

垂直壁面近傍におかれた水平円管群の 核沸騰熱伝達特性について

土 田 一・藤 島 幸 樹*・細 田 宣 彦*

Heat Transfer in Nucleate Boiling of the Horizontal two cylinders in a Narrow Spacing

Hajime TSUCHIDA, Kouki FUJISHIMA, Norihiko HOSODA

(昭和 62 年 10 月 31 日受理)

Heat transfer in nucleate boiling the horizontal two cylinders was experimentally investigated under the condition of the narrow spacings. The test cylinders, which were vertically situated in tandem at distance (c), were mounted between two vertical plates in a pool of saturated Freon-11. The clearance (s) between the plates and the cylinders was from 0.2 mm to ∞ , and c from 0.5 mm to 30 mm. This study has been made at heat flux varying from $10^3 \sim 1.4 \times 10^4$ w/m².

1. はじめに

近年、省エネルギーあるいは熱エネルギーの有効利用が重要視されている。特に、相変化を伴い、しかも限定された空間内におかれた伝熱面の沸騰熱伝達特性を解明することは、熱交換器等の伝熱促進あるいは高熱負荷除熱などを考えると重要である。

従来より、沸騰空間が伝熱面相互あるいは伝熱面を覆う隔壁面によって限定された特に狭い空間における沸騰では、通常のプール沸騰に比較し沸騰状況が異なるため、その沸騰伝熱に大きな差異が生ずることが知られている。甲藤ら¹⁾は、水平上向き円形伝熱面に対して円形干渉板を、S.C. Yao ら²⁾、藤田ら³⁾は、矩形垂直平板伝熱面に対し非加熱ガラス板を近づけ、また、石橋・西川ら⁴⁾は同心垂直二重円筒を用いるなど、それぞれ伝熱面形状および供試流体は異なるものの、伝熱面近傍の沸騰空間を制限した場合の沸騰熱伝達特性について報告している。

本報では、密集形管群の核沸騰熱伝達性に関しての基礎的研究として、垂直壁面近傍におかれた 1 列 2 段からなる水平円管群をモデルにとりあげ、狭い空間内での円管群の核沸騰熱伝達特性について、円管相互の間隔および円管群と垂直壁面とのすきまをそれぞれ変化させ、沸騰様相との関連で定性的考察を行い、その伝熱特性を明らかにしようとするものである。

主な記号

c : 供試伝熱管相互の間隔
 D : 供試伝熱管直径
 L : 有効伝熱部長さ
 Q : 供給熱量
 q : 伝熱面熱流束
 q_c : 限界熱流束
 s : 垂直平板と供試伝熱管とのすきま
 T_w : 供試伝熱管表面温度
 T_s : 試験液体 (R-11) 飽和温度
 ΔT_{sat} : 過熱度 = $T_w - T_s$
 α : 熱伝達率

2. 実験装置および方法

本実験装置の概略を図 1 に示す。試験容器①は幅 170 mm、高さ 250 mm、奥行 180 mm の直方体で、伝熱管はフランジに片持ちで固定され、伝熱管表面より発生した蒸気は凝縮器④で凝縮され、予熱管⑤を通して試験容器内にほぼ飽和状態で戻される。なお、伝熱管の下方約 30 mm のところに、被加熱流体フロン系冷媒 R-11 の温度測定のための銅—コンスタンタン熱電対が取り付けられている。図 2 は、本実験に使用した伝熱管の詳細を示す。伝熱管は、外径 18 mm 内径 12 mm、有効伝熱部長さ 100 mm の銅管で、円管表面は 0/4 番エメリー紙にて研磨し、内部に埋め込まれたカート

*機械工学科 第19期卒業生

垂直壁面近傍におかれた水平円管群の核沸騰熱伝達特性について

リッジヒータにより間接電気加熱で伝熱面熱流束を与える。また、銅管の管壁には銅-コンスタンタン熱電対が軸方向中央まで4対挿入されていて、これらの平均温度より伝熱管表面温度を算出

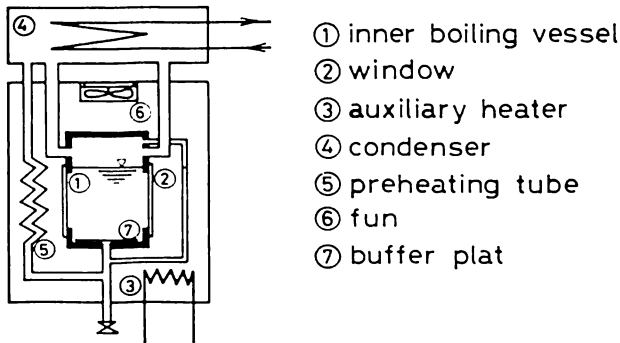
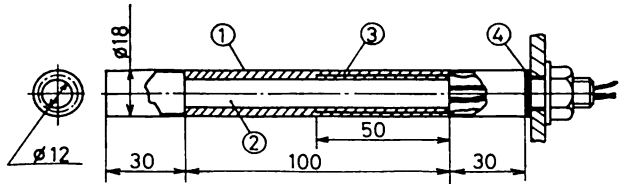


図1 実験装置



- ① heating surface ③ thermocouple
- ② cartridge heater ④ packing

図2 供試伝熱管

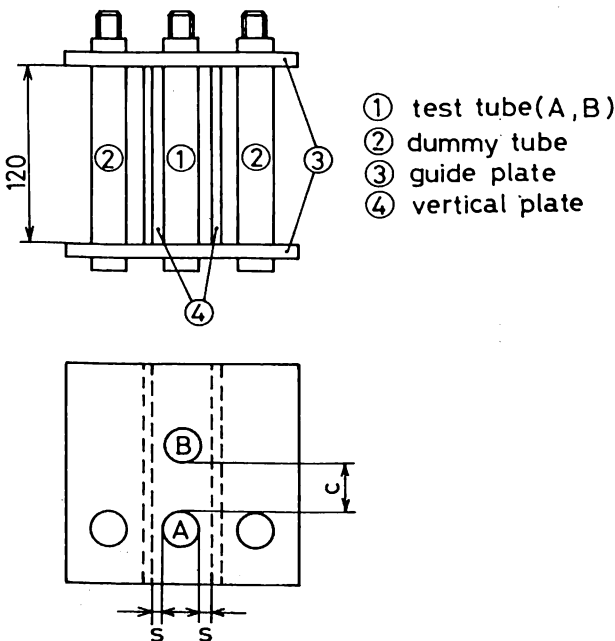


図3 試験部

した。なお、伝熱管は熱電対挿入のための孔加工都合上2分割し、その接合面はハンダにより接合されている。図3は、試験部について示したもので、2本の供試伝熱管 (A, B 管) および垂直平板はガイド板により指示されている。ここで、垂直平板およびガイド板は、ベークライト製である。また、ガイド板は供試伝熱管より発生した蒸気泡の円管軸方向への流出を阻止している。なお、供試伝熱管 A 管の両側にはダミー管 2本が設置されていて、ガイド板と垂直平板とのねじれおよび傾きの矯正と補助ヒータとしての役割を兼ねている。

実験は、2本の供試伝熱管と垂直平板とのすきま s を 0.2, 0.4, 0.5, 1, 5 mm および ∞ と変化させ、伝熱管相互の間隔 c が 0.5, 5, 30 mm の場合について、供試伝熱管 A および B を等温壁とし、大気圧下・飽和沸騰の条件で行った。

3. 実験結果と考察

3.1 単独円管の核沸騰熱伝達特性

核沸騰熱伝達は、伝熱面の表面条件等により大きく左右される。したがって、管群を構成する各供試伝熱管がそれぞれ単独で同じ伝熱特性を有することの確認と、管群効果を評価する場合の基礎となる単独円管の伝熱特性を知るため、各伝熱管についてプール飽和自由沸騰の実験を行った。

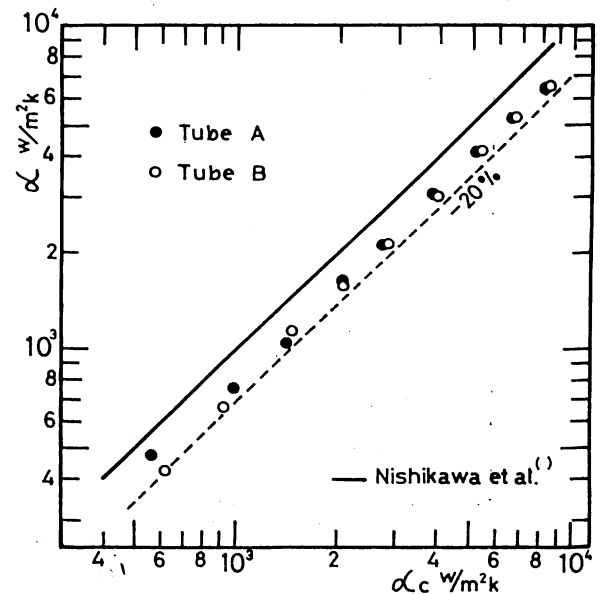
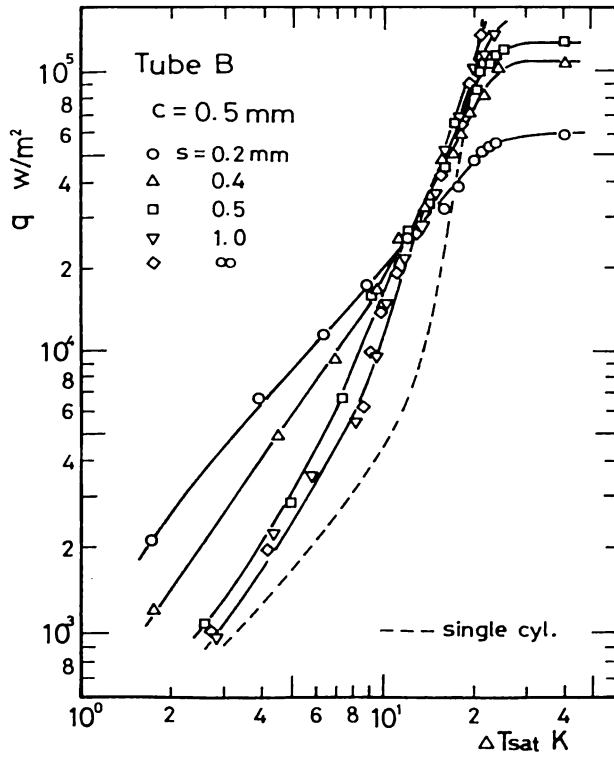
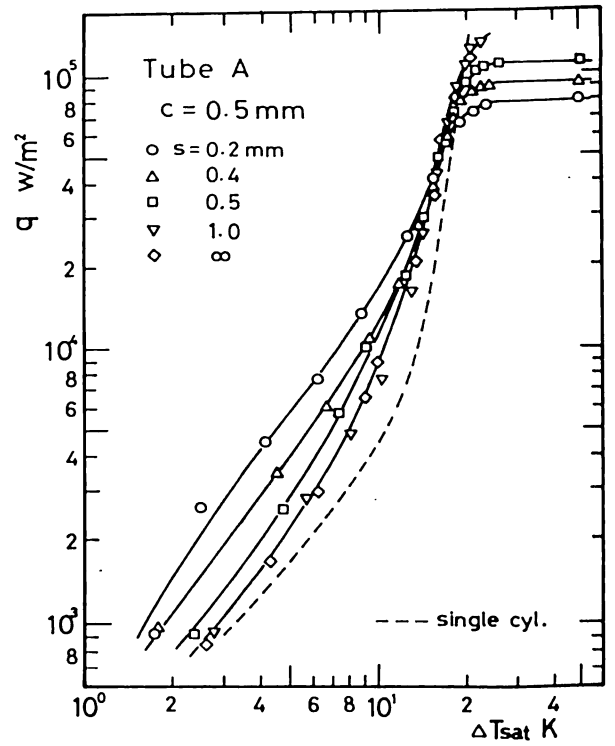


図4 供試伝熱管 (単独円管) の伝熱特性

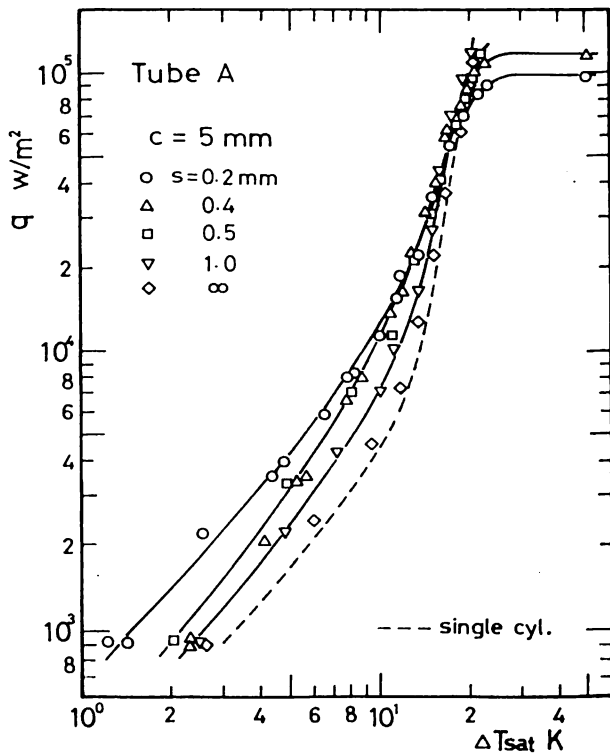


(a)

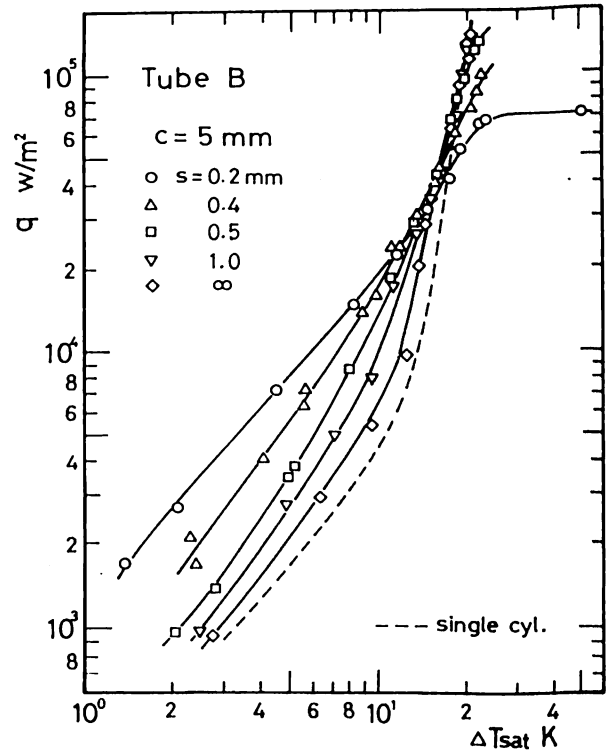


(b)

図 5 沸騰曲線



(a)



(b)

図 6 沸騰曲線

垂直壁面近傍におかれた水平円管群の核沸騰熱伝達特性について

図4は、A管およびB管の各供試伝熱管の結果を横軸に西川ら⁵⁾の実用簡易式から求められた熱伝達率の計算値 α_c 、縦軸に本実験より得られた熱伝達率 α をとり図示したものである。本実験範囲内では、2本の伝熱管ともほぼ同様な熱伝達特性を示していることがわかる。また、西川らの計算値と比較すると全般的に計算値よりも小さい結果となっているが、2本の伝熱管とも-20%以内にまとまっている。

3・2 水平円管群に垂直平板を近づけた場合の核沸騰熱伝達特性

3・2・1 沸騰曲線と沸騰様相

図5および6は、各円管間隔において円管群と垂直平板とのすきまを変化させ得られた沸騰曲線で、それぞれA、B両管について示してある。なお、図中の破線は単独円管の自由沸騰曲線である。

図5は、円管間隔 $c=0.5\text{ mm}$ について示したものでA管の場合、過熱度 ΔT_{sat} が比較的小さい領域では、単独円管に比較しいずれのすきま s においても熱伝達が良く、すきま s が狭くなるほど伝熱面熱流束 q は増加し熱伝達が向上している。しかし ΔT_{sat} が大きくなるにしたがい q の値は単独円管の結果に近づき、 $s \leq 1.0\text{ mm}$ では ΔT_{sat} が19~20 K近傍を境に s より q の値は異なるものの単独円管の結果より熱伝達が低下し、特に $s \leq 0.5\text{ mm}$ では伝熱面熱流束が飽和し、伝熱管表面温度のみが増加している。また、 $s=1\text{ mm}$ においても q の値が飽和する傾向がみられる。なお、 s が5 mmおよび ∞ (垂直平板がない状態)の場合は、過熱度が増しても単独円管の結果とほぼ同一となっている。

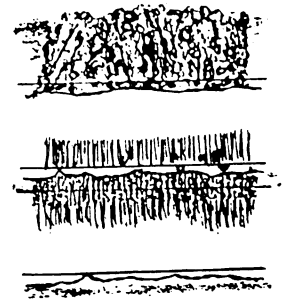
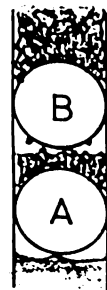
他方、B管の場合、A管の場合とほぼ同様な傾向を示しているが、特に小さい過熱度域において沸騰曲線の勾配は $s \leq 0.5\text{ mm}$ で小さく、同一過熱度における q は、A管の場合より q は高い値となり熱伝達が向上し、 $s \leq 0.4\text{ mm}$ で顕著となっている。また、高過熱度域において、A管同様 $s \leq 0.5\text{ mm}$ で q が飽和する現象がみられる。

図6は、 $c=5\text{ mm}$ の場合でA、B両管ともに $c=0.5\text{ mm}$ の場合のほぼ同様な傾向を示している。しかし、A管の場合、 $s \geq 5\text{ mm}$ においてその沸騰曲線は $c=0.5\text{ mm}$ の場合とは異なり、単独円管の結果とほぼ同一となっている。また、高過熱度域においてA管は $s=0.2, 0.4\text{ mm}$ 、B管では $s=0.2\text{ mm}$ と極めて狭いすきまで伝熱面熱流束の飽和現象が現れている。

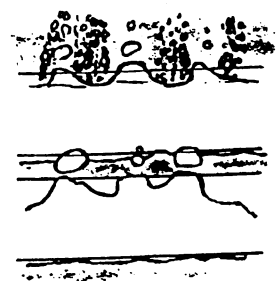
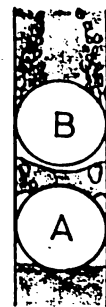
なお、 $c=30\text{ mm}$ の場合については、AおよびB管ともに $c=5\text{ mm}$ の場合とほぼ同様な沸騰曲線となっている。

図7は、本実験における核沸騰の様相をビデオで撮影し、これをもとにスケッチした図である。ここでは、その代表例として円管間隔 $c=5\text{ mm}$ 、 $s=0.2\text{ mm}$ および $s=0.5\text{ mm}$ の場合について示した。

比較的低い過熱度 ΔT_{sat} が5 K近傍において、 $s=0.2\text{ mm}$ の場合、A管伝熱面より局所的に発生した蒸気が合体し、この合体泡が一時的に下方面を覆い円管と垂直平板の狭いすきま内を間欠的に浮上し、さらにB管下面の垂直平板近くを覆い再びすきま内を浮上する。また、B管の上面の垂直平板近傍で比較的活発な気泡の発生がみられる。一方、 $s=0.5\text{ mm}$ の場合、A、B両管のような蒸気泡の一時的な滞留はみられず、円管群と垂直平板のすきま内をスムーズに浮上している。



$\Delta T_{\text{sat}} = 19.5\text{ K}$



$\Delta T_{\text{sat}} = 5.6\text{ K}$

$c = 5\text{ mm}$ $s = 0.2\text{ mm}$

図7(a) 沸騰様相

過熱度が 20 K 近傍の高過熱度域においては、 $s=0.2\text{ mm}$ の場合、A 管の下面はほぼ蒸気で覆われているものの比較的速い周期で液体と接触し沸騰、さらに伝熱管表面に付着した液滴が蒸気とともに A, B 両管の間に押し上げられ、A 管上面で激しく沸騰している。一方、B 管下面は A 管からの飛散液滴が多量に付着し沸騰蒸発しているものの、伝熱管表面には部分的にはあるが乾いた面があらわれている。しかし、 $s=0.5\text{ mm}$ の場合、 $s=0.2\text{ mm}$ の沸騰様相とは異なり、A 管全面より激しく蒸気泡が発生するものの伝熱管表面を蒸気が覆うまでにはいたらず、円管群と垂直平板とのすきま内を非常にはやい速度で浮上する。また、A, B 管のすきま内は蒸気泡と液体とが共存していて、A 管から発生した蒸気泡とともに引き上げられた液体が B 管に付着し沸騰蒸発している。なお、 $s=0.2\text{ mm}$ の場合のような伝熱管表面上の部

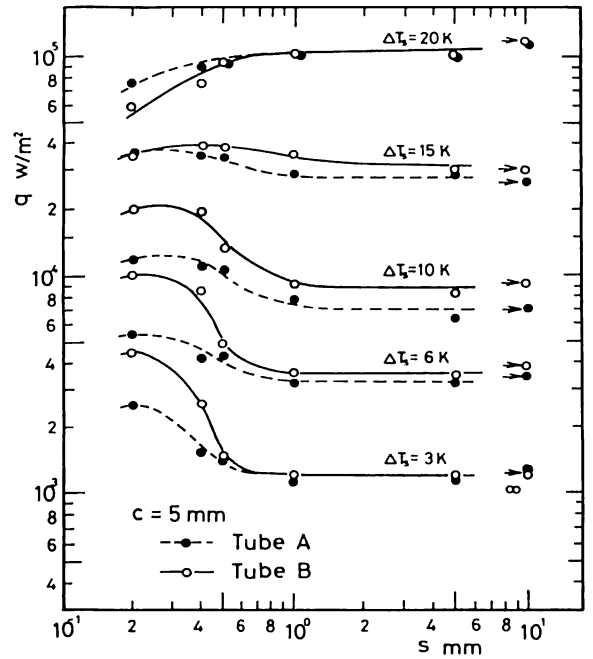
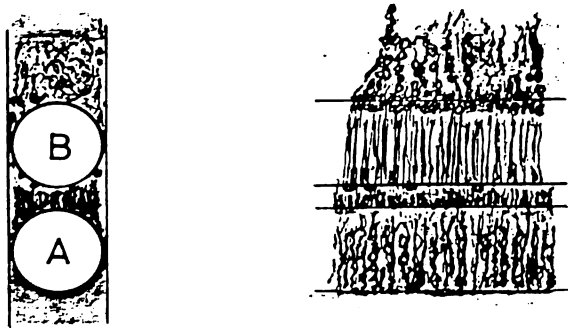
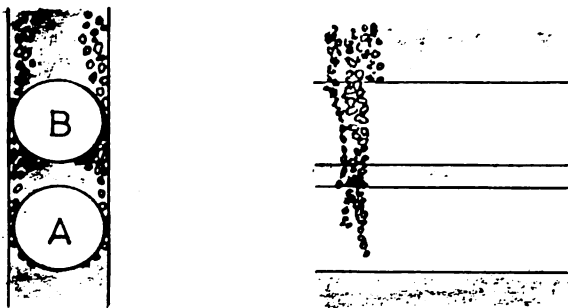


図 8 s による q の変化



$\Delta T_{\text{sat}} = 21\text{ K}$



$\Delta T_{\text{sat}} = 5\text{ K}$

$c = 5\text{ mm}$ $s = 0.5\text{ mm}$

図 7 — b 沸騰様相

分的な乾き面の存在は認められない。

3・2・2 伝熱面熱流束 q のすきま s による影響

図 8 は、円管群と垂直平板のすきま s による A, B 両管の伝熱面熱流束 q の変化を、 $c=5\text{ mm}$ の場合について示したものである。

ΔT_{sat} が 10 K 近傍以下では、 s が ∞ から 1 mm 近傍までは、A, B 両管とも q に大きな変化はみられないが、 s の減少に伴い q は徐々に増加し $s=0.2\text{ mm}$ 近傍で最大となる。このことは、3・2・1 の沸騰様相でも述べたように、低過熱度域において A, B 両管とも部分的に蒸気泡に覆われていて、蒸気泡の間欠的な上方への浮上とそれに伴う新鮮な液体の円管すきま内への侵入すなわち気液交換機構により、 $s=0.2\text{ mm}$ 近傍で熱伝達が最大となっていると考えられる。

ΔT_{sat} が 15 K 近傍においては、A, B 両管ともに自立的な核沸騰が行なわれているため s による変化はほとんど認められないが、 ΔT_{sat} が 20 K 近傍になると s が狭くなるにつれ q が徐々に減少し、 s が 0.5 mm 近傍から急激に減少している。

また、 s が特に狭い 0.2 mm 近傍で、 ΔT_{sat} が 10 K 近傍以下において A, B 両管の差が大きく、A 管に比較し B 管の熱伝達が向上しているが、 $\Delta T_{\text{sat}} > 15\text{ K}$ では A 管と B 管の q の値が逆転する現象がみられる。

垂直壁面近傍におかれた水平円管群の核沸騰熱伝達特性について

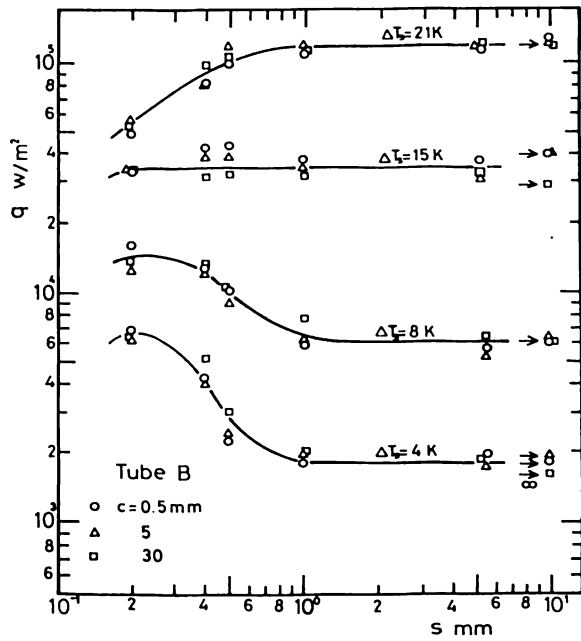


図9 sによるqの変化

なお、円管間隔 c が 0.5 mm および 30 mm の場合においても $c = 5\text{ mm}$ とほぼ同様な傾向となっており、図9に示したように、 ΔT_{sat} が 21 K 近傍以下において円管間隔 c による核沸騰熱伝達特性への大きな影響はみられない。

ここで、比較的低い過熱度域において、B管の q の値がA管より大きく熱伝達の向上が顕著となっていたが、これは、A管から発生した蒸気泡による強制対流効果と、さらには、円管と垂直平板のすきまを蒸気泡が通過する際の増速効果によるものと考えられる。また、高い過熱度域において、A管とB管の q の値が逆転する要因として、A管およびB管とも伝熱面のおよそ半分が蒸気で覆われているものの、A管では伝熱面が漏れていて、この部分でも沸騰蒸発が行われている。一方、B管では伝熱面の一部が乾き、ドライアウトに近い状況となっているためと考えられる。

3・2・3 最大熱伝達率について

本実験範囲内において、 c によらず主に s が 0.5 mm 以下の場合で、A、B両管に熱伝達率の最大値が存在する。この最大熱伝達率 α_{max} と伝熱面熱流束 q の関係を図10に示す。なお、図中の実線は単独円管の熱伝達率と伝熱面熱流束の関係を示したものである。

いずれの場合の最大熱伝達率も、単独円管の熱

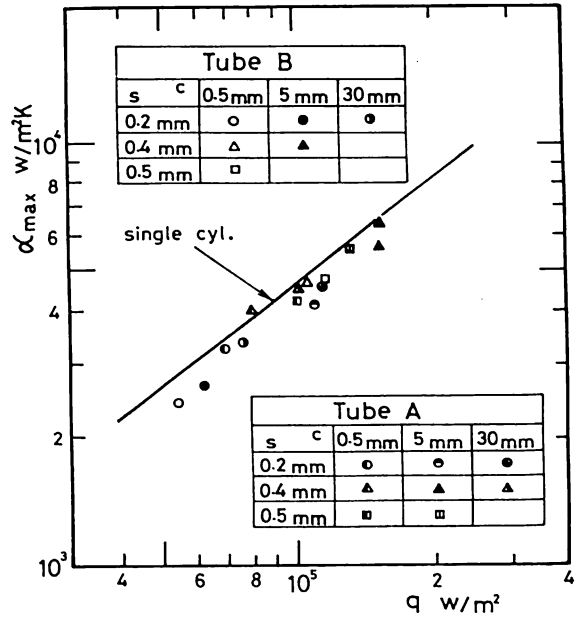


図10 $\alpha_{\text{max}}-q$ の関係

伝達率より若干低い値となっているが、ほぼ同様な結果となっている。すなわち、 $s \leq 0.5\text{ mm}$ の狭いすきま内では、A、B両管ともに α_{max} 近傍での沸騰状況は3・2・2でも述べたが、それぞれの伝熱管からの自立的な核沸騰が続けられており、特に、B管ではA管から発生した気泡による強制対流および蒸気泡がすきま内を浮上する際の増速による影響がなくなるものと考えられる。しかし、傾向として α_{max} は、沸騰空間が狭くなるにしたがい q の小さい領域で存在しており、沸騰空間が極めて限定された場合の核沸騰が α_{max} におよぼす影響は大きいことがわかる。

3・2・4 すきま s による限界熱流束 q_c の変化

沸騰曲線において、 $s \leq 0.5\text{ mm}$ で伝熱面熱流束 q がある値で飽和し、伝熱管表面温度のみ増加する現象がみられたが、この熱流束を本実験での限界熱流束 q_c とすると、 s による q_c の変化は図11に示したようになる。

円管間隔が狭い $c = 0.5\text{ mm}$ の場合において、A管およびB管ともに s が広がるにしたがい q_c はほぼ直線的に増加しているが、A管に比較しB管の勾配が大きくなっており、 q_c に対する s の影響が顕著となっている。このことは、沸騰様相においても明らかな相違がみられる。すなわち、 $s = 0.2\text{ mm}$ の極めて狭いすきまにおいては、B管の場

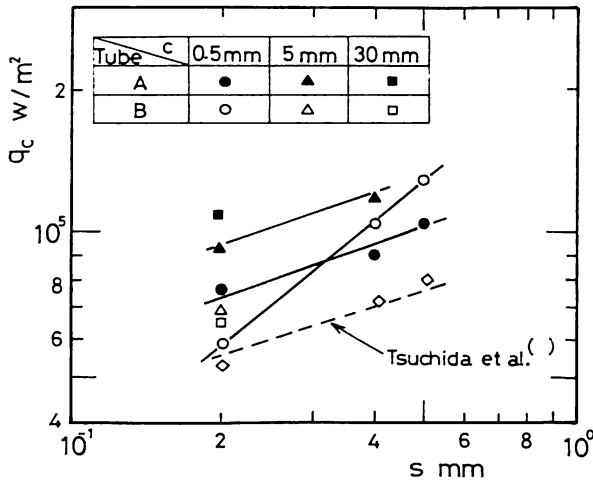


図11 sによる q_c の変化

合、伝熱管表面の大部分が蒸気で覆われ、下方からの液体の供給もなく、その伝熱面は乾燥状態となる。一方、A管の場合、伝熱管表面は蒸気で覆われているものの、乾き面は少なく、B管と同様な状態にいたるまでにはさらに高い q が必要となるためと考えられる。しかし、 s が0.3 mm近傍を境に s の広がりとともに沸騰様相は異なり、B管の q_c がA管よりも高い値となっている。

また、本実験範囲内で $c=5$ mm および 30 mm の場合においても、 s が極めて狭い場合で q_c が存在し、特にA管では、 c の広がりに伴い q_c も増加しており、 $c=5$ mm においては $c=0.5$ mm の場合とほぼ同じ直線の傾きとなっている。しかし、 s の広がりとともに q_c の増加は緩慢となっている。

なお、図には、著者ら⁶⁾が3列1段の水平円管群上方に水平平板を近づけた場合 ($c=0.5$ mm, $s=0.2$ mm) について行った結果も示しているが、本実験のA管の場合と限界熱流束 q_c の値は異なるものの、ほぼ同様な傾向となっている。

4. まとめ

垂直壁面近傍におかれた1列2段からなる水平円管群の核沸騰熱伝達特性に関して、垂直平板と円管群のすきま s および円管間隔 c を変化させた場合の2本の供試円管(A, B)の伝熱特性について、沸騰様相との関連で検討を行った。得られた主な結果を以下に示す。

(1) 加熱度 ΔT_{sat} が比較的低い領域において

は、円管間隔 c によらず、A, B両管ともすきま s の減少とともに熱伝達が向上する。しかし、 ΔT_{sat} が高い領域では、 s が比較的広い1 mm以上において単独円管の結果とほぼ同様となるが、 s が0.5 mm以下では単独円管の熱伝達より低下する。

(2) ΔT_{sat} が15 K近傍以下では、A管からの上昇気泡流の影響でB管の熱伝達が促進される。しかし、 ΔT_{sat} が15 K近傍以上においては、 s が0.4 mm以上で ΔT_{sat} の増大とともに熱伝達の低下がみられるものの、A管およびB管に熱伝達の差はほとんどなくなる。

(3) A管およびB管いずれの場合においても、 s が0.5 mm以下で熱伝達率の最大値 α_{max} が存在し、沸騰空間の大きさにより α_{max} の値は異なるが、単独円管の結果とほぼ同様となる。

(4) 限界熱流束 q_c は、円管間隔が極めて狭い0.5 mmの場合、特にB管において、すきま s による影響が顕著である。しかし、A管の場合、すきま s の広がりとともに限界熱流束 q_c の増加はゆるやかとなり、本実験範囲内では、B管ほど大きな変化はみられない。

(5) 過熱度 ΔT_{sat} が21 K近傍以下において、円管間隔 c によるA, B両管の伝熱特性への影響はみられない。

参考文献

- 1) 甲藤ほか2名, 平行水平2円板間の狭い空間における核および遷移沸騰, 日本機械学会論文集, 42巻361号, p. 2854-2861, (昭和51-9)
- 2) S.C. Yao and Y. Chang, Pool boiling heat transfer in a confined space, Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 26, No. 6, pp. 841-848, 1983.
- 3) 藤田ほか4名, 狭い間隙における核沸騰熱伝達, 第22回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 34-36頁, (1985-5)
- 4) 石橋・西川, 狭い空間における沸騰熱伝達, 日本機械学会論文集, 33巻245号, 121-129頁, (昭42-1)
- 5) 西川ほか3名, 核沸騰におけるフロン系冷媒の熱伝達係数について, 冷凍—第53巻607号, (昭53-5)
- 6) 土田ほか3名, 壁面近傍におかれた円管群の核沸騰熱伝達特性, 第23回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 157-159頁, (1986-5)