

原著論文

カビ発育から測定する実測カビ指数と 温湿度から計算する予測カビ指数の比較

阿部恵子

[受付 2005.9.25] [受理 2006.2.21]

Comparison of a Measured Fungal Index determined using Fungal Growth and a Computed Fungal Index based on Temperature and Relative Humidity

Keiko ABE

[Received September 25, 2005] [Accepted February 21, 2006]

要 旨

カビ指数は生物学的な気候パラメータで、好乾性カビ *Eurotium herbariorum* を封入した試験片を調査箇所に曝露し、その発育（すなわち調査環境に対するカビの応答）と曝露期間から計測するものである。カビ指数は調査箇所がどの程度カビが発育しやすい環境（気候）であるかを示す指数である。

鎌倉市の木造戸建住宅で駐車場軒下（外気）と東西の床下に温湿度記録計と上記試験片を吊り下げ、2003年に温湿度とカビ指数を測定した。温度と相対湿度は1時間ごとに自動計測し、カビ指数は上記試験片の曝露期間を1週間として毎週測定した。測定された温度と相対湿度からエクセルソフトの関数“INDEX”を使ってカビ指数を計算し、得られたカビ指数（予測カビ指数）と上記試験片を用いて測定したカビ指数（実測カビ指数）を比較した。予測カビ指数は実測カビ指数に近い値を示し、外気でも床下でも季節的な変動パターンはほぼ同じであった。

正確な温度と相対湿度のデータが得られれば、気候の履歴からカビ指数が計算でき、さらに、建築設計の段階で温湿度シミュレーションからカビ指数をシミュレーションすれば、カビ汚染のない快適な室内環境を創ることが可能になる。

Abstract

A fungal index is a biological climate-parameter. It is measured using the growth response of the xerophilic fungus *Eurotium herbariorum* sealed in a test piece, the fungal detector, exposed at the survey site and the period of exposure. The index represents the environmental (climate) capacity to allow fungal growth at the survey site.

Thermo-hygrometers and fungal detectors were hung in the roofed parking space (outdoors) and in two crawl spaces, east and west side, under the floor of a house in Kamakura, Japan. The temperature and relative humidity were measured at 1-hour intervals and the fungal index was measured every week (1-week exposure) at each survey site during 2003. Fungal indices at each site were computed from the temperature and relative humidity measured with the thermo-hygrometers. The Excel software “INDEX” was used for these computations. The computed fungal index values were compared with the measured fungal index values determined using the fungal detectors. The computed indices showed similar values to the measured indices, and the seasonal variation patterns for computed and measured indices were about the same both outdoors and in the crawl spaces.

We can compute the fungal index from the climatic history if we obtain accurate data for temperature and relative humidity. We can also simulate the fungal index using simulated temperature and relative humidity at the design stage before construction of buildings in order to create a comfortable indoor environment free from fungal contamination.

Key words: computed fungal index, fungal index, fungi, climate, relative humidity

環境生物学研究所

〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津4036-1 日本国土開発(株)内 TEL:046-285-7801

Institute of Environmental Biology

JDC Corporation, 4036-1 Nakatsu, Aikawa-cho, Aikou-gun, Kanagawa 243-0303, Japan

1. 緒言

カビはアレルギーの誘因であり、建物がカビ汚染されることは健康上好ましいことではない¹⁻⁶⁾。カビによる汚染は、その場所に①カビの胞子が付着、②胞子が発芽、③胞子から菌糸が伸長、④菌糸上に新しい胞子が着生、⑤着生した胞子が周囲に飛散、そして飛散した胞子が再び①付着、②発芽・・・という発育のプロセスが何回も繰り返されることによって拡大していく。

建物がカビ汚染される最大の原因は湿気である。しかしカビは生物であり、建材に付着したカビが発育するためには時間が必要で、建物に湿気が多い場合でも直ちにカビ汚染が現れるわけでは無い。居住者は建物にカビが発生するかどうかを毎日観察し続けることは無く、あるとき気付くとカビ汚染が目に見えるようになってるのが現状である。建物に湿気が多くその内部でカビの発育する環境が保たれていることがわかれば、カビ汚染される前に対策をたて被害を防止することができる。

温湿度計は広く一般に使用され、温度と相対湿度は通常の室内環境の測定で用いられる。しかしこれらの物理的な気候パラメータから直接カビの発育を読み取ることはできない。カビの発育そのものを使って環境を測定することができれば、カビの発育しやすい環境を正確に検知できると考え、著者はカビ指数 (fungal index) を発案した^{7,8)}。カビ指数は、カビの胞子とその栄養源を内部に封じ込めて乾燥させた試験片 (カビセンサー, fungal detector) を調査箇所に設置し、その調査箇所に一定期間曝露して測定するもので、調査環境でのカビの育ちやすさを表す生物学的な気候パラメータである⁷⁻¹²⁾。その調査箇所がカビの発育可能な環境であれば、カビセンサー内部でカビが発育 (すなわち周囲の環境に対してカビが応答) する。調査箇所がカビの発育できない環境であればカビセンサー内部のカビは発育しない。カビ指数はカビの発育 (カビの応答) と曝露期間を用いて環境を定量的に評価するものである。カビ指数が高い箇所ほどカビが発育しやすい環境でカビ汚染が速く進行するので、カビ指数を測定すればカビ汚染の可能性が予測できる⁹⁾。

カビ指数は調査箇所の温度と相対湿度によりその値が決定されることが今までの研究から明らかになっている^{7,8,11)}。そこで、温度と相対湿度をカビ指数に変換するソフトの開発について検討した。

本報では、前報^{7,8)}で発表した温度、相対湿度とカビ指数の関係についてのデータとエクセルソフトの関数“INDEX”を用いて温度と相対湿度からカビ指数を計算するソフトを作成し、住宅の床下と外気で計測された温湿度データをこのソフトを用いてカビ指数に変換し、この温湿度の変換から得られたカビ指数 (予測カビ指数) とカビセンサーを用いて測定したカビ指数 (実測カビ指数) を比較することによって予測カビ指数を評価し、作成したソフトの実用性について考察した。

2. 材料と方法

2.1 調査箇所および調査時期

鎌倉市の木造戸建住宅1戸で、住宅の東側にある台所の床下 (以後、東床下と記載) と西側居室の床下 (以後、西床下と記載) の各1ヶ所、および道路に面した駐車場の軒下 (以後、外気と記載) を調査した。東床下と西床下は何れも床下収納庫を取り外すと現れる床下空間¹²⁾で、外気は直射日光のあたらない駐車場軒下30cmの位置とした。

調査は2003年の3月25日から10月7日に行った。

2.2 カビ発育環境調査用試験片 (カビセンサー)

好乾性カビ *Eurotium herbariorum* J-183⁷⁾ 胞子を封入した環境調査用の試験片 (カビセンサー, fungal detector) を作製した。従来のカビセンサー¹¹⁾ は菌糸長の計測上限が2000 μm であったが、本調査で用いたカビセンサーは菌糸長7000 μm 程度まで計測できるように変更した。

本調査で用いたカビセンサーは以下の方法で作製した。透明プラスチック板 (13 \times 50mm, 厚さ0.4mm) に、両面接着シートの枠 (外寸13 \times 23mm, 幅3mm, 厚さ0.3mm) の片面を貼り、胞子懸濁液^{7,8)} を枠内のプラスチック板上にスポット状に接種し風乾させた。次に両面接着シートの枠の上からガス透過性フィルム (13 \times 23mm) で覆い両面接着シートの枠と密着させた。プラスチック板上の胞子分散スポット (直径約3mm) はガス透過性フィルムと両面接着シートの枠で囲まれた内部に封入された状態で、内部でカビが著しく発育しても、すなわち胞子が発芽し菌糸が胞子分散スポットの外側まで伸長し菌糸上に新しい胞子が多量に着生しても、着生した胞子が調査環境中に飛散することは無かった。

2.3 実測カビ指数

各床下にはクリップを結びつけた10cmの紐を1本ずつ吊り下げ、駐車場軒下にはクリップを結びつけた30cmの紐を2本並べて吊り下げた。これらのクリップにカビセンサーを挟み、調査環境に1週間曝露し、カビ指数を測定した。以後の文中ではカビセンサーを用いて測定したカビ指数を実測カビ指数とする。

実測カビ指数の測定法は以下のとおりである。①カビセンサーを調査環境に設置し、一定期間曝露する。②カビセンサーを回収しシリカゲルを入れた容器に入れる。シリカゲルによる乾燥により菌糸の伸長は直ちに停止する。③カビセンサー内部のカビの発育状態を顕微鏡下で写真撮影する。④写真プリント上で菌糸長を計測する。⑤菌糸長の平均値から、標準曲線を用いて曝露期間中のカビ応答単位(Fungal response unit, ruと単位を表示¹¹⁾)を見積る。⑥カビ応答単位(ru)を曝露週数で割り、カビ指数を算出する¹¹⁾。

Fig. 1に、菌糸長とカビ応答単位(ru)の関係を表す標準曲線を示す。Aの菌糸長は、胞子から菌糸

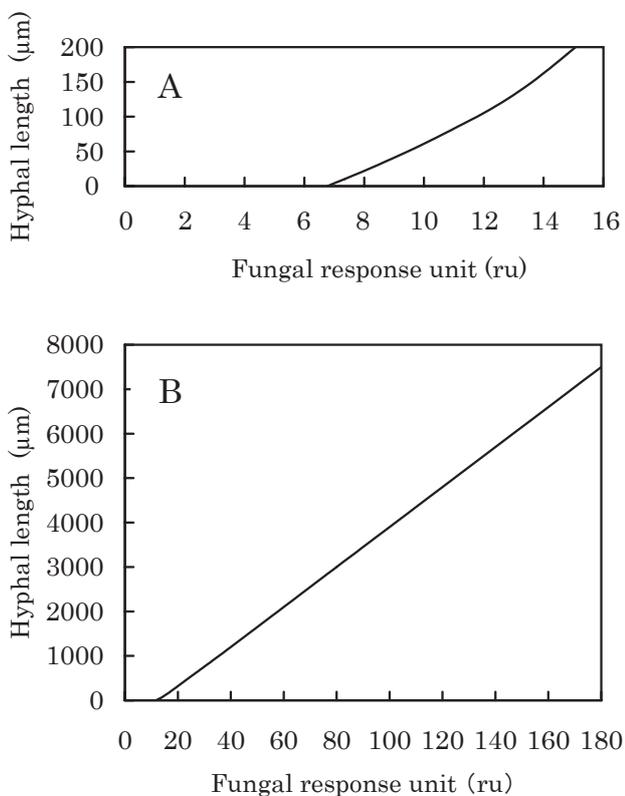


Fig. 1 Standard curves

The hyphal length is the distance from the spores to the tips of hyphae in A, and the distance from the edge of the spore containing spot to the tips of hyphae in B.

先端までの距離で、菌糸がまだ短い状態で孢子分散スポットのエッジから外にあまり伸長していなかった場合に使用した。Bの菌糸長は、孢子を分散させたスポットのエッジから菌糸先端までの距離で、菌糸が孢子分散スポットのエッジから外側(栄養分の無い部分)に100 μm以上伸長していた場合に使用した。

標準曲線は以下の方法で作成した。まず基準菌(*Eurotium herbariorum* J-183)を基準気候(温度25°C・相対湿度93.6%, KNO₃の結晶とその飽和水溶液で湿度を調節した密閉容器の内部空間)の環境下で培養して菌糸伸長曲線を作成し、次にその菌糸伸長曲線の培養時間(h)を1:1の関係でカビ応答単位(ru)に置き換え標準曲線とした。

カビ指数はカビ応答単位(ru)を曝露期間(週)で割った値で、1週間あたりのカビ応答単位である。以下にカビ指数の計算例を挙げて説明する。例えば、曝露期間中にカビセンサー内部で菌糸が伸長し孢子分散スポットのエッジから菌糸先端までの距離が3000 μmであったとする。この場合、標準曲線Bから菌糸長3000 μmに相当するカビ応答単位として80ru(基準菌を基準気候で80時間培養した時と同じ発育状態)が得られる。本調査のように曝露期間が1週間の場合は、 $80 \div 1 = 80$ で、調査環境のカビ指数は80になる。もし、同じ80ruでも曝露期間が4週間であった場合は、 $80 \div 4 = 20$ で、調査環境のカビ指数は20になる。曝露期間が2日間で80ruであった場合は、 $80 \div 2 \times 7 = 280$ で、調査環境のカビ指数は280になる。

2.4 温湿度

温湿度記録計(サーモレコーダーRS11, エスペックミック社製)の温湿度センサー部分(RSH-1010, エスペックミック社製)をカビセンサーの真横の位置に吊り下げ、温度と相対湿度を自動計測で1時間毎に記録した。

記録された温湿度の値を補正するため、調査終了後(10月)に、NaClの結晶とその飽和水溶液を用いて湿度を調節し25°Cに保った密閉容器(内部空間の相対湿度が75%^{13, 14)})の中に、各箇所の調査で使用した温湿度記録計を入れ24時間後に表示される値を調べた。各温湿度記録計に表示された相対湿度の値が75%の値からどれだけずれていたかを調べ、各温湿度記録計に保存されていた相対湿度の測

定値のずれを補正した。温度は全調査箇所で使用した温湿度記録計に表示された値を、外気測定で使用した温湿度記録計に表示された値と合わせるように補正した。

2.5 予測カビ指数

温度0~35℃と相対湿度0~100%を組み合わせた気候のカビ指数値を示す一覧表を、前報^{7,8)}記載のカビ指数の気候図から作成した。エクセルソフトの関数“INDEX”を用いて、温度と相対湿度を指定すると、このカビ指数一覧表の中から、温度と相対湿度の組み合わせによって決定されるカビ指数値を抽出して返すソフトを作成した。

作成したソフトを用いて、温湿度記録計に測定記録されていた1時間毎の温度と相対湿度の値を1時

間毎のカビ指数値に変換し、168時間移動平均を出した。168時間移動平均とは、その時間から168時間を過去にさかのぼった期間の平均値である。実測カビ指数が1週間(168時間)あたりのカビ応答単位であるので、168時間移動平均を予測カビ指数とした。

3. 結果

3.1 予測カビ指数と実測カビ指数の経時変化

Fig. 2に、2003年3月25日から10月7日の予測カビ指数と実測カビ指数の経時的な変化を示す。Aは外気、Bは東床下、Cは西床下のカビ指数である。予測カビ指数を168時間移動平均で示しているのので、Fig. 2では実測カビ指数をカビセンサー曝露期間の終了時にプロットした。

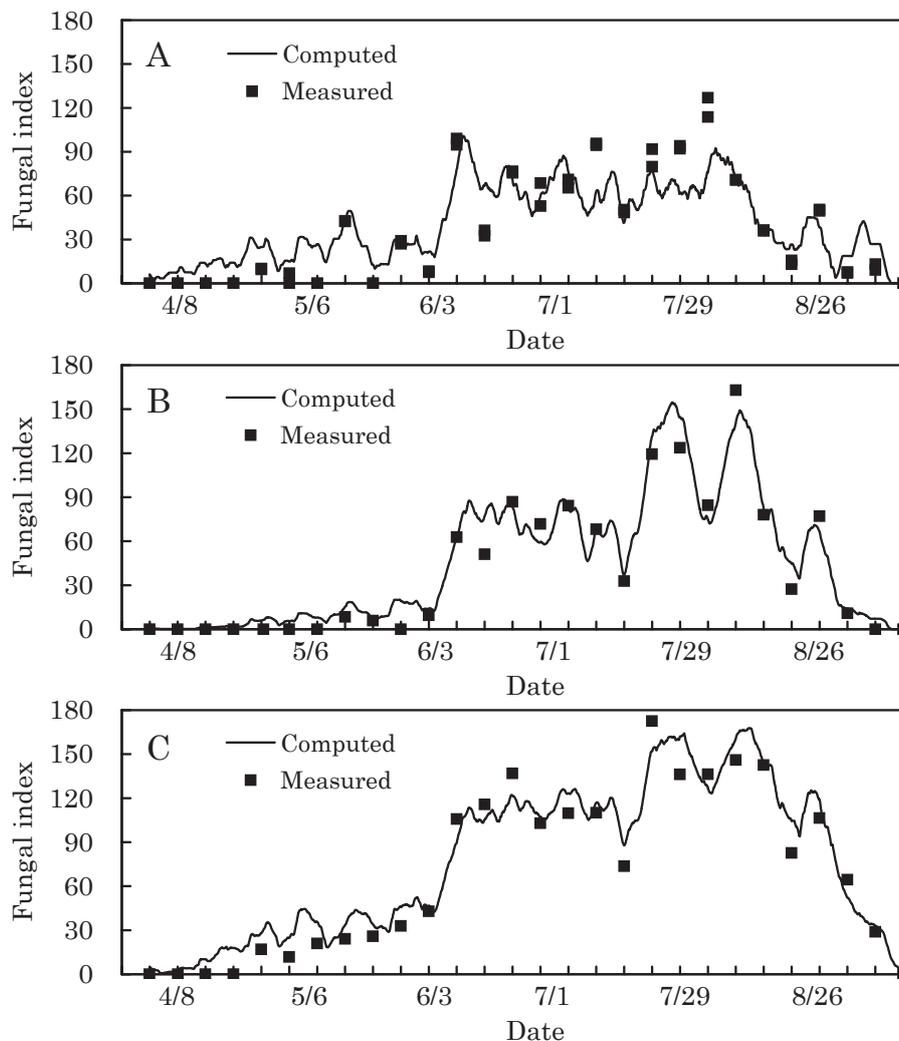


Fig. 2 Computed and measured fungal-indices at outdoors (A), east crawl space (B), and west crawl space (C) From March 25 to October 7, 2003

何れの調査箇所でも予測カビ指数は実測カビ指数に近い値を示し、季節的な変動パターンはほぼ同じであった。2003年の梅雨入りは6月10日で梅雨明けは8月2日であった¹⁵⁾。予測カビ指数は梅雨に入ると全調査箇所でも値が高くなった。実測カビ指数も同様で、梅雨入り直前の6月3日から10日の1週間の実測カビ指数は、外気が8.4と7.6 (平均8.0)、東床下が9.5、西床下が42.9であったが、梅雨に入った6月10日から17日の1週間では、外気が99.0と94.7 (平均96.9)、東床下が62.8、西床下が105.8になり、梅雨に入ると全調査箇所でも実測カビ指数が高い値に変わった。梅雨明け後は、外気の予測カビ指数は梅雨の期間中と大差なかったが、床下の予測カビ指数は東西の2箇所ともさらに上昇した。実測カビ指数も同様で、外気の実測カビ指数は梅雨明け後も梅雨の期間中と大差なかったが、床下の実測カビ指数は梅雨明け後は梅雨の期間中よりも高い値であった。9月に入ると全ての調査箇所でも予測カビ指数が低下し、実測カビ指数も低下した。

3.2 温度と相対湿度の経時変化

Fig. 3に、Fig. 2の予測カビ指数の算出に用いた外気 (A)、東床下 (B)、および西床下 (C) の温湿度の経時的な変化を示す。Fig. 2と同じ時期で2003年の3月25日から10月7日である。

外気よりも床下のほうが温湿度の変動幅が小さかった。床下では、西床下のほうが東床下よりもさらに温湿度の変動幅が小さかった。

3.3 予測カビ指数と実測カビ指数の比較

Fig. 4に、2003年の予測カビ指数と実測カビ指数の比較を示す。外気は◆、東床下は□、西床下は○で示した。

3月25日から10月7日の予測カビ指数と実測カビ指数の相関係数は、外気が0.90、東床下と西床下が共に0.97で、床下のほうが外気よりも予測カビ指数と実測カビ指数の相関性が高かった。

床下の調査箇所では予測カビ指数値と実測カビ指数値の差は、全て±30以下であったが、外気では

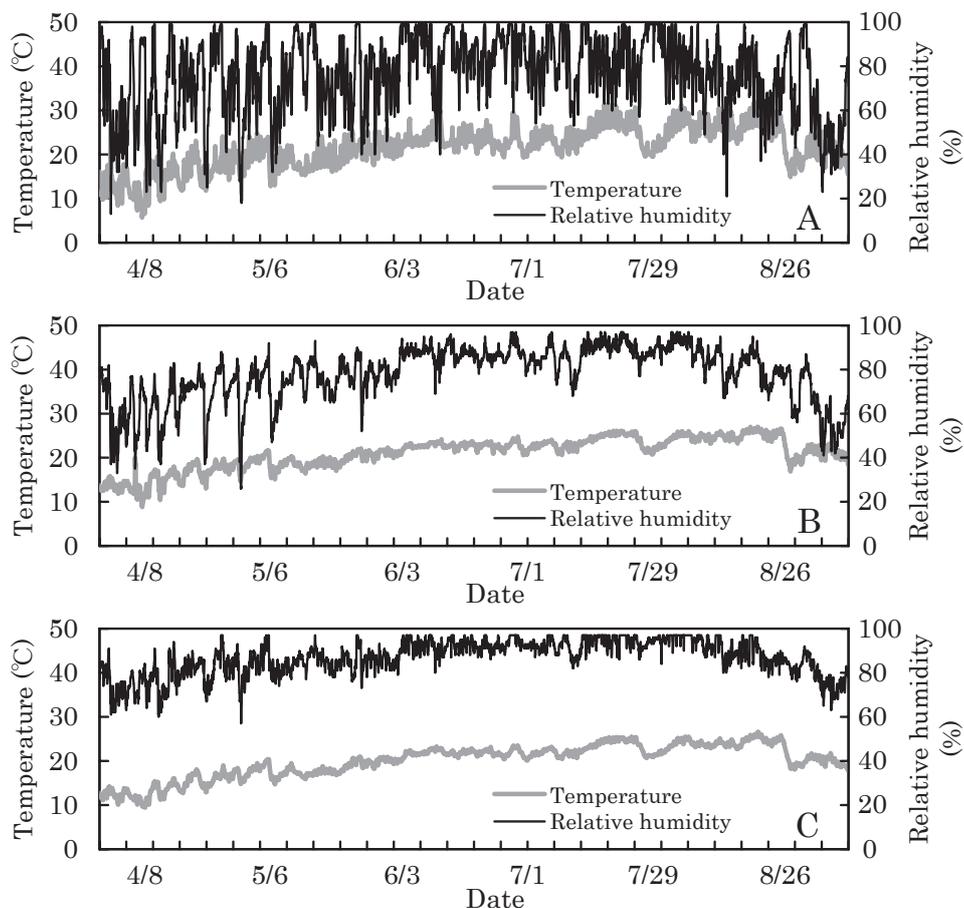


Fig. 3 Temperature and relative humidity at outdoors (A), east crawl space (B), and west crawl space (C)
From March 25 to October 7, 2003

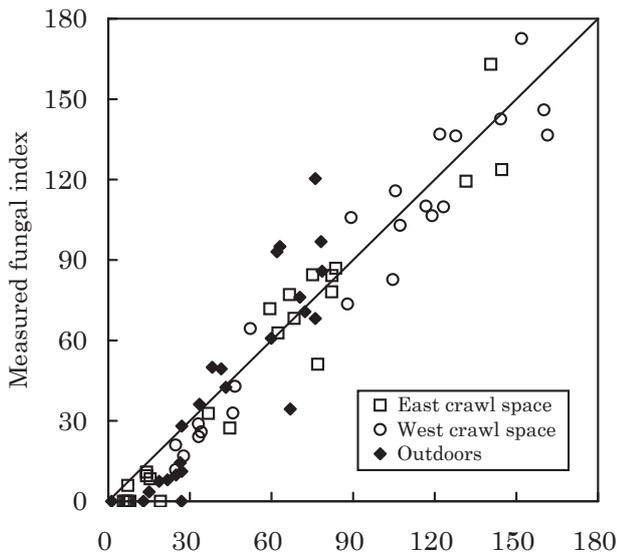


Fig. 4 Comparison of the computed and the measured fungal indices

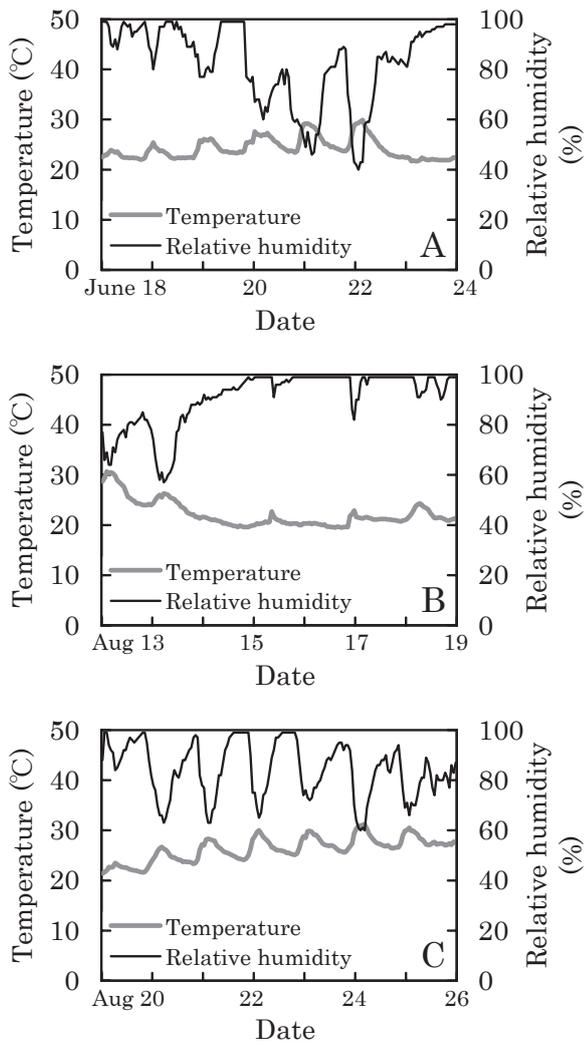


Fig. 5 Temperature and relative humidity of outdoors from June 17 to 24 (A), from August 12 to 19 (B), and from August 19 to 26 (C)

±30を超える差を示した週があった。Fig. 5に、外気の調査で、予測カビ指数が実測カビ指数から乖離した週および一致した週の代表的な温湿度変化を示す。

6月17日から24日は、予測カビ指数が66.9、実測カビ指数が36.3と32.5（平均34.4）であり、この1週間の予測カビ指数は実測カビ指数よりも30以上高い値（約2倍）を示した（A）。8月12日から19日は、予測カビ指数が76.1、実測カビ指数が126.9と115.8（平均120.4）であり、この1週間の予測カビ指数は実測カビ指数より40以上低い値（約4割減）であった（B）。8月19日から26日は、予測カビ指数が72.3、実測カビ指数が70.6と70.9（平均70.8）であり、この1週間は予測カビ指数と実測カビ指数がほぼ一致した（C）。

4. 考察

計算ソフトを用いて温度と相対湿度から求められた予測カビ指数と、カビセンサーを用いて測定された実測カビ指数は高い相関性を示したので（Fig. 2, Fig. 4）、実際の環境評価に予測カビ指数が適用できると思われる。作成した計算ソフト（エクセルソフトの“INDEX”）で用いたカビ指数一覧表は、温度と相対湿度が一定の定常環境で測定したカビ指数^{7,8)}から作成したものである。今回の調査では、温度と相対湿度が変動しても予測カビ指数は実測カビ指数に近い値を示す場合が多く、温湿度環境の変動が外気に比べれば少ない床下では（Fig. 3）、予測カビ指数と実測カビ指数の相関係数が外気よりも高く、予測カビ指数が実測カビ指数から乖離してもその差は±30以内であった。外気より環境変動の少ない室内では、予測カビ指数の精度は外気よりも高くなると思われる。今後、室内環境における予測カビ指数と実測カビ指数の比較を検討予定である。

Fig. 3に示されるような温湿度データから直接カビ発育を予測することは困難と思われる。室温付近で相対湿度70%以上のカビ発育可能な気候が継続している場合や、相対湿度60%以下の発育不可能な気候が継続している場合には温湿度からカビ発育の有無を予測できても、どの程度発育するかは予測は困難である。また、調査環境にカビ発育可能な気候と不可能な気候の両方が含まれている場合も予測は困難であり、カビ発育を予測するためにはカビ指数が必要である。

発育途中のカビの菌糸は相対湿度が一時的に低下すると、低下の程度によっては枯死し、発育可能な相対湿度が回復しても発育を再開しないことが、著者による相対湿度低減処理実験¹⁶⁾から明らかになっている。本調査においても、相対湿度の低下によりカビセンサー内部のカビが死滅したため予測カビ指数と実測カビ指数が乖離したと思われる事例が外気のカビ指数に見られた。6月17日から24日までの外気1週間 (Fig. 5A) の気候では、実測カビ指数が予測カビ指数の約半分の値であった。この1週間の曝露期間中に相対湿度が低下して50%に達した時期が2回あり、相対湿度の低下によりカビセンサー内部でカビの発育が停止し、その後の相対湿度上昇で発育が再開しなかったため、実測カビ指数が低い値になったと思われる。それに対し、8月19日から26日までの外気1週間 (Fig. 5C) の気候では実測カビ指数と予測カビ指数の値が一致した。この1週間の気候は温度の上昇に伴って相対湿度が低下する日周変動を繰り返していたが、相対湿度は常に60%以上が保たれていた。カビ指数の実測に用いた *Eurotium herbariorum* が発育可能な相対湿度は70%以上である¹¹⁾。夏期の外気の気候下で相対湿度が50%以下に低下すると発育が停止しその後相対湿度が上昇しても発育が再開せず、相対湿度が60%までの低下であれば発育は一時的な停止で相対湿度の上昇に伴い発育が再開したことをこれらの調査は示している。

8月12日から19日までの外気1週間 (Fig. 5B) の気候は相対湿度が高く、正確な相対湿度が測定されなかった可能性がある。使用した温湿度記録計の説明書には、相対湿度の計測範囲は10~95%、測定精度は±5%と記載されていた。*Eurotium herbariorum* は好乾性カビで相対湿度95~96%での発育速度が最も高いが、相対湿度99%以上ではほとんど発育しない。8月12日から19日の外気1週間には、相対湿度99%の記録が70時間含まれていたが、実際は相対湿度が99%よりも低く *Eurotium herbariorum* が発育可能な相対湿度の期間がもっと多く含まれていたため、実測カビ指数の値が予測カビ指数の値よりも高くなったと推定される。

予測カビ指数は、相対湿度の低下による不可逆的なカビ発育停止状態を反映せず、また相対湿度が計測範囲を超える場合には正確な相対湿度の値が得られないので、元々ある程度の不正確さを持つが、

Fig. 2に示されるように気候の大きな変化を捉えることができ、従来の温湿度の測定からは知ることができなかった環境の状態を捉えることができた。

予測カビ指数は温度と相対湿度から決定されるので、建物内部の温度と相対湿度の正確な履歴があれば、その履歴からカビ指数の変動を推定しカビ汚染の可能性を判定でき、温湿度の計測をカビ汚染の予防に活用できると思われる。さらに、建物の設計段階でなされる温湿度分布のシミュレーションからカビ指数分布をシミュレーションすれば、カビ汚染されにくい建物を建てるのが可能になると思われる。

5. 結論

- 1) 物理的な気候パラメータである温度と相対湿度から生物的な気候パラメータであるカビ指数を算出するソフトを作成した。
- 2) 作成したソフトを用いて温度と相対湿度から求めた「予測カビ指数」とカビを封入した試験片(カビセンサー)を用いて計測した「実測カビ指数」を、1軒の住宅の床下2箇所と外気において比較検討すると、予測カビ指数は実測カビ指数に近い値を示す場合が多く、予測カビ指数の季節的な変動パターンは実測カビ指数の季節的な変動パターンに類似した。
- 3) 外気よりも気候変動が少ない床下では外気よりも予測カビ指数値と実測カビ指数値の相関性が高く、床下の予測カビ指数値と実測カビ指数値が大きく乖離した場合でも差は±30以内であった。
- 4) 温湿度の履歴からカビ指数を予測することによりカビ防止対策を立てることが可能になり、建築設計の段階で温湿度シミュレーションからカビ指数をシミュレーションすることによりカビ汚染を受けにくい建物の設計が可能になる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、実験にご協力頂きました関口律子様、松下優子様および勝田薫様に感謝致します。

文 献

- 1) アル・ドーリー, J. F. ダムソン編著, 田中健治, 鳥居新平訳: かびアレルギー, 学会出版センター, (1988).
- 2) ヨハンナ・バン・ブロンスウィック著, 森谷清樹訳: ハウスダストの生物学, 西村書店, (1990).
- 3) 宮治誠, 西村和子, 福島和貴, 他: 特集カビと健康, 健康創造研究会誌, 2, 1-43 (2003).
- 4) B. Jakob, B. Ritz, U. Gehrig et al.: Indoor exposure to molds and allergic sensitization. *Environ. Health Perspect.*, 110, 647-53 (2002).
- 5) A. P. VerHoeff, and H. A. Burge: Health risk assessment of fungi in home environment. *Annals of Allergy Asthma & Immunology*, 78, 544-554 (1997).
- 6) C.G. Bornehag, J. Sundell and T. Sigsgaard: Dampness in buildings and health (DBH): Report from an ongoing epidemiological investigation on the association between indoor environmental factors and health effects among children in Sweden. *Indoor Air*, 14, Suppl. 7, 59-66 (2004).
- 7) 阿部恵子: 好乾性カビをバイオセンサーとする室内環境評価法, 防菌防黴, 21, 557-565 (1993).
- 8) K. Abe: A Method for numerical characterization of indoor climates by a biosensor using a xerophilic fungus. *Indoor Air*, 3, 344-348 (1993).
- 9) K. Abe, Y. Nagao, T. Nakada, and S. Sakuma: Assessment of indoor climate in an apartment by use of a fungal index. *Appl. Environ. Microbiol.*, 62, 959-963 (1996).
- 10) 阿部恵子: エアコン冷房時のカビ指数とカビ汚染, 室内環境学会誌, 1, 41-50 (1998).
- 11) 阿部恵子: カビ指数による室内環境評価, 防菌防黴, 29, 557-566 (2001).
- 12) 阿部恵子, 大釜敏正, 立本英機: カビセンサーを用いた床下環境の実態調査, 室内環境学会誌, 6(2), 124-125 (2003).
- 13) 春田三佐夫, 細貝祐太郎, 宇田川俊一編: 目で見える食品衛生検査法, p132, 中央法規出版, (1989).
- 14) The American Society for Testing and Materials: Standard practice for maintaining constant relative humidity by means of aqueous solutions. ASTM designation E, 104-85, 790-795 (1985).
- 15) 東京管区気象台: 関東甲信越地方の梅雨入りと梅雨明けについて (確定値, 平成15年9月18日), (2003).
- 16) K. Abe: Effect of reducing relative humidity on fungal viability. *The proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate - Indoor Air '96*, 3, 185-190 (1996).