

## 床下空間に起因する微生物汚染リスク統合評価手法の構築

主査 本間 義規\*<sup>1</sup>

委員 長谷川 麻子\*<sup>2</sup>

気密性能の向上に伴い、基礎断熱床下空間の温湿度形成に影響する隙間換気量が減少している。そうしたなか、床下空間利用の暖冷房換気システムも開発されている。こうした工法の変化或いは設備技術の進展が床下空間の微生物増殖に与える影響は小さくない。その程度を把握するため、3軒の建築物の床下温湿度性状、浮遊微生物量、浮遊微粒子量等の測定を行い、その特徴を把握した。また、微生物汚染リスクの統合評価手法の構築に向けて微生物増殖モデルの検討を行い、その数理モデルを作成した。孢子生成・飛散後に着床・発芽する可能性のある孢子比率（生菌率）や菌種毎の成長速度パラメータ等、モデル構築に必要な新たな課題が明らかとなった。

キーワード：1) 微生物汚染, 2) 浮遊微生物, 3) 浮遊微粒子, 4) 基礎断熱床下空間, 5) 断熱気密, 6) 微生物増殖モデル, 7) 菌系成長, 8) 分枝モデル, 9) ロジスティックモデル, 10) 湿流

### ESTABLISHMENT OF AN INTEGRATED EVALUATION METHOD FOR EVALUATING THE RISK OF MICROBIAL CONTAMINATION CAUSED BY UNDERFLOOR SPACE

Ch. Yoshinori Honma

Mem. Asako Hasegawa

The application as chambers for heating, cooling, and ventilation in the crawl space with insulated foundation walls has also spreading. To examine these effects, the temperature and humidity, suspended microorganisms, and suspended particulates of three characteristic buildings were measured. In addition, a microbial growth model that necessary for integrated risk assessment method for microbial contamination. Although it is a closed mathematical model, it is needed to determine the spore viability rate that may germinate after spores are generated and dispersed, as well as the growth rate parameters for each fungal species.

#### 1. はじめに

##### 1.1 背景

床下空間スラブ面は地盤面より高いベタ基礎構造となることが多い。基本的に給排水管敷設のための空間として利用されるだけなので、その床下高さは必要最低限の高さ及び空間容積となる。しかし、この合理性が日常的な清掃を困難にしている。湿った土壌に近い場所でもあることから微生物汚染を発生させるリスクは相応に高く、何某かの衛生的配慮が求められる。

床下空間を熱湿氣的に室内側に位置づける基礎断熱工法は防霉・防カビの観点で有利であることを示し<sup>1),2)</sup>、1999年、床廻りの断熱技術の一つとして全国適用が可能となっている。住宅金融支援機構の調査<sup>3)</sup>では全国15.2%のシェアを誇る（現状では20%近いと推定される）。

2023年、日本住宅性能表示基準が改正され（2022年11月7日公布、2023年4月1日施行）、ZEH水準の等級として温熱等級6,7が新設された。こうした動きに連動し、

ここ5年ほど戸建住宅の断熱性能はその水準が高まりつつあり、気密性能が $C=1.0\text{cm}^2/\text{m}^2$ を下回る住宅も一般化してきている。そのため、1990年代に検討していた床廻りの空気流れ特性とは異なってきており、そのためか基礎断熱工法も床下での結露・真菌被害が頻繁に聞かれるようになってきている<sup>4)</sup>。そうした問題が顕在化しつつあるなかで、床下にエアコンを設置し全室暖冷房を行う住宅が増加してきており、さらに、床下空間や天井懐などを活用してDCファンで強制的に空気熱搬送を行うシステムも出現してきている。

海外では、室内微生物汚染の注目度が日本よりも高く、建材を用いたBiohygrothermal modelを構築するための体系的な研究がフィンランドやドイツ等で行われている<sup>5),6)</sup>。微生物汚染が社会問題化したことが要因であり、2004年に発表されたフィンランドの研究事例では、アパート内の微生物汚染は床下起因であることが明らかにされている<sup>7)</sup>。また北欧諸国は、岩盤の影響で床下又は地下室

\*<sup>1</sup> 国立保健医療科学院 統括研究官, 博士(工学) \*<sup>2</sup> 宮城学院女子大学 教授, 博士(工学)

のラドン娘核種濃度が高いため、床下空間を環境調整空間として活用する意識が低い。ダンプネスと真菌に関する室内空気質ガイドライン (WHO)<sup>8)</sup>によると、建築物内の湿気及び微生物増殖の防止は健康被害を最小限に留めるための重要な要素であることを明言している。海外と異なる日本固有の床下空間活用のための設備的工夫と床下空間の微生物汚染防止に向けた方策は、居住者の健康や新たな暖房換気システム開発に対し不可欠である。

## 1.2 研究の目的

本研究では、微生物が床下空間内でどのように増殖・飛散し、結果として人間の生活する居住空間に流入するのか、そして最終的に人間の健康状態にどのような影響を及ぼし得るのかを把握する手法構築を目的としている。基礎断熱した床下空間利用にはいくつかのバリエーションが存在する。そこで、①基礎断熱床下空間を有する住宅2軒および施設(認定こども園の保育室)を対象として、i) 通常の床下使用状態、ii) 床下空間或いは天井懐等をチャンパーとして利用する多数室住宅暖冷房システム、およびiii) 床下暖冷房を行っている単室システムの各々について、その温湿度性状と浮遊微生物、気流速などの環境特性を把握する。次に、微生物汚染リスクを検討する多数室モデル開発の一環として、熱水分同時移動モデルに組み込むための②建材微生物増殖モデル(コンクリート、木材、床合板など、床下空間を構成する部材表面を対象)の開発を行う。

## 2. 住宅および施設の床下環境の実態把握

### 2.1 床下を空調利用しないA住宅の実測結果

#### 1) 実測住宅の概要

A住宅は、岩手県大東町する180.6m<sup>2</sup>(1F:99.0m<sup>2</sup>, 2F:81.6m<sup>2</sup>)の2階建て住戸であり、Ua値0.23W/(m<sup>2</sup>・K)、C値0.2cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>の高性能住宅である。顕熱形熱交換換気設備(顕熱交換効率91.1%、比消費電力0.35W/(m<sup>3</sup>/h)、定格風量300m<sup>3</sup>/h)を用いており、外気(OA)はストレージ経由の給気、床下空間に給気ダクトを配する設計が行われている。暖房は電気ヒートポンプ式温水暖房を用いており、床廻りの断熱はEPS特号300mmを基礎外張り、ベタ基礎の下にもXPS3b100mm(ペリメータ)+50mm(スラブ中央)という仕様となっている。

#### 2) 測定内容

温湿度およびCO<sub>2</sub>濃度測定はTandD TR-76UiおよびHOBO UX100-011Aを用いて10分間隔で測定した。

浮遊微生物は、バイオサンプラー(BIOSAMP MBS-1000N)で100リットル吸引、真菌はDG18培地、細菌はSCD培地を用い、サンプリング後各々25℃5日間、32℃2日間で培養しコロニー数をカウントしている。浮遊微粒子個数濃度はパーティクルカウンタ(Kanomax model

3889, 6粒径)を用いて測定を行った。

測定箇所は、床下(Crawl)、1F居間(1F Living)、ストレージルーム(Storage)および外気(Outair)でサンプリングを行っている。浮遊微粒子個数濃度は以上の空間にプラスして、UT給気口1か所でも測定を行った。この住宅は長期測定を実施しているが、今回の分析には2023年8月1日~10月10日までのデータを用いている。

### 3) 温湿度測定結果

温湿度は微生物増殖に必要な不可欠なデータである。床下空間は竣工後一冬を経過すると基礎コンクリートからの余剰水分発生が収束し周期定常状態となるため<sup>9)</sup>、湿度形成に必要な水分移動は換気或いは多室間移流によるものとなる。そのため、外気季節変動および室内での水分発生状態(人体+調理+入浴等)の影響を受けることになるが、実験的に発生させる以外の方法で、居住者に生理的・心理的負担を負わせることなく水分発生量を定量的に把握するのは極めて困難である。従って、今回は実測結果からその状態を把握するに留める。図2-1に床下空間、1F居間、収納室、外気の2023年8月1日~10月10日までの温度Boxplot図を、図2-2に絶対湿度のBoxplot図を示す。床下空間の温度はほとんど変動せず(SD:0.25℃)、平均温度23.3℃で外気温度の平均値(24.2℃)より0.9℃程度低い。床下絶対湿度は1F居間絶対湿度よりも低く(平均14.1g/kgDA)、基礎コンクリート・スラブコンクリート等からの水分発生は殆どなく平衡状態になっているものと思われる。

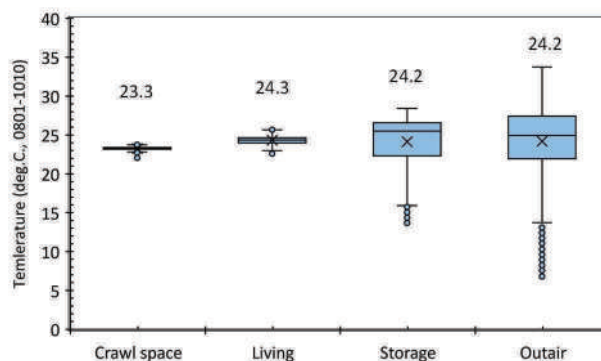


図 2-1 A住宅の温度 Boxplot 図(8/1-10/10)

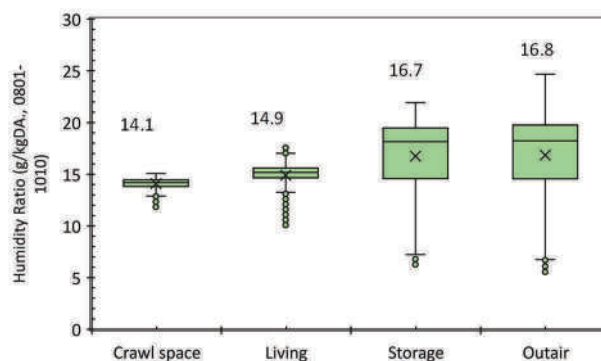


図 2-2 A住宅の絶対湿度 Boxplot 図(8/1-10/10)

#### 4) 浮遊微生物及び浮遊微粒子測定結果

写真 2-1 に A 住宅の各室の真菌培養結果を、写真 2-2 に細菌培養結果を、表 2-1 にコロニーカウント数を示す。屋外は森林で囲まれている立地である。測定の結果、真菌に関しては I/O 比で 2.85 であり、床下内での増殖が疑われる。菌種では *Aspergillus* 属や *Penicillium* 属が多く、外気由来ではない。一方、細菌数は外気に対する I/O 比が 0.13 となり、真菌に比べて低い結果となった。

図 2-3 に A 住宅床下空間の浮遊微粒子個数濃度を示す。床下空間は 1F リビングより低く、粒径が大きくなるに従ってその差は開いてくる。A 住宅は床下空間を暖房換気のチャンバー空間として利用していないため差が生じていると推測できる。しかし、後述する B 住宅と比較すると粒子個数濃度が 1 桁オーダーで低く、床下の清浄度は手術室レベルの高さになっている。パーティクルカウンタがカウントする個数は 1m<sup>3</sup> 当たり 100 万単位であり、バイオサンプラーはそれより 3 桁小さい。組成比は不明だが、少なくとも A 住宅の床下真菌量は、浮遊状態で存在する量は少ないのではないかと考えられる。

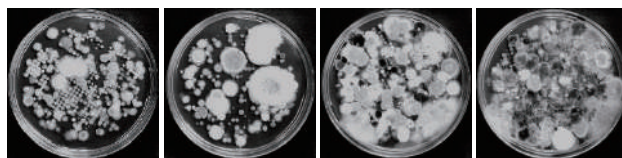


写真 2-1 A 住宅の真菌(DG18)培養結果(10/10 サンプルング)

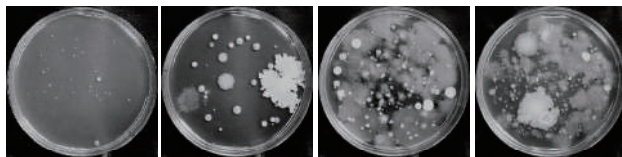


写真 2-2 A 住宅の細菌(SCD)培養結果(10/10 サンプルング)

表 2-1 真菌・細菌のカウント数(CFU/m<sup>3</sup>) (10/10 サンプルング)

	crawl	1F Living	storage	Outair
DG18	3050	1250	1020	1070
SCD	310	350	1290	2350

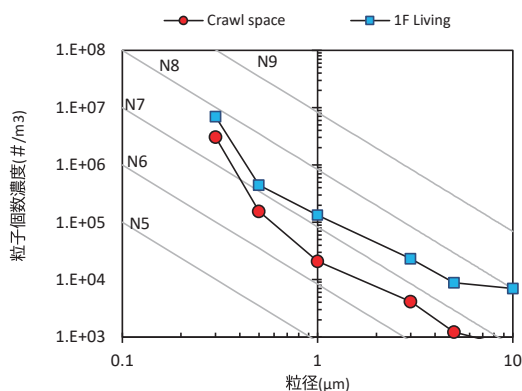


図 2-3 A 住宅の床下空間、1F リビングの浮遊微粒子濃度(10/10 サンプルング)

#### 5) CO<sub>2</sub> 濃度測定結果

図 2-4 に真菌・細菌量及び浮遊微粒子濃度測定日前の 3 日間(10/8-10)の CO<sub>2</sub> 濃度変化を示す。CO<sub>2</sub> 濃度変化をトレースすることで空気流れ推定ができる。ストレージは外気が導入される経路空間なので追従した濃度になっている。また、床下の CO<sub>2</sub> 濃度は 1F リビングの CO<sub>2</sub> 濃度と連動した動きになっており、タイムラグは 90 分程度である。床下での CO<sub>2</sub> 発生はないことから、室内空気が床下に流入する経路が存在していることが理解できる。その量がどの程度かは換気回路網シミュレーションにより同定することで把握することができる。

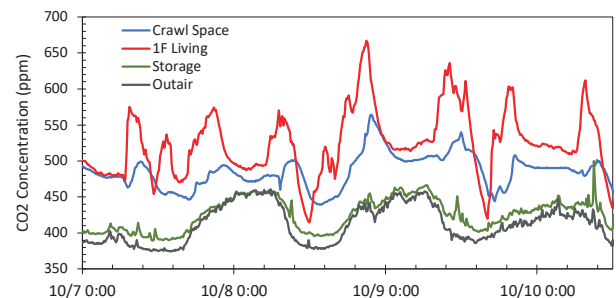


図 2-4 A 住宅の床下、1F リビング、ストレージ、外気の CO<sub>2</sub> 濃度変化(10/8-10/10)

### 2.2 B 住宅における床下気流性状の把握

#### 1) 床下空間チャンバーの気流分布

床下空間を利用した換気或いは熱搬送空気を各室に供給するチャンバーとする計画は少なくない。換気ダクトを床下に配する場合の風量設定は 30m<sup>3</sup>/h 程度、熱搬送を兼ねるシステムは 300~500m<sup>3</sup>/h と幅が広い。床下エアコンは吹出風量が 1000m<sup>3</sup>/h 程度に達する。真菌は床合板あるいは大引、土台、根太等の構造材表面でも増殖するが、その増殖は、表面付着を阻害する気流に直接影響を受ける。そこで一例ではあるが、実際の住宅空間の複数ポイントの床下気流測定を試みた。

#### 2) 測定概要

床下気流測定を実施した住宅は岩手県水沢市に立地する B 住宅(展示住宅)である。延面積 130.22m<sup>2</sup> の 2 階建て木造(2023 年築)であり、空調室と称するチャンバーに熱交換換気された SA 及び RA (室内空気) が供給される。空調室には住宅全体の熱負荷に見合ったエアコン(4.0kW)を 1 台設置し、DC ファンで各室或いは床下ゾーンに送風する。各室の換気排気(RA)は熱交換換気設備に直接戻すが、ゾーン或いは各室の熱負荷に応じた熱を供給するため、DC ファン風量は 150~400m<sup>3</sup>/h 程度で運転している。従って、換気性状としては希釈換気に相当する。本ケースの場合は、床下空間および天井懐に各々 200φ の軟 PVC フレキダクトで各 4 本供給されている。実測したところ、床下への給気量合計は約 1300m<sup>3</sup>/h であった。今回測定した床下空間は 1 階全体で 67.3m<sup>2</sup>、床下



高 45cm, 中基礎で 4 つの空間に仕切られており, 人通口で連続している。今回, センサープローブのケーブル長の制限があったため, 床点検口のある UT 室下の床下空間 (3.64m×1.82m, 6.62m<sup>2</sup> 人通口 2 か所) 内で表面風速測定を行った (写真 2-3)。

表面風速測定には eATVS-8(ATS Inc.)にキャンドルスティックセンサー (プローブ高さ 9mm, 0-6m/s, 精度 FS ±2%) を用いた (写真 2-4)。センサープローブは床根太や給水管等を避けて SA ダクト前方 80cm, ダクト後方 50cm の位置に設置した (写真 2-3)。



写真 2-3 気流測定をした床下空間

写真 2-4 センサープローブ設置状況

表面風速の測定結果を図 2-5 に示す。SA ダクトの吹出風速は平均 2.93m/s であり, 測定空間内の気流性状を決定付けている。ダクトが床スラブに近い位置にあり, 床合板裏の表面平均風速はダクト後方 0.03m/s, ダクト前方で 0.07m/s であった。一方, 床スラブはダクト後方で 0.08m/s, ダクト前方で 0.24m/s であった。ダクト吹出位置からは左側にずれているものの, 床付近はダクト気流の影響を大きく受ける結果となっている。基礎壁は吹出風向と並行面でダクト中心から 130cm 離れており, 平均風速で 0.12m/s であった。以上の測定結果から表面風速性状を一般化するのは困難であるが, 少なくともダクト等の気流速のない空間における表面平均風速は 0.03m/s 程度以下であると推測できる。この値は温度差によって生じる自然対流伝達と同等とみなすことができる。なお, 床下空間, 空調室, 1F リビング空間の浮遊微粒子個数濃度を, パーティクルカウンタ(Kanomax3889)を用いて各々 30 分間測定した。測定結果を図 2-6 に示す。図 2-3 と同様, 図中には空気清浄度クラスも記載している (N5~N8)。結果をみると, 粒径 1μm 以下の浮遊微粒子は床下空間, 空調室および 1F リビングともほぼ同等である。一方, 粒径が大きくなるに従い, 空調室の粒子個数濃度が高くなる。A 住宅に比べると, 粒子個数濃度が 1 桁程度大きいことが特徴である。空調室内は 2000m<sup>3</sup>/h 以上の空気が通過しているため, コンクリート等の粉じんも舞いやすい状況になっていると想像される。また, 粒径の大きな微粒子は, 空間ボリュームと吹出風量・風速の小さくなる空間ほど床面に沈降するため, 数値としては小さくなるものと考えられる。

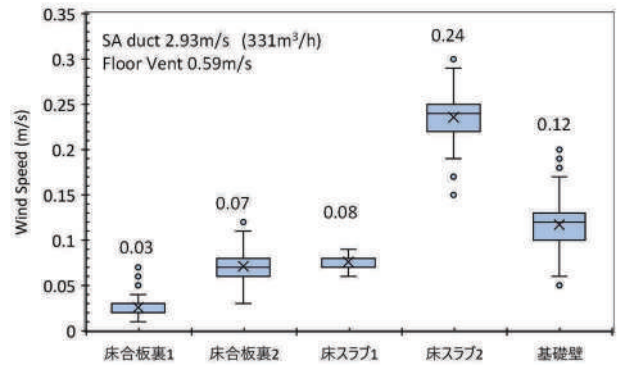


図 2-5 B 住宅の床下空間の表面風速分布

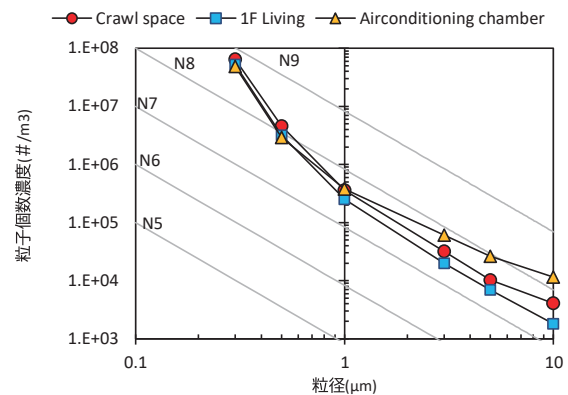


図 2-6 B 住宅の床下空間, 空調室, 1F リビングの浮遊微粒子濃度

## 2.3 床チャンバー方式冷暖房システムを採用した C 施設の空気環境調査

### 1) 実測施設の概要

C 施設 (仙台市青葉区) は木造平屋建ての認定こども園である。延べ面積は 998.84m<sup>2</sup>, 収容定員は合計 120 名である。全室, 床下空間に設置したエアコンから供給される温風・冷風が, 床下空間を経由して床面開口から吹き出す方式であり, 床面放射と空気熱搬送を組み合わせた伝熱形態となっている。今回, 測定したのは床面積 95.16m<sup>2</sup> の保育室である。エアコン吹き出しを直接室内に行わない理由は, 意匠上の理由のほか, 気流感と機器騒音のコントロールにあると推測する。また幼児保育は床に座る活動が多いことから, 床表面温度のコントロールが重要と考えたとも思われる。

C 施設に採用されている暖冷房設備概要を表 2-2 に示す。エアコンの設置方法は図 2-7 に示す通りフカシ壁内にビルドインした形態であり, 稼働時は床下空間内で 24.0m<sup>3</sup>/min~34.0m<sup>3</sup>/min の風量を水平方向に吹出し, 床面開口 (750mm×150mm) 12 か所から温冷風を室内に供給している。

表 2-2 園児室の暖冷房・換気設備

暖冷房設備	空冷ヒートポンプエアコン冷房 14.0kW, 暖房 16.0kW, 消費電力 4.32kW
換気設備	第 3 種換気装置 300m <sup>3</sup> /h, 80W (定格)

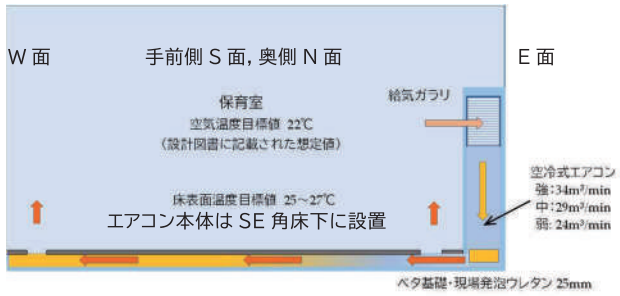


図 2-7 床下エアコン暖冷房システム・概念図(暖房時)



写真 2-5 給気ガラリ 写真 2-6 床下空間の状態

## 2) 測定概要

室内および床下空間、外気の CO<sub>2</sub> 濃度を TandD TR-76Ui および床下空間温湿度を SYSCOM SHTDL-3 で測定した。測定時間間隔は 5 分とした。

また、浮遊真菌測定には BIOSUMP MBS-1000N (ミドリ安全) を、浮遊微粒子個数濃度はパーティクルカウンタ (Kanomax 3889) を用いた。サンプリング箇所は幼児室、床下吹き出し 4 か所、外気とし、エアコン停止時および運転時の 2 回実施している。

## 3) トレーサーとしての CO<sub>2</sub> 測定結果概要

CO<sub>2</sub> 濃度は、人体呼気中に含まれ、室の在・不在状態が明確な施設では、トレーサーガスとしての利用が可能である。C 施設は 1 室のみを対象とするため、図 2-7 に示すように単純な 2 室モデルで扱うことができる。実測は 2022 年 8 月 19 日から 9 月 5 日に行った。夏休み期間を含むが学童保育も実施しているため、土日以外は幼児・児童が通園している。新型コロナウイルス対策のため窓開け換気を行っているが窓開度幅は測定しておらず通風量は不明である。図 2-8 に測定期間中の 5 歳児室中央および床下空間の CO<sub>2</sub> 濃度変動を示す。土日はほぼ 500ppm 以下となっているが月～金は 1400ppm に達することもある。図 2-9 に床下エアコン稼働時の室中央および床下空間の CO<sub>2</sub> 濃度散布図を、図 2-10 に夜間(0:00~6:00)の同散布図を示す。

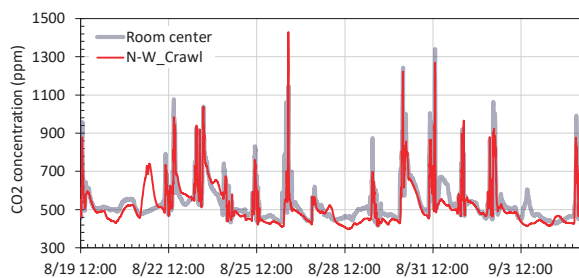


図 2-8 室中央及び床下空間の CO<sub>2</sub> 濃度変動

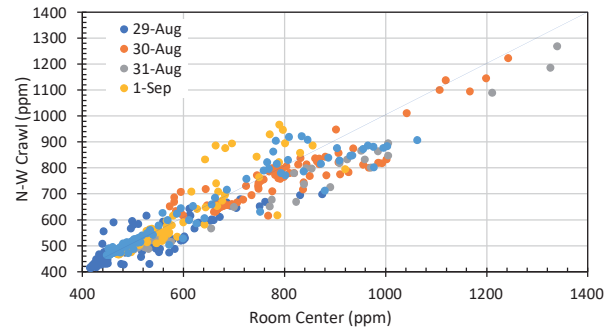


図 2-9 床下エアコン運転時の室中央・床下 CO<sub>2</sub> 濃度

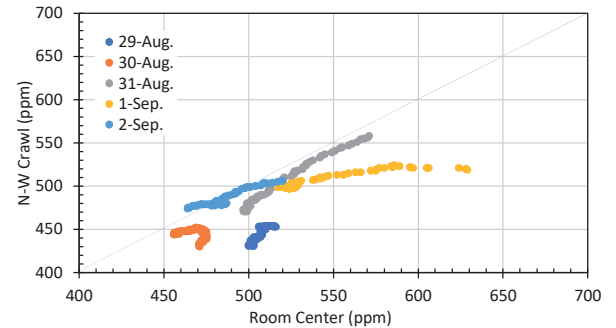


図 2-10 夜間停止時の室中央・床下 CO<sub>2</sub> 濃度

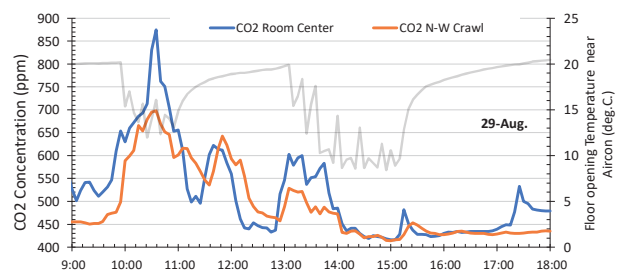


図 2-11 床下エアコン稼働時の CO<sub>2</sub> 濃度時系列変動

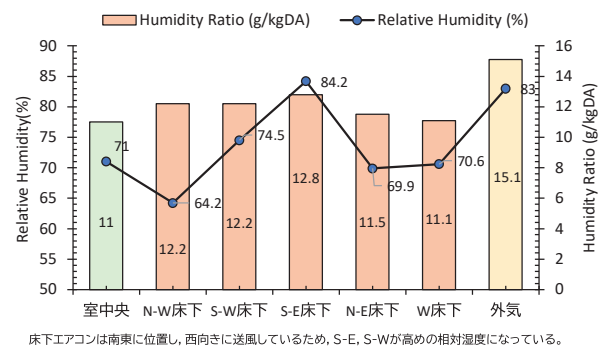


図 2-12 床下エアコン稼働時の室内・床下空間の湿度環境

床下エアコン稼働時は空気攪拌されるため場所により濃度むらの状態はほぼ同等であるが、夜間は床下濃度の方が低く、かつ室中央および床下ともに標準偏差が小さい。一例として 8/29 の床下エアコン稼働時の濃度変化(および床下エアコン直近の床下温度)を図 2-11 に示す。図 2-11 をみると床下エアコンの発停が断続的に確認することができ、10:00~11:00 は濃度応答にほぼタイムラグは見られないものの、11:30~12:00 および 15:00~16:00 はタイムラグが確認できる。

#### 4)冷房時の床下湿度環境

特に冷房時の業務用エアコン吹出温度は一般の家庭用エアコンより低温となるため、空間及び材料表面の相対湿度が上昇する反面、成り行き除湿されることから絶対湿度が低下するという特徴がある。床下エアコン運転時に10℃以下になるときがあり、特に床下エアコン直近で相対湿度が上昇し、南東床下開口(S-E)が84.2%で一番高く、北西床下開口(N-W)は64.2%で一番低い(図2-12)。しかし、絶対湿度で見ると、エアコンを使用に伴う成り行き除湿により、いずれの空間も外気より低い数値となることがわかる。

#### 5)浮遊微粒子個数濃度測定結果

室内空間および吹出口からの空気の浮遊微粒子個数濃度を、パーティクルカウンタ(Kanomax 3889)を用いて測定した。室内は中央テーブル上で測定を行い、吸込口濃度はフカシ壁内のエアコン本体吸込口前で測定した。吹出口は、床面吹出口に設置する段ボールのケーシングをつくり、床下から噴き出した空気のみをサンプリングできるように工夫した。図2-13に外気個数濃度に対する各所の個数濃度を示す。エアコンOFFの状態は外気に近く、エアコンがONになると粒径1.0~10μm/m<sup>3</sup>の個数濃度が上昇することがわかる。

なお、測定時は幼児および保育者の出入りがあり、また一部窓を開放している時間帯があった。従って粒径の個数濃度増加は床下起因であると考えられる。

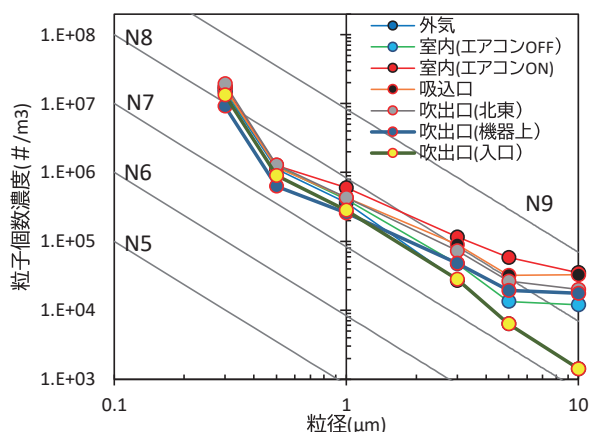


図2-13 C施設の浮遊微粒子個数濃度(室内, 吹出口, 外気)

#### 6)浮遊微生物濃度測定結果

浮遊微生物(真菌)は温度の高い夏期に多く、温度の低い外気に低くなる傾向にある。夏期(2022/8/23)および冬期(2022/12/9)の測定結果の一例を示す(表2-3)。基本的に外気由来であるため、I/O比で1を超える場合に当該空間での培養が疑われる。今回測定した結果をみると、I/O比が1を超える箇所はなく、床下内での培養が認められる状態ではなかった。しかし、浮遊微生物濃度が決して低いわけではない点には注意が必要である。外気濃度が比較的高いことが原因と考えられる。A住宅も

同様に高く、A住宅、C施設の共通点はともに森林に囲まれた立地であるという点にある。真菌濃度に対する森林の影響についてはさらなる検討が必要だろう。

表2-3 C施設の浮遊微生物濃度の夏期・冬期測定結果

夏期 22/08/23	床面給気 ガラリ	室内空間 (エアコン on)	外気
CFU/m <sup>3</sup>	1180	1660	1960
I/O 比	0.60	0.85	1
冬期 22/12/09	エアコン 吸込口手前	室内空間 (エアコン on)	外気
CFU/m <sup>3</sup>	820	200	980
I/O 比	0.84	0.20	1
	床下給気 ガラリ	保育室廊下	
CFU/m <sup>3</sup>	220	460	
I/O 比	0.22	0.47	

#### 2.4 床下空間の浮遊微生物濃度, 浮遊微粒子濃度および温湿度・気流の関係

A住宅、B住宅、C施設の3つの建築物の床下空間を対象に実測を行った。近年の床下空間は、床高さが低くメンテナンスがしにくいこと、基礎断熱化により床下空間が熱的に内側に配されたことにより、暖冷房用の空気搬送空間として計画されることも多くなったため、その事例(B住宅、C施設)を含めた。A住宅は20年前よりも気密性能が高くなったために隙間換気量の少なくなった事例として考えることができる。

床下空間に起因する微生物汚染リスクを正しく評価するためには、『どのような利用状態であるときにどのような汚染状況なのか』を把握することが何より重要である。パラメータとして挙げられるのは、①断熱気密性能、②使用材料と初期含水率、③建物全体の換気量とその経路、④隙間分布、⑤建物利用状況(室内水分発生量、室内温度)、⑥外部空間の浮遊微生物濃度、⑦浮遊微粒子濃度等である。今回の測定事例では、床下空間ではほぼ気流の生じていないA住宅の浮遊微粒子濃度は低い一方で、隙間換気量が少なく比較的恒温高湿状態が長く続いていて浮遊微生物濃度は高めであったこと、他方、床下空間で気流が発生しているC施設では浮遊微粒子濃度は高く、浮遊微生物量も絶対値として大きめであるが、I/O比では増殖している状況は見られない、ということが明らかになった。異なる仕様の3つの建築物から一般解を導くことは難しいが、特徴的な性状は把握することができた。しかし、浮遊微粒子のうち、の程度が浮遊微生物であるのかについてはインピンジャー法或いはアンダーセンサーによる粒径別浮遊微生物の把握など、いくつかの情報を追加すること、またサンプリングした空気の浮遊微生物以外の成分分析を行い、トータルとして浮遊微粒子の発生源を特定することが宿題として残された。また、真菌・細菌の生菌・死菌の別に関する定量化も重要で、これら検討は今後の課題としたい。



### 3. 建材面を対象とした微生物増殖モデルの検討

#### 3.1 微生物増殖モデル

微生物増殖モデルは数理生物学分野で詳細な検討が行われている。特にウイルスやバクテリアはその増殖プロセスや伝播メカニズムの正しい理解が健康被害防止に直結するため研究蓄積も多い。SARS, MARS, 新型インフルエンザ, COVID-19 等のウイルスが原因の健康被害のほかに結核菌やレジオネラ属菌等の細菌被害も多い。さらに食品衛生分野では、経口感染症であるカンピロバクター, サルモネラ菌, 病原性大腸菌など食中毒の原因となる感染症も少なくない<sup>例え10)</sup>。一方, 真菌の菌糸成長プロセスは, 菌糸先端でのアクチンの重合化, 酵素分泌, 細胞伸長の周期性, クオラムセンシングなど複雑な機構を持つものが多い。毒性を持つものも少ないため細菌研究ほど活発ではないが, 培養工學上有用な真菌でもあるため, 現在でも様々な研究アプローチが行われている<sup>11)</sup>。

一方, 建築物衛生を保持するためには生活環境内での微生物増殖を抑制する必要がある, 建材を基材とする独自のモデル構築が図られてきた。Hens ら<sup>12)</sup>, Abe ら<sup>13)</sup>, Clarke ら<sup>14)</sup>, Krus ら<sup>15)</sup>などのモデルがある。国内では伊藤ら<sup>16)</sup>, 柳ら<sup>17)</sup>の研究がある。伊藤らは富栄養状態のシャーレ上, 柳らは富栄養状態の建材上での微生物増殖実験に基づき数理モデル開発を行っている。ただ, いずれも菌糸成長のみ或いは成長ステージの表現にとどまり, 孢子生成量を算出できないため, 部分的な真菌増殖と気流に基づく飛散拡散状況を再現するシミュレーションモデルとすることができない。

#### 3.2 菌糸成長のモデリング

まずは菌糸成長に伴う孢子生成のモデリングが必要である。真菌の生活環は, 孢子が発芽して菌糸(発芽管)が伸長・分枝し, 菌糸体とよばれる多細胞ネットワーク構造を形成, やがて子実体を形成し生殖細胞で孢子形成という流れをたどる。

菌糸は先端成長により増殖するが, 菌糸体へのプロセスには分枝, 吻合, 転流を繰り返すことで環境中の資源を探索・吸収し, 菌糸体内で効率的に配分を行うとされる。グラフ理論を応用して忠実にモデリングする研究も進んでいるようであるが<sup>18)</sup>, ミクロレベルでの成長過程の実態を把握する必要がある。本研究では文献情報を基に菌糸成長のモデリングについて検討した。

菌糸は糸状, 筒形の細胞で細胞膜の外側は細胞膜で覆われており, 一般に菌糸の太さは2~10マイクロメートル程度であるとされる。また菌糸体に含まれる菌糸の長さは菌糸の成長と消失のバランスにより決定され, 菌糸密度を  $165\text{kg/m}^3(165\text{mg/cm}^3)$  とすると,  $5000\text{m}(2.6\text{mg})$  の菌糸表面積は  $314\text{cm}^2$  という試算もある<sup>19)</sup>。ただし, こ

れらが全て生菌糸というわけではない。通常は2~10%が生菌糸とされ, 残り90%以上はゴースト菌糸とよばれる細胞質が消失した菌糸の抜け殻であるという。

栄養吸収・代謝に伴う菌糸の役割ゾーンは, 先端成長ゾーン, 吸収ゾーン, 貯蔵ゾーン, 老衰ゾーンの4つにわかるとされており, 先端部分が新たに作られる部分である。イメージとしては, 根本で成長する毛髪ではなく, 表面が膨張する風船に近い。

菌糸の栄養源(基質)かつ生息場所となる基物という。建材の場合, 材質と表面状態により異なるが, 構造木材はそれ自体が基物になる。菌糸体は分枝により形成される先端の数に比例して栄養をより効率的に獲得できるようになるが, 逆に基質が乏しい環境下では, 先端成長ゾーンは主軸となる菌糸の伸長を維持するのに必要な小胞しか供給できないため分枝はほとんど形成されないとされ, 外部からの基質の供給速度に対応し成長の単位である菌糸の先端数を調節しているという。

例えば, *Aspergillus Niger* は寒天培地上において28℃前後で培養すると, 6時間後に発芽し18時間後には分枝が形成され24時間後には直径3~4mmの菌糸体が形成されるという<sup>19)</sup>(図3-1)。またこの文献によれば, 実験による菌糸成長速度は  $4\mu\text{m/min}$  であったという。

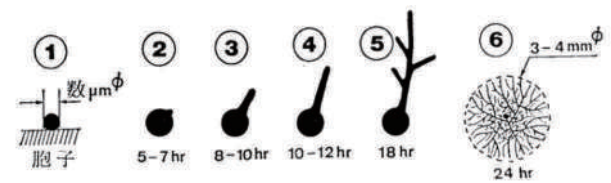


図3-1 真菌成長過程の例(文献19より引用)

図3-1は菌糸が成長して行き, 一定時間(図中では18時間)で分枝が始まっている。その後, 栄養状態に応じて分枝を繰り返していき, その6時間後には⑥の状態になっている。このタイムラグは一般に②~④までが誘導期, ⑤で加速増殖期, ⑥は減速増殖期に入り, その後定常期になる, と説明され, 数学的にはシグモイド関数形で表現されることが多い。例えば文献10では, ロジスティック増殖モデル, コンペルツ型増殖モデル, バラニーモデル, 新ロジスティックモデルなど様々なモデルが紹介されている。

#### 3.3 分枝モデリング

分枝するまでの時間は直線的時間変化をしないが, 分枝する最終形状(状態量)は幾何的に定めることができる。すなわち, 菌糸成長が最終的に終了するまでの経過時間, その時の菌糸総長さは, 菌糸成長速度を  $v$  と置くと, 以下のような単純なモデルで表現することができる(これを  $K$  分枝モデルと命名する)。

K 分枝モデルは、最終的平衡状態時間  $t_{eq}(h)$ (eq: Equilibrium), 平衡に達するまでの分枝イベント数  $n$ (回), 菌糸成長速度  $v(m/h)$ , 分枝するまでの時間  $\tau(h)$ , 菌糸総延長距離  $L(m)$  とおくと, 分枝してできた菌糸長さの総和が完成時(平衡時)の菌糸総長となることから, 2つに分枝する場合, 図 3-2 のように表現することができる。また, 分枝数は菌の性質によって変化しないと仮定し, その分枝数を  $K$  とおくと(1)式が成立する。

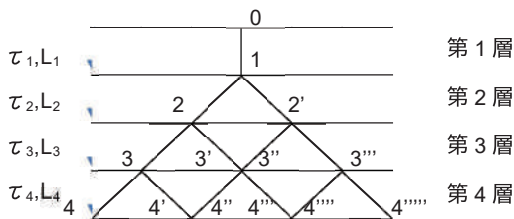


図 3-2 2分枝モデル

$$K^n - 1 = \frac{L}{v\tau} \quad \dots (1)$$

$$n = \frac{t_{eq}}{\tau} \quad \dots (2)$$

例えば,  $t_{eq}=120(h)$ ,  $v=2.4 \times 10^{-4}(m/h)$ ,  $L=5000m$  とすると, 分枝数と分枝するまでの時間  $x(h)$  は図 3-3 で表現される。

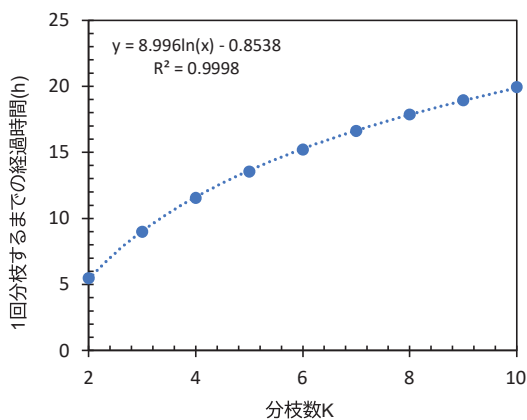


図 3-3 分枝数 K と 1 回分枝するまでの経過時間

(1)式の菌糸成長速度  $v$  は一定値である必要はなく, 時間進行に応じて可変にすることも可能である。

### 3.4 菌糸成長速度のモデリング

上記のモデルは, 決定論的モデルかつ機構論モデルであり, かつ成長速度  $v$  で記述した静的なモデルである。実際の微生物増殖挙動は, 前述したとおりシグモイド関数型となることから, 速度も一定ではない。ここでは, 最も基本的なロジスティック方程式を用いる。(3)式に基礎式を示す。なお, 他にも多数検討されているこのモデ

ル自体は, 数値計算上はいつでも変更可能である。

$$\frac{d\lambda}{dt} = r\lambda \left(1 - \frac{\lambda}{L_n}\right) \quad \dots (3)$$

ここで  $\lambda$  は菌糸長さ(m),  $L_n$  は  $n$  層目の菌糸長さの最大値(m),  $r$  は菌糸成長速度に影響する関数(温度と栄養量及び水分量に応じる数値)となる。

$n$  層目の菌糸長さとは, 分枝  $n$  回目ときの平衡時長さである。(n+1)層目の菌糸が分枝を開始したときに, それ以前の層の菌糸は成長を止めるものとする。

(3)式は速度の式であり,  $r$  をどのような関数とするのかが重要である。ここでは, (4)式に表すような単純な平方根モデルを組み込むことにする。

$$\sqrt{r} = b(T - T_{min}) \cdot \sqrt{x - x_{min}} \quad \dots (4)$$

なお,  $T$  は基材表面温度 ( $^{\circ}C$ ),  $T_{min}$  は成長可能最低温度 ( $^{\circ}C$ ),  $x$  は基材絶対湿度(g/kgDA),  $x_{min}$  は成長下限基材絶対湿度 (g/kgDA) である。

### 3.5 木材表面湿流をパラメータとする真菌増殖実験

(4)式の右辺ルート内は, 成長限界の表面絶対湿度であり, 一般的な数理微生物学で扱っている水分活性(表面相対湿度)とは異なっている。相対湿度を与えることはもちろん可能であるが, 雰囲気との関係, すなわち境界条件によって湿流向きは変わってくる。微生物が常に同じ吸収量となるようなコントロールをするわけではなく, 湿流の向きに応じて成長のしやすさ・しにくさが発生するという仮説を立てた。木材表面湿流に関しては, 筆者らは既に熱水分同時移動モデルを確立しており, 数理モデルの一部として実装することは可能である。このことを確かめるため, 湿流をパラメータとする真菌実験を行う。

#### 1) 実験手順および実験準備

含水率調整をした木片に孢子懸濁液を塗布または噴霧し, 無機塩飽和水溶液を入れて湿度調整した密閉容器の中に入れて培養, 真菌増殖するかどうかを確認する。床下構成木材を中心に実験することがモデル作成上重要であることから, 対象木材としてヒノキ, エゾマツ, スギを用いることとした。熱水分同時移動シミュレーションに組み入れるためには, これら木材の湿気伝導率や平衡含水率曲線等の熱湿気物性が別途必要である。

#### 2) 実験パラメータ

木材表面の真菌成長には下記の要素に左右される。表面温度, 表面相対湿度(温度および相対湿度が与えられれば絶対湿度も自動的に決まる), 表面栄養分の 3 つ



をパラメータとする。木材表面温度については、等温系であるので、インキュベーター温度とする（真菌培養で一般的な 25℃に設定し、温度変化がないものと仮定）。すなわち、(4)式右辺の温度項は一定値を仮定する。

表面湿流は、①雰囲気からの水分供給（吸湿状態）および②木材からの水分放出（放湿状態）の 2 パターン及び③平衡状態が考えられる。例えば図 3-4 の平衡含水率曲線を例にすると、表 3-1 のような条件を考えることができる。

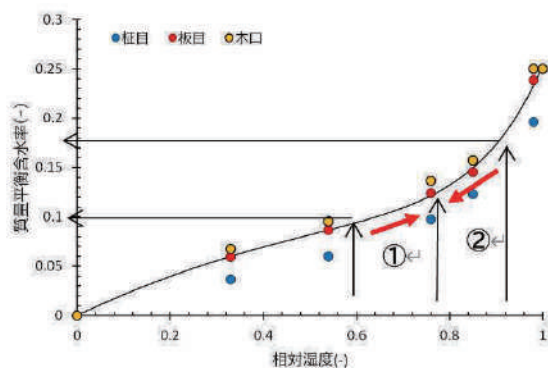


図 3-4 スギ材の平衡含水率曲線と放湿・吸湿条件の考え方

表 3-1 材料含水率と吸放湿状態（スギ材）

状態	材料含水率	飽和塩水溶液
①吸湿状態	9.5%	NaCl (76%), 平衡含水率 12%
②放湿状態	18.5%	NaCl (76%), 平衡含水率 12%

### 3) 実験パラメータ

試験体はヒノキ、エゾマツ、スギとし（90mm×90mm 角）で、ヒノキ、エゾマツは 9mm 厚、スギは 14mm 厚とした（市販品の厚みのままとした）。絶乾密度は、ヒノキが 418~427kg/m<sup>3</sup>、エゾマツは 381~382kg/m<sup>3</sup>、スギは 284~286 kg/m<sup>3</sup>であった。なお、異方性については柱目のみ考慮した。湿度調整を行った試験体を無機塩飽和水溶液 (NaCl, 平衡湿度 76%) アクリルボックス内に設置した。その際、実験時間短縮のため、やや富栄養状態となるように、ポテトデキストロースアガー粉末 6.12g を精製水 300ml に混ぜ合わせ、刷毛で試験体表面に塗布した。塗布量は塗回数を均一とし、塗布前後の刷毛質量差より 1 枚当たり 0.37g とした。

培地培養した胞子 (*Cladosporium cladosporioides*) をディスプレイスティックでかきとり、精製水 300ml に加えて十分に攪拌して胞子懸濁液を作製した。胞子懸濁液をマイクロピペットで細胞計数盤 (65×24×3mm) に注入し、生物顕微鏡により胞子が四隅区画で 20 個 (濃度 2×10<sup>5</sup> spores/ml, 塗布量は 0.2ml であり、個数としては 4×10<sup>6</sup> spores) あることを確認し塗布した。

試験体を密閉したアクリルボックスを 25℃一定のインキュベーター内にて養生し、毎日観察を行った。増殖実験の観察画像について、材料表面が吸湿側となる含水

率 9.5% 群の画像を写真 3-1 に示す。15 日経過後も目視で確認できるほどのコロニーには成長しなかった。写真 3-2 は放湿側となる含水率 18.5% 群の観察画像である。目視上は色相変化が生じていることがわかるが、培地上のような大きなコロニーが形成されてはいなかった。

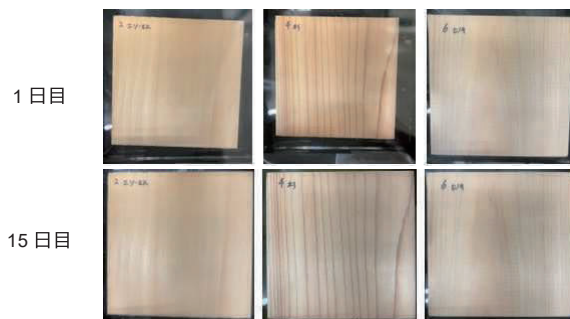


写真 3-1 吸湿状態の木材表面状態 (含水率 9.5%→12%)



写真 3-2 放湿状態の木材表面状態 (含水率 18.5%→12%)

画像から胞子直径を計測したところ、約 1mm であった。今回提案した数理モデルに当てはめて計算すると、分枝するまでの時間は 24.58967h であり、菌糸総長は 150.7m となった。放出する胞子数は菌全体の 20% が発芽し、かつ菌糸成長する胞子量の最大 20% を仮定すると、 $2.55 \times 10^4$  個と見積もられ、これは当初の胞子数の 1021 倍である (図 3-5)。

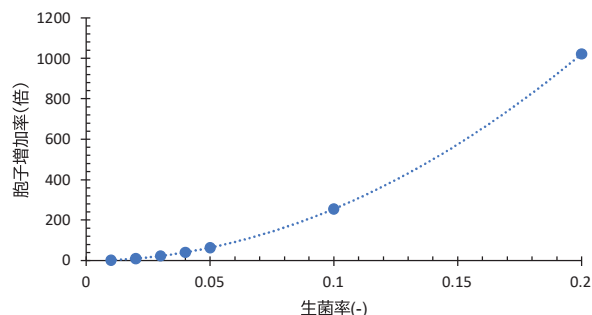


図 3-5 今回の実験後における真菌コロニー直径から推算した 360 時間後の胞子増加率 (生菌率をパラメータとした計算値)

## 4. まとめ

4.1 3つの住宅或いは建築物から明らかになったこと  
基礎断熱化の進展に伴って床下空間を暖冷房換気設

備のチャンバーとしての利用に際し、微生物汚染を防止するための各種設計条件を定めるため、特徴的な3つの建築物の床下温湿度性状、浮遊微生物量、浮遊微粒子量の測定を行った。3つの特徴的な床下空間の測定から一般化することは難しいが、定性的な性状については把握することができた。主な知見は以下の通り。

- ・ 気密性能の高いA住宅の床下空間は、浮遊微粒子個数濃度は一般より低いにも関わらず、浮遊微生物濃度は高い結果となった。換気量も少なく気流も生じにくい空間であるため、初期的な影響が残っていることが推測される。室内の浮遊微生物は床下由来のものは少ないと考えられる。
- ・ 床下空間を積極的に利用するB住宅とC施設は、浮遊微粒子個数濃度は比較的高いことがわかった。
- ・ パラメータとして①断熱気密性能、②使用材料と初期含水率、③建物全体の換気量とその経路、④隙間分布、⑤建物利用状況（室内水分発生量、室内温度）を入力条件とする必要がある。

#### 4.2 微生物増殖モデリング検討から得られた知見

統合評価手法に必要な微生物増殖モデルの構築を行った。数理モデルとしては閉じているが、本来、貧栄養状態における菌糸成長の観察や、栄養状態や水分状態を精緻に捉えた実験を行い、現在、得られていないパラメータの決定を今後行うことが必要である。また、床下空間でサンプリングされる主要な菌種を対象とすることが必要だろう。

胞子生成して飛散した後に発芽する可能性のある胞子比率（生菌率）は、決定論的にモデル化するのは難しく確率論モデルを併用するなどの工夫が必要である。

#### 4.3 微生物汚染リスク統合評価手法確立に向けた課題

今回は既往研究に倣い富栄養状態での微生物実験を行った。しかし床下での微生物培養の観点からすると、床下構成木材は殆どが貧栄養状態と想定され、そうした条件での実験が必要であろう。また、コロニー成長の確認に高解像度タイムラプスカメラ等を用いた自動計測や、限界境界条件での実験に120日以上時間を確保するなど<sup>4)</sup>、新たな研究設備や研究期間が必要となることがわかった。これらの課題は今回の実験を通して得られた知見でもある。今後引き続きこれらの課題検討を行い、床下微生物汚染リスクをシミュレートできる多数室熱湿気解析モデルへの組み込みを進めたい。

#### <謝辞>

実測にご協力頂いた佐藤誠氏（佐藤工夢店）、藤原大充氏（株式会社 NATURAL SENSE）、末光眞希園長、足立智昭副園長（宮城学院女子大学附属杜のこども園）、また、実験にご協力頂いた

宮城学院女子大学4年大島彩由佳氏（2022年当時）に記して謝意を表する。

#### <参考文献>

- 1) 本間義規・鈴木大隆・坂本雄三・永田明寛・岩前篤：温暖地における冬期の基礎断熱床下空間の温湿度特性、温暖地における基礎断熱工法に関する研究 その1、日本建築学会計画系論文集 第525号、33-38、1999.11
- 2) 本間義規・鈴木大隆・坂本雄三：梅雨時期を含む夏期の基礎断熱床下空間の温湿度環境、温暖地における基礎断熱工法に関する研究 その2、日本建築学会計画系論文集 第530号、25-30、2000.4
- 3) 住宅金融支援機構、フラット35住宅仕様実態調査報告(平成29年度)、2023/09/11 閲覧、[https://www.jhf.go.jp/about/research/tech\\_flat35\\_siyou.html](https://www.jhf.go.jp/about/research/tech_flat35_siyou.html)
- 4) 住宅に広がるカビ汚染、日経ホームビルダー、2018.10
- 5) A. Hukka, H. A. Viitanen; A mathematical model of mould growth on wooden material, Wood Science and Technology 33, 475-485, 1999
- 6) Klaus Sedlbauer: Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation, Journal of Thermal Environment and Building Science, vol.25, No.4, 321-336, 2002.
- 7) M. Airaksinen, P. Pasanen, J. Kurnitski, O. Seppänen: Microbial Contamination of Indoor Air due to Leakages from Crawl Space - A Field study, Indoor Air 2004, vol.14, No.1, 55-64, 2004.2
- 8) WHO Guidelines for Indoor Air Quality, Dampness and Mold, 2009
- 9) 本間義規・林基哉・長谷川兼一・大澤元毅：基礎断熱工法住宅の床下環境と室内浮遊真菌濃度との関係、日本建築学会環境工学委員会熱環境運営委員会第40回熱シンポジウム、pp.1-6、2010
- 10) 藤川浩：食品における微生物増殖予測のための新ロジスティックモデルの開発、日本食品工学会誌、Vol.8, No.3, 99-108, 2007.9
- 11) 竹下則男：カビ菌糸生長の細胞外シグナルに応答した環境適応、文部科学省科学研究費補助金、基盤研究C（一般）(2018-2020)、18K05545
- 12) Hens H. Mold in dwellings: field studies in a moderate climate, Annex41, Subtask 4, Kyoto meeting; 2006
- 13) Abe K, Nagao Y, Nakada T, Sakuma S.: Assessment of Indoor climate in an apartment by use of fungal index, Applied and Environmental Microbiology, 62(3), 959-963, 1996.
- 14) Clarke JA, Johnstone CM, Kelly NJ, McLean RC, Anderson JA, Rowan NJ, et. al.; A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings, Building and Environment, 1999; 34; 515-521
- 15) Krus M, Kilian R, Sedlbauer K., Mould Growth prediction by computational simulation on historical buildings, Museum Microclimates, T. Padfield & K. Borchesen, National Museum of Denmark; 2007
- 16) 伊藤一秀・水野優：各種の湿度環境下における真菌類の増殖速度測定と増殖挙動モデル、日本建築学会環境系論文集、第74巻、第636号、193-199、2009年2月
- 17) 柳宇・鍵直樹・大澤元毅：木材表面におけるかび増殖特性の評価方法、日本建築学会環境系論文集、第78巻、第689号、589-593、2013年7月
- 18) 望月敦史：ネットワーク構造に基づく生命システムの制御、システム制御情報、Vol.61, No.7, pp.283-289, 2017
- 19) 大園亨司：基礎から学べる菌類生態学、共立出版、2018
- 20) 松岡英明：細胞成長の動的計測、日本農薬学会誌18, S1-S5, 1993
- 21) Evy Vereecken, Staf Roels: Review of Mould Prediction Models and Their Influence on Mould Risk Evaluation, Building and Environment 51, 296-310, 2012.