ナノ物質結合系の新展開
――光子と電子を介して協同するナノ物質

田 原 弘 量
横浜国立大学工学研究院
tahara-hirokazu-cf@ynu.ac.jp

近年，ナノ物質科学の研究が新しい段階に入りつつある．単一のナノ物質を高品質に作製する技術が飛躍的に進み，さらに複数のナノ物質を複合したシステムによって新しい機能が実現されつつある．

ナノ物質の次元性にも多様な研究アプローチが展開されており，特に2次元ナノ物質では，同種あるいは異種の単原子層物質を積層した構造が盛んに研究されている．グラフェン2枚をねじって重ねることで発現する超伝導特性や，異なる組成の単原子層物質を重ねることで形成されるモアレポテンシャルなど，複合構造に由来した新規物性が明らかになりつつある．

0次元ナノ物質であるコロイド半導体量子ドットでも，集積化によって生じる機能が明らかになってきた．コロイド半導体量子ドットは，大量合成の観点で優れた材料であり，2023年のノーベル化学賞の対象になったナノ材料である．**量子ドット**の集積膜は塗って作れる半導体膜であることを特徴として，太陽電池や発光ダイオードなどの光電デバイスへの応用に向けた研究が進められている．量子ドットはサイズによってバンドギャップエネルギーが変わるため，光吸収および発光波長の制御が可能な材料として有望である．しかし，これまでは量子ドット膜の欠陥低減と伝導特性の向上に注力し，バルク半導体単結晶のような性質の実現を志向する状況にあった．ところが近年，サイズ不均一性を低減させた試料が合成されることで，量子ドットの集合体としての本質的な特徴が明瞭に観測されるようになってきた．特に，レーザー発振特性などの共鳴光学応答ではサイズおよび形状の制御が不可欠であり，精密な物性計測が可能となってきた．また，化学合成によって無機量子ドットと有機分子の結合を利用する新たな展開も進みつつある．これらの技術によって生み出された量子ドットと有機分子のハイブリッド構造では，量子ドットを配列して結合させることができるため，量子ドットの集団としての特性が強く現れる．

具体的には，量子ドットを近接して配列した超構造体を作ることで，発光や非線形光電流応答の増幅が観測されている．これは量子ドット同士が協同的な光学応答を示すことで生じる**量子協同現象**である．これまで，光場を介した協同過程の観測が行われてきたが，最近，電子間結合に起因した協同過程も観測されている．量子ドット間距離の調整により協同効果の大きさを制御できることから，光電増幅変換に向けた量子ドット集合体特有の新しい機能としての応用が期待される．

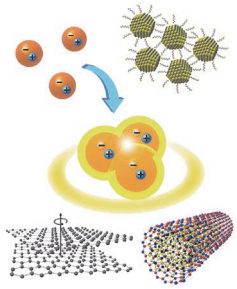
これまでは，同一次元のナノ物質同士を集合させた研究が行われてきたが，今後は異なる次元性を有した物質間の複合体でも協同的な振る舞いが現れると期待される．ナノ物質の種類と複合方法の適切な選択が，新たな物性機能の発現を左右する重要な要因となる．ナノ物質を創出し，さらにそれらを組み合わせる段階に入ったことで，ナノ物質科学の新たな展開が期待されている．

用語解説

ナノ物質：
一般に100 nm以下のサイズを持つ物質と定義される．特に，電子の量子閉じ込め効果が顕著に現れるのは10 nm以下のスケールであり，この領域では物性がサイズに強く依存する特徴が見られる．

量子ドット：
10 nm程度まで微細化された半導体微結晶は，量子ドット（ナノ粒子，ナノ結晶）と呼ばれる．電子の量子閉じ込め効果によりエネルギー準位が離散化し，零点エネルギーが増大する．発光波長をサイズによって制御できるため，蛍光体として量子ドットテレビなどへの応用が進んでいる．

量子協同現象：
原子，分子，量子ドットなどから成る集団量子系において，孤立した量子系では見られない集団的な振る舞いを示す現象．構成要素が相互に影響し合うことで，位相の揃った光学的・電気的応答が現れる．



ナノ物質を結合した構造体では，光子や電子を介することで協同的な応答が生じる．

©2025 日本物理学会