

球体のはなし

柴田順二（芝浦工業大学名誉教授）

● **ボールセミコンダクターの出現** シリコンウエハの平坦な表面に、ステップにより集積回路を焼付けるのが伝統的な IC チップの製法である。これに対して、シリコンボールの球面に集積回路を構築するのがボールセミコンダクター（球面半導体）の原理である。具体的には、直径 0.5~1mm φ程度の単結晶シリコンボール表面に、多面体（45面）のミラーを使用した3次元露光システム（球面フォトリソグラフィ）によって IC や LSI を作製するもので、ボールセミコンダクター社を起業（1996年）した石川明氏によって米国で特許申請がなされた。この技術が実用化すれば、金喰い虫との悪名高い半導体製造プロセスに革命をもたらすことは間違いなく、当時、マスコミは大々的に報じた。しかし、この革新的な半導体は期待されたほどの事業成果を発揮できないまま、雌伏の期間を過しているのが現状である。

● **ボールセミコンダクターの機能特性** ボールセミコンダクターは機能的にも、幾つかの魅力ある特長を秘めている。まず、平面シリコン（角チップ）に比べるとその実表面積（ $=3\pi r^2$ ）が3倍大きいことは、投影面積（フットプリント）当たりの集積密度が約3倍向上することを意味している。また、複数個のシリコンボールを立体的に接続（インタコネクタ実装）することで、VLSI（システム LSI）の構築も可能となる。

1つのチップに多くの機能を搭載する従来の半導体実装に対して、ボールセミコンダクターでは、個々のシリコンボールに搭載する IC をできるだけ単能化し、多様な機能シリコンボールを選択・組合せ、立体構造化することで、多彩な機能を付加した製品システムを構築できるのである。更に、ボールセミコンダクターはシリコン集積回路（ロジックやメモリーIC）といった伝統的な IC に止まらず、化合物半導体素子や MEMS へ展開する可能性も秘めている。

● **ソーラーエネルギーと平板シリコン太陽電池** 環境意識の高まりに加え、国の補助制度や過剰電力買い取り制度などが追い風となり、太陽光発電はここ数年、国内で住宅用として急伸し、世界市場は数兆円に拡大する勢いである。日本の太陽電池メーカー（シャープ、京セラ、三洋電機）はこれまで世界のトップを走って来たものの、最近では生産量や国内普及率において世界の潮流の後塵を拝している感が否めない。

● **シリコンボール太陽電池の利点** 平板シリコン太陽電池にとって、高額な設備費および集光・変換効率の低さ（現在、10%程度）からくる発電コスト高が、その普及の足枷となっている。その救世主になることを囑望されるのが、球状シリコン太陽電池である（図1）。すなわち、平面型のように太陽を追尾する必要がなく高い集光効率を誇っており、更に全方向（360度）から

の入射を可能とするように、裏面まで反射ミラーを配した全球面受光型のシリコンボール太陽電池なども開発されるなど、今やシリコンボール太陽電池は国家的プロジェクトと化した感がある。

歴史的には、シリコンボール太陽電池はボールセミコンダクター社（米）のシリコンボール量産技術を応用して製品化し市場へ登場することとなった経緯があり、既に国内でも実用に供されている。

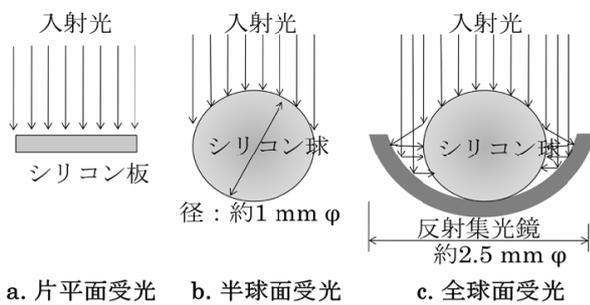


図1 平板 Si 太陽電池と球状 Si 太陽電池

● 熔融凝固による小球の製法 セミコンダクターや太陽電池用シリコンボールの製造、すなわち直径 1mm 程度の単結晶シリコン粗ボールの量産には、自然摂理を利用して科学的に成形する技術開発が進行している。その代表的製法として、

① ゴル-ゲル法や気相成長（CVD）法

② 熔融素材の滴化凝固法

が挙げられる。CNP で馴染みの深いコロイダルシリカ球は前者である。一方後者は、疑似無重力環境下に置かれた熔融シリコン滴が表面張力によって真球体を呈するという物理的摂理の応用であり、工業的には金属微小球やガラス球の製法としても常用され、最近では高密度実装のためのマイクロハンダボールが度々話題となる。また、金属極小球の製造に利用される均一液滴噴霧法も、この原理に属している。

ところで、球体の創成にとって一見理想摂理とも見える無重力下での熔融凝固法ではあるが、金属では凝固過程における結晶相変態で球体積が収縮することから表面の終盤凝固部に引け巣（凹み）という表面欠陥が生じ、また表面層にはデンドライト組織（樹枝状結晶）が形成される。

LSI や太陽電池に用いる単結晶 Si 小球を、電磁場などを用いた擬似無重力環境下で滴下凝固させる場合には、金属とは逆に凝固膨張により液相が尾のように終盤結晶し、突起部を形成する（図 2）。一般論で言えば、単結晶 Si 球の製造にとって一見理想的とも見える無重力下での熔融凝固法ではあるが、形状精度や定寸管理に難があり、高品質な単結晶シリコンボールの直接製造は決して容易なことではない。したがって、仮にこのような自然摂理に基づく小球の製造法が実用化したとしても、伝統的な砥粒研磨による仕上工程から逃れることはできないのである。現実のボールセミコンダクター生産における仕上工程は、チューブ内で転動研磨させると言う漠然とした情報が漏れ伝わるだけで、その実体は不明である。

なお、高分子の球晶成長あるいはガラスのようなアモルファス素材の軟化凝固などに拠れば、自然摂理の下で比較的理想的に近い真球体の形成を期待できる。

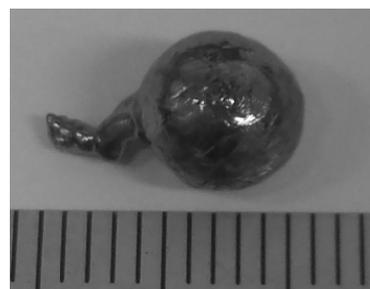


図2 電磁場での滴下凝固法による単結晶シリコン小球（芝浦工業大学 2008）