

業績

## 4族重合触媒を用いたポリオレフィンの高機能化

Functionalization of Polyolefins Using Group 4 Polymerization Catalysts


 しおの たけし  
 塩野 毅

広島大学大学院先進理工系科学研究科・教授 (工学博士)

エチレンやプロピレンなどのシンプルなモノマーから製造されるポリオレフィンは、分子量・分子量分布、共重合組成・連鎖分布や立体規則性を制御することでさまざまな軽量高分子材料を与える。官能基の導入やモノマー連鎖の精密制御は、ポリオレフィンを高性能化・高機能化する鍵技術としてその開発が望まれていた。

塩野毅氏は、高立体規則性ポリプロピレンの合成に必須である4族金属を用いたZiegler-Natta触媒ならびにメタロセン触媒に着目し、それぞれの触媒の特徴を生かして末端や側鎖に官能基を導入する手法を確立した。さらに、プロピレン重合において高シンジオ特異性から非立体特異性まで制御しうる共重合反応性に優れたチタン系リビング重合触媒を見だし、新規ポリオレフィンの精密合成に道を拓いた。その概略を以下に紹介する。

## 1. 4族重合触媒を用いたポリプロピレンの官能基化

4族金属触媒は極性基により被毒されるため極性モノマーとの直接共重合によるポリプロピレンの官能基化は困難である。塩野氏は、不均一系Ziegler-Natta触媒およびジルコノセン触媒によるプロピレン重合の素反応を調べ、1) 連鎖移動末端の反応性、2) ジアルキル亜鉛連鎖移動剤、3) 非極性反応性モノマー・極性基保護モノマー、を詳細に検討することで、イソタクチックポリプロピレンやシンジオタクチックポリプロピレンの停止末端・開始末端・側鎖に反応性基や極性官能基を導入する手法を開発した。

## 2. 新規チタン錯体触媒によるプロピレンの高シンジオ特異的高速リビング重合

新規に合成・単離したジメチルシリレン架橋 (フルオレニル) (*tert*-ブチルアミド) ジメチルチタン錯体に適切な助触媒とスカベンジャーを組み合わせた触媒系が、温和な条件下、プロピレンや1-ヘキセンのシンジオ特異的リビング重合を進行させることを明らかにした。溶解性が高くリビング重合に有効な助触媒を見だし、成長速度・シンジオ特異性に及ぼす溶媒の効果を明らかにした。さらに、一連のチタン錯体誘導体を合成しプロピレン重合能を評価することで置換基効果を明らかにするとともに、高シンジオ特異的高速リビング重合系を実現した。また、シンジオ特異性が重合温度や

プロピレン圧に依存することを明らかにし、ステレオブロックポリマーを精密に合成する手法を開発するとともに、高速リビング重合系を用いた単分散ポリマーの触媒的合成法を提案・実証した。

## 3. シクロオレフィン共重合体の精密合成

エチレンとノルボルネンやその誘導体との共重合体 (シクロオレフィン共重合体) は、低複屈折かつ低吸湿性で耐熱性に優れた透明材料として注目されている。同氏は、上記のチタン錯体触媒がノルボルネンの単独重合やノルボルネン/1-アルケン共重合をリビング的に進行させることを見いだした。さらに、ポリプロピレンの官能基化に有効であったモノマーと共重合することでシクロオレフィン共重合体の官能基化にも成功した。10-ウンデセノールの水酸基をトリイソブチルアルミニウムで保護したモノマーでは、ノルボルネンとの共重合が高速でリビング的に進行することも見いだした。ハードセグメント (H) にノルボルネン連鎖やノルボルネン/1-アルケン共重合連鎖、ソフトセグメント (S) にアタクチックポリプロピレンやエチレン/プロピレン共重合体連鎖を有するH-S-H型ブロックコポリマーを合成し物性を評価した。それぞれの連鎖長に応じて良好なエラストマー性を示したが、ポリノルボルネン鎖への水酸基の導入は表面物性だけでなく機械物性をも向上させ、高強度の高耐熱・高透明エラストマーとなることを示した。また、ノルボルネン/1-アルケン共重合においてはノルボルネンの重合が優先することを明らかにし、長鎖1-アルケンを用いたグラジエントコポリマーやグラジエント連鎖からなるブロックコポリマーでは脆性が改善されることを明らかにした。

以上のように、塩野毅氏は工業的に重要なZiegler-Natta触媒やジルコノセン触媒を用いたポリオレフィンの官能基化手法を確立するとともに、立体特異性が制御可能でノルボルネンとの共重合反応性に優れた高速リビング重合触媒系を開発し駆使することで、高性能・高機能ポリオレフィンの創製に道を拓いた。その業績は国内外で高く評価されており、高分子学会賞 (科学) に値するものと認められた。

業績

## 新規動的キラル機能開拓を指向したらせん高分子の精密構造デザインと制御

Precision Design and Synthesis of Helical Macromolecules for Exploration of New Dynamic Chiral Functions


 すぎのめみちのり  
 杉野目道紀

京都大学大学院工学研究科・教授 (博士 (工学))

らせん高分子の合成と構造制御は、長年にわたる重要な研究分野であり、特にらせん不斉制御に関する多くの知見が蓄積されてきた。キラル分離および検出機能に代表されるらせん高分子の機能開拓も大きく進展したが、らせんキラリテの完全誘起が必要なキラル機能、特に不斉合成におけるキラル触媒としての利用は、ほぼ手つかずで残されてきた。また、円偏光発生や、らせんの動的反転挙動をその機能に活かした事例も極めて限られていた。杉野目氏はポリ(キノキサリン-2,3-ジイル) (以下PQX) の構造特性に注目し、PQXの動的らせん不斉の高度な制御を様々な手法により達成するとともに、この骨格をプラットフォームとして様々な機能性官能基を導入するモジュール型の分子設計により、らせん高分子の新規キラル機能を開拓した。以下にその概略を紹介する。

### 1. PQXに対する動的らせん誘起

杉野目氏はキラル側鎖を用いる分子デザイン (第1世代) により、PQXのらせん不斉が動的かつ完全に制御されることを見出した。キラル側鎖の構造により、クロロホルム/1,1,2-トリクロロエタン、*n*-オクタン/シクロオクタンなど、物性に大きな差異を認めたい溶媒間でも鋭敏にらせん方向が逆転し、完全な右または左巻きらせんが形成されることを明らかにした。

また、キラル置換基を持たないアキラルPQXにおいても、ゲスト受容基を導入しキラルゲストとの動的共有結合の形成によってらせん誘起を行う第2世代デザインを確立した。さらにはキラル置換基もゲスト受容基も持たないアキラルPQXに対しリモネン等のキラル溶媒を作用させる第3世代デザインにより完全ならせん誘起が進行することを見出し、らせん高分子に対するキラル溶媒による初めての高度ならせん誘起として報告した。

### 2. キラリテ可換らせん高分子触媒の開発

PQXに様々なアキラル触媒活性部位を組み込むことで、高いエナンチオ選択性を示す種々のキラル高分子触媒を開発した。配位性のトリフェニルホスフィンや2,2'-ビピリジン、求核性のp-アミノピリジンを導入したPQXが、種々の遷移金属触媒反応や有機触媒反応において、低分子キラル配位子と同等以上の選択性を示す回収再利用可能なキラル触媒となることを明らかにした。特筆すべきことに、高分子触媒のらせん不斉が動的で

あることを利用し、反応条件によって生成物の絶対配置スイッチングが可能な不斉反応システムを実現した。

### 3. キラル溶媒を不斉源とする不斉触媒反応の実現

アキラルPQXにキラル溶媒からの不斉転写を行う第3世代デザインは、有機合成化学において1970年代からの長年の課題とされてきた「キラル溶媒を不斉源とする不斉合成」の実現を可能とした。触媒部位を有するPQXを光学活性リモネン中に溶解してらせん不斉を誘起することで、各種不斉触媒反応において高いエナンチオ選択性を得ている。本系はらせん高分子を触媒骨格として用いることで、微弱な非結合性キラル相互作用を増幅して溶媒から触媒に不斉転写することを特徴としており、不斉合成における新しい戦略としての展開が期待される。

### 4. 不斉増幅を特徴とする触媒反応の開発

杉野目氏はらせん高分子のMajority-rule効果に基づいた不斉増幅触媒反応を初めて実現した。低光学純度の出発原料から合成したPQXが、高選択的かつキラリテ可換な高分子キラル触媒として働くことを見出した。この結果は、不斉源として用いるキラル化合物の鏡像異性体の一方だけが低光学純度で入手できれば、キラリテスイッチングと不斉増幅を組み合わせることで、高い光学純度の両エナンチオマーが得られることを示しており、動的らせん高分子触媒を用いる優位点を明確に示した。

### 5. キラリテ可換円偏光発生材料の開発

杉野目氏はPQX骨格への発光団の組み込みによる円偏光蛍光発光高分子、およびPQXが薄膜形成時にコレステリック型超構造をとることを利用した円偏光選択反射膜の開発にそれぞれ成功している。いずれも、PQXの動的ならせん形成を利用することで、発生円偏光のキラリテを可逆的にスイッチングできることを特徴としている。特に、円偏光反射膜は、円偏光キラリテのみならず選択反射波長を可視領域全域にわたってチューニングすることのできる初めての固体薄膜として特徴的である。

以上のように、杉野目道紀氏はらせん高分子の動的キラリテ、立体効果、キラル超構造形成、エネルギー集積効果などを巧みに利用し、低分子では実現が困難なキラル機能開拓に成功している。その業績は国内外で高く評価されており、高分子化学に寄与するところ大であることから高分子学会賞に値するものと認められた。



業績

## 単一分子分光法を用いた高分子の特性及び機能の研究

Study of Polymer Properties and Function Using Single-molecule Spectroscopy



マーティン バッハ  
Martin Vacha

東京工業大学物質理工学院・教授 (理学博士)

単一分子の光検出および光学分光法は、近年目まぐるしい発展を遂げ、分子の構造・ダイナミクスのナノレベルでの研究にとって非常に有用な手段の一つとなっている。一般的に、分子には“個性”があり、様々な物性の値が個々の分子によって異なっている。また多くの場合、その物性が経時的に変化している。単一分子分光法のメリットは、通常の分子集団のアンサンブル測定では分からない物性の分布とそのダイナミクスが得られることである。分子個々の性質を調べて統計的に解析することで、多数の分子の平均値では得られない重要な性質や現象を明らかにすることができる。Martin Vacha氏は、今まで主にバイオサイエンスの分野で活発に適用されてきた単一分子分光法を、高分子や有機物質を含む複雑系ソフトマターに展開し、1分子の分光を通してナノスケール領域における構造、物性、およびそのダイナミクスについての高いポテンシャルを確信し、研究を推進してきた。新しい手法の開発、発光性の共役系高分子の特性、高分子のナノスケール物理など、多くの世界初の試みを行い、興味深い成果を挙げ続けている。以下にそれらの概略を紹介する。

### 1. 共役系高分子一本鎖のコンフォメーション、光物理特性の測定およびその制御

高分子鎖のコンフォメーションを測定するために、単一分子の3次元光吸収異方性測定装置を開発し、MDシミュレーションを通して高分子一本鎖のコンフォメーションを決定する手法を創出した。また、代表的な共役系高分子であるMEH-PPVを用い、一本鎖のコンフォメーションと励起子移動やスペクトルに代表される種々の光物理的過程との相関を明らかにした。さらに、共役系高分子として、ポリフルオレンを用いた場合において、一本鎖からの電界発光の検出に成功し、緑色発光の原因として折りたたまれた一本鎖内のセグメント間におけるH-会合体やCT会合体のような凝集体形成を特定したほか、 $\beta$ 相を含む様々なモルフォロジーの形成メカニズムを解明した。また、蛍光顕微鏡と原子間力顕微鏡 (AFM) を組み合わせた装置を用い、共役系高分子のナノ粒子に局所的な力を当てる方法や、高分子鎖一本をAFMカンチレバーで引っ張り上げる手法でコンフォメーションの制御を行い、共役系高分子の発光特性が力学的に制御でき

ることを示した。

### 2. 単一色素プローブによるポリマーナノスケール物性

蛍光顕微鏡イメージングでは、個々の色素プローブ分子の座標や配向の高精度な決定、個々の分子の分光学的特性の評価により、高分子や複雑系ソフトマターの様々な物性のナノメートルスケールでの研究が可能になってきた。Vacha氏は、これらの手法を用いて高分子薄膜の厚さ方向の緩和ダイナミクスを研究し、高分子のガラス転移温度と局所的な緩和時間の関連性を明らかにした。例えば、ガラス転移温度が測定温度より数十度高い条件では、高分子の緩和時間は表面から内部にかけて緩やかに増加し、基板から数十nmの距離からは基板に近づくに従い急激に増加することが明らかになった。このほか、高分子溶液中や液晶中の物質拡散に関する研究を推進し、単一粒子蛍光イメージングを用いた液晶モノマーの光重合中における動的プロセスの観察にも成功した。

### 3. その他の研究

Vacha氏は、高分子以外の材料科学や物理学における様々な課題においても単一分子分光法を駆使した独創的な研究を展開してきた。特に、自然や人工の光合成集光アンテナ分子の構造と機能の解明、半導体量子ドットおよびペロブスカイトナノ結晶の発光効率向上につながるプリンキングのメカニズム解明および電界発光の1ナノ粒子レベルでの研究、分子固体における励起子拡散とフォトンアップコンバージョンのナノスケール特性の解明、1金ナノロッドにおける局在プラズモンによる共鳴エネルギー移動の増強などの課題における成果を挙げることができる。

以上のようにMartin Vacha氏は、独創性と新規性の高い単一分子分光法の開発と応用を源にして、高分子物理学と高分子材料科学の分野における基礎研究を中心とした活動を精力的に行っている第一人者である。その業績は、国内外で高く評価されており、高分子科学に寄与するところが極めて大きい。また、当該分野の国際会議の実行委員や国際科学誌の編集長を通じ、本分野の学問的発展にも多大な貢献を行っていることから、高分子学会賞に値するものと認められた。

業績

## 精密分子集積化による機能性ソフトマテリアルの創製

Development of Functional Soft Materials by Precision Molecular Assembly



ふくしまたかのり  
福島孝典

東京工業大学化学生命科学研究所・教授 (博士 (理学))

有機物質を構成する分子は、形や種々の性質が異方的であり、また多様なコンフォメーションや動的挙動を示す。これらの多様性が、原子を構成要素とする無機物質との対照をなす、しなやかな機能の根源である。有機・高分子合成化学の発展により、合目的に分子を合成できるようになってきた。しかし、ほとんどの分子機能は凝縮系において発現するため、分子本来の性質を最大に活用するためには、分子合成と同等の重要性をもって精密な分子集積化技術を開発する必要がある。福島孝典氏は、主に $\pi$ 電子系分子、高分子、ナノカーボンなどを構成要素とし、ナノから巨視的スケールにわたる革新的な精密分子集積化手法を開拓し、数々の新機能や新現象を発現するソフトマテリアルを開発してきた。以下にその概要を紹介する。

### 1. $\pi$ 電子系ソフトナノマテリアルの開発

福島氏は、カーボンナノチューブによりイオン液体がゲル化する現象を見だし、この知見を活かし、高電導性高分子複合体、空中で高速駆動する高分子アクチュエータ、伸縮性エレクトロニクスを実現した導電性材料の開発に成功した。さらに、ナノグラフェンとも呼べるヘキサベンゾコロネンを構成要素とし、独自の化学修飾により世界初の電子機能活性な自己集合ナノチューブを創製した。この研究を広く展開し、らせんコイルを含む、特徴ある機能を示す種々の一次元ナノ構造体を構築した。究極的には、光電子機能を発現する過去に例のないヘテロナノ接合体の創製に成功している。これらの成果は関連分野のマイルストーンとして世界的に認知されている。

### 2. 拡張 $\pi$ 電子系分子の新規骨格構築法の開発

オルトフェニレン骨格を有するオリゴマーやポリマーが潜在的に動的ラセン性を示すことに着目し、新たな刺激応答性高分子を開発した。オルトフェニレンオリゴマーやポリマーは、最も単純な $\pi$ 共役高分子であるがほとんど研究例がなかった。福島氏はこれらの分子群の有効な合成法を確立し、ユニークな構造特性、酸化還元反応や溶媒環境に対する応答機能、円盤状液晶の配向制御機能などを明らかにした。また、ボラフルオレンとアセチレン誘導体から直接、特徴ある湾曲構造を有する拡張 $\pi$ 電子系骨格を構築する新反応を開発した。この反応を用いた高分子反応により、ミクロ多孔性を示す $\pi$ 共役ポリマーの開発にも成功している。

### 3. スケール横断的精密分子集積化法の開発

上記の研究過程で福島氏は、ナノスケールで精緻に作り込まれた構造を巨視的スケールにボトムアップすることの重要性を強く認識し、ナノを超えた長さスケールで精密な分子集積化を可能にする分子系の設計に取り組んだ。最初の成果はボトルブラシポリマーの大面积配向制御による巨大な力学応答機能の発見である。その後、三回対称性を有するトリプチセンの空間充填を巧みに利用した分子設計により、ミリ～センチメートルスケールで分子配向と配列が完全に制御された薄膜の構築を実現した。展開研究により、高分子の高次構造化と力学物性の向上、有機半導体の二次元集積化、無機材料の物性制御、分子レジストの開発、高密度・高配向大面积自己組織化単分子膜の構築などにも成功している。またプラスチック表面上にトリプチセン誘導体のナノ配向膜を作製する技術を開発し、有機トランジスタの性能指標の改善などに応用できることを示した。

### 4. 従来の物質相の概念を覆す新物質の発見

あたかも単結晶のように、分子の三次元的な位置秩序と配向秩序を有し、かつ液体のような流動性も併せ持つ、従来の物質相の既存概念では説明できない新物質を発見した。詳細な検討から、分子のキラリティーと集合体の巨視的集団運動の相関や、特異な粘弾性挙動を明らかにしている。さらに、独自に設計したイオン性側鎖を有するトリフェニレン系液晶の研究から、反磁性有機物の相挙動が強磁場で書き換わるという常識を覆す新現象を見いだしている。

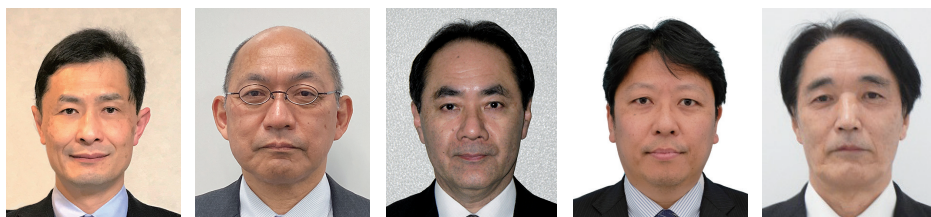
以上のように福島氏は、分子の構造特性、物理的性質、分子間相互作用などに対する洞察から数々の独創的な分子/分子集合体システムを構築し、前例のない構造形成、性質、現象の発見へと結実させている。 $\pi$ 電子系分子・高分子やナノカーボンを基盤とするソフトマテリアルの創製に加え、自発的超長距離構造秩序を形成するソフトマテリアルの研究は、分子性材料を実応用に資する巨視的スケールにいかにもボトムアップするか? という課題を解決するための学術基盤の創出に通じる。既存概念や技術の更新を目指すというよりむしろ、0を1にする独創的な研究と位置づけられる福島氏の研究は、国内外で高い評価を得ており、高分子科学に大きく貢献することから、高分子学会賞に値するものと認められた。



業績

# 電動自動車用高耐熱コンデンサ向け二軸延伸ポリプロピレンフィルムの開発と工業化

Development and Industrialization of Biaxially Oriented Polypropylene Film for Heat Durable Film Capacitor in Electric Automobiles



おおくら まさとし  
大倉正寿  
東レ(株)

いとう たつ や  
伊藤達也  
東レ(株)

なが い つ お  
永井逸夫  
東レ(株)

あさ の てつ や  
浅野哲也  
東麗薄膜加工(中山)有限公司

もり ぐち いさむ  
森口 勇  
東レKPフィルム(株)

世界的な気候変動の問題が深刻化し、温暖化ガス削減に向けた規制強化により、電動自動車(xEV:ハイブリッド自動車、プラグインハイブリッド自動車、電気自動車、燃料電池車の総称)の需要が急増している。現在、このxEVの動力制御回路の基幹部品としてポリプロピレン(PP)フィルムコンデンサが採用されているが、その採用から基幹部品として定着に至るためには、誘電体の二軸延伸PPフィルム(OPPフィルム)の高電位傾度(厚み当たりの絶縁破壊電圧)を大幅に高め、薄膜化を推進する必要があった。

受賞者らは、革新的な独自技術により高耐熱極薄OPPフィルムを開発・工業化、継続的に進化させ、世界初となるxEV向けPPフィルムコンデンサの採用並びに基幹部品化と、継続的なOPPフィルム薄膜化と高電位傾度化によるコンデンサ小型化および性能向上に大きく貢献した。以下に受賞の業績を要約する。

## 1. 技術の内容と独創性

受賞者らは、絶縁破壊メカニズムに基づくOPPフィルム電位傾度向上コンセプトと、それを具現化する以下の革新的なフィルム設計・プロセスと構造制御技術を順次創出し、工業化に繋げた。

### (1) 高結晶化：超高立体規則性アイソタクティックPPの極薄OPPフィルム量産化技術

樹脂メーカーと共同開発した延伸フィルム用としては前例のない超高立体規則性PP樹脂を、高速・広幅で極薄膜フィルム化するため、高精度で延伸温度と搬送張力を制御する独自の延伸プロセスを確立した。結晶化度・融点向上により高電位傾度が2割向上した世界最薄3.2 μmの第1世代耐熱OPPフィルムを開発・工業化した。PPコンデンサとして世界初となる耐熱温度105℃と小型化が達成され、世界で初めてxEV用に採用された。

### (2) 構造均一化：延伸前結晶構造制御によるフィルム表面微細緻密突起形成技術

OPPフィルムの加工に必要な滑り性を付与する、粗大なクレータ状構造が絶縁破壊の起点になることを見

出し、微細突起を緻密に形成した表面を得ることを目標とし研究を進めた。このため、クレータ状構造を形成する延伸前シート中のβ晶球晶を微細かつ高密度に生成させる延伸前結晶構造制御に取り組み、β晶球晶サイズと数密度の独立制御技術を創出した。本技術により、延伸フィルムの表面突起を均一・微細緻密化することで加工適性を維持して電位傾度が大幅に向上し、合わせて製膜安定性も向上した。この独自技術により、第1世代対比で高電位傾度が1割以上向上、薄膜化した第2世代を工業化した。

### (3) 非晶運動抑制：非晶構造制御による高電位傾度向上技術

特に高温で運動が抑制された非晶構造を目標とし、結晶間をつなぐタイ分子を増加させ高温での結晶および非晶構造を安定化させる新コンセプトを創出し研究を進めた結果、フィルム破断強度が高いほど高電位傾度が高くなることを確認し、非晶運動抑制を示唆する結果も得た。本知見に基づき、結晶、可動非晶、中間相(拘束非晶)の3相モデルを構築し、中間相の運動性抑制や割合増加により高電位傾度を高められると考察した。これを踏まえて新たに創出した独自の非晶構造制御技術適用により、第2世代対比で高電位傾度2割向上、薄膜化した第3世代耐熱OPPフィルムを工業化した。

## 2. 技術の社会的価値・重要性・波及効果

本成果により、初上市以降フィルムの高電位傾度は6割以上増加、厚みは約7割とする薄膜化(コンデンサ体積半減に相当)を達成した。本研究成果のOPPフィルムは、xEV用コンデンサのデファクトスタンダードとして、xEVの信頼性向上と継続的な高性能化に寄与し、さらには気候変動問題に対して多大な貢献をするものと期待される。また、PP結晶・非晶の精密構造制御や絶縁フィルムの研究への寄与など科学技術進歩への貢献も期待できる。

以上の理由によって、高分子学会賞(技術)に値するものと認められた。

業績

## バイオ樹脂アロイの創製と自動車用樹脂部品への適用

Invention of Bio-based Polymer Alloys and Its Applications for Automobile Plastic Parts

かわだ じゅんぺい  
河田順平

(株)豊田中央研究所

もうり まこと  
毛利 誠

(株)豊田中央研究所

きとう まさゆき  
鬼頭雅征

トヨタ紡織(株)

ありお としゆき  
有尾敏幸

トヨタ紡織(株)

かとう けいすけ  
加藤恵介

トヨタ紡織(株)

18世紀の産業革命以降、二酸化炭素(CO<sub>2</sub>)の排出量が増大し、地球温暖化に影響を与えている。国際連合は持続可能な開発目標(SDGs)を掲げ、社会はその実現を求めている。自動車業界も、製造時のCO<sub>2</sub>の排出量が少ない材料開発、および自動車を軽量化させることにより燃費を向上させ、CO<sub>2</sub>排出量の削減を目指した研究開発が進められている。河田氏と鬼頭氏は、生育時にCO<sub>2</sub>を吸収し、かつ非可食植物由来の100%バイオプラスチックであるポリアミド11(PA11)と自動車樹脂部品において使用量が最大の樹脂であるポリプロピレン(PP)からの“バイオ樹脂アロイ”を創製し、相構造を制御することにより新たな機能を発現させるという独創的な研究を社会に役立つ製品としての実用化に繋げた。以下に、彼らの研究概要を紹介する。

## 1. バイオ樹脂アロイの創製

PP/PA11バイオ樹脂アロイの創製に向け、混ざり合わないPA11とPPの親和性向上に取り組んだ。バイオ樹脂アロイの作製方法(二軸溶融混練機のスクリュエデザイン、温度、粘度)、用いる相容化剤の種類等、様々な検討を重ねた結果、例えば、使用する相容化剤を適切に選定することにより、バイオ樹脂アロイの相構造をnmレベルで制御可能なことを見出した。PP/PA11バイオ樹脂アロイの相構造を“サラミ構造”にすると、従来困難であった剛性と耐衝撃性の両立を可能とし、自動車用PP内装材の物性を上回るPP/PA11バイオ樹脂アロイの創製に成功した。

## 2. バイオ樹脂アロイの高性能化

バイオ樹脂アロイの力学特性は相構造に基づいて変化するため、相構造制御によるバイオ樹脂アロイの更なる高性能化に取り組んだ。世界に先駆けて、バイオ樹脂アロイの相構造を進化させた結果、サラミ構造をナノ化させた“ナノサラミ構造”およびサラミ構造を連結させた革新的な“共連続相サラミ構造”の形成を実現し、耐衝撃性の飛躍的向上に成功した。また、共連続相サラミ構造を形成させることにより、剛性を維持した状態で、かつ先の耐衝撃性の飛躍的向上を達成した。

これらは、ゴム成分の多量添加による耐衝撃性の向上とは異なり、厚み数十nmのゴム連続相の形成による耐衝撃性の発現であるため、剛性を低下させることなく耐衝撃性の向上を可能としている。

## 3. バイオ樹脂アロイの実用化

バイオプラスチックの実用化には、力学特性、生産性、耐久性、経済性等の解決すべき様々な課題がある。PP/PA11バイオ樹脂アロイは、混練中のせん断流動場の活用により、バイオ樹脂アロイのペレットを作製可能であり、特殊な装置や特別な成形条件を必要とせず、既存の設備による通常の成形条件でも優れた力学特性を発現するよう設計されている。本材料は優れたチクソ性を有するため、射出成形のみならずその他の成形も可能であり、発泡成形への適用を可能とした。その結果、優れた耐衝撃性を有するバイオ樹脂アロイを発泡させた場合、発泡により材料の使用量を削減可能なため、世界で初めてバイオプラスチックによる耐衝撃性と軽量化を同時に実現した。なお、本バイオ樹脂アロイは、既に使用されているPA11およびPP等を用いているため、耐久性等問題がなく、現在、自動車の発泡ドアトリムとして使用されている。

## 4. 今後の展開(社会的意義、将来性)

持続可能な非可食植物からのバイオプラスチックを用いたPP/PA11バイオ樹脂アロイの相構造を精密に制御した結果、剛性を維持しつつ、かつそのシャルピー衝撃強さを飛躍的に向上可能であった。本材料は射出成形のみならず発泡成形にも適用可能なため、現在、発泡による軽量化製品として自動車部品に使用されており、ドアトリムにおいて20 wt%以上の重量削減を達成した。河田順平氏らの技術はその他のポリアミドにも応用可能であることから、高分子科学の発展に寄与したと考える。今後、本材料は家電製品および生活用品への適用も期待され、産業界への波及効果も大きい。以上により、これらの業績が高分子学会賞に値するものと認められた。