油・冷媒混合液中の水平細線上の沸騰熱伝達*

門出 政則**, Erich HAHNE***

Boiling Heat Transfer on a Fine Horizontal Wire
in Refrigerant-Oil Mixtures

by Masanori MONDE and Erich HAHNE

An experimental study has been made of boiling heat transfer on a fine horizontal wire in refrigerant-oil mixtures with a wide range of pressures up to 24 bar. The effect of oil on boiling heat transfer becomes more marked in a high heat flux region. Especially, in the case of R 115 with a small solubility for oil, an anomalous phenomenon appears that the heat transfer coefficient contrarily decreases with increasing the heat flux beyond a certain heat flux which depends on the system pressure as well as the oil concentration although it is below the critical heat flux. In the R 11-oil mixtures, the effect of oil is contrary depending on the system pressure, that is, the oil enhances the heat transfer at the oil concentration below 2 or 3 wt % for $p=2$ bar, but deteriorates it over the experimental range of the oil concentration for $p=1$ and 5 bar. The intensity of the effect of oil on the boiling heat transfer depends on the type of oil.

Key Words: Phase Change, Boiling, Boiling Heat Transfer, Binary Mixture, Refrigerant-Oil Mixture

1. 緒 言

純粋液体(単成分)の沸騰熱伝達については、広範に研究が行われており、かつ種々の液体に対する沸騰熱伝達の一般無次元整理式も数多く提案されている。

一方、2成分系の沸騰熱伝達については石油化学や冷凍工学への応用に関連して注目されてきているが、この場合沸騰熱伝達は質量拡散過程と密接に連成しているため、純粋液体の場合と比較して非常に複雑になってくる。特に、油(運転中に溶け込む潤滑油)と冷媒との混合液については、油の物性値や油の混入に伴う混合液の物性値の変化が十分わかっていないため、油・冷媒混合液の沸騰熱伝達の研究は非常に困難な状況下にある。

森ら⁽¹⁾は系の飽和温度を0°Cに設定し、4種類の試験液体 R 22 (圧力 $p=4.96$ bar), R 502($p=5.71$ bar), R 115($p=4.42$ bar) と R 11 ($p=0.402$ bar) を用いて管群に対する沸騰熱伝達率を測定し、R 22 と R 502 については、油の重量濃度が数 wt % という小さい範囲

では熱伝達率が、冷媒のみの場合より促進されること、R 11 については6 wt %濃度まで油の影響がなかったこと、また R 115 については油の濃度の増加に伴って急激に減少することを報告している。坂口・山崎⁽²⁾は、大気圧下で油・R 113 の混合液を用いて垂直円管周りの沸騰熱伝達率を測定し、熱伝達率が油の濃度の増加に伴って減少すること、さらにその結果に対し濃度差と温度差とが比例するという仮定に基づく理論解析を行っている。Jensen-Jackmann⁽³⁾は、大気圧下の水平円管に対する油・R 113 の混合沸騰熱伝達率を実測すると同時に熱伝達と質量拡散とを連成させたモデルに基づいた理論解析を行い、両者の結果がほぼ一致することを報告している。Chongrungrong-Sauer⁽⁴⁾は油・冷媒の混合沸騰熱伝達の実験データ⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾を集積し、有次元の整理式を提案し、その式で熱伝達率が16%以内で予測できることを報告している。

Burkhardt⁽⁹⁾は、大気圧下で油・R 11 の混合沸騰熱伝達の実験を行い、熱伝達率は油種と密接に関連することを指摘している。Stephan-Mitrović⁽¹⁰⁾は、油・冷媒の混合沸騰熱伝達に対し3種類のモデルを提案しているが、具体的な検討には至っていない。Elle⁽¹¹⁾は、流下液膜流における油・R 11 の混合沸騰熱伝達率を

* 昭和60年11月15日 第934回講演会において講演、原稿受付 昭和60年5月15日。

** 佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町1)。

*** Stuttgart Univ., ITW (Pfaffenwaldring 6, 7000, Stuttgart 80 FRG)。

測定し、濃度が2.8 wt %のとき熱伝達率が最大になることを報告しているが、その特異性を説明するにはよりいっそうの研究が必要であると述べている。

油・冷媒の混合沸騰熱伝達に関する従来の研究は、ほとんど圧力が6 bar以下の範囲であるため圧力の影響、すなわち圧力の増加に伴う混合液の物性値の変化が熱伝達にどのような影響を及ぼすかについての検討は不十分であり、さらに油・冷媒の種々の混合液に対する系統的な実験もまだ十分とは言えない。また、冷媒あるいは有機液体相互の混合沸騰熱伝達の研究は、油・冷媒の混合液の場合に比較して実験的⁽¹²⁾⁽¹³⁾にも理論的⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾にも広く行われているが、その結果が油・冷媒の混合液に対してそのまま適用できるかどうか不明である。

そこで本研究では、まず油・冷媒の混合沸騰熱伝達についての基本的理解を深めるために、水平細線を用いて広い圧力範囲で実験を行い、混合沸騰熱伝達の特性について報告する。

記 号

C : 油の重量濃度 wt %

d : 線径 m

p : 系の圧力 bar

q : 熱流束 W/m^2

T_b : 液体のバルク温度 $^{\circ}C$

T_{sat} : 飽和温度 $^{\circ}C$

T_w : 加熱面の表面温度 $^{\circ}C$

α : 熱伝達率 $W/(m^2 \cdot K)$

λ : 熱伝導率 $W/(m \cdot K)$

2. 実験装置と実験方法

2-1 実験装置 図1に実験装置の概略を示す。加熱面は、試験容器①内に張られた白金線(直径 $d=0.3$ mm, 長さ $l=67$ mm)に直接直流電流を通電することによって得られる。白金線の表面温度 T_w は、白金線の抵抗温度係数⁽¹⁶⁾を用いると式(1)のように与えられる。

$$T_w = 3383.33 - 1304.1\sqrt{7.7308 - R_w/R_0} - 0.125qd/\lambda \quad (1)$$

ここで、抵抗 R_0 は $0^{\circ}C$ における抵抗値、 R_w は白金線の平均温度に対する抵抗値である。また式(1)の右辺第3項は白金線内部での発熱に対する補正項である。

また白金線の表面熱流束 q は、白金線を通る電流とその電圧降下を測定することによって計算した。

試験容器①は、恒温浴槽内②内に沈められており、外部の温度変化の影響を受けないようになっている。恒温浴槽内の液体の温度は、最高0.01 Kまで温度制御可能なサーモスタットにより制御されているので、試験容器内の液温も静的には ± 0.02 Kの範囲で、また白金線加熱時でも ± 0.05 Kの範囲(容器内の温度測定点M2の位置で)一定に保たれている。試験液体の温度は、容器内の3本の熱電対によって測定されているが、熱流束の増加に伴って液体内の半径方向温度こう配も大きくなり、測定点の温度も異なってくる。しかし、その温度差は、実験範囲内($q=1.8 \times 10^5$ W/m²以下)で約0.1 K以下であったので、中央位置の熱電対M2で測定された温度を液体の代表温度すなわちバルク温度 T_b として採用した。そして、Gibbsの相律によれば、単成分が圧力一定のもとに気液二相共存している熱平衡状態では、このバルク温度がちょうどその液体の飽和温度になる。ところが、2成分(例えば、油・冷媒)の混合液が気液二相で共存する場合、飽和温度は圧力と濃度の関数となる。混合液の飽和温度は、圧力一定の条件下で揮発性の低い成分の濃度を増加させると、揮発性の高い成分の飽和温度よりも徐々に上昇することが知られている。Burkhardt⁽⁹⁾の実験によれば、R 11と油1あるいは油2の混合液に対し、油の濃度の増加に伴う飽和温度の上昇は大気圧の条件下で、その濃度が10 wt %のときたかだか1 Kであることが報告されている。

他方、バルク温度一定の条件下に油の濃度を増加さ

1. Pressure vessel 2. Insulated tank 3. Heating element(wire) 4. Copper connecting plate 5. Glass window 6. Tube with thermocouples 7. Storage tank 8. Thermostat 9. Cooler 10. Piston pump 11. Thermocouple selector 12. Precision resistance 14. Multiple precision switch 15. Digital volt meter 16. Line voltage meter 17. Thermocouple selector 18. Reference voltage adjuster 19. Galvanometer

図1 実験装置全体図

せる場合、混合液の飽和圧力は減少するはずであるが、その減少量については混合液の相平衡線図あるいは各濃度に対する飽和圧力-温度線図が得られていないので不明である。そこで、本実験では混合液に対する飽和温度の上昇を無視し、混合液のバルク温度を冷媒の飽和温度に等しいと仮定し、そのときの飽和圧力を系の代表圧力とした。

熱伝達率 α は、 $\alpha = q / (T_w - T_b)$ から算出した。

また、冷媒と油の均質な混合液を得るために補助容器⑦を用いて、混合液を試験容器と補助容器との間で2~3回激しく往復させるという方法を用いた。油の重量濃度 C は、封入した冷媒の重量をあらかじめ測定しておき、添加した油の重量と冷媒の重量から計算した。ところで、R11と油が均質な混合液になっているかどうかを確認するため、密度測定器（測定精度 10^{-4} g/cm^3 ）を用いて、濃度 10 wt % 以上の混合液に対してサンプリングを行い、その測定密度から逆算された重量濃度と前者の濃度を比較した結果、密度測定器から算出された濃度のほうが、相対値で常に3~4%高くなった。これは、サンプリング時あるいは測定中にR11が蒸発したために高くなったものと思われる。したがって、上記方法で得られた混合液は、ほぼ均質な状態になっているものと考えられる。

2.2 実験方法 試験容器および補助容器内のガスを真空引きした後、既知量の冷媒を充てんする。試験液体の温度を恒温槽内の液温を調整することによって一定温度に保つ。それから、白金線への電気入力すなわち熱流束を段階的に最高 $q = 1.8 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ まで増加し、再び段階的に減少させた。各測定は、各々の熱流束に対して白金線の温度が一定になったことを確認した後、行われた。実験は、まず初めに冷媒のみの場合について行われ、その後適量の油を添加しすべ

ての熱流束に対する測定を終了後、再び油を適量添加するという方法で最高 30 数 wt % まで繰返し行われた。また、油・冷媒の混合液に対する実験を完了した後、再び冷媒のみの実験を行いデータの再現性についても検討した。

本研究で行われた実験範囲を表1に示す。

3. 実験結果

3.1 R11とR115の熱伝達率 図2は、圧力 $p = 1, 2 \text{ bar}$ と 5 bar における R11 の α - q の関係を示す。図2中の記号○、●と◇以外の記号、例えば□、■や▽は、同一油に対する一連の実験を終了後、再びR11のみを封入して行った実験データを示す。また黒塗り記号は、熱流束を減少したときに測定されたデータを示す。なお、図2中の実直線は、 α - q データを結ぶ直線である。

図2から、熱流束の増加に伴って自然対流から核沸騰に急に遷移し、その後熱流束を $q = 1.8 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ まで増加した後、再び熱流束を減少させると核沸騰から滑らかに自然対流に移ることがわかる。次に、図2中の記号○、□や▽の α - q データを比較すると、本実験の沸騰現象は非常に再現性のよいことがわかる。なお、白金線を限界熱流束以上に加熱後、再び同様な実験を行ったところ、冷媒の熱分解によって白金線が汚損されていたため、データの再現性が非常に悪くなったことを参考までに記しておく。

図2中の一点鎖線は、西川ら⁽¹⁷⁾の提案した冷媒に対する核沸騰熱伝達の高熱流束域に対する実用簡易式（表面条件の影響を表す係数 $f_s = 1$ ）を示す。また図2中の破線は、大気圧下の円形平板（直径 $d = 120 \text{ mm}$ ）上の R11 に対する核沸騰熱伝達⁽⁹⁾を示す。一般的には、細線の核沸騰熱伝達率は平板の場合より高くなることが報告⁽¹⁸⁾されているが、白金線表面が滑らかなために平板の熱伝達率よりも低くなったものと推測される。また西川らの簡易式において、表面条件の係数 f_s を $f_s = 0.58$ （西川らが、Grigull ら⁽¹⁹⁾の水平白金線に

図2 α - q の関係 (R11)

表1 実験範囲

Test liquid	R11		R115
Oil	Oil 1 (Naphthenbasis)	Oil 2 (Synthetic)	Oil 1
Pressure (bar)	1, 2, 5	1, 2, 5	5, 10, 18, 24
Oil mass fraction(%wt)	0 - 35	0 - 31	0 - 2
Heat flux (W/m²)	3.2×10^3 - 1.8×10^5	3.2×10^3 - 1.8×10^5	1.6×10^3 - 1.3×10^5
Diameter of wire (mm)	0.3	0.3	0.3
Material	Platinum	Platinum	Platinum

に対する実験結果から推定した値)とすると、その予測値は図2中の二点鎖線のようにになる。この二点鎖線と本実験データを比較すると $p=1$ barと2 barについては、 $f_s=0.58$ を使用した簡易式とかなりよく一致していることがわかる。

次に図3は、R115の圧力 $p=5, 10, 18, 24$ barにおける α - q の関係を示す。図3中の一点鎖線は、西川らの簡易式において $f_s=0.58$ を代入して得られた予測値を示す。

図3から、 $p=10$ bar以下のデータについては予測値のほうが全体的に25%程度高くなっているが、一方 $p=18$ barと24 barについては両者に大きな相違があり、本実験の α - q データに対して西川らの簡易式は適用できないようである。

冷媒に対する従来の整理式の間にもかなりのばらつきがあり、さらに本実験結果と西川らの簡易式を比較しても多少のばらつきが存在している。そこで、混合液の沸騰熱伝達に及ぼす油の影響は、本実験で得られた冷媒のみの α - q 曲線に基づいて検討することにする。

図3 α - q の関係 (R115)

図4 油1とR11混合液の α - q の関係

3.2 α - q 曲線に及ぼす油の影響 図4と図5は、系圧力 $p=2$ barにおける油1と油2をそれぞれR11に混合したときの α - q の関係を示す。また、図6は、 $p=5, 10$ barにおけるR115と油1の混合液に対する α - q の関係である。なお、実験はR11の場合 $p=1, 5$ bar, R115の場合 $p=18, 24$ barについても行われているが、 α - q の関係は図4~6に例示されている結果と同様な傾向となるのでここでは省略されていることを記しておく。

図4~6中の一点鎖線は、冷媒のみの α - q の関係(図2, 3の再録)を示す。なお参考までに、油1と2の物性値を表2に簡単に記しておく。

図2~6に示されるように、細線上の沸騰では α - q の関係に大きなヒステリシスが生じるが、本研究では、熱流束を減少したときの α - q 曲線を基に沸騰熱伝達に及ぼす油の種類、濃度や圧力の影響について検討する。

図4, 5から、油2との混合液については濃度の低い範囲で熱伝達率は上昇しているが、油の濃度が高くなるにつれて熱伝達率が徐々に減少すると同時に熱伝達率に対する熱流束の指数も小さくなることから油の影響は高熱流束域においてより顕著になることがわかる。そしてR11の場合、 $p=1, 5$ barについても α - q の関係は図4, 5に示される傾向と同様になる。

また一般に油に対する溶解度が小さい⁽²⁰⁾R115の場合

表2 油1と油2の物性値

	Oil 1	Oil 2
Type of oil	Naphthenbasis	Synthetic
Kinematic viscosity at 40°C (DIN 51 562) ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$)	65	33
Density [9] (g/m^3) ($-10 < T < 80^\circ\text{C}$)	$0.90312 - 0.000643 T$	$0.88284 - 0.00067 T$
Surface tension [9] ($-10 < T < 80^\circ\text{C}$) ($10^{-3} \text{ N}/\text{m}$)	$32.76 - 0.076 T$	$31.01 - 0.083 T$
Commercial name	Glavus oil G68	Alkylaromat

図5 油2とR11混合液の α - q の関係

(a)

(b)

図6 油1とR115混合液の α - q の関係

合、図6に示されるようにある濃度以上になると熱伝達率が熱流束の増加に対して逆に減少するという特異現象が現れることがわかった。そして、この特異現象が発生するときの熱流束は、系の圧力が高くなるにつれて低熱流束側に移ることがわかる〔図6(a), (b)〕。また、この特異現象が現れたときの加熱面上の状況を肉眼観察すると、加熱面上に油滴が生成されていることがわかった。この油滴の成長速度は、熱流束の増加につれて大きくなり、ある油滴径以上になると加熱面から離脱する。このような状況下になると、加熱面の温度も激しく変動するようになり、例えば $p=10$ bar, $C=1.39$ wt %で $q=1.29 \times 10^5$ W/m²のとき $\Delta T=7.9$ Kとなる。

3.3 熱伝達に及ぼす油の濃度の影響 図7~9は、熱伝達率を濃度に対して整理したものである。

図7, 8から、圧力 $p=1, 5$ barについては油1および油2ともに濃度が増加すると熱伝達率が減少することがわかった。しかし圧力 $p=2$ barの場合、濃度が1 wt %までは油の混入によって熱伝達率が促進される傾向にある。特に、油2の場合熱伝達率が著しく促進されることがわかった。また、油1とR11の混合液においても濃度3~5 wt %の間で熱伝達率が上昇あるいは回復する傾向にあるようである。この原因については不明であるが、Burkhardt⁽⁹⁾の実験においても全く同様

図7 熱伝達率と濃度の関係

図8 熱伝達率と濃度の関係

図9 熱伝達率と濃度の関係

な傾向が現れることが報告されている。

R 115 と油 1 の混合液の場合、図 9 に示されるように熱伝達率は油の影響を強く受け、1 wt % 以下の濃度でも急激に減少することおよび濃度 1.39 wt % と 2.0 wt % に対する α - q の関係がほぼ重なることを考えると、熱伝達は油の拡散過程に支配されるようになるものと予想される。特に、特異現象の現れるような高熱流束になると蒸発過程が油の拡散過程に依存するようになると考えられる。

3・4 熱伝達に及ぼす圧力の影響 図 7~9 を比較すると、圧力が高くなると熱伝達率が高い油の濃度域で急激に劣化する傾向にあることがわかった。この傾向は、一般に圧力が高くなると混合液の飽和温度が上昇し、油の溶解度が小さくなるということ⁽²⁰⁾と関連しているようである。特に R 115 のように油の溶解度の小さい場合、ある熱流束以上で熱伝達が油の拡散過程に支配されるようになり、熱伝達率が頭打ちになるという特異現象が起こるのではないと思われる。ただ、R 11 の場合 $p=2$ bar で熱伝達率が油の濃度の低い範囲で上昇するという興味ある結果を考えると、油の溶解度だけでなくもっと別な油・冷媒の沸騰熱伝達を支配するパラメータを見いだす必要がある。また従来の研究においても、熱伝達率が油の濃度数 wt % 程度まで冷媒のみの場合よりも高くなることが報告されているが、その結果もある特定の条件下で起こったものではないかと思われる。

4. 結 論

(1) 油・冷媒混合液中における水平細線上のプール沸騰熱伝達に及ぼす油の影響について広い圧力範囲で実験を行った。

(2) 熱伝達に及ぼす油の影響は、熱流束が増加するにつれて大きくなる。

(3) 油・R 11 の混合液の場合、熱伝達は $p=1, 5$ bar については油の全濃度域で R 11 のみの場合よりも悪く、濃度の増加につれてその劣化も大きくなるが、 $p=2$ bar では、低い濃度域で R 11 のみの場合よりも熱伝達が促進される。

(4) 油の溶解度の小さい R 115 の場合、熱伝達に及ぼす油の影響は非常に大きく、また $p=10$ bar 以上ではある熱流束以上になると熱流束に伴って熱伝達率が減少するという特異現象が見いだされた。

おわりに、本研究は西ドイツの Stuttgart 大学にて行われたもので、ここに記して感謝する。

文 献

- (1) 森・ほか, 冷凍, 50-573 (昭 50), 1.
- (2) 坂口・山崎, 冷凍, 58-673 (昭 58), 1.
- (3) Jensen, M. K. and Jackman, D. L., *Trans. ASME J. Heat Transf.*, 106-1 (1982), 184.
- (4) Chongrungreong, S. and Sauer, H. J., *Trans. ASME J. Heat Transf.*, 102-4 (1980), 701.
- (5) Stephan, H., *Proc. Int. Congr. Refrig.*, 1 (1963), 369.
- (6) Dougherty, R. L. and Sauer, H. J., *ASHRAE Trans.*, 80, Part2 (1974), 175.
- (7) Sauer, H. J., ほか 2 名, *Proc. 6th Int. Heat Transf. Conf.*, 1 (1978), 181.
- (8) Chaddock, J. B., *ASHRAE Trans.*, Part1 (1976), 73.
- (9) Burkhardt, J., *DKV, Forschungsberichte Nr. 4*, (1981).
- (10) Stephan, K. and Mitrović, J., *Proc. 7th Int. Heat Transf. Conf.*, 4 (1982), 73.
- (11) Elle, C., *Proc. 16th Int. Congr. Refrig.*, B-1 (1983), 616.
- (12) Thome, J. R., ほか 2 名, 文献(10)の 95 ページ.
- (13) Stephan, K. and Preusser, P., 文献(7)の 187 ページ.
- (14) Thome, J. R., *Int. J. Heat Mass Transf.*, 26-7 (1983), 965.
- (15) Schlünder, E. U., *Int. Chem. Eng.*, 23-4 (1983), 589.
- (16) Vines, R. F. and Wise, E. M., (1941), McGraw-Hill Book Comp. Inc., New York.
- (17) 西川・ほか 3 名, 冷凍, 53-607 (昭 53), 9.
- (18) Cornwell, K., ほか 2 名, 文献(10)の 47 ページ.
- (19) Crigull, U. and Abadzic, E., *Proc. Int. Mech. Eng.*, 182 (1967), 52.
- (20) 冷凍空調便覧(旧版), 基礎編 (昭 40), 96, 日本冷凍協会.

討 論

〔質問〕 伊 藤 猛 宏〔九州大学工学部〕

貴研究の実験結果を「油の沸騰液に対する溶解度の温度変化」という視点から眺めるとどうなるか。

〔回答〕 本実験で使用した冷媒に対する油の溶解度が温度によってどのように変わるのか実測していないし、またこの件に関する文献調査も行ったが現在まで見い出すことができなかったのも不明である。ところで、一般的には油の溶解は油の濃度が小さい範囲で

は温度の上昇につれて増加する(溶解しやすくなる)傾向にあるようであるが、その傾向は冷媒と油の組合せによって大きく異なっているので本実験結果と溶解度との関係を検討するに至っていない。ただ私見であるが、R 115 と油の実験で得られた特異現象(熱流束の増加に対して熱伝達率が減少すること、図 6 参照)は、油の溶解度と関係しているものと思う。