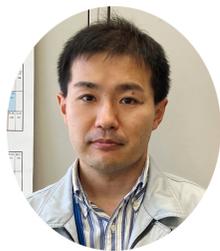




リサイクル炭素繊維の評価技術開発と その標準化



産業技術総合研究所

杉本 慶喜

1 はじめに

炭素繊維 (Carbon Fiber : CF) を強化繊維として用いたCF強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastic : CFRP) は、高強度・高弾性率でありながら軽量という特性を有する材料である。これらの材料は、宇宙航空分野をはじめ、風力発電用ブレードや水素タンクなどのエネルギー分野、さらにはスポーツ用品に至るまで、幅広い分野で活用されている。

現在主流となっているPAN系CFは、1959年に大阪工業試験場(現・産業技術総合研究所(産総研))の進藤博士によって発明された¹⁾。その後、国内企業による生産が開始され、採用実績の増加とともに信頼性を獲得してきた。その結果、2000年以降には航空機への本格的な採用が始まり、需要が急速に拡大している。ガラス繊維を含む繊維強化型複合材料全体の中では、CFRPの使用量はまだ少ない状況にあるが、今後さらなる需要拡大が見込まれている²⁾。

CFRPは、CFと樹脂という異なる材料を複合化して製造されるため、ブレンド材料やアロイと比較して成形の難易度やコストが高く

なる傾向がある。しかし、それにもかかわらず採用が進んでいるのは、得られるメリットが非常に大きいためである。例えば、航空機にCFRPを採用することで、原油消費量を約7%削減できるとされている³⁾。また、自動車への採用では約16%の削減が可能である³⁾。風力発電分野では、CFRPの使用により部材剛性が大幅に向上し、大型化が可能となることで発電効率の向上が期待されている。さらに、土木・建築分野においては、軽量性により施工性の向上や搬入コストの削減にも寄与する⁴⁾。

このように複合材料の採用には多くの利点がある一方で、2015年以降、欧州を中心に環境への影響を重視した政策が導入されてきた。例えば、使用済み自動車に関するELV規制⁵⁾や、ヨーロッパのCEパッケージ⁶⁾に関連する政策が挙げられる。現時点では、CFRPを直接対象とした規制は存在しないものの、現状では複合材料が埋め立て処分されているため、将来的に規制対象となる可能性がある。そのため、法規制による制限を回避するためにも、リサイクルの推進が求められている。

現在、CFRPのマトリックス樹脂には熱硬化性樹脂が主に使用されており、これがリサイクルを困難にしている要因の一つである。そのため、現状ではマトリックス樹脂を除去して繊維のみを回収して再利用する方法⁷⁻⁹⁾が一般的である。しかし、得られたリサイクルCFには多様な種類が存在し、品質が十分に担保できないケースも多い。その結果、素性が明確な限られたリサイクル材を使用しなければ安定した製品の製造が困難となるため、これがリサイクルCFの普及を妨げる要因の一つにもなっている。

このような課題を解決するためには、リサイクルCFの品質を保証する標準的な試験方法の確立が不可欠である。そこで産総研では、リサイクルCFの品質評価試験方法の開発およびその標準化に取り組んできた。本稿では、その取り組みの概要について紹介する。

2 リサイクルCFとは

リサイクルCFと一口に言っても、回収方法や原材料の違いにより、その形態や特性は多岐にわたる。まずは、CFRPからCFを回収する方法について説明する。

CFRPは、CFと樹脂という物性の異なる2種類の材料を組み合わせたものである。そのため、熱特性、耐薬品性、力学特性などの違いを利用して、CFを分離・回収する必要がある。主な回収方法としては、熱分解法⁷⁾、化学的溶解法⁸⁾、機械的分解法⁹⁾が挙げられる。

現状の技術では、新品のCFと全く同じ状態での回収は困難であり、必要な性能やコストに応じて適切な処理方法が選択される。場合によっては、複数の方法を組み合わせて処理が行われることもある。

プラスチックのリサイクルでは、原材料の違いがリサイクルの難易度に直結するため、製造工程由来のリサイクル(Post Industrial Recycled : PIR)と消費後のリサイクル(Post Consumer Recycled : PCR)を明確に区別して

いる。CFにおいても同様に、リサイクルの難易度に応じた分類が存在するが、図1に示すように中間基材の種類によってその分類はより複雑になる傾向がある。

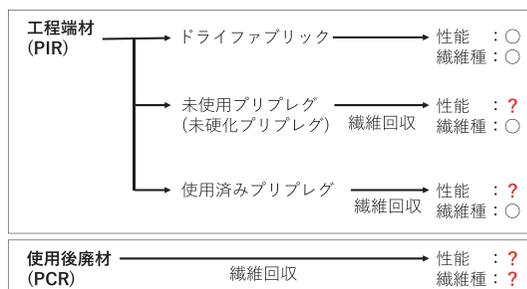


図1 リサイクル炭素繊維の分類

リサイクルCFは、原料や回収方法の違いにより、新品とは大きく異なる状態で得られる。樹脂を除去する過程で、樹脂が完全に除去できない場合や、CF自体が損傷を受ける場合がある。また、使用履歴やリサイクルプロセス中に物理的損傷が加わることもあり、表面状態の劣化が生じる可能性がある。

新品のCFには、繊維の加工性や樹脂との接着性を向上させるためにサイジング剤が塗布されており、さらに表面には官能基が存在する。しかし、リサイクルプロセスにおいてこれらが除去されることがあり、繊維強度の低下や、再複合化時の含浸性・接着性の低下につながる可能性がある。

さらに、繊維の形態にも大きな違いがある。新品のCFは、連続繊維のロービングやそれを用いた織物として供給されるが、リサイクルCFは部材や端材から回収されるため、不連続繊維で綿状の形態になることが多い。そのため、リサイクルCFに適した成形方法の選定が重要となる。

このような背景から、リサイクルCFは主に射出成形品や不織布などの形で利用されており、現時点ではプリプレグやフィラメントワインディングといった長繊維CFを用いる主要な成形方法とは異なる用途での活用が中

心となっている。これらの活用方法は、いわゆるカスケードリサイクルに該当し、今後は水平リサイクルやアップサイクルといった高度な活用方法の探索が重要となる。

3 標準化の動き

CFは、多くの場合に強化繊維としての再利用が期待されており、その品質保証は極めて重要である。しかし、これまでリサイクルCFの品質を評価・保証するための国際的な基準は存在していなかった。こうした背景を踏まえ、新たに策定されたのが「ISO 19350 : 2025」¹⁰⁾であり、これはリサイクルCFの引張強度分布および界面せん断強度を同時に評価可能な試験方法を定めた国際標準である。

ISOにおいて国際標準化を進めるには、国内委員会や、ISO内部でのワーキンググループ(WG)の設置が必要である。しかし、当初この分野に関する委員会やWGは存在していなかった。そこで、産総研は日本プラスチック工業連盟と連携し、「リサイクルCF標準化委員会」の設立と、ISOへの新規標準提案を推進した。その結果、ISO/TC61/SC13(国際標準化機構/プラスチック専門委員会/複合材および強化繊維分科委員会)において、リサイクルCFを議論するWG8(リサイクル強化繊維作業グループ)が新設された。さらに、WG8設立時のコンビーナー(議長)には産総研の研究者が選出され、日本が主導する体制が整えられた。

WG8で最初に議論されたのが、産総研が提案した「ISO 19350 : 2025」に定められたリサイクルCFの引張強度分布と界面せん断強度の同時評価法である。短い繊維を用いた複合材料では、繊維が破断する場合もあれば、界面から引き抜ける場合もある。そのため、短いリサイクルCFについては繊維引張強度と繊維/樹脂界面せん断強度の両方を評価することが不可欠である。

この評価法の詳細な説明はここでは割愛するが、図2に示すような産総研が開発した

「改良型フラグメンテーション試験」¹¹⁾に基づいている。樹脂中に1本のCFを包埋し、それを引張試験することで、繊維の破断挙動を観察する。繊維を引張ると、内部の繊維が徐々に破断し、繊維強度と界面せん断強度が釣り合うまで破断が進行する。破断した領域をワイブル分布に基づく数式でフィッティングすることで繊維強度分布を、破断が終了した領域から界面せん断強度を算出することが可能である。

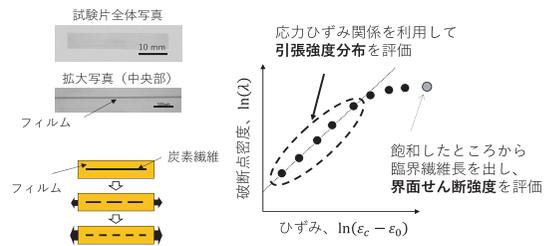


図2 改良型フラグメンテーション試験

従来の試験法では短い繊維の評価が困難であったが、本試験法では短い繊維にも対応可能であり、今まで評価できず性能が分からなかった短いリサイクルCFの特性評価が可能になった。

4 標準化の意義と影響

これまでのリサイクルCFは、流通量の制約に加え、品質保証の観点から、製造工程由来のリサイクルが主流であった。しかし、リサイクルCFに対する標準的な試験方法が国際標準として整備されることで、品質の定量的評価が可能となり、品質保証が実現されるようになる。この結果、従来は品質保証の不確かさから使用が困難であったリサイクルCFについても、材料選定の選択肢として活用できるようになり、設計における信頼性向上にも寄与することが期待される。

このような流れが進展すれば、例えば連続繊維をわざわざ切断して樹脂と混練しているような射出成形用途において、代替としてリ

サイクルCFの活用が可能となり、産業界での導入が促進されると考えられる。さらに、標準化によって品質の見える化が進むことで、サプライチェーン全体での取り扱いが容易になり、設計者・材料選定者・製造者の間での共通理解が形成される。これにより、製品開発の効率化やコスト削減にもつながる可能性がある。

また、一般的にリサイクルプロセスを経ることでCFの性能は低下する傾向にあるが、もともと性能が高い高品質なCFであれば、リサイクル後も高い性能を維持することが期待されている。そのため、日本のCFメーカーが製造したCFのリサイクル品についても高い価値を有することから、高品質な日本のCFの競争力維持といった部分についても寄与するものと考えられる。

さらに、国際標準の整備は、グローバル市場への展開においても重要な役割を果たす。各国で異なる評価基準を用いることなく、共通の尺度で品質を示すことができるため、海外企業との取引や技術連携が円滑に進む。これにより、日本発の技術や製品が国際市場で競争力を持つことが可能となる。

加えて、リサイクルCFの活用は、資源の有効利用や廃棄物削減といったサステナビリティの観点からも極めて有意義である。CFは製造時に多くのエネルギーを要する素材であり、その再利用は環境負荷の低減に直結する。標準化によってリサイクル材の信頼性が高まれば、企業の環境対応やESG戦略にも貢献することができる。

このように、ISO 19350 : 2025の策定は、材料選定・設計の信頼性向上、産業界での導入促進、グローバル市場への展開支援、そしてサステナビリティへの貢献という多方面にわたる効果をもたらすものであり、今後のリサイクルCFの普及と発展において極めて重要な役割を果たすと考えられる。

5 課題と今後の展望

今後の普及に向けた技術的課題として、リサイクルCFの繊維長に関する問題が挙げられる。従来、多くの用途では長繊維のCFが使用されてきたが、短繊維は成形性に対して優位である反面、性能面で長繊維に劣るため、射出成型等での活用などに制限されていた。しかし、現状のリサイクルCFの多くは短繊維状態であることが多いため、短繊維状態で最大限の性能を発揮できるような成形技術の検討が今後の重要な課題となる。このような課題を解決することで図3に示すようなCFの資源循環が実現できると考えている。もちろん、長繊維を直接回収可能な技術も開発されつつあり、これらの技術革新はリサイクルCFの利用範囲を広げる上で非常に重要である。

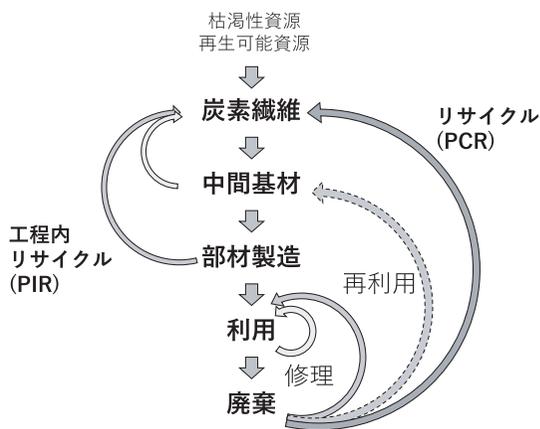


図3 炭素繊維の資源循環

現在ISOにおいて、改良型フラグメンテーション試験に続き、リサイクルCFの定義に関する国際標準の策定が進められている。この定義が使用されるようになることでリサイクルCFの状態を表現できるようになることで、品質保証の面で大きな前進が期待されている。そのため、品質保証されたリサイクルCFの産業界での活用が加速すると考えている。また、日本からも新たな規格案が提案していく予定であり、日本主導でリサイクルCFの標

準化を推進していき、日本の強いCFを新品だけではなくリサイクルCFについて日本の強い分野にしていくよう活動している。

こうした標準化の取り組みには、実際に評価方法の普及も不可欠である。ISO今回の標準化活動ではラウンドロビン試験なども実施されており、これらの取り組みを通じて、規格の信頼性向上と普及促進を図っていきたいと考えている。

6 まとめ

リサイクルCFは、新品のCFと比較して物性が劣化している可能性があり、さらにその劣化の程度が明確でないという課題を抱えていた。このため、リサイクルCFを用いた製品開発は長らく停滞していた。しかし、今回の標準化を契機として、リサイクルCFの品質や特性が明確に定義されつつあり、これらの課題は徐々に解消されつつある。

標準化は、技術の信頼性向上や市場の拡大を促進するうえで極めて重要な手段であり、リサイクルCFの普及においても大きな価値をもたらすものと考えている。今後、省エネルギー社会の実現に向けて、CFRPをはじめとする軽量かつ高強度な材料の需要は一層高まると予想している。リサイクルCFがその一翼を担うことにより、持続可能な社会の構築に貢献することが期待される。

参考文献

- 1) 特公昭37-4405号「アクリルニトリル合成高分子物より炭素製品を製造する方法」。
- 2) Hao Chen, Heather P.H. Liddell, Amod A. Ogale, Zoe Chunyu Miao, Muzan Williams Ijeoma, Michael Carbajales-Dale, A critical review and meta-analysis of energy demand, carbon footprint, and other environmental impacts from carbon fiber manufacturing, *Resources, Conservation and Recycling*, 219, 108302 (2025).
- 3) 炭素繊維協会, LCAモデル
(<https://www.carbonfiber.gr.jp/tech/lca.html>)
- 4) 田原慎太郎, 池永周造, 樋口彰悟, 野村一樹, 中島浩二, 今井祐介, 杉本慶喜, 松本幸大, ミルドリサイクル炭素繊維を混合したマトリックス樹脂・FRPの物性評価と内部観察, *土木学会論文集*81, 24-14013 (2025).
- 5) ELV規制 (https://environment.ec.europa.eu/topics/waste-and-recycling/end-life-vehicles_en)
- 6) CEアクションプラン (https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en)
- 7) Marina Corvo Alguacil, Kentaro Umeki, Shujie You, Roberts Joffe, Evolution of carbon fiber properties during repetitive recycling via pyrolysis and partial oxidation, *Carbon Trends*, 18, 100438, (2025).
- 8) Daniele Tortorici, Yi Chen, Leon Mishnaevsky Jr, Susanna Laurenzi, Recycling carbon fibers by solvolysis: Effects of porosity and process parameters, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 190, 108667, (2025).
- 9) Costantino Menna, Luigi De Simone, Vittorio Capozzi, Mechanical recycling of GFRP wind turbine blades: Evaluating the sustainability and economic potential of recycled fibers, *Developments in the Built Environment*, 23, 100710, (2025).
- 10) ISO 19350:2025 Recycled carbon fibre — Determination of tensile strength distribution and interfacial shear strength of single filament embedded in matrix polymer.
- 11) Yoshiki Sugimoto, Daisuke Shimamoto, Yusuke Imai, Yuji Hotta, Simultaneous evaluation of tensile strength and interfacial shear strength of short length carbon fibers using fragmentation test, *Carbon*, 161, 83, (2020).

Well-Beingな未来社会を支える「空間」研究への挑戦

— 自然の力を科学するGenki空間®プロジェクトの学際的アプローチ —



株式会社豊田中央研究所

池内 暁 紀

トヨタ自動車株式会社

伊藤 正 和

1 はじめに

様々な情報が高度にシステム化された未来社会において、モビリティの価値は単なるクルマとしての移動手段にとどまらず、私たちの生活のあらゆる場面に浸透していくと考えられる。豊田中央研究所とトヨタ自動車 未来創生センターでは、人とモビリティの接点である「空間」に新たな価値を提供することで、未来のモビリティだけでなく、居住空間や街づくりなどで人々をWell-Beingにする研究「Genki空間®プロジェクト」を行っている。Genki空間®プロジェクトは大きく、心理学や生理学、感性工学などを中心とした「デザイン研究」と、微生物学や分子生物学などバイオ分野を中心とした「空気質研究」に分けられる。本稿では、Genki空間®プロジェクトの概要と、それぞれの研究について最近の事例を紹介したい。

2 Genki空間®プロジェクトとは？

空間研究を始める上で注目したのが、森林のような植物に囲まれた自然空間である。このような緑豊かな自然が人へ与える効果としては、リラックス効果やストレス軽減に加え、近年では、森を散策すると注意力や記憶力、創造性の向上にも寄与すると報告がある¹⁻⁴⁾。また、異なる視点からの自然の効果として、自然環境に含まれる多様な微生物や植物由来の化学物質との接触を増やすことが、免疫機

能の維持やアレルギー疾患の抑制につながっている可能性が示唆されている⁵⁾。もし、1日のうちで長い時間を過ごすオフィスやリビングといった空間が、自然の森と同じように多様な効果を持った空間ならば、そこに滞在するだけで人が心身ともに良好な状態でいられるのではないかと考えた。この考えをもとに、自然の力を科学的に検証し、そのエビデンスをもとに理想的な空間を創り上げることを目的としたのが、Genki空間®プロジェクトである。Genki空間®プロジェクトの特徴の1つとして、実際に森などの自然を調査するフィールド研究と、実験室内に「自然環境を切り取った」かのような空間を再現し、制御された環境で人に与える効果を評価する実験室研究を並行して進めていることが挙げられる(図1)。両研究の結果を相互にフィードバックすることで、「自然のどの要素が、人の何に働きかけているのか」といったメカニズムを細胞レベルから人個体まで明らかにすることを目指している。



図1 実験室内に製作した自然の要素を取り込んだ空間

3 論理的な空間設計に向けた「デザイン研究」

3.1 植物の葉の形状と人の印象の関係

「デザイン研究」では、今までプロのデザイナーの「感性」に依存していた空間設計を、自然の視覚的要素が人に及ぼす効果を数値化することで、科学的根拠に基づいた空間設計を可能にすることを目的としている。例えば、植物の「葉の形状」の研究では、オフィスデザインなどでよく用いられる40種類の観葉植物に対して、プロの植物空間デザイナーが持つ印象を主観評価でデータ化し、スキャンした植物の葉から、幅、長さ、面積、周囲長、真円度、フラクタル次元などの物理的測定値との相関解析を行った。その結果、植物の葉の幅・長さ・丸さといった比較的単純な物理的測定値で植物の印象分類マップが作成できること、人が「癒される」と感じる植物群は「小さく、丸い葉」を、「集中力がアップする」と感じる植物群は「細く、長い葉」を、「活力がアップする」と感じる植物群は「大きく、広い葉」を持つ傾向があることなどが分かってきた(図2)⁶⁾。このマップから似た印象の植物を選定・植栽することで、空間全体の印象が変わることも明らかとなり、プロのデザイナーの「感性」や「暗黙知」を指標化することで、論理的な空間設計が可能になった。

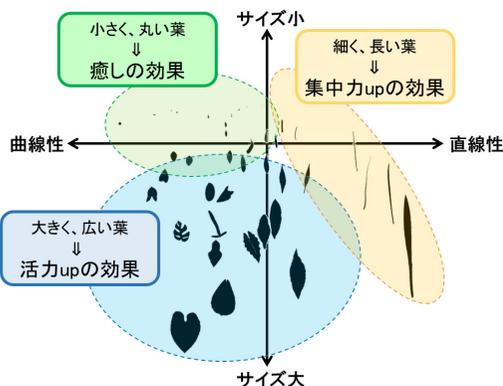


図2 植物の葉の形状と人に与える印象の分類マップ

3.2 心理学からみた自然が持つ回復効果

自然による癒し効果について、心理学の観点からの研究に「注意回復理論 (Attention Restoration Theory)」がある⁷⁾。注意回復理論には、「逃避、魅了、広がり、適合」という4つの回復特性が上げられており、自然環境にはこれらの要素が多く含まれていると考えられている。私たちは、この注意回復理論をベースに、任意の空間がどの程度「回復環境」であるかを評価する主観評価手法の開発を行った。既に報告されているPRS (Perceived Restorativeness Scale) という屋外の自然環境を評価する手法⁸⁾を参考に、30項目からなる室内用のアンケートを作成し、約1,200名の主観評価を行った。双因子モデルを使った因子分析を行った結果、PRSの4つの下位尺度のうち「逃避、魅了、広がり」が、室内空間を評価するためには重要であることが分かり、新たに11項目からなる「室内回復特性尺度 (Indoor Restorative Characteristic Scale, IRCS)」を作成した(図3)⁹⁾。IRCSを用いれば、任意の空間がどの程度回復環境であるのか、またどの回復特性(下位尺度)の寄与度が高いのかなどを評価することが可能になる。この手法を用いて図1に示した「Genki-office」を評価した結果、一般的な会議室と比較して有意にIRCSが向上しており、植物を空間に取り入れることで回復環境になることが示唆された。また、オフィス空間での具体的な作業や行動に関するアンケートと、IRCSの下位尺度(逃避、魅了、広がり)との相関解析を行ったところ、魅了や広がりが高い席はカジュアルな会話やクリエイティブな作業、逃避が高い席はリフレッシュやクールダウンに適している可能性が示唆された(図4)。IRCSの下位尺度のバランスを設計指針に加えることで、回復環境でありながら作業に合わせた空間設計が可能になるのではと考えている。

IRCS=下位尺度の平均値	
下位尺度	評価項目
逃避 日常のストレス源から離れていると感じられる程度	仕事や日常から解放された気分になれる場所だ 日々の喧騒を忘れられる場所だ 気分をリフレッシュできる場所だ 頭が疲れたときに来たい場所だ
魅了 ふと目を引く要素 見ていると飽きない要素	好奇心を掻き立てられる場所だ いろいろな発見がありそうな場所だ いろいろなことに興味を引かれる場所だ いろいろな興味深いことがありそうな場所だ
広がり 空間の心理的な広がり	広々として感じられる場所だ 窮屈な感じのする場所だ* 閉塞感を感じる場所だ*

* 逆転項目 5段階: まったく感じない(1)~とても感じる(5)

図3 室内回復特性尺度
(Indoor Restorative Characteristic Scale, IRCS)

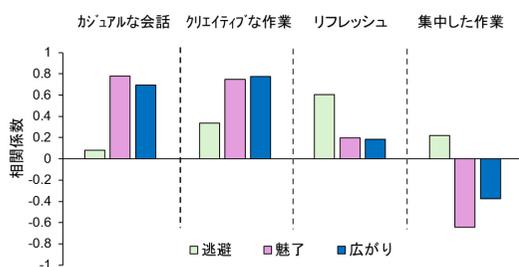


図4 IRCSの下位尺度と作業適合性の関連

4 バイオ視点でみた自然の力「空気質研究」

4.1 人に良い効果を示す空気質の研究

急激な都市化による自然との接触の減少が、非感染性のアレルギー疾患などにつながっている可能性が示唆されている。私たちは、この要因の一つとして、人類が緑豊かな自然環境の中で長い年月を過ごし、進化する過程で最適化されてきた共生微生物叢(ヒトマイクロバイーム)の乱れが関与しているのではないかと考えている。特に、呼吸や皮膚への曝露を通じて取り込まれる空気中の微生物(以下、大気マイクロバイーム、大気MB)がカギを握っているのではないかと推察し、自然の空気に含まれる「大気MB」にどのような特徴があるのか、またそれらが人にどのような影響を与えているのかについて研究を行っている。

4.2 空気質(大気MB)の見える化

大気MBは、水圏や土壌に含まれる微生物

と比較して非常に少ないため、作業過程で混入するコンタミネーションを極力排除するなど高度な採取方法や分析技術が必要になる。具体的には、ゼラチンフィルターを装着した特殊なポンプで大気を吸引し、フィルターごと温水で溶解することで付着した微生物を全て回収する。回収した微生物からゲノムDNAを抽出後、16S rRNA遺伝子アンプリコンを次世代シーケンサーで解析し、得られた配列情報を基に菌叢解析を行う。このような手法で、日本全国の森林や公園、市街地などの屋外空間、オフィスや住宅などの屋内空間、合わせて400以上の空気をサンプリングし、大気MBの比較解析を行った。その結果、森林、都市、郊外、オフィスで菌叢が異なり、空間ごとに特徴的な大気MBを構成していることが明らかとなった。

4.3 空気質を測るモノサシ「バイオフィリックスコア™」の開発

前述した各地の大気MBの結果に加え、各地点における環境メタデータ(温湿度、CO₂濃度、微粒子数、周辺の緑化率などの定量的データと、実験者のアンケートデータなどを含む定性的データ)から機械学習を利用して、空気質を測るモノサシ「バイオフィリックスコア™」を開発した。バイオフィリックスコア™を使うことで、その環境の大気MBがどれほど自然の空気質に近いのかを推定することが可能になる。実際に、太陽光型環境制御温室内に作製した「Genki-tron™」のバイオフィリックスコア™を調査した。植物導入前は「-1.04」と東京のオフィス街に近いスコアだったのに対して、緑化後は最大「+1.86」と長野の森や岐阜の白川郷などの自然環境に近い大気MBであると推定された(図5)。このことから、植物や土壌など自然の要素を空間デザインに加えることで、大気中の微生物を自然環境に近づけることが可能であることが示唆された。今後は、それぞれの自然要素の大気MBへの寄与度を研究するこ

とで、特定の自然環境を再現するなど、大気MBを制御する技術開発を目指している。

5 空気質の人への効果

5.1 皮膚常在菌の見える化

空気中に浮遊している微生物が人の共生微生物に与える影響については不明な点が多い。そこで、空気中最も曝露される人の組織である皮膚に着目し、大気MBが皮膚に常在する微生物叢(皮膚MB)に与える影響について研究を行っている。まず取り組んだことは、皮膚MBの見える化である。従来、皮膚MBのサンプリングは、綿棒を用いて皮膚MBをこすり取るスワブ法が中心だったが、実験手技での

ばらつきなどが大きく、大気MBによる僅かな変化を検出するには、より高感度かつ安定的な手法が必要だった。そこで、直径22mmの小型の粘着シールを用いた手法を考案した¹⁰⁾。粘着シールを前腕部に貼り付け、加圧器具により一定の圧力と時間で押し付けることで、安定して皮膚MBをサンプリングすることが可能になった(図6中央)。皮膚MBが付着したシールごとビーズ破碎によりゲノムDNAを抽出し、大気MBと同様の手法で菌叢解析を行った。この「シール法」により、いつでも、どこでも一人で安定したサンプリングが可能になっただけでなく、スワブ法では困難であった「微生物量(DNA量)」の定量も高い精度



図5 空気質を測るモノサシ「バイオフィリックスコア™」

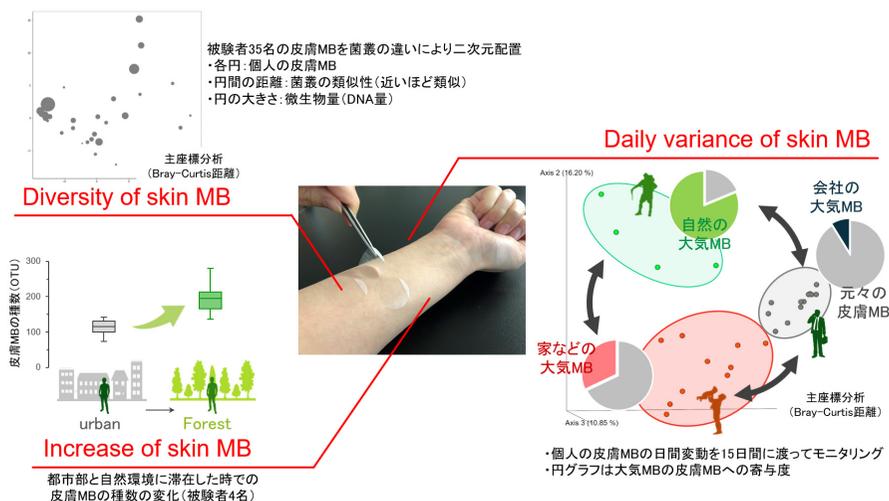


図6 大気MBが皮膚MBに与える影響

で行えるようになった。試験的に35名の皮膚MBをシール法で解析したところ、菌叢の個人差だけでなく、微生物量の個人差は最大で約100倍にも及ぶことが分かった(図6左上)。

5.2 大気MBが皮膚MBに与える影響

次に、自然環境での滞在が皮膚MBに及ぼす影響を検討するために、都市部と緑豊かな自然環境に滞在した前後での皮膚MBの変化を比較した。その結果、都市部よりも自然環境での変化が大きく、すべての被験者において皮膚MBの種数が増加した(図6左下)。さらに、日常生活における皮膚MBと被験者の行動パターンを長期的にモニタリングしたところ、勤務日、家庭で過ごした休日、自然環境での滞在日など、生活環境に応じて皮膚MBが周期的に変動することが明らかとなった。加えて、皮膚MBの変化には滞在場所の大気MBが反映されており、とくに自然環境に特徴的な多様性の高い大気MBは、皮膚MBにより大きな変化をもたらすことが分かった(図6右)。これらの結果は、空気質を制御することで皮膚MBを変化させられる可能性を示しており、将来的には、ただそこに滞在するだけでヒトマイクロバイオームを望ましい状態に調整できるような「空間技術」へと発展させていきたいと考えている。

6 まとめ

本稿では、Well-Beingな未来社会の実現を目指す「Genki空間®プロジェクト」について、「デザイン研究」と「空気質研究」という二つの異なる視点から、自然の力を科学的に検証する試みを紹介した。紙面の関係で紹介しきれなかったが、「創造性」などの創発型集団知や、植物由来の化学物質に着目した「空気質」など、他にもさまざまな切り口で「自然の力」について研究を進めている。詳細は、トヨタ自動車 未来創生センターのHP「未来につながる研究」やトヨタ自動車のオウンドメディア「トヨタタイムズ」内で詳しく紹介し

ているので参照して頂きたい。

人間は自然環境の中で進化してきた経緯から、自然や生命に本能的な愛着や関心を抱く傾向があるとする「バイオフィリア」の概念や¹¹⁾、それを建築や都市設計に応用する「バイオフィリックデザイン」は、国際的にも注目を集めている¹²⁾。これらの取り組みは、緑、水、自然光といった要素を空間に取り入れることで人の健康や快適性を高めることを目的としている。しかし従来のアプローチは、主として感覚的・経験的価値に基づいており、自然環境のどの要素がどのようなメカニズムを通じて人の心身に作用するのかという科学的根拠は十分に明らかにされていない。Genki空間®プロジェクトは、この課題に応えるべく、心理学や感性工学、微生物学や分子生物学など複数の学問領域を横断する学際的アプローチを採用し、自然の効果を可視化・定量化するとともに、その因果関係の解明を目指す新しい挑戦である。

参考文献

- 1) M. Antonelli, G. Barbieri, D. Donelli, *Int. J. Biometeorol.*, **63**, 1117 (2019).
- 2) M. G. Berman, J. Jonides, S. Kaplan, *Psychol. Sci.*, **19**, 1207 (2008).
- 3) G. N. Bratman, J. P. Hamilton, G. C. Daily, *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, **1249**, 118 (2012).
- 4) R. A. Atchley, D. L. Strayer, P. Atchley, *PLoS One*, **7**, e51474 (2012).
- 5) G. A. W. Rook, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, **110**, 18360 (2013).
- 6) K. Tokuhiro, H. Sugimoto, A. Ikeuchi, T. Tsujie, E. Wada, M. Muramatsu, C. Ohto, *Build. Environ.*, **276**, 112828 (2025).
- 7) S. Kaplan, *J. Environ. Psychol.*, **15**, 169 (1995).
- 8) T. Hartig, K. Korpela, G. W. Evans, T. Gärling, *Scand. Hous. Plan. Res.*, **14**, 175 (1997).
- 9) S. Shibata, K. Tokuhiro, A. Ikeuchi, M. Ito, H. Kaji, M. Muramatsu, *Front. Psychol.*, **15**, 1443540 (2024).

- 10) N. Soga, R. Nagura, R. Nakamura, K. Kohda, Y. Motoyama, M. Ito, I. Nakagawa, S. Nakajima, A. Ikeuchi, *Exp. Dermatol.*, **33**, e15154 (2024).
- 11) E. O. Wilson, *Biophilia*, p.157 (1984), (Harvard Univ. Press).
- 12) W. Zhong, T. Schröder, J. Bekkering, *Front. Archit. Res.*, **11**, 114 (2022).

東海化学工業会からのご案内

令和7年度 東海化学工業会 見学会・講演会 のお知らせ

日時 2025年10月7日(火) 9:30~16:30

見学場所および講演会

1) INAXライブミュージアム

(常滑市奥栄町1丁目130)

施設見学：トイレの文化館

世界のタイル博物館

窯のある広場・資料館

講演会：INAXライブミュージアム学芸員

「日本のトイレ文化について(仮題)」

株式会社LIXIL トイレタイル事業部

トイレ空間商品部 主査 都築秀昭

2) 日本製鉄名古屋製鉄所

(東海市5丁目3番地)

施設見学：高炉(車中)

連続铸造工程

出荷岸壁

スケジュール

名鉄 常滑駅 バス乗り場

9時30分集合

常滑駅発(9:30)→移動[貸切バス]→INAX

ライブミュージアム(10:00) 講演会[1時間]

+滞在[1時間]→昼食(ライブミュージアム内

レストラン)→移動(13:10)[貸切バス]→日本

製鉄名古屋製鉄所(14:00)滞在[2時間]→

移動(16:00)[貸切バス]→JR名古屋駅着

(16:30頃)

参加費 会員・共催・協賛団体会員の個人・
法人会員 8,000円、非会員 10,000
円、学生 4,000円、(貸切バス代、
昼食代を含む)

定員 25名

申込締切 2025年9月26日(金) 但し、定員
になり次第締め切ります。

申し込みフォーム↓よりお申込み下さい。

申し込みフォーム：

<https://forms.gle/YtqmpmfqyFHh52HB8>

東海化学工業会HP (<https://tcia.jp>)

中部科学技術センターHP

(www.cstc.or.jp/)

※申込フォームから申し込みできなかった場
合は、必要事項を明記の上、メールにて
tcia@cstc.or.jp 宛てにお申込みください。

必要事項：氏名、勤務先及び所属(役職)

又は学校名、連絡先(E-mail、電話)、会
員/非会員の別

入金方法 10月4日(土)までに下記口座へご
送金ください。

三菱東京UFJ銀行 名古屋営業部

「普通」No.0662250

振込先口座名義：東海化学工業会(トウカ
イカガクコウギョウカイ)

問合せ先 東海化学工業会(事務局担当：梅
澤) tcia@cstc.or.jp

TEL：052-231-3070

〒460-0011 名古屋市中区大須1-
35-18 一光大須ビル7F 中部科学
技術センター内

編集委員名簿

委員長

伊藤 彰浩 三重大学大学院工学研究科 教授

副委員長

伊奈 孝 東邦ガス(株) 技術研究所
データ・分析ソリューショングループ
課長

委員

林 修二郎 中部電力(株) 電力技術研究所
研究副主査

太田 一徳 (国研)産業技術総合研究所
マルチマテリアル研究部門
キャリアエキスパート

木全 良典 東亜合成(株) 名古屋クリエイシオ
R&Dセンター基盤コア技術研究所
主査

金岡 英徳 愛知工業大学応用化学科 准教授

小林 亮 名古屋大学未来材料・システム研究所
准教授

宮川 淳 名古屋工業大学大学院工学研究科
准教授

宮本 学 岐阜大学工学部 准教授