

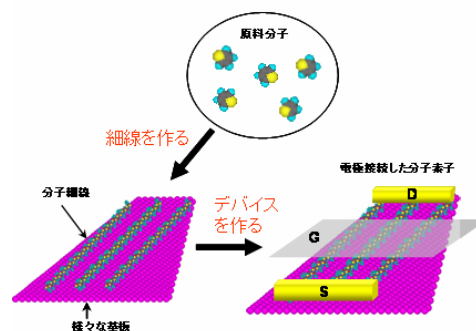
ディビジョン番号	14
ディビジョン名	ナノテク・材料化学

大項目	2. ナノ操作
中項目	2-2. 超微細加工
小項目	2-2-4. ボトムアップ

概要（200字以内）

現在の情報機器を成す半導体素子のサイズはナノメートルに及んでいる。ナノサイズ素子を形成させる方法としてバルク材料を微細化する“トップダウン”の微細加工技術が用いられている。しかしトップダウンの方法は莫大なエネルギーとコストを要するため、将来は低エネルギー、低コストで、原子や分子を組上げて微細素子を作る“ボトムアップ”のナノ操作技術が望まれている。単一分子を組立て作る分子素子への応用が期待される。

ボトムアップ法により原料分子を組立て作る分子素子



現状と最前線

ボトムアップ法による分子の超微細加工技術では、主に表面におけるナノ操作技術が行われてきた。微細な探針を使い表面上の分子のナノ構造を形成させたり、電気的な刺激を与え反応を誘起して分子細線を作ろうとする研究がその代表的なものである。

例えばディップペンリソグラフィーという方法は、原子間力顕微鏡（AFM）のカンチレバーを用い、インク（分子）を基板上に描画することにより望む位置に分子パターンを形成させる微細加工技術である。金属をコートしたカンチレバーを使い、電圧印加状態で描画することにより導電性高分子細線を形成させることもできる。しかしこの方法は、AFM カンチレバーを用いているため解像度の限界があり、～数十ナノメートルに限られてしまう。

一分子レベルでの超微細加工を行うには走査トンネル顕微鏡（STM）の探針を用いる STM リソグラフィーがある。この研究例としてはグラファイト表面上にジアセチレン化合物の周期配列構造を形成させ、走査トンネル顕微鏡（STM）の探針から放出する非弾性トンネル電子の注入によりポリジアセチレンを一分子レベルで重合させることに成功した。この方法は任意の位置での重合と分子長の制御が可能な優れた方法であるが基板上にモノマー分子を基板に高度に配列させる必要がある。

固相法に対し、電気化学は液相中に溶解させた物質を外部印加電圧で反応させながら電極基板に堆積させる方法である。原料供給が液相中から行える利点がある。電気化学を用い液相中で一本の導電性高分子を長さ・密度・方向・形を制御しながら大面積に形成させる電気化学エピタキシャル重合がある。この方法はヨウ素原子で表面修飾した原子平坦金属電極にパルス電圧を印加することにより、基板上の表面ヨウ素原子配列に沿ってモノマーの逐次的な電解重合を起こさせ、単一分子細線を形成させる原理に基づいている。一分子細線の大面積形成、積層化、異種分子細線の形成が可能である。

ボトムアップの超微細加工技術の流れは大別して二つに分類できる。一つは本項で述べた表面のナノ操作技術であり、探針や電気化学などの外部制御を利用して表面上の分子を配列させたり、反応を誘起して細線を作る方法である。もう一つの方法は分子その物が自発的に高度な構造を形成する自己組織化である。これは生命現象で行われる一般的現象であり、光合成ではクロロフィルと呼ばれる分子が光エネルギーを効率良く電子に変換するために必要な最適の配列が達成されている。将来においては、これら二つの“外的”ボトムアップ技術である表面ナノ操作技術と“内的”ボトムアップ技術である自己組織化が融合した既存の技術を超えた新しい技術が開発されていくであろう。すなわち様々な構造を得るために必要な自己組織化する合成分子（部品）を使い、表面ナノ操作技術を使って、これを望む構造に1次元、2次元、3次元に階層を越えて配列させる技術である。

将来予測と方向性

5年後までに解決・実現が望まれる課題

- ・ 金属、誘電体、絶縁体など様々な基板上に分子を高度に二次元的に配列させる技術
- ・ 分子細線を望む位置に方向を揃えて大面積（二次元面）に形成させる技術
- ・ 分子細線の末端に電極を接合する技術の開発

10年後までに解決・実現が望まれる課題

- ・ 分子を望む位置に3次的に組上げる技術（ナノアSEMBラー）
- ・ 自己組織化とボトムアップ法を組み合わせたナノデバイスの大量生産
- ・ 生物に見られるような、長距離秩序や高階層の分子組織化のプログラミング（情報入力）と実現（出力）

キーワード

ボトムアップ、ナノ操作、自己組織化、分子素子、分子細線

（執筆者：坂口浩司）