

Microbiology of Built Environments

「本文は Anne S. Marsh、FAQ Microbiology of Built Environments、Report on an American Academy of Microbiology Colloquium held in Washington, DC, in September 2015、Bookshelf ID: NBK519802 PMID: 30176129 DOI: 10.1128/AAMCol. Sept. 2015 を日本語に翻訳したものである。」

翻訳・文責 広島大学 藤吉奏・丸山史人 2021. 6. 27

この翻訳者はアメリカ微生物学会より以下のような特別な許可を得ています。

"We grant Dr. Fumito Maruyama the right to translate the FAQ: Microbiology of Built Environments colloquium report to Japanese and use the translated version for the purpose as requested. The translated version must include the disclaimer that the original version in English is copyrighted by ASM and is an intellectual property of ASM. However, ASM is not responsible for the accuracy of the translation. The translated version can be used for teaching purposes only. The disclaimer must be mentioned whenever the translated version is used (e.g., when posted online or discussed in class)."



AMERICAN
SOCIETY FOR
MICROBIOLOGY

A report from the
AMERICAN
ACADEMY OF
MICROBIOLOGY
RECOGNIZING SCIENTIFIC EXCELLENCE



建築環境の微生物学

2015年9月にワシントンDCで開催されたAcademy of Microbiology
会議の報告

文：Anne S. Marsh, Ph.D.

米国微生物学会（The American Academy of Microbiology：以下、アカデミー）は、約4万人の会員を擁する非営利の科学学会であるAmerican Society for Microbiology（ASM）の伝統ある支部です。アカデミーの委員は、微生物学への顕著な貢献が認められるかどうかの観点から、同一研究分野の専門家によって選出されます。アカデミーの会議プログラムでは、微生物学における重要な問題解決のために、これらの委員の専門知識を活用しています。

本報告書は、建築環境に存在する複雑な微生物生態系の役割に関する一連の課題について、1日かけて集まった専門家たちの検討に基づいて運営委員会が作成しました。

この報告書は、参加者全員によって確認されており、情報の正確性と完全性を確保するためにあらゆる努力が払われています。内容は参加委員の見解を反映したものであり、アカデミーやASMの公式見解を反映したものではありません。

本報告書の編集にご協力いただいたKaren MacKavanagh氏に感謝いたします。また、このプロジェクトに協力してくれたChelsie Geyer, Ph.D.に感謝します。

本報告書の内容は、本アカデミーの著者であることを明記し、本免責事項を記載する限り、再配布することができます。

米国微生物学会理事会

Michele S. Swanson, Ph.D., Chair
University of Michigan

Martin J. Blaser, M.D.
New York University

Donald A. Bryant, Ph.D.
Pennsylvania State University

Nancy Craig, Ph.D.
John Hopkins University

Terence Dermody, M.D.
Vanderbilt University

Stan Fields, Ph.D.
University of Washington

Gerry Fink, Ph.D.
Massachusetts Institute of Technology

James M. Hughes, M.D.
Emory University

Steven Lindow, Ph.D.
University of California, Berkeley

Margaret McFall-Ngai, Ph.D.
University of Wisconsin-Madison

Mary Ann Moran, Ph.D.
University of Georgia

Graham C. Walker, Ph.D.
Massachusetts Institute of Technology

コロキウム運営委員会

Joan W. Bennett, Ph.D., Chair
Rutgers University

Paula Olsiewski, Ph.D.
Alfred P. Sloan Foundation

Lutgarde Raskin, Ph.D.
University of Michigan

PARTICIPANTS

Martin J. Blaser, M.D.
New York University

Maria Gloria Dominguez-Bello, Ph.D.
New York University

Jack Gilbert, Ph.D.
University of Chicago,
Argonne National Laboratory

Vincent Hill, Ph.D.
U.S. Centers for
Disease Control and Prevention

Vito Ilacqua, Ph.D.
U.S. Environmental
Protection Agency

Bruce Hamilton, Ph.D.
National Science Foundation

Elliott Horner, PhD
UL Environment

Jeff Kline
University of Oregon

Shelly Miller, Ph.D.
University of Colorado, Boulder

Edward Nardell, M.D.
Harvard School of Public Health

Aino Nevalainen, Ph.D.
National Institute for Health
and Welfare, Finland

Gary Roselle, M.D.
Cincinnati Veteran Affairs
Medical Center

Michael Schmidt, Ph.D.
Medical University of South Carolina

Julie Segre, Ph.D.
National Institutes of Health

Jeffrey Siegel, Ph.D.
University of Toronto

Michele S. Swanson, Ph.D.
University of Michigan

John Taylor, Ph.D.
University of California, Berkeley

ACADEMY STAFF

Marina Moses, MS, DrPH
Director

Virginia Dolen
Program Manager

Daniel Peniston
Colloquium and
Public Outreach Program Assistant

1. 建築環境とは何でしょうか、そしてなぜこれらの生態系を研究することが重要なのでしょうか？

建築環境は、私たちの日常生活の中心となっています。農村部から都市部まで様々な地域に存在し、人間が屋外から身を守るために作り、生活、仕事、遊び、場所を確保するための空間を提供する構造物です。住宅、オフィス、学校、病院、長期療養施設、専門看護施設、商業施設、小売店、飛行機、電車、バス、地下鉄の駅、自動車、さらには宇宙ステーションなど、人間の特定のニーズを満たすためにさまざまな形態、機能、組織で設計された屋内の空間です。

これらの空間は決して無生物ではありません。建築物の中には、人間、ペット、害虫、観葉植物などが生息しており、その中には人間の目には見えない小さな生物である、さまざまな微生物が存在しています。実は、人間の体に付着している微生物の数は、人間の体にある細胞の数よりも多いのです。

本文中で使用されている主要な用語の説明

空気交換率—建物内の空気が外気と交換される割合で、空間の容積で規格化された浸透（漏出）、機械・自然換気の合計となります。

βグルカン—植物や細菌、酵母やカビなどの真菌の細胞壁に含まれる多糖類のことです。

エンドトキシン—人や他の動物に有害なグラム陰性菌の外膜に含まれるリポ多糖で、毒性のほとんどはリポDによって媒介されます。

メタゲノミクス—実験室で培養できるかどうかに関わらず、特徴的な核酸を分析することで微生物群集の構成を解析する分子生物学的ツールのことです。

マイクロバイーム—特定の環境下に生息するすべての微生物群集のゲノム（例：土壌マイクロバイーム、ヒト腸内マイクロバイーム）、メタゲノムDNA（*訳注：ゲノム、DNAとは現在異なる定義となっている）とも呼ばれます。

菌糸—菌類の増殖部分で、糸状のフィラメントで構成されています。

カビ毒—カビに汚染された食品や飼料、水害を受けた建物に関連する有毒な真菌の代謝物であり、吸入、摂取、皮膚への接触によって人や動物に健康被害を与える可能性があります。屋内でカビ毒を生産する真菌として、*Alternaria*、*Aspergillus*、*Penicillium*、*Stachybotrys*などが知られています（Fog Nielsen 2003）。

病原体—病気の原因となる微生物のことです。

相対湿度—同じ温度で飽和するために必要な量と比較した時の空気中の水蒸気量（通常、%で表されます）。

孢子—糸状菌や一部の細菌が代謝を停止した休眠状態のことで、過酷な環境条件に対して高い耐性を持つことがあります。

揮発性有機化合物（VOCs）—室温で蒸発しやすい低分子の炭素系化学物質の総称。微生物によるメタボライトVOC（MVOC）には、アルコール類、エステル類、ケトン類、テルペン類、炭水素類、硫黄系化合物、カルボン酸類などがあります。（Herrmann 2010; Horner and Miller 2003; Korpi et al. 2009）。



建造空間における微生物のバイオエアロゾル発生源としては、人間、ペット、植物、配管システム、暖房・換気・空調設備、カビ、浮遊粉塵の再浮遊、外気などが考えられます。緑と赤の点は、それぞれ人の健康に有益な微生物と有害な微生物を表しています

(Turnbaugh et al. 2007)。微生物というと「悪いもの」というイメージがあるかもしれませんが、ほとんどはそうではありません。多くの微生物は、病原体を抑え、消化など私たちの体の重要な機能を支えています。

人間同士が建築環境と一緒にいるとき、私たちはお互いに微生物を共有し、周囲の空間も共有しています。微生物は、皮膚の細胞や汚れと一緒に剥がれ落ち、抱擁や握手、唾液によって受け渡され、配管システムに流されて浄化システムや下水道、下水処理場に運ばれます。これら微生物は種々の表面、空気中、水道水や我々が生み出す排水の中など、ほとんどの場所にいます。このような偏在性と、先進国の人々は90%以上の時間を屋内で過ごしているという事実 (Klepeis and Nelson 2001) を考慮すると、建築環境にどのような種類の微生物が存在し、これらの微生物が人間とどのように相互作用し、人間の健康や経済にどのような影響を与えるかを理解することが重要です。微生物の中には、特に免疫システムが低下している人にとって病原性のあるものがあります。他にも影響を与えることがわかってきたばかりの微生物もいます。

地球規模の気候変動に伴い、私たちは建築環境の設計・運用方法を見直すことになるでしょう。その際には、屋内の微生物生態系への影響や、人間の健康、快適性、満足度への影響を検討することが今後必要になってくるでしょう。

2. 建築環境にはどのような微生物が いるのでしょうか？

DNAシーク
エンス技術
の発展によ
り、自然の
中に生息す
る微生物の
研究が容易
になってき
ています

建築環境のマイクロバイームは、細菌や古細菌などの単細胞生物から、原生動物、真菌、藻類などの動植物に近い細胞構造を持つ微生物まで、何千もの異なる種で構成されています（Adams et al.2015; Kelly and Gilbert 2013; Konya and Scott 2014; Stephens et al.2015）。また、このような多様な微生物群集の中には、ウイルスも多く存在しています。これらの微生物が建築環境のマイクロバイームにどのように貢献しているかについてはほとんど分かっていないため、本報告書では取り上げていませんが、その重要性については研究されるべきです。

建築環境の中で微生物が人や構造物に与える潜在的な影響を特定するためには、微生物群集の生物地理的特徴を明らかにすることが重要です。どのような微生物がいるのか？どのくらいの数か？その微生物は生きているのか死んでいるのか、生きているとしたらどのくらい活動しているのか？どのような種類の微生物の生成物や代謝産物が存在し、それらの濃度はどのような要因で変化するのか？私たちが直面している問題の1つは、これらの微生物群集内のさまざまな個体群を定量化することは、現在の方法やコスト、時間的・空間的な個体群の変動性を考えると非常に難しいということです。しかし、過去20～30年の分子生物学の発展により、この課題は多少容易になってきています。

微生物の分析 従来微生物の研究は、試料を採取し、実験室で専用の培地を用いて微生物を増殖させることで行われてきました。また、微生物への影響を把握するために、薬物や汚染物質などの「異質な」薬品を培地に添加する研究も行われています。培養した微生物を分析することで、代謝の盛んな微生物に関する情報が豊富に得られるようになりました。科学者たちは、屋外と屋内の微生物の関係や、屋内の空気中、屋内の表面、配管や換気システムに存在する微生物の動態についての知見を獲得してきました。培養法は、屋内環境における微生物の動態をモデル化するために使用できますが、この方法では、適切な培養条件を見つけることができた特定の種についての情報しか得られません

建築物は、その形状、構成、材料、用途、使用スケジュールなど、極めて多様性に富んでいます...

資源をめぐる競争を含めた、生物間相互作用が存在する群集動態は、ペトリ皿やフラスコの中と、さまざまな生態的ニッチが存在する建築環境の中とは大きく異なる可能性があります。

DNAシーケンス技術の発展により、自然環境下の微生物の研究が加速しています。現在では、直接自然環境から採取した微生物細胞から遺伝物質を抽出し、DNA・RNA鎖の塩基の順番を決定することができます。特定の塩基配列パターンは、特定の分類群や生物活性の特徴となることがよくあります。この塩基配列は、微生物の代謝活性に関する情報を提供するものではありませんが、従来知られていなかった何千もの新しい微生物種を微生物学者が発見することを可能にしました (Hugenholz et al.1998)。

科学者たちは、すべての種に存在する単一の「マーカー」遺伝子に関連する変異を調べることがよくあります。微生物生態学者は、16SリボソームRNA遺伝子の配列を用いて、さまざまな細菌や古細菌の種の存在と相対的な存在量をスクリーニングしています (Hugenholz et al. 1998 ; Knight et al. 2012) 。同様に真菌類は、リボソームの内部転写スペーサー (ITS) 領域を用いて分析することができます (Schoch et al.2012) 。この方法は効率的ですが、分析のために目的の遺伝子を増幅 (多数の複製を作製) する過程で試料に偏りが生じる可能性があります (Pinto and Raskin 2012) 。

ショットガンメタゲノムシーケンスは、一般的な塩基配列決定法の1つです。この方法は、微生物群集全体から直接抽出したランダムなゲノムDNA断片を調べるものです。この方法は、標的マーカー遺伝子解析と同様に、どの微生物分類群が存在するかを効果的に特定し、その存在量を推定することができます。メタゲノミクスは、全ゲノムを再構築することで、その生物の遺伝的機能の評価を可能としました。この方法は、マーカー遺伝子解析に比べて少なくとも一桁以上多くのコストがかかりますが、得られるデータ量は格段に多く、新たな知識を生み出す可能性はるかに高いです。幸いなことに、シーケンス技術とコンピューティングパワーの進歩により、コストは下がりつつあります (Kelly and Gilbert 2013) 。

微生物の試料採取（サンプリング） 試料（サンプル）採取と処理もまた、調査対象となる建築環境の微生物の数、種類、生存率に影響します（Hoisington et al.2014）。方法によって採取能力や効率は大きく異なります。例えば、綿棒（拭き取り法）は狭い場所や手の届きにくい場所から表面の微生物を効率的に採取するために使用されますが、吸引法は多孔質の表面や「綿棒」では困難な表面（カーペットなど）を含む広い範囲から試料を採取することができます。綿棒を使って得られる微生物の数は、試料の付着度合いに依存します。一方、吸引法で得られる微生物の数と生存率は、エアフィルターを通過する空気のと、空気の流れによる微生物の乾燥に対する抵抗性によって決まります。エアロゾルの採取では、採取機器（サンプラー）の種類や特性が採取できるエアロゾルの粒子径に影響し、微生物は種類によって大きさが異なるため、採取できる微生物の種類にも影響を与えます（Morrow et al. 2012）。

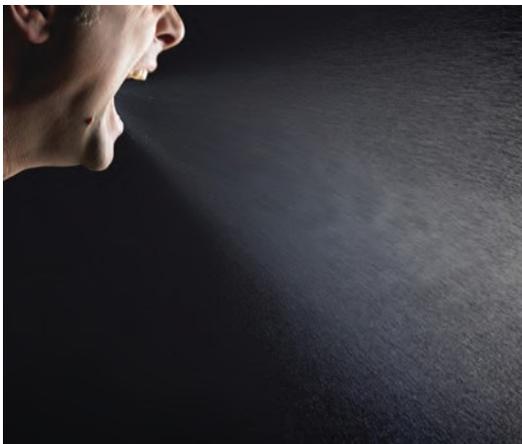
サンプルの汚染が問題になることがあります。人間は常に皮膚の細胞と一緒に微生物を排出しているため、サンプル採取時や実験室での分析時に人間が存在するだけで、サンプルに影響を与えます。また、機器も汚染の原因となります。例えば、シークエンサーでは、過去の分析から次の分析への遺伝子の持ち越しが生じる可能性があります（Salter et al.2014）。

建築環境の微生物学的研究において、同様に困難なのが研究デザインです。建物は、形状、構成、材料、用途、使用スケジュールなどが非常に多様で、これら因子間に複雑な相互作用があります。研究は、これらの変動要因を制御するために、建物全体からラボスケールの空間モデルまで様々な規模で行われています。

建築環境における微生物の研究が進むにつれ、方法的な偏りを認識して最小限に抑え、研究デザインを明確にすることが重要になってきています。研究者は、使用した技術をより一層、明確に記載する必要があります。また、ある研究の結果を別の研究と比較できるように、サンプリング方法を標準化する必要があります（Ramos and Stephens 2014）。サンプルの採取、処理、分析のための有効な基準とプロトコルを定めて（Morrow et al.2012）、懸念される、または消毒が必要な病原体の濃度、種類、場所を同定することは有用です。

微生物集落（コロニー）形成のパターン 方法論的な限界はありますが、建築環境に生息する微生物の数や種類に影響を与える基本的な要因の一部を私たちは理解し、初期の培養研究の結論のいくつかを確認することができてきました。予備的な研究から、屋内空間には独特の微生物群集が存在することがわかっています。建物の中には、屋外環境と同じ種類の微生物が存在していますが、その中には、屋内で増殖し、屋外よりも多く生息している特定の分類群が存在します（Barberán et al.2015）。

屋内のマイクロバイームに含まれる微生物はどこから来るのでしょうか？あるものは初期の建材から、あるものは建築作業員によって持ち込まれ、他の多くはその建物の居住者や環境からもたらされます。人間は、皮膚、腸、鼻、口腔、膣からの分泌物、精液などを介して微生物をもたらし、ペットは、皮膚、毛皮、唾液、排泄物を介して微生物をもたらします。また、観葉植物や水槽からも微生物が発生します。大規模集中型の水処理施設からの水には微生物が含まれており、私たちがシャワーを浴びたり、トイレを流したり、食洗機を動かしたりするときに飛散します（Pinto et al.2012）。外気は窓やドア、換気システムを通じて微生物を運び、人間やペットは、微生物が付着した土壌や、衣服や毛皮に付着した花粉やほこりなどを吸い込みます。家の中に持ち込まれる食べ物にも微生物が含まれています（Montville and Mathews 2005）。また、あまり考えたくはありませんが、昆虫やげっ歯類などが、さらに微生物を持ち込む可能性もあります（Kelly and Gilbert 2013）。



建築環境の中に入った微生物は、空気、水、あるいは居住者同士や室内の表面との接触によって運ばれます。個々の微生物や微生物群は、複数回飛散して、定着した後、その場の状況に応じて増殖したり、休眠したり、死に絶えたりします。

建築環境で見られる細菌の種類は、建物内や個々の空間での人、植物、ペットの居住パターンや活動パターンに関係しています。人の往来が多いほど、活動が活発で多様であるほど、微生物の量と多様性は高くなります。さらに、建築環境における空間の構成、つまりそれらの配置によって、その場所に存在するマイクロバイームが決まります（Kembel et al.2014）。

咳やくしゃみをする時、微生物が飛沫に乗って飛んでいきます。

構成、つまりそれらの配置によって、その場所に存在するマイクロバイームが決まります（Kembel et al.2014）。

私たちの住まい方が無限にあることを考えると、細菌が建物や部屋ごとに異なることは驚くべきことではありません（表1参照）（Adams et al.2014; Kelly and Gilbert 2013). 実際、建物の細菌の「サイン」は非常にはっきりしており、人間の居住者の男女比や、猫や犬の有無を予測するのに利用できません（Barberán et al.2015）。居住者が新しい家に移ると、その人固有の細菌マイクロバイオームが新しい場所で再構築されるまでに、わずか数日しかかからないこともあります（Lax et al. 2014）。

一方、建築環境に存在する真菌は、水の存在や屋外の真菌の組成に強く影響されます（Adams et al.2013）。一般的な真菌には、*Aspergillus*、*Alternaria*、*Cladosporium*、*Penicillium*などのカビや、*Stereum*、*Trametes*、*Phlebia*、*Ganoderma*などの木材分解菌のほか、皮膚や粘膜に付着する一般的な酵母である*Candida*など、人間に関連する真菌が含まれます。真菌の個体数は、主に水分量、気候、地域によって異なる傾向があり、米国内でも大きな地域差があります（Barberán et al.2015）。

Table 1. 様々な建築環境における特徴的な微生物

場所	細菌種	場所	細菌種
オフィス	<i>Streptococcus</i> spp.	カテーテル	<i>Pseudomonas</i> spp.
	<i>Corynebacterium</i> spp.		<i>Staphylococcus</i> <i>spidermidis</i>
	<i>Flavimonas</i> spp.		<i>Enterococcus</i> <i>faecalis</i>
	<i>Lactobacillus</i> spp.		<i>Klebsiella</i> spp.
	<i>Burkholderia</i> spp.		
新生児 集中 治療室	<i>Bacillus</i> spp.	トイレ	<i>Propionibacterium</i> spp.
	<i>Bradyrhizobium</i> spp.		<i>Corynebacterium</i> spp.
			Micrococcaceae
			<i>Streptococcus</i> spp.
			<i>Staphylococcus</i> spp.
水槽フィルタ		シャワーカーテン	Bacteriodaceae
	<i>Nitrospumilus</i> spp. (古細菌)		<i>Methylobacterium</i> spp.
	<i>Nitrosospira</i> spp.		<i>Sphingomonas</i> spp.
病院の空気	<i>Nitrosomonas</i> spp.	シャワーヘッド	<i>Mycobacterium</i> spp.
			<i>Pseudomonas</i> <i>aeruginosa</i>
	<i>Kytococcus</i> <i>sedentarius</i>	治療用プール	<i>Legionella</i> spp.
	<i>Staphylococcus</i> <i>epidermidis</i>		<i>Mycobacterium</i> spp.
	<i>S. haemolyticus</i>	<i>Sphingomonas</i> spp.	
	<i>Ralstonia</i> <i>pickettii</i>	教室	Propionibacterineae
	<i>Enterobacter</i> spp.		Xanthomonadaceae
	<i>Kocuria</i> <i>rhizophila</i>		Micrococccineae
	<i>Micrococcus</i> <i>luteus</i>		<i>Sphingomonas</i> spp.
	<i>Microcystis</i> <i>aeruginosa</i>		<i>Caenibacterium</i>
<i>Prochlorococcus</i> <i>marinus</i>	<i>Staphylococcus</i> spp.		
<i>Methylocella</i> <i>silvestris</i>	Enterobacteriaceae		
<i>Methylobacterium</i> <i>extorquens</i>	Corynebacterineae		

換気と空気の流れは、建築環境に存在する微生物の数と種類を決定する上で重要な役割を果たします。窓やドアから自然換気が行われている部屋は、密閉された窓や機械的な換気が行われている部屋に比べて、屋外の真菌や細菌が多く生息しています（Kembel et al.2012; Meadow et al.2014）。また、小さくて古い住宅構造は、大きくて新しい構造に比べて、壁や窓・ドア周辺からの相対的な漏れが多い傾向にあります（Chan et al.2005）。暖房、換気、空調（HVAC）システムは、空気中の微生物の一部をろ過します。

温かい温度と高い湿度は、建築環境の中で微生物の増殖を促進する傾向があります（Tang 2009）。微生物は、トイレやキッチン、具体的には洗面台、シャワーヘッドやシャワーカーテン、トイレの中や周囲で繁殖します（Feazel et al.2009）。これらの場所は湿っているため、食品、胃腸、膣、水道などから特定の微生物が持ち込まれることで、微生物のホットスポットとなる可能性があります（Adams et al.2014）。また、欠陥のある建築物からの雨漏りや結露も、湿気の蓄積や微生物増殖の原因となります。



洪水は、「屋外」の微生物や栄養分を屋内に運び込み、広範囲にわたって微生物を増殖させます。ハリケーン・カトリーナの後、米国疾病対策予防センター（CDC）は、ニューオーリンズ地域の住宅のうち43%に、目に見える大きなカビのコロニーがあったと見積もっています（CDC 2006）。コロラド州ボルダーでは、浸水した住宅の空気には、浸水していない住宅の空気に比べて、カビのDNAが3倍多く含まれていることを科学者が発見しました。

ハリケーン・カトリーナの被害の後、建物に発生したカビ（ニューオーリンズ）

さらに、洪水によるマイクロバイオームへの影響は、相対湿度が基準値に戻り、住民が洪水の被害を受けた物を取り除き、被害を受けた部屋を改装した後も続いています（Emerson et al. 2015）。

換気と空気の 流れは、 建築環境に 存在する微 生物の数と 種類を決定 する上で重 要な役割を 果たします

建築環境における材料の特性は、微生物の増殖にも影響を与えます（Ramos and Stevens 2014）。木材、金属、石膏、コンクリートはすべて、微生物にとって魅力的なさまざまな物理・化学的特性を持っています。多孔質の素材は、微生物の生息地となり、水分を蓄える機会を提供します。例えば、石膏が浸水後に特に真菌が繁殖しやすいことを科学者たちは発見しました（Anderson et al.2011）。銅はカビが生えにくく、そのため病院の設計ではよく使われる素材です（Mehtar et al.2008）。実際、実験室でのテストでは、銅合金は抗菌剤としても機能することがわかっています（Michels et al. 2015）。

微生物のコロニー形成は、洗浄によっても影響を受けます。清掃の過程で、私たちは埃やそれに付随する微生物、そして微生物が生息する物質の一部を取り除きます。掃除の頻度が高く、徹底しているほど、素材に微生物が付着する機会が減り、微生物のバイオマスが減少します（Adams et al.2013、Dunn et al.2013、Medrano-Félix et al.2011）。居住者は床よりも壁を洗うことが少ないため、家の壁でさえも微生物群集の貯蔵庫となる可能性があります（Ruiz-Calderon et al.2016）。手指の衛生状態も同様に重要です。適切な手洗いと洗浄プロトコルの遵守は、医療現場における感染性物質の拡散を最小限に抑えませんが、非感染性の微生物を殺してしまう可能性もあります（Boyce and Pittet 2002）。

微生物の進化 建築環境は、新しい微生物の種や機能の進化を促進する能力を持っています。固有の物理・化学的条件や室内の生物種間の相互作用は、微生物に選択圧を加え、最終的にはその遺伝子構造を変化させます（Martin et al.2015）。微生物は、遺伝子の複製などによって新たな機能を生み出したり、共生や遺伝子導入によって他の生物から機能を譲り受けたりします（Eisen 2009）。近年確認されている多くの新しい生物の中には、建築環境の多様な生息環境に対応して進化したものもあるかもしれません（Lax and Gilbert 2015）。

3. 微生物の代謝は建築環境の化学的な性質にどのような影響を与えるのでしょうか？

真菌類や細菌などの従属栄養微生物は、有機化合物を分解して、成長や繁殖に必要なエネルギーを作り出します。建材に微生物が繁殖すると、その結果として、分解や腐敗が起こります。これが長期間放置されると、建築資材、特に木材の構造的な健全性を損ない、しばしば悲惨な結果をもたらしています。残念なことに、近年、木質建材を使用したバルコニーやデッキの倒壊が頻発しています（Van Derbeken et al.2015）。



微生物は、屋内空気中の微粒子の一部です。胞子や菌糸の破片は屋外から発生するだけでなく、屋内で生育している真菌や一部の細菌（例：放線菌）によって拡散します。空気中の濃度は時空間で変化し、目に見えるカビがない「きれいな」建物でも、1立方メートルあたり1,000胞子に達します（Baxter et al. 2005; Nevalainen et

カリフォルニア州パークレーにあるバルコニーの壊滅的な崩壊の原因となった木材支持部の微生物による分解

al. 2015). 細胞の破片、分解された材料からの物質、死んだ微生物は、屋内空気のさらなる粒子増加の原因となります。

微生物は、建築環境の一部となる追加産物を多く生産します。特に興味・関心を集めるのは、 β グルカン、エンドトキシン、カビ毒、揮発性有機化合物（VOC）です。建築環境では、これらの化合物は頻繁にホコリの粒子に付着します。

微生物が建築環境で変化するように、その代謝産物も変化します。VOC、毒素、グルカンの生成はすべて、微生物が他の生物と相互作用したり、増殖に必要な基質の特性に影響されます。現場の状態をモニタリングし、微生物の生化学的プロセスと相互作用をより詳細に研究するモデルシステムを開発することで、科学者は建築環境における微生物の代謝物に関する理解を深めていくことができます。

4. 建築環境に生息する微生物は、人間の健康にどのような影響を与えるのでしょうか？

微生物は、
屋内の空気
に含まれる
微小粒子状
物質の一部
です

体調不良と屋内のマイクロバイオーームとの具体的な因果関係を明らかにするのは難しいことです (Mendell et al. 2011)。微生物の影響を、粉塵や非微生物性の揮発性物質などの他のストレス要因から分離することはほとんど不可能であり、さらに、微生物や微生物の副産物への人間の暴露に関する情報は限られています (Husman 1996)。統一された診断基準や明確なバイオマーカーがあるわけではなく、健康影響の診断カテゴリーは多くの科学者や医師から懐疑的に見られています。それにもかかわらず、カビへの曝露と体調不良との間に明らかに関連性があることから、カビ毒、カビのVOC、およびその他のカビの代謝物が、報告されている一連の症状を引き起こすのではないかという説が多く唱えられています。カビやその代謝物への曝露に関連する健康リスクについては合意が得られていないにもかかわらず、専門家は屋内でのカビの繁殖を防ぐか、最小限にとどめるべきだと提言しています。

屋内のマイクロバイオーームと健康状態の悪化との最も明らかな関連性は、放線菌や*Penicillium*、*Aspergillus*、*Cladosporium*などをはじめとする真菌類のカビの生えた建物で記録されています (Pestka et al. 2008)。疫学調査によると、これらの環境では、呼吸器の炎症、アレルギー、喘息、および細菌やウイルスによる二次的な呼吸器感染症と関連しています。また、頭痛や疲労感などの非特異的な症状も報告されています (Institute of Medicine 2004; Mendell et al. 2011; World Health Organization 2009)。

まれに、屋内のマイクロバイオーームが過敏性肺炎と関連している場合があります。この症状は、小さな生物学的粒子が吸い込まれて肺に留まるような、温室やキノコ小屋などの労働条件で発生する傾向があります。過敏性肺炎は農村でよく見られ、しばしば農民の肺と呼ばれています (Husman 1996)。

また、レジオネラ菌やその他の日和見的な配管に生息可能な病原体が繁殖しやすい建物の水回りでも病気が発生しています (Falkinham et al 2015)。

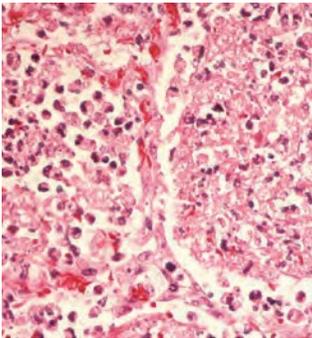


レジオネラ菌が水滴に含まれてエアロゾル化し、それを吸い込むと、本菌は増殖して、肺炎の一種であるレジオネラ症や、より軽度のインフルエンザ様疾患であるポンティアック熱を引き起こす可能性があります。CDCによると、米国ではレジオネラ症による入院が年間8,000～18,000件発生していると推定されています

(<http://www.cdc.gov/legionella/fastfacts.html>)。最近のレジオネラ菌による大規模な感染症の発生は、飲料水システムと工業用水のメンテナンスの重要性を浮き彫りにしています。

レジオネラ菌は整備されていない冷却塔で繁殖することがあります。

2015年夏、Bronxにあるホテルの冷却塔に関連して発生したアウトブレイクは、133件のレジオネラ症の報告と16人の死亡につながりました(<http://www.nyc.gov/html/doh/html/diseases/cdlegi.shtml>)。



肺組織中のレジオネラ菌

糞便に関連する細菌は、屋内でも健康問題を引き起こします。例えば、腸球菌は、手洗いや表面の清掃などの衛生管理が行われていないと、人と人との間で感染したり、付着した表面から人に感染したりします。特に細菌が傷口や血流に入ると、感染症を引き起こす可能性があります。腸球菌やその他の微生物の拡散を最小限に抑えることは、おむつ交換やベッドパン（おまる）の使用が一般的なデイケアセンターや高齢者介護施設では特に問題となります(Hodgeson et al. 2000)。

病院における日和見病原微生物の健康への悪影響は、特に懸念されるものであり、建物の設計や運営において慎重な検討が必要です。患者が病院に来ると、病気の原因となる微生物を新たに、あるいは追加で建物に持ち込む可能性があります。これらの微生物は、人と人の接触、人と機械の接触、くしゃみ、咳、嘔吐、下痢などによって感染する可能性があります。入院患者の多くは、免疫力が低下していたり、未発達であったりするため、感染のリスクが高くなります。2002年、米国では入院患者の5%にあたる170万人の患者が院内感染にかかり、99,000人が死亡しました(Klevens et al. 2007)。これらの感染症の3分の1は、適切な清潔さを保つための方法を怠ったことが原因とされています。

病院内では、患者の治療がマイクロバイームや健康状態に強い影響を与えます。感染症対策には抗菌薬が使用されます。しかし、抗生物質の使用には、特に注意が必要です。抗生物質の使用を繰り返したり、不適切に使用したりすると、特に誤った用途（例えば、ウイルス感染症の治療）で、抗生物質に耐性を持つ微生物群集を増強する可能性があります。さらに、化学療法や放射線療法は、骨髄細胞にダメージを与えることで、がん患者が感染症にかかりやすくなります。骨髄細胞が少なくなると、微生物感染に抵抗するために必要な白血球産生が困難になります。

病院内で病原性微生物の汚染源に近接している患者は、病原体と接触して病気になる可能性が高くなります。適切な防壁がない場合、病院の建設や改築は、空気中のカビの胞子を発生させ、*Zygomycetes*や*Aspergillus*による真菌性肺感染症などの感染症を増加させる可能性があります(Kanamori et al. 2015)。さらに、抗生物質耐性菌（メチシリン耐性黄色ブドウ球菌、バンコマイシン耐性腸球菌、クロストリジウム・ディフィシル、アシネトバクターなど）が感染・定着していた患者が使用していた部屋を患者が使用すると、これらによる感染症にかかるリスクが高まる可能性があります(Weber and Rutala 2013)。



病院内での微生物の感染には不明な点が多く、大きな問題となっていることから、Alfred P. Sloan財団はHospital Microbiome Project (<http://hospitalmicrobiome.com>)に資金を提供しています。このプロジェクトでは、シカゴ大学に新設された病院において、患者、医療従事者、スタッフの導入前と導入後の表面、空気、水、人微生物の組成を調査しています。

微生物学者のジャック・ギルバート氏がシカゴ大学の新病院で微生物の試料を採取するために、新しい病室の床を綿棒で拭いているところです

このプロジェクトが進むにつれ、科学者たちは微生物がどこで発生し、どこで繁殖し、どのように定着するのかを解明することで、患者の健康状態を改善したいと考えています。

5. 健康な屋内マイクロバイームはあるのでしょうか？

地球上に存在する100万から1000万種の微生物のうち、病気を引き起こすのはわずか1%と科学者は推定しています(Proctor 2014)。残りのものは、生態系に貢献していますが、その仕組みはまだ解明されていません。例えば、人間の腸内には、消化に欠かせない微生物や、ビタミン、抗菌剤、神経伝達物質を生成する微生物が存在しています(LeBlanc et al. 2013; Lyte 2013)。このため、屋内の微生物群集が居住者の健康に良い影響を与える条件を作り出すことができるかどうかという問は、合理的だと言えます。

しかし、現在のところ、その答えは見つかっていません。また、「健康な」屋内マイクロバイームの適切な定義もありません。しかし、健康なマイクロバイームについては、有害なマイクロバイームを回避する方法と、健康を促進する方法の2つの考え方があります。このうち、1つ目の方法について、より多くのことがわかっています。科学者たちは、病気に関わる問題のある微生物を蓄積するような不健康なシステムを避けることが最善であると考えています。そのためには、建物を適切に設計・運用する必要があります。例えば、建築家は、部屋の間仕切りやその他の物理的な構造によって、人の往来や空気中の微生物伝搬を制御するような建物を設計することができます。エンジニアは、建物内の空気交換量を最適化し、冷暖房ゾーン内の相対湿度を制御することができます。相対湿度を30%以下にすることで、微生物の繁殖を抑制できます。窓からは、太陽光や、外気を取り入れることで、建物内の空気の入れ替えを促進し、一部の微生物に影響を与えることができます。ただし、このような空気の入れ替えは、外気の質が良い地域や時間帯にのみ有効であり、大気汚染時には避ける必要があります。さらに、微生物のコロニー化を最小限に抑えるための配管システムの設計とメンテナンスを行うことも可能です。配管システムは、水が滞留してバイオフィルムを形成し、

レジオネラ菌、シュードモナス菌、マイコバクテリアが繁殖するようなデッドゾーンを避けるべきです。給湯器の水を高温にすることで、微生物の汚染を抑えることができます (Falkinham et al.2015)。さらに、古い銅管によく見られる孔食(金属の腐食の一種)を含めた、配管の漏れを迅速に検出して修理することで、局所的な湿気の問題を最小限に抑えることができます。住宅では水道メーターを使って、建物内のすべての水を止めた状態で漏水を確認することができます。



空調設備のフィルターは微生物を捕捉するのに役立ちますが、頻繁に清掃または交換する必要があります

ホコリやカビが発生した場合には、適切な処置をして除去しなければなりません。これには、汚れた空調フィルターの清掃や交換、ダクトの清掃、建物内の腐った木材の除去や交換、住み着いている鳥の駆除などが挙げられます。天井を撤去することで、ホコリが溜まるデッドスペースや、微生物が付着しやすい多孔質のタイル素材を排除することができます (Hodgeson et al. 2000)。このような作業により、病原性微生物の拡散を最小限に抑えることができますが、間違いなく多くの「良い」微生物も取り除くことになります。

病院では、病気の原因となる微生物の拡散を最小限に抑えるために、日頃から細心の注意を払っています。表面は頻繁に清掃され、部屋には手洗い用の設備が配置されています。また、空気中のカビや細菌の繁殖を徹底的に除去したり、病原体の侵入を防ぐために部屋を加圧したり、感染力の強い微生物の流出を防ぐために部屋を減圧したりすることもあります。また、病院では部屋の上部に紫外線 (UV-C) を照射し、6.5フィート以上の微生物を死滅させている場合もあります。部屋の中で空気が循環すると、微生物の一部が死滅します (First et al.2005)。また、効果的な免疫システムと健全なマイクロバイオームの発達と維持を促進することで、微生物との健全な共存を図ることができます。この分野にはまだ多くの課題がありますが、科学者たちは、逆説的に、細菌やウイルス、寄生虫にさらされることで、感染症に対抗できる免疫力を身につけることができることを認識しています。私たちがよく使っている抗菌石鹸、抗菌ワイブ、抗菌表面、特にトリクロサンを含むものは、私たちに害を与えているかもしれません (Bertelsen et al. 2012; Halden 2014)。



特定の微生物に触れることは、免疫系がまだ発達していない幼少期には特に重要です。例えば、犬のいる家に住んでいる乳児は、犬のいない家に比べて、喘息やアレルギーを発症する可能性が低いことが知られています(Ownby et al. 2002; von Mutius and Vercelli2010)。マウスに犬の乳酸菌を与えたところ、マウスの免疫力が向上したと報告されています (Fujimura et al.2014)。また、妊娠中や幼少期に農場の動物に触れることで、アレルギーのリスクが低下します (Holbreich et al.2012)。農場のホコリに含まれるエンドトキシンは、肺の上皮細胞を保護する働きがあると考えられています (Schuijs et al.2015)。

犬の微生物に触れて育った乳児は、喘息やアレルギーになりにくいとされています

出産方法も、子供の微生物接種に影響を与えます。経膈分娩の場合、赤ちゃんは母親の膈内と腸内の微生物の影響を受けます。帝王切開で出産すると、この接種がバイパスされ、赤ちゃんが最初に接触するのは部屋の微生物になります。帝王切開の新生児の場合は、多くの皮膚細菌や潜在的な病原体（ブドウ球菌やアシネトバクターなど）を含む、まったく異なる微生物が生息することになります (Dominguez-Bello et al. 2010)。免疫系の発達と健康状態との関連性については、まだ研究が始まったばかりですが、帝王切開で出産した子どもは、小児喘息、アレルギー性鼻炎、肥満の発生率が高いことが指摘されています (Mueller et al. 2015; Renz-Polster et al. 2005)。

建築環境における「健康な」マイクロバイオームについての理解を深めるためには、疫学的な知識を拡大する必要があります。これらの研究は困難であり、研究者は微生物とその副産物に暴露される時間、濃度、経路、および用量反応を理解する必要があります。また、建築環境と疾患との関連性を明らかにするために、疾患を緩和する可能性のある建築物の因子を明らかにすることも重要です (Luongo et al.2015)。これらの研究を行う際には、社会経済的グループ、年齢層、地域を超えてリスクを評価し、建物の設計や運用の変更に伴うエネルギーコストやカーボンコストを念頭に置くことが重要になります。

6. 異なる信念で建築環境を研究する科学者同士のコラボレーションを促進するにはどうしたらいいのでしょうか？

屋内のマイクロバイームを評価し、建物の設計・運用や健康状態との関連性を明らかにすることは非常に複雑で、多くの分野の専門家が必要となります。微生物生態学者、建築技術者、建築家、公衆衛生・労働衛生の専門家、医師などが、それぞれの知識やツール、アプローチを持ち寄ることで、お互いの研究を高め合うことができます。

どのようにしてコラボレーションを促進するか。最も基本的なレベルでは、インセンティブとして助成金を提供することができます。資金提供者は、研究プロジェクトへの資金援助を行う際に、学際的な共同研究を推奨または義務付けることができます。また、研究者同士がつながり、アイデアを交換する機会を提供することもできます。学会で分野横断的なセッションやワークショップを開催したり、研究者が自分の専門外の学会に出席するための旅費を提供したりすることで、学会の主催者は、研究者が会話の幅を広げたり、共同目的を模索したりすることを促すことができます。



科学者は、研究結果、プロトコル、アイデア、プレゼンテーション資料、データなどを共有するためのインターネットプラットフォームを構築することができます。アルフレッド・P・スローン財団の助成を受け、カリフォルニア大学デービス校のJonathan Eisenの研究室が運営しているプロジェクト「microBEnet」は、特に有用なリソースです。ユーザーは、ブログや簡単なガイド、ソーシャルメディアのグループにアクセスでき、建築環境の微生物学に関するスライドやビデオを共有することができます（www.microbe.net）。もう一つの有用なリソースは、mVOCデータベースで、細菌や菌類からのVOC排出に関する情報を交換するための優れたプラットフォームを提供しています。ユーザーは、VOC構造、特定の微生物の特徴的なVOC、化合物の標的経路、さらには微生物のVOCに関する基本的な情報を検索し、共有することができます（Lemfack et al.2014; <http://bioinformatics.charite.de/smvoc/>）。

また、標準化された完全なメタデータを使用することで、研究者間のコミュニケーションを改善することができます。この目的のために、Genomics Standards Consortiumは最近、構築環境の研究に関連する特定のメタデータ用語を定義したMlxS-BEパッケージを開発しました（Glass et al.2014）。米国環境保護庁、米国食品医薬品局、米国農務省、米国疾病管理予防センターなどの規制・調査機関や、世界中のそれぞれの対応機関に相談し、データの収集と削減に関する議論に貢献することを奨励するべきです。

7. 建築環境の微生物学を研究することで、 私たちが住空間を設計、構築、運用、 居住、清掃する方法が変わるのしょうか？

建物のデザインや構造の変更は、より困難かもしれません

確かに、建築環境のマイクロバイーム、その決定要因、健康への影響についての知識を深めることで、変わる可能性があります。すべての微生物が「悪いもの」であるという一般的な考え方は改める必要があります。一般の人々が微生物の既知のリスクと期待される利益をよりよく理解すれば、人々は建物の清掃、居住、使用方法をより積極的に変えることができるでしょう。そのためには、情報の透明性を確保し、専門用語を使わず、一貫性のある言葉で広く伝えていかなければなりません。

建物のデザインや構造の変更はより困難かもしれません。新しい手法を広く採用するには、政策的な支援と建築基準法の変更が必要です。専門家は、政策立案者と協力して、変化の必要性を裏付ける研究結果を示すことで、このプロセスを促進することができます。可能な限り、既存の専門家コミュニティや関連する企業を巻き込んで対話を行うべきです。具体的には、Green Building Council、American Institute of Architects、Center for Health Design、American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)、建築科学者やエンジニア、病院を設計している企業、建物のセンサーやバイオハザード・ルームに関心のある企業などが挙げられます。

模範的な建物や手法のケーススタディを文書化し、コスト削減の可能性があれば、健全な手法の採用を促進することができます。先見性のある建築家には、スマートデザインのスポークスマンとして協力してもらうべきです。研究結果は、WELL Building Standard (<http://delos.com/about/well-build-ing-standard/>) やLeadership in Energy and Environmental Design (LEED) Standard (<http://www.usgbc.org/leed>) などの既存の基準に反映させることができます。

参考文献

- Adams RI, Bateman AC, Bik HM, and JF Meadow. 2015. Microbiota of the indoor environment: a meta-analysis. *Microbiome* 3:49. doi:10.1186/s40168-015-0108-3.
- Adams RI, Milleto M, Taylor JW, and TD Bruns. 2013. Dispersal in microbes: fungi in indoor air are dominated by outdoor air and show dispersal limitation at short distances. *The ISME Journal* 7(7):1262–1273. doi:10.1038/ismej.2013.28.
- Adams RI, Milleto M, Taylor JW, and TD Bruns. 2014. Airborne bacterial communities in residences: similarities and differences with fungi. *PLoS One* 9(3):e91283. doi:10.1371/journal.pone.0091283.
- Anderson B, Frisvad JC, Sondergaard I, Rasmussen IS, and LS Larsen. 2011. Associations between fungal species and water-damaged building materials. *Applied and Environmental Microbiology* 77(12):4180–4188. doi:10.1128/AEM.02513-10.
- Barberán A, Dunn RR, Reich BJ, Pacifici K, Laber EB, Menninger HL, Morton JM, Henley JB, Leff JW, Miller SL, and N Fierer. 2015. The ecology of microscopic life in household dust. *Proceedings. Biological Sciences/The Royal Society* 282(1814). doi:10.1098/rspb.2015.1139.
- Baxter DM, Perkins JL, McGhee CR, and JM Seltzer. 2005. A regional comparison of mold spore concentrations outdoors and inside “clean” and “mold contaminated” Southern California buildings. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2:8–18. doi:10.1080/15459620590897523.
- Bertelsen RJ, Longnecker MP, Løvik M, Calafat AM, Carlsen KH, London SJ, and KC Lødrup Carlsen. 2012. Triclosan exposure and allergic sensitization in Norwegian children. *Allergy* 68(1):84–91. doi:10.1111/all.12058.
- Boyce JM, and D Pittet. 2002. Guidelines for hand hygiene in health-care settings: recommendations of the Healthcare Infection Control Practices Advisory Committee and the HICPAC/SHEA/APIC/IDSA Hand Hygiene Task Force. *Infection Control and Hospital Epidemiology* 23(12):S3–S40. doi:10.1086/503164.
- Centers for Disease Control and Prevention. 2006. Health concerns associated with mold in water-damaged homes after Hurricanes Katrina and Rita—New Orleans area, Louisiana, October 2005. *MMWR. Morbidity and Mortality Weekly Report* 55(2):41–44.
- Chan WR, Nazaroff WW, Price PN, Sohn MD, and AJ Gadgil. 2005. Analyzing a database of residential air leakage in the United States. *Atmospheric Environment* 39:3445–3455. doi:10.1016/j.atmosenv.2005.01.062.
- Dominguez-Bello MG, Costello EK, Contreras M, Magris M, Hidalgo G, Fierer N, and R Knight. 2010. Delivery mode shapes the acquisition and structure of the initial microbiota across multiple body habitats in newborns. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 107(26):11971–11975. doi:10.1073/pnas.1002601107.
- Dunn RR, Fierer N, Henley JB, Leff JW, and ML Menninger. 2013. Home life: factors structuring the bacterial diversity found within and between homes. *PLoS One* 8(5):e64133. doi:10.1371/journal.pone.0064133.
- Eisen JA. 2009. Genomic evolvability and the origin of novelty: studying the past, interpreting the present, and predicting the future, p 230–251. In Relman DA, Hamburg MA, Choffness ER, and A Mack (ed), *Microbial evolution and co-adaptation: a tribute to the life and scientific legacies of Joshua Lederberg*. The National Academies Press, Washington, DC.
- Emerson JB, Keady PB, Brewer TE, Clements N, Morgan EE, Awerbuch J, Miller SL, and N Fierer. 2015. Impacts of flood damage on airborne bacteria and fungi in homes after the 2013 Colorado Front Range flood. *Environmental Science and Technology* 49(5):2675–2684. doi:10.1021/es503845j.
- Falkinham JO, III, Hilborn ED, Arduino MJ, Pruden A, and MA Edwards. 2015. Epidemiology and ecology of opportunistic premise plumbing pathogens: *Legionella pneumophila*, *Mycobacterium avium*, and *Pseudomonas aeruginosa*. *Environmental Health Perspectives* 123:749–758. doi:10.1289/ehp.1408692.

- Feazel LM, Baumgartner LK, Peterson KL, Frank DN, Harris JK, and NR Pace. 2009. Opportunistic pathogens enriched in shower-head biofilms. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106:16393–16399. doi:10.1073/pnas.0908446106.
- First MW, Weker RA, Yasui S, and EA Nardell. 2005. Monitoring human exposures to upper-room germicidal ultraviolet irradiation. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2:285–292. doi:10.1080/15459620590952224.
- Fog Nielsen K. 2003. Mycotoxin production by indoor molds. *Fungal Genetics and Biology* 39(2):103–117. doi:10.1016/S1087-1845(03)00026-4.
- Fujimura KE, Demoor T, Rauch M, Faruqi AA, Jang S, Johnson CC, Boushey HA, Zoratti E, Ownby D, Lukacs NW, and SV Lynch. 2014. House dust exposure mediates gut microbiome *Lactobacillus* enrichment and airway immune defense against allergens and virus infection. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111(2):805–810. doi:10.1073/pnas.1310750111.
- Glass EM, Dribinsky Y, Yilmaz P, Levin H, Pelt RV, Wendel D, Wilke A, Eisen JA, Huse S, Shipanova A, Sogin M, Stajich J, Knight R, Meyer F, and LM Schriml. 2014. MixS-BE: a MixS extension defining a minimum information standard for sequence data from the built environment. *The ISME Journal* 8:1–3. doi:10.1038/ismej.2013.176.
- Halden RU. 2014. On the need and speed of regulating triclosan and triclocarban in the United States. *Environmental Science and Technology* 48:3603–3611. doi:10.1021/es500495p.
- Herrmann A. 2010. *The chemistry and biology of volatiles*. Wiley, Chichester, United Kingdom.
- Hodgeson M, Brodt W, Henderson D, Loftness V, McCrone R, Roselle G, Rosenfeld A, Woods J, and R Wright. 2000. Needs and opportunities for improving the health, safety and productivity of medical research facilities. *Environmental Health Perspectives* 108(Suppl 6):1003–1008.
- Hoisington AJ, Maestre JP, King MD, Siegel JA, and KA Kinney. 2014. Impact of sampler selection on the characterization of the indoor microbiome via high-throughput sequencing. *Building and Environment* 80:274–282. doi:10.1016/j.buildenv.2014.04.021.
- Holbreich M, Genuneit J, Weber J, Braun-Fahrländer C, Waser M, and E von Mutius. 2012. Amish children living in northern Indiana have a very low prevalence of allergic sensitization. *The Journal of Allergy and Clinical Immunology* 129(6):1671–1673. doi:10.1016/j.jaci.2012.03.016.
- Horner WE, and JD Miller. 2003. Microbial volatile organic compounds with emphasis on those arising from filamentous fungal contaminants of buildings. *ASHRAE Transactions* 109:215–231.
- Hugenholz P; Goebel BM, and NR Pace. 1998. Impact of culture-independent studies on the emerging phylogenetic view of bacterial diversity. *Journal of Bacteriology* 180(18):4765–4774.
- Husman T. 1996. Health effects of indoor-air microorganisms. *Scandinavian Journal of Work, Environment, and Health* 223:5–13.
- Institute of Medicine. 2004. *Damp indoor spaces and health*. The National Academies, Institute of Medicine, Washington, DC.
- Kanamori H, Rutala WA, Sickbert-Bennett EE, and DJ Weber. 2015. Review of fungal outbreaks and infection prevention in healthcare settings during construction and renovation. *Clinical Infectious Diseases* 61:433–444. doi:10.1093/cid/civ297.
- Kelly ST, and JA Gilbert. 2013. Studying the microbiology of the indoor environment. *Genome Biology* 14:202. doi:10.1186/gb-2013-14-2-202.
- Kemmel SW, Jones E, Kline J, Northcutt D, Stetson J, Womack AM, Bohannon BJ, Brown GZ, and JL Green. 2012. Architectural design influences the diversity and structure of the built environment microbiome. *The ISME Journal* 6:1469–1479. doi:10.1038/ismej.2011.211.

- Kembel SW, Meadow JF, O'Connor TK, Mhuireach G, Northcutt D, Kline J, Moriyama M, Brown GZ, Bohannon BJM, and JL Green. 2014. Architectural design drives the biogeography of indoor bacterial communities. *PLoS One* 9(1):e87093. doi:10.1371/journal.pone.0087093.
- Klepeis NE, and WC Nelson. 2001. The National Human Activity Pattern Survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 11(3):231–252. doi:10.1038/sj.jea.7500165.
- Klevens RM, Edwards JR, Richards CL, Jr, Horan TC, Gaynes RP, Pollock DA, and DM Cardo. 2007. Estimating health care-associated infections and deaths in U.S. hospitals, 2002. *Public Health Reports* 122:160–166.
- Knight R, Jansson J, Field D, Fierer N, Desai N, Fuhrman JA, Hugenholz P, van der Lelie D, Meyer F, Stevens R, Bailey M, Gordon JI, Kowalchuk GA, and JA Gilbert. 2012. Unlocking the potential of metagenomics through replicated experimental design. *Nature Biotechnology* 30(6):513–520. doi:10.1038/nbt.2235.
- Konya T, and JA Scott. 2014. Recent advances in the microbiology of the built environment. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports* 1(2):35–42. doi:10.1007/s40518-014-0007-4.
- Korpi, A, Jarnberg J, and AL Pasanen. 2009. Microbial volatile organic compounds. *Critical Reviews in Toxicology* 39:139–193. doi:10.1080/10408440802291497.
- Lax S, and JA Gilbert. 2015. Hospital-associated microbiota and implications for nosocomial infections. *Trends in Molecular Medicine* 21:427–432. doi:10.1016/j.molmed.2015.03.005.
- Lax S, Smith DP, Hampton-Marcell J, Owens SM, Handley KM, Scott NM, Gibbons SM, Larsen P, Shogan BD, Weiss S, Metcalf JL, Ursell LK, Vázquez-Baeza Y, Van Treuren W, Hasan NA, Gibson MK, Colwell R, Dantas G, Knight R, and JA Gilbert. 2014. Longitudinal analysis of microbial interaction between humans and the indoor environment. *Science* 345(6200):1048–1052. doi:10.1126/science.1254529.
- LeBlanc JG, Milani C, de Giori GS, Sesma F, van Sinderen D, and M Ventura. 2013. Bacteria as vitamin suppliers to their host: a gut microbiota perspective. *Current Opinion in Biotechnology* 24(2):160–168. doi:10.1016/j.cobio.2012.08.005.
- Lemfack MC, Nickel J, Dunkel M, Preissner R, and B Piechulla. 2014. mVOC: a database of microbial volatiles. *Nucleic Acids Research* 42(1):D744–D748. doi:10.1093/nar/gkt1250.
- Luongo JC, Fennelly KP, Keen JA, Zhai ZJ, Jones BW, and SL Miller. 2015. Role of mechanical ventilation in the airborne transmission of infectious agents in buildings. *Indoor Air*. doi:10.1111/ina.12267.
- Lyte M. 2013. Microbial endocrinology in the microbiome-gut-brain axis: how bacterial production and utilization of neurochemicals influence behavior. *PLoS Pathogens* 9(11):e1003726. doi:10.1371/journal.ppat.1003726.
- Martin LJ, Adams RI, Bateman A, Bik HM, Hawks J, Hird SM, Hughes D, Kembel SW, Kinney K, Kolokotronis SO, Levy G, McClain C, Meadow JF, Medina RF, Mhuireach GW, Moreau CS, Munshi-South J, Nichols LM, Palmer C, Popova L, Schal C, Täubel M, Trautwein M, Ugalde JA, and RR Dunn. 2015. Evolution of the indoor biome. *Trends in Ecology and Evolution* 30(4):223–232. doi:10.1016/j.tree.2015.02.001.
- Meadow JF, Altrichter AE, Kembel SW, Kline J, Mhuireach G, Moriyama M, Northcutt D, O'Connor TK, Womack AM, Brown GZ, Green JL, and BJ Bohannon. 2014. Indoor air bacterial communities are influenced by ventilation, occupancy, and outdoor air source. *Indoor Air* 24(1):41–48. doi:10.1111/ina.12047.
- Medrano-Félix A, Martínez C, Castro-del Campo N, León-Félix J, Peraza-Garay F, Gerba CP, and C Chaidez. 2011. Impact of prescribed cleaning and disinfectant use on microbial contamination in the home. *Journal of Applied Microbiology* 110(2):463–471. doi:10.1111/j.1365-2672.2010.04901.x.
- Mehtar S, Wiid I, and SD Todorov. 2008. The antimicrobial activity of copper and copper alloys against nosocomial pathogens and *Mycobacterium tuberculosis* isolated from healthcare facilities in the Western Cape: an in-vitro study. *The Journal of Hospital Infection* 68:45–51. doi:10.1016/j.jhin.2007.10.009.

- Mendell MJ, Mirer AG, Cheung K, Tong M, and J Douwes. 2011. Respiratory and allergic health effects of dampness, mold, and dampness-related agents: a review of the epidemiologic evidence. *Environmental Health Perspectives* 119(6):748–756. doi:10.1289/ehp.1002410.
- Michels HT, Keevil CW, Salgado CD, and MG Schmidt. 2015. From laboratory research to a clinical trial: copper alloy surfaces kill bacteria and reduce hospital-acquired infections. *HERD* 9:64–79. doi:10.1177/1937586715592650.
- Montville TJ, and KR Matthews. 2005. Food microbiology: an introduction. ASM Press, Washington, DC.
- Morrow JB, Downey AS, Peccia J. 2012. Challenges in microbial sampling in the indoor environment: workshop report summary. NIST technical note 1737. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Mueller NT, Whyatt R, Hoepner L, Oberfield S, Dominguez-Bello MG, Widen EM, Hassoun A, Perera F, and A Rundle. 2015. Prenatal exposure to antibiotics, cesarean section and risk of childhood obesity. *International Journal of Obesity* 39(4):665–670. doi:10.1038/ijo.2014.180.
- Nevalainen A, Täubel M, and A Hyvärinen. 2015. Indoor fungi: companions and contaminants. *Indoor Air* 25:125–156. doi:10.1111/ina.12182.
- Ownby DR, Johnson CC, and EL Peterson. 2002. Exposure to dogs and cats in the first year of life and risk of allergic sensitization at 6 to 7 years of age. *JAMA* 288(8):963–972. doi:10.1001/jama.288.8.963.
- Pestka JJ, Yike I, Dearborn DG, Ward MD, and JR Harkema. 2008. *Stachybotrys chartarum*, trichothecene mycotoxins, and damp building-related illness: new insights into a public health enigma. *Toxicological Sciences* 104(1):4–26. doi:10.1093/toxsci/kfm284.
- Pinto AJ, and L Raskin. 2012. PCR biases distort bacterial and archaeal community structure in pyrosequencing datasets. *PLoS One* 7(8):e43093. doi:10.1371/journal.pone.0043093.
- Pinto AJ, Xi C, and L Raskin. 2012. Bacterial community structure in the drinking water microbiome is governed by filtration processes. *Environmental Science and Technology* 46(16):8851–8859. doi:10.1021/es302042t.
- Proctor L. 2014. Overview of the NIH Human Microbiome Project. Presentation at the AAAS Symposium Microbiomes of the Built Environment, 27 March 2014, Washington, DC.
- Ramos T, and B Stephens. 2014. Tools to improve built environment data collection for indoor microbial ecology investigations. *Building and Environment* 81:243–257. doi:10.1016/j.buildenv.2014.07.004.
- Renz-Polster H, David MR, Buist AS, Vollmer WM, O'Connor EA, Fraser EA, and MA Wall. 2005. Caesarean section delivery and the risk of allergic disorders in childhood. *Clinical and Experimental Allergy* 35(11):1466–1472. doi:10.1111/j.1365-2222.2005.02356.x.
- Ruiz-Calderon JF, Cavallin H, Song SJ, Novoselac A, Pericchi LR, Hernandez JN, Rios R, Branch OH, Pereira H, Paulino LC, Blaser MJ, Knight R, and MG Dominguez-Bello. 2016. Walls talk: microbial biogeography of homes spanning urbanization. *Science Advances* 2:e1501061. doi:10.1126/sciadv.1501061.
- Salter SJ, Cox MJ, Turek EM, Calus ST, Cookson WO, Moffatt MF, Turner P, Parkhill J, Loman NJ, and AW Walker. 2014. Reagent and laboratory contamination can critically impact sequence-based microbiome analyses. *BMC Biology* 12(1):87. doi:10.1186/s12915-014-0087-z.
- Schoch CL, Seifert KA, Huhndorf S, Robert V, Spouge JL, Levesque CA, Chen W, and Fungal Barcoding Consortium. 2012. Nuclear ribosomal internal transcribed spacer (ITS) region as a universal DNA barcode marker for fungi. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109(16):6241–6246. doi:10.1073/pnas.1117018109.
- Schuijs MJ, Willart MA, Vergote K, Gras D, Deswarte K, Ege MJ, Madeira FB, Beyaert R, van Loo G, Bracher F, von Mutius E, Chanez P, Lambrecht BN, and H Hammad. 2015. Farm dust and endotoxin protect against allergy through A20 induction in lung epithelial cells. *Science* 349(6252):1106–1110. doi:10.1126/science.aac6623.

Stephens B, Adams RI, Bhangar S, Bibby K, and MS Waring. 2015. From commensalism to mutualism: integrating the microbial ecology, building science, and indoor air communities to advance research on the indoor microbiome. *Indoor Air* 25:1–3. doi:10.1111/ina.12167.

Tang JW. 2009. The effect of environmental parameters on the survival of airborne infectious agents. *Journal of the Royal Society, Interface/the Royal Society* 6(Suppl 6):S737–S746. doi:10.1098/rsif.2009.0227.focus.

Turnbaugh PJ, Ley RE, Hamady M, Fraser-Liggett C, Knight R, and JI Gordon. 2007. The human microbiome project: exploring the microbial part of ourselves in a changing world. *Nature* 449(7164):804–810. doi:10.1038/nature06244.

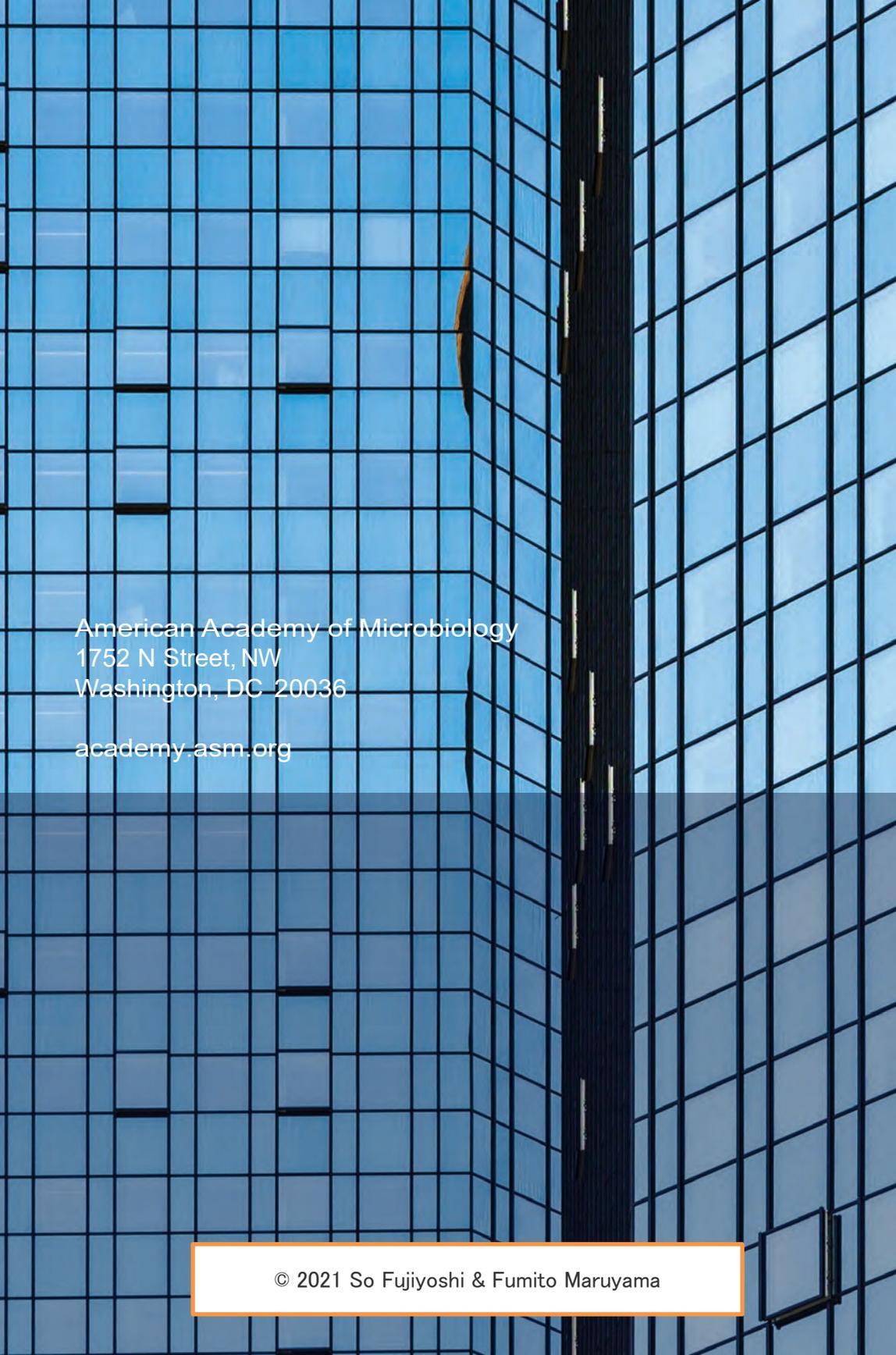
Van Derbeken J, Lee HK, Aleaziz H, and K Alexander. 16 June 2015. 6 dead, 7 hurt in Berkeley balcony collapse. *San Francisco Chronicle*, San Francisco, CA.

von Mutius E, and D Vercelli. 2010. Farm living: effects on childhood asthma and allergy. *Nature Reviews in Immunology* 10(12):861–868. doi:10.1038/nri2871.

Weber, DJ, and WA Rutala. 2013. Understanding and preventing transmission of healthcare-associated pathogens due to the contaminated hospital environment. *Infection Control and Hospital Epidemiology* 34(5):449–452. doi:10.1086/670223.

World Health Organization. 2009. WHO guidelines for indoor air quality: dampness and mould. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark.

Images retrieved from: p 2) Tim Skiles, Linsey Marr of Virginia Tech; p 6) James Klotz, shutterstock; p 7) Kelley, S.T., & Gilbert, J. A. (2013). Studying the microbiology of the indoor environment. *Genome Biology*, 14(2), 202.; p 8) Beth Poe; p 10) Jeff Chiu, AP Photo; p 12) (top) James Keivom, shutterstock, (bottom) Yale Rosen, flickr; p 13) Jack Gilbert; p 15) Serenethos, shutterstock; p 16) Richard Saxon, "My New Best Friend", Flickr



American Academy of Microbiology
1752 N Street, NW
Washington, DC 20036

academy.asm.org