

人工キャビティを有する模擬チップの浸漬沸騰冷却

高松, 洋

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

久保, 秀雄

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

本田, 博司

九州大学大学院総合理工学研究科熱エネルギーシステム工学専攻

<https://doi.org/10.15017/17440>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 19 (2), pp.197-202, 1997-09-01. 九州大学大学院総合理工学研究科

バージョン :

権利関係 :

人工キャビティを有する模擬チップの浸漬沸騰冷却

高松 洋*・久保 秀雄**・本田 博司*

(平成9年5月30日 受理)

Immersion Cooling of Simulated Microelectronic Chip with Artificial Cavity Surface

Hiroshi TAKAMATSU, Hideo KUBO and Hiroshi HONDA

Pool boiling heat transfer results from a 10mm × 10mm rectangular chip immersed in subcooled FC-72 were reported. Three kinds of surface were tested: an untreated silicon wafer surface, an etched SiO₂ surface formed on a silicon wafer, and the same kind of SiO₂ surface with artificial cavities. The cavities were the re-entrant type with mouth diameters ranged from 0.6 to 1.2μm. These artificial cavities were effective for the reduction in boiling incipient superheat. The boiling incipient temperature agreed well with the theoretical value estimated from the boiling nucleation theory. The chip temperature at fully developed nucleate boiling as well as at the boiling incipience was reduced significantly by dissolved air.

1. 緒 言

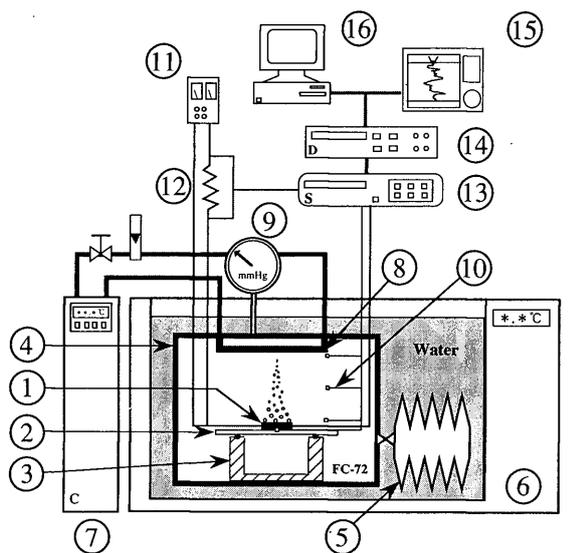
コンピュータの演算処理の高速化を目的とした半導体チップの高集積化および高密度実装により、チップの発熱密度は指数関数的に増大し1990年代のうちに100W/cm²に達すると考えられていた。近年、従来の汎用コンピュータに用いられてきたバイポーラチップのマルチチップモジュールに代わってCMOSチップを用いる技術の開発により発熱密度が一旦減少したため、チップの高性能冷却技術の開発に対する要求が一段落しているが、さらに高速化が進むと発熱密度が再び増加するのは自明である。一方、信頼性の面からはチップの温度を85℃以下に保つ必要があり、このための高性能な冷却技術の開発が望まれている。そのひとつとして不電導性液体を用いた浸漬沸騰冷却が考えられているが実用化された例は極めて少ない。その主な理由は、冷却液とチップ表面の濡れ性が高いため、核沸騰開始温度がかなり高く、かつこの沸騰開始が不安定で再現性にも乏しいことである。したがってチップ表面に微細構造を有する面を用いた研究が数多く行われている¹⁾。

Wright-Gebhart²⁾は、12.7×12.7mmの正方形のシリコン面を用いて大気圧の水の飽和プール沸騰実験を行い、高密度に配置された六角形の窪み(開口径11.5μm 深さ4.1μm)や縦溝(幅12.6μm 深さ11.5μm)が沸騰に及ぼす影響を調べている。その結果、核沸騰領域での熱流束が平滑面の3~4倍になり、縦

溝のある面では沸騰開始時のオーバーシュートがみられなかったことを報告している。Phadkeら³⁾は、リエントラント型キャビティ(開口径230~490μm)を有するシリコン伝熱面からの沸騰実験をR-113を用いて行った。しかし、飽和沸騰ではキャビティを有する面の伝熱は促進されたが、過冷沸騰ではキャビティの効果がほとんどなかった。また、沸騰開始における伝熱面温度のオーバーシュートに関しても系統的な特性は認められなかったと述べている。O'Connor-You⁴⁾は、銀の薄片(長さ3~10μm)やダイヤモンドの粒子(直径8~12μm)を伝熱面に塗布して微細な多孔質構造を製作し、不電導性液体FC-72の沸騰実験を行った。そして、沸騰開始および核沸騰での壁面過熱度が85%減少し、限界熱流束も2倍になるという好結果を得ている。また、O'Connorら⁵⁾はFC-72液中に空気を飽和させた場合の実験を行い、溶存空気が0.004 mol air/mol liquid 以上になると沸騰開始および核沸騰での壁面過熱度が減少することを明らかにしている。一方、西尾⁶⁾は、均一温度場における既存気泡核の安定性について熱力学的考察を行い、気泡核となり易い二重リエントラントキャビティでも液の接触角が小さい場合には不活性になり易いことを示している。しかし、上述の実験結果を定量的に説明するには至っていない。このように実験結果に差があり、その物理的解釈ができないのは、(1)実験に用いられた表面微細構造のスケールが様々で実際に沸騰開始を決めるスケールが不明であること、(2)微細構造が適切なスケールであっても制御したものでないため理論との比較が困難である、ことが原因と考えられる。したがって、本

*熱エネルギーシステム工学専攻

**熱エネルギーシステム工学専攻 博士課程



- | | |
|-------------------|------------------------|
| 1. Test chip | 9. Pressure gauge |
| 2. Glass plate | 10. Thermocouples |
| 3. Holder | 11. DC power supply |
| 4. Liquid vessel | 12. Standard resistor |
| 5. Rubber bag | 13. Scanner |
| 6. Water bath | 14. Digital Multimeter |
| 7. Coolant supply | 15. Pen recorder |
| 8. Condenser | 16. Computer |

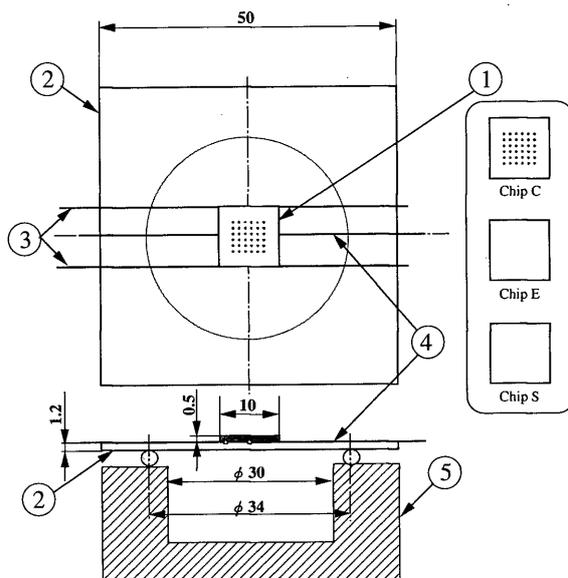
Fig. 1 Experimental apparatus

研究では口径 $0.6\sim 1.2\mu\text{m}$ のリセントラント型の人工キャビティを模擬チップ表面に設け、これがFC-72液のプール沸騰に対して有効かどうかを実験的に明らかにすることを第一の目的とする。そして、沸騰開始に関して既存の核生成理論との比較を行う。また、核沸騰および沸騰開始に及ぼす溶存空気の影響についても明らかにする。

2. 実験装置および実験方法

Fig. 1 に実験装置の概略を示す。恒温水槽⑥内に設置された密閉試験容器④は試験液体FC-72で満たされており、その中に模擬チップ①を取り付けたテスト部が浸漬されている。試験液体の温度は恒温水槽により所望の温度に保たれる。試験容器にはゴム製の袋⑤が取り付けられており中の圧力は常に大気圧に保たれる。また、両面に観察用の窓ガラスが設けられている。試験液体の温度は、チップの端から25mm離れた場所に縦方向に40mm間隔で3ヶ所設けた熱電対⑩で測定した。

Fig. 2 にテスト部の詳細を示す。模擬チップ①は、リングドーピングされた厚さ0.5mmのN型のシリコン単結晶ウエハ（比抵抗 $1\sim 2\Omega\cdot\text{cm}$ ）を10mm×10mmに切り出したもので、チップ表面には、人工キャビティが1mm間隔で碁盤目状に36個（6×6）設けられている。チップは厚さ1.2mmのガラス板②の上



- | | |
|----------------------|------------------|
| 1. Silicon chip | 4. Thermocouples |
| 2. Pyrex glass plate | 5. Holder |
| 3. Copper wire | |

Fig. 2 Test section

にダイボンド用接着剤で貼り付けてあり、裏面からの熱損失を最小限にするため、ガラスは内径30mmの円筒状の窪みを持つホルダー⑤に真空吸着されている。チップは直流電流によりジュール加熱される。その電力供給および電圧降下測定のために、チップの両端側面に直径0.25mmの銅線③がハンダ付けされている。銅線と半導体チップのオーム接触を保つため、チップの端面にセラソルザを超音波ハンダ付けした後、銅線を共晶ハンダを用いて取り付けられた。端面からの沸騰を極力抑えるため、チップ側面および端から約0.5mmの表面部分には、フォトレジスト剤が薄く塗ってある。チップの裏面中央の位置には、代表温度測定のため直径0.12mmのT熱電対④が設けられている。チップおよび試験液体の温度はペンレコーダで常時監視し、十分定常に達したのを確認した。その後、スキャナ、デジタルマルチメータ、パソコンより成るデータ収録システムにより1点あたり連続8回測定し、後の5回の平均値を測定値とした。なお、沸騰開始直前の最高到達温度はペンレコーダより読み取った。

チップ表面の人工キャビティは、Fig. 3 に示すように以下の手順で造った。(1) Si基板上にSiO₂の薄膜（厚さ3μm）をスパッタリングにより形成する、(2) その上にフォトレジストを塗布し電子描画装置を用いてマスクを製作する、(3) SiO₂膜およびSi基板にそれぞれのエッチング液を用いて湿式エッチングを施す。

Fig. 4 にキャビティの走査電子顕微鏡（SEM）写真を示す。Fig. 4 (a), (b) は試作したキャビティの写真であり (a) は上から観察したもの、(b) は断面を観

察したものである。口径が約 $3\mu\text{m}$ のリエントラント型キャビティが形成されているが、Siのエッチン

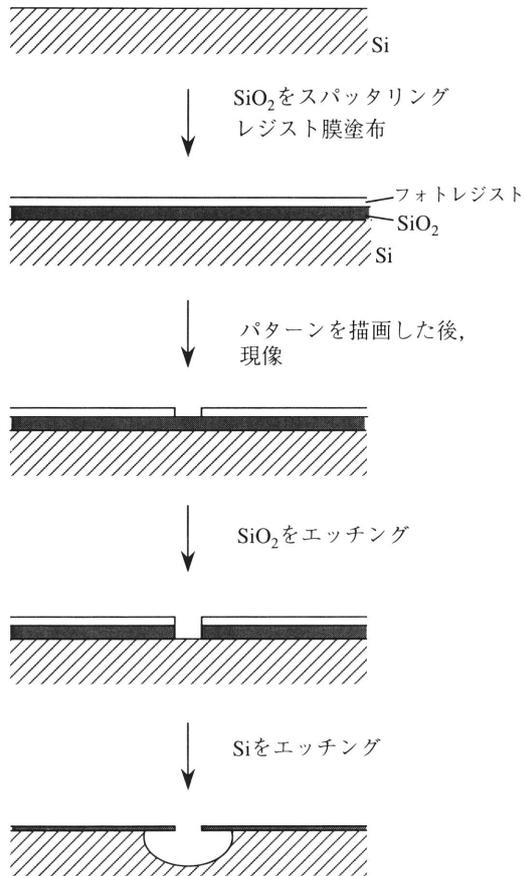


Fig. 3 Fabrication process of artificial re-entrant cavity

グの際に SiO_2 膜もエッチングされており、膜厚が約 $1\mu\text{m}$ に減少している。このため、表面にサブマイクロオーダーの凹凸が生じ、鏡面状態のシリコン基板とは表面状態がかなり異なっている。Fig. 4 (c) は実際に実験に用いたチップの上からの観察写真である。この場合には、ほぼ同様な条件でエッチングを施したにもかかわらず、開口部の径は $0.6\sim 1.2\mu\text{m}$ であった。この差はエッチング液の使用回数の差によるものと考えられる。試作キャビティより口径がかなり小さいため穴の真円度が良くないが、中の空洞部が開口部より小さいリエントラント型になっていると考えられる。実験はこの人工キャビティを有するチップ (略称 C) のほかに、比較のため2種類のチップを用いて行った。一つは Si 基板のままのもの (略称 S)、もうひとつは、Si 基板上に SiO_2 膜を形成し、キャビティを造る場合と同じ条件でその表面をエッチングし同様の凹凸をつけたもの (略称 E) である。この3種類のチップの表面状態の SEM 写真を Fig. 5 に示す。チップ S の表面状態はエッチングを施した他の2種とは異なり非常に滑らかである。またチップ E はチップ C と同様にエッチングしたにもかかわらずチップ C より荒い表面状態となっている。

実験は液体の過冷度 ΔT_{sub} が 3K と 25K の場合 (チップ S は 25K のみ) について行い、実験前には十分に脱気を施した。 $\Delta T_{sub} = 25\text{K}$ ($T_b = 31^\circ\text{C}$) の場合には、バブリングにより十分空気を溶存させた状態でも実験を行った。ガスクロマトグラフを用いて測定した溶存空気の濃度 (標準状態での体積分率) はバブリ

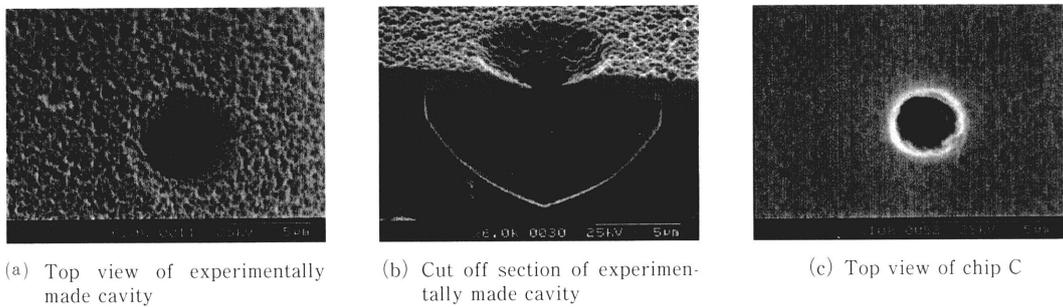


Fig. 4 SEM view of artificial cavity

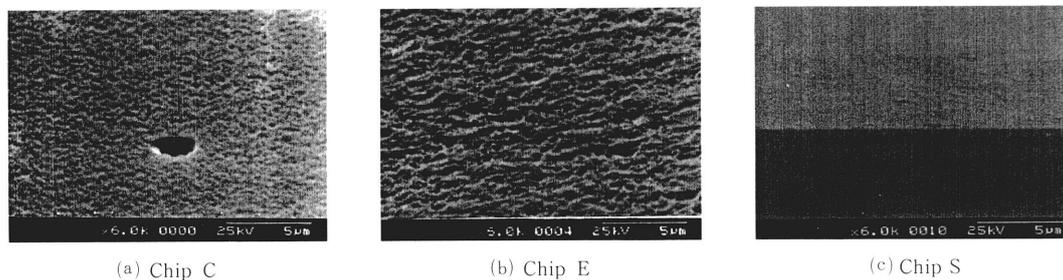


Fig. 5 SEM view of chip surface

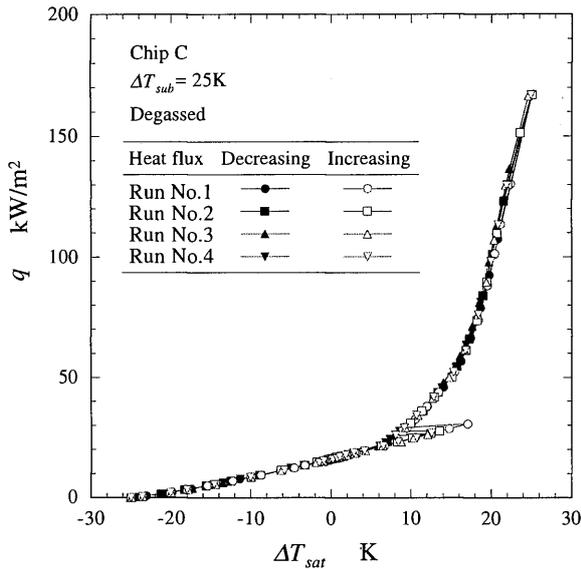


Fig. 6 Boiling curve for different runs

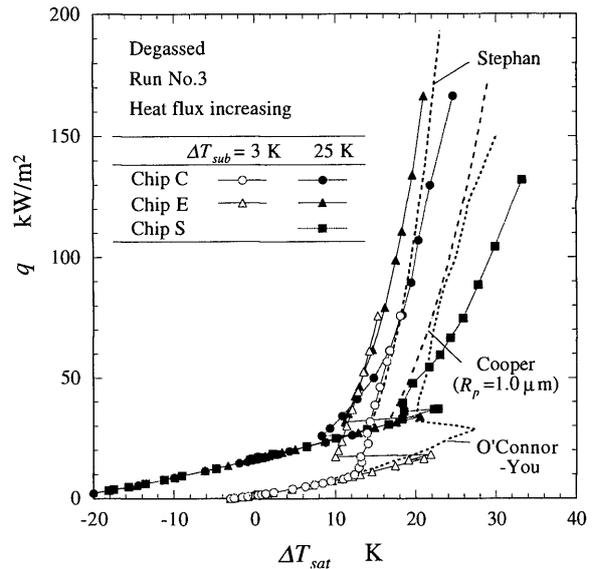


Fig. 7 Boiling curve for different surfaces

ング後で約31%，脱気後で3%未満であった。沸騰開始はチップの温度履歴の影響を受けるため、チップを試験液体中に浸漬し脱気した後（あるいは空気溶解後）1日おいて実験を開始した。実験は熱流束を段階的に増加させた後再び減少して加熱を停止した。このサイクルを1日連続2回、2日間にわたって計4回行った。試験液体の温度は実験期間中所望の過冷度に保った。

3. 実験結果および考察

Fig. 6は、同一条件下で4回行った実験から得られた沸騰曲線をチップC、 $\Delta T_{sub} = 25K$ の場合について示している。ただし、壁面熱流束 q はチップへの投入電力を表面積 $10mm \times 10mm$ で割った値、過熱度 ΔT_{sat} はチップの代表温度としてチップ裏面の熱電対で測定した値に基づいており、いずれもリニアスケールで示している。熱流束を上げていく場合（白抜き）と下げていく場合（黒塗り）の沸騰曲線は、沸騰開始直前を除いて一致している。また、沸騰開始温度を除き4回の実験結果は一致している。なお、他のチップの場合も同様であった。

Fig. 7は、脱気後のFC-72に対する3種類のチップの沸騰曲線を示している。いずれも一連の実験のうち3回目（2日目の最初）の熱流束増加時のものである。キャビティを有するチップC（丸印）および SiO_2 面のチップE（三角印）のどちらの場合も、 $\Delta T_{sub} = 3K$ （白抜き）と $25K$ （黒塗り）の沸騰曲線は十分発達した沸騰状態ではほぼ一致する。チップEおよびチップCの ΔT_{sat} は $q = 100kW/m^2$ でSi表面のチップSよりそれぞれ $12K$ および $9K$ ほど低い。これは、前述のようにチップEおよびチップCの表面

がエッチングにより荒くなっていることに起因する。また、チップEの方がチップCより過熱度が低いのは、Fig. 5に示すようにチップEの表面の方がやや荒い状態になっていることが原因と考えられる。

沸騰開始の過熱度はチップS、E、Cの順に低くなり、それぞれ $\Delta T_{sat} \approx 23K$ 、 $21K$ 、 $12K$ である。チップSの場合、沸騰は常にチップの端で開始し、熱流束の増加とともに端からの気泡は増加した。しかし、かなりの高熱流束になっても伝熱面中央部での沸騰は認められなかった。チップEの場合にも初気泡はチップの端で生じ、それに伴い過熱度がやや低下したが、その後も熱流束の増加と共に過熱度は上昇した。その間の気泡はすべて端から生じており発泡点数も数個程度であった。その後、ある過熱度に達すると突然伝熱面上に発泡点が広がった。Fig. 7中の急激な過熱度の低下はこの点に対応している。一方、チップCの場合には沸騰は常に伝熱面中央部の人工キャビティから開始した。 $\Delta T_{sub} = 25K$ の場合には、他のチップと同様に過熱度のオーバーシュートが見られるが、 $\Delta T_{sub} = 3K$ の場合には沸騰開始に伴う過熱度の低下はほとんど見られず、その後の熱流束の増加とともに過熱度は増加する。この場合、熱流束の増加とともに発泡点数は徐々に増し、低熱流束時には気泡は人工キャビティで生じた。

Fig. 7中には、 $5.1mm \times 16.5mm$ のアルミ箔を用いたFC-72の飽和沸騰に関するO'Connor-You⁴⁾の実験結果を示している。また、参考のため冷媒に対するStephan-Abdelsalam⁷⁾の式および表面粗さを $1\mu m$ としてCooper⁸⁾の式から算出した熱流束も示している。チップCおよびチップEの沸騰特性はStephanの式に比較的近くO'Connor-Youの結果より ΔT_{sat} にして

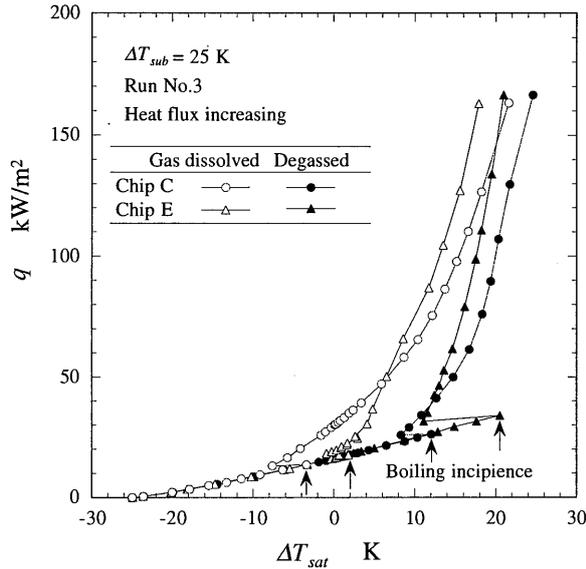


Fig. 8 Effect of dissolved gas on the boiling curve

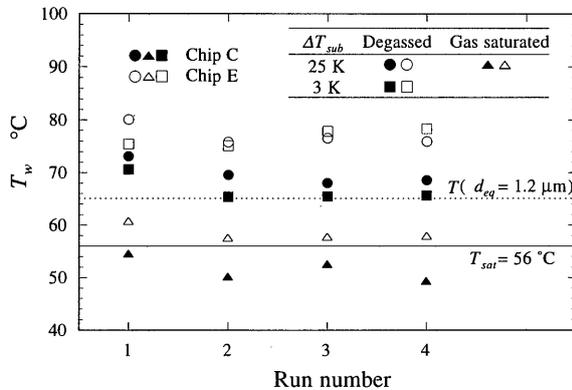


Fig. 9 Boiling incipient superheat for each run

5～8 K 低いが、 ΔT_{sat} に対する q の依存性はいずれの式、実験値ともほぼ等しい。チップ S の特性が他と異なるのは前述のように、沸騰が端面からのみ生じているのが原因と考えられる。

Fig. 8 はチップ C と E の脱気後（黒印）と空気溶解後（白印）の沸騰曲線を $\Delta T_{sub} = 25\text{K}$ の場合について示している。どちらのチップにおいても空気溶解後の初気泡は脱気後の場合よりはるかに低い過熱度で現れ、特に、チップ C では飽和温度以下で気泡が生じる。この初気泡は、明らかに壁面近傍で溶解限度を超えた空気が気泡として現れたものである。過熱度は沸騰が十分発達したと思われる領域でも脱気後の値より約 3 K 低い。

Fig. 9 は沸騰開始時のチップの温度を実験回数に対して示している。4 回の実験を比較すると、ほとんどの場合 1 回目が最も高い。同一条件での沸騰開始温度はチップ C のほうが、チップ E よりかなり低くなる。脱気した場合、チップ E では沸騰開始過熱度は最高

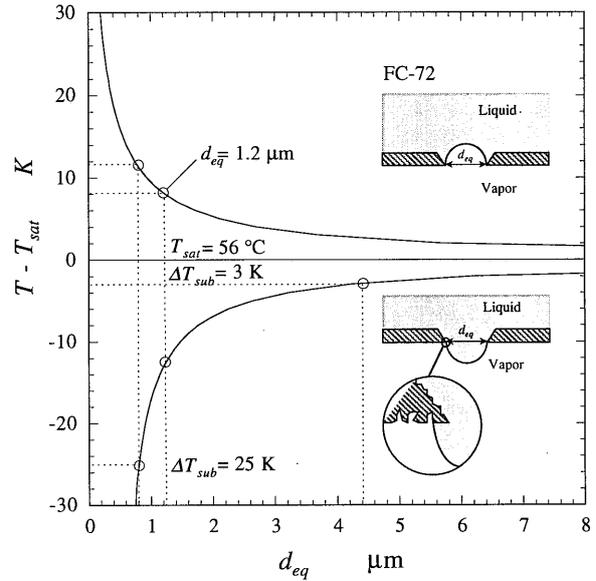


Fig. 10 Variation of temperature with equilibrium bubble diameter

24K にも達する。これに対して、チップ C の場合には 1 回目を除いて $\Delta T_{sub} = 25\text{K}$ では約 13K、 $\Delta T_{sub} = 3\text{K}$ では約 10K である。チップ C ではチップ E の場合と異なり、 $\Delta T_{sub} = 25\text{K}$ のほうが $\Delta T_{sub} = 3\text{K}$ より 3K ほど沸騰開始温度が高くなる。空気を十分溶解した場合には、チップ E では $\Delta T_{sat} \approx 1\text{K}$ 、チップ C では $\Delta T_{sat} \approx -5\text{K}$ であり、沸騰開始に及ぼす溶存空気の影響は極めて大きい。

本実験のようにエッジ型の開口部を有する場合、気泡成長時には開口部に形成された半球状の気泡の曲率が最も大きくなり、この条件が既存気泡核からの沸騰開始を決定すると考えられる。一方、気泡消滅時には接触角 ≈ 0 の場合、液が固体表面を拡がるため僅かの過冷度ですべてのキャビティが不活性となる。ところが、本実験に用いたキャビティでは Fig. 4 に示したように SiO_2 面がエッチングされたため、キャビティの内側にも微小な凹凸があると考えられる。そこで例えば Fig. 10 中に示すエッジの拡大部のような状態を想定すれば半球状の液滴が存在し得ることになる。

Fig. 10 は、キャビティの開口部に形成された直径 d_{eq} の半球状の気泡または液滴が力学的平衡状態を保つための過熱度または過冷度を d_{eq} に対して示している。ただし、ここでは均一温度場を仮定している。一度沸騰を経験したキャビティ内には蒸気が存在すると考えられる。 $\Delta T_{sub} = 3\text{K}$ の場合、 $d_{eq} < 4.4\mu\text{m}$ であれば気泡は凝縮せずに残り、次の沸騰の気泡核となり得る。本実験の場合、キャビティ径が $0.6 \sim 1.2\mu\text{m}$ であるのですべてが既存気泡核となり、最も径が大きいすなわち沸騰開始に必要な過熱度の低い $1.2\mu\text{m}$ のキャ

ピティから順に沸騰が生じると考えられる。 $d_{eq} = 1.2\mu\text{m}$ に対応する過熱度は9.1 Kであり、これは Fig. 9 に示す2回目以降の沸騰開始過熱度とはほぼ一致する。一方、 $\Delta T_{sub} = 25\text{K}$ の場合、 Fig. 10 より $d_{eq} = 0.8\mu\text{m}$ となる。これに相当する沸騰開始過熱度は11.5 K であり、この値も Fig. 9 に示す実験値とはほぼ一致する。したがって、本実験結果は既存の不均質核生成理論で説明できると考えられる。

4. 結 言

口径0.6~1.2 μm の開口部を持つリエントラント型のキャビティを人工的に設けたシリコンの模擬チップの沸騰実験を行い、以下のことを明らかにした。

(1) FC-72のような濡れ易い液に対しても、本実験で用いたリエントラント型のキャビティは沸騰開始過熱度の低減に有効である。

(2) 溶存空気が沸騰開始過熱度の低下および沸騰熱伝達に及ぼす効果は極めて大きい。

(3) 人工キャビティからの沸騰開始に関する本実験結果は既存の不均質核生成理論で説明できる。

謝 辞

本研究において、キャビティ製作には総合理工学研

究科修士 福富章宏君 (現(株)キャノン)、実験には同池田康之君の協力を得た。また、本研究は総合理工学研究科奨励研究費の援助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 日本機械学会編, 沸騰熱伝達と冷却, 日本工業出版, 256(1989).
- 2) Wright, N. and Gebhart, B., ASME, J. Heat Transfer, **111**, 112(1989).
- 3) Phadke, N.K., Bhavnani, S.H., Goyal, A. and Jaeger, R.C., Goodling, J.S., IEEE, Transaction on Components, Hybrids and Manufacturing Technology, **15**-5, 815(1992).
- 4) O'Connor, J. P. and You, S. M., ASME, J. Heat Transfer, **117**, 387(1995).
- 5) O'Connor, J. P., You, S. M. and Chang, J.Y., ASME, J. Heat Transfer, **118**, 662(1996).
- 6) 西尾, 日本機械学会論文集, B偏, 54巻, 503号, 1802(1988).
- 7) Stephan, K. and Abdelsalam, M., Int. J. Heat Mass Transfer, **23**, 173(1980).
- 8) Cooper, M. G., I. Chem. E. Symp. Ser. No. 86, **2**, 785(1984).