

特集

「第15回日本臨床環境医学会総会シンポジウム」 (臨床環境16: 8~16, 2007)

環境から考えるカビ防止法

阿部 恵子

環境生物学研究所

I. カビの発育する条件

カビはアレルギーの誘因になるので、建物がカビ汚染されることは健康上好ましいことではありません。外気中にはカビの胞子が常に漂っており、外気と共にカビの胞子は住宅内に入ってきます。住宅のカビによる汚染は、①住宅内のどこかにカビの胞子が付着、②付着した胞子が発芽して菌糸を伸長、③伸長した菌糸上に新しい胞子を形成、④その新しく形成された胞子が周囲に飛散、というプロセスが繰り返されることによって拡大します。どこかに付着したカビの胞子が、その箇所に定着して発育のプロセスが繰り返されるかどうかは、その箇所の環境次第です。そこで本報では、カビが発育する環境条件と、環境の制御によるカビ汚染防止法について述べます。

図1に、カビの発育する条件を示します。カビの発育する環境条件には ①栄養分、②酸素、③温度、④水分があり、これらの条件を満たす環境が持続するとカビ汚染が起こります。これらの環境条件を1つでも取り除けばカビ汚染は防止できますが、「栄養分」、「酸素」、「温度」の条件は人が生活する室内では常に満たされています。「水分」だけが制御可能な環境条件です。

環境がカビの発育する条件を満たしていても一時的で、すぐに途切れてしまうとカビは発育でき

ません。カビの胞子が発芽して菌糸を伸ばし、その菌糸上に新しい胞子が形成されるまでには時間がかかります。環境条件が満たされている状態があること、そしてその状態がカビが発育するのに十分な時間継続すること、がカビの発育には必要です。従って、環境の持続時間を制御することでもカビ防止は可能です。

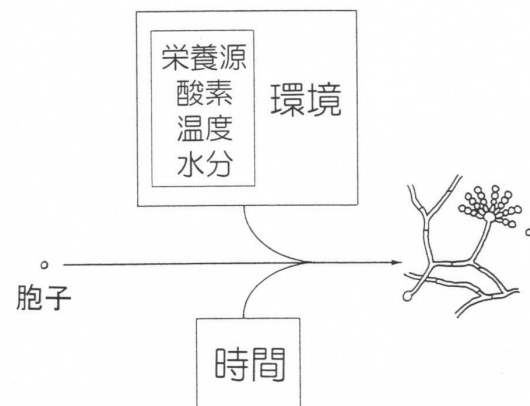


図1 カビが発育する条件

カビの発育には、環境条件（栄養分、酸素、温度、水分）が満たされた状態であること、そして、その状態が十分な期間、維持されることが必要。

《Key words》 fungi, mould, fungal index, contamination, indoor climate
カビ、カビ指数、汚染、室内気候

別刷請求宛先：阿部恵子

〒243-0303 愛甲郡愛川町中津4036-1 日本国土開発気付 環境生物学研究所

Reprint Requests to Keiko Abe, Institute of Environmental Biology, JDC Corporation, 4036-1 Nakatsu, Aikawamachi, Aikougun, Kanagawa 243-0303 Japan

II. 空気の性質

水の無い所で育つカビは、空気から水分をもらうので、空気を含んでいる水分が重要です。図2は、「湿り空気線図」といい、空気が元々持っている性質を示すものです。横軸が温度で、縦軸が絶対湿度（乾燥空気1kgあたりに含まれる水分量）、斜めに走っている線が相対湿度です。絶対湿度とは空気中に含まれる水分の絶対量を表し、相対湿度とはその温度の空気を含みうる最大の水分量を100として現在含まれている水分量をパーセントで表したものです。

空気は温度が高くなるほど含むうる水分の量が多くなる性質があります。そのため同じ空気でも温度が上がると相対湿度が低下し、空気の温度が下がると相対湿度が上昇します。例えば絶対湿度が10.1g/kg D.A. (10.1g water / kg dry air、乾燥空気1kgあたり10.1gの水分を含む)の空気の場合、20℃では相対湿度69% (図2b) ですが、温度が25℃に上がれば相対湿度は51% (図2c) に下がり、温度が15℃に下がれば相対湿度は95% (図2a) に上がります。同じ空気

の温度が14℃に下がれば相対湿度が100%になります。このときの温度が露点温度です。さらに空気の温度が下がれば、空気は水蒸気の状態では水分を含んでいることができなくなり、結露として液体状態の水が現れます。

相対湿度の高い環境はカビが発育しやすい環境です。絶対湿度が一定の室内では、温度が低い箇所ほど相対湿度は高くなるため、冷えやすい箇所ほどカビが発育しやすい環境になります。

III. カビ指数—カビ発育環境の表示手段—

環境の制御によりカビ汚染を防止するためには、カビが発育する環境であるかどうかを知ることが必要です。そこで、調査箇所がどれくらいカビの発育しやすい環境になっているかを数値で表す手段として、カビ指数を開発しました。

図3は、カビ指数を調査するための試験片（カビセンサー）の正面図と側面図です。カビセンサーの内部には、カビの胞子と栄養分（乾燥状態）が入っています。透明なプラスチック板にカビの胞子と栄養分をスポット状に接種して乾燥させ、周

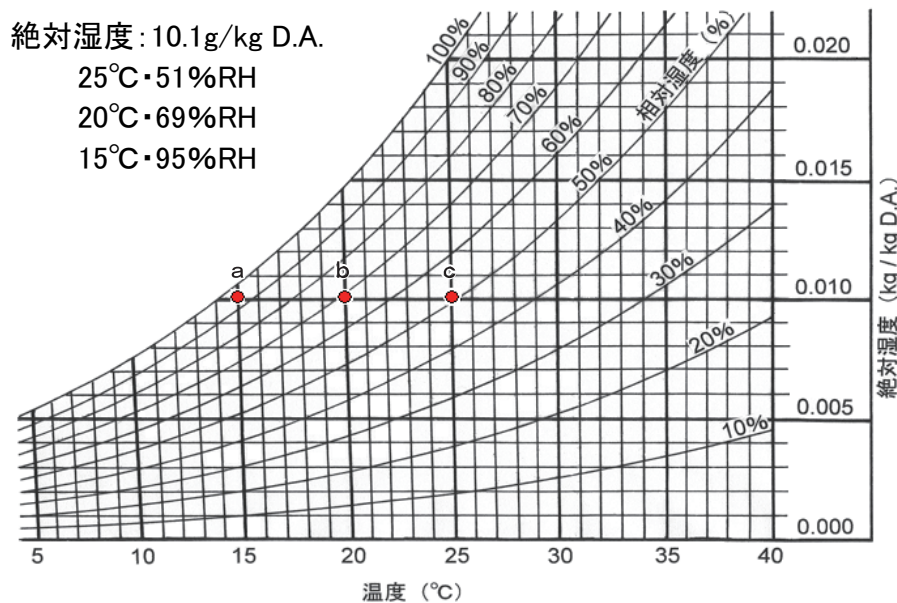


図2 湿り空気線図

乾燥空気1kgあたり10.1gの水分を含む空気の場合、温度25℃では相対湿度51% (c)、温度20℃では相対湿度69% (b)、温度15℃では相対湿度95% (a)になる。同じ絶対湿度の空気の場合、温度が低下すると相対湿度が上昇するため、カビは空気から水分をもらいやすくなる。

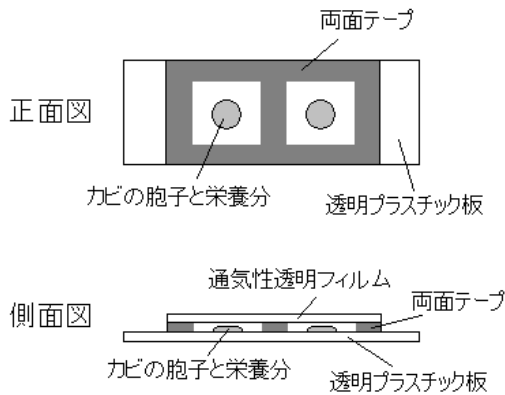


図3 カビセンサー（カビ発育環境調査用試験片）

カビの胞子とその栄養源を封じ込めた試験片。水分は通気性フィルムを通して内部のカビ胞子に伝わる。カビセンサーを設置した箇所周辺がカビの発育するような環境であれば、カビセンサー内部でカビが発育する。カビセンサー内部のカビ発育は周囲の環境に依存する。

囲を両面テープの枠で囲み、上から通気性のある透明フィルムで覆い、密着させたものです。胞子はカビセンサー内に閉じ込められた状態です。

この試験片を調査場所に置きます。すると周囲の温湿度環境は内部のカビに伝わります。もしその場所がカビの育つ環境であれば、試験片の内部でカビが発育します。カビが発育しやすい環境であればあるほど、中のカビは早く発芽し菌糸が長く伸びます。カビが発育しない環境であれば、どんなに長い期間その箇所に設置しても、カビセンサー内部のカビは胞子のままです。カビセンサー内部のカビ発育は周囲の環境に依存します。カビセンサー内部のカビの発育程度とカビセンサーを設置していた期間から、カビ指数を測定します。

図4は、カビセンサー内部のカビ発育例です。ある調査箇所に一定期間カビセンサーを設置した後の写真です。設置開始時は、胞子だけでしたが、設置期間中に胞子が発芽して菌糸が伸長していました。この写真では、胞子分散スポットのエッジから菌糸先端までの菌糸長が約300 μm です。この発育状態が1週間で得られた場合、その環境はカビ指数20になります。この発育状態が2週間で得られた場合はカビ指数10、この発育状態が4週

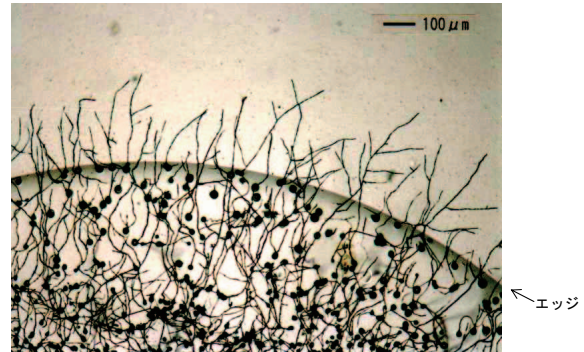


図4 カビセンサー内部のカビ発育例

胞子が発芽し、菌糸が伸長している。胞子が分散したスポットのエッジから菌糸先端までの距離は約300 μm 。カビ指数は、菌糸の発育程度とカビセンサーの設置期間から計算する。7日間で写真の発育状態になった場合はカビ指数20。2週間で写真の発育状態になった場合はカビ指数10、4週間の場合はカビ指数5、24時間の場合はカビ指数140。

間で得られた場合はカビ指数5になります。24時間でこの発育状態の場合はカビ指数140になります。カビ指数の値が高い箇所ほどカビの発育速度が高くカビにより汚染されやすい箇所です。

IV. カビ指数の実測例

図5に、実際の住宅でカビ指数を測定した一例を示します。左図が調査住宅の間取りと調査箇所です。矢印が調査位置で、○は天井下30 cm、□は床上30 cmの位置を表します。AからUが調査箇所です。右図に、各調査箇所での年間（52週）のカビ指数平均値を示します。

カビ指数が最も高かった箇所は浴室（L）です。次いで、トイレ（J）、玄関（I）、洗面所（K）、北東室の北東隅の下部（B）です。この5箇所が外気（U）よりもカビ指数が高かった箇所です。カビ指数の分布を見ると、水廻りと北側の外階段に面した部分でカビ指数が高く、カビが生えやすい環境になっていることがわかります。南北を比較すると北側のほうが南側よりもカビ指数が高く、同じ場所の上下を比較すると下部のほうが上部よりもカビ指数が高くなっています。カビが生えやすいことが経験的に知られている箇所でカビ指数

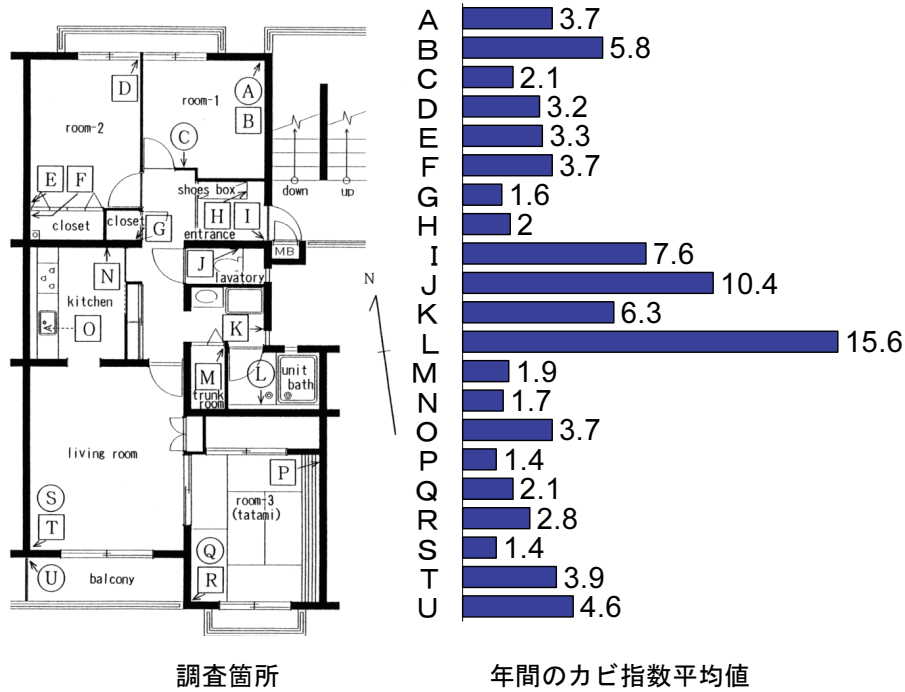


図5 一般住宅のカビ指数分布

A~Uがカビ指数調査箇所、右図は年間(52週)のカビ指数平均値。

が高い値になりました。

この住宅を入居後半年(築1年半)と入居後3年(築4年)に目視調査しました。入居後半年の調査でカビ汚染が認められた箇所は、浴室の目地の部分だけでしたが、入居後3年の目視調査では、玄関、トイレ、洗面所の窓枠の表面と、北東部屋の東壁の下部にカビ汚染が認められました。築4年(入居後3年)でカビ汚染された箇所はいずれもカビ指数の年平均値が5以上で、カビ指数が外気より高い値を示した箇所でした。カビ指数が高い箇所は確実にカビ汚染されます。

V. 湿度(空気中の水分)制御によるカビ防止法

湿度制御による室内のカビ防止法としてここでは、空気中の水分を除去する方法と、温度を利用して相対湿度をコントロール方法について述べます。

1. 絶対湿度を下げる(空気中の水分を除去)

日本の夏の気候は絶対湿度が高く、空気中の水分が多いので、換気しても室内に入ってくる空気

は湿っていて、カビ防止には役立ちません。絶対湿度が高い時期には、除湿機や空調機を利用して室内空気中の水分を取り除く必要があります。

表1は、梅雨時期の住宅で除湿の影響を調べた一例です。調査は鎌倉市の戸建住宅で、空き部屋(普段使用していない客間)、廊下、その廊下にある物入れの3箇所で、カビセンサーを設置してカビ指数を測定しました。空き部屋と物入れに除湿機を導入し、稼動させた時期と稼動させない時期を作りました。廊下には除湿機はありません。使用した除湿機は一般家庭用の除湿機で、連続で稼動させると相対湿度を50~60%に保ちます。6月3日~17日の梅雨に入ってからすぐの時期は、除湿機を稼動させませんでした。除湿機を稼動させていないと、住宅の中はどこもカビが育つ環境になりました。6月17日~7月1日は除湿機を連続で稼動させました。除湿機を連続で稼動させると、除湿機を入れている空室と物入れではカビ指数が検出されず、除湿機の無い廊下ではカビ指数が検出されました。7月1日から、再び除湿機を停止

表1 除湿の効果

調査開始日	調査期間(週)	除湿機の使用	調査個所のカビ指数		
			空室 除湿機あり	物入 除湿機あり	廊下 除湿機なし
6/3	2	なし	8.5	7.5	5.5
6/17	2	連続	—	—	6.8
7/1	1	なし	14.0	13.2	9.4
7/8	1	連続	—	—	9.2
7/15	1	なし	18.8	14.0	13.1

1993年鎌倉、戸建て住宅での調査。除湿機は空室と物入れに導入。—：カビ指数が検出されない（カビセンサー内部の胞子に発芽が認められない）。

させると、調査個所全てでカビ指数が検出され、7月8日から除湿機を稼働させると除湿機を入れている個所だけカビ指数が検出されませんでした。除湿はカビ防止に有効です。

2. 温度を使って相対湿度をコントロール (絶対湿度は変化なし)

1) 断熱—温度低下を防ぐことにより相対湿度の上昇を防ぐ—

カビの発育には相対湿度が影響します。「II. 空気の性質」で述べたように。空気の温度が下がると相対湿度が上がります。冬に北側の壁面や窓ガラスで結露するのは、低温の外気の影響でガラスや壁の温度が低下し、接している空気温度が低下するためです。冬の室内で壁面の温度が何度まで下がるとカビが発育する環境が変わるかを検討しました。

表2は、絶対湿度が6.5 g/kg D.A.の室内で、外気温度の影響で壁面温度が低下した場合の、壁面の相対湿度とカビ指数の予測値です。ここで用いた絶対湿度は、図5のカビ指数分布を調査した住宅での、1月の室内絶対湿度の平均値です。絶対湿度が6.5 g/kg D.A.の空気の場合、室温20℃では相対湿度45%でカビ指数は1未満です。温度が12℃以上であればカビ指数が1未満で、カビは発育しない環境です。低温の外気の影響で壁面温度が11℃以下になると、カビが発育する環境になります。温度が低いほどカビ指数は高くな

表2 壁面温度とカビ指数
(絶対湿度 6.5 g/kg dry air の場合)

温度 (°C)	相対湿度 (%)	カビ指数
20	45	< 1
12	69	< 1
11	80	5
10	85	13
9	90	24
8	98	70
7	100	72

壁面の温度が下がるとカビ発育環境に変わる。断熱で、温度を12℃以上に保てばカビ発育なし。

り、カビが発育しやすい環境に変わります。8℃以下であれば、カビの胞子が1日で発芽するような環境です。この室内空気の場合、壁面の断熱が充分になされ冬期に12℃以上を保つことができれば、カビが生えてくる可能性はありません。

2) 加温—暖めることにより相対湿度を低下させカビ発育を防止—

冬の室内の壁面は外気温度の影響による温度低下を防止すれば良いわけですが、壁面で温度を上昇させ、積極的にカビを防ぐ方法も考えられます。

相対湿度95%で15℃の壁面を想定して実験室でその環境を作り実験しました。温度15℃で相対湿度95%の空気は絶対湿度が10.1 g/kg D.A.です（図2参照）。絶対湿度が10.1 g/kg D.A.の空気は、温度16℃では相対湿度が89%になります。同じ絶対湿度で温度が15℃と16℃の環境を作り、その環境の中にカビセンサーを入れて3日間培養し、好湿性カビのアルタナリアの発育を調査しました^{注1)}。図6Aは15℃で3日間培養、図6Bは16℃で3日間培養の写真です。15℃・絶対湿度10.1 g/kg D.A.の壁面環境は、壁面温度を1℃上昇させるだけで相対湿度は6%低くなり、好湿性カビの発育しない環境に変わります。

冬期に外気温度の影響で壁面温度が低下し、温度低下の影響で相対湿度が上昇し、壁際に置いている筆筒の裏側や引き出し収納している衣類などにカビが生える場合があります。このような場合

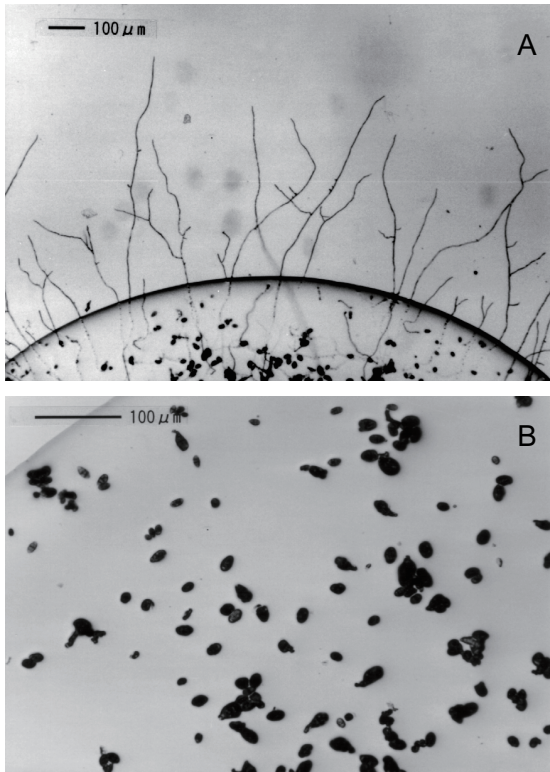


図6 絶対湿度が変わらない環境での温度上昇がカビ発育に与える影響。絶対湿度10.1 g/kg D.A.の環境に設置したカビセンサー内部の *Alternaria alternata* の発育。

A: 温度15°C (相対湿度95%)の環境にカビセンサーを3日間曝露。カビセンサー内部の *Alternaria alternata* の孢子が発芽し、孢子を分散させたスポットの外側に菌糸が伸長している。B: 温度16°C (相対湿度89%)の環境にカビセンサーを3日間曝露。*Alternaria alternata* (好湿性カビ)の孢子は発芽せず、菌糸の発育が認められない。

は、壁の上方にサーキュレーターを取り付けるか、扇風機を高い位置に置き、天井付近の暖かい風を筆筒の裏側に吹き込むようにするとカビが防止できます。

VI. 環境持続時間の制御によるカビ防止法

水分の制御が困難な環境もあります。このような環境でも、間欠的に乾燥させてカビを枯死させるカビ防止法が考えられます。発育途中のカビの菌糸が乾燥で枯れてしまえば、水分の多い環境に戻っても、菌糸の発育は再開せず、新しい孢子は

形成されません。その環境でのカビ発育は振り出し(発芽せずに生き残っていた孢子や外部から侵入した孢子が発育を開始)になるので、間欠的な乾燥によって発育途中の菌糸を枯死させる操作を繰り返していれば、新しい孢子が形成されることも無く、孢子の飛散によるカビ汚染の拡大は防止できます。

1. 冷房時のエアコン内部

冷房時はエアコン内部がカビ汚染されることが知られています。「夏になると毎年エアコンから黒いゴミが降ってくるので調べてほしい」と、黒いゴミのサンプルがもちこまれたことがあります。そのゴミを観察すると、カビの菌糸と孢子の塊でした。図7は、そのゴミから分離したカビを25°C・相対湿度97%で24時間培養した写真です。ウロクラディウムという好湿性のカビでした。このカビは非常に発育の速いカビで、24時間で菌糸が伸長しその菌糸上に新しい孢子が形成されました。

図8は、冷房時のエアコン停止前後の温湿度です。0分が冷房運転を停止させた時です。冷房時は、熱交換器部分で空気が露点温度以下に冷やされるため、エアコン内部の相対湿度は100%近くです。冷房停止後もエアコン内部の相対湿度は100%を保ちます。冷房中はエアコン内部の温度が18°C・相対湿度100%近くでカビが育ちやすい環境ですが、冷房停止後は相対湿度が高い状態のまま温度が高くなり、さらにカビの発育しやすい環境になります。エアコン内部は夏の間はカビの発育に適した環境が連続するので、冷房期間中にカビ汚染されるのは当然です。

冷房のメカニズムから考えて、冷房中に湿度を低下させてカビが発育しない環境に変えることはできませんが、冷房停止後まで高湿度でカビの発育しやすい環境を保つ必要はありません。エアコンは冷房と暖房の両方ができるので、冷房停止の後に内部を暖めて乾燥させることが可能です。そこで、冷房停止後に内部を少し暖めて乾燥させるプログラムを組み、このプログラムを入れた場合と入れない場合で、エアコン内部環境を調査比較しました。

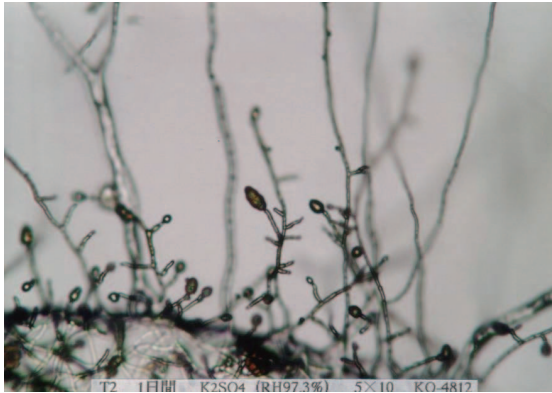


図7 エアコン汚染カビの実例

Ulocladium sp. エアコンから降ってきたゴミから分離したカビ。25℃相対湿度97.3%で24時間培養。

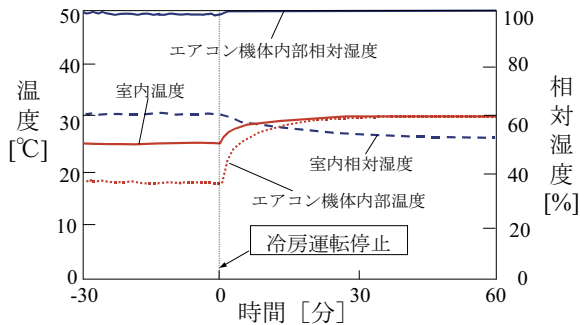


図8 エアコン停止後の温度と相対湿度

エアコンの問題点は、冷房停止後もエアコン機体内部が相対湿度100%を保っていること。

表3は、冷房停止後に内部を乾燥させるプログラムを入れたエアコンで、このプログラムがoffの場合とonの場合のカビ指数です。エアコン内部にカビセンサーを貼り、毎日5時間の冷房運転をしました。冷房停止後に内部を乾燥させない通常のエアコンの状態では、エアコン内部はカビ指数80以上でした。80以上とは、5日間の曝露期間(カビセンサーを設置していた期間)中にカビセンサー内でカビの菌糸が伸びすぎて長さが測定できなかった状態です。カビセンサーの曝露期間をもっと短くすれば測定でき、エアコン内部のカビ指数は100~300程度です。乾燥プログラムを入れた場合、カビ指数の最高値はドレンパン(結露水

表3 エアコン内部のカビ抑制対策の効果

調査箇所	カビ指数	
	乾燥プログラムなし	乾燥プログラムあり
フィルター	—	—
ドレンパン 底面	>80	—
ドレンパン 排水口	>80	20
送風ファン	>80	14
エアコン内部の背面	>80	—
室内中央	—	—

乾燥プログラム：冷房停止後に加温と送風により内部乾燥。カビセンサー設置期間は5日間。—：発芽なし、カビ指数10未満。

>80：カビ指数80以上、5日間で菌糸長が計測上限を超えた。

の受け皿)の排水口で、カビ指数20でした。他の箇所ではもっと低いカビ指数で、全体のカビ指数は1/10程度まで落とすことができました。

ここでは、乾燥プログラムを入れたエアコンの例を示しましたが、冷房停止後に送風に切り替えてエアコン内部に室内の空気を送り込んで内部を乾燥させることも可能です。冷房停止後に2時間の送風運転(送風する空気を乾燥状態に保つため、エアコン送風運転時に室内に除湿機をいれた)により、カビ指数は1/5に低下させることができました。カビ指数が1/5になることは、エアコン内部でのカビの発育速度が1/5です。ひと夏の冷房期間が15週間とすれば、エアコン内部の汚染状態は、通常の冷房3週間程度の汚染状態で夏を乗り切ることになります。連続で高温環境が続いている環境と、毎日乾燥状態が入って発育が停止する環境では、同じ夏の冷房期間でも到達する発育状態は異なります。乾燥だけでは菌糸が死滅しないカビもありますが、暖房の季節になれば生き残っていたカビも徐々に死滅します。夏の間のカビ発育を抑制することができれば、エアコン内部のカビ汚染は防止できます。

2. 住宅内の間欠乾燥

住宅内では、北側の押入れや北側の部屋の隅などがカビ汚染されやすいことが知られていますが、このような場所は常に低温で相対湿度が高い状態

が保持されやすく、空気から水分が供給され湿気が溜まった状態を保ちやすい場所です。このような箇所には、間欠乾燥によるカビ防止が有効と思われる。実際の住宅での調査例が無いので、ここでは、24時間培養ごとに3時間の間欠乾燥を入れた培養実験の例を示します。絶対湿度が変わらない室内環境を想定して、絶対湿度が一定(10.1 g/kg D.A.)で温度と相対湿度が異なる環境を使って間欠乾燥の実験をしました。方法は、あらかじめ16℃・相対湿度89%の環境と30℃・相対湿度38%の環境を作っておき、カビセンサーを16℃・相対湿度89%の環境に入れて24時間培養し、次に30℃・相対湿度38%の環境に移し(低湿処理)3時間後に、再び16℃・相対湿度89%の環境に戻して培養する操作を繰り返すものです^{注2)}。

図9Aは連続培養で、16℃・相対湿度89%で3日間培養です。図9Bは間欠培養で、30℃・相対湿度38%・3時間の低湿処理を挟みながら、16℃・相対湿度89%・24時間を3回繰り返した培養です。ユーロチウムは好乾性カビで、16℃・相対湿度89%で図9Aの写真のように育ちますが、24時間ごとに30℃・相対湿度38%処理を挟むと、発芽しても菌糸長は10μm程度で停止し、発育は進行しません(図9B)。このような間欠乾燥処理をしたユーロチウムを高湿度環境に戻して培養を続けても、発育は再開せず、菌糸が短い状態や発芽直前の胞子の状態で死滅したと思われる。間欠乾燥は、相対湿度85%以下の環境でも発育する中湿性カビ(耐乾性カビ)や相対湿度75%以下の環境でも発育する好乾性カビの両方に有効で、押入れや収納箇所を汚染するカビとして知られているペニシリウムやアスペルギルスの菌糸は乾燥で容易に死滅させることができます。

住宅内の絶対湿度は季節によって異なりますが、同じ時期には住宅内の絶対湿度がほぼ一定です。温度の違いが相対湿度の違いとなって現れカビの生えやすい箇所やカビの生えにくい箇所が現れます。外気温の影響で壁面温度が低下することが原因でカビが生える押入れや収納などは、定期的に一定時間、扇風機で室内の空気を送り込む、あ

るいは布団乾燥機の風を送り込むなどの方法で内部を乾燥させることによりカビ防止が可能です。

天気の良い日に布団を干して日光に当てることは、布団内部の温度を上昇させて相対湿度を低下させ、間欠乾燥によるカビ防止対策をしていることとなります。春や秋の虫干しや大掃除は、収納物や畳に半年周期あるいは1年周期の間欠乾燥処理を施し、カビ防止策を繰り返していることになり、合理的な風習です。経験に基づいた先人の知恵を見直すことも大切でしょう。

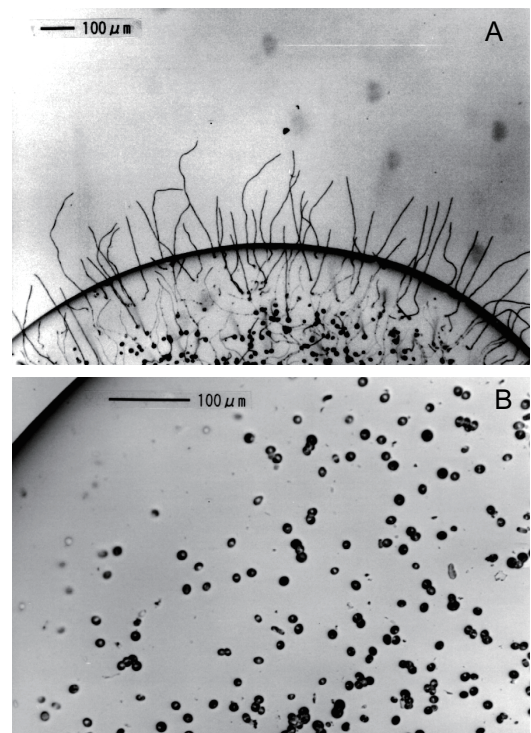


図9 間欠乾燥がカビ発育に与える影響。
カビセンサー内部の好乾性カビ
*Eurotium herbariorum*の発育。

A: 連続培養。温度16℃・相対湿度89%・絶対湿度10.1 g/kg D.A.の環境にカビセンサーを3日間(72時間)曝露。*Eurotium herbariorum*の胞子が発芽し菌糸が伸長している。B: 間欠乾燥。絶対湿度は同じ10.1 g/kg D.A.で、一時的に温度を上昇させて相対湿度を低下。温度16℃・相対湿度89%・24時間曝露3回の中に、温度30℃・相対湿度38%・3時間曝露を2回挟んだ。*Eurotium herbariorum*の菌糸は伸長していない。

注釈

- 1) カビセンサー内部には、好湿性カビのアルタナリアと好乾性カビのユーロチウムが入っています。通常の室内ではアルタナリアは発育しませんが、浴室や結露が現れる箇所など水分が多い環境の場合には、アルタナリアが発育します。
- 2) 16℃相対湿度89%の環境では、アルタナリアのような好湿性カビは発育しませんが、ペニシリウムのような中湿性（耐乾性）カビやユーロチウムやアスペルギルス・レスツリクタスのような好乾性カビは発育します。