

〈一般研究課題〉 マイクロ波照射型高性能デシカント調湿システムの開発

助成研究者 愛知工業大学 渡辺 藤雄



## マイクロ波照射型高性能デシカント調湿システムの開発

渡辺 藤雄  
(愛知工業大学)

### Development of desiccant humidity conditioner system with microwave irradiation

Fujio Watanabe  
(Aichi Insutitute of Technology)

#### Abstract:

For the efficient development of dehumidifier (D-hum), a microwave heating type D-hum was proposed. The microwaves have the characteristics energy is readily transformed into heat inside the particles by dipole rotation and ionic conduction and selectively heats water in the adsorbent.

In this study, the effect of heat and microwave irradiation on adsorbed water-vapor desorption from various type zeolites was studied. Desorption performance of water from zeolites by microwave heating under the conditions of N<sub>2</sub> gas of 30°C with relative humidity 40%, microwave power of 800W was compared with that for hot-air heating at 40~80°C and microwave power of 50W. The effect of microwave irradiation was approved to be better than that of hot air heating in any zeolites.

#### 1. はじめに

調湿環境制御技術は民生活動空間における快適環境調和の有力手段であるのみならず、夏季/冬季の低湿度化/高湿度化による冷房/暖房のエネルギーの削減に大きく寄与する。除湿/加湿機能を有するデシカント調湿システムは吸着現象を利用して高湿度環境からの除湿/低湿度環境への加湿を行うシステムであり、可動部が少なく操作が容易、機械圧縮式に比べてエネルギー消費が少ないなどのため、既に一部実用化されている。従来システムではこの加熱熱源としてヒータ加熱、太陽熱利用加熱などの温風が用いられているが、温風加熱法は間接加熱のため、イ)加熱速度が遅い、ロ)熱損失が大きい、などのことにより、脱着率の低下による装置の大型化、エネルギー消費の増

大が余儀なく、汎用実用化に至っていない。この課題に対して申請者は、脱着部の直接加熱を可能とするマイクロ波(MW)加熱脱着に着目してその高度・高速脱着を可能とするMW照射型デシカント調湿システムを提案し、脱着平衡論的にその有効性を確認した。<sup>1)</sup>

本研究ではこの研究を一步進め、熱源(低温排熱、ヒータなど)およびMW照射併用による超高性能デシカント調湿システムの構築を最終目標として、その中心課題となる吸着器の設計基準の確立に向けた検討を行った。具体的には、種々の吸着材を対象として広範な湿度条件下でのMW照射型としての最適な吸着材の選定、ならびにMW照射場および熱源とMW照射の併用場における脱着速度の実験的定量化を行った。

## 2. 実験

### 2.1 ゼオライト試料および水蒸気吸着平衡特性の測定

ゼオライト試料として3種(平均粒子径 $500\ \mu\text{m}$ の4A型(細孔径 $0.4\text{nm}$ )および13X型のDF9(細孔径 $0.8\text{nm}$ )、OXYIV-5(細孔径 $1.0\text{nm}$ )を使用した。これらの試料について、高精度蒸気吸着装置(日本ベル製BELSORP-aqua3)による $30^\circ\text{C}$ および $50^\circ\text{C}$ の水蒸気吸着平衡の測定を行なった。

### 2.2 マイクロ波加熱脱着の実験装置および実験方法

Figure 1に本実験で使用したマイクロ波加熱脱着実験装置の概略を示す。本装置はマイクロ波発生装置(株IDX)、流通式吸着管、蒸発器により構成される。また、装置全体は断熱壁で囲まれ、所定の一定温度( $15\sim 45^\circ\text{C}$ )に保たれる構造になっている。

マイクロ波は $2.45\text{GHz}$ で発振され、矩形導波管( $\text{TE}_{01}$ モード)を経て、直径 $110\text{mm}$ の円筒形導波管( $\text{TE}_{11}$ モード)を通

り、マイクロ波吸収体に吸収される。流通式吸着管は円筒形導波管中央(入口より $140\text{mm}$ )の断面中心位置に垂直に設置した。この設置位置は、あらかじめ測定した導波管内のマイクロ波の電界強度が最大となった位置である。吸着管の出入り口にはそれぞれ温湿度計測計(PosiTector DPM, DeFelsko Corp.)が設置されており、測定温度・湿度差から流通空気の水蒸気濃度を求め、これに基づいて吸着量および脱着量を算出した。吸着材層の中心部には光ファイバー温度計(AMOTHFL-200,安立計器株)が挿入されており、この温度を吸着材層の代表温度とした。

本研究では、Figure 2に示すように、流通式吸着管内の試料層上部にコイル状マイクロヒーター( $20\text{W}$ )を挿入し、供給電力により流通ガスを加熱し吸着材層温度を調整できるようにした。

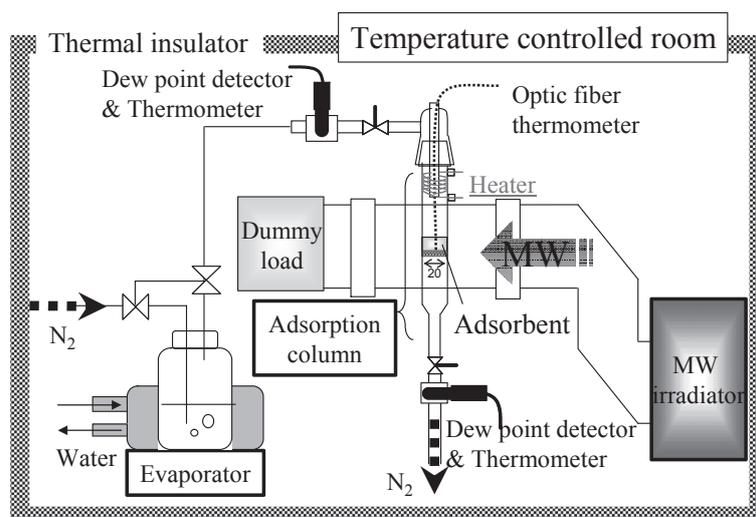


Fig.1 Schematic diagram of experimental apparatus

この温度調節ではあらかじめ吸着材層区間にガラス球(粒径0.3~1.0mm、粒子層厚み;約2.5mm)を充填し、流通ガスを供給した条件下で充填層中心温度が所定の到達温度になる供給電力を計測し、マイクロ波照射加熱実験ではこの計測電力の供給と合わせてマイクロ波照射を行った。

実験は、約0.5~2.0g(吸着材層厚み:約2.5~10.0mm)のゼオライトを吸着管中央部に装填した後、前処理として吸着管を350℃で加熱保持し、純度99.99%の窒素ガスを十分流通させることで吸着材の乾燥を行った。吸着過程では室温30℃の条件で14.9℃に調整した蒸発器に窒素ガスを流速 $u=0.053\text{m/s}$ で流通させ、相対湿度40%の湿潤窒素とし、吸着管に流通させ吸着操作を行なった。つぎに、吸着完了後引き続き、相対湿度40%の湿潤窒素流通させた条件下でマイクロ波出力800Wを印加したマイクロ波加熱脱着実験を行なった。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 ゼオライト水蒸気吸着平衡特性

Figure 3には使用したゼオライト試料の水蒸気吸・脱着等温線を前報<sup>1)</sup>に示した13X型 OXYSIV-5(細孔径1.0nm)の結果と併せて示す。また、Figure 4にはゼオライトDF-9について異なる温度の吸着等温線の測定結果を示す。Figure 3の結果より次のことがわかる。4A型では相対圧 $RH=5\%$ 以下の低相対圧域で急峻な吸着等温線の立ち上がりを示し、その後は徐々に吸着量が増大する。 $RH=5\%$ 以下の吸着量 $RH=98\%$ における吸着量の75%を占める。また、OXYSIV-5に比べて吸着量は小さく、 $RH=5\%$ 、80%基準でそれぞれ0.95倍および0.84倍である。DF9では $RH=10\%$ 以下で急峻に立ち上がり、

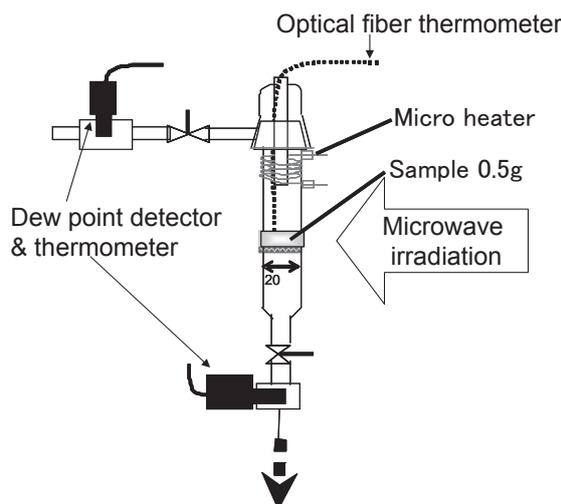


Fig.2 Adsorption column

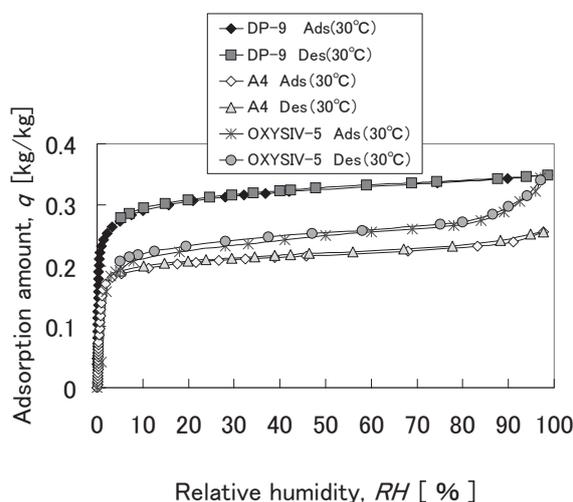


Fig.3 Adsorption isotherm of water vapor on zeolites at 30°C

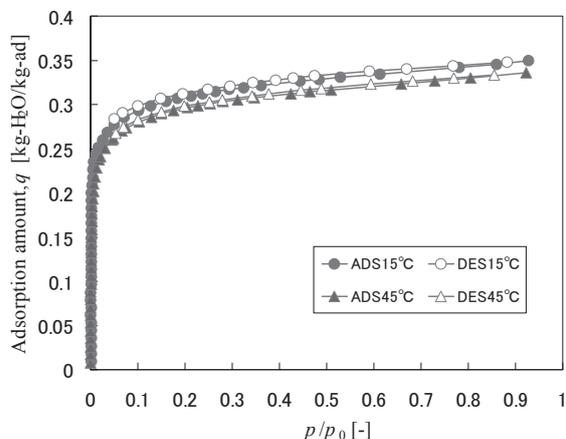


Fig. 4 Adsorption isotherm of water vapor on zeolite DF-9 at 15°C and 45°C

その後はOXYIVE-5 とほぼ類似の吸着量の増大を示し、 $RH=10\%$ 以下の吸着量は $RH=98\%$ における吸着量の84%を占める。また、OXYIV-5に比べて吸着量は大きく、 $RH=10\%$ 、80%基準でそれぞれ1.35倍および1.22倍である。 $RH=5\sim 80\%$ の範囲で吸着量がOXYIV-5の約1.3倍程度と大きい。4A型、DF-9ともに、吸・脱着のヒステリシスを示すがそれはOXYIV-5に比べて小さい。また、Figure 4のゼオライトDF-9の結果より、平衡吸着量は温度依存性を示し、吸着量は温度の上昇とともに減少する。

Table 1 Adsorption and desorption heat for zeolite DF-9

$q$ [kg-H <sub>2</sub> O/kg-ad]	$\Delta H_{ads}$ [kJ/kg-H <sub>2</sub> O]	$\Delta H_{des}$ [kJ/kg-H <sub>2</sub> O]
0.290	3280	3540
0.300	3250	3460
0.310	3240	3400
0.320	3210	3310
0.330	3070	3170

つぎに、本測定のDF-9の2温度の結果にClausius-Clapeyron式を適用して吸・脱着熱を求めた結果をTable 1に示す。吸着熱 $\Delta H_{ads}$ および脱着熱 $\Delta H_{des}$ はいずれも吸着量の増大に伴って減少すること、同一吸着量条件では脱着熱は吸着熱に比べて大きくそれは吸着量に対応して1.07~1.03倍となりその値は吸着量が増大するにしたがって、大きくなるのがわかる。

### 3.2 異なるゼオライトによるマイクロ波加熱脱着促進効果の比較

ゼオライトDF-9を用いた吸着管入口温度30℃、相対湿度 $RH=40\%$ におけるマイクロ波加熱脱着過程の熱・物質移動挙動は、その一例をFigure 5 (MW:800W, flow rate:3.18m/min)に示すように、前報のゼオライトOXYIV-5の場合と類似の挙動を示した。この挙動は、同条件の繰返実験により良好な再現性を示すことを確認した。しかし、ゼオライトの種類によって、マイクロ波照射加熱による脱着量( $q_{MW}$ )、試料層の温度( $T_{MW}$ )上昇および最高到達温度( $T_{MAX}$ )が異なった。ゼオライトの種類による脱着の相異を比較するため、各ゼオライトの30℃、 $RH=40\%$ における平衡吸着量における平衡吸着量 $q_E$ 、ならびにマイクロ波出力800W、脱着開始15minにおける $q_{MW}$ 、脱着率( $q_{MW}/q_E$ )、 $T_{MAX}$ 、Figure 3の吸着平衡関係を用いて求められる仮想温度脱着量( $q'$ )、仮想熱源温度( $T'$ )およびこれらの値から計算される仮想温度脱着量比 $R_d (= q_{MW}/q')$ 、仮想熱源温度上昇 $T_D (= T' - T_{MW})$ をTable 2に前報のOXYIV-5におけるマイクロ波照射時間15minの結果とあわせて示す。また、ゼオライト試料層の温度上昇速度( $\Delta T/\Delta \theta$ )および脱着速度( $\Delta q_{MW}/\Delta \theta$ )を脱着率( $1 - q_{MW}/q_E$ )に対して整理した図をそれぞれFigure 6およびFigure 7に示す。ここで、 $q'$ 、 $T'$ は前報と同様に以下のように定義される。本実験ではマイクロ波照射により吸着材温度が上昇する。一方、吸着材層入口温度は常に30℃、 $RH=40\%$ (絶対湿度: $H=0.0106\text{kg/kg-air}$ )一定としている。そのため、吸着材層温度が上昇することにより層の相対湿度は低下し、脱着はこの低下した相対

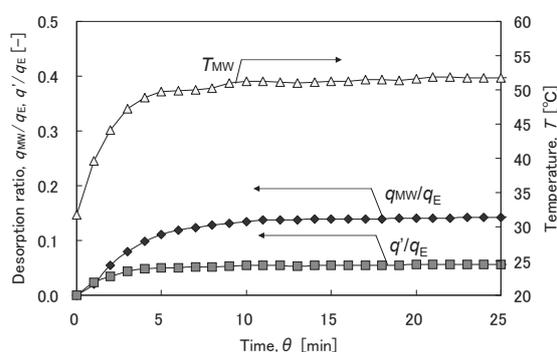


Fig. 5 Desorption ratio and temperature of zeolite DF-9 during MW heating

湿度基準の平衡吸着量まで起こることが予想され、この温度上昇による平衡脱着量の差を $q'$ とした。同様に、マイクロ波照射による脱着量から逆演算を行い $q_{MW}$ に相当する平衡論的に必要な温度を $T'$ とした。なお、この計算では、吸着等温線の温度依存性を考慮して、各ゼオライトの2温度の吸着等温線に基づくClausius-Clapeyron式を適用した。

Table 2およびFigures 6, 7より以下のことが観察される。1)  $q_{MW}$ はDF-9 > OXYSIV-5 > 4Aの順に小さく、4A、OXYSIV-5ではDF-9のそれぞれ0.36倍および0.73倍である。2)  $q_{MW}/q_E$ もまたDF-9 > OXYSIV-5 > 4Aの順である。この値は、OXYSIV-5ではDF-9よりやや小さい程度であるのに対して4Aでは0.54倍となる。3)  $T_{MAX}$ 値はDF-9 > 4A > OXYSIV-5の順である。4)  $R_d$ 値はいずれも1以上を示し、4A、DP-9ではOXYSIV-5の約1.4倍および1.6倍となる。4A、DP-9の $T_D$ 値はOXYSIV-5それぞれ約0.9倍および3.0倍である。5) 温度上昇速度( $\Delta T/\Delta \theta$ )には試料による大きな違いはなく、脱着初期が最大でありその後減衰する。また、脱着初期ではゼオライトの種類によって多少異なるが変化の形状に大きな相違はない。一方、脱着速度は、DF-9、4Aでは $(1-q_{MW})/q_E$ が0.98付近および1.0で最大を示しその後 $(1-q_{MW})/q_E$ の減少に伴って減少する。また脱着速度の最大値および最大脱着速度到達後の脱着速度はDF-9 > OXYSIV-5 > 4Aの順に小さい。

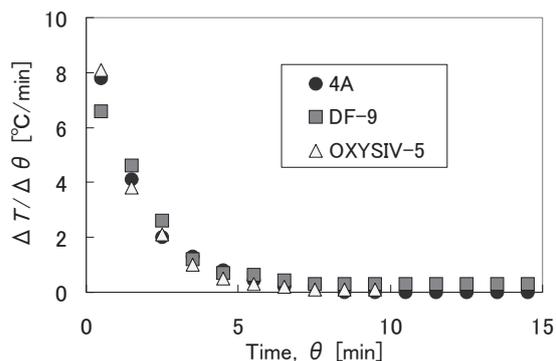


Fig. 6 Rate of temperature rise for adsorption beds

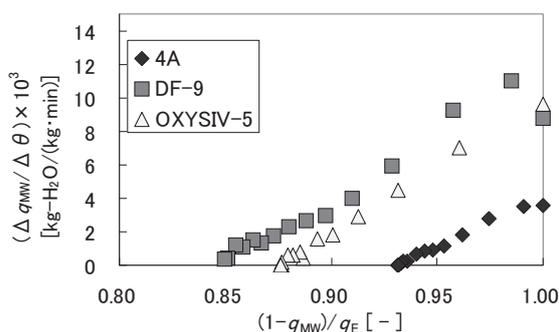


Fig. 7 Relationship between desorption rate and adsorption ratio

Table 2 Amount of desorbed water and temperature rise

zeolite	4A	DF-9	OXYSIV-5
$q_E$ [kg-H <sub>2</sub> O/kg]	0.218	0.322	0.242
$q_{MW}$ [kg-H <sub>2</sub> O/kg]	0.016	0.044	0.032
$q_{MW}/q_E$ [-]	0.074	0.136	0.132
$T_{MAX}$ [°C]	47.8	50.1	46.7
$q'$ [kg-H <sub>2</sub> O/kg]	0.007	0.017	0.019
$T'$ [°C]	62.4	93.7	61.4
$R_d$ [-]	2.22	2.59	1.57
$T_D$ [°C]	13.3	43.6	14.7

上記1)の結果は与条件下の平衡吸着量に対応しており、本実験範囲内では平衡吸着量の小さい吸着材において $q_{MW}$ 値が小さくなることを示している。因みに、DF-9を基準とするとOXYSIV-5における平衡吸着量は0.76倍であり、この値は $q_{MW}$ における0.73倍とほぼ同一である。しかし、4Aの平衡吸着量はDF-9の0.67倍であるのに対して $q_{MW}$ は0.36倍と大きく減少する。これは、マイクロ波加熱による試料の温度上昇速度(Figure 4)の形状および15min後の到達温度に大差がなかったことを考慮すると、本実験範囲内では水蒸気吸着性の支配因子の一つとなる細孔径に影響されていると考えられ、5)の結果で示されるように細孔径0.8nm、1.0nmのDF-9、OXYSIV-5に比べて細孔径0.4nmの4Aの最大脱着速度はそれぞれ約0.33倍および0.38倍であることで裏付けられる。一方、OXYSIV-5に比べてDF-9の細孔径はやや小さいが、この程度の細孔径の範囲では脱着速度はむしろ吸着量に依存し、平衡吸着量が大きい試料において大きくなったと考えられる。

4)の $R_d$ の結果は本実験で使用したゼオライト4A、DF-9においてもOXYSIV-5と同様に過剰脱着効果が発現し、その効果はゼオライトの種類によって異なることを示している。具体的には、4AとOXYSIV-5で比較すると、与実験条件下の4Aの初期吸着量はOXYSIV-5の0.88倍であるのに対して $R_d$ 値は1.4倍である。初期吸着量が小さいにもかかわらず $R_d$ 値が大きいことは細孔径が小さい難脱着性のゼオライトにおいて温風加熱脱着よりマイクロ波加熱による脱着が有利であることを示す。一方、OXYSIV-5に比べて初期吸着量が1.3倍のDF-9では $R_d$ 値は1.6倍となり、マイクロ波加熱が水蒸気を多量に吸着しているゼオライトの脱着により有効であることを示す。つぎに、マイクロ波による過剰脱着効果の発現をより明確に確認するため、Figure 8にOXYSIV-5によるもう一つの実験結果

を示す。本図は吸着管入口温度30℃、RH=40%、マイクロ波出力800Wの脱着およびヒータ加熱脱着における吸着材層温度および脱着量変化を示す。図中の $T_{MW}$ はマイクロ加熱による吸着材層温度である。また、 $T_{HE}$ は $T_{MW}$ と同一の温度上昇を示すようにヒータ加熱を行なった温風供給条件下の吸着材層温度である。図より、 $T_{HE}$ と $T_{MW}$ はほぼ同一曲線を描いている。これに対して、マイクロ波加熱の

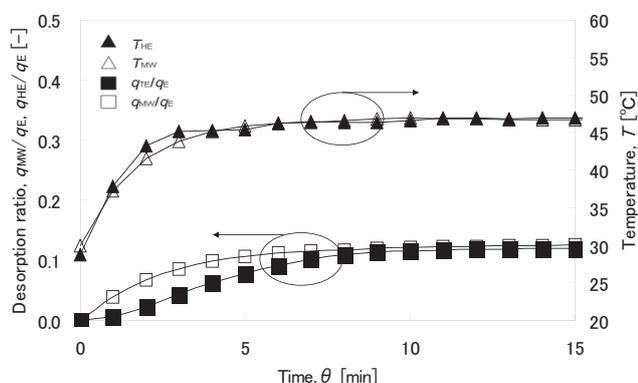


Fig. 8 Desorption ratio and temperature during MW irradiation and heat

脱着率( $q_{MW}/q_E$ )は全時間範囲で温風加熱の脱着率( $q_{HE}/q_E$ )より大きく、それはとくに脱着初期において顕著であることがわかる。これは、マイクロ波加熱が温風温度脱着以上の過剰脱着を生じさせ、それは吸着水が多い条件下で効果的であることを示し、Figure 5の結果を裏付けている。

3)の $T_b$ 値はマイクロ波加熱による熱源温度の低減効果を示す。この値もゼオライトの種類によって異なる。とくにDF-9では4A、OXYSIV-5より30℃程度以上の差があり、マイクロ波加熱が水蒸気高吸着量ゼオライトの脱着に効果的に機能することが分かる。具体的には温風温度93.7℃の脱着が温風温度50.1℃とマイクロ波照射加熱を併用した場合の脱着量に相当し、熱源温度の43.6℃の低減が可能となる。

## 結 言

吸着平衡特性、細孔径の異なる2種のゼオライトについてマイクロ波加熱による水蒸気脱着特性を評価した。その結果、本実験範囲内で以下の結言を得た。

- 1)ゼオライトの種類によらずマイクロ波加熱では温風加熱以上の過剰脱着効果を認めた。この効果は難脱着性および水蒸気大容量吸着性を有するゼオライトにおいて顕著であり、4A型、13X型(DF-9)のゼオライトにおけるマイクロ波加熱による脱着量は温熱加熱による脱着量のそれぞれ2.22倍および2.59倍となる。この効果を温度基準で換算すると温風加熱脱着より13～43℃の高温で脱着させたことに相当する。
- 2)脱着速度は細孔径の大きいゼオライトにおいて大きい。また、細孔径が同程度では吸着量の大きいゼオライトにおいて大きい。
- 3)過剰脱着効果の発現はマイクロ加熱と同一の温風加熱温度上昇の実験結果により確められた。

## 参考文献

- 1) Saitake, M., M. Kubota, F. Watanabe and H. Matsuda: "Enhancement of Water Desorption from Zeolite by Microwave Irradiation" (in Japanese), Kagakukougaku Ronbunshu, 33, 53-57 (2007)
- 2) Yoshida, H: "Handbook on Porous Adsorbents" (in Japanese), pp.190-193, Fuji Technosystem, Tokyo, Japan (2005)
- 3) Koshijima, T., C. Shibata, T. Toishi, K. Norimoto and S. Yamada: Microwave Heating Technology Collection (Maikuroha Kanetsu gijutsu Shusei), p.9, NTS Inc., Tokyo, Japan (2004)

本研究成果の一部は、2010 Inter. Symp. On Next-generation Air Conditioning and Refrigeration Tech., P12-1～P12-8 (2010) (Tokyo, JAPAN) で発表した。