SEMICONDUCTOR FRONT-END · PART 3-13

計測・検査と歩留まり
見えないほど小さな欠陥を、見つけて、突き止める

何百もの工程を通るあいだに、ウェハには小さな異物や形の崩れが生まれます。欠陥の種類・大きさ・場所によっては、チップが不良になります。工場は、工程の合間に**寸法や膜の厚さを測り（計測）**、**欠陥を探し（検査）**、どの工程で生まれたのかを突き止めて、良品の割合（**歩留まり**）を上げていきます。この回では、欠陥がチップを殺すしくみと歩留まりの数え方、光と電子で欠陥を探す方法、寸法と膜を測る方法、原因の突き止め方、そして検査装置で圧倒的な米国のKLAと、日本の日立ハイテク・レーザーテックを見ていきます。

半導体前工程シリーズ 第3部 3-13／難易度 ★★☆
事前学習：概論1-4、3-5／最終更新：2026年11月19日

この記事の構成

1. この回を3行でつかむ
2. 技術編① — 歩留まりと、欠陥がチップを殺すしくみ
3. 技術編② — 欠陥を探す：検査
4. 技術編③ — 測る：計測
5. 技術編④ — 電気で確かめる：テスト
6. 技術編⑤ — 原因を突き止める：歩留まり学習
7. 産業編① — 検査装置：KLAの独走
8. 産業編② — 素材の技術者の出番
9. 検査の限界と、これから求められること
10. まとめと次回予告
11. 確認クイズ
12. 用語集
13. 参考資料（一次情報）
14. 主張と出典の対応表

本記事の表記ルール

事実 ＝公的機関・学術資料・企業の公式発表に記載のある内容（出典番号つき）
本稿の計算 ＝明示した前提から本記事が計算した値
推測 ＝出典から読み取れる範囲を超えた、本記事の見立て
未確定／将来 ＝計画・ロードマップであり、実績が確認できていない事項
物理の一般原理（教科書で確立している内容）の説明は、とくにタグを付けずに書いています。

この回の学習目標

- 歩留まりの種類と、欠陥がチップを殺すしくみ（臨界面積）を説明できる
- 欠陥が固まって起きると、歩留まりの見積もりがどう変わるかを説明できる
- 隣のダイと比べて欠陥を見つける方法と、検査・レビュー・分類の流れを説明できる
- 寸法・膜の厚さ・重ね合わせを測る方法を挙げられる
- 歩留まりの原因を突き止めるのに、どんなデータを使うかを説明できる
- 検査・計測の装置で、どの国のどの会社が強いのかを挙げられる

1. この回を3行でつかむ

- **歩留まり**は、作ったチップのうち良品の割合です。欠陥がチップを殺すかどうかは、欠陥の大きさと、その欠陥が落ちると回路が壊れる場所の面積（**臨界面積**）で決まります。IRDSは、致命的な粒子の大きさを、ロジックの最も重要な寸法の半分、つまり**3.0 nm**としています。欠陥は固まって起きることが多く、概論1-4で見た単純なモデルより、大きなチップの歩留まりは高めになります。
- **検査**は、隣のダイ（チップ）と画像を比べて違うところを探し、電子顕微鏡で確かめ（**レビュー**）、種類に分けます（**分類**）。**計測**は、線の幅、膜の厚さ、層どうしのずれを測ります。1984年に、日立が電子線で線幅を測る**測長SEM**を、KLAが量産向けの**自動外観検査装置**を世に出しました（各社の説明）。
- 経済産業省の資料では、ウェハ表面検査装置の市場は7,952億円で、米国の**KLA**が69%を占めます。日本からは**日立ハイテク**（4%）のほか、EUVのマスクを検査する**レーザーテック**が、KLAの年次報告書で競合として名指しされています。

2. 技術編① — 歩留まりと、欠陥がチップを殺すしくみ

歩留まりは1つではない

MITの講義資料は、歩留まりにかかわる問題を3つに分けています [1] 事実 。

- **パラメトリックな不良**：線の幅などがずれて、動かない、あるいは性能が落ちる
- **ランダムな不良**：たとえば、何百万個もあるビア（3-12）のうちの1個の不良
- **面積に依存する不良**：「キラー欠陥」と呼ばれる粒子など

同じ資料は、歩留まりにも、最後のプローブ試験までたどり着いたウェハの割合（ウェハ歩留まり）、電気のテストで動くチップの割合（機能の歩留まり）、速さなどの性能を満たすチップの割合（**パラメトリックな歩留まり**）など、いくつかの数え方があるとしています [1] 事実 。

欠陥の大きさと「臨界面積」

粒子（異物）は欠陥の一種で、回路の機能を壊すものすべてを欠陥と呼びます。典型的には、配線の**断線**と**短絡**です [1] 事実 。

ただし、欠陥がどこに落ちても壊れるわけではありません。MITの講義資料は、ある大きさの欠陥の中心が落ちると故障する領域を**臨界面積**と呼び、断線と短絡では臨界面積が違うとしています [1] 事実 。小さな欠陥は臨界面積が小さく、大きな欠陥はそもそも数が少ないので、歩留まりに最も効くのは、**最小の寸法に近い大きさの欠陥**だとしています [1] 事実 。

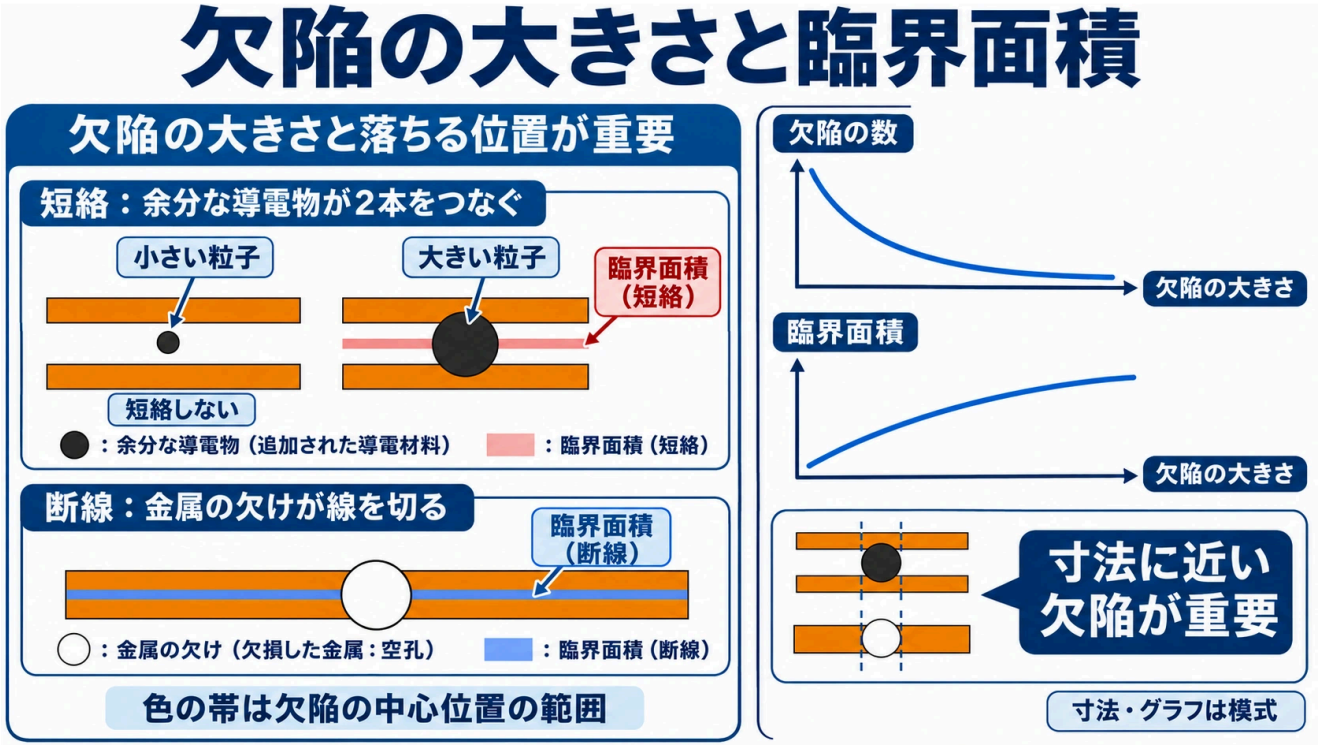


図1　臨界面積：欠陥の大きさと、落ちる場所で決まる（概念図）

図の読み方

臨界面積の考え方と、最小寸法に近い欠陥が最も効くという結論は、MITの講義資料によります [1]。図の線や円の大きさは模式です。

IRDSが議論する3 nm級のキラー粒子

IRDSの2024年版は、ロジックの最も重要な寸法の半分を基準にする粒子の定義を説明し、超純水の汚染管理に関する議論では、特に重要な電気的活性粒子が**3.0 nm**に達するとしています [2]。材料・層・故障モードによって、致命的になる大きさや検出条件は異なります。

物理のツボ①：欠陥が「固まって」起きると、大きなチップは少し助かる

概論1-4では、欠陥がウェハにランダムにばらまかれるとして、歩留まりを $Y = e^{-D_0A}$（D_0は欠陥密度、Aはチップの面積）と計算しました。このとき、欠陥が固まって起きることが多いので、このモデルは大きなチップの歩留まりを悲観的に見積もる、と書きました。

MITの講義資料は、欠陥密度そのものがウェハやチップごとにばらつくと考える**負の二項モデル**を紹介しています。欠陥が固まると、1つのチップに複数の欠陥が集まり、「すでに死んだチップは2度は死なない」ので、そのぶんほかのチップが助かります [1] 事実 。このモデルの歩留まりは次の形で書かれます。αは**固まりの度合い**を表す数で、大きいほど固まりが少なく、ポアソンのモデルに近づきます [1] 解説 。

$$Y = (1 + D_0A/\alpha)^{-\alpha}$$

同じ資料は、典型的なメモリやマイクロプロセッサで $\alpha = 1.5〜2$ としています [1] 事実 。概論1-4と同じ $D_0 = 0.1$個/cm² で比べると、次のようになります 本稿の計算 。

チップの面積	ポアソン	負の二項（$\alpha=2$）	負の二項（$\alpha=1.5$）
1 cm²	約90.5%	約90.7%	約90.8%
6 cm²	約54.9%	約59.2%	約60.4%

小さなチップではほとんど差がありませんが、大きなチップでは、欠陥が固まるぶん歩留まりが約4〜6ポイント高く見積もられます 本稿の計算 。それでも、大きなチップほど歩留まりが下がる傾向は変わりません 解説 。

- **「工程のゆらぎ」による損失**

MITの講義資料は、粒子のような局所的な欠陥とは別に、工程のゆらぎから生まれ、ウェハ上で**空間的な模様**を持つ全体的な歩留まりの損失があるとし、これを欠陥密度や臨界面積とは関係のない係数として扱うとしています [1] 事実 。たとえば、ウェハの縁だけで不良が多い、といった模様です 解説 。IRDSも、ウェハの**縁と裏面**が歩留まりに大きく影響することが分かってきたとしています [2] 事実 。

3. 技術編② — 欠陥を探す：検査

- **人の目から、自動の検査へ**

KLAは、1984年に発売した「KLA 2020」が、量産向けで**最初の自動のパターン付きウェハ検査装置**で、それまでの人の目による検査を置き換えたとしています（同社の説明）。検査を製造ラインの中（インライン）に持ち込み、工程への速い帰還を可能にして、歩留まりの管理を変えたとしています [6] 事実 。

隣のダイと比べる

ウェハの上には、同じ回路のダイが何百個も並んでいます。そこで、**隣どうしのダイの画像を比べ、違うところを欠陥の候補にする**という方法が使われます 解説 。KLAの1978年出願の特許は、フォトマスクの**2つのダイの違い**を光学的に見つける装置で、2つのダイの像を電気の信号にしてメモリにため、電子的に位置を合わせてから比べ、違いを示すとしています。従来の方法として、基準と比べる方法や、隣のダイどうしを比べる方法を挙げています [8] 事実 。

この方法なら、回路の「正解」の画像がなくても、同じはずのものが違っている場所を見つけられます 解説 。

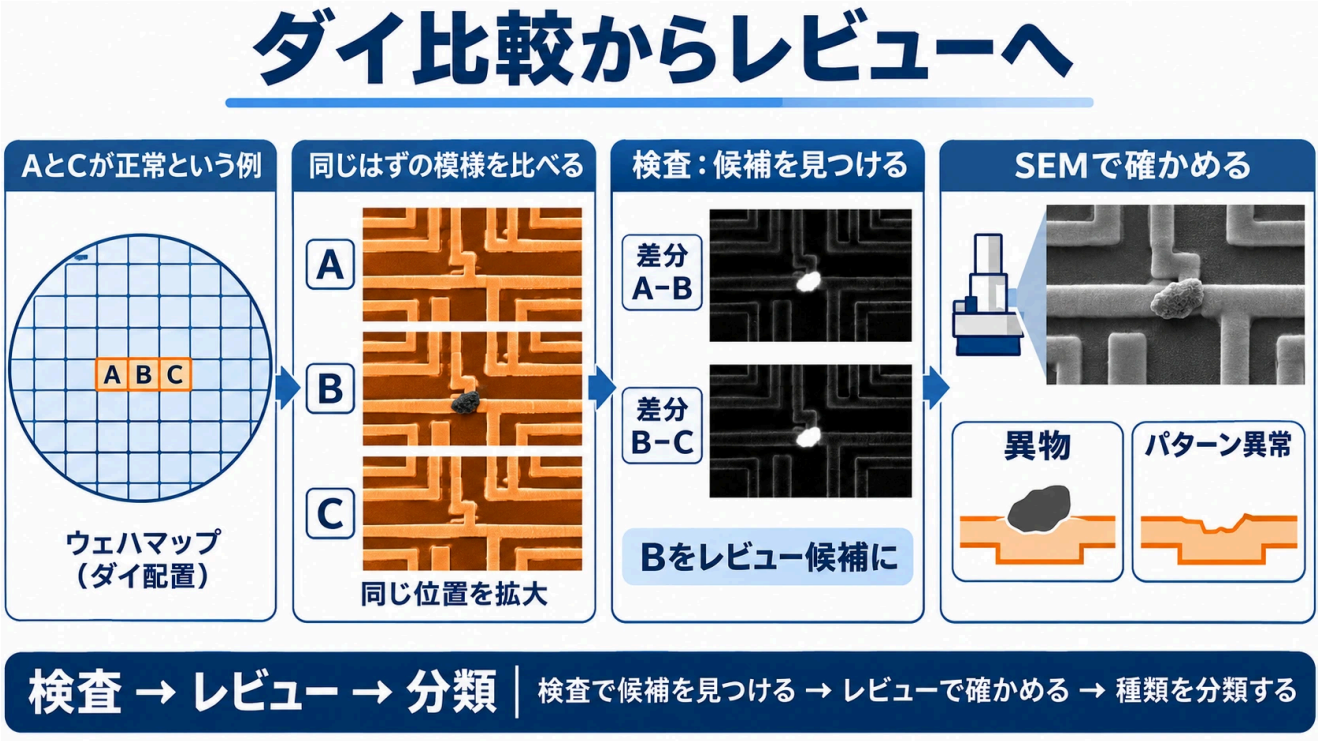


図2　隣のダイと比べて、違いを欠陥の候補にする（概念図）

図の読み方

2つのダイの像を位置合わせして比べるという原理はKLAの特許によります [8]。3つのダイで犯人を決める手順や、レビュー・分類の流れは、説明のための一般的な整理です。

明視野と暗視野

明視野は、主に正反射を含む光を集めて模様の像やコントラストを調べる方法です。暗視野は、主な正反射を避け、欠陥などで散乱された光を集める方法です。照明と集光の角度、波長、偏光を組み合わせて、目的の欠陥を見つけやすくします。KLAは、広帯域光の検査装置のほか、斜め照明のレーザー走査型検査装置を製造ラインの監視に用いると説明しています [7]。

KLAは、自社の広帯域の検査装置の光を、初代（1984年）のタングステンハロゲンランプ（波長700〜480 nm）から、最新の39xxシリーズの**260〜190 nm**の深紫外光まで、短い波長へと移してきたと説明しています [6] 事実 。

物理のツボ②：小さな欠陥の「検出」と、形を見分ける分解能

IRDSが議論する粒子の3.0 nmと、原稿が紹介するKLA検査装置の波長190〜260 nmを比べると、波長は約63〜87倍です [2][6]。

光の検査では、欠陥の形を細部まで写せなくても、散乱や反射の信号の変化を拾える場合があります。検出できるかどうかは、材料、模様の背景、散乱の強さ、集光、雑音、検査条件に依存します。この波長比だけで、装置があらゆる3 nmの欠陥を検出できると判断することはできません。

候補を詳しく調べるレビューでは、SEMなどを使って形や材質の手掛かりを得ます。埋もれた欠陥では別の手法を組み合わせることもあります。

速さも重要です。KLAが挙げる画像データ速度は、初代の毎秒0.8メガ画素から39xxシリーズの毎秒24.8ギガ画素へ、約3万1千倍という比較になります [6]。実際のウェハ処理速度は検査する範囲と条件にも依存します。

- **本物の欠陥と、「ニューサンス」**

感度を上げるほど、歩留まりに関係のない小さな違い（**ニューサンス**、厄介もの）や、偽の欠陥も大量に拾います。IRDSは、膨大なニューサンスと偽の欠陥の中から、**歩留まりに効く欠陥**を見分けることを、検査の近い課題に挙げています [2] 事実 。KLAは、2005年に検査装置の中で欠陥を自動で分類する機能を入れ、ニューサンスを除いて重要な欠陥に絞り込めるようにしたとしています [6] 事実 。同社の最近の装置は、深層学習で、注目すべき欠陥とニューサンスを分けるとしています [7] 事実 。

- **光の次は、電子と3D**

IRDSは、深い構造の内部、ボイド、埋もれた欠陥を調べる**3D検査**を優先課題に挙げています [2]。KLAは光学検査と電子線レビューを連携させる仕組みを説明しています [7]。ASMLがHMIブランドの電子線検査装置を製品化していることは同社の資料で確認できます [12]。経産省の市場区分で同社のシェアを構成する製品の詳細は、別途その市場定義に依存します。

4. 技術編③ — 測る：計測

検査が「おかしなところを探す」のに対し、**計測**は「決めた場所の寸法や厚さが、狙いどおりかを測る」ことです 解説 。IRDSの「計測」の章は、EUVやマルチパターニングで、**線の寸法（CD）・重ね合わせ・欠陥・材料の性質**の測定がそれぞれ難しくなっているとし、重ね合わせの許容幅は縮み続けて、歩留まりの制約になっているとしています [3] 事実 。

重ね合わせのずれは、下の層と上の層にそれぞれ**目印**（重ね合わせマーク）を作っておき、2つの中心がどれだけずれているかを測るのが基本の考え方です 解説 。

線の幅を、電子で測る：測長SEM

日本半導体歴史館によると、1980年代に縮小投影の露光でサブミクロンの加工ができるようになると、光学顕微鏡での寸法の測定は使えなくなりました。電子顕微鏡（SEM）は焦点深度と分解能で優れていましたが、電子線を当てると表面が帯電して像が乱れ、トランジスタも傷つくので、寸法の検査には向かないとされていました [5] 事実 。

日立（現・日立ハイテク）は、1972年に開発した電界放出型の電子銃を使い、**約1 keVという低い加速電圧**で帯電と損傷を抑えながら高い分解能で測れるようにして、1984年に**測長SEM「S-6000」**を開発しました。レンズの磁場を通して二次電子を検出し、自動で速く測れる装置にしました [5] 事実 。

IRDSは、3D NANDのチャネルホール（3-9）の**底の直径**を、加速電圧の高い（10 keVを超える）SEMで、製造ラインの中で測るようになっているとしています。ただし、そうした電子線は測った場所に電気的な損傷を与えることも知られています [3] 事実 。

光で測る：スキャトロメトリとエリプソメトリ

光で寸法を測る方法もあります。周期的に並んだ模様に光を当て、はね返った光の強さや偏りが波長でどう変わるかを測り、模様の断面の形をモデルで逆算します。これを**スキャトロメトリ**（光学的CD計測、OCD）と呼びます 解説 。IRDSは、顕微鏡が構造を「見る」のに対し、スキャトロメトリは**像を作らない**方法だと説明しています [3] 事実 。

膜の厚さや光学的な性質は、反射した光の**偏り（偏光）の変化**から求める**エリプソメトリ**で測ります 解説 。IRDSは、膜の屈折率と吸収を、露光に使う波長で分光エリプソメトリで測るのが理想だとしています。ただし、測った角度から光学定数を逆算する問題は、答えが一つに決まらないことがあると注意しています [3] 事実 。



フランス・トゥールーズの研究施設LAAS-CNRSのエリプソメーター（Commonsの説明による）。左の腕から偏りをそろえた光を斜めに当て、右の腕で反射した光の偏りの変化を測ります。中央の台にウェハを置きます 解説 。
画像：Guillaume Paumier / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0（掲載用に縮小・WebP化）

組み合わせて測る：ハイブリッド計測

1つの装置だけでは、すべてを正しく測れないこともあります。IRDSは、スキャトロメトリで線幅を求めるときに、側壁の角度や線の凸凹を、それが得意な別の装置（原子間力顕微鏡など）で測った値で補う、といった**ハイブリッド計測**の考え方を挙げ、AIと機械学習が測定と解析を速く、正確にしていると書いています [3] 事実 。

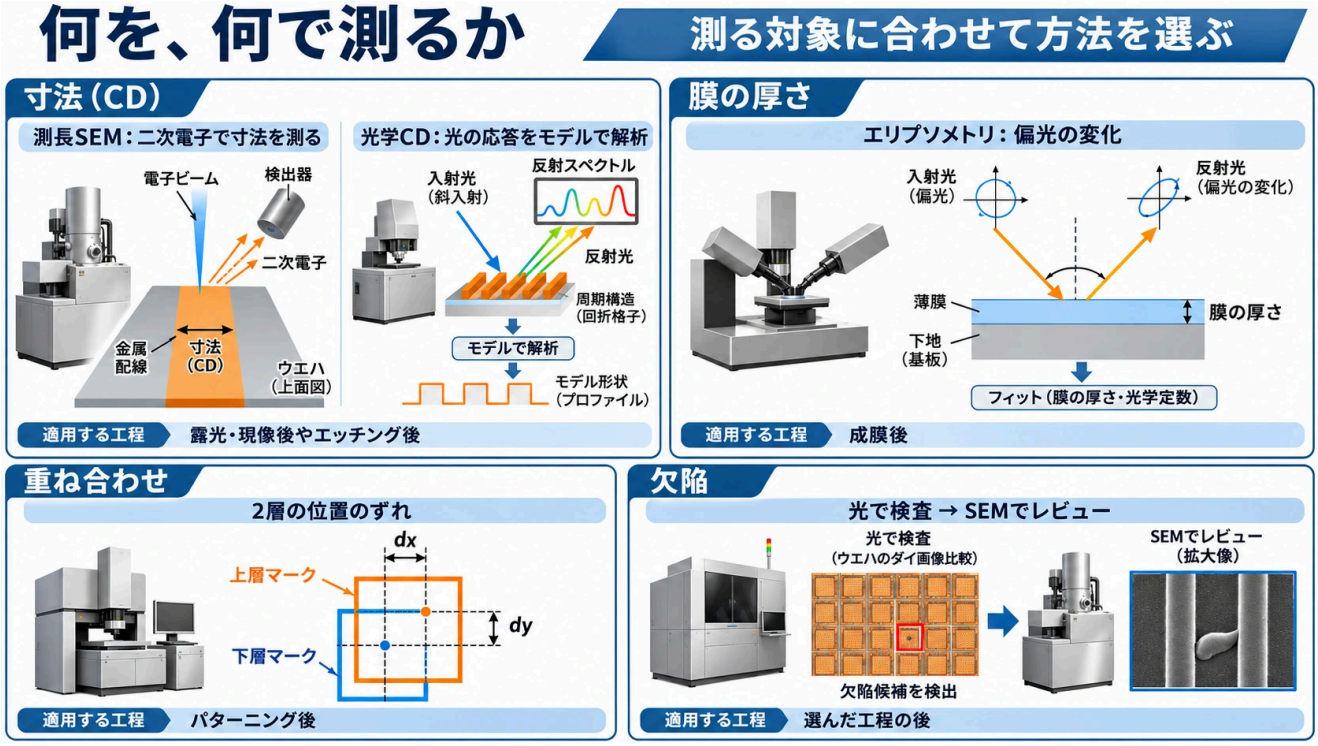


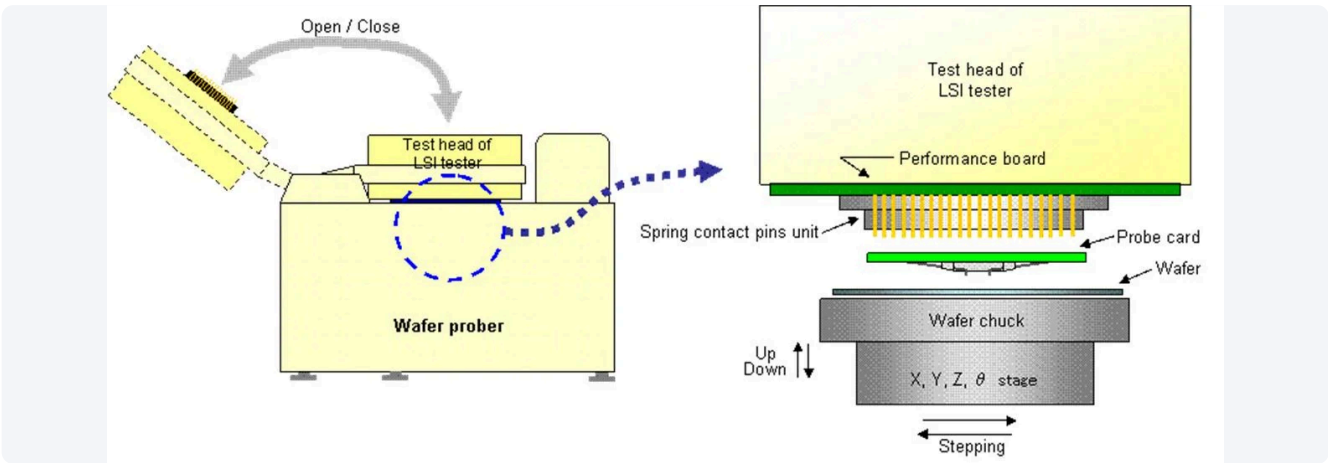
図3　何を、何で測るか：寸法・膜・重ね合わせ・欠陥（概念図）

図の読み方

測定の項目と方法はIRDSの「計測」の章と日本半導体歴史館の説明をもとにした整理です [3] [5]。どの工程の後に何を測るかは、工場と製品で違います。

5. 技術編④ — 電気で確かめる：テスト

最後は、電気のテストです。チップに切り分ける前に、**ウェハプローバー**で、細い針（プローブ）を各チップの電極に当て、テスターで電気の特性を調べます [9] 事実 。MITの講義資料は、配線の間隔を変えた短絡用・断線用の**テスト構造**を電気で測って、欠陥の大きさの分布を調べる方法を紹介しています [1] 事実 。



ウェハプローバーの図。右の拡大図では、上からLSIテスターのテストヘッド、針のついたプローブカード、ウェハ、ウェハを載せて縦横と回転に動く台が並び、台がウェハを1チップずつ動かして針に当てます（Commonsの説明・図中の注記による）。
画像：GUCCIN / Wikimedia Commons / CC BY-SA 3.0

6. 技術編⑤ — 原因を突き止める：歩留まり学習

データをつなぐ

欠陥を見つけるだけでは、歩留まりは上がりません。**どの工程で、どの装置で、なぜ生まれたのか**を突き止めて直す必要があります 解説 。IRDSは、従来の歩留まりの管理は、製造ラインの中の検査で欠陥を見つけて短い帰還のループを作り、歩留まりやテストの不良と結びつけることだったとしています。そのうえで、ハードウェアが影響を受ける前に兆しをつかむ「予防的な」管理のために、次のようなデータを工場全体でつないで歩留まりを予測する仕組みが必要だとしています [2] 事実 。

- 製造の実行システム（MES）とウェハの履歴
- 装置から流れ続けるデータ（トレース）
- 計測と欠陥のデータ
- 電気の特性のテスト（PCM）
- 歩留まり（ウェハプローブ・ビンソート・最終試験）
- 材料・施設・環境のデータ、故障解析、信頼性、装置の保守の記録

同じ章は、施設・設計・工程・電気・仮想計測の結果を歩留まりと結びつける**自動の解析**が、根本原因の分析と速い**歩留まり学習**に必要だとしています [2] 事実 。

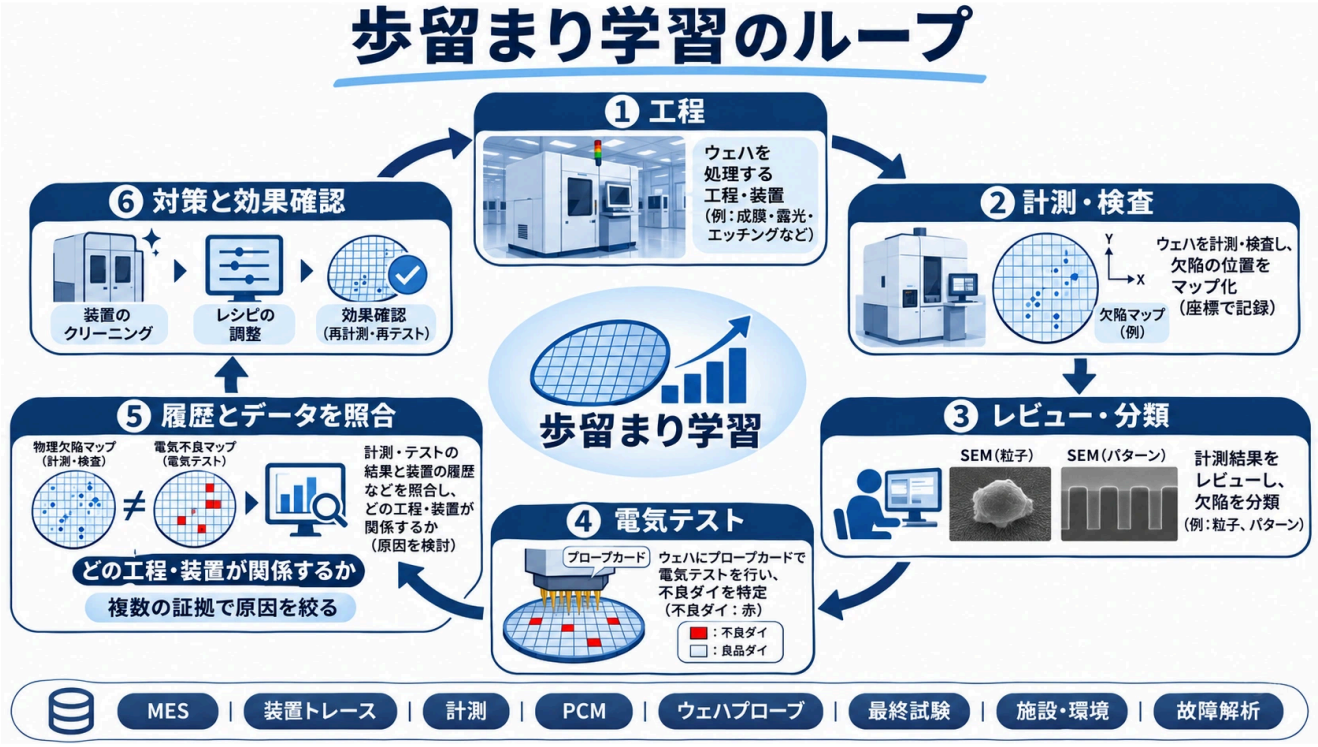


図4　歩留まり学習のループ：見つけ、確かめ、突き止め、直す（概念図）

図の読み方

データの種類と考え方はIRDSの「歩留まり向上」の章によります [2]。ループの段階は説明のための整理です。

なぜ、速さが大切か

KLAは年次報告書で、最先端の半導体工場の建設には**100億ドルを大きく超える**費用がかかり、歩留まりの立ち上げを速くして、競合より先に量産に入ることが、半導体メーカーの売上と利益に決定的だとしています [10] 事実 。同社は、2 nm世代では工程管理への投資の密度が高まっているとも書いています [10] 事実 。

7. 産業編① — 検査装置：KLAの独走

市場とシェア

経済産業省の資料（2025年12月公表、グローバルネットの資料をもとに作成、年の記載なし）は、検査装置の市場と会社別のシェアを次のように示しています [4] 事実 。

装置	市場	会社別のシェア
ウェハ表面検査装置	7,952億円	KLA 69%、ASML 10%、Applied Materials 6%、日立ハイテク 4%、Onto Innovation 4%、その他 6%
ウェハ外装検査装置	742億円	KLA 36%、Applied Materials 26%、上海精測 7%、その他 12%（ほかに日系企業の色の帯、社名なし）

ウェハ表面検査装置の市場は、3-11で見たCMP装置（4,242億円）の約1.9倍の大きさです 本稿の計算 。

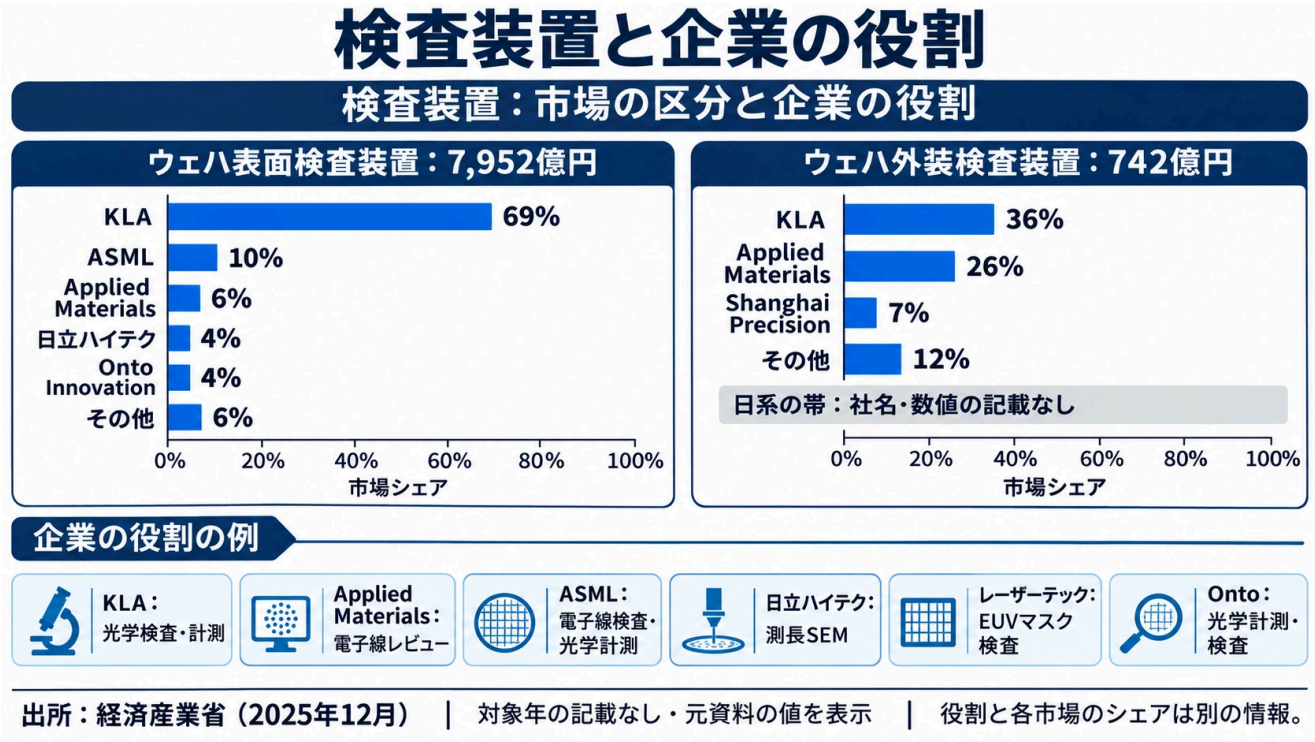


図5　検査装置の勢力図（概念図）

市場の数値の読み方
表面検査の掲載値の合計は99%なので、元の数値のまま表示しています。外装検査の「日系」の帯は、元原稿の説明に社名と数値がありません。図5ではその点を明記しています。装置区分の対象年は記載されていません。

図の読み方

市場の数値は元原稿が引用する経産省資料に基づきます [4]。企業の役割は各社の製品情報をもとにした例で、特定の市場区分のシェアとは対象が異なります。

- **KLA — 歩留まり管理の会社**

KLAの2026年6月期の売上は**135.8億ドル**、純利益は48.3億ドルです。売上の約23%は、保守などのサービスです [10] 事実 。同社は、1975年と1976年に創業したKLA InstrumentsとTencor Instrumentsが1997年に合併してできた会社で、検査・計測・ソフトウェアで、研究開発から量産まで、目標の歩留まりを達成するのを助けるとしています [10] 事実 。年次報告書は、競合として、Applied Materials、ASML、**日立ハイテク**、**レーザーテック**、Onto Innovationを挙げています [10] 事実 。

- **日本勢 — 測長SEMとEUVのマスク**

  - **日立ハイテク**：4章で見たように、1984年に測長SEMを製品化しました [5] 事実 。経済産業省の資料では、ウェハ表面検査装置で4%です [4] 事実 。
  - **レーザーテック**：EUV露光のマスク（3-7）の欠陥を、EUVと同じ13.5 nmの光で検査する装置を作っています。同社は、「ACTIS A150」を**世界初**のEUVパターンマスク欠陥検査装置だとし、High-NAのEUV露光に対応した「ACTIS A300」や、EUVマスクの元になる多層膜の板（ブランクス）の中の欠陥を13.5 nmの光で見つける「ABICS」も製品に並べています（同社の説明） [11] 事実 。マスクの欠陥は、そのマスクで露光するすべてのチップに写るので（3-7）、マスクの検査は特に重要です 解説 。

8. 産業編② — 素材の技術者の出番

素材の技術者の出番

計測と検査は、**材料の性質を知っていること**が前提の技術です 解説 。

- **光学定数のデータ**：膜の屈折率と吸収を、露光の波長で正しく知ること。同じ組成でも、非晶質か結晶かで性質が違う（[3]）
- **基準になる試料**：寸法や厚さの「ものさし」になる標準の試料。原子間力顕微鏡は、もともと測長SEMの校正に使われた（[3]）
- **電子線に強い材料**：電子線で測っても縮んだり傷ついたりしにくいレジストや膜（[3] [5]）
- **汚れの出ない材料**：超純水や薬液、部品から出る3 nm級の粒子を減らすこと。測れないほど小さい粒子は、出さない工夫が先になる（[2]）

9. 検査の限界と、これから求められること

いまの限界：5つの壁

ここまで見てきた方法にも、越えにくい壁があります 解説 。

- **小さすぎる欠陥**：3.0 nmのキラー粒子は、最先端の計測で見つけられる大きさをすでに下回っています。超純水では10年近くその状態です [2] 事実 。
- **光は形を写せない**：3 nmは、光の検査装置の波長（190〜260 nm）の60〜90分の1です 本稿の計算 。像としては写せず、散らばり方のわずかな違いを「候補」として拾うだけなので、何の欠陥かは電子で確かめます（3章） 解説 。
- **電子は試料を傷めることがあり、広い範囲には時間がかかる**：電子線は細かく見られますが、帯電や損傷を起こすことがあります [3] [5] 事実 。細かく見るほど、広い範囲を調べるには時間がかかります 解説 。
- **光の計測はモデル頼み**：スキャトロメトリやエリプソメトリは、測った光からモデルで形や厚さを逆算するので、答えが一つに決まらないことがあります [3] 事実 。
- **埋もれた欠陥**：深い穴の奥のすき間や埋もれた欠陥は、表面からは見えません [2] 事実 。

検査は、いつもつり合いの中にあります。感度を上げるほどニューサンスが増え、速く広く調べようとすれば、一つひとつを細かく見る時間が減って見逃しが増えます 解説 。だから、見つけられないほど小さい粒子は、見つけるより先に、出さない工夫が必要になります（8章） 解説 。

これからの課題

- **見えない欠陥**：3 nmのキラー粒子は、もはや計測で見つけられる大きさを下回っています [2] 事実 。
- **3Dの検査**：3D NANDや先端パッケージの、深い穴や埋もれた欠陥を見る技術 [2] [3] 事実 。
- **データで予測する**：工場中のデータをつなぎ、不良が出る前に兆しをつかむ歩留まりの予測 [2] 事実 。
- **確率的な欠陥**：EUVでは、光子のゆらぎによる確率的な欠陥とばらつき（3-7）が、新しい計測の課題です [3] 事実 。

10. まとめと次回予告

視点	ポイント
歩留まり	機能・パラメトリックなど。不良はパラメトリック・ランダム・面積依存
臨界面積	欠陥の中心が落ちると壊れる領域。最小寸法に近い欠陥が最も効く
キラー粒子	ロジックの最も重要な寸法の半分。3.0 nm（IRDS）
固まる欠陥	負の二項モデル、$\alpha = 1.5〜2$。6 cm²のチップで、ポアソンの約55%に対し約59〜60%（計算）
検査	隣のダイと比べる（KLAの1978年の特許）、明視野・暗視野、レビュー・分類、ニューサンス。KLA 2020（1984年）

視点	ポイント
光の限界	3 nmは波長の60〜90分の1（計算）。散らばり方の違いで見つけ、電子で確かめる
計測	測長SEM（日立 S-6000、1984年、約1 keV）、スキャトロメトリ、エリプソメトリ、重ね合わせ、ハイブリッド計測
歩留まり学習	工場中のデータをつなぎ、根本原因を突き止める（IRDS）
産業	表面検査7,952億円でKLA 69%。日立ハイテク・レーザーテック（EUVマスク）、ASML・Applied Materials・Onto

これで、第3部「工程をひとつずつ」は終わりです。次回からの**第4部「何を作るか（デバイス構造）」**では、ここまでの工程を組み合わせて作るトランジスタ（FinFETからGAA、CFETへ）、メモリ（DRAM・3D NAND）、パワー半導体を見ていきます。

11. 確認クイズ

1. 歩留まりにかかわる不良の3つの種類を挙げてください。

> **▼ 答えを見る**
>
> 線の幅などのずれによるパラメトリックな不良、ビア1個の不良のようなランダムな不良、キラー欠陥の粒子のような面積に依存する不良です。

2. 臨界面積とは何ですか。歩留まりに最も効くのは、どんな大きさの欠陥ですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> ある大きさの欠陥の中心が落ちると回路が故障する領域の面積です。小さな欠陥は臨界面積が小さく、大きな欠陥は数が少ないので、最小の寸法に近い大きさの欠陥が最も効きます。

3. IRDSは、致命的な粒子（キラー粒子）の大きさをどう定義していますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> ロジックの最も重要な寸法の半分です。電気的に効く最も重要な粒子では3.0 nmです。

4. 欠陥が固まって起きると、大きなチップの歩留まりの見積もりはどう変わりますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 1つのチップに欠陥が集まり、ほかのチップが助かるので、ランダムに起きると仮定したポアソンのモデルより高くなります。D_0＝0.1個/cm²、6 cm²のチップでは、約55%が約59〜60%になります（α＝1.5〜2の計算）。

5. 「隣のダイと比べる」検査の利点は何ですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 同じ回路のダイが並んでいるので、正解の画像がなくても、同じはずのものが違っている場所を欠陥の候補として見つけられることです。

6. 光の波長より何十倍も小さい欠陥を、光の検査で見つけられるのはなぜですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 欠陥の形を写すのではなく、欠陥があるところで光の散らばり方や明るさがわずかに変わることを、隣のダイとの比較で拾うからです。何の欠陥かは電子顕微鏡で確かめます。 検出可能な大きさは、材料・背景・雑音などの条件に依存します。

7. 測長SEMが実用になるまで、電子顕微鏡が寸法の検査に向かないとされていた理由と、日立の解決策を説明してください。

> **▼ 答えを見る**
>
> 電子線で表面が帯電して像が乱れ、トランジスタも傷つくからです。日立は電界放出型の電子銃を使い、約1 keVの低い加速電圧で、帯電と損傷を抑えながら高い分解能で測れるようにしました（1984年、S-6000）。

8. 歩留まりの根本原因を突き止めるために、どんなデータを結びつけますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 製造の履歴（MES）、装置のトレース、計測と欠陥のデータ、電気特性のテスト（PCM）、ウェハプローブや最終試験の歩留まり、材料・施設・環境のデータ、故障解析などです。

9. ウェハ表面検査装置で最も大きなシェアを持つ会社と、そのシェアは。

> **▼ 答えを見る**
>
> 米国のKLAで、69%です（経済産業省の資料。年の記載なし）。

12. 用語集

計測
決めた場所の寸法・膜の厚さ・層のずれなどが、狙いどおりかを測ること。

検査
ウェハの上の異物やパターンの崩れなど、欠陥を探すこと。

歩留まり
作ったチップのうち良品の割合。

パラメトリックな歩留まり
速さなどの性能の基準を満たすチップの割合。

欠陥密度（D_0）
単位面積あたりの致命的な欠陥の数。

臨界面積
ある大きさの欠陥の中心が落ちると回路が故障する領域の面積。

キラー欠陥（キラー粒子）
チップを不良にする欠陥や粒子。

負の二項モデル
欠陥密度がばらつく（欠陥が固まる）ことを取り入れた歩留まりのモデル。

ダイ比較
隣り合うダイの画像を比べ、違うところを欠陥の候補にする検査の方法。

明視野・暗視野
はね返った光で像を作る方法（明視野）と、欠陥で散らばった光だけを拾う方法（暗視野）。

レビュー
検査で見つけた欠陥の候補を、電子顕微鏡などで拡大して確かめること。

ニューサンス
検査で拾われるが、歩留まりに関係のない違いや偽の欠陥。

測長SEM（CD-SEM）
電子線で線の幅などの寸法を測る走査電子顕微鏡。

スキャトロメトリ（OCD）
周期的な模様に当てた光の反射の変化から、模様の断面の形を逆算する計測。

エリプソメトリ
反射した光の偏り（偏光）の変化から、膜の厚さや光学的な性質を求める計測。

重ね合わせ（オーバーレイ）
上の層の模様と下の層の模様の位置のずれ。

ハイブリッド計測
複数の計測の結果を組み合わせて、より正しい値を求める方法。

ウェハプローバー
プローブの針をウェハ上のチップの電極に当て、テスターで電気の特性を調べる装置。

PCM
ウェハ上のテスト用の構造で、工程の電気的な特性を測ること。

歩留まり学習
不良の原因を突き止めて直し、歩留まりを上げていくこと。

13. 参考資料（一次情報）

1. **MIT OpenCourseWare**「2.830J/6.780J Control of Manufacturing Processes, Lecture 10 Yield Modeling（2008年。May & Spanos の教科書、Stapper & Rosner 1995 を引用）」 — https://ocw.mit.edu/courses/2-830j-control-of-manufacturing-processes-sma-6303-spring-2008/4aff1e21de13870355ef44dbe71f45c6_lecture10.pdf
2. **IRDS（国際デバイス・システム・ロードマップ）**「2024 Edition, Yield Enhancement（PDFのp.9、p.13、p.27〜28）」 — https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2024/2024IRDS_YE.pdf

3. **IRDS（国際デバイス・システム・ロードマップ）**「2024 Edition, Metrology（PDFのp.7、p.15〜16、p.24）」 — https://irds.ieee.org/images/files/pdf/2024/2024IRDS_MET.pdf
4. **経済産業省**「半導体・デジタル産業戦略の今後の方向性（2025年12月23日）p.5（製造装置別企業シェア）」 — https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital/0014/handeji14-3.pdf
5. **日本半導体歴史館**「1984 Critical Dimension-Scanning Electron Microscope (CD-SEM)（2022年5月28日版）」 — https://shmj.or.jp/english/pdf/em/exhibi2448E.pdf
6. **KLA**「BBP 40th Anniversary（広帯域プラズマのパターン付きウェハ検査装置の40年）」 — https://bbp.kla.com
7. **KLA**「Defect Inspection and Review（製品ページ、2026年11月19日閲覧）」 — https://www.kla.com/products/chip-manufacturing/defect-inspection-review
8. **K. Levy, P. Sandland（KLA Instruments）**「米国特許 US 4,247,203 Automatic photomask inspection system and apparatus（1978年4月3日出願、1981年1月27日登録）」 — https://patents.google.com/patent/US4247203A/en
9. **Advantest**「Wafer Inspection—A Crucial Step in Semiconductor Manufacturing（Semiconductor Lab、2026年10月13日時点）」 — https://www.advantest.com/en/semiconductor-basics/wafer-inspection/
10. **KLA**「Form 10-K（2026年6月期、Item 1）」 — https://www.sec.gov/Archives/edgar/data/319201/000031920126000027/klac-20260630.htm
11. **レーザーテック**「半導体の製品一覧（ACTIS A300・A150、ABICS E120）」 — https://www.lasertec.co.jp/products/semiconductor/
12. ASML, HMI eScan 1100（電子線検査の製品情報） https://www.asml.com/en/en/products/metrology-and-inspection-systems/hmi-escan-1100
13. Applied Materials, SEMVision H20（電子線レビューの製品情報） https://www.appliedmaterials.com/us/en/product-library/semvision-h20-defect-analysis.html
14. Onto Innovation, Metrology（OCD・膜・重ね合わせの製品情報） https://ontoinnovation.com/product-categories/metrology/

14. 主張と出典の対応表

本文の主張	根拠	区分
不良の3種類、歩留まりの数え方、粒子と欠陥・断線と短絡、臨界面積と最小寸法近くの欠陥、負の二項モデル・固まりのパラメータ α・1.5〜2・死んだチップは2度死なない、全体的な損失と空間的な模様、テスト構造	MIT [1]	事実
キラー粒子は最も重要な寸法の半分・3.0 nm・計測で見つけられる大きさより小さい（超純水で約10年）、縁と裏面、ニューサンスと偽の欠陥、3D検査、従来の管理と予防的な歩留まり予測・つなぐデータ、自動の解析と歩留まり学習	IRDS 歩留まり向上 [2]	事実
CD・重ね合わせ・欠陥・材料の測定の課題と重ね合わせの許容幅、高エネルギーSEMで3D NANDの底の直径・損傷、スキャトロメトリは像を作らない、分光エリプソメトリと逆問題、ハイブリッド計測とAI、AFMは校正用、確率的な欠陥	IRDS 計測 [3]	事実

本文の主張	根拠	区分
ウェハ表面検査装置7,952億円と各社のシェア、ウェハ外装検査装置742億円と各社のシェア	経済産業省 [4]	事実
光学顕微鏡の限界、SEMの帯電と損傷、1984年S-6000、1972年のFE電子銃・約1 keV・二次電子の検出・自動化	日本半導体歴史館 [5]	事実
KLA 2020（1984年）は最初の自動検査（同社）、インライン化、波長700〜480 nm→260〜190 nm、データ速度0.8メガ→24.8ギガ画素、2005年の自動分類	KLA [6]	事実
光と電子線、斜め照明のレーザー走査型、深層学習でニューサンスと分ける、電子線レビューとの連携	KLA [7]	事実
2つのダイの像を位置合わせして比べる、従来法に隣のダイどうしの比較	KLAの特許 [8]	事実
ウェハプローバーで針を電極に当て、切る前に電気特性を評価	Advantest [9]	事実
売上135.8億ドル・純利益48.3億ドル・サービス約23%、1997年の合併、歩留まりの達成を助ける、工場は100億ドル超・立ち上げの速さが決定的、2 nmで工程管理の密度、競合	KLA 10-K [10]	事実
ACTIS A150は世界初（同社）、A300はHigh-NA対応、ABICSは13.5 nmの光でブランクスの欠陥	レーザーテック [11]	事実
歩留まりの比較表、波長の60〜90分の1、データ速度約3万1千倍、CMP装置の約1.9倍	本稿の計算	本稿の計算
ASMLのHMI電子線検査製品	ASMLの製品情報 [12]	事実

最終更新：2026年11月19日／技術は大学の講義資料（MIT）、IRDS（国際デバイス・システム・ロードマップ）、日本半導体歴史館、特許、企業の情報は各社の年次報告書（米国SEC提出書類）・製品ページ・解説ページ、会社別のシェアは経済産業省を出典としています。「最初」「世界初」などの表現は各社自身の発表で、本文中にそのことを明記しています。物理の一般原理の説明と、本稿の計算・推測は、本文中のタグで区別しています。

© 2026 Troy Technical
当サイトの文章・図版・動画のうち、著作権法で保護される部分の無断転載・再配布・再アップロードを禁じます。ただし、法令上認められる引用等を除きます。
引用資料・商標等の権利は各権利者に帰属します。記事へのリンクによるご紹介は歓迎します。転載・二次利用についてはお問い合わせください。

図はImageGenによる説明用の模式図です。図1は追加された導電物と欠損した金属を描き分け、図2はA・Cが正常な場合の比較例です。市場シェアは元原稿の値と区分を引き継いでいます。