

# 沸騰の際の熱伝達

橋 藤 雄

古くから広く利用されていたにもかかわらず、近年になってようやく研究の進んできた沸騰熱伝達について解説し、われわれの研究室で手がけている二、三の問題について説明した。

## 1. は し が き

液体が気化する場合には、海水が海面から蒸発するときのように自由表面から気化してゆくだけで気泡を作らぬ場合と、鍋の中の湯のように気泡を作る場合とがある。沸騰 (boiling) とは後者をさす言葉である。

沸騰が関係する工業上の装置や操作は大変多いけれどその研究の歴史は比較的新しい。最近水冷却型の原子炉の開発が行なわれるにつれて沸騰現象に多くの関心が払われるようになり、多額の費用と多くの労力が投入されその結果膨大な研究成果が得られたのであるが、その基本的な機構には依然として多くの疑問が残され、設計資料としてもまだ頼りない資料しか得られていないのが実状である。この一事によって見ても沸騰現象が一見簡単に見えて容易ならぬ複雑な現象であることが知れよう。

## 2. 沸騰のいろいろ

前述のように、沸騰は気泡を形成する気化である。気泡はほとんど液体を加熱している固体加熱面の表面に発生し成長する。加熱面に接する液体温度はその部分の圧力に対応する飽和温度よりは高く、伝熱面上では伝熱面と同じ温度になっていると考えられる。気泡はこのようないわゆる過熱層 (superheated layer) の中で発生成長するが、気泡発生点はあまり移動せず、また比較的少数であり、その数は過熱層の温度に関係し、温度が高くなれば発生点も増す。気泡はある程度の大きさに成長すると周囲の液の動揺と浮力の作用で加熱面から離れて上昇する。気泡を作るときには気化の潜熱を必要とするから、周囲の液の温度は若干低下し伝熱面の温度も局所的に低下するので、それが回復するまでは気泡の形成は休止される。気泡発生の頻度は数十サイクルから数百サイクルにわたり、小さな気泡ほど頻度が大きく、ほぼ反比例の関係にある。このように加熱面上の発泡点から、独立した気泡が発生する沸騰を核沸騰 (nucleate boiling) というが、加熱温度が高いときには加熱面上に連続した蒸気膜が形成されこの膜と液の界面から気泡が発生する場合もある。これは膜沸騰 (film boiling) と呼んでいる。またある中

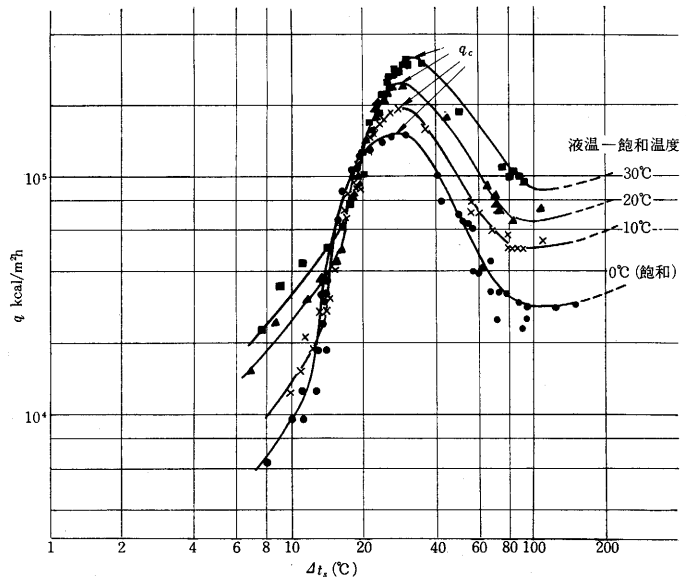
間的な温度の伝熱面では核、膜両沸騰が場所的にも時間的にも混在する場合もある。この沸騰を遷移沸騰という。容器内の液体が容器の底面から加熱される場合などでは容器内の液の平均温度は飽和温度の付近になっている場合が多い。これを飽和沸騰と呼んでいる。一方金属の焼入れ作業などで見られるように、物体が相当高温であれば、液全体は飽和温度よりはるかに低くても物体表面では沸騰を生じる。この種の沸騰を表面沸騰または局所沸騰、未飽和沸騰などといっている。また、管内を流動している液体が管壁から加熱されて沸騰するような場合と、容器内に流動せずにある液体のそれとはいろいろ様子の違う点があるので前者を管内沸騰、後者をプール沸騰と呼んで区別している。以上述べたような種類を組み合わせるとずい分多くの違った沸騰があることになる。

## 3. 沸騰現象の問題点

基本的な問題点を大別すると

- (1) 沸騰の際の伝熱
- (2) 液と蒸気の 2 相流の流動
- (3) 気泡の占めるポイドに関する問題

の 3 種類になる。(2)は沸騰時にかきらず気体液体の混合物で問題になるものであり、(3)は原子炉関係以外は



図・1 フレオンの 113 の上向水平面 (銅) による定常沸騰 (塩冶の実験値)

やや関係が薄いので、ここでは(1)について主として述べることにしよう。沸騰の際の熱伝達の大きな特徴は核沸騰時に見られる高い熱伝達率であり、常温の水で  $10^4$  kcal/m<sup>2</sup>h °C の程度に達する。伝熱面温度と液の飽和温度の差  $\Delta t_s$  を横軸にとり、縦軸に熱流束(単位時間、単位面積当りの伝達熱量)  $q$  をとったのが図・1である。このように核沸騰の領域では、 $q$  は  $\Delta t_s$  のほぼ3乗に比例して増加するがこれには局限があり、最大熱流束  $q_c$  を越えると  $\Delta t_s$  が増加するとかえって  $q$  の低下する領域がある。これを遷移沸騰という。それ以後は遷移沸騰を経て膜沸騰に移行するのであるが、この最大熱流束を限界熱流束またはバーンアウト熱流束と呼んでいる。その意味は、内部で発熱する物体が沸騰水で冷却されているとき、熱流束が  $q_c$  をこすと発生熱を冷却水が取り切れず、熱の蓄積のために物体温度が上昇し、熔融破壊するに至るからである。これは液体を冷却に用いる場合に大きな制限となる。しかも  $q_c$  の値は測定値にかなりのばらつきがあるので、万一を顧慮して安全に設計すると相当のゆとりを見込まなければならない。

図・1に示したような関係は値こそ変わるが、飽和沸騰でも未飽和沸騰でも、またプール沸騰でも管内沸騰でもほぼ同様である。

ところで、核沸騰領域ではなぜ熱伝達率が高くなるのか、また、バーンアウトはなぜ生じるのか二つの課題に対する完全な説明は未だに得られていない。もちろん多くの研究者の努力によってだんだん輪郭ははっきりし

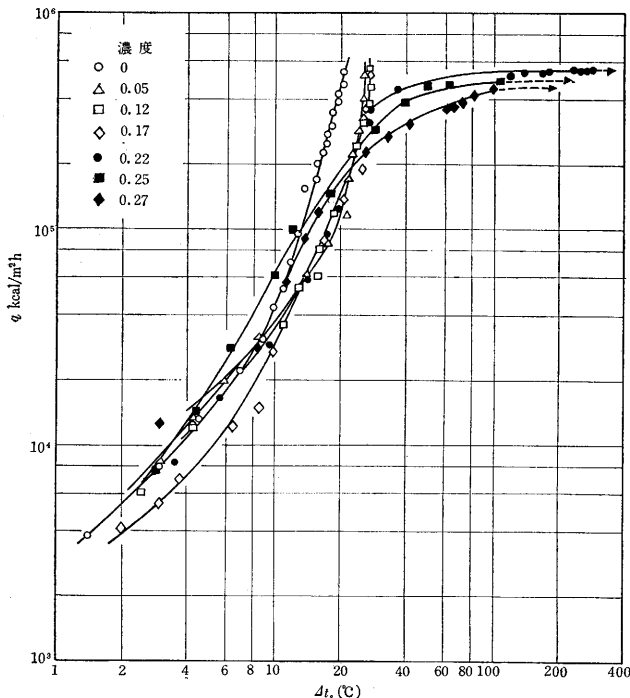
つある。

たとえば前者の問題についても、その機構がいくつかあって重なっており、伝熱面温度によって主役となる機構が変わって行くらしいことがわかっている。弱い沸騰では気泡が成長し、伝熱面から離脱して行くときに生じる流動が液体を混合することで熱伝達が良好になるが、盛んな沸騰ではそのほかの機構が考えられる。気泡の底にできる液体薄膜の中の大きな温度勾配によって行なわれる熱伝導を考える人もある。また、バーンアウトにしても諸説あって定説はない。管内を飽和温度に近い液体が流れている場合には、圧力が低下すれば容易に自己蒸発をして気泡が出るし、その泡が飽和温度以下の液に触れれば冷却されてつぶれることなどが原因となり、このようなループには振動的な現象が発生し易く、気泡分布が一樣でなくなったり相当の圧力変動が生じたり、流量が変化したりする。これらが皆限界熱流束に関係しデータのばらつきを一層大きくする。日本機械学会では昭和40年度、41年度にわたり科学技術庁原子力局の委託研究を受託してその原因の追究に努力しており、着々成果は集まりつつある。

いずれにしても、バーンアウトは加熱面で発生した気泡が邪魔になって冷却に十分な液体が加熱面に到達できなくなるために生ずる現象であるには違いないが、たまたま大きく合体した気泡が付着して冷却をさまたげることによって起こることもあり、面を離れてゆく気泡流と面に近づく液体流との対向流の安定が破れるような状態

になって生じることもあるらしい。加熱面身体の熱容量が大きければ、まだ温度がそう上昇する以前に流れの状態が変化して、また冷却が利くようになることもあるので、バーンアウトに発展しないこともありうる。したがってあまり小さな模型の実験値は実用とならない。このように機構はあまりはっきりしないが、とにかく、その限界熱流束の値を高くする考案を模索する努力もいろいろと行なわれている。管内の流れに旋回を与えとか、いろいろの物体を流れの中に置いて流れを乱すとか、さまざまなことが報告されている。

以上は一物質の沸騰であるが、化学工学などでは何種類かの液体の混合液の沸騰が問題になることも少なくない。この場合にはA物質は気化するが、共存するB、C……物質は気化しないというような状態も起こり、加熱面の近くのA物質の濃度は減少し、蒸発速度はB、C中をAが拡散して来る速度に関係する。この方面ではまだ十分なデータは集積されていない。混合物は液体と液体の混合物に限らない。固体と液体の混合物であるスラリーが沸騰する場合もある。スラリーでは固体粒子が発泡の核になって、単相液体とはよほ



図・2 水とアルミナのスラリー沸騰、伝熱面は垂直白金線(森下の実験値)

ど違った様相を呈すると想像されるが予想に反して意外に違わない。図・2は森下の実験値<sup>1)</sup>で重量%で0~27%のアルミナと水のスラリーの沸騰である。

しかし、濃度を増すにしたがって、スラリーは次第に Bingham 流体の性質を持つようになる。そのような濃度になるとパーンアウトも普通の単相液のそれとは性質が変わって来て、一定の熱流束を与えておくと、伝熱面温度はじょじょに上昇をつづけてとまらなくなる。このほか互いに miscible でない A, B 液があり、A の沸点以上の温度に保たれた B 中に A の滴が混合し、両者の界面で沸騰の起こる場合もある。実用としては海水から真水を取る手段として海水から氷を作る方法に 응용されている。すなわち常温の海水中にイソブタンの滴を混合し、ブタンの気化熱を海水から奪って氷を作るのである。この場合の熱伝達の研究はまだ十分に行なわれてはいない。

#### 4. 沸騰冷却の二、三の例

##### (a) 噴流冷却

噴流冷却はノズルから噴出する液体で物体を冷却するもので、流れが液滴になってしまう噴霧冷却とは区別している。鋼板の圧延などの場合には板の温度が高いために沸騰を発生する。液柱が衝突したところは非沸騰領域がある場合が多く、これは非常に高い熱伝達率を示す<sup>1)</sup>。しかしその下流ではわずかな核沸騰の領域を過ぎると、大部分が膜沸騰になり冷却が悪い。このため赤熱した金属をこの方法で冷却すると、液の当たった部分を中心にして比較的狭い範囲では金属面は黒色となり、その周囲が赤熱のまましばらく経過するような現象が生じる。注水の量を増してもあまり効果はなく、特に膜沸騰域には利かない。事実この部分の熱伝達率は水を十分にたたえた槽内に物体を浸漬したときと大体似たような値なのである。図・3は裏面から水蒸気で加熱された黄銅製の水平上向き伝熱面にエチルアルコールの噴流を当てた場合の局所熱伝達率の位置による変化を示すもので、非沸騰領

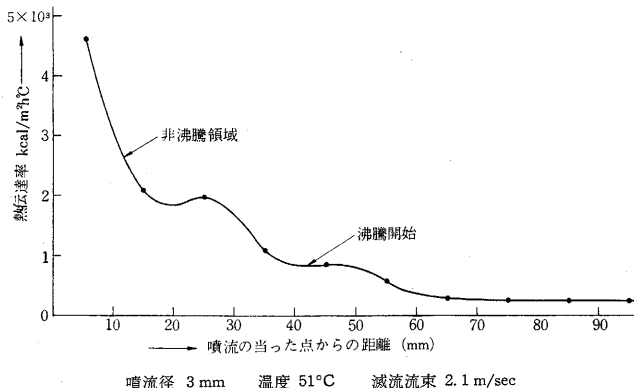
域では熱伝達率の定義に用いる温度差は噴流温度と伝熱面の局所温度の差をとり、沸騰域では飽和温度と局所伝熱面温度の差をとつてある。沸騰が始まるとこの実験のように液量が少ないと間もなく液膜温度が液和温度に近いものとなる。以上のような伝熱の機構を知って考えるのでないと、液量を増加した意味や、噴流の数を増すことの意味を正しく理解することは困難である。

多くの場合、この膜沸騰領域の伝熱を良好にすることが望まれるが、それには液温度を低くし、かつ冷却すべき物体の端まで低温度の液が行きわたるようにすることがとりあえず有効な方法であろう。次には噴流が物体に沿ってよく流れるようにし、その上に、その流れる距離をなるべく短くすることで、非沸騰域の割合を増すことも考えられる。非沸騰域では熱伝達率が噴流速度を増すほど増大するから<sup>2)</sup>、この範囲では噴流径を増して水量を増大するより、同じ水量を細くて速い噴流にして使う方が有利な場合も考えられる。膜沸騰を核沸騰に変えられればよいが、これはあまり有効な方法はなさそうである。これらについてはわれわれの研究室でなお研究を続行している。

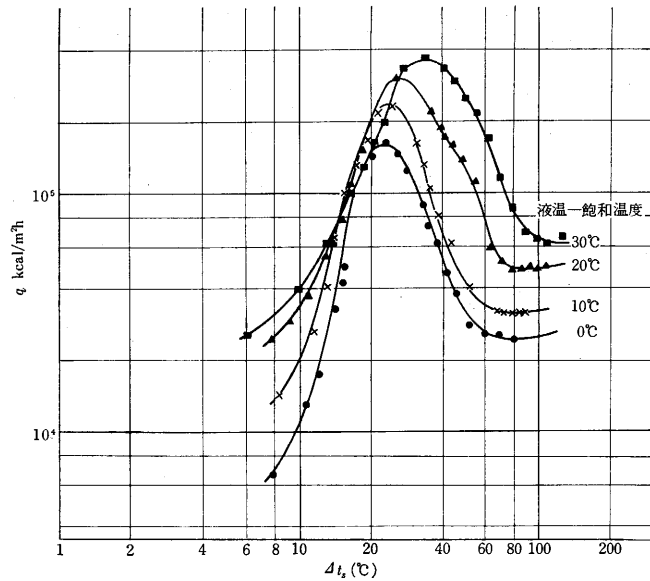
##### (b) 液体による急冷

これもいろいろな場合があるが、金属の焼入れなどでは普通には液の中に物体を浸して冷却する。噴流にして物体に注いでももちろんよいが、この場合は (a) に似た現象となる。

いずれにしても、物体表面の温度が急変し、それに支配されて沸騰の型が変わって行く非定常沸騰になる。非定常沸騰は原子炉などで発熱が突然増加した場合に、気泡発生までの経過を問題にするときのようにきわめて早い現象もあるが、焼入れなどはこれに比べるとずっとゆっくりしている。まず高温物体を飽和温度またはそれ以下の液中に投入すると、きわめて短い時間の間に核沸騰を経過して膜沸騰になる。はじめの核沸騰部分はよくわからないが定常沸騰とは様子の異なるものであろう。しかしそれは物体の冷却という面から見るとほとんど問題



図・3 エチルアルコール噴流を黄銅の水平上向伝熱面に当てたときの局所熱伝達率 (謝の実験値)



図・4 急冷時の熱流束と過熱度の関係 フレオン 113 による  
水平上向面を冷却した場合 (塩冶の実験値)

にしないですむ。膜沸騰は物体がある温度まで低下するまでつづき、ついで核沸騰になり、熱伝達率は急増する。焼入れの結果は物体温度と、その温度を経過するときの冷却速度によるのであるが、物体内部の熱伝導は物質と物体の形状寸法がきまればどうにもならないので、われわれにできることは表面の熱伝達率の値や、時間的な変化を制御することしかない。焼入れ液の性質によって沸騰の曲線は違うから、その選択である程度の制御はできよう。その方面の研究をして行くのには、まず非定常沸騰に、定常沸騰で得られた知識がどの程度まで、定性的に、または定量的に通用するかが問題である。図・4はわれわれの研究室でいろいろな液で物体を冷却し、その冷却曲線と物体の熱容量から時々刻々の熱流束を求めてみた一つを示す。図・1と比較してみると、定性的にも定量的にもかなり似たものになることがわかる。したがって一応は定常沸騰の考え方で考えてよいことがわかる。従来の焼入れ理論では焼入れ中の物体表面の熱伝達率を膜沸騰の場合にみられる程度の値をとり、これを一定として計算されているが、実際には核沸騰領域まで関係することもあり得るので、沸騰曲線から求まる温度によって変化する熱伝達率を考慮する必要があるように思える。

次に同様に急冷ではあるが、物体中に設けられていた冷却液通路を液体が非沸騰または沸騰状態で流れつづつ物体を冷却している場合、何等かの原因で、冷却液の供給

が途絶えてしまったような事故が生じたとする。物体の破損をふせぐために急いで液を別個の供給源から注いでやることは誰しも思いつくことだが、この場合、はたしてせまい流路に液が流れ込み、物体を冷却しうるかどうか問題である。最初に注がれた液の蒸発で生じた蒸気が噴出して、それ以後の液の流入を一時阻止するとか、または流路の途中までは液が来るが、そこまでで蒸発してしまつて、それ以下は冷却されず、破壊されるということも考えられる。これは水冷却型の原子炉の安全装置と関連して注目を惹いている問題であるが、研究はまだ緒についたばかりの段階にあるようである。

### 5. む す び

以上述べたところは現象にしても、また応用例も、きわめて限られた範囲にとどまるが、これだけの簡単な解説からだけでも沸騰熱伝達の複雑な面と、それだけに、この方面の知見の集積がいろいろな冷却法を生む基になるであろうことは推察していただけたかと思う。各方面の技術者が沸騰という共通の目でそれぞれの分野の問題を見直され、この共通の広場に持ち出して合理的な考察をされることを切に望むものである。

(1966年6月17日受理)

### 文 献

- 1) 橋, 森下, 内藤, 大窪: 日本機械学会第714回講演会前刷集
- 1) 橋, 内藤: 生産研究, 8, 9, p. 361 (1956)

