

光スイッチ型海洋分解性の 可食プラスチックの開発研究

PM：金子達雄
北陸先端科学技術大学院大学 教授

PJ参画機関：
国立大学法人北陸先端科学技術大学院大学
国立大学法人神戸大学
国立大学法人東海国立大学機構名古屋大学
国立大学法人鹿児島大学、
学校法人東京理科大学
国立大学法人東京農工大学、
国立研究開発法人産業技術総合研究所
地方独立行政法人大阪産業技術研究所

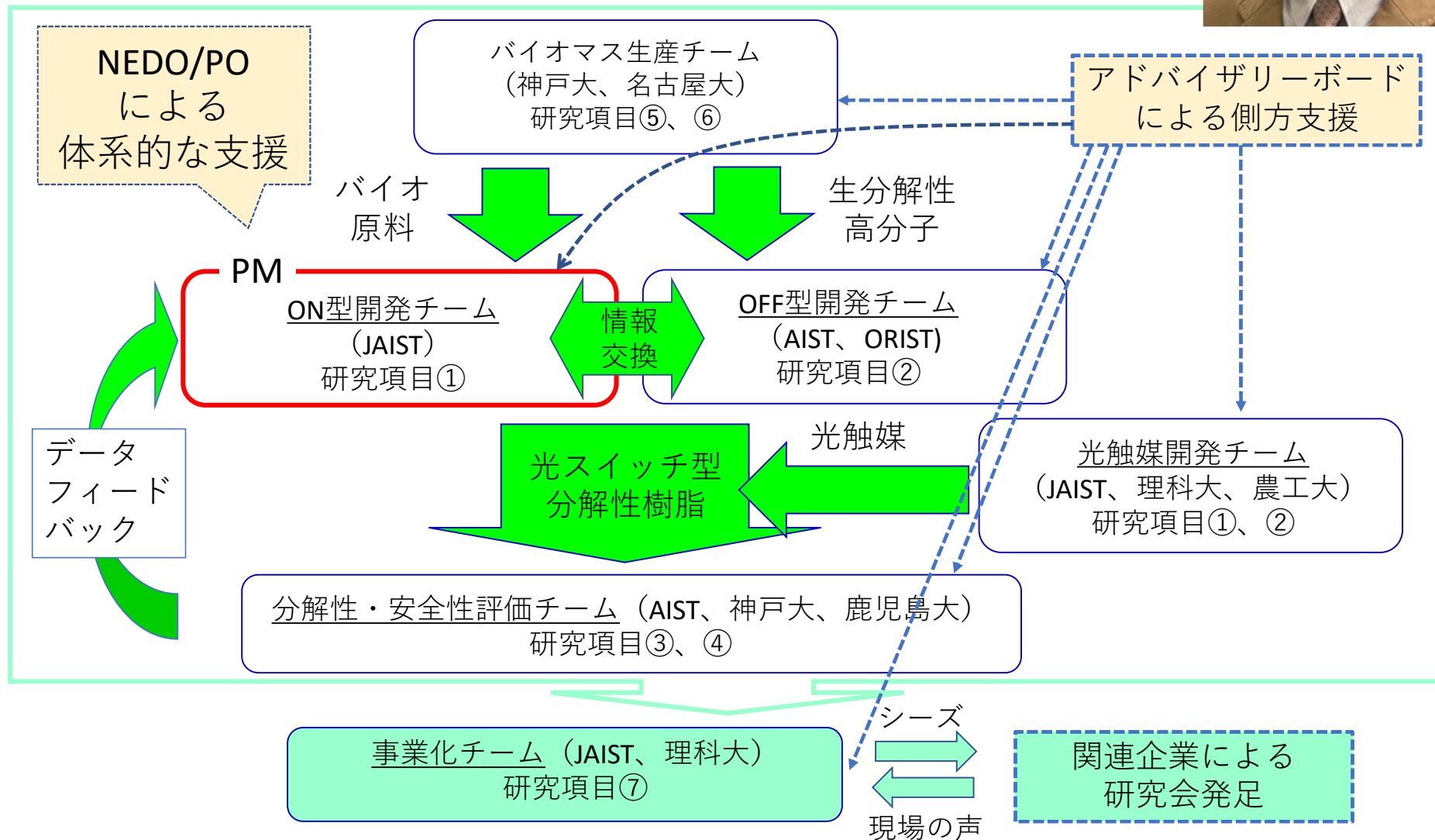
実施体制

【実施期間】 2020年度～2029年度

【最終目標（2029年度）】 ソルガム新品種から生産したイタコン酸と生分解性高分子を用いて新規開発の高機能光触媒をコンポジット化し光スイッチ型海洋生分解性の可食プラスチックを開発する

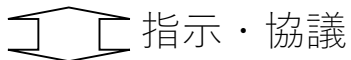


【実施体制】



各研究項目

NEDOおよびPD



PMマネジメント方針：地域性（繊維90%）と国際性（ACS、欧州・アジアでも活動）を生かし、国内外の産官学の連携を通し柔軟かつ大胆にマネジメントを行う。

産業技術総合研究所

研究開発実施場所：バイオメディカル研究部門（池田市）

研究項目②-2 海洋分解性プラスチックと抗菌性光触媒のコンポジット化

研究項目③-2 ラボ試験による海水生分解および安全性評価：BOD試験

研究項目④-1 消化酵素中における分解性評価

研究項目④-3 魚類を用いた分解性および安全性試験

大阪産業技術研究所

研究開発実施場所：応用材料化学研究部（和泉市）

研究項目②-3 OFF型およびON/OFF型光スイッチ生分解性コンポジットの抗菌活性評価

東京理科大学

研究開発実施場所：基礎工学部材料工学科（東京都葛飾区）

研究項目①-2 ON型光スイッチシステムに資する光触媒の新規開発

研究項目⑦-2 事業基盤強化および環境醸成

東京農工大学

研究開発実施場所：農学研究院生物システム科学部門（小金井市）

研究項目②-1 還元型抗菌性光触媒の開発

委託

北陸先端科学技術大学院大学

研究開発実施場所：先端科学技術研究科（能美市）

研究項目①-1 イタコン酸からのナイロンブロックの組み込み重合による各種ポリマーの開発

研究項目①-3 ON型光スイッチ生分解性ポリマーの分解を制御する添加剤システムの開発

研究項目①-4 ON型光スイッチ生分解性プラスチックの成形加工

研究項目⑦-1 LCA計算

委託

神戸大学

研究開発実施場所：大学院科学技術イノベーション研究科および内海域環境教育研究センター（神戸市）

研究項目⑥ ソルガムからのイタコン酸の発酵生産

研究項目③-1 実海域における分解性評価

研究項目④-2 疑似腸内環境における分解性および安全性評価研究項目

研究項目④-4 プラスチックの分解産物が海洋生態系に及ぼす影響評価

委託

委託

委託

名古屋大学

研究開発実施場所：生物機能開発利用研究センター（名古屋市）

研究項目⑤-1 高バイオマス収量に優れた根系を有する品種の開発

委託

委託

鹿児島大学

研究開発実施場所：大学院理工学研究科理学専攻（鹿児島市）

研究項目④-5 ナイロン分解酵素の特定とin vitro分解評価

研究項目④-6 ナイロン分解酵素を用いたコンポストイング

委託

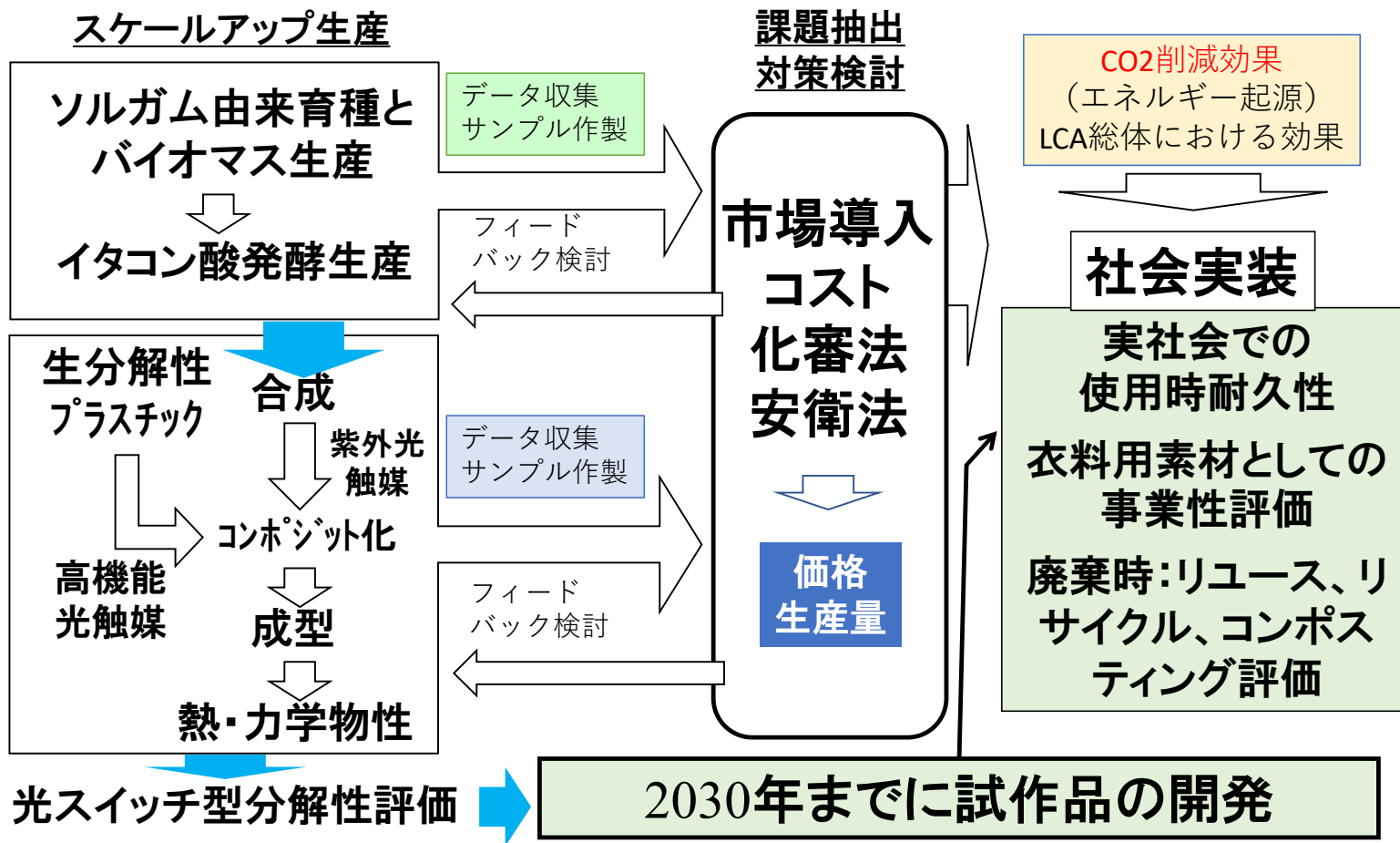
開発スケジュール（時系列のみ）

研究開発項目		2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
研究開発項目① ON型光スイッチ生分解性プラスチックの作製	①-1	ON型ブロック合成		ON型ブロック導入ポリマー合成				ON型ポリマー大量合成			
	①-2		ON型スイッチ光触媒の開発および合成法の確立				ON型スイッチ光触媒と調湿材料の複合体の開発				
	①-3	ON型スイッチ等劣化立証				安定化剤開発・光触媒試験			添加剤システム完成		
	①-4	レオロジー特性把握		繊維化・高強度化		フィルム化・高強度化			芯鞘繊維・多層フィルムの調製		
研究開発項目② 光触媒の抗菌機能を活用したOFF型光スイッチ生分解性プラスチックの開発	②-1		光触媒の合成法確立			光触媒の改質と抗菌活性評価			光触媒のコンポジット化		
	②-2		スイッチ性能評価法の確立		OFF型材料の開発と評価			ON/OFF具有型材料の開発と評価			
	②-3		抗菌活性評価系の構築		光スイッチ性能（抗菌性）評価				実環境試験との相関性評価		
研究開発項目③ 光スイッチ型生分解性プラスチックの海洋分解性評価	③-1			ON型、OFF型樹脂の実海域評価					ON/OFF具有型の実海域評価		
	③-2		閉環型ON型樹脂の安定性確認		OFF型スイッチ性能の評価		閉環型ON型のBOD評価			ON/OFF具有型のBOD評価	
研究開発項目④ 光スイッチ型生分解性プラスチックの酵素分解性および安全性評価	④-1		ON/OFF型樹脂の分解性評価			分解機構の解析				高分子構造の影響評価	
	④-2		ヒト腸内細菌叢モデルによる分解性評価系の構築	安全性評価系構築			海洋動物の腸内細菌叢モデルによる分解性評価系の構築	安全性評価系構築			
	④-3		ON/OFF型樹脂の経口摂取/排泄挙動の評価				水溶性樹脂(開環ON型)の評価			ON/OFF具有型の評価	
	④-4		オリゴナイロン6i誘導体・OFF型の評価				水溶性樹脂(開環ON型)の評価			ON/OFF具有型の評価	
	④-5		微生物スクリーニング		性質付け・酵素遺伝子単離				分解条件最適化・酵素機能強化		
	④-6		微生物機能強化・分子育種・コンポスティング条件検討					コンポストシステム開発		パイロット試験	
研究開発項目⑤ 光スイッチ型海洋分解性プラスチックの原料として最適化したソルガム品種の開発	⑤-1		ゲノムワイド関連解析								
			コアコレクション形質評価				QTL集積育種				
研究開発項目⑥ ソルガムからの生分解性プラスチック原料の発酵生産	⑥-1		糖化プロセスの開発および発酵阻害の影響解析						デザイン化ソルガムの糖化プロセス開発		
	⑥-2		イタコン酸生産モデルおよび株の構築						OFF型プラスチック原料生産菌の開発		
	⑥-3		低酸素適合生産菌の開発						低炭素プロセスによるソルガムバイオマスからの物質資産		
研究開発項目⑦ 光スイッチ型海洋分解性プラスチック生産における事業基盤強化およびマネジメント業務	⑦-1		ラボデータによるLCA課題明確化			量産スケールLCA計算モデル構築				世界規模GHG削減効果算定	
	⑦-2	海プラ問題の概要把握				アプリケーション探索・コンセプト検証（PoC）			アプリケーション決定・PoC完		
		研究会設立準備				研究会活動推進・協創基盤構築				コンソーシアム結成	

社会実装のイメージ



その先も見据えて



全てナイロン製

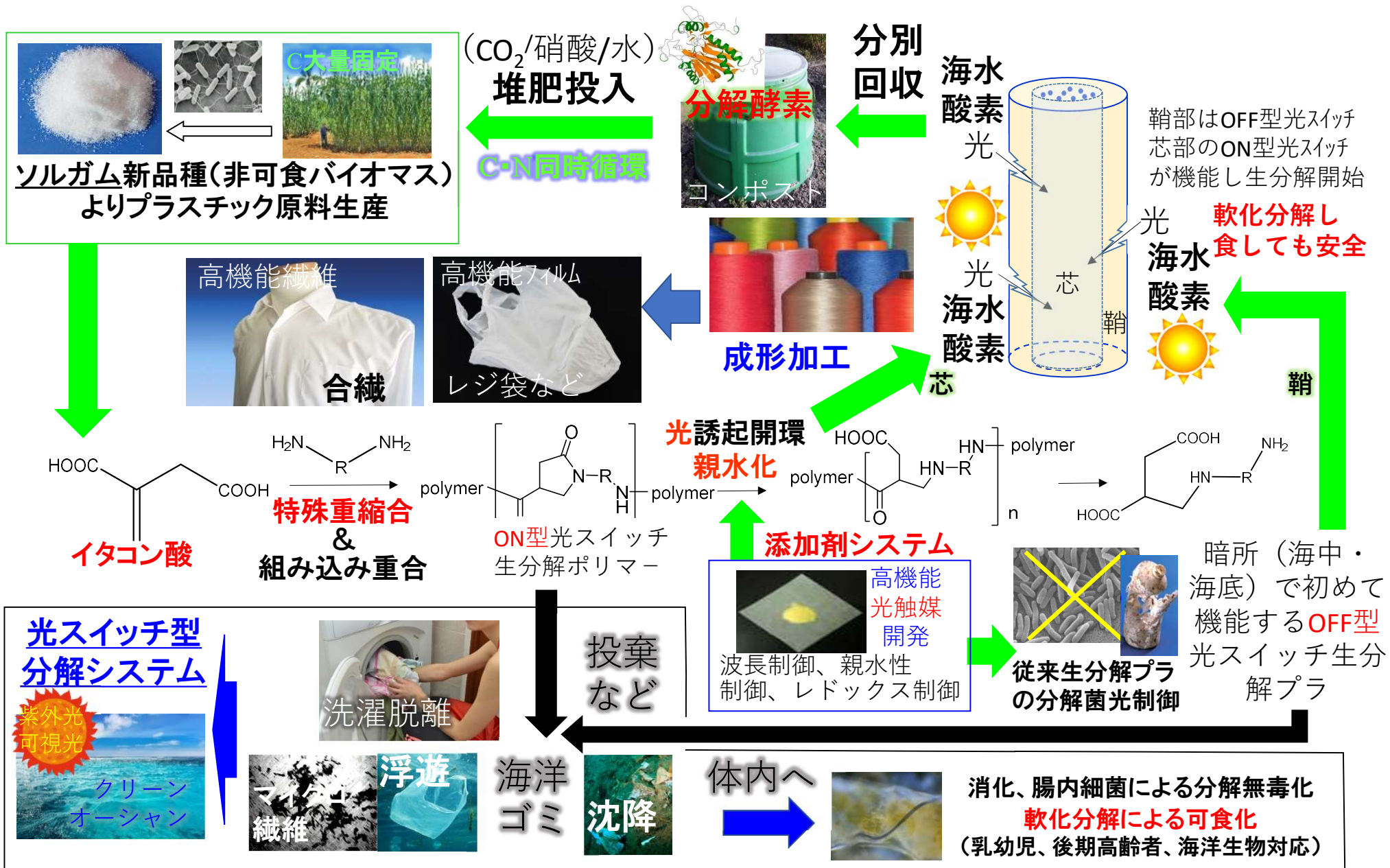
自動車用ナイロン樹脂の市場規模と環境への貢献度は大きく、分解性高性能ナイロンとして拡大

長期戦略

繊維としての最適用途およびフィルム、容器、成形樹脂としての用途開発2050年までに流通

光スイッチ型分解性プラスチックの最適事業形態の提案

研究開発項目・内容



最適化したソルガム品種からの生分解性プラスチック原料の発酵生産を行う

⑤原料として最適化したソルガム品種の開発

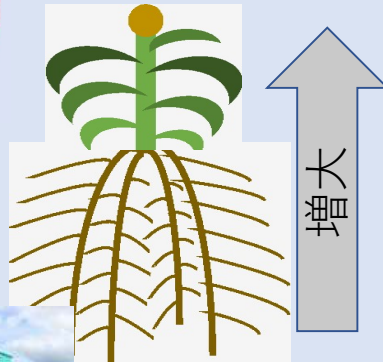
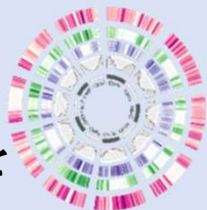
バイオリファイナリー作物：ソルガム

- 高バイオマス → >85t/ha
- スイート品種 → 搾汁糖液も利用可
- 転換畑でも栽培可 → 休耕地対策
- 広い栽培地域 → 赤道直下～温帯、
→ 半乾燥地域での栽培可
- C4植物 → CO2固定能力が大
- 機械化播種・機械化収穫体系が確立

高バイオマス収量に優れた根系を有する品種の開発

根系形態改良 → バイオマス増大

- 250品種の根系形質評価
- 重要QTLの同定 (GWAS)
- MASによる重要QTLの蓄積

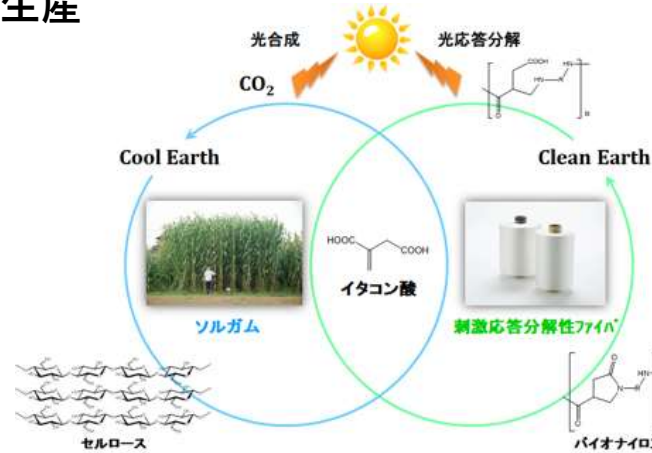


ゲノムビックデータを駆使した育種



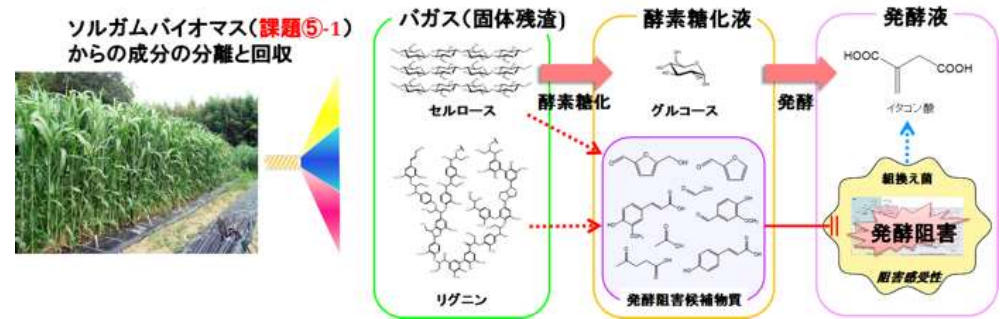
バイオプラ原料作物へと最適化

⑥ソルガムからの生分解性プラスチック原料の発酵生産



非食かつ再生可能な資源である
ソルガム残渣からイタコン酸を生産し、生分解性プラスチック原料として供給する、新しい生産体系の構築

⑥-1 バイオプラント適合型”ソルガムの酵素糖化技術開発



⑥-2 微生物創製および発酵最適化支援ツールの開発

⑥-3 イタコン酸を効率的に生産可能な新規低炭素プロセスの開発（課題①に原料供給）



高効率バイオマス生産における進捗状況（研究項目⑤、⑥）

最適化したソルガム品種からの生分解性プラスチック原料の発酵生産を行う

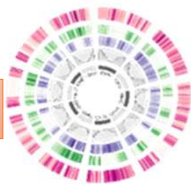
世界各地から集められた250系統を供試

イタコン酸生産菌の開発とソルガムの資源化



245系統全ゲノムリシーケンシング
7.1Gb/1系統（ゲノムサイズ約732Mb）

データベース化

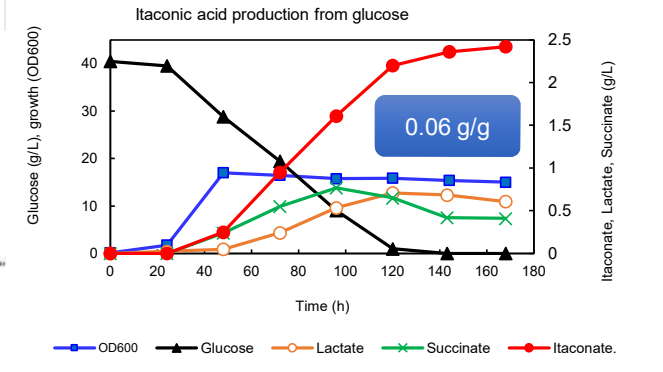
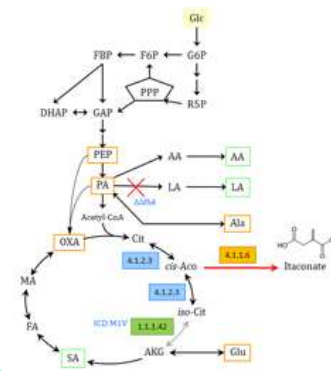


各系統の根の形質評価とゲノムワイド関連解析

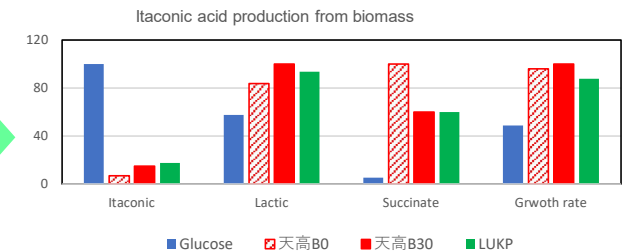
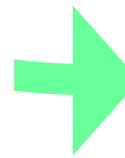
品種I（インド）品種C（スーダン）品種B（メキシコ）品種H（中国）



非常に大きな根系形態の品種間差異→有用遺伝子座の同定へ



ソルガム
糖化液



微生物創製および発酵最適化支援ツールの開発

コリネ菌のゲノム情報を用いた数理モデル



細胞内物質動態シミュレーション

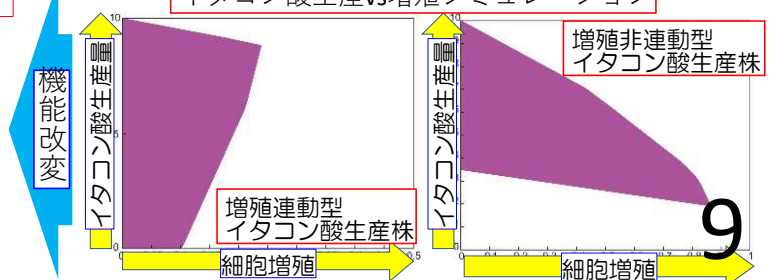
物質動態定量化

細胞デザイン
(生産性向上)

全反応を俯瞰した最適細胞 iCell の開発

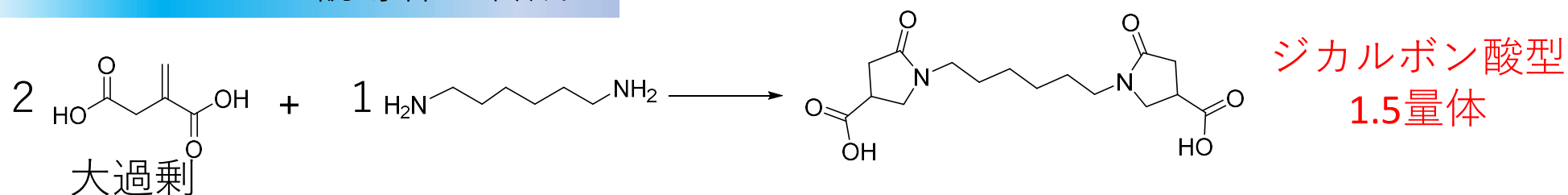


イタコン酸生産vs増殖シミュレーション

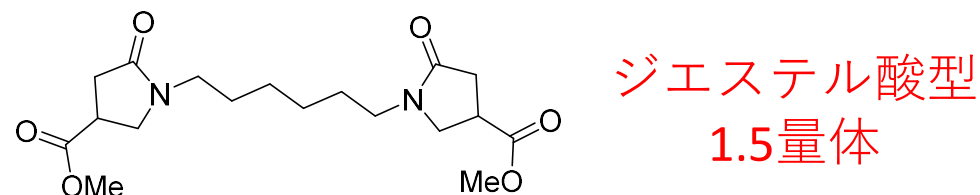
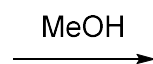


ON型光スイッチ生分解性システムにおける進捗 (研究項目①-1)

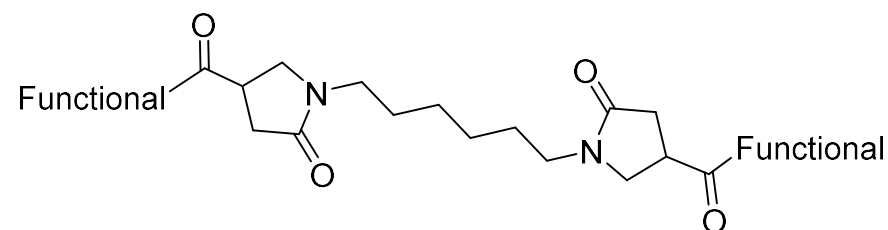
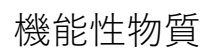
オリゴナイロン6i誘導体の合成



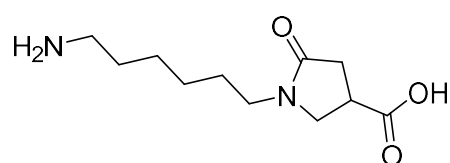
ジカルボン酸型
1.5量体



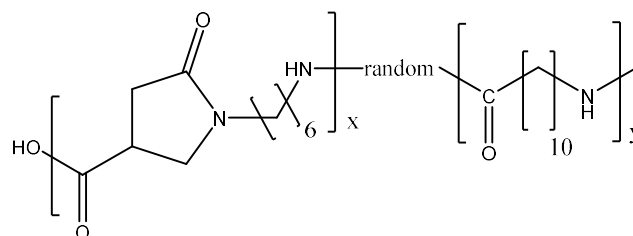
ジカルボン酸型
1.5量体



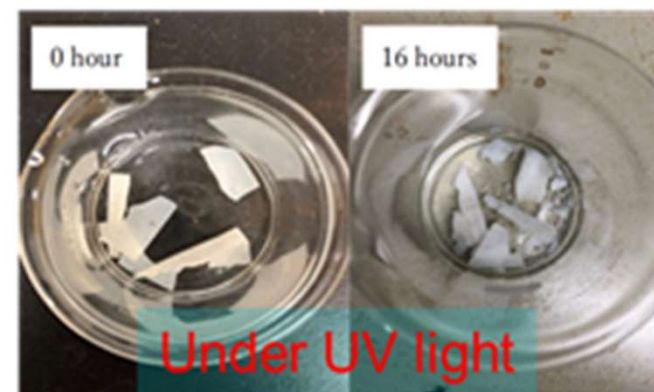
末端機能化ナイロンブロック



アミノ酸型1量体



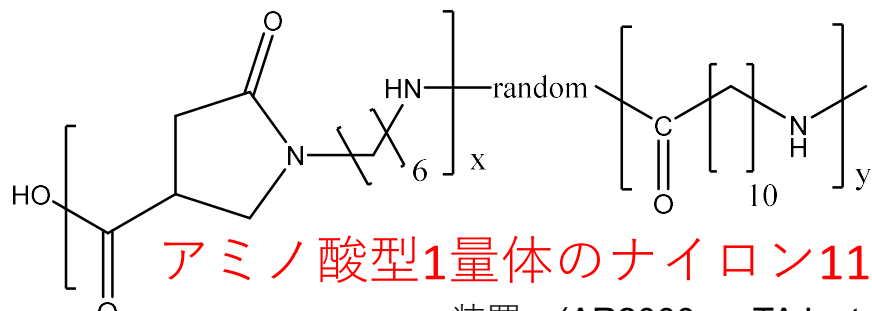
アミノ酸型1量体のナイロン11への組み込みに成功



水中で紫外線照射することで親水化しゲル状に膨潤する性質も保持されている。

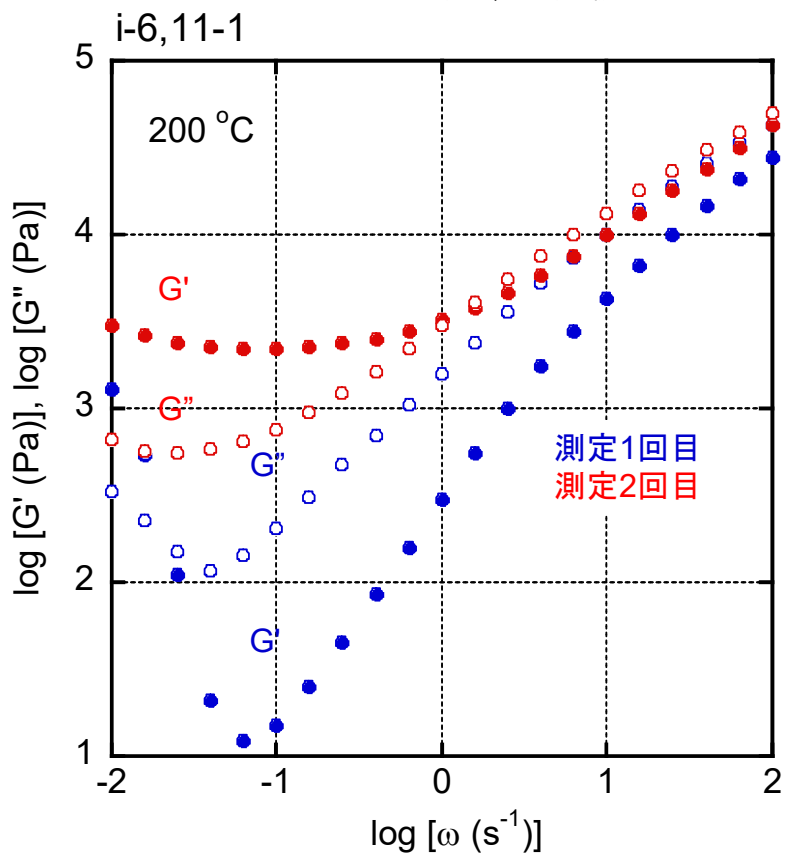
ナイロン6i/ナイロン11共重合体の成形加工（研究項目①-4）

塩モノマー法において第三成分であるヒマシ油由来の11-アミノウンデカン酸の導入条件を明確にした（ナイロン11とのポリマーコンポジット）

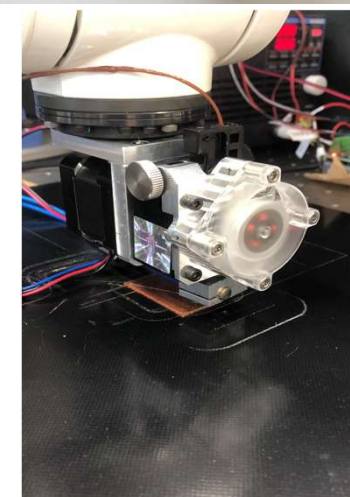
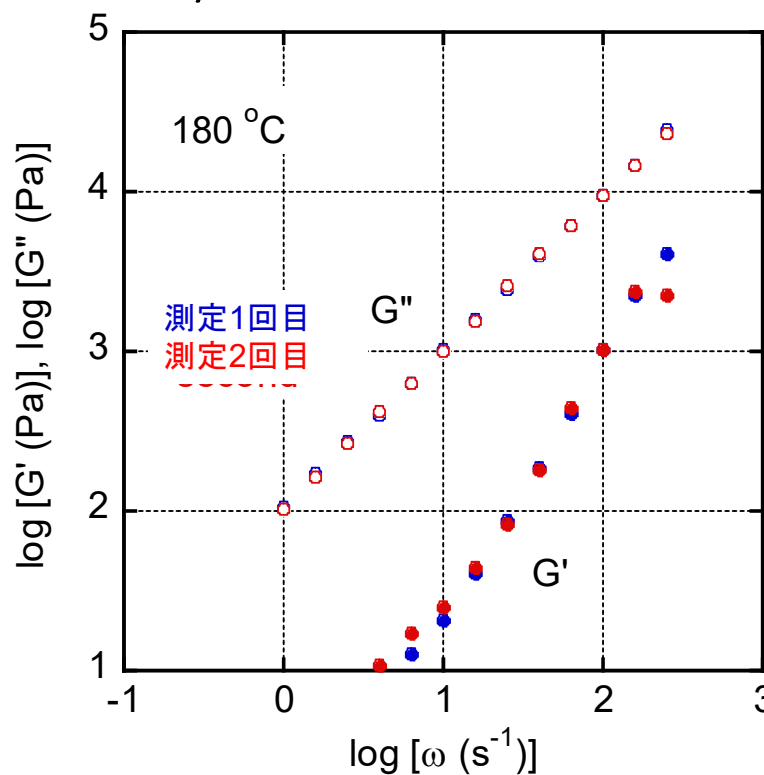


アミノ酸型1量体のナイロン11への組み込み

動的せん断弾性率 装置 (AR2000ex, TA Instruments製) 高周波数側から低周波数側に測定を実施
円錐-円板レオメータ



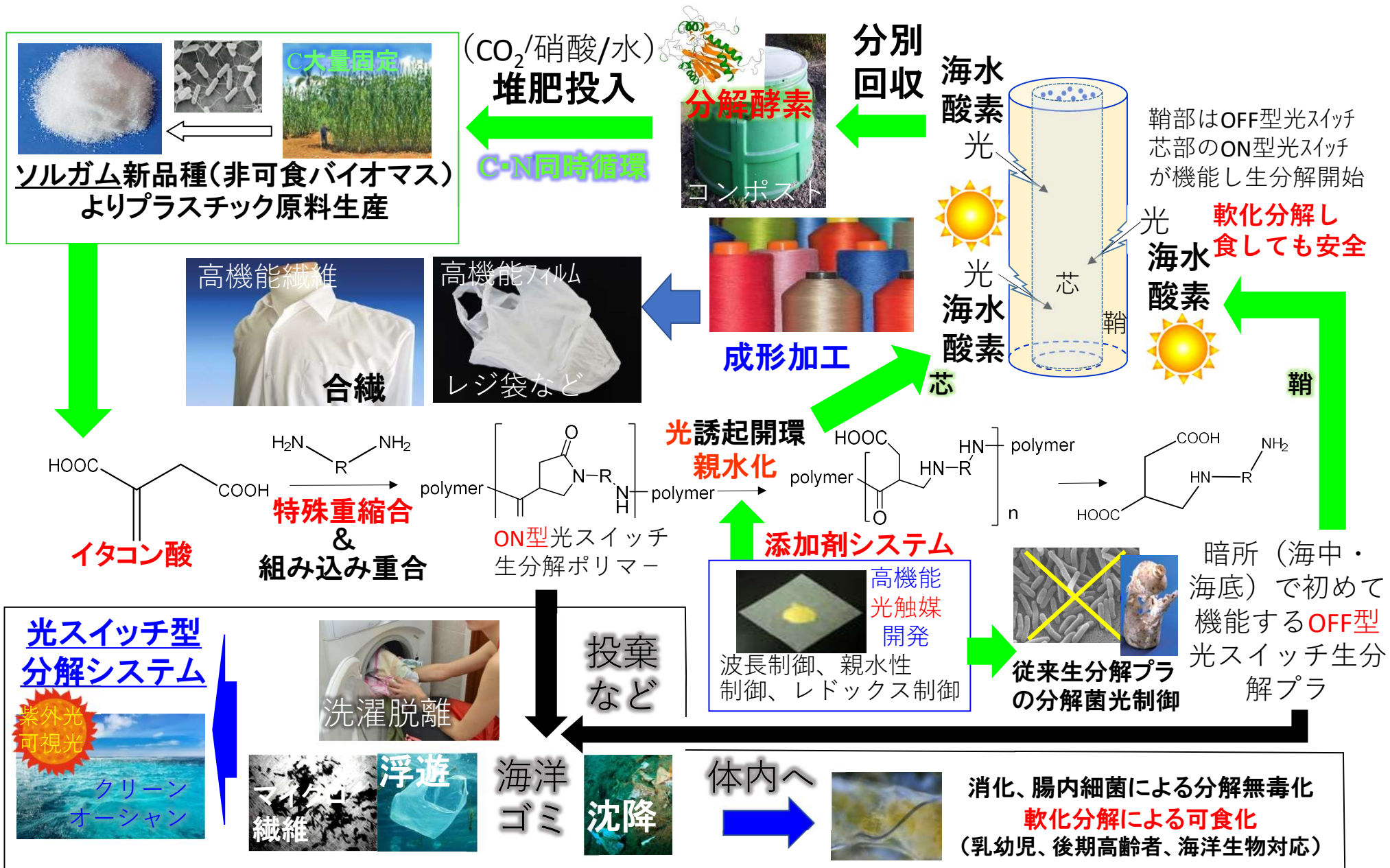
CuI/KI 添加



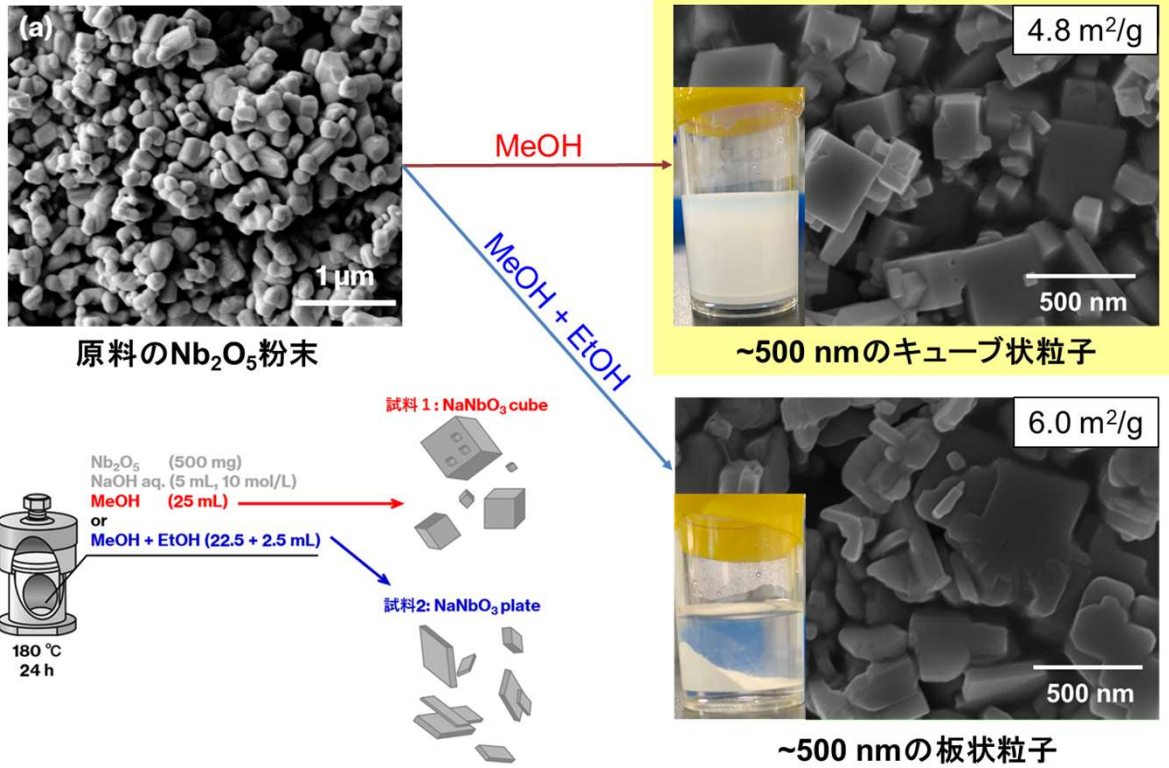
熱履歴を与えると弾性率が高まった。これは、高温で架橋反応が進行しやすいことを示す。一度目の測定でも低周波数領域で弾性率が高くなるのは測定中に架橋反応が進行したためと考えられる。

一般のナイロンと同様に高温で架橋するため安定化剤の検討を行った

研究開発項目・内容

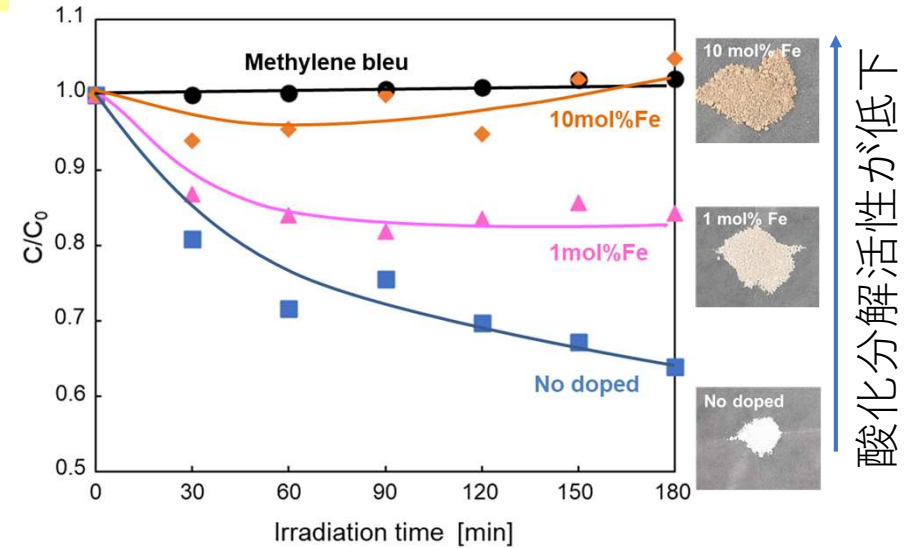
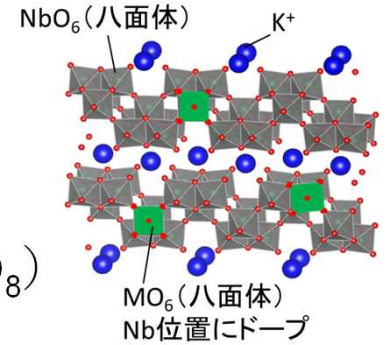


酸化分解活性が低く光誘起親水性を示す光触媒の開発(研究項目①-2)

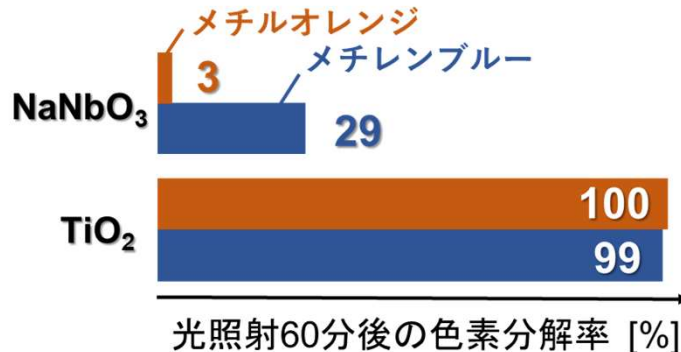


新規光触媒の開発

Feドープ層状
ニオブ酸カリウム
(Fe-doped KNb_3O_8)



市販の Nb_2O_5 試薬から、直接的に粒径と結晶系を制御した NaNbO_3 合成に成功



Feを KNb_3O_8 構造中にドープすることで、酸化分解活性が低い光触媒を合成することに成功した。

合成した NaNbO_3 は TiO_2 と比較して、酸化分解活性は低く、高度な親水性を示す

ナイロン6i／ナイロン11共重合体と光触媒とのコンポジット(研究項目①-3)

- Photodegradation of biobased nylon in artificial seawater.
- Investigate the photodegradation of biobased nylon in the presence of photocatalysts and stabilizers.



Nylon 6i-11-50%-CuI



Nylon 6i-11-50%-CuI/TiO₂ (0.5 wt%)



Nylon 6i-11-50%-CuI/NaNbO₃ (0.5 wt%)

新規開発光触媒とON型光スイッチ型ナイロンとのコンポジットフィルムが得られた

- Examination of the fate of degradation.



DI water

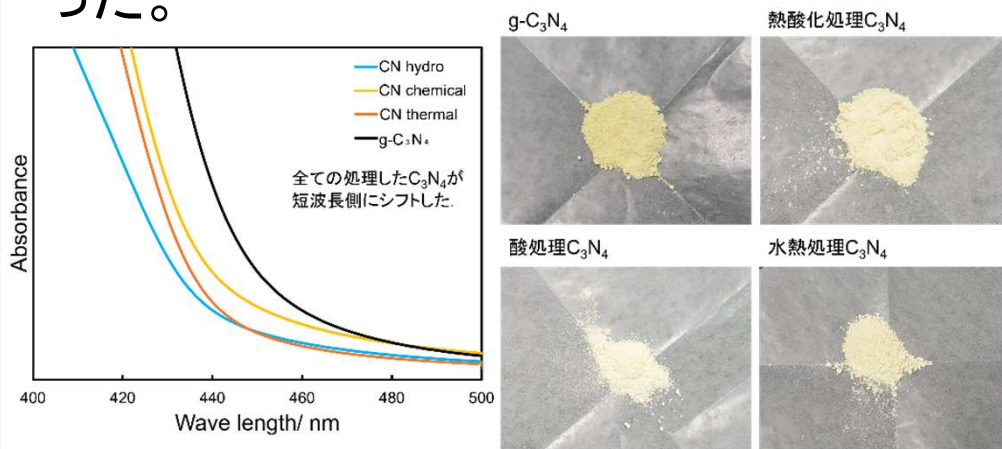


Artificial seawater

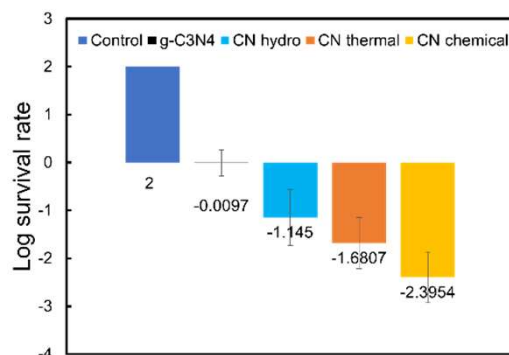
人工海水中で分解が促進されることが確認された

■ 可視光で抗菌性を発現し、樹脂本体にダメージを与えない光触媒の開発

g-C₃N₄光触媒に対して各種処理を行った。

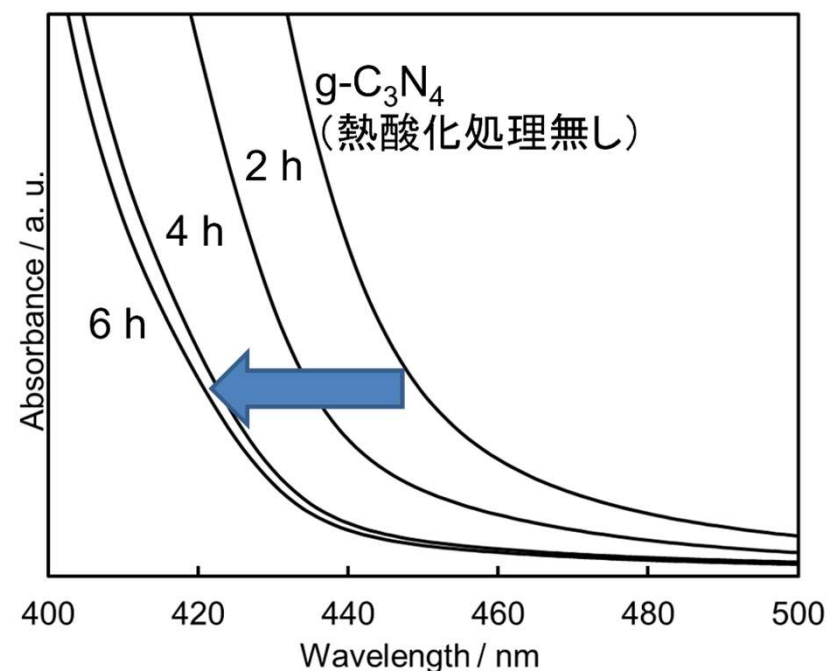


- g-C₃N₄の熱酸化処理、酸処理、水熱処理により、いずれもブルーシフトした



- g-C₃N₄の熱酸化処理、酸処理、水熱処理により、抗菌活性が向上した

g-C₃N₄光触媒の熱酸化処理時間の最適化を検討した。

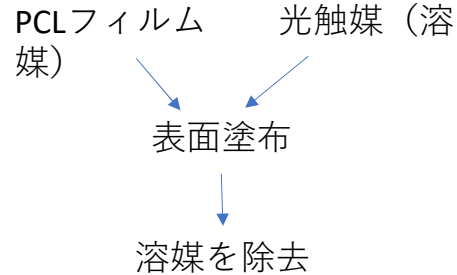


- 熱酸化処理時間が長くなると、吸収端はブルーシフトした。
- 熱酸化処理時間の長い試料は、短い試料に比べて淡色化しているため、将来は白色の繊維などに塗布しやすいことが期待される。

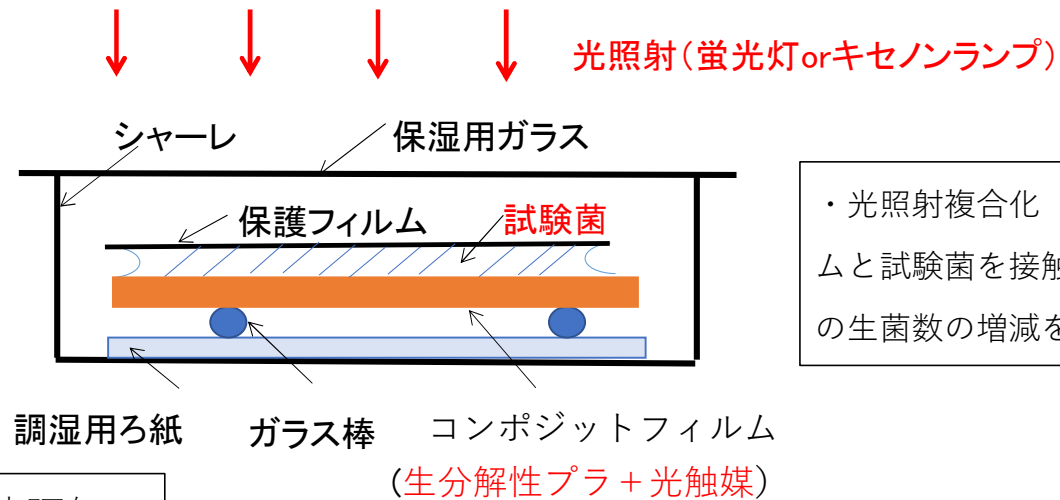
OFF型光スイッチ生分解性システムの構築 (研究項目②-2、②-3)

光触媒複合化 (表面塗布)

フィルム表面を溶媒で部分的に溶かして光触媒をコーティング

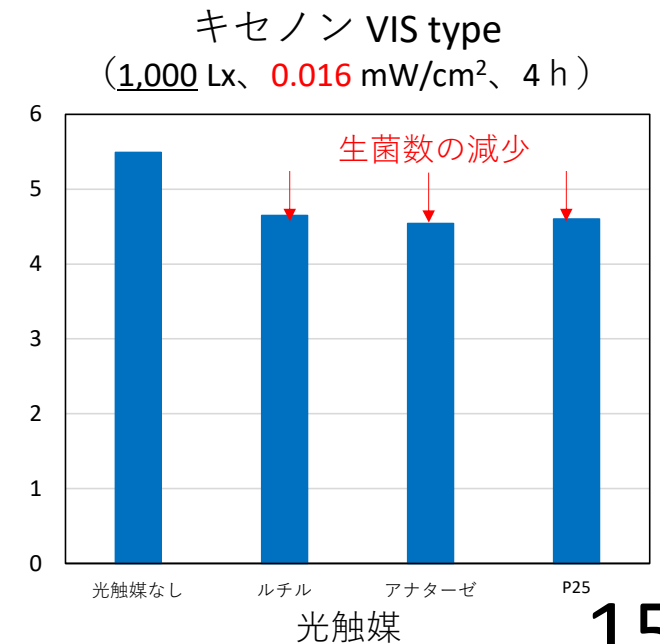
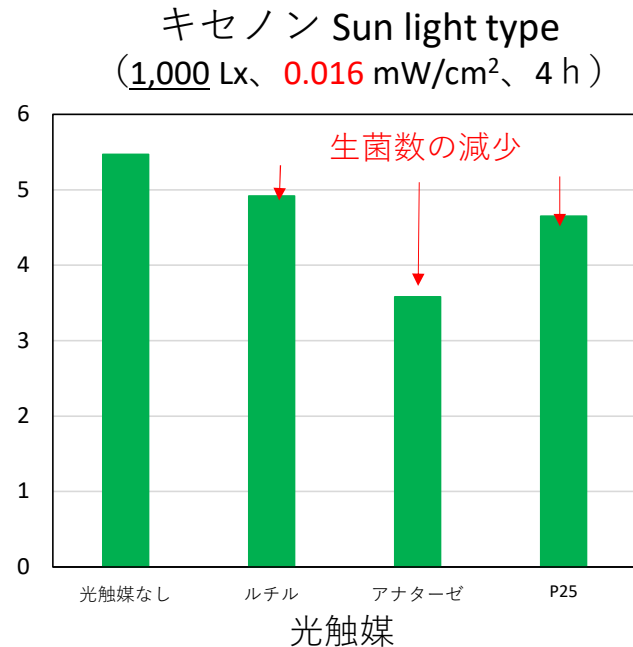
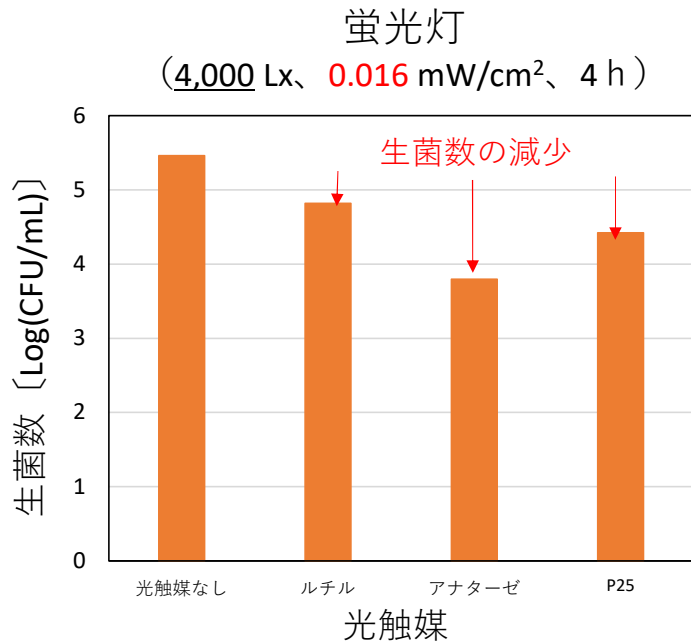


抗菌活性評価法 (フィルム密着法)



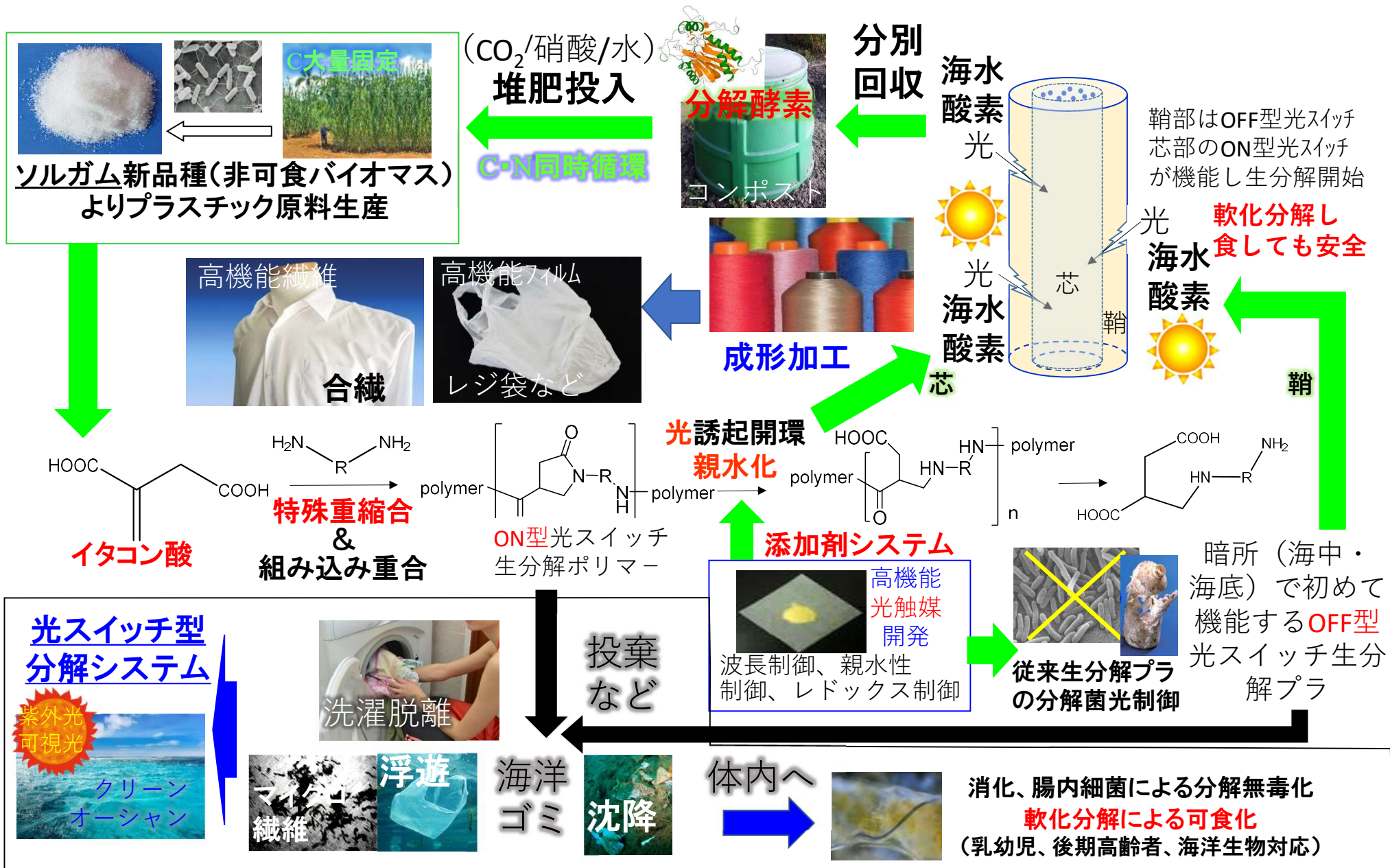
・光照射複合化 (コンポジット) フィルムと試験菌を接触させ、一定時間経過後の生菌数の増減を測定する。

光触媒複合化フィルムの抗菌活性評価



・光源の種類や照度 (Lx) の違いにかかわらず、紫外線強度 (mW/cm²) が同じなら、生菌数の減少 (抗菌活性) に大きな差は見られない。

研究開発項目・内容

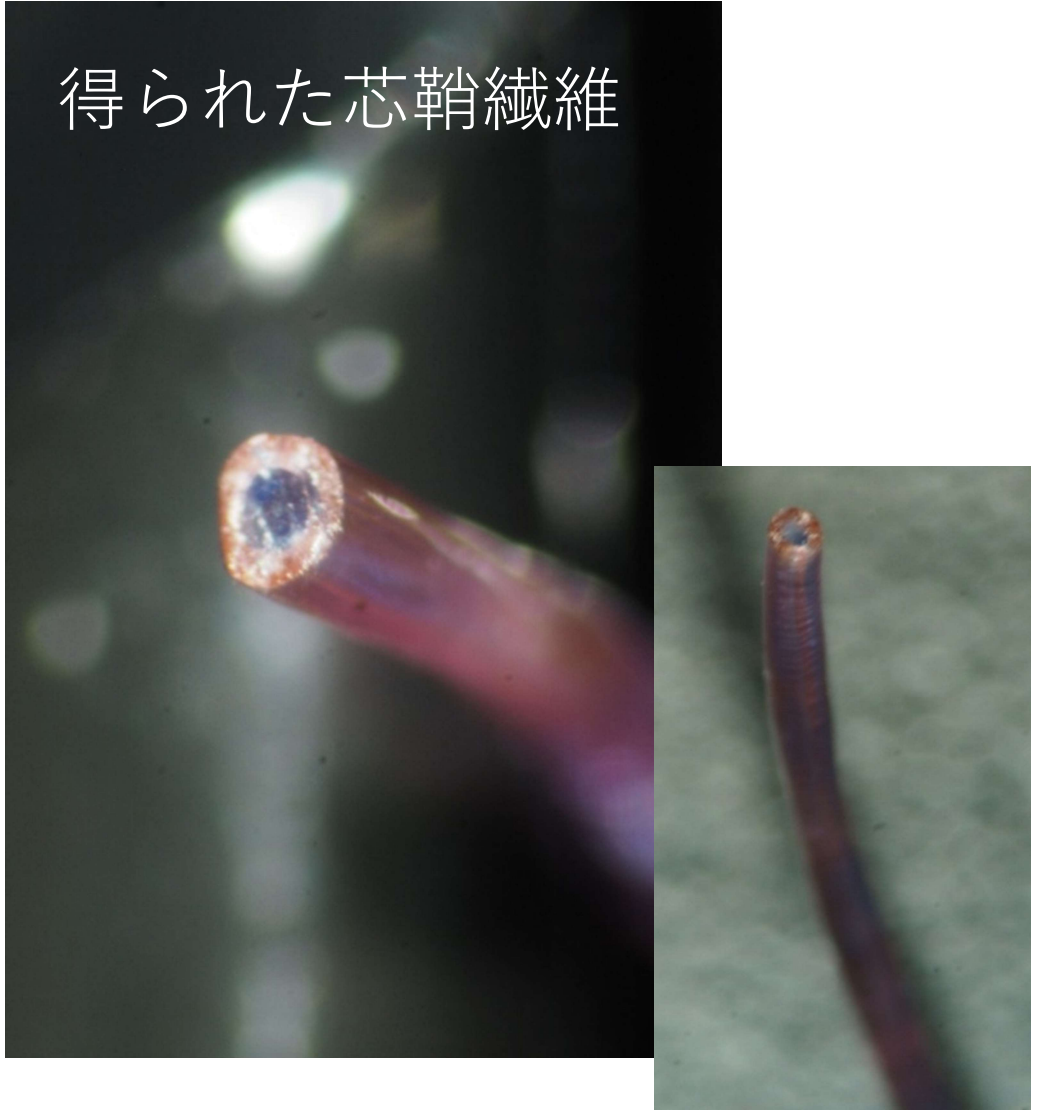


芯鞘構造繊維の作製システム構築（研究項目①-4）

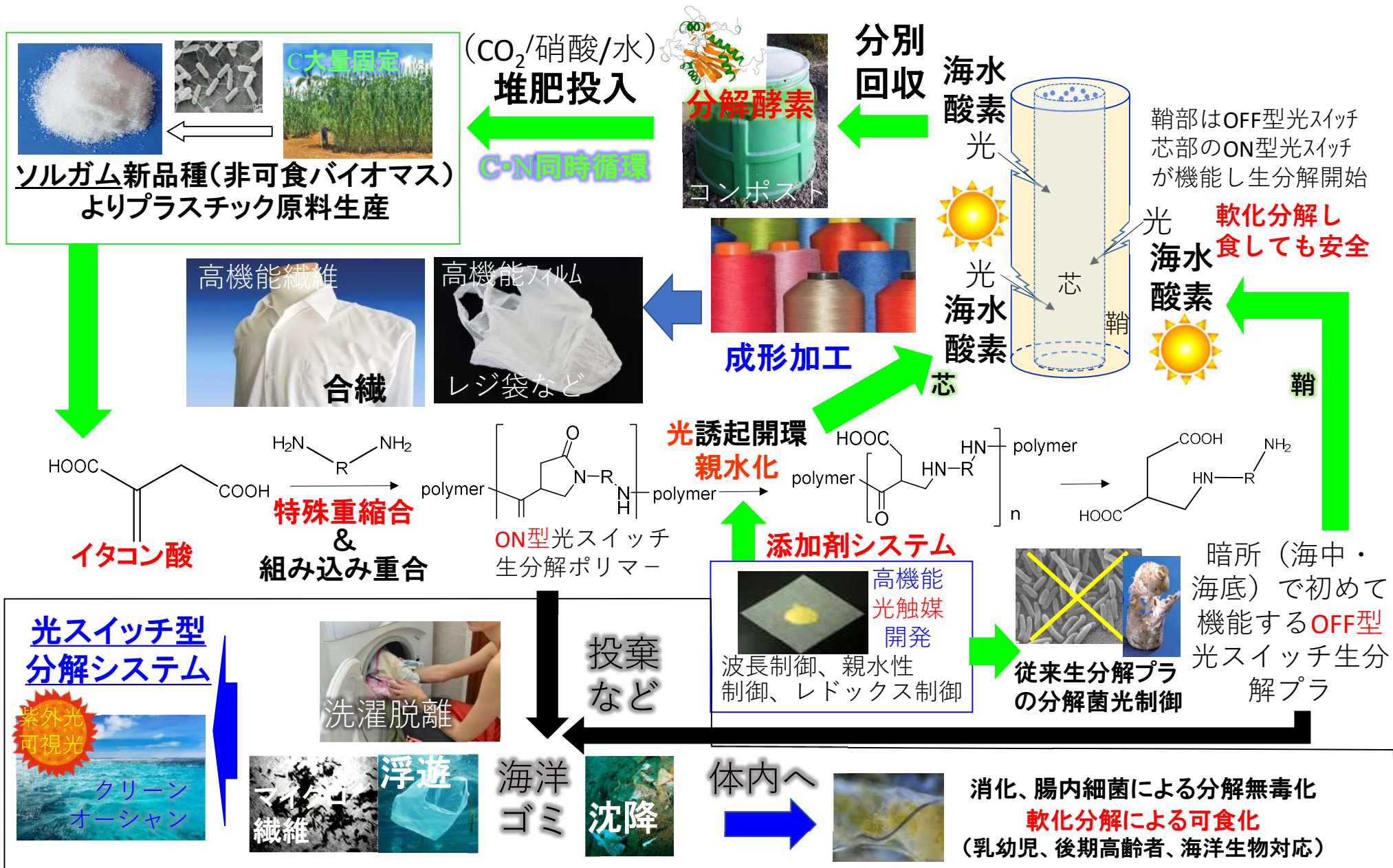
モデルポリマー（ポリスチレン）で芯鞘構造繊維の作製システムを構築した



得られた芯鞘繊維



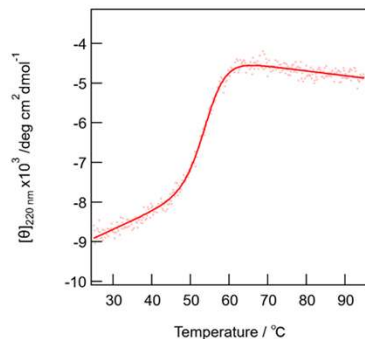
研究開発項目・内容



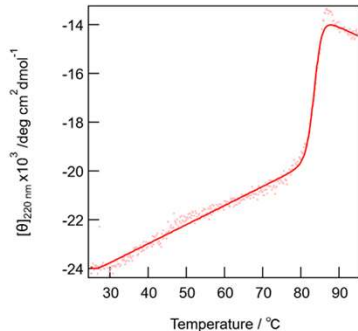
世界中で唯一鹿児島大学のみが保有しているナイロン分解酵素(NylIC)を利用して、本事業にて開発中のイタコン酸由来ナイロンの生分解システムを開発中

実用的な再モノマー化に耐えられる熱安定性向上タンパク質の作成に成功

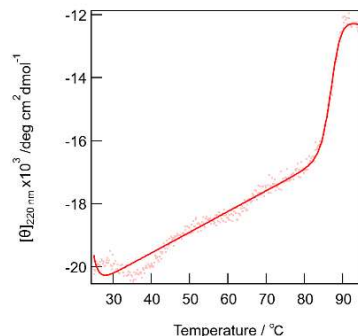
CDスペクトル測定：NylIC



GYAQ



GYAQT

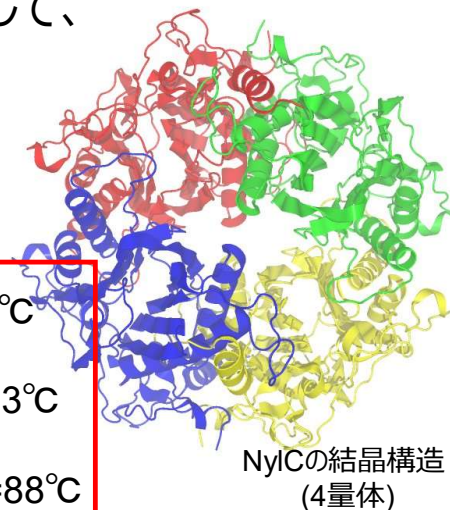


NylIC野生型： $T_m=52^\circ\text{C}$

GYAQ変異体： $T_m=83^\circ\text{C}$

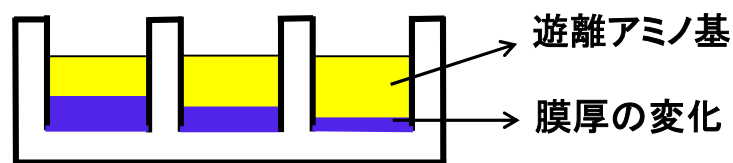
GYAQT変異体： $T_m=88^\circ\text{C}$

ナイロンガラス転移温度でも活性を保持

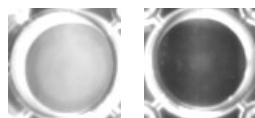


高分子ポリアミド加水分解反応を定量的に追跡する方法の構築に成功

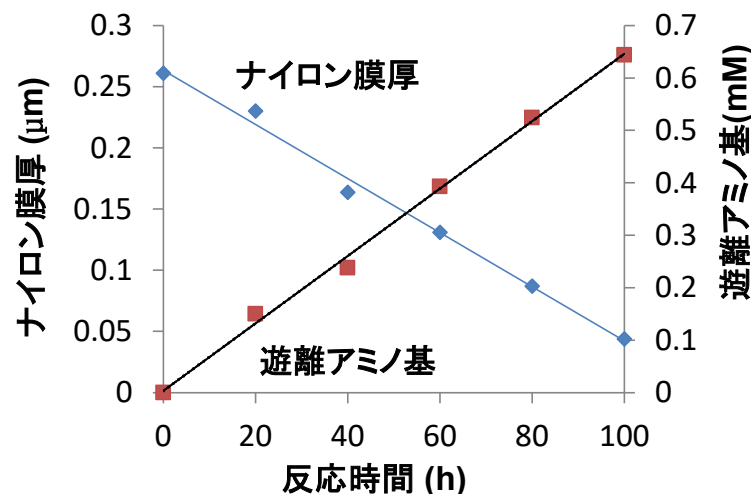
薄膜化ポリマーの利用



マイクロプレート
のナイロン薄膜



酵素反応前 反応後



耐熱性向上NylIC変異体は高分子ナイロン6だけでなく、ナイロン66、コポリマー体など広い分解特性を示す。

研究開発項目・内容



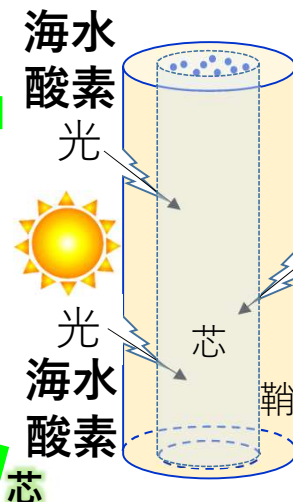
ソルガム新品種(非可食バイオマス)よりプラスチック原料生産

大量固定

(CO₂/硝酸/水)
堆肥投入
C・N同時循環

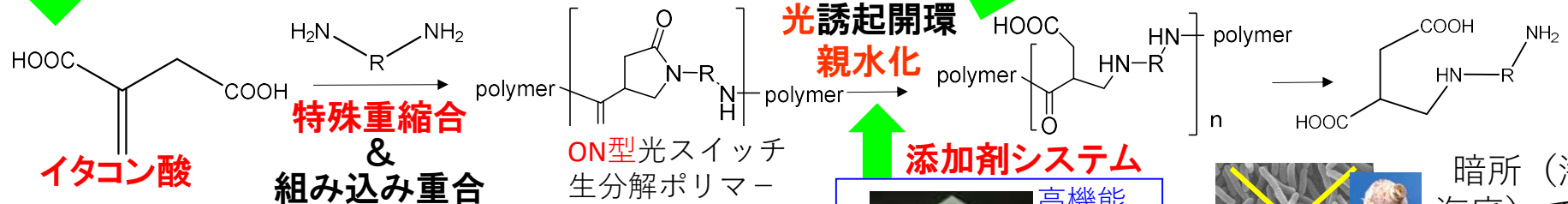


分別回収



鞘部はOFF型光スイッチ
芯部のON型光スイッチ
が機能し生分解開始

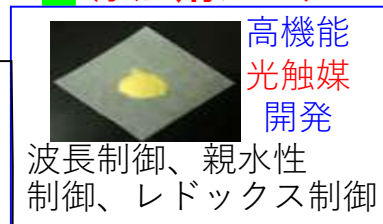
**軟化分解し
食しても安全**



**光スイッチ型
分解システム**



投棄
など



暗所(海中・
海底)で初めて
機能する**OFF型**
光スイッチ生分
解プラ

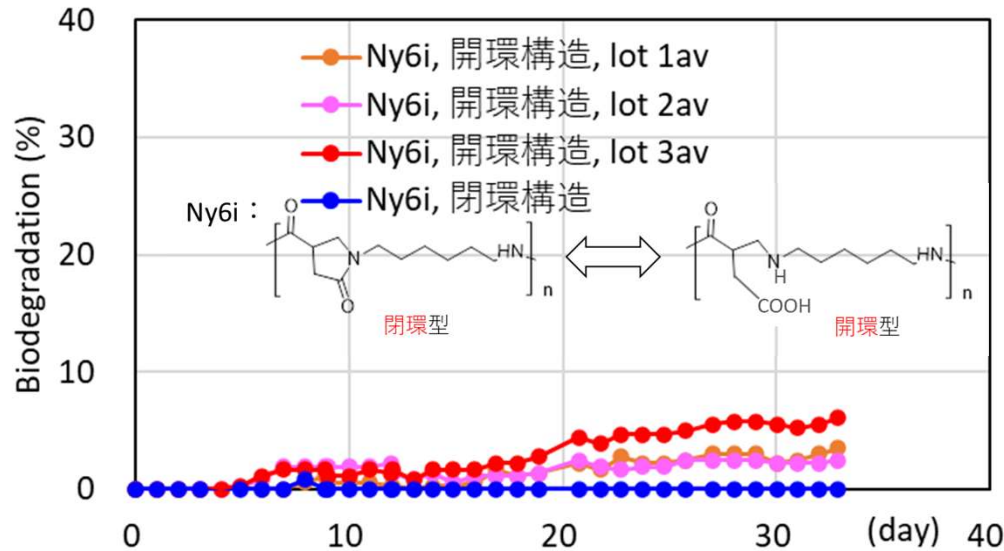


体内へ

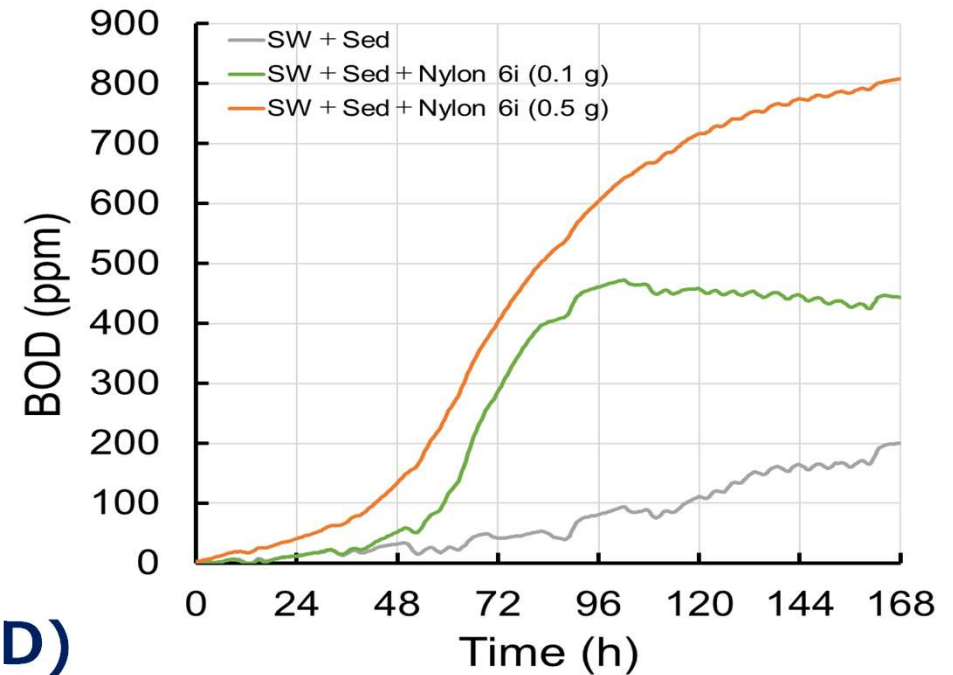


消化、腸内細菌による分解無毒化
軟化分解による可食化
(乳幼児、後期高齢者、海洋生物対応)

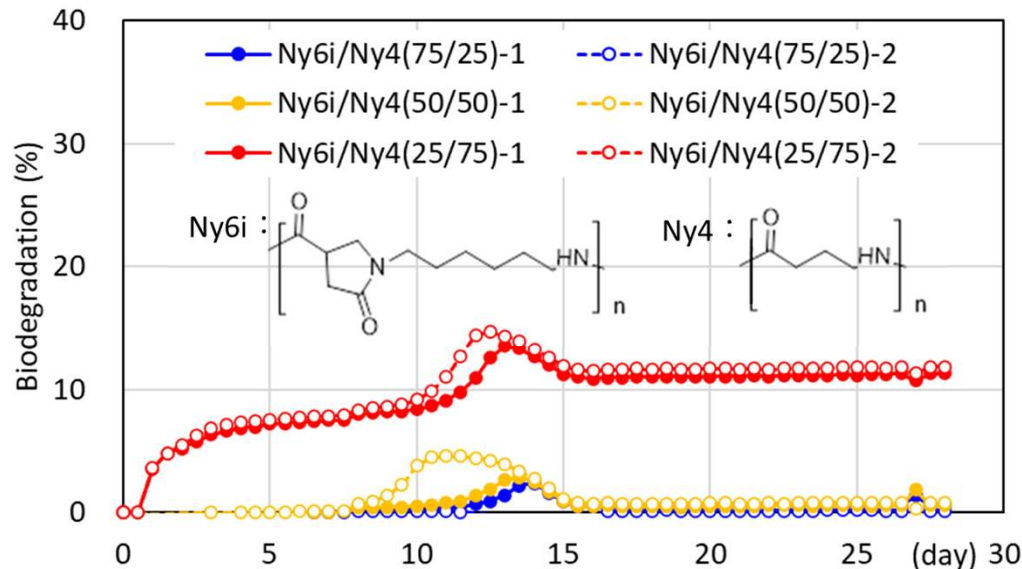
1. Ny6iの海水生分解(BOD)



2. Ny6iの活性海水生分解(BOD)



3. Ny6iコポリマーの海水生分解(BOD)



- Ny6i閉環型は海水生分解されないが、開環型はゆっくりと生分解すると思われる。
- 活性海水生分解性を調べた結果、海水生分解性が確認された (JAMSTEC調べ)。
- Ny6i構成単位(1.5量体 = ON型光スイッチ部分)を組み込んだNy4とのコポリマーは組成によって生分解挙動は異なる。

イタコン酸由来ナイロンの海洋環境中での分解挙動解(研究項目④)

東町ステーション(長島)



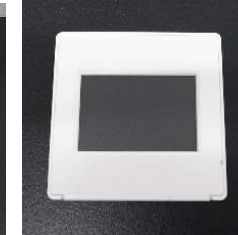
浸漬したナイロンフィルムに集積する海洋性細菌叢解析データの取得

NEDO海洋生分解性プラスチックの社会実装に向けた技術開発事業
/ 海洋生分解性に係る評価手法の確立(NEDO標準化プロジェクト)
にてNITEさんが用いている方法を利用

参考:「最新の海洋生分解性プラスチックの研究動向」テクノシステム社

浸漬用治具

フィルムマウント



水深における菌叢の違い
海水・底泥サンプルとの比較

40days
➔



水深5 m



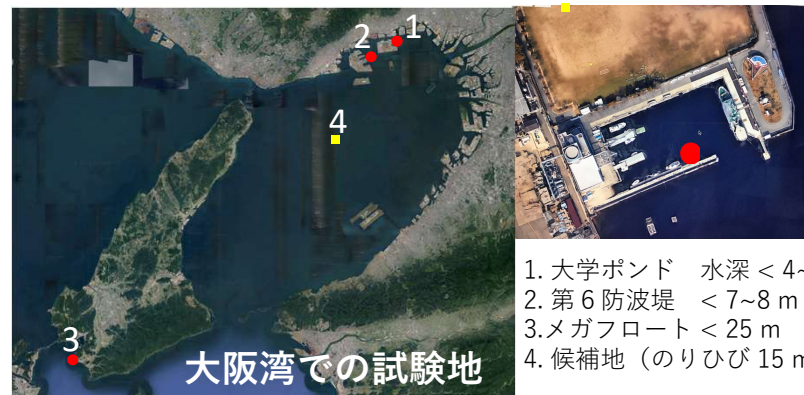
海底から2 m (水深~20 m)



木製漁礁マリンクルードル

実海域における分解性の評価(神戸大、産総研)(研究項目③-1)

神戸大学深江キャンパスの船舶係留地(水深1 m)に光スイッチ型プラスチックを浸漬して2週間後に重量を測定し、光触媒による抗菌性を確認した。また、神戸港第6防波堤、南あわじ市のメガフロートで浸漬試験を実施するための準備を完了した。



大阪湾での試験地

1. 大学ポンド 水深 < 4~5 m
2. 第6防波堤 < 7~8 m
3. メガフロート < 25 m
4. 候補地 (のりひび 15 m)



実海域での浸漬

供試試料が海洋生物に及ぼす有害性評価

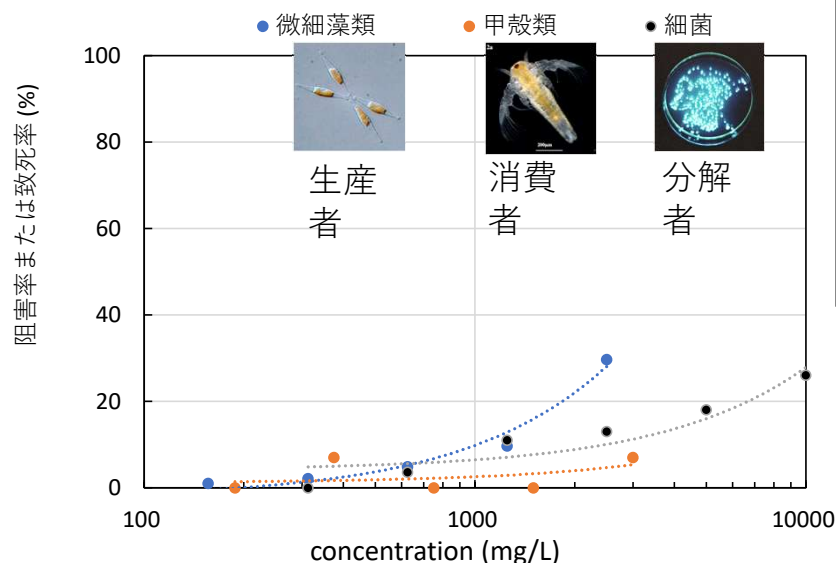


図1 Nylon6iLowの有害性

試料を供試水に溶解して、生態毒性試験(分解者-生産者-消費者)を実施。

海産発光細菌発光阻害試験 [ISO 11348-1 (2007)]

Aliivibrio fischeri, 30 min-EC50

海産微細藻類増殖阻害試験 [ISO 10253 (2016)]

Phaeodactylum tricornutum (珪藻), 3-day EC50, NOEC

塩水性甲殻類急性致死試験 [ISO/TS 20787 (2017)]

Artemia salina, 2 day-LC50

海洋生物に及ぼす供試試料の毒性値

	Nylon6iLow		ジカルボン酸型1.5量体	
	NOEC (mg/L)	EC50またはLC50 (mg/L)	NOEC (mg/L)	EC50またはLC50 (mg/L)
海産発光細菌	-	>10,000	-	40
海産藻類	313	>2,500	125	330
塩水性甲殻類	-	>3,000	-	340

Nylon6iLowの環境リスク初期評価

- 急性毒性値について、信頼できる知見が得られなかった。
- 慢性毒性値について、藻類の信頼できる知見が得られたとしてアセスメント係数100を採用する。毒性値 313 mg/lを100で除してPNECは3130 $\mu\text{g/l}$ となる。
- 本物質のPNECとしては、藻類の慢性毒性値をアセスメント係数 100 で除した 3130 $\mu\text{g/L}$ を採用する。
- PECが3130 $\mu\text{g/l}$ 以上の場合には、詳細な検討を行う候補となる。

ジカルボン酸型1.5量体の環境リスク初期評価

- 急性毒性値について、2生物群（藻類、甲殻類）の信頼できる知見が得られたとしてアセスメント係数1000を用いる。最も低い値(藻類の330 mg/l)を1000で除して、急性毒性値によるPNECとして330 $\mu\text{g/l}$ が得られた。
- 慢性毒性値について、藻類の信頼できる知見が得られたとしてアセスメント係数100を用いる。藻類の125 mg/lを100で除して、慢性毒性値によるPNECは1250 $\mu\text{g/l}$ が得られた。
- 本物質のPNECとしては、藻類の急性毒性値をアセスメント係数 1000 で除した 330 $\mu\text{g/L}$ を採用する。
- PECが330 $\mu\text{g/l}$ 以上の場合には、詳細な検討を行う候補となる。

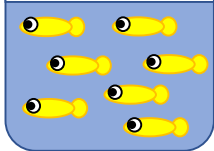
魚類を用いた分解性および安全性試験／進捗

①急性毒性試験実施



3 L ビーカー

飼育水 2 L



メダカ 7 匹

餌 7.3mg/匹/日

MP 3.7mg/匹/日

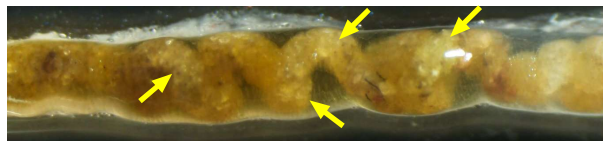
<結果>

MPの種類	急性毒性
PS	なし
Ny6	試験中
Ny6i(1%TiO2)	試験中
Ny6i(3量体)	なし

* 24日までにNy6iL, Ny6i(0.5% TiO2)も実施

<摘出した腸内のMP残存>

PS (14日目)



Ny6i 1.5量体 (8日目)



PSは14日目でもMPが残存していたが
Ny6i 3量体は8日目の段階で残存していない

➡ NMRでMPの残存確認（予定）

②摂食MPの生体影響～遺伝子発現解析～

MP煉り込み粉末飼料作成

メダカ成魚に給餌（給餌期間：1カ月）

腸発現遺伝子のRNAシーケンシング解析

→MP摂食による発現変動遺伝子の探索

※ PET粉末でケーススタディ進行中

<Ny6i系材料の煉り込み飼料作成>

Ny6iL

Ny6i(0.5%TiO2)

Ny6i(1%TiO2)

Ny6i,3量体



固体



ペースト



固体～粉末



粉末



煉込み飼料



※ 各煉込み飼料の給餌開始（期間：1カ月予定）

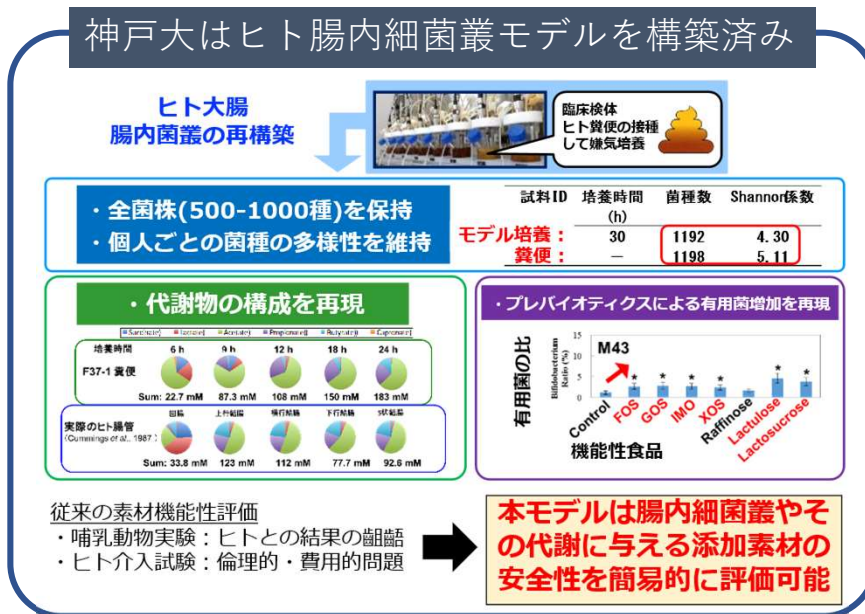
※ 2週間で明確な急性毒性観られない。

※ 腸遺伝子の遺伝子発現解析予定

分解性や菌叢構造変化を指標にして、海洋性動物の疑似腸管モデルによる安全性評価系を構築する

これまでの開発項目・成果（2020-22年度）

ヒト大腸の腸内細菌を模擬したモデル培養系を用い、分解性・安全性の評価方法を構築する



プラスチック素材のヒト腸内細菌による分解性評価



ヒト腸内細菌叢モデル

解析項目

1. 分子系統学的解析

→ NGSを用いた16S rRNA遺伝子シーケンスによる菌叢解析



2. 代謝物解析

→ 培養液中の微生物代謝物の検出

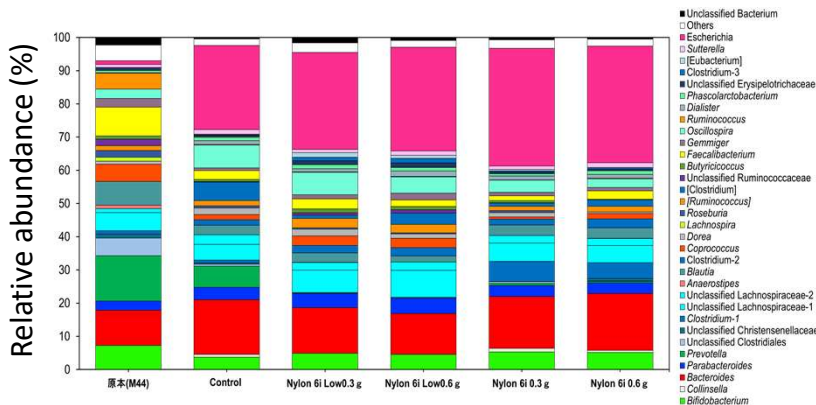


3. 物理化学的分析

→ 全炭素有機物量(TOC) 浮遊物質(SS, VSS)



1. 腸内細菌叢、多様性に大きな影響はない



2. 短鎖脂肪酸* 産生に大きな変化はない

* ヒトの健康に特に影響する物質

	Control	Nylon 6i L 0.3%	Nylon 6i L 0.6%	Nylon 6i 0.3%	Nylon 6i 0.6%
酢酸 (mM)	97.5	99.3	105.6	87.8	94.8
プロピオン酸 (mM)	28.1	24.6	26.7	25.2	29.6
酪酸 (mM)	20.7	18.2	16.0	33.6	27.6

3. TOC除去量の変化にNylon 6i投与が影響していない

	培養前 (mg/L)	培養後 (mg/L)	除去量 (mg/L)
Control (非添加)	16,000	13,500	2,500
Nylon-6i-L (0.3% 添加)	16,500	15,000	1,500
Nylon-6i-L (0.6% 添加)	19,500	17,000	2,500
Nylon-6i (0.3% 添加)	15,500	12,500	3,000
Nylon-6i (0.6% 添加)	16,500	14,179	2,321

→ ヒト摂取による分解および腸内細菌への影響は少ないことが予想された

LCA評価における進捗状況（研究項目⑦-1）

LCA評価は、狭義の製品LCA（テーマ1）と広範囲に削減貢献量の算定（テーマ2）に区分けして検討を行っている。

	概要	対象とする製品	2021年度上期の推進内容	下期以降の実施事項
テーマ1 製品LCA	新素材による新製品（衣類等）のライフサイクルのCO2排出量を詳細に算定する。 今期は新素材の原材料調達段階（ソルガム育成～イタコン酸～光触媒ナイロンブロック～紡糸）におけるラボデータを収集しCO2算定を行い、CO2の発生状況を把握する。	光触媒を混練した新素材ナイロン糸	原材料調達段階のLCA(2回) ①1回目のLCAを実施し、CO2排出量削減ポイントをフィードバック。 ②ラボデータ再収集。 ③LCA計算及びさらなる削減の方向性の考察。	原材料調達段階のLCA(3回目) ①削減の方向性に基づいたデータ再収集及び計算。 ②結果の考察及び次ステージへ向けた課題抽出。 ③ライフサイクル全体でのLCA計算(コンポスト化など：来期以降)
テーマ2 削減貢献量	新素材が普及した場合に、海洋マイクロプラスチック(以下MP)汚染防止を通じてどのように世の中のCO2削減に貢献するかを検討し、モデル化し可能な限り定量化する。 新素材がない現在において衣類からのMPの放出を抑制するための手段とそれに伴うCO2排出量を削減貢献量として見積もる。	衣類、PETボトル、被覆肥料	①海洋プラスチックごみの現状調査。 ②衣類以外の対象製品・プラスチックの選定（PETボトル、被覆肥料）。 ③対象製品・プラスチックの環境への排出スキームの調査	①排出スキーム調査結果に基づいた製品・プラスチックの排出抑制シナリオ作成 ②シナリオに基づいた排出抑制に関わるCO2排出量の算定 ③世界規模での計算へ向けた予備調査

テーマ1：製品LCA アウトプット例

原材料調達段階のLCA計算結果(2回目)

プロセス	最終製品1kgあたりのCO2排出量[kg]			
	①投入物質起源CO2	②エネルギー起源CO2	③排出物起源CO2	合計
紡糸	0.00	132.63	5.94	138.58
混練	0.22	518.18	0.99	519.39
NaNbO3の合成	1.30	14.33	0.03	15.66
C3N4の合成	11.13	42.58	0.00	53.71
ナイロン合成	72.49	2.68	0.14	75.30
イタコン酸製造(発酵)	242.94	12,437.59	2.00	12,682.53
イタコン酸製造(酵素糖化)	108.34	1,555.05	0.00	1,663.39
イタコン酸製造(バイオマス前処理)	3,581.05	3,182.90	3.99	6,767.94
ソルガム生産				0.00
合計				21,916.49

紡糸（最終製品）1kg製造時CO2排出量は収率増などの取り組み結果として、前回LCAの1/100のCO2排出量にまで削減効果が得られた。

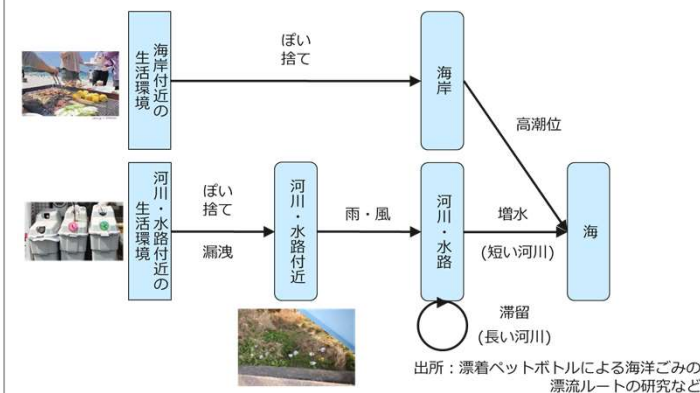
さらなる削減の方向性について

プロセス	削減の方向性
紡糸	収率向上の検討。スケールアップ係数の見直し。
混練	スケールアップ係数の見直し。
NaNbO3の合成	活性増加による配合比率の低減。
C3N4の合成	活性増加による配合比率の低減。
ナイロン合成	CO2排出量の高い溶媒の見直し。
イタコン酸製造	菌体の遺伝子改変による発酵収率の向上。ワットモニターによる電力量精査。
ソルガム生産	引き続きのデータ収集。

引き続き収率向上や、触媒の活性増加による配合比率の低減等を切り口に排出量削減を目指す。

テーマ2：削減貢献量 アウトプット例

PETボトルの排出スキーム



今回の調査結果に基づき、本プロジェクトの素材が普及しなかった場合に起こり得る、製品・プラスチックの環境流出抑制シナリオを作成する。

社会実装基盤強化および環境醸成（研究項目7-②）

1. 海洋プラスチックの原因別の対策状況の把握

- ・ 2018年の海洋プラスチック流出量：310～1243万 t /年
- ・ 3大原因：未管理のプラスチック、タイヤ摩耗、ポイ捨て
- ・ 国際機関 & 国の規制/企業の対策状況：大量の原因物質への対応は未着手
⇒ 「減らす」、「代替品」、「回収する」で対応不可の用途が「新材料」のターゲット

2. 研究会設立に向けた活動

- ・ 名称：プラスチックの未来を考える会
- ・ Collective Impact※ のコンセプトの下、会を設計/運営
- ・ 2021年度：企画/準備期間、2022年度：研究会活動開始
- ・ 現在、5組織から参加の回答有（複数企業参加検討中）

※ 個別の努力の限界を超えて、協働を通じて大きな変化を産み出す

3. アプリケーション探索

- ・ 比較的短期間での社会実装ターゲット：被覆肥料
- ・ JAIST金子研と肥料メーカー間で共同研究実施
- ・ 被覆肥料によるプラスチックごみ対策ロードマップ提示予定(農水省/全農/業界団体)
⇒ 本プロジェクト成果の社会実装に向けた露払い



進捗状況のまとめ

課題①達成率90%

研究項目①-1 イタコン酸から明確な構造のナイロンオリゴマーを得、ポリエステルへの組み込みの準備を行った。

研究項目①-2 ON型光スイッチシステムに資する超親水化光触媒の細胞毒性評価、および新規光触媒の開発を行った。研究項目①-3 ON型光スイッチを組み込んだナイロン11に関し、塩水中で照射することで劣化が初めて促進される現象を確認した。

研究項目①-4 ON型光スイッチを組み込んだナイロン11の架橋防止のためにCuIが効果的であることを確認した。

課題②達成率90%

研究項目②-1 OFF型光スイッチに資する還元型抗菌性光触媒の合成プロセスのスケールアップ調査、合成条件による抗菌活性の比較を行った。

研究項目②-2 キャスト型複合フィルム、表面塗布型フィルムを作製し、抗菌活性評価試験及び海洋浸漬実験に供試した。

研究項目②-3 各種光源(蛍光灯、太陽光、キセノンランプ)の波長スペクトルを確認し、各光源を用いた抗菌活性評価に着手した。

課題③達成率90%

研究項目③-1 光スイッチ性能を評価できる水深を持つ実海域を2か所選定し、浸漬試験を開始した。

研究項目③-2 スwitchの入っていないナイロン6iのラボ海水生分解試験を行い、生分解されないことを確認した

課題④達成率90%

研究項目④-1 高分子の酵素による加水分解を観測するために分光学的手法を用いる系を準備した。

研究項目④-2 ナイロン6iを用いて疑似腸内環境における分解性および安全性評価研究項目の準備を行った

研究項目④-3 表面親水性の異なる各種汎用樹脂粉末を用いた魚類への経口投与試験を行い摂取され残存しないことを確認した。

研究項目④-4 プラスチックの分解産物が海洋生態系に及ぼす影響評価のための準備を前に進めた

研究項目④-5 ナイロン6iを用いてナイロン分解酵素特定とin vitro分解評価の準備を前に進めた

研究項目④-6 ナイロン6iを用いてナイロン分解酵素を用いたコンポスティング構築の準備を行い分解菌コロニーを得た。

課題⑤進捗80%

研究項目⑤-1 ソルガムモデル品種を用いて根系評価の予備試験、及びゲノム情報基盤の構築を行った。

課題⑥進捗80%

研究項目⑥-1 複数品種のソルガムバイオマスについて糖化効率90%を達成した(進捗100%)

研究項目⑥-2 計算ツール開発に必要な情報を収集し、最適化支援ツール(美声粒反応モデル)を開発した(進捗100%)

研究項目⑥-3 生産菌の第1世代を開発し、現在、低炭素プロセスで代謝活性を維持するための機能改変に着手している(進捗75%)

課題⑦達成率90%

研究項目⑦-1 LCA計算のためのライフサイクルフロー明確化及びCO2削減貢献効果を考えるための調査およびデータ取得を行った。

研究項目⑦-2 海洋プラスチック/マイクロプラスチック問題解決に向けた事業提案と研究会発足のための準備をおこなった

全体を通しておおむね予定通り進捗している

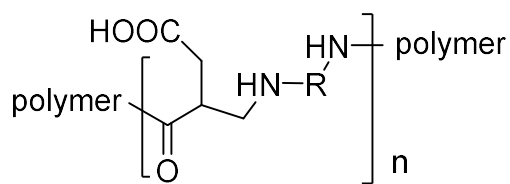
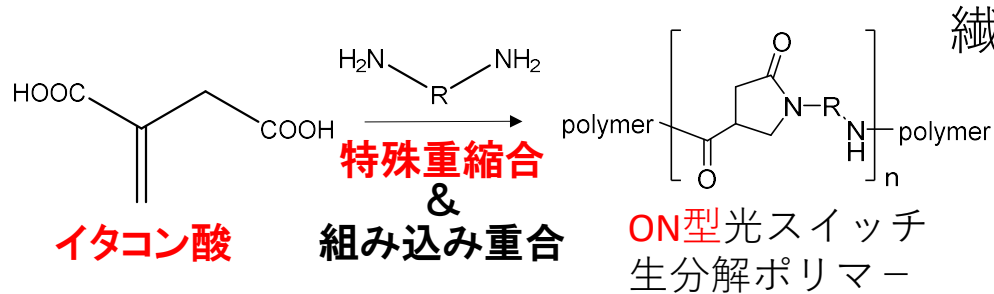
1. 光スイッチ生分解性を示すナイロン/ナイロンコンポジットの合成に成功
2. 光誘起超親水化などの性質を示す新規光触媒を開発
3. イタコン酸由来ナイロンに集積する微生物の解析、分解物の安全性を確認
4. 大手企業が本気で集まり語る研究会を設立

終わり



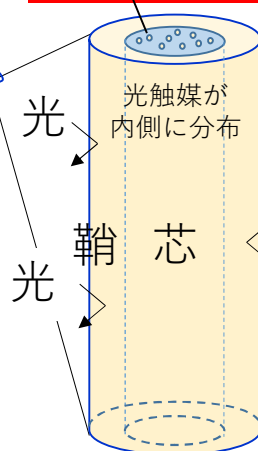
ON型とOFF型スイッチ

1. ON型光スイッチ海洋生分解性プラスチック

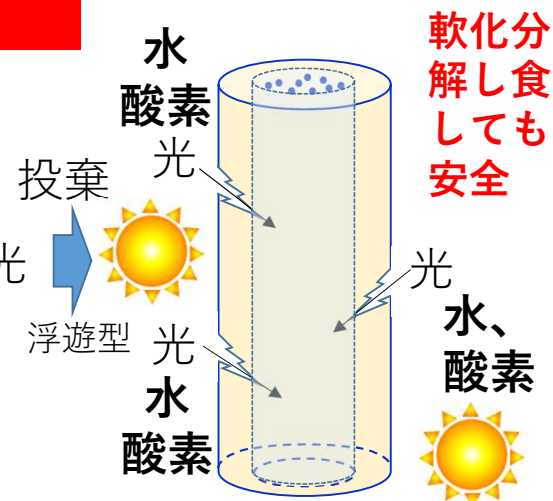


繊維

光誘起超親水化
を活用



使用中は短波可視光は芯部まで届かない

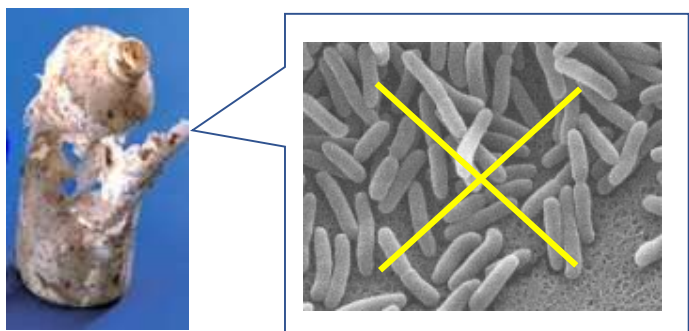


物理的破壊により芯部の光触媒が機能し破損部より親水化生分解開始

軟化分解し食しても安全

光誘起開環親水化

2. OFF型光スイッチ海洋生分解性プラスチック



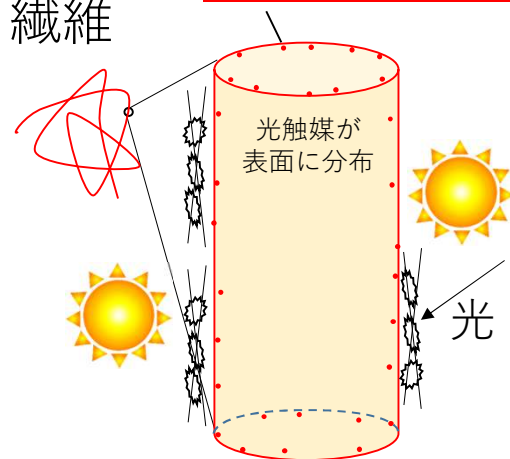
従来生分解プラスチックの分解菌光制御

生活空間の露光で生分解抑制し、暗所（海中・海底）で初めて機能する

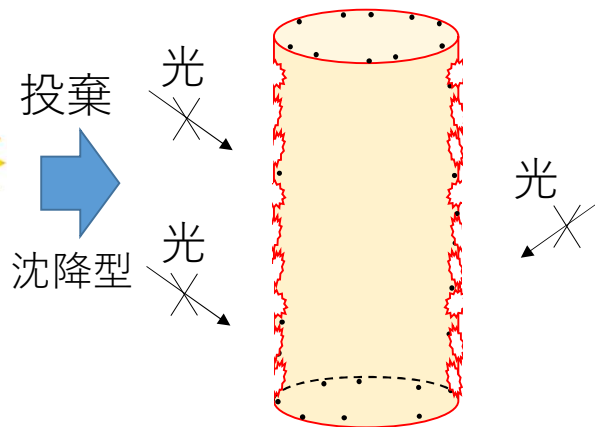
OFF型光スイッチ生分解プラ

光誘起抗菌性
を活用

繊維



使用中は広い波長域で効率よく抗菌（非分解化）



暗所で光触媒が機能せず生分解開始

3. ON/OFF型光スイッチ海洋生分解性プラスチック