

甲藤好郎先生ご遺稿
「沸騰の科学 (3)」
Science of Boiling (3)

甲藤 好郎 (東京大学名誉教授)

Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)

3. 強い核沸騰

春の陽炎, 夏の入道雲

春が来て, 私たちの住む台地に緑が萌え出る頃, うららかな陽光に暖められた野原から陽炎(かげろう)が立ちのぼります. しかし, いつか時が経って夏の激しい日差しが照りつけるようになると, 紺碧の空を背景に真白な入道雲が巨大な姿を現すでしょう. 同じ太陽の光に照らされる大地でも, その受ける熱の強弱で私たちに見せる光景を随分違ったものにするわけです.

ところで前の2章で, 日頃, 身近に見るタイプの核沸騰, つまり「弱い核沸騰」をテーマにしてその状況を観察して来ました. しかし夏の入道雲ではありませんが, 加熱の強さをこれよりもっと強めたら一体どんなことになるのでしょうか. そこで, これからその大切な話に入ろうと思うのですが, ただいつまでもガスレンジにかけた鍋の中の沸騰では, 強い加熱も困難ですし, 加熱面上の加熱の強さにも偏りがあります. それに加熱面の温度はもちろん, 伝わる熱の強さすら正確にはわかりません. そこでまず, 本章の説明用の簡単な実験装置の様子を見ておくことにしましょう.

さて, 2章でお話した鍋の中の水の沸騰のように, 一つの容器に入れた液体をそのまま加熱した時の沸騰を「プール沸騰」と言っています. そしてこのプール沸騰の実験に必要な加熱面として最も簡単なのは, 容器内の液体中に2本の電極を入れ, その二つの電極の間に水平に張ったニクロム線や白金線に電流を流して電気抵抗で発熱させるやり方です. この時, 小なりと言えども針金表面が沸騰を起こす加熱面になり, 針金に消費される電力をメーターで測れば, 加熱面から出る熱の強さが分ります. また, 金属の電気抵抗の値は一般に温度で変わるので, 針金の電気抵抗の測定から逆に針金の温度, つ

まり加熱面の温度を知ることが出来ます.

しかしなにも針金にも針金は細いので, 通常の沸騰に現れる気泡の大きさや蒸気のかたまりの大きさに比べて加熱面寸法が大変に小さく, 針金の温度も局部的に変化しやすく, さらに発泡点の分布も限られるため, とかく特殊な沸騰状況になりがちです. そこで, それを避けるため, 直径10ないし20ミリメートル位の銅の棒を用い, その一方の端を特殊の電気ヒーターで加熱, それから銅棒を伝わって来る熱を利用して, もう一方の端面の上で沸騰を起こさせる方法が考えられます. この時, 銅棒の熱伝導の方向に温度が下がりますが, その温度勾配の測定から, 加熱面を通過する熱の強さ(それは温度勾配に比例します)を知ることが出来, 同時に温度勾配を外挿して加熱面の温度を求めることが出来ます. なお銅棒内部の温度を測るには熱電対(ねつでんつい)と言うものを使います. これは平行に並べた二種類の異なる金属細線の端同志を接合したもので, その2接点の温度の相違によって細線内に起電力が生じる性質を利用する温度計で, これを銅棒にあけた細い孔の中に差込んで局所温度を正確に測ることが出来るのです.

沸騰の様相の変化

さて, 十分な大きな容器に蓄えた液体の中に, いまお話したような直径10ないし20ミリメートル位の銅棒端面, つまり平らな円形加熱面を上向き水平に置いた時, この加熱面上に生じる沸騰の様子を, しばらく見て行くことにしましょう.

ここでは, 実験の条件を明確にするため, まず液中に沈めた補助ヒーターで容器内の液体を加熱しながら常に液温を飽和温度に保つようしておきます. そして, 銅棒の下端の電気ヒーターに適当な強さの電流を流して加熱しますと, やがて液体に触れている上端の円形加熱面温度が飽和温度より少

し高くなります。この加熱面温度と飽和温度の差を、一般に加熱面の「過熱度」と言いますが、2章で見たように加熱面上に泡を発生させるには、ある大きさ以上の過熱度が必要です。従って過熱度がまだ小さい間は、過熱面上に気泡の発生が見られず、加熱面から出る熱は、ただ液体の普通の自然対流で取り去られています。

そこで電気ヒーターの電流を増し、液体に触れている加熱面の温度をあげていきますと、やがて加熱面上のどこか1, 2の点から蒸気泡の発生が始まります。これが沸騰の開始であって、ここでそれまでの自然対流の状態とは異なる伝熱状態へ不連続な変化を生じるわけです。そしてその後、気泡の連続的な発生によって、前にお話したところの「弱い核沸騰」の状態に移り、さらに加熱面からの熱の強さを上げるにつれて発泡点の数が増え、加熱面上に散らばるようになります。なお各発泡点からは、それぞれ小さな蒸気泡が列を作って立ち上がっており、瞬間写真をとってみると前後の気泡同志が互いに分かれているのが分ります。つまり弱い核沸騰では、隣接する発泡点同志も、また一つの発泡点から発生する気泡同志も互いに干渉せずに分かれていると言う特徴があって、この弱い沸騰の領域のことを学問的には「孤立気泡域」と言う難しい言葉で呼んでいます。

しかし、さらに加熱面温度を上げていくとやがて、加熱面上の発泡点密度が大きくなり、発生、浮上する多くの気泡もこみ合ってきて、次第に混乱の様相が濃くなって来ます。そして写真観察をはじめいろいろの方法で調べた結果によると、発泡点からつぎつぎに出る気泡が前後つながる形で細い連続蒸気柱に見えるものが出来たり、加熱面の少し上の方で浮上中の気泡同志がいろいろに合体したり、とにかく各種の複雑な状況を呈します。しかし少し大胆に言うことを許して頂けるなら、こうした状況は、前にあった弱い核沸騰の状態から、次項で説明する新しい核沸騰の状況、つまり「強い核沸騰」への移り変わりの状態にすぎないのです。

強い核沸騰の出現

実際、もっと加熱面温度があがると、沸騰はこれまでとはまるで違った新しい様相のものになります。すなわち、いま実験に使っている円形加熱面(直径10ないし20ミリメートル程度)と同じ位のかな

り大きな蒸気のかたまりが、加熱面上をひとり占めする形で、時間の経過と共に、つぎつぎ成長と離脱を繰り返す状況が観察されるようになるのです。そして詳しくはすぐ後でお話するように、この大きな蒸気のかたまりは、実は加熱面から伝わる熱の全部を消費して、加熱面近くで絶えず作られている蒸気の集合して出来るものなのです。つまり、現在の沸騰は加熱面から強い熱を受けながら、その全部を使って加熱面近くで多量の蒸気を発生、加熱面上に前述のような大きな蒸気のかたまりを次々に作っているものであり、これこそまさに沸騰そのものの状態と言っても過言ではないでしょう。そして、これをここでは弱い核沸騰に対応して、わかりやすく「強い核沸騰」と呼ぶことにしましょう。学問的には、この沸騰領域のことを「干渉領域」、また時には「発達した核沸騰」と言います。干渉というのは、加熱面上で多数の発泡点が近接し、隣り同志が互いに影響を受け合っていることを指しているのです。

さて前述のように、「強い核沸騰」では加熱面上に蒸気の大なかたまりが次々に発生するのですが、しかし2章で見た「弱い核沸騰」だって、加熱面上の発泡点から小さな気泡が次々に発生しているわけです。だから、これだけを見ますと、大きな蒸気のかたまりと小さな気泡と、大きさの規模が違うだけで、それ以外は両者の性質に違いがないように見えます。当然、「強い核沸騰」は「弱い核沸騰」に比べて本当に異質なものでしょうかという疑問が生じます。

もちろん、これは科学的に大切な問題です。そこでいま、「強い核沸騰」で生じる大きな蒸気のかたまりの挙動を高速カメラで撮影、観察してみることしましょう。するとまず、蒸気のかたまりが十分大きくなって加熱面から離脱したあと、ほとんど間髪を入れず加熱面上に次の蒸気のかたまりが成長を始めるという連続的な蒸気生成の特徴がみられるのです。これに対し弱い核沸騰の場合は、発泡点から気泡が離脱後、次の気泡の成長開始までの間に「待ち時間」があり、気泡発生が間欠的だったことを思い出して頂けるとと思います。

また、やはり高速カメラを用い、強い核沸騰の蒸気のかたまりが加熱面上で成長して行く途中の体積変化を撮影し、それを定量的に分析してみますと、加熱面から出ている熱の全部が加熱面上で蒸気の発生に消費されるとした時の蒸気の体積増加の計

算結果にちょうど一致することが分ります。そしてこのことは、前後2個の蒸気のかたまりの間に「待ち時間」がほとんど無いという前述の実験事実とも、ちゃんと合致することになります。一方、弱い核沸騰の場合は、2章でお話したように、加熱面上での蒸気発生には加熱面から出る熱の一部しか使われていません。それに気泡の成長も、成長の始めは速いが終わり頃は遅く、速度が途中で大きく変化しているものだったのです。

なお「強い沸騰」の場合、前述のように加熱面からの熱が、加熱面近くで全部、蒸気生成に使われてしまうことを知りましたが、これはもう、それ以外の領域で液体の過熱を生じ得ないことを意味します。つまり沸騰容器内の液体の温度は、加熱面上を除いて全面的に飽和温度に保たれることになるのです。

加熱面を覆う薄い核沸騰液層

とすると、私たちが次に当面する大切な問題は、前述のようにして加熱面上に大きな蒸気のかたまりを次々に作り出している蒸気そのものが、一体どこで、どのようにして作られているのかということでしょう。そこでとりあえず、加熱面上の強い核沸騰の状況を真横から写した瞬間写真を見てみると、あたかも水栽培のヒヤシンスやクロッカスの球根が下向きに小さな根を沢山出すように、加熱面上の大きな蒸気のかたまりの下には沢山の微小な蒸気噴流が付いていて、それらが加熱面上に垂直に立っているという状況に気付くのです。もちろん、このように沸騰の外側から写した写真だけでは、加熱面の周辺の様子しか見えず、蒸気のかたまりに邪魔されて加熱面内部の方の状況はよく分かりません。しかし、2、3の巧妙な間接的観測の助けを借りて、加熱面内部の方も同様な状況にあることが明らかにされています。その説明はややこしくなるので、ここには省略しますが、いずれにせよこの状況を多少モデル化して表現してみるならば、加熱面全面を薄い液体の層が覆っており、その液層内に沢山の微小な蒸気噴流が加熱面に垂直に立って、液層の上に滞留している蒸気のかたまりに下からさかんに蒸気を吹き込んでいるという状況になります。

そして、これら加熱面上に立つ微小な蒸気噴流は、弱い核沸騰での発泡点と同じく、加熱面上に分布する微細な凹みの所に作られるものです。ただ現在は、

加熱面温度が前より高く、従って随分小さな凹みに至るまで活性化しているのです、その上に立つ蒸気噴流は加熱面上に非常に密に分布することとなり、たがいに隣同志押し合うために非常に小さな直径のものになっています。また、弱い核沸騰では各発泡点で間欠的な気泡発生があったのに対して、ここでは前記のように定常的な流れの蒸気噴流が形成されています。この場合、加熱面から伝わる熱は、まず液層内の液体部分を熱伝導で噴流の気液界面まで伝わって、そこで蒸気を連続的に蒸発させています。またこのような状況であればこそ、加熱面から出る熱は全部、加熱面近くで蒸気発生に使われ、また加熱の強さに比例した一定の速度で蒸気の発生が続くのです。

もちろん、蒸気のかたまりと加熱面の間にはさまれて存在する前記の薄い液層は、この蒸発のために時々刻々液量が減って行くわけです。従って、この状況下に加熱面上に何時までも沸騰が続くためには、まわりの液体から加熱面上の液層に、何らかの方法で液体が補給され、蒸気発生が途切れないようになっていなければなりません。そしてプール沸騰の場合には、十分に成長した蒸気のかたまりが液層から離れて浮上する時、そのあとに流れ込む液体によって液層への液体補給が生じると考えられます。つまりプール沸騰では、このような間欠的な液体補給が定常的な沸騰を支えているわけですが、なおそれに加えて、現在のように比較的小さい寸法の加熱面（直径10ないし20ミリメートル位）の場合は、加熱面の周辺から、まわりの液体が加熱面上の薄い液層へ連続的にしみこむ現象も起こっている筈です。

それにしても、このように蒸気のかたまりと加熱面の間にはさまれ、その中に加熱面に垂直な多数の微小な蒸気噴流を持つ薄い液層、このような状況が、それでは一体どうして作り出されるのでしょうか。その物理的原因の説明は、少し準備があるので4章にゆずることにしますが、この加熱面上の液層は、強い核沸騰の蒸気発生や伝熱特性を支配し、しかも核沸騰の限界問題（5章）にも重要な役割を持つ大切なものですから、今後これを「核沸騰液層」と呼ぶことにいたしましょう。

自律的な熱伝達

例えば高温の物体を冷たい風の中にさらす時、冷

却されて行く物体の表面から出る熱は周囲の空気に伝わり、そして風に持ち去られます。このように一般に物体の表面が、それとは温度の違う流体の流れに接している時、物体表面と流体の間に起こる熱の交換のことを特に熱伝達（ねつでんたつ）と言います。この種の伝熱状態に初めて注目したのは、イギリスのかの有名なニュートン（1643-1727）ですが、今では自動車のラジエーター、ガス湯沸し器、エアコン、その他、私たちの身近な装置の中でも常に利用されている伝熱状態です。そしてこの「熱伝達」の性能の良否は、物体表面と流体間の単位温度差あたり、物体表面の単位面積を通して単位時間に、どれだけの熱量が伝わるかで決めることが出来ませんが、それは流体の熱伝導率の大小など流体固有の性質だけでなく、物体表面近くの流体の流れの強さや運動の状態によっても大きく変わります。例えば冬、同じ温度の風にさらされていても、風が強ければ強いほど私たちは寒く感じることからそれは分るでしょう。

さて「強い核沸騰」の場合は、いま見て来たように、加熱面からの熱は、加熱面上で蒸気を作り出すのに全部消費されてしまいます。そして、その伝熱状況は、加熱面からの強い熱を受けながら、加熱面のごく近傍に沸騰によって自然に作り出される流体の挙動、その自律的と言っていいような状態に支配されるものと言って過言ではありません。実際、この強い核沸騰の「熱伝達」は、加熱面の形、向き（水平、垂直など）、あるいは液体の深さなど、いろいろ条件が変わってもその影響をほとんど受けない自律的な熱伝達になることが知られています。特に印象的な例を挙げるならば、液体の深さがその自由液面からわずか2、3ミリメートル程度のごく浅い位置に円形加熱面（直径10ミリメートル程度）を水平、上向きに置いて沸騰させても、熱伝達の強さは、液体がずっと深い普通のプール沸騰時とあまり変わらないのです。なおこの非常に低い液位の時、加熱面上の沸騰によって出現する蒸気のかたまりは、しゃぼん玉のように薄い液膜に包まれた、美しくきれいなドーム状のものになります。そしてこのドーム状の蒸気のかたまりが膨張すると破れ、また直ぐに薄い液膜に包まれた次の蒸気のかたまりが成長を始めるといった状態が見られます。

ところで現在はプール沸騰を考えているわけですが、強い核沸騰の熱伝達は前述のように自律性が

強いと、仮に容器内の流体を人工的にかなり強くかきまわしてみても、熱伝達にあまりその影響が現れないことを付け加えておきましょう。前に「強い核沸騰」は「発達した核沸騰」とも呼ばれることを記しましたが、そのように呼ばれる一つの根拠はこんなところにもあるのです。

サブクール液内での強い核沸騰

前に2章では、沸点より低温のサブクール液の中で起こる「弱い核沸騰」の話をしましたが、「強い核沸騰」の場合は一体どうなるのでしょうか。そこで、いままでと同様、直径10ないし20ミリメートル位の円形加熱面をとり、これをサブクール液中において、強い核沸騰をさせる時の状況について説明しておきましょう。

さて、飽和液内の強い核沸騰では、前に述べたように蒸気のかたまりが加熱面から離れると、ほとんど間髪を入れず次の蒸気のかたまりの成長が加熱面上に始まるものでした。しかしサブクール沸騰になると、加熱面から蒸気のかたまりが離れた後、しばらく間をおいてから、次の蒸気のかたまりの成長が始まるようになります。なぜなら、蒸気のかたまりが離脱して裸になった核沸騰液層の上に、周囲から冷たいサブクール液が入れ替わりにやって来ますから、液層から出る蒸気は凝縮され、また時には液層自体も冷却されるわけです。従ってその後、加熱面からの加熱によって、加熱面近くの液体の温度が少なくとも飽和温度まで回復してから、次の蒸気のかたまりの成長が始まるわけです。なお現在、蒸気のかたまりはサブクール液を押し退けながら拡大膨張して行くわけですから、蒸気の一部はどうしても凝縮を受け、それだけ蒸気のかたまりの体積の増加温度が減ることになります。

そして他の条件は変えずに、ただサブクール度だけをさらに上げて行くと、後続の蒸気のかたまりの成長開始までの待ち時間はさらに長くなり、またその成長速度も遅くなるでしょう。そしてサブクール度が非常に大きくなると、今まで蒸気のかたまりと呼んで来たものは姿を消して、加熱面上の薄い蒸気膜状の形に変わっていくと同時に、さらにサブクール度が進めば、遂には加熱面上の蒸気噴流からの蒸気もはや合体出来ず個々に凝縮するような状態になっていくことなどが想像されます。

自由浮上中の気泡や気体のかたまり

これまでの観察から、2章の「弱い核沸騰」では比較的小さな気泡が現れ、また本章の「強い核沸騰」では大きな蒸気のかたまりの現れることを知りました。そこでこれらの事に関連して、沸騰自体とは少し話が離れますが、静止液体の中をただ一個の気泡（あるいは気体のかたまり）が浮上する時の状態について、参考までに触れておきましょう。そして結論から先に言えば、それは気泡の大きさによって次のような4つの特性領域に分かれるのです（ただし以下の出て来る気泡の寸法は静止した水中で空気が浮上する時のものと思って下さい）。

まず第1は、サイダーとかビールを入れたコップを静かに置いておく時に見られるような、非常に微細な気泡の浮上に関する領域で、気泡は球形のまま液中を真っ直ぐに上昇します。この時ちょっと不思議なことですが、浮上中の気泡はあたかも固体の球であるかのようにふるまいます。つまり浮上する気泡は、それが固体球である時と同じ大きさの粘性抵抗を液体から受け、それが気泡の浮力と釣り合って浮上速度が定まるのであって、気泡が大きいくほど浮上速度が速くなります。

第2は、気泡がもう少し大きくなった領域で、その浮上特性は前の第一領域に似ていますが、ただ気泡が固体球のようにふるまうのではなく、ここでは気泡内部に生じる気体の流れが少し影響を持つようになるため、第一領域の水準より多少大きめの浮上速度を持つようになります。

しかし第3の領域に入ると、これまでとは状況が

まるで違うものになります。この領域は、気泡の大きさが直径2、3ミリメートルから、その2、3倍程度の大きさまでわたる領域で、扁平な回転楕円体状の気泡が、らせん形ないしジグザグ形のやや複雑な軌跡を描きながら（ある意味で一種の波のような性質を示しながら）液中を上昇して行きます。しかも、この領域では気泡の大きさが増すと浮上速度がかえっておそくなります。

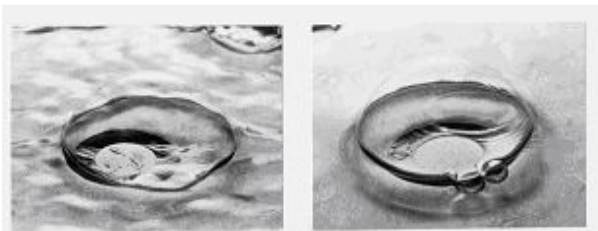
そして最後の第4の領域は、私たちが口にくわえたストローコップの中の水に空気を吹き込む時に出来る程度、ないしそれ以上の大きさの気泡、従って、気泡というより気体のかたまりと言うべき領域ですが、その気体のかたまりは不規則なきのこ状ないし球冠状の形を取って、液中をほぼまっすぐ上昇します。そしてこの領域では、気体のかたまりの大きさの増加と共に浮上速度が再び増して行きます。

さて、いま上述の4領域を順次つなげてみると、気泡の大きさが増すに従い気泡の浮上速度は、第1、第2領域で増加して極大点に至った後、第3領域では減少して極小点に至り、第4領域で再び増加して行くことになります。また、第1、第2領域では気泡の浮上速度に液体の粘性が強い影響を持つのに対し、第3、第4領域ではほとんど粘性の影響がありません。そして前にも述べましたように、例えば第3領域における気泡の上昇運動は、気液界面の一種の波のような運動によって生じていると言った見方をすると物理的に理解し易いのではないかと思います。

（次号に続く）

〔実験の写真〕 低水位核沸騰

（元東京大学伝熱工学研究室横谷定雄氏提供）



Heat flux=1.78X10⁵ W/m²

3.79X10⁵ W/m²