

平成20年度
オプトメカトロニクス技術を用いた次世代型の
超大型基板の進歩に関わる加工処理と
その周辺技術に関する調査研究報告書

平成21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://ringring-keirin.jp/>



日機連
20 先端
5

平成
20 年
度

オプトメカトロニクス技術を用いた次世代型の超大型基板の
進歩に関する加工処理とその周辺技術に関する調査研究報告書

平成
21 年
3 月

社団法人 日本オプトメカトロニクス協会
社団法人 日本機械工業連合会

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、弊会では機械工業に係わる技術開発動向調査等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「オプトメカトロニクス技術を用いた次世代型の超大型基板の進歩に関わる加工処理とその周辺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 21 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

消費者指向の高まりを受け、フラットパネルディスプレイ用ガラス基板は当初考えられないほど大型化が進展し、今後もこの方向は変わらないであろうと考えられております。超大型化ガラス基板のこれからの研究開発は今まで以上の投資額が必要とされ、開発企業が引き続いて競争力を維持・向上させるためには加工処理等の課題を具体的およびシステムティックに整理するとともに、その問題点を明確にする必要があります。

このような背景をふまえ、当協会は平成20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、「オプトメカトロニクス技術を用いた次世代型の超大型基板の進歩に関わる加工処理とその周辺技術に関する調査研究」を実施しました。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土肥俊郎九州大学大学院教授にご就任いただきました。

当該調査研究では、次世代型の超大型ガラス基板を主体に世の中のニーズを調査しつつ将来どのように進歩していくか、また大型化へ向けた研究開発が進められるなか生産性・経済性について検討を行い、当該技術の現状と将来の課題を整理し、周辺技術の動向をも調査したほか、関連分野への応用技術も探索いたしました。また、特殊用途向けにとらわれず一般家庭で実用的なサイズの基板についても、加工面の品質・精度並びに加工処理方法などについて調査を行いました。そして、これらの課題について、その方向性を明確にし、将来に向けてのロードマップを提示することを試みております。

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21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 20 年度 オプトメカトロニクス技術を用いた次世代型の
超大型基板の進歩に関わる加工処理とその周辺技術に関する
調査研究委員会委員名簿

委員 長	土肥 俊郎	九州大学 大学院工学研究院 知能機械システム部門 教授
幹 事	林 孝好	コーニングホールディングジャパン合同会社 コーニング研究所 所長
同	上村 宏	元 セントラル硝子株式会社 知的財産部長
同	黒河 周平	九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門 准教授
同	南 博文	株式会社日立ハイテクノロジーズ FPD・HD装置営業本部 事業戦略部 マーケティンググループ 部長代理
同	永壽 伴章	独立行政法人 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 副研究部門長
同	河西 敏雄	埼玉大学名誉教授／ 株式会社 河西研磨技術特別研究室 代表取締役

【製造技術分野の調査研究分科会】

主 査	林 孝好	コーニングホールディングジャパン合同会社 コーニング研究所 所長
副 主 査	上村 宏	元 セントラル硝子株式会社 知的財産部長
委 員	山口 典生	パナソニック環境エンジニアリング株式会社 技術開発ユニット 開発グループ グループリーダー
同	山崎 博樹	日本電気硝子株式会社 技術部 部長
同	氏原 孝志	トッキ株式会社 技術企画部 技術推進グループ
同	七五三木 浩一	キヤノン株式会社 光学機器事業本部 液晶機器設計センター 液晶機器設計管理部 液晶機器開発企画室 室長
同	清水 政二	三星ダイヤモンド工業株式会社 レーザー技術研究所 課長
同	宮本 誠	三菱電機株式会社 先端技術総合研究所 環境システム技術部 主席研究員

【計測制御分野の調査研究分科会】

主	査	黒河 周平	九州大学 大学院工学研究院 機械工学部門 准教授
副	主	査 南 博文	株式会社日立ハイテクノロジーズ FPD・HD装置営業本部 事業戦略部 マーケティンググループ 部長代理
委	員	小田切 章	タカノ株式会社 常務取締役 エレクトロニクス部門担当
同		山内 良彦	レーザーテック株式会社 第二事業部 第二部 部長
同		濱砂 智訓	株式会社ソキア・トプコン 計測機器部 計測開発課 課長
同		下川 清治	株式会社ミットヨ KDC 商品開発部 2グループ チームマネージャー
同		内田 直樹	株式会社トプコン ファインテックビジネスユニット 企画管理部 兼 技術部 専任課長
同		相川 富士雄	株式会社安川電機 モーションコントロール事業部 ソリューション営業部 次長

【応用技術分野の調査研究分科会】

主	査	永壽 伴章	独立行政法人 産業技術総合研究所 先進製造プロセス研究部門 副研究部門長
副	主	査 河西 敏雄	埼玉大学名誉教授/ 株式会社 河西研磨技術特別研究室 代表取締役
委	員	田邊 功	有限会社ITコンサルティング 代表取締役社長
同		伊藤 桂	昭和電工株式会社 塩尻事業所 リーダー
同		吉田 國雄	東京工業大学 イノベーション研究推進体 特任教授
同		宮本 岩男	東京理科大学 基礎工学部 電子応用工学科 教授
同		藤本 靖	大阪大学 レーザーエネルギー研究センター EMPグループ 助教
同		高田 清司	元 信越化学工業（信越半導体）株式会社
同		阿部 耕三	新日鉄マテリアルズ株式会社 ファインセラミックス部 技術グループ グループリーダー
同		小倉 勝行	株式会社ミットヨ 宇都宮事業所 商品設計部 部長付
同		田中 克敏	東芝機械株式会社 精密機器事業部 技術顧問
同		佐藤 憲二	日造精密研磨株式会社 取締役 技術営業部長

執筆協力者 川村 香苗 株式会社ミットヨ 宇都宮事業所 商品設計部 1グループ
副主任研究員

同 齊藤 靖 タカノ株式会社 画像計測部 営業開発部 開発課 課長

同 松本 栄一 トッキ株式会社 R&Dセンター 技術開発グループ 課長

事務局 松倉 孝男 社団法人日本オプトメカトロニクス協会 専務理事

同 中野 正人 社団法人日本オプトメカトロニクス協会 技術部長

同 釧持 和夫 社団法人日本オプトメカトロニクス協会 技術部

同 高岡 孝徳 社団法人日本オプトメカトロニクス協会 業務部

(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（土肥俊郎） ----- 1
- 2 調査概要 ----- 4
 - 2.1 委員会の開催状況 ----- 4
 - 2.2 報告書の概要（林 孝好） ----- 6
- 3 第 II 章 製造技術分野（材料と加工・洗浄処理関係）の概要（上村 宏） -- 7
- 4 第 III 章 計測制御分野（基板検査／搬送）の概要（南 博文） ----- 10
- 5 第 IV 章 応用技術分野の概要（永壽伴章） ----- 12

第 II 章 製造技術分野（材料と加工・洗浄処理関係）

- 1 フラットパネルディスプレイ大型化の現状と将来展望（山口典生） ----- 17
 - 1.1 はじめに ----- 17
 - 1.2 各フラットパネルディスプレイの大型化の現状 ----- 18
 - 1.3 今後の展望 ----- 22
- 2 液晶ディスプレイ用ガラス基板と加工技術（林 孝好） ----- 24
 - 2.1 はじめに ----- 24
 - 2.2 薄膜トランジスタ液晶ディスプレイ基板 ----- 24
 - 2.3 液晶ディスプレイ用ガラス基板の加工技術 ----- 28
 - 2.4 今後の展望 ----- 33

3	プラズマディスプレイ用ガラス基板と加工技術	(山崎博樹)	35
3.1	はじめに		35
3.2	プラズマディスプレイの構造と原理		35
3.3	プラズマディスプレイの製造工程と使用されるガラス部材		36
3.4	プラズマディスプレイ基板大型化における課題		38
3.5	今後の展望		43
4	有機発光ダイオードにおける大型基板技術	(松本栄一)	45
4.1	はじめに		45
4.2	有機 EL の構造		45
4.3	有機 EL の製造プロセス		46
4.4	有機 EL の製造装置		46
4.5	有機 EL の製造技術		47
4.6	アプリケーション		48
4.7	基板サイズの推移		48
4.8	有機 EL 製造の課題		49
4.9	大型基板への課題と対策		50
4.10	装置の方向性		51
4.11	今後の展望		52
5	液晶基板用パターン製造装置	(七五三木 浩一)	54
5.1	はじめに		54
5.2	液晶基板用パターン製造装置の現状		54
5.3	超大型基板対応の技術課題		58
5.4	今後の展望		63
6	大型ガラス基板の分断技術	(清水政二)	65
6.1	はじめに		65
6.2	スクライビングホイールによるガラスの割断		65
6.3	CO ₂ レーザーによる熱応力を利用した亀裂進展		69
6.4	今後の展望		71

7	洗浄装置 (宮本 誠)	74
7.1	はじめに	74
7.2	フラットパネルディスプレイ製造の洗浄プロセス・装置の共通課題	75
7.3	フラットパネルディスプレイ製造における洗浄プロセスの重要性	75
7.4	フラットパネルディスプレイ製造における洗浄方法	77
7.5	今後有望な新しい洗浄技術	84
7.6	フラットパネルディスプレイ洗浄装置	85
7.7	今後の展望	88

第Ⅲ章 計測制御分野 (基板検査／搬送)

1	ガラス基板検査装置	91
a)	ガラス基板検査装置 (南 博文)	91
a.1	はじめに	91
a.2	マザーガラスの大型化と検査装置	91
a.3	ガラス傷検査装置	93
a.4	ガラス基板検査装置	97
a.5	今後の展望	100
b)	カラーフィルターの検査 (小田切 章)	102
b.1	はじめに	102
b.2	カラーフィルターの検査技術	103
b.3	今後の展望	111
c)	アレイ検査 (山内良彦)	112
c.1	はじめに	112
c.2	外観検査装置の用途	112
c.3	検査装置概要	113
c.4	欠陥検出原理	114
c.5	検査装置に対する要求・課題	115
c.6	今後の展望	115

d)	寸法検査（座標・線幅測定）	-----	116
d.1)	基板検査（濱砂智訓）	-----	116
d.1.1	はじめに	-----	116
d.1.2	測定原理	-----	117
d.1.3	今後の展望	-----	118
d.2)	フォトマスク検査（下川清治）	-----	119
d.2.1	はじめに	-----	119
d.2.2	フォトマスクの寸法検査装置	-----	119
d.2.3	測定の高精度化	-----	120
d.2.4	測定用センサーの高性能・高機能化	-----	123
d.2.5	測定の利便性の向上	-----	124
d.2.6	フォトマスクの寸法測定の標準化	-----	126
d.2.7	今後の展望	-----	127
2	画質検査（輝度・色度）（内田直樹）	-----	128
2.1	はじめに	-----	128
2.2	分光放射計の測定原理	-----	129
2.3	色彩輝度計の測定原理	-----	133
2.4	今後の展望	-----	135
3	基板搬送ロボット（相川富士雄）	-----	136
3.1	はじめに	-----	136
3.2	市場動向	-----	136
3.3	クリーンロボットの変遷と種類	-----	137
3.4	市場の要求（ロボットへの要求仕様）と対応	-----	139
3.5	真空ロボット	-----	142
3.6	今後の展望	-----	143
4	その他	-----	145
a)	原子間力顕微鏡（斉藤 靖）	-----	145
a.1	はじめに	-----	145

a.2	原子間力顕微鏡の特長	145
a.3	装置の構成	146
a.4	フラットパネルディスプレイ分野での測定応用事例	149
a.5	従来原子間力顕微鏡の課題解決事例	151
a.6	今後の展望	153
b)	レーザー顕微鏡 (山内良彦)	154
b.1	はじめに	154
b.2	スキャナの原理と方式	154
b.3	レーザー顕微鏡のメリット	157
b.4	レーザー顕微鏡の応用	158
b.5	今後の展望	159

第IV章 応用技術分野

1	フォトマスク (田邊 功)	161
1.1	はじめに	161
1.2	液晶ディスプレイフォトマスク製造工程	165
1.3	今後の展望	170
2	磁気ディスク基板 (伊藤 桂)	173
2.1	はじめに	173
2.2	磁気ディスクの製造プロセス	173
2.3	ガラス製磁気ディスク基板の要求特性	175
2.4	基板の加工方法	177
2.5	今後の展望	178
3	大口径ミラー／レンズ	180
a)	ミラー／レンズの研磨 (吉田國雄)	180
a.1	はじめに	180
a.2	ミラーの研磨	180
a.3	レンズの研磨	182
a.4	今後の展望	185

b)	イオン加工（宮本岩男）	186
b.1	はじめに	186
b.2	イオンビームについて	187
b.3	イオンビーム形状創生・修正技術	189
b.4	イオンビーム形状創生・修正プロセス	191
b.5	形状修正加工の例	191
b.6	今後の展望	192
4	その他	193
a)	レーザーガラス（藤本 靖）	193
a.1	はじめに	193
a.2	核融合用ドライバーに必要とされる性能	194
a.3	熱衝撃に対する強度	195
a.4	レーザー媒質としてのシリカガラス	195
a.5	Nd ドープシリカガラスのレーザー動作特性	196
a.6	今後の展望	197
b)	超大口径シリコンウエハ（高田清司／阿部耕三）	199
b.1	はじめに	199
b.2	スーパーシリコン研究所（SSi）の成果	199
b.3	φ 450mm ウエハ出現時のコスト想定	207
b.4	今後の展望	207
c)	石定盤（川村香苗）	209
c.1	はじめに	209
c.2	産業分野で使われる石材の特性	209
c.3	精密定盤と石材	211
c.4	石材の使用例	213
c.5	石材の加工例	214
c.6	石材使用のポイント	215
c.7	今後の展望	215

d) 金属定盤 (田中克敏)	217
d.1 はじめに	217
d.2 定盤の精度	217
d.3 金属定盤の特長	218
d.4 金属定盤の形状	219
d.5 金属定盤の用途	221
d.6 定盤の精度測定	223
d.7 鋳鉄製三面すり合せ定盤の精度と製作	226
d.8 今後の展望	226
e) 電解複合研磨 (佐藤憲二)	228
e.1 はじめに	228
e.2 金属の表面処理	228
e.3 電解複合研磨	230
e.4 電解複合研磨適用例	235
e.5 今後の展望	238
第V章 おわりに (黒河周平)	239
付録	243

(敬称略)

第 I 章 序 言

1	はじめに	1
2	調査概要	4
3	第 II 章 製造技術分野（材料と加工・洗浄処理関係）の概要	7
4	第 III 章 計測制御分野（基板検査／搬送）の概要	10
5	第 IV 章 応用技術分野の概要	12

第 I 章 序 言

1 はじめに

オプトメカトロニクス技術を駆使したフラットパネルディスプレイ（FPD）は、生産技術の革新に極めて大きな役割を果たしている。ディスプレイの主要な座を占めてきたブラウン管（CRT）は、画質の点で優れていたこともあって 40 数年という長い間続いたが、薄型・軽量・大型・低消費電力化などを目指して新しい電子ディスプレイへと進化した。とりわけ、薄型の画面化をめざす夢の壁掛けテレビというコンセプトは早くからあったが、高精細画像のハイビジョン放送は新しい電子ディスプレイの開発に拍車をかけた。40 インチ前後もしくはそれ以上の大画面は、プラズマディスプレイ（PDP）や液晶ディスプレイ（LCD）などが最有力候補となっていた。しかし、LSI デバイスに象徴される半導体技術の進歩と高度情報化社会の到来とともに表示用ディスプレイの需要と相俟って、中・小型の電子ディスプレイが脚光を浴びることになった。とくに LCD の研究開発なくして、パーソナルコンピュータ（PC）の中でもノート型 PC、カーナビゲーションあるいは携帯電話などのディスプレイの普及は考えられない。同時に、単なる小さな情報表示ディスプレイからエンタテインメントディスプレイとしての道へと進み、21 世紀にはいるとディスプレイ産業の市場規模は予想以上の規模となって、2007 年には 12 兆円を越える市場となるに至った。

しかしながら、サブプラム問題に端を発した市場低迷は、最大の用途・民生機器であるディスプレイ市場に影響を及ぼしつつある。例えば、液晶パネル最大の需要先・液晶テレビ市場についてみると、2008 年には 1 億台と予測していたものが 9,500 万台に落ち着くとも予測されている。しかしながら、この世界的な不況下といいつつも、電子ディスプレイ市場は液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイのほか、自発光パネル特有の高画質で台頭しようとする有機 EL などを含めて、2008 年 1,200 億ドル（12 兆円）という巨大市場であり、今後も年率 6.5% の成長が確実視されている。この市場を牽引するディスプレイは言うまでもなく LCD であろう。大型液晶ディスプレイは、コンピュータとテレビという日常生活でもっとも身近な市場で成長し、他方、中小型の液晶ディスプレイは、モバイル用途で解像度向上やサイズ拡大化への傾向で成長する。プラズマディスプレイはその用途が主として大型テレビ用に特化された市場であるが、急速に大型化が進む液晶パネルと競合し市場規模は横ばいとみられている。次世代ディスプレイとして期待される有機 EL ディスプレイ市場は、競合デバイスが液晶

ディスプレイと位置づけるならば、そのディスプレイの量産化・大型化・コストダウン化はもの凄い勢いで進められているから、有機 EL ディスプレイは必然的にその次の世代とみるのが妥当であろう。現在、例えば液晶テレビのサイズは、一般家庭用でも 40 インチ前後が主流となりつつあることを考えれば納得できよう。

以上、フラットパネルディスプレイの開発・市場動向について概観してきたが、とくに LCD のマザーガラス基板のサイズが大型化してきている。コストダウン、製造工程の効率化を進めるためである。関係企業では既に第 8 世代の生産ラインが稼動しており、2200×2400mm サイズのガラス基板から 45 型のパネルを 8 面生産することができるという。第 10 世代のマザーガラスの生産ラインの建設も計画、もしくは工場の建設が完成に近づいている。第 10 世代のガラスサイズは 2850×3,050mm 程度になる（図 1 参照）。

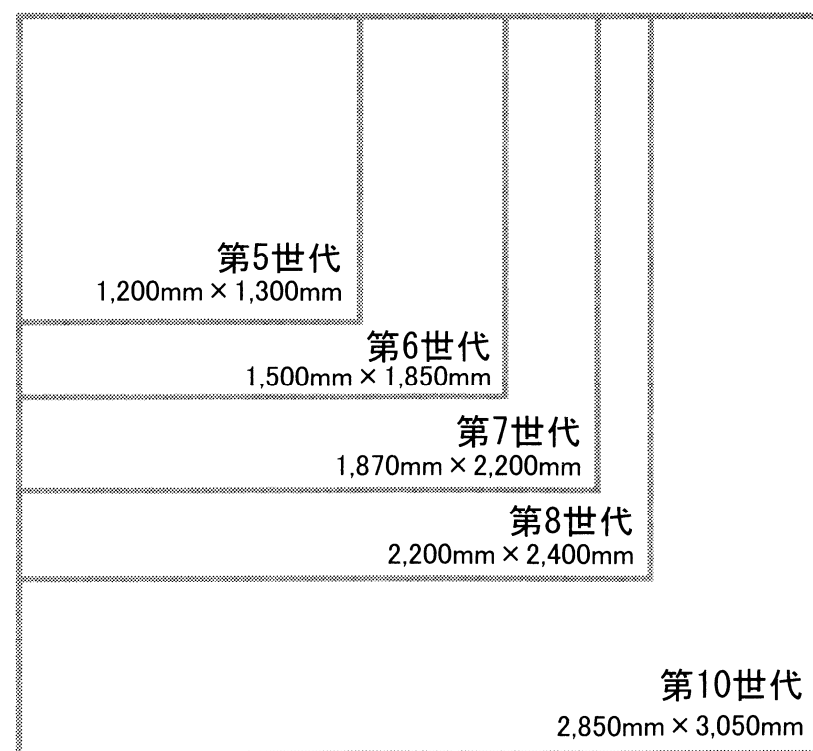


図 1 マザーガラス基板の各世代の寸法とその比較

このようなフラットパネルディスプレイ（FPD）の開発動向のように、FPD用ガラス基板は当初考えられないほどの大型化が進み、将来も超大型化に進むことは必至である。この超大型化ガラス基板のこれからの研究開発は、1社のみではかなりの投資をしなければならず、競争力を維持・向上するためには超大型基板に関わる加工処理等の課題を整理して、具体的かつシステムティックに課題を明確にする必要がある。

そこで本調査研究では、これらの課題を各専門分野の研究者、技術者から様々の課

題に挑戦するための課題をブレークスルーするための研究開発とその方向性を明確にし、そして将来に向けてのロードマップを提示することを目的とした。次世代型の大型ガラス基板を適用するFPD分野を主体に、世の中のニーズを調査しつつ将来のFPDがどのように進歩していくか、また大型化へ向けた研究開発が進められる中、生産性・経済性についても検討を行い、当該技術の現状と将来の課題を整理し、将来を見据えた周辺技術の動向をも調査する他、関連技術分野として半導体ウエハや太陽電池の基板加工処理などへの応用を探索する。さらに、特殊用途向けにとらわれず一般家庭でもっとも使用されるであろう30～60インチサイズの基板についても、加工面の品質・精度並びに加工処理方法などの調査を行う。これらの調査研究の中で、基板の大型化がこれまでのように進めることが果たして得策であるのかどうか議論をし、各分野の技術者からの忌憚のない意見としてまとめるとともに、今後、大型基板の進歩がどのように進んでいくのか、その加工処理と周辺技術に係わる調査しロードマップとして提案をするものである。

以下、本報告書の骨子について述べる。

本調査研究では、産学官の学識経験者による「オプトメカトロニクス技術を用いた次世代型の大型基板の進歩に関わる加工処理とその周辺技術に関する調査研究委員会」を設置し、わが国のオプトメカトロニクスをリードする一線の研究者・技術者の方々が一堂に結集し、それぞれの専門の立場から大型基板の進歩に係わる加工処理とその周辺技術について、最近のトピックスの整理・分析結果をまとめ執筆していただいた。報告書の骨子は、「製造技術分野」（材料と加工・洗浄処理関係）、「計測制御分野」（基板の検査・搬送制御関係）、「応用技術分野」（大型基板関係技術の他分野への応用）の3章から成り、各項目に当該技術の原理、発展の経緯を踏まえて最近のトピックス、そして将来展望の順に記述されている。限られた紙面の都合上、技術項目を限定せざるを得なかったが、執筆者の方々のご努力で、わが国のオプトメカトロニクス技術を用いた大型基板の進歩に関わる加工処理・周辺技術の現状を反映した充実した内容の報告書に仕上げられた。

大型基板化は第11、12世代へと進められる岐路に立つ今、本報告書は実にタイミングを得たものと確信するものであり、本報告書がオプトメカトロニクス技術を用いた次世代の大型基板の進歩に関わる技術の発展に貢献するものと考えている。

（土肥俊郎）

2 調査概要

2.1 委員会の開催状況

本調査は、平成 20 年 8 月 15 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「オプトメカトロニクス技術を用いた次世代型の超大型基板の進歩に関わる加工処理とその周辺技術に関する調査研究委員会」（委員長・土肥俊郎 九州大学大学院 教授）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 20 年 9 月 8 日（月） <ul style="list-style-type: none">・ 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 2 回幹事会 | 平成 20 年 10 月 10 日（金） <ul style="list-style-type: none">・ 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・ 今後の調査の進め方について |
| 第 1 回委員会 | 平成 20 年 10 月 10 日（金） <ul style="list-style-type: none">・ 委員紹介・ 本委員会の趣旨、調査概要説明・ 各分野の内容説明・ 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 回製造技術分科会 | 平成 20 年 10 月 10 日（金） <ul style="list-style-type: none">・ 製造技術分野における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・ 今後の調査の進め方について |

- 第 1 回計測制御分科会 平成 20 年 10 月 10 日（金）
- ・ 計測制御分野における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
 - ・ 今後の調査の進め方について
- 第 1 回応用技術分科会 平成 20 年 10 月 10 日（金）
- ・ 応用技術分野における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
 - ・ 今後の調査の進め方について
- 第 3 回幹事会 平成 21 年 1 月 20 日（火）
- ・ 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 回委員会 平成 21 年 3 月 30 日（月）
- ・ 調査報告書全体の調査結果に関する報告について
 - ・ 各分野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、フラットパネルディスプレイ用大型基板に係わる加工技術や検査技術、パネル製造に係わる加工技術や検査技術、さらに他技術分野に応用が期待される周辺技術に関して、市場からの要求、技術的課題、現在実用化されている技術と開発が進められている技術のそれぞれに関して実態を把握し、5年および10年後の展望を探ることとした。この方針に基づいて、本調査研究では3つの分科会が、製造技術、計測制御、応用技術の3つの分野の調査、執筆をそれぞれ担当した。

第Ⅱ章 製造技術分野（材料と加工・洗浄処理関係）では、フラットパネルディスプレイ大型化の現状と将来展望を調査した上で、今後も大型化が加速すると考えられる液晶ディスプレイ、プラズマディスプレイ、および有機発光ダイオードを取り上げ、ガラス基板の成形・加工技術およびパネルの製造技術に関する詳細な調査をそれぞれ実施した。パネル製造技術に関しては、液晶基板用パターン製造装置、大型ガラス基板の分断技術、洗浄装置についても大型化対応について詳細に調査した。

第Ⅲ章 計測制御分野（基板検査／搬送）では、ガラス基板検査装置、液晶用カラーフィルターの検査、アレイ検査など、様々な分野・工程で多様な技術が要求されるため、工程および用途ごとに種々の欠陥を検査する装置を詳細に調査した。また、寸法検査（座標・線幅測定）として基板検査やフォトマスク検査、ディスプレイの画質検査（輝度・色度）などの画質検査技術、大型基板用の原子間力顕微鏡や共焦点走査型レーザー顕微鏡についても調査した。制御技術では、基板搬送ロボットをとりあげ、クリーンルーム用、真空装置内用の大型クリーンロボットについて調査を行った。

第Ⅳ章 応用技術分野では、大型基板関連技術を半導体の基板加工処理など、他の技術分野への応用を探索するため、周辺技術の動向を調査した。具体的には、フォトマスク製造技術、磁気ディスク基板加工技術、大口径ミラー／レンズの研磨技術とイオン加工技術、核融合用レーザーガラス、超大口径シリコンウエハ、石定盤、金属定盤、および電解複合研磨技術を取り上げた。

なお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、多少見にく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団法人日本機械工業連合会 <http://www.jmf.or.jp>、および社団法人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けると幸いである。

（林 孝好）

3 第Ⅱ章 製造技術分野（材料と加工・洗浄処理関係）の概要

街の電気店や量販店をのぞいて見ると、所せましと大型の薄型テレビが並べられている。その中心となっている非発光型（受光型）の液晶ディスプレイ（LCD；Liquid Crystal Display）は1970年代に電卓や腕時計の数字を表示する装置としてモノクローム（monochrome）の7セグメント表示で実用化されて以来、目覚ましい発展を遂げている。それと平行して自発光型のプラズマディスプレイ（PDP；Plasma Display Panel）や有機ELディスプレイ（OLED；Organic Electro-Luminescence）も開発が進められ発展を続けている。これらの薄型のディスプレイはフラットパネルディスプレイ（FPD；Flat Panel Display）と総称されているが、中でもその両翼をなすLCDとPDPは表示の高品質化や薄型化、省電力化さらには低コスト化などを進めながら、相互に大型化を競い合っている。これらのFPDに必須の材料であるガラス基板は、このようなディスプレイメーカーの技術進展に伴ってより大型化が求められているが、ガラス基板を大型化するためには、ガラスの製造技術はもちろん切断、研磨、洗浄、検査などの加工技術も対応していかなければならない。

第Ⅱ章では、これらFPDに使用されるガラス基板の製造技術・加工技術について、ディスプレイメーカー、ガラスメーカー、加工装置メーカーの第一線の技術者から解説していただいた。

第1節「フラットパネルディスプレイ大型化の現状と将来展望」では、FPDに大型化が求められる背景とFPDの種類が紹介された後に、LCD、PDP、OLEDを取り上げ、各ディスプレイの現状最大サイズと技術動向および課題が述べられている。今後の展望においては、5年後、10年後のFPDはどの様になっているか、新しい情報化時代の到来を大胆に予測されている。

第2節「液晶ディスプレイ用ガラス基板と加工技術」では、LCD用ガラス基板に求められる表面品質、エッジ品質、熱安定性などの基本的な条件に加えて環境問題への取り組み、ガラス基板の大型化の推移について紹介された後に、それらの基本的な諸条件、環境対応、大型化などを実現させるためのガラス組成の設計、板状ガラスの製造方法とその特徴、特許から見た研磨や切断など加工技術について解説されている。今後の更なる大型化に対しては、ガラス基板の製造面だけでなくパネルの製造コストの削減効果や環境問題も踏まえて判断していくことが必要であるとの展望が述べられている。

第3節「プラズマディスプレイ用ガラス基板と加工技術」では、PDPの構造と原理、PDPに用いられる基板をはじめとする誘電体、バリアリブ、封着材など種々のガラスの役割と要求される特性について解説された後、ガラス基板の製造・加工方法と大型化に伴う課題としてガラスの欠陥、表面品位、強度、熱膨張係数、歪と熱収縮などへの要求が個々に述べられている。これに加えて、PDPの製造過程で使用されるガラス材料であるセッターと炉壁材の特徴と課題についても紹介されている。

第4節「有機発光ダイオードにおける大型基板技術」では、OLEDの構造、製造プロセス、製造装置、製造技術およびそのアプリケーションについて概説された後、ガラス基板サイズの推移と今後の大型化にともなう課題と対応策として開発されつつある技術について述べられている。OLEDの市場での歴史は浅いため、開発課題は多いが、5年後には20～30インチのテレビが数社から発売される可能性があるとして展望されている。

第5節「液晶基板用パターン製造装置」では、液晶パネルのアレイ工程とカラーフィルター工程の各々についてパターン形成方法と製造装置が紹介された後に、これらのパターン製造工程における様々な要求と超大型基板に対応するための露光装置の課題と開発の方向性について詳細に述べられている。今後の展望では、100型サイズの液晶ディスプレイが2018年に出現すると仮定して、液晶基板用パターン製造方式のロードマップがまとめられている。

第6節「大型ガラス基板の分断技術」では、ガラス基板の分断はスクライビングホイールによりガラス表面に筋をつけるスクライプ工程とスクライプ線に沿って裏側から押し割るブレイク工程からなること、大型の液晶パネルの分断にはブレイク工程を不要とした高浸透刃先が有効であること、が詳しく紹介されている。さらに、新しい分断法として登場しつつある、レーザスクライプ法、レーザアブレーション法についても特徴と課題が述べられている。

第7節「洗浄装置」では、FPDの製造工程における洗浄の重要性と基板の大型化に伴う洗浄プロセスの抱える課題を述べた上で、これまでに採用されている各種の洗浄方法の特徴と課題、FPD用の洗浄装置の技術動向、更には今後有望な新しい洗浄技術について詳細に延べられている。今後の展望としてFPD洗浄装置のロードマップが課題毎にまとめられているが、基板の大型化に伴い薬液や水使用量は増加の一途を辿っており、何より重要な課題は環境対策であるとの指摘には耳を傾ける必要がある。

ここで調査された製造技術の開発、進展があつてはじめてFPDの大型化が実現して

いるといっても過言ではない。今後、更なる大型化がガラス基板にも求められると思われるが、その技術開発や装置開発にかかるコスト、製造設備や装置そのもののコスト、更には環境対策をも考慮すると、ガラス基板の大型化が必ずしもディスプレイのユーザーの利益に直結するとは限らないことを十分に議論したうえで進めるべきであろう。

(上村 宏)

4 第Ⅲ章 計測制御分野（基板検査／搬送）の概要

液晶テレビを筆頭にFPDは、近年急速に大型化が進んでおり、それを生産するためのマザーガラスおよびマスクも大型化が加速してきている。

第Ⅲ章では、FPD用のガラス基板の計測制御分野（基板検査／搬送）に関わる応用分野についての調査報告で、9の範囲に関して調査を行った。

以下、報告順に計測制御分野の概要を記載した。

第1節「ガラス基板検査装置」では、a)「ガラス基板検査装置」、b)「カラーフィルターの検査」、c)「アレイ検査」、d)「寸法検査（座標・線幅測定）」の4項について解説している。

a)「ガラス基板検査装置」では、液晶画面の高精細化、高画質化のニーズの進展に伴い、ガラス基板の傷、および製造工程における異物の管理はますます重要となっている。大型化する液晶用マザーガラス基板（素ガラス）の傷、および製造工程における異物の管理に対応したガラス基板傷検査装置とガラス基板検査装置について報告されている。

b)「カラーフィルターの検査」では、液晶ディスプレイに用いられるカラーフィルターの検査についてその技術、装置について、本稿では、光を用いた外観検査を対象とし、カラーフィルター製造工程の各工程における検査の実際と課題について報告されている。

c)「アレイ検査」では、液晶パネル用TFT（Thin Film Transistor）アレイ基板検査には、電子ビームやコンタクトプローブを用いて、電気的にTFTアレイパターンの断線・短絡を検査する電気式検査方法と、照明光と光検出器を組み合わせ、異物の混入やアレイパターン規則性を検査する光学式検査方法の二種類がある。本稿では、光学検査装置（AOI: Auto Optical Inspection System）に関する技術が報告されている。

d)「寸法検査（座標・線幅測定）」では、d.1)「基板検査」とd.2)「フォトマスク検査」に分類して解説している。

d.1)「基板検査」では、ガラス基板検査における寸法検査（座標・線幅測定）では、基板の大型化による単純なパターンの縮尺・位置ずれの管理だけではなく、露光の分割によりパターンの縮尺・位置ずれも複雑化し、座標および線幅測定の重要性が高くなっている。本稿では寸法測定の測定原理と大型化の課題について報告されている。

d.2)「フォトマスク検査」では、製造されるパネルの精度や品質に直接影響する加工原版であるフォトマスクの大型化・高精度化・高機能化に伴って、これらを測定する装置の重要性もますます高まっている。フォトマスクの寸法測定に関する現状の取り組み事項を紹介すると共に、課題を解決するための今後の展開に関して報告されている。

第2節「画質検査（輝度・色度）」では、液晶ディスプレイの大型化、高精細化、高コントラスト化が進んでいる。この為、ディスプレイの研究開発、製造品質管理の現場では、より厳密な評価と管理が求められるようになってきた。これら画質検査に欠かせない分光放射計と色彩輝度計の測定原理について説明し、今後、求められる画質検査（輝度・色度）について報告されている。

第3節「基板搬送ロボット」では、FPDの生産工程における基板搬送では、クリーンルーム内で、マザーガラスを各装置間もしくは装置とカセット間で搬送するのが主なアプリケーションであり、これにはガラス基板搬送用クリーンロボットが適用される。また真空の装置内でのハンドリングに使用される大型真空ロボットやその他の事例なども交えて報告されている。

第4節「その他」では、a)「原子間力顕微鏡」とb)「レーザー顕微鏡」の2項について解説している。

a)「原子間力顕微鏡」では、微細な三次元表面形状を絶対値で測定するには、光学式をはじめいくつかの装置の選択肢があるが、中でも原子間力顕微鏡（AFM；Atomic Force Microscope）は、nmオーダーの極めて高精細な形状測定手段として利用されている。本稿では特にFPD分野における応用事例、および課題について報告されている。

b)「レーザー顕微鏡」では、レーザー顕微鏡は1957年Malwin Minskyによって開発され、1980年代になって、複数の企業が製品化に成功し、普及するようになった。本稿ではレーザー顕微鏡の原理と応用について報告されている。

FPD産業では最終製品の大型化と低コスト化が同時に急速に進んできている。特に量産ラインでは、対象となるガラス基板の大型化にともない計測制御分野（基板検査／搬送）に対する要求は一段と厳しくなっている。

ガラス基板が更なる大型化へ世代交代が進むと、量産ラインでは、高精度と高スループットという、相反する要求を満たす検査・分析・測定・搬送装置の役割は、ますます重要となってくると予測される。

（南 博文）

5 第Ⅳ章 応用技術分野の概要

大型の FPD には、ガラス基板の大型化が必須であり、そのため様々な技術開発が行われている。

もともとガラス基板は建物用の窓材のようなさほど面精度は要求されないものとレンズ／ミラーなどいわゆる光学素子用の高精度のものとの間で、材料の製造方法や加工方法も異なっていた。極めて特殊な例として、天体望遠鏡のように、大型かつ高精度のガラス材が要求される場合もあったが、個別生産の高価なものであり、それでも許容されていた。しかし、今回の調査対象の FPD 用の素材に対しては、大型、薄型で、高面精度（正確には貼り合わせた 2 枚の基板の間隔精度）が求められ、かつ、大量に低コストで生産しなくてはならない、表示用の半導体プロセスにも対応しなくてはならないなど、様々な要求を同時に満たさなくてはならないものであり、それまでの生産方法では対応できず、様々な新技術が開発された。逆にここで開発された技術がガラス基板の新たな用途を開発することも期待される。

第Ⅱ章、第Ⅲ章では、直接 FPD の開発に不可欠な、材料と加工・洗浄処理などの製造技術や、基板検査や搬送などの計測制御技術について解説しているが、第Ⅳ章では、それらを支える周辺技術や派生的な応用技術について解説した。

第 1 節「フォトマスク」では、その構成材料によって、ハードマスク（クロムハードマスク）、エマルジョンマスク（エマルジョンハードマスク）、フィルムマスク（エマルジョンフィルムマスク）の三種類に分類でき、FPD 用のマスクとしては、かつては、精度は低いが高価であるエマルジョンマスクやフィルムマスクも使われていたが、現在は精度を重視して、ほとんどクロムハードマスクになっているとしている。マスクの概要では、マスクの転写方法、大型マスクのサイズ推移、マスク仕様・規格項目等について、LCD フォトマスク製造工程では、マスクブランク製造、マスクパターン形成、マスクパターン検査修正、ペリクル貼付について述べている。今後の展望として、市場概要を概観し、技術的には、大型化、高精度化、多階調フォトマスクの開発、また、スタンダード規格への戦略が今後重要であるとしている。

第 2 節「磁気ディスク基板」では、ガラス製磁気ディスクに的を絞って現状の製造工程、要求される特性、加工方法及び今後の動向について概説されている。HDD は、低コストで大容量を実現できることや書き換えに対する信頼性が高いことなどから、近年の情報・通信技術における必要不可欠な記録装置として今後ともゆるぎない地位を占めるものと予想

されている。今後の展望として、垂直磁気記録メディアは既に成熟期に入りつつあり、それに次ぐ次世代記録方式として、ディスクリットメディアやパターンドメディア、更にその先の技術として熱アシスト記録方式の実用化が進められており、数年先には磁気ディスク 1 枚で TB (テラビット) オーダーの記録容量をもった媒体の登場が予測されている。

第 3 節「大口径ミラー／レンズ」では、**a)「ミラー／レンズの研磨」と b)「イオン加工」**の 2 項について解説している。

a)「ミラー／レンズの研磨」では、主としてレーザー核融合用の大出力レーザーに用いられる大口径ミラーや、液晶、ステッパー、天体望遠鏡、およびレーザー核融合などに用いられている大口径レンズについて、それらの研磨方法が述べられている。反射波面精度として $\lambda/5 \sim \lambda/10$ を要求される場合、従来から用いられている横振り研磨方式では精度が得られず、輪帯ラップ面を用いた遊星回転研磨方式(リングポリシャー)が使われている。また、大口径の非球面レンズの研磨が可能な磁気粘弾性流体を用いた精密研磨機(MRF)が開発されている。高精度の研磨面を得るためには干渉計など高精度の計測装置で計測しながら加工を進めてゆくことが重要である。

b)「イオン加工」では、固体電子素子の高密度化・高速度化に対応した EUVL のための投影光学系を実現するための超高精度の表面加工方法が要求されており、そのため有望視されているイオンビームを用いた停留時間制御による EUVL 用多層膜反射ミラー基板の最終形状修正加工について述べている。半導体メモリー素子では、2008 年現在、ハーフピッチが 60nm 前後、2013 年にはハーフピッチが 32nm の DRAM の量産も開始される見込みであり、5nm 以下の加工精度が要求されるようになる。この時代になると、EUVL (Extreme Ultra Violet Lithography ; 波長 13.5nm 程度を利用) がリソグラフィ技術の世界的な標準になる可能性が高い。

第 4 節「その他」では、**a)「レーザーガラス」、b)「超大口径シリコンウエハ」、c)「石定盤」、d)「金属定盤」**および**e)「電解複合研磨」**を取り上げた。

a)「レーザーガラス」では、人類のエネルギー問題を解決すべく提案されてきた技術がレーザー核融合の重要な要素であるレーザー光増幅用のガラス素子について述べている。レーザー核融合は慣性核融合とも呼ばれ、磁場核融合とは異なる手法で、核融合の点火条件であるローソン条件を満たす手法である。この手法には良質なエネルギードライバーが必要で、Nd を活性元素としたシリカガラスが有望なレーザー媒質として開発されている。将来展望として、ガラスレーザーの代名詞でもある、核融合レーザーに利用されているリン酸ガラスはシリカガラスをベースとした研究によってその欠点が克服され、将来的には 100J/100Hz/10kW への発展が可能であるとしている。

b)「超大口徑シリコンウエハ」では、最近、その実用化が2012年と取り沙汰されているφ450mmの超大口徑ウエハについて課題が述べられている。集積回路の微細化でコスト低減が困難であり、過去40年、各メーカーは大口徑化でのコスト削減に対応してきた。φ450mmの課題として、①単結晶化率、②数値シミュレーションの開発・熱物性値の標準化、③大型高寿命高純度石英ルツボの設計・製造、④磁場印加での結晶成長と遠隔操作、⑤結晶欠陥密度の極小化、⑥超精密スライシング技術、⑦大型ラッピング装置の開発、⑧延性モード研削技術の開発、⑨大型両面ポリシング装置の開発、⑩超高清浄度洗浄技術の開発について述べられている。将来展望として、昨今の世界的金融不安の拡大で半導体産業の低迷が危惧され、1998年の半導体不況でφ300mmが3年ずれ込んだことを考え、φ450mmの実用化の動きにブレーキがかかり2012年がかなりずれ込む可能性が大きいとし、次世代ウエハが浮上してくるまでの数年間、産官学が真に一致協力しての研究開発が重要であるとしている。

c)「石定盤」では、産業分野でも石定盤として使われる他、多くの用途に使われている材料である石材について、特に石定盤に使われている石材の特徴と加工例、工業製品での用途例を紹介し、装置の大型化に対する石材流用について今後の展望を述べている。石材の特性によるメリットとデメリットを理解し、デメリットを補うことが石材使用上のポイントと言える。例えば、石材は機械的特性にばらつきがあるので安全率をとり、精度や使い方により選ぶと良く、高精度の定盤を製作する場合は、吸水性の低い緻密な石材を選ぶこと、剛性を高くすることで精度変化量を少なく出来る。

d)「金属定盤」では、計測だけでなくすり合わせ定盤、ラップ定盤としての用途もある精密定盤のうち金属定盤の特長、用途、計測方法について述べている。精密定盤として最も重要なことは、精度が維持できること、現状の精度を把握していることであり、鋳鉄製定盤はきさげで精度修正が可能で、三面すり合せ定盤または平面の原器としての金属定盤を持っていることが重要であるとしている。将来展望としても高精度の定盤を維持するためには、金属定盤を三枚組みで持つことが唯一の方法であるとしている。

e)「電解複合研磨」では、イオン単位の除去作用性をもつ電解作用に、粘弾性支持砥粒による微小切り込み作用を補助させた電解複合研磨法について述べている。この方法は電解生成物の排除と加工面の均一平滑化によって高品質鏡面を得ることができるものである。今後の展望として、ECB技術は、加工法の特質を考えて、大型タンクや大型真空容器などの特にステンレスの大幅面積を対象にきわめて高い適用効果を発揮させてきたが、最近では、アルミ、チタンなど各種材料さまざまな形状、など鏡面化の要望が高まっており、今後はこれらに対応すべく技術開発、機械化など今まで以上に加速させる必要があるとしている。

ここで調査された応用技術は、**FPD** 用のガラス基板に限らず様々な分野で利用される可能性のあるものである。直接必要な技術のみならず周辺の技術にも目を向けることで新たな技術革新が創発される可能性を期待したい。

(永壽伴章)

第Ⅱ章 製造技術分野（材料と加工・洗淨処理関係）

1	フラットパネルディスプレイ大型化の現状と将来展望	17
2	液晶ディスプレイ用ガラス基板と加工技術	24
3	プラズマディスプレイ用ガラス基板と加工技術	35
4	有機発光ダイオードにおける大型基板技術	45
5	液晶基板用パターン製造装置	54
6	大型ガラス基板の分断技術	65
7	洗淨装置	74

第Ⅱ章 製造技術分野（材料と加工・洗浄処理関係）

1 フラットパネルディスプレイ大型化の現状と将来展望

1.1 はじめに

近年、薄型テレビやパーソナルコンピューターなどの心臓部であるフラットパネルディスプレイ（FPD；Flat Panel Display）の需要は、デジタル放送サービス、光通信等情報化社会の進展に伴い、急激な成長を続けてきた。2008年度の薄型テレビの普及台数はブラウン管（CRT；Cathode Ray Tube）テレビを抑え世界需要の半数を超えようとしている。

本来フラットパネルディスプレイというカテゴリーは CRT の対義語として使用されはじめた。CRT は主にテレビ用の用途で 1950 年代より長期にわたって使用されてきたが、発売当初は 17 型のサイズで最大級であった。1990 年代 CRT も 30 型以上の大型テレビへの対応を行ってきたが、これらのニーズに答えるには CRT はあまりにも奥行きが広く、スペース的に限界を生じてしまった。

下の図 1 に FPD の技術分類を示す。

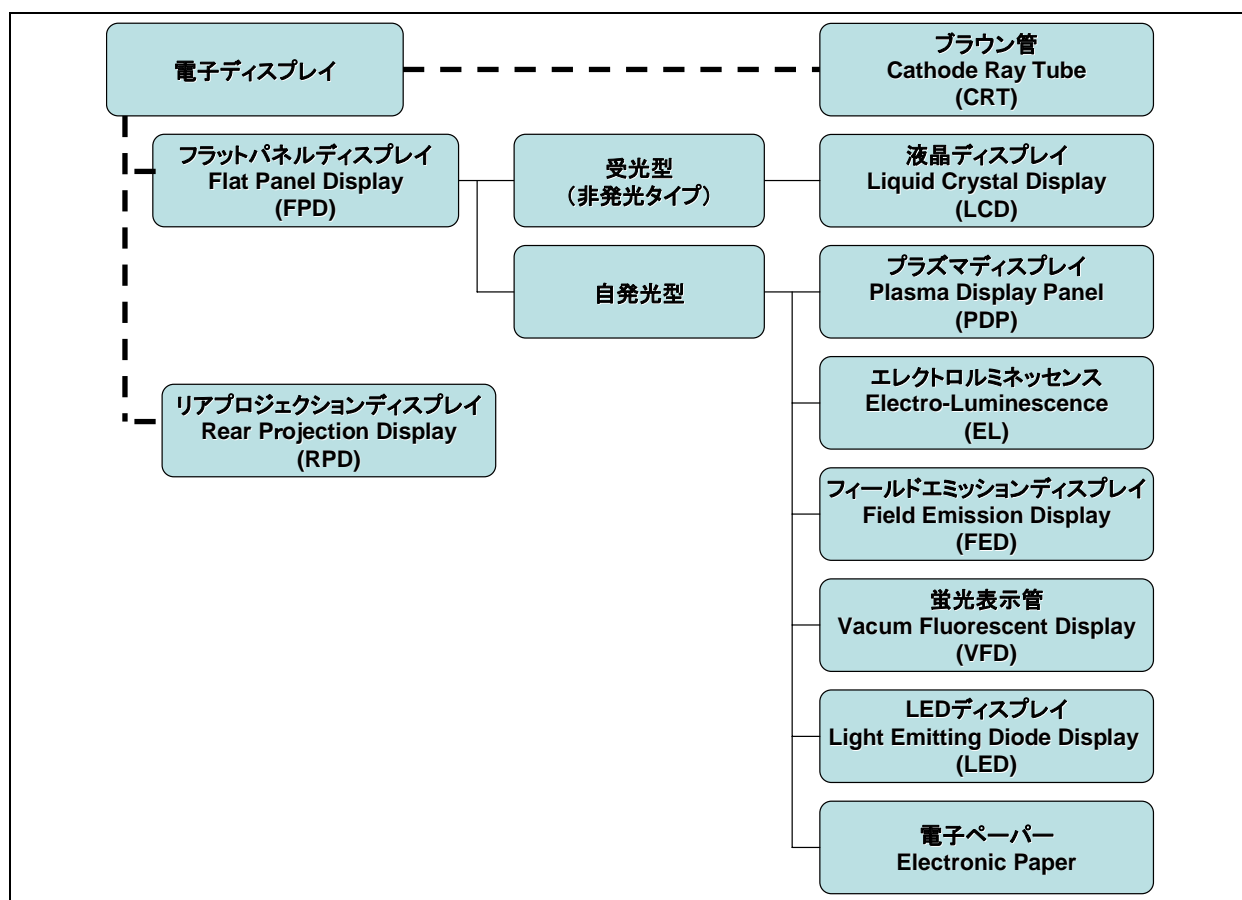


図 1 電子ディスプレイの分類

高度経済成長国の住居の近代化欧米化によりリビングを中心とした生活様式への変化も大型化を加速させた主因であるが、一方でビデオ、DVD ソフトの普及によりパーソナルユースの映画ソフト視聴へのニーズもプロジェクションを中心とした大型化ディスプレイを創出した要因である。プロジェクションテレビはリアプロジェクションの到来依頼ずいぶん薄型になったがやはり投射型は他の FPD には劣るため、フラットパネルとして分類されない場合が多い。

フラットパネルディスプレイは図 1 の分類のように技術的には自発光型と受光型で大きく分類することができる。FPD の将来予想にもこの発光の有無が大きなファクターであり次世代のテレビ市場に対しては特に新旧を分ける主因になると思われる。

本章では主に大型ディスプレイで現在最も花形である液晶ディスプレイ (LCD ; Liquid Crystal Display) とプラズマディスプレイ (PDP ; Plasma Display Panel)、これから最も有望視されている有機発光ダイオード (OLED ; Organic Light Emitting Diode) について記述する。

1.2 各フラットパネルディスプレイの大型化の現状

1.2.1 液晶ディスプレイ



図 2 最大サイズのシャープの LCD (液晶ディスプレイ) (2008 年 12 月時点) ¹⁾

表 2.1 に経済産業省の調査結果のように 2000 年初期は液晶テレビや液晶ディスプレイとしての液晶パネルは中小型用途が中心であり大型の TV 用途には向かないとされていた。しかし、TV メーカーの戦略と市場ニーズが合致し液晶 TV は 40V 型を最大として急速に

拡販された。2005年にはシャープの65V型発売と前後して、各社50V型以上の製品へいっせいにパネルサイズを引き上げた。現時点で最大のパネルはシャープの108V型でありすでに業務用として市場投入されている。家庭向けの最大はソニーの70V型である。

2002年ごろのLCDの課題であった応答速度の問題は液晶材質の改善やオーバードライブ駆動回路などの駆動系の急速な進化によりすでに市場対応されている。またTV等の動画の残像問題は倍速、3倍速駆動の搭載で対応しているメーカーが多い。

表1 各 FPD の年代別実用化レベルと課題及び大型化の推移²⁾

Display ディスプレイの種類	2002年頃の状況		現在の状況		大型化の 推移
	実用化段階	将来性と課題	実用化段階	将来性と課題	
CRT (ブラウン管)	・TV用主流 ・大量生産	・低コストで高画質 ・耐久性高い ・薄く出来ない ・将来性は低い	・TV用主流 ・生産量減少	・低コストで高画質 ・耐久性高い ・薄く出来ない ・将来性は低い	× ↓ ×
LCD (液晶ディスプレイ)	・ノート型パーソナルコンピュータ・携帯電話で主流 ・大量生産	・中小型中心に広汎な利用見込む ・消費電力が低い ・耐久性が高い ・輝度、動画描写に課題	・大型TV向け 中小型何れも主流	・大型TVから中小型まで 広汎な利用見込む ・LEDで消費電力が低い ・耐久性が高い ・駆動技術の進歩 ・クリスタルサイクルによる 価格下落	△ ↓ ○
PDP (プラズマディスプレイ)	・薄型・大型TV向け製品化済み	・大画面薄型でモニターや大型TV用に ・消費電力大 ・生産コスト大 ・高精細化困難	・大型TV向け主流	・超薄型9mm以下 ・超画質 ∞:1 ・超大型 150型 ・消費電力の低下 ・大型に特化	○ ↓ ◎
OLED (有機ELディスプレイ)	・一部の携帯電話で製品化	・携帯電話、TV、パーソナルコンピュータ用など広汎な利用に見込 ・耐久性に課題 ・高画質	・小型、中小型	・大型化へ技術革新 ・耐久性の克服 ・ポストLCD、PDPへ ・照明、広告用途へ	△ ↓ ○
FED (フィールドエミッションディスプレイ)	・試作段階	・大画面薄型、低消費電力、高画質でポストPDP ・中小型でも可能性	・試作段階	・高画質化へ特化 ・PDPの進歩により大型市場価値低下	○ ↓ △

これら大型化への技術的な課題は概ね解消されたが、2008年後期にLCDのもう一つの課題、液晶産業のジレンマであるクリスタルサイクルの大きな谷が訪れた。需要と供給のバランスは近代稀にみるアンバランス状態をおこしてしまい、国内を問わず海外でも年末商戦と在庫処分で液晶テレビは究極的な価格下落を招いてしまった。このため再度高価値をもたらす差別化技術の開発、パネルサイズによる住み分け及びコストダウンが各社に与えられた最大の課題となった。

そういう点では、シャープはすでに堺コンビナート化でパネルメーカーへと転向し、世界初の 10 世代という大型化と大量生産を実現させ、合わせてインフラを併設する太陽電池工場と共用化することで究極の低コスト化をさせようとしている。また、最新の情報ではパナソニックは LED バックライトと新駆動方式で、37V 型フルハイビジョンクラスでは世界最少となる 90kWh/年の超省電力で、LCD では世界最高の動画解像度 1000 本を実現する高画質・高効率な 37V 型フルハイビジョン LCD を発表した³⁾。クリスタルサイクルの谷を乗り越えて、新しい市場をつくるにはこのような家電テレビメーカーの高付加価値技術の連打と業界をけん引するパワーが必要であるが、LCD にとって今回の谷はあまりにも深いものになってしまったのかも知れない。

1.2.2 プラズマディスプレイ

PDP は液晶に比べ消費電力と高精細化への対応で遅れをとったが、現状液晶に十分な競争力をもつ技術で 40V 型以上の大型パネルに差別特化することで薄型 TV 市場の優先率を上げてきている。

特筆すべきはまず今回のテーマである大型化だが、現時点では FPD で最大なパネルは下の写真のパナソニックの 150V 型である。50V 型パネルが 9 枚とれるマザーガラスを使用して作成された横 3.3m×縦 1.8m、対角 3.8m のパネルであるが、DCI (Digital Cinema Initiative) 規格の 4K2K の解像度に対応可能なフル HD の 4 倍、4096×2160 ドットのスペックを備えている⁴⁾。



図 3 最大サイズのパナソニックの PDP (プラズマディスプレイ)⁴⁾

パネルの超大型化とともに超薄型化も急速に進行した、フラットパネルの本来の目的であるこの技術により大型化に関しては液晶テレビにさらに差をつけたといっても良い。

パイオニアは2008年初旬50V型で厚さ9mm重さ18.6kgの超薄型軽量ディスプレイを発表した。翌年パナソニックも50V型で下の写真のように8.8mmの超薄型PDPを発表した⁵⁾。

パナソニックのこの薄型化は発光効率3倍の高効率化技術により、部品点数の大幅な削減や部品の小型化・高集積化が可能になり、パネル構造や回路レイアウトの改善による抜本的な合理化を図ったためであり、従来と同等の輝度を維持しながら、合わせて従来比3分の1の消費電力を可能としている⁵⁾。



図4 パナソニックの薄型・省電力PDP⁵⁾

さらに、パイオニアはPDPの本来機能である自発光をさらに活かし超ハイコントラスト型のパネルを発表した。予備放電を完全にやめることに成功し、全く黒を発光させないようにした。黒の輝度がゼロとなることで計算上のコントラスト比は $\infty : 1$ となる。

2009年PDPは本来の自発光の強みを活かしたハイコントラストと効率化による省電力と薄型化の3大差別化技術により、現時点の50V型以上の大型パネルとしての競争では勝算を得たように見える。

1.2.3 有機エレクトロルミネッセンスディスプレイ

OLEDは1997年にパイオニアから販売された見えるラジオのディスプレイとして市場投入されてからすでに10年以上を経過したが、耐久性の課題と製造方法の問題の克服の

遅れから、主に中小型の携帯電話、カーエレクトロニクスなどの用途を中心にしか普及しておらず大型化は遅れている。



図5 ソニーの11V型有機ELテレビ⁶⁾

テレビ用としては2007年に唯一ソニーから11V型が販売された⁶⁾。このOLEDテレビの出現により、薄く軽く美しいOLEDは次世代テレビ用ディスプレイとしてユーザーに最も期待されることとなり、各テレビメーカーは大型パネル化へ拍車をかけることとなった。現時点では2008年にソニーが27V型のフルHDに対応した大型パネルの試作品を発表している他、サムスン電子が31V型の試作品を発表している。

今後、特に国内では売れ筋の40V型までをターゲットに付加価値向上の起爆剤としてポストLCDの役割を担うことになる。

1.3 今後の展望

この100年に一回といわれる大不況とクリスタルサイクルの谷の最中、今後を展望するのは非常に難しいがまず5年後について想定してみる。

表1の2002年と2008年を比較すれば、5年強という期間を要すれば現在のディスプレイメーカー特に業界リーダー各社であれば確実に弱みである課題を克服して逆に強みに変えるだけの開発力をもっていることが解る。しかし全ての大型ディスプレイ技術を実用化する必要はない、投資の分散を防ぐためにもポストLCDを意図するのであれば次の技術は自発光技術の中から選択していくべきである。実際、50年に一度のディスプレイ技術として次世代大型ディスプレイとして最も期待されてきた電界放出ディスプレイ（FED；

Field Emission Display) は、開発が遅れており今後の動向が危ぶまれているのは事実である。

逆に今最も切望されているのは OLED のテレビ用への大型化であり、海外勢を含めて各社他社に先駆けて実用化するためにしのぎを削っている。現状の動向から推察すると 5 年後には、LCD の 30~40 型の大型パネルは OLED にかわっており、40 型以上の超大型では 60 型以上の試作を完成させ PDP の領域に進出していると思われる。この時点でパネルメーカーは新たな局面を向かえ、家電メーカーから印刷大手、照明、インク、樹脂などのさらに広範囲な業界からの進出が当たり前になるだろう。

さらに 5 年後の 10 年後はフラットパネルディスプレイという分類は必要が無くなる、市場のディスプレイ全てがほぼフラットに変わっているからで、フラットというよりもシートディスプレイつまり紙のように薄いというのが基本技術になっているだろう。また現在のガラス基板からプラスチック基板を中心にしたフレキシブルシートディスプレイ (FSD; Flexible Sheet Display) という新しいセグメントが主流になっていると思われる。ポスターや看板に変わる新しい広告の形態、オフィスや学校の電子ディスプレイ化とペーパーレスとペンレスの加速、新しい照明器具など無数の新ビジネスを生み出す花形技術になることは現時点ですでに明白である。特に印刷や照明などの異業種が参入することで技術がリミックスされ、ディスプレイにとってはこれまでにない新ジャンルや新用途が生まれ、さらに材料や製造方法も革命的な技術が台頭してきていると推察する。

単なる大型ディスプレイ技術の移行ではなく FPD から FSD に移行していくことで動画、静止画ともにディスプレイを中心とした新しいライフスタイルが生まれ産業や文化を牽引していく事で、新しい情報化時代が到来するといっても過言ではない。

参考文献

- 1) <http://www.sharp.co.jp/lcd-display/corporate/lineup/pdf/lb1085.pdf>
- 2) <http://www.meti.go.jp/kohosys/press/0002386/> 図表 3-1 を修正流用
- 3) <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn090108-4/jn090108-4.html>
- 4) <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn080108-12/jn080108-12.html>
- 5) <http://panasonic.co.jp/corp/news/official.data/data.dir/jn090108-3/jn090108-3.html>
- 6) <http://www.sony.jp/products/Consumer/oel/>

(山口典生)

2 液晶ディスプレイ用ガラス基板と加工技術

2.1 はじめに

液晶ディスプレイ（LCD ; Liquid Crystal Display）には様々な種類があるが、薄膜トランジスタ駆動の液晶ディスプレイ（TFT（Thin Film Transistor）液晶ディスプレイ）に用いられる基板を中心に調査した。はじめに、TFT液晶ディスプレイ用ガラス基板に対する基本要件、要求される品質に対する最近の動向についての調査結果を述べる。次に、TFT液晶ディスプレイ用ガラス基板の加工技術の現状、および要求される品質に対する技術開発の動向を述べる。

2.2 薄膜トランジスタ液晶ディスプレイ基板

TFT液晶ディスプレイは、1990年台前半のノート型パーソナルコンピュータ（PC ; Personal Computer）への応用、1990年代中ごろのデスクトップPC用モニターへの応用、最近のフラットパネルテレビへの応用、さらには携帯電話等モバイル機器用ディスプレイへの応用と、時代とともに用途が拡大され、同時に基板に要求される項目も多様化している。また、個々の項目に対する要求条件も厳しさを増している。

2.2.1 ガラス基板に対する基本的な要件

TFT液晶ディスプレイ用ガラス基板に対する要件には、以下に挙げた通り、薄膜トランジスタを形成するプロセスから要請される基本的な必要条件と、ガラス基板を製造する側からの基本的な要件がある。

- 1) 基板からのアルカリ金属汚染がないこと
- 2) 表面が平坦、平滑、清浄であること
- 3) 化学処理に対して表面が安定であること
- 4) 熱処理後も寸法が安定していること
- 5) 可視光域で透明性が高いこと
- 6) できるだけ熔融温度が低いこと
- 7) ガラス中の気泡を除去しやすいこと
- 8) できるだけ低温度で成形に適した流動性が得られること

9) ガラス成形工程で結晶化がおきにくいこと

これらの要求条件のうち 1)～5)は、薄膜トランジスタを形成する半導体プロセスからくる基本的必要条件である。また 6)～9)は、低コスト、高品質、高歩留まりといった、ガラス基板を製造する側からの基本的な要求条件である。

要求条件 1)は、本来ガラス基板にとっては厳しいものであった。従来の一般的な板ガラスはアルカリ成分を含むためである。しかしながら、1980 年代初頭にこの要件を満たす無アルカリ組成（低ナトリウム、低カリウム濃度）のガラスの適用により問題が解決され、以来、TFT 液晶ディスプレイ用基板としてガラス基板が広く使われるようになった。

要求条件 2)～5)、特に 4)の熱安定性はガラスが基本的にポリマー等他材料に比べて優れている特長である。

2.2.2 ガラス基板に要求される表面品質

表面の粗さが小さいことは、半導体プロセスに用いる基板として基本的に要求される項目である。

表面のうねりは、セルギャップ（TFT 基板とカラーフィルター基板間の間隔）を変動させる場合があり、表示ムラを生じさせることがある。特に、IPS 方式（In Plane Switching）、VA 方式（Vertical Alignment）など、テレビ用の高視野角で高品位な TFT 液晶ディスプレイの場合は、表示ムラがセルギャップに敏感であるので、うねりに対する要求条件が厳しくなっている。

板厚のむらについては、板厚の偏差がフォトリソ工程で使われる露光装置の焦点深度を超えると露光特性に悪影響を及ぼすため、露光パターンの微細化に伴い板厚むらに対する要求も厳しくなる。

基板表面に存在するキズ、汚れ、パーティクルは、TFT 配線の断線やショートを引き起こす原因となるため、許容範囲を超えた密度でこれらがガラス基板表面に存在すると TFT プロセスの歩留まりを低下させる。また、これらはカラーフィルター製造プロセスについても歩留まり低下の原因になる。

ガラス基板の大型化は、これらの表面品質への要求を一段と厳しくする。1 枚の基板あたり 1 個の存在も許されないような致命的な表面欠陥の単位面積あたりの許容数は、基板サイズに逆比例して小さくなるためである。致命的な欠陥の例には、キズ、表面に吸着したガラス粉、粒子、有機物の汚れ、内部の異物や気泡に起因した表面の凹凸等がある。

2.2.3 ガラス基板に要求される熱安定性

一般にガラスは液体状態が凍結された状態であり、熱的平衡状態でない。従ってガラスが高温にさらされるとガラスの安定化が進行し、その結果として体積の収縮が起きる。ガラス基板の熱収縮を許容範囲に抑えることが必要になってくるが、低温ポリシリコン TFT のプロセスでは、アモルファスシリコン TFT の場合と比べて、ガラス基板がより高温にさらされるため、またパターンもより微細であるため、熱収縮に対する要求も、さらに厳しいものになる。

ガラス基板の大型化は、寸法安定性への要求を厳しくする。基板サイズによらず同じ位置合わせ精度が要求されるとすると、第 10 世代の基板では第 6 世代の基板に比べ基板対角寸法が 2 倍になるため、熱収縮等による寸法変動を 1/2 に抑える必要がある。

2.2.4 ガラス基板に要求されるエッジ品質

エッジについては第 6 項（ガラス切断、面取り装置）で述べられているので、ここでは要求される品質項目を挙げるに留める。ガラス基板は、成形プロセスを経た後、仕様にあったサイズに切り出され、エッジを加工して最終製品の形状となる。これらの加工段階には以下のような品質が要求される。

- 1) 切断の寸法精度（直角度、直線性）
- 2) エッジの形状（R エッジ、C エッジなどの形状）
- 3) オリエンテーションコーナ、角取り状態
- 4) エッジの機械的強度（曲げ強度、衝撃耐性）

2.2.5 ガラス基板に要求される軽量化

ノート型 PC や携帯電話等のモバイル用のガラス基板において、基板の軽量化は強い要求条件になっている。液晶テレビ用ガラス基板においても、テレビ画面の大型化に伴い、基板の軽量化の必要性も議論されるようになってきている。

2.2.6 ガラス基板に要求される大型化

TFT 液晶ディスプレイの生産効率を上げるため、TFT 液晶ディスプレイ用ガラス基板の

サイズは、時代とともに大型化してきたことを図1に示す。液晶テレビへの応用の加速に伴い、第5世代以降、大型化の速度が速まっている。これは、例えば、32インチのTV用パネルを生産する場合、第5世代基板を使うと1枚あたり3枚のパネルしか取れないのに対して、第6世代基板を使えば1枚あたり8枚取る事ができるからである。同じように、65インチのTV用パネルを生産する場合、第8世代までの基板では2枚しか取れないのに対し、第10世代のガラス基板を使えば6枚取れることになる。

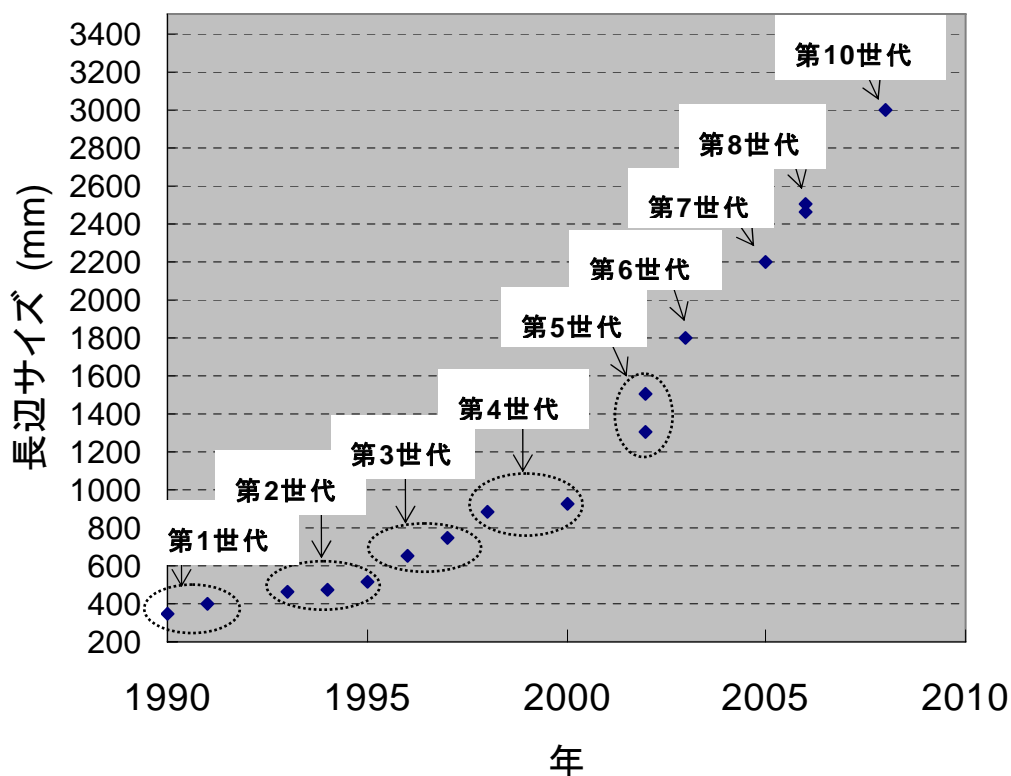


図1 ガラス基板のサイズの変遷

2.2.7 ガラス基板に要求される環境対応

液晶ディスプレイの利用が拡大するに伴い、環境問題への取り組みも重要な課題になってきている。ガラスの溶融工程では、原料物質の分解等のために、溶融ガラス中には大量の気泡が発生する。従って、透明なガラスを製造するためには、この気泡を取り除く工程(清澄工程)が必要である。ガラス原料中に微量のヒ素酸化物(As_2O_3)等を混ぜておくと、ガラス中の泡を効果的に取り除ける事が知られている。中でも As_2O_3 は最も有効な清澄剤として知られ、ガラス業界では古くから広く使われている。環境負荷を低減させるため、ヒ素化合物を含まないガラスが望まれるようになってきた。

2.3 液晶ディスプレイ用ガラス基板の加工技術

2.3.1 ガラス組成の最適化とガラス熔融工程

ガラスの大きな特長の1つは、ガラス組成を最適設計することにより、要求される基本的な要求や品質をかなりの程度満たすことができるという点である。

(1) 軽量化のための組成設計

基板の軽量化には、できるだけBaのような重元素の少ないガラス組成を選ぶことが有効である(特表2005-537209)。1980年代に適用されたCode 7059、AN635、NA45、OA2等の初期のガラス基板の密度は2.7~2.8 g/ccであったが、1990年代に開発されたCode 1737、AN100、NA35、OA10、等のガラス基板では2.5~2.55 g/ccに、そして2000年以降に開発されたEAGLE2000®とEAGLE XG™基板では~2.38 g/ccと、時代とともに密度の低減、即ち基板の軽量化が図られてきた。

(2) 熱安定性向上のための組成設計

ガラスの熱安定性を議論する際、ガラスの粘度が $10^{14.5}$ poiseになる温度(歪点)を目安として使うことが多いが、熱安定性を向上させる基本的な設計指針は、歪点の高いガラス組成を選ぶことである。例えば、1980年代に液晶ディスプレイ用基板に適用されたCode 7059ガラスの歪点は593℃であったが、現在広く使われているEAGLE XGは669℃に向上されている。しかし、低温ポリシリコンTFT用ではこれでも十分でない場合がある。最近開発されたJade™は歪点を732℃に向上させることに成功している。

(3) 内部異物、気泡と熔融工程の関係

熔融工程では、微小な固体異物や気泡がガラスに混入することを最小限にするよう管理されるが、基板の大型化は、固体異物や気泡への要求を一段と厳しくする。基板1枚につき1個の存在も許されないような致命的な固体異物や気泡の単位面積あたりの許容数は、基板サイズに逆比例して小さくなるためである。原料の品質管理から熔融工程全般にわたる様々な技術開発、工程管理の努力が継続されている。

(4) 環境対応

ヒ素を含まないガラスを実現するための考え方の一つは、ヒ素より清澄効果は低いが環境には優しい清澄剤を使うということである。候補材料としては、アンチモン酸化物、セ

リウム酸化物、錫酸化物、鉄酸化物、ハロゲン化合物などが考えられる。もう1つの考え方は、ガス発生原因成分の少ない原料を選ぶとか、熔融、清澄、成形工程の徹底的な改善努力により、有害な清澄剤なしでも気泡を取り除くことのできる熔融・成形プロセス技術を開発することである。特表 2001-500098、特開 2003-192377 にヒ素を含まないガラスが開示されている。AN100、OA-10G、EAGLE XG はヒ素やアンチモン等の有害な清澄剤を含まないガラス基板である。EAGLE XG は Ba も含まない。

2.3.2 板ガラス成形工程

ガラス基板を成形するプロセスとして現在実用的に使われている方法は2つある。1つは建築用ガラス等に広く使われているフロート法で、熔融したガラスを、水平方向に引き出し、熔融した錫の浴槽（フロートバス）の上にガラスを浮かせて板状に成形する。熔融した錫はガラスよりも比重が重く、またガラスと混ざらないという特徴を利用している。フロート法では大型のフロートバスが使えるため、大型ガラス板の成型に適している。

もう1つの方法はフュージョン法と呼ばれる方法である。フュージョン法では、図2に示のように、耐火性材料でできたトラフ（樋のような形の溝）の中に熔融ガラスを流し込み、トラフの両端から溢れ出したガラスをトラフの下方で融合させて1枚のガラス板を成形する。フュージョン法という呼び名は、トラフの両側に分かれたガラスが下方で再び融合（フュージョン）するという、当方法の特徴に由来している。また、トラフ両端から熔融ガラスを溢れさせるということから、オーバーフロー法とも呼ばれている。



図2 フュージョン法の概念図

(1) 表面品質と成形法の関係

フュージョン法の大きな特長は、最終的にガラス基板の表面となるどちらの面も、耐火性材料でできたトラフの表面等に一切接触することなく基板成形が完了するため、非常に表面の粗さが小さく、かつ清浄な表面が得られることである。また、表面の平坦度、板厚の変動、微小な表面うねりといった表面品質についても成形条件の制御によって要求条件を満たすことができる。従って、基板形成後に表面を研磨する必要がない。しかしながら、表面研磨工程がないため、要求される種々の表面品質をガラス板成形工程で実現する必要がある。例えば、表面の粗さ、表面うねり、板厚の偏差等を厳しく制御できる成形技術が開発されている。

フロート法で成形したガラスの表面には、微細なうねりや熔融したスズからの汚染層があるといわれ、これらを無くすために、基板形成後に表面を研磨することが一般的に行われている。フロート法の場合は、表面研磨工程で表面品質が決まるため、成形工程への要求はそれ程厳しくない。

(2) 熱安定性と成形法の関係

組成設計により熱安定性を向上できることを 2.3.1 (2) で述べたが、同じ組成のガラスを使った場合でも、融液状態からの冷却速度を遅くすることで熱安定性は向上できる。一般にフロート法は冷却速度が遅いため、同じ組成のガラスと比較するとフュージョン法で成形されたガラスに比べて熱収縮が少ない。

2.3.3 ガラス切断、エッジの面取り仕上げ工程

これらの技術については第 6 項で詳しく述べられているので、ここでは最近要求が強い品質との関係について述べるに留める。

ガラスの切断は、通常超硬ホイールによる機械的スクライブ法が広く使われている。また、エッジの加工には通常機械研磨が用いられる。これらの加工技術は、現状エッジに求められる要求条件を満足する技術である。ただし、2.2.2 で述べた表面品質を向上させるために、最近では汚れやパーティクルの発生が少ないエッジ加工プロセスが望まれている。現状使われている機械研磨は多量のガラス粉やグラインダーの磨耗粉等を飛散させるプロセスであり、この点では大いに改良の余地が有る技術と言える。

機械的スクライブに変わる技術としてはレーザースクライブ法が最近広く検討されている（例えば特表平 8-509947）。

また、磨耗粉を飛散させないエッジの面取り仕上げ技術として、レーザによる加工が提案されている（特開 2002-210577、特開平 9-225665）。

しかしながら、このような新しい技術は、長年使われ成熟した現状の機械研磨技術を置き換え得る実用的な技術にまでは至っていないのが現状である。

2.3.4 表面研磨工程

フロート法で成形されたガラス基板では、表面の微小な凹凸やうねりを研磨によって除去する必要がある。このため、一般的には、図 3 に示すように、ガラス基板の幅よりも大きな直径を持つ研磨パッドを自転および公転させ、その下をテーブルに固定したガラス基板を搬送させることにより、連続的にガラス基板を研磨する方法が使われている（特開 2001-293656）。

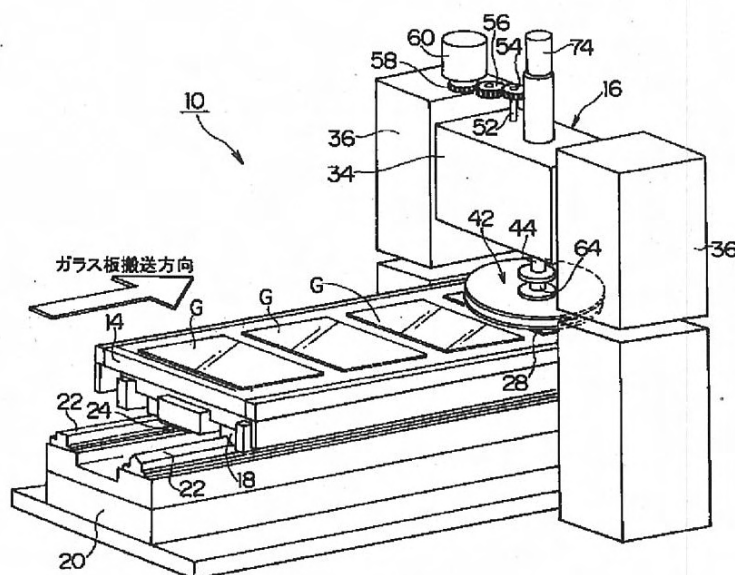


図 3 ガラス基板表面研磨機の例

研磨パッドの自転速度、公転の速度、半径、研磨圧力、スラリーの種類や供給方法（特開 2004-276133、特開 2008-62304）、スラリーのフィルタリング方法（特開 2003-19669）、ガラス基板の吸着保持法とその剥離法（特開 2005-19591）等、様々な条件を最適化することで要求される加工精度、研磨効率等を維持できる。高精度が要求される研磨精度の再現性を向上させ、容易に維持できる技術も開示されている（特開 2008-62304、2008-36738）。

ガラス基板の大型化により研磨装置の大型化が必要になるが、特に研磨パッドの大型化

は、パッド素材の確保、交換作業、研磨加工精度の維持などを困難にする。この問題に対して、図4に示すように、2台の小型の研磨パッドを千鳥状に配置して稼働させることで、研磨パッドの直径(D)の2倍弱の幅(W)を持つ大型ガラス基板全面を均一に連続研磨加工できる方法が開示されている(特開2007-190657)。

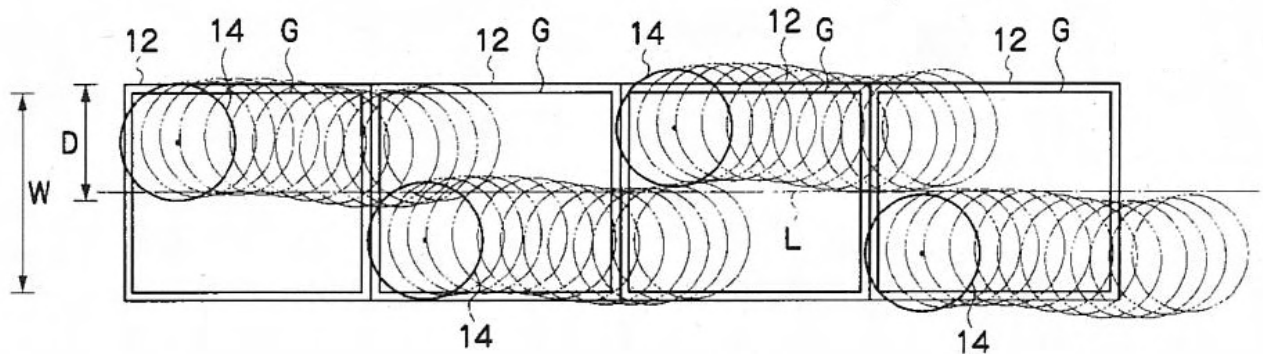


図4 研磨パッドを2台千鳥状に配置した研磨装置

また、大型化したガラス基板では、研磨終了後にステージからの取り外しなどのハンドリング方法も特殊な技術が必要になる(特開2004-122351)。

2.3.5 洗浄、検査、梱包工程

表面品質の中で、汚れ、パーティクル等は、洗浄プロセス、検査、梱包プロセス等に大きく依存している。洗浄プロセスにおける汚れ、パーティクル洗浄能力の向上、洗浄プロセス以降のクリーンルーム化、表面品質を維持したまま輸送できる梱包技術の開発等、各プロセスにおける技術開発努力が現在もなお続いている。

特にガラス基板の梱包においては、大型化に伴い、まったく新しい方法が必要になってきた。第5世代までのサイズでは、プラスチックケース内に、隣り合うガラス基板の表面が接触しない程度の間隔で並べる方法が広く用いられていた。しかし、第6世代以降の大型基板では、ケース内でのガラスの接触を避けるためには、ガラス間の間隔を非常に広くとる必要がある。これではガラス基板の輸送が極めて非効率になる。ガラス間の間隔を狭くしてもガラスの接触を回避できる方法として、ガラスの4辺の縁だけをスペーサで挟み、全体を傾斜させる方法が提案されているが実用には至っていない(特開2006-521975)。

現在第6世代以降のサイズに実用化されているのは、ガラスを隙間無く積み重ねて包装し輸送する、“高密度梱包”という方法である。この方法は輸送の効率化という点では非常

に優れているが、梱包、搬送にともなう表面品質の低化リスクが大きくなる。ガラスの清浄表面を保護フィルムで覆うなど、ガラス基板メーカーごとに様々な工夫がなされている。

ガラス表面を保護するためのガラス表面加工技術の1つとして、コーティング方法が提案されている（特開 2000-319038、特開 2005-529049）。

2.4 今後の展望

コーニングでは、堺工場の 2010 年 3 月の稼働に向けて、第 10 世代のガラス基板の開発を進めている。旭硝子も第 10 世代ガラス基板の生産ラインを構築中である。したがって、今後を展望するには、第 11 世代、第 12 世代への大型化が進むかどうかを議論することになる。

今後 5 年以内に第 11 世代、第 12 世代のガラスが導入される可能性は、ガラス基板を製造する立場からは、技術的には第 10 世代の技術の延長であり、可能と考える。しかしながら、技術開発費、製造コストの上昇は避けられない。ガラス基板のみならず、他の部材やパネル製造装置等のあらゆる設備・装置のコストも同様に上昇し、それらがパネル製造コストの上昇にも繋がることを想定した上で、第 11 世代以降のガラス基板の大型化によるパネル製造コスト削減の効果を判断する必要がある。また、最近の世界的な景気後退に伴い、液晶テレビ市場も従来予測よりも大幅に下方修正されてきている。従って、大型ガラス基板の需要も考慮されるべき要因の一つといえよう。

以上のような状況の中で、5 年後以降についての予測はさらに難しいが、大型液晶 TV 市場の今後の見通し、および、第 11 世代以降の基板の大型化によるメリット、さらには、パネル製造に関する革新的な技術あるいは標準化等、ガラスサイズの拡大に頼らないパネル製造効率化を十分見極めた後に、展望が見えてくるものと思われる¹⁾。ガラス基板サイズ拡大の限界については、2002～2003 年に様々な項目が詳しく検討されている^{2,3)}。当時、議論・予測された限界は、第 10 世代の実現によって破られたようにも思われるが、当時の検討項目や考察結果は第 11 世代以降のサイズ拡大の動向を考える上でも十分参考になると思われる。

今後の展望としては、環境問題への対応や新しいディスプレイ用ガラス基板も議論されるべきであろう。環境負荷に関しては、今後はライフサイクルアセスメント等に基づいた総合的判断が求められると思われる。新しいディスプレイの中では大型有機発光ダイオード（OLED ; Organic Light Emitting Diode）ディスプレイが将来有望なビジネス分野として注目される。

参考文献

- 1) 「大型化から多様化への転換 第 25 回 総集編(II): FPD 産業が目指す方向」 北原洋明 Semiconductor FPD World 2007 p.116
- 2) 「液晶パネルの長期展望と課題－製品動向と生産技術－」 2003 年 SEMI PCS-Forum-FPD Phase IV ロードマップ委員会編集 北原洋明監修
- 3) 「大型化の限界はどこか (パネルディスカッション)」 北原洋明他 フラットパネルディスプレイ 2003 実務編 p.150

(林 孝好)

3 プラズマディスプレイ用ガラス基板と加工技術

3.1 はじめに

プラズマディスプレイ（PDP ; Plasma Display Panel）は大型のフラットパネルディスプレイを目指して開発されたため、基板ガラスは開発当初から比較的大きなサイズのものが用いられた。その後、液晶ディスプレイと同様に画面サイズの大型化、パネルの多面取りによるコストダウンによりガラス基板サイズの大型化が進められてきており、PDP 用ガラス基板のサイズは液晶ディスプレイ基板ガラスと非常に良く似た変遷を示している。

図 1 に PDP と液晶ディスプレイ（LCD ; Liquid Crystal Display）基板ガラスサイズの変遷を示す^{1,2)}。PDP は LCD と同様、フラットパネルディスプレイであるが、PDP の構造や製造工程は LCD と大きく異なる。PDP 基板大型化に伴う課題は LCD 基板と良く似た事情を持つ場合と、まったく異なる事情をもつ場合がある。本項では PDP の構造や製造工程について解説し、基板サイズの大型化における課題について概説する。

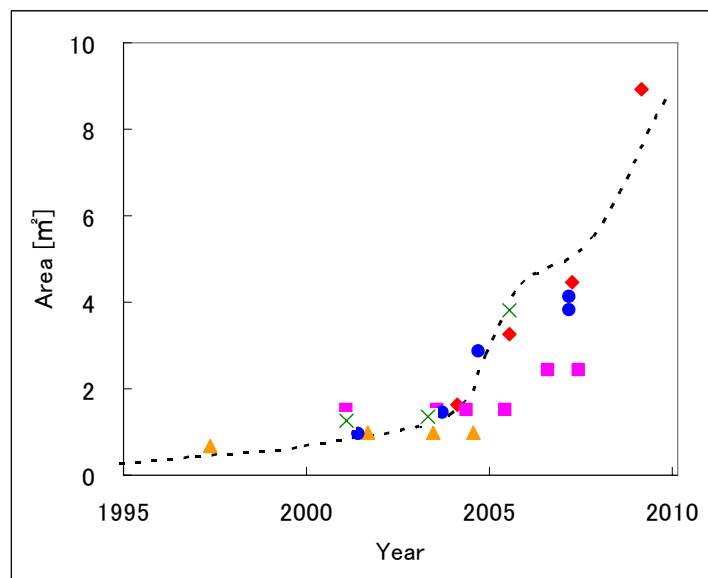


図 1 PDP 基板ガラスサイズの変遷^{1,2)}（点線は LCD 基板ガラスサイズの変遷）

3.2 プラズマディスプレイの構造と原理

PDP は自発光で応答速度が早く視野角が広い、大型化が容易などの特徴を持つ。この特徴を生かし、当初は空港や証券会社の公共用表示用パネルとして 42~50 インチのパネルが用いられた。量産により価格が低下し、さらに課題とされていた消費電力の大きさや輝

度の低さが改善されたことから、家庭用テレビとして急速に普及しつつある。

図 2 に PDP の構造を示す²⁾。PDP は蛍光灯と同じ真空放電の原理で発光させる。2 枚のガラス基板の間に Ne や Xe ガスを封入し、バリアリブと呼ばれる隔壁で仕切られたセル内に前面板に設けられた維持・走査電極で電圧をかけて放電を起こし紫外線を発生させる。この紫外線が背面板に塗布された R, G, B それぞれの蛍光体に当たり各色に発光する。発光させる場所は、前面板の表示電極と直交する方向に設けられた背面板の書込み電極により決定する。発光に要する時間が短いため、パッシブマトリックス駆動であってもすばやい動画に対応することができる。

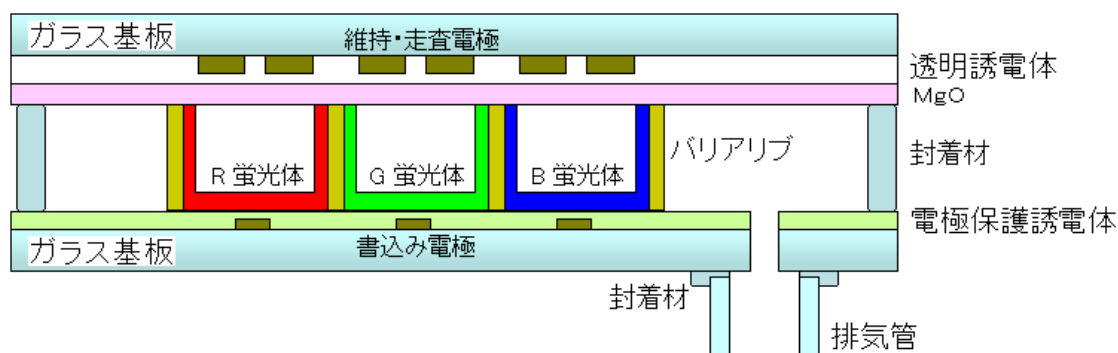


図 2 PDP の構造²⁾

3.3 プラズマディスプレイの製造工程と使用されるガラス部材

PDP に使用されるガラス部材には電極やセルを形成する基板、前面板と背面板それぞれに設けられた電極を保護する誘電体、セルを仕切る壁の役割をするバリアリブ、パネルや排気管を封着するフリット、パネルを真空にした後 Ne や Xe ガスを導入し封止する排気管がある。

PDP の製造では誘電体形成、隔壁形成、パネル・排気管封着の各工程で熱処理が施される。各工程の熱処理では、前の工程で形成した構造が変形しないよう、工程毎に温度を下げてゆく。粉末ガラスを使用する熱処理の最高温度は 600℃程度、最低温度は 450℃程度である。

一般に低い熱処理温度で使用される粉末ガラスほどガラスの熱膨張係数が高くなる傾向がある。パネルに使用される各種ガラス材料の熱膨張係数が整合するように材料が選定される。

3.3.1 基板

PDP 用基板に求められる特性として

- 1) 大型でかつ平坦な表面と高い寸法精度を持つこと
- 2) 熱処理時に寸法変化を生じないこと
- 3) 周辺材料との熱膨張係数が整合すること
- 4) 電極との反応による変色（黄変）を生じにくいこと

などがある。

基板ガラスには当初安価なソーダライムガラスが用いられていたが、耐熱性の低さによる変形の問題が生じた。そこでソーダライムガラスと同じ熱膨張係数を持ち、歪点を約 70～80℃上昇させた PDP 専用のガラス材質が開発された。PDP 基板用ガラスの特性を表 1 に示す^{3,4)}。この高歪点ガラスは、ソーダライムガラスと同等の熱膨張係数を維持したまま歪点を上昇させるために MgO, CaO, SrO, BaO などのアルカリ土類金属酸化物を多く含有したガラスとなっている。

基板ガラスの肉厚は 2.8mm でスタートしたが、パネルの軽量化のため現在では肉厚 1.8mm が主流となっている。

表 1 PDP 用基板ガラスの特性^{3) 4)}

ガラスタイプ	ガラスメーカー	ガラスコード	密度 [g/cm ³]	熱膨張係数 [×10 ⁻⁷ /°C]	歪点 [°C]	徐冷点 [°C]	軟化点 [°C]
ソーダライムガラス	旭硝子	AS	2.49	87	511	554	735
		PD200	2.77	83	570	620	830
高歪点ガラス	日本電気硝子	PP-8C	2.82	84	582	626	836

3.3.2 誘電体

前面板と背面板に設けられる誘電体層は電極保護の役割を持つ。ガラスペーストを基板上に塗布し、熱処理することで均一な肉厚を持つ層を形成する。数百 V の電圧に耐えるよう電気抵抗が高く、絶縁破壊を生じないよう欠陥のないことが求められる。

前面板では誘電体を透過して画像が表示されるため無色で透過率が高く、泡や異物などが存在しないことが重要となる。背面板では蛍光体で発光した光を有効に利用するため誘電体層の反射率をあげることでパネルの輝度を向上させるよう工夫されている。

3.3.3 バリアリブ

放電空間の壁となり同時に前面板と背面板の間隔を保つ役割を持つ。また、蛍光体は背面板上のみならずバリアリブにも塗布され、輝度向上に寄与している。幅 50~100 μm 、高さ 100~200 μm のバリアリブリブを 200~300 μm 間隔で並べるという特殊な形状を形成する必要があり各社形成方法に工夫を凝らしている。開発当初はストライプ状のリブ形状が主流であったが、画質向上と低消費電力のために複雑な形状が用いられるようになってきた。背面の誘電体と同様パネルの輝度向上のための工夫を行っているメーカーもある。

3.3.4 封着材

封着材は前面板と背面板、背面板と排気管を封着するのに用いられる。先に形成した誘電体層やバリアリブが変形せず、排気ができるだけ高い温度で行えるよう材料の熱特性が設定される。熱膨張係数を整合させるため、低い熱膨張係数をもつセラミックフィラーを混合したものが用いられる。

3.3.5 排気管

排気管には基板ガラスと熱膨張係数が整合し、封止が比較的低温で行える PDP 専用のホウケイ酸ガラスが用いられる。また、封着材をタブレット状に加工し、あらかじめ排気管に接着したものが開発されている。

3.4 プラズマディスプレイ基板大型化における課題

PDP 用ガラス基板はフロート法で製造される。図 3 にフロート法の概念図を示す⁵⁾。

フロート法は 1953 年にイギリスの Pilkington 社によって発明された方法で、熔融スズ上にガラスを浮かべることによって平坦なガラス面を得る。肉厚は熔融スズ、熔融ガラス、フロートバス雰囲気の間張力のつりあいによって決まり、6~7mm がつりあいの肉厚となる。製品の肉厚がつりあいの肉厚よりも小さい場合には両側から引き伸ばして成形する⁶⁾。ガラスの肉厚はガラスの流量、フロートバス上で両側に引き伸ばす量、製品の板引き速度によって決定される。成形されたガラスはフロートバス直後に設置されたレアーと呼ばれる徐冷窯でアニールされる。

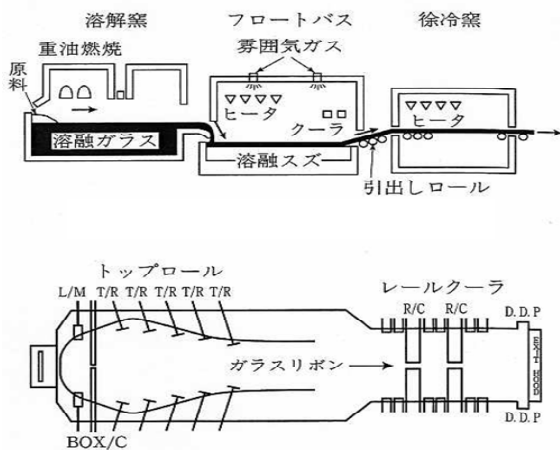


図3 フロート法⁵⁾

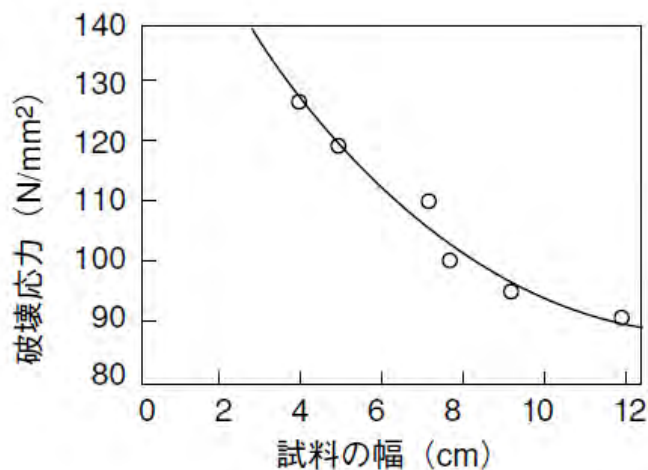


図4 ガラス強度のサイズ効果⁸⁾

アニールされた原板はスクライブ、折割により必要なサイズに切断され、ダイヤモンド砥石による端面加工、ポリッシャーによる表面仕上げ、ダイヤモンド砥石による排気用の穴あけ加工が施された後に、洗浄・検査・梱包され出荷される。

フロート法は建築物や自動車などの窓ガラス用に開発された製造方法で、比較的精度が高く、大きな面積のガラスを得るのに適した方法とされている。表2に建築用板ガラスの製品寸法一覧表を示す⁷⁾。肉厚が6~19mmの製品では最大寸法が約3m×6mの板ガラスが供給されている。

表2 建築用板ガラスの製品寸法一覧⁷⁾ (旭硝子カタログより抜粋)

■単板ガラス						
一般名	品種(商品名)	呼び厚さ(ミリ)	略号	最大寸法(mm)	製造可能特注寸法(mm) ^{*1}	
透明板ガラス	フロート板ガラス	2	FL2	914×913・1219×610	—	
		3	FL3	3637×2520		
		4	FL4	3780×2510		
		5	FL5	3780×3018		
		6	FL6	6056×3008		
		8	FL8	6046×2998		7570×2490
		10	FL10	6046×2998		7570×2490
		12	FL12	6046×2998		7570×2490
		15	FL15	5906×2948		10566×2438
19	FL19	5946×2898	10566×2438			

●単板ガラスの注意事項

*1 製造可能特注寸法欄に記載されている寸法は、製作は可能な最大寸法ですが、運搬上の制約を受け、また受注生産になる場合がございます。納期、仕様等などにつきましては、事前に弊社代理店あるいは弊社営業担当者までご確認をお願い致します。

3.4.1 基板の欠陥

ガラス基板製造上の代表的な欠陥として、泡、異物、キズなどがある。これらの欠陥があると画素の妨げになったり、電極断線の原因となったりするため、一定の規格を設けている。

ガラス基板のサイズが大きくなると、一枚の基板内にこれらの欠陥が存在する確率が高くなり、歩留まりが低下する。本件に関しては、液晶用ガラス基板の際にも課題とされ、多くの検証が行われている⁸⁾。

基板の洗浄、検査装置に関しても大きな基板を精密かつ迅速に洗浄、検査する装置の開発が必要となる。

3.4.2 基板の表面品位

基板に要求される品位として板厚偏差、そり、うねりなどがある。これらは基板上に印刷する誘電体やバリアリブなどの肉厚の均一性に影響を及ぼすため、それぞれに規格を設定して管理を行っている。面内の表面品位を制御するために、基板のサイズが大きくなるほど製造工程における厳密な管理が必要となる。また、規格を越えた箇所が存在する場合、基板サイズが小さい場合には選別によって良品を得ることが可能であるが、基板サイズが大きくなるほど歩留まりが低下する。

3.4.3 基板の強度

ガラスは共有結合性の物質で酸素との結合強度が高いため、破壊を生じるために必要なエネルギーが大きく、理論強度は 10~20GPa と非常に高い。しかし、通常のガラス製品の実用強度は 100MPa 程度で、理論強度よりも 2 桁以上低く、バラツキも大きい。これはガラスの表面に欠陥が存在し、欠陥が応力集中の原因となって強度が低下するためとされている。強度のバラツキが大きい理由はガラス表面に存在する欠陥の大きさ、分布が不規則なためである。また、ガラス製品のサイズが大きくなるほど相対的に欠陥を含有する確率が高くなることから、強度が低下する。図 4 に強度のサイズ効果のデータを示す⁹⁾。

また、ガラス基板のサイズが大きくなるに従い、基板の支持点数を多くしないと自重や移載時の加速度によるたわみが大きくなり、たわみによる応力で割れが生じる確率が高くなる。一般にたわみ量は基板にかかる力に比例し、肉厚の 2 乗に反比例し、支持スパンの 4 乗に比例する¹⁰⁾。前述のように基板ガラスの肉厚はパネルの軽量化のため 2.8mm から 1.8mm へと移行しており、より一層、基板の割れに対する対応が必要となる。具体的には基板端面や排気穴の加工精度を向上させ、欠陥を最小限にすること、基板ガラスを支持する点数を増やすことにより支持スパンを小さくしてたわみ量を小さくすること、移載時の加速度を低下させてたわみ量を小さくすることなどが求められる。

表 2 に示した建材用板ガラスの製品寸法一覧でも肉厚 6~19mm の最大寸法が約 3m×6m なのに対し、肉厚が小さくなるに従い最大寸法が小さくなる。肉厚 2mm では肉厚 6mm の 1/20 以下のサイズとなっており、肉厚が小さく、大きな面積を持つ基板が割れやすいことを裏付けていると推測される。

3.4.4 基板の梱包、運搬

基板ガラスの大型化は梱包、運搬にも配慮が必要となる。基板自体の重量が大きくなることにより支持部に荷重が集中しやすくなる。また、基板のたわみによる応力が生じやすくなるため、応力を分散させるような梱包方法が必要となる。

また、梱包単位の体積、重量が大きくなることにより、運搬方法や、積載効率についても検討が必要となる。

3.4.5 熱膨張係数管理

PDP の製造工程では前述のように前面板と背面板を封着材で貼り合わせる。この際、前面と背面の基板ガラスに熱膨張係数の差があるとパネルにそりが生じる。このそりの量は熱膨張係数差に比例し、肉厚に反比例し、パネルの対角線長さの 2 乗に比例する。現在でも基板ガラスの熱膨張係数は厳密に管理されているが、封着工程での基板サイズが大きくなるほど熱膨張係数の管理幅をより小さくしてゆく必要がある。

3.4.6 歪、熱収縮

ガラスは冷却されるに従い粘度が徐々に上昇する。図 5 にガラスの体積-温度曲線を示す。図 5 において高温で熔融状態のガラスが A 点から冷却されると体積は AB にそって減少してゆく。ガラス転移点 (B 点) で融液のランダムな構造が凍結し、それ以降ガラスは固体として振舞う。固体のガラスは液体のガラスよりも小さい熱膨張係数を持つため、熱膨張曲線はガラス転移点で屈曲する。

基板ガラス製造の際に、形状はフロートバス内で決定され、その後レーアでアニールされる。基板面内で冷却速度に分布があると、冷却が遅れた部分の体積収縮挙動が先に冷却された部分によって制限され、応力が生じる。基板が常温になった際に残留した応力によってガラスに歪が生じる。

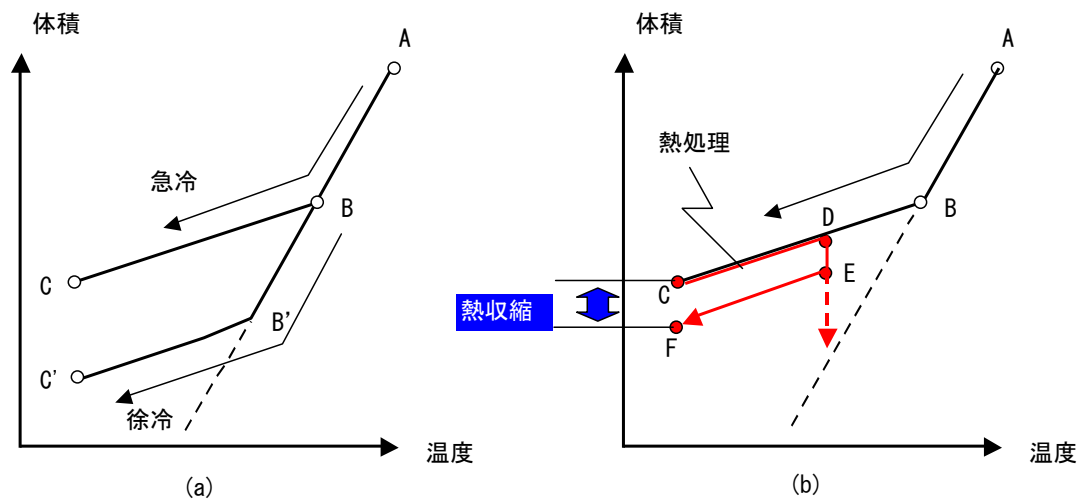


図 5 ガラスの体積－温度曲線

基板ガラス面内の歪が大きくなると、パネル製造工程の熱処理による応力緩和によって基板が変形するなどのトラブルを生じる。

また、パネルメーカーで基板ガラスを熱処理した際に生じる体積減少を熱収縮と呼び、通常長さの変化率で表す¹¹⁾。

図 5 においてガラスの冷却速度が高いほどガラス転移点は高くなり、その結果、常温でのガラスの体積は大きくなる。

図 5 において C の体積を持つガラスをガラス点 D の温度まで加熱保持すると、ガラスの体積はその温度で液体のガラスが本来持つ体積に向かってゆっくりと収縮してゆく。その後常温まで冷却すると、体積は図 5 の C→D→E→F のように変化する。このときに生じる体積減少 (C→F) が熱収縮である。

パネルメーカーの各製造プロセスでは事前に基板の熱収縮率を把握し、各デバイスのパターンを補正する。よって熱収縮率が安定し、そのバラツキの小さい基板ガラスが求められる。

パネルメーカーの工程で歪や熱収縮のトラブルを生じさせないために、基板サイズが大きくなるほど基板の面内すべてで冷却速度が一定になるよう厳密な管理が必要となる。

3.4.7 セッターと炉壁材

パネルの熱処理装置で用いられるガラス部材にセッターと炉壁材がある。図 6 にセッターと炉壁材の概略図を示す。

セッターは熱処理の際にパネルを載せて炉内を移動する板状の部材で、熱処理時にパネ

ルを水平に支持するために、高い平坦性と耐熱性が求められる。

炉壁材は熱処理炉に用いられる耐火物や発熱体からの粉塵で炉内が汚染されるのを防ぐため、炉の側壁と天井に設置される。

これらの材料には通常超耐熱結晶化ガラスが用いられる。この結晶化ガラスは、熱膨張係数が非常に小さいため熱衝撃に強い、結晶化度が高いため熱処理時に変形しにくい、赤外線をよく通すため加熱効率が高い、緻密な構造を持つため発塵を生じないなどの特徴を持つ。また、セッターにセラミックスを利用する開発も進められている¹²⁾。

セッターは基板ガラスを載せて熱処理するため、基板ガラスよりもひと回り大きなサイズである必要がある。超耐熱結晶化ガラスはロール製板法¹³⁾で、セラミックスセッターは焼結法で製造され、いずれも大きなサイズのセッターを製造するには困難が伴う。また、プロセスのエネルギー消費量削減のため、より肉厚の小さいセッターが求められており、平坦度、肉厚偏差を維持することや、強度を維持することなど、基板ガラスと同様な技術課題がある。

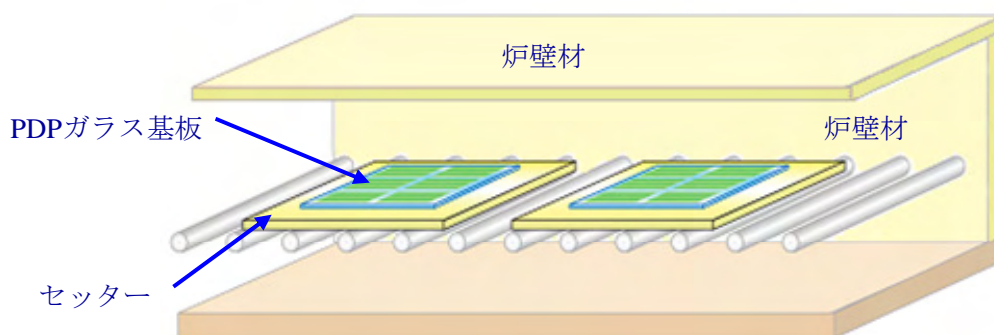


図 6 PDP の焼成工程で使用される結晶化ガラスセッターと炉壁材

3.4.8 パネル熱処理炉

パネルを熱処理する炉についても同様に大型化が求められる。炉内の幅方向の温度分布を限りなく小さくし、前述の炉壁材の施工などにも工夫が求められる。

3.5 今後の展望

これまでは今まで挙げてきた課題を基板ガラス、各部材および装置メーカーがクリアし、パネルコストの低減に寄与してきた。フラットパネルディスプレイの高画質化とともに低

価格化への要求は一層高まることが予想される。従って今後も基板ガラスのサイズを大きくする要求は続くものと考えられ、基板ガラス、各部材および装置メーカーは基板ガラスの大型化にともなうコストの上昇を最小限にとどめることによって PDP の競争力を維持することが必要となる。

参考文献

- 1) NIKKEI FPD2008 トレンド 戦略編, Part 1-1, 日経 BP 社, (2008) pp. 46-47
- 2) 山崎博樹 光技術コンタクト 46, No. 11, 3-7 (2008)
- 3) 中尾泰昌 セラミック工学ハンドブック 第 2 版 [応用], 技法堂出版 (2002) pp. 73-476
- 4) 日本電気硝子㈱ “電子部品用ガラスカタログ” 第 22 版 (2008)
- 5) 神立孝良 セラミック工学ハンドブック第 2 版 [応用], 技法堂出版 (2002) pp.413-416
- 6) W.C. Hynd. Flat glass manufacturing. processes, Glass Science and Technology vol2, pp. 83-100
- 7) <http://www.asahiglassplaza.net/attached/D4P01.pdf>
- 8) Sachiko Hamada. Electronic Display Forum 2004 Proceedings Equipment & Materials Session 3&5 (2004) pp. 34-48
- 9) A. J. Holland and W. E. S. Turner, J. Soc. Glass Technol., 20, (1936)
- 10) 黒木浩 12th FPD Manufacturing Technology EXPO & Conference Seminar Text D3, pp. 5-23
- 11) 近藤敏和 ガラス工学ハンドブック, 朝倉書店 (1999) pp. 502-505
- 12) 森博 Ceramic Data Book 2004 Vol. 32 (2004) pp. 135-137
- 13) 坂本明彦他 セラミックス 43, 1067-1070 (2008)

(山崎博樹)

4 有機発光ダイオードにおける大型基板技術

4.1 はじめに

有機 EL (Electro Luminescence) の研究は 1960 年代から行われてきた¹⁾。特に 1987 年、当時コダック社の Tang 氏らが極薄膜の 2 積構造により高効率な有機 EL を発表した²⁾ことが、現在の有機 EL のブレークスルーとなった。その後 10 年を経て 1997 年にパイオニア株式会社から世界で初めて有機 EL を搭載した商品が発売された。更にその 10 年後の 2007 年にはアクティブマトリクス駆動方式で 3 インチ程度の QVGA (Quarter Video Graphics Array) 有機 EL ディスプレイ、そしてソニー株式会社から世界初の 11 インチ型有機 EL テレビが発売された。有機 EL はディスプレイとして一般消費者にも認知され、また液晶などと競合するまでに至った。

また有機 EL の魅力としてディスプレイ以外に照明やフレキシブル化に期待がもてることである。有機 EL 照明は唯一の面光源であり、水銀を使用しないため環境負荷も少ない特徴がある。フレキシブル化の研究は TFT 駆動回路 (Thin Film Transistor) を含め全てを有機材料で形成することも検討されている³⁾。

このように注目度が高く将来が期待されている有機 EL について、本稿ではその製造技術の現状と課題、そして将来について述べていく。

4.2 有機 EL の構造

図 1 に有機 EL の構造を簡単に示す。ガラス基板上に透明電極層、発光層となる有機層、そしてカソード層を形成し、最後に封止をした構造である。有機層の厚さは数 10nm 程度の極薄膜であり、電極から電気を印加することで有機層が発光する。有機層は発光効率や寿命を向上させるために注入層、輸送層や発光層などに機能分離した積層構造を取る。

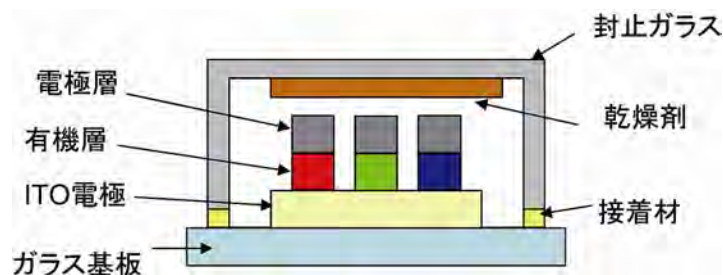


図 1 有機 EL の構造

ガラス面側から光を取出す場合（ボトムエミッション）、透明導電層として ITO（Indium Tin Oxide）などが用いられる。反対にカソード側から光を取出す場合（トップエミッション）はカソードを透明導電膜で形成する。封止は金属缶やガラスを用い、UV（Ultraviolet）硬化型の接着材で封止する。このとき封止部位に乾燥剤を貼付け、接着材を通して進入する水分を捕獲する。

4.3 有機 EL の製造プロセス

有機 EL の材料は低分子材料と高分子材料の 2 種類ある。低分子材料は真空蒸着法を用い、高分子材料は塗布法で形成する。図 2 に有機 EL の製造プロセスを示す。基板はパッシブ駆動とアクティブ駆動に分けられる。アクティブ駆動基板は液晶のものと構造が異なるものの、プロセスや設備は共通するところが多い。

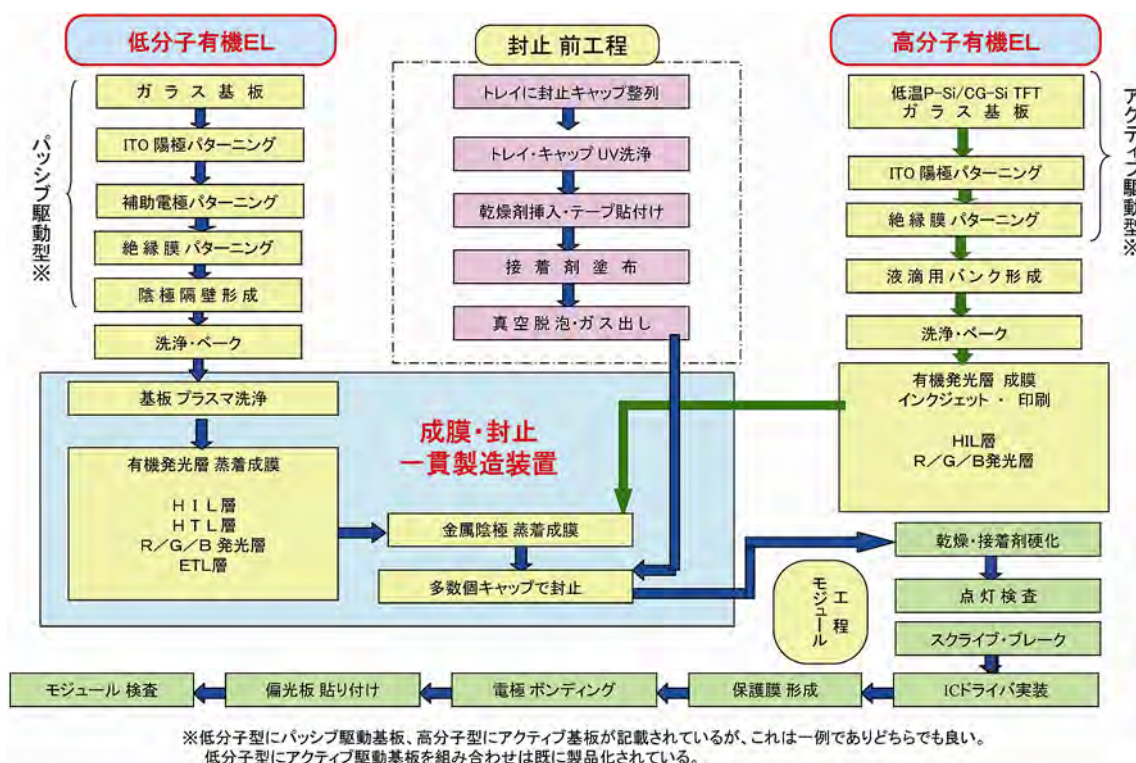


図 2 有機 EL の製造プロセス

4.4 有機 EL の製造装置

有機 EL の量産用製造装置の例を図 3 に示す。有機材料が大気中の水分や酸素で劣化するため、製造途中で素子を大気に触れさせないことと、素子を封止する必要がある。この

ため蒸着から封止まで連続一貫した製造設備となる。図 3 はクラスタ型の装置で、蒸着工程と封止工程が合体している。途中で真空環境と大気圧環境を切り替えている。

現在の有機 EL 製造装置のラインナップを図 4 に示す。量産装置の最大基板サイズは第 3.5 世代（実際は第 4 世代のハーフサイズ）である。

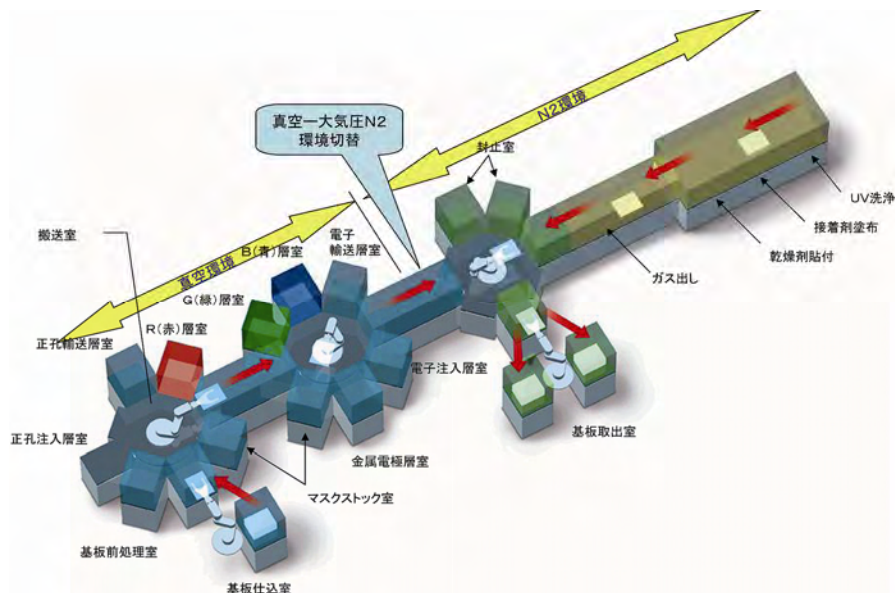


図 3 有機 EL のクラスタ型蒸着・封止連続一貫量産製造装置

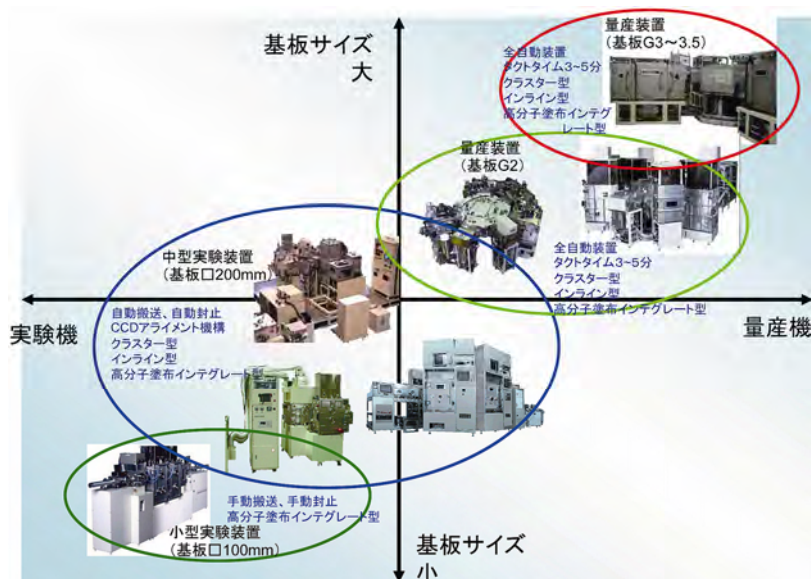


図 4 有機 EL 製造装置のラインナップ (トッキ)

4.5 有機 EL の製造技術 4)

有機 EL の製造技術には、有機材料の成膜技術、マスクアライメント技術、カソード電極形成技術、封止技術などが主なものである。有機材料は突沸しやすく、過熱で劣化する。また有機材料の成膜では膜厚が数 10nm と極めて薄く、かつ膜厚は発光特性に影響するた

め均一性が要求される。更にカラー化のために数%のドーピング材料を共蒸着する。これらを考慮し、長時間安定に蒸着する蒸着システムを構築している。マスクと基板の位置合わせは±5μmの精度を実現している。我々は4項で示した第3.5世代基板用の蒸発源として平行ショット蒸発源を開発している。封止はメタル缶やガラスによる中空封止(図1)の他、トップエミッション用として中空部に充填材を入れた固体封止がある⁵⁾。

4.6 アプリケーション

有機ELのアプリケーションはディスプレイと照明に大別できる。ディスプレイは更に、携帯電話など携帯ツール用の小型ディスプレイと、大画面のテレビに区別できる。それらを図5にまとめた。有機ELの製品化のスタートは、パッシブ駆動、ボトムエミッションのモノカラー方式である。しかし、小型ディスプレイでも3インチクラスの画面になると低消費電力を得るためにはTFT駆動が必要で、かつ高い精細度を得るために開口率が大きく取れるトップエミッション構造が必要になる。テレビでは大画面が必要であり、RGB(Red,Green,Blue)塗分けの他、白色+カラーフィルター方式もある。また画素が大きく、TFT回路による開口率の低下が少ないためボトムエミッション方式でもよい。

照明はパッシブのボトムエミッション構造である。高輝度な白色発光を得るためにマルチフォトン構造⁶⁾などが提案されている。

アプリケーション		駆動方式	光取出し方向	カラー方式
ディスプレイ	モバイル用。小型(~10インチ)	パッシブ	ボトム	モノカラー
		アクティブ	トップ	RGB塗分け
	テレビ用。大画面(10インチ~)	アクティブ	トップ	RGB塗分け
			ボトム	White+CF
照明		パッシブ	ボトム	2色(青+オレンジ)
				マルチフォトン

図5 有機ELの代表的なアプリケーションと構造

4.7 基板サイズの推移

図6に有機ELの基板サイズの推移を示す。量産製造は第2世代のガラス基板からスタートした。それ以降徐々に大きくなってきて、現在第3.5世代サイズである。

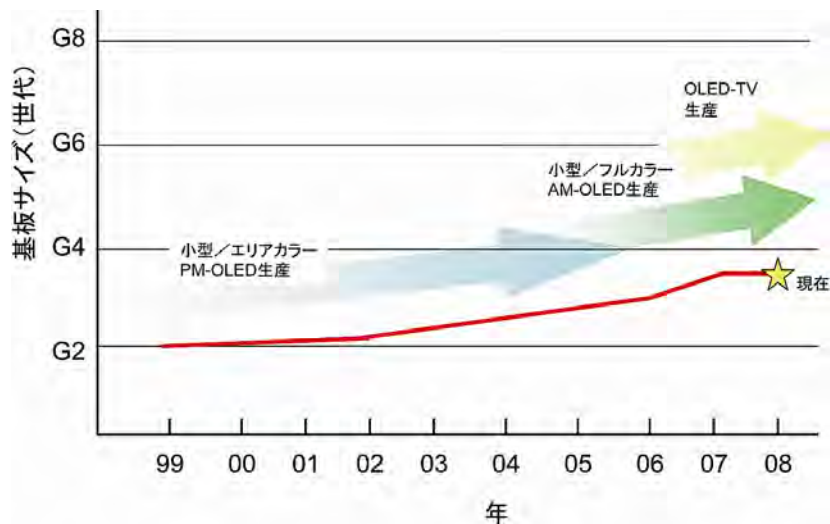


図 6 有機 EL の基板サイズの推移

4.8 有機 EL 製造の課題

図 7 に有機 EL の製造課題を示す。4.6 項で示したアプリケーションの全てにおいて、大きな課題は「低コスト化」である。そのために基板サイズの大型化、タクトタイムの短縮、材料使用効率の向上などが挙げられる。小型ディスプレイは液晶との価格競争を意識し、生産性を上げるために基板サイズを大きくする。またテレビ用では大画面を作るために基板サイズの大型化の要求がある。照明用も低価格化が必要なためである。

	項目	現状	要求	
			ディスプレイ	照明
低コスト化	基板サイズ	第2～第3世代	第4世代以上	第4世代以上
	タクトタイム	240sec	180～120sec	120sec以下
	材料使用効率	数%～10%程度	20%	20%以上
	封止	缶/ガラス封止	全面封止	全面封止
高精細化 大画面化	膜厚均一性	±5%	±2%	±2%
	アライメント精度	±5μm	±2μm	±5μm
	マスク温度	80℃以下	常温+10℃以下	80℃以下
	大画面マスク製造	10インチ	40インチ～	—
	高精細マスク製造	～200ppi	200ppi～	—
	透明カソード形成	—	低ダメージ、大面積	—
	透明封止形成	—	低ダメージ、大面積	—

図 7 有機 EL の製造課題

またディスプレイでは高精細化、大画面化の課題がある。マスク蒸着法で成膜するため、マスクの高精細化、大画面化、大型化の製造がキーとなる。独立行政法人 新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）では 40 インチ有機 EL テレビの開発に向け、成膜技術、透明カソード技術、透明封止技術などのテーマを挙げて取り組み始めた⁷⁾。

有機 EL 材料は実用化の一方で更なる高効率化の開発が進められている。特に青色の高効率、長寿命な材料の開発が急務である。

4.9 大型基板への課題と対策

第 4 世代以上の基板サイズの大型化に対し、その課題と対策についても述べる。

(1) TFT 基板

低温ポリシリコン TFT は第 4 世代の基板サイズが最大であり、それ以上の基板サイズではアモルファスシリコン TFT (a-SiTFT) を用いる。しかし a-SiTFT は電圧シフトが起こるなど不安定である。現在、移動度と安定性と大型基板化を兼ね備えたマイクロクリスタルシリコン TFT などの開発がなされている⁸⁾。

(2) 蒸着マスク

蒸着マスクは大型化、そして高精細化、大画面化の製造に課題がある。これはマスク製造メーカーの努力に期待するところである。その回避方法としてレーザー転写法⁹⁾や白色＋カラーフィルター法などマスクレスの製造方法が検討されている。

(3) 大型基板用成膜

大型基板に極薄い有機膜を均一に成膜することは容易ではない。現在大型基板用の蒸発源はライン状蒸発源、面状蒸発源やパラレルショット蒸発源などが開発されている⁴⁾が、水平姿勢ではマスクと基板のたわみが大きくなる。マスクのたわみを考慮した縦型装置の開発も進んでおり、縦型の蒸発源も開発中である¹⁰⁾。

大型基板に対してはインクジェット法や印刷法も期待できる。高分子材料のみならず、低分子材料の溶液化の開発も進んでいる¹¹⁾。

(4) 透明カソード

トップエミッション用の透明カソード膜は、低温成膜で低抵抗な透明膜が必要で、更に大面積を、有機 EL にダメージを与えずに形成しなければならず、容易ではない。8 項で

述べたとおり現在 NEDO で開発に取り組んでいる 7)。

(5) 基板の平坦化と洗浄

有機 EL では ITO 膜上に直接有機層を形成していくため、ITO の表面状態、パーティクルの管理が重要であり、基板サイズが大きくなると平坦化や洗浄も容易ではない。我々は ITO 膜の平坦化技術を開発した 12) が、今後大型化への対応が必要になる。

(6) 封止

固体封止は液晶の封止技術が生かせるが、トップエミッション用の透明封止材や透明パシベーション膜の低ダメージ、大面積形成に課題がある 7)。また膜封止は成膜プロセスで形成するため大型化が比較的容易であり、かつ封止部材費を削減できる可能性があることから大型化・低コスト化としても有力である。

4.10 装置の方向性

図 8 に今後の装置の方向性を示す 13)。生産性を上げるためにインライン化になるだろう。特に照明用では高精細なアライメント工程が必要ないためインライン化がしやすい。また基板サイズの大型化には縦型装置化の方向である。基板のたわみや設置面積で有利である。

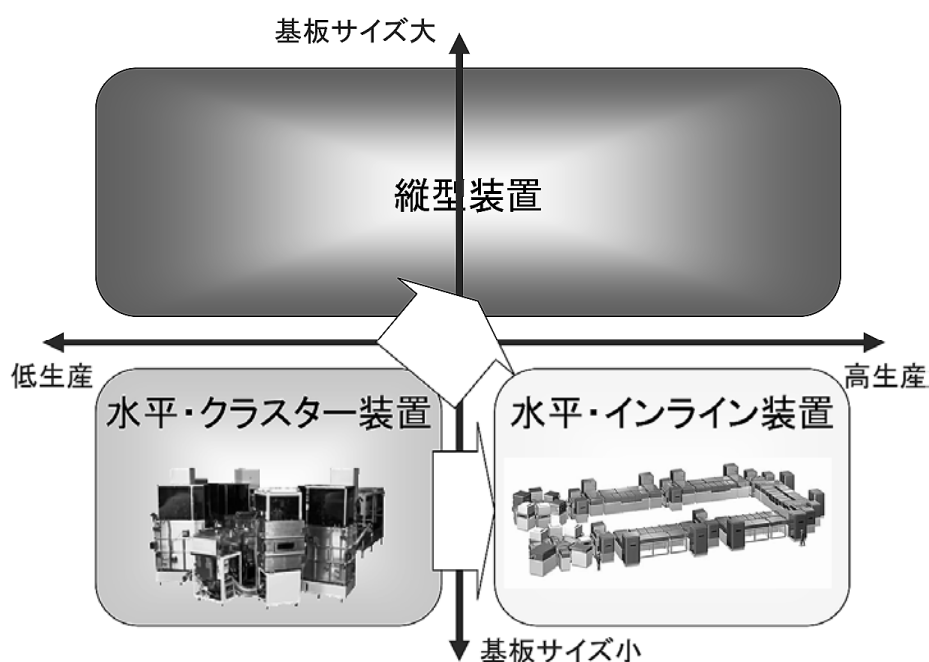


図 8 有機 EL の製造装置の方向性

4.11 今後の展望

モバイル用小型ディスプレイは高精細化が進む。試作段階ではあるが現在 308ppi が最高の精細度である¹⁴⁾。5年後には市場に投入されている可能性は高い。

テレビの生産はソニー株式会社のみであるが、サムソン SDI 社もテレビを試作しており、彼らのロードマップでは 2009 年にノート型パーソナルコンピューター (PC ; Personal Computer)、2010 年にテレビへの市場投入を予定している¹⁵⁾。大型化では、NEDO の「次世代大型有機 EL ディスプレイ基盤技術の開発」で 40 インチの大型テレビの製造技術を開発する。図 9 に内容を示すが、これは平成 24 年度までのプロジェクトである⁷⁾。またパナソニック株式会社が昨年 6 月に 2011 年に 37 インチの有機 EL テレビを生産することを発表した。したがって有機 EL テレビは 5 年後には数社から、また画面サイズも 20~30 インチクラスのものが発売される可能性はあるだろう。

照明は、三菱重工業株式会社らが 2008 年 5 月には照明用有機 EL パネルの事業性検証会社「Lumiotec」を設立し、2009 年春からサンプル製造・販売を開始することを発表し、具体的な動きがでてきた¹⁶⁾。5 年後には本格的な生産に入っていると考えられる。

有機 EL は製品化に至ったものの、本稿で述べた通り低コスト化や大型化など課題は多く、材料、デバイス、製造技術を含めまだ開発段階と言える。今後も製造装置メーカー、デバイスメーカー、材料メーカーが協力して開発することが必要である。

開発項目	中間目標(平成22年度)	最終目標(平成24年度)
低損傷大面積電極形成技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・対角10インチ以上にわたり電極原料粒子を均一に飛散させ、かつ、有機膜に損傷を与えないよう粒子の熱・運動エネルギーを下げる方法を見出す。 ・電極の可視光損失率およびシート抵抗値を低減させるための材料・構造の候補を絞り込み、上述の製造プロセスが適応可能であることを示す。 	右記の条件を満たす製造プロセスを確立する。尚、40インチ以上の製造に適応可能であるというスケールビリティを客観性のある技術データをもって示す。また、生産性が見込める技術であることを定量的に示す。
大面積透明封止技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・有機膜や電極に損傷を与えることなく対角10インチ以上にわたり封止膜を均質に製膜する方法を見出す。 ・高バリア性と高透明性材料を両立する材料を探索する。 ・封止膜の透明性、平滑性、屈折率等と光取出し効率との関係を明らかにする。 	<ul style="list-style-type: none"> ・封止膜の可視光損失率(波長400~700)が基板面内で10%以下。また面内ばらつきが±3%以内。 ・バリア性の経時安定性が常温・常圧下でダークスポットや発光領域減少等を生じさせないことが5万時間以上見込まれる。 ・上記性能を示す封止膜を用いた有機EL素子の発光特性が小型ディスプレイに適用されている技術を用いて作製した素子の発光効率と比較して90%以上。
大面積有機製膜技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・溶液プロセス・印刷製法・真空プロセスなどを検討し候補を絞り込む。 ・上記製法に対応するパターン化技術を検討し候補を絞り込む。 	<ul style="list-style-type: none"> ・有機膜の膜厚ばらつきを基板面内および各画素内において±3%以内。 ・上記製膜技術に対して適切なパターン化プロセスが追加的に適応可能。もしくは製膜技術に内包している。 ・パターン化プロセスは、サブピクセル幅が150μm以下。位置精度はサブピクセル幅の±10%以内。 ・上記性能を示す有機膜を用いた有機EL素子の発光特性が小型ディスプレイに適用されている技術を用いて作製した素子の発光効率と比較して90%以上。
大型ディスプレイ製造に向けた検証	<ul style="list-style-type: none"> ・上記の中間段階での成果を総合的に判断し、大型ディスプレイの省電力化に関わる最終目標達成に向けた研究開発手段と方向性を具体化する。 ・また開発した技術がG6サイズ以上の基板に適用可能であることを示すための検証方法を具体化する。 ・生産性に関する最終目標を定量的に設定する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・上記開発技術の成果とそれ以外の周辺技術・要素技術を踏まえ、フルHD40インチ有機ELディスプレイの消費電力が40W以下になることを示す。 ・G6サイズ以上の基板に適用可能であることを客観的な技術データをもって示す。 ・生産性は中間段階での設定値を達成する。

NEDOホームページ公開の『次世代大型有機ELディスプレイ基盤技術の開発(グリーンITプロジェクト)』の平成20年度実施計画を参考に著者がまとめた。

図 9 NEDO プロジェクトのロードマップ

参考文献

- 1) 徳丸：「有機 EL のデバイス物理・材料化学・デバイス応用」、シーエムシー出版、(2007) p3
- 2) C. W. Tang et al., Appl. Phys. Lett., 51, (1987) p913
- 3) I. Yagi et al, SID 07 DIGEST, (2007) p1753
- 4) 松本：「有機 EL のデバイス物理・材料化学・デバイス応用」、シーエムシー出版、(2007) p157
- 5) 飯田：「有機 EL のデバイス物理・材料化学・デバイス応用」、シーエムシー出版、(2007) p140
- 6) J. Kido et al., SID 03 Digest, (2003) p964
- 7) NEDO ホームページ参照 <http://www.nedo.go.jp/>
- 8) T. Arai et al., SID 07 Digest, (2007) p1370
- 9) T. Hirano et al., SID 07 Digest, (2007) p1592
- 10) 松本：月刊ディスプレイ (テクノタイムズ社)、Vol. 14, No. 9, p68 (2008)
- 11) W. F. Feehery, SID 07 Digest, (2007) p1834
- 12) 松本、氏原、光技術コンタクト、通巻 540 号、08Vol.46 (2008) p21
- 13) 松本、Semiconductor FPD World, 1 (2009) p72
- 14) S. Kim et al., SID 08 Digest, (2008)
- 15) S. Kim, FPD International 2008 Forum, G-21 テキスト (2008) p3-1
- 16) 三菱重工ホームページ参照 <http://www.mhi.co.jp/news/story/080528.html>

(松本栄一)

5 液晶基板用パターン製造装置

5.1 はじめに

フラットパネルディスプレイ（FPD ; Flat Panel Display）自体の大型化対応とパネルを多面取りすることによるコスト低減対応のために、マザーガラス基板の大型化が図られてきた。デジタルサイネージ用途の大型ディスプレイやスーパーハイビジョン対応の大型モニターが出現する可能性があり、ガラス基板の大型化は今後も進むものと思われる。一方、FPD 大型化と共に FPD 用製造装置は装置サイズと重量が増大し、部品加工設備、輸送条件、ユーザー先での設置方法などの対応手段が限界に近づいている。また FPD 製造装置の部品コストの上昇は装置メーカーの利益確保を難しくし、購入するパネルメーカーの投資額が大きくなり、共に厳しい局面になりつつある。

本報告ではフラットパネルのうち、液晶ディスプレイ（LCD ; Liquid Crystal Display）パネルのアレイ工程とカラーフィルター工程のパターン形成方法に関わる技術分野について、超大型基板に対応するための課題と方向性について述べる。

5.2 液晶基板用パターン製造装置の現状

5.2.1 パターンニング方法

LCD パネルは、図 1 に示すように薄膜トランジスタ（TFT ; Thin Film Transistor）アレイ基板とカラーフィルター（CF ; Color Filter）基板の間に液晶が封入されている。

TFT アレイパターンは一般にフォトリソグラフィ方式で製造されている。通常 4～5 回フォトリソグラフィの工程を繰り返し、ガラス基板上に TFT パターンが形成される。マスク露光方式では、感光物質であるフォトレジストをガラス基板に塗布し、原版となるマスクのパターンを紫外線を用いて転写する。現像・エッチング・フォトレジストの剥離工程を経てパターンが形成される。

カラーフィルターはブラックマトリックス（BM ; Black Matrix）と RGB（Red、Green、Blue）セルからなり、製造方法はマスク露光方式とインクジェット（IJ ; Ink Jet）方式の 2 種類がある。マスク露光方式では BM 用の樹脂レジストをガラス基板に塗布し、BM パターンのマスクを用いて露光し、現像・熱処理工程を経てパターンを形成する。さらに顔料レジストを塗布し、例えば Red のパターンを転写し現像・熱処理を行ない、同じ工程を

繰り返して Green、Blue のパターンを形成する。

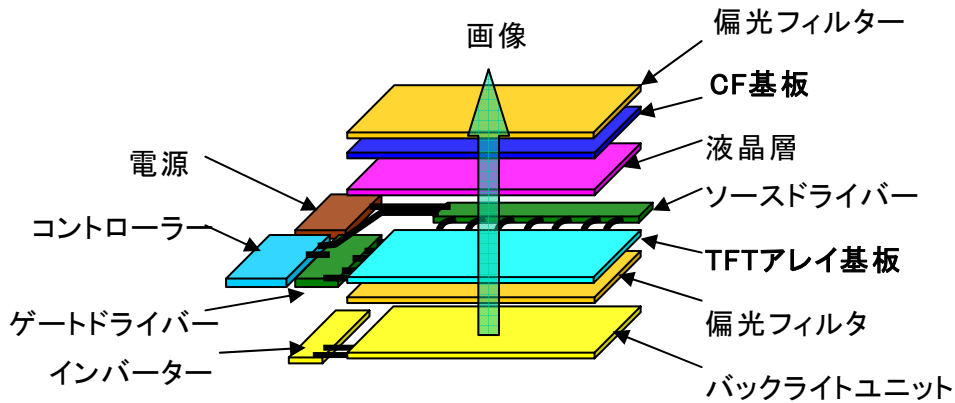


図 1 液晶パネルの構成

一方、インクジェット方式では樹脂 BM で枠体を形成し、拡散性を高める表面処理を施した上で RGB の硬化性インクを各セル内に打ち込み、熱処理を行い硬化させて CF 基板を製造する¹⁾。

5.2.2 製造装置の種類

図 2 は LCD パネルのパターン製造装置のうち、現在主に使われている装置の構成と特徴を示している。

	インクジェット方式	プロキシミティ露光方式	スキャン露光方式
構成			
長所	<ul style="list-style-type: none"> 高スループット 製造コストが安い 	<ul style="list-style-type: none"> 高スループット 装置価格が安い 	<ul style="list-style-type: none"> 高解像力 高スループット
短所	<ul style="list-style-type: none"> 高精細化の課題 インクの制約 	<ul style="list-style-type: none"> 解像力が低い 製造プロセスが多い 	<ul style="list-style-type: none"> マスク価格が高い 製造プロセスが多い

図 2 パターンニング方式と特徴

TFT アレイパターンはスキャン露光方式の装置が使われる。この方式はマスクとガラス基板の間に投影光学系があり、マスクの上部から紫外線を照射し、投影光学系を通してガラス基板上にマスクパターンが結像される。マスクはマスクステージに、ガラス基板は基板ステージに搭載され、マスクステージと基板ステージが同期スキャンすることにより、マスク上のパターンがすべてガラス基板上に転写される。TFT アレイパターンは 4~5 工程積層するため、露光工程毎にガラス基板とマスクの位置合わせが行なわれる。そのため、露光装置には光学的な計測手段を用いた位置合せ機能を備えている。

スキャン露光装置には投影光学系の種類により、ミラー投影光学系を用いたミラースキャン方式とレンズ投影光学系を複数組み合わせさせたレンズスキャン方式がある(図 3 参照)。

	ミラースキャン方式	レンズスキャン方式
構成		
長所	<ul style="list-style-type: none"> ・装置がシンプル ・一括露光のため繋ぎムラ無し ・露光照度が高い 	<ul style="list-style-type: none"> ・レンズ数増により露光幅拡大が可能 ⇒一度に露光できる面積が広く、 タクトタイムが早い

図 3 スキャン露光装置の種類

CF パターンの形成方法は、プロキシミティ露光方式と直接描画するインクジェット方式がある(図 2 参照)。プロキシミティ露光装置は、マスクとガラス基板の間隔を数 $10\mu\text{m}$ に近接した状態で露光を行なう方式である²⁾。この方式の露光装置は投影光学系を持たない為、解像性能は $10\mu\text{m}$ 程度であるが、装置構成が比較的簡単なため装置価格が安い。

インクジェット描画装置は、ガラス基板を一方向にスキャンしながら IJ ヘッドの無数のノズルから直接インクを吐出する。1つのサブピクセルに 10 発程度のインクが吐出される。インクの種類毎に IJ ヘッドが構成され、ガラス基板の横幅相当の長さを満たす数 10 の IJ ヘッドが横方向に配置されている³⁾。インクはインクタンクから一定の圧力で供給される。

5.2.3 パターン製造工程における要求

図 4 は、大型 LCD に対する市場の要求とそれに対応した LCD パネルへの要求およびパターン製造工程における要求を一覧にしたものである⁴⁾。

① 大画面一括処理

分割された露光範囲を繋ぎ合わせることなく、大型マスクを用いて一括で大画面をパターンニングすることである。繋ぎ目のない美しい画面を提供できる。

② 画面の均一性

表示ムラがない画面のことで、TFT アレイの電気特性の違いが局所的にあると表示ムラになりやすい。特に広視野角対応の液晶モード (VA ; Vertical Alignment や、IPS ; In-Plane Switching) で発生しやすい。また、CF では各画素の膜厚均一性が確保できないと表示ムラになる⁵⁾。表示ムラが発生しない描画装置が要求される。

③ 微細パターン対応

VA モード、IPS モードとも液晶分子の配列をそろえるために TFT 素子のほかに画素内に特殊なパターンを描画している。基本的には酸化インジウムスズ (ITO ; Indium Tin Oxide) の透明電極であるが、画素の開口率を悪化させている。パターンを微細化すれば LCD パネルの透過率が上がり、バックライトの消費電力を下げる可能性がある。パターンの微細化を図るには、積層される TFT 露光工程の重ね合わせ精度も重要な要因である。デザインルールに合った重ね合わせ精度が製造装置に要求される。

④ 薄厚基板対応

大型 LCD よりもモバイル用途の LCD でガラス基板の厚さが薄くなっている。現在標準の基板厚さは t0.7mm であるが、t0.63mm、t0.5mm が使われ始めている。ガラス基板の表面高さを計測する際、裏面の影響を受けにくい計測方法が必要である。

⑤ パネルの多面取り

生産コストを下げるためにガラス基板サイズを大きくして、一枚のガラスから生産できるパネル数を多くしてきた。現在稼働中の第 8 世代のガラス基板では、32 型ワイドが 15 面、42 型ワイドが 8 面取れる。さらに計画中の第 10 世代のガラス基板では 32 型ワイドが 24 面、42 型ワイドが 15 面取れ、効率的な生産が期待されている。

⑥ マスク数削減対応

1998 年当時 TFT アレイパターンは 5 工程の露光工程を繰り返して形成していた⁶⁾。2000 年以降ハーフトーンマスクまたはグレートーンマスク⁷⁾を露光工程で使うことにより、露光工程を 4 回で済ます技術が開発された。ハーフトーンまたはグレート

ン部分の露光量は通常約 1/2 のため、現像した後 1/2 の厚さのレジストが残る。露光装置に求められる性能は、露光範囲全域で解像性能・照度分布が均一でなければならない。最近では、3 マスク工程が提案されている⁸⁾。

⑦ 更なるコストダウン

ガラス基板の大型化に伴って、露光装置で使うマスクサイズが大きくなり、マスクの価格が問題視されている。第 10 世代のマスクは 1 枚 1 億円以上とされ、高額なマスクを使わないパターン製造方式の開発が要求されている。安価な小型マスクを使った露光方式やマスクレス露光方式、あるいは IJ 法による直接描画で TFT パターンを形成する方法が提案されている⁵⁾。

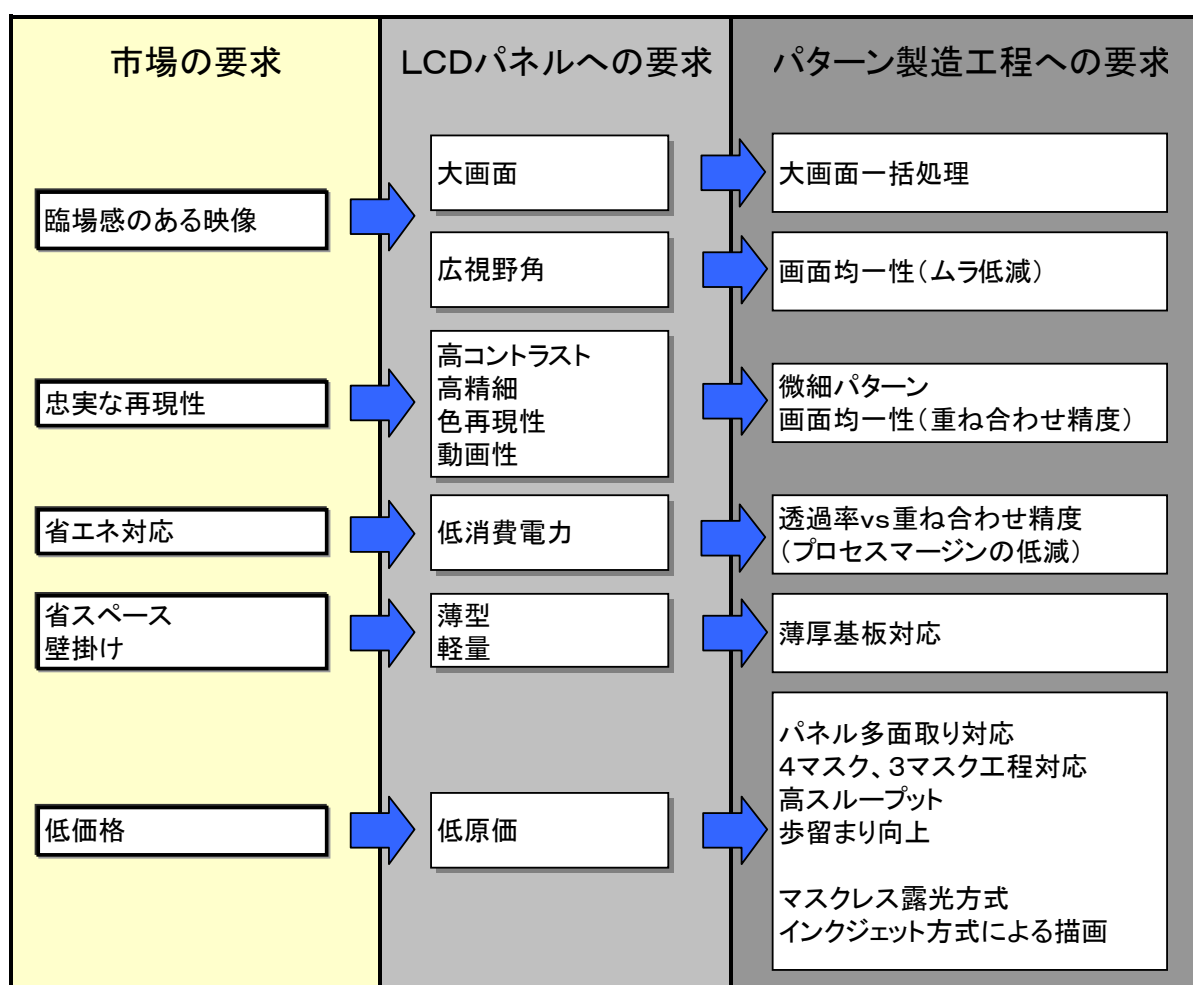


図 4 大型 LCD パネルへの要求とパターン製造工程への要求

5.3 超大型基板対応の技術課題

ガラス基板がさらに大型化する場合に、パターン製造装置が対応しなければいけない技術テーマを装置ごとに整理したのが表 1 である。表 1 に従って以下に詳細を説明する。

表 1 大型化対応の技術テーマ

描画方式		描画工程への要求	装置の技術テーマ	挑戦課題
マスク転写露光	スキャン露光	①画面内均一性	<ul style="list-style-type: none"> ・ムラが発生しにくい光学系 ・解像性能の均一性 ・基板チャックの反射率低減 ・重ね合わせ精度の向上 	大型光学部品の加工設備 投影光学系のコスト低減 マスク価格の低減
		②微細パターン	<ul style="list-style-type: none"> ・投影光学系の開口数拡大 ・重ね合わせ精度の向上 	
		③パネル多面取り	<ul style="list-style-type: none"> ・大型基板ステージ 	
		④高スループット	<ul style="list-style-type: none"> ・ステージの高速化 ・露光の高照度化 	
		⑤大画面一括処理	<ul style="list-style-type: none"> ・大型マスク ・大型投影光学系 	
		⑥マスク数の削減対応	<ul style="list-style-type: none"> ・解像性能の安定性 	
	プロキシミティ	①画面内均一性	<ul style="list-style-type: none"> ・ギャップ量の均一性 ・照度のユニフォミティ ・基板チャックの反射率低減 	マスク価格の低減
		②パネル多面取り	<ul style="list-style-type: none"> ・大型ステップステージ 	
		③高スループット	<ul style="list-style-type: none"> ・ステージの高速化 ・露光の高照度化 ・ダブルステージ 	
		④大画面一括処理	<ul style="list-style-type: none"> ・大型マスク ・大型照明光学系 	
直接描画	インジェクト	①画面内均一性	<ul style="list-style-type: none"> ・着弾精度の向上 ・吐出量の安定化 	金属インクの開発 熱処理温度の低温化 IJヘッドの耐久性・安定性
		②微細パターン	<ul style="list-style-type: none"> ・吐出量の微量化 	
		③パネル多面取り	<ul style="list-style-type: none"> ・大型基板ステージ 	
		④高スループット	<ul style="list-style-type: none"> ・ヘッドのマルチ配置 ・ヘッドの高速吐出 	
ダイレクト露光	二次元表示素子	①画面内均一性	<ul style="list-style-type: none"> ・露光ユニット間の照度管理 	高速描画システムの開発 DMD素子の耐久性
		②微細パターン	<ul style="list-style-type: none"> ・ビーム径縮小 	
		③パネル多面取り	<ul style="list-style-type: none"> ・大型基板ステージ 	
		④高スループット	<ul style="list-style-type: none"> ・DMDの高速駆動 ・露光ユニットのマルチ配置 ・高速データ処理技術 ・ビームの高照度化 	

5.3.1 スキャン露光装置

① 画面内均一性

投影光学系が大きくなると光学部品の自重変形や、構造部品のひずみが光学部品に伝わり光学部品が変形しやすくなる。光学部品の変形は局所的な収差になり、解像不良や面内ひずみが表示ムラの原因になる。光学部品の自重変形を考慮した加工方法や構造体の変形が光学部品に伝わらない保持方法を検討しなければならない。またガラス基板を保持するチャックの表面反射率の僅かな差が、露光時にチャック面反射の差となって表示ムラになる。チャック自体の反射率を低減すると共にチャック全体の反射

率の管理が必要である。さらにパネル面内の重ね合わせずれが表示ムラになる場合がある。倍率補正等の自動補正機能で補正しきれない成分のディストーションを低減する必要がある。

② 微細パターン

将来のスーパーハイビジョン放送（画素数が 4k×8k）に対応するテレビは、現在のフルハイビジョンテレビの 16 倍の画素数になる（図 6 参照）。大型テレビにおいてもパターンが微細化する可能性がある。パターンの微細化に対応するには、投影光学系の開口数（NA）を現在よりも大きくした設計値にする必要がある。

③ パネル多面取り対応

超大型ガラス基板に対応して基板ステージの構成部品は大きくなり、これまで使ってきた機械材料では変形量が大きくて成り立たない。スキャン露光装置では基板ステージ自体が高速で移動・停止を繰り返すため、軽量で剛性が高くなければならない。比重が小さく剛性が高い材料を材料メーカーおよび加工メーカーと一緒に開発していく必要がある。

④ 高スループット

大型ステージが高速で移動・停止するために、加減速時に発生する反力を抑える技術が必要である。また、露光時の照度を上げるために光源の高出力化を図ると、高い露光エネルギーのため投影光学系が温度上昇し光学性能が変化する。投影光学系の温度上昇を抑える手段と、光学性能をモニターする機能が必要である。

⑤ 大画面一括処理

大型マスクに対応してマスクステージが大型化する。基板ステージと同様に剛性を確保しながら軽量化を達成しなければならない。また露光幅が拡大するために投影光学系が大型化する。画面内均一性で記述したように、光学ユニットの保持方法を改善していく必要がある。

⑥ マスク数削減対応

投影光学系の露光領域内の解像力ムラ、ステージがスキャンするときの速度ムラを管理して、グレートンマスクを用いたときの光学強度が一定になるように評価方法の検討が必要である。

5.3.2 プロキシミティ露光装置

現在 CF のパターンニング方法の主流は、プロキシミティ露光装置を使った露光方式で

ある。超大型ガラス基板の対応は、マスクの大型化、基板ステージの大型化、露光照明光源の出力アップが必要である。但しパターンの微細化の対応は、光学原理的にできない。

① 画面内均一性

マスクの自重たわみを補正する機能³⁾、およびマスクとガラス基板の間隔を均一に設定する機能は、現状の機構を大型化対応する必要がある。また、ガラス基板を保持する基板チャックの反射率と反射率ムラの低減が必要である。

② パネル多面取り対応

超大型ガラス基板に対応するため大型のステップステージの開発が必要である。

③ 高スループット

マスクのギャップ設定機構の高速化、基板ステージの高速化が必要である。また、露光光の高照度化を図るため光源の高出力化が必要になる。

④ 大画面一括処理

マスクステージ部分は、ガラス基板を交換する際上方に退避し、露光時にはガラス基板と数 10 μm のギャップを確保する。大型マスクに対応するためには、マスク保持部と駆動部の剛性確保が必要である。また、広い範囲を一括で照明するために照度ムラを抑えた照明装置の開発が必要である。

5.3.3 インクジェット描画装置

インクジェット描画装置は、CF 製造に用いられている。マスクを使わずフォトリソグラフィ工程の装置を使わない為、極めて効率的な製造方法である。将来的に金属インクが開発されれば、TFT アレイパターンを直接描画する可能性がある⁹⁾。

① 画面内均一性

インクはインクヘッドのノズルから吐出されるが、インクの着弾精度と吐出量のムラが表示性能に影響を与える。吐出されたインクの着弾位置がずれて所定のピクセルから外れる、あるいはインクの不吐出は濃度ムラになる¹⁾。着弾精度の向上、吐出量の安定化に向けた改善が重要である。

② 微細パターン

将来の TFT パターンの描画にむけて、インクの吐出量の微量化（ドット径）とドット配置の制御が重要な技術である⁹⁾。

③ パネル多面取り

超大型ガラス基板に対応するため大型のスキュンステージの開発が必要である。

④ 高スループット

基板の横幅方向を一括で描画できるように複数の IJ ヘッドをマルチ配置する。基板上のパターンに合わせて吐出するノズルを制御する。スループットを上げるためには、安定した高速吐出の技術が必要である。

5.3.4 ダイレクト露光

マスクを使わないで細いビーム状の光をレジストに照射する方法で、二次元表示素子 (DMD ; Digital Micromirror Device) を用いた方式が提案されている。図 5 に概略構成を示す^{10,11)}。大画面对応するには DMD を搭載した露光ユニットをマルチ配置して、同時露光するシステムの開発が必要である。

① 画面内均一性

多重露光による露光量の制御。DMD を搭載した露光ユニット間の照度管理が重要である。

② 微細パターン

露光ビーム径の小径化が必要である。

③ パネル多面取り

超大型ガラス基板に対応するため大型スキュンステージが必要である。

④ 高スループット

DMD 自体の高速駆動の対応、露光ユニットのマルチ配置、ビーム光の照度アップ、高速データ処理技術が必要である。

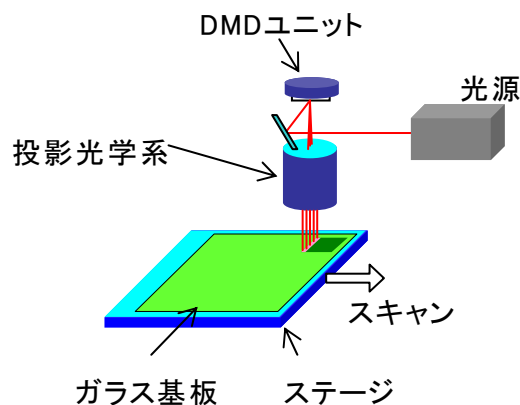


図 5 ダイレクト露光機

5.4 今後の展望

過去のガラス基板世代の変遷スピードと同様にガラス基板サイズが大型化し、100型サイズのLCDが2018年に出現すると仮定して、LCDパターン製造方式のロードマップをまとめた（図6参照）。

大型LCDを一括露光できることを前提にすると、マスクサイズは2世代毎に大きくなり、マスクの価格は2015年頃には現状の5.5倍になると予測される。高額なマスクを使わないダイレクト露光方式、またはIJ描画方式が超大型LCDのパターン製造方式になると考えられる。また、スーパーハイビジョンの実験放送にあわせて画素の微細化も進むと思われる。LCDパターンの微細化はマスク露光方式が引き続き使われると考えられる。

今後もコスト的に有利な製造方法が提案されていくであろう。

分野	分野要素	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
大型LCD	サイズ	～65型			～72型				～90型				～100型		
	走査線数	1080本 FHD(1k×2k)				2160本 QFHD(2k×4k)				4320本 SHD(4k×8k)					
	ピクセルサイズ デザインルール	600μm(FHD 52型) 3.0μm			300μm(QFHD 52型) <3μm				150μm(SHD 52型) <2.5μm						
	消費電力	現状比1			現状比1/2				現状比1/3						
	ガラス基板	世代	Gen.8		Gen.10	Gen.11			Gen.12	Gen.13			Gen.14		
長辺寸法	2.5m		3.0m	3.3m			3.8m	4.2m			4.8m				
量産パネルサイズ	52型×6面		65型×6面	72型×6面			82型×6面	92型×6面			106型×6面				
フォトマスク	サイズ	1200×1400×13mm			1600×1800×13mm				2000×2250×20mm				2250×2550×20mm		
	価格	現状比1			現状比2.5				現状比5.5				現状比7.5		
アレイ・ パターン形	マスク露光方式	■													
	ダイレクト露光方式								■						
	IJ描画方式											■			
CF・ パターン形	マスク露光方式	■													
	IJ描画方式	■													

図6 LCDパターン製造方式のロードマップ

参考文献／引用文献

- 1) 赤平 誠 「インクジェット法による光学カラーフィルターへの応用」 カラーフィルタ最新技術動向、情報機構（2005）
- 2) <http://www.hitachi-hitec.com/fpd-hd/le9300s.html>
- 3) <http://www.epson.jp/technology/mirai/inkjet/>

- 4) <http://electronics.toppan.co.jp/cf/index.html>
- 5) <http://techon.nikkeibp.co.jp/article/NEWS/20070522/132901/>
- 6) http://www.lgdisplay.com/homeContain/jsp/eng/tech/tech301_mask_j_e.jsp
- 7) http://www.sk-el.co.jp/products/photomask/feature2_2.html
- 8) 「潮目を迎えた FPD 技術「SID 2008」で見た 2016 年の姿」 日経マイクロデバイス 日経 BP 社 (7 月 2008)
- 9) 菅沼克明 「インクジェット配線技術とその応用ー現状と将来展望ー」 インクジェット技術とその応用徹底検証講演予稿集 電子ジャーナル (2006)
- 10) 入江 明 「微細化に対応するダイレクトイメージング技術の最新動向」 PWB 微細パターン形成技術徹底解説講演予稿集 電子ジャーナル (2008)
- 11) <http://www.hitachi-via.co.jp/products/exposure.html>

(七五三木 浩一)

6 大型ガラス基板の分断技術

6.1 はじめに

最近の薄型テレビや携帯電話など、あらゆるところにフラットパネルディスプレイ（FPD ; Flat Panel Display）が欠かせないものとなってきた。FPD サイズの大画面化や生産効率向上のために、扱われるガラス基板の大型化が進んでいる。特に大型テレビの市場では、第 10 世代と呼ばれる生産ラインの稼働に向け、急ピッチで準備が進められている。本稿では、液晶向けセル基板の分断技術を中心に、大型化する液晶向けガラス基板の分断技術について解説する。

6.2 スクライビングホイールによるガラスの割断

6.2.1 ガラスの割断工程

ガラスを切る手法は火割り、割断、研削切断等¹⁾に分類することができる。FPD ガラス基板の分断技術としては割断が用いられている。割断とはガラスの深さ方向に縦割れを作り、この割れを伸ばすように応力をかけて割る一連の工程である。つまり、割断は、筋をつける「スクライブ」工程とスクライブ線に沿って裏側から押し割る「ブレイク」工程からなる。ガラスの厚さ方向に縦割れを生成するため古くから使われてきた工具は、天然ダイヤモンドを使ったガラス切りであった。現在、ガラス切りの主流になっているのは、算盤珠形状をしたスクライビングホイールと呼ばれる工具である。スクライビングホイールを用いたガラス板の加工も「スクライブ」「ブレイク」の 2 つの工程が必要になる。

液晶パネルのように 2 枚のガラス板をスクライビングホイールで加工する場合は、「スクライブ」－「反転」－「ブレイク」－「スクライブ」－「反転」－「ブレイク」の流れで加工（以下 SBSB 方式と呼ぶ）を行う。この方法で良好な加工が出来ず分断不良が生じた場合、刃先工具自身に問題があるのか、スクライブ条件やブレイク条件などの分断プロセスに問題があるのかを確認する必要がある。よって、分断工程を安定させるためには、多くの要素を制御することが必要となっていた。このような問題を解決するにはブレイク工程そのものを排除し、分断工程が簡素化されることが要求された。

1996 年頃、当時の開発チームはブレイクレスが可能なガラス切りの研究に鋭意取り組んでいた。ブレイクレスが可能になれば分断工程で使用するブレイク機が不要となり、省ス

ペース化が実現できる。また、分断プロセスも簡素化できる利点もある。従来の概念にとられることなく、試行錯誤している中でガラス板の厚みに対して 80%以上の垂直クラックを発生させる刃先を開発することが出来た。ブレークス・ガラス切りの刃先として製品名を Penetration（浸透する）から Penett®（ペネット）と決定し、現在では日本・米国・韓国・中国・台湾・欧州各国などで特許や商標取得に至っている²⁾。図 1 に従来刃先、図 2 に Penett®の写真を示す。

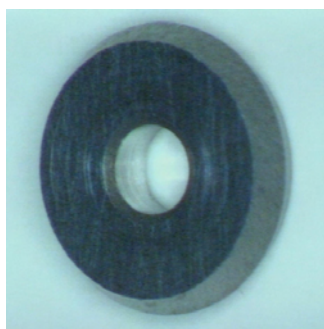


図 1 ガラス板を切る刃先（従来品）

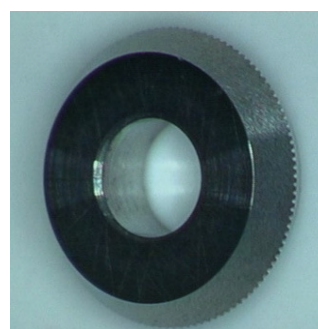


図 2 Penett®

6.2.2 Penett®の特徴

ガラスの割断において垂直クラックを深くすればするほどブレークが容易になることは想像に難くない。ガラスの割断ではスクライブによりチップングや水平クラックを発生させないことが大前提である。スクライブにより得られる垂直クラックの深さはガラスの厚さの 10~15%となる刃先荷重を選定することが、水平クラックの発達を抑制しつつ良好な分断が行える最適な作業領域として経験的に知られてきた。Penett®は従来のスクライビングホイール（以下、従来刃先）の外周部に適切なピッチ・深さで溝を設けることで突起を形成し、刃先の回転運動に伴う連続点応力付与効果でガラスの厚みに対して 80%以上の垂直クラックを発生させることが可能である³⁾。図 3 に従来刃先と Penett®で得られる垂直クラックを示す。

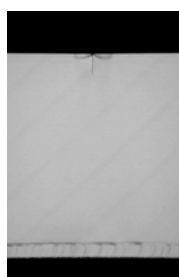


図 3 従来刃先で得られる垂直クラック（左図）と Penett®での垂直クラック（右図）

Penett®で得られる垂直クラックは、基板の厚みに対して 80%を超えている。

6.2.3 Penett®によるガラス分断システム

図4は従来行われてきた方式の貼り合わせガラスを切断する典型的な SBSB 方法である。

ここで、スクライブにより得られる垂直クラックの深さは、ガラスの厚さの 10~15%となる刃先荷重を選定することが、水平クラックの発達を抑制しつつ良好な分断が行える最適な作業領域として経験的に知られてきた。

図5は Penett®によりガラスの厚さ 80%以上に達する深い垂直クラックを生成するブレイクレスによる分断工程を示す。ここで垂直クラックの深さは、従来からのスクライブの常識を越え、分断は必要でなく単に分離するというガラス切断に新しい概念が生まれた。

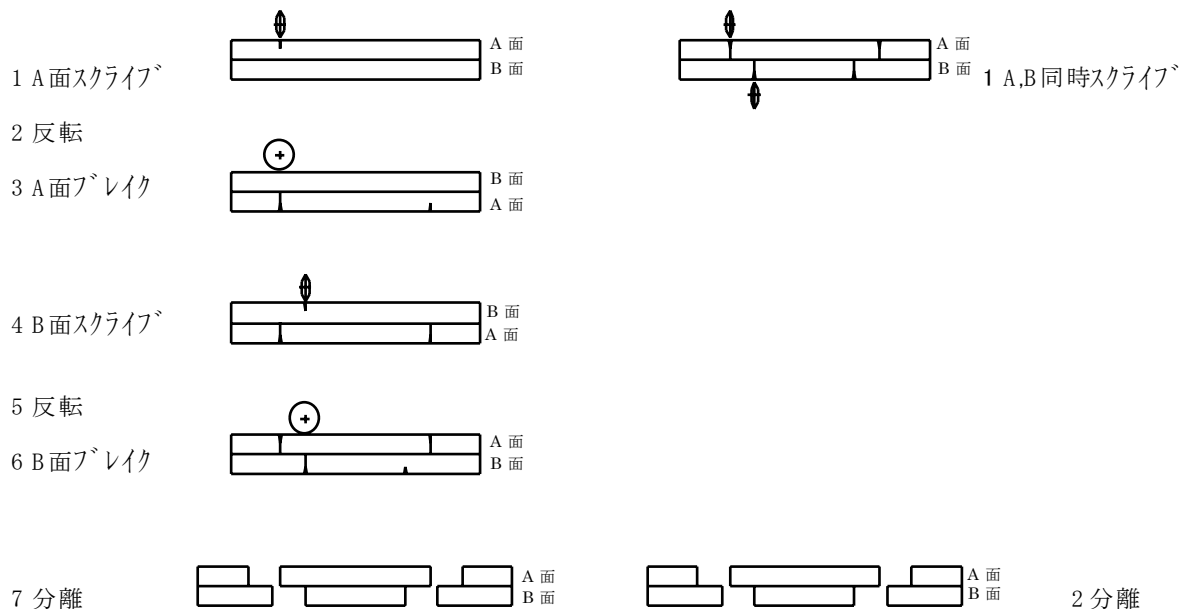


図4 従来刃先による SBSB 方式

図5 Penett®によるブレイクレス方式

Penett®を開発してから電機メーカー各社より問い合わせが急激に増えさまざまな分断依頼が来るようになった。しかし、開発当初の液晶パネルは TN (Twisted Nematic)、STN (Super Twisted Nematic) が主流で TFT (Thin Film Transistor) の技術が出始めた頃でもあり従来刃先で確立していた分断システムから Penett®による分断システムへの切り替えはすぐには広まることはなかった。そうした中、TV、パーソナルコンピューター (PC ; Personal Computer) モニター用途でブラウン管から液晶パネル化も進み、携帯電話やカーナビゲーションなどの小型モバイル向けの液晶パネルの一般家庭への普及が加速するこ

とになる。TV、PC モニター用のガラス板が 1,100×1,250mm（第 5 世代）まで大型化が進むとガラス板を反転させてスクライブするという従来刃先での分断技術では限界が出てきた。さらに、第 5 世代の液晶パネルでは液晶の注入に敵下注入法（ODF；One Drop Filling）が採用されたのに加え、ガラス板を 2 枚貼り合わせるシール剤を使う工法の変化に伴うガラスの分断特性の変化もあり、ガラス板にブレイク等のストレスを加えて分離することが出来なくなった。そのためブレイク工程の際に基板を反転することなく 2 枚のガラス板が貼り合わされた基板を Penett®でスクライブすることで、基板の分離が可能となる装置を開発できた（図 6）。今では、TV、PC モニター用で第 5 世代以上の液晶分断システムとしてデファクトスタンダードになりつつある。



図 6 上下分断ライン MPL シリーズ

一方携帯端末等のモバイル用のガラス板は薄板化による軽量化が求められ、同時にガラス板を分断した後のパネル割れ強度の向上が求められた。ガラス板の薄板化の手法は、各社様々な方法で行っているが、分断工程にはすでに薄板化されたガラス板が流品される。分断工程において薄板化されたガラス板を従来刃先の分断プロセスで流品した場合、ブレイクするまでの搬送工程やブレイクする際にガラス板の割れ発生が注目されるようになり、ブレイクレスが可能な Penett®による分断システムへの期待も高まった。

薄板化されたガラス板をスクライブする際、刃先に加える荷重が高いと同じように割れ発生の原因となり、低荷重でのスクライブと分断後の割れ強度を向上するために Penett®の改良も同時に行う必要があった。ガラス板厚みに対して適切な Penett®の開発を同時に進めた。

ガラス板厚み 0.4mm 以下に対し、スクライブ時の割れ発生等の問題を抑制でき、パネル割れ強度も向上できる MicroPenett®を開発した。現在は更なるパネル割れ強度が求められ改良版として APIO®の開発まで至っている（図 7）。

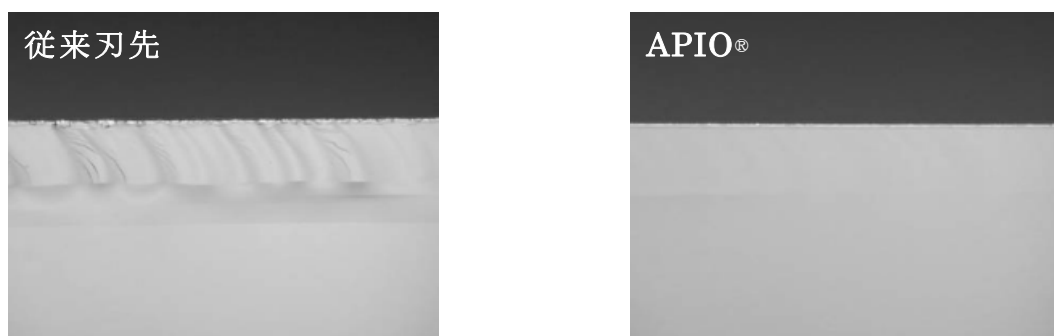


図 7 従来刃先と APIO®によるガラス板の断面比較

6.3 CO₂レーザーによる熱応力を利用した亀裂進展

6.3.1 レーザーによるガラスの加工

刃先による機械的な加工法に対して、レーザーを用いてスクライブと分断を行う加工法がある。FPDのような薄板ガラス基板に対する加工では、パーティクルの生成と機械的な接触を低減するために、レーザーを用いた加工方法が有利である。レーザーを用いた加工法として、パルスレーザーを集光照射しガラスを熔融、蒸発させて加工を行うレーザーアブレーション加工とCO₂レーザーを熱源とした熱応力による亀裂進展加工が存在する。

レーザーアブレーションによるガラスの加工法は、様々な分野で実用化されている。しかし、レーザーアブレーションでは、基板表面の温度がガラスの沸点より高い温度になり、熱影響が基板表面に残存しマイクロクラックが生成する。また、蒸発したガラスが酸化物等の汚染物質となり基板表面に付着することが避けられない。以上の理由により、通常のレーザーアブレーションによるガラス加工は、FPD用ガラス基板の切断には適していない。しかし、近年ではフェムト秒レーザーに代表される短パルスレーザーによる高品位加工が実用化され、レーザーアブレーションにおける熱影響の低減とマイクロクラック生成の回避が実現している。フェムト秒レーザーを用いた加工法は、レーザー装置の低価格化が進めばFPD分野における加工にも応用が進むと考えられる。

6.3.2 CO₂レーザーによる亀裂進展

CO₂レーザーを熱源とした熱応力による亀裂進展法(以下、レーザースクライブ法)は、ガラスの融点以下の温度で加工を行うのでマイクロクラックの生成を抑えることができ、同時に加工面からのパーティクル生成が抑制されるので、クリーンな切断工程が達成でき

る。現在、ガラス基板分断後の端面強度における優位性と分断工程の確立が進んでいることにより、実用化が検討され始めている。

レーザースクライブ法はガラス表面に CO₂ レーザーを照射し、その直後を急冷することにより、ガラス基板表面に引張応力を発生させスクライブ線を形成する加工法である。図 8 にレーザースクライブ法による加工概要を示す。実際の加工は、以下の手順で行われる。

- 1) ガラス端面にスクライブを開始するための初期亀裂を生成する。
- 2) ガラス端面から分断予定線に沿ってレーザーを照射しガラス表面を加熱する。
- 3) 加熱直後を冷却流体により冷却する。
- 4) 基板を取り出しブレイクを行う。

図 9(Section a-a)に示すように、分断予定線に沿って楕円状にレーザーを照射することにより、ガラス表面を加熱し圧縮応力を生成する。この直後を急冷すると、(Section b-b)に示すように、ガラス表面が急激に収縮することにより、大きな引張応力を発生する。この引張応力が初期亀裂もしくは初期亀裂から続いてきたスクライブ線の先端に集中し、ガラス表面から垂直方向に亀裂が入り、スクライブ線を形成する。この時、レーザー加熱によるガラスの損傷を回避するために、ガラス表面は熔融温度より低温で加工される。

図 10 にレーザースクライブによる分断面を示す。図中のスクライブ線は鏡面に近い亀裂面で加工されており、ガラス断面にマイクロクラック等の生成は見られない。このように美しい加工断面により、分断後のガラス端面強度はこれまでの加工法に比べて数倍高く保つことができる。また、この時のガラス分断線の真直度は $\pm 40\mu\text{m}$ 程度となる。

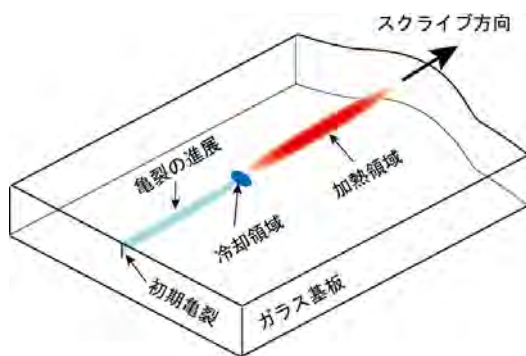


図 8 レーザースクライブによる加工概要

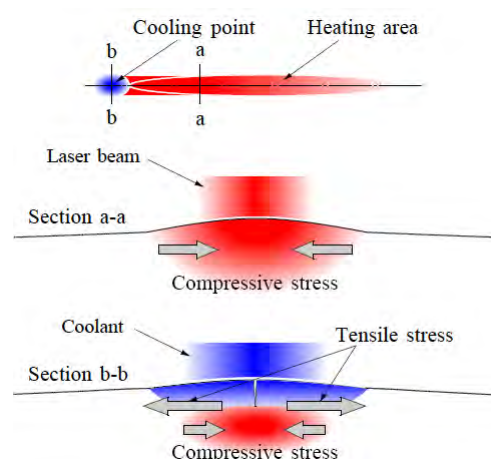


図 9 レーザースクライブ原理



図 10 レーザースクライブで加工されたガラスの分断面

6.3.3 レーザースクライブ法の高速度化への取り組み

大型ガラス基板の分断における加工速度の向上によるタクト短縮は、最重要課題の 1 つである。固体における亀裂の進展速度は、固体内の音速（弾性波の伝播速度）の 0.38 倍以下となることが理論的に指摘されている。もちろん、音速の 0.38 倍で亀裂伝搬が可能であるということではないが、現在の加工速度と比較しても十分に大きな値である。言い換えると、ガラスが割れる熱応力をガラス基板表面に瞬時に形成することが出来れば、加工速度が飛躍的に向上する可能性がある。

上記、理論的な予測に基づきガラスの高速分断に対する研究開発を進めている。現在、研究用レーザースクライブ装置で、スクライブ速度 1500 mm/s の加工を達成している。一般的な高速分断スクライブ装置が 1000 mm/s 程度の加工を行っていることから、高速レーザースクライブは十分な有意性を持っている。また、ガラス基板と直接接触することはないので、一般的な機械装置における走査速度の限界値（3000～5000 mm/s）の加工検証も可能である。加熱ビームの最適化や冷却条件の見直しなど、いくつかの課題が指摘されるが非常に魅力的な開発課題である。

6.4 今後の展望

液晶用のガラス基板は 2 極分化を起こしている。すなわち、テレビやモニターにおけるマザーガラスの大型化と、携帯電話などのモバイル機器用ガラスにおける薄板化である。表 1 ならびに図 11 にテレビやモニター用等に使われる液晶用マザーガラスの大きさの変遷を示す。第 5 世代マザーガラスが 2002 年に立ち上がるまでは空セルを分断したあと液晶を注入してきたが、第 5 世代マザーガラス以降、液晶パネルの生産でもっともタクトタ

イムが長かった液晶の注入工程に ODF 法が導入され、液晶を注入した後セルガラスを切断することになった。

マザーガラスが大きくなるとブレイクをするためのガラスの反転は困難を伴う上に、液晶が注入されたガラスを反転すると貼り合わせた2枚のガラスの間のギャップむらが生じるという問題も出てきた。液晶パネルの生産では、もともとブレイク工程での歩留まり向上を要請されてきたところへ、これらの新しい問題への対応も迫られることになった。

これらの諸問題を解決に導いたのがブレイク工程を不要とする「高浸透刃先 - Penett® -」の開発であった。今後、更なる基板の大型化についても、Penett®を用いた分断工程が採用されて行くことが想定される。一方、分断速度や歩留まりの向上、ガラス端面強度の保持など、ガラス基板の大型化に伴って分断工程に対する要求は増加の一途である。MicroPenett®や APIO®など新しいスクライブ工具の開発を進めることにより、新しい分断工程の提案を続けていくことが要求されている。

また、図 11 に見られるように、2000 年以降、基板サイズの大型化は衰えることなく進んできている。世界的な経済状況の変化や FPD 市場の成熟に伴って、今後は異なった展開を見せる可能性もはらんでいると考えられるが、分断工程に対する生産性の向上要求は留まるところを知らない。よって、レーザースクライブ法など全く新しい分断手法を適応することにより、加工速度と端面強度の両方を飛躍的に向上させる分断工程が必要とされることもそう遠くないと考えられる。

表 1 液晶用マザーガラスの大きさの変遷とパネルの取り出し数

LCD	LCDサイズ [°]	ガラス基板の大きさ (mm)									
		1G	2G	3G	4G	5G	6G	7G	8G	10G	
アスペクト比		320×400	370×470	550×650	680×880	1100×1250	1500×1800	1870×2200	2160×2460	2850×3050	
最も早い稼働開始年		1992	1994/09	1995/12	2000/05	2002/05	2004/01	2005/04	2006/10	2010/03	
対第1世代面積比		1	1.4	2.8	4.7	10.7	21.1	32.1	41.5	67.9	
取り出し枚数	標準	14		4	6	16					
		15		4	6	15					
		17		2	4	12					
	ワイド	24				2	6	12		24	
		32				1	2	8	12	15	
		36~37				1	2	6	8		
		40				1	2	3	8		15
		42				1	2	3	8		
		46				0	2	3		8	
		50								6	8
60									6		
出典：Morgan Stanley Research, 2002/6 Electronic Times, January 2002							Nikkei Microdevice, 2005/01/12 Sharp News 070731				

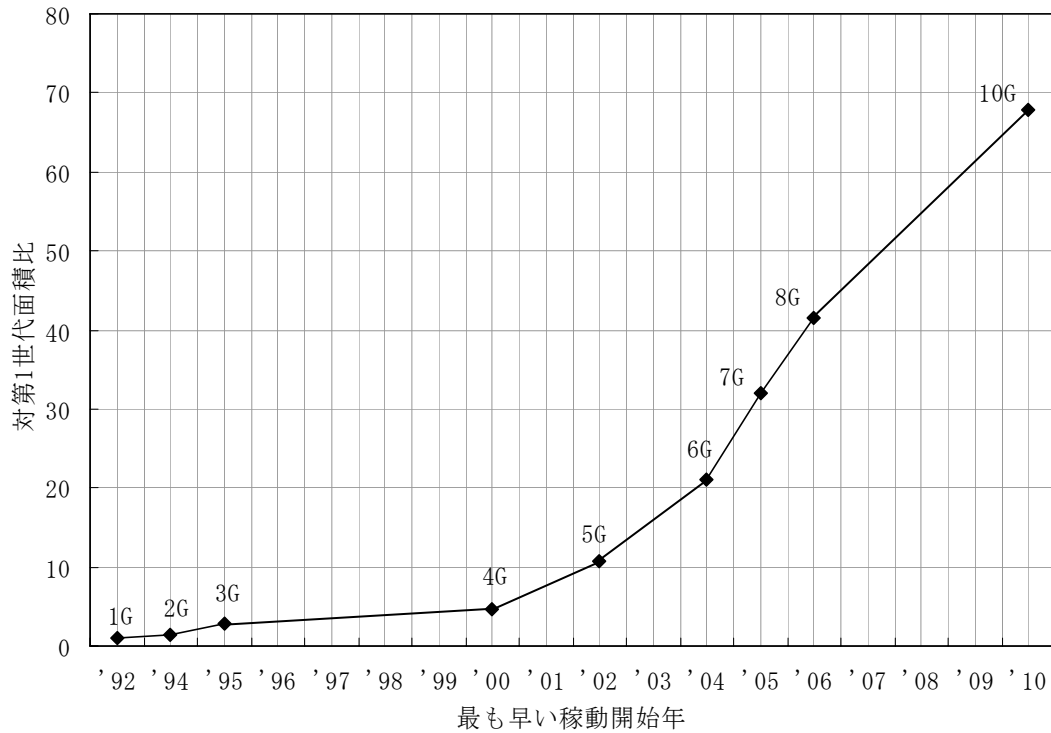


図 11 マザーガラスサイズの変遷

参考文献

- 1) ガラス施工法（上巻）、昭和 53 年 12 月 10 日、第 5 版、全国板硝子昇降協同組合連合会・職業訓練法事業委員会編、p.49
- 2) 三星ダイヤモンド工業株式会社：特許第 3074143
- 3) 富森 紘：ダイヤモンド技術総覧、ダイヤモンド工業協会編、エヌジーティー（2007）、p.527

（清水政二）

7 洗浄装置

7.1 はじめに

薄型テレビ市場の急速な拡大に伴い、液晶パネル、プラズマディスプレイをはじめとするフラットパネルディスプレイ (FPD ; Flat Panel Display) は、大画面化が加速している。大画面化は、①基板となるマザーガラスの大型化が可能となったこと、②生産技術が進歩したこと (生産性の改善、製造コストの低減) が大きな要因である。処理基板面積の拡大は、パネル製造コストの大幅な低下をもたらし、結果として、消費者の購買意欲を高め、市場が急拡大させてきた。急速な市場拡大を期待したパネルメーカーなどの旺盛な設備投資によって、液晶ディスプレイ (LCD ; Liquid Crystal Display) 製品の価格は年率 20% の勢いで低下してきた。その結果過去 10 年間に於いて製品の面積単価は約 1/10 にもなった。新興国を含む世界的な競争激化や有機 EL ディスプレイなど新しい高付加価値型ディスプレイの出現などの要因とも相まって価格低下のトレンドは続くと考えられる。

FPD は省エネ型のディスプレイといわれながらも、巨大化する製造工場において膨大なエネルギーを消費しており、その限界とターニングポイントに来ている。そしてこの産業の将来について最も重要なテーマが環境の問題である。エネルギー使用量、CO₂ 排出量の削減、水使用量の削減を考慮した生産技術の構築が必要となる。製造工程の環境負荷低減は、即ち製造工程の全体最適化であり、製造コストの低減にも直結する。そのためにはパネルメーカー、装置メーカー、部材メーカー相互の連携も重要である。

LCD の製造工程において、洗浄工程はパネル製造の歩留まり、製品の品質・性能・コストに直結する重要な工程であるため、素ガラス (薄膜トランジスタ TFT (Thin Film Transistor) アレイ形成前のガラス) 基板の加工に始まり、TFT アレイ形成、カラーフィルター製造、LCD 組み立てなど、それぞれの工程ごとで多数行われ、また多くのエネルギーを要している。このため常に環境負荷低減とコスト低減が求められている。今後その要求はさらに強まると考えられる。

本稿では FPD パネルの洗浄方法、洗浄プロセス、洗浄装置などについて解説するとともに、機能水など比較的新しい環境配慮型の洗浄技術についても解説を加え、将来展望についても最後に述べる。

7.2 フラットパネルディスプレイ製造の洗浄プロセス・装置の共通課題

基本的には次の 2 点に集約される。

- 1) 基板大型化に対応した洗浄プロセス・装置の開発
- 2) 洗浄工程における環境負荷の低減

基板大型化に対しては特に第 7 世代（1870mm×2200mm クラス）以降で顕著になってきた。具体的には洗浄装置のフットプリントの増加、付帯設備の大規模化、ランニングコストの上昇などである。フットプリントの増加や付帯設備の大規模化は、従来の処理時間を維持しようとする、基板の移動速度が速くなる分、面積当たりの洗浄時間が短くなる点とも深く関係している。洗浄プロセスにおいては、処理の均一性確保、加工寸法の低下による要求清浄度の向上などが大きな課題である。洗浄プロセスに関する技術課題としては次の 4 つが挙げられる。

- 1) 洗浄性能の向上（付着異物の剥離）、
- 2) リンス性能の向上（異物の再付着防止）、
- 3) 液切性能の向上（次工程への持出し抑制）、
- 4) 乾燥性能の向上（高速・均一乾燥）

環境負荷の低減に対しては、薬液・純水などの使用量削減およびそれらのリサイクル対応、プロセス全体の省エネルギー化などがあげられる。薬液・純水使用量削減についてはランニングコスト低減にも直結するため各パネルメーカーともに積極的な取り組みがみられる。一方でプロセス全体の省エネルギー化については、ライフサイクルアセスメント（LCA ; Life Cycle Assessment）の観点から、材料の製造、運搬、工場全体で使用する化学物質収支、プロセス全体のエネルギー消費などを考慮した最適化が今後重要になると考えられる。

7.3 フラットパネルディスプレイ製造における洗浄プロセスの重要性¹⁾

LCD の全製造工程の概略を図 1 に示す。LCD の構成要素であるアレイ基板とカラーフィルター基板を別々に作製し、両者に配向膜をつけてから貼り合わせ、液晶を封入した後偏光板を貼ってパネルを組み立てる。これに駆動回路やバックライト等を実装してモジュールとする。ガラス基板の投入段階からガラス基板上の汚染を除去するために 10 回以上の洗浄が行われることがわかる。これは全行程の約 30%にもなる。前述のように洗浄プロセスが歩留まりに大きく影響するからである。それぞれの洗浄工程では、除去対象物と要

求清浄度が異なる。FPD の高性能化と高精細化が進められていく中で、基板表面の清浄度に対する要求も厳しさを増している。近年はポリシリコン薄膜トランジスタ (TFT ; Thin Film Transistor) が増加している。ポリシリコンは従来のアモルファスシリコンに比べて TFT 性能が高いので、それに応じて高い清浄度を實現する洗浄技術が必要となる。

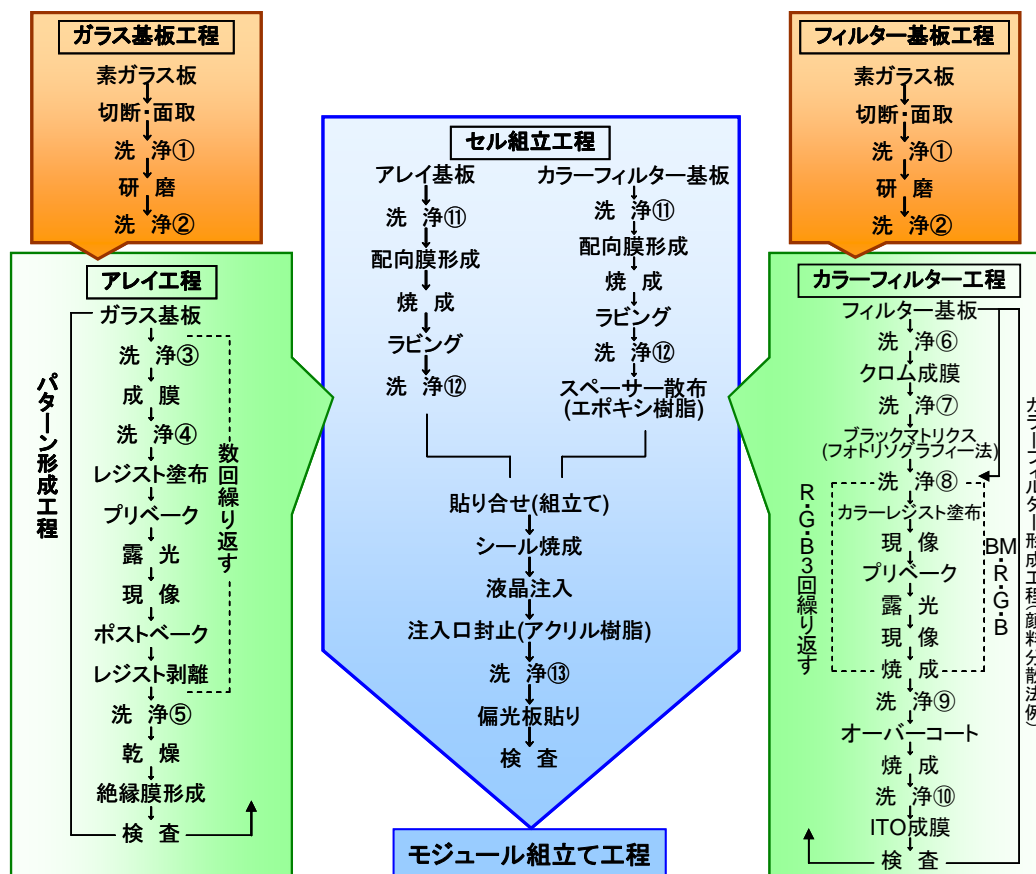


図 1 カラーTFT 液晶ディスプレイ製造プロセスでの洗浄個所

除去すべき汚染と汚染源およびそれぞれの汚染が TFT 特性にあたる影響を表 1 に示す。半導体と同様に TFT 製造工程においても除去すべき汚染は、1) 有機物、2) 微粒子、3) 金属汚染および 4) 自然酸化膜である。洗浄の基本原則²⁾として重要なことは、汚染を基板表面よりも液中（あるいは気中）に存在させるほうが安定度を高めることである。有機物は、溶解、酸化分解、微粒子は物理力あるいは表面のライトエッチングによるリフトオフ、再付着防止のためのゼータ電位制御、金属は、イオン化が基本的な除去原理となる。TFT アレイプロセスにおける洗浄においても、基板に付着した粒子、有機物をエッチングや超音波などの物理力により基板から引き離すプロセスと洗浄液の pH や酸化還元電位を制御し粒子と基板の電氣的反発力を利用した再付着を防止したプロセスの 2 段階で行われ、有機物の除去は酸化剤による分解除去、溶剤や界面活性剤による溶解、あるいはドライ処理では UV やオゾンによる分解、金属は酸化剤によるイオン化による除去プロセスが利用されている。

表 1 TFT 製造における汚染物質と TFT 特性への影響

汚染の種類	汚染源・汚染物質など	TFT 特性への影響
有機物	油脂、大気中の有機物吸着、 梱包材や有機溶剤蒸気など	コンタクト抵抗増大、 絶縁膜信頼性劣化など
微粒子 (パーティクル)	各種部材(金属・樹脂)の磨耗片、 クリーンルーム内の浮遊粒子(ダスト)など	パターン欠陥、 絶縁膜信頼性劣化など
金属	金属部材からの溶出イオン、 処理溶液中の溶解金属イオン	しきい値電圧変動、 リーク電流異常など
酸化膜	長時間待機放置、基板の加熱処理など	コンタクト抵抗増大など

洗浄プロセスの基本機構は LCD、プラズマディスプレイ (PDP; Plasma Display Panel)、有機 EL (Organic Electro-Luminescence) などいずれの FPD に対しても共通であり、電界放出ディスプレイ (FED ; Field Emission Display) など新しいディスプレイが出現したとしても変わらないと考えられる。図 2 には洗浄が不十分な場合の不良原因の内訳を示す³⁾。占有率が高い面内短絡、層間短絡、断線、点欠陥不良などは、主にパーティクル付着によって起こることから、パーティクルの除去の優劣が歩留まりに大きく影響することがわかる。次に主として用いられる洗浄方法について解説する。

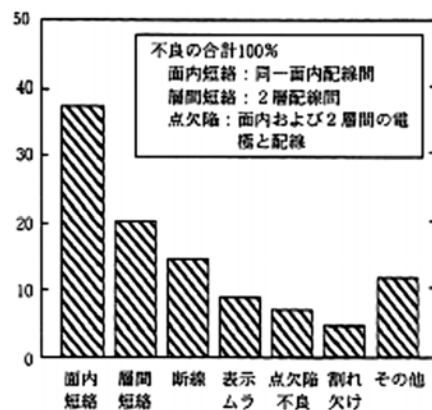


図 2 TFT 不良の内訳

7.4 フラットパネルディスプレイ製造における洗浄方法

7.4.1 ブラシ洗浄

ブラシ洗浄は回転しているブラシを被洗浄物に押し付け洗浄液を供給しながら洗う方法である。基本的にブラシの接触による擦り洗いであるので、平滑な基板などに対して高い清浄度が得られやすい。素材には親水性で耐摩耗性がよいとされるナイロンやポリビニルアルコール発泡体などが使われている。ブラシ洗浄の洗浄力を決める因子は、ブラシの押し付け圧（一般的にブラシと基板との接触に比例）と回転数である。押し付け圧の増加に

比例して摩擦力が増加し、回転数に依存してせん断力を作用させることができる。このせん断力がパーティクルの付着力より大きくなれば、パーティクルを基板表面から脱離（リフトオフ）させることができる。ブラシ洗浄法の場合には、押し付け圧に対して洗浄液の供給量が少な過ぎるとブラシと基板とが直接擦れる状態を生み出すことになり、逆にパーティクルを基板に対して擦りつけることにもなる。また 1 μ m 径以上のパーティクルの除去率は高いが、サブミクロンになると除去率は悪くなる傾向がある。剥離力が強いので固着した粒子の除去に有効といえる。また大面積の洗浄に向いていることからガラス基板メーカーの出荷前洗浄やパネルメーカーの受け入れ洗浄として頻用されている。

7.4.2 超音波洗浄

大別すると浸漬およびスプレー洗浄にわけられ、FPD ではスプレー洗浄が一般的である。使用周波数は通常 20～50kHz であり、キャビテーション作用を除去原理とする。キャビテーションは高い洗浄効果を与える反面、微細構造の損傷など基板へのダメージを考慮する必要がある。

半導体や FPD の製造工程では、近年 1MHz 以上の周波数を有するメガソニック洗浄といわれる比較的高い周波数の超音波を用いた洗浄方法が用いられている。これは 1MHz ではキャビテーション発生の閾値が約 100W/cm²にも達するため、キャビテーションの影響が小さいと考えられているからである。メガソニック洗浄では、メガソニック振動によって、媒体からパーティクルに大きな振動加速度が与えられ、それがリフトオフの推進力として作用する⁴⁾。通常の洗浄では除去が困難とされるサブミクロンのパーティクルが除去できる洗浄方法として注目されている。通常は、基板の直上に設置されるシャワーヘッドに超音波素子が付属され、シャワーヘッドから吐出する直前の媒体に超音波が印加され、水柱を介して基板に対して超音波を伝播される仕組みとなっている。シャワー洗浄の場合には基板上的水流形成も行えるので、リフトオフされたパーティクルが再付着しにくいというメリットも有する。最近はスポットノズルを基板上で走査させる以外に、スリット型のノズルユニットが開発され、大型基板を一度にカバーできるようにもなった。さらに基板大型化に対応した超音波洗浄方式として、従来の超音波シャワー方式と比べ 1/10 という少ない洗浄液量ですむ新たなノズル超音波洗浄方式（BPP ; Balanced Pushed Pull）が開発されている⁵⁾。図 3 にその基本構成を示す。6mm 程度の薄い液層中に基板を通過させ、上部より超音波を照射させる。安定な液層形成のために洗浄液の供給・排出量のバランス、ノズル間距離、洗浄液の表面張力などを最適に制御する必要がある。

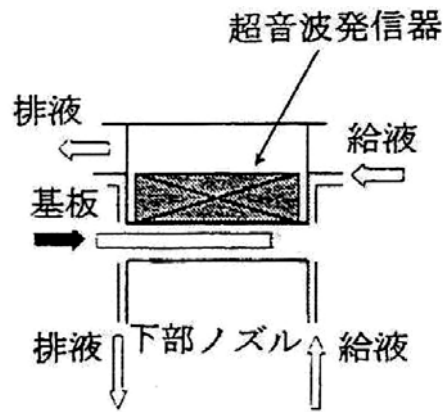


図 3 BPP ノズルの概略図

7.4.3 噴射（スプレー洗浄）

ノズルから洗浄液を加圧して吐出させることで洗浄液に流速を与え、その勢いで基板上の不純物を除去する洗浄方法である。洗浄液の衝突エネルギーは、流速の 2 乗に比例するので、洗浄効果は吐出圧力に比例する。一般的に、業界では吐出圧力の違いによって、シャワー、スプレー、ジェットと区別される。0.2 MPa 以下をシャワー、0.2～2 MPa をスプレー、2 MPa 以上をジェットと一応の目安と考えられるが特に明確な閾値があるわけではない。シャワー洗浄は、すすぎや軽微な汚れの除去に用いられる。通常はスプレーが頻用されるが、汚れの表面への付着力が強く、スプレーでは十分除去できない場合や高い清浄度が要求される場合には、ジェット洗浄が用いられる。

ジェット洗浄方式は、ブラシ洗浄に適さない段差や溝などがある面や、傷つきやすい素材などに対して有効である。洗浄槽を必要としないので、基板などの被洗浄物の大きさに制約を受けず、大型基板の洗浄に適している。しかし、1 個のノズルの洗浄面積が小さいために、多数配置させて洗浄面積を大きくする必要がある。そのほかに、洗浄液を高速で基板に衝突させるので、液のはねかえりやミストの発生を起し、装置内の汚染や排気への負荷がかかる、発泡性のある洗浄剤は使用できないなどの制約もある。

1 流体ジェット洗浄である超高压マイクロジェット洗浄⁶⁾は、洗浄液または洗浄水を 3 MPa から 32 MPa 程度の圧力で圧縮し、直径数 100 μm の特殊形状のオリフィス径をもつノズルから射させて洗浄する技術である。図 4 に示すように数 10 μm 程度の微小液滴を高速で噴射可能であるので高い洗浄効果が期待できる。またオリフィス径の工夫と水圧と流量などの生成条件によってジェットパターンを種々工夫することができるので、1 個のノズルあたりの噴射量が少ない（約 1 L/min）にもかかわらず、洗浄範囲を比較的大きくできることが特徴である。

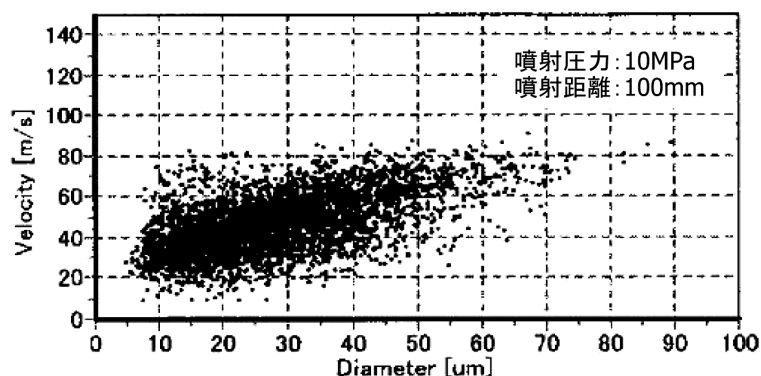


図 4 超高压マイクロジェットの液滴径と速度分布

2 流体ジェットはノズル内で液体と気体を混合させて吐出させる洗浄方法で、気体の流量比率を高く（一般的に液体 0.5 L/min に対して気体 100 L/min 程度）して、微小な液滴を形成させ、それを高速で基板に衝突させる。図 5 に 2 流体ジェットの洗浄メカニズム⁷⁾を示す。水滴がウエハに速度: V_0 で衝突した際、衝撃の反射波によって液滴内に衝撃圧: P が生じる。次にウエハ面方向への放射状の流れ: V_f となってパーティクルに対する除去力として作用する。したがってジェット洗浄では洗浄力は液滴の径には依らず、液滴速度に依存することがわかる。2 流体ジェット洗浄では、330 m/sec 程度の液滴速度を作用させることで、 $0.3\mu\text{m}$ 程度のパーティクルに対しても 90% 以上の高い除去効率が得られることが報告⁷⁾されている。ジェット洗浄の場合には基板からの跳ね返りによってミストが生じやすいので、洗浄条件の最適化や装置内の排気の充実化などが課題となる。

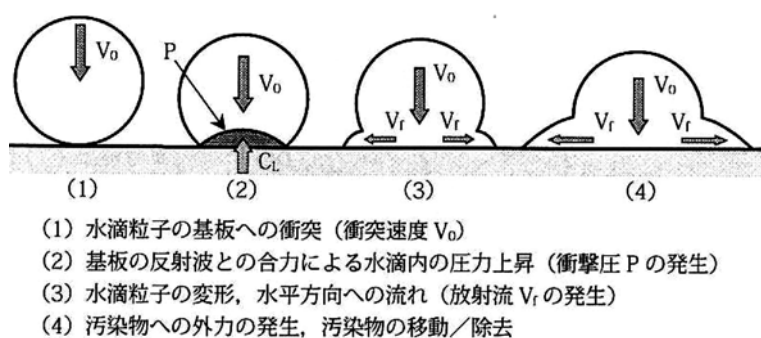


図 5 2 流体洗浄のメカニズム

7.4.4 ドライ洗浄 (UV 光)⁸⁾

紫外線 (UV ; ultraviolet) 洗浄あるいは UV/オゾン洗浄と呼ばれる。液体を使わないでよいことが最大のメリットであり、FPD 製造工程のみならず、あらゆる産業分野ですでに使用されている。UV/オゾン洗浄の基本原理は、紫外線による有機化合物の分子結合の切

断と紫外線による酸素を含んだ雰囲気ガス中の活性酸素種（オゾン（ O_3 ）や原子状酸素など）生成により、有機物を酸化・分解し、揮発されるものである。光洗浄に用いられる紫外線ランプには低圧水銀ランプ（185 nm、254 nm）とエキシマランプ（172 nm）があり、最近短波長で洗浄効果の高いキセノンエキシマランプが FPD 製造の洗浄プロセスで広く利用されている。具体的には、アレイ/カラーフィルターの基板投入前洗浄、成膜前洗浄、レジスト塗布前洗浄、エッチング前の親水化処理など、セル工程の配向膜塗布前洗浄などですでに実用化されている。

大気圧プラズマによる洗浄効果も注目されている。電極間に印加された高電圧によって電離させられた荷電分子を含む気体をプラズマという。プラズマは空気中の酸素に作用することでエキシマと同様に励起酸素を発生させ有機物除去が可能となる。エキシマと比較して有機物の除去能力が高いため装置やラインへの導入が増加している。

ドライ洗浄は水などの液体を使わないため環境負荷削減に有効な洗浄方法であるといえる。ただし、FPD 製造におけるドライ洗浄の課題は基板大型化と製造コストに関わるもので、主に、1) 洗浄処理の均一性、2) イニシャルコストの低減、3) ランニングコストの低減に集約される。

7.4.5 環境配慮型洗浄技術

(1) 機能水洗浄方法⁹⁾

機能水とは水中に特定のガスやごく微量の化学物質を溶解させて、ウエハやガラス基板などの表面に付着した微粒子（パーティクル）、有機物、金属などの不純物を除去する機能を持たせた水のことである。最近その有用性も次第に認知されてきて、適用対象も広がってきている。

機能水洗浄のメリットは、薬品使用量の大幅な削減、すすぎのための純水の使用量削減、洗浄時間短縮による生産性向上、洗浄排水処理の負荷軽減、ランニングコストの削減など多くのことがあげられる。現在使われている機能水としては、主に基板表面の微粒子除去を目的とした水素水と基板表面の有機物、金属除去を目的としたオゾン水があげられる。

(2) 水素水洗浄

水素水は純水中にフッ素樹脂製の溶解膜モジュールなどを用いて水素ガスを溶解させた水である。比抵抗、pH は純水とほぼ同じであるが、酸化還元電位がマイナス（還元性）である。水素水はパーティクル除去に用いられることが多い。洗浄効果を発揮するには超

音波を併用する。図 6 に酸化セリウム研磨材で基板を汚染したものを洗浄した結果を示す⁹⁾。5 秒間の洗浄で、純水に超音波を印加した場合には 20%程度しか除去できていない。これに対して、水素水に超音波を印加した場合には 97%以上除去できることが示されている。水素ガス以外に様々なガスを溶解させた機能水でのパーティクル除去効果も確認されている。純水に比べガスを溶解させることでパーティクルの除去効果が向上すること、ガスの種類により洗浄効果は大きく異なることが確認されている。ただし、水素ガスを溶解させた場合が最も効果的であった。以下、酸素ガス、希ガス類、窒素ガスという順であった。このように水素水のパーティクル除去効果の高さが証明されているが、中性領域では再付着防止作用に乏しい。そこで水素水にアンモニアを添加し、pH9 程度にするとさらに洗浄効果が高くなる。大型基板の多い FPD では基板表面から脱離したパーティクルは基板外に排出されるまで相当の距離を移動せねばならず、パーティクルの再付着防止作用を考慮すると弱アルカリ化した水素水の使用はたいへん有用と考えられる。また環境負荷の観点からは、使用する化学物質の量が極めて少ないので、今後 FPD 業界での適用拡大が期待される有望な洗浄方法である。

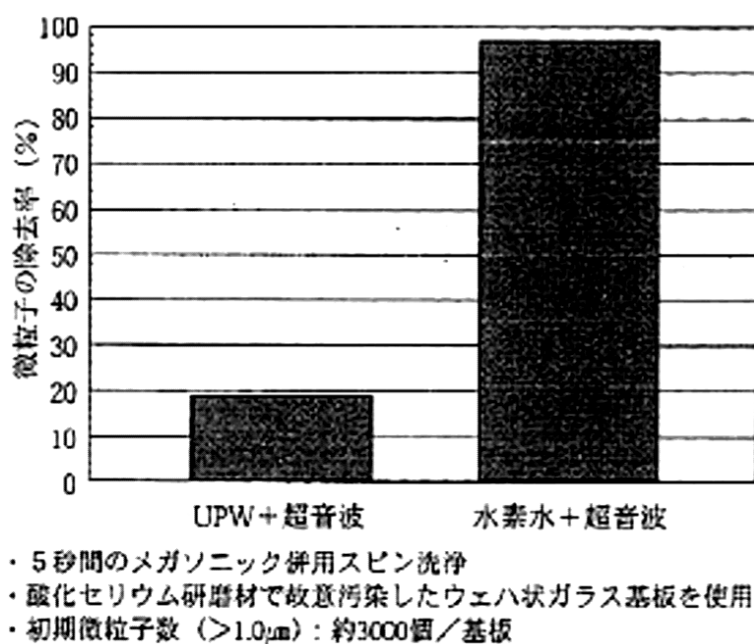


図 6 水素水の洗浄効果

(3) オゾン水

オゾンはフッ素につぐ強い酸化力を持ちながらも、反応や分解後には酸素に戻り無害化されるという大きな特徴をもつ。オゾン水とは純水に高純度のオゾンガスを溶解させた水であり、中性で酸化還元電位はプラス（酸化性）である。このため基板表面に吸着した有

機物除去や金属除去に有効である。図 7 にオゾン水による有機物除去の一例を示す。酸化シリコン薄膜がついたウェハ(通常は完全親水性)をクリーンルーム内に 5 日ほど放置し、クリーンルーム部材由来の有機物を吸着させた後、オゾン水で洗浄した結果である。有機物吸着のため 23 度まで大きくなった接触角はオゾン水を作用させると速やかに減じ、もとのレベルまで回復した。回復速度はオゾン水濃度に強く依存している¹⁰⁾。金属除去については Cu 汚染の除去効果が注目されている。通常 Cu は金属の中でも酸化還元電位が高いためにイオン化されにくい、オゾンは Cu よりも高い酸化電位を有しており除去効果を有する。FPD においても将来配線抵抗低減のために銅配線の導入が検討されており、有望な洗浄方法といえる。

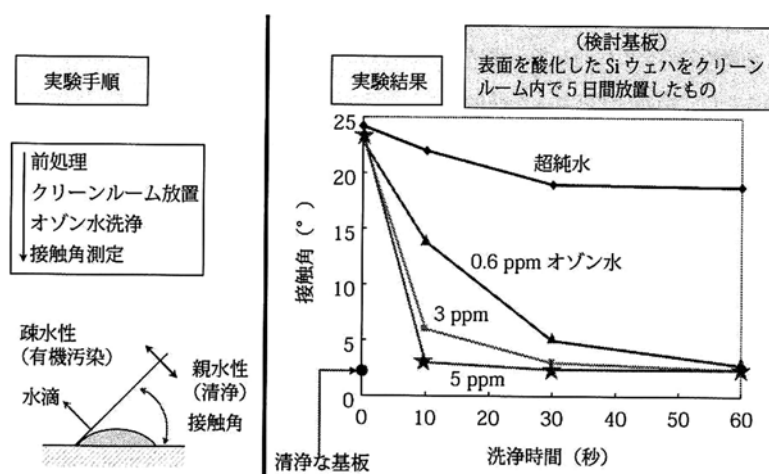


図 7 オゾン水による基板表面の有機物汚染除去効果

さらに、オゾン水と希フッ酸を繰り返し用いた新しい枚葉洗浄方法も開発されている¹¹⁾。本洗浄方法はウェハ表面のあれを生じさせることなく、パーティクル、金属、有機汚染を一括除去できる洗浄方法であり、主に半導体ウェハ洗浄で実用化されている。回転している基板に常温のオゾン水と希フッ酸を交互に数秒から 10 秒ずつ供給し、このオゾン水と希フッ酸処理を 1 サイクルとして、これを数サイクル繰り返した後、純水リンスを行う洗浄方法である。オゾン水は主に金属や有機物の除去に有効に作用し、またシリコンウェハ表面を酸化する。フッ酸は金属汚染除去とともにオゾン水で酸化された酸化膜をエッチングする。このエッチング作用によって基板表面のパーティクルがリフトオフされ、パーティクル除去作用が付与されることになる。薬液使用量が極めて少なく、低コストで短時間の室温処理で、さらに環境への負荷の少ない環境配慮型洗浄方法といえる。

前述したようにオゾン水は有機物を酸化あるいは分解する作用を有するので、高濃度であればレジストなど大量有機汚染の除去に用いることが可能となる。LCD 用レジスト剥離で使用するアミン系の有機溶剤は高価で用量も多いため、薬液コスト削減と環境負荷

の低減が大きな問題である。そこで高濃度のオゾン水を用いたレジスト除去技術（広義では有機物を除去するための洗浄プロセスと位置づけられる）が開発されている。オゾンによるレジスト除去ではレジスト除去速度の高速化がさらに必要となっているが、オゾンの水への溶解度は主にヘンリーの法則で決まるためその高濃度化には限界がある。一方、高濃度オゾンガスの発生技術¹²⁾は急速に進歩しており、その特徴を最大限に生かすために高濃度オゾンガスと水分の供給法を制御することにより、レジスト除去速度が大幅に向上することも報告されている¹³⁾。またオゾンとUVを併用した処理技術、オゾンとアッシングを併用したイオン注入レジストの高速処理技術なども提案されており、今後オゾンを用いた洗浄プロセスの適用は拡大していくものと考えられる。

7.5 今後有望な新しい洗浄技術

最近は従来の溶剤、超音波、機能水洗浄といわれる洗浄方法に加えて、新しい環境配慮型洗浄法として、スチーム洗浄¹⁴⁾、マイクロバブル洗浄¹⁵⁾、超臨界流体洗¹⁶⁾、レーザークリーニング¹⁷⁾なども開発されている。また洗浄は汚れが付着した箇所のみを洗浄することができればよいという考え方から、局所洗浄（スポットクリーニング）についてもいくつか提案されている。

スチーム洗浄は通常純水をヒーターで加熱し、140～240℃の過熱水蒸気として、1mmφ程度の小さな孔から噴出させて洗浄する方法である。蒸気の一部が凝縮し、液滴と水蒸気の混合流となって作用する。本洗浄方法は、ガラス切断後に端面に付着した大量の異物除去の洗浄に対して、超音波や2流体洗浄よりも高い洗浄効果が得られることが報告されている。洗浄範囲が狭いことが課題であるが、今後その洗浄効果の高さから適用範囲が広がることが期待される。

マイクロバブルとは50～100μm程度の微細な気泡である。安全な添加剤を用いたマイクロバブルの高密度化によって高いスループットを要求されるエレクトロニクス分野の洗浄工程にも対応可能とし、機械・部品洗浄工程などですでに実用化されている。今後FPDをはじめとするエレクトロニクス分野への適用拡大が見込まれる。

レーザーを用いた洗浄としては、レーザー光を基板上のパーティクルに直接照射し、瞬間的な熱膨張による変位加速度によってパーティクルを除去するドライ洗浄方法が知られている¹⁸⁾。また同様の洗浄方法であるが、基板上にスチームを吹きかけてμmレベルの薄い水膜を形成し、そこにパルス的にレーザー光を照射する洗浄法も報告されている。この洗浄方式では、熱は基板面と水との界面が効率的に加熱されるため、水が爆発的に蒸発し

て、その強い圧力でパーティクルが飛散する。水膜の存在により無い場合に比べて低ダメージで洗浄できる。

このように様々な着眼点での洗浄技術が次々と開発されている。最近では超音波洗浄のメカニズムの解明が進み低ダメージでの洗浄技術も開発されてきた。今後も新しい洗浄技術の提案がより一層期待される。

7.6 フラットパネルディスプレイ洗浄装置

ガラス基板の大型化に伴い洗浄装置で問題になるのは、まず装置のフットプリントが大きいことである。主として薬液（液体）を取り扱うものが多いので、洗浄部以外にリンス部、乾燥部などを要する。またこれらを連続で行う必要があるので基板を移動させながらの処理となり、多くの処理槽が横並びとなる。高いスループットを求めるほど基板移動速度は速くなるため各処理槽は大きくなる。これらに加え排気部、薬液供給部、気液分離部、基板搬送部および付帯設備まで含めると他の製造装置と比較してもかなり巨大な装置となる。国内の洗浄装置メーカーの高い技術力を背景に改善がなされているが、さらなる省フットプリント化が期待される。

基板の大型化により撓みの影響が大きくなる。基板搬送については第 10 世代（2850×3050mm）対応の搬送ロボットがいくつか実用化（図 8）¹⁹⁾されており、第 8 世代レベルの機動性が実現されている。洗浄プロセスでは、撓んだ基板の中央に液体が集まりやすくなるので、下流プロセスへの液の持ち出しが多くなる。薬液処理では端面と中央部で反応差が生じるため、プロセスの面内均一性が悪化する。第 6 世代以降の装置では、基板を少し傾斜させる方式を採用することで、基板上で重力を利用した液の流れを作りたわみによる問題を解消している。最近ではさらに基板を傾け垂直に近い姿勢にすることで、基板を流れる流速をさらに大きくする装置も登場している（図 9）²⁰⁾。垂直に近くすることで、水平搬送システムに比べて装置のフットプリントが 30%以上削減可能となる。さらに本方式は、基板の洗浄状態などプロセスを目視できるので、作業者にとって好都合である。リンス性能のさらなる向上に伴い、純水の使用量も 60%以上削減できるので、大型基板の洗浄システムとしては適した処理方式といえる。



図 8 第 10 世代のガラス基板搬送用ロボット

<http://www.yaskawa.co.jp/newsrelease/2007/27.htm>



図 9 傾斜搬送方式を用いた大型液晶基板洗浄装置

http://www.shibaura.co.jp/products/fpd/f_01.html

さらに、大型基板の洗浄装置において重要なことは、湿式洗浄の共通課題である洗浄の最終仕上げ、つまり乾燥工程である。基板乾燥に洗浄効果はないものの、乾燥がうまくできないと水滴残りや水しみ（ウォーターマーク）、浮遊ダストの付着などで、基板が再汚染してしまうことになり、いくら洗浄工程が完全であったとしても、完全な清浄表面が得られないことになる。現状はエアナイフ乾燥といわれる乾燥方法がとられている。この乾燥方法は、スリット形状のノズルから吐出される均一なカーテン状のエアにより、基板上の液滴を上流側に押し戻しながら水切り乾燥する方法である。エアナイフによる乾燥方法は基板上の液体量が少ないこと、また重力による作用を利用できることから傾斜搬送方式では有利となる。本乾燥方法で注意すべきはエアナイフ乾燥後の水との再付着である。従って乾燥槽の構造自体が重要となる。最近の洗浄装置では、気流シミュレーション

による給排気の最適化がなされるなどの工夫がされている。

PDP の洗浄装置は LCD の洗浄装置をベースに開発されたものが多く、実用化されている装置の基本構成は同様である。洗浄方法としては、基板をローラー搬送させながら、中性あるいはアルカリ薬液を用いたブラシ洗浄、超音波洗浄、ジェット洗浄などの物理力洗浄を行い、純水でのリンス、エアナイフ乾燥を行う。有機 EL パネルでは、平坦化が重要であることから、研磨と洗浄の両機能を兼ね備えた研磨・洗浄装置が実用化されている（図 10）²¹⁾。高精度のポリシングにより薄膜の平坦化と微細な異物・残渣を削り取り、高圧純水で洗浄するシステムである。今後 FPD 洗浄装置として使用拡大が期待されるドライ洗浄装置では、プラズマ、UV 処理ともに基板搬送型装置に対応したインライン型の装置が開発されている（図 11 は常圧プラズマタイプの洗浄装置）²²⁾。処理均一性のさらなる確保や高スループットに対応した装置開発によって適用拡大が進むと考えられる。



図 10 有機 EL パネル向け研磨・洗浄装置

http://www.tokki.co.jp/ir/library/pdf/2005/05_10_25_kouseidosenjyousouchi_kaihatuganbai.pdf

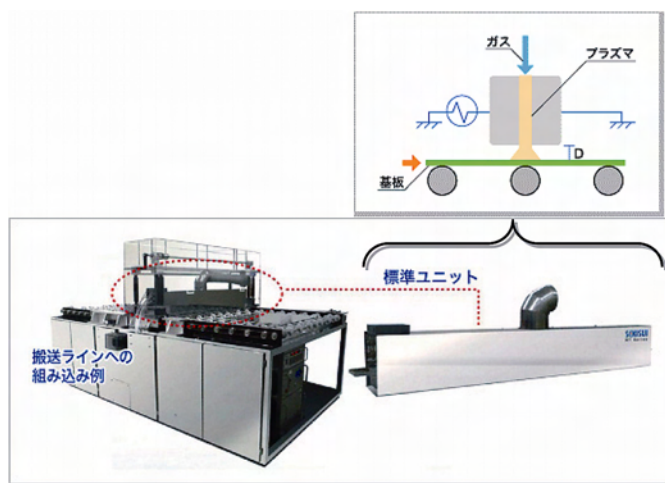


図 11 大型基板用常圧プラズマ洗浄装置と処理部のイメージ図

<http://www.sekisui-semi.jp/new/unit/index.html>

7.7 今後の展望

液晶をはじめとする FPD の市場は、大型化の需要を中心として拡大することは間違いない。旺盛な設備投資によって全世界的な規模で供給能力が急激に向上している。このため今後も価格低下の傾向は続くと考えられる。また、有機 EL をはじめとする次世代のディスプレイの開発も盛んに行われている。昨今の世界経済情勢からみて需要の伸びが予測を下回る場合には、さらに価格競争が激しくなると考えられる。

これらの状況下、製造プロセスのコスト削減、歩留まり（品質向上）への要求はこれまで以上に高まる。洗浄プロセスは、製造プロセス内で高い割合を占めるため、洗浄プロセスの高性能化、効率改善、コスト削減、スループット改善などに対する取り組みが必要となる。汚れの性状や種類、汚れの度合い、必要清浄度を見極めたうえで、最適な洗浄方法を選択する必要がある。また装置導入の際にも搬送方式、装置フットプリント、消費エネルギーなどを含めて適切な装置を選択する、あるいは必要に応じてカスタマイズすることが求められる。基板大型化に伴い薬液や水使用量は増加の一途を辿っており、何より重要な課題は環境対策である。

図 12 に FPD 洗浄装置のロードマップを課題毎にまとめた。今後 FPD も最小加工寸法の縮小化やデバイス構造の複雑化が進むと考えられ、それに対応した高性能の洗浄プロセス・装置の開発は必須と考えられる。最重要の環境負荷低減においては、やはり薬液、水をいかに減らすか、あるいは最小エネルギーでいかに洗浄・乾燥プロセスを構築するかに着目した技術・装置開発が進むものと考えられる。また国際競争激化のなかでの日本のものづくり力のさらなる強化のためには、あくなき高生産性、低コスト化の要求が高まることは間違いなく、パネル・装置・部材メーカーが連携した開発が望まれる。

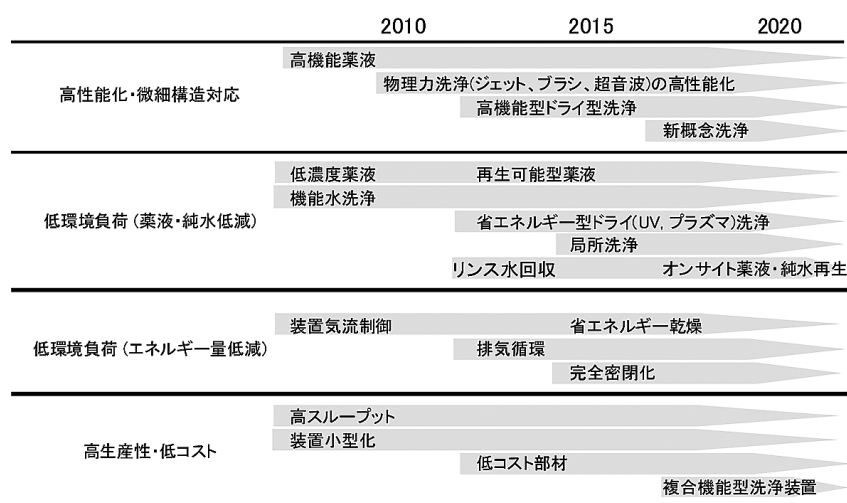


図 12 FPD 洗浄装置のロードマップ

FPD をとりまく環境は液晶や PDP を中心とした普及が現時点で主であるが、有機 EL をはじめとする次世代のディスプレイの開発も盛んに行われており、それらの洗浄プロセス、洗浄装置などへの対応も急務となっている。このような急激な環境変化に柔軟に対応していくとともに、低環境負荷、省エネ、低コストをキーワードとしたプロセス・装置の普及が中心となっていくことは間違いなく、さらなる技術の進歩が強く望まれる。

参考文献

- 1) 平塚豊, 北田由光, 月刊ディスプレイ No.5, pp26-33 (2007).
- 2) 森永均, ウェット洗浄の物理化学, 応用物理, 69, pp568-574 (2000)
- 3) 鈴木聖二, 石井宏, 木下勝行, フラットパネルディスプレイ'92” Part 5 生産技術, pp181-185 (1992)
- 4) 藤江明雄, カイジョー技報, No3, pp73 (1996)
- 5) 今岡孝之, クリーンテクノロジー, 11, No.9, pp52-56 (2000)
- 6) 宮地計二, 月刊ディスプレイ, No.3, pp11-17 (2003)
- 7) 菅野至, 空気清浄, 33, No.5, p21 (1996)
- 8) 遠藤真一, エレクトロニクス洗浄技術 (技術情報協会), pp109-121 (2007)
- 9) 井田純一, 月刊ディスプレイ, No.5, pp40 - 44 (2007)
- 10) 黒部洋, エレクトロニクス洗浄技術 (技術情報協会), pp248-257 2007)
- 11) T.Hattori et al, J. Electrochem. Soc., 145, pp3278-3284 (1998)
- 12) 葛本昌樹, 静学論誌, 21, No.1, pp18-21 (1997)
- 13) S. Noda et. al., J.Electrochm. Soc., 150, pp537 (2003)
- 14) 野田清治ら, クリーンテクノロジー, 18, No.5 (2008)
- 15) 宮本 誠, クリーンテクノロジー, 17, pp24-27 (2007))
- 16) 猪俣ら, ECO INDUSTRY, 5, No.8, pp55 (2000)
- 17) 服部毅, 月刊 Semiconductor FPD World, No9., pp48-53 (2006)
- 18) 服部毅, エレクトロニクス洗浄技術 (技術情報協会), pp148-154 (2007)
- 19) 安川電機ホームページより, <http://www.yaskawa.co.jp/newsrelease/2007/27.htm>
- 20) 芝浦メカトロニクスホームページより, http://www.shibaura.co.jp/products/fpd/f_01.html
- 21) トッキホームページより, http://www.tokki.co.jp/ir/library/pdf/2005/05_10_25_kouseidosenjyousouchi_kaihatuganbai.pdf
- 22) 積水化学ホームページより, <http://www.sekisui-semi.jp/new/unit/index.html>

(宮本 誠)

第Ⅲ章 計測制御分野（基板検査／搬送）

1	ガラス基板検査装置	91
a)	ガラス基板検査装置	91
b)	カラーフィルターの検査	102
c)	アレイ検査	112
d)	寸法検査（座標・線幅測定）	116
2	画質検査（輝度・色度）	128
3	基板搬送ロボット	136
4	その他	145
a)	原子間力顕微鏡	145
b)	レーザー顕微鏡	154

第三章 計測制御分野（基板検査／搬送）

1 ガラス基板検査装置

a) ガラス基板検査装置

a.1 はじめに

液晶パネルの市場は、デスクトップ型パーソナルコンピューター（PC ; Personal Computer）でのブラウン管（CRT ; Cathode Ray Tube）代替などで 15～20 型サイズの大型パネルへと需要が広がっていることに加え、テレビ向けのニーズも大型化が進んでおり、最近では 40 型を超えるパネルの需要が高まっている。

生産ラインの面から見ると、価格の低下とパネルサイズの大型化を同時に実現するには、マザーガラス基板のさらなる大型化と処理スピードの高速化による高効率生産が必要であり、これらを満たす新しい生産ラインの構築が必要となっている。

一方、液晶画面の高精細化、高画質化のニーズの進展に伴い、ガラス基板の傷、および製造工程における異物の管理はますます重要となっている。

特に、ガラス基板の大型化、薄型化が進み、高精度の検出が求められる中で、検査時間の短縮も合わせて要求されている。

本稿では、これらの市場要求に対応したガラス基板傷検査装置とガラス基板検査装置について報告する。

a.2 マザーガラスの大型化と検査装置

液晶パネルはマザーガラスと呼ばれるガラス基板から作られ、通常は複数枚のパネルを大きなマザーガラス上で加工してから最終的にノート型パーソナルコンピューター、モニター、テレビなどの画面に合わせた寸法に分断する。複数のパネルを一度に製造することは、パネル 1 枚当たりのコストの低減につながる。液晶のアプリケーションであるパーソナルコンピューター、テレビなどではパネルサイズの大型化と価格の低下が急速に進み、それに対応して生産性向上で面取り数を増やすため、ここ数年、マザーガラス基板サイズも大型化が加速してきている（図 1 参照）。

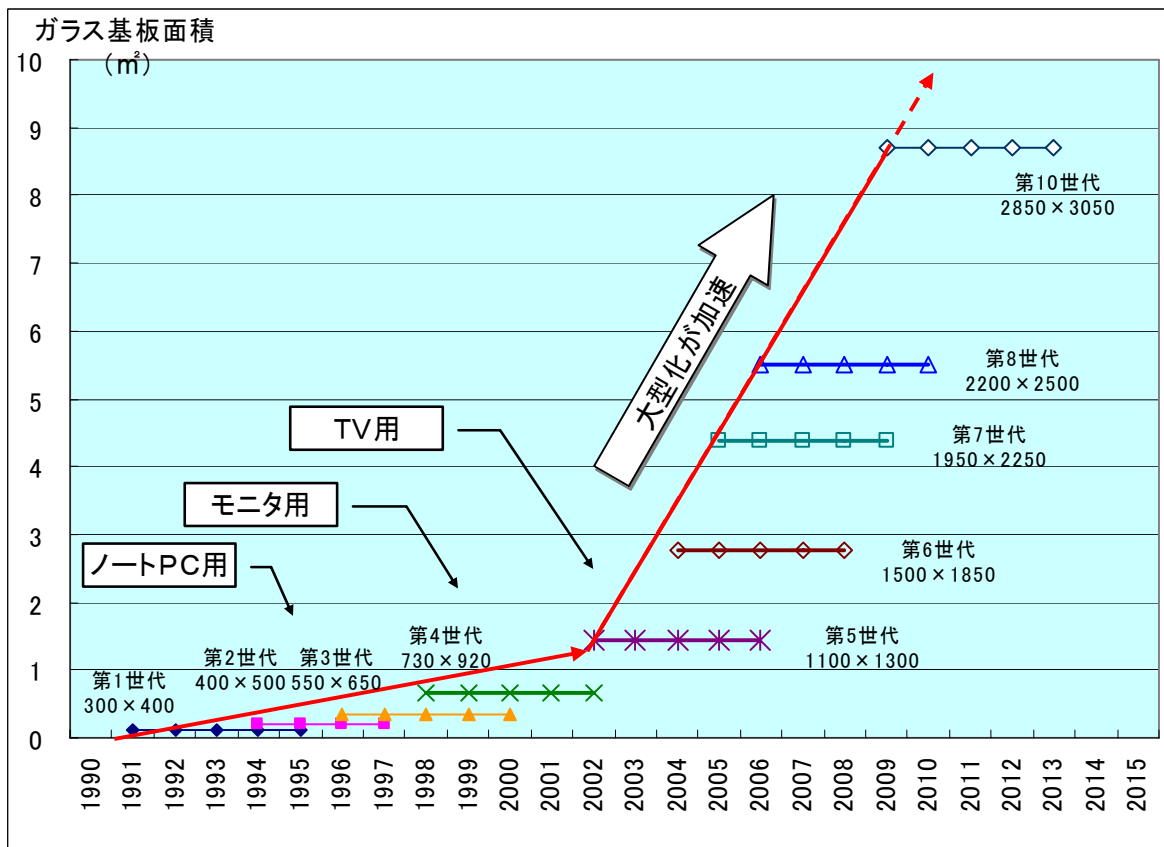


図1 大型化が加速するマザーガラス

ガラス基板サイズの大型化や配線パターンの微細化が進むにつれ、より高い頻度でガラス基板の傷や表面に付着する異物が原因で短絡や断線が発生し、歩留まりの低下をもたらす。ガラス基板に付着した異物が製造プロセス中のどの段階で付着したか、また付着した異物の種類によって不良内容が異なってくる。このため、図2に示した薄膜トランジスタ (TFT; Thin Film Transistor) 液晶パネル製造の各工程において、検査装置を用いて付着異物を定量的に把握し、適切な対策をとることが歩留まりを確保する上で必要不可欠である。

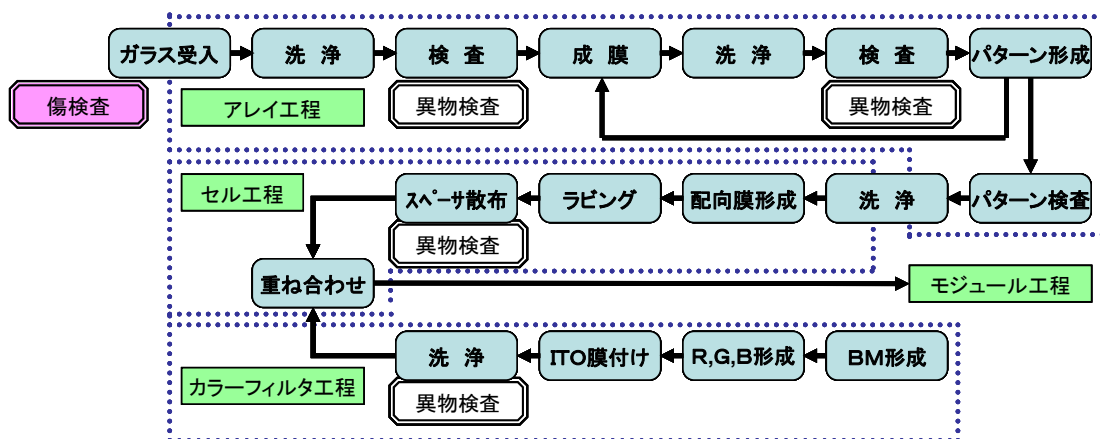


図2 TFT液晶製造工程と検査装置

a.3 ガラス傷検査装置

アレイ工程で、TFT デバイスを構成するための基材である液晶用ガラス基板は、ディスプレイの表示品質と製品歩留まりを向上するため表面の傷や内部の気泡を検査・管理する必要がある。

ガラスの大型化への対応および品質の安定化を図るため傷等の欠陥を検査するための装置のニーズが高まってきており、全数検査を目的としたガラス傷検査装置 GK シリーズを開発した。

a.3.1 ガラスにおける欠陥の種類

液晶ガラス基板の欠陥は、欠陥の及ぼす不良モードにより 2 つに大別される。

- 1) ガラス自体の光学的不良により表示品質を低下させる欠陥。
- 2) TFT 回路の断線、ショートが発生させ表示不良につながるガラス表面上の欠陥。

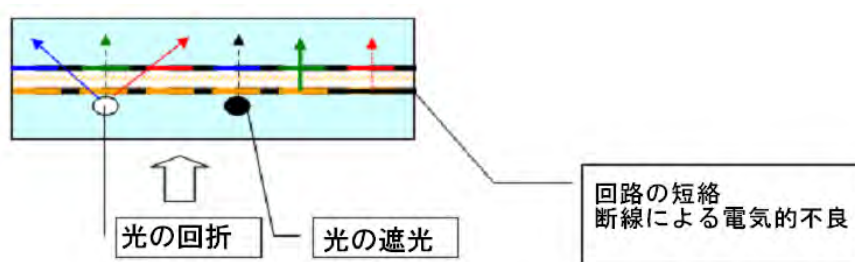


図 3 表示不良模式図

a.3.1.1 形状分類

欠陥の種類については、欠陥形状、位置により表 1 に分類される。

表 1 ガラスの欠陥

項番	名称	分類上の定義	液晶製品への影響
①	傷	ガラスの平面性を失なわせるガラス自体が形状変化している部分	回路パターンの断線や傷の進行による割れ等の重要な欠陥の要因となる。
②	泡	ガラス内部の気泡	位置により、表示上の輝点もしくは暗点の欠陥となる。
③	内包物	ガラス内部の気泡以外の不純物	光学的に遮光するため、サイズが大きな場合は、パネル上暗点欠陥となる。
④	付着異物	ガラス表面に付着した異物	洗浄で除去できるものは、ガラスの品質という面に関しては、影響がない。

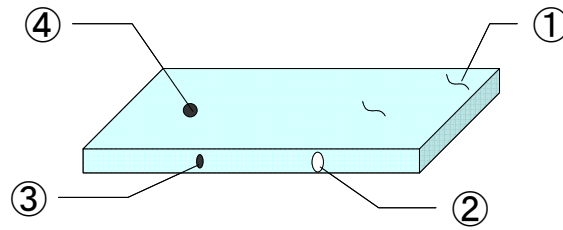


図4 ガラスと欠陥のイメージ図

a.3.1.2 位置による欠陥の影響

形状分類による欠陥においても、ガラスの厚さ方向の存在箇所により良否判定は大きく異なる。

傷、異物については、回路形成される表面側では、図5のように断線、ショート起因となるため、 $1\mu\text{m}$ レベルの欠陥の検出が必要であるが、裏面に対しては目視状態で視認できないレベルの欠陥は影響が少ない。

内包物、泡に関しては、数 $10\mu\text{m}$ の大きさであれば影響を与えないが、表面に影響を与える場合は、不良と判断する必要がある。

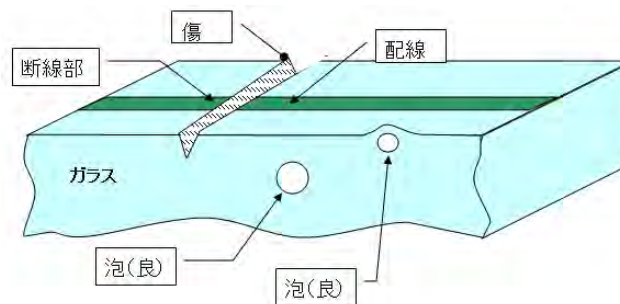


図5 欠陥存在箇所による影響

a.3.2 ガラス傷検査装置に対する要求仕様

ガラス傷検査装置に要求される仕様として以下の2つの大きな要素がある。

- 1) 液晶パネルの大型化にともない不良要因となる欠陥を確実に検出するための高い検出再現性と検出性能。
- 2) 全数検査するための高速測定および高速なデータ判定機能。

欠陥検出において傷と分類される欠陥は、長さ・幅・深さ・形状など多岐にわたる。光学検査装置においては他の種類の欠陥に比較して検出光学系に工夫が必要である。形状

面でも直線状・点状、色彩的に白く見える傷、透明な傷など千差万別の形態を呈している。

広義の傷のなかで特に目視した場合一方向でしか視認できない傷が、検査において課題となる。照射した照明光は傷の微細なエッジで回折するが、この回折光は指向性が高く、検出可能な光の方向はきわめて狭い。したがって光学検査装置では、この微細な回折光を検出する光学系が必要となる。

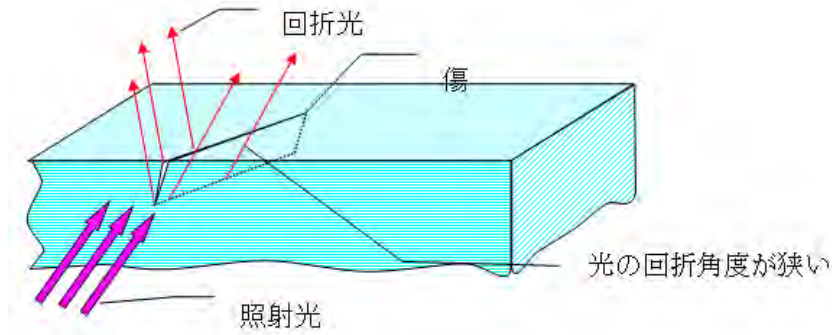


図 6 傷の回折光の特徴

a.3.3 ガラス傷検査装置の特長

a.3.3.1 検出光学系の構成

本装置の光学検出系は、光学的不良要因となる欠陥の検出系と TFT 回路の不良要因となる欠陥の光学系を装備している。

(1) 光学不良要因欠陥検出系

本検出系は、図 3 で説明したようにパネルを人が実使用で見た状況に近似した検出系である。ガラスを透過する光の明暗および欠陥の大きさを良否判定の基準として検出判定する。

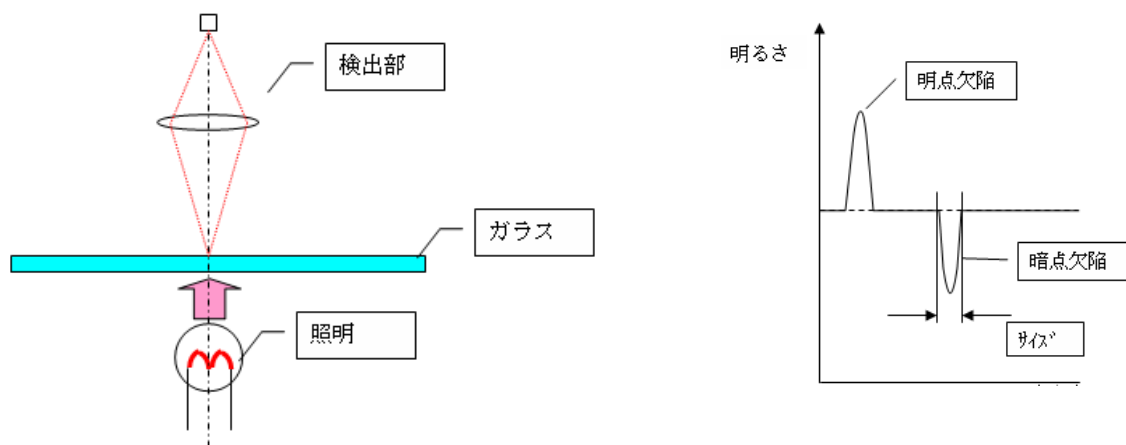


図 7 光学的不良欠陥検出系

(2) 傷検出光学系

本検出系は、ガラス表面上の微細な傷を検出することを目的として高い光強度のレーザー光を使用し、傷の微細な回折光を検出する光学系である。

検出性能として、異物換算 $0.5\mu\text{m}$ の高検出精度と高再現性を実現している。

表側の傷を選択的に検出する光学系を構成しかつオートフォーカス機能を装備して表面側の欠陥を選択的に検出するとともに、高い検出再現性を実現した。

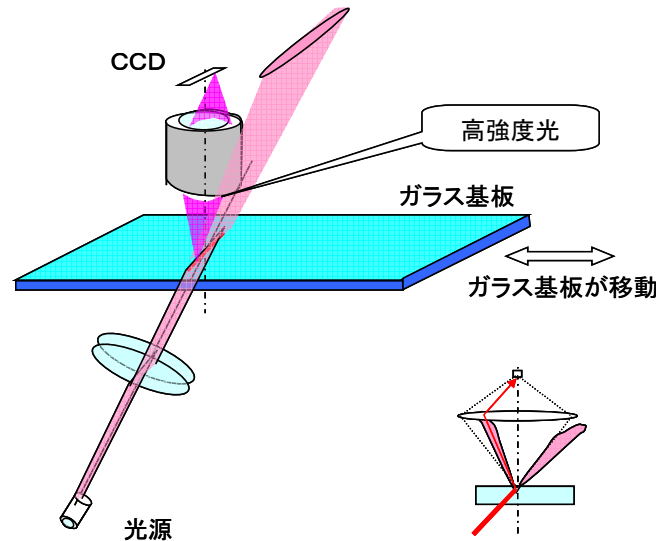


図 8 傷検出光学系

a.3.3.2 高速性

全数検査を行なうためには、生産プロセスに合う検査速度の高速性も重要である。高速性の実現手段として、

- 1) 大型パネルを高速走査時に安定して支える高速移動ステージ。
- 2) 前記高強度分布レーザー投光系と光学的不良欠陥検出系の 2 種類の専用光学系による高精度の検出能力と高速走査。
- 3) 複数光学ユニット採用による広範囲検査。
- 4) 各光学系に対応したマルチ CPU (Central Processing Unit) の搭載によりデータ処理の高速化を図ったリアルタイム判定機能等により、第 8 世代においても全数検査に耐える高速性。

複数の光学系の採用およびマルチ CPU と専用高速データ処理部による長さ、強度、面積などの形状分析および各欠陥の特徴抽出アルゴリズムにより検出物の欠陥分類能力を高めている。

a.3.3.3 ガラス傷検査装置の特徴

本装置は、以下の4項目の特徴により、ガラスの品質管理が可能なガラス傷検査装置を製品化し販売されている。

- 1) 高速移動ステージおよび複数光学系により第8世代のガラスに対応。
- 2) 広範囲走査、高速データ処理により1枚あたり約60秒の高スループット。
- 3) 異物換算0.5 μ m相当の高検出能力により高品質な管理。
- 4) 豊富な欠陥判定機能により自動検査装置としての高信頼性。

a.4 ガラス基板検査装置

液晶パネルの高精細化、高画質化、およびマザーガラスの大型化に対して、歩留り向上のための異物管理はますます重要となっており、定量管理を行うための検査装置の市場ニーズがますます高まっている。このような背景の下、大型化、薄型化する液晶生産工程における高スループット、高精度の異物検出性能などに対応したガラス基板検査装置「GI7500シリーズ」を開発した(図9参照)。



図9 ガラス基板検査装置「GI7500」の外観

a.4.1 異物管理の目的

異物管理の必要性としては次の5項目が挙げられる。

- 1) 製造ライン立ち上げ時におけるプロセスの条件出しをする。例えば、各工程の装置、発塵(じん)チェック、洗浄前後の評価などである。
- 2) 製造装置導入時の発塵をチェックする。

- 3) 量産段階において一度に大量の不良が発生することを防止するため、プロセスモニタを行う。
- 4) ある工程で発生させた不良を、そのまま次の工程に持ち込ませない。
- 5) 工程の定量評価および時系列評価をする。

以上は、いずれも製品の歩留り向上を目的とするもので、異物によるプロセス不良を監視するためのモニタとして位置づけられる。

異物起因による不良としては、高精細化に伴う配線パターンの微細化、表示の高速化に対する TFT アレイ基板、カラーフィルター基板のギャップが狭くなるなど、より高い頻度でガラス基板表面に付着する異物が原因で短絡や断線が発生させる。ガラス基板に付着した異物が製造プロセス中のどの段階で付着したか、また付着した異物の種類によって不良内容が異なってくる。液晶パネル製造の各工程において、検査装置を用いて付着異物を定量的に把握し、適切な対策をとることが歩留りを確保するうえで必要不可欠である。

a.4.2 ガラスの大型化およびテレビ用途における要求仕様

ガラスの大型化およびテレビ用途向けプロセスの装置では、従来に増して以下の内容を考慮することが重要になる。

- 1) 1枚のパネルが占める面積が大きく、かつ不良要因となる異物はたとえパネルに1個でも欠陥となるため、高い再現性と検出感度。
- 2) 大型のガラス基板搬送では、裏面接触は必然であるため、デバイス表面のみを選択的に検査。
- 3) プロセスへの早急なフィードバックが不可欠であるため、高速な検査と分析能力。

a.4.3 ガラス基板検査装置の特徴

今回開発したガラス基板検査装置 GI7500 の特徴は以下のとおりである。

- 1) 高検出感度：サブミクロン検出 (0.3 μ m)
- 2) 検出再現性：95%以上
- 3) 表裏分離性能： 0.3 : 50

表面 0.3 μ m 感度で裏面 50 μ m 以下の異物を非検出にすることが可能となる。

- 4) 検査時間 (高速検査モードの場合)：150 秒/2,200 \times 2,500 角 mm
- 5) CIM (Computer Integrated Manufacturing) 対応

異物管理情報がネットワークを用いて統括的に制御・管理することが可能となる。

6) 観察機能搭載

高倍率での異物観察機能で異物内容の早期確認とフィードバックが可能となる。

7) 省設置スペース

最大対応ガラス基板 2,200×2,500 角 mm に対して約 3 倍の占有面積であり、ユーティリティ、クリーンルームを含めた投資の低減が可能となる。

a.4.4 異物検出技術

検出感度および表裏分離性能の向上を実現した検出部概要を図 10 に示す。

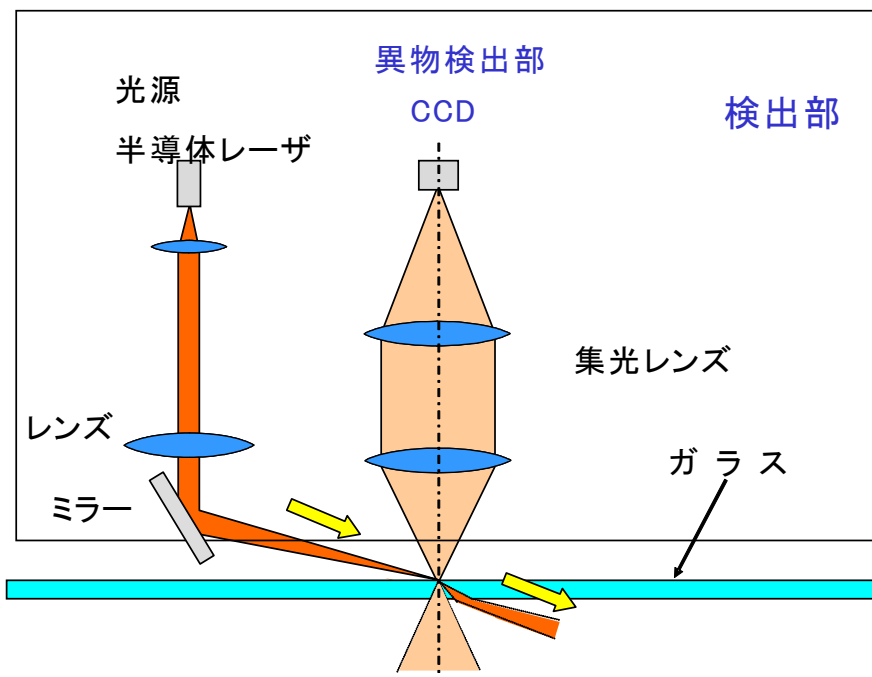


図 10 ガラス基板検査装置検出部

液晶用ガラス基板は、パターンが形成されるガラス基板の表面に付着する異物が欠陥の原因となることから、表面と裏面とを弁別して検出する必要がある。この装置は、異物の検出方法の一つとして光学的検出方法が用いられている。光源は半導体レーザーを使用し、レンズ・ミラーを介してガラス基板表面に低角度でレーザー光を照射する。パーティクルがあるとそこで散乱光が発生し、その散乱光は集光レンズを通して CCD (Charge Coupled Device) 受光素子により受光し、パーティクル信号として検出する。

また、このときガラス裏面に異物があっても、レーザー光が当たらず、散乱光が発生しな

いため、裏面異物（50 μm まで）は検出しない。表裏分離機能の確認マップを図 11 に示す。

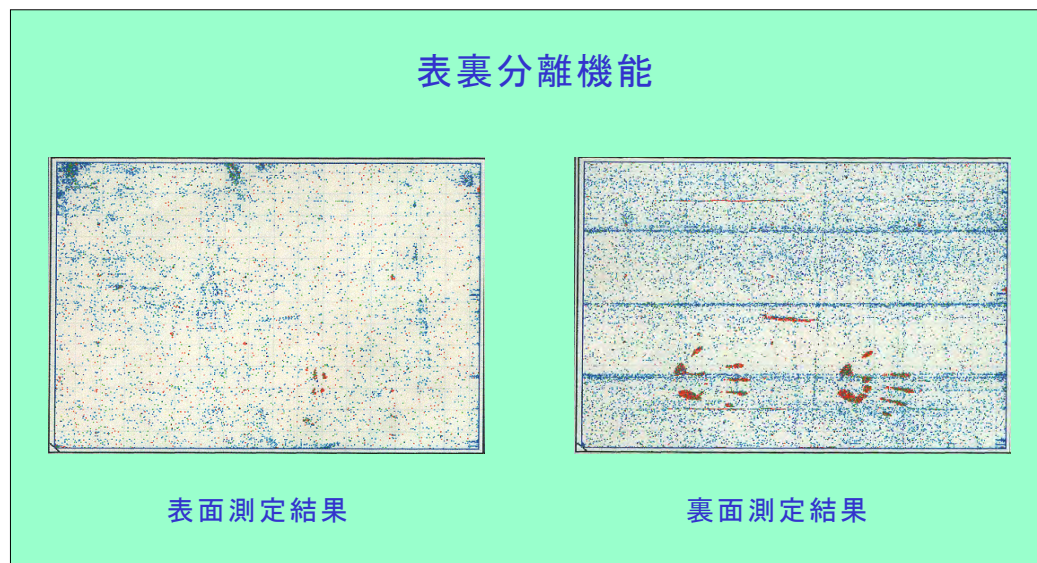


図 11 ガラス基板検査装置検出結果

パターン形成面（表面）に付着する異物が欠陥の原因となる。一方、裏面は基板搬送により異物付着頻度は高いが、欠陥の原因となることは少ない。したがって、ガラス基板の表面と裏面の異物を弁別して検出、管理する必要がある。この二つのマップは同一基板の表面と裏面の 0.3 μm 感度での測定結果である。

左側のマップはガラス表面を 0.3 μm 感度で検出した結果で、右側マップは同じ感度でガラスの裏面を測定した結果である。裏面の手の跡は実験のため、意図的に付着させたものである。マップは S・M・L サイズを 3 色で色分けしており、裏面の測定結果では、基板搬送時のローラの接触跡、手で触って汚染した跡を検出している。

しかし、この基板を表面から測定すると裏面に付着している S サイズのローラの跡はもちろんのこと、L サイズの手で触った汚染跡も検出していない。手で触った跡も弁別できるほど表面と裏面のパーティクルの弁別ができていることがわかる。

a.5 今後の展望

ここでは、大型化が加速する液晶用ガラス基板の検査装置技術について述べた。

液晶ディスプレイは、市場拡大と急激な価格低下が進んでいる。このような状況下で、液晶パネルメーカーも投資効率が高く、低価格パネルの生産が可能な第 8 世代ラインによる量産を実施している。さらなる生産性の向上を目的とした 1 辺の長さが 3m を越えるマザーガラスによる生産ラインの構築が計画されている。次世代ラインに対応するためには、

装置の高速化、高感度化は必然であるが生産コスト低減に対応して装置の小型化、分割などトータルコストの削減を図っていく必要がある。

液晶製造装置業界の共通の開発テーマは、装置の種類を問わず、生産性の向上とコストの低減である。今後も、このテーマを念頭におき、さらなる超大型化に対する製造・検査装置、および次世代プロセス革新対応への技術開発を進め、液晶産業の発展に寄与していく考えである。

参考文献

- 1) Production Cost Saving (PCS) Forum-FPD-PhaseIV Roadmap 報告書, SEMI ジャパン (2002.4)
- 2) 液晶ディスプレイ製造装置用語辞典, 日本半導体製造装置協会 (1999.10)

(南 博文)

b) カラーフィルターの検査

b.1 はじめに

フラットパネルディスプレイ（FPD ; Flat Panel Display）の製造工程では、ガラス基板を大型化して、生産タクトタイムの短縮、製造設備、建物の償却費負担の軽減に向かって、プロセスそのものの改革とあわせて、大型化の方向で生産改革が進んでいる。半導体は微細化、高集積化で1トランジスタの単価を下げられるのに反して、ディスプレイという人間の目に見せるという機能から、微細化には限度があることから、ディスプレイのインチ当たりの単価を下げる努力は、大型化による生産性の向上に向けられている。

FPDの表示技術面では、液晶ディスプレイパネル（LCD ; Liquid Crystal Display）では、広視野角、ハイコントラスト、高速応答、高精細化が、プラズマディスプレイパネル（PDP ; Plasma Display Panel）では省電力、ハイコントラスト、高精細化が課題でありこの為の技術革新が進んでいる。

本稿は液晶ディスプレイに用いられるカラーフィルターの検査についてその技術、装置について述べる。

カラーフィルターの製造工程は大きく分けて4つの工程（1. ブラックマトリックス（BM ; Black Matrix）形成工程、2. RGB（Red,Green,Blue）着色工程、3. 透明導電性膜（ITO ; Indium Tin Oxide）/保護膜（OC ; Over Coat）形成工程、4. フォトスペーサー（PS ; Photo Spacer）形成工程）により生産されている。その各々の工程で検査装置を導入し、そのデータにより欠陥の早期発見と対策が行われている。

生産面における大型化、表示技術面における新技術導入等は新しい挑戦であるため、生産ラインの歩留まりは当初は低い状態にある。そのため、その不具合を検査機で検出し、フィードバックをかけ、歩留りを改善していく。

量産立ち上げ初期には、様々な予期しないトラブルが発生する。その原因を早く突き止め、対策を打ち、早く生産ラインを立ち上げるには検査機からの情報が不可欠である。

生産ラインが初期立ち上げ段階を過ぎ、安定稼動状態になってからは、検査機から出力されるデータは次のように活用されている。

検査の結果、欠陥と判定された部分については、検査装置はその欠陥座標データと欠陥を含んだその周辺の画像データとを出力し、後工程での人間の目によるレビュー、または出力された画像データに対しては自動分類処理にかけられ、修正可能なものについては修正工程に送られる（図1）。

パネルメーカー各社は熾烈な歩留まり競争、表示技術競争を繰り広げており、そのために貢献するツールとして、各種検査装置が使われている。

ここで述べる検査は光を用いた外観検査を対象とし、カラーフィルター製造工程の各工程における検査の実際と課題について述べる。

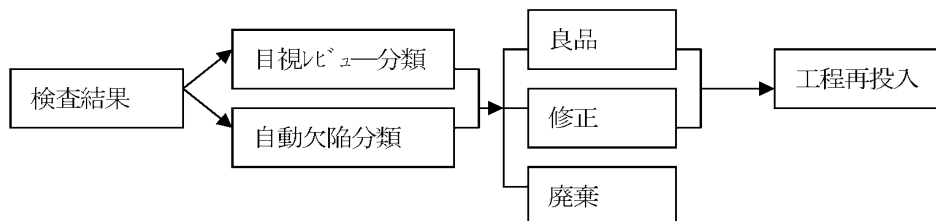


図1 検査結果データの活用

b.2 カラーフィルターの検査技術

この工程は素ガラスにBMを形成し、開口部に赤、緑、青のカラーレジストを塗布し、その上にITO、OCをコートし、更に液晶を入れるスペースを確保する為のPSを形成する工程である。この工程は図2のような工程と検査工程で構成されている。この各々について以下に解説する。

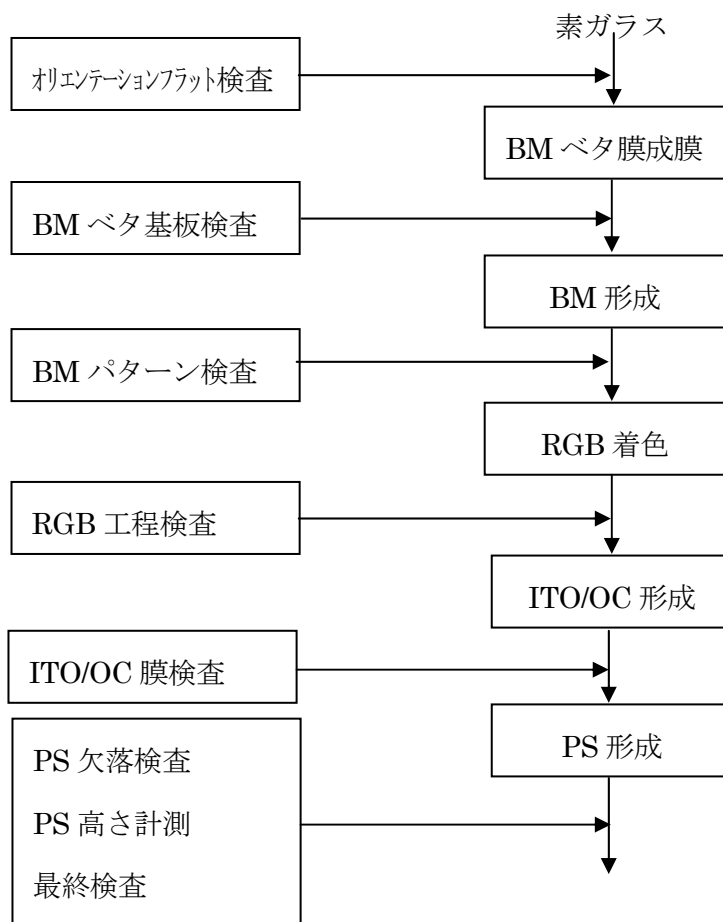


図2 カラーフィルター工程と検査

(1) 検査内容

① オリエンテーションフラット検査

開梱後の素ガラス基板のコーナー部のオリエンテーションフラットの方向及び形状の検査を行い、異品種、異常品の混入防止、及びライン投入方向の確認を行う。

検査は簡単なエリアカメラで行う。

② BM ベタ基板検査

ラインセンサーを複数個並べた光学検査装置（AOI ; Auto Optical Inspection System）にてベタ膜のピンホール検査を行う。また、特性検査として成膜の透過率を透過率計により測定し、反射型分光測定装置により膜厚管理と反射分光特性の計測を行う。

③ BM パターン検査

BM パターンの欠陥検査をラインセンサー複数個並べた AOI で行う。

検査項目としては BM 残り、ピンホール、欠け、異物等がある。また表示部外の周辺部の BM マークの形状検査も行う。

④ RGB 工程検査

この工程は赤、緑、青の各色をそれぞれの工程で塗り分ける工程で、例えば R 工程では、BM パターン形成後のガラス面に赤のレジストを全面塗布し、次にパターンを露光し、洗浄工程にて不要なレジストを洗い流して、所定の位置に赤のレジストを残す。このようなプロセスを残りの緑、青の着色工程において繰り返す。

検査は、この 1 工程後毎行う。ラインセンサーを複数個並べ、透過光、反射光を使い、検査項目としては、白抜け（カラーレジストが無い欠陥）、カラーレジストの混色、異物、突起等である。そして R、G、B 工程全てが終了した後、次工程にはいる前に最終検査を行う。

R、G、B 工程検査は 3 枚に 1 枚等の抜き取り検査の場合が多いが、最終検査は全数検査が行われる。検出すべき欠陥の大きさの最低限度は 15~25 μ m 角である。

また、各レジストを全面塗布した後、露光プロセスの前にムラ検査をする場合もある、このムラはレジストの膜厚のマクロな変化が原因である場合が多く、検査はエリアカメラにてマクロ的に見て行う。

⑤ ITO / OC 膜検査

ITO 膜や OC 膜成膜後のピンホール、異物の検査をラインセンサー複数個並べた AOI により行う。

⑥ PS 欠落検査

PS は液晶が入るスペースを確保するスペーサーで、直径 8~15 μm 、高さ約 3 μm である。この PS の形成方法は透明膜を全面に塗布し、露光し、不要な部分を洗い流して、BM 上に周期的に膜を残す。この残った部分が液晶の入るスペースを確保する柱となる。この検出は他のカラーフィルター用 AOI よりも分解能を細かく設定した装置により行う。PS 形成後、欠落検査を行うが、PS の欠落は集団で発生することがあるので、PS を検出し、良否判断は一定領域毎の PS 個数、即ち PS の密度により行う。

⑦ PS 高さ計測

カラーフィルター上に形成された PS の高さを、光干渉法により、サンプリング計測し、合否判定をする。

⑧ 最終検査

全ての工程が終了した後、BM、R、G、B、OC、ITO 各種パターン検査、異物の検査を AOI にて行う。

なお、上記全ての検査により検出された欠陥を目視により再検査するためにレビュー装置がある。AOI の判断と人間の判断との整合をとり、修正すべきか、廃棄すべきか、良品とすべきかを判定する。

(2) 検査技術

上記各種検査で説明してきた検査装置で中心的なものはラインセンサーを用いた AOI である。この検査装置の構成と検査アルゴリズムについて以下に述べる。

① 構成

図 3 に検査部の画像処理装置の構成を示す。図はラインセンサーカメラ 1 台の場合の構成である。カメラから入力された画像データはハードウェアで前処理され、高速 CPU (Central Processing Unit) で処理する画像処理部へ転送され、ソフト処理により個別の対応、高度な処理が行われる。処理の内容により、処理ボードの枚数、即ち CPU の個数が決まる。

画像処理部で処理された画像データはパーソナルコンピューターに送られ、最終処理をされた後、ローカル・エリア・ネット・ワーク (LAN ; Local Area Network) を通して工場内のサーバーに送られる。

② 基本処理アルゴリズム

画像処理の基本アルゴリズムは繰り返し比較法である。ディスプレイ用パターンは繰り返しパタ

ーンが多く、一定の間隔に同じパターンが存在するという特性を利用して、絵素毎に対応する同じ位置の画素の明るさは同じはずである。そうでない場合は欠陥があると考え、欠陥候補とする。そしてさらにプロセス毎に特有な要素を判定に加え、最終的な欠陥判定を行う。図4にその概念図を示す。

例えば比較ピッチをカラーフィルターの同色絵素間の距離 $X1$ を設定する。この場合、欠陥のない基板であれば a 、 b 、 c の輝度は、 $a \doteq b \doteq c$ となる。 $(a-b) \doteq (b-c)$ であれば異常ないが、 $(a-b)$ と $(b-c)$ との差が設定した閾値より高ければ a 、 b 、 c のどれかの画素が異常であると考え、他の比較演算の結果も突き合わせ、欠陥候補として上位の判定処理部にデータを送る。

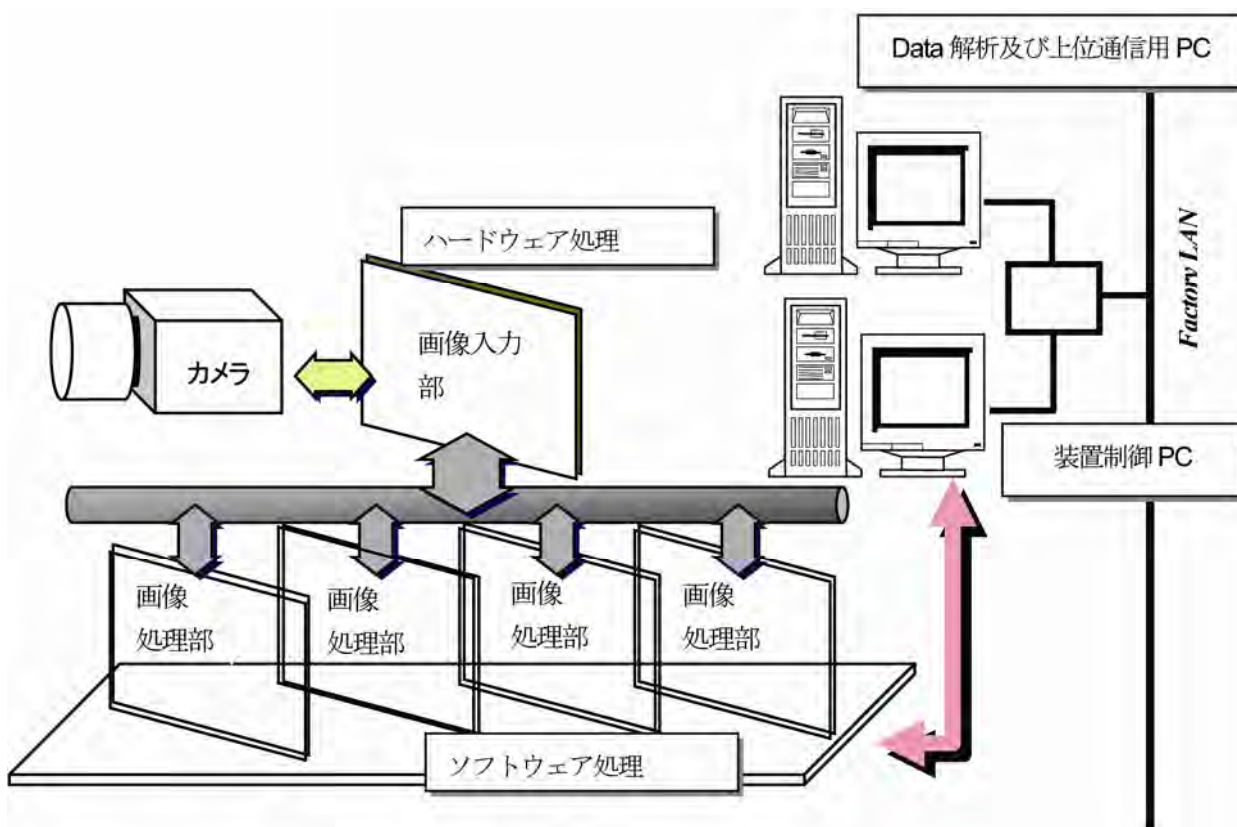


図3 画像処理装置構成

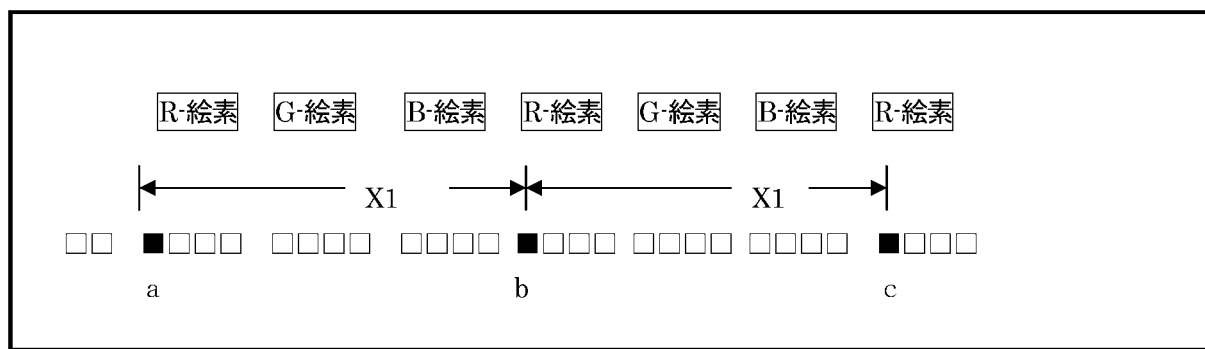


図4 繰り返し比較処理概念図

③ 並列処理

カラーフィルターにはカラーレジストのみでなく ITO 膜、OC 膜、PS などの別々の機能を果たすものが、違うプロセスを経て形成されている。それらが、プロセスの最終段階では集積されてくる結果、検査手法の基本は繰り返し比較法とはいいいながら、同一アルゴリズムでは目的の処理ができない。その為、各種の処理を並列で行っている。具体的には図 5 に示すが、カラーフィルター、BM、ITO、OC にまつわる 15~25 μm の欠陥検出は Micro 欠陥処理として、通常の比較間隔を越えて欠陥部分が広がっているものは Macro 欠陥処理として、PS の欠陥検査は PS カウント処理として、並列処理を行っている。

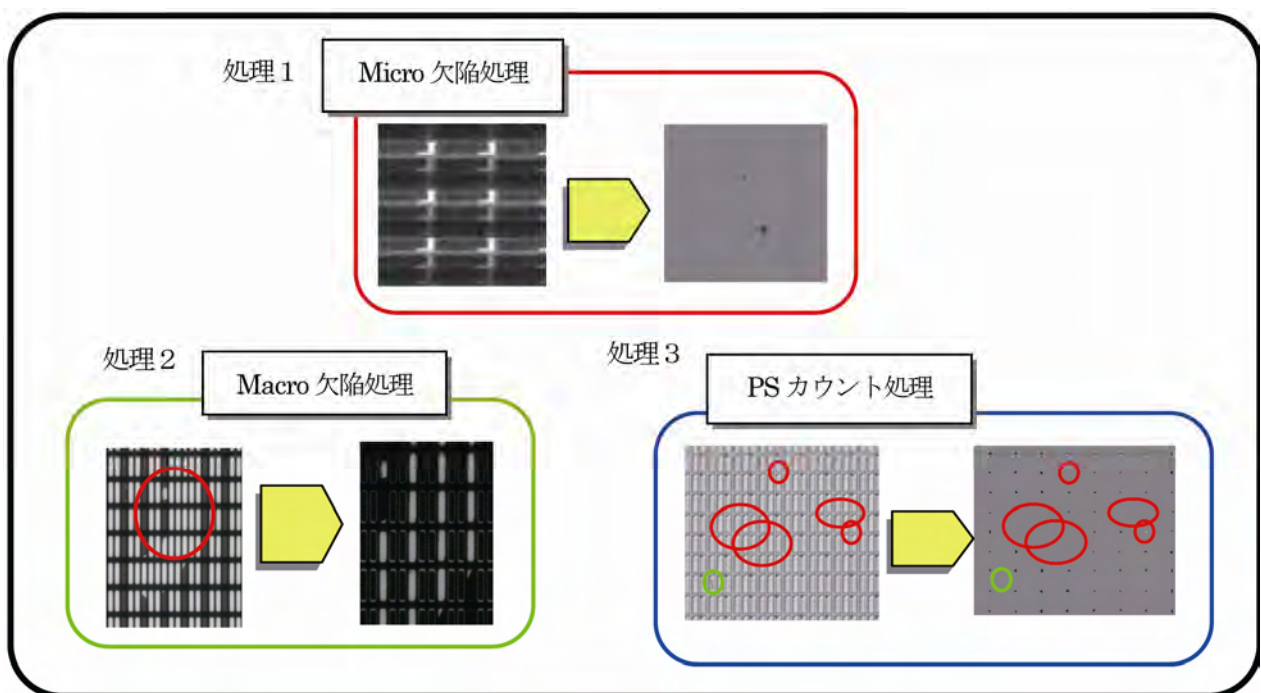


図 5 並列処理

④ S/N 向上対策

カラーフィルター工程は大きく分けて、半導体のプロセスと同じフォトリソグラフィ工程と R、G、B の着色レジストの塗布工程とが混在する工程である。着色レジストは膜厚が厚く、半導体工程のような薄膜で均一な状態ではなく、断面を見ると、BM、着色レジストが重なりあったデコボコの状態である。また着色レジストが重なる部分ではその境界線はストレートではなく、うねって重なっている。したがって、取り込まれた画像はそれらの 3 次元形状を反映して、繰り返し比較する画素間の濃淡レベルで微妙に差がある。欠陥ではないが濃度差があるために欠陥（擬似欠陥という）と認識してしまう場合がある。その対策として閾値を大きくすれば検査が甘くな

り、欠陥を見逃してしまうというジレンマがある。この対策として小欠陥を見逃さずに、擬似欠陥を出さないという工夫が検査装置メーカー各社で行われている。その一例を図 6 に示す。

良品部の濃淡輝度の揺らぎを考慮した演算を行うことにより、欠陥部のみを抽出している(図 6 c. S/N 対策処理)。また 1 画素レベルの PS を画像化した場合、(図 6 d. 通常処理)のように 1 画素レベルの PS 以外にも画像化されるが、(図 6 e. S/N 対策処理)により PS のみを確実に抽出できている。

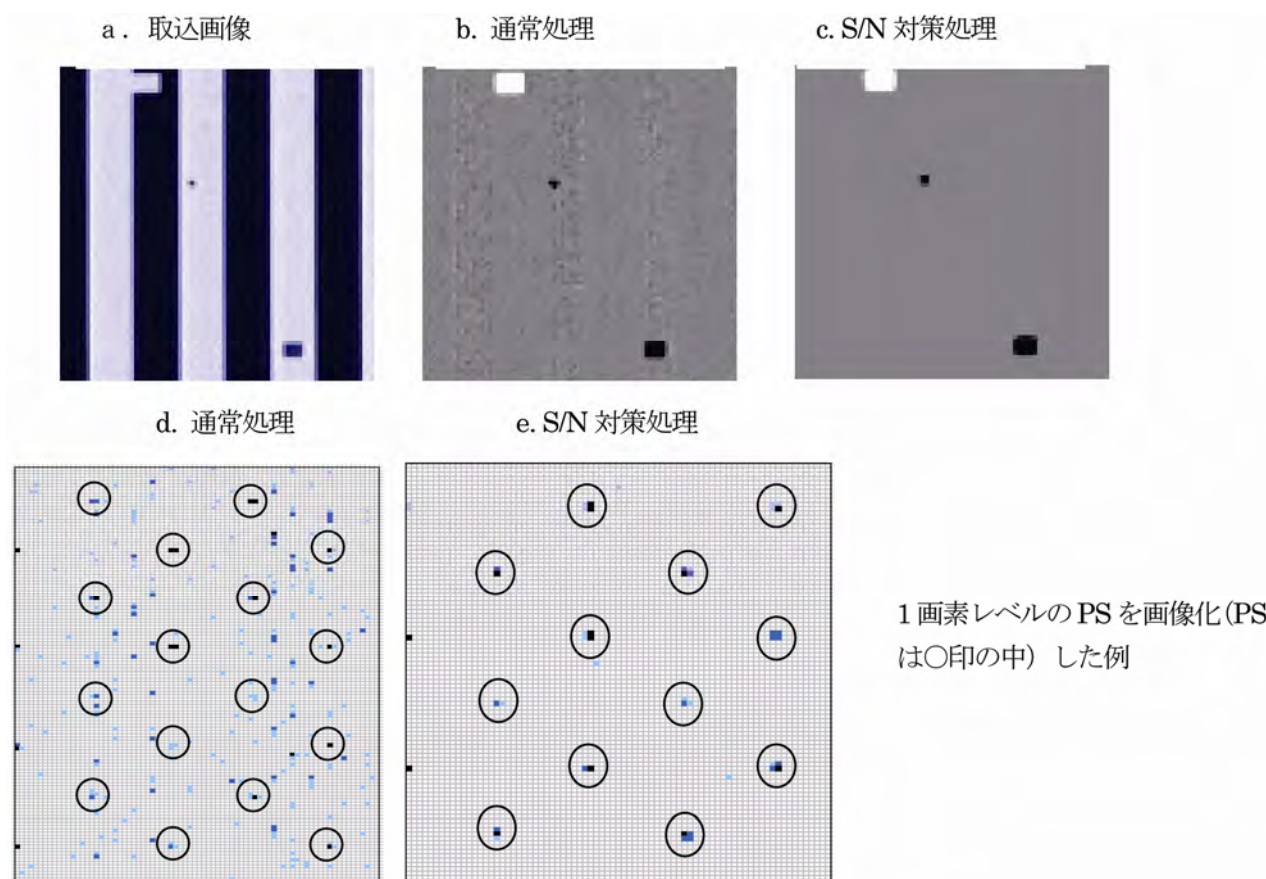


図 6 S/N 向上対策処理

⑤ PS 高さ計測

カラーフィルター上に形成された PS の高さを、白色干渉法により計測する。全数計測は時間的に無理であるので、マザーガラスの中のパネルごとに、数箇所サンプリング計測する。この高さ精度は 10nm 程度が必要である。PS は液晶の入るスペースを確保する為の柱であるが、液晶を過不足なく滴下するためにこの精度が必要である。

図 7 に白色干渉法の原理図を、図 8 に PS 測定方法の実際を示す。

白色光源から出た光のうち被測定物からの反射光と参照ミラーからの反射光が干渉するように光学部品を配置して図の圧電素子により $D2$ を変化させたとき、 $D1=D2$ となったとき、全ての波

長において干渉が起こる。このときの D2 即ち圧電素子の移動量から被測定物の底面からの相対的高さを計測する。

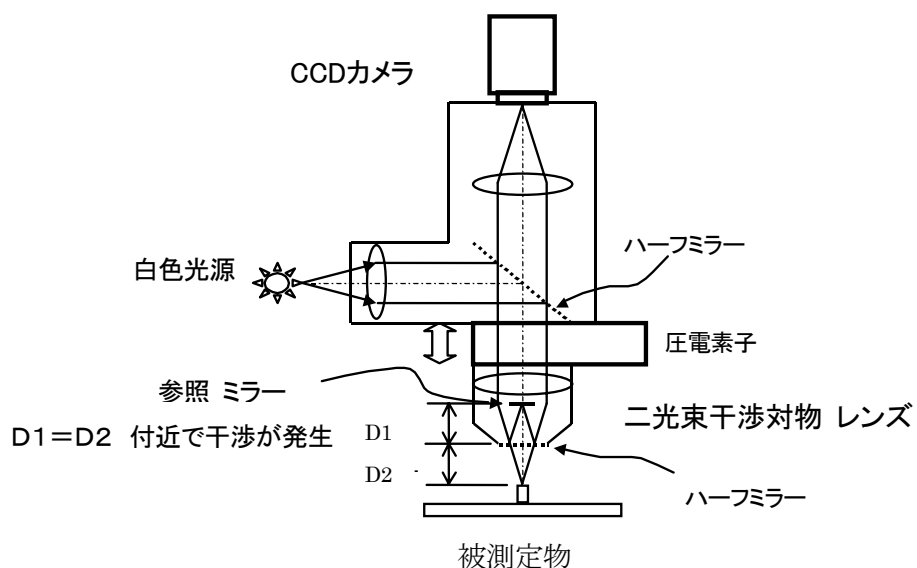


図7. 白色干渉原理図

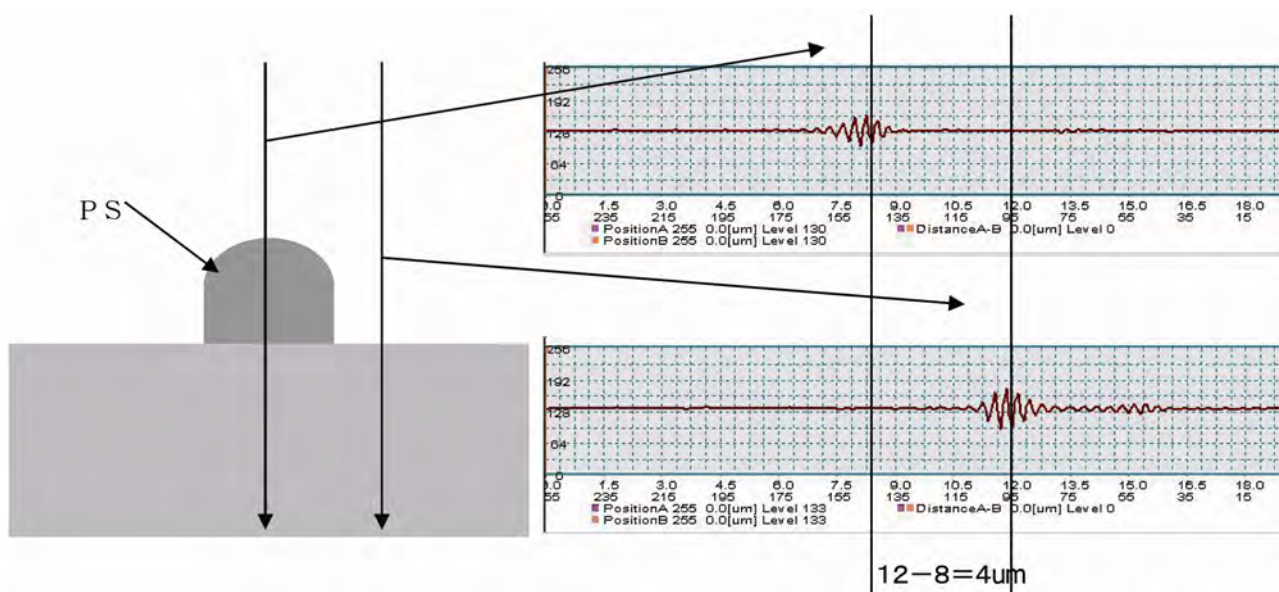


図8 PS測定方法

⑥ 工程の進化に伴う課題

現在は、フォトリソグラフィ方式によるパターン形成方法が主であるため、BM工程、R、G、

B 着色工程のそれぞれで露光、現像、洗浄を繰り返す必要がある。従って、製造装置、検査装置、修正装置を工程毎に配置しなければならず、設備投資額が多大なものとなっている。更に、マザーガラスのサイズが大型化することにより、製造装置、検査装置、修正装置などのコストアップおよび装置設置面積の拡大に伴い、建屋自体にかかる費用も増えてきている。カラーフィルターメーカーは、これらの問題解決のため従来の工程を抜本的に見直し、製造工程を減らすことにより設備投資額の大幅な圧縮を図る工夫をしている。その代表的な例の概要を下記に説明する。

1) 反転印刷法

- ・ BM、R、G、B を同時印刷
- ・ 従来の印刷法で最大の弱点であった高精細基板を、版を逆に作ることで可能にした。
- ・ 露光、現像、洗浄などのプロセスを無くすことができ、生産性の向上と設備面積の圧縮が可能となる。

2) インクジェット法

- ・ R、G、B の 3 色工程が同時に可能。
- ・ フォトリソグラフィー方式で大量に破棄していたレジスト材料の使用量を約 10 分の 1 にできる。
- ・ 露光、現像、洗浄などのプロセスを無くすことができ、生産性の向上と設備面積の圧縮が可能となる。

パターン形成方法の変化に伴う検査装置の課題としては以下の内容がある。

1) 反転印刷法の場合

フォトリソグラフィー方式ではなかった、版で基板に転写する際の、良品レベルの僅かなパターンピッチずれがある。従って、検査装置ではピッチずれによる擬似欠陥を抑止する機能が必要となる。

2) インクジェット方式の場合

インクジェット法の場合、インクの塗布ムラなどの従来のフォトリソグラフィー方式では少なかった欠陥モードが発生する。インク塗布ムラは発生する箇所や程度により、欠陥とする場合や欠陥と扱わない場合がある。従って、検査装置に求められる性能として、欠陥候補として抽出した情報から、更にその発生箇所、輝度情報などから欠陥とすべきか良品として扱うべきかを判断する機能が必要となる。

b.3 今後の展望

液晶パネルの製造工程では、マザーガラス（製造工程で生産される、液晶パネルを複数枚取れる大型ガラス）の大型化により、生産効率を上げることに投資、開発の力点を置いてきた。この動きに従い、検査装置も大型化を進めてきた。マザーガラスの世代が1世代上がる毎にその面積は約1.5倍～2倍になるが、生産のタクトタイムはその率では長くないので、検査コストを上げずに、検査時間を短縮する必要がある、その方向の開発を重点的に行ってきた。

今後は、第11世代（ガラスサイズ；3000×3300mm）の大きさを、マザーガラスの大型化指向は一段落するものと見られており、検査装置の方向性としては、未だ完成していない技術として

- 1) ムラの検出
- 2) 欠陥の分類

が挙げられる。1) ムラ検査は、従来の微細欠陥を検出する方法とは異なり、マクロ的にわずかなコントラストの違いを検出する技術であり、2) 欠陥の分類は、欠陥を生ずる原因の推定や欠陥を修正する際に有用な情報としてニーズが高い。いずれの技術も未完の技術であり、製造工程の効率、歩留りを上げることに寄与する技術であるので、これらを組み込んだコストパフォーマンスの高い装置を完成させることが望まれる。

(小田切 章)

c) アレイ検査

c.1 はじめに

近年、液晶パネル生産におけるマザーガラスの大型化、液晶テレビ用パネルの大型化・フル HD (High Definition) 対応による高精細化が急速に進んでいる。液晶パネル製造工程における生産性向上のため、全数パネルの検査が一般化している。また、最終製品における無欠陥製品に対する要求も増加している。各工程間における欠陥流出による歩留まり低下の防止、中間工程での欠陥修正による不良品救済のための検査装置に対する要求が高まっている。

液晶パネル用 TFT (Thin Film Transistor) アレイ基板検査には、電子ビームやコンタクトプローブを用いて、電氣的に TFT アレイパターンの断線・短絡を検査する電気式検査方法と、照明光と光検出器を組み合わせて、異物の混入やアレイパターン規則性を検査する光学式検査方法の二種類がある。ここでは、光学検査装置 (AOI; Auto Optical Inspection System) に関する技術を紹介する。

c.2 外観検査装置の用途

液晶用 TFT アレイ基板の外観検査装置の用途として、主に以下の三つの用途が挙げられる。

① 解析用途

- ・ 生産ライン立ち上げ時の歩留まり向上のためのプロセス改善
- ・ 新規製品立ち上げ時の各種プロセス条件の最適化

② プロセス管理

- ・ 量産工程におけるプロセス監視
- ・ 突発的なプロセス異常の早期検知とプロセス改善のためのフィードバック

③ 修正目的

- ・ 工程上致命的な欠陥の流出防止と修正装置への迅速なフィードバック
- ・ 不良品発生による生産コストアップの防止(良品/不良品の判定)

光学式検査においては、電気式検査による断線・短絡検査と比較して、以下に挙げるような利点がある。

- ① 中間工程における、点欠陥の検出が可能
 - ・ パターン欠けによる半断線の検出
- ② 正確な欠陥位置の特定が可能
 - ・ 修正装置に対して、正確・迅速なフィードバックが可能
- ③ 品種変更が容易
 - ・ 検査用レシピの変更のみで対応が可能
 - ・ プローブカード等の付帯設備が不要
 - ・ 非接触方式のため、基板に対する損傷がない

c.3 検査装置概要

検査対象基板サイズの大型化に伴い、欠陥検出用のカメラヘッドを複数台設置した門柱型の検査ヘッドを固定して、検査対象基板を流れ方向に移動させる方法が一般的となっている。検査カメラヘッドは、分解能が約 $10\mu\text{m}$ 、画素数が約 7,000 の検出器を必要数並べた構成となる。基板上での検出分解能は、検査光学系の設計倍率によって、 $2\sim 10\mu\text{m}$ 程度に設定されている。検査用照明光学系は、透過照明、反射照明、または両者が組み合わされたものが設置されている。

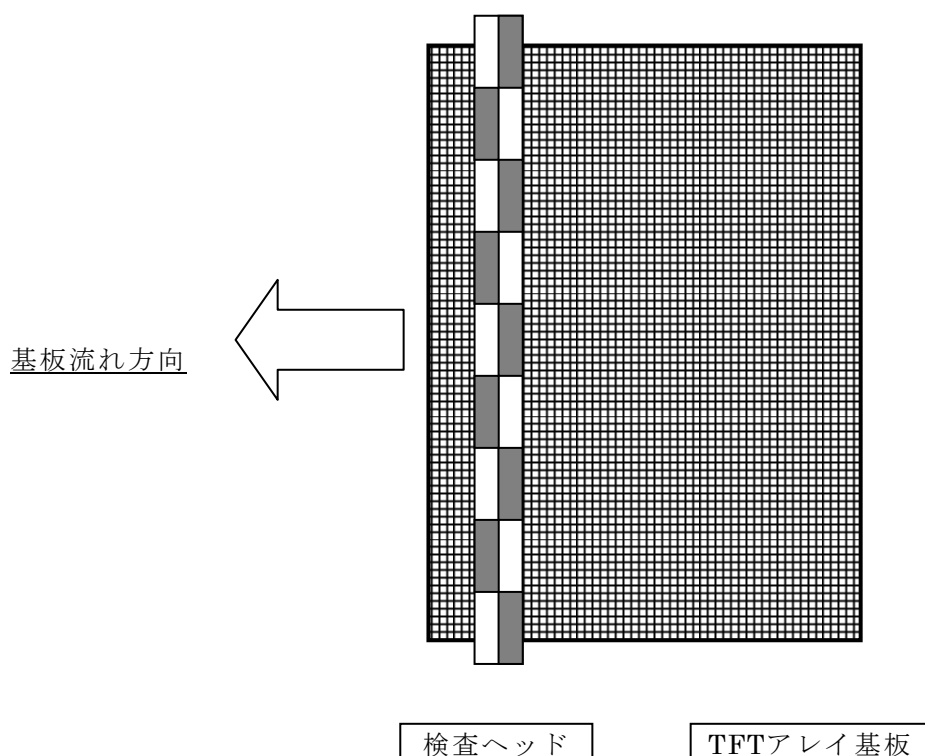


図 1 検査装置模式図

c.4 欠陥検出原理

TFT アレイパターンは、同一形状のパターンが一定周期で繰り返されている構造である。隣接パターンとの画像信号を比較することで、欠陥の有無を検出することが可能となる。検出画像信号と一画素周期分だけずらしたシフト画像信号との間で、差分画像信号を形成する。差分画像信号に対して、正方向・負方向（白欠陥・黒欠陥）に対して、それぞれしきい値を設定する。差分画像信号において、しきい値を超える信号を検出した場合を欠陥信号とし、欠陥座標位置、欠陥サイズ、欠陥属性を記憶する。

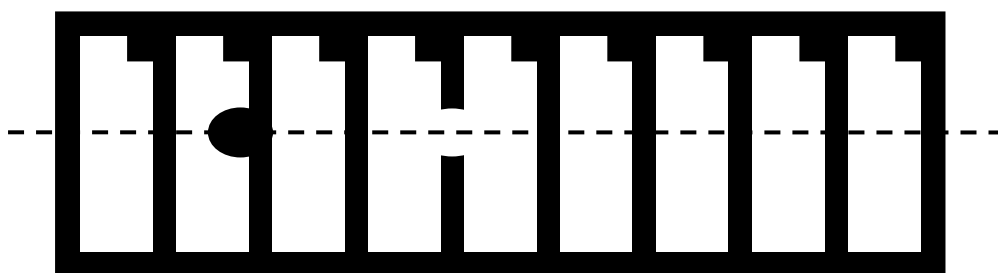


図 2 TFT アレイパターン

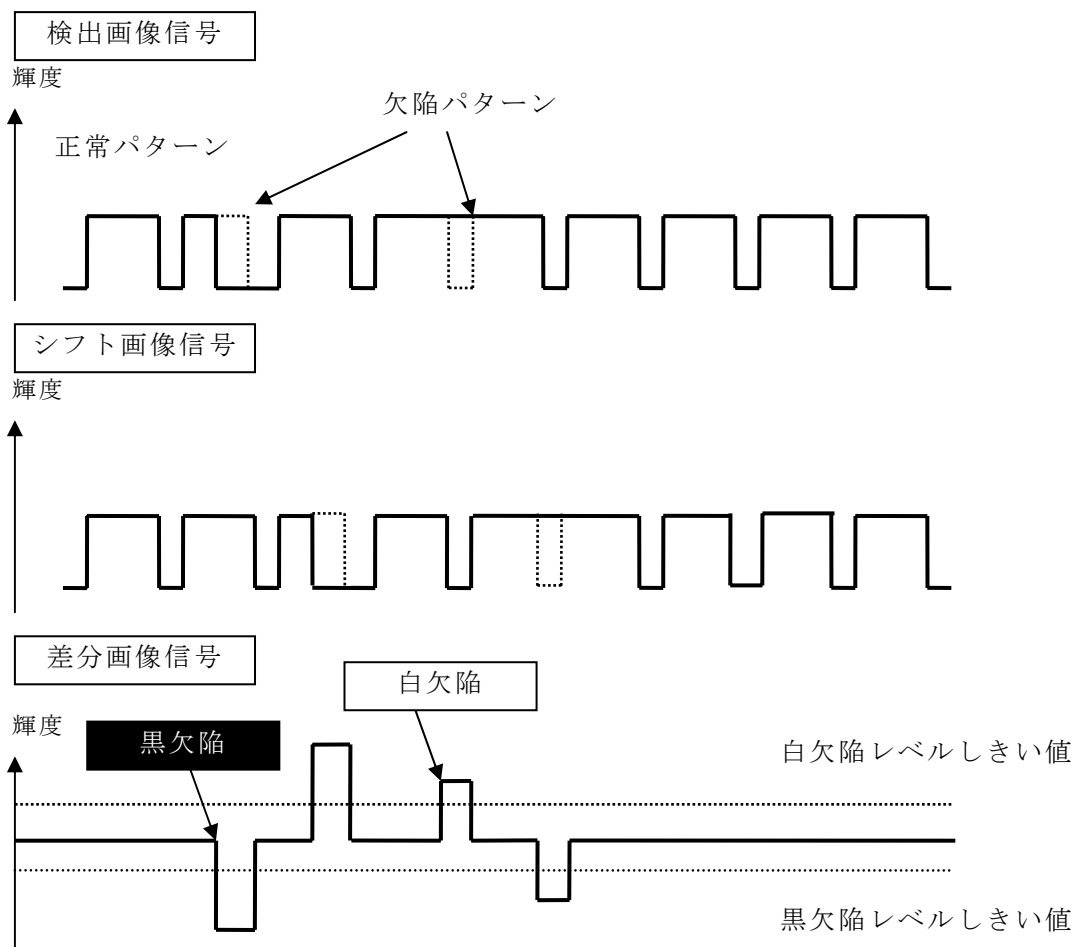


図 3 欠陥信号概念図

c.5 検査装置に対する要求・課題

検査対象基板の大面积化、検査処理時間短縮の要求に伴い、検査処理時の画像信号の高速転送に対して、様々な取り組みが成されている。

液晶パネルのフル HD 化対応のために、画素サイズが微細化されている。また、液晶パネルの特性改善のために、画素内における微細な ITO 電極パターンの形成や、絶縁膜の形成が行われている。これらの光学的に透明に近い素材で形成された膜面上の欠陥は、高反射率・低透過率の金属電極配線と比較して、低コントラストの欠陥となることが多い。欠陥画像信号におけるコントラスト強調の取り組みがされている。また、検出対象となる欠陥サイズも微細になり、検出感度に対する要求も厳しくなっている。

c.6 今後の展望

検査装置の機能として、検出された対象欠陥の欠陥分類が今後重要になると思われる。検出欠陥がパネル表示特性に影響を与えるものかどうか、中間工程での修正が可能かどうかを、検査機上で正確・迅速に判定することにより、液晶パネル製造工程における歩留まり向上や生産効率の向上に貢献するものとする。

(山内良彦)

d) 寸法検査（座標・線幅測定）

d.1) 基板検査

d.1.1 はじめに

これから出てくる座標測定、線幅測定について説明すると、座標測定とは軸の移動（もしくは、検出部の移動）を伴う測定を指し、線幅測定とは軸の移動（もしくは、検出部の移動）を伴わない1つの画像内での測定を示す。

寸法検査における座標測定は、第一層にある管理マークを測定し露光の縮尺・位置ずれの誤差を検査する。その理由として、液晶ディスプレイ（LCD ; Liquid Crystal Display）での第 4.5 世代もしくは第 5 世代程度までと異なり、年々、大型化する基板では露光を分割しておこなうため、1枚の基板の各露光の位置ずれが各層の重なり合いのズレや薄膜トランジスタ（TFT ; Thin Film Transistor）とカラーフィルターパネル（CF ; Color Filter Panel）張り合わせ時のズレの要因になる。このため、座標測定の結果を露光機にフィードバックすることでプロセスの安定を図る。

ワーク座標系を設定するためのアライメント測定においても、基板の大型化による分割露光に伴う変化が見られる。以前は、基板4隅のうち1辺側2点のアライメントマークを測定し、2点の midpoint から設計値を基にして所定の量を基板の中央側に移動した仮想点をワーク座標の原点とすることが多かった。しかし、露光の分割数が多くなると今までの2点アライメント測定では、分割露光による位置ズレの誤差が多く出てしまう。現在では、基板4隅のアライメントマークを測定し、その4点の中心をワーク座標の原点とすることで各露光の誤差を分散する傾向にある。

また、座標測定機で第一層の管理マークの測定と同一層の線幅測定を兼ねることで、線幅測定機への搬送の無駄を省き効率化を図る企業も増えている。

寸法検査における線幅測定は、各層のパターンの線幅と層と層とのパターンの重なり具合の測定になる。測定位置としては、それぞれの測定のための管理マークや実パターン上の線幅や重なり合い測定があり測定箇所も多い。ただし、第一層は線幅測定のみである。測定箇所が多い理由として、線幅測定では各層でのパターンである線幅の出来具合が管理され、重なり合いの測定では露光の位置ずれや縮尺（各分割された露光の位置ずれにより縮尺比がわかる）が管理される。また、重なり合いの測定では各層でのズレ量を測定し露光機にフィードバックされる。

また、線幅測定機ではパターン欠陥検査機からの欠陥位置データを取り込みカラー画像のレビュー機能や画像の保存や測定箇所のカラ画像保存などの要求が多くなっている。これも欠陥と思われる線幅の出来具合や重なり具合を数値だけでなく、画像でも管理する傾向にあるためである。

このように、基板の大型化による単純なパターンの縮尺・位置ずれの管理だけではなく、露光の分割によりパターンの縮尺・位置ずれも複雑化し、座標および線幅測定の重要性が高くなっている。

d.1.2 測定原理

測定原理は、従来の技術であり非常に単純である。一般的に軸（もしくは、検出部）の移動量を検出するための X 軸と Y 軸のスケールとパターンを検出するためのエリアカメラ内の XY 座標値の演算である。

移動量を検出した X 軸と Y 軸のスケール値に対して、移動軸の姿勢差による誤差や環境差による誤差を付加した値を X_t, Y_t とし、エアリアカメラで検出された XY 座標値を X_c, Y_c とした座標値 X, Y は、

$$(X , Y) = (X_t + X_c , Y_t + Y_c)$$

となる。

移動量を検出するスケールとしては、レーザースケールやリニアスケールなどが用いられる。当社では、高精度の座標測定機には日本国の長さ標準であるよう素安定化ヘリウムネオンレーザーからトレースしたヘリウムネオンレーザースケールを採用しており、線幅測定機や通常の座標測定機ではガラス製リニアスケールを採用している。

エリアカメラのスケールとは、エリアカメラ内の画素間（画素と画素の距離）に値付けを行い検出したエリアカメラ内の基準位置からの距離を検出する。この検出の分解能は、各社、画像処理の方法としていろいろあるが、当社では 256 階調のグレースケール処理により画素間を更に分割している。

また、一部の線幅測定機では透明導電膜（ITO；酸化インジウムスズ）パターンなどの画像にコントラストが出にくいパターンの検出に白色干渉法を用いた三次元計測装置から線幅測定を行う場合もある。

d.1.3 今後の展望

LCD での第 8 世代までの座標測定機では、基板の大型化に伴い本体を一枚の石定盤で構成された XY ステージで対応してきた。しかしながら、第 10 世代以上になると、本体を一枚の石定盤で構成された XY ステージでは、本体の大きさが輸送限界に到達し対応できない。また、素材ガラスの熱膨張係数も $3.2 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ から $3.8 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 程度であるため、 0.1°C の測定環境変化で長辺方向が約 $1\mu\text{m}$ 変化する。現状では T.C.C. (Thermal Clean Chamber) に収納された座標測定機の測定面での温度分布を 0.1°C 以下にして温度変動も抑える必要がある。しかし、装置要求精度に至っても、先に述べたように座標測定の重要性もあり高い精度(第 6 世代以降でも、基板サイズに関わらず同等の精度)が要求される。よって、測定環境の更なる向上が課題となる。

線幅測定機については、測定点が多く装置の処理能力の向上が求められるため、検出部を多数にすることで対応してきた。ITO パターンの測定に対しても、現状では特定の波長の照明で画像のコントラストを向上させ測定を可能にしてきたが、基板の大型化に伴い基板の位置による膜の厚みに不均一さが見受けられる。この場合、特定の波長のみの照明を使用した場合にパターンのコントラストに変化がでるだけでなく、ひどいものはパターンの明暗が反転してしまう。

また、装置立ち上げ時、もしくは、装置選定におけるサンプル測定時と異なる膜厚に変化した場合、測定不可能に陥る危険がある。この課題に対しては、現状では多くのサンプルを測定し照明条件や測定方法の改善を行う必要がある。

コストについても大きな課題と言える。第 10 世代以上では装置の大型化により、装置の製造工場で組立・調整をおこなった装置を分解搬送し顧客先で再組立となり、この組立には重量物を扱うためのクレーンなどの設備も必要になる。更に、第 10 世代以上の工場を立ち上げる顧客も数社と見られており装置台数も見込めない。これらの理由により、輸送コストもちろんのこと、今まで発生しなかったコストが大幅に増加する。しかし、コストの増加による装置価格の大幅な増加は顧客のニーズに反することになる。今後は、装置の性能および精度を維持しつつ価格も極力抑えられるかが鍵となることは間違いない。

(濱砂智訓)

d.2) フォトマスク検査

d.2.1 はじめに

近年、フラットパネルディスプレイ（FPD ; Flat Panel Display）のパネルサイズの大型化に伴い、精密・微細・再現性に優れた基幹部品であるフォトマスクも世代に応じ大型化が進展している。フォトマスクはそのほとんどがパネルごとにデザインされ、各工程に適したコスト、精度、品質を実現する多種類のフォトマスクが利用されている一方で、近年パネルの製造工程を減らすことで、歩留り等の製造効率向上に貢献する高機能なフォトマスク（グレートーンマスク、スリットマスク）もすでに実用化されている。このように、製造されるパネルの精度や品質に直接影響する加工原版であるフォトマスクの大型化・高精度化・高機能化に伴って、これらを測定する装置の重要性もますます高まっている。このような動向に伴い、これらを測定する装置の課題としては以下の項目があげられる。

- 1) フォトマスクの加工精度の向上に対応した更なる測定の高精度化
- 2) 高機能化するフォトマスクを測定するための、測定用センサの高性能・高機能化
- 3) 大型化による測定効率およびスループットの向上
- 4) 測定装置の利便性の向上

本節では、先進的な企業におけるフォトマスクの寸法測定に関する現状の取り組み事項を紹介すると共に、課題を解決するための今後の展開に関して、その方向性を示す。

d.2.2 フォトマスクの寸法検査装置

フォトマスクの寸法検査システムには、画像処理、あるいは散乱光や透過光強度の変化を検出するシステムがあるが、現在、これらの検出方式を組み合わせた画像測定システムが広く用いられている。図1に寸法検査測定システムの外観図、および主な仕様の例を示した。



図1 フォトマスクの寸法検査システム

表 1 主な仕様 (例)

項 目	仕 様
測定範囲 (X×Y×Z) [mm]	800×800×150 ~ 2000×2500×100
最大測定物サイズ [mm]	幅 883×高さ 150 ~ 幅 2610×高さ 100
本体精度 [μm]	X/Y 軸 1.5+3L/1000 ~ 3.5+5L/1000 Z 軸 3+4L/1000 ~ 4.0+5L/1000
繰返し精度 3σ [μm]	長寸法 0.5 ~ 2.5 短寸法 0.2 ~ 0.2
駆動速度 [mm/s]	X/Y 軸 200 ~ 300 Z 軸 100 ~ 150

フォトマスクの寸法検査装置の目的として第一に正確な寸法測定的能力が要求される。これまで、マスクサイズの大型化に合わせて、測定システムの大型化も図られてきたが、さらなる大型化については、従来からの技術の延長では解決が難しい課題もある。ここではこれらの課題を含め、今後の技術展開を示す。

d.2.3 測定の高精度化

(1) 大型載物テーブルの高剛性化

フォトマスクの寸法測定は、透過照明による測定が広く用いられている。このため、測定システムの多くはフォトマスクを挟んで、センサーと照明、あるいは発光装置を対向させた構成となる。本構成ではフォトマスクに光を透過させるためにフォトマスクを支える構造物はガラスのような透明体を用いるのが一般的である。したがってガラスの剛性不足により生じるフォトマスクのたわみによる変形が測定誤差の要因となる。この対策として、例えばテーブルへのジャッキ機構の搭載による平面度の部分的補正や梁によるテーブル補強が行われている。しかしながら、いずれの方法も、構造的に透過照明の光を一部遮る構造となり、部分的に測定が実行できないという制約が生じる。

また、このようなマスクの平面度の部分的補正や載物テーブルの補強を行う方法では均一的な平面度の維持は難しく、大型化に対する課題の一つといえる。したがって次のような対策が必要とされる。

- 1) 高剛性化を図るために、透過照明を用いず、特殊なステージと照明系を用いる方法
- 2) たわみを取り除くための空気圧制御を用いた自動補正機能
- 3) 測定後にたわみを後処理によってソフトウェアにより補正する技術

(2) 測長システムの高精度化

高精度化を目的とする測定機の測長システムには、不確かさを低減するための手法としてトレーサビリティ体系の上位にあるレーザー測長システムを採用するケースが多い。

さらに、大型のフォトマスクの測長システムにレーザー測長システムを採用することにより、測定長さが長くなってもシステムを構成するパーツのコストが増加しないといったコストメリットも大きい。しかしながら、更なる長ストローク化を考えた場合、レーザー光路内の空気揺らぎによる測定値の変動が大きくなることから、測定の繰り返し精度や制御特性の低下などの課題に対して対策が必要となる。

これに対して、リニアエンコーダは長さ基準からのトレーサビリティ体系上は不利であるが、応答速度や繰り返し精度の安定性などでは、レーザー測長システムに比較して有利な面もある。測定システムによっては、レーザー測長システムとリニアエンコーダを組み合わせることにより、応答速度の向上と精度面での信頼性維持の両立を図るシステムもある。

また、寸法検査装置の大型化に伴う質量の増加等により、装置が構成する空間座標には微小ながらも複雑な歪みが発生する。この課題を解決するために幅広い測定領域を各軸1軸のみのエンコーダを使用するのではなく多軸を用いる方法がある。

近年では、サーフェスエンコーダと呼ばれる2次元エンコーダの開発も盛んであり、このような新しい測長システムの出現が、今後の寸法検査装置の技術課題解決につながる可能性がある。

(3) 温度補正機能による高精度化

トレーサビリティを確保するための長さ測定における測定環境は通常20℃であるが、フォトマスクの製造および測定環境により、測定機が使用される温度環境は20℃と異なる場合がある。さらに、フォトマスクの寸法測定では、使用温度環境を考慮した寸法評価が要求される場合がある。他方、フォトマスクが大型化すると、測定時のフォトマスク自身の温度分布によっては、正確な寸法評価が行えないことが懸念される。

温度環境を考慮したフォトマスク寸法評価の信頼性を確保するため、測定装置自身の温度コントロールを実施するとともに、フォトマスクの温度管理および温度モニターを行い、本来使用されるべき温度環境に補正した寸法評価などに対応する必要がある。

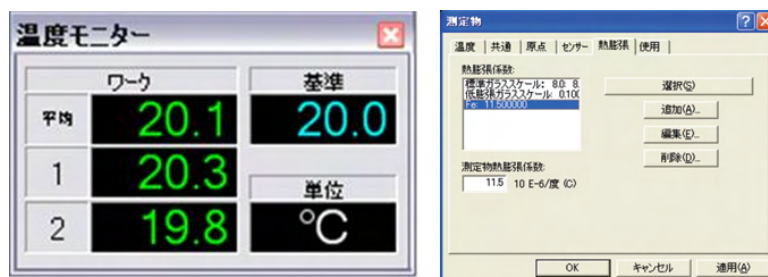


図2 温度補正機能

(4) 搬送装置

寸法検査は、マスク製造の最終工程に位置するため、検査機への搬入・搬出の際にハンドリングミスによりマスクへダメージを与えることは莫大な損失となる。フォトマスクを装置へ搬入する際は、パターンの描画されていない周辺部をローラで支持する方法や空圧などによりフォトマスクを浮上させる方法が広く用いられている。

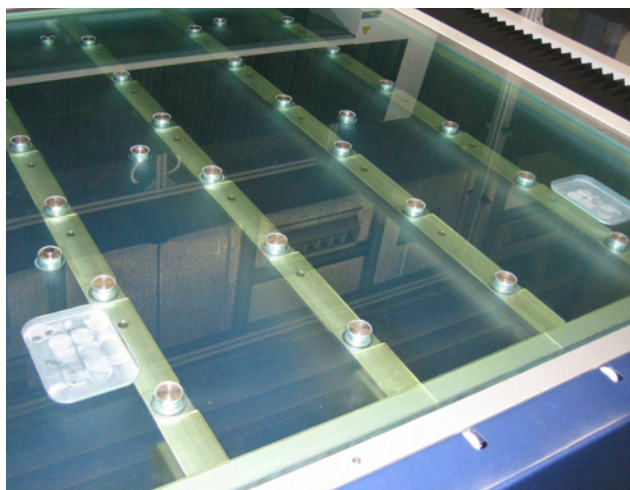


図3 大型フォトマスク用昇降機能付きステージ

(5) フォトマスクの寸法測定の高精度化

フォトマスクのパターンの測定項目には、短寸法測定と長寸法測定がある。短寸法測定では、1つのパターンの両側（線幅）のエッジを検出し、その間隔を短寸法の測定値とすることが多い。短寸法測定をCD（Critical Dimension）測定と呼ぶこともある。また、長寸法測定では、複数のパターンの中心位置を測定し、その間隔を長寸法の測定値とすることが多い。

フォトマスクの短寸法測定と長寸法測定は、画像測定機で行われるのが一般的であり、特に重要な機能はエッジ検出技術である。ここではフォトマスクの大型化に伴うエッジ検出の技術動向について述べる。

① 画面内測定の高精度化

これまで述べたようにフォトマスクの測定は高精度化がキーになっている。一般的に短寸法測定では、一画面内において測定が行われるが、この画面内精度を向上するための方法として以下の方法が考えられる。

- a. サイズの小さいイメージセンサー（メガピクセルイメージセンサー等）を使用する。
- b. サブピクセリング処理を行う。
- c. 光学的分解能を向上させる。
- d. 光学収差を小さくする。または画面内精度を補正する。

このうち画像処理によってエッジ検出精度を向上させる方法としてはサブピクセリング処理があげられる。サブピクセリング手法としては、エッジの空間的補間や、平均化、時間的平均化等の手法がある。

② エッジ検出のロバスト性の向上

一般にフォトマスクはエッジ品質が高いため、エッジ検出は画像の濃度の変化点（コントラスト）を自動的に検出することで効率よく測定することができる。

しかしながら、近年ハーフトーンマスク等の半透過タイプのフォトマスクも実用化され、このようなフォトマスクのパターン線幅を画像によってエッジを検出して寸法を測定するには、コントラストの低いエッジを検出する必要がある。

最近の画像のエッジ検出技術の向上により、標準的なコントラストに依存したエッジ検出法だけでなく領域解析や統計的手法を用いて、従来の方法では検出困難なエッジを検出することも可能になっている。



図4 コントラストの低いエッジの検出例

d.2.4 測定用センサーの高性能・高機能化

現在、フォトマスクの検査用装置に搭載される測定用光学センサーは、以下の方法¹⁾が

広く用いられている。

- 1) 顕微鏡等を用い反射光学像をイメージセンサーやフォトセンサー等で検出し、画像データ処理する方法。
- 2) レーザー光・あるいは斜め照明光を用いエッジからの散乱光を検出する方法
- 3) スリット光による透過光学像の光の強度変化を検出する方法

特に画像データを処理する方法は、フォトマスクへの正確なフォーカスが必要となるため高精度なオートフォーカス機能を搭載し測定精度を高めている。

上記いずれの方法も検出可能な分解能を決める要因としては光学系に使用される波長、対物レンズの開口数 (NA) がある。さらに画像をイメージセンサーによって取り込む場合は測定エリアと使用するイメージセンサーのサイズおよび画素との関係から倍率も要素として加わる。このため測定の高精度・微細化を実現するためのシャープなエッジ検出には、更なる光源の短波長化、高 NA 化、高倍率化が必要不可欠である。

一般に 1)および 2)の中で光源にレーザーを用いて検出する方法はスポットサイズを小さくすることができるため、発光ダイオード (LED ; Light Emitting Diode) ・ハロゲン等の光源を用いて検出する場合よりも測定における横分解能をさらに向上させることができる。また 1)および 3)の中で用いられる照明系においては、透過・反射のいずれの場合でもテレセントリック照明により測定精度の向上が可能である。2)の斜め照明光を用いる方法においては、照射角度可変型等の特殊照明によりエッジ部のコントラストの向上が図られる。

このように光学的に検出分解能を向上させるための様々な技術が展開されているが、いずれの方法も正確な測定を行うための校正技術が必要不可欠である。

d.2.5 測定の利便性の向上

現在、フォトマスクの寸法の評価については、標準化された規格がなく、メーカーや製造工程ごとに仕様が異なる。また、商品寿命が短く、多種少量生産のフォトマスクに対応するために、測定は可能な限り効率的に実施される必要がある。本節ではいかに効率的な測定を行うかについてソフトウェアの面から述べる。

(1) CAD (Computer Aided Design) データの利用

フォトマスクの大型化により、測定項目や測定箇所の数も増大し、測定プログラムの作成の効率化が必要である。また、短納期の注文に応じるために、完成したフォトマスクを直ちに寸法検査し、良否判定をする必要もある。このような背景から、フォトマスクのパ

ターンを描画するための CAD データにより、オフラインで測定手順のティーチングを行い、その手順をそのまま測定プログラムに展開することが行われている。これによりフォトマスクの完成を待たずに測定用プログラムを用意することも可能となっている。また、各種のデータフォーマット（CSV/DXF/IGES/NC/ガーバー/エクセロン等）に対応することも必要である 2)。

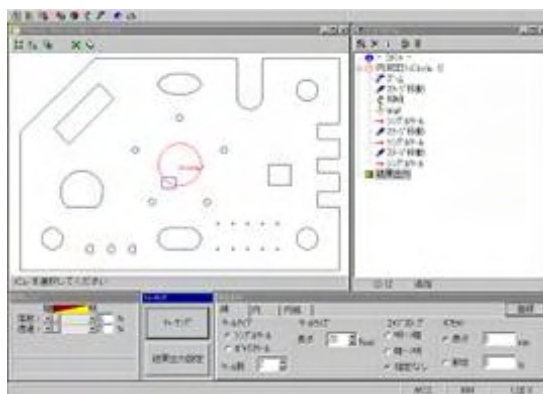


図 5 CAD データによるオフラインティーチング

(2) マクロ測定による操作性向上

マスクパターンの測定項目、測定箇所、測定手順は、フォトマスクごとに異なるのが普通であり、顧客が測定用のプログラムを簡単・独自に作成できるようなプログラムが必要である。このような背景から、これに対応したフォトマスク測定用プログラムを効率的に作成できるソフトウェア（例：マクロエッジ検出ツール及びマクロ測定コマンド）が広く利用されている。これらのプログラムにより、簡単に測定用プログラムを作成することが可能となり、測定における効率化に大きく貢献できる。

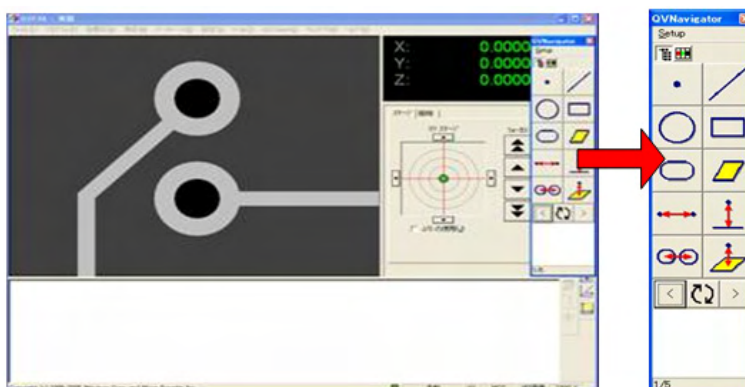


図 6 マクロ測定コマンド

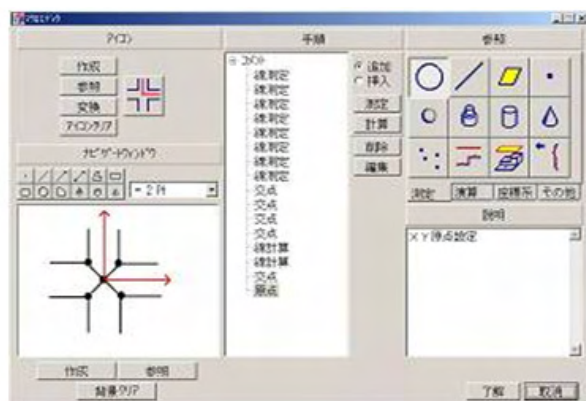


図 7 フォトマスク測定用プログラムと、独自プログラムの作成例

表 2 例：マクロエッジ検出ツール

	アイコン	操作イメージ	
十字形状マクロエッジ検出ツール			マークの中心位置付近やエッジ付近をクリックすると自動的に中心位置を点要素として出力
四角マクロエッジ検出ツール			
円マクロエッジ検出ツール			

d.2.6 フォトマスクの寸法測定の標準化

大型化するフォトマスクの測定においては、イメージセンサーによる検出方式が、測定効率の面から広く利用されている。近年、イメージセンサーの性能向上や画像処理によるエッジ検出に関する研究が盛んに行われ、イメージセンサーによる寸法測定の信頼性の向上が図られている。しかし線幅測定等の定義付けが、各社独自の規格により運用されている一面もある。今後、フォトマスクの厳密な寸法管理を行うには、イメージセンサーによる線幅測定の定義等、トレーサビリティを保証するための標準化が不可欠と言える。現在、国際標準化機構（ISO）の TC213 では、イメージセンサーによる寸法測定の検査規格の策定が進められていることから、近い将来にイメージセンサーによる寸法測定の標準化が進むものと期待される。

d.2.7 今後の展望

現在、大型パネルのカラーフィルターやパターン形成には、製造工程に応じて各種のフォトマスクが必要であり、また、製品が変われば新しいマスクが必要になるため製造設備における装置コストは増大する傾向にある。これまで述べたように、大型化・微細化するフォトマスクに対応して、これの寸法測定を行う測定システムもまた大型化・高精度化が進展している。これに伴い、加工原版であり製品の品質に直接影響を与えるフォトマスクに対する測定の精度向上、システムの大型化・測定の効率化（スループットと操作性の向上）・高機能化（低コントラストや微細パターン等の測定困難なフォトマスクへの対応）に関する要求は今後ますます高まっていくと考えられる。

一方、従来のフォトリソグラフィ技術を使いながら、大型のフォトマスクを使わずに小型のフォトマスクを効率よく利用する露光技術の開発や、カラーフィルターやパターンを直接、焼き付けていく装置が一部の工程で利用されはじめている。

このように、多様化する製造技術とともに、フォトマスクも微細化・高精度化が進み、これを測定するシステムにおいても、高精度化・測定の効率化・高機能化が更に進展するものと思われる。

参考文献

- 1) 田邊功、竹花洋一、法元守久（2006）「入門フォトマスク技術」東京 工業調査会 p.65-p67
- 2) 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（2004）「平成 15 年度オプトメカトロニクスシステム技術ロードマップの作成報告書」東京 p.112

（下川清治）

2 画質検査（輝度・色度）

2.1 はじめに

デジタルハイビジョン放送移行にともない液晶ディスプレイの大型化、高精細化、高コントラスト化が進んでいる。この為、ディスプレイの研究開発、製造品質管理の現場では、より厳密な評価と管理が求められるようになってきた。また、フラットパネルディスプレイ（FPD；Flat Panel Display）の著しい表示性能の向上によって、昨今は、 $\approx 0(\text{cd}/\text{m}^2)$ に限りなく近い輝度計測やコントラスト比の大きいメガコントラストの計測ニーズが高まってきた。表 1 に液晶ディスプレイの画質検査で評価される主な測定項目を示す。研究開発・品質管理部門においては、分光放射計が使われ分光スペクトルの解析、輝度・色度の精密な確認が行われる。また、製造工程の検査においては、輝度色度の値管理、発光の均一性など、より人間の視感度に近い形での測定が行われ、かつ安価で高速に測れる色彩輝度計が使用される。色彩輝度計は、3種類の視感度補正フィルターを組み込んだ3刺激値直読方式で、回折格子を使用した分光放射計に比較し取り扱いが容易で高速な測定が出来る。しかしながら組み込むフィルターの分光特性のバラツキにより複数の機器間で僅かながら機差が生じてしまう。このため測定値に補正を加え複数の色彩輝度計を管理することが必要になる。このように、ディスプレイの画質検査においては色彩輝度計と、その基準管理

表 1 画質評価で評価される主な測定例

	分光放射計	分光色彩計	色彩輝度計	応答度検出器
液晶モジュール	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・γ特性 ・コントラスト比 ・ユニフォミティー ・視野角 ・反射率 ・立上り特性 ・温度特性 ・NTSC比 ・分光スペクトル 	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・γ特性 ・コントラスト比 ・ユニフォミティー ・反射率 ・立上り特性 ・温度特性 ・NTSC比 	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・γ特性 ・コントラスト比 ・ユニフォミティー ・反射率 ・立上り特性 ・温度特性 ・レスポンス測定 	<ul style="list-style-type: none"> ・レスポンス測定 ・フリッカ測定
バックライトユニット	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・ユニフォミティー ・立上り特性 ・温度特性 ・分光スペクトル 	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・ユニフォミティー ・立上り特性 ・温度特性 		<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・ユニフォミティー ・立上り特性 ・温度特性
CCFL	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・輝度/色度ムラ ・立上り特性 ・分光スペクトル 	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・輝度/色度ムラ ・立上り特性 		<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・輝度/色度ムラ ・立上り特性
LED	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・分光スペクトル 	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 		<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度
拡散板・偏光板	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・分光反射率 ・分光透過率 ・分光スペクトル 	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・反射率 ・透過率 	<ul style="list-style-type: none"> ・輝度/色度 ・反射率 ・透過率 	

に高精度な分光放射計を併用することで高いレベルの品質管理を実現している。

以下、これら画質検査に欠かせない分光放射計と色彩輝度計の測定原理について説明し、今後、求められる画質検査（輝度・色度）の展望について述べる。

2.2 分光放射計の測定原理

まず液晶ディスプレイの研究開発や品質管理現場で多く使われている分光放射計の測定原理から説明する。図1に分光放射計の基本原則を示す。分光放射計は、自発光光源や物体表面で反射する光の輝度や色度を測定する装置である。光源のスペクトルを波長毎に出力するものを分光放射計と位置づけているが、広い意味で輝度計の部類に含まれる。

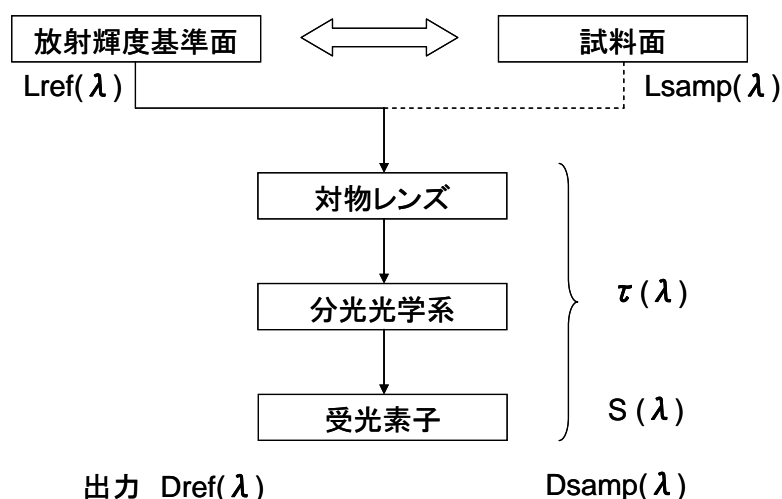


図1 分光放射計の測定原理¹⁾

スペクトルの観測波長は、380nm～780nmまでの可視域領域で、各波長の分光放射輝度を測定し内部演算により輝度・色度を入力する。

対物レンズより分光放射計に入った光は、分光光学系により波長分散され、受光素子で放射強度に応じた出力を発生させる。放射輝度基準との整合は次により行う。

受光素子からの出力 $D_{ref}(\lambda)$ は、対物レンズおよび分光光学系の分光効率 $\tau(\lambda)$ と受光素子の分光応答度 $S(\lambda)$ の特性により出力される。本器で分光放射輝度既知の基準面 $L_{ref}(\lambda)$ を測定した場合の光電出力 $D_{ref}(\lambda)$ は、

$$D_{ref}(\lambda) = k(\lambda) \cdot L_{ref}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (1)$$

ここで、 $k(\lambda)$: 係数

また、試料面を測定した場合の光電出力 $D_{\text{samp}}(\lambda)$ は、

$$D_{\text{samp}}(\lambda) = k(\lambda) \cdot L_{\text{samp}}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot S(\lambda) \quad (2)$$

で求めることができる。

図 2 に分光放射計（トプコン製）の構造図を示す。

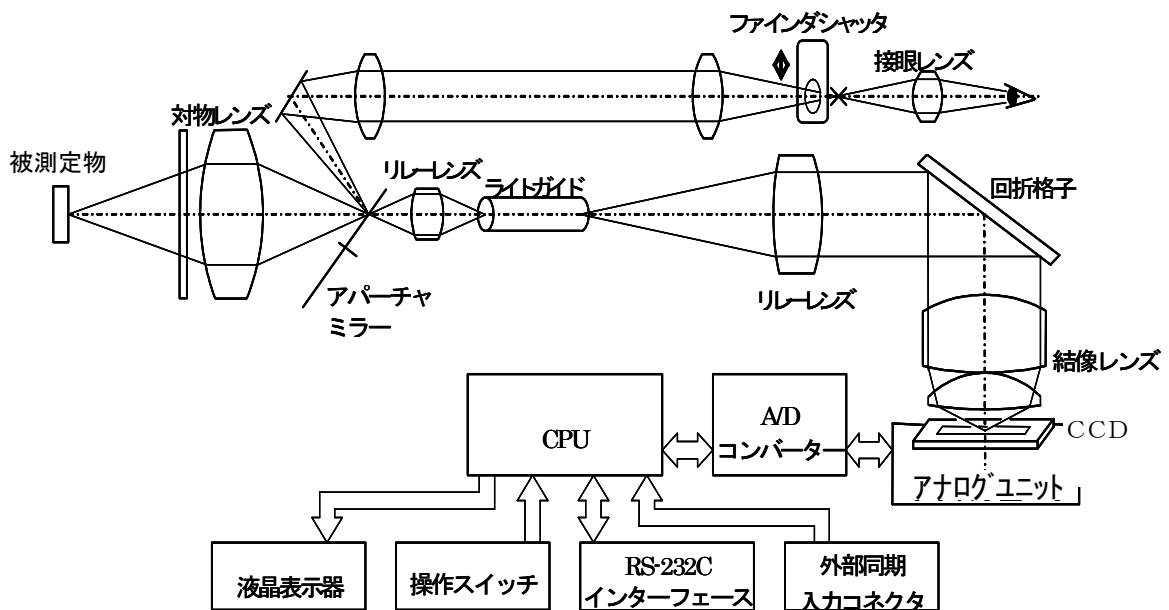


図 2 分光放射計の構造図（トプコン SR-UL1R）¹⁾

被測定面の光は、対物レンズを通過しアパーチャーミラー上に結像する。アパーチャーミラーには測定角を決める小径穴が空いており、ミラーを回転し、小径穴の種類を切換えることで測定角の変更を可能としている。測定角は、被測定面の測定スポットサイズを選択を可能とすると共に $0.001 \sim 300000$ (cd/m^2) までの幅広い測定を可能とするものである。小径穴を通過した光は、リレーレンズ、ライトガイドを通過し回折格子により波長分散し、受光素子により光電変換を行う。回折格子を用いた分光は、偏光の影響を受けてしまい液晶などの偏光した対象物の測定では誤差が大きい。光路内にライトガイドを配置することで、偏光特性を小さくした後に分光を行っている。受光部における波長検出は、半値波長幅約 5nm 、約 $0.9\text{nm}/\text{pixel}$ となっている。

図 2 の分光放射計はポリクロメータ方式の分光器を採用している。光計測器の分光方式には、ポリクロメータ方式のほかにモノクロメータ方式などがある（図 3）。

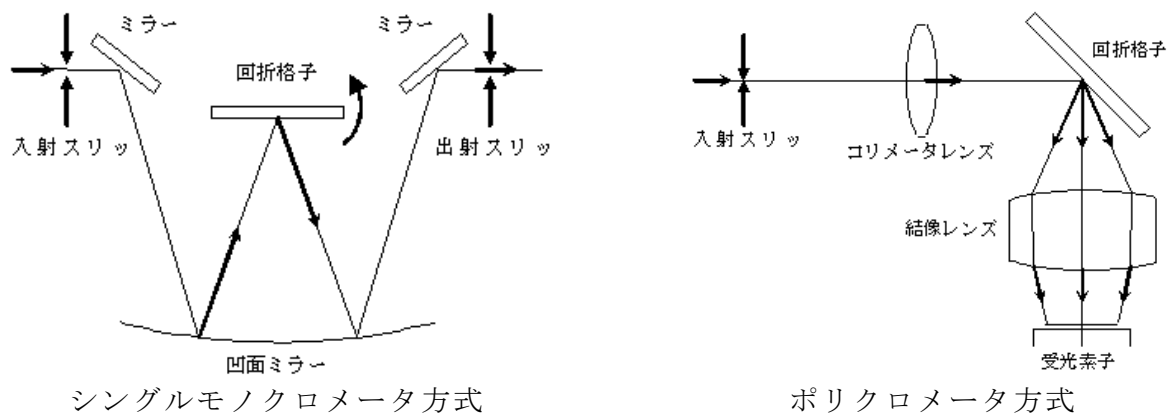


図3 分光器の光学配置例²⁾

分光分析に使用される精密な分光測光装置には、モノクロメータを2つ備えるダブルモノクロメータ方式を使用するのが一般的であるが、構造が大きくなり本器のような小形で容易に持ち運びできる用途には適さない。また、本器は精密分光分析用途が主目的ではなく、輝度および色度の精密管理を目的とするため、ここまでの分光精度は要求されない。シングルモノクロメータ方式の場合、分光器はコンパクトな可搬型が実現できるが、回折格子をモータ駆動して単色光を順次検出するため、測定時間が長いという欠点がある。これに対し、ポリクロメータ方式では、波長分散された光を受光素子により一括測定できるため、短時間での測定が可能である。

分光放射計で測定した結果は、分光放射輝度として内部に記憶され、放射輝度、輝度、XYZ表色系における三刺激値、色度 x y 、 u' v' 、相関色温度および黒体放射軌跡からの偏差の演算が行われる。本器は、分光放射輝度および演算結果を50データ記憶し、任意のデータを読み出し表示することができる。内部演算は次の式により行われる。

$$\text{分光放射輝度} : R(\lambda) \text{ (W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{nm}^{-1} \cdot \text{sr}^{-1}\text{)} \quad (3)$$

(1) XYZ表色系の三刺激値

$$X = k \sum_{380}^{780} R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (4)$$

$$Y = k \sum_{380}^{780} R(\lambda) \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (5)$$

$$Z = k \sum_{380}^{780} R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (6)$$

ここで、 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$: XYZ 表色系における等色関数 (図 4)、 k (定数) は 683 lm/W である。

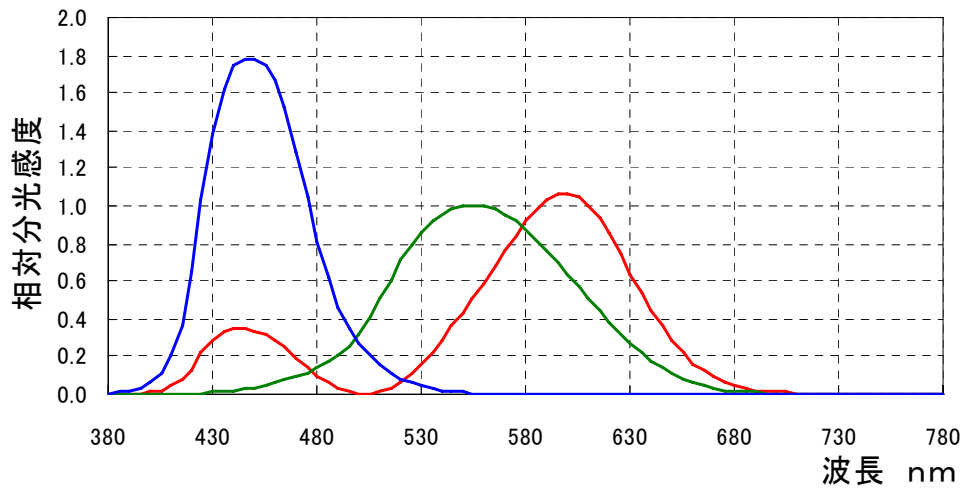


図 4 CIE1931 XYZ 表色系における等色関数³⁾

(2) XYZ 表色系の色度座標 x y

$$x = X / (X+Y+Z) \quad (7)$$

$$y = Y / (X+Y+Z) \quad (8)$$

(3) UCS 表色系の色度座標 u' v'

$$u' = 4X / (X+15Y+3Z) \quad (9)$$

$$v' = 9X / (X+15Y+3Z) \quad (10)$$

相関色温度および黒体放射軌跡からの偏差は、JIS Z 8725 光源の分布温度及び色温度・相関色温度により算出する。図 5 に分光放射計による出力例を示す。

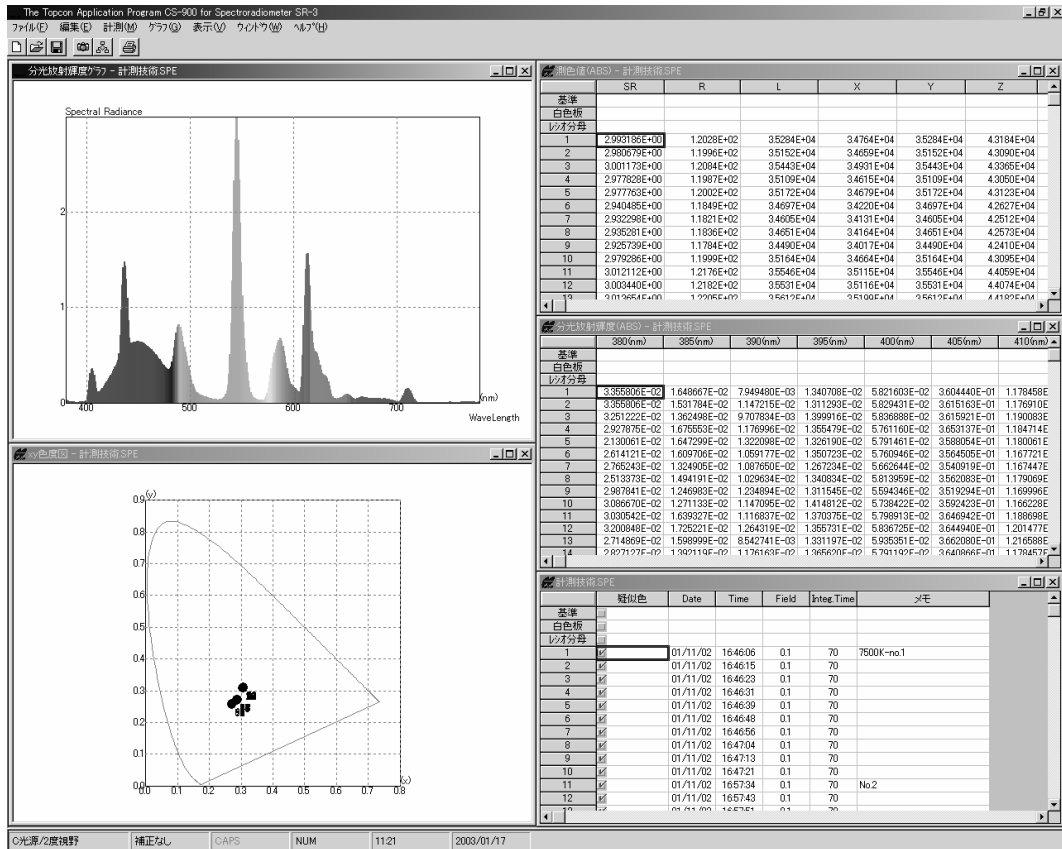


図5 分光放射計による分光スペクトル表示と色度座標表示例¹⁾

2.3 色彩輝度計の測定原理

色彩輝度計は、輝度色度表示するために CIE1931XYZ 表色系における等色関数に近似した受光器を内蔵し、三刺激値 XYZ を直読する計測器である。簡単な操作で輝度・色度・色温度の測定結果をデジタル表示するので容易に評価を行うことができる。

等色関数受光器は、一般的にレンズ系や色ガラスフィルターの分光透過率とシリコンフォトダイオードや光電子増倍管の分光感度特性の合成により作成されている。分光放射計は、この色彩輝度計の発展型であり基本的には視感度フィルターの代わりに分光器が内蔵されている点が異なるだけで、同じ基本原理で測定される。色彩輝度計には、いくつかの方式があるが、ここではトプコンのアーチャーミラー方式で原理を説明する。

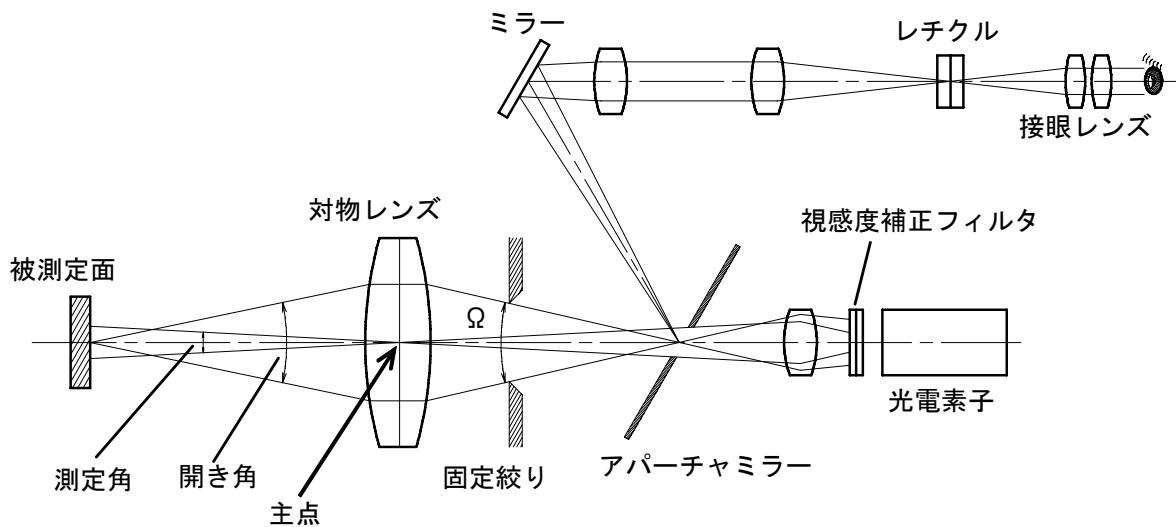


図 6 色彩輝度計の構造図 (トプコン BM シリーズ) 4)

被測定面からの光は対物レンズによって、アパーチャーミラー上に結像する。アパーチャー(開口)を通過した光はリレーレンズ、視感度フィルタを経て光電素子に入射する。一方、ミラー面を反射した光はファインダ系に導かれ、レチクル上に結像する。接眼レンズからのぞくと視野の中に黒い丸が見え、測定スポットを確認することができる。本方式の最大のメリットは、ファインダから確認した測定スポットと実際に測定するスポットにズレが生じないことである。対物レンズとアパーチャーミラーの間に位置する固定絞りは、射出立体角 Ω を固定するためのもので、輝度一様な拡散面を測定した場合、測定距離によって輝度測定値が変化しないようにするための役割をもっている。

さらに最近では、この輝度計測技術をベースに2次元一括で液晶ディスプレイの輝度・色度分布を高速で測定する装置も登場した。測定開始から評価結果がでるまでの時間を大幅に短縮することができ検査コスト低減に貢献している(図7)。



図 7 二次元輝度・色度測定システムの例 (トプコン UA-1000)

2.4 今後の展望

光計測において安定したデータ収集を行うためには、計測器の適切な使用の他に測定対象物の光出力特性（配光特性）に対する正しい理解が重要である。対象物によっては、測定光の特性と計測器の特性のミスマッチが生じ正しく測定できない。

液晶ディスプレイに求められているものは、さらなる高コントラスト、高色再現性、高レスポンス、省エネルギー化である。このため、ディスプレイメーカーから求められる画質検査の精度・機能のハードルも年々高くなってきている。

従って、これら要求に対して適切な測定ソリューションをサポートすることも測定機メーカーとして重要な役割である。

今後の画質評価は、高精度・高速測定、2次元一括画面測定、そしてトータル検査コストの削減をキーワードに進展していくものとする。

参考文献／引用文献

- 1) 伊藤智理、「分光放射計 SR-3」、計測技術 2003年5月号、日本工業出版(株)
- 2) 伊藤智理、「分光放射計の特徴と使用例」、光アライアンス 2006年4月号、日本工業出版(株)
- 3) 伊藤智理、「トプコンエンジニアリングの色彩輝度計・分光放射計」 Electronic Journal 2003年8月号、(株)電子ジャーナル
- 4) 伊藤智理、「色彩計測器によるディスプレイの測定」、月間ディスプレイ、2002年2月号、(株)テクノタイムス社
- 5) <http://www.topcon-techno.co.jp/products/bright.html>

(内田直樹)

3 基板搬送ロボット

3.1 はじめに

フラットパネルディスプレイ（FPD ; Flat panel display）の生産工程における基板搬送では、クリーンルーム内で、マザーガラスを各装置間もしくは装置とカセット間で搬送するのが主なアプリケーションであり、これにはガラス基板搬送用クリーンロボットが適用される。本稿ではこの適用に関して主体に説明し、また真空の装置内でのハンドリングに使用される大型真空ロボットやその他の事例なども交えて紹介する。具体的なロボットの写真などについては、安川電機のロボットを例に挙げて紹介する。

3.2 市場動向

クリーンロボットは、1990年代後半頃から FPD 市場で使われ始めた。

2001 年は FPD を使用した液晶テレビ、プラズマテレビの普及元年と言われる。家庭用テレビにおいてブラウン管（CRT ; Cathode Ray Tube）から FPD への切り替えとこれに伴う大画面化の流れが本格化し、2003 年には液晶テレビ、プラズマテレビの国内出荷額はブラウン管テレビのそれを超えた。そして 2004 年に急激に拡大した FPD 市場は 2005 年に一服したが、その後の北京オリンピック開催やアナログ放送終了が間近になってデジタル放送が本格化し、これらの影響で FPD 市場は安定して成長してきた。

液晶ディスプレイ（LCD ; Liquid crystal display）の生産に使用されるマザーガラスサイズは飛躍的に大きくなっており、最新の第 10 世代（3m 角級）では、2000 年初めの第 4 世代の 10 倍以上になっている。FPD 用ガラス基板サイズの推移を図 1 に示す。

需要量の増加とテレビの大型化への要求などから FPD 用ガラス基板の大型化は飛躍的に拡大してきたが、価格競争によるコストダウン要求から高い生産性を要求されてきており、市場の動向は 2 極化している。

① 中型ガラス基板での高速生産

投資コストを抑え、スループット向上を目差して安定した第 5、6 世代で、32 インチクラスまでの普及分野を狙う。

② 超大型ガラス基板での大量生産

大型ガラス基板を採用し、付加価値の高い大型テレビの多面取りで生産効率を追求。

3.3 クリーンロボットの変遷と種類

FPD用ガラス基板サイズの推移に対応したクリーンロボットの變遷を図1に示す。

人手作業や周辺装置からの発塵防止／生産品質の向上を目的にクリーンロボットへの要求が1990年代頃に出てきた。これを受けて初期の頃は、一般産業用ロボット（6軸垂直多関節型：旋回軸、下腕軸、上腕軸、手首旋回軸、手首振り軸、手首回転軸の6軸構成）をベースに、クリーン化に対応したロボット（図2を参照）が市場で使われ始めた。ガラス基板が小さく軽量だったこともあり、ガラス基板を縦・横の自在な方向で搬送でき姿勢変更が可能なこの形で、走行台車無しで複数のカセットおよび装置に対応するフレキシブルな使い方が出来た。

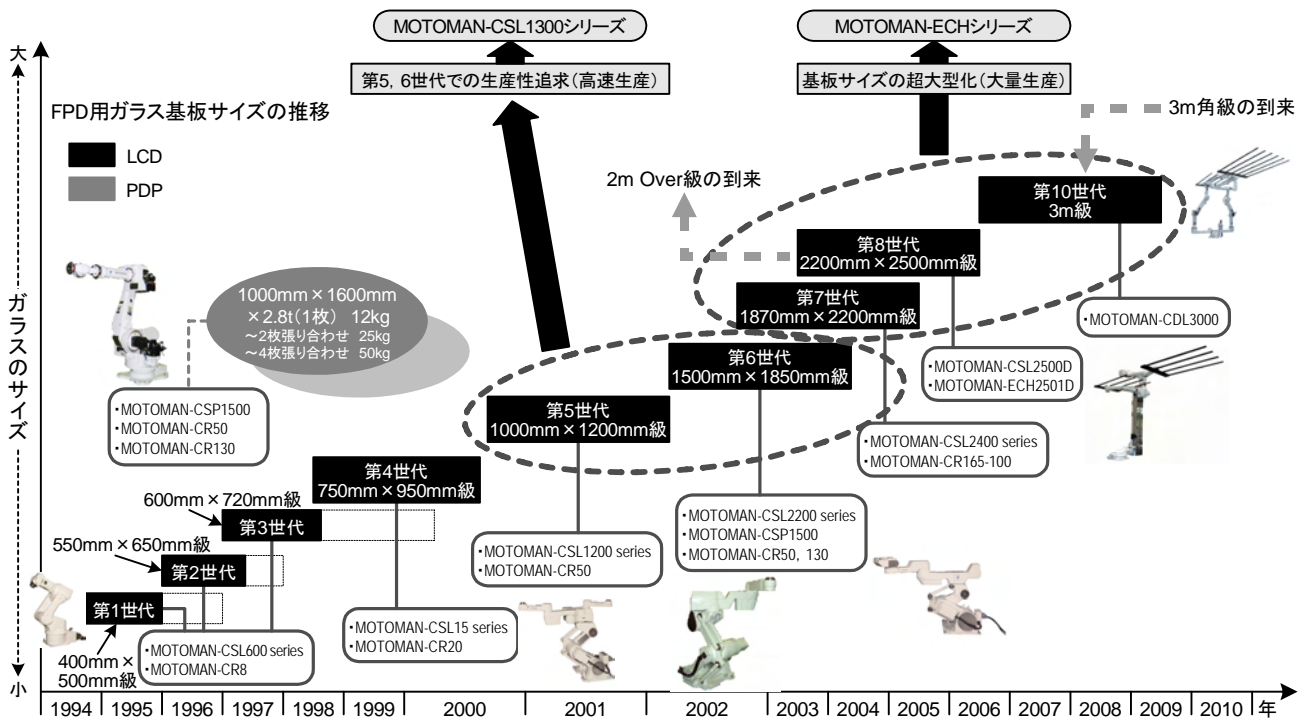


図1 FPD用ガラス基板サイズの推移とクリーンロボットの變遷



図2 6軸垂直多関節型ロボット



図3 4軸水平多関節型ロボット

その後ガラス基板の大型化に伴い、また FPD の生産工程におけるガラス基板の搬送がほとんど水平方向であるため、上下軸、回転軸、前後軸で構成される水平多関節型のロボットが主流になってきた。前後軸が上下軸の上部に配置されており、上面での旋回作業が可能で広い動作範囲と狭い干渉領域を実現できる。つまり低いパスラインと長い上下ストロークに対応できるため、限られた空間を有効活用できる訳である。横方向の移動には走行台車と組み合わせ、カセットステーションを介在するシステムの採用が多くなってきた。生産効率を向上するためにハンドを 2 個持つロボットは、4 軸構成の水平多関節型ロボットとなる（図 3 を参照）。

ハンドは図 4 に示す通り、ガラス基板に直接接触するフォーク部とフォーク部をロボットに固定するフレーム部とから構成される。搬送系の先端に位置するハンドには、たわみ、振動への対策である剛性アップとこれに背反する軽量化が要求される。ガラスサイズの大型化に伴い、フォーク部の材質はアルミニウム→炭素繊維強化プラスチック(CFRP ; Carbon Fiber Reinforced Plastics)、フォークの形状は中実→中空、フォーク数は 2 本→3/4 本→5/6 本へと変化してきた。

更なるガラス基板の大型化（第 8 世代以上）に対応するため、水平多関節型ロボットの上下軸が、リンク型のもの（図 5 を参照）と直動型のもの（図 6 を参照）とが使い分けられるようになってきた。より大型のガラス基板に対して高応答性を要求される用途には、剛性がより高く長い上下ストロークでも高精度を実現し易い水平多関節・上下軸直動型ロボットが適している。

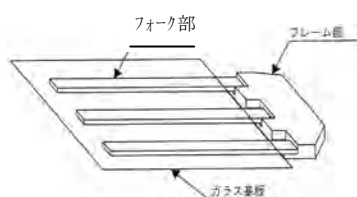


図 4 ハンドの構成



図 5 上下軸リンク型 R



図 6 上下軸直動型 R

最近の FPD の生産工程においては、搬送距離や速度と要求精度に応じて上下軸リンク型ロボットと上下軸直動型ロボットとが使い分けられている。これは市場動向の 2 極化に対応しており、「中型ガラス基板での高速生産」では上下軸リンク型ロボットを、「超大型ガラス基板での大量生産」では上下軸直動型ロボットが主に採用されている。更に、水平多関節型ロボットでは対応が困難な縦から横方向へあるいは横から縦方向へガラス基板の

姿勢を変更する搬送用途には 6 軸垂直多関節型ロボットが適している。各生産工程での搬送形態に応じて各種のロボットが使い分けられており、生産効率の向上に役立っている。

3.4 市場の要求（ロボットへの要求仕様）と対応

ガラス基板の大型化に伴い可搬質量は増加し動作範囲も拡大するが、市場からの要求は以前と変わらず、むしろ価格競争によるコストダウン要求から、より高い生産性・タクトアップが求められている。これらに応えるためには、クリーン度、高速化・高精度化への対応が重要であり、これらへの対応に関して以下に述べる。

3.4.1 クリーン度

ワーク、搬送工程に適したクリーン度の確保が必要となる。一般的には液晶生産工程では ISO クラス 4、マザーガラスをラインへ投入する工程では ISO クラス 6 が必要である。クリーン度を確保するためには、接触摩耗にて発生する発塵物が機外へ漏えいしないように完全に封止する必要がある。このため基本的に、ハンドへの配線・配管など発塵が発生する部品は全て、ロボット内部に収納する必要がある。

図 7 は水平多関節・上下軸リンク型ロボットでのクリーン対策部位を示している。回転運動部へのオイルシールによる封止構造と、ガラス破損など何らかの原因でオイルシールリップ部がダメージを受けて封止能力が低下した場合でも発塵物が機外へ直接飛散しないように封止するためのラビリンス構造を併用した、信頼性の高い対応策である。

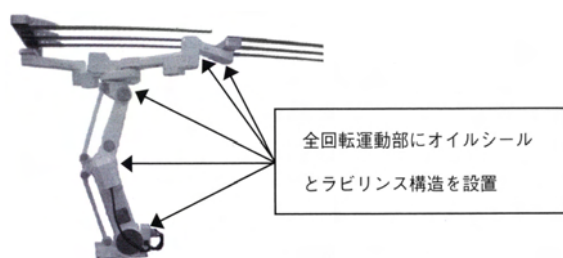


図 7 水平多関節・上下軸リンク型ロボットのクリーン対策部位

図 8 は水平多関節・上下軸直動型ロボットでのクリーン対策部位であり、運動部への特殊シール構造と内部排気構造の工夫により、機内の発塵物が機外へ飛散するのを封止している。しゅう動開口部をシールベルトというゴム製のベルトで覆い、機内に設置している

小型ファンで機内ダクトに発塵物を集める。集めた発塵物をフィルタに通して排気することによりクリーン度を確保できる。

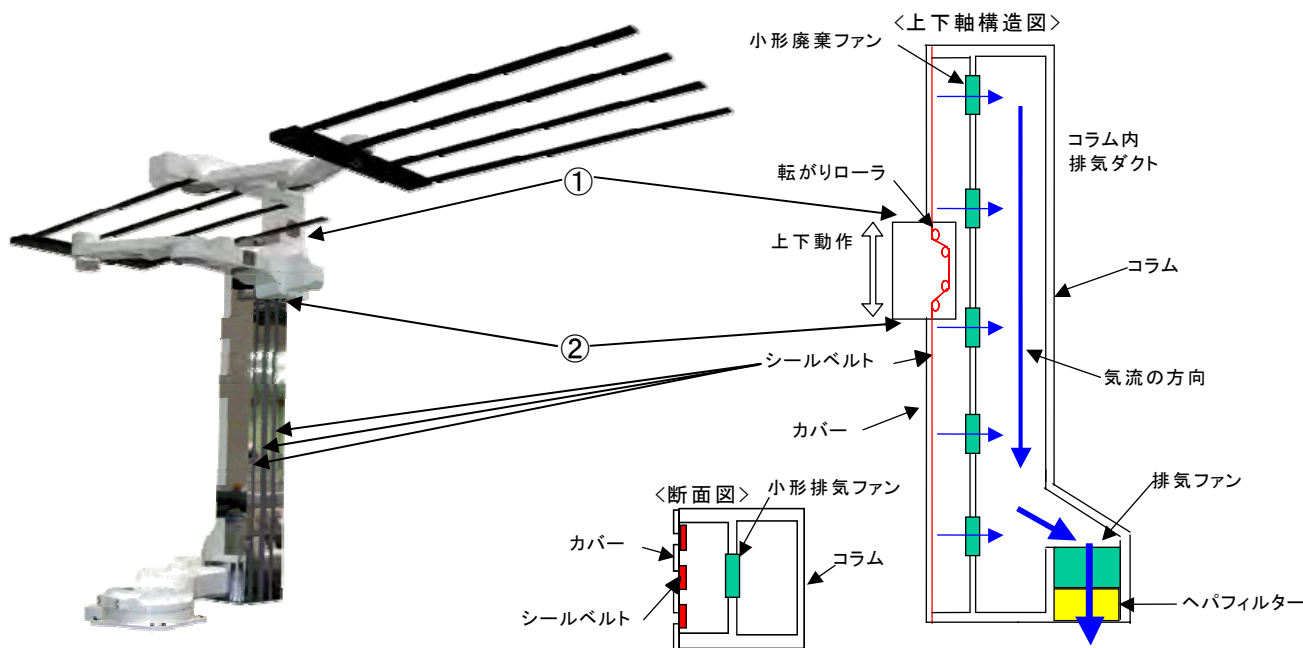


図8 水平多関節・上下軸直動型ロボットのクリーン対策部位

3.4.2 高速化・高精度化

ガラス基板の大型化に伴い可搬質量が増加するため、高速化・高精度化は背反した要望になるが、生産性アップには必須の要求項目である。ロボットは比較的low剛性のメカであり、元来振動が発生しやすい構造になっている。またアームを直列に配置しているため、一つのアームの動作が別のアームの動作に影響を及ぼし易い。高速に移動させるためには各軸を最大の速度および加減速度で動作させれば良いが、より振動しやすくなり、停止時の残留振動を抑えるためには低速で動作させるほうが振動は残らない。つまり高速化と高精度化もまた、相反した要求と云える。

(1) 機械系

まずは機械系の最適化が重要である。必要なトルク、イナーシャを考慮した上で最軽量の部品を選定し、最適な配置により可能な限り高剛性化を追求する必要がある。剛性を上げることによりロボットを駆動させるサーボ系のゲインを大きくすることができ、高ゲインの設定により、整定時間の短縮（位置決め時間の短縮つまり高速化の実現）および振動の低減が図れる。

(2) 搬送システム

FPDの生産工程において、各装置でのタクトスピードの違いや搬送ラインの影響などにより、バッファ用途としてカセットステーションを介在させるシステムが多い。半導体生産工程におけるFOUPのような位置づけの搬送システムの一部であるが、残念ながら規格が無いため共通化は図れていない。各装置とこのカセット間でのガラス基板搬送が多いため、カセットの仕様が高速化・高精度化に大きく関与する。

格納するガラス基板の間隔（カセットのピッチ）を狭くすれば、格納可能なガラス基板の枚数を増やせて生産効率を上げられる。しかしこのピッチを決めるためには、図9に示すように、カセットの設置，ティーチング誤差，静的要素，動的要素のような内容についての検討が必要になる。余り狭いピッチにするとカセットとハンドもしくはガラス基板との接触が懸念されるために搬送速度を速く出来なくなる。

(3) 制御

先にハンドに関して簡単に触れたが、CFRPを含めた構成材質、フォークの形状、フォーク本数などが、ハンドの先端振動に大きく関わってくる。図10にハンドの応力解析例を示すが、これらの諸条件を加味して振動を抑制するために最適の検討が必要である。

No.	要素	項目	内容
	設置	カセット	バーたわみ: δ_1
		カセット	ピン構造: δ_2
	教示	ティーチング	作業精度 δ_3
静的要素	ガラス	厚さ	δ_4
	ガラス	水平面	δ_5
	フォーク	平面度	ULD δ_6
	フォーク	平面度	δ_7 (A~B)
動的要素	振動 [p-p]	軌跡 + 振幅	δ_8

図9 カセットピッチの検討例

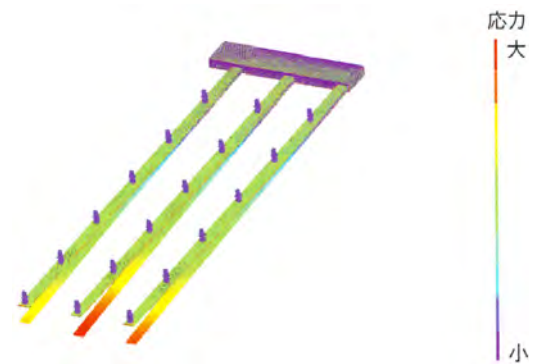


図10 ハンドの応力解析例

更に振動を抑制するために、フォークの振動を解析してこれと逆位相の指令を加えることで振動を低減させ、動作時間を短縮させる制御も有効な手段の一つと言える。制御で振動を軽減させ整定時間を短縮させるのは、ロボットを構成する全ての軸に有効な手段であるが、軸毎に有効な制御が異なる場合が多く色々な検討が必要と云える。振動の発生源により機械共振，負荷振動などがあり各々振動周波数が異なるため、これに応じた制振制御が

必要になる。現状では、ロボットの各動作軸に使用しているサーボドライブで数々の制振制御を確立しており、また何種類かの制振制御の組み合わせも非常に有効である。また前後軸のアームの姿勢状態により、旋回軸の加減速度を最適調整するなど指令での工夫によっても位置決め時間の短縮を図れる。

3.5 真空ロボット

今まで、クリーンルーム内において装置間でガラス基板を搬送するロボットについて説明してきた。これとは別に、真空の装置内でハンドリングの用途に使用される大型真空ロボットの事例も簡単に紹介する。

図 11 に示す通り、ガラス基板の蒸着プロセスを行うクラスタツールの各処理室（真空チャンバ）間で水平方向の受け渡しが主であるため、クリーンロボットと同様、上下軸，旋回軸，前後軸で構成される水平多関節型のロボットが最適である。ロボットの例を図 12 に示す。

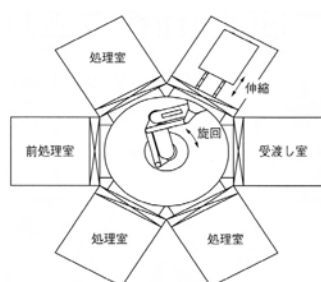


図 11 クラスタツール内でのロボット動作例



図 12 水平多関節型真空ロボット

ガラス基板の受け渡し時には昇降動作が不可欠であるため、各処理室に昇降機構を付けるよりはロボットに上下軸を備えることで各処理室の受け渡し機構もシンプルに出来る。また、蒸着プロセスに必要な真空度： $1 \times 10^{-6} \text{Pa}$ への対応は必須である。ガラス基板サイズの大型化によりハンド部も大型化し質量も増大する。更に真空のため、クリーンロボットの様な吸着機構を持たないためガラス基板は単にハンド上に乗っているだけなので、クリーンロボット以上に振動を抑制する必要がある、ハンドの剛性を上げるため更に質量が大きくなる。真空用のシール機構，ガスを出さない工夫（ベルト駆動からリンク機構へ見直し）、振動抑制などが必須の対応となる。

各軸の駆動にはサーボドライブを使用し、モータ及び減速機を大気側に配置する。真空シールへの対応に関して、回転部にはメカロスが少ない磁性流体シールを使用し、昇降部のシールには金属ペローズを使用して真空度を確保している。

機構部に関して、タイミングベルトを使用した駆動機構の場合、剛性が低く且つ発ガスの問題があるため、平行リンク機構を採用している。但し平行リンクの場合、タイミングベルト駆動に比較して最小回転半径を大きくする必要があるので、アームのリーチを確保しながら機械の大きさへの影響を最小限に止める工夫が必要である。

最後に、振動への対策として、ガラス基板サイズの大型化に伴いハンド部も大型になるため、構造解析によるアーム形状の最適化や駆動機構部の高剛性化が必要になる。この点はクリーンロボットと同様、ハンドの材質等の検討とサーボドライブでの制振制御の活用などが重要となる。

3.6 今後の展望

ガラス基板の大型化に伴い市場の要求に答えるべく、説明してきたような対応がされてきた。今後、更にガラス基板が大型化していく場合、クリーンロボットに関しては従来と同様の対応により、ある程度までの大型化には対応できると思われる。

従来の市場動向としては2極化が進んでおり、生産性が安定している既存の世代を用いた高速生産によってスループットの向上を目指した方が、設備投資も抑えられて市場のコストダウン要求にも答え易いとも云える。またテレビ画面のサイズアップもほぼ最終近くまで来たとも考えられ、大画面テレビ用のガラス基板もこれ以上のサイズアップも必要ないと思われる。生産性の向上と云う面から考慮した際、これ以上の大型化がFPD生産工程として最適かどうかの検証が必要と思われる。

別の見方として、特に日本では公道を使用して運送する場合、3m以上のものは運送が困難であり、生産設備を一度解体してから現地で再度組み立てなければならず、再組み立ての工数及び精度保証など非効率的である。クリーンロボットにおける新たな対応として、現地での再組み立てを不要にする機構を具備した製品も市場から受け入れられ易いと考えられる。図13に示したロボットは、最下降位置にすることで非常にコンパクトに出来、分解しないで運送が可能である。新たなコンセプトの製品と云える。

今後、このような新たなコンセプトの製品が生産の効率化には重要であり、これらの製品によりまた新たな市場要求が喚起され、レベルアップしていくことを期待する。



図 13 現地での再組み立てが不要なクリーンロボット

参考文献

- 1) 技報 安川電機 268号 「ロボット&ソリューション特集」
- 2) 技報 安川電機 276号 「ロボット&ソリューション特集」

(相川富士雄)

4 その他

a) 原子間力顕微鏡

a.1 はじめに

微細な三次元表面形状を絶対値で測定するには、光学式をはじめいくつかの装置の選択肢があるが、中でも原子間力顕微鏡（AFM ; Atomic Force Microscope）は、nm オーダーの極めて高精細な形状測定手段として利用されている。触針粗さ計、光学式よりも水平分解能が桁違いに優れ、材質を選ばずに簡単に測定することができる。すでに半導体分野において必須のツールとなっているが、フラットパネルディスプレイ（FPD Flat Panel Display）や電子材料分野でも一般的に使用されており、本稿では特に FPD 分野における応用事例、および課題について報告する。

a.2 原子間力顕微鏡の特長

AFM はカンチレバーと呼ばれるシリコン製のプローブを原子間力レベルの極めて弱い力でサンプルに接触させ、一次元あるいは二次元的に走査して表面形状を測定する。プローブ先端半径が約 10nm と極めて鋭いために微細な形状測定が可能になる。AFM は従来の触針段差計のスタイラス径では測定不可能な微細形状、あるいはレーザー顕微鏡および白色干渉法などの光学式では困難な透明あるいは鏡面材質なども測定可能とする。分解能の点では走査型電子顕微鏡（SEM ; Scanning Electron Microscope）も優れているが定量的な評価を苦手とするため、測定ではなく観察手段となる。他の三次元形状測定手段と比較した AFM の優位性として、主に以下の項目があげられる。

(1) 触針段差計・粗さ計との比較

- 1) 数 μm 径のスタイラスでは不可能な微細凹凸形状の測定が可能。
- 2) 三次元的な表面形状解析により、全体像の把握、および表面粗さ測定ができる。
- 3) 柔らかいサンプルでも傷を付けずに測定が可能。

(2) 光学測定方式との比較

- 1) 水平分解能が光学式よりはるかに優れており、nm オーダーの分解能を持っている。
- 2) 材料を選ばず、レジスト、プラスチック等の透明物、鏡面状態の金属等の測定可能。

- 3) 光学式が苦手とするエッジ部形状の測定が可能。
 - 4) 光学パラメータ、下地の影響などを受けない。
- 一方で、AFMには以下のような課題も知られている。

(3) 原子間力顕微鏡の課題

- 1) 二次元で画像を取り込む場合、プローブ走査速度の限界から数分以上の時間を必要とする。
 - 2) 走査範囲が最大 100 μm 程度であり狭い。
 - 3) 測定可能なサンプルサイズに制約があり、FPD 基板は切り出す必要がある。
 - 4) 画像の湾曲、測定形状の非対称性など、得られた結果に精度の問題がある。
- 最近の装置はこれらの課題について改良されてきており、この点は後述することとする。

a.3 装置の構成

a.3.1 測定原理

AFM はカンチレバーと呼ばれるシリコン製の極めて細いプローブをサンプルに接近させ、プローブとサンプルの間に働く原子間力レベルの弱い力を検出しながら、プローブを形状に沿って一次元あるいは二次元的に移動させる。プローブは XY 方向の移動にともなってサンプルの表面形状に追従し、XY 位置と高さ方向のデータを同時にコンピューター

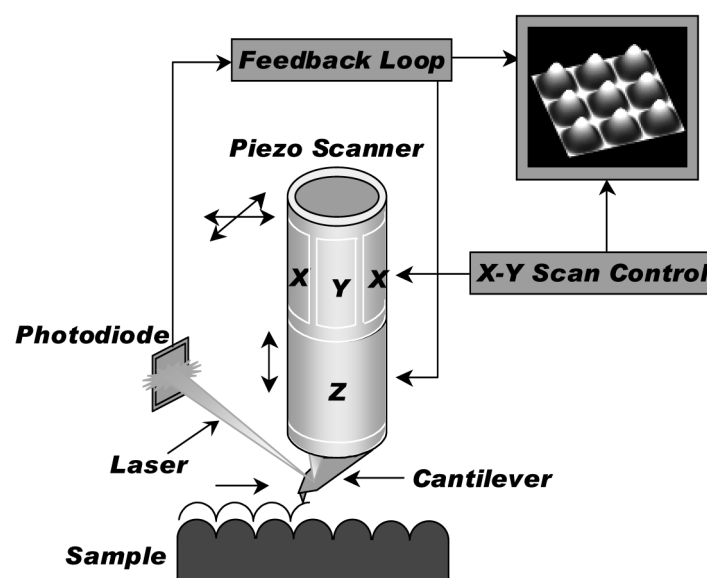


図 1 AFM 測定原理

で取り込むため、三次元形状として画像化することが可能になる。XY 方向の走査および Z 方向へのプローブ上下には、分解能および追従速度が優れていることから圧電素子が使用される。またプローブに働く力を知るためには、最も一般的な方法はカンチレバー部の背面にレーザースポットをあて、サンプル表面の凹凸形状によるカンチレバーの傾き角度の変化を光学センサーで検出する。AFM の測定原理を図 1 に示す。

a.3.2 カンチレバー

AFM の最大の特長は nm 分解能での三次元形状測定を可能にすることであるが、それを実現できたのは極めて先鋭化されたカンチレバープローブによるものである。カンチレバーは MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) の一種であり、半導体シリコンウェハのエッチングプロセスで作られる。国内では唯一オリンパスが商品化している。様々なサンプル形状や目的に合わせたカンチレバーが販売されており、AFM による測定結果の信憑性はプローブ先端形状や特性によって決定付けられる。従って目的とする測定対象物に適合したカンチレバーを選択する必要がある。図 2~5 に市販カンチレバーの例をいくつか示す。一般的なカンチレバーはプローブ長が約 10 μm 、先端曲率半径が約 10nm であるが、近年はカーボンナノチューブのような特殊なプローブも実用化されてきている。



図 2

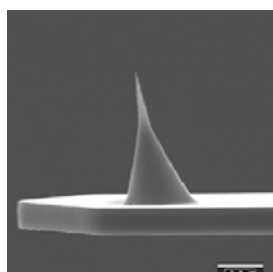


図 3

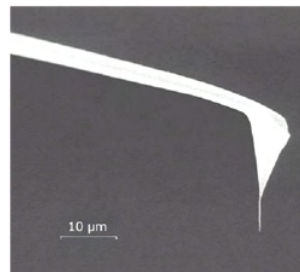


図 4

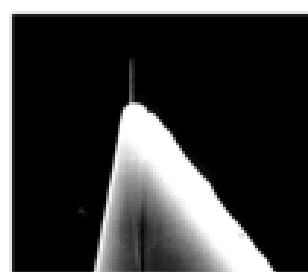


図 5

図 2 オリンパス(株)製 汎用的に使用でき、安価で入手しやすい。

図 3 独 Teamnanotec 社製 プローブがサンプルと直角になるようチルトされている。

図 4 独 NanoTools 社製 シリコン製プローブの先端に High Dense Carbon を成長させ、高アスペクトな形状測定を可能にしている。

図 5 大研化学工業(株)製 シリコン製プローブの先端に直径 30nm 程度のカーボンナノチューブを接着し、摩耗に強く、高アスペクト測定が可能である。

a.3.3 市販原子間力顕微鏡装置

AFM は国内外 10 社以上から販売されており、各社それぞれに特長を持たせている。大別すると、研究評価目的の小型で安価な卓上タイプの AFM と、半導体あるいは FPD 業界の製造ラインでプロセス・品質管理を目的としたインライン AFM がある。汎用的な AFM は表面形状だけではなく、同時にサンプル表面の磁気力、電流や電位、摩擦や粘弾性測定などの拡張性を持っており、研究開発あるいは評価・不良解析用途で使用される。インライン向けの AFM は、例えばカセットに格納されたサンプルをローダーロボットで装置に搬入し、プローブの位置決めから測定、解析までの一連の動作が自動化されている。またインライン動作に見合った測定時間に短縮するため、一次元走査による形状からデータを解析することが多いようである。微細形状の膜厚や線幅、テーパ角、あるいは半導体ウェハのトレンチ深さ、CMP (Chemical Mechanical Polishing) 平坦性測定などを主に抜き取りで運用している。

大型化が急激に進んできた FPD 業界においても、AFM による TFT (Thin Film Transistor) アレイ基板やカラーフィルター基板、あるいは有機 EL (Organic Electro-Luminescence) 基板の形状測定ニーズが多くあり、その内容も多岐に渡る。製造ラインで運用するには、高価な基板を非破壊で測定できることが前提となり、従って装置は大型基板に対応できる構造を持つ必要がある。これに対応できる装置の例として、タカノ株式会社の AS-7B シリーズがある (図 3)。AFM ヘッドが XY に移動するガントリーステージ構造になっており、最大で第 8 世代サイズの基板まで対応可能である。ローダー・アンローダーでガラス基板を装置に搬送し、基板を真空吸着固定してからレシピで設定された位置へ AFM ヘッドが移動する。測定ターゲットとプローブの位置ずれを画像パターンマッチングによって数 μm 以内に補正しながら、基板内の多点ポイントを自動的に順次測定して解析結果を上位コンピューターに保存する。特に製造ラインで運用する場合は、オペレータが装置の知識が無くても運用できなければならないことから、レシピの選択だけでルーチンワーク作業ができるように操作性を考慮している。

AFM は振動の影響を受けやすいため、高性能なアクティブ除振台を内蔵して外来振動を減衰させると同時に、筐体は音響ノイズを遮断できるように完全密閉構造になっている。ステージ、定盤等は花崗岩を使用して剛性を高くしており、また極力低重心になるように設計を考慮している。本装置はクリーンルームに設置するため、床の構造が弱い場合はコンクリート等の架台工事を施工する場合が多い。これらの振動対策を施すことにより、クリーンルーム設置環境において 5nm 以下のノイズレベルを実現している。



図 6 大型 FPD 基板対応 AFM

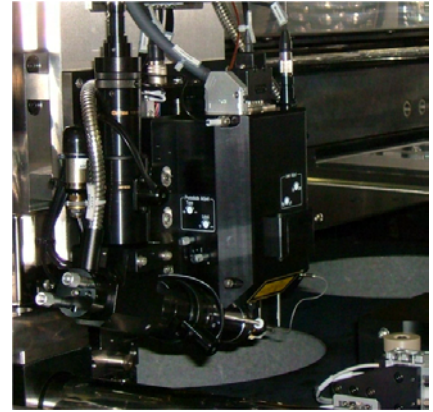


図 7 AFM ヘッド部

a.4 フラットパネルディスプレイ分野での測定応用事例

FPD 分野における AFM 測定のニーズは、大きく分けて二つに大別される。

(1) 表面粗さ測定

数 μm から $20\mu\text{m}$ 程度の狭いエリアで ITO、レジスト等の表面粗さを測定し、通常は R_a (算術平均粗さ) で成膜状態を評価する。

(2) パターン形状測定

TFT、カラーフィルター、有機 EL 膜などの膜厚、パターン形状 (線幅、テーパ角等)

AFM は微細な表面形状測定においてオールマイティに対応できる装置と言えるが、基本的には装置価格、測定時間、扱い易さなどの面から、光学式やスタイラス触針段差計などでは測定困難な場合に選択される場合が多い。従って AFM でなければ測定できない対象が多くあるわけであり、以下にいくつかの応用事例をあげてみる。

a.4.1 表面粗さ測定

膜表面の微細な形状を観察する手段としては SEM あるいは AFM になるが、SEM はサンプルの切り出しやコーティングが必要で、真空中で観察することから準備に手間がかかる。またコーティングやチャージアップによって本来の表面状態を破壊する可能性がある上、定量的な粗さ数値が分からないことから AFM を使用することが多い。ただし薄膜の表面粗さ測定時は、プローブ先端が摩耗していると本来の水平分解能が得られず、誤った

結果に気づかないこともあるので注意が必要である。

図 8 は ITO を $3 \times 3 \mu\text{m}$ 角で測定した画像である。個々のグレインの大きさ、凹凸状態から成膜条件を最適化することが可能になる。

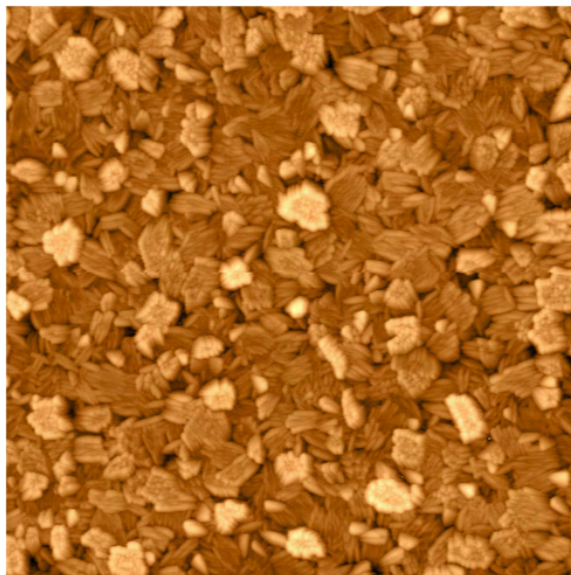


図 8 ITO $3 \times 3 \mu\text{m}$ 角

図 9 は低温ポリシリコン膜の表面を $5 \times 5 \mu\text{m}$ 角で測定した画像である。粒界の状態が観察でき、グレインの大きさや凹凸状態からレーザーアニールの条件設定に応用される。

図 10 は液晶フォトマスク用ガラスの研磨途中工程サンプル表面を $3 \times 3 \mu\text{m}$ 角で測定した画像である。研磨パッド、研磨材、回転圧力等の研磨条件と表面粗さの相関から、使用材料や工程を最適化することが可能になる。

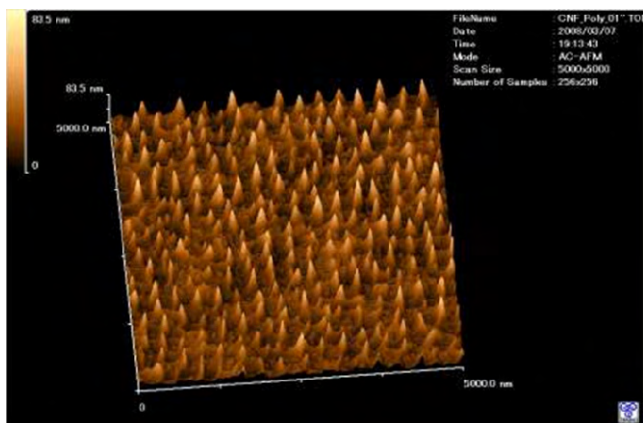


図 9 低温ポリシリコン $5 \times 5 \mu\text{m}$ 角

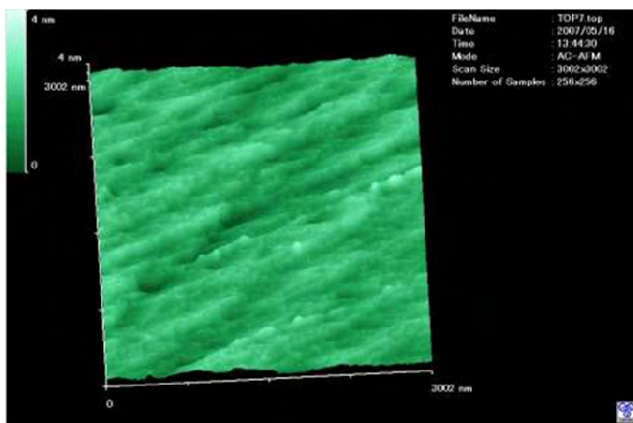


図 10 フォトマスクガラス $3 \times 3 \mu\text{m}$ 角

a.4.2 パターン形状測定

FPD 分野におけるパターン形状測定には様々なニーズがある。適度な表面反射率を持った数十 μm 以上の形状サンプルの場合は、レーザー顕微鏡や白色干渉式の光学測定器が利用できるが、透明体や鏡面反射する材質の場合は測定困難になる。また従来の触針式ではスタイラスの形状、触針圧の問題から金属膜などのステップ段差などに限られてくる。このような理由から AFM による測定運用例が多くある。

代表的な例として、図 11 に TFT 形状、図 12 にカラーフィルター形状を示した。

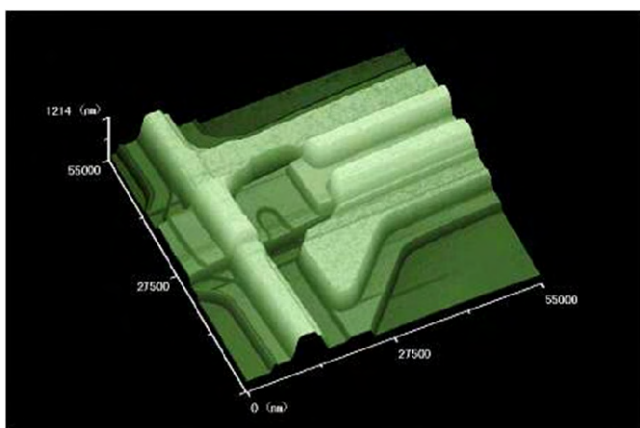


図 11 TFT 50×50 μm 角

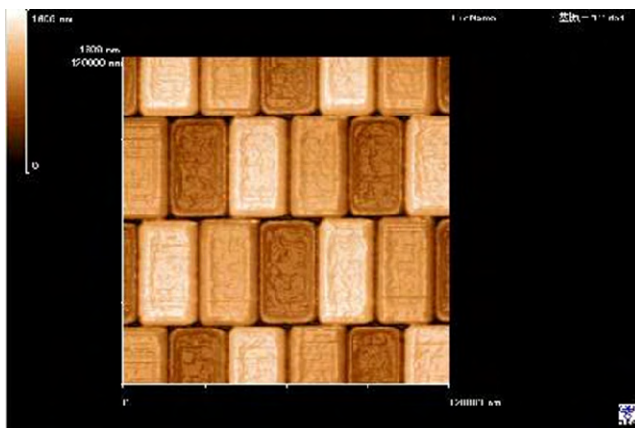


図 12 カラーフィルター 120×120 μm 角

このような三次元的な画像表示は視覚的に分かりやすいが、実際の製造ラインの運用では着目する形状部分を一次元で走査して膜厚やテーパ等を測定することが多い。

a.5 従来原子間力顕微鏡の課題解決事例

以上の様に、AFM は優れた点を持ちながら測定上の課題がいくつかあったが、メーカーによってはすでに解決されてきた事例もあるので紹介する。

a.5.1 走査範囲の拡大

プローブを XY 方向に走査するアクチュエーターに圧電素子を使用しているが、変位量の限界から 100 μm 程度の測定視野が最大であった。しかし、特に FPD 分野では RGB 全ての画素を同時に測定する要望があり、解決方法として AFM ヘッドの中に長ストロークに変位可能な XY 圧電素子ステージを内蔵させて、最大で 700 μm 視野まで測定可能にした

事例がある。図 13 に広視野で測定したカラーフィルター形状画像例を示す。従来の AFM と比較して画期的な広視野測定が可能になり、また画像の歪みや湾曲を発生しない特長を持っている。

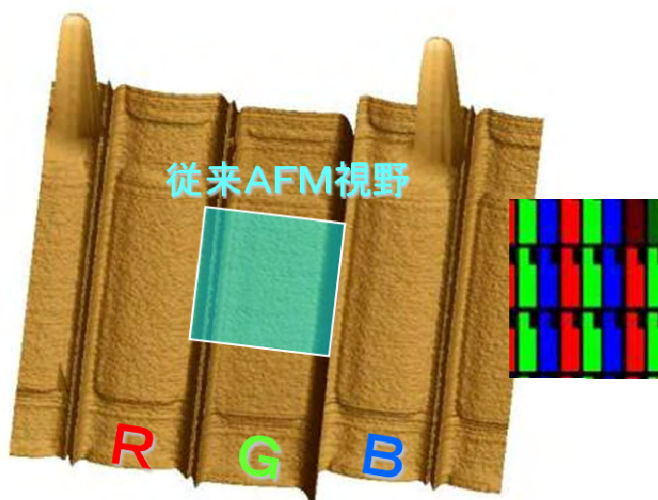


図 13 広視野 AFM 測定例 400×400μm 角

a.5.2 形状測定結果の非対象性の解決

例えば左右（上下）対象のテーパ形状を測定した場合、図 14 に示すように AFM で得られた結果が非対象になって角度が一致しない現象が見られる。

原因は Z 軸圧電素子の伸縮直進性に起因し、本来は上下動するべき圧電素子が XY 方向にもクロストークを持っているためである。最近の優れた AFM 装置はこの問題を解決しており、図 15 に示すように 1 度以内の角度精度を実現している。



図 14 角度非対称性例

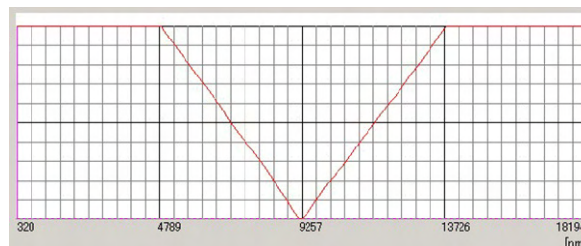


図 15 角度精度改良結果

a.5.3 走査速度の向上

AFM の大きな欠点として測定時間の長さがあげられる。特に二次元画像では 1 ラインずつ走査を積み重ねるため、数分以上の時間を必要とする。各社とも初期の AFM と比較

するとサーボ性能の向上などで改善されてきたが、凹凸の大きな形状に対しては速度が著しく向上したとは言えず、今後も技術の改善が必要と思われる。

a.5.4 カンチレバープローブの寿命

原子間力レベルの極めて小さな触圧とは言え、測定を重ねるとプローブは徐々に摩耗していく。実際の測定対象物は凹凸が原子レベルとは比較にならないほど大きいいため、プローブがサンプルに衝突しながら移動して削れていくためである。カンチレバーメーカーは、従来のシリコン製以外に高密度カーボンプローブやカーボンナノチューブ、あるいはレバー部のバネ定数を小さくするなどして耐摩耗性を向上したプローブを開発している。摩耗の問題を抱えた AFM ユーザーは、メーカーに相談しながら改善を試みる必要がある。

a.6 今後の展望

FPD 基板の大型化にともない、成膜プロセスでの面内バラツキをはじめとして品質管理の必要性が高まってきている。また、次世代ディスプレイとして各社が有機 EL の開発を進めており、1 μ m レベルで発光層の膜厚管理が必要とされている。微細な表面形状、膜厚等をどの手段で測定するのが最適なのか迷う場面も多いと思うが、AFM も着実に進化を続けており、選択肢の一つとしてさらに普及していくことを期待している。

参考文献

- 1) <http://www.olympus.co.jp/jp/insg/probe/>
- 2) <http://www.nano-tools.com/>
- 3) <http://www.team-nanotec.de/>
- 4) <http://www.daiken-chem.co.jp/kabonpuro1.htm>
- 5) <http://www.takano-kensa.com/index.html>
- 6) 精密工学会 2008 年春季大会予稿集

「表面性状に関わる ISO の曖昧性と市販測定機の新展開」

(齊藤 靖)

b) レーザ顕微鏡

b.1 はじめに

レーザー顕微鏡は 1957 年 Malwin Minsky によって開発された。当時、理想に近い光源のレーザー光はまだ発明されておらず、またデジタル信号処理もデバイスの制約上発達していなかったため、実用化されるまで一般化せず。その後、産業界のニーズの高まりとエレクトロニクスの発達により、1970 年代から再び盛んに研究されるようになった。1977 年 Sheppard と Wilson らによって走査型顕微鏡の結像特性が理論計算により解析され、1980 年代になって、複数の企業が製品化に成功し、やっと普及するようになった。

共焦点走査型レーザー顕微鏡（CLSM ; Confocal Laser Scanning Microscopy）とも言われる。

b.2 スキャナの原理と方式

b.2.1 レーザ顕微鏡の原理

図 1 のような、光源はピンホールを経て小さな点光源に形成し、点光源はビームスプリッタに反射され、対物レンズを透過し、サンプル表面に焦点を結ぶ。サンプルからの反射光は入射光と同様な光路でビームスプリッタを透過し、検出器の前のピンホールの位

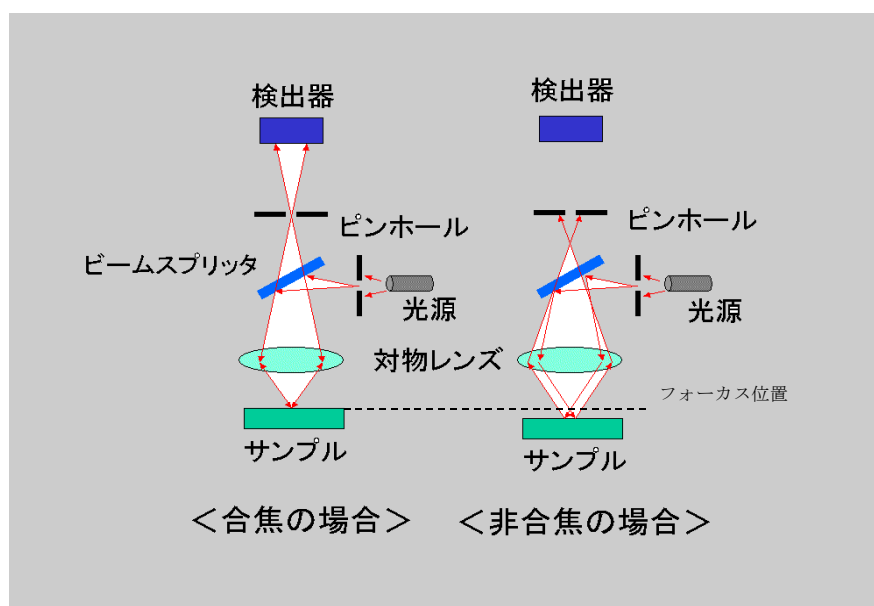


図 1 共焦点光学系の結像イメージ図

置で焦点を結ぶ。ここで、対物レンズの焦点がっている位置ならピンホールに遮断することなく、再び拡散し、検出器に到達し、結像される。一方、焦点が合っていない場合、ピンホールに遮断され、結像ができなくなる。

b.2.2 レーザーのスキャン方法

レーザー顕微鏡は点光源またはレーザー光を用いる。一点のみの照明で得られたのは対物レンズの焦点位置における 0 次元の信号である。画像としての 2 次元情報を得るため、サンプル面内での焦点を移動させ、位置と得られた信号強度から画像を構築する。

焦点位置を 2 次元でスキャンする方法として、ガルバノミラー方式が使われている。ミラーをモータに取り付け、対物レンズに対するレーザー光の入射角を変化させ、集光点の位置をサンプル上でスキャンする。

別な方法として、ニポウディスク方式がある。多数列の 2 万個余りのピンホールを螺旋状に配置した円盤を回転させ、対物レンズに対する点光源の位置をスキャンする。この円盤はテレビ開発初期の 1884 年にドイツ人 Paul Nipkow によって画像転送装置として発明されたことから、ニポウディスクと呼ばれている。

図 2 のように、ニポウディスクの一部をレーザー光で照射すると、ディスクの回転に応じてピンホールが照射面を横切り、レーザー光の透過する点の点光源が円周方向に移動する。各ピンホールは半径の異なる位置に配置してあるので、ディスクの回転に応じて点光源はディスク上を円周方半径方向に移動する。ここで対物レンズの焦点面をニポウディスクに合わせると、この点光源の 2 次元の移動は対物レンズの倍率で縮小され、サンプル側での焦点面におけるレーザー光スポットのスキャンとなる。この方式は回転数を上げることと複数条のピンホール螺旋を設けることで、スキャン時間を速くすることができる。

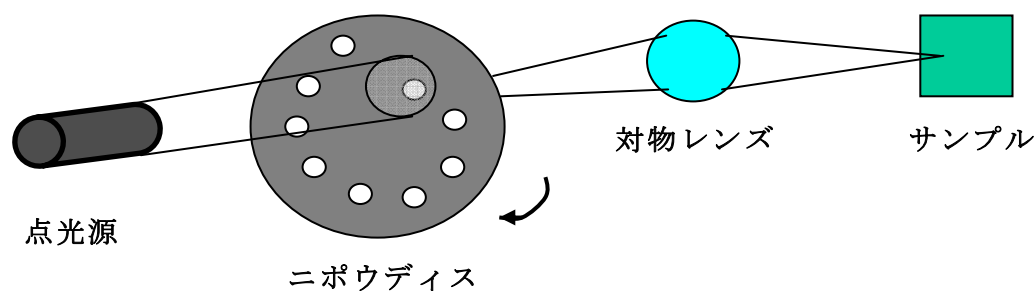


図 2 ニポウディスクイメージ図

b.2.3 その他のレーザースキャン方法

(1) ポリゴンミラー (Polygon Mirror)

ポリゴンミラーは多面体の各面をミラーとして、モータなどで高速に回転させることによりレーザーを走査する。最も簡単な構成で実現でき、レーザー走査が必要な幅広い分野で利用されている。

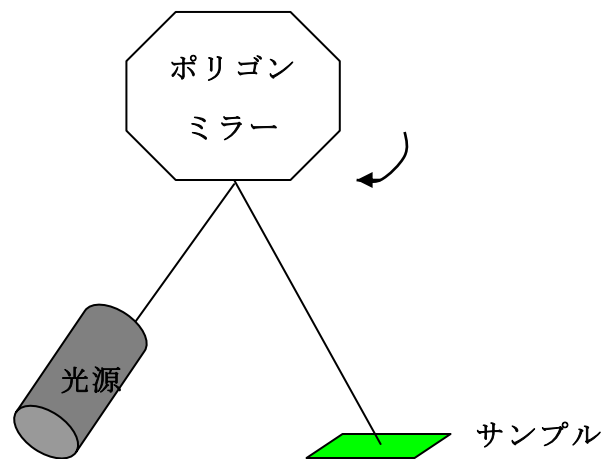


図3 ポリゴンミラーイメージ図

(2) 音響光学偏向素子 (AOD ; Acoustic Optical Deflector)

AODは光の回折を利用した素子である。物質に超音波を周波数変調させて与えると、物質内での屈折率変化が回折格子として働き、光の偏向角度、すなわちレーザー走査が行える素子である。機械的可動部がないので高速な走査を実現できる (図4)。

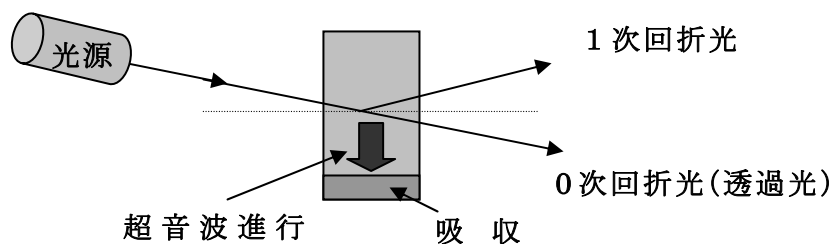


図4 AODイメージ図

(3) DMD (Digital Micro-mirror Device)

1987年にテキサス・インスツルメンツ (Texas Instruments) によって開発された。MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) デバイスで、多数の可動式のマイクロミラ

一を形成し、各マイクロミラーが表示素子の1画素に相当する。各マイクロミラーは鏡面をねじれ軸周りに+/-12度傾斜させることができ、鏡面下部に設けた電極を駆動することにより「ON」(+12度)と「OFF」(-12度)の二つの状態を持たせることができる。各ミラーを個別に駆動することにより、表示画素ごとに光の投射を制御することができる(図5)。

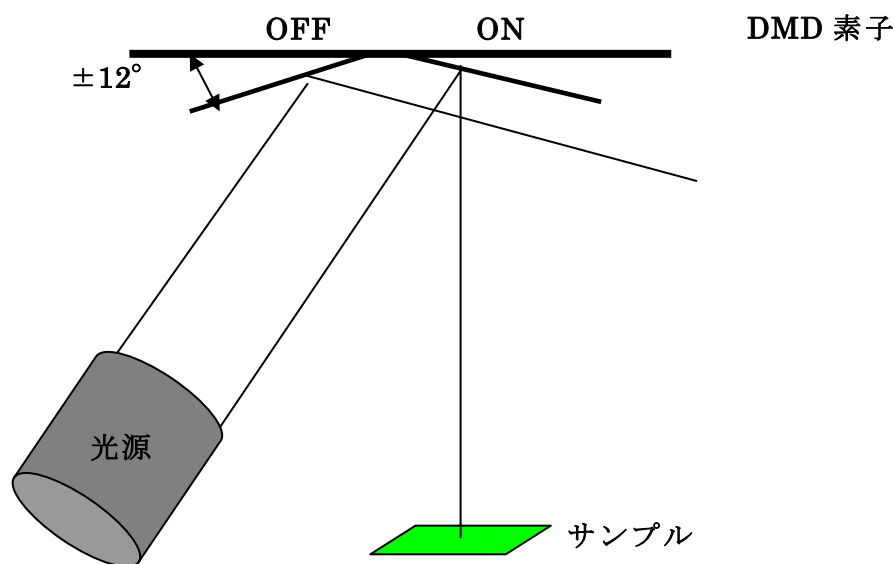


図5 DMDイメージ図

b.3 レーザー顕微鏡のメリット

- 1) レーザー顕微鏡は焦点のあった面だけから情報を取り出す共焦点型であるため、鮮明な画像が得られる。そこで、焦点位置を変えて画像を数枚撮り、それらを画像メモリーで足し合わせれば、完全に3次元の情報をもった画像ができる。これと良く似た画像は走査電子顕微鏡でも得られていたが、奥行き(z軸)方向の正確な情報は得られていなかった。
- 2) 光学顕微鏡は解像度を高くすることと焦点深度を深くすることは困難であったが、レーザー顕微鏡はこの難問題を解決した。
- 3) レーザー顕微鏡は大気中で標本を破壊せず観察できる。また、レーザー顕微鏡で使用するレーザー光は通常の顕微鏡照明よりはるかに微弱であるから、標本に与える影響は少ない。
- 4) レーザー顕微鏡は焦点面以外からの光を通さないため、通常の光学顕微鏡のように像がぼやけることがない。

b.4 レーザー顕微鏡の応用

レーザー顕微鏡は今医学、バイオ、材料、半導体などさまざまな分野で利用されている。ここで、レーザーテック社が開発した新鋭のコンフォーカル顕微鏡を紹介する。

この顕微鏡は高輝度の白色キセノンランプを光源としており、RGB3つの CCD (Charge Coupled Device) イメージセンサーと共焦点光学系を組み合わせることで、リアルカラーの高精細 HD (High Definition) 画像を取得可能にした。以下の特長を有する。

① 1200 万画素

共焦点顕微鏡としての画像の追求により、3ライン CCD 方式による 1200 万画素の高精彩画像が誕生し、優れた色分離能力と緻密、精細な画像がリアルタイムで描画される。

カラーフィルターは、ガラスの下にもかかわらずクリアに観察でき、RGB 色別のセル形状測定ができる。

透過性を持ったサンプルの観察や測定には、RGB 波長切り替え機能で対応できる。

1 回の垂直スキャンで RGB ごとの高さ測定データを同時に取得できるので、RGB ごとの高さ情報からサンプルに最適なものが選べる。

透過性を持った表面形状が測定しにくいサンプルも、Blue のデータを利用して最表面の状態が観察、測定できるばかりか、Red のデータで仮想の様子もクリアに取り出すこと可能である。

② 光学系

広視野で低倍率、高 NA から高倍率、高 NA の対物レンズを生かせる光学系の採用により、低倍率から高倍率まで、高さ測定精度が向上し、且つ傾斜面に強い光学系となっている。

5x、10x、20x の低倍対物レンズは広視野での測定性能を引き出すために専用開発されたものである。対物レンズの瞳径を 20mm として、3.6mm の正方視野においても、最外周入射角 14.5° と反射光の集光効率が上がるようになっている。そのため低倍でも明るく暗部に強い画像が取得できる。

③ ハイスピード処理

フレームサイズの大きさと走査時間の相反する課題もクリアし、2048×2048×RGB の超高精細画像も毎秒 7.5 フレームで取得可能にしている。また、可変フレームレート (VFR) を採用し、最速毎秒 120 フレームという高速走査を実現した。レーザーテック社の従来機より測定時間も 4 倍早くなっている。

④ WIDE 機能

436nm (青)、488nm (青緑)、546nm (緑)、577nm (黄)、630nm (赤)、白色の6つからサンプル観察に適した波長の選択が可能である。

共焦点と干渉機能の融合によりナノレベルからミリレベルオーダーまでの広大なダイナミックレンジの垂直方向の測定ができる。

サンプル表面のナノレベルの微小凸凹を観察する微分干渉観察機能を装備することができる。またノマルスキープリズムを外せば偏光顕微鏡機能も実現できる。

原子間力顕微鏡 (AFM ; Atomic Force Microscope) 機能の一体化によりナノからミリまでのシームレス観察を可能にする。

b.5 今後の展望

ナノテクノロジーとバイオサイエンス先端技術が著しい発展している今、一般の紫外線顕微鏡は試料に損傷を与える、走査型電子顕微鏡 (SEM ; Scanning Electron Microscope) は真空引きが必要で観察に手間がかかるといった欠点を抱えていた。しかし、レーザー顕微鏡はこのような欠点に影響されない観察が可能になったため、レーザー顕微鏡の実用化、普及率が進んできた。しかしながら、レーザー顕微鏡はレーザーが試料の微小ポイント毎を走査していき、最終的に全体の画像を得るには多少時間の遅延が発生するデメリットがある。走査の高速化、リアルタイム観察でき、レーザー顕微鏡をより進展していくのに、関連している光制御走査技術、分光技術、レーザー光源、コンピュータ技術等十分活用されることを今後の開発課題になると思われる。

(山内良彦)

第IV章 応用技術分野

1	フォトマスク	161
2	磁気ディスク基板	173
3	大口径ミラー／レンズ	180
	a) ミラー／レンズの研磨	180
	b) イオン加工	186
4	その他	193
	a) レーザーガラス	193
	b) 超大口径シリコンウエハ	199
	c) 石定盤	209
	d) 金属定盤	217
	e) 電解複合研磨	228

第IV章 応用技術分野

1 フォトマスク

1.1 はじめに

1.1.1 フォトマスクとは

フォトマスクとは、大型基板を加工する際用いられる光学的なパターン転写を行うための原版である。フォトマスクは透明基板の上にクロムあるいはエマルジョンの遮光膜パターンが形成されている。図1にフォトマスク基本構造の断面図を示す。

大型基板を加工する場合、目的に合わせていろいろなフォトマスクが選択されている。フォトマスクはその構成材料によって三種類に分類できる。

- 1) ハードマスク（クロムハードマスク）
- 2) エマルジョンマスク（エマルジョンハードマスク）
- 3) フィルムマスク（エマルジョンフィルムマスク）

ハードマスク、エマルジョンマスクの基板材料は合成石英ガラスやソーダ石灰ガラス、あるいは低膨張ガラスである。フィルムマスクの基板材料はポリエステルフィルムである。

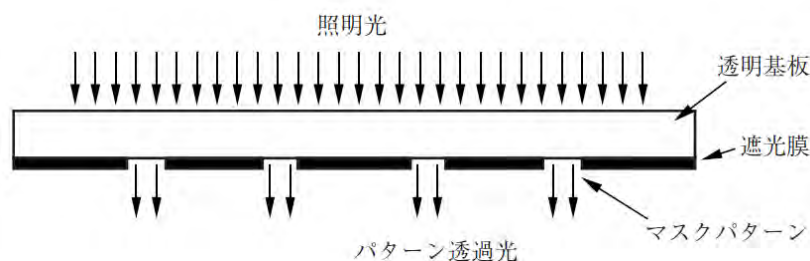


図1 フォトマスク基本構造の断面図

1.1.2 FPD用フォトマスクの概要

(1) マスクの区分

フラットパネルディスプレイ（FPD ; Flat Panel Display）用マスクは通常大型マスクと呼ばれている。表1に示したように液晶ディスプレイ（LCD ; Liquid Crystal Display）用のTFT（Thin Film Transistor）マスク、STN（Super-twisted Nematic）マスク、CF（Color Filter）マスク、PDP（Plasma Display Panel）用のマスク等がある。マスクとしての精度は低いが安価であるエマルジョンマスクやフィルムマスクも使われていたが、

現在は精度を重視して、ほとんどクロムハードマスクになっている。

最近 CF は、マスクを用いる光転写方式によるパターン形成ではなく、インクジェットプリント方法で顔料を直接基板に印刷する製造方法も実用化している。

なお、FPD 製造工程のパターン製造方法としては、シルクスクリーン印刷やリフトオフ手法も用いられているため、スクリーンマスクやメタルマスクも一部の工程で用いられている。

本節では大型マスクの中で最も精度要求の厳しい LCD の TFT 用クロムハードマスクを中心に説明する。

表 1 マスクの区分

分野	製品		ハードマスク	エマルジョンマスク	スクリーンマスク	メタルマスク
FPD	LCD	TFT/STN	◎	○	○	
		CF	◎	○	○	○
	PDP		◎	○	○	○

◎：主に使用されている ○：一部で使用されている

(2) マスクの転写方法

ガラス基板を高精度にパターニングする方法には大型マスクを用いる方式とレチクルを用いる方式がある。

レチクル方式は現在の半導体と同じようにステッパを用いてレチクル像を一括転写して、ステップ&リピートによってガラス基板を露光する方法である。投影倍率 1.25 倍のステッパを用いてマスク像を基板上に投影する。6 インチレチクルより大きな製品を転写する場合は複数のレチクルを用いてつなぎ合わせて 1 つの製品を基板上に形成する。使用するレチクルは半導体と比べると加工精度が厳しくない。たとえ複数枚のレチクルが必要でも大型マスクを用いるより安価に製造できる場合が多い。高精度加工は必要であるが製品サイズがあまり大きくない場合や、少量多品種生産にはコスト的に有利な露光方法である。

大型マスク方式は、等倍アライナによってマスクを基板にスキャン投影する方法である。現在この大型マスクの等倍投影方式が高精度に生産性良くパネル製造できる大型ガラス基板の標準的製造方法になっている。

当初は製造対象の基板より一回り大きな等倍マスクを原版として製造し、マスク全面を基板に転写していたが、現在は基板サイズのほぼ半分程度の大型マスクを用いて、スキャン&リピートして基板全面を露光する方式になっている。

なお、PDP や CF では製品の要求精度と製造コストを考慮して大型マスクを用いたプロキシミティ露光方式が一般的である。

(3) 大型マスクのサイズ推移

ガラス基板サイズの世代に対応して大型化した LCD 用フォトマスク基板の標準サイズの推移を表 2 に示す。

表 2 LCD 世代とマスクサイズの推移

(単位：mm)

		第4世代	第5世代	第6世代	第7世代	第8世代
パネル基板サイズ		680×880×0.7	1200×1300×0.7	1500×1850×0.7	1870×2200×0.7	2160×2400×0.7
マスクサイズ	キヤノン	520×610×8	520×610×8	850×1200×10	850×1200×10	850×1200×10
	ニコン	(6025) ^{注)}	800×920×10	800×920×10	1220×1400×13	1220×1400×13

注): 6インチレチクル

大型マスクサイズの標準化は基板サイズの標準化と共に 1990 年代から取り組まれているが、世代交代前にサイズを統一化することはできていない。同じ世代向けのマスクであっても露光機メーカーごとにマスクサイズが異なる。また、実際には標準サイズ以外のマスクも使われている。

(4) マスク仕様

マスクの品質仕様として、半導体における国際半導体技術ロードマップ (ITRS ; International Technology Roadmap for Semiconductor) のように業界が合意したロードマップは作られていない。基本的にはマスク発注者とマスク製造者の個別取り決めになっている。

① フォトマスクの規格項目

主要項目について示す。基板の精度からの仕様項目として、マスクサイズ、フラットネス、マスク厚み、膜質、反射率、光学濃度がある。パターンの精度からの仕様項目として、描画エリアサイズ、トータルピッチ精度、重ね合せ精度、線幅精度がある。このほかパターン形状異常、欠落、余剰などのパターン外観欠陥がある。

② LCD 用フォトマスクの仕様例

各仕様項目ともディスプレイのサイズ、高精細度、マスクのサイズによって設計値からの許容公差が設定される。第 7 世代用の LCD-TFT 用大型マスクの仕様例を表 3 に示す。また LCD-TFT 用レチクルの仕様例を表 4 に示す。

表 3 第 7 世代用の LCD-TFT 用大型マスクの仕様例

項目		規格	備考
基板	Glass Type	Synthetic QZ	
	Size	850±0.3mm×1200±0.3mm	
	Thickness	10mm+0.2,-0.4mm	
	Flatness	≤20μm	
	Cr Film Type	Anti-reflective double layer Cr	
	光学濃度(OD値)	≥2.7 at λ=450nm	
	反射率	10±5% at λ=436nm	
寸法精度	最小線幅	3μm	レーザー描画機
	短寸法精度	±0.5μm	レーザー顕微鏡
	座標位置精度	±0.75μm	高精度座標測定機
	重ね合わせ精度	±0.75μm	
欠陥	画素部	3μm free and 1/2 Line Width	自動欠陥検査機 レーザーCVDによる修正
	配線部	5μm free	
	周辺部	10μm free	

表 4 LCD-TFT 用レチクルの仕様例

項目		規格	備考
基板	ガラス種	LE, QZ	
	サイズ・公差	5", 6", 7", 7"×8", 7.25R±0.4mm	
	厚さ・公差	0.09", 0.12", 0.25"±0.1mm	
	フラットネス	2/5/10μm	
	膜質	Cr/AR	クロム, 酸化クロムによる 2層低反射膜
	膜厚・公差	780/980 ±100 Å	
寸法精度	最小線幅	1~2μm	EB/レーザー描画機
	線幅公差	±0.3μm	微小寸法測定機
	トータルピッチ精度	±0.3~±0.5μm	高精度座標測定機
	重ね合わせ精度	±0.3~±0.5μm	
欠陥	画素部	2~4μm free	自動欠陥検査機 レーザーCVD修正機
	電極部	5/10μm free	
	その他	10~μm free	

(1) ガラス基板

フォトマスク用ガラス基板として要求される品質は表面欠陥、内部欠陥がないこと、面精度、平坦度が良いことなどが基本的な項目であるが、大サイズマスクの場合ガラス基板の熱膨張率が重要なファクタである。マスクの製造時、使用時の温度の変化によってパターンの位置誤差が発生するので高精度を要求される LCD 用マスクは石英ガラスが使用される。CF、PDP 用マスクは低膨張ガラス、ソーダライムガラスである。

(2) クロム成膜

ガラス基板に、真空中でクロム (Cr) をターゲットとして使用し、スパッタにより成膜する。図 3 にハードマスクブランクの膜構成例を示す。低反射率を使用することが多い。

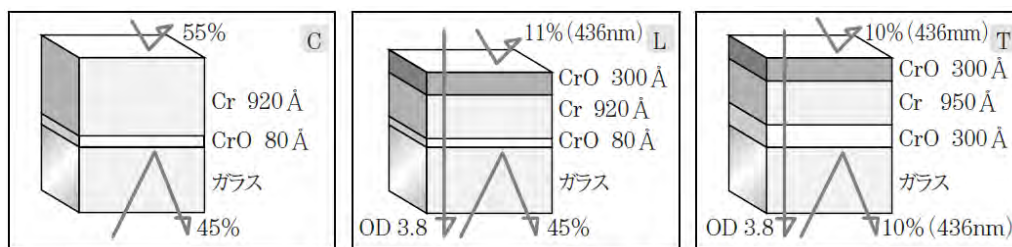


図 3 ハードマスクブランクの膜構成例

1.2.2 マスクパターン形成

(1) CAD

FPD を生産する場合、通常数回のフォトリソグラフィ工程が適用され、各工程ごとに異なるマスクが使用される。そのマスクに必要なパターンデータを作成するのが CAD である。図 4 に CAD～描画工程フローを示した。

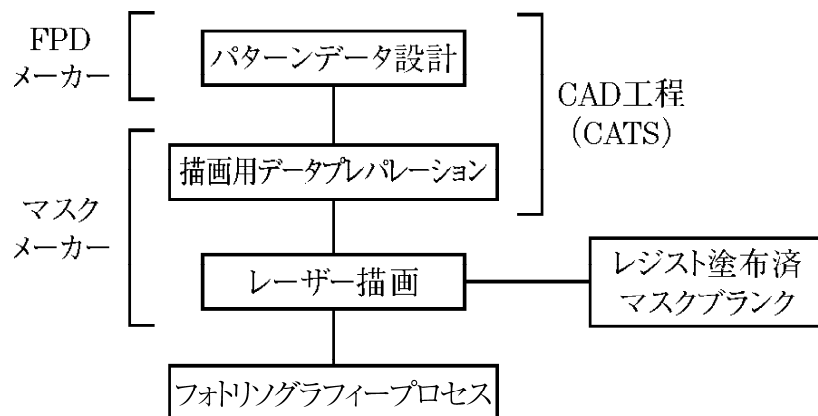


図 4 FPD 製造における CAD の位置づけ

(2) 露光描画

ディスプレイメーカーから支給されたデータを、描画装置に対応したデータに加工する工程がマスクメーカーでのデータプレパレーションの CAD である。

そのデータを使用して、レーザー描画装置にて、あらかじめ装置に設置したフォトリジストを塗布したマスクブランク上に、レーザー光で所定のパターンを描画する。レーザー描画のメカニズムを図 5 に示す。

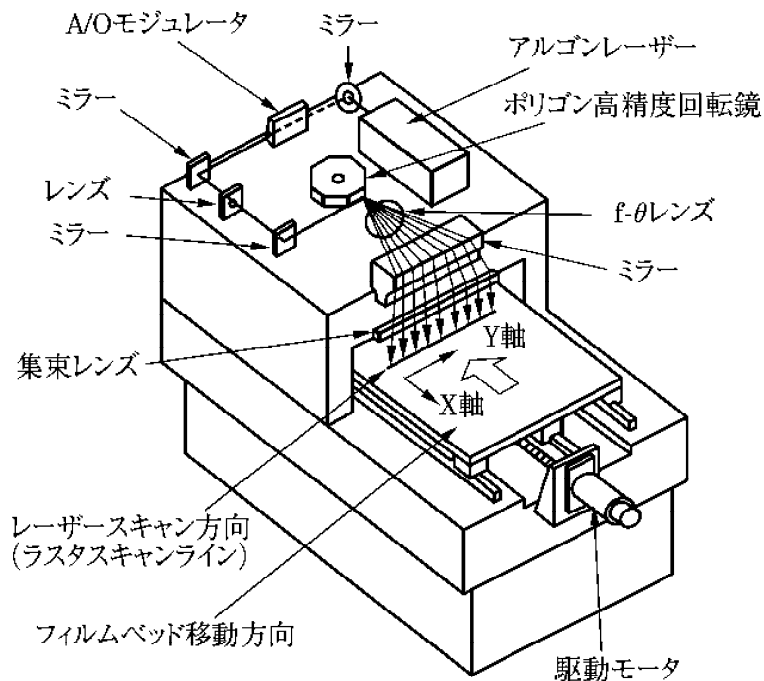


図 5 レーザー描画装置の描画部概略

(3) フォトリソグラフィープロセス

露光描画されたマスクブランクスを現像、エッチングするのがフォトリソグラフィープロセスである。プロセス装置は殆ど使用するマスクメーカーの特注仕様で、フォトリジスト塗布装置、現像装置、ベーク装置、剥離装置、洗浄装置等と個別の装置を並べてラインとする。

TFT 用の第 8 世代のマスク基板サイズは 1220mm×1400mm×13mm、PDP 用マスク基板は 1300mm×1850mm×4.8mm と超大型サイズで重さも数十キログラムになる。

表 5 にプロセスフローを示す。プロセス工程はパターン形成技術の中で CAD、露光描画がデジタル的であるのに対してアナログ的な要素の強い工程である。この工程の性能がフォトマスクの品質を決定する重要なファクタの一つである。

レジストの塗布されたブランクにレーザー光でパターンを露光描画する。露光描画された部分のレジストを、現像液を用いて除去する。レジストの除去された部分はクロム膜が露出している。その露出したクロム膜を除去することをエッチングと言う。最後にレジストを除去しブランク全体を洗浄して終了する。

表 5 フォトリソグラフィープロセスフロー

フロー	実施内容
○ blanks 受入れ	表面検査
↓	
□ フォトレジスト塗布	スピコート, スリットコート
↓	
□ プレバーク	オープン, ホットプレート
↓	
□ 露光・描画	レーザー描画装置
↓	
□ 現 像	ディップ方式, スピンスプレー方式, バドル方式
↓	
□ ポストバーク	オープンホットプレート
↓	
□ クロムエッチング	ウェット/ドライエッチング装置
↓	
□ レジスト剥離	ケミカルウェットステーション
↓	
□ 洗 浄	ディップ, スピンドライ, ペーパードライ
↓	
○ 検査工程へ	搬送

1.2.3 マスクパターン検査修正、ペリクル貼付

(1) 概要

マスクブランクにパターンを形成したものがフォトマスクである。前項までで加工としての工程は完了である。フォトマスクは FPD の製作に原器として使用されるので、完全な品質であることが保証されたものであることが必須である。加工完了したフォトマスクを検査し、不具合箇所を修正するのが本工程である。

表 6 に検査、修正、ペリクル貼付の工程を示した。検査はパターンの寸法を計測する項目と、パターンの形状を確認する項目がある。寸法が不具合な場合は修正することは不可能であるので不良となるが、形状が不具合な場合は修復が可能である。

表 6 検査・修正・ペリクル貼付工程

フロー	項目	装置
マスク受入れ		
基本検査	サイズ膜質 パターンの白黒 パターンの向き 品名・キズ・汚れ	顕微鏡・投光器
短寸法測定	設計値からのズレ	透過光式測長機(CCD方式) 反射光式測長機(レーザー顕微鏡他)
長寸法測定	トータルピッチ精度 直交度 重ね合わせ精度	座標測定機, 長寸法測定機 (レーザー干渉計付き X-Yステージ)
外観検査	ランダム欠陥(白黒欠陥)	チップ比較検査装置
修正	データ欠陥	データ検査比較装置
洗浄	白黒欠陥修正	黒欠陥修正装置(レーザーリペア) 白欠陥修正装置(CVD, FIB), リフトオフ法
ペリクル貼付	異物除去	デンプ式, ベーノ乾燥 枚葉式
異物検査	異物	投光器 ペリクル貼付装置
出荷	異物	異物検査装置, 投光器 外観検査装置
		専用大型ケース

(2) パターン計測検査

パターン計測は図 6 に示す線幅（短寸法）精度、トータルピッチ精度、直交度、重ね合わせ精度を測定するものである。

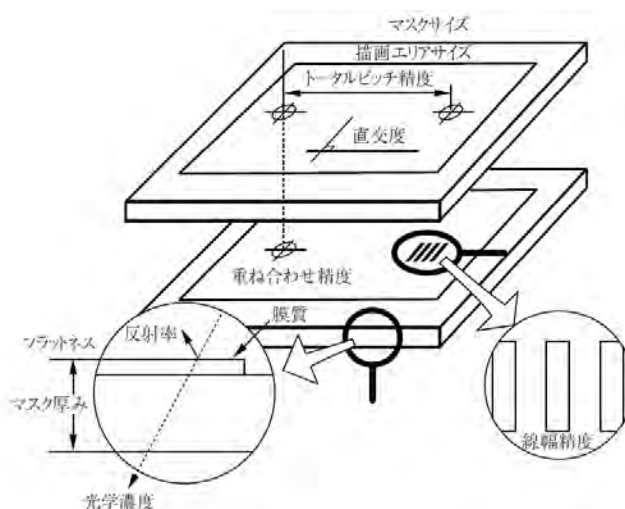


図 6 フォトマスク規格項目

(3) パターン欠陥検査

欠陥検査はパターンの形状異常を検出判定するものである。

(4) パターン欠陥修正

欠陥検査にてパターン異常として検出判定される欠陥はパターンが欠損、欠落しているものと、その逆で余計なものが存在している場合の二通りがある。一般に前者を白欠陥、後者を黒欠陥と呼ぶ。白欠陥は欠落している部分を補充し、黒欠陥は余分な部署を削除することにより正常なパターンに復元させる。これを欠陥修正と言う。

(5) ペリクル貼付

検査、修正が終了し合格したマスクに異物等が付着して、TFT パネル製造工程でマスクを使用するとき問題が発生することの無いように、きれいな状態を保持する治具がペリクルである。フォトマスクのパターン面とガラス面の両面に面上から数 mm 離れたところに数 μm の厚さの透明なフィルムを、パターン面とガラス面に異物等が付着することを防止するため設ける。これがペリクルである。ペリクル上に付着した異物等は TFT パネル製造工程では結像されない。

本工程を終了し大型フォトマスクが完成する。

1.3 今後の展望

1.3.1 市場概要

(1) 市場規模

FPD 市場の拡大に相応してフォトマスクの市場も拡大して行く。図 7 に 2001 年から 2008 年の LCD、PDP フォトマスクの世界市場予測を示した。

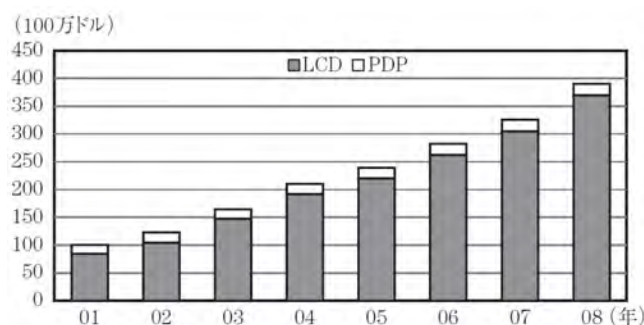


図 7 LCD と PDP のフォトマスク世界市場予測

3～4年で2倍になるような大幅な市場の拡大である。2005年は3億ドルを越えたとの見方もある。同年 FPD 市場は600億ドルであるので、現状、パネル製品に占めるマスクの比率は0.5%である。

(2) フォトマスク供給状況

パネルの製造は世界の中で、日本、韓国、台湾に集中している。この状況の中、マスクメーカーも日本、台湾、韓国に生産拠点がある。台湾、韓国には現地マスクメーカーもあるが技術的に先行している日本のメーカーが台湾、韓国にも進出している。

LCDのTFT用マスクは高精度が要求されている。なお、CF工程へマスクが不要なインクジェット方式の導入の検討も進んでいる。

1.3.2 製造技術の動向

(1) 大型化、高精度化

LCDマスク、PDPマスク、CFマスクいずれも益々大型化が進んでいく。最も高精度が要求されるLCDのTFTのパネルガラス基板のサイズは第8世代で2140mm×2460mm、第9世代では2400mm×2800mmである。この製造に用いられる第8世代のLCDマスクのサイズは1120mm×1400mm×13mmである。またPDPマスクは1300mm×1850mm×4.8mmと、それぞれ超大型サイズで重さも数十キログラムになる。

大型マスクの課題は高精度を維持した大サイズマスクの製造技術の確立である。具体的には、大面積のガラス基板に均一な膜厚を確保するフォトレジスト塗布技術、大面積を欠陥なく仕上げる洗浄技術、数十キログラムの大サイズマスクの搬送、梱包、輸送である。勿論短納期が強力に要求されるのは言うまでもない。

(2) 多階調フォトマスク (MTM ; Multi Tone Mask)

従来のフォトマスクはバイナリマスク (Binary Mask) と云って、光の遮光部の黒と透過光部の白の2階調でパターンが構成されている。

多階調マスクはグレイトーンマスク (GTM ; Gray Tone Mask) とハーフトーンマスク (HTM ; Half Tone Mask) の2種類がある。両者とも遮光部の黒と透過光部の白に加え半透過光部の灰色 (gray) を有する3階調マスクである。両者は半透過光部の構成が異なる。GTMは透過光部に解像限界以下の微細パターンを並べることにより光の透過量を低下させた半透過光部を形成したマスクである。HTMは非透過光部の遮光膜をエッチングによ

り薄くして半透過性膜として半透過光部を形成したマスクである。図 8 に BM、GTM、HTM の断面図を示す。

中間調を有したマスクを使用することにより、フォトリソ工程の回数を 5 回から 4 回に低減できる。製造コスト削減に繋がる施策として今後適用が進む。



図 8 フォトマスク断面図

(3) スタナード規格

JIS 規格は日本国内の代表的なスタンダード (standard、規格) であるがマスク分野は特に設けられていない。欧州から発信されている ISO 規格もスタンダードであるがマスク関係の規定は現在のところない。

現在 SEMI (Semiconductor Equipment and Materials International) スタナードが FPD 関係では世界の標準規格である。表 7 に示す。今後は標準化が進む。

表 7 マスク関連の SEMI スタナード

スタンダード番号	更新年月日	タイトル
〈フラットパネルディスプレイ, FPD〉		
SEMI D11-95	2003/11/1	FPDガラス基板カセットの仕様
(Reapproved 0703)		
SEMI D20-1000	2000/10/1	FPDマスク欠陥用語の定義
SEMI D21-1000	2000/10/1	マスク関連用語の定義
SEMI D26-1000	2000/10/1	FPD用大型マスクの暫定仕様(北米地区限定)
SEMI D37-0304	2004/7/1	LCD用ベリクルの仕様
SEMI D38-0304	2004/7/1	LCD用マスクの有効範囲のガイド
SEMI D42-0305	2005/7/1	超大型マスク基板材料(収納用)ケースの仕様
SEMI D6-0305	2005/7/1	LCDマスク基板の仕様

参考文献

- 1) 田邊、竹花、法元：入門 フォトマスク技術、工業調査会 (2006)

(田邊 功)

2 磁気ディスク基板

2.1 はじめに

ハードディスクドライブ（HDD）は、近年の情報・通信技術の発展の中で、大容量の情報を高速に取り扱うことが出来る記録装置として無くてはならない存在になっている。特に最近では、その用途が、パーソナルコンピューターやサーバーなどの主及び補助記録装置としてだけでなく、携帯音楽プレーヤー、ビデオレコーダー、ビデオカメラ、カーナビと言った民生用機器にまで広がり、我々の生活にとってますます身近なものになりつつある。今後、数十 GB（ギガバイト）クラスの中容量領域ではフラッシュメモリーを始めとする半導体メモリーにその役割を譲る可能性もあるが、大量のしかも高品質な映像データを扱うような領域においては、数百 GB あるいは TB（テラバイト）クラスの容量を必要とし、低コストで大容量を実現できることや書き換えに対する信頼性が高いことなどから、HDD は今後ともゆるぎない地位を占めるものと予想される。

HDD は、図 1 で示すようにプラッターと呼ばれる磁気ディスク、磁気ヘッド、スピンドルモーター、アクチュエーターなどからなり、このうち磁気ディスクは HDD の今後の発展を支える最も重要な部品の一つである。以下本文においては、ガラス製磁気ディスクに的を絞って現状の製造工程、要求される特性、加工方法及び今後の動向について概説したい。

2.2 磁気ディスクの製造プロセス

ガラス製磁気ディスクの製造プロセスを図 2 に、及び断面構造を図 3 に示す。プロセスとしてはまず始めに元基板（サブストレート）の表面をラッピング工程及びポリシング工程を経て鏡面加工を行ない、その上にスパッター法で磁性膜を形成し、更にカーボン層及びルブリカント層と呼ばれる保護膜をつくり、最終的にバニッシュ及びワイピング工程を経てつくられる。

なお、仕上げのポリシング加工を行ったのちに、テクスチャリングと呼ばれる、表面に周期的な溝を形成し磁気特性を向上させる為の加工を行う場合もある。

現在、元基板としては主にアルミ製及びガラス製のものが用いられている。アルミ基板は主としてパソコンやサーバー用途の大口径磁気ディスク用に用いられ、ガラス基板は、その耐衝撃性を生かしてノート型パーソナルコンピューターや各種モバイル機器向けの小口径磁気ディスク用に用いられている。

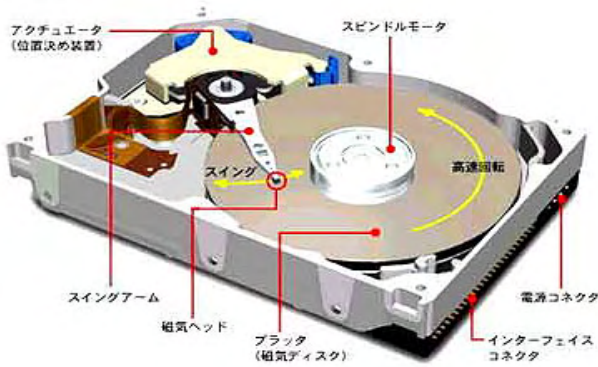


図 1 HDD の構造

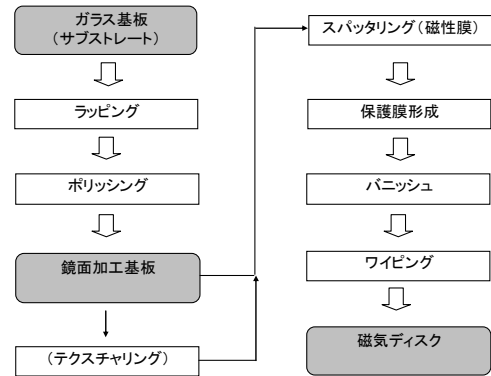


図 2 磁気ディスク製造プロセス

ルブリカント膜
カーボン保護膜
磁性膜
ガラス基板

図 3 ガラスディスクの断面

磁気ディスク用に用いられるガラス基板は、非晶質（化学強化）ガラスと結晶化ガラスに分けられる。ガラスの代表特性を表 1 に示すが、どちらの材料を用いるかは加工性能や磁性膜との相性あるいはヘッドとの関連等により、HDD メーカーの設計方針に基づいて決められる。

表 1 磁気ディスク用ガラス

	非晶質ガラス	結晶化ガラス
比重	2.5	2.4
ヤング率 (Gpa)	70~90	
曲げ強度 (Mpa)	300~500	
硬度 (Hv)	70~90	
耐熱温度 (°C)	>550	>650
熱伝導率 (W/m・K)	0.8~2	
線膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)	8~9	7
電気抵抗 (Ω・cm)	>10 ¹¹	

鏡面加工工程は、磁性膜を形成する前段階の工程であるが、ここでの表面状態が磁気ディスクとして仕上がった場合のトータル性能に大きな影響を及ぼし、非常に重要な役割を果たしている。最終の仕上げ面を得るために、一般的には何段階かのプロセスを経て加工がなされる。この加工に関しては後で詳しく述べる。

磁性膜は一般的にスパッタリング法により Cr 合金からなる下地層を形成したのち、更に Co 合金からなる磁性層を形成することで行われ、磁気記録媒体としての主要な役割を担っている。カーボン層及びルブリカントと呼ばれる層は、HDD の磁気ヘッドと磁気ディスクとの間のインターフェースを安定的に実現する上で必要な耐摺動性や耐食性をもたせる為の保護膜である。また、バニッシュ及びワイピング工程とは、最終的な製品として表面仕上げを行う工程である。具体的にはバニッシングテープを用いて表面の余分な潤滑剤等を除去し、更にワイピングを行うことで製品表面に仕上げられる。

2.3 ガラス製磁気ディスク基板の要求特性

磁気ディスク基板の要求性能としては、鏡面性、無欠陥性、耐衝撃性、耐摺動性、量産性（タクト）といった項目があげられるが、これらの特性がなぜ重要かを理解する上で、改めて HDD の構造について述べる。

HDD のへのデータ記録や消去といった動作が行われる際、磁気ヘッドは磁気ディスクの上を浮上している。これは、ディスクの回転に伴うヘッドとの摩擦トラブルを回避する為の必然的な工夫である。ヘッドの浮上はディスクの高速回転に伴って表面に発生する空気の流れが、図 4 に示すようにヘッドとディスクの間に流れ込み、その空気の圧力によって押し上げられることで行われる。その場合のヘッドとディスクの間隙は極めて小さく、というより高記録密度を達成させる為には磁力線を近づける目的で間隙をより小さくする必要があり、近年では 10nm レベルまでになってきている。一方で、ディスクの方は、HDD の利点である早い読み書き速度を実現しようとした場合に、回転数をより高速にする必要がある。前述したような背景から、ヘッドとディスクの間隙に比べるとディスクの回転による線速度は極めて大きく、よくジャンボジェット機が滑走路 1mm 単位の高さを飛行するのと同じに例えられる。このような HDD 固有の構造により、磁気ディスクの表面は極めて高い精度での鏡面特性及び無欠陥性が要求されている。

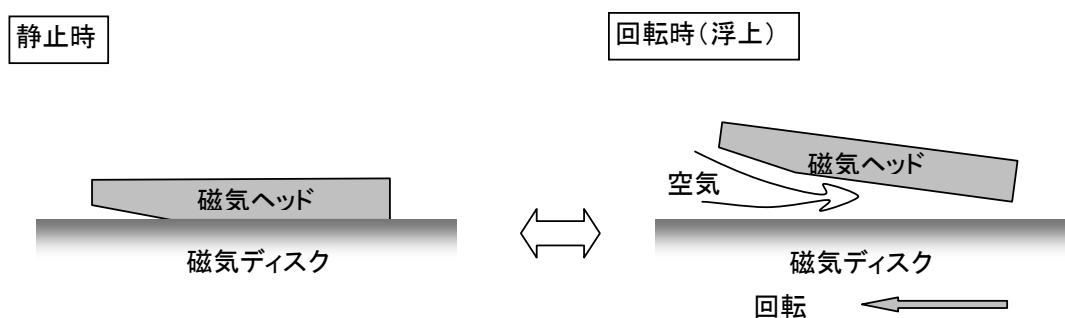


図 4

ところでディスクが回転していない場合は、ヘッドは浮上できずディスク上に接触していることになる。このように回転開始前と停止後は直接接触が生じるようなヘッドとディスクの構造を CSS (Contact Start-Stop) 方式と呼ぶ。CSS 方式の場合、このような直接接触が繰り返し行われるので接触の際の摺動への耐久性も重要な特性の一つになる。

一方で、最近とくにガラス製小型ディスクにおいては停止時にヘッドをディスク面外に退避させる L/UL (Load/Unload) 方式を採用するものが主になってきている。この場合は CSS 方式のような摺動への考慮は少なくすむ。

以上の背景を踏まえた上で鏡面加工基板への要求特性について更に述べる。

(1) 基板表面のトポロジカル特性

基板の鏡面性はガラス基板表面を研磨加工したのちの表面粗さによって決まる。一般的に Ra や Rt の値で代表されるが、最新の基板ではÅのオーダーの精度を求められている。また、表面粗さとは別にうねりと呼ばれる言わば長波長域での粗さも重要である。更に磁気ディスク用基板に固有の特性として、外周とか内周の端部形状も磁気記録メディアとしての性能に影響を及ぼす重要な項目である。

(2) 表面欠陥

研磨加工後の表面に、研磨屑等の突起物や逆にスクラッチやピットといった凹状のような欠陥があってはいけないことは当然のことであるが、更にガラスの研磨面においてしばしば問題となる潜傷と呼ばれる加工傷も問題となる。これは言わば内在した欠陥でありその部分に応力集中が起きているため、何らかの要因で応力が開放された場合に実欠陥として顕現する可能性があり問題となる。

(3) 量産性 (タクト)

これは仕上げ面の品質とは直接関係ないが、実際的な鏡面加工実現性を判断する上で非常に重要である。具体的には研磨速度 (レート) がその指標となる。HDD は近年フラッシュメモリを始めとする半導体メモリと熾烈な競争にさらされているが、HDD がもっている極めて大容量の記録を安価に提供できるという特徴を今後とも維持していく上で考慮しなければならない特性である。ただし、これは仕上げ面の品質と相反する部分もあり、またどういったプロセスを経て必要な加工面に仕上げるかという問題と合わせ、タクトという観点でトータルに追求していく必要があると思われる。

2.4 基板の加工方法

ラッピング及びポリシングによって最終的な鏡面仕上げ面を得る工程は、言わば荒削りから始まっていかに効率よく、目的とする仕上げ面質が得られるようにもって行くかと言うプロセス設計が重要である。中間段階での面質目標をどこにおくか、何段階の研磨プロセスを経て最終の仕上げ面を得るかによって設計のベースが異なってくる。次いで、その面質を達成する為の研磨材の選定及び研磨条件の設定が必要となる。ラッピング工程は基板の寸法精度や形状精度の向上を主目的とする工程である。ただし、ここでの平面度は後のポリシング工程において所定の性能を得るうえで非常に重要である。ラッピング及びポリシング工程においては遊星歯車のついた両面研磨機が主に用いられる。ポリシングにおいては研磨材の選定が非常に重要であり、改めて研磨材について述べる。

周期律表で原子番号が 57 のランタンから原子番号が 71 までの 15 種類の元素をランタノイドと呼び、これにイットリウム、スカンジウムを含めた 17 元素を一般にレアアースと呼ぶ。このうちランタノイドに属する La、Ce、Pr、Nd、Pm、Sm、Eu、Gd、Tb、Dy、Ho、Er、Tm、Yb、Lu は外側の 5d、6s の電子配列が同じである為、化学的に非常に良く似た性質を有している。具体的には原子半径、イオン半径とも比較的大きく、6 配位以上の配位数をとっていることが多いこと、かなり強い塩基性を有すること、安定した酸化物をつくりやすいことなどがあげられる。このうちガラス基板用の研磨材としては、酸化セリウム系研磨材が多く用いられている。酸化セリウム系研磨材を用いることで、他の研磨材に比べて格段に効率よく研磨が行える点に特徴があり、その研磨メカニズムとしては、微小除去説や、流動説、機械的・化学的作用説など種々の仮説が提唱されている。

酸化セリウム系研磨材の化学組成として重要なのは、TRO として一般に表される、レアアース酸化物のトータル含有率である。研磨性能を考える上で研磨材の粒度分布は非常に重要であるが、市販されている酸化セリウム系研磨材の平均粒径はおよそ 1~3 μm のものが多い。

最近、仕上げ研磨の段階では酸化セリウム系研磨材に代わってコロイダルシリカ系研磨材が用いられることも多くなっている。これは近年になって更に急速に進展している磁気ディスクの高記録密度化に伴って求められている、低 Ra 化を始めとする極めて高精度の仕上がり面を達成するには、酸化セリウム系研磨材では対応が難しくなっている為である。

ポリシング工程において、研磨材は水に懸濁させた上で所定濃度を維持しながら研磨機に供給される。この工程での重要な因子は、研磨材の選択の他にはパッドの選択及びコン

ディショニング、研磨圧力、回転数、スラリー流量などがあげられる。研磨材の選択について言えば、仕上げ研磨に近づくほどより小粒径のものを使用して加工精度をあげていくというのが一般的である。

2.5 今後の展望

磁気ディスクの記録密度は年々着実に増大してきている（図 5）。これは、磁気ヘッド及び磁気ディスクそれぞれの飽くなき技術革新に負うところが大きい。磁気ディスクに関して言えば、垂直磁気記録メディアの登場が最近の話題だが既に成熟期に入りつつあり、垂直磁気記録方式に次ぐ次世代記録方式としては、ディスクリットメディアやパターンドメディアが活発に開発されている。更にその先の技術として熱アシスト記録方式が検討され始めている。

パターンドメディアとは、従来の磁性層が磁氣的に孤立した磁性結晶粒子からなるグラニューラー構造であるのに対し、1 ビット単位の均一な磁性薄膜のパターンを形成した構造のメディアであり、グラニューラー構造である場合に磁性粒子の微細化にともなって発生する熱ゆらぎの問題を改良することで高記録密度化を達成可能な技術である。

ディスクリットメディアとは、電子線リソグラフィやナノインプリントの技術を用いて記録に不要な部分の磁性材料を除去（溝の形成）する方法でつくられたメディアを指す。なお、溝加工した部分には非磁性材料を埋め込んで、隣接するデータビットと隔離すると共に、磁気メディアに求められる超平坦化を実現する必要がある。

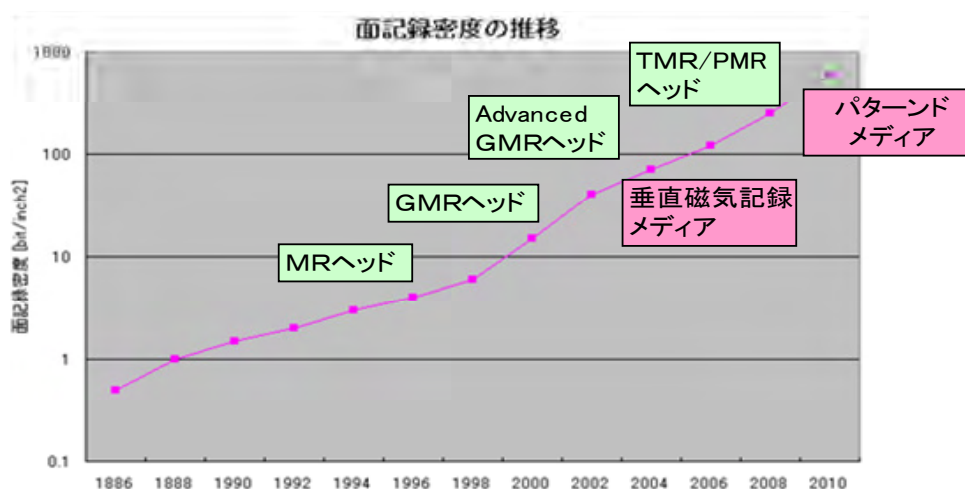


図 5 HDD の面記録密度推移

図 6 にディスクリットメディアの製造プロセス例を示す。

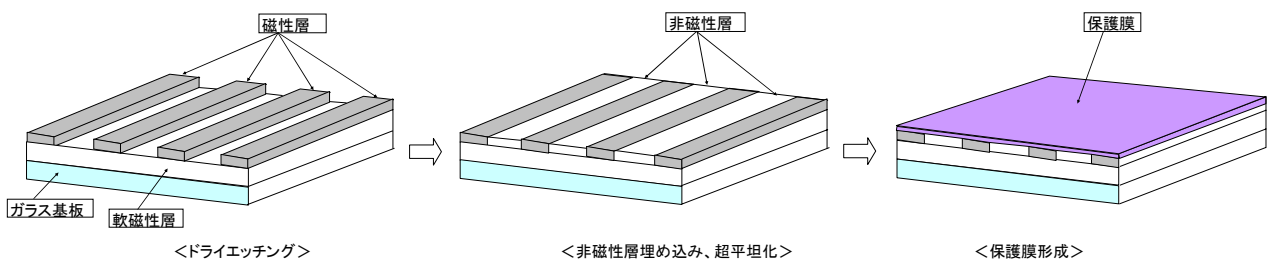


図 6 ディスクリットメディア製造プロセス

HDD の高密度化にともなって顕著になる熱ゆらぎの問題を基本的に回避するには、磁性材料の保磁力を高めてやる必要がある。ところが、保磁力が高すぎると既存のヘッドでは記録が出来なくなってしまふ。そこで登場が期待されているのが熱アシスト磁気記録方式である。これは、レーザーで記録媒体を加熱して保磁力を下げることで記録することを可能にした方式である。記録後には温度が下がるので保磁力が高まり熱ゆらぎに強い状態に復帰する。レーザーを用いることから、光磁気記録とのハイブリッド型記録方式ともいえる。

これまで述べてきたような革新的な技術の採用により、数年先には磁気ディスク 1 枚で TB(テラビット)オーダーの記録容量をもった媒体が登場するのも間違いないと思われる。

このように磁気ディスクはまさに日進月歩で技術が進展してきた世界であるが、それを支えているのは、磁性材料やヘッドを始めとする各種材料の高度化技術であり、また研磨プロセスを始めとする精密加工技術である。特に、今後は従来のプレーンな基板の表面に要求される超平滑性や無欠陥性がより重視されると同時に、膜材質に対する選択加工性とかトポロジカル特性の精密な制御といった観点で、半導体基板加工と類似の手法が用いられていくものと思われる。こうした総合力によって磁気ディスク基板は今後ともますます発展していくものと期待される。

参考文献

- 1) 喜々津哲：IDEMA Japan News 74,1 (2006)
- 2) 岡村康弘：IDEMA Japan News 59,1 (2004)
- 3) 海津明正，添野佳一，田上勝道：電子情報通信学会技術研究報告 107,381,13 (2007)
- 4) 加藤順也：表面化学 26, No.5, 288 (2005)
- 5) 伊藤 桂，増田知之：精密工学会第 272 回講習会テキスト 23 (2001)

(伊藤 桂)

3 大口径ミラー／レンズ

a) ミラー／レンズの研磨

a.1 はじめに

大口径ミラーは、主としてレーザー核融合用の大出力レーザーに、大口径レンズは液晶、ステッパー、天体望遠鏡、およびレーザー核融合などに用いられている。これらの研磨に関しては、それらの用途に対して表面への研磨精度が要求される。ここでは、それらの用途に応じた大口径ミラー／レンズを研磨する方法や表面精度などを述べる。

a.2 ミラーの研磨

大口径ミラーの加工工程は、材料のプレス成形、荒摺り、砂かけ、研磨の手順で行う。ミラーの基板材料には、用途に応じて BK-7、石英、低膨張ガラスなどを用いる。研磨したガラス基板には金属、または誘電体光学薄膜を蒸着するが、薄膜とガラス基板の熱膨張の違いによって薄膜に応力が生じ、その結果として薄膜が剥離したり、クラックを生じるようになるので、これらを考慮して基板材料を選択する必要がある。ガラス基板を研磨する際には一般に工具としてピッチを用い、工具とワークの間には液体中に懸濁した研磨剤を介して相対運動させ、最終的に高精度の面を得る。

レーザー核融合用の高出力レーザー装置で使われている直径 50～80cm 程度のガラス基板の研磨においては反射波面精度として $\lambda/5 \sim \lambda/10$ を要求されるため、従来から用いられている横振り研磨方式によってこのような精度を得るのは極めて困難であるため、輪帯ラップ面を用いた遊星回転研磨方式¹⁾が使われている。大口径ガラス基板の高精度平面研磨に対する要求に応じて大型の研磨機も開発され、これらの要求に答えている。現存の研磨機では、最大口径 1.5m 程度まで加工できる。この遊星回転方式の研磨機は一般にリングポリシャーと呼ばれており、C. Johanson が導入した遊星運動研磨法によるもので、その原理図を図 1 に示す。リング状で中心部の抜けた工具面がその中心を軸として角速度 Ω で回転する。工具面上にワークを置き、これを角速度 ω で回転させる。

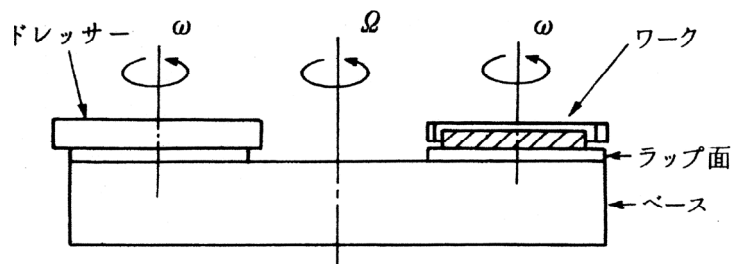


図1 リングポリシャーの原理図

ω と Ω を等しくすると、ワークの全ての点と工具面との相対速度が等しくなる。この場合、工具面が均一で圧力分布が一定であればワークの各点は均一の速度で研磨される。リングポリシャーの工具面は、加工中にワークが接触した部分に変形するので、ドレッサーを用いて絶えず工具面を修正しながら研磨を行っていく。このような方式においてもワークおよび工具が内部温度分布をもち、サブミクロンオーダーの熱変形を生じる。研磨をする場合は、熱発生を零にすることは不可能である。この温度分布による熱変形を少なくするには、低圧・低速で発生熱量を最小にすること、温度制御された研磨液をうまく循環させるなどの注意をすることが肝要である。また、基板材料には石英などの熱膨張係数の小さなものを選択すべきである。リングポリシャーによって短時間で大口径ミラーの高精度平面を得るには、高精度の下地をこしらえるのが重要である。具体的には、ラップ材として硬いポリウレタンを用いた高速・高圧の加工によって平面度を λ 程度まで研磨した後、リングポリシャーで仕上げる。このリングポリシャーでは、 λ から $\lambda/10$ まで研磨するのに要する時間は、BK-7ガラスで約1日、石英ガラスの場合は2日で可能となる。

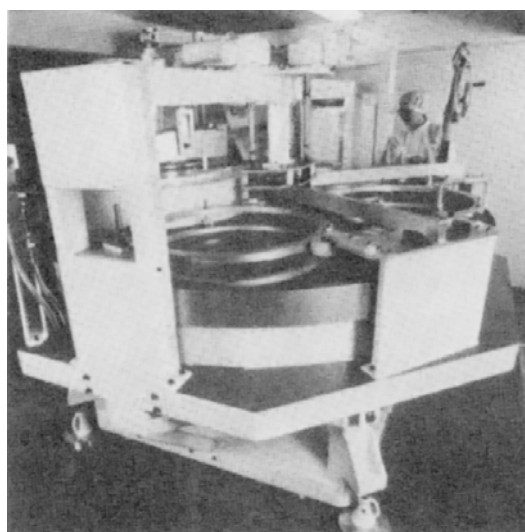


図2 工具の直径96インチの大型リングポリシャー

a.3 レンズの研磨

大口径のレンズは、液晶、ステッパー、天体望遠鏡、及びレーザー核融合などにおいて用いられている。これらのうち、天体望遠鏡やレーザー核融合では大口径の非球面レンズも使用する。

(1) 球面レンズ

性能の高いレンズを製作するには、先ず高品質（均質性が高く、泡や脈理フリーで、吸収損失が少ないこと）な光学ガラスを用いる。前述の用途には主として BK-7 や石英ガラスが使われている。図 3 は、大口径球面レンズの加工工程を示す。溶解されて得られた光学ガラスは気泡や脈理などの検査を行い、高品質な部分を用いる。選び出した部分を加工し、円盤状にする。次に、荒ざり工程では光学ガラスの均質度を検査できるように平面加工をし、しかる後、カーブジェネレータでレンズの形状にしていく。レンズの形状が出来上がったら砂や人工ダイヤモンドの微小な粒子で加工し、滑らかな面に仕上げていく。

これらの工程でレンズ形状は最終寸法に近い値となっているが、まだ光沢面ではなく、スリ面である。次に CeO_2 などの研磨剤を使ってレンズ面を仕上げていく。十分に透明となったレンズはレンズ原器や干渉計などを使用して検査する。なお、工具にピッチを用いた場合は、表面粗さ 10Årms 程度の平滑面となる。図 4 に最大径 1.5m まで研磨可能なレンズ研磨機を示す。ここで注意すべきことは、レーザー核融合用のレンズでは高出力レーザー光がレンズを透過するので、レンズがレーザー光に十分に耐えることが要求される。レンズ素材の表面には荒ざり、砂かけの工程でマイクロクラックが発生し、このマイクロクラックの内部に研磨剤が混入し、この研磨剤がレンズのレーザー損傷を引き起こすことになる。この研磨剤がマイクロクラック内に侵入している深さは約 1000Å であるので、このレンズ表面部を劣化させることなく除去する必要がある。エッチング液による方法は、表面粗さがかなり大きくなるので良くない。やはり、ドライエッチングが良い。曲率半径が余り大きくないレンズでは、イオンビームによるエッチングが最適であり、レンズのレーザー耐力は 2 倍以上になる。

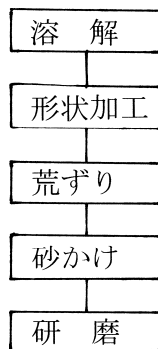


図 3 球面レンズの研磨工程

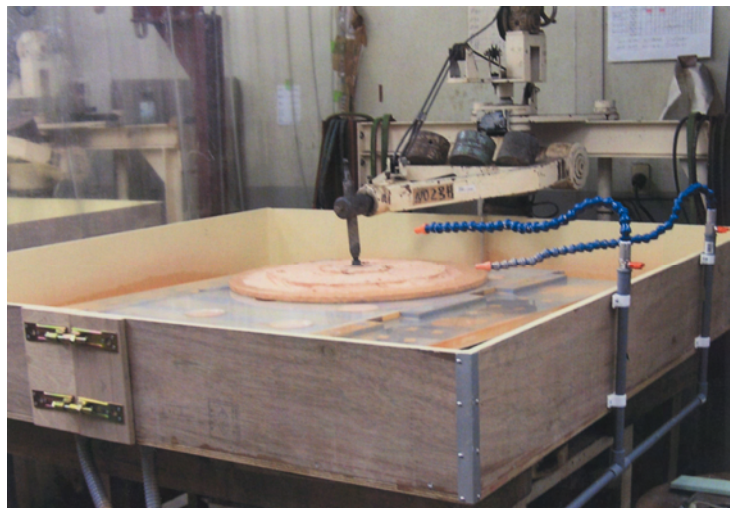


図 4 最大径 1.5m まで研磨できるレンズ研磨機
(岡本光学加工所の好意による)

(2) 非球面レンズ

集光レンズ系や結像レンズ系では、レンズの使用枚数を出来る限り少なくする目的で非球面加工をする。非球面といっても、その表面形状はそれぞれ異なっており、非球面の加工を簡単に記述することは困難である。また、形状のみならず、凸凹の度合いや平均曲率、それに直径は加工機の仕様や作動範囲などの機械的制限をうけてしまう。ここでは、大阪大学レーザー核融合研究センター（現在、大阪レーザーエネルギー学研究センター）で大出力ガラスレーザー激光Ⅻ装置に使用している直径 400mm の非球面レンズの仕様、および製作されたレンズの検査結果を述べる。非球面レンズを製作するには、レンズの寸法、材質、研磨精度、レーザー耐力を詳細に決める。表 1 に、レンズの仕様と製作された 2 枚のレンズ LT-001、LT-003 の測定結果を示す。研磨されたレンズ表面のスクラッチ/ディグ、透過波面収差、バックフォーカス、およびレーザー耐力など全てが仕様を満たしている。このような大口径非球面レンズの研磨工程を図 5 に示す。図 3 の球面レンズの研磨工程によって砂かけ状態まで製作されたレンズを準備する。このレンズを計算機制御によって非球面量が $1\mu\text{m}$ 程度となるまで研削によって部分修正を行い、検査工程にはいる。検査を終了したら砂かけをし、最後に計算機制御の研磨機で仕上げる。研磨過程では常時表面形状をモニターし、測定する。研磨を終えた非球面レンズは、表面形状、波面収差、集光特性等进行检查し、仕様を満たした段階で研磨を終える。表 1 に 2 枚の非球面レンズ LT-001 と LT-003 の測定結果を示す。表から明らかなように、全ての仕様項目を満たしている。図 6 は、非球面レンズ LT-003 の透過波面収差をトワイマン・グリーン干渉計で測定した結果を示す。研磨による微小なリップルを観測することができるが、波長 526nm での散乱損失は 1% 以下であり、直径 350 mm のレーザービームを $20\mu\text{m}$ ϕ 程度の大きさまで集

表 1 大口径非球面レンズの仕様、および製作されたレンズの検査結果

	仕 様	測 定 結 果	
		LT-001	LT-003
(1) 寸 法 (mm)			
(イ) 外 径	400 +0.0 -0.5	399.98	400
(ロ) 肉 厚	5.0 ± 1.0	4.983	5.028
(2) 材 種	BK-7W	BK-7W	BK-7W
(3) 材 質			
(イ) 均 質 度	$\leq 1.5 \times 10^{-6}$	$< 1.5 \times 10^{-6}$	$< 1.5 \times 10^{-6}$
(ロ) 残 留 歪 み (nm/cm)	≤ 8	1.1	2.2
(ハ) 減 衰 係 数 (cm ⁻¹)	≤ 0.002	≤ 0.002	≤ 0.002
(ニ) 泡 及 び 不 純 物			
・断面積総和 (mm ² /100cc)	≤ 0.12	< 0.12	< 0.12
最 大 径 (mm)	≤ 0.2	< 0.2	< 0.2
(ホ) 脈 理	ジュリ-レン法にて観測されないこと	なし	なし
(4) 研 磨			
(イ) エッチアップ 最大径 (mm)	≤ 2.0	なし	なし
(ロ) スクラッチ / ディグ	30/20	$< 30/20$	$< 30/20$
(ハ) 透過波面収差 ($\lambda = 6328 \text{ \AA}$)	$\leq \lambda/3$	$\lambda/3.32$	$\lambda/3.42$
勾 配	$\leq \lambda/6/\text{cm}$	$\lambda/10/\text{cm}$	$\lambda/8/\text{cm}$
(ニ) バックフォーカス (mm)	98.5 ± 0.8	98.472	98.47
(5) レーザー耐力 (J/cm ²)			
$\left[\begin{array}{l} 1.053 \mu\text{m}, 1 \text{ ns} \\ 0.526 \mu\text{m}, 1 \text{ ns} \end{array} \right]$	≥ 6	> 6	> 6

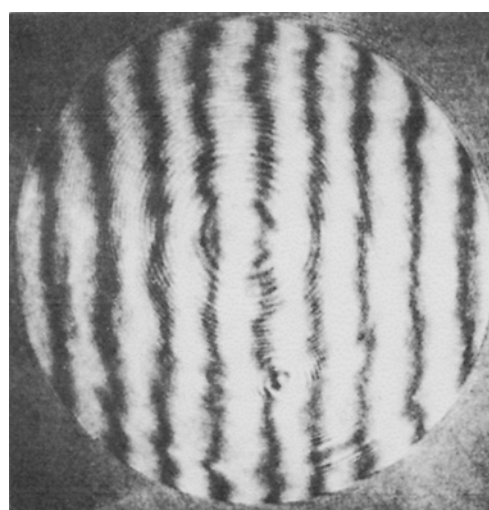
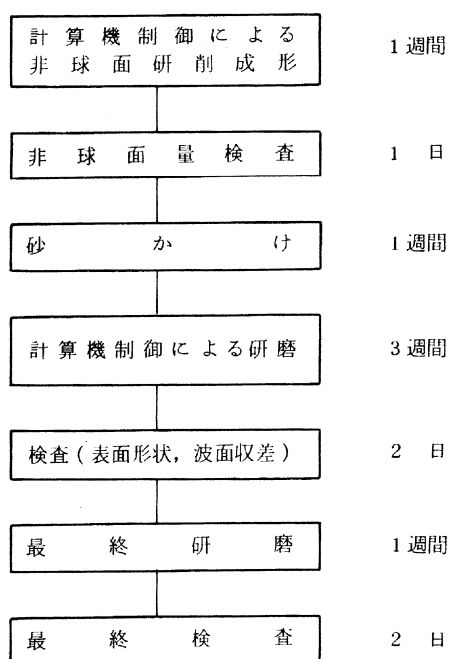


図 5 大口径非球面レンズの研磨工程

図 6 非球面レンズの透過波面収差

光できる。このような計算機制御による方法では、レンズの光学材料が BK-7 の場合、研磨終了まで約 1.5 カ月、石英ガラスでは 2.5～3 カ月を要した。

ところで、米国の QED Technologies 社で開発された磁気粘弾性流体を用いた精密研磨機 (MRF) によって大口径の非球面レンズの研磨が可能となっている。MRF では、磁気粘弾性流体のワークへの滞留時間を制御することによって研磨量を調整できる。従って、ワークの波面データを記憶させておけば、高い凸面のところでは滞留時間が長くなり、研磨量が多くなる。非球面量が 1～2 μm 程度の非球面レンズの製作においては、研磨された球面レンズを MRF によって短時間で加工して非球面レンズを製作できる。非球面量が大きい場合は、ジェネレーターで 1 μm 程度までにして光沢面としたあと、そのレンズの波面のデータを MRF に記憶させ、加工を行う。この MRF をうまく使いこなすには、研磨面を出来る限り最終の仕上げ寸法に近い状態にし、MRF で研磨に取り掛かることが肝要である。非球面レンズの波面の測定に関しては、光学部品の測定面を部分領域 (サブアパチャー) 毎に測定し、データを繋ぎ合わせて全面のデータとするサブアパチャー・ステッピング干渉測定器 (SSI) が開発され、大口径のレンズの収差を数 10 分の λ の高精度で測定できるようになっているので、この測定器によって 300mm 程度までの大きさのレンズ測定の問題は解決されたが、それ以上の口径に対しては今後の開発を待たねばならない。

a.4 今後の展望

QED Technologies 社で開発された研磨機 MRF は、平面はもとより球面、非球面を研磨できる画期的な研磨機である。この研磨機がその能力を十分に発揮するには、MRF で加工される面をどれだけ最終の研磨面に近づけるかが重要なポイントとなる。MRF で加工される面を早く提供できる加工機が出現すれば、研磨費も現在よりかなり安価にできるようになる。

参考文献

- 1) F. Cook et al. : Opt. Eng. Vol. 15, 407 (1976).

(吉田國雄)

b) イオン加工

b.1 はじめに

近年、固体電子素子の高密度化・高速度化は著しく、特に半導体メモリー素子では、2008年現在、ハーフピッチが60nm前後のDRAM (Dynamic Random Access Memory) の量産が行われており、2013年にはハーフピッチが32nmのDRAMの量産も開始される見込みである。これらDRAM等の生産では、ハーフピッチの1/5~1/10程度の加工精度が要求されるので、将来のIC (Integrated Circuit) 世代 (例えば、ハーフピッチが32nmの量産) 製造においては、5nm以下の加工精度が要求されるようになる。この時代になると、EUVL (Extreme Ultra Violet Lithography ; 波長13.5nm程度を利用) がリソグラフィ技術の世界的な標準になる可能性が高い。EUVLのための投影光学系では、この波長におけるミラーの反射率やコントラストあるいは収差を保証するために、これに用いられる非球面多層膜反射ミラー等の光学素子の形状精度 (LSFR ; Low Spatial Frequency Roughness)、うねり (MSFR ; Middle Spatial Frequency Roughness) や表面粗さ (HSFR ; High Spatial Frequency Roughness) に対して次に示すように、非常に高い性能 (仕様) が要求される。

- 1) 形状精度 (空間波長 ; 1mm以上) : 150pm RMS (root mean square)
- 2) うねり (空間波長 ; 1 μ m~1mm) : 150pm RMS
- 3) 表面粗さ (空間波長 ; 1 μ m以下) : 100pm RMS

EUV (Extreme Ultra-Violet) 露光装置 (多層膜反射マスクや投影系の多層膜反射ミラー) の他にも、光源の波長が短いX線を用いたX線露光装置、X線顕微鏡やX線望遠鏡等の開発が盛んに進められているが、これらに用いられる光学部品も100pmオーダーの形状精度や表面粗さに加え、大口径かつシリンドリカル面やトロイダル面あるいは非球面など形状に高い自由度が求められるようになってきている。なお、現在のリソグラフィ技術の主流であるArFエキシマレーザーを用いた液浸露光装置の投影光学系等では、蛍石や熔融石英等の材料が用いられているが、それらの加工でも1nmの形状精度や表面粗さが必要と思われる。

上述したように、UV露光、EUV露光やX線露光等の色々な応用において非球面レンズやミラーのような高精度の光学部品が次第に要求されるようになった上に、使用される材料も多岐にわたるようになってきている。このような光学部品の製造には、研削、ラッピングや小径のポリシング工具を用いた高精度機械的CCP (Computer Controlled

Polishing) 等の機械加工技術により行われてきた。しかし、加工による表面層の損傷やプロセスの低収束率（1回の加工による形状精度の向上が数十%程度である）等の問題点が残っている。そこで、これらの問題点を解決するために、我々は、イオンビームを用いた停留時間制御による EUVL 用多層膜反射ミラー基板の最終形状修正加工に付いて検討している。そこで、本稿ではこれに付いて述べる。

b.2 イオンビームについて¹⁾

イオンビーム加工（IBM ; Ion Beam Machining）は、数十 eV から数百 keV の運動エネルギーを持つ不活性ガスイオンを固体試料表面に照射したときに、試料原子が固体試料表面より真空中に放出される、いわゆる Sputtering（スパッタリング）現象を利用して固体表面を原子・分子の単位で除去する加工法である。このため、この加工法は、

- 1) 原子オーダーの加工が可能である。
- 2) 加工物に力を及ぼさない。
- 3) 加工による損傷がほとんど起きない等の利点の有するものの次の欠点も持ち合わせている。
- 4) 加工物の表面が荒れる可能性がある。
- 5) ガラス等の絶縁物の加工では表面にイオンの正電荷が蓄積する。
- 6) 加工速度が遅い。

(1) イオンビーム加工装置

図 1 には我々が加工材料のイオンビーム加工特性を検討するために使っている高圧放電型高エネルギーイオンビーム加工装置の概要を示す。この装置はイオンビームの集束機能を有しており、ビームを直径 1mm まで絞り込むことが出来る。したがって、この装置は空間周波数が 1mm 以上の形状修正に用いることが出来る。なお、この装置は計算機制御による xy テーブルを備えているので、イオンビーム停留時間制御による平面の形状修正は行う事もできる。

図 2 に電子サイクロトロン共鳴（ECR ; Electron Cyclotron Resonance）型イオン源を備えたイオンビーム加工装置の一例を示す。これは、加工室の上部に設けたイオン源に Ar ガスを導入し、その中でマイクロ波放電を行いこれらのガスをイオン化し、プラズマ状態を生じさせ、そこから三枚の静電電極の穴を通して低エネルギー（0.2~3keV）のイオンのみを引き出し、加速し加工室に置かれた試料にイオンビーム（直径：30~80mm）を衝

突させ加工を行うものである。

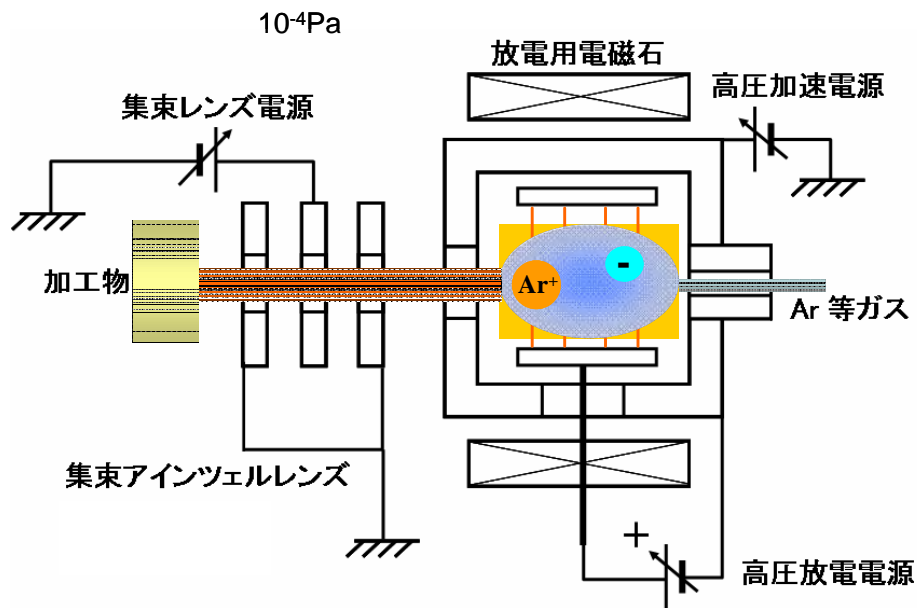


図 1 高圧放電型高エネルギーイオンビーム加工装置 (3~10keV)

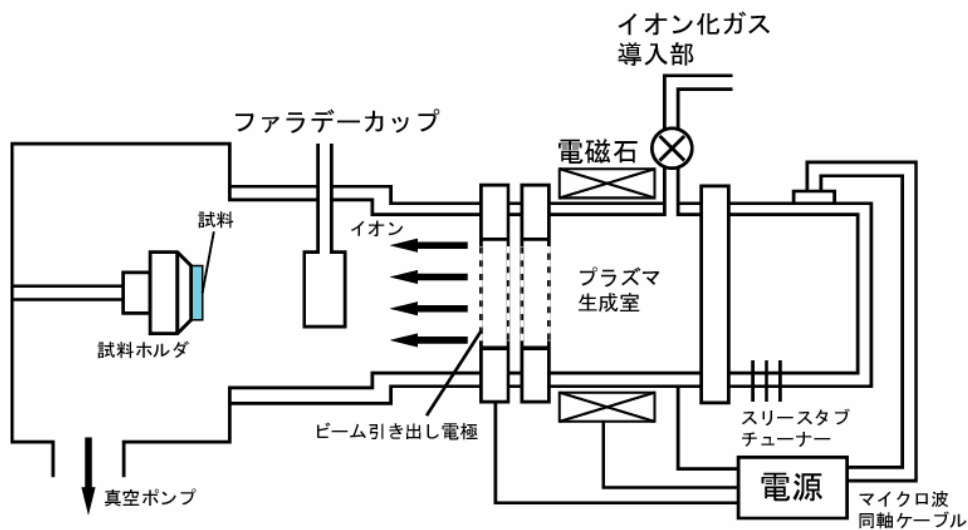


図 2 ECR 型イオン源を備えた低エネルギーイオンビーム加工装置 (0.3~3keV)

(2) イオンビーム加工特性について

イオンビーム加工技術を用いると、表面もしくは表面層に損傷を発生せず、しかも長い空間波長の形状誤差の効果的な修正が可能になる。しかし、ガラス材料の IBF の加工速度は数十 nm /min 程度と比較的遅いため、IBM の主な応用は、加工深さが nm オーダーの非球面光学部品の形状創生・修正に限られている。なお、イオンビーム加工の進行に伴う表面の荒れが問題になる。例えば、SiO₂ 中に β-石英固溶体結晶構造を有す Zerodur を 0.3~10keV の Ar イオンビームで加工した場合、前加工面が 0.10nm RMS に仕上がっていて

も、10nm ほどの加工で表面粗さは 0.6~0.7nm RMS (50nm の加工でも表面粗さは 0.7nm RMS ままである) に悪化してしまう。これに対して、図 3 に示すように、SiO₂ の母材中の Si が Ti に置換 (数%) した材料である ULE を 0.3~1.0keV の Ar イオンビームで加工した場合、50nm ほど加工しても表面粗さはほぼ均質材料は 0.10nm RMS 以内に加工ができる。したがって、ULE はほぼ均質な材料と看做せる。

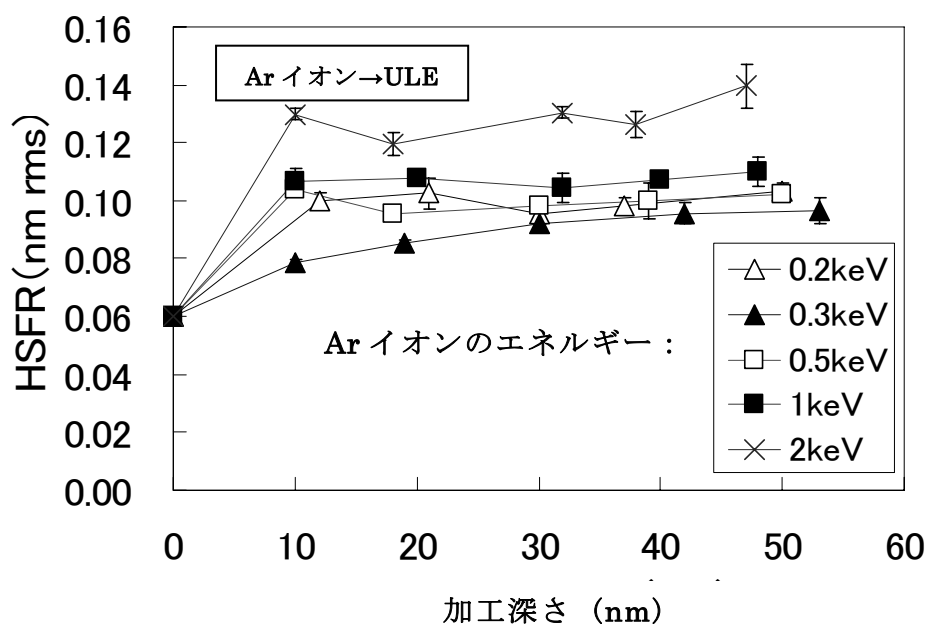


図 3 加工深さと ULE の表面粗さの関係

b.3 イオンビーム形状創生・修正技術

光学部品の形状創生・修正において、通常のラッピングと小研磨工具によるポリシングでは物理的な拘束がしばしば問題となるし、研磨工具の摩耗や工具-加工物間の端面効果等のために高精度が要求される光学素子の表面形状を希望の精度で仕上げるのは非常に困難になる。これに対して、イオンビーム加工法を用いたミラー基板等の形状修正加工において考慮すべき主な問題点は各々の繰返しにおける予測、すなわち設計値と測定値から加工量を推定することである。したがって、実際の加工の前に、被加工物の形状測定が非常に重要になる。この形状測定には光干渉計が用いられる場合が多いが、その改良が年々進み、その分解能や再現性の限界は 0.05nm にも達している。その他にも接触式の三次元座標測定機が形状精度の測定に用いられているが、その分解能は 0.1μm であり、その絶対精度は 0.5μm 程度である^{2,3)}。

IBF (Ion Beam Figuring) を用いた光学部品の形状創生・修正で最も簡単な方法は、被

加工物に比べて十分に小さな径とガウス電流密度分布を持つイオンビームを希望する物質除去量に比例する停留時間分布で表面を横切って走査することである。この原理に基づく IBF システムが光学部品の残留形状誤差を修正するために実用化されている。この技術の欠点は、固定イオンビーム径による固定除去関数のために、横方向分解能に制限のあることである。なお、大口径イオンビームを用いると高速度加工が可能であるが、この場合には高次の形状誤差が残るので、高空間周波数における形状誤差を修正するために小径のイオンビームを用いた後加工が必要になる。このような問題は、イオンビーム成形デバイスと大口径のイオンビームを組み合わせた方法で解決できる。そこで、Carl Zeiss Jena GmbH と IOM Leipzig は、共同で幾つかの異なる IBF 技術を開発した。その 1 つは、希望する全領域除去関数を表現するような透過分布を持つ多孔穴金属箔マスクを用いてイオンビーム電流密度を局所的に変調する方法である。このマスクは被加工物の表面から上方に数 mm 離れた位置に固定した位置に置かれ、形状修正は 1 回のエッチングで達成される。しかし、この方法は均一なイオンビームの口径に等しいか、それより小さなアパーチャーの大きさ程度に被加工物の大きさが限定される。実際に、ポリシングで誤差の生じた光学部品の修正やナノメートル非球面の加工がこの方法によって成功している。この方法は、系統的なポリシング誤差の場合には繰返しマスクが利用でき、全アパーチャー領域で加工できるように、効率的な方法の 1 つである。もう 1 つの効率的な方法は、形状修正や軸対称非球面の加工に対して回転マスクを利用した IBF 技術である。

3 つ目の方法は、固定大口径イオンビームとイオンビーム成形サブシステムとを組み合わせた計算機制御システムによるものである。このイオンビーム成形サブシステムでは、エッチング窓を空間的・時間的に可変するために、4 枚のモータ駆動シャッター板と 5 軸被加工物位置決めステージが用いられている。このシステムの利点は、被加工物の表面形状に応じて異なるイオンビーム径を選択することによりイオンビーム除去関数を自由に制御できる点である。この装置を用いると、被加工物のミラーの表面に沿って固定されたビーム形状でイオンビームを走査速度やイオンビーム電流密度を変えて動かすことも可能である。言い換えると、光学部品を固定されたイオン源の前面でイオンビーム電流密度等を変えながら動かすことができる。IOM (Institute for Surface Modification, Leipzig, Germany) で用いられている方法の装置の概略を図 4 に示す。

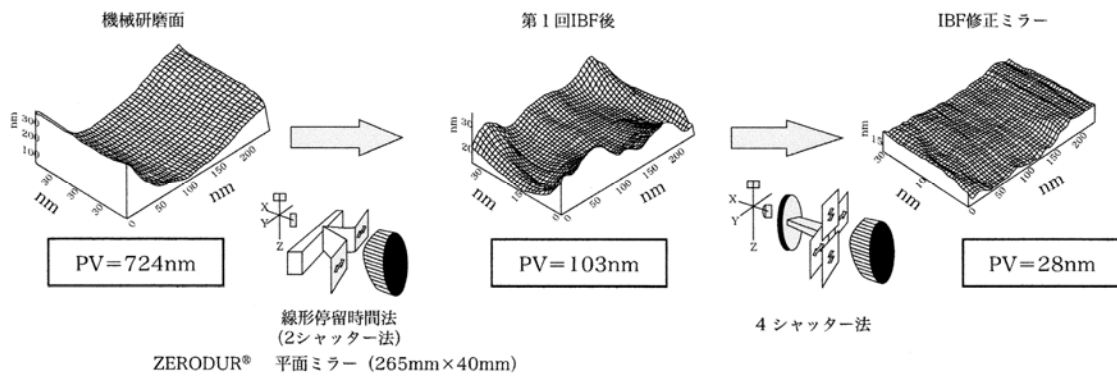


図 4 IOM における非球面レンズの形状修正例

b.4 イオンビーム形状創生・修正プロセス

イオンビームを用いた形状創生プロセスの手続きを次に示す。

- a. デジタル干渉計等を用いて初期表面プロファイル $z(x, y)$ を測定するか、ナノメートル非球面を加工する場合には希望する等高線プロファイルの数学的な設計を行う。
 - b. 初期表面プロファイルや希望（設計）プロファイルと全加工データを考慮に入れて、エッチングプロセスの計算機シミュレーションを行う。
- 窓エッチングアルゴリズムの場合には、手続きは次のようになる。
 - c. 可能な最大窓サイズで表面をでき得る限り加工し、未加工量を最小にする。続いて、エッチング窓（窓のサイズと位置、エッチング時間）を変え、形状制御のための制御データファイルあるいは処理時間（エッチング時間と位置決め時間の合計）を計算し、加工（修正）を繰り返し行う。
 - 停留時間アルゴリズムの場合には、手続きは次のようになる。
 - d. フーリエ変換を用いた局部座標空間における von Cittert 畳み込み積分の修正に基づく固定ガウス分布のイオンビームで表面を連続的に加工する。
 - e. 最終的な表面形状測定を再びデジタル干渉計で行う。
 - f. 必要であればこのプロセスを繰り返す。

b.5 形状修正加工の例 4)

イオンビーム加工により直径 12mm から 450mm のガラス基板に光学表面を創生する技術や装置がドイツの IOM において開発され、そのシステムの効率や形状創生アルゴリズムが検討された。ZERODUR ミラー（265mm×40mm）をナノテク-IBS イオンビーム

形状創生システムを用いて加工した例を図 4 に示す。この図に示すように、IBF 前（機械加工したもの）に 724nm（Peak to Valley：PV 値）であった形状誤差が、2 枚シャッターシステムを用いた線形停留時間制御による形状修正でそれを 103 nm(PV 値)に減少でき、さらに 4 枚シャッターシステムを用いた線形停留時間制御による形状修正により 28nm (PV 値) にできた。

我々も EUVA（極端紫外線露光システム技術開発機構）のプロジェクトでキヤノンの共同で 300mm 程度の加工物の形状修正が行える IBF 装置を開発し、80mm 平面基板の形状精度を 0.20nm RMS に仕上げた。

b.6 今後の展望

EUVL の非球面多層膜基板の用いられる予定の Zerodur や ULE 等の極低熱膨張ガラス基板（最大直径：300mm 程度）は機械加工で 20nm PV 程度の形状精度に仕上がった後、IBF により形状精度が 0.20nm RMS に仕上がられる。通常の光学素子やエキシマレーザを用いた露光装置では IBF による加工取りしろが 1 μ m 前後になると思われるので、高速 IBF 装置の開発や加工特性の検討が必要である。なお、SiO₂等のガラス材料に対して活性なフッ素 (F) を含む CF₄ や SF₆ 等のガスを用いる活性イオンビーム加工 (RIBM; Reactive Ion Beam Machining) が有用と考えられる。

現在、我々は除去加工による形状修正のみならず、イオンビームスパッタ付着加工やこれと IBF を併用した加工法なども検討している。

参考文献

- 1) 宮本岩男ほか：CMC テクニカルライブラリー「イオンビーム技術の開発」、シーエムシー、(2001) 333-366.
- 2) Y. Kurashima et al: Microelectronic Engineering, 85 (2008) 1193-1196.
- 3) T. Inaba et al: Microelectronic Engineering, in press
- 4) A. Schindler et al: JSPE Publication Series No.3 (1999) 243-246.

(宮本岩男)

4 その他

a) レーザーガラス

a.1 はじめに

レーザーが 1960 年アメリカの物理学者 Townes によって発明されて以来、レーザーは様々な分野に応用されてきた。その一つの大きな、また、人類のエネルギー問題を解決すべく提案されて来た技術がレーザー核融合である。レーザー核融合は慣性核融合とも呼ばれ、磁場核融合とは異なる手法で、核融合の点火条件であるローソン条件を満たす手法である。この手法には良質なエネルギードライバーが必要で、レーザーの他、各種粒子線が研究されてきた。その中でも、レーザーはエネルギー粒子の高密度・短パルス化に優れ、今では、エネルギードライバーの最有力候補となっている。大阪大学レーザーエネルギー学研究センターにて、核融合研究に利用されている大型レーザー激光 XII 号（図 1）には大型のリン酸ガラス（図 2）が用いられている。



図 1 激光 XII 号レーザーシステム



図 2 レーザー用リン酸ガラス

レーザービームの口径が小さい場合は円筒形状（ロッド）のガラスが用いられるが、口径が 10cm 以上になると励起光が中心まで十分に届かなくなるため、図 2 に示したような板形状（ディスク）のガラスが用いられる。楕円形となっているのはブリュースター角（リン酸ガラスでは 56.6° で p 偏光成分の反射が 0 となる）に設置した場合に円形のビームに対応できるようにするためである。

a.2 核融合用ドライバーに必要とされる性能

核融合研究に用いられる大型レーザーにガラスレーザーが用いられる大きな理由の一つとして、誘導放出断面積が適正であることが挙げられる。誘導放出断面積とはレーザー光の発生に対し、最も重要なパラメータであり、この値の大きいものほどレーザーエネルギーを取り出しやすくなる反面、大きすぎると寄生発振と呼ばれる予期しない発振によりレーザーエネルギー¹⁾が失われていく。つまり適正な値を持つものが必要である。その他、励起に伴って発生する熱の蓄積によって生じる応力に耐えうること（評価パラメータ R_T ：熱衝撃定数）、非線形光学効果により生じるビームのフィラメンテーションによるダメージを生じないこと（評価パラメータ B ： B 積分値）等が挙げられる。これらのパラメータは誘導表出断面積（飽和フルーエンス： E_s ）の大きさとも密接に関係しながら、レーザードライバー設計ウインドウを決定することになる。また、何よりも大型の母材を作成可能なことが重要である。それらをまとめたものを図 3 に示す。

最も要求の厳しいレーザー媒質は核融合ドライバーにおけるレーザー媒質であると考えられる。核融合発電プラントを建設するためには、高繰り返し（10Hz）で、メガジュールクラスのレーザーが必要である。この様なレーザーに用いられる固体レーザー媒質は、励起に伴う激しい熱衝撃に耐えうる物でなければならない。核融合用レーザー媒質の開発において熱衝撃に対する強度はドライバー開発のボトルネックになっている²⁾。

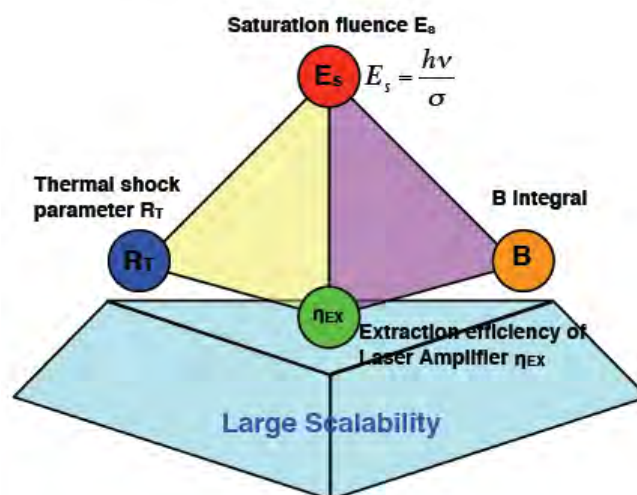


図 3 核融合ドライバーに要求されるパラメータ

a.3 熱衝撃に対する強度

レーザー媒質の破壊強度は熱衝撃定数 R_T で評価することができる。熱衝撃定数 R_T は材料物性値により次式で与えられる。

$$R_T = \frac{(1 - \nu)\kappa}{\alpha E} S_T \quad (1)$$

ここで、 ν はポアソン比、 κ は熱伝導係数、 α は線膨張係数、 E はヤング率、 S_T は破壊せん断応力を示す。熱衝撃定数は値が大きいものほど急激な熱の蓄積や除去及び、媒質内の著しい温度分布に耐えうる。核融合に利用されている、リン酸ガラスをベースとした LHG-8 では 0.41W/cm 、Nd:YAG（結晶）では 7.9W/cm 、であるのに対し、シリカガラスは 14.5W/cm である。シリカガラスは YAG に対して 2 倍、リン酸ガラスに対しては実に 30 倍の熱衝撃定数値をもち、その熱特性がいかに優れているかがわかる²⁾。

核融合用レーザードライバの媒質として利用する場合には、大型化が可能な材料であることが望ましい。レーザービームのセグメント化を考慮したとしても少なくとも 10cm 級のサンプルが必要である。シリカガラスはガラス系材料であるために光学的均質性を保ったままで大型化が可能で、non ドープであれば、商業的にメートルサイズの物が製造可能である。

a.4 レーザー媒質としてのシリカガラス

Nd を活性元素としたシリカガラスをレーザー媒質とすることの開発における課題は、量子効率と光学均質性の向上であったが、それらを改善するゼオライト法が 1997 年に我々のグループから提案され、当時世界最高の量子効率 ($\eta=50\%@1.0\text{wt}\%$) を示す事に成功した。以後改良を加え、2006 年の段階ではその効率は ($\eta=81\%@1.25\text{wt}\%$) まで改善されている²⁾。また、Nd ドープシリカガラス (NdSG) の光学的品質はレーザーの増幅や発振実験が十分可能なほどに大幅に向上した。図 4 に NdSG、Nd:YAG、LHG-8 の蛍光スペクトルを示す。

NdSG の蛍光ピークは 1062nm にあり、Nd:YAG の波長に近いので、Nd:YAG ブースターアンプ用の材料としても有効である。また、FWHM が 51.7nm であるので、将来的に高平均出力超短パルスレーザーの開発への展開も可能である。 806nm に吸収のピーク

を持ち、LD (Laser Diode) による励起が可能である事も付記する。熱衝撃定数より YAG よりも高い熱衝撃特性を示すため、YAG 以上の過酷な条件での動作が可能である。

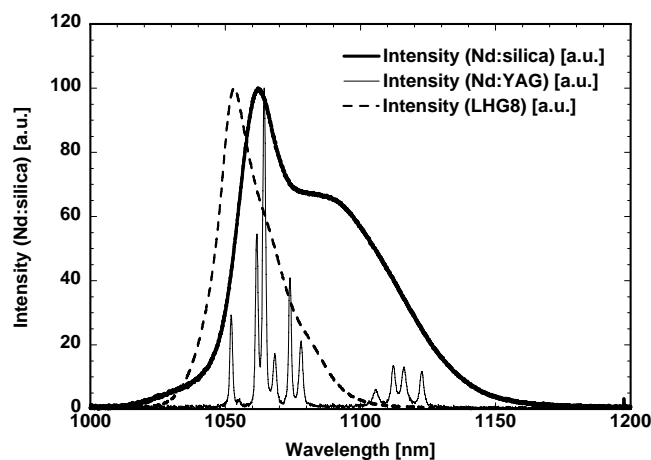


図 4 蛍光スペクトル (a) NdSG、(b) Nd:YAG、(c) LHG8.

a.5 Nd ドープシリカガラスのレーザー動作特性

30mmφ・300mmL ものサイズの NdSG ロッドの製作に成功した。つまり、数十センチクラスのシリカガラスによるレーザー媒質の実現のめどが立ったことを意味する。その Nd₂O₃ 濃度は 1.34wt% であった。

30mmφ・300mmL のサイズの NdSG ロッドの写真を図 5、それを用いた利得及びシングルショット発振出力の励起光強度依存性を図 6 に示す。最大の利得はフラッシュランプ励起 18.6kJ 時に 3.75 倍、蓄積エネルギーは 124J となった。また、最大励起時において寄生発振が確認されていないので、さらに高エネルギーの蓄積が可能であり、コンパクト・高ピークパワー・高繰り返しのレーザーの出現が期待できる。シングルショットの発振実験において出力鏡は透過率 30% (flat)、高反射鏡は HR:r=3000mm 凹面鏡を用い、最大電気入力 18.6kJ の時に発振出力 37.3J を得た。

また、高密度励起レーザー筐体を用いた実負荷試験 (最大 2.25kW (QCW/808nm/2.5kHz) 励起) を行い、NdSG ロッドが Nd:YAG を超える励起密度 (熱負荷に相当する) にて破壊を生じない事を確認した。これより、NdSG ロッドは YAG と同等以上の破壊強度を持つことが解った。LD 励起を用いれば、励起時の熱負荷を軽減できるため、100J/100Hz/10kW とした核融合発電用のレーザーを指向した新しいレーザーシステムを生み出すことも可能であり、EUV 光源の他、高エネルギー粒子の生成や PLD 装置の進展等新たなレーザー応用が促進されると考えられる。また、理科学研究用としては、

Nd:YAG のブースター増幅器として利用することが可能であり、PW クラスの $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ レーザーの実現や、optical parametric charged pulse amplification の高平均出力化に対する非常に重要な役割が期待される。

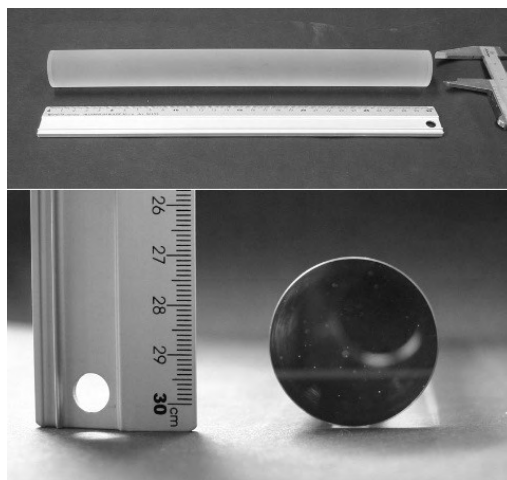


図 5 大型 NdSG レーザーロッド (30mmφ・300mmL) .

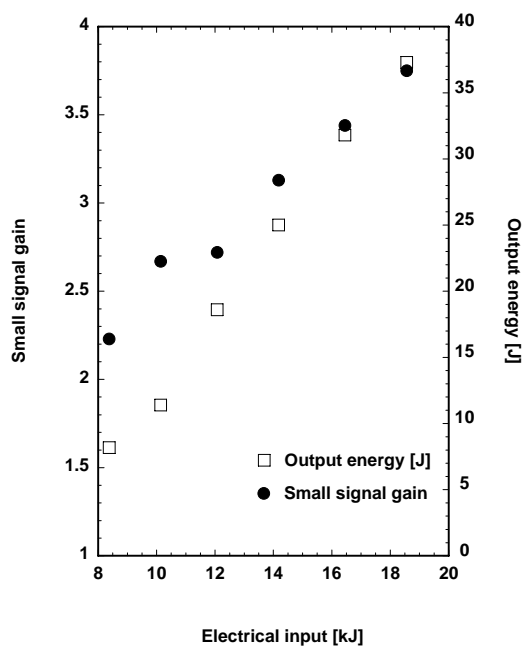


図 6 大型 NdSG レーザーロッド (30mmφ・300mmL) での小信号利得とレーザー出力

a.6 今後の展望

ガラスレーザーの代名詞でもある、核融合レーザーに利用されているリン酸ガラスは熱負荷に弱いという欠点があるが、シリカガラスをベースとした研究によってその欠点が克服されつつある。将来的には、100J/100Hz/10kW への発展が可能であることを示し、こ

これらのレーザーの出現は高平均出力レーザーの発展的応用を促す事になるだろう。また、ガラス素材とは別に光学セラミックスの技術的発展もめざましく、大型のものが出来るようになってきている。大型のレーザー素子として新たな発展が期待できるものとして、ここに付記しておく。

参考文献

- 1) レーザーハンドブック、レーザー学会編、オーム社、1982年。
- 2) “シリカガラスを用いた高平均出力レーザーの開発”、藤本 靖、佐藤 堯洋、吉田 英次、徐 永錫、上田 哲司、藤ノ木 朗、松岡 伸一、菅 博文、中塚 正大、レーザー研究, vol.35, no.10, (2007) p657-662.

(藤本 靖)

b) 超大口径シリコンウエハ

b.1 はじめに

集積回路の微細化でコスト低減が困難になると、ウエハの大口徑化にメーカー各社が対応してきたのが過去 40 年の歴史であった。しかしそれも $\phi 300\text{mm}$ までで、膨大な開発投資が必要となる次の超大口径ウエハの開発は、 $\phi 400\text{mm}$ を目的とした官民プロジェクトのスーパーシリコン研究所に委ねられ（当初は $\phi 400\text{mm}$ が $\phi 300\text{mm}$ の次と推測されていた）、大きな成果を上げたことは記憶に新しい。最近では、超大口径ウエハは $\phi 450\text{mm}$ とされ、その実用化は 2012 年と取り沙汰されている。

超大口径化に挑戦した実務者として、 $\phi 450\text{mm}$ の主な技術課題と難易度、そしてそのコストならびに実用化条件を模索したい。

b.2 スーパーシリコン研究所 (SSi) の成果

これまでの約 10 年間で、関連学会などを通して国内外に SSi の成果が紹介されてきている。ここでは代表的な 2 例を紹介する。

(1) 総重量 411 kg の $\phi 400\text{ mm}$ シリコン単結晶

$\phi 200\text{mm}$ との対比を図 1 に示す。このインゴットは、SSi の株主であった一社に展示されている。後々の教材として参考になろう。



図 1 $\phi 400\text{mm}$ シリコン単結晶インゴット
(スーパーシリコン研究所提供)

(2) 130nm 以下のサイトフラットネス

SFQR (Site flatness Front least sQuares Range) は図 2 に示すように、研削技術により 100nm 以下 100%が達成された。

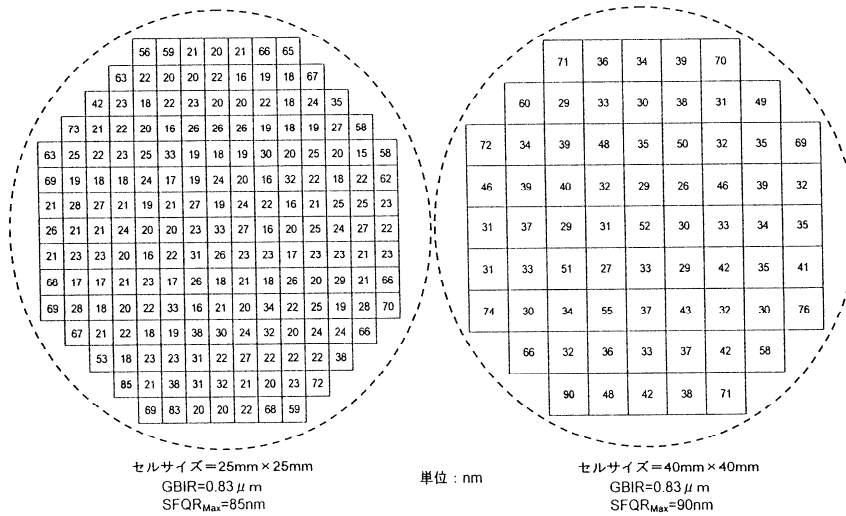


図 2 SFQR < 100nm、100%達成
(スーパーシリコン研究所提供)

スーパーシリコン研究所は官民プロジェクトとしてφ400mm ウエハの結晶・加工・エピタキシャル・計測技術について、ブレークスルーを必要とする要素技術の確立を目的に設立され、世界で初めて φ400mm シリコンウエハの試作に成功した。期間は 1996 年から 5 年間で、開発投資総額は 133 億円、人員は 40 名、その中で研究者は国内ウエハメーカー 7 社より選出された 25 名が重責を担った。

(3) φ450mm を想定した結晶・加工各工程の主要技術課題と難易度

SSi における実績から、φ450mm シリコンウエハの結晶ならびに加工工程に関する主要技術課題とその難易度を表 1 に示す^{1,2)}。

表 1 φ450mm シリコンウエハの主要な技術課題

工 程	技 術 課 題	難易度
結晶工程	①生産性を考慮に入れた単結晶化率	×～△
	②数値シミュレーションの開発・熱物性値の標準化	△
	③大型高寿命高純度石英ルツボの設計・製造	△～○
	④磁場印加での結晶成長と遠隔操作	△～○
	⑤結晶欠陥密度の極小化	△～○
加工工程	⑥超精密スライシング技術	×～△
	⑦大型両面ラッピング装置の開発	△～○
	⑧延性モード研削技術の開発	△～○
	⑨大型両面ポリシング装置の開発	△～○
	⑩超高清浄度洗浄技術の開発	×～△

(注) ○: SSi の成果、または現行の技術水準を参考にして可
△: SSi の結果および現行の技術水準の更なる改良を要す
×: 新規に研究・開発を要す

(4) φ450mm の技術課題と難易度の具体的内容

① 単結晶化率（難度：×～△）

経済性を考慮に入れると、大型ルツボに投入する多結晶原料は少なくとも 800kg を超えることになろう。大型ルツボ内の内側と外側の温度差はさらに拡大し融液対流が激しくなり、融液温度は不安定となって結果的に単結晶化が極端に難しくなる。φ300mm の立上げ時の単結晶化率も 50%前後から発しており、量産になって採算の取れる収率に達した経緯がある。

したがって、φ450mm の立上げ時には 30%～40%程の単結晶化率も覚悟せねばなるまい。シミュレーションソフトを改良しコンピューター制御の精度を上げ、単結晶化率の向上に努めねばならない。

② 数値シミュレーションの開発・熱物性値の標準化（難度：△）

新たな結晶成長装置の設計には、コンピューターシミュレーションによる検証が必須であった。シミュレーション技術は開発コストの低減に計り知れぬほど重要な役割を果たした。例えば、ホットゾーンの総合伝熱解析にはソフト結晶成長関連で著名な FEMAG や STHAMAS が、融液の対流解析には STREAM や FLUENT が役立った。SSi で用いたシミュレーションソフトの大半が海外で開発されたものであった。また、シミュレーションソフトで用いられる各種の熱物性値の整備と標準化が急務になることが識者から指摘されている。

③ 大型高寿命高純度石英ルツボの設計・製造（難度：△～○）

従来の経験から、結晶径の 3 倍則で計算すると口径約 140cm の大型ルツボとなる。しかしながら、多結晶シリコンの充填率やルツボのコストを考慮すると、実用口径は 115cm 以下になると考えられる。SSi と石英ルツボメーカーとで共同開発した口径 100cm のルツボの実績から、φ450mm 用の石英ルツボは、最低 1 週間以上の高温に耐える長寿命（耐熱・耐変形）と、高純度素材であることが大きな要素になるものと考えられる。

④ 磁場印加での結晶成長と遠隔操作（難度：△～○）

MCZ 法は、融液の制御と石英ルツボから酸素の拡散を低減させ、且つ石英ルツボの寿命を引き伸ばす手段ともなり得ることから、MCZ の設置は欠かせない。φ300mm 同様に横磁場（horizontal または transverse MCZ）が用いられるであろう。磁場発生による人体暴露安全対策として、SSi の遠隔操作方式は参考になろう。

⑤ 結晶欠陥密度の極小化（難度：△～○）

結晶欠陥（COP; Crystal Originated Particle）の制御法として V/G の法則が φ400mm

の結晶成長過程でも採用され、COP 低減に有効であることが検証されている。φ 400mm では図 3 に示すようにウエハ全面について COP は検出されなかった。評価には米国 ADE 社と SSi との共同開発による検出限界能 60nm のパーティクルカウンターAWIS400 型を用いた。これはスポットレーザーの入射光の散乱成分を検知・解析する従来型の異物検出器を改良したものである。

このように、φ 450mm でも V / G の法則^{注)}が適用されよう。ただし、結晶引き上げ速度 (V) を極低速にすることが必要で生産性は犠牲になろう。

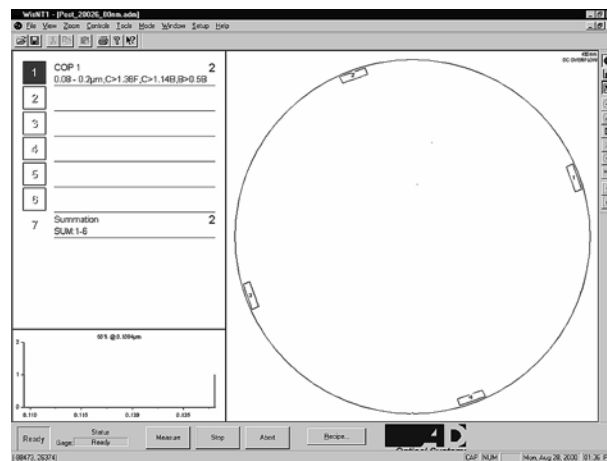


図 3 COP 欠陥が皆無に近い φ 400mm シリコンウエハ
(スーパーシリコン研究所提供)

⑥ 超精密スライシング技術 (難度：×～△)

インゴット切断ではワイヤースライシングが業界標準となったが、超精密スライスサーの開発はかなり難しそうである。高精度スライスが困難となれば、次工程の研削工程に負荷を負わせることは得策ではない。φ 450mm の時代においてもスライスうねりの除去のために、両面同時ラッピングが必要な可能性は高いと思われる。

⑦ 大型ラッピング装置の開発 (難度：△～○)

従来のウエハ加工プロセスでは、スライスうねりの除去を目的に両面同時ラッピングが利用されている。大口徑化とスループットの両立にはラッピング装置の大型化は避けられない。各ウエハに対し必要となる装置サイズの比較を図 4 に示す。φ 200mm ではラップ定盤の直径は約 1.5m であったが、φ 300mm では定盤径が約 2.1m となる。φ 450mm ウエハ・20 枚／バッチで試算すると、定盤径は約 3.2m となり装置重量は

注) V / G の法則とは、結晶の引き上げ速度 V と成長界面での結晶側の温度勾配 G との間に、 $V / G = \zeta$ (臨界値) なる関係式があり、 $V / G > \zeta$ の場合は成長界面で点欠陥が優勢に、 $V / G < \zeta$ の場合は拡散速度の速い格子間シリコンが優勢になることがわかっている。これは、生産性を上げるために高速引き上げを行うと、点欠陥の多いウエハになってしまうことを意味する。

40ton を超えると思われる。このような大型の装置では、流体軸受け・フレキシブルリンク機構・定盤平面維持サイクルなど⁴⁾の高度な装置技術が高精度ラッピングに不可欠と考えられる。

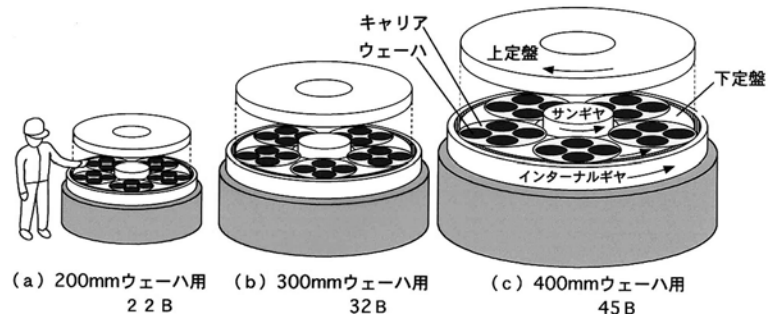


図4 ウェーハサイズと装置サイズの比較

⑧ 延性モード研削技術の開発（難度：△～○）

シリコンウェーハには大口径化とともに、より厳しい平坦度が求められてきているが、遊離砥粒研磨と反応性の高いエッチングとを用いる旧来の加工プロセスでは対応できなくなってきておりプロセス革新が必務となっていた。また、φ300mm で表裏両面がミラー仕様となったことから、SSi では両面ポリシングの導入とあわせ研削技術の本格導入を図ることとした。超大口径ウェーハに求められる高精度・高品位の研削面を得るためには、図5に示すような、脆性破壊で生じるクラックの集積に依存しない延性モード研削の実現が必要となる。単結晶シリコンの場合、脆性-延性遷移臨界切込み深さ D_c 値は 100nm とされており、加工に関与する砥粒の切り込み深さ D_p を 100nm 以下にコントロールすることが必要となる。

延性モード研削の実現には、ナノメートルオーダーの運動精度を持つ切込み案内機構・高剛性のフレームや主軸などの機械要素技術・熱変形による平坦度変動を抑制可能な構造の超精密研削装置の開発が必要である。そこで SSi では精密工学の基本原則の一つであるアッペの原理に忠実な装置をゼロから開発した。

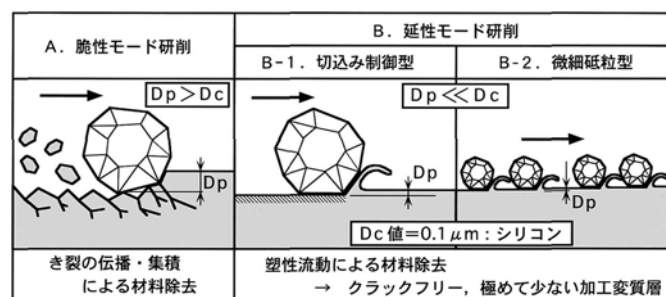


図5 延性モード研削の概念⁵⁾

従来のウエハ研削装置は片持ち構造を基本としており、研削抵抗や室温などの変動により主軸とワークテーブル軸との平行度が変化し研削されたウエハの平坦度のバラツキが大きくなってしまふという課題があった。そこで研削主軸の支持剛性を高めるため、図 6 に示す三角柱型五面体構造を新たに発案・採用した。

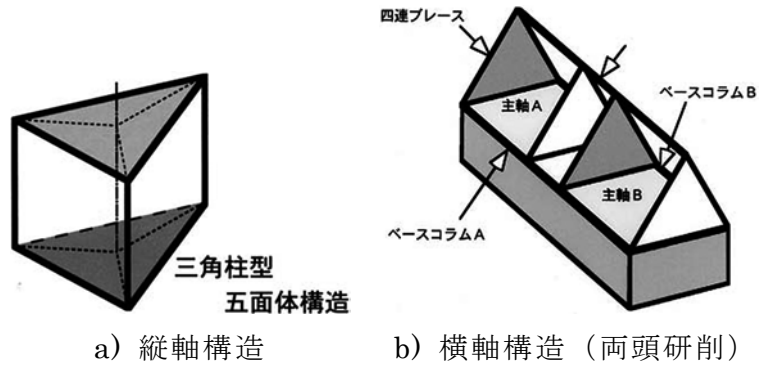
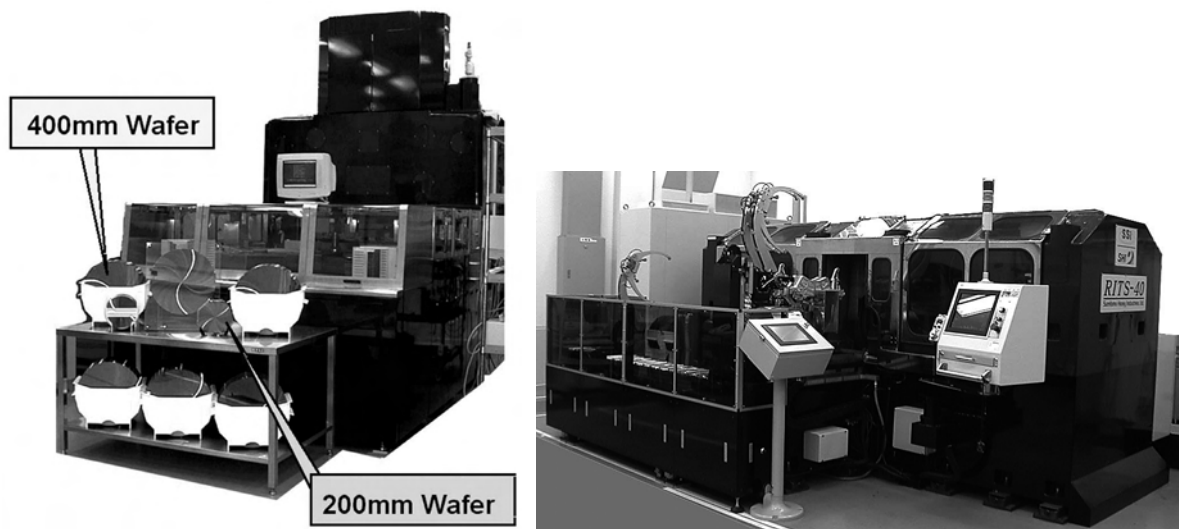


図 6 超精密研削装置のデザインコンセプト

ここで a) の縦軸構造はウエハを片面ずつ研削する方式の研削装置用の三角柱構造であり、b) は横軸の両頭研削装置用の二連横置ききの三角柱構造である。これらのデザインコンセプトのもと、水静圧軸受け・軸間姿勢調整機構・力操作型リニアアクチュエーター・V-V 式複合案内などの超精密機械技術を備え、カセット to カセットの無人自動運転が可能な研削装置をメーカーと共同開発した。開発した装置の外観を図 7 に示す。



a) 反転式両面研削装置 b) 超精密両頭研削装置

図 7 開発した超大口径ウエハ用超精密研削装置

a) の反転式両面研削装置では、真空チャックで吸着された両面ラッピングウエハを片面ずつ研削し、ウエハの反転は自動搬送系により行われる。装置前面に、研削されたφ400mm ウエハをφ200mm ウエハと対比している。b) の超精密両頭研削装置は、両面ラッピングの省工程化の可能性探索を目的に開発したもので、アズスライスウエハの鏡面研削が可能であることを確認できている。φ300mm ウエハでは両頭研削方式が両面ラッピングの代替技術としてスライスうねり除去に利用されている。φ450mm ウエハにおいても上述の成果をもとに両方式が検討されるものと考えられる。

⑨ 大型両面ポリシング装置の開発（難度：△～○）

両面ポリシングは機構的には両面ラッピングと同様の機械技術によって構成されている。ポリシングでは、定盤やその支持系が加工時の発熱によって熱変形したり、ケミカル作用の不均一による加工レートのばらつきが生じやすく、平坦度に影響する。その対策として両面ポリシング装置では定盤内に温度調整用のジャケットが設けられており、系の温度を一定に保つようになっている。SSi 発足当時はウエハ径に比例した装置の大型化が困難であったため、図8に示す1ウエハ／キャリア方式を採用し、インプロセス計測の導入により平坦度創成のメカニズムを解明し目標をクリアした。本方式によって両面ポリシングしたウエハを、前工程のラッピング・研削ウエハとともに図9に示す。

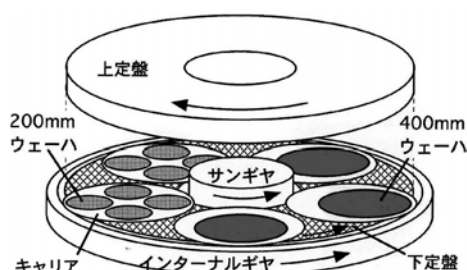


図8 超大口径ウエハの両面ポリシングレイアウト

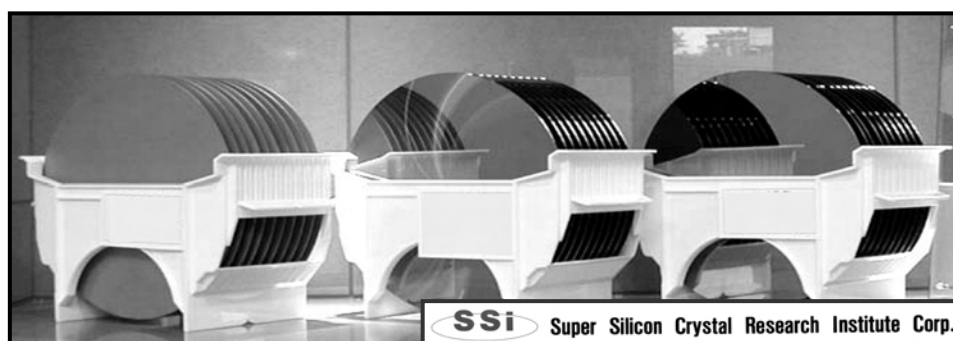


図9 φ400mm ウエハの例
(左からラッピング、研削、ポリシングウエーハ)

現行のφ300mmにおいても複数ウエハ／キャリアの高スループット・大型ポリシング装置（図10）の本格導入は今後の検討を待つ状況のようである。

φ450mm ウエハ用大型両面ポリシング装置は、装置コスト・スループット・加工精度のバランスにより採用可否が検討されると考えられる。

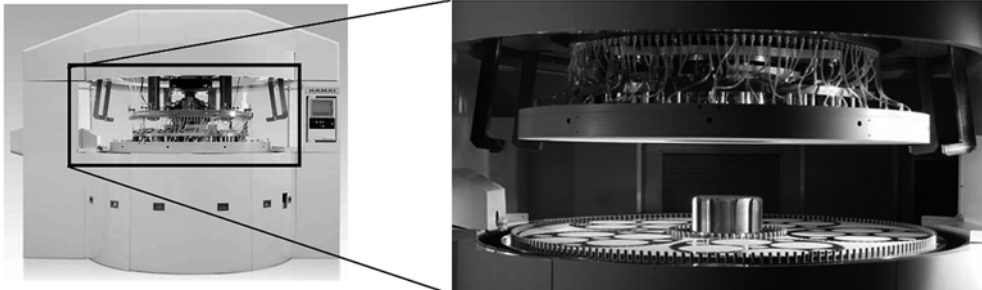


図10 φ300mm用大型両面ポリシング装置：4枚／キャリア（浜井産業提供）

⑩ 超高清浄度洗浄技術の開発（難度：×～△）

当面のウエハ洗浄後の品質目標値を表面金属$1E+9$、パーティクルサイズ<math><30nm</math>とすれば、現行の洗浄技術ではこれをクリアできそうにない。周辺技術として、フィルター・純水・化学薬品の高純度化など目覚しく改善されてきているが、それでも十分ではない。

さらに厄介なことに、洗浄中または洗浄後にウエハの表面状態に変化が生じることも指摘されている。各洗浄方式の比較を表2³⁾に示す。各洗浄方式には一長一短があるが、オゾン水や電解イオン水を用いた枚葉方式スピン洗浄が有力視されている。近年では、スピン洗浄とマランゴニー洗浄の長所を合わせ持つロタゴニー（Rotagoni）洗浄法も注目され始めており、その効果に期待したい。

表2 大口径ウエハ洗浄を目的とした各種洗浄方法の比較

洗浄方式	金属、パーティクル除去能力	純水、薬品消費量	装置サイズ	スループット (一定時間内の処理量)	大口径ウエハ 適応性
従来のRCA洗浄 (バッチ方式)	○	△	△	◎	△
改良RCA洗浄 (枚葉方式)	○	△	○	○	○
UCT洗浄	○	○	○	○	○
スピン洗浄 (枚葉方式)	○	○	◎	△	◎
スクラバー洗浄 (物理的、機械的)	△	◎	○	○	○
乾式洗浄 (フッ酸蒸気、プラズマ、アルゴンガスなど)	△	◎	○	△	◎

(注：◎優れる、○ふつう、△劣る)

b.3 φ450mm ウエハ出現時のコスト想定

生産性・経済性の観点から、φ450mm ウエハ出現時の製造コストを想定してみる。算出にあたっては以下のように仮定した。

① 生産規模

試作サンプルおよびパイロット生産レベルの規模とする。

単結晶量：500～600kg、月産1000枚程度。

② 単結晶化率

～40%、収率：有効直径比率70%。

③ 結晶工程関連の設備一式

10億円。

ただし、設置場所・ユーティリティ設備・評価機材などは転用とする。

④ 加工工程および評価機器関連の設備一式

30～50億円。

サイズの関係で300mm用の改造にも限度があると判断。

⑤ 労務費・償却費：取り敢えず固定費として40%を計上。

以上の仮定のもとに極めて大胆な計算を試みると、φ450mm ウエハ一枚で\$2000 という値が得られる。1999年～2000年にかけてφ300mmの試作サンプルのコストは、\$1000前後であったと記憶しているので、的外れの数値ではあるまい。φ300mmの量産が軌道にのった4～5年後に市場価格は\$500を切っていたが、φ450mmの場合は採用するデバイスメーカーに限られる可能性があり、量産効果が思うように進行せずφ450mmのコストを半減させるには、φ300mmの倍の年月を要するようになる。

b.4 今後の展望

官民プロジェクトのスーパーシリコン研究所でφ400mm ウエハの試作に携わった経験から、φ450mmを実現させるための技術課題を述べた。その中で特に解決すべき課題を以下にまとめる。

- (i) 結晶成長工程ではシミュレーションソフトを改良し、コンピューター制御の精度を向上させ単結晶化率を高める必要がある。大重量の単結晶化率向上と高収率化なしにφ450mmを実用に供することは極めて厳しいものになる。φ450mmの実現には結晶工程がカギを握っている。

(ii) 加工工程は SSi での知見を活かすことで加工精度の確保は可能であろう。ただし、品質を保証する評価技術が確立できなければ意味がない。とくに、洗浄工程の良否を判断するパーティクル測定は 20~30nm レベルの異物検出が求められると考えられ、従来のレーザー光の散乱光による検出法が適用できるかどうかは疑問である。しかも経済性に見合った検出機器でなければならない。

昨今の世界的金融不安の拡大で半導体産業の低迷が危惧される。φ450mm の実用化の動きにブレーキがかかり 2012 年がかなりずれ込む可能性が大きい。1998 年の半導体不況で φ300mm が 3 年ずれ込んだことが想起される。次世代ウエハが浮上してくるまでの数年間、産官学が真に一致協力し、半導体デバイスの基盤となるシリコンウエハ産業のリーダーシップを将来とも日本が堅持してゆくための技術開発に専念されることを切望したい。

参考文献

- 1) 高田清司：「大口径シリコンウエーハ」、シーエムシー出版「半導体製造プロセス材料とケミカルス」、p9-23 (2006)
- 2) 高田清司：「次世代大口径単結晶 Si 基板と研削技術」、砥粒加工学会誌、第 52 巻、第 3 号、特集 2、p134-137 (2008)
- 3) 高田清司、林信行、今井正人：「次世代大口径ウエーハ結晶・加工・エピタキシャル」、Realize 社出版「最新シリコンデバイスと結晶技術」、p238-256 (Dec,2007)
- 4) 浜井産業ホームページ、<http://www.hamai.com/product/index.html>
- 5) 阿部耕三：「研削の科学」、サイエンスフォーラム出版「超精密ウエーハ表面制御技術」、第 5 章第 2 節、p122-134 (2000)

(高田清司／阿部耕三)

c) 石定盤

c.1 はじめに

石材は産業分野でも石定盤として使われる他、多くの用途に使われている材料である。しかし石材と言えば墓石や石碑、美術工芸品、土木建築用の外壁などをイメージするように土木建築学の文献や岩石・鉱物学的な文献が多く石定盤についての文献は少ない。

そこで本章では石定盤に使われている石材の特徴と加工例、工業製品での用途例を紹介する。また装置の大型化に対する石材流用について今後の展望を簡単に述べる。

c.2 産業分野で使われる石材の特性

工業製品で使われる石材は一般的に花崗岩（Granite）と言われているが、国際地質科学連合（IUGS）の提案による火成岩分類および命名法（IUGS, 1973）によれば工業製品で使われる石は花崗岩類と言われ図 1 の QAPF 図（Q は石英、A はアルカリ長石、P は斜長石、F は準長石）の一部で表される。

国際地質科学連合（IUGS）の提案は火成岩を構成している鉱物グループの量比（容量%）によって分類する方法である。

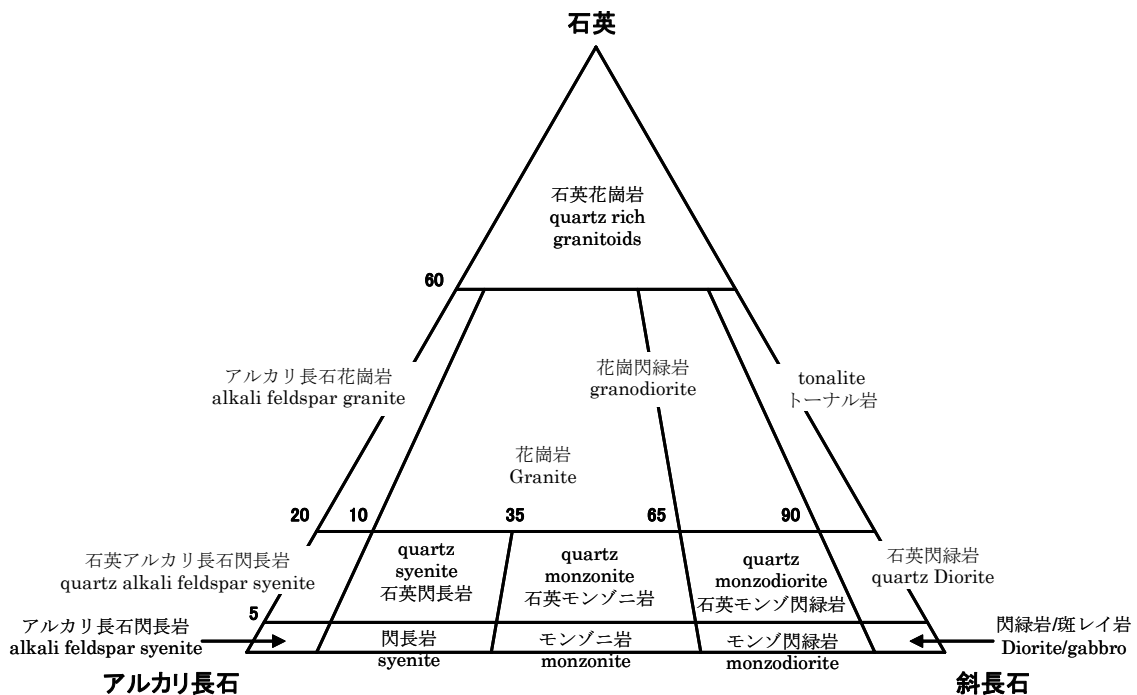


図 1 IUGS, 1973 による花崗岩グループの分類

花崗岩（Granite）を見分けるには、表 1 の火成岩の分類に示すようにまずは色で判断出来る。また、各メーカーから出されている石材の二酸化ケイ素の量を確認することも判断材料の一つになるだろう。

黒雲母の粒子の大きさが剛性や、ばらつきに大きく関与すると文献¹⁾では言われている。また硬度や性質の異なる造岩鉱物で造岩されているか否かで機械的特性が変わる。表 2 に石材の機械的特性を、表 3 に石材の熱的特性を示す。

ここから斑レイ岩や閃緑岩は花崗岩類の中でも特に強度が高く、緻密でしかも吸水性係数が低いという性質を持っていることが分かる。また値のばらつき幅は 15～30%程度あるが、斑レイ岩や閃緑岩のほうが比較的小さい¹⁾。

しかし石材は自然に造岩されたものである関係上、組織は必ずしも一様ではないためで十分に安全率を考慮する必要がある。

表 1 火成岩の分類

		酸性岩	中性岩	塩基性岩	超塩基性岩
二酸化ケイ素の量(SiO ₂) (重量%)		多い	←—————→		少ない
		65	52	45	
色		白	←—————→		
ガラス質 完晶質	細粒	火山岩	流紋岩	安山岩	玄武岩
	粗粒	深成岩	花崗岩	閃緑岩	斑レイ岩 カンラン岩
含有鉱物		無色鉱物	石英 カリ長石	石英 カリ長石 斜長石	斜長石
		有色鉱物	黒雲母 角閃石	角閃石 輝石	輝石 カンラン石 角閃石

表 2 石材の機械的特性¹⁾

材質	比重	ショア硬さ	ヤング率	抗折力	吸水性係数
	× 10 ³ kg/m ³	Hs	× 10 ⁴ N/mm ²	N/mm ²	%
斑レイ岩	2.92	93	9.4～9.5	22.5～26.5	0.004～0.076
閃緑岩	2.85	97	11.4～12.8		～0.056
花崗岩	2.58	98	5.9～6	12.8	0.18～0.21
鑄鉄	7.27	38	8.3～9.8	377.6	0.0016

表 3 石材の熱的特性¹⁾

材質	比重	比熱	熱伝導率
	$\times 10^3 \text{kg/m}^3$	J/Kg·K	W/(m·k)
斑レイ岩	2.92	711.8	1.2
閃緑岩	2.85	795.5	1.5
花崗岩	2.58	753.6	1.6
鋳鉄	7.27	418.7	52.3

c.3 精密定盤と石材

精密定盤とは精密な平面又は基準平面を使用面として上面に備え、一般的には鋳鉄または石で作られた盤状の構造体で平面の基準として平面度の測定に用いられる他、けがき・芯だし・組立て作業の際の基準面として用いられるものである。図 2 に石定盤を示す。全体の平面度の算出方法は、式 1 として JIS B 7513-1992 精密定盤に記されている。

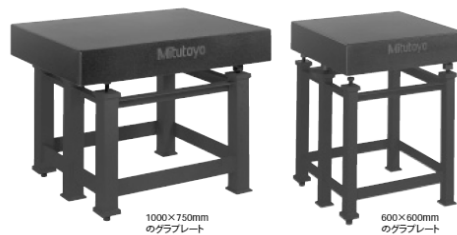


図 2 石定盤

$$\text{平面度 } (\mu \text{ m}) = L \times C_1 + C_2 \dots \dots \text{(式 1)}$$

L: 対角線長さ ($= \sqrt{a^2 + b^2}$) を 100mm 単位で切り上げた数、a:縦 b:横

表 4 C1 及び C2 の値

定盤の等級	C1	C2
0 級	0.003	2.5
1 級	0.006	5
2 級	0.012	10

当然基準平面として使用するためには長い年月使用しても変形せず、磨耗しないことが重要なため材質の機械的特性は重要なポイントであると言える。石材は鋳鉄と比べた場合、引張り強さ、ヤング率といった剛性は低いけど硬度や熱的特性などから優秀な材料であるこ

と言えるため定盤の素材として使われるようになった。欠点となる剛性は厚みを増すなどの工夫をすることで補うことが出来る。

精密定盤の中でも石定盤は下記のような特徴を持つ。

- 1) 鋳鉄に比べて硬さが約 2.5 倍なので耐磨耗性が優れている。
- 2) 傷がつきにくい。
- 3) 鋳鉄に比べて抗折力が小さいのでキズがついてもカエリや盛り上がりが生じないため平面度を維持しやすい。
- 4) 防錆処理の必要がなく維持しやすい。
- 5) 非磁性体のため磁性を持つワークを載せることが可能である。
- 6) 図 3 に示すように振動減衰性に優れている。
- 7) 多孔性があるためリングングしない。

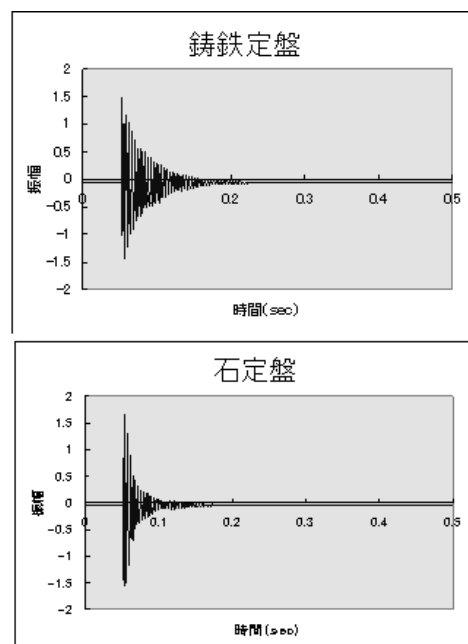


図 3 振動減衰比

熱的に鈍感なので瞬間的な温度変化がある場合での平面の安定性は良いが、熱伝導率が小さいため、長時間にわたって温度変化がある場合は一様の温度となるのに時間がかかる。

吸水性を持つため、吸水によって膨張し精度変化を起こす。水分のかかる場所での使用は吸水性の低い材質を選定するか、水分のかからない工夫が必要である。

石定盤に使用される石材については JIS B 7513-1992 精密定盤に記されており、花崗岩又はこれと同等以上の物理的特性を持つもので、組織が均一であり割れなどの欠点があってはならないとしている。また表 5 のような物理的特性が記されている。

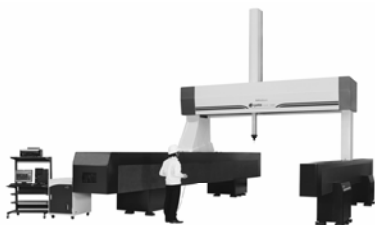
表 5 石材の物理的性質²⁾

密度	引張破壊力	圧縮破壊力	多孔性係数	吸収性係数	線膨張係数
$\times 10^3 \text{ Kg/m}^3$	N/mm^2	N/mm^2	%	%	10^{-6} K^{-1}
2.5~3	7~35	100~300	1.5 以下	3 以下	2~8

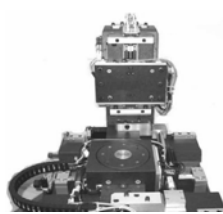
表 4 の JIS0 級と JIS2 級の係数を見ると 4 倍異なることが分かる。つまり、2 級の定盤の許容精度 $20\mu\text{m}$ に対して 0 級の定盤は $5\mu\text{m}$ となり許容値の幅が小さい。表 5 の物理的特性を持つ石材でも十分に定盤として使用可能だが、JIS0 級やそれ以上の高精度定盤の製作時は、強度が高く緻密でしかも吸水性係数の低い表 2 や表 3 で示した花崗岩類の中でも斑レイ岩や閃緑岩といった黒色の石材を選ぶ方が良い。

c.4 石材の使用例

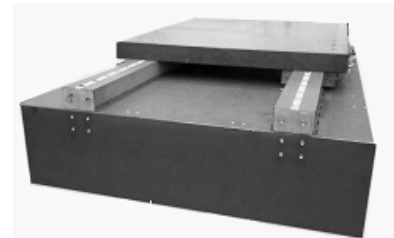
石材は材質としての特長のほかに長尺、大型部品の製作も可能なため、石定盤の他にも図 4 で示すような装置のベッドやエアベアリング、エアベアリングの案内、ガラス基板の吸着板といった工業用部品として利用されている。



三次元測定機のガイド
(ガイド長：7m)



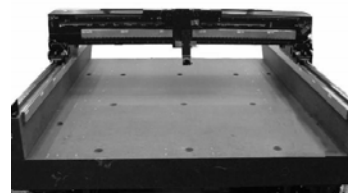
石製検査装置



一軸エアスライダ
(装置ベース一部)



エアベアリング案内



ステージ用ベース
(リニアガイドとの組み合わせ)

図 4 石材の使用例

c.5 石材の加工例

石材は原石を採ることが出来れば、切断、研削加工、ラップ仕上げ加工を施して製作出来る。

一枚物では長さ 6000mm の石定盤まで、弊社では製作した実績がある。例として図 5 に示す三次元測定機に用いているベースは幅 2.5m 長さ 6m である。

もちろん大型の石材になればなるほど、部材として使用可能な石材が採れにくくなる。そのため小型の石材に比べると長納期、高額になるが、加工設備さえあれば十分に製作可能である。

また、形状については、図 6 や図 7 で示すようなマシニングセンタでの加工や図 8 のような小幅の溝や小穴の加工が可能である。

しかしネジを直に加工出来ないため、石材に穴をあけてインサートブッシュを接着しなければならない。



図 5 大型三次元測定機

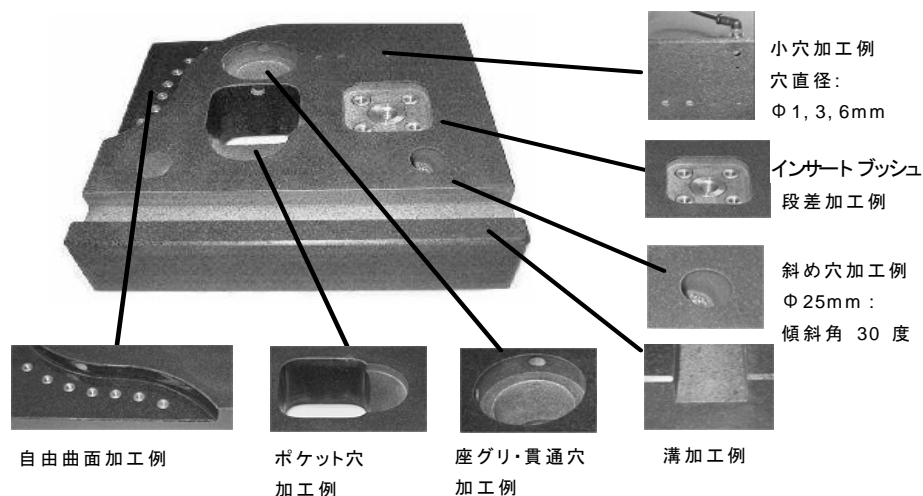


図 6 石材加工事例

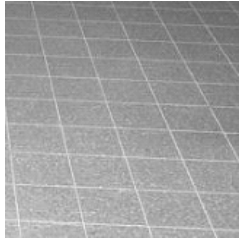


図 7 石材加工事例
(吸着溝 0.5mm)

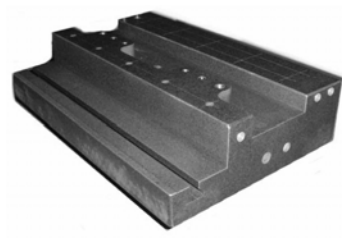


図 8 石材加工事例
(段差加工)

c.6 石材使用のポイント

石材は機械的特性にばらつきがあるので安全率をとり、精度や使い方により選ぶとよい。高精度の定盤を製作する場合は、吸水性の低い緻密な石材を選ぶこと、剛性を高くすることで精度変化量を少なく出来る。

また石材の特性によるメリットとデメリットを理解し、デメリットを補うことが石材使用上のポイントと言える。

例えばインサートブッシュ接着を考えてみる。

必要な締め付け力を得るためには、インサートブッシュの直径や長さ、接着方法を工夫しなければならない。なぜなら、この場合ネジの強度は締め付け力の他にインサートブッシュの接着面積でも決定するからである。

端面近くへのインサートブッシュ加工やインサートブッシュとインサートブッシュ間の距離が短い場合では、十分な締め付け力を得るために強度を考慮した設計と、温度変化が生じた場合の石材とインサートブッシュの線膨張係数の違いによる材質の伸縮を考慮した、肉厚の設計を行うことが必要である。

温度環境が変化する場合を考えてみる。

熱伝導率が低いため温度変化に対して鈍感である、というメリットは反対に均一の温度となるための時間がかかるというデメリットになる。

例えば、装置内外に熱源がある場合で長時間にわたって作業を行う場合は、作業の始めと終わりでは精度が変わってしまう場合があるため、定盤の温度を均一にするなどの立ち上げに時間を要す必要がある。

c.7 今後の展望

フラットディスプレイ関連装置、特に液晶ディスプレイ関連装置の大型化が加速してい

る。近年はワークのサイズが大きくなり、装置自体が道路交通法で定められる大きさを超え、運ぶことが困難な大きさにならざるを得なくなっている。今までは石材ベースや吸着盤を装置組み込み一体化として対応している事例が多いが装置の大型化に伴って、分割式や組み立て式など工夫されており研究されている。また大型装置であればあるほど、軽量化、コストダウン、短納期化が必要なため、石材の持つメリットを活かした装置の研究や石のメリットを持った石に変わる素材の研究、もしくは大型石材を用いない装置の研究等が必要となると考える。

参考文献

- 1) 斎藤勅男著 『石材定盤』 日刊工業新聞社
- 2) JIS B 7513-1992 精密定盤
- 3) 山口梅太郎・西松裕一著岩『石力学入門』 東京大学出版会
- 4) 白水晴雄著『石のはなし』 技報堂出版
- 5) http://en.wikipedia.org/wiki/QAPF_diagram
- 6) <http://www.geol.lsu.edu/henry/Geology3041/lectures/02IgneousClassify/IUGS-IgneousClassFlowChart.htm>

(川村香苗)

d) 金属定盤

d.1 はじめに

精度を追求して行こうとした場合、基準となる原器が必要となる。

平面の原器としてはオプチカルフラット、定盤がある。前者は光の干渉を利用した測定器であり、光学部品、鏡面を有した小形部品の平面度の計測に使用され、一般の機械部品の計測（定盤を基準平面として平行度、平面度、直角度等の計測）には定盤を使用することが多い。計測用の定盤にも評価しようとする精度によって使い分けが必要であり、JISの精密定盤（B7513）でも0級、1級、2級の3段階に分類されている。

定盤は計測だけでなく図1に示すようなすり合わせ定盤、ラップ定盤としての用途もある。本稿では精密定盤のうち金属定盤の特長、用途、計測方法について述べる。

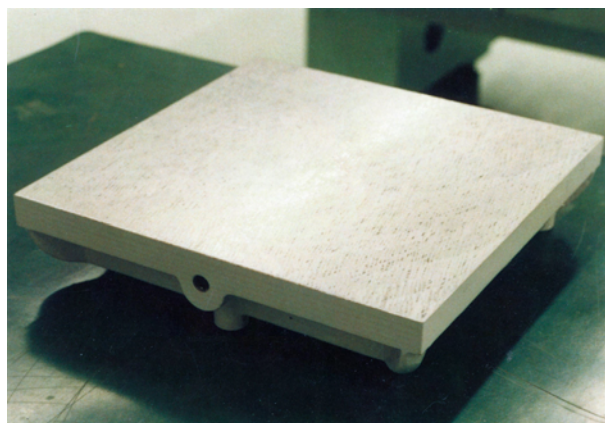


図1 すり合わせ用定盤

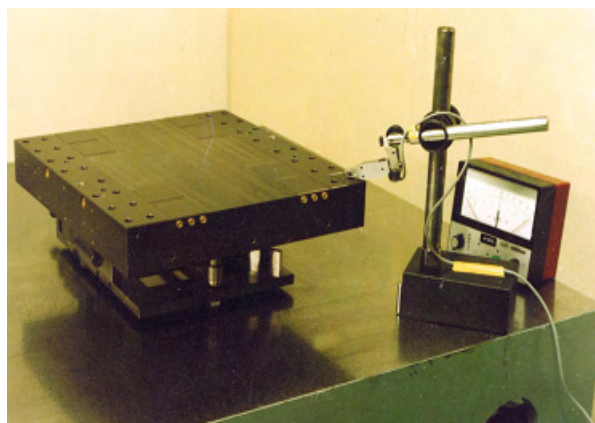


図2 定盤を基準に平面度を測定

d.2 定盤の精度

精密定盤の精度はJIS（7513）で表1に示すように規定されている。

定盤は平面の基準として使用される測定器であり、平面度が確認されていれば図2に示すように、定盤を基準に電気マイクロメートル、ダイヤルインジケータを使用して平面度、平行度を知ることができる。このため基準となる定盤の精度（平面度）は被測定物に求められている精度の1/5～1/10であることが理想である。

光学的鏡面の精度は別にして、超精密機械部品の精度として0.1～1 μ mの定量化が必要であり、少なくともJIS 0級の1/5～1/10の精度の定盤が必要となる。

表 1 使用面の平面度の許容値

JIS(B7513)による

使用面の大きさ (mm)	使用面の平面度の許容値 (μm)			対角線の長さ(参考) (mm)
	0級	1級	2級	
250×250	2	4	8	354
400×250	3	5	10	472
400×400	3	6	12	566
630×400	4	8	16	746
630×630	5	9	18	891
1000×630	6	12	24	1182
1000×1000	8	15	30	1414
1600×1000	10	19	38	1887
2000×1000	12	23	46	2236
2500×1600	15	30	60	2968

多少精度の悪い定盤を使用しても測定回数を増やすことや定盤上で測定位置を変えることによって被測定物の真の姿に近づくことは可能であるが測定時間がかかるため温度変化(室温の変化・体温)の影響を受けることになる。高精度の測定になればなるほど信頼できる測定器で短時間に測定することが重要である。

d.3 金属定盤の特長

精密定盤の材質として鋳鉄、斑れい岩、セラミックがあり、通常、きさげ仕上げされた鋳鉄製定盤、ラップ仕上げされた斑れい岩製、セラミック製定盤が使用されている。

いずれの材質にしても経年変化が少ないこと、耐摩耗性が高いこと、熱変形が少ないこと、剛性が高いこと、使い易いこと等が求められる。

鋳鉄製と斑れい岩製の定盤の特徴を比較すると表 2 のようになる。

精密定盤として最も重要なことは、精度が維持できること、現状の精度を把握していることである。しかし、いずれの材質の定盤も使用すれば摩耗や傷によって精度は劣化する。このため精度修正ができなければ精度が劣化した場合、廃棄するか別な用途に使用するしかない。このため斑れい岩、セラミック定盤よりきさげで精度修正が可能な鋳鉄製定盤の方が経済的であり、現状精度の把握、修正を行うためには三面すり合せ定盤または平面の原器としての金属定盤を持っていることが重要である。但し、きさげの技能を有することが前提となる。また、金属定盤について重要なことは単位面積の中に当りが幾つあるか(坪当り)と当りが定盤全面にわたって均一に分散していることである。

金属定盤は使用するに従って表面が摩耗し当りが大きくなり(当り率が大きくなる)す

べりが悪くなる。このため精度劣化がなくても当りを細分化するためのきさげによる修正が必要である。

表 2 鋳鉄製と斑れい岩製定盤の性能比較

項目	鋳鉄	斑れい岩
安定性 (経年変化)	◎素材の製作方法，加工方法によって長期間にわたって高精度が維持できる。	◎地質学的にみても経年変化は少ないと思われる。
精度	◎すり合せの技能があれば修正することにより高精度を維持できる。三枚摺合せの手法により，目的に応じた精度に製作できる。	○精度，精度修正のいずれもメーカに依存せざるを得ない。
剛性	◎リブによる補強が可能である。	◎単位重量当りの強さは鋳鉄に比べて小さい。
湿度	○手入れをおこたればさびが発生する。	◎さびは生じないが膨潤の可能性はある。
温度	◎被測定物との熱膨張係数が等しく熱伝導が良いため短時間に同一温度になりうる。	◎むくであるため熱容量が大きく熱膨張係数も小さいため温度変化の影響を受けにくい。被測定物と熱膨張係数に差があるのは欠点となる。
使いやすさ	○きずがつきやすく打痕，きずは盛り上る。使用後は防錆処置をしなければならない。図2-2に示すようにスタンドを斑れい岩で製作することにより，すべりの悪さは解決できる。	◎インジケータスタンド（鋼製）の移動に対してすべりがよい。
価格	○高価である。	◎比較的安価

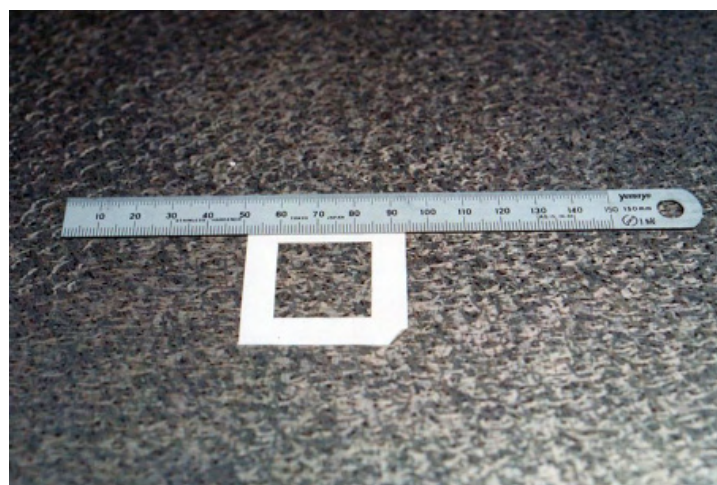


図 3 すり合せされた定盤の坪当り

d.4 金属定盤の形状

金属定盤の形状として図 4 に示す舟形形状のものを多くみかけるが精密定盤としては図 5 に示す箱形構造が剛性が高く、上下対称であるところから熱的にも安定している。平面の原器として製作した箱形構造の金属定盤（鋳鉄製）は図 6 に示すように上下面の肉厚が 30mm、側面の肉厚が 25mm、内部のリブの肉厚が 20mm となっており、重量は 700kgf である。中央部に荷重を加えた時の剛性は 2000N/ μm となっている。ちなみに JIS 7513

では 200N/μm となっている。

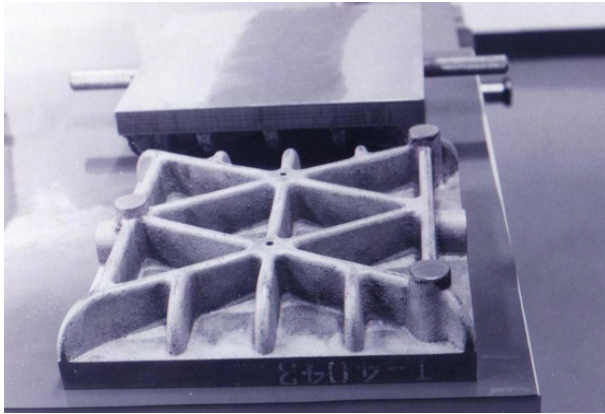


図 4 舟形定盤

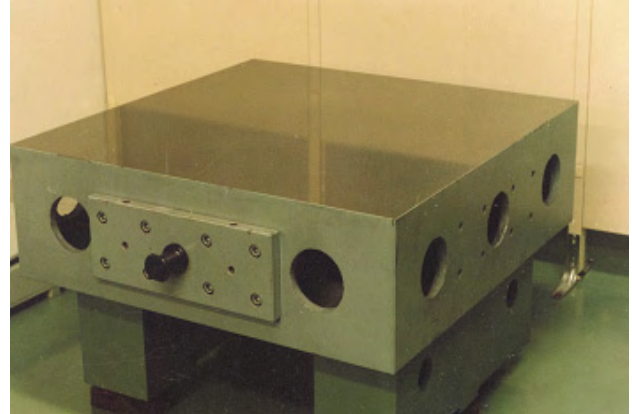


図 5 箱形定盤

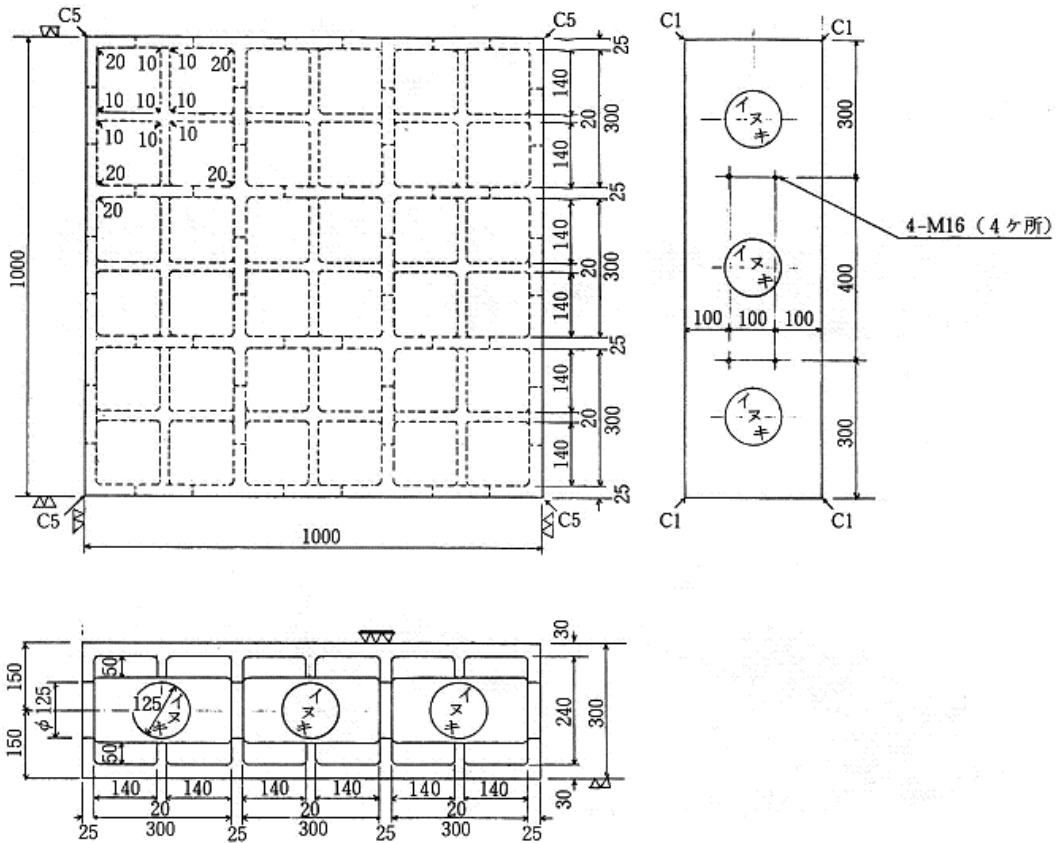


図 6 箱形定盤の構造

このような金属定盤はすり合せで製作・修正するものであり安全に吊り上げたり、裏返しにするための金具、吊り具が必要である。図 7 に見られる吊り用金具は取付け、取外しによる精度への影響を避けるため取付けたままにしておく。

定盤は使用状態に据付けた時、安定させるため JIS でも三箇所の足を有することが規定されているが、被測定物の重量によるたわみと自重によるたわみを少なくするため支持点

を三箇所以上とし、荷重分布を等しくし、応力を生じさせないように支持点は自由に回転できるように球面座金を用い、最終的にはこれらを統合して3点支持としている。

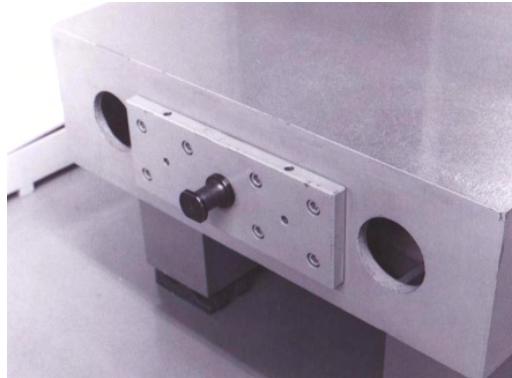


図7 定盤の吊り用金具

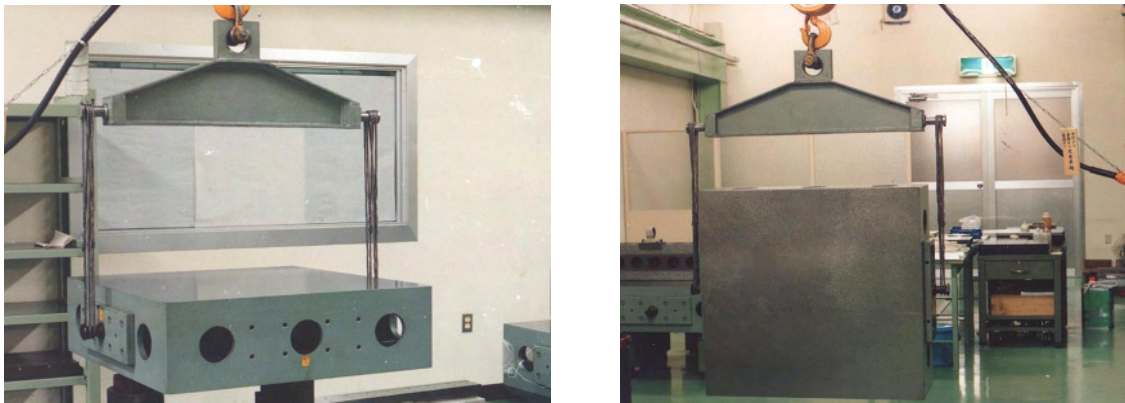


図8 定盤の吊り用冶具

d.5 金属定盤の用途

(1) すり合せの基準平面としての用途

金属定盤のすり合せ、機械部品の取付け面などの平面度向上のための当り付けに使用される。基準定盤側にブルーペーストを塗り、きさげされる側に光明丹を塗って図9に示すように重ね合わせ20～30mmのストロークで3～4回往復させる。光明丹は当りをはっきりさせるためと潤滑剤としてかじりを防止する目的で使用する。すり合せにすることにより図10に示すような当りが付き（中心部、外周部の黒く見える部分が高くなっている）被加工物の平面の状態が分かる。この高い部分をスクレーパで除去することによって当りが分散し、平面度が向上する。

また、金属定盤の平面度を確認するため同様な作業を行い、当りの分布、当りの大きさによって良否を判定する。

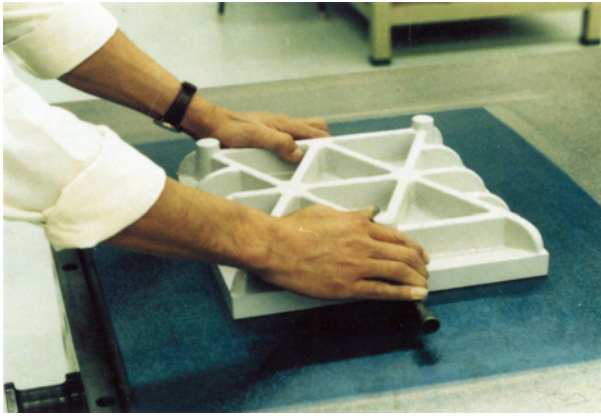


図 9 基準定盤とのすり合せ

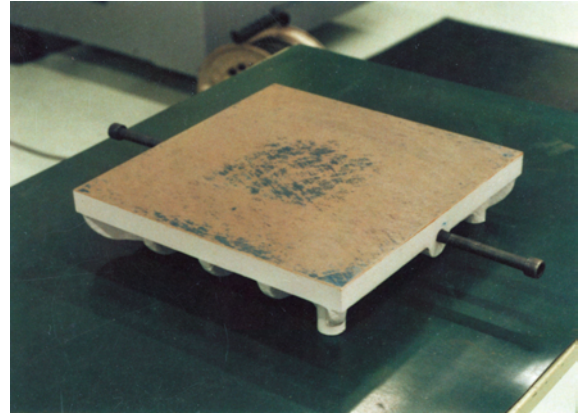


図 10 すり合せによる当り

(2) 支持台としての用途

自重によるたわみを避けたい機械部品、装置の組付け、測定には図 11 に示すように支持台として使用する。

(3) 平面度の測定

定盤と微調整が可能な載物台を用い図 2 に示したように定盤基準に電気マイクロメートル、ダイヤルインジケータを用いて平面度を測定する。干渉計を用いた測定と異なり、電気マイクロメートル等の測定は点あるいは線での測定であり、平面研削、すり合せ、ラップで加工した特異点のない平面であることが前提となる。

(4) 平行度の測定 (図 12)

定盤上にべた置きされた被測定物の平行度・平面度を電気マイクロメートル、ダイヤルインジケータで測定する。厚みの絶対値が必要な場合は定盤上に置いたブロックゲージ(定盤、ブロックゲージ、被測定物が同一温度になっていること)との比較測定を行う。



図 11 支持台としての定盤の使い方
(オートコリメータによる真直度の測定)

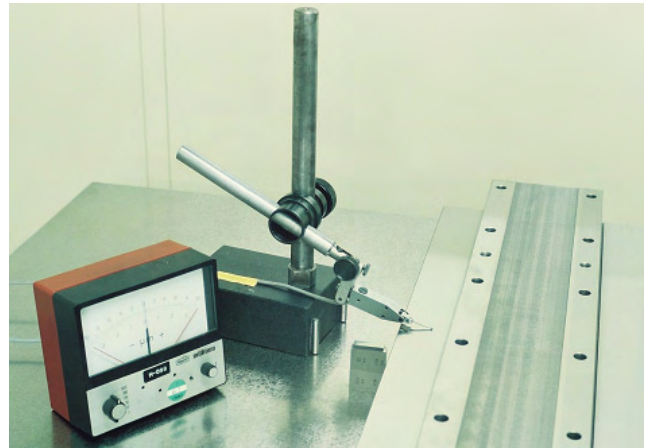


図 12 定盤での平行度と寸法の測定
(ブロックゲージとの比較測定)

(5) 直角度の測定

円筒スコヤ、角スコヤを用い底面に対する直角度の測定ができる。また、図 13 に示すような手順で定盤と電気マイクロメートルを用いて幾何学的に直角度の定量化ができる。

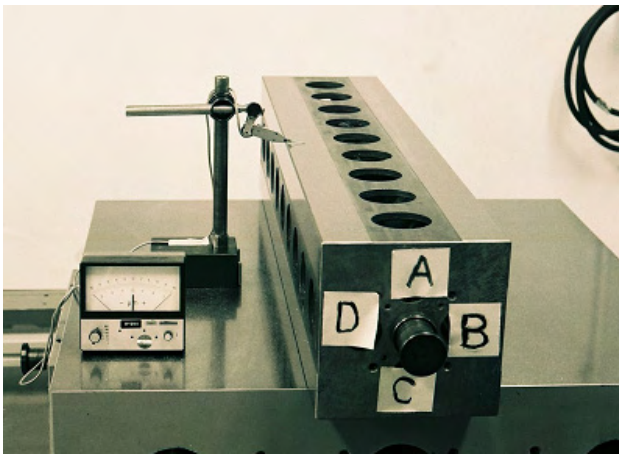


図 13(a) 定盤基準に平行度を確認する。

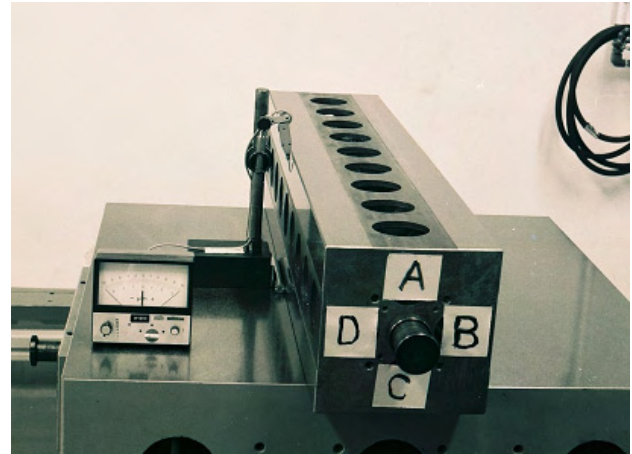


図 13(b) 電気マイクロメートルの目盛りを 0° に合わせる。

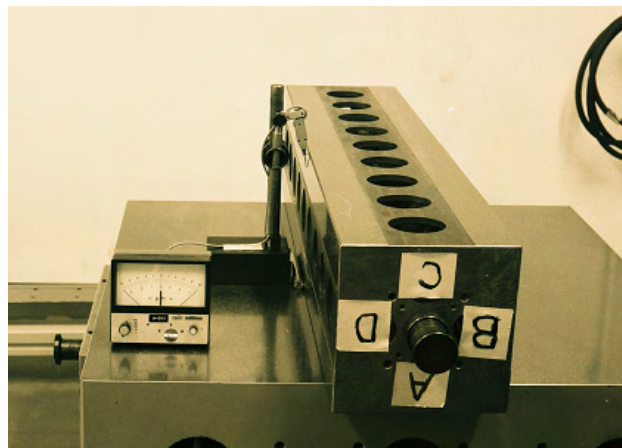


図 13(c) スコヤを長手方向に 180° 回転させ電気マイクロメートルの目盛りを読む。読み の 1/2 が直角からのずれとなる。

d.6 定盤の精度測定

定盤の精度測定法として下記に示す方法があり、定盤の大きさ、精度によって使い分けの必要がある。

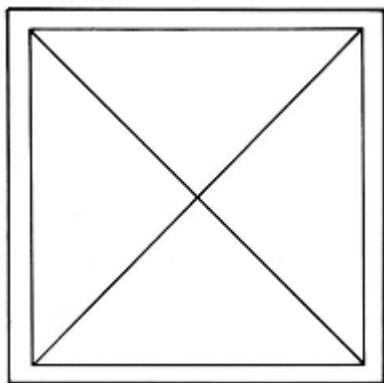
(1) オートコリメータまたは水準器を用いる方法

オートコリメータ、水準器を用いた平面度の測定は対角線法、井げた法あるいは両者を組合せた測定線に沿った垂直面内真直度から求める (図 14)。

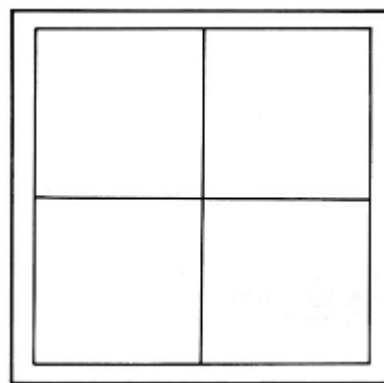
これらの測定は、オートコリメータの反射鏡、水準器を測定線に沿って測定間隔だけ移動させて行うため、反射鏡、水準器の大きさから小形定盤の測定には適していない (図 14)。

オートコリメータ、水準器を用いた精度測定に要する時間（1000mm□の定盤で3時間以上を要する）から測定精度の信頼性には限界がある（図15）。

オートコリメータ、水準器による測定は測定線上での測定値であり、平面としての評価ではなく、すり合せ、ラップにどの加工方法により、特異点のないことが確認されてなければならない。

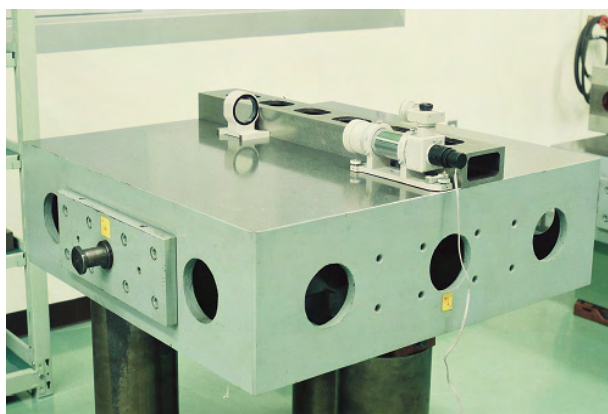


対角線法

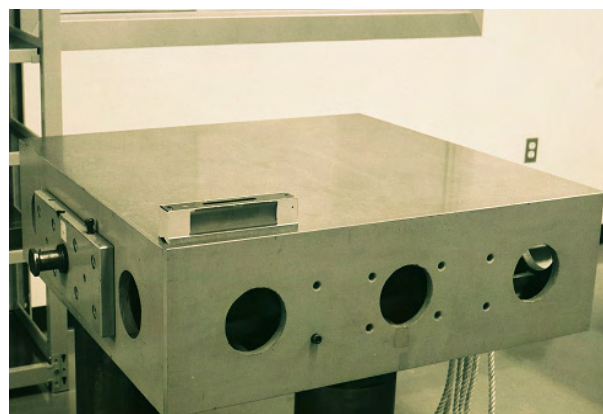


井げた法

図14 平面度測定のための測定線の決め方



(a) オートコリメータを用いる方法



(b) 水準器を用いる方法

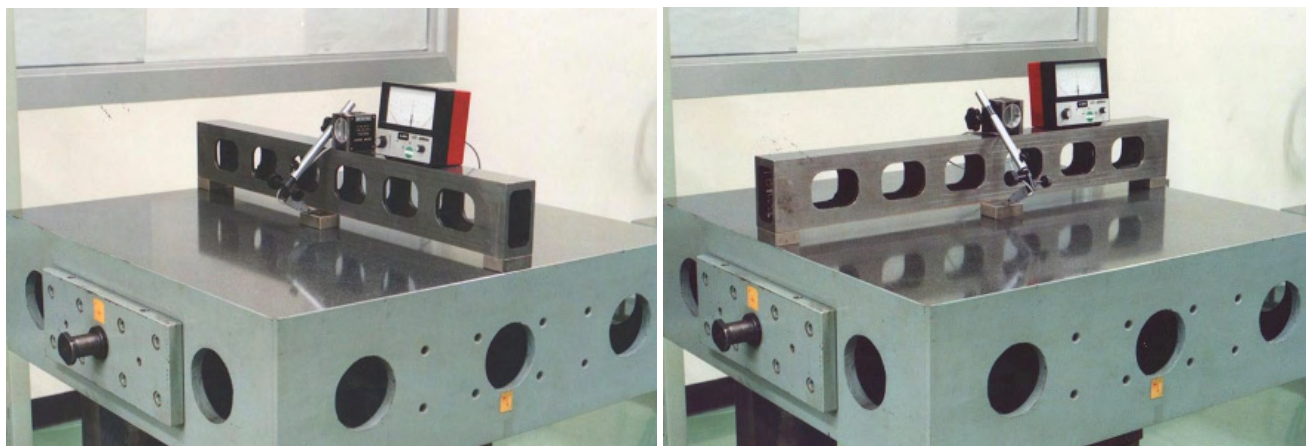
図15 定盤の平面度の測定方法

(2) 基準平面と比較する方法（その1）

精度が確認されている平面（定盤）を基準に当りで平面度を確認する方法がある。

この方法は、基準定盤にブルーペーストを被測定定盤に光明丹を薄く塗りお互いをすり合わせる。すり合わせる時の移動量は20～30mm以下とし、すり合せの結果、被測定定盤の全面にわたって小さな当りが均一に分散していることで定性的であるが基準定盤と同等の平面度が得られたものとする。25mm□の中にある当りの数を坪当たりといい精密定盤では30～40個の坪当たりが必要である。この方法では当り付けのため上に乗せる被測定定盤の大きさによっては大きな振れや曲がり自重によるたわみに含まれてしまうため、振れや曲がりの量を図16に示す方法で確認しなければならない。

(a)に示すように両端で支持された直定規の中央に電気マイクロメータを当て目盛りを“0”にセットする。次いで(b)に示すように直定規を 90° 回転させ電気マイクロメートルの目盛りを読み取る。この読みの差が当りで現されなかった定盤の曲がり、捩れとなる。対角線に沿って同様の測定を行う。



(a) (b)
図 16 定盤の曲がり、捩れの測定方法

(3) 基準平面と比較する方法 (その 2)

精度が確認されている定盤を基準に電気マイクロメートル等で測定する。この測定方法は基準の定盤に対して被測定定盤が小さいことが条件であり、対角線、井げたの測定線に沿って電気マイクロメートルを移動させる (図 17)。

被測定定盤がきさげて仕上げられた定盤の場合、きさげ面には 2~3 μm の凹凸があり、電気マイクロメートルのプローブと被測定定盤の間にブロックゲージなどを挟んで凹凸の影響を避けなければならない。

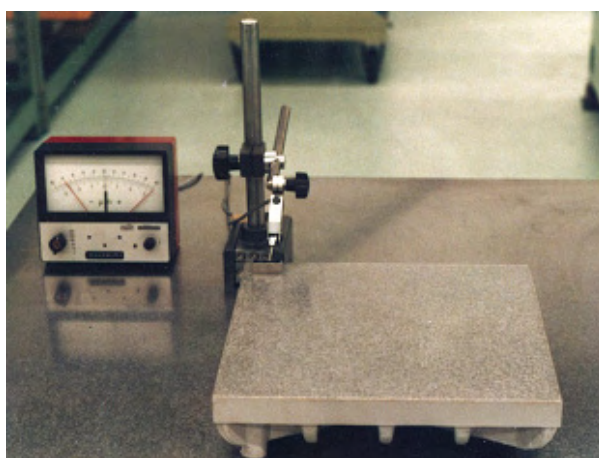


図 17 基準定盤を用いた平面度の測定きさげの凹凸の影響を避けるためブロックゲージを使用する。

d.7 鋳鉄製三面すり合せ定盤の精度と製作

常に高精度の定盤を維持して行くには鋳鉄で三面すり合せ定盤を作ることである。

三面すり合せはオートコリメータ、水準器、ダイヤルインジケータ等の検査工具が存在しなかった時代に同一形状（正方形がよい）の定盤を三個以上準備し、これらをお互いにすり合せ、どの定盤とすり合せても均一な当りが得られるまですり合わせを繰返し、平均化によって高精度な平面を得る方法であり、ウィットフォースによって考案されたと言われる。

ウィットフォースから 100 年以上を経た現在でも比較的大型の定盤の製作方法、精度把握の方法として三面すり合せ以上の方法はない。

平面の原器となる三面すり合せ定盤として図 5 に示した定盤を製作したが、製作の手順、精度について述べる。

前述したように高い剛性と熱的な安定性を得るため図 6 に示した構造とした。

鋳鉄は組織が緻密で硬度（HB195）も高く、引張強さ（300N/mm²）のミーハナイト鋳鉄を使用し、鋳造による残留応力を残さないよう砂型の中で常温まで除冷する自己焼きなまし法を取ったほかは熱処理、枯らしは行わなかった。機械加工は加工による残留応力を発生させないよう荒加工、中仕上げ、仕上げの 3 段階に分けてプレーナのみで加工した。鋳造から機械加工完了までリードタイムを含め 4 ヶ月を要した。

低速切削、シングルポイント切削のプレーナを加工機械に選んだほか、プレーナでの荒加工においても切削抵抗の少ない剣バイトのみを使用し、1 回の切込み量（5mm 以下）、送り量（1mm 以下）を制限した。仕上げ加工は超硬のヘールバイトを使用し、切込み量 0.04mm、切削速度 10m/min で行い、塗装、吊り金具を取付け後、平面度 1 μ m/1000mm \square 、坪当たり 40 を目標に 23 \pm 0.5 $^{\circ}$ C の恒温室ですり合せに入った。

4 ヶ月を経て完成したが精密定盤のすり合せには、すり合せの技能、スクレーパの形状・研削方法、光明丹の塗布のし方と当りの付け方、きさげによって生じたばりを取るための砥石（アルカンサス砥石を使用）の選択とかけ方、当りの状態による作業の進め方や測定技術が優れているだけでなく、長期間にわたる忍耐と集中力が必要である。

d.8 今後の展望

平面の原器として高精度の定盤を有することによって高精度で信頼性のある測定を容易に行うことができる。しかし、安心してこの定盤を使用するには現状の精度を把握し、精

度劣化があれば直ちに修正しなければならない。

高精度の定盤を維持するということは評価と修正ができるということに他ならない。金属定盤を三枚組みで持つことはこれらを具体化する唯一の方法だと思う。

(田中克敏)

e) 電解複合研磨

e.1 はじめに

電解複合研磨（ECB ; Electro-Chemical Buffing Overview）は、昭和 51 年に開発した金属表面処理技術で、ステンレス鋼はもとより、アルミ、チタン、銅などの非鉄金属まで、加工変質層を伴わずに 200～300 Å までの高品位鏡面を、安定した品質で加工できる新しい技術である。

イオン単位の除去作用性をもつ電解作用に、粘弾性支持砥粒による微少切り込み作用を補助させたもので、電解生成物の排除と加工面の均一平滑化によって高品質鏡面を得ることができる。

従来の研磨法では、限界にきている ULSI（Ultra-Large Scale Integration）製造プロセスのウルトラクリーン化や、超、極高真空システムの高性能化など、先端ハイテク分野へ貢献しうる ECB 技術の特質を紹介し、適用例、効果についてのべる。

e.2 金属の表面処理

(1) ステンレス鋼の表面

半導体製造装置や、超高真空装置の構成材料は、耐食性、強度、加工性などから、ステンレス鋼が最も広く使用されている。

通常、ステンレス鋼板の製造工程で得られる表面仕上げには、2D（冷間圧延後、熱処理、酸洗）、2B（冷間圧延後、スキンプス）及び BA（冷間圧延後、光輝熱処理）仕上げなどがある。

熱間圧延されたこれらの素材表面は、不純物や介在物を含む複雑な変質層を形成し、それが多孔性の酸化物層で覆われている。図 1 は SUS304 熱間圧延の酸処理材を表面 SEM 像と三次元表面粗さを観察したもので、表層の粒界が腐食され局部的に侵食されていることがわかる。これは製造工程中に、熱処理を大気中で行ったときの表層酸化スケールを除去するために、硝酸などで酸処理することにより発生したものである。これらを表面処理なしで、半導体製造装置用材料として使用した場合、粒界の溝は、ガスや液体の滞留するデッドゾーンとなり、水分、ガス分の吸着サイトとなる。また溝部の金属粉等はパーティクル（微粒子）の原因となる。これらの表面変質層を、加工変質層を伴わずに、しかも表面粗さをできるだけ小さくし、表面層を薄くて緻密な酸化皮膜で覆う適切な表面処理

を施す必要がある。

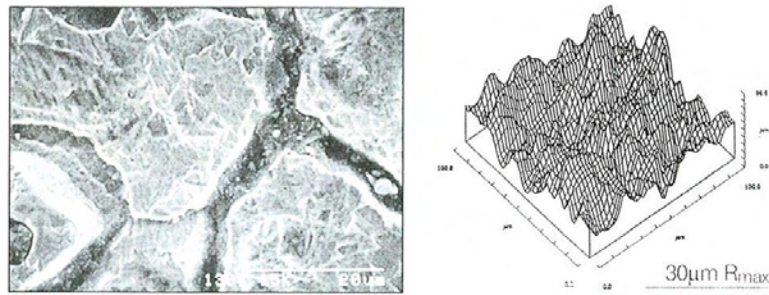


図 1 熱間圧延素材 SEM 像と粗さ

(2) 各種表面処理法

従来行われてきた金属の表面処理方法としてバフ研磨及び電解研磨法がある。バフ研磨は、クッション性を有する紙や布等に砥粒と油脂性研磨剤を付着させたバフ材により、金属を局部的に加圧し研磨する方法で、いわば研磨面の凸部を切削あるいは塑性変形などによる表面層の変形により、光沢と平滑を得る機械的研磨法である。

バフ研磨においては、局部的に加圧及び加熱して研磨するため、粒界の溝へ、金属粉や砥粒めり込み、金属表面におおいかぶさってこれを隠している。又むしれ等も発生している。図 2 に走査型電子顕微鏡 (SEM ; Scanning Electron Microscope) の写真及び三次元表面粗さを示す。

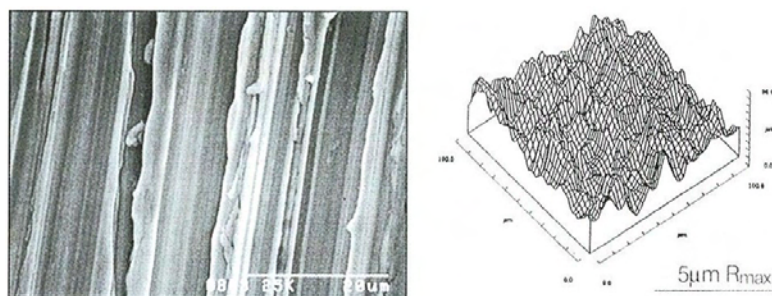


図 2 バフ研磨の SEM 像と粗さ

また電解研磨は通称 EP と言われ、電気めっきの逆原理を応用したもので、電解液 (硫酸、リン酸等の強酸) 中の電気化学的反応 (陽極酸化) により、表面の微少凸部を優先的に溶解 (イオン化) し、光沢ある面に仕上げる電気化学的研磨法である。電解研磨は、粒界腐食が発生し、電解によるピット (小孔) の発生する。図 3 に SEM 写真及び三次元表面粗さを示す。

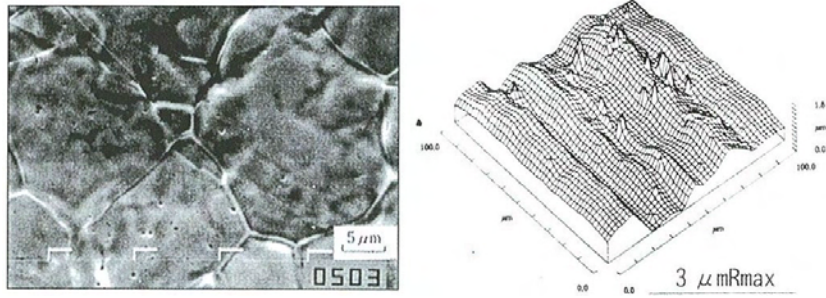


図 3 電解研磨の SEM 像と粗さ

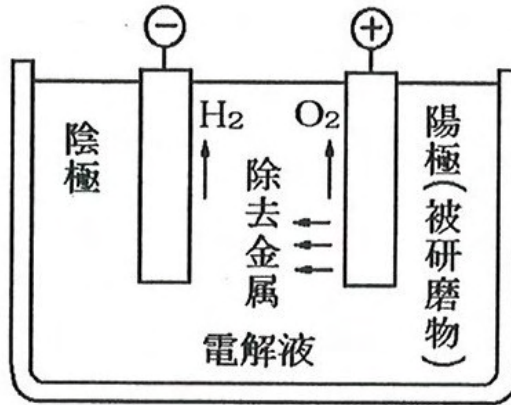


図 4 電解研磨の原理

図 4 に電解研磨の基本概念図を示す。この方法は複雑な形状の研磨を得意とするものの、液組成の複雑さや素材の下地研磨が必要であるなどの問題点がある。

いずれの研磨方法においても、装飾品などのみばえや電子部品の脱脂等を主目的としたもので、その原理から鏡面を創成する手段ではない。

e.3 電解複合研磨

中性塩電解液を用いて、砥粒擦過作用を複合する ECB 法は、電極工具を用いて接触式研磨法で、工具回転と送りを与えることにより被研磨面の面積に関係なく高品質な鏡面仕上げが可能となる。

(1) 研磨原理

図 5 は、ECB 加工状態図である。中空型電極と研磨材が交互に配列された回転工具を陰極側、被研磨金属を陽極にして一定の間隔を保持し、この間に不動態化型電解液を供給するとともに電圧を印加し、陰極を被研磨金属に押しつけ回転する。

電解作用で金属の陽極溶解が行われ、かつ金属表面の凸凹部に生成された不動態被膜のうち、その凸部が研磨砥粒により擦過除去され、優先的かつ選択的に電解溶出される。

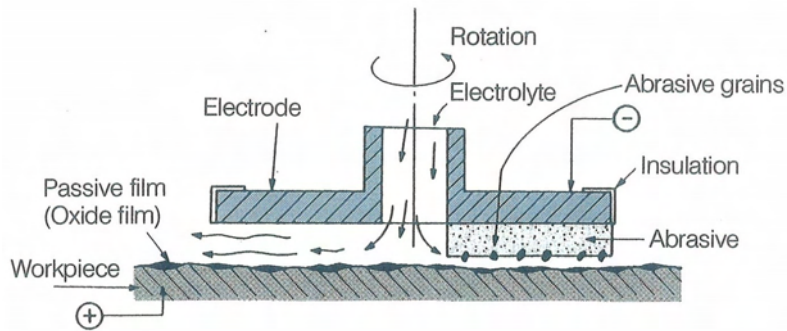


図 5 電解複合研磨加工の原理

(2) 電解複合研磨の加工特性

本研磨法の除去量 W は、電解研磨法と同じくファラデー則に基づいて、 $W = \eta KI_t$ (g) で表される。ここで K は被研磨物の電気化学当量、 η は電流効率である。図 6 は本研磨法における砥粒作用の複合効果を調べるために、電解作用単独の場合と砥粒を複合させた場合、砥粒作用単独の W 及び η を比較したものである。電解作用単独の場合、 η は作用時間 t に大きく影響され、電通直後から急激な低下を示し 20%以下になる。これは中性塩電解液を用いることで、被研磨物表面に酸加皮膜や電解生成物が成長するためである。そこで、この電解生成物を排除するとともに全面均一に除去する目的で砥粒作用を複合すると、 η は t には無関係で 60%前後の一定値を保ち、 W は t とほぼ比例関係になることがわかる。

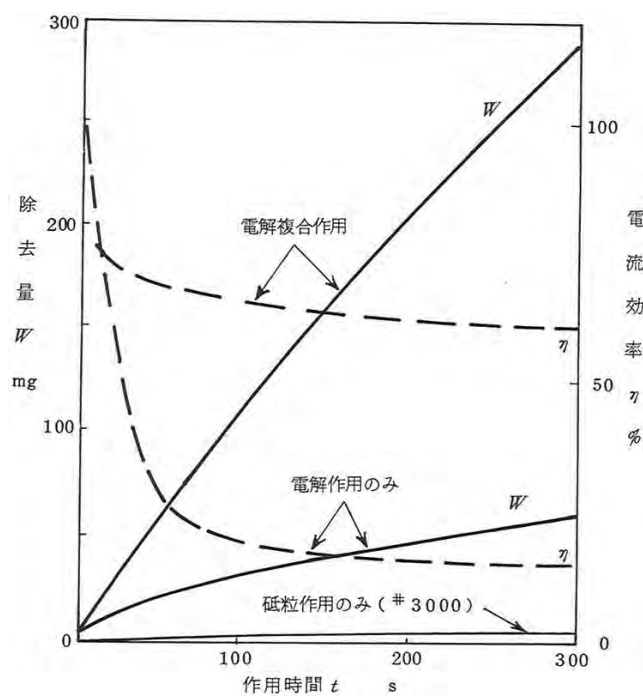


図 6 電解と砥粒作用の複合効果比較

(3) 電解複合研磨の特長

① 平滑性

図 7 は、研磨材の砥粒々度と加工面粗さの関係を示した一例であり、砥粒々度に応じて $0.01\mu\text{mRmax}$ 以下までの鏡面が効率よく短時間で得られる。

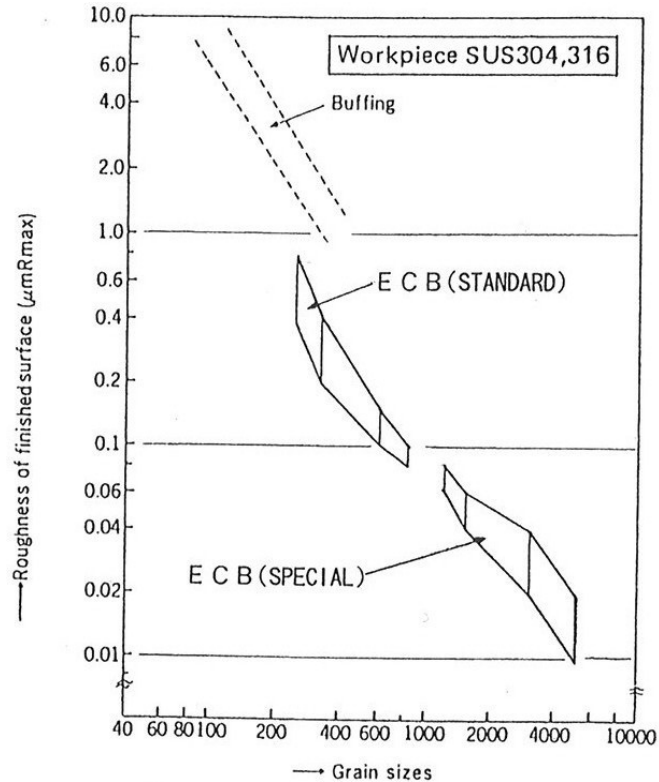


図 7 砥粒々度と粗さの関係

② 表面性状

図 8 は、ECB 法の表面性状と表面粗さを示したもので、圧延時の加工変質、欠陥層や粒界腐食による局所的な溝およびガス吸着層など隠すことなく、積極的に除去し金属素地を出す。

MA グレードは、表面に僅かに残る砥粒の擦過条痕が観察されるが、電解により丸みを帯びバリは除去され均一な平滑面が創成されている。また、MX グレードは、砥粒による擦過条痕を除去し、表面粗さで数 10nm オーダーの平滑性が均一に得られる。実効面積も極めて小さいことがわかる。

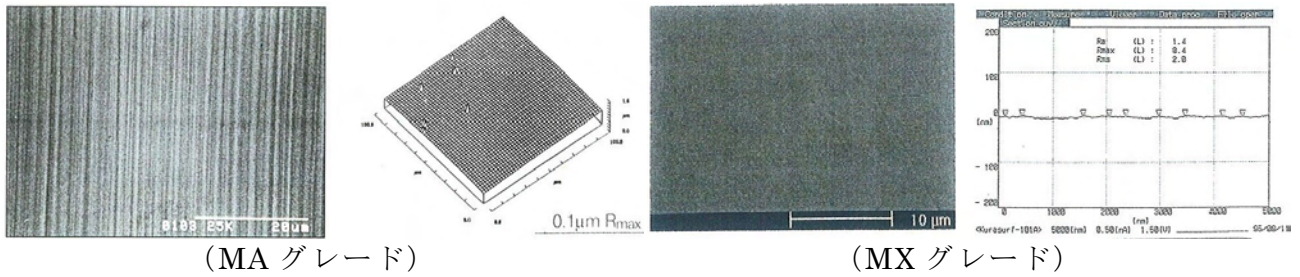


図 8 ECB 法の表面写真と粗さ

③ 表面組成

ステンレス鋼 (SUS316L) 表面の X 線光電子分光法 (XPS) による深さ方向の主要元素分析結果の一例を図 9 に示す。

基材の主要合金組成で 100% になるように補正して表示すると、バフ研磨の場合、表面と内部で組成の変化は少ないが、ECB 法の場合は、表面に Cr の濃縮がありその分 Fe の濃度の減少が見られる。図 10(a)(b) にそれぞれ処理前後における H、C、P、S そして Fe 元素に対応する各負イオン強度の深さ方向分布を示す。

主要元素である Fe のイオン強度は、処理前後の表面近傍で少し大きく、深さ方向でそれほど大きな変化はない、しかし H、C、O そして S 元素は処理前後で大きく異なる。一般に未処理のステンレス鋼表面には制御されていない酸化層を含む変質層が存在するが、電解複合研磨によってその層がよく除去されていることがわかる。このことは変質層内に多く存在すると思われる細孔の減少に大きく寄与する。同時にバルクから表面へのガス成分元素の拡散が効いてくるとされる、極高真空領域の排気にとって重要なことである。

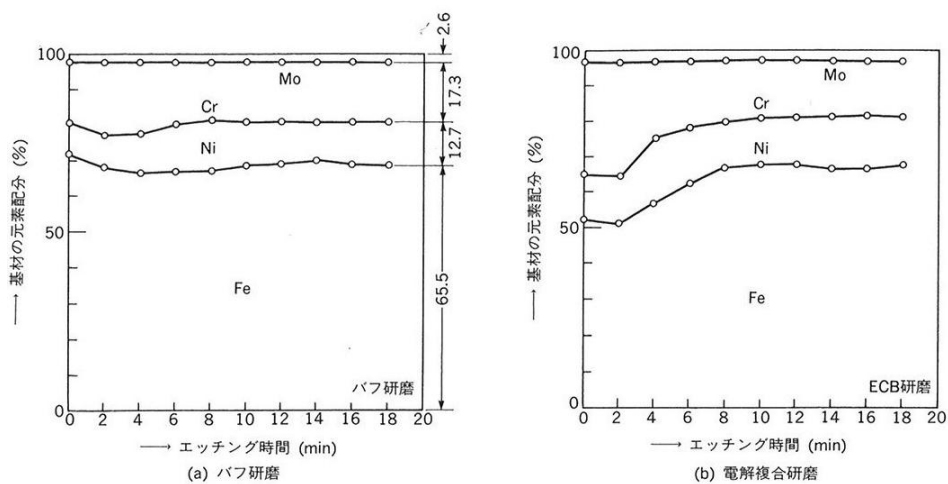


図 9 ステンレス鋼表面の XPS 元素深さ分析

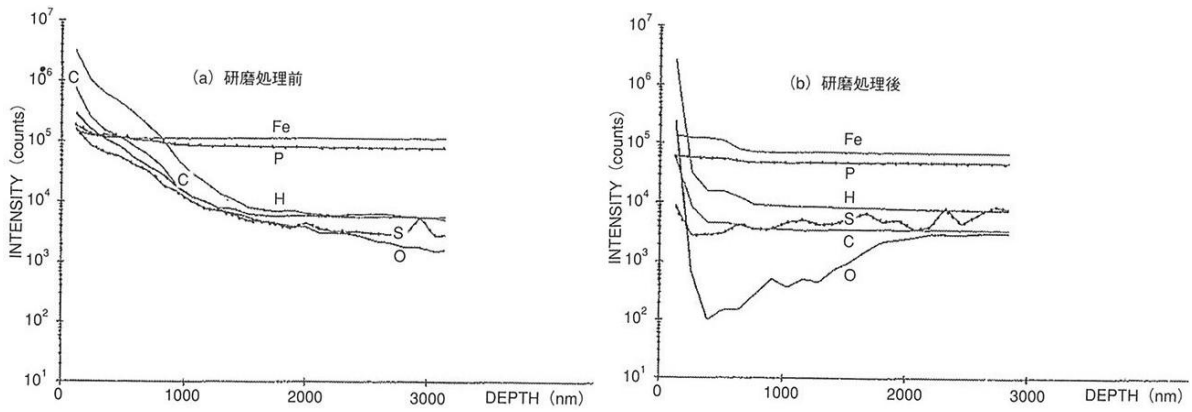


図 10 研磨処理前後の 2 次イオン質量分析

④ 非鉄金属材料への適用

ECB は、鉄鋼材料に対してはきわめて高品質の鏡面を創成する。しかし、Al や Ti および Cu とその合金などの非鉄金属に対しては、研磨液、砥粒、電解条件との複合バランスなどがポイントとなる。

Al 材の場合、加工液による酸化、又研磨材の目づまり、Ti 材は、元来難削材であり、耐食性に富む硬質の TiO_2 膜に覆われているため砥粒擦過による“むしれ”、電解条件による酸化など複合効果適正バランスが重要なファクターとなる。

図 11 に研磨実績の多い素材に対するパイプの研磨例を示す(アルミ合金、ステンレス、黄銅、無酸素鋼、チタン、銅、2 相ステンレス、スーパーインバー)。



図 11 各種素材の研磨実績例

e.4 電解複合研磨適用例

(1) 超高、極高真空容器

固体表面の電子構造の研究、新機能デバイスの開発などは試料表面状態に極めて敏感であり、残留ガスによる汚染を防ぐため 10^{-9}Pa 台の極高真空が要求される。

超高、極真空を得るための理想的な表面の条件は

- a) ガス付着確率が小さい。
- b) 表面粗さが小さい（鏡面）。
- c) ガスの脱離の活性化エネルギーが小さいなどが挙げられる。

図 12 に内面を ECB により鏡面加工した超高、極高真空容器例を示す。

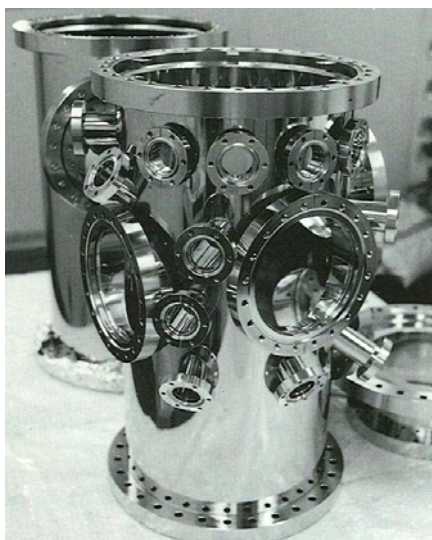


図 12 内面 ECB により鏡面研磨した超高、極高真空容器例

(2) 成膜装置用真空容器

デバイスの高密度化、高集積化に伴い、プロセスのクリーン化を目的とした、成膜装置用真空容器、内部品、排気系などの鏡面研磨”ECB”が適用されている。

図 13 に ECB された半導体ウエハープロセス用チャンバー、図 14 に太陽電池成膜用真空容器の ECB 例を示す。



図 13 ウエハプロセスチャンバー

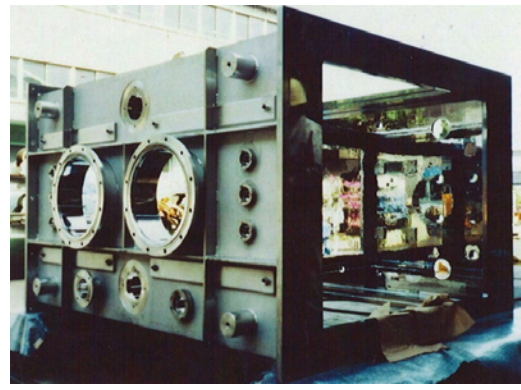


図 14 太陽電池成膜チャンバー

(3) クリーンガスボンベおよびタンク

特殊ガスを高純度で供給するには、ガスボンベ内面の接ガス部を ECB により $0.1\mu\text{mRmax}$ 以下に抑えて実効面積をできるだけ小さくし、不純物および微粒子の付着をなくすことが必要である。図 15 はボンベ内圧と H_2O 濃度の関係を示し、ECB により表面を平滑にしたことにより、従来のガスボンベで見られた、壁面に吸着していた不純物が圧力低下とともに脱離する現象、すなわち圧カスイング現象がなくなり、圧力が減っても H_2O 濃度の変化は見られない。

図 16 に従来のボンベと ECB したボンベを示す。

同様の理由で、半導体用高純度ガスタンク、タンクローリー、配管などにも適用されている。

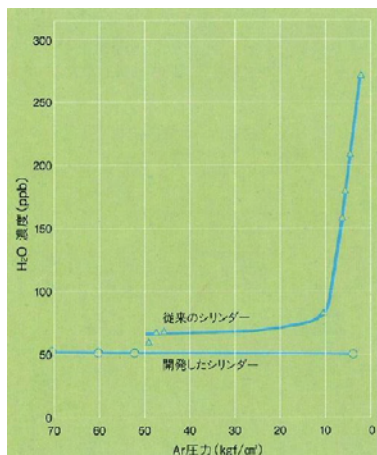


図 15 ガスボンベ内圧と H_2O 濃度



図 16 ECB したボンベと従来のボンベ

(4) 薄板ステンレス材の ECB

薄板ステンレス板は、アモルファスシリコン (a-Si) 太陽電池用基板、光センサーなどの薄膜用基板としての用途がある。

これらの共通要求項目として、鏡面で表面に有害欠陥のないことなである。

成膜する膜厚が $1\mu\text{m}$ 程度あれば基板全体を均質膜とするためには少なくとも膜厚より 1 桁以下の表面粗さが要求される。

さらに、耐破壊性、耐候性など必要とされている。これらの仕様を満足するものとして、ECB 法による薄板ステンレス ($0.1\sim 0.5\text{mm}$) の鏡面基板が現在検討されている。

薄板ステンレス基板のメリットは、Roll to Roll の連続生産が可能となり又その結果フレキシブルな低コストのモジュールの実現が可能となる。

図 17 に Roll to Roll の量産研磨法実現するための試作した鏡面基板例を示す。

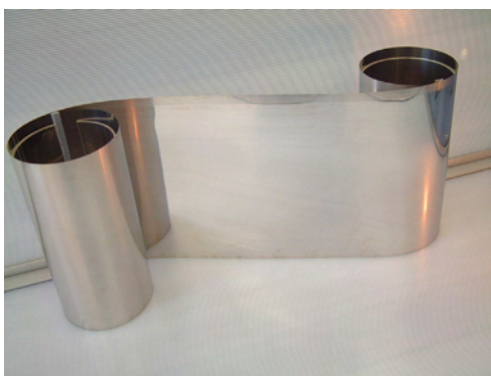


図 17 ステンレスロールの研磨例

SUS304、 0.1mm 厚 $\times 300\text{mm}$ 幅のロール材で ECB により表層の変質層を数ミクロン除去されている。

ECB 法は、効率よく下地面凹凸を平滑化するとともに、高品質の鏡面を得る新しい化工法である。

図 18 とは、研磨前の市販の BA 処理材、素材面写真と粗さを示す。

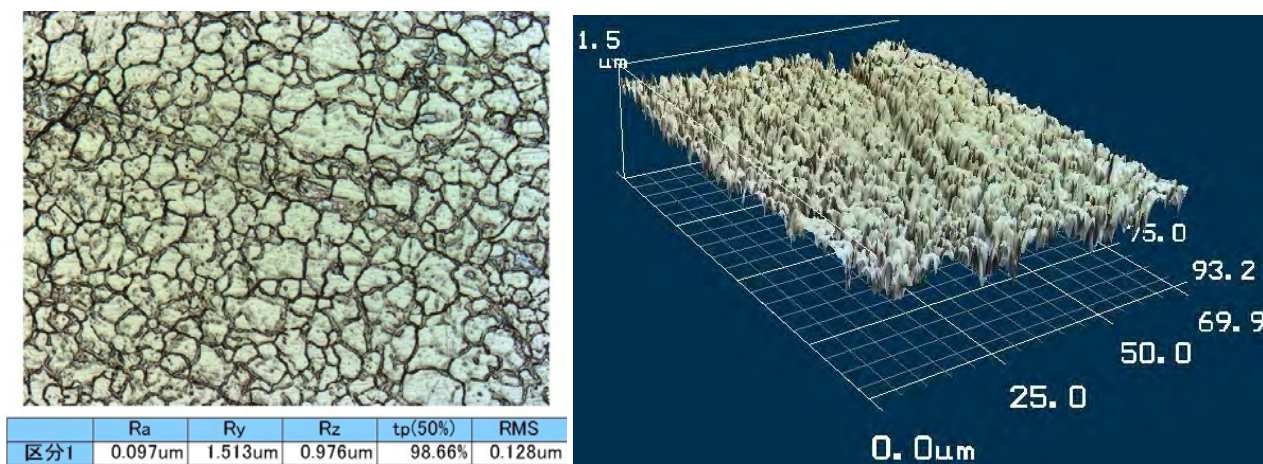


図 18 薄板ステンレスの表面性状（研磨前）

図 19 は、研磨後の表面写真と粗さを示す。

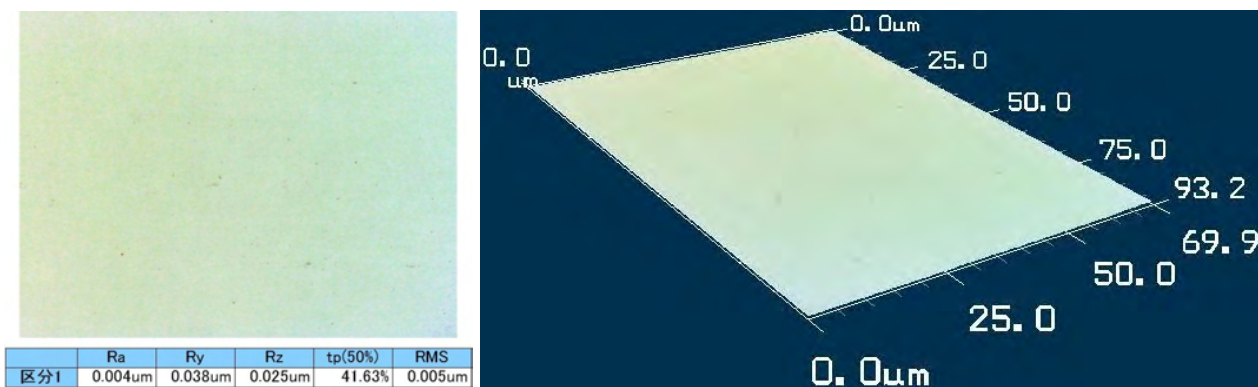


図 19 薄板ステンレスの表面性状（研磨後）

e.5 今後の展望

ECB 技術は、加工法の特質を考えて、大型タンクや大型真空容器などの特にステンレスの大面积を対象にきわめて高い適用効果を発揮させてきた。しかし最近では、アルミ、チタンなど各種材料さまざまな形状、など鏡面化の要望が高まっている。

現在これらに対応すべく技術開発、機械化など今まで以上に加速させる必要がある。

参考文献

- 1) 電解複合研磨による金属の超鏡面化技術
表面科学第 11 巻 第 6 号 (1990)
- 2) 室温排気の試験容器における極高真空の発生
真空第 3 巻 第 1 号 (1991)
- 3) Xvth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum
Darmstadt-1992
- 4) 電解複合研磨 (ECB) の特徴と最近の技術動向
真空第 41 巻 第 4 号 (1998)
- 5) 他

(佐藤憲二)

第V章 おわりに

おわりに	-----	239
付録	-----	243

第 V 章 おわりに

フラットパネルディスプレイ用大型基板に係わる加工技術や検査技術、それに関わる周辺技術と将来展望に関して、「製造技術分野」、「計測制御分野」、「応用技術分野」の 3 つの分科会を立ち上げ、調査報告を行った。報告を終えるにあたっていくつかの観点から全体を俯瞰、展望してみたい。

フラットパネルディスプレイ用ガラス基板では、液晶ディスプレイとプラズマディスプレイが牽引役となり大型化が進められ、既に開発が終了した第 10 世代で基板長辺寸法が 3m に達している。大型ガラス基板には、表面品質、熱安定性、軽量化、基板強度、大型化に加え、切断、研磨等の加工技術および洗浄に伴う環境対応も要求される。基板の大型化にともなう技術開発・部材・製造装置など、いずれもコスト上昇を如何に小さくするかが大きな課題である。超薄型が実現できる有機 EL ディスプレイに代表される次世代ディスプレイでも大画面化、高細密化、大型化がキーポイントであり、これに加えて発光効率を高め、かつ長寿命となるための材料開発も必須であり、今後の開発に注目したい。

これら大型基板を検査する検査装置についても、高画質化にニーズに伴い傷や異物のパターンの検査および輝度・色彩の検査を、大面積に対して高速かつ高精度で行わなければならない命題が課せられる。傷やパターン等の検査において光学方式は高速化に対応できる利点がある反面、分解能に難点がある。一方、原子間力顕微鏡等に代表されるプローブ顕微鏡は分解能の点で極めてすぐれているが、スキャニング方式のため大面積を高速に検査するのに困難を伴う。基板の大型化に伴い、計測におけるスケールファクタを悪化させない努力が必要となる。スケールファクタを確保しつつ、欠点をお互いに補完し合いながら、個々の問題を克服すべく、今後も検査技術向上を目指して開発が進むであろう。輝度や色彩の検査においても、高コントラスト、高レスポンス、色再現性など、検査項目の多様化・高精度化にともない、ハードウェア／ソフトウェア両面からの要求はさらに厳しくなることは間違いない。

これらの調査をふまえ、5 年後および 10 年後の展望を探るべく、フラットパネルディスプレイにおける技術ロードマップを作成した。再録を含め、以下にその一覧を掲載する。

大型ディスプレイの今後の展望において、現状の動向から推察すると 5 年後には、液晶ディスプレイの 30～40 型の大型パネルは有機 EL ディスプレイにかわっており、開発レベルでは 60 型を超え、プラズマディスプレイの領域にも進出していると思われる。

液晶ディスプレイ

分野	分野要素	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
大型LCD	サイズ	~65型		~72型				~90型				~100型		
	走査線数	1080本 FHD			2160本 QFHD(2k x 4k)						4320本 SHD(4k x 8k)			
	ピクセルサイズ デザインルール	600μm (FHD 52型) 3.0μm			300μm (QFHD 52型) <3.0μm						150μm (SHD 52型) <2.5μm			
	消費電力	現状比1			現状比1/2				現状比1/3					
ガラス基板	世代	第8世代		第10世代		第11世代		第12世代		第13世代		第14世代		
	長辺寸法 量産パネルサイズ	2.5m 52型x6面		3.0m 65型x6面		3.3m 72型x6面		3.8m 82型x6面		4.2m 92型x6面		4.8m 106型x6面		
フォトマスク	サイズ	1200x1400x13mm			1600x1800x13mm				2000x2250x20mm					
	価格	現状比1			現状比2.5				現状比5.5				現状比7.5	
アレイ・ パターン形	マスク露光方式	▲												
	ダイレクト露光方式							▲						
	IJ描画方式							▲						
CF・ パターン形	マスク露光方式	▲												
	IJ描画方式	▲												

プラズマディスプレイ／有機 EL ディスプレイ

分野	分野要素	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	
大型PDP	サイズ	~100"									~250"			
	走査線数	2k x 4k									4k x 8k			
	消費電力 効率	現状比1 2lm/W			現状比2/3				現状比1/2		10lm/W			
大型有機EL	サイズ	10~20型			20~30型				30~60型				60~100型	
	効率	20lm/W			35lm/W		50lm/W		150lm/W				180lm/W	
	寿命	2,000h			15,000h		25,000h		40,000h				45,000h	

一方で、超大型ガラス基板においては、第11世代、第12世代への大型化が速やかに進むかどうか最も関心のある点であるが、技術的には可能でも、昨今の経済状況の悪化で、経費削減効果が得られるかどうかについて疑問の声も聞かれ、今後もコスト的に有利な製造方法に向かうことが予測される。

いずれにしろ 10 年後は市場のディスプレイが全てフラットに変わっており、フラットパネルディスプレイという分類は必要がなくなることだけは間違いない。

最後になるが、本報告書の作成にあたって各分野の最新動向をお寄せいただいた本調査研究委員、また、編集にご協力いただいた関係各位に感謝の意を表したい。

(黒河周平)

Keywords	full spell	日本語訳
AFM	Atomic Force Microscope	原子間力顕微鏡
AOD	Acoustic Optical Deflector	音響光学偏向素子
AOI	Auto Optical Inspection System	光学式外観検査
BM	Black Matrix	ブラックマトリックス
BPP	Balanced Pushed Pull	ノズル超音波洗浄方式
CAD	Computer Aided Design	コンピューター支援設計
CCD	Charge Coupled Device	電荷結合素子
CCFL	Cold Cathode Fluorescent Lamp	冷陰極蛍光ランプ
CCP	Computer Controlled Polishing	電算機制御研磨
	Chemical Combination Polishing	化学複合研磨
CD	Critical Dimension	クリティカルディメンジョン
CF	Color Filter	カラーフィルター
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics	炭素繊維強化プラスチック
CIM	Computer Integrated Manufacturing	コンピューター統合生産
CLSM	Confocal Laser Scanning Microscopy	共焦点走査型レーザー顕微鏡
CMP	Chemical Mechanical Polishing	化学機械研磨
COP	Crystal Originated Particle	結晶欠陥
CPU	Central Processing Unit	中央演算処理装置
CRT	Cathode Ray Tube	陰極線管またはブラウン管
DMD	Digital Micro-mirror Device	デジタルマイクロミラーデバイス
DRAM	Dynamic Random Access Memory	ディーラム、ダイナミックラム
ECB	Electro-Chemical Buffing	電解複合研磨
ECR	Electron Cyclotron Resonance	電子サイクロトロン共鳴
EL	Electro Luminescence	電界発光効果
EUV	Extreme Ultra-Violet	極端紫外線
EUVL	Extreme Ultra Violet Lithography	極端紫外線露光システム
FED	Field Emission Display	電界放出ディスプレイ
FOUP	Front-Opening Unified Pod	FOUP ウェハ搬送容器

FPD	Flat Panel Display	フラットパネルディスプレイ
FSD	Flexible Sheet Display	フレキシブルシートディスプレイ
GTM	Gray Tone Mask	グレイトーンマスク
HSFR	High Spatial Frequency Roughness	表面粗さ、高空間周波数領域粗さ
HTM	Half Tone Mask	ハーフトーンマスク
IBM	Ion Beam Machining	イオンビーム加工
IBF	Ion Beam Figuring	イオンビーム描画
IC	Integrated Circuit	集積回路、アイシー
IJ	Ink Jet	インクジェット
IOM	Institute for Surface Modification, Leipzig, Germany	表面改質研究所 (独 ; ライプニッツ)
IPS	In-plane Switching	横電界スイッチング
ITO	Indium Tin Oxide	酸化インジウム・錫
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductor	国際半導体技術ロードマップ
LAN	Local Area Network	構内通信網
LCA	Life Cycle Assessment	ライフサイクルアセスメント
LCD	Liquid Crystal Display	液晶ディスプレイ
LD	Laser Diode	レーザーダイオード
LED	Light Emitting Diode	発光ダイオード
LSFR	Low Spatial Frequency Roughness	形状精度、低空間周波数領域粗さ
MEMS	Micro Electro Mechanical Systems	微小電気機械システム (部品)
MRF	Magneto Rheological Finishing	磁気粘弾性流体研磨
MSFR	Middle Spatial Frequency Roughness	うねり、中空間周波数領域粗さ
MTM	Multi Tone Mask	多諧調フォトマスク
OC	Over Coat	オーバーコート
ODF	One Drop Filling	滴下注入法
OLED	Organic Light Emitting Diode	有機発光ダイオード
PC	Personal Computer	パーソナルコンピューター
PDP	Plasma Display Panel	プラズマディスプレイ
PS	Photo Spacer	フォトスペーサー

QVGA	Quarter Video Graphics Array	QVGA 解像度
RGB	Red,Green,Blue	赤色、緑色、青色（3原色）
RIBM	Reactive Ion Beam Machining	活性イオンビーム加工
SEM	Scanning Electron Microscope	走査型電子顕微鏡
SFQR	Site flatness Front least sQuares Range	平坦度（チップサイド）
S/N	Signal to Noise ratio	信号対雑音の対数
STN	Super Twisted Nematic	TN の一種（液晶関連分野）
TFT	Thin Film Transistor	薄膜トランジスタ
TN	Twisted Nematic	ティエヌ（液晶関連分野）
ULSI	Ultra-Large Scale Integration	超高密度集積回路
UV	Ultraviolet	紫外線
VA	Vertical Aligned	垂直配向（液晶表示モード）

非 売 品
禁無断転載

平 成 2 0 年 度

オプトメカトロニクス技術を用いた次世代型の超大型基板の
進歩に関わる加工処理とその周辺技術に関する調査研究報告書

発 行 平成21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