

## 二次元物質と三次元物質の間にある物性

守谷 頼 (東京大学生産技術研究所 moriyar@iis.u-tokyo.ac.jp)

竹山 慶 (東京大学生産技術研究所 hand.takke@gmail.com)

笹川 崇男 (東京工業大学科学技術創成研究院 sasagawa.t.aa@m.titech.ac.jp)

町田 友樹 (東京大学生産技術研究所 tmachida@iis.u-tokyo.ac.jp)

二次元物質と呼ばれる物質群がある。英語でいうとTwo-dimensional materialである。この物質を説明する際に、我々はよく二次元物質とは膜厚が1原子または1分子層の単結晶薄膜のことである、という言い方をする。これは構造による分類であり、平面的なものは二次元的であり、立体的なものは三次元的であるという見方であろう。これは直感的にはわかりやすい。しかし、我々も含め、二次元物質の研究者はこの説明の詳細に立ち入ろうとはしない。例えば、厚みが数原子層は二次元物質と呼ぶべきであろうか？ 数原子より少し厚かったらどうか？ どの程度厚くなると二次元物質ではなくなるのか？ 明確に分けるのは難しくそうである。

構造ではなく、性質から分類するのはどうであろうか。二次元物質とはその性質が二次元平面内の成分のみで記述されることとしてみる。例えば伝導率が二次元平面内の成分のみで記述できて面直方向成分を持たないという考え方である。この考え方はすぐに問題に突き当たる。例えば、2層の二次元物質では層間を電子が自由に飛び移ることが可能であり、また面直方向の格子振動も存在する。2層は二次元物質と呼んではいけないのか？ これはなかなか同意されそうにない。総じて、二次元物質と三次元物質の境界というのはぼんやりしていて、明確に分けることが困難なのではないだろうか。

このあいまいな、二次元にも三次元にも属さない領域の研究についてここでは触れない。ニセレン化タングステン ( $WSe_2$ ) という結晶を例に挙げる。この物質は層状の結晶構造を持っており、一層の  $WSe_2$  の

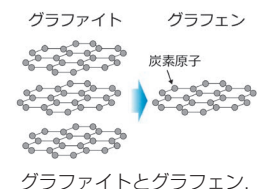
シートを積み重ねた構造をしている。1つの層内は結合が強い一方で、層間はファンデルワールス (vdW) 力で弱くつながっているため、比較的簡単に、テープなどを使って、結晶を剥がして1層、2層まで薄くすることができる。1層の  $WSe_2$  は伝導電子が面内方向にのみを移動するため、二次元物質である。では、2層、3層、4層、と厚くすると何が起るのか？ 複数層になると、電子は層内の移動に加えて、層間を飛び移って移動できるようになる。この面直方向に移動する電子の波は上下の表面で反射され、その結果面直方向に定在波を形成する。定在波が形成されることによりエネルギーは離散的な値をとる。これがサブバンド量子化と呼ばれる現象である。vdW 界面で劈開された結晶の表面には未結合手が存在しない。そのため原子レベルで平坦かつ化学的に安定な結晶表面が得られる。このような理想に近い表面が存在するため、 $WSe_2$  のサブバンド量子化は、結晶をテープで薄片化するだけで自然に現れる、安定なファンデルワールス量子構造である。

我々は共鳴トンネル効果を用いることによって、数層の  $WSe_2$  内のサブバンド量子化準位の観測に成功した。二次元物質を数層積み重ねることで、二次元物質が本来持つ二次元平面内の自由度に加えて、面直方向の量子化という新しい自由度を操ることができるようになった。これは二次元の物性と称すべきであろうか、それとも三次元の物性だろうか？ 我々はこの現象は、二次元でも三次元でもない2.5次元の物性と称するのがふさわしいと考えている。

### 用語解説

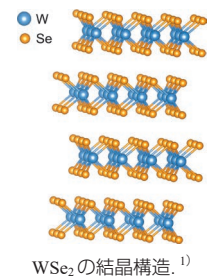
#### 二次元物質：

グラファイトは層状の結晶構造を持っている。そのうち1層だけを取り出した炭素1原子層の物質はグラフェンであり、グラフェンは二次元物質である。二次元物質とは層状の結晶構造を持った物質から薄片化された、厚み1~数層の結晶の総称である。



#### ニセレン化タングステン ( $WSe_2$ )：

$WSe_2$  の結晶構造を以下に示す。1層はW原子1個とSe原子2個で構成される3原子分の厚みを持つ。



#### ファンデルワールス (vdW) 力：

原子や分子間に働く相互作用の一つ。グラファイトや  $WSe_2$  などの層状構造を持つ結晶では、ファンデルワールス (vdW) 力によって層と層の間が結合している。イオン結合や共有結合とは異なり、vdW 結合は化学結合を持たない。そのため、vdW 結合は比較的弱い結合であり、層状物質はこの vdW 界面で容易に劈開することが可能である。