

博士 論文

ステルスダイシング事業の競争力強化に関する研究
- タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス
干渉計測技術の開発 -

2021 年 9 月

光産業創成大学院大学
光産業創成研究科

星川 雅春

目次

第 1 章 序論	1
1.1. はじめに	1
1.2. ステルスダイシング技術	1
1.2.1. ダイシング工程	1
1.2.2. ステルスダイシングの基礎	2
1.2.2.1. ステルスダイシング技術の工程	3
1.2.2.2. 改質層形成のメカニズム	4
1.2.2.3. 打痕形成のメカニズム	4
1.2.3. 既存方式に対するステルスダイシング方式のメリット・デメリット	6
1.2.4. ステルスダイシング方式の問題点	9
1.3. ステルスダイシング事業	10
1.3.1. 事業の変遷	10
1.3.2. ステルスダイシング技術を内蔵するダイシング装置	12
1.3.3. 業務提携の変遷	13
1.3.4. ステルスダイシング事業の問題点と課題	14
1.4. 本博士論文の目的	15
1.5. 本論文の構成	16
第 1 章の参考文献・引用	18
第 2 章 ステルスダイシングの顧客ニーズの探索	21
2.1. はじめに	21
2.2. 現場観察による調査	21
2.2.1. 参与観察法	21
2.2.2. 調査の対象	22
2.2.3. 調査の概要	23
2.3. ダイシング工程の運営方針に影響を与えている背景	24
2.3.1. ダイシング工程の役割	24
2.3.2. ダイシング工程の運営方針	26
2.3.3. ダイシング工程の作業内容	27
2.3.4. ダイシング工程への要求事項	28

2.4. ダイシング工程の問題点 -----	29
2.4.1. 問題が残されている作業 -----	29
2.4.2. 「抜取り検査」作業 -----	30
2.4.3. 「レシピ検討」作業 -----	31
2.4.4. 共通する要因「断面観察」作業 -----	32
2.5. 製造現場のニーズ -----	34
2.6. 結論 -----	36
第2章の参考文献・引用 -----	37
第3章 低コヒーレンス干渉計測技術とタイムストレッチ技術のレーザ加工計測への応用 -----	39
3.1. はじめに -----	39
3.2. 低コヒーレンス干渉技術 -----	40
3.2.1. 光干渉計測と可干渉距離 -----	40
3.2.2. 低コヒーレンス干渉計測の原理 -----	41
3.2.3. 媒質内部計測手段としての低コヒーレンス干渉計測 -----	44
3.2.4. 低コヒーレンス干渉計測の方式による分類 -----	46
3.3. タイムストレッチ技術 -----	47
3.3.1. タイムストレッチ技術の原理 -----	47
3.3.2. タイムストレッチ技術によるレーザ加工の測定 -----	49
3.3.3. タイムストレッチ技術を使った低コヒーレンス干渉計測の特長 -----	51
3.4. まとめ -----	52
第3章の参考文献・引用 -----	53
第4章 タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術の開発 -----	55
4.1. 本章の目的 -----	55
4.2. タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測の原理 -----	56
4.3. タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測システム -----	57
4.3.1. タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測システムの概要 -----	57
4.3.2. 超短パルスレーザ部 -----	59
4.3.3. タイムストレッチャ -----	59
4.3.4. 干渉計部 -----	61

4.3.5. 検出部	61
4.4. 測定システムの基本特性	62
4.4.1. 測定で得られる干渉信号	62
4.4.2. 干渉信号から光路長差を求める手順	63
4.4.3. 光路長特性	66
4.5. 波長分散の測定方法とその補正	67
4.5.1. 一般的な波長分散の測定方法	67
4.5.2. 本研究における波長分散測定方法	67
4.5.2.1. 分類1：単体の分散ファイバを測定する方法	68
4.5.2.2. 分類2：干渉計全体を測定する方法	68
4.5.2.3. 波長分散補正式の結果	71
4.5.3. 光路長特性の比較	72
4.5.4. 本研究で行った手法の新規性と有用性	73
4.6. 結論	74
第4章の参考文献・引用	75
第5章 ステルスダイシング技術への応用	77
5.1. 本章の目的	77
5.2. タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測システムの構築	77
5.2.1. 計測システムの概要	77
5.2.2. 超短パルスレーザ部	78
5.2.3. タイムストレッチャ	80
5.2.4. 干渉計部	80
5.2.5. 検出部	81
5.3. 測定結果	82
5.3.1. 基本特性	82
5.3.2. ステルスダイシング加工サンプルの説明	83
5.3.3. ステルスダイシング加工サンプルの測定結果	84
5.4. ステルスダイシング技術の課題に対する考察	87
5.4.1. タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測導入のメリット	87
5.4.2. 今後の課題	88
5.5. 結論	89

第5章の参考文献・引用-----	90
------------------	----

第6章 技術開発の成功要因の抽出

- ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づいて - -----	91
6.1. はじめに-----	91
6.1.1. 本章の目的 -----	91
6.1.2. 本章の構成 -----	92
6.2. 我が国のものづくり産業が抱える課題-----	93
6.2.1. 不確実性の高い状況下での競争力強化 -----	93
6.2.2. ダイナミック・ケイパビリティ理論-----	95
6.2.3. 企業存続を左右する能力：ダイナミック・ケイパビリティ -----	97
6.2.3.1. 富士フィルムホールディングス株式会社の事例 -----	97
6.2.3.2. 根本特殊化学株式会社の事例 -----	99
6.3. 技術開発の省察 -----	101
6.3.1. 産学連携による技術開発のメリット・デメリット -----	101
6.3.2. 産学連携による技術開発の成功と失敗に関する先行研究-----	102
6.3.3. 筆者が取り組んだ技術開発の概要 -----	105
6.3.4. 先行研究との比較分析-----	108
6.4. インタビュー調査-----	110
6.4.1. インタビュー調査の目的 -----	110
6.4.2. インタビュー手法-----	111
6.4.3. 質問票 -----	112
6.4.4. 調査結果-----	113
6.4.5. 定量分析-----	125
6.4.6. インタビュー調査のまとめ-----	128
6.4.7. 筆者が行った技術開発の「成功」の定義 -----	129
6.5. 技術開発の成功要因の考察 -----	131
6.5.1. ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づき考えられる成功要因-----	131
6.5.2. ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づく本活動の構図 -----	131
6.5.3. 成功要因1：製造部に浸透していた、不確実なものへの挑戦を推奨する組織風土 -	134
6.5.4. 成功要因2：上司による「感知」能力と「調整機能」の発揮 -----	137
6.5.5. 成功要因3：筆者による「感知」と「変容」能力の発揮 -----	139

6.6. 本章のまとめ-----	140
第6章の参考文献・引用-----	141
第7章 結論 -----	143
7.1. 本研究の振り返り-----	143
7.2. 本研究の目的と結論-----	144
7.3. 今後の課題と事業戦略-----	147
第7章の参考文献・引用-----	150

要旨

本論文は、企業 Z に所属する筆者が行った、「ステルスダイシング(Stealth dicing、以下 SD)事業の競争力強化に関する研究」を取りまとめたものである。SD 技術は、半導体デバイスの製造技術であり、レーザー照射により 1 枚のウェハから、数万個に及ぶデバイスチップへ分割して個片化する、新しいダイシング技術である。

企業 Z の所属部署 X1 では、SD 事業に売上高の伸び悩みの問題を抱えている。その原因は、間近に迫った基本特許の失効、模倣品出現による顧客離反、対象市場の飽和であり、SD 事業の競争力を高める必要があった。

そのため、技術的手段による打開策を見出すべく、本研究では 3 つの研究目的を設定した。具体的に、第 1 の目的は、SD 事業の顧客ニーズを探索することである。これに対し、本研究では、SD 装置が半導体デバイスの生産設備として実際に使われている製造現場に密着した参与観察により、製造現場のニーズを調査した。その結果、製造現場に課された使命は、極少量多品種生産体制における生産スケジュール遵守であることを確認した。そして、分割工程後に行われている、「断面観察」作業に時間が掛けられており、潜在的な問題となっている事を明らかにした。そのうえで、顧客ニーズを、分割工程の前に、SD 層と呼ぶレーザー加工層の深さを測定することとした。そして、最も効果が見込まれる、レーザー加工のリアルタイム測定のためには、200 kHz 以上の高速な測定速度が必要なことを示した。

第 2 の目的は、SD 加工深さのリアルタイム測定を行うための、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術を開発することである。これは、現場観察で明らかにしたニーズへの対応に必要な光測定技術である。これに対し、筆者は、既存技術であるフェムト秒レーザー光源技術とタイムストレッチ技術を深化させ、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術を開発した。測定の繰り返し速度は 15 MHz、シリコン基板内での深さの分解能は 6.97 μm 、光路長範囲が 0-18 mm の範囲で測定可能な測定系を開発した。さらに、SD 加工の測定に特化した設計により、440 μm の深さに作られた SD 層の深さを誤差 1% の精度で検出することができた。また、本測定技術で得られる光路長特性の改善に必要な波長分散補正手法に、学術的新規性を見出した。

第 3 の目的は、技術開発の成功要因を、ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づき抽出することである。成功要因から得られる示唆を今後の技術開発にも応用し、技術開発の効率を高め続けるためである。この目的に対し、3 つのことは行った。第 1 に、筆者が行った技術開発活動を省察した。この結果、活動に影響を与えた転換点に着目することができた。第 2 に、その転換点に至る背景や理由を知る為、筆者の活動に影響を与えた上司へのインタビュー調査を行い、定性的かつ定量的な分析を行った。定性分析では、上司が当時、SD 事業への行き詰まりを感じていたことや、レーザー応用の新しい何かへの期待感が、筆者を大学へ派遣させるに至った理由として浮き彫りにすることができた。一方、テキストマイニングに基づく定量分析では、上司がこれまでの事業運営で重要と考えていた項目を、3 つの単語群、

すなわち、「事業領域」、「顧客」、「知識」、として明確にすることができた。そして第3に、筆者が技術開発に成功できた要因を、ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づき考察した。その結果、3つの成功要因を抽出することができた。すなわち、「製造部に浸透していた不明確なものへの挑戦を推奨する組織風土」、「上司によるダイナミック・ケイパビリティの『感知』能力と『調整機能』の発揮」、「筆者によるダイナミック・ケイパビリティの『感知』と『変容』能力の発揮」、である。

最後に、本博士研究で開発したタイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術は、既存事業の強化に必要であるが、それだけでなく、医療分野や、レーザ加工が使われる自動車産業、航空機産業などの新規事業の進出にも有用な技術であり、半導体産業以外の光応用産業領域の拡大に貢献する。

Abstract

This article presents a summary of "research for enhancing the competitiveness of the Stealth dicing (SD) business", conducted by the author while working at company Z. SD technology is a technology for manufacturing semiconductor devices, specifically, a new dicing technology for dicing a single wafer into as many as tens of thousands of separate device chips by means of laser irradiation.

Department X1 at company Z, where the author works, is experiencing a problem that sales in the SD business are not substantially increasing. The causes of this problem include the impending expiration of basic patents, loss of customers due to the emergence of similar products, and saturation of the target market. Thus, there is a need to enhance the competitiveness of the SD business.

Accordingly, three research objectives were set in order to identify solutions based on technological means. Specifically, the first research objective was to explore customer needs in the SD business. Concerning this objective, in the present research, the author surveyed the needs at a manufacturing site by participant observation in close association with that manufacturing site, where SD machines were in actual used as production equipment for semiconductor devices. The results demonstrated that the mission at the manufacturing site was to keep to production schedules under a high-mix, low-volume production system. The results also revealed that time was being spent on the work of "cross-sectional observation" conducted after the dicing step, which constituted a potential problem. On the basis of these findings, the author saw the customer's need for measuring the depth of a laser processing layer called an SD layer before the separation step. Furthermore, the author demonstrated that a high measurement rate not lower than 200 kHz was necessary for the purpose of real-time measurement of laser processing, which is considered to be most effective, and set a high measurement rate as a technological target.

The second research objective was to develop a low-coherence interferometry technology utilizing time-stretch technology, which allows real-time measurement of SD processing depth. This technology is an optical measurement technology necessary to meet the needs clarified by participants observation. Concerning this objective, the author developed a low-coherence interferometry technology utilizing time-stretch technology by improving existing femtosecond laser light source technology and time-stretch technology. The measurement system that was developed enabled measurement at a repetition rate of 15 MHz, at a resolution of 6.97 μm for the depth position in a silicon substrate, and with an optical path length in the range of 0–18 mm. Furthermore, with a design specialized for measurement of SD processing, the author succeeded in detecting the depths of SD layers formed at depths of

440 μm with a precision of 1% or less. In addition, the author found academic novelty in a wavelength dispersion correction method necessary for improving optical path length characteristics obtained with the present measurement technology.

The third research objective was to elicit the factors for successful technological development on the basis of dynamic capabilities theory. This will serve to apply suggestions derived from these factors for success to future technological development, thereby continuously improving the efficiency of technological development. Concerning this objective, three actions were taken. First, the author carefully reviewed the technological development activities that he conducted, and as a result, recognized a turning point that affected those activities. Second, in order to discover the background and reasons for reaching this turning point, the author interviewed his supervisor who influenced the author's activities, and also conducted qualitative and quantitative analysis. The qualitative analysis revealed that the author was sent to a university because the supervisor then had perceived an impasse in the SD business and also had harbored expectations for something new in laser applications. Meanwhile, the qualitative analysis, conducted through text mining, clarified the factors that the supervisor had considered to be essential in the past business operation into three phrases, namely, "business domain", "customer", and "knowledge". Third, the author examined the factors for his successful technological development on the basis of dynamic capabilities theory. As a result, three factors for success were elicited: namely, 'the organizational culture of encouraging challenges to uncertainties, which was prevalent in the manufacturing department', 'the supervisor's exercise of the ability to "sensing" dynamic capabilities, as well as an "orchestration"', and 'the author's exercise of the ability to "sensing" dynamic capabilities as well as the ability to "transformation"'.

Lastly, while being necessary for the empowerment of existing businesses, the low-coherence interferometry technology utilizing time-stretch technology, developed in the present doctoral research, will also be useful in entering new markets, such as medical applications, as well as the automobile and aircraft industries, in which laser processing is employed, contributing to the expansion of industry domains involving optics applications other than the semiconductor industry.

図表一覧

図 1-1	半導体製造工程とダイシング工程の位置づけ	2
図 1-2	SD 技術の工程	3
図 1-3	SD 層が形成される様子の概念図	4
図 1-4	打痕形成の経時的模式図	5
図 1-5	SD 方式と他方式との比較	6
図 1-6	加工交差点部分の比較写真	8
図 1-7	媒質内部の亀裂状態の概念図	9
図 1-8	分割工程後のシリコンウェハ断面顕微鏡写真	10
図 1-9	SD 事業の売上高推移	11
図 1-10	直近約 10 年の開発ロードマップ	12
図 1-11	SD 事業のサプライチェーン	12
図 1-12	SD エンジンの製品概要	13
図 1-13	業務提携先とこれまでの変遷	14
図 1-14	ダイシング装置の市場動向	15
図 1-15	本論文の構成	17
表 1-1	他方式に対する SD 方式のメリット・デメリット	7
表 1-2	本研究の目的	16
図 2-1	非参与観察法と参与観察法の違い	21
図 2-2	現場調査の様子	24
図 2-3	ダイシング工程と製造部門の関係	25
図 2-4	ダイシング加工投入を待つウェハが収納されているカセット	27
図 2-5	ダイシング工程の作業フロー	28
図 2-6	抜き取り検査の作業風景	30
図 2-7	抜き取り検査の作業フロー	31
図 2-8	レシピ検討作業の比較	32
図 2-9	SD 加工後ウェハ断面の比較	33
表 2-1	事業部 Y の製品群一覧	23
表 2-2	現場調査の概要	24
表 2-3	ダイシング工程の構成員と役割	25
表 2-4	ダイシング工程の運営方針と施策	26
表 2-5	ダイシング加工要求項目に対する BD と SD の比較	28
表 2-6	問題を抱える SD の作業とその内容	30

表 2-7	ダイシング工程 Y1 のニーズ	34
図 3-1	マイケルソン型干渉計	41
図 3-2	インターフェログラムの比較	42
図 3-3	多層構造体のインターフェログラム	43
図 3-4	媒質内部計測技術の特性比較	44
図 3-5	LCI のスキャン方向	45
図 3-6	各方式 LCI の装置構成図	46
図 3-7	分光方法の比較	48
図 3-8	タイムストレッチ分光により入力光の波長スペクトルを得る手順	48
図 3-9	レーザアブレーション現象計測の実験構成図	50
表 3-1	LCI の方式間比較	47
表 3-2	LCI の先行研究例	51
図 4-1	TS-LCI 測定システムの外観写真	58
図 4-2	TS-LCI 測定システムのブロック図	58
図 4-3	超短パルスレーザ部の構成図	59
図 4-4	時間波形と波長スペクトルのタイムストレッチャ通過前後の比較	60
図 4-5	オシロスコープによる記録波形	62
図 4-6	光路長差 L に対する干渉信号の変化	63
図 4-7	干渉信号から光路長を求める手順	64
図 4-8	1 次の項までを考慮した場合の光路長特性の測定結果	66
図 4-9	使用した波長分散分析装置	68
図 4-10	ヒルベルト変換手順	70
図 4-11	光路長差と係数の関係	70
図 4-12	異なる方法により求めた波長分散補正式の係数	71
図 4-13	波長分散補正式により求めた光路長特性	72
表 4-1	一般的な波長分散測定法	67
図 5-1	計測システムの外観図	78
図 5-2	計測システムのブロック図	78
図 5-3	光源部の波長スペクトル	79
図 5-4	検出したパルス波形の違い	80

図 5-5	リアルタイムオシロスコープで取得したデータ	82
図 5-6	TS-LCI の光路長特性	83
図 5-7	SD 加工サンプルの詳細	84
図 5-8	TS-LCI 測定レーザと SD 加工サンプルの方位関係	85
図 5-9	測定アーム詳細	85
図 5-10	SD 加工サンプル測定解析結果のグラフ	86
図 5-11	TS-CLI の配置	89
表 5-1	構築した干渉測定システムの基本特性	83
表 5-2	SD 加工サンプル測定結果で得られたピークの帰属	87
表 5-3	追加ヒアリングの概要	88
図 6-1	「今後 5 年間程度の自社ビジネスを取り巻く環境」に関する意識調査	93
図 6-2	ダイナミック・ケイパビリティ・フレームワークの理論構造	96
図 6-3	富士フィルムホールディングス(株)の事業構成比率	98
図 6-4	根本特殊化学(株)の海外投資額の推移	100
図 6-5	産学連携による技術開発の成功要因と失敗要因	102
図 6-6	産学連携活動の失敗要因	104
図 6-7	本活動の鳥瞰図	105
図 6-8	インタビュー当日の様子	110
図 6-9	発言した内容の内訳	126
図 6-10	頻出単語のパレート図	127
図 6-11	経営理念が浸透した製造部像と本活動の中で確認された DC	133
図 6-12	企業 Z の経営理念	135
表 6-1	OC と DC の比較	95
表 6-2	DC の三要素：ミクロ的基礎	96
表 6-3	産学連携による技術開発のメリットとデメリット	101
表 6-4	産学連携による技術開発の成功事例の傾向	103
表 6-5	産学連携による技術開発の成功に必要な要因	104
表 6-6	本活動の出来事	106
表 6-7	先行研究の指摘と本事例との比較	108
表 6-8	半構造化インタビューの特徴	111
表 6-9	インタビューの質問リスト	112
表 6-10	頻出単語の分類	127
表 6-11	インタビュー結果のまとめ	128
表 6-12	筆者の行った技術開発の成功の定義	130

表 6-13	頻出単語の分類と特徴 -----	131
表 6-14	OC と DC の比較と企業 Z の経営理念 -----	135
図 7-1	筆者の成功を基にした今後の事業戦略 -----	147
図 7-2	光応用産業の持続的成長に対する TS-LCI 技術の寄与 -----	149

第1章 序論

1.1. はじめに

筆者の携わるステルスダイシング[†] (Stealth dicing, 以下、SD) 事業は、事業成長鈍化の問題を抱えている。筆者は、光技術によって科学技術の発展に寄与することを理念に掲げる企業Zに所属する技術者である。筆者は具体的に、半導体製造技術の1つであるSD技術の新製品開発業務に従事している。このSD技術は、2004年に初の製品が販売された比較的新しい技術であり、ダイシング市場において右肩上がり成長を続けてきたが、2016年頃になると事業成長鈍化の問題が顕在化してきた。この問題に対し、SD事業の経営責任者は、事業戦略として「レーザ応用の新しい何か」を見つける必要性を認識していたものの、一方で、それが何かについての明確な答えは持ち合わせていなかった。

本博士論文では、技術的視点、経営学的視点の両視点により、筆者が取り組んだ新技術開発に関わる研究について述べる。前述のように、「レーザ応用の新しい何か」の有効な手立てが見出せない状況の中、筆者は光産業創成大学院大学(以下、GPI)へ派遣された。そして、「レーザ応用の新しい何か」を具体化する、という不明瞭な目標に向け、GPIとの連携による新技術開発に取り組む運びとなった。目標が不明確な中、暗中模索的に取り組み始めた連携であったが、その活動に取り組む中で解決すべき課題を発見し、「レーザ応用の新しい何か」に繋がる「次の一手」を徐々に定めてゆき、新技術開発に辿り着くことができた。ここでいう「次の一手」とは、SD事業の競争力を高め、且つ、次なる「レーザ応用の新しい何か」の両者に繋げることが可能な、「新しい技術」のことである。本博士論文では、その「次の一手」について、その新規性や有用性について科学技術的視点による検討に加え、如何にして辿り着くことができたのか、その過程と成功要因について経営学視点からも検討する。

1.2. ステルスダイシング技術

1.2.1. ダイシング工程

SD技術は、レーザを用いた新しいダイシング技術である。既存のダイシング技術が抱える技術的問題点を解決し、さらにダイシング工程における生産コスト削減に寄与する新たなダイシング技術である。

ここでは、ダイシング工程全般に関する説明をする。ダイシング工程は半導体デバイス製造工程の一部であり、半導体ウェハを切断し、デバイスサイズのチップへと分割する技術で

[†] ステルスダイシングは浜松ホトニクス株式会社の商標です

ある。半導体デバイスには、例えば、NAND フラッシュメモリ、MEMS マイクロフォン、LED 素子など、我々の身の回りには様々なものがある。図 1-1 に、半導体デバイス製造工程の構成を示す[1]。半導体デバイス製造工場では効率的な製造工程が構築され、製造工程はさらに、前工程と後工程に大別される。

前工程は、シリコンウェハの上にデバイスを作製する工程である。4 インチから 12 インチの円形のシリコンウェハの表面に、ウェハ状態のまま数万個に及ぶデバイス集積回路を効率よく一括作製する。前工程には、ウェハ研磨工程、製膜工程、エッチング工程、検査工程、などがある。これらの工程では非常に高価な装置が使われているため、前工程を経て集積回路が作りこまれたウェハは、付加価値が非常に高い。そして、前工程を完了したデバイス付きウェハは、後工程に移送される。

後工程は、デバイスウェハから各チップへの切り出し、検査を行い、デバイスを作りこむ工程である[2]。後工程では最初に、前工程を完了したウェハの状態から個々のチップへ切り分けられる。そしてデバイス製品に組みこまれ、品質検査が行われる。これらの後工程の中で、1 枚のウェハから、個々のチップへの切り出し加工を行うのがダイシング工程である。ダイシング工程を失敗してしまった部分は、加工をやり直すことができない。従って、前工程でかけられてきた付加価値が高ければ高いほど損失も大きくとなるため、ダイシング工程には、失敗をできるだけ最小限に抑えることが要求される。

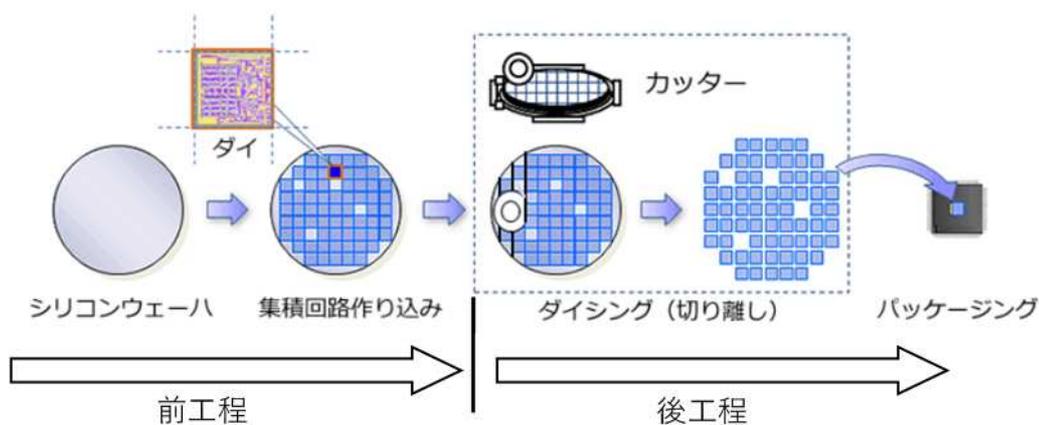


図 1-1 半導体製造工程とダイシング工程の位置づけ

出所：[1]より引用

1.2.2. ステルスダイシングの基礎

ここでは、SD の基礎を説明する。はじめに SD 技術の工程について、続いて SD 層形成のメカニズムについて、最後に打痕形成のメカニズムについて、という具合に、徐々に詳細の説明をする。

1.2.2.1. ステルスダイシング技術の工程

SD 技術の工程は、レーザ加工工程と分割工程の 2 つの工程により構成される。図 1-2 に SD 技術の工程を示す[3]。レーザ加工工程では、レーザを照射しながら、加工予定ラインに沿ってウェハを移動させる。この基本動作により、1 本の線状のレーザ加工領域を作ることができる。このレーザ加工領域のことを、改質層、または SD 層と呼ぶ。SD 層の詳細については後で説明する。1 本の加工後にレーザ照射を一旦停止し、ウェハを 2 本目の加工予定ライン上に移動させ、前述の基本動作を行うことで 2 本目の加工をする。この動作を繰り返すことにより、ウェハの 1 つの方向に複数本の SD 層を作製する。次にウェハの方向を 90 ° 回転し、同様に複数本の加工を行う。これにより、図 1-2(a)に示すような、ウェハ内部に格子構造の SD 層を作製することができる。

次に、分割工程について説明する。レーザ加工工程を終えたウェハは、次に分割工程に移送される。ウェハの内部に格子状に SD 層が作られていて、その SD 層には小さな初期亀裂が出来ている。分割工程では、ウェハの下に貼られているダイシングテープの拡張が大きな役割を果たす。テープ拡張前は初期亀裂が表面に達しておらず、外観からは内部の状態がどうなっているのか観察できない、“ステルス状態”である。ダイシングテープの下からテーブルを押し上げると、ダイシングテープが拡張しウェハは引っ張り応力を受ける。すると、ウェハの内部まで応力が伝わり、SD 層の初期亀裂を起点とし、ウェハの上下方向に亀裂が伸びる。そして亀裂が表面に達するまで伸びると、各所から伸びてきた亀裂同志が繋がり、個々のチップに分割される。分割工程を行った結果、チップ同士の割れ残りや品質不良が出て初めて、目視検査により加工の失敗を認識できるようになる。

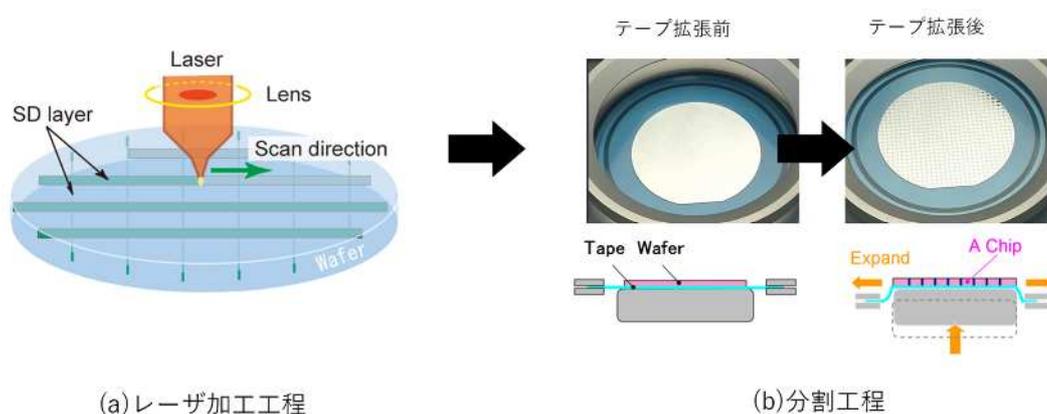


図 1-2 SD 技術の工程

1.2.2.2. 改質層形成のメカニズム

SD 層が形成されるメカニズムを説明する。図 1-3 に 1 本の SD 層が形成される様子の概念図を示した。SD 加工は、レーザ光をウェハに集光させて、分割の起点となる小さな加工キズをウェハ内部に形成する加工である。使用するレーザは、パルス発振レーザである。1 パルスのレーザパルスにより、1 つの小さな加工キズをウェハ内部に形成する。この小さな加工キズのことを、打痕(だこん)と呼ぶ。ウェハが保持されている保持テーブルを高速に移動させると、パルスレーザの発振周波数に対応する間隔で打痕が連続して形成され、図 1-3 に示すような連続した 1 本の線状の加工領域を得ることができる。このようにして得られた線状の加工領域が、SD 層である。図 1-3 の中で、横に並んだ小さな粒の 1 つ 1 つが打痕で、複数の打痕が連続し、亀裂で繋がっている層状の構造物が SD 層である。高い生産性が期待されるため、保持テーブルは 1,000 から 2,000 mm/sec で高速移動される。また、この図に示すように、SD 層はウェハ材質の内部に形成されている。半導体材料であるシリコンウェハは可視光に対して不透明なため、可視光による一般的な観察では加工領域が見えない。そのため、この技術をステルスダイシングと命名した[3]。また、SD 技術では、加工対象材料に対して十分に透過性の高い波長のパルスレーザを使用し、材料の内部に集光するように光学系を調整する。

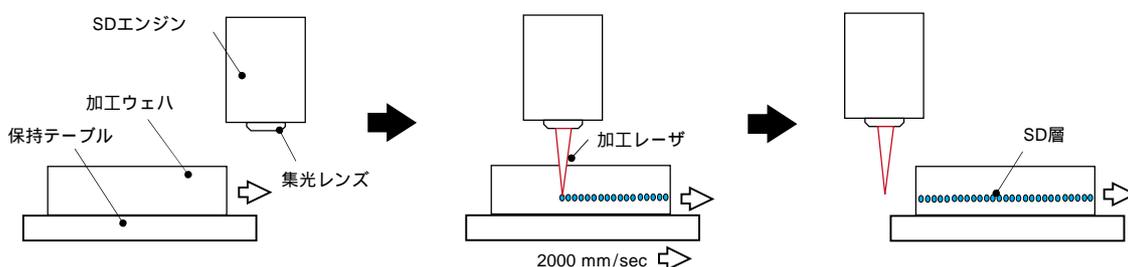


図 1-3 SD 層が形成される様子の概念図

1.2.2.3. 打痕形成のメカニズム

最後に、打痕が形成され、亀裂が発生するまでの様子を、図 1-4 により時間を追って説明する。図 1-4 は、SD 加工時のシリコンウェハ内部の加工領域近傍の結晶相状態で、1 ショットのレーザパルスが照射されてから打痕が形成されるまでの経時的な変化を(a)-(e)で表す[4]。(a)はレーザ光照射直後、(b)(c)は、レーザ光の 1 パルスの照射が持続している間、(d)はレーザの 1 パルスの照射が終わった直後、(e)は十分時間を経過した後をそれぞれ示す。レーザのパルス幅はナノ秒であり、(a)から(c)までは、レーザ光の 1 パルスの照射が持続している最中である。レーザ光は図に赤色で表示した。レーザ光は上部から照射され、ウェハ材料であるシリコン単結晶の内部に集光される。ウェハの表面付近ではレーザ光は吸収されないが、ウェハ内部の集光点ではエネルギー密度が加工閾値を上回り、材質が物理的に変質を受ける[5]。

(a)では、レーザー照射により集光位置のエネルギーが加工閾値を超えると、シリコン単結晶が溶融する。シリコン結晶は、単結晶に比べて溶融状態の方が単位物質あたりの体積は小さい。そのため、溶融すると、体積が減るため、その分ボイド(以下, Void)と呼ばれる空隙が生じる。図の中で、Voidを黒色で示した。(b)では、レーザー照射によりエネルギーが物質に注入され、(a)でできた溶融領域とVoidがレーザー進行方向と逆方向(図中の上方向)に成長する。(c)では、単結晶領域と溶融部分の境界部分の温度が熱拡散により低下し、この部分の再結晶化が始まる。図の中で、再結晶化部分は濃い灰色で示した。(c)の時点でレーザー照射は終了する。(d)では溶融領域の冷却が、外側からさらに進行する。その際、再結晶化部分により、溶融部分とVoidは隔離され、溶融部分が再結晶化領域に周囲を囲まれて閉じ込められる。そしてさらに冷却が進むと、隔離されていた溶融部分も再結晶化する。このとき、溶融状態で小さな体積で収まっていた溶融部分は、冷えて凝固する際に大きな体積に戻ろうとするが、外周は、先に固まった再結晶相に囲まれている。そのため、再結晶化と共に内部に蓄積される応力が大きくなり、応力が降伏点を超えて、最後に亀裂が発生する。この亀裂は、(e)に示すように再結晶相の外側にまで達している。これが、打痕の形成されるメカニズムである。

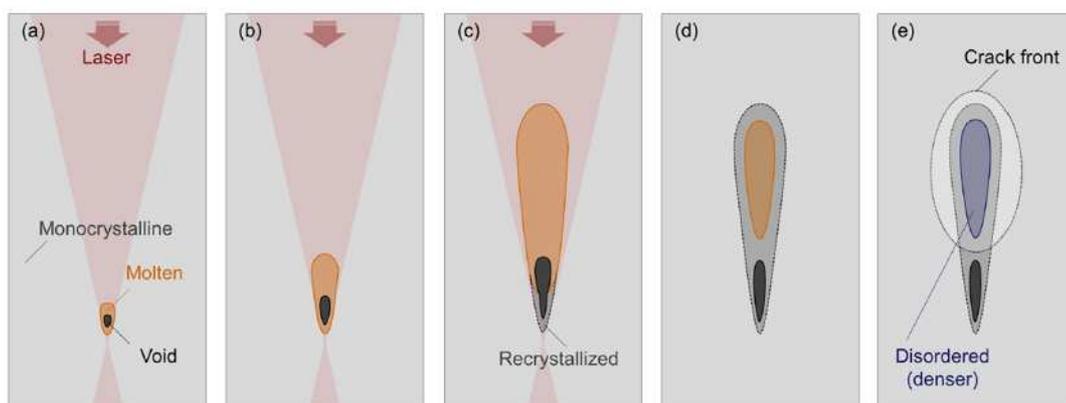


図 1-4 打痕形成の経時的模式図

出所：[4]より引用

1.2.3. 既存方式に対するステルスダイシング方式のメリット・デメリット

ここでは、既存方式に対するSD方式のメリット・デメリットを示す。その説明のために、まず既存方式とSD方式との違いを説明する。ダイシング工程では、ブレードダイシング(Blade dicing, 以下、BD)技術が既存技術として広く浸透しており、現在でも主流の技術である。BDに対抗する方式として誕生したのが、アブレーションダイシング方式とSD方式である。図1-5に、これら3つの方式の比較を示す。図1-5の左から順に、(a)BD方式、(b)アブレーションダイシング方式、(c)SD方式である。

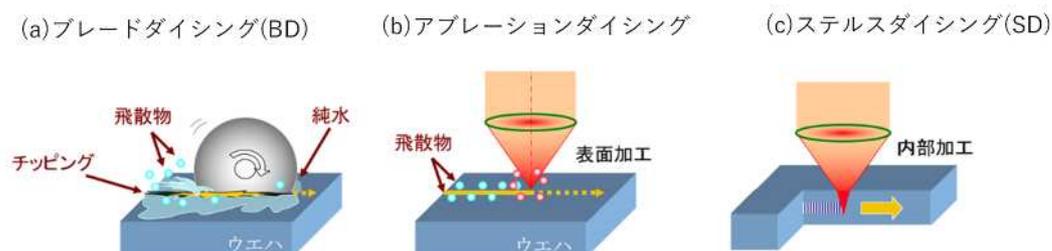


図 1-5 SD方式と他方式との比較

はじめに、BD方式とSD方式の違いを説明する。BD方式は分割するためにブレードと呼ばれる円盤状砥石を使用し、チップとチップの間の領域を削り取ることでチップ同士を分割する。この削り取られる部分を「削りしろ」と呼び、削りしろの分だけ切削くずが発生する為、該当部分が材料損失となる。また、図1-5(a)に示すように、BD方式では純水をかけながら分割を進める。純水を利用する目的は2つあり、切削くずの洗い流しと、ブレードの冷却である。一方で、SD方式では分割の手段としてブレードではなくレーザーを使用し、純水を使わない。また、材質を削り取ることで分割するのではなく、材質内部に形成されるSD層から延びる亀裂を成長させることによりチップとチップを分割するため、削りしろが限りなくゼロに近い。

次に、アブレーションダイシング方式とSD方式の違いを説明する。両方式とも分割にレーザー光を使うことは同じである。違いは、レーザー光を集光させる位置である。つまり、図1-5(b)に示すように、アブレーションダイシング方式ではレーザーをウェハの表面に集光させるのに対し、SD方式ではレーザーをウェハ内部に集光させる。アブレーションダイシング方式は、集光部分の材質を加熱、蒸散させて吹き飛ばしながらウェハを走査し、分割の起点となる1本の溝をウェハ表面に形成する。その際、飛散物の一部がウェハのデバイス領域に付着してしまうため、その飛散物の洗浄工程が必要である。一方、SD方式では、レーザーはウェハ表面を透過し、材質の内部に集光してSD層を形成する。材質内部に閉じこめられるようにSD層が作られるため、飛散物は発生せず、飛散物を洗い流す洗浄工程が不要である。

SD方式のメリットとデメリットを表1-1にまとめる [6]。メリットは、チップの収率が高いこと、デバイスの信頼が高いこと、純水を使う洗浄工程が不要なこと、工程のスループ

ットが高いこと、である。一方でデメリットは装置が高額なため、イニシャルコストが高いこと、加工材料に対する汎用性が低いこと、分割工程後でないレーザー加工の品質を判断することができないこと、が挙げられる。以下にメリット、デメリットについて詳しく説明する。

表 1-1 他方式に対する SD 方式のメリット・デメリット

メリット	デメリット
<ul style="list-style-type: none"> ・チップ収率が高い ・デバイスの信頼性が高い ・純水洗浄が不要である ・スループットが高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・イニシャルコストが高い ・材料に対する汎用性が低い ・分割工程の後でない加工品質の判断ができない

まず、メリットについて説明する。第 1 の「チップ収率が高い」というメリットを説明する。図 1-6 は、加工部分の品質を、BD 方式と SD 方式で比較した図である。この図のうち、SD 方式は、テープ拡張によりウェハ内部にある亀裂をウェハ表面まで伸ばして分割した後、テープ拡張を解除した後の様子である。BD 方式ではブレードでウェハを切削しながら分割を進めるため、ブレード幅に相当する数十 μm の領域は削りしろとなって消失する。一方、SD 方式では消失する部分が無く、設計段階でストリート幅を狭くでき、その分だけウェハ面積を有効活用できる。12 インチのウェハに対し、 1mm^2 のデバイスを、ストリート幅を BD が $80\ \mu\text{m}$ 、SD が $10\ \mu\text{m}$ として設計した場合の取得チップ数を試算すると、BD に対して SD では 14.4 % のチップ収率の向上が期待できる[7]。従って、SD 方式ではデバイスウェハ設計の段階で 1 枚のウェハの中に BD 方式より多くの数のデバイスチップを配置し、チップの収率を高めることができる。

次に、第 2 の「デバイスの信頼性が高い」というメリットを説明する。前に述べたように、BD 方式では切削くずが発生する。この切削くずは純水洗浄により洗い流すことができるが、除去しきれずにデバイスウェハ上に細かい粒子が残ってしまうことがあり、電氣的な短絡などの不良原因となる。一方、SD 方式では発塵がでないことから純水洗浄の必要性が無い。また、BD 方式の図 1-6(a)には、削りしろに沿ってチップングと呼ばれる部分がみられる。これはブレード状の刃物が回転し、材料に機械的に接触する際に発生するカケである。SD 方式は機械的に非接触なレーザー加工であるため、チップングは原理上発生しない。そして、チップング部分に外部からの応力が集中し、デバイス破壊の起点となる。デバイスの頑丈性は抗折強度で評価される。SD 方式では、チップングが無いため、高い抗折強度をもつデバイスを製造することが可能である[8-10]。このように、SD 方式を使ったデバイスは、電氣的短絡不良がなく抗折強度が高いため、デバイスの信頼性が高い。

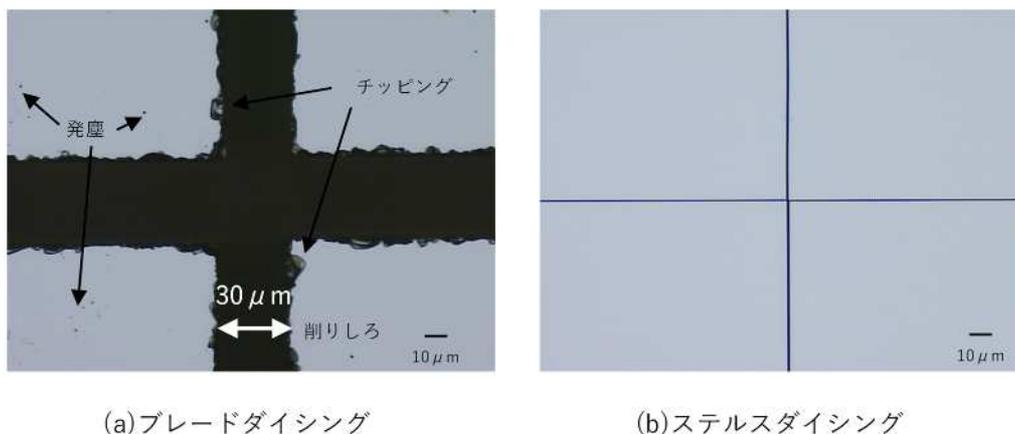


図 1-6 加工交差点部分の比較写真

第3の、「スループットが高い」というメリットを説明する。スループットとは、単位時間間に処理できるウェハの枚数のことである。ダイシングでは、ウェハの送り速度が速い程スループットは高くなる。生産性の点ではスループットが高い方がより望ましいが、スループットと分割品質との間にはトレードオフが存在する。送り速度を速くするとスループットは向上するが、逆にチッピングの発生頻度が増加し、切削くずによる目詰まりや、熱の影響によりブレード破損のトラブルが起きる。従って、BD方式ではウェハ送り速度には限界があり、現状は100 mm/sec程度の送り速度で運用がされている。一方でSD方式では、切削くずが出ない為目詰まりは発生せず、また送り速度を速くすることによってレーザが破損することもない。そのため、SD方式では2,000 mm/secの速い送り速度による運用も可能である[11]。半導体製造装置の生産性は、時間に処理可能なウェハ枚数:Wafers per hourの頭文字を取り、WPHとして表される。12インチのウェハを2mm角のチップヘダイシングする場合のWPHを試算すると、100 mm/sec運用のBD方式ではWPH 1.31であるのに対して、2,000 mm/secのSD方式ではWPH 19.3と、単位時間あたり約15倍の処理ができる。このように、SD方式ではスループットが高い。

デメリットについて説明する。第1は、「イニシャルコストが高いこと」、第2は、「材料に対する汎用性が低いこと」、第3は、「分割工程後でないと加工品質の判断ができないこと」である。第1、第2のデメリットに対しては、後ほど1.3.1.にて説明するように、現在まで継続的な改良に取り組んでいる。そして、第3の「分割工程後でないと加工品質の判断ができないこと」は、未分割不良の原因となる。第3のデメリットは大量の未分割不良に繋がるものの、現在までに具体的な解決策がない。次節以降でこの問題を深掘りする。

1.2.4. ステルスダイシング方式の問題点

上記で説明したように、SD方式の解決のできていない問題点の1つは、分割工程の後には、分割の可否や加工品質の判断ができないことである。そして、加工状態の善し悪しは、分割工程後の加工状態を直接確認することにより判断している。現在の工程は、加工工程、分割工程、加工判断、の順序となっており、大量の分割不良を発生させてしまう可能性が残る点が問題である。分割工程後に加工不良が判明しても、加工のやり直しができないため、分割に失敗したウェハは巨額な仕掛損失となる。また、現段階では、加工品質を分割工程の事前に計測できる手段は存在しない。

図1-7に分割成功と失敗の場合の違いを詳しく説明する[12]。上段は分割成功の場合、下段は分割失敗の場合である。図の中に示す赤い線は、SD層から上下方向に伸びている内部亀裂の上端、下端を表す。レーザ加工工程の直後には、成功、失敗に関わらず、亀裂はウェハ表面まで到達していない。そのため、(a)と(d)の段階では、その後分割するか否かについて、外観検査からでは判断ができない。レーザ加工工程の後、ウェハは分割工程へ移動しテープ拡張を受ける。分割成功の場合(c)は亀裂の先端がウェハ表面まで到達してチップへ分割されるが、失敗の場合(f)は亀裂の先端が表面まで達しないため、格子状の亀裂同志が繋がらず、分割に至らない。

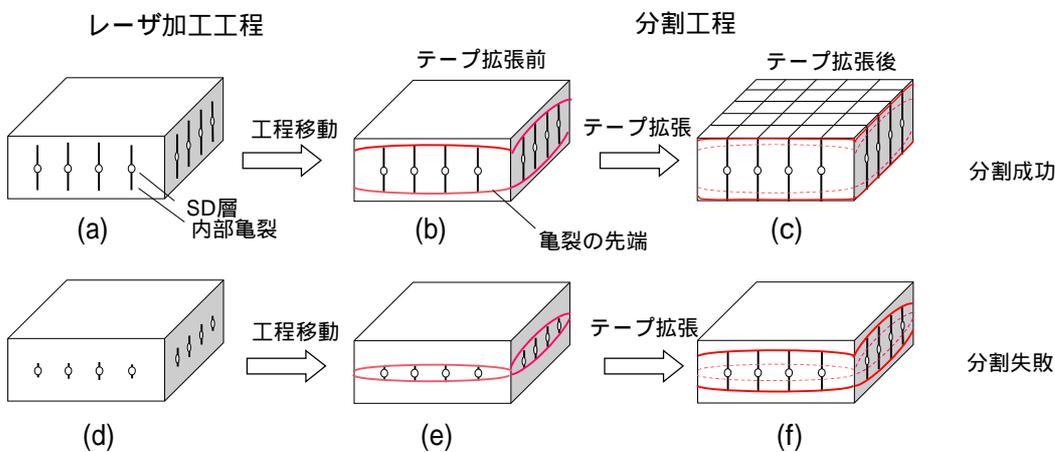


図1-7 媒質内部の亀裂状態の概念図
上段：分割成功時、下段：分割失敗時

SD層からの亀裂が表面まで伸びない様子を説明する。そのため、SD層がウェハの内部でどのような状態になっているか、詳しく説明する。図1-8は、厚さ100 μmのシリコンウェハに対してSD加工と分割工程を行った後の断面を、顕微鏡観察により撮影した写真である。この時の加工条件は、SD層から延びた初期亀裂をウェハ上面にまで成長させて分割する加工条件であるが、観察対象は、その条件で未分割不良が発生した部位の写真である。図の中

にある「亀裂の上端」と示した横筋は、テープ拡張の際にできた亀裂の先端位置である。断面観察でこの線が見えないのが正常な加工状態であるが、写真ではこの線が見えている。つまり、この線の位置で亀裂の伸びが止まり、表面まで到達していなかったことを示している。亀裂が表面まで伸びない主要な原因は、形成したSD層の深さ位置が狙い通りになっていないことである。

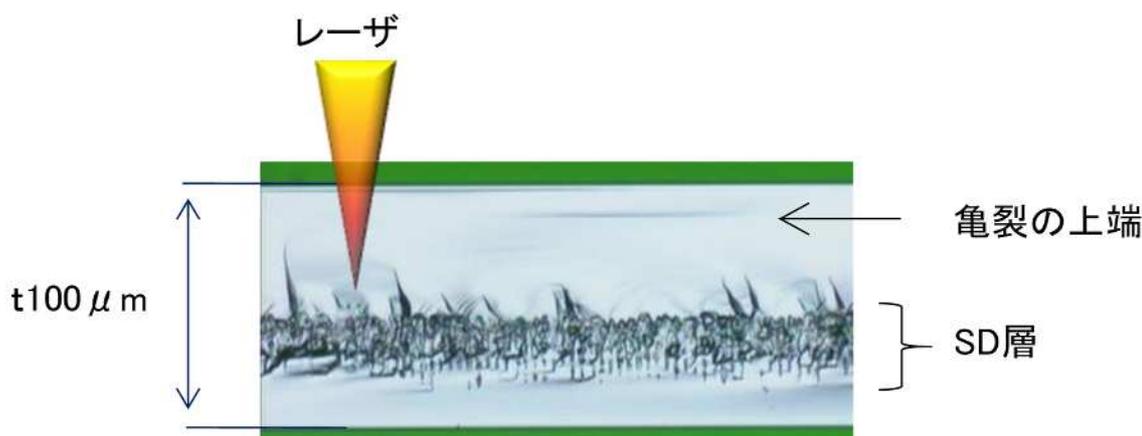


図 1-8 分割工程後のシリコンウェハ断面顕微鏡写真

1.3. ステルスダイシング事業

1.3.1. 事業の変遷

SD 技術は、1990 年代後半から開発が行われ、2001 年 9 月に基本特許を出願した。その後 2002 年 8 月に新聞発表により公知の技術となった後、多くの企業と連携や共同開発に取り組んだ[13]。装置メーカーとの協業により、2003 年になり初めての製品となる SD エンジンを開発し、ダイシング装置を上市した。本製品は、半導体製品である MEMS(Micro Electro Mechanical System)マイクロフォンの製造に利用される目的で導入された。それまでの MEMS デバイスは BD によって分断されていたが、機械的振動や純水を使う洗浄工程によるデメリットを克服する手段として SD 方式が初めて採用された[14]。このようにして、SD 技術はシリコンウェハの切断手段として製品化され、ダイシング市場へと参入した。

SD 事業の売上高の推移を説明する。前述のように、市場拡大、性能向上、低コスト化を進めることにより、これまで順調に事業を拡大してきた。図 1-9 に、2004 年 9 月期の上市から現在に至るまでの決算期毎の売上高比率の推移を示した。横軸は決算期、縦軸の左軸は 2018 年 9 月期の売上高を基準とした比率を示し、右軸は Semiconductor Equipment and Materials International (SEMI) による世界半導体製造装置市場統計(Worldwide semiconductor equipment market statistics, 以下 WWSEMS)を示す[15]。売上高は WWSEMS に概ね連動しつつ、製品上市以降、堅調に推移している。2011 年頃からは高輝度 LED 市場の立ち上がりで盛り上がりを見せたが、同時に新規参入者の出現などにより競

争が激しくなった。2013年に入ると、LED景気の波が去ると共に売上げは減少した。また、2015年から2018年までの4期間はWWSEMSの大きな伸びに対し、事業成長は低調なものに留まった。市場開拓と共に、分割性能向上と低コスト化を志向した技術開発に取り組んできたものの、次第に高い競争力を維持できなくなってきたと認識せざるを得ない。



図 1-9 SD 事業の売上高推移

出所：[15]を引用し筆者作成

技術開発の変遷について説明する。図 1-10 は、直近の 10 年に取り組んできた技術開発のロードマップである。上市以来、対象材料の拡大、分割性能向上、低コスト対応、の 3 つの方向性で開発に取り組み、事業規模を拡大してきた[6]。対象材料の拡大を狙った開発については、当初、シリコンウェハを対象に開始した事業であったが、レーザ波長の検討などにより、切断対象をシリコン基板以外の材質へ拡張してきた。材質の範囲を広げることは、市場範囲の拡大に繋がる。例えば、サファイア基板、SiC 基板、ガラス基板の使われる最終市場はそれぞれ、高輝度 LED デバイス市場、パワー半導体市場、スマートフォン市場である。従って、加工材料範囲の拡大に取り組むことにより市場規模を拡大してきた。分割性能向上を狙った開発では、装置の加工速度向上に寄与する技術開発に取り組んできた。具体的には、レーザ波長の選択、レーザの出力アップ、液晶型空間光変調器応用によるレーザビームの分岐を実現し、分割性能向上を実現してきた。低コスト化を狙った開発では、製品のモジュール化、共通化による製品開発に 2013 年、2016 年と継続的に取り組んできた。



図 1-10 直近約 10 年の開発ロードマップ

出所：[6]より引用

1.3.2. ステルスダイシング技術を内蔵するダイシング装置

SD 技術を内蔵するダイシング装置の説明をする。SD 技術は、「SD エンジン」という名称で製品化がされているが、SD エンジン単独ではダイシング機能を果たすことができない。ダイシング機能を持つためには、SD エンジンを、ウェハの位置を高精度かつ高速に走査する、精密位置決め装置と組み合わせる必要がある。そのため、精密位置決め装置技術を保有する半導体製造装置メーカー（以下、装置メーカー）との業務提携を結び、ダイシング装置としての商品化を実現した。図 1-11 に SD 事業のサプライチェーンを示す。企業 Z は SD エンジンを製造し、装置メーカーへ納入する。装置メーカーは SD エンジンを精密位置決め装置に組み込み、SD 装置として半導体デバイスメーカーへ納入する。

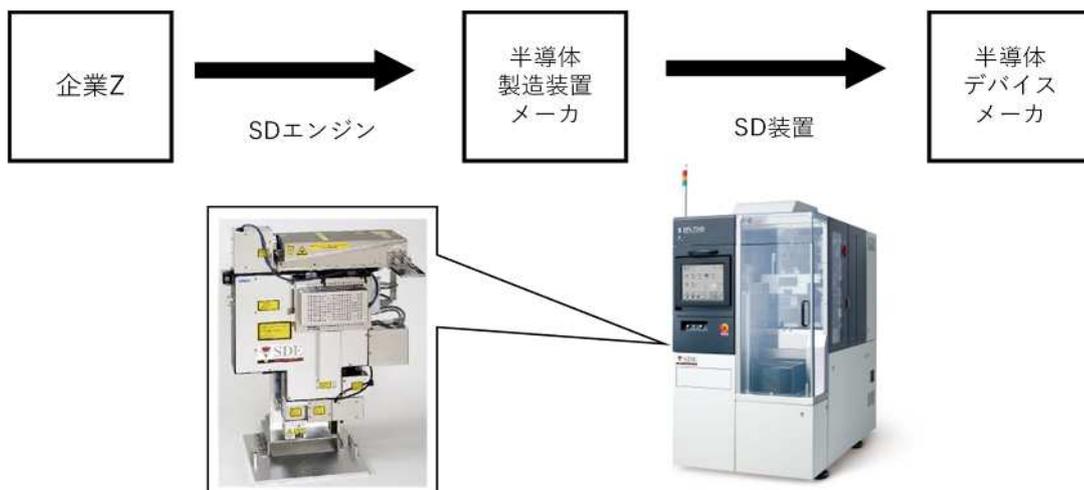


図 1-11 SD 事業のサプライチェーン

出所：[11]より引用し筆者作成

ここで、SD エンジンについて補足する。図 1-12 に SD エンジンの製品構成を示す[6]。製品は、SD エンジンユニット、電源ユニット、制御ユニットの3つのユニットにより構成されている。このうち、SD エンジンユニットは機能の中心部分であり、レーザヘッドとその周辺光学系、加工深さ位置の乱れを極力抑えるためのオートフォーカスユニットが集積化されている。電源ユニットは、SD エンジンユニットに内蔵されているレーザヘッドへの電源供給およびレーザ発振制御を行うユニットである。制御ユニットは、SD エンジン全体の制御をとりまとめるための専用ユニットである。さらに、SD エンジン全体の制御だけでなく、次節で述べるダイシング装置からの指令を受け、ダイシング装置と連動した加工ができるようにレーザ出力の調整を行う。これら3つをまとめてSD エンジンと呼ぶ。

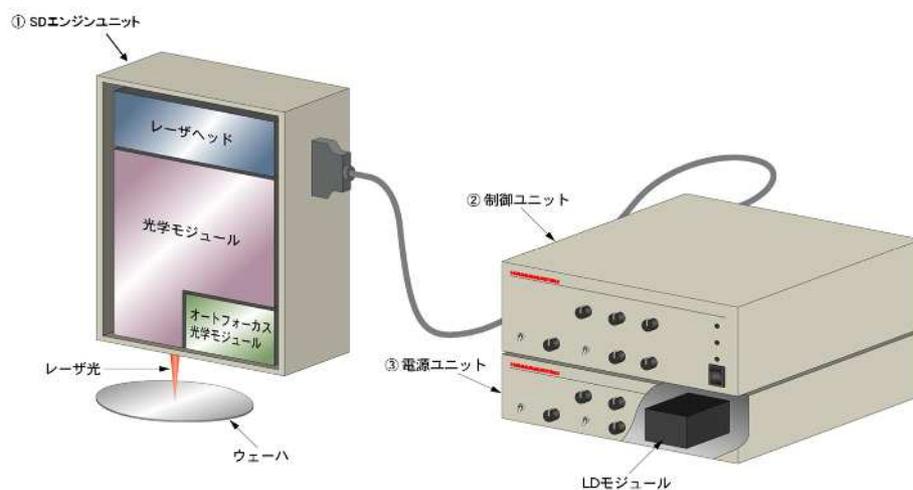


図 1-12 SD エンジンの製品概要

出所：[6]より引用

1.3.3. 業務提携の変遷

SD 事業の業務提携について説明する。前述したように、SD 技術は単独製品としては機能を果たすことができず、装置との連携が必要である。SD 技術は、レーザの制御技術や加工条件の導出にノウハウがあり、装置メーカーが単独で使いこなすことが困難な技術であった。これらの困難を乗り越えて製品上市を果たすためには、技術者同士の継続的な交流が必要であったため、販売先とは、綿密なすり合わせ開発が可能な業務提携をとった。これにより、迅速な製品開発ができるだけでなく、新規市場共創の相乗効果も得られた。そして、SD エンジンは業務提携先ごとに最適な設計が行われ、特長ある SD ダイシング装置となり、半導体デバイス製造メーカーへ納入されている。

上市から 2020 年までの業務提携の状況を図 1-13 に示す。業務提携関係は、装置メーカー U 社との間で 2004 年から始まった。2007 年に別の装置メーカー W 社と、2011 年に更に装置メーカー W 社と業務提携関係を開始し、サプライチェーンの幅の拡大に取り組んだ。しかし 2017 年 9 月をもって、最初に業務提携を結んだ装置メーカー U 社との業務提携関係を終

了した。2020年9月末現在の業務提携先は3社から2社に減少した。最終顧客である半導体デバイスメーカーへ直接製品を納入できない企業Zにとって、業務提携関係の終了による販路縮小は大きな脅威である。



図 1-13 業務提携先とこれまでの変遷

1.3.4. ステルスダイシング事業の問題点と課題

はじめに、SD 事業の問題点とその背景について述べる。SD 事業の抱える問題点は、図 1-9 で指摘したように、売上高が頭打ち傾向になってきていることである。そして、その背景として3つのことが考えられる。

第1に、SD 事業の市場であるダイシング装置市場全体の成長飽和である。図 1-14 にダイシング装置市場の動向を示す[16]。この資料から、2010年から2017年の間、ダイシング市場の規模はほとんど変化していないことがわかる。半導体装置市場全体は集積回路微細化の技術傾向に牽引され堅調な推移を示し、前工程の装置市場は伸びているものの、ダイシング装置が導入される後工程の装置市場は停滞している。このことから、ダイシング市場は成熟市場であり、競争が激しいことが想像される[17]。第2に、保有する特許保護期間の満了が迫っていることである。特許が切れると参入障壁が低くなり、新規参入者が出現するため、競争激化は必至である[18]。第3に、低コスト化を志向した製品開発に取り組んできたものの、価格による訴求力が不十分なことである。これら3つの点が複合的に作用し、SD 事業の競争力が低下したことが売上げ伸び悩みの背景にあると考えられる。

従って、今後のSD 事業の課題は、低下したSD 事業の競争力を高めることであり、そのために必要な「新しい技術」の開発が求められている。

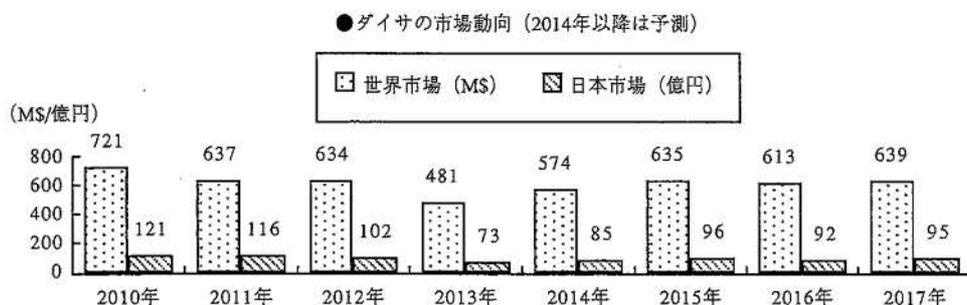


図 1-14 ダイシング装置の市場動向

出所：[16]より引用

1.4. 本博士論文の目的

本博士論文の研究目的について述べる。事業実践の目標は、主力事業である「ステルスダイシング事業の競争力を高めること」である。この目標に向け、本論文では技術開発を主題として3つの研究目的を設定した。表 1-2 に、本博士論文の研究目的と、設定した理由を説明する。

研究目的 1：競争力強化に繋げるための顧客ニーズの探索

SD 事業の競争力を強化するためには、SD 技術を使用している顧客のニーズを適切に把握する必要がある。本博士研究においては、SD 技術の顧客ニーズを発見するための手段として、参与観察による現場調査を選択し、これを筆者が中心となり実践する。

研究目的 2：SD 加工深さのリアルタイム測定を行うための、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術の開発

研究目的 1 で選択した SD 工程の現場調査の結果、SD 加工されたウェハの検査工程に手間がかかり、検査手法に問題が残されていることが分かった。この問題を解決するため、SD 加工深さを加工とリアルタイムに計測可能な新規技術開発が必要であると考えられた。条件を満たす光技術として、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術が適切であると考え、本技術を選択した。

研究目的 3：技術開発の成功要因の抽出

本博士研究では、産業側と学術側の連携を通じた技術開発に取り組み、SD 事業の競争力を高められる「新しい技術」を具体化することができた。そして、「レーザ応用の新しい何か」を確立するためには、「新しい技術」を今後も見つけ続けることが必要である。SD 事業

の更なる成長を目指す今、既存知識を深掘りするだけでなく、新しい知識や「新しい技術」を獲得し続けることが重要である。こうした中で本目的を設定した理由は、外部連携による技術開発のメリット・デメリットを踏まえたうえで、技術開発を成功できた要因を抽出しておくことが、今後のSD事業の成長、ならびに、あらゆる技術開発にとって有意義と考えるためである。

表 1-2 本研究の目的

事業実践の目標	ステルスダイシング事業の競争力を高めること		
本研究の目的	研究目的 1	研究目的 2	研究目的 3
	・競争力強化に繋げるための顧客ニーズの探索	・SD加工深さのリアルタイム測定を行うための、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術(TS-LCI)の開発	・技術開発の成功要因の抽出
手段	・SD技術が使われている製造現場への参与観察による調査	・測定システムの開発、基本特性の確認、光路長特性改善手法の提案 ・SD技術への応用検討	・筆者が取り組んだ技術開発活動の省察 ・上司へのインタビュー調査とその分析
結論	・製造現場の中で、「断面観察」作業が潜在的な問題であることに着目した ・SD加工深さを加工と同時にリアルタイムで測定することができれば、顧客のメリットとなることを明らかにした ・メリットは、時間や手間が短縮できること、加工不良によるウェハ損失の抑制が可能なことである	・先行技術であるフェムト秒レーザ光源技術とタイムストレッチ技術を深化させ、SD加工深さのリアルタイム測定に特化したTS-LCI技術を開発した ・15 MHzの繰返し速度、6.9 μmの位置分解を持つTS-LCIを開発し、SD加工の測定が可能であることを示した	・ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づき、3つの成功要因を抽出した ・要因1:製造部に浸透していた不確実なものへの挑戦を推奨する組織風土 ・要因2:上司によるDCの「感知」能力と「調整機能」の発揮 ・要因3:筆者によるDCの「感知」と「変容」能力の発揮

1.5. 本論文の構成

本章では、本博士論文の構成を説明する。本論文は、以下の7章により構成される。その構成を図1-15に示す。

第1章では研究に至る背景を説明し、本博士研究の目的について述べた。

第2章では、SD技術の課題を検討する。そのために、製造現場に密着した調査を行い、SD技術が抱える問題点と、それが問題視される背景を深く洞察する。そのうえで、SD技術の

顧客ニーズを明確にする。

第3章では、レーザ加工状態の計測技術として、低コヒーレンス干渉計測を使った応用例を紹介した。また、SD技術の抱える問題を解決し、顧客ニーズに対応する為に必要な技術として、タイムストレッチ技術について説明する。

第4章では、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測の測定系を構築する。測定系の概要と、基本特性の取得方法、信号解析手順、特性の改善方法について説明をする。この内容は、2019年の国際会議、Optical Metrologyにて発表し、日本光学会の雑誌、Optics Reviewに投稿論文として掲載された内容である。

第5章では、第4章で説明した測定系の、SD層検出への応用について説明するはじめに測定サンプルの説明をすし、次に測定系について説明する。そして、SD加工サンプルを本測定システムで測定し、得られたデータと解析結果を示す。

第6章では、第2章から第5章で取り組んだ技術開発を経営的視点から考察し、成功要因を抽出する。はじめに活動を省察し、筆者の活動と先行研究との比較分析をする。また、筆者の上司へのインタビュー調査を行い、筆者への期待を紐解き、何を以て成功といえるのかを定義する。そして、ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づく考察により、筆者が成功できた要因を抽出する。

最後に第7章では、本研究のまとめ、今後の課題と展望について述べる。

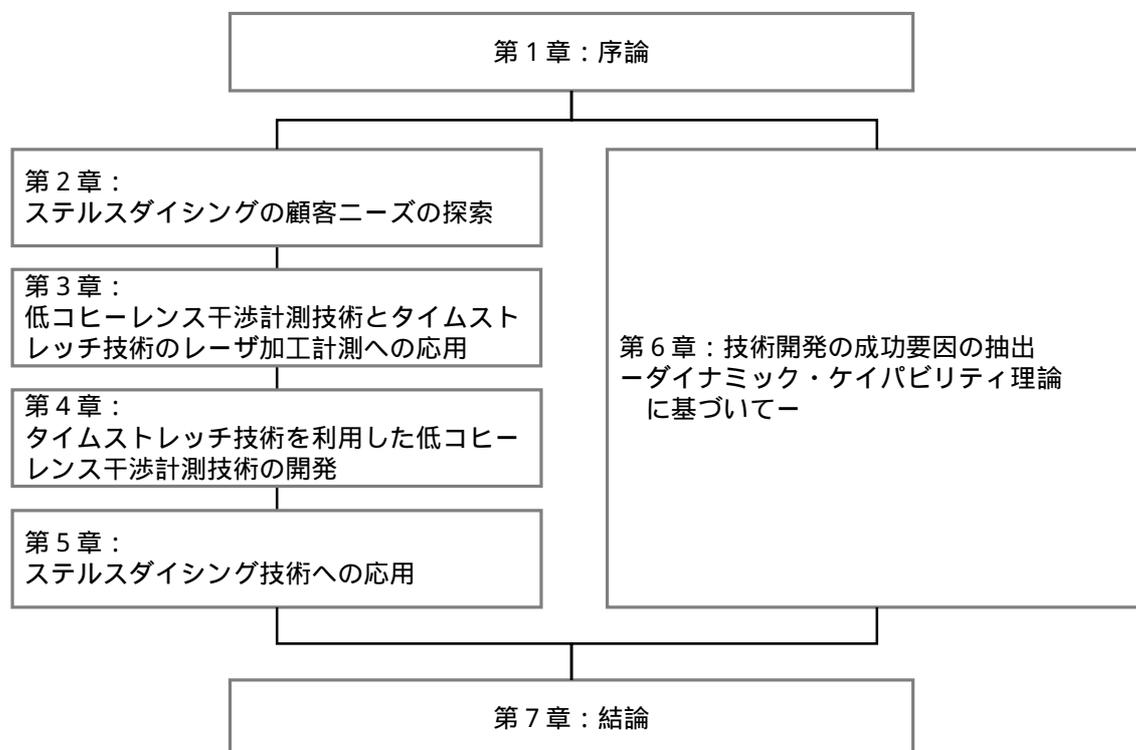


図 1-15 本論文の構成

第1章の参考文献・引用

- [1] 株式会社日立ハイテク web ページ, “半導体の部屋”; <https://www.hitachi-hightech.com/jp/products/device/semiconductor/metrology-inspection.html>, (最終閲覧日, 2021年7月7日) .
- [2] 湯之上隆, “半導体製造装置市場の最新動向”; *Electronic journal*, 2015年1月号.
- [3] 渥美一弘, “シリコンウェハにおけるステルスダイシング(SD)技術と実用化”; *日本機械学会誌*, Vol.110, No. 1068(2007) .
- [4] H. Kiyota, K. Hara, M. Jankowski, M. M. Fejer, “Numerical simulation and validation of subsurface modification and crack formation induced by nanosecond-pulsed laser processing in monocrystalline silicon”; *Journal of applied physics*, **127**, 085106 (2020) .
- [5] E. Ohmura, M. Kumagai, M. Nakano, K. Kuno, K. Fukumitsu, H. Morita, “Analysis of processing mechanism in Stealth Dicing of ultra thin silicon wafer”; *Journal of Advanced Mechanical System Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.2 Issue4, 540(2008).
- [6] 久野耕司, “ステルスダイシングによる微細加工技術の変遷と展望 24時間稼働できる高スループットレーザ加工装置”; *レーザ加工学会誌*, Vol.26, No.2(2019) .
- [7] N. Suzuki, X. Shiqin, K. Atsumi, N. Uchiyama, T. Ohba, "Laser dicing for higher chip productivity", 2016 11th International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology Conference (IMPACT)(2016) .
- [8] 河口大祐, 関本祐介, 清田大樹, 原圭祐, 伊ヶ崎泰則, “内部吸収型レーザダイシングによる機械信頼性向上”; *日本機械学会 2017 年度次大会講演論文集*, J2210202(2017) .
- [9] 灰本隆志, 松崎栄, 川合章仁, 泉隼人, 神谷庄司, “極薄シリコンチップの曲げ強度測定”; *日本機械学会 2019 年度次大会講演論文集*, J22306(2019) .
- [10] Disco corporation, “Dicing technologies for SiC”; *Disco technical review*, **TR16-04**(2016) .
- [11] 株式会社ディスコ web, “製品情報レーザソー”; <https://www.disco.co.jp/jp/products/laser/dfl7341.html>, (最終閲覧日, 2021年7月7日) .
- [12] 是松克洋, “内部加工型レーザダイシング技術(ステルスダイシング)の最新動向”; *光エレクトロニクス第130委員会 第304回研究会資料*(2017) .
- [13] 日経産業新聞 2001年8月5日記事.
- [14] “パッケージ技術で付加価値向上マイクに見る MEMS デバイス開発術”; *日経マイクロデバイス*, (2008) .
- [15] SEMI web, “世界半導体製造装置統計発表”; <https://www.semi.org/jp/node/jp-84791>, (最終閲覧日, 2021年7月7日) .

- [16] 電子ジャーナル社, '第 16 章 ダイサ', *Semiconductor Equipment Databook 2014 年版* (2014) .
- [17] J. B. Barney 著, 岡田正大 訳, '企業戦略論 全社戦略編', ダイヤモンド社(2003) .
- [18] M. E. Porter 著, 土岐 坤, 服部 照夫, 中辻 万治 訳, '競争の戦略', ダイヤモンド社 (1995) .

第2章 ステルスダイシングの顧客ニーズの探索

2.1. はじめに

第1章では、本博士研究に至る背景と研究の目的を説明した。そのなかで、SD事業の問題点として、「売上高の伸び悩み」を指摘した。そして、その背景として、ダイシング市場の飽和、特許切れ問題、低コスト対応への遅れについて現状を説明し、SD技術の競争力が低くなってきており、これを高めるための技術開発の必要性を述べた。

そして本章の目的は、顧客ニーズを探索することである。本研究では、問題点を把握するため、自社製品が使われている現場に入り込んで調査を行う。具体的には、半導体デバイス製造工場のダイシング工程に、筆者が5日間立ち入って調査を行い、自社製品の使われ方、競合技術製品の使われ方、自社製品に関わる前後の工程を観察し、作業員への聞き取り調査を行う。これらの調査により、工程の抱える技術的問題点、及びその背景を踏まえ顧客ニーズを明らかにする。

2.2. 現場観察による調査

2.2.1. 参与観察法

実施した現場観察による調査手法について説明する。本研究では調査のために参与観察法を用いた。この方法を用いた理由は、適切に課題を設定するため、問題点だけでなく、その背景を知る為である。参与観察法は、質的研究手法の1つである[1-3]。参与観察と対比される方法に、非参与観察法がある。図2-1にこれら2つの方法の違いを示した[4]。非参与観察法は、観察者は調査対象から距離をとり、観察対象の外部から観察を行う。これに対して、参与観察法は、研究者である観察者が、調査対象である集団の中に入り込み調査を行うことが特徴である。

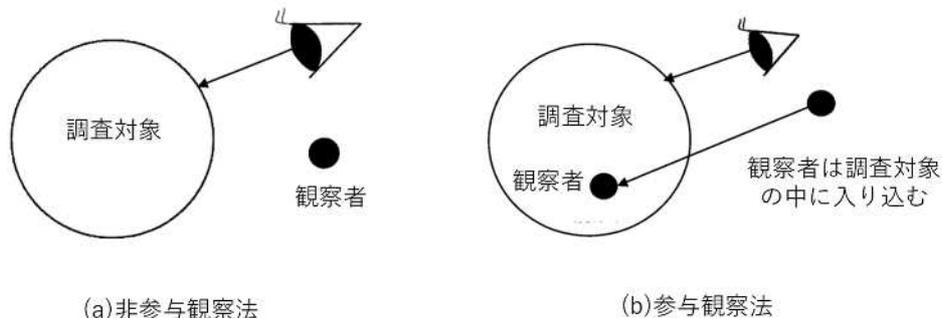


図 2-1 非参与観察法と参与観察法の違い

出所：[4]より引用

参与観察と非参与観察の特徴を説明する。非参与観察法のメリットは、調査対象との距離を保つ為、観察されていることの影響を極小化することが可能な事、デメリットは、隠れて観察するため倫理上の問題が残される事である。一方、参与観察法のメリットは、インタビューなど他の方法と併用することが可能で、得られたデータに内部視点の解釈ができることである。デメリットは、調査対象に入り込んで調査を行う為、観察者が調査対象に与える影響を完全には排除できないことである。

本研究で行った現場調査時の参与の度合いを説明する。参与観察と非参与観察との間は、さらに次の4つの類型に分類される[5][6]。これによると、参与の程度が大きい順に、(1)完全な参与者、(2)観察者としての参与者、(3)参与者としての観察者、(4)完全な観察者、としている。このうち、本研究では、「(2)観察者としての参与者」の立場をとった。そして、現場に入り込むことによる影響を極小化し、可能な限りありのままの製造現場の姿を記録することに留意した。本章の以降では、本章で行った参与観察法による現場観察を、簡単に「現場観察」として説明を進める。

2.2.2. 調査の対象

現場観察の対象は、企業 Z の中の製造部門 Y1 である。企業 Z は、光関連製品の製造、販売を主な事業とする企業で、調査当時の状況は、資本金は 349 億円、従業員数は 3270 人、売上高は 1018 億円である。また、企業 Z は事業部ごとの経営体制をとり、電子管事業、光半導体事業、画像計測機器事業、その他事業、中央研究所の 4 事業部と 1 研究所により構成されている。これらの事業部のうち、Y1 は光半導体デバイスの製造と販売を営む事業部 Y に所属する。企業 Z は事業部制をとるため、SD エンジンを作っている事業部 X と、SD エンジンを使って半導体デバイスを製造する事業部 Y は、社内であっても業者と顧客の関係にある。

光半導体デバイスとは、光を電気に変換する機能や、その逆に電気を光に変換する機能を持つ半導体素子のことである。表 2-1 に事業部 Y が取り扱う光半導体素子の分類、製品群、対象、応用例の一覧を示す。表 2-1 に示すように、事業部 Y は用途毎に特化した製品を擁し、多種多様な製品群を構築している。

表 2-1 事業部 Y の製品群一覧

分類	製品群	対象	製品名	応用例
受光素子	ポイントセンサ	高エネルギー粒子	SSD	産業用計測機器
		X線	X線フォトダイオード	非破壊検査・医用機器
		紫外	紫外用 Si フォトダイオード	公害分析機器
		可視	補正フィルタ付き Si フォトダイオード	照度計
		近赤外	フォト IC	光電スイッチ
		赤外	赤外高感度 Si フォトダイオード	YAG レーザモニタ
	フォトカウンタ		MPPC	放射線計測
	イメージセンサ	2次元	エリアイメージセンサ	非破壊検査装置
		1次元	リニアイメージセンサ	分光光度計
	位置センサ	分割型	分割型フォトダイオード	位置検出
非分割型		位置検出装置	測距装置	
発光素子		可視	赤外 LED	光ファイバ通信
		赤外	赤外 LED	ロータリーエンコーダ
モジュール		-	ミニ分光器	-

2.2.3. 調査の概要

次に、調査の概要を説明する。表 2-2 に、調査日時、実施者を示す。調査は 2016 年 8 月 29 日から同 9 月 2 日までの 5 日間、8 時 10 分から 16 時 40 分の間に実施した。調査実施者は筆者を含め総勢 4 名である。筆者の他に、筆者の所属企業の同僚であり現場調査の共同研究者である A 氏、筆者の所属企業の上司である B 氏、筆者所属大学教員である C 氏が同行し本調査に取り組んだ。

調査に際しては、筆者らは現場作業者の傍に立ち、作業内容、製造仕掛品の流れ等を記録した。作業内容にできる限り影響を与えないよう、作業内容についての質問がある場合のみ作業者に対して質問をする形式をとった。調査では、ダイシング装置の操作のみならず、ダイシング工程の作業全体に渡り、一通りを観察した。

表 2-2 現場調査の概要

調査日	8月29日	8月30日	8月31日	9月1日	9月2日
時間	8 : 10 - 16 : 40				
実施者	筆者	筆者 A	筆者 A B C	筆者 A	筆者

A 筆者所属企業の同僚であり、共同研究者
 B 筆者所属企業の上司
 C 筆者所属大学の教員



図 2-2 現場調査の様子
 右端が筆者

2.3. ダイシング工程の運営方針に影響を与えている背景

2.3.1. ダイシング工程の役割

はじめに、図 2-3 に事業部 Y におけるダイシング工程 Y1 の役割を説明する。事業部 Y の中には、半導体デバイスの製造と販売を主な事業とする、デバイス製造部門(Y2 - Yn)が存在する。矢印はモノの流れを示す。Y2 - Yn は Y1 にとっては顧客に相当する。つまり、顧客部門 Y2 - Yn から半導体デバイスウェハを受け入れ、ダイシング加工を専門に請け負っているのが Y1 である。Y1 は、BD 装置と SD 装置の両方を保有し、Y2 - Yn の要求仕様に沿い、半導体デバイスウェハのダイシングを行う。ダイシング後は、後続の工程で部品の組

み立てと最終検査を行い、Y2 - Yn に半導体デバイスとして返納する。

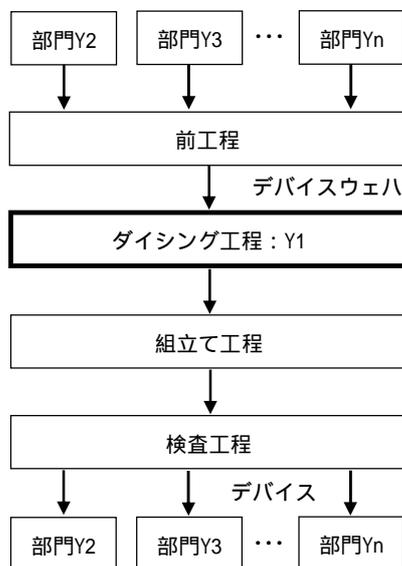


図 2-3 ダイシング工程と製造部門の関係

次に、表 2-3 に、Y1 の構成メンバーの役割を示す。Y1 は総勢 6 名で構成され、各メンバーは表のような役割に分類されていた。D 氏はダイシング工程の全体を取りまとめる責任者である。E 氏と F 氏は、SD の専任者であり、SD のダイシング装置の操作、及び工程内検査を担当していた。一方、G 氏は BD の専任者であり、BD のダイシング装置の操作、及び工程内検査を担当していた。H 氏は、BD と SD に共通する、デバイスウェハをダイシングテープに貼り付ける作業の専任者であった。そして、I 氏は SD 装置に関する、難易度が高い新規加工条件の開発専任者である。ダイシング工程 Y1 のスケジュールは工程の責任者である D 氏によりすべて統括されていた。

表 2-3 ダイシング工程の構成員と役割

構成メンバー	役割	具体的作業内容
D	ダイシング工程の責任者	工程調整、異常時対応、工程改善、自動化、インプット会議
E	SD 工程担当	装置操作、装置保守、抜き取り検査、加工後検査、SD レシピ構築
F	SD 工程担当	
G	BD 工程担当	装置操作、装置保守、抜き取り検査、加工後検査、BD レシピ構築
H	テープ貼り工程	装置操作、装置保守、工程内検査、テープ貼り
I	SD 条件開発	レシピ構築、インプット会議

2.3.2. ダイシング工程の運営方針

ダイシング工程 Y1 の運営方針を明らかにする為、工程 Y1 への参与観察、および工程責任者である D 氏への聞き取り調査を行った。そして、工程 Y1 の 2 つの工程の使命、運営方針と、これらに大きな影響を与えている背景を明らかにすることができた。また、運営方針に沿った具体的施策について、観察することができた。表 2-4 に、ダイシング工程の使命、運営方針、具体的施策と、それらの背景を示した。以下にて詳しく説明する。

表 2-4 ダイシング工程の運営方針と施策

背景	<ul style="list-style-type: none"> ・ 事業部 Y の製品のダイシング工程を一手に請け負う ・ 極少量多品種に対応できる生産体制 	
使命	<ul style="list-style-type: none"> ・ 生産計画の遵守 	
運営方針	(1) ダイシング工程起因の不良ゼロ	(2) 異常の早期検知
具体的施策	<ul style="list-style-type: none"> ・ 始業前、引継ぎ時の装置点検の徹底 ・ 段取り変更時の検査 ・ テープ貼り工程検査の徹底 ・ 引継ぎ打合せによる情報共有 ・ ポカヨケの工夫 ・ 堅牢な加工レシピ構築 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 始業前、引継ぎ時の装置点検の徹底 ・ 工程内検査、抜取り検査の実施 ・ 異常発生時の、現場主導による迅速な対応

はじめに、工程の使命、運営方針と、これらに影響を与えている背景を説明する。背景となっていることは 2 つある。第 1 は、事業部 Y の製品のダイシングを Y1 が全て請け負っていること、第 2 は、極少量多品種に対応する生産体制をとることである。図 2-3 で説明したように、ダイシング工程では、事業部内全ての製造部門からのデバイスウェハの加工を担う。そのため、事業部全体の生産性は、ダイシング工程 Y1 の生産性と連動している。

Y では表 2-1 に示すような多種類の製品を生産している為、Y1 に加工依頼されるデバイスウェハの種類は非常に多い。その一方、1 種類のデバイスウェハのロットサイズは非常に小さい。1 ロットがウェハ数枚で構成されている製品も存在する。図 2-4 に、テープ貼り工程を完了し、ダイシング工程への投入を待つウェハを示す。1 枚のデバイスウェハが予め 1/4 の小片に分割され、その小片が改めてダイシングテープに貼り付けられて、ダイシング工程へ投入されていることが現場観察により分かった。極少量の生産ロットに対応するため、このような特殊な方法がとられていた。

次に、ダイシング工程の使命と運営方針、これに沿う具体的な施策について説明する。ダイシング工程の使命は、生産計画を遵守する事である。そのため、工程の方針は、ダイシング工程起因の不良ゼロ、異常の早期検出、である。そして、現場では、表 2-4 に示すような具体的な施策を確認することができた。この中で、段取り変更時の検査は、工法に関わらず手間をかけて実施されていた。加工レシピ変更時の最初や、ロット単位の変更時に加工する最初の 1 枚目については、必ず「抜取り検査」を実施し、装置に異常のないことを確認して

いた。また、現場調査の期間中に、BD 加工で小さな異常が検出された。すると、異常が発生したその場で、現物を見ながら、G 氏と I 氏により原因や解決手段についての相談がされていた。不良検出のタイミングを早めることで不良発生の拡大を抑え、対処方法を現場に任せることで迅速な PDCA 対応が可能となり、納期遅延を発生させない体制が構築されていた。

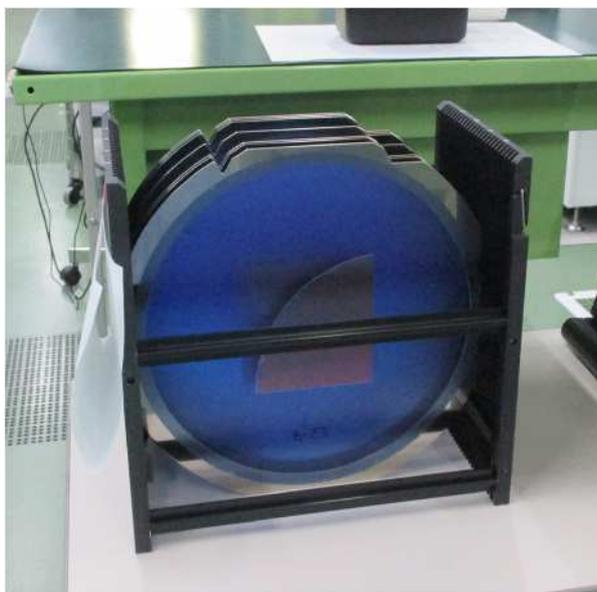


図 2-4 ダイシング加工投入を待つウェハが収納されているカセット

2.3.3. ダイシング工程の作業内容

次に、ダイシング工程の作業内容を説明する。ダイシング工程では、BD、SD の両方の工法を管轄し、デバイスウェハごとに使い分けている。但し、どちらの工法で行うかは、事前に十分な検証がなされる。図 2-5 はダイシング工程の作業フローである。BD、SD の 2 つの工法について表し、上段が BD、下段が SD である。「ウェハ受け入れ」、「日常点検」、「レシピ検討」、「ダイシングテープ貼り」、「加工後処理」の作業は両方の方法にある。それ以外の作業は BD と SD で異なる。BD、SD ごとに詳しく説明する。

はじめに BD の説明をする。BD は、「日常点検」、「ブレード交換」、「テープ貼り」、「抜き取りダイシング加工」、「純水洗浄」、「抜き取り外観検査」、「ダイシング本加工」、「外観検査」、「後処理」の順に行われる。日常点検、レシピ設定、ブレード交換では、作業に伴いベアウェハの加工検査を実施し、交換の健全性を確認する。全工程のうち BD に特有なのは、「ブレード交換」、「純水洗浄」である。このうち、ブレード交換は Y1 の作業者が実施し、ブレード交換後にブレードのドレッシング、ベアウェハの加工検査を実施し、装置状態の健全性を確認する。

次に、SD の説明をする。SD は、「日常点検」、「テープ貼り」、「抜き取りダイシング加工」、「テープ拡張」、「抜き取り外観検査」、「ダイシング本加工」、「外観検査」、「後処理」の順に

行われる。「日常点検」では、作業に伴いペアウェハの加工検査を実施し、装置状態の健全性を確認する。

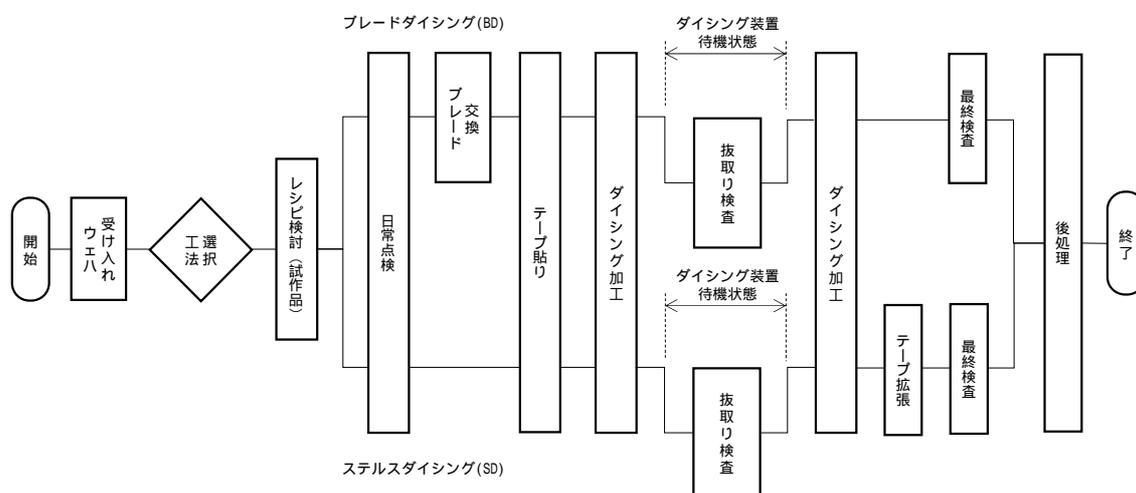


図 2-5 ダイシング工程の作業フロー
上段：BD, 下段：SD

2.3.4. ダイシング工程への要求事項

ダイシング加工への要求される項目を説明する。大きく、品質とコストが要求される。表 2-5 にダイシング加工への主な要求項目を示した。表の中の「○×」は、その要求項目に対して向いている項目を「○」、向いていない項目を「×」で示した。要求項目は、コスト面と品質面に分けられる。具体的に、コスト面は、装置価格、スループット、品質面は、加工ラインの直線性、チップング、発塵、抗折強度、である。こうしてみると、BD と SD ではコストと品質は概ねトレードオフの関係にある。よって、コストが重視される場合には BD が、品質が重視される場合には SD が選ばれる傾向にある。

表 2-5 ダイシング加工要求項目に対する BD と SD の比較

要求項目		BD	SD
コスト面	装置価格	○	×
	スループット	○	○
品質面	加工ラインの直進性	×	○
	チップング	×	○
	発塵	×	○
	抗折強度	×	○

出所：[7]より引用

品質面について説明する。品質面は、SD は BD に対して優れている。特に SD に専用設計されたデバイスウェハはその傾向が高い。SD 優位の主な理由は、SD はレーザにより微少サイズの加工キズを作ることが可能なためである。この特長を活かし、SD は加工ラインの品質に対する要求が非常に高く、直線性が高いことと、ムシレと呼ばれる加工不良が無いことが要求される。直線性とは加工ラインが蛇行している範囲で表され、BD では 30 μm (P-V 値)以下に対して、SD では 10 μm (P-V 値)、といった具合で、SD は直線性がより高い。但し、高い加工品質を得るためには、デバイス設計の段階で、例えばダイシングストリート上に金属膜を使わない設計にするなど、SD 加工が対応可能な仕様に落とし込む必要がある。最近では、SD による加工の直線性が高い特長を積極活用し、ダイシングストリート幅を狭くして 1 枚のウェハから取れるチップ数が増えるよう SD 加工専用デバイスウェハが設計されている。

コスト面について説明する。コスト面は、SD は BD に比べて劣っている。理由は、装置価格が高いこと、前後の工程にボトルネックが存在すること、である。コストの概念は、CoO(Cost of Ownership)で考えられている。CoO は「半導体製造の設備投資や運営の経済性の評価基準で、製造装置の価格、生産性、信頼性、歩留まりなどから製品のコストを算出する。」と定義される[8]。具体的には、 $\text{CoO} = (\text{全コスト} / \text{良品チップ数})$ で表され、「1チップの良品を得るために必要なコスト」と考えることができる。第 1 章の開発の経緯に説明したように、自社ではこれまで、製品そのものの低コスト化に加え、装置の高スループット化に注力してきた。この努力により、SD は BD の数倍のスループットを達成したにも関わらず、十分なコストメリットが受けられていない。そしてその原因が、ダイシング加工自体のスループット自体ではなく、ダイシング加工の前後の作業にあることを、現場観察により明らかにすることができた。次節で詳しく説明する。

2.4. ダイシング工程の問題点

2.4.1. 問題が残されている作業

工程全体では全体最適化がなされ、作業員間の連携や日程調整など、非常に高度な精緻化がなされており、工程全体を眺めると問題は見当たらない。しかし、現場観察を行うことで、細部にとり残された問題を見つけ出すことができる。観察の結果、3つの作業に問題が残されていることが明らかになった。それらを表 2-6 に示す。問題を抱えている作業は、「抜取り検査」、「レシピ検討」、「作業員育成」の3つである。問題の内容は、全ての項目で共通して、「時間が掛かること」であった。これらの問題のうち、本研究では「抜取り検査」と「レシピ検討」に着目し、その更なる要因を明確にすることとした。

表 2-6 問題を抱える SD の作業とその内容

作業	内容
(1) 抜き取り検査	作業に人の手間と長い時間が掛かっており、検査の間装置の空転がみられ、工程のボトルネックとなっている
(2) レシビ検討	BD に比べて SD では、長い検討時間が必要である
(3) 作業員教育	BD に比べて SD では、長い教育期間が必要である

2.4.2. 「抜き取り検査」作業

「抜き取り検査」の問題点は、SD では長い時間が掛かり、ボトルネックとなっている事である。人手がかかり、ダイシング装置は待機状態となり、装置稼働率が低下していた。図 2-6 に「抜き取り検査」の様子を示す。図から分かるように、「抜き取り検査」は、ダイシング加工済のウェハに対して作業員が顕微鏡観察により行う検査である。そして、その目的は装置に異常が無いことを確認する事である。「抜き取り検査」は BD でも SD でもどちらの工法でも実施されるが、SD では BD に比べ検査に長い時間がかっていた。その時間は概ね、BD では 1 分間であるのに対し、SD では 10 分間であった。この違いの根本的な原因は、SD では「断面観察」が必要な為であった。



図 2-6 抜き取り検査の作業風景

SD 加工で「断面観察」が必要な理由は、装置の小さな異常にできるだけ早く気づき、不良発生を未然に防ぐ為である。ダイシング工程で行われている「抜き取り検査」の流れを図 2-7 に説明する。上段が BD の、下段が SD の手順である。「抜き取り検査」は、各ロット単位の 1 枚目の加工ウェハに対して実施する。SD の場合はテープ拡張器へウェハを持って移動し、テープ拡張を行ってチップに分割する。作業員は分割工程後のウェハを目視検査し、分

割状態を判断する。次に光学顕微鏡へ移動し、加工ラインの「直進性検査」、「発塵検査」を行う。ここで、加工ラインの直進性に異常が確認された場合には、原因を追及するため「断面観察」を行う。もし仮に装置に重大な異常が有り、1枚目の検査を行っていなかった場合、加工の失敗により1ロットのウェハ全部を仕掛損失してしまう可能性が有る。しかし、ロットの最初のウェハに対して抜き取り検査を行うことで、加工失敗のリスクを最大でウェハ1枚に抑制することができる。そのために「断面観察」を行っている。

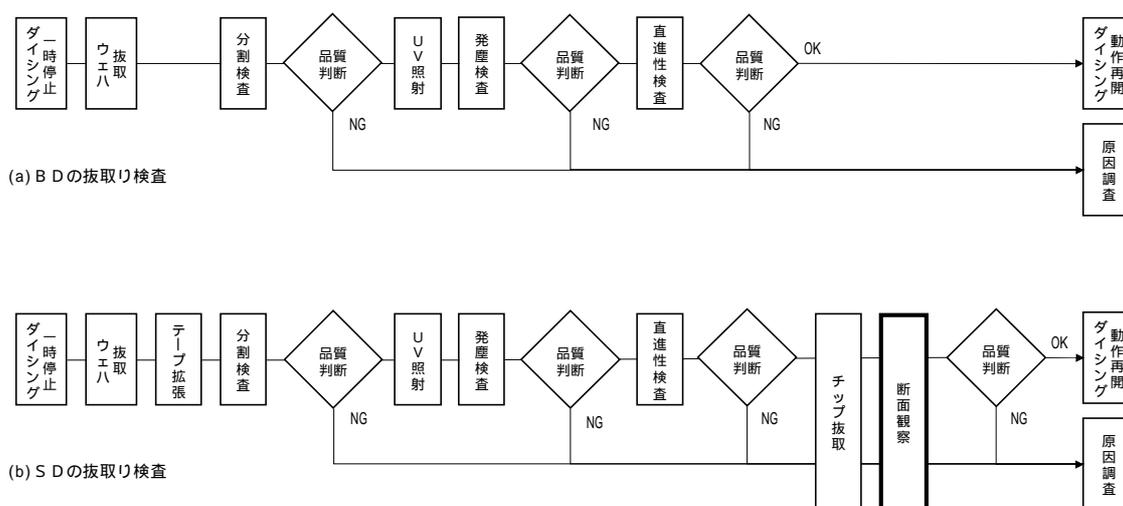


図 2-7 抜き取り検査の作業フロー
(a)BD, (b)SD

2.4.3. 「レシピ検討」作業

「レシピ検討」においても、SD では BD に比べ長い時間が掛かる事が問題となっている。この問題は、I 氏への聞き取り調査により明らかとなった。流れ品の製品に対する「レシピ検討」は、半導体デバイスの設計段階で済んでいるため Y1 の負担にはならない。負担となるのは、飛込で依頼される製品認証前の試作品など、1点モノへの対応時である。試作品の加工レシピ検討作業は Y1 の作業員、E 氏、F 氏、I 氏が担当する。担当者は、机上検討だけでなく、実際にダイシング加工をしてみて加工レシピを決定する。デバイス膜を製作していないベアウェハや、場合によりダミー膜付きウェハをダイシング加工し、得られた加工品質が要求内容に適合しているかの詳しい検証が行われる。この「レシピ検討」は BD に比べ、SD ではより多くの時間が必要であるため工程に負担がかかり、問題となっていた。時間が掛かっている原因を確かめるため、その手順を調査した。

「レシピ検討」の具体的な手順を、図 2-8 に手順を示す。上段が BD の手順で、下段が SD の手順である。SD の場合について手順を説明する。図 2-3 の顧客部門である Y2-Yn からの要求仕様を満たすように、机上検討して仮のレシピでベアウェハの加工を行う。そのウ

エハを、前節で説明した抜取り検査の要領に沿って品質の良否を判定する。判定の際、SDでは「断面観察」を行う。加工品質が要求に沿えない場合には、条件を微修正して、再度ウェハ加工以降の手順のPDCAループを回す。このループは品質が要求を満たすまで繰り返される。加工品質が要求を満たせば、加工レシピが決定する。以上がSDの手順である。BDとSDの違いを説明すると、「テープ拡張」と「断面観察」がBDでは不要である。

「レシピ検討」にかかる平均的な時間は、BDのレシピ検討は30分以下であるのに対し、SDのそれは熟練した作業員でも2時間である。この差が生まれている理由は、レシピの堅牢性を確認するため、SDでは生産品の「断面観察」が必須なためである。「レシピ検討」はダイシング工程とは並行して実施可能な作業であるため、ボトルネックにはならないものの、「断面観察」の作業が工程作業員の負担となっていることが分かった。

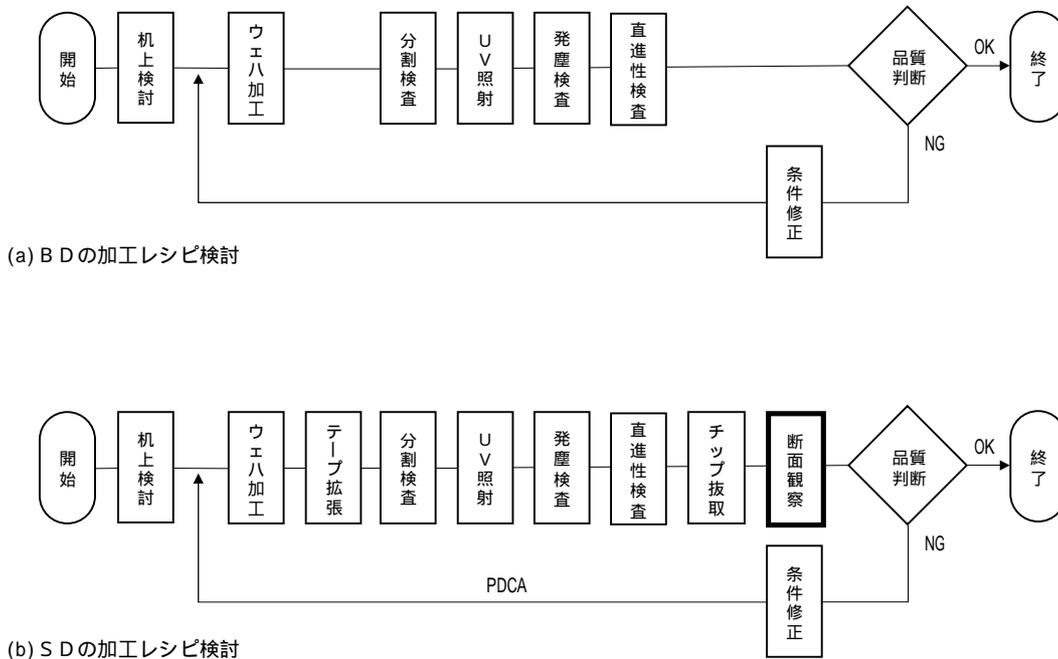


図 2-8 レシピ検討作業の比較
(a)BD, (b)SD

2.4.4. 共通する要因「断面観察」作業

SDでは、「抜き取り検査」、「レシピ検討」の両方で時間が掛かり、その共通の要因は「断面観察」であった。「断面観察」での検査項目は多数ある。例えば、SD層の幅、SD層の深さ位置、亀裂長さ、端面凸凹、などである。一方、SD加工の最も深刻な不良モードはチップの未分割である。そして、その主要因は、SD層が形成されている加工深さ位置の異常である。調査対象の生産品では、チップ未分割のほぼ100%をこの原因が占めていた。すなわち、ウェハ分割作業の前にSD層が形成されている深さ位置を検査することができれば、分割可否を事前に察知することができる。

加工深さ位置の異常について説明する。図 2-9 に、SD 層の加工深さ方向が正常な場合と、異常な場合のウェハ断面の様子を示す。正常な場合は、加工ラインの範囲に渡り加工深さが一定となっている。一方、異常な場合は、加工ラインの範囲で加工深さが一定ではなく、深さ方向に大きくうねっているのが分かる。この状態は、SD 層の蛇行と呼ばれる。

このような SD 層の蛇行は分割不良の原因となる。第 1 章で説明したように、SD 層からの亀裂がウェハ表面・または裏面まで到達することができないため、全数分割できずにチップが割れ残る不良が発生する。このような蛇行が発生する原因は、装置や工程の異常である。具体的には、加工深さ位置を一定に保つオートフォーカス機能がうまく機能していない場合や、ダイシングテープとウェハの間に隙間が残っている場合である。こうした異常は、デバイスの種類切り替え時や、ロットの切り替わりを契機に発生することがあるため、Y1 ではロットの切り替わり時に検査を実施し、不良発生予防に努めていた。



(b)異常発生時のウェハ断面



(a)正常時のウェハ断面

図 2-9 SD 加工後ウェハ断面の比較

(a)正常時, (b)異常時

2.5. 製造現場のニーズ

ここでは、製造現場のニーズを示す。表 2-7 に、ダイシング工程 Y1 のあるべき姿と現状の分析から問題を指摘し、ニーズを示す。あるべき姿は、不良を出さず、かつ、ムダのないスムーズな工程である。これに対し現状は、「抜き取り検査」と「レシピ検討」に手間と時間が掛かっている。そして問題は、「断面観察」作業に依存した検査手順になっていることである。この問題を解決するためには、「断面観察」作業に依存した検査手順からの脱却を図る必要がある。従って、ニーズは、分割工程の前に、SD 層の深さ位置を測定することとした。

表 2-7 ダイシング工程 Y1 のニーズ

背景	<ul style="list-style-type: none"> ・事業部 Y の製品製造のダイシング工程を一手に請け負う ・極少量多品種に対応できる生産体制
使命	<ul style="list-style-type: none"> ・生産計画の遵守
運営方針	<ul style="list-style-type: none"> (1) ダイシング工程起因の不良ゼロ (2) 異常の早期検出
あるべき姿	<ul style="list-style-type: none"> ・不良を出さず、かつ、ムダのないスムーズな工程
現状	<ul style="list-style-type: none"> ・「抜き取り検査」と「レシピ検討」に手間と時間が掛かる
問題点	<ul style="list-style-type: none"> ・「断面観察」に依存した検査手順
ニーズ	<ul style="list-style-type: none"> ・分割工程の前に、SD 層の深さを測定すること

このように、顧客ニーズは、分割工程の前に、SD 層の深さを測定することである。もし、加工と同時に SD 層の深さをリアルタイムで測定できる方法があれば、断面観察にかかる手間を大幅に省くことが可能である。これに適した、SD 加工ヘッドと深さ測定装置の光学ヘッドの配置を図 2-10 に説明する。(a)別軸配置では、2つのヘッドを加工ライン上に並べて配置し、レーザ加工の直後を測定する。一方、(b)同軸配置では、加工用レーザと深さ測定用レーザをダイクロイックミラーで合波する構成で、加工のその場を加工と同時に測定する。

(a)別軸配置では、加工の直後に SD 層の深さ測定をするため、抜き取り検査における断面観察の代替手段と成り得る。この検査方法では、加工しながら SD 層深さを測定し、異常が発見された場合には即座にアラームを挙げ加工装置を止める。レーザ加工をしながら SD 層の深さ測定をするため、完全に置き換えることができれば、10 分かかっていた抜き取り検査の時間をゼロにすることも可能となる。

(b)同軸配置では、加工と同時に、加工している場所の SD 層の深さ測定をするため、レシピ検討作業における、条件修正と断面観察の PDCA ループの回数の削減が期待出来る。これにより、1 条件の導出にかかる 2 時間かかっていた手間を、30 分程度に短縮することが期待される。

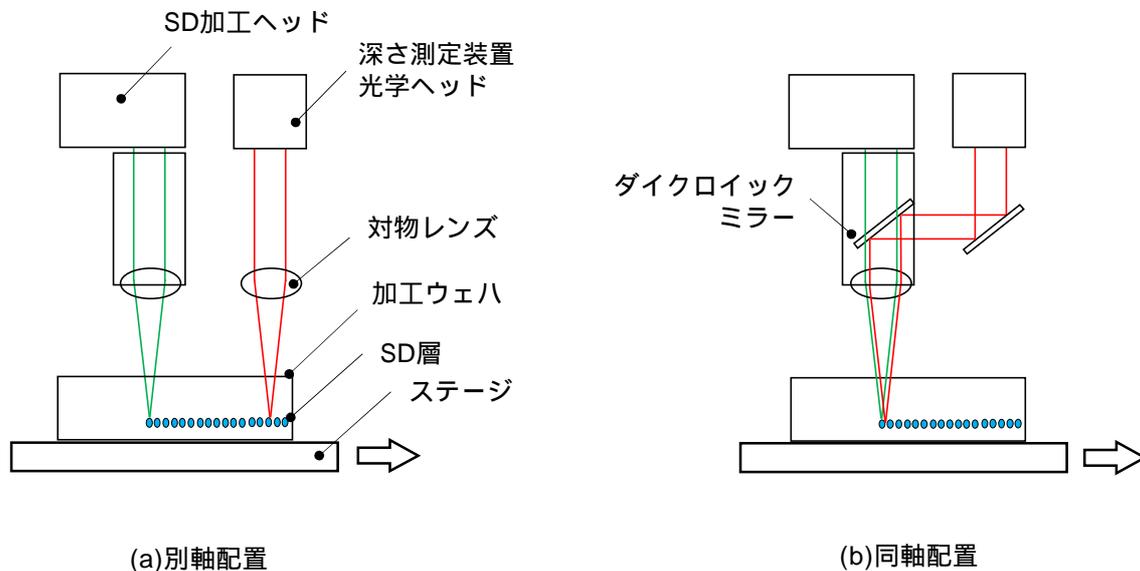


図 2-10 深さ測定装置の配置
(a)別軸配置, (b)同軸配置

最後に加工と同時のリアルタイム測定のために必要な測定速度を求める。2.4.4.節で説明したように、チップ未分割不良の原因のほぼ 100 %が SD 層の深さ方向の蛇行である。SD 層の蛇行をリアルタイム測定により検出するためには、測定対象である SD 層の横方向蛇行の長さ、加工の送り速度の 2 つの条件を考える必要がある。加工に異常がみられる時、SD 層の蛇行は、図 2-9(b)を改めて参照すると、その長さは百から数百 μm 程度である。この蛇行を検出するためには、横方向に 10 μm 程度のサンプリング間隔が必要となる。加工の送り速度については、現在 2,000 mm/sec が可能なダイシング装置が発表されている[9]。装置高速化への要請は非常に高く、今後も更なる高速化が進むことは必至である。これらの 2 つの条件を合わせて考えると、2,000 mm/sec の送り速度の時に 10 μm 間隔で測定をするために、200 kHz の繰返し速度が必要である。

2.6. 結論

本章の結論を述べる。本章では、はじめに現場調査手法を説明し、参与観察法のメリットとデメリットを説明した。次に、筆者が行った参与観察法による現場調査の結果を示した。調査の中で行われたヒアリングでは、調査の対象組織であるダイシング工程のおかれている組織的な立場や、取り扱い製品に対する責任、同工程への要求事項等の背景とともに、ダイシング工程の運営方針や使命を明らかにすることができた。また、ダイシング工程および前後に係る作業を観察し、「抜き取り検査」と「レシビ検討」の2つの作業に潜在的な問題点があることを明らかにした。さらにその根本的な原因は「断面観察」に依存した検査手順であることを指摘した。

最後に、上記で指摘した問題と工程のあるべき姿を対比し、製造現場のニーズを明らかにした。すなわちニーズは、「分割工程前に、レーザ加工とリアルタイムでSD層深さを測定すること」である。それには、測定の繰り返し周波数が200 kHz以上の手法が必要である。

第2章の参考文献・引用

- [1] 小田博志, “エスノグラフィー入門 <現場>を質的研究する”, 春秋社(2010).
- [2] 金井壽宏, 佐藤郁哉, ギデオン・クンダ, ジョン・ヴァン・マーネン, “組織エスノグラフィー”, 有斐閣(2010).
- [3] 小池和男, 洞口治夫, “経営学のフィールド・リサーチ 「現場の達人」の実践的調査手法”, 日本経済新聞社(2006).
- [4] 武田信秀, “中小企業を進化させるための中小企業経営者進化論 -光産業創成大学院大学を活用した実践的検証-”(2016).
- [5] Uwe Flick (原著), 小田博志, 山本則子, 春日常, 宮地尚子(翻訳), “質的研究入門 <人間科学>のための方法論”, 春秋社(2002).
- [6] 高橋正泰, 大月博司, 清宮徹, “経営組織論シリーズ 3 組織のメソドロジー”, 学文社(2020).
- [7] 株式会社ディスコ web, “ステルスダイシングによるサファイア加工のメリット”, <https://www.disco.co.jp/jp/solution/library/laser/sapphire.html> (最終閲覧日, 2021年7月1日).
- [8] 株式会社 SCREEN ホールディングス web, “企業価値を高める経営環境を推進するために”, <https://www.screen.co.jp/sustainability/special-report/sp-1> (最終閲覧日, 2021年7月1日).
- [9] 日本経済新聞, “ディスコ、ステルスダイシングレーザー「DFL7362」を開発”, 2017年12月6日付.

第3章 低コヒーレンス干渉計測技術とタイムストレッチ 技術のレーザ加工計測への応用

3.1. はじめに

本博士研究ではこれまでに、第1章では本博士論文の背景を説明した。そして、レーザ加工技術の一つであるステルスダイシング(SD)技術とSD事業を説明し、本博士論文の目的を示した。第2章では、「分割工程の前に、レーザ加工とリアルタイムでSD層深さを測定すること」がSD加工の顧客ニーズであることを明らかにした。また、その測定には、200kHz以上の繰り返し速度が必要であることを説明した。

そして、本章の目的は、SD加工を200kHzで測定可能な技術を示すことである。低コヒーレンス干渉計測法(Low coherence interferometry, 以下LCI)は、レーザ加工の深さ方向の測定方法として既に実用化されている[1]。しかし、SD加工を測定するためには測定速度が不足する。そこで筆者は、より高速な測定速度を実現できる、タイムストレッチ分光技術に着目した。本章では、以下の構成により、SD加工を測定するため、タイムストレッチ技術を使った低コヒーレンス干渉計測技術が必要な理由を説明する。

3.2.では、LCIの一般的な説明をする。LCIの4つの方式を示した上で、先行研究を参照し、測定速度などの特徴を比較する。3.3.では、タイムストレッチ分光技術について、動作の原理と特長を説明する。最後に3.4.にて、これらの内容をまとめる。

3.2. 低コヒーレンス干渉技術

3.2.1. 光干渉計測と可干渉距離

LCI は、光干渉信号から、対象物の深さ方向の位置情報を取得する測定方法である。はじめに、光干渉計測の原理を説明する。図 3-1 に、マイケルソン型干渉計の構成を示す。干渉計は、光源、ビームスプリッタ、固定した反射ミラー、可動反射ミラー、光検出器で構成される[2]。光源をビームスプリッタに入射して、固定ミラーと可動ミラーの2つの光路に分岐する。それぞれのミラーで反射され、ビームスプリッタ上で再び重なり光検出器へ入射する。光源 - 固定ミラー - 光検出器の伝搬距離を L_1 、光源 - 可動ミラー - 光検出器の光路を L_2 とし、それぞれの光路を経て光検出器に入射する光の電界を E_1 、 E_2 とする。ここで、 E_1 、 E_2 はそれぞれ、

$$E_1 = A_1 \exp[i(\omega t - \varphi_1)] , \varphi_1 = 2\pi k L_1 , \quad (3.1)$$

$$E_2 = A_2 \exp[i(\omega t - \varphi_2)] , \varphi_2 = 2\pi k L_2 , \quad (3.2)$$

$$k = \frac{1}{\lambda} , \quad (3.3)$$

と表される。 A_1 、 A_2 は光の振幅、 ω は角周波数、 k は波数、 λ は光の波長、 φ_1 、 φ_2 は光伝搬に伴う位相変化を表す。これらの式を用いると、光検出器の位置における光強度 I は、

$$\begin{aligned} I &= |E_1 + E_2|^2 \\ &= E_1^2 + E_2^2 + 2E_1 E_2 \cos(2\pi k \Delta L) , \end{aligned} \quad (3.4)$$

と表すことができる。ここで、 $\Delta L = L_1 - L_2$ で、光路 1 と光路 2 の間の光路長差である。この式の中で、第 1 項、第 2 項は整流成分、第 3 項が干渉光成分を表す。この項から、干渉信号成分は、光路長： ΔL 、または波数： k に伴って強度変化することがわかる。

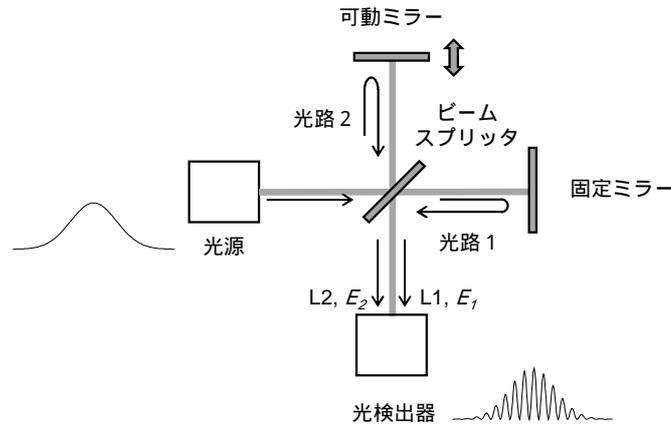


図 3-1 マイケルソン型干渉計

次に、可干渉距離について説明する。レーザー光の特長の1つは、可干渉性が高いことである。可干渉性は「コヒーレンス」とも呼ばれ、光がどのくらい離れても干渉ができるかの度合いである[3]。可干渉距離 l_c （：コヒーレンス長）は、

$$l_c = \frac{4 \ln(2)}{\pi} \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \approx 0.88 \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda} \quad (3.5)$$

で表される[2]。ここで、 λ_0 は光源の中心波長、 $\Delta\lambda$ は光源の波長幅である。この式から、波長幅が広くなる程 l_c は短くなり、逆に波長幅が狭くなる程 l_c は長くなる事が分かる。

3.2.2. 低コヒーレンス干渉計測の原理

LCIの原理を説明するため、インターフェログラムの説明をする。インターフェログラムとは、図 3-1 の 2 光路干渉計において、可動ミラーの位置を動かして、光路長差 ΔL をゼロから徐々に増やしながら光強度を計測し、横軸に光路 1 と光路 2 間の光路長差、縦軸に光強度をプロットしたグラフである。

単色光源を用いた場合のインターフェログラムの様子を図 3-2 (a)に示す[4]。単色光源を用いた場合に得られるインターフェログラムは、山と谷が延々と繰り返される。光路長差がゼロの位置から光路長差が増えに従い光強度は徐々に弱くなり、光路長差が 1/2 波長となる位置で光強度は最小となる。この点からさらに光路長を増やすと光強度は増加に転じ、光路長差が 1 波長の点で光強度は再び最大値となる。単色光源を用いた場合は、このような光強度の山と谷が繰り返し続き、(a)のような干渉縞を示すインターフェログラムとなる。このように、単色光源を用いた場合には、光路長差を大きくし続けても信号強度の変動が収束しない。この理由は、単色光源の可干渉性（コヒーレンス）が非常に高いためである。

次に、光源に広帯域光源を用いた場合のインターフェログラムの様子を図 3-2 (c)に示す。

広帯域光源を用いた場合に得られるインターフェログラムは、光路長差がゼロとなる点だけでピークを示す。この理由を以下に説明する。広帯域光源は、波長の異なる単色光源の集まりと考えることができる。この場合の干渉の様子を説明するために、図 3-2 (b)を用いる。図 3-2 (b)は、波長が異なる単色光源を使ったときの干渉信号である。異なる波長成分による干渉信号を全て表示するため、複数の線が表示されている。中心の位置 A では全ての波長の光に対して光路長差はゼロであるため、全ての波長成分の信号が強め合う。この点から光路長差が少し大きな点 B では、それぞれの波長ごとに異なる光路長差となり、強め合う波長だけでなく、弱めあう波長が出現し、これらが混在しはじめる。そして、さらに光路長差が大きい点 C では、強め合う波長と弱め合う波長の比率が同程度になり、光強度は次第に一定の値に収束する。その結果、図 3-2(c)のように、中心付近だけでピークを持つインターフェログラムが得られる。そして、このような理由により、広帯域光源は単色光源に比べて可干渉性が低いのである。

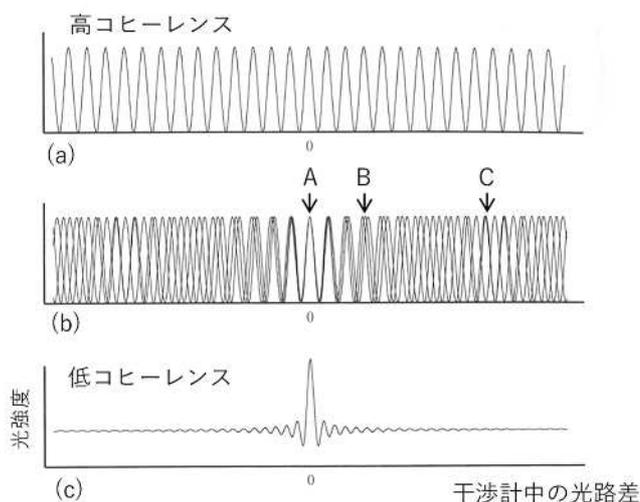


図 3-2 インターフェログラムの比較
(a)単色光源、(b)波長の異なる単色光源、(c)広帯域光源

出所：[3]より引用

このように、光路長差がゼロとなる付近のみでインターフェログラムのピークが得られることが LCI の重要な特徴である。そして、この特徴を利用して、インターフェログラムから計測対象の光路長を導き出すことができる。測定系の構成は、図 3-1 のうち、可動ミラーの位置に参照ミラーを、固定ミラーの位置に測定したいサンプルを配置する。多層構造物の LCI 測定で得られるインターフェログラムの例を図 3-3 に示す [2]。図 3-3 (a)は計算モデルで、上下の空気層を含む 4 層から成る構造である。各層の材質は、媒質表面から 5 mm 上の位置を基準面として、第 1 層は厚さ 5 mm の空気、第 2 層は厚さ 15 mm で屈折率 1.3 の材料、第 3 層は厚さ 30 mm で屈折率 1.5 の材料、第 4 層は空気、となっている。図 3-3(b)は、このサンプルを、中心波長 800 nm、波長幅 50 nm の広帯域光源で測定した時に得られ

るインターフェログラムの計算結果で、横軸は可動ミラーの移動距離、縦軸は光強度である。インターフェログラムには、3つの大きなピークが見られる。これらは左からそれぞれ、第1層 - 第2層の界面、第2層 - 第3層の界面、第3層 - 第4層の界面に対応する信号である。ピークが検出された可動ミラー移動距離は、基準面から検出した層位置までの片道光路長である。

一方、測定結果から内部構造を求める手順を簡単に説明する。実際の測定では、図 3-3(b)のようなインターフェログラムが得られる。図中の A は、基準面から第1層 / 第2層界面までの光路長、B は基準面から第2層 / 第3層界面までの光路長、C は基準面から第3層 / 第4層界面までの光路長を示す。これらの信号ピーク位置が示す横軸から、各界面が基準面に対してどの光路長位置にあるかが分かる。さらに、各層の屈折率が既知であれば、各光路長差を各屈折率で割る事で各層間の経路長を求めることができる。例えば、B は 24.5 mm の光路長差位置にピークが測定され、第1層の屈折率は 1.0、第2層の屈折率は 1.3、基準面 - 第1層間距離は 5 mm、第1層 - 第2層間距離を未知数 L_x とする。この場合、 $24.5 = 5 \times 1 + L_x \times 1.3$ の関係が成り立ち、これを解くことで $L_x = 15 \text{ mm}$ と求めることができる。このように、LCI 計測と解析により層間の距離を知ることができ、透明媒質内部の構造を明らかにすることができる。

測定の深さ方向の分解能について説明する。図 3-3(b)に示される信号の、包絡線の半値全幅が測定の深さ方向の分解能を示し、分解能の値が小さいほど性能が高い。分解能、 R_{res} は光源のコヒーレンス長に比例し、 $R_{res} = l_c/2$ で表される [2]。この構造の場合、構造物の3つの界面を示す信号は分離して認識が可能である。分離して認識ができる理由は、識別したい光路長よりも分解能が小さいためである。分解能不足の場合はピークがなだらかになり、3つのピークは重なり、多層構造がどのようにになっているかの判別が不可能になる。

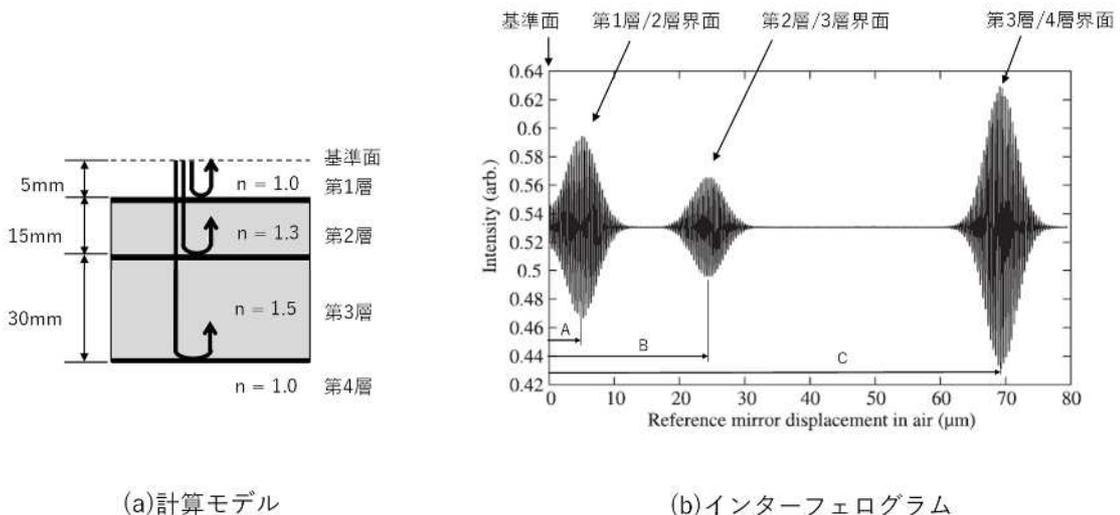


図 3-3 多層構造体のインターフェログラム

出所：[2]を引用して筆者加筆

3.2.3. 媒質内部計測手段としての低コヒーレンス干渉計測

媒質内部計測手段としての LCI の技術的立ち位置を確認しておく。媒質の内部を計測する方法には、LCI の他にもいくつかの方法がある。図 3-4 は、媒質内部の測定方法として、共焦点顕微鏡計測、LCI、超音波計測、X 線 CT の 4 つの技術を比較した図である[5]。横軸は測定可能な侵入深さ、縦軸は測定の深さ方向の分解能を示す。侵入深さと深さ方向分解能は、概ねトレードオフの関係になっていることが分かる。LCI は、侵入深さと分解能の両面で、超音波計測と共焦点顕微鏡の間を埋める重要な技術として発展してきた[6]。すなわち、LCI は共焦点顕微鏡と比較すると、深さ方向分解能は数 μm と劣るものの、侵入深さは数 mm と優れる特徴がある。

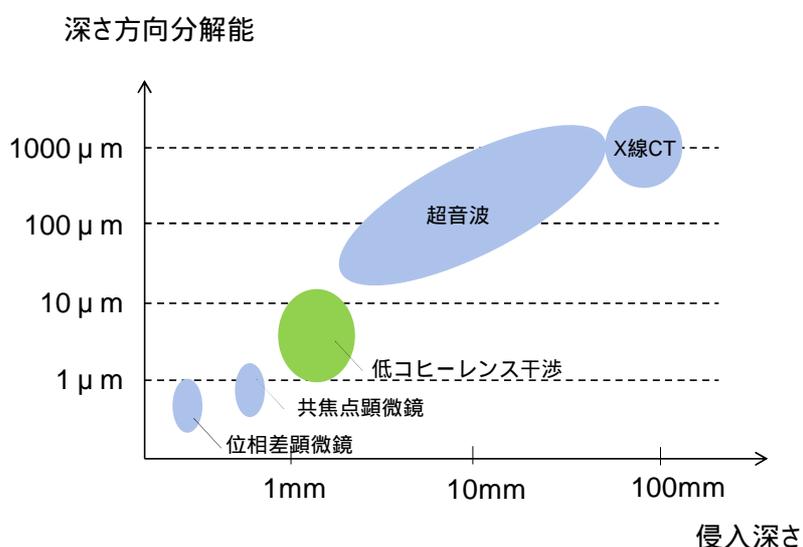


図 3-4 媒質内部計測技術の特性比較

出所：[5]より引用

LCI では、測定の方向を走査させることで物体の構造に関わる立体情報を得られるが、その基本的な測定は A-Scan と呼ばれ重要である。図 3-5 に測定のスキャン方向、そのスキャンの呼び方と、得られる情報の関係を示す。図 3-5(a)の A-Scan では、1 回の測定で、ある 1 点の深さ方向の構造を得ることができ、これは 1 次元の深さ情報である。そして A-Scan 位置を 1 つの軸方向に走査し、得られた 1 次元情報を面方向に繋げることで、2 次元的な断面情報を得ることができる。これは図 3-5(b)に相当し、B-Scan と呼ばれる。そしてさらに、A-Scan を図 3-5(b)と垂直方向に走査することで、3 次元的な立体情報を得ることができる。これは図 3-5(c)に相当し、C-Scan や Volume-Scan と呼ばれる。そして、B-Scan や C-Scan を得るための基本的な測定単位が A-Scan である。よって、この A-Scan にかかる時間が B-Scan、C-Scan 全体にかかる時間を決定するため、測定時間の判断指標として重要である。

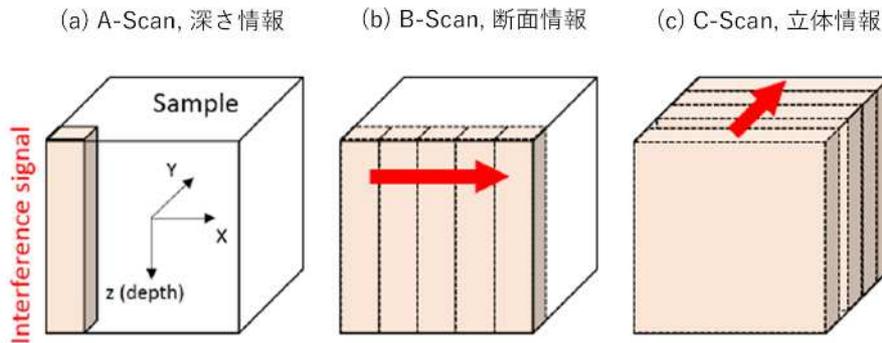


図 3-5 LCI のスキャン方向
(a)A-Scan、(b)B-Scan、(c)C-Scan

出所：[7]より引用

LCI を応用した技術に、反射計(Optical low coherence reflectometry, 以下、OLCR)と光干渉断層画像(Optical coherence tomography, 以下 OCT)がある。両者はどちらも LCI を利用し、光の進行方向に対して奥行方向の距離を測定するという原理的な点は共通する。違いは測定の目的であり、OLCR の目的は、対象物の位置を得ることであるのに対し、OCT の目的は、深さ方向の微細な構造を画像として可視化することである。具体的に、OLCR は表面段差位置の測定[8]に、OCT は眼科における眼底組織構造の検査[9]や膜厚測定[10]に使われている。また最近では、LCI の利点である高速性を利用して、レーザ加工のような高速現象の計測への応用が実用化されている[11,12]。先行研究においては、OLCR と OCT の用語はほぼ同義的に使われている。例えば、先行研究[8]では、表面形状計測であるものの OCT という用語が使われている。本研究では、これら 2 つの技術に共通する LCI に用語を可能な限り統一して説明をする。

3.2.4. 低コヒーレンス干渉計測の方式による分類

LCIには4つの方式がある。方式は大きく分けて、時間領域 LCI(Time-domain LCI, 以下 TD-LCI)と、周波数領域 LCI(Fourier-domain LCI, 以下 FD-LCI) の2つの方式に分けられる。そして、FD-LCI はさらに、波長領域 LCI(Spectrum-domain LCI, 以下 SD-LCI)、波長掃引 LCI(Swept-source LCI, 以下 SS-LCI)、タイムストレッチ LCI(Time-stretch LCI, 以下 TS-LCI)に細かく分類され、図 3-6 に示すように全4種類に分類することができる。

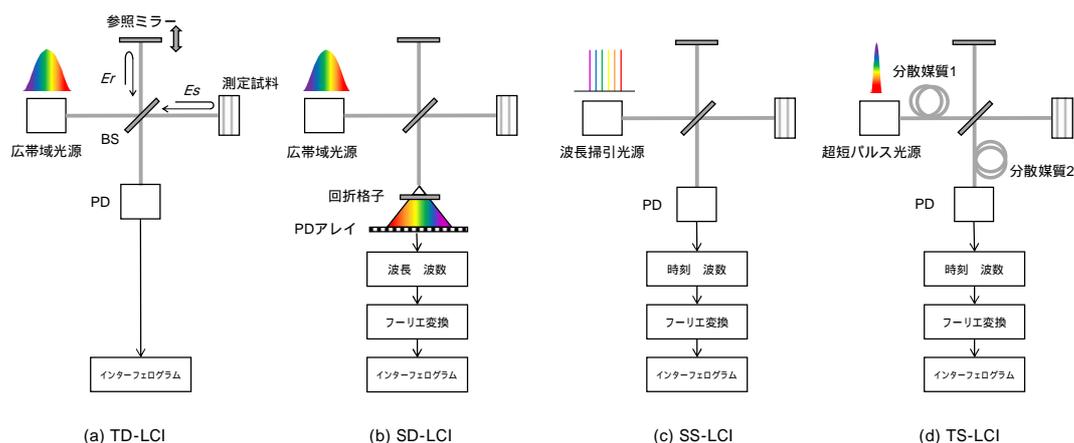


図 3-6 各方式 LCI の装置構成図

各方式間の違いを表 3-1 にまとめた。はじめに、測定に使う光源は、すべての方式で広帯域光源を使う点が共通するが、広帯域光源の種類が各方式で異なる。TD-LCI と SD-LCI は広帯域光源であれば他に制約はない。SS-LCI は波長掃引光源、TS-LCI は超短パルス光源、またはスーパーコンティニウム光源(SC 光源)の必要がある。光信号を検出する検出器は、TD-LCI、SS-LCI、TS-LCI ではフォトダイオード(Photo-diode, 以下 PD)を、SD-LCI では PD アレイを使う。分光手段はそれぞれ、TD-LCI では不要、SD-LCI は回折格子、SS-LCI は波長掃引光源の持つ波長掃引機能、TS-LCI は分散媒質の持つ波長分散機能である。TD-LCI では参照光学系の光路長を変化させるため、参照ミラーを光線進行方向に移動する必要があるが、それ以外の方法では参照ミラーは固定する。また、参照ミラーを動かさない方式では、測定した信号から光路長を求めるために、フーリエ変換処理が必要である。

一方、TS-LCI では、測定の繰り返し周波数は一般的に数十 MHz であり、他方式よりも高いと言える。この点で、SD 加工において材料内部の構造を高速に測定する用途には、TS-LCI 方式が最も適している。測定速度については、後ほど詳しく説明する。

表 3-1 LCI の方式間比較

	TD-LCI	SD-LCI	SS-LCI	TS-LCI
光源	SLD	SLD	波長掃引光源	フェムト秒レーザ
検出器	PD	PD アレイ	PD	PD
分光手段	不要	回折格子	波長掃引	媒質の波長分散
参照ミラー	可動式	固定式	固定式	固定式
A-Scan 速度	数秒	kHz	kHz	MHz
A-Scan 速度 制限因子	参照ミラーの 掃引時間	分光器の 測定周波数	波長掃引光源の 掃引周波数	光源の 繰返し周波数

SLD: Super luminescent diodes

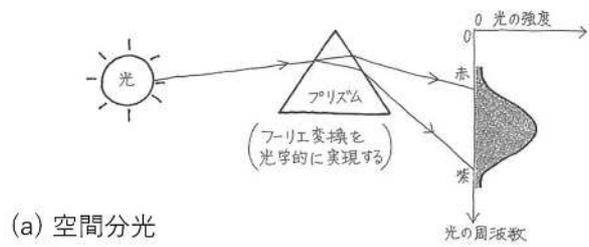
3.3. タイムストレッチ技術

3.3.1. タイムストレッチ技術の原理

タイムストレッチ技術は分光技術の一つである。歴史的には比較的新しい技術で、1994年頃から、Bennett らにより高速な信号を検出する並列アナログ - デジタル変換器 (Analogue digital converter, 以下 ADC) 手段として研究がされ始め[13, 14, 15]、2007年頃からはこれを応用した高速計測の応用研究[16, 17]が盛んに行われるようになった。これらの研究では、繰り返しのない1回きりの現象を化学的、物理的に測定するための手段として用いられてきた。

タイムストレッチ技術の詳細を説明する。タイムストレッチ技術は、フェムト秒のような広帯域かつ超短パルスのレーザ光パルス波形を、PD で検出可能とする為に、大きな群速度分散(Group velocity dispersion, 以下 GVD)を持つ材料を通過させてパルス波形を時間的に引き延ばす技術である[17]。

タイムストレッチ技術は、分光技術の中でも、時間分光技術の中の1つとすることができる。図 3-7 に、分光の観点で空間分光と時間分光技術を比較する。空間分光(a)では、分光される光は波長が広帯域であればランプ光源などの白色光でよい[18]。空間的な1点からの入力光をプリズムや回折格子に入力して波長成分を空間的距離に分離する。十分に距離を離れた先に PD アレイを配置することで、波長成分ごとに強度が測定でき、分光スペクトルを得ることができる。一方、時間分光(b)では、分光される光は超短パルスレーザである必要がある。超短パルスレーザは全範囲の波長がピコ秒以下の極短時間に位相が揃っているため、PD によって波長分解して測定することができない。PD で波長成分を検出するためには、信号波形の波長成分を時間ごとにずらして出射させる工夫が必要である。そのために使うのがタイムストレッチ分光技術である。時間的に1点からの入力光を波長分散媒質に入力し、波長成分ごとに時間的に分離する。そして、光検出器はシングル画素の PD を用いる。PD で検波する光は、時々刻々とその波長が変わる為、時間ごとに異なる波長の強度が記録される。時間から波長へ変換することで、分光情報を得る事ができる。



(a) 空間分光



(b) 時間分光 (タイムストレッチ分光)

図 3-7 分光方法の比較
(a)空間分光, (b)時間分光

出所：[18]より引用

タイムストレッチ技術により、超短パルス信号から波長スペクトルを得る具体的な手順を図 3-8 に示す。前述したように、超短パルスレーザは、波長分散媒質へ通過させると波長分散を受け、チャープパルスとなる。十分に距離がある波長分散材料を通過すると、光パルスは PD で波長成分を分解して計測ができ、横軸が時間の波形を取得することができる。さらに、事前取得した波長分散媒質の分散特性から、横軸の時間を波数に変換して、横軸が波数の波長スペクトルを得ることができる。十分なタイムストレッチ効果を得るために、一般的に数百 m から数 km のシングルモード光ファイバを波長分散媒質として利用する。

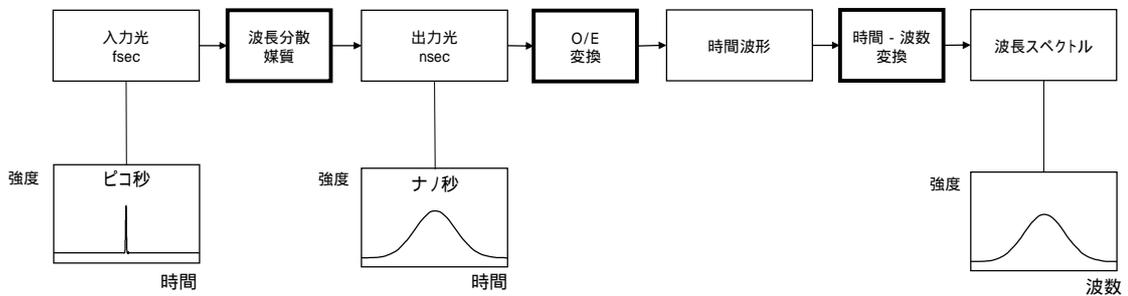


図 3-8 タイムストレッチ分光により入力光の波長スペクトルを得る手順

前述したように、タイムストレッチ分光では、レーザのすべての光周波数成分が同一時間に重なった信号を、光波長と対応する波数ごと時間的に分離する。以下に、波長分散材料である光ファイバの分散特性と、タイムストレッチ分光で得られる時間波形の関係を説明する[19]。

光ファイバなどの媒質中を異なる波長の光が進む時を考える。屈折率は光の波長ごとに異なるため、波長ごとに異なる速さで媒質中を伝搬し、これを波長分散と呼ぶ[20]。超短パルスを入射し、光ファイバ中を伝搬させると、伝搬の際に波長分散の影響を受け、出射端からは時刻ごとに異なる波長が連続して出射し、時間波形が伸びる。

光ファイバの分散係数は、

$$\beta = \beta_0 + \beta_1\Omega + \frac{1}{2}\beta_2\Omega^2 + \dots, \quad (3.6)$$

で表される。ここで、 $\Omega = \omega - \omega_0$ は角周波数、 β_0 は光ファイバの群屈折率、 β_1 は光ファイバの群遅延、 β_2 は光ファイバの群速度分散である。また、光ファイバ中を距離 z だけ通過した後の光の電場 $E(z, t)$ の時間波形は、

$$E(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \tilde{E}(0, \omega) \exp[i(\omega t - \beta z)] d\omega, \quad (3.7)$$

で表される。ここで、 $\tilde{E}(0, \omega)$ は $z = 0$ の位置におけるフーリエ変換であり、入射光の光スペクトルを表す。分散が十分に大きな場合 ($\beta_2 z \gg 1$) には、電場 E は式(4)のように近似される[17][19]。

$$E(z, t) = \frac{1}{2\pi} \exp[i(\omega_0 t - \beta_0 z)] \exp\left[i\frac{T^2}{2\beta_2 z}\right] \tilde{E}\left(0, \frac{T}{\beta_2 z}\right), \quad (3.8)$$

ここで、 ω_0 は中心光の角周波数、 $T = t - \beta_1 z$ である。(4)式から、2つのことが言える。1つ目は第2項に関する点であり、超短パルスは $1/\beta_2 z$ のチャーププレートを持ったチャープパルスに変化することが分かる。2つ目は第3項に関する点であり、時間波形は光スペクトルと相似な形状を示すことが分かる。このように、タイムストレッチにより光周波数のフーリエ変換が得られることから、Time stretch-dispersive Fourier transform (以下 TS-DFT) という呼び方でも研究がなされている[11][12]。

3.3.2. タイムストレッチ技術によるレーザ加工の測定

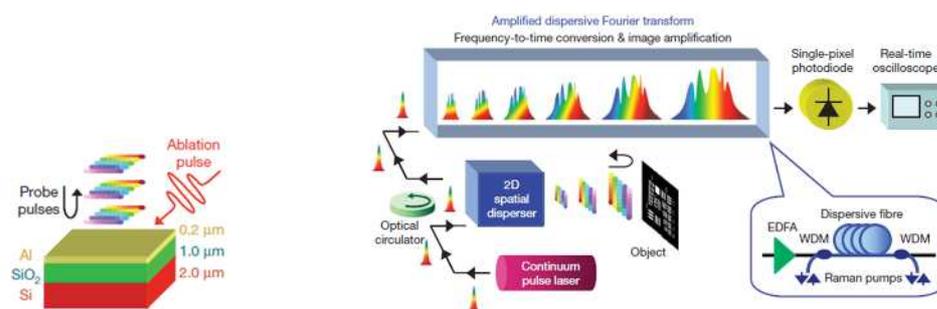
タイムストレッチ技術では、測定の繰り返し周波数が数十 MHz にまで高められるため、レーザ加工の様な高速現象を測定するのに有用である。ここでは、レーザ加工を測定した先行研究例により、どのようにして高繰返し測定を実現しているかを具体的に説明する。

測定の対象としているレーザ加工現象は、レーザアブレーションと呼ばれる除去加工である。この加工では、レーザ照射により基板表面に蒸着されている金属膜などを蒸散させる。

Goda らは、材料の表面を測定し、金属膜が蒸散する様子をピコ秒間隔のフレーム速度で観察した。時間を追った画像化ができることから、彼らはこの技術を STEAM(Serial time-encoded amplified microscopy)カメラと呼んだ[21, 22]。

図 3-9(a)にレーザアブレーションの構成を、図 3-9(b)に STEAM カメラを含む実験の構成を示す。計測用のレーザを加工対象物に垂直に照射し、加工用のレーザを斜めから照射し、反射光量の経時変化を計測した。計測用レーザは、図 3-9(b)中の「2D spatial disperser」の作用により、その波長に応じて二次元に並べられた後、計測対象物体「Object」へ様に照射される。レーザ加工がされる前には金属膜により高い反射率を示すが、レーザアブレーションによって表面の金属膜除去された部分からの反射率は低下する。アブレーション加工は、図 3-9(a)に示すように、パルス幅 5 nsec - パルスエネルギー 5 mJ の赤外レーザ光を金属膜に対して斜めから照射して行った。一方、計測は、「Probe pulse」で表示されている波長 1582-1597 nm、繰り返し周波数 6.1 MHz のフェムト秒レーザにより行う。タイムストレッチの機能を持つ部分は、図 3-9(b)上部の右下囲い「Dispersive fiber」と示された部分で、具体的には総分散量が-3.3 ns/nm の分散補償ファイバ(Dispersion compensating fiber, 以下 DCF)と、これに統合されたラマン増幅器のことである。DCF に光を通過させることで、440 psec の入力パルスが約 30 nsec のパルスに時間伸張して出力した。時間伸張することでシングルピクセルフォトダイオードによる信号検出が可能となった。加工用レーザの照射直前から直後に渡る反射率の面内分布に関する経時変化を、6.1 MHz に相当する 163 nsec 間隔のフレーム速度で観察し、レーザ加工により金属が蒸散する様子を可視化することに成功した。

筆者の課題解決方法への適用可否を検討し、ここで示される 6.1 MHz という測定の高速度性は非常に有用であると考えた。この高速度性は、計測用のフェムト秒レーザの繰り返し速度に由来するものである。また、その高速度性を損なうことなく測定できる理由は、検出器として分光器ではなく PD を使っている為であることが分かる。



(a) レーザアブレーション計測の構図

(b) 装置概要図

図 3-9 レーザアブレーション現象計測の実験構成図

出所：[21][22]より引用

3.3.3. タイムストレッチ技術を使った低コヒーレンス干渉計測の特長

ここでは、TS-LCI の特長を他の方式と比較する。表 3-2 に、TS-LCI を含む LCI の特性を示す。表の縦には LCI の 4 つの方式を、横には性能等を示す。

まず、繰り返し速度を比較する。繰り返し速度は、A-Scan 速度により比較する。TD-LCI では、可動式の参照ミラーを機械的に移動させる時間がかかり、これには少なくとも数秒が必要である。SD-LCI では A-Scan 速度は分光器の測定繰り返し速度に依存する。市販の分光器の繰返し周波数は数十 kHz が主流であるが、近年高速化が進んでいる。最速では 250 kHz の分光器を使った SD-OCT が報告されている[23]。SS-LCI では、波長掃引光源の繰返し周波数に依存する。波長掃引光源は通常数十 kHz の繰返し周波数を示すため、SS-LCI 測定の A-Scan 速度も数十 kHz である。SS-LCI を工夫した報告では、光ファイバと分岐カプラで特殊で大がかりな光回路を光源の後段に取り付ける工夫により、6.7 MHz の繰返し速度を実現している[24]。そして TS-LCI では、数十 MHz が実現できるため、TS-LCI が最も高速な測定ができる。

次に深さ方向分解能の傾向を比較する。TS-LCI は他の方法に比べて深さ方向分解能は低い傾向にある。具体的に、TD-LCI と SD-LCI では、深さ方向分解能は数 μm 程度が比較的容易に実現できるが、TS-LCI では深さ方向分解能は数十 μm 程度である。その理由は、TS-LCI で利用する光源であるフェムト秒レーザーの波長帯域は TD-LCI や FD-LCI に使われる光源と比べ、その波長帯域が狭いためである。

最後に、検出器の違いを改めて説明する。TS-LCI 以外の方式ではバランス検出器 (Balanced detector) や分光器などが用いられ、TS-LCI では主に PD が使われる。PD による検出は、高速化が容易であるだけでなく、他の方法と比較して格段に簡単、安価に測定できることから、この点も TS-LCI の特長である。

以上を総括し、TS-LCI は他方式 LCI に比べ、高速の測定に適した方法である。

表 3-2 LCI の先行研究例

項目 方式	中心 波長 nm	波長 幅 nm	A-Scan 速度	深さ 分解能 μm	深達 深さ mm	検出器	用途	引用
TD-LCI	1700	190	100 Hz	4.6	-	BD	豚組織	[7]
SD-LCI	1700	300	47 KHz	3.6	1	分光器	豚組織	[7]
SS-LCI	1080	47	6.7 MHz	16	2.6	A/D+FPG	眼底	[24]
	1040	106	100 KHz	7	5.6	A BD	眼底	[25]
TS-LCI	815	14	90.9 MHz	28	-	PD	蒸散	[21]
	1630	120	7.14 MHz	15	15	PD	魚眼	[22]
	1375	350	5 MHz	8	0.6	PD	紙	[26]

3.4. まとめ

本章をまとめる。まず、3.2.では、低コヒーレンス干渉計測 (LCI) について説明した。単色光源を使った高コヒーレンス光源を使った光干渉と比較し、LCI の測定原理を説明した。LCI で得られるインターフェログラムから光路長をもとめ、内部構造を測定できることを説明した。そして、LCI の4つのタイプとして、TD-LCI、SS-LCI、SD-LCI、TS-LCI の構成を示し、測定速度を決める要素である A-Scan 速度を比較した。SD 加工の計測には A-Scan 速度の点でタイムストレッチ技術を使った TS-LCI が最も適することを示した。

3.3.では、3.2.で簡単に触れたタイムストレッチ技術を詳しく説明した。そして、タイムストレッチ技術は、レーザパルスの時間幅を伸ばす技術であり、これによりフェムト秒のレーザパルスを PD で分光可能となることを説明した。また、TS-LCI でレーザアブレーション加工を測定した先行研究を参照し、計測に使用した光源の繰返し速度で測定ができることを示した。そして、TS-LCI と他方式を比較し、TS-LCI は高速現象の測定に向けた測定方法であることを説明した。

以上をまとめ、筆者の課題である SD 加工を 200 kHz 以上の繰返し速度で測定するためには、TS-LCI が最も適していることを説明した。そして、その理由は、MHz という高速な繰返し速度で媒質内部の測定が可能な方法であるためである。

第3章の参考文献・引用

- [1] 溝辺浩史, 中村強, "レーザ加工のインテリジェント化", *スマートプロセス学会誌*, 第6巻, 第2号 (2017).
- [2] P. H. Tomlins, R. K. Wang, "Theory, developments and applications of optical coherence tomography", *Journal of physics D: Applied physics* **38**, pp.2519-2535 (2005).
- [3] 左貝潤一, "光計測入門", 北森出版社(2016).
- [4] 伊東一良, "分光画像入門", 朝倉出版(2013).
- [5] S. Chang, Y. Mao, C. Flueraru, S. Sherif, "Optical coherence tomography: technology and applications", *Proceedings of SPIE* **715606-1** (2008)..
- [6] N. V. Iftimia, D. X. Hammer, C. E. Bigelow, D. I. Rosen, T. Ustun, A. A. Ferrante, D. Vu, and R. D. Ferguson, "Toward noninvasive measurement of blood hematocrit using spectral domain low coherence interferometry and retinal tracking" *Optics express*, **14**, 3377-3388(2006)
- [7] 川越寛之, "波長 1.7 μm 帯 OCT を用いた高分解能かつ高侵襲な生体イメージング", 博士論文 甲第 12061 号 (2017).
- [8] F. Dorsch, W. Dubitzky, J.P. Hermani, A. Hromadka, T. Hesse, T. Notheis, M. Stambke, "Controlling laser processing via optical coherence tomography", *Proceedings of SPIE* **109110G** (2019).
- [9] J. Fujimoto, E. Swanson, "The development, commercialization, and impact of optical coherence tomography", *Investigative ophthalmology and visual science*, **Vol. 57**, No.9, special issue (2016).
- [10] 上野雅浩, "屈折率分散適応による SS-OCT 膜厚計測の高精度化", *電子情報通信学会 ソサイエティ大会抄録*, **2017S**, C-3(2017).
- [11] K. Goda, K. K. Tsia, B. Jalali, "Dispersive Fourier transformation for fast continuous single-shot measurements", *Nature photonics*, **Vol.7** (2013).
- [12] K. Goda, K. K. Tsia, B. Jalali, "Amplified dispersive Fourier-transform imaging for ultrafast displacement sensing and barcode reading", *Appl. Phys. Lett.* **93**, 131109 (2008).
- [13] C. V. Bennett, R. P. Scott, B. H. Colner, "Temporal magnification and reversal of 100 Gb/s optical data with an up-conversion time microscope", *Applied Physics Letters* **65**,2513-2515(1994).
- [14] A. S. Bhushan, F. Coppinger, B. Jalali, "Time-stretched analogue-to digital conversion", *Electronics Letters*, **34**, 839(1998).

- [15] F. Coppinger, A. S. Bhushan, B. Jalali, 'Photonic time stretch and its application to analogue-to digital conversion ', *IEEE Transactions on Microwave and Techniques*, **47**, 1309(1999).
- [16] J. Chou, O. Boyraz, D. Solli and B. Jalali, 'Femtosecond real-time single-shot digitizer ', *Applied Physics Letters*, **91**, 161105(2007).
- [17] D. R. Solli, J. Chou, B. Jalali, "Amplified wavelength–time transformation for real-time spectroscopy ", *Nature Photonics*, **2**, 48-51(2008).
- [18] 三谷政昭, "今日から使えるフーリエ変換 普及版 ", 講談社(2019).
- [19] T.Jansson, 'Real-time Fourier transformation in dispersive optical fibers ', *Optics letters*, **Vol.8**, No. 4. pp.232-234(1983).
- [20] 住村和彦, 西浦匡則, "解説 ファイバーレーザー 基礎編 ", オプトロニクス社(平成23年).
- [21] K. Goda, A. Fard, O. Malik, G. Fu, A. Quach, B. Jalali, "High-throughput optical coherence tomography at 800 nm", *Optics express*, **20**, pp.19612–19617(2012).
- [22] J. Xu, X. Wei, L. Yu, C. Zhang, J. Xu, K. K. Y. Wong, K. K. Tsia, 'Performance of megahertz amplified optical time-stretch optical coherence tomography (AOT-OCT) ', *Optics express*, **22**, 22498-22512(2014).
- [23] B. Tan, Z. Hosseinaee, L. Han, O. Kralj, L. Sorbara, and K. Bizheva, '250 kHz, 1.5 μm resolution SD-OCT for in-vivo cellular imaging of the human cornea ', *Biomedical Optics Express* **Vol. 9**, Issue 12, pp. 6569-6583 (2018).
- [24] T. Klein, W. Wieser, L. Reznicek, A. Neubauer, A. Kampik and R. Huber, 'Multi-MHz retinal OCT ', *Biomedical Optics Express* 1894, **Vol. 4**, No. 10(2013).
- [25] S.Marschall, A.Gawish, Y.Feng, L.Sorbara, P. Fieguth, 'In-vivo imaging of keratoconic corneas using high-speed highresolution swept-source OCT ', *Proceedings of SPIE*, **8802**(2013).
- [26] S. Moon, D. Y. Kim, 'Ultra-high-speed optical coherence tomography with a stretched pulse supercontinuum source ', *Optics Express* 11575, **vol.14**, No. 24(2006).

第4章 タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス 干渉計測技術の開発

4.1. 本章の目的

本博士論文では、第1章では、本博士論文の背景を説明した。そのなかで、レーザ加工技術の一つであるSD技術とSD事業を説明し、本博士論文の目的を示した。第2章では、「分割工程の前に、レーザ加工とリアルタイムでSD層深さを測定すること」がSD加工の顧客ニーズであることを明らかにした。また、その測定には、200 kHz以上の繰返し速度が必要であることを説明した。第3章では、SD加工を測定する為に、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測法(TS-LCI)が測定速度の観点から適していることを説明した。

そして、本章の目的は、SD加工深さをリアルタイムで測定するために、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測(TS-LCI)技術を開発することである。このことは、本研究の目的の1つに挙げた。具体的には、まずTS-LCIの実験系を構築し、基本特性を確認し、特性改善の方法について説明する。この方法は、本博士研究の主論文[1]の内容である。また、本章で開発する測定システムでは、SD加工がされるシリコン基板に対する透過性や、次章で行う光増幅へ対応を考慮し、1550 nm帯の波長を選択した。

本章の構成は以下のとおりである。4.2.では、TS-LCIの動作原理を説明する。4.3.では、本研究にて構築したTS-LCIシステムの構成を具体的に説明する。4.4.では、構築した測定システムの基本特性の説明をする。基本特性として、測定の繰返し速度と光路長特性について説明し、光路長特性の劣化について指摘する。4.5.では、劣化した光路長特性改善のために必要な波長分散の測定方法を2つ説明し、実験結果を示す。最後に4.6.では、その改善方法について、類似した先行研究と比較し、本研究で見出した方法の新規性について述べる。

4.2. タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測の原理

この節では、TS-LCI の測定原理を説明する。TS-LCI では、測定した干渉信号のビート周波数（うねり）を解析することで、光路長を求めることができる。

第3章の式(3.4)に、タイムストレッチャを通過したレーザパルスの電場を、時間 T の関数として示した。これを本章においても改めて、式(4.1)として示す。すなわちレーザ光の電場 E は時間 T の関数として、

$$E(z, t) = \frac{1}{2\pi} \exp \left[i \left(\omega_0 T + \frac{T^2}{2\beta_2 z} \right) \right] \tilde{E} \left(0, \frac{T}{\beta_2 z} \right), \quad (4.1)$$

と表すことができる。ここで、 ω_0 は中心波長の角周波数、 β_2 [ps/nm/km] はタイムストレッチャに使われている光ファイバの群速度分散、 z [km] は光ファイバの長さである。また、 $\tilde{E} \left(0, \frac{T}{\beta_2 z} \right)$ は複素数であり、 $z = 0$ の位置における電場のフーリエ変換、つまり光ファイバへの入射光の光スペクトルを表す [2]。

つぎに、参照光と信号光のそれぞれについて説明する。式(4.1)を用いると、光検出器上での参照光、 $E_r(t)$ と信号光、 $E_s(t)$ の電場はそれぞれ、

$$E_r(t) = E_{r0} \exp \left[i \left(\omega_0 T_r + \frac{T_r^2}{2\beta_2 z} \right) \right] \tilde{E} \left(0, \frac{T_r}{\beta_2 z} \right), \quad (4.2)$$

$$E_s(t) = E_{s0} \exp \left[i \left(\omega_0 T_s + \frac{T_s^2}{2\beta_2 z} \right) \right] \tilde{E} \left(0, \frac{T_s}{\beta_2 z} \right), \quad (4.3)$$

と表される。ここで、 T_r は参照光の時間、 T_s は信号光の時間である。 T_r と T_s の間の関係は、 $T_s = T_r - \Delta L/c$ で、 ΔL は参照光と信号光の間の光路長差、 c は光の速度、 E_{r0} は参照光の振幅、 E_{s0} は信号光の振幅である。

次に、参照光と信号光の干渉信号について説明する。光検出器上で、 E_r と E_s は干渉し、その干渉光の強度 $I(t)$ は、 $E_r(t)$ 、 $E_s(t)$ を用いて、

$$I(t) = [E_r(t) + E_s(t)][E_r(t) + E_s(t)]^* \quad (4.4)$$

と表すことができる[3]。これを展開し、 T_r についてまとめると、

$$\begin{aligned}
I(t) &= [E_r(t) + E_s(t)][E_r(t) + E_s(t)]^* \\
&= E_r(t) \cdot E_r^*(t) + E_r(t) \cdot E_s^*(t) + E_s(t) \cdot E_r^*(t) + E_s(t) \cdot E_s^*(t) \\
&= E_{r0}^2 \left| \tilde{E}\left(0, \frac{T_r}{\beta_{2z}}\right) \right|^2 \\
&\quad + E_{r0} \cdot E_{s0} \cdot \tilde{E}\left(0, \frac{T_r}{\beta_{2z}}\right) \cdot \tilde{E}^*\left(0, \frac{T_s}{\beta_{2z}}\right) \exp\left[i\left(\frac{\Delta L}{c\beta_{2z}} T_r - \frac{\Delta L^2}{2c^2\beta_{2z}} + \frac{\omega_0 \Delta L}{c}\right)\right] \\
&\quad + E_{s0} \cdot E_{r0} \cdot \tilde{E}\left(0, \frac{T_s}{\beta_{2z}}\right) \cdot \tilde{E}^*\left(0, \frac{T_r}{\beta_{2z}}\right) \exp\left[i\left(\frac{\Delta L}{c\beta_{2z}} T_r - \frac{\Delta L^2}{2c^2\beta_{2z}} + \frac{\omega_0 \Delta L}{c}\right)\right] \\
&\quad + E_{s0}^2 \left| \tilde{E}\left(0, \frac{T_s}{\beta_{2z}}\right) \right|^2 \\
&= (E_{r0}^2 + E_{s0}^2)S(T_r) + 2E_{r0}E_{s0}S(T_r)\text{Re}\left\{\exp\left[i\left(\frac{\Delta L}{c\beta_{2z}} T_r - \frac{\Delta L^2}{2c^2\beta_{2z}} + \omega_0 \frac{\Delta L}{c}\right)\right]\right\}, \quad (4.5)
\end{aligned}$$

と表される。ここで、 S はパワースペクトルである。ここで、レーザの時間幅に対して参照光と信号光の間のずれは非常に小さいため、

$$S(T_r) = \left| \tilde{E}\left(0, \frac{T_r}{\beta_{2z}}\right) \right|^2 \cong \left| \tilde{E}\left(0, \frac{T_s}{\beta_{2z}}\right) \right|^2 \cong \tilde{E}\left(0, \frac{T_r}{\beta_{2z}}\right) \tilde{E}^*\left(0, \frac{T_s}{\beta_{2z}}\right) \cong \tilde{E}^*\left(0, \frac{T_r}{\beta_{2z}}\right) \tilde{E}\left(0, \frac{T_s}{\beta_{2z}}\right), \quad (4.6)$$

として近似した。(4.5)式において、第1項は整流成分として、第2項が干渉成分となって検出される。そして、干渉信号のビート周波数は $\Delta L/\beta_{2z}$ であり、光路長差 ΔL に比例し、光ファイバのチャープ量 β_{2z} に反比例することが分かる。従って、光ファイバのチャープ量が既知であれば、干渉信号のビート周波数から光路長を知ることができる。

4.3. タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測システム

4.3.1. タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測システムの概要

本研究で構築した TS-LCI 測定システムの外観写真を図 4-1 に、ブロック図を図 4-2 に、それぞれ示す。本測定システムは大きく分けて、超短パルスレーザ部、タイムストレッチャ、干渉計部、そして検出部の4つの部分により構成される。また、本システムのほとんどの部分で、レーザパルスはシングルモード光ファイバ(Single mode optical fiber, 以下 SMF)の中を進む。以下、測定システムの各部分での機能について細かく説明する。

そして、この測定システムでは、参照光アームと信号光アームとの間の往復の光路長差である L を TS-LCI によって測定することを目的とする。ここで、50:50 光ファイバカプラから参照ミラーまでの往復光路長を L_{ref} 、50:50 光ファイバカプラから信号ミラーまでの往

復する光路長を L_{sig} とした場合、 $L = L_{ref} - L_{sig}$ で表される。

なお、本章で説明する測定システムは、国立研究開発法人情報通信研究機構(National Institute of Information and Communications Technology)との共同研究において、基本動作の確認を目的に構築した測定システムである。これに対し、続く第5章で説明する測定システムは、筆者の企業内で、SD 加工の計測を目的に構築した測定システムである。



図 4-1 TS-LCI 測定システムの外観写真

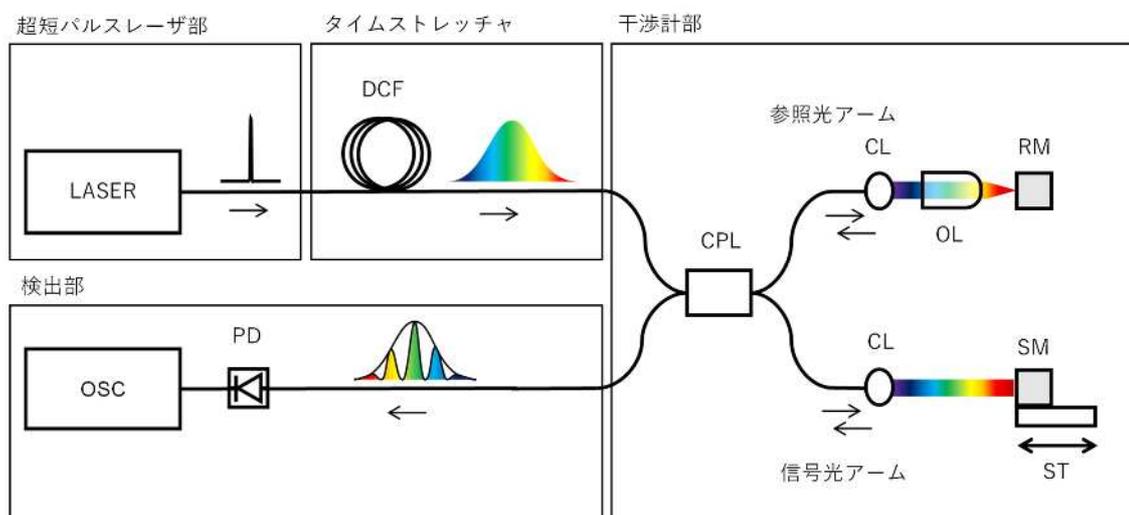


図 4-2 TS-LCI 測定システムのブロック図

LASER : 超短パルスレーザー部, DCF : 分散補償ファイバ, CPL : 50:50 光ファイバカップラ,
 CL : コリメートレンズ, OL : 対物レンズ, RM : 参照ミラー, SM : 信号ミラー,
 ST : 手動ステージ, PD : フォトダイオード, OSC : リアルタイムオシロスコープ

4.3.2. 超短パルスレーザ部

超短パルスレーザ部の詳しい構成を図 4-3 に示す。元となるレーザ発振器は、半導体型のモードロックレーザダイオード(Mode-lock laser diodes, 以下 MLLD)であり、中心波長は 1550 nm、発振周波数は 10 GHz であった。このレーザを、光ファイバ増幅器(Erbium doped fiber amplifier, 以下 EDFA)で強度を増幅させ、分散フラットファイバ(Dispersion flattened fiber, 以下 DFF)に挿入し非線形効果により波長幅を広げ、バンドパスフィルタによりその波長帯域を適切な範囲に切り出した。さらに、2 段階の LiNbO₃変調器を通過させることにより、その繰り返し周波数を 10 GHz から 10 MHz にまで間引いた。最後に可変光減衰器(Variable optical attenuator, 以下 VOA)により光出力を調節し、約 2 mW のスーパーコンティニウム(Super continuum, 以下 SC)光を得た。

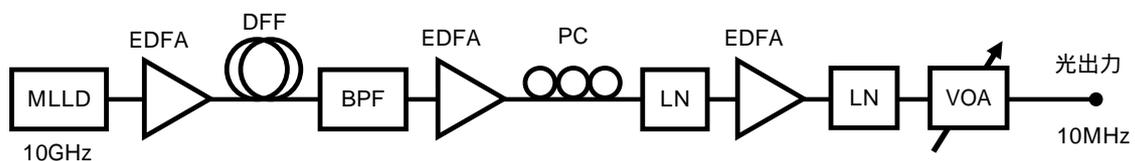


図 4-3 超短パルスレーザ部の構成図

MLLD : モードロック半導体レーザ, EDFA : エルビウム添加ファイバ増幅器,
DFF : 分散平坦化ファイバ, BPF : バンドパスフィルタ, PC : 偏波コントローラ,
LN : LiNbO₃変調器, VOA : 可変光減衰器

得られた SC 光は、光スペクトラムアナライザ (YOKOGAWA, AQ6370C) によって波長スペクトルを測定した。中心波長は 1557 nm、波長幅は約 20 nm であることを確認した。

4.3.3. タイムストレッチャ

タイムストレッチャについて説明する。超短パルスレーザ部から出射したレーザパルスは、タイムストレッチャを通過し、屈折率の波長分散を受けてそのパルス幅が広がる。本測定システムに使用したタイムストレッチャは、図 4-1 の外観写真の中に示した。タイムストレッチャは、約 8.5 km の長さの分散補償ファイバ DCF によるシンプルな構成である。

次に、タイムストレッチャの機能を説明する。確認する点は 2 つあり、パルス幅が広がることと、広げられた時間波形が入力光の波長スペクトルを示すことである。そのため、時間波形と波長スペクトルに関する測定を行い、それぞれの測定について、タイムストレッチャの通過前後の比較を行った。図 4-4 にこれらの結果を示す。

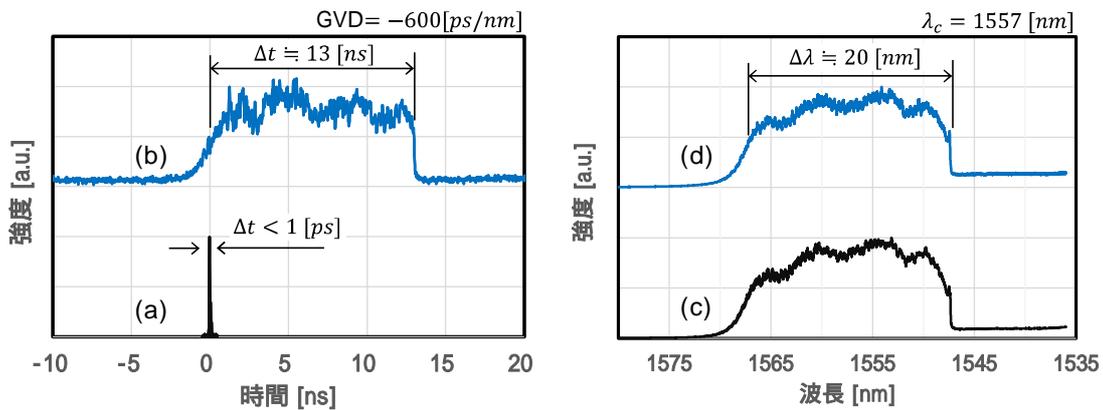


図 4-4 時間波形と波長スペクトルのタイムストレッチャ通過前後の比較
(a)(c)通過前, (b)(d)通過後

はじめに、レーザパルス幅を比較する。測定は、PD (Agilent 社製 83440B, 帯域 : DC-6 GHz)によりレーザパルスを検出し、オシロスコープにより波形を記録した。その結果を、図 4-4(a)と(b)に示す。下段(a)はタイムストレッチャ通過前の時間波形、(b)は通過後の時間波形である。この測定に使用したタイムストレッチャの GVD は-600 ps/nm である。(a)では、パルス波形の半値全幅(Full width at half maximum, 以下 FWHM)は 1ps 以下であった。PD の帯域が不十分なため正確なパルス幅を測定していないものの、レーザパルスは 1 ps 以下に収まっていることを確認した。これに対し、タイムストレッチャ通過後である(b)の FWHM は約 13 ns であった。これより、タイムストレッチャ通過により、超短パルスレーザの 1 ps 以下のパルス幅が、13 ns へと大きく延ばされたことがわかる。また、13 ns という測定値は、群速度分散-600 ps/nm の絶対値と波長スペクトルの FWHM : 20 nm の積で得られる概算値 12 ns とほぼ一致する。このように、タイムストレッチャを使うことで、超短パルスレーザのパルス幅を広げることができ、その時のパルス幅は光ファイバの群速度分散と長さにより決まる。

つぎに、波長スペクトルを比較する。レーザパルス幅に比べて波長分散が十分に大きい場合、タイムストレッチ分光の出力波形は、入力パルスのフーリエ変換となる[4]。実験では、光スペクトラムアナライザにより波長スペクトルの測定を行った。その結果を図 4-4(c)と(d)に示す。下段(c)は通過前の波長スペクトル、上段(d)は通過後の波長スペクトルで、横軸は長波長側を左側にとった。タイムストレッチャを通過しても波長スペクトルは変化しないことがわかる。最後に、広げられた時間波形が入力光の波長スペクトルを示すことを示す。PD により取得した時間波形(b)と、光スペクトラムアナライザで取得した波長スペクトル(c)を比較すると、両者は相似であることが分かる。従って、タイムストレッチャを通過させて時間波形を取得することで、元の光の分光スペクトルを得られることが分かる。またこの点は、式 (4.1) においても説明した。

4.3.4. 干渉計部

干渉計部は大きく分けて、50:50 光ファイバカプラ、参照アーム、信号アームの3つの部分から構成される。干渉計部に入射したレーザパルスは、50:50 光ファイバカプラにより2つの光路に半分ずつの光量に分岐される。一方は参照光アームへ、他方は信号光アームへ、それぞれ導光される。参照光アームに導光された光は、SMF から空間へ出射される。そして、コリメートレンズにより平行光となり、対物レンズによりその焦点位置に集光される。焦点位置に参照ミラーを配置することで、ミラーに照射した光は反射し、対物レンズを通り再び SMF に入射する。そして、50:50 光ファイバカプラに戻る。ここで示したような、光ファイバカプラから出発して、参照ミラーで反射し、再び光ファイバカプラに戻る光路を、本論文では「参照光路」と呼ぶ。信号光アームへ導光された光も同様にして、SMF から空間へ出射される。そして、コリメートレンズにより平行光となり、直接反射ミラーにて反射し、再び SMF に入射する。そして、50:50 光ファイバカプラに戻る。ここで示したような、光ファイバカプラを出発し、信号ミラーで反射し、再び光ファイバカプラに至る光路を、本章では「信号光路」と呼ぶ。

光路長差について説明する。干渉測定では、信号光路と参照光路の光が感じる長さの差が重要な変数であり、一般的に「光路長差」と呼ばれる。光路長差は、参照ミラーの位置を前後に変えることで調整できる。参照ミラーの距離を移動させると、その2倍の光路長差が生じる。2倍となる理由は、この構成で、光はミラーまでの距離を往復するためである。本研究では、これらの往復の差分を「光路長差」と呼ぶ。

また、干渉計測では、光路長差がゼロとなる位置を知っておく必要がある。これは、後で述べる光路長特性測定などで必要になるためである。光路長差がゼロとなる位置は、干渉信号の観察により実験的に求めることができる。本実験系では、参照ミラーの前後位置を微調整しながら干渉計波形を観察した。干渉波形の縞の数は、参照ミラーの位置の前後に伴い変化する。この観察を通じて、干渉縞が出なくなる参照ミラーの位置を見つけることができ、その位置を、光路長差がゼロとなる基準位置として規定する。

4.3.5. 検出部

検出部の構成を説明する。参照光路を経た参照光と、信号光路を経た信号光は、50:50 光ファイバカプラで再び合波される。このうち半分の光量は検出部の方向に進み、PD に入射する。これら2つの光は、PD 上で干渉し、電気信号の波形として検出される。検出された波形は、リアルタイムオシロスコープにより記録される。本測定システムでは PD (Agilent 社製 83440B, 帯域 : DC-6 GHz) にて光信号を検出し、リアルタイムオシロスコープ (Tektronix 社製 DSA71604, 帯域 : 16 GHz, 50 G Sample/s) によりその信号波形が記録された。

4.4. 測定システムの基本特性

ここでは、構築した測定システムで取得される生データと、光路長を求める詳細手順を説明する。

4.4.1. 測定で得られる干渉信号

本測定システムで得られる干渉信号の概要を示す。本測定システムで得られるデータは、横軸が時間、縦軸が強度の時間波形である。図 4-5 に、光路長差を 2 mm に設定した時に得られる測定信号を示す。横軸は時間[nsec]、縦軸は信号強度である。図 4 - 5 (a)には時間が 2000 nsec の間に記録された波形を示す。図 4-5(a)では、20 個のパルスを確認でき、パルス間隔、すなわち周期は約 100 ns であった。これは、超短パルスレーザーの繰返し周波数と一致する。さらに、図 4-5(a)の点線で囲まれた 1 パルスを拡大したのが図 4-5(b)であり、1 つのパルスにおいて干渉信号が得られていることがわかる。これらより、10 MHz で干渉信号を測定できることを確認した。以下の説明では、図 4-5(b)に示したような 1 パルスの干渉波形を使って議論を進めるものとする。

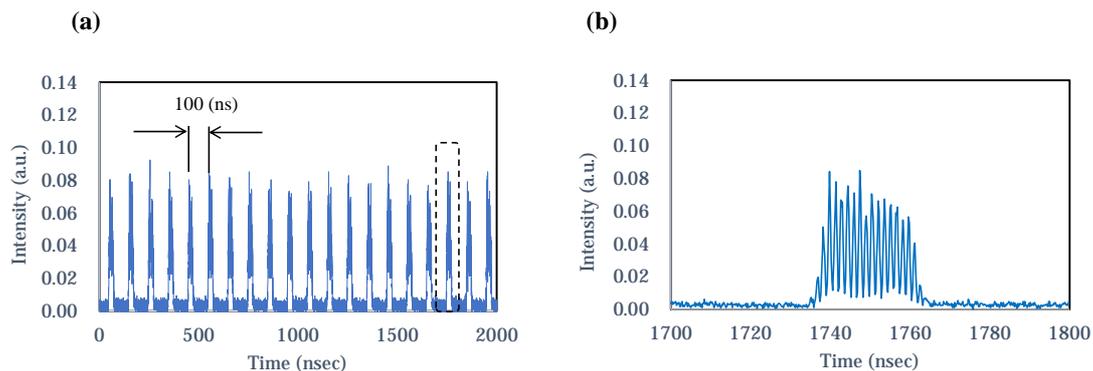


図 4-5 オシロスコープによる記録波形
(a)パルス列, (b) 1 パルスの詳細

次に、光路長を変化させた時に、干渉信号に現れる変化を説明する。図 4-6 に、手動ステージ操作により信号ミラーの位置を動かし、光路長差を、1 mm から 4 mm の範囲で変更した場合の干渉信号を示す。この時使用したタイムストレッチャの分散量は-300 ps/nm である。このグラフから、光路長差が大きくなるに従い、干渉信号の縞の周期は徐々に短くなる様子が分かる。

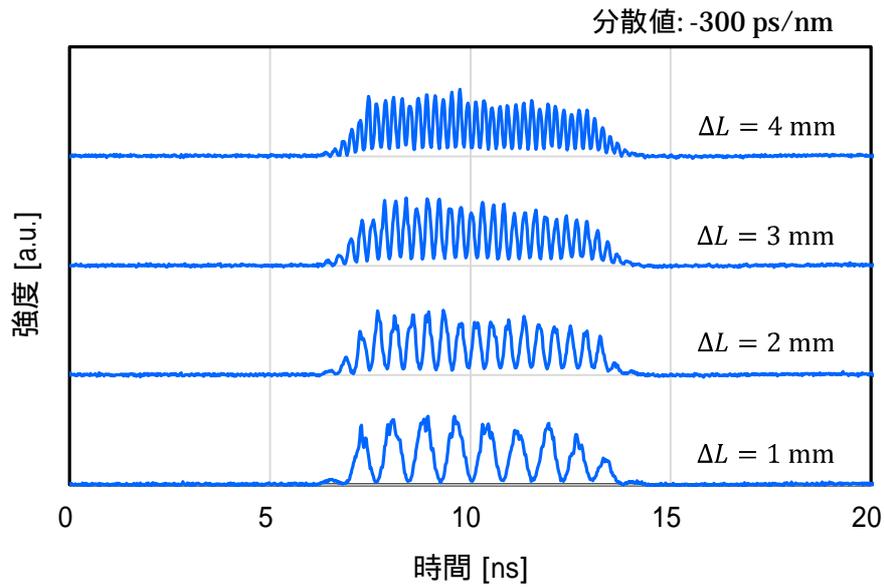


図 4-6 光路長差 L に対する干渉信号の変化

4.4.2. 干渉信号から光路長差を求める手順

リアルタイムオシロスコープで記録した干渉信号から、干渉計の光路差長を求める具体的手順を説明する。図 4-7 に、干渉信号から光路長を求める手順を示す。解析には、図 4-5(b)、及び、図 4-6 に示す、1 パルス分の干渉波形を取り出して計算に用いる。

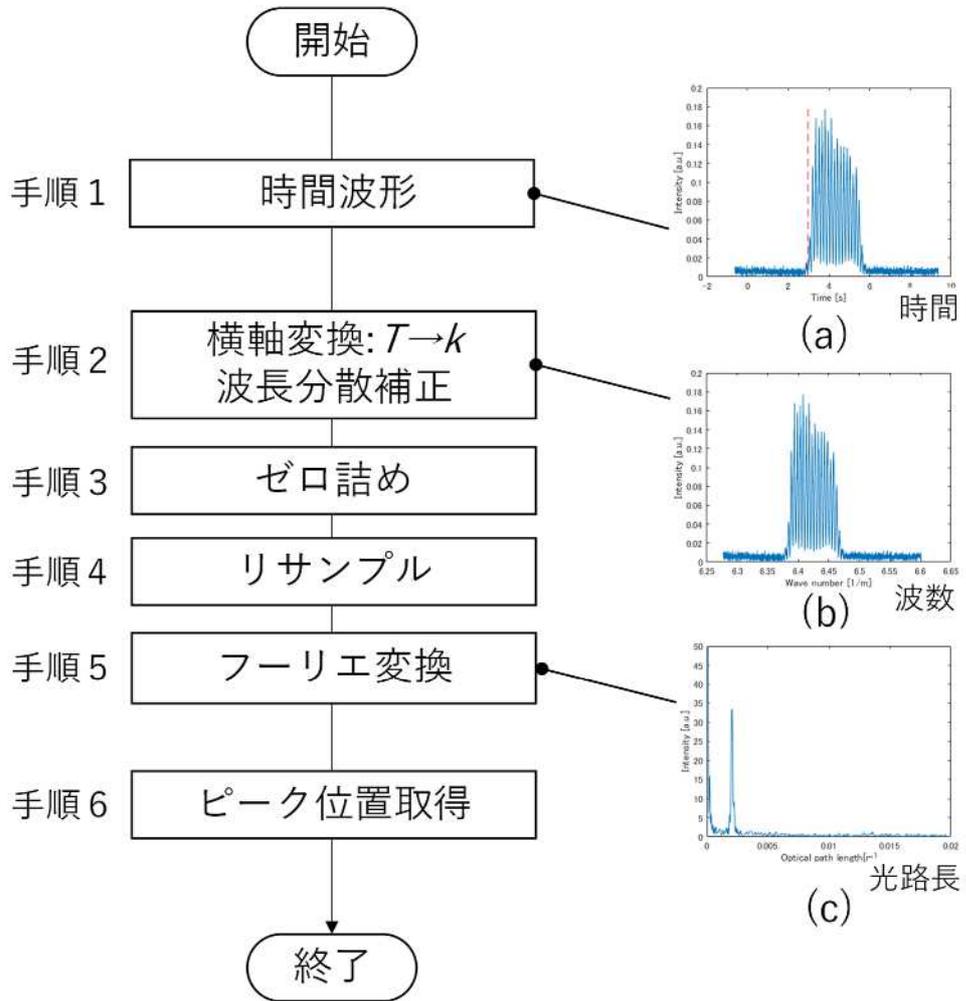


図 4-7 干渉信号から光路長を求める手順
(a)干渉信号, (b)干渉信号, (c)フーリエ変換

以下に手順1から手順6までを説明する。

手順1：パルス列の中から1パルスを取り出す。パルスの横軸は、時間[s]、縦軸は光強度である。この1パルスを解析の対象にする。

手順2：横軸を時間 T [s]から波数 k [1/m]へ変換する。第3章で説明したように、入射光はタイムストレッチャにより波長分散を受け、時間 T ごとに異なる波長が出射する。フーリエ変換により光路長を求めるためには、横軸が波数のデータが必要なため、時間 T を波数 k に変換する必要がある。本検討では、-600 ps/nm の波長分散値を用い、光スペクトラムアナライザ測定による最長波長の 1567 nm を基準として、時間 T から波数 k への変換を行った。この計算により、図4-7(b)に示すような、横軸が波数 k の干渉信号を得る。

手順3：ゼロ詰め(zero padding)として、横軸の波数に対して、両側に値ゼロのデータを作成する。

手順4：フーリエ変換されるデータは、横軸に対して等間隔となっている必要がある。しかし、(4.7)式により時間 T を波数 k に変換して得られたデータ配列は、波数に対して不等間隔となっている。そのため、波数に対して等間隔になるように横軸を区切り直し、縦軸の値を取り直し、リサンプリング処理を行う。処理には、MathWorks®社の計算ソフト MATLAB の resampling 関数を用いる。

手順5：続いて、前処理を行った干渉波形データをフーリエ変換し、強度をとる。これにより、図4-7(c)に示すような、横軸が光路長差[m]、縦軸が信号強度のグラフが得られる。

手順6：強度のピーク位置を見つけ、これに対応する横軸の位置を参照することで、干渉信号から光路長差が得られる。

以上に示す一連の手順により、1つの状態を解析することができる。そして、手動ステージにより信号ミラーを既知の光路長位置に移動させて2点目の測定を行い、同様の手順で光路長差を得る。これらの操作の繰り返しにより、横軸が光路長差、縦軸が強度の光路長特性を得ることができる。

4.4.3. 光路長特性

光路長特性を図 4-8 に示す。横軸は光路長差、縦軸は信号強度である。凡例は、手動ステージを動かして設定した光路長である。光路長差が 2 mm から 16 mm となるように、参照ミラーの位置を調整し、全部で 8 つのミラー位置について測定を行った。

光路長特性では、ピークの高さ、ピークの半値幅、ピーク位置の 3 つの指標に着目する。高さは感度に、半値幅は 2 点分解能に、位置は精度に、それぞれ対応する。光路長差が大きくなるほど、感度の低下と、分解能の増大の傾向が見られた。そして、半値幅拡大に伴い、ピーク位置の特定が困難になることが分かる。

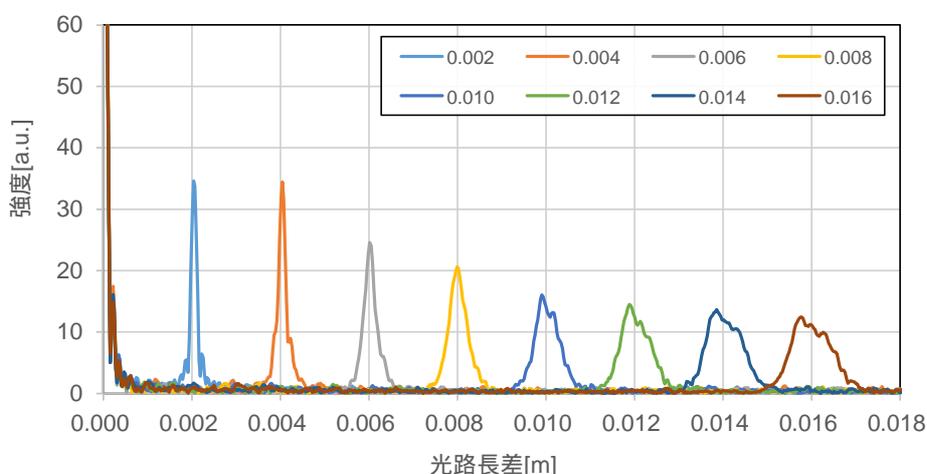


図 4-8 1 次の項までを考慮した場合の光路長特性の測定結果

ピーク高さ低下と半値幅拡大の原因は、分散補償ファイバの高次の波長分散であることが先行研究により示されている。そして、高次の波長分散を補正し、光路長特性の改善を試みる研究が行われている。次節では、本研究で行った高次の波長分散補正方法と、その効果について説明する。

4.5. 波長分散の測定方法とその補正

4.5.1. 一般的な波長分散の測定方法

前述のように、高次の波長分散の影響により、TS-LCI 計測の光路長特性は光路長が大きくなるに従って劣化する。劣化が起きない様にする為には、TS-LCI 計測の事前に波長分散を測定し、波長分散を補正したうえで図 4-7 の手順 2 を行う必要がある。すなわち、

$$k = a_0 + a_1T + a_2T^2 + \dots, \quad (4.7)$$

として、波数 $k (= \frac{1}{\lambda})$ を時間 T に関する多項式近似する必要がある。ここで、 a_0, a_1, a_2 はそれぞれ、定数項[1/m]、1 次の係数[1/ns/m]、2 次の係数[1/ns²/m]、 T は時間[ns]である。従って、(4.7)式を知ることができれば、時間波形の横軸を時間 T [ns]から波数 k [1/m]へ変換し、横軸が波数のデータを得ることができる。

実験的に波長分散を測定し、(4.7)式の係数を求める方法について説明する。干渉計測において、波長分散を求める方法は大きく 2 つの方式に分類することができる。分散媒体である光ファイバを単体で測定する方法と、分散媒体を含む干渉計全体を測定する方法である。前者はさらに、光ファイバの分散を時間遅れとして測定するパルス法と、干渉計測の位相から計算して求める干渉法の 2 つに分類される[5][6]。

これらの方法の一般的な特徴を表 4-1 に示す。分類 1 と分類 2 の大きな違いは、分類 1 では、分散光ファイバに起因する波長分散だけを測定するのに対して、分類 2 では、分散光ファイバだけでなく、その他の光学部品を含む干渉計全体の波長分散を測定する点である。

表 4-1 一般的な波長分散測定法

方式	概要	特徴
分類 1	分散ファイバを単体で測定する	パルス法： ・時間遅延が直接測定可能である ・測定系の校正が必要となるため管理に手間が掛かる
		干渉法： ・比較的短いファイバでも測定が可能である ・高精度な信号同期や高額な装置が必要となる
分類 2	干渉計全体を測定する	・短いファイバでは高精度な測定が困難である ・高額な装置が不要である ・干渉系全体のもつ分散を測定が可能である

出所：[5][6]を引用し筆者作成

4.5.2. 本研究における波長分散測定方法

本博士研究では、表 4-1 に示した 2 つの方式による波長分散測定を行った。波長分散を測定する目的は、図 4-7 の手順 2 で使用するための、時間 T から波数 k への変換式(4.7)を求め

ることである。そして、得られた係数を(4.7)式に適用し、手順2を行い、光路長特性を得た。以下に、本研究で行った2つの方式による波長分散測定の手順を説明し、得られた変換式を比較する。

ここで、本博士研究では、2次の項までを考慮することとする。そのため、(4.7)式を改めて、

$$k = a_0 + a_1T + a_2T^2, \quad (4.7a)$$

とした。この(4.7a)式の係数を求めることが当面の目標である。

4.5.2.1. 分類1：単体の分散ファイバを測定する方法

はじめに、分類1のパルス法による測定方法を説明する。パルス法では、分散補償ファイバを直接測定し、ファイバがもつ波長分散式を求める。先行研究では、Moon[7]らは、この方法で分散補償ファイバの測定を行い、波長分散の4次式近似を行った。本博士研究では、図4-9に示す波長分散分析装置(ADVANTST AQ7770)により、DCFのもつ波長分散を測定した。測定により、1530 nm-1570 nmの波長分散を求めることができた。この結果は後ほど示す。



図 4-9 使用した波長分散分析装置

4.5.2.2. 分類2：干渉計全体を測定する方法

分類2の干渉系全体の干渉信号から測定する方法を説明する。この方法は、本博士研究の主論文[1]の内容である。

LCI の干渉信号は、第 3 章の(3.4)式を用いて、

$$I = \exp\{i(2\pi k\Delta L + \varphi_0)\} , \quad (4.8)$$

$$\varphi = 2\pi k\Delta L + \varphi_0 , \quad (4.9)$$

と表すことができる。ここで φ は位相である。すなわち、干渉信号は光の位相で決まる。

つぎに、TS-LCI で取得する干渉信号の時間波形について考える。(4.5)のうち、干渉波形に寄与する成分を抜き出して書き直すと、

$$\begin{aligned} I &= \exp\left[i\left(\frac{\Delta L}{c\beta_{2z}}T_r - \frac{\Delta L^2}{2c^2\beta_{2z}} + \omega_0\frac{\Delta L}{c}\right)\right] \\ &= \exp[i(a\Delta L T_r + c.c.)] , \end{aligned} \quad (4.10)$$

とすることができる。ここで、 a 、 $c.c.$ は定数である。(4.5)式、および(4.10)式では、チャーププレートが線形であると仮定した。しかし、実際の光ファイバではチャーププレートの非線形性を考慮する必要がある。従って、時間 T の高次項を考慮し、(4.10)を以下のように変形する。

$$I = \exp\{i[(a_1\Delta L - b_1)T + (a_2\Delta L - b_2)T^2]\} \quad (4.11)$$

$$\varphi = (a_1\Delta L - b_1)T + (a_2\Delta L - b_2)T^2 \equiv B_1T + B_2T^2 \quad (4.12)$$

ここで、 a_1, a_2 はチャーププレートに依存する定数、 b_1, b_2 は定数、 φ は位相である。

一方で、光の位相は、ヒルベルト変換により求めることができる[8]。ヒルベルト変換は、波形の元信号から、瞬時振幅と瞬時位相を求める計算方法である。本博士研究でも同様に、測定された時間波形をヒルベルト変換することにより瞬時位相を計算した。図 4-10 に、ある特定の ΔL で測定した干渉信号から瞬時位相を求める手順を示した。図 4-10 (a)が実際に測定された元信号で、(b)が瞬時振幅、(c)が瞬時位相である。位相は、2 ごと連続するようにアンラップ処理した。(c)のグラフに表すように、ある光路長 ΔL の 1 点における干渉波形から、ヒルベルト変換により位相を求められる。そして、(4.12)式にあてはめ、時間に関する二次関数にフィッティングする。そして、1 点の ΔL に対し、それぞれ 1 点の B_1, B_2 を求めることができる。

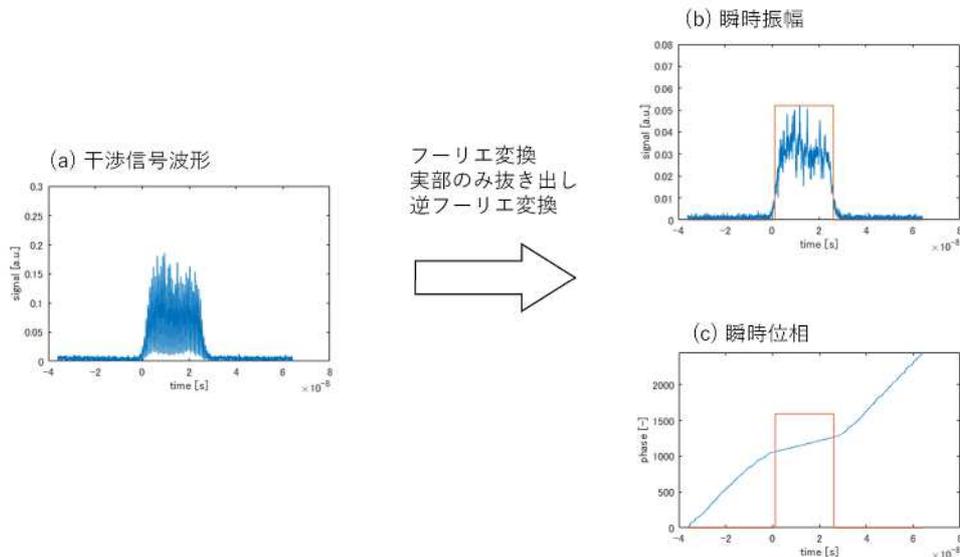


図 4-10 ヒルベルト変換手順

(a)元の干渉信号波形, (b)瞬時振幅, (c)瞬時位相

この手順により求めた係数 B_1 , B_2 と光路長差 ΔL の関係を図 4-11 に示す。(a),(b)の縦軸はそれぞれ、 $B_1[1/ns]$, $B_2[1/ns^2]$ 、横軸は両グラフとも $\Delta L[m]$ である。白丸でプロットした点は測定値、実線は測定点の一次の近似直線を示す。両グラフとも、 ΔL に対して一定の傾きを持つ直線であり、特に B_2 では原点を通らないことがわかる。

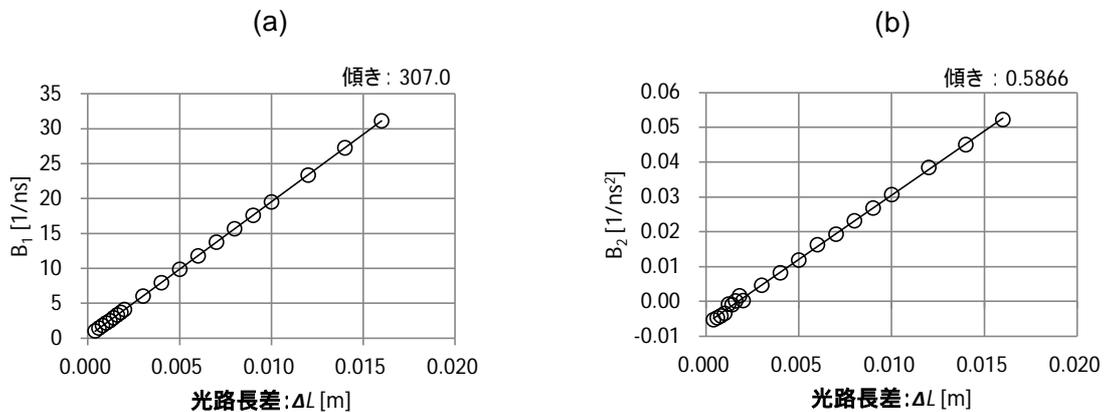


図 4-11 光路長差と係数の関係

(a)一次係数 B_1 , (b)二次係数 B_2

図 4-11 に示す B_1 , B_2 は、(4.12)式の定義より、

$$B_1 = a_1 \Delta L - b_1, \quad (4.11)$$

$$B_2 = a_2 \Delta L - b_2, \quad (4.12)$$

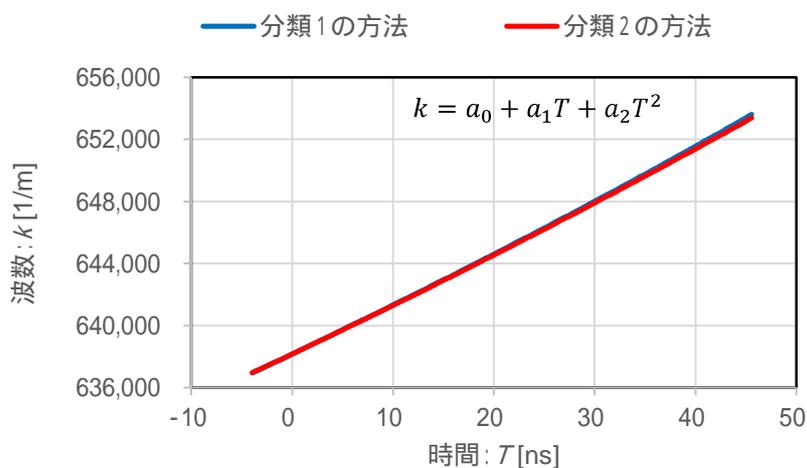
である。そのため、図 4-11(a)、図 4-11(b)に示す直線の傾きは、それぞれ、 a_1 、 a_2 に対応する。傾きから a_1 、 a_2 はそれぞれ、 $a_1 = 307.0 [1/ns/m]$ 、 $a_2 = 0.5866 [1/ns^2/m]$ と求められる。

た。また、最長波長である 1567 nm は、波数に換算すると $k = 638,162[1/m]$ である。時間 $T = 0$ において最初に検出されるのが最長波長であるとして、(4.7a) にあてはめ、 $a_0 = 638,162[1/m]$ とした。

最後に分類 2 の方法をまとめる。このように、分類 2 の方法では、まず、ある光路長の干渉信号からヒルベルト変換により位相 φ を求める。次に、位相 φ を、(4.12) 式に表す時間の 2 次関数にフィッティングし、 B_1 、 B_2 をそれぞれ求める。次に、 ΔL を変更し、複数の ΔL に関してそれぞれ B_1 、 B_2 を求め、 ΔL に対して B_1 、 B_2 をプロットしたグラフを作成する。そしてそのグラフの傾きから a_1 、 a_2 を求める。こうして得られた a_1 、 a_2 と、別で求めた a_0 を (4.7a) 式へ代入し、波長分散の補正式を得ることができる。

4.5.2.3. 波長分散補正式の結果

分類 1 と分類 2 の方法を比べる。分類 1 と分類 2 の方法により求めた、波長分散の補正式を図 4-12 に示す。グラフより、2 つの方法でほぼ同じような波長分散補正式を得ることができた。また、時間 T が大きくなるに従って、僅かではあるが 2 つの曲線にずれが生じていることが分かる。各係数を下の表に示した。 a_1 と a_2 に差異があり、特に 2 次の係数である a_2 の差が大きいことが分かる。



	分類 1 の方法	分類 2 の方法	単位
a_0	638162	638162	1/m
a_1	308.8	307.0	1/ns/m
a_2	0.6527	0.5866	1/ns ² /m

図 4-12 異なる方法により求めた波長分散補正式の係数

4.5.3. 光路長特性の比較

波長分散の2次の項まで考慮した補正の結果を比較する。まず、前節で求めた2つの波長分散補正式を使用し、時間 T から波数 k への変換を行った。以降は図4-7に示す手順で光路長特性を求めた。得られた結果を図4-13に示す。図4-8で示した、一次の項まで考慮した近似による結果も含め、全部で3つの方法を比較する。

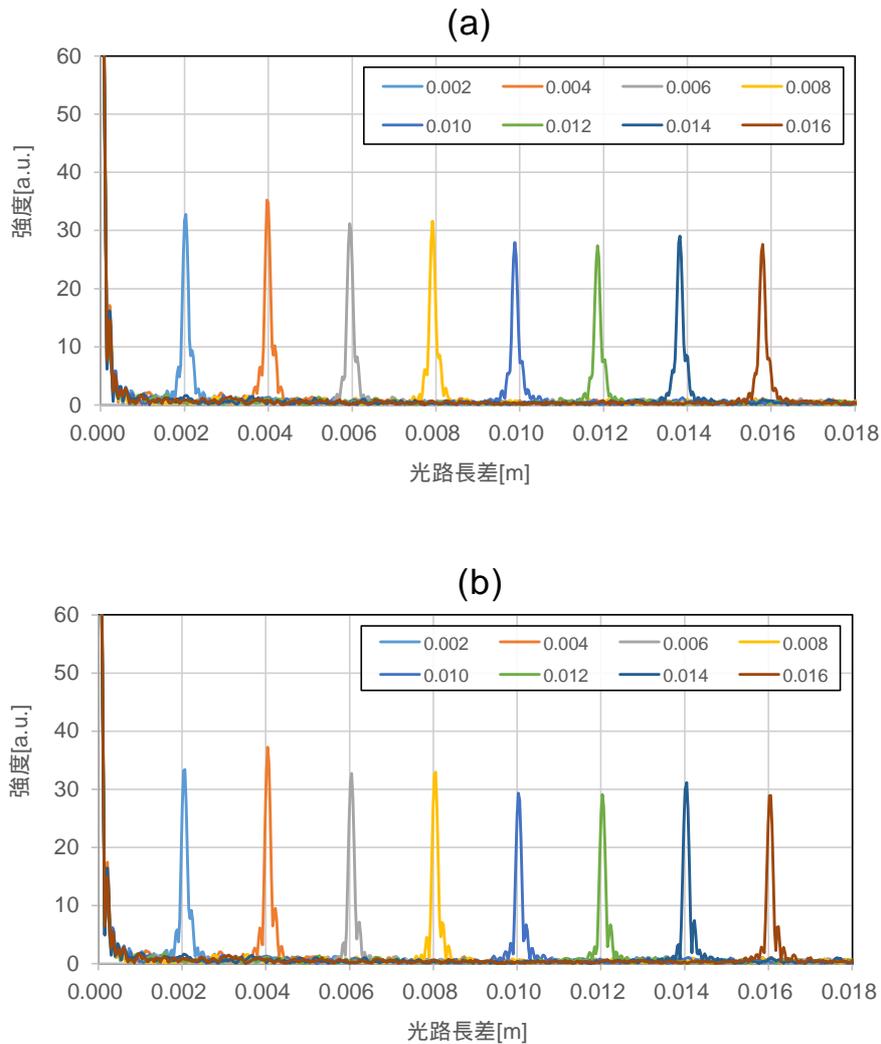


図4-13 波長分散補正式により求めた光路長特性
(a)分類1の方法, (b)分類2の方法

はじめに図4-8で示した1次近似と、図4-13に示す2次近似を比較する。図4-13(a)と(b)のいずれも、光路長差が大きい領域では、図4-8と比較して、ピークの高さは高い値を維持し、半値幅の拡大が抑制できていることが分かる。従って、(4.7)式の2次の項まで考慮することで、感度と分解能は改善できることが示された。

次に、図4-13において、分類1と分類2を比較する。凡例0.016 mの結果に着目すると、

図 4-13(a)ではピークの位置が 0.016 m から少し左側にずれていることがわかる。一方、図 4-13(b)ではずれが改善されている。(a)と(b)では、2 次の項を考慮した点は同じであるが、波長分散の測定方法が異なる。このことから、ピーク位置のずれ、すなわち精度を改善できた理由は、分類 2 の方法では、分散ファイバ以外の光学系に起因する波長分散の補正ができたため、と推測することができる。これは、分類 2 の方法のメリットと言える。

図 4-13 の光路長特性の横軸のデータ点同士の間隔はピーク位置測定の分解能を表し、30.9 μm であった。

4.5.4. 本研究で行った手法の新規性と有用性

本研究で行った手法(本手法)の新規性は、より正確に波長分散を求められことである。J. Kang らは、ヒルベルト変換により、時間から波数への変換式を導いた[9]。彼らは、光路長が 0.002 m の 1 点だけの測定を行い、この点と原点を結んだ 2 点の直線の傾きから係数を算出した。これに対して、本手法では、複数点の測定を行い、原点を通らない直線により近似した。従って、先行研究のやり方では、切片の分だけ係数に誤差要因が残るが、本手法ではこれによる誤差がないため、より正確で新しい方法であるといえる。

また、C. M. Eigenwilling らは、干渉計ではなく、光源自体の持つ波長分散を、位相解析により波長分散を事前に校正した[10]。タイムストレッチ技術ではないが、レーザ波長幅が 100 nm と広帯域であり、波長分散の影響が無視できないためである。構成は、LCI 計測用の干渉計とは別に、キャリブレーション専用のマツハツェンダ干渉計を準備した。この構成の難点は、キャリブレーション用の干渉計を準備することで、装置構成が複雑になる点である。

本手法の有用性は、測定が簡便に、安価にできることである。本手法を用いることで、4.5.2.1.に示したような高価な装置を使わずとも、干渉信号から干渉計全体のもつ波長分散を測定し、これを補正することができる。また、測定光源の波長スペクトルが変化した時や、タイムストレッチャを交換した場合などは変換式を求め直す必要はあるが、干渉信号から計算することができるため、波長分散方式の測定のために測定装置へつなぎ直す手間が不要である。

4.6. 結論

本章をまとめると、本章では、TS-LCIの実験系の構築とその基本特性、特性改善手段について説明した。測定の繰り返し速度は10 MHz、ピーク位置測定の分解能は30.9 μm 、測定可能な光路長は16 mm以上であることを示した。

詳しくは、4.2.では、TS-LCIの動作原理を説明し、タイムストレッチャに使う光ファイバのチャープ量が既知であれば、干渉信号のビート周波数から光路長を知ることができることを示した。4.3.では、本研究で構築したTS-LCI測定システムの具体的な構成と、各部位におけるレーザ光の特性を説明した。4.4.では、構築した測定システムの基本特性の説明をする。基本特性として、測定の繰り返し速度と光路長特性について説明し、光路長が長くなるにつれて特性が劣化する点を指摘した。4.5.では、劣化した光路長特性の改善方法として、2つの分類による方法を説明し、得られた結果を具体的に比較した。比較により、本研究で見出した方法は、導かれる光路長位置が既存方法と比べ、より正確に求められることを示した。また、本研究の先行研究に対する新規性は、複数点測定による精度向上で、有用性は、測定の簡便さであることを述べた。

第4章の参考文献・引用

- [1] M. Hoshikawa, K. Ishii, T. Makino, T. Hashimoto, H. Furukawa, N. Wada ‘Low-coherence interferometer with 10 MHz repetition rate and compensation of nonlinear chromatic dispersion ’, *Optical review*, No.7, pp246-251(2020).
- [2] 鈴木将之, “タイムストレッチ分光法を用いたフェムト秒レーザーパルス形成のダイナミクス”, *レーザー研究*, 第49巻, 第4号(2021).
- [3] C. Dorrer, N. Belabas, J. P. Likforman, M. Joffre, ‘Spectral resolution and sampling issues in Fourier-transform spectral interferometry ’, *Journal of Optical Society of America B*, Vol.17, No.10 (2000).
- [4] 神成文彦, “「タイムストレッチ分光法とその応用 超高速光信号処理における時空間双極性 - 」解説総特集によせて”, *レーザー研究*, 第49巻, 第4号(2021).
- [5] 住村和彦, 西浦匡則, ‘解説 ファイバーレーザー 基礎編’, オプトロニクス社(平成23年).
- [6] 財団法人光産業技術振興協会, “JIS C 6827 光ファイバ波長分散試験方法”, (2005).
- [7] S. Moon and D. Y. Kim, ‘Ultra-high-speed optical coherence tomography with a stretched pulse supercontinuum source ’, *Optics Express* 11575, vol.14, No. 24(2006).
- [8] M. Wojtkowski, V. J. Srinivasan, T. H. Ko, J. Fujimoto, A. Kowalczyk, J. S. Ducker, ‘Ultrahigh-resolution, high-speed, Fourier domain optical coherence tomography and methods for dispersion compensation ’, *Optics express*, Vol.12, No.11, 2404-2422(2004).
- [9] J. Kang, P. Feng, X. Wei, E. Y. Lam, K. K. Tsia, and K. K. Y. Wong, “102-nm, 44.5 MHz inertial-free swept source by mode-locked fiber laser and time stretch technique for optical coherence tomography ’, *Optics Express* Vol. 26, Issue 4, pp. 4370-4381(2018).
- [10] C. M. Eigenwilling, B. R. Biedermann, G. Palte, R. Huber, ‘K-space linear Fourier domain mode locked laser and applications for optical coherence tomography ’, *Optics express*, Vol.16, No. 12, 8916-8937(2008).

第5章 ステルスダイシング技術への応用

5.1. 本章の目的

本博士論文ではこれまでに、SD 事業の競争力を高めるための技術開発について述べた。具体的に、第1章では本博士論文の背景を説明した。そのなかで、レーザ加工技術の一つであるSD技術とSD事業を説明し、本博士論文の目的を示した。第2章では、「分割工程の前に、レーザ加工とリアルタイムでSD層深さを測定すること」がSD加工の顧客ニーズであることを明らかにした。また、その測定には、200 kHz以上の繰返し速度が必要であることを説明した。第3章では、SD加工を測定する為に、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測法(TS-LCI)が測定速度の観点から最適であることを説明し、第4章では、TS-LCIの開発を説明した。

そして、本章の目的は、TS-LCIのSD加工への応用により、第2章で掲げた技術課題を解決し、顧客ニーズ満足の可能性を実験的に示すことである。具体的には、TS-LCIによりSD加工の深さ位置が測定できることを示す。そのために、本章では大きく3つのことを行う。1つ目に、TS-LCIの測定システムを構築し、基本特性を確認する。2つ目に、実際のSD試料を測定し、測定結果を示す。そして3つ目に、確立した測定方法が、顧客ニーズに対してどのようなメリットを持つのか検討する。また、本章で開発するTS-LCIは、第4章で開発したTS-LCIを基本とし、SD層からの微弱な散乱光測定に特化するため、対物レンズと光増幅器を導入し、光信号の検出感度向上に取り組む。

なお、本章で説明する計測システムは、第4章で説明したシステムを基本として、SD加工の測定に適するよう、自社内で新たに構築したものである。また、SD加工とTS-LCI測定は別の場所で行っている。つまり、本章で説明するのは、SD加工装置でレーザ加工がされたサンプルを、本計測システムに持ち込んで行った測定結果である。

5.2. タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測システムの構築

5.2.1. 計測システムの概要

はじめに計測システムの概要を説明する。本計測システムの外観を図5-1に、ブロック図を図5-2に示す。本計測システムは、1800×900 mmの光学定盤上に構築した。図5-2に示されるように、超短パルスレーザ部、タイムストレッチャ、干渉計部、検出部の4つの部分から構成されている。各部分の詳細は次節以降で説明する。これらの部分同士は、光コネクタを介してシングルモード光ファイバ(Single mode optical fiber, 以下SMF)または、偏波保持光ファイバ(Polarization maintain optical fiber, 以下PMF)で接続されている。

第4章で説明した計測システムの目的が基本特性を確認することであるのに対し、本章で構築する計測システムの目的は、SD加工サンプルを測定することである。



図 5-1 計測システムの外観図

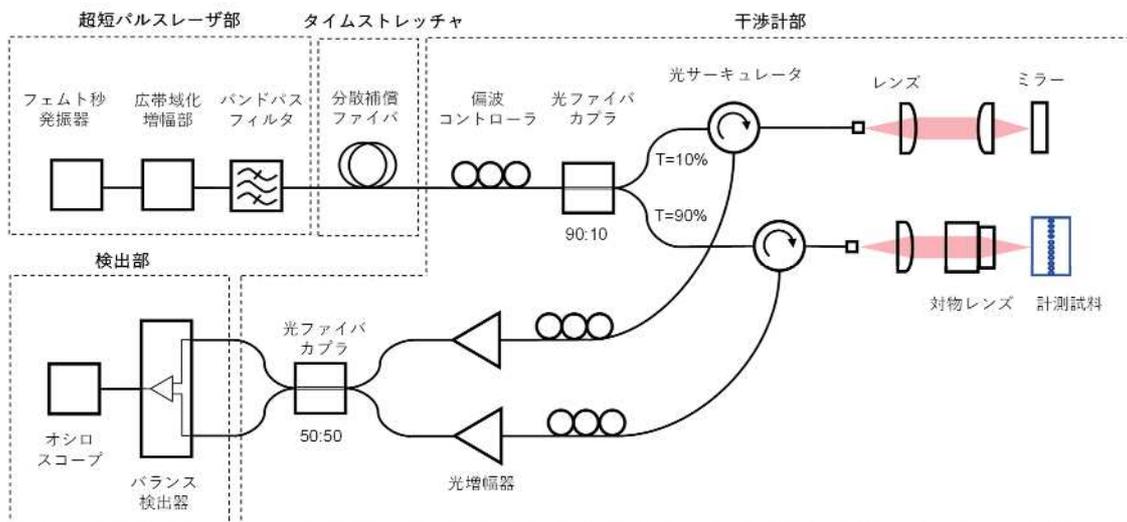


図 5-2 計測システムのブロック図

5.2.2. 超短パルスレーザ部

先述のように、超短パルスレーザ部の機能は、測定に使うための広帯域・超短パルスレーザを発生させることである。細かく見ると、3つの機能がある。1つ目は超短秒レーザを発振させる機能、2つ目は発振したフェムト秒レーザをさらに広帯域化する機能、3つ目は光強度の増幅をする機能である。以下に具体的に説明する。

実験で使用した超短パルスレーザ部は、筆者の自作である。外観は図 5-1 の中央部に示した。2つの箱に分かれていて、下側が超短レーザ発振部（前段部）、上側が広帯域化と光強度増幅の機能を持つ（後段部）。超短パルスレーザ発振器は、駆動電流値 102 mA で、パルス幅は 200 fs、繰り返し周波数は 14.87 MHz、光出力は約 2 mW であった。その時の波長スペクトルを光スペクトラムアナライザ（Optical spectrum analyzer, 以下 OSA,

YOKOGAWA : AQ63752) により測定を行った。波長スペクトルを図 5-3 (a)に示す。中心波長は 1558 nm、波長幅は半値全幅で 4.8 nm であった。特に、レーザ発振の繰返し周波数が約 15 MHz となるようにレーザの共振器長さを設計、作製し、その結果、14.87 MHz の繰返し周波数を得た。

後段部の機能は、光増幅と波長幅の広帯域化である。光増幅されたレーザパルスが、光ファイバ中を伝搬する際に非線形効果を受け、波長幅が広がる。後段部は、エルビウム添加ファイバ、波長 1480 nm の励起レーザダイオード(Laser diode, 以下 LD)と、WDM ファイバコプラを光ファイバ融着接続器により接続して組み合立てた。励起 LD の駆動電流値によって得られる光出力と波長スペクトルは変わるが、電流値 1200 mA とした場合に、28.9 mW の光出力が得られた。また、同様に OSA により測定した波長スペクトルを図 5-3(b)に示す。波長帯域は 1562 nm-1586 nm(3 dB 位置)であり、波長幅は半値全幅で 21.9 nm であることを確認した。後段部により、波長幅は 5 倍に、光出力は約 6 倍にすることができ、より広帯域で高強度の超短パルス光源を、測定用の光源として得ることができた。

また超短パルスレーザ部には、オシロスコープでの波形記録が容易となるように、2つの工夫をした。1つ目はトリガー信号の取り出しである。超短パルスレーザの出力の一部を1%タップコプラにより取り出し、光 - 電気変換し、データ記録の為にトリガー信号として利用した。2つ目は波長の長波長端に目印を付けた事である。具体的には、光源部の最後段に可変式の短波長透過型バンドパスフィルタ (Band pass filter, 以下 BPF、WL Photonics 社製, WLTF-BM-P-S-1560-SM-0.9/1.0FC) を挿入し、透過する波長の長波長端を 1600 nm となるように調整した。図 5-3(c)に、波長フィルタ調整した時の波長スペクトルを示す。この図では、1600 nm の位置にエッジが確認できる。このエッジは時間波形にも表れるため、時間波形の立ち上がりに対応する波長を 1600 nm とすることが可能となった。

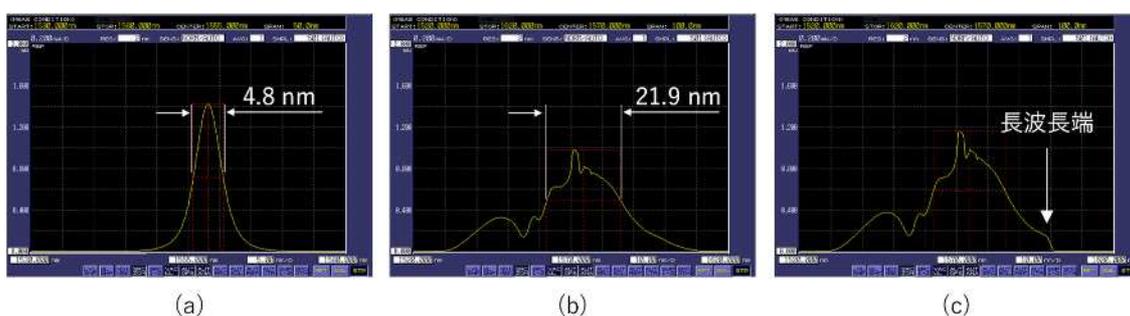


図 5-3 光源部の波長スペクトル
(a)超短パルスレーザ, (b)後段部通過後, (c)BPF で長波長端を 1600 nm に調整した時

5.2.3. タイムストレッチャ

タイムストレッチャの機能は、第4章でも説明したように、レーザのパルス幅を時間的に伸ばすことである。タイムストレッチャには、ofs社製のDCFを用いた。分散係数は、-300 ps/nm から-900 ps/nm である。このDCFを通すと、波長1 nmあたりで300 ps から900 ps、短い波長が長い波長よりも遅れて進むことを意味する。従って、DCFからの出射光は、長い波長が先に出射する。

DCFを通過させる前後のパルス波形をフォトダイオードPDにより測定をした。InGaAs-PD (Thorlabs社製、型番: DET08CFC/M) で光を検出し、リアルタイムオシロスコープ (LeCroy社製、型番: Wave Master 813Zi-A, 帯域: 13 GHz, サンプルング数: 40 GS/s) で波形を記録した。結果を図5-4に示す。半値全幅のパルス幅は、DCFを通過させる前には100 ps以下であったものが、DCFを通過させた後は35 nsであった。パルス波形は図5-4(b)に示されるように、きれいなガウシアン形状ではない。そのためパルス幅の規定は簡単ではないが、本研究では、ピーク値に対して波高値に対する10%の範囲をパルス幅とした。

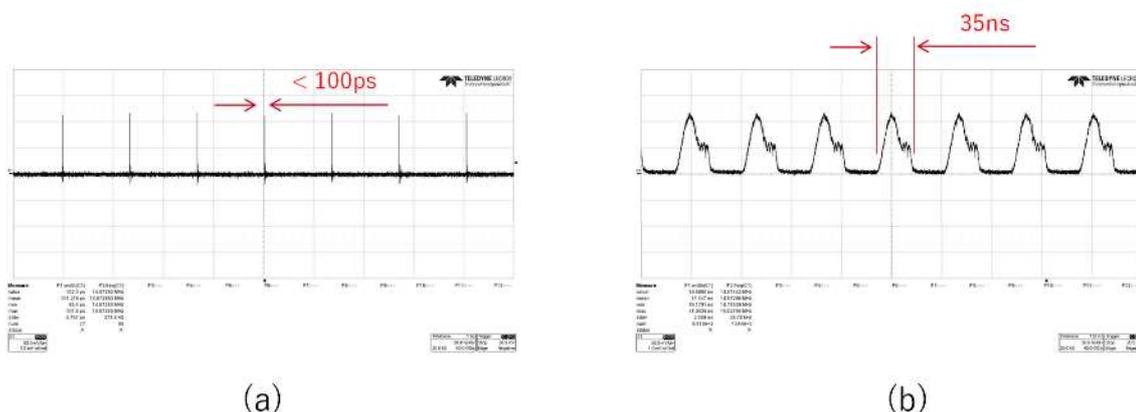


図5-4 検出したパルス波形の違い
(a) 分散補償ファイバ無し, (b)分散補償ファイバ有り

5.2.4. 干渉計部

干渉計部の説明をする。干渉光学部はブレッドボードの上に構築した。光路調整がしやすいように、ブレッドボードの上にさらにレールを敷き、その上に各ブロックを配置した。図5-2を使い説明する。干渉光学系は、マッハツェンダ型の干渉計である。タイムストレッチャを出射した測定光は、ファイバ型カップラにより、参照アームと測定アームの2つの光路に分岐される。参照アームと測定アームへ行った光は、それぞれ、参照ミラー、測定サンプルで反射、散乱され、光サーキュレータに戻る。光サーキュレータでは、参照光、信号光とも、測定光源の入射側とは別のポートへそれぞれ出射する。分岐後の光強度比率は、参照アーム10%、測定アーム90%である。干渉計測についての基本的な説明は、第3章の低コヒーレ

ンス干渉計測の項目を参照されたい。

参照アームの説明をする。参照アームは、光サーキュレータ(Thorlabs社製:6015-3-APC)、コリメートレンズ(Thorlabs社製:F280APC-1550、 $f=18.75\text{ mm}$)、集光レンズ(Edmund製: $f=30\text{ mm}$)、誘電体多層膜の全反射ミラー(Thorlabs社製)が配置されている。全反射ミラーと集光レンズは、集光レンズの焦点距離である 30 mm の位置を保ち半固定化したブロックとした。このブロック全体をレールに沿って動かすことで参照アームの長さを変更ができ、これにより参照光路の光路長が変更できる。光路長が微調整できるように、このブロックはマイクロメータを装備した直動ステージ上に設置した。

測定アームの説明をする。測定アームは、光サーキュレータ、集光レンズ、測定試料、ピエゾアクチュエータで構成される。集光レンズについてはいくつか検討を行ったが、本報告ではOlympus社製:LCPLN50XIR(NA0.65)の対物レンズを用いた。赤外光用の対物レンズで、補正環と呼ばれる収差補正機構を備えている。厚い材質の深い位置を顕微鏡観察したい場合、材質の屈折率により収差が発生し像がぼやける問題がある。この対物レンズは、この補正環を回すことで発生する収差の影響を低減し、像のぼやけを、ある程度解消することができる[1]。ピエゾアクチュエータは、測定サンプル位置を $0.1\ \mu\text{m}$ の位置精度で微調整するために使用した。

SD層からの微弱な信号を検出するために、干渉計部では3つの工夫をした。第1は90:10カプラにより、SD加工サンプル側へ照射する光量比率増大、第2は、補正環対物レンズによる、SD層への照射光とSD層からの戻り光の効率向上、第3は、光増幅器による、信号光強度増強である。光サーキュレータに戻ってくる光の強度は、ミラーや試料からの反射光、散乱光であるため非常に微弱である。微弱光のまま検出器へ導いても、雑音が大きく、期待する信号が得られない。そのためには、光を増幅することが有効であり、本測定系では半導体式の光増幅器(Thorlabs社製、型番:BOA1004)を参照アーム、測定アームの両方に導入した。これらの工夫により、SD層からの微弱な信号を検出できるようになった。

5.2.5. 検出部

検出部の説明をする。検出部は2つの部分から構成される。バランス検出器とリアルタイムオシロスコープである。バランス検出器は光信号を電気信号に変換する装置である。本測定系で使用したバランス検出器は、Finisar製:BPD2120R(帯域:64GHz)である。そしてバランス検出器により検出した電気信号を、リアルタイムオシロスコープにより記録した。信号は高周波であるため、バランス検出器とリアルタイムオシロスコープ間の接続にはSMAケーブルを使用した。

5.3. 測定結果

5.3.1. 基本特性

リアルタイムオシロスコープで取得された測定データについて説明をする。測定データは、時間軸の設定により見え方が異なる。図 5-5 は、時間軸の 1 目盛りをそれぞれ、(a)100 nsec とした場合、(b)10 nsec とした場合の信号波形である。横軸は時間[s]、縦軸は電気信号の強度(V)である。図 5-5 (a)では 67 nsec ごとに連続したピークが検出されていることが分かる。これは、超短パルスレーザーの繰り返し周波数の 14.87 MHz に対応する。

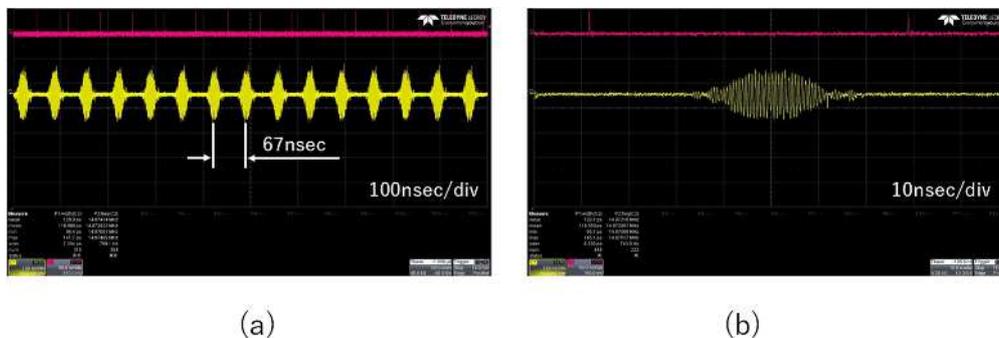


図 5-5 リアルタイムオシロスコープで取得したデータ
(a) 長時間領域 100 nsec/div, (b)短時間領域 10 nsec/div

第 4 章の図 4-7 に示した手順を行い、(b)の波形から時間から波数への変換式を求めた結果を示す。(4.7a)式において、 T は時間(ns)、 a_2 、 a_1 、 a_0 は、2 次の係数、1 次の係数、定数項であり、それぞれ、 $a_2 = 2.8368 (1/ns^2/m)$ 、 $a_1 = 608.505 (1/ns/m)$ 、 $a_0 = 625000 (1/m)$ であった。光源部には可変 BPF が挿入され、透過する長波長端を調節することが可能である。先に説明したように、本測定システムでは、BPF により最長波長端が 1600 nm となるよう調整した。従って、定数項は $a_0 = 625000$ と定めることができた。これらの係数を(4.7a)式に適用することで、インターフェログラムの横軸を時間 T から波数 k へ変換した。

図 4-7 の手順を引き続き行うことで、図 5-6 に示されるような光路長特性を得た。途中で行うゼロ詰めでは、データ長が 16384 要素(14bit 相当)となるようにデータ補完した。光路長特性は、与える光路長差を 0-18 mm の範囲として取得した。この図から 2 つのことが言える。第 1 は、フーリエ変換で得られるピークの半値幅(FWHM)が劣化しないことである。図には、光路長を 1 mm と 18 mm に設定した時に得られたピークの半値幅を示した。いずれの値も 192 μm であり、第 4 章で説明したような、光路長増加に伴う半値幅の劣化は見られなかった。第 2 は、広い光路長範囲で高い感度を示す点である。光路長特性のピーク高さが測定の感度を表す。この測定では、感度が半分になるのは光路長が 18 mm

であり、広い光路長範囲で高い感度が保たれていることが示された。光路長の分解能は、フーリエ変換時の横軸の最小目盛りに対応し、約 48 μm であった。

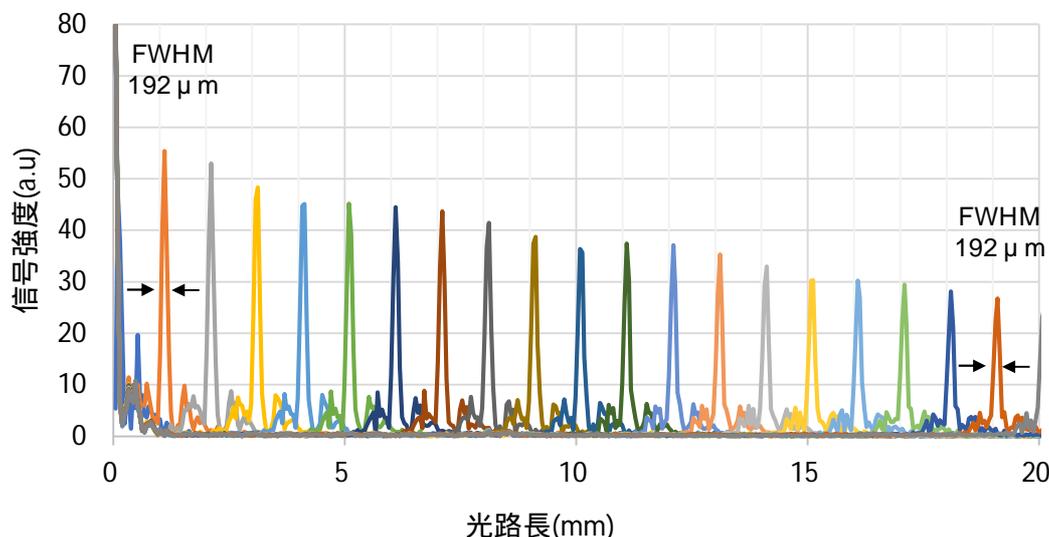


図 5-6 TS-LCI の光路長特性

干渉測定系の基本特性をまとめる。基本特性として、以下の表 5-1 に示す内容を確認した。測定の繰り返し周波数は 14.87 MHz であり、これは超短パルスレーザー光源に由来する。光路長測定の半値幅は 192 μm であり、0 から 18 mm の光路長範囲で劣化せず、半値幅はほぼ一定の値であった。一方、感度については、光路長が大きくなるに従い感度の低下 (Roll-off) が確認されたものの、感度が半分になる光路長は 18 mm と長く、波長分散を補正することにより、広い範囲で高い感度を保つことが示された。

表 5-1 構築した干渉測定システムの基本特性

項目	特性値
測定繰り返し周波数	14.87 MHz
光路長測定の半値幅	192 μm
光路長測定の位置分解能 (in Air)	48 μm
感度が半減する光路長	18 mm

5.3.2. ステルスダイシング加工サンプルの説明

測定に使用した SD 加工サンプルの説明をする。サンプルの詳細を図 5-7 に示す。測定試料の外観を図 5-7 (a) に示す。図から分かるように、シリコン基板は可視光に対して不透明であるため、基板内部に加工されている SD 層は目視では確認することができない。模式図を図 5-7 (b) に示す。両面研磨された、厚さ 775 μm のシリコン基板に 1 ラインの SD 加工

を行ったものを測定サンプルとした。SD 加工は、自社に保有する SD 装置（レーザ発振波長 1099 nm、繰り返し周波数 80 kHz、パルス幅 700 nsec、加工速度 800 mm/sec）を用いて行い、シリコン基板の内部に、1 ラインのレーザ加工がされている。この時の加工の深さ位置は、基板の表面から 440 μm の深さを狙った加工を行った。本測定系に設置できる試料サイズには制限があるため、最終的に縦 15 mm、横 12 mm の長方形の小片とした。図 5-7 (c)には、赤外顕微鏡による基板表面方向からの観察結果を示す。黒く写っている部分は、SD 加工による打痕や、亀裂が伸びている部分である。約 10 μm の間隔で打痕が形成され、打痕同士を繋ぐように亀裂が伸びている様子が伺える。しかし、このような顕微鏡観察では、深さ方向の情報を得ることができないため、LCI による深さ方向の測定が必要である。

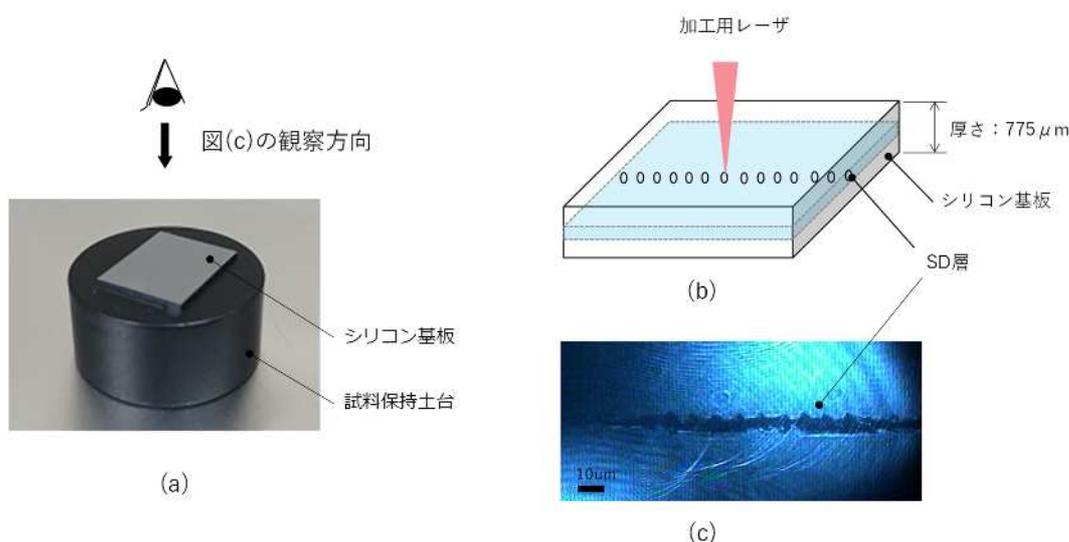


図 5-7 SD 加工サンプルの詳細
(a)外観写真、(b)模式図、(c)赤外顕微鏡写真

また、本測定系での解析の参照とするため、測定サンプルは別の方法でレーザ加工深さを予め計測した。但し、その方法は破壊検査であるため、測定試料を作製した時の同一ロット、同一ライン上に作製した別の小片を計測した。その結果、SD 層の深さ位置は、表面から深さ約 440 μm であることを確認した。

5.3.3. ステルスダイシング加工サンプルの測定結果

ここでは、構築した TS-LCI 測定システムにより、SD 加工サンプルを測定した結果を示す。

はじめに測定の配置図を説明する。測定をしたいのは、レーザ加工層の基板表面からの深さ位置である。測定用レーザと、測定試料の位置関係を図 5-8 に、測定アームの詳細を図 5-9 に示す。測定用レーザ光を、測定試料の表面から入射する。測定用レーザの一部は、基板

表面、SD層、基板裏面のそれぞれの位置で反射、散乱され、もと来たレンズへ再び結合する。この時に、それぞれの反射・散乱を受けた位置により通ってくる光路長は異なるので、干渉計測では異なる光路長の位置にピークが観測される。

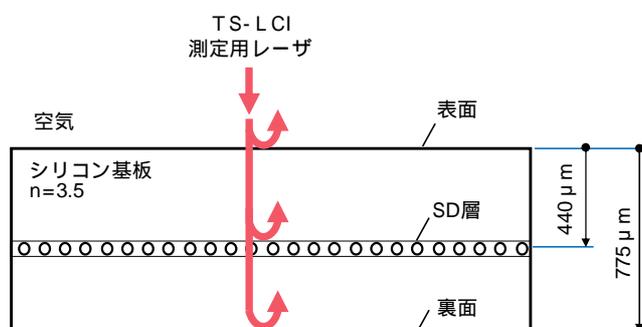


図 5-8 TS-LCI 測定レーザーと SD 加工サンプルの方位関係

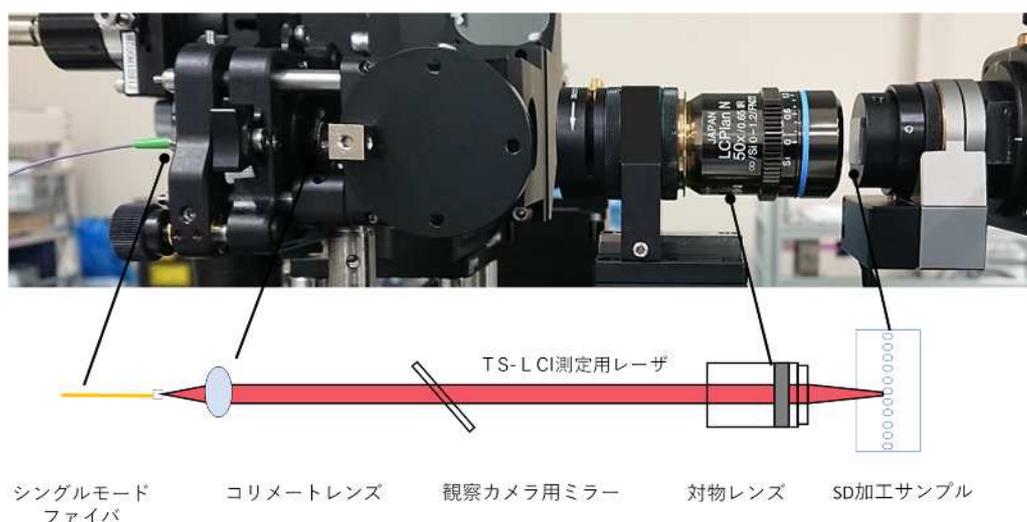


図 5-9 測定アーム詳細

次に、測定信号の解析結果を説明する。図 5-10 に、3 つの計測結果を示す。図 5-10(a)と (b)は通常の測定で、参照アームと測定アームの両方にレーザー光を照射して得られた結果である。このうち、図 5-10(a) は SD 層のある場所にビームを照射した時の結果、図 5-10(b) は SD 層の無い場所の測定結果である。これらに対して図 5-10(c)は、参照アームの光を遮り、測定アームに光だけを照射して得られた結果である。図 5-10(c)は、「自己干渉」と呼ばれ、測定アームに照射された光同士の間で起きる干渉(例えば基板表面から返ってくる光と基板裏面から返ってくる光の間で起きる干渉)によるピークである。ここでは自己干渉に関する詳しい解析はしない。改めて図 5-10(a)をみると、A-E の 5 つのピークを確認することができた。

次に、ピークの帰属をする。A-E のピークうち、A と B のピークは図 5-10(c)にも同じ光路長位置にみられるため、自己干渉によるものと判断できる。図 5-10(b)では、SD 層が無い箇所の測定を行い、C と E の位置にピークが得られた。これにより、C と E は基板によるピークであることが分かり、C は基板表面、E は基板裏面にそれぞれ帰属することができた。さらに、図 5-10(a)と(b)を比べると、(a)の SD 加工直上でのみ、表面 C と裏面 E の間に D のピークが検出されることから、D のピークは SD 層に帰属することができる。

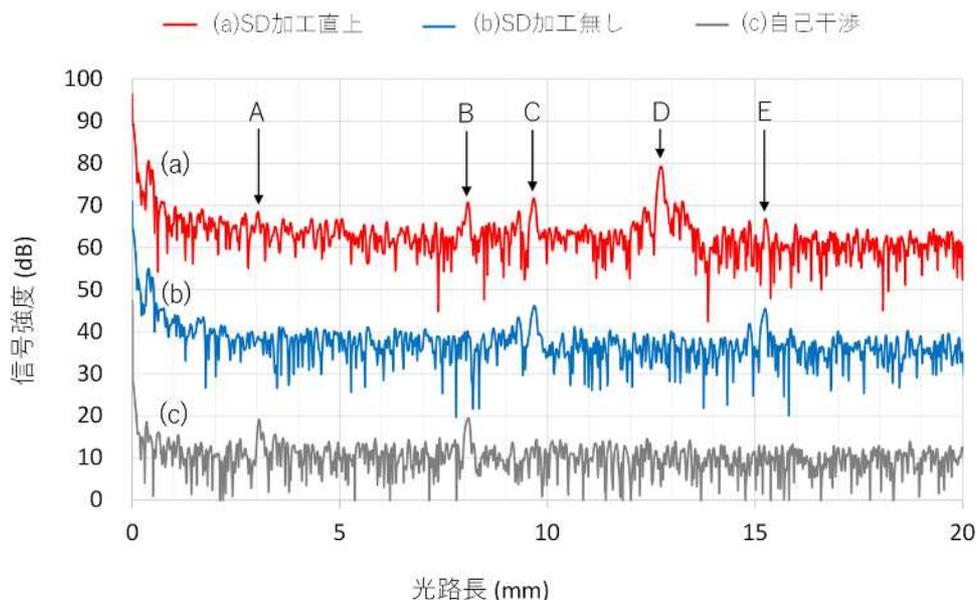


図 5-10 SD 加工サンプル測定解析結果のグラフ
(a)Si 基板の SD 加工の直上, (b)Si 基板の SD 加工の無い所, (c)自己干渉

最後に帰属されたピークから距離を求める。表 5-2 に、これらのピークの光路長差位置、ピーク C を基準とした光路長差を示した。また、(1)として記載した光路長差は往復の光路長差であるので、この値を 2 で割り、さらにシリコンの屈折率 3.5 で割り、片道の経路長差に換算した。C は基板表面、D は SD 層であるため、基板表面から SD 層までの深さは 0.434 mm と求められた。断面観察により予め求めた 0.440 mm に対して、1.5 %小さな値であった。また、シリコン中の位置分解能は、フーリエ変換時の横軸の最小目盛りを片道当たりの経路長に換算した値で、 $6.86 \mu\text{m}$ ($48 \mu\text{m} \div 2 \div 3.5$)であった。SD 加工では、シリコン中の加工位置を $4 \mu\text{m}$ の精度で制御し、条件出しを行っている。それを鑑みると、 $6.86 \mu\text{m}$ という位置分解能はまだ十分とは言えない。一方で、深さ方向に $10 \mu\text{m}$ 以上の SD 層蛇行が発生するような加工異常が有る場合に、異常を検出可能な分解能であるということもできる。分解能向上については今後も検討が必要であり、ゼロ詰めを使用するデータ数増加や、フィッティング関数を使用したピーク位置検出などが考えられる。

表 5-2 SD 加工サンプル測定結果で得られたピークの帰属

ピーク	光路長差 (mm)	C 基準とした 光路長差(1) (mm)	片道経路長差 (1) ÷ 2 ÷ 3.5 (mm)	ピークの帰属
A	3.05	-	-	サンプルアームの自己干渉
B	8.10	-	-	サンプルアームの自己干渉
C	9.69	0	0	シリコン基板表面
D	12.73	3.04	0.434	SD 層
E	15.24	5.55	0.792	シリコン基板裏面

5.4. ステルスダイシング技術の課題に対する考察

5.4.1. タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測導入のメリット

本博士研究で開発した TS-LCI 技術により、ダイシング工程にどのようなメリットがあり、課題解決に繋がるのかを考察する。本研究の第 2 章では、自社内の SD 技術のユーザであるダイシング工程 Y1 のニーズを明らかにした。以下に、表 2-7 を再掲する。すなわち、ニーズは、「分割工程の前に SD 層の深さを測定すること」である。

(抜粋して再掲) 表 2-7 ダイシング工程 Y1 のニーズ

運営方針	(1)ダイシング工程起因の不良ゼロ (2)早期の異常検出
あるべき姿	・不良を出さず、かつ、ムダのないスムーズな工程
現状	・「抜取り検査」と「レシビ検討」に手間と時間が掛かる
問題点	・「断面観察」に依存した検査手順
ニーズ	・分割工程の前に、SD 層の深さを測定すること

一方、本博士研究で開発した TS-LCI 技術は、シリコン基板内の SD 層の深さを 15 MHz の繰返し速度で測定可能であり、その位置分解能はシリコン中で 6.86 μm である。これらがどのようなメリットになるのか確認するため、ユーザへのヒアリングを実施した。ヒアリングの対象は、第 2 章にて参与観察を実施したのと同じ現場である。相手は工程責任者 D と、SD 加工条件開発担当者 I の 2 名である。ヒアリングの概要を表 5-3 に示す。

表 5-3 追加ヒアリングの概要

日時	2020 年 10 月 22 日
場所	事業部 Y のダイシング工程 Y1 (SD 技術のユーザ)
ヒアリング実施者	筆者
ヒアリング対象者	ダイシング工程責任者：D SD 加工条件開発担当者：I
内容	・開発した TS-LCI 技術の説明 ・同技術の使い方
回答	「1 ラインで異常が検出できれば 1 ウェハ丸ごと無駄にはならない。非常に助かる。」

ヒアリングでは、まず筆者から、開発した TS-LCI 技術により、SD 層の深さ測定が非常に短時間で検出できる可能性を説明した。加えて、この技術の将来展望として、レーザ加工機のインライン検査による加工監視が技術的に期待できる事を説明した。そして、SD 加工の条件出しの担当者 I からは、「1 ラインで異常が検出できれば 1 ウェハ丸ごと無駄にはならない。少量多品種では非常に助かる。」という回答を得ることができた。

重要なのは、ダイシング工程 Y1 が極少量多品種生産体制をとり、事業部全体の生産スケジュールを守ることを運営方針としている点である。Y1 が加工依頼を受けるウェハの数量は非常に少ないため、デバイスが作りこまれたウェハ 1 枚を丸ごと加工失敗してしまうと、生産スケジュールを守れないため、製造現場にとって非常に大きな問題となる。従って、TS-LCI 導入により、加工ラインの 1 ライン毎に異常が無いことを確認することができれば、デバイスウェハの全損という最悪の事態を免れることができるため、ダイシング工程 Y1 にとって意味があることが分かった。

5.4.2. 今後の課題

以上により、SD 加工の測定が可能な TS-LCI 測定システムが実現でき、ダイシング工程へ導入することで得られるメリットについて説明した。但し、ダイシング工程 Y1 で使えるようにするためには、TS-LCI 装置を小型化してダイシング装置へ組み込み、1 本の SD 加工の度に測定可能な装置構成にする必要がある。そのためには、まず、干渉計部全体を箱の中に収めてモジュール化する。次に、各部品、モジュール同士は可能な限り光ファイバによる接続方式とする。さらに、図 5-9 に示した測定アーム部分を、小型かつ堅牢な光学ヘッド化し、光学ヘッド部分をダイシング装置へ組み込みが可能なようにする。

光学ヘッドの配置は 2 通り考えられる。図 5-11 に 2 つの配置とモニタリング方式を示した。1 つ目は(a)で、光学ヘッドと SD 加工ヘッドを別軸として、同一加工線上に並べた配置、2 つ目は(b)で、光学ヘッドと SD 加工ヘッドを同軸で一体化させた配置である。前者はインラインモニタリングが、後者はリアルタイムモニタリングが、それぞれ可能である。いずれの配置の場合でも、1 本の SD 加工の度に深さ位置の測定が可能な構成とすることが

でき、第 2 章でも説明したように、抜き取り検査とレシビ検討作業の中で行われている断面観察の代替手段の一部と成り得る。

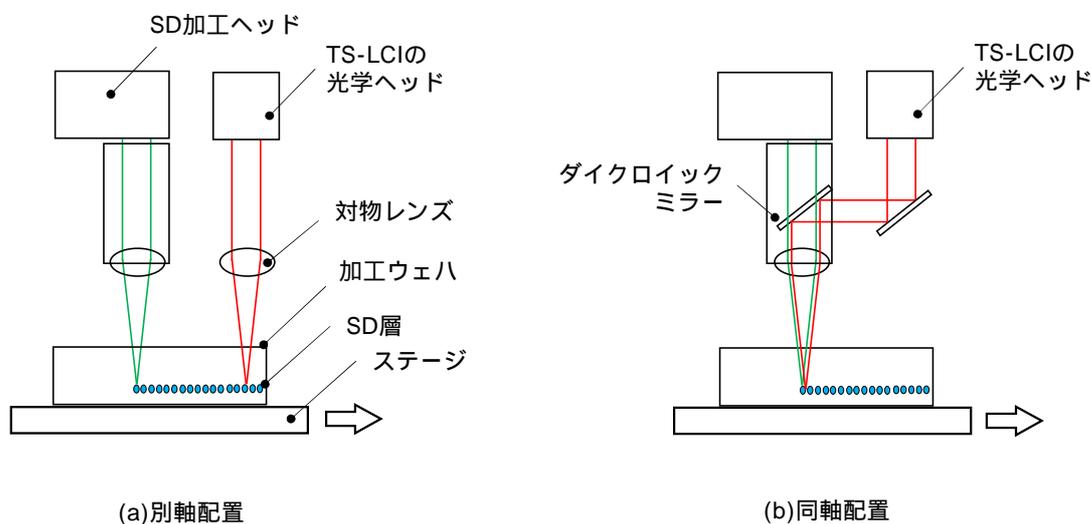


図 5-11 TS-CLI の配置
(a)別軸配置, (b)同軸配置

5.5. 結論

本章をまとめる。本章では、3つのことを行った。第1に SD 加工を測定する為に TS-LCI システムを構築した。フェムト秒レーザー光源は自作の SC 光源で、繰り返し周波数 14.87 MHz、光出力 2 mW であった。また、BPF を使うことで、長波長端を容易に識別できる構成とした。SD 加工を測定するために、90:10 カプラの使用、補正環つき対物レンズの使用、光増幅器とバランス検出器による光信号処理、の3つの工夫を行った。第2に、SD 加工の測定を行った。構築した TS-LCI 測定システムにより SD 層からの微弱な信号を高い S/N 比のまま検出することができた。シリコン中における測定の位置分解能は 6.86 μm であった。実際の SD サンプル測定に応用し、表面から深さ 440 μm の位置にある SD 層に対し、434 μm と測定することができた。第3に、TS-LCI の導入により、実際に製造工程にどのようなメリットがあるのか検討した。ユーザへのヒアリングの結果から、加工ラインの 1 ライン毎に異常が無いことを確認することで、デバイスウェハの全損を免れ、生産スケジュールを守られる点にメリットがあることが分かった。今後の課題は、装置へ組み込むために小型化することである。

第 5 章の参考文献・引用

- [1] オリンパス株式会社 web, “顕微鏡の構成と仕様”, <https://www.olympus-lifescience.com/ja/support/learn/03/047/>, (最終閲覧日, 2021 年 7 月 1 日).

第6章 技術開発の成功要因の抽出

- ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づいて -

6.1. はじめに

6.1.1. 本章の目的

本博士論文ではこれまでに、ステルスダイシング(SD)事業の競争力を高めるための技術開発について述べた。具体的に、第1章では本博士論文の背景を説明した。そのなかで、レーザー加工技術の一つであるSD技術とSD事業を説明し、本博士論文の目的を示した。第2章では、「分割工程の前に、レーザー加工とリアルタイムでSD層深さを測定すること」をSD加工の顧客ニーズとして挙げた。また、その測定には、200kHz以上の繰返し速度が必要であることを説明した。第3章では、SD加工を測定する為に、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測(TS-LCI)が測定速度の観点から最適であることを説明した。第4章では、TS-LCIの実験系を構築し、特性の改善を図るために多項式近似による波長分散補正が必要な点を説明した。また、第5章では、SD加工のリアルタイム計測にTS-LCIを応用した測定システムを開発し、技術課題解決の可能性があることを実験的に示した。

そして、本章の目的は、筆者が行った技術開発の成功要因を抽出することである。今後必要であろう技術開発の指針とするためである。そして、本章では大きく2つのことを行う。第1に、本研究において筆者が取り組んだ、技術開発活動(以下、本活動)を省察する。はじめに、筆者が取り組んだ本活動を俯瞰し、本活動の転換点(ここでいう転換点とは、本活動の中では欠くことのできない重要な働きでありながら、なぜそこに至ったのか理由が不明確な活動を指す。)を抽出する。そして、産学連携による技術開発に関する先行研究を参照し、本活動と比較分析する。次に、その転換点が生じた理由やその背景を明らかにするため、筆者の活動に強い影響を与えた所属先の上司2名に対してインタビュー調査を行う。このインタビュー調査の内容を、定性的かつ定量的に分析し、本活動の転換点に至った背景を深く掘り下げるとともに、成功とは何かを明確にする。

第2に、上記の成功の定義を踏まえ、本活動の成功要因について考察をする。先行研究と本活動を比較すると、本活動には先行研究の指摘に沿わない点があることが判明した。具体的には、先行研究では、「取り組み前の目標設定が曖昧であると成功しない」という指摘に対して、本活動では「取り組み前の目標設定が不明確であっても成功できた」ことである。このような矛盾がある中でも成功できた理由を説明するため、変化対応的な自己変革能力と言われる「ダイナミック・ケイパビリティ理論」に基づき本活動の成功要因について考察を進めるものとする。ダイナミック・ケイパビリティはイノベーションに必須の能力と言われており、今後の技術開発を成功させるためには、成功事例の考察は重要である。しかしな

がら、同理論は比較的新しい理論であるため、体系的検証に十分な数の事例が存在しない。特に、光技術開発に関して言えば、皆無と言ってよい。従って、筆者が行った本活動を光技術開発の成功事例と捉え、ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づいて分析し、成功要因を抽出する。

6.1.2. 本章の構成

本章の構成を説明する。本章は、本節を含み6つの節により構成される。

6.2.では、我が国のものづくり産業が抱える問題と、解決すべき課題を示す。そして、その課題解決のため、企業には変化対応的な自己変革能力が必要であることを、ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づいて説明する。そして、そのような能力が、現代企業の生存・成長にどのように役立ってきたのかについて、企業の実例により具体的に説明する。

6.3.では、産学連携による技術開発について述べる。はじめに筆者自身が取り組んだ技術開発を省察し、本活動の転換点として2つの出来事に着目する。次に、産学連携による技術開発の成功と失敗に関する先行研究を参照する。そして、筆者の活動と先行研究を比較し、筆者の活動が先行研究の指摘に一致する点と、一致しない点をそれぞれ挙げる。

6.4.では、上記の転換点に至る背景を確認するため、本活動に大きな影響を与えた所属先の上司へのインタビュー調査を行う。インタビュー調査で得られた記録を示し、それらの記録を定性的かつ定量的に分析する。定量分析では、インタビュー調査で得られた文章を単語単位に分解し、統計的手法により特徴的な単語のグループを抽出する。定性分析では、活動の転換点に至った背景や活動の目的を明らかにする。そして、これらの調査に基づき、筆者に期待されていたことを明確にし、本研究における技術開発の成功とはなにかを定義する。

6.5.では、上述の成功の定義を踏まえつつ、本活動の成功要因を抽出する。はじめに、成功要因を3つ挙げ、それぞれの内容について説明していくものとする。所属企業の企業風土の影響が考えられるため、同社の経営理念に触れる。そして、ダイナミック・ケイパビリティ理論で述べられている企業能力の特長を参照しつつ、筆者の上司、筆者のそれぞれが変化対応的な自己変革能力を発揮できたことが成功の要因であることを指摘し、6.6.にて本章のまとめとする。

6.2. 我が国のものづくり産業が抱える課題

6.2.1. 不確実性の高い状況下での競争力強化

我が国のものづくり産業が抱える課題を一言で言い表すならば、「不確実性が高く、環境の変化が激しいなかで競争力を強化すること」である。

事業を取り巻く環境の変化は、年々大きくなっている。図 6-1 は、三菱 UFJ リサーチ & コンサルティング（株）により行われたアンケート調査結果である[1]。国内企業を対象とし、今後 5 年間の自社事業の環境変化に関する意識を調査したものである。調査をした 2019 年では、「大規模な変化が見込まれる」「これまでよりは大きな変化が見込まれる」の回答をした企業の割合は合計で 60%を超えており、環境が大きく変化すると認識している企業が大勢を占めている。

競争環境には、企業自身がコントロール可能な内部環境と、企業独自の努力ではどうすることもできない外部環境の 2 つがあるが、ここでいう環境とは主に外部環境を指す。外部環境はさらに、機会と脅威に分けられる。機会は、その企業にとってのプラス要因を指し、新規顧客獲得の機会、外部連携の機会、新規用途獲得の機会などがある。一方で脅威は、その企業にとってのマイナス要因を指し、感染症流行の脅威、政治・経済の脅威、代替技術出現の脅威、などがある。現代は、機会と脅威の移り変わりが激しく、要因が多岐にわたるため、先行きの見通しが立てにくくなっている。このように、各国の政策や国際情勢、事業環境に急峻な変化があり、予測しづらい状態を「不確実性が高い」と言う[1]。

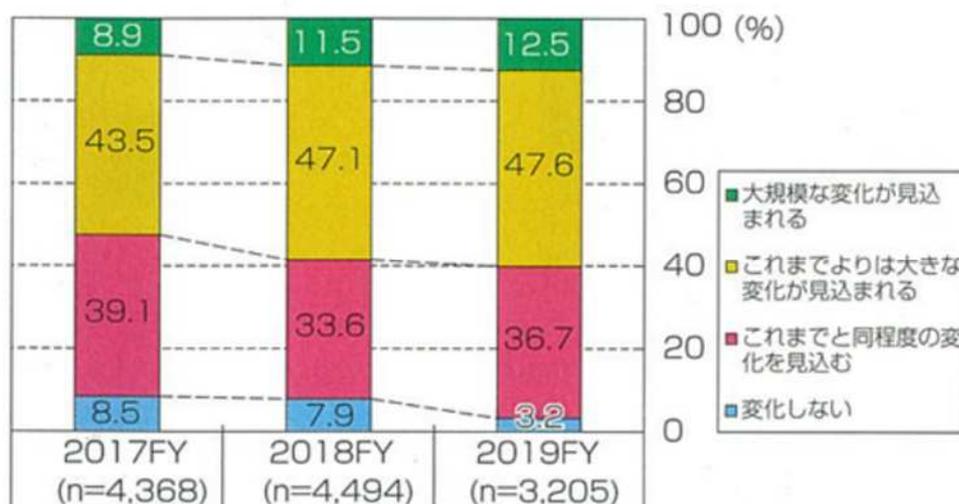


図 6-1 「今後 5 年間程度の自社ビジネスを取り巻く環境」に関する意識調査

出所：[1]より引用

政府が2001年から毎年発刊し、ものづくり基盤技術の振興に向けて講じた施策に対する報告書である「2020ものづくり白書」によれば、我が国のものづくり産業の競争能力の維持には、環境変化に適合するように自分自身を変化させる「ダイナミック・ケイパビリティ」の必要性が指摘されている[1]。

我が国のものづくり企業は、製品の品質や、大規模生産による低コスト化、ケイレッツによる迅速な提案力、といった強みを中核的な競争力として成長してきた。しかし、中心的な競争力は永続的なものではない。時代の流れと共に競争環境は変化し、かつては強みとして活かしていたとしても、その競争力は次第に失われてしまう。最初は技術レベルが高くて模倣困難な製造技術であっても、拡張現実(Augmented reality, 以下 AR)や人工知能(Artificial intelligence, 以下 AI)に代表される新技術の出現を機に、次第に他社による模倣が容易になってしまう場合がそうである[2]。そのような変化の激しい競争環境の下、企業が競争力を維持する為には、企業は自社の強みや利用可能な経営資源の見直しを絶えず行い、環境変化に適合するよう、戦略、あるいは自分達自身を変化させ続ける必要がある。

しかし、我が国のものづくりでは、このような環境変化に対して適応することができなかった苦い経験を持つ。携帯電話技術、家電技術、液晶技術はその例である。具体的には、シャープ株式会社の事例を挙げることができる。同社にとって、液晶技術は中核的な競争力であり、同技術を小型電子辞書や大型ディスプレイに用途開発し、電子産業の巨人として君臨した。しかし2008年になると、サムスン電子などの新興勢力が台頭し、競争環境が激変した。しかし、当時の同社は、自社を見直し、変化に対応することができなかった。原因は、自社の中核的な競争力を再定義することで無駄になってしまう埋没費用と、機会損失が非常に大きかった為である。これらにより社内の既得権者を説得することができず、その結果環境の変化に対応しきれず、競争力が低下してしまった。

このように、不確実性が高く、競争環境の変化が激しい現代において、企業が持続的に成長を続けるためには、企業家にはある能力が必要であると指摘されている。その能力が、「ダイナミック・ケイパビリティ」である。ダイナミック・ケイパビリティは「不確実性が高い状況において、自己を改革し変化に適合する能力」と定義されている[3]。つまり、競争環境が変化してきた時には、変化を察知し、周囲を見渡し、環境変化に対応するように自分自身を適合させてゆくことが必要なのである。

6.2.2. ダイナミック・ケイパビリティ理論

先に示したとおり、「2020 ものづくり白書」の中でも注目され、我が国のものづくり産業に必要な能力と指摘されるダイナミック・ケイパビリティ理論とは、カリフォルニア大学バークレー校ハース・ビジネススクール教授の D. J. Teece により提唱された、組織の成長戦略に関する新しい理論である[4]。表 6-1 を用いて本理論について詳しく説明する。

まず、経営活動を実行するために必要な能力全般を、ケイパビリティという。ケイパビリティはさらに、オーディナリー・ケイパビリティ (Ordinary capability, 以下 OC) とダイナミック・ケイパビリティ (Dynamic capability, 以下 DC) に分けられる。簡易的に、OC は通常能力、DC は変化対応的な自己変革能力と比較される[5]。OC と DC の違いは表 6-1 に示したとおりである。OC は、事業環境が比較的安定している時に、ものごとを効率的に実行するために必要な能力であるのに対し、DC は、事業環境の変化が激しい時に、変化に対応してものごとを進めるために必要な能力である。

表 6-1 OC と DC の比較

	オーディナリー・ケイパビリティ	ダイナミック・ケイパビリティ
目的	技能的効率性	顧客ニーズとの一致 技術的機会や事業機会との一致
経営方針	利益最大化	付加価値最大化
獲得方法	買う、あるいは構築（学習）する	構築（学習）する
知識	知の深化	知の深化と知の探索
構成要素	オペレーション、管理、ガバナンス	感知、捕捉、変容
ルーティン	ベスト・プラクティス	企業固有の文化・遺産
経営上の重点	コストコントロール	企業的資産の再構成とリーダーシップ、（オーケストレーション機能）
優先事項	ものごとを正しく行う	正しいことを行う
模倣可能性	比較的模倣できる	模倣できない
結果	効率性	イノベーション

出所：[1][5]より引用

DC はさらに、ミクロ的基礎と呼ばれる 3 つの能力と、これらの能力を調整する機能（オーケストレーション）により構成される[3][6][7]。3 つの能力とは、「感知」する能力、「捕捉」する能力、「変容」する能力である。これらのミクロ的基礎の 3 つの能力について、Teece は以下のように述べている。「感知とは、ビジネス・エコシステムの他の要素を分析しながら、技術的機会の模索や市場調査を徹底し、顧客の声に耳を傾ける本来的に企業家に備わっている能力のことである。次に、捕捉とは、機会に対処し、そうすることで生まれる価値を捉えるための資源を動員することを指す。すなわち、顧客を満足させ、価値を引き出すようなビジネスモデルをデザインすることと関係し、そのために必要な資本や人材を確保する事も含まれている。さらに、変容とは、刷新を続けることをいい、急進的な新たな機会に対

処しなければならないときに、最も必要とされるケイパビリティである。そして、エコシステム内で有形・無形の資産を成功的に構築し、オーケストレーションする（調整する）企業が上手に利益を上げているとしているのである。」[5]

表 6-2 DC の三要素：ミクロ的基礎

感知（センシング）	顧客の声に耳を傾ける能力
捕捉（シーシング）	機会を捉え資源を動員する能力
変容（トランスフォーミング）	刷新を続ける能力

出所：[3]より引用

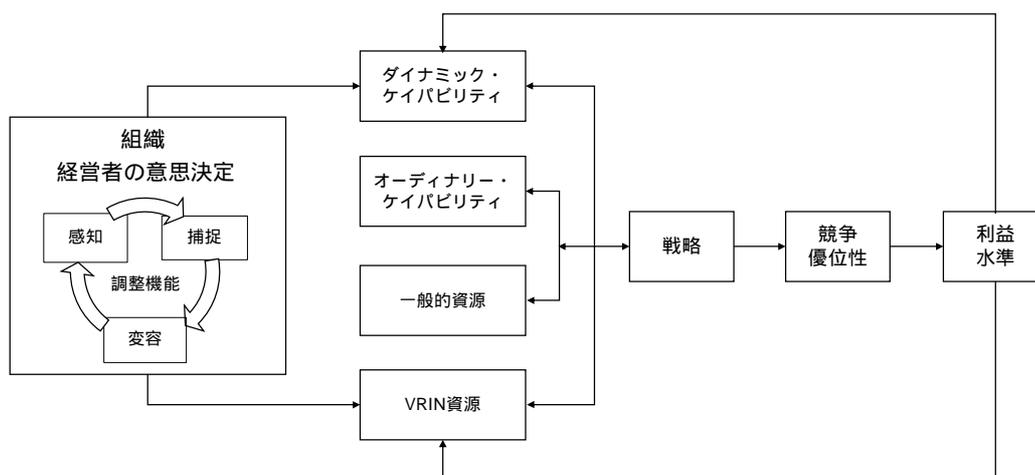


図 6-2 ダイナミック・ケイパビリティ・フレームワークの理論構造

出所：[4]より引用

図 6-2 に、ダイナミック・ケイパビリティ・フレームワークの理論構造を示した[4]。一番左に示されるように、経営者の意思決定は、感知、捕捉、変容のミクロ的基礎と調整機能によって構成される。また、DC は、ミクロ的基礎と調整機能だけでなく、良い戦略、VRIN 資源、利益水準がうまく組み合わせることで初めて成り立つことをこのフレームワークにより説明している。OC、DC どちらがよいということではなく、OC と DC は共存が可能である。また、OC は基本的にはどの組織にも備わっていると考えられるが、DC はどの組織にも存在するとは限らない。

図 6-2 の中の VRIN 資源について簡単に説明する。VRIN 資源とは、他社が模倣しにくく、かつ自社にとって利用価値の高い経営資源を指す。Value（価値）、Rarity（希少性）、Inimitability（模倣困難性）、Non-substitutability（非代替可能性）の 4 つの単語の頭文字をとってこう呼ばれる。企業がそれまでに獲得した VRIN 資源は経営上の強みとなる。それらの VRIN 資源のうち、他事業に転用し、再構成が可能な能力は、その企業にとって中核的な競争力、すなわち、「コア・コンピタンス」となる[3]。本田技研工業（株）にとってはエンジン技術が、かつてのソニー（株）にとっては小型化技術がそれに相当する。

6.2.3. 企業存続を左右する能力：ダイナミック・ケイバビリティ

先に述べたように、DC とは、環境変化の速い現代のものづくり企業に必要な能力である。本節では、日本に実在するものづくり企業の事例を 2 つ挙げ、環境変化に対応しながら生き抜くために、DC がどのような場面で、また、どのように役立ってきたのかについて説明する。

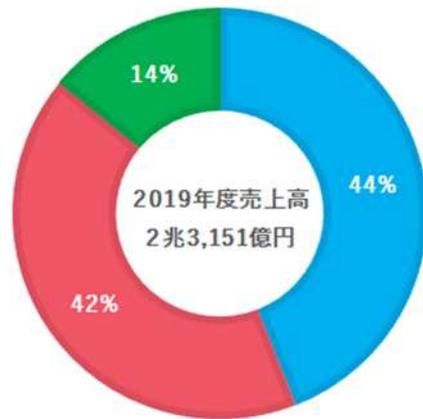
6.2.3.1. 富士フィルムホールディングス株式会社の事例

1 つ目の例として、富士フィルムホールディングス(株)の事例を説明する[1]。2000 年の同社の主力事業は写真フィルム事業であり、売上高の 6 割、営業利益の 3 割を稼いでいた。しかし、デジタルカメラの普及に伴い、写真フィルムの市場規模は 2010 年には約 1/10 に縮小した。この劇的ともいえる急速な環境変化の元、本業が消えるという危機的状況を迎えたが、同社はその時には既に、時代の変化による脅威の到来を感知し、先手を打って経営資源の再配置に取り組んでいた。

まず、銀塩フィルム全盛時代の 1970 年頃には、デジタル化時代の到来を予見し、デジタルカメラの研究開発に着手をしていた。1988 年に世界初のデジタルカメラを開発したのは同社である。次に、この時期に写真フィルム事業を通じて保有していたフィルム技術を再利用し、液晶パネルに使われる革新的な偏光フィルムの開発に成功した。同社は、このフィルム技術をもとにディスプレイ材料事業を設立した。そして、2000 年以降、液晶パネル事業への多額の資金投入と、写真フィルム事業の縮小を同時に取り組み、その結果、同社は事業構造を改革し、写真フィルム事業への依存体質から脱却することに成功した。

その後も同社は写真技術に使われるカラーゲンに関する知識を転用した化粧品・医薬品事業や、写真技術で培った画像処理の知識と A.I. 技術を組み合わせた再生医療分野への進出に取り組んでいる。デジタル時代到来の変化を感知し、フィルム技術をコア・コンピタンスとして経営資源の再配置を行うことで、事業構造を変容することに成功したのである。

2019 年度の同社の事業構成は図 6-3 のようになっている[8]。開業の祖であるイメージングソリューション事業に対し、ヘルスケア&マテリアルズソリューション事業、ドキュメントソリューション事業の方が現在では高い構成比率にまで変化した事がわかる。



- ヘルスケア&マテリアルズソリューション
- ドキュメントソリューション
- イメージングソリューション

図 6-3 富士フィルムホールディングス(株)の事業構成比率

出所：[8]より引用

6.2.3.2. 根本特殊化学株式会社の事例

2つ目の事例として、根本特殊化学(株)の事例を説明する[9]。同社は、放射性物質を含まない蛍光材料(N夜光,ルミノーバ)が世界で80%を超えるシェアを持つ、グローバルニッチトップ企業である。国内の時計の文字盤に使われている夜光塗料には、ほぼ100%同社の製品が使われている。現在の同社の技術は、蛍光体製造技術、塗装・印刷技術、放射線取扱技術の3つのコア技術から構成されており、このコア技術を元に、安全、安心、健康の3つの分野にわたって事業を展開している。1941年の創業から現在までには、事業継続の危機を克服しつつ、複数の機会を利用して成長を続け、2016年5月期のグループ従業員数は729名、売上高は63億円となっている。

同社は、夜光塗料加工および夜光塗料の販売業で創業した。その後、時計メーカーである精工舎(現セイコーホールディングス)の文字盤に同社の製品が採用された。その後は夜光塗料の継続的な材料開発に挑戦し、特殊化の追究に取り組んだ。1960年にラジウムに比べて安全性の高いプロメチウムを使った材料開発に成功し、国内シェア100%を実現することができた。しかし、1991年に、主要顧客である精工舎が今後5年以内に放射性物質の使用を全廃する意向である、という情報をキャッチした。同社は事業継続の危機を察知した。これに対し、同社は研究開発本部を立ち上げ、3年目標を掲げ、放射性同位体を含まない蛍光材料の開発に全社一丸となって対応した。その結果、1993年に、放射性同位体を含まない新しい蛍光材料である、N夜光の開発に成功した。このN夜光は、現在はセイコーだけでなく、ロレックス社からも注文を受け、時計用としては世界シェア100%の主力製品となった。このようにして、蛍光材料の開発技術が同社のVRIN資源となった。

上述の1991年以前にも、同社は2回「捕捉」の能力を発揮している。図6-4に同社の海外投資比率の推移を示す。図6-4は累積棒グラフとなっていて、一番色の濃い凡例1は時計用夜光塗料である。この時計用夜光塗料への投資は1981年をピークに減少に転じている。同社はこの変化を事前に「感知」し、用途の多角化着手(1974年)とグローバル化着手(1977年)いう2つの時点で「捕捉」する能力を発揮したことが読み取れる。具体的には、1974年の多角化の着手と、1977年のグローバル化着手への投資がそれらに相当する。その後、1995年の阪神大震災、2001年の米国同時多発テロなどの大災害、大事件が契機となり、社会的価値観が大きく変化し、暗い所でも安心できる避難誘導標識へのニーズが高まった。この機会を同社は上手く捉え(捕捉)、時計表示盤の技術を蛍光体事業へと転用することができた。その準備は約20年前の1974年に既に取り組みされていることがこの図から読み取ることができる。

グローバル化の面では、1977年にスイスのチューリヒに連絡事務所を開設していることが図に記載されている。そして、グローバル展開に際しては、事実上の標準化を狙った国際特許戦略を重要視し、「コストはかかっても特許は取得する」というトップ方針のもと資源投入を行い、グローバル展開を推し進めた。

もし仮に、同社がOCによる効率の追究に終始し、DCによる海外進出に取り組みなかったとすると、図6-4中の1. 時計用夜光塗料に示唆される市場規模に連動し、1981年をピークに同社は衰退していたことが予想される。つまり、同社は1981年以降の時計用夜光塗料市場の衰退を予見し、社内資源を動員した準備に取り組み、来るべき機会の「捕捉」に備えた対応を取っていた。そのような点から、同社はDCを持つ企業であるといえる。

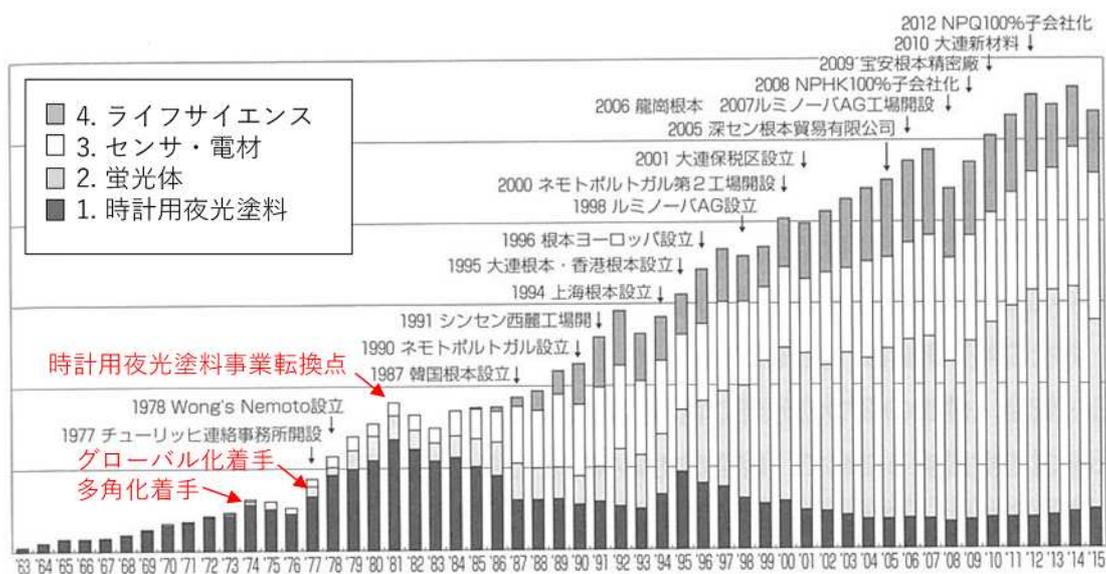


図 6-4 根本特殊化学（株）の海外投資額の推移

出所：[9]より引用

6.3. 技術開発の省察

6.3.1. 産学連携による技術開発のメリット・デメリット

上述したとおり、不確実性が高く、経営環境の変化が激しいなかで競争力強化が求められるものづくり産業では、中国などアジア諸国の新興勢力が台頭してきている。日本をはじめとする先進国では、製品の高度化による差別化と、製品寿命の短命化に対応した技術開発体制の構築が必要な状況である。技術開発力能力の向上の為に、様々な技術開発手法の試みが行われている。そして、それらの方法の1つに、産学連携による技術開発がある。本研究もまた、産業側と学術側の連携による技術開発に取り組んだ1つの事例と言える。そこで、産学連携による技術開発の一般的なメリット・デメリットをはじめに確認する。

産業側から見た場合の連携の最大のメリットは、産業側である企業が、社内にはない高度な知識を大学などの専門家から得ることである。そして、上記メリットを含め、表6-3に示すようなメリット、デメリットがある[10]。次に重要なメリットは、開発のスピードが速められることである。さらに、その効果として、開発コストが低減できること、市場投入が早められ先行者利益が得られること、が挙げられる。一方、デメリットは、連携にかかる手間が煩雑で、場合によっては専門部署を設立するなどの手間がかかること、情報や技術の流出リスクがあること、長期研究開発志向が低下すること、が挙げられる。

表 6-3 産学連携による技術開発のメリットとデメリット

メリット	デメリット
社内にはない知識の獲得 開発のスピードアップ 開発のコスト低減 先行者利益	連携に手間がかかる 情報や技術の流出 長期研究開発志向の低下

出所：[10]より引用

6.3.2. 産学連携による技術開発の成功と失敗に関する先行研究

ここでは、産学連携による技術開発の成功と失敗に関する2件の先行研究を参照する。1つ目は、九州経済産業局による研究である[11]。この中で、同局は、企業500社へのアンケート調査で、企業側から見た成功要因と失敗要因を類型化した。図6-5は、アンケート調査で得られた回答を頻度ごとに並べたグラフで、左側が成功要因、右側が失敗要因である。成功要因の上位5位は、「大学、企業との推進体制構築、緊密なコミュニケーション」、「組織、体制面でのキーパーソン存在」、「大学関係者の熱意の強さ」、「大学のシーズが優れていた」、「明確な目標設定」である。一方、失敗要因の上位5位は「目標設定が不十分」、「マーケティングでのキーパーソン不在、または指導力不足」、「目標管理、進捗管理が不十分」、「大学、企業との連携体制、コミュニケーションが不足」、「企業側の推進体制構築が不十分」である。特に注目される点は、成功要因の5位に「明確な目標設定」と、失敗要因の1位に「目標設定が不十分」が挙げられている点である。この点は、事前の目標設定が曖昧であったにも関わらず結果的に技術開発に成功した本研究事例と明らかに異なるため、後ほど詳しく検討を行う。

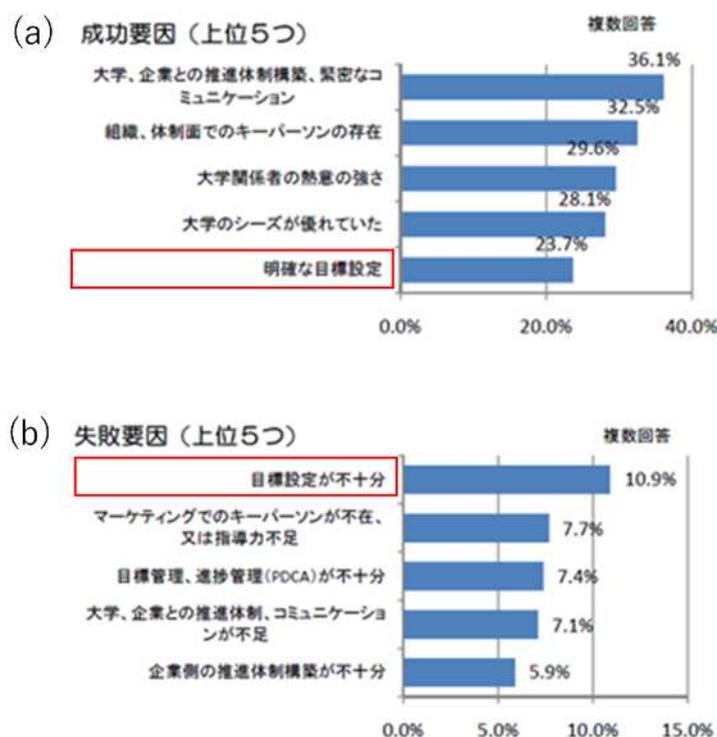


図6-5 産学連携による技術開発の成功要因と失敗要因
(a) 成功要因, (b) 失敗要因

出所：[11]より引用

2つ目は、日本機械工業連合会神鋼リサーチによる研究である[12]。この中で、同団体は2つの調査について報告している。1つ目の調査は、産学連携による技術開発に成功した21社へのヒアリング調査、2つ目の調査は技術開発が失敗に終わった39社へのアンケート調査である。そして、成功事例と失敗事例について分析し、成功の事例の傾向と失敗事例の失敗要因を類型化した。

はじめに、成功要因を説明する。調査の結果、企業側と大学側との間で、「徹底した話し合いの上で開発目標を設定する」ことと、「コミュニケーション頻度を高くとる」ことを前提とした上で、成功要因は表6-4に示す4つの項目であることを示した。これらをさらにまとめると、「企業側に高い意欲が必要である」という点が指摘できる。課題としては、前提の中にも示したが、「コミュニケーションの重要性」を改めて指摘しており、「大学側への調整機関の設置」や「企業側へのコミュニケーションコストへの理解」を求めている。

表 6-4 産学連携による技術開発の成功事例の傾向

成功事例の傾向	
1	企業サイドが技術的なリーダーシップを探る方が成功しているケースが多い
2	企業が自分にはない技術的シーズを大学に求めて新製品開発を行う方が企業活動の周辺の改善よりは成果が出やすい
3	企業側から戦略的に連携を持ち掛けた場合の方が成功する率が高い
4	企業のトップの感心が高い方が成功する率が高い

出所：[12]より引用

つぎに、失敗要因について説明する。失敗要因は、「想定市場が存在せず」「技術的な未成熟、目論見外れ」「実用化・製品化でのコスト面の課題」「開発の遅れ等による時期喪失」の4つの問題点を指摘した。さらに、これらの問題に対しては、「企業側と大学側の目標の不一致」が根本的な原因であると指摘している。

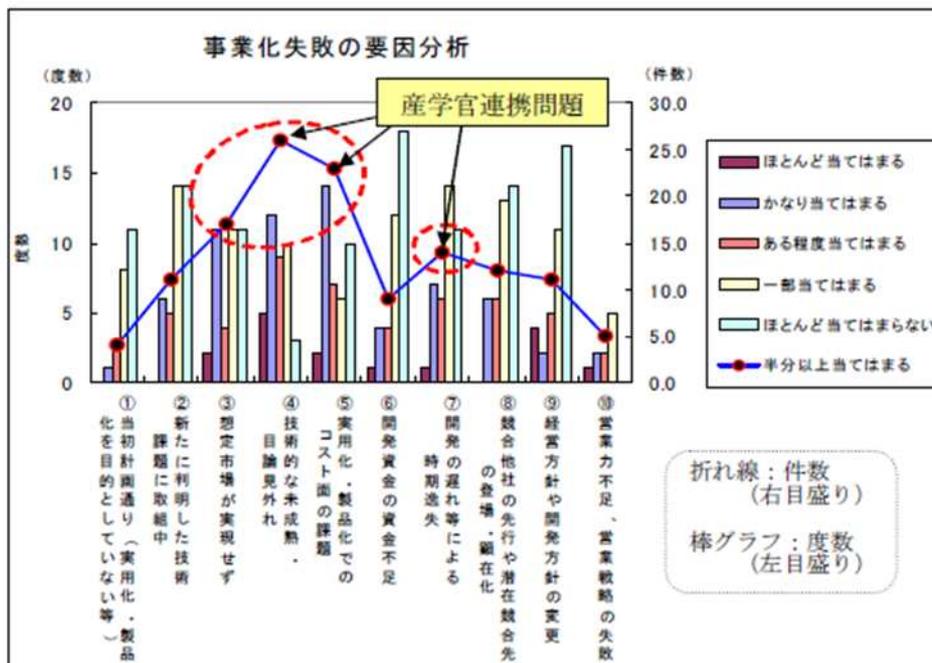


図 6-6 産学連携活動の失敗要因

出所：[12]より引用

以上2つの先行研究の結果から、成功事例に共通する要因として、表6-5に示すとおり5項目に纏めることができる。すなわち、目標が明確であること、緊密なコミュニケーションがあること、企業・大学の熱意があること、キーパーソンが存在すること、企業が持たない技術を連携に求めること、の5つである。

表 6-5 産学連携による技術開発の成功に必要な要因

成功に必要な要因	
1	目標が明確であること
2	緊密なコミュニケーションがあること
3	企業・大学共に意欲があること
4	キーパーソンが存在すること
5	企業が持たない技術を連携に求める姿勢

出所：[10][12]より引用

6.3.3. 筆者が取り組んだ技術開発の概要

本活動を端的にまとめるならば、「目標が不明確なまま技術開発に取り組み、その中で市場ニーズを発見し、問題解決のために新しい技術を獲得・再構築した活動」と表すことができる。筆者が取り組んだ本活動の鳥瞰図を図 6-7 に示した。図には、活動に関わった、組織や技術と、人の移動、技術の流れを表示し、その中で、黒淵四角は組織を、角丸四角は技術を、細線矢印は人の動きを、白抜き矢印は技術の流れを、それぞれ示している。大文字アルファベットは組織名、小文字アルファベットは出来事である。本活動の中で生じた各出来事については、表 6-6 に、時期と内容を詳しく示した。

本活動の発端は、製造部 X1 と光産業創成大学院大学（以下 GPI）との間で連携による技術開発を開始したことである。これは図 6-7 の凡例 a、b で示した。そして、詳しく見ると、本活動の中にさらに細かい活動が 2 つある。1 つ目は、GPI - 研究法人 U - 企業 T 間で取り組んだ研究クラスター的な活動で、2 つ目は、製造部 X2 - 大学 V 間で取り組んだ活動である。本章における「本活動」とは、図 6-7 と表 6-6 に示した全体の活動を指す。

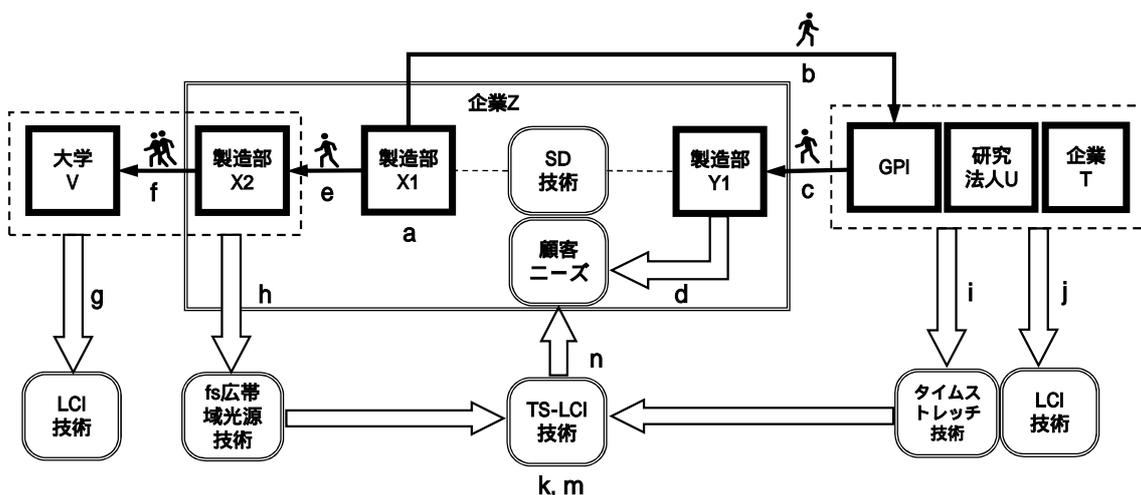


図 6-7 本活動の鳥瞰図

表 6-6 本活動の出来事

凡例	時期	出来事
a	2015年/11月	GPIへの派遣決定
b	2016年/4月	SD技術を携えて筆者 GPIへ入学
c	2016年/8月	SD技術のユーザである製造部 Y1にて、SDエンジンの使われ方を調査
d	同上	製造部 Y1の潜在的問題を認識し、「顧客ニーズ」を明確化
e	2016年/11月	製造部 X1にとっての新技術である、「フェムト秒(fs)広帯域光源技術」の開発メンバーに筆者選出
f	同上	「fs 広帯域光源技術」の開発を目的として、大学 V との連携による開発に取り組む
g	2016年/12月	「fs 広帯域光源技術」の応用技術である「低コヒーレンス干渉計測(LCI)技術」が「顧客ニーズ」の対応手段と成りうることに筆者気付く
h	2017年/2月	筆者が「fs 広帯域光源技術」を習得
i	2018年/10月	GPIを中心とした研究クラスター活動への参画を通じて、筆者が「タイムストレッチ技術」を習得
j	2019年/7月	GPIを中心とした研究クラスター活動への参画を通じて、筆者が「LCI技術」を習得
k	同上	「fs 広帯域光源技術」「タイムストレッチ技術」「LCI技術」を深化させた高速計測技術を開発し、レーザ加工技術の計測に着手
m	2019年/10月	上記の高速計測技術に関する学術的新規性を筆者が見出す
n	2020年/12月	上記の高速計測技術を利用して、「顧客ニーズ」対応に必要な手段を検討

図 6-7 の鳥瞰図と、表 6-6 に示した出来事の概要を説明する。対象とした期間は 5 年間強である。開始時期は、GPI への派遣が決定した 2015 年 11 月、終了時期は、顧客ニーズの解決手段を提案した 2020 年 12 月である。この期間で、筆者が関わった組織・機関の数は、製造部 X1 を含めて 7 つ、見出した顧客ニーズの数は 1 つ、組み合わせた技術の数は、SD 技術を含めて 5 つ、である。

出来事の詳細を、獲得した技術を中心に説明する。本活動の基本となった技術は SD 技術で、この技術 1 つを携え筆者は学生として GPI へ入学した。これは、図 6-7、表 6-6 の凡例 a、b で示した。そして、GPI の教員、共同研究者と共に、製造部 X1 の顧客部門である製造部 Y1 の製造現場へ立ち入り自社製品の使われ方を調査した。その結果、製造現場の潜在的ニーズを見出すことができた。これは凡例 c、d で示した。これ以降の活動では、製造部 X1 にとっては新技術となる技術の探索活動に取り組んだ。

新技術の 1 つ目は、フェムト秒 (femto second, 以下 fs) 広帯域光源技術である。これらを凡例 e、f、h で示した。この活動は、自社内の隣接部署である製造部 X2 が主導する技術開発案件であった。製造部 X2 が、大学 V との連携による技術開発に取り組み、筆者はメンバーとしてこの案件に参加した。この活動を通じて、筆者は fs 広帯域光源技術を獲得することができた。

新技術の2つ目は、凡例 i に示されるタイムストレッチ技術である。この技術に行き当たるまでには、1年半ほどの長い時間が掛かった。凡例 i では、筆者は GPI と研究法人 U による技術開発にメンバーとして参加した。この活動を通じて、筆者は研究法人 U に足を運び、現地での実験に取り組んだ。

新技術の3つ目は、LCI 技術である。この技術を獲得するまでには、2つの段階を経た。1つ目の段階を凡例 g に示す。凡例 g では、fs 広帯域光源の応用技術である LCI 技術が、凡例 d で既に明らかにした顧客ニーズ対応に利用可能であることに筆者が気付いた。凡例 g の時点では、LCI 技術が利用可能なことに気付いたことに留まり、技術の獲得には至っていない。2つ目の段階は、凡例 j に示した。凡例 j は、凡例 g の気づきから1年半ほどの長い時間が経った頃の出来事である。凡例 j では、筆者は GPI と企業 T の間で取り組まれていた技術開発へ、メンバーの一員として参加した。この活動を通じて、筆者は企業 T に足を運び、現地での実験に取り組んだ。この活動では、実地訓練として LCI 技術に深く触れることができ、LCI 技術を獲得することができた。

新技術の4つ目は、fs 広帯域光源とタイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術である。図 6-7、表 6-6 では、凡例 k、m に示す。深い検証を通じ技術を深化させ、そして学術的な新規性を見出すことができた。そして、2020年12月現在は、本技術をさらに深化させ、SD の顧客ニーズへの対応に取り組んでいる最中である。図 6-7、表 6-6 に凡例 n として示した。

最後に、本活動の特徴を明確にするため、GPI で主宰されていた経営ゼミナールへ参加した。2020年7月22日から2021年1月12日までの間、合計十数回、業種の異なる学生と教授陣の間で、筆者の取り組んだ活動に対しての議論を重ねた。そして、本活動には2つの転換点があることが分かった。その転換点とは、図 6-7 における凡例 b と e である。凡例 b では、SD 技術を携えて製造部 X1 から GPI へ入学し、凡例 e では隣接部署である X2 の技術開発案件にメンバーとして参加した。転換点として挙げた理由は、これらの転換点とその後の活動に重要でありながら、そもそもなぜその活動に至ったのか理由がよくわからないからである。

6.3.4. 先行研究との比較分析

筆者が取り組んだ技術開発の成功要因に対し、先行研究の指摘と比較分析した結果を表 6-7 に示す。表 6-7 には、先行事例の指摘に対し、筆者が取り組んだ技術開発(本事例)があてはまるかそうでないか、またその根拠を具体的に示した。

表 6-7 先行研究の指摘と本事例との比較

番号	先行研究が指摘した成功要因	本事例の該当	根拠
	目標が明確であること	<u>あてはまらない</u>	・筆者が GPI へ派遣された当時、 目標は明確ではなかった
	緊密なコミュニケーションがあること	あてはまる	・筆者が GPI へ入学したことで、ゼミ活動を通じて教授陣との間で頻繁なコミュニケーションが確保できた ・筆者が各組織へ足を運び、共同で検証に取り組む事で、濃密なコミュニケーションが確保できた
	企業・大学共に意欲があること	あてはまる	・企業側は予算と人員を確保し、筆者を GPI へ派遣した ・大学側は博士号を取得させることを使命とし、担当指導教官制による指導に取り組んだ
	キーパーソンが存在すること	あてはまる	・キーパーソンを筆者が担った
	企業が持たない技術を連携に求めること	あてはまる	・企業にない「タイムストレッチ技術」と「LCI 技術」を連携に求め、新しい計測技術の確立に取り組んだ

表 6-7 の内容について詳細を説明すると次のとおりである。 の目標が明確であること、に対しては、本事例はあてはまらない。その根拠は、筆者が GPI へ派遣されたときに目標が予め定まっていなかったからである。目標は、入学した後になってから、活動を通して検討を続けながら徐々に明確にした。そして、目標が定まったのは、早くとも、表 6 - 6 の g 『「fs 広帯域光源技術」の応用技術である「LCI 技術」が、ニーズの対応に利用可能であることに気付いた』2016 年 12 月であり、活動開始から 1 年以上後になってからである。このように、本活動は、目標が不明確なまま着手した。

の緊密なコミュニケーションがあることに関しては、本事例はあてはまるといえる。本活動に対しては、筆者と GPI との間、および、筆者と各組織との間のコミュニケーション構築が必要であった。筆者は、これらの組織に筆者が直接足を運び、現地でゼミ活動や実地検証に取り組んだ。これによって、緊密なコミュニケーションを構築できた。

の企業・大学に熱意があること、に対しては、本事例はあてはまるといえる。筆者の所属する企業側は、人員と予算を確保し、満を持して連携活動に取り組んだことから、企業側は熱意があったといえる。また、大学側については、入学者が博士号取得できるように意欲を保つことを目標とし、担当指導教官制度をとっている。本事例では、図 6-7 の凡例 i、j、k、m の活動においては、筆者が解決したい技術課題に対して有効と考えられた技術を筆者へ紹介し、その後具体的な技術の習得までハンズオンの指導がなされた。また、第 2 章に説明した c の活動では、大学教員 C に立ち会いを頂き、現場調査に臨むことができた。これらのことから、大学側が相当の熱意を持っていたことが伺える。

のキーパーソンが存在すること、については、本事例はあてはまると考える。キーパーソンの役割とは、産行側と学術側の間を取り持ち、互いの目標の不整合を上手く解消しつつ、活動を推進することであると考え。本事例では、筆者がその役割を担った。つまり、活動で関わった各組織にとっての連携する意義をくみ取り、共通の目標を設定して活動に取り組んだ。この活動により、筆者は各それぞれの要素技術を習得する事できた。そして、それらの要素技術を組み合わせ、技術をさらに深化させることで、レーザー応用の新しい何かを明確にすることができた。

最後に、の企業が持たない技術を連携に求めた、に対しては、本事例はあてはまると考える。本事例では、筆者が GPI へ入学し、活動に着手した当時、自部署では既存技術である SD 技術しか持っていなかった。そして、本活動では、新規技術の探索に前向きであり、その獲得のために GPI へ入学し、GPI を拠点としてさらに外部に新しい技術を求めた。

以上をまとめると、本事例を先行研究と比較すると、の目標が明確であること、はあてはまらず、それ以外の点はあてはまる結果となった。

6.4. インタビュー調査

6.4.1. インタビュー調査の目的

インタビュー調査の目的は、省察によって認識された本活動の転換点が生じた理由やその背景を明らかにするためである。

活動の転換点については、6.3.3.において説明した。具体的には、図 6-7、表 6-6 における凡例 b と e で示される活動へ着手したことを指す。これらの両方については、その活動に舵を切るきっかけとなっていたのは上司のアドバイスや提案であることが、筆者自身の活動の省察により明らかになった。しかし、その後の活動全体を俯瞰した際、これらがきっかけとして重要ではあるものの、その転換点に至った理由については筆者自身の活動の省察だけでは合理的に説明することができない。

合理的に説明するためには、筆者にアドバイスを送った当時の事業背景や上司自身の考えを知ることが最も正確な近道であると考えた。学術的観点からも、当時の事業環境など、その転換点に至った事業背景や、上司自身の考え等を引き出し、客観的な記録に書き起こすことは重要な作業である。上述したとおり、これらの記録内容を精緻に分析し理論的解釈を加え、転換点に至った理由を明らかにすることが本インタビュー調査の目的である。



図 6-8 インタビュー当日の様子

6.4.2. インタビュー手法

インタビューの方式は、半構造化インタビューの形式をとった。半構造化インタビューを説明するため、構造化インタビューと比較する。構造化インタビューは、主に定量的情報を得るために用いられる。調査対象グループ内の多数のメンバーの間の特性の違いを定量的に表現する為に、既定のフォーマットで並べられた質問に対して答えてもらう。一方、半構造化インタビューは、主に定性的情報を得るために用いられる。調査対象が限定的な場合に行われ、調査対象のことを深く理解するために行われる。インタビューでは、基本となる質問をあらかじめ用意しておき、基本的にはこの質問を行う。そして、さらに回答への理解を掘り下げるため、得られた回答を元に聞き手は必要に応じて内容を追加して質問をする[13]。

半構造化インタビューの結果について、本研究では、定性的な解釈と、定量的な分析を行った。定量分析は、MathWorks®社の計算ソフト MATLAB®(Ver. R2020b)の Text Analytics Toolbox™ を利用した。

表 6-8 半構造化インタビューの特徴

インタビュー形式	構造化インタビュー	半構造化インタビュー
	すべての項目に対して、予め内容を決めておき、話し手は聞かれた内容に対して答える	予めいくつかの質問内容を決めておき、聞き手はインタビュー時に得られた回答に対して内容を追加して質問を重ねる
知りたい情報	客観的情報	主観的情報
分類	量的手法	質的手法

出所：[13]より引用

以下に、実施したインタビューの概要を説明する。

日時：2020年9月24日 13:30 - 17:30

場所：企業 Z T 工場内

聞き手：筆者、共同研究者 A

話し手：製造部 X1 製造部長 J、同技術開発責任者 B (B は第 2 章の B と同一人物)

立会人：大学教員 K

時間：J、B に対してそれぞれ各 1 時間 30 分

質問数：全 12 問

その他：調査の内容は IC レコーダに録音し、記録として保存

6.4.3. 質問票

インタビューに使用した質問票を以下に示す。質問は全部で 12 問であり、事前に話し手に質問票を送付し、当日は質問票に沿ってインタビューを実施した（表 6-9 参照）。

表 6-9 インタビューの質問リスト

光産業創成大学院大学(GPI)への派遣について

	JとBは、GPIに筆者を派遣することを決断されました。その決定当時（2015年11月：第69上期）の事業背景、並びに当時のお考えについて質問致します。
質問 1	製造部 X1 事業の事業領域はどの範囲であるとお考えでしたか。
質問 2	製造部 X1 事業の競争力の源泉は何であるとお考えでしたか。
質問 3	SD は技術開発に成功し、57 期の製品上市以来、71 期まで右肩上がり売上高を成長してきました。事業化に成功した要因は何であるとお考えでしょうか。
質問 4	当時の製造部 X1 事業について、どのような成長を描いていましたか。
質問 5	当時の製造部 X1 事業について、経営上層部からの要望など、影響を受けていた事があればその点についても教えて下さい。
質問 6	筆者の GPI 派遣が決まった時期は、次期新製品の市場投入を約 1 年後（2017 年 2 月：70 期）に控えた時期でした。そこで、当時の技術開発の状況について質問致します。当時の製造部 X1 の技術開発力の問題点、課題は何であったと考えていましたか。
質問 7	上記問題や課題を解決するための方針や具体策が、当時あったのであれば教えて下さい。
質問 8	GPI への派遣を決定した理由は何でしょうか。また、共同研究開発の手段が他にもある中で、GPI を選択した決め手は何だったのでしょうか。

フェムト秒広帯域光源開発について

	部門 X3 と製造部 X2 により主導された fs 広帯域光源技術（技術 2）案件へ、筆者が参加することが決定されました。その当時（2016 年 11 月：第 70 上期）のお考えについて質問致します。
質問 9	技術 2 案件は、部門 X3 と製造部 X2 が案件の主体でした。そもそも製造部 X1 の J が依頼を受けた経緯について教えて下さい。
質問 10	上記の技術 2 案件は、その後順調に製品開発が進んだとしても製造部 X2 の成果となる見込みでした。その中で筆者が参加することの意義は何でしたか。心配事などはありませんでしたか。
質問 11	最終的に筆者は技術 2 案件の正式メンバーとなりました。他の人ではなく、筆者でなければ駄目な理由や狙いはありましたか。

企業価値について

質問 12	経営理念に謳われている「企業価値の向上」に対して、製造部 X1 としてどのように貢献をしていると考えますか。
-------	--

6.4.4. 調査結果

インタビュー調査の結果、製造部長 J、技術開発責任者 B の 2 名より、合計 4 万字を超える回答が得られた。全部を掲載すると膨大であるため、質問内容に直接関係する箇所や、筆者が重要であると感じた箇所のみを抜き出した。以下、質問番号の順に、質問文、J の回答、B の回答を示した。また、筆者や共同研究者 A 並びに大学教員 K が追加して行った質問内容も必要に応じて記載した。

【質問 1】 製造部 X1 事業の事業領域はどの範囲であるとお考えでしたか。

(J)「領域というか、シェアとかそういうことでいいのかもしれないですけど。この質問から私が思ったのは、まず半導体工程のダイシングにおいて、この当時はちょうどメモリとか。MEMS の市場というのはその前にある程度凌駕して、やっとなメモリ(筆者修正 MEMS メモリ)の市場に入れたなど。半導体の中では一番大きな市場に入れたなど。やっとなり込めたところなんですけれども、ただダイシング市場全体においてはまだ 3 %とか 5 %とか、そのぐらいのシェアしか取れていないというのが、事業の領域というか事業の範囲、この当時での私が思っていたのはそれくらいかなと感じていたと思います。」

(B)「J さんと同じ答えになってしまうのかもしれないですけど、半導体の後工程のプロセス。特にダイシングの装置分野ということですか。ブレードダイシングがほとんどの所にレーザダイサのお客さまに提案したということだと思います。2015 年だから、結構シリコン以外にも段々、ガリ砒素とかサファイアとか、あと IR カットフィルタなどもやり出したのかもしれないけれども、デバイスに適用する範囲を広げてきていたところなのかなと思います。」

【質問 2】 製造部 X1 事業の競争力の源泉は何であるとお考えでしたか。

(J)「顧客の要求に真摯に答えていくという、そういう真面目さというか姿勢、そういうのがすごくよかったというのは、体質として思っていて、SD そのものとしては、例えば知財の戦略だとか、知財をたくさん取ってポートフォリオ築くとか、あとはダイシングの品質にすごくこだわっている。(中略)あとは環境対応というか水を使わないとか、そういうところ。メモリの場合はランニングコストというところが、SD の競争力を示せたところかなと、この質問を見てそう感じました。」

(J)「ただ技術力と言われると、あまり技術力として何かすごく優れている人がいたという感じではなかったから、何だろうな。そういう感じが僕はしているんだね。」

(筆者)「何か特別な技術力とか、誰か特定のスーパー技術者みたいな人に頼るというわけではなくて、組織の体質として、うまく対応できるような体制をつくれたということですね。」

(J)「それぞれ何か資質を持った人たちがうまくかみ合ってきたのかもしれないけど。そういうところが大きかったのかな。それとこの当時はメモリを何とか取ろうというのがあ

ったので、目標一つになっていたというのも大きな要因だったのかもしれない。とにかく L 社を取ろうという。L 社という大きいキーワードが一つあったと思うんだよね。いま思えば L 社はほぼ SD で切られているわけだから、そういう意味では成功したんじゃないかなと。その L 社だけに限っては。」

「それは前の M 事業部長、今はもういらっしゃいませんけど、その方がかなり強引にこれはいけるだろうと思って、かなり資金をつぎ込んでくれて特許がたくさん取れているので、やられたところもあったので大きかったのかな。最初は内部加工というのがあったんだけど、それ以外にも 30 件ぐらい周辺特許としていろいろ取ったと思うんですね。」

(A)「技術力ではないという、たぶん当初はそういう感じで積み上がってきて、今で見れば SD とコア技術みたいなところが組み合わせ技術だったり、低コストレーザと光学系みたいなところは、今となればあるんですけど、ハードのキーパーツとしてレーザだったり光部品 M だったりというところはどう思いますか。」

(J)「光部品 M がキーパーツだと僕は昔から思っていて、光部品 M を採用しようとなったときに、最初に中研に僕が言って、今の N 取締役。当時は n 研の室長だったのでですけど、これを使わせてほしいということをお願いしに行ったんですね。ただ、その当時はまだ試作品みたいな感じで、『これはなかなか使うのは難しいぞ』と言われたんだけど、やってみますということで動き出したと思うけれども、それがよかったのかな。それと波長、Q 社の特許があってそれを選んだんだけど、それを選んで部門 S につくってもらったという。それも部門 S にお願ひしに行って、最初はなかなかできなかったんだけど、その 2 つの組み合わせが今となっては、その波長はスプラッシュにもいいし、亀裂も伸びるしという本当にいい塩梅の波長のレーザで、光部品 M という 2 分岐したりして、補正もかけられるし、収差補正とか、そういう技術的なところで、そういうのもうまく重なり合ったのかな。ただ、光部品 M に対してすごく知見をもった人間がうちにいるかということ、別にいるわけではないし、レーザに対する知見が別にあったわけではないけれども、そういうものをどう組み合わせずということとか、みんなでない知恵を絞ってやってきたようなところがあったのかなと。」

(K)「ちなみにいくつかポイントがある中で、目標が明確で L 社を取りにいこうと一致団結してそちらに向かったということで、これは自然発生的にそちらの目標に向かったのですか。」

(J)「僕ではなくて、その時に付き合っていた P 社という会社が、L 社とはすごく懇意でした。Q 社という競合の会社に L 社を取られそうな状況になりそうだったので、そこでとにかく何とか L 社を死守したいというお話をいっぱい聞いていたし、ダイシングでも装置自身でも Q 社に負けているというところがあったので、最初から L 社と懇意というか、かなり一生懸命やっていた者としては、何とかしてあげたいという気持ちがあったので。」

(K)「まさにそこで顧客ニーズ。」

(J)「そういうところが一番大きかったのかな。」

(B)「この製造部というのは他の事業部と違って、中心となるハードウエアはつくってないんですね。なので、すごくそこが弱いところだと言われているんですけど、世界で初めてレーザ波長に対して透明材料に集光して光を入れると傷が中にできると。その亀裂をきっかけに、割ることができるのではないかという可能性を見いだしてこの話をやってきたと。最初に見つけたというのが強みなのかもしれないけれども、それを信じてずっとやってきているのかなと。諦めないでやっているというのが強みなのかなと思います。あとは一生懸命怒られながらお客さんと付き合っていて、個人個人もそうだし、組織としてもそうだし、お客さんとの信頼関係を保ってやってこられたのかなと。最初はQ社だって、Z社はエンジンだけ入れてくれればいいと。あとのフォローはQ社でやるから、あんたたちは引っ込んでろみたいな感じだったんだけど、ステルスダイシングの技術というのは原理的にもなかなか説明するのが難しく、Q社だけではお客さんに説明するのが困ったことがあったんですね。そういうところから段々、Z社の営業が、エンドユーザと話をさせてもらえるような機会が増えてきたというところが大きいのではないかと思います。装置メーカーだけだと、どうしても情報が限定されてしまうのですけども、エンドユーザの声が聞けて、お客さんが本当に欲しいことがわかってきたと。苦労してそういうことをやっている、プロセスとかでも工夫ができてきて、知財化もできたし、新しいエンジンの傾向はこうなんだろうというのが予測できて、市場開発グループというのがあって、そこでエンドユーザさんとの対話があって、最新のデバイスの加工を試すことができ、そこでハードウエアの展開もできたんだろうなと思います。いろんな強みがあるんだろうけど、お客さんとの太いパイプをつくっているというのが一番かなと私は感じます。」

(B)「まずはお客さんにこの装置を使ってもらうような問い掛けをしていくというところが、大事だったんだろうなと思いますけれど。これは宣伝しなくてもお客さんから噂が伝わっていく感じなので、広告をたくさん打ってやるみたいなものではないんですね。」

(筆者)「産業装置なので口コミというか。」

(B)「レーザ学会誌に宣伝を打ったりしたことはない。逆にあまりしなかった。秘密裏に広げた。」

【質問3】 SDは技術開発に成功し、57期の製品上市以来、71期(現在)まで右肩上がりで売上を成長させてきました。事業化に成功した要因は何であるとお考えですか。

(J)「最初上市したときは、とにかく水を使わないとかそういうところで、あと品質、そういうのをすごくうたっていて、その時に合致したのがMEMSだったんです。たまたまマイクロフォンというのは、昔の工法は、最初膜が付いているからウェハに樹脂を塗って、膜が壊れないように固めてからダイシングして、それをピーカーの中にばらばらとみんな入れて、溶剤で膜を取って、それを組み立てる女性がピンセットで1個ずつ拾って、それを基板の上に1個ずつ付けていったという、そういう工法だったので、ものすごく時間と手間がか

かったのですけれど、このSDによって表面を樹脂で固めることもなく、水を使わないのでダイシングすることで膜を破るということもなくなって、そういう一つメリットがあって、SDというのが普及したんですね。」

「その後でQ社から「LEDを切る装置が欲しい」ということを言われて、その時に何でLEDにSDが採用されたかという、SDを使うことで10%くらい輝度が上がったんですね。ブレードで切るとどうしても亀裂が出て、その亀裂がデバイスに影響して輝度が落ちてしまうものがあったのですけれど、SDで切ると輝度が上がるというのがあって、それでSDが急激に採用されたと。63期から64、65とすごく伸びたんですね。」

(筆者)「市場が冷めたのが66、67。」

(J)「その時にさっき言ったメモリ市場というのがちょうど出てきて、P社と一緒に頑張っ

てやりましょうというのが出て、L社を目指して、メモリ市場目指してというので、また1つターゲットが出て、売上としては少し伸びたと。」

(筆者)「そう考えると63、64のLEDへの要求に対応するところは、今までずっとシリコンだけで来たわけではないですか。なので、技術がまたかなり違うと思うんですね。レーザーも違ったし。ここへの小さい多角化の準備を地道にされていたということですか。」

(J)「いや。この時はどちらかという、Q社のアドバイスも結構あったんだと思う。」

(B)「いろんなテストカットしていて、シリコンMEMSとかというものが、表面がメンブレンという構造体になっているので、チップングとか汚れに弱いと。水も使えないということで、ドライプロセスであるステルスダイシングを採用していただいたと。そこから販路を拡大していったんですけど、最初は厚いウェハに対して、レーザービームを何回も何回もスキャンしなければいけなかったんですね。なので、ブレードダイシングに比べると加工時間がかかる。加工時間がかかるということは、1個のチップを切り出すのにコストがすごくかかるんですね。だからこういうブレードでないと、ブレードでできないものから入っていったという感じだったんですけど。あとはタクトを上げるためのいろんな工夫をして、最終的には、今現在ですけれど、NANDメモリには、ほとんどこのステルスダイシングで加工をいただいていると。それもZ社のためを思ってやってくれたのではなくて、SD方式、ブレードでやる方式とSD方式をシビアにコスト比較をして、お客様がですね。それとうちを選んでくれてということですかね。」

【質問4】 当時の製造部X1の事業について、どのような成長を描いていましたか。

(J)「この時の中短期計画というのを見てみたのですが、その時にはメモリとか、メモリの中でもとにかくNANDのところまで100%、あとDRAMへの普及を結構描いていまして、ちょうど今なんですけど、73期で今の約2倍を超える目標、A計画ですね。B、Cよりはもっと上だったのですけれど、今の約2倍ぐらいの売り上げを描いていました。で、72期だと売上が今の約1.5倍ぐらいだったのですが、今は売上が落ちてしまって。コロナとか半導体不況の影響があって。だから今の73期でいうと、当初描いていた目標の半分ぐらいしか

達成できていないのかなと。去年だったら4分の3くらいしか達成できていないというのが実情です。そんな成長を描いてきました。」

(筆者)「一つずつ目の前の市場を取っていくという感じの成長戦略ですかね。」

(J)「そうですね。R氏はもっと先を見て、ロジックやりたいとか、Low-kやりたいとかいう、彼は彼でそういうビジョンを描きながら、みんなに話はしていると思いますけど。僕の中では一つ一つ、いけそうなものは確実に取っていきましょうというのが一つあるのかな。」

(筆者)「不確実性が大きいから、まず1歩というところで。」

(J)「例えばメモリの市場を確実に押さえていけば、そこから下がることはないじゃないですか。そういうものを一つ一つ積み重ねていくというのが、最初は大事だと思うんですね。ある程度のところまで行ったら、ぼんと挑戦するというのがあってもいいのかもしれないと思うんだけども。」

(筆者)「まだ最初の頃という認識なんですね。」

(J)「最初の頃というか、もうちょっと安定した製品というかですね。そういうふうになっていないと、本当の製品とは言えないのかなと。」

(筆者)「『安定』とおっしゃいますと、どういう。」

(J)「やはり市場に、半導体、ダイシング市場で使ってもらおうというわりには、本当に一部の顧客とかにしか使ってもらえないじゃない。そういうことを考えると、まだまだ製品としては成熟したものではないなという。」

(B)「69期は1年間で今とほぼ同じ程度の売上がありました。(中略)73期、ここから7年後に、売り上げを倍にしようという目標を立てていました。どうやって目標を達成しようかなというのが、メモリを中心としたいろんなデバイスの売上を上げていくんだみたいなことを言っていました。当時の上層部からの要望、Sさんは結構、僕らの製造部のことを応援してくれていて、社内にレーザ事業推進部というのがあって、Z社としてはステルスダイシングのビジネスを通じて、社内のレーザ分野を育てていこうという大きな使命がありましたと。なので、レーザを含めて全社的な対応を取って、売上を上げてほしいということ言われていました。」

【質問5】 当時の製造部X1の事業について、経営上層部の方からの要望など、何か影響を受けていた点があればその点について教えてください。

(J)「それは早く売上増というか、売上に貢献する、早い時期にそれを達成しろというのは常に言われてことですね。それは今でも言われていますけど。それが一番大きなところですよね。」

【質問6】 当時の製造部X1の技術開発力の問題点、課題は何だったとお考えですか。

(J)「設計者、開発者が少なかった。そこが一番の問題だったのかな。(中略)それで設計者が明らかに少なくなってしまったというのが、ひとつ問題もあったのかな。」

(筆者)「そう考えると、私たちが派遣されたというのは、その問題に対して直接解決策ではない。」

(J)「解決策ではないね。解決策ではないんだけど、まあその時期に出す、そっちも出しちゃったし、せっかくなのでそういう話もいただいたので、GPIで、で、相談したらいいという話だし、この際だから一気にやってみようかって思ったんだけどね。」

(B)「お客さんの本当の要望に応じていろんなふうに展開することが、まだ技術的に難しかったのかな。自分よがりなところもあったんだよね。俺たちはこうだからと言って、これに言うことを聞けみたいなところがすごくあった。最終的には、こうも言いながら、P社の要望に応じてこうもつくりたかったんです。だったら最初からやればいいじゃないかっていう話で、僕もその時責任ある立場にいたんだけど、みんながこうだって言ったから、これも作ったらって強く言わなかったんですよ。それは僕の反省ですね。」

(B)『考えるのが面倒くさかったのもあると思う。無理だ無理だって言うのに反して。それこそTさんじゃないけれど『駄目と言わずにやってみろ』と僕が強く言えなかった。そこだね。まあ結果論かもしれないけど。』

(筆者)「その強く言えなかった理由は何ですか。改めて。」

(B)「リソース不足なのかな。リソース不足あるよね。その次の年ぐらい、1年か2年以内に立ち上げなければいけないというスケジュールありきでやっちゃったのかな。」

【質問7】 上記問題や課題を解決するための方針や具体策が、当時あったのであれば教えて下さい。

(J)「部門X3に委ねるしかなくて、部門X3に開発はお願いしていて、それができたら製造部に移管して。人も少し異動してもらったり、U君だったり、少しこちらに異動してもらって、その人間が担当して製品を売り出しているというというような形なので、それが答えかな。そういうことをしています。」

(筆者)「この場合だと課題は、開発力を強化することと、お客さんへの要望に応えるような設計変更していくような、開発リソースですね。ここを確保することが課題だったのかなと。」

(A)「第3世代の切り替えタイミングは、かなりいろいろあったということですね。」

(B)「あったよ。」

(A)「ちょうど僕らが派遣されるタイミングなんです。」

(B)「みんな言ってたのは、『なんでここで』ってみんなに言われてたんだもん。A君はメカのメンバーとして期待していたのに、なんで抜けちゃうのみたいなことを言われていた。』

(中略)

(B)「製造部の経費、売上を確保するために人を減らしたんですね。若手とか設計者を部門X3へ移しました。そこからは技術力がなくなったことはあるけれど、根本的に光部品Mを積んだエンジンの設計の見直しをその頃にしたんですね。一生懸命やって、その頃から技術

的な主体が部門 X3 に移ってしまって、残された製造部 X1 の開発グループの技術力がちょっと落ちてしまったんですよ。設計者不在とあって、そんな時代でしたかね。そういうのもあるのに、(筆者)と A 君を大学院大学に出したんだよね。そんな感じでしたかね。」

【質問 8】GPI への派遣を決定した理由は何でしょうか。また、共同研究開発の手段が他にもある中で、GPI を選択した決め手は何だったのでしょうか。

(J)「本音というか、正直なところを言うと、(中略)各製造部でそういう人を出してくれないかというのが 1 番のきっかけだったと思うんですよ。でもそういうきっかけはあったんですけど、その当時でも SD ビジネスの行き詰まりというか、僕個人的にはその当時それをすごく感じていたのかなというのがあって、GPI に行けばレーザーの関係の先生もいたので、新たなレーザー応用とか市場の開拓、そういうのを持ち込んでもらって製造部の成長も一緒にならないかなというのと、あとは最新の経営学的の知識なんて僕は全然ないから、そういう経営思想とか持った人がこれから重要かなと思ったので、そういうのも一緒に学んでやってくれるといいのかなというのはありました。」

(筆者)「この中で、共同研究開発の手段が他にもある中で、GPI を選択した決め手は何だったのでしょうかという質問を重ねてさせてもらおうと。」

(J)「決め手。やはりレーザーの新しい応用とかというところで、レーザー応用の先生がたくさんいたので、何か面白いことをできるのかなというのは、僕の中ではそれは結構あったんです。」

(A)「ありましたね。レーザーで何か新しいものを。」

(J)「僕自身は何だか思いつかなかったけど。正直。思いつかないけど、何かそんな感じだった。」

(J)「それと、本当は事業部から 1 人でと言われたんですけど、1 人だと不安なところもあるのかなと思って、2 人だったら協力し合うし、逆に競争もあっていいのかなと思って、それで 2 人に。逆に 2 人でいいですかって V さんをお願いして、『何人でもいいよ』って言われたけど、そんなに出すと製造部のほうも困ってしまうので、2 人ぐらい出して何とかやってみたいとお願いしたんですけど。」

「将来的にね、何か製造部の成長に 2 人が関わってくれたらいいなというのが一番。」

「あとはアプリケーションというか、そういうことだね。市場の創造というか、新たに市場をつくり上げるという、そういうところも。」

(B)「一つは共同開発先として他にもあると。確かにそうなんですけど、予算的な会社のバックアップがあったというのがあってと思います。他の会社にやると共同契約みたいな、それなりのお金を出さなければいけないんだけど、会社が応援していたので、大学院大学を選ぶことというのは、一番流利的にはよかったのかなと思います。(中略)僕らってハードウェアのことしか知らないみたいな。特徴は何ですかといたら、世界一ですと言うだけの話なので、そんなんじゃ駄目だよと。お客さんがわかるような言い方というのを考えてみよ

うと、いろいろこの時に教わっていたんですね。なので、大学院大学というのは光学的な話だけでなく、ビジネスのことも勉強できるみたいなことがあったので選ばせてもらった。」

(B)「そう。開発は開発できちんとやって、それをただ製造はモノをつくるだけみたいな。よくVさんに言うんですけど、そんなふうになっていいんですかと言ったら、『それは困る。それじゃあ企業Zはつぶれちゃう』とか言って。だったらその辺の微妙なバランスだとは思うんだけど。」

(B)「だけど今まで部品がなくても、メインパーツがなくてもやって来られたんですよね。それはちょっとないがしろにしていたお客様とのパイプなんです。それやはり大事にしなければ。パイプとサービス、フィールドのサービス、世界にまたぐフィールドのサービスって偉そうだけど、ちょっとね。まあ、東南アジアぐらいかな、はあるんですね。そこは強みだとは思いますが、そこは大事にしなければいけないと。」

(B)「さっきリソース不足って言ってたよね。簡単に少ない人数でいろいろ立ち上げて、何かモノをつくるという力が落ちてしまっている。そこを時間がかかるかもしれないけれど、それこそ企業を大きくするには20年かかるわけなので、そういうのを今からやっていると駄目なんだねというふうに、みんながそこを思っている。」

(筆者)「Bさんは今SDだけでできているんですけど、SDだけでいいと思うか、これでは絶対に駄目だと思うか。どちらですか。」

(B)「うーん、今、正直ちょっと行き詰まっているんだろうね。それはあると思う。過去の成功体験だけでやっていけるのかなというのはあるわね。そこは考えないといけないかもしれない。」

(A)「SD以外のその先を何かやっていくために今やると。」

(筆者)「何かわからないけど、行き詰まりは感じているということですね。」

(B)「わかる。そのためのきっかけづくりとして、この2人を外に出していると思うけどね。どうなるかなと思ったけど、段々芽が出てきそうじゃん。(中略)そういうのってこの会社好きなの。そういう流れって。新しい流れって好きなのね。おまえあと2年だから駄目だからつぶすからな、なんて言わないですよ。この会社って。新しいモノをやっていていいモノができると、みんな関心してくるんです。やったな、よかったじゃんみたいな感じで、そこは素直に喜んでくれるような土壌があるような気がする。この会社には。」

【質問9】 技術2案件は、部門X3と製造部X2が案件の主体でした。そもそも製造部X1のJ部長が依頼を受けた経緯について教えてください。

(J)「この事業部内ではレーザに知見を持っている人が少なかったもので、製造部X1というのはそういう人間が何人かいるので、レーザに知見を持った人を誰か貸してくださいという話がありました。その時に、ある程度時間が取れて協力できないと駄目なのかなというのがあったんですね。(中略)彼はファイバのところも前職であったし、ファイバレーザとかそういうのも十分知見があったので、彼だったら何とかやってくれるかなと思ったのもあ

ります。」

(筆者)「私がファイバレーザというかファイバ部品について知識があるというのは、Jさんは知っていたわけですか。」

(J)「昔どこかで話をしていた。そうやって教えてくれたよ。それを覚えてた。」

(筆者)「そういったところはJさん、だいたいの人の能力みたいなバックグラウンドを把握されているのですか。」

(J)「何となく把握はしているかな。」

(B)「昨日、自分の手帳を見直した。エバーノートに全部入れてある。この辺かなって見たら、16年の8月4日に部門X3の部長さんと面談してるんです。その時にV大学と出力が安定した新規光源の共同開発をやろうとしていますと。で、そういうのを協力してくれませんかという話がありました。(中略)製造部X2と製造部X1、同じ近くですし、(筆者)君はもう大学院大学へ行っていて、筆者君の研究テーマになるんじゃないかということで、この話を受けたというふうに記憶しています。」

【質問 10】上記の技術2案件は、その後順調に製品開発が進んだとしても製造部 X2 の成果となる見込みでした。その中で筆者が参加することの意義は何でしたか。心配事などはありませんでしたか。

(J)「あとは、もともと目指してもらったのがレーザ応用とかということもあったので、そういうことをやる。別にそれが製造部 X2 の成果になってもいいんだけど、また新たな知見としての知識を得られるわけじゃないですか。新しいものをつくらうとするんだから。そういうものが得られれば、それは本人にとってもいいし、将来的には製造部にとってもいいのかなというのはすごく僕は思っています。で、そういう仕事の仕方って僕は昔からしていて、どこかの大学の先生に『こういうのつくってよ』とか言われたら、内緒でちょっとこちょこちょってつくって、これつくったよって、そういうことを昔からよくやってきて、そういうので自分の知識もすごく広がったし、社内外で人間関係もすごくいっぱい構築できたので、そういう意味ではいいことかなと、僕は思っているんですよ。余裕さえあれば、そういうのはどんどんみんなにやってもらいたいと思っていて、そういう意味でよかったのかなと。視野が広がるでしょ。それをやることによって、自分でもまた調べたりするじゃない。新しいことをやろうとすれば。そうすればまた自分の知識も身に付くし、個人が成長するためには、そういうのはすごく大事なかなと思っています。」

(筆者)「新しい知識を獲得するというふうにおっしゃいましたが、個人としては何となくわかりますが、部署としてどういう。」

(J)「だってその時には何もないかもしれないけれども、例えばどこから何か話が来たときに、もしかしたらその知見が使えるかもしれないじゃない。そういう余分な知識って、すごく重要だと思っているの。(中略)関係なくても本を読んだり、僕の机の下にみんなに本を読んでもらおうと思って、日経のビジネス的な本とか、『ダイヤモンド』とか『サイエンス』

とか、ちゃんと取って置いてあるんですよ。僕は必ず全部読んでいます。暇なときは仕事中でも読んでるんですよ。結構そういうのって、仕事には関係なくても読んで知識として、特に『サイエンス』なんてみんなぼんぼん読んでくれば、いろんな知識が広がると思うんだよ。(中略)それと同じ発想で、何かに携われればそれは個人の知識にもなるし、(筆者)君がずっとこの製造部に、いるかどうかわからないけど、この製造部にいてくれば、それは製造部の知識にもなることだと思うから、それは大事なのかなと。」

(J)「知識も、本来はいろんなことを経験してもらいたんですけど。だから経験したということでは相当。(中略)自分でもそれを成し遂げるために勉強もしたし、いろんな所行った話をしたりするでしょう。そういうのはいいと思うんだよね。あと研究の遅れというのは心配したよ。あの時確か(筆者)君に確認したんだよね。研究のほうは影響でないか聞いたから、『大丈夫です』って言ったから、それしっかり覚えてるから。」

(筆者)「言いましたっけ。」

(J)「言ったよ。『大丈夫です』って言った。この時はちょっと研究に行き詰まっていたことあったんだよ。」

(筆者)「そうなんです。行き詰まっていたんです。」

(J)「実はここに書いてあるんだけど、それを言おうか言うまいか。その時は(筆者)君、研究に行き詰まっていて、何か違う刺激というか、違うもので何かできたらいいなというのもあったんだね。ちょっと方向性が定まっていなかったというのをすごく感じて。ノートにそういうのを書いてあったんだよ。(中略)ここに書いてあるんだけど。研究に行き詰まりがあったように感じたよ。僕がね。で、方向性も定まっていなと。で、研究への何らかの足しになればいいなと思ったのも一つだった。」

(B)「大学の研究テーマになるのかなと思ったと思います。期間も限定されていたということで、あまり無駄にはならないのかなと、思っていたと思うんですけどね。」

(筆者)「『無駄にはならない』と今おっしゃいましたけれども、全然畑違いではあるじゃないですか。それでも無駄になることはないという。」

(B)「製造部 X1 のやっていることとちょっと違うということか。でもレーザーだから似てるんじゃないかなと思うけどね。」

【質問 11】最終的に(筆者)は技術 2 案件の正式メンバーとなったのですが、他の人ではなく、(筆者)でなければ駄目な理由や狙いはありましたか。

(J)「それはさっき言ったように、ファイバとかレーザーの知識を持っているし、GPI へ行っていても時間もある程度は、他の人に比べたら取りやすいのかなと。何か制約されることはないというところがある。」

(B)「やはり前職で経験があったということなのではないですか。今思うと製造部 X2 は、光源をつくっているけれども、お客さんと干渉計の話をしたときに、彼らはお客さんの言っていることがよくわからないと。アプリケーションに近いところに(筆者)君の技術がある

んだよね。なので、(筆者)君は応用に近いところにいるので、製造部 X2 のレーザと(筆者)君の技術が一緒になれば、もっと広がるのかなという感じはするけど。別に僕そんなに、これ製造部 X1 なので(筆者)君)そこに出さないよとは考えない。人がいいと言うか。会社としては広がればいいんじゃないのと思ってはいる。すごい成功して製造部 X2 の製品がぐんと伸びたと。そっちに(筆者)君が行ったほうがいいと思ったら、それはそれで(筆者)君行けばいいと思ってるよ。あまりそこは抱え込むということは考えたことはないんだけどね。その社員にとって、こちらに行ったほうがいいだろうというのは思っているような気がしますね。なので、2 人とも大学院大学へ出したと思うよ。」

【質問 12】 経営理念にうたわれている「企業価値の向上」に対して、製造部 X1 としてどのように貢献しているとお考えでしょうか。

(J)「例えば事業性とか、そういうことだけ考えると、この事業部の中でうちの製造部というのは、売り上げが数百億億ぐらいある中の、それこそ数 %もないような所なので、あまり貢献はできてないと思います。(中略)できていないと実際は思っているんです。でもそれ以外、例えばこの SD というかこの技術というのは、新規の市場を一から開拓したような事業だったんですね。これはある意味、昔の会長が言っていた『未知未踏』というか、そういうところにつながるようなことだったのかなと思っていて、そういう意志を継いでいるのかなと。(中略)あとは社内のレーザだとか、さっき言った光部品 M という技術を使って、そういうものを製品に持っていったとか、新しいものをどんどんつくってやって、昔ホトマルがやっていたようなそういう思想というか、そういうのをうまく引き継いでいて。こういうのは、例えば株主とか市場とか、社内、社外に対しても、ある程度アピールというかある程度のインパクトを示せたのかなと思って、そういう意味での事業価値というか、そういう意味での貢献はしてきたのかなというふうに、この質問を見て思いました。それも僕の理解が正しいのかどうか分からないですけど、そんなふうに感じています。」

(B)「世の中のスマートフォンとかみんな使っているじゃないですか。その中の重要な部品の生産に携わっていったら、もし製造部 X1 がみんなコロナでダウンしてしまったら、生産が立ち行かなくなってしまうので、現時点ではお客さんが困ることになるんだろうなという感じがするんですけど。みんながそういう意識を持って働いているのかなというのは若干疑問というか。(中略)そういうところに企業価値があるのかなと思うんですけど。どんなに貢献しているか。でも結構コマーシャルには使われているのかな。ステルスダイジングというのは、良い宣伝にはなってるような気がするんだけど。昔だったらストリークカメラというのが、よく宣伝に使われていましたけど。企業イメージをアップするのに。ただ、当時の亡くなられた T 会長が、『21 世紀は光の時代になる。光を産業として使う時代になる』と言っていて、そういうところにはレーザは研究とか検査ぐらいしか使われてなかったのだけど、このレーザ加工装置が本当に生産に使われているから、そういう意味では、当時

の会長が目指していた、21 世紀の光が産業に使われるというところには、うちは貢献しているのかなと思いますけど。そんなところですかね。」

(B)「まだみんな手離れがいい製品がいいと思っているんだね。お客さんからいろいろ言われることを嫌っているような気がするんだけど。本当はそこから始まると思うんだけど。」

(筆者)「Bさんが一番初めにおっしゃっていた価値みたいのところ、競争力の源泉みたいなところは、お客さんとの。」

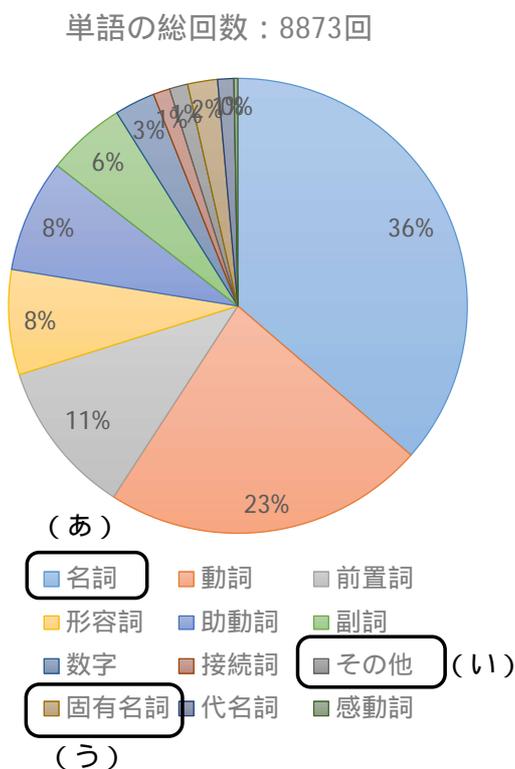
(B)「対話だと思う。そうしておけば、よくわからないところはあいつに聞いてみるかってなるわけじゃない。そうすると新しい仕事って増えてくる。そういうふうになっていかないといけないんだろうね。お客さんの困りごとは真摯に向かってやってあげないと、困っているときに助けてあげないと駄目だと思う。(中略)ある程度の信頼性を、ちゃんと試験を出すというのが基本なんだろうけど。僕の言う手離れというのは、うまく加工できない。新しいデバイスでやりたいんだけど、どうしましょうかみたいな問い合わせがきたときに、きちんと答えてあげるとというのが重要なんだろうなという感じがするけど。お客さんに使ってもらえるようにしてあげるとというのがポイント。お客さんにその装置を使って稼いでもらうっていうところに持っていかないと、そこで一緒になって苦労したというのは、そういうのが信頼関係だと思いますね。」

6.4.5. 定量分析

本節では、上記のインタビューによる調査結果を定量的に分析する。分析手順は次のとおりである。はじめに、インタビューの記録である音声データから文字起こしを行い、テキストデータ化した。得られたテキストデータは、MathWorks®社の計算ソフト MATLAB®(Ver. R2020b)の Text Analytics Toolbox™ を利用し、単語へ分解した。解析の対象を、インタビュー(interviewee)である J、B が発言した文章に限定するため、音声データ中にあるインタビュワー(interviewer)による質問文や会話などの部分は、前処理により取り除いた。また、日本語に独特の活用や言い回しによる微妙な語尾の違いの修正のため、データのクリーニング処理である、レンマ化処理、語尾の除去などを、統計解析の前に行った[14]。

以下に分析結果を示す。単語レベルに分解されたデータについて、単語の品詞別にその登場回数を集計した。その結果を図 6-9(a)に示す。インタビュイー J の発言の総文字数、総文章数、出現単語の総回数、出現単語の種類数はそれぞれ、18,571 文字、417 文、3,854 回、521 種類であった。インタビュイー B についても同様にして、それぞれ、24,515 文字、611 文、5,019 回、817 種類であった。J、B の二人の文章を合わせた文章では、それぞれ、43,086 文字、1,028 文、8,873 回、1,338 種類(重複集計)であった。このうち、出現した単語の総回数である 8,738 回について更なる分析を行い、品詞の種類ごとにその出現回数を集計した。その結果を図 6-9(b)に示す。出現回数が多い順に、名詞、動詞、形容詞の順となっており、その中でも名詞が 36 %を占めた。

	2人合計	J氏	B氏
文字数	43086	18571	24515
文章数	1028	417	611
単語の総回数	8873	3854	5019
単語の種類数	1338	521	817
名詞 (あ)	3229	1330	1899
動詞	2018	892	1126
前置詞	975	439	536
形容詞	661	297	364
助動詞	710	263	447
副詞	493	262	231
数字	255	117	138
接続詞	105	71	34
その他 (い)	114	64	50
固有名詞(う)	188	49	139
代名詞	100	57	43
感動詞	25	13	12
(あ)+(い)+(う)	3531	-	-



(a)単語の出現回数

(b)単語の品詞毎の出現比率

図 6-9 発言した内容の内訳

(a)単語の出現回数、(b)単語の品詞毎の出現比率

発言内容をさらに細かく確認するため、単語の中でも「名詞」(図中凡例(あ))、 「その他」 (同(い))、 「固有名詞」(同(う))の3種類の合計 3,531 回について詳細の分析を行った。この3種類に限定した理由は、これらの3種が話したい内容を端的に表す品詞であり、分析に適すると考えた為である。具体的には、「その他」に分類された単語には、「SD」など、アルファベットで始まる固有名詞などの略語が含まれていた。

これら3種類が単語総数に占める割合は 39.8 %であった。出現回数を調べ、その結果について可視化と順位付けを行ったパレートグラフを図 6-10 に示す。横軸には、出現したそれぞれの単語を出現回数順に示し、縦軸の左軸は各単語の出現回数を、縦軸の右軸は単語の総回数に対する累積比率をそれぞれ表す。解析対象品詞である単語の種類は 1,087 種類に及ぶため、図 6-10 には、これらのうち上位 50 種類を示した。特に、上位 3 位までの単語はやや突出した傾向にあるのが分かる。具体的に、第 1 位は「技術」、第 2 位は「製造」、第 3 位は「レーザ」、であった。第 2 位の「製造」という単語は、本インタビューの中では「製造部」という意味で使用されていた。また、グラフに示した上位 50 位で、詳細分析対象の約 35 % の出現率を占めていた。

上位 50 位に登場した単語のうち、インタビューの質問文や説明に使用した資料に含まれていない単語は以下であった。すなわち、「お客」、「顧客 Q」、「顧客 P」、「駄目」、「昔」、「装置」、「意味」、「知識」、「勉強」、「お金」、「亀裂」、「営業」である。これらは質問文に含まれない単語であるため、インタビュイーが自発的に使用した単語であるといえる。

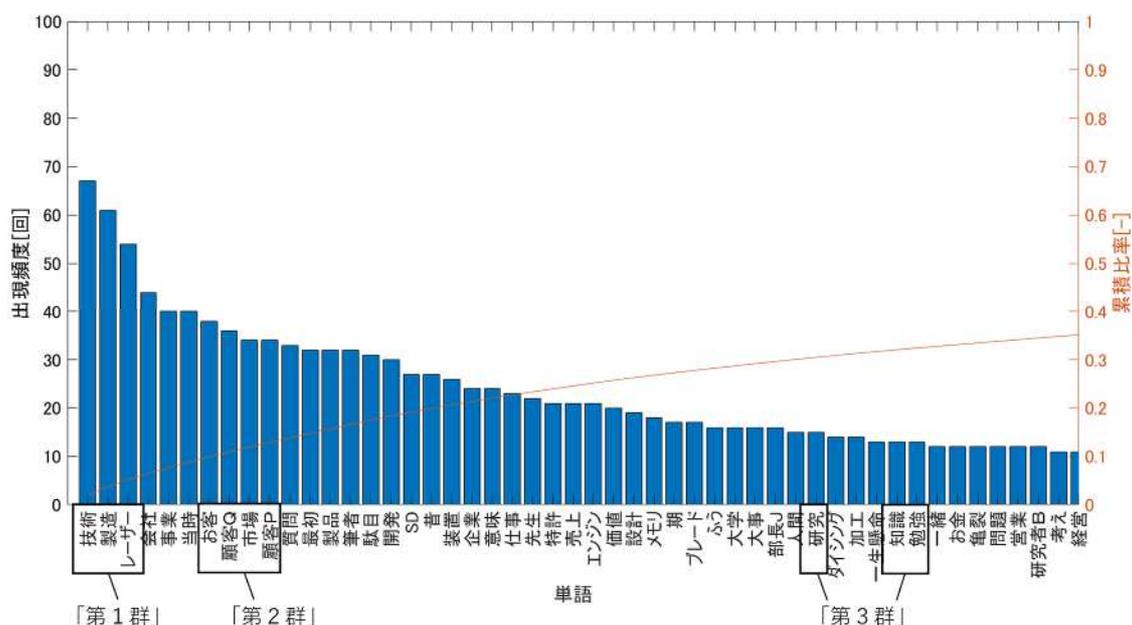


図 6-10 頻出単語のパレート図

最後に、解析結果から特徴的な3つの単語群を抽出した。表 6-10 に、3つの群と、その群に属する単語を示した。第 1 群の単語は、頻出上位 3 位までに登場する、「技術、製造、レーザ」、第 2 群は、「お客、顧客 P、市場、顧客 Q」、そして第 3 群は、「研究、知識、勉強」である。これらの単語に関する考察は後ほど 6.5 節にて行う。

表 6-10 頻出単語の分類

単語群番号	単語
第 1 群	技術、製造、レーザ
第 2 群	お客、顧客 P、市場、顧客 Q
第 3 群	研究、知識、勉強

6.4.6. インタビュー調査のまとめ

インタビュー調査の内容をまとめる。本節の冒頭に示したように、インタビュー調査の目的は、省察により認識された、本活動の転換点が生じた理由やその背景を明らかにすることである。本活動の転換点とは、図 6-7 および表 6-6 の凡例 b と e に示した二つの出来事である。表 6-11 に、インタビュー内容から明らかになったことをまとめた。

転換点(b)では、この時期に上司たちは SD 事業に行き詰まりを感じるようになっていた。そしてちょうどその時に、GPI が学生を募集しているという情報を得た。GPI には、レーザに関する深い知識や経営的な知識をもつ教授陣が多数在籍していたことを知っていたので、「レーザ応用の新しい何か」が生み出されることを期待し、この機会を利用して筆者らを GPI へ派遣することを決断した。

転換点(e)では、この時期に、筆者が研究の方向性に行き詰まっていることを上司たちは察知していた。そしてちょうどその時に、同じ事業部内の隣接製造部 X2 で、レーザ知識を持つ人材を探しているという情報を得た。ここでもまた、この機会をうまく活用し、筆者の研究テーマの一助になることを期待して筆者を隣接部署の開発テーマに送り込んだ。

また、インタビューでは上記の点だけでなく、大学派遣による技術開発の目的、事業の競争力の源泉、企業価値への貢献や、新しい知識の探索を重要視していることについても確認することができた。具体的に、大学派遣による技術開発の目的は「レーザ応用の新しい何かを目指すこと」、SD 事業の競争力の源泉は「顧客との信頼を構築すること」、企業価値への貢献については「『未知未踏の追究』により新しい市場を一から開拓し、市場や株主へアピールできたこと」である。その他には、第 3 群の単語から、製造部成長のため、新しい知識や知識の探索が重要、と考えていることが明らかになった。

表 6-11 インタビュー結果のまとめ

項目	内容	根拠
転換点(b)に至った理由・背景	・SD 事業に行き詰まりを感じていた	質問 8
	・GPI が学生を募集していた	
転換点(e)に至った理由・背景	・上司は、筆者の研究に行き詰まりを感じており、刺激や研究への足しになったと思った	質問 9
	・社内でレーザ知識を持った人材を探していた	
技術開発の目的	・その時にそれが何かは分からなかったが、レーザ応用の新しい何かを目指すこと	質問 8、9
SD 事業の競争力の源泉	・顧客の要求に真摯に応えてゆく姿勢	質問 2、8
	・お客さんとの太いパイプ、信頼関係	定量分析第 2 群
企業価値への貢献	・新しい市場を一から開拓し、「未知未踏の追究」を体現した	質問 12
	・株主や市場に対してのアピールができた	
	・SD は良い宣伝になっている	
知識探索の重要性	・余分な知識というものはなく、製造部の知識にもなるため重要	質問 10 定量分析第 3 群

6.4.7. 筆者が行った技術開発の「成功」の定義

インタビューの結果から、筆者が行った技術開発の成功とは何かを定義する。結論を先に述べると、成功とは、「SD 事業の競争力強化と『レーザ応用の新しい何か』の両方に繋がる『新しい技術』として、TS-LCI 技術を確立したこと」である。以下に詳しく説明する。

表 6-12 に、上司が当時認識していた使命や事業に対する考えと、筆者の行った技術開発の成功の定義を示す。まず、上司の使命は、製造部 X1 を成長させることであった。既存事業である SD 事業を強化することが、製造部 X1 の成長の 1 つの方法であるものの、当時の上司は、SD 事業の先行きへの行き詰まり感や、これまでのそのままのやり方に対して疑問を感じるようになっていた。そして、それが何かは分からなかったものの、製造部 X1 の成長に繋がるような「レーザ応用の新しい何か」を見出す必要性を強く認識するようになっていた。しかし、どうしたらよいかの明確な解決策は持ちあわせておらず、打開策を模索する日々が続いていた。そのような中、その「何か」に辿り着くための手段として辿り着いた一筋の光明のようなものが、GPI との連携による技術開発なのである。

これらのことから、本技術開発活動に対して筆者が期待されていたことは、製造部 X1 の成長に繋がるような「レーザ応用の新しい何か」を具体的にすることであったと考えられる。すなわち、技術開発の目的は、「製造部の成長に繋がるような、レーザ応用の新しい何かを具体化すること」である。

次に、開発した「新しい技術」が製造部 X1 の成長にどのように寄与するのかを説明する。寄与は 2 つある。第 1 に、SD 事業成長への寄与である。第 5 章に示したように、この技術を SD 工程へ導入することで、SD 加工後検査を短時間化することができ、顧客の利便性が向上する。この点でダイシング市場内の SD 技術における競合他社との差別化が可能となり、SD 事業の競争力を強化できる。SD 事業の競争力を強化することで SD の市場シェアを高められ、SD 事業は成長し、製造部 X1 は成長を続けることができる。第 2 に、SD 以外の新規事業展開への寄与である。TS-LCI 技術は、高速 OCT や、レーザ溶接のインプロセス計測への転用が可能な技術である。つまり、TS-LCI 技術により SD 事業以外の新規事業への展開も可能となり、製造部 X1 の成長軸を広げることができる。このように、既存事業の強化と新規事業への展開という 2 軸の広がりをもち、開発した「新しい技術」は製造部 X1 の成長に寄与する。

最後に、筆者が行った技術開発は、何をもって成功と言えるのか説明する。上述のとおり、技術開発の目的は、「製造部の成長に繋がるような、『レーザ応用の新しい何か』を具体化すること」である。前述のように、「レーザ応用の新しい何か」とは、フェムト秒レーザ技術を応用した高速 OCT や、レーザ溶接のインプロセス計測といった、新規事業のことである。また、筆者が開発した TS-LCI 技術は、SD 事業の競争力強化だけでなく、これら 2 つの事業への転用が可能な技術で、製造部 X1 の持続的な成長に繋げることができる。筆者はこのようにして、製造部 X1 の成長に繋がる「レーザ応用の新しい何か」を明確にし、それに共通する「新しい技術」を確立した。ゆえに、本技術開発は成功したとすることができる。

表 6-12 筆者の行った技術開発の成功の定義

上司の使命	・製造部 X1 の成長	根拠
上司の所感	・SD 事業に行き詰まりを感じていた ・これまでのやり方の延長に疑問を感じていた	インタビュー 質問 8
本技術開発活動の目的	・製造部の成長に繋がるような、「レーザ応用の新しい何か」を具体化すること	インタビュー 質問 8
外部連携による技術開発の意義	・社内に無い知識を連携に求め、知識探索と技術開発に取り組み、新しい技術を確立できたこと	第 6 章 活動の省察
成功の定義	・成功とは、SD 事業の競争力強化と「レーザ応用の新しい何か」の両方に繋がる「新しい技術」として、TS-LCI 技術を確立したこと	第 5 章

表 6-12 の中で根拠として挙げた質問 8 に対するインタビューの回答を幾つか抜粋し、以下に引用する。

(J) 「(前略) その当時でも SD ビジネスの行き詰まりというか、僕個人的にはその当時それをすごく感じていたのかなというのがあって、GPI に行けばレーザの関係の先生もいたので、新たなレーザ応用とか市場の開拓、そういうのを持ち込んでもらって製造部の成長も一緒にならないかな」

(中略)

(筆者)「この中で、共同研究開発の手段が他にもある中で、GPI を選択した決め手は何だったのでしょうかという質問を重ねてさせてもらうと。」

(J)「決め手。やはりレーザの新しい応用とかというところで、レーザ応用の先生がたくさんいたので、何か面白いことをできるのかなというのは、僕の中ではそれは結構あったんです。」

(B)「ありましたね。レーザで何か新しいものを。」

(J)「僕自身は何だか思いつかなかったけど、正直。思いつかないけど、何かそんな感じだった。」

(中略)

(筆者)「これが長期的な売上増につながっていくぞと。」

(J)「将来的にね、何か製造部の成長に 2 人が関わってくれたらいいなというのが一番。」

引用：インタビュー、質問 8

6.5. 技術開発の成功要因の考察

6.5.1. ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づき考えられる成功要因

本節では、目標が不明確な中で本活動が成功できた要因を、DC 論を理論的基礎として考察をおこなうものとする。はじめに、今までの経緯を振り返ると、6.3.3.冒頭では、筆者が取り組んだ技術開発活動を、「目標が不明確なまま技術開発に取り組み、その中で市場ニーズを発見し、問題解決のために新しい技術を獲得・再構築した活動」と説明した。そして、6.3.4.では先行研究との比較分析を行い、本活動が先行研究の指摘にあてはまらない点を見つけた。すなわち、「目標が曖昧であると失敗する」という先行研究の指摘に対して、本活動は、「目標が曖昧であるにもかかわらず成功できた」のである。そこで、本節では、目標が曖昧であっても成功できた要因を DC 論に基づいて明らかにしようと試みた。そして、DC 理論に基づく一連の考察により、本活動の成功要因として、次の3点が浮揚してきた。

成功要因 1 . 製造部に浸透していた、不確実なものへの挑戦を推奨する組織風土

成功要因 2 . 上司による DC の「感知」能力と「調整機能」の発揮

成功要因 3 . 筆者による DC の「感知」と「変容」能力の発揮

6.5.2. ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づく本活動の構図

本活動に関係する DC については、はじめに筆者の上司に対するインタビュー調査の結果を振り返る。調査のうち、表 6-10 に示す定量分析で抽出した3つの単語群について、DC 論の特徴を併記する形で新たに表 6-13 に纏めた。第1群は「事業領域」、第2群は「DC の『感知』」、第3群は「DC の『変容』」、がその特徴である。

表 6-13 頻出単語の分類と特徴

分類番号	単語	特徴
第1群	技術、製造、レーザ	事業領域
第2群	お客、顧客 P、市場、顧客 Q	DC の「感知」
第3群	研究、知識、勉強	DC の「変容」

次に、図 6-11 に、DC 理論に基づいた本活動の構図を説明する。図の上下方向は企業の階層構造ごとの方針・機能に対応する。赤色部分は所属企業の経営理念、灰色部分は製造部の方針、白色部分は個別機能単位の各活動、青色部分は市場・顧客の存在を表している。図の左右は、左側が OC、右側が DC をそれぞれ示す。凡例に示した太色矢印は、DC を発揮した場面である。また赤色で示した矢印と四角囲い文字は筆者の活動とミクロ的基礎、青字は上司の働きかけとミクロ的基礎にそれぞれ相当する。

図 6-11 から、製造部 X1 の特徴を読み取ることができる。詳しくは次節以降で説明し、ここでは 3 つの特徴を簡単に説明する。1 つ目は、製造部 X1 に OC と DC の両方が備わる事である。OC は企業には必ず備わるべき能力であることから、製造部 X1 にとっても OC がその根幹となっているものの、製造部 X1 内には OC だけでなく DC も備わっていることが明らかとなった。2 つ目は、顧客と製造部の距離が非常に近いことである。顧客と企業 Z との関係というよりは、顧客と製造部は直結し、むしろ顧客は製造部の内側に存在する。つまり、顧客から製造部までの階層が非常に少なく、これにより、顧客や市場の声に迅速かつ柔軟に対応することが可能である。3 つ目は、製造部 X1 の組織構造に、企業の経営理念が上手く反映されていることである。この点は次節で説明する。

以下、図 6-11 に沿って成功要因を 3 つ説明する。

(a) オーディナリー・ケイパビリティ

(b) ダイナミック・ケイパビリティ

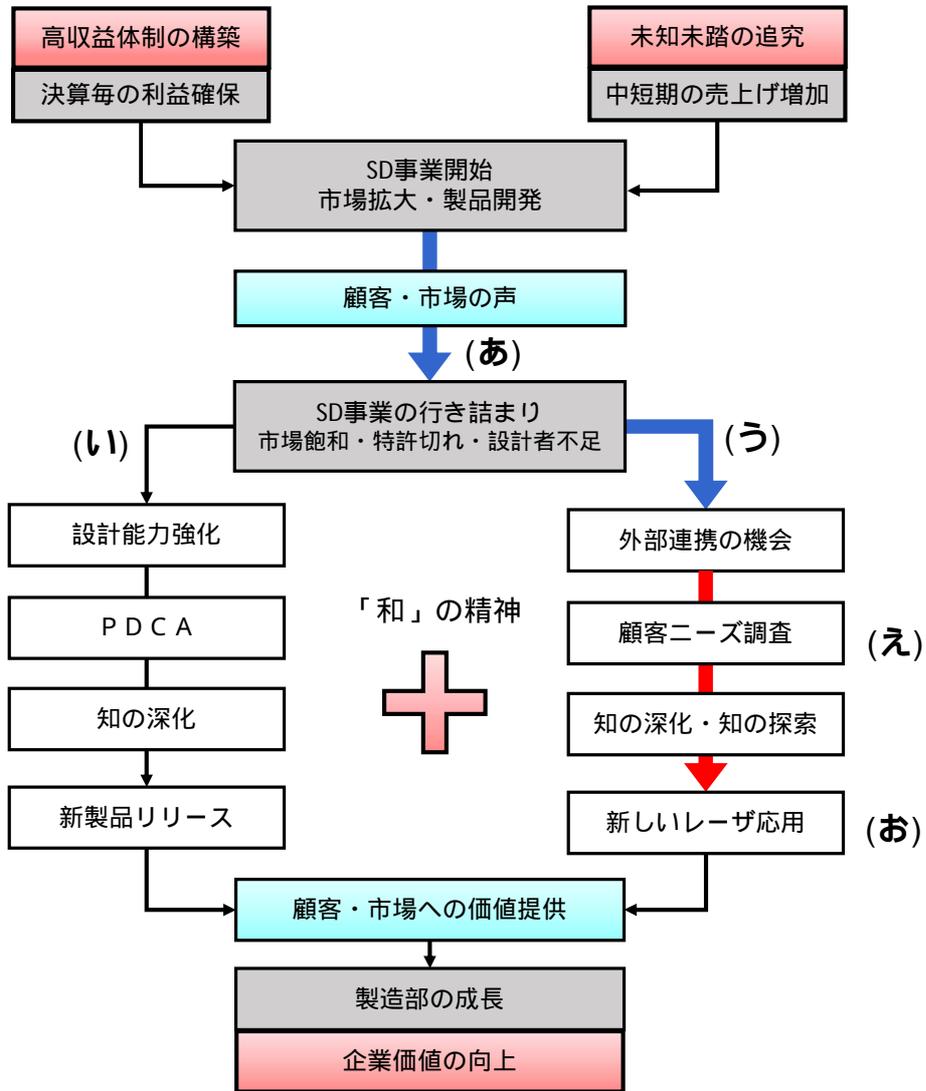


図 6-11 経営理念が浸透した製造部像と本活動の中で確認された DC

6.5.3. 成功要因1：製造部に浸透していた、不確実なものへの挑戦を推奨する組織風土

はじめに、成功要因の1つ目である、「製造部に浸透していた、不確実なものへの挑戦を推奨する組織風土」について説明する。菊澤によれば、「DC とは、他社にとっては模倣困難な能力」であり、その理由は「既存知識や資産を再構成し、再配置するダイナミック・ケイパビリティは、再構成され再配置される知識や資産と同様に、企業固有の歴史をとおして形成され、獲得されてきたものだからである」としている[5]。それでは、企業Zの企業文化、特徴はいったいどのようなものなのだろうか。企業Zの文化や歴史を簡潔に洞察するため、企業の姿が色濃く反映されているであろう、同社の経営理念を参照し考察を進める。

企業Zの経営理念を図6-12に示す[15]。この中に、特徴的な4つの用語に着目することができる。すなわち、「未知未踏の追究」、「企業価値の向上」、「高収益体制の構築」、「『和』の精神」である。これらの用語を用い、経営理念は端的に纏めると「我々は、高収益体制を構築し、未知未踏の追究に取り組む事で、自社の企業価値を向上させる。これを、『和』の精神を通じて取り組む」といえる。実際に企業Zでは、部門採算制により適正な利益水準を維持しつつも、高水準な研究開発費の確保や、光産業創成大学院大学の設立などを通じ、「未知未踏への追究」が継続的に取り組まれている。そのようにして、計画の下で「高収益体制の構築」と「未知未踏の追究」が並列している。

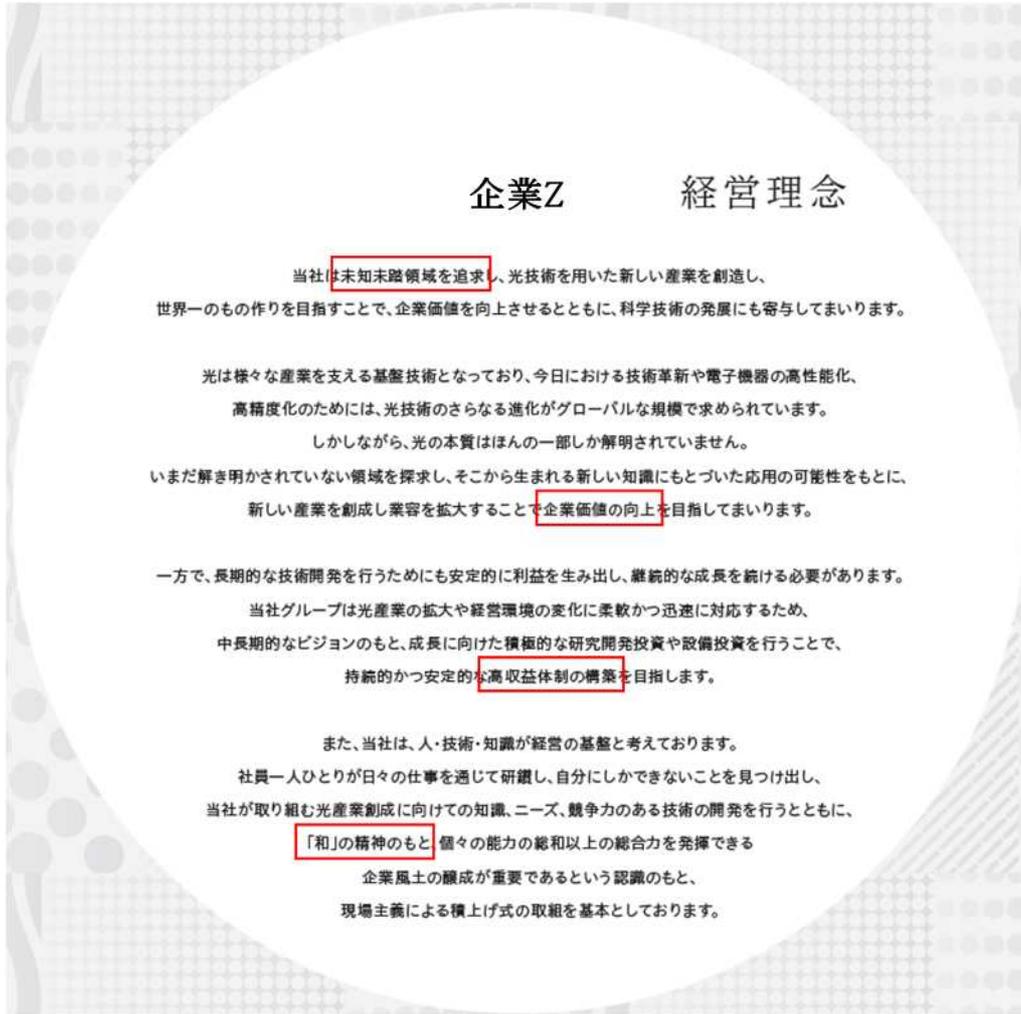


図 6-12 企業 Z の経営理念

出所：[15]より引用

次に、経営理念と OC、DC との関係性を説明する。OC と DC の特長を参照する為、表 6-1 から該当項目を抜粋したうえで、企業 Z の経営理念との関係を表 6-14 に示した。

表 6-14 OC と DC の比較と企業 Z の経営理念

	オーディナリー・ケイパビリティ	ダイナミック・ケイパビリティ
目的	技能的効率性	顧客ニーズとの一致 技術的機会や事業機会との一致
経営方針	利益最大化	付加価値最大化
知識	知の深化	知の深化と知の探索
構成要素	オペレーション、管理、ガバナンス	感知、捕捉、変容
企業 Z の経営理念	「高収益体制の構築」	「未知未踏の追究」

出所：[1][5]より引用し筆者追記

「高収益体制の構築」が OC に、「未知未踏の追究」が DC にそれぞれ対応することを説明する。表 6 - 14 に示す経営方針の行を参照すると、OC は利益最大化が対応する。利益最大化は、経営理念で言うところの「高収益体制の構築」に相当する。よって、経営理念に謳われている「高収益体制の構築」は OC に対応する。また、企業 Z の先代会長は、「人類未知未踏を追究するには、人類がこれまで見つけてきた既知既踏の知識もたくさん吸収しなければいけません」と説く。つまり、「未知未踏の追究」とは、「知の深化」だけでなく、「知の深化と知の探索」の両方に取り組む事と言える。表 6-14 の知識の行を参照すると、「知の深化と知の探索」は DC に相当するため、「未知未踏の追究」は DC に対応する。このように、経営理念に謳われている「高収益体制の構築」と「未知未踏の追究」は OC と DC にそれぞれ対応する。

次に、「高収益体制の構築」、「未知未踏の追究」と、製造部の使命となっている「決算期毎の貢献利益」と「中短期の売上高増加」を関連付ける。

まず、「決算期毎の貢献利益」は、経営理念で謳われている「高収益体制の構築」に対応することは明らかである。一方、「中短期の売上高増加」について、表 6-14 の経営方針の行を参照して説明する。これによると、DC に対応する経営方針は「付加価値最大化」である。利益と付加価値との大きな違いは、人件費に着目すると説明ができる。つまり、「利益 = 売上 - 費用」のため、費用である人件費は減算されるのに対し、「付加価値 = 営業利益 + 人件費 + 原価償却費」となり、人件費は加算される[5]。人件費を削減して利益を確保するのは OC に対応するのに対して、人件費を投入して付加価値を高め、売上高を伸ばすことは DC に対応する。従って、「中短期の売上高増加」は「未知未踏の追究」に対応すると考えることができる。

最後に、図 6-11 の、製造部 X1 の階層の説明をする。図 6-11 の第 3 段目に X1 製造部の方針を示す。X1 製造部の方針は、「新製品開発と、市場拡大により製造部 X1 を成長させ、企業 Z の企業価値の向上に貢献すること」である。製造部長である J は、その使命を負い、これまでの事業に取り組んできた。しかし、2015 年頃になると、図 6-11 の 4 段目に示すように、J は SD 事業の先行きに行き詰まりを感知していた。これはインタビュー内容を整理した表 6-11 にも示した。そして、ちょうどその当時に認識していた課題は 2 つである。1 つ目の課題は、新製品を効率よく開発して事業を回転させてゆくために必要な設計者不足の問題に対して、「設計能力強化」をする事である。これは表 6-14 の中の「技能的効率性」の追究であるため OC に相当し、この課題を 5 段目の左側に記載した。そして 2 つ目の課題は、それが何かは不明瞭ではあるが、「新しいレーザ応用開拓」することである。何かわからないものを明らかにする必要があったため、この課題は「未知未踏」に対応する DC を示す右側の 8 段目に示した。

このように、企業 Z では、経営理念が企業風土として末端組織にまで浸透し、その結果、OC と DC の両方が製造部 X1 に備わることが理解できた。そして、OC と DC は「P 和」の

精神」により調和し、新製品・技術を生み出し続けることができる。顧客・市場から新しい価値を認められ、その結果、製造部は成長し、最終的に企業 Z の企業価値向上に貢献する。

6.5.4. 成功要因 2：上司による「感知」能力と「調整機能」の発揮

次に、成功要因の 2 つ目である、「上司による DC の『感知』能力と『調整機能』の発揮」について説明する。本活動を示す図 6-11 の中で、上司が DC を発揮した場面は 2 回確認された。1 回目は、SD 事業の先行きに行き詰まりを感じた時で、2 回目は、筆者を大学へ派遣するため、製造部内をうまく取りまとめ人的資源を捻出した時である。1 回目は「感知」する能力、2 回目は調整機能にそれぞれ相当する。順に詳しく説明する。

はじめに、「感知」する能力を発揮した場面を説明する。表 6-2 のなかで、「感知」は、「顧客の声に耳を傾ける能力」と説明した。一方、筆者を大学へ派遣した当時は、図 6-11 の凡例(あ)に示すように、事業の先行きの不透明感を感知していた。「SD 事業に行き詰まりを感じていた、市場飽和・特許切れ・設計者不足」の困みがこれに対応する。その背景には、SD 市場の飽和、特許保護期限切れ、設計者不足、という問題を認識していた。顧客と対話し、競合の動きを観察することで、市場の変化や事業の行き詰まりを感じるようになっていた。上司たちは、顧客の声に耳を傾けることにより、6.2.3.2.の根本特殊化学株式会社的事例において説明したような、既存市場の閉塞感や事業継続への危機感をこの時まさに「感知」したと考えられる。インタビューの設問 2 のやり取りの中で、「顧客の声を聴くことが製造部の競争力の源泉である」と述べている事や、量的分析結果の第 2 群の単語が「顧客・市場」を表す単語である事からも、顧客の声を重要視していたことが理解できる。上司たちは、この様にして顧客の声に耳を傾けることで「感知」する能力を発揮した。

次に、「調整機能」を発揮した場面を説明する。図 6-11 の中では、凡例(う)の矢印がこれに相当する。具体的には、SD 市場の飽和、慢性的な設計者不足、基本特許期限切れ問題、などの問題を抱え、SD 事業に行き詰まりを感じている中で、外部連携の機会を活用して筆者を大学へ派遣した場面である。インタビュー内容の質問 6、7 より当時の上司たちの考えを理解する。

(筆者)「質問 6、当時の製造部 X1 の技術開発力の問題点、課題は何だったとお考えですか。」

(J) 「設計者、開発者が少なかった。そこが一番の問題だったのかな。(中略)それで設計者が明らかに少なくなってしまったというのが、ひとつ問題もあったのかな。」

(筆者)「そう考えると、私たちが派遣されたというのは、その問題に対して直接解決策ではない。」

(J) 「解決策ではないね。解決策ではないんだけど、まあその時期に出す、そっちも出しちゃったし、せっかくなのでそういう話もいただいたので、GPI で、で、相談したらいいという話だし、この際だから一気にやってみようかって思ったんだけどね。」

引用：インタビュー質問 6

(筆者)「質問 7、上記問題や課題を解決するための方針や具体策が、当時あったのであれば教えてください。」

(筆者)「この場合だと課題は、開発力を強化することと、お客さんへの要望に応えるような設計変更していくような、開発リソースですね。ここを確保することが課題だったのかなと。」

(中略)

(A)「第 3 世代の切り替えタイミングは、かなりいろいろあったということですね。」

(B)「あったよ。」

(A)「ちょうど僕らが派遣されるタイミングなんです。」

(B)「みんな言ってたのは、『なんでここで』ってみんなに言われてたんだもん。A 君はメカのメンバーとして期待していたのに、なんで抜けちゃうのみたいなことを言われていた。」

(中略)

(B)「製造部の経費、売上を確保するために人を減らしたんですね。若手とか設計者を部門 X3 へ移しました。そこからは技術力がなくなったことはあるけれど、根本的に空間光変調器を積んだエンジンの設計の見直しをその頃にしたんですね。一生懸命やって、その頃から技術的な主体が部門 X3 に移ってしまって、残された部署の開発グループの技術力がちょっと落ちてしまったんですよ。設計者不在とかって、そんな時代でしたかね。そういうのもあるのに、(筆者)と A 君を大学院大学に出したんだよね。そんな感じでしたかね。」

引用：インタビュー質問 7

インタビュー内容から、以下のことが読み取れる。

- ・当時の製造部 X1 の最大の問題点は、「設計者不足」であると上司が認識していた。
- ・筆者らの大学院大学派遣は設計者不足問題の解決策にはならない。
- ・筆者らを大学院大学へ派遣することに、部署内では疑問の声があった。

つまり、設計者不足の問題に対する素直な解決策は、筆者らを設計者として割り振り、効率的な設計能力を確保することであった。この流れは図 6-11 の左側の OC 側に凡例(い)として示した。しかし実際は、上司たちは「設計者不足」の問題を製造部の問題として認識しながらも、この解決のために全ての人的資源を集中することは敢えてせず、「新しいレーザ応用」の実現に向けて筆者らを充てたものと考えられる。当時、部署内には疑問や反対意見があったものの、それでも製造部内を上手に「調整」し、筆者らの派遣を実行した。これらの一連の流れは、図 6-11 においては OC と対極な能力である DC に相当し、凡例(う)として示した。そして、短期的な利益確保だけでなく、中長期的な売上高成長への種をまいたのである。

DC が製造業に与える効果は決して定性的なものではない。この点を補足する。Katila らは、ロボット製造業界での新製品の数を調査し、知の深化・知の探索との相関を明らかにした[16]。同調査によれば、知の深化だけに取り組んだ場合は、新製品数は知の深化度合いが進むにつれて逆Uの字状となりやがて効率が低下するのに対し、知の深化と知の探索の両方に取り組んだ場合には、このような低下はみられず、効率は右肩上がりとなった。知の探索の有効性を定量的に立証し、新製品を効率よく出すためには、知の深化と知の探索の両方が重要であると結論付けた。従って、DC に示される「知の探索」の重要性を上司たちは認識しており、「知の深化」にあたる「設計能力の強化」を求める声が部署内で大勢を占めた局面においても「知の探索」に人的資源を投入する、という「調整機能」の発揮に繋がったものと考えられる。

6.5.5. 成功要因 3：筆者による「感知」と「変容」能力の発揮

最後に、成功要因の3つ目である、「筆者による DC の『感知』と『変容』能力の発揮」について説明する。筆者の活動で、「感知」する能力が発揮されたのは、図 6-7、表 6-6 における d と g の合計 2 度であり、図 6-11 では、凡例(え)の囲みに相当する。d では、「製造部 Y1 の抱える技術的な問題を認識し、顧客ニーズを明確化した」という活動である。g は「『fs 広帯域光源技術』の応用技術である『LCI 技術』が『課題』の解決に利用可能であることに気付いた」という気付きである。気付きを得た時は、f の活動の最中で、「fs 広帯域光源」の共同研究に取り組んでいる活動の最中であった。このようにして、筆者は本活動中に「感知」する能力を発揮した。

また、筆者が「変容」する能力を発揮したのは、図 6-7、表 6-6 における、k の活動で、図 6-11 では、凡例(お)に相当する。k では、顧客ニーズの対応に向け、これまでに獲得してきた 3 の技術、「fs 広帯域光源技術」「LCI 技術」「タイムストレッチ技術」を深化させて、「TS-LCI 技術」を開発した。顧客ニーズ対応のために必要な新しい知識を獲得し、そのうえで既存知識との再構成をしたため、筆者は「変容」の能力を発揮したと考えられる。

6.6. 本章のまとめ

最後に本章をまとめる。6.1.では、本章の目的と本章の構成を示した。目的は、筆者が行った産業側と学術側の連携による技術開発の成功要因を抽出することである。そのために、「筆者が行った技術開発活動を省察すること」と、「筆者が行った技術開発の成功要因を考察すること」の2つを手段とした。

6.2.では、我が国のものづくり産業が抱える問題と、解決すべき課題を示した。そして、その課題解決のため、企業には変化対応的な変革能力が必要であることを、ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づいて説明をした。そして、富士フィルムホールディングス株式会社と根本特殊化学株式会社という実在する企業の事例を取り上げ、ダイナミック・ケイパビリティが、現代企業の生存や成長にどのように役立ってきたのかについて具体的に説明した。

6.3.では、産業側と学術側の連携による技術開発について述べた。はじめに筆者自身が行った技術開発活動を省察し、本活動の転換点として2つの出来事に着目した。具体的には、「2016年4月、ステルスダイシング技術を携えてGPIへ入学した」と、「2016年11月に、製造部X1にとっての新技术である、『フェムト秒広帯域光源技術』の開発メンバーに選出された」との2つである。次に、産学連携による技術開発の成功と失敗に関する先行研究を参照した。先行研究との比較により、本活動では「目標が曖昧であっても技術開発に成功できた」という点が先行研究の示唆と大きく異なる事を指摘した。

6.4.では、上記の転換点に至る背景を確認するため、筆者の活動に大きな影響を与えた所属先の上司へのインタビュー調査を行った。インタビュー調査で得られた記録を示し、それらの記録を定性的かつ定量的に分析をした。定量分析では、統計的手法により3つの単語群を抽出した。定性分析では、転換点に至った背景や、技術開発の目的を明らかにし、技術開発の成功とはなにかを定義した。すなわち、技術開発の目的は、「製造部の成長に繋がるような、レーザ応用の新しい何かを目指すこと」で、成功とは、「レーザ技術の新しい何かを明確化したこと」であることを示した。

6.5.では、上述の成功の定義を踏まえつつ、本活動が成功できた要因をDC論に基づき抽出した。抽出に際しては、筆者の所属企業の経営理念を解釈し、「未知未踏」「高収益体制」「企業価値の向上」「『和』の精神」の4つのキーワードを抽出し、経営理念を反映した製造部像を示しつつDC理論と関連付けた。これらの結果、3つの成功要因を導きだした。すなわち、「製造部に浸透していた、不確実なものへの挑戦を推奨する企業風土」「上司によるDCの『感知』能力と『調整機能』の発揮」「筆者によるDCの『感知』と『捕捉』の能力の発揮」、の3つが成功の要因であると結論付けた。

第6章の参考文献・引用

- [1] 経済産業省, “不確実性の高まる世界の現状と競争力強化”, 2020年版ものづくり白書 pp.65, pp.91 (2020).
- [2] C. M. Christensen, M. Raynor, R. McDonald, 有賀裕子 訳, “破壊的イノベーション理論: 発展の軌跡”, *ハーバード・ビジネスレビュー*, ダイヤモンド社 (2016).
- [3] 菊澤研宗, “ダイナミック・ケイパビリティの経営戦略論”, 中央経済社(2018).
- [4] D. J. Teeth(著), 菊澤研宗, 橋本倫明, 姜理恵(訳), “A dynamic capabilities-based entrepreneurial theory - ダイナミック・ケイパビリティの企業理論 -”, 中央経済社 (2019).
- [5] 菊澤研宗, “成功する日本企業には「共通の本質」がある ダイナミック・ケイパビリティの経営学”, 朝日新聞出版, pp.34 (2019).
- [6] 島田直樹, “経営戦略 理論と実践”, 丸善出版 (2018).
- [7] D. J. Teeth, “The Foundations of enterprise performance: Dynamic and ordinary capabilities in an (economic) theory of firms” *The Academy of Management Perspectives*, Vol. 28, No. 4, 328–352 (2014).
- [8] 富士フィルムホールディングス株式会社 web, “事業ポートフォリオ”, <https://ir.fujifilm.com/ja/investors/value/portfolio.html> (最終閲覧日,2020年2月4日).
- [9] 土屋勉男, 金山権, 原田節雄, 高橋義郎, “事例でみる中堅企業の成長戦略 - ダイナミック・ケイパビリティで突破する「成長の壁」”, 同文館出版 (平成29年).
- [10] 米倉誠一郎, 清水洋, “オープン・イノベーションのマネジメント”, 有斐閣 (2015).
- [11] “産学連携の成功・失敗要因に関する事例調査の結果について”, 九州経済産業局 (2009).
- [12] “産学官連携における成功要因と課題についての調査研究報告書”, 日本機械工業連合会神鋼リサーチ株式会社 (2010).
- [13] K.N. デンジン, Y.S. リンカン 編, 平山満義 監訳, 大谷尚, 伊藤勇 編訳, “質的研究ハンドブック第3巻 - 質的研究資料の収集と解釈 -”, 北大路書房(2006).
- [14] MathWorks®社 web, “Text Analytics Toolbox テキストデータの解析とモデル化”, <https://jp.mathworks.com/products/text-analytics.html>, (最終閲覧日,2021年7月1日).
- [15] 浜松ホトニクス株式会社 統合報告書(2020)
- [16] R. Katila and G. Ahuja, “Something old, something new: A longitudinal study of search behavior and new product introduction”, *Academy of Management Journal*, Vol.45, No.6, 1183-1194 (2002).

第7章 結論

本章では、はじめに本研究の内容を振り返る。そして、本研究の目的に対する結論を説明する。最後に残された課題と今後の事業戦略について述べる。

7.1. 本研究の振り返り

本論文を振り返る。第1章では、研究に至る背景と研究の目的を説明した。そのなかで、SD事業とSD技術について説明した。その中で、SD事業の問題点は、「売上高が頭打ち傾向になってきていること」、SD技術の問題点は、「分割工程の後にしか、分割の可否や加工品質の判断ができないこと」であることを示した。

第2章では、顧客ニーズ発見に至る調査について述べた。顧客が抱える問題の深掘りが可能な、参与観察による現場調査手法について説明し、具体的に調査した内容を示した。この調査の結果、「分割工程の前に、SD層の深さを測定可能な手段の実現」をSD技術の顧客ニーズとすることができた。

第3章では、第2章で設定したニーズの解決手段として、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術に着目した理由を説明した。主な理由として、低コヒーレンス干渉計測(LCI)が高速なレーザ加工の測定に使用可能なこと、SD加工の測定には200 kHz以上の繰り返し速度が必要なこと、この速度を実現する為にはLCIにタイムストレッチ技術を使う必要があることを述べた。

第4章では、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉の測定系を構築し、その基本特性を示した。使用した分散補償ファイバが持つ波長分散の影響を受け、光路長特性が劣化する事、その改善のためには波長分散補正が必要な事を説明した。また、その波長分散補正の方法に技術的新規性を見出し、先行技術との違いを説明した。

第5章では、第4章までに開発した技術を、SD加工の計測に応用した。そして、実際の加工サンプルを、6.9 μm の位置分解能、15 MHzの繰り返し速度で測定ができることを実証した。また、この技術を製品応用することで、顧客の利便性向上に期待できることを確認した。これにより、競合製品との差別化ができ、SD事業の競争力の向上に繋がることを述べた。

第6章では、本研究活動を、産業側と学術側の連携による技術開発と捉え、その成功要因を抽出した。そのために、筆者が行った技術開発活動の省察と、筆者の上司へのインタビュー調査を行った。活動の省察では、転換点となった2つの出来事に着目した。インタビュー調査からは、上司らがSD事業に行き詰まりを感じており、「レーザ応用の新しい何か」に繋がる「次の一手」を見出す必要性に駆られていたことが浮き彫りとなった。これに対して、筆者には「レーザ応用の新しい何か」に繋がる技術開発を期待されていたことが分かった。また、筆者の成功の定義は、「既存のSD事業の競争力を高め、且つ、新たなレーザ応用の可能

性を広げる『新しい技術』として、TS-LCI 技術を確立したこと」とすることができた。また、技術開発の成功要因を、ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づき考察し、3つの成功要因を抽出することができた。

7.2. 本研究の目的と結論

本研究の目的と結論を述べる。以下に、第1章にて説明した表1-2を再掲する。

表1-2 本研究の目的（再掲）

事業実践の目標	ステルスダイシング事業の競争力を高めること		
本研究の目的	研究目的1	研究目的2	研究目的3
	・競争力強化に繋げるための顧客ニーズの探索	・SD加工深さのリアルタイム測定を行うための、タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術(TS-LCI)の開発	・技術開発の成功要因の抽出
手段	・SD技術が使われている製造現場への参与観察による調査	・測定システムの開発、基本特性の確認、光路長特性改善手法の提案 ・SD技術への応用検討	・筆者が取り組んだ技術開発活動の省察 ・上司へのインタビュー調査とその分析
結論	・製造現場の中で、「断面観察」作業が潜在的な問題であることに着目した ・SD加工深さを加工と同時にリアルタイムで測定することができれば、顧客のメリットとなることを明らかにした ・メリットは、時間や手間が短縮できること、加工不良によるウェハ損失の抑制が可能なことである	・先行技術であるフェムト秒レーザ光源技術とタイムストレッチ技術を深化させ、SD加工深さのリアルタイム測定に特化したTS-LCI技術を開発した ・15 MHzの繰返し速度、6.9 μmの位置分解を持つTS-LCIを開発し、SD加工の測定が可能であることを示した	・ダイナミック・ケイパビリティ理論に基づき、3つの成功要因を抽出した ・要因1:製造部に浸透していた不確実なものへの挑戦を推奨する組織風土 ・要因2:上司によるDCの「感知」能力と「調整機能」の発揮 ・要因3:筆者によるDCの「感知」と「変容」能力の発揮

本博士研究に至る背景は、SD事業が行き詰まりを迎えていたことである。具体的には、市場の飽和に加え、基本特許失効時期の切迫や模倣メーカーの出現による顧客離反などにより、SD事業の競争力は低くなり売上の伸び悩みに直面していた。そして、その打開策となる新技術を見つけるべく、所属組織は筆者を光産業創成大学院大学へ派遣し、技術開発に取り組むことになった。そして、筆者の事業実践目標は、SD事業の競争力を高め

ることであった。そして、そのような背景の中取り組んだ本博士研究もまた、SD 事業の競争力の強化に繋がられる必要がある。以下に、本博士研究の3つの目的と結論、そのためにとった手段を説明する。

本研究の第1の目的は、SD 技術に残されている問題を明らかにし、顧客ニーズを明確にすることである。そのためには、顧客を深く知る必要があり、その調査手法として参与観察法による現場観察を選択した。調査では、SD 技術が半導体素子の生産に使用されているダイシング工程に密着し、SD エンジンを中心とした一連の工程フロー、現場の行動方針、それに影響を与える生産体制の調査を行った。この結果、問題点の残されている作業として、「抜取り検査」、「レシピ検討」、「作業教育」の3つを抽出することができた。さらに、これらの作業に共通する作業として、「断面観察」作業に大きな手間がかかり、潜在的な問題となっている点を指摘した。一方、工程は極少量多品種生産に対応した体制をとり、「生産計画を守る事」を重要視した運営方針であり、これに基づいた工程設計となっていることが分かった。最後に、上記で指摘した問題と工程のあるべき姿を対比し、SD の顧客ニーズを明らかにした。すなわち顧客ニーズは、「分割工程前に SD 層の深さを測定する手段の実現」である。

本研究の第2の目的は、「タイムストレッチ技術を利用した低コヒーレンス干渉計測技術 (TS-LCI) の開発」である。SD 加工を 200 kHz 以上の繰返し速度で測定するのに適した方法として、筆者は TS-LCI 技術に着目した。そして、実践的な技術開発活動に取り組み、活動を通して複数の技術を獲得し、これらを深化させることで TS-LCI 技術を開発することができた。また、その中で直面した、波長分散の影響による光路長特性の劣化の問題については、波長分散を補正することにより改善可能であり、学術的新規性のある、より簡便かつ正確な波長分散補正方法を見出した。その後、SD 加工を測定するための専用設計に取り組み、15 MHz の繰返し速度、6.9 μm の位置分解能で SD 加工の深さ位置を測定できることを示した。結論として、「技術開発により得た複数の技術を深化させ、SD 加工の測定が可能な TS-LCI 技術を開発することができた」といえる。

本研究の第3の目的は、筆者が行った技術開発について振り返り、その成功要因をダイナミック・ケイパビリティ (DC) 理論に基づき抽出することである。そのために、筆者の活動に多大な影響を与えた筆者上司へのインタビュー調査を行った。本調査では3つのことに取り組んだ。第1に、筆者が行った技術開発を省察した。これにより、活動の転換点となった出来事を抽出することができた。第2に、筆者の上司へのインタビュー調査結果の定性分析を行った。これにより、転換点に至る背景を明らかにすることができ、上司は当時、SD 事業の行き詰まりを感じており、「レーザ応用の新しい何か」を見出す必要性に駆られていたことがわかった。また、筆者への期待、これに対し、成功とは何かについて定義することができた。すなわち、筆者への期待は、「製造部 X1 の成長に繋がるような『レーザ応用の新しい何か』に繋がる新しい技術を具体的にすること」であり、筆者の成功とは、「既存の SD 事業の競争力を高め、且つ、新たなレーザ応用の可能性を拡げる『新しい技術』」として、

TS-LCIを開発したこと」である。そして第3に、筆者の上司へのインタビュー調査結果の定量分析を行った。これにより、SD事業の成長の為に上司たちが重要視していた事柄が、「事業領域」、「顧客」、「知識」の3つであることを明らかにした。そして筆者が成功できた要因として、DC理論に基づいて考察をし、3つの成功要因を導き出した。すなわち、それは、「製造部に浸透していた不確実なものへの挑戦を推奨する組織風土」、「上司によるDCの『感知』能力と『調整機能』の発揮」、「筆者によるDCの『感知』と『変容』能力の発揮」であった。

このように、本事業実践では、SD事業の競争力を高めることを目標に据え、SDの顧客ニーズの探索、ニーズに適するTS-LCI技術の開発、技術開発の成功要因抽出、の3つの研究に取り組んだ。そしてこれらの研究成果は、SD事業の競争力強化に繋がるものとする。

7.3. 今後の課題と事業戦略

本研究では、技術開発を伴う事業実践活動に取り組むことで、SD 事業の競争力を高める技術を開発し、新しい技術を獲得することができた。しかし、現状では経済的価値の創出には結びついておらず、イノベーションの成功にまでは至っていない。残された課題は、開発した技術により SD 事業の競争力を高め、経済的価値を創出することである。今後の事業戦略を図 7-1 に示す。図 7-1 に示した事業戦略は、本論の第 6 章で実施した筆者の上司へのインタビュー調査結果から明らかになった製造部 X1 の「思い」、すなわち、SD 事業の成長のために上司たちが最も重視している点 - 「事業領域」の拡大と「顧客」との信頼性構築と満足度向上 - を意識しながら筆者が考えたものである。(a)は SD 事業の成長戦略、(b)は可能性のある今後の戦略オプションである。残された課題は、図の中で(a)の第 2 段階までに示す。

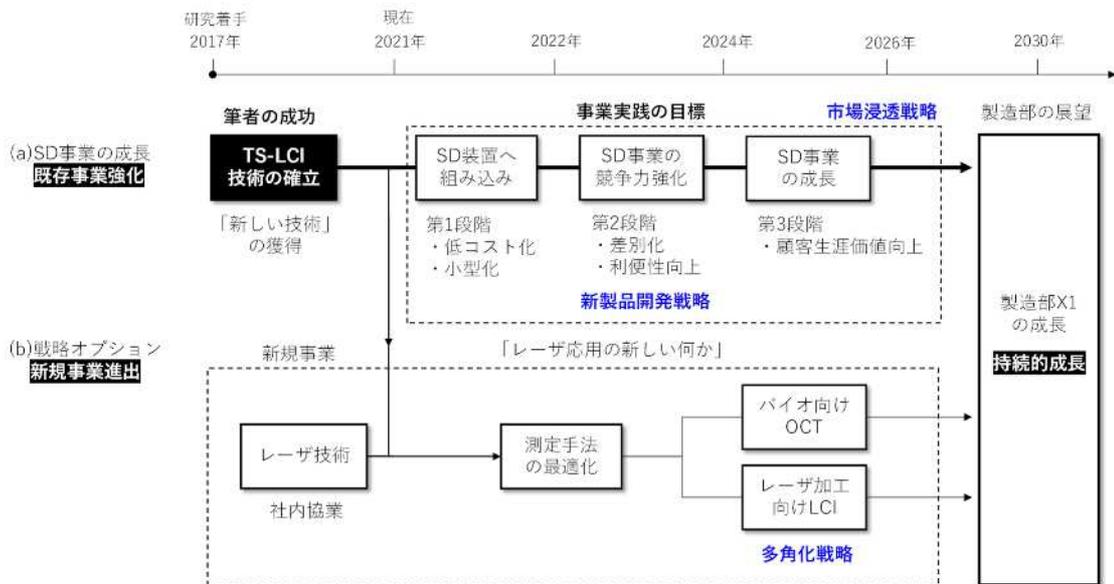


図 7-1 筆者の成功を基にした今後の事業戦略
(a)SD 事業の成長戦略, (b)戦略オプション

はじめに、(a)既存事業である SD 事業の成長戦略について説明する。現状、開発した TS-LCI システムは、光学ベンチ上の実験用システムである。そのため、経済的価値の創出までに残される課題を、2024 年までの 2 つの段階に分けて示した。第 1 段階では、2022 年を目途に、SD 装置へ組み込み可能な試作品にすることを旨とする。そのために必要なことは、小型化と低コスト化である。例えば、干渉計部を筐体に収め、測定アーム部分は SD エンジンに並列させ、SD 装置に組み込み可能な小型サイズの光学モジュール化を図る。また、現在は信号記録に使用しているリアルタイムオシロスコープを AD 変換ボードへ置き換え、コストダウンを図る。使いやすいサイズと、機能に見合う価格の両方を実現し、ユーザに受け

入れやすくすることで製品化にこぎ付ける。

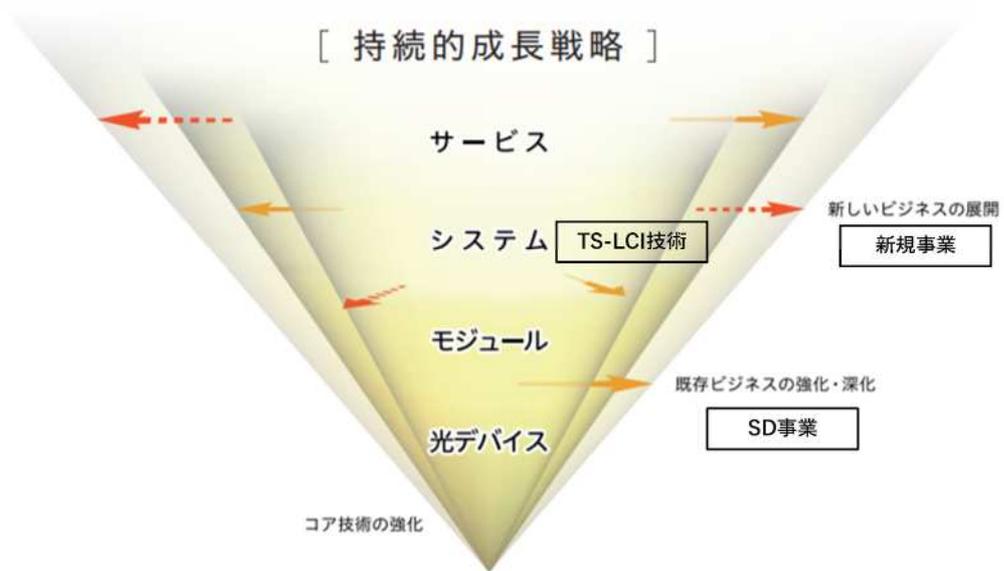
第2段階では、2024年を目途に、他社との差別化に取り組む。TS-LCI技術の測定精度の向上や、測定結果をSD装置へのフィードバック機能を設けるなどにより、SD装置とTS-LCI装置との相乗効果を狙う。そして、自社SD装置の利便性を高め、加工機能を模しただけの競合他社製品との差別化に繋げる。独自の価値を顧客に認めてもらうことで、経済的価値創出につなげる。他社との差別化を図ることで、SD事業の競争力を強化するという事業実践の目標に近づくことができる。

第3段階では、顧客生涯価値の向上に取り組む、2026年に現在の約2倍の売上げを目指す。SD事業で現在顕在化した問題のように、レーザ加工ができる、検査ができる、などの単純機能の提供に留まると、顧客の離反が起こり易い。他社による模倣が容易なうえ、他社への切り替えコストが低いためである。顧客を繋ぎとめてゆくためには、その顧客にとって意味のある価値を顧客と一緒に創り出し、提供し続ける必要がある[1]。現在、具体的な案は持ち合わせていないが、本研究で取り組んだ参与観察による現場調査など、顧客に寄り添った調査により、これらのヒントを得ることは可能と考える。そして、顧客もまだわかっていないニーズを共に掘り起こし、解決策を提供し、顧客の信頼を得ることでSD事業はより一層成長することができる。

(a)SD事業の戦略をまとめる。製造部X1の競争上の立場はニッチャーであり、差別化集中戦略をとることが定石である。この戦略では、高価格であっても、特定顧客のニーズに完全に応えることで差別化を図り、模倣メーカーの追従を振り切る。本事業実践で開発したTS-LCI技術は、特定顧客Y1のニーズに応えて差別化を図ることで、SD事業の競争力強化に繋がると考える。

次に、(b)戦略オプションについて説明する。開発したTS-LCI技術を基に、SD事業以外の新規事業への展開を想定する。まず、TS-LCIはレーザ溶接やレーザ溶着などのレーザ加工の監視に技術転用が可能である。レーザ溶接監視は主に自動車産業[2][3][4]、レーザ溶着監視は航空産業応用の報告例[5]があり、レーザ加工品質の監視に使うことができる。現在は数十kHzのLCI計測が使用されているが、高スループット化に価値を見いだせればMHzの繰り返し速度のTS-LCIに機会がある。また、TS-LCIはバイオ用のOCT(Optical coherence tomography：光断層画像)や、OCM(Optical coherence microscopy：光断層顕微鏡)に転用が可能である。眼科手術用の非侵襲計測では、3D画像をカメラレートで表示したいというニーズに対し、MHzの繰り返し速度を持つ特殊なLCI技術が使われており、このような用途にTS-LCIの転用が可能である[6]。

最後に、図7-2で示すように、本博士研究で開発したTS-LCI技術は、(a)既存事業の強化と、(b)新規事業展開の両方に貢献可能な技術である。光応用産業構造の裾野を広げるための要素は、(a)既存事業の強化と(b)新規事業への展開の2つである[7]。従って、TS-LCI技術は、製造部X1のみならず、光応用産業の持続的成長に繋がる「新しい技術」であると言える。



出所：[7]より引用

図 7-2 光応用産業の持続的成長に対する TS-LCI 技術の寄与

第7章の参考文献・引用

- [1] 延岡健太郎, ‘顧客価値の暗黙化’, *一橋ビジネスレビュー*, 2017 SPR.(2017).
- [2] F. Dorsch, W. Dubitzky, J.P. Hermani, A. Hromadka, T. Hesse, T. Notheis, M. Stambke, ‘Controlling laser processing via optical coherence tomography’, *Proceedings of SPIE 109110G* (2019).
- [3] N. D. Dupriez, C. Truckenbrodt, ‘OCT for efficient high quality laser welding’, *Laser Technik Journal*, pp37-41(2016).
- [4] 石井勝弘, 長谷川博, 古川英昭, ‘タイムストレッチ分光法を利用した高繰返し光干渉画像法とレーザー溶接のその場計測’, *レーザー研究*, 第49巻, 第4号(2021).
- [5] G. Lamouche, S. Roy, B. Gauthier, ‘SS-OCT for automated composite manufacturing quality control’, *Conference on SPIE. Optical Metrology, Nondestructive testing and fault detection, Session16* (2019).
- [6] J. P. Kolb, W. Draxinger, J. Klee, T. Pfeiffer, M. Eibl, T. Klein, W. Wieser, R. Huber ‘Live video rate volumetric OCT imaging of the retina with multi-MHz A-scan rates’, *Plant Phenomics and Precision Agriculture* (2019).
- [7] 浜松ホトニクス株式会社 統合報告書(2020)

研究業績

・主論文

論文名 : Low-coherence interferometer with 10MHz repetition rate and compensation of nonlinear chromatic dispersion

著者名 : M. Hoshikawa, K. Ishii, T. Makino, T. Hashimoto, H. Furukawa, N. Wada

掲載学会誌 : *Optical Review* (2020) **27**, p.246-251

掲載年月日 : 2020年2月14日

・学会発表

発表題目 : タイムストレッチ技術を応用した高繰り返し低コヒーレンス干渉計測

発表者 : 星川雅春, 石井勝弘, 牧野健, 橋本崇弘, 古川英昭, 和田尚也

学会名 : 応用物理学会 光波センシング技術研究会

開催年月 : 2018年12月5日

開催場所 : 東京理科大学 森戸記念館

発表題目 : Highly-repetitive low-coherence interferometry suitable for use in smart factories

発表者 : 星川雅春, 石井勝弘, 牧野健, 橋本崇弘, 古川英昭, 和田尚也

学会名 : OPIC2019 IoT-SNAP

開催年月 : 2019年4月24日

開催場所 : 横浜 インターコンチネンタルホテル

発表題目 : Highly repetitive low-coherence interferometry with time-stretch technique

発表者 : 星川雅春, 石井勝弘, 牧野健, 橋本崇弘, 古川英昭, 和田尚也

学会名 : SPIE Optical Metrology

開催年月 : 2019年6月17日

開催場所 : ミュンヘン国際会議場

謝辞

こうして今、本論文に向き合った日々を振り返ってみると、道程は予想した以上に険しく、私一人の努力だけでは成し遂げることはできなかったことと思います。特に、最終年度となった2021年は、COVID-19の蔓延により、様々な対応を求められる1年でありました。そのような中、多くの皆様からのご協力、そして情熱を頂いたことで、ようやく終着地点に至ることができました。その原動力を頂いた皆様に対して、論文の最後になりましたが、感謝の気持ちとお礼を述べさせていただきます。

研究活動を遂行するにあたり、研究全般に渡り終始丁寧なご指導、ご鞭撻、ご高配を賜りました、光産業創成大学院大学 石井勝弘先生に深く感謝いたします。本学への入学当初、研究テーマが全く定まっていない状態から、最終的な研究テーマ設定に至るまで、終始的確にご指導、ご助言を頂きました。実験では、筆者に知識がない光干渉計測分野への門戸を開き、新しい知識探索への意欲を高めて下さいました。また、本論文の作成では、休日深夜を厭わず原稿の校正、推敲をして頂きました。心より重ねてお礼申し上げます。

本論文を纏めるにあたり、光産業創成大学院大学 長谷川和男先生には、論文の審査委員長を務めて頂きました。レーザー加工の豊富な知識と経験に裏打ちされたご助言により、本論文の完成度をより一層高めることができました。

光産業創成大学院大学 姜理恵先生には、論文の副審査委員長を務めて頂きました。経営ゼミでは、私の中でおぼろげに抱いていた疑問を整理し、本論文に独特の視点を与えて頂きました。先生と同じ大学出身ということが分かり、ご指導に一層熱気を帯び始めたことが鮮明に思い出されます。

光産業創成大学院大学 瀧口義浩先生、増田靖先生、江田英雄先生、藤田和久先生、花山良平先生、内藤康秀先生、沖原伸一郎先生、森芳孝先生、横田浩章先生、楠本利行先生、平野美奈子先生には、論文審査、ゼミを通じて貴重なご助言を賜りました。宇佐美健一先生には、現場調査や市場調査の極めて実践的な方法をご指導頂きました。実線を通じた考察をすることで、本論文の深みを飛躍的に増すことができました。

光産業創成大学院大学 職員の皆様には、文献手配など、研究に没頭できる環境を整えて頂きました。コロナ禍においては毎朝の消毒などのご対応を頂き、安心して大学に通うことができました。ありがとうございました。

本学では、5年間を通じて光情報・システム分野に所属しました。その分野ゼミでは、学生ならではの素朴な疑問や、異なる視点、かつ純粋な意見交換をすることができ、新たな着想を得ることができました。本分野に所属したすべての先輩、後輩の皆様に感謝いたします。

そして、同期生の存在を忘れることはできません。鈴木那津輝様、安田忠史様、本山功様、長谷川正仁様、宮本淳子様。苦しい学生生活でしたが、皆様の頑張っている姿が私を励ましてくれました。

所属企業の鈴木賢次様、加藤久喜様、渥美一弘様、久野耕司様、山中武志様は、私に学びの機会を与えて下さいました。私の十数年来の希望に応え、大学への派遣という重大な決断をして頂きました。事業の先行きが見通せない中、貴重な機会を頂いたことに、改めて感謝を申し上げます。

また同僚の皆様には、私が戦力から抜けてしまうことで様々なご不便をおかけしました。そして、大学と企業という、2足のワラジを履く私に格別なるご配慮を頂きましたこと、改めて感謝申し上げます。今後は、研究を通じて得た知識や経験を活かし、和の心を意識し企業活動に取り組む所存です。

また、ダイシング工程の皆様には、仕事場である製造現場での調査にご協力を頂き、調査結果の本論文への掲載をご快諾頂きました。皆様のご協力無くして、本研究は成り立つことができませんでした。親切丁寧なご協力を頂き、誠にありがとうございました。

最後に、家族にお礼を述べ、謝辞を閉じさせて頂きます。研究活動は長く、不安な時も少なくありませんでした。そのような時、そばで支え続けてくれた、妻 やよい、勇気を与えてくれた、長男 慶成、安らぎを与えてくれた、長女 優衣に心より感謝します。