

第 7 回 先端膜工学研究センター成果発表会 (先端膜工学研究センター各部門成果報告)

日時：2025年7月30日(水) 13:00 - 16:40

会場：神戸大学瀧川記念学術交流会館 2階大会議室/オンライン

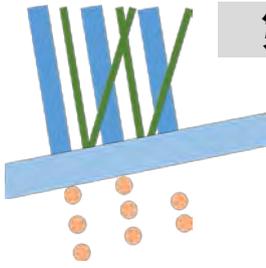
主催：神戸大学先端膜工学研究センター

後援：(一社)先端膜工学研究推進機構



先端膜工学研究センター

Research Center for Membrane and Film Technology



第7回 先端膜工学研究センター成果発表会



主催：神戸大学先端膜工学研究センター
後援：一般社団法人先端膜工学研究推進機構

開催日：2025年7月30日（水）13:00～16:40

会場：瀧川記念学術交流会館 大会議室 / オンライン (ZOOM)

挨拶：先端膜工学研究センター長 松山秀人教授

司会：先端膜工学研究センター副センター長 吉岡朋久教授

■ 成果発表会プログラム

部門	部門長	時間	タイトル・発表者（敬称略）
水処理膜研究部門	大西 洋	13:10 13:50	嫌気性 MBR を核とした廃棄物系バイオマスの資源循環 吉田 弦（農学研究科食料共生システム学専攻 助教）
			氷点下温度での液中 AFM 測定 大西 洋（理学研究科化学専攻 教授）
ガス分離・ガスバリア膜研究部門	蔵岡孝治	13:50 14:30	有機-無機ハイブリッドガスバリア膜の開発 蔵岡 孝治（海事科学研究科海事科学専攻 教授）
			イオン液体含有ゲル薄膜複合膜の開発と CO ₂ 分離膜への応用 神尾 英治（工学研究科応用化学専攻 准教授）
機能性薄膜研究部門	舟橋正浩	14:30 15:10	粒子含有薄膜の充填性と平滑性を両立するための乾燥プロセス 菰田 悦之（工学研究科応用化学専攻 准教授）
			拡張 π 共役強誘電性液晶のバルク光起電力効果と電界発光 舟橋 正浩（工学研究科応用化学専攻 教授）

休憩 15:10 - 15:30

膜合成バイオプロセス研究部門	丸山達生	15:30 16:10	バイオものづくりを加速する合理的酵素設計戦略 森 裕太郎（工学研究科応用化学専攻 助教）
			フェナントロリン抽出剤の機能向上を指向した構造変換研究 杉田 翔一（先端膜工学研究センター 特命助教）
国際共同研究推進部門	熊谷和夫	16:10 16:25	国際連携強化による国際共同研究推進の取組状況 熊谷 和夫（先端膜工学研究センター 特命教授）
膜技術社会実装部門	北河 享	16:25 16:40	2024 年度活動内容と今年度の進め方 北河 享（科学技術イノベーション研究科 特命教授）

■ 懇親会 17:00～18:00

会場：瀧川記念学術交流会館 1F 食堂

参加費：無料（要事前申込）

第 7 回先端膜工学研究センター成果発表会オンライン参加方法

成果発表会用 URL は下記の通りです。

トピック: 第 7 回先端膜工学研究センター成果発表会

時間: 2025 年 7 月 30 日 12:30 PM

Zoom ミーティング URL :

<https://us06web.zoom.us/j/84061761331?pwd=4AbqZyPoQz5wKx2MXbWT3igvWGM0lq.1>

ミーティング ID: 840 6176 1331

パスコード: 034767



こちらの QR コードからもご参加いただけます。

【オンライン参加に関するご注意】

- ・名前の設定を「(所属)_(お名前)」に変更してください。
- ・マイクとビデオは常時 OFF にしてください。
- ・オンラインにて質問される場合は、チャット機能をご利用ください。

発表時間の関係で、成果発表会中にお返事が難しい場合は、後日、発表者より返答いたします。

その他、質問がございましたら、先端膜工学研究センター(eng-membrane@research.kobe-u.ac.jp) まで、ご連絡ください。

第7回先端膜工学研究センター成果発表会 発表補足資料

日時：2025年7月30日(水) 13:00-16:40

会場：神戸大学瀧川記念学術交流会館 大会議室/オンライン

目次

1. 水処理膜研究部門

- 1.1 嫌気性 MBR を核とした廃棄物系バイオマスの資源循環 (吉田 弦) P. 1
- 1.2 氷点下温度での液中 AFM 測定 (大西 洋) P.12

2. ガス分離・ガスバリア膜研究部門

- 2.1 有機-無機ハイブリッドガスバリア膜の開発 (蔵岡孝治) ※発表に関する論文 P.18
- 2.2 イオン液体含有ゲル薄膜複合膜の開発と CO₂ 分離膜への応用 (神尾英治) P.24

3. 機能性薄膜研究部門

- 3.1 粒子含有薄膜の充填性と平滑性を両立するための乾燥プロセス (菰田悦之) P.32
- 3.2 拡張 π 共役強誘電性液晶のバルク光起電力効果と電界発光 (舟橋正浩) P.40

4. 膜合成バイオプロセス研究部門

- 4.1 バイオものづくりを加速する合理的酵素設計戦略 (森 裕太郎) P.49
- 4.2 フェナントロリン抽出剤の機能向上を指向した構造変換研究 (杉田翔一) ※補足資料なし

5. 国際共同研究推進部門

- 国際連携強化による国際共同研究推進の取組状況 (熊谷和夫) P.59

6. 膜技術社会実装部門

- 2024 年度活動内容と今年度の進め方 (北河 享) P.64

※本資料について

本資料は、当日の発表資料ではありません。

本会の趣旨として、昨年度の成果発表のため、発表内容は最新の研究成果を含んでおります。

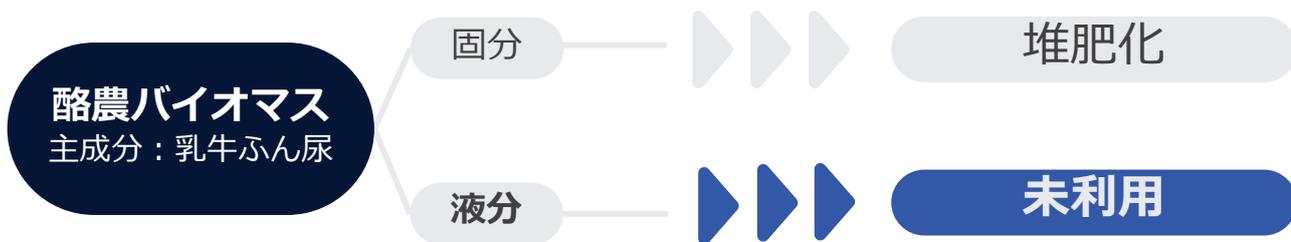
そのため、発表スライドより、未公開の研究成果等、新規性を有する内容を省いて配布いたします。

ご理解の上、ご了承ください。

嫌気性MBRを核とした 廃棄物系バイオマスの資源循環

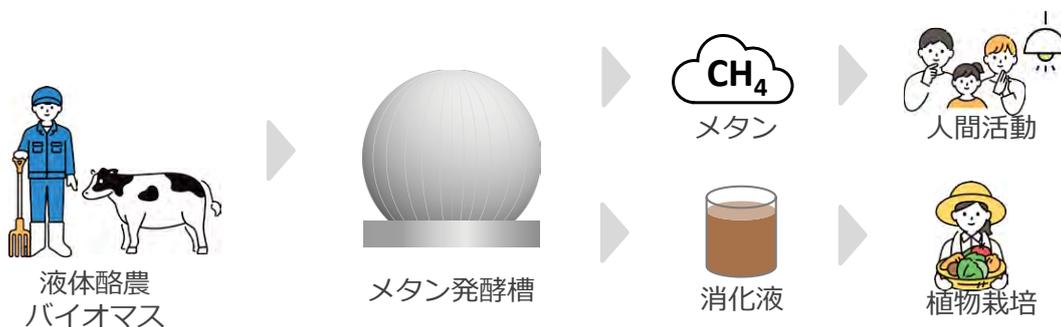
神戸大学 農学研究科
食料共生システム学専攻
吉田 弦

研究背景 | 酪農バイオマスの利用



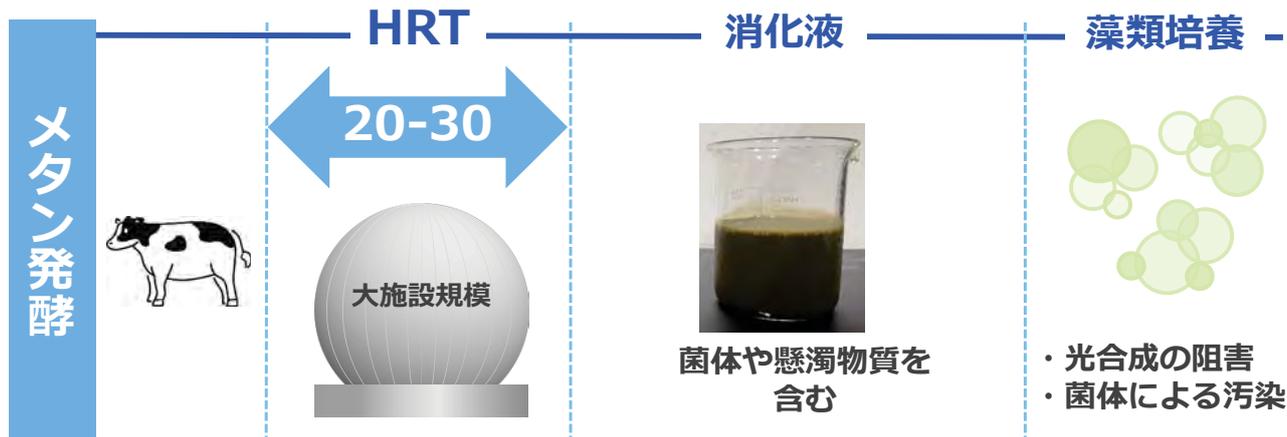
▶ 酪農バイオマスの液分（液体酪農バイオマス）のメタン発酵を検討

- メタン発酵**
 廃棄物を嫌気性微生物によって分解し、エネルギー資源として**メタン**を得る技術
 同時に**消化液**も発生する。

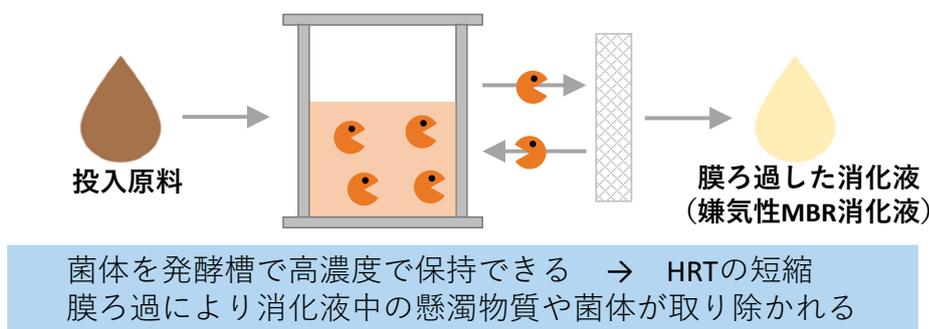


研究背景 | メタン発酵の課題と嫌気性MBRによる課題解決

HRT: 処理水が発酵槽内に滞留する時間



嫌気性MBR (Anaerobic Membrane Bioreactor: 嫌気性膜分離法)
 : メタン発酵に膜分離技術を組み合わせた手法

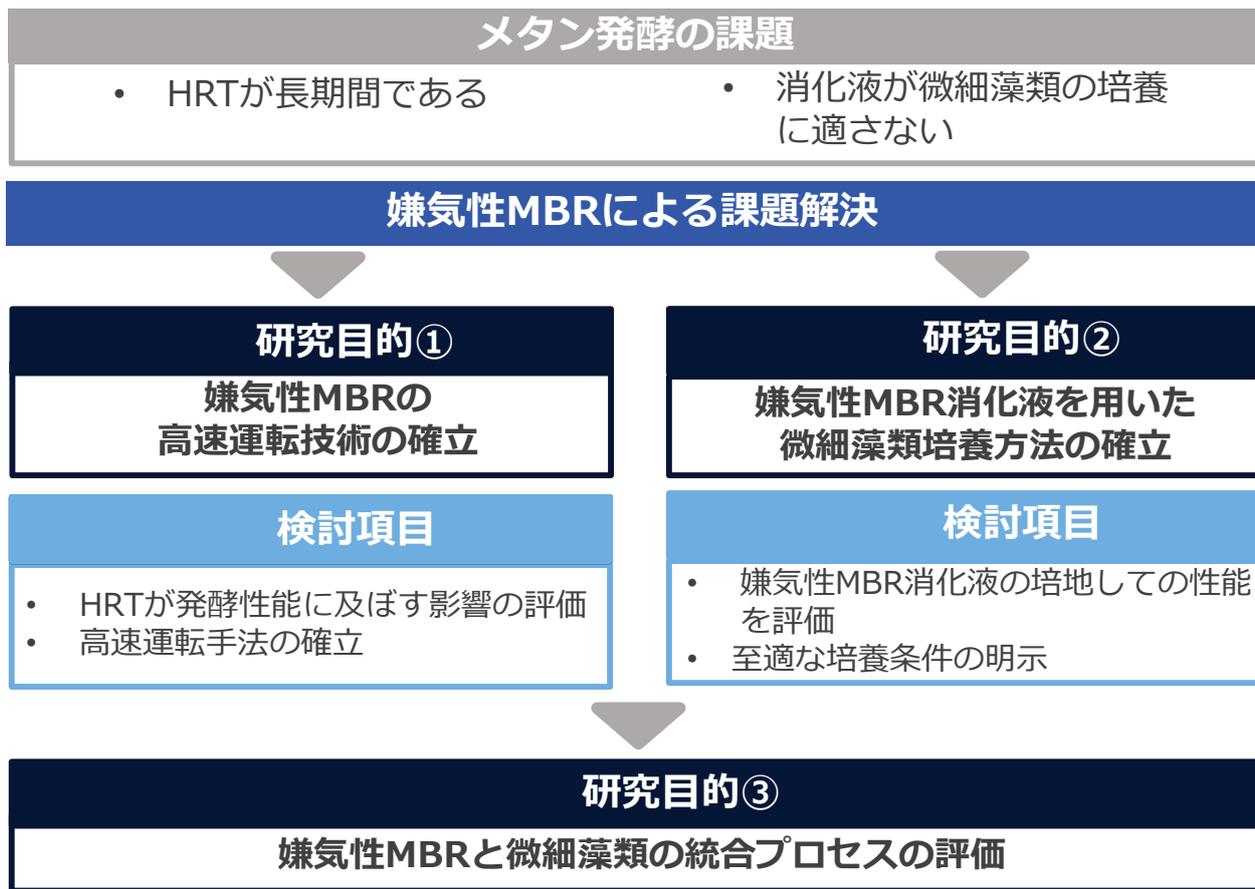


研究背景 | メタン発酵の課題と嫌気性MBRによる課題解決

HRT: 処理水が発酵槽内に滞留する時間



研究目的 | 研究目的および研究目標



嫌気性MBR 連続運転試験

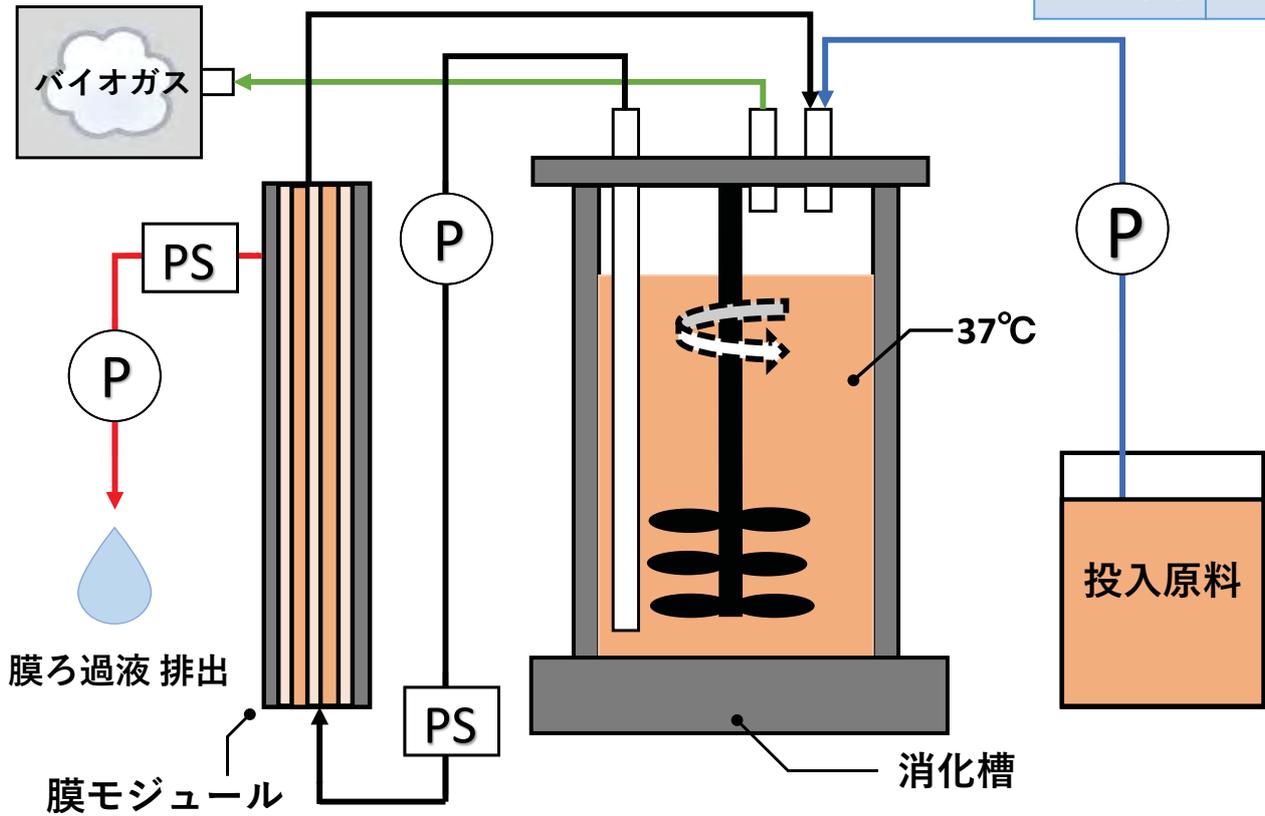
試験目的および調査項目

目的① | 嫌気性MBRの高速運転技術の確立

- 液体酪農バイオマスを投入原料とした嫌気性MBRの連続運転試験を行い、HRTの短縮がメタン発酵に及ぼす影響を調査する。
- 有機物の資源循環を明確にするために、嫌気性MBRの連続運転時の有機物の物質収支を調査する。

嫌気性MBR概要図

チューブ数	2
内径(mm)	3.0
孔径(μm)	0.2
膜面積(m ²)	0.00942



6

嫌気性MBRの運転方法

●投入原料

液体酪農バイオマス (40メッシュのスクリーンで夾雑物を除去)

乳牛糞尿液分 + 酪農施設内で発生した廃水

表 投入原料の性状

TS(mg/L)	VS(mg/L)	SS(mg/L)	COD(mg/L)
17,000	11,000	8,000	20,000



図 液体酪農バイオマス

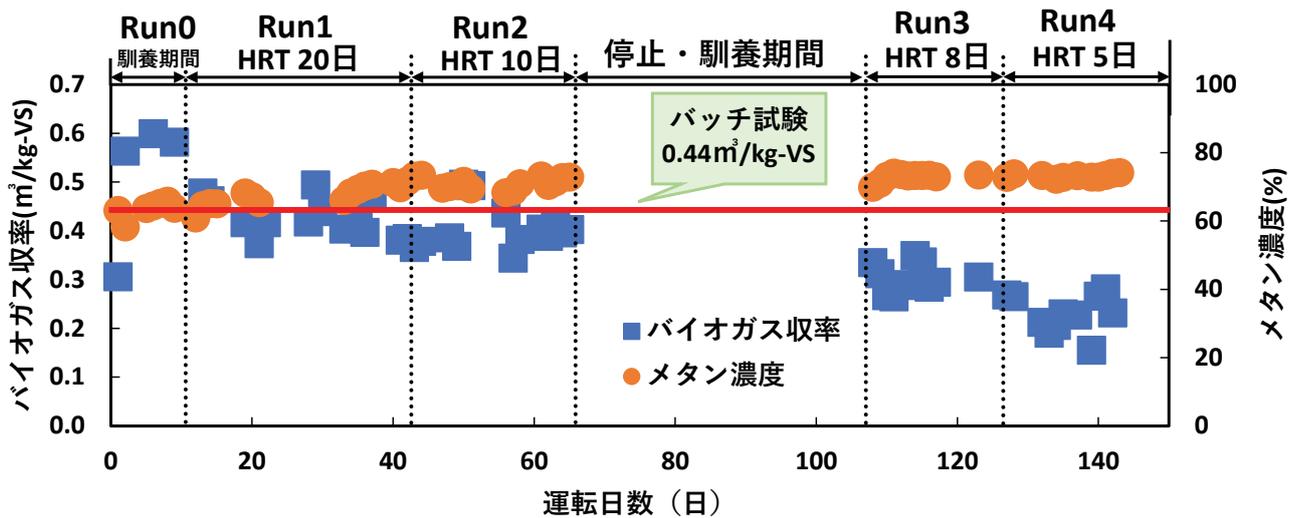
●運転条件

Run	0	1	2	3	4
HRT(d)	20	20	10	8	5
OLR(kg-COD/m ³ /d)	/	1.1	2.0	2.4	3.4
SRT(d)	60	60	60	40	20

4

7

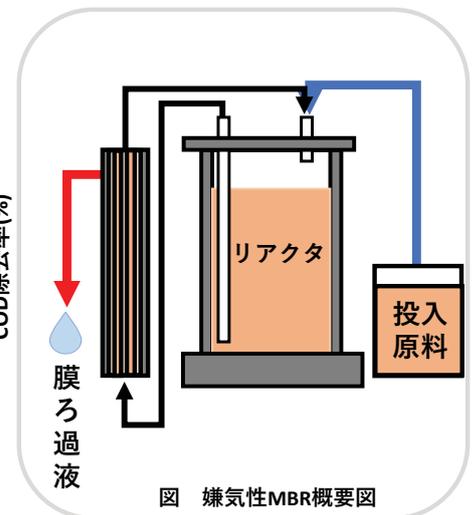
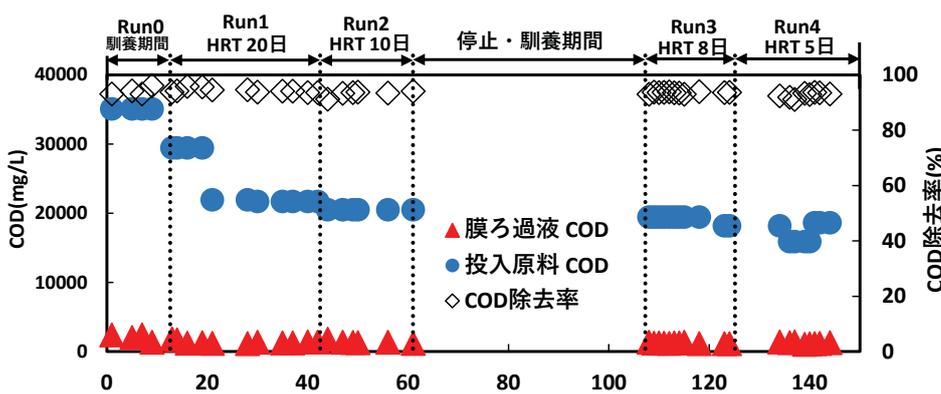
バイオガス収率およびメタン濃度



- 各Runの平均バイオガス収率は、Run1から順に0.43, 0.40, 0.30, 0.22, m³/kg-VS
 - バッチ試験におけるバイオガス収率は0.44 m³/kg-VSであり、HRT20日および10日の平均バイオガス収率と同程度の値
- 消化槽内の菌体を保持することにより、HRTを10日に短縮しても性能を維持して運転が可能

8

嫌気性MBRによる有機物の分解性能



- 全てのRunにて、膜ろ過液CODは低い値を維持し、COD除去率は90%以上を達成した。
 - 全てのRunにて、膜ろ過液中の酢酸などの有機酸は検出限界未満だった。
- バイオガス収率が低下したにも関わらず膜ろ過液中の有機物濃度が低いことから、有機物の可溶化ができていない可能性が考えられる。

9

消化槽内の固形物濃度

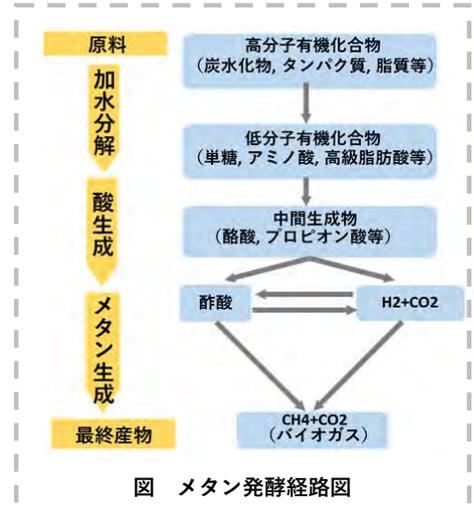
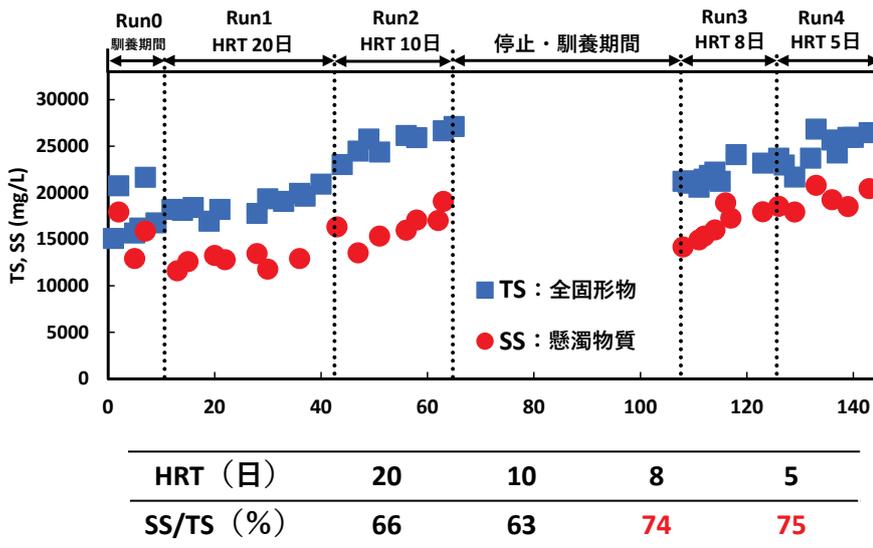


図 メタン発酵経路図

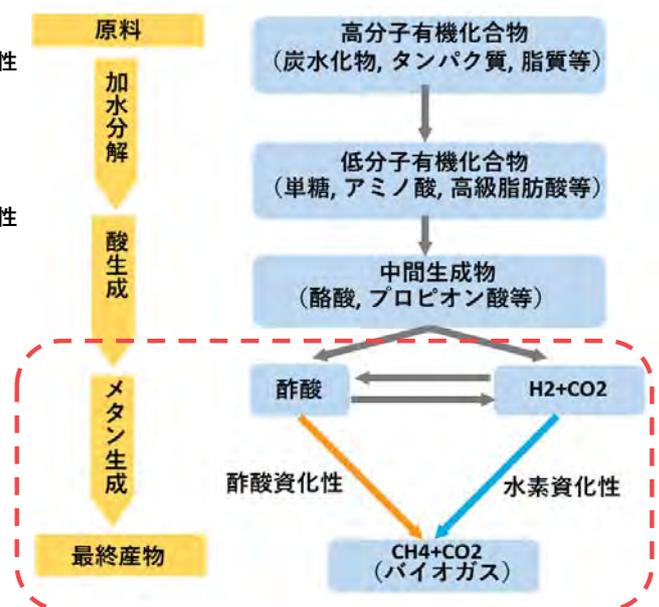
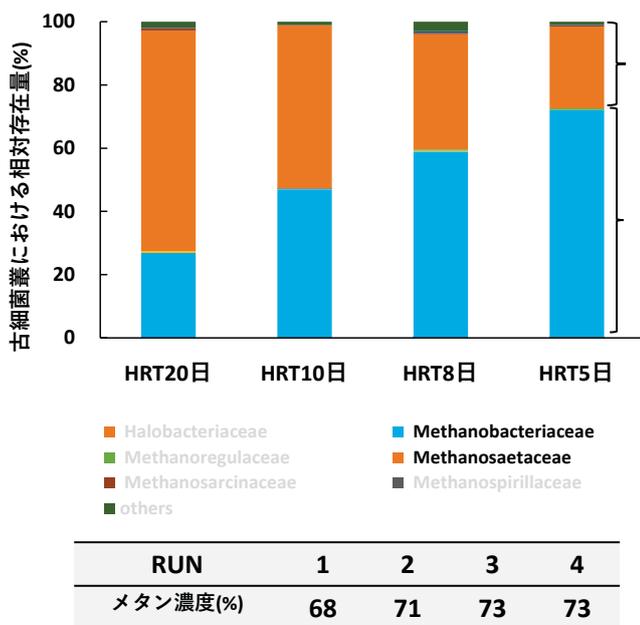
HRT10日から8, 5日に短縮すると,

- 全固形物中の懸濁物質の割合 (SS/TS) が増加した。
- SS分解性能が低下した可能性。

→有機物負荷の増加により, 加水分解段階が抑制されたと考えられる。

10

槽内における古細菌叢の変化 (科レベル)

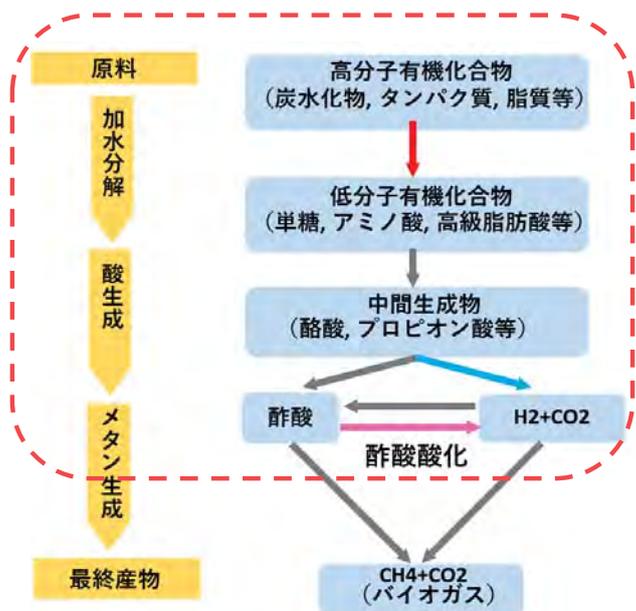
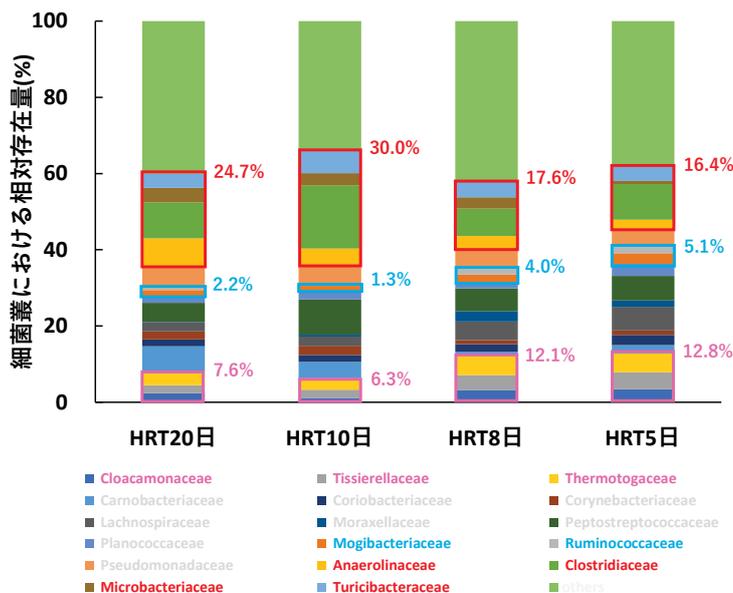


- HRTの短縮により、酢酸資化性メタン生成菌の相対存在量が減少し、水素資化性メタン生成菌の相対存在量が増加した。

水素資化性メタン生成菌は酢酸資化性メタン生成菌よりも、HRTなどの環境変化に強い⁽²⁾。

(2) Bi et al, Renewable Energy 2020

槽内における細菌叢の変化 (科レベル)

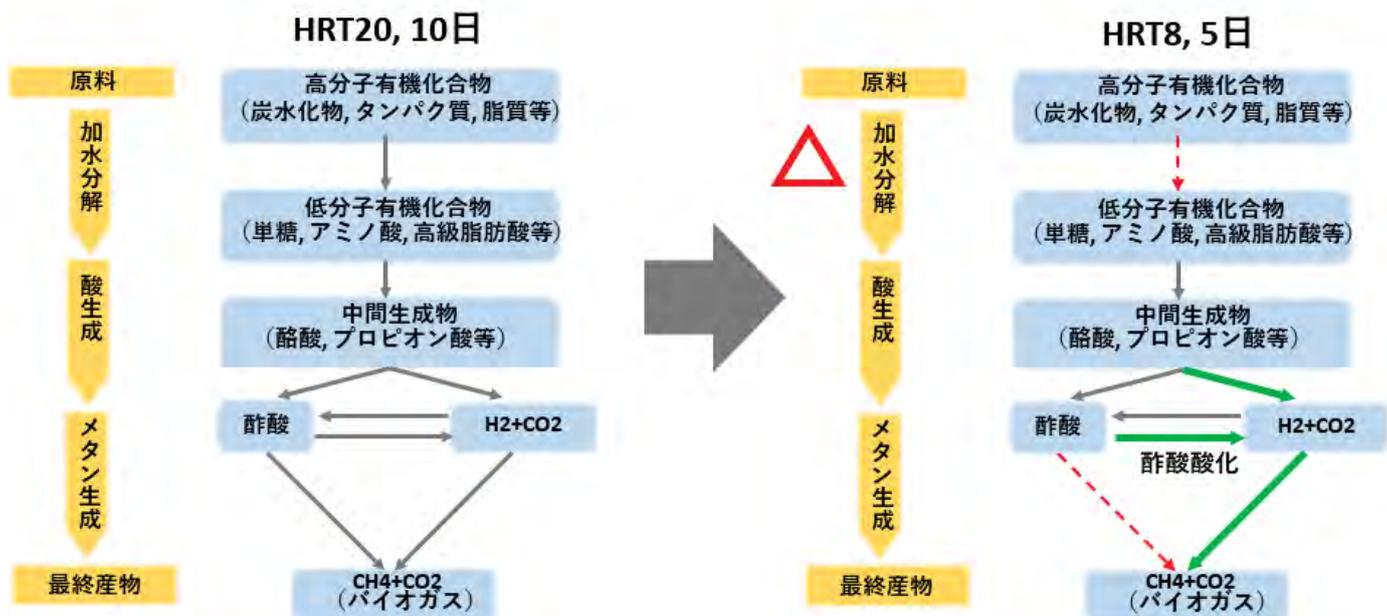


HRTを短縮すると...

- 炭水化物の加水分解に関わる微生物^{(3) (4) (5) (6)}の存在割合が減少
- 水素生成に関わる微生物^{(7) (8)}の存在割合が増加
- 酢酸酸化経路に関わる微生物^{(9) (10) (11)}の存在割合が増加

(3) He et al., Bioresource (2023)
 (4) Regueiro et al., Journal of Biotechnology(2016)
 (5) Wang et al., Journal of Environmental Sciences(2018)
 (6) Aziz et al., Science of The Total Environment (2019)
 (7) Ciciura et al., Renewable Energy (2020)
 (8) Liu et al., Bioresource Technology (2019)
 (9) Zhang et al., Waste Management(2020)
 (10) Regueiro et al., Journal of Biotechnology(2016)
 (11) Zhang et al., Waste Management(2020)

HRT短縮によるメタン発酵経路図の変化



目的②

嫌気性MBR消化液を用いた
微細藻類培養方法の確立

- 微細藻類培養試験を実施し、従来のメタン発酵消化液と比較して嫌気性MBR消化液を培地とした場合に微細藻類の増殖特性を調査する。
- 嫌気性MBR消化液を培地とした場合に、微細藻類が最も増殖する希釈倍率、嫌気性MBRのHRTを調査する。

材料および方法

• 供試藻類

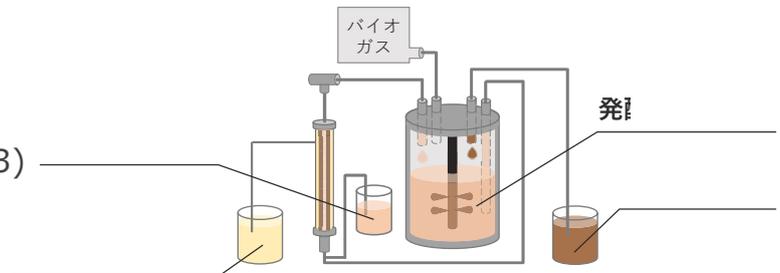
Chlorella sorokiniana

淡水性クロレラの種類

国立環境研究所より分譲(NIES-2173)

• 培養条件

温度：26℃ 光源：LED

光量：69-115 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ メタン発酵消化液と
嫌気性MBR消化液の比

- 培地：
引き抜き汚泥
(メタン発酵消化液とみなす)
嫌気性MBR消化液
- 各培地とも3, 5, 10倍で脱イオン水で希釈
- クロロフィル濃度で成長評価
- 初期細胞密度：
 $2.96 \times 10^4 \text{ cells/mL}$
- 明暗周期：12 h/12 h

嫌気性MBR消化液の
至適な希釈倍率

- 培地：嫌気性MBR消化液
- **無希釈, 2, 10, 20, 50倍**で脱イオン水で希釈
- 直接係数法および吸光度で成長評価
- 初期細胞密度：
 $1.93 \times 10^4 \text{ cells/mL}$
- 明暗周期：24 h/0 h

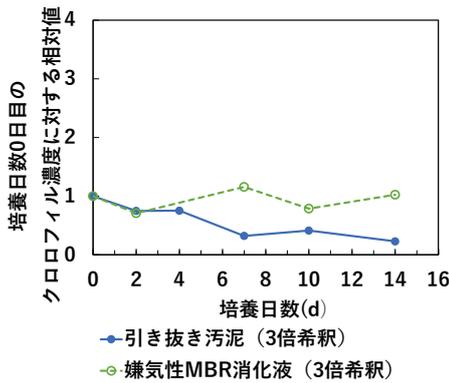
嫌気性MBR消化液の
至適なHRT

- 培地：**HRT8日, 5日, 3日**の嫌気性MBR消化液
- 10倍で脱イオン水で希釈
- 初期細胞密度：
 $3.75 \times 10^4 \text{ cells/mL}$
直接係数法で成長評価
- 初期細胞密度：
 $3.38 \times 10^7 \text{ cells/mL}$
培地のCODの測定
- 明暗周期：12 h/12 h

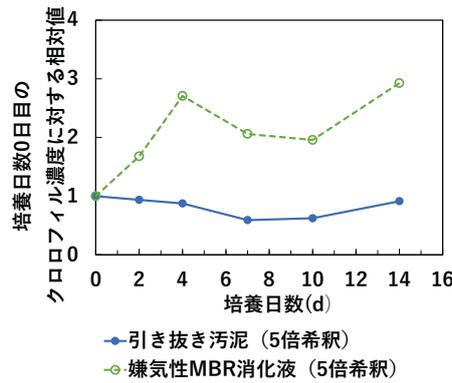
微細藻類
培養試験

引き抜き汚泥（メタン発酵消化液）および嫌気性MBR消化液の培地性能の比較

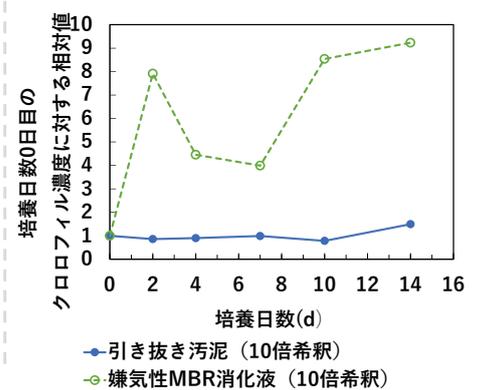
3倍希釈



5倍希釈



10倍希釈

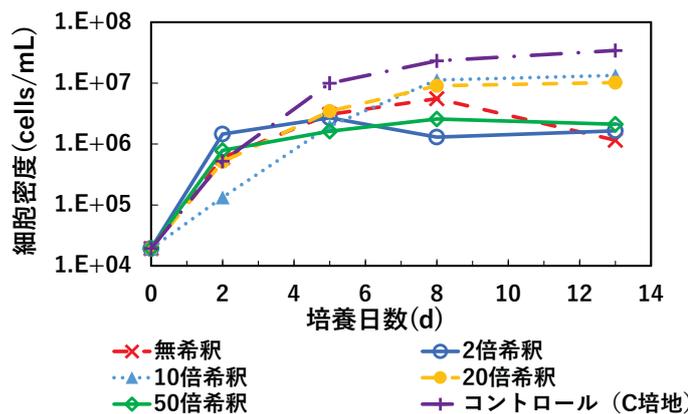


- 培養日数0日目のクロロフィル濃度に対する培養最終日の相対値
すべての希釈倍率で **嫌気性MBR消化液 > 引き抜き汚泥**
→引き抜き汚泥中の懸濁物質 微細藻類の光合成を阻害
→引き抜き汚泥中の菌体 微細藻類の汚染
- 各培地の相対値 10倍希釈 > 5倍希釈 > 3倍希釈
- 嫌気性MBR消化液は、膜ろ過により懸濁物質や菌体が除去
→微細藻類培養に**直接利用できる可能性が高い**

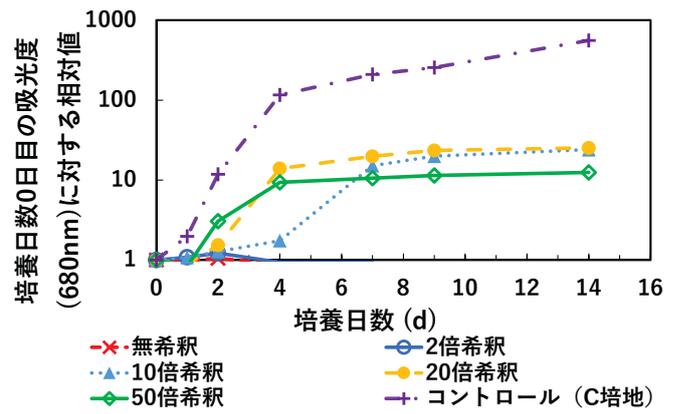
微細藻類
培養試験

嫌気性MBR消化液の希釈倍率が藻類培養に及ぼす影響

直接係数法



吸光度



- 直接係数法：10倍, 20倍希釈した嫌気性MBR消化液でC培地と同等レベルで増殖
→嫌気性MBR消化液を希釈することで直接利用できる可能
- 無希釈, 2倍, 50倍希釈した嫌気性MBR消化液では微細藻類の増殖が小さかった
→無希釈, 2倍希釈：培地の透光性の低下により微細藻類の光合成が阻害
→50倍希釈：培地中の栄養塩の不足
- 直接係数法：無希釈, 2倍希釈で、低い水準で増殖
吸光度：無希釈, 2倍希釈で、変化なし
→微細藻類細胞の大きさが十分に成長しなかった可能性

総合考察

試験目的および調査項目

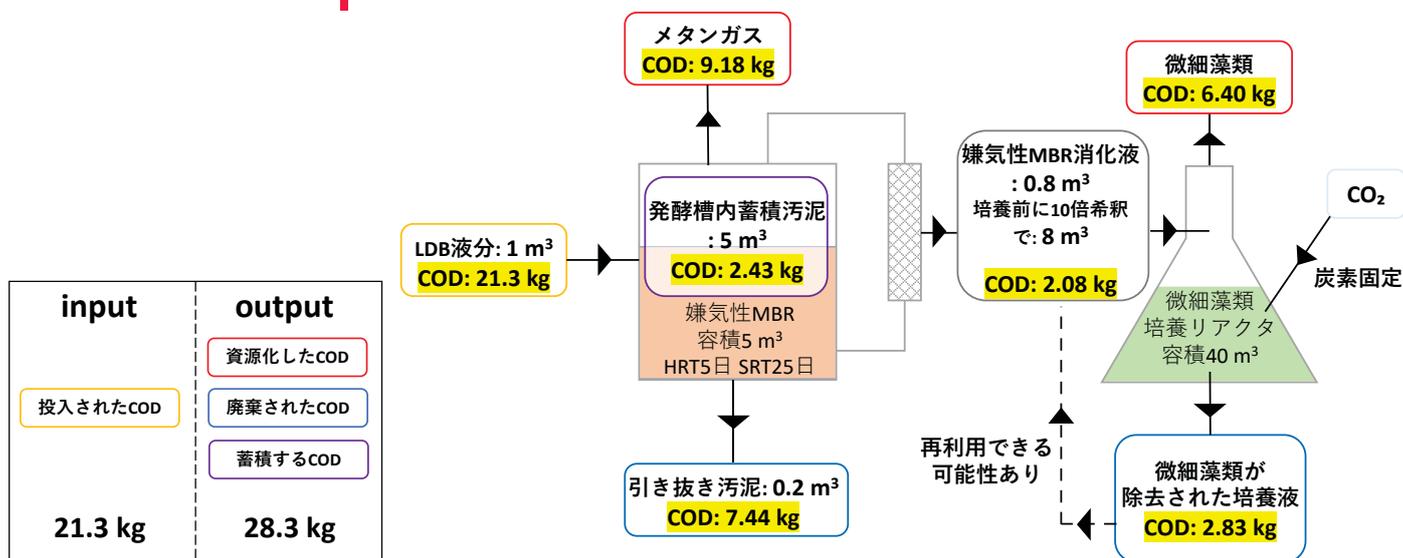
目的③

嫌気性MBRと微細藻類の
統合プロセスの評価

- 嫌気性MBRと微細藻類培養の統合プロセスをHRT5日で連続運転した場合の有機物の物質収支を調査する。

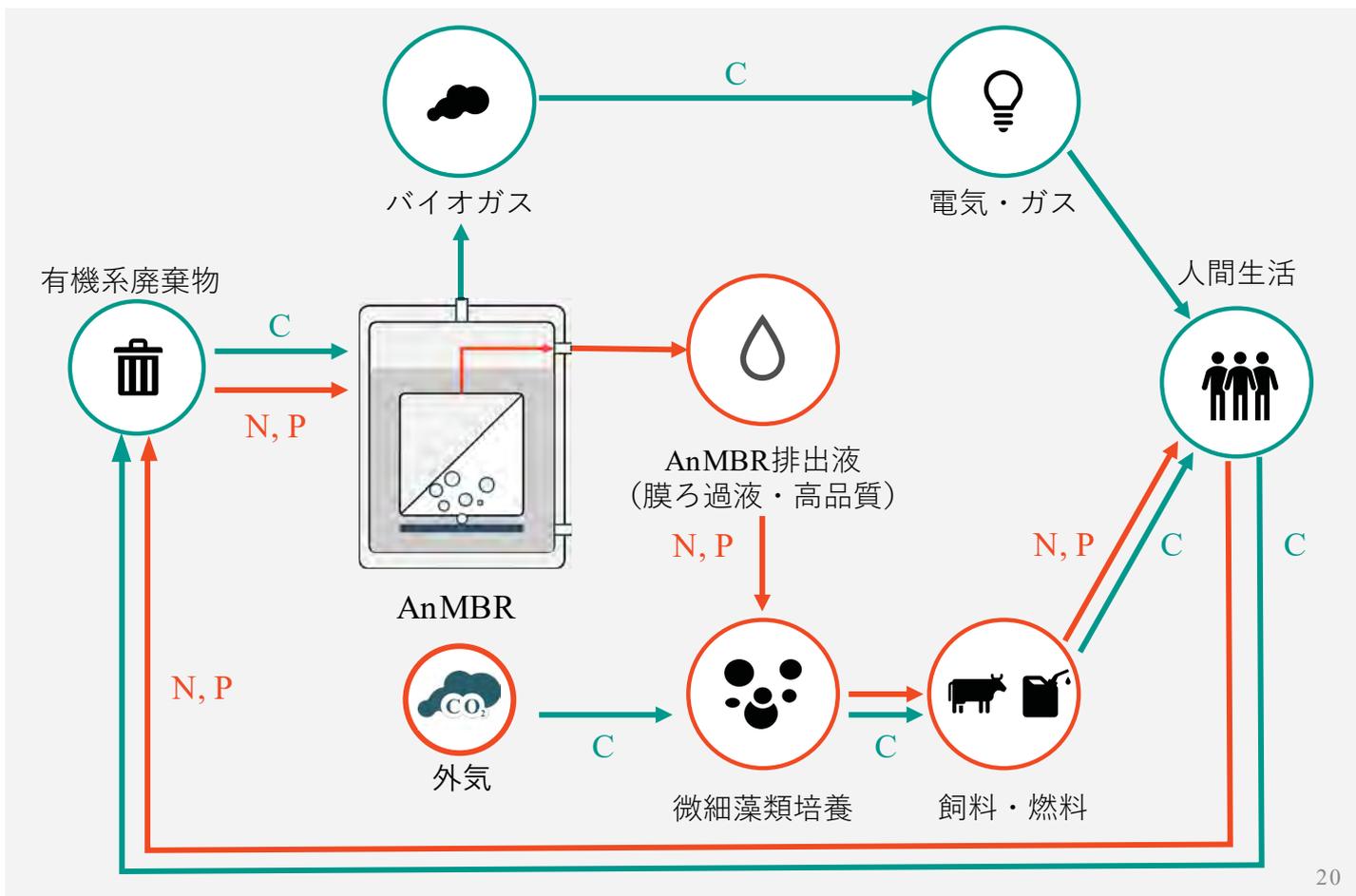
総合考察

統合プロセスの有機物の物質収支の解明



- 有機物の物質収支をCODより算出した場合、input < output
→微細藻類が光合成の際に大気中の二酸化炭素を固定した可能性
- 资源化したCODは、inputに対して約73%
- 廃棄されたCODは、inputに対して約48%
- 各プロセスにおける加温や送液に伴うCO₂の排出に留意する必要があるが、嫌気性MBRと微細藻類培養の統合プロセスは**カーボンネガティブ**な方法である可能性

嫌気性MBR × 微細藻類



水処理膜研究部門

- 大西洋 教授 (部門長)
- 井原一高 教授
- 松山秀人 教授
- 吉田弦 助教
- Kecheng GUAN 助教
- Zhaohuan MAI 特命助教
- Mengyang HU 特命助教



氷点下温度での 液中AFM測定

大西 洋

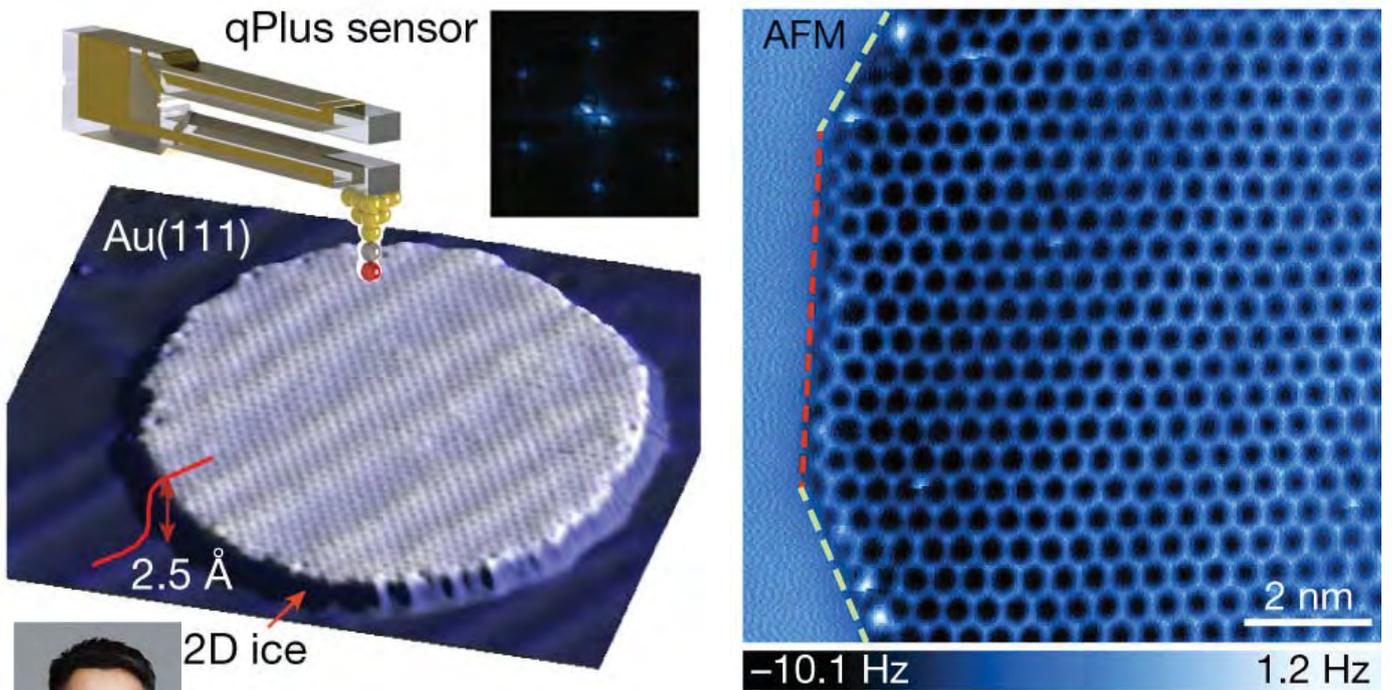


科研費
KAKENHI



基盤研究 (S) 23H05448, 基盤研究 (B) 25286009,
二国間共同研究 (フィンランド), 挑戦的研究 (萌芽) 18K19058, 21K18935.

Imaging ice in vacuum



2D ice

Ying Jiang

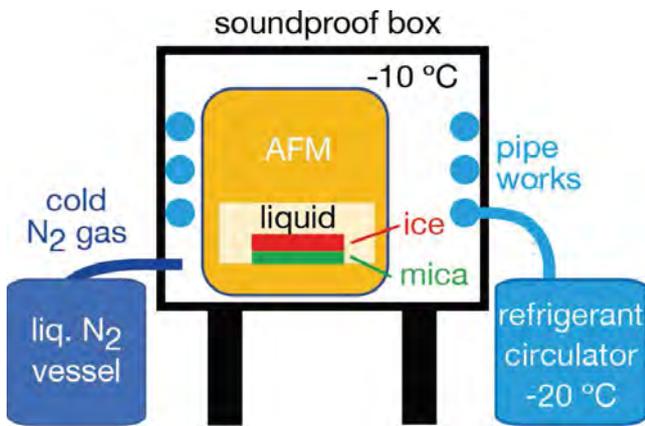
Ma et al. Nature 577 (2020) 60.

Problem

at freezing point



Imaging ice in antifreeze liquid



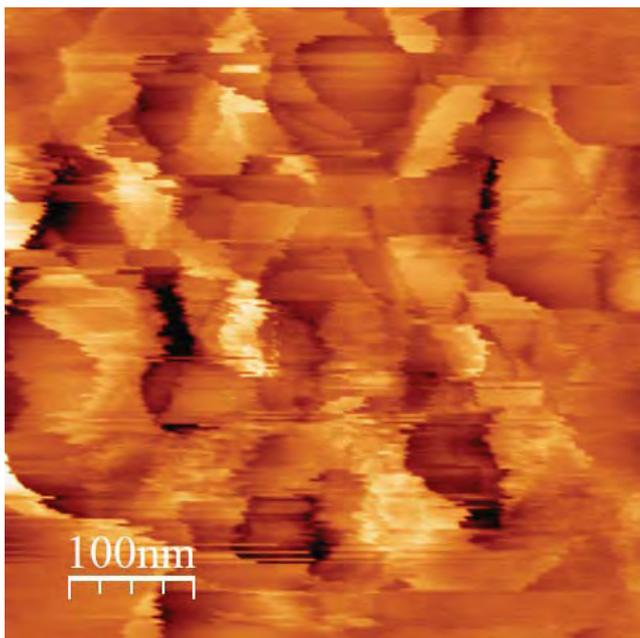
Bruker AFM for Amplitude-Modulation imaging (AM-AFM)

Dimension XR Icon NanoEC

Institute for Molecular Science

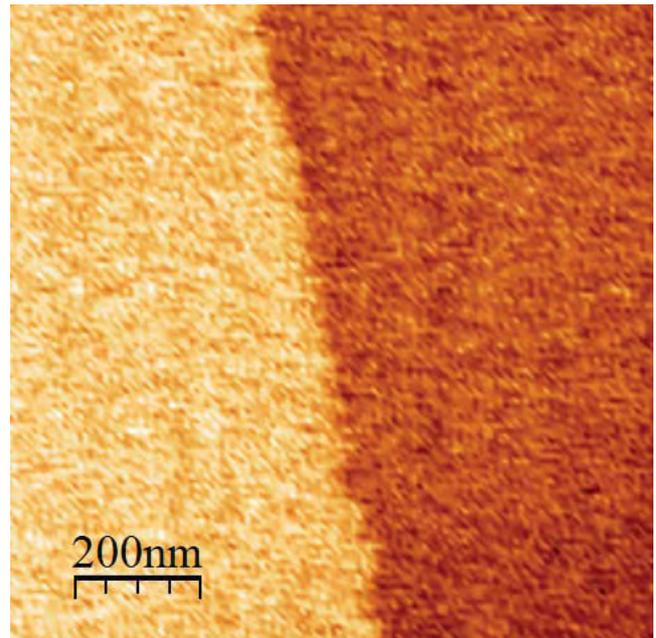
Ice flatten under octanol

N₂ vapor, -6 °C



frost pillars of 20 nm

1-octanol, -9 °C

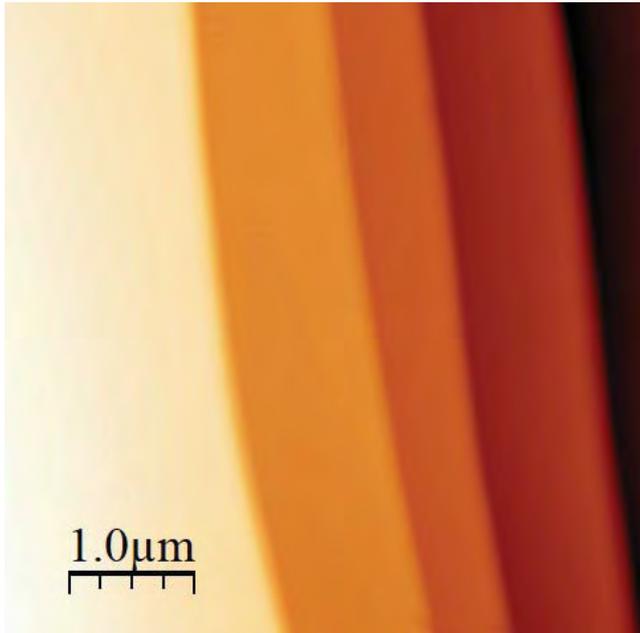


step of 0.1 nm

Yanagisawa et al., J. Chem. Phys. 161 (2024) 024702.

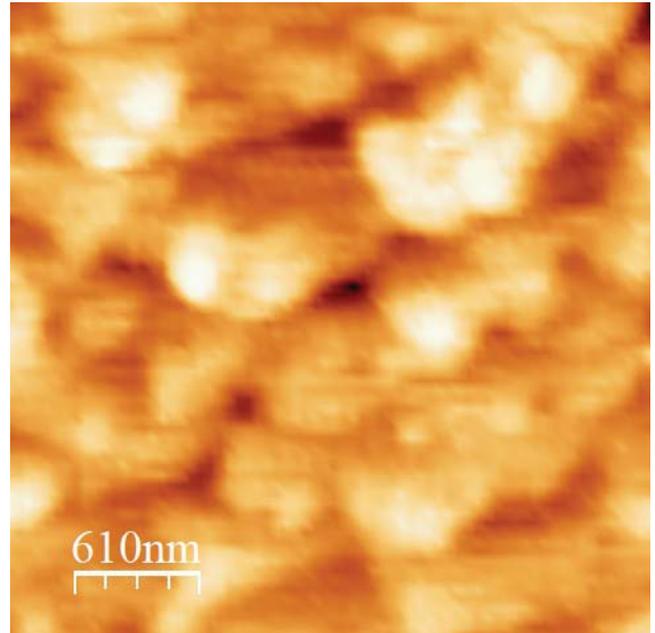
Ice under short-chain alcohols

1-hexanol, -3°C



steps of 100 nm

1-butanol, -6°C



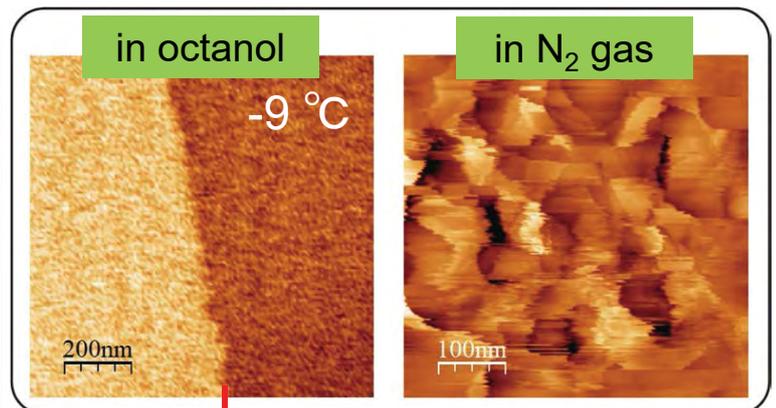
irregularly shaped

Yanagisawa et al., J. Chem. Phys. 161 (2024) 024702.

Imaging ice in liquid



Bruker AFM
(Dimension XR Icon NanoEC)



step by 0.1 nm

frost pillars of
20 nm

Ryo Yanagisawa et al., J. Chem. Phys. 161 (2024) 024702.

Featured by Physics Today and 30+ web sites
神戸大学令和6年度学生表彰 (学術部門)

sub-zero FM-AFMs

Shimadzu AFM, SPM-8100FM

IMS

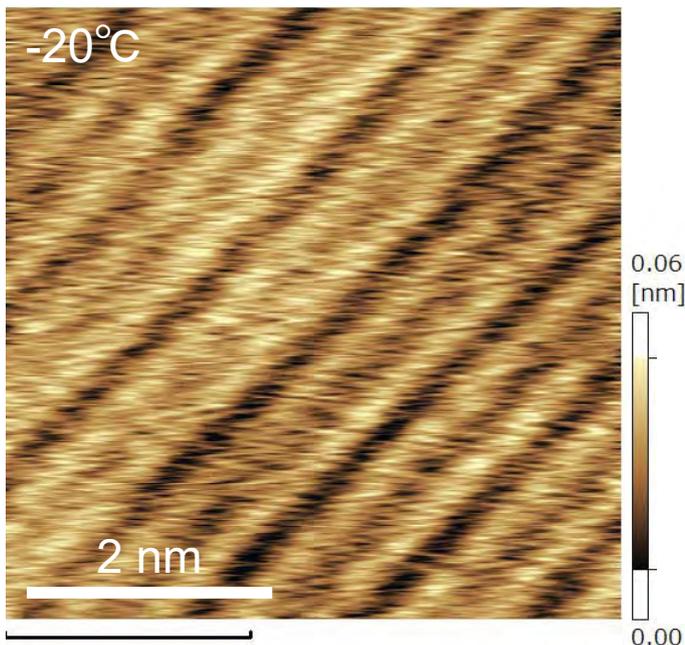


Kobe

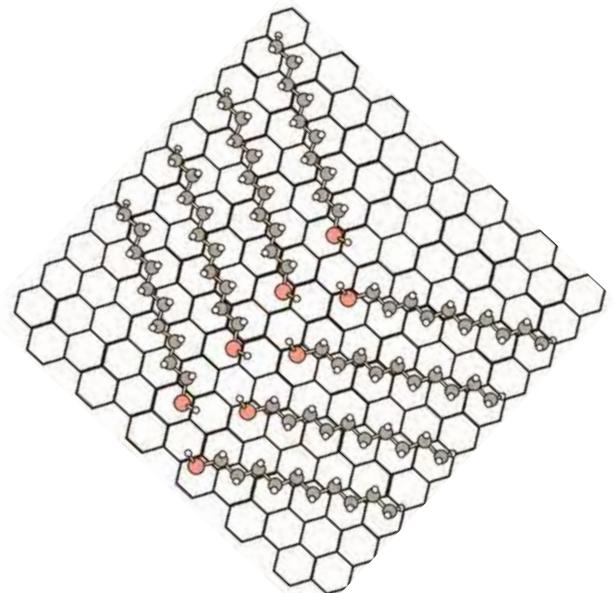


Sub-zero FM-AFM on graphite

octanol on graphite



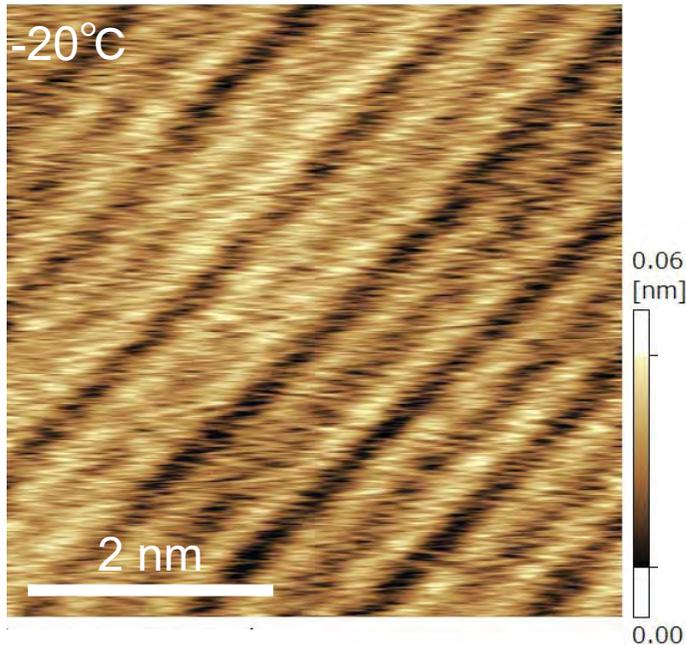
decanol on graphite



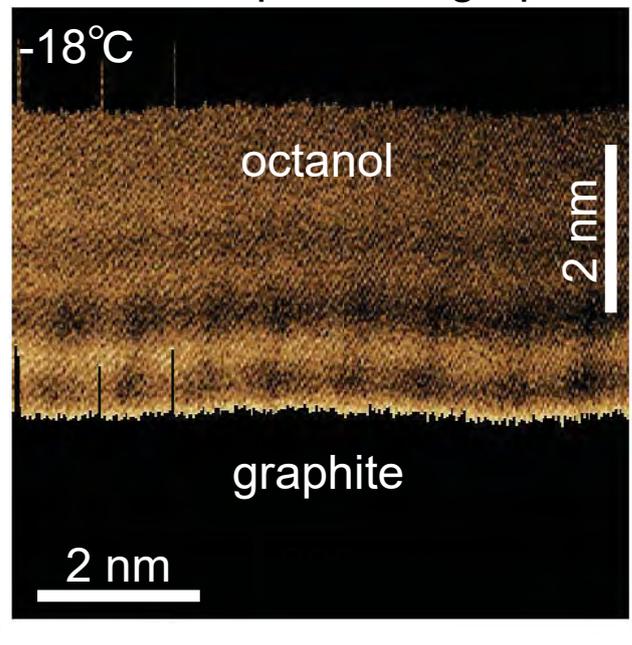
Lu et al., Jpn. J. Appl. Phys. 64 (2025) 05SP05.

FM-AFM in sub-zero octanol

1-octanol
adsorbed on graphite



1-octanol liquid over graphite



microscope: Shimadzu SPM-8100FM, cantilever: PPP-NCHAuD

Lu et al., Jpn. J. Appl. Phys. 64 (2025) 05SP05.

FULL PAPER

Preparation and gas barrier properties of chitosan/silica organic–inorganic hybrid gas barrier membranes with cross-linked structure

Koji Kuraoka^{1,2,†} and Risako Yamamoto¹¹Graduate School of Maritime Sciences, Kobe University, 5–1–1 Fukaeminami, Higashinada, Kobe 658–0022, Japan²Research Center for Membrane and Film Technology, Kobe University, 1–1 Rokkodai-cho, Nada, Kobe 657–8501, Japan

Chitosan/silica organic–inorganic hybrid gas barrier membranes were prepared by sol–gel method on plastic films using tetramethoxysilane, 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane, chitosan, and cross-linked structures of chitosan were introduced by cross-linking reaction using citric acid (CA) and malic acid (MA). Water vapor transmission rate (WVTR) of the membranes was evaluated by dish method. Oxygen permeation through the membranes was also measured by a variable-pressure method. WVTR of the hybrid layers were lower than that of poly(vinylidene chloride) (PVDC) and oxygen permeability coefficients of the hybrid layer was small and about one-third to half of that of PVDC. These properties were thought to be due to well dispersion of inorganic segments (silica) and organic segments (chitosan) at molecular level and the formation of cross-linked structures in the hybrid. Pencil hardnesses (750 g load) of the hybrid layers coated on polyethylene terephthalate (PET) films were HB. These values were higher than that of PET film (B). Light transmittance of the chitosan/silica organic–inorganic hybrid gas barrier membranes (CA100 and MA110) coated on PET film were higher than PET film. The hybrid gas barrier membranes are transparent, rigid, flexible and have excellent water vapor and oxygen barrier properties.

Key-words : Organic–inorganic hybrid, Gas barrier, Chitosan, Cross-linked structure

[Received March 13, 2025; Accepted April 22, 2025; Published online May 20, 2025]

1. Introduction

The gas barrier properties of packaging materials are very important for food science field.¹⁾ The barrier to water vapor and oxygen or their combination in the packaging field can extend the shelf life of foods and improve their quality.²⁾ Polyolefins (such as polyethylene and polypropylene) are widely used in the food packaging field due to improved treatment, lower cost requirements, and higher resistance to chemicals and harsh environments.²⁾ In general, polyolefin films have excellent water vapor barrier properties and low cost.³⁾ Therefore, renewable and biodegradable biopolymers, which are environmentally friendly materials, have long been ignored. This is mainly due to the low cost of polyolefins and the low water resistance and mechanical properties of biopolymers. However, many of the widely used polyolefin films are derived from petroleum resources, and there are concerns about emission of greenhouse gases during incineration and plastic pollution in the ocean due to their non-biodegradability.

Chitosan is attracting attention as a potential gas barrier membrane component due to its excellent oxygen barrier properties.^{4–6)} Chitosan obtained from natural chitin after deacetylation by alkaline treatment.⁶⁾ In fact, chitosan is

non-toxic, biocompatible and antigenic. It is also gradually broken down by enzymes such as lysozyme in the human body.⁷⁾ Nevertheless, chitosan has very good gas barrier properties in dry conditions, but loses this property in high relative humidity. The presence of water in chitosan affects the way gas permeates are adsorbed and diffused.^{8,9)} Controlling the swelling of chitosan seemed very interesting and several studies have dealt with this.^{10–13)}

This work was done to evaluate the gas barrier properties of chitosan/silica organic–inorganic gas barrier membranes with cross-linked structures. The water vapor transmission rate of the membrane was studied as a function of the amount of cross-linking agents (citric acid and malic acid) and the molar amount of carboxyl group (–COOH) in the cross-linker molecule. Oxygen permeation was also evaluated.

2. Experimental

2.1 Materials

Chitosan with a deacetylation degree of 75–85 % (LLWP) was received from KIMICA Corporation. Tetramethoxysilane (TMOS) and 3-glycidoxypropyltrimethoxysilane (GPTMOS) were purchased from Shin-Etsu Chemical Co., Ltd. Citric acid (CA) and malic acid (MA) as cross-linking agents were purchased from Kanto Chemical Co., Inc. Commercially available reagent grade chemicals were used.

† Corresponding author: K. Kuraoka; E-mail: kuraoka@crystal.kobe-u.ac.jp

2.2 Preparation of chitosan/silica organic–inorganic hybrid gas barrier membranes

Chitosan/silica organic–inorganic hybrid gas barrier membranes were prepared using the sol–gel method. The sols were composed of TMOS, GPTMOS, water (H₂O), acetic acid (CH₃COOH), chitosan, CA and MA as cross-linking agents. The compositions of the sols are shown in Table 1. The molar amount of –COOH in MAXX was same as that in CAXX (XX is wt% of cross-linking agents).

A typical preparation of the membrane (CA100) is as follows. Chitosan (0.32 g) was added to a mixture of H₂O (19.44 g) and CH₃COOH (0.10 g). The mixture was stirred for 1 day at room temperature, filtered, and then a mixture of TMOS (0.33 g) and GPTMOS (0.13 g) was added at room temperature. After stirring the mixture for 3 h, a cross-linking agent (CA: 0.32 g) was added to the mixture and the mixture was stirred for 1 h to give a homogeneous sol. A polyethylene terephthalate (PET) film with a thickness 25 μm was used as the support for water vapor transmission rate and a polypropylene (PP) film with a thickness of 70 μm was used as the supports for oxygen permeation. The support was spun at a rate of 750 rpm for 30 s, and 1 ml of the sol was dropped onto the support. Following the spin-coating procedure, the membranes was heated in an electric oven at 338 K for 12 h to promote a solvent evaporation, hydrolysis and condensation.

2.3 Characterization of the membranes

The prepared chitosan/silica organic–inorganic hybrid gas barrier membranes were transparent and the thicknesses of hybrid layers were measured by a contact-type membrane thickness meter (Hakattaro G, Seiko EM Co., Ltd.).

Water vapor transmission rate of the membranes was evaluated by dish method (JIS Z0208).¹⁴⁾ A test dish with a diameter of 60 mm and a depth of 25 mm was made from aluminum. Granular calcium chloride products were used to maintain the RH (Relative Humidity) inside the dish about zero. The membrane was cut into circle shapes and used to cover the test dish. The test dish with the membrane was kept in a constant temperature/humidity chamber (AE-215, Advantec Toyo Kaisha, Ltd.) at 313 K,

90%RH and the weight of the dish was measured every 24 h. The water vapor transmission rate was calculated from the weight change, W and elapsed time, t and permeation area, A using the following equation.

$$WVTR = \frac{W \times 240}{A \times t} \quad (1)$$

Where WVTR is water vapor transmission rate.

Oxygen permeation through the membranes at 313 K was measured by a variable pressure method using a gas permeation measurement apparatus (K-315N-01, Tsukubarikaseiki Co., Ltd.).¹⁴⁾

The pencil hardness test (load: 750 g) according to JIS K-5600-5-4 was conducted to determine the surface hardness of the membranes.

3. Results and discussion

3.1 Water vapor transmission rates of the membranes

Water vapor transmission rates of chitosan/silica organic–inorganic hybrid gas barrier membranes with cross-linking agents (CA and MA) are shown in Fig. 1. The water vapor transmission rates of the membranes were lower than that of the PET support (24 g·m⁻²·day⁻¹). The water vapor transmission rates of the membranes de-

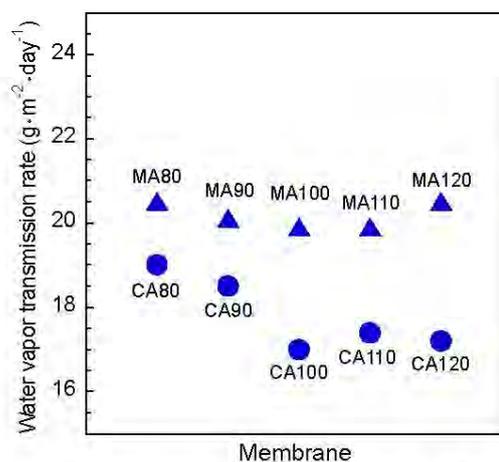


Fig. 1. Water vapor transmission rates of the prepared membranes.

Table 1. Sample name and sol composition

Sample	Sol composition						
	molar ratio				Chitosan (wt %)	CA (wt %)	MA (wt %)
	TMOS	GPTMOS	H ₂ O	CH ₃ COOH			
CS						0	0
CA80						80	—
CA90						90	—
CA100						100	—
CA110						110	—
CA120	0.8	0.2	400	0.6	70	120	—
MA80						—	84
MA90						—	94
MA100						—	105
MA110						—	115
MA120						—	126

creased until CA100 (100wt% CA) and MA110 (115 wt% MA) as CA and MA content increased due to the increase of the cross-linked structure in the membranes. The reason for the sudden decrease in water vapor transmission rate from CA90 to CA100 is unclear, but it is thought to be due to the proper progress of the cross-linking reaction and the formation of a dense membrane structure. Water vapor transmission rate of CA110 and MA120 is due to defects in the hybrid layer caused by high hydrophilicity and viscosity of the sol.

Water vapor transmission rates of the membranes with CA (CA80–120) were lower than those of the membranes with MA (MA80–120). The CA and MA molecules differ in the number of –COOH groups they contain. MA molecules require reaction with all two –COOH groups to form cross-linked structures, while CA molecules need only two of the three –COOH groups. Therefore, the lower water vapor transmission rates of the membranes containing CA was thought to be due to higher probability of cross-linking with CA molecule than with MA molecules.

3.2 Water vapor transmission rates (thickness 25 μm) and oxygen permeability coefficients of the membranes

For multi-layer membranes, the permeability coefficient of the whole system, P and the permeability coefficient of each layer, P_n have the following equation.

$$\frac{L}{P} = \frac{L_1}{P_1} + \frac{L_2}{P_2} + \dots + \frac{L_n}{P_n} \quad (2)$$

Where L and L_n are the thickness of the whole system and of each layer. By using this equation, the water vapor transmission rates (thickness 25 μm) of chitosan/silica organic-inorganic hybrid gas barrier layer on PET or PP film was calculated.¹⁾

Figure 2 shows the water vapor transmission rates (normalized to thickness 25 μm) of CA100, MA110, polyvinylidene chloride (PVDC), PET and PP. The chitosan/silica organic-inorganic hybrid gas barrier layer thickness

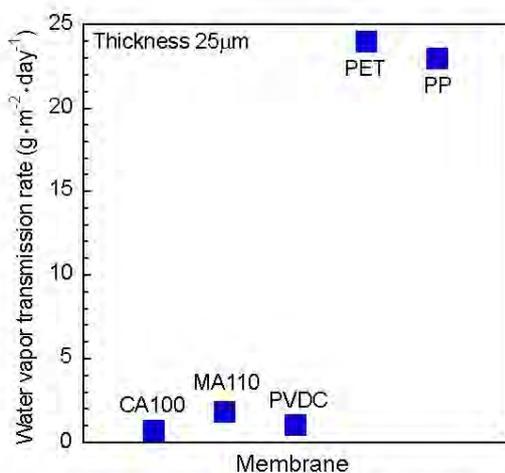


Fig. 2. Water vapor transmission rates of CA100, MA110, PVDC, PET and PP.

of CA100 and MA110 were 0.2 and 0.2 μm , respectively. The water vapor transmission rate of CA100 was 0.7 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$. This value is lower than that of PVDC ($1\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$).^{15,16)} The reported water vapor transmission rate of chitosan was about $1000\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{day}^{-1}$ (thickness about 40 μm , 298 K, 84 %RH).⁴⁾ This value is considerably higher than that of CA-100 and MA-110. This high value is due to swelling of chitosan caused by hydroxyl groups in the molecular structure. Water molecules can adsorb in chitosan molecular chain network and permeate easily.

Oxygen permeability coefficients of the chitosan/silica organic-inorganic hybrid gas barrier layers were also calculated by using Eq. (2). The calculated oxygen permeability coefficients are shown in **Fig. 3** with reported values of PVDC, PET and PP. The oxygen permeability coefficient of CA100 and MA110 calculated from the permeance and thickness were 6.0×10^{-19} and 9.3×10^{-19} $\text{mol}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$, respectively. This value was about one-third and half of that of PVDC (1.7×10^{-18} $\text{mol}\cdot\text{m}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Pa}^{-1}$ at 298 K), respectively. The PVDC data is from the literature.^{16,17)} This value indicates that the chitosan/silica organic-inorganic hybrid layer is effective in suppressing the oxygen permeation. The high gas barrier property can be explained by the formation of a dense structure during coating procedure. Therefore, the hybrid layer could be applicable for oxygen barrier.

The water vapor transmission rate (thickness 25 μm) and oxygen permeability coefficient of CA100 were lower than those of MA110. These results indicated CA100 possessed higher gas barrier properties than MA110 despite the fact that molar amounts of –COOH in MA110 was more than those in CA100. Number of –COOH in the molecules of CA and MA are 3 and 2, respectively. To create cross-linked structures, MA molecule needs reaction with all –COOH. However, CA molecule needs reaction with two –COOH among three –COOH. Therefore, better gas barrier property of CA100 was thought to be due to higher probability of cross-linking with CA molecule.

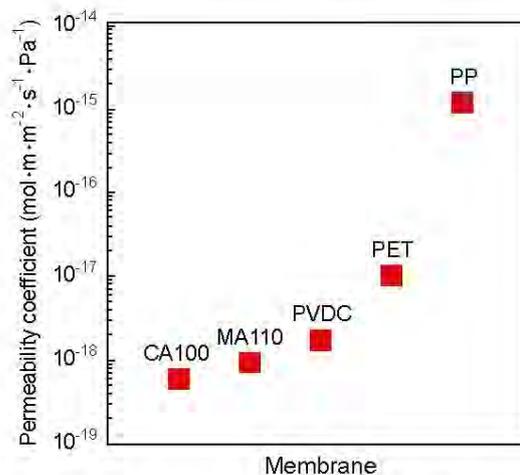


Fig. 3. Oxygen permeability coefficients of CA100, MA110, PVDC, PET and PP.

3.3 Structure and properties of the membranes

The structures of the chitosan/silica organic-inorganic gas barrier membranes were determined using a Fourier-transform infrared spectrometer (FTIR) (FT/IR-4100, JASCO Co.). The IR spectra of CA, MA, CA100 (with the best water vapor and oxygen barrier property) and MA110 are presented in **Figs. 4** and **5**. Figure 4 shows the IR spectra from 4000 to 700 cm^{-1} , and Fig. 5 shows the IR spectra from 2000 to 1500 cm^{-1} . The membranes (CA100 and MA110) show a typical band at $\sim 960 \text{ cm}^{-1}$ associated with the stretching mode of Si-OH along with the characteristic bands related to the Si-O-Si bond ($\sim 1200, 1050, 800 \text{ cm}^{-1}$),^{18,19} which confirm the presence of the Si-O-Si network in the membrane. The absorption band near 2900 cm^{-1} is assigned to the C-H stretching vibration of chito-

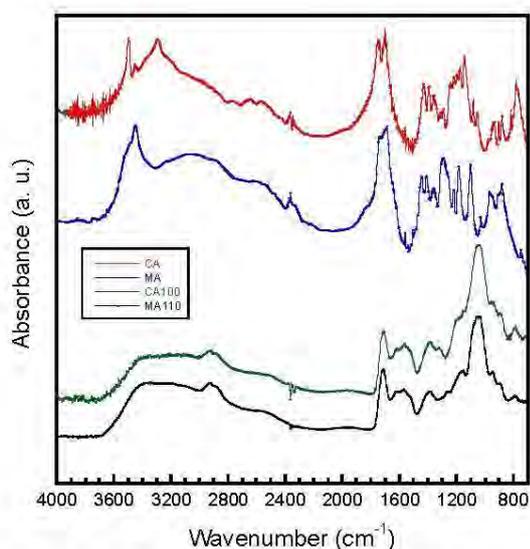


Fig. 4. IR spectra of CA, MA, CA100 and MA110 from 4000 to 700 cm^{-1} .

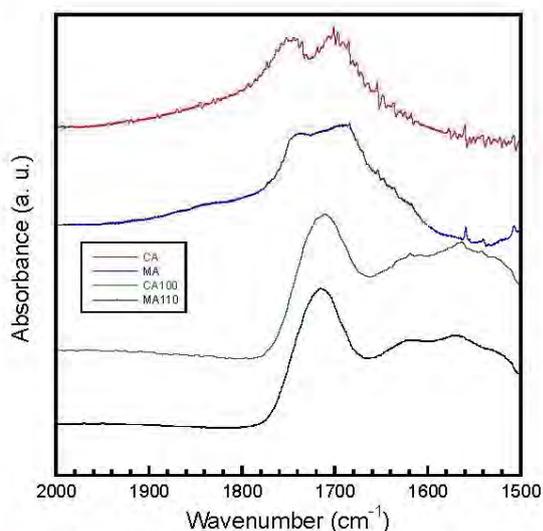


Fig. 5. IR spectra of CA, MA, CA100 and MA110 from 2000 to 1500 cm^{-1} .

san.²⁰ The strong and broad band at $\sim 3700\text{--}3000 \text{ cm}^{-1}$ is assigned to the hydroxyl groups of Si-OH and chitosan. Other characteristic bands originating from chitosan and C=O (CA and MA) were also observed. CA and MA had two absorption peaks at around 1800 to 1700 cm^{-1} in Fig. 5. Some parts of CA and MA are thought to exist as dimers with intermolecular hydrogen bonds between carboxyl groups.^{21,22} Therefore, the absorption band of the monomer and the dimer C=O stretching vibration appears at $\sim 1700 \text{ cm}^{-1}$ and the absorption band of the dimer C=O stretching vibration appears at $\sim 1760 \text{ cm}^{-1}$.^{21,22} The band at $\sim 1720 \text{ cm}^{-1}$ is the absorption band of C=O stretching vibration of ester bond due to esterification of carboxyl group in CA or MA and hydroxyl group in chitosan, and unreacted carboxyl group in CA or MA.^{23,24} From the results, it was suggested that CA100 and MA110 had crosslinked structures of ester bonds formed by the reaction of carboxyl groups in CA or MA and hydroxyl groups in chitosan.

3.4 The thermal stability of the membranes

The thermal stability of the prepared hybrid gas barrier membrane (CA100 and MA110) was measured by thermogravimetry (TG) and differential thermal analysis (DTA) equipment (EXSTAR6000, TG/DTA6300, Seiko Instruments Inc.). The TG/DTA experiments were performed in air at a heating rate of 10 K/min up to 1050 K. **Figure 6** shows TG/DTA curves of the membranes and chitosan at temperatures between 300 and 1050 K.

Comparing the temperatures at 50 wt % reduction, chitosan was approximately 560 K, whereas CA100 and MA110 were approximately 700 K, indicating improved thermal stability. For CA100 and MA110, exothermic peaks were observed around 650 and 840 K, and the exothermic peak around 650 K is thought to be due to chitosan with no cross-linked structure. On the other hand, the exothermic peak around 840 K is thought to have shifted to a higher temperature side than the peak around 760 K of chitosan

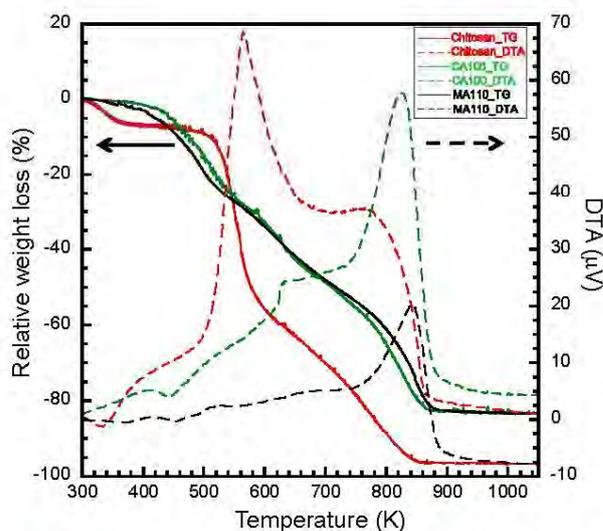


Fig. 6. TG/DTA curves of chitosan, CA100 and MA110.

due to the improvement in thermal stability of chitosan by the introduction of cross-linked structures and silica networks.^{13,25} This is thought to be because the decomposition temperature of the chitosan main chain increased due to the introduction of cross-linked structures, and the apparent molecular weight of chitosan increased.

At 1050 K, relative weight loss of chitosan, CA100 and MA110 was 96.6, 83.3 and 83.4 %, respectively. Although there is some error, silica (SiO₂) wt % obtained by the combustion reaction in air is about 20 wt %, so the amounts of inorganic components introduced were considered to be almost as calculated.

3.5 The pencil hardness, light transmittance and flexibility test of the membranes

The other properties of the prepared hybrid gas barrier membrane (CA100 and MA110) were evaluated. The pencil hardness of CA100 and MA110 indicated HB. This value was higher than that of the PET substrate (B) because calculated inorganic compound contents in the membranes, CA100 and MA110 was 26 and 25 wt %, respectively.

For the flexibility test (cylindrical mandrel: JIS K5600-5-1), a 2 mm diameter stainless rod was attached to the membrane, bent 10 times along the rod circle, and then the membrane surface was observed with optical microscope. The membrane surfaces without cracks were observed. This result means that the prepared membranes are flexible and adhesion between the chitosan/silica organic-inorganic hybrid coatings and the substrates were strong enough. This flexibility with hardness is a new property of the organic-inorganic hybrid gas barrier membranes due to the high dispersion of organic and inorganic components and the effect of silica networks.

Light transmittance was measured by ultra violet-visible spectrophotometer (V-530, JASCO Co.). **Figure 7** shows transmission spectra of PET, CA100 and MA110. Light transmittances of the organic-inorganic hybrid gas barrier

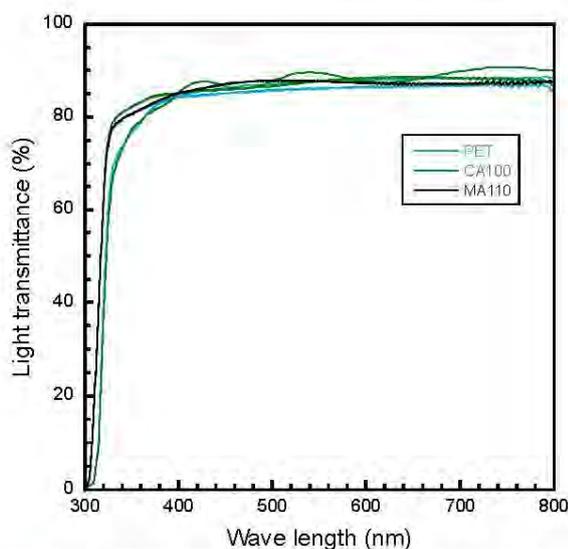


Fig. 7. Transmission spectra of PET, CA100 and MA110.

membranes (CA100 and MA110) coated on the PET was about 88 % (wave length = 550 nm) and higher than that of PET itself (Light transmittance = about 86 %) because the SiO₂-3-glycidoxypopySiO_{3/2} contents in the membranes were about 25 wt % (SiO₂ contents in the membranes about 20 wt %) and the refractive index of the membranes were lower than PET. Therefore, it functioned like an antireflection film. This transparency is important for the practical applications of packaging and flexible electronics.

4. Conclusion

Chitosan/silica organic-inorganic hybrid gas barrier membranes with cross-linked structure were successfully prepared by the sol-gel method with cross-linking reaction. Water vapor transmission rates of the hybrid membranes were evaluated as the function of cross-linking agents (CA and MA) content. The water vapor transmission rates (thickness 25 μm) and the oxygen permeability coefficient were calculated from water vapor transmission rates, oxygen permeances and thickness of the membranes. The calculated values indicated that the hybrid layers had a high barrier property. It was also investigated that the effect of number of -COOH in cross-linking agent molecules on the gas barrier properties of chitosan/silica organic-inorganic hybrid gas barrier membranes. The results indicated that number of -COOH in the molecules was effective for gas barrier properties of the hybrid membranes and the hybrid membranes could be applicable to gas (water vapor and oxygen) barrier membranes.

Acknowledgement This research was supported in part by the A-STEP Feasibility Research Program of the Japan Science and Technology Agency (JST).

References

- 1) K. Kuraoka and T. Iwasaki, *J. Sol-Gel Sci. Techn.* 104, 464 (2022).
- 2) K. Marsh and B. Bugusu, *J. Food Sci.* 75, R39 (2007).
- 3) D. Dziadowiec, D. Matykiewicz, M. Szostak and J. Andrzejewski, *Materials* 16, 1071 (2023).
- 4) C. Caner, P. J. Vergano and J. L. Wiles, *J. Food Sci.* 63, 1049 (1998).
- 5) M. Kurek, M. Ščetar, A. Voilley, K. Galić and F. Debeaufort, *J. Membrane Sci.* 403-404, 162 (2012).
- 6) L. A. M. van den Broek, R. J. I. Knoop, F. H. J. Kappen and C. G. Boeriu, *Carbohydr. Polym.* 116, 237 (2015).
- 7) I. Aranaz, A. R. Alcántara, M. C. Civera, C. Arias, B. Elorza, A. Heras Caballero and N. Acosta, *Polymers-Basel* 13, 3256 (2021).
- 8) J. L. Wiles, P. J. Vergano, F. H. Barron, J. M. Bunn and R. F. Testin, *J. Food Sci.* 65, 1175 (2000).
- 9) S. Despond, E. Espuche and A. Domard, *J. Polym. Sci. Pol. Phys.* 39, 3114 (2001).
- 10) Y. Mizushima, *J. Non-Cryst. Solids* 144, 305 (1992).
- 11) Y.-L. Liu, Y.-H. Su and J.-Y. Lai, *Polymer* 45, 6831 (2004).
- 12) R. Yamamoto and K. Kuraoka, *J. Packaging Sci. Tech. Jpn.* 23, 195 (2014).
- 13) R. Yamamoto and K. Kuraoka, *J. Packaging Sci. Tech.*

- Jpn.* 23, 435 (2014).
- 14) K. Kuraoka, A. Hashimoto and H. Ashihara, *Desalin. Water Treat.* 17, 66 (2010).
 - 15) T. Katsura, "KINOSEI HOSO NYUMON", Ed. by S. Nitta, S. H. K. KYOKAI, Nikkan Kogyo Shimbun Ltd., Tokyo (2002) pp. 43–66.
 - 16) K. Kuraoka and K. Miki, *J. Ceram. Soc. Jpn.* 128, 573 (2020).
 - 17) T. Nakagawa, "MAKUGAKU NYUMON", Ed. by M. Nakagaki, KITAMI SYOBO, Tokyo (1985) pp. 273–293.
 - 18) J. Wong and C. A. Angell, "Glass Structure by Spectroscopy", Ed. by, MARCEL DEKKER, INC., New York (1976) pp. 436–451.
 - 19) A. Bertoluzza, C. Fagnano, M. A. Morelli, V. Gottardi and M. Guglielmi, *J. Non-Cryst. Solids* 48, 117 (1982).
 - 20) J. Brugnerotto, J. Lizardi, F. M. Goycoolea, W. Argüelles-Monal, J. Desbrières and M. Rinaudo, *Polymer* 42, 3569 (2001).
 - 21) L. C. Bichara, H. E. Lanús, E. G. Ferrer, M. B. Gramajo and S. A. Brandán, *Adv. Phys. Chem.* 2011, 1 (2011).
 - 22) H. Barañska, J. Kuduk-Jaworska, R. Szostak and A. Romaniewska, *J. Raman Spectrosc.* 34, 68 (2003).
 - 23) C. Q. Yang, X. Wang and I.-S. Kang, *Text. Res. J.* 67, 334 (1997).
 - 24) B.-H. Kim, J. Jang and S.-W. Ko, *Fiber. Polym.* 1, 116 (2000).
 - 25) M. Kanazawa, A. Hata and K. Kuraoka, *J. Packaging Sci. Tech. Jpn.* 21, 363 (2012).



イオン液体含有ゲル薄膜複合膜の開発とCO₂分離膜への応用

先端膜工学研究センター
 ガス分離・ガスバリア膜研究部門
 神尾 英治

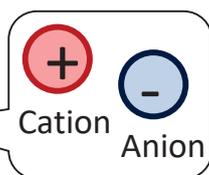
第7回 先端膜工学研究センター成果発表会
 2025年7月30日 神戸大学瀧川記念学術交流会館

Membrane Engineering Lab.  KOBE UNIVERSITY



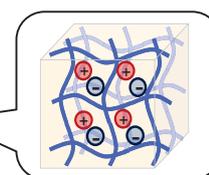
Introduction

Ionic liquids (ILs)



Gelation

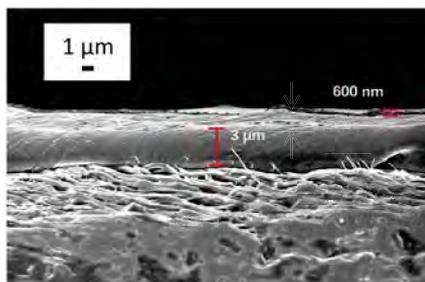
Ion gel : Quasi-liquid solid material



- Non-volatility
- High CO₂ solubility

Promising material of high performance CO₂ separation membrane

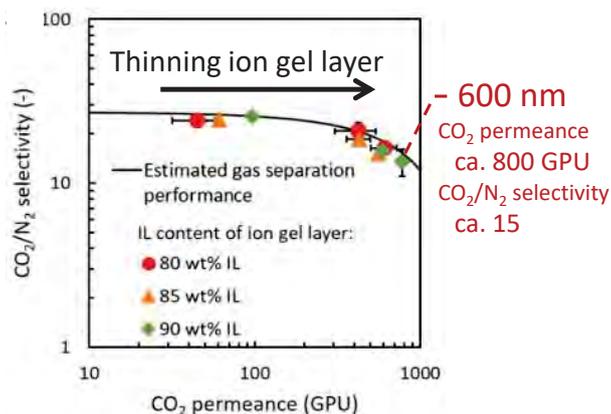
Ion gel-based Thin Film Composite (TFC) membrane (Previous work)



Ion gel layer (600 nm)
 Gutter layer (PDMS)
 Support membrane

TFC membrane with 600 nm thick ion gel layer containing 80 wt% of [Emim][Tf₂N]

Zhang, J., et al., *J. Membr. Sci.*, **663**, 5, 121032, 2022.





Challenge of previous work

Challenge

Improvement of the CO₂ separation performance of an ion gel-based TFC membrane for practical application.

(e.g. CO₂ capture from coal-fired power plant, CO₂ permeance > 1000 GPU, CO₂/N₂ > 20)

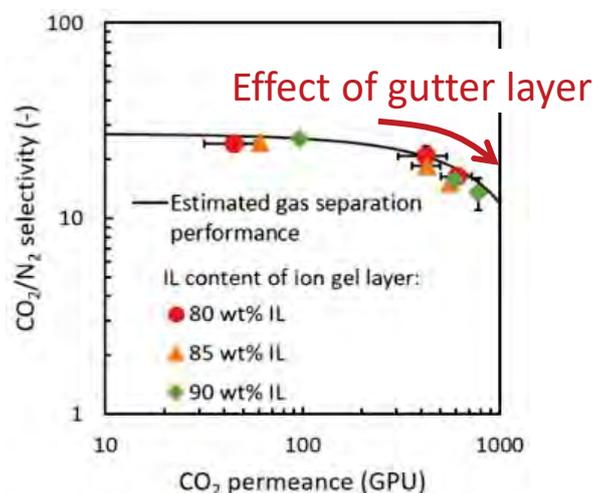
Merkel, T. C., *et al.*, *J. Membr. Sci.*, **359**, 126-139, 2010.

Problem 1 : Gutter layer

Low CO₂ permeance (ca. 1500 GPU)
limited the performance of the TFC
membrane with thin ion gel layer.

Problem 2 : Ion gel

Insufficient CO₂ permeation performance
CO₂ permeability : 747.2 barrer
CO₂/N₂selectivity : 15



Improvement of the gutter layer and ion gel is needed.

3

Membrane Engineering Lab.  KOBE UNIVERSITY



Contents

Topics

1. Fabrication of a gutter layer with high gas permeance
2. Development of tough ion gels with high CO₂ separation performance
3. Development of ion gel-based TFC membrane with high CO₂ permeance and CO₂/N₂ permselectivity

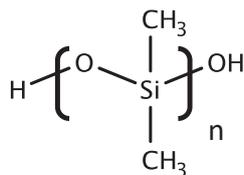
4

Membrane Engineering Lab.  KOBE UNIVERSITY



Strategy to improve the poor CO₂ permeance

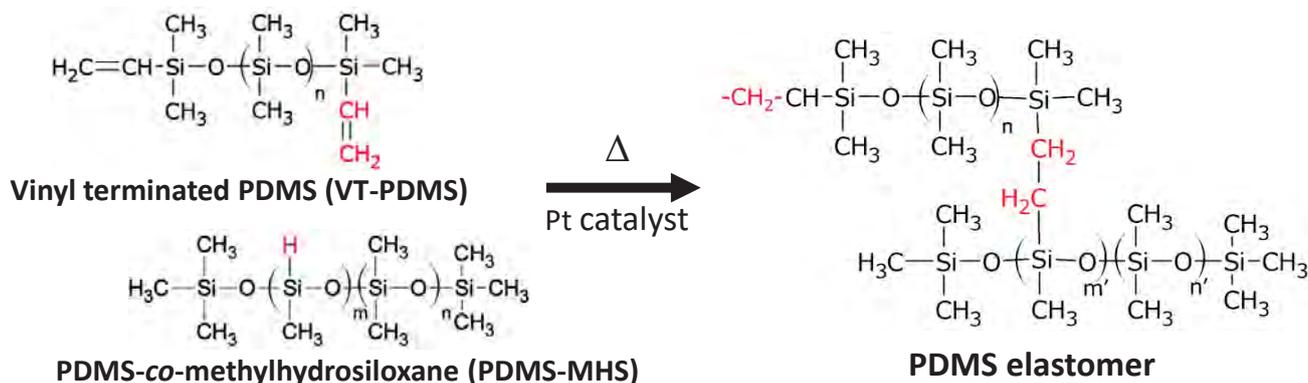
Polydimethylsiloxane (PDMS)



- High chemical stability
- High mechanical strength
- High thermal stability

PDMS is the most common material of gutter layers.

Crosslinking between precursors (Hydrosilylation)



Control the crosslinking density by changing VT-PDMS/PDMS-MHS ratio

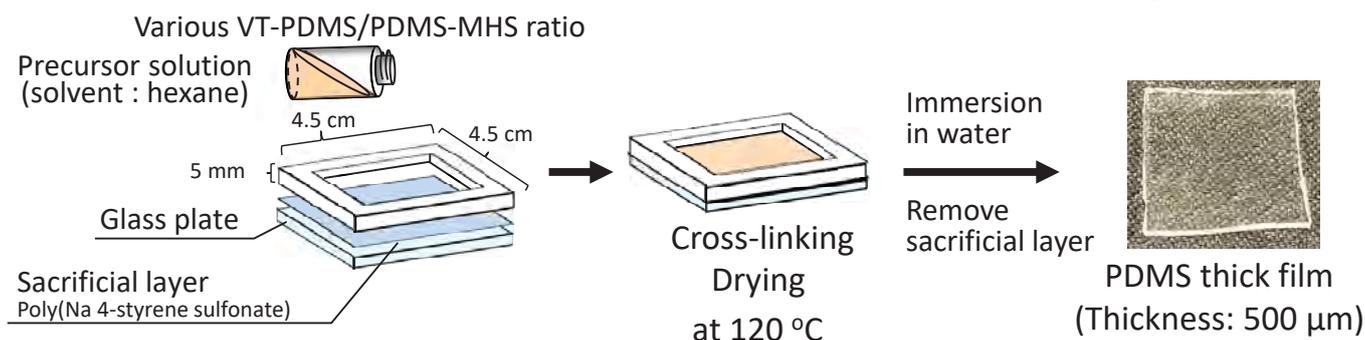
5

Membrane Engineering Lab.  KOBE UNIVERSITY

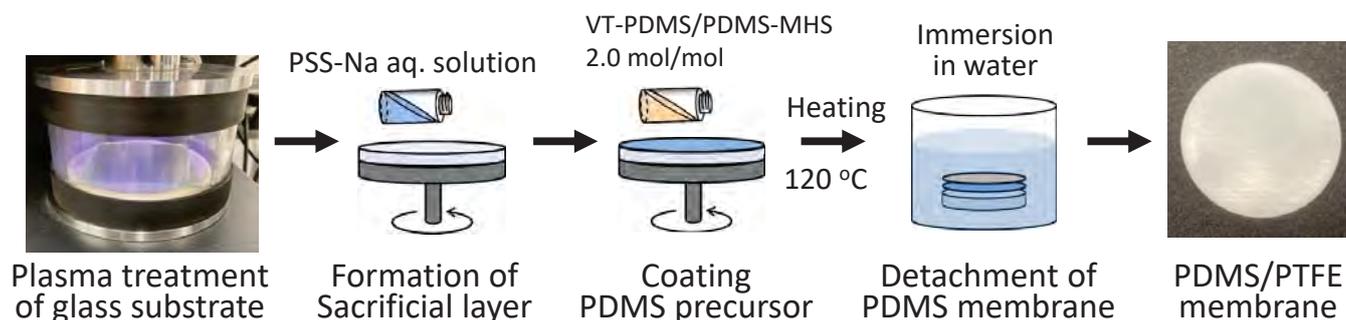


Experiment : Fabrication of PDMS gutter layer

Fabrication of PDMS **thick** film : Evaluation of crosslinking density and CO₂ permeability



Fabrication of PDMS **thin** film : Evaluation of CO₂ permeance



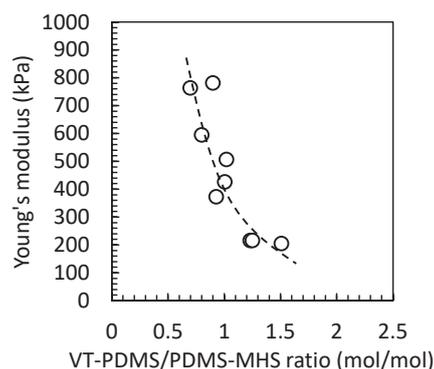
6

Membrane Engineering Lab.  KOBE UNIVERSITY

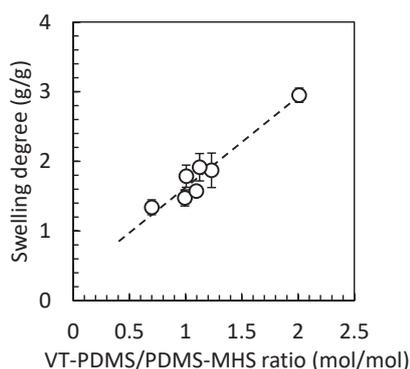


Control of the crosslinking density of PDMS

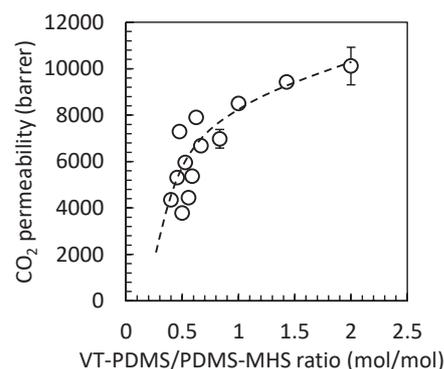
Young's modulus



Swelling test (Solvent:hexane)



CO₂ permeability



Young's modulus decreased and Swelling degree increased with increasing VT-PDMS/PDMS-MHS.

→ Crosslinking degree of PDMS decreased.

Crosslinking density was successfully controlled by changing VT-PDMS/PDMS-MHS ratio.

Previous PDMS	CO ₂ permeability
PDMS *	3800 barrer
Sylgard 184 **	3434 barrer
This work	10114 barrer

* Merkel, T. C. *et al.*, *Polym. Phys.*, 2000, 38, 415

** Fujikawa, S. *et al.*, *Chem. Lett.*, 2019, 48, 1351

1 barrer = 3.35×10^{-16} mol·m/(m²·sPa)

PDMS with high CO₂ permeability was successfully fabricated.

7

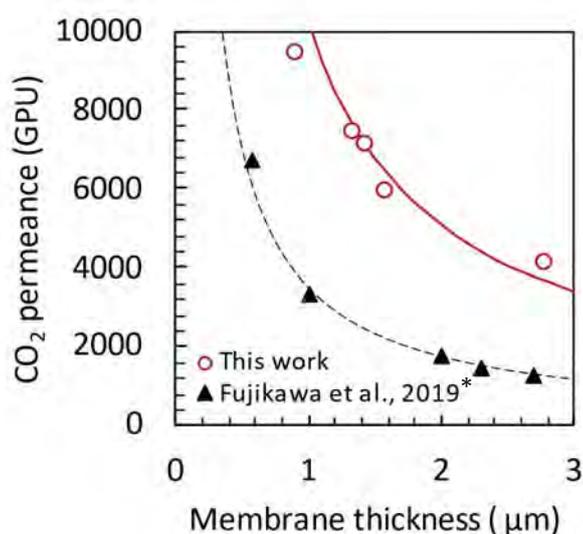
Membrane Engineering Lab.  KOBE UNIVERSITY



Thin PDMS membrane

CO₂ permeance of the loosely crosslinked thin PDMS membrane

Thickness was controlled by changing PDMS concentration of precursor solution



* Fujikawa, S. *et al.*, *Chem. Lett.*, 2019, 48, 1351.

- Experimental data was well correlated with the theoretical line estimated using the CO₂ permeability.

The thin PDMS membrane was defect-free.

- PDMS membrane with the thickness of 1 μm exhibited CO₂ permeance of ca. 10000 GPU.

The CO₂ permeance is much higher than conventional one.

The developed loosely crosslinked thin PDMS membrane could be used as a high performance gutter layer.

8

Membrane Engineering Lab.  KOBE UNIVERSITY



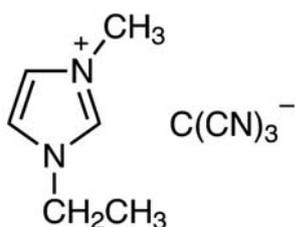
Topics

1. Fabrication of a gutter layer with high gas permeance
2. Development of tough ion gels with high CO₂ separation performance
3. Development of ion gel-based TFC membrane with high CO₂ permeance and CO₂/N₂ permselectivity



Strategy

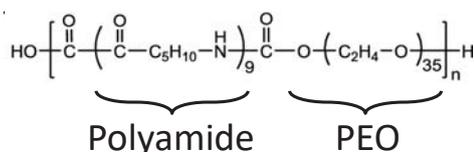
Ionic liquid [Emim][C(CN)₃] 1-ethyl-3-methylimidazolium tricyanomethanide



- High CO₂ permselectivity (CO₂/N₂ = 57^{*})
- Good solute diffusivity due to relatively low viscosity.^{*}

^{*} Tomé, L. C., *et al.*, *Phys. Chem. Chem. Phys.*, **16**, 17172-17182, 2014.

Ion gel network **Pebax 1657** Poly(nylon 6-*b*-ethylene oxide)



- PEO has good affinity with [Emim][C(CN)₃].^{**}
- Polyamide brock forms semi-crystalline structure in imidazolium-based IL.^{***}

^{**} Hwang, Y., *et al.*, *RSC adv.*, **7**, 51257-51263, 2017.

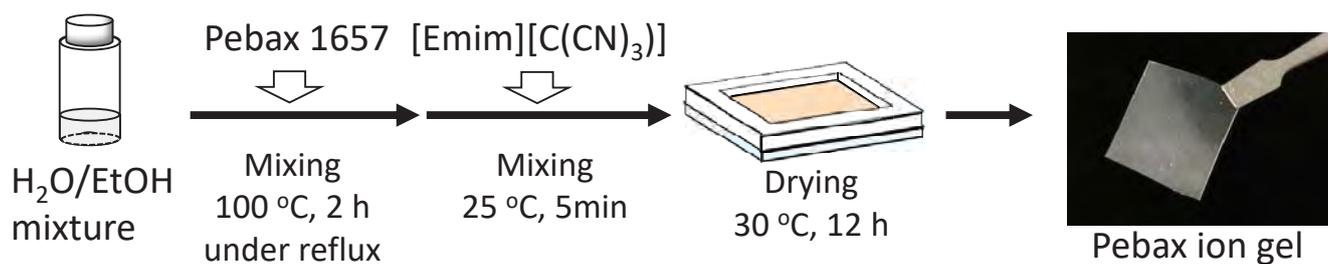
^{***} Li, M., *et al.*, *RSC Adv.*, **7**, 6422-6431, 2017.

Formation of Pebax 1657 network in [Emim][C(CN)₃] could enable to fabricate tough ion gel with high CO₂ separation performance.

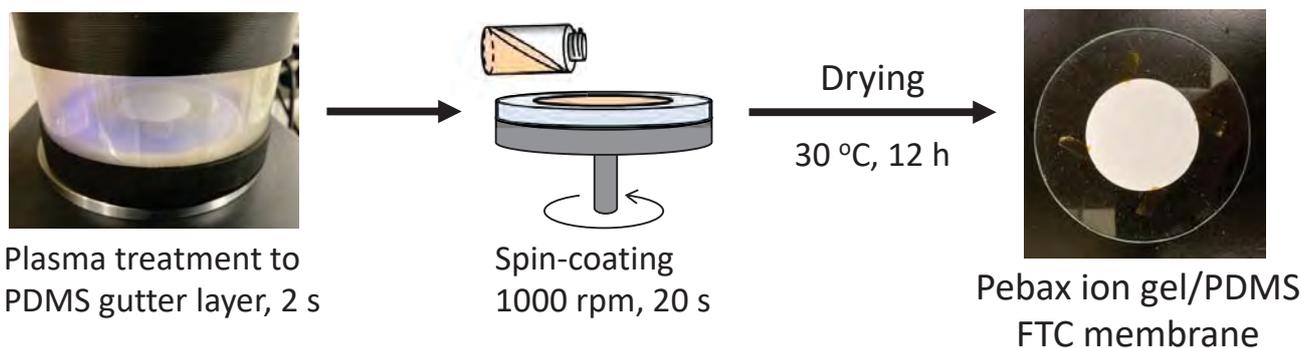


Preparation of Pebax ion gel

Pebax ion gel : Evaluation of CO₂ permeation property



Pebax ion gel-based TFC membrane : Evaluation of CO₂ separation performance

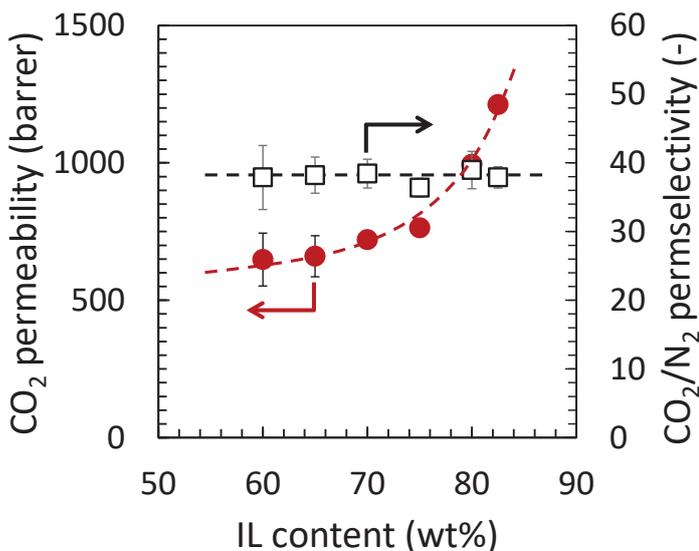


11



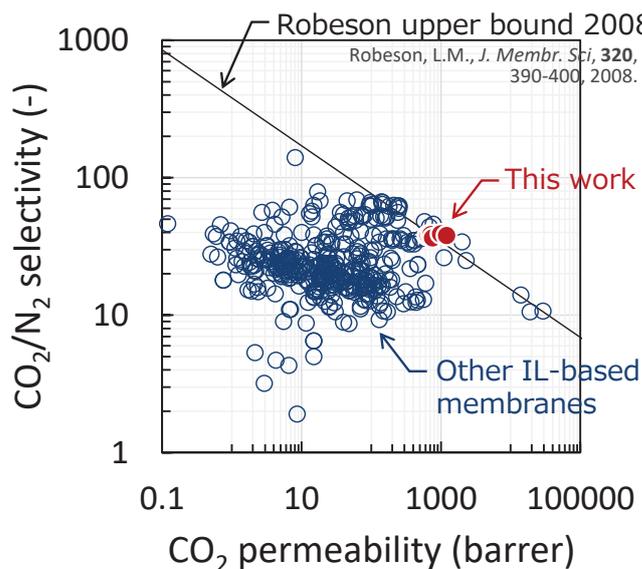
CO₂ permeation property of Pebax ion gel

Effect of IL content



- ✓ CO₂ permeability monotonically increased.
- ✓ CO₂/N₂ permselectivity kept constant.

Comparison with other membranes



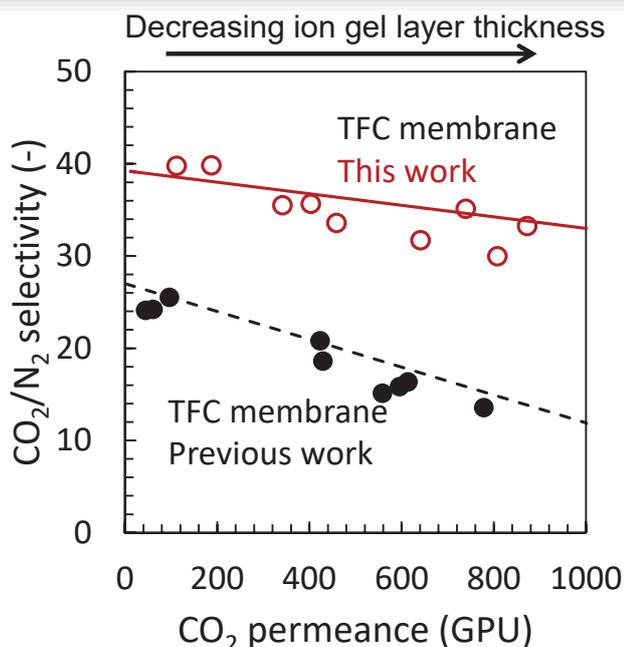
Even when the IL content is 60 wt%, the CO₂ separation performance is on the upper bound.

Pebax ion gel has great potential as a high performance CO₂ separation membrane.

12



CO₂ separation performance of TFC membrane



TFC membrane composed of thin Pebax ion gel layer and loosely cross-linked PDMS gutter layer (**This study**)

○ IL content 60 wt%

Previously developed ion gel-based TFC membrane

● IL content 80 wt%

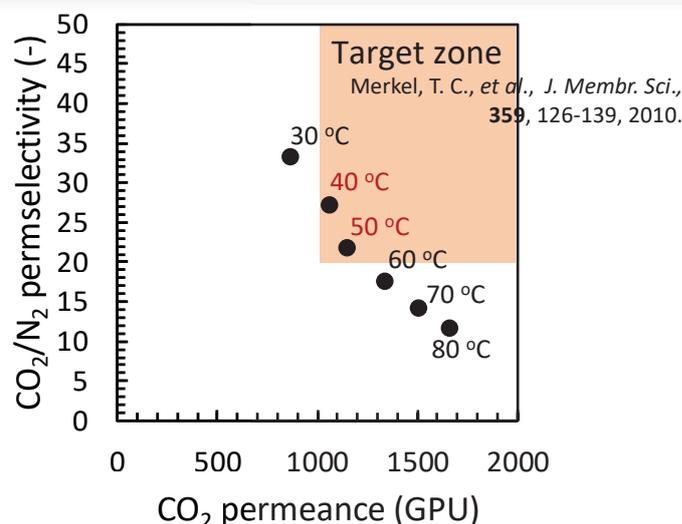
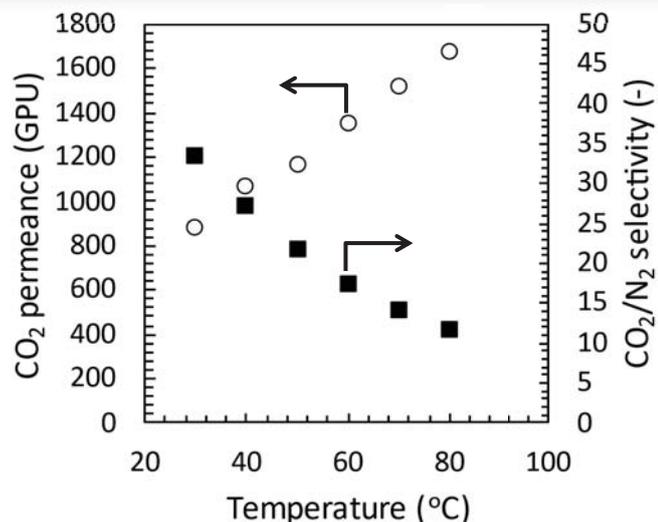
Zhang, J., et al., *J. Membr. Sci.*, **663**, 121032, 2022.

Relationship between CO₂/N₂ permselectivity and CO₂ permeance of the Pebax ion gel-based TFC membrane

Pebax ion gel-based TFC membrane has high CO₂ separation performance.



Effect of temperature on the CO₂ separation performance



CO₂ separation performance of the TFC membrane with 600 nm thick ion gel layer containing 60 wt% [Emim][C(CN)₃]

The developed TFC membrane has the CO₂ separation performance required for CO₂ capture from coal-fired power plant flue gas after desulfurization process having the temperature of 50 °C.



Summary

Ion gel-based TFC membrane with high CO₂ separation performance was successfully developed.

- PDMS membrane with high gas permeance was successfully fabricated by decreasing the cross-linking density.
- Pebax/[Emim][C(CN)₃] ion gel has high mechanical strength and great CO₂ separation performance.
- Developed ion gel-based TFC membrane has the CO₂ separation performance required for practical application.

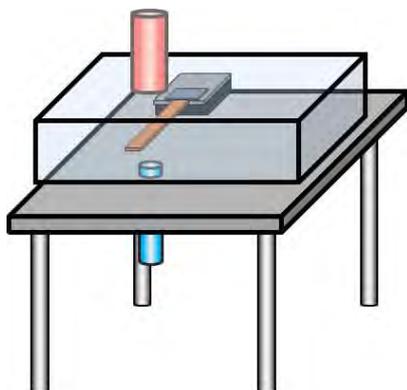
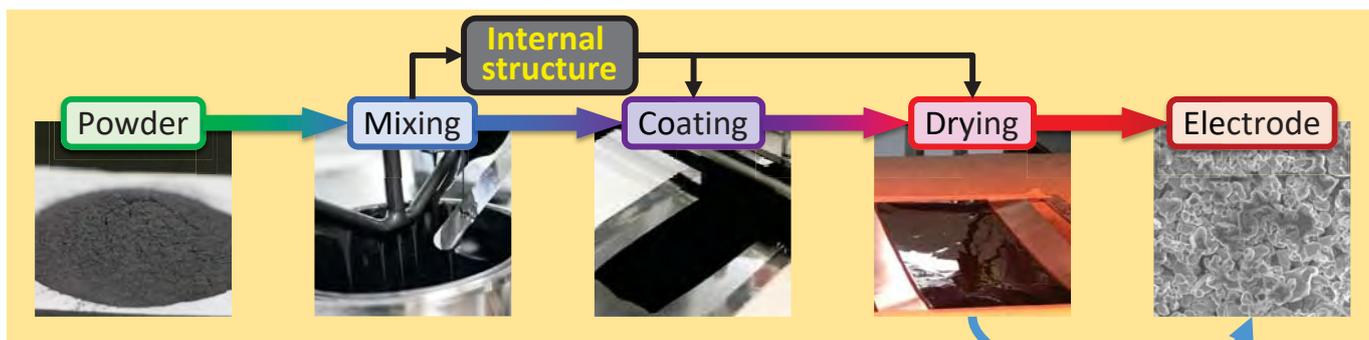


粒子含有薄膜の充填性と平滑性を両立するための乾燥プロセス

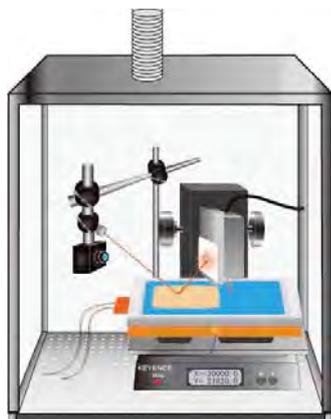
機能性薄膜Gr
菰田悦之



Characterization of drying process



Stress evolution & Evaporated mass

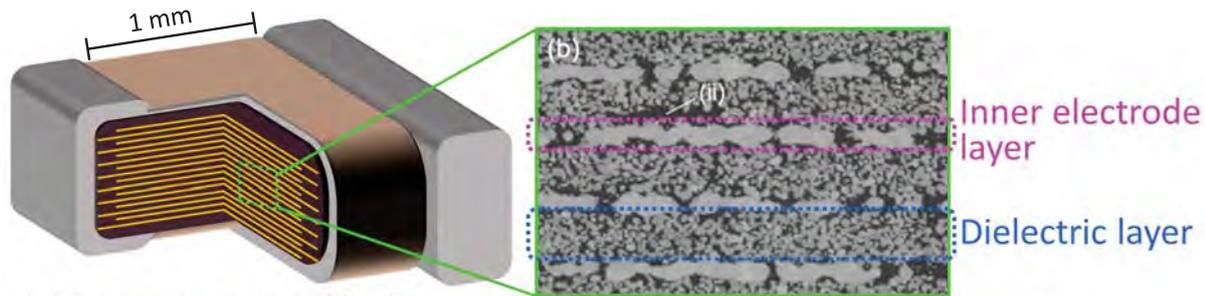


Surface roughness & Particle packing

- Drying rate
- Packing density
- Uniformity
- Crack formation
- Migration
- etc..



Multi Layer Ceramic Capacitor (MLCC)



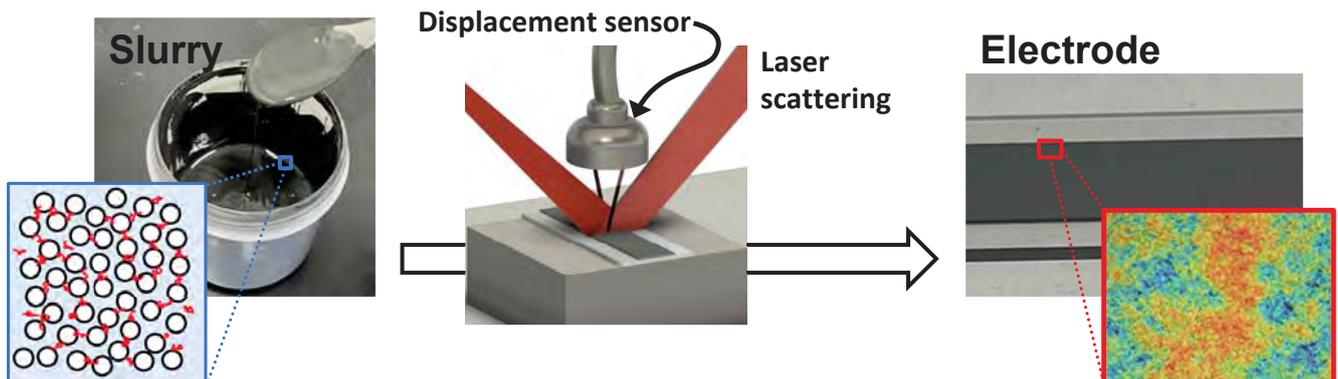
Schematic structure of MLCC

Okuma, et al., *Acta Materialia* **206** (2021): 116605

- ✓ Electronic component used to stabilize voltage in electronic devices
- ✓ Sandwich structure of dielectric and inner electrode layers
- ✓ Requirement for inner electrodes
 - **Smooth surface:** to avoid short cur between electrodes.
 - **High packing density:** to improve conductivity of electrodes
- ✓ Understanding the formation of surface structure and particle packing during drying is essential



Objectives of this study



- The relationship between slurry internal structure and particulate coating structure is always “black box”
 - The simultaneous measurements of film shrinking and surface roughness evolution has been conducted.
 - Revealed the effect of binder on the internal structure of slurry and particulate coatings





Materials of test slurries

Materials		[wt%]	[vol%]	
Particle	Ni (200 nm)	65	15	NV
Binder	EC or PVB	4	7	
Solvent	High b.p.	15	78	
	Low b.p.	16		

Ni vol. fraction in NV: 68%

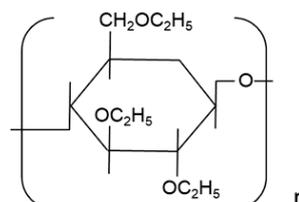
➔ Void space between Ni particles can be filled with binder after drying

NV: Nonvolatile component

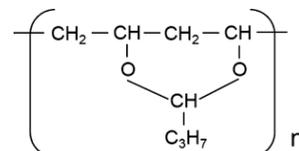
EC: Ethyl Cellulose, PVB: Poly Vinyl Butyral

Random coil size of binder

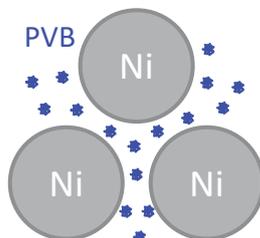
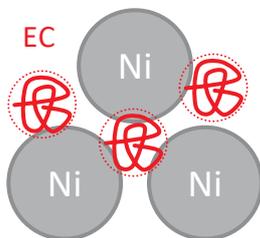
	Mw [g/mol]	Polymerization Degree, N [-]	Kohn length b , [nm]	$D (= 2b\sqrt{6/N})$ [nm]
EC	4.4×10^4	220	10 (Cellulose)	120
PVB	2.3×10^4	160	1 (PVA)	10.2



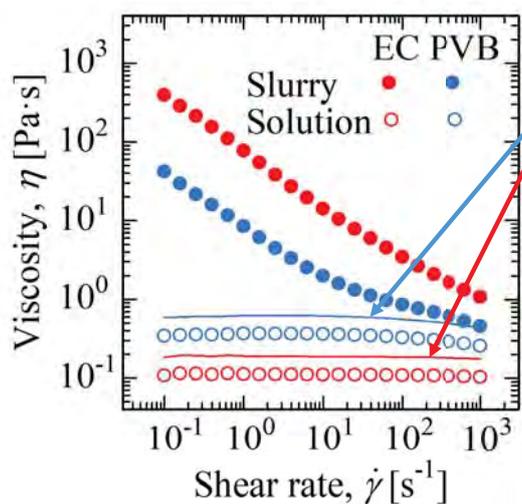
EC: Ethyl Cellulose



PVB: Poly Vinyl Butyral

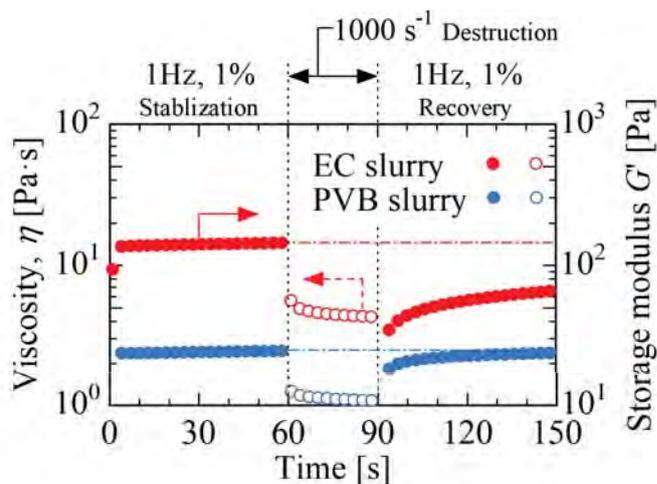


Rheological characterization of test slurries



Complete dispersion viscosity -Quemada Eq.-

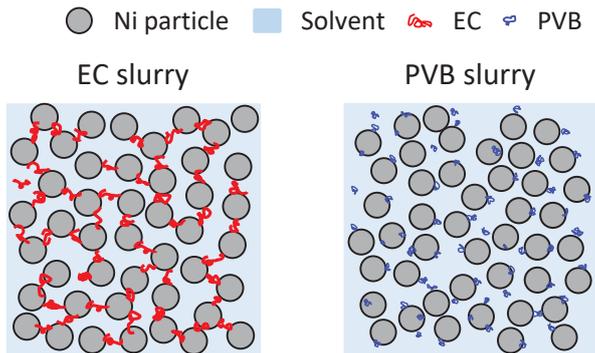
$$\frac{\eta_{slurry}}{\eta_{sol}} = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m (= 0.64)}\right)^{-2}$$



- ✓ Significant shear-thinning implies the destruction of Ni aggregates
- ✓ Ni aggregates in PVB slurry can be completely dispersed at 10^3 s^{-1} and the aggregated structure is quickly reconstructed
- ✓ Ni aggregates in EC slurry remained under shear flow and slowly recovered after shearing



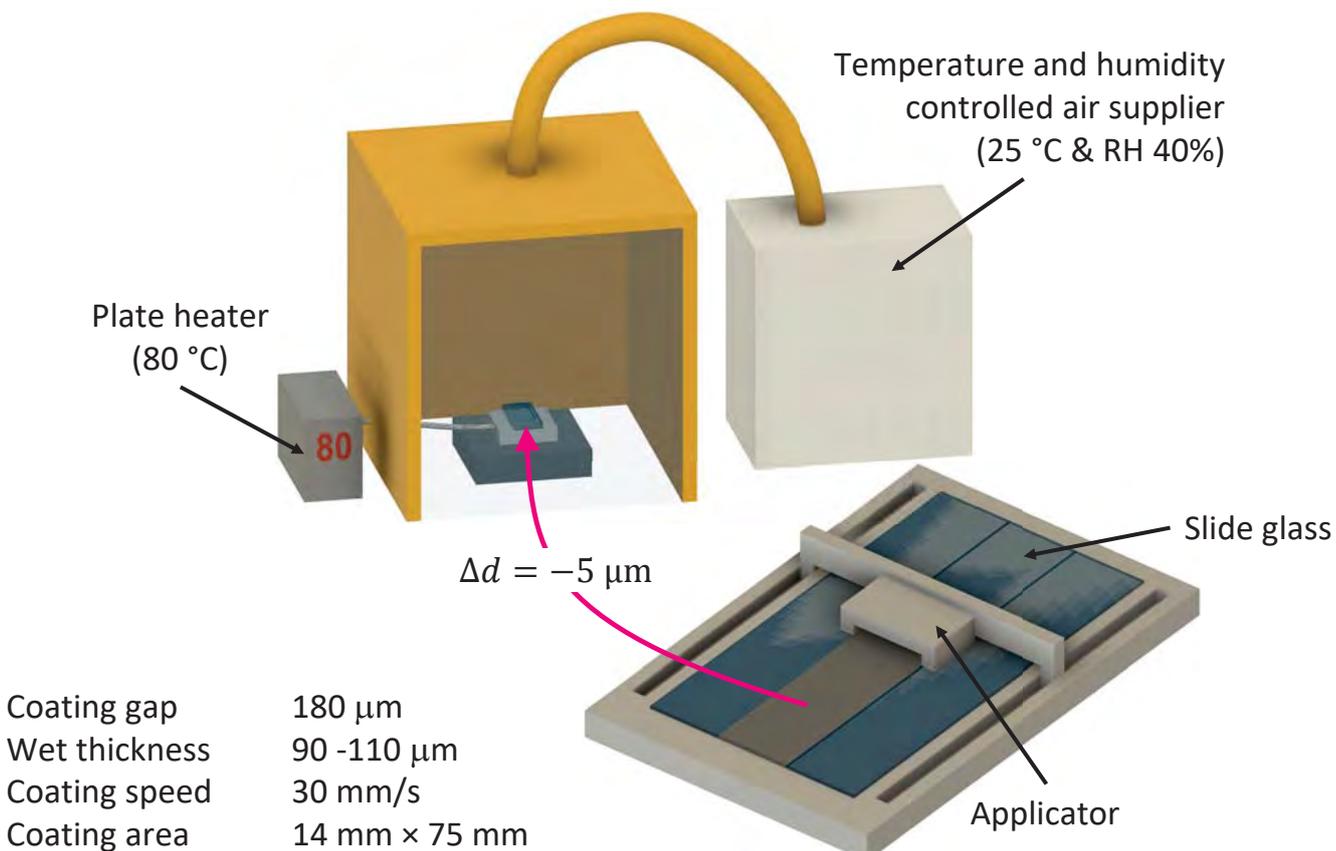
Internal structure of EC and PVB slurries



	Dispersion state of Ni particles
EC slurry	Inter-connecting structure by bridging flocculation (Binder works as a “flocculant”)
PVB slurry	Can be well dispersed by shear deformation (Binder works as a “dispersant”)

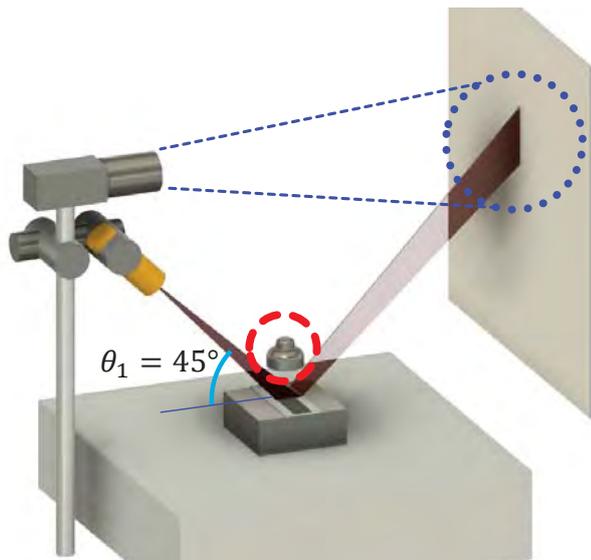


Experimental setup for coated slurry





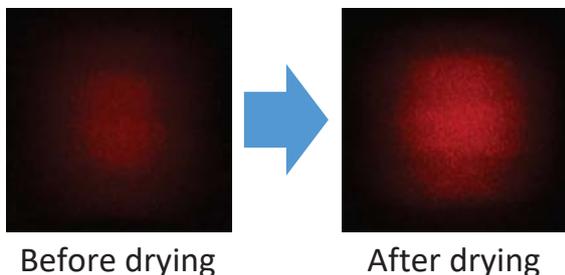
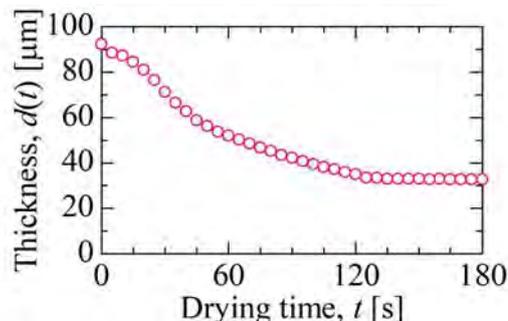
Characterization of drying process



1. Thickness change

Confocal laser displacement sensor

➔ How does the coated film shrink with the evaporation of the solvent



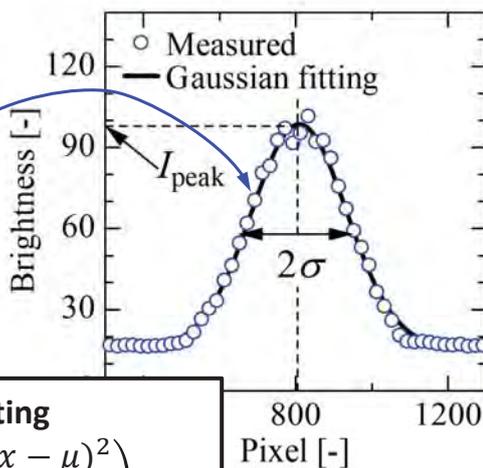
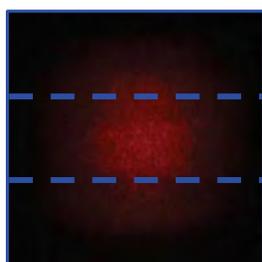
2. Structural change at the surface

Laser scattering at the surface

➔ How does the surface structure change with solvent evaporation



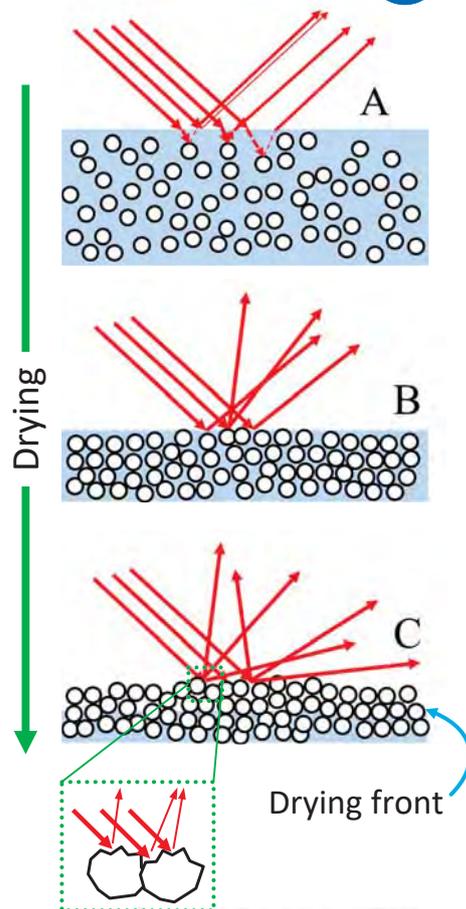
Analysis of laser scattering pattern



Gaussian fitting

$$I(x) = \frac{I_{peak}}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) + I_0$$

- **Peak brightness, I_{peak} ,** reflects the local refractive index corresponding to **local composition** at the drying surface.
- **Standard deviation, σ ,** related to the **surface roughness** and is used for nano-meter order accurate surface roughness measurement.

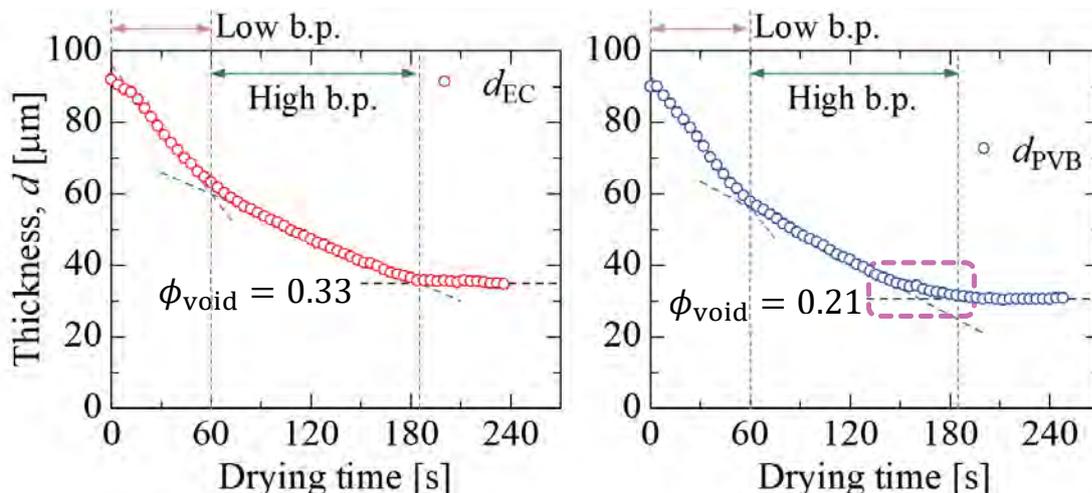




$$\phi_{\text{void}} = 1 - \frac{d_0 \cdot \phi_{\text{NV}}}{d_{\infty}}$$

11

Shrinkage of EC and PVB slurries

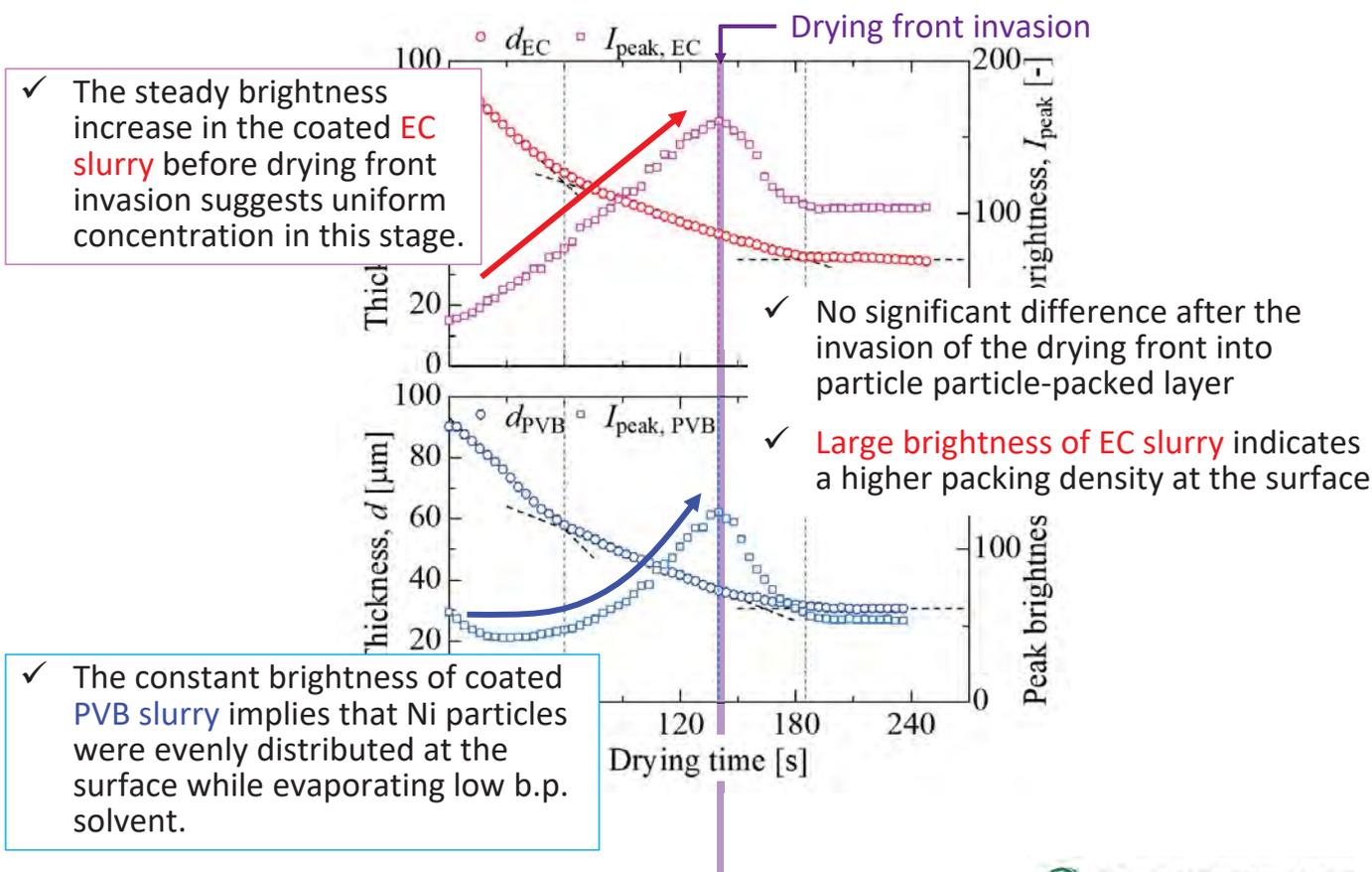


- Two constant drying rate periods correspond to the evaporation of high and low b.p. components
- Binder does not affect the drying rate.
- **EC slurry produced less packed film** after drying
- **ONLY for PVB slurry**, the falling drying rate was observed during drying of the low b.p. component



12

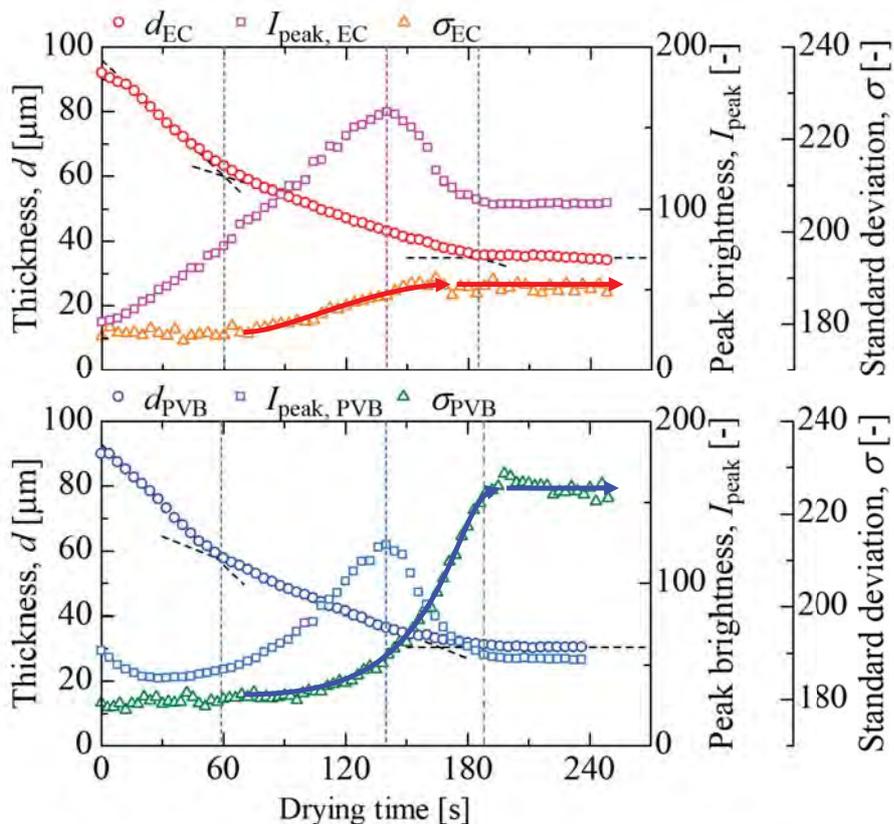
Particle concentration at the surface



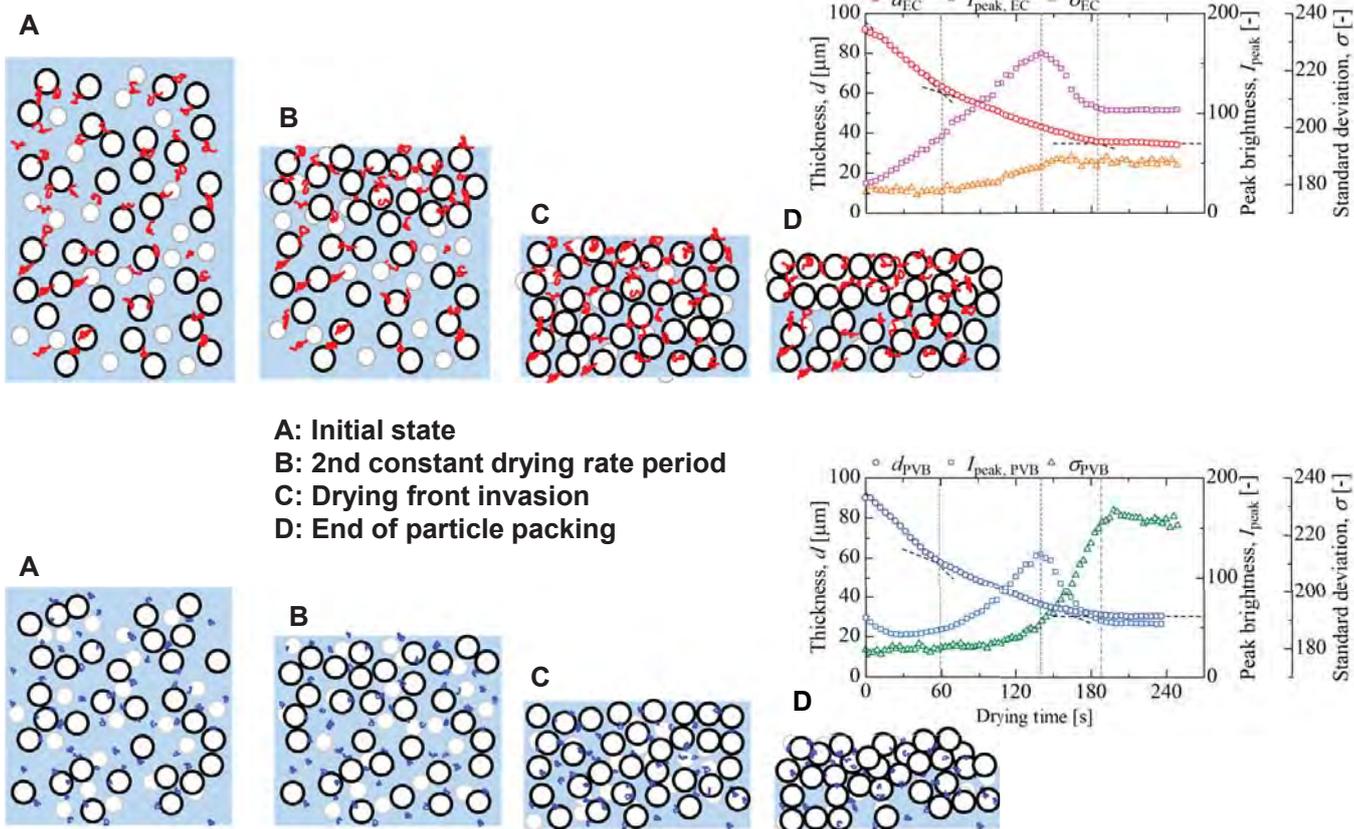


Surface roughness evolution

- ✓ Roughness begins increasing during the 2nd constant drying rate period.
- ✓ **EC slurry** showed a moderate roughness increase and reached the final state at the drying front invasion.
- ✓ **PVB slurry** exhibited a pronounced roughness increase as the drying front advanced.



Difference in particle packing process



A: Initial state
 B: 2nd constant drying rate period
 C: Drying front invasion
 D: End of particle packing



Effect of binder on the drying process

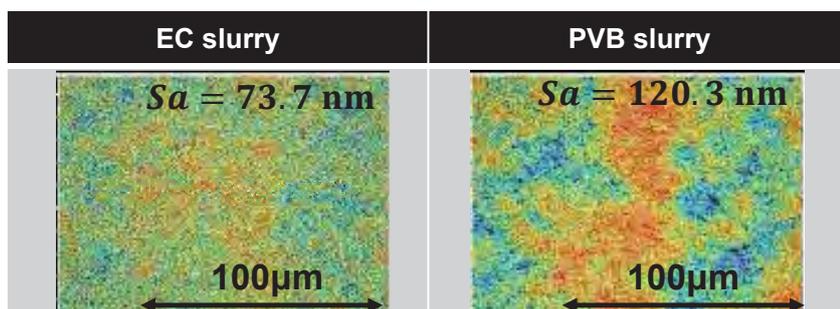
	EC slurry	PVB slurry
Rheology: Internal structure of slurry	Inter-connecting structure	Uniform dispersion
Thickness: Particles packing	$\phi_{\text{void}} = 0.33$	$\phi_{\text{void}} = 0.21$ → Drying rate reduction
Brightness: Surface concentration	Locally concentrated until the drying front invasion	No concentration in the 1st constant drying rate period
Standard deviation: Surface roughness	Roughness increased with particle concentration	Roughness increase after the drying front invasion

- What happens in the drying process of coated Ni slurries
- ✓ During the constant drying rate period, well-dispersed slurry concentrates uniformly, enhancing packing density. The onset of the falling drying rate period signals this densification.
- ✓ As particles become tightly packed, lateral capillary forces emerge, promoting particle aggregation and increasing surface roughness.



Conclusions

- ✓ **In-situ observations** revealed that Ni particle slurries with differing internal structures produced distinct surface morphologies and packing densities.
 - **EC binder** promoted inter-particle connections, inducing gel-like rheology that limited particle mobility. This led to surface accumulation, forming a flat but porous layer.
 - **PVB binder** enabled better dispersion and uniform condensation, resulting in higher packing density. However, strong capillary forces during drying caused the surface to become rough.
- ✓ Effective dispersion enhances packing density. Once loosely packed, binder-induced immobilization helps minimize surface roughness during drying.



Acknowledgement
Ms. Miyauchi, Mr. Nakaki
Sumitomo Metal Mining



第7回 先端膜工学研究センター成果発表会 2025. 7.30

拡張π共役強誘電性液晶のバルク光起電力効果と電界発光

舟橋正浩

神戸大学大学院工学研究科応用化学専攻

神戸大学先端膜工学研究センター機能性薄膜研究部門

光電子機能性ソフトマターの合成、構造・物性評価、デバイス応用

強誘電性と電子伝導

液晶 結晶薄膜
強誘電体
高分子

結晶成長の制御と機能化

分子薄膜の高度秩序化、配向制御
電子機能、センシング

拡張π電子共役系と電子・イオン分極

ドーピングと価電子制御

CNT、π共役分子の電荷ドーピング
光・熱・電子物性、熱電変換デバイス

電解質
炭素材料
ゲル

電解液のSeebeck効果、熱化学電池
エレクトロクロミック液晶

物質物理化学研究グループ

教授 舟橋正浩
准教授 堀家匠平
助教 秋山吾篤
助手 小柴康子



液晶相で電子伝導と他の物性をカップリング

強誘電性液晶のバルク光起電力効果

双極子配向

電気分極

イオン分極

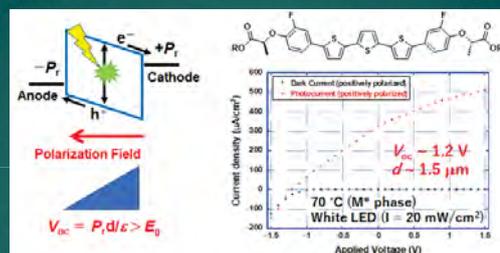
液晶性電気化学機能材料

Polymerizable moiety
Redox-active part
Ion-recognition part
Nanosegregation

Electrochromism

Neutral state ↔ Dianion state

ナノ相分離



強誘電性

キラリティー

フォトニックバンド

円偏光発光液晶材料

Right-handed helix
Periodicity: p
Selective reflection

Reflection of R-CPL / R-CPL confined
Transmission of L-CPL / L-CPL emission

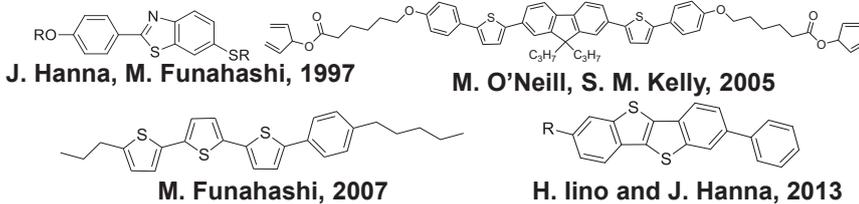
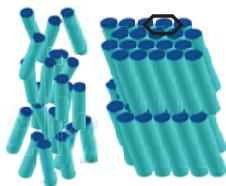
周期構造

らせん構造

液晶が半導体になる！

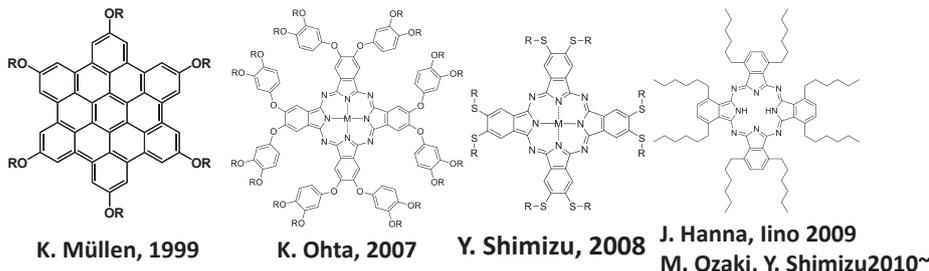
1. 棒状分子からなる液晶相 (ネマティック相、スメクティック相)

高次のスメクティック相 – 高キャリア移動度 ($\sim 0.1 \text{ cm}^2/\text{Vs}$) FET への応用
 ネマティック相、コレステリック相 – 偏光電界発光素子、円偏光発光素子



2. 円盤状分子からなる液晶相 (カラムナー相)

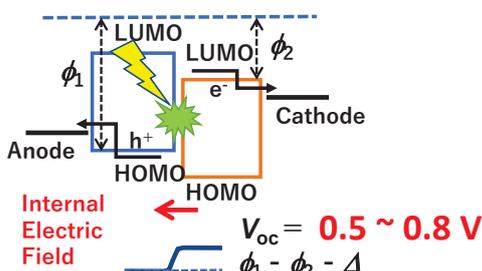
1次元伝導 ($10^{-3}-10^{-1} \text{ cm}^2/\text{Vs}$), 配向薄膜の作成、FET、太陽電池



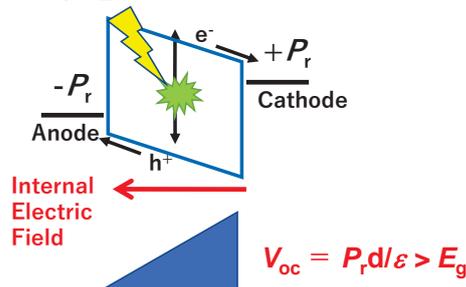
溶液プロセスによる薄膜作製、配向処理による特性向上

強誘電体におけるバルク光起電力効果

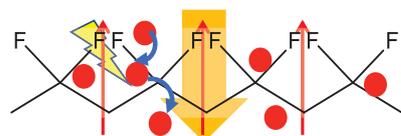
強誘電体のバルク光起電力効果 – Beyond Shockley-Quiesser Limit 接合での局所電界 → 自発分極による内部電界



従来のp-n接合による太陽電池

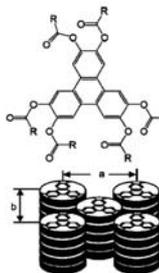


強誘電体の光電力効果



色素添加 PVF
 $V_{oc} \sim 10^4 \text{ V}$
 $\eta \sim 0.25 \% (I < 0.1 \text{ nA/cm}^2)$

H. Sasabe et al, *Polym. J.*, **13**, 967-973 (1981).



トリフェニレンヘキサエステル
 結晶性薄膜

$P_r = 20 \text{ nC/cm}^2$
 $\eta \sim 0.5 \% (I < 5 \text{ nA/cm}^2)$

A. Sugita, K. Suzuki, S. Tasaka, *Phys. Rev. B*, 2004, **69**, 212201.

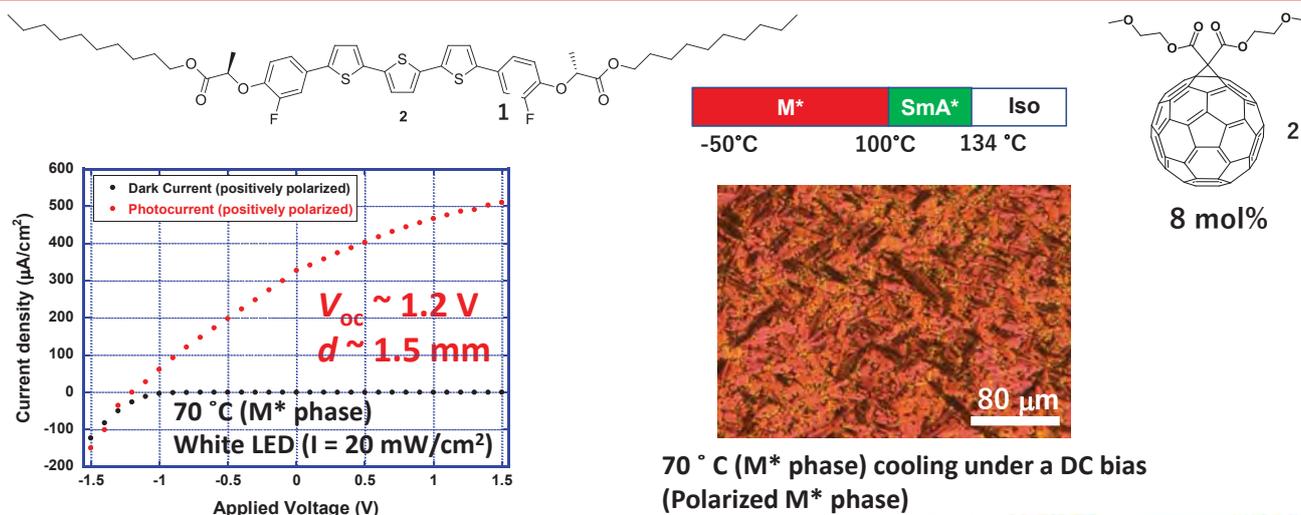
バルク光起電力効果の主な問題点

- ・絶縁体なので、光電流が低い→エネルギー変換効率が低い
- ・バンドギャップが広い→長波長側の可視光を利用できない
- ・有機強誘電体：分極率低い→内部電界弱い
- ・強誘電相の温度領域が低い

検討されているアプローチ

- ・シフトカレント：有機電荷移動錯体、BiFeO₃、CuI（二次元物質）
 - 温度領域、分子・結晶凝集・配向制御
 - 量子力学的効果（サイエンスとしては面白い）
 - 結晶・膜レベルの評価、デバイス化は相当大変
- ・キラルアンモニウム塩
 - 一発ネタかも...
- ・拡張π共役強誘電性液晶：オリゴチオフエン、サブフタロシアニン
 - キラル側鎖の導入により対称性を崩す（舟橋GR）
 - 温度領域、低エネルギー変換効率
 - 分子設計の自由度は大きい。デバイス化も容易

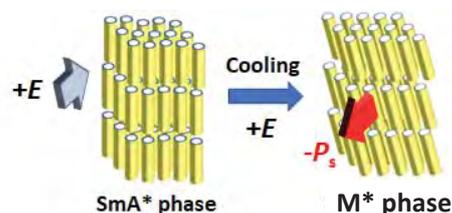
乳酸エステルを拡張π共役系に導入



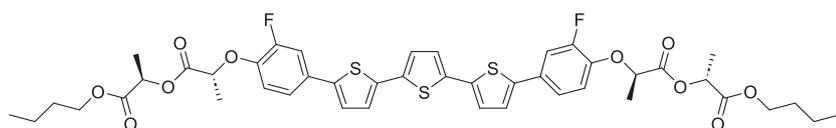
直流電圧印加下、SmA*相からM*相へ冷却
→ 分極誘起・固定

M. Funahashi, *Mater. Chem. Front.*, 5, 8265-8274 (2021).

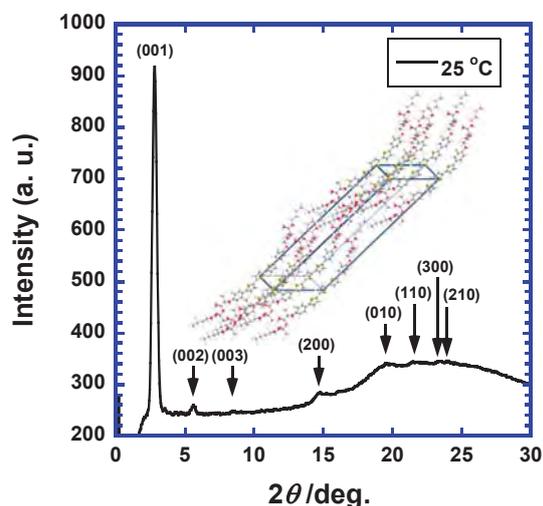
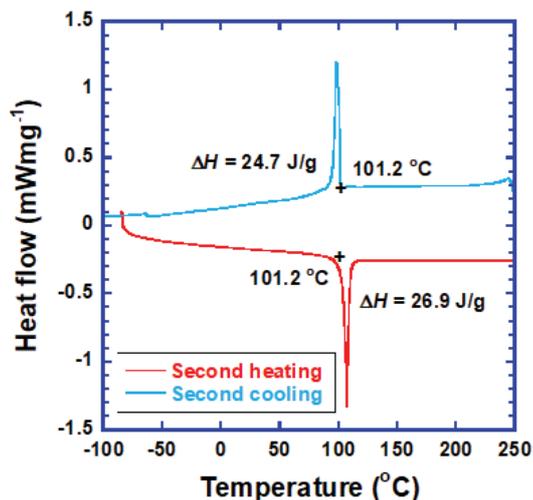
室温では、分極緩和→光起電力効果消失



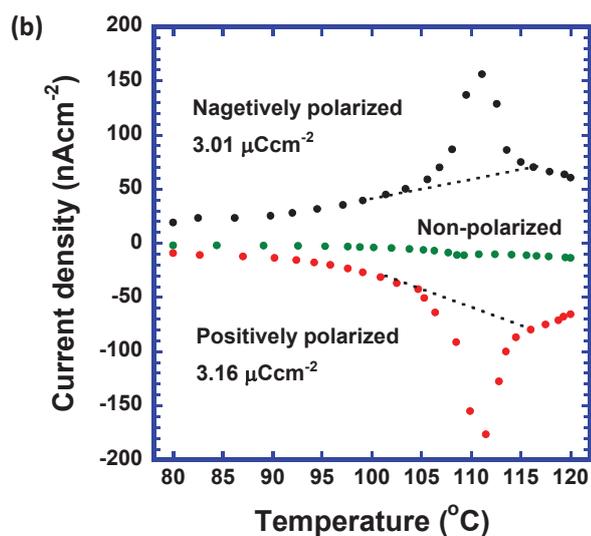
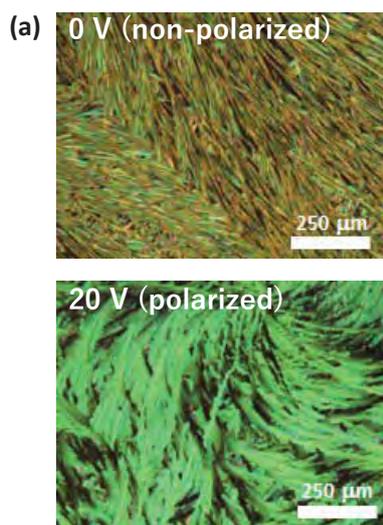
乳酸ダイマーを側鎖に導入



側鎖の運動性を制限 → 分極緩和を抑制



分極を間接的に確認

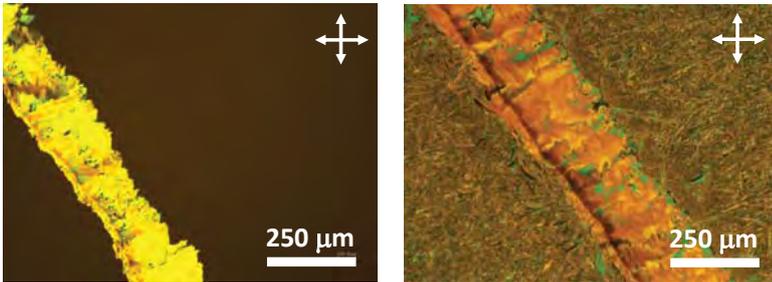


偏光顕微鏡観察
分子配向・分極 → 構造欠陥消失

熱刺激電流測定 → 分極を間接的に推定
 $P_s \sim 3 \mu\text{Ccm}^{-2}$

分極を間接的に確認

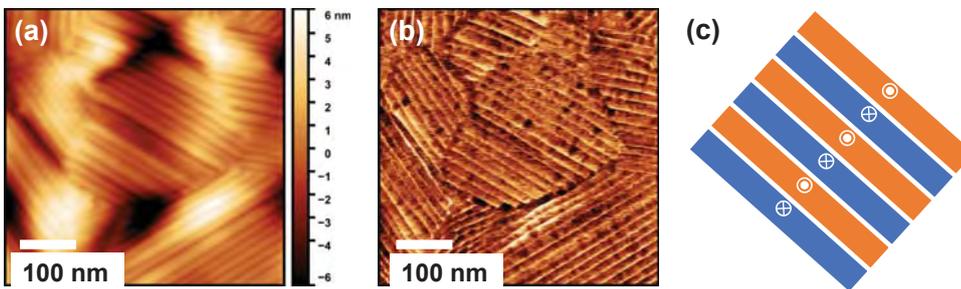
偏光顕微鏡観察



相転移直上で800 V印加
→ 電界誘起相転移

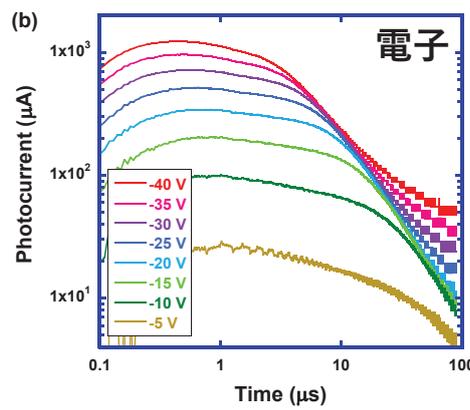
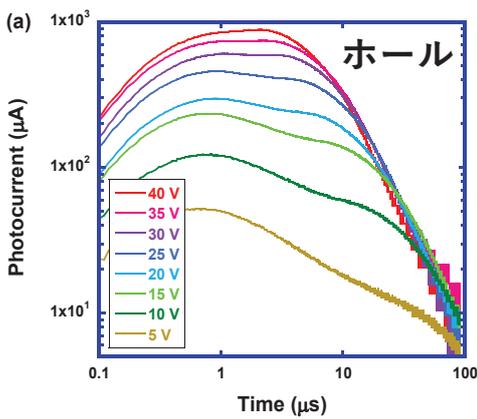
M*相に冷却
→ 分子が電界と垂直に配向

原子間力顕微鏡 (AFM)

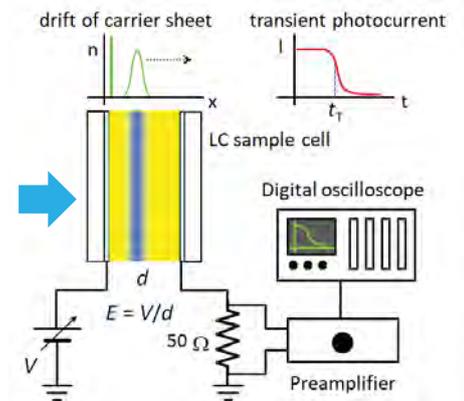


スピンコート膜表面
→ 分極ドメイン?

TOF法によるキャリア移動度測定



Time-of-Flight法

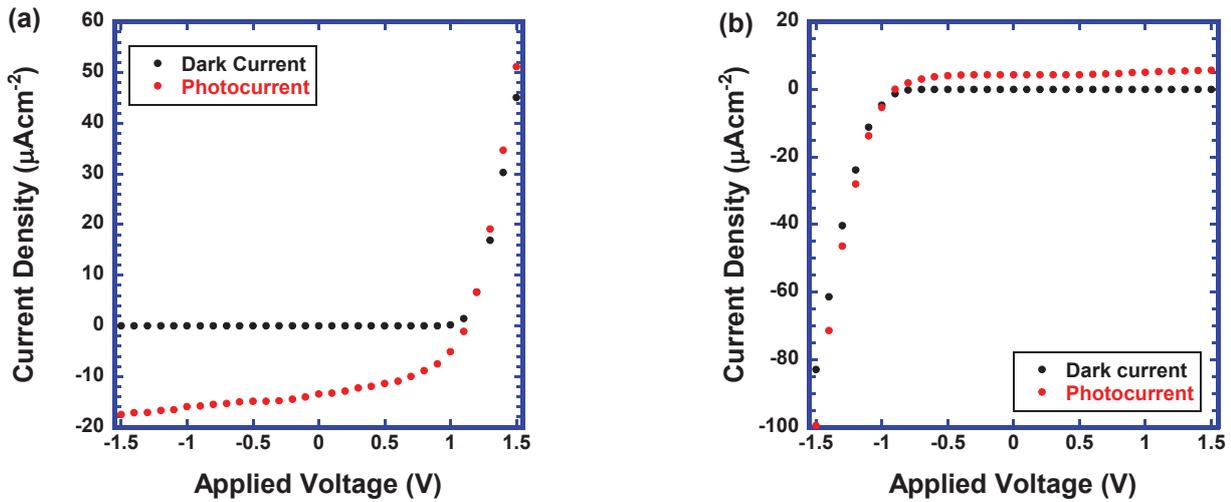


試料厚さ 4 μm

$$\mu_h, \mu_e \sim 1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1} \text{ at r. t.}$$

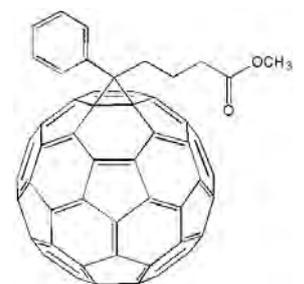
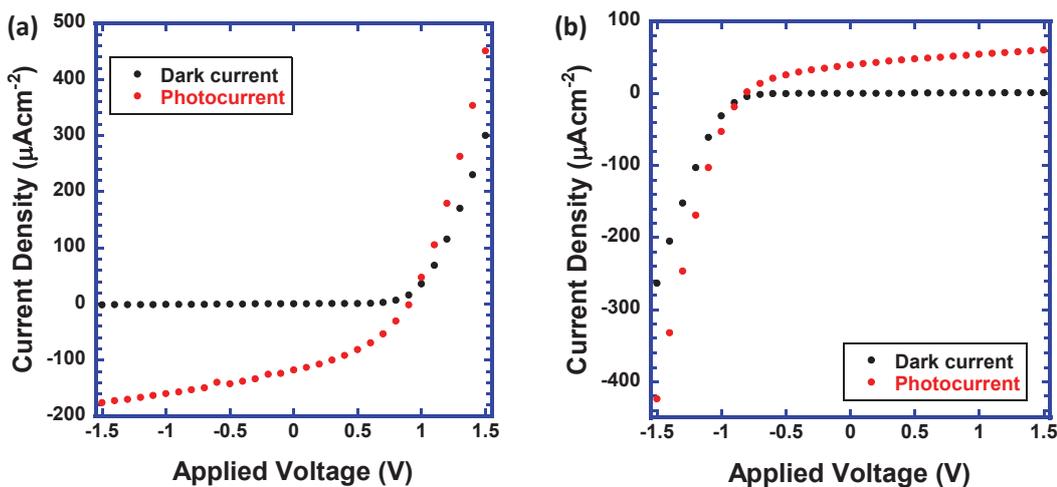
数 μmの距離を電子・ホールが捕まることなく等速運動できる
室温でも良好なキャリア移動度を保持できる

バルク光起電力効果



白色光 (white LED) 20 mWcm^{-2} 照射
 室温で光起電力効果、分極反転により極性反転
 $\eta = 0.035 \%$, $V_{oc} = 1.1 \text{ V}$, $J_{sc} = 8.8 \text{ } \mu\text{Acm}^{-2}$, $FF = 0.48$

バルク光起電力効果

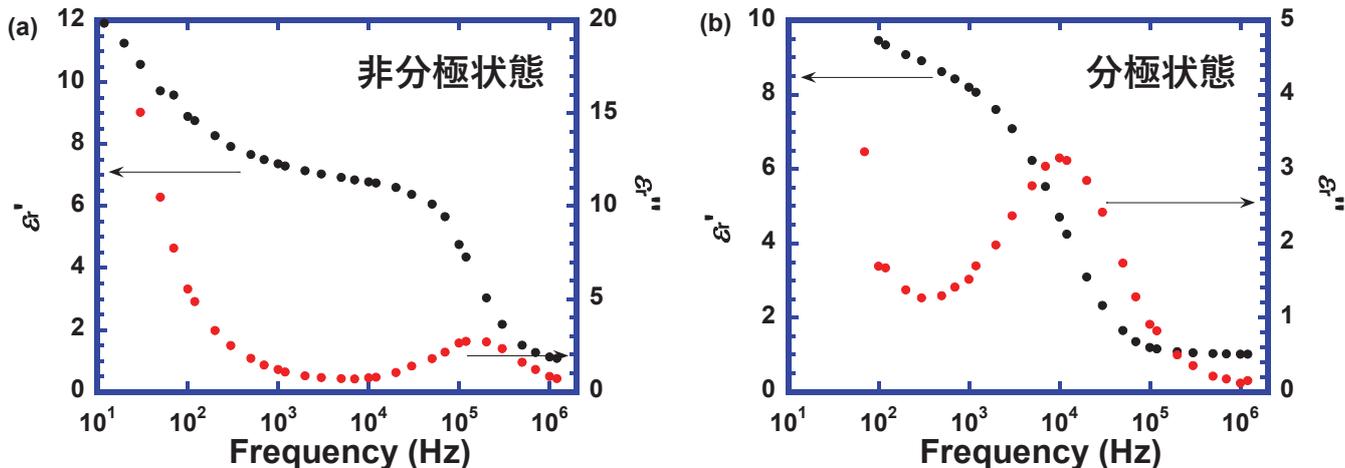


PCBM 8wt%

$V_{oc} = 0.9 \text{ V}$, $I_{sh} = 124 \text{ } \mu\text{Acm}^{-2}$, $FF = 0.39$, $\eta = 0.21 \%$ 室温

アクセプター分子添加により効率は上昇 (短絡電流増大)
 FF 、 V_{oc} は減少 (構造の乱れ?)

誘電緩和スペクトル

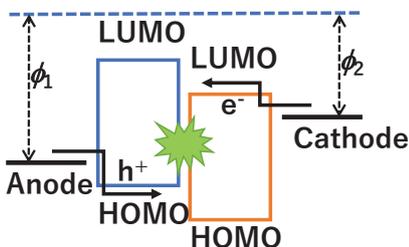
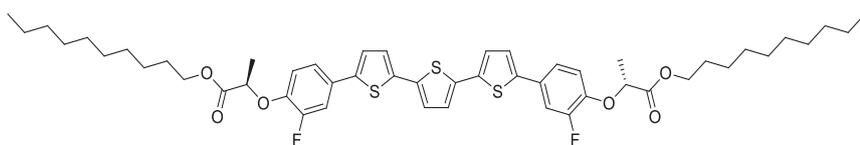


分子回転（双極子の回転）による緩和過程（ $\sim 10^5$ Hz）
 分極状態で、低周波数側にシフト → 分極緩和の抑制

M. Funahashi, Y. Koshiba, S. Horike, S. Uemura, *Sc. Tech. Adv. Mater.*, **26**(1), 2525058 (2025).

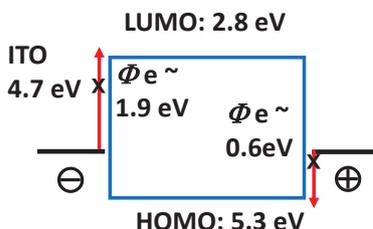
- ・ 分極の増大、 π 電子共役系の拡張、デバイス構造の改良（空間電荷の排除）

強誘電性液晶からの偏光電界発光



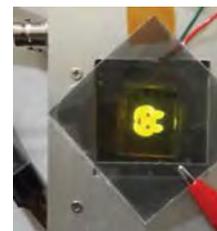
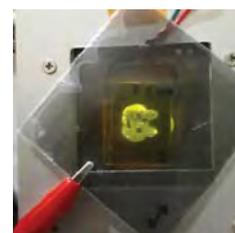
従来のOLED: 非対称構造

$d \sim 100$ nm



強誘電性OLED: 対象構造

$d \sim 2$ μ m



直線偏光発光

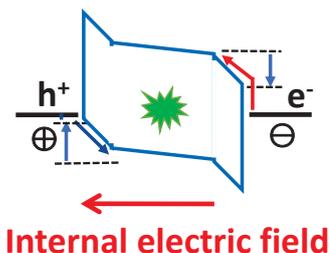
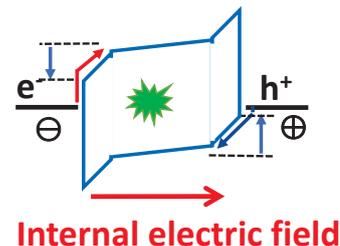
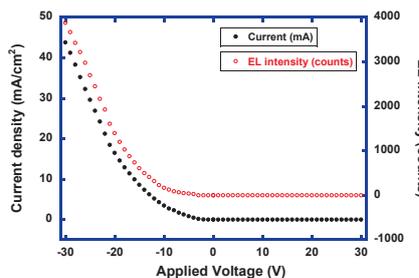
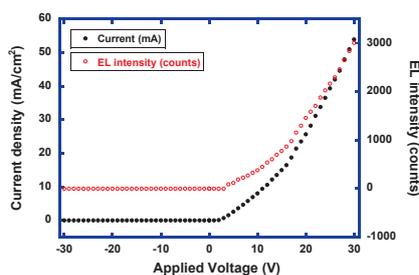
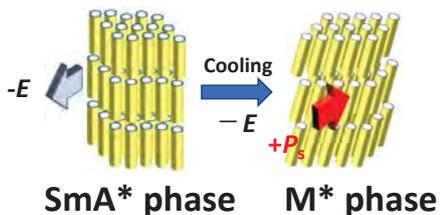
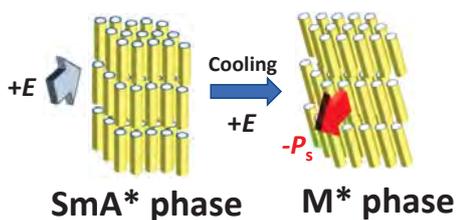
ITO/LC/ITO

$d \sim 2$ mm

$V = 30$ V

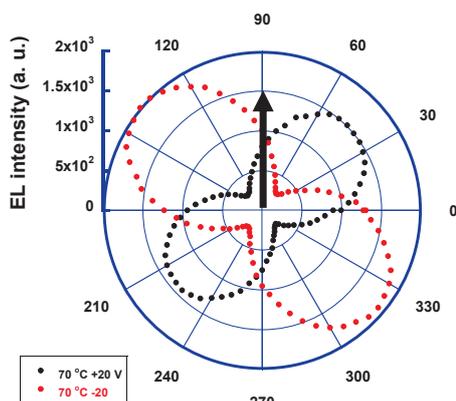
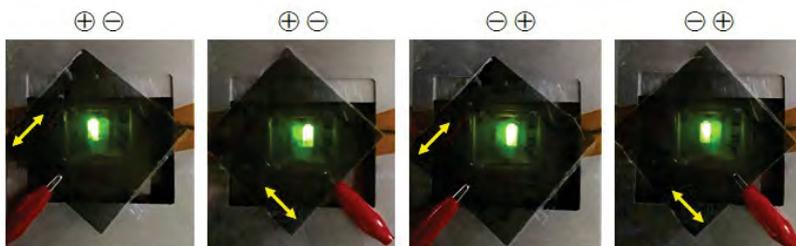
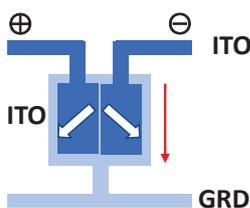
分極状態での電界発光一分極誘起電界発光

整流性の極性が反転



M*相：分極発生 → 分子が一方向に傾く
 界面での分極電界によりキャリア注入障壁が低減 → 整流性
 分極反転により、整流性の極性も反転

強誘電性電界発光素子における偏光面の回転



摩擦転写法 → 液晶分子を一軸配向
 分極を反転すると、分子配向方向が90度回転
 偏光二色比 ~ 7 : 1
 閾値電圧 ~ 5 V (膜厚 2 μm デバイス)

課題と取り組み

- 分極反転に昇温・冷却が必要
 → 低粘性液晶の開発
- 薄膜化による閾値電圧の低減、発光輝度の向上

M. Funahashi, Y. Mori, *Mater. Chem. Front.*, 4, 2137 (2020).

まとめ

1. 拡張 π 共役強誘電性液晶の設計・合成と評価
2. 室温でのバルク光起電力効果の実現
3. 直線偏光電界発光素子の偏光面の動的制御
4. 整流性の極性反転
5. 高分子基板上への薄膜作製

謝辞

小笠原敏晶記念財団、福岡直彦記念財団、フジシール財団、フジクラ財団

香川大学創造工学部 上村忍教授（液晶薄膜のナノ構造評価）

鶴町徳昭教授（円偏光発光材料）

神戸大学大学院工学研究科 北村雅季教授（IGZO薄膜の製膜）



2025/07/30

バイオものづくりを加速する 合理的酵素設計戦略

Rational Enzyme Design Strategies to Accelerate Biomanufacturing

森 裕太郎

神戸大学大学院工学研究科 応用化学専攻
バイオ生産工学研究室
助教

Yutaro Mori

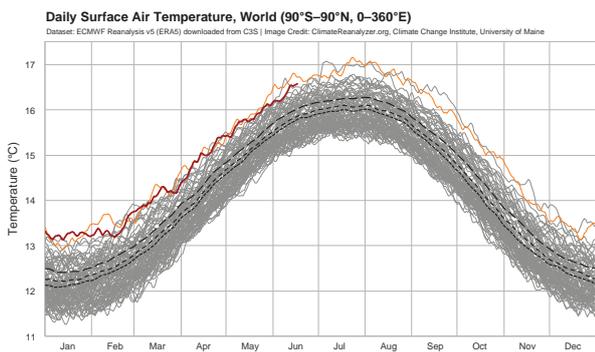
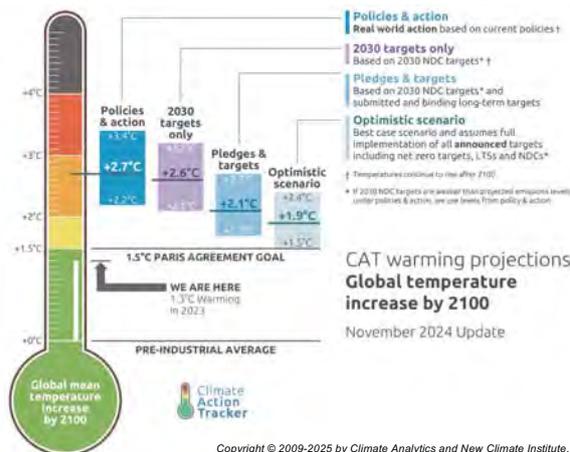
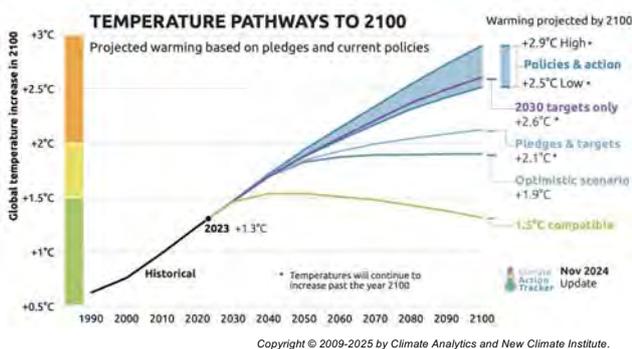
Department of Chemical Science and Engineering,
Graduate School of Engineering, Kobe University, Japan
Assistant professor



地球温暖化・気候変動・異常気象

Background

2



Climate Reanalyzer (n.d.). Daily Surface Air Temperature. Climate Change Institute, University of Maine. Retrieved June 23, 2025, from <https://climateanalyzer.org/> CC BY-SA 4.0

「たとえ一時的であっても1.5°Cを超えることは、不可逆的な影響、たとえば臨界点につながる」

「地球温暖化は終わり地球沸騰化の時代が到来した」
(次の氷期は5万年後)

持続可能社会の実現に向けた
研究・社会実装の加速が求められている

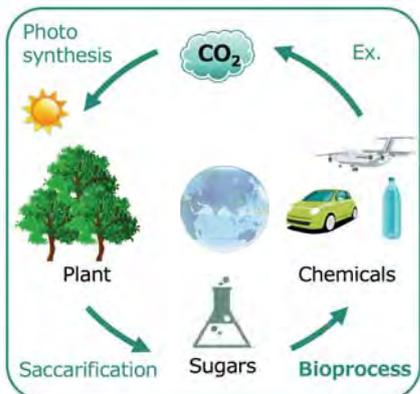


本格的なバイオエコノミー世界の到来

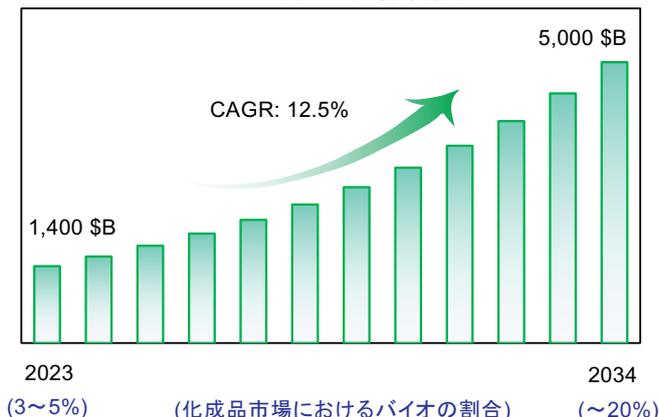
Background

3

Circular bioeconomy society



バイオ化成品の市場規模予測



SDGs 「Sustainable Development Goals (持続可能な開発目標)」の設定 (2015年、国連)

SDGsへの取り組みが世界経済の拡大を支えるとして各目標を達成すべく全世界で様々な取り組みが行われている。

バイオエコノミーの急速な拡大：

バイオテクノロジーの急速な発展により、産業規模は2025年に1.7兆ドル(約252兆円)、2034年には5.0兆ドル(約730兆円)に成長する見通し。

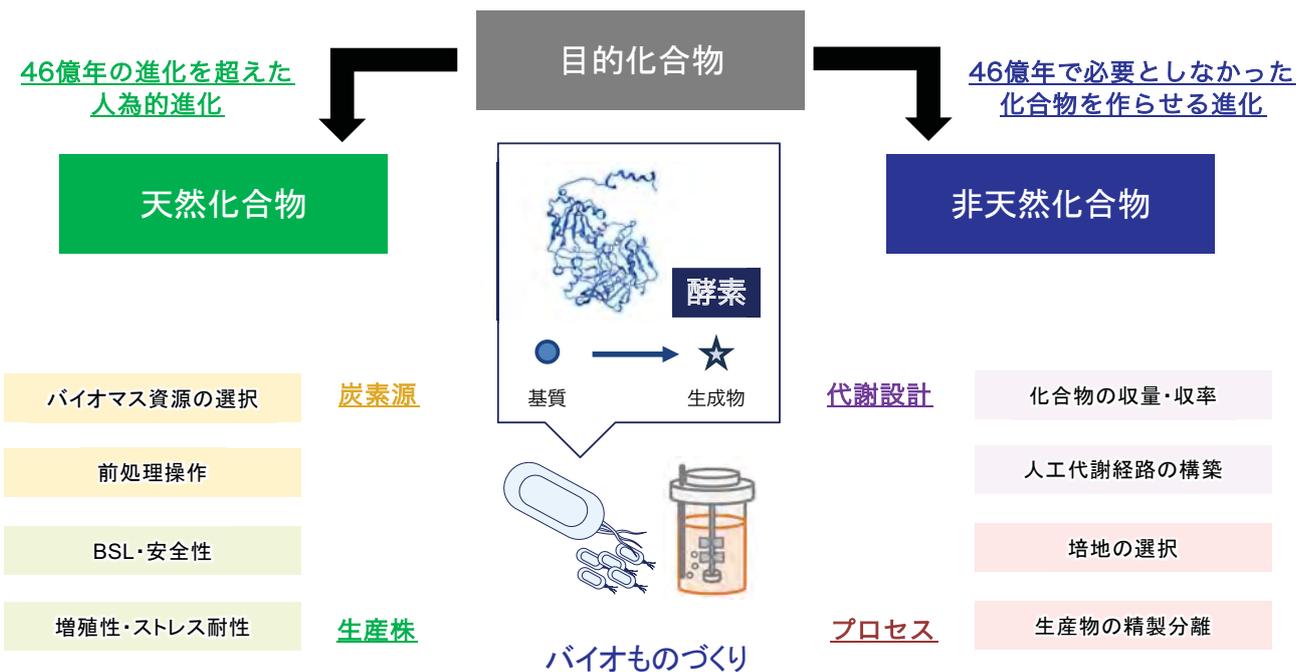
農業、健康、工業の幅広い産業に多大なインパクトを与えている。
バイオとケミカルの融合による持続可能な循環型社会の構築が必要。



タンパク質工学を軸にしたバイオものづくり

Background

4



バイオものづくりのための基幹となる「目的化合物を生成するための反応」、これを触媒するタンパク質である酵素に着目

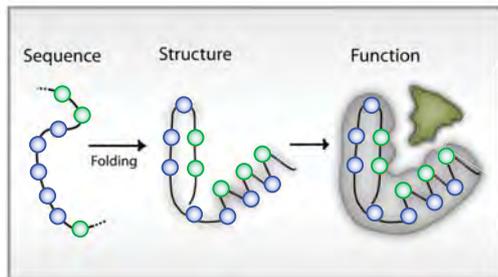


タンパク質工学：人工的進化による機能改変

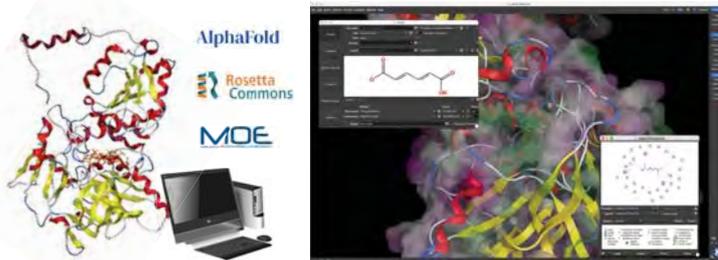
Background

5

タンパク質の階層構造
「配列→構造→機能」



ランダム (10¹⁰⁰) からラショナル(10²⁻³)へ



ヒトが利用しようとする、
不十分な酵素機能・性能であることが多い

「タンパク質工学」

酵素機能の鍵となるアミノ酸残基を
他のアミノ酸残基へと置換・付与することで、
タンパク質の機能を改変する

基質親和力 K_m (基質特異性)	触媒活性 k_{cat} (単位時間の反応回転数)
反応特異性	耐熱性・長期安定性
可溶性・発現量	副生成物の回避

任意の機能を向上させる酵素変異体を迅速に開発・獲得するための
アルゴリズム・アプローチ手法の構築



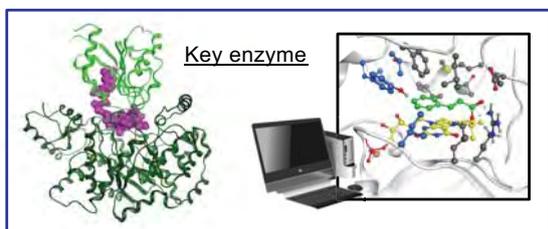
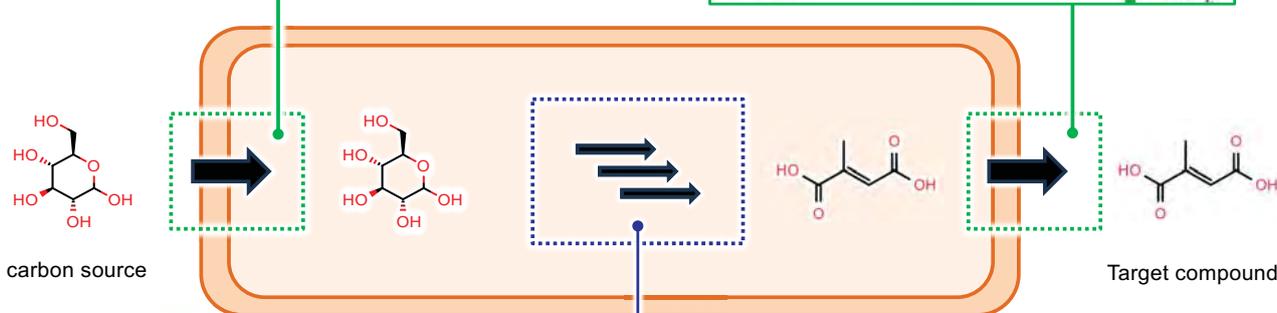
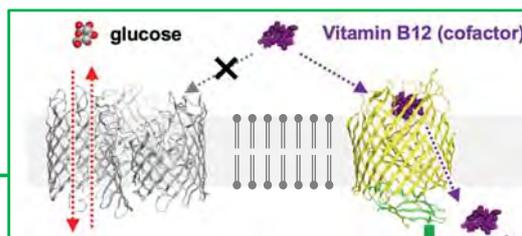
バイオものづくりを加速させる 「細胞膜」と「細胞内」のデザイン

Strategy

6

細胞膜のデザイン

- 原料 / 反応必須成分の取り込み
- 目的生成物の輸送
- 細胞の頑強性の向上



- 副生成物の回避による生産量向上
- 人工基質に対する反応性向上
- ドメイン安定化による酵素活性の改善

細胞内のデザイン



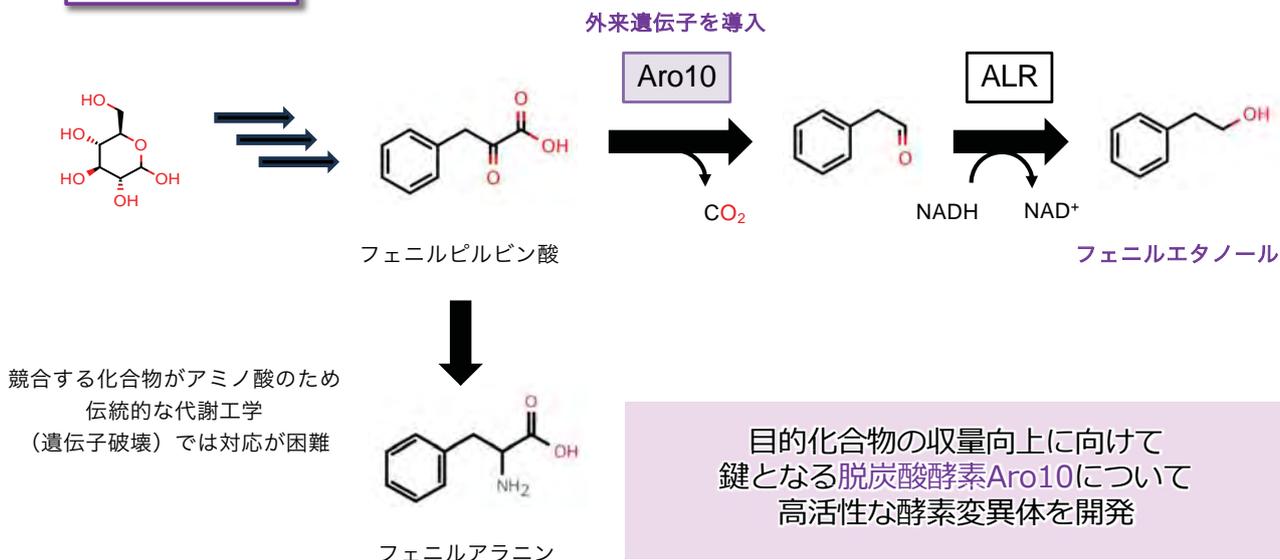
細胞内デザイン: 目的化合物の生産量向上

Topic 1

7



- バラのような香りと抗菌活性を有する芳香族化合物
(世界の市場規模 400億円、10,000 ton/year)
- 植物や微生物が自然界で生産可能な化合物
- ほぼ全てが化石資源由来
→ 持続可能社会の実現に向けてバイオへの転換が求められている



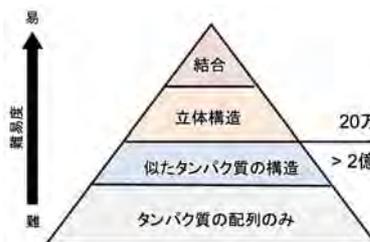
タンパク質配列情報からの酵素開発

Topic 1

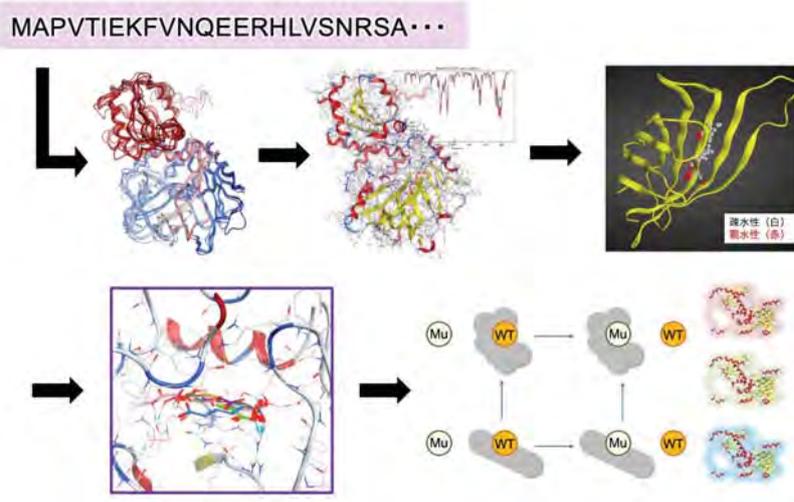
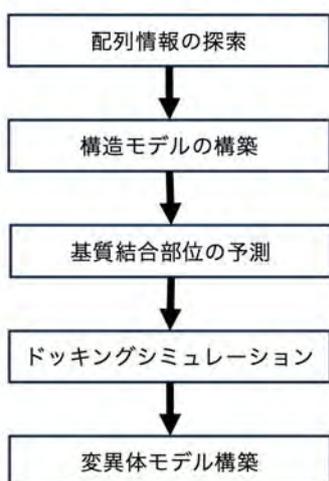
8

問題: Aro10の結晶構造が報告されていない
(酵素の反応触媒場である基質結合部位への
ピンポイントな変異導入ができない)

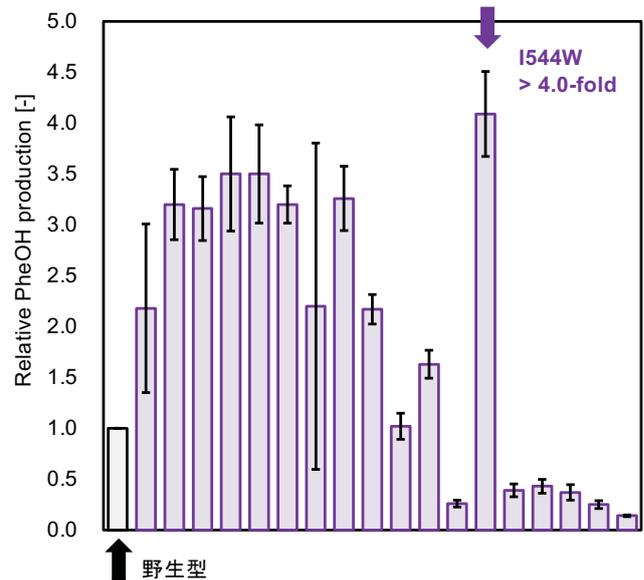
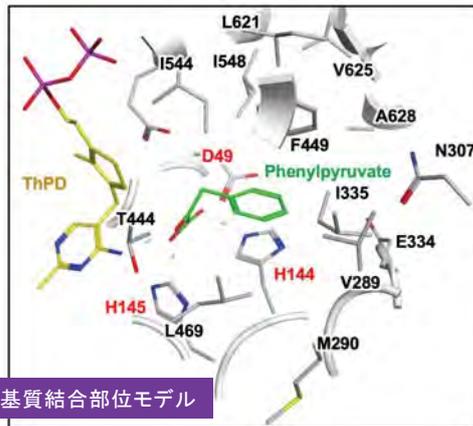
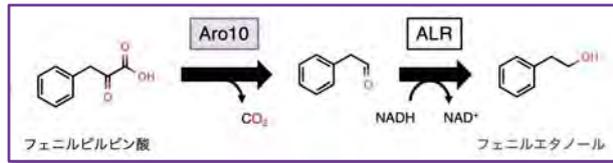
→ in silicoシミュレーションを用いた配列情報からの酵素開発



■ 酵素開発ワークフロー

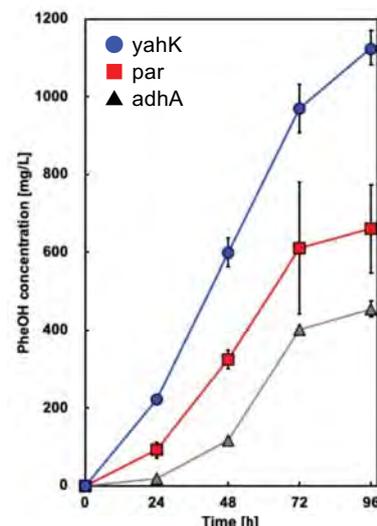
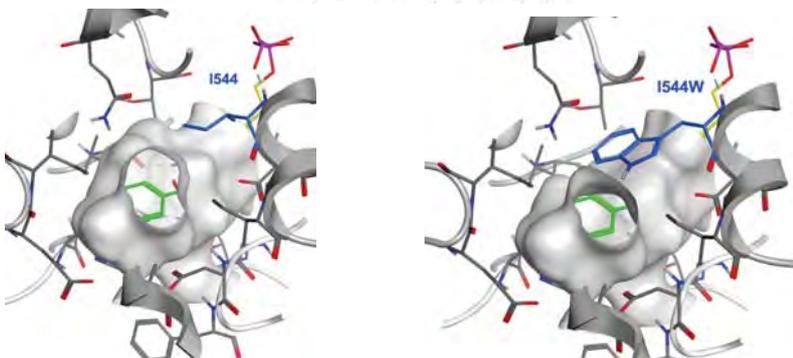
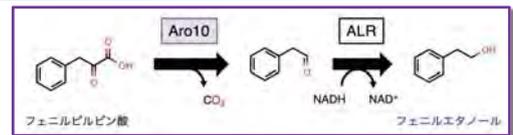
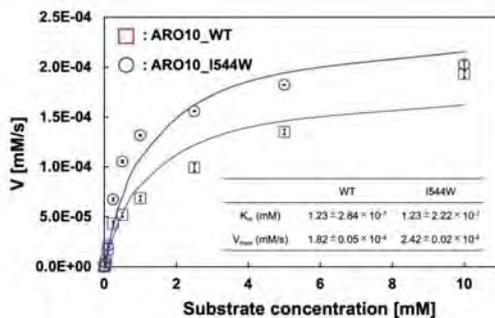


シミュレーションの結果、親和力の向上が期待されるTop18の1残基変異Aro10変異体を作成
→ フェニルピルビン酸生産大腸菌に導入してフェニルエタノール生成能力の評価を行った



Aro10への部位特異的変異導入によりin vivoでの高活性変異体の獲得に成功

酵素配列情報のみからの変異体構築であっても、
少ない変異体作成数で4倍以上の活性向上を達成



(Noda et. al., *Bioresource technology*, 2024)

in vitroにおける活性向上 (K_m 変化なし、 k_{cat} 1.3倍)に比べてin vitroでの目的化合物の収量増大

生体内にケト酸化合物が多く存在しており、基質ポケットを狭める変異により効果的に働いたか
= in vivoで評価することの重要性

最終的にグルコースからの2.5 g/Lのフェニルエタノール生産を達成

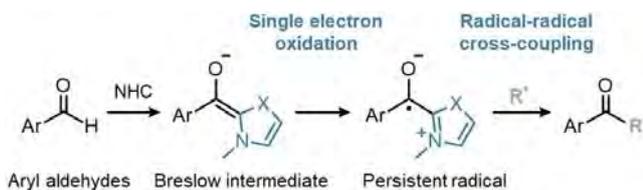


人工合成基質に対する反応性向上 生成酵素の探索と人工進化

Topic 2

11

NHC-mediated radical acrylation 課題: ラジカル中間体が短寿命

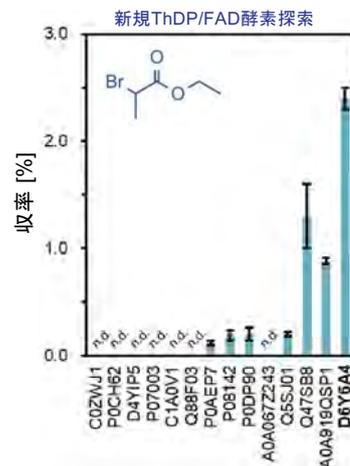
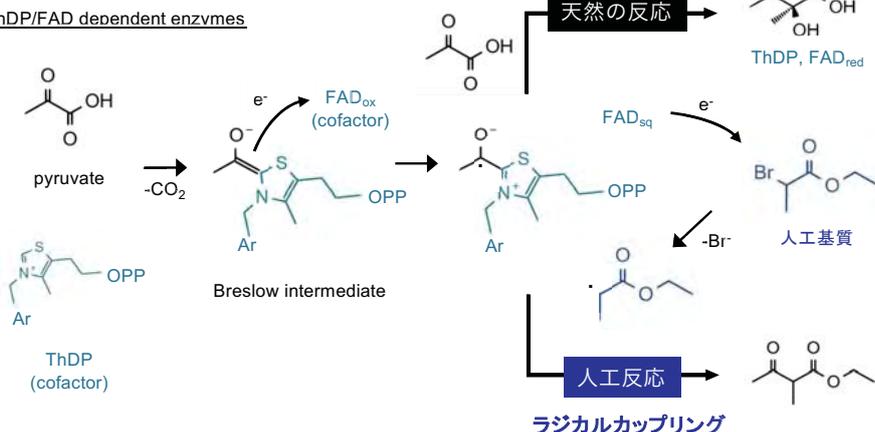


チアミン / フラビン依存性酵素が
Breslow中間体を生成することに
着想したラジカルカップリング反応



加藤 俊介 准教授
(神戸大イノベ)

ThDP/FAD dependent enzymes



チアミンおよびフラビン依存性酵素の触媒機構に基き、有機化学において困難な反応である短寿命ラジカル間のN-ヘテロ環カルベン(NHC)媒介型ラジカルカップリング反応を開発

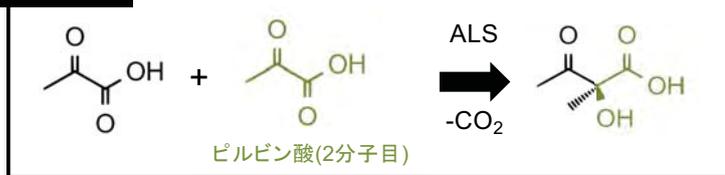


人工合成基質に対する反応性向上 生成酵素の探索と人工進化

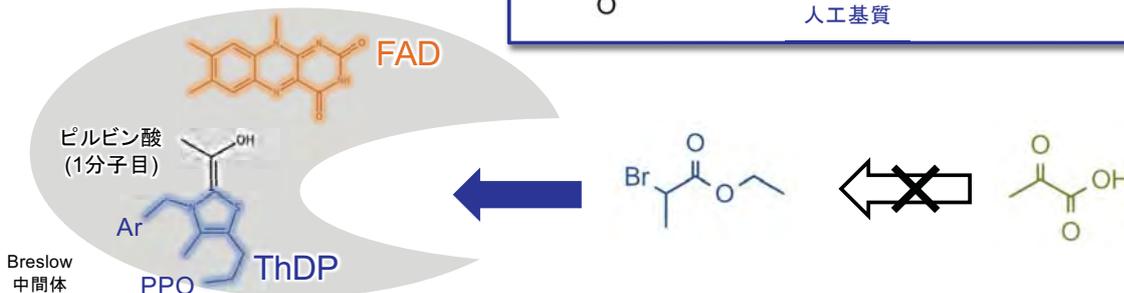
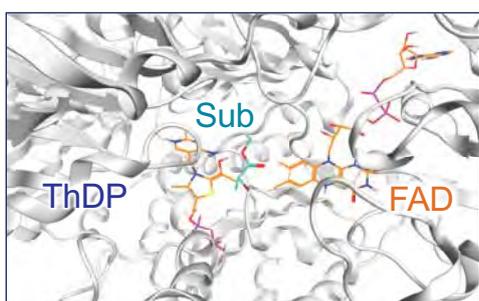
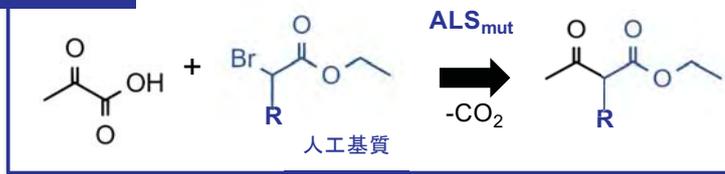
Topic 2

12

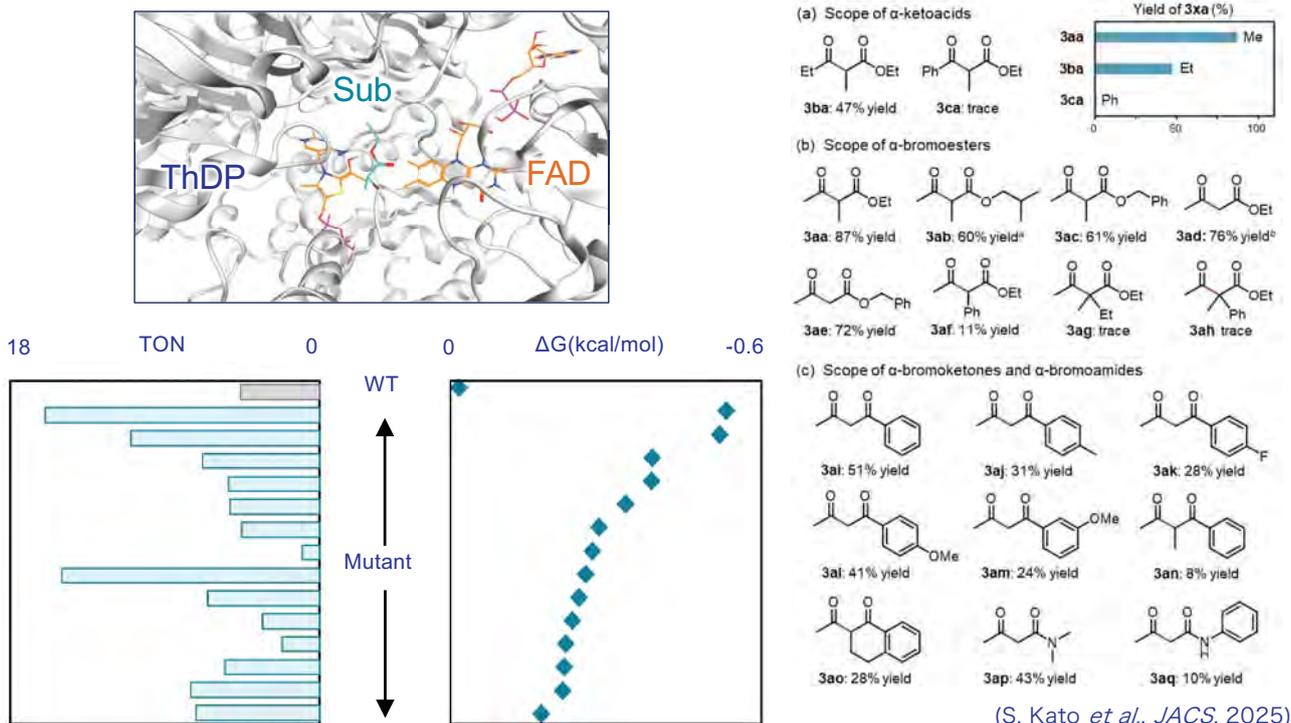
天然の反応



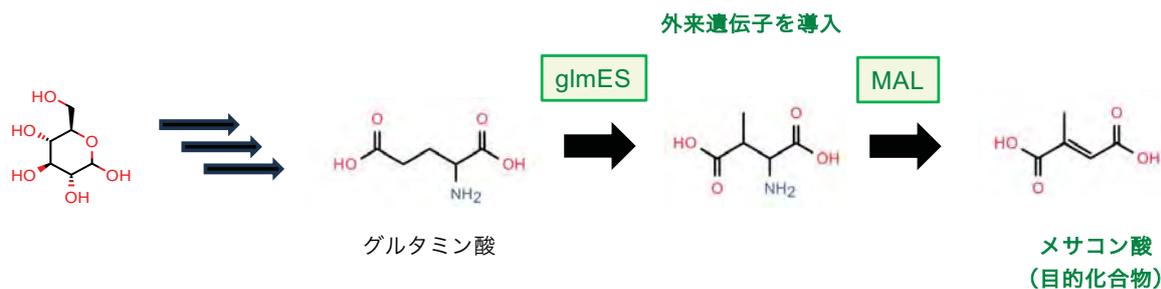
目的の反応



1分子目のピルビン酸の反応性は維持しつつ2分子目のピルビン酸の取り込みを低減し、新規人工基質が取り込まれるような酵素設計



人工基質との親和力変化を基準としてALS変異体を設計・構築
広い基質特異性を持つ高活性変異体の獲得に成功



既報の論文を参考に分子内転移酵素glmESとアンモニア脱離酵素MALの
2つの外来遺伝子の導入により、メサコン酸のバイオ生産を検討
(当初は、変異体により生産量の向上を目指す予定)

問題: メサコン酸が全く生産されない。(培地中におけるメサコン酸濃度 0 g/L)

- ・ 異種タンパク質の発現 → どちらも大腸菌内での発現を確認
- ・ それぞれの酵素の活性 → 精製酵素で活性を確認
- ・ 反応前駆体であるグルタミン酸の生産 → ~数百 mg/Lの蓄積
- ・ *in vivo*での中間体の確認 → 検出されず、glmESが機能していない
- ・ glmESは補酵素としてB12が必要 → 論文を参考に培地に添加するも変わらず

目的化合物を高生産するための細胞膜のデザインというアプローチ



酵素デザイン:ドメイン安定化による活性向上

Topic 3

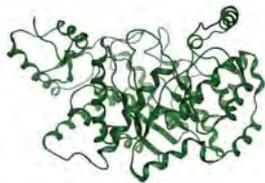
17

Small subunit



反応後にまた解離するため各サブユニットが空間的に近接したほうが有利

Large subunit

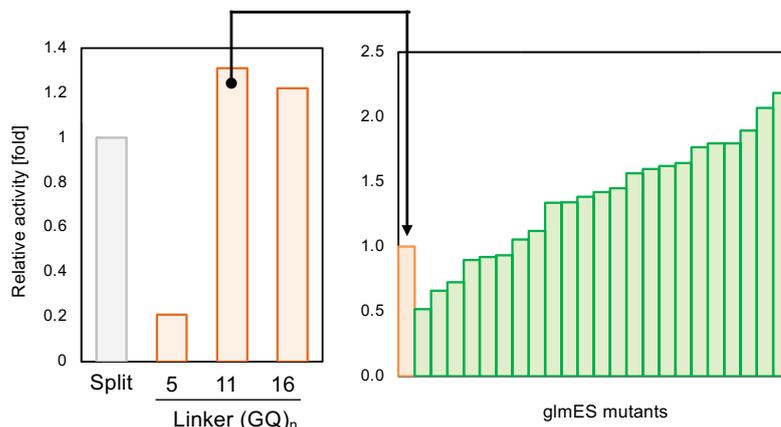


glmES

融合タンパク質化



fused-glmES



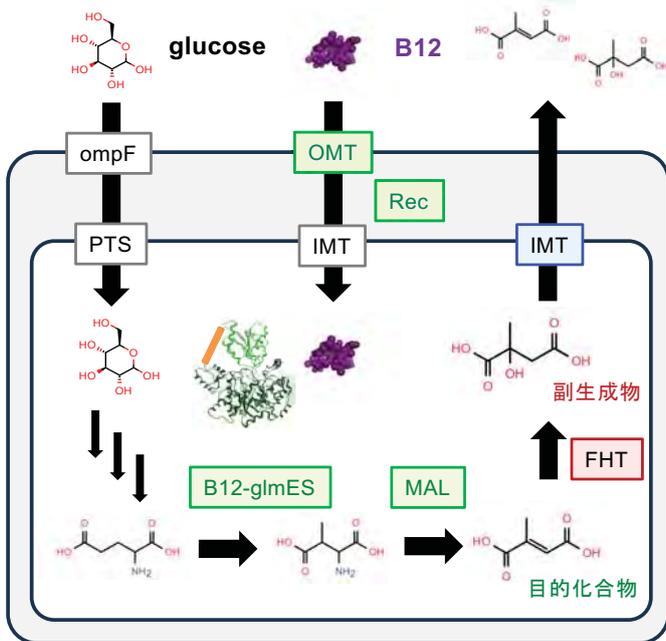
鍵となる酵素glmESの融合タンパク質化およびin silicoデザインによる安定化変異により、メサコン酸生産量の向上に成功



細胞膜デザイン:生成物輸送による副反応の回避

Topic 3

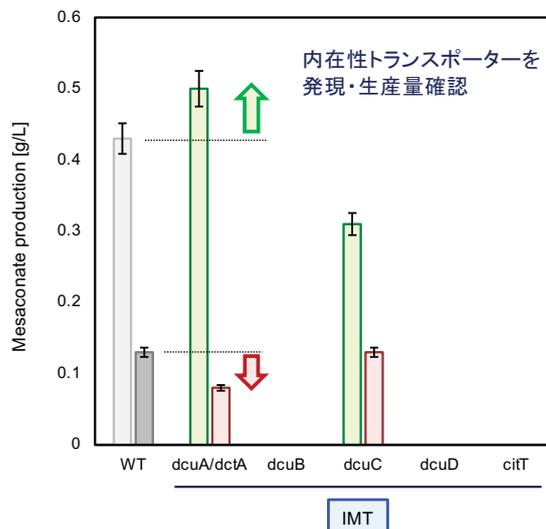
18



問題: 酵素的水和反応による副生成物

必須遺伝子であるため遺伝子させると増殖が著しく低下

→ 生成物を体外に輸送することで回避できないか?



大腸菌内在性の有機酸輸送タンパク質の発現を増強させることで、生産量の向上と副反応物の低減を達成



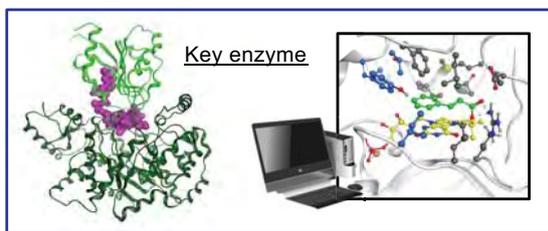
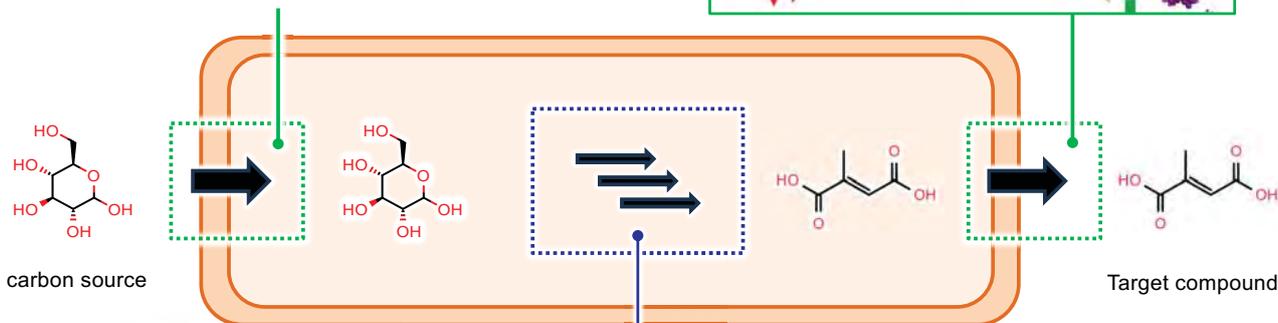
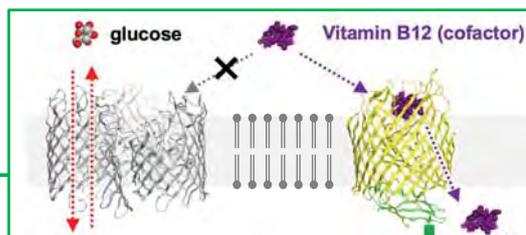
バイオものづくりを加速させる 「細胞膜」と「細胞内」のデザイン

Strategy

19

細胞膜のデザイン

- ・ 原料 / 反応必須成分の取り込み
- ・ 目的生成物の輸送
- ・ 細胞の頑強性の向上



- ・ 副生成物の回避による生産量向上
- ・ 人工基質に対する反応性向上
- ・ ドメイン安定化による酵素活性の改善

細胞内のデザイン

第7回先端膜工学研究センター成果発表会

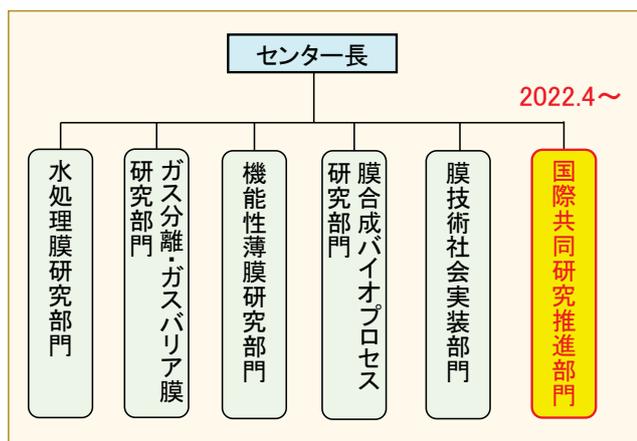
国際連携強化による 国際共同研究推進の取組状況

2025年7月30日
先端膜工学研究センター
国際共同研究推進部門
熊谷 和夫

1

国際共同研究推進部門について

先端膜工学研究センター体制



国際共同研究推進部門

- ◆部門長: 熊谷和夫(特命教授)
- ◆メンバー: 岡本泰直(特命助教)、Liheng Dai(同)、Erda Deng(同)、Yongxuan Shi(同)、棕 亜希、高木良助、文 健



熊谷 和夫



岡本 泰直



Liheng Dai



Erda Deng



Yongxuan Shi

主なミッション

- ・国際共同研究の企画・推進
- ・国際人材交流の推進(研究者招聘・派遣など)
- ・海外競争的資金の調査、応募(支援)
- ・新たな協定締結先の開拓
- ・英語ホームページ等による情報発信



棕 亜希



高木 良助



文 健

2

2024年度の国際連携関係の主な取組み

・連携協定(MOU)締結相手先の拡充(現在計18拠点に拡充)

2024年度は4機関と新たにMOUを締結

- ・イタリア学術会議膜技術研究所
- ・中国科学院青島バイオエネルギー・プロセス研究所
- ・中国科学院上海高等研究院
- ・長庚大学膜センター(台湾)

・iWMK(神戸国際膜ワークショップ)2024の開催

2024年11月14～15日に開催、海外から13機関が参加

1日目:コンソーシアム会議

MOU連携先機関からの発表(3機関+神戸大)、学生ポスター発表(21件)

2日目:特別招待講演(米国ジョージア工科大学Ryan P. Lively教授、オンライン)

MOU連携先機関からの発表(10機関+神戸大)

参加者数:2日間で計133名

・海外からの研究者招聘

- ・国立台湾大学B.Yu教授(9月に特別講演会)、中原大学(台湾)A.Venault教授(11月に特別講演会)
- ・招聘外国人研究者を3名受入(シアクアラ大学(インドネシア)、大連工業大学(中国)、東華大学(中国))

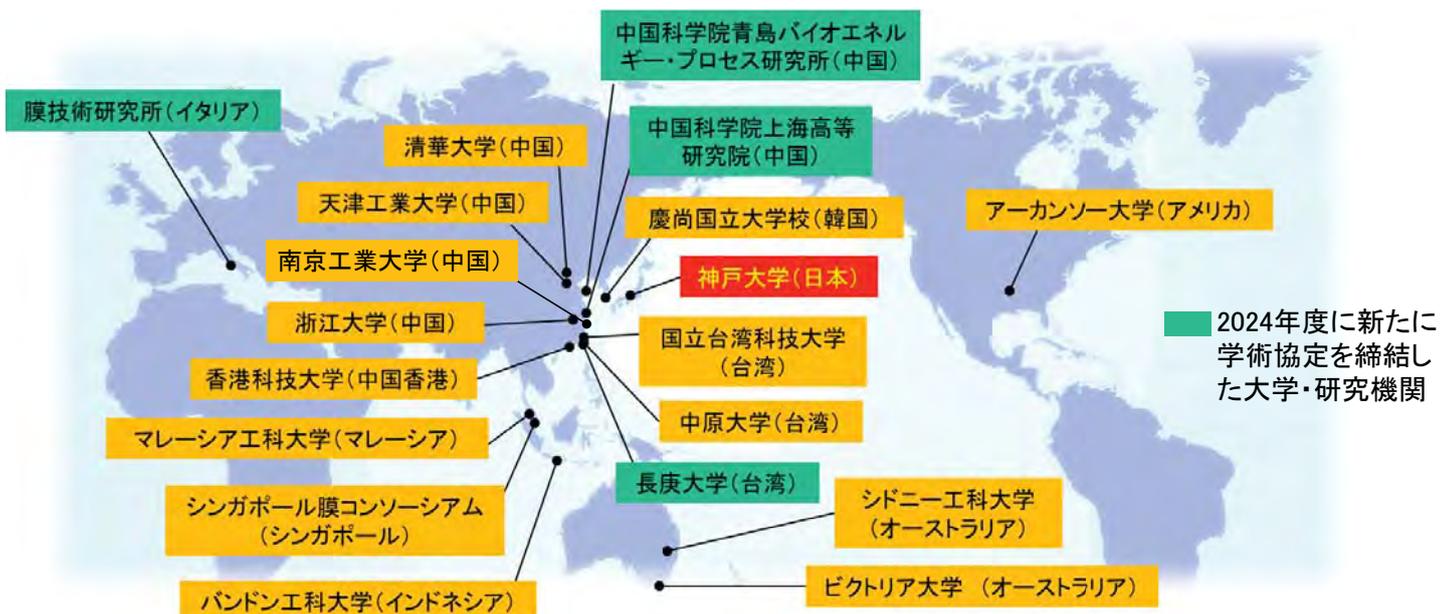
・共同研究先への研究者派遣

- ・アーカンソー大学(米国)、ヴィクトリア大学(豪)へ共同研究のため若手研究者派遣(5月、8月)
- ・南京工業大学(中国)へ17名の若手研究者が訪問(JSPS二国間交流事業、7月)

3

MOU締結相手先

2024年度に4拠点増え、現在計18拠点



2025年7月現在

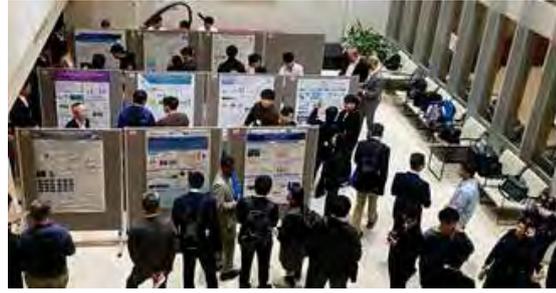
4

iWMK2024 (2024年11月14～15日、於神戸大)

1日目 (MOU締結機関会議)



1日目 (学生ポスター発表)



2日目 (参加機関による講演)



2日目 (参加者全員による記念撮影)

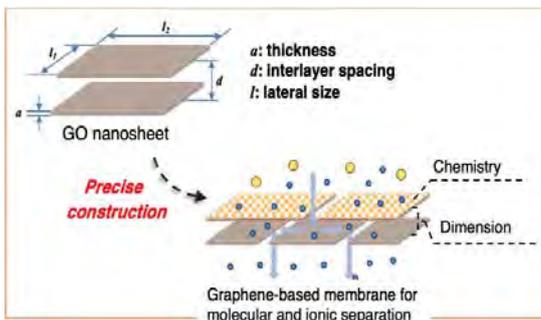


5

国際共同研究の状況 (1)

JSPS二国間交流事業 (南京工業大学、2022.4～2024.12)

酸化グラフェンナノシート膜の共同研究



交流・研究実績 (2024年度)

- ・2024年7月 先方へ17名で訪問 (教員6名、学生11名)
先方と共同セミナー開催
- ・2024年11月 先方から研究者4名来訪
神戸大にて**最終共同セミナー**開催
- ・共著論文 *Nat. Commun.*や*Angew. Chem. Int. Ed.*誌など
一流国際誌に計17報掲載 (3年間)
国際学会で双方学生の受賞計15件 (同)

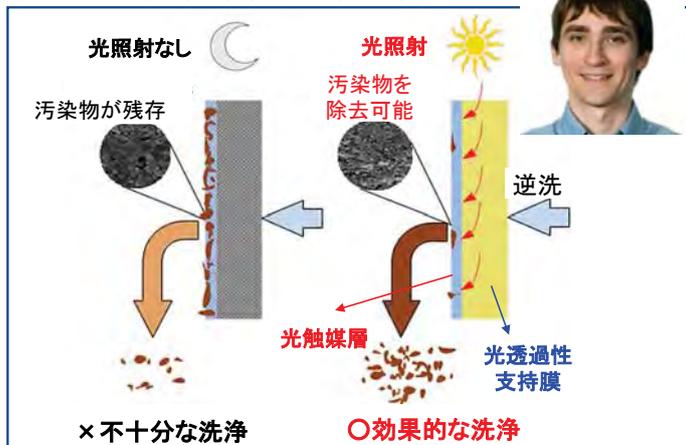
2024年7月に南京工業大学で開催した共同セミナー集合写真



6

国際共同研究の状況 (2)

ヴィクトリア大学 M. Duke教授との共同研究
光透過型光触媒膜反応器の開発



- ▶ オンライン打合せを月1回程度継続
- ▶ **ヴィクトリア大学での滞在研究**
博士前期課程学生2年 森口さん
(2024年8月2日～9月6日派遣)
共著論文 *J. Water Proc. Eng.* (2024)

アーカンソー大学 R. Wickramasinghe教授との共同研究

水処理膜や油水分離膜等で共同研究

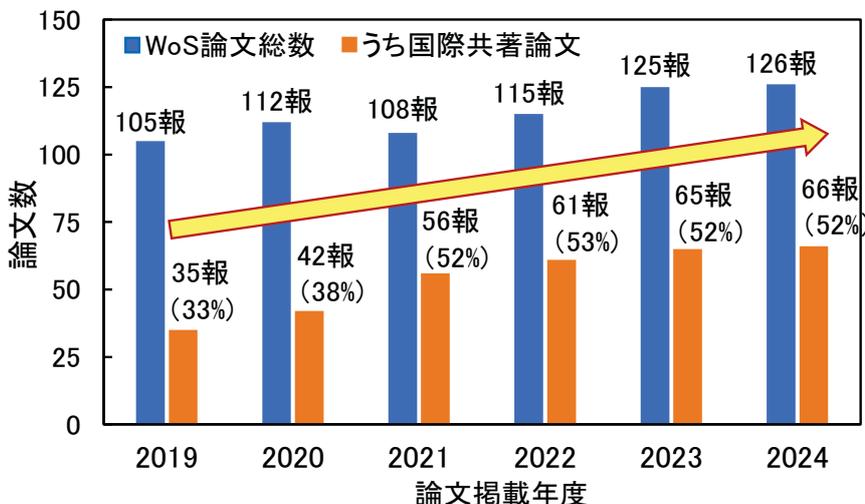


- ▶ ここ数年は毎年、若手研究者数名が先方ラボを訪問し、研究協議や共同セミナー(2024年5月、2025年5月)
- ▶ 2024～25年度で**計4報の共著論文**発表

7

国際共同研究の状況 (3)

先端膜工学研究センターの発表論文数(WoS)と
国際共著論文数の推移

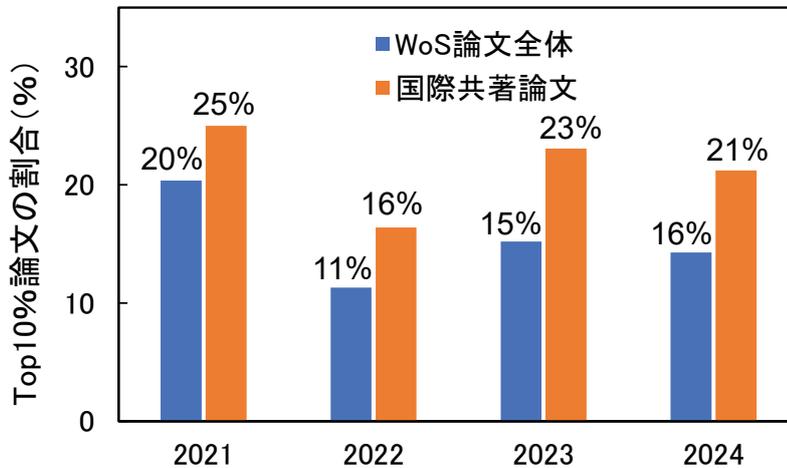


- ・全体の論文数の伸び以上に、国際共著論文数が増加
- ・2021年度以降は**当センターの論文の半分以上が国際共著論文**

8

国際共同研究の状況(4)

先端膜工学研究センターの発表論文のうち
引用Top10%論文の割合



- ・当センターの論文の引用割合は分野全体の平均より1.5倍程度高い
- ・国際共著論文のTop10%割合はさらに高い(分野平均の約2倍)
⇒ **国際共著論文は注目度の高い論文が多い**

9

2025年度の活動計画

- ・iWMK2025の開催
2025年11月13日(木)～14日(金)開催予定(神戸大にて対面開催)
- ・外部資金による国際共同研究
国内および海外の制度に応募計画or応募済
- ・海外研究者の招聘、講演、研究指導
年に数回の招聘や講演を予定
直近では、8/5(火)に東華大学(中国)Fang Li教授の特別講演会を予定
11:00～12:00、於大会議室 + Zoomハイブリッド
「Membranes with functionalized nanomaterials: To maximizing the permeability and selectivity」
- ・研究者の相互交流
 - ・現在4名の海外研究者を招聘外国人研究者として受入中(長庚大(2名)、東華大、天津工業大)
 - ・5月にアーカンソー大学(米)へ若手教員3名が訪問
 - ・8月のAMS15(マレーシア)など海外で開催される国際学会を利用して、学生にも海外の研究者との積極的な交流を予定
- ・オンライン活用などで共同研究推進
南京工業大、ヴィクトリア大学などと引き続き密に国際共同研究を推進

10



膜技術社会実装部門 「2024年度活動内容と今後の進め方」

2025年7月30日
神戸大学大学院
科学技術イノベーション研究科
北河享

ミッション

- ①社会実装に向けて啓蒙活動
MBTA(Membrane Business & Technology Academy)の開催
- ②社会実装の実現に向けた検討
バイオモノづくりに関する膜抽出・膜濃縮技術確立に向けての、
廃水からの金属資源循環のための技術開発
- ③社会実装に向けての支援
技術相談、共同研究、委託研究の斡旋

メンバー紹介

部門長	特命教授	北河享	(科学技術イノベーション研究科)
	客員教授	中塚修志	(先端膜工学研究センター)
	特命准教授	Yuqing LIN	(先端膜工学研究センター)
	特命助教	Zhan LI, Pengfei ZHANG, Yanyan LIU, Xiao XU, Xueru YAN	(先端膜工学研究センター)

講座 MBTA 2024年度の歩み

MBTA (Membrane Business & Technology Academy) の企画趣旨

開発した膜の社会実装を進めていくためには、**市場の未来動向の考察、ビジネスモデルの構築を考える必要**があります。また新規膜開発の性能や効率を高めるためには、問題の原因を確かめたうえで対策を講じ、結果を判断するサイクルを回していく必要があります。新規プログラムでは、**ビジネスと技術の両側面から、開発膜を社会実装することを想定し、ビジネスの考え方と膜技術発展の方向性について議論をすすめる**予定です。

第8回 MBTA (Membrane Business & Technology Academy)

テーマ: RO開発秘話

「海水淡水化膜(SWRO)モジュールとともに」

元東洋紡株式会社 関野政昭 様

対談、質疑応答、討論

モデレーター 科学技術イノベーション研究科 蔭山広明先生



講座 MBTA 2024年度の歩み

第9回 MBTA (Membrane Business & Technology Academy)

テーマ：地球温暖化とイノベーション

「これから地球温暖化問題はどうなるのか？」

国立環境研究所 主幹研究員 横畠徳太先生

「気候危機におけるイノベーションの必要性と政策的課題」

福井大学 国際地域学部 飯田健志先生

対談、質疑応答、討論

モデレーター

蔭山広明先生



講座 MBTA 2024年度の歩み

第10回 MBTA (Membrane Business & Technology Academy)

テーマ：「ケーススタディで考える、ディープテック、ディープサイエンスによるイノベーション」

「ディープテック、ディープサイエンスによるイノベーションの基礎知識」

東京大学 特任教授 忽那憲治 先生

「ディープテック・(IT) ベンチャーの事例研究「扶桑プレジジョン」」

株式会社扶桑プレジジョン 代表取締役 竹田直人様

「ディープサイエンス・(バイオ) スタートアップの事例研究「シンプロジェン」」

株式会社シンプロジェン 代表取締役 社長 兼 CEO 山本一彦様

全体討論

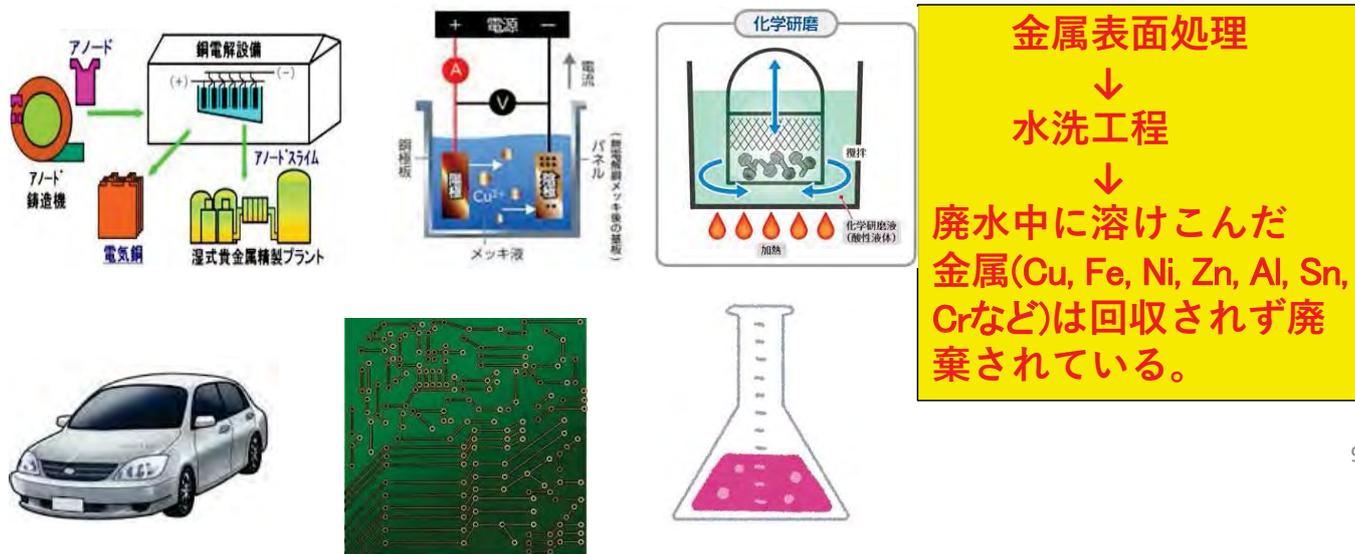
山本一彦先生



産業廃水からの資源循環

令和7年度環境研究総合推進費
 「革新省エネ分離技術による廃水からの希少資源循環」
 東北大学と共同で応募し採択された。(2025~2027年度)

無機金属（精錬、金属加工、メッキ、自動車、電子・電気、化学等）



9

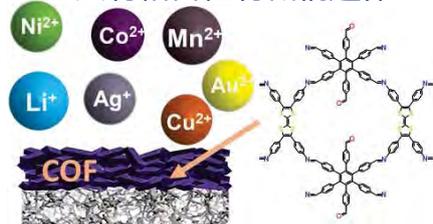
プロジェクト概要

テーマ1: 金属選択COF吸着膜、超耐酸性FO膜の開発の開発

1-1: 金属選択COF吸着膜の開発

東北大学

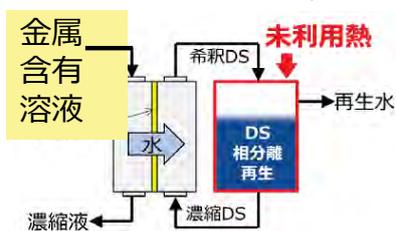
COF: Covalent Organic Framework, 共有結合性有機構造体



1-2: 超耐酸性FO膜の開発

神戸大学

FO: Forward Osmosis, 正浸透



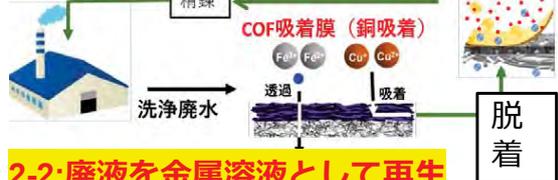
DS: Draw Solution, 高浸透物質

テーマ2: 金属資源回収プロセスの開発

神戸大学

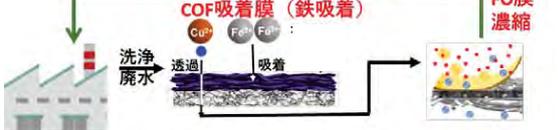
2-1: 廃液を金属固体として再生

電子産業廃水



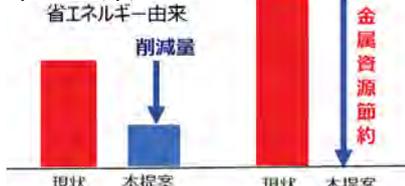
2-2: 廃液を金属溶液として再生

めっき産業廃水

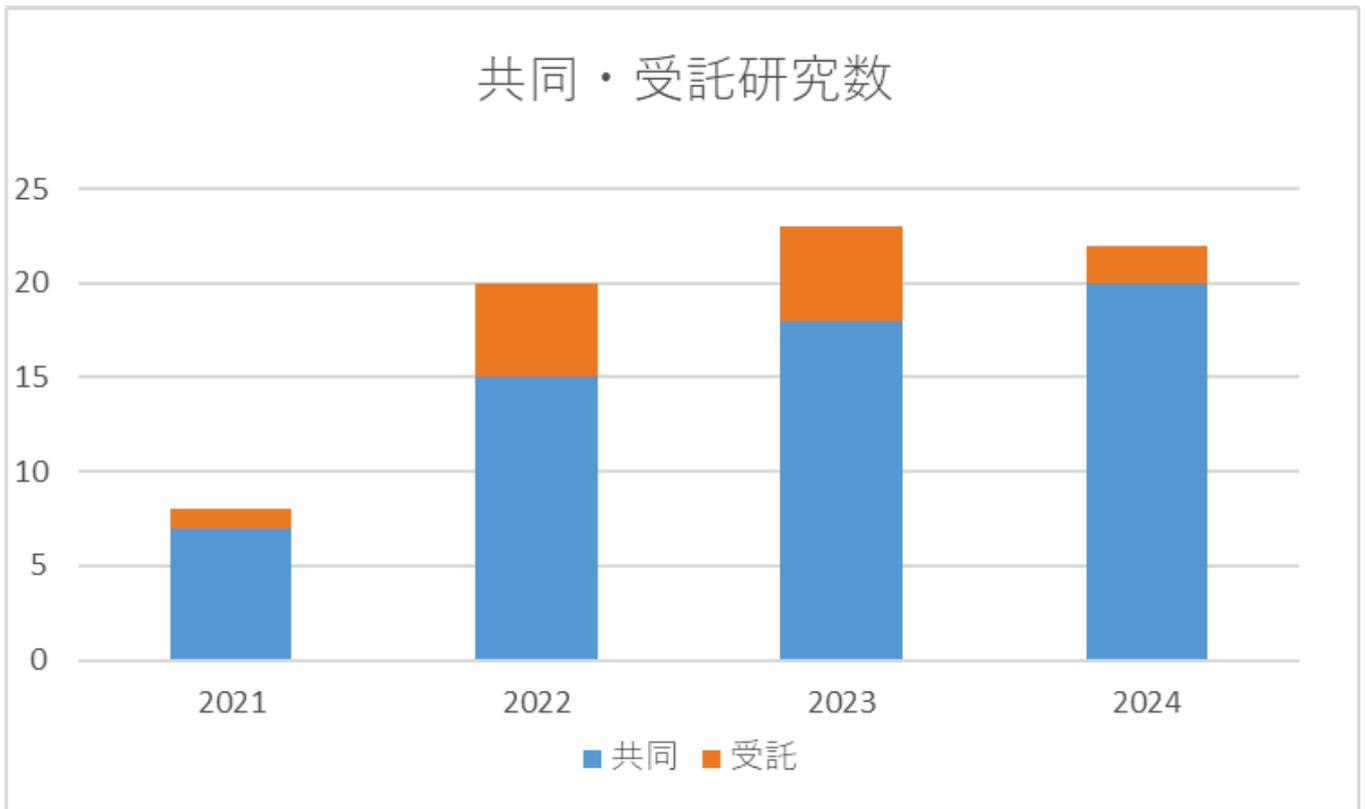


テーマ3: プロセス開発、エネルギーコスト試算

栗田工業

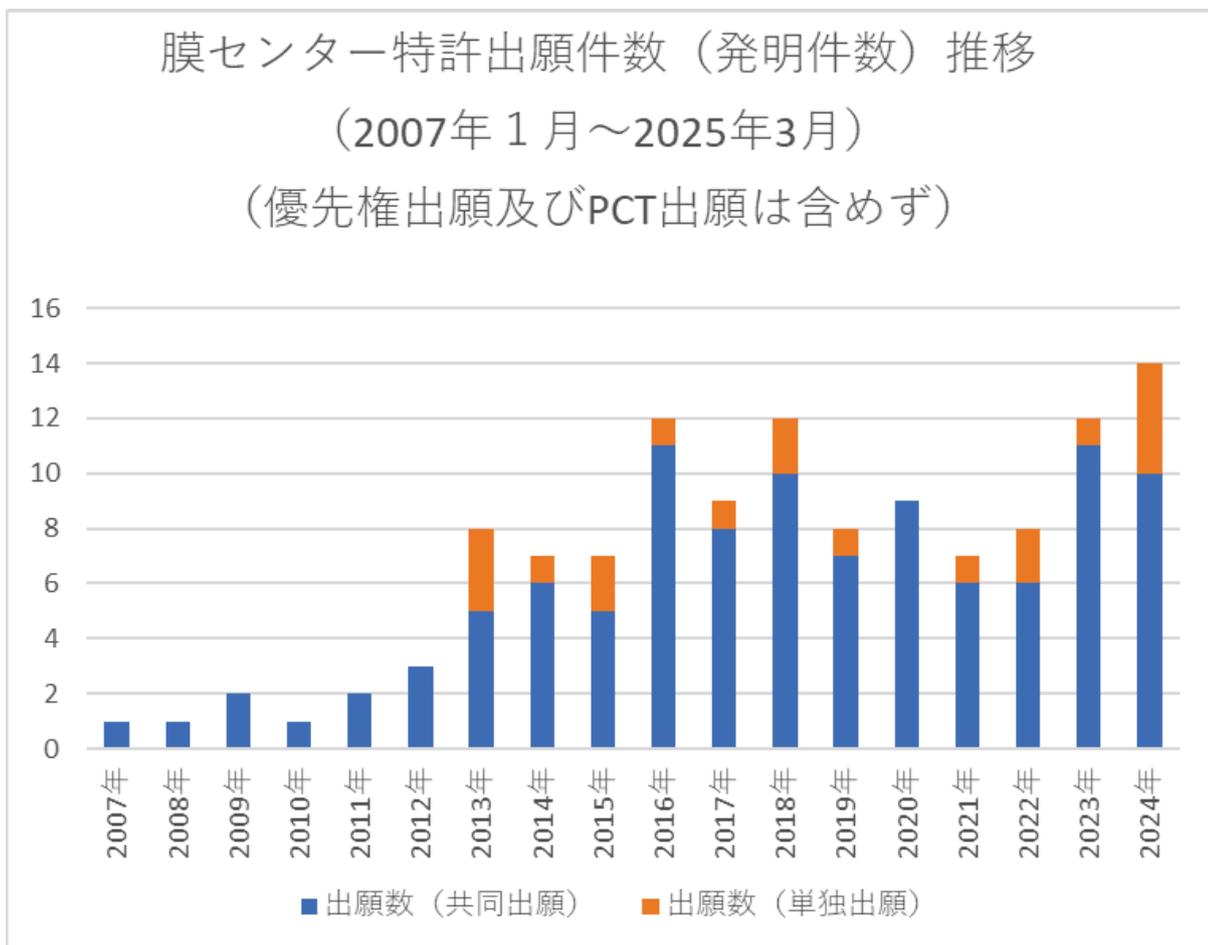


膜センター共同・受託研究数の推移



共同・受託研究数は毎年増加傾向

膜センター特許出願



ご清聴いただきありがとうございました。
今後ともよろしくお願いいたします。



请多多关照!