

鉛直振動伝熱面上の滴状凝縮熱伝達に関する理論的一検討

白岩寛之

A Theoretical Study of Dropwise Condensation Heat Transfer
on a Vibrating Vertical Surface in the Gravity Direction

Hiroyuki SHIRAIWA

(Accepted August 1, 2016)

Abstract By applying the Le Fevre-Rose theory to dropwise condensation heat transfer on a vibrating heat transfer surface, the quantitative and qualitative changes in the heat transfer characteristics of dropwise condensation on a sine vibrating vertical surface in the gravity direction were investigated theoretically. As a result, when the relational equation of the falling limit droplet diameter of a single droplet on the vibrating vertical surface obtained in past studies of authors was applied to the maximum droplet diameter in the Le Fevre-Rose theory, the theoretical value calculated by the method and the experimental value were roughly matched. Therefore, in a limited extent, the quantitative and qualitative dropwise condensation heat transfer characteristics on the vibrating vertical surface and its increasing rate could be calculated theoretically.

Keywords [Dropwise condensation, Heat transfer characteristic, Vibrating vertical surface, Gravity direction, Theoretical analysis]

1 緒言

近年、省エネルギー、省資源の立場から、空調システムをはじめとする熱エネルギー変換システムに見られる熱交換器の高性能、高効率化が望まれている。現在実用化されている表面式熱交換器において、伝熱表面への気体の凝縮形態は、伝熱表面がぬれやすい場合に生じる膜状凝縮である。一方、伝熱表面がぬれにくい場合には滴状凝縮が見られ、このときの熱伝達率は膜状凝縮の場合よりも著しく大きくなることが明らかにされている。しかし、滴状凝縮における凝縮液滴の挙動は伝熱性能に重要な影響を及ぼすが、その現象は極めて複雑であり、凝縮液滴の挙動と滴状凝縮熱伝達率との定量的な関係についてはいまだ明らかとなっていない。そこで、狭い凝縮伝熱面（以下、凝縮伝熱面を単に「伝熱面」と称する。）の初生液滴および成長過程の凝縮液滴の挙動に関しては、田中の報告¹⁾が見られるが、広い伝熱面

全体における滴状凝縮の熱伝達特性について考える場合、文献²⁾により明らかにされている落下液滴の下部伝熱面の掃除効果および被覆効果等も考慮する必要があり、凝縮液滴の挙動と熱伝達率の関係を定量的かつ厳密に求めることは困難である。

著者らは従前、高い熱伝達率を有する滴状凝縮現象の液滴挙動と熱伝達の関係、および二相・密閉型サーモサイフオンの凝縮部伝熱面への滴状凝縮の適用について、基礎的研究^{3~7)}を継続している。例えば、伝熱面上端部付近の落下液滴の挙動および落下速度等が下部伝熱面の凝縮現象に影響を及ぼし、伝熱面全体の伝熱性能に関して重要な要素となると考えられることから⁸⁾、大気中において鉛直振動板上の単一液滴の落下限界液滴径および落下速度等を、実験および簡単な計算モデルによる諸計算を行うことにより求め³⁾、そこで得られた諸式を用いて、簡単な滴状凝縮のサイクルモデルによる諸計算を行い、比較的小さい伝熱面を重力方向に変位正弦加振した

場合の滴状凝縮における熱伝達特性を定性的に求めた⁴⁾。また、二相・密閉型サーモサイフオンの熱輸送特性に及ぼす凝縮形態の影響について実験的に検討し⁶⁾、さらに滴状凝縮の熱伝達理論として Le Fevre-Rose の理論⁹⁾を用いることにより、膜状凝縮を滴状凝縮に変更することによる伝熱促進割合を概算的に評価する簡易手法について理論的に検討した⁷⁾。

本研究では、既報⁷⁾において用いた滴状凝縮熱伝達に関する Le Fevre-Rose の理論を振動する伝熱面上の滴状凝縮熱伝達に適用し、重力方向に変位正弦加振した鉛直伝熱面（以下、「鉛直振動伝熱面」と称する。）上の滴状凝縮熱伝達特性（本研究では熱流束、熱伝達率を指す。以下同じ。）の定量的および定性的変化を理論的に検討する。具体的には、前述のように、伝熱面上端部付近の落下液滴の挙動が滴状凝縮熱伝達特性の重要な要素となることから、既報³⁾で得られた鉛直振動平板上の単一液滴の落下限界液滴径の関係を Le Fevre-Rose の理論における最大液滴径に適用することにより、鉛直振動伝熱面上の滴状凝縮熱伝達特性を理論的に算出する。そして、実験値との比較、検討を行う。

2 鉛直振動伝熱面上の滴状凝縮熱伝達理論

温度の不均一や変動のない静止した鉛直伝熱面上における、不凝縮ガスを含まない蒸気の滴状凝縮熱伝達に関する Le Fevre-Rose の理論⁹⁾（以下の計算において、液滴の形状は半球欠と仮定する。）において、一個の液滴に関して、液滴の底面を通過して伝熱面に向かう熱流束 q_B と伝熱面過冷度 $\Delta T_C (= T_S - T_C, T_S$: 飽和蒸気温度、 T_C : 伝熱面温度) の関係は式(1)で表される。

$$q_B = \frac{\Delta T_C - \frac{2\sigma v_l}{r\Gamma}}{\frac{K_1 r}{\lambda T_S} + \frac{K_2}{q_2}} \quad (1)$$

ここで、 σ は凝縮液の表面張力、 v_l は凝縮液の比体積、 r は液滴半径、 Γ は潜熱、 λ は凝縮液の熱伝導率であり、 q_2 は式(2)で表される。

$$q_2 = \frac{\Gamma^2}{v_v} \sqrt{\frac{2\pi}{RT_S} \frac{\kappa - 1}{\kappa + 1}} \quad (2)$$

ここで、 v_v は蒸気の比体積、 κ は比熱比、 R はガス定数である。また、式(1)の K_1 は液滴中での温度降下 ΔT_d と q_B を関係づける定数であり、式(3)で定義される。

$$q_B = \frac{\lambda}{K_1 r} \Delta T_d \quad (3)$$

式(3)では、半径 r の液滴を等価的な厚み $K_1 r$ に置き換えることを意味しており、液滴を同一体積の直円柱と仮定した場合、直円柱の高さは $2r/3$ となることから、 $K_1 = 2/3$ となる。さらに、式(1)の K_2 は液滴底面と液滴表面との面積比および滴状凝縮の促進剤層の熱抵抗に関連する係数であり、促進剤の種類によって Table 1¹⁰⁾ のようになることが知られている。

Table 1 The relationship between a promoter of dropwise condensation and K_2

| Promoter of dropwise condensation | K_2 |
|-----------------------------------|-------|
| Diocetadecyl disulphide | 1.046 |
| Primary amine | 1.065 |
| Dodecane silane | 2.255 |
| Montan wax | 1.162 |
| Diocetadecyl disulphide | 0.937 |
| Montanic acid | 0.502 |
| Dibenzil disulphide | 2.122 |
| Oleic acid | 2.155 |

次に、伝熱面上における液滴の大きさの分布について考える。伝熱面のうち、半径が r から r_{max} （最大（または離脱）液滴半径）までの液滴で覆われている面積割合を α とすると、 α は式(4)で表される。

$$\alpha = 1 - \left(\frac{r}{r_{max}} \right)^{1/n} \quad (4)$$

ここで、 n は定数であり、理論的に $n \geq 1.4$ となる。なお、鉛直振動伝熱面上における式(4)中の最大液滴半径 r_{max} は、著者らの研究³⁾において得られた落下限界液滴半径で与えられ、式(5)で表される。

$$r_{max} = r_0 \left[\frac{g + A(2\pi f)^2}{g} \right]^{-1/4} \quad (5)$$

ここで、 r_0 は凝縮液滴の離脱液滴半径、 g は重力加速度、 A は振幅、 f は振動数である、ただし、 r_0 は無加振時に液滴の自重によって離脱する限界半径を表し、液滴を半球欠と仮定した場合、理論的⁸⁾に $r_0 = 1.1 \times 10^{-3} \text{m}$ となり、実験¹¹⁾においても同様の結果が報告されている。

以上より、一個の液滴に関する熱流束の関係式(1)を用い、伝熱面上の液滴の大きさの分布を考慮した場合の伝熱面全体における平均熱流束 q_C は式(6)となる。

$$q_C = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\frac{\Delta T_C}{T_S} - \frac{2\sigma_l}{r\Gamma}}{\frac{K_1 r}{\lambda T_S} + \frac{K_2}{q_2}} \left[\frac{1}{n} \left(\frac{r}{r_{\max}} \right)^{(1-n)/n} \right]_{r_{\max}} dr \quad (6)$$

ここで、 r_{\min} は最小液滴半径であり、理論的に式(7)で表される。

$$r_{\min} = \frac{2\sigma_l}{\Gamma} \frac{T_S}{\Delta T_C} \quad (7)$$

上記 $n \geq 1.4$ の関係より、簡単のため $n = 2$ として式(6)を解くと、正の実数解、すなわち鉛直振動伝熱面上の滴状凝縮の平均熱流束 q_C は式(8)となる。

$$q_C = \frac{B+C}{D} \quad (8)$$

ここで、式(8)中の B 、 C 、 D はそれぞれ、式(9)~(11)で表される。

$$B = 2q_2\sigma_l\sqrt{K_1K_2T_S\lambda}(\sqrt{r_{\min}} - \sqrt{r_{\max}}) \quad (9)$$

$$C = \sqrt{q_2r_{\max}r_{\min}}(2K_1q_2\sigma_l + K_2\Gamma\lambda\Delta T_C) \times [\arctan(E\sqrt{r_{\max}}) - \arctan(E\sqrt{r_{\min}})] \quad (10)$$

$$D = K_2^{3/2}r_{\max}\Gamma\sqrt{K_1r_{\min}T_S\lambda} \quad (11)$$

式(10)中の E は式(12)で表される。

$$E = \sqrt{\frac{K_1q_2}{K_2T_S\lambda}} \quad (12)$$

以下、本章で示した諸計算式を用い、鉛直振動伝熱面上の滴状凝縮熱伝達特性を理論的に算出し、実験値との比較、検討を行う。なお、本計算においては、上述から $K_1 = 2/3$ とし、 K_2 については、Table 1 中の滴状凝縮促進剤をオレイン酸とした場合の $K_2 = 2.155$ を用いる。

3 結果および考察

3.1 熱流束および熱伝達率

Fig. 1 は、振幅 $A = 2.5 \text{mm}$ における、鉛直振動伝熱面上の滴状凝縮の平均熱流束 q_C と伝熱面過冷度 ΔT_C の関係について、振動数 f をパラメータとして示す。なお、図中の各太線は平均熱流束 q_C の理論値であり、2 章で示した諸計算式および飽和蒸気温度 $T_S = 100^\circ\text{C}$ の水（液体または気体）の物性値を用いて求める。また、図中の各プロットは平均熱流束 q_C の実験値、細実線は実験値の累乗近似曲線 ($q_C = a\Delta T_C^b$) であり、無加振において $a = 320.9$ 、 $b = 0.2786$ 、相関係数 0.9816、振動数 $f = 5 \text{Hz}$ において $a = 265.9$ 、 $b = 0.3865$ 、相関係数 0.9728、振動数 $f = 10 \text{Hz}$ において $a = 201.6$ 、 $b = 0.6045$ 、相関係数 0.9053、振動数 $f = 15 \text{Hz}$ において $a = 284.3$ 、 $b = 0.5226$ 、相関係数 0.9740 である。以下、実験の概略について簡単に記す。実験には、不凝縮ガスの流入を抑制するため、内部の水蒸気圧力をゲージ圧で約 490 Pa（飽和蒸気温度約 100°C ）に保った凝縮器（一辺 250mm の立方体型のアルミニウム製容器）内に伝熱板（一辺 25mm の立方体型の銅製ブロック）を設置したものをを用いた。伝熱板はスライドベアリングを通る 4 本の支持棒により固定され、偏心クランク機構をモータにより往復運動させることにより、重力方向に振動させる仕組みとした。そして、伝熱板の一面（伝熱面）をボイラから気水分離器を通過させ凝縮器内に流入させた水蒸気にさらし、その背面に冷却水を流して熱交換を行い、各部の温度を測定した。伝熱面は 2000 番の紙ヤスリで磨いた後、アルコールで脱脂乾燥させ、その表面に滴状凝縮促進剤としてオレイン酸を吸着させることにより、滴状凝縮面とした。実験条件は、振幅 $A = 2.5 \text{mm}$ とし、振動数 f および冷却水流量を種々に変化させた。なお、実験の詳細、および実験値の算出方法等については文献⁴⁾に記載されている。

Fig. 1 より、いずれの振動条件においても、伝熱面過冷度 ΔT_C の増加に対して平均熱流束 q_C の理論値は増加している。そして、振動数 f の増加に対して平均熱流束 q_C の理論値は増加している。これらの定性的傾向は、平均熱流束 q_C の実験値についても概ね

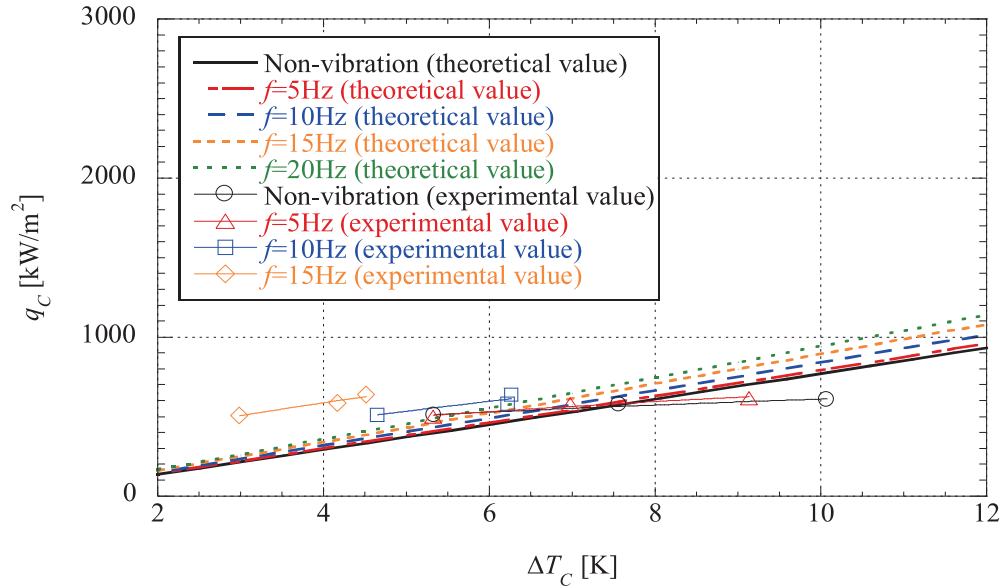


Fig. 1 The relationship between the subcooling ΔT_C of the heat transfer surface and the average heat flux q_C

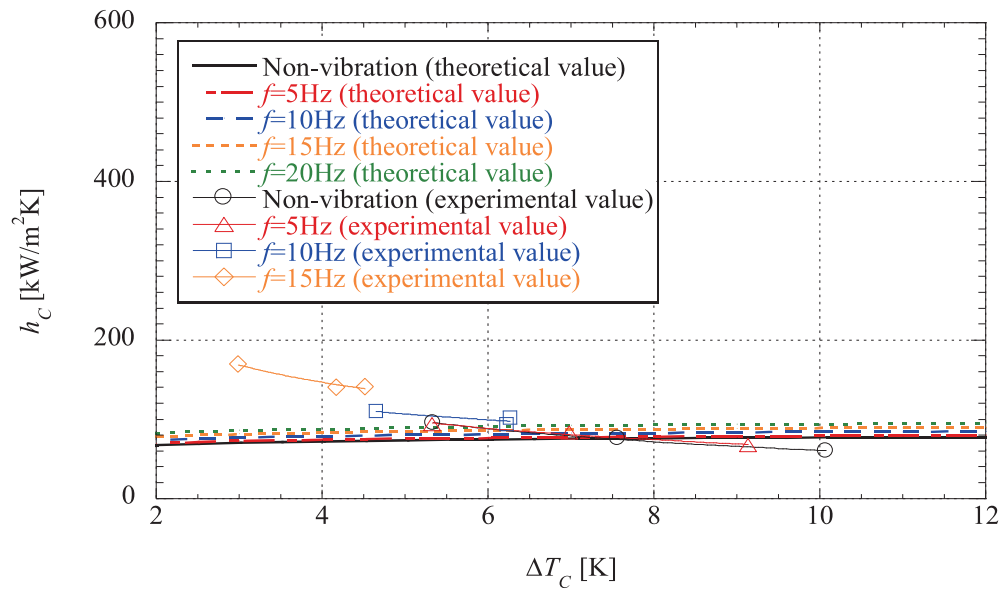


Fig. 2 The relationship between the subcooling ΔT_C of the heat transfer surface and the average heat transfer coefficient h_C

同様である。また、平均熱流束 q_C の理論値と実験値を比較すると、定量的に近い値を示しているものの、振動数 f や伝熱面過冷度 ΔT_C の変化に対する傾向に差異も見られる。引き続き熱伝達率について検討する。

Fig. 2 は、振幅 $A = 2.5\text{mm}$ における、鉛直振動伝熱面上の滴状凝縮の平均熱伝達率 h_C と伝熱面過冷度 ΔT_C の関係について、振動数 f をパラメータとして示す。なお、図中の各太線は平均熱伝達率 h_C の理論

値、各プロットは実験値であり、式(13)より求める。

$$h_C = \frac{q_C}{\Delta T_C} \tag{13}$$

また、図中の細実線は実験値の累乗近似曲線 ($h_C = c\Delta T_C^d$) であり、無加振において $c = 320.9, d = -0.7213$ 、相関係数 0.9975、振動数 $f = 5\text{Hz}$ において $c = 265.9$ 、

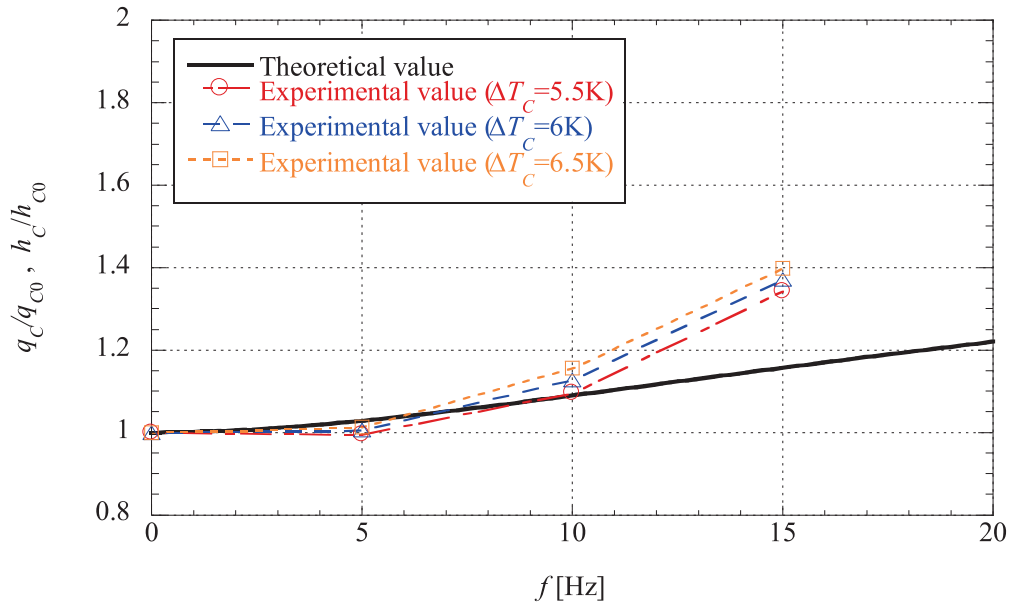


Fig. 3 The relationship between the frequency f and the increasing rate q_c/q_{c0} , h_c/h_{c0}

$d = -0.6134$ 、相関係数 0.9890、振動数 $f=10\text{Hz}$ において $c = 201.6$ 、 $d = -0.3954$ 、相関係数 0.8468、振動数 $f = 15\text{Hz}$ において $c = 284.3$ 、 $d = -0.4773$ 、相関係数 0.9772 である。

Fig. 2 より、上述の平均熱流束 q_c の場合と同様に、いずれの振動条件においても、伝熱面過冷度 ΔT_c の増加に対して平均熱伝達率 h_c の理論値は増加している。そして、振動数 f の増加に対して平均熱伝達率 h_c の理論値は増加している。これらの定性的傾向は、平均熱伝達率 h_c の実験値についても概ね同様である。また、平均熱伝達率 h_c の理論値と実験値を比較すると、定量的に近い値を示しているものの、振動数 f や伝熱面過冷度 ΔT_c の変化に対する傾向に差異も見られる。

以上から、Le Fevre-Rose の理論における最大液滴径に鉛直振動平板上の単一液滴の落下限界液滴径の関係式を適用し、鉛直振動伝熱面上の滴状凝縮熱伝達特性の理論値に算出することにより、実験値との概ね良好な一致が確認された。しかし、理論値と実験値の間には、振動数や伝熱面過冷度の変化に対する傾向に差異も見られた。これは、理論において振動伝熱面上の液滴に作用するせん断力等の影響が考慮されていないこと等が原因として考えられるが、今後のさらなる検討が望まれる。

3.2 振動による熱伝達特性の増加率

Fig. 3 は、振幅 $A = 2.5\text{mm}$ における、同一の伝熱面過冷度 ΔT_c における伝熱面の加振による平均熱流

束および平均熱伝達率の増加率 q_c/q_{c0} 、 h_c/h_{c0} (q_{c0} : 無加振時の平均熱流束、 h_{c0} : 無加振時の平均熱伝達率) と振動数 f の関係を示す。なお、図中の実線は q_c/q_{c0} 、 h_c/h_{c0} の理論値、各プロットは実験値である。ただし、 q_c/q_{c0} 、 h_c/h_{c0} の実験値は、Fig. 1、Fig. 2 で求めた各振動条件における実験値の累乗近似曲線の関数に、任意の伝熱面過冷度 ΔT_c を代入して得られた値を用いて求め、Fig. 1、Fig. 2 の各振動条件において伝熱面過冷度 ΔT_c の範囲がより多く重複している伝熱面過冷度 $\Delta T_c = 5.5\text{K}$ 、 6K 、 6.5K の場合を示している。理論値、実験値のいずれにおいても、同一の伝熱面過冷度 ΔT_c において振動条件の影響を評価しているため、 q_c/q_{c0} と h_c/h_{c0} は同一の値となる。

Fig. 3 より、 q_c/q_{c0} 、 h_c/h_{c0} の理論値は伝熱面過冷度 ΔT_c によらず、振動数 f の増加に対して同一の増加割合を示している。それに対し q_c/q_{c0} 、 h_c/h_{c0} の実験値は、伝熱面過冷度 ΔT_c の増加に対して、振動数 f の増加に対する増加割合が大きくなることがわかる。これは、理論値においては伝熱面過冷度の変化による液滴の初生や成長速度の影響等を考慮していないが、実験値においてはこれらの影響が含まれており、これが振動に対する液滴挙動に影響を及ぼすためではないかと考えられる。また、 q_c/q_{c0} 、 h_c/h_{c0} の理論値と実験値を比較すると、振動数 $f = 10\text{Hz}$ までは理論値と実験値は概ね同様の増加傾向を示し、比較的良好的な一致が見られる。しかし、振動数 $f = 15\text{Hz}$ では理論値より実験値が大きな値を示している。このことから、比較的低振動数においては、Le

Fevre-Rose の理論の最大液滴半径に式(5)の落下限界液滴半径を適用することの妥当性が示され、伝熱面の加振により液滴に作用する慣性力による落下限界液滴径の変化が、熱伝達特性の促進の支配的要因であることが確認された。一方、振動数が増加していくと、液滴に作用する慣性力のみならず、液滴と蒸気間のせん断力の影響が無視できなくなり、実験における最大液滴半径が理論における式(5)の落下限界液滴半径よりも小さくなり、実験値と理論値の差異につながったものと考えられる。

4 結言

本研究では、鉛直振動伝熱面上の滴状凝縮熱伝達特性について、滴状凝縮熱伝達に関する Le Fevre-Rose の理論の最大液滴径に鉛直振動平板上の単一液滴の落下限界液滴径の関係式を適用することにより、理論的に検討を行った。その結果、本研究範囲において以下の結論を得た。

- (1) 理論値において、伝熱面過冷度および振動数の増加に対して平均熱流束および平均熱伝達率は増加し、これらの定性的傾向は実験値と一致した。
- (2) 平均熱流束および平均熱伝達率の理論値と実験値は、定量的に近い値を示した。
- (3) 理論値において、鉛直振動伝熱面上の平均熱流束および平均熱伝達率の増加率は伝熱面過冷度によらず、振動数の増加に対して同一の増加割合を示した。しかし、実験値においては、伝熱面過冷度の増加に対して、これらの増加率の振動数の増加に対する増加割合は大きくなることがわかった。
- (4) 比較的低振動数において、鉛直振動伝熱面上の平均熱流束および平均熱伝達率の増加率の理論値と実験値は、比較的良好な一致が見られ、伝熱面の加振により液滴に作用する慣性力による落下限界液滴径の変化が、熱伝達特性の促進の支配的要因であることが確認された。

本研究により、滴状凝縮熱伝達に関する Le Fevre-Rose の理論の最大液滴径に鉛直振動平板上の単一液滴の落下限界液滴径の関係式を適用することにより、限られた範囲ではあるが、定量的かつ定性的に鉛直振動平板上の滴状凝縮熱伝達特性およびその増加割合を理論的に予測することが可能であることがわかった。しかし、本理論において、液滴と蒸気間のせん断力の影響、および伝熱面過冷度の変化による液滴の初生や成長速度の影響等が考慮できていないこと、また滴状凝縮の熱伝達理論として用いた Le Fevre-Rose の理論において、各種定数の理論的な導

出方法が未確立であること等、さらに精度の高い理論的解析を行うための課題も存在するため、今後のさらなる検討が望まれる。

参考文献

- 1) 田中宏明：滴状凝縮に関する理論的研究，日本機械学会論文集，Vol.39，No.326，pp.3099-3113，1973
- 2) 棚沢一郎：伝熱工学の進展，Vol.4，pp.229-325，養賢堂，1976
- 3) 白岩寛之，細川力：重力方向に振動する鉛直平板上の単一滴の挙動，空気調和・衛生工学会論文集，No.92，pp.93-99，2004
- 4) 白岩寛之，細川力：滴状凝縮における鉛直振動伝熱面上の熱伝達特性，混相流研究の進展，Vol.1，pp.135-142，2006
- 5) 白岩寛之，細川力：Fundamental study on heat transfer characteristics of two-phase closed thermosyphon in lower oscillation (under dropwise condensation in smaller input heat)，空気調和・衛生工学会論文集，No.111，pp.19-27，2006
- 6) 白岩寛之，細川力，冨田雅史：二相・密閉型サーモサイフオンの凝縮形態による熱輸送特性，空気調和・衛生工学会論文集，No.119，pp.1-6，2007
- 7) 白岩寛之：滴状凝縮サーモサイフオンの熱輸送特性に関する理論的検討，日本機械学会論文集 B 編，Vol.78，No.787，pp.672-679，2012
- 8) 細川力，河合彊，藤尾暁彦，小松源一：水平円管外面の滴状凝縮熱伝達，日本機械学会論文集 B 編，Vol. 51，No.472，pp.4055-4062，1985
- 9) 棚沢一郎：伝熱工学の進展，Vol.4，pp.288-293，養賢堂，1976
- 10) 棚沢一郎：伝熱工学の進展，Vol.4，p.292，養賢堂，1976
- 11) 宇高義郎，棚沢一郎：水蒸気の滴状凝縮における凝縮曲線の測定（続報），日本機械学会論文集 B 編，Vol. 47，No.420，pp.1620-1628，1981