

2025年2月4日  
東京科学大学

## 卓越した CO<sub>2</sub> 分離回収性能を持つ新型多孔材を開発 — 超高密度の CO<sub>2</sub> 捕獲基をもつ 2.5 次元共有結合性有機骨格 —

### 【ポイント】

- CO<sub>2</sub> 捕獲基を超高密度にもつ結晶性多孔体、2.5 次元共有結合性有機骨格を創出。
- 元素戦略的に問題が無く環境負荷も低い軽元素組成で、卓越した CO<sub>2</sub> 分離回収性能（低消費エネルギー、高 CO<sub>2</sub> 選択性、高吸着速度、空気中の高耐熱性）を実現。
- 現行の CO<sub>2</sub> 分離回収技術の化学吸収法の諸問題を解決しており、分離回収コストの大幅な低下が見込める新材料。

### 【概要】

東京科学大学 (Science Tokyo) \* 総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所の村上陽一教授らの研究チームは、現行の CO<sub>2</sub> 分離回収技術の**化学吸収法 (アミン水溶液)** (用語 1) の諸問題を解決した新型の結晶性多孔材を開発しました。

この新材料は CO<sub>2</sub> の吸着選択的が高く、空気中で高い耐熱性があり、低環境負荷で腐食性がなく、現行技術から劇的に CO<sub>2</sub> の吸脱着エネルギーを低下している (図 3d) ため、現行法の普及の障害となっている高コスト等の諸問題を効果的に解決するものです。本材料は近年注目を集める**共有結合性有機骨格 (COF、用語 2、図 1)** に分類されます。COF は、平面状または直線状の原料分子が周期的に共有結合を形成し面状のネットワークを作った「2 次元 COF」と、原料分子間の立体的な共有結合形成により 3 次元方向に伸展したネットワークを作った「3 次元 COF」とに分類されてきましたが、本成果の COF はそのどちらにも当てはまらない中間的な新構造 (2.5 次元と命名) をもつもの (図 1d、図 2) です。この新材料は、多孔体であるその内部に CO<sub>2</sub> の捕獲能がある**一級アミン** (用語 3) が超高密度に配置されている独特な特長 (図 2a) を有し、液体・固体によらず従来の CO<sub>2</sub> 吸収材・吸着材が同時には実現できなかった以下の 6 要件を初めて同時に実現しました。〔要件 1〕エネルギーコストと相関する **CO<sub>2</sub> の吸着熱** (用語 4、図 3b) が低いこと。〔要件 2〕CO<sub>2</sub> への選択的が高いこと。〔要件 3〕吸着速度が高いこと。〔要件 4〕空気中で耐熱性が高いこと。〔要件 5〕腐食性や環境懸念がないこと。〔要件 6〕元素戦略的に問題がないこと。本成果により、脱炭素に資する産業展開の可能性をもつ新たな CO<sub>2</sub> 分離回収の手段が提供されることとなります。

本成果は 1 月 2 日付の *Nature Communications* 誌に掲載されました。本論文は [オープン・アクセスで無料閲覧](#) できます。

## ●背景

大気中の CO<sub>2</sub> 濃度は増加の一途を辿っており、その増加の傾きは年々大きくなっています[1]。この CO<sub>2</sub> 濃度の増加は主に人間の活動に起因しており、地球温暖化の主要因となっています[2,3]。CO<sub>2</sub> 濃度増加に伴う気候変動は日本国内の気候災害の激甚化[4]のみならず、世界に広く災害[5]、飢餓[6]、健康被害[7]を引き起こしています。

気候変動の軽減を目指し、国際社会では人為起源の CO<sub>2</sub> 排出を減らす取り組みを活発化させています。日本では、政府が 2050 年までにカーボンニュートラルを目指すことを宣言[8]しており、その方策の一つとして CO<sub>2</sub> 排出量取引制度(GX-ETS [9])が 2026 年度から本格的に稼働します[10]。GX-ETS には、年間 CO<sub>2</sub> 排出が 10 万トン以上の企業 300~400 社が参加を義務付けられる見込みです[11]。このように、人為起源の CO<sub>2</sub> 排出は、今や気候変動を通じて人類全体の安心・安全に脅威を及ぼしているだけでなく、私たちの身近な経済にも影響を及ぼすものになりつつあります。

この問題を考える上で最重要なのが「量の視点」です。人類は現在年間 400 億トンもの CO<sub>2</sub> を排出[12]しており、日本は年間約 11 億トン排出[13]しています。このような「量的な排出削減」を行いうる方法の一つが、二酸化炭素回収・貯留 (CCS : Carbon Capture and Storage) [14]です。CCS は海外で本格化しており[15]、日本では昨年 CCS 事業法が成立し[16]、今後 CCS 事業が本格化する見込みです。

CCS を行うには排出源から CO<sub>2</sub> を分離する必要があります。そして、その手段には経済的な現実性があることが必須ですが、そのような手段が現状存在しないことが問題となっています。現行の技術の筆頭に**化学吸収法 (アミン水溶液法)** (用語 1) があります。しかし、この方法により米国テキサス州で実際において行われた「ペトラ・ノヴァ・CCUS プロジェクト」[17]では、分離回収コストが約 60 米ドル/トン・CO<sub>2</sub> と推定されており[18]、運転コストが莫大だったため[18,19]、不採算を理由にこの分離回収プラントは稼働を停止しました[19]。この技術の分離回収コスト (推定約 60 米ドル/トン・CO<sub>2</sub> [18]) は、政府の分離回収コストの目標 (2030 年に 2000 円台/トン・CO<sub>2</sub>、2040 年以降に 1000 円以下/トン・CO<sub>2</sub> [20]) とは数倍の乖離があります。すなわち CCS の事業レベルでの本格普及には革新的な CO<sub>2</sub> 分離回収技術の開発が必須となっています。

コストを劇的に低下させるには方式を革新する必要があります。上述の現行法には、原理上回避が難しい幾つかの問題があります。例えばアミン水溶液の金属腐食性や溶質のアミン分子が環境に放出され環境汚染につながる懸念[19,21]に加え、後述するように、運転に伴うエネルギー消費が過大[19,21]なためにこれ以上大幅なコストの削減が困難という根本的な問題があります。その解決には水溶液の使用をやめること、すなわち、CO<sub>2</sub> の捕獲媒体に固体を用いることが効果的です。しかし、稠密な固体を用いてしまうと CO<sub>2</sub> の捕獲及び脱離の速度が大変遅くなるので、微細な孔が沢山あいた多孔体を使うことが効果的です。本成果は「新型の多孔体を開発し、現行技術の化学吸収法の諸問題を解決した成果」です。以下にその内容と効果を示します。

## ●研究成果

### 新材料の内容

本研究では、多孔体として**共有結合性有機骨格 (Covalent Organic Framework, COF)** (用語 2) という材料カテゴリを選択しました。COF は、近年急速に研究数が増加している比較的新しい材料カテゴリです (図 1a)。COF は、図 1b に示すように、安定性の高い共有結合から成ること、元素戦略的に問題がない軽元素 (炭素、水素、窒素、酸素等) のみからなり、メタルフリーかつ軽量で応用上有利であること、規則正しい微細孔を有する結晶性多孔体であることが、従来材料にはない長所となっています。

COF では、構成部品となる二種類の原料分子が**縮合** (用語 5) を繰り返すことで規則的な構造が作られます。COF は、骨格の幾何学的な次元性に基づき、「2 次元 COF (2D-COF)」と「3 次元 COF (3D-COF)」に分類されてきました (図 1c)。2D-COF は、図 1c の左側に模式的に示すように、二種類の平面状または直線状の原料分子が平面をなすように繰り返し縮合して共有結合が形成されることで、多くの場合六角形パターンの平面的な層が形成され、その層同士が分子間力などの弱い力で積層して形成されます。その結果、層に垂直な方向に 1 次元の孔が形成されます。もう一種類の 3D-COF では、図 1c の右側に模式的に示すように、二種類の原料分子が 3 次元的な共有結合形成を繰り返して縮合することにより、結合が 3 次元方向に伸展した周期骨格を形成します。3D-COF は、立体的な結合をなす形の原料分子を用いることで形成されます。

本成果の新規性は、2D-COF と 3D-COF の中間的な新構造の COF を創出した点にあります。すなわち、図 1d にまとめたように、本研究で開発した COF は、微視的には 3D-COF であるが巨視的には 2D-COF であり、これまで使われてきた 2D-COF と 3D-COF の分類の定義に当てはまらないことに基づき、この新 COF を、2D-COF と 3D-COF の中間的構造という意味で「2.5 次元 COF」と命名しました。

その詳細を図 2a に示します。原料分子として、四面体の頂点に各 1 個の一級アミン (-NH<sub>2</sub>) をもつ原料分子(1)と、三角形の頂点に各 1 個のアルデヒド基 (-CHO) をもつ原料分子(2)とを縮合させて、周期的な共有結合を形成させたところ、意外にも、原料分子(1)の一つの頂点の一級アミンが未反応なまま残り (図 2a)、原料分子間の結合形成は 3 次元であるにも関わらず、マクロな形状としては原子層が積層した層状となった、新しい構造のネットワーク骨格を生成しました (図 2b)。

この 2.5 次元 COF は高品質な単結晶として得られ (図 2c)、大きさは 0.1 mm に達しました。これは、層状 COF としては現在 (少なくとも論文出版時点において) 世界最大の大きさとなっています。走査型電子顕微鏡像 (図 2d) から、本材料が 3 次元 COF の典型的な原料である正四面体形状の原料分子(1)から作られたにも関わらず、意外にも 2 次元 COF の定義的な特徴である層形状となっていることが見いだされました。

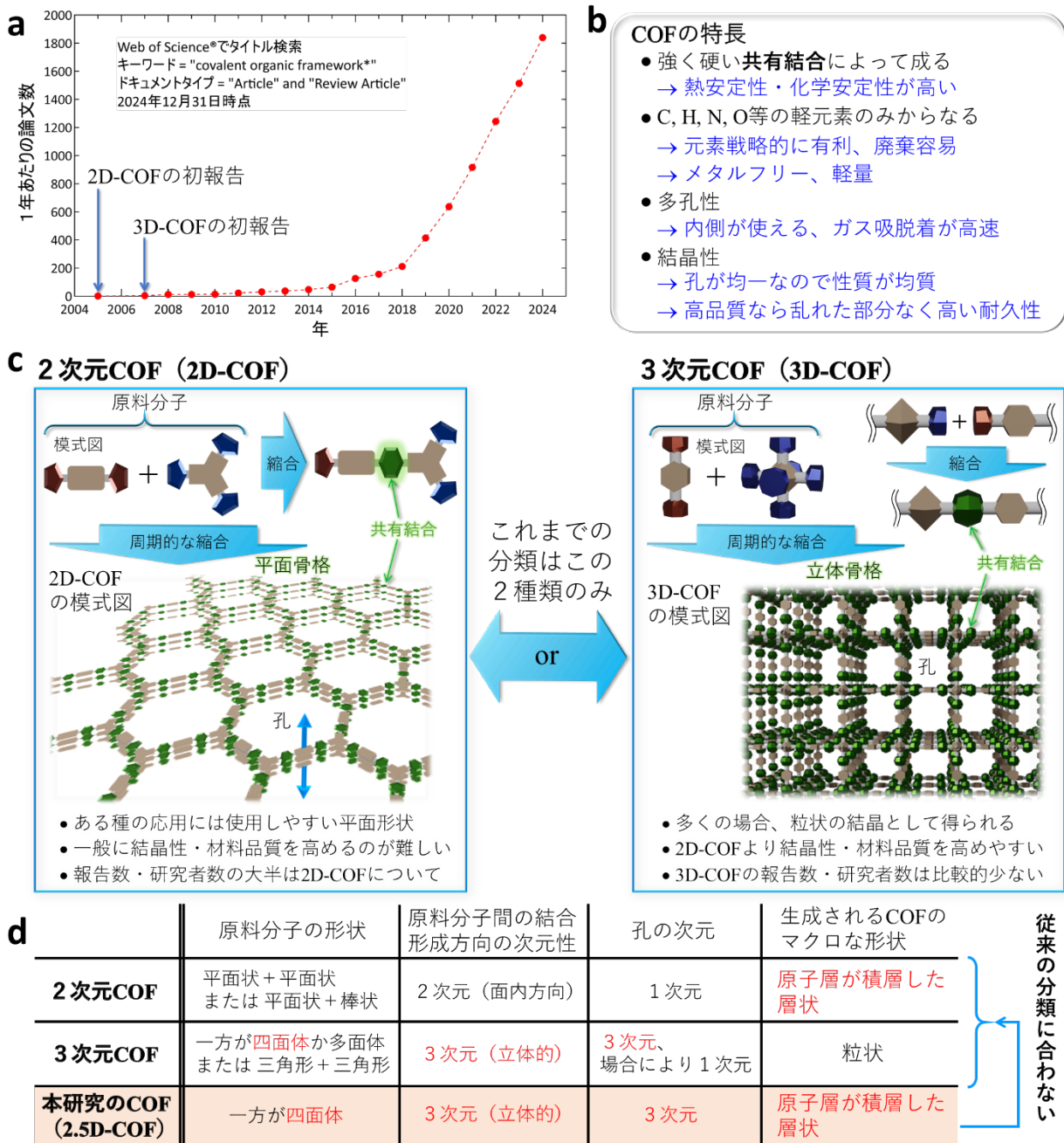
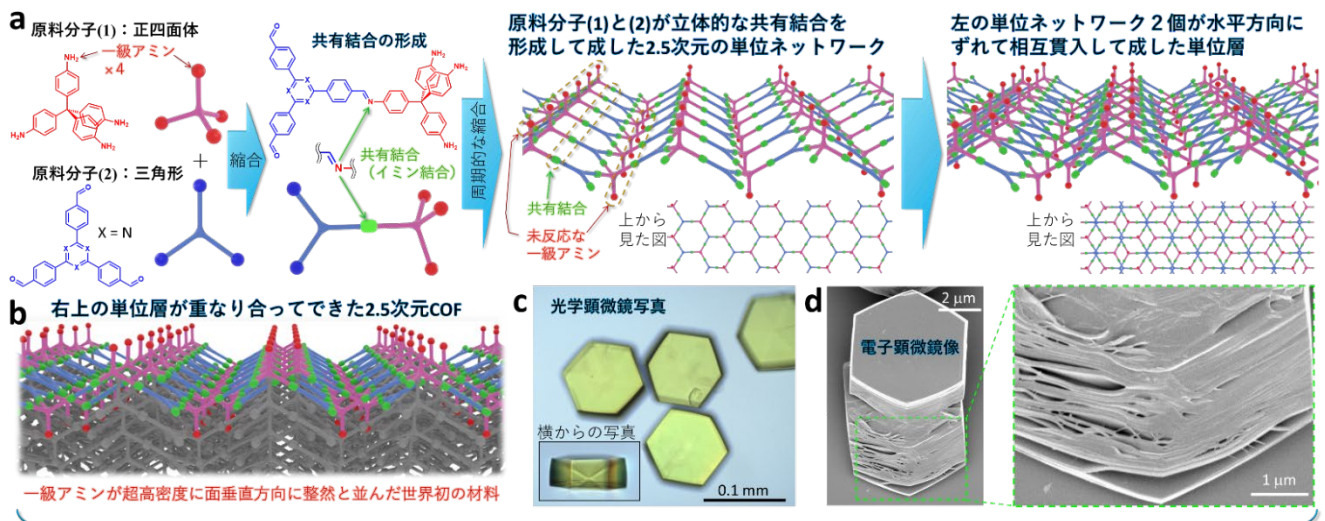


図1 (a) 2005年のCOFの初報告以来のCOFの論文数の増加 (Clarivate社のWeb of Science®調べ)。(b) COFの特長の要約。(c) 2次元COFと3次元COFの違い。(d) 2次元COFと3次元COFの違いの詳細、及び、本研究で開発したCOFがそれらには分類できないことを示す表。本研究のCOFは「微視的には3次元COF」だが「巨視的には2次元COF」であることに基づき、このような新構造のCOFを、それらの中間的な構造という意味で2.5次元COFと命名した。





ミクロには立体的な共有結合形成によってマクロには平面状（層状）のCOFを生成 → 従来の2次元 vs. 3次元の区別分類できない → その中間の2.5次元COF → 2.5次元性によって一級アミンが面の垂直方向に超高密度に整然と並ぶ → CO<sub>2</sub>分離回収に卓越した性能発揮

図2 (a) 本成果で使用した二種類の原料分子。正四面体形状（各頂点に一級アミンを持つ）の原料分子(1)と三角形（各頂点にアルデヒド基を持つ）の原料分子(2)とが縮合により共有結合でつながる。共有結合は一級アミンとアルデヒドの縮合で形成される（黄緑色、イミン結合）。原料分子(1)あたり1個の一級アミンを残し、立体的な共有結合形成により平面的に伸展して単位層が形成される。(b) 単位層が積層して2.5次元COFが形成される。(c) 2.5次元COFの単結晶の光学顕微鏡写真。(d) 機械的な力を加えて変形させた後の単結晶の走査型電子顕微鏡像。

本2.5次元COFの特徴は、原料分子(1)の一級アミンのうち1個が使われずに残っている点（図2a）です。本2.5次元COFには、一級アミンが原子層一層あたり・1 μm四方あたり約5×10<sup>11</sup>個という超高密度で整然と整列しているという極めて独特な特徴があります。一級アミンにはCO<sub>2</sub>の捕獲能力があります。本材料は炭素・水素・窒素（いずれも周期表2段目以内の軽元素）のみからなるため、大量生産を見据えたときに元素戦略的な問題がありません。また、共有結合で形成され、結晶性が高いために、有機材料であるにもかかわらず、空気中で300℃近くまで安定、無酸素中では400℃近くまで安定という驚異的に高い熱安定性を持ちます。この熱安定性は応用に有利となります。

## 新材料の効果

CO<sub>2</sub>の分離回収材に望まれる要件は図3aにまとめられます。このうち要件4～6が満足されていることは先述のとおりです。残りの要件1～3が分離回収コストの削減に重要です。要件3「高い吸着速度」は分離回収の処理速度を決めるため、コストに影響します。要件2「高いCO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>選択比」については、空気の主成分であるN<sub>2</sub>に対するCO<sub>2</sub>の選択比が分離回収コストに大きく影響すること[22]が知られています。

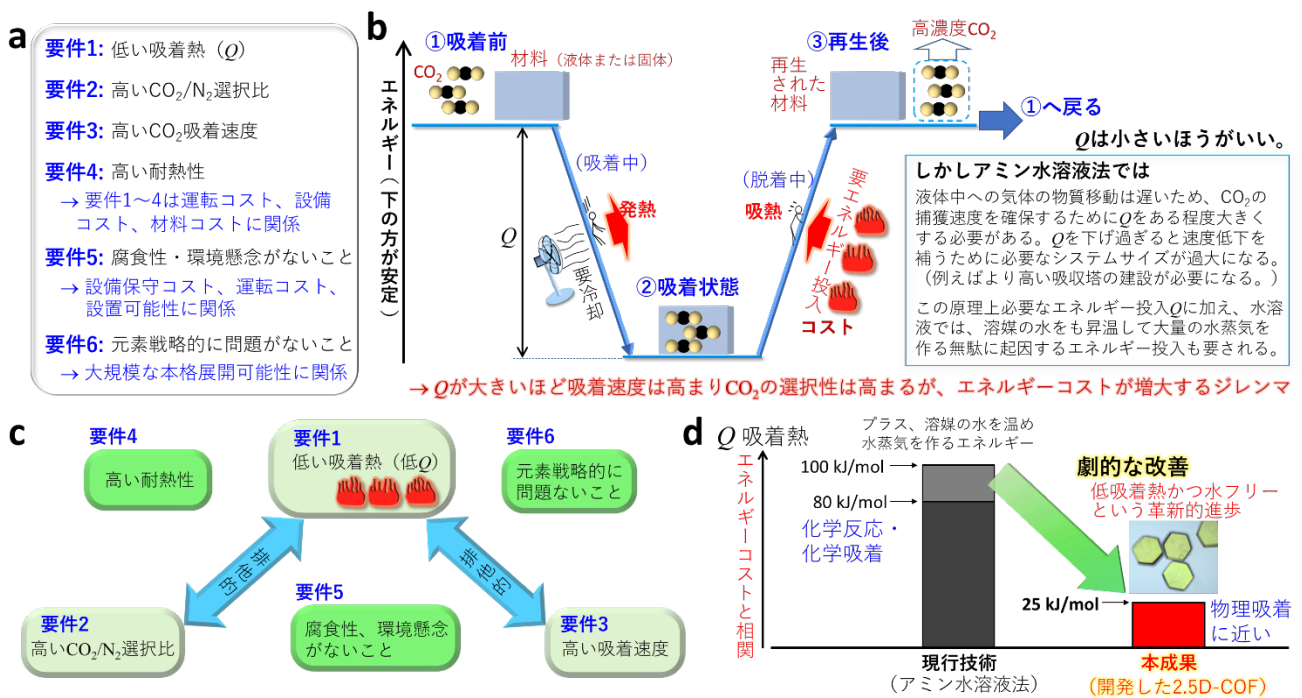


図3 (a) CO<sub>2</sub>分離回収材に求められる6要件。(b) CO<sub>2</sub>の捕獲（固体の場合は吸着、液体の場合は吸収と言う）の過程を縦軸にエネルギー、横軸に過程の進行をとって表した模式図。谷の深さがCO<sub>2</sub>分子の材料への吸着熱（化学吸着の場合は化学反応熱） $Q$ を表す。 $Q$ が大きいほど迅速かつ選択的にCO<sub>2</sub>を捕獲できるが、その代償として材料の再生（CO<sub>2</sub>の材料からの脱離）過程で要される投入エネルギー量が大きくなる。(c) 要件間にある関係。(d) 本成果が現行技術のアミン水溶液法の高コストの主要因である過大な $Q$ を劇的に低下させたことを示す棒グラフ。

運転コストに大きく影響するのが、要件1の、材料へのCO<sub>2</sub>分子の吸着熱（アミン水溶液法では反応熱）です。吸着熱は記号 $Q$ （単位：J/mol、CO<sub>2</sub>分子1モル当たりの吸着エネルギー）であらわします。図3bは、 $Q$ のエネルギーコストへの影響を示しています。まず、材料がCO<sub>2</sub>分子を捕獲すると、 $Q$ の熱を周囲に放出します。 $Q$ が大きいほどCO<sub>2</sub>の捕獲速度は上がり、CO<sub>2</sub>に対する選択性も高くなる二重のメリットがあります。一方、システムを連続運転するには、CO<sub>2</sub>を捕獲した材料からCO<sub>2</sub>を引きはがし、材料を捕獲前の状態に戻すこと（再生）が必要です。この再生の工程でエネルギー（実際には化石燃料を燃やして得られる熱エネルギー）の投入が必要になります。（注：強さの尺度の「温度」と量の尺度の「エネルギー」は別物で、大事なのはエネルギーの方です。）材料の $Q$ が大きければ、それと同じエネルギーを再生工程で投入する必要があるため、分離回収コストは上昇します。つまり、 $Q$ は小さいほどよいのですが、図3b中の「しかしアミン水溶液法では」に詳述のように、水溶液を使う限り、実際上 $Q$ をある程度以上の大きさにすることが必要で、むやみに $Q$ を下げることはできません。これは、図3cに示したように、「 $Q$ の小ささ（要件1）」と「CO<sub>2</sub>選択比の高さ（要件2）」との間、及び、「 $Q$ の小ささ（要件1）」と「CO<sub>2</sub>吸着速度の高さ（要件3）」の間には

相反する関係があるためです。

しかし、COF は多孔体なためガス分子の材料内拡散が速いため、アミン水溶液法の場合より大幅に  $Q$  を下げても  $\text{CO}_2$  の吸脱着速度を確保できる利点が期待できます。また、本発明で創出した 2.5 次元 COF は、材料内部に  $\text{CO}_2$  捕獲基である一級アミンを超高密度にもつため、 $Q$  を下げても  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  選択比が犠牲にならない利点も期待できます。

計測の結果（データは下記「論文情報」の論文参照）、本成果の 2.5 次元 COF の  $Q$  は約 25 kJ/mol と、現行の化学吸収法の  $Q$  (80~120 kJ/mol) の約 4 分の 1 であることが判明し、 $\text{CO}_2$  の分離回収のエネルギーコストを劇的に低下しうることが判明しました（図 3d）。また、このように低い  $Q$  にも関わらず、 $\text{CO}_2$  の吸着平衡の時定数は 10 秒以下と高速であることが判明しました。これらの結果は、本成果の材料を用いれば、吸着速度を犠牲にすることなく、 $\text{CO}_2$  の分離回収の運転にかかるエネルギーコストを現行法から大きく削減しうることを示しています。

続いて、この新材料が、相反する「 $Q$  の小ささ（要件 1）」と「 $\text{CO}_2$  選択比の高さ（要件 2）」とを前例がない高い程度で同時達成できていることを示します。図 4 は、横軸を  $Q$  が右に行くほど小さくなるようにとり、縦軸に  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  選択比をとったグラフで、点が右上にある方が高性能となります。 $\text{CO}_2/\text{N}_2$  選択比は  $\text{CO}_2$  の分離回収コストに大きく影響します[22]。図 4 が示すように、本成果の 2.5 次元 COF は、 $\text{CO}_2$  の分離回収性能が報告されている他の COF（図 4a）、金属有機構造体（MOF、図 4b）、多孔性有機ポリマー（POP、図 4c）のいずれの材料より、この判断基準においてコスト面で優越しています。すなわち、本成果で開発した新材料は、従来のさまざまな有機多孔材との比較においても、図 3a の要件 1~6 を同時に満足した極めて稀な材料となっています。

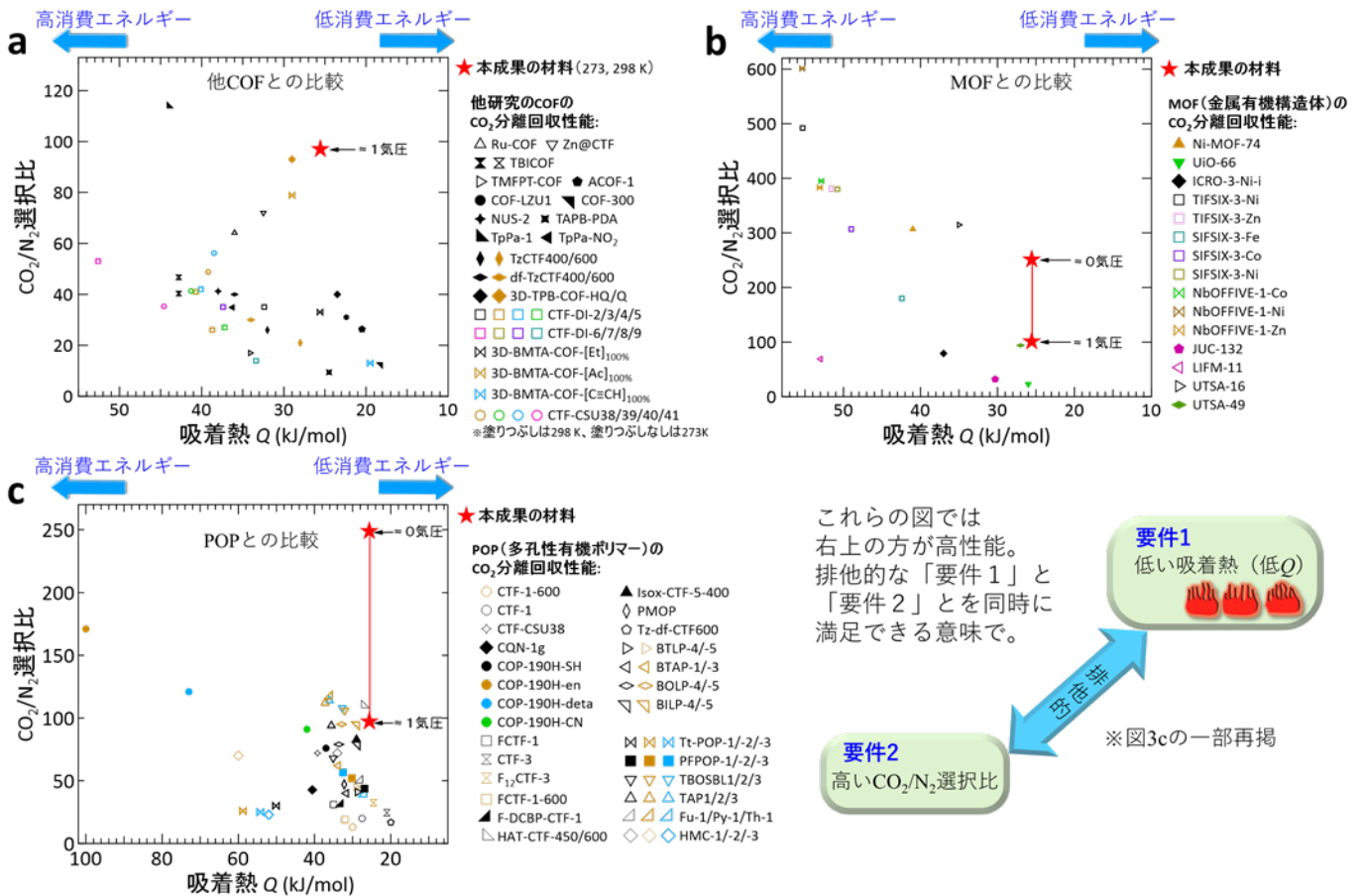
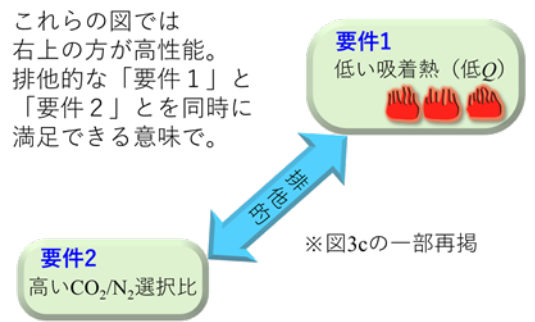


図4 本成果の2.5次元COFと、これまでにCO<sub>2</sub>分離回収性能が報告されたさまざまな多孔性有機固体である(a)他のCOF、(b)金属有機構造体(MOF)、(c)多孔性有機ポリマー(POP)との性能比較。性能評価指標として、縦軸にCO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>選択比(要件2の指標)、横軸にCO<sub>2</sub>分子の材料への吸着熱 $Q$ (要件1の指標)をとる。横軸は右の方が値が小さくように表示している。要件1と要件2は相反する性質なため、これらの図では右上の方が高性能となる。これらの比較は、本成果のCOFが従来のCOF・MOF・POPより高性能であることを示している。この根底には、芳香環についた一級アミンはCO<sub>2</sub>選択性がありつつも、塩基性すなわちCO<sub>2</sub>の捕獲力が弱いことが理由としてある。詳細な議論は下記「論文情報」の論文参照。

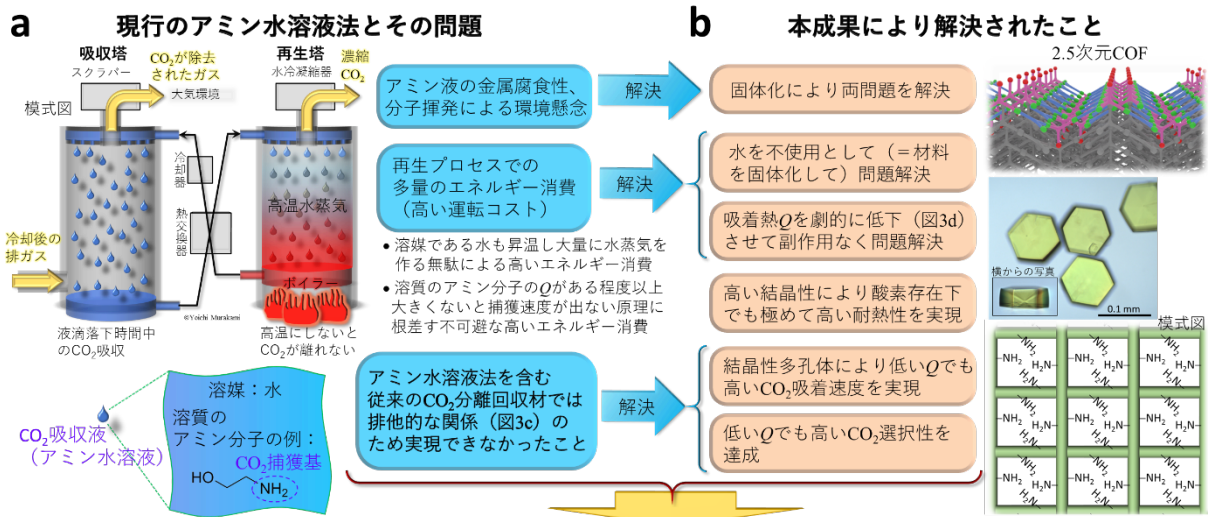
### ●社会的インパクト

「背景」で述べたように、気候変動を有意に軽減するにはCCSの事業レベルでの本格展開が必要です。しかし、現行技術の化学吸収法(アミン水溶液法)のCO<sub>2</sub>分離回収コストは政府の目標コストから数倍もの乖離があり、その解決には革新的な新技術が必要となっています。図5に要約したように、本成果の新型多孔材は、現行技術の諸問題を解決しています。今後、本材料を基盤とした新技術が社会実装に発展すれば、カーボンニュートラル・脱炭素に貢献し、気候変動の軽減に寄与しうる、事業レベルでの展開





可能性をもつ新たな CO<sub>2</sub> 分離回収の手段が社会に提供されることとなります。



要件1~6（図3a）を同時満足する卓越したCO<sub>2</sub>分離回収材の開発に成功

図5 (a) 現行のアミン水溶液法の概略模式図とその問題点、(b) 本発明が解決した事項。

## ●今後の展開

本成果の社会実装には、適切な産学連携と公的助成支援を通じた以下の4点の遂行が必要となっています。

- 1 点目：本成果の 2.5 次元 COF 材料のスケールアップ生成を実証するとともに、トンスケールで低コストな材料生産を実現するため、同様の優れた CO<sub>2</sub> 分離回収性能を持つ COF を生成できる圧倒的に低コストな原料分子を見いだすこと。
- 2 点目：本成果の COF の長期使用の耐久性等の諸性能を、各業界における実際の使用条件に近い条件で試験し、問題点を洗い出し、材料に必要な改良を加えてゆくこと。
- 3 点目：実験室スケールでデモシステムを構築し、CO<sub>2</sub> 分離回収の実証デモを行うこと。
- 4 点目：関連する特許を確保しつつ、本成果をスタートアップの創出につなげること。

## ●付記

本研究は参加した各研究者が以下の支援を受けて行われました。村上陽一、本課題の直接的助成：科研費補助金 [23H00165](#)、村上陽一、関連の支援：科研費補助金 [22K18286](#)、東京科学大学グリーン・トランスフォーメーションイニシアチブ ([Science Tokyo GXI](#))、物質・デバイス領域共同研究拠点（文部科学省プログラム）、植草秀裕：科研費補助金 24H00005 及び 22K05032、三宮工：科研費補助金 22H05033。材料評価では本学オープンファシリティセンター（OFC）、結晶面の同定では本学理学院化学系 岸田裕子氏（植草秀裕研究室大学院生）の協力を得ました。ここに謝意を表します。

## 【参考文献】

- [1] 米国海洋大気庁 (NOAA)  
<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- [2] 気候変動に関する政府間パネル (IPCC)  
第 6 次評価報告書 (AR6) 第 1 作業部会報告書 (WG1) 第 1 章  
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-1/>  
及び第 3 章  
<https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-3/>
- [3] The Nobel Prize organisation press release: The Nobel Prize in Physics 2021  
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2021/press-release/>  
の中にある Illustration: Carbon dioxide temperature
- [4] 国土交通白書 2022 序章、国土交通省  
<https://www.mlit.go.jp/statistics/hakusyo.mlit.r4.html>
- [5] 国連環境計画 (UNEP)  
<https://www.unep.org/topics/fresh-water/disasters-and-climate-change/climate-change-and-water-related-disasters>
- [6] 国連世界食糧計画 (WFP)  
<https://www.wfp.org/climate-action>
- [7] 世界保健機関 (WHO)  
<https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- [8] 経済産業省 資源エネルギー庁  
<https://www.enecho.meti.go.jp/about/whitepaper/2021/html/1-2-0.html>
- [9] GX リーグ  
<https://gx-league.go.jp/action/gxets/>
- [10] 内閣官房 GX 実現に向けたカーボンプライシング専門ワーキンググループ  
GX 実行推進室資料 3 「排出量取引制度の本格稼働に向けた検討の方向性」  
[https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx\\_jikkou\\_kaigi/carbon\\_pricing\\_wg/dai1/index.html](https://www.cas.go.jp/jp/seisaku/gx_jikkou_kaigi/carbon_pricing_wg/dai1/index.html)
- [11] 日本経済新聞オンライン 2024 年 11 月 19 日  
<https://www.nikkei.com/article/DGXZQOUA191M10Z11C24A1000000/>
- [12] Statistical Review of World Energy 73rd edition, 2024, Energy Institute  
<https://www.energyinst.org/statistical-review/home>
- [13] 環境省ニュースリリース 2024 年 4 月 12 日  
[https://www.env.go.jp/press/press\\_03046.html](https://www.env.go.jp/press/press_03046.html)

- [14] 経済産業省 資源エネルギー庁  
[https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ccs\\_law\\_01.html](https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/ccs_law_01.html)
- [15] Global CCS Institute  
<https://status23.globalccsinstitute.com/>
- [16] NHK ニュース 2024 年 5 月 17 日  
<https://www3.nhk.or.jp/news/html/20240517/k10014452401000.html>
- [17] 藤原勝憲、石油技術協会誌 第 84 巻 114~122 ページ、2019  
[https://www.jstage.jst.go.jp/article/japt/84/2/84\\_114/\\_article/-char/ja/](https://www.jstage.jst.go.jp/article/japt/84/2/84_114/_article/-char/ja/)
- [18] Institute for Energy Economics and Financial Analysis, 2022 年 10 月 5 日  
<https://ieefa.org/resources/ill-fated-petra-nova-ccs-project-nrg-energy-throws-towel>
- [19] 日興リサーチレビュー (2022 年 4 月) より、「【Research Clip】主要な CO<sub>2</sub> の分離・回収技術とコスト的課題」(日興リサーチセンター)  
<https://www.nikko-research.co.jp/library/11258/>
- [20] 経産省資料 2023 年 6 月 23 日  
[https://www.meti.go.jp/shingikai/energy\\_environment/carbon\\_recycle\\_rm/20230623\\_report.html](https://www.meti.go.jp/shingikai/energy_environment/carbon_recycle_rm/20230623_report.html)  
の p. 8 下に目標とする CO<sub>2</sub> 分離回収コストのロードマップが記載。
- [21] 例えば、F. Meng et al., [Research progress of aqueous amine solution for CO<sub>2</sub> capture: A review](#), *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 168, article number 112902, 2022.
- [22] 例えば、M. T. Ho et al., [Reducing the cost of CO<sub>2</sub> capture from flue gases using pressure swing adsorption](#), *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 47, pp. 4883–4890, 2008.  
の Figure 7 参照。

## 【用語説明】

- (1) **化学吸収法 (アミン水溶液法)**: 多くの場合一級アミンをもつ分子 (二級アミンや三級アミンをもつ分子の場合もある) を溶質とした水溶液をシステムに循環させ、CO<sub>2</sub> の吸収と放散 (再生) とを繰り返して、排ガスに含まれる CO<sub>2</sub> の分離回収する方法。図 5a の模式図で表される方式で、そのシステムは通常、排ガス中の CO<sub>2</sub> の吸収を行う吸収塔と濃縮 CO<sub>2</sub> の放散及びアミン液の再生を行う再生塔とから構成される。事業レベルでの展開に向けては多くの課題が残るとされる[19,21]。
- (2) **共有結合性有機骨格**: 英語では Covalent Organic Framework (COF、コフ)。通常二種類の原料分子が繰り返し**縮合** (用語 5) して共有結合のネットワークを構築し、周期性すなわち結晶性を有する多孔体となったもの。多くの場合、

C (炭素)、H (水素)、N (窒素)、O (酸素) などの元素戦略上問題がなく大量に存在する元素からなり、金属フリーなため、一般に環境負荷が低く、廃棄が比較的容易。共有結合で形成されるため、比較的耐熱性や耐久性が高い長所もある。COF は分子の幅の棒からなるジャングルジムのような物質で、近年海外で研究が活発化している材料ジャンルである (図 1 参照)。

- (3) **一級アミン**：アンモニア (NH<sub>3</sub>) の一つの水素を有機の基で置換したもの。「-NH<sub>2</sub>」と表され、それ自体はアミノ基とも呼ばれる。塩基であり、CO<sub>2</sub> 分子の捕獲能がある。吸着が強ければ化学反応 (新たな化学結合の形成) を伴う化学吸着に、弱ければ化学反応を伴わない物理吸着になる。
- (4) **CO<sub>2</sub> の吸着熱**：CO<sub>2</sub> 分子が固体に吸着したときに安定化する分のエネルギー。単位は kJ/mol (キロジュール/モル)。1 モルの CO<sub>2</sub> 分子が捕獲された際に放出される熱で、図 3b の *Q* のこと。CO<sub>2</sub> を捕獲した材料を元の状態に戻す再生工程では、この量の熱エネルギーを材料に加えなければならず、従って吸着熱 *Q* が大きな材料ほど再生時の必要エネルギー投入量が大きくなる。アミン水溶液法では溶質のアミン分子と CO<sub>2</sub> との反応熱にあたる。本成果では CO<sub>2</sub> 分離回収におけるエネルギーコストの主要部分であるこの吸着熱を、副作用なく現行のアミン水溶液法の約 1/4 と劇的に低下させることに成功している (図 3d)。
- (5) **縮合**：2 個の分子が H<sub>2</sub>O などの小分子の脱離を伴って反応した結果、その 2 個の分子が共有結合で結ばれ一体化すること。本成果の場合 (図 2a) にはアルデヒド基 (-CHO) と一級アミン (-NH<sub>2</sub>) とが H<sub>2</sub>O 一分子の脱離を伴って縮合し、イミン結合 (-C=N-) が形成される反応となっている。

## 【論文情報】

掲載誌： *Nature Communications*

論文タイトル： 2.5-dimensional covalent organic frameworks

著者： Tomoki Kitano, Syunto Goto, Xiaohan Wang, Takayuki Kamihara, Yoshihisa Sei, Yukihiro Kondo, Takumi Sannomiya, Hidehiro Uekusa, and Yoichi Murakami\*

DOI： [10.1038/s41467-024-55729-2](https://doi.org/10.1038/s41467-024-55729-2)

## 【研究代表者プロフィール】

村上 陽一 (ムラカミ ヨウイチ) Yoichi MURAKAMI

東京科学大学 総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所 教授

研究分野：カーボンニュートラル技術、次世代エネルギー技術



**【お問い合わせ先】**

(研究に関すること)

東京科学大学 総合研究院 ゼロカーボンエネルギー研究所 教授

村上 陽一

Email: [murakami.y.af@m.titech.ac.jp](mailto:murakami.y.af@m.titech.ac.jp)

(報道取材申し込み先)

東京科学大学 総務企画部 広報課

申し込みフォーム: <https://forms.office.com/r/F3shqsN7zY>



Email: [media@ml.tmd.ac.jp](mailto:media@ml.tmd.ac.jp)

TEL: 03-5734-2975 FAX: 03-5734-3661