

令和 6 年 9 月 9 日現在

機関番号：32702

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04372

研究課題名（和文）リサイクルを指向した酸化分解性高分子材料の開発

研究課題名（英文）Development of Oxidatively Degradable Polymeric Materials Directed toward Recycling

研究代表者

木原 伸浩（Nobuhiro, Kihara）

神奈川大学・理学部・教授

研究者番号：30214852

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：長鎖アルキルエステル基およびエーテル基によって溶解性を確保したビスフェノール型酸化分解性エポキシ樹脂硬化剤を開発した。2-チオエチルエステルおよびウレタンが新しい酸化分解性官能基として利用できることを明らかにし、グリシジルスルフィドが酸化分解性エポキシ樹脂となることを示した。ビニルポリマーの主鎖に官能基を導入する方法を開発し、酸化分解性ビニルポリマーを得た。ジアシルヒドラジンが二酸化窒素で乾式分解できることを明らかにした。ジアシルヒドラジンが酸化分解性エラストマーのハードセグメントとして、アシルセミカルバジドが酸化分解性保護基としてそれぞれ利用できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高分子材料のリサイクルや容易な廃棄を目指し、熱や生物によって分解する高分子材料の開発が活発である。しかし、既存の分解性高分子材料は使用中の分解が避けられない。本研究は、使用中には全く安定であり、かつ、使用後は望むタイミングで直ちに分解する新しい分解性官能基、それを利用した分解性高分子材料、その原料物質あるいは可溶性物質への分解、および、新しい分解方法を開発した。本研究で見出された分解性官能基を組み込むことで、既存の高分子材料に制御可能な分解性を付与し、高分子材料のケミカルリサイクルだけでなく、分解性接着剤・塗料によるマテリアルリサイクルをも可能とするものである。

研究成果の概要（英文）：We developed bisphenol-type oxidatively degradable epoxy resin-curing agents with high solubility that was ensured by ester group bearing long alkyl chain or polyether.

2-Thioethyl ester and urethane were found to be available as new oxidatively degradable functional groups, and glycidyl sulfide was shown to be an oxidatively degradable epoxy resin. We developed a method to introduce any functional group onto the main chain of vinyl polymer to obtain oxidatively degradable vinyl polymer. We found that diacylhydrazine can be degraded by nitrogen dioxide under dry condition. It was also found that diacylhydrazine can be used as hard segments in oxidatively degradable elastomer. Acylsemicarbazide could be used as an oxidatively degradable protective group.

研究分野：高分子化学、有機化学

キーワード：酸化分解性ポリマー ジアシルヒドラジン 2-チオエチルエステル アシルセミカルバジド 次亜塩素酸ナトリウム 過酸化水素 エポキシ樹脂 ビニルポリマー

様式 C-19、F-19-1 (共通)

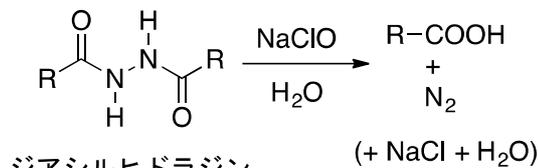
1. 研究開始当初の背景

私たちの健康で文化的な生活は様々な機能性高分子材料や複合材料によって実現されている。しかし、用いられる高分子材料が高度化し多様化したことにより、その廃棄やリサイクルは困難となっている。PP や PET など生産量が多くて単一材料として集めやすい高分子材料や、分解再利用に経済的合理性がある CFRP などの高分子材料については様々なリサイクル方法が検討されている。しかし、それ以外の高分子材料については、焼却処分や油化・ガス化以外のリサイクル方法はない。

高分子材料の効果的な回収・再利用を系統的に進めるためには、制御された分解機構を高分子材料に組み込む必要がある。しかし、分解機構を単純に組み込んだ高分子材料である易分解性高分子材料は、水、熱、光、微生物など天然の刺激によって分解する高分子材料であるため、保存安定性や使用時の安定性を確保できない。安定性を確保するために分解性を抑えると、望むタイミングで分解させることができなくなる。さらに、分解性を付与するために導入された置換基のため、物性が限定されたり、低下したりする。

高い分解性と使用時の安定性を両立させるためには、天然の刺激に対しては安定な、しかし非天然の刺激によって容易に分解する官能基を用い、それを主鎖に組み込んだ高分子材料が必要である。我々は、ジアシルヒドラジンがそのような官能基として優れていることを示してきた。ジアシルヒドラジンは次のような性質を持つ：

- (i) ジアシルヒドラジンに非天然の刺激である次亜塩素酸ナトリウムを酸化剤として作用させると、速やかに窒素とカルボン酸にまで酸化分解される。天然の酸化剤である酸素とは高温でも反応しない。酸化分解生成物は安全で明確なので、回収再利用が容易である。



- (ii) ジアシルヒドラジンは熱的にも化学的にも安定であり、ジアシルヒドラジンを組み込んだ高分子材料の耐熱性・耐候性は低下しない。

- (iii) 強い水素結合能のため、ジアシルヒドラジンを組み込んだ高分子材料は高い強度を示す。

我々はジアシルヒドラジンのこのような特性を利用し、使用時には化学的安定性と高い機械的特性を示すにも関わらず、任意のタイミングで速やかに酸化分解できる様々な高分子材料を開発してきた。特に、ジアシルヒドラジンを組み込んだエポキシ樹脂は、任意に分解除去できるだけでなく、剥がした後に表面に痕跡が残らない高強度接着剤となる。酸化分解性接着剤を利用すると、複合材料を各材料に分けることができるので、複合材料もリサイクルできるようになると期待される。

一方、ジアシルヒドラジンを利用した酸化分解性分子材料と、それによる新しいリサイクル技術を提案していく中で、次のような課題が浮き彫りになってきた。

酸化分解性エポキシ樹脂を室温無触媒で硬化させることはできないだろうか？

ジアシルヒドラジンの強い水素結合能のため、酸化分解性エポキシ樹脂は硬く、接着力が低い。酸化分解性を維持したまま水素結合性を取り除くことはできないだろうか？

主要な高分子材料であるビニルポリマーの主鎖にジアシルヒドラジンを組み込み、酸化分解性とすることはできないだろうか？

2. 研究の目的

前項で示した課題を解決するために、本研究では次の3つの目的を設定した。

室温無触媒でエポキシ樹脂を硬化するためには、求核性の高いアミンやチオールを求核性部位とする硬化剤を開発する必要がある。ジアシルヒドラジンを組み込んだ、アミン型あるいはチオール型のエポキシ樹脂硬化剤を開発する。

酸化分解性も水素結合性もジアシルヒドラジンの NH 基によって生じる。酸化分解性を保ったまま水素結合性を除去するためには、酸化反応によって除去される保護基でジアシルヒドラジンの NH 基を保護しなければならない。そのような保護基は知られていないことから、酸化分解性保護基を新たに開発する。

主鎖にジアシルヒドラジンを導入したビニルポリマーを得る。

当初はこのような目的の下に研究を開始したが、当初の目的にこだわることなく、研究過程で見出された有用な知見を丁寧に拾い上げるように研究を行なった。その結果、当初意図していなかった様々な研究成果を得ることができた。

3. 研究の方法

いずれの研究目的についても、有機合成化学の知見と手法を用いて、研究目的に応じた分子構造のポリマーを分子設計して実際に合成を行い、その性質を評価することで解決を図った。ポリマーが新規物質であるなら、新規モノマーを合成した。ポリマーの合成法が知られていない場合は、新しい重合方法を開発し、各種分析方法を用いて実際に目的の構造のポリマーが得られたことを確認した。

4. 研究成果

4-1. 酸化分解性エポキシ樹脂硬化剤

4-1-1. フェノール型

ビスフェノール型の酸化分解性エポキシ樹脂硬化剤は、硬化に触媒と加熱が必要であるが、合成が容易で、室温無触媒では硬化しないため、一液型にできるという利点がある。これまで、ビスフェノール型酸化分解性エポキシ樹脂硬化剤では、エポキシ樹脂への硬化剤の溶解性を確保するために、長鎖アルキル基またはポリエーテル鎖をエステルを介して導入していた。そのためには、5-ヒドロキシイソフタル酸の2つのカルボキシ基を非対称化する必要があり、大量合成ができなかった。そこで、ジエステルをヒドラジド化したときの溶解性の変化を利用した大量合成法を検討した。オクチル基型のモノヒドラジドは、ジヒドラジドを沈殿として取り除いた後、酢酸エチルを加えて生じる沈殿を濾取するだけで容易に純粋な状態で得られた。ポリエーテル鎖型のモノヒドラジドは、同様にジヒドラジドを取り除いた後、エーテルで沈殿させることで大量合成が可能であることを見出した。いずれのモノヒドラジドもオクソンで酸化カップリングすることでビスフェノール型酸化分解性エポキシ樹脂硬化剤を与えた。ポリエーテル鎖型のジアシルヒドラジンは水溶性であるためにオクソン酸化は使えないものとされてきたが、酢酸エチルで抽出することで水中から取り出せることを明らかにし、ビスフェノール型酸化分解性エポキシ樹脂硬化剤の大量合成法として確立した。

2つの等価なカルボキシ基の非対称化を避けるために、長鎖アルキル基をエーテルを介して導入することとした。フェノール性ヒドロキシ基の統計的な非対称化を避けるために、カテコールの環状アセタールの還元により、長鎖アルキル基の導入とフェノールの導入を同時に定量的に行なった。あらかじめ導入しておいたエステルをヒドラジド化し、オクソンで酸化カップリングしてジアシルヒドラジンを得た。このビスフェノール型ジアシルヒドラジンは、イミダゾール存在下加熱することでエポキシ樹脂を硬化し、硬化体は次亜塩素酸ナトリウム水溶液で酸化分解された。酸化分解性エポキシ樹脂硬化剤がエステルを持つと、硬化触媒として用いたイミダゾールを触媒としてエポキシ樹脂硬化体のヒドロキシ基とエステル交換して架橋するものと考えられるので、長鎖アルキル基をエーテルを介して導入することで、硬化体の高温での機械特性の変化が抑えられるものと期待できる。

4-1-2. アミン型

室温でも無触媒でエポキシ樹脂を硬化できる酸化分解性硬化剤として、ジアミン型のジアシルヒドラジンの合成とそれを用いたエポキシ樹脂の硬化を検討した。第一級アミンは二官能性求核剤として働くので、求核性部位が第一級アミンであるとジアシルヒドラジンが硬化体の主鎖に導入できない。そこで、求核性部位として求核性の高い環状第二級アミンであるピペリジンをを用い、ピペリジン-4-カルボン酸ヒドラジドとジカルボン酸との縮合によりジアミン型のジアシルヒドラジンを得た。様々なジアシルヒドラジンを合成したが、いずれも溶解性が低く、エポキシ樹脂と混和しなかったが、9位に2つのオクチル基を導入したフルオレン-2,7-ジカルボン酸を用いると比較的溶解性が高いジアシルヒドラジンが得られた。このジアシルヒドラジンはエポキシ樹脂に溶解させることができ、そのまま室温で放置すると硬化した。しかし、硬化体はオクチル基のために疎水性が高く、次亜塩素酸ナトリウム水溶液で酸化分解しても可溶化しなかった。そこでオクチル基の代わりに親水性のポリエーテル鎖の導入を検討したが、合成が困難であった。そこで、オクチル化フルオレンを持つジアミン型ジアシルヒドラジンに親水性の高い低分子ジアミンを混合して硬化剤として用いたところ、エポキシ樹脂を室温でも硬化することができ、硬化体は次亜塩素酸ナトリウム水溶液で酸化分解して可溶化した。

4-2. ジアシルヒドラジンの非ハロゲン性酸化物による酸化分解

4-2-1. 過酸化水素による酸化分解

これまでジアシルヒドラジンの酸化分解には次亜塩素酸ナトリウム水溶液が使われてきた。しかし、次亜塩素酸ナトリウムで酸化分解したときに生じる塩化物イオンは半導体の特性に大きな影響を与える。酸化分解性材料は、仮止め接着剤など、電子部品を効率的に製造するための材料として期待されているが、分解に用いる酸化剤が次亜塩素酸ナトリウムであると、ジアシルヒドラジンをを用いた酸化分解性材料を電子部品の製造に使うことができない。そこで、ハロゲンを含まない酸化剤として過酸化水素を用いた酸化分解について検討したところ、アセトニトリルと炭酸カリウムの存在下、30%過酸化水素によってジアシルヒドラジンを処理すると、カルボン酸まで酸化されることが分かった。次亜塩素酸ナトリウム水溶液による酸化に比べると遅いものの、ポリ(ジアシルヒドラジン)を酸化分解性材料として用いるには十分な速度であった。ハロゲン化物イオンを生じない条件での酸化分解が可能であることから、ポリ(ジアシルヒドラジン)を電子部品の製造にも使えるようになった。

4-2-2. 窒素酸化物による分解

ジアシルヒドラジンの酸化分解は酸化に引き続く加水分解によって起こる。そのため、ポリジアシルヒドラジンの酸化分解には水溶液が必要であると考えられてきた。しかし、酸化分解に水溶液を用いると、局所的に分解しようとしても液垂れが起こる、基板が濡れてしまう、細い隙間での分解が困難、等の問題があった。また、将来的に船や飛行機を丸ごと分解するようなこととなったとき、水溶液中での分解は実施困難である。そこで、酸化性の気体を用いた乾式の分解につ

いて検討を行なった。当初、乾式酸化分解を行なうためには、水に相当する官能基を分子内に持たせる必要があると考え、ヒドロキシ基をカルボニル基の位に持たせたジアシルヒドラジン合成し、その酸化分解を検討した。しかし、対照実験として単純なジアシルヒドラジンを窒素酸化物に曝したところ、定量的にカルボン酸とアシルアジドに分解することを見出した。窒素酸化物による分解はジアシルヒドラジンのニトロソ化で進行する。同様の構造をもつアミドやウレタンでは、ニトロソ化はされるものの分解しないことから、ジアシルヒドラジンの新しい選択的な分解法となる。窒素酸化物の中で、二酸化窒素がニトロソ化に重要な役割を持つことを明らかにした。ポリ(ジアシルヒドラジン)の粉末だけでなく、ポリ(ジアシルヒドラジン)の板も低分子量化した。ジアシルヒドラジンで架橋した架橋体は窒素酸化物によって脱架橋された。

4-3. ジアシルヒドラジンをハードセグメントとする酸化分解性エラストマー

ジアシルヒドラジンは強い水素結合性部位であるため、エラストマーのハードセグメントとなることが期待できる。そこで、ポリエチレングリコールをソフトセグメントとして用いてポリ(ジアシルヒドラジン)エラストマーの調製を検討した。ポリエチレングリコールの両末端にカルボン酸エステルを導入することを検討したところ、用いたルイス酸による主鎖の切断が起こった。切断点にもエステルを導入し、定量的にヒドラジドに変換してからポリジアシルヒドラジンに導いたが、重合度は上がらなかった。そこで、ソフトセグメントとしてポリ THF を用いてポリ(ジアシルヒドラジン)エラストマーの調製を検討した。ポリ THF の末端の第一級アルコールをカルボン酸へと定量的に酸化してからヒドラジドに導いた。その酸化カップリング重合あるいはジカルボン酸クロリドとの重縮合により、ジアシルヒドラジン含有率の異なる様々なポリ THF-ジアシルヒドラジン合成した。いずれのポリマーも次亜塩素酸ナトリウム水溶液によって酸化分解し可溶化した。イソフタル酸との重縮合で得られたポリ(ジアシルヒドラジン)はエラストマーとしての性質を示し、ジアシルヒドラジン部位とポリ THF 部位の割合が適切であればエラストマーとなることが明らかとなった。

4-4. 2-チオエチルエステルの酸化分解を利用した酸化分解性高分子材料の開発

4-4-1. 2-チオエチルエステル構造を有するポリエステルの合成と酸化分解

本研究では、ジアシルヒドラジンの酸化分解性を維持しながらジアシルヒドラジンの水素結合性を取り除くために、ジアシルヒドラジンを酸化分解性の N-保護基で保護することを計画した。N-保護基として 2-チオエチル基が利用できると期待できたので、まず、脱離性の高いカルボン酸を脱離基として持つ 2-チオエチルエステルで酸化分解性を検討した。2-チオエチルエステルは過酸で定量的にスルホンまで酸化され、生成物を炭酸カリウム水溶液で処理したところ、カルボン酸とビニルスルホンへと定量的に分解した。ビニルスルホンは水が付加したアルコールとして得られた。このことから、2-チオエステルが新しい酸化分解性官能基として利用できることが明らかとなった。

そこで、N-(2-チオエチル)アミド、2-チオエチルエーテル、N-(2-チオエチル)イミドで同様に酸化分解を検討したが、これら脱離性の低い脱離基では、酸化はされても分解はしないことが明らかとなった。すなわち、スルフィドの酸化を利用する酸化分解性官能基としては、2-チオエチルエステルが適当であることが分かった。

そこで、2,2-チオジエタノールをジオール成分とするポリエステルを合成した。mCPBA で酸化したところ、スルホン型のポリエステルとなり、これを炭酸ナトリウム水溶液で処理したところ、完全に可溶化した。すなわち、2-チオエチルエステルは酸化分解性高分子材料の新しい酸化分解性官能基として利用可能である。ジアシルヒドラジンが強い水素結合部位であるため、ポリジアシルヒドラジンが丈夫ではあるが硬いポリマーとなるのに対し、2-チオエチルエステルは非水素結合性であるため、2-チオエチルエステルを含むポリエステルは柔らかく、同じ酸化分解性でも、その物性においてジアシルヒドラジンと相補的である。

過酸によるスルフィドの酸化をアルカリ条件で行なうと過酸が分解するため、スルフィドの酸化と塩基を用いる分解は 2 段階で行なう必要があった。また、酸化剤として安価な過酸化水素を用いると、スルフィドの酸化はスルホキシドまでしか進まなかった。そこで、過酸化水素によって塩基性条件下でスルフィドをスルホンまで酸化する酸化触媒を検討したところ、ポリ酸あるいはヘテロポリ酸がよい触媒となり、過酸化水素と炭酸ナトリウムの水溶液により 2-チオエチルエステルを 1 段階で酸化分解できることを明らかにした。

さらに、スルフィド部位をチオアセタールとした同様のポリエステルを合成し、酸化分解を検討したところ、塩基として炭酸水素ナトリウム水溶液を用いても酸化分解できることを明らかにした。

4-4-2. 2-チオエチルエステル構造を有するポリウレタンの合成と酸化分解

2-チオエチルエステルと同様に O-(2-チオエチル)ウレタンも酸化分解性であることが期待される。そこで 2,2-チオジエタノールと二官能性イソシアナートとの重付加反応を行ないポリウレタンを得た。得られたポリウレタンは mCPBA で酸化してから炭酸ナトリウム水溶液で処理したところ可溶化し、酸化分解性ポリウレタンであることが分かった。ポリウレタンは塗料や接着剤として広く利用されているので、酸化分解性ポリウレタンには様々な用途があるものと期待できる。

4-4-3. グリシジルスルフィドの硬化と酸化分解

2-チオエチルエステルが酸化分解性であることから、エポキシ樹脂としてグリシジルスルフィドの硬化と硬化体の酸化分解を検討した。グリシジルスルフィドを環状酸無水物と加熱して硬化したところ、交互共重合によりポリエステルが得られた。このとき転移が併発し、ジオール成分として1,2-ジオール型だけでなく1,3-ジオール型が混じってきた。得られたポリエステルは、過酸で酸化した後、塩基で処理すると可溶化した。酸化した後、1,2-ジオール型では一方のエステルのみが分解するのに対し、1,3-ジオール型では両方のエステルが分解することから、効率良く分解したものと考えられる。グリシジルスルフィドは、酸化分解性をもつ初めてのエポキシ樹脂として利用可能である。

4-4-4. 2-チオエチルエステル構造を有するエポキシ樹脂硬化剤

2-チオエチルエステル構造をもつビスフェノールはフェノール型の酸化分解性エポキシ樹脂硬化剤となることが期待される。2,2-チオジエタノールと4-ヒドロキシ安息香酸メチルとのエステル交換でビスフェノールを合成した。2-チオエチルエステルはジアシルヒドラジンと異なり非水素結合性なので、このビスフェノールはそのままエポキシ樹脂と混和させることができた。混合物にイミダゾールを添加して加熱すると硬化した。硬化体はリンモリブデン酸ナトリウム存在下で過酸化水素と炭酸ナトリウムの水溶液で処理すると酸化分解した。

4-4-5. 2-チオエチルエステル構造を有する架橋体

2,2-チオジエタノールとアクリル酸クロリドとの反応により、2-チオエチルエステル構造をもつ二官能性モノマーを合成し、スチレンとの共重合により架橋体の合成を行なった。

4-5. ビニルポリマー主鎖への官能基の導入と酸化分解性ビニルポリマーの開発

我々が利用する高分子材料のうち約2/3はビニルポリマーである。ビニルポリマーはその主鎖が炭素鎖だけからなることから、ラジカル開環重合性の特殊なモノマーを使わなければ主鎖にジアシルヒドラジンのような官能基を導入することは不可能とされてきた。そのため、主鎖に分解性官能基を導入したビニルポリマーは、酸素、硫黄、チオカルボニルなどと共重合した、特殊な分解性ポリマーに限られている。そこで、ビニルポリマーの主鎖に官能基を導入する一般的な方法を開発し、酸化分解性ビニルポリマーへの応用を検討することとした。

4-5-1. 架橋剤と連鎖移動剤の併用による方法

ビニルモノマーとラジカル開環重合性モノマーとの共重合では、短いビニルポリマー鎖の末端同士が官能基で連結したポリマーが得られる。二官能性モノマーでポリマー鎖同士を連結しながら、連鎖移動剤の存在下で動力学的連鎖長を抑えてビニルモノマーの重合を行なうと、三次元網目構造体の形成が抑えられ、内部連結型の溶媒可溶性ビニルポリマーが得られると期待できる。ビニルモノマーとしてスチレンを用い、連鎖移動剤の存在下でジアシルヒドラジン構造をもつ二官能性モノマーとの共重合を行なうと、連鎖移動剤の量を調節することにより、ジアシルヒドラジンで内部連結された溶媒可溶性ポリスチレンが得られることが分かった。連鎖移動剤の必要量は連鎖移動剤の構造によって大きく異なった。得られたポリスチレンは次亜塩素酸ナトリウム水溶液によって酸化分解し、低分子量のポリスチレンを与えた。このことは、ジアシルヒドラジンがポリスチレンの主鎖に導入されていることを示しており、ビニルポリマーの主鎖に任意の官能基を導入する一般的な方法を明らかにしただけでなく、酸化分解性とするのでできる高分子材料の対象を一気に広げることができた。

粘着剤として使われるポリアクリル酸エステルに酸化分解性を導入した。アクリル酸ブチルを連鎖移動剤の存在下でジアシルヒドラジン構造をもつ二官能性モノマーと共重合し、ジアシルヒドラジンで内部連結された可溶性ポリアクリル酸エステルを得た。このポリマーは粘着性を示したが、次亜塩素酸ナトリウム水溶液で処理すると直ちに酸化分解して粘着性を失った。

4-5-2. オレフィンメタセシス反応による方法

主鎖に炭素-炭素二重結合をもつ高分子量ポリジアシルヒドラジンを合成した。オレフィンメタセシス反応によって、ブタジエン共重合体やROMPポリマーなど主鎖に炭素-炭素二重結合をもつポリマーにジアシルヒドラジンを組み込み、酸化分解性を導入できると期待できる。

4-6. アシルセミカルバジドの酸化分解

4-6-1. ポリ(アシルセミカルバジド)の合成と酸化分解

ジアシルヒドラジンと同様の構造をもつアシルセミカルバジドも次亜塩素酸ナトリウム水溶液によって酸化分解される。ジヒドラジドとジイソシアナートとの重付加反応により高分子量のポリ(アシルセミカルバジド)を合成し、酸化分解性ポリマーとなることを明らかにした。

4-6-2. アシルセミカルバジドの酸化分解で自己崩壊するポリウレタンの開発

自己崩壊性ポリウレタンの末端にアシルセミカルバジドあるいはアシルカルバゼートを導入し、これら酸化分解性官能基の酸化分解により、自己崩壊のトリガーとなる官能基を発生できるようにした。ポリ(アシルセミカルバジド)の分解には、アシルセミカルバジド部位と当量の酸化剤が必要となるが、自己崩壊性ポリウレタンでは末端だけを酸化分解すればよいので、効率的な分解系となるものと期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 木原 伸浩	4. 巻 76
2. 論文標題 酸化分解性ポリマー：使用中は分解しない分解性ポリマー	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 アロマティックス	6. 最初と最後の頁 6-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 木原 伸浩	4. 巻 23
2. 論文標題 不要になったら直ちに分解できる、難分解性で高耐熱性のポリマー材料	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 マテリアルステージ	6. 最初と最後の頁 64-70
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 木原 伸浩	4. 巻 50
2. 論文標題 高速に分解できる難分解性・高耐熱性ポリマー材料「ポリ（ジアシルヒドラジン）」	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 コンバーテック	6. 最初と最後の頁 112-115
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yanaze Kazuya, Kihara Nobuhiro	4. 巻 53
2. 論文標題 Superabsorbent polymer solubilized instantly by decrosslinking with sodium hypochlorite	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Polymer Journal	6. 最初と最後の頁 1153 ~ 1155
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41428-021-00499-7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 木原 伸浩	4. 巻 42
2. 論文標題 ネットワークポリマーの酸化的脱架橋 - 高安定性と高分解性の両立 -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ネットワークポリマー論文集	6. 最初と最後の頁 236 ~ 242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木原 伸浩	4. 巻 30
2. 論文標題 自在に分解できる耐熱性・耐候性ポリマー	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 クリーンテクノロジー	6. 最初と最後の頁 53-60
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 木原 伸浩	4. 巻 69
2. 論文標題 高分子反応で分解する	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 高分子	6. 最初と最後の頁 527-528
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計52件 (うち招待講演 10件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 古川 聖純、木原 伸浩
2. 発表標題 マイケル反応を利用した酸化解体性接着剤の開発
3. 学会等名 日本接着学会年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 分解性プラスチックの基礎と課題および高分解性と安定性の両立技術
3. 学会等名 3Mテクノフォーラム（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性ポリマーと分解性接着剤への応用：分解性と安定性の両立
3. 学会等名 日本接着学会関西支部2023年度関西接着ワークショップ第2回研究会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 矢部 丈登、木原 伸浩
2. 発表標題 アミドの水素結合を利用した位置選択的反応場の開発
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会（2024）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 倪 汪斌、木原 伸浩
2. 発表標題 アミドの水素結合を利用した位置選択的Diels-Alder反応系の開発
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会（2024）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 齋藤 穂高、木原 伸浩
2. 発表標題 メタセシス反応によるビニルポリマーへの酸化分解性の導入
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会 (2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 望月 美緒、木原 伸浩
2. 発表標題 スルフィドの酸化反応を利用した酸化分解性ポリエステル合成
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会 (2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 露木 俊介、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性エラストマーの開発
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会 (2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 橋爪 孝太、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性の新規フェノール系エポキシ樹脂硬化剤の開発
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会 (2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 梶原 光平、木原 伸浩
2. 発表標題 主鎖への官能基の導入による酸化分解性ビニルポリマーの合成
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会 (2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 渋谷 土筆、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解により自己崩壊するポリウレタンの開発
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会 (2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 金子 卓弘、木原 伸浩
2. 発表標題 窒素酸化物を用いたポリ(ジアシルヒドラジン)の乾式分解
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会 (2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 本間 美帆、木原 伸浩
2. 発表標題 チオアセタール構造を有するジオールを用いた酸化分解性ポリエステル
3. 学会等名 日本化学会第104春季年会 (2024)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 梶原 光平、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性ビニルポリマーの合成
3. 学会等名 第10回高分子学会グリーンケミストリー研究会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 露木 俊介、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性エラストマーの開発
3. 学会等名 第10回高分子学会グリーンケミストリー研究会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 齋藤 穂高、木原 伸浩
2. 発表標題 メタセシス反応によるビニルポリマーへの酸化分解性の導入
3. 学会等名 第10回高分子学会グリーンケミストリー研究会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 望月 美緒、木原 伸浩
2. 発表標題 スルフィドの酸化反応を利用した酸化分解性ポリエステル合成
3. 学会等名 第10回高分子学会グリーンケミストリー研究会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渋谷 土筆、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解をトリガーとする自己崩壊型ポリウレタンの開発
3. 学会等名 第10回高分子学会グリーンケミストリー研究会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 本間 美帆、木原 伸浩
2. 発表標題 チオアセタール構造を有するジオールを用いた酸化分解性ポリエステル
3. 学会等名 第10回高分子学会グリーンケミストリー研究会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梶原 光平、木原 伸浩
2. 発表標題 オリゴマーの架橋によるビニルポリマーへの酸化分解性の導入
3. 学会等名 高分子学会関東支部第7回神奈川地区講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子 卓弘、木原 伸浩
2. 発表標題 乾式条件でのジアシルヒドラジンの酸化分解
3. 学会等名 高分子学会関東支部第7回神奈川地区講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大庭 莉琉、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性ポリシロキサンの合成
3. 学会等名 高分子学会関東支部第7回神奈川地区講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 橋爪 孝太、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性の新規フェノール系エポキシ樹脂硬化剤の開発
3. 学会等名 高分子学会関東支部第7回神奈川地区講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 露木 俊介、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性エラストマーの開発
3. 学会等名 高分子学会関東支部第7回神奈川地区講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渋谷 土筆、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解により自己崩壊するポリウレタンの開発
3. 学会等名 高分子学会関東支部第7回神奈川地区講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木原 伸浩、山口 陽之
2. 発表標題 新規酸化分解性官能基を用いた酸化分解性高分子材料の開発
3. 学会等名 第71回高分子討論会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kazuya Yanaze and Nobuhiro Kihara
2. 発表標題 Superabsorbent Polymer (SAP) Solubilized Instantly by Decrosslinking with Sodium Hypochlorite
3. 学会等名 3rd International Conference on Polymer Science and Composite Materials (Polymer Connect) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 使用中は分解せず、使用後には直ちに漂白剤で分解できるプラスチック
3. 学会等名 第12回CSJ化学フェスタ2022 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 使用時には安定な高分解性ポリマー材料技術
3. 学会等名 関西ペイント技術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 高分解性と使用時の安定性が両立する高分子材料・接着剤
3. 学会等名 産総研「接着・接合関係のコンソーシアム」第16回企業ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 高い分解性と高い化学的安定性・機械的強度の両立と易解体性接着剤への応用
3. 学会等名 技術情報協会セミナー「易解体性接着剤の分子設計と安定性・分解性の両立」（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 使用時に高い安定性を持つ易解体性高分子の設計と易解体性接着剤への応用
3. 学会等名 日本接着学会 構造接着・精密接着研究会2022年度 第4回研究講演会（招待講演）
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 真下 睦生、木原 伸浩
2. 発表標題 大環状スルホキシミンの合成と分子認識能
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 矢部 丈登、木原 伸浩
2. 発表標題 アミドの水素結合を利用した位置選択的反応場の開発
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 倪 汪斌、木原 伸浩
2. 発表標題 アミドの水素結合を利用した位置選択的Diels-Alder反応触媒の開発
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 露木 俊介、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性エラストマーの開発
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 橋爪 孝太、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性の新規フェノール系エポキシ樹脂硬化剤の開発
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大庭 莉琉、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性ポリシロキサンの合成
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 梶原 光平、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性ビニルポリマーの合成
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金子 卓弘、木原 伸浩
2. 発表標題 乾式条件でのジアシルヒドラジンの酸化分解
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渋谷 土筆、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解により自己崩壊するポリウレタンの開発
3. 学会等名 日本化学会第103春季年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 高い分解性と安定性を併せ持つ高分子材料の設計と応用
3. 学会等名 第70回高分子討論会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木原 伸浩、菊地原 愛
2. 発表標題 酸化分解性高分子材料の簡便合成
3. 学会等名 第70回高分子討論会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 梶原 光平、木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性ビニルポリマーの合成
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渋谷 土筆、木原 伸浩
2. 発表標題 自己崩壊型ポリウレタンへの酸化分解トリガーの導入
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金子 卓弘、木原 伸浩
2. 発表標題 ヒドロキシ基をもつジアシルヒドラジンの合成と無水条件下での酸化分解
3. 学会等名 日本化学会第102春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 矢部 丈登、木原 伸浩
2. 発表標題 アミドの水素結合を利用した位置選択的反応場の開発
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 渋谷 土筆、木原 伸浩
2. 発表標題 自己崩壊型ポリウレタンへの酸化分解トリガーの導入
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 牧 航平、木原 伸浩
2. 発表標題 ポリカテナンの合成
3. 学会等名 日本化学会第101春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 ジアシルヒドラジンをを用いた架橋体の開発と酸化的脱架橋
3. 学会等名 第69回高分子討論会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性エポキシ樹脂硬化剤 -安定性と高分解性の両立-
3. 学会等名 エポキシ樹脂協会特別講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木原 伸浩
2. 発表標題 酸化分解性高分子材料 - 化学的安定性と高分解性の両立 -
3. 学会等名 第38回高分子学会千葉地域活動若手セミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 執筆者：52名、技術情報協会	4. 発行年 2023年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 481
3. 書名 エポキシ樹脂の配合設計と高機能化	

1. 著者名 松本章一	4. 発行年 2023年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 258
3. 書名 接着と剥離のための高分子設計と応用	

1. 著者名 執筆者：60名、技術情報協会	4. 発行年 2024年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 621
3. 書名 プラスチックのリサイクルと再生材の改質技術	

1. 著者名 粕谷健一	4. 発行年 2024年
2. 出版社 シーエムシー出版	5. 総ページ数 291
3. 書名 高分子材料の分解制御技術	

〔出願〕 計6件

産業財産権の名称 ポリエステル製造方法	発明者 木原 伸浩	権利者 アデカ株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-114848	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 高分子化合物を分解する方法、及びそのための組成物	発明者 木原 伸浩	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2024-038957	出願年 2024年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 高分子化合物及びその分解方法、その高分子化合物を含むプラスチック製品、繊維強化プラスチックとそれに含まれる繊維を回収する方法、並びにポリエステル、ポリウレタン又はポリカーボネートの製造方法	発明者 木原 伸浩	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-104626	出願年 2022年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 ポリマー化合物の分解方法、分解性接着剤組成物及びそれを用いてなる接合体の分離方法、分解性塗料組成物及びそれを用いてなる塗膜の除去方法、並びに繊維強化プラスチックに含まれる繊維を回収する方法	発明者 木原 伸浩	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-150423	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 連結型ビニルポリマー化合物及びその製造方法、それを用いたプラスチック製品及びその分解処理方法、並びに接合体の分離方法	発明者 木原 伸浩	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2023-056348	出願年 2023年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 繊維強化プラスチック、及びそれに含まれる繊維を回収する方法	発明者 木原 伸浩	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-025866	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計1件

産業財産権の名称 ポリマー化合物の分解方法、分解性接着剤組成物及びそれを用いてなる接合体の分離方法、分解性塗料組成物及びそれを用いてなる塗膜の除去方法、並びに繊維強化プラスチックに含まれる繊維を回収する方法	発明者 木原 伸浩	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特開2024-045015	取得年 2024年	国内・外国の別 国内

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関