

接着剤は固まった後も内部で動いていたーゲル化後の構造再編成を発見！

自動車や航空機の軽量化を支える新規接着技術への応用に期待！

ポイント

- ① 接着剤が固まる過程で起こる「縮み」現象と、「内部構造の変化」との関係性を明らかにした。
- ② 接着剤が固まり始める「ゲル化（※1）」後は体積収縮が抑制される一方で、構造が再編成されることを実証した。
- ③ ゲル化を境に、「緻密（ちみつ）化」から「構造再編成」へ切り替わることを見いだした。

概要

世界のエネルギー消費の約3割はモビリティ（人や物の移動）によるものであり、その低燃費化に向けて自動車や航空機などの構造部材の軽量化が求められています。軽量化の実現には、金属や高分子材料などの異種材料を適材適所で組み合わせることが重要であり、それらを強固に接着するための高性能な接着技術の開発が課題となっています。九州大学大学院工学研究院応用化学部門／次世代接着技術研究センターの田中敬二主幹教授／センター長らは、科学技術振興機構（JST）未来社会創造事業 大規模プロジェクト型「界面マルチスケール4次元解析による革新的接着技術の構築」を遂行しています。

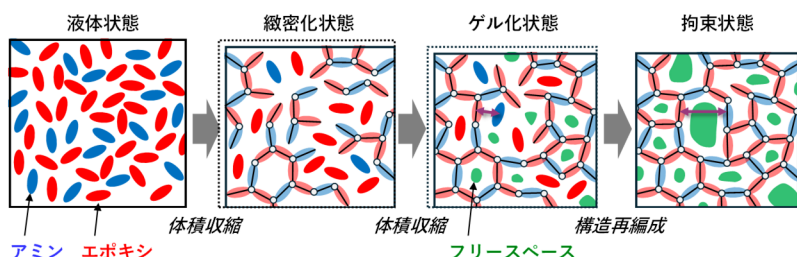
熱硬化性樹脂は硬化反応によって3次元ネットワーク構造を形成しますが、その過程で生じる硬化収縮は内部応力の発生や界面剥離による接着強度の低下を引き起こすため、長年にわたり材料信頼性を左右する重要な課題とされてきました。このため、硬化反応中に材料内部でどのような構造変化が生じるのかを分子レベルで理解し、精密に制御することが求められていました。

九州大学大学院工学研究院応用化学部門の田中敬二主幹教授らの研究グループは、モデルエポキシ樹脂を対象に、体積収縮測定、広角X線散乱測定、および全原子分子動力学シミュレーションを組み合わせることで、マクロな収縮挙動と分子レベルの構造変化との関係を詳細に解析しました。その結果、材料全体の体積収縮は主にゲル化前に進行し、ゲル化後は著しく抑制される一方で、分子間距離やフリースペース（※2）はゲル化後も変化し続けることを明らかにしました。

本成果は、「硬化収縮が分子構造の変化を直接反映する」という従来の理解を刷新し、ゲル化を境として「マクロな緻密化」と「構造再編成」が分離することを初めて実証したものです。とくに、ゲル化後にはネットワーク構造による拘束下で局所的な構造再編成が支配的となる新たな分子描像を提案しました。本成果は、熱硬化性樹脂の硬化収縮、それに伴う内部応力の発生機構の理解を深めるとともに、異種材料接着剤の性能向上に向けた分子設計の加速につながることが期待されます。

本研究は、JST 未来社会創造事業ならびに経済安全保障重要技術育成プログラム（K Program）の支援を受けて実施されました。本研究成果は、Nature Portfolio の材料科学分野のオープンアクセス誌「Communications Materials」オンライン版に2026年9月18日（金）（日本時間午後6時）に掲載されました。

本研究成果の概要図



熱硬化性樹脂の硬化過程における分子描像。（左から）反応前の液体状態、ゲル化前での緻密化状態、ゲル化状態、ゲル化後での拘束状態を示す。図中の点線は体積収縮前の体積に対応し、ポストゲル拘束状態における矢印は分子相関を示す。

【研究の背景と経緯】

世界のエネルギー消費の約3割は、モビリティ（人や物の移動）によって占められており¹⁾、その削減は持続可能な社会の実現に向けた喫緊の課題です。モビリティ分野におけるエネルギー消費を抑える有効な手段の一つが、構造部材の軽量化です。その実現には、金属や高分子材料などの異種材料を適材適所で組み合わせる複合化が不可欠であり、異種材料を強固につなぐ接着技術の重要性が高まっています。接着剤や繊維強化プラスチック（FRP）の主要構成材料である熱硬化性樹脂は、電子材料や塗料などにも広く利用されており、現代のものづくりを支える重要な材料です。これらの材料は、硬化反応によって3次元ネットワーク構造を形成することで優れた強度や耐久性を発現します。一方で、硬化過程で生じる硬化収縮は内部応力の発生や界面剥離を引き起こし、材料や接着構造体の信頼性を低下させる要因となるため、長年にわたり重要な研究課題とされてきました。

九州大学大学院工学研究院応用化学部門／次世代接着技術研究センターの田中敬二主幹教授／センター長らの研究グループは、接着界面の本質的理解に基づく次世代接着技術の確立を目指し、JST 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型「界面マルチスケール 4 次元解析による革新的接着技術の構築」を遂行しています。本プロジェクトでは、高分子科学および先端計測を専門とする研究者と連携企業を結集し、接着および高分子ネットワーク材料の構造形成過程を分子レベルから巨視的物性まで包括的に理解することで、高性能材料の設計指針の構築を進めています。

これまで、熱硬化性樹脂の硬化収縮は、架橋反応に伴う分子の緻密化を直接反映していると考えられてきました。また、ゲル化は力学特性や流動性が大きく変化する重要な転換点として知られていました。しかし、ゲル化が分子レベルの構造形成機構にどのような影響を及ぼすのか、また硬化収縮と構造変化が常に対応しているのかについては十分に理解されていませんでした。特に、ゲル化後に形成されたネットワーク構造の中で、分子構造がどのように変化し続けるのかについての分子描像はこれまで明らかにされていませんでした。

このような背景のもと、本研究では、体積収縮測定、広角 X 線散乱および全原子分子動力学シミュレーションを組み合わせることで、熱硬化性樹脂の硬化過程におけるマクロな収縮挙動と分子レベルの構造変化との関係を明らかにすることを目指しました。

【研究の内容と成果】

九州大学大学院工学府の紺谷藍大学院生、徳永惇大学院生、統合新領域学府の宮下剛大学院生、大学院工学研究院の春藤淳臣教授、次世代接着技術研究センターの山本智教授、大学院工学研究院応用化学部門の田中敬二主幹教授らの研究グループは、代表的な熱硬化性樹脂であるエポキシ樹脂を対象として、硬化反応中の体積収縮、分子間相関、およびフリースペースを定量的に解析しました。

レオロジー（※3）測定によってゲル化点を特定し、同時に体積収縮挙動を測定したところ、硬化収縮の大部分はゲル化前に進行し、ゲル化後には著しく抑制されることが明らかになりました。すなわち、材料全体の緻密化はゲル化によってほぼ完了することが示されました。一方で、広角 X 線散乱測定および分子動力学シミュレーションによる解析から、フェニル基や水酸基に由来する特徴的な分子相関距離は、ゲル化後も変化し続けることが分かりました。さらに、その距離分布は次第に狭くなり、ネットワーク構造による拘束の中で分子の局所構造が再編成されていることが示されました。また、分子シミュレーションから、ゲル化後には密度がほぼ一定であるにもかかわらず、材料内部のフリースペースの割合およびサイズが増加することが明らかとなりました。これは、ネットワーク構造による拘束の下で局所的なパッキング状態が再配分され、小さな空隙（くうげき）がより大きなフリースペースへと再編成されるためと考えられます。

これらの結果から、本研究は、ゲル化を境として「マクロな緻密化」と「構造再編成」が分離することを初めて実証しました。すなわち、ゲル化前は全体の緻密化が支配的であるのに対し、ゲル化後はネ

ネットワーク構造の拘束下での局所的な構造再編成が支配的となることを明らかにし、熱硬化性樹脂の硬化過程に関する新たな分子描像を提案しました。

【今後の展開】

今回の成果は、「硬化収縮が分子構造変化を直接反映する」という従来の理解を刷新し、ゲル化を構造形成機構の転換点として捉える新たな視点を提供するものです。本研究で得られた知見により、硬化収縮や内部応力の発生を、ゲル化前のマクロな緻密化とゲル化後の局所的な構造再編成という二つの過程に分けて理解できるようになります。

これにより、異なる材料同士を接合する接着剤において、界面剥離やひび割れの原因となる内部応力の発生機構をより精密に理解できるようになり、接着強度と耐久性を両立する分子設計の高度化につながります。また、低内部応力接着剤や高信頼性複合材料、電子材料の開発において、硬化時に生じる変形や残留応力を抑制するための設計指針を提供し、半導体実装材料や構造接着材の長寿命化・高信頼化に貢献することが期待されます。さらに、本研究で明らかになったネットワーク構造の拘束下での構造再編成という概念は、近年注目を集めるビトリマー（※4）をはじめとする動的共有結合ネットワーク材料の設計にも新たな知見を与えるものです。

これらの知見は、接着剤、複合材料、電子材料のさらなる高信頼化・高性能化を支えるとともに、次世代自動車や次世代輸送機における軽量・高強度マルチマテリアル構造の実現や、電子機器の高性能化・長寿命化を促進し、Society 5.0 が目指す未来社会の実現に貢献すると考えられます。

【引用文献】

1) REN21 (Renewable Energy Policy Network for the 21st Century) , Global Futures Report: Renewables for Sustainable Transport 2024.

【用語解説】

（※1）ゲル化

硬化反応の進行により、分子同士が化学結合によって連結され、材料全体に広がる3次元ネットワーク構造が形成される現象。

（※2）フリースペース

架橋ネットワーク中に形成される局所的なナノメートル（1メートルの10億分の1）程度の空隙。分子によって占有されていない空間であり、その大きさや分布は材料の構造や物性に影響される。

（※3）レオロジー

物質の変形や流動の挙動を扱う学問分野。

（※4）ビトリマー

結合交換反応によりネットワーク構造を維持したまま再加工やリサイクルが可能な材料の総称。

【謝辞】

今回の研究成果は、以下の事業・研究領域・研究課題によって得られました。

科学技術振興機構（JST） 未来社会創造事業 大規模プロジェクト型

技術テーマ「Society5.0の実現をもたらす革新的接着技術の開発」

研究開発課題名「界面マルチスケール4次元解析による革新的接着技術の構築」

（課題番号：JPMJMI18A2、研究開発代表者：田中敬二 九州大学大学院工学研究院 主幹教授）

研究者：九州大学 大学院工学研究院応用化学部門／次世代接着技術研究センター

田中敬二 主幹教授／センター長
研究実施場所：九州大学

<https://www.jst.go.jp/mirai/jp/program/large-scale-type/theme05.html>

科学技術振興機構（JST） 経済安全保障重要技術育成プログラム（K Program）

研究開発構想「輸送機等の革新的な構造を実現する複合材料等の接着技術」

研究開発課題名「革新的軽量構造を実現する複合材接着技術に関する研究開発とその学理構築」

（課題番号：JPMJKP24W1、研究代表者：岡部朋永 東北大学大学院工学研究科 教授）

研究者：九州大学 大学院工学研究院応用化学部門／次世代接着技術研究センター

田中敬二 主幹教授／センター長

研究実施場所：九州大学

https://www.jst.go.jp/k-program/program/rt/21_w/24w1/24w1_rd.pdf

【論文情報】

掲載誌：Communications Materials

タイトル：Decoupling between macroscopic densification and molecular structural evolution across gelation in cross-linked polymer networks

著者名：Atsuomi Shundo, Aoi Kontani, Atsushi Tokunaga, Tsuyoshi Miyashita, Satoru Yamamoto, and Keiji Tanaka

D O I : 10.1038/s43246-026-01353-0

【お問い合わせ先】

<研究に関すること>

九州大学 大学院工学研究院応用化学部門／次世代接着技術研究センター

主幹教授／センター長 田中敬二

Tel : 092-802-2878

E-mail : k-tanaka@cstf.kyushu-u.ac.jp

<JST 事業に関すること>

科学技術振興機構 未来創造研究開発推進部 正木法雄

Tel : 03-6272-4004 Fax : 03-6268-9412

E-mail : kaikaku_mirai@jst.go.jp

<報道に関すること>

九州大学 広報課

Tel : 092-802-2130 Fax : 092-802-2139

E-mail : koho@jimu.kyushu-u.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 Fax : 03-5214-8432

E-mail : jstkoho@jst.go.jp