

平成18年度
先端的外観検査技術に関する
調査研究報告書

平成19年3月

社団法人 日本機械工業連合会
社団法人 日本オプトメカトロニクス協会



この事業は、競輪の補助金を受けて実施したものです。

<http://keirin.jp/>



日機連18先端1

平成18年度 先端的外観検査技術に関する調査研究報告書

平成19年3月

社団法人
日本オプトメカトロニクス協会

平成 18 年 度
先端的外観検査技術に関する
調査研究報告書

平成 19 年 3 月

社団法人 日 本 機 械 工 業 連 合 会
社団法人 日本オプトメカトロニクス協会

序

我が国機械工業における技術開発は、戦後、既存技術の改良改善に注力することから始まり、やがて独自の技術・製品開発へと進化し、近年では、科学分野にも多大な実績をあげるまでになってきております。

しかしながら世界的なメガコンペティションの進展に伴い、中国を始めとするアジア近隣諸国の工業化の進展と技術レベルの向上、さらにはロシア、インドなど BRICs 諸国の追い上げがめざましい中で、我が国機械工業は生産拠点の海外移転による空洞化問題が進み、技術・ものづくり立国を標榜する我が国の産業技術力の弱体化など将来に対する懸念が台頭してきております。

これらの国内外の動向に起因する諸課題に加え、環境問題、少子高齢化社会対策等、今後解決を迫られる課題も山積しており、この課題の解決に向けて、従来にも増してますます技術開発に対する期待は高まっており、機械業界をあげて取り組む必要に迫られております。

これからのグローバルな技術開発競争の中で、我が国が勝ち残ってゆくためにはこの力をさらに発展させて、新しいコンセプトの提唱やブレークスルーにつながる独創的な成果を挙げ、世界をリードする技術大国を目指してゆく必要があります。幸い機械工業の各企業における研究開発、技術開発にかける意気込みにかげりはなく、方向を見極め、ねらいを定めた開発により、今後大きな成果につながるものと確信いたしております。

こうした背景に鑑み、当会では機械工業に係わる技術開発動向等の補助事業のテーマの一つとして社団法人日本オプトメカトロニクス協会に「先端的外観検査技術に関する調査研究」を調査委託いたしました。本報告書は、この研究成果であり、関係各位のご参考に寄与すれば幸甚です。

平成 19 年 3 月

社団法人 日本機械工業連合会
会 長 金 井 務

は し が き

近年のアジア諸国や BRIC s 諸国の工業化の進展と技術レベルの向上は著しいものがあり、経済のグローバル化のなかで、わが国の機械産業の製品はより高信頼性と高付加価値化が期待されます。高品質の製品を製造するうえに大きく影響するものに検査技術が上げられますが、その検査技術は各産業、各企業、各製品に固有なものが多く、多品種生産、商品のサイクル、コスト等の面から市場に十分対応しているとはいえないのが実状です。

このような背景と現状をふまえ、当協会は平成 18 年度社団法人日本機械工業連合会から研究調査委託を受け、「先端的外観検査技術に関する調査研究」を実施しました。最近進歩の著しい光技術をもちいて、各種産業における製品や部品の外観、形状等を非接触で高精度活高速に検査する技術及びシステムについて総合的かつ体系的に調査を行い、その結果を分析することによって、機械産業の検査技術のあるべき方向を探り、競争力を高めることを目的にいたしました。当協会内に学識経験者及び産業界の有識者からなる委員会を設置し、委員長には斯界における第一人者である天神林孝二氏（独立行政法人産業技術総合研究所 光学技術研究部門グループ長）にご就任いただき、基礎的研究分野から産業の応用分野にいたる広範囲な外観検査技術について調査研究を実施しました。基礎分野においては、測定方法、基本デバイス、データ処理アルゴリズムなどについて、また応用分野においては、さまざまな産業における光計測の特徴を利用した先端的な応用事例について調査研究を行っております。

時間的制約の多々あるなかで、本調査研究のために時間さいて報告書の作成にあたられた委員長をはじめ委員各位、並びに種々のご指導をいただいた経済産業省、社団法人日本機械工業連合会その他の関係者の皆様方に厚く御礼を申し上げます。

本報告書が機械産業及びオプトメカトロニクス産業の発展に寄与し、関係各位の参考になり大いに活用されますことを期待する次第です。

平成 19 年 3 月

社団法人 日本オプトメカトロニクス協会
会 長 岩 居 文 雄

平成 18 年度 先端的外観検査技術に関する調査研究委員会委員名簿

委員長 天神林 孝二 (独)産業技術総合研究所 能力開発部門
人材開発企画室長 (兼務) 光画像計測グループ

【基礎技術分野分科会】

分科会長・幹事 小野寺 理文 職業能力開発総合大学校 通信システム工学科 助教授
長谷部 光雄 (株)リコー MFP 事業本部 開発革新センター 技師長
豊田 晴義 浜松ホトニクス(株) 中央研究所 第 4 研究室 専任部員
山田 吉郎 (株)テクノス 代表取締役社長・技術士
長尾 智晴 横浜国立大学 大学院環境情報研究院 教授
齋藤 理一郎 東北大学 大学院理学研究科 理学部 物理学専攻
固体統計物理学講座 物性理論研究室 教授

【応用技術分野分科会】

分科会長・幹事 稲 秀樹 キヤノン(株) コアテクノロジー開発本部
製品技術研究所 機器システム 32 研究室 室長
幹事 井関 敏之 (株)リコー 研究開発本部 基盤技術研究所
計測制御研究室 課長研究員
布施 正樹 (株)メック INS 技術センター 次長
崎田 隆二 (株)リコー 研究開発本部 基盤技術研究所
資源循環システム研究室 研究主担
鵜川 浩一 コニカミノルタセンシング(株) 国内販売部
東京営業所 FPD 技術担当
五十嵐 誠 オリンパスメディカルシステムズ(株) 商品企画本部
研究部 研究 1 グループ 主任研究員
若海 博樹 (株)モリテックス オプト・ビジョン開発生産本部
技術開発部 システム技術開発グループ
河野 澄夫 (独)農業・食品産業技術総合研究機構 食品総合研究所
食品分析研究領域 非破壊評価ユニット長

込山 貴仁 (株)コンステック IT 診断技術本部 副本部長
高橋 哲 東京大学 大学院工学系研究科 精密機械工学専攻
助教授
足立 秀之 ヴィスコ・テクノロジーズ(株) 代表取締役社長
武田 一男 (株)レイテックス 技術・生産本部 技術部 開発技術課
部長代理
清原 元輔 (株)清原光学 代表取締役社長
赤尾 佳則 科学警察研究所 法科学第四部 情報科学第二研究室
研究員

事務局 松倉 孝男 (社)日本オプトメカトロニクス協会 専務理事
事務局 高岡 孝徳 (社)日本オプトメカトロニクス協会 業務部長
事務局 中野 正人 (社)日本オプトメカトロニクス協会 技術部長

(敬称略、順不同)

目 次

序 文

はしがき

委員会名簿

第 I 章 序 言

1	はじめに (天神林孝二)	1
2	調査概要	2
2.1	委員会の開催状況	2
2.2	報告書の概要 (井関敏之)	4
3	第 II 章 基礎分野の概要 (小野寺理文)	5
4	第 III 章 応用分野の概要 (稲 秀樹)	7

第 II 章 基礎分野

1	基礎分野の概要 (小野寺理文)	9
1.1	概要	9
1.2	MT システムを使った外観検査	9
1.3	テラヘルツ波を利用したセンシング技術	10
1.4	形状検査	10
1.5	光イメージセンサ・変調器	11
1.6	ニューロ視覚センサによる先端的超汎用外観検査システム	12
1.7	外観検査のための先端的画像処理アルゴリズム	12
1.8	CNT (カーボンナノチューブ) のラマン分光	13
2	MT システムを使った外観検査 (長谷部光雄)	15
2.1	はじめに	15
2.2	MT システムの基本思想	15

2.3	実例(1) 蛍光ランプの外観検査	17
2.4	実例(2) はんだの自動外観検査	18
2.5	問題点と今後の課題	19
2.6	将来の方向	20
3	テラヘルツ波を利用したセンシング技術 (小野寺理文)	22
3.1	はじめに	22
3.2	テラヘルツ波の特長	22
3.3	テラヘルツ光源の開発	24
3.4	テラヘルツ検出技術	26
3.5	テラヘルツ波のセンシングへの応用	28
3.6	まとめ	32
4	形状検査 (天神林孝二)	33
4.1	はじめに	33
4.2	微細な形状の検査	33
4.3	モアレによる形状検査	36
4.4	形状補正型格子投影による形状の検査	36
4.5	あとがき	40
5	光イメージセンサ・変調器 (豊田晴義)	41
5.1	はじめに	41
5.2	光イメージセンサ技術	41
5.3	空間光変調器と補償光学技術	49
6	ニューロ視覚センサによる先端的超汎用外観検査システム (山田吉郎)	54
6.1	はじめに	54
6.2	従来システムの原理と歴史的な流れ	56
6.3	人間の目の機能実現のバックグラウンド	64
6.4	目視 36 倍精度の原理	66
6.5	目視 116.5 倍精度の原理	68
6.6	確実性 (不確実性) の原理	69

6.7	検査システム導入に関するユーザの期待と実際	70
6.8	外観検査システムの応用分野	71
7	外観検査のための先端的画像処理アルゴリズム (長尾智晴)	73
7.1	はじめに	73
7.2	画像処理アルゴリズムの構築とその効率化	73
7.3	画像処理への最適化法の適用	76
7.4	まとめ	82
8	CNT (カーボンナノチューブ) のラマン分光 (齋藤理一郎)	83
8.1	カーボンナノチューブの概要と共鳴ラマン分光	83
8.2	共鳴ラマン分光を用いた試料の欠陥の評価	87
8.3	おわりに	89
第Ⅲ章 応用分野		
1	応用分野の概要 (稲 秀樹)	91
1.1	はじめに	91
1.2	シート検査	91
1.3	事務機器の外観検査	92
1.4	ディスプレイ分野における画質検査	92
1.5	次世代内視鏡イメージングへの新展開	92
1.6	顔・肌の検査技術	93
1.7	農産物の非破壊検査技術	93
1.8	建築・土木分野の検査技術	94
1.9	近接場光を利用した検査技術	94
1.10	電子デバイスにおける画像処理を使った外観検査技術	94
1.11	ウェーハのエッジおよび裏面の検査技術	95
1.12	光学部品の高精度・高速計測	95
1.13	文書鑑識における外観検査	96
2	シート検査 (布施正樹)	97
2.1	はじめに	97

2.2	シート検査装置の構成	97
2.3	ソフトウェア	99
2.4	画像処理技術	100
2.5	光学フィルム検査技術の課題	104
2.6	欠陥検出技術	105
2.7	おわりに	107
3	事務機器の外観検査 (崎田隆二)	108
3.1	はじめに	108
3.2	検査工程概要	108
3.3	自動外観検査装置の事例	109
3.4	おわりに	117
4	ディスプレイ分野における画質検査 (鵜川浩一)	119
4.1	はじめに	119
4.2	画質検査項目について	119
4.3	色彩輝度計について	120
4.4	各種画質検査項目詳細について	122
4.5	おわりに	127
5	次世代内視鏡イメージングへの新展開 (五十嵐 誠)	128
5.1	はじめに	128
5.2	Narrow Band Imaging	128
5.3	Auto-Fluorescence Imaging	130
5.4	Infra-Red Imaging	134
5.5	今後の展開	136
6	顔・肌の検査技術 (若海博樹)	138
6.1	はじめに	138
6.2	肌の弾力性の検査	138
6.3	肌の表面形状の検査	140
6.4	肌の色の検査	141

6.5	肌の皮脂の検査	143
6.6	肌の水分の検査	145
6.7	肌カウンセリングシステムの例	146
6.8	おわりに	147
7	農産物の非破壊検査技術 (河野澄夫)	149
7.1	はじめに	149
7.2	農産物の非破壊検査における光学的方法	149
7.3	農産物等を対象とした非破壊検査装置	151
7.4	おわりに	161
8	建築・土木分野の検査技術 (込山貴仁)	162
8.1	はじめに	162
8.2	可視光線を利用した外観検査技術	164
8.3	赤外線を用いた外観検査	171
8.4	おわりに	174
9	近接場光を利用した検査技術 (高橋 哲)	175
9.1	はじめに	175
9.2	近接場光を利用した半導体ウエハ基板のナノ欠陥検査	177
9.3	近接場光を利用したナノインプリント残膜検査	179
9.4	おわりに	181
10	電子デバイスにおける画像処理を使った外観検査技術 (足立秀之)	185
10.1	はじめに	185
10.2	電子デバイス	186
10.3	今後の課題	198
10.4	さいごに	199
11	ウェーハのエッジおよび裏面の検査技術 (武田一男)	200
11.1	背景	200
11.2	ウェーハエッジ検査技術	200

11.3	裏面検査技術	-----	203
1 2	光学部品の高精度・高速計測 (清原元輔)	-----	205
12.1	はじめに	-----	205
12.2	レーザー干渉計	-----	205
12.3	まとめ	-----	220
1 3	文書鑑識における外観検査 (赤尾佳則)	-----	221
13.1	はじめに	-----	221
13.2	文書鑑識と偏角分光反射特性	-----	221
13.3	分光画像計測を利用した外観検査	-----	223
13.4	偏角画像計測を利用した外観検査	-----	226
13.5	複眼光学系を利用した外観検査	-----	228
13.6	おわりに	-----	230
第IV章	おわりに (井関敏之)	-----	233

(敬称略)

第 I 章 序 言

1	はじめに	1
2	調査概要	2
3	第 II 章 基礎分野の概要	5
4	第 III 章 応用分野の概要	7

第 I 章 序 言

1 はじめに

一般に検査技術は直接製品を作り出さないので軽視されがちであるが、検査無くして製品の品質を保証することはできないため、高品質の製品を生産するには必須の技術である。一方で検査は、製品の不良、誤作動、欠陥などを事前に予知し、それらが市場に出てしまうことによる損失を防ぐ。その場合、表に出ないブランド失墜などの損失を含めると、その額はなんと売上高の 20～28%にも達するという試算がある。

近年の機械工業においては、東アジア諸国をはじめとした新興工業国の技術の進展が著しく、天然資源の少ないわが国においては部品や製造物にいつそうの高性能化と高信頼性が求められている。そのため、それらの部品や製造物の外観（形状等）を非接触で高精度かつ高速に検査する先進的検査技術を確立することによって、機械工業部品および製造物に高付加価値と高信頼性を与え、その競争力を高めることが期待されている。

しかしながら現状は、さまざまな産業分野でさまざまな新製品が次々に生産されているが、それらの製品に対しての検査は各社それぞればらばらに行っており、それらの検査技術は閉ざされがちである。そのため汎用検査機器はあってもその数が少なく、さまざまな製品検査には必ずしも十分対応しているとは言えないのが実情で問題となっている。

当該調査研究では、最近進歩の著しい光技術などを主な手段として用い、さまざまな産業における部品や製造物または生産物の外観（形状等）を非接触で高精度かつ高速に検査する技術およびシステムについて注目されているトピックスを中心に現状の調査を行い、その結果を分析することによって、機械工業における検査技術のこれからのあるべき方向を探り、もって機械工業製品に高付加価値と高信頼性を与えてその競争力を高め、同時にエコロジー効果をも得るための一つの指針を示すことを目的とする。

調査研究は産学官の学識経験者による「先端的外観検査技術に関する調査研究委員会」を設置して行い、その報告書は、前半が先端的外観検査技術に関する基礎分野の調査研究とし、後半を先端的外観検査技術に関する応用分野の調査研究とした。

2 調査概要

2.1 委員会の開催状況

本調査は、平成 18 年 7 月 31 日付けで、社団法人日本機械工業連合会から社団法人日本オプトメカトロニクス協会が委託を受け実施したものである。

調査の実施にあたっては、協会内に「先端的外観検査技術に関する調査研究委員会」（委員長・天神林孝二（独）産業技術総合研究所）を設置し調査を実施した。

本委員会の開催、検討状況は、次のとおりである。

第 1 回幹事会 平成 18 年 9 月 19 日（火）

- ・ 調査内容の大枠について
- ・ メンバー構成（案）について
- ・ 第 1 回本委員会の進め方について

第 1 回委員会 平成 18 年 11 月 1 日（水）

- ・ 委員紹介
- ・ 本委員会の趣旨、調査概要説明
- ・ 各分科会の内容説明
- ・ 今後の調査の進め方及び報告書原稿の書き方等に関する説明

第 1 回基礎技術分野分科会／応用技術分野分科会

平成 18 年 11 月 1 日（水）

- ・ 調査内容の大枠について
- ・ 報告書の執筆担当者割り当てについて
- ・ 第 2 回分科会の進め方について

第 2 回幹事会 平成 19 年 1 月 25 日（木）

- ・ 各分科会の活動状況中間報告
- ・ 報告書内容の確認
- ・ 報告書の全体調整について
- ・ 今後のスケジュールについて

第 2 回基礎技術分野分科会／応用技術分野分科会

平成 19 年 1 月 29 日（月）

- ・ 調査項目の確認
- ・ 報告書内容の報告
- ・ 報告書内容の審議
- ・ 今後のスケジュールについて

第 2 回委員会

平成 19 年 3 月 30 日（金）

- ・ 調査報告書全体の調査結果に関する報告について
- ・ 各分科会の調査結果報告について

2.2 報告書の概要

本調査研究では、その調査方針として、

- ① 基礎技術分野と応用技術分野の 2 つのカテゴリーについて調査を行うこと
 - ② 基礎技術分野では、特定の産業分野に限定されない共通基盤技術、ならびに、近い将来、産業応用が期待される最先端技術について調査すること
 - ③ 応用技術分野では、さまざまな産業分野における外観検査技術を取り上げ、具体的応用事例の紹介と、将来に向けた課題について重点的に調査すること
- の 3 つを掲げた。

これに基づいて本調査研究では、2 つの分科会が活動を行い、基礎技術分野分科会が第 II 章基礎分野、応用技術分野分科会が第 III 章応用分野の執筆をそれぞれ担当した。各項目の執筆者は目次に記した通りである。

第 II 章基礎分野では、外観検査における共通基盤的な技術として、マハラノビス距離を使った外観検査技術、格子投影による形状検査技術、新しい機能デバイス技術、人間の視覚メカニズムを応用したセンシング技術、遺伝的アルゴリズムによる画像処理の最適化手法を、また今後の産業応用が大いに期待される最先端技術として、テラヘルツ波を利用したセンシング技術、共鳴ラマン分光による新たな非破壊検査技術をそれぞれ取り上げ、調査報告を行った。

第 III 章応用分野では、メカトロニクス分野、医療・美容等のヘルスケア分野、農作物等の食料品分野、建築・建設分野、防犯・セキュリティ分野の中から、計 12 の応用分野について調査を行い、具体的な事例を取り上げながら、各応用分野における外観検査技術の現状および将来動向について展望した。なお、半導体製造のマスク検査やウエハの異物検査に代表されるように、すでに他の多くの出版物で扱われている技術分野については、あえて調査対象から除くことにした。

本報告書に挿入されている図面の中で、原図面がカラーのものを白黒印刷としたため、多少見づらくなっていることをご容赦願いたい。本報告書の電子版が(社)日本機械工業連合会 <http://www.jmf.or.jp>、及び(社)日本オプトメカトロニクス協会 <http://www.joem.or.jp> のホームページに掲載されており、自由にダウンロード可能となっている。電子版では、原図面のままカラーで掲載されているので、あわせてご利用いただくと幸いである。

3 第Ⅱ章 基礎分野の概要

第Ⅱ章は、外観検査技術に関わる基礎分野についての調査報告で、測定方法、基本デバイス、データ処理アルゴリズムなど、全部で7つの節（2節～8節）からなる。

2節は、外観検査において検査項目間の相対関係を利用して、良品か不良品かの本質的な判定を下すことができるMTシステムについての記述である。良品だけから構成される基準サンプル群に対して行われた検査結果を多変量解析して算出された“マハラノビスの距離”は、1の近傍に分布するようになる。一方、不良品から求められた“マハラノビスの距離”は、良品のそれと異なる分布パターンを示し、それを手がかりに検査の判定を下すことができる。これまでは検査項目ごとに独立に判定していたのに対して、MTシステムは、それらの相対的な関係を利用して製品の総合精度を高めることが出来る。

3節は、外観検査用光源として近未来的に有望なテラヘルツ波の光源開発とセンシングへの応用例を報告している。テラヘルツ波による透視イメージは、X線でのイメージングに比べて、物質構造を壊すような被ばくの心配がまったくなく、コントラストの高い像が得られる。また、薬物・爆発物などの試薬類は、テラヘルツ帯に固有の吸収スペクトル（指紋スペクトル）を有しており、テラヘルツ波分光計測により郵便物中の禁止薬物が非破壊で検出できる。さらに、テラヘルツ波は水に対する吸収係数が大きいので、プラスチックフィルム製小袋のヒートシール部に生じた漏れ（マイクロリーク）の高速な欠陥検出システムに利用されている。

4節は、光技術を利用した形状検査についての調査報告で、主に格子投影法について報告している。格子投影法は、平行で等間隔の直線群上の格子を被検物体に照射し、格子の変形量から被検物体の形状を求める方法である。さらに、被検物体の理想的な表面形状によって生じる格子の変形量を考慮して、物体に照射された後の変形格子像が直線状となるように設計された形状補正型格子投影が報告されており、被検物体が既知な形状を有している基準試料と同等な形状であるかどうかを高速、簡便に検査する技術への応用が提案されている。

5節は、光イメージセンサ・変調器についての報告で、オンチップに数千倍の電子増倍機能を実現し微弱なイメージを撮像することができるEM-CCD（Electron-Multiplier-CCD）や、対象物の移動方向とCCDの電荷転送方向の速度を合わせることにより、高感度化を実現したTDI-CCD（Time-Delay-Integration-CCD）

が紹介されている。さらに、スポット光の 2 次元位置情報を高速・高精度に取得することができるプロファイルセンサやイメージセンサと並列演算部がオンチップで組み合わされた IVS (Intelligent Vision System)、光アドレス型液晶 SLM (Spatial Light Modulator) を利用した補償光学システムが記述されている。

6 節は、人間の目の 116.5 倍の微細欠陥検出精度と、目視の 14 倍以上のムラ検知性能が実現されているニューロ視覚センサについての報告で、既に鉄鋼・自動車・半導体・フィルムなどの業界における外観検査へ応用されている技術の紹介である。このセンサは、人間の目の機能に着目し、目の細胞構造を参考にしたセンサシステムが構築されており、固視微動のような眼筋の動きを電子回路化することにより、これまでのセンサに比べて高性能な視覚センサシステムを実現している。

7 節は、外観検査のための先端的画像処理アルゴリズムについての報告で、汎用的に用いられている画像処理エキスパートシステム、汎用画像処理ライブラリについて紹介した後、近年進歩の著しい進化計算法などの最適化法を利用した画像処理アルゴリズムについて記述している。最適化法を画像処理に適用する方法は膨大な計算処理時間を要し、これまでは実用化が困難であったが、計算機や画像処理ボードの処理能力の向上、進化計算法などの有効な方法論の発展があり、これからの外観検査のための画像処理技術の主流になると考えられている。

8 節は、共鳴ラマン分光を利用した非破壊検査法についての記述で、カーボンナノチューブの欠陥位置がマイクロメートルの精度で検出されている。ラマン光は、レーザー光を照射した試料から波長変換された非弾性散乱光であり、入射光の光子エネルギーが試料分子の電子遷移エネルギーに等しい場合には、散乱強度が非常に（約 1000 倍）に強くなる共鳴ラマン散乱となる。ラマンスペクトルは、試料の分子振動などと密接に関係しており、試料の分子構造などの情報を得ることができ、試料評価の標準検査技術として発展していくと考えられる。

4 第Ⅲ章 応用分野の概要

第Ⅲ章は、外観検査技術に関わる応用分野についての調査報告で、12の範囲に関して調査を行った。

以下、報告順に検査対象に関して記載する。

2節は、シート検査として、走行するシート状物に含まれる欠陥を検出するものであり、検査対象は液晶関連向けの光学フィルムである。

3節は、事務機器の外観検査として、複写機、プリンター等の事務機器内で使用され、画像品質に大きな影響を及ぼすローラ状部品の外観検査方法に関して、事例を中心に紹介した。

4節は、ディスプレイ分野における画質検査として、液晶、プラズマディスプレイ、有機EL、FED等の新しい表示デバイスにおける画質検査項目を挙げ、その各項目の評価方法・特徴・注意点を説明し、将来の方向性を示す報告である。

5節は、次世代内視鏡イメージングへの新展開として、従来の内視鏡イメージングが抱える課題を改善しうる次世代の内視鏡イメージング技術として特殊光観察技術の報告を行った。

6節は、顔・肌の検査技術として、肌の状態（肌の柔軟性や弾力性、表面形状、色、皮質および水分）を測定する技術や機器について概観し、これらを統合した美容カウンセリングセールスのツールへの応用例の報告を行った。

7節は、農産物の非破壊検査技術として、非破壊検査法として、光学的方法による農産物・食品の外観等測定の、多くの事例を挙げ報告を行った。

8節は、建築・土木分野の検査技術として、可視光線、デジタル写真、レーザ光線、ノンプリズムトータルステーション、赤外線を用いた外観検査の例を挙げ報告を行った。

9節は、近接場光を利用した検査技術として、半導体ウエハー基板のナノ欠陥検査、ナノインプリント残膜検査に関する研究内容の報告を行った。

10節は、電子デバイスにおける画像処理を使った外観検査技術として、半導体のパッケージ、一般電子部品とシコネクタ)の現在の外観検査技術について調査を行い、報告を行った。

11節は、ウェーハのエッジおよび裏面の検査技術として、レーザビームをプローブとして散乱光あるいは反射光で検出する方法と、発光ダイオードまたは白色ランプ

光源を用いて画像計測を行う方法の報告を行った。

1 2 節は、光学部品の高精度・高速計測として、位相シフト法を、リファレンス面又はテスト面を駆動させることなく、光学部品のレンズ・ミラー・プリズムの表面精度や内部透過波面の検査を高精度、高速に行う瞬間位相シフト干渉法と呼ぶ方法の報告を行った。

1 3 節は、文書鑑識における外観検査として、犯罪に関係する文書を解析し、その真偽、作成方法、改ざんの有無等を識別することを目的とする文書鑑識における外観検査について、応用例を多数示して報告を行った。

第II章 基礎分野

1	基礎分野の概要	9
2	MTシステムを使った外観検査	15
3	テラヘルツ波を利用したセンシング技術	22
4	形状検査	33
5	光イメージセンサ・変調器	41
6	ニューロ視覚センサによる先端的超汎用外観検査システム	54
7	外観検査のための先端的画像処理アルゴリズム	73
8	CNT（カーボンナノチューブ）のラマン分光	83

第Ⅱ章 基礎分野

1 基礎分野の概要

1.1 概要

本報告における基礎分野では、外観検査に関わる基本技術に注目し、測定方法、基本デバイス、データ処理アルゴリズムなど、全部で 7 つの節（2 節～8 節）に分けて調査報告を行った。以下、それぞれの節ごとに概要を記述する。

1.2 MT システムを使った外観検査

外観検査を自動化する際に、近年使用されるようになった MT システムについて記述している。外観検査を行う場合、検査で得られた多項目のデータから、良品か不良品かの一元的な判断をしなければならない。MT システムは、多次元データから検査の合否を決定することができる処理法を提供するもので、外観検査の自動判別を可能にする。例えば、軸と軸受けという二つの部品が組み合わさった製品検査の場合、軸と軸受けは別々の工程で加工されるので、それぞれの工程で管理されている良品寸法の範囲は単独に決まっている。軸と軸受けが、どちらも良品同士ならば、それらを組み合わせて、製品にすれば問題ないが、良品同士でなくても問題のない組み合わせもありえる。つまり小さめの軸には小さめの軸受けを、反対に大き目の軸には大きめの軸受けを組み合わせたという、“選択勘合”という考え方である。MT システムは、このように検査項目間の相対関係を利用して、組み合わせた製品の総合精度を高めることが出来る本質的な判定を下す方法である。始めに、良品だけから構成される基準サンプル群に対して、検査項目ごとのデータを取得する。各々の検査データは、平均値が 0 で標準偏差が 1 の規格化データに変換された後、多変量解析により“マハラノビスの距離”が算出される。基準サンプル群から算出されたマハラノビスの距離は、1 を中心とした近傍に分布するのに対して、不良品から求められたマハラノビスの距離は異なる分布パターンを示す。報告書では、MT システムを利用した、蛍光ランプとはんだ付け部の外観検査についての具体例が示されている。

1.3 テラヘルツ波を利用したセンシング技術

次世代の計測・センシング用光源として有望なテラヘルツ波（THz 波）について、その物理的な特徴から光源と検出器の開発について概観し、外観検査をはじめとしたセンシングへの応用例を報告している。テラヘルツ波は、可視光と電波の間の周波数帯に存在する電磁波であり、光波のようにレンズやミラーで屈折や反射する一方、電波のように物質を透過する性質を持っている。さらに、波長が数百 μm なので、物質を透過するときの散乱や回折の影響を受け難く、イメージングに対して必要十分な空間分解能が得ることができる。唐辛子内部の種子やエビの内部構造が、はっきり現れているテラヘルツ透視イメージの結果が与えられており（空間分解能は約 0.4 mm）、X線でのイメージングに比べて、物質構造を壊すような被ばくの心配がまったくなく、コントラストの高い像が得られている。また、薬物・爆発物などの試薬類は、テラヘルツ帯に固有の吸収スペクトル（指紋スペクトル）を有しており、テラヘルツ波分光計測を利用した郵便物中の禁止薬物を非破壊で検出した、世界で初めての例が示されている。紙やプラスチックに比べて、水に対する吸収係数が大きいというテラヘルツ波の性質を利用して、プラスチックフィルム製小袋のヒートシール部に生じた漏れ（マイクロリーク）の高速な欠陥検出システムが実現されている。さらに、テラヘルツ波を利用した集積回路の電氣的な欠陥箇所検出や癌診断の可能性まで触れられており、今後の展開が楽しみな領域である。

1.4 形状検査

光技術を利用した形状検査についての調査報告で、主に格子投影法について報告している。線幅が狭く、かつ輝度の高い平行で等間隔の直線群上の格子は、フィゾー干渉計や横シヤ干渉計を利用した多光束干渉によって生成され、被検物体に照射される。照射された直線群上の格子は、物体の表面形状に従い変形する。格子投影法は、この格子の変形量から被検物体の形状を求める方法である。横シヤ多光束干渉縞格子投影像とフィゾー多光束干渉縞格子投影像の測定結果が与えられており、被検物体の形状によって干渉縞格子が変形している様子が示されている。4節では、さらに形状補正型格子投影による形状検査技術が報告されており、外観検査へ応用できることが示唆されている。形状補正型格子は、物体に照射された後の変形格子像が直線状となるよ

うに、被検物体の理想的な表面形状によって生じる格子の変形量を考慮して設計されている。補正型格子の照射パターンは、マスクや液晶パネルで作成され、被検試料に照射される。もし、被検試料が理想的な形状を有しているときは、変形格子像は直線上となるが、被検試料が不良品の場合、不良箇所の部分の格子像は、直線状でなくなる。この部分を検出することによって、物体の外観形状検査における欠陥検出を行うことができる。この方法は、光干渉計測技術で長年実用化されてきた **null test** を格子投影法へ適用したものと考えられ、被検物体が既知な形状を有している基準試料と同等な形状であるかどうかを高速、簡便に検査する技術へ応用することができる。

1.5 光イメージセンサ・変調器

光イメージセンサ・変調器についての報告で、検査対象をセンシングするデバイスや画像演算機能を実現するための空間光変調器について、最近の進展を含めて調査している。EM-CCD (Electron-Multiplier-CCD) は、通常の CCD 転送ラインの最終段に、数百段の電子増倍転送部を持たせることで、オンチップに数千倍の電子増倍機能を実現したものである。センサを -50°C に冷却し、読み出しノイズを1電子レベルに押さえることにより、微弱なイメージを撮像することができる。TDI-CCD (Time-Delay-Integration-CCD) は、一定の速度で動く対象物に対して、対象物の移動方向と CCD の電荷転送方向の速度を合わせることにより、高感度化を実現したカメラである。TDI-CCD は、半導体検査、電子部品製造ラインやフラットパネル検査など、オンライン検査システムへの応用が考えられている。プロファイルセンサは、スポット光の2次元位置情報を高速・高精度に取得することができるカメラである。プロファイルセンサを構成する各画素は、X方向/Y方向のそれぞれに対応した受光エリアを持ち、それぞれの受光エリアは、行方向または列方向に電氣的に接続されている。そのため、プロファイルセンサは、X方向およびY方向の射影データを直接出力することになる。プロファイルセンサを2つ用いたステレオ計測モジュールにより、対象物の位置が3kHzの速度で計測された実験結果が与えられている。IVS (Intelligent Vision System) は、高速読出し可能なCMOSイメージセンサと同じCMOSプロセス技術で製造可能な並列演算部を組み合わせることで、汎用画像処理演算をミリ秒オーダーで実行できるシステムである。IVSを用いたロボット制御やステレオ視、微弱光計測などへの応用研究が進められている。光アドレス型液晶 SLM (Spatial Light

Modulator) は、書込み光の強度に応じて読出し光の位相を 2 次元的に高速変調する機能を持っている。SLM による波面制御を用いた補償光学システムは、ハワイのマウナケア山頂のすばる望遠鏡で、大気のゆらぎを計測し逆向きの位相を与えることで、大気ゆらぎを除いたシャープな星像を得ることに成功している。電気アドレス型空間光変調器は、コンピュータからの信号により読出し光の位相変調を行うことができ、フェムト秒レーザ加工技術、光ピンセット、顕微鏡、検眼鏡、光メモリーなど、幅広い応用が期待されている。

1.6 ニューロ視覚センサによる先端的超汎用外観検査システム

人間の目の機能をコンセプトに開発されたニューロ視覚センサについての報告で、人間の目の 116.5 倍の微細欠陥検出精度と、目視の 14 倍以上のムラ検知性能が実現された外観検査システムについて紹介している。人眼の網膜上にある光受容細胞は、5% のバラツキを持つ光センサと考えられている。神経細胞（ニューロン）のうちの水平細胞は、60～80 個程度の光受容細胞のデータを集めて明度データを取得しており、光受容細胞一個一個の感度のバラツキが結果的に測定精度の向上につながっている。また人間の目は、固視微動という、人間の意志とは関係のない勝手な動きをしており、いくつかの光受容細胞をまたがって入射してくるイメージの空間的な分解能を等価的に向上させることができる。ニューロ視覚センサは、このような人間の目の機能に着目し、その細胞構築の電子化や、眼筋の動きを電子回路化するといった、従来のアプローチとは全く異なる原理によって高精度化を達成している。既に鉄鋼・自動車・半導体・フィルムなどの業界で、ニューロ視覚センサを利用した外観検査技術が用いられており、今後ますます他の業界での利用が期待される。

1.7 外観検査のための先端的画像処理アルゴリズム

外観検査のための先端的画像処理アルゴリズムについての報告で、汎用的に用いられている画像処理エキスパートシステム、汎用画像処理ライブラリについて述べた後、進化計算法などの最適化法を利用した画像処理アルゴリズムについて紹介している。画像処理エキスパートシステムは、人間の専門家が持っている知識を、『もし～なら、～である』という if～then 形式のルール（プロダクションルール）で記述・蓄積して

データベース化しておき、推論・検索処理によってそこから有益な知識を得ようとするものである。ただし、対象領域が限定されている上、新たな検査対象に対しては、画像処理プロセスを一から作り直す必要があり、あまり有効であるとは言えない。汎用画像処理ライブラリは、これまでに構築された画像処理アルゴリズムをライブラリ化することにより、情報資源として使用者が共用しようというものである。これまでに、コンピュータビジョン用画像処理ライブラリ **OpenCV** などが知られており、それらを組み合わせるだけで様々な画像処理を構築することができるが、必要とされる処理を実現するために、どの関数・サブルーチン・フィルタをどのように組み合わせれば良いかが煩雑で、画像処理アルゴリズムの構築に膨大な時間がかかってしまう。一方、画像処理に最適化法を利用する手法が近年報告されており、効率的なアルゴリズム構築が検討されている。数値最適化は、画像処理の一部に最適化法を取り入れる手法で、2次元パターンの位置決め問題の場合、そのパターンの特徴的な部分を手掛かりにしてパターンを抽出するという従来の方法に対して、パターンのパラメータ（中心の x 、 y 座標、拡大倍率、回転角度）自体を決定する（＝最適化する）手法である。組み合わせ最適化は、画像処理プロセス構築の自動化・省力化に最適化法を使う方法で、例えば原画像に何種類かの画像処理フィルタを順次適用して必要な画像に変換する場合には、原画像に何番のフィルタをどのような順序で適用すれば最も目標画像に近い画像を得ることができるかを見出す最適化問題を解くことになる。このように最適化法を画像処理に適用する方法は、近年の計算機や処理ボードの処理能力の向上、進化計算法（**Evolutionary Computation**）などの有効な方法論の発展が後押ししており、外観検査のための画像処理のほとんどを、人手による人海戦術に頼らずに自動的に構築することができる時代がすぐそこまでやってくる。

1.8 CNT（カーボンナノチューブ）のラマン分光

非破壊検査の方法として今後有望と考えられる共鳴ラマン分光を紹介し、共鳴ラマン分光を利用したカーボンナノチューブの試料評価について報告している。ラマン分光は、試料にレーザー光を照射して入射光と同じ波長の弾性散乱光（レイリー散乱光）を除いて、試料によって波長変換された非弾性散乱光（ラマン散乱光）を取り出し、スペクトル測定する方法である。ラマンスペクトルは、試料の分子振動などと密接に関係しており、それを利用して試料の分子構造などの情報を得ることができる。ラマ

ン分光において、入射光の光子エネルギーが試料分子の電子遷移エネルギー（試料の吸収、もしくは発光のエネルギー）に等しい場合には、ラマン散乱強度が非常（約1000倍）に強くなり、これを共鳴ラマン散乱という。8節では、共鳴ラマン分光を利用したカーボンナノチューブの欠陥評価が報告されており、マイクロメートルの精度で欠陥位置が検出されている。近年共鳴ラマン分光は、空間分解能がナノメートル領域まで高まっており、試料評価の標準検査技術として発展していくと考えられる。

2 MTシステムを使った外観検査

2.1 はじめに

人間の目視による外観検査は、計測器を使った自動検査が困難な対象について行われてきた。主な検査項目は、製品形状の異常や色むらなどの検出である。つまり外観検査とは本来、単純な計測値だけでは判断できない多次元の性質を扱っているのである。したがって自動検査の実現には、多次元の多様な計測特性に対応している高機能の計測器と、多次元データを合理的に処理する技術の両方が必要なのである。

外観検査の自動化を検討する際、このように自動計測の問題と自動判別の問題を分けて考えることは重要である。幸いなことに近年は、さまざまな高機能の計測器が登場してきて、計測の自動化と高精度化に関しては選択肢が豊富になってきた。そうすると残る課題は、合否の自動判別方法に絞られることになると思う。そこで本稿では、合否判定の自動化に関して、MTシステム¹⁾と呼ばれる考え方を適用した例を紹介する。そして今後の課題についても述べる。

2.2 MTシステムの基本思想

最初に、外観検査データの自動処理と判別について、MTシステムの基本的な考え方を紹介しておく。

多次元的な性質を持つ製品に関してその検査合否を判定するには、多次元データから一元的な判断を下さなければならない。そのためには、多変量データの一元表示ができる処理法が、ぜひ必要である。その一元化された評価特性は、良品群に共通する性質を表現しており、同時に不良品の評価特性が良品のそれと確実に異なっている必要がある。そうでなければ検査において自動的な合否判定ができない。

以上の二つの条件を満たすために、MTシステムでは以下の考え方を採用する。

- 1) 多変量のデータ処理法・・・マハラノビスの距離
- 2) 評価特性・・・良品データを基準尺度として計算した距離値

つまり良品からのみ計算されたマハラノビスの距離を尺度として、検査対象品の多次元データを一元的な距離で表現し、その良否を自動判定する考え方である。

良品とは安定した工程から作り出される製品なので、良品から得られる測定データのばらつきは比較的小さいのが普通である。したがって各種項目の測定値の平均値とばらつき

を使えば、良品の総合的な性質を表現できるはずである。この考え方を基にして、良品のデータのみを使いマハラノビスの距離を求めると、良品は距離 1 を中心とした近傍に分布する。一方、不良品は 1 から離れた距離を示すのである。なぜなら不良品は、たとえば工程のどこかで良品とは異なる扱いを受けているので、各種データのうちどこかのデータが必ず良品とは異なるパターンを示すからである。

以上の論理を、簡単な二次元の場合で分かりやすく説明しよう。図 2.1 は、軸と軸受けという二つの部品が組み合わさった製品の管理データの関係である。軸と軸受けは別々の工程で加工されるので、それぞれの工程で管理されている良品寸法の範囲は単独に決まっている。良品同士を組み合わせ製品にすれば勿論問題ないが、良品同士でなくても問題のない組み合わせもありえる。図 2.2 に示すように、A と B の寸法を組み合わせると、良品部品の範囲が広がるのである。

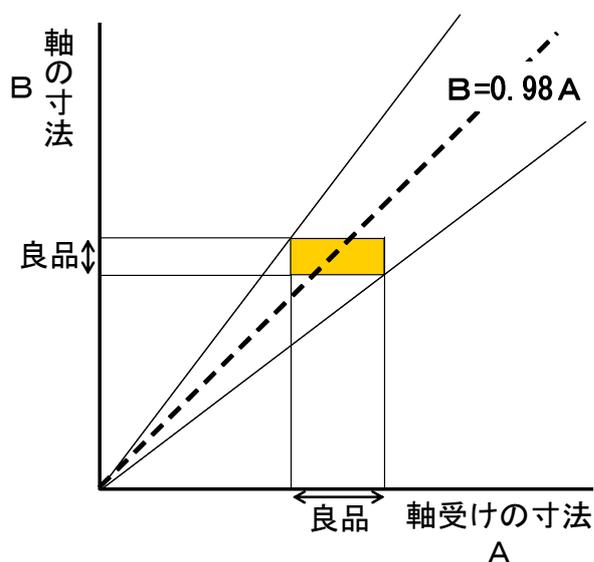


図 2.1 軸と軸受けの単独寸法の場合

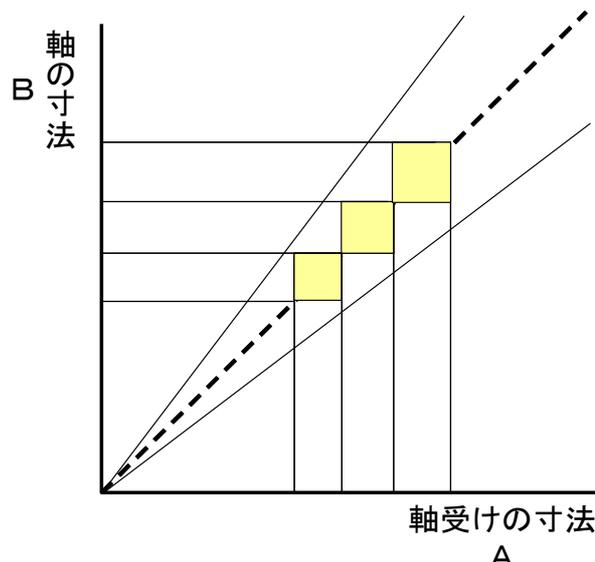


図 2.2 軸と軸受けの合成寸法の場合

例えば、軸受けの寸法 A と軸の寸法 B が、

$$0.97 \times A \leq B \leq 0.99 \times A$$

という関係を満たしていれば、図 2.1 の良品範囲外の軸と軸受けを組み合わせても問題は発生しないはずである。つまり小さめの軸には小さめの軸受けを、反対に大き目の軸には大き目の軸受けを組み合わせるのである。このように項目間の相対関係を利用すれば、単独に検査判定するよりもっと本質的な判定が下せるのである。広い範囲の寸法ばらつきがあっても、組み合わせた製品の総合精度を高めることが出来る。精密なボールベアリングなどで使われている選択勘合という考え方である。

以上の説明は二種類のデータの場合だが、二次元に限定されず、もっと多元的なデータであっても事情は全く同じである。実際の部品や製品は、もっと多種類のデータの組み合わせになっているのが普通である。例えば次章で紹介する家庭用の丸型の蛍光灯の場合でも、ガラス管や端子などいくつかの部品の組み合わせで構成されているし、その部品を作るための工程には、さらに多くのパラメータや検査項目がある。それら数多くの項目は、最終的な製品の品質に複雑に関係しているはずである。

人間の目視による外観検査をせざるを得ない製品とは、本来的にこのような多次元的な相互作用のある性質を持っている。したがって、個別の検査項目だけでなく項目間の相対関係をこそ考慮する必要がある。

そこで MT システムでは、この相対関係をマハラノビスの距離を使って表現している。つまりマハラノビスの距離が 1 に近いということは、各種項目間の相対関係が良品に近いパターンということの意味しており、反対に距離が 1 よりはるかに大きいということは、項目間の相対関係が良品とは異なるパターンであるということの意味する。つまり、項目間の相対パターンが良品と異なる製品は、不良品の可能性が高いということになり、自動判別ができるのである。

このような考え方にに基づき、MT システムを活用した外観検査の自動化が検討され報告されている。その中から二つの例を紹介する。

2.3 実例 (1) 蛍光ランプの外観検査²⁾

従来の蛍光ランプの製品検査においては、目視によりチェックしていた。しかし検査項目が多い上に、検査項目の有効性自体も不明であるという問題が指摘されていた。とは言え、目視作業を単に自動化装置に置き換えただけで、この問題を解決できるというものではない。

そこで目視に頼らない形態検査装置の開発を進めると同時に、その装置から出力される多くの種類の計測パラメータを一元的に表現する、つまり多次元データの一元化処理のために MT 法の応用を検討した例である。最終的にインラインの判定時に、どのような基準を採用すべきかの検討である。

MT システムの手順に従って、良品だけから構成される基準サンプル群を定義する（単位空間と呼ぶ）。マハラノビスの距離自体については従来も使われていたが、良品だけのデータを使い距離を算出するのが、MT システムの特徴である。今回の例では、製品受け入れ先の専門スタッフが合格品と判断した品物 120 個を使用した。次に、それらのサンプル

の計測パラメータを 19 項目選び出す。その内容は、外形、内径、へこみ量、対称性、真円度などである。そして 120 個の良品の計測データを表 2.1 のように用意する。

表 2.1 測定データ

サンプル No.	内径	へこみ量	・・・	計測項目	・・・	対称性
1	X1.1	X2.1	:	Xi.1	:	X19.1
2	X1.2	X2.2	:	Xi.2	:	X19.2
:	:	:	:	:	:	:
j	X1.j	X2.j	:	Xi.j	:	X19.j
:	:	:	:	:	:	:
120	X1.120	X2.120	:	Xi.120	:	X19.120

次にマハラノビスの距離を求めるため、次式による基準化を行う。得られたデータ $X_{i,j}$ から計測項目ごとの平均値 m_i と計測項目ごとの標準偏差 σ_i を計算して、基準化値 $x_{i,j}$ を求める。

$$x_{i,j} = (X_{i,j} - m_i) / \sigma_i \quad (i = 1, 2, \dots, 19 \quad j = 1, 2, \dots, 120)$$

このように計算される基準化されたデータの平均値は 0、標準偏差は 1 になる。この基準データを使ってマハラノビスの距離を求めるための手順は省略する。

さて、このようにして求められたマハラノビスの距離は、計算に使用したサンプルがすべて合格品なので、合格品に類似した製品ならば 1 に近い値になるはずである。なぜなら、19 項目のデータのほとんどが合格品のデータに近いからである。しかし合格品に類似しない不合格品は、計測項目のいくつかが合格品の基準データとは異なる値を持つために、距離が 1 よりも大きな値に計算されることになる。したがって 19 項目の計測データのマハラノビス距離を使えば、一元的な良否判定が可能になる。しかも、多くの項目についての相対関係を考慮してあるので、いろいろな種類の不良を対象にできるのである。

引用した文献では、計測特性値を 12 項目に絞ることにより、距離 $D^2 = 4$ を閾値として合格品と不合格品の判別ができると報告されている。

2.4 実例 (2) はんだの自動外観検査³⁾

電子デバイスの高機能化や小型化に伴い、ハンダ付け部の外観検査技術も自動化が進み、より高精度な検査と省力化を狙った積極的な検討が行われている。本事例は、従来行われ

ていた外観検査装置では、必ずしも適正な良品判定ができていなかった点に関して、改善を検討したものである。特に誤判定の多かった細密ピッチ部分で、レーザを用いたハンダ外観検査に、マハラノビスの距離を適用した事例である。

まず基準となる正常サンプルを選別する。正常なハンダ接続は、検査要員が識別した結果を用いた。選別されたサンプルの引張り破壊強度を測定したところ、正常品と異常品は明らかに区別できることを確認してある。次に、図 2.3 に示すレーザ方式のハンダ外観検査装置により、はんだ形状のデータを入手する。レーザの掃引は、パターン先端からリード先端上までを $20\mu\text{m}$ ピッチで $1000\mu\text{m}$ を行って、50 個のマハラノビス解析用の項目を作成した。

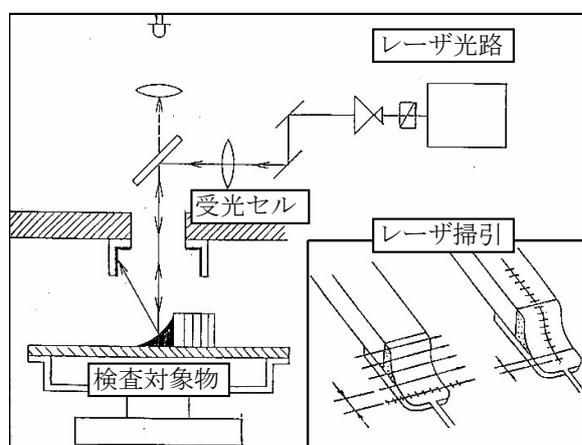


図 2.3 レーザ方式はんだ外観検査基本原理

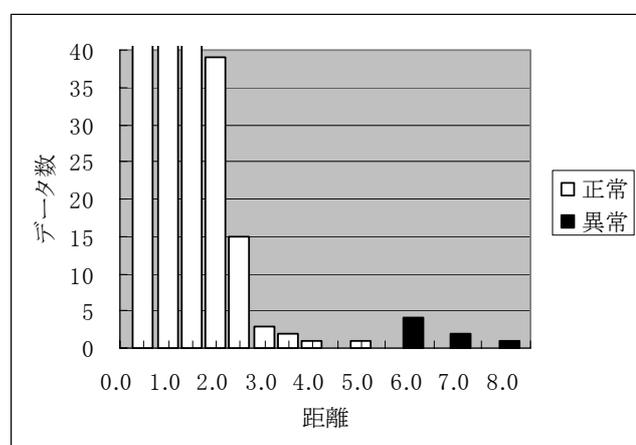


図 2.4 異常データの判別

図 2.4 は、50 個の反射データから計算したマハラノビス距離を用いて、正常品と異常品の判別性を確認したデータである。検査装置で自動的に測定できるデータのみで、正常品と異常品の識別が可能であることを示している。

引用した文献では、この結果に基づいて検査の自動化ができれば、検査パフォーマンスの飛躍的な向上が期待できると結論づけている。

2.5 問題点と今後の課題

外観検査の自動化に MT システムを採用するに際し、問題となる点や今後の検討課題について述べる。

(I) 判定の基になる基準データを作成するサンプル群の決定法

判定の基準とするサンプル群のことで、MT システムでは単位空間と呼ぶ。この単位空間を決定することが、結果の成否に影響する。単位空間は検査対象ごとに研究する必要がある。

(II) 検査対象の性質を表す項目の抽出

判定を行う項目のことである。この項目に適切な内容が入っていれば、検査の精度は向上する。MT システムでは多くの項目を取り扱えるので、出来るだけ多くの項目を収集した方が、判定精度の向上が期待できる。判定に使用する項目は、検査対象ごとに研究する必要がある。

(III) 多重共線性

マハラノビスの距離を計算する際に問題になるのは、多重共線性である。最近はこの問題を解決した計算法も提案されており、対象の性質によって使い分けていく方向になるだろう。

(IV) 実施例の少なさ

MT システムを活用した例は多くなってきたが、外観検査に応用した例はまだ多くない。そして実用化まで確認した例になると、非常に少ないのが現状である。方法自体がまだ新しいこともあるので、今後に期待したい。

2.6 将来の方向

MT システムは、多数の項目からなる多次元データを総合的に解析し、そのデータ群に内在するパターンの違いを距離という一元化された特性値で表現する方法である。外観検査の自動化には適している方法だが、さらにその性質を利用すればいろいろな応用も考えられる。MT システムの紹介の最後に、将来の方向性を示す一例として、紙幣の真贋判別に関する研究を引用する⁴⁾。

紙幣は精巧な印刷技術を駆使しており、模倣は相当に困難であるが、それでも偽札は出回っている。紙幣の真贋を判定するのは、紙幣から得られる多種多様の情報を用いた専門家による総合判定が必要である。したがって専門家の判断を機械で自動化するという MT システムの狙いにとっては、大変に興味がある対象である。

研究は米ドルの人物画の部分を用いて行われた。対象画像の濃淡ピクセルデータをフーリエ変換し、その周波数スペクトルを用いてマハラノビスの距離を設定した。新品から使い古しのものまで 30 枚の真札の測定値を基準データとして使い、真札の一部を改造したものや複写機による複写札などの偽札の真贋を判定した。

その結果、5 から 6 ぐらいの距離に閾値を設ければ、真贋の判定ができることを確認した。今回は白黒の濃淡ピクセル値のみを使ったので、カラーへの拡張や人物画以外の部分への拡張など、将来の可能性もあるだろう。

このように MT システムというデータ処理法は、外観検査以外にも適用可能であり、今後ともさまざまな可能性が検討されていくと思われる。

参考文献

- 1) 田口玄一；MT システムにおける技術開発（品質工学応用講座）、日本規格協会
- 2) 酒井一昭、中山勝之、今西音和、越山卓；MTS による環状蛍光ランプの外観評価、品質工学誌 Vol.8 No.5（2000）
- 3) 間ヶ部明、高田圭、矢野宏；ハンダ自動外観検査へのマハラノビスの距離の適用、品質工学誌 Vol.6 No.6（1998）
- 4) 坂野進；MTS 法を用いた紙幣の識別、品質工学誌 Vol.8 No.3（2000）

3 テラヘルツ波を利用したセンシング技術

3.1 はじめに

テラヘルツ波 (THz 波) は、可視光と電波の間の周波数帯に存在する電磁波であり、光波と電波の両方の性質を兼ね備えている特殊な光／電磁波である。従って、テラヘルツ波は、光波のようにレンズやミラーで屈折や反射する一方、電波のように物質を透過する性質を持っている。さらに、波長が数百 μm なので、物質を透過するときの散乱や回折の影響を受け難く、イメージングに対して必要十分な空間分解能が得ることができる。また、薬物・爆発物などの試薬類は、テラヘルツ帯に固有の吸収スペクトル (指紋スペクトル) を有しており、テラヘルツ波分光計測を利用した物質の非破壊検出など、様々な応用が検討されている¹⁾。ここでは、外観検査技術に関連したテラヘルツ波を利用したセンシング技術に注目し、テラヘルツ光源とセンシングへの応用例について報告する。

3.2 テラヘルツ波の特長

テラヘルツ波は、周波数が 0.3~10THz 程度 (波長 1~0.03 mm) の電磁波として定義される。多くの物質は、およそ 3THz 以下の電磁波に対して透明となる物質透過性を有している一方、およそ 0.5THz 以上で物質との相互作用が電磁波の周波数により異なるという分光特性を示す。テラヘルツ波は、ちょうどこの中間の領域に存在し、程良く物質に吸収される光／電磁波として考えられ、非破壊・非接触での検査技術の光源として有望視されている。図 3.1 は、乾燥した唐辛子と桜エビの実体写真(上)と周波数 1.0THz (波長 0.3 mm) のテラヘルツ透視イメージ(下)である²⁾。唐辛子内部の種子やエビの内部構造が、はっきり現れており (空間分解能は約 0.4 mm)、X 線でのイメージングに比べて、コントラストの高い像が得られていることがわかる。このように、テラヘルツ波は、X 線と同様に物質を透過するが、若干の吸収もあり、それを測定することによって物質の内部情報を得ることが出来、しかも物質構造を壊すような被ばくの心配がまったくないことが、特長となっている。

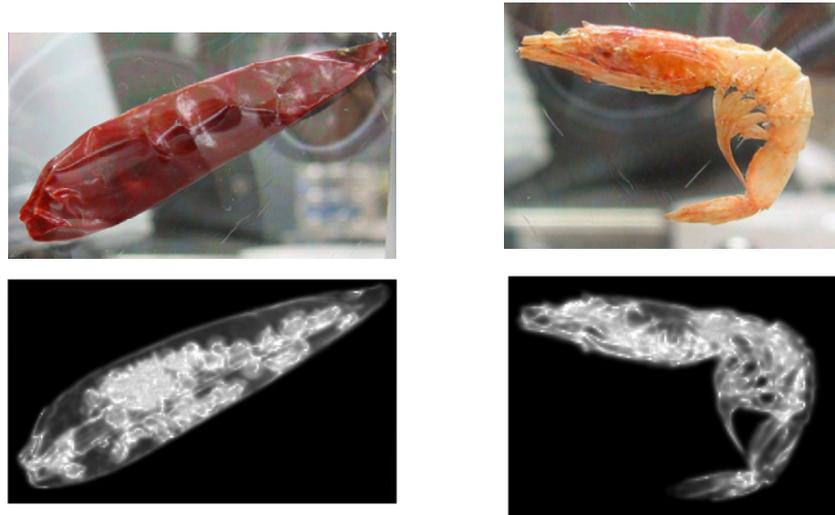


図 3.1 乾燥した唐辛子と桜エビのテラヘルツ透視像

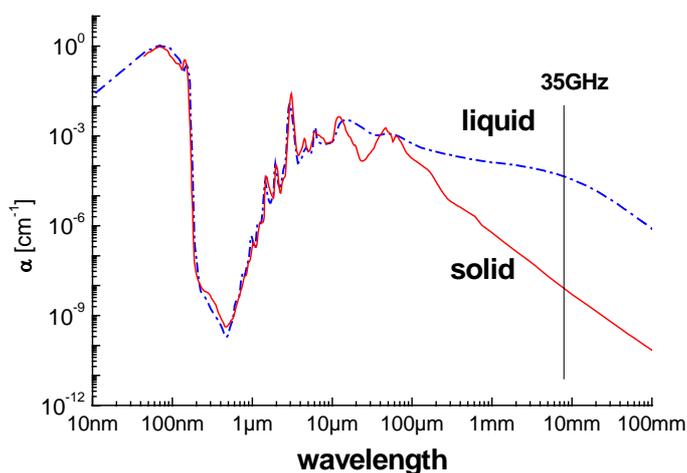


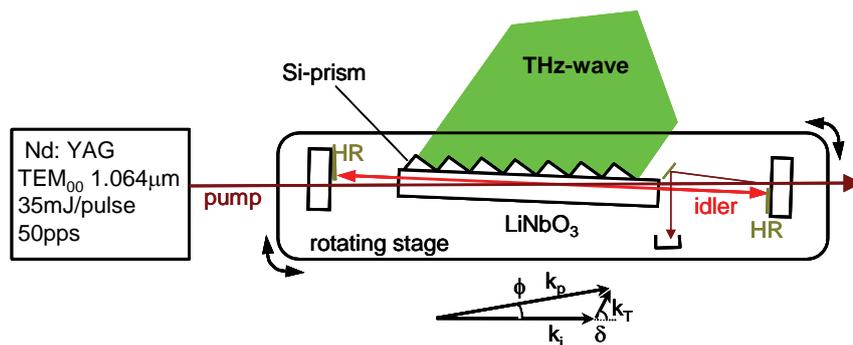
図 3.2 氷と水の吸収特性

図 3.2 は、氷 (solid) と水 (liquid) に対する、波長 10 nm～100 mm (30 PHz～3 GHz) の電磁波の吸収係数を示している。図より、テラヘルツ波は可視光に比べて吸収係数が大きく、氷や水に対する感度が高いことがわかる。従って、わずかな水に対しても、その量の変化を検出することが可能で、その性質を利用して、液体が入っている小袋のヒートシール部の欠陥検出への応用が報告されている (3.5.1 で紹介)。また、テラヘルツ波の波長の大きさに起因する物質透過性より、生物細胞の微小構造による散乱や回折の影響を受けずに、細胞内の水の可視化などに応用することができる。さらに、テラヘルツ帯において水の吸収係数が氷よりも高いことから、水分の凍結に関する情報を得ることが可能となる。一般的に食品や医学サンプルを凍結保存したり解凍する場合、細胞内の氷核が大きくなり、

細胞が損傷を受けることがある。テラヘルツ波を利用して、凍結状態をモニタリングすることにより、食品や生体試料の凍結・解凍を最適化する技術開発が可能となる。

3.3 テラヘルツ光源の開発

テラヘルツ光源は、主に YAG レーザーとパラメトリック光共振器から成る。共振器に置かれた LiNbO_3 結晶は、両端の X 面が鏡面研磨され、中心波長 $1.064 \mu\text{m}$ の無反射コーティングが施こされている。YAG レーザーからのポンプ波 ($1.064 \mu\text{m}$) は、進行波で結晶を励起し、パラメトリック発振によりアイドラ波とテラヘルツ波が発生する。アイドラ波は、高反射 (HR) コーティングが施こされた 2 枚のミラーから成る共振器中で増幅される。パラメトリック発振で生成されたテラヘルツ波は、図 3.3 の挿入図に示すようにノンコリニアな位相整合条件を満足する方向に発生する。ここで \vec{k}_j は波数ベクトルで、 $j = p, i, T$ はそれぞれポンプ波、アイドラ波、およびテラヘルツ波を表わし、 $|\vec{k}_p| > |\vec{k}_i| \gg |\vec{k}_T|$ なる関係にある。従って、ポンプ波とアイドラ波のなす角 ϕ は小さく ($\phi \approx 1^\circ$)、アイドラ波とテラヘルツ波のなす角 δ は大きくなる ($\delta \approx 65^\circ$)。テラヘルツ波の波長は、ミラーおよび結晶が載っているステージの回転角をコンピュータで制御して、共振器の角度を変えることにより、変化することができる。ポンプ波の LiNbO_3 結晶への入



波長可変性 : 0.9-2.2THz
 出力ピーク値 : 30mW
 繰り返し : 50Hz~500Hz

図 3.3 テラヘルツ波パラメトリック発振器

射角が $2\sim 1^\circ$ へ変わると、結晶中でのポンプ波とアイドラ波とのなす角 ϕ は $1\sim 0.5^\circ$ 、テラヘルツ波とアイドラ波のなす角度 δ は $66\sim 65^\circ$ へ変化する。この角度変化に伴う位相整合条件の変化で、アイドラ波は $1.072\sim 1.068\ \mu\text{m}$ と変化し、テラヘルツ波は $140\sim 310\ \mu\text{m}$ の間で波長可変となる。結晶中で発生したテラヘルツ波の大部分は、 LiNbO_3 結晶中の吸収および Y 面での全反射のために、そのままでは外部に出射することができない。そのため、モノリシック構造のグレーティングカップラを結晶表面に機械加工してテラヘルツ波を結合させ、出射効率を大幅に改善することができた³⁾。

図 3.4 は、テラヘルツ波パラメトリック発振器を実装したもので、出力ピーク値 $30\ \text{mW}$ 、繰り返し周波数 $50\sim 500\ \text{Hz}$ 、 $0.9\sim 2.2\ \text{THz}$ の可変テラヘルツ光源となっている。ポンプ光の YAG レーザーは、外部からファイバによりカップリングされ、供給されている。近年は、アイドラ波の種光としてチューナブル LD を利用し、共振器構造無しにテラヘルツ波が発生できる光注入型テラヘルツパラメトリック発生器が開発されており、パルス幅のフーリエ限界の狭線化 ($0.003\ \text{cm}^{-1}, 100\ \text{MHz}$) が達成されている。さらに、小型化された YAG マイクロチップレーザー ($30\times 32\times 105\ \text{mm}$) を利用したパームトップサイズのテラヘルツ光源が誕生している。

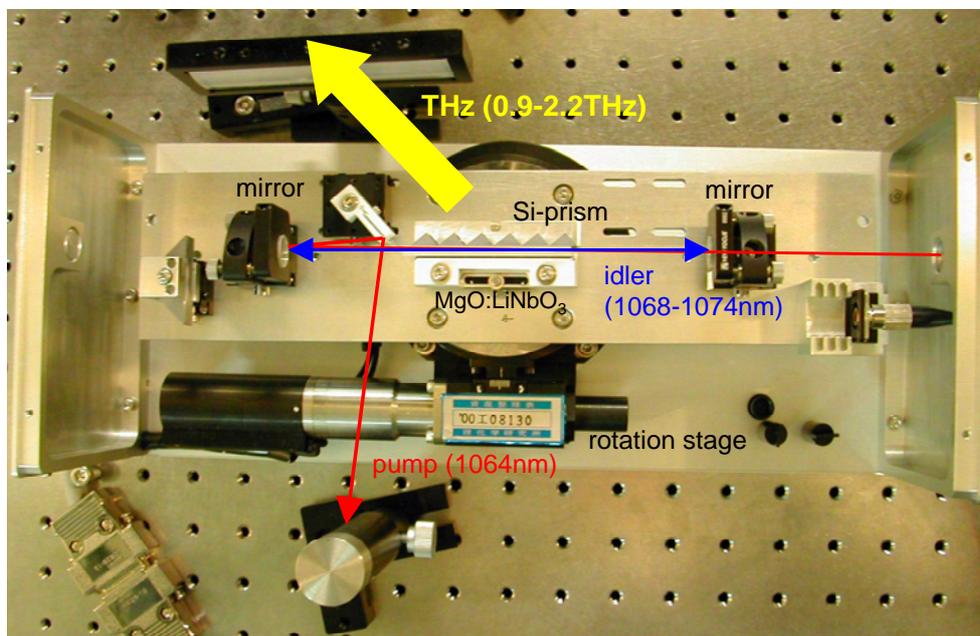


図 3.4 卓上型テラヘルツ光源

3.4 テラヘルツ検出技術

3.4.1 テラヘルツ波検出器

ボロメータは、テラヘルツ波の検出器として古くから使用されているが、信号強度に比べて背景熱雑音を少なくするため、極低温冷却が必要となる。ショットキーバリアダイオード (SBD) は、常温で動作する高速・高感度なテラヘルツ波検出器であるが、動作安定性のある SBD の研究開発が続けられている。SBD の他、超伝導材料を利用した検出器や量子型検出器などが研究されており、今後は 2 次元アレー化することによる 2 次元テラヘルツイメージング検出器の開発が極めて重要な課題となると考えられる。

3.4.2 テラヘルツ時間領域分光法

図 3.5 は、テラヘルツ時間領域分光法の実験システムを表している。右下から入射したフェムト秒レーザーは、ビームスプリッタ (BS) で 2 分され、片方はテラヘルツ発生素子 (THz emitter) へ、もう片方は光ディレイラインを通して、テラヘルツ検出器 (THz detector) に照射される。フェムト秒レーザーが照射されたテラヘルツ発生素子は、モノ

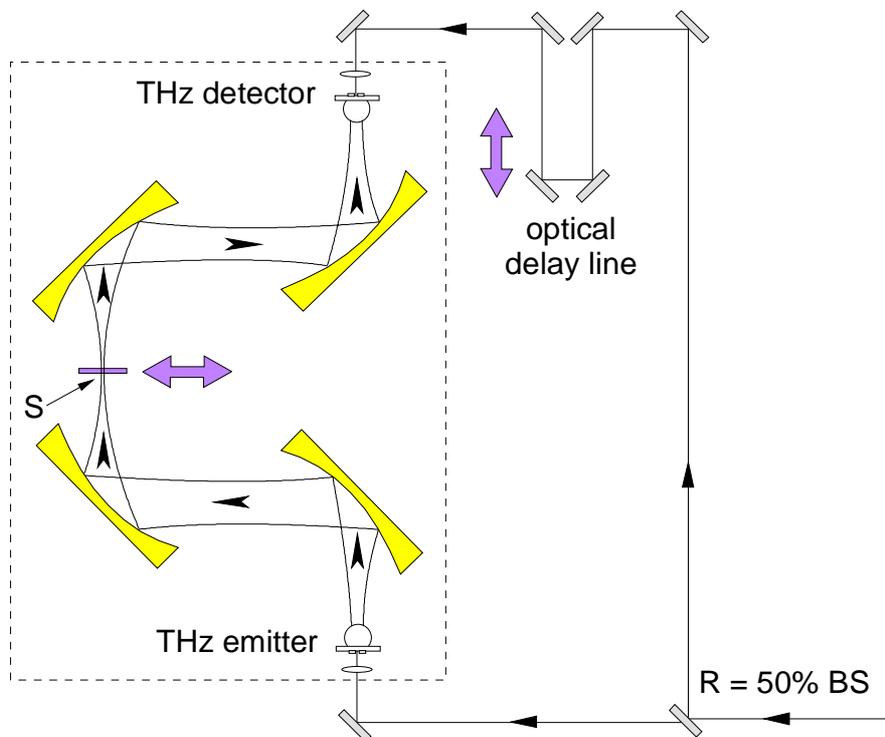


図 3.5 テラヘルツ時間領域分光法

サイクルに近いパルス状のテラヘルツ電磁波を発生させ、試料 (S) に集光される。試料を透過したテラヘルツ波は、テラヘルツ検出器で検出される。このとき、フェムト秒レーザーパルスを利用して、検出器に時間的なゲートがかけられ、背景熱雑音を抑制した信号強度を検出することができる。また、試料を空間的にスキャンすることにより、2次元分布を得ることができる。テラヘルツ時間領域分光法は、電界の絶対値と向きからテラヘルツ波電界の振幅と位相を同時に検出することができ、試料の複素屈折率もしくは複素誘電率を直接測定できることが特長となっている。

3.4.3 レーザーテラヘルツ放射顕微鏡

図 3.6 は、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM ; Laser THz Emission Microscope) を表している。左上から入射してきたフェムト秒レーザーは、近赤外領域の波長を有しており、集光され、試料に照射される。その際、光照射によって試料内に光キャリアが励起され、試料内部の電界分布に依存した局所的なパルス電流が生成され、数 ps 程度の時間幅 (テラヘルツ領域) の電磁波パルスが放射される。放射されたテラヘルツ電磁波は、軸外し放物面鏡などを介してフェムト秒レーザーでトリガされた検出器で測定される。試料は、XY ステージにより走査され、試料の空間的な電界分布像などが検出される。

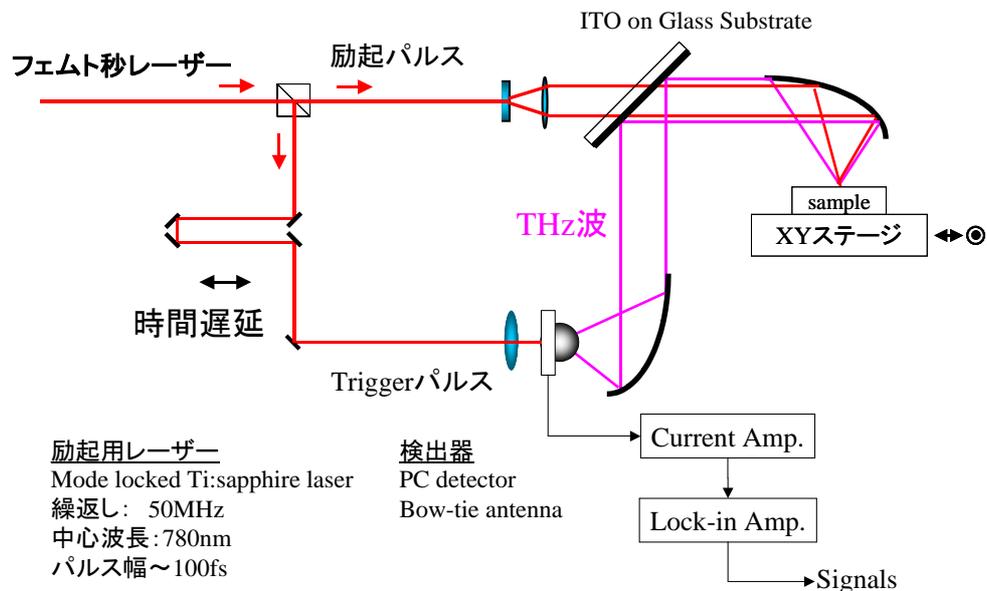


図 3.6 レーザーテラヘルツ放射顕微鏡

3.5 テラヘルツ波のセンシングへの応用

3.5.1 小袋のヒートシール部の欠陥検出

3.2 で、テラヘルツ波が可視光に比べて水に対する吸収係数が大きく、水に対する遮蔽性があることを示した。これは、テラヘルツ波の吸収が主に物質中の双極子の回転運動によるものであると考えられており、無極性の非金属固体である紙、ゴム、ビニール、セラミック、プラスチックや無極性の液体である油、ガソリンは、テラヘルツ波を良く透過するが、極性をもっている水は、テラヘルツ波を強く吸収することに起因している。また、水が凍って氷となると水の中の双極子が凍結し、テラヘルツ波の吸収が減り、氷に対する吸収係数が下がることも説明できる。これらの性質を活用して、プラスチックフィルム製小袋のヒートシール部に生じた漏れ（マイクロリーク）の欠陥検出に、テラヘルツ波を用いた非破壊検査システムが開発された⁴⁾。このシステムは、テラヘルツ波の吸収係数が、包装紙であるプラスチックと漏れ部にある水とで異なることを利用している。小袋生産ラインにおいて、高速な欠陥検査システムが実現されており、テラヘルツ波を利用したセンシングが実際の産業界で十分応用できる可能性を証明している。

3.5.2 郵便物中の禁止薬物の非破壊検出

図 3.7 は、代表的な覚醒剤のテラヘルツ帯における指紋スペクトルである。図から分かるように、覚醒剤をはじめとして様々な試薬は、テラヘルツ帯の電磁波に対して固有な吸収スペクトルを有している。従って、可変テラヘルツ光源を用いたテラヘルツ分光測定を行い、異なるテラヘルツ波で撮像したマルチスペクトル画像データを主成分分析することにより、複数の試薬が混ざった測定対象から、それぞれの試薬の指紋スペクトルを手かがりにして、特定覚醒剤の抽出が可能となる。

図 3.8 は、郵便物中に隠された覚醒剤・麻薬などを非破壊で検出した実験結果で、世界で初めて成功した例である⁵⁾。これまで示したように、テラヘルツ波は紙で出来ている封筒を透過し、封筒内の試薬で固有の吸収を受ける。図の中程にあるイメージは、テラヘルツ波で分光測定した結果であり、それぞれの試薬が照射するテラヘルツ波の周波数によって異なる吸収を示していることがわかる。この測定結果を主成分分析し、麻薬などの特定に成功した結果が図の右側に示されている。

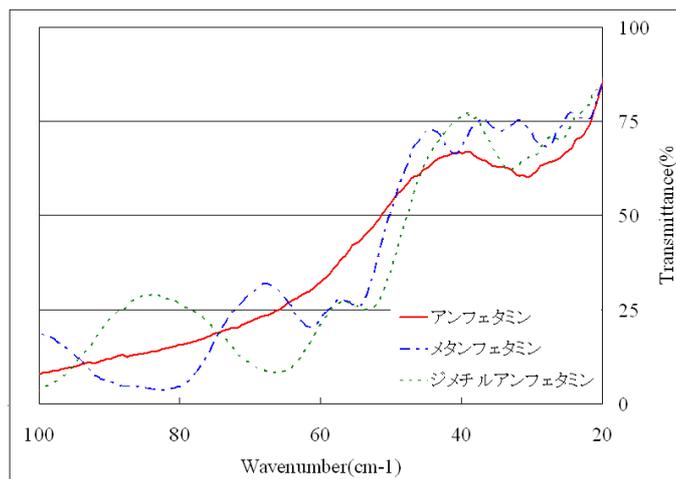


図 3.7 代表的な覚醒剤の指紋スペクトル

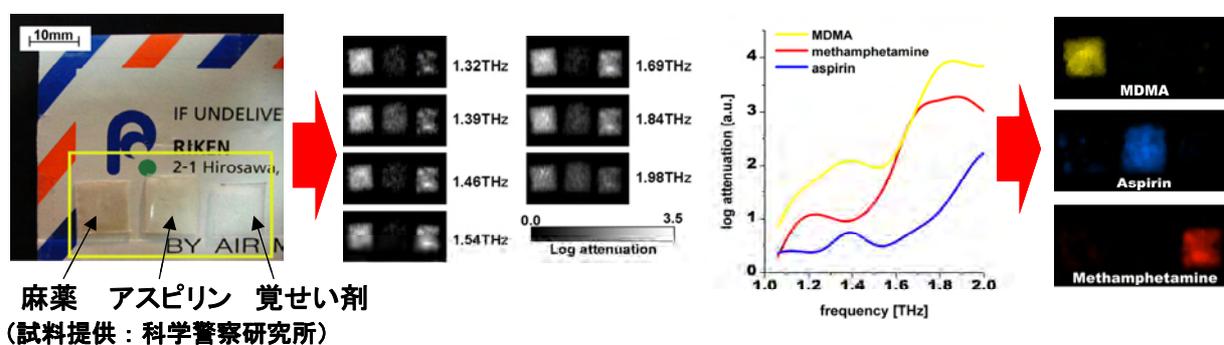


図 3.8 封筒中の薬物検出

3.5.3 テラヘルツ波の反射散乱強度による粉体検出

テラヘルツ波の特長のひとつに、物質を透過するときの散乱・回折特性があり、テラヘルツ波の波長 (1~0.03 mm) 程度の構造をもっている物質を透過するときは、強く散乱されるが、それよりも小さい分子構造などに対しては、ほぼ透明体として通過する。麻薬などは、テラヘルツ波程度の粒径を持つ粉体として輸送されることが多く、テラヘルツ波を照射したときに、強く散乱される。図 3.9 は、これを実験的に確かめた結果で、封筒の中に様々な粒径の粉体を入れたときに、テラヘルツ波を照射して散乱光と非散乱光の強度比を測定した結果である。全ての粒径に対して 5 倍以上の差があり、散乱光を測定する方法が、封筒中の禁止薬物の非破壊検査における第一段階のスクリーニング技術として使用されている。スクリーニングで検出された疑わしい封書は、3.5.2 で示した分光イメージングにより測定し、薬物の効果的・効率的な検出が可能となった。

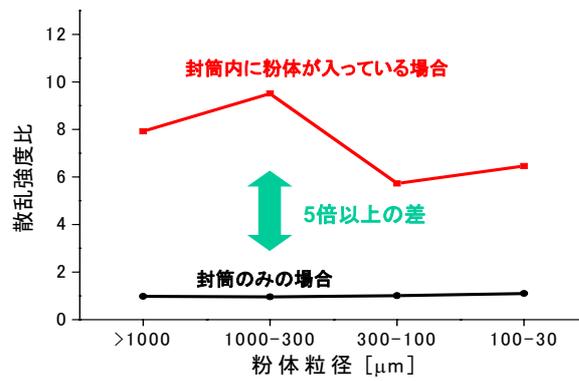


図 3.9 散乱強度の粉体粒子径依存

3.5.4 集積回路の電氣的欠陥箇所検出

3.4.3 で、レーザーテラヘルツ放射顕微鏡 (LTEM) により、試料内部の空間的な電界分布像を検出できることを示した。この技術を利用することにより、半導体大規模集積回路 (LSI) など電子デバイスの電氣的不良箇所を検出することができる。LSI 内部には、外部から印加された電界や、トランジスタの p-n 接合におけるビルトイン電界があり、デバイス内部に不良箇所が存在すると、それらの電界分布が変化する。LTEM を用いて、電界分布の空間的な変化を検出することによって、LSI の不良箇所の絞り込みを行うことができる。図 3.10 は、測定結果の一例である。左側は正常に動作する MOSFET の LTEM 像であり、右側が故障したものの LTEM 像である。故障した MOSFET の電氣的不良箇所付近のテラヘルツ放射波形が反転しており、正常に動作する LTEM 像と比較することにより、不良箇所を同定することができる。

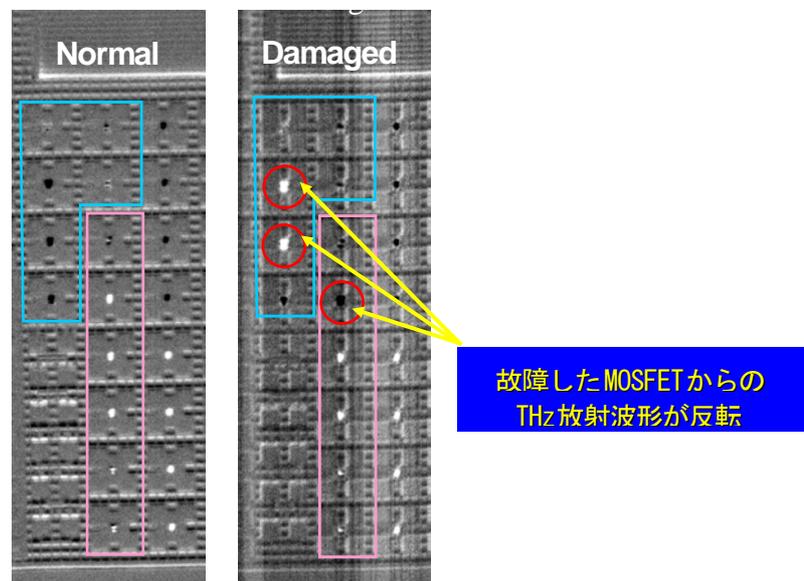


図 3.10 故障した MOSFET の LTEM 像

3.5.5 テラヘルツ分光イメージングによる癌診断の可能性

癌、特に皮膚癌がある組織にテラヘルツ波を照射し、そこから得られるテラヘルツイメージが癌組織と正常組織で明らかに異なることが、これまでに報告されており、この違いを利用した癌診断が提案されている。図 3.11 の上図は、癌組織を含んだ部位のテラヘルツ分光イメージで、左下に吸収スペクトルが示してある。吸収スペクトルの結果から、テラヘルツ波の周波数に依存しないノイズ成分を除いて、癌組織の部分は正常組織に比べてテラヘルツ波を吸収して減衰率が大きいことがわかる。右下の図は、この分光特性から、正常組織と癌組織を特定した結果で、癌組織の位置がよく現れている。正常組織と癌組織でテラヘルツイメージが異なる理由は、まだはっきり特定されていないが、癌のような悪性の腫瘍は、組織に含まれる水分が多くなり、テラヘルツ波の吸収が大きくなるからではないかと考えられている。テラヘルツ波を用いた癌診断は、生きたままの状態で行うことが可能で、組織を摘出して癌診断するこれまでの方法に比べて、早期の癌発見につながり、今後有望な診断法として考えられている。

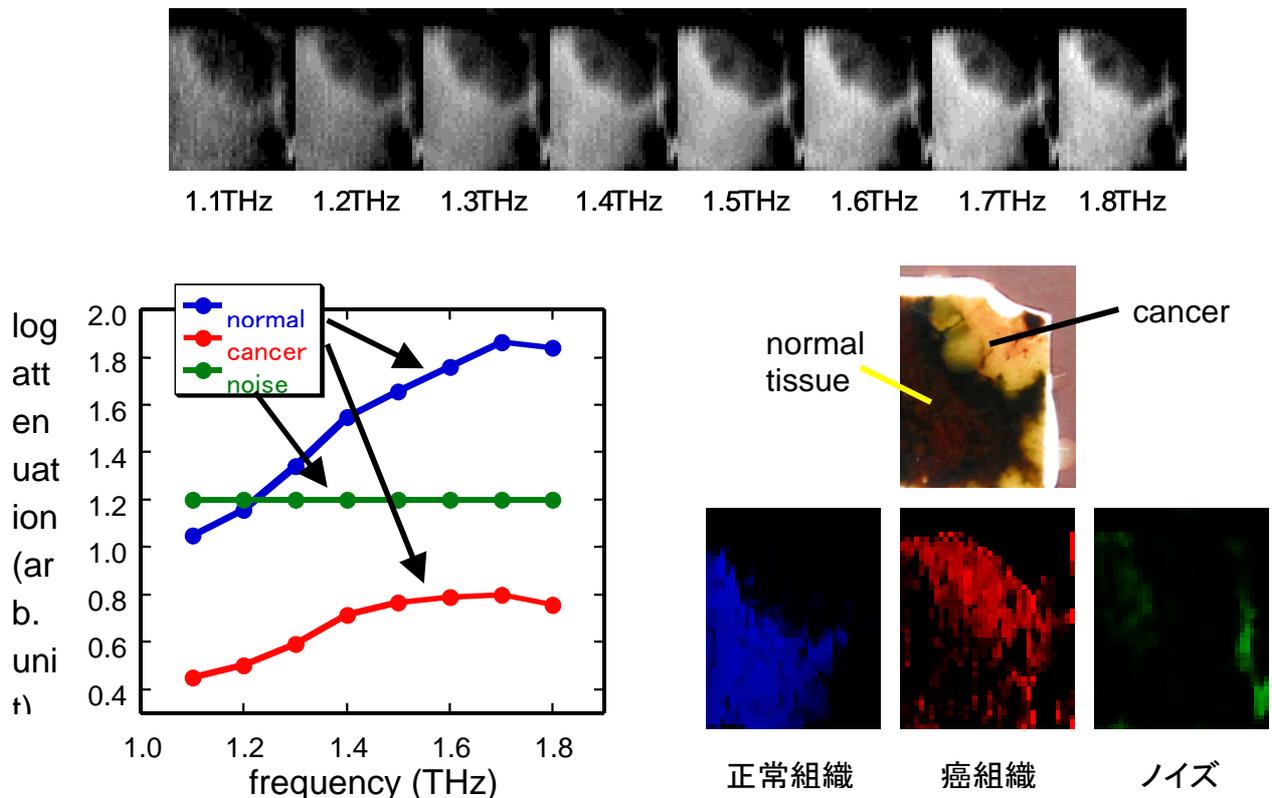


図 3.11 正常組織と癌組織のスペクトルの違い

3.6 まとめ

米国防総省の研究機関、国防高等研究計画省（DARPA）は、テラヘルツイメージング技術に関するプロジェクトを最近開始した。自爆テロリストの摘発が狙いであり、爆薬を服の下などに隠していないかを判別できるシステムを開発することを目指している。また NASA は、スペースシャトルの外壁タイル内部の欠陥検査技術として、他の非破壊検査技術と公平にテストした結果、テラヘルツイメージング技術を用いた検査システムを利用することを決めた。このように、テラヘルツ波を利用したイメージング、センシング技術は、広範囲な応用分野が見込まれ、今後ますます発展するものと期待される。

謝辞

ここで掲載した全ての図、写真は、名古屋大学大学院工学研究科教授・川瀬晃道先生から提供して頂いたものである。（<http://www.nuee.nagoya-u.ac.jp/labs/optlab/kawase/jp/index.html>）また、本報告書を執筆するにあたり、川瀬先生の研究室を訪問させて頂き、テラヘルツ波光源の開発とそのイメージング技術について大変丁寧な説明をして頂きました。心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 斗内政吉監修，テラヘルツテクノロジー動向調査委員会編：「テラヘルツ技術」オーム社
- 2) K. Kawase, Optics & Photonics News **15**, No.10, 34-39(2004).
- 3) K. Kawase, J. Shikata, H. Ito, J. Phys. D: Appl. Phys. **35**, R1(2002).
- 4) Y. Morita, A. Dobroiu, K. Kawase and C. Otani, "Terahertz technique for detection of micro-leaks in the seal of flexible plastic packages." Optical Engineering **44**, 019001-1-6(2005).
- 5) K. Kawase, Y. Ogawa, Y. Watanabe and H. Inoue, Opt. Exp. **11**, 2549(2003).

4 形状検査

4.1 はじめに

一般に機械やその部品は、設計された特定の形状によって必要とされる機能を発揮するという特徴を有している。そのためそれらの形状を検査することは重要である。この場合、非接触、高精度、短時間、その場検査、簡単な装置、メンテナンスが容易、等の条件が望まれる。ここでは検査する対象を微細な形状と複雑な形状の二つに大きく分け、それぞれについて前記条件を満たすような、光技術を用いた先進的検査方法について重要と思われるいくつかの方法について報告する。

4.2 微細な形状の検査

多光束干渉によって線幅が狭くかつ輝度の高い平行で等間隔の直線群状の格子をつくり出し、それを検査対象に投影し、その歪み（変形格子像）から微細な形状を検査する方法が提案されている¹⁾。線幅が狭いので微細な形状も検査でき、かつ直線群格子を投影することで全面同時検査ができる。

4.2.1 多光束干渉縞を用いた格子投影の原理

格子を計測対象表面に投影し、その歪みから形状を計測する方法（格子投影法）はよく知られており、テレビカメラとパソコンを用いて自動解析されている²⁾。また二光束干渉縞のような正弦波状の強度の格子を用い、それに位相シフトを導入して計測精度を高める方法も知られている³⁾。しかしながらこのような方法は、一般的に高精度であるが位相シフトに時間を要するため、部品の形状や欠陥を高速に計測・検査するというニーズには対応していない。

一方、多光束干渉によると線幅が細く輝度が高い多数の干渉縞が同時に生成できる。ここでは直線状で等間隔の多光束干渉縞格子を投影することにより、高速かつ高精度で微細形状を検査する方法について述べる。

簡単のため、図 4.1(a)のように対象物を高さ h の段差とし、直線状で等間隔 D_0 の格子を角度 θ の方向から照射し、正面で観測する場合を考える。ここでパラメータは角度よりも長さのほうが都合なので、 θ の代わりに対象物面と平行な平面に投影された格子間隔

D_p を採用する。すなわち $D_p = D_0 / \cos \theta$ の関係がある。段差による変形格子像のずれ量 d から段差の高さが次式で得られる。

$$h = \frac{d}{\sqrt{D_p^2 / D_0^2 - 1}} \quad (1)$$

一般に多光束干渉は反射率の高い二つの面からの反射光が繰り返し干渉することによって生じ、得られる干渉縞は線幅が細く輝度が高い。平行で等間隔な直線群の多光束干渉縞は、フィゾー干渉計や横シア干渉計によって作り出すことができる。フィゾー干渉計はさらに独立した二つの高反射率面か、両面を高反射率とした一枚の楔ガラス面に分類することができる。前者は互いの傾きを変えることによって投影格子の間隔を可変とすることができる反面、干渉計が二つの独立した面から構成されているために外部振動などで互いの傾きが変動する恐れがあり不安定となる。それに対して後者は投影格子の間隔は固定だが、干渉計が一枚のガラスで構成されているために安定しており、干渉計の調整も不要である。前者は検査対象が多品種少量である場合に適しており、後者は少品種多量の検査に適している。フィゾー干渉計が平行光を入射させて多光束干渉縞を得るのに対して、横シア干渉計は球面波を平行平面ガラスに入射させることによって得られる。ただし多光束フィゾー干渉縞はその縞間隔が連続的に可変なのに対し、横シア多光束干渉縞の縞間隔は離散的である。

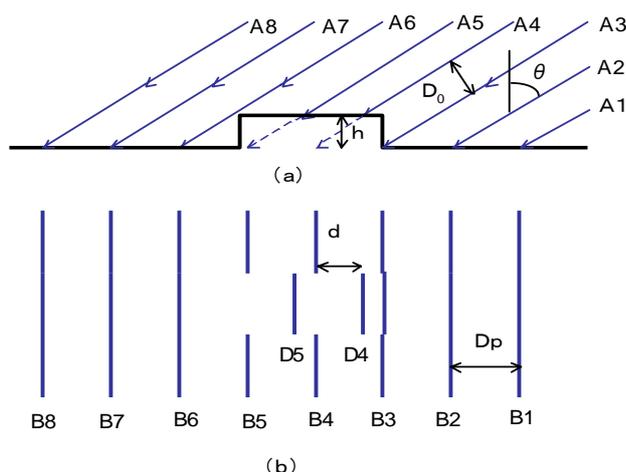


図 4.1 (a) 格子投影法における投影断面図 (b) 格子投影法における変形格子像

4.2.2 多光束干渉縞を用いた格子投影による検査例

図 4.2 は横シヤ多光束干渉縞を用いた格子投影システムである。用いた光は波長 633nm の He-Ne レーザー光で、顕微鏡対物レンズとピンホールで球面波とし、両面の反射率が 95% の平行平板に入射させた。平行平板の入射光に対する角度を適度に調整することにより、計測対象上に線幅が狭く輝度の高い多光束干渉縞格子をつくることができる。検査対象の微小形状は蒲鉾状である。図 4.3 はこのようにして得られた多光束干渉縞の投影格子像で、線幅はピッチに比べて充分狭く、かつ輝度も高い。

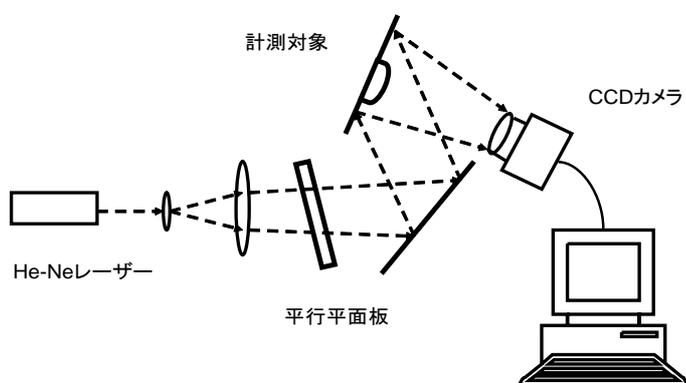


図 4.2 横シヤ多光束干渉縞を用いた格子投影システム

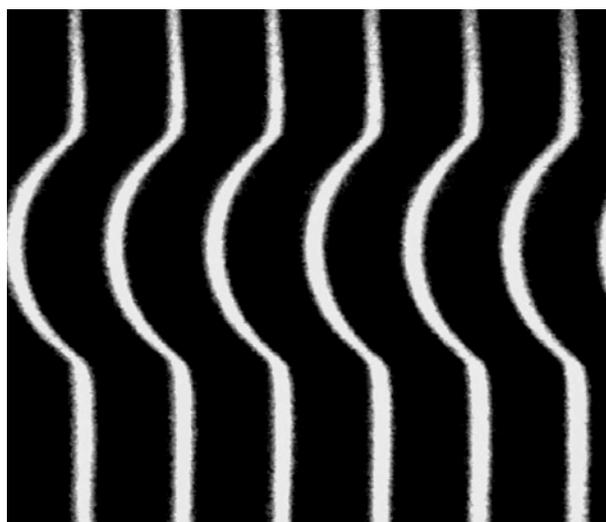


図 4.3 横シヤ多光束干渉縞格子投影像

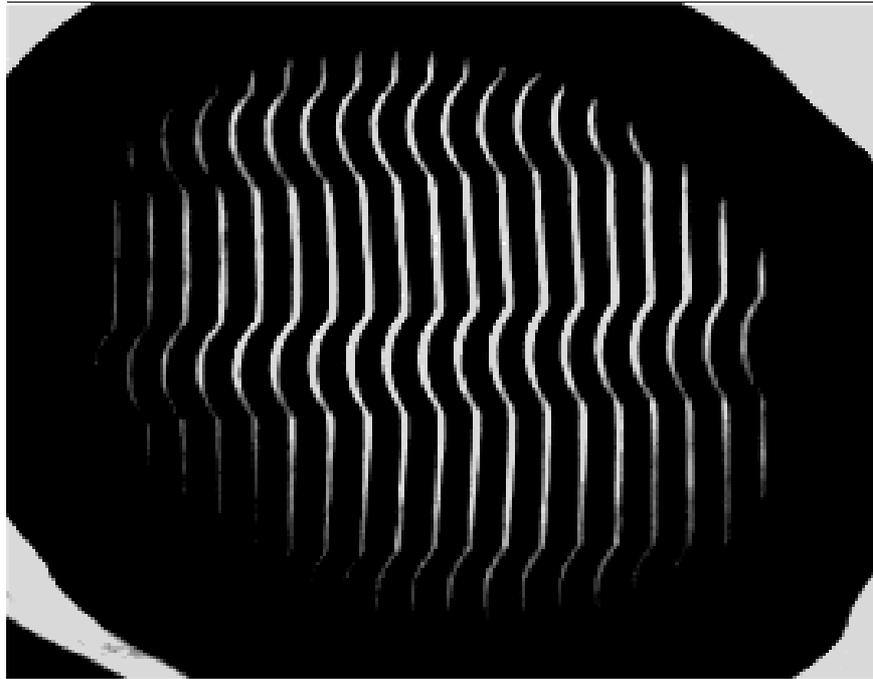


図 4.4 フィゾー多光束干渉縞の格子投影像

図 4.4 は同じく波長 633nm の He-Ne レーザー光を平行光とし、両面が 96% の高反射率一枚の楔に入射させて得られた多光束フィゾー干渉縞の投影格子像である。同じく干渉縞の線幅はピッチに比べて充分狭く、かつ輝度も高いという多光束干渉縞の特徴が現れている。

4.3 モアレによる形状検査

格子投影法は本来形状を計測するためのものである。形状を検査する場合は、いわゆる光学面を干渉計によって検査する null test の手法を導入することが考えられる。光を用いて粗面の形状を検査する方法としてモアレトポグラフィに null test を導入する方法が提案された。これは計算機によって形状を補正するような格子を創生して、変形格子像が直線となるようにし、これと直線格子を重ねたモアレによって形状が設計値どおりかどうか検査する方法である⁴⁾。

4.4 形状補正型格子投影による形状の検査

モアレトポグラフィが既に出現した後、変形格子像を直接解析して形状を計測する手法が提案されたように、モアレトポグラフィによる null test が提案された後に、変形格子像

による null test が提案されている。

計測対象が深い溝や段差などを持つ複雑な形状であると格子次数の同定ができなくなって計測が困難となる。また材質が金属のように光沢を持つものであると、変形格子像がその反射格子像と重なって複雑となりやはり計測が困難となる。そこで変形格子像が直線状となるようにあらかじめ創生された投影格子を、形状誤差をもつ実際の計測対象に投影し、表面形状誤差を直接計測および検査できる格子投影法（以降は形状補正型格子投影法と呼ぶ）を紹介する⁵⁾。

4.4.1 形状補正型格子投影による形状の検査の原理

図 4.5 に形状補正型格子投影システムを示す。

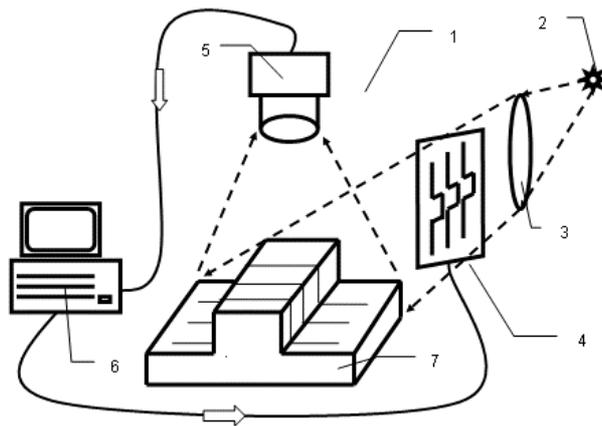


図 4.5 形状補正型格子投影システム

計測対象 7 が理想形状（設計形状）であるとして、その変形格子像が直線状となるようにあらかじめ創生された投影格子 4 をマスクや液晶パネルで作成する。次に形状誤差をもつ実際の計測対象にこれを投影し、変形格子像を TV カメラ 5 で取り込み、パソコン 6 で解析を行う。

図 4.6(a)のように対象を高さ h の単純な段差とすると、この段差に投影されるべき形状補正型格子は簡単な計算により段差部分が段差の無い周りの部分に比べて

$$\Delta D_0 = \frac{h}{\sqrt{D_p^2 / D_0^2 + 1}} \quad (2)$$

だけ離れていなければならない。

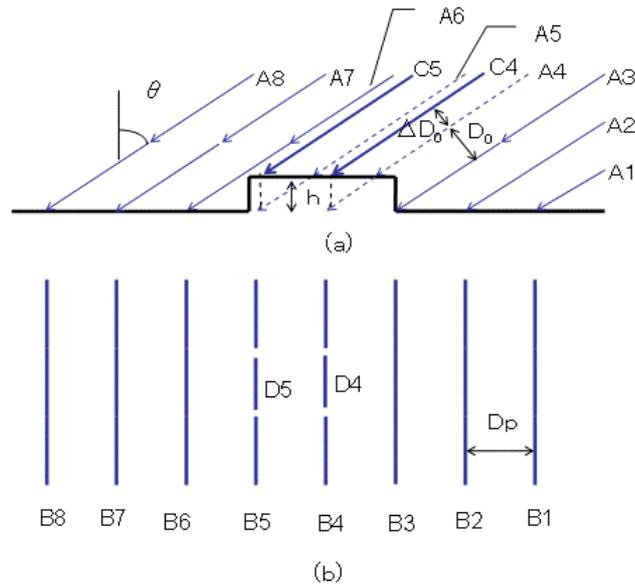


図 4.6 (a) 形状補正型格子の投影断面図 (b) 形状補正型格子による格子投影像

ここで D_0 は段差の無い周りの部分に投影される格子の間隔であり、 D_p は θ を投影角とした場合に $D_0/\cos \theta$ に等しい。図 4.6(b) は形状補正型格子を投影した場合の変形格子像を示す。段差の部分の変形格子 D_4 と D_5 は、通常の格子投影法においてあたかも段差が無いように平行等間隔となる。これによって形状検査が目視で簡単に行える。もし形状補正型変形格子像が Δd だけずれていたとしたら、段差の高さ誤差 Δh は、

$$\Delta h = \frac{\Delta d}{\sqrt{D_p^2/D_0^2 - 1}} \quad (3)$$

として求められる。

4.4.2 形状補正型格子投影による形状の検査例

検査対象の段差は一辺の長さが 20mm の正方形で高さは 10mm である (図 4.7)。

これを He-Ne レーザー平行光で 45 度の入射角で図 4.8 のような通常の格子と形状補正型格子を用いて投影した。図 4.9 は通常の平行等間隔の直線投影格子による変形格子像である。この変形格子像は当然ながら段差の部分で不連続となっており、計測には適しているが、検査には解析が必要なため必ずしも適していない。次にこの段差用の形状補正型格

子を作成し、それを投影した結果を図 4.10 に示す。

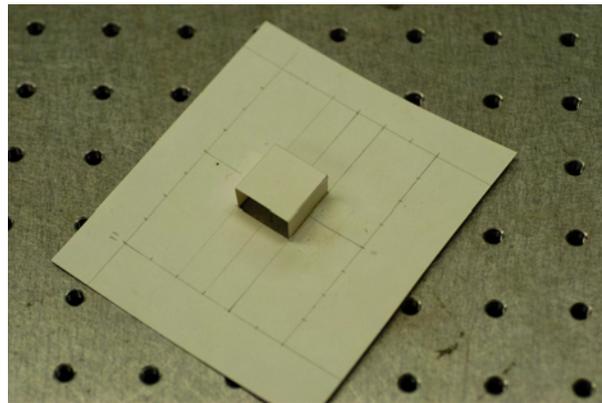


図 4.7 検査対象段差

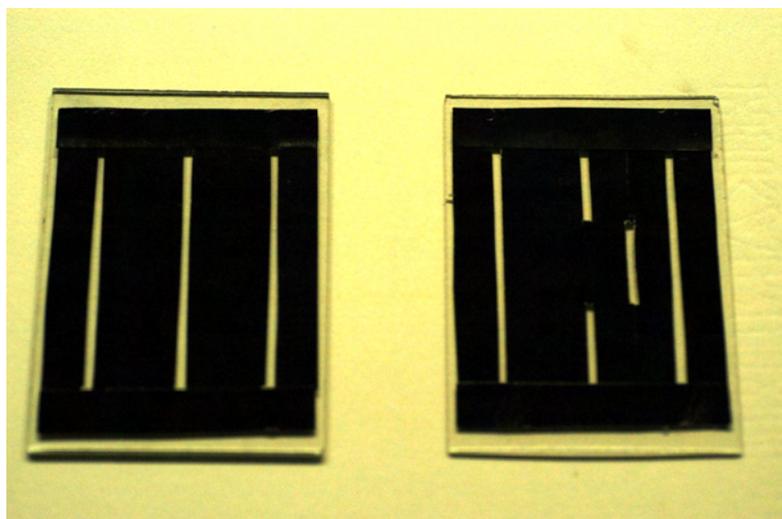


図 4.8 (左) 通常の投影格子 (右) 形状補正型格子

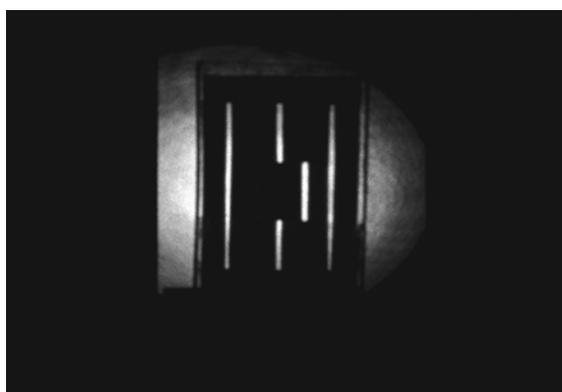


図 4.9 通常の投影格子による変形格子像

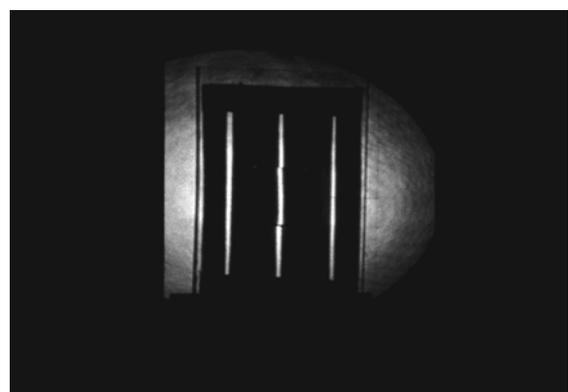


図 4.10 段差用の形状補正型格子による
変形格子像

この場合の変形格子像は平行等間隔の直線になっており、形状の段差に誤差が無いことが一目瞭然でわかる。本方法は深い溝や段差を持つ複雑な形状等の検査に適しており、とりわけ金型のようなマスター形状から作られる部品の検査に適していると思われる。

4.5 あとがき

ここで述べた微細形状検査は微細構造を定量的に検査できる点が特長で、同じ意味で欠陥検査にも応用できる。一方で光散乱によると粗さの検査や欠陥の検査が可能となるがこれはある領域にわたる平均的な粗さの概算値を求めたりや欠陥の有無を検査する方法で、どちらかと言うと定性的な検査である。

またホログラフィ干渉を利用したいくつかの方法⁶⁾によると形状の等高線を干渉縞として計測できるが、これらを実現するには通常は実験室レベルの静粛な環境と高度な技術が必要とするので、ここで掲げた短時間、その場検査、簡単な装置、メンテナンスが容易、等の検査条件を満たすのは難しい。

参考文献

- 1) 天神林孝二：新しい格子投影による形状計測・検査方法、光技術コンタクト Vol.44, No.7(2006)373.
- 2) 吉澤 徹，鈴木賢策，格子パターン投影による物体形状の自動測定，精密工学会誌 53(1987) 422.
- 3) 小松原他，縞走査を導入した格子パターン投影法，精密工学会誌 55（1989）1817.
- 4) T. Yatagai, M. Idesawa “USE OF SYNTHETIC DEFORMED GRATINGS IN MOIRE TOPOGRAPHY” Optics Communications Vol.40 (1977) pp243-245
- 5) 天神林孝二：形状補正型格子投影法，Optics and Photonics Japan 2006 講演予稿集（2006） pp256-257
- 6) 谷田貝豊彦，光学測定ハンドブック（田幸，辻内，南編集），朝倉書店 p 592～p594

5 光イメージセンサ・変調器

5.1 はじめに

外観検査の応用分野の拡がりに伴い、対象をセンシングするためのイメージセンサには、高精度・高感度・高速化といったセンサ性能の向上に加え、演算機能の集積化・高速化などの多岐にわたる要求が顕在化してきている。また、画像歪みを光学的に補正して高解像度化を実現する補償光学技術などの応用研究が進められている。ここでは、最近の光イメージセンサ技術として高感度イメージセンサと画像演算機能に焦点を当て、EM-CCD (Electron-Multiplier-CCD)、TDI-CCD (Time-Delay-Integration-CCD)、プロファイルセンサ、インテリジェントビジョンシステムについて紹介する。また、補償光学技術として、そのキーデバイスである空間光変調器とその応用を概説する。

5.2 光イメージセンサ技術

現状のイメージセンサとしては、CCD (Charge Coupled Devices) および CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) の2種類が応用されている。一般に、科学計測用のイメージセンサとしては、高感度・低ノイズ特性を兼ね備えた CCD センサが用いられる。一方、低消費電力・小型化・集積化の特長を持つ CMOS センサは、携帯機器や機能化センサに応用が広がっている。ここでは、最近の光イメージセンサ技術として、CCD センサにおける高感度化・低ノイズ化を実現した EM-CCD と TDI-CCD を紹介する。また、CMOS センサの応用例として、位置検出機能に特化したプロファイルセンサと並列演算機能を集積化したインテリジェントビジョンシステムについて示す。

5.2.1 EM-CCD (Electron-Multiplier-CCD)

(I) 原理

EM-CCD は、従来の CCD センサの回路構成に工夫を加えることで、オンチップに数千倍の電子増倍機能を実現したものである^{1,2)}。センサの原理を図 5.1 に示す。図 5.1 左に示すように、通常の CCD は、イメージエリアの光検出部で光を電荷に変換し、その蓄積された電荷を垂直転送部に保存し、順次水平転送部から出力する構成を持つ。EM-CCD は、通常の CCD 転送ラインの最終段に、数百段の電子増倍転送部を持ち、1 段あたりの電荷増

倍率は1~2%と低いものの、それを数百回繰り返すことで最大数千倍の増倍率を達成している。EM-CCDの像倍率は大きな温度依存特性を持つため、低温度化によるノイズ対策とともに、センサ温度の安定化が重要となる。

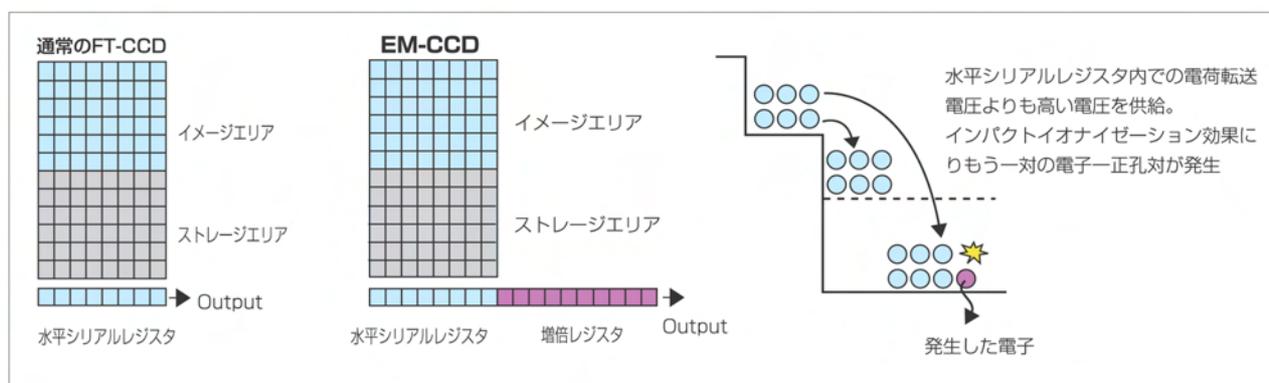


図 5.1 EM-CCD の原理²⁾

(II) 主な特性

現在、EM-CCDを用いたカメラは、複数のメーカーから製品化されている。ここでは、一例として、C9100（浜松ホトニクス社製）³⁾の仕様を表 5.1 に、カメラの外観を図 5.2 に示す。最大 2000 倍の増倍機能を持ち、センサ画素数は 1000×1000 画素で 30 フレーム/s の読み出しが可能である。図 5.3 に示すようにノイズの 1 因となる暗電流は冷却によって低く抑えることができるため、真空封じ切りしたセンサを -50°C ($\pm 0.05^{\circ}\text{C}$) に冷却し、読み出しノイズを 1 電子レベルに押さえている。図 5.4 に出力画像例を示した。

また、背面照射タイプの EM-CCD カメラも実用化されており、図 5.5 に示すように、紫外域から近赤外域まで幅広い領域において高感度化が図られたタイプもある。

こうした高感度特性を応用して、EM-CCDを用いたフォトンカウンティング実験も報告されており、1 分子蛍光イメージングや DNA チップの読み出しなど幅広い応用分野に広がりが見込まれている。

表 5.1 C9100 の仕様³⁾

型名	C9100-02
カメラヘッドタイプ	真空封じ切り空冷ヘッド
有効画素数	1000(H)×1000(V)
画素サイズ	8.0 μm × 8.0 μm
ピクセルクロック	35MHz/pixel
電子増倍ゲイン(typ.)	x 2000
フレームレート (ビニング読出し)	30~520 フレーム/s
読み出しノイズ(r.m.s.) (typ.)	< 1 electron (電子増倍最大時)
冷却温度	-50°C
インターフェース	Camera Link



図 5.2 カメラの外観³⁾

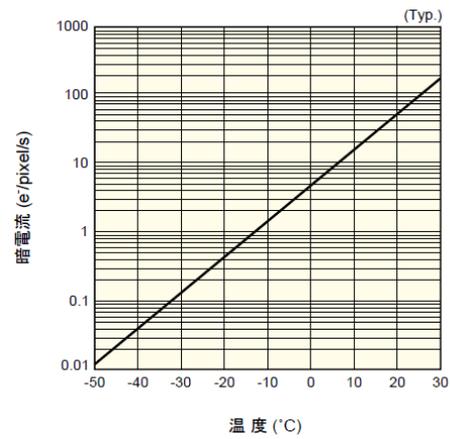
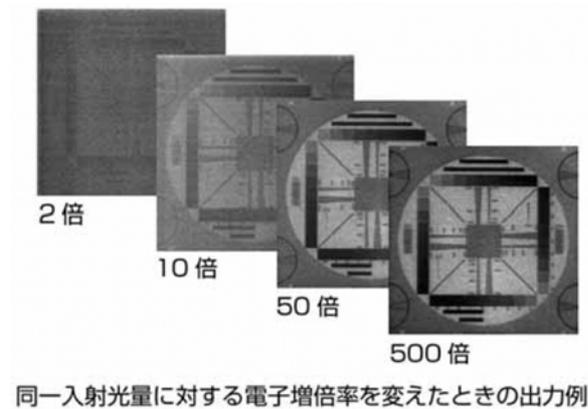


図 5.3 温度と暗電流の関係³⁾



同一入射光量に対する電子増倍率を変えたときの出力例

図 5.4 EM-CCD の出力画像²⁾

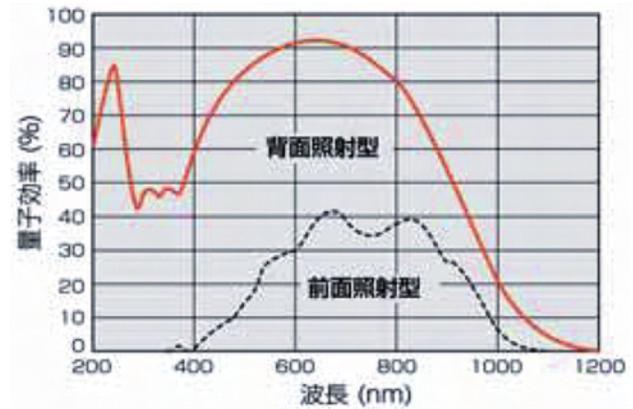


図 5.5 背面照射タイプ CCD の分光特性³⁾

5.2.2 TDI-CCD (Time-Delay-Integration-CCD)

(I) 原理

TDI は、CCD の特殊な読み出し方法の 1 つで、一定に動く対象物に合わせて露光・蓄積動作を工夫することで、高感度化を実現する手法である。図 5.6 に原理を示す。通常の CCD カメラなどで、ステージ上をある方向に動く物体を撮影する場合、移動によるボケなく対象物を撮影するためには、十分に速いフレームレートで撮影する必要がある。しかし、対象物が高速に移動すると、露光時間が少なくなり十分な光量が得られないため後段の画像演算処理の工程で十分な S/N の画像が得られないなどの問題が生じる。そこで、TDI-CCD では、対象物の移動方向と CCD の電荷転送方向と速度を合わせた撮影を行なうことで、移動する対象物を高 S/N で撮影する。図 5.6 (右) に 1 次元センサの場合の転送原理を示す。時刻 Time1 で 1 行目に対象像を撮影し光電変換により電荷を 1 行目の転送領域に蓄積する。次の時刻 Time2 では、対象物は 2 行目に移動しているため、電荷の転送を

1行分行って、Time1の蓄積電荷とTime2の蓄積電荷を転送領域内で総和する。この動作を対象物の移動速度と電荷転送速度を合わせてM行まで連続して行なった場合には、M倍の電荷が蓄積されるため、最終出力信号としてS/Nの向上した信号を得ることができる。つまり、移動物体像のボケを生じさせないで露光時間を長くした効果が得られる。

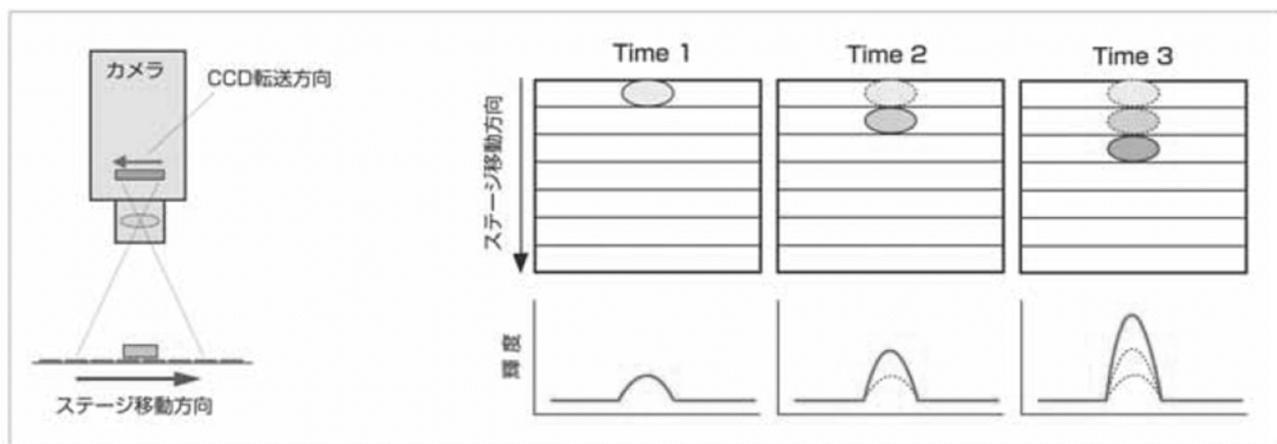


図 5.6 TDI-CCD の原理 4)

(II) 主な特性

TDI-CCD の一例として、C10000-201 (ホトニクス社製) 4)の仕様を表 5.2 に、カメラの外観を図 5.7 に示す。

これまで、工場のラインなどで幅広く使用されているラインセンサカメラに比較して、TDI-CCD は高感度な撮影ができるため、半導体検査、電子部品製造ラインやフラットパネル検査など、オンライン検査システムへの応用が広がっている。

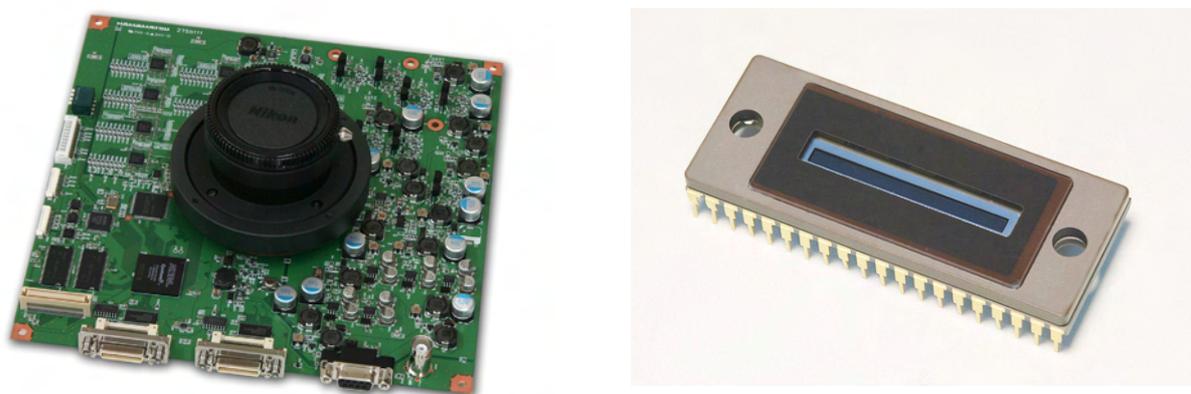


図 5.7 カメラの外観とセンサ 4)

表 5.2 TDI-CCD カメラの一例⁴⁾

型名	C10000-201
有効画素数	2048(H)×128(V)
撮像素子構造	背面照射タイプ
画素サイズ	12 μ m(H)×12 μ m(H)
ピクセルクロック	30MHz
読み出しノイズ	130electron
ダイナミックレンジ (typ.)	770:1
A/D コンバータ	12bit/8bit
インターフェース	Camera Link

5.2.3 プロファイルセンサ

(I) 原理と特性

プロファイルセンサは、2次元の位置情報を高速・高精度に取得するため、射影データ取得専用のイメージセンサとして設計された CMOS 機能センサである⁵⁾。通常のイメージセンサに比較し、少ない情報量でスポット光の位置情報を得ることができるため、高速な位置検出が可能となる。原理を図 5.8 に示す。各画素に対応する領域に、X 方向/Y 方向のそれぞれに対応した受光エリアが構成され、それぞれの受光エリアは、行方向または列方向に電氣的に接続されている。そのため、出力としては、X 方向および Y 方向の射影データが直接出力されることになる。センサ内部にアンプと A/D コンバータ (8bit/10bit 切替え) を備えるため、出力はビットシリアルなデジタルデータとして取得できる。図 5.9 に 256×256 画素のプロファイルセンサ S9132 の外観を示す。射影データのみを出力するため、3kHz (8bit 読み出し時) のフレームレートが実現されている。表 5.3 に示すように、センサピッチは正方 7.8 μ m、センサの有効領域は 2mm 角である。

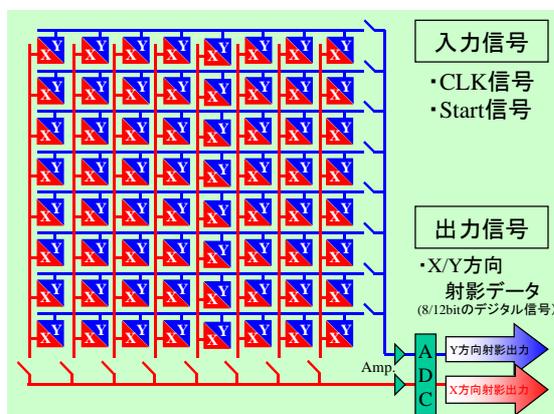


図 5.8 プロファイルセンサの原理

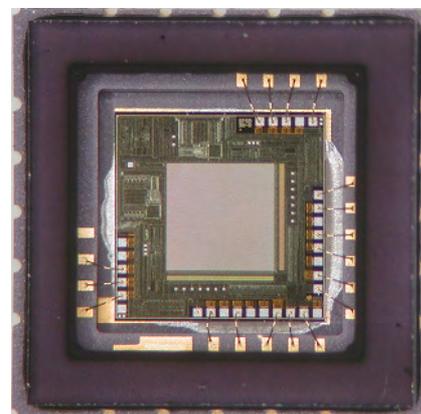


図 5.9 プロファイルセンサの外観

表 5.3 プロファイルセンサの仕様

型名	S9132
有効画素数	256(H)×256(V)
ピクセルピッチ	7.8 μm(H)×7.8mm(H)
有効領域	2.0mm(H)×2.0mm(V)
フレーム速度	3200fps(8bit 時) 1600fps(10bit 時)
波長範囲	380～1000nm
A/D コンバータ	12bit/8bit
インターフェース	シリアル TTL 出力
電源	5V 単一電源

(II) 3次元計測応用

プロファイルセンサを用いた3次元計測への応用例を示す⁶⁾。図 5.10 にプロファイルセンサを2つ用いたステレオ計測モジュールの外観図を示す。また、図 5.11 に実験系を示した。対象として図 5.12 に示すような3点のLED光源を計測した場合、X/Yのそれぞれの方向に3点の輝点の出力が3kHzの速度で得ることができる。この信号を重心演算することで、各輝点の位置をサブピクセルで計測することが可能となる。対象物を0.05mmごとに移動させた場合の位置計測結果を図 5.13 に示した。画角はほぼ200mmであったので、1画素あたり0.8mmとなるが、対象物の細かい動きがサブピクセル精度で線形性よく計測できていることがわかる。対象が十分な光量を持つ場合には、線形性は0.01画素程度(RMS値)、時間ゆらぎは0.01画素程度(RMS値)が得られている。また、輝点3点のそれぞれの3次元位置を計測することで、対象物の3次元的な位置及び傾きを計測することが可能となる。

このように、本センサを用いたシステムでは、演算する情報量が非常に少ないため、3kHzの高速フレームレートにおいて、対象の重心計算や2カメラからのステレオ計測までを実時間で行うシステムがコンパクトに実現できる。

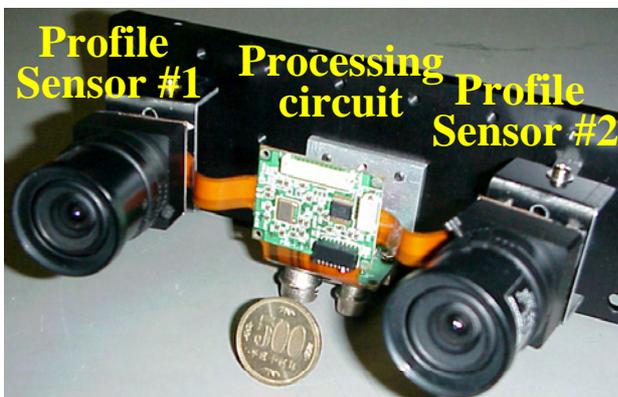


図 5.10 ステレオモジュールの外観

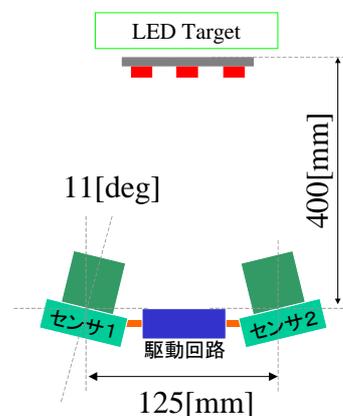


図 5.11 実験の構成

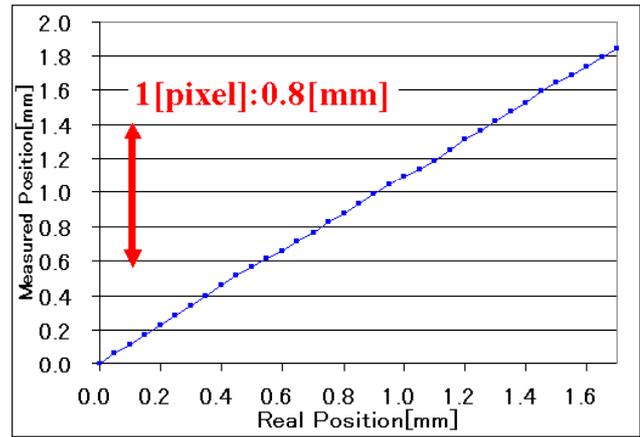
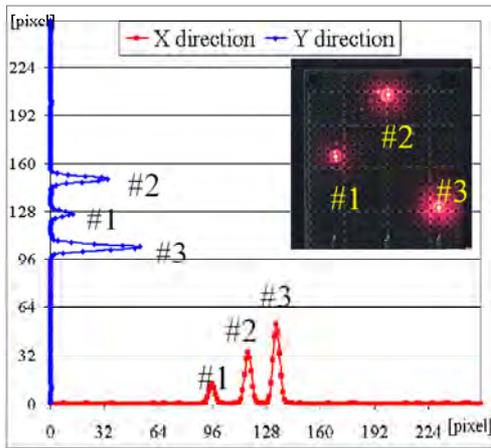


図 5.12 プロファイルセンサの出力例

図 5.13 プロファイルセンサの位置計測精度

5.2.4 インテリジェントビジョンシステム (IVS ; Intelligent Vision System)

(I) インテリジェントビジョンシステムとは

これまでの工業用イメージセンサとしては CCD センサが使用されることが多かったが、最近になって、低消費電力・小型化・集積化の特長を持つ CMOS センサの応用が広がっている。こうした CMOS 機能センサでは、様々な処理機能を持った回路を集積化できるため、「画像センシング～画像処理～アクセラレータ制御」までの処理を一体化した視覚センサシステムが実現できることが報告されている^{7~9)}。ここでは、一例として、東京大学と浜松ホトニクスが共同で開発したインテリジェントビジョンシステム (IVS)^{10,11)}を紹介する。

(II) 原理とシステム構成

IVS は、高速読出し可能な CMOS イメージセンサと同じ CMOS プロセス技術で製造可能な並列演算部を組み合わせることで、汎用画像処理演算をミリ秒オーダーで実行するシステムである。構成を図 5.14 に示す。IVS は、センサ部 (128×128 画素、8bit)、並列演算部 (128×128)、制御部から構成される。センサ部では 128×128 の PD アレイからの出力を 128ch の並列 A/DC により 8bit 長 1000fps (frame/s) のデジタル信号として並列演算部に転送する。並列演算部では、図 5.15 に示されるように S³PE アーキテクチャ⁷⁾に基づいた SIMD 型並列演算素子 (PE) から構成される。センサ部の PD アレイの各画素に 1 対 1 に対応した PE を用意することで完全並列な演算を実現している。各 PE は、演算器 (ALU)、レジスタ (A-register/B-register)、および 24×1 ビットのランダムアクセスメモリ (Local memory) によって構成され、外部から供給される演算指令 (プログラム)

により汎用的な演算が実行される。制御部は、システム全体（PD アレイ、PE アレイ）の制御および外部のホストコンピュータとのインターフェースを行う。この IVS は、専用ハードウェアを意識しないプログラム開発を実現するため、C 言語やアセンブラ、ハードウェアデバッガなどの開発環境が用意されており、1kHz 高速演算処理の必要となる応用分野に対してアルゴリズム研究開発が効率的に進められる環境が用意されている。

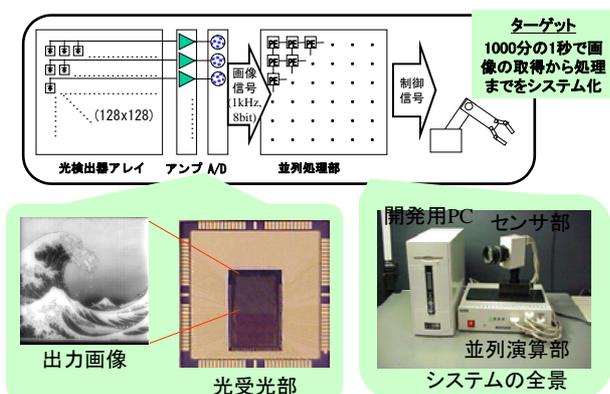


図 5.14 IVS の構成

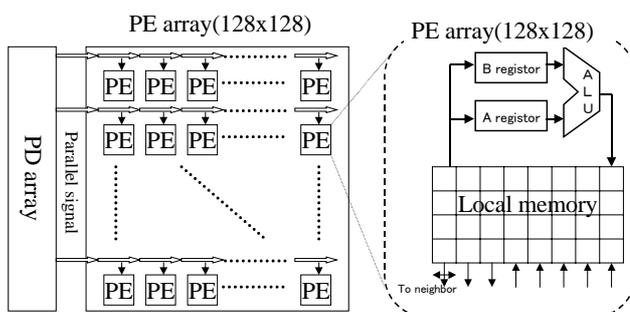


図 5.15 並列演算部の構成

(Ⅲ) 応用

これまでに IVS を用いて、ロボット制御¹⁰⁾やステレオ視¹²⁾、微弱光計測¹³⁾などへの応用研究が進められてきた。代表的な研究を図 5.16 にまとめた。

東京大学では、本技術を用いたロボットのビジュアルフィードバック制御研究が進められている¹⁴⁾。これまでに、ボールのキャッチやバッティング、顕微鏡下でのゾウリムシのトラッキングなど、高速フレームレートによる画像処理とフィードバック制御によりロボットの超高速制御の有効性が実証されている。

科学技術計測分野では、位相計測を高速に行うための多点重心演算を実装したシャックハルトマンセンサシステム¹⁵⁾や、ロックイン計測システムなどへの応用が進められている。また、2つのカメラからの信号を1つの並列演算部に転送し、左右画像の視差情報から奥行き情報を得るステレオカメラとしても評価を行った¹²⁾。

また、顕微鏡下の微弱光対象物の画像処理に用いる場合、受光感度が課題となる。そこで、イメージンシファイアの持つ増倍機能（数千～1万倍）を用いた微弱光計測能力を CPV に導入したシステム (I-CPV; Image-intensified coupled column parallel vision system) の開発も行っている¹³⁾。本システムを用いたフォトンカウンティングの実験を行った結果、図のように、1kHz で画像を取り込み、各輝点の重心演算をリアルタイムに実行し、その積分を行なうことで、フォトンカウンティング画像が得られることを確認した。

この他にも、機能を専用化することで小型化を実現し、ロボットアームなどの目として利用できるモジュール開発なども進められている^{16,17)}。

以上のように、高速運動対象を捕らえリアルタイム演算機能を有するインテリジェントビジョン技術は、さまざまな画像処理産業分野においての応用が期待される。

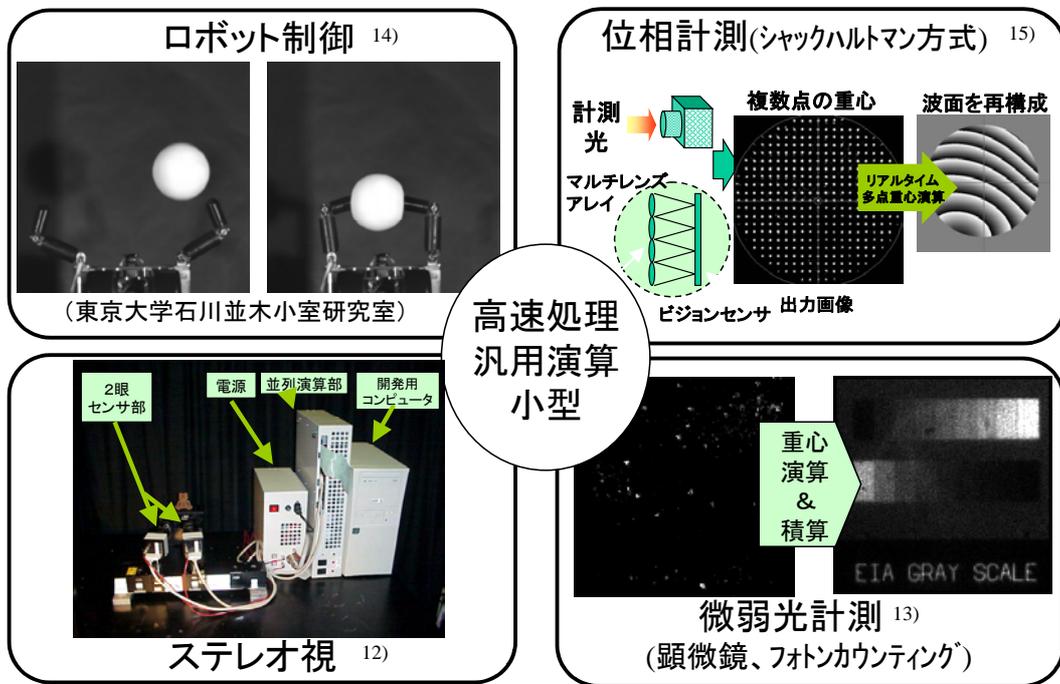


図 5.16 IVS の応用分野

5.3 空間光変調器と補償光学技術

5.3.1 はじめに

高解像度の画像計測手段として、光の波面の乱れを位相変調素子を用いて補正する補償光学技術の応用が進められている。例えば、ハワイのマウナケア山頂のすばる望遠鏡では、大気ゆらぎを計測し逆向きの位相を与える補償光学技術を採用することで、大気ゆらぎを除いたシャープな星像を得ることが可能となっている¹⁸⁾。

こうした補償光学システムは光ピックアップやレーザ加工等のビーム制御などにも応用が始まっており、外観検査技術の応用分野においても、厚みを持った透明対象物の検査や位相歪を伴う環境下でのイメージングなどにおいて重要な技術となることが予想される。キーデバイスの1つが、光の位相を2次元的に高速制御する空間光変調器 (SLM; Spatial Light Modulator) である。ここでは、液晶を用いた2種類の空間光変調器 (光アドレス

型空間光変調器、電気アドレス型空間光変調器) と、その応用として波面制御を用いた補償光学システムについて紹介する。

5.3.2 光アドレス型空間光変調器 (Optically Addressed Spatial Light Modulator)

一般的な光アドレス型液晶 SLM は図 5.17 に示される層構造を持ち、書込み光の強度に応じて読出し光の位相を変調する機能を持つ¹⁹⁾。図のように両側のガラス基板の内側に透明電極が施され、その間に光アドレス材料の α -Si 層、ミラー層、光変調材料の液晶層が挟持された構成である。書込み光により α -Si 層の抵抗率が変化し、液晶層に印加される電圧に空間的な分布を持たせることができる。これにより、液晶層の屈折率が変調され、読出し光の位相分布を 2 次元変調することができる。図 5.18 に外観図を示す。電極構造を持たないため、原理的に 100%の光利用効率を持ち、 2π を越える純粋な位相変調が行えるため、高い回折効率が実現されている。

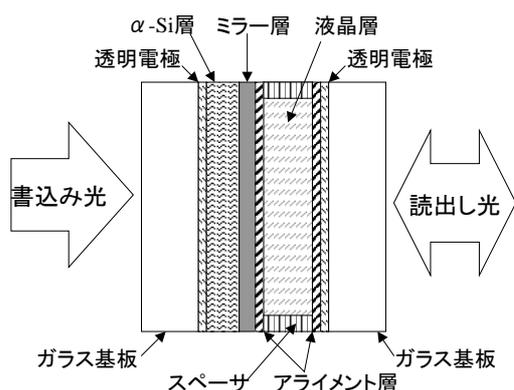


図 5.17 光アドレス型 SLM の構造

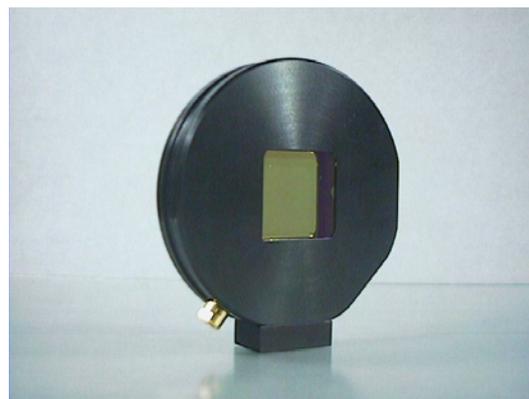


図 5.18 PAL-SLM の外観

5.3.3 電気アドレス型空間光変調器 (Electrically Addressed Spatial Light Modulator)

コンピュータからの信号により読出し光の位相変調を行うデバイスが電気アドレス型空間光変調器である。電気アドレス型空間光変調器の 1 例として PPM (Programmable Phase Modulator)¹⁹⁾を紹介する。構成は図 5.19 に示すように、コンピュータからの信号を表示する液晶パネルを半導体レーザで読出し、光アドレス型 SLM に結像する構成を持つ。図 5.20 に PPM の外観を示す。また、図 5.21 に本デバイスの入出力特性を示す。0~ 2π 以上の範囲で線形性よくレーザ光の 2 次元位相分布をコンピュータから制御することが可能となった。コンピュータから CGH (Computer generated hologram) を表示した場合

の出力例を図 5.22 に示す。入射レーザ光の位相を 2 次的に変調することにより、光量のロス無く任意のレーザパターンを照射することが可能となる。

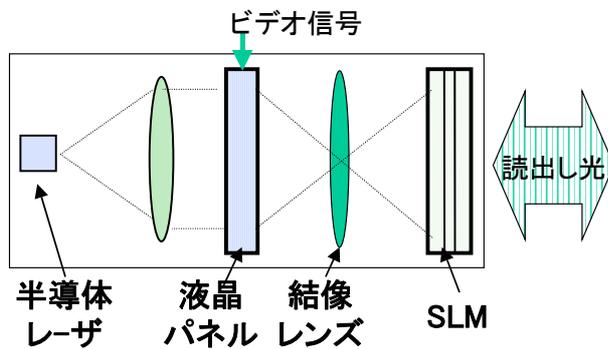


図 5.19 PPM の構成



図 5.20 PPM の外観図

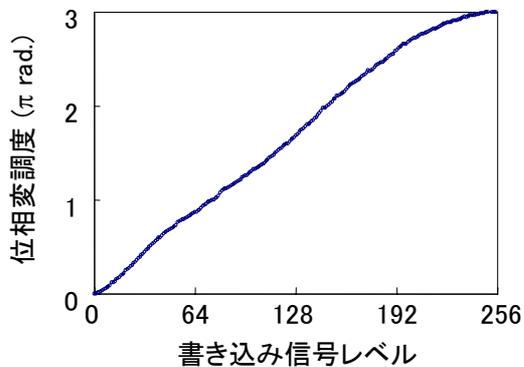


図 5.21 PPM の入出力特性

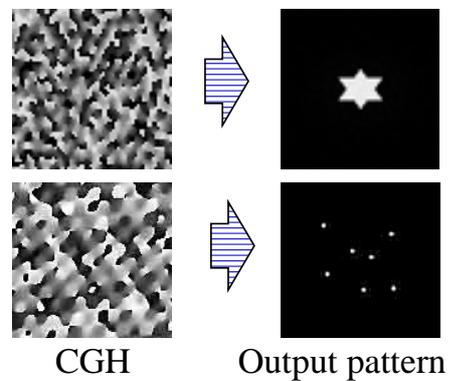


図 5.22 CGH を表示した場合の出力

5.3.4 空間光変調器を用いた補償光学システム

空間光変調器を用いた補償光学技術の応用として、波面制御システムによる高解像度計測²⁰⁾について説明する。図 5.23 に実験システムを示す。入力面からの光を PPM の光位相変調面に結像し、さらにレンズ結像で出力面に転送を行う。出力面の直前のミラーは、一部の光量が透過して波面センサに導かれ波面計測を行う。この計測された波面歪みを補正するパターンが PPM に表示され、波面補償が実行される。実験結果を図 5.24 に示す。光源のレーザ光はコリメート（平行光）されたのち歪媒体を通して位相歪を持たせた。このビームをレンズで集光し画像を CCD カメラでモニタした。波面補償の OFF 状態では、図 5.24（左）のように、結像レンズによって 1 点に絞ることができず、ビームが広がって観測されている。このビームを波面制御システムにより補正すると図 5.24（中央）のように、1 点に絞ることが可能となる。また、その場合の位相補償パターンを図 5.24（右）に

示す。つまり、光路中で生じた波面歪を本システムより除去し、高精細な画像を得ることが可能になる。

こうした波面制御技術は、フェムト秒レーザ加工技術、光ピンセット、顕微鏡、検眼鏡、光メモリーなど、幅広い応用が期待されている²¹⁾。

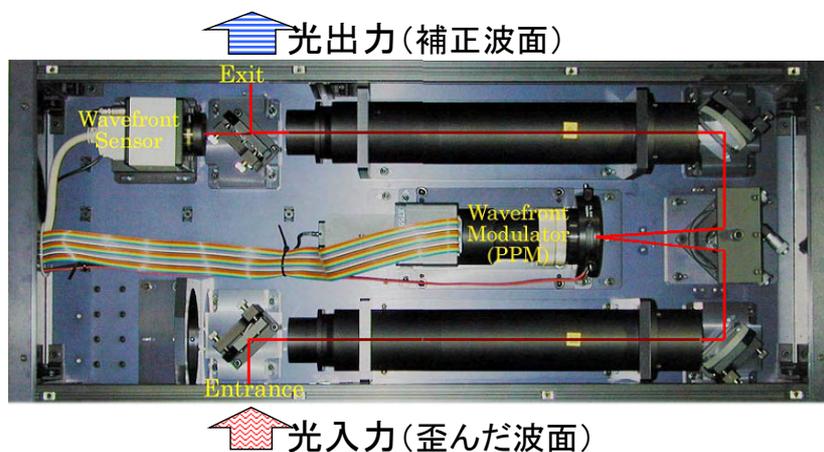
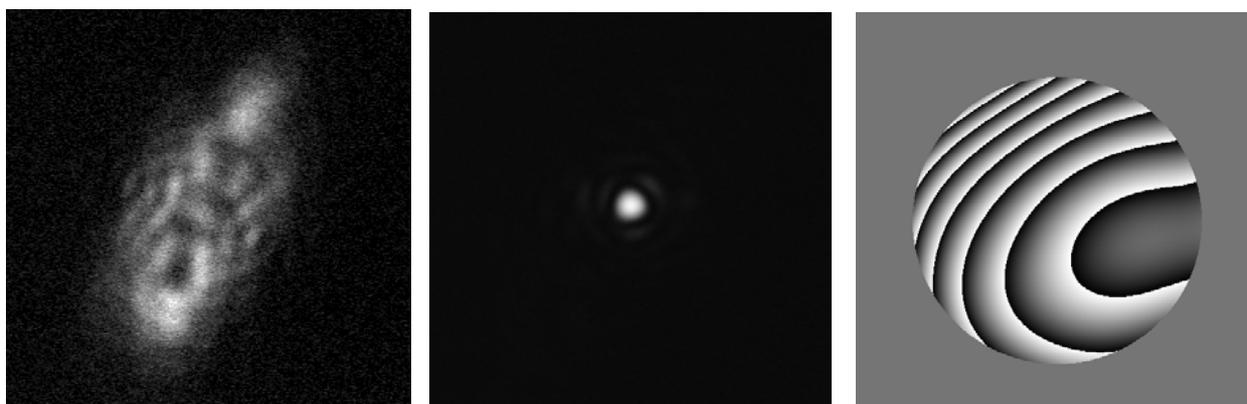


図 5.23 実験光学系



(a)補正前の出力画像

(b)補正後の出力画像

(c)補正に用いた位相画像

図 5.24 波面補償の実験結果

参考文献

- 1) IMPACTRON 技術資料 (TI 社), <http://www.tij.co.jp/jsc/docs/disp/index.htm>
- 2) ImagEM 技術資料 (浜松ホトニクス), <http://www.hpk.co.jp/>
- 3) C9100 技術資料 (浜松ホトニクス), <http://www.hpk.co.jp/>
- 4) C10000 技術資料 (浜松ホトニクス), <http://www.hpk.co.jp/>
- 5) S9132 技術資料 (浜松ホトニクス), <http://www.hpk.co.jp/>

- 6) 松井克宜他, 第 10 回画像センシングシンポジウム講演論文集, D-2, pp241-246 (2004)
- 7) 石川正俊, 日本ロボット学会誌, 13, 306 (1995)
- 8) 石川正俊, 応用物理, 67, 1, 33 (1998)
- 9) 小室孝他, 信学論(D-1), J81-D-1, 70 (1998)
- 10) 中坊嘉宏他, ロボット学会誌, 15, 417 (1997)
- 11) 豊田晴義他, 第 6 回画像センシングシンポジウム, E-4, 213 (2000)
- 12) 向坂直久他, 第 8 回画像センシングシンポジウム, B-29, 173 (2002)
- 13) 豊田晴義他, 高速度撮影とフォトニクスに関する総合シンポジウム 2001, 5-1, 89 (2001)
- 14) 東京大学石川並木小室研究室 HP, <http://www.k2.t.u-tokyo.ac.jp/index-j.html>
- 15) 豊田晴義他, OpticsJapan2002, 4pC2, 384(2002)
- 16) 宅見宗則他, 第 8 回画像センシングシンポジウム, I-2, 569(2002)
- 17) 松井克宜他, 信学技報, ICD2002-91,65(2002)
- 18) 国立天文台, http://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2005/07/06/j_index.html
- 19) X8267 技術資料 (浜松ホトニクス), <http://www.hpk.co.jp/>
- 20) H. Huang, et.al, Proc. SPIE Vol.5639, 129(2004)
- 21) 原, “液晶空間光変調素子の最近の展開”, 光学, 2007.3 月号掲載予定(2007)

6 ニューロ視覚センサによる先端的超汎用外観検査システム

6.1 はじめに

外観検査は従来目視により行われてきた。この機能を代替してゆこうとして、いくつかのアプローチがなされてきている。しかし、確実に目視代替できるシステムは従来のシステムでは構築できないことが最近になってわかってきた。

これは大量に生産されるフラットパネルディスプレイ関連の検査や半導体関連の検査などのなかでも極めて精度の要求される分野で自動検査から目視検査へ検査のやり方が後戻りしていることでも実証されていると考えるべきであろう。

端的な例をとると目視検査では点欠点は 50 ミクロンが検知限界と言われているが 10 ミクロン幅しかない傷（線欠点）を容易に発見できる。細い髪の毛（20 ミクロン細さ）を 400～500mm 離れて見えるのに、同じ距離からは 100 ミクロンの大きさの点欠点でなければ見ることができない。これが人間の見え方である。図 6.1¹⁾には 0.1mm=100 ミクロンの点と同じ幅の線がある。視力にも拠るが点は 400～500mm 離れると見づらくなるが、同じ幅の線は 2m 以上離れても見えるのである。

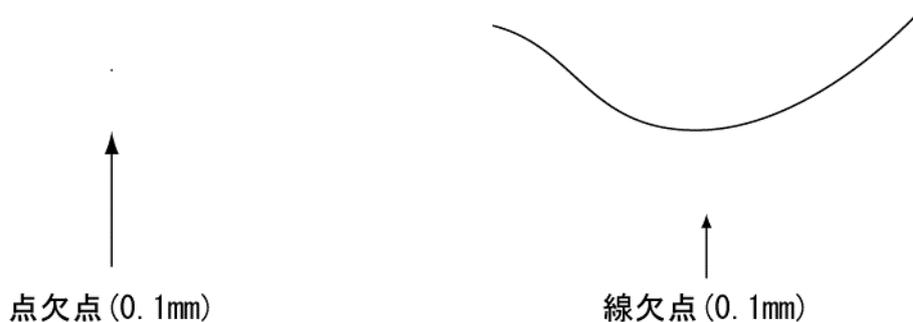


図 6.1 目視による同一幅の点と線の見え方¹⁾

しかし、従来方式の検査機では点欠点で 50 ミクロンを検知できる条件では線欠点も同じ 50 ミクロン幅なければ検知できないのである。

それでも 10 ミクロンの線欠点を検知するためには、個人差による見える大きさのバラツキや集中力などの問題を考慮に入れつつ目視の検査員を復活させるか、10 ミクロンの欠点まで検知するように検査機を通した後に 50 ミクロンまでの小さな点欠点を目視で良品として戻さなければならないことになる。10 ミクロンの線欠点まで検知するには従来の CCD カメラ方式（例として 4000 画素のラインセンサ）では原理的に 40mm 視野まで、実

用では 10mm 視野まで縮めなければ検知できないし、その場合のピント範囲は（図 6.6 参照）視野幅 50mm の場合の ± 30 ミクロン以下になることは明確である。このサイズは顕微鏡で検査せざるを得ない範疇となってしまう。

検査装置の設置理由が無くなるのは当然ともいえるであろう。何故このようなことが起きるかと言えば従来方式の検査システムが目視と同様な検出アルゴリズムを持ち得ないからである。

一方同じ 10 ミクロンの線欠点を新技術では、たった 1 台のカメラで 1200mm 視野の検査をし、その時のピント範囲が ± 180 mm もあるので既存のラインにも追加設置することが出来る。

この基本を解決せずに不確実検査しか行えない検査システムを作り続けてきたのである。我々も今にして 30 余年このようなシステムを市場に送り続けてきたことに対して忸怩たるものがある。

逆に言えば、ここで明確にこの事実が認識され、またその大きな問題を超越する技術が開発されたのであるから、これからの先端的な外観検査技術は大きく変わっていく必要があると思う。

もともと人間は外界の情報の 80% 以上を目から得ているといわれてきており、また我々が品物を購入しようとする時には、特別な場合を除いて、その外観を見てから購入することが通常行われている。外観検査の自動化において目視と同様な見え方ができるシステムが是非とも導入されていかなければならない必須の条件である。

人間の目の機能や検出アルゴリズムをもった高精度で確実な外観検査システムが求められてきたが、従来このようなコンセプトで検査機を構成することは考えられてこなかったのである。

その発生はシーズオリエンテッドでモノクロテレビカメラがあるから画像処理に使ったり、マイコンが出来たから、これを使って画像処理を行おうとするが、処理容量が少ないため照明の明度変化で検知が不安定になったりするものばかりだったと言える。

必要なのはニーズ・オリエンテッドの開発で、ユーザが望む検査をどのようにして実現してゆくのが一番重要なことである。

外観検査システムが目視検査の代替を行うことは主として製造業で製品が作られその外観を検査するのに対し、絶対的なニーズを持っていたのである。今後も目視の代替を行う先端的な外観検査には目視のアルゴリズムを持つ検査システムがさらに必須となってくるに違いないと思われる。

また、このニーズは日本だけにとどまらず世界的に人間を対象とした商取引や販売、検

査(事実上これ以外の商取引など考えられもしないが)などに応用されて行くと思われる。

我々が開発し市場投入しているシステムは前述の点と線の見え方まで目視と同じ上に、その能力は既に人間の目の 116.5 倍の微細欠陥検出精度と、目視の 14 倍以上のムラ検知性能を持つものである。

この技術は昨年、東京発明展で 50 社以上ノミネートされた中からトップの「文部科学大臣奨励賞」と「東京都ベンチャー技術大賞優秀賞」を相次いで受賞した²⁾。既に第 27 回の「新機械開発賞」のトップ賞の「中小企業長官賞」や「中小企業優秀新技術新製品賞」を 3 度も受賞している。

基本技術に関しては日本を始め世界 8 カ国で特許登録され、最新技術はアメリカ、台湾、中国で既に特許登録され、ドイツ、イギリス、フランス、スイス、オーストリアと韓国で登録が進行している。日本についても特許化されると考えられる。

本稿では従来システムの出現の歴史的な流れ、その性能を人間の目の機能をコンセプトに開発されたニューロ視覚センサで実現する原理、性能、応用分野を紹介する。

6.2 従来システムの原理と歴史的な流れ

外観検査を代替するセンサは近年市場に現れてきたものであるが、その画像読み取り原理は 19 世紀中ごろに発明されたものである。

1800 年代の初頭に電信機が発明され遠方に情報を送る手段として画期的な代物であった。電話の発明される 19 世紀末まで情報を遠方に送る手立てとして画期的な技術であったのだ。

1850 年代になってファックスの原理が発明され実用化は 1900 年代初頭になったが、写真も電送することができるようになった。

最初に実用化されたのが新聞の画像を遠方に届ける用途で、まさにこの時の方式が対象画像の各点の明度データを決められた閾値で分離して明暗の ON/OFF 信号に変換するもので、ファックスは、このデータを遠方に送信するものである。対象画像を基本的に 2 値化データとして分ける方式は、現在も市場にある従来型の外観検査システムのほとんどの画像分解方法に踏襲されている。

このために精度を上げるためには画素数を増やし、フレームレートを上げるという方法以外は手が無かった。同時に、前述したように点と線の欠点の検出具合が人間と全く異なり、そしてもっとも問題なのは確実な検査を行うことができないことにある。

現在まで使われてきている画像処理システムすべてに関して、この不確実性の問題が付

きまとっているのである。これは 150 年以上も前からの原理の問題点が精度を求めるニーズに合わなくなってきたことを示している。しかし、この問題点は原理的であるとともに根本的な問題であるので検査を目視の代替として考えた時にシステムとして使うことができない大きな問題である。

それでは外観検査市場にフォーカスして歴史を振り返ってみる。

日本における光学センサの歴史は 1959 年竹中新策氏の光電子スイッチから始まると考えられる。光の入光と遮断を 1 ビット情報として取り出すもっとも単純な形から入ってきた。

よく考えれば、画像処理技術は 1 ビット情報しか取り扱わない極めて単純なものまで振り返っても、まだまだ 50 年の歴史も刻んでいない新しい技術である。

図 6.2~6.5 に光センサの情報の拡大に関する図を示す。

この表示は縦横 X,Y に対して各点の明度を Z 軸にとったもので、明度の変化を縦方向に表示することによって 3 次元世界にいる我々に明度の微妙な変化も理解できるようになる。この表示方法は我々が 1980 年代から使ってきたもので、3 次元世界に住む我々が画像変化を解り易いように考えたもので Z 軸は実高さではなく明度の変化を表す。

6.2.1 点情報のセンサ (0 次元)

前述の光センサは一番単純な情報量 1 ビット (明暗の 2 値、1 と 0 で表現できる情報判断を行うもの) から始まった。X,Y,Z 軸の原点の明度情報の変化を明暗で捉える。現在も生産ラインで物の通過を検知したり、個数をカウントするなどの基本的な用途に使われている。

(A) 点の情報を抜うもの

	読取り画面	明度情報	情報量	例
	点	明暗 2 値化	0 次元 (点)	光電スイッチ

図 6.2 0 次元

6.2.2 線情報のセンサ（1次元）

次に情報量を増やすには点から線への拡張である。位置的な広がりを持つものがラインセンサと呼ばれるもので、アメリカのレチコン社のラインスキャンイメージセンサが数十ほどの単位の画素を集積した、まさに画期的な半導体センサであった。この拡張はX軸方向に拡張してゆき、ファックスのセンサなどにも使われ現在は数千までの単位の画素を持ったものになっている。

線への情報拡張をZ軸方向にしたものが色差計などと呼ばれるものである。通常Z軸方向はアナログ量で検知される。もちろん近年はデジタル化されているものもある。

(B) 線の情報を扱うもの

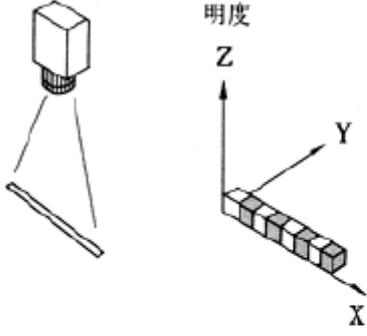
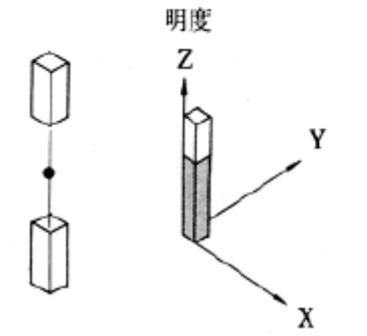
	読取り画面	明度情報	情報量	例
	線	明暗 2値化	1次元 (線)	ライセンサ
	点	明暗 アナログ量	1次元 (線)	分光分析 濃度計

図 6.3 1次元

6.2.3 面情報のセンサ（2次元）

情報はさらに拡張してゆき、線から面（2次元）になる。

いちばん簡単なものがX軸とY軸で出来る2次元平面の各点の明度を2値化したもので、従来型の画像処理に使われるもので、従来タイプのテレビカメラを使用したものがこれに

相当する。

もうひとつ X 軸と Z 軸による 2 次元情報を評価するもので分光計などに使われるものである。

(c) 面の情報を扱うもの

	読取り画面	明度情報	情報量	例
	面	明暗 2値化	2次元 (面)	テレビカメラ 方式
	線	明暗 多値化	2次元 (面)	明度分布検出 オンライン分 光分析 テクノス 5000K

図 6.4 2次元

6.2.4 立体情報のセンサ (3次元)

ついに面から立体へと情報量が拡張する。

テレビカメラのように X と Y 軸で出来る面の各点の明度情報をそのまま Z 軸にとって対象画像を取り込む方法である。このタイプでは 2 次元と比較して 3 次元化することによって情報量が飛躍的に増大するので、ただ次元を上げるだけでは処理時間が掛かったりして実時間処理を行うことが出来なくなるなど大きな問題が発生する。これを乗り越えられずに照明の工夫や撮像条件の厳格化により外観検査を行おうとして正確な検査が出来ず、問題解決の出来ていないのが従来型の画像処理システムと呼ばれる範疇のものであると断言してもよいだろう。

これに加えて前述の分光計の原理の X 軸の各点の明度情報を Z 軸に取り、そのデータを Y 軸方向に拡張する方式が考えられる。

この方式はテクノスが国家プロジェクト³⁾のウラン濃縮でウランの濃縮具合の判断に使ったもので、Y軸は時間軸に取る。もちろん対象物を定速で走行させれば長さ軸としてもよい。前述したように取り扱い情報量が膨大になるので情報を受け取って即刻処理するリアルタイム処理プロセッサを構築しなければ実時間処理を行うことは出来ない。

(D) 立体の情報を扱うもの

	読取り画面	明度情報	情報量	例
	面	明暗 多層 マルチ レイヤ	3次元 (立体)	オフライン 画像解析
	線	明暗 多値化	3次元 (立体)	リモートセン シング テクノス 5000K
	面	明暗 アナロ グ量	3次元 (立体)	テクノス 71XX

図 6.5 3次元

テクノスは微妙なアナログ信号処理をウラン濃縮用の分光分析技術から得た。また、デジタル化した信号をリアルタイム処理し毎秒 88 億回処理を行うスーパーコンピュータを独自開発し、膨大な 3 次元情報を処理するようにした。

このように 0 次元から 1 次元、1 次元から 2 次元、2 次元から 3 次元へと情報は膨大になってゆく。

実際の容量は点 (0 次元) → 線 (1 次元) → 面 (2 次元) → 立体 (3 次元) となると、1 ビット → 数十から数千ビット → 数十万から数百から千万ビット → 数千万から数十億ビットの単位に膨張される。当然のことだが 0 乗、1 乗、2 乗、3 乗と爆発的に情報量が拡大するのである。特に 2 乗から 3 乗になると通常のマイコンレベルではとても処理が追いつかなくなるため、高速なハードウェア演算器をさらに並列にして処理するようなアーキテクチャを持ったシステムを構築せざるを得なくなる。しかも、演算内容は対象画像によって変化するので、高速性と同時にフレキシビリティが要求される。

20 年ほど前、テレビカメラとマイコンを接続し画像処理を行う画像処理メーカーが雨後の筍のように出来、300 社とも 400 社とも言われた時代があった。この時のテレビカメラを使用した画像処理では、取り扱う情報量をマイコンの限界から明度を 2 値化することしか出来なくて、照明の変化に対して結果が異なることが問題となり、当時の一般的な画像処理はそれを乗り切ることが出来ずに 10 年もたたずに淘汰されていった。いずれも各画素の情報をコンパレータで 2 値化し対象物の長さの計測や面積の計測を行うものであった。これらの画像検査機器は 20 世紀末 2000 年に至っても当初開発されたままの姿であった。極端に言えば現在もこの形の踏襲が市場にある製品の代表的なものであり、対象を絞ってエンジニアリングによって対象となる処理に対してチューニングを行って結果を出しているに過ぎない。

従来型の外観検査システムのエンジニアリングは十分な精度が得られず、これを補うためには特殊な光源を使ったり、数々の制約があったりして目視代替としては不十分なもので、未だに目視精度を超えることが出来ていない (図 6.6)。

一方、従来の照明の照度の経時変化やレンズのヤケ、対象物のロットによる変化 (検査としては変化としてはいけないもの) を無視する機能を持ちながら人間の能力を超えたムラ検出能力や微細欠陥検出能力を持った新しい原理が発明された。その原理は人間の目が能力を発揮する仕組みを電子回路に置き換えたもので、原理を人間の目の機能にとっているので人間の目視機能と極めて似た性能を持ち、目視代替の外観検査に最適なものである。

図 6.6 は目視限界といわれる 50 ミクロンの点欠陥を目視、CCD ラインカメラ (4000 画素相当) テクノスの最新技術による検知の 3 方法でどの距離から検知できるのかの比較を

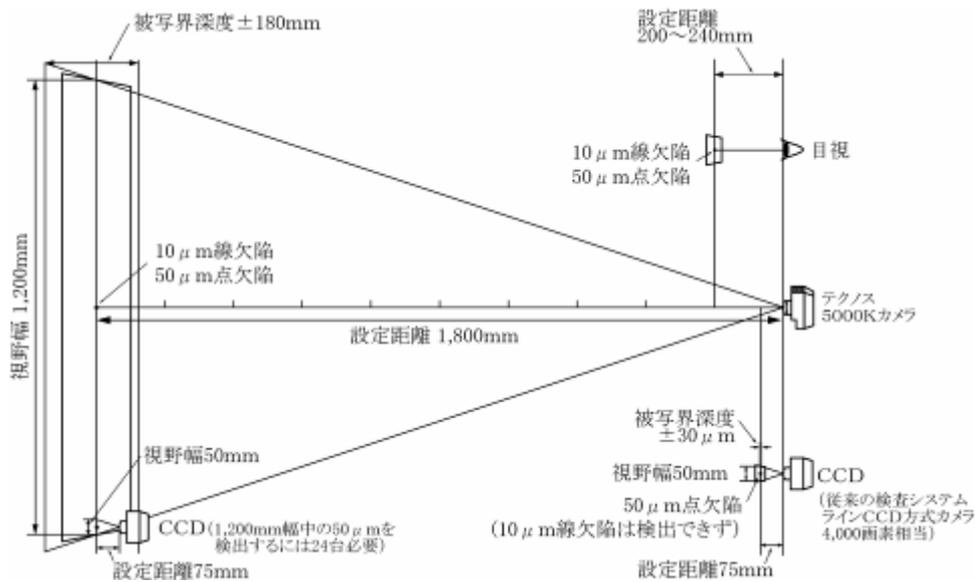


図 6.6 50 ミクロン欠陥検知時の目視、テクノス、CCD ラインカメラ 4000 画素の比較

示す^{4,5)}。もちろん検知自体は 50 ミクロン以下も可能であるが、目視と比較するために目視で見える限界である 50 ミクロンを例に挙げている。距離をさらに近づければテクノスのシステムでは 45 ナノメートルの欠陥検査、遠ざければ石油備蓄タンクの直径 82m の内壁検査までを行うことが可能である^{6,7)}。

この絵を見ても従来の CCD カメラ方式では目視で見える距離の約 1/3 の距離まで近づかなければ同じ 50 ミクロンの欠点を検知できない。事実目視の縦横 3 倍すなわち 9 倍の面積にしなければ同じ距離から検知できず、目視の 1/9 の性能しか持っていない。

これに対しテクノスの最新技術によるシステムでは目視で 200-240mm まで近づかなければ見えない 50 ミクロンの欠陥を 1800mm 離れて 1200mm 幅のどこにあって検知することができる。同じ幅を従来の CCD カメラ方式で検知するには 24 台ものカメラを並列に並べるしかない。線欠点の場合であれば 120 台もの CCD カメラを並列に並べる必要があるし、しかも点欠点は見直す必要がある。

しかも目視とテクノスは 10 ミクロンの線欠陥を同じ距離から検知できるのにも関わらず CCD カメラ方式ではそれが出来ない。同じ距離からの線欠点は同じ 50 ミクロン幅が必須なのである。

またピントの比較では CCD カメラでは、たったの±30 ミクロン=±0.03mm の範囲しかピントが合わずこれ以上ワークの振動や表面位置変化があればピントがぼけて検査できない。これに対し同じ欠陥を検知するのにテクノスのものでは±180mm すなわち 6000 倍ものピント範囲（被写界深度）をもっている。

図 6.7 に人間の視力との比較を示す。視力検査を行う時には 5m 離れて 1.5mm 角を見分けることができると視力 1.0 であると言われている、この距離からテクノスの最新技術で検知すると 138 ミクロン角の変化を検知できる性能をもっている⁸⁾。

1.5mm は 1500 ミクロンであるから 150 ミクロン角は 1500 ミクロン角の縦横 1/10 すなわち 1/100 の面積で、それよりもさらに小さな 138 ミクロン角の検知を行える。これは目視の 116.5 倍の性能に相当する。CCD ラインカメラ方式 (4000 画素) と目視は前述したように目視が 9 倍の性能を持っているので、テクノスの新技術による検知能力は CCD ラインカメラ方式の 1000 倍以上の性能を持っていることになる。

エリアカメラ方式では最近のものであっても 1 スキャンの画素数は 1080~1600 程度でこの図に示した 4000 画素のラインカメラに比較してもさらに精度が下がる。

現在も市場で見られる外観検査システムのコンポーネントの精度は目視の 1/9 程度しか持たず、ピントの範囲も前述したように 6000 倍もの違い (50 ミクロン検知時、図 6.6 参照) 極めて狭く、限定した使用方法でなければとても使える代物ではなかった。

この違いが技術の差である。なぜ同じ時代に存在する画像処理システムが 1000 倍を超える性能の差異があるのかといえば原理が大きく異なっているからである。

これは従来のシステムが前述したように 150 年以上も前の画像読み取り原理を踏襲し、対象物の各点の明度を白黒情報として判断を行っているだけで世紀末を越えても原理的には新しいものが出現していなかったからである。

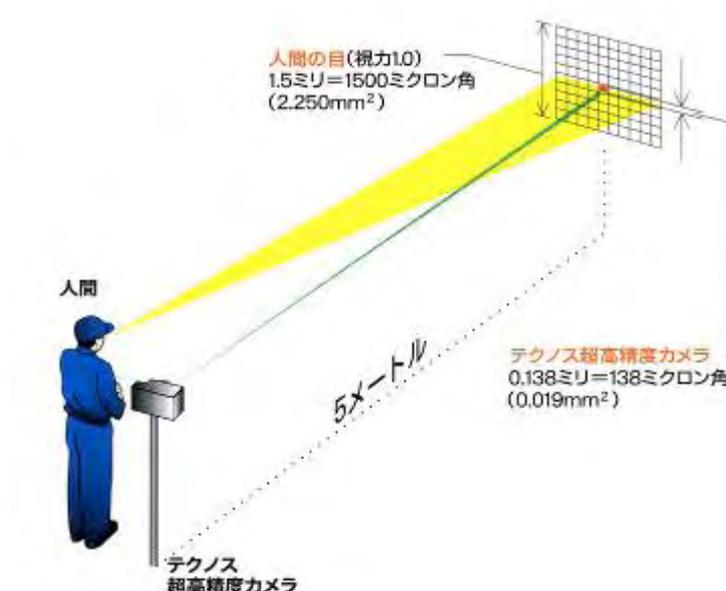


図 6.7 目視 116.5 倍精度

テクノスは従来の原理と全く異なるアプローチで外観検査システムを構築し、従来のシステムの 1000 倍以上の飛躍的な性能を持つ原理を開発し、世界特許化するとともに、システムを市場投入してきている。

この技術の違いは人間の目に機能に着目し、その細胞構築の電子化や、眼筋の動きを電子回路化するといった、従来のアプローチとは全く異なる原理によって高精度化を達成する手法をとっているからであろう。

この性能によって応用分野も大きく広がってきている。

6.3 人間の目の機能実現のバックグラウンド

簡単に人間の目の原理といってもいろいろな機能が統合されて人間の目の機能が実現されており、我々はこの中から電子回路化できるものを選択して実現してきた。

この技術の元は豊橋科学技術大学で開かれた生体工学シンポジュームのレセプションで脳のニューロ（神経細胞）の専門家であるの臼井教授から目のニューロの専門家である富山大学の八木教授をご紹介いただいたことに遡る。

生体に関して全く素人が網膜の枚数を八木先生に尋ね、先生から目の中のセンサである光受容細胞が後ろを向いてついていることを学んだ。その後、先生が専門雑誌や学会発表された資料を大量に送ってくださり、学会で東京に出られた時にお目にかかったりしてご指導を受けた。

それまでは、カメラとマイコンだけは標準で用意し、お客様のニーズに合わせて画像処理部分の作りこみを行っていた。現在でも一部で行われている手法である。

作り込みにはお客様の欠陥ワークをお預かりし、画像データを当時 50MB 容量のハードディスクが 50 万円の時代に、読み取った画像データを直接ハードディスクに書き込めるほどの低速でワークを動かし、画像データを読み取り、ハードディスク上に記録して行く。ハードディスク上のデータに対して自ら開発したマシン語レベルのシミュレータを夜中中働かせてロジック検証し、その結果をハードウェアプロセッサに落とし込むという現在では信じられないほどの手間と時間をかけてシステムを製作していた。しかし、ハードウェアプロセッサ方式は製作してしまえば極めて高速動作をするし、確実な動きをするため極めてユーザの評判も良いものの製作期間は半年から 10 ヶ月も掛かるものであった。段々ハードウェアプロセッサに関する評価が高まると受注が増え、一方製作期間は短く出来ないため、とうとう受注を断らざるを得ない事態が発生してしまった。これを、何とか解決できる手段を探しているうちに人間の目の汎用性に着目し、これが生体工学シンポジュー

ムへの参加に結びつき、現在のシステムに続いている。

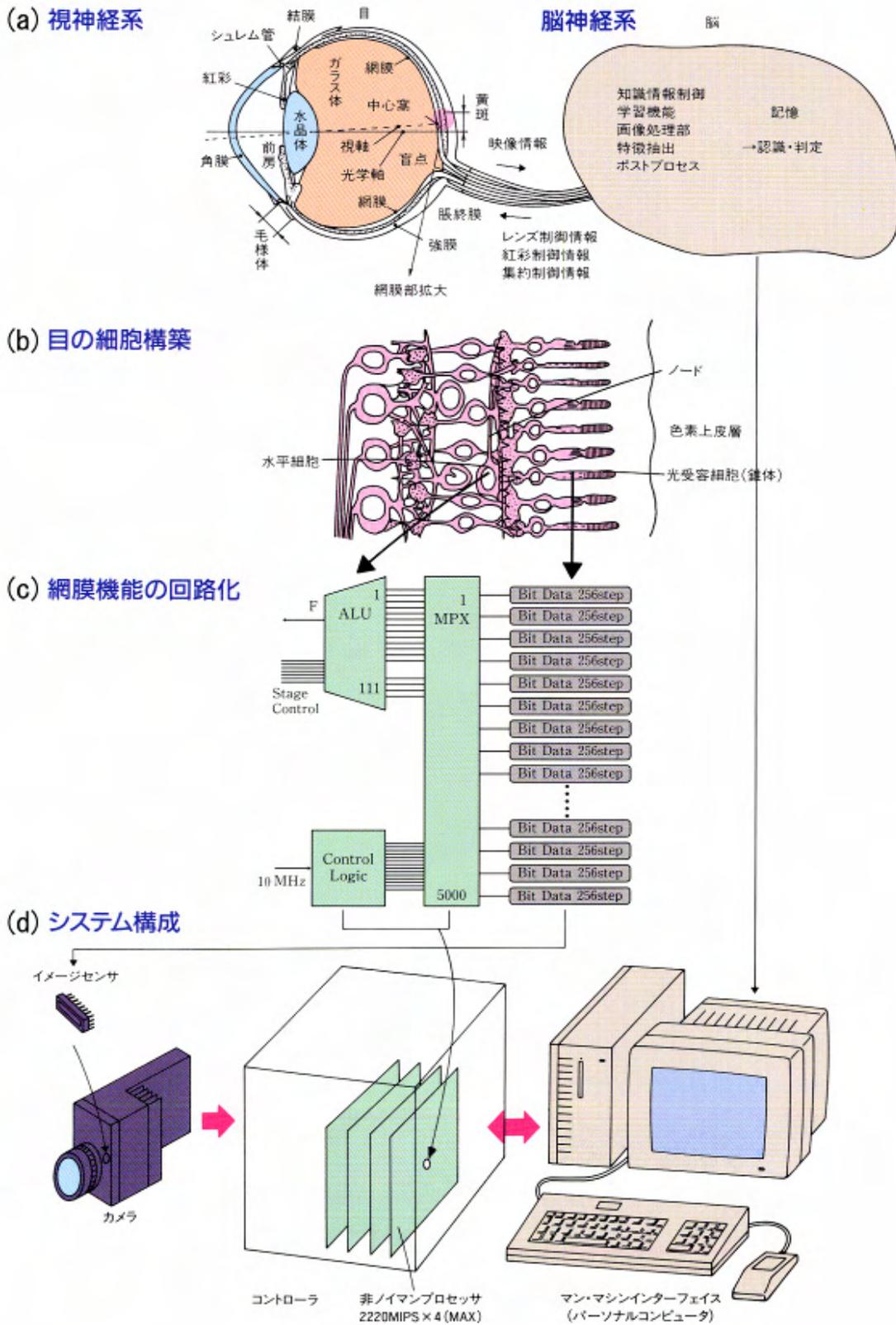


図 6.8 人間の視覚系の構成と電子回路化⁹⁾

6.4 目視 36 倍精度の原理

ニューロ視覚センサの名称の元となったのは人間の目の網膜上にある神経細胞（ニューロン）のうち水平細胞の機能を電子回路化したものである。図 6.8 の(a)は人間の視覚系の構成である。人間の受け取る情報の 80%以上が目からと言われており、従来考えられてきたのが目はカメラの代わりで、脳で情報の処理を行っていると考えられてきた。しかし、人間が微妙な色ムラを検知したりする機能は人間の目の中の細胞の機能によるものであった。

人間が判定できるムラの明度差は $1/1500 \sim 1/2000$ と言われている。しかし網膜上の光受容細胞一個一個の感知できる明度精度はたった $1/20$ までで、しかも各細胞の明度検知バラツキは 5%もあると言われている。

どう考えてもたった 20 段階しか検知できず、5%のバラツキを持つセンサで微妙な色ムラを検知できるわけがない。画像処理に使われるセンサの性能といえはバラツキ 3%程度であるので人間の目の細胞のバラツキよりずいぶん少ない、しかし明度を如何に細かく変換（DA 変換器などで）してもこの 3%のバラツキを超えることは出来ない。8 ビットの DA 変換器では確かに入力される明度データを 256 段階に分けてはいるがバラツキの 3%を超えることが出来ない。すなわち 3%は $3/100$ であるから $1/33.3$ 以上に細かく DA 変換しても意味がない。256 段階に変換しても 3%の呪縛に縛られ $7/256$ までの変化はバラツキとして残ってしまい精度を上げることができない。増してや 8 ビットより 10 ビット、10 ビットより 12 ビットと AD 変換器のビット数を上げてても $1/33.3$ 以上に細かく検知することは出来ない。これを考えずに AD 変換器のビット数を上げてきたことはカタログスペックを上げただけで検出精度を上げるには何の意味もない。

しかし、人間の目の場合はたった 20 段階の精度しか持たない細胞の明度精度を使って 2000 段階もの微妙な明度の検知を行っているのである。バラツキを超える細胞構成を電子回路化することによって画像処理の精度を飛躍的に上げることが出来るのである。

図 6.8 の(b)は目の網膜の拡大で細胞構築を示す。網膜は透明であるようで、光は左方から入ってきて網膜を透過し、一番右の色素上皮層（人間の体）に当たって跳ね返り後ろ向き（図の右方向）についている光受容細胞に入って検知される。光受容細胞のうち中心部には高精度の錐体と呼ばれる先端部が円錐状になっている細胞が 600~700 万個あると言われている。

網膜は体の外側（左側）についているので、爪と同じで体の表にあり、爪と同じように剥れることがある。網膜はく離は右側の体に当たって跳ね返った光が剥れて遠くになった

光受容細胞に光を十分に入れられないために良く見えなくなるのである。

光受容細胞の左となり、すなわち目のレンズ（水晶体）側に検知情報は流れ、ここにリンクしているのが水平細胞（ニューロン）である。水平細胞には樹状突起と呼ばれるノードがあり周辺の 60~80 個の光受容細胞のデータを集めていると言われている。しかも、いつもこれだけ集めているのではなくドーパミンと呼ばれる化学物質によって集める数をコントロールすることができると言われている。

人間の細胞一個一個それぞれは極めて単純な機能を持っていると考えられ、水平細胞も単純に周辺の細胞のデータを集約していると考えられる。しかしこの機能こそが前述したバラツキを乗り越えることのできる根本となっている。

例えば外界から目の断面図で言えば左方から明度 20.00 の明度が与えられた場合、細胞構築図でこの光は色素上皮層で跳ね返り光受容細胞に達し光受容細胞を刺激する。各細胞は 5%のバラツキを持っているが 20 段階の明度しか判別できないので各々の光受容細胞からの出力は 20 が出てくる。光受容細胞に隣接している水平細胞が 80 個の光受容細胞のデータを集めるとすると $20 \times 80 = 1600$ の出力が得られる。次に左方から与える明度を 19.99 にすると、光受容細胞の出力は 20 の下は 19 であり、まだ 19 に近づいていないので殆どの細胞は 20 を出力している。しかし 80 個もの光受容細胞の中には気の早いのがいるので少し明度が落ちたことにより 1 個の気の早い細胞が 19 の出力を出したのであれば、80 個のうち 1 個が 19、他の 79 個が 20 となり $19 \times 1 + 20 \times 79 = 1599$ の出力を得ることになる。さらに与えられる明度が 19.50 まで下がると 80 個の光受容細胞のうち半数の 40 個が 20 の出力を出し、残りの 40 個が 19 の出力を出すようになる。

このように光受容細胞 1 個 1 個のスイッチする明度レベルが均一にばらついていればいほど微妙な明度変化を検知できることになる。我々は学校教育でバラツキは悪いものであると教えられてきたが、もしもバラツキが無くて 19.50 になった途端に 80 個全部の出力が 20 から 19 に変わったのであれば微妙なムラを検知することはできない。この原理はそれぞれの光受容細胞の明度精度のバラツキを味方にして精度を上げる方法を取っているのである。この原理により 8 ビット分解の 256 明度の分離が確実に行えるようになるのである。

極めてシンプルでありながらバラツキを見方にした人間の目の原理を電子回路化することにより図 6.8 の(c)のように対応することが出来る。光受容細胞に見立てたカメラ内のセンサー一個一個のデータ（図の左端）明度を 8 ビットで分解し 256 段階の明度を検知できるようにしたもの、を水平細胞に見立てた演算器（ALU）で最大 111 まで演算する。人間の場合前述の場合 20 明度 \times 80 水平細胞積算で 1600 段階まで検知、一般的には 1500~2000

段階と言われているが、電子回路化した時には 256 明度×111 積算演算で 28416 段階の明度が分解検知できる。前述の人間の場合 2000 段階程度までは検知できると言われているので、その場合でも人間の 14 倍以上の精度で色ムラを検知することが可能である。

このように人間の細胞はそれぞれが極めて単純な機能しか持ち合わせてはいないが総合的には極めて高機能を発揮するように作られておりこの原理を画像処理のアルゴリズム¹⁰⁾として取り込むことによって今まで出来なかった色ムラなどの微妙な検知を原理から安定して行えるようになるのである。

6.5 目視 116.5 倍精度の原理

人間の眼球は 6 本の筋肉によって支えられている。眼球と言われる様に球形をしているものを動かすには 3 本の筋肉の動きで十分である。人間の場合は 3 本が随意筋で、自分の意思で目を勝手な方向に向けることが出来るようになっている。

6 本のうち、あとの 3 本は不随意筋で心臓の動きと同じで勝手に動くのである。この動きを固視微動と呼び、この働きが失われると視力 1.0 の人が 0.1 の視力に落ちるといわれている極めて重要な動きである。

固視微動にはフリック・ドリフト・トレモアの 3 種類の動きがあるといわれている。

それぞれの動きは

- ① フリック：0.2～3 秒間隔で左右の目が同時に動いて戻る運動を繰り返している
- ② ドリフト：いつも動いて光軸合わせを行う
- ③ トレモア：毎秒 70～90 回縦振動を繰り返す

フリックはピント合わせ、ドリフトは左右の目線を合わせて立体視が確実に出来るように、トレモアは我々のカメラで実測してみると前から見て、黒目の位置ズレは約 5 ミクロンであり確かに毎秒 70～90 回上下に震動している。前から見える水晶体が上に 5 ミクロン動けば同時に裏面の網膜側では下に 5 ミクロン動くことになり、前後で 10 ミクロン分上下することになる。網膜の細胞の大きさが 3～7 ミクロンと言われているのでこの寸法以上にしかも人間の認識できる速さ（1/20 秒）の 4 倍（1/80 秒）で動かして細胞の狭間に写って見えなくなるのを防いでいると考えられる。

この働きを人間の目が行っているので次項の確実な検査が行えるようになり、CCD カメラ方式ではこれを行っていないので設定した大きさの 4 倍近い大きさの見逃しが発生し、全てを検知しようとする欠陥検知目標の 1/4 の大きさの微細な、目視では良品にしていた変化までも不良として判別してしまい歩留まりを大きく落とすことになる。これは目視

では固視微動により同じものは同じに見えることを使って目視検査を行っていることと大きく異なり従来の CCD カメラシステムでは同じレベルで検査を行えないことを意味する¹¹⁾。

6.6 確実性（不確実性）の原理

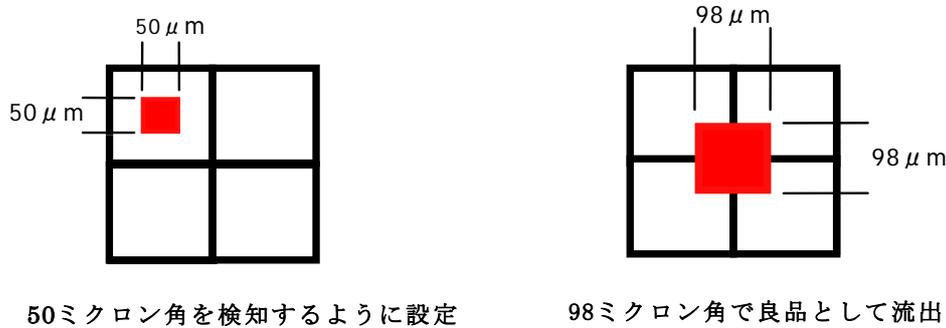


図 6.9 4 倍近くの大きさの欠陥を良品として流出する例

従来の CCD カメラ方式では図 6.9 の(左)のように仮に 50 ミクロンを検知し不良と判断するようにセットした場合にも、図 6.9 の(右)のようにほぼ 4 倍の 98 ミクロン角の欠点がある 4 画素の狭間にくれば、各画素 49 ミクロンとなって良品として判断される。目視であらかじめ設定した大きさの 4 倍近い大きさの欠点を出荷すれば大きなクレームになる可能性が極めて高い¹²⁾。

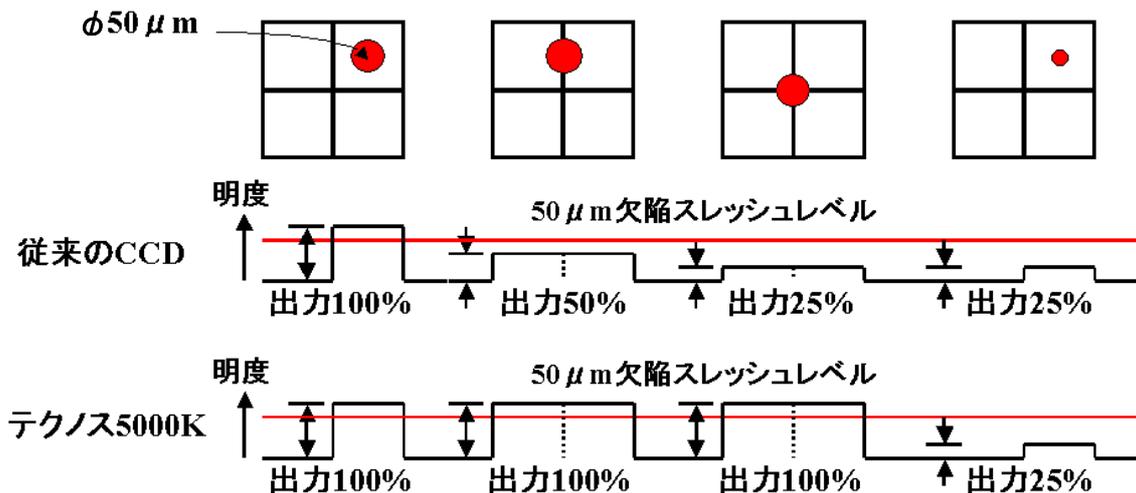


図 6.10 従来の CCD カメラ方式とテクノスの新技術の比較

図 6.10 で説明すれば、欠陥が画素の中にある場合には従来の CCD カメラ方式とテクノスの方式は同じ出力を出す、しかし、同じ欠陥が 2 画素の狭間にくると左右各画素の半分

づつしか左右それぞれの画素の画像に映らないため従来の CCD カメラ方式では出力が 50%になってしまう。現在のスレッシュレベルでは不良と判断できない。しかし同じ大きさの欠陥なので検知するためにはスレッシュレベルを 50%以下に設定しなければならない。しかし、さらに右のように 4 画素の狭間に同じ欠陥がくれば各画素には 25%の出力しか出ないので検知できない。さらにスレッシュレベルを下げても同じ欠陥がどこにあっても検知できるようにすると検知したい欠陥の 1/4 の大きさの良品レベル（良品として出荷され商品となり対価を受け取ることが出来るもの）まで不良として排出することになる。CCD カメラ方式の検査システムを導入したために起きる歩留まり低下は、カメラを導入したことにより見落としをしなくなったためではなく、積極的に設定の 4 倍近くのものまで見逃すようなロジックになっていたのである。

テクノスの新技術では各画素の出力を演算するので画素の狭間にある場合にも演算後の値は同じであり正確で確実な検査を行える。前述したように人間の場合には人間のトレモアと呼ばれる毎秒 80 回の眼球の上下震動によって見逃しをなくし確実な検査を行うことが出来る。この機能を実現するには①人間と同じようにカメラ(水晶体に対応するレンズと網膜に対応するセンサ)を振動させるか、②レンズを振動させるか③センサを振動させるか④対象物を動かすことによって実現できる。

通常ユーザは検査システムを導入するときに図 6.11 のように例として 50 ミクロン以上を不良、以下を良品として判断することを期待するが、図 6.9 のような設定であれば 100 ミクロン近い設定の 4 倍近い大きさの不良が良品として流出することは免れず、かといって図 6.10 の全ての 50 ミクロン欠点を確実に検知できるように設定すれば 50 ミクロンの 1/4 の 25 ミクロンに至る 40 ミクロン、30 ミクロンなど目視では確実に良品にしなければならない、お金になりうるものまで排出してしまうことになる。従来は検査システムの再現性であると考えられてきた内容は検出ロジックの必然性により起きていたことが明確になった。テクノスの世界特許化されると考えられるシステムでは、この確実性を持った検査が目視の 116.5 倍の微細欠陥検出精度と 14 倍以上のムラ検知性能を併せ持つて行える。しかも前述したように線欠陥と点欠陥を目視と同様な見方で検出を行え、ピント範囲も 6000 倍(50 ミクロン検知時)あるので新ラインは無論、既存ラインにも高信頼性の外観検査システム導入することが容易に出来るのである。

6.7 検査システム導入に関するユーザの期待と実際

自動外観検査システム導入のユーザは 50 ミクロンで設定すればそれ以上は不良、それ以

下は良品となり図 6.11 の OK と NG が 50 ミクロン角（目標サイズ）を境にステップ状になると期待している。しかし CCD カメラ方式導入のユーザは図 6.9 の設定では設定の 4 倍近い面積の大きな欠点も良品として流出してしまう可能性をもち¹³⁾、図 6.10 のように全ての位置で 50 ミクロンを確実に検知させるためには良品出荷しなければならない目標の 1/4 の 25 ミクロンの大きさまでの良品を不良と判断してしまう。商材となりうるものを製品に出来ない、良品を不良として日々垂れ流し、損失を重ねることになってしまう。

一方、テクノスの方式では演算を行って欠陥がどの位置でも同じ出力を得られるので 50 ミクロン（設定によっていくらかでも変更も可能）を境に OK と NG を正確に判別することが出来、確実に製品を判定することが出来るため原料を全く無駄にすることがない。

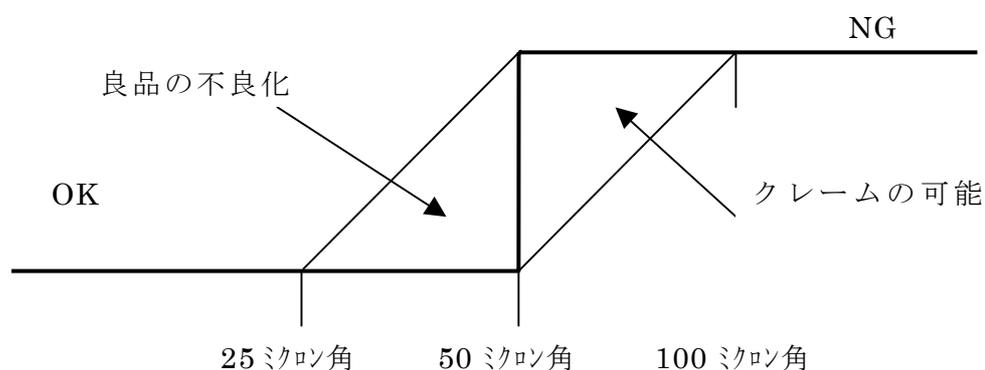


図 6.11 ユーザの期待と実態

6.8 外観検査システムの応用分野

外観検査の応用分野を図 6.12 に示す¹⁴⁾。

具体的にはラインを流れるものでは最小のものが携帯電話などに搭載される撮像チップの検査で、2~3 ミクロンピッチで並ぶ撮像チップ上のマイクロレンズアレー上の 0.09 ミクロン（90 ナノメートル）のキズの検査から、30m 長さ 6m 幅、厚さが 6mm から 200mm までのタンカーの甲板材料や橋脚素材などに使われる鉄材のコーティングの塗布ムラや異物・キズ検査までをカバーする。

近年進展が大きなフラットパネルディスプレイ関連の素材である素ガラスや偏光フィルムやカラーフィルタから製品の点灯検査まで。立体形状の自動車の車体検査からガラス、感光フィルムやコピーの感光ドラム、鉄・非鉄・プラスチック素材、真っ黒なタイヤ、鏡面のウエハなどさまざまである。ニューロ視覚センサは既に鉄鋼・自動車・半導体・フィルムなど 31 の業界のトップ企業に納入されている。

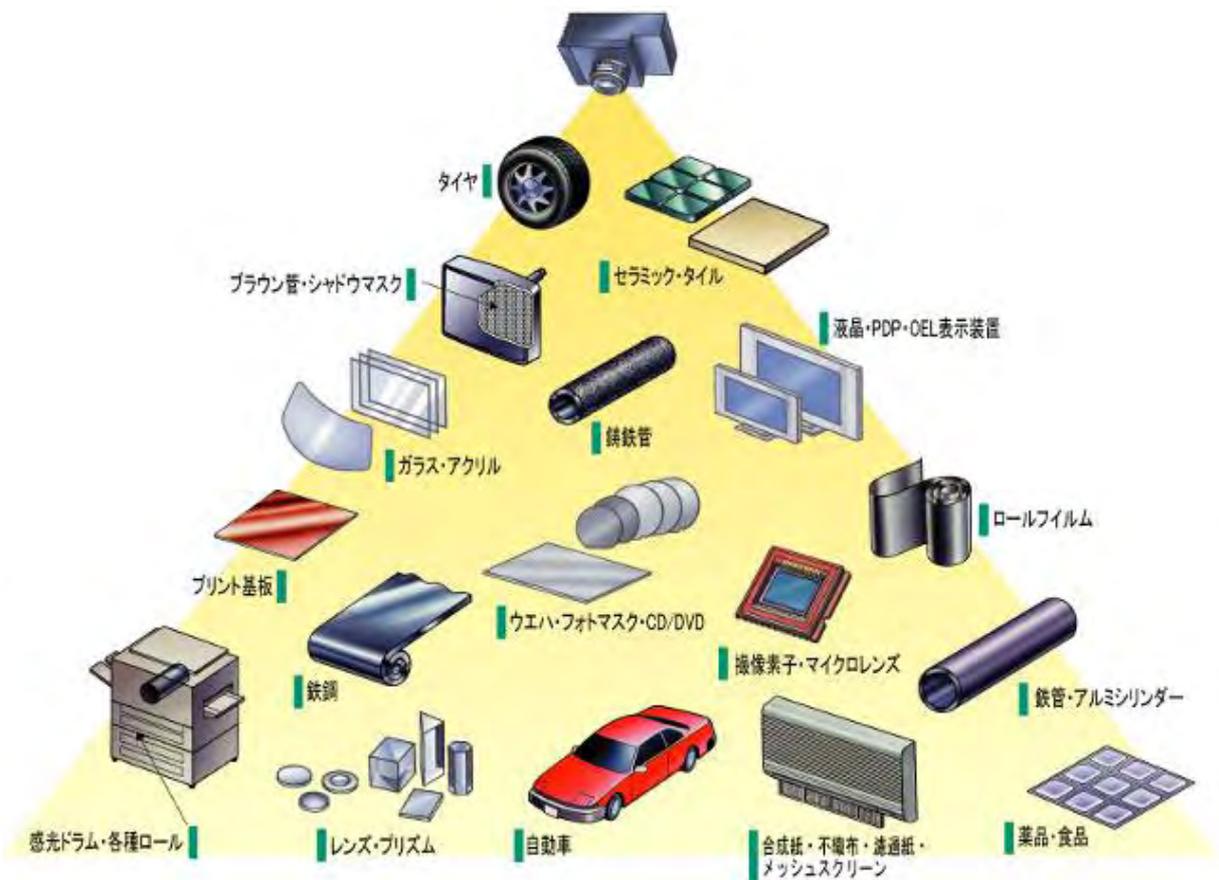


図 6.12 外観検査の応用分野¹⁴⁾

参考文献

- 1) 先端科学技術要覧 2006, pp268-269, オーム社
- 2) 最新の計測制御機器 2007, pp.44-47, 日本工業出版
- 3) 日経ナノビジネス, 2006年6月26日号, pp14-16, 日本経済新聞社
- 4) 月刊ディスプレイ, 2006年12月号, 表1, p008, pp35-43, pp120-124 テクノタイムズ社
- 5) プラスチック 2006年7月号, pp45-52, 工業調査会
- 6) メンテナンス 2006年冬, pp75-79, 技術評論社
- 7) 配管技術, 2006年9月号, pp87-91, 日本工業出版
- 8) テクノス 5000K カタログ
- 9) 目のニューロがよく解かるカタログ
- 10) O plus E 2006年2月号 pp167-173 新技術コミュニケーションズ
- 11) 計測技術, 2006年12月号, 表1, pp23-28, 日本工業出版
- 12) 計装 2006年4月号 pp83-86 工業技術社
- 13) エレクトロニクスジャーナル 2006年2月号, pp110-111 電子ジャーナル
- 14) 計装, 2007年1月号, 表2 対向, pp.73-77, 工業技術社

7 外観検査のための先端的画像処理アルゴリズム

7.1 はじめに

一般に製品の疵検査や良・不良判定などの外観検査においては、人間の目視による判断と同等あるいはそれ以上の精度の判定性能と高速な処理速度が要求される。これらを実現するためには処理対象毎に緻密に画像処理・認識アルゴリズムを設計する必要があるが、その設計は画像処理技術者の試行錯誤に依存している場合がほとんどである。近年、消費者の好みの多様化に伴って少量多品種生産が主流になりつつあり、日々増え続ける処理対象に対して、それら进行处理する画像処理アルゴリズムをいかに効率良く開発するかが外観検査においてますます重要となってきた。

画像処理アルゴリズムの生産効率を向上させるための試みとして、これまでも画像処理エキスパートシステムや汎用画像処理ライブラリの構築などの試みがなされてきたが、いずれも処理対象に依存する傾向や扱える処理対象が限定されているなどの課題があった。これらに対して近年、進化計算法などの最適化法を画像処理アルゴリズムの構築に積極的に利用する試みがなされており、その効果が注目されている。

本節では、画像処理アルゴリズムの一般的な開発プロセスとその課題、従来の効率化手法としての画像処理エキスパートシステム、汎用画像処理ライブラリについて述べた後、最適化法を取り入れた新しい画像処理の構築方法について述べる。

7.2 画像処理アルゴリズムの構築とその効率化

7.2.1 画像処理の一般的な構築プロセス

画像処理の一般的な構築プロセスは図 7.1 のように表すことができる。処理対象・目的が決まった後、関連する手法・理論・特許などの調査を経て、図中 A で示される開発プロセスに入り、仕様を決定し、実際にプログラミングを行なって基礎実験によってその性能を検証する。検証結果に基づいて随時、仕様の変更とプログラムの修正を繰り返すことで、必要とされる性能をもつ画像処理を構築する。

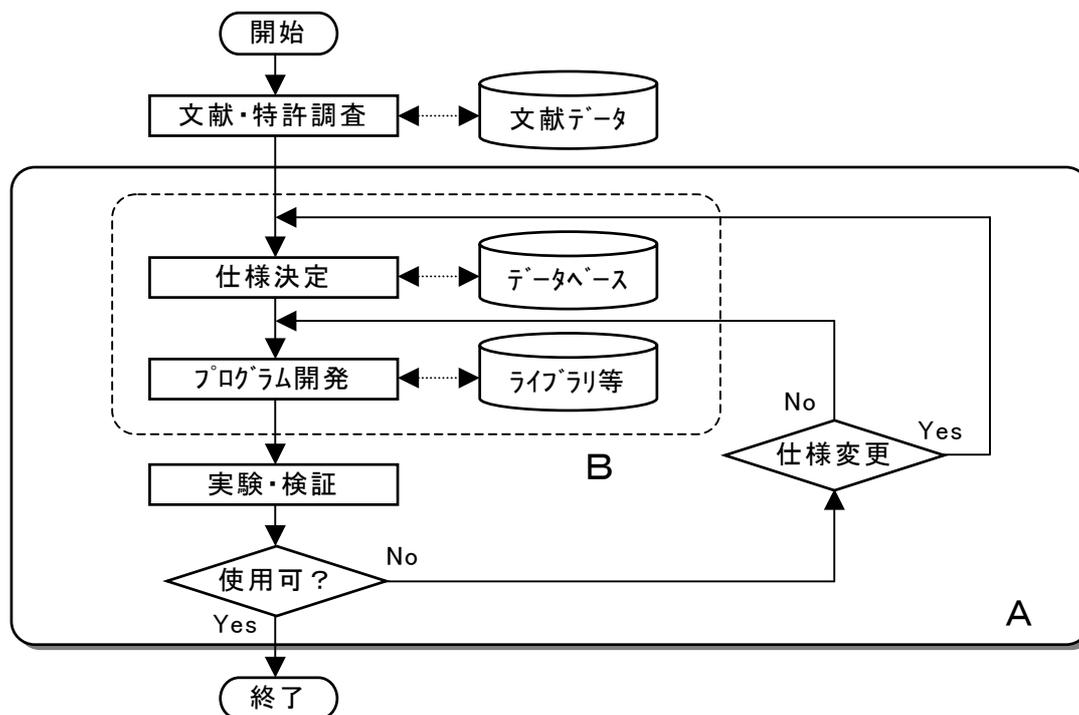


図 7.1 画像処理アルゴリズムの一般的な開発プロセス

この開発工程は一般的なソフトウェア開発の場合と同様であるが、例えば計算目的が明確な場合や詳細な仕様があらかじめ決定されている対象を扱う場合とは異なり、図中 A の部分に対して膨大な労力・時間が必要とされる上、事前に見積もれないのが画像処理の特徴である。人間は知能が高いため画像中の疵などを容易に見つけることができるが、だからと言ってそれをプログラムで実現することは容易ではない。現時点では人間の脳内情報処理の詳細が不明だからである。すなわち、現在の画像処理は次のような容易に解決することが困難な課題をもっていると言える。

- 1) 全てを統一的に論じることができる筋の通った数学理論がない。
- 2) 処理プロセスの構築には試行錯誤のための膨大な労力と時間を要する。
- 3) 処理対象が限定されており汎用性がない（場当たりのである）。
- 4) 画像処理の熟練者でなければ構築することができない職人芸的な部分がある。
- 5) 市販ソフトでは性能が十分ではない場合が多い。
- 6) 特殊な専門知識を必要とする場合（医用画像処理など）は特に大変である。

このため、画像処理をもっと効率良く開発するための研究が以前から行なわれてきている。そのような例として、従来から提案されている画像処理エキスパートシステムと汎用画像処理ライブラリについて次に紹介する。

7.2.2 画像処理エキスパートシステム

初期の人工知能分野における成功例として、エキスパートシステム¹⁾がある。これは、人間の専門家が持っている知識を、例えば『もし～なら、～である』という if～then 形式のルール（プロダクションルール）で記述・蓄積してデータベース化しておき、推論・検索処理によってそこから有益な知識を得ようとするものである。先に示した図 7.1 において、図中 B の部分を効率化したものであると言える。これまでに、このエキスパートシステムを画像処理に応用した画像処理エキスパートシステムがいくつか提案され、その有効性が示されている^{2,3)}。

画像処理エキスパートシステムでは、適用分野をある程度絞り、そこでよく用いられる処理をあらかじめライブラリ化して再利用することや、GUI（グラフィカルユーザインタフェース）を利用して画像処理の部品を画面上で組み合わせるだけで複雑な処理を構築できるようにすることで、画像処理に不慣れな人でも複雑な画像処理を構築し易くしたシステムである。しかしながら、元々のエキスパートシステムがそうであったように、画像処理エキスパートシステムも対象領域が限定されている上、有効な処理に関する事前知識がなく、画像処理プロセスを一から作り直す場合にはあまり有効であるとは言えない。

7.2.3 汎用画像処理ライブラリ

一方、誰もが手軽に利用できる汎用画像処理ライブラリを作り、情報資源として使用者が共有することで、画像処理アルゴリズム（プログラム）の構築を支援する考え方がある。我が国でも電子技術総合研究所（現産業技術総合研究所）による FORTRAN 言語による画像処理ライブラリ SPIDER⁴⁾の構築など、かなり以前から研究機関や学会、有志、企業などを中心にして画像処理ライブラリの構築が行なわれてきている。最近では、米国インテル社がオープンソースで提供しているコンピュータビジョン（computer vision）用画像処理ライブラリ OpenCV⁵⁾などが知られている。これらのライブラリは、確かにそれらを組み合わせるだけで様々な画像処理を構築することができるが、必要とされる処理を実現するために、どの関数・サブルーチン・フィルタをどのように組み合わせれば良いかは事前に分からないため、画像処理の構築に人手がかかること自身が改善されているとはいえない。

7.3 画像処理への最適化法の適用

7.3.1 画像処理における最適化の重要性

先に 7.2.1 で示した画像処理の構築プロセス及び現状の画像処理の課題から分かるように、画像処理では画像処理技術者の“試行錯誤”が大部分を占めており、目的とする処理が過去に構築した処理に類似している場合は画像処理エキスパートシステムが有効であり、汎用画像処理ライブラリの利用によって開発プロセスを短縮化することができる。一方、全く新しい処理対象については、文字通り一から構築するしかなく、膨大な時間と労力を浪費することになる。

新しい対象に対する処理を構築する場合であっても、基本的には既開発の様々な手法を組み合わせ、パラメータを調整することによって対処する場合が多い。ただしこの際、それらを組み合わせたときの適用結果をあらかじめ予想することは困難である。図 7.2 に一例を示す。同図では、同じ画像に対して共通の 3 つの基本的な処理（ γ 補正、ヒストグラム平滑化、2 値化）を適用したものであるが、上段と下段ではその適用順序が異なるために処理結果は大きく異なるものになっていることがわかる。

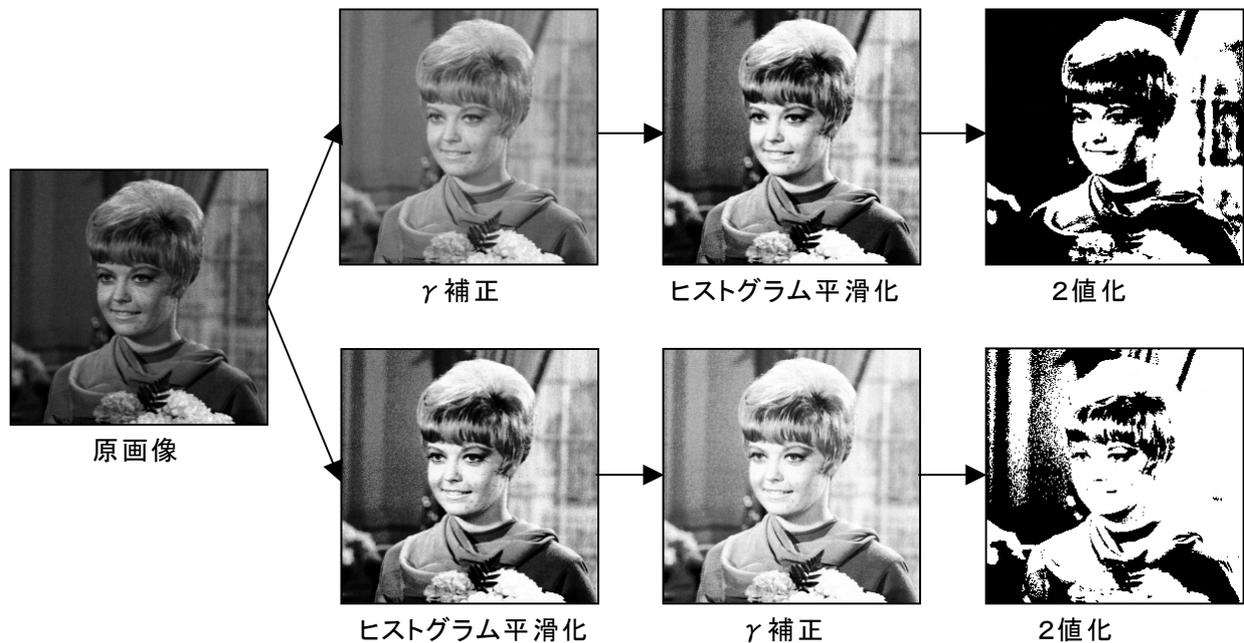


図 7.2 処理順序の違いによる処理結果

例え個々の処理内容が明確であったとしても、それらを組み合わせた結果がどうなるか

は画像処理の専門家であっても容易に想像することはできない。とりあえず対象に対して適用してみて、その結果を判断して有効であるかないかを判断しなければならない。検討すべき処理、組み合わせる処理が多ければ多いほど、組み合わせの総数は指数関数的に増大するため、人手では手に負えないものになってしまう。このため、何らかの最適化技法を画像処理構築プロセスに利用しようとする考え方が、近年高まりつつある⁶⁾。

これまでも画像処理に最適化法は頻繁に利用されてきている。例えば変形を考慮するマッチングにおける動的計画法の利用、動画像のオプティカルフローを勾配法で求める際の弛緩法の適用、動的輪郭線モデルにおけるエネルギー最小化法の利用など、枚挙にいとまがない。しかしながらこれらは“画像処理の一部に最適化法を取り入れた”だけに過ぎない。以下で紹介するのは“画像処理プロセスの構築の自動化・省力化に最適化法を使う”方法であって、前者とは考え方を異にするものである。一般に最適化問題は数値最適化問題と組み合わせ最適化問題に大別することができる（両方の性質をもつ問題も存在する）。そこで、それぞれについて7.3.2と7.3.3で述べる。

7.3.2 画像処理への最適化の適用 1 (数値最適化型)

多くの画像処理は複数の数値パラメータの値を最適化する“数値最適化問題”として定式化することができる。例として図7.3の2次元パターン位置決め問題を考える。このような処理は工場内の部品の位置決めなどにおいて必要となる処理である。

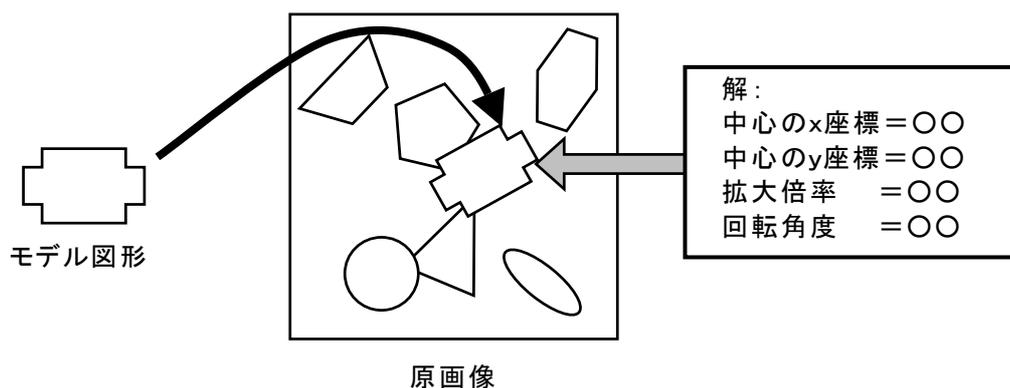


図 7.3 2次元図形の位置決め問題

このような問題を扱う場合、従来はまずモデル図形の特徴的な部分を探し（この場合は直角の角点など）、その特徴を原画像から抽出して候補領域を出した上でマッチング処理を施して最終決定、というようにアルゴリズムを考案する必要があった。しかし一般にその

ようなアルゴリズムは対象となる図形や画像に依存する傾向が強く、図形や画像が変わった場合にはアルゴリズムの修正が必要となる場合が多い。これに対して、ここでの問題は対象図形の原画像におけるパラメータ（中心の x 、 y 座標、拡大倍率、回転角度）を決定する（＝最適化する）問題であると考えられる。従来はこのような方法は計算負荷が大き過ぎる、という理由だけで考慮されることはなかった。一方、近年、計算機や処理ボードの処理能力が向上するとともに、最適化法として進化計算法（Evolutionary Computation）⁷⁾ などの有効な方法論が発展してきている。このため、上記のパラメータを実用時間内に直接求めることができるようになった。

進化計算法とは、生物進化から着想された最適化法群のことである。図 7.4 にその概念を示す。進化計算法では始めに与えられた問題の解をランダムに生成して初期個体群とみなす。続いて各世代の相対的に劣った個体を淘汰し、生き残った個体を組み合わせることで少し異なる子孫の個体を作る世代交代を繰り返し実行することによって実用解を自然発生的に求める。これまでに様々な問題に対する有効性が確認されている。

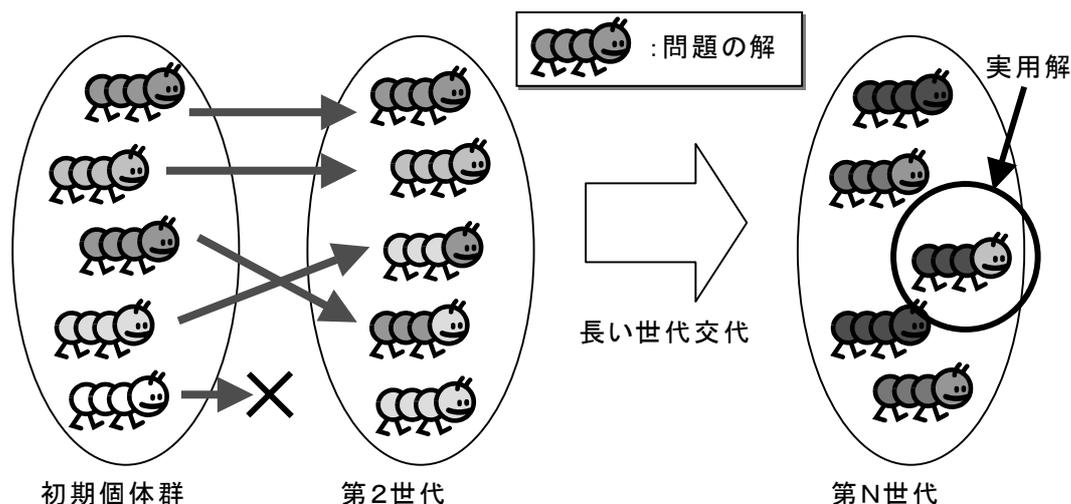


図 7.4 進化計算法の原理

図 7.3 に示した問題の場合は、進化計算法の一種としてよく知られている遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm ; GA）が有効である。この場合の問題の解（個体）は未知数である 4 つのパラメータを表すビット列を並べたものであり、その評価値（適応度）はそれら 4 つのパラメータを用いて図形を変換して原画像に重ねたときのマッチング率と定義すれば良い。これによって特定のアルゴリズムを開発することなく、処理を実現することができる。この方法は図形や原画像に依らない頑健な手法であり、同様の考え方で 3 次元物体の位置決めなども行うことができる。

例として、モノクロ階調画像中の顔領域を同様な手法で決定した例を図 7.5 に示す。なおこの例では、図 7.3 のパラメータに、マッチングに用いる顔のテンプレートの番号を加えた合計 5 個のパラメータ最適化問題として定式化している。



図 7.5 数値最適化型画像処理の例（顔領域の抽出）

7.3.3 画像処理への最適化の適用 2（組み合わせ最適化型）

一方、画像処理の多くの問題は“組み合わせ最適化型”として定式化することができる。例えば、原画像にエッジ強調、平滑化、反転などのいわゆる画像処理フィルタを順次適用することで、必要な画像に変換する場合を考える。この場合は図 7.6 のように考えることによって進化計算法による最適化が可能になる。すなわち、あらかじめ原画像に対して手動で作った理想的な画像を目標画像として用意する。そして、原画像に何番のフィルタをどのような順序で適用すれば、最も目標画像に近い画像を得ることができるかを見出す最適化問題であると考え、フィルタの適用順序を最適化する。この場合のフィルタの組み合わせは 1 次元の数字列であり、7.3.2 で述べた遺伝的アルゴリズムを適用することができる。これによって、学習用画像セット（原画像と目標画像の組）を計算機に入力するだけで、必要な画像処理フィルタ列を自動的に得ることができ、人手で様々な組み合わせを試す試行錯誤を行なう必要がないため、大幅な省力化が可能になる。

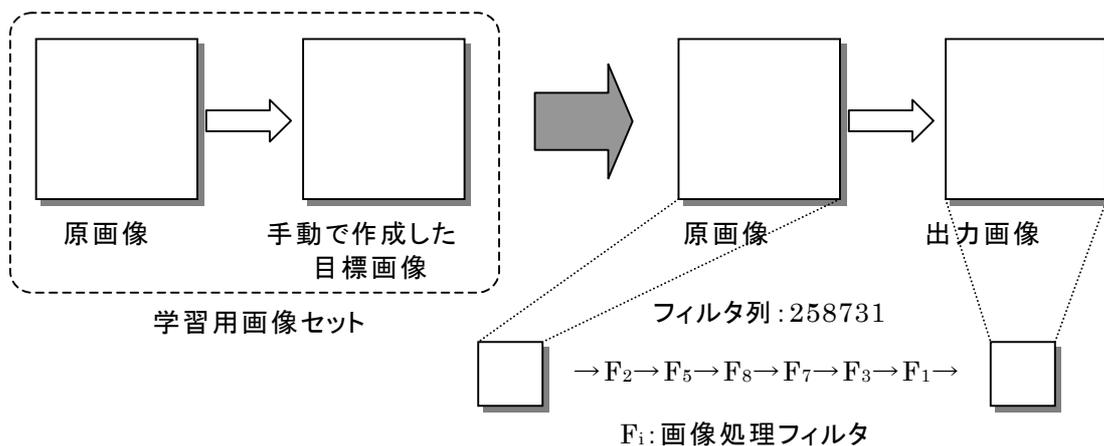


図 7.6 画像処理フィルタ適用順序の最適化の原理

一般に画像処理には図 7.6 のような直列構造では実現することができない処理も多い。この問題は図 7.7 に示すように処理の流れを木構造にすることで解決される。すなわち、原画像を複数個ある木の“葉”から入力し、“根”から最終的に出力される出力画像と、原画像に対してあらかじめ作った目標画像を比較することで、木の評価値を決定する。ただし、この場合は最適化対象が木構造であるため、文字列・数字列の最適化を行なう遺伝的アルゴリズムではなく、木構造を進化的に最適化することができる遺伝的プログラミング (Genetic Programming ; GP) を用いる。

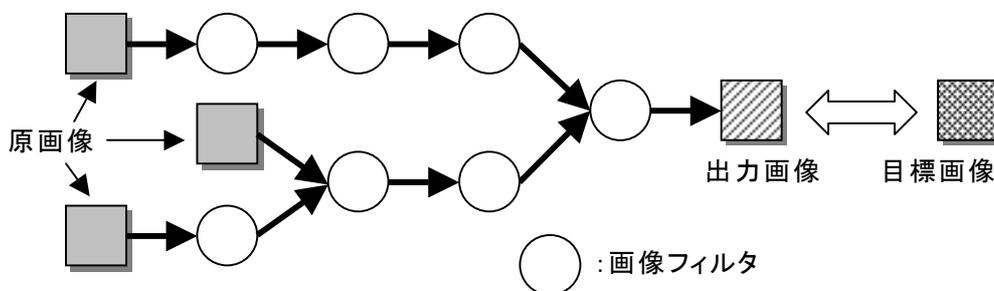


図 7.7 木構造状画像処理フィルタ

図 7.8 にこの考え方によって学習用画像セットから自動的に生成された画像処理の例を示す。非常に複雑な処理であり、人手で作るためには大変な手間がかかる処理が、完全に全自動で生成されることから、本方式の有効性を確認することができる。学習画像セットとして複数組の原画像と目標画像を与え、得られる処理の汎用性を高めることによって外観検査装置へ導入することが可能であり、実際に本原理に基づく検査装置も実用化されている。

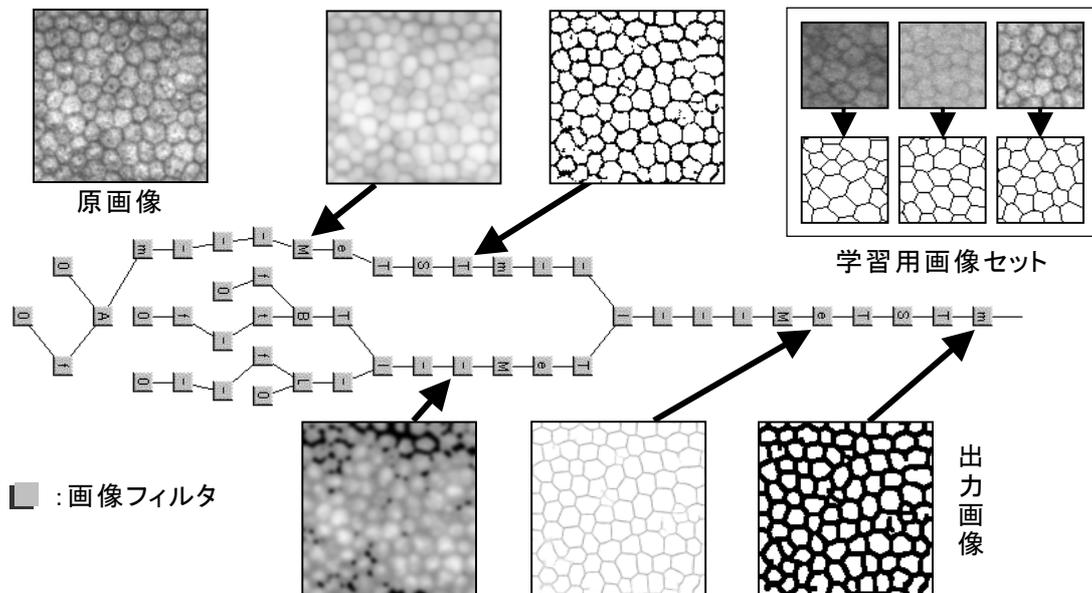


図 7.8 全自動で生成された木構造状画像処理の例（細胞画像処理）

このような考え方は、2次元の画像処理だけでなく、MRI や PET に代表される 3次元医用データの処理や ITS (Intelligent Transportation System) のための動画画像処理の自動構築にも適用可能である。なお、3次元画像処理では画像処理フィルタも 3次元画像用に変える必要がある。また、動画画像処理を扱う場合は、原画像として時刻 t の画像だけでなく、 $t-1$ 、 $t-2$ といった時間的に異なる画像を入力することで、時間的な差分を考慮して対象の移動物体だけを選択的に抽出する処理などを実現することができる。

また、最近では画像処理を行なう構造としてネットワーク構造を用いるものも提案されている。これは図 7.9 に例示するように画像処理フィルタをノードとする有向グラフ構造を進化的に最適化する方式である。動画画像処理など、繰り返し処理が必要となる画像処理の自動生成に対して特に有効であることが確認されている。

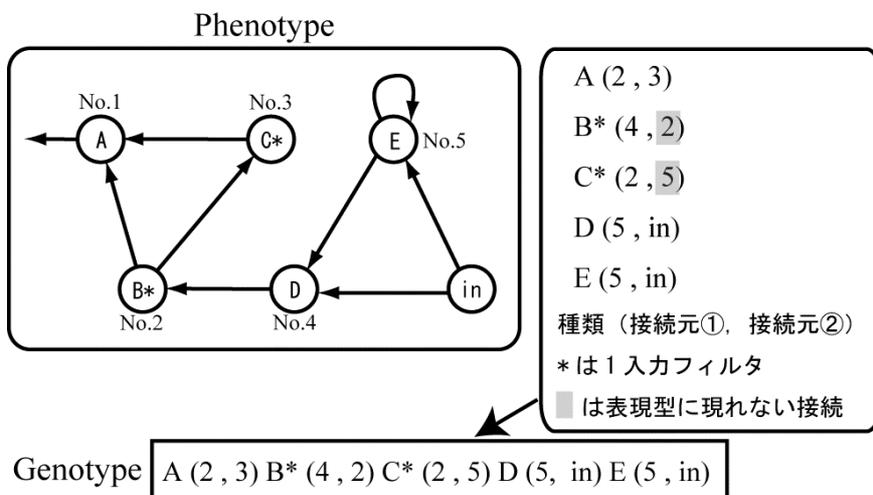


図 7.9 ネットワーク型画像処理

7.4 まとめ

ここでは、従来は人手による試行錯誤による人海戦術に頼っていた画像処理アルゴリズムの構築を、進化計算法に代表される強力な最適化法を用いることで全自動化する先端的な画像処理自動構築について述べた。具体的な例として、直列型、木構造型、ネットワーク型画像処理の自動構築方法を紹介した。画像処理アルゴリズムの自動構築に最適化を適用する方法は、ここで紹介した以外にも様々な形式が考えられる。この分野がさらに発展することによって、外観検査のための画像処理のほとんどを、人手による人海戦術に頼らずに自動的に構築することができる時代がすぐそこまでやってきていると言えよう。

参考文献

- 1) 馬場口登, 山田誠二: “人工知能の基礎”, 昭晃堂 (1999)
- 2) 長谷川純一, 久保田浩明, 鳥脇純一郎: “サンプル図形提示方式による画像処理エキスパートシステム IMPRESS”, 信学論, Vol.J70-D, No.11, pp.2147-2153 (1987)
- 3) 松山隆司, 尾崎正治: “LLVE: トップダウン・セグメンテーションのための画像処理エキスパートシステム”, 情報学論, Vol.27, No.2, pp.191-204 (1986)
- 4) http://www.aist.go.jp/aist_j/aistinfo/aist_today/vol05_04/series/p34.html
- 5) <http://www.intel.com/technology/computing/opencv/index.htm>
- 6) 長尾智晴: “進化的画像処理”, 昭晃堂 (2002)
- 7) 長尾智晴: “最適化アルゴリズム”, 昭晃堂 (2000)

8 CNT（カーボンナノチューブ）のラマン分光

8.1 カーボンナノチューブの概要と共鳴ラマン分光

8.1.1 はじめに

カーボンナノチューブ（CNT）は、新しい炭素材料として広く研究が行われている¹⁾。CNTはグラファイトの層を丸めて円筒状にした物質であり、丸め方によってさまざまな立体構造が可能（図 8.1）で、構造に依存して金属にも半導体にもなるという著しい性質を持っている²⁾。CNTの直径は1nm程度、長さは1 μ mでありナノテクノロジーの代表的な物質として、さまざまな応用が提案されていて、その一部はすでに企業によって実用化の段階にきている。

カーボンナノチューブの応用に不可欠な課題として、

- (a) 安定したCNTの大量供給
- (b) CNT材料の評価
- (c) CNT材料の安全性の確認

がある。(a)の大量供給とは、応用の種類によってだいぶ意味合いが異なる。すなわち、ナノチューブをカーボンファイバーの代わりの強度材料として使う場合には、数万トンレベルの量であり、半導体デバイスやセンサーとして使う場合にはグラムの量である。グラムオーダーの量は企業から十分供給できる状況になっている。CNT材料には、アモルファスグラファイトのような、別の炭素骨格の不純物がある。また比較的低温（700C）で気相合成したCNTは、CNTの構造のなかに欠陥が比較的多いことが知られている。したがって、市販されているCNT試料を購入する場合には、なんらかの(b)の試料評価が必要である。値段で品質が決まるものではない。本章では、共鳴ラマン分光の手法をもちいて、ナノチューブの試料評価を行うことを解説する。(c)の安全性については、多く議論されているところであるが、現在の段階では重要な問題は提起されていないので、特に格段の注意を持って実験する必要は無い。吸引しない程度の注意は肝要であろう。

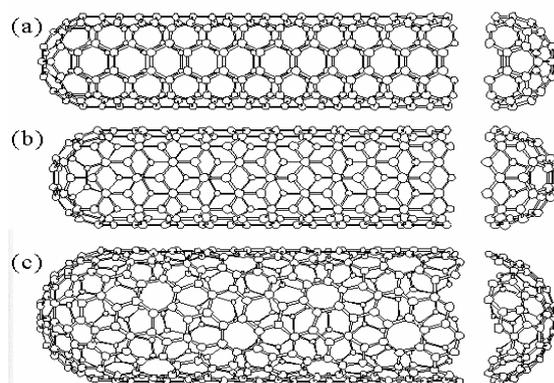


図 8.1 カーボンナノチューブの立体構造 (a) アームチェア型、(b) ジグザグ型、(c) カイラル型。ナノチューブの端にはキャップがついている。円筒部は (n,m) の 2 つの整数で表示。

8.1.2 ラマン分光

(I) ラマン分光の概要

ラマン分光は、光の非弾性散乱である。散乱光のエネルギーは、フォノン（格子振動の量子化したエネルギー）を放出する分小さくなる。実際の測定にはレーザーの光を試料にあて、散乱光（おもに後方散乱をもちいる）を分光しスペクトルを測定する。ラマン分光は、非処理、非接触、非破壊、常温、大気圧で行う測定であり、測定時間も 1 分程度であるので測定は容易である。ナノチューブの試料を合成すると、最初に試料評価する方法である。

ラマン分光装置は、システム全体で市販されていて、導入は比較的容易である。ナノチューブのラマン分光として適しているのは、入射の光を光学レンズで絞って直径 $1\mu\text{m}$ 程度の空間分解能を得るマイクロラマン分光である。顕微鏡下の微量な試料を測定する場合に便利である。光学顕微鏡では、1 本のナノチューブは見えないが、マイクロラマン分光ではシグナルを得ることができる。

複数のレーザー光源（または色素による波長を変換した光源）があると、共鳴ラマン分光の共鳴の様子をはかることができる。散乱光には、強い弾性散乱光（レイリー光）があり、ラマンスペクトルで低いエネルギー領域 (100cm^{-1}) のスペクトルを観察するのは困難である。通常は、ノッチフィルターと呼ばれる、光源の波長の光だけをカットするフィルターを用いる。この場合、光源が複数になるとその数だけフィルターを用意しないといけないので、最初は単一の光源で始めるのがよいと思う。ほぼエネルギー的に連続的に光源を容易する場合には、分光器を 3 重にするなど分光器でレイリー光をとる。

(II) ラマンスペクトルの概要 RBM と G バンド

CNT のラマン分光には、いろいろなスペクトルが観測される³⁾。最も重要なスペクトルは、ナノチューブの直径が振動するモードでラジアルブリージングモード (RBM) と呼ばれるスペクトルである (図 8.2)。RBM のスペクトルは $100\text{-}300\text{ cm}^{-1}$ の低周波数領域にあらわれる。このスペクトルが観測されれば、試料中にナノチューブが存在しているといえることができる。RBM の周波数は CNT の直径に反比例 ($248/dt\text{ cm}^{-1}$ 、 $dt\text{ nm}$ はナノチューブの直径) するので、RBM の周波数から、観測しているナノチューブの直径を評価できる。

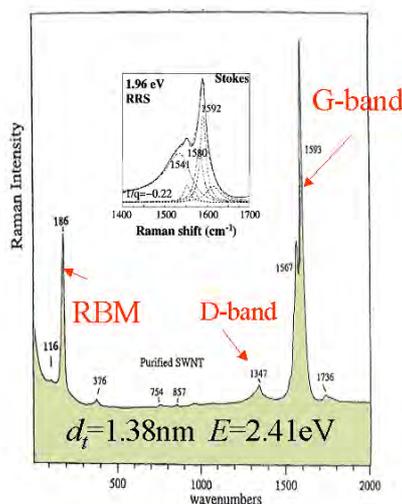


図 8.2 ナノチューブのラマンスペクトル (インセットは G-バンドの詳細)。

もう一つの重要なラマンスペクトルは、G バンドと呼ばれる 1590 cm^{-1} 付近に現れるグラファイトの物質に共通してあらわれるスペクトルである。グラファイトの場合には、 1585 cm^{-1} 付近にスペクトルが現れるが、CNT の場合には G バンドが 2 つに分裂し、G+ と G- に分裂する。したがって、G バンドが 2 つのピークをもつように見れば、ナノチューブがあると判断できる。これは、G バンドが層の面内の光学フォノンモードに対応しているのであるが、グラファイトの場合には縦波 (LO) と横波 (TO) が同じ振動数を持つものに対し、CNT の場合には、LO が TO の振動数より大きいことによる。この振動数の縮退がとけるのは、CNT の円筒面の曲率によるものである。G+ が CNT 軸方向の LO モード G- が軸に垂直な TO モードに対応する。G+ の振動数は、直径によらずほぼ 1590 cm^{-1} にあらわれるのに対して、G- の振動数は、直径の 2 乗に反比例して変化する。金属ナノチューブの場合には、半導体ナノチューブに比べて G- の振動数が 1550 cm^{-1} と大きくずれる。金属ナノチューブの G- は Breit-Wigner-Fano (BWF) と呼ばれるスペクトルのフィッティング関数にあわせると良いことがわかっている。BWF のスペクトルは、現在で

は伝導電子の存在によって格子振動がソフト化すること（コーン異常）によると理解されている。

1350 cm^{-1} 付近にあるスペクトルは、D-band と呼ばれていて、欠陥に起因するラマンスペクトルである、ナノチューブやグラファイトに点欠陥や、結晶の端などの欠陥がある場合には、この D-band のスペクトルが強くなるので、G-バンドとの相対強度が欠陥量のめやすになる。

(Ⅲ) 共鳴ラマン効果

ラマン分光において、入射光（もしくは散乱光）が光の吸収（もしくは発光）のエネルギーに等しい場合には、ラマン強度は非常に（約 1000 倍）に強くなる。これを共鳴ラマン効果という。カーボンナノチューブの場合には、電子の状態密度が発散する（図 8.3、ファンホープ特異性という）。1次元物質では、エネルギーバンドのバンド端で $E-1/2$ で発散するエネルギーと発散するエネルギーの間をつなぐ光の遷移（ E_{ii} 遷移と呼ぶ）では、強い光の吸収（発光）が観測され、この場合のラマン強度は非常に（約 1000 倍）強くなる。ナノチューブのラマン分光が観測される場合には、共鳴しているナノチューブだけを観測していると考えるよい。

カーボンナノチューブは、さまざまな立体構造が可能であり、一つの立体構造は (n,m) という 2つの整数で表される。光の遷移エネルギー E_{ii} は、 (n,m) に依存して可視光領域でほぼ連続な値をとりうる。図 8.4 に E_{ii} エネルギーを RBM の周波数（ナノチューブの直径の逆数）でプロットしたものを示す（これを片浦プロットと呼ぶ）。図 8.4 の中の数字は (n,m) に対する $2n+m$ の値である。同じ $2n+m$ の値をとるものは、星座のように比較的近い値をとる。これをファミリーと呼び、 (n,m) の同定のときに非常に有効な手法で

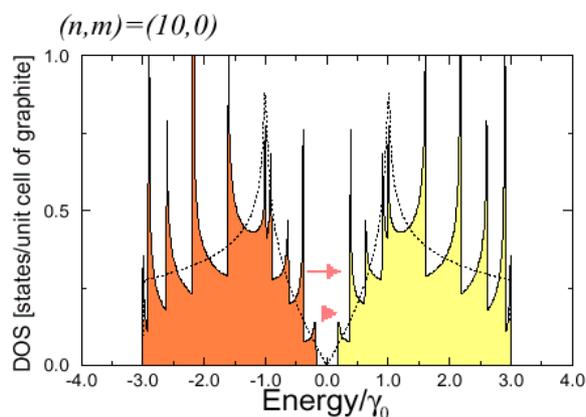


図 8.3 チューブの電子の状態密度、エネルギーサブバンド端で発散する。
矢印は光学吸収を表す。

ある。 $2n+m$ の値を 3 で割った余りは、金属の場合には 0 になり、半導体の場合には 1 か 2 になる。半導体ナノチューブのこの余りの数 1 か 2 に応じて TypeI、TypeII 半導体と呼ぶ。図 8.4 の半導体ナノチューブの場合をみてわかるように、TypeI、TypeII 半導体は異なる方向にファミリーのパターンが現れる。また相対強度も TypeI、TypeII で異なり E22 の場合には、TypeI の方が相対的に強い。金属ナノチューブの場合には、状態密度が分裂するので同じ (n,m) の値に対して、2 つの E_{ii} 値を理論的に与えるが、エネルギーの高いほうの E_{ii} に対するラマン強度が小さいため、実験で観測されるのはエネルギーの低いほうの E_{ii} に限られる。(注意深く測定すると、エネルギーの高い E_{ii} の方を観測することができる。)

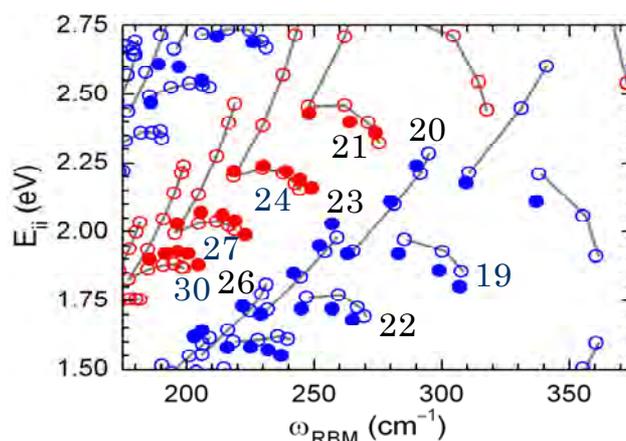


図 8.4 片浦プロット。赤が金属ナノチューブ、青が半導体ナノチューブ、●が実験、○が理論。数字は (n,m) に対する $2n+m$ の値。

ナノチューブは、電子とホールで励起子ができる。1次元性を反映して励起子の束縛エネルギーが 0.5eV ぐらいとおおきいので、室温でも励起子の効果を考えないといけませんが、電子電子の反発によって、束縛エネルギーの値が相殺されるため、上記の議論が適用できる⁴⁾。

8.2 共鳴ラマン分光を用いた試料の欠陥の評価

8.2.1 D-band の空間分解による欠陥の位置の評価

上記の (II) で説明した、D-band は欠陥の量に関するラマンシグナルであり、この強度と G-バンドの強度を測定することで、欠陥の大まかな量を測ることができる。非常に高温で生成されたナノチューブは、D-band はほとんど観測されない。一方低温で生成さ

れた（例えば CVD 合成で作られたナノチューブ）は D-band の強度が強い。場合によっては、G-band より強くなるようなケースもある。

マイクロラマン分光を用いて、観測するラマンスペクトルを D-band にあわせて空間をスキャンすれば、欠陥の位置をマイクロメートルの精度で判定することができる。

図 8.5 は、ナノグラファイト試料片のラマン分光の強度を空間分解して表示したものである。左の図は、G-band の強度であり、試料全体からラマン強度が得られていることがわかる。中の図は、D-band の強度であり、試料の端および角などの構造欠陥と思われる部分から強い強度が得られていることがわかる。さらに右の図は、端の部分拡大したものでいろいろなところに D-band が強くなる部分がかかなり局所的にあることが理解できる。これらは、電子顕微鏡とは別の原理で共鳴ラマン分光強度をもちいて欠陥の位置を同定できることを示している。

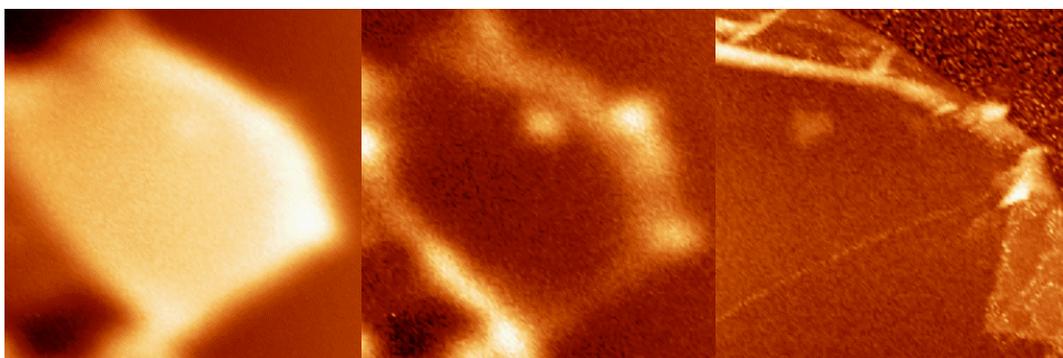


図 8.5 ナノグラファイト試料片のラマン分光 (左) G-band の強度、(中) D-band の強度、(右) グラファイト層が折り返されている部分の D-band の強度

8.2.2 近接場分光

このような D-band は古くから知られていたが、空間分解を行う実験はごく最近におこなわれたものである。1本のナノチューブ上の欠陥を調べるものも原理的に可能であるが、1マイクロメートルの光の波長以下に空間分解能をあげることができない。従来のマイクロラマン分光にかわる、近接場分光がより小さな空間分解能をあたえるラマン分光として大きく研究が進められている⁵⁾。近接場とは、電磁波の解の一つで、波として伝播しないが発光する物質のごく近傍で減衰する電磁場のことである。光ファイバーの先に金属のチップをつけ光の波長より小さい開口部を作り、ここから染み出る電磁場を用いる(図 8.6)。

開口部は、光の波長より小さいので伝播する波動の解は近接場のみになる。共鳴ラマン分光シグナルは、光ファイバー方向に後方散乱された信号を、通常の共鳴ラマン分光と同じ方法で得ることができる。

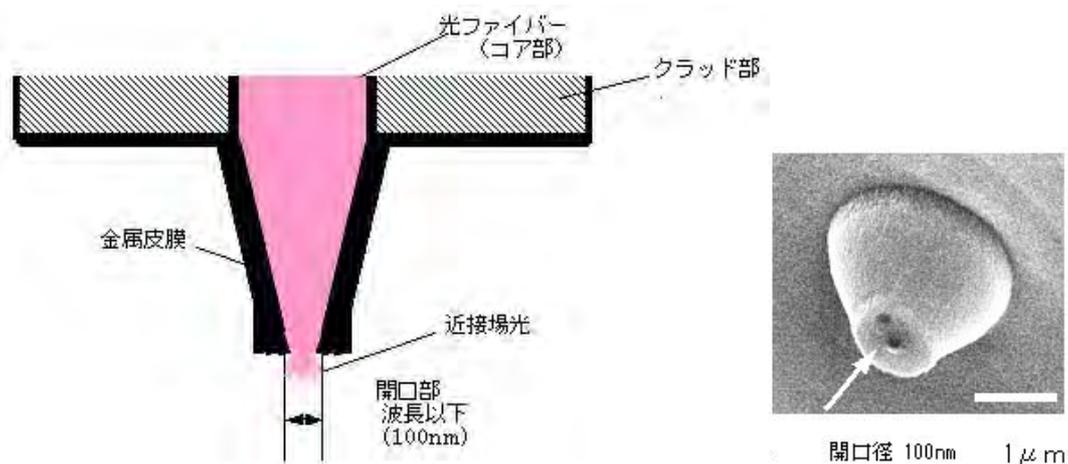


図 8.6 近接場の開口部の図 (左) と電子顕微鏡写真 (右)

<http://www.jst.go.jp/pr/report/report145/icons/zu1.jpg> より転載

8.3 おわりに

共鳴ラマン分光は、このように非破壊の検査として、エネルギー分解能、空間分解能を技術によってナノメートル領域まで高めることができるようになってきた。今後、試料評価の標準として発光分光と共におおいに期待される分野である。

謝辞：本稿に関する研究の一部は、文部省科学研究費『異常量子物質の創製—新しい物理を生む新物質—』（課題番号 16076201）による成果である。論文の多くの共著者との共同研究であり、新しい展開を産み出してきた共同研究者の皆様に感謝する。

齋藤理一郎（東北大学大学院理学研究科教授 物理学専攻）

<http://flex.phys.tohoku.ac.jp/japanese/>、rsaito@flex.phys.tohoku.ac.jp

参考文献

- 1) 『カーボンナノチューブの基礎と応用』 齋藤理一郎、篠原久典編、培風館 2004. Physical Properties of Carbon Nanotubes, Imperial College Press, by R. Saito, G. Dresselhaus, M. S. Dresselhaus (1998). ナノチューブの導入の教科書に最適。
- 2) R. Saito et al., Appl. Phys. Lett. 60, 2204 (1992); Phys. Rev. B 46, 1804 (1992)
- 3) M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, R. Saito, A. Jorio, Physics Reports, 409, (2005) 47. ラマン分光の Review.
- 4) M. S. Dresselhaus, G. Dresselhaus, R. Saito, A. Jorio., Ann. Rev. Phys. Chem. Chem. Phys. 58, in press (2007) 励起子に関する Review. 関連する文献がある。
- 5) 近接場分光に関しては、近接場で Web 検索をかけると多くの情報を得ることができる。

第Ⅲ章 応用分野

1	応用分野の概要	91
2	シート検査	97
3	事務機器の外観検査	108
4	ディスプレイ分野における画質検査	119
5	次世代内視鏡イメージングへの新展開	128
6	顔・肌の検査技術	138
7	農産物の非破壊検査技術	149
8	建築・土木分野の検査技術	162
9	近接場光を利用した検査技術	175
10	電子デバイスにおける画像処理を使った外観検査技術	185
11	ウェーハのエッジおよび裏面の検査技術	200
12	光学部品の高精度・高速計測	205
13	文書鑑識における外観検査	221

第Ⅲ章 応用分野

1 応用分野の概要

1.1 概要

本報告における応用分野に関しては、さまざまな産業において、さまざまな検査物体に対して、非接触、高速計測と言う光計測の特徴を利用した先端的な外観検査技術の応用事例の調査研究を行い、その結果を本章において報告を行う。

今回は、あまりこれまでに報告されてない範囲の研究開発の技術に注目して、調査を行い、報告を行った。このため、例えば半導体製造のマスク、レチクル、あるいはウエハの異物検査と言う様な既に多々報告がされており、教科書のような本の出版も行われている技術範囲の最新動向は含まれていないことは、ご了解頂きたい。

尚、応用分野の範囲としたのは、委員会で協議した上で報告者の合意により決めたものであるが、報告の内容には応用範囲に限る必要はなく、基礎研究の内容も含むこともよしとした。

以下、報告順に、12の外観検査の応用分野の調査報告の概要を示す。

1.2 シート検査

シート検査装置は、走行するシート状物に含まれる欠陥を検出するものであり、検査対象は液晶関連向けの、偏光フィルム、位相差フィルム、保護フィルム、反射防止フィルム、AG (Anti-Glare) フィルム、光拡散フィルム、反射フィルム、離型フィルム、プリズムシートなどの光学フィルムである。検出すべき欠陥は、微弱な凹凸欠陥（打痕、クレーター、核無フィッシュアイ）、微小キズ、無色透明欠陥（異物、コートムラ、コートスジ、コート部のピンホール）である。検出方法は、走行するシートを照明装置で照明し、その反射光、または、透過光をライン CCD カメラで読み取りその出力を画像処理によりリアルタイムで行うものであり、走行速度 30、200m/分、フィルム幅 1600、1700mm の実用化例を紹介している。微小キズ検出用として、斜め植え込みタイプの光ファイバ照明装置を使用することによって、ライン CCD カメラの幅分解能（100 μ m 程度）よりも大幅に細かいキズ（幅が数 μ m、長さが数 mm）を検出可能としている。

今後の課題として、欠陥検出能力の向上、欠陥検出性能が保持されていることを現場で

容易に確認できる技術、品質の向上と保守体制の向上、不具合発生の予防を挙げている。

1.3 事務機器の外観検査

複写機、プリンター等の事務機器内で使用され、画像品質に大きな影響を及ぼすローラ状部品の外観検査方法に関して、事例を中心に紹介した。ローラを回転させながら、その表面をラインカメラで撮像し、画像処理で欠陥部を検出しているのが一般的である。検査項目は、キズ・異物・汚れ等の外観検査や、部品位置・欠品有無等の組立状態確認、画像出し後の印字品質テストなどである。事務機器製造時においては近年、資源の有効利用、リユース・リサイクルに対する要求が高まっており、再生工程が構築されており、ユニットや部品の再利用、マテリアルへの分解等が積極的に進められている。製品の各段階（部品、ユニット、本体）において、様々な検査工程が存在し、製造工程全体において検査工程の占める工数はかなり高くなっている。

対象の特性（直径、表面粗さ、色合い等）が変わると、光学系や画像処理パラメータを調整するのに多大な労力を要するため作業自体を支援あるいは自動で最適化できる手法が求められる。

1.4 ディスプレイ分野における画質検査

液晶、プラズマディスプレイ、有機 EL、FED 等の新しい表示デバイスにおける画質検査項目を挙げ、その各項目の評価方法・特徴・注意点を説明し、将来の方向性を示す報告である。画質検査項目は現在一番使用用途範囲が広く身近な存在である液晶パネルの、輝度（明るさ）、色度（色み）、コントラスト、応答時間、視野角、フリッカ、輝度・色度ムラ、解像度、欠陥、ガンマ特性等を挙げた。検査にとって重要な色彩輝度計について解説した。

将来的にはコストダウンを図るためには、生産現場での検査に要する工数・設備も最低限にする方向になるとし、CCD センサを用いて輝度・色度のみならず、他の評価項目も計測できるような方向に進むと予想している。

1.5 次世代内視鏡イメージングへの新展開

従来の内視鏡イメージングが抱える課題を改善しうる次世代の内視鏡イメージング技術として特殊光観察技術である、Narrow Band Imaging, Auto-Fluorescence Imaging,

Infra-Red Imaging について紹介し、各々が切り開く内視鏡診断の近未来の世界について、舌裏粘膜、消化管粘膜、消化管（食道静脈瘤、腫瘍の深達度診断）への適用例を示し報告を行った。

これらの技術の登場により、スクリーニングから病変の精密診断に至るまで、従来よりも格段に診断精度の向上や内視鏡診断の効率化が図られ、近い将来、内視鏡分野における質的診断能患者、及び、患者 **QOL** を向上させる診断技術の更なる発展、普及を期待している。

1.6 顔・肌の検査技術

肌の状態（肌の柔軟性や弾力性、表面形状、色、皮質および水分）を測定する技術や機器について概観し、これらを統合した美容カウンセリングセールスのツールへの応用例の報告を行った。測定法として、圧力法、吸引法、回転変位法および固有振動法、目視評価法、トレース法、画像解析法、**SEM** 画像法、共焦点顕微鏡法および光投影法、光透過法、オスミウム酸ろ紙法、クロマトグラフィ法、赤外分光法等を紹介した。

測定作業者の技能により正確性が左右されやすいことやデータの解釈が難しい等の問題を指摘し、一人ひとりの肌に適した化粧品を選択するために、また化粧品の効能効果を適切に評価するために、肌の検査技術・機器の研究開発はさらに進められ、改善・向上が図られていくと予想している。

1.7 農産物の非破壊検査技術

非破壊検査法として、光学的方法による農産物・食品の外観等測定の多くの事例を挙げ報告を行った。紫外線、可視光線、近赤外線、赤外線を利用し、鱈（タラ）フィレ残留小骨・回虫の自動選別装置、渋柿判定装置、果実の色、傷およびサイズを測定する「カラーグレーダ」と称する選別機、パイナップル熟度測定装置、精米の自動色彩選別機、一粒玄米の色彩・形状・胴割の自動選別機、カビ豆選別機、糖度選別機の紹介を行った。

近赤外イメージングの測定可能な計測器により対象物中の成分分布を明らかにすることで、新たな応用技術を期待している。

1.8 建築・土木分野の検査技術

昨年、建築物の耐震偽装問題が発覚し、検査技術は新設構造物においても重要なものとなっており、その検査技術に関して、可視光線を利用した外見検査、デジタル写真による外観検査、レーザ光線を利用した外観検査、ノンプリズムトータルステーションを用いた外観検査、赤外線を用いた外観検査の例を挙げ報告を行った。既設構造物の維持管理を合理化し、構造物の維持保全を低コストかつ効率的に行う必要があり、構造物に発生する劣化・損傷を効率的に検出・計測し、構造物の機能や安全性を的確に判断する技術が要求されているとしている。

検査方法の標準化、品質管理による生産性向上を達成すべく、産学官一体での研究開発型企業の努力を生産活動に反映させ、より良質で安全快適な社会資本整備を行う必要を示している。

1.9 近接場光を利用した検査技術

近接場光を利用した検査技術に関する研究内容の報告を行った。半導体ウエハ基板のナノ欠陥検査に関して、従来法では検出が困難だった数 10nm スケールの微小欠陥検出の可能性、ナノインプリント残膜検査に関して、FDTD シミュレーションにより膜厚情報を計測できる可能性があることを示した。

近接場光を利用した検査技術は、原理的にリモートセンシングは困難であるが、非破壊性等の光学的な外観検査技術としての優れた特性を本質的に有しており、遠隔伝搬光では不可能だったサブマイクロメートル以下のナノスコピックな微小領域の計測評価技術として展開可能なポテンシャルを有していると指摘し、基盤要素技術のさらなる開発とともに、それら要素技術の高度な融合による近接場光応用外観検査技術のさらなる発展を期待している。

1.10 電子デバイスにおける画像処理を使った外観検査技術

半導体、一般電子部品（その中でも特にコネクタ）の現在の外観検査技術について調査を行い、その結果の報告を行った。まず、検査技術の現状を述べ、画像検査装置のハードウェア構成（CPU、産業用カメラ、照明）、次に画像処理技術として、正規化関連サーチ、エッジ検出、プロブ解析の紹介を行った。

事例として半導体（パッケージ）の検査、コネクタ検査を挙げ、最近の動向、検査内容、主な画像検査装置メーカーの順で報告を行った。

今後の市場要求としては、パッケージ、コネクタ検査ともに共通で、更なる高精度化、3次元計測を指摘し、産業用カメラの高解像度化、CPU等ハードウェアの高速化による対応を予想している。

1.11 ウェーハのエッジおよび裏面の検査技術

半導体製造プロセスにおけるウェーハエッジおよび裏面の検査に関する報告である。この検査ニーズは、半導体プロセスの高精度化や高集積化にともなう副作用による歩留まり低下が顕著になってきたことに由来する。この検査技術は、大別して2種類に分類され、レーザービームをプローブとして散乱光あるいは反射光で検出する方法と、発光ダイオードまたは白色ランプ光源を用いて画像計測を行う方法である。エッジ検査技術として、レーザー照射の場合は高立体角検出、画像計測の場合は多方向照明など曲面という形状の影響を緩和する方法、レーザービームを用いるエッジ検査技術としては、楕円鏡を利用する方法、エッジ部の画像計測の技術として、エリアカメラまたはラインセンサカメラを用いる方法等の紹介を行っている。裏面検査として、多数のエリアカメラによるステップアンドリピートで静止画像によって全面を検査する方式の紹介を行っている。ウェーハ全面のデータ量は莫大な量となるため、リアルタイム画像処理の重要性を指摘している。

1.12 光学部品の高精度・高速計測

位相シフト法を、リファレンス面又はテスト面を駆動させることなく、光学部品のレンズ・ミラー・プリズムの表面精度や内部透過波面の検査を高精度、高速に行う瞬間位相シフト干渉法と呼ぶ方法の報告である。計測原理は、干渉計の測定部に3つのCCDを位相差が0度、90度、180度となる様に配置し、位相情報を3つ同時に取り込むものである。この瞬間位相シフト干渉計は、光学部品の高速度計測だけに留まらず、空気の擾乱の計測も可能になり、新たな測定分野の開拓に貢献するとしている。

今後、CCDカメラの画素数も超ハイビジョン化され、デジタル画像技術もますます発展していくものと考えられ、より精細な測定が可能になることを期待している。

1.13 文書鑑識における外観検査

犯罪鑑識の一分野である、犯罪に関係する文書を解析し、その真偽、作成方法、改ざんの有無等を識別することを目的とする文書鑑識における外観検査について、応用例を多数示して報告を行っている。文書鑑識では、経験豊富な文書鑑定担当者の目視による検査とともに、光画像計測を応用して資料の分光反射特性及び反射光の角度依存性等の各種光学的特性を解析することにより、資料の外観を検査している。応用例として、偏角分光反射特性を使用する方法、分光画像計測を利用した外観検査として塗抹・改ざん文字の検査に関して、マルチバンド画像ヒストグラムの解析による印刷物の分類、偏角画像計測を利用した外観検査としてインクジェットプリンタ拍車痕の検査と昇華型熱転写プリンタサーマルヘッド痕の検査、複眼光学系を利用した外観検査の紹介を行っている。

光画像計測に基づく検査は、光源、光学素子、光センサなどの成熟した要素技術をもとに構築された光システムに支えられており、今後の光システムの進展は、従来は不可能であった切り口で偽造文書を解析することを可能とし、文書鑑識、犯罪鑑識に効果をもたらすものと期待している。

2 シート検査

2.1 はじめに

シート検査装置は、走行するシート状物に含まれる欠陥を検出するものである。シートは、幅が広いこと、高速走行していること、微妙な欠陥を検出しなければならないことから、目視検査では対応できない場合が多い。また、ISO9001 への対応もあり、未検査で製品を生産することが許されない状態となっている。

シート検査装置は、フィルム、金属、紙の 3 つの用途に分類される。各用途で数社の検査機メーカーが参入しており、前記の背景により各用途ともに検査需要が高まっている。特に、最近では液晶関連向け光学フィルム検査の需要が拡大している^{1~4)}。

本稿では、シート検査における現状の技術について調査を行うとともに、高い欠陥検出性能が要求される光学フィルム検査での問題点と解決策、および、今後の課題について報告する。

2.2 シート検査装置の構成

シート検査装置の基本構成を、図 2.1 に示す。

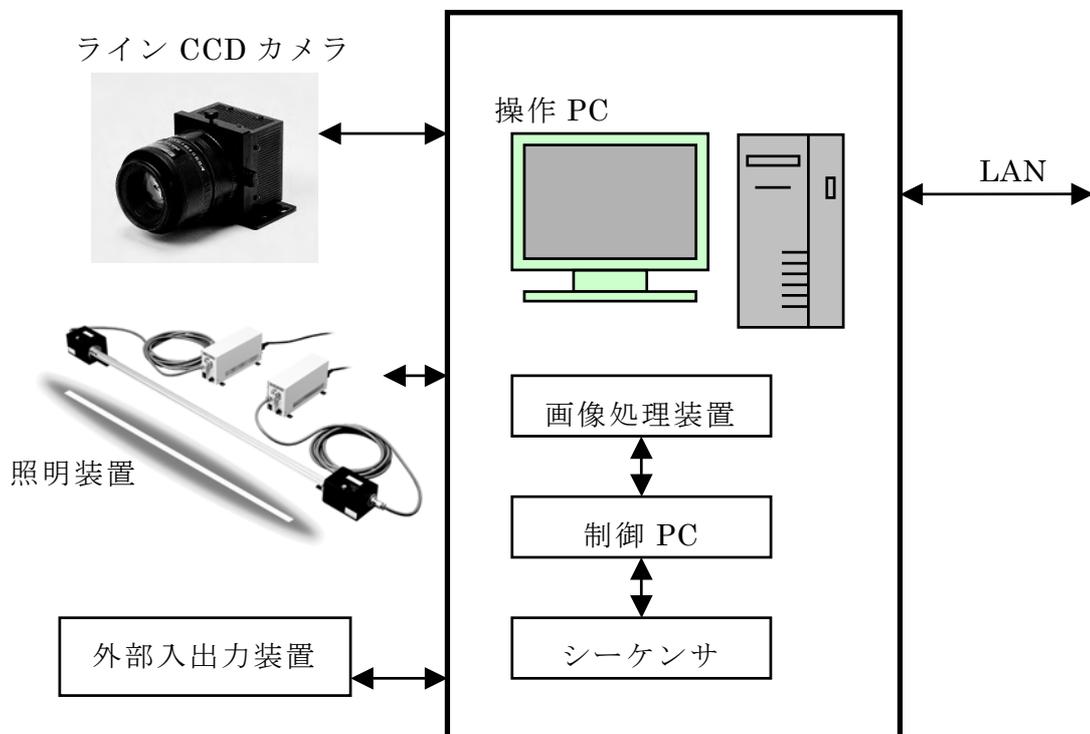


図 2.1 シート検査装置の基本構成

走行するシートを照明装置で照明し、その反射光、または、透過光をライン CCD カメラで読み取る。ライン CCD カメラの出力は、画像処理装置に入力し、リアルタイムで欠陥検出を行う。制御 PC は、画像処理装置、シーケンサなどの高速制御を行い、外部入出力機器を制御するとともに、操作 PC (Windows Xp) へ欠陥検出結果を転送する。操作 PC では、検査条件の設定、検査中の欠陥検出状況の表示、過去の検査結果の確認とシミュレーションなどを行う。また、ネットワークにより他の場所で検査データの管理を行うことも可能となっている。

(I) ライン CCD カメラ

ライン CCD カメラの素子数は、2048 素子か 5000 素子が多く使用されているが、検査対象のシート幅、走行速度、および、欠陥を検出するために必要な分解能により、他の素子数を選択する場合もある。ライン CCD カメラの駆動周波数は、40MHz が標準となっており、160MHz (40MHz×4 タップ)に対応したものも採用され始めている⁵⁾。ライン CCD カメラの台数は、4~10 台が多いが、シート幅、分解能、センシング方式の種類によっては、数十台になる場合がある。

(II) 照明装置

ライン状の照明装置として、高周波点灯蛍光灯、石英ロッド照明、光ファイバ照明の 3 種類が使用されている。高周波点灯蛍光灯は、15~110W の範囲があり、低価格、長寿命のため、標準的に使用される。しかし、ライン CCD カメラの高速化、センシング方式の多様化により、蛍光灯では輝度と調光範囲が不足することが多くなったため、石英ロッド照明を採用する比率が増加している。石英ロッド照明は、350mm~2200mm の照明長のものがある⁶⁾。石英ロッド照明の輝度と調光範囲は、高周波点灯蛍光灯と比較して約 10 倍ある。光ファイバ照明⁶⁾は、石英ロッド照明よりも高輝度が得られるので、透過率が非常に低い検査対象、受光量が非常に少なくなるセンシング方式の場合などで採用される。

(III) 画像処理装置

画像処理装置は、ライン CCD カメラの出力を基に欠陥検出を行うものであり、検査機メーカーが自社開発したものを採用することが多い。画像処理装置は、画像データの補正、強調、検出、分類といった機能を有しているが、検査機メーカーにより詳細は異なっている。

(IV) 外部入出力装置

外部入出力装置は、シートの走行速度変動に追従するためのロータリエンコーダ、欠陥検出時の警報器、表示器、欠陥部へのマーキング装置（インクジェットプリンタ、レーザーマーカ、ラベラ）などが採用されている。

2.3 ソフトウェア

(I) 検査条件の設定

条件設定ソフトは、オペレータが使用する条件に限定したものと、管理者が使用する全ての条件設定ができるものに分けている。

(II) 検査画面

検査モニターは、図 2.2 に示したように品種、ロット No、巻 No などの検査対象条件、欠陥測定値のリスト、欠陥の発生分布を示す 2 種類のマップ、画像、各欠陥の集計などを表示している。また、現状の生産速度、検査長、光源使用時間なども表示している。

(III) 検査結果の確認

履歴モニターは、過去の検査結果を図 2.2 に示した検査モニターとほぼ同じ書式で表示している。また、図 2.3 に示した画像ビューアにより、閾値、2 次元フィルタなど欠陥検出条件のシミュレーションを行うことができる。さらに、ユーザの要求仕様に対応した特注の応用ソフトを追加する場合もある。

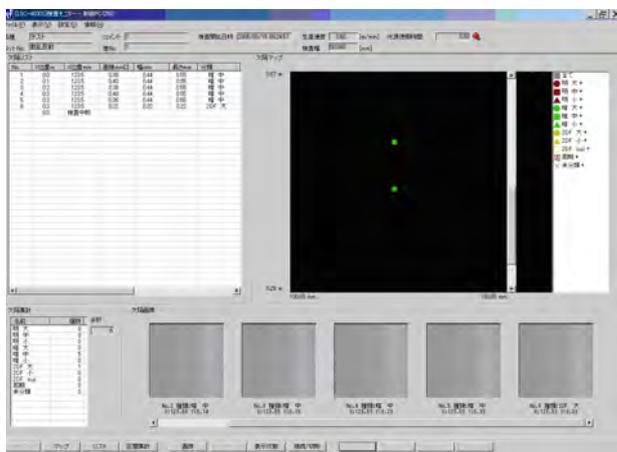


図 2.2 検査モニター画面

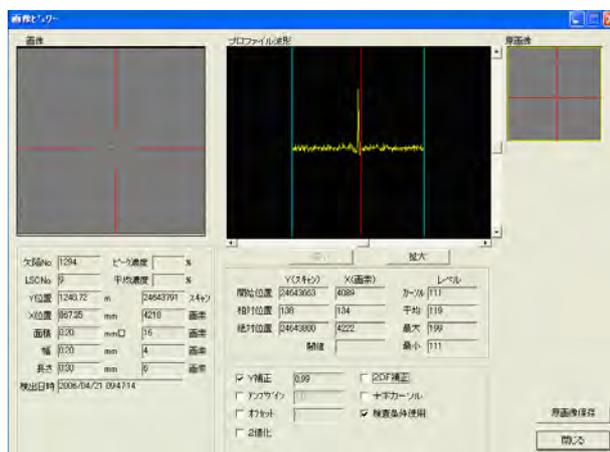


図 2.3 画像ビューア

(IV) その他

図 2.4 は波形表示画面を示している。ライン CCD カメラの波形、閾値波形、MTF などの情報を表示し、光量調整もできる。図 2.5 のように、複数台のライン CCD カメラを使用する場合は、一括表示することができる。また、検査データの自動バックアップ、地合モニター、自動印字（リスト、マップなど）などの応用ソフトも含まれている。

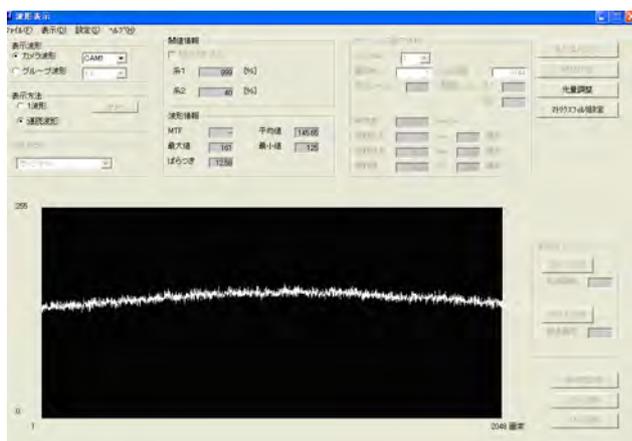


図 2.4 波形表示

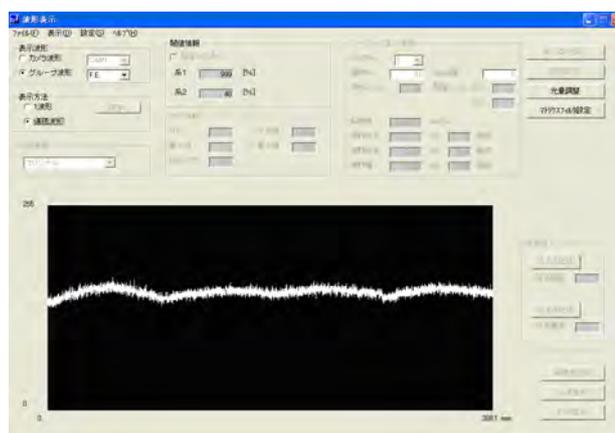


図 2.5 グループ波形表示

2.4 画像処理技術

ライン CCD カメラの出力から欠陥を精度よく検出するため、画像データの補正、強調、検出、分類といった画像処理技術を有している。

2.4.1 補正技術

ライン CCD カメラの出力方向、幅方向、流れ方向の 3 つの方向について補正を行い、欠陥検出性能を向上させている。

(I) ライン CCD カメラの出力補正

検査対象の反射率、透過率が変わると、ライン CCD カメラの出力レベルが変わる。欠陥検出性能を安定化させるためには、照明の自動調光を行うか、AGC³⁾によりライン CCD カメラの出力の感度変更を行うことが必要となる。S/N を安定させるためには、前者の方法が望ましい。照明の調光範囲は、蛍光灯が約 4 倍、石英ロッド照明が約 60 倍であり、調光特性も異なる。このため、光源の調光特性に合わせて早く適正な値に調光できるよう

にしている。また、シェーディング補正により、レンズ、照明ムラなどによるライン CCD カメラの出力変化を補正している。

(II) 幅方向の補正

幅方向の補正として、蛇行追従技術⁸⁾がある。検査直前にシート両端のエッジを検出することで自動幅検出を行い、予め指定されたマスク幅分内側を検査領域として設定する。検査中は、シートの蛇行に追従して検査領域を補正している。ライン CCD カメラは複数台使用することが多いので、シートエッジがライン CCD カメラの境界を跨って蛇行する場合もあるが、問題なく検出することができるようにしている。また、反射、透過など 2 系列以上の光学系を使用している場合は、エッジが検出できない系列があっても、いずれかの蛇行追従結果を他方の系列に反映させることができる。

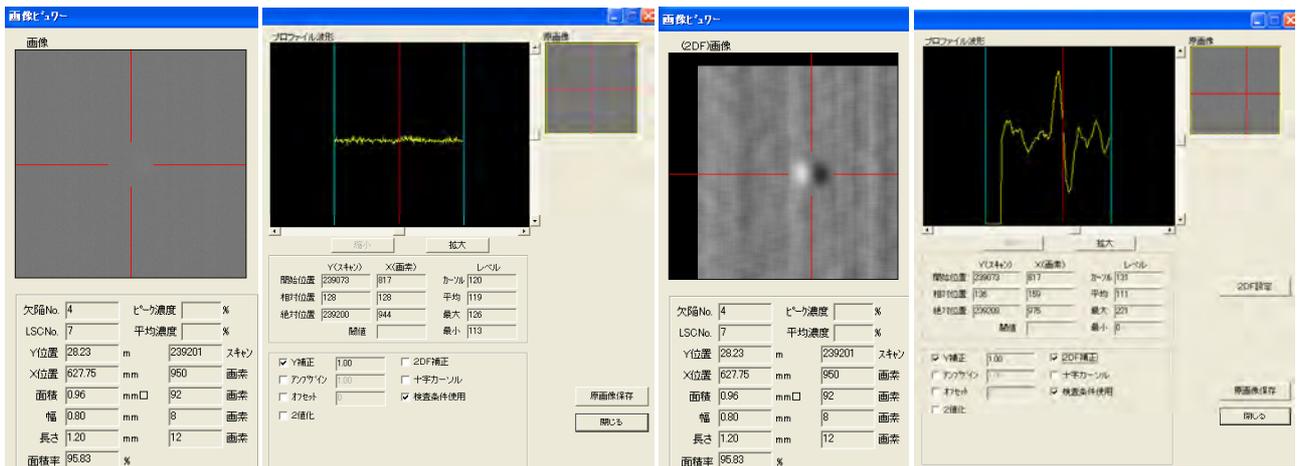
(III) 流れ方向の補正

ライン CCD カメラの走査周期は一定であるが、シートの走行速度は変化する可能性がある。シートの走行速度が変わっても欠陥検出性能を変えないようにするため、流れ分解能を一定にさせている。また、予め複数種類の流れ分解能を設定することも可能である。

2.4.2 強調技術

スジ、ムラなど、原画像のままでは検出できない微妙な欠陥は、画像フィルタにより欠陥部のコントラストを強調して検出することができる。画像フィルタは、検査機メーカーにより方式が異なり、汎用的な 2 次元フィルタ、または、スジ、ムラに合わせた検出回路で対応している。前者の場合、2 次元フィルタのサイズは、限度欠陥にあわせてユーザが設定することが可能である。処理方法は、幅方向差分、流れ方向差分、差分無の選択が可能である。また、画像ビューワーソフトによるシミュレーションを行うことで、2 次元フィルタのサイズ、閾値を適正な値に設定することができる。

図 2.6(a)は、中心部に凹み欠陥があるが、原画像では欠陥が見つらい状態である。波形でも欠陥が確認しづらい程度である。しかし、図 2.6(b)では 2 次元フィルタ処理 (サイズ : 16×16 画素、処理方法 : 幅方向差分) により欠陥部が強調され、波形でも欠陥が確認可能となっている。



(a) 原画像 (b) 2次元フィルタ処理後の画像

図 2.6 2次元フィルタによる欠陥強調

2.4.3 検出技術

検出技術は、%閾値設定技術と連結性処理技術からなる。

%閾値設定技術は、ライン CCD カメラの入力データを基準データとして入力し、これに対する欠陥検出感度を%で設定している。このため、照明装置、ライン CCD カメラのバラツキの影響を防止できる。また、検査中も閾値を更新することで、検出感度の長期安定化を図っている。さらに、基準データの中に欠陥データが含まれている場合であっても、その影響を少なくするため、流れ方向に複数行入力し平均化を行っている。基準データの中にスジ欠陥が含まれている場合は、流れ方向の処理では対応できないため、幅方向のスムージング処理により補正を行っている。

連結性処理技術は、2 値化、圧縮後のデータに対して 1 パスで連結性を判断し欠陥の検出を行っている。連結性処理時に幅方向、流れ方向の膨張処理を行うことで、近接した画像を 1 個として測定することができる。膨張係数は、画像を処理するのではなく、圧縮後のデータに対して連結性処理で行うため、幅方向、流れ方向について異なる値を設定できる。また、設定範囲を広くしてもリアルタイム処理が可能となる。また、スジが連続している場合は、欠陥画像が終了しないが、予め指定した最大の長さで連結性処理を終了し、欠陥として出力することができる。

2.4.4 分類技術

検出した欠陥を分類する場合、形態的特徴からある程度は分類できるが、複数のセンシング方式を利用することで分類精度を向上させることができる。さらに、欠陥の位置情報も利用できる。

形態的特徴から欠陥を分類する場合は、画像処理グループ、検出系列、面積、幅、長さ等の特徴量を基に最大 100 種類の欠陥に分類できる。分類した欠陥毎に測定結果の保存画像の表示、NG 信号の出力の有無などを設定できる。また、どの分類にも適合しない欠陥は、未分類欠陥として処理している。

通常は、数画素以下といった微小な欠陥が多いため、形態的特徴から欠陥を分類する上で制約がある。例えば、異物とフィッシュアイは、1 つのセンシング技術で検出すると形態的特徴からは判断できない場合が多い。しかし、2 つの異なるセンシング技術を使用し、検出欠陥の同一性を判定することで、両者の区別を行うことが可能となる。また、複数の方式で検査を行うと、1 つの欠陥をいずれの方式でも検出し、複数個として検出される場合がある。このようなダブルカウントを防止したい場合は、欠陥検出時に以前に検出された欠陥のうち、欠陥中心座標が指定値以内のものがあることを確認し、欠陥データから削除することができる。

2.4.5 再分類、再測定技術

再分類は、検査結果を基に異なる分類条件で再度分類するものである。再分類結果は、欠陥マップとして表示し、印字出力もできる。測定結果を基に欠陥分類条件を検討することができるため、再度、生産ラインで検査することがなく条件を変更できる。

再測定は、検出した欠陥画像を基に異なる検出条件で測定するものである。図 2.7 は画像ビューアの画面であるが、欠陥の測定結果と、閾値を変更した場合の再測定結果を示している。この機能で限度欠陥の検出条件を調整しやすくなった。また、検査単位でも、異なる検出条件で測定し分類することもできる。

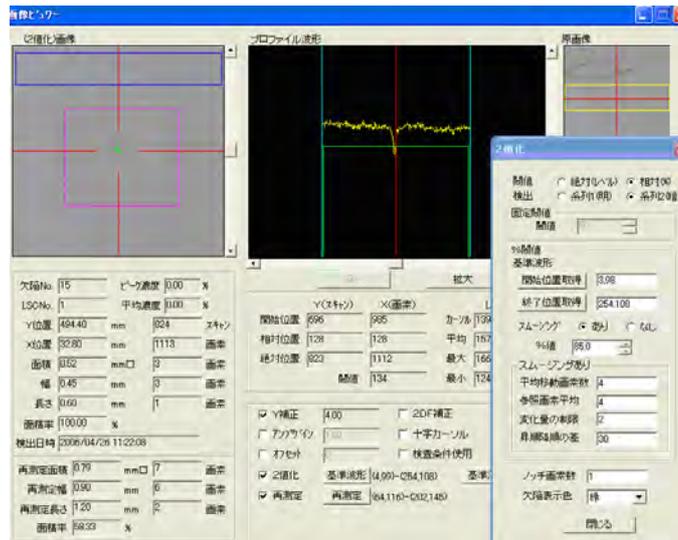


図 2.7 再測定機能

2.5 光学フィルム検査技術の課題

(I) 検査対象

光学フィルムには、偏光フィルム、位相差フィルム、保護フィルム、反射防止フィルム（AR (Anti-Reflective) / LR (Low- Reflective))、AG (Anti-Glare) フィルム、光拡散フィルム、反射フィルム、離型フィルム、プリズムシートなどがある。

(II) 欠陥

検出すべき欠陥は各種のものがあるが、下記のように高い欠陥検出性能が要求されるものがある。

- 1) 微弱な凹凸欠陥（打痕、クレーター、核無フィッシュアイ）
- 2) 微小キズ
- 3) 無色透明欠陥（異物、コートムラ、コートスジ、コート部のピンホール）

(III) 評価方法

通常の正透過方式、正反射方式では、検出が困難な場合が多いため、特殊な照明とセンシング方式の採用、画像フィルタによる強調処理などが必要となる。また、検査装置の仕様を決定するには、限度欠陥を含むカットサンプルの評価、ロールサンプルの評価、テスト装置による現場での評価を行っている。

2.6 欠陥検出技術

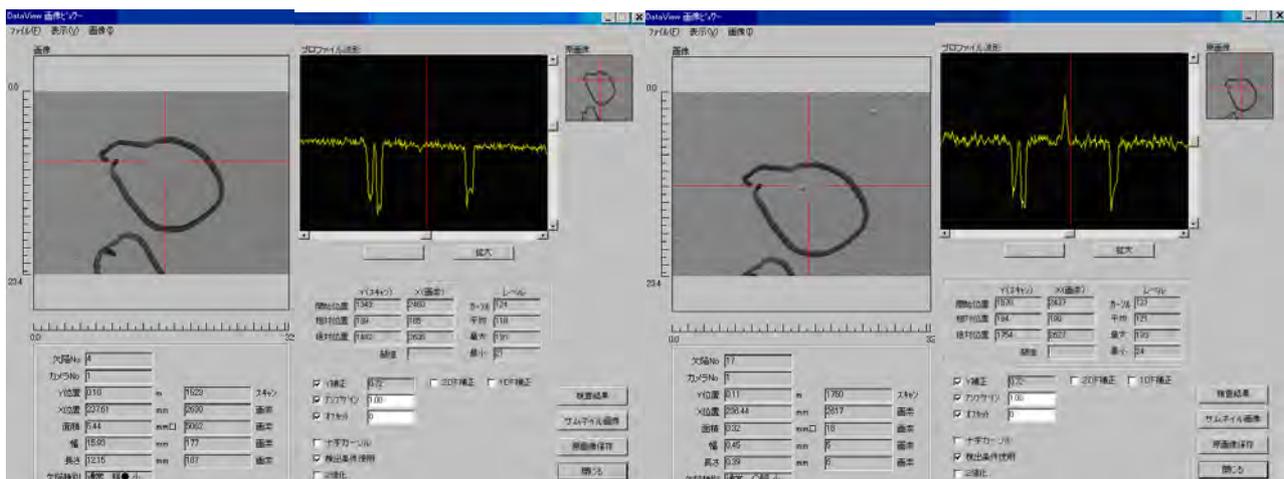
欠陥検出性能は、センシング条件でほぼ決定される。実用的な欠陥検出性能を確認するため、実用機と同じセンシング条件で限度サンプルによる評価が行われる。通常のセンシング技術では検出できない代表的な例である微弱な凹凸欠陥、微小キズを検出する技術について述べる。

2.6.1 微弱な凹凸欠陥検出

透明フィルムに含まれる凹凸が μm レベルの欠陥は、通常の正透過方式では図 2.8(a)に示した画像のように欠陥部が見えない。波形にも欠陥部の出力変化がほとんど現れていない。フィルムと照明間の距離を離し、照明装置にスリットを取り付けても欠陥が見えるレベルにはならない。また、微小欠陥のため、2次元フィルタを使用しても効果が少ない。

このような微弱な凹凸欠陥も、図 2.8(b)に示したように、照明装置の片側にスリットを取り付け、ライン CCD カメラの読取位置をスリットのエッジ部を読み取るようにすることで欠陥部に明暗を発生させ、高いコントラストで検出することが可能となっている。波形は、欠陥部の明部分の出力変化を示している。

図 2.8 は、走行速度 30m/分、ライン CCD カメラ 1 台当たりのフィルム幅 400mm (1600mm/4 台) で実用化した例である。



(a) 正透過方式の原画像

(b) 凹凸強調方式の原画像

図 2.8 微弱な凹凸欠陥検出方法

2.6.2 微小キズ検出

微小キズを検出する場合、ライン CCD カメラの分解能を微小キズの幅に合わせてカメラ台数が増加し実用性がなくなることが多い。フィルムの流れ方向に対して、ライン CCD カメラと照明装置を斜めに配置することによって、キズ検出性能を向上させることが可能な場合もあるが、設置スペースが流れ方向に長くなり、フィルムのバタツキの影響を受けやすくなるという問題がでる。

微小キズ検出用として、斜め植え込みタイプの光ファイバ照明装置を使用することによって、ライン CCD カメラの幅分解能よりも大幅に細かいキズが検出可能となっている⁹⁾。この光ファイバ照明装置は、フィルムの走行方向に対して垂直方向に設置した状態でも微小キズに対して斜め方向から高輝度光を照射することができるため、微小キズの部分で光を散乱させることができる。

図 2.9 は、幅が数 μm 、長さが数 mm の微小キズをライン CCD カメラの幅分解能 $110\ \mu\text{m}$ で検出した原画像を示している。正常部は、斜め方向の光がそのまま透過するため暗い状態であるが、微小キズの部分で輝点となり、高いコントラストが得られている。波形は、欠陥部で正常部の 2 倍以上の出力を示している。

図 2.9 は、走行速度 $200\text{m}/\text{分}$ 、ライン CCD カメラ 1 台当たりのフィルム幅 170mm ($1700\text{mm}/10$ 台) で実用化した例である。

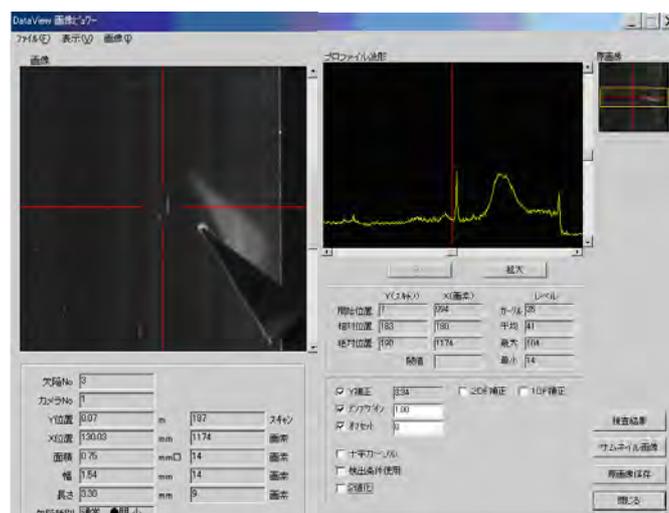


図 2.9 微小キズの検出

2.7 おわりに

製品の欠陥検出要求は今後も厳しくなる方向にある。これに対応するため、各検査機メーカーでは、センシング技術、画像処理技術、応用ソフトの技術開発を進めているが、今後の課題は以下の通りである。

欠陥検出能力を向上させることによって、検査対象のゆるやかなシワ、バタツキなど、シートの走行状態による誤検出が発生しやすくなる。このため、今後も検出すべき微妙な欠陥だけを強調して検出し、見逃すべき正常部の地合のバラツキを誤検出しない技術が必要となる。

シート検査装置の欠陥検出性能は、サンプル評価で確認しているが、導入後もその欠陥検出性能が保持されていることを現場で容易に確認できる技術が必要となる。導入後は定期点検などによって性能確認を行っているが、今後は、ユーザでも容易に実施できる方式が必要となる。

シート検査装置は長期間使用されるため、導入時と検査基準や検査対象が変化し、検査条件の見直しを行わなければならない場合がある。これにユーザが適正に対応できるように技術フォローを行うことが必要となる。シート検査装置を長期間使用した場合は、部品の故障は避けられない。しかし、シート検査装置が停止すると、生産ラインも停止することになるため、品質の向上と保守体制の向上を行うとともに、不具合発生の予防についても改善していくことが必要となる。

参考文献

- 1) 2006年 画像処理システム市場の現状と将来展望 株式会社富士経済
- 2) <http://www.mec-ins.co.jp/>
- 3) <http://www.futec.co.jp/>
- 4) <http://www.nagase.co.jp/>
- 5) <http://www.ayaha.co.jp/>
- 6) <http://www.eskasensor.com/>
- 7) 特許第 3356367 号 自動光量調節装置及び方法
- 8) 特許第 3119581 号 欠陥検査装置及び欠陥検査方法
- 9) 特許第 1914764 号 ライン状光源を用いた欠陥検査装置

3 事務機器の外観検査

3.1 はじめに

この章では、複写機、プリンター、FAX等の事務機器に関連した外観検査技術に関して述べる。製造時の検査工程の概要や、画像品質に大きな影響を与えるローラ部品の検査方法を中心に、自動化の事例を紹介する。

3.2 検査工程概要

事務機器製造時における検査工程の流れを図3.1に示す。横軸は、左側から順に材料→部品→ユニット→本体→市場といった製品の段階、物の流れを示している。近年、資源の有効利用、リユース・リサイクルに対する要求が高まっており、下段のような再生工程

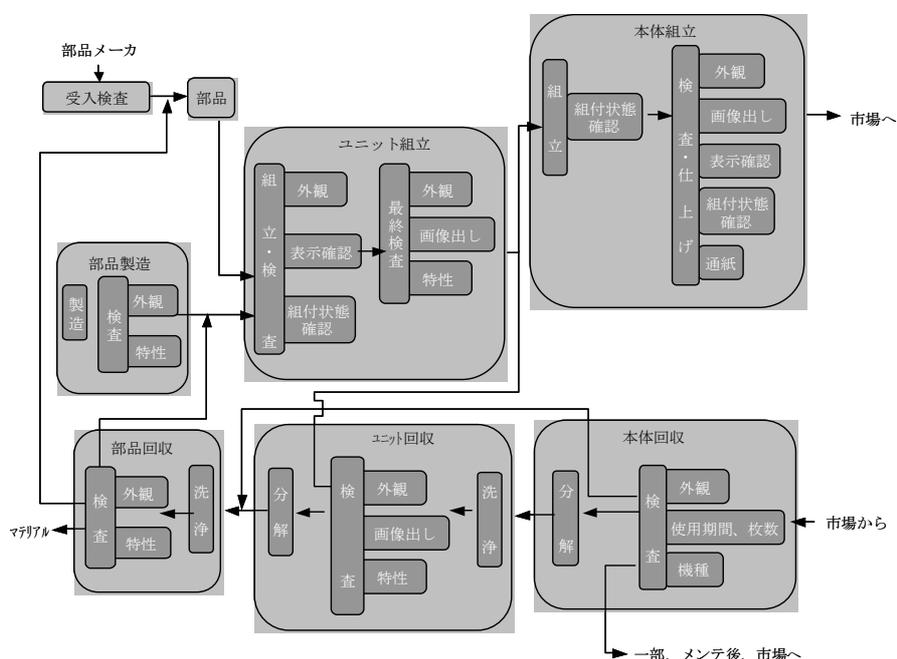


図 3.1 検査工程概要

が構築されており、ユニットや部品の再利用、マテリアルへの分解等が積極的に進められている。製品の各段階（部品、ユニット、本体）において、様々な検査工程が存在し、製造工程全体において検査工程の占める工数はかなり高くなっている。検査項目としては、キズ・異物・汚れ等の外観検査や、部品位置・欠品有無等の組立状態確認、あるいは画像出し後の印字品質テストなど、目視検査で対応しているのが一般的であり、画像処理技術を応用できる例も多い。例えば、組立状態確認は市販の画像処理装置で対応できるケースであり、自動化の例が多い。一方、外観検査、画像出し検査に関しては、対象部品や欠陥項目の多様性から自動化の実現が難しい状態である。また、特性検査とは、例えば感光体ドラムの表面電位等、部品やユニット毎に必要な機能を直接評価する工程であり、画像処理技術だけでは対応し切れない。

3.3 自動外観検査装置の事例

3.3.1 電子写真プロセス

ここで、複写機やプリンターの電子写真プロセスに関して簡単に述べる（図 3.2）。1.帯電→2.露光→3.現像→4.転写→5.分離→6.定着→7.クリーニングという順で1回のプロセスが行われる。このように、事務機器の画像品質に大きく影響する電子写真プロセスには、多くのローラ状部品が使用されている。特

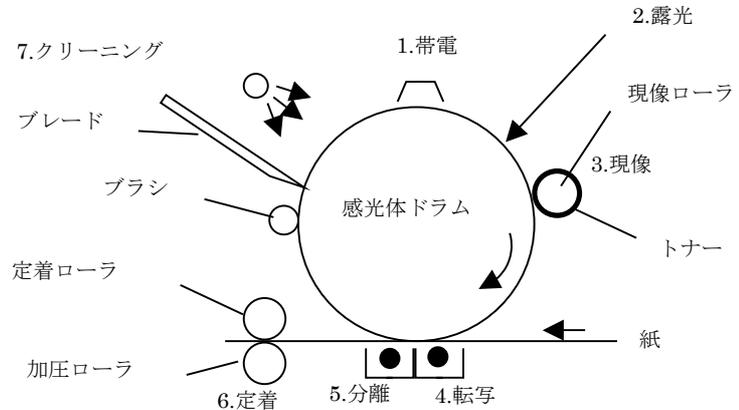


図 3.2 電子写真プロセス

に感光体ドラムは、品質を決定付けるキーパーツとして社内開発・製造されており、検査工程自動化の例が報告されている。

3.3.2 感光体ドラム自動外観検査装置の事例

(I) ドラム構造と欠陥の種類

感光体 (Organic Photo Conductor) ドラムの構造を図 3.3 に示す^{1,2)}。円筒状のアルミ素缶上にアンダーコート層 (UC 層 ; Under Coat Layer) が塗装され、さらに電荷発生層 (CG 層 ; Charge carrier Generation Layer)、電荷輸送層 (CT 層 ; Charge carrier Transfer Layer) が塗膜された 3 層構造が一般的である。

検査対象となる欠陥の種類は、内部欠陥、表面欠陥、膜厚むらの 3 つに大きく分類される (図 3.4)^{1,2)}。内部欠陥は図 3.4 B、C に示すように、3 層構造の内部に発生した気泡、塗膜の途中で付着した異物等によるものや、塗膜のむらによる濃淡色むらである。表面欠陥は図 3.4 D のようにドラム表面層での接触によるキズや付着した異物による欠陥である。膜厚むらは図 3.4 A に示すように CT 層の厚みが正常部と異なる場合に発生する欠陥である。

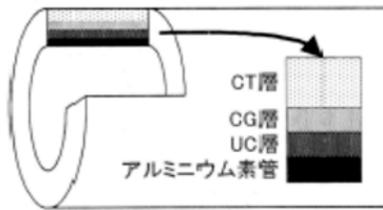


図 3.3 感光体ドラムの構造

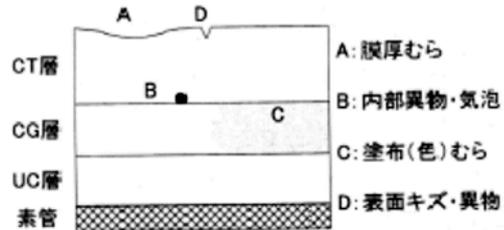


図 3.4 各欠陥の発生部位

(II) 事例 1 2 ステージ構成による検査装置³⁾

内部欠陥検査ステージと表面欠陥検査ステージの 2 つの検査ステージから構成される (図 3.5)。内部欠陥検査ステージでは、正反射光を受光することにより感光層内部の欠陥 (点欠陥、すじ欠陥、塗布むら欠陥) を検出する。一方、表面欠陥検査ステージでは、表面からの散乱光を受光することにより感光層表面の欠陥 (表面凹凸、塗料はね、異物付着) を検出する。どちらのステージにおいても、回転機構にセット後、ドラムを回転させ、その表面を高 S/N 比のラインカメラ (2048 画素×1500 ライン、12 ビット) で撮像する。

次に画像処理方法に関して説明する。内部欠陥検査ステージでの点・すじ欠陥は、2 次元の空間演算オペレータ処理と閾値処理により抽出され、明るい欠陥 (白欠陥)、暗い欠陥 (黒欠陥) の分類を行い、さらに連結性の評価により点欠陥 (S、M、L) とすじ欠陥に分類される。内部欠陥検査ステージでのむら欠陥では、画像圧縮後の濃度ヒストグラムの分布形状を、良品画像の分布と比較することにより、良否判定を行う。表面欠陥検査ステージでの処理方法は、内部欠陥検査ステージの点・すじ欠陥検出方法と同様である。検出の様子を図 3.6 に示す。

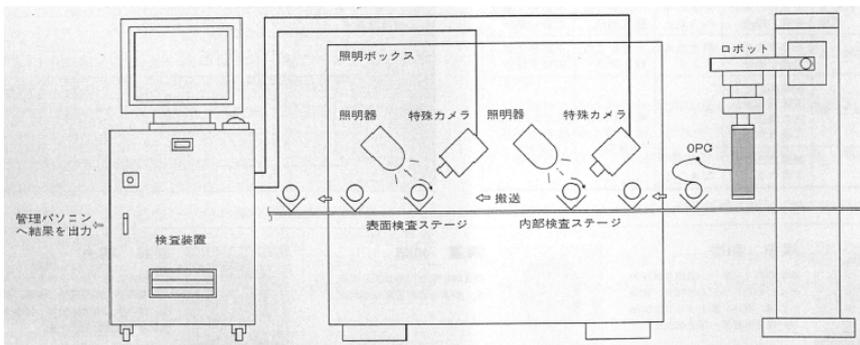


図 3.5 システム構成

図 5 むら欠陥の検出の様子

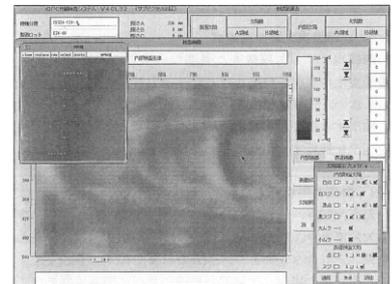


図 3.6 むら欠陥検出例

(Ⅲ) 事例 2 輝線追従制御による S/N 比の向上⁴⁾

ドラムを回転させ、その表面をラインセンサで撮像するという基本構成（図 3.7）は事例 1 と同様である。この場合、ラインカメラによる撮像位置を輝線（正反射光）に近付けることにより検出感度が向上する一方で、ドラム回転振れ等による位置変動が画像上ノイズとして現れてしまうという相反する関係がある（図 3.8）。

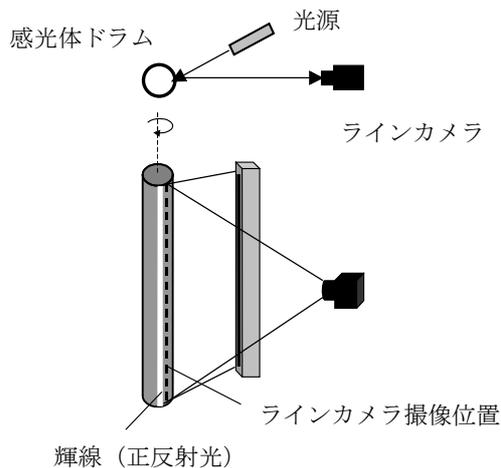


図 3.7 基本構成

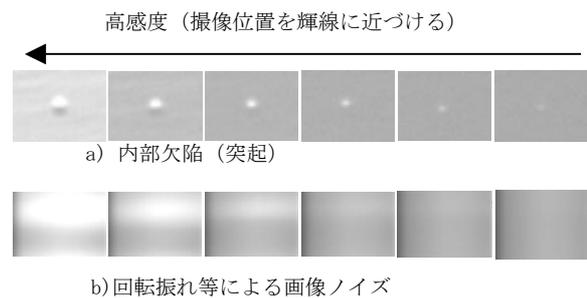


図 3.8 検出感度とノイズの関係

その問題を解決するために新たな制御方法（輝線追従制御）を導入した（図 3.9）。輝線位置の変動を画像計測し、その結果に応じて、ラインカメラ撮像位置と輝線位置の相対関係を一定に保つように追従制御する。ハーフミラーにより分割した反射光をエリアカメラで撮像し、輝線位置の計測を行い、その変動に検査用ラインカメラの位置を輝線垂直方向（図 3.9 の Y 方向）に制御する。十分な S/N 比で欠陥を検出するためには、輝線位置の変化に対して $\pm 30 \mu\text{m}$ 以内にラインカメラ位置を追従制御させる必要がある。輝線追従制御をしながらドラムを 1 回転した時の、ドラムとラインカメラの位置変化を図 3.10 に示す。図 3.7 と同一条件であるにもかかわらず、輝線追従をしながら撮像したラインカメラの画像（図 3.11）は、輝線に近いところでも濃度が均一でノイズの少ない画像が得られていることが確認できる。また制御偏差は $\pm 25 \mu\text{m}$ 以内であり、欠陥検出感度を従来比 2 倍以上に向上できる。

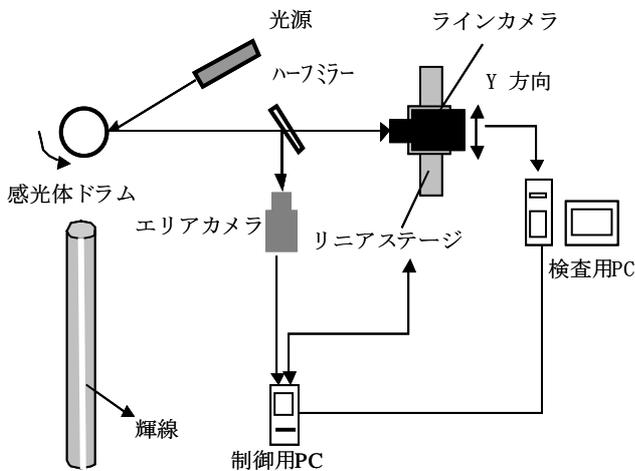


図 3.9 輝線追従制御システム

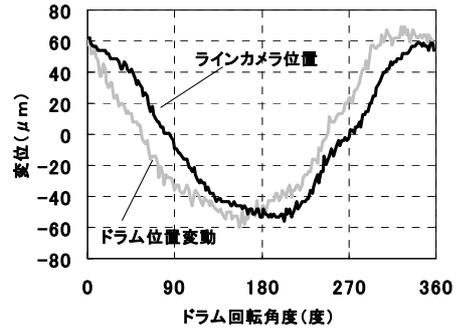


図 3.10 追従結果



図 3.11 ノイズ低減の効果

(IV) 事例 3 干渉縞を利用した膜厚むらの検出^{1,2)}

事例 1、2 のような方法では、内部欠陥、表面欠陥は検出できるが、膜厚むらに関しては十分な検出感度を得られない場合があり、本事例では専用の光学系を用意している (図 3.12)。照明に単波長 (約 590nm) 光源を用い、その正反射光を 4096 画素のラインカメラで撮像する。感光体ドラムの薄膜層では、主にドラム表面とアルミニウム素管からの反射光により干渉が発生し、膜厚に急激な変化がある場合、図 3.13 のような密度の高い干渉縞が現れる。膜厚むら検出処理のフローを図 3.14 に示す。

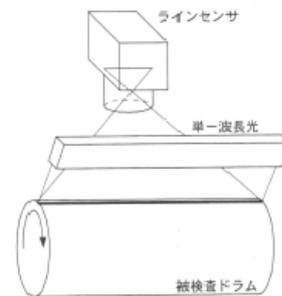


図 3.12 膜厚むら検査光学系

シェーディング補正後画像 (4096×2048 画素) を 8×8 の矩形ブロックに分割し、各矩形ブロックに対して DCT (離散コサイン変換) を施し、空間周波数解析を行う。各矩形ブロック毎の変換係数のうち、有意義な低周波領域 E (図 3.15 の太線で囲まれた領域) についてのみ着目し、正規化した後、周波数強度画像 (図 3.16) を生成する。次に、変換係数値が高い部分、すなわち縞コントラストの高い部分を抽出し、さらに、縦、横、斜め等の方向別のブロック連結条件によるフィルタ処理、つまり縞は 2 次元的には滑らかに連続しているという性質を利用して、干渉縞部分を検出する (図 3.17)。

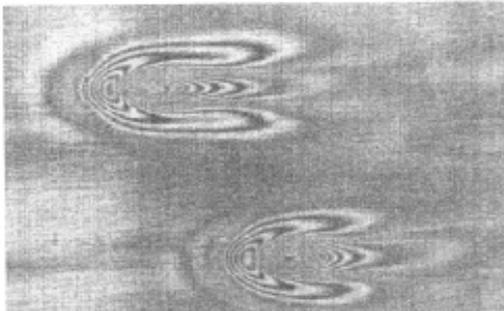


図 3.13 膜厚むらによる干渉縞



図 3.14 膜厚むら検査アルゴリズム

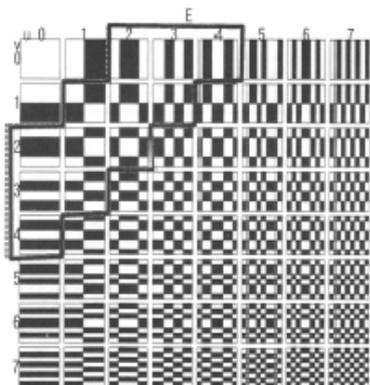


図 3.15 変換係数に対応する基底画像

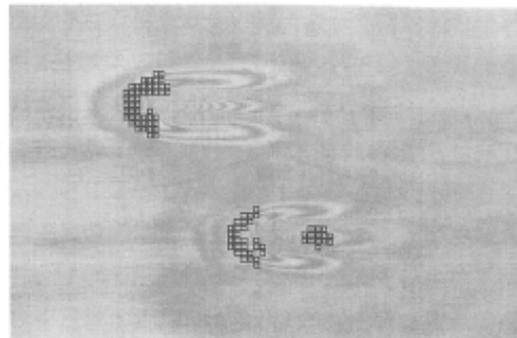


図 3.17 干渉縞検出例

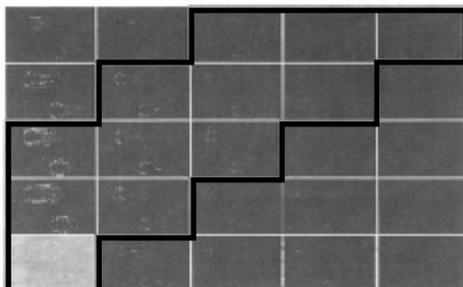


図 3.16 周波数強度画像

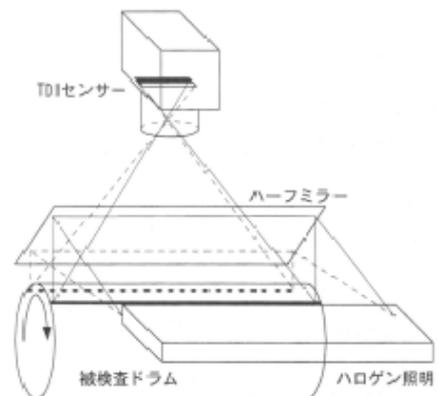


図 3.18 内部欠陥検査光学系

内部欠陥の撮像光学系は、図 3.18 のように同軸落射光学系で構成され、光源はハロゲンランプを用い、2048 画素、8bit の TDI (Time Delay and Integration) 式ラインカメラを使用している。TDI 式ラインカメラは、1 次元アレイセンサを複数段備えており、ドラム回転に同期して、各アレイで順に同一部分を撮像・蓄積する事によって、高速・高感度で高 S/N 比画像を撮像することができる。処理フローを図 3.19 に示す。ドラム縦方向に現れる塗布むらの様な、低コントラストな濃淡むらの検出を主な目的にしている。検査画像を矩形領域に分割し X 軸方向 (ドラム縦方向) に射影して分散値を求める事により、ドラム縦方向のむらを強調するとともに、照明むら・シェーディングの影響を低減させている。

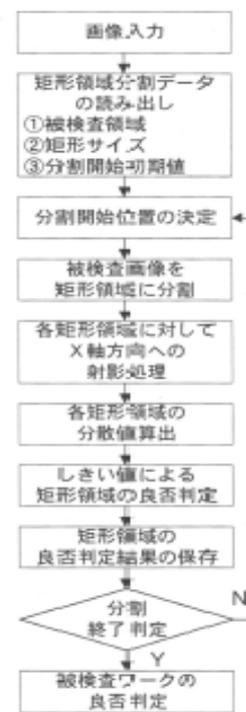


図 3.19 内部欠陥検査アルゴリズム

最後に、表面欠陥の撮像光学系は、図 3.18 の光学系において、カメラを 4096 画素のラインカメラに置き換えたものである。図 3.20 に示すように、TDI 式ラインカメラは 2 次元的な広がりを持って撮像を行う為、キズ、異物を観察する際に、アレイの初期段と修了段 (図 3.20 の A 及び C) では主に乱反射成分を検出するため欠陥部が高輝度になり、アレイの中間段 (図 3.20 の B) では主に正反射成分を検出するため欠陥部は低輝度になり、これらが蓄積されるとコントラストが低くなってしまふ。よって、ドラム表面のキズ・異物の撮像はラインカメラの方が適している。

図 3.21 に装置全体の構成を示す。被検査ドラムは右から左へ順番に搬送され、上述した 3 つの検査が行われる。各検査方法の概要や、性能を表 3.1 にまとめた。

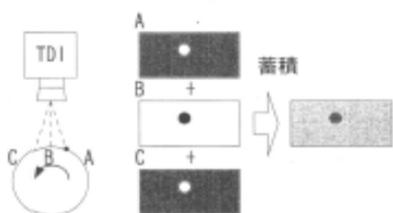


図 3.20 TDIカメラによる表面異物の撮像

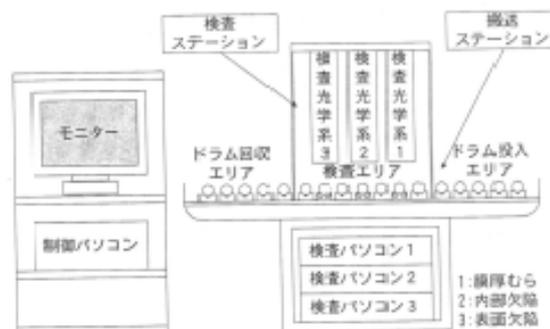


図 3.21 システム構成

また、本検査機には、しきい値決定モードという機能が備わっている。これは、良品サンプルを投入し、仮しきい値で自動運転をさせ、欠陥が発生した場合はしきい値を緩くし、発生しない場合はしきい値を厳しくしていき再検査処理が行われ、適なしきい値を効率良く決定できる。

表 3.1 検査方法と性能

	膜厚むら	表面欠陥	内部欠陥
欠陥の種類	膜の厚さのむら	表面のキズや異物	内部の異物や気泡、 堵膜の色むら
目視検査手法	単一波長照明による 干渉縞観察	白色光による乱反射 光観察	白色光による正反射 光観察
光学系	正反射光	同軸落射	同軸落射
照明	単一波長光	ハロゲン	ハロゲン
センサ	ラインカメラ	ラインカメラ	TDI 式ラインカメラ
画素数	4096 画素	4096 画素	2048 画素
階調	8bit	8bit	8bit
検出感度 (mm)	1.0×1.5	0.78×0.75	0.72×0.72
分解能 (mm)	0.09×0.12	0.09×0.12	0.18×0.18
タクトタイム	10.5 秒 (φ50、L350mm)		

(V) 事例 3 外観欠陥と電氣的欠陥の検出⁵⁾

この事例では、①明暗変化が強く伴う欠陥（モノクロ欠陥）に対して明視野レンズシステム、②明暗変化があまり伴わず R（赤色）成分の変化が強い欠陥（R 欠陥）に対しては R フィルタ挿入の明視野レンズシステム、③色や明暗の変化が少なく微妙な凹凸が伴う欠陥（凹凸欠陥）に対して微分干渉レンズシステムを用意している（図 3.22）。但し、③の微分干渉レンズシステムで、事例 2 の膜厚むらのような欠陥を検出することはできない。①、②のレンズシステムはハロゲンランプによる同軸落射式である。また、何れのレンズ系も、ワーキングディスタンスは 20mm で、有効視野は 5.4mm（ラインカメラ 2048 画素、

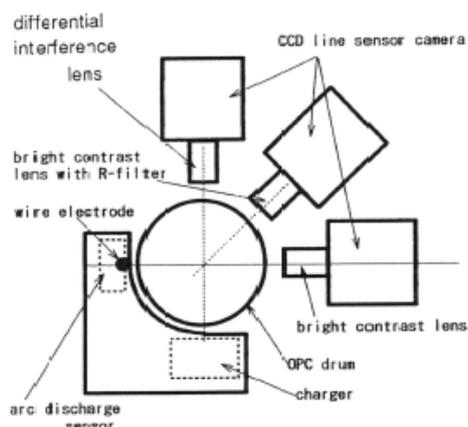
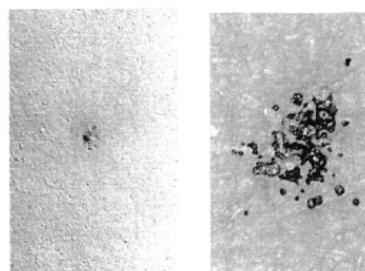


図 3.22 装置構成



(a) 印刷前 (ドラム上) (b)印刷後 (紙上)

図 3.23 印刷後の品質比較

8bit) である。被検査ドラム径 $\phi 30\text{mm}$ 、検査領域 225mm の場合、撮像に 18 秒、データ処理・結果転送及び判定に 1 秒掛かる。

感光体ドラムの場合、外観そのものが必要な機能と必ずしも一致しない場合もある。例えば、感光体帯電時には高圧ロール電極が感光体塗膜に接触するが、塗膜にピンホールや、アルミニウム素菅に微小突起があると、そこが起点となって絶縁破壊を起こす。しかしながら、下地に存在する微小突起は外観からはほとんど認識できない。そこで、本事例では、塗膜表面から数ミリ離れた位置に、ワイヤー電極を設け、ワイヤーとドラム間に高圧を印加し、ピンホール等によって生じる火花放電を検出する。

また、感光体上での外観欠陥と、印刷後の品質を比較してみると、必ずしも対応しないことがある。その例を図 3.23 に示す。感光体上での大きさ(a)に対して、印刷後は紙の上では数倍拡大されて現れ(b)の様になる。つまり、外観検査だけでなく、必要な機能により近い特性値を用いた評価も取り入れていく必要があるといえる。

3.3.3 定着ローラ自動外観検査装置の事例⁶⁾

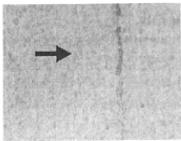
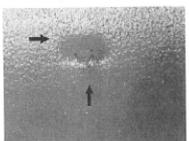
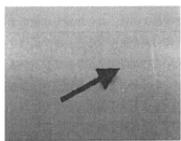
定着ローラは、アルミニウム素菅に接着剤であるプライマーを塗布し、その上にフッ素樹脂層を静電塗布して、研磨、洗浄後、焼成した構造である。表面がゆず肌状で、粗さが R_a で $1\mu\text{m}$ 程度であることから鏡面性は低い。そのため、表面が鏡面状態である感光体ドラムに対して、正常面の信号にノイズが大きくなり、不良欠陥のみを検出するのが困難となる。この事例でも、欠陥の特徴に合わせて複数の検出方法を用意している。基本的な構成は蛍光灯によるスリット状光源とラインカメラの組合せであるが、欠陥の種類に合わせて最適な受光位置を選択している (図 3.24、表 3.2)。

色むらは反射率が正常面と異なること、異物欠陥は光が散乱することから、正反射光 (図 3.24 (a)) ないし散乱光 (図 3.24 (c)) の受光量レベルが変動して欠陥信号が得られる。ここでは正反射光 (図 3.24(a)) を選択している。緩やかな膨らみ、凹みに対しては、スリット光像の境界部分に合わせるとコントラストが上がることから、図 3.24 (b) 示す位置で受光する。また、円周方向の切削傷に対しては、ローラ両端からハロゲン光スポット光を照射すると、円周方向の欠陥に対して直行方向からの平行光となり、欠陥部の抽出が可能となる (図 3.25)。

正常面が低光沢の表面はゆず肌状でありカメラ信号のノイズは大きくなる。繊維異物などは図 3.25(a) に示すように正常面ノイズと欠陥信号のコントラストが小さく、突起に比べ S/N 比が低下し、閾値処理すると途切れ状の画像になってしまう (図 3.26(b))。そこで、途切れ状の

個々の中心位置の距離を計算し、一定距離以内にあるものは連結して1つの欠陥と見なす。正常面のノイズ画像は近傍して現れることはないため、欠陥部のみを抽出可能となる。

表 3.2 欠陥種類と検出方法

欠陥種類	色むら、異物、へこみ	緩やかな膨らみ凹み	円周方向の切削傷
発生要因	塗装洗浄付均一 異物混入	溶剤の乾燥中	研磨工程
撮像方法	正反射光	スリット光像の境界の変形	
	図 3.24(a)	図 3.24 (b)	図 3.25(c)
欠陥例			

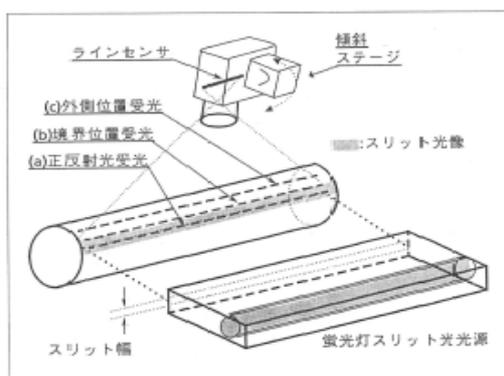


図 3.24 蛍光灯スリット光受光方式

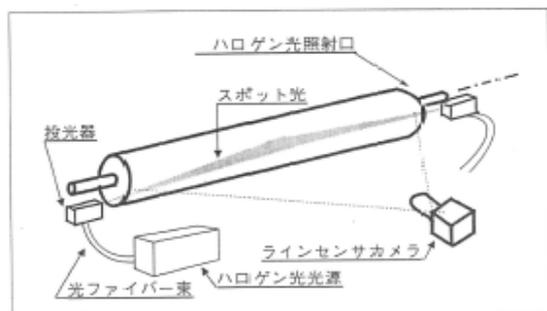


図 3.25 ハロゲン光スポット光方式

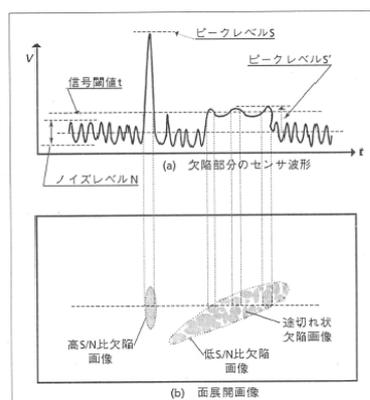


図 3.26 低 S/N 比表面欠陥の途切れ状画像

3.4 おわりに

複写機、プリンター等の事務機器内で使用され、画像品質に大きな影響を及ぼすローラ

状部品の外観検査方法に関して、事例を中心に紹介した。ローラを回転させながら、その表面をラインカメラで撮像する基本的な構成は共通しており、欠陥の種類に応じて複数のカメラで検出を行っている。今後もカラー化（感光体ドラムは4本/1台）、高速・高解像度・高耐久化に伴い、検査機側も多品種対応、検査タクトの短縮、検出感度の向上等、更なる高性能化が必要となる。しかし、現状の方式は汎用性が高くなく、対象の特性（直径、表面粗さ、色合い等）が変わると、光学系や画像処理パラメータを調整するのに多大な労力を要する。このような作業自体を支援あるいは自動で最適化可能な手法が求められる。また、(IV)で述べたように、外観検査は必要な機能そのものと必ずしも一致しない場合がある。このような問題は、特にリユース部品の検査で益々大きな課題となり得る。外観以外に機能そのものを評価する手法を取り入れていく必要があると考えられる。あるいは、検出光学系を増やし、様々な情報から、主要機能と相関性の高い情報を得ていく必要がある。その場合、情報量が膨大になるため、有効な結果を効率よく導き出す手法の確立が求められる。

参考文献

- 1) 重山吉偉, 上田泰広, 中村淳良 (シャープ): 「OPC ドラム外観検査装置」, 電気学会産業システム情報化研究会資料, Vol.IIS-00 (2000), No.1-12, Page 47-52
- 2) 安川実, 重山吉偉, 上田泰広, 中村淳良 (シャープ生産技術開発セ): 「外観検査技術 OPC ドラム自動外観検査装置」, 光技術コンタクト, Vol.42 (2004), No.11, Page 598-606
- 3) 福田和彦 (富士ファコム制御), 柳沢邦昭 (富士電機 松本工場), 新井明夫 (富士電機): 「画像処理技術 複写機・プリンタ用有機感光体の自動外観検査システム」, 富士時報, Vol.70 (1997), No.5, Page269-273
- 4) 鎌田照己, 崎田隆二, 中山攻 (リコー 研究開発本部): 「輝線追従制御を用いた高感度外観検査技術」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (CD-ROM), Vol.2003, Page2 P1.2F.E7 (1) -2P1.2F.E7 (2)
- 5) えび沢勝英, 大嶋清志, 常松則夫, 上堀龍夫 (大日本インキ化学工業): 「OPC ドラムの欠陥検査装置の開発研究」, DIC Tech Rev, No.2 (1996), Page80-89
- 6) 広野歩, 小林政憲 (富士ゼロックス 生産技研) 佐田貞二 (富士ゼロックス コンポーネント開セ): 「フューザーロール表面欠陥自動検査」, Fuji Xerox Tech Rep, No.10 (1995)

4 ディスプレイ分野における画質検査

4.1 はじめに

過去、長年に亘ってディスプレイといえばブラウン管がその主役の座に位置していた。しかし近年、液晶、プラズマディスプレイを始めとして、有機 EL (Electroluminescence)、FED (Field Emission Display) 等新しい表示デバイスの技術開発・普及が著しく進みつつある。これら新しい表示デバイスの特徴として、ブラウン管より大きいもしくはより小さな表示サイズを作ることができる。このことにより民生・産業用の広い分野でブラウン管に取って代わる存在になった。そこで、これらの外観的要素以外でブラウン管に代わるためもしくは、新しい表示デバイス同士の競争を繰り広がる中で、消費電力以外に画質検査もその表示デバイスが市場に浸透するか否かの重要な鍵になっている。本章では、画質検査項目を挙げながら、その各項目の評価方法・特徴・注意点を説明し、将来の方向性を示す。

4.2 画質検査項目について

ここでは、現在一番使用用途範囲が広く身近な存在である液晶パネルの画質検査項目について述べることにする。項目としては

- 1) 輝度 (明るさ)
- 2) 色度 (色み)
- 3) コントラスト
- 4) 応答時間
- 5) 視野角
- 6) フリッカ
- 7) 輝度・色度ムラ
- 8) 解像度
- 9) 欠陥
- 10) ガンマ特性

等が挙げられる。この中で 3)、4)、6) の項目において、実際の測定は輝度で行われる。また 5)、7) は輝度・色度両方の尺度で測定・評価される。よって色彩輝度計 (輝度計) が画質検査において非常に大きな役割を占める。9) の欠陥検査については CCD カメラを用いたり、一部目視検査を行っているようである。また 3)、4)、5)、8) の項目は設計段

階で押さえていることが多く生産現場で検査することはあまり無いようである。

まずは検査にとって重要な色彩輝度計について解説を行い、個々の検査項目で主な点について述べていく。

4.3 色彩輝度計について

4.3.1 輝度・色度測定

輝度・色度とは光源自体の分光スペクトルに人間の目の感度を掛け合わせた結果で、実際に人が感じる明るさ・色みに相当する。波長に対する人間の目の感度を図 4.1 に表す。これは CIE（国際照明委員会）が 1931 年に制定したものである。

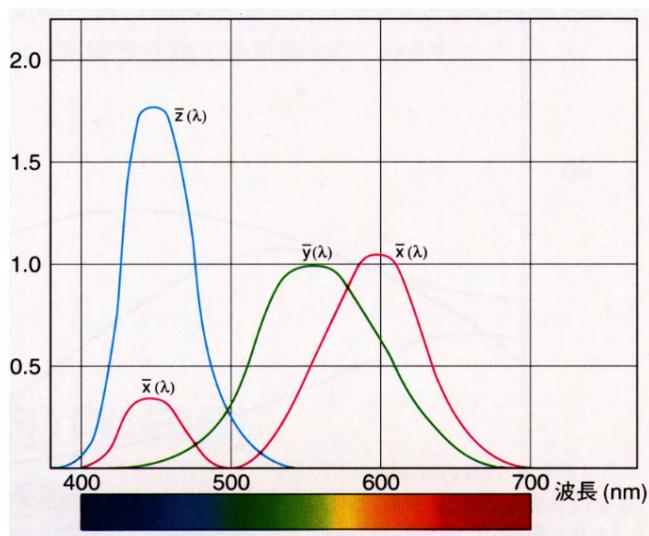


図 4.1 人間の目に対応する分光応答度

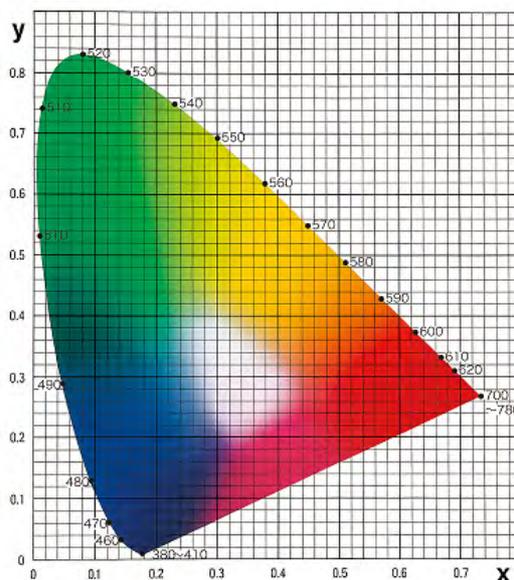


図 4.2 xy 色度図

人間の目は赤と少しだけ青に感度のある $x(\lambda)$ と緑に感度のある $y(\lambda)$ と青に感度のある $z(\lambda)$ の 3 個のセンサ（以下 CIE1931 等色関数と呼ぶ）が組み合わさったものと等しいということになる。これは JIS（日本工業規格）でも採用されている。被測定光源の分光スペクトルに CIE1931 等色関数を掛け合わせたそれぞれの測定結果を X 、 Y 、 Z とし、これらの値から一つの色を x と y の座標位置で色を表した図を 4.2 に表す。

また、 $y(\lambda)$ を明るさの感度と同じということにしており、輝度もしくは照度を測定する場合は、この $y(\lambda)$ のセンサのみを使用すればよい。

4.3.2 色彩輝度計の種類

色彩輝度計を原理的に分類すると

- 1) 刺激値直読方式
- 2) 分光方式
- 3) 分光フィッティング方式（分光センサを用いた刺激値直読方式）

の3種類がある。JISでの分類は1)と2)だけになる。

刺激値直読方式はCIE1931等色関数に近似した3個のセンサを内蔵したもので、センサからの出力により輝度・色度を求める方式である。

分光方式は被測定光源の各波長（一般的には380nm～780nm間の1nmピッチ毎）のエネルギー量を測定し、それにCIE1931等色関数を各波長毎に乗じる演算を行うことで輝度・色度を求める方式である。各方式の特徴を表4.1に示す。

表 4.1 刺激値直読方式と分光方式の特徴

	刺激値直読方式	分光方式	理由
絶対値精度	低い	高い	分光型の分光応答度が等色関数に一致しているのに対し、刺激値型の分光応答度は等色関数に対し誤差がある。
大きさ 構成	小さい シンプル	大きい 複雑	分光素子が必要とする光学部品が多い センサ数も、刺激値型が3個と少ないのに対し、分光型はセンサ数が数100個となる。
感度	高い	低い	1センサあたりの受光光量が、刺激値型に対し分光型は非常に小さくなるため。
速度	速い	遅い	分光型は刺激値型に対し、処理データ数が多い
得意な用途	白色測定 ガンマ測定・ ライン調整	白色・単色測定 LED測定	単色測定では特に絶対値精度に差が出る 直読型（ユーザー校正）は、測定光源の波長方向の変化に弱い 直読型は測定速度が速い

分光フィッティング方式は従来分光方式で数百個のセンサを用いているところを数十個レベルのセンサに置き換える。この数十個のセンサ出力に最小二乗法で求めたある係数を掛けたものを最適な形で組み合わせることで誤差の少ない XYZ 出力を得て、輝度・色度値を出す方式である。長所としては高精度・小型軽量になり、短所としては分光スペクトルの出力が得られない。概念を図 4.3 に示す。

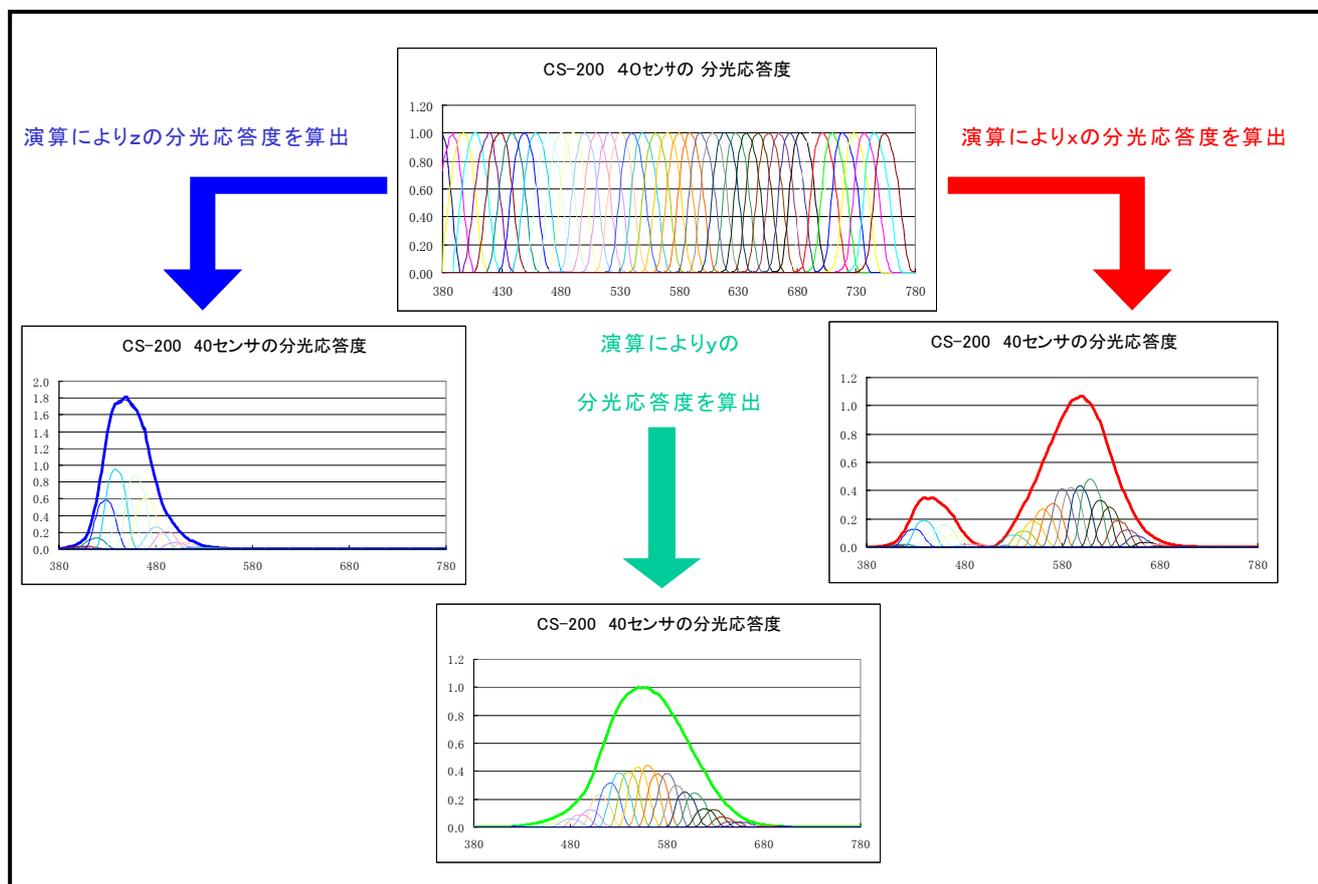


図 4.3 分光フィッティング方式

従来、輝度・色度測定には刺激値直読方式の色彩輝度計を用いることが多かったが、近年液晶パネルの低輝度化、表示色度領域の拡大化に伴い、輝度・色度測定に対しての要求精度レベルが高くなってきており、分光方式もしくは分光フィッティング方式の色彩輝度計を用いることが多くなってきた。

4.4 各種画質検査項目詳細について

この章では 4.2 章で記した画質検査項目について、解説を行う。

4.4.1 コントラスト

ディスプレイの白表示時の輝度値と黒表示時の輝度値の両者間の輝度比率である。

コントラスト測定の場合、黒輝度（低輝度）の測定精度の良い色彩輝度計を選択することが肝要である。色彩輝度計の場合、一般的には白輝度（高輝度）測定は精度良く測定できるが、黒輝度（低輝度）測定は、センサの物性上、S/N比が悪くなり、確度・繰返し性共に悪くなる。最近では、測定時間を長くしたり、測定面積を拡大してセンサに入る光の量をアップさせることで低輝度精度を上げたりして対応している。

4.4.2 応答時間

（Ⅰ）静止画

ディスプレイの黒表示から白表示にもしくはその逆に表示が切り替わるのに必要な時間である。一般的には輝度計もしくは照度計のセンサ出力に近い回路部からアナログ出力電圧を取り出し、それをオシロスコープに接続し、輝度値に対応した電圧変化を読み取り、全体の電圧レベルの10%-90%の間の時間を応答時間とする。この場合、輝度計自身の電圧出力応答時間が測定誤差要因になる。よって輝度計の電圧出力応答時間の少ないものを選択することが重要である。

（Ⅱ）動画

ディスプレイ、特に液晶テレビにおいて動画評価が重要視され、動画の応答度速度も行われてきている。装置としては CCD カメラをベースにした測定機器がある。

4.4.3 視野角

ディスプレイの観察する方向によって輝度・色度が変わることがある。この特性が視野角特性である。視野角特性を測定する装置としては

- 1) 色彩輝度計もしくはディスプレイの角度を動かして測定する装置
- 2) 魚眼レンズのような広角レンズと CCD センサを組み合わせた装置

がある。それぞれに特徴があり 1) はコストが安くできること 2) は測定時間が非常に短いことが挙げられる。

4.4.4 フリッカ

ディスプレイの画面がちらついて見えることがある。これは画面輝度が短い周期で変動している状態を示している。よって微少時間内の輝度変動を観測できる色彩輝度計もしくは輝度計を用いて測定できる。フリッカ測定には輝度の時間的変動を交流成分と直流成分に分けてその比で表す方式と人間の目の周波数特性（20Hz以上の周波数の点滅には感じにくくなる）を考慮して、フリッカ成分を周波数毎に測定結果を出していく方式の二つがよく用いられる。液晶パネルの場合、フリッカを調整することができる場合があり、通常前者の方式で調整する。

4.4.5 輝度・色度ムラ

輝度・色度ムラを測定する場合、今までは色彩輝度計もしくはディスプレイの位置を移動させて、ディスプレイ内の複数個所の輝度・色度を測定していた。しかしこの測定方法だと、測定点数が増えるにしたがって、測定に要する時間も長くなり作業効率が悪くなる。また自動化にするとステージ・制御用ソフトウェアにかかるコスト負担も大きくなる。しかもテレビ用ディスプレイは大型化が進み、測定点数もより増加してきているのが現状である。

そこで、CCDをセンサに用いて一回の測定でディスプレイ画面全体の輝度分布・色度分布を測定する手法が生まれてきた。この方式だと測定時間が短い・ステージ等の機構なしで簡単に測定できるということから、装置の需要がここ数年非常に増してきている。CCDセンサを用いる測定は原理的に下記の二種類に分類される。

- 1) 刺激値直読方式
- 2) RGBカメラ方式

この両者の根本的な違いは、波長に対する分光応答度違いである。図4.4に示す。

RGBカメラの分光応答度のR、G、Bそれぞれの分光応答度は人間の目の感度と等しいXYZの分光応答度は異なる。そのためRGBカメラでの測定結果は、輝度・色度の絶対値からかなりずれることがある。その測定結果の一例を表4.2に示す。これは測定対象で表示された各種色の輝度・色度を分光放射輝度計で測定し、それを真値として差分を記載している。

また表中に“3CCD方式”と記載されているのがRGBカメラ方式のことである。この結果を見るとRGBカメラ方式の場合、輝度値・色度値共に、かなり誤差が大きくなる場合が多いことがわかる。RGBカメラ方式の特徴としてはコスト面で安い・測定時間が

短いがある。精度的には絶対値管理より相対値管理に適していると思われる。

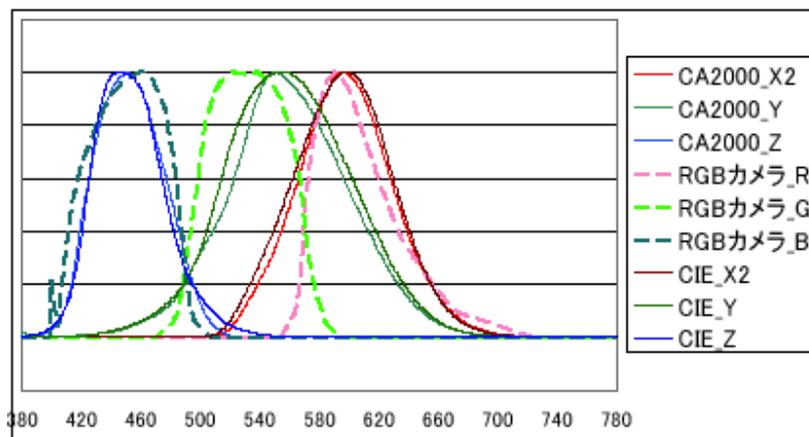


図 4.4 刺激値直読方式と RGB カメラ方式の違い

表 4.2 液晶 TV、プラズマディスプレイの精度比較

測定対象	色	三刺激値方式			3 CCD方式		
		輝度値	色度点 x	色度点 y	輝度値	色度点 x	色度点 y
LCD TV	W	-0.8%	0.002	-0.002	-1.5%	-0.011	0.031
	R	0.1%	0.001	-0.001	-72.4%	0.221	-0.221
	G	-0.4%	0.000	-0.003	11.1%	-0.109	0.047
	B	-2.3%	0.004	-0.004	34.4%	-0.029	0.065
PDP	W	-0.9%	0.002	-0.002	-15.1%	0.054	-0.016
	R	1.7%	-0.004	0.004	-88.8%	0.305	-0.309
	G	-2.0%	0.013	0.004	30.7%	-0.125	0.089
	B	-3.3%	0.000	-0.003	-1.3%	0.001	0.017

従来の色彩輝度計での輝度・色度測定をこのような2次元測定で全て行う傾向が強くなってきている。これは従来ディスプレイの輝度・色度調整は画面全体に一様にしかできなかったものが、画面内を何分割化してその分割エリア毎に輝度・色度調整ができるようになってきたことも大きく影響してきていると思われる。

図 4.5 に携帯電話の輝度分布測定結果を示す。これは輝度値が高いと白、低いと黒の表示にしている。画面中央部の少し下の部分に輝度の明るい部分があり、右の下部分は輝度が暗いのがわかる。

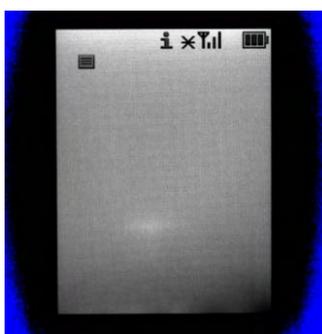


図 4.5 携帯電話測定結果

4.4.6 解像度

ディスプレイで、TV 放送を表示するデバイスに対して、決められた画像信号（静止）で表示を出して、目視で表示されている線の数を目視で数えて測定している。最近、動画状態での解像度評価方法も出てきている。

4.4.7 ガンマ特性

ディスプレイの色を構成している赤、緑、青、そしてこれらの混色したものになる白について、階調を変えるとどのように明るさの強度が変化するかの特徴である。明るさの最大強度を 1 として正規化したものを縦軸、階調を横軸とする。



図 4.6 ガンマ特性

サンプルを測定したガンマ特性図を 4.6 に示す。

これも色彩輝度計で測定できるが、ポイントとして

a) XYZ 値をそれぞれ計測出力できること

赤の明るさの強度を X、緑の明るさの強度を Y、青の明るさの強度を Z、白の明るさの強度を Y で得るため。

b) 測定速度が速いこと

例えば、赤、緑、青、白を 256 階調ずつ測定すると、合計 1024 回測定しないといけないため、測定速度が遅いと全体の計測に要する時間が長くなるため。

ガンマ特性のバランスが悪いと、例えば、青の強度が他の赤、緑より全体的に強い状態だと、白が青っぽい白になり、不自然な色再現になる。

4.5 おわりに

各種ディスプレイが今後も汎用的に使われるために、いかに消費電力を抑え、画質を向上させ、そしてコストダウンを図れるかが大きなポイントになる。

その中でコストダウンを図るためには、生産現場での検査に要する工数・設備も最低限にする方向になると思われる。解説してきた流れに沿うと、将来的には CCD センサを用いて輝度・色度のみならず、他の評価項目も計測できるような方向に進むと考えられる。

参考文献

- 1) 電子情報技術産業協会発行：電子情報産業協会規格 EIAJ ED-2522 マトリクス形液晶表示モジュール測定方法

5 次世代内視鏡イメージングへの新展開

5.1 はじめに

近年、癌等の腫瘍の診断及び治療の質的向上のための様々な検討が施行されているが、これを達成するには如何に早期の段階で腫瘍を発見し、治療するかが重要な鍵となる。1983年に Welch-Allyn 社から低侵襲かつ高精細に生体粘膜を観察可能な電子内視鏡が市場導入され、現在に至るまで腫瘍の早期発見や早期治療へ貢献する医療機器として広く普及している。一方、従来の内視鏡システムは、スクリーニング能（存在診断能）、切除すべき腫瘍範囲の特定化、更に、生検箇所を狙撃性という観点で必ずしも十分な医療機器とはいえない。

そこで本稿では、従来の内視鏡イメージングが抱える課題を改善しうる次世代の内視鏡イメージング技術である、Narrow Band Imaging, Auto-Fluorescence Imaging, Infra-Red Imaging について紹介し、各々が切り開く内視鏡診断の近未来の世界について述べたい。

5.2 Narrow Band Imaging

5.2.1 概要

Narrow Band Imaging（以下、NBI）は、数十 nm 程度の波長帯域幅が非常に狭い可視域照明光を生体粘膜に照射することにより、粘膜表層付近に存在する毛細血管像や粘膜表層の微細構造を強調する技術である¹⁾。

一般に癌等の腫瘍は血管の拡張や新生等が生起されるため、NBI 技術を用いて患部を観察することで、通常白色光観察時と比べて毛細血管像や粘膜微細構造の視認性は飛躍的に向上する。したがって、NBI は病変部の見落とし防止や腫瘍と非腫瘍の鑑別診断へ貢献する次世代の内視鏡イメージング技術として大いに期待されている。

5.2.2 原理

本節では NBI による毛細血管像の強調メカニズムについて説明する。粘膜表層に存在する血管パターンを強調させるためには、血管中を流れる血液に強く吸収され、なおかつ、生体粘膜内で拡散しにくい（即ち、光散乱性の強い）波長域の光を利用すればよい²⁾。

一般に、波長が短い光ほど光の散乱は強く、また、血液中の酸素運搬を担うタンパク質であるヘモグロビンは 415nm 付近の波長帯において光吸収ピークを持つ。したがって、415nm 付近の光を用いれば、粘膜表層を走行する毛細血管領域でこの光は強く吸収され、血管以外の粘膜領域では光の吸収はさほど起こらないため、NBI 技術は粘膜表層の毛細血管領域とその周辺粘膜領域のコントラストを従来の白色光観察技術と比べて飛躍的に向上させることが可能となる。

5.2.3 NBI システム

図 5.1 に NBI のシステム構成を示す。NBI システムは、主に光源ユニット、内視鏡、ビデオプロセッサ、観察モニタにより構成されている。

まず、光源ユニット内部には、キセノン光源、RGB 回転フィルタ、狭帯域フィルタ (NBI filter) が配置されており、光軸上に狭帯域フィルタが配置されると、中心波長 415nm と 540nm (半値幅は各々 55nm, 30nm) の狭帯域光が同時刻に RGB 回転フィルタ面へ到達する。415nm の狭帯域光は RGB 回転フィルタの B フィルタが光軸上に位置した時に光源ユニットから照射され、同様に 540nm の狭帯域光は RGB 回転フィルタの G フィルタが光軸上に位置した際に光源ユニットから粘膜へ照射される。なお、R フィルタが光軸上に差し掛かっても、光源ユニットからは一切の照明光は粘膜へ照射されない。

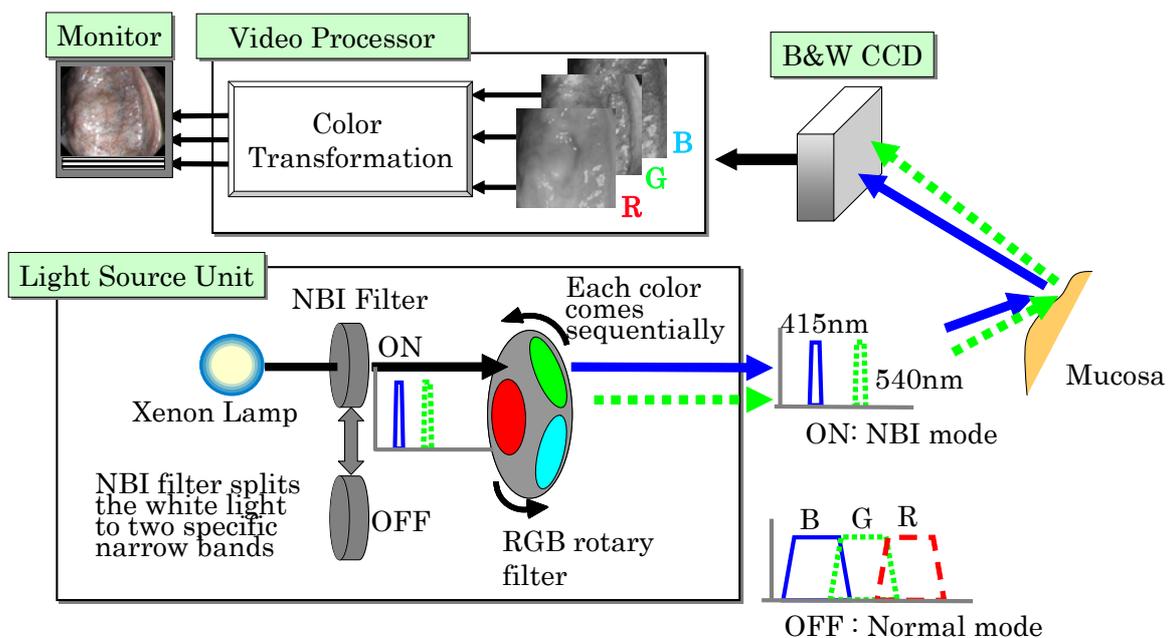


図 5.1 NBI システムの概略図

次に、面順次的に粘膜へ照射される各狭帯域光は、時間を隔てて粘膜から反射された後、内視鏡先端のモノクロ CCDにて観測される。モノクロ CCDから出力される各映像信号は、ビデオプロセッサ内の色変換回路において色調整等の画像処理を施され、観察モニタ上に観察対象粘膜の狭帯域画像として表示される。

5.2.4 舌裏粘膜への適用例

図 5.2-1 から図 5.2-3 は人の舌裏粘膜を NBI で観察した結果であるが、中心波長 600nm (図 5.2-3)、及び、540nm (図 5.2-2) の狭帯域光よりも、415nm (図 5.2-1) の狭帯域光を用いる方が、粘膜表層付近に存在する毛細血管のコントラスト、即ち、毛細血管パターンの視認性が良いことが確認できる。

一般に、早期癌は粘膜の浅い領域から発生し、それらの多くは周辺の毛細血管を集積する血管新生の傾向を有するため、NBI 技術は病変部のスクリーニング能の向上、また、病変の鑑別診断に大いに貢献するものと考えられる。現在まで、中下咽頭、食道、胃、大腸等、様々な消化管粘膜に対する NBI の医学的有用性が多数報告されている。

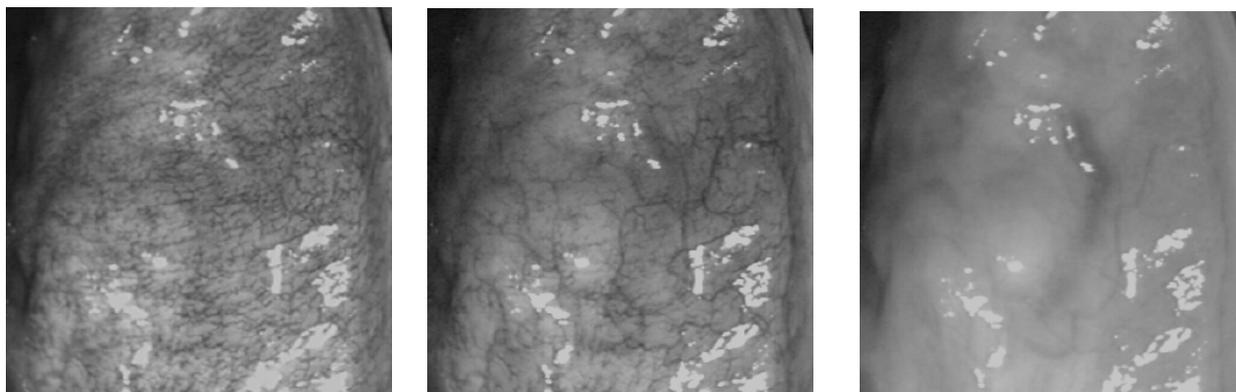


図 5.2-1 中心波長 415nm 図 5.2-2 中心波長 540nm 図 5.2-3 中心波長 600nm

5.3 Auto-Fluorescence Imaging

5.3.1 概要

生体粘膜へ励起光を照射すると、粘膜内部に存在するコラーゲンやポリフィリン等の蛍光物質から自家蛍光が発生する。Auto-Fluorescence Imaging (以下、AFI) は、この自家蛍光を検出することにより、腫瘍性病変と正常組織を異なる色調でイメージングする技

術である。AFI は粘膜構造の形態変化に乏しい病変（例えば平坦型腫瘍）に対する存在診断能改善への期待が高く、現在まで早期の食道癌、大腸癌、早期胃癌への医学的有効性が検討されている。

5.3.2 原理

一般に、生体のような多重散乱媒質へ光を照射すると、反射、散乱、吸収といった光学的な現象が起こるが、一方、僅かではあるが生体粘膜内部に存在する蛍光物質から自家蛍光が発生する。表 5.1 に示すように、生体内部には様々な蛍光物質が含まれており、例えば、紫外～青色の波長帯域の励起光を生体へ照射すると、Collagen や NADH 等から微弱ではあるが自家蛍光が発生する³⁾。

表 5.1 生体内部に存在する蛍光物質とその特長

Fluorephore	Excitation (nm)	Emission (nm)	Remarks
Tryosine	280	300	Amino Acid
Tryptophan	275	350	Amino Acid
NADH	340	450	Metabolic cofactor
FAD	450	515	Metabolic cofactor
Collagen	280	310	Protein (skin, bone, connective tissue etc.)
	265	385	
	330	390	
	450	530	
Elastin	350	420	Protein (aortal cortex, connective tissue etc.)
	410	500	
	450	520	

図 5.3 は、AFI で使用する励起光のスペクトルと、in vivo で計測した大腸の正常組織と腺腫（adenoma）の自家蛍光スペクトルを示したグラフである。このグラフから、腺腫は正常組織と比べて蛍光強度が減弱していることが分かる。これは、蛍光物質から生じる自家蛍光が、腫瘍周辺部の血管増生に伴い強く吸収され、更に、腫瘍のポリープ化に伴う粘膜肥厚によって引起される蛍光の多重散乱の影響により減衰するため、腺腫の自家蛍光強度は正常組織のそれに比べて著しく減弱したものと考えられる。

以上から、AFI は正常組織や腫瘍性病変の自家蛍光強度の違いを内視鏡的に捉えることで、組織性状の違いを異なる色調として描画することが可能である。

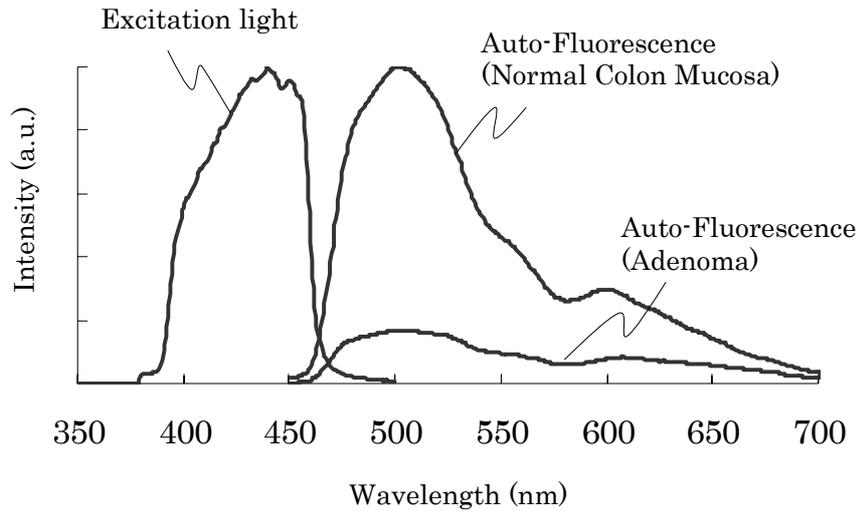


図 5.3 大腸粘膜の正常組織と腺腫の自家蛍光スペクトル

5.3.3 AFI システム

AFI システムを図 5.4 に示す。光源のキセノンランプから照射される白色光は回転フィルタにより分光され、390nm~470nm の励起光と中心波長 550nm の緑色光が順次生体粘膜へ照射される。次に、励起光照射により発生する自家蛍光と、緑色光の反射光を、各々内視鏡先端部に設置された高感度 CCD により検出し、自家蛍光画像と反射光画像を取得する。ここで、高感度 CCD の前面には微弱な自家蛍光を感度良く検出するための励起光

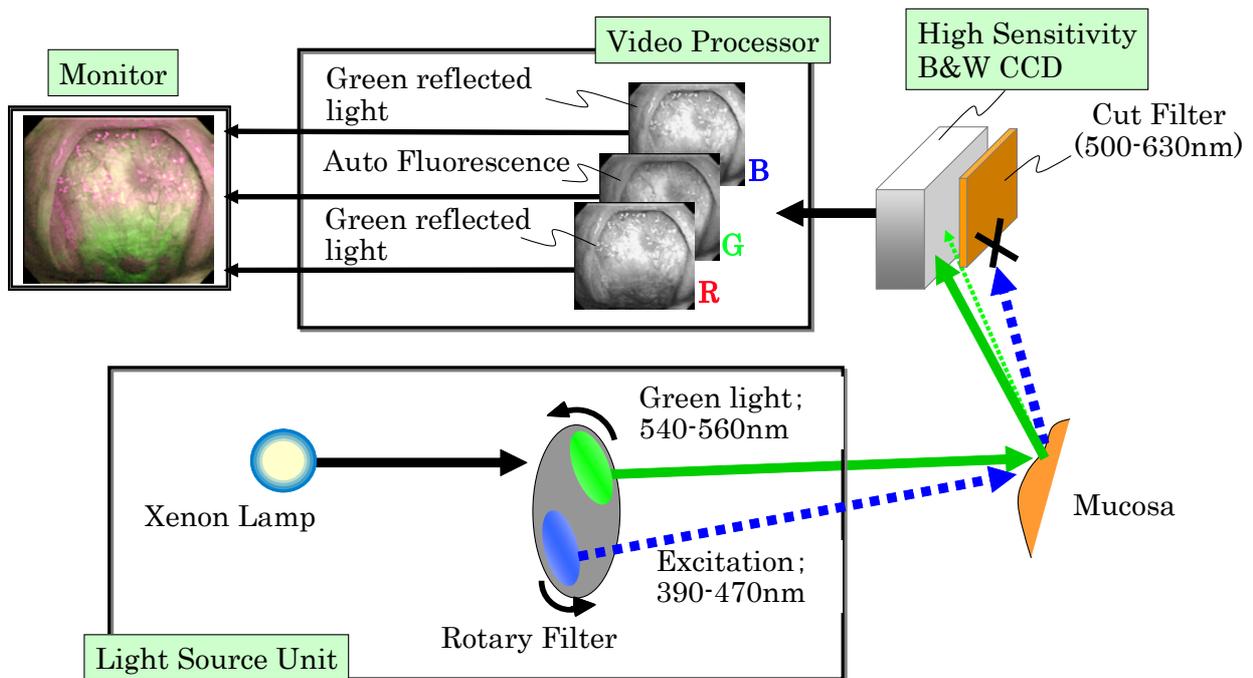


図 5.4 AFI システムの概略図

カットフィルタ（波長透過域 500-630nm）が設けられている。

取得した反射光画像はモニタ上の R 及び B チャンネルに、また、自家蛍光画像は G チャンネルに割り当てるようにプロセッサ内部で信号処理が行われ、正常組織と病変組織が異なる色調となるように観察モニタ上に擬似カラーで表示される（正常組織は緑色、病変組織はマゼンタ色）。

5.3.4 消化管粘膜への適用例

表 5.2 及び表 5.3 に胃粘膜と大腸粘膜それぞれに AFI を適用した結果を示す⁴⁾。胃病変（胃癌、腺腫）と非腫瘍（胃炎、潰瘍）に関して、AFI の診断結果と病理診断所見を比較したところ、感度 97%、特異度 81%であった。また、大腸腺腫（adenoma）と非腫瘍（hyperplastic）に関しては、感度 88%、特異度 82%であった。このように、AFI による腫瘍鑑別診断への有効性が示唆されている。

一方、自家蛍光画像中の色調は、炎症の度合いや腫瘍周辺の血液の有無、更に、粘膜の厚みによっても変化する。今後は、感度及び特異度を高水準に安定して得るための装置改良が必要である。

表 5.2 胃粘膜の腫瘍と非腫瘍に対する AFI 診断結果と病理診断所見との比較

		Pathological diagnosis		Total
		Neoplastic	Non neoplastic	
AFI diagnosis	Neoplastic	37	5	42
	Non neoplastic	1	21	22
Total		38	26	64

(Sensitivity 97%, Specificity 81%)

表 5.3 大腸粘膜の腫瘍と非腫瘍に対する AFI 診断結果と病理診断所見との比較

		Pathological diagnosis		Total
		Adenoma	Hyperplastic	
AFI diagnosis	Adenoma	104	7	111
	Hyperplastic	14	31	45
Total		118	38	156

(Sensitivity 88%, Specificity 82%)

5.4 Infra-Red Imaging

5.4.1 概要

Infra-Red Imaging（以下、IRI）は粘膜深部の血管や血流に関する生体情報を近赤外光を利用することで映像化する内視鏡イメージング技術である。本技術は、可視光では到達できない粘膜深部の生体情報を取得可能なため、様々な医学応用が期待されている。

5.4.2 原理、システム

図 5.5 に IRI システムの概略図を示す。キセノンランプから照射される光は、赤外光カットフィルタまたは赤外光透過フィルタを通過した後、RGB 回転フィルタを透過する。赤外光カットフィルタと赤外光透過フィルタの分光特性は図 5.6 のようであり、白色光観察時には赤外光カットフィルタが光軸上に、また IRI 観察時には赤外透過フィルタが光軸上に設置される。また、RGB 回転フィルタの分光特性は図 5.7 のように可視域と近赤外域それぞれに透過特性を持つ 2 峰性の分光特性を持つ。したがって、白色光観察時は赤外光カットフィルタと RGB 回転フィルタの組合せにより、図 5.8 に示す RGB の光が時間を隔てて粘膜へ照射される。

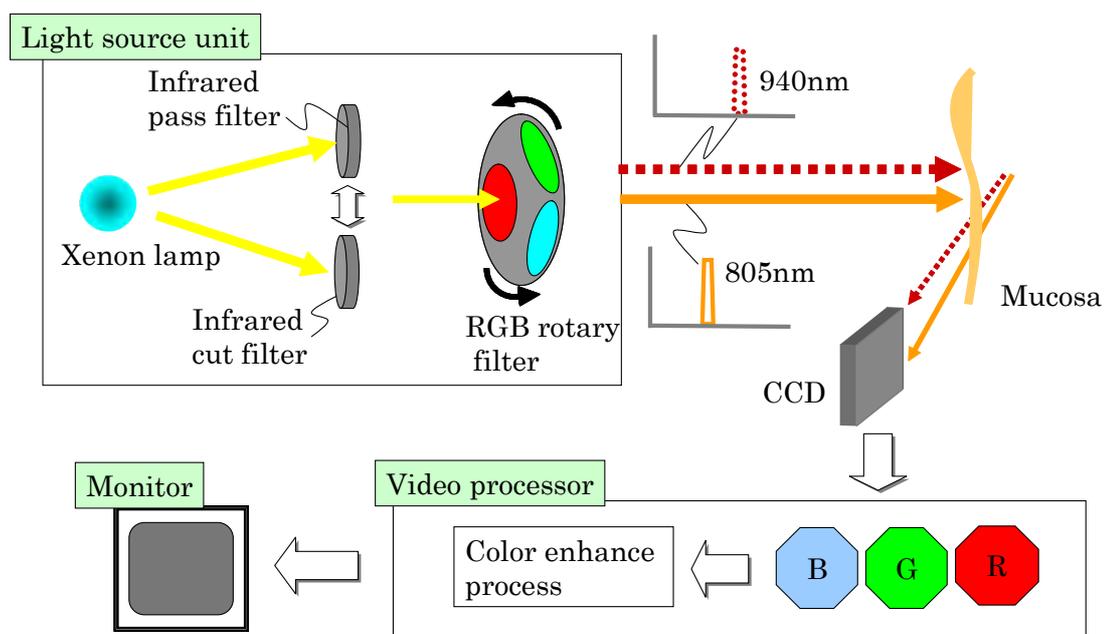


図 5.5 IRI システムの概略図

IRI 観察時には、赤外透過フィルタと RGB 回転フィルタの組合せにより図 5.8 の 805nm 帯 (790nm-820nm) と 940nm 帯 (905nm-970nm) の二種類の光が粘膜へ照射される。なお、805nm と 940nm の光はそれぞれモニタ上にて黄色と青色で描出されるようにプロセッサ内部で画像処理される。

通例、近赤外光を強く吸収する ICG (Indocyanine Green) を血管造影剤として IRI 診断前に静注する。ICG は血中でタンパク質と結合することで図 5.9 に示すような 805nm を吸収ピークとする吸収特性を有する。つまり、血管部位では 940nm の照明光よりも 805nm の照射光が ICG により強く吸収されるため、例えば ICG を豊富に含んだ比較的粘膜深部に位置する太い血管は、モニタ上で青く描写される。因みに、図 5.5 の Color Enhanced Process では、青みを強調する色彩強調処理が行われており、ICG 濃度の微かな差が大きな色調変化としてモニタへ出力される。

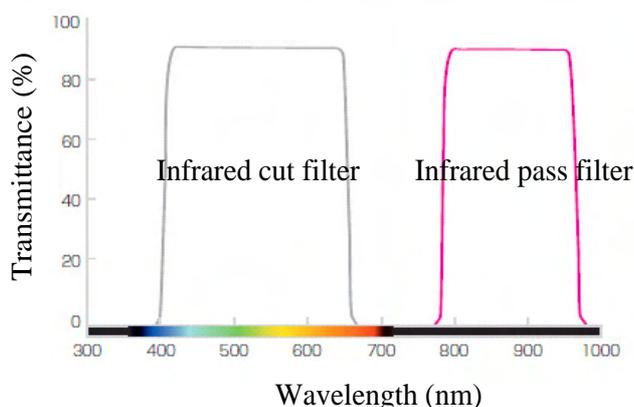


図 5.6 赤外光カットフィルタと赤外光透過フィルタの分光特性

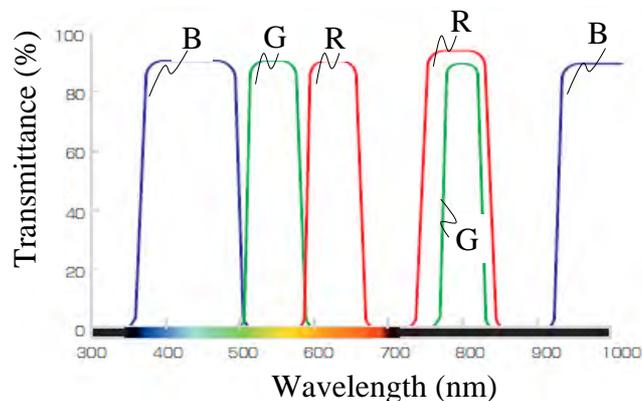


図 5.7 RGB 回転フィルタの分光特性

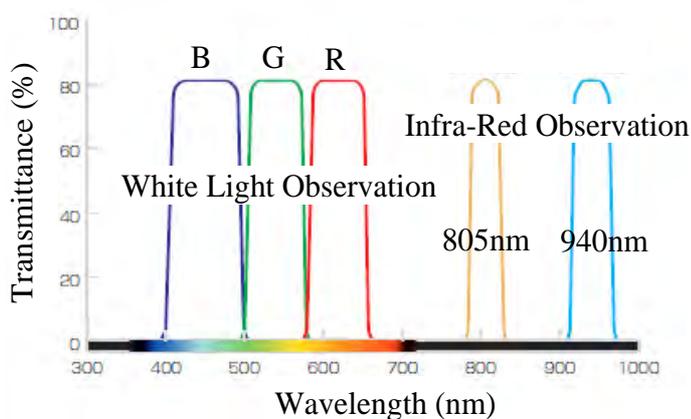


図 5.8 通常観察時、及び、IRI 観察時における照明光の分光特性

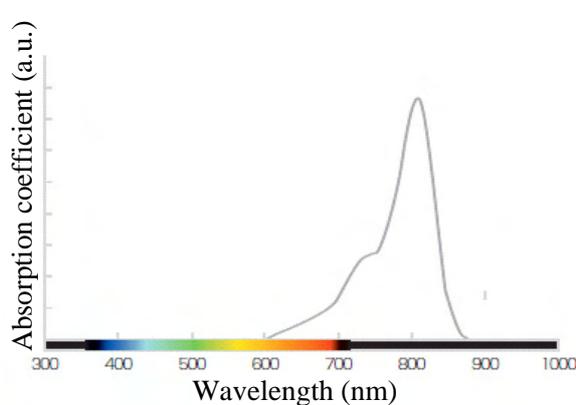


図 5.9 ICG の吸収特性の波長依存性

5.4.3 IRI の消化管への応用例

(I) 食道静脈瘤

食道静脈瘤硬化症療法時に硬化剤を ICG に混ぜて体内に注入した後に IRI 観察すると、必要な部位に硬化剤が到達したかどうかを判断できる。また、治療後の効果判定の際、ICG 静注後に IRI 観察することで、僅かな血管の残存度合いから静脈瘤の消失を精度良く確認できる可能性もある⁵⁾。

(II) 腫瘍の深達度診断

食道癌や胃癌の浸潤の度合いを知ることは、内視鏡的治療の適用可否を判断する上で重要な情報となる。上記で述べたように、癌等の病変は血管新生により周辺組織の血管を集める傾向にあるため、血管構築パターンは正常のそれとは大きく異なる。従って、深層の血管異常所見を IRI 観察によりイメージとして捉えることで、迅速な診断や治療方針の決定が行える可能性がある⁶⁾。

5.5 今後の展開

本稿で述べた“特殊光観察技術”に加えて、我々は内視鏡下で顕微鏡観察を可能とする Endo-Cytoscopy System (以下、ECS) を開発した⁷⁾。ECS は、ルーチン検査中に最大 1100 倍の拡大倍率 (14 inch モニタ上) で細胞や細胞核を観察できる内視鏡イメージング装置である。メチレンブルー等による組織の染色は要するものの、ECS はリアルタイム、かつ、数 μm の空間分解能で細胞を映像化できるため、病理診断を *in vivo* で行う、所謂“仮想生検 (Virtual histology)”という新たな内視鏡診断領域を切り開く技術として期待が寄せられている。

以上から、本稿で述べた新たな内視鏡イメージング技術の登場により、スクリーニングから病変の精密診断に至るまで、従来よりも格段に診断精度の向上や内視鏡診断の効率化が図られつつある。近い将来、内視鏡分野における質的診断能患者、及び、患者 QOL を向上させる診断技術の更なる発展、普及を期待する。

参考文献

- 1) H. Mizuno, K. Gono, S. Takehana, T. Nonami and K. Nakamura, “Narrow band imaging technique,” *Tech. Gastrointes. Endosc.* 5, 78-81 (2003).

- 2) K. Gono, T. Obi, M. Yamaguchi, N. Ohyama, H. Machida, Y. Sano, S. Yoshida, Y. Hamamoto, T. Endo, "Appearance of enhanced tissue features in narrow-band endoscopic imaging," *J. Biomed. Opt.* 9, 568-577 (2004).
- 3) R. Richards-Kortum, E. Sevick-Muraca, "Quantitative optical spectroscopy for tissue diagnosis," *Annu. Rev. Phys. Chem.* 47, 555-606 (1996).
- 4) 荻原達雄, 浪久晶弘, 佐藤信紘, "自家蛍光診断," *消化器内視鏡* 17, 744-746 (2004).
- 5) 高田雅博, 國分茂博, 大井田正人, 山岡佐世, 日高央, 西元寺克禮, "内視鏡的硬化療法が胃粘膜内血行動態に及ぼす影響の検討 一新たに開発された 2 波長赤外線電子内視鏡による評価一," *Gastroenterol. Endosc.* 43, 3-13 (2001).
- 6) N. Mataki, S. Nagao, A. Kawaguchi, K. Matsuzaki, J. Miyazaki, Y. Kitagawa, H. Nakajima, Y. Tsuzuki, K. Itoh, H. Niwa, S. Miura, "Clinical usefulness of a new infrared videoendoscope system for diagnosis of early stage gastric cancer," *Gastrointest Endosc.* 57, 336-342 (2003).
- 7) 笹島圭太, 工藤進英, 竹内司, 檜田博史, 井上晴洋, 日高英二, 河内洋, 坂下正典, 大前芳雄, 工藤由比, 佐竹信哉, 大森靖弘, 田中淳一, 塩川章, "大腸腫瘍性病変に対する,超拡大内視鏡 Endo-Cytoscopy によるリアルタイム診断に関する有効性," *早期大腸癌* 9, 181-187 (2005).

6 顔・肌の検査技術

6.1 はじめに

肌（皮膚）はヒトの体の最も外側を覆う臓器である。この目に見える臓器である肌は、日常的な社会生活において個人の外見的美醜の判断に強く影響する。そのため、女性の化粧品に代表される「美容」という行為は、古代から人類の歴史とともに発展してきた。美容は、個人が心豊かな充実した生活を送るために、当該個人の肌が有する若々しくあろうとする力や当該個人の内面的な魅力を最大限引き出すことである¹⁾。これを実践することがスキンケア、メイクアップ等と言われる作業であり、そのためのツールとして種々の用途に応じた化粧品が開発されている。これらの化粧品を効果的に活用するためには、自身の肌の状態（肌質、色、分泌物等）を科学的手法によりの確に把握し、それに適する化粧品やスキンケア手法を選択することが非常に重要である。

皮膚医療や美容の研究の現場においてはもちろんのこと、近年、化粧品販売の現場においても肌を対象とする計測機器の導入が相次いでおり、顧客の肌の状態を測定しその結果に基づいて使用が推奨される化粧品を提案する肌カウンセリングが盛んに行われている。

本稿では、これら肌の状態を測定する技術や機器について記述する。まず、肌の柔軟性や弾力性、表面形状、色、皮質および水分の各目的別にどのような計測機器があるかを概観する。次に、これらを統合したカウンセリングシステムへの応用例を紹介する。

6.2 肌の弾力性の検査

肌の「張り」、「柔らかさ」等で表現される柔軟性や弾力性（以下、本項では「弾力性等」という。）は、指先の触覚的な感覚により評価される量である。肌の弾力性等は、加齢および光老化等の環境により変化する。弾力性等を測定することは化粧品の効能効果を評価することに大きく関連し、化粧品の有用性を検証するために重要な測定対象とされている。代表的な測定法には、圧力法、吸引法、回転変位法および固有振動法があり、それぞれの概要は次のようになる²⁾。

圧力法は、肌に一定の押し圧で荷重を付加したときの変位や一定の変位を肌に付加したときの応力の最大値を測定することによって肌の弾力性等を評価する。肌に荷重を付加したときの応力とひずみを測定することは、官能的な感覚で弾力性等を知覚することに近く方法も簡便であることから、一般的に応用されている。

吸引法は、肌に吸引開口部を有するプローブを密着させて肌を吸引させ、吸引により生じる肌の変位量や時間的变化を測定し弾力性等を評価するものである。図 6.1 に示すキュートメータによる吸引法では、プローブ内の最大減圧時の変位量と減圧開放時の変位の比から肌の回復率を算出し、弾力性等を評価する。

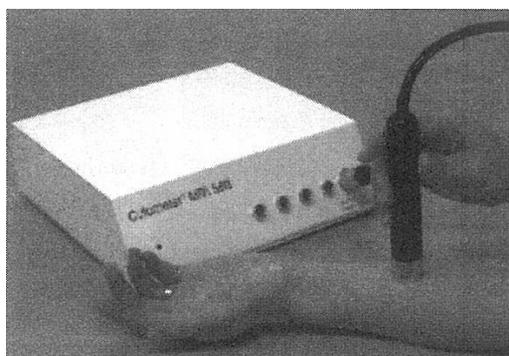
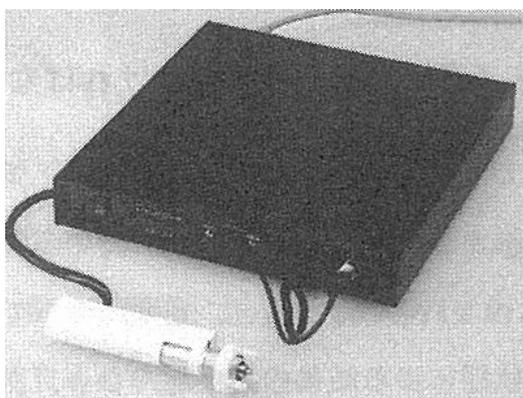


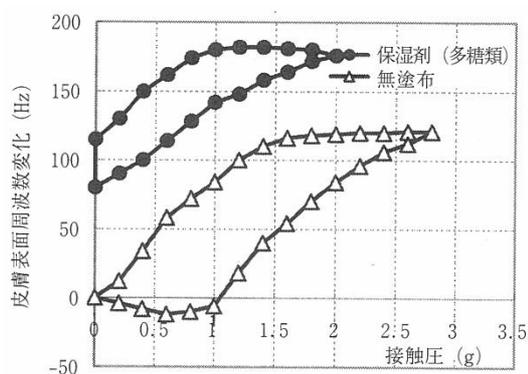
図 6.1 キュートメータの外観および測定の様子（文献 2 から引用）

回轉變位法は、肌に回転運動を与えたときの応力から弾力性等を評価する。

固有振動法は、物質の固有振動数は当該物質が硬ければ高く柔らかければ低いという性質を利用する測定法である。圧電素子を肌に接触させ、音響負荷により肌表面に生じる周波数変化量を測定する。代表的な装置として図 6.2 に示すビーナストロン（株アクシム製）があり、これを用いて保湿剤を塗布したときと塗布していないときの肌の弾力性を比較した結果を同図(b)に示す。グラフは接触圧に対する肌表面周波数変化のヒステリシス曲線である。接触圧に対して周波数変化量が増加した後一定値を示しており、この周波数変化量を肌の弾力性等と評価する。



(a)



(b)

図 6.2 ビーナストロン（文献 2 より引用）

(a) 外観、(b) 保湿剤塗布による肌の柔軟効果評価

以上に挙げた弾力性等の測定方法は、測定プローブと肌との位置関係や測定プローブの肌への押し圧が測定結果に大きく影響する。したがって、測定作業者の技能のばらつきの解消や測定装置の精度の向上が大きな課題である。

6.3 肌の表面形状の検査

肌の表面形状を把握するための代表的な計測対象として、きめおよびしわを採り上げ、計測技術を紹介する。

きめは、規則的に走る線上の溝（皮溝）および皮溝により区画される多角形（皮丘）により定まる肌表面のパターンである。また、しわは、きめよりもさらに大局的に生じる肌表面の形状変化である。共に、加齢、日光暴露等の環境の影響および化粧品の連用により変化することから、簡便かつ精度の高い計測法が求められている。

しわの測定については、日本化粧品学会抗老化機能評価専門委員会が「シワ測定法プロトコル（案）」により標準化の案を発表しており、次に掲げるパラメータを用いることが望ましいとしている³⁾。

- 1) 測定対象範囲におけるしわに由来する影の面積が測定対象範囲の総面積を占有する割合
- 2) 測定対象範囲に存在するすべてのしわの深さの平均値
- 3) 測定対象範囲に存在するしわのうち最大の影面積を生じさせるものの平均の深さ
- 4) 測定対象範囲に存在するしわのうち最大の影面積を生じさせるものの最大の深さ

今日用いられているしわの代表的な測定法には、目視評価法、トレース法、画像解析法、SEM 画像法、共焦点顕微鏡法および光投影法があり、それぞれ次の特徴を有する⁴⁾。

目視評価法は、しわの拡大写真またはレプリカ写真から肉眼で半定量的に判定する方法である。

トレース法は、レプリカ表面を表面粗さ計（針状またはレーザ）により解析する方法である。精度が高く 3 次元解析も可能であるが、所要時間が長い。

画像解析法（斜光照明法）は、レプリカに対し斜方から光を照射し CCD カメラを用いて陰影の強調された画像を撮像し画像解析を施す方法である。影に隠れた部分の解析が困難である。

画像解析法（落射照明法）は、レプリカに対し光がほぼ均一に照射し、CCD カメラを用いて撮像し各画素の輝度分布を解析する。しわの深さの測定が困難である。

照明差ステレオ法は、3 種以上の異なる照明条件下において撮像した画像の各画素にお

ける輝度分布の違いからその面の勾配を求め、得られた勾配を対象物全体について積分することにより 3次元形状を得る方法である。急峻な凹凸は捉えられない。

SEM 画像法は、レプリカまたはそれを反転させたポジティブレプリカについて走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて表面画像を得る方法である。

共焦点顕微鏡法は、共焦点顕微鏡を用いてレプリカの深さ方向を解析する方法である。

光投影法 (レーザ光切断法) は、基準線に対して角 β なす方向からレーザスリット光をレプリカに照射し、それが物体の凹凸状態に応じて変化した様子を角 γ の方向から観測する方法である。レプリカ上の点 (x, y) における高さ z は三角測量の原理により β および γ から求められる。

光投影法 (格子パターン投影法) は、格子状の縞パターンを測定面に投影しこれを投影方向と異なる方向から観測する方法である。測定面の表面形状に応じて格子パターンが湾曲するので、このパターンに画像解析を施すことによりしわの 3次元形状を測定する。in vivo で測定可能である。

なお、レプリカ採取に用いる材料にはシリコンラバーがよく用いられている。また、きめはしわ同様に肌表面の形態変化であるためしわと同一の機器を用いて測定されるが、しわの測定では個別のしわの形状 (長さ、深さ等) が対象となるのに対しきめの測定は測定領域全体における皮溝と皮丘のなすパターンが対象となることから、撮像条件および解析ソフトウェアの設定値等は相異なる。

シワ測定結果の一例として、図 6.3 に、光投影法 (レーザ光切断法) を用いて測定したしわの画像を示す⁴⁾。レプリカ上の点における高さ方向の座標が三角測量の原理により算出され、レーザスリット光をレプリカ表面全体に走査することによりしわの 3次元画像が得られている。

上記の測定法以外に、昼白色蛍光灯を光源として肌を直接 CCD カメラで拡大撮像し、鮮鋭化、ラベリング等の画像処理の組合わせを工夫してしわを抽出する方法も開発されている。

6.4 肌の色の検査

肌の色を把握することは、メイクアップ化粧品の効能効果の評価、しみの状態や回復の評価等の指標を得るものとして美容や医療の分野で重視されている。色は、観察者の感覚、感性、観察時の環境等の影響を受け、第 3 者に正確に表現することは難しい。しかし、色の系統的な分類およびオプトメカトロニクスの進展により、色を科学的に測定し表現する

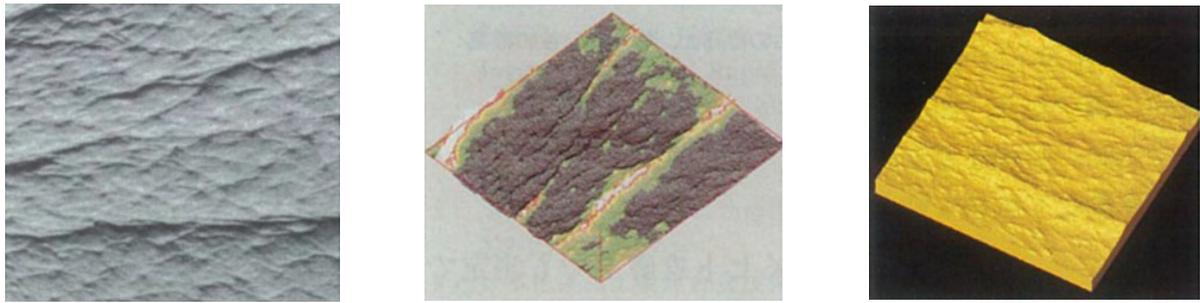


図 6.3 レプリカに対し画像解析を施して得たしわの画像（文献 4 より引用）

(a) レプリカ像、(b) 3次元解析結果（ワイヤフレーム表示）、

(c) 3次元解析結果から OpenGL を用いて表示した結果

ことが可能となった。

肌の色の代表的な表記法として、CIE 標準表色系、CIE1976 $L^*a^*b^*$ 表色系、マンセル表色系等が挙げられる。

CIE 標準表色系⁵⁾は、光の三原色（赤、緑および青）の加法混色の概念に基づき三刺激値（ X （赤み）、 Y （緑みおよび明るさ）および Z （青み））に関して制定されたものである。

CIE1976 $L^*a^*b^*$ 表色系⁵⁾は、明度を L^* で表し、色相および彩度で表される知覚色度指数を a^* および b^* で表したものである。 L^* 、 a^* および b^* は、三刺激値を用いて次式により求められる。

$$L^* = 116 (Y / Y_0)^{1/3} - 16$$

$$a^* = 500 \{ (X / X_0)^{1/3} - (Y / Y_0)^{1/3} \}$$

$$b^* = 200 \{ (Y / Y_0)^{1/3} - (Z / Z_0)^{1/3} \}$$

ここで、 X_0 、 Y_0 および Z_0 は標準光下の完全拡散反射面の三刺激値である。また、 X / X_0 、 Y / Y_0 および Z / Z_0 は0.008856より大きい値であり、いずれかが0.008856未満の場合、対応する立方根の項を $\{7.787 (A / A_0) + (16 / 116)\}$ （ $A : X, Y$ または $Z, A_0 : X_0, Y_0$ または Z_0 ）に置換する。

マンセル表色系⁶⁾は、物体の色の見え方を色の三属性（ H （色相）、 V （明度）および C （彩度））で表し、尺度化した表色系である。例えば、肌色を5YR6/3.8（色相：5YR、明度：6、彩度：3.8）と表す。

色を測定する装置には、図 6.4 に示すような、分光反射率を測定し三刺激値を演算する分光測色計および三刺激値を直接測定する色彩計（ミノルタ株（現コニカミノルタセンシング株）製）がある⁷⁾。分光測色計は高精度の測定値を与えるが非常に高価であり、高精度な測定が要求される場合や研究の用途に用いられる。一方、色彩計は構造が分光測色計

よりも簡便であるため手軽かつ安価であり、色差の測定や色調の管理には十分であるが高精度の測定には向かない。これらの他、CCD カメラ等で撮影した画像の各画素におけるRGB情報をコンピュータ上で種々の表色系に変換する方法がある。

測色計により色に関する数値は得られるが、それらを正しく解釈するためには、分光反射率特性が肌表面のパターンであるかを検証することが必要であるとともに、変色部位の背景にある要素（血流量変化、メラニン量変化等）を慎重に勘案することが重要である⁷⁾。

なお、肌の測色に関連して、日本化粧品学会美白機能評価専門委員会が「色素沈着測定法ガイダンス（案）」を発表しており、上述の分光測色計、色彩計、画像情報変換法等を用いた測定法を標準化することが提案されている⁸⁾。

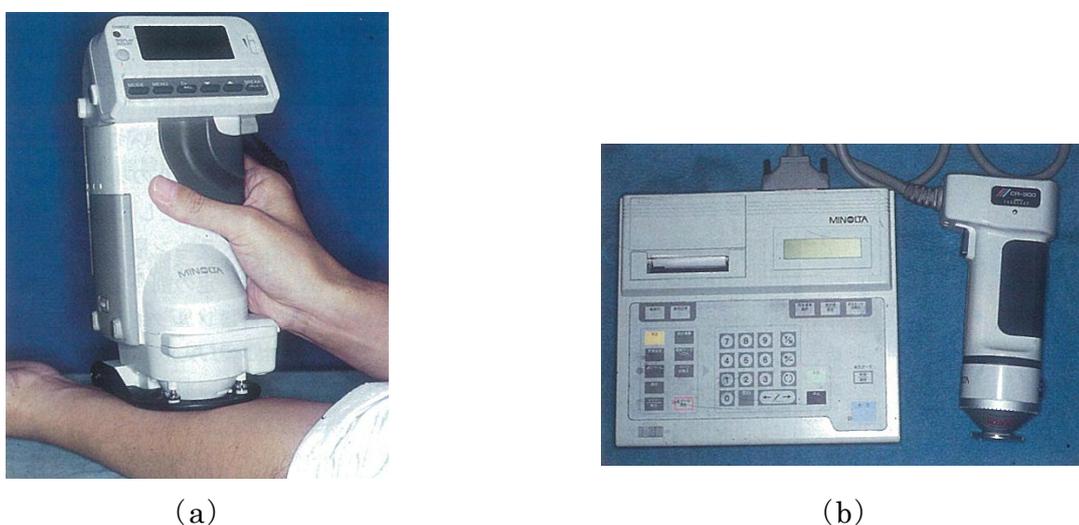


図 6.4 肌の測色装置 (a) 分光測色計 (CM2002)、(b) 色彩色差計 (CR-300)

(文献 6 より引用、各々の後継機として分光測色計 (CM-2600d) および色彩色差計 (CR-400) がある。)

6.5 肌の皮脂の検査

肌の表面に存在する皮脂は、皮脂腺から分泌された脂質（トリグリセリド、ワックスエステル、スクワレン等）で 90%以上を占められており、その機能は、体外物質侵入の防護、水分蒸散防止、緩衝、殺菌および排泄である。皮脂の過小分泌はひび、かさつき等の原因となる一方、過剰分泌はべたつきのような不快感、にきびの発生等の原因となる。

皮脂の測定法としては、光透過法、オスミウム酸ろ紙法、クロマトグラフィ法、赤外分光法等が用いられており、それぞれの概要は次のようになる⁹⁾。

光透過法は、フィルム等を肌に圧着して皮脂を付着させ、付着量により光透過性が変化することを利用して皮脂量を光学的に測定するものである。光透過法は簡便であるため代表的な測定法であり、種々の測定器が市販されている。図 6.5 に、**Courage+Khazaka** 社製の油分計を示す。

オスミウム酸ろ紙法は、皮脂を吸着させたろ紙をオスミウム酸にさらすと皮脂がオスミウム酸によって酸化され黒点化することを利用して、皮脂腺の分布状態を測定するものである。

クロマトグラフィ法は、採取した脂質の総量および組成を測定することのできる方法である。その一種であるガスクロマトグラフィ法では、採取した脂質を有機溶媒に溶かした後蒸発乾固させ、さらにトリメチルシリル化処理を施し、これにガスクロマトグラフィ分析を行う。この分析により得られる皮脂組成分析を図 6.6 に示す。クロマトグラフィ法は、研究の用途によく用いられている。



図 6.5 油分計 (Sebumeter®SM815 (Courage+Khazaka 社製))

(a) 外観、(b) 皮脂採取の様子 (株インテグラルのウェブサイト¹⁰⁾から引用)

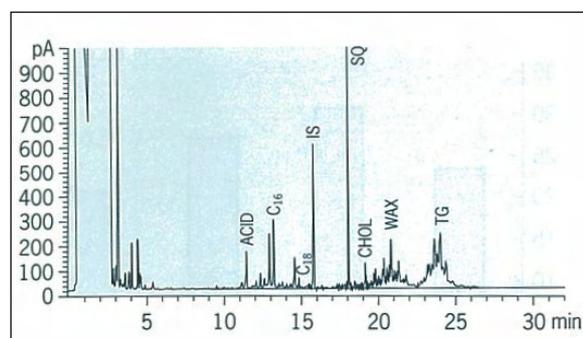


図 6.6 ガスクロマトグラフィによる皮脂組成分析結果 (39 歳、女性、額)

(文献 9 より引用)

6.6 肌の水分の検査

ここでは、水分は角層水分を指すものとする。皮膚の最外層である角層には、健康な場合、角層重量当たり 20～30%の水分が含まれるが、外界の環境湿度、角層機能の低下および皮下内部の病変により水分量は変化する¹¹⁾。したがって、水分量は、角層機能の状態、肌が受けたダメージの程度、スキンケアの効能効果の評価等の重要な指標となる。

水分の測定には、肌表面の通電性¹²⁾を測定することが簡便でよく用いられている。通電性の高い方がより多くの水分量を有する。この通電性の測定には電気伝導度および電気容量の2方式がある。電気伝導度式は各層の表層の通電性を測定し、電気容量式はそれよりも深層の通電性を測定している。電気伝導度式は測定値がばらつきやすいが、感度がよく肌の水分の増減に敏感である一方、電気容量式は測定値が安定しある程度乾燥した肌の水分測定も可能である。このように、両者には各々の特徴がある。図 6.7 に、Courage+Khazaka 社製の電気容量式水分計を示す。電気容量式・電気伝導度式ともに、プローブを肌表面の測定したい部位に接触させるため、肌にワセリン等の絶縁性物質が塗布されている場合や、体毛が多いためプローブが肌に接触しにくい場合等において測定に注意が必要である。



図 6.7 電気容量式水分計 (Corneometer®CM825 (Courage+Khazaka 社製))

(株インテグラルのウェブサイト¹⁰⁾から引用)

水分量の光学的な測定の代表例としては、近赤外分光法が挙げられる¹³⁾。これは、近赤外 (800～2500nm) が 2 つの水分子吸収帯 (1400nm および 1900nm) を有することを利用して、スペクトルのピーク値から水分量を測定するものであり、ピーク近傍のスペクトル形状から水分子の状態を推測することができる。測定深度が角層より深いという課題はあるが、非接触測定を可能にし、水分子の状態分析も行えることから、展開が期待されている測定法である。

このほか、フーリエ変換赤外分光法、in vivo 共焦点ラマン顕微鏡等を用いて水分量を測

定した研究もなされており¹³⁾、水分量の光学的測定法の開発が進められている。

6.7 肌カウンセリングシステムの例

顔をはじめとする肌の検査装置は各種開発され肌カウンセリングに活用されているが、少数の画像から多種類の測定を行うソフトウェアを搭載したもの、皮脂や水分の検出器を一体化して一度の肌への接触により複数の種類の測定が行えるもの等、美容アドバイザーおよび被検者の利便性を高めるための工夫がなされている。

一例として、図 6.8 に、顔の肌表面の解析を目的とする全顔撮影装置「フェイシャルステージ」（㈱モリテックス製、以下、「FS」という。）を示す。被検者は、FS 本体開口部において顎と額を固定された状態で、顔の正面および側面を撮像される。開口部内側には相関色温度 5000[K]の昼白色ランプが取り付けられている。また、開口深奥部に 500 万画素デジタルカメラおよび波長約 360[nm]のブラックライト（UVA）ストロボ発光源が取り付けられている。FS は市販のパーソナルコンピュータと USB で接続され、美容アドバイザーは FS 専用のアプリケーションソフトウェアで被検者の顔の動画観察、静止画撮影、画像処理による肌解析および解析結果に基づくカウンセリングを行うことができる。

側面画像は頬の肌の明るさの測定、頬のしみ分布の抽出および目尻のしわ分布の抽出に用いられ、正面画像は頬および毛穴分布の抽出および毛穴につまっている分泌物等（蛍光点）の分布の抽出に用いられる。解析領域は、コンピュータのマウス操作により柔軟に移動および形状変更させることができる。

頬の肌の明るさは、解析領域中の各画素の RGB 情報から CIE1976 $L^*a^*b^*$ 表色系の L^* の平均値で表している。しみは、昼白色ランプ光およびブラックライトの各々について画像処理し、個数および平均面積（しみ 1 個当たり画素数の平均）を示している。ブラックライト撮像により、表皮化のメラニン色素のより多い部分が周囲に比べ暗くなることから潜在的なしみを可視化することができる¹⁴⁾。毛穴は、昼白色ランプ光の画像処理により個数および大きさ（毛穴 1 個当たり画素数）で表している。蛍光点は、ブラックライト画像の処理により、毛穴につまっている分泌物等を色相により赤系と白系に分類し、それぞれの個数で表している。ここで、赤系はニキビの原因となりやすい酸化ポルフィリンが、白系は皮脂がそれぞれ毛穴につまっていることを示している¹⁵⁾。しわは、昼白色ランプ光の画像を処理し、解析領域中のしわの面積（画素数）比率で表している。美容アドバイザーはこれらの結果を総合的に判断して被検者に肌カウンセリングを行うことができる。図 6.9 に、蛍光点およびしわの解析結果の例を示す。



図 6.8 全顔撮影装置（フェイシャルステージ（株モリテックス製））



(a)

(b)

図 6.9 画像解析結果例 (a) 蛍光点（ブラックライト、おもに鼻と頬の境界上に蛍光点分布を抽出している。）、(b) しわ（昼白色光、目尻のしわ分布を抽出している。）

6.8 おわりに

本稿では、肌の弾力性、表面形状、色、皮脂および水分に着目し、各々の検査技術の概要について記述し、さらに肌カウンセリングのツールの例を紹介した。しかし、肌に関する測定対象はこれらにとどまらず、むしろ本稿に挙げられなかったものの方がはるかに多い。例えば、角層のターンオーバー、血流、皮膚温、pH 等、種々の測定対象があり、そのための検査技術がある。

肌の検査技術の課題として、肌（表面上または表面下）の状態により測定精度が左右されやすいこと、およびデータの解釈基準に曖昧性や困難性があることが挙げられる。前者の例は、体毛がしわやきめの解析に影響し得ることや測定プローブの肌への接触不良の誘因となること等であり、後者の例は、しわときめの区別のしきい値の未確定、肌の色の分光特性の検証必要性等である。

一人ひとりの肌に適した化粧品を選択するために、また化粧品の効能効果を適切に評価するために、肌の検査基準・技術・機器の研究開発がさらに進められ改善・向上が図られていく必要がある。

参考文献

- 1) 日本化粧品技術者会編：化粧品事典， p.707（2003）
- 2) 技術情報協会編：皮膚の測定・評価マニュアル集， p.99-106（2003）
- 3) 日本化粧品学会：化粧品機能評価法ガイドライン（案）， p.7-16（2005）
- 4) 田上八朗，宮地良樹，瀧川雅浩編：皮膚科診療プラクティス 14. 機器を用いたスキンクリニック， p.34-35（2002）
- 5) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック（第2版）、p.87-129（1998）
- 6) 日本色彩学会編：新編色彩科学ハンドブック（第2版）、p.134（1998）
- 7) 田上八朗，宮地良樹，瀧川雅浩編：皮膚科診療プラクティス 14. 機器を用いたスキンクリニック， p.73-77（2002）
- 8) 日本化粧品学会：化粧品機能評価法ガイドライン（案）， p.26-27（2005）
- 9) 田上八朗，宮地良樹，瀧川雅浩編：皮膚科診療プラクティス 14. 機器を用いたスキンクリニック， p.145-149（2002）
- 10) 株式会社インテグラルのホームページ：<http://www.integral.to/>
- 11) 日本化粧品技術者会編：化粧品事典， p.384（2003）
- 12) 田上八朗，宮地良樹，瀧川雅浩編：皮膚科診療プラクティス 14. 機器を用いたスキンクリニック， p.10-14（2002）
- 13) 技術情報協会：皮膚の測定・評価マニュアル集， p.83，（2003）
- 14) 金子治，川口由紀子：分光画像解析による色素沈着の評価（第1報），粧技誌 Vol.32， No.4， p361（1998）
- 15) 田上八朗，宮地良樹，瀧川雅浩編：皮膚科診療プラクティス 14. 機器を用いたスキンクリニック， p.150-151（2002）

7 農産物の非破壊検査技術¹⁾

7.1 はじめに

非破壊検査法は、一般の工業分野においては、工業製品の品質・特性を検査する手段として古くから用いられてきたが、農業・食品の分野では比較的新しい分野である。しかし、日常的には無意識のままこの方法を用いたり、この方法の恩恵にあずかっていたりしている。例えば、スイカを購入するときポンポンと手でたたいて品定めをすることや病気の診断のために行う X 線（レントゲン）写真はその良い例である。

非破壊検査法は、使われるエネルギーの種類によって、光学的方法、電磁気学的方法、力学的的方法、及びその他の方法に大別されるが、ここでは、光学的方法の農産物・食品への応用の事例について紹介する。

7.2 農産物の非破壊検査における光学的方法

農産物等を対象にした光学的方法による外観等測定の実例を表 7.1 に示す。

7.2.1 紫外線の利用

紫外線照射により生じた励起状態にある電子エネルギーが、基底状態に戻るとき放射されるケイ光を用いる方法で、鱈（タラ）フィレ残留小骨・回虫の自動選別機、腐敗卵の検出、ナッツのアフラトキシンの検出、温州ミカンの外傷の検出、キュウリの鮮度の測定、卵の鮮度の測定などの応用例がある。

7.2.2 可視光線の利用

可視光線を利用した非破壊法は古くから開発が進められてきた。この方法は可視光線の吸収と放射の現象を物質の定性・定量分析に応用したもので、青果物の色彩をはじめ肉眼で検出できる情報を得ることができ、実用化された技術も多い。対象物の中を透過した光を利用する透過法、および対象物の表面で拡散反射した光を利用する反射法などがある。透過法および反射法は、渋柿判定装置、カラーグレーダー、パイナップルの内部障害測定器、米粒（精米）色彩選別機、及び米一粒選別機に応用されている。

表 7.1 非破壊検査技術の農産物等への応用

エネルギーの種類	測定内容
紫外線(ケイ光)	鱈フィレ残留小骨・回虫の自動選別機 (腐敗卵の検出) (ナッツのアフラトキシンの検出) (温州ミカンの外傷の検出) (キュウリの鮮度の測定) (卵の鮮度の測定)
可視光線	渋柿判定装置 カラーグレーダー パイナップルの内部障害測定器 米粒(精米)色彩選別機 米一粒選別機
近赤外線	カビ豆選別機 果実糖度選別機(反射方式、透過方式) 携帯型糖度測定器(ショルダ型、ハンディ型) (残留農薬の測定) (穀類成分の非破壊迅速測定)
赤外線	(残留農薬(ATR)) (農産物の外傷) (卵の受精の有無)

() 内は研究事例

7.2.3 近赤外線の利用

近赤外線を用いる方法(以後、近赤外法)は食品に含まれる各種成分の C-H、N-H、O-H の原子団(官能基)による近赤外線の吸収現象を利用した方法であって、食品のタンパク質、脂質などの化学成分や硬度、加工適性などの理化学的な特性の計測が可能である。本法が我が国に導入された当初の利用は小麦・大豆などの比較的水分の少ない穀物の成分分析に限られていたが、現在では青果物のような高水分系の食品にも適用されている。例えば、カビ豆選別機、果実糖度選別機(反射方式、透過方式)、携帯型糖度測定器(ショル

ダ型、ハンディ型)、残留農薬の測定、穀類成分の非破壊迅速測定など例がある。

7.2.4 赤外線の利用

赤外線を用いる非破壊計測には、赤外域の吸収スペクトルを用いる方法（赤外分光法）と赤外放射を用いる方法とがある。前者は残留農薬の測定、後者は柑橘類の外傷の検出、受精卵の識別などに応用した例がある。

7.3 農産物等を対象とした非破壊検査装置

7.3.1 鱈（タラ）フィレ残留小骨・回虫の自動選別装置

紫外線照射とカラー画像処理技術を用い、鱈フィレ中の残留小骨・回虫を自動検出・選別する装置が開発された。この装置は、紫外線照射下で小骨や回虫がケイ光を発する現象を応用したものである。図 7.1 に、鱈フィレ中の残留小骨・回虫の自動選別装置の構造を示す。ベルトコンベア上の鱈フィレがトンネル状の検出部を通過するとき、フィレに紫外線が照射され、フィレから発するケイ光がトンネル上部に設けられたカラーカメラによって検出される。タラ属の魚類の場合、紫外線照射によって骨部分からは紫色のケイ光が、また、アナサキス等の回虫からは青白色のケイ光が発する。得られた画像シグナルは色抽出回路、2 値化回路などを経て信号処理され、残留小骨・回虫が検出される。

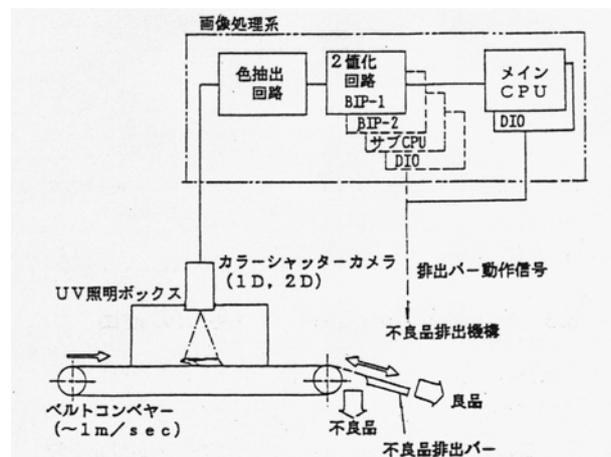


図 7.1 鱈（タラ）フィレ残留小骨・回虫の自動選別装置

7.3.2 渋柿判定装置

可視光線を利用した渋柿判定装置（図 7.2）が開発・実用化された。柿の渋の素はタンニンという成分である。渋柿の中ではこの成分が水に溶ける状態（可溶性）で存在する。したがって、果実は渋みを呈する。しかし、高炭酸ガス処理などの脱渋処理を行なうと、このタンニンが水に溶けなくなり（不溶化）、舌に感じなくなる。不溶化したタンニンは果肉内に褐色の物質として点在する。通常、これが「ごま」と呼ばれる。したがって、この「ごま」の有無を光学的に検出することによって渋柿を判別することが可能である。渋柿判定装置はこの原理を応用したもので、ランプとレンズ系から構成された簡単な装置である。試料台に果実を置くだけで果実に下方から可視光が照射され、光の透過具合の目視による測定から渋の有無が判別される。渋柿の場合、果実は赤くきれいに透けて見えるのに対して、「ごま」の入った甘柿の場合、透過光が少なく果実はうす暗く見える。



- A : ランプ
- B : 集光レンズ
- C : 遮光スポンジ
- D : 冷却ファン
- E : 通風孔

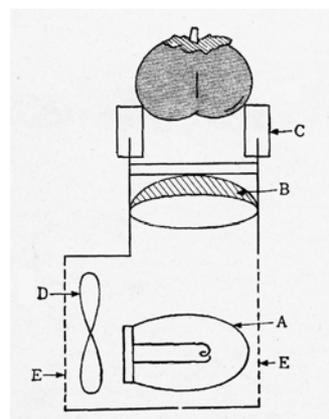


図 7.2 渋柿判定装置

7.3.3 カラーグレーダ

果実の色、傷およびサイズを測定する「カラーグレーダ」と称する選別機が、(株)マキ製作所によって開発・実用化された（図 7.3）。

コンベア上の果実が検出部を通過するとき、コンベアの上方に設置された CCD（8 電荷結合素子）カメラによって、果実上面および両側面の画像が撮影される。得られた画像は 64×128 の 8192 点の画素に分割され、各画素の明度と色彩が測定される。果実の色彩は、各画素の赤色から緑色のヒストグラムの平均色から求められる。傷の程度は、基準値より明度の低い画素の数をカウントすることにより測定される。0.2~0.3mm φ の微小な傷まで判別可能である。果実サイズは幅方向の寸法と高さ方向の寸法のいずれか大きい方をそ

の果実サイズとしている。開発時の主な課題は、光沢によるハレーションの防止、5～7個/secの選別処理スピードの実現などであった。現在では、温州ミカン、トマト、リンゴなど多くの青果物の選別に用いられている。

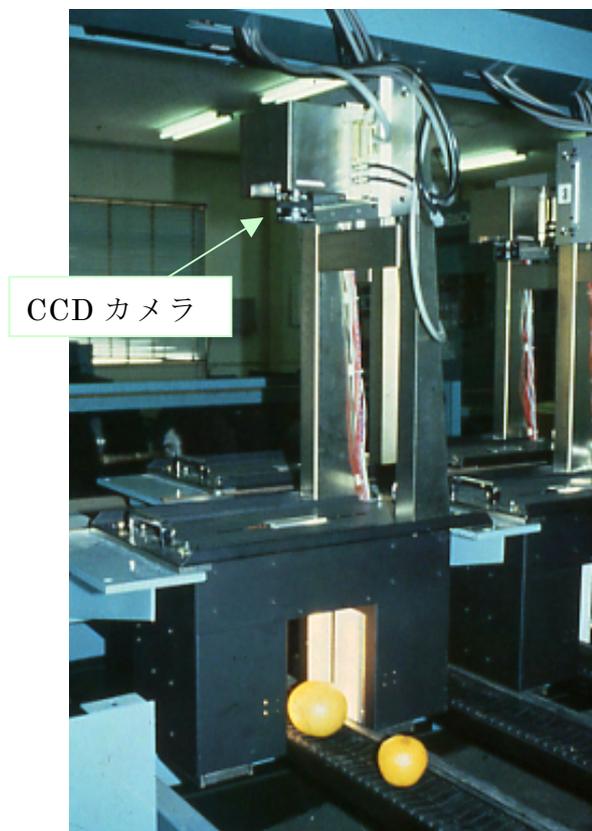


図 7.3 カラーグレーダ

7.3.4 パイナップルの内部障害測定器

可視光線の透過法を用いたパイナップル熟度測定装置（試作機）（図 7.4）が生研機構によって開発された。強力な光源、高感度のセンサーおよび暗箱から構成されている。強力な白色光を受けた果実の透過光および透過像が高感度の光電子像倍管および高感度の CCD カメラでそれぞれ捕らえられる。未熟あるいは内部褐変の場合、透過光は非常に弱く、画像として捕らえにくい。過熟の場合、透過光は非常に強く、画像は露出オーバーになる。適熟の場合、きれいなネット状の画像が観察される（図 7.5）。

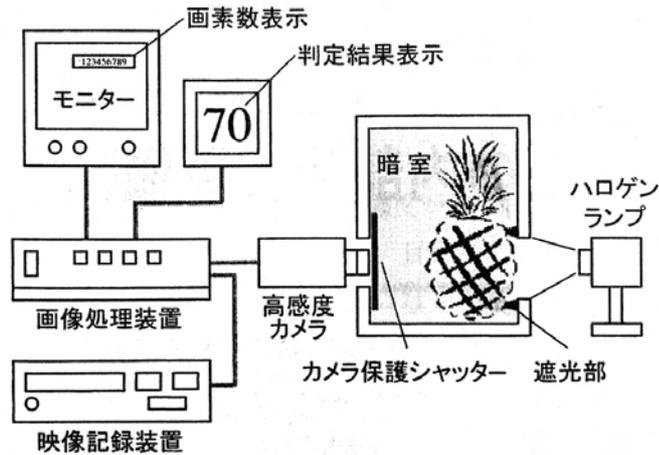


図 7.4 可視光線を用いたパイナップル熟度測定装置



図 7.5 パイナップルの透過像（左から未熟、適熟、過熟）

7.3.5 精米の自動色彩選別機

虫、水、熱、かび、菌などにより生じるやけ米・黒斑粒のような着色精米や、異物の除去を目的として、可視光を用いた米粒色彩選別機が開発され、精米工場で広く利用されている。図 7.6 にその検出・選別部を示す。高速で流下する穀粒の色彩を 2 台の光センサーで検出し、着色粒や異物は圧縮空気を噴出することにより除去される。検出部を通過する米粒は蛍光管で照明され、米粒の反射光が前後の光センサーで検出される。整粒（良質粒）の場合、反射光の明るさはバックグラウンドのそれと同じであるが、着色粒の場合、その明るさは減衰する。本装置はこのような原理を応用したものである。処理能力は装置に設けられた穀粒を流下させる細かい溝（チャンネル）の数によって異なるが、概ね 3～5 トン／時間である。

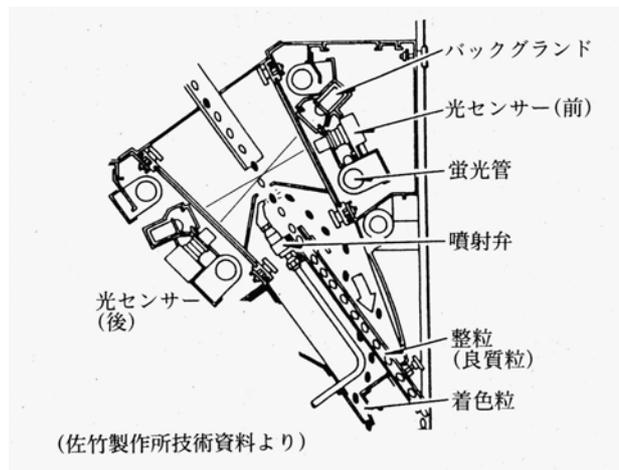


図 7.6 米粒色彩選別機の検出・選別部

7.3.6 一粒玄米の色彩・形状・胴割の自動選別機

可視光を用いた一粒玄米の色彩・形状・胴割の選別機が開発・市販されている。図 7.7 にその構造図を示す。米粒一粒ごとに光が照射され、反射光及び透過光の強度が検出され、次の①透過率、②分光比、③胴割度が算出される。

- ① 透過率：光がハロゲン光源ユニットから光源用光ファイバーを通して透過ヘッド部へ供給される。粒送円板によって運ばれた玄米一粒ごとに光が照射される。玄米粒により反射された光の一部が反射光センサーにより、玄米粒を透過した光の一部が透過光センサーにより測定される。透過光強度／反射光強度の値から透過率が求められる。
- ② 分光比：上述した反射光の一部が分光用光ファイバーで分光ヘッドへ導びかれ、その光の赤色光強度と緑色光強度が測定される。赤色光強度／緑色光強度の値から分光比が求められる。
- ③ 胴割度：良質粒と判定された玄米 1 粒ごとに LED 光源の光が胴割ヘッドにおいて照射される。前部光センサーおよび後部光センサーで測定された信号の比から胴割度が求められる。

測定部カバーを開けて、粒送円板上へ必要な量の試料をまとめて投入し、測定開始キーを押すだけで、自動的に上記の 3 つの値が測定され、測定した透過率、分光比、胴割度の値を基に、良質粒（整粒）、未熟粒、被害粒、死米、着色粒、胴割粒が判定、選別される。

この一粒選別機は公式な検査機器としてまだ認定されていないが、①水稲の収穫適期の推定、②下見検査、③精米工場における品位の検査に使用されている。水稲の収穫適期の推定では、収穫適期の整粒歩合を 80% とし、本装置により測定した整粒歩合がこの数値

に満たない場合は1日当たり整粒歩合の上昇を2%として、80%に達する日を推定する。
 下見検査では、正式な穀物検査の前に、本装置により整粒歩合を測定し、整粒歩合が高くなるように玄米粒選別機を調整する。精米工場における品位の検査では、混米（ブレンド）の参考資料とするため、ロットごとの整粒の割合が調査される。

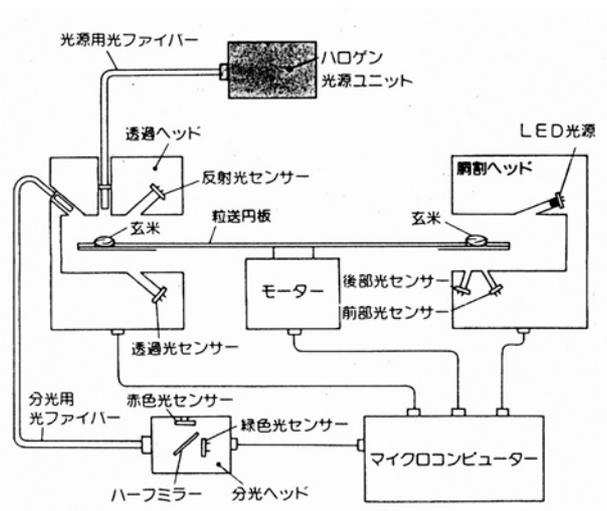


図 7.7 米一粒選別機

7.3.7 近赤外線を用いたカビ豆選別機

近赤外線を用いたカビ豆選別機が開発された（図 7.8）。ピーナッツのカビの検出では、700nm と 1100nm の透過率が用いられる。図 7.9 に正常なピーナッツとカビが生えたナッツの透過率のスペクトル（500～1500nm）を示す。700nm の透過率は正常ナッツで高く、カビが生えたナッツで低い。1100nm の透過率は逆に前者で低く、後者で高い。このことから、次式により両波長における透過率の比を算出することによってカビが生えたナッツの検出が可能である。

$$\text{透過率の比} = T_{700} / T_{1100}$$

ここで、 T_{700} : 700nm の透過率

T_{1100} : 1100nm の透過率

透過率はナッツの大きさによって影響を受けるが、除算することにより大きさの影響が排除されるため、透過率の比はその影響を受けない。



図 7.8 カビ豆選別機

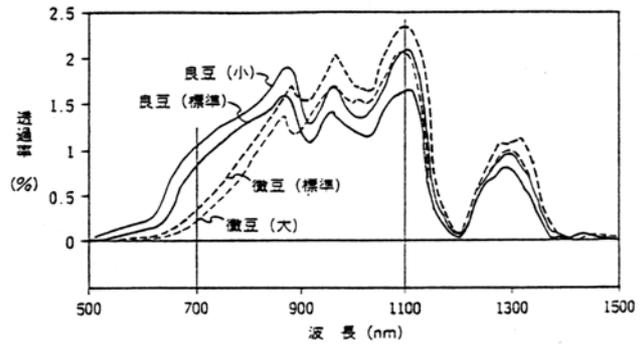


図 7.9 ナッツの透過率のスペクトル

7.3.8 糖度選別機

近赤外線を用いた糖度選別機はスペクトルの測定方式の違いにより反射方式と透過方式に大別され、透過方式は更に全照射・遮光方式と部分照射・非接触方式に分けられる。全照射・遮光方式とは赤道部の全部に光を照射し、果実の下へ透過した光を完全な遮光状態で検出する方式である。一方、部分照射・非接触方式とは果実の赤道部の一部に光を照射し、その反対側から透過光を非接触で測定する方式である。

(I) 反射方式

反射方式の例として、三井金属鉱業株式会社製のモモ糖度選別機（図 7.10）がある。その 1 号機が 1989 年山梨県西野農協に導入された。同装置はランプ、回折格子及びダイオードアレイから構成されている。お皿状のコンベアに乗せられた果実はセンサー部を通過する瞬間 2 個のタングステンハロゲンランプによって腹部を照射され、果実表皮及び表皮に近い果肉層で反射された光が集光部によって捕らえられ、回折格子及びダイオードアレイによって近赤外吸収スペクトルが測定される。予め作られた検量線により、果実の糖度が瞬時に算出さる。本方式は果実糖度の部位によるバラツキを直接受ける欠点があるが、果実の性状をうまく利用することによりこの欠点を低減することが図られている。例えば、モモ果実の場合、縫合線と直角をなす果実赤道部（腹部）が平均糖度を示すことから、その部分がセンサー部を向くように果実はコンベア上で揃えられる。選別速度は毎秒 3 個程度である。

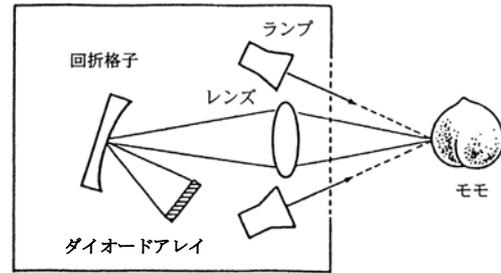


図 7.10 モモの糖度選別機（反射方式）

（Ⅱ）透過方式の全照射・遮光方式

透過方式の全照射・遮光方式の例として、株式会社果実非破壊品質研究所のリンゴ糖度選別機（図 7.11）がある。同装置では、果実赤道部の周辺に 10～12 個の強力なランプ（100 ワット程度）が配置されていることを特徴とする。ベルトコンベアの試料台上の果実が測定部を通過するとき、果実赤道部周辺に設置された多数のランプにより果実赤道部のほぼ全面が照射される。試料台は中心部に穴が空いており、果実内を透過した光は試料台の穴を通過して下に抜け、コンベアの直下に設けられたセンサーユニットに達し、果実の透過スペクトルが測定される。予め作られた検量線を用いてスペクトルから糖度が瞬時に算出される。選別速度は毎秒 3 個程度である。赤道部以下の果実全部を光が透過することから、測定部位の違いによる測定誤差が比較的小さくなるという特徴がある。

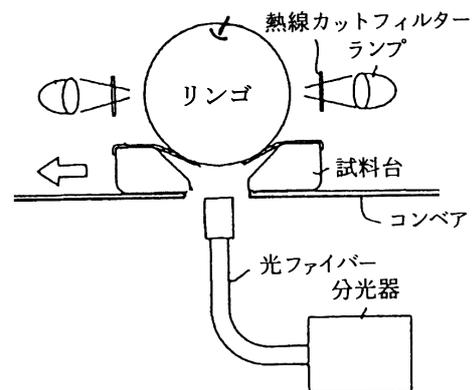


図 7.11 リンゴ糖度選別機（全面照射・遮光方式）

(Ⅲ) 透過方式の部分照射・非接触方式

透過方式の部分照射・非接触方式の例として、三井金属鉱業株式会社及び社団法人雑賀技術研究所の温州ミカン糖度選別機（図 7.12）がある。同装置では、光源、果実、センサーが一直線に並んでいることが特徴である。果実を挟んで両側に光源とセンサーを配置していることから、俗に横-横方式と呼ばれている。ベルトコンベア上の果実がセンサー部を通過するとき、果実の赤道部の一部がランプで照射される。果実内部を通過して反対側へ透過した光が非接触の状態ダイオードアレイによって捕らえられ、果実の透過スペクトルが測定される。前述した装置と同様、予め作られた検量線を用いてスペクトルから糖度が瞬時に算出される。非接触状態で計測を行えることから、従来の選果機を改造することが比較的容易ある。

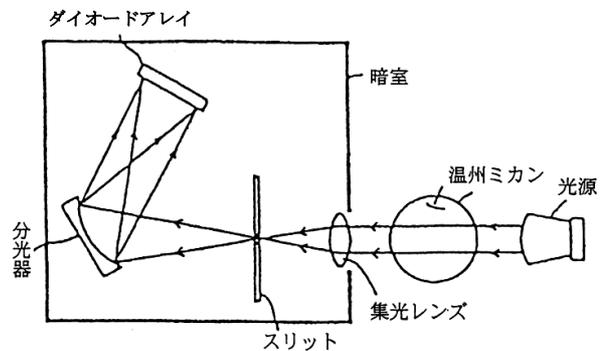


図 7.12 温州ミカン糖度選別機（部分照射、非接触方式）

7.3.9 携帯型糖度測定器

糖度選別機は果実の糖度を選別するだけで、品質を向上させる装置ではない。従って、糖度選別機のメリットを最大限に発揮するためには、質の良い産物を生産することが重要である。このような要求を満足するため、ほ場などの現場で品質チェックが可能な携帯型の装置が開発されている。携帯型装置は、肩にかけるタイプのショルダ型装置、拳銃型のハンディ型装置、糖度専用の糖度検出器に分類される。

(Ⅰ) ショルダ型装置

図 7.13 に株式会社クボタ製の K-BA100 を示す。K-BA100 (H240×W300×D118) は、測定部、光学系（分光器及び検出器）、制御・演算用マイクロプロセッサ（CPU）、表示部から構成された小型の分光装置である。光源にはタングステンハロゲンランプ、分光器

には回折格子、検出器にはリニアイメージセンサー（256 波長）が用いられている。測定部のインタラクタンス型のプローブ（光ファイバーの長さ：1m）を対象物に接触するだけで、600～1,000nm のスペクトルが数秒で測定される。インタラクタンスプローブは中心部とリング状部からなり、リング状部から光が試料に照射され、試料内部で拡散反射された光が中心部のバンドルを介して検出部に導入、リニアイメージセンサーで瞬時に検出される。通常、このようなスペクトル測定は本装置単体で行われるが、検量線作成時のように多数の試料のスペクトル測定を室内で行う場合、装置に接続したコンピュータ側から専用のソフトを用いて本装置を制御することが可能である。すなわち、コンピュータ制御による小型の分光装置としての利用が可能になっている。K-BA100 の開発のコンセプトは、①非破壊測定が可能である、②操作が容易である、③コストパフォーマンスに優れている、④ほ場などの現場で使用可能である、などであった。価格は 100 万円～200 万円程度である。



図 7.13 ショルダ型装置（クボタ製、K-BA100）

（Ⅱ）ハンディ型近赤外装置

図 7.14 に株式会社果実非破壊品質研究所（略称：FANTEC）製の FQA-NIRGUN を示す。FQA-NIRGUN（H210×W88×D225）は、重量 750 グラムのピストル型をした超小型の分光装置である。前述した K-BA100 と同様、測定部、光学系（分光器及び検出器）、制御・演算用マイクロプロセッサ（CPU）、表示部から構成されている。図中の左先端部を試料に接触させ、装置の引き金を引くだけで、瞬時にスペクトルを測定することが可能である。専用ケーブルと専用ソフトを用いることにより、FQA-NIRGUN 内のスペクトルデータをコンピュータ側に転送できる。通常、重回帰による検量作成が行われるが、より

複雑なスペクトル解析を行う場合は市販のケモメトリック用ソフトを利用することも可能である。FQA-NIRGUN は、①総重量が 750 グラムと軽量であることからどこへでも運べる、②充電電池で 2000 回以上の計測が可能である、③屋外の環境でも使用可能である、④3成分がほぼ同時計測可能である、⑤収集したスペクトルデータを保存・転送が可能であるなどの特徴を有する。価格は 100 万円～200 万円程度である。



図 7.14 ハンディ型装置 (FANTEC 製、FQA-NIRGUN)

(Ⅲ) 糖度検出器

果実糖度測定専用の携帯型装置として、東和電機工業株式会社製の「アマミール (Optical Taster TD-2000C)」や、株式会社アステムの「非破壊果実糖度計 (AMAICA)」が開発されている。前者はリンゴの糖度測定専用であり、後者は内蔵された検量線を選択することによりリンゴ、モモ、日本ナシ、トマトなどの糖度を測定可能としている。価格は共に数十万程度である。

7.4 おわりに

最近、近赤外イメージングの測定可能な計測器が市販され始めた。対象物中の成分分布が明らかになることから、新たな応用技術が期待できる。

参考文献

- 1) 河野澄夫 (編): 食品の非破計測ハンドブック, (株)サイエンスフォーラム, 東京, 2003

8 建築・土木分野の検査技術

8.1 はじめに

20世紀の高度な技術革新は、人類の社会に多大な恩恵をもたらした。しかし、その一方において廃棄物・排出ガス、エネルギー問題等、便利な現代社会の代償とも言える数々の問題を併発した。21世紀の工学分野には、20世紀の生産と廃棄の時代を終えて、維持保全の時代へ転換を図るための対応が要求されている。特に建設分野は、総労働人口の約1割が従事する基幹産業でありながら、他分野と比較して循環型社会への適応が遅れており、スクラップ&ビルドの時代から、産業構造・生活習慣の変化に対応できる柔軟、快適かつ耐久的な建築・社会資本を整備し、また既設構造物の安全性を保障し、アメニティを実現しながら寿命延伸、アップグレードに対応したストック長命化構造物を建設する技術革新が迫られている。

経年構造物のストック増大を踏まえ、今後は、既設構造物の維持管理を合理化し、構造物の維持保全を低コストかつ効率的に行う必要がある。このためには、構造物に発生する劣化・損傷を効率的に検出・計測し、構造物の機能や安全性を的確に判断する技術が要求される。

1999年に発生した山陽新幹線福岡トンネルにおけるコンクリート剥落事故は、維持保全技術の重要性を再認識させられる事故であった。また、最近では建築物の耐震偽装問題が発覚し、検査技術は新設構造物においても重要なものとなっている。

工場製品と異なり、建築・土木構造物の生産においては、製造環境を選ぶことができない。同一形状の構造物を建設する際にも、寒冷地であったり、敷地が軟弱地盤であったり、資材の搬入が困難な山間部であったり、環境は千差万別である。また、使用する砂利や土砂なども地域による品質のばらつきが大きく、労働者も多くは現地雇用されるため、技量のばらつきも大きい。このような現地生産という特殊性は建築・土木分野における品質確保を困難にしている大きな要因のひとつである。また、同一のも

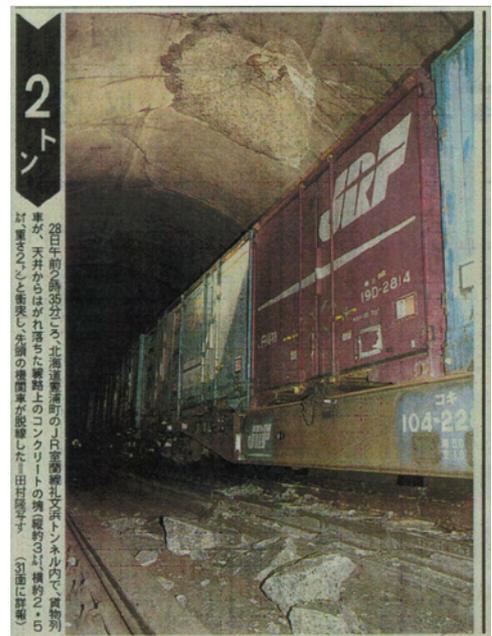


図 8.1 鉄道トンネルにおけるコンクリートの剥落事故

のを大量生産することが多い他の工業製品と異なり、建築・土木構造物は単品生産であるため標準化が困難であり、物件ごとの特殊性に対応するため、その生産段階においては、さまざま「例外的」工程が発生する。安定した環境下で均質な材料を用い、一定の工程で生産される他の工業製品と異なり、一物一価である建築・土木構造物は、品質検査においても管理方法、管理特性、管理基準値、検査時期等を規格統一することが難しい。



図 8.2 タイル仕上げの大規模な剥落

また、製品が現場生産される以上、検査も現場に出向いて行う必要がある。このとき、建築・土木構造物は、工場のラインを流れる製品のように、一定の距離、角度から測定することができない。検査対象が超高層ビルであれば、対象物に近接することが困難であるし、逆に天井裏のような部分ではスペースがなく、検査装置を持ち込むことが難しい。病院では、患者を検査装置に入れて CT スキャンを撮ることができるが、ビルやダムを検査装置に入れることはできない。小型の電化製品等であれば、X線等で比較的容易に内部の状況を知ることができるが、ビルや橋をX線で調べるとしたら、天文学的な枚数のX線フィルムとコストが必要になる。また、工場製品では、製品を検査し、不良品を取り除き、不良発生の原因を調べ、その結果を後の製造工程にフィードバックし、ラインを改良していくことは、長期的に見て製造所の生産性向上・コスト軽減につながることであり、認識があるが、建築・土木分野では、請負契約・単品生産という性格上、手抜きや瑕疵を隠蔽しがちであり、生産者にはむしろ検査したくない・されたくないという意識すらある。構造物には、発生原因の異なる様々な欠陥・損傷が存在する。これらの発生原因は、製造・施工時の欠陥と、その後の維持管理の不良及び自然発生的に生じる経年劣化に区別される。前者としては、材料・配合の不良や設計上の不備、コンクリート打設時の充填不良や不連続部の存在などが挙げられ、後者には、鋼材の腐食やコンクリートの中酸化、塩害、アルカリ骨材反応等が考えられる。鉄筋の腐食が始まると腐食生成物の膨張圧で周りのコンクリートは押し広げられ、ひび割れが発生し、かぶりコンクリートの浮き、剥落という損傷が発生する。近年、社会問題となっている高架橋の剥落事故等の多くはこうした劣化に起因するものである。

一方、タイル・モルタル等の外壁仕上げ材は、異材間の投びょう効果に期待した伝統的

な張り付け工法が現在でも主流となっており、統計的にみてもこれらの工法で施工されたタイル・モルタルの寿命は、十数年であることから、浮き・剥落の発生は不可避であり、落下による第三者災害を未然に防ぐためには、可能な限り頻度の高い点検を行い、損傷部に適切な対策工を施す以外に方法がない現状である。特に、近年はコスト削減、工期短縮の必要から、外壁タイル張りは未熟な職工による粗雑な施工がなされることが多く、建築後数年で大規模な剥落事故が発生する事例が頻発している。

前述のように、建築・土木構造物は、一定の条件・装置で検査することが困難であるため、検査方法としては、現在でも肉眼による目視が主流となっている。目視は、検査結果の個人差が大きいこと、検査漏れや転記ミスが少なからず発生すること等の問題点が指摘されているが、構造物の大小、複雑な形状やあらゆる部位に対応することが可能で、高価な測定器や高度の技術を必要としない等、利点も多い。しかしながら、膨大な建物ストックを群管理することを前提とした場合、目視により得られる情報はあまりにも少ない。

したがって、この状況を改善するための、効率的な検査方法の確立が望まれて久しく、一部にあらゆる困難を覚悟の上で、より工学的な検査手法を導入する試みがなされている。

本報は、こうした建築・土木分野における外観検査技術の動向について記すものである。

8.2 可視光線を利用した外観検査技術

可視光線は、人間が肉眼で認識することが可能な電磁波であり、赤外線やX線などのように物体内部の状況が反映されることはないため、内部欠陥の探査には利用できない。しかしながら建築・土木構造物に生じる劣化現象は、ひび割れや欠損、変形等、肉眼で認識できる症状として表面に現れることが多いため、肉眼あるいは双眼鏡等で外観を調べ、表面に露見したひび割れや欠損、変形、露出鉄筋などを記録することは、最も基本的でかつ有益な情報が得られる手法として、建築・土木構造物を検査・診断する際には必ず実施される項目である。

ただし、目視点検は、調査員が肉眼で認識した情報を現場で野帳にスケッチし、持ち帰って図面に清書するという煩雑な工程を要するため、現場における見落としや誤記、図面化の段階における人的ミスの発生を完全に防ぐことが難しく、経年変化をモニタリングするための客観的データとしての利用価値に乏しい。

以上のような観点から、伝統的な目視点検に代わる外観検査法として下記の手法が実用化されている。

8.2.1 デジタル写真による外観検査

近年、CCD や CMOS を撮像素子とするデジタルスチルカメラやデジタルビデオカメラの普及が急速に進んでいる。これらは、画像を 1 ピクセル単位で数値情報として記録、再生できるため、銀塩フィルムや磁気テープに保存するアナログカメラと比較してコンピュータ処理に適し、また、撮影後の画像をその場で再生、確認できるため、撮影ミスによる手戻りが発生しにくく、また、フラッシュメモリー等の記録媒体は、繰り返し利用できるため省コストであり、建設産業に適した記録手段である。

以下にデジタル写真を利用した建築・土木構造物の検査方法について記す。

(I) 検出対象と適用限界

デジタル写真で検出可能な欠陥・損傷には、ひび割れ、漏水、露筋、欠損、汚れ、析出物等が考えられるが、ひび割れの検出は、最も期待されている用途である。ただし、デジタルカメラの現状の画素数で、構造物の耐久性に影響するといわれる 0.2mm 以上のひび割れを検出するためには、構造物を小面積のブロックに分けて、多数の写真を撮影する必要がある。

仮に 400 万画素（縦 2000×横 2000 画素）のデジタルカメラを用いて 5m×5m の壁面を撮影した場合、1 ピクセルの撮影面積は、2.5mm となり、これ以上の幅を持つひび割れしか検出できないことになる。また、デジタル写真は、JPEG と呼ばれる汎用の形式で、圧縮保存される際に情報が間引きされることが多く、この場合、微細なひび割れの検出はさらに困難となる。実際には、強い光線の下で撮影を行えば、1 ピクセルに満たない幅のひび割れでもグレーの線として認識され、また、ひび割れに沿って汚れや変色がある場合、その面積効果が期待できるため、1 ピクセルに満たないひび割れを検出できることが多いが、より高画素の撮像素子の普及が望まれる。

(II) 画像診断支援システム

デジタル写真からコンクリートの欠陥・損傷を検出し、画像の編集、数量の積算等を可能にするコンピュータ処理ソフトが市販されている。その機能は下記のとおりである。

- 1) 画像合成機能：分割撮影された構造物のデジタル写真を合成し、構造物の全景写真を作成する。
- 2) 画像調整機能：明度・コントラスト・エッジエンハンス等の機能により、欠陥の認識を容易にする。

- 3) あおり補正機能：斜めから撮影した写真を正対して撮影した状態の形状に変換する。
- 4) 数量積算機能：画像上でひび割れ等の欠陥・損傷部をトレースし、その長さ、面積等の情報を集計する。

(Ⅲ) 適用事例¹⁾

本適用事例は、高架橋の床版下面をデジタルカメラにより撮影し、ひび割れ・浮き等の損傷を検出・集計したものである。

a) 調査概要

- 1) 対象構造物：RC ラーメン高架橋
- 2) 撮影日：2001年5月
- 3) 使用機材：①デジタルスチルカメラ：ニコン D1(有効 266 万画素)
②レンズ：トキナーAF193(19～35mm F3.5～4.5)

b) 処理内容

- 1) 分割撮影した画像に回転・あおり補正・濃度補正等を施す(図 8.3)。
- 2) 画像を合成する(図 8.4)。
- 3) ひび割れ・浮きをトレースし、その数量を積算する(図 8.5)。



図 8.3 回転・あおり補正・濃度補正

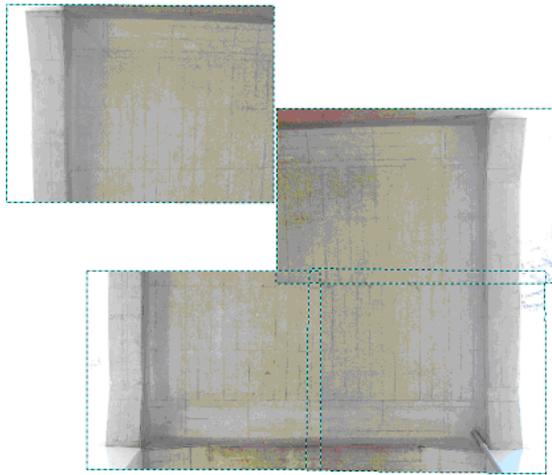


図 8.4 画像合成

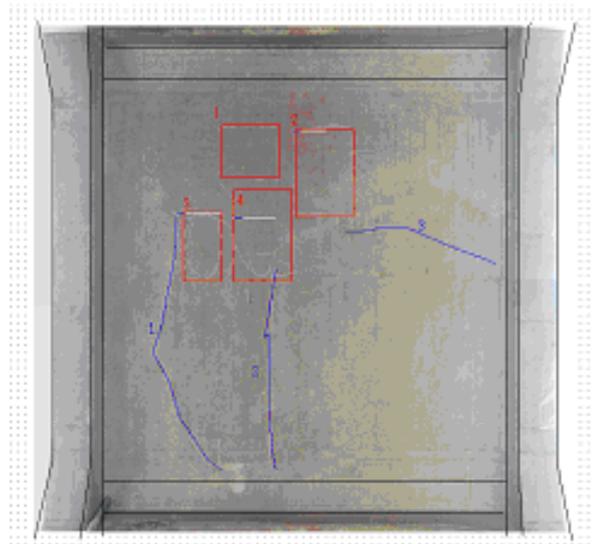


図 8.5 トレース・数量積算

c) 問題点と今後の展望

デジタル写真法は、使用機材が比較的安価・簡便で肉眼による目視点検に比べて客観的なデータが得られるという特長を持つが、微細なひび割れを検出するためには、より高解像度の撮像素子の普及が望まれる。ただし、撮像素子が高解像度化されれば、画像処理・編集を行うコンピュータの負担も増大するため、コンピュータの高速化・メモリの大容量化など、周辺機器全体の性能向上が必要であると考えられる。

8.2.2 レーザ光線を利用した外観検査

(I) 測定方法¹⁾

レーザーによるひび割れ検出の原理図を図 8.6 に示す。レーザー発振器より放出されたレーザー光線は、ポリゴンミラーを経て壁面に照射される。さらに壁面で反射されたレーザー光線を光センサで検出する。光センサで検出された信号の強度を濃淡表示することにより、1ピクセルのレーザー反射像が形成される。レーザーがひび割れに照射された部分は、反射光の強度が弱くなるため、健全な部分とは、濃淡の違いとして検出できる。さらにポリゴンミラーを用いて壁面をスキャンしながらこの操作を行えば、壁面のラインスキャン画像が得られる。

トンネルの壁面のように計測システムを対象物の距離をほぼ一定に保つことが可能な測定対象物の場合、前述の操作を繰り返しながら、走行方向に一定速で移動することにより、トンネルの展開画像作成が可能となる。

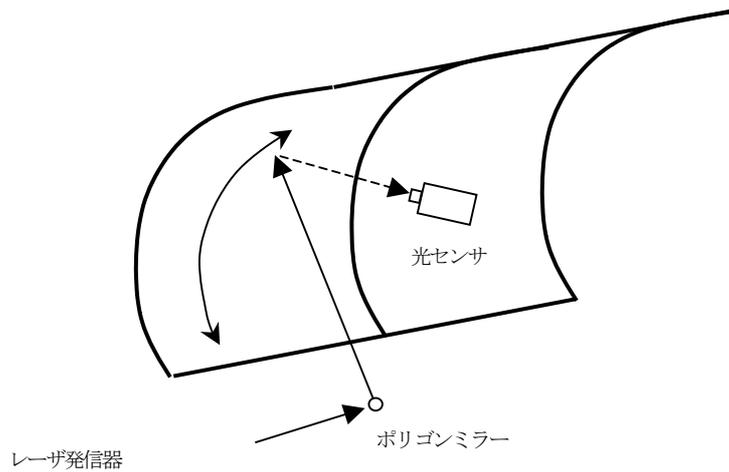


図 8.6 ひび割れ検出の原理図

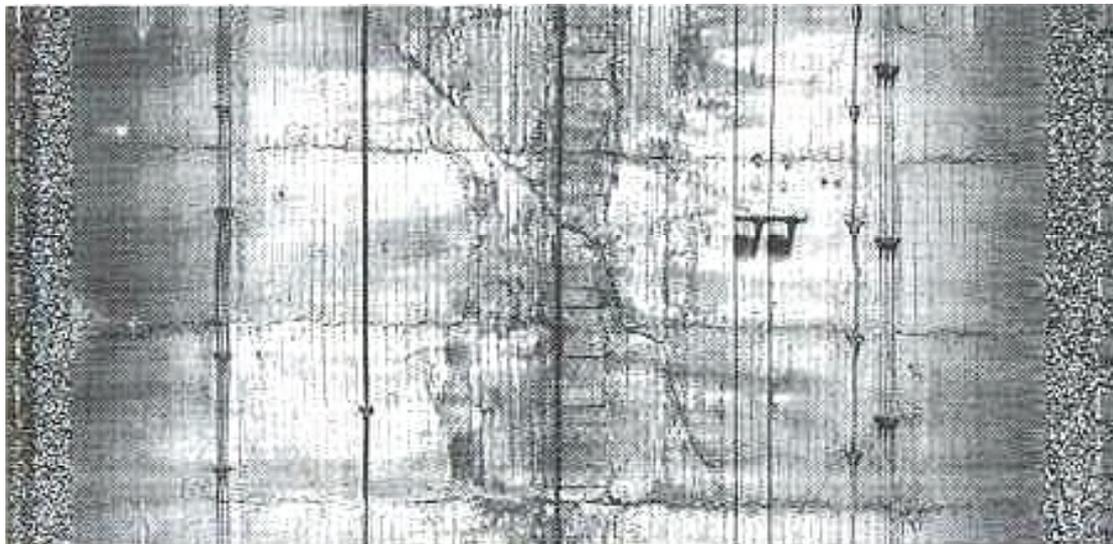


図 8.7 トンネル測定事例

(II) 問題点と今後の展望

レーザを用いたひび割れ探査技術は、高精度の走査メカニズムと大電力、高速・大容量の記憶媒体を必要とすることなどから、測定システムは専用の特装車に搭載することが要求され、システム全体は高額である。

また、建築物のように、形状が複雑で対象物までの距離が大きく変化する構造物の探査には適さない。特に、大出力のレーザは、人体に有害であるため、適用に際しては、安全に対する十分な配慮が必要である。

しかしながら、本法は、一定速で測定対象物の前方を通過するだけで展開画像が得られるため、デジタル写真法と比較しても調査効率がよく、また、要求される検出精度に応じ

てスキャニングレートを上げたり、移動速度を下げるなどの方法で、分解能を比較的自由に設定できるため、トンネルなど、同一形状が連続するような構造物の探査方法としては、非常に有効なものであると考えられる。

8.2.3 ノンプリズムトータルステーションを用いた外観検査

従来、ひび割れの測定は、クラックスケールと呼ばれる定規のような道具をひび割れ部分にあてて幅を測定し、その位置・形状を野帳にスケッチする方法で行われている。

しかしながらこの方法では、ひび割れが高いところにある場合、高所作業車や仮設足場を使用するため手間がかかり、そのうえ危険も伴う。しかも、測定結果を手書きで転記するため、ひび割れの形状や位置座標についての正確なデータを得ることは難しい。また、手書きの野帳をもとに、CAD 図面を作成する際にも、手間がかかり、さらに誤差が拡大する。正確なデータが取得できなければ、ひび割れの経年変化をモニタリングするという耐久性を判断するうえで最も重要な分析を行うことも困難である。現在は、図 8.8 および図 8.9 に示すような CCD 方式のひび割れ幅測定装置が市販されているが、このような装置を用いてもひび割れに近接できなければ、幅の測定ができないという問題は解決されなかった。

この問題を解決し、ノンプリズムトータルステーションを用いて、ひび割れの幅と位置座標を遠方から非接触で測定可能にした装置が開発されている。本装置では、トータルステーションにより得られるターゲットの距離・角度情報を利用し、ファインダー上に検出されたひび割れの幅・位置を記録する。測定結果は、汎用の CAD で閲覧可能な 3 次元座標データとして保存される。



図 8.8 ひび割れ幅測定器（CCD 方式）



図 8.9 同上（測定状況）



図 8.10 ノンプリズムトータルステーションによる検査と従来法との比較



図 8.11 ひび割れ計測用ノンプリズムトータルステーションの外観

8.3 赤外線を用いた外観検査

8.3.1 測定原理

人間が風邪をひいて発熱したり、怪我をして患部に炎症を起こしたりするのと同様に、建築・土木構造物についても、欠陥や損傷が存在する部分は、他の部分と異なる温度変動を示すことが多い。健全部と欠陥・損傷部の温度差を赤外線映像装置を用いて測定することにより、構造物表層部の検査を行う技術を赤外線サーモグラフィと呼んでいる。本技術では、外観の異常のほか、表層付近に存在する空洞等の内部欠陥も検出可能である。

タイル・モルタルの浮き部、コンクリート中のジャンカ、空洞、漏水部等、構造物中に欠陥が存在する部分は、熱伝導率、比熱等、熱的性質が健全部と異なる。健全部と欠陥部の熱的性質の違いは、気温や日射、あるいは人工的な加熱・冷却に起因して生じる構造物の温度変動の中で、表面温度の差となって現れる。土木・建築分野におけるサーモグラフィ法とは、赤外線映像装置を用いて物体の表面温度分布（熱画像）を測定し、熱画像上に現れる表面温度異常部から、内部欠陥の存在を推定する方法である。

サーモグラフィ法による欠陥検出の原理図を図 8.12 に示す。同図からわかるように、サーモグラフィ法は、内部に生じた空隙が断熱層となり、日射や気温変化に起因して生じる表面温度の日変動の中で、欠陥部と健全部との間に表面温度差が生じる時間帯があることを利用して、内部欠陥を検知する手法である。ただし、近年は、構造物を人工的に加熱して強制的に欠陥部と健全部間の温度差を生じさせる手法も実用化されている。高解像度の赤外線装置を用いて近距離から撮影を行えば、空洞放射効果を利用したひび割れの検出等も可能であるが、建築・土木構造物の測定時には遠距離からの撮影が必要となるため、

こうした方法が適用できるほど高解像度の赤外線装置は、普及していない。

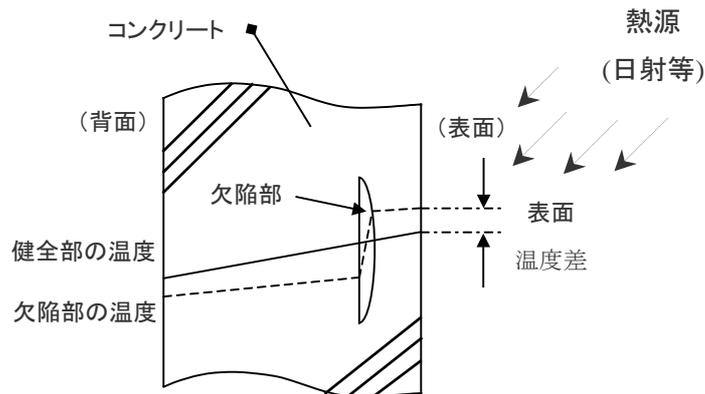


図 8.12 欠陥検出の原理図

8.3.2 問題点と今後の展望

本法は、その原理上、温度変化のない環境下で構造物の検査を行うことはできない。この問題を解決するために、遠赤外線ヒータ等を用いて構造物の加熱を行うアクティブ加熱サーモグラフィ法が一部で実用化されている。しかしながら、大面積の構造物を均一に加熱することは難しく、現状では、アクティブ加熱法の適用対象は、トンネルや室内など比較的狭い空間に限られている。

また、本法は写真撮影という性格上、検出された欠陥の位置や寸法を正確に測定することは難しく、デジタル写真との併用や CAD 図面への合成などの処理を行って、位置・寸法の測定精度を向上させている。

位置・寸法を正確に測定する方法として、赤外線カメラ・デジタルカメラの複合モデルに測量機能を付加した測定システムが開発されている²⁾。このシステムでは、パララックス補正、アフィンひずみ補正などの技術を用いて、完全に位置と視野の一致した赤外線画像およびデジタル写真を撮影し、さらにレーザ距離



図 8.13 システムの外観

計および角度センサから送られる情報をもとに、画像上で検出された欠陥・損傷の位置や寸法を正確に算出するものである。このシステムの外観写真および測定例をそれぞれ図 8.13 および図 8.14～図 8.17 に示す。

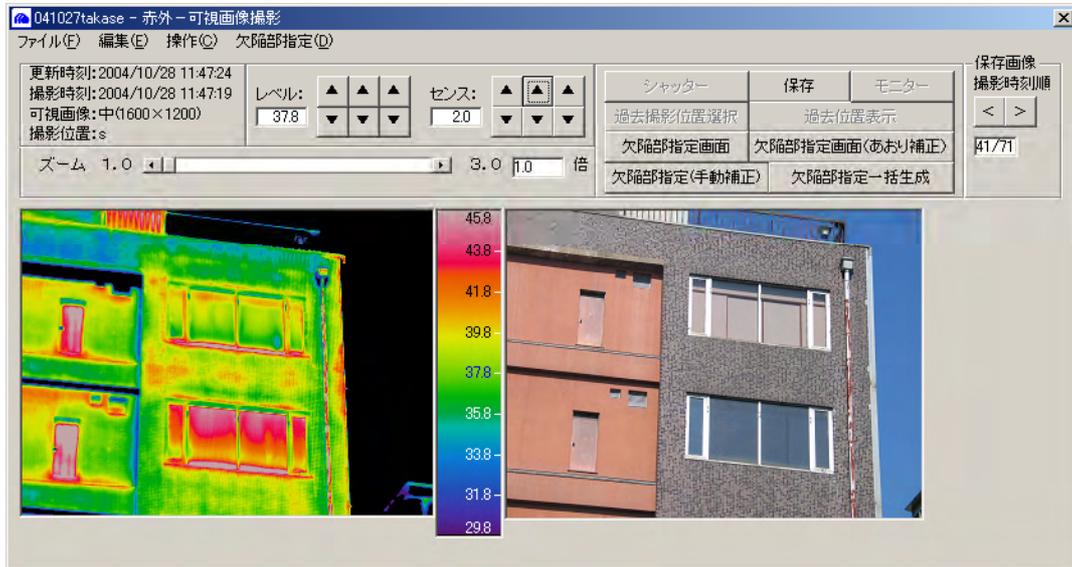


図 8.14 測定状況

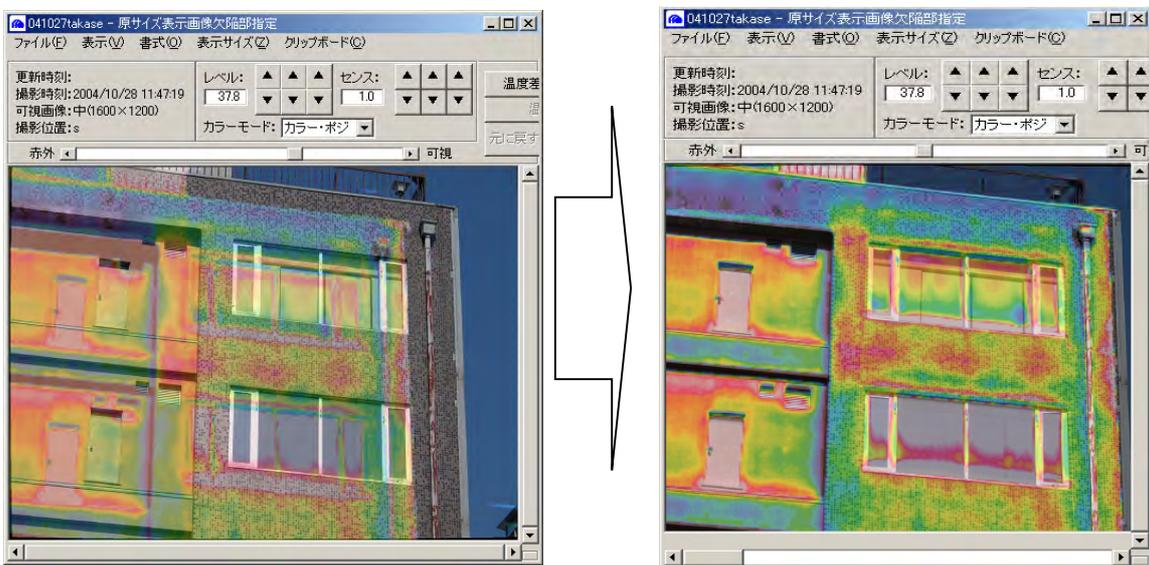


図 8.15 歪曲収差補正・パララックス補正・可視赤外線データフュージョン

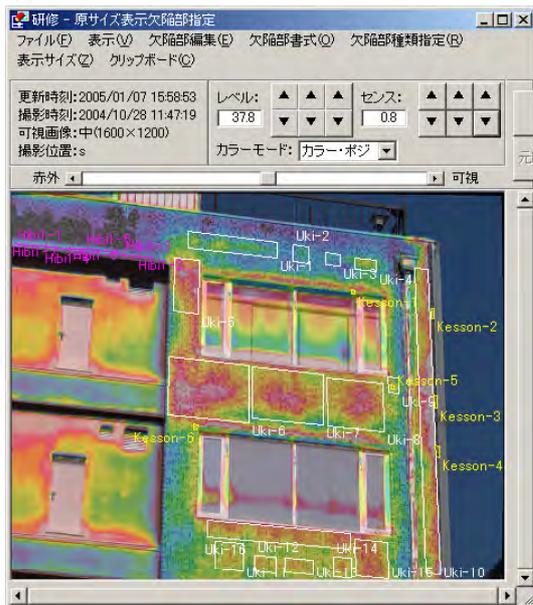


図 8.16 損傷トレース

No.	コードNo	距離(mm)	コードNo	面積(mm ²)	コードNo	面積(mm ²)
1	Hibit-1	2639.185	Uki-1	611665	Kesson-1	5616
2	Hibit-2	78.422	Uki-2	112530	Kesson-2	11607
3	Hibit-3	86.971	Uki-3	72868	Kesson-3	14022
4	Hibit-4	89.385	Uki-4	110250	Kesson-4	15750
5	Hibit-5	137.182	Uki-5	532584	Kesson-5	6764
6	Hibit-6	154.883	Uki-6	1763771	Kesson-6	8217
7	Hibit-7	127.817	Uki-7	1414308		
8			Uki-8	1084736		
9			Uki-9	66054		
10			Uki-10	1684770		
11			Uki-11	265104		
12			Uki-12	125600		
13			Uki-13	142800		
14			Uki-14	123784		
15			Uki-15	433484		
16			Uki-16	832920		
合計		3323.845		9377358		61976

図 8.17 トレース結果出力

8.4 おわりに

冒頭にも述べたように、建設分野における生産物には、現地生産、一物一価、受注生産、単品生産などの特徴のほか、検査に際しても他の分野と比較して使用材料の品質のばらつきが極めて大きい、製品の仕様や履歴に関する情報が保存されていないことが多い、検査業務自体が現地に向いての屋外作業となる等の特殊性があるため、検査方法の標準化が極めて難しい。また、生産者側に品質管理による生産性向上の意識が乏しいことも事実である。しかしながら、これまでに記したように少数の企業の献身的な努力による検査技術の開発は継続的に行われており、その成果は徐々に実を結びつつある。今後は、産学官一体となって、このような研究開発型企業の努力を生産活動に反映させ、より良質で安全快適な社会資本整備を行う必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 谷川恭雄：コンクリート構造物の非破壊検査・診断方法，セメントジャーナル社，pp.65-69，2004年4月
- 2) 佐藤大輔，込山貴仁，羽矢洋，和田光弘：デジタル画像技術を用いたコンクリート劣化モニタリングシステムの開発，第59回年次学術講演会梗概集，pp.327-328，2004年9月

9 近接場光を利用した検査技術

9.1 はじめに

光は本質的に、工業的外観検査技術の計測パラメータとして高い親和性を有しているため、様々な計測原理に基づいた実に多様な光学的検査技術が開発されてきている^{1~4)}。その理由としては、光が絶対的な長さ基準であること、測定対象に関連づけられた光波属性値（振幅、波長、位相、偏光）を遠隔から取得できること、光学的並列処理が可能であり、電氣的物理量に容易に変換できるため高速コンピュータ処理が可能であること、そして測定対象への非破壊性、非襲侵性を有していること等が挙げられる。

しかし、従来、有効な外観検査技術として適用されてきた光学的計測技術は、基本的に「光」を光波として扱う“遠隔場光学（Far-field optics）”に基づいており、光源波長に依存する回折限界のため、ナノメートルオーダーで計測対象の情報取得を行うことは原理的に難しい。そのため、回折限界に支配されず、サブマイクロメートル以下といった微小領域の光学属性情報を取得可能な近接場光の工業的検査技術への適用が様々なアプローチにより進められている。

近接場光計測^{5~8)}は、1928年のSyngeによる原理提案に始まり、1980年代に近接場光学顕微鏡（Near-field Scanning Optical Microscope ; NSOM）が実現されたことで、多くの研究者により活発な基礎研究が進められた。当初は高効率プローブ原理の探索や、新たなプローブ創製法の開発、プローブ走査技術といった要素技術の開発が大きなウエイトを示していたが、20年あまりの時を経て、近接場光による局在光エネルギーと物質の相互作用の観点から、新しい学問分野としてナノ光学理論体系の整備が進む^{7,8)}と同時に、近接場光応答を用いた幅広いアプリケーションが提案され、研究開発が進められている。

図9.1は、近接場光計測法を、その試料照明方法および信号光検出方式に基づき分類したものである。イルミネーションモード(a)は光源からの光をプローブに導波させ、先端に設けられた微小開口から試料を照明し、その限定照明部からの光学的応答を遠方に設置した検出器で検出する。コレクションモード(b)は外部照明により励起されたサンプル表面の電場分布を微小開口から検出する。すなわち、(a)、(b)はそれぞれ、照明領域もしくは検出領域を限定させることで、解像力を向上させる手法となっている。イルミネーション・コレクションモード(c)は、(a)と(b)を組み合わせたものに相当し、解像力のさらなる向上が可能となるが、微小開口を二回通過するため、如何にしてSN比を確保するかが重要となる。本手法は、照明光・検出光の伝搬形態から反射モードとも呼ばれている。金属散乱プ

ローブ(d)は、前述の三手法とは異なり微小開口を用いない手法で、金属材料で創製されたプローブ先端をサンプル表面に近づけ、近接場光を散乱させ遠方に設置された検出器で検出する。本手法は、金属特有のプラズモン共鳴による検出光の増幅効果が利用できること、また、微小開口型と比較して、より先鋭化したプローブ先端により分解能が向上できることが挙げられる。

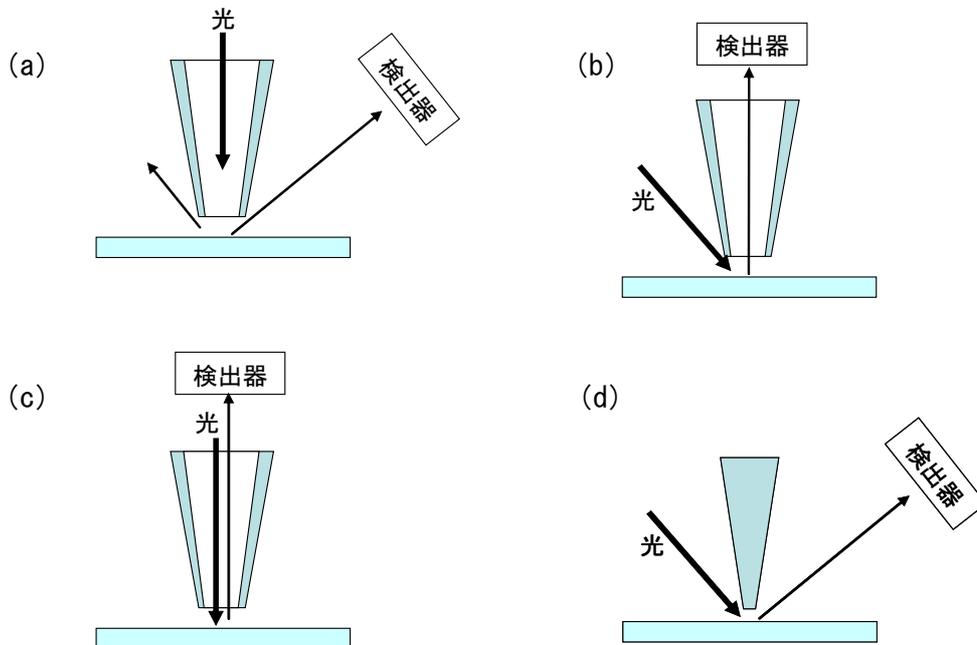


図 9.1 近接場光計測法の照明・検出形態による分類

- (a) イルミネーションモード, (b) コレクションモード,
(c) イルミネーション・コレクションモード, (d) 金属散乱プローブ

以上を概観すると、近接場光計測技術は様々な構成が提案されているが、それらの計測原理の本質は、先鋭化されたプローブ先端部と試料面との間で生じた近接場相互作用を、伝搬光に変換し検出する手法となっていることが分かる。すなわち、外観検査法としての観点から近接場光計測技術をとらえたとき、本技術の特性として以下の二点を挙げる事ができる。

- 1) 測定領域は狭いが回折限界を超えた高分解能検査が可能
- 2) 所謂、表面性状に対応した“外観”にとどまらず、近接場光相互作用を及ぼす範囲に関して、表面内部の情報も取得可能

この特性 1) の高分解能能力に関しては、近接場光応用技術自体が光学顕微鏡の分解能限界を超越することを目的に開発されてきた歴史を鑑みても明らかなものであるといえるが、特性 2) の表面近傍内部検査能力は、近接場光計測技術による外観検査法ならではの

特徴であると言える。

最近の近接場光計測技術のアプリケーションを列記すると、ナノ領域における磁気光学カー効果観測⁹⁾、カーボンナノチューブのラマンイメージング¹⁰⁾、半導体量子ナノ構造の光物性評価^{11,12)}、半導体ウエハ基板のナノ欠陥計測^{13,14)}、ナノインプリント残膜検査¹⁵⁾、導波路の微小欠陥評価¹⁶⁾、ナノインデント試験片の応力分布の直接観測¹⁷⁾、光ファイバグレーティング (FBR) 等のフォトニック構造ナノ光学特性評価^{18~21)}からソーラーセル内ナノ構造領域における光起電流解析²²⁾、トリニトロトルエン (TNT) の極微量同定²³⁾等を挙げることができる。基礎科学分野はもちろん最先端の工学的分野に至るまで、実に多様な分野への適用が試みられているのが分かる。次項では、これらのうち、工業的検査技術としての適用を目指した研究開発例として半導体ウエハ表面欠陥検査法およびナノインプリント残膜厚検査法について紹介する。

9.2 近接場光を利用した半導体ウエハ基板のナノ欠陥検査

図 9.2(a)に、半導体基板のベースとなるベアウエハ表面層の微小欠陥計測手法¹⁴⁾の概念図を示す。シリコンに対して吸収の少ない赤外レーザービームを、ウエハ内部より伝搬させ、ウエハ上面にエバネッセント光を生成させる。エバネッセント光はナノメートルオーダーといった微小領域における光学特性の影響をうけるため、表面に微小欠陥が存在すると、その微小欠陥の光学属性に応じてその分布は変化する。本手法は、そのままでは観測不可能なエバネッセント光をプローブを用いて伝播光に変換することで間接的に観測し、その分布の変化から表面層微小欠陥の検出・評価を行うものである。検出分解能は光源波長に依存せず、プローブ先端径により決定されるため、従来法では検出が困難だった数 10nm スケールの微小欠陥検出の可能性を有する。さらにエバネッセント光の生成方法としてウエハ内部からの臨界角条件を利用していることから、表面層下の内部欠陥も検出できる可能性を有する。図 9.2(b)は、この計測原理に基づいて構築したエバネッセント光検出装置である。本装置は、Si を透過可能な波長 1064nm の Nd:YAG レーザ光源、Si ウエハ裏面カップリング用台形プリズム、エバネッセント光検出用ファイバースコープ、高感度赤外検出素子からなる光学システムと、プローブ高精度走査制御・データ処理 PC システム等から構成される。

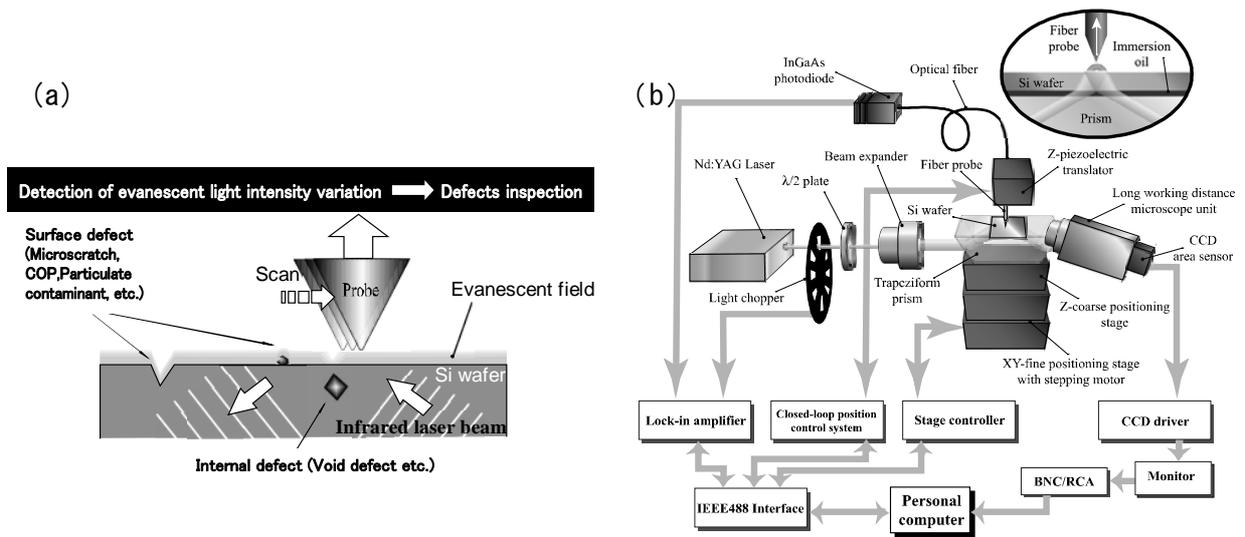


図 9.2 近接場光を利用した半導体ベアウエハ表面層の微小欠陥計測法

(a) 概念図, (b) 構築装置

図 9.3、図 9.4 に本装置による計測例を示す。5nm 程度の凹凸を有する微細スクラッチ状表面欠陥（図 9.3(a)）と表面層内部（深さ約 300nm）に存在するトンネル状欠陥（図 9.4(a)）の計測結果（図 9.3(b)、図 9.4 (b)）となっている。ナノメートルスケールの表面微細凹凸や、また原子間力顕微鏡等では測定が困難な内部空洞欠陥も検出可能なことが分かる。特に、図 9.4(b)の結果は、上述した近接場光を利用した外観検査技術として特徴的な表面近傍内部の検査技術となっている点で興味深い。

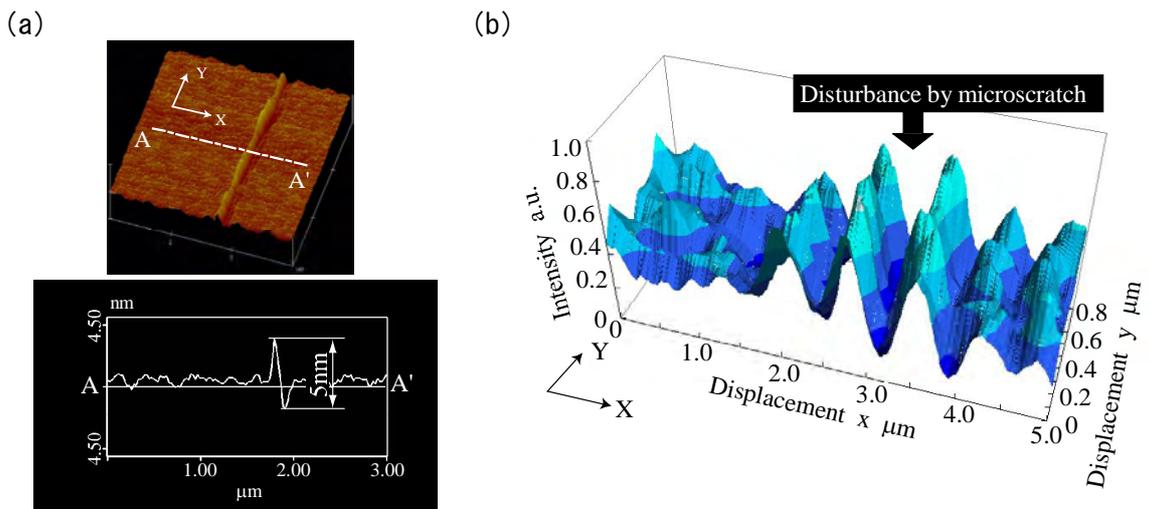


図 9.3 ベアウエハ表面の微細スクラッチ状欠陥計測例

(a) 微細スクラッチ状欠陥, (b) 近接場光学応答

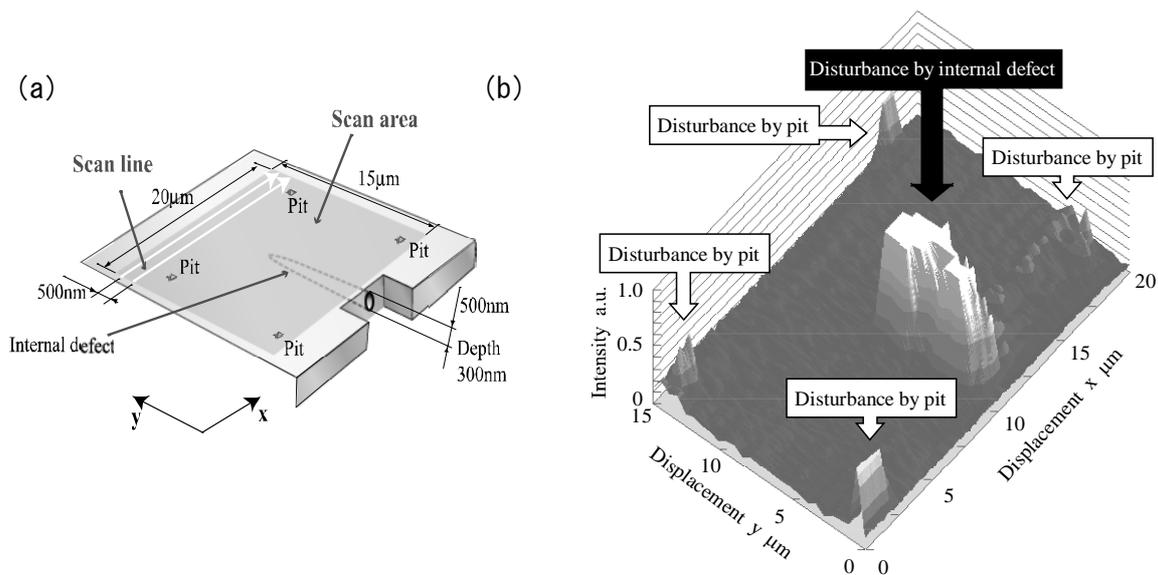


図 9.4 ベアウエハ表面層内部の微細トンネル状欠陥計測例

(a) 微細トンネル状欠陥, (b) 近接場光学応答

9.3 近接場光を利用したナノインプリント残膜検査

近年、半導体デバイスは微細化・高集積化がますます進んでいる。その要求を満たすため、リソグラフィー技術にはさらなる微細化による技術面の問題やコストの高騰が懸念されている。そこで現在、次世代リソグラフィーとしてナノインプリント技術²⁴⁾が検討されている。図 9.5 にナノインプリント技術の基本プロセスを示す。ナノインプリント技術は、微細なパターンが刻まれたモールドをレジストに押し付けパターンを転写する方法であり、比較的簡単な装置でナノメートルサイズのパターン形成が可能となる。しかし転写プロセスにおいて、モールドとウエハの隙間に数 10nm 程度の残膜が存在するため、エッチングにより取り除く必要がある。この残膜厚がばらつくとエッチングの寸法がばらつき、結果として半導体の動作不良の原因となることが問題となっている。そのため、より信頼性の高い半導体プロセスの実現には、非破壊での極薄残膜の膜厚測定技術が必要不可欠である。しかし、従来の伝搬光を用いた膜厚測定法では横分解能に限界があるためナノインプリントの細線間の測定には不適となっていた。

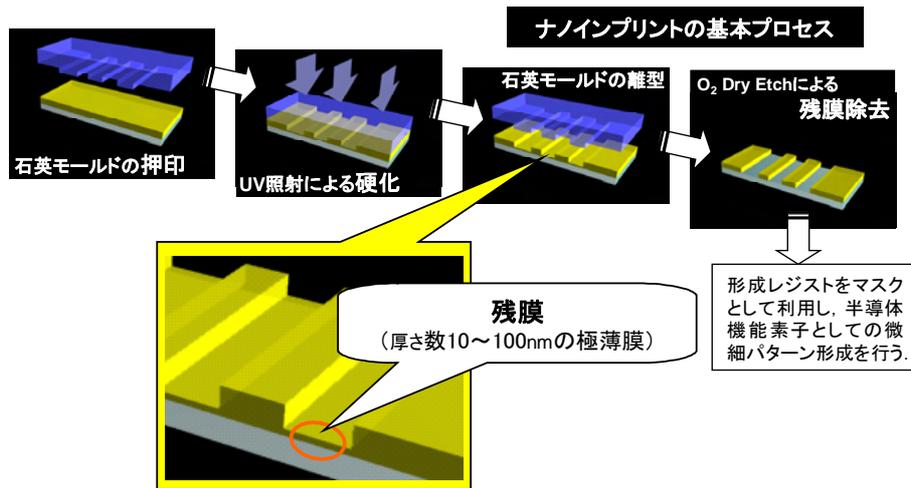


図 9.5 ナノインプリント技術の基本プロセス

図 9.6 に近接場光によるナノインプリント残膜検査法の概念図¹⁵⁾を示す。開口型ファイバプローブ先端にレーザーを照射し、プローブ先端部で得られる近接場光応答を検出する構成となっている。プローブ先端を薄膜表面近傍に接近させることにより、プローブ先端とレジスト薄膜および Si 表面との近接場相互作用によって生成される検出信号を取得する。この近接場光学応答にレジストの厚さ情報が含まれれば、本手法により極薄膜厚の測定が期待できる。本手法では、横分解能はプローブの開口サイズで決まるため、回折限界を突破した横分解能を実現でき、遠隔伝搬光では困難だったナノインプリント残膜測定への適用が期待される。

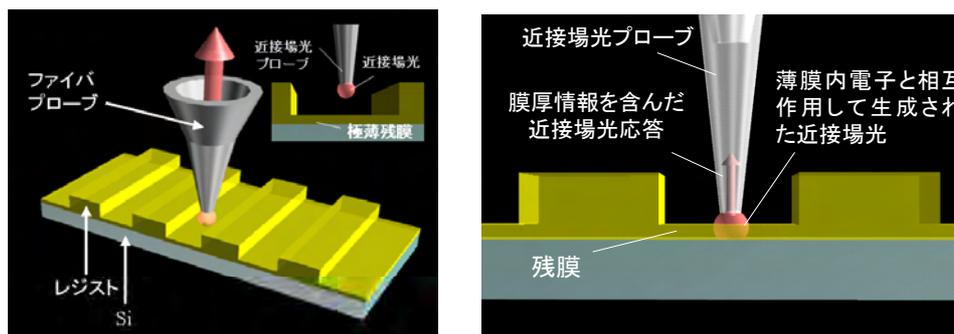


図 9.6 近接場光によるナノインプリント残膜検査法の概念図

図 9.7 は、FDTD シミュレーションにより、膜厚変化による近接場光応答特性の解析例である。異なった膜厚 (0、10、20、30nm) に対して、プローブ先端—試料表面間隔 (以降、airgap と呼ぶ) を 10~100nm まで変化させ、ファイバプローブ取得光の強度を算出した。膜厚の増加により、airgap に対する近接場光応答曲線が左にシフトしていること

が分かる。このレジスト残膜量に応じたシフトは、プローブ先端部が、光学的に透明に近いレジスト残膜部よりも、レジスト残膜下部にある Si 表面と強い近接場光学的相互作用を引き起こしていること意味していると思われる。この結果は、shear-force 制御等による airgap と近接場光学応答量を独立に取得することで、膜厚情報を計測できる可能性があることを意味するものである。

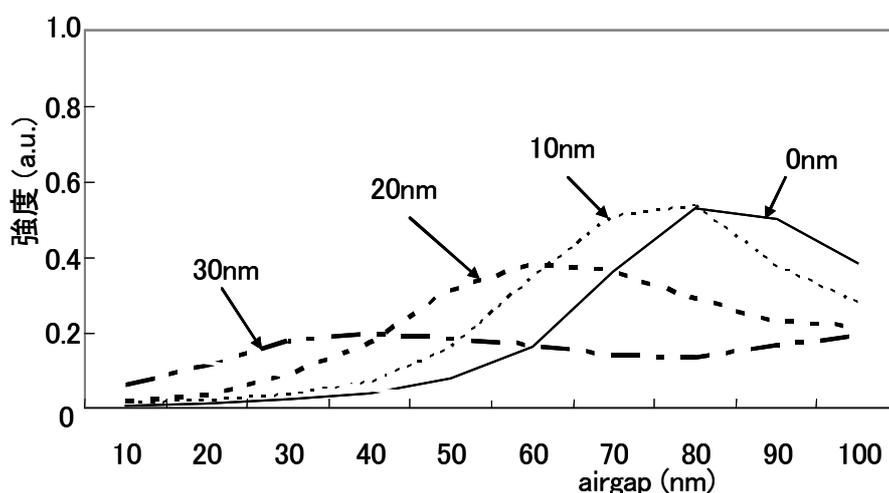


図 9.7 膜厚による近接場光応答の違い

9.4 おわりに

光学的外観検査技術は、多様な光学属性値（振幅、波長、位相、偏光）により、測定物を多角度から評価できる他、被測定物にやさしく（非破壊で内部情報も取得可能）、真空環境が不要等、モノづくりを支援する工業計測技術として優れた特性を有している。近接場光計測技術は、原理的にリモートセンシングは困難となるものの、非破壊性等の光学的外観検査技術としての優れた特性を本質的に有しており、遠隔伝搬光では不可能だったサブマイクロメートル以下のナノスコピックな微小領域の計測評価技術として展開可能なポテンシャルを有している。特に、近年のナノテクノロジー研究に牽引されたマイクロ加工技術の発達により、工業計測技術としての微細領域の詳細評価の重要性はますます高まっており、今後、プローブ構造に代表される基盤要素技術^{25~27)}のさらなる開発とともに、それら要素技術の高度な融合による近接場光応用外観検査技術のさらなる発展が期待される。

参考文献

- 1) 三好隆志, 高増潔, 高偉: “ナノスケールの知的計測の確立を目指して,” 精密工学会誌, 70, 8(2004)1028-1029.
- 2) 高増潔: “光, 非光による形状計測:精密計測の課題,” 2006 年度秋季大会精密工学会学術講演会シンポジウム資料, 2006.
- 3) 三井公行: “計測・評価の軌跡—ミクロンからナノへ, 非接触から接触へ—,” 精密工学会誌, 65, 1 (1999) 54-59.
- 4) 野村俊, 神谷和秀: “精密工学を支える光形状計測,” 精密工学会誌, 67, 6 (2001), 883-887.
- 5) 斎木敏治: “近接場光学顕微鏡で何が見えるようになってきたか,” OPTRONICS, 12 (2006) 88-93.
- 6) 大津元一, 河田聡, 堀裕和編 “ナノ光工学ハンドブック,” 朝倉書店, 東京, (2002).
- 7) 張紀久夫: “ナノ構造物質の光学応答,” Springer-Verlag, 東京, (2004).
- 8) 大津元一, 小林潔: “近接場光の基礎,” オーム社, 東京, (2003).
- 9) G. Meyer, T. Crecelius, A. Bauer, I. Mauch, and G. Kaindl:” In situ near-field imaging of magnetic domain patterns in ultrathin iron films, ” Appl. Phys. Lett, 83, 7(2003)1394-1396.
- 10) Taka-aki Yano, Prabhat Verma, Satoshi Kawata, and Yasushi Inouye:” Diameter-selective near-field Raman analysis and imaging of isolated carbon nanotube bundles, ” Appl. Phys. Lett, 88, 093125(2006)1-3.
- 11) M. Hadjipanayi, A. C. Maciel, J. F. Ryan, D. Wasserman, S. A. Lyon:” Scanning near-field photoluminescence mapping of (110) InAs-GaAs self-assembled quantum dots.” Appl. Phys. Lett, 85, 13(2004)2535-2537.
- 12) Takashi Yatsui, Motoichi Ohtsu, Jinkyong Yoo, Sung Jin An, and Gyu-Chul Yi:” Near-field measurement of spectral anisotropy and optical absorption of isolated ZnO nanorod single-quantum-well structures, ” Appl. Phys. Lett, 87, 033101(2005)1-3.
- 13) Y. Saito, M. Motohashi, N. Hayazawa, M. Iyoki, S. Kawata:” Nanoscale characterization of strained silicon by tip-enhanced Raman spectroscopy in reflection mode, “Appl. Phys. Lett. 88, 143109(2006)1-3.
- 14) S. Takahashi, R. Nakajima, T. Miyoshi, Y. Takaya, T. Yoshioka, T. Hariyama, K. Kimura, T. Nakao, K. Takamasu:” Nano-Defects Inspection of Semiconductor

- Wafer using Evanescent Wave,” VDI Berichte, 1844(2004)307-316.
- 15) 南口修一, 臼杵深, 高橋哲, 高増潔, 中尾敏之, 2006年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 187-188, (2006)
 - 16) Tadashi MITSUI, Kazuaki SAKODA and Giyuu KIDO “The Influence of Defects on the Propagation Light within Polymeric Optical Waveguides Studied by Polarized Near-Field Scanning Optical Microscopy” Opt. Rev. 13, 4 (2006) 242-248.
 - 17) 大久保進也, 高柳淳夫, 梅田倫弘: “複屈折近接場光学顕微鏡によるナノインデント試験片の応力分布の直接観測,” 精密工学会誌, 69, 4 (2003) 521-523.
 - 18) R. Wüest, D. Erni, P. Strasser, F. Robin, H. Jäckel, B. C. Buchler, A. F. Koenderink, V. Sandoghdar, R. Harbers:” A “standing-wave meter” to measure dispersion and loss of photonic-crystal waveguides, ” Appl. Phys. Lett, 87, 261110(2005)1-3.
 - 19) B. Cluzel, E. Picard, T. Charvolin, E. Hadji, L. Lalouët, F. de Fornel, C. Sauvan, P. Lalanne:” Near-field spectroscopy of low-loss waveguide integrated microcavities, ” Appl. Phys. Lett, 85, 051112 (2006)1-3.
 - 20) T. N. Oder, J. Shakya, J. Y. Lin, and H. X. Jiang:” III-nitride photonic crystals, ” Appl. Phys. Lett, 83, 6(2003)1231-1233.
 - 21) J. C. Gates, J. D. Mills, and W. S. Brocklesby:” Near-field scanning optical microscopy of standing waves in fiber Bragg gratings, ” Appl. Phys. Lett, 83, 9(2003)1890-1892.
 - 22) S. Smith, P. Zhang, T. Gessert, and A. Mascarenhas:” Near-field optical beam-induced currents in CdTe/CdS solar cells: Direct measurement of enhanced photoresponse at grain boundaries, ” Appl. Phys. Lett, 85, 17(2004)3854-3856.
 - 23) Lewis Mortimer Gomez, Celia Osorio, Erich Amman, Samuel P. Hernandez, and Miguel E. Castro:” The spectroscopic fingerprint of TNT between 395 and 495 nm determined from transmission near field optical microscopy measurements, ” Chem. Phys. Lett. 422(2006) 313-316.
 - 24) Stephen. Y. Chou, Peter. R. Krauss, Preston. J. Renstrom, J. Vac. Sci. Technol. B, Vol.14, No6, (1996)
 - 25) Yasushi Inouye, Norihiko Hayazawa, Koji Hayashi, Zouheir Sekkat, Satoshi Kawata:” Near-field scanning optical microscope using a metallized cantilever tip for nanospectroscopy,” Proc. SPIE, 3791 (1999) 40-48.

- 26) 小西康介, 奥田満, 片岡俊彦, 押鐘寧, 中川寛文, 井上晴行, 中野元博: “微小突起をプローブとした走査型近接場光学顕微鏡の開発-結晶の劈開面のナノ構造の観察-,” 2006年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (2006) 1125-1126.
- 27) P. Tortora, R. Da "ndliker, W. Nakagawa, L. Vaccaro:", Detection of non-paraxial optical fields by optical fiber tip probes, " Opt. Commun.259(2006) 876-882.

10 電子デバイスにおける画像処理を使った外観検査技術

10.1 はじめに

わが国の産業の中で最も重要なもののひとつに電子デバイスをあげることができる。近年、家電製品や携帯電話などのセット機器は、韓国・中国・欧米等の新旧様々な企業が存在し、日本企業のシェア拡大・維持は難しい状況になっている。しかし、そのセット機器を構成する材料や部品レベルで考えると日本製品の依存度はかなり高い。さてその電子デバイスの外観検査であるが、非接触な検査として画像処理を使った方法が一般的である。現在、産業界で主流となっている電子デバイスを分類すると半導体、フラットパネルディスプレイ、一般電子部品という3つに大別ができる(図10.1)。そのうちフラットディスプレイに関しては、特殊な検査が必要なこともあり本章では取り上げない。外観検査の内容が比較的一般的である半導体、一般電子部品(その中でも特にコネクタ)の現在の外観検査技術についての調査を本章ではまとめている。

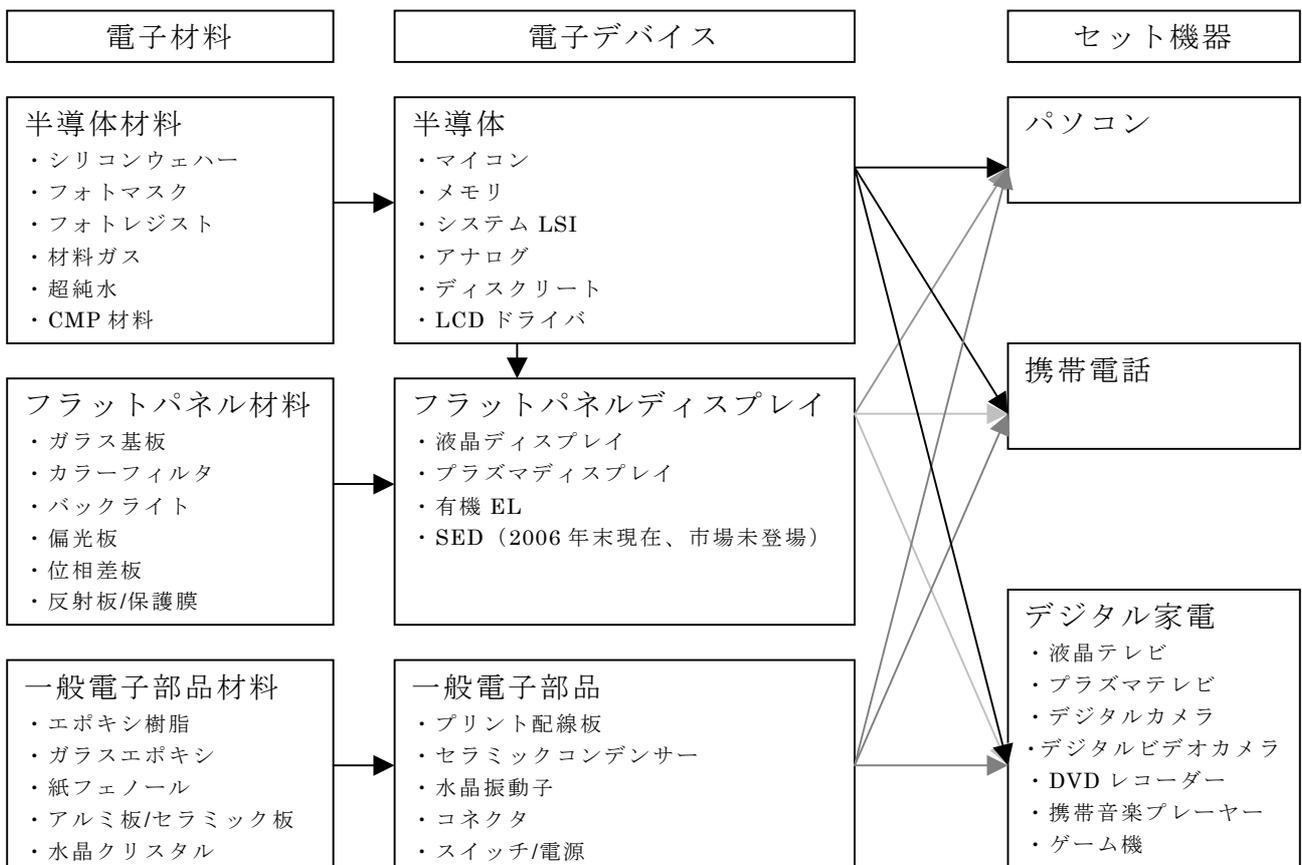


図 10.1 電子デバイスの分類

10.2 電子デバイス

10.2.1 電子デバイス業界の概要

パソコン、携帯電話、デジタル家電のデジタル民生機器の小型化、軽量化が進み、また市場でもその要求が高まっている。これに伴い、これらの機器に使用される半導体や一般電子部品もまた、小型化、軽量化、肉薄化、微細配線基盤への高密度実装などの要求も同時に高まっている。それに合わせて各部品でより精度の高い画像処理が求められるようになってきている。例えば、ある部品のリードピッチ 1.0mm を 1 画素 0.1mm で計測していたとする。集積率を高めるために 1.0mm から 0.3mm に設計変更（実際にはリードピッチだけの設計変更はない。）すると、同じ分解能では 3 画素しかなく十分な検査ができなくなる可能性が出てくる。これらの市場要求がそのまま外観検査の要求に直結してくる。

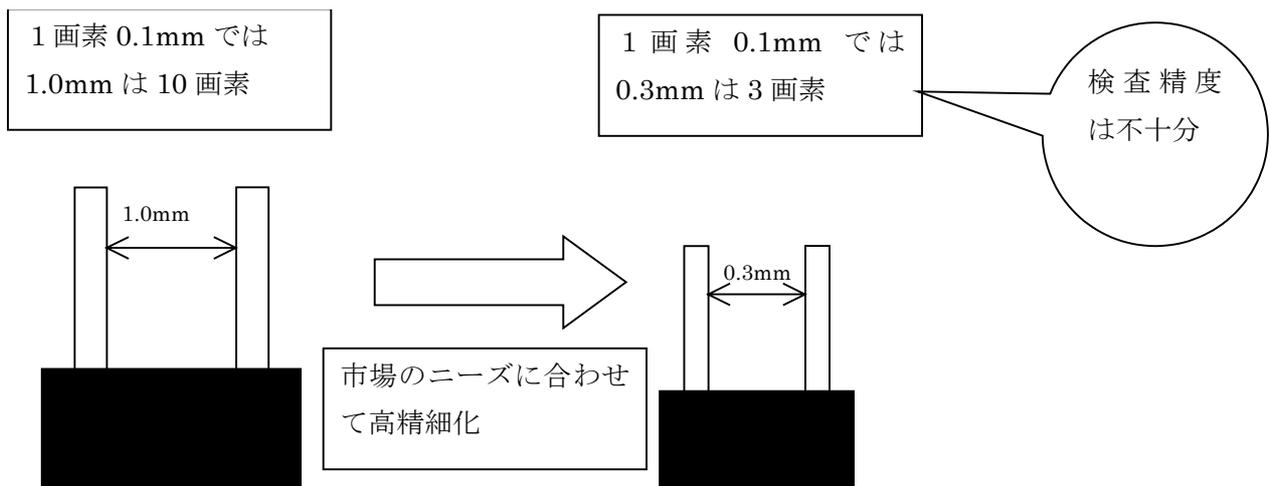


図 10.2 電子デバイスの高精細化

10.2.2 電子デバイスの検査技術

(I) 検査技術の現状

電子デバイスの画像処理を使った外観検査は、大きく分けると 2 通りある。1 つは検出した点や線を使って距離や幅、高さを計測する画像計測である。外形やリード等の寸法を画像上のエッジ等を検出することにより図面通りにできているかどうかを計測する。もう 1 つは、かけ、ひび、われ、ゴミなど外観の欠陥を検出する欠陥検査である。これは画像上の濃淡差を利用して正しい輝度でないものは、欠陥として検出する。

これらの外観検査の画像処理のコアテクノロジーは、正規化相関サーチ、エッジ検出、プロブ解析、画像フィルタなどの基本的な画像処理の手法である。それらの基本的なテクノロジーを様々な組み合わせる事によって様々なアプリケーションに特化した複雑な検査を行っている。

また、このコアテクノロジー（ソフトウェア）と一緒に使用するハードウェアはここ数年で劇的な変化がおきている。前述したようなデジタル民製品の拡大により、検査そのものも増えたが、画像処理で使用するハードウェアもその恩恵を大いに受けている。

- 1) 画像計測と欠陥検査
- 2) 基本的なテクノロジーの組み合わせ（アプリケーションは複雑化）
- 3) 精度アップはハードウェアに依存

（Ⅱ）画像検査装置のハードウェア構成

この分野で使用される画像検査装置のハードウェア構成は、2種類に分類される。1つはPCタイプである。主にインテル系のCPUを搭載したWindows PCに画像取込ボードという構成である。もう1つは、画像処理専用の装置である。メインCPUは、日立、テキサス・インスツルメンツ等の汎用CPUやDSPを使い専用の画像処理エンジン（ASIC）を搭載した構成が多いが各社である。尚、ハードウェアの変化を捉えるため8年前（1998年）の状況もそれぞれの項目で挙げている。リファレンスとして8年前としたのはそれ以前の画像検査装置の仕様は専用ハードウェアが多く、今日のように汎用ハードウェアの組み合わせの装置とは比較できないからである。

（a）CPU

PCタイプと専用装置では多少状況は異なるがCPU速度は速くなり、メモリが大容量化し更に低価格化しており画像処理にとっての環境は良い状況となっている。CPUが高速化することにより画像処理演算速度が向上し、メモリが増えたことにより高画素カメラのデータなども扱えるようになった。8年前に比べると約10倍高速に画像処理は行われる。

	1998年	2006年	
CPU	Pentium II / 300MHz	Pentium 4 / 3GHz	10倍
Main Memory	128MB	1GB	8倍

※画像処理に使われる標準的なCPU速度であり当時、現在ともに最高速度ではない。

(b) 産業用カメラ

近年、民生用のデジタルカメラの普及に伴い産業用カメラの CCD サイズも飛躍的に大きくなり、価格も低下した。ごく近年はデジタル化も進んでいる。

	1998 年	2006 年	
カメラ解像度	30 万画素	200 万画素	6.7 倍
インターフェース	アナログ	デジタル	高精細

※画像処理に使われる標準的な解像度であり当時、現在ともに最高速度ではない。

(c) 照明

数年前までは、主力照明はハロゲン照明であったが最近の主力照明は LED 照明となっている。その理由は数々ある。元々、ハロゲンに比べ低消費電力であり、長寿命であるためライン等で長時間使用する画像検査に向いているとされていたが、価格が高い、輝度が足りない等の問題を抱えていた。しかし、近年民生機器や信号機等インフラに応用され大量採用されたことにより、大量生産効果と歩留まりの向上により価格が下がり、LED の高出力化や LED の集光率をあげるなど欠点が次々に改善され採用されるようになった。更に青色 LED の開発・生産が成功したことにより赤、青、緑の各色やそれらを混合させることにより様々な色を作り出せるようになった。このことにより、素材や表面の状態・検出したい対象物によって色（波長）を変更することによって正しく欠陥を検査する事が容易くなった。

	1998 年	2006 年
主な照明	ハロゲン照明	LED 照明

(Ⅲ) 現状使われているコアテクノロジー

(a) 正規化相関サーチ

画像の一部とあらかじめ登録されたモデル画像の相関係数（類似度）を計算し、その類似性を尺度としたサーチ手法である。類似性を測定することによってモデル画像と近い特徴を持った画像の特徴位置を特定できるため、位置検出等に主に使用されている。結果としては、X、Y 座標、得点（相関係数）が出力される。一般的に、繰り返し位置精度は、 3σ で 1/4 ピクセル。

サーチモデル



サーチ結果

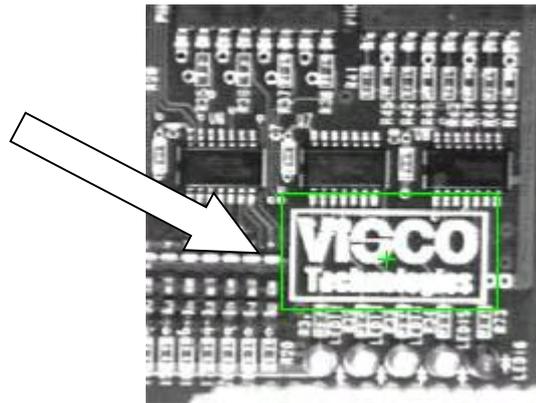


図 10.3 正規化相関サーチモデルとサーチ結果

(b) エッジ検出

画像上の対象物を微分することによりエッジピークを抽出し、エッジ部の位置、有無、数、長さ、方向等対象のエッジ特徴を計測する画像処理の基本的な手法である。

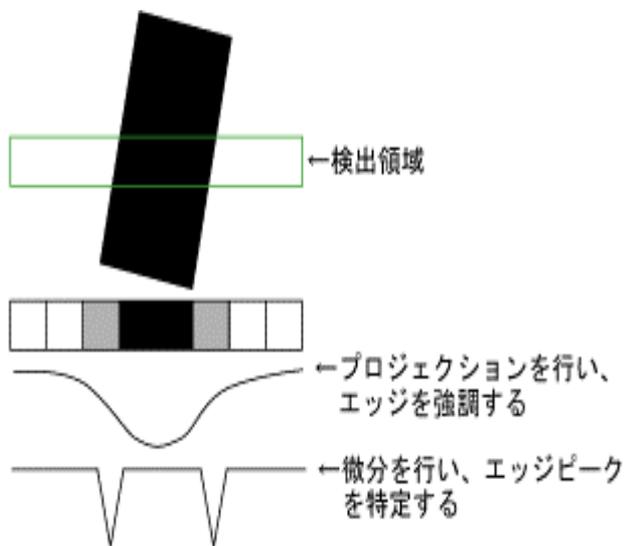


図 10.4 エッジ検出のアルゴリズム

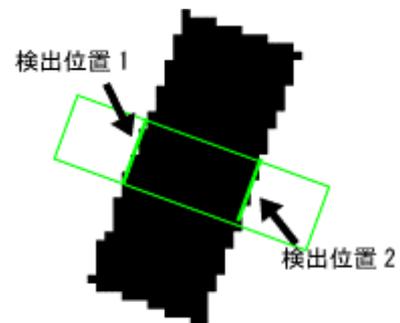


図 10.5 エッジ検出結果

【存在の有無】画像上の対象物にエッジが存在するかどうか判定することができる。

【カウ ント】画像上の対象物のエッジ数を計測することができる。

【計 測】画像上の対象物の長さ(精度 1/4 ピクセル)などを計測することができる。

【位 置 検 出】画像上の対象物のエッジ位置などを特定することができる。

例：図中の対象物は下記のように分析できる。

【存在の有無】 エッジあり

【カ ウ ン ト】 2 エッジ

【 幅 】 検出位置 1 と 2 の距離:13.53

【位 置 検 出】 検出位置 1 x:26.27, y:37.14

検出位置 2 x:36.54 y:45.95

(c) ブロブ解析

グレー階調の画像を任意のしきい値により 2 値化を行い、2 値（通常は黒、白）のいずれかを塊（ブロブ：Blob）とし、存在の有無、数、面積、位置、長さ、方向等対象の形状特徴を解析する画像処理の基本的な手法である。

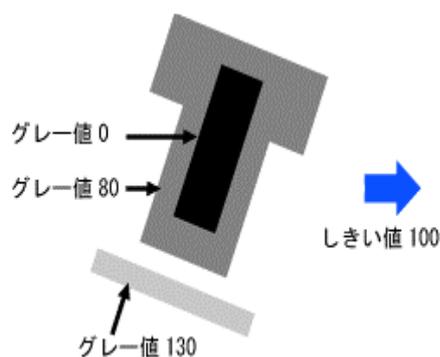


図 10.6 ブロブ解析のアルゴリズム

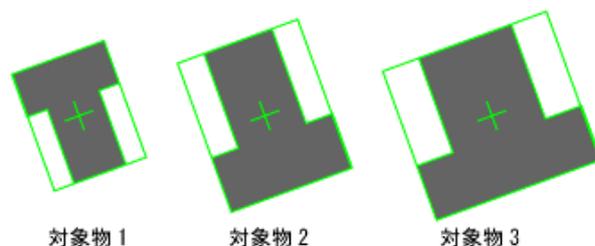


図 10.7 ブロブ解析の結果

【存在の有無】 画像上に対象物が存在するかどうか判定することができる。

【カ ウ ン ト】 画像上に対象物の数を計測することができる。

【大 き さ】 画像上に対象物の面積（ピクセル単位）を計測することができる。

【計 測】 画像上に対象物の長さや周囲長（ピクセル単位）などを計測することができる。

【方 向 判 別】 画像上に対象物の方向（角度）を計測することができる。

【位 置 検 出】 画像上に対象物の重心位置などを特定することができる。

【検 査】 画像上に対象物を欠陥として上記の形状特徴などから検査することができる。

例：図 10.7 内の対象物は下記の通り分析できる。

【存在の有無】 Blob 有り

【カウント】 3個

【大 き さ】 対象物 1:692

対象物 2:1165

対象物 3:1700

【周囲長計測】 対象物 1:128

対象物 2:163

対象物 3:228

【方 向 判 別】 対象物 1:-160 度

対象物 2:20 度

対象物 3:20 度

【位 置 検 出】 対象物 1:x36.86, y:36.13 対象物 2:x95.9,y38.31 対象物 3:x168.35, y:36.13

(Ⅲ) 検査の手順

図 10.8 のような順序で画像処理検査を行うことが多い。検出&計測と欠陥検査の順序は入れ替わっても問題なさそうであるが、検出データを使用して検査を行う場合があるため検出&計測→欠陥検査の順で実行する方が一般的である。

- a) 位 置 決 め : 部品 の 画 像 上 の 位 置 を 検 出 す る 。 こ こ で 使 用 さ れ る 画 像 処 理 技 術 は 正 規 化 相 関 サ ー チ で あ る こ と が 多 い 。
- b) 検 出 & 計 測 : 計 測 す る 箇 所 の 検 出 を 行 い 。 必 要 な 検 出 点 ・ 検 出 線 を 使 い 計 測 を 行 う 。 こ こ で 使 用 さ れ る 画 像 処 理 技 術 は 正 規 化 相 関 サ ー チ ・ エ ッ ジ 検 出 で あ る こ と が 多 い 。
- c) 欠 陥 検 査 : あ る 範 囲 の 欠 陥 検 査 を 行 う 。 欠 陥 検 査 に 使 用 す る 画 像 処 理 技 術 は 、 画 像 フ ィ ル タ + ブ ロ ブ 解 析 処 理 が 多 い 。
- d) 結 果 計 算 & 判 定 : b), c) で 出 力 さ れ る 結 果 を 使 い 、 各 種 演 算 を 行 い 、 良 品 範 囲 に あ る か ど う か の 判 定 を す る 。 こ こ で は 画 像 処 理 技 術 を 使 用 し な い 。

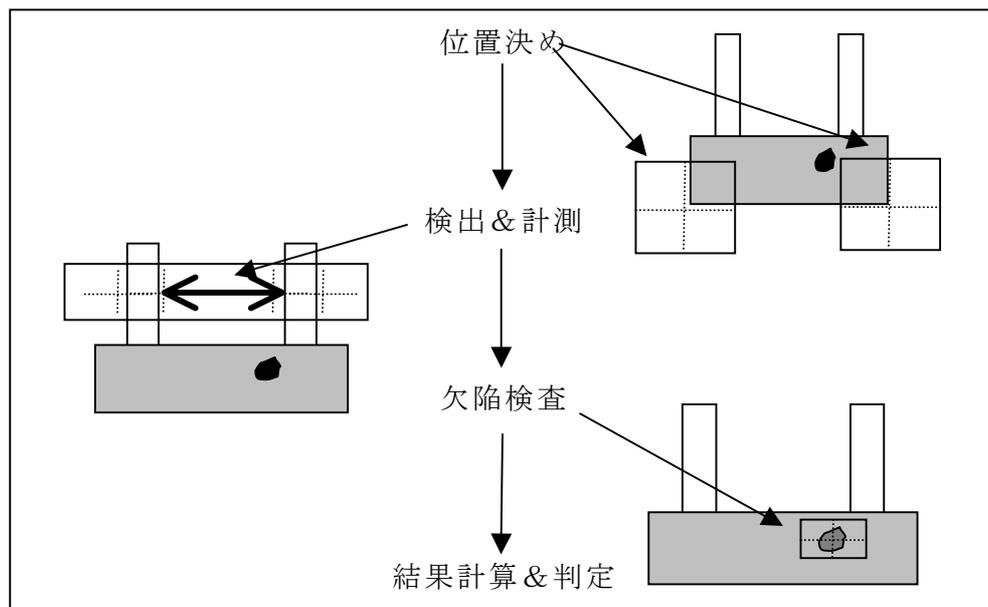


図 10.8 画像処理の検査手順

10.2.3 半導体（パッケージ）の検査

（I）最近の動向

業界動向で述べた様に半導体においても小型化、高精細化が進んでいる。特に従来の半導体パッケージのようなリードを持たない BGA（Ball Grid Array）パッケージを代表とした CSP（Chip Size Package）の需要は高まり、特に注目されている技術のひとつである。ちなみに日本電子機械工業会（EJAJ）によると CSP の定義は『チップサイズと同等あるいはわずかに大きいパッケージの総称』としている。この様なリードレスパッケージもリード型パッケージ（QFP・DIP・SOP 等）も外観検査としては項目数が多く、複雑な検査処理が必要となってくる。

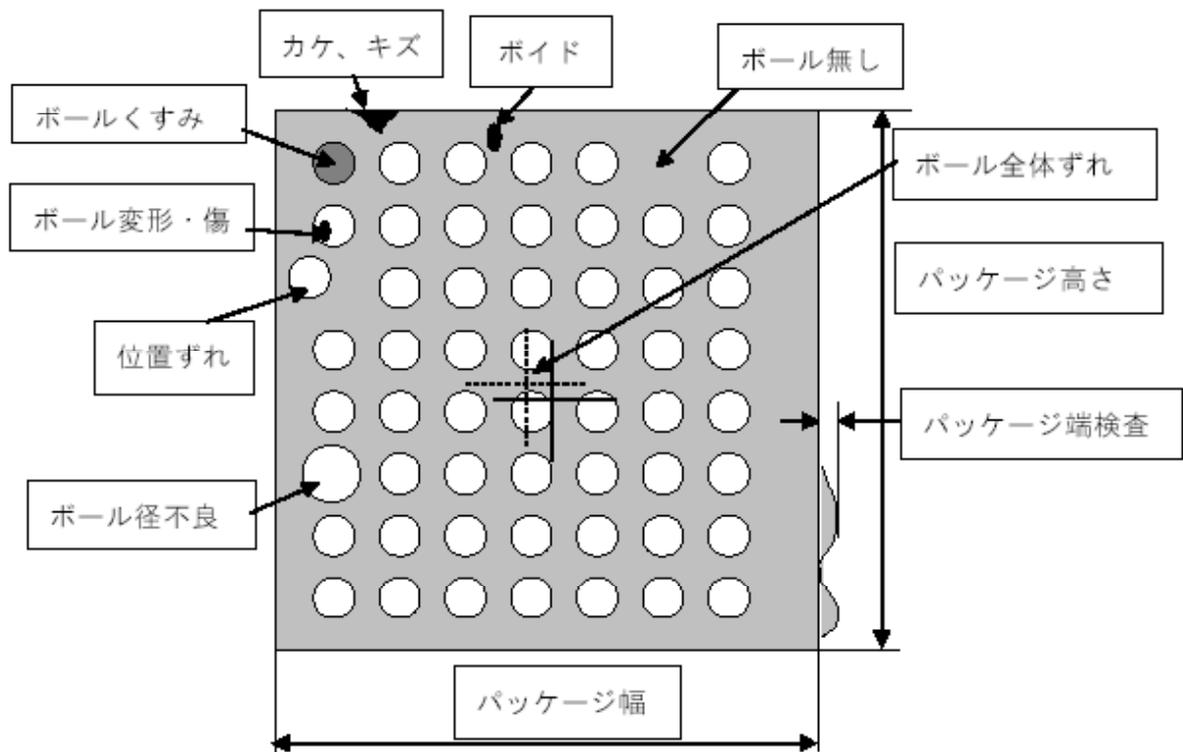


図 10.9 CSP/BGA の外観検査項目

CSP/BGA の検査項目

【画像計測】 ボール数、ボール径、ボール位置ずれ、パッケージ寸法、ボール全体ずれ

【欠陥検査】 カケ、キズ、未充填、ボイド、文字検査、ボール変形・傷、ボールくすみ、
パッケージ端検査

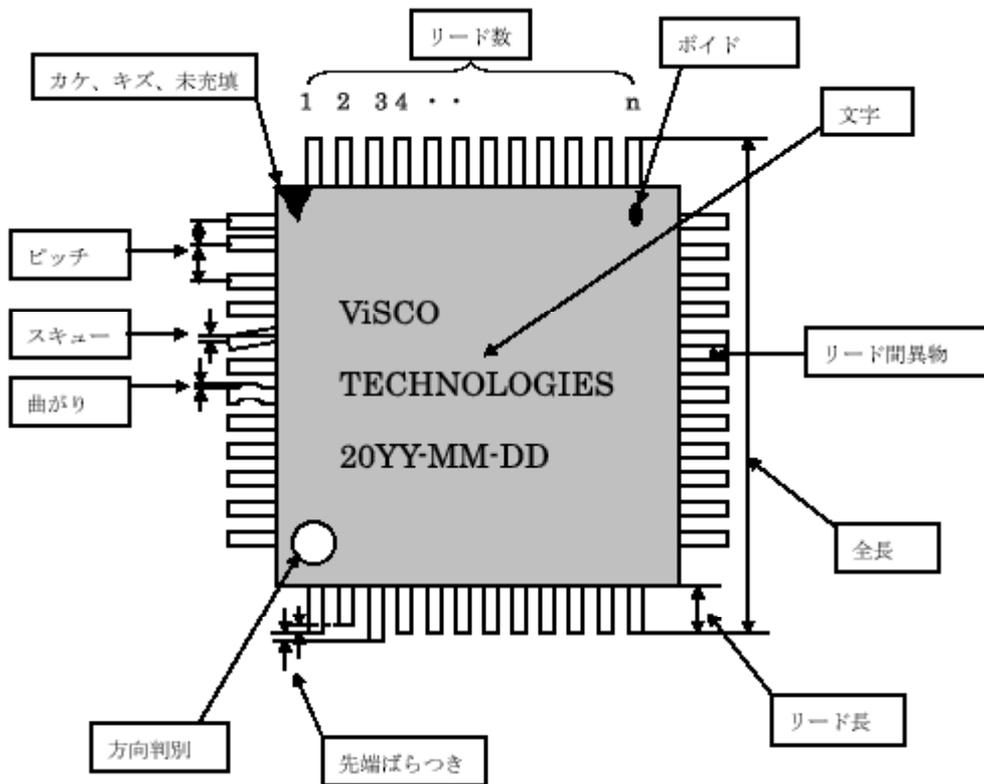


図 10.10 QFP の外観検査項目

QFP の外観検査項目

【画像計測】 リード数、リードピッチ、スキュー、曲がり、先端ばらつき、リード長、全長、パッケージ寸法

【欠陥検査】 カケ、キズ、未充填、ボイド、文字検査、リード間異物

(Ⅱ) 検査内容

半導体パッケージの検査は、大きく分けると 3 つ、ボール・リード部 (BGA 等はボール部 QFP 等の場合はリード部) 本体パッケージ部及び文字部に分けることができる。また、ボール・リード部は計測、パッケージ部・文字部は欠陥検査となることが多い。

(a) ボールの検査

リードの検査は、後述のコネクタと殆ど同じなのでここではボールの検査について述べる。ボールの検査は、まずボールを検出することから始める。背景よりボールが明るくなることを利用しある閾値レベルで 2 値化を行いボールのおおよその位置を検出する。その後、エッジ検出ツールにて円を検出しボール径を計算する。円の中心をボール位値とする。

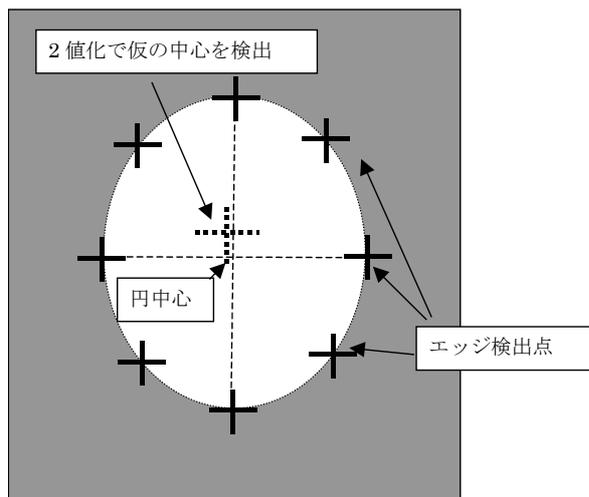


図 10.11 ボールの計測

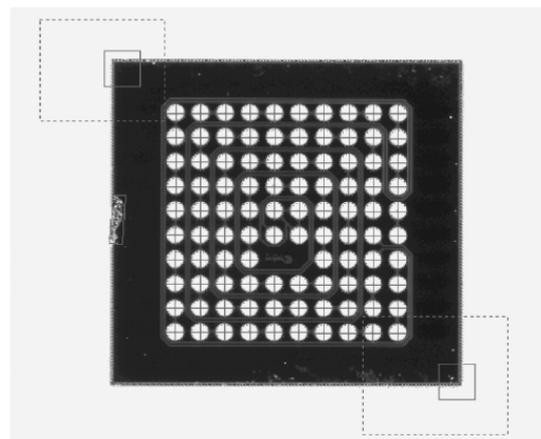


図 10.12 実際の BGA パッケージの検査画像

(b) パッケージの検査

パッケージの検査は、カケ、キズ、未充填、ボイドなどの項目である。画像処理手法としては、検査枠を置き、画像フィルタ+プロブ解析を行うことが多い。それぞれの検査内容に合わせて、検査枠や検出しきい値を変更する場合もある。

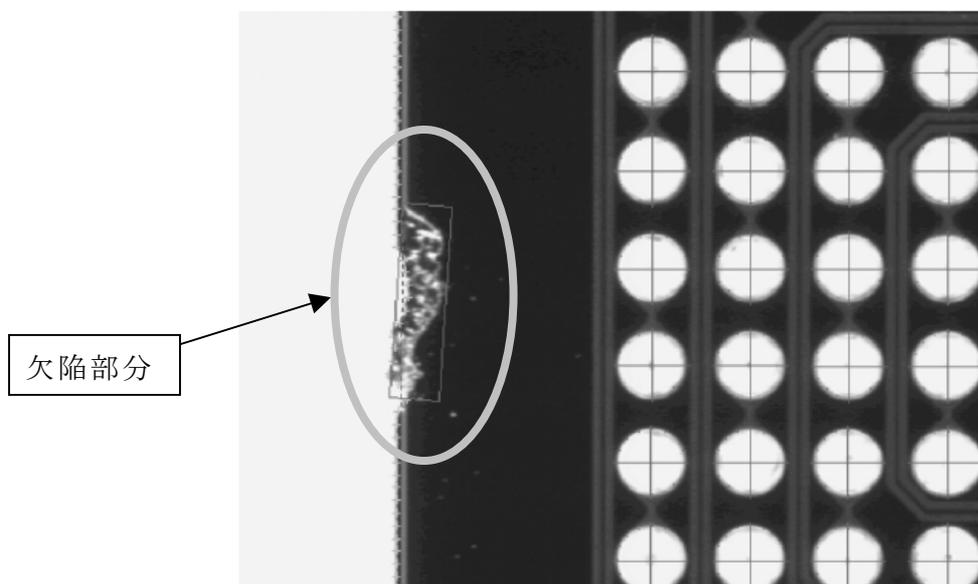


図 10.13 パッケージかけの検査

(c) 文字の検査

文字の検査は、正規化相関サーチによるパターンマッチング処理により点数化して検査を行うことが多い。

(Ⅲ) 主な画像検査装置メーカー

(a) 専用装置

外観検査のコアとして画像処理を使用し搬送装置等も含めて IC パッケージの外観検査を行う専用の装置。画像処理部分、搬送系ともに IC パッケージに特化しており他の部品等を検査することはできない。特化しているために使いやすく、自動化できるが基本的には高価である。PC タイプが多い。BGA ボールの高さ検査等の 3次元計測を行うのはこの専用装置である。

代表メーカー：アイコス、ヤスナガ、高岳製作所

(b) 汎用装置：専用アプリケーション有り

原則的には、汎用画像検査装置であるが汎用ツールの中にアプリケーションに特化したツールを用意している。PC タイプが多い。

代表メーカー：アジアエレクトロニクス、ドットウェル BMS、ヴィスコ・テクノロジーズ

(c) 汎用装置：専用アプリケーションなし（汎用ツールのみ）

専用アプリケーションがないまたは一部あるもの。基本的には、ユーザー自身が汎用ツールの組み合わせを考えて作成する。その為あまり複雑な検査はできない。専用ハードウェアが多い。

代表メーカー：キーエンス、オムロン、松下、コグネックス

10.2.4 コネクタ検査

(I) 最近の動向

一般電子部品の中からコネクタを取り上げる。コネクタは、あらゆる電子機器に使われる重要な部品であり、携帯電話やデジタル機器の小型化には欠かせないキーデバイスのひとつである。特に FPC (Flexible Print Circuit ; フレキシブル電子基板)、BTOB (Board To Board ; ボード間接続) 用のコネクタは、その微細加工により、電子機器の集積化に大きく貢献している。プリント基板やフレキシブル基板が年々小さくなっている。しかし、デジタル機器は小さくなっていくが扱うデータ量や扱うソフトウェアの種類は増えていく方向にありデータバスはむしろ増える方向である。同じ大きさでもリード間のピッチを狭くし、リード本数を増やす方法が進められている。最近のこれらのコネクタは、ファイン

ピッチコネクタと呼ばれリード間ピッチ 1mm 以下であることが多い。(主流は 0.4mm ピッチ) また注目すべきは、これらのファインピッチコネクタは、熟練かつ繊細な微細加工技術を必要とするため中国など日本以外の国では現状殆ど生産できていない。更にコネクタの外観検査をする画像処理装置は世界中に例がなく日本独自の複雑な検査方法を確立している。コネクタは、単純な構造ではあるが、リードの精度が命であるためリードに関する検査は半導体パッケージ以上に項目数が多い。また、コネクタ特有の問題として横長になることが多く、画面を分割して検査することも多い。

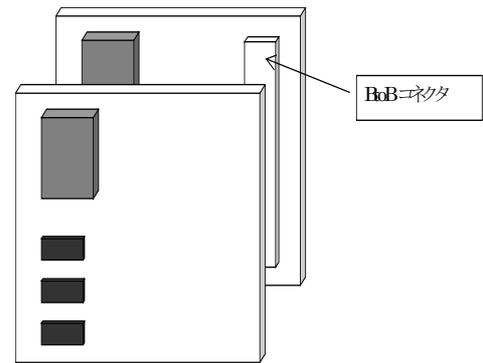
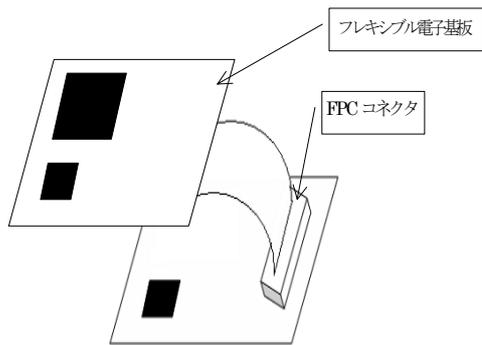


図 10.14 フレキシブル電子基板とコネクタ
(基板が薄型軽量であるため携帯電話等で普及している)

図 10.15 ボード間接続のコネクタ

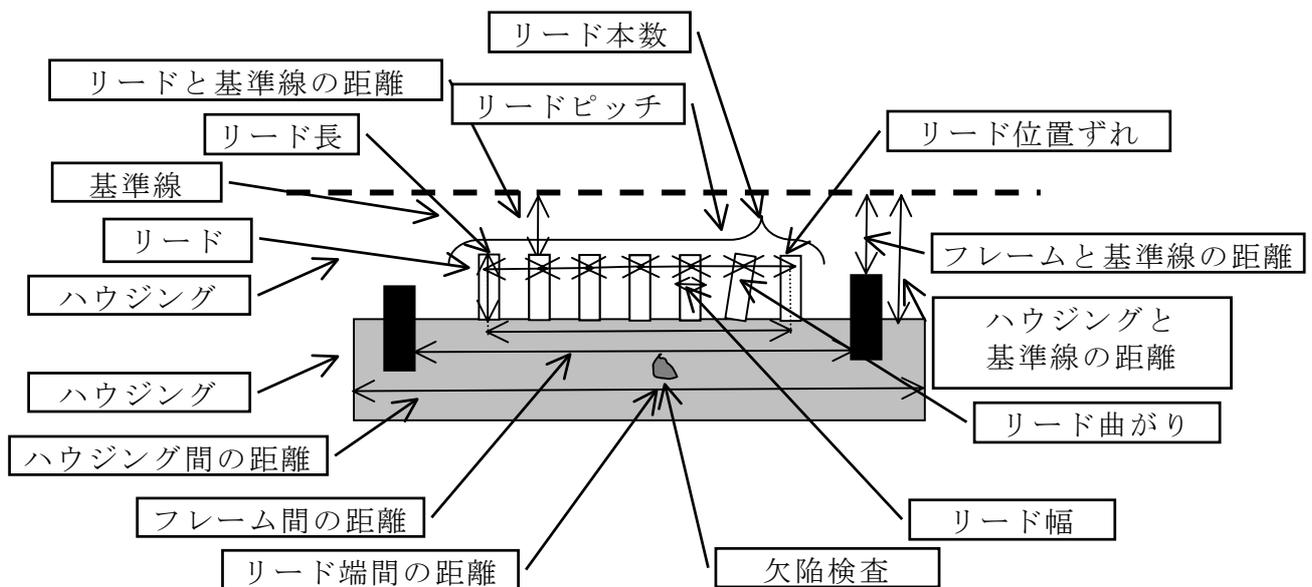


図 10.16 コネクタの外観検査項

【画像計測】 リード本数、リードピッチ、スキュー、曲がり、先端ばらつき、リード長、全長、基準線からの距離、リードの位置検査、ギャップ検査、フレーム・ハウジングの位置

【欠陥検査】 カケ、キズ、未充填、ボイド、リード間異物

(II) 検査内容

コネクタの検査は、大きく分けると2つ、リード部及び本体パッケージ部に分けることができる。また、リード部は計測、パッケージ部は欠陥検査となることが多い。コネクタは、文字検査を行うことはない。

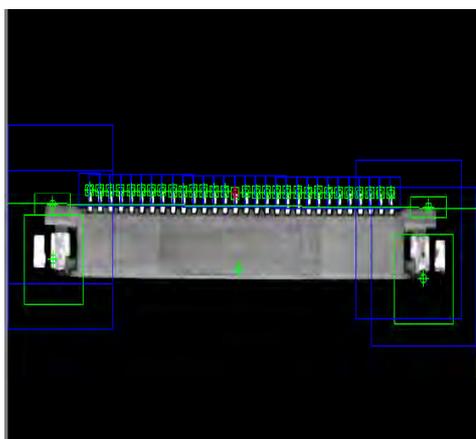


図 10.17 FPC (Flexible Print Circuit ; フレキシブル電子基板) コネクタ
上図はピッチ 0.4mm

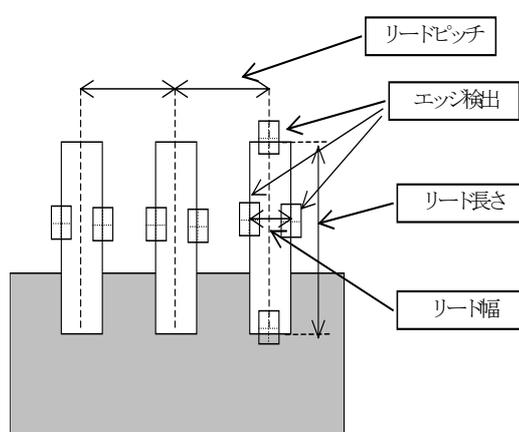


図 10.18 リードピッチの計測

(a) リードの検査

リードの検査項目としては、リードの本数、ピッチ、長さ、幅、曲がりなどがある。最も一般的な手法を紹介すると、リードは光っていて背景に比べ白くなる、それを利用してエッジ検出する方法である。リードの本数及びピッチは、リードブロック全体に検出枠を配置しエッジを検出する。リードが白いため濃淡が規則的に並び規則的なエッジペアが検出できる。そのエッジペアの数がリード本数となり、隣り合ったエッジペアの中心点の距離がピッチとなる。リードの長さ、幅、曲がりについては一本一本のリードに注目することになる。先の全体の検出によって得られたエッジペアの中心点を基準として長さを計測するための検出枠をリードの長手方向に置くことでリードの長さを検出する。また幅は、エッジペアに並行に複数の検出枠を置き、複数の幅を計測し平均値を求める。曲がりはその複数幅の中点のずれを計算する。

(b) パッケージの検査

パッケージ検査は、半導体パッケージと同様と考えてよい

(Ⅲ) 主な画像検査装置メーカー

(a) 専用装置

現在標準品として装置をリリースしている装置メーカーはない

代表メーカー：なし

(b) 汎用装置：専用アプリケーション有り

原則的には、汎用画像検査装置であるが汎用ツールの中にアプリケーションに特化したツールを用意している。PCタイプが多い。

代表メーカー：ヴィスコ・テクノロジーズ、PPT Vision

(c) 汎用装置：専用アプリケーションなし（汎用ツールのみ）

専用アプリケーションがないまたは一部あるもの。基本的には、ユーザー自身が汎用ツールの組み合わせを考えて作成する。半導体と同様、あまり複雑な検査はできない。専用ハードウェアが多い。

代表メーカー：キーエンス、オムロン、松下、コグネックス

10.3 今後の課題

今後の市場要求としては、IC パッケージ、コネクタともに共通であり 2 つ考えられる。ひとつは、更なる高精度化である。それに対する回答としては産業用カメラの高解像度化になるだろう。現在、200 万画素程度のカメラが主流であるが今後は 500 万画素がリリースされ始め、更に 1000 万画素を超える高画素カメラが供給され要望にこたえていくであろう。

もうひとつは、3 次元計測である。従来からニーズはあったが、計算処理が多く検査スピード等実用的な面から考えると専用装置でしか実現できなかった。しかし、今後 CPU 等ハードウェアの高速化により計算速度が上がり汎用画像処理装置でも実現することができると予想される。

10.4 さいごに

IC パッケージ、コネクタ、その他電子部品全般いえることは、何度も繰り返すことになるが、今後も更に微細化が進んでいくと考えられる

携帯電話の世界的なシェアはスウェーデンのノキア、韓国のサムスン、アメリカのモトローラの 3 社で 60% を占めている。日本企業は、NTT 規格の開発に固執してしまったため国際的な規格への対応が遅れ世界的なシェアは全く取れていない。しかし、携帯電話に使われるファインピッチコネクタに限れば、前述したように、日本でしか生産できないことが多く、日本のコネクタメーカーのシェアは 100% に近い。他の電子部品も含めて日本でしか生産できないものは、日本の画像処理メーカーでしか検査できないものも多い。従って、電子部品向けの画像処理による外観検査装置もまた日本製品が世界的に主流となっていくであろう。

参考文献

- 1) 2006 画像処理システム市場の現状と将来展望 富士経済
- 2) <http://www.visco-tech.com/>

1.1 ウェーハのエッジおよび裏面の検査技術

11.1 背景

半導体製造プロセスにおけるウェーハエッジおよび裏面の検査に対する要望は強くなってきた。

ウェーハエッジの検査ニーズは、半導体プロセスの高精度化や高集積化にともなう副作用による歩留まり低下が顕著になってきたことに由来する。この内容を以下に説明する。第1の例としては、ウェーハのハンドリングロボットおよびキャリアケースとの接触部はエッジ部であり、いくら表面の異物を管理してもエッジ部を管理しなければ汚染を防ぐことはできない。たとえば、拡散工程においてエッジ部からデバイス形成領域に汚染が拡大する。第2の例としては、ウェーハ熱処理プロセスの短時間化の傾向は、ウェーハ内部で生じる熱応力を増大させ、ウェーハ破壊の危険性を高める傾向がある。とくに、ウェーハエッジ部に深い亀裂が存在する場合にそこを起点として欠陥が成長しウェーハ全体の破壊が生じる危険性が高くなる。第3の例としては、現在の半導体製造プロセスはエッジ部にも成膜されるがパターン形成管理対象外であるため、エッジ部は膜剥がれなどによる異物発塵源となっていることである。第4の例としては、今後の微細化技術の主流と考えられる液浸ホトリソグラフィ工程において、エッジ部の異物が液浸用の液体中に混入し表面全体のパターンにわたって結像不良を引き起こす可能性がある¹⁾。この場合に必要な管理に必要な異物サイズは10 μm 以上である。

ウェーハ裏面の検査ニーズは、ウェーハサイズが300mmになってから裏面もポリッシュ面となり、裏面も表面と同様に加工キズや異物の高感度検査が可能となってきたことで、キャリア中での裏面から表面への異物転写などの防止が裏面異物管理で図れるようになってきたことに由来する。裏面の場合の異物管理でとくに重要な点は、表面のホトリソグラフィ工程に影響する5ミクロンメートル以上の異物の管理である。つまり、ホトリソグラフィの露光光学系の焦点深度より大きい異物がウェーハ裏面とウェーハチャックの間に存在した場合、表面のパターンはピントのぼけたパターンになってしまう²⁾。このように、裏面検査ではミクロンオーダー以上の異物のサイズ評価が重要であるといえる。

11.2 ウェーハエッジ検査技術

この検査技術は、大別して2種類に分類される。それはレーザビームをプローブとして

散乱光あるいは反射光で検出する方法と、発光ダイオードまたは白色ランプ光源を用いて画像計測を行う方法である。前者のメリットとしては数値データで管理できる事があげられる。デメリットとしては、像が得られないことである。後者のメリットは画像が得られることである。デメリットは定量化には画像処理が必要である点である。ウェーハエッジ検査における難点は、ウェーハエッジは平面ではなく曲面であるため曲面均一に検査することが難しいという点である。さらにこのエッジ曲面形状はウェーハメーカーによって多様である。この難点を克服するために、レーザ照射の場合は高立体角検出、画像計測の場合は多方向照明など曲面という形状の影響を緩和する方法が必要となっている。

レーザビームを用いるエッジ検査技術としては、楕円鏡を利用する方法がある(図 11.1)³⁾。この検査方法は図 11.1 に示すようにレーザ光をエッジに垂直に照射し、異物や欠陥から発生した散乱光を楕円鏡で光検出器に集光することでエッジ部の異物や欠陥を検出する。エッジ全周を1回の走査で完了する。走査の回転速度は300mm ウェーハで1~7秒/回転である。この散乱光信号波形は、そのAC成分が欠陥や異物を検出するのに用いられ、その信号発生位置の画像計測を行って、画像処理によってNG欠陥であるか否かを判定する。最近、エッジ部検査にレーザの散乱と反射と干渉を適用した装置が発表されている(図 11.2)⁴⁾。図 11.2 は表面検査に適用された光学系であるがエッジ部に適用し、エッジ部の残膜有り無しによる凹凸の評価を可能としている。

エッジ部の画像計測の技術として、エリアカメラまたはラインセンサカメラを用いる方法がある。ラインセンサを用いる画像検査技術は、300mm ウェーハ全周を分解能2 μ mでは10秒以内で計測することができる。図 11.3 はエッジ部のラインセンサ画像である。分解能と計測スループットはトレードオフの関係にあるが、画像ファイルの容量は分解能が高いほど増大する。数100Mバイトがカメラの台数分でウェーハ1枚あたりの1Gバイト

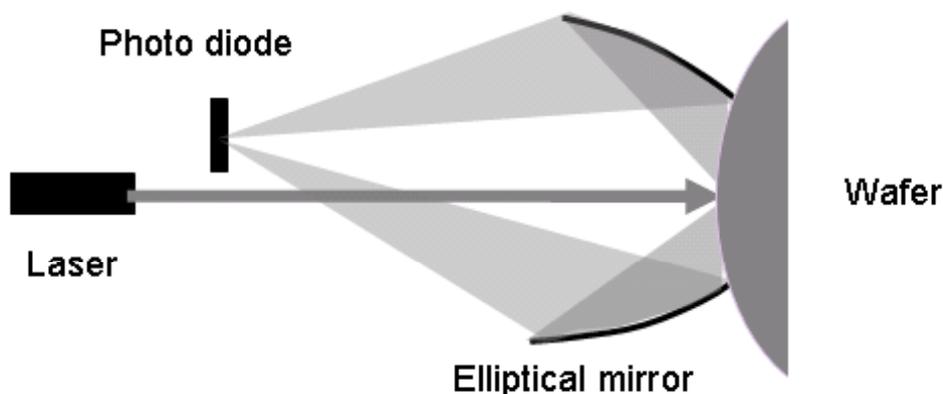


図 11.1 エッジ部におけるレーザ散乱法³⁾

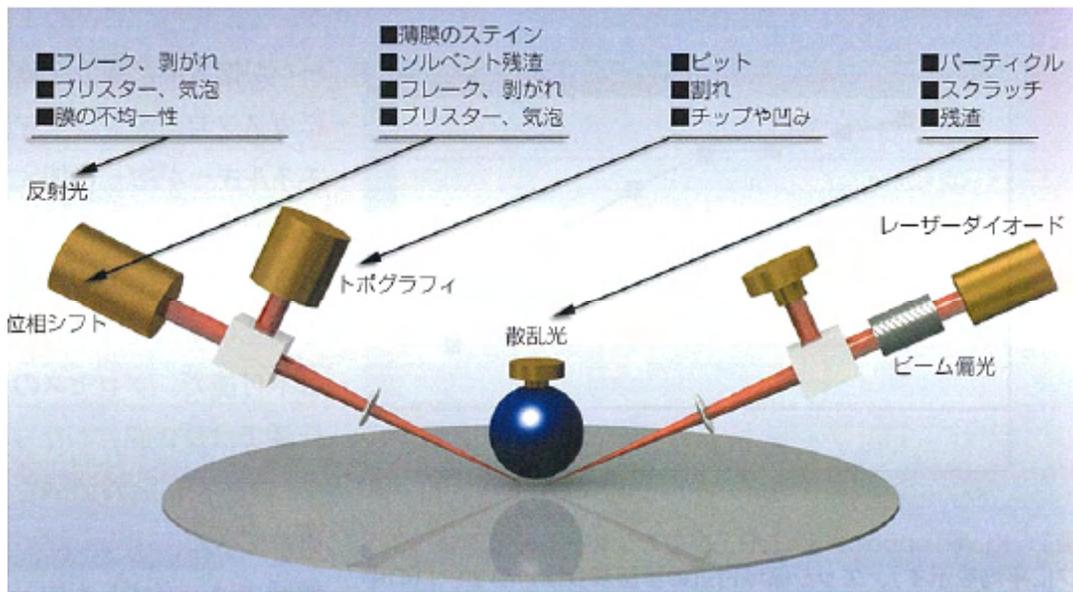


図 11.2 エッジ部に適用するレーザ散乱、反射、干渉検出を行う OSA 技術⁴⁾

近いデータ量となる。そのため、図 11.1 のレーザ散乱で閾値以上の波高値を発生させた位置のみラインセンサ画像を切り出すという方法により、保存する画像の容量を少なく抑えることが行われている。一方、エリアカメラでエッジ観察ショットを重ね合わせて順次計測する方法もある⁵⁾ (図 11.4)。

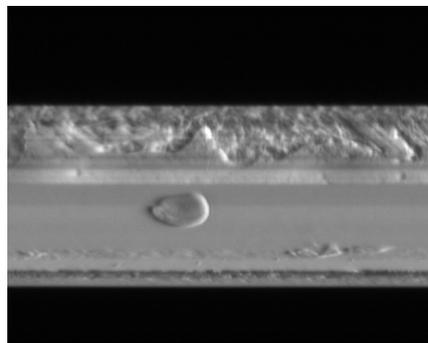


図 11.3 エッジ部のラインセンサ画像例³⁾

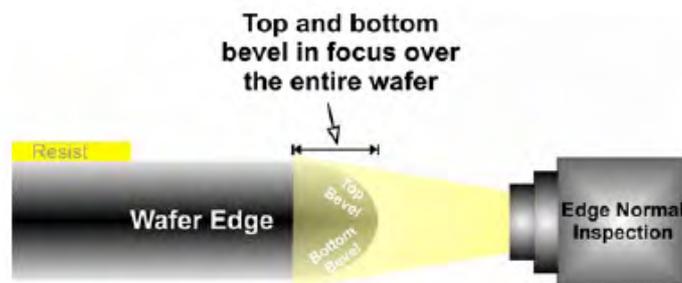


図 11.4 エッジ部の CCD 画像計測技術⁵⁾

11.3 裏面検査技術

この検査技術も、大別して2種類に分類される。それはレーザービームをプローブとして散乱光あるいは反射光で検出する方法と、発光ダイオードまたは白色ランプ光源などを用いて画像計測する方法がある。裏面の検査技術では、真空チャックなど使用不可であり、エッジグリップが必要であるためにウェーハのたわみ量が多い状態での検査となる。また、11.1節でも述べたようにミクロンオーダ以上のサイズの正確な評価が重要となっている。また、図11.5は、表面検査に一般的に採用されているレーザー散乱および反射の検出法を裏面検査に適用した例である⁶⁾。この検査方法は、裏面にも高感度異物検出感度を求める場合に適している。しかし、この検出器である光電子増倍管の特性として、飽和した信号の減衰が遅いため巨大な異物が付着して飽和信号が発生すると、その異物から走査方向に直線的なゴーストパターンが発生する危険性がある。これに対して、多数のエリアカメラによるステップアンドリピートで静止画像によって全面を検査する方式がある^{3,5)}。この方式の特徴は静止状態での観察なので、1mm以上の異物でもサイズ評価もゴーストパターンの発生無しに可能である。図11.6は、エリアカメラによる裏面の検査光学系の例である。この例ではウェーハたわみの影響をなくすために、焦点深度の深いテレセントリック光学系を採用している。ラインセンサを用いる装置も発表されている。この場合は、ウェーハ全面のデータ量は莫大な量となるため、リアルタイム画像処理が重要となってくる。

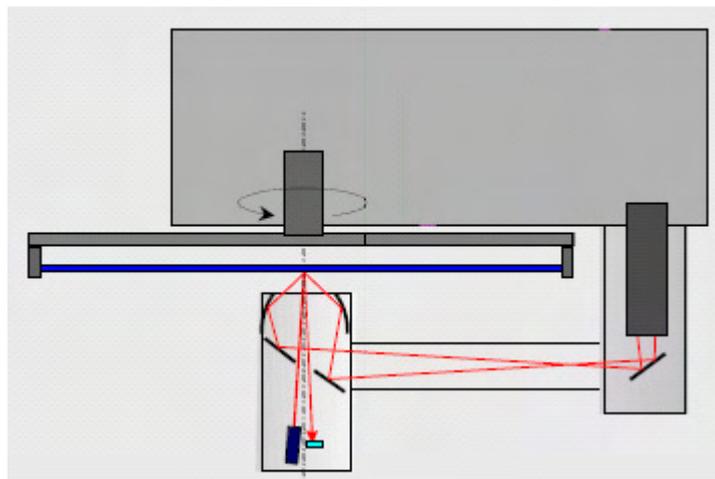


図 11.5 レーザ散乱法を裏面に適用した例⁶⁾

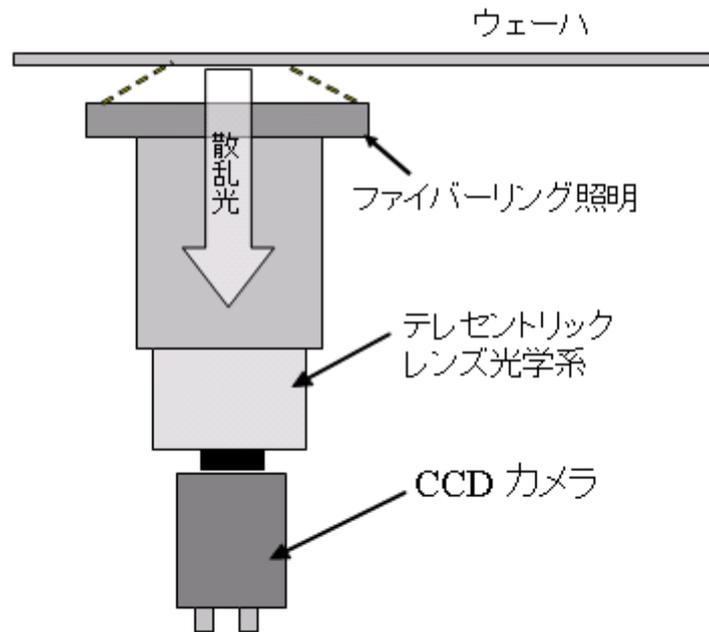


図 11.6 エリアカメラによる裏面検査光学系³⁾

参考文献

- 1) Tsai-Sheng Gau, Chun-Kuang Chen, and Burn J. Lin ;"Image characterization of bubbles in water for 193-nm immersion lithography—far-field approach" Journal of Microlithography, Microfabrication, and Microsystems 2004 Vol.3, Issue 1, pp. 61-67
- 2) Twan B et al.: Deformations Induced by Backside Particle Contamination ; SPIE 2006
- 3) <http://www.raytex.com/edge>
- 4) <http://www.kla-tencor.com/edge/>
- 5) <http://www.rudolphtech.com/>
- 6) <http://www.nanophotonics.de/>

1 2 光学部品の高精度・高速計測

12.1 はじめに

1953年のレーザーの発明、そして1960年、可視レーザー光の発明により光学部品の検査にとって有効な光源が利用可能になった。その結果としてレーザー干渉計が実現した。

それまでは、水銀灯やナトリウムランプなどの光源を利用した、ニュートン原器で光学部品の高精度計測を行なってきた¹⁾。

現在でも、光学研磨の現場では、上記、ニュートン原器法は有益な手法として利用されているが、レーザー光を利用した干渉計の商品化が行なわれた事により徐々に、このレーザー干渉計に置き換わりつつある²⁾。

従来のニュートン原器法と比べてレーザー干渉計は、非接触で光学部品の表面や内部欠陥を検査が出来るので、より精度の高い計測が可能となった³⁾。

1970年代から1980年代はこのレーザー干渉計、特にフィゾー型干渉計の全盛の時代であった。その後、1974年IBMのBrunningによって発表された位相シフト法は、コンピュータの高精度化に伴い、1990年代から現在まで、高精度光学部品の計測の標準となってきた⁴⁾。

しかし、この位相シフト法は、リファレンス面又はテスト面をPZT等を用いて $\lambda/2$ 分駆動させる必要があるため、約1/10秒程度の測定時間が掛かる。

この間、干渉計や被検物は静止している必要があるため、除震台の設置が不可欠であり、レーザー干渉計の設置環境にも特別な配慮が必要であった。

最近、光学部品の大口径化における計測の需要が出てきて、従来の位相シフト法では、駆動機構の問題や測定環境での空気の擾乱など対処が難しい状況がある。

このひとつの解決法として、瞬間位相シフト干渉法があるので紹介する。

12.2 レーザー干渉計

干渉計には、その測定目的により、いろいろな干渉のタイプが存在する。ここでは、主に光学部品としてのレンズ・ミラー・プリズムの表面精度や内部透過波面の検査用としての一般的なレーザー干渉計を紹介する。

12.2.1 トワイマン・グリーン型干渉計

この干渉計はマイケルソン型干渉計の発展したタイプである。

光学材料の内部脈理や泡などの欠陥、レンズの透過波面収差を計測するのに最適であり、光路調整の自由度が高く、光路差を自由に決めることが可能である。

図 12.1 はこの干渉計の内部構成図である。ブルーレイ DVD 用のピックアップ用 非球面レンズの透過波面精度を計測でき、ディスクの厚さと同等な光学基盤を挿入できる。

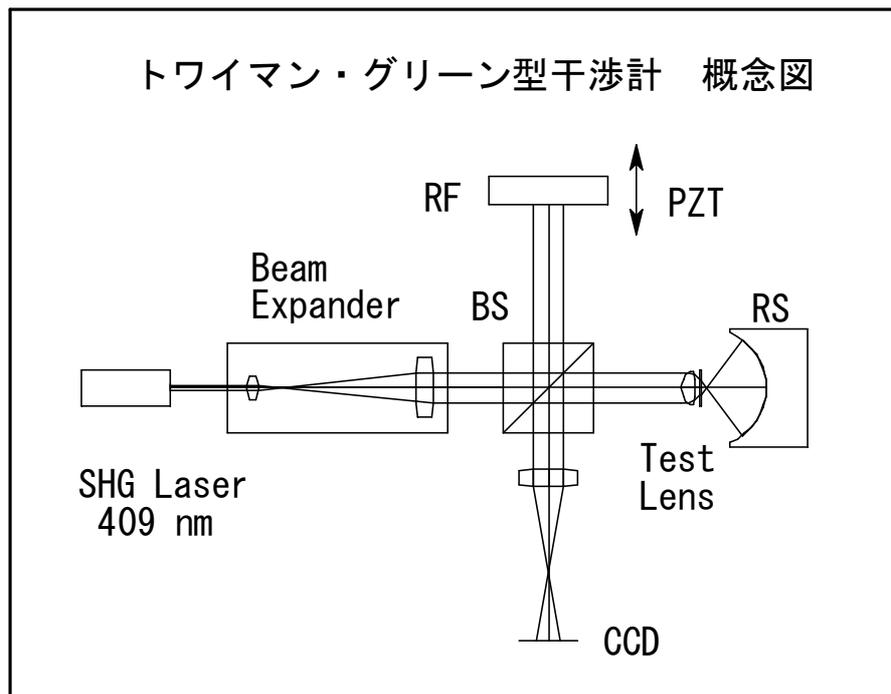


図 12.1 トワイマン・グリーン型干渉計 概念図

テストレンズの後に光学基盤があり、その先に N.A0.9 まで対応可能な RS (リファレンス・スフェア) が配置されている。参照波面は、高精度 RF (リファレンス・フラット) によって戻され、PZT による位相シフト機構により、 $\lambda/100$ までの測定が可能である。

写真 12.1 の製品は、上記概念図のトワイマン・グリーン型小型位相シフトレーザー干渉計である。剛性を強く製造すれば、このマイケルソン型干渉計のタイプは、光路差に強く、安定した干渉縞が再現性良く、表示できる。この写真の干渉計は、レンズを入れ替えても即、干渉縞が見えて、安定した干渉計測が可能である。さらに、光路長を同等にすれば、可干渉距離の短い光源での干渉も可能になり、応用範囲の広い干渉計と言える。

また、テストレンズの代わりに、被検光学部品を設置し、RS を RF または平面鏡に変更して配置すれば、内部欠陥や波面収差の計測にも利用する事が可能になる。



写真 12.1 小型位相シフト干渉計（トワイマン・グリーン型）

12.2.2 マッハツェンダー型干渉計

この干渉計（写真 12.2）は、図 12.2 の構成で配置され、光路は一方向のみで、他の干渉計と違い同光路を戻す事はしない。それゆえに、シングルパス干渉計とも言われている。テストピースは、片側のサンプルの位置に設置して、もう一つの光路を通る波面との 2 光波干渉で波面収差の計測を行なう。

同じ精度の光学部品を多量に製造する時に便利な干渉計であり、一方向にのみ進む波面を測定するので、テストする光学部品の真の波面収差が計測できる。また、必要とする収差を維持したい光学部品を検査する事が出来、目的の収差を持った光学部品のレプリカを大量に製作するには、最適な干渉計と言える。

サンプルの部分に、マスターになる光学部品を配置し、その反対の光路にレプリカの光学部品を配置すれば、同等な製品の製作と検査が飛躍的に早くなる。また、M1 のミラー部分に PZT を配置すれば、位相シフト計測が可能となり、凹・凸の判定を自動的に行なう事が出来る。光路にチェンバーを配置すれば、真空中や窒素などのガス中の計測も可能となる。

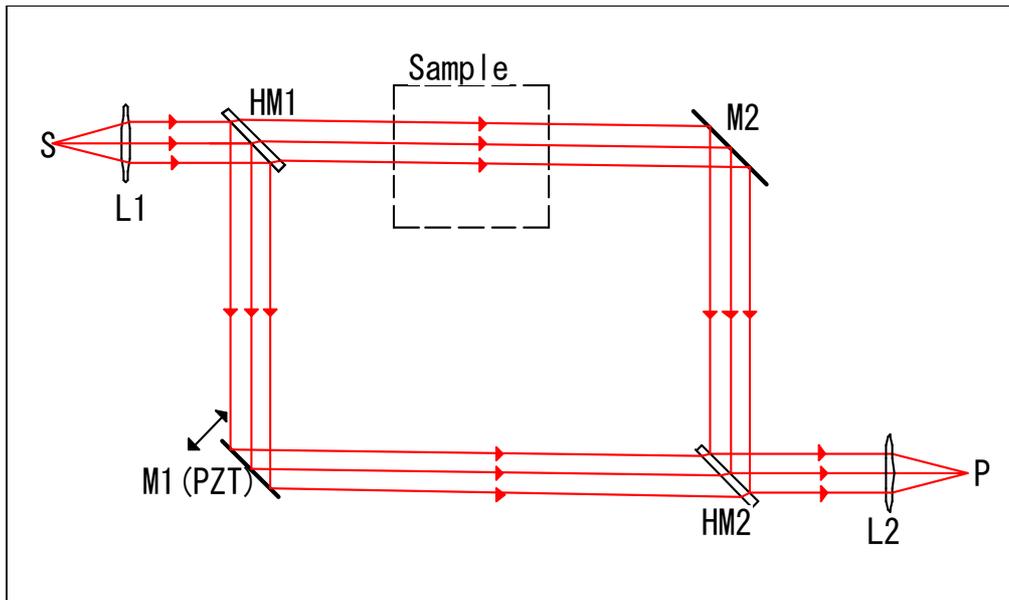


図 12.2 マッハツェンダー干渉計光路図

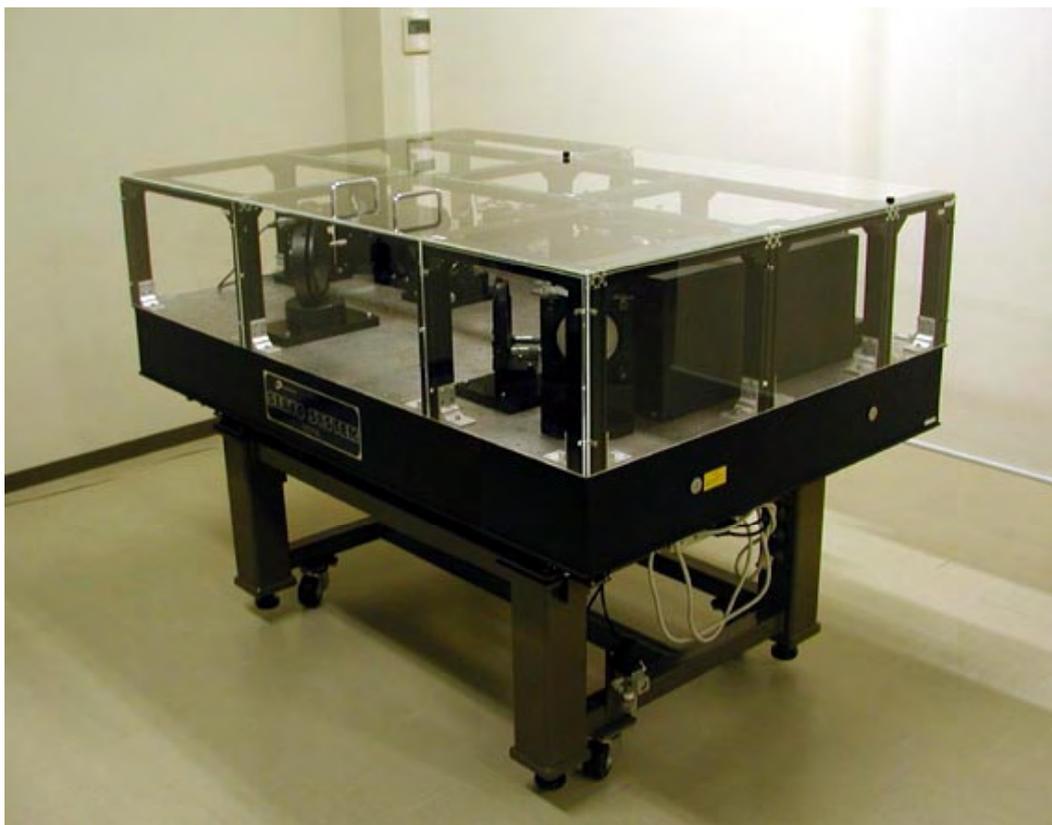


写真 12.2 マッハツェンダー干渉計

上記は、大型高級カメラレンズの品質管理にも応用が可能であり、内部を通る光が一方のみであるので、正確な性能検査が実施できる。

12.2.3 フィゾー型干渉計

簡単な構成で平面度測定や球面の測定が出来る干渉計である。

図 12.3 の光学系は球面測定用フィゾー干渉計の配置図である。

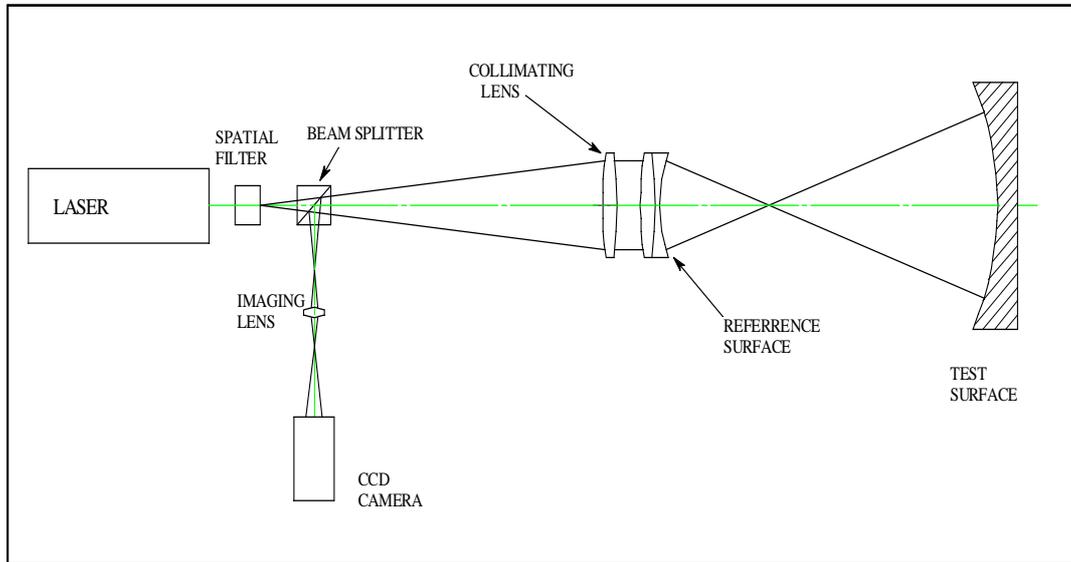


図 12.3 フィゾー干渉計光路図

レーザー光は集光後 Spatial Filter を通り、Beam Splitter を通り抜け Collimating Lens で拡大された平行光が出射される。

その先端に設置された RS（参照球面）で出射されたレーザー光が一点に集まる。

この位置は、キャッアイ・ポイントと呼ばれている。この位置にテスト面を置くと光は 180 度回転した光路を戻り、Reference Surface（参照面）からの反射波面も同様に Beam Splitter で反射し干渉像が CCD を経て干渉縞として観察される。

次にテスト面をこの曲率半径（R）分だけ後方に移動させ、キャッアイ・ポイントと一致させると前記と同様に干渉縞が観察される。この干渉縞が測定値である。

この移動距離を正確に測定する事により、テスト面の曲率半径（R）が測定できる。

図 12.3 は凹面の測定事例であるが、凹面の F#すなわち口径と曲率半径（R）との関連で最適な、N.A をもった RS（参照球面）を用意する必要がある。

また、凸面の測定の場合は、キャッアイ・ポイントと Reference Surface（参照面）との間にテスト面を置く事になり、凸面の曲率半径（R）により、測定できる範囲が限定される事になる。従って、曲率半径（R）の異なる測定には、各種の RS（参照球面）を用意する事は凹面の場合と同様である。

平面の計測の場合は、RS（参照球面）を RF（参照平面）と交換して設置する事によりテスト平面の測定が可能になる。

以上が、基本的なフィゾー型干渉計の測定法であるが、測定と判定には、ある程度の経験が必要になる。それは、干渉縞の画像からは収差量は判断できるが、その収差が+方向か-方向かの判定が出来ない事である。

すなわち、テスト面が凹面にへこんでいるのか、あるいは凸面に出っ張っているのかの判断は、テスト面に少し傾きを与え、その時の干渉縞の動き方を測定者が自分の目で見て、どちらの方向に縞が動いたかで凹凸を判定するのである。

この少し傾ける測定作業と判定作業に、人間が介入するので経験が必要になる。

この経験者の必要性の軽減と計測作業の判断ミスを抑減させる手法として、次の位相シフト法の導入が現在、進んでいる。構成を図 12.4 にて説明する。

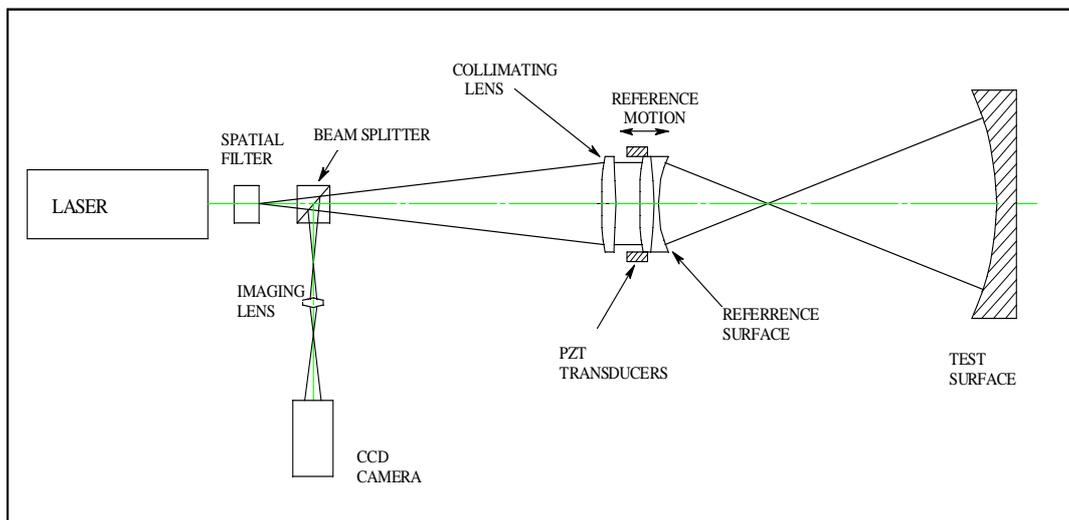


図 12.4 PZT 位相シフトフィゾー干渉計光路図

これは、Collimating Lens の前に PZT Transducers というピエゾ素子駆動機構が新たに取り付けられており、コンピューターで制御するようになっている。この機構の部分に RS(参照球面)を取り付けて測定するのである。この手法が位相シフト法と言われており、まず、テスト面を通常のやり方で干渉計にセットし、干渉縞画像を出して、コンピューターにデータを取り込む。

次に、PZT に加える電圧をステップ状に走査させ、走査させる都度に干渉縞画像をコンピューターに取り込んでテスト面の形状を凹凸も含めて判定させる。

これら一連の工程は、干渉縞解析装置と組み合わせられており、テスト面の 3 次元形状が表示でき、また、断面形状の表示が出来るので加工にフィードバックが可能になり、光

学加工精度が格段によくなった。この方法は、フリンジスキャン法とも言われ、縞と縞の間の計測をする事になり、より高精度の測定が自動的にできるようになった。位相シフト法は、現在の測定の主流になってきている。位相シフト干渉縞解析装置での出力結果を下記の図 12.5 に示す。

干渉縞表示や 3 次元形状等が表示されており、 $PV=1.6371\lambda$ 、 $RMS=0.3456\lambda$ の数値も計算されており、X 方向と Y 方向にアスティグマがある事がわかる。

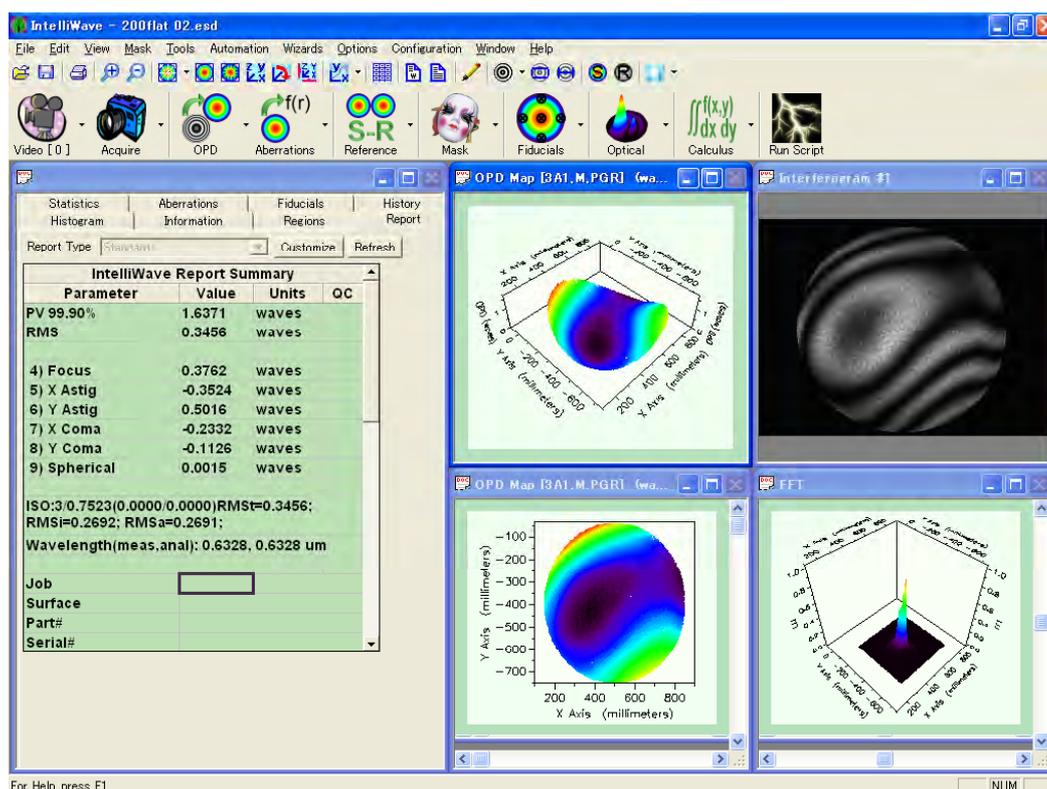


図 12.5 干渉縞解析 解析結果表示例

大口径の光学系とかの需要が出てくると共に、これまでの位相シフト法では、対応が難しい状況も最近は出てきている。参照面も大型になり、PZT で駆動するのも大変になる。

また、測定精度を上げようとするれば、ステップ数も問題になる。この取り込む回数を 4 回、5 回、7 回、・・・とか、いろいろなステップで位相情報を取り込むアルゴリズムが提案されている。測定回数を増やせば、それだけ位相情報が多く入手でき測定精度は上がるが、測定に時間を要する事になる。

通常の測定においては、約 1/2 秒~1/10 秒程度の測定時間が必要で、この間は、干渉計本体も被検物も動いてはならず、同一のテーブルの上に設置し、振動も回避する、除震台が必要不可欠になる。

また、光路長が長くなると、その間の空気の擾乱が測定精度に影響をあたえる。

このように、大型の除震台つき光学台も必要になり、部屋の構造にも配慮がいる事になる。このような状況の中で、位相シフト法の利点を生かしつつ、測定の時間を短縮するいろいろな方法が試みられており、提案されている⁵⁾。

現在、下記の図 12.6 に示すように多くの手法が考えられているが、今回はそのうちの中央に位置する、ESDI H-1000 Multi-CCD の方法について紹介する。

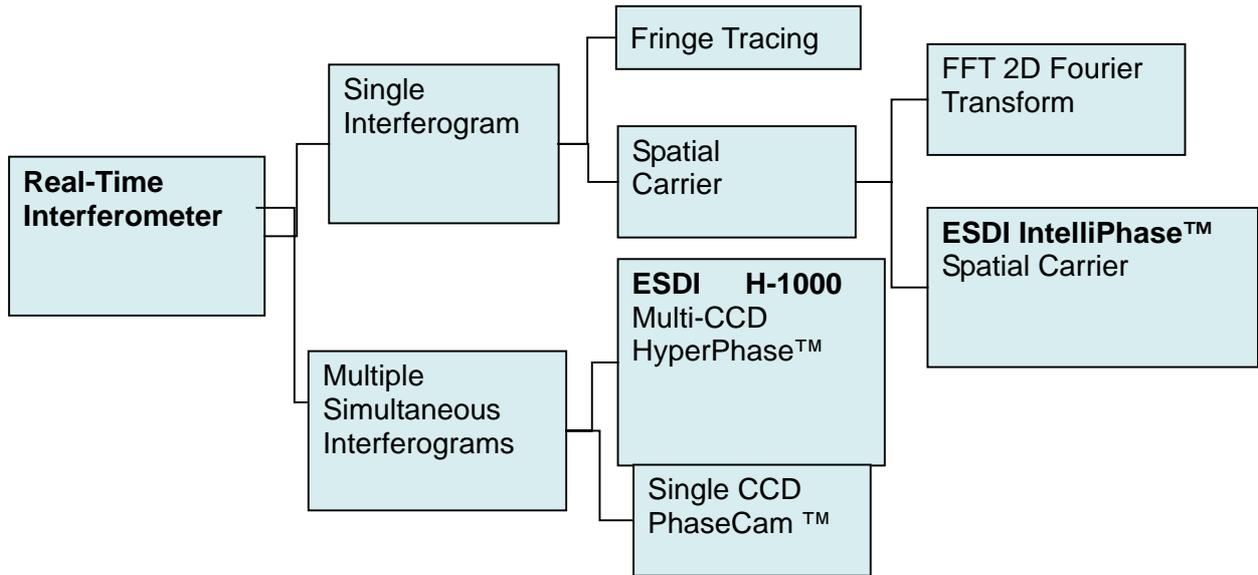


図 12.6 実時間干渉計 相関図

この方法は、フィゾー型干渉計であり、測定部に 3 つの CCD を配置してある。

これは、位相情報を 0 度、90 度、180 度の 3 つを同時に取り込む事が出来る。その光学的配置図を下記の図 12.7 に示す。

光源には半導体レーザーを用いてあり、直交する偏光を出力し、その位相差を利用した方法である。干渉計内部には波長板と偏光ビームスプリッターが組み込まれている。3CCD の部分の外観を写真 12.3 で示し、その受光の位相情報を図 12.8 に表示する。90 度ずつ位相がシフトした干渉縞情報が瞬時に取得できる。

通常位相シフト干渉計との大きな違いは、PZT 等を用いていない構造で機械的な駆動機構をもたないことが特徴である。機構的には偏光を利用しているので、偏光干渉計といえる。

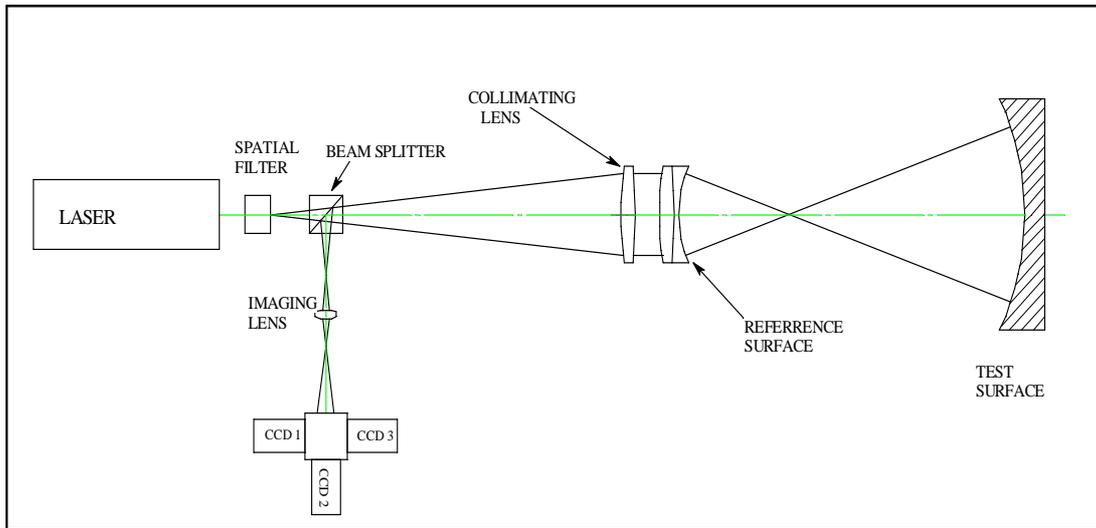


図 12.7 H-1000 瞬間位相シフトフィゾー干渉計光路図



写真 12.3 3CCD カメラユニット

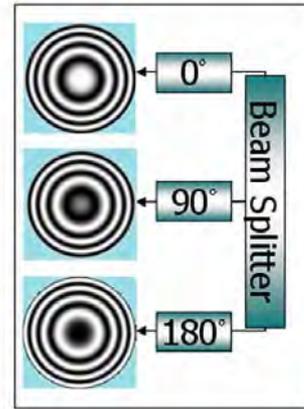


図 12.8 位相シフトした干渉縞



写真 12.4 H-2000 瞬間位相シフトフィゾー干渉計 外観

最新の瞬間位相シフトフィゾー干渉計の外観写真を写真 12.4 で示す。

当初、H-1000 の名称であったが、可干渉距離を 30M 程度まで可能に出来る光源を採用したので名称を最新鋭機は H-2000 に改称している。

この干渉計は、名称から推定できるように駆動の部分が無い為に測定の実時間が 1/2000 ~ 1/100000 秒の超高速であり、瞬間的に干渉縞を取り込む事が出来る。

最新のデジタル信号処理装置との組み合わせにより、位相の減算や積算が柔軟に行なう事が出来、空気の擾乱や、振動に由来するランダムノイズを取り除く事が可能になっている。

この事は、設置場所に除震装置を必ずしも必要としない。また、長い光路長における空気の擾乱にも影響を受けにくい事をあらわしている。

実際における、瞬間位相シフトフィゾー干渉計の測定写真を以下に紹介する。

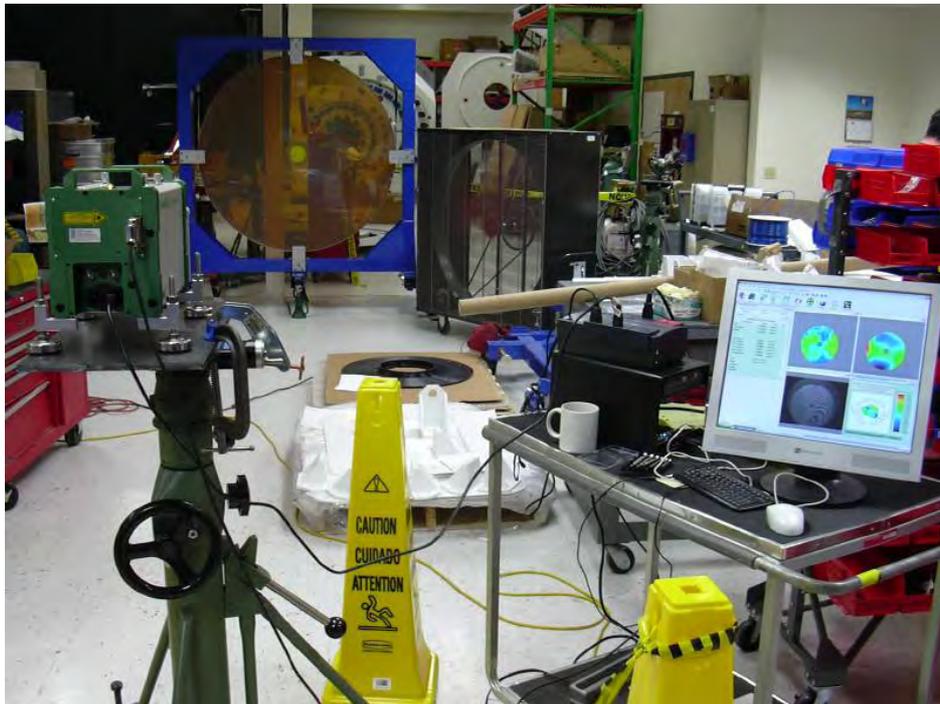


写真 12.5 ϕ 1.5M 凹面ミラー 干渉縞計測の事例

写真 12.5 の配置は、口径 1.5 メーター曲率半径 6 メーターの凹面鏡の測定を瞬間位相シフト干渉計で計測している風景である。

手前え左側に干渉計が台座の上に設置されており、被測定物の ϕ 1.5M の凹面鏡が奥の所に設置されている。凹面鏡は中央に円形の穴が開けられている。

その右側には、空気の擾乱を解消するための大きな扇風機が置かれている。

このような、配置では、今までのレーザー干渉計では測定が不可能な状況であるが、

この瞬間位相シフト干渉法を利用すれば干渉縞計測が可能になってくる。

写真 12.6 は、被測定物の $\phi 1.5\text{M}$ 凹面鏡と大型扇風機の写真である。



写真 12.6 $\phi 1.5\text{M}$ 凹面ミラーと空気気流制御用大型扇風機

$\phi 1.5\text{M}$ $R=6\text{M}$ 凹面ミラー の測定

表 12.1

$\phi 1.5\text{M}$ 凹面測定事例 1

PV=5.8659 RMS=1.5187

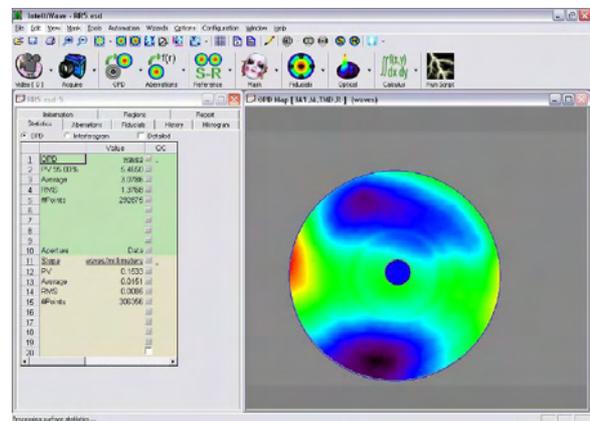
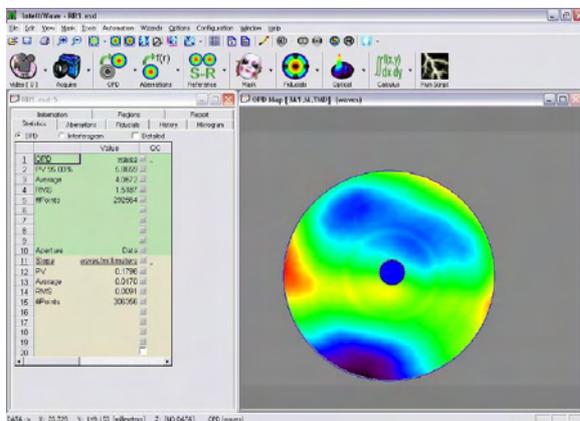
扇風機 OFF #1

表 12.2

$\phi 1.5\text{M}$ 凹面測定事例 2

PV=5.4650 RMS=1.3768

扇風機 OFF #2



上記の計測では、大型扇風機は回しておらず、空気の擾乱は存在している。

干渉計とミラーは、6メートルも離れており、振動もあるが測定が出来ている。

表 12.1(#1)と表 12.2(#2)の干渉縞解析結果から、その差分を減算して空気の擾乱の具合を表示したのが、表 12.3 である。空気の熱分布が中心部に見られる。

大型扇風機を回していないので、空気の擾乱が大きく、RMS の値が大きく出ており測定のタイミングにより、測定値が大きくずれる可能性がある。

大型扇風機を回して、空気の擾乱を平均化して計測した。

表 12.4(#3)と表 12.5(#4)の干渉縞解析結果から、その差分を減算して空気の擾乱の具合を表示したのが、表 12.6 である。大型扇風機が ON で空気の擾乱が平均化されている。

表 12.3

φ 1.5M 凹面測定時における 測定誤差要因 1

扇風機 OFF 時の 空気の擾乱の具合 1

P V=2.3426 RMS=0.6591

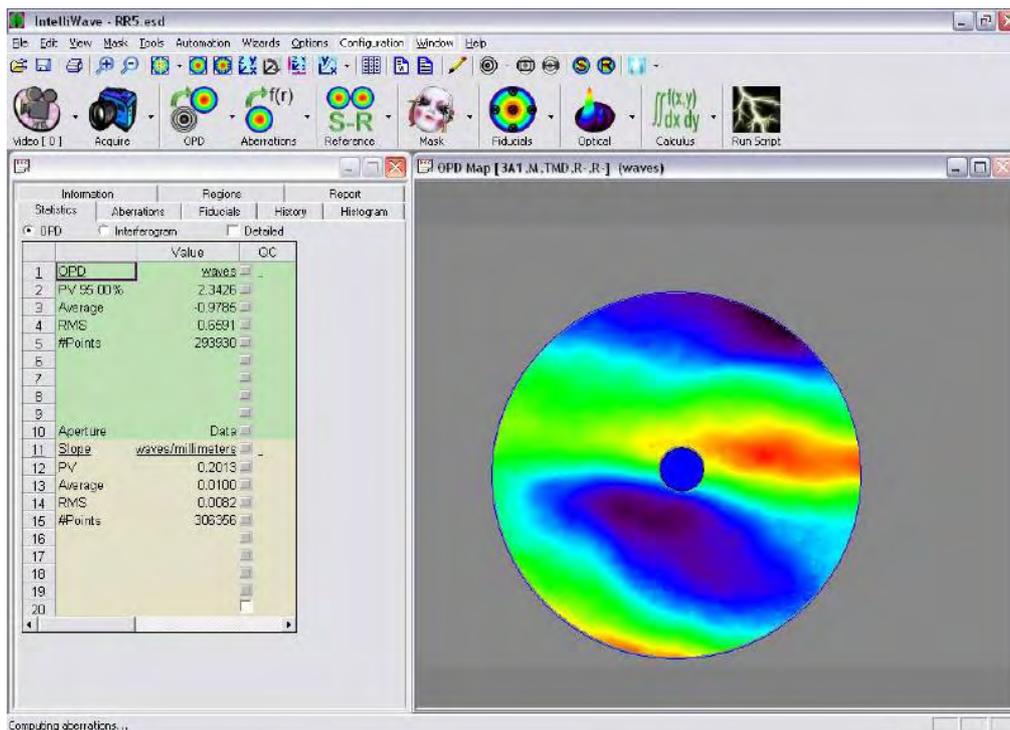


表 12.3 では、中心部分に空気の擾乱が見られ、PV 値 2.3426λ 、RMS 値 0.6591λ と大きな値がでており、鏡面計測においては、測定値の不安定要因になっている。

以上の値が、測定時の計測値に及ぼす、誤差要因になる。

表 12.4

φ 1.5M 凹面測定事例 3
 扇風機 ON #3
 PV=4.8374 RMS=1.1281

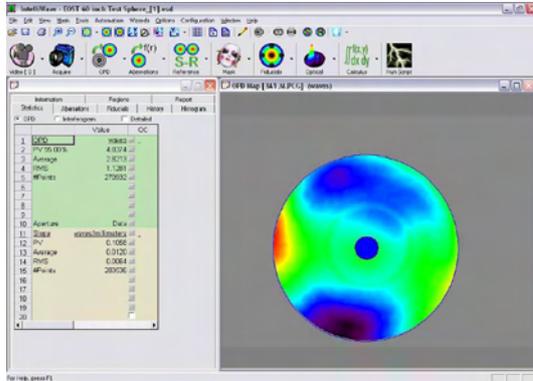


表 12.5

φ 1.5M 凹面測定事例 4
 扇風機 ON #4
 PV=4.7664 RMS=1.1184

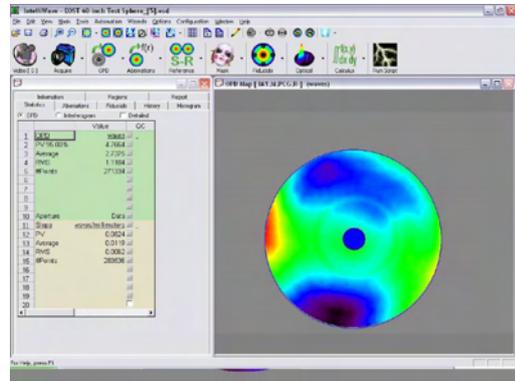


表 12.6

φ 1.5M 凹面測定時における 測定誤差要因 2
 測定誤差要因が小さくなっている事例
 扇風機 ON 時の 空気の擾乱の具合 2
 PV=0.0836 RMS=0.0226

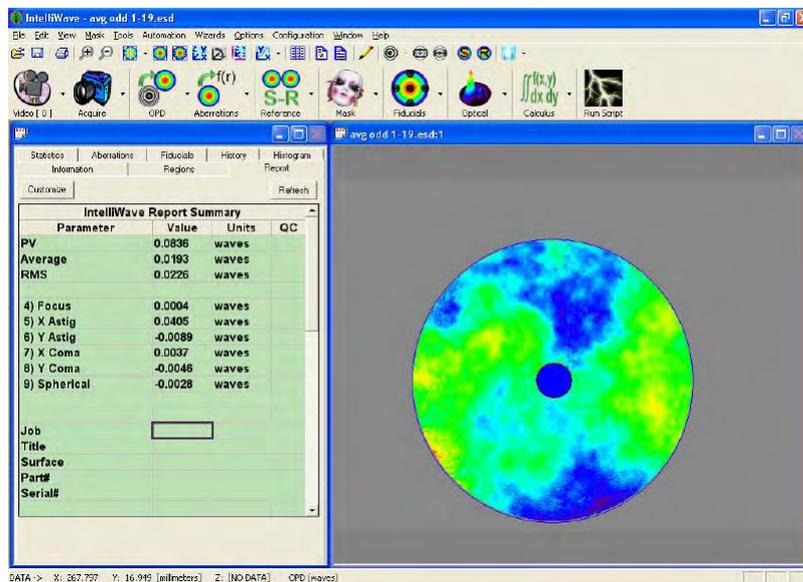


表 12.3 と比較して、この表 12.6 は PV 値が 0.0836λ で RMS 値も 0.0226λ と大変、小さな値となっており、空気の擾乱が平均化されたことがわかる。このような測定状態にすれば、測定値における誤差要因が少なくなる。

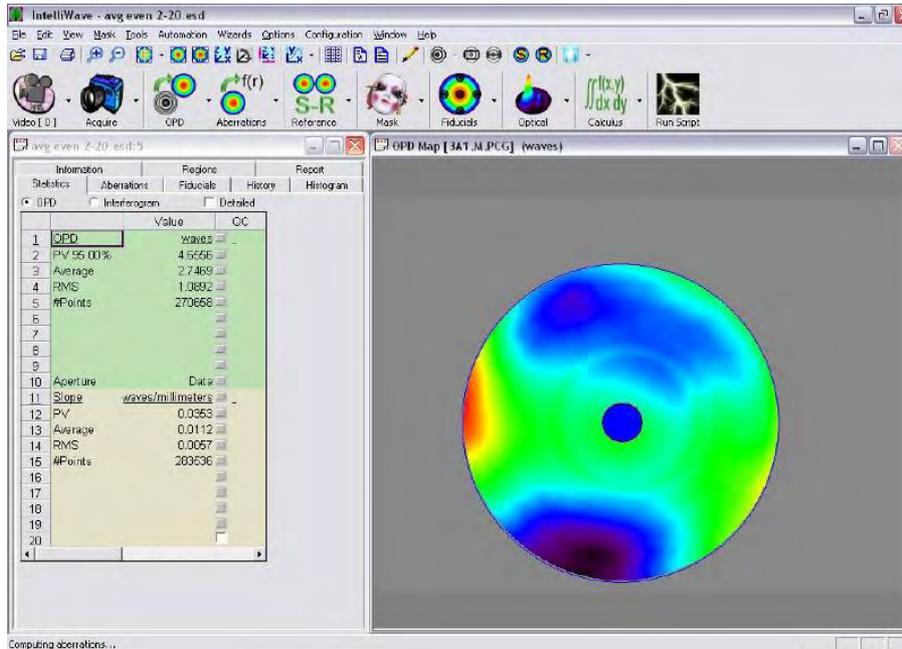
最終計測結果 扇風機 ON ϕ 1.5M 凹 R=6M

空気の擾乱の影響が除去されている。

表 12.7

測定誤差の少ない測定結果の値

PV =4.6556 RMS=1.0892



以上のように、振動によるランダムノイズは演算により、取り除き、空気のタービランスは、大型扇風機を回転させる事により、空気の擾乱が平均化され、RMS 値も小さくなっており、誤差要因が少なくなりこの様な環境下での信頼性ある測定ができた。

その計測結果が表 12.7 である。

今後、大口径の光学系の干渉縞測定には、今までと違った測定環境になることが予想されその意味からも、瞬間位相シフト干渉計の利用は、有効であると言える。

現在、この干渉計の可干渉距離は、約 30 メートルあり、この測定範囲以内であれば、レーザー干渉縞計測が可能である。

余談であるが、ハワイにある、口径 8.2 メートルのスバル望遠鏡でも一定方向に風を送ると星像がゆらゆらせずにくっきりと見えるそうである。

大口径で光路長が長い計測においては、空気の擾乱は、測定に影響がでる事が、上記の話からも推測できる。

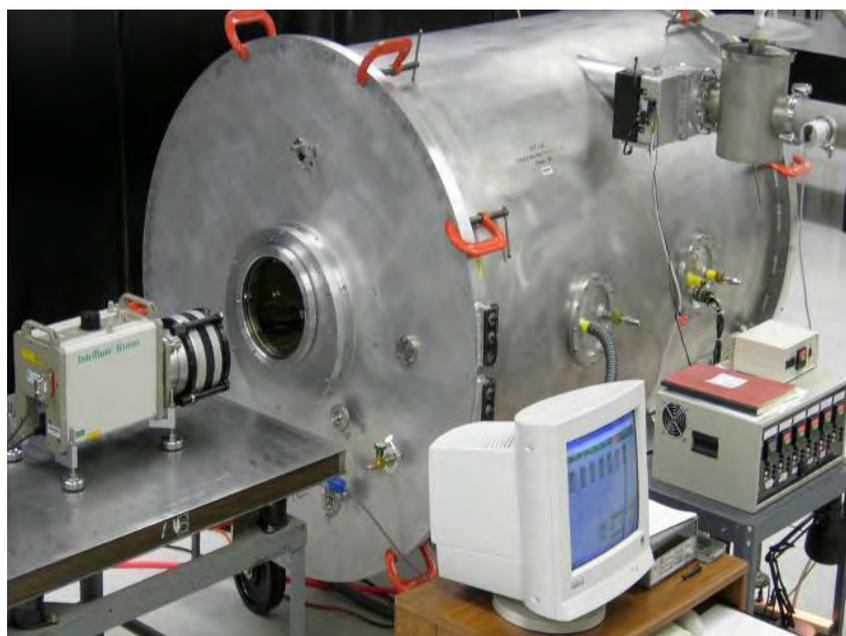


写真 12.7 真空容器内での測定事例

Top View of Vacuum Test Configuration

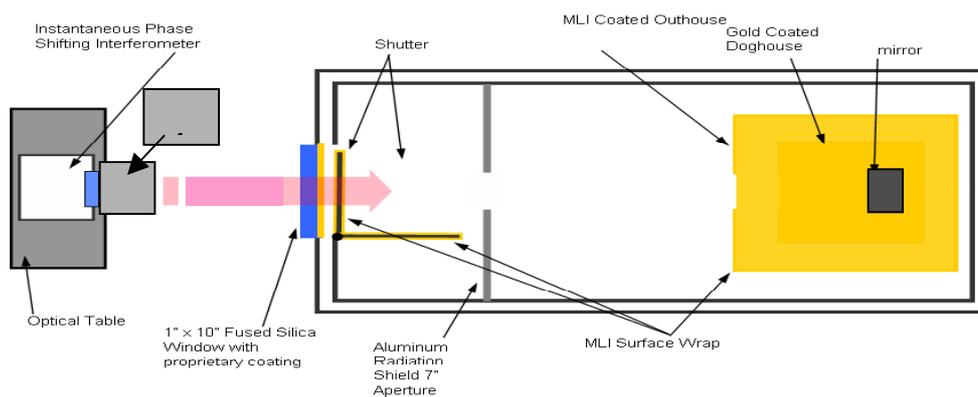


図 12.9 真空容器内測定の配置図

このような干渉縞測定は今までは、難しかったが、瞬間位相シフト干渉法の利用により、きちんとした計測が可能になった。

新しい測定のチャンスが広がっており、真空容器の内部におかれたテスト面の外部よりの計測が出来るようになった。その外観（写真 12.7）と配置（図 12.9）を示す。

干渉計本体と真空容器とは、それぞれ別の架台に乗っており、個別の振動がおこる。

そのような状況下で、真空窓を通して内部の光学系の変化などを計測する事が出来た。

同一テーブルに配置が難しいケースでも、干渉測定が可能になった事で、今後いろいろな応用計測の道が開けると思われる。

12.3 まとめ

光学部品の計測手法は、レーザー光の発明で飛躍的に進歩をとげた。

それとあいまって、コンピューターの計算処理能力の向上、そしてデジタル画像処理の高性能化は、測定時間の短縮に多大の貢献をした。

今回、紹介の瞬間位相シフト干渉計は、光学部品の高速度計測だけに留まらず、空気の擾乱の計測も可能になり、新たな測定分野の開拓に貢献するものだと考えられる。

今後、CCDカメラの画素数も超ハイビジョン化され、デジタル画像技術もますます発展していくものと考えられ、より精細な測定が可能になると思われる。

瞬間位相シフト干渉計がさまざまな分野で利用され、新たな測定分野に貢献することを期待している。

参考文献

- 1) Principles of Optics, Max Born & Emil Wolf, Cambridge Univ. Press
- 2) Optical Shop Testing, Second Edition, Daniel MALACARA, John Wiley & Sons
- 3) Optical Interferometry, P.Hariharan, Academic Press
- 4) J.Bruning,et.al. "Digital Wavefront Measuring interferometer for Testing optical surface and lenses,"Appl. Opt.13, 2693-2703 (1974)
- 5) Hettwer, Kranz, & Schwider, "Three channel phase-shifting interferometer Using polarization-optics and adiffraction grating "Opt. Eng. Vol.39, No.4, April 960-966 (2000)

13 文書鑑識における外観検査

13.1 はじめに

文書鑑識は、犯罪に関係する文書を解析し、その真偽、作成方法、改ざんの有無等を識別することを目的とするものであり、犯罪鑑識の一分野である。文書鑑識で扱う資料は、筆跡、印影、印刷物、コピーされた複写文書、プリンタで出力された文書、偽造通貨をはじめとして多岐にわたるが、いずれもその形状を保ってこそ価値が認められる場合が多いため、基本的に資料を損傷、破壊することが許されない。そのため文書鑑識では、非接触、非破壊を特徴とする光計測に基づく検査が多く用いられている。

光計測は、光源、光学素子、光センサなどの成熟した要素技術が豊富であり、それらを組み合わせて用途に応じたシステムを構築できる利点がある。文書鑑識においても、用途に応じた光システムが活用されているが、特に解析対象とする文書の各点における情報の二次元的な検査が求められることが多いため、画像センサを用いた画像検査を多く用いている。

そこで本節では、文書鑑識における外観検査について、画像検査の応用例を示しつつ概説するとともに、そこで重要となる偏角分光反射特性について説明する。

13.2 文書鑑識と偏角分光反射特性

文書鑑識では、資料の形状だけでなく色や材質感をも正確に検査する必要がある。資料の色や材質感、文書鑑定担当者が目視で検査する場合において、資料の真偽、作成方法、改ざんの有無等を判断する際に大きな役割を果たしており、画像検査を用いる場合においても、資料の色や材質感に関する情報を取得することが重要である。

まず色に関しては、撮影時の光源や撮像機器の分光特性に依存しない物体固有の色情報である分光反射率として取得する必要がある。分光反射率に基づく色情報は、文書鑑識資料における条件等色対（メタメリックペア）を識別するために不可欠である。図 13.1 は、条件等色対をなす 2 種類のインキによる印刷物の色度及び分光反射特性を示したものである。図 13.2(a)に示すように、二つのインキの色度は、D50 光源下で測色値的に一致しているが、図 13.2(b)に示すように、二つのインキの分光反射特性が異なっている。文書が偽造される場合、見た目の色を合わせる測色的色再現であることが多く、技術的に困難である分光的色再現までおこなわれることは稀である。したがって文書鑑識では、色情報を分

光的に取得し、条件等色対を識別することが不可欠である。

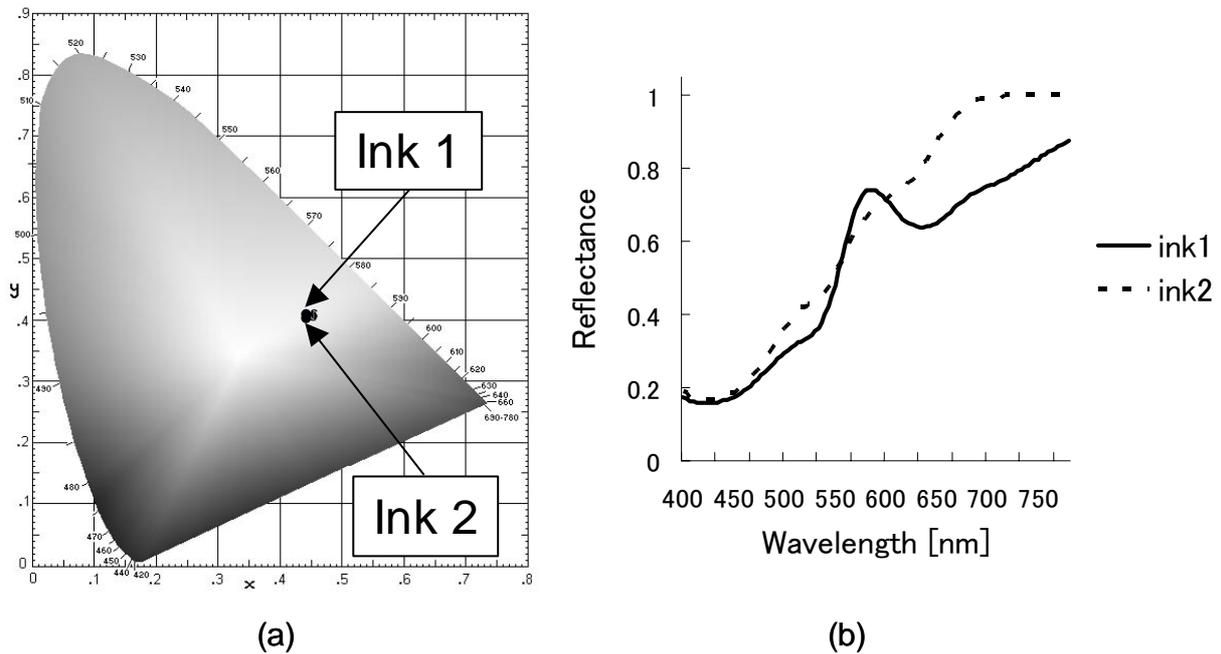


図 13.1 条件等色対の例 (a)xy 色度図, (b)分光反射特性



図 13.2 米国 100 ドル紙幣の凹版印刷部分 (a)正反射画像, (b)斜光線照明画像

また材質感については、資料の偏角反射特性を記録する必要がある。偏角反射特性は、照明方向や観察方向、すなわち測定ジオメトリに対する光の反射特性をあらわすものであり、物体の材質感とかかわりがあると考えられている。文書鑑識では、さまざまなジオメトリで資料を観察し、紙や色材の光沢、粗さ、テクスチャなどの材質感を目視によって把握することにより、鑑定に必要な情報をとらえている。図 13.2 は、米国 100 ドル紙幣の

凹版印刷部分であり、二種類の異なるジオメトリで観察したものであるが、同一の資料であっても測定ジオメトリによって見え方が大きく異なっていることが分かる。このような資料の偏角反射特性により、文字部分に盛り上がりのある凹版印刷物の材質感を把握することができる。特に図 13.2(b)に示すような斜光線照明下での検査は、試料表面の凹凸によるテクスチャ、表面粗さなどが陰影情報として可視化されるため、文書鑑識では重視される。

物体の分光反射特性と偏角反射特性を統合した偏角分光反射特性は、物体の色と材質感に大きく関係するものであるが、それを画像計測する方法として偏角分光画像法が提案されている^{1,2)}。この方法は、分光画像計測を、照明方向を変化させながら、また複数の方向からおこなうことにより、三次元物体の色と材質感を忠実に記録するものであり、究極のデジタルアーカイブ技術と考えられる。文書鑑識では、偏角分光画像法の測定要素のうち、分光画像計測、偏角画像計測、またその両方を利用しており、さらに各種光学計測及び画像処理を組み合わせて検査をおこなっている。

13.3 分光画像計測を利用した外観検査

本項では、偏角分光反射特性のうち、主に分光反射特性に着目した検査法について説明する。

13.3.1 塗抹・改ざん文字の検査

文書鑑識では、文字が塗りつぶされて読めなくなった塗抹文字や、文字が加筆されて別の文字に書き換えられた改ざん文字を解析し、塗抹・改ざんされる前の文字を判読することが求められる。塗抹や改ざんに使用された筆記具が、もとの文字の記載したものと異なる場合、両者の違いを分光画像計測、蛍光画像計測で検出することにより、文字を判読することができる。

分光画像計測を利用した塗抹文字の検査例を図 13.3 に示す。図 13.3(a)の可視反射画像では、黒色インクで塗りつぶされた状態であるが、赤外光を豊富に含む白熱光源を用い、赤外線透過フィルタ取り付け付けたモノクロ CCD カメラで試料からの反射光をイメージングした赤外反射画像（図 13.3(b)）では、“光センシング”という文字が記載されていることが分かる。この検査により、赤外波長域の吸収率が高いインクで文字が記載された後、同波長域の吸収率が低いインクで塗りつぶされたことが分かる。



図 13.3 塗抹文字の検査例 (a)可視反射画像, (b)赤外反射画像

また、分光画像計測と蛍光画像計測を利用した改ざん文字の検査例を図 13.4 に示す。図 13.4(a)の可視反射画像では、黒色インクで“¥ 4,000”の文字が記載されているように見える。しかしながら、光源にバンドパスフィルタ (580-700 nm) 取り付けて波長帯域を制限した光を資料に照射し、モノクロ CCD カメラに波長 735nm 以上の光を透過するロングパスフィルタを取り付けて資料の蛍光成分のみをイメージングした蛍光画像 (図 13.3-2(b)) では、“4”の文字の一部が蛍光を発している。すなわちこの文字は、“¥ 1,000”と記載された後に、別の筆記具で加筆改ざんされたことが分かる。

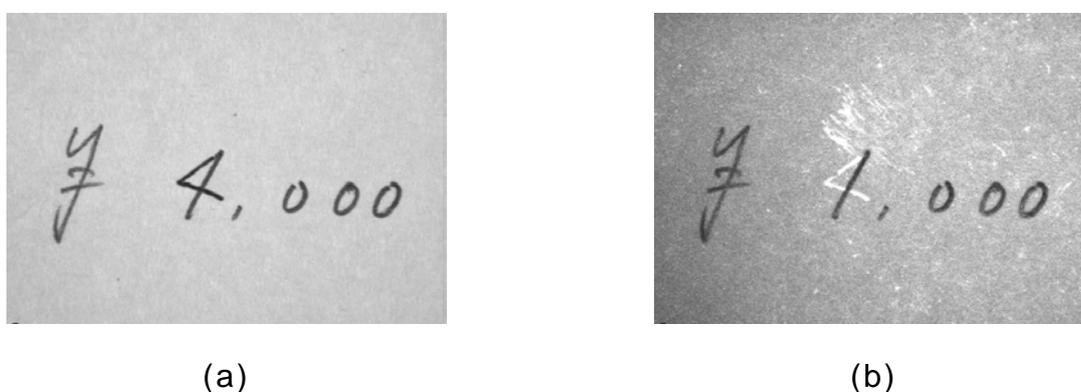


図 13.4 改ざん文字の検査例 (a)可視反射画像, (b)蛍光画像

13.3.2 マルチバンド画像ヒストグラムの解析による印刷物の分類

情報画像機器の普及を背景として、偽造紙幣をはじめとする偽造印刷物が増加しているが、文書鑑識では、偽造印刷物の作成方法を検査し、その手口に基づいて分類することが求められている。一般に印刷物の分光特性や色合いは、印刷に用いる画像処理方法、インキ、印刷機器等によって特徴が生じ、使用する機材等が異なると印刷物の分光特性や色合

いに差異が生じると考えられる。

これまでに、マルチバンド画像のヒストグラムによって分光特性や色合いを数量化し、主成分分析により印刷物を分類する方法が提案されてきた³⁾。さらに主成分スコアをクラスター分析することにより、印刷物を分類する試みも行われている⁴⁾。

マルチバンド画像の撮影には、図 13.5 に模式図を示すマルチバンドスキャナ（セキュリティスキャナ、グローリー工業製，FM-10）を用い、可視光反射画像、可視光透過画像、紫外蛍光画像、赤外反射画像を各 3 バンド、ピクセル深度 8bit、解像度 400dpi で取得した。各バンドの画像ヒストグラムを主成分分析し、累積寄与率が 80%になる次元まで採用することによって得られた 35 次元の主成分スコアをクラスター分析した。

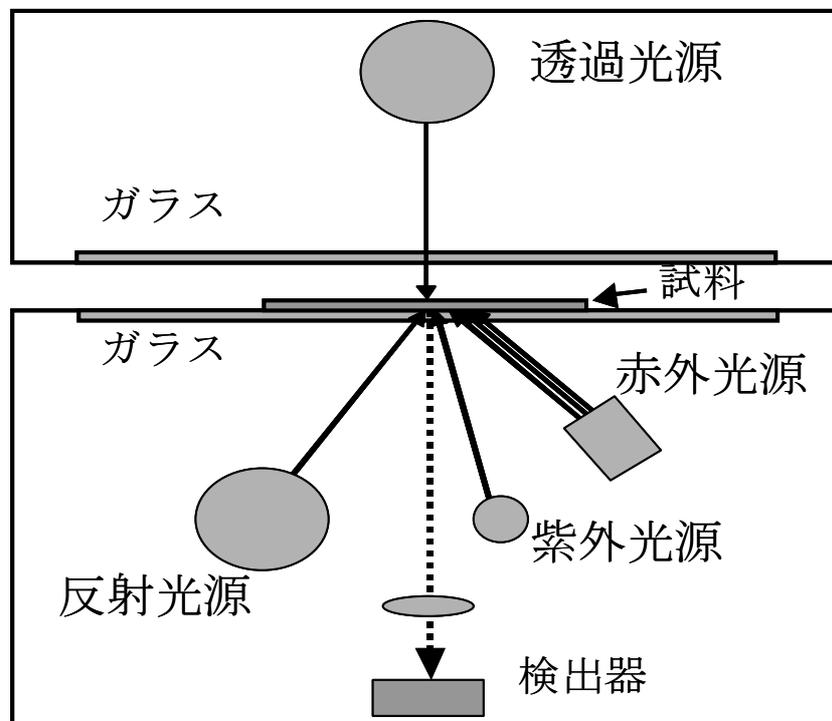


図 13.5 マルチバンドスキャナの模式図

絵柄が同一で作成方法が異なる 5 種類の印刷物 23 枚を分析し、Ward 法によって算出した平方距離を樹状図として示したものを図 13.6 に示す。樹状図では、同一の作成方法のものが平方距離 1500 以下でまとまっており、異なるグループが同一とされる平方距離は 8000 以上であった。本手法により、作成方法の異なる印刷物（G 及び C1～C4）が明確に分類されており、印刷物の分類検査法として有効であることが示されている。

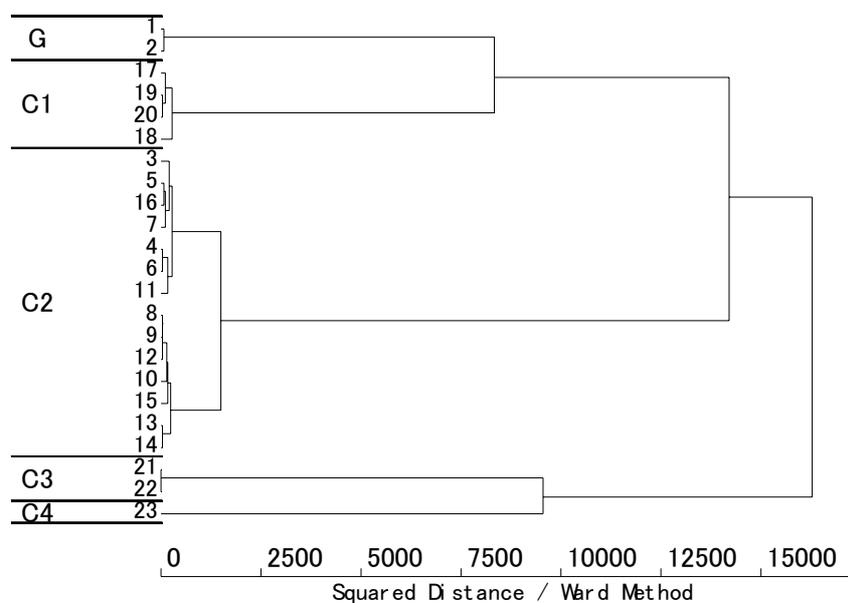


図 13.6 マルチバンドヒストグラムの多変量解析による印刷物の分類結果

13.4 偏角画像計測を利用した外観検査

本項では、偏角分光反射特性のうち、主に偏角反射特性に着目した検査法について説明する。

13.4.1 インクジェットプリンタ拍車痕の検査⁵⁾

情報画像機器の普及により、個人でカラー印刷物を作成することが容易になったが、それと同時に紙幣、有価証券類が偽造されるケースも増えている。文書鑑定では、作成に使用されたプリンタを解明することが求められているが、その一つの方法として、印刷物表面に形成された痕跡を検査する方法がある。

インクジェットプリンタの多くは、用紙搬送部に拍車と呼ばれる歯車に取り付けられており、印刷物上に拍車痕と呼ばれる窪み状の痕跡を形成することが多い。拍車痕は、用紙表面の窪みであることから、斜光線照明によって表面の凹凸を陰影として顕在化することにより、拍車痕を可視化することができる。

インクジェットプリンタの拍車痕の検査例を図 13.7 に示す。斜光線照明により、拍車痕が陰影として可視化されているが、図 13.7(a) に示す可視反射画像では、インクの濃淡と同時に観察されるため、拍車痕を認識することが難しい。そこでインクジェットプリンタに多く用いられる染料インクの光学濃度が、赤外波長領域で低下することに着目し、赤外波

長域で画像計測することにより、紙面の凹凸による陰影のみを選択的に可視化することができる（図 13.7(b)）。

この例では、縦方向に 2 本の拍車痕の列が可視化されている。これらの拍車痕の間隔等を検査することにより、印刷に使用されたプリンタのメーカー及び機種群を識別することができる。

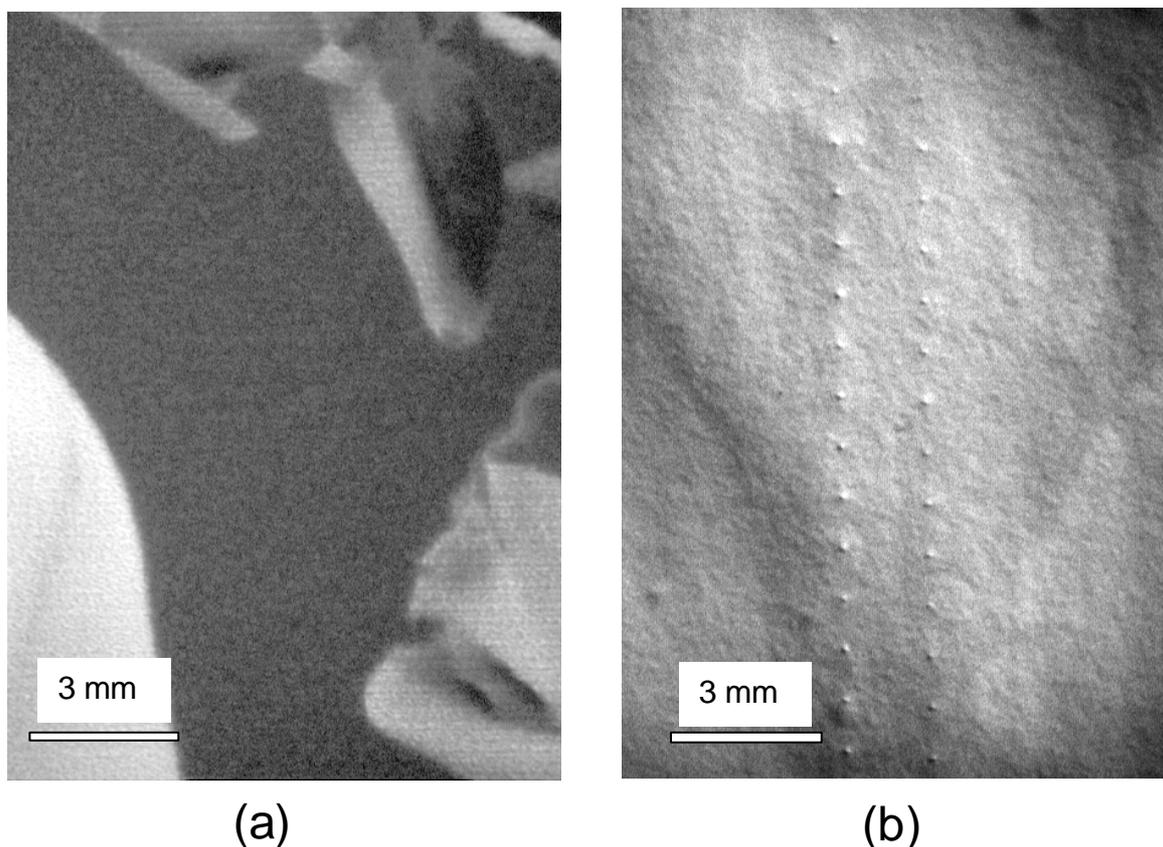


図 13.7 インクジェットプリンタ拍車痕の可視化 (a)可視光斜光線照明画像,
(b)赤外斜光線照明画像

13.4.2 昇華型熱転写プリンタサーマルヘッド痕の検査⁶⁾

昇華型熱転写プリンタは、階調表現が優れており、光沢のある受像紙に印刷を行うため、銀塩写真の代用として、免許証、パスポートをはじめとする各種 ID カードの顔写真の印刷等に用いられている。

昇華型熱転写プリンタの印刷物には、印刷時に印加される熱と圧力により、サーマルヘッドの痕跡が形成される。サーマルヘッド痕は印刷物表面の法線方向のわずかな変動として存在しているが、同プリンタに用いられる光沢のある紙では、法線方向の変動が正反射

方向における反射光強度の変動として鋭敏に検出される。そこで、正反射方向で印刷物を観察するとともに、偏光を利用して表面反射光及び内部散乱光を分離し⁷⁾、表面反射光成分のみを画像計測することにより、サーマルヘッド痕を可視化した。

昇華型熱転写プリンタの検査例を図 13.8 に示す。図 13.8(a)に示す拡散反射光画像では、色素受容層中の染料インクによる濃淡のみが観察されており、サーマルヘッド痕を確認することができない。一方、図 13.8(b)の表面反射光画像では、印刷物表面からの反射光が選択的に計測されており、格子状のサーマルヘッド痕が明瞭に可視化されている。

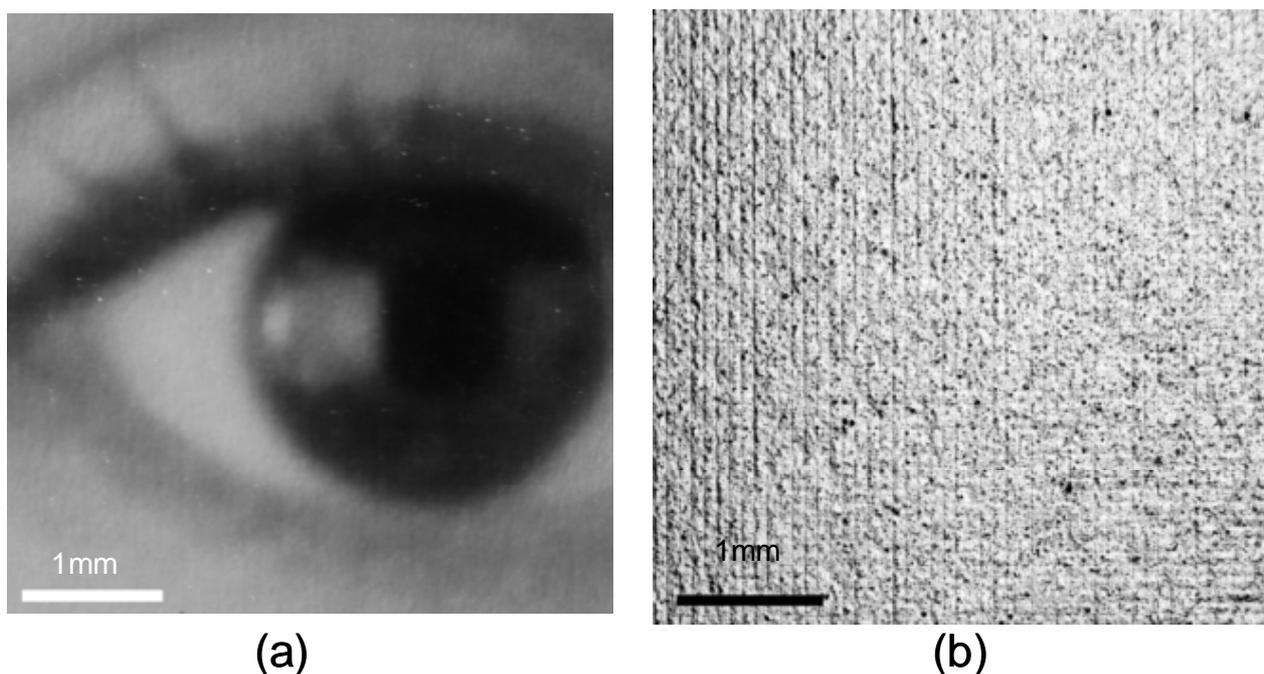


図 13.8 昇華型熱転写プリンタサーマルヘッド痕の可視化 (a) 拡散反射光画像,
(b) 表面反射光画像

この例では、可視化されたサーマルヘッド痕の間隔を計測することにより、主走査方向の画像解像度が 300dpi のサーマルヘッドを有するプリンタで印刷されたことが分かる。

13.5 複眼光学系を利用した外観検査

本項では、偏角反射特性と分光反射特性の両方に着目した検査として、複眼光学系を利用した光学的変化素子 (OVD ; Optically Variable Device) の検査⁸⁾について説明する。

クレジットカードや有価証券類の多くには、偽造防止を目的としてホログラムなどの光学的変化素子を取り付けられているが、その真偽を鑑定するためには、照明方向や観察方向に

よる見え方の変化（偏角特性）を解析する必要がある。そこで複眼光学系を用いて偏角画像を同時に撮影することにより、OVDを迅速かつ効率的に検査する方法が提案されている。

実験装置の模式図を図 13.9 に示す。試料（クレジットカード（VISA）のエンボスホログラム）に対して約 45° の方向から白色光源（SIGMA, 1MH-250）の光を照射した。OVDによって反射及び回折された光は、試料からほぼ焦点距離の位置に配置した対物レンズ（Edmund, 45399-F, $f=18\text{ mm}$ ）で集光されて平行光となり、複眼光学系を用いた薄型画像入力システム TOMBO[®]に入射した。

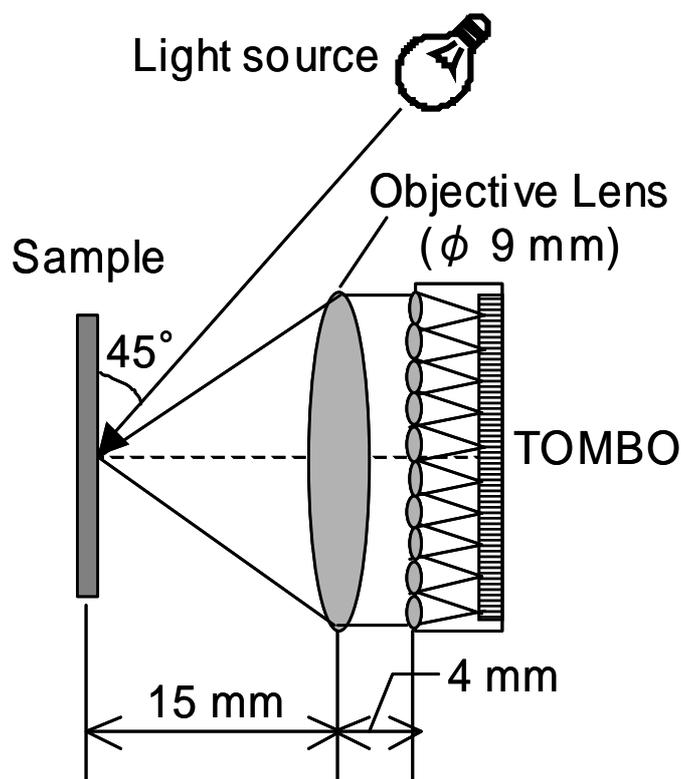


図 13.9 複眼光学系を用いた偏角画像の同時計測

図 13.10 に偏角画像の測定結果を示す。単位光学系ごとに観察角度が約 1.9° 異なる偏角画像群が一度の画像撮影で得られた。ホログラム像の色は、図中上方では波長約 350 nm に相当する青色であったものが、下方に近づくにつれて波長約 550 nm に相当する緑色を経て、波長約 750 nm に相当する赤色へと徐々に変化した。また画素値から色度座標から主波長を求め、グレーティング方程式を用いてエンボスホログラムの格子間隔を算出したところ、誤差率 2.5% の精度で格子間隔が求められた。

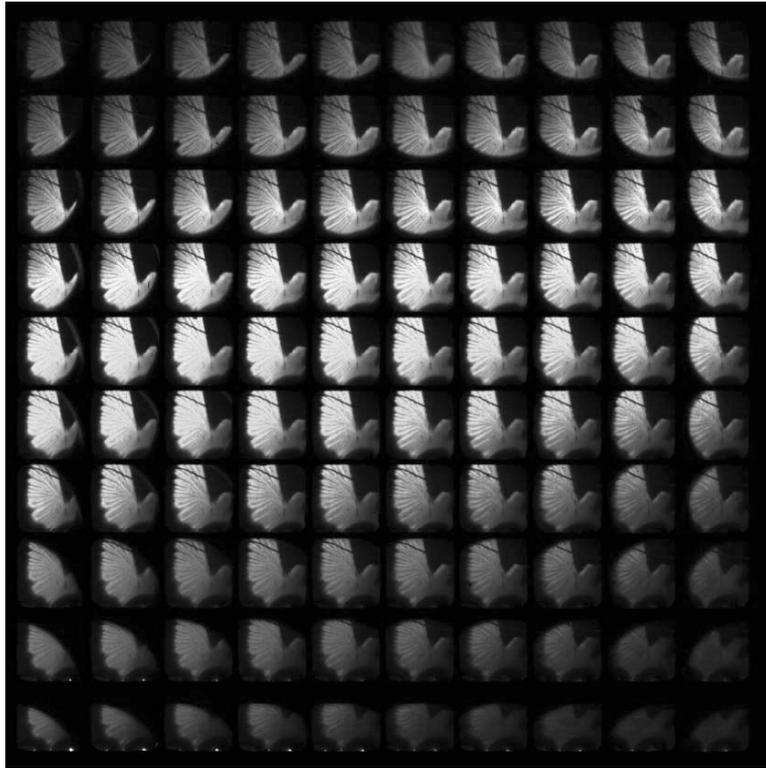


図 13.10 複眼光学系を用いた偏角画像の同時計測結果

本手法により、ホログラムの回折光の偏角特性が機械的な走査を要することなく一度の画像撮影で計測されており、ホログラムの回折格子間隔の二次元分布を検査することができる。

13.6 おわりに

本節では、犯罪鑑識の一分野である文書鑑識における外観検査について、応用例を示しつつ概説した。文書鑑識では、経験豊富な文書鑑定担当者の目視による検査とともに、光画像計測を応用して資料の分光反射特性及び反射光の角度依存性等の各種光学的特性を解析することにより、資料の外観を検査している。光画像計測に基づく検査は、光源、光学素子、光センサなどの成熟した要素技術をもとに構築された光システムに支えられており、今後の光システムの進展は、従来は不可能であった切り口で偽造文書を解析することを可能とし、文書鑑識、犯罪鑑識に効果をもたらすものと期待される。

参考文献

- 1) H. Haneishi, T. Iwanami, T. Honma, N. Tsumura and Y. Miyake, *J. Imaging Sci. Technol.*, 45(5), 451-456 (2001).
- 2) S. Tominaga, T. Matsumoto and N. Tanaka, *Proc. of IS&T/SID's 9th Color Imaging*

Conference, 337-341 (2001).

- 3) 下山昌彦, 日本化学会情報化学部会誌, 23, 95-98 (2005).
- 4) 赤尾佳則ほか, 2006 年春季第 53 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 1082 (2006).
- 5) Y. Akao et al., Proc. of SPIE, 4677, 129-137 (2002).
- 6) 赤尾佳則, 2002 年春季第 49 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 988 (2002).
- 7) 小島伸俊, 羽石秀昭, 三宅洋一, 日本写真学会誌, 56(4), 264-269 (1993).
- 8) 赤尾佳則, 生源寺類, 津村徳道, 山口雅浩, 三宅洋一, 谷田純, 2005 年春季第 52 回応用物理学関係連合講演会講演予稿集, 1149 (2005).
- 9) J. Tanida, T. Kumagai, K. Yamada, S. Miyatake, K. Ishida, T. Morimoto, N. Kondou, D. Miyazaki, and Y. Ichioka, Appl. Opt., 40, 1806-1813 (2001).

第IV章 おわりに

おわりに -----233

第IV章 おわりに

先端的外観検査技術に関する現状ならびに将来展望について、基礎技術分野と応用技術分野の2つのカテゴリーに分けて調査報告を行った。今回調査対象とした様々な外観検査技術を、光源・センサ・データ処理という3つの切り口から今一度概観し、今後の課題についての考察を述べさせていただくことで、本報告の締めくくりとしたい。

光源については、検査対象の特性に合わせて、これまで様々な波長域の光が選択され、利用されてきたわけだが、特に最近のレーザ技術の進歩により、光と電波の境界領域であるテラヘルツ波の基礎研究および応用研究が、グローバルな規模で急速に拡大してきていることは注目すべきであろう。産業応用が本格化するには、さらに小型・高出力・安価なテラヘルツ光源と、室温で動作する小型・高感度なアレイセンサの開発が待望される場所である。ミリ波帯の基本コンポーネントである送受信モジュールが、車載レーダという強力なドライビングフォースを得て急速に民生用途向けの開発が進展したのと同様に、テラヘルツ波帯の基本コンポーネントの技術革新も、今後のキラーアプリケーションの発見・開拓にかかっていると見えよう。

センサについては、本報告で紹介された Electron Multiplier CCD や Time Delay Integration CCD に代表されるように、高感度・低ノイズ・広ダイナミックレンジといったセンサとしての基本性能を極限まで高めるための技術開発が、今後も重要であり続けることはあえて言うまでもないが、もう一つ注目すべきトレンドとしては、センサとプロセッサの融合が挙げられよう。本報告の中でも CMOS センサにロジックを組み込んだ応用事例として、インテリジェントビジョンシステムが紹介されているが、センサとプロセッサを1チップに集積化することは、データ転送のボトルネックを解消し、リアルタイム処理を可能にするので、高速処理が必要となる用途にはもちろん、高度な知的処理が要求される用途に対しても、非常に有効かつ重要な技術であると思われる。

データ処理については、本報告でも取り挙げた、画像処理アルゴリズムおよび各種パラメータの最適化手法の開発が、今後、極めて重要になると考えられる。外観検査の中でもとくに人の官能に頼る検査の自動化においては、評価パラメータと評価関数の発見や、機械判定結果と人による目視判定結果の照合による閾値の決定に多大な時間を要するという問題がある。また、製造プロセスの経時変化により、検出すべき欠陥の種類や特性が変化すると、各種パラメータの再チューニングを余儀なくされ、手離れの悪さだけに留まらず、エンジニアリングコストの増大にもつながる。最適化手法は、これらの問題に対する突破

口として、非常に有効と考えられ、大いに期待が持たれるところである。

以上、本報告内容に基づいて、今後の課題についての考察を述べさせていただいた。ところどころに私見や勝手な思い込みが入っていることについては、どうかご容赦願いたい。本報告によって、さまざまな産業分野において外観検査技術の重要性が明確に認識され、また将来の技術開発に向けた一助となれば幸いである。最後に、本報告書の執筆にご協力くださった方々に、心より感謝申し上げます。

非 売 品
禁無断転載

平 成 18 年 度
先端的外観検査技術に関する
調査研究報告書

発 行 平成19年3月

発行者 社団法人 日本機械工業連合会
〒105-0011
東京都港区芝公園三丁目5番8号
電 話 03-3434-5384

社団法人 日本オプトメカトロニクス協会
〒105-0011
東京都港区芝公園三丁目5番22号
電 話 03-3435-9321