

龔 劍萍(グン チェンピン) 氏

北海道大学教授(大学院先端生命科学研究院) 博士(工学)

## 犠牲結合原理による多様な高靱性ソフトマテリアルの創出

Creation of Diverse Soft Materials with High Toughness by Sacrificial Bond Principle



従来のゲルは力学的に弱いため、その応用が極めて限られていた。龔 劍萍(グン チェンピン)氏は硬くて脆い網目と柔らかくて伸びる網目からなるダブルネットワーク構造が、ゲルに工業用ゴムに匹敵する強度と靱性をもたらすことを発見し、「ゲルが弱い」という常識を覆した。2011年以降、同氏は、ダブルネットワークゲルの研究を発展し、より一般的なソフトマテリアルの強靱化原理を確立するとともに、多様な高靱性ソフトマテリアルを創出し、顕著な業績をあげた。以下に同氏の主な業績を紹介する。

### 1. 多様な高靱性ソフトマテリアルの創出による犠牲結合原理の普遍性の証明

同氏はダブルネットワークゲルの脆い網目の化学結合は、ゲル全体を破壊しないための「犠牲結合」と見なすことができることを提唱した。さらに、この犠牲結合原理は普遍性があり、脆い共有結合の網目に限らず、非共有結合やほかの壊れやすい超分子構造も、犠牲結合としてゲルを強靱化することが可能であると提唱した。同氏は、ダブルネットワークゲルのような化学架橋した高分子網目のほか、イオン結合、疎水結合、水素結合などの非共有結合を犠牲結合として高分子ゲルに導入し、様々な高靱性ゲルの創製に成功した。化学結合を用いた場合、結合は不可逆であるため、一旦壊れた構造は自己修復できないのに対して、非共有結合は可逆的であり、壊れた構造は自己修復できる特徴があることを示した。非共有結合を犠牲結合に用いたゲルが、高強度・高靱性に加えて自己修復性や高い内部粘性による衝撃吸収性も併せ持つことを解明した。

また、犠牲結合として自己組織化分子を使い、ゲルに秩序構造や異方構造などを形成させることにも成功し、高靱性に加えて、異方的な膨潤・物質拡散・力学物性ならびに変形に伴って美しい構造色変化などを併せ持つ、従来のアモルファス構造のゲルにはない機能性ゲルの創製に成功した。

これらの研究は、多様な非共有結合が犠牲結合として機能し、ゲルの靱性を大きく増大させることを示し、「犠牲結合による高靱性化」は普遍性を持つと証明するものである。

### 2. 犠牲結合概念の拡張

同氏は硬い相と柔らかい相からなるメソスケールの双連続相分離構造を有する高分子ゲル、骨のようなバイオセラミックスと高分子ゲルとの複合体、低融点金属が骨格とするマクロなダブルネットワークゲルを創製し、これらの材料も硬い相分離相、セラミックス、金属骨格が先に壊れることによって靱性が大きく増大することを解明した。こ

これらの研究は、犠牲結合の概念をナノスケールの分子構造からメソスケールやマクロスケール構造、ならびに有機材料から無機材料や金属材料に拡張したものである。

同氏は、さらに「犠牲結合による強靱化原理」をソフト/ハード複合材料に拡張した。高靱性ゲルやエラストマーをマトリックス相と、硬いガラス繊維や炭素繊維を骨格として複合させ、金属や繊維強化プラスチックなどの既存の高靱性材料を凌駕した超靱性「繊維強化ソフトマテリアル」の創製に成功した。

### 3. 繊維強化ソフトマテリアルの定量的設計指標の確立

同氏は、ソフトマテリアルの破壊を研究し、靱性を特徴付ける破壊エネルギーは、亀裂先端での犠牲結合によるエネルギー散逸ゾーンの大きさとエネルギー散逸密度との積で表すことができ、高靱性材料の靱性は、この2つの量を最大化する構造の設計問題に帰結するという明快な考え方を提唱した。ソフト/ハード複合材料において、散逸ゾーンの大きさは硬い成分と柔らかい成分の弾性率比のルートに比例すること、エネルギー散逸密度は各成分のエネルギー散逸密度の体積平均であることを実験的に解明した。また、既存の高靱性材料を凌駕した破壊耐性を有する超靱性「繊維強化ソフトマテリアル」は、強靱ソフトマテリアルに支配される強い界面結合と数センチメートルにも達する力伝達長に起因することを解明した。これらの研究によって、同氏は、ソフト/ハード複合材料の超靱性発現には、強い界面結合、ハード骨格とソフトマトリックスの高い弾性率比、マトリックスの高い靱性という3つの条件が必要であることを解明した。これらの結果は、材料創製に定量的な設計指標を与えたものとなる。

同氏が確立した「犠牲結合による高靱性化」の原理は、すでに世界的に広く応用され、多くの強靱で自己修復性を示すゲルやエラストマーの創出に繋がった。これらの成果は、生体適応性も合わせ持ち、医療・衛生材料としてのハイドロゲルの選択肢を大幅に増加させた。「犠牲結合による高靱性化」原理は産業界にも応用され、高靱性ゴム材料の開発につながり、タイヤの軽量化・長寿命化を通じ、環境保護と省エネルギーに貢献する。

以上のように、龔氏は、ソフトマター材料に関して先導的研究を行い、この分野の最近の飛躍的な進歩の牽引役を果たしてきた。よって、同氏の業績は誠に顕著であり、日本化学会賞に値するものと認められた。