

非可食性バイオマスを原料とした海洋分解可能なマルチロック型バイオポリマーの研究開発

Development of Multi-Lock Biopolymers Degradable in Ocean From Non-Food Biomasses



伊藤耕三
東京大学特別教授
Project Manager



委託先：東大(代表)・三菱ケミカル・ブリヂストン・クレハ・九大・名大・山形大・RITE・産総研・愛媛大・東京科学大
(再委託先：京都工織大・阪公大・神戸大・信州大・長岡技大・CERI・鹿児島大・岩手大・三井化学・東レ)

分解性とタフネス（強靭性・耐久性）の両立

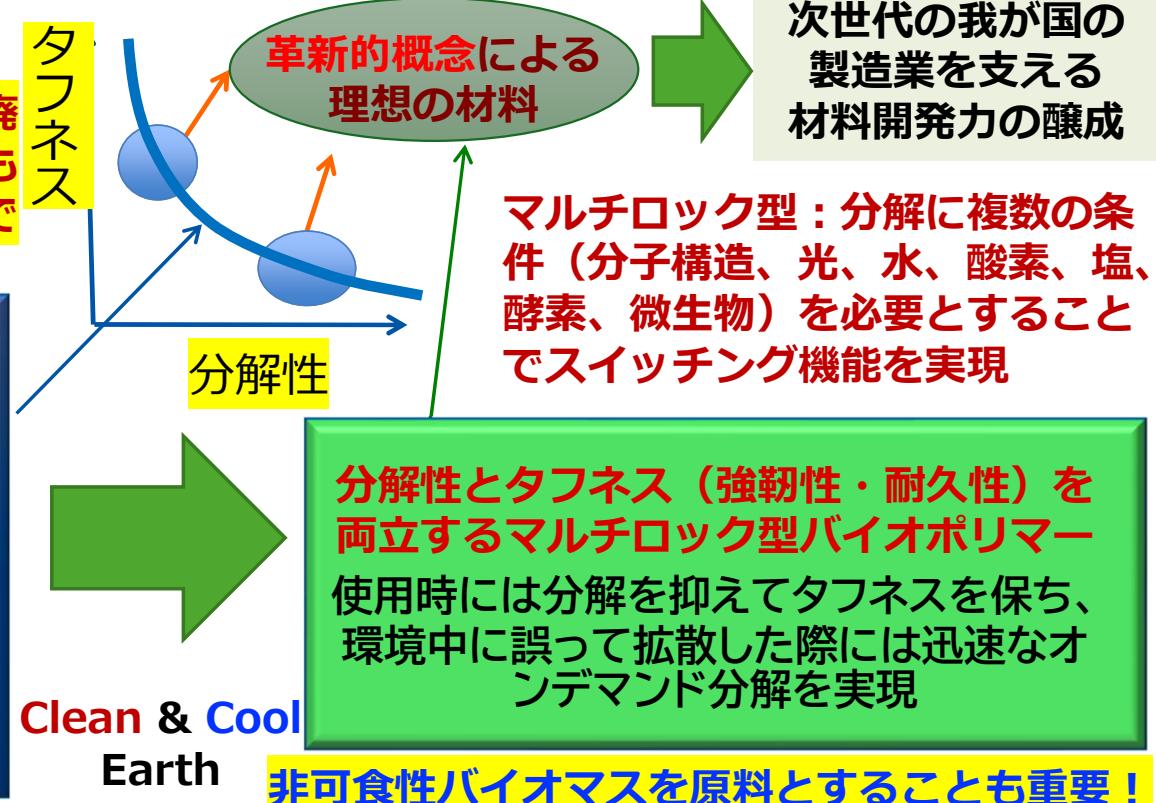
回収できない
プラゴミ、タ
イヤ摩耗粉、
繊維くず、漁
具などが地球
環境にとって
深刻な問題と
なっている

理想的なポリマー
使用時は丈夫で、誤って廃棄されたとき海洋などでもすぐに壊れて自然環境下で最終的に水とCO₂に還元

従来技術の問題点

海洋分解性とタフネス（強靭性・耐久性）の両立が困難

環境分解のメカニズムが未だに十分解明されていない



Clean & Cool
Earth

非可食性バイオマスを原料とすることも重要！

産官学に渡る世界最高レベル技術（分子合成、バイオ・成形プロセス、構造解析・物性評価、シミュレーション、海洋動態・生分解評価）を結集した圧倒的な材料開発力

社会実装のイメージ：用途と参画企業

農業資材・ タイヤ摩耗粉等	分解設計	その他のスペック	
肥料被覆材	<ul style="list-style-type: none"> 主に陸域で利用、河川を通じて海に流出する場合もある。 陸域では弱酸性（雨のpHは4.7程度）、川は中性（pH6.5～8.5）、海は弱アルカリ性（pH8.1）。pHスイッチで低分子量化することは有効。 河川の場合には長期間の水浸漬で働くスイッチも有効。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状、利用されているプラスチック並の強度（耐衝撃強度、引き裂き強度）と加工性。 	
タイヤ摩耗粉		<ul style="list-style-type: none"> 現状、利用されている架橋ゴム並の強度（破壊エネルギー）と加工性。 	
漁業資材	分解設計	その他のスペック	
釣り糸	<ul style="list-style-type: none"> 間欠的に利用され、切れたときに海底に沈んで分解。 海は弱アルカリ性（pH8.1）なので、生分解性ポリマーをpHスイッチで低分子量化することは有効な分解設計。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状、利用されている非分解性釣り糸並の強度（結節強度）と加工性。 	
漁網	<ul style="list-style-type: none"> 海中で長期間利用されるため、生分解性ポリマーの分解性の制御、特に遅延（3～15年後に分解がスタート）が重要 	<ul style="list-style-type: none"> 現状、利用されている非分解性漁網並の強度（結節強度）と加工性。 	
発泡材（養殖フロート等）	<ul style="list-style-type: none"> 海面付近での利用および海岸で遺棄されている。光スイッチも有効だが分解性の制御が必要（利用時は分解が遅く、遺棄時は速く分解）。 	<ul style="list-style-type: none"> 現状、利用されているプラスチック並の強度（耐衝撃強度）と加工性、発泡性、撥水性。 	

研究開発体制（マトリクス運営）

	A 農業用資材等 三菱ケミカル TL 楠野篤志	B タイヤ ブリヂストン TL 浜谷悟司	C 繊維 帝人、帝人F 22年度 スピナウト	D 釣糸 クレハ TL 正木崇士	F 発泡材等 三井化学 TL 景岡正和	G 漁網 東レ TL 増田正人	E 共通課題 アカデミア TL 伊藤耕三
E1:マルチロック分解 東大	●	●	●	●	●	●	●
E2:構造物性評価 九大、京都工織大、 神戸大、長岡技大、 鹿児島大、岩手大	●	●	●	●	●	●	●
E3:合成・プロセス 名大、山形大、 RITE、東京科学大、 大阪公大、信州大、 長岡技科大	●	●	●	●	●	●	●
E4:海洋分解 産総研、愛媛大、 CERI	●	●	●	●	●	●	●

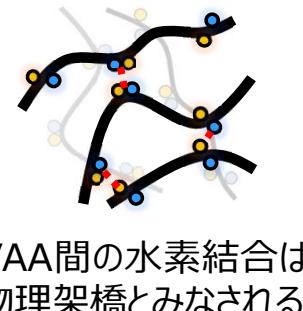
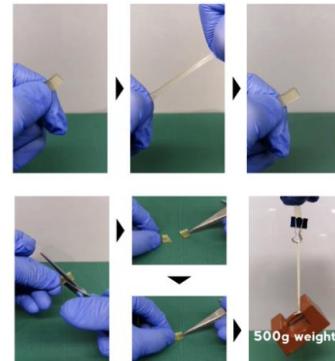
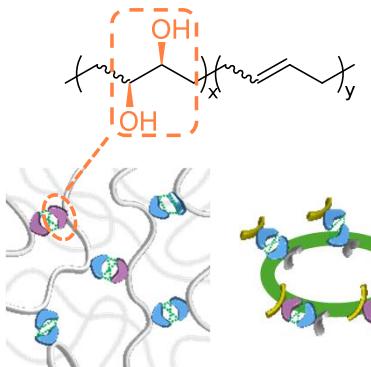
- ・ A～D, F, Gは競争領域（クローズ）、Eは協調領域（オープン）
- ・ 1つの企業が多数のアカデミアと同時に共同研究を実施（産学ともに相乗効果）
- ・ 企業とアカデミアの組み合わせは開発ステージによって柔軟に変化（常に最適化）

横断的共通課題

	共通課題	目標	メンバー
E1+E3	マルチロック型分解機構の開発	参画企業が利用するポリマー種を対象に、コポリマー、動的架橋、触媒、酵素などを利用して、 海洋環境で想定される複数の刺激でオンデマンド分解可能なマルチロック型分解機構を開発する。	吉江、伊藤耕、上垣外、乾、佐藤浩、高坂
E2	微生物による生分解を中心とした分解機構の解明	海洋や河川、湖沼、水田等も含む自然環境下での、微生物による生分解を中心とした分解機構を解明する。	高原、笠井、乾、山田、加藤、菊地、伊藤耕
E3-1 E6統合	CO2固定用海藻を含む非可食性バイオマスを原料としたポリマーの開発	CO2固定用海藻を含む非可食性バイオマスを原料とするモノマーを、酵素や化学的手法を用いて合成するとともに、その重合法についても検討する。	上垣外、乾、佐藤浩、高坂、佐藤絵
E3-2	環境分解性ポリマーの耐久性および強靭性の向上	成形加工技術、動的架橋、コポリマー、超分子などを用いることで、海洋も含む環境分解性ポリマーの耐久性および強靭性向上について検討する。	伊藤浩、高原、吉江、伊藤耕、佐々木、佐藤春
E4	実海洋域を中心とした分解性の評価	海域または河川も含めた陸域における漁網、タイヤ摩耗粉、肥料被覆材の動態解析や、海洋、河川、湖沼、水田等の実環境下における分解評価、ラボにおける高速分解評価手法の開発を検討する。	日向、菊地、伊藤耕、加藤
E5	オリゴマーの海洋分解性と安全性	精密重合により、各企業で開発しているポリマーに相当する分子量の揃ったオリゴマーを合成し、海洋分解性と安全性を評価する。	上垣外、高原、佐藤浩、佐藤絵、高坂、菊地
E7	DBの構築とAIの活用	AI・MI利活用に資する海洋分解標準DBを構築するとともに、データ科学や機械学習を活用してポリマーの種類や構造（高次構造も含む）と物性および分解性の相関を明らかにする	天本（伊藤耕）、森田、全機関

国内外に他には無い独自技術を用いてスイッチ機能の制御（ポイント制御）に挑戦！

エントロピー駆動型動的架橋(東大吉江+産総研森田)→海中の金属イオンによるスイッチオン(強靭性の向上にも成功)



Vicinal diol (VDO)

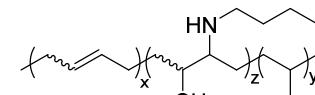
- ✓ Incredible dynamicity
- ✓ Excellent mechanical toughness
- ✗ Poor universality
- ✗ Synthesis is complex

Previous work

新規のエントロピー駆動
型水素結合の探索

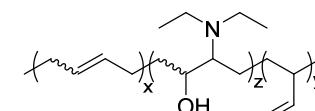
生分解可能なゴムの開発に成功！

PB-Bu-X

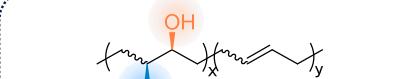
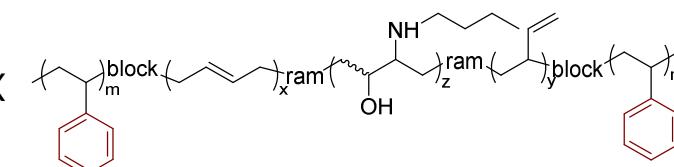


$$X = \frac{z}{x+y+z}$$

PB-DE-X



SBS-Bu-X



Vicinal amino alcohol (VAA)

- ✓ Favorable universality
- ✓ Easy to Synthesize
- ✓ High mechanical toughness
- ✓ Good dynamicity

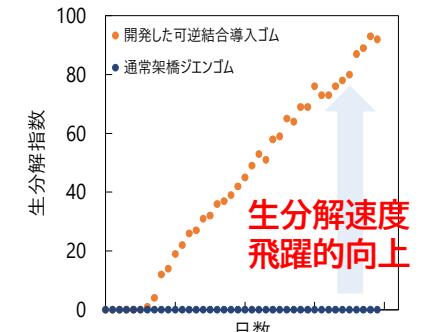
This work

BRIDGESTONE

生分解可能なゴムの開発
【物性試験結果】



【海洋生分解試験結果】

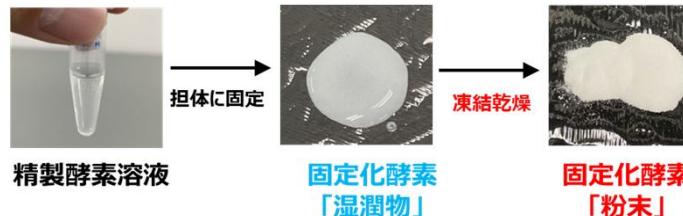
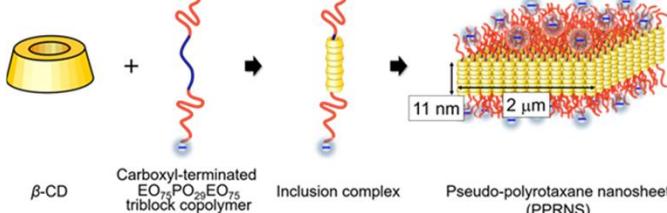


破壊強度2倍以上、生分解速度10倍以上を達成 6

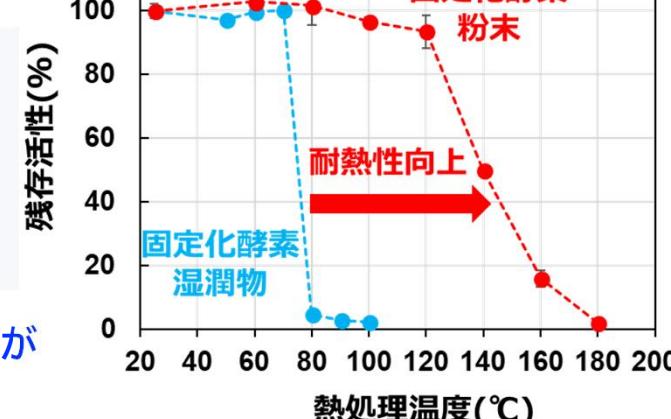
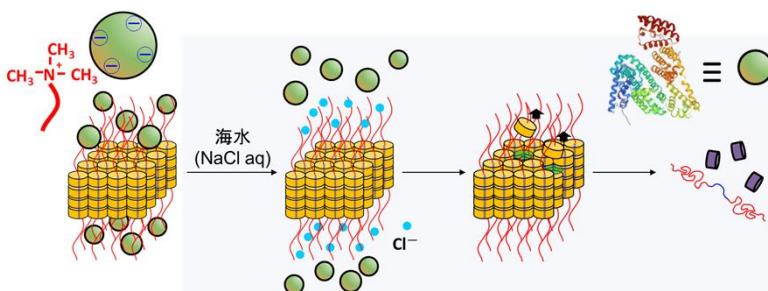
国内外に他には無い独自技術を用いてスイッチ機能の制御（ポイント制御）に挑戦！

擬ポリロタキサンナノシートを担体とした耐熱性分解酵素(東大伊藤十RITE乾)→海中の塩イオンによるスイッチオン(強靭性の向上にも成功)

擬ポリロタキサンナノシート(PPRNS)の新規酵素担体材料としての応用

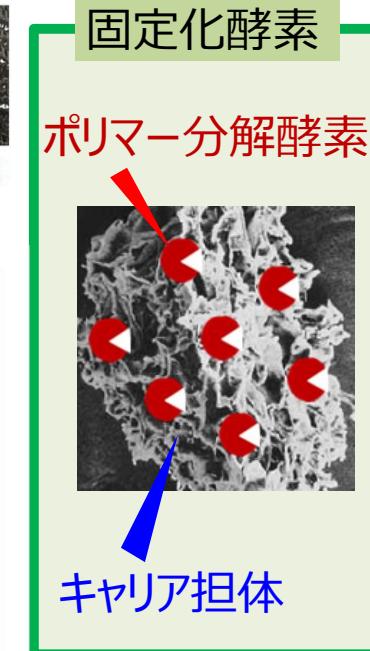


ナノシート表面に酵素を吸着



シート状のフィラーが
亀裂の進展を抑制

強靭性の向上



塩なし条件

分解酵素は担体から遊離しないため
ポリマーは加水分解されない。

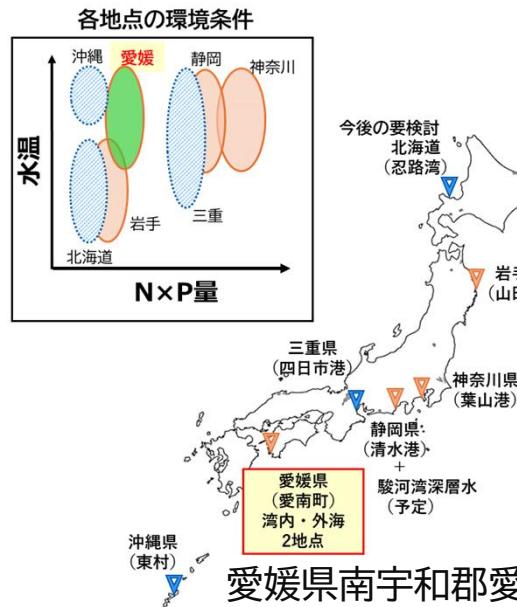
塩あり(海洋)条件

海水の塩濃度 (~0.5 M NaCl)
では酵素が担体から遊離するため、ポリ
マーは加水分解される
= ポイント制御機構
(スイッチ機構)

実海水でのポリマー分解酵素活性の塩濃度スイッチングを実証
PBS (肥料被覆材) の生分解性と強靭性の両立に成功

愛媛県実海域で大規模(年サンプル1,000件以上)フィールド試験を実施、データベースに集積！

海洋分解性プラスチックの普及・社会実装の実現のため、**信頼性が確保された評価法の確立、ラボとフィールドの相関を解明**
また得られたデータから構築したデータベースをポリマー合成・物性等のデータと関連付け、材料開発へのフィードバックを行う

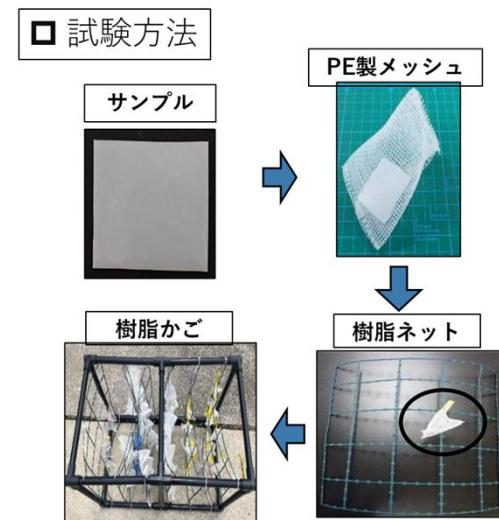


※亞熱帯海域(沖縄県東村)追加検討

支援: CERI

愛媛大南水研

マングローブ林



実施サンプル数

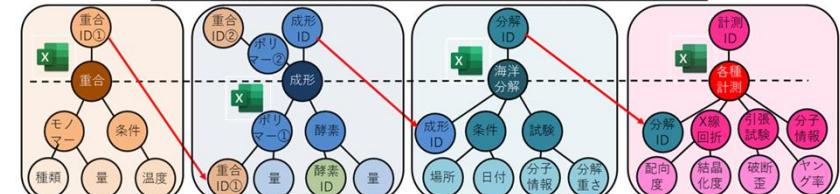
2023年度計	1,078
2024年度計	1,255
2025年度6月分	1,158
2025年度9月分	480

データベースの構築

最終目標:

- ✓ AI・MI利活用に資する海洋分解標準DB
- ✓ 高次構造や力学物性、表面吸着物などの重要情報がタグで紐づいたDB

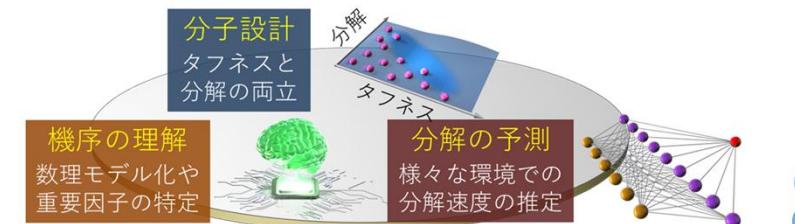
多様な分野のExcelデータをDB上で紐づける



分解に関する複雑な方程式をAIで学習する

分解 = f (一次構造, 高次構造, 表面物性, 環境要因, 微生物, 時間)

AIやMIに基づきデータを利用する

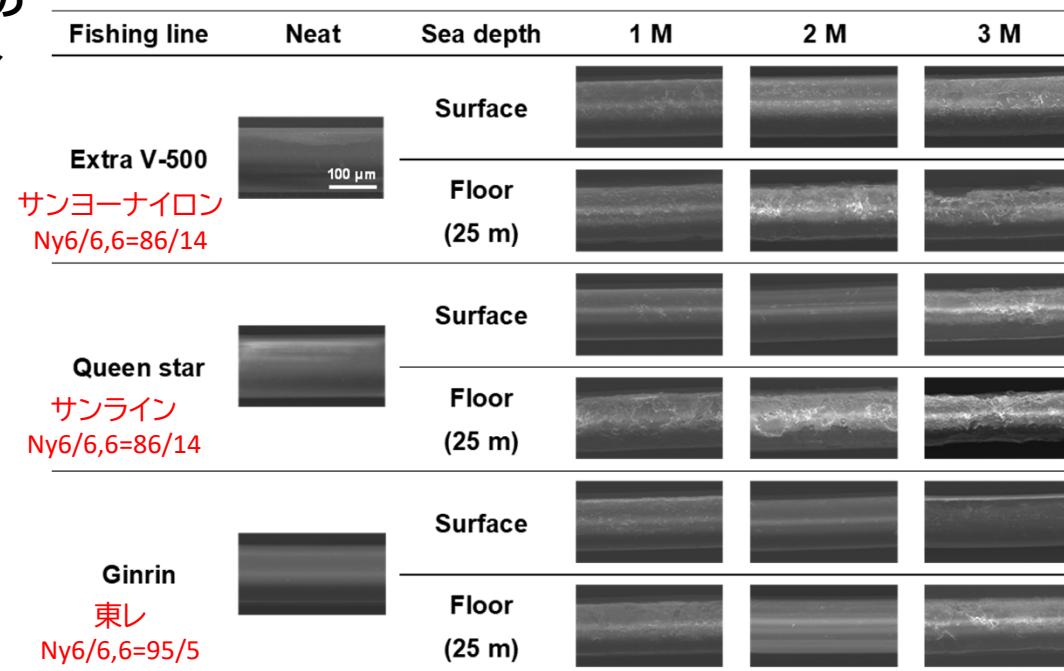


ナイロン製(PA6/66共重合体)の市販釣り糸が海洋で生分解することを発見！

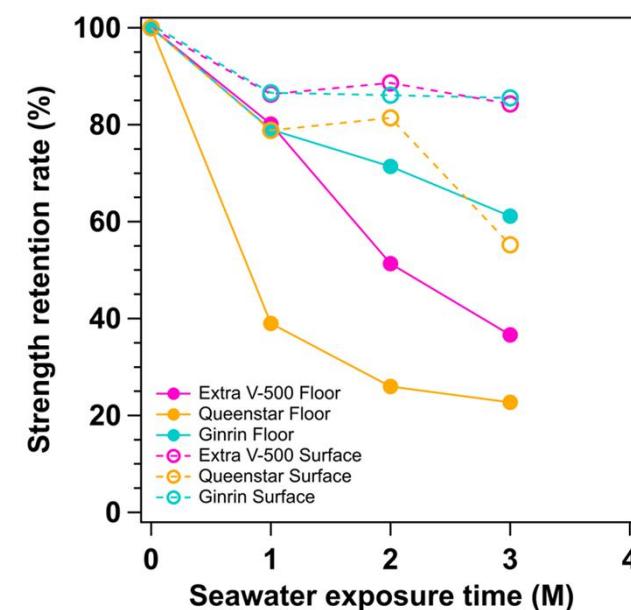
ナイロンを非生分解性と考えてきたこれまでの教科書の記述や水産業の常識を覆す新発見

- ✓ 海洋では分解しないと共通認識されていた市販釣り糸(ナイロン6とナイロン6,6の共重合体)が、共重合体の比率によっては、代表的な海洋生分解性ポリマーのセルロースと同等レベルで生分解することを世界で初めて明らかにした。
- ✓ 今回の発見は、釣り糸による海洋汚染拡大の歯止めとなるのみならず、漁網などの漁業系プラスチックに展開することにより、ゴーストギア問題の包括的解決にも貢献できる。

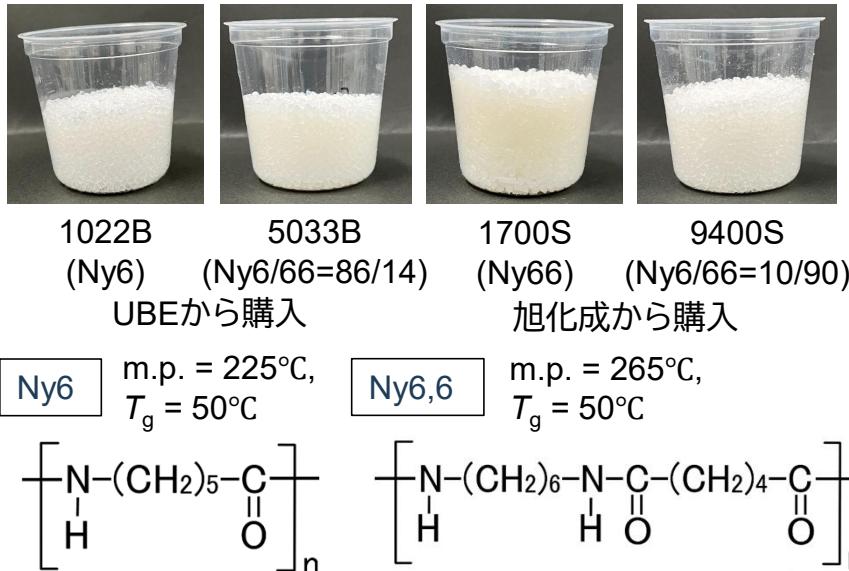
市販ナイロン釣糸の フィールドテスト @愛媛県愛南町



- Extra V-500とQueenstarは海底で崩壊が進行し結節強度低下が著しい
- Queenstarは表層でも3ヶ月で結節強度が低下



Ny6, Ny66釣糸の共重合組成による生分解性の違い

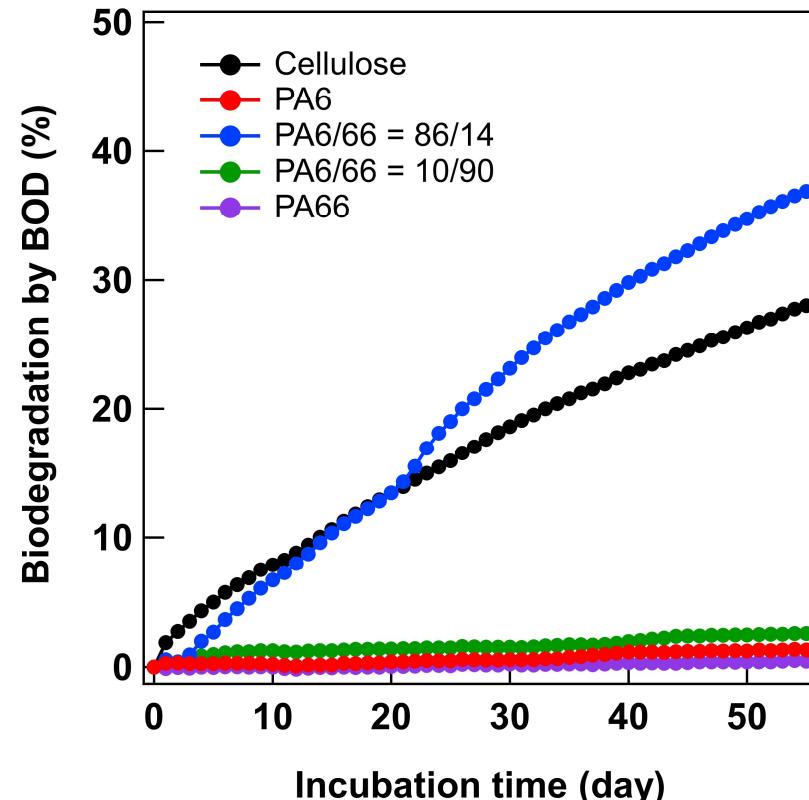


○X線分析

Line	Ny6 content (%)	Crystallinity (%) ^{a)}	Crystal size (nm) ^{b)} $\alpha(200)$	$\alpha(002/202)$
Ny6	100	34.0	10.7	7.9
Ny6/66= 86/14	86	49.0	9.0	6.1
Ny6/66= 10/90	10	28.2	11.3	7.8
Ny66	0	34.0	11.5	8.4

Ny6/66= 86/14は結晶化度大、結晶サイズ小。他はほぼ同等。

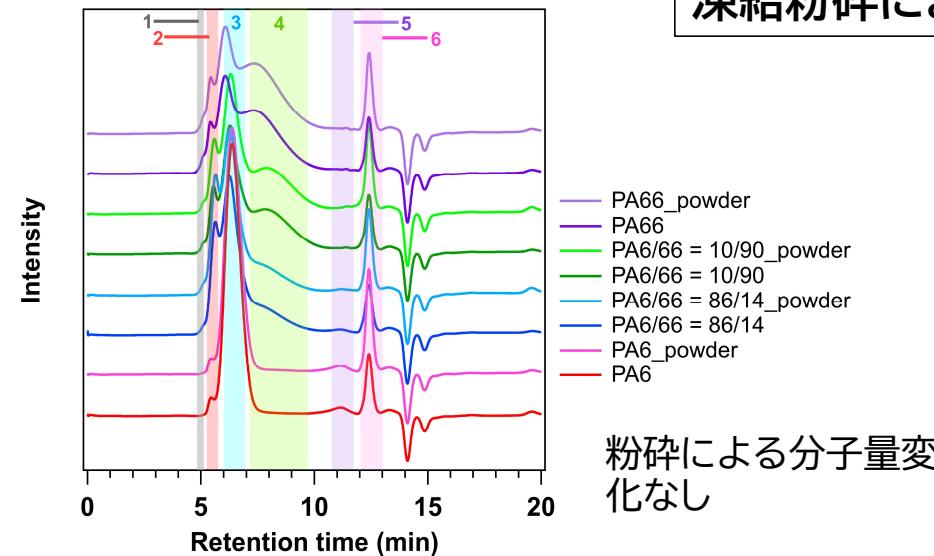
○生分解性試験



Ny6/66コポリマーがセルロース
 並みの生分解性を示した。

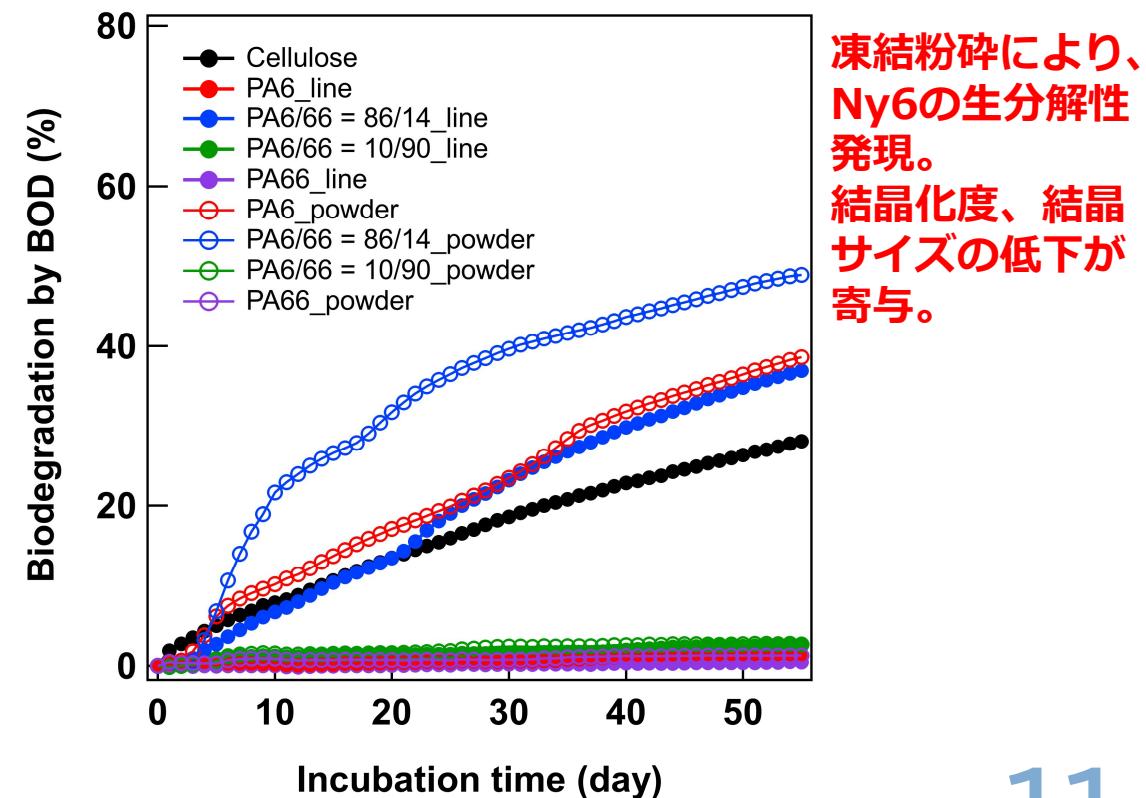
Ny6, Ny66と共に重合体の凍結粉碎による生分解性の発現

○分子量分析



凍結粉碎による結晶化度、結晶サイズの低下

○生分解性試験

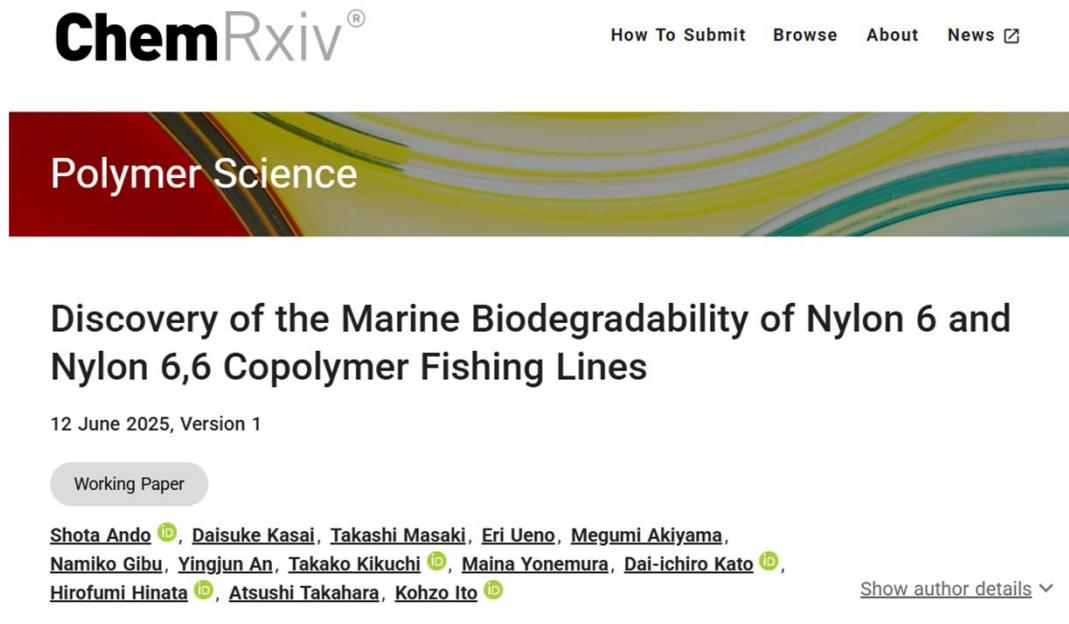


○X線分析

Powder	Ny6 content (%)	Crystallinity (%) ^{a)}	Crystal size (nm) ^{b)}	
			$\alpha(200)$	$\alpha(002/202)$
Ny6	100	11.4	7.9	-
Ny6/66= 86/14	86	10.2	9.0	-
Ny6/66= 10/90	10	9.7	9.1	-
Ny66	0	14.3	8.5	-

凍結粉碎により、結晶化度、結晶サイズが大幅に低下

ゴーストギア（漁業系プラスチックごみ）問題解決の決定打に！



ChemRxiv®

How To Submit Browse About News

Polymer Science

Discovery of the Marine Biodegradability of Nylon 6 and Nylon 6,6 Copolymer Fishing Lines

12 June 2025, Version 1

Working Paper

Shota Ando , Daisuke Kasai, Takashi Masaki, Eri Ueno, Megumi Akiyama, Namiko Gibu, Yingjun An, Takako Kikuchi , Maina Yonemura, Dai-ichiro Kato , Hirofumi Hinata , Atsushi Takahara, Kohzo Ito 

Show author details ▾



●チーム連携

- ・長岡技科大(笠井):ナイロン生分解菌叢解析、海水・土壤分解菌のスクリーニングなど
- ・九州大(高原)、JASRI(増永):ナイロンの結晶構造解析など
- ・鹿児島大(加藤)、岩手大(山田):ナイロン生分解酵素の解析、分解産物の特定など
- ・愛媛大(日向)、CERI(菊地):ナイロン釣糸・フィルムのフィールドテスト、植種源収集など
- ・神戸大(佐藤春実):ナイロン非晶相の水素結合力と生分解性の相関性など
- ・東大(天本)、産総研(森田):データ解析によるナイロン生分解性の支配的要因の特定
- ・山形大(伊藤浩志、小林):ナイロンの成形加工、紡糸など

■今後のPJ方針

- ・ターゲット(用途)：農業資材(肥料被覆材など)、タイヤの摩耗粉、漁業資材(漁網、ブイ、発泡スチロール等)
- ・企業チームのターゲットを明確にして、分子設計及び用途に合わせた材料開発をアカデミアのサポートの下、強力に推進し、早期の社会実装に繋げていく。

■（ナイロン生分解の発見による）今後の新しい追加方針

- ・常識を覆す今回発見により、国際的な競争下で「分解性を制御可能なナイロン」の多様な用途開発が展開する可能性があり、MS伊藤PJ(アカデミア)は、分解メカニズムの解明により協調領域を構築し、広く発信を行う
- ・協調領域の成果発信により、企業の競争領域の開発を促し、国内の産業競争力を向上する

※産業応用の可能性：漁業用資材全般(釣糸,ルアー,ロープ,漁網等)、衣料用纖維、他農業用資材、カトラリー/コンポスト、人工芝等

関連サイト



問合せ先

〒113-8656 東京都文京区弥生2-11-16工学部12号館310室
東京大学大学院 新領域創成科学研究所
MS伊藤プロジェクト TEL:03-5841-0250
kohzo@edu.k.u-tokyo.ac.jp naokikato@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

<http://www.moonshot.k.u-tokyo.ac.jp/project.html>