703 多孔質体内における水平平板伝熱面上の熱及び物質移動現象に関する研究

A study on heat and mass transfer phenomena on a horizontal cooled flat plate in a porous medium

正 加藤 泰生 (山口大) 〇学 山口 俊輔 (山口大院)
正 栗間 諄二 (山口大)

Yasuo KATOH, Yamaguchi University, Tokiwadai2-16-1, Ube-city, Yamaguchi
Junji KURIMA, Yamaguchi University
Shunsuke YAMAGUCHI, Yamaguchi University

Key Words : Porous medium, Condensation, Needle probe method, Heat and mass transfer

1. 緒言

多孔質体内における相変化を伴う熱及び物質の輸送現象は、工業的には凝縮・蒸発を伴う熱交換器、蓄熱槽、燃料電池等にみられ、その輸送過程を解明し、改善することは多くの理・工学分野に関連した重要な課題である。とりわけ、多孔質体内における凝縮に関しては、どちらかと言うと理論的研究が多く、実験的研究が少ない。その中でも、伝熱面が垂直平板なもの、角度が付けられた平板のものが多く^[1-2]。そして、これらは凝縮水が滞留していくデシカントローラー除湿機、燃料電池の電極内などのモデルにそのまま使用するには難しい。そこで本研究では、凝縮水の排除を伴わない多孔質体内における水平平板伝熱面上の凝縮液膜の成長過程の可視化観察、探針法を用いた液膜厚さの定量的測定を行い、熱及び物質移動現象が多孔質体内の熱伝達特性に及ぼす影響について検討した。

2. 実験装置及び実験方法

凝縮実験装置の配置を Fig.1 に示す。テストセクション詳細を Fig.2 に示す。熱交換を行う伝熱面温度は 11℃ に保たれている。層内は平均粒子径 1.0[mm] である 2 種類の粒子 (Glass beads, Alumina ball) を 20[mm] の高さまで充填させることにより、20×20×100[mm³]、空隙率 38.0[%] の多孔質体を模擬した。この粒子充填層を上部から見て、一辺 20[mm] の 5 つの正方形領域に区切って考え、この領域内において温度、液膜厚さは均一とし、探針法を用いた多孔質体内の局所液膜厚さの測定を行った。Table.1 に実験条件を示す。また、多孔質体有効熱伝導率 k_{eff} ^[3]、凝縮量 $\dot{m}$ 、熱伝達率 h 、凝縮数 H_L ^[4] の計算には次式を用いる。

$$\frac{k_{eff}}{k_s} = \left(1 - \varepsilon^{\frac{2}{3}}\right) + \frac{\varepsilon^{\frac{2}{3}}}{\left(1 - \varepsilon^{\frac{1}{3}}\right) + \varepsilon^{\frac{1}{3}} \left(\frac{k_p}{k_L}\right)} \quad (1)$$

$$\dot{m} = \rho_L A \bar{U}_L x \quad (2)$$

$$h = \frac{q}{\Delta T_0} = \frac{\dot{m} L}{\Delta T_0} \quad (3)$$

$$H_L = \frac{k_{eff} \Delta T_h}{\mu_L L} \quad (4)$$

ここで、 k_p, k_L : 粒子、水の熱伝導率[W/mK]、 ε : 空隙率、 ρ_L, μ_L : 水の密度、粘度[kg/m³]、 A : 伝熱面積[m²]、 $\bar{U}_L$: 凝縮水平均流速[m/s]、 x : 絶対湿度[kg/kg*]、 L : 凝縮潜熱[J/kg]、 ΔT_0 : 多孔質体表面温度と伝熱面温度の差[℃]、 ΔT_h : 加湿蒸気温度と多孔質体表面温度の差[℃]である。

Table.1 Experimental conditions

Flow rate of humidifying air Q_{Air} [Nl/min]	5 ~ 20
Temperature of humidifying tank T_h [℃]	30 ~ 70
Temperature of heat exchange plate T_c [℃]	11
Relative humidity of humidifying air ϕ [%RH]	99.9
Specific humidity of humidifying air x [kg/kg*]	0.027 ~ 0.27
Kind of particle used	Glass beads, Alumina ball
Measurement area	Area ①~⑤
Measurement interval [s]	During 0~2400 [s] → 300 [s] During 2400~7200 [s] → 600 [s]

Fig.1 Configuration of experimental apparatus

Fig.2 Detail of test section

3. 実験結果及び考察

3-1. 平均液膜厚さ

測定した液膜厚さから平均液膜厚さ $\bar{\delta}$ を計算し、この $\bar{\delta}$ に及ぼす加湿空気の流れの影響を調べるために、流れの強さを表現する指標である無次元数 $F_l^* = Re_l^2 / Gr_l$ を用いて区別した (Fig.3)。

結果、共存対流領域 ($F_l^* < 0.9$) から強制対流領域 (F_l^*

>0.9)への遷移の間では、 δ は上昇する傾向にあった。また、強制対流領域内では δ はほぼ一定の値をとる。これは、共存対流の場合には、まだ多くの不凝縮ガスが凝縮液膜の上に層を作ってしまう、凝縮液膜の発達ができない状態であることに對して、強制対流の場合は、この不凝縮ガスの多くが加湿空気の流れによって強制的に吹き飛ばされるため、凝縮液膜の上にガス層による熱及び拡散抵抗が小さく、凝縮液膜の増加が維持できたものと考えられる。

また、この液膜厚さについて加湿空気温度 T_h が高い場合に限られるのだが、強制対流領域では多少のばらつきが見られた。これは、加湿空気温度が高いほど凝縮液膜の存在厚さが薄い、つまり、加湿空気温度が高いときの凝縮と蒸発の界面位置では蒸発が支配的となり、平衡状態界面位置が下方にシフトしたと考えられる。

粒子特性(熱伝導率 k_p)の影響については、Alumina ballのほうが δ が厚く、さらに強制対流領域での δ のばらつきが小さい結果となった。また、多孔質体表面平均温度を調べると Alumina ball のほうが小さいことが確認できた。凝縮は主流速度、濃度が同じであれば温度差に依存することから、加湿空気温度との差が大きい Alumina ball のほうが液膜が厚く形成されると考えられる。粒子充填層による多孔質体表面の温度については、Alumina ball の熱伝導率 $k_{p,Alumina}$ のほうが高いことより、有効熱伝導率が高くなり、多孔質体表面温度が小さくなり、伝熱面との温度差 ΔT_c が小さくなることを考えられる。

Fig.3 Influence of the flow condition

3-2. 凝縮熱伝達

平均液膜厚さ δ を用いた多孔質体平均有効熱伝導率 $\bar{k}_{eff}$ などから定義される凝縮数 H_L を縦軸に、膜レイノルズ数 Re^* を横軸に取ったグラフを Fig.4 に示す。ここで、 Re^* の代表長さは δ を用いた。この結果より、2種類の粒子とも $1.5 < Re^* < 17$ において、 H_L はほぼ一定値であった。このことより、この Re^* 範囲においては流れの影響を受けない、いわゆる伝導支配の伝熱形態をとるということがわかる。従って H_L の大きさについては、見かけの有効熱伝導率 $\bar{k}_{eff}$ が大きい Alumina ball のほうが大きい値を与える結果となった。

また、凝縮量より定義される熱伝達率 $\bar{h}$ を用いて、平均ヌセルト数 $\bar{Nu}^*$ を求め、 Re^* の平方根で除した無次

元数を縦軸にとり、横軸に顕潜熱比 $C_p \Delta T_c / L$ を取ったグラフを Fig.5 に示す。ここで、 $\bar{Nu}^*$ の代表長さには伝熱面長さ l 、熱伝導率には加湿空気の熱伝導率 k_h を用い、顕潜熱比の物性値には凝縮水の物性値を用いた。結果より、Alumina ball における $\bar{Nu}^*$ 数は顕潜熱比によらず一定であることがわかった。しかし、Glass beads の場合は $C_p \Delta T_c / L > 0.07$ になると $\bar{Nu}^*$ 数が増加傾向にあり、対流の影響が出てくることがわかった。

Fig.4 Relationship between H_L and Re^*

Fig.5 Relationship between $\bar{Nu}^* / (Re^*)^{1/2}$ and $C_p \Delta T_c / L$

3-3. 液膜成長初期領域

凝縮液膜成長初期過程を 0~270[s] の間で調べた。今回は 30 秒毎の計測データしかないため図は省略した。結果、Area③で凝縮した液膜が下流域から上流域 (Area ②→①) へと逆流するような液膜上昇現象が確認された。これは、実験開始前の多孔質体内の不凝縮ガスが流出しないまま加湿空気の剥離流が流入し、その流れの再付着点が Area③あたりにあるのではないかと推測された。

4. 結言

δ に関して、自由-強制対流共存領域においては流れの強さが増すほど δ は増加し、強制対流領域においては、 δ は加湿空気温度に依存することがわかった。凝縮熱伝達に関しては、伝熱形態への流れの影響はほぼ無く、多孔質体有効熱伝導率に依存した伝導支配であること。Glass beads に関しては、 $C_p \Delta T_c / L > 0.07$ になると若干対流の影響が現れてくることがわかった。

また、液膜成長初期状態を知るためにはそのサンプリング周期を短くした実験が必要である。

参考文献

- [1] Shin-Chien Wang et al. : *Int.J.Thermal Sci*, 45, (2005), pp367-377
- [2] M.I. Char et al. : *Int.J.Engug Sci*, 39, (2001), pp897-912
- [3] 国井 大蔵 : 熱的単位操作(上),丸善,(1976)
- [4] 藤井 哲 : 膜状凝縮熱伝達,九州大学出版会,(2005)