

『浅くて深い CMP』



黒河周平

プラナリゼーション CMP 委員会幹事

九州大学大学院工学研究院 機械工学部門

教授 (工学博士)

--- 研磨と CMP ---

そもそも研磨というのは不思議でならない。工作機械を用いた機械加工となれば母性の原理で何とか大枠は説明がつくが、遊離砥粒による研磨はそれが成り立たない世界。ナノメートルオーダーの加工精度が日常化している現代の先端技術の中でも、数十から数百原子層の除去加工に用いられる技術が、経験とノウハウのかたまりとって良いポリシングに頼っていることがそれを象徴している。

「半導体用基板の研磨」と耳にしたとき、機械的側面はどの程度あるのだろう、というのが第一印象だった。CMPの第一人者である土肥教授が埼玉大学から九州大学に赴任されるということを伺ったときのことである。今まで基礎的な機械工学の分野にどっぷりと浸かり、やれ切りくずだ、やれ寸法精度だと言っていた小生にとって、ゼロから勉強開始の日々となること必至であった。それだけに、どのような技があるのか、理論がどの程度進んでいるのかといったことには興味津々であった。

そこは見た目機械的研磨と何ら変わらない世界のように思えたのも束の間、従来の polishing に加え、planarization の実現が CMP の特徴であり、Chemical (化学的作用) がそれを特徴付ける。それにしても、今まで縁遠かった化学的作用に関する内容は、ただただ面食らうばかり。耳慣れない専門用語と知識不足から、消化不良になった。また、新しい分野では良くあることだが、略語のオンパレードには閉口した (実際、用語に関しては厳密に定義されていない部分もあり、先に使ったものの勝ち、といったところがある。困ったときは『半導体 CMP 用語辞典』が役に立つ!)。

化学的作用の御利益は、極表層を軟質な状態に変化させて機械的ポリシング作用により研磨を行うという。しかし、砥粒自身が持つ化学的作用もあると聞くと、何とも複雑な現象が起こっているに違いないといった感じだった。

--- ラブ・ミー・テンダー (優しくこすって) ---

砥粒・スラリーの作用は複雑で、諸説ありまだ根本的なメカニズム解明には至っていない。各種要素が複雑に絡み合う結果、基本原則がほとんど無いに等しい。ガラスのポリッ

シングで経験的に求められたプレストンの式は、化学的作用はプレストン係数に押し込められており、機械的運動によるパラメータのみが明示されているにすぎない。さらに、対象となる材料が異なると、主に化学的作用の違いから全く異なる様相を呈する場合があります、これが予測を困難にする。当プラナリゼーション CMP 研究会では、チュートリアル的な内容を新たに始めたが、スラリーの研磨メカニズムについて、講師と聴衆の間で激論が交わされることもあり、常識と思われていることすら、そのメカニズムが解明されているわけではないのである。

一方でスラリーを流体としてトライボロジー的に考えると、潤滑状態になぞらえて考えることが出来るのかも知れない。パッドとの相互作用という観点では、流体潤滑領域では研磨はそれほど進行せず、通常の研磨状態では混合潤滑あるいは境界潤滑領域になっているはずである。関連するパラメータは、相対速度、圧力、粘度、表面粗さ、温度などである。トライボロジーでは油膜形成により摩擦を下げて表面が摩耗しないように注力するが、研磨では逆に適度に摩耗させる必要がある。実際のところ、パッド・砥粒・ウエハの接触状態がよく分かっていないのが現状であるが、プレストンの関係式がある程度成り立つ状態であれば、摩擦による運動・熱エネルギーが加工に転換されていると考えるのが自然である。ただ、加工レートは通常の研削に比べ圧倒的に小さく、 $\mu\text{m}/\text{min}$ 、難加工材に至っては nm/hr の世界である。また、研削とは比べものにならないほど軟らかいポリシングパッドが用いられることから、パッドの弾性変形と流体の相互作用が影響することも十分考えられる。

このポリシングパッドも多様な世界である。CMP 要素の一つであり、ポアのある発泡ポリウレタン、不織布、スウェード、多層構造のものや、砥粒を練り込んだものまである。パッドの硬さ、粘弾性、ポアのサイズ・分布、溝の効果、いずれも分かっているようで経験的説明が先行し、定量評価はまだまだである。ただ、目詰まりや目つぶれ現象が起こるのは通常の機械的研削や研磨と同様で、当初コンディショニングは必要と聞いて、「切りくずが出るんだ」、と妙な親近感を短絡的に覚えたものである。

軟らかいパッドで優しくこすること、まさに、"Love Me Tender"ならぬ"Rub Me Tender"である（カラオケの際、我々日本人が不得意とする"L"と"R"の発音を間違えて歌うと、後者の意味になってしまう。英語圏で熱唱し、観客がやたら盛り上がるので「自分の歌も捨てたものではないな」、などと勘違いしないように。歌唱力がウケているわけではないのだから...）。最近では、パッドとウエハの接触状態、スラリー流れの観察やパッドの弾性変形を考慮しソフト EHL まで考慮に入れた研究も行われており、今後のメカニズム解明が楽しみである。

--- 浅くて深い ---

砥粒は硬い粒であるので、凝集などによるスクラッチ傷や表面下への加工変質層の形成もデバイス性能に影響を与える。加工変質層について言えば、前加工である研削やラッピ

ングの出来が、最終仕上げである CMP のプロセス時間に多大な影響を与える。加工変質層が厄介なのは、表面下であるため、表面上は平滑に仕上げられているようでも、実際には潜傷という形で表面下に変質層が残っている場合があり、研磨を進めると顔を覗かせるケースがあることである。僅か数十から数百原子層といえども、加工変質層の非破壊での検査が基板の種類によっては必ずしも適切に行えるわけではない点も厄介である。

そういう意味で、計測・検査技術の進歩も重要である。300mm や将来 450mm と言った直径のウェハに対して、nm オーダの検査を短時間でかつ正確に行わなければならない。測定分解能を上げようとするれば測定レンジが狭くなり、横方向の測定領域も狭くなる。光学的手法は強力であるが、空間分解能が落ちるのが欠点である。光ではいずれ限界が来ると言われ続けて、何とかしのいできた現状はあるものの、根本的なブレークスルーが必要である。

このように、CMP ではマイクロ・ナノメータオーダの非常に浅い領域が対象であるにもかかわらず、その奥は非常に深い。今や、三次元実装等、MEMS 応用技術も必要になってきた。また、シリコンやその酸化膜、タンゲステンや銅と言った金属材料ばかりではなく、サファイア、SiC、GaN と言ったセラミクス系の超難加工材、究極はダイヤモンドも対象にしなければならない。これら難加工材の多くは、研削でいえば砥粒材であり、加工の上では工具側に位置するものだ。それをワークとして相手にしなければならない世界は、どんな加工領域でも同様に困難を伴う。これらの基板においては、現状加工レートが極端に小さく、化学的作用の効果がほとんど現れていないことを示しており、まさに CMP の新しい挑戦領域と言えよう。

さて、そろそろ列車はグルノーブルに到着する。まだまだ勉強、明日からの ICPT2012 国際会議が楽しみだ。