遷移沸騰熱伝達問題

第一部 概 要

Transition Boiling Heat Transfer Part I

V. V. Kostiyuk, N. N. Borisov and I. Berlin

Moscow Aviation Institute, Moscow USSR

(Received July 24, 1978)

玉 田 紀 治*・富 山 朔 太 郎* 訳

Synopsis :

Transition boiling is the least studied field of boiling. During the last few years advances in cryogenic technology stimulated the interest to the transition and there appeared a number of works, in which boiling curve was investigated under conditions of independent changes of T_e .

Transition from nucleate to film boiling at independently varying temperature differences is a smooth, gradual and continuous process and this hinder reliable fixation of actual boundaries of the processes, characteristic for the transition region.

In the works mentioned in this paper, special attention was paid to the effects of geometry, surface roughness, gravitational acceleration, pressure and subheating in boiling of various liquids upon relations between heat flux density and temperature difference and upon the position of boundaries in the transition boiling region.

遷移沸騰現象は沸騰研究において最も遅れた分野である。長い間、この現象については実際上の興味を持たれなかった。研究方法においては、遷移沸騰領域が成立しないときには、電氣的に q —一定の熱を加えることにより沸騰熱交換の研究が行われてきた。

ここ数年来の低温技術の進歩によって、この分野に再び興味が投げかけられ、いくつかの論文が発表されてきた。それらの論文では沸騰曲線は、 ΔT_e に独立しているという条件下で調べられている。

現在では、沸騰による熱交換の特有な現象、そのプロセスメカニズム等に関してはかなり明確になってきた^{1)~22)}。

これまでの解釈によると、遷移沸騰領域とは温度差が $\Delta T_{kp1}(q_{max})$ から $\Delta T_{kp2}(q_{min})$ の領域であるとされていた。しかし、これまで発表された論文¹¹⁾¹²⁾¹⁴⁾¹⁹⁾

によると、遷移沸騰に特有なプロセスは、沸騰限界領域でも、また核沸騰領域($\Delta T < \Delta T_{kp1}$)、及び膜沸騰領域($\Delta T > \Delta T_{kp2}$)においても生じているのが観測されている。

このように、核沸騰から膜沸騰への遷移は、温度差を独立に変化した場合には、なめらかな、連続したプロセスなのである。このことが遷移領域のプロセスや特性のはっきりした境界を定めることを困難にしているのである。

遷移沸騰による熱交換の実験的研究として文献1)~22)がある。特に注意が払われた諸点は、熱流束と温度差の間の関係、及び遷移沸騰領域の境界に影響を及ぼす因子、すなわち幾何学的配置、表面粗さ、重力加速度、圧力、予熱条件等の効果であって、これが種々の液体の沸騰について調べられている。これら論文の実験条件及び使われたパラメータは Table 1 の通りである。

* 電子技術総合研究所高エネルギー研究室

Table 1

Author	Fluid	Geometry of test section	Test section size (mm)	Orientation of test section	Surface material	Pressure (bar)	Subcooling (K)	Comment
Drew and Mueller 1)	Water	Cylinder (wire)	D = 0.14		Nichrome nickel, platinum	1		
Faber and Scorah 2)	Water	Cylinder (wire)	D = 1, 0	Horiz	Chromel nickel	1-8		Pressure effect
Westwater and Santangelo 3)	Methl-alcohol	Cylinder (tube)	D = 9, 53	Horiz	Copper	1		
Berenson 4)	n-pentane, carbon tetrachloride	Disk	D = 50, 8	Horiz	Copper	1		Effect of surface conditions
Flynn et. al 5)	Nitrogen	Cylinder	D = 15, 9	Horiz	Copper	1		
Merte and Clark 6)	Nitrogen	Sphere	D = 12, 7-25, 4		Copper	1		Effect of gravitation $g/g_0 = 0, 01-1$
Ishigai and Kuno 7)	Water	Cylinder (tube)	D = 40	Vert	Copper	1		Effect of surface conditions
Kesselring, Rosche and Bankoff 8)	Freon 113	Band	L = 6.35-12.7; 25.4	Horiz	Stainless steel	1		
Denisov 9)	Water, ethyl alcohol	Disk	D = 10	Horiz, Vert	Copper	1	0-80	Effect of subcooling
Kato and Yokoya 10, 11)	Water	Disk	D = 10	Horiz, Vert	Copper	1		
Ioda and Kobayashi	Water	Disk	D = 20	Horiz	Copper	1		
Aoki and Welty 13)	N-pentan	Disk		Horiz	Copper	1		
Kalinin et al. 14)	Nitrogen	Cylinder (tube) Sphere	D = 10	Vert	Stainless steel, teflon	1	0-15	Unsteady cooling
Nishikawa, Fujii and Honda 15)	Water	Disk	D = 8	Horiz	Copper	1		
Hesse 16)	Freon	Cylinder (tube)	D = 14	Horiz	Nickel	0.5-30		Pressure effect
Sakurai and Shiotsu 17)	Water	Cylinder	D = 1.2	Horiz, Vert	Platinum	1	0-40	Computer temperature controlled system
Petukhov Kuzma-Kichta 18)	Freon 113	Disk	D = 36.6	Horiz	Copper	1		
Tolubinskii 19)	Water	Cylinder (tube)	D = 10	Horiz	Copper	1-5	5-120	Effect of subcooling

Author	Fluid	Geometry of test section	Test section size (mm)	Orientation of test section	Surface material	Pressure (bar)	Subcooling (K)	Comment
Rubin et al. (20)	Water	Disk	D=35	Horiz	Copper	1		
Grigoriev Klimenko et al. (21, 22)	Nitrogen helium	Cylinder (tube)	D=8-36	Horiz Vert	Copper nickel, stainless steel	1		Effect of surface condition

Fig. 1 Heated surface roughness effect upon transition boiling heat exchange (h -height of protruding points-).

加熱表面粗さの効果については沸騰限界の大きな液体を使った研究が文献4), 7)に, 低温液体を使った研究が文献21), 22)に記載されている (Fig. 1)。

遷移沸騰領域における熱交換表面粗さの影響を解析する前に次のことに注意したい。

すなわち, この影響は膜沸騰熱交換には何ら関与しないが, 核沸騰による熱伝達には表面が粗ければ大いに増加するのである。

二相流の流体力学的不安定性に起因する核沸騰限界は蒸気発生速度により決まる。すなわち, それは熱流束密度により決まると言える。

それゆえ, 正確に言えば q_{kpl} は表面粗さに関係せず, 核沸騰曲線に決まる ΔT_{kpl} が表面粗さに関係しているのである。つまり, なめらかな表面の場合は, 限界熱流束値は ΔT_{kpl} が大きな値の所に存在するのである。

膜沸騰限界は加熱面に接している液体の流体力学不安定性に大いに影響されるが表面粗さには無関係である。そこで, 遷移沸騰領域における表面粗さの影響は沸騰限界パラメータで決まると言える。すなわち, 同じ温度差の下では遷移沸騰熱流束値はなめらかな面の方が大きくなる。低温流体における表面粗さの影響は

Fig. 2 Gravitational acceleration effect upon transition boiling heat exchange. $[1-\frac{\alpha}{g}=1, 2-\frac{\alpha}{g}=0$ ($0.01 \sim 0.03$) α =acceleration, g =gravitational]

文献21), 22)に示されているように, 粗さが 0.5μ 以下で問題となる。

Fig. 2 は沸騰現象に対する重力加速度の影響を示している。熱放射は遷移領域も含め, あらゆる領域で G の減少に伴い小さくなっている。熱流束の限界値は G の減少に従い小さくなるが, 温度差は ΔT_{kpl} , ΔT_{kpe} とも不変である。

遷移沸騰熱交換の圧力による影響は文献2), 6), 16)に記載されている。遷移沸騰の境界位置は作動液体や材質及びその表面粗さ等の要素に種々の割合で影響されるので, 圧力が減少すると沸騰熱交換は大きくなる場合も小さくなる場合もありうる。

Fig. 3 は加熱面材質を変えた場合の熱流束と温度差の関係を示している。Fig. 3 より明らかなように, $q = 1(\Delta T)$ 座標内の遷移沸騰領域の位置は加熱面の材質特性により大幅に変わる。同様にして, この位置は飽和温度以下の液体を加熱することでも影響される。沸騰曲線は液体への予熱を増し, $(\rho c \lambda)_e$ を小さくすると, より大きな温度差側にずれる。

このように, 遷移沸騰に関して20以上の論文が発表されているが, 実際に熱放射に関するパラメータを組

Fig. 3 Correlation between heat flux and temperature difference for various materials of the heated surface.

織的に扱った論文はない。ほとんどのものは大気圧下の大きな体積の飽和液体の沸騰曲線の研究にとどまっている。圧力とか配置構造とか、液体への予熱量とか表面粗さ等の効果に関する論文も若干発表されており、沸騰限界位置がこれらのパラメータにより決まることから、その質的な特性が調べられている。

それゆえ、将来においては限界温度差の影響を排除した自由座標系で遷移沸騰データを調査研究するのが良からう。

沸騰機構の研究方法としては写真によるもの³⁾⁷⁾⁸⁾や、加熱面のパルス温度上昇測定法⁷⁾⁸⁾¹⁰⁾¹³⁾¹⁵⁾とか、加

Fig. 4 Correlation between mean frequency of contacts and temperature difference for water.

Fig. 5 Correlation between mean time of vapour presence on the surface and temperature difference.

熱面の近傍の蒸気量測定法^{9)10)~12)20)}とか、音響スペクトル測定法¹⁹⁾等がある。

これらの測定方法によって遷移沸騰領域内においては、液体と壁との瞬間的な局部接触が起きていることが明らかとなった。Fig. 4, Fig. 5は液体が水の場合の温度差と平均接触頻度の関係、及び温度差と加熱表面上の発生する蒸気の平均滞在時間を示している。

加熱面のパルス温度上昇測定法は、十分な精度で壁と液体、壁と蒸気の接触時間を知ることを可能としているが、パルスの大きさを決定する手助けとはならない。なぜならば、加熱面からわずかに離れても信号が急激に減少するためである。

このようにして得られた沸騰機構の研究から、遷移沸騰熱伝達モデルが提案された。文献²³⁾のモデルによると、全ての熱は壁と液体の周期的に接触の際に非定常熱伝達により伝えられる。モデルを一次元非定常熱伝達問題としたときは、解は次のようになる。

$$q_c = 2\lambda_{jk}\Delta T \left(\frac{\tau_k}{\pi a_{jk}} \right)^{1/2} f_k$$

$$\Delta T = \Delta T_c / [1 + \rho c \lambda]_{jk} / (\rho c \lambda)_c]^{1/2}$$

文献²⁰⁾のモデルでは非定常熱伝達を考慮するだけでなく、さらに膜沸騰熱流束項をも考慮している。

これらのモデルによって遷移沸騰熱放射量を計算する場合には、実験的に接触時間 τ_k 、その頻度 f_k を知っておく必要がある。

実験値と解析値との結果を比較することで、温度差が大きい領域で非定常熱伝達機構が成立していることがわかった。しかし、 ΔT_c が小さくなると接触点で核沸騰が発達する可能性があり、沸騰が最初の沸騰限界に近づくと、核沸騰の成分はより明確となる。

熱伝達機構に関しては、三つの全ての要素を考慮した遷移沸騰モデルが我々によって文献²⁴⁾で提案されている。

このモデルによると、遷移沸騰熱伝達は次のように表わせる。

$$q_c = q_{jk} f + q_n (1 - f)$$

ここに、 q_n は核沸騰による熱流束

q_{jk} は壁と液体との接触点上の熱流束

q_{jk} は、液体内の非定常熱伝達を考慮した核沸騰の式から求める。

このモデルにより筆者は、実験データを温度差 ΔT_c と液体と接触する表面の割合の統計平均との関係として一般化した (Fig. 6)。

文献^{10), 11)}は蒸気のかたまりが加熱面を塞いでい

Fig. 6 Correlation between mean statistical part of the surface contacting the liquid and temperature difference.

る状態での液体膜蒸発過程を解析することにより、遷移沸騰熱交換モデルを提起している。蒸気の泡の移動時間を一定とし ($t = \text{const} = t_{kp1}$)、壁と蒸気の接触している間の熱交換を無視して ($q_n = 0$)、泡の下の液体膜の初期厚さの式 $\delta_{жс} = Aq^{-3/2}$ を $q > q_{kp1}$ の領域まで外挿し、壁と液体の接触時間は液体層の蒸発時間に等しいと仮定することにより、筆者は遷移沸騰時の熱交換の関係を求めた。だが、このモデルは最初の沸騰限界附近でのみ適用できるだけで、温度差が大きい領域ではほとんど合わなくなる。

多くの研究は、単に、(4, 6, 9, 18) の諸論文の実

Fig. 7 Generalization of the data on transition boiling of cryogenic liquids in great volume.

- 1-W $2 \cdot 10^{-3}$
 2-W $2 \cdot 10^{-4}$
 3- $2 \cdot 10^{-4}$ W $2 \cdot 10^{-3}$

験データを一般化した経験式を示唆しているに過ぎない。論文21) に見られる、多数の研究者によって提案されたデータの経験的な一般化の方がより興味がある。

これらの調査研究において、状態の非定常評価を与えるパラメータとして次のものが用いられた (Fig. 7)。

$$W = \sqrt{\frac{(\rho c \lambda)_c}{(\rho c \lambda)_{ж}}} \cdot \frac{\tau_{жс}}{\tau_{kp1} - \tau_{kp2}}$$

核沸騰や膜沸騰だけを扱った研究よりはるかに複雑な遷移沸騰領域の物理学研究は、極めて限られたものしかない。特に、液体蒸気間の接触時間とか頻度、あるいは表面効果など沸騰過程の内部特性に関するデータは十分ではない。

それゆえ、熱放射の調査研究を行なうにあたり、これらの重要な問題を解き明かす努力を払うべきである。

参考文献

(第一部、第二部共通)

- 1) T. B. Drew and A. C. Mueller: "Boiling" Trans. Amer. Inst. Chem. Congr. 33 (1937) 449
- 2) E. A. Farber and E. L. Scorach: "Heat Transfer to Water Boiling under Pressure" Trans. ASME Ser C, J. Heat Transfer 70 (1948) 369
- 3) Y. W. Westwater and Y. C. Santangelo: "Photographic Study of Boiling" Industr. and Engng. Chem. 47 (1955) 1605
- 4) P. Y. Berenson: "Transition Boiling Heat Transfer from a Horizontal Surface" Mass. Inst. Technol. Techn. Rept. No. 17 (1960)
- 5) T. M. Flynn, Y. W. Draper and Y. Y. Roos: "The Nucleate and Film Boiling Curve of Liquid Nitrogen at one Atmosphere" Advances Cryog. Engng. Vol. 7 (New York 1962) 539
- 6) H. Merte and Y. A. Clark: "Boiling Heat Transfer Data for Liquid Nitrogen at Standard and Near Zero Gravity" Trans. ASME 86 No. 3 (1964) 66-76
- 7) S. Ishigai and T. Kuno: "Experimental Study of Transition Boiling on a Vertical Wall in Open Vessel" Bulletin JSME Vol. 9, No. 34 (1966) 361-368
- 8) R. C. Kesselring and P. H. Rosche: Bankoff S. G. A. JCLE journal Vol. 13, No. 4 (1967) 669-675
- 9) I. P. Denisov: "Experimental Study of Water

- and Ethyl Alcohol Boiling on Massive Heat-Conducting Bodies." Personal Communication
- 10) J. Katto and S. Yokoya : "Principal Mechanism of Boiling Crisis in Pool Boiling" Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 11 (1970) 993-1002
 - 11) J. Kato, S. Yokoya and H. Jasunaka : "Mechanism of Boiling Crisis and Transition Boiling in Pool Boiling Heat Transfer" (1970), Papers of Fourth Intern. Heat Transfer Conf., Paris-Versailles, Vol. 5, B. 3, 2 (1970)
 - 12) J. Jida and K. Kobayashi : "An Experimental Investigation on the Mechanism of Pool Boiling Phenomena by a Probe Method" Heat Transfer (1970), Papers of Fourth Intern. Heat Transfer Conf., Paris-Versailles, Vol. 5, B. 1, 3 (1970)
 - 13) T. Aoki and J. R. Veltz : "Energy Transfer Mechanisms in Transitions Pool Boiling" International Journal of Heat and Mass Transfer Vol. 13 (1970) 1237-1240
 - 14) E. K. Kalinin, V. V. Kostiyuk, I. I. Berlin and E. M. Nosova : "Transition Boiling of Cryogenic Liquids" Proc. Cryog. Eng. Conf. CEC-75 (1975)
 - 15) K. Nishikawa and H. Honda : "Experimental Study on the Mechanism of Transition Boiling Heat Transfer" Bul. of the JSME Vol. 15, No. 79 (1972)
 - 16) G. Hesse : "Heat Transfer in Nucleate Boiling Maximum Heat Flux and Transition Boiling" Int. J. Heat Mass Transfer Vol. 16 (1973) 1611-1627
 - 17) A. Sakurai and M. Shiotsu : "Temperature-controlled Pool Boiling Heat Transfer" Proc. of the 5th Int. Heat Transfer Conf., B3, 1 (1974)
 - 18) B. S. Petukhov, S. A. Kovalev, V. M. Zhukov and Yu. A. Kuzma-Kichta : "Investigation of the Mechanism of Heat Transfer upon Film Boiling of Liquid" Proc. of the Vth Int. Heat Transfer Conf. (1974) Tokyo
 - 19) V. I. Tolubinsky, A. M. Kitehigin and S. G. Porsten : "Spectral Analysis of Boses in Pool Boiling in the Transition Region" Proc. of the 5th Int. Heat Transfer Conf. B-3-2 (1974) 86-90
 - 20) L. I. Roizen and G. R. Rubin : "Mechanism of Transition Boiling" Heat Transfer (Soviet Investigations, 1974) 207-213
 - 21) V. A. Grigoriev et al. : "Experimental Investigation of the Thermal Properties of Heated Surface on Boiling Heat Transfer" Proc. of Moscow Energy Power Inst., Vol. 198 (1974)
 - 22) V. V. Klimenko : "Experimental Investigation of Boiling Heat Transfer" Disc. Moscow Energy Power Inst., (1975)
 - 23) S. G. Bankoff and V. S. Mehra : "A Quenching Theory for Transition Boiling" J/EC Fundamentals Vol. 1, No. 1 (1963) 38-40
 - 24) E. K. Kalinin, V. V. Kostiyuk, I. I. Berlin and E. M. Nosova : "Transition Boiling of Cryogenic Liquids" Adv. Cryog. Eng. Vol. 21 (1976)

記 号

(第一部, 第二部共通)

A , coefficient in Eq. (5)
 B , coefficient in Eq. (19)
 Bi , Bio number,
 C , specific heat at p-const
 D , coefficient in Eq. (14)
 E , coefficient in Eq. (2)
 F , coefficient in Eq. (3)
 f , liquid-occupied fraction of surface
 q , -heat flux(per unit surface area)
 T , temperature
 α , heat transfer coefficient
 δ , vapor film thickness
 ρ , density
 τ , tim
 Subscripts : ж, liquid
 н, saturation
 нач, initial
 пл, film
 пыз, nucleate
 с, wall
 о, at the inlet