A. Gorodetsky, “Cephalopod-inspired optical engineering of human cells,” *Nat. Commun.*, vol. 11, no. 1, p. 2708, 2020, doi: 10.1038/s41467-020-16151-6.
- [35] Y. Choi *et al.*, “Reflection phase microscopy using spatio-temporal coherence of light,” *Optica*, vol. 5, no. 11, pp. 1468–1473, 2018, doi: 10.1364/OPTICA.5.001468.
- [36] M. A. Model and J. C. Petrucci, “Chapter Eight - Intracellular Macromolecules in Cell Volume Control and Methods of Their Quantification,” in *Cell Volume Regulation*, I. Levitane, E. Delpire, and H. Rasgado-Flores, Eds. Academic Press, 2018, pp. 237–289.
- [37] M. Pircher, E. Götzinger, and C. K. Hitzenberger, “Dynamic focus in optical coherence tomography for retinal imaging,” *J. Biomed. Opt.*, vol. 11, no. 5, pp. 1–6, Sep. 2006, doi: 10.1117/1.2358960.
- [38] G. Song *et al.*, “First Clinical Application of Low-Cost OCT,” *Transl. Vis. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 3, p. 61, May 2019, doi: 10.1167/tvst.8.3.61.
- [39] J. P. Su *et al.*, “Imaging the anterior eye with dynamic-focus swept-source optical coherence tomography,” *J. Biomed. Opt.*, vol. 20, no. 12, pp. 1–7, Dec. 2015, doi: 10.1117/1.JBO.20.12.126002.
- [40] I. Grulkowski, S. Manzanera, L. Cwiklinski, F. Sobczuk, K. Karnowski, and P. Artal, “Swept source optical coherence tomography and tunable lens technology for comprehensive imaging and biometry of the whole eye,” *Optica*, vol. 5, no. 1, pp. 52–59, 2018, doi: 10.1364/OPTICA.5.000052.
- [41] Z. Wang *et al.*, “Spatial light interference tomography (SLIT),” *Opt. Express*, vol. 19, no. 21, pp. 19907–19918, 2011, doi: 10.1364/OE.19.019907.
- [42] E. P. Goodwin and J. C. Wyant, *Field Guide to Interferometric Optical Testing*. SPIE Press, 2006.
- [43] N. Suzuki, T. Yamauchi, H. Yamada, and K. Ishii, “Dynamic focusing in low-coherence quantitative phase imaging with decoupling of spatio-temporal coherence gating and geometric focusing,” *OSA Contin.*, vol. 4, no. 9, pp. 2391–2399, 2021, doi: 10.1364/OSAC.433900.
- [44] S. Shin, K. Kim, K. Lee, S. Lee, and Y. Park, “Effects of spatiotemporal coherence on interferometric microscopy,” *Opt. Express*, vol. 25, no. 7, pp. 8085–8097, 2017, doi: 10.1364/OE.25.08085A.

10.1364/OE.25.008085.

- [45] I. Zeylikovich, “Short coherence length produced by a spatial incoherent source applied for the Linnik-type interferometer,” *Appl. Opt.*, vol. 47, no. 12, pp. 2171–2177, 2008, doi: 10.1364/AO.47.002171.
- [46] I. Abdulhalim, “Spatial and temporal coherence effects in interference microscopy and full-field optical coherence tomography,” *Ann. Phys.*, vol. 524, no. 12, pp. 787–804, Dec. 2012, doi: <https://doi.org/10.1002/andp.201200106>.
- [47] A. Ahmad, T. Mahanty, V. Dubey, A. Butola, B. S. Ahluwalia, and D. S. Mehta, “Effect on the longitudinal coherence properties of a pseudothermal light source as a function of source size and temporal coherence,” *Opt. Lett.*, vol. 44, no. 7, pp. 1817–1820, 2019, doi: 10.1364/OL.44.001817.
- [48] A. Ahmad, V. Dubey, A. Butola, J.-C. Tinguely, B. S. Ahluwalia, and D. S. Mehta, “Sub-nanometer height sensitivity by phase shifting interference microscopy under environmental fluctuations,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 7, pp. 9340–9358, 2020, doi: 10.1364/OE.384259.
- [49] Z. M. Daniel Malacara, Manuel Servín, *Interferogram Analysis For Optical Testing*, 2nd ed. CRC, 2005.
- [50] S. N. Kasarova, N. G. Sultanova, C. D. Ivanov, and I. D. Nikolov, “Analysis of the dispersion of optical plastic materials,” *Opt. Mater. (Amst)*, vol. 29, no. 11, pp. 1481–1490, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2006.07.010>.
- [51] マイケル E. ポーター, 競争優位の戦略—いかに高業績を持続させるか. ダイヤモンド社, 1985.
- [52] ジョアン・マグレッタ, マイケル・ポーターの競争戦略. 早川書房, 2012.
- [53] ハーマン・サイモン and 上田隆穂監訳, グローバルビジネスの隠れたチャンピオン企業: あの中堅企業はなぜ成功しているのか. 中央経済社, 2012.
- [54] H. Simon, “Hidden Champions of the 21st Century,” 独立行政法人経済産業研究所. https://www.rieti.go.jp/en/special/p_a_w/018.html (accessed Oct. 21, 2021).
- [55] 国際貿易開発会議, “貿易収支データ.” <https://unctad.org/statistics> (accessed Oct. 24, 2021).
- [56] 細田裕二, グローバル・ニッチトップ企業論: 日本の明日を拓くものづくり中小企業.

白桃書房, 2014.

- [57] グローバルネット株式会社, “世界半導体製造装置・試験/検査装置市場年鑑2020.”
- [58] Cyper optics Web, “Automated Optical Inspection.”
<http://www.cyberoptics.com/product-category/automated-optical-inspection/> (accessed Jan. 28, 2022).
- [59] Olympus Web, “Introduction to Confocal Microscopy.” <https://www.olympus-lifescience.com/ja/microscope-resource/primer/techniques/confocal/confocalintro/> (accessed Jan. 28, 2022).
- [60] ブルカー・ジャパン Web, “3次元白色光干渉型顕微鏡.” <https://www.bruker-nano.jp/wyko-contour-principle> (accessed Jan. 28, 2022).
- [61] アレックス・オスターワルダー and イヴ・ピニユール, ビジネスモデル・ジェネレーション ビジネスモデル設計書. 翔泳社, 2012.

謝辞

本研究に取り組み、学位論文をまとめるまでには、多くの方々のご支援とご指導を賜りました。博士論文を上梓するにあたり、お世話になった皆様方にこの場をお借りして感謝の意を申し上げます。

指導教官である光産業創成大学院大学 石井勝弘教授には、本研究を進めるにあたり、終始あたたかいご指導と激励を賜りました。入学当初の研究テーマの変更後から、博士研究の骨格から細部にわたり、丁寧なご指導をいただきましたことを深く感謝申し上げます。

光産業創成大学院大学 姜理恵准教授には、ビジネスマネジメント、ファイナンスの基礎をご指導いただきました。特に博士論文をまとめる際には、所属企業における基本戦略を整理するためのアイデアを与えていただき、新規事業における戦略をまとめることができました。心よりお礼を申し上げます。また、論文審査委員の主査を務めていただいた平野美奈子講師には、博士論文を完成させるにあたり、本論文をご精読頂き、数々の貴重なご助言を賜りました。これにより、本論文の完成度を飛躍的に高めることが出来ました。心より感謝申し上げます。

本研究の遂行ならびに本論文の執筆にあたり、多様な視点からの有益なご助言や個別のご指導を賜りました光産業創成大学院大学 瀧口義浩学長をはじめとする教員の皆様方に心より謝意を表します。さらに、コロナ過の中、快適な研究環境をご提供頂きました事務局の皆様方に心より謝意を表します。

光産業創成大学院大学に進学する大変貴重な機会を与えていただいた浜松ホトニクス株式会社の鈴木賢次副社長、渥美一弘部長、久野耕司部長主幹に深く感謝いたします。また、本研究の遂行にあたり、6年間の長期間にわたって多大なご迷惑をお掛けしながらも、業務のご支援を賜りました内山直己副事業推進部長、箆島哲也部長、飯田哲也氏、山内豊彦氏、吉田敬正氏、坂本幸優氏、星川雅春博士をはじめとする職場の皆様方に深謝申し上げます。

最後に、離れた地から様々な面でいつも支えてくれた北海道に住む両親と妹、カナダに住む Gallant 家族、近くで支えてくれた義父、義母に心から感謝します。そして、どのような状況においても応援し、支え続けてくれた妻 瑠璃子、息子たちの研造、将悟に心からの感謝の気持ちを捧げます。

2022年3月

鈴木那津輝

研究業績

学術論文

1. N. Suzuki, T. Yamauchi, H. Yamada, and K. Ishii, "Dynamic focusing in low-coherence quantitative phase imaging with decoupling of spatio-temporal coherence gating and geometric focusing," OSA Continuum 4, 2391-2399 (2021).

国際会議

1. N. Suzuki and K. Ishii, "Label-free and vibration-free imaging using low-coherent quantitative phase microscope," The 13th Japan-Finland Joint Symposium on Optics in Engineering (OIE2019), pp. 37-38, August 2019, Finland.

国内会議

1. 鈴木那津輝、石井勝弘, “定量位相顕微鏡を用いた細胞のラベルフリーイメージング,” 第15回バイオオプティクス研究会, 2018年12月, 山形県米沢市
2. 鈴木那津輝、山内豊彦、石井勝弘, “自動化された定量位相顕微鏡を用いた生体サンプルのラベルフリーイメージング,” 日本光学会年次学術講演会(OPJ2020), 講演番号17pA9, 2020年11月, オンライン開催

特許

1. 【特許番号】 特願 2020-202168
【発明の名称】 干渉画像取得装置および干渉画像取得方法
【発明者】 山内豊彦、安彦修、鈴木那津輝

その他の業績

1. N. Suzuki, X. Shiqin, K. Atsumi, N. Uchiyama, and T. Ohba, "Laser dicing for higher chip productivity," 2016 11th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT), pp. 62-64, October 2016, Taiwan.