SEMICONDUCTOR FRONT-END · PART 3-11

CMP（化学機械研磨）
化学で柔らかくし、
機械で削って、平らにする

膜を付け、型紙を写し、削り、打ち込む。これを繰り返すと、ウェハの表面には凸凹が積み上がっていきます。凸凹のままでは、次の層の露光でピントが合わず、配線も途中で細くなります。そこで使われるのが**CMP（化学機械研磨）**です。研磨液（スラリー）で表面を化学的に柔らかくし、回転するパッドで高い所から削って、ウェハ全体を平らに仕上げます。この回では、「汚い工程」とされた研磨がIBMで半導体の工程になった経緯、削れる速さを決める簡単な式、高い所だけが速く削れる理由、狙った膜で止める工夫と削りすぎの失敗、そして装置の米国と日本、研磨液とパッドの日本の強さを見ていきます。

半導体前工程シリーズ 第3部 3-11／難易度 ★★☆
事前学習：3-3、3-4、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 — なぜ平らにするのか
3. 技術編② — 「汚い工程」が、半導体の工程になるまで
4. 技術編③ — 装置と消耗品のしくみ
5. 技術編④ — 化学 × 機械：高い所から削れる
6. 技術編⑤ — 狙った膜で止め、削りすぎない
7. 技術編⑥ — 傷と、残った粒
8. 産業編① — 装置：米国と日本の2社で8割超
9. 産業編② — 研磨液とパッド：日本が強い消耗品
10. これから求められること
11. まとめと次回予告
12. 確認クイズ
13. 用語集
14. 参考資料（一次情報）
15. 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

- 半導体の製造で、なぜ表面を平らにする必要があるのかを説明できる
- CMPが「化学」と「機械」を組み合わせて削るしくみと、装置の主な部品の役割を説明できる
- 削れる速さを決める Preston の式を使って、凸部だけが速く削れる理由を説明できる
- 狙った膜で止める工夫（選択比・止めの膜）と、ディッシング・エロージョンという削りすぎの失敗を説明できる
- CMPの装置と消耗品で、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

- 膜を重ねるほど、ウェハの表面には凸凹がたまります。凸凹は露光のピント（**焦点深度**）を外し、配線を段差の角で細くします。**CMP**は、研磨液（**スラリー**）の化学の力と、回転する**パッド**の機械の力で表面を削り、ウェハ全体を平らにする方法です。Cornell大学の資料は、CMPを「唯一の全体的な平坦化の方法」とし、CMP以前は配線が3〜4層までだったのに対し、CMPで7〜8層が可能になったと書いています（2007年の資料）。
- もとはガラスやシリコンウェハを磨く技術で、半導体の工程に持ち込むには「汚すぎる」と考えられていました。IBMの**Klaus Beyer**は1983年1月、ガラスで覆った試作ウェハを研磨台で磨いて平らにできることを見つけ、IBMで製品のウェハに使われるようになりました。削れる速さはおおよそ**押す圧力 × 速さ**に比例し（Prestonの式）、パッドが当たる**凸部ほど速く削れる**ことが平らになる理由です。
- 経済産業省の資料では、CMP装置の市場は4,242億円で、米国の**Applied Materials**が51%、日本の**荏原製作所**が34%です。研磨液とパッドでは日本の会社のシェアが高く、2023年でCMPスラリーの51%、CMPパッドの72%を日本の会社が占めます。

2. 技術編① — なぜ平らにするのか

凸凹は、層ごとに積み上がる

3-3・3-4で見たように、成膜では下の形に沿って膜が付きます。Cornell大学のナノ加工施設の入門資料は、トランジスタの上に付けた絶縁膜（酸化シリコン）は**下の段差をそのまま写し**、場合によっては段差をさらに大きくすると説明しています [3] 事実 。その上に配線の金属を付けると、段差の角で金属が薄くなり、配線の断面積が減って**抵抗が上がります** [3] 事実 。

もう一つの問題は露光です。3-5で見たように、細かい模様を描くために開口数（NA）の大きい露光装置を使うほど、ピントが合う深さの幅（**焦点深度**）は狭くなります。Purdue大学の講義資料は、焦点深度が λ/NA^2 に比例する（λは光の波長）ことを示しています [4] 事実 。表面に高い所と低い所があると、その両方にピントを合わせることが難しくなります [3] 事実 。

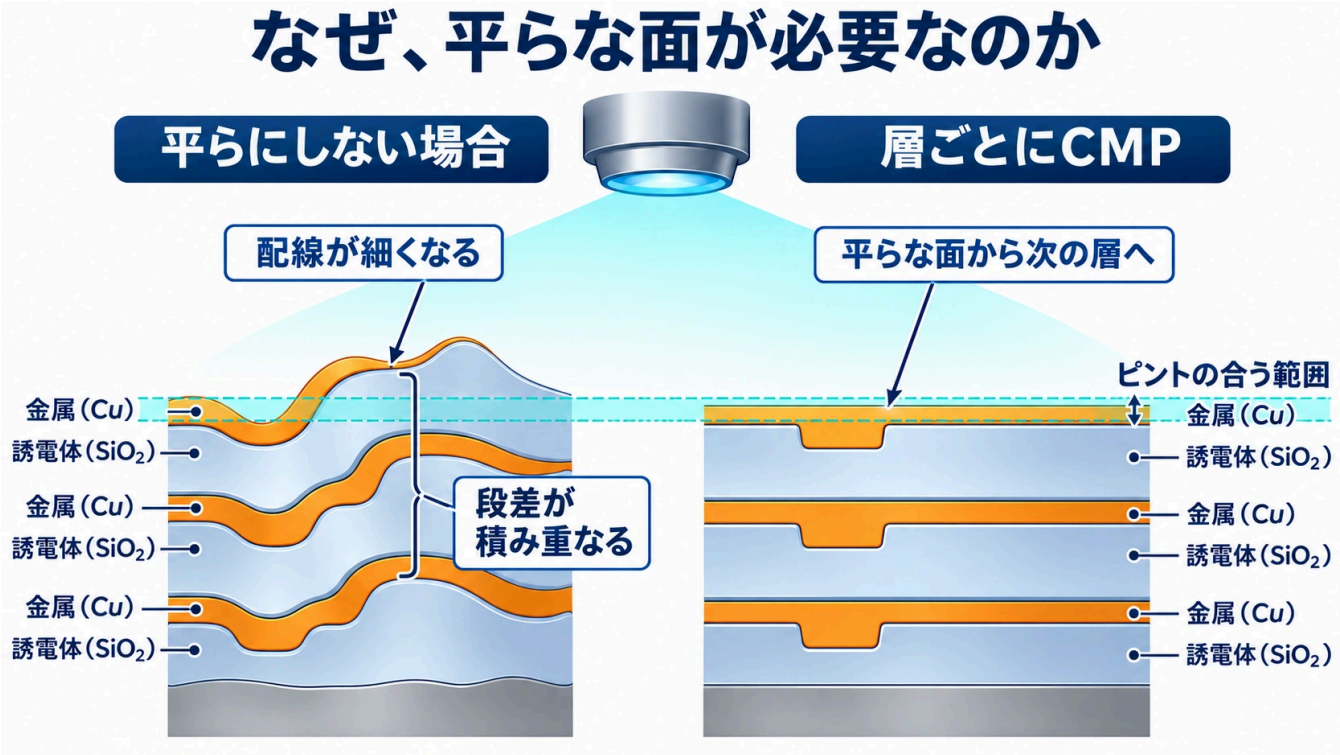


図1　平坦化しないと：凸凹が積み上がり、ピントが合わない（概念図）

図の読み方

焦点深度が λ/NA^2 に比例する関係は、Purdue大学の講義資料によります [4]。層の数は、Cornell大学の2007年の資料の記述です [3]。図の段差の大きさは説明のための模式で、実寸の比ではありません。

- **「局所的」と「全体的」**

Purdue大学の講義資料は、平坦化の度合いを、何もしない状態から、角を丸める「なめらか化」、部分的な平坦化、局所的な平坦化、そして**全体的な平坦化**までの段階に分けています。磨く前と後の段差の比（**段差比**）を小さくし、平らになる範囲（**平坦化距離**）を長くするのが目標です [4] 事実 。同じ資料は、CMPがマイクロメートルの範囲（局所）とミリメートルの範囲（全体）の両方を平らにする方法だとしています [4] 事実 。

- **CMPより前の方法**

CMPより前にも、平らにする工夫はありました [1] [3] [4] 事実 。

方法	やり方	弱点
ガラスのリフロー（BPSG）	ホウ素とリンを入れて融けやすくした酸化膜を、約1,000 ℃で少し流す	短い距離しか平らにならない
塗布ガラス（SOG）	液体を塗って広げ、焼き固める	膜の質が熱酸化膜より悪い。厚い所と薄い所の縮み方の違いで段差が残る
エッチバック	レジストや塗布ガラスで凹みを埋めてから、全体を削る	制御が難しい

Cornell大学の資料は、これらの方法の最大の問題は、どれも**局所的な平坦化**にとどまり、チップの中で模様の密度が違う場所の間には高さの差が残ることだったとしています [3] 事実 。CMPは、膜を最終的に必要な厚さより厚く付け、段差がなくなるまで削り戻します。これを配線の層ごとに繰り返せます [3] 事実 。

3. 技術編② — 「汚い工程」が、半導体の工程になるまで

1983年1月、研磨台へ

CMPを半導体の工程に持ち込んだのは、IBMの物理化学者 Klaus Beyer です。2024年の講演資料（Beyer 本人の文章を含む）によると、Beyerは1968年にIBMに入り、1981年にウェハの製造部門に移って、研磨液が付いたウェハをブラシで洗うときにできる**微小な傷**の問題を担当しました。当時の大手の半導体会社はシリコンの結晶を自社で育てていたので、IBMの中にウェハの研磨部門がありました [1] 事実 。

Beyerは、溝にガラスを埋めて素子を分ける構造の表面にできる「こぶ」の問題にも関わっていました。ガラスを流して平らにする方法は短い距離にしか効かず、広い範囲では盛り上がりが残りました [1] 事実 。

本人の文章によると、**1983年1月**、最後の手段として、流したガラスで覆った溝のウェハを、シリコンウェハを作る部門の**研磨台**に持ち込みました。研磨は激しく汚しますが、得意にしていた超音波（メガソニック）の洗浄で汚れを落とすと、顕微鏡で見た表面は、それまで見たことのないほど**全面が平ら**でした [1] 事実 。

Beyerは、「受け入れられない汚い工程」を使っていると自覚していたので、**2週間は誰にも話さなかった**と書いています。IBMの、上層部に直接相談できる制度を使って提案すると、上層部は関心を示し、小さなチームが作られました。約10か月、実際のデバイスのウェハで調べて問題が見つからず、IBMは製品のウェハにCMPを使うことを認めました [1] 事実 。Beyerは、この経験の教訓として、「機械的な研磨は汚すぎる」という思い込みから自由だったことを挙げています [1] 事実 。

特許：「上の膜を、下の膜より速く削る」

IBMは1985年10月28日に、Beyerら6人を発明者とする特許を出願し、1990年7月31日に米国で登録されました（US 4,944,836） [2] 事実 。請求項1は、次の流れです [2] 事実 。

1. 凸凹のある1つめの層（金属か絶縁膜）を作る
2. その上に、もう一方の材料の2つめの層を付ける（下の凸凹に沿う）
3. **2つめの層を、1つめの層より速く削る**ように化学機械研磨し、両方の上面がほぼ同じ高さになるまで続ける

特許の要約は、絶縁膜にあけた穴に金属を埋め、穴の外の金属だけを除く例を挙げています。金属を絶縁膜よりずっと速く削る研磨液を使うので、絶縁膜が**自動的な止め**になります [2] 事実 。請求項には、アルミナやシリカの粒を分散させた研磨液、pHが約3未満の酸性の液、アルミニウム系の金属と酸化シリコンの組み合わせ、間に止めの膜を挟むこと、工程を繰り返すことも書かれています [2] 事実 。

この「絶縁膜に溝や穴を掘り、金属を埋めて、上の余分を削る」やり方は、のちの**ダマシン**（象嵌）配線の考え方そのものです 解説 。Cornell大学の資料は、IBMが1980年代後半に、**配線の層を増やすために**CMPを発明したとし、もとは Chemical Mechanical **Planarization**（化学機械平坦化）と呼ばれていたと書いています [3] 事実 。

研磨そのものは、ずっと古い

レンズや板ガラスの研磨は古くからの技術です。削れる速さを表す Preston の式は、1927年のガラスの研磨の研究（英国のガラス技術の学会誌）にさかのぼります [4]。日本のフジミインコーポレーテッドは、1960年に光学ガラス向けの酸化セリウムの研磨材を、1967年にシリコンウェハ用の研磨材を発表しています [1][2] 事実 。CMPは、こうしたウェハの研磨技術を、配線の層を平らにする工程に持ち込んだものです 解説 。

4. 技術編③ — 装置と消耗品のしくみ

回る台に、ウェハを下向きに押し付ける

CMPの装置の基本の形は、次のとおりです [3][4] 事実 。

- **テーブル（プラテン）**：回転する大きな円盤。上に**研磨パッド**を貼る
- **研磨パッド**：ポリウレタンなどの樹脂でできた、細かい穴のあるシート
- **研磨ヘッド（キャリア）**：ウェハを**表を下にして**持ち、パッドに押し付けながら回す。周りを**リテーナーリング**で囲み、ウェハが飛び出さないようにする
- **スラリー**：砥粒（研磨の粒）と薬液を混ぜた研磨液。パッドの上に流し続ける
- **コンディショナー**：ダイヤモンドの粒を埋め込んだ円盤で、パッドの表面を目立てする

Cornell大学の2007年の資料が示す当時の例では、押す圧力は**4〜10 psi**が一般的で、この例では低すぎる圧力で浮き上がり、高すぎる圧力で破損の危険があると説明されています。実際の許容範囲は装置・膜・レシピにより異なります [3] 事実 。1 psiは約6.9 kPaなので、約28〜69 kPa、大気圧（約101 kPa）の3割〜7割ほどの圧力です 本稿の計算 。

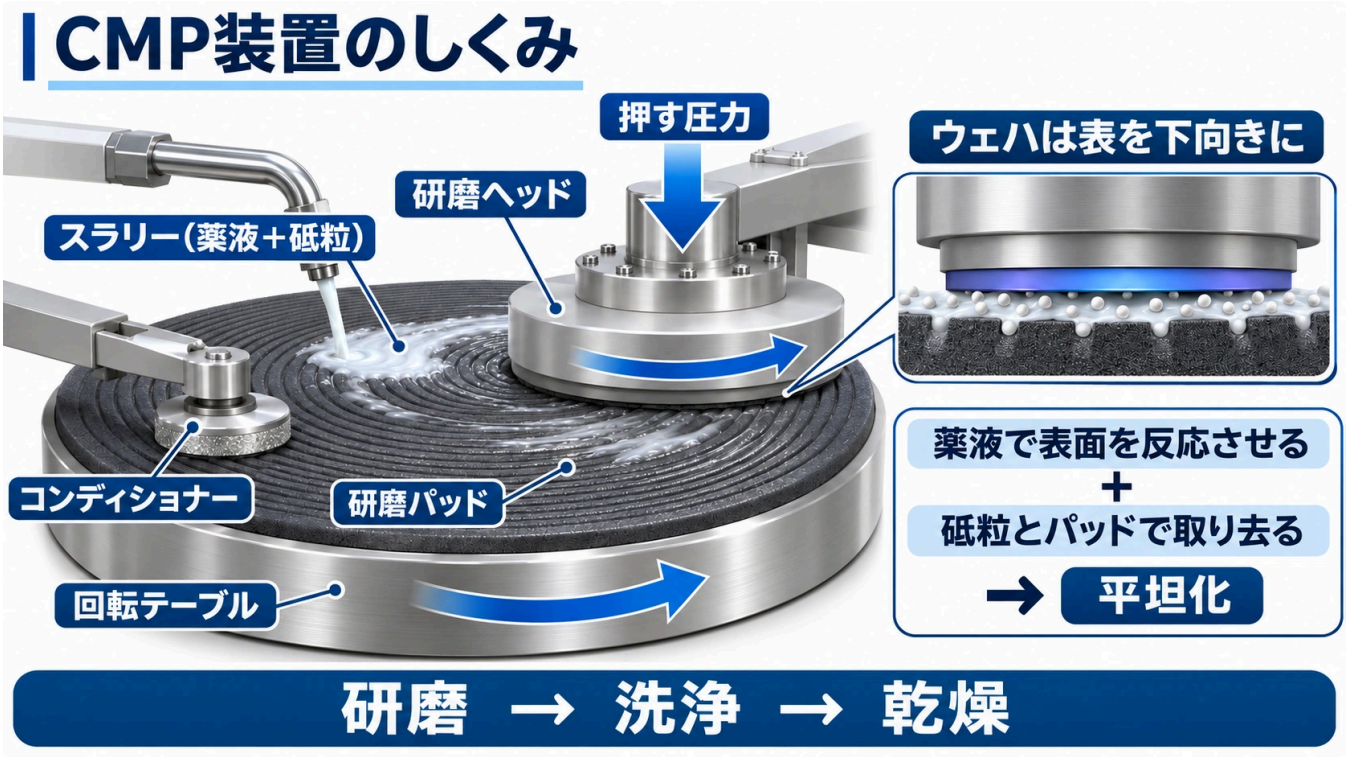


図2　CMP装置のしくみ：テーブル・パッド・ヘッド・スラリー・コンディショナー（概念図）

図の読み方

部品の名前と役割は、Cornell大学とPurdue大学の資料によります [3] [4]。実際の装置は、テーブル・ヘッドの数や配置がメーカーと機種で違います。



CMPで、パッドの表面を整える「コンディショナー」（Chiaping の型番108）。ダイヤモンドの粒を埋め込んだ円盤で、使ううちに表面がつるつるになるパッドをこすって、新しい面を出します（Commonsの説明による）。
画像：cpxmn / Wikimedia Commons / CC BY-SA 2.0（掲載用に縮小・WebP化）

- **消耗品の中身**

Purdue大学の講義資料は、代表的な条件を次のように示しています [4] 事実 。

	酸化膜を磨く	金属を磨く
砥粒	シリカ	アルミナ
薬液	水酸化カリウム・アンモニア水（アルカリ性）	硝酸鉄（酸化剤）
粒の大きさ	100〜250 nm	180〜280 nm
pH	10.5〜11.3	4.1〜4.4
流量	毎分250〜1,000 mL	毎分50〜100 mL

パッドは、使ううちに表面がつるつるになり（**目つぶれ**）、削れる速さが落ちていきます。そこで、ダイヤモンドのディスクでこすって、新しい面を出します。これを**パッドコンディショニング**（目立て）と呼び、条件を合わせれば削れる速さを安定させられます [3] 事実 。

● 磨いて、洗って、乾かして出す

CMPのあとは、ウェハに砥粒が残ります。Cornell大学の資料は、ウェハは磨いたあと**乾かさずに濡れたまま**洗浄まで運ぶ必要があり、一度乾くとスラリーは機械的にほとんど取れなくなると説明しています。また、砥粒は静電気でウェハに付いているので、水ですすぐだけではほとんど取れません。そこで、柔らかいスポンジ状の樹脂（PVA）の**ブラシ**でこすり、薄いアンモニア水で静電気の引き合いを弱めます [3] 事実 。

量産の装置は、研磨と洗浄・乾燥を1台にまとめています。たとえば Applied Materials の Reflexion LK Prime は、研磨パッド4枚、研磨ヘッド6個、洗浄室8つ、乾燥室2つを備えています [8] 事実 。

物理のツボ①：削れる速さは「圧力 × 速さ」— Preston の式

削れる速さ（RR：1分あたりに削れる厚さ）は、おおよそ次の式で表されます。もとは1927年のガラスの研磨の研究で、Purdue大学の講義資料が「最も簡単な（そしておそらく唯一の）CMPのモデル」として紹介しています [4] 事実 。

$$RR = Kp \times P \times V$$

- P：ウェハをパッドに押し付ける圧力
- V：パッドとウェハの相対的な速さ
- Kp：Preston係数。削る材料・スラリー・パッドで決まる

同じ資料の実験の図では、押す力を強くしても、テーブルの回転を速くしても、削れる速さはほぼ直線的に増えています [4] 事実 。ただし、この式で予測できるのは大まかな傾向だけで、ウェハの中のむらや、模様の密度による違いまでは予測できません [4] 事実 。

この式は、「同じ場所を、どれだけ強く、どれだけの距離こすったか」に比例して削れる、と読めます 解説 。圧力 × 速さ × 時間 は、こすった距離に押す圧力をかけたものだからです。

物理のツボ②：なぜ、ヘッドとテーブルを同じ向きに回すのか

Cornell大学の資料は、ヘッドはテーブルと**同じ向き**に回ると書いています [3]。Purdue大学の資料は、ヘッドとテーブルの回転数を同じにすると、ウェハ上の相対速度が一定になるとしています [4] 事実 。

理由を計算で確かめます。テーブルの中心からヘッドの中心までの距離を d、テーブルとヘッドの角速度をそれぞれ ω_p、ω_w とします。ウェハの中心から r だけ離れた点で、パッドの速さとウェハの点の速さの差（相対速度）を、ベクトルで引き算すると次のようになります 本稿の計算 。

相対速度 $= \omega_p \times d + (\omega_p - \omega_w) \times r$

$\omega_p = \omega_w$（同じ向き・同じ回転数）なら第2項が消え、相対速度は**ウェハのどの点でも $\omega_p \times d$** の一定値になります 本稿の計算 。Preston の式で、削れる速さは速さに比例するので、相対速度による削れ方の差を減らせます。実際には圧力分布・パッド・薬液・縁の影響も残ります 解説 。

仮にテーブルの回転を毎分70回（講義資料の実験の条件）、中心間の距離を20 cmとすると、相対速度は $2\pi \times 70 \div 60 \times 0.20 \fallingdotseq$ **毎秒約1.5 m** です 本稿の計算 。中心間の距離は仮定の値です。

実際には、Purdue大学の資料が示すように、ヘッドの回転数をテーブルに近づけ、さらに超えていくと、ウェハの中心と縁で削れる速さの差が広がることがあります [4] 事実 。講義資料は、ウェハを柔らかい膜（メンブレン）で押し、リテーナーリングにも圧力をかけるように改良したヘッドで、縁の削れ方のむらを抑える例を示しています [4] 事実 。

5. 技術編④ — 化学 × 機械：高い所から削れる

- **化学で柔らかくし、機械で取り去る**

酸化膜（SiO_2）のCMPでは、何が起きているのでしょうか。Purdue大学の講義資料は、①スラリーを流す、②水と水酸化物イオン（OH^-）が表面に届く、③機械的な力で粒が押し付けられる、④表面の反応と削り取り、⑤できたもの（$Si(OH)_4$）を運び去る、の5段階で説明しています [4] 事実 。アルカリ性の液の水酸化物イオンが酸化膜の表面を**柔らかくし、溶かし**、そこを粒とパッドがこすり取ります [4] 事実 。

STIのCMPを扱った総説によると、酸化シリコンの表面の Si–O–Si の結合は水と反応し、**$Si(OH)_4$**として外れていきます。研磨に水が欠かせないことは、水とエチレングリコールの混合液でガラスを磨く実験から知られていました [5] 事実 。

金属のCMPでは、薬液の**酸化剤**が金属の溶け方と、表面を覆う薄い酸化物の膜（不働態）を調整します [4] 事実 。凸部の膜は粒にこすり取られて新しい金属が出るので削れ、凹部の膜はこすられにくいので残ります 解説 。

セリアの「化学の歯」

酸化膜を磨く粒には、シリカのほかに**セリア**（酸化セリウム）がよく使われます。総説は、セリアが酸化シリコンとともに強く反応すると説明しています。Cook は、セリアの表面の Ce–OH が酸化シリコンの表面と結び付き、**Ce–O–Si** の結合を作ってから、$Si(OH)_4$を1分子ずつ引きはがすと考え、これを「**化学の歯**（chemical tooth）」と呼びました [5] 事実 。粒が塊ごとはがすという別のモデルや、表面の3価のセリウム（Ce^{3+}）が鍵になるという説もあり、しくみは今も議論されています [5] 事実 。

同じ総説によると、シリカのスラリーは、十分な速さを得るのに**10 wt%を超える**粒が必要で、欠陥やCMP後の洗浄の負担になります。一方、セリアは**約0.25 wt%**の少ない粒でも速く削れ、量産の費用や廃液の処理の点で有利です。ただし、セリアの粒は欠陥を起こしやすいことも知られています [5] 事実 。

凸部に、圧力が集まる

CMPで平らになる理由は、パッドが**高い所に先に当たる**からです。Cornell大学の資料は、段差のあるウェハを磨くと、パッドに触れるのは凸部の上だけで、**圧力がその接点に集まり**、平らなウェハより速く削れると説明しています [3] 事実 。

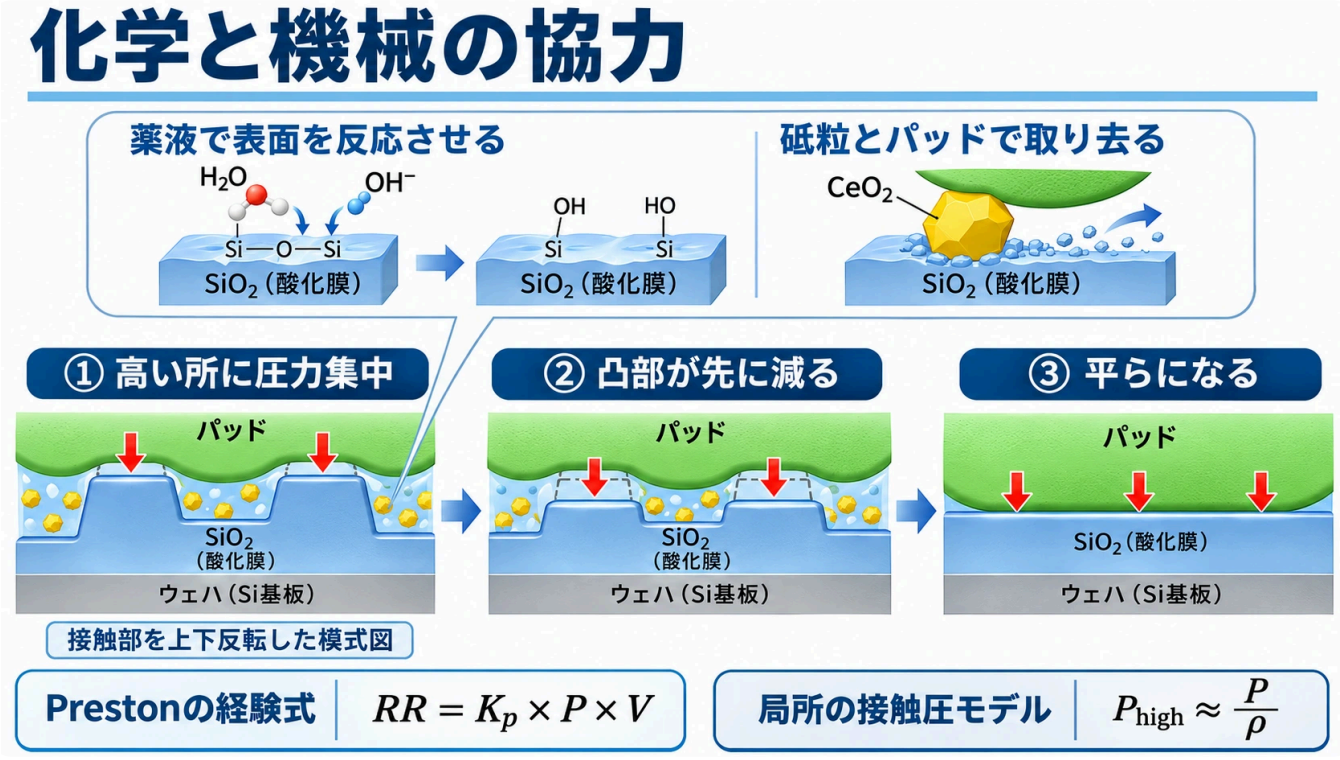


図3　化学 × 機械：パッドが当たる凸部から削れていく（概念図）

図の読み方

5段階の化学のしくみはPurdue大学の講義資料、セリアの「化学の歯」は総説によります [4] [5]。凸部の圧力の式は、力のつり合いを使った本稿の単純化です（下の物理のツボ③）。実際のパッドはたわむので、凹部にも少し圧力がかかります [4]。

物理のツボ③：凸部の割合が4分の1なら、4倍速く削れる

ウェハを押す力の合計を F、ウェハの面積を A とすると、平らなウェハでは圧力は P ＝ F／A です。表面のうち、凸部の上の面積の割合（**模様の密度**）を ρ とし、パッドが凸部だけに触れているとすると、同じ力を ρA の面積で受けるので、凸部の圧力は 本稿の計算

$$P_{凸} = F／（\rho A）= P \div \rho$$

になります。Preston の式で削れる速さは圧力に比例するので、凸部は平らなウェハの **$1／\rho$ 倍**の速さで削れます。ρ ＝ 0.5 なら2倍、ρ ＝ 0.25 なら4倍です 本稿の計算 。凹部は、パッドが触れなければほとんど削れません 解説 。

この単純な計算から、もう一つ分かることがあります。**模様の密度が違うと、削れる速さが違う**ことです。密度の低い場所の凸部ほど速く削れるので、チップの中で密度がばらばらだと、磨き終わりの高さがそろいません 解説 。Purdue大学の講義資料も、密度の低い所ほど速く削れるとしています [4] 事実 。

- **平らさと、速さと、傷のつり合い**

Purdue大学の講義資料は、条件を変えたときの傾向を次のように示しています [4] 事実 。

- **押す力を強くする**：削れる速さは上がるが、平らさは悪くなる。パッドがたわんで、凹部にも圧力がかかるため
- **テーブルを速く回す**：削れる速さが上がり、平らさもよくなる。パッドが凹部に沿う時間がなく、凸部に主に当たるため
- **硬いパッド**：たわみにくいので段差比が小さく、平らになる範囲も広い。ただし、削れる速さと**欠陥**も増える

6. 技術編⑤ — 狙った膜で止め、削りすぎない

- **止めの膜と、選択比**

CMPは「どこまで削るか」が大切です。そこで多くの工程では、**止めの膜**を使います。2つの材料の削れる速さの比を**選択比**と呼びます [3] 事実 。

- **STI（浅い溝の素子分離）**：トランジスタどうしを電気的に分けるため、シリコンに浅い溝を掘り、酸化膜で埋めます。下に薄い**窒化膜**を敷いておき、溝の外の余分な酸化膜を削って、窒化膜で止めます。窒化膜は下のシリコンを研磨の傷から守るので、**酸化膜は速く、窒化膜はほとんど削らない**高い選択比が必要です [3] [5] 事実 。総説によると、セリアのスラリーに添加剤を加え、窒化膜の削れる速さを抑えて選択比を上げます。速く削る段階と仕上げの段階に分ける2段階の研磨も使われます [5] 事実 。
- **タングステンのプラグ**：絶縁膜にあけた縦の穴に、CVDでタングステンを埋め、上の余分をCMPで除きます。タングステンを絶縁膜よりずっと速く削るので、絶縁膜が止めになります [3] 事実 。
- **銅の配線（ダマシン）**：絶縁膜に配線の形の溝を掘り、銅を埋めて、上の余分を削ります。銅は通常のドライエッチング条件で揮発性の反応生成物を作りにくいため、実用的な微細加工が難しく、このダマシンが、銅を配線に使う鍵の技術になりました [3] 事実 。銅の配線は、次回3-12で詳しく見ます。

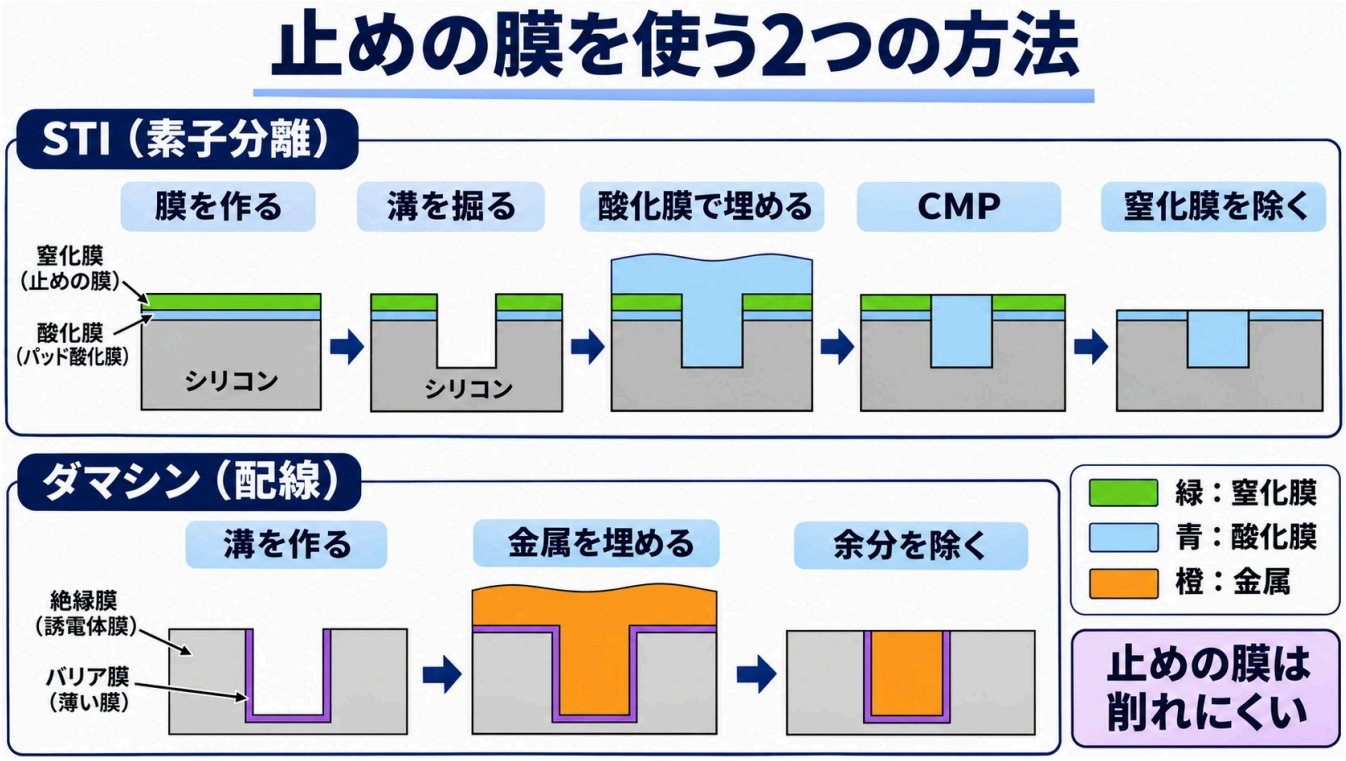
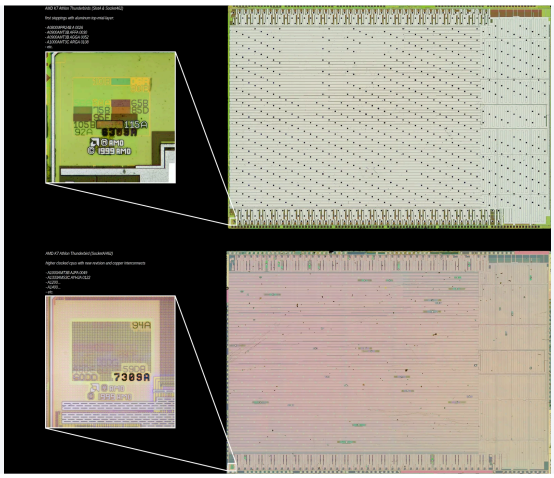


図4　止めの膜で止める：STIとダマシン（概念図）

図の読み方

STIの手順は総説の図1とCornell大学の資料、ダマシンはCornell大学の資料とIBMの特許によります [2] [3] [5]。STIの窒化膜を除く工程は、CMPのあとに薬液で行います [5]。



AMD Athlon（Thunderbird）のダイ写真の比較。上は最上層にアルミニウムの配線を使った初期の版、下は銅の配線を採用した後の版です（Commonsの説明・画像内の注記による）。銅の配線は、絶縁膜の溝に銅を埋めて上を削るダマシンで作られ、CMPが欠かせません 解説 。

画像：FritzchensFritz / Wikimedia Commons / CC0（掲載用に縮小・WebP化）

- **削りすぎの失敗：ディッシングとエロージョン**

止めの膜があっても、思いどおりに止まるとは限りません。埋めた材料のほうが速く削れることが多いからです。Cornell大学の資料とPurdue大学の講義資料は、次のような失敗を挙げています [3] [4] 事実 。

名前	何が起きるか	主な原因
くぼみ（リセス）	埋めた材料の上面が、周りより少し低くなる	埋めた材料のほうが速く削れる。化学の作用が強いスラリーほど大きい
ディッシング	幅の広い配線などの真ん中が、皿のように凹む	押されたパッドがたわんで、広い構造の中に入り込んで削る。構造の大きさ、パッドの硬さ、条件で決まる
エロージョン	配線が密に並ぶ場所で、周りの絶縁膜ごと全体が薄くなる	埋めた部分が下がると周りの角が出て、余計に削れる。密度が高いほど大きい

Cornell大学の資料は、平らなウェハで測った選択比は、エロージョンのため、模様のあるウェハでは**実際より高く出る**ことが多いと注意しています。例として、あるスラリーのポリシリコンと熱酸化膜の選択比は、メーカーの値で300：1です [3] 事実 。総説も、STIでは過研磨の時間が長いほどディッシングが大きくなり、粒が大きいとわずかに増えるという研究を紹介しています [5] 事実 。

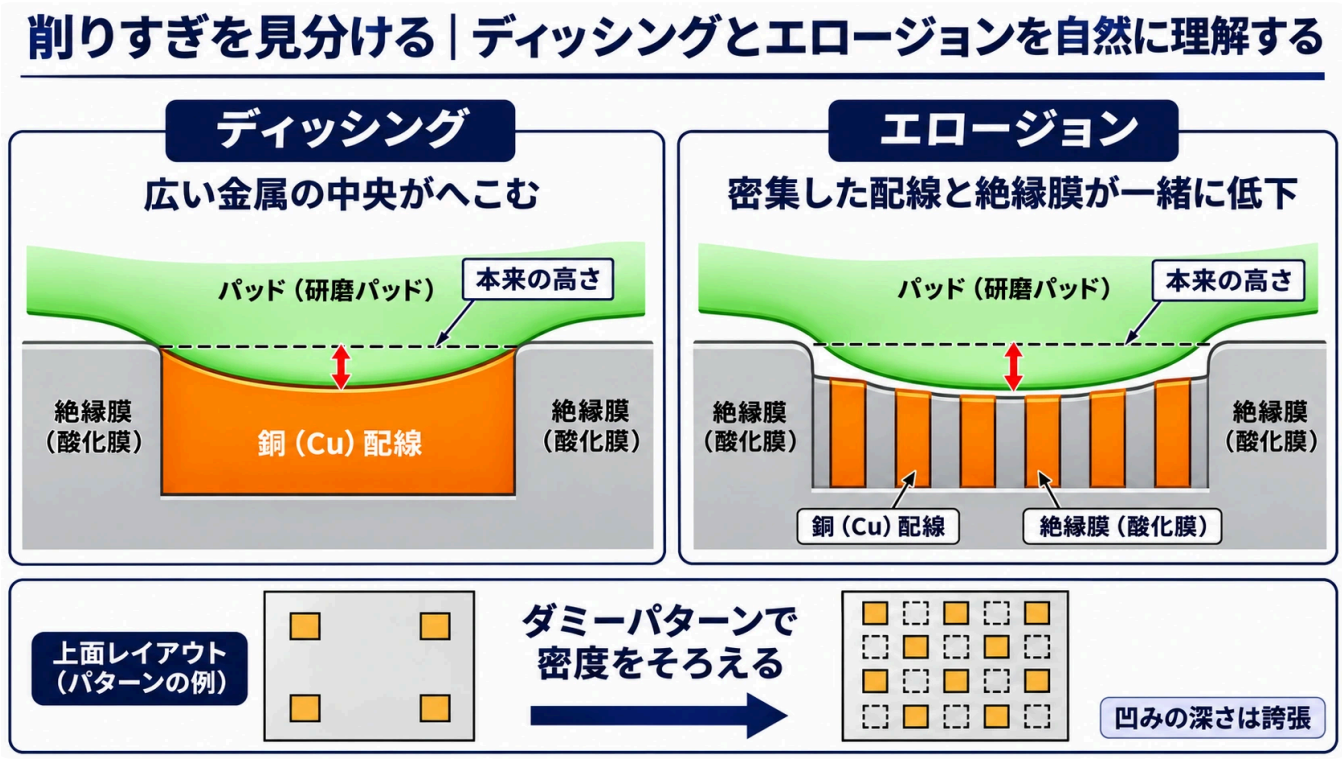


図5　削りすぎの失敗：ディッシングとエロージョン（概念図）

図の読み方

定義はCornell大学とPurdue大学の資料によります [3][4]。凹みの深さは見やすいよう大きく誇張しています。

● 密度をそろえる：ダミーの模様

模様の密度の違いを小さくするために、電気的には使わない**ダミーの模様**を、模様のまばらな場所に置きます [3] [4] 事実 。CMPの都合が、回路の図面（レイアウト）にまで影響するということです 解説 。

- **いつ止めるか**

総説は、STIで酸化膜を削る速さが大きすぎると溝の中の酸化膜まで薄くなるので、**終点の制御**が重要だとしています [5] 事実 。研磨の時間を決めて削る方法のほかに、モーターの電流の変化で終点を見つける方法が研究されてきました [5]。中国の装置メーカー華海清科は、自社の装置に光で終点を見つける機能を組み込んでいるとしています [9] 事実 。

7. 技術編⑥ — 傷と、残った粒

CMPは粒でこする工程なので、**傷**（マイクロスクラッチ）が付くことがあります。Cornell大学の資料は、パッドの上のごみ、固まったスラリーの粒、パッドの欠陥が原因で、防ぐのはとても難しいとしています [3] 事実 。総説も、傷は歩留まりの低下につながり、残った粒などはCMP後の洗浄で除く必要があるとし、形が細かくなるほど欠陥を減らすことが大きな課題だとまとめています [5] 事実 。

Beyerが最初に担当したのが、研磨液の付いたウェハのブラシ洗浄で付く傷の問題だったことを思い出すと、CMPは、**磨く技術と洗う技術を一体で**作り上げてきたと言えます 解説 。3-1の洗浄の回とつながる部分です。

8. 産業編① — 装置：米国と日本の2社で8割超

- **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、CMP装置の世界市場を**4,242億円**とし、会社別のシェアを次のように示しています [6] 事実 。

会社	国	シェア
Applied Materials	米国	51%
荏原製作所	日本	34%
Hwatsing Technology（華海清科）	中国	11%

2社を合わせると85%です 本稿の計算 。図には、ほかに韓国の会社と日本の会社の細い帯がありますが、社名と数値は書かれていません [6] 事実 。

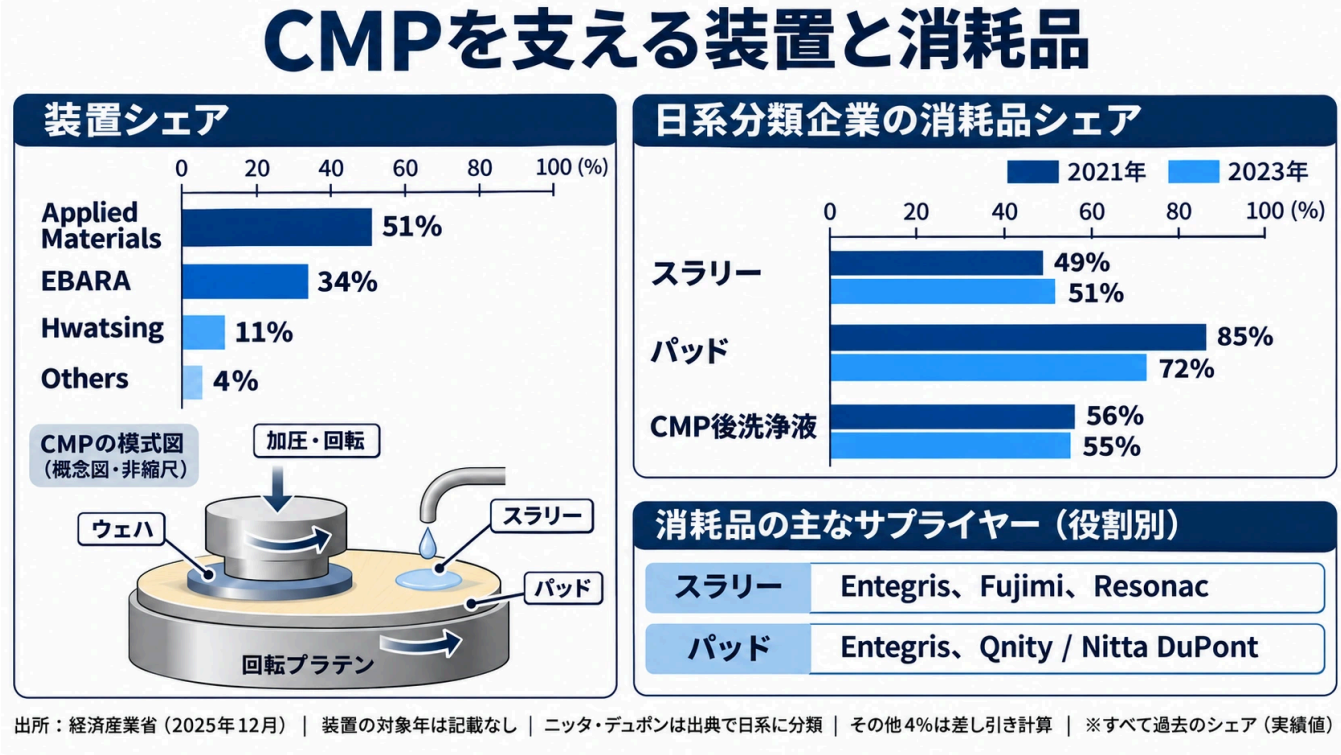


図6　CMPの勢力図：装置は米日、消耗品は日本が強い（概念図）

図の読み方

装置のシェアは経済産業省の資料のp.5、消耗品の国別シェアはp.7によります [6]。会社の例は本文で取り上げた会社で、順位や取引関係を示すものではありません。

- **Applied Materials — 磨いて、洗って、乾かす1台**

Applied Materials の Reflexion LK Prime は、研磨パッド4枚、研磨ヘッド6個、洗浄室8つ、乾燥室2つを備え、研磨と洗浄の部屋（モジュール）は14で、前の機種（7つ）の2倍です。同社は、多くの用途で処理できる枚数が最大2倍になるとしています [8] 事実 。3D NANDの厚い膜と大きな段差は長い研磨が必要なので、複数の台で短い研磨に分けて、安定して平らにするとも説明しています [8] 事実 。

- **荏原製作所 — ポンプの会社から、世界2位へ**

荏原製作所は、1912年にポンプの会社として始まった会社です [17]。同社は、半導体の工場向けのドライ真空ポンプと**CMP装置**で、ともに**世界シェア2位**だとし、CMP装置の出荷は累計**4,000台**を超えたとしています（同社の説明） [7] 事実 。

- **中国の華海清科**

華海清科（Hwatsing Technology）は、2025年の年度報告で、自社のCMP装置が自主的な知的財産権で**国際的な独占を破った**とし、12インチのCMP装置を量産できる国内でごく少数の会社だとしています。国産のCMP装置の販売の**90%以上**を占め、一部の先端の装置は大手のメモリメーカーのHBMの生産ラインに基準の装置として入ったとも説明しています（いずれも同社の説明） [9] 事実 。

9. 産業編② — 研磨液とパッド：日本が強い消耗品

国別のシェア

CMPは、装置よりも**消耗品**で日本の存在感が大きい分野です。経済産業省の資料（富士経済の資料をもとに作成）は、日本の会社のシェアを次のように示しています [6] 事実 。

品目	2021年	2023年
CMPスラリー	49%	51%
CMPパッド	85%	72%
CMP後洗浄液	56%	55%

同じ資料は、ニッタ・デュポンを、ニッタ（日本）とDuPont（米国）の合弁で本社が大阪にあるため**日系**に分類したと注記しています [6] 事実 。パッドのシェアは2年で13ポイント下がっています 本稿の計算 。

スラリー：レゾナックとフジミ

- **レゾナック**（発表時は昭和電工マテリアルズ）は、2022年の発表で、CMPスラリーで**世界2位**（金額、2021年、富士経済の調査）、そのうちセリアのスラリーで**世界トップ**（金額、2021年度、グローバルネットの調査）だとしています。独自の合成技術による、粒子径が数ナノメートルの砥粒を使う「**ナノセリアスラリー**」は、研磨傷を減らせる点が評価されているとしています [10] 事実 。2025年には、STI用のCMPスラリーで世界の販売金額**1位**（2024年実績、富士経済の調査）だとしています [11] 事実 。
- **フジミインコーポレーテッド**は、1950年に研磨材の生産を始めた会社です。1957年に東京通信工業（現ソニー）のゲルマニウム基板用の研磨材、1967年にシリコンウェハ用の研磨材、**1995年にCMP用スラリー**の「PLANERLITE」を開発しました [12] 事実 。製品は、酸化膜用・タングステン用・ポリシリコン用・銅用・バリア膜用と、削る材料ごとに分かれています [13] 事実 。

米国の総合材料会社：Entegris と Qnity

- **Entegris**は、2022年7月6日に、CMPのスラリーとパッドを手がける CMC Materials（旧 Cabot Microelectronics）を買収しました。年次報告書によると、タングステン・誘電体・銅・バリア（タンタル）・モリブデン・アルミニウム・SiC・GaN 用のスラリー、パッド、CMP後の洗浄液、PVAのブラシ、スラリーのフィルターまでをそろえ、モリブデンやルテニウムといった新しい材料のスラリーの開発にも取り組んでいるとしています [14] 事実 。
- **Qnity**は、DuPontの電子材料の事業が2025年11月1日に分かれてできた会社です [16] 事実 。同社のパッド「IC1000」は、CMPのパッドの**業界標準**と広く見なされている硬いパッドで、銅・タングステン・STI・酸化膜などに使われるとしています（同社の説明） [15] 事実 。

素材の技術者の出番

CMPは、**化学と機械を同時に設計する**工程です。装置の性能だけでなく、消耗品の材料が結果を大きく左右します 解説 。

- **砥粒の設計**：粒の種類（シリカ・セリア・アルミナ）、大きさ、形、表面の状態。速く削りつつ、傷を付けない（[4] [5] [10]）
- **添加剤**：止めたい膜の削れる速さだけを抑えて、選択比を上げる（[5]）
- **パッドの樹脂**：硬さ・細かい穴の大きさ・つぶれやすさ・溝の形で、平らさと欠陥のつり合いを決める（[4] [14]）
- **洗浄の化学**：砥粒と有機物の残りを、傷や汚れを増やさずに取る（[3] [14]）
- **新しい材料への対応**：モリブデン・ルテニウムなどの新しい配線の金属、SiCのような硬い基板（[14]）

10. これから求められること

- **3D NANDの厚い膜**：何百層にも積んだ膜は、段差が大きく、長い研磨が必要です [8] 事実 。
- **先端パッケージ**：華海清科は、CMPが3D IC・HBM・CoWoSといった先端パッケージで、**接合面の準備**、ウェハの裏面の薄化、貫通電極（TSV）の金属化の全体にかかわり、接合の歩留まりを直接左右するとしています [9] 事実 。チップどうしを銅で直接つなぐような接合では、接合面の平らさがますます重要になると考えられます 推測 。
- **新しい材料**：モリブデン・ルテニウムなどの配線の金属や、SiC・GaNのような硬い基板のためのスラリーとパッド [14] 事実 。
- **欠陥を減らす**：形が細かくなるほど、傷や残った粒を減らすことが課題です [5] 事実 。

11. まとめと次回予告

視点	ポイント
なぜ平らに	凸凹は層ごとに積み上がる。焦点深度（λ/NA^2に比例）と、段差の角での配線の細り。CMP以前は局所的な平坦化だけ
生まれ	1983年1月、IBMのBeyerが研磨台で平坦化を発見。約10か月の評価で製品へ。特許US 4,944,836（1985年出願、上の膜を下の膜より速く削る）
装置	テーブル＋パッド、ウェハを下向きに押すヘッド、スラリー、ダイヤモンドのコンディショナー。4〜10 psi（約28〜69 kPa）。研磨・洗浄・乾燥を1台に
削れる速さ	Prestonの式 $RR = K_p \times P \times V$。同じ向き・同じ回転数で相対速度が一定
平らになる理由	パッドが凸部に当たり圧力が集まる。密度ρなら圧力は$1/\rho$倍（計算）。密度の違いはダミーで緩和

視点	ポイント
化学	酸化膜は水・OH⁻で$Si(OH)_4$に。セリアの「化学の歯」。セリアは0.25 wt%でも速い
止める	止めの膜と選択比（STIの窒化膜、W・銅のダマシン）。ディッシング・エロージョン。終点の制御
装置の産業	4,242億円。AMAT 51%・荏原 34%・華海清科 11%
消耗品の産業	日本のシェア（2023年）：スラリー51%・パッド72%・洗浄液55%。レゾナック（セリア）、フジミ、Entegris、Qnity（IC1000）

次回は**3-12「配線（ダマシン、銅配線、裏面電源）」**です。この回で見た「溝に埋めて、上を削る」ダマシンで、銅の配線を何層も積み上げていきます。銅の配線の作り方と、トランジスタの裏側から電気を送る新しい配線（裏面電源）の考え方を見ていきます。

12. 確認クイズ

1. 半導体の製造で、表面を平らにしないと困る理由を2つ挙げてください。

> **▼ 答えを見る**
>
> ①露光の焦点深度が狭く、高い所と低い所の両方にピントを合わせられない。②段差の角で配線の金属が薄くなり、抵抗が上がる。

2. CMPより前の平坦化の方法（ガラスのリフローや塗布ガラスなど）に共通する弱点は何ですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 局所的な平坦化にとどまり、模様の密度が違う場所の間に高さの差が残ることです。

3. IBMのBeyerが提案するまで、なぜ研磨は半導体の工程に向かないと考えられていたのですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 研磨は粒や液で激しく汚す「汚い工程」だと考えられていたからです。Beyerは得意の超音波洗浄で汚れを落とせることを確かめ、約10か月の評価で問題がないことを示しました。

4. Prestonの式を書き、それぞれの文字の意味を説明してください。

> **▼ 答えを見る**
>
> 削れる速さ $RR = Kp \times P \times V$。Pは押す圧力、Vはパッドとウェハの相対速度、KpはPreston係数で、削る材料・スラリー・パッドで決まります。

5. ヘッドとテーブルを同じ向き・同じ回転数で回すと、何がよいのですか。

> **▼ 答えを見る**
>
> ウェハのどの点でも、パッドとの相対速度が同じ（テーブルの角速度×中心間の距離）になり、Prestonの式から、ウェハ全体が同じ速さで削れるからです。

6. 凸部の面積の割合が4分の1の場所では、凸部は平らなウェハの何倍の速さで削れますか（パッドが凸部だけに当たると仮定）。

> **▼ 答えを見る**
>
> 同じ力を4分の1の面積で受けるので圧力が4倍になり、Prestonの式から約4倍の速さで削れます。

7. STIのCMPで、窒化膜はどんな役割をしていますか。そのために、スラリーに何が求められますか。

> **▼ 答えを見る**
>
> 余分な酸化膜を削ったところで研磨を止め、下のシリコンを傷から守る止めの膜です。酸化膜は速く、窒化膜はほとんど削らない高い選択比が求められます（セリアのスラリーに添加剤を加えるなど）。

8. ディッシングとエロージョンの違いを説明してください。

> **▼ 答えを見る**
>
> ディッシングは、幅の広い配線などの真ん中が、たわんだパッドに削られて皿のように凹むこと。エロージョンは、配線が密に並ぶ場所で、周りの絶縁膜ごと全体が薄くなることです。

9. CMP装置の世界シェアが大きい会社を2社、国名とともに挙げてください。

> **▼ 答えを見る**
>
> Applied Materials（米国、51%）と荏原製作所（日本、34%）です（経済産業省の資料。年の記載なし）。

13. 用語集

CMP（化学機械研磨）
研磨液の化学の作用と、パッドでこする機械の作用を組み合わせて、ウェハの表面を平らにする工程。Chemical Mechanical Polishing／Planarization の略。

平坦化
表面の凸凹をなくすこと。狭い範囲の「局所的な平坦化」と、チップやウェハ全体の「全体的な平坦化」がある。

焦点深度

露光で、像のピントが合う深さの幅。開口数（NA）が大きいほど狭い。

段差比

磨いたあとの段差を、磨く前の段差で割った値。小さいほどよく平らになっている。

BPSG

ホウ素とリンを加えて融けやすくした酸化シリコンの膜。熱で流して段差をならすのに使われた。

SOG（塗布ガラス）

液体を塗って焼き固め、酸化シリコンに近い膜にする材料。

スラリー

砥粒（研磨の粒）と薬液を混ぜた研磨液。

砥粒

研磨に使う細かい粒。シリカ（酸化シリコン）、セリア（酸化セリウム）、アルミナ（酸化アルミニウム）など。

研磨パッド

テーブルに貼る、樹脂（ポリウレタンなど）のシート。細かい穴や溝がある。

コンディショナー

ダイヤモンドの粒を埋め込んだ円盤。パッドの表面をこすって新しい面を出す（目立て）。

リテーナーリング

研磨ヘッドでウェハの周りを囲む輪。ウェハが外れるのを防ぐ。

Prestonの式

削れる速さが、押す圧力と相対速度の積に比例するという経験式。RR＝Kp×P×V。

模様の密度

ある範囲のうち、凸部（または配線など）が占める面積の割合。

選択比

2つの材料の削れる速さの比。

STI（浅い溝の素子分離）

シリコンに浅い溝を掘って酸化膜で埋め、トランジスタどうしを電気的に分ける構造。

ダマシン

絶縁膜に溝や穴を掘って金属を埋め、上の余分をCMPで削って配線を作る方法。象嵌（ぞうがん）の意味。

ディッシング

幅の広い埋め込み構造の真ん中が、皿のように凹むこと。

エロージョン

配線などが密な場所で、周りの絶縁膜ごと全体が薄くなること。

ダミーの模様

CMPで高さをそろえるために置く、電気的には使わない模様。

終点検出

研磨をどこで止めるかを、モーターの電流や光の反射などの変化から見つけること。

CMP後洗浄

磨いたあとのウェハから、砥粒や有機物の残りを除く洗浄。PVAのブラシと薬液を使う。

14. 参考資料（一次情報）

1. **K. Beyer（IBM Fellow、退職）、B. Roberts（X-trinsic、North America CMP User Group）**「The Inception of Chemical Mechanical Polishing for Device Applications（AVS CMP User Group、2024年12月。Beyerの文章〈IBM MicroNews Vol.5 No.4、1999年11月ほか〉の再掲を含む）」 — https://nccavs-usergroups.avs.org/wp-content/uploads/2024/12/CMPUG1224-Ses-1.1-BeyerK-RobertsB.pdf
2. **K. D. Beyer, W. L. Guthrie, S. R. Makarewicz, E. Mendel, W. J. Patrick, K. A. Perry（IBM）**「米国特許 US 4,944,836 Chem-mech polishing method for producing coplanar metal/insulator films on a substrate（1985年10月28日出願、1990年7月31日登録）」 — https://patents.google.com/patent/US4944836A/en
3. **D. Woodie（Cornell NanoScale Facility）**「Chemical Mechanical Polishing (CMP)（CMPの入門資料、2007年）」 — https://www.cnfusers.cornell.edu/sites/default/files/Equipment-Resources/CMP%20Primer.pdf
4. **M. Qi（Purdue大学）**「ECE 695 Nanometer Scale Patterning and Processing, Lecture 48 Planarization, Part 1（2016年、p.4〜30。Prestonの式は Preston, J. Soc. Glass Technol. 11, 247 (1927) の引用）」 — https://nanohub.org/resources/25347/download/2016.04.25-ECE695Q-L48.pdf
5. **R. Srinivasan, P. V. R. Dandu, S. V. Babu**「Shallow Trench Isolation Chemical Mechanical Planarization: A Review, ECS J. Solid State Sci. Technol. 4 (11) P5029–P5039（2015年、CC BY 4.0）」 — https://doi.org/10.1149/2.0071511jss
6. **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）・p.7（前工程素材のシェア変化）」 — https://www.meti.go.jp/policy/mono_info_service/joho/conference/semicon_digital/0014/handeji14-3.pdf
7. **荏原製作所**「Precision Machinery Company（半導体製造装置の事業紹介、2026年11月19日閲覧）」 — https://www.ebara.com/global-en/precision/
8. **Applied Materials**「Reflexion® LK Prime® CMP（製品ページ、2026年11月19日閲覧）」 — https://www.appliedmaterials.com/us/en/product-library/reflexion-lk-prime-cmp.html
9. **華海清科（Hwatsing Technology）**「2025年年度報告摘要（上海証券取引所に開示。東方財富の掲載版）」 — https://pdf.dfcfw.com/pdf/H2_AN202604221821467051_1.pdf
10. **昭和電工マテリアルズ（現レゾナック）**「次世代半導体製造に使われる研磨材料の増産を本格化（2022年11月24日）」 — https://www.resonac.com/jp/news/2022/11/24/2023.html
11. **レゾナック**「【世界シェアNo.1※】レゾナックの５つの半導体材料（2025年9月1日）」 — https://www.resonac.com/jp/corporate/resonac-now/20250901-3592.html
12. **フジミインコーポレーテッド**「沿革」 — https://www.fujimiinc.co.jp/company/history.html
13. **フジミインコーポレーテッド**「半導体デバイス 製品ラインナップ（PLANERLITE）」 — https://www.fujimiinc.co.jp/service/cmp/lineup.html
14. **Entegris**「Form 10-K（2024年12月期、Item 1）」 — https://s205.q4cdn.com/144974603/files/doc_financials/2024/q4/10K-2024.pdf
15. **Qnity Electronics**「IC1000™ CMP Polishing Pads（製品ページ、2026年11月19日閲覧）」 — https://www.qnityelectronics.com/products/ic-1000-cmp-pad
16. **DuPont**「DuPont Completes Separation of Qnity Electronics（2025年11月3日）」 — https://www.dupont.com/news/dupont-completes-separation-of-qnity-electronics.html
17. **荏原製作所**「EBARA CORPORATION（グループのトップページ、2026年11月19日閲覧）」 — https://www.ebara.com/global-en/

15. 主張と出典の対応表

本文の主張	根拠	区分
Beyerの経歴（1968年IBM、1981年に製造部門・傷の問題）、IBMに研磨部門、溝のガラスのこぶ・リフローは短い距離のみ、1983年1月に研磨台で平坦化、メガソニック洗浄、2週間黙っていた、オープンドア、約10か月の評価で製品へ、思い込みからの自由、他の平坦化法（BPSG約1000 ℃など）	Beyer・Roberts [1]	事実
特許の発明者・出願日・登録日、請求項1（上の層を速く削る）、要約（穴の金属・絶縁膜が自動の止め）、アルミナ・シリカ・pH約3未満・Al系とSiO_2・止めの膜・繰り返し	米国特許 [2]	事実
成膜は段差を写す・角で金属が薄く抵抗増、ピントの問題、BPSG・SOGとその弱点、局所的な平坦化だけ、厚く付けて削り戻す・層ごとに繰り返す、唯一の全体的な平坦化・3〜4層→7〜8層、IBMが80年代後半に発明・もとはPlanarization、部品と役割、4〜10 psi、目立て、乾かさない・PVAブラシと希アンモニア水、凸部に圧力集中、ダミー、Wのダマシン、銅はエッチングできない、STIの窒化膜、選択比300:1と実際より高く出る、リセス・ディッシング・エロージョン、傷の原因、ヘッドは同じ向き	Cornell [3]	事実
DOF∝λ/NA²、平坦化の段階・段差比・平坦化距離、局所（μm）と全体（mm）、エッチバックは制御が難しい、OH^-で柔らかく・酸化剤で不働態、Prestonの式（1927年）、スラリーの条件表、回転数が同じなら相対速度一定、押す力・回転・パッドの硬さの傾向、密度の低い所が速い、ディッシングとエロージョン、ヘッドの回転と中心・縁の差、メンブレン、酸化膜の5段階	Purdue [4]	事実
水とSi–O–Si・$Si(OH)_4$、Cookの化学の歯・別のモデル・Ce^{3+}、シリカ10 wt%超とセリア0.25 wt%、セリアは欠陥を起こしやすい、STIで高い選択比・添加剤・2段階、終点の制御・モーター電流、ディッシングと過研磨・粒の大きさ、傷と残った粒の課題	Srinivasan ほか [5]	事実

本文の主張	根拠	区分
CMP装置4,242億円・AMAT 51%・荏原34%・Hwatsing 11%・ほかの細い帯、スラリー49→51%・パッド85→72%・洗浄液56→55%、ニッタ・デュポンの分類	経済産業省 [6]	事実
ドライ真空ポンプとCMP装置で世界2位、CMP装置の出荷累計4,000台超（同社）	荏原製作所 [7]	事実
パッド4・ヘッド6・洗浄8・乾燥2、14モジュール（前機種7）、最大2倍、3D NANDは複数の台で短く	Applied Materials [8]	事実
国際的な独占を破った・12インチを量産する少数の会社・光の終点検出・国産の90%以上・HBMラインの基準装置・先端パッケージの接合面の準備など（同社）	華海清科 [9]	事実
CMPスラリー世界2位（2021年）・セリアスラリー世界トップ（2021年度）・ナノセリア（数nm）・研磨傷を減らす	レゾナック [10]	事実
STI用CMPスラリーで販売金額1位（2024年実績）	レゾナック [11]	事実
1950年創業、1957年ゲルマニウム、1960年酸化セリウムのガラス用、1967年シリコンウェハ用、1995年PLANERLITE	フジミ [12]	事実
PLANERLITEの材料別のシリーズ	フジミ [13]	事実
2022年7月6日にCMC Materialsを買収、スラリーの対象材料、パッド、洗浄液、PVAブラシ、フィルター、モリブデン・ルテニウム	Entegris 10-K [14]	事実
IC1000は業界標準と広く見なされる硬いパッド、用途（同社）	Qnity [15]	事実
2025年11月1日にDuPontから分離	DuPont [16]	事実
1912年にポンプの会社として創業	荏原製作所 [17]	事実
psiからkPaへの換算、相対速度の式と一定になる条件、毎秒約1.5 m（中心間20 cmは仮定）、凸部の圧力P/ρ・2倍・4倍、2社で85%、パッドのシェア13ポイント減	本稿の計算	本稿の計算
接合面の平らさの重要性が増す	本稿の推測	推測

最終更新：2026年11月19日／技術は大学の講義資料（Cornell、Purdue）、原論文と総説、特許、発明者の講演資料、企業の情報は各社の年次報告書（米国SEC提出書類を含む）・中国の年度報告・公式サイト・ニュースリリース、会社別・国別のシェアは経済産業省を出典としています。「世界トップ」「シェア2位」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。

図版はImageGenで制作した説明用の模式図です。寸法・粒子・凹みの大きさは実寸ではありません。図3は接触部を上下反転して表示しています。図6の対象年・分類は図注と本文を参照してください。