マイクロ波照射による実大模型の気化式加湿器エレメントの温度分布

空調用気化式加湿器のマイクロ波殺菌に関する研究（その2）

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE TEMPERATURE DISTRIBUTION OF EVAPORATIVE HUMIDIFIER ELEMENTS IRRADIATED BY MICROWAVE

Germicidal effect of microwave radiation on microbial contamination of evaporative humidifier in HAVC system Part 2

姜 允 敬*, 加藤 信 介**, 成 旻 起***, 柳 宇****
阿 部 恵 子*****, 原 田 光 朗*****Yoonkyung KANG, Shinsuke KATO, Minki SUNG,
U YANAGI, Keiko ABE and Mitsuo HARADA

In this study, microwave irradiation was considered to be used to sterilize evaporative humidifiers in air-conditioning systems. A mockup of humidifier was prepared to identify the applicability of the microwave irradiation system. For effective heating of an evaporative humidifier element, the optimum operating conditions of the system such as usage of air blower and water spray during microwave irradiation, microwave output powers and dry or wet element condition were investigated. The results showed that the front surface temperature of the element was higher in wet condition than in dry condition, whereas back surface temperature was higher in dry condition. Further study to make the surface temperature of the element uniformly high shall be necessary.

Keywords: Microwave irradiation, germicidal effect, evaporative humidifier, temperature distribution

マイクロ波, 殺菌, 気化式加湿器, 温度分布

1. はじめに

加湿器は室内の湿度調節のみならず、加湿によって湿度を上昇させることで、低湿度時に発生しやすい呼吸系疾患の予防機能も兼ね備えている。気化式加湿器は水滴中に存在する無機成分の残留成分による微粒子をエアロゾル化させない特徴を有しており、また、エレメントがフィルターのように空気中の浮遊汚染物質を除去する機能も持つ。しかし、気化式加湿器は加湿水の高い清浄度が確保されたにも関わらず、エレメント表面での微生物による汚染の可能性が指摘されている¹⁾²⁾。また、気化式加湿器エレメントの表面での微生物汚染が深刻になるとその汚染物質が室内に放散する可能性もある³⁾。そのため、気化式加湿器において微生物汚染を防ぐことは重要な課題となっている⁴⁾。一つの方策としてマイクロ波による殺菌が考えられる。筆者らは既報⁵⁾において、真菌孢子 (*Cladosporium herbarum*, *Fusarium solani*) 及び細菌 (*Bacillus subtilis*) を対象菌としてマイクロ波による殺菌が可能であることを確認した。また、その殺菌原理を明らかにするた

図1 実験概要

* 東京大学大学院工学系研究科 大学院生・修士(理学)

** 東京大学生産技術研究所 教授・工博

*** 東京大学 特任研究員・工博

**** 工学院大学 教授・工博

***** 環境生物学研究所 所長・農博

***** 東京電力法人営業部産業 ES 部 スペシャリスト

Graduate Student, the University of Tokyo, M. Sci.

Prof., Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Dr. Eng.

Project Researcher, Institute of Industrial Science, the University of Tokyo, Dr. Eng.

Prof., Kogakuin University, Dr. Eng.

Institute of Environmental Biology, Dr. Agr.

Tokyo Electric Power Company

めにマイクロ波の殺菌効果及び同温度条件でマイクロ波を用いない非マイクロ波の殺菌効果を比較する基礎検討結果を報告した。その結果、マイクロ波の殺菌は熱による効果であることを明らかにしたと共に、菌液（0.9%食塩水）の温度が約 60℃ 以上の条件で殺菌効果が高いことを報告した。

本報では空調用気化式加湿器におけるマイクロ波の実用性を検討するために加湿器の模型実験装置を製作し、加湿器エレメントの温度がマイクロ波照射により殺菌効果が高かった温度である約 60℃ 以上になる条件を検討する。まず、実験による検討の際、安全管理上、空調機からのマイクロ波の漏れを防ぐのが実用化への重要な前提条件となるため、併せてマイクロ波の模型実験装置からの漏れについて検討する。その後、殺菌条件を検討するために行った加湿器への給水と送風機の稼働有無、マイクロ波の出力、エレメント上の水分の有無によるエレメント表面の温度変化及び温度分布の測定結果を報告する（図 1）。

2. 空調用気化式加湿器の模型実験装置の製作及びマイクロ波漏れの確認

2.1 空調用気化式加湿器の模型実験装置の製作

空調用気化式加湿器の全体の模型実験装置を図 2 に示す。模型実験装置は HEPA フィルター付き給排気口及び排気送風機、マイクロ波発生装置、ダクト、気化式加湿器で構成されている。排気送風機を稼働するとき気流は図 2 のように吸入口から出口に向かって流れてくる。サンプリング窓は加湿器エレメントにおける試験菌付着の有無などを確認するために設けた。気化式加湿器は給水ポンプ、積算流量計、水槽、加湿器エレメントから構成される（図 3）。マイクロ波発生装置は周波数 2455 MHz ± 30 MHz であり、最大出力は 2000 W である。加湿器エレメントはハニカム構造であり、無機充填材と無機結合材で構成された不燃タイプである。

2.2 マイクロ波漏れの確認

加湿器上部の気密性の確保及びマイクロ波漏れを防止するため、部材内部の隙間には導電性ゴムを、外部の隙間には導電性テープを付けた。また、加湿器とダクトの連結部及びシールド部には導電性テープを付けた。実験装置周辺のマイクロ波強度を高周波電磁界測定器（TES-92、TES Electrical Electronic 社）を用いて測定した結果、公共の場所における ICNIRP（国際非電磁波放射線防護委員会）^④基準 10 W/m² の 1/10 以下であることが確認された。

3. マイクロ波照射によるエレメント表面の温度変化及び温度分布

既報ではマイクロ波による殺菌効果は主に熱によるものであり、真菌胞子及び細菌に対して約 60℃ 以上の温度条件において殺菌効果が認められることについて報告した。本報では効率的に加湿器エレメントを加熱するために加湿器への給水及び送風機の稼働有無、マイクロ波の出力、水分の有無によるエレメント表面の温度変化及び温度分布について詳細な検討を行った。

図 2 模型実験装置

図 3 空調用気化式加湿器の模型実験装置

3.1 実験方法

3.1.1 加湿器への給水と送風機の稼働有無によるエレメント表面の温度変化

マイクロ波による加熱はエネルギー消費量、安全、殺菌効果などを考慮したスケジュールを決めて断続的に行う必要があり、空調機の運転スケジュールによって加湿器及び送風機が稼働しない場合があるため、空調機の運転可否がマイクロ波加熱に与える影響及びそれによるエレメント表面の温度変化を確認するための試験を行った。

加湿器と送風機を稼働する場合は、加湿器エレメントに給水すると共に送風機を稼働させ、水を十分エレメントに染み込ませてから、エレメント表面の温度が 60℃ 以上に上昇するまで 1200 W のマイクロ波を照射する。送風量は 29.1 m³/min であり、気化式加湿器の給水流量は 0.48～0.52 L/min である。加湿器と送風機を稼働しない場合には、加湿器エレメントへの給水と送風機の稼働を行い、エレメントを十分に水で湿らせて加湿器の給水と送風機の稼働を停止する。エレメントから水が落ちなくなるまで待った後、エレメントが濡れている状態で 1200 W のマイクロ波を照射する。エレメント表面の温度測定は光ファイバー温度センサー（Reflex™, Neoptix 社）を用いてエレメン

トの前面及び裏面中央の表面温度を測定する（図 4-(a)）。そこで前面と裏面はマイクロ波を照射する上流側のエレメント面を前面、下流側のエレメント面を裏面とする（図 3）。エレメントは厚さ 100 mm の 1 枚条件で行う。

3.1.2 マイクロ波の出力によるエレメント表面の温度変化

マイクロ波照射による加湿器エレメントの表面温度が殺菌に有効な温度である 60°C 以上になる条件を検討するためにマイクロ波の出力によるエレメント表面の温度変化を測定する。マイクロ波の出力を 450 W、600 W、750 W、900 W、1050 W、1200 W、1350 W の 7 段階に設定し、エレメント表面の温度が十分に上昇し安定するまでマイクロ波を照射する。加湿器と送風機は稼働しない条件、エレメントは乾燥させた条件及び 1 枚のみを設置した条件で行う。エレメントの温度測定はエレメントの前面及び裏面中央の表面温度を測定する。

3.1.3 水分有無によるエレメント表面の温度変化及び温度分布

3.1.2 の実験では乾燥したエレメントにマイクロ波を照射するが、実際の加湿器エレメントは、その使用時には常に水で濡れている状態である。従って、エレメントが濡れている状態でマイクロ波を照射し、水の蒸発によるエレメントの乾燥の過程を含めた温度の時間推移を検討する必要がある。そこで、加湿器エレメントが濡れている状態及び濡れていない状態でマイクロ波を照射した際のエレメント表面の温度変化を確認する。

加湿器エレメントが濡れていない場合（乾燥条件）は、エレメントが乾燥している状態で 1200 W のマイクロ波を照射する。加湿器エレメントが水で濡れている場合（非乾燥条件）には、加湿器を稼働させエレメントに給水する。そしてエレメントから水が落ちなくなるまで約 5 分間待った後、マイクロ波を照射しエレメントの表面温度を測定する。加湿器と送風機は稼働させず、エレメントは乾燥条件及び 1 枚のみを設置した条件で行う。また、加湿器部とダクト部を分離し、赤外線カメラ（Fluke Ti25, FLUKE 社）を用いてエレメントの前面と裏面の温度分布を測定する（図 4-(b)）。

3.1.4 エレメントの枚数による温度変化及び温度分布

エレメントが厚い場合、内部まで殺菌が可能であるかを検討するため、厚さ 100 mm のエレメント 1 枚と 2 枚の 2 ケースに対して 1200 W のマイクロ波を照射し温度変化を比較する。エレメント表面の温度変化はエレメントの前面、前面と裏面の間、及び裏面の中央を測定する（図 5）。また、エレメントの前面と裏面の温度分布を測定する。加湿器と送風機は稼働しない条件、エレメントは乾燥条件で行う。

3.2 実験結果

3.2.1 加湿器への給水と送風機の稼働有無によるエレメント表面の温度変化

加湿器と送風機を稼働させながらマイクロ波を照射した場合、温度変化が殆ど見られなかった（図 6-(a)）。一方、加湿器と送風機を稼働させない場合、エレメント前面及び裏面の温度は約 55~60°C まで上昇した（図 6-(b)）。加湿器と送風機を稼働させた場合、エレメントの温度変化が殆ど見られなかった理由としては、加湿のために供給した水と送風の影響によりエレメント表面の温度上昇が抑制されたためと考えられる。前報で確認したように、対象とする微生物を殺菌するためにはエレメントの表面温度を約 60°C 以上に上げる必要がある。そのため、以後の実験では加湿器と送風機を稼働させない条件でマイクロ波を照射することにした。

図 4 気化式エレメントの表面温度測定

(a) 温度センサー設置（光ファイバー温度計）

(b) 温度分布測定（赤外線カメラ）

図 5 気化式エレメントの表面温度測定点

(a) 前面 (b) 側面

図 6 加湿器と送風機の稼働有無によるエレメント表面の温度変化

(a) 加湿器と送風機の稼働 (b) 加湿器と送風機の未稼働

3.2.2 マイクロ波の出力によるエレメント表面の温度変化

マイクロ波の出力によるエレメント表面の温度変化を測定した結果を図7に示す。マイクロ波の出力によってエレメント表面の温度が上昇した。また、エレメントの裏面温度は前面温度より多少低かった。1200 Wの出力でマイクロ波を照射した場合、エレメントの前面温度は照射3分後に約60°Cまで上昇した。

3.2.3 水分の有無によるエレメント表面の温度変化及び温度分布

水分の有無によるエレメント表面の温度変化及び温度分布を測定した結果を図8、9に示す。乾燥条件において1200 Wの出力でマイクロ波を照射してから2分後にエレメント前面の温度の方が裏面に比べ少し高めであるが、続けてマイクロ波を照射したら6分後にはエレメント前面と裏面の温度差が殆どなくなった(図8-(a))。また、エレメント表面の温度分布は全体的に温度むらが生じて中心部の温度が低く、それ以外の温度は高い傾向を示す(図8-(b), (c))。また、前面(図8-(b))と裏面(図8-(c))の温度分布は同じ傾向を示す。この結果からマイクロ波はエレメント前面を通過しており、エレメント内部にまで十分に到達し加熱していると考えられる。

非乾燥条件では、エレメント前面と裏面の温度差が大きく(図9-(a))前面(図9-(b))と裏面(図9-(c))の温度分布は異なる。これはマイ

図7 マイクロ波出力によるエレメント表面の温度変化
(a) 前面 (b) 裏面

図8 乾燥条件でのエレメント温度変化の比較 (a) 温度変化 (b) 前面の温度分布 (c) 裏面の温度分布

図9 非乾燥条件でのエレメント温度変化の比較 (a) 温度変化 (b) 前面の温度分布 (c) 裏面の温度分布

図10 エレメント(乾燥条件)2枚条件でのエレメント温度変化の比較 (a) 温度変化 (b) 前面の温度分布 (c) 裏面の温度分布

クロ波がエレメント前面の水分に優先的に吸収されるため、裏面温度が前面温度より低くなったことが原因であると考えられる。その結果から水分の有無はマイクロ波加熱の効果に対して重要な因子であると判断される。

3.2.4 エレメントの枚数による温度変化及び温度分布

エレメント枚数によるエレメント表面の温度変化及び温度分布を測定した結果を図 10 に示す。全体的に 0～600 分までの平均裏面温度はエレメント 1 枚 (図 8-(a)) より 2 枚 (図 10-(a)) の方が多少低かった。また、エレメント 2 枚の場合も前面 (図 10-(b)) と裏面 (図 10-(c)) の温度分布は一致する。その結果からマイクロ波はエレメント 2 枚でも通過すると考えられる。また、エレメント 2 枚 (図 10-(b), (c)) の温度分布はエレメント 1 枚 (図 8-(b), (c)) の温度分布と異なる。この結果からエレメントが 1 枚ある場合と 2 枚ある場合は加湿器内部のマイクロ波分布が異なると考えられる。なお、エレメントの裏面は殺菌可能なエレメント表面の温度とした約 60℃ よりも高い 61.4℃ であり、エレメントが厚い場合も十分にマイクロ波を照射すると裏面まで加熱可能であると判断される。

4. 加湿器模型装置内部のマイクロ波強度の測定

先の章ではマイクロ波照射によりエレメントに温度むらが生じることが確認された。本章では原因を確かめるために、(1) マイクロ波を照射する位置からの距離とマイクロ波強度の関係、(2) 加湿器の形とマイクロ波強度の関係、(3) エレメントに吸収されるマイクロ波強度を考慮して行われた。加湿器内部におけるマイクロ波強度分布の測定とその結果について示す。

4.1 実験方法

各実験のケースはエレメントがない場合 (Case1) 及びエレメントが 1 枚ある場合 (Case2)、エレメントが 2 枚ある場合 (Case3) を検討する。すべてのケースはエレメントを乾燥した条件、送風機及び加湿器を稼働してない条件で行う。

測定方法を以下に示す。50 mL の蒸留水を入れた 100 mL 容量のガラスビーカーをエレメントの前後に配置し、1200 W のマイクロ波を 1 分間照射する。

測定点は図 11 のように①から⑧とする。エレメントに吸収されるマイクロ波の強度を確認するためにエレメントに接触している測定点 (③、④、⑤、⑥) とエレメントに接触していない測定点 (①、②、⑦、⑧) のマイクロ波強度を比較する。また、ダクトの形が対称なのでマイクロ波強度も対称であることが想定される。それを確認するためにダクトの中心 (図 11 の点線) に関して対称な位置に測定点を設けた。一回の計測でエレメントに接触していない測定点とエレメントに接触している測定点で 2 回に分けて行った。水の温度の測定は光ファイバー温度センサーを用いて行う。

筆者らは一分間の照射の間に上昇する蒸留水の温度を指標として式

(1) によりマイクロ波強度を算定した。水の温度は照射初期には上昇するが、やがて周辺空気との熱バランスにより温度の時間勾配が小さくなり平衡状態に近づいてゆく。本研究では空気温度を計測しておらず、水から空気への熱輸送を定量評価できない。従って本報告では試験方法は JIS C 9250⁷⁾を参考とし照射初期の水の温度上昇率をもってマイクロ波強度を大まかに算定することを試みた。

4.2 実験結果

4.2.1 マイクロ波を照射する位置からの距離とマイクロ波強度の関係

蒸留水の温度及び計算したマイクロ波の強度を表 1 に示す。マイクロ波を照射する位置から近い測定点 (位置①, ②) から遠い測定点 (位置⑦, ⑧) のマイクロ波強度の測定結果、エレメントがない場合 (Case1)、マイクロ波を照射する位置からの距離とマイクロ波強度に一定の傾向は見られず加湿器内部の位置により異なるマイクロ波強度を示した。

図 1 1 加湿器内部のマイクロ波強度の測定位置 (平面図)

Case1 : エレメントなし, Case2 : エレメント 1 枚, Case3 : エレメント 2 枚
①から⑧はマイクロ波強度の測定位置を示す。

$$W = M \times C \times (T_b - T_a) / t$$
 式 (1)

W : マイクロ波強度 [W]
M : 蒸留水質量 [g]
C : 蒸留水の比熱 [J/g・℃]
T_a : マイクロ波照射前の蒸留水温度 [℃]
T_b : マイクロ波照射後の蒸留水温度 [℃]
t : マイクロ波照射時間 [sec]

表 1 加湿器内部のマイクロ波強度

エレメント	ケース	マイクロ波強度 (W)							
		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
なし	Case1	76	53	118	131	60	64	175	147
1 枚	Case2	153	161	75	61	58	40	124	133
2 枚	Case3	98	93	96	78	-	-	43	41

4.2.2 加湿器の形とマイクロ波強度の関係

全体的に図 11 におけるダクトの軸を示す点線に関して対称な各測定点 (①-②、③-④、⑤-⑥、⑦-⑧) でマイクロ波強度がほぼ同じ傾向を示した。その結果から加湿器の形は加湿器内のマイクロ波強度に大きな影響を与えると考えられる。また、ダクトの軸方向に (①-③-⑤-⑦方向) に関しては加湿器内部のマイクロ波強度にばらつきが出た。これは加湿器内部に定在波が生じている可能性が考えられる。

4.2.3 エレメントに吸収されるマイクロ波強度

エレメントに接触している測定点とエレメントに接触していない測定点のマイクロ波強度を比較した結果、エレメントが 1 枚ある場合 (Case2)、エレメントに接触する測定点 (位置③, ④, ⑤, ⑥) よりエレメントから 10 cm 離れた測定点 (位置①, ②, ⑦, ⑧) のマイクロ波強度が強かった。しかし、エレメント 2 枚がある場合 (Case3) には、エレメントに接触する測定点 (位置③, ④) とエレメントから 10 cm 離れた測定点 (位置①, ②) のマイクロ波強度の差はほぼなかった。その結果からエレメントに吸収されるマイクロ波強度は予測が困難であると考えられる。

5. 考察

前報では、マイクロ波の殺菌は主に熱の影響であり、約 60°C 以上の温度条件で殺菌効果が見られたことを確認した。これを踏まえて本研究ではマイクロ波の実用性を検討するために加湿器の模型実験装置を製作し、加湿器エレメントを約 60°C 以上に加熱する方法を検討した。その結果、乾燥したエレメント 1 枚を設置した場合、加湿器への給水と送風機を稼働させない条件で 1200 W の出力のマイクロ波を 2 分以上照射すると、エレメントの表面温度が 60°C まで上昇することが確認された。また、濡れているエレメント 1 枚を設置した場合は 1200 W の出力のマイクロ波を 3 分以上照射すると 60°C まで上昇した。

また、乾燥したエレメント 2 枚を設置した場合は 1200 W の出力のマイクロ波を 10 分以上照射するとエレメント裏面の表面温度が 60°C まで上昇した。濡れているエレメントを 2 枚設置する場合に関しては実験を行わなかったが、以上の結果から、適切な時間マイクロ波を照射することによりエレメントが前面から乾燥し、最終的には乾燥したエレメント 2 枚を設置した場合と同様に、裏面まで加熱が可能であると考えられる。

紫外線による気化式加湿器エレメントの殺菌はエレメント表面の殺菌には有効であるが、紫外線が届かないエレメント内部までは殺菌効果が期待できないと報告されている⁹⁾。その一方でマイクロ波による加湿器エレメントの殺菌は以上の実験からエレメント内部まで殺菌が可能であると判断される。

しかし、エレメント表面に不均一な温度むらが生じ、エレメント温度が 60°C より低いところが生じる可能性があるため、エレメント全体で均一な殺菌は期待されないと考えられる。また、温度むらの形はエレメントが乾燥条件にある場合と濡れている条件にある場合で異なる。エレメントの水分有無は温度むらの形に大きな影響を与えると考えられる。

エレメントに生じる温度むらの原因を確認するために加湿器内部のマイクロ波分布を確認した結果、加湿器内部の軸対称な各測定点でマイクロ波強度がほぼ同じ傾向を示したが、ダクトの軸方向に関しては加湿器内部の位置により異なるマイクロ波強度を示した。これはマ

イクロ波強度が空間分布を持っているということであり、定在波が加湿器内部に生じている可能性があることを示している。強度測定点を加湿器床面近傍のみに設置し、加湿器内部の鉛直方向のマイクロ波強度は本実験では計測しなかったため、鉛直方向の強度分布については言及できない。しかしエレメント表面で生じる鉛直方向の温度むらに関しても、定在波によるものである可能性はある。そして水分の有無やエレメント枚数が、マイクロ波の定在波形に影響するために各設定条件でのエレメント温度分布が異なったという可能性が考えられる。

したがって定在波の存在を実証し、それを適切に制御・調整し温度むらが生じない照射方法を開発する必要があると考えられる。その方法として、今後はマイクロ波シミュレーションを用いて実験を再現し、エレメントへの均一な加熱が可能になるように反射板等を設けるなどの対策を検討する予定である。

6. まとめ

本研究ではマイクロ波の実用性を検討するために加湿器の模型実験装置を製作し、マイクロ波照射の出力、水分有無によるエレメント表面の温度変化と温度分布を確認した。また、加湿器内部のマイクロ波強度分布を確認した。本研究で得られた結果を以下に示す。

(1) 加湿器と送風機を稼働させた場合は、加湿器エレメントの表面温度上昇が殆どなかった。

(2) 乾燥条件のエレメントに関して加湿器と送風機を稼働しない条件で 1200 W の出力のマイクロ波を 2 分以上照射した場合、エレメント前面の表面温度は約 60°C まで上昇した。また、エレメント表面に不均一な温度むらが生じた。

(3) エレメント前面温度は乾燥条件に比べ非乾燥条件の方が高かった。非乾燥条件の場合、エレメント前面温度と裏面温度の差が大きかった。また、乾燥条件のエレメントの温度むらと異なる形の温度むらが生じた。

(4) 加湿器内部の位置によりマイクロ波強度が異なる。それによりエレメントに温度むらが生じたと考えられる。

参考文献

- 1) Harriet A. Burge, William R. Solomon, and Jean R. Boise, Microbial prevalence in domestic humidifiers, Applied and Environmental Microbiology, 39(4), pp. 840-844, 1980.
- 2) Eva Henningson, Emission of bacteria from air humidifiers, Environment International, 17, pp. 235-241, 1991.
- 3) 山崎省二、木村昌伸、竹下節、Jan Wettengard : 加湿器から空中への細菌飛散の機序に関する研究、第 9 回空気清浄とコンタミネーションコントロール研究大会予稿集, pp. 83-86, 1990.
- 4) 池田耕一、仲井章一、田村和也、気化式加湿より発生する菌および臭気等の対策に関する実験的研究: 運用上効果のある方法の選定に関する検討, 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集, F-13, pp. 477-480, 2011. 9.
- 5) 姜允敬, 加藤 信介, 成 旻起, 金 鐘訓, 柳 宇, 阿部 恵子, 原田 光朗, 柳原 隆司, 空調用気化式加湿器のマイクロ波殺菌に関する研究 (その 1) マイクロ波による微生物殺菌性能に関する基礎実験、日本建築学会環境系論文集 第 667 号, pp.793-798, 2011.9.
- 6) ICNIRP Guidelines, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, 74 (4) , pp. 494-522, 1998.
- 7) JIS C 9250 Microwave ovens, 1992.
- 8) Minki Sung, Shinsuke Kato, U Yanagi, Minsik Kim and Mitsuo Harada, Disinfection performance of ultraviolet germicidal irradiation systems for the microbial contamination on an evaporative humidifier, HVAC&R 17(1), pp. 22-30, 2011.

(2011年10月8日原稿受理, 2012年1月20日採用決定)