

甲藤好郎先生ご遺稿
「沸騰の科学 (2)」
Science of Boiling (2)

甲藤 好郎 (東京大学名誉教授)

Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)

2 弱い核沸騰

青磁のやわらかな青さ

中国の南宋時代に特に優れたものが出来たことで有名な青磁と言う磁器があります。僅かな鉄を含んだ青緑色または淡黄色のうわぐすりをかけて焼くもので、灼熱の炎の中で鉄分が発色して、あの青磁特有のあわい青を出しています。ところでこの青磁の表面を虫眼鏡で詳しく見ると、無数の微小な透明の泡が一面に閉じ込められていて、これが青磁独特のやわらかな色の感触のもとになっているのでしょう。いうまでもなく高熱の下でうわぐすりの中に析出したガスが、小さな泡に閉じ込められて出来たものですが、このように泡というものは思いがけない所にも大切な役割を果たしています。もちろん、この青磁の泡は、これからお話ししようとしている沸騰の泡とは成因もなにも随分違うものですが、科学的な話に入る前に、泡とはこんな芸術性もあることを知っておくのも悪くはないでしょう。

ところでいま、中が見やすいように、なるべく底の広い金属製の鍋に新しく水を十分に入れてガスレンジにかけてみたとします。すると水の温度が上がるに従い、水にひたる金属面上に沢山の小さな泡が一面に現れて来るのが見えるでしょう。しかしこれは実は初め水の中に溶けていた空気が出て来るもので、沸騰ではありません。一般に液体の中には気体が溶け込んでおり、そして溶解できる気体の量は液温の上昇と共に急に減少するので、余った気体が出て来るのです(脱気現象)。なお面白いことに、これらの泡は水中に浮かんで現れるのではなく、例外なく水に触れた金属面上に出て来ます。

しかし、そのうち水温がさらに上がり、水面か

らかすかに湯気が出るのが見えたりするようになると、鍋の底のいくつかの点から蒸気の泡が列をなして連続的に立上り始める一方、最初に出ていた空気泡は壁面から離れ次々に浮上して、やがて無くなってしまいます。そうして一つの定常的な沸騰状態が現れるのですが、ここでさらにガスの火を段々強くして行くと、鍋の底の発泡点の個数が前より次第に増えて行くのが観察されるでしょう。

これが普通、私たちが家庭の台所などで見ることの出来る沸騰、つまり大変身近な沸騰です。そして加熱面上に不規則に分布した特定の気泡核(どんな面でも細かく見ると粗さがあり、そこに気泡の核が隠れています)の所が発泡点になるので、一般に核沸騰(かくふっとう)と言いますが、後に3章で述べるもっと強い加熱条件下の核沸騰とはかなり状況が違うので、それと区別するため現在の沸騰を「弱い核沸騰」と呼んでおくことにします。

なお注意深い読者の中には、こうして鍋の中で水を沸騰させた後、ガスを止め、水を十分に冷やした上で、もう一度ガスをつけて再沸騰させますと、前には確かに発泡の見られた場所の中に、今度は泡を出さない場所があったりすることに気付いている人がきつといると思います。

発泡点の仕組み

さて、以上見てきたことを整理しますと、(1)蒸気は加熱面上のいくつかの決まった場所で小さな泡の形で発生を続け、(2)その加熱面上の発泡点の数は加熱の強さと共に増加し、(3)一度水を十分に冷やした後には、発泡点のなかに少数ながら死滅するものもあり得る、と言うことです。そして、このような特色を持つ発泡点とは一体、物

理的にどんな仕組みを持っているものなのでしょうか。これからこの問題を解くにあたって、最初は簡単に、水の入った容器の底にごく小さな孔を一つあけ、この孔を通して外から空気をゆっくり押し込み、底面上に泡を一つ作ってみることにしましょう。

このとき私たちがすぐ気付くことは、どんなにゆっくり空気を押し込むにせよ、孔から入れる空気の圧力は、容器の底面にかかる水圧より常に高くなければならぬことです。なぜなら、気泡を包む丸い水面に表面張力が働き、そのため気泡の中の空気の圧力 p_b (孔から押し込む空気の圧力に等しいと見てよい) は、気泡周囲の水の圧力 p_w よりそれだけ高くなるからで、両者の圧力差 $\Delta p = p_b - p_w$ は表面張力が σ 、気泡半径が r の時、次の式で求められます。

$$\Delta p = 2\sigma/r$$

この式は一見、奇妙な形に見えますが、次のようにして容易に導くことが出来ます。すなわち、気泡内の気体の圧力が外の水圧より Δp の値だけ高いとすると、気泡の右半分と左半分を押し離そうとする力 (それは $\pi r^2 \Delta p$ になります) が働き、それが気泡の両半分を引き寄せる表面張力 (その力は $2\pi r \sigma$ になります) と釣り合いますから $\pi r^2 \Delta p = 2\pi r \sigma$ の関係が成立、これから前式がすぐ得られるのです。そしてこの式で計算すると、例えば大気圧、温度 100°C の水の場合 (このとき水の表面張力は長さ 1 メートルあたり 0.0589N (ニュートン)、半径 r の気泡の内外圧力差は次のようになります。

r (mm)	0.1	0.05	0.02	0.01	0.005	0.002
Δp (mbar ¹)	12	24	59	118	236	589

つまり気泡の半径 r が減少して零に近づくに従い、内外圧力差 Δp は限りなく大きくなっていくのが見られます。

従って沸騰の場合にも、発泡点内の蒸気は、周囲の水より常に高い圧力になっている筈ですが、ただし半径 r が零でないある有限の大きさの発泡点から蒸気泡が成長を始めない限り、はじめに無限大の圧力の蒸気を必要とすることになってしまいます。一方、普通の固体面上には、目には滑ら

かに見える面でも、一般にいろいろの寸法の傷や凹みが分布しているものです。従って、乾いた鍋に新しく水を入れる時、水が入り込みやすい比較的大きな凹みは別として、一般に微小な凹みの中にはそれぞれ空気が残ります。そして、これらの凹み内に残っている気体を核として、そこから発泡が始まると考えれば、無限大の蒸気圧を必要とする問題は無くなり、また発泡点が鍋の面上に点々と現れることも理解できます。なお、最初凹み内に残っていた空気は、沸騰が続くうちに発生する蒸気と共に持ち去られ、やがて凹みの中は水から蒸発した水蒸気に置き換わってしまいます。従って、この沸騰を中止し冷却すると、凹み内部にある水蒸気が全部凝縮して外部の水とつながってしまうような凹みもあり得るわけで、そのような凹みは次にもう一度沸騰させた時、もはや発泡点になる力を持ってはいないのです。

発泡の開始

こうして発泡点の物理的仕組みが一応説明できましたが、次に問題になるのは沸騰の場合、発泡点の中にある蒸気が、別に加圧装置も持っていないのに、どうして前述のように周囲の水より高い圧力になれるのでしょうか。この問題を次に考えてみましょう。

さて一般に、液体と蒸気が同じ温度、圧力で釣り合って平衡状態にある時、これを飽和状態にあると言います。そして面白いことに飽和状態では、系の温度が与えられると、その系の圧力もひとりでに決まる性質があるので、それぞれ飽和温度、飽和圧力と言います。いま水の場合、試みに温度 100~110°C の範囲内でその関係を見てみますと

飽和温度 (°C)	100	102	104	106	108	110
飽和圧力 (mbar)	1013	1088	1176	1250	1339	1433

この表で最初に書かれた温度 100°C に対応する圧力 1013 mbar (ミリバール) が標準の大気圧です。そして温度が 100°C より高くなるに従い、飽和圧力は大気圧より次第に高くなるのがわかるでしょう。

そこでいま鍋の中で大気圧の水が沸騰している時の水や鍋の温度を、少し詳しく検討してみることにとしましょう。この時、鍋の中の水の大部分は

¹ bar=10⁵Pa, mbar=10²Pa

飽和温度 100℃にはほぼ近い温度にあるのに対し、鍋の壁面温度は、水を加熱しているのですから 100℃より必ず高いわけです。そして、この 100℃より高温の壁面の凹みの中にある蒸気の温度は当然 100℃より高く、従って前表に見るように、この蒸気の示す飽和圧力は大気圧 (1013 ミリバール) より高いこととなります。すなわち、このようにして飽和圧力を経て自然に生じる圧力差を Δp_s とする時、壁面温度と Δp_s の関係は、前表に示した飽和温度、圧力の関係から直ちに次のようになります。

壁面温度 (°C)	100	102	104	106	108	110
Δp_s (mbar)	0	75	154	237	326	420

そして、このようにして自然に生じる圧力差 Δp_s が、前項でお話した表面張力の作り出す圧力差 Δp (その値は半径 r が大きいものほど低い) より高い値を取る凹みだけが、表面張力に打ち勝って泡を成長させることが出来て発泡点になり得るわけです。つまり、壁面上の凹みのうち、半径がある大きさ r_{min} (最小限界半径) 以上の凹みだけが発泡点となり、それより小さい凹みは発泡できず静かにじっとしていることとなります。そして、前の表に掲げた各壁面温度に対応する最小限界半径の値 r_{min} は、 $\Delta p_s = \Delta p = 2\sigma/r$ の関係から容易に計算されて次のように求められます。

壁面温度 (°C)	100	102	104	106	108	110
r_{min} (μm)	∞	15.6	7.55	4.87	3.52	2.71

この表で μm (マイクロメートル) は 1000 分の 1 ミリメートルの単位を示しており、また ∞ は無限大を示す記号です。そしてこの表からわかるように、鍋の壁面温度が大気圧の水の飽和温度 100℃より高くなるに従い、より小さな凹みまで次第に発泡点になることが出来るので、従って加熱面上に発泡点の個数が次第に増加し、これは前にお話した実験の観察結果 (加熱を強めると発泡点の数がふえる) をよく説明するわけです。また、ある程度以上大きい凹みには水が中まで全部入ってしまい、気体の保持が出来ないので、これらは気泡核になれません。従って、鍋の壁面温度が水の沸点 100℃より少し高くなると壁面上に発泡が

起り得ず、つまり沸騰が起こらないのですが、これも実験観察と合致する事柄です。

蒸気泡の成長と待ち時間

さて、これまで考えて来た発泡点は実は極めて小さなものですが、その発泡点から蒸気泡の成長がいざ始まると、泡の内面 (つまり泡を包んでいる丸い水面) から泡の内部に向かって蒸気の蒸発が続き、蒸気泡の体積が急速に増すと同時に泡の表面積も広く広がって行きます。そして次の問題は、このような状況下に水の蒸発に必要な熱 (蒸発潜熱) が、どこからどのようにして泡の内面に伝えられているのかの問題です。

ところで、沸騰している加熱面上にある一つの発泡点に注目すると、時間の経過と共に、そこから蒸気泡が次々に続いて出ていることが見られます。そして、これを高速カメラで撮影すると、一つの泡が大きくなって加熱面を離れた後、必ずある長さの時間をおいてから、次の泡の成長が始まっているのが分ります。この時間のことを泡発生の「待ち時間」と言いますが、ただこの間、のんびり次の泡の発生を待っているわけではなく、次の泡の発生に必要な諸条件の整備が発泡点の近くで着々とおこなわれているのです。

すなわち、一つの泡が大きくなって鍋の面を離れると、入れ替わりに、そのあとへ周囲から飽和温度の液体がやって来て鍋の面を覆うでしょう。そして、その後しばらく発泡点の近くでは、この液体が加熱面 (その温度は飽和温度より高く、その差を加熱面の過熱度と言います) からの熱伝導によって飽和温度以上に熱せられて行く期間が続きます。そしてその結果、鍋の面上には飽和温度以上に熱せられた薄い液体部分が出来てきますので、これを過熱液層 (かねつえきそう)、つまり飽和温度より高く過熱された液体の層と呼んでいます。

さて、こうして発泡点近くの液体が十分高く過熱されると、凹み内の蒸気圧も高くなり、やがて表面張力や液体の慣性力に打ち勝って、蒸気泡の成長が始まります。つまり発泡点を覆っている薄い過熱液層の下から、これを上方に持ち上げる形で蒸気泡は拡大成長を始め、過熱液層に周囲を包まれる格好で泡は次第に大きくなって行くことになります。そしてこのとき成長の初期の段階を過ぎ

れば、泡の中の蒸気の温度は飽和温度に近くなり、泡を包む高温の過熱液層から泡の内面に熱伝導で熱が伝わり、その内面で蒸気の発生が続いて泡の成長を維持します。だが同時に、泡を包む過熱液層は冷やされ（なお過熱液層は自分の外側の飽和温度の水の部分にも熱を捨てています）、また泡の成長によって引き伸ばされ厚さが薄くなって行きます。そしていつか過熱液層のパワーは弱くなり、それに伴い泡の成長が鈍化するのです。

こうして成長して来た泡はやがて、浮力、表面張力、また泡の成長に伴って動く周囲液体の慣性力などに支配されながら、最後に加熱面から離れることとなります。そして時には、この周囲液体の持つ慣性力のため下向きの加熱面から泡が下向きに飛出すのが見られることさえあります。

加熱面から流体側への伝熱

さてこれまで考えて来た「弱い核沸騰」の場合、加熱面から流体側に伝えられる熱のうち、加熱面上の蒸気泡の生成に使われる割合は比較的少なく、実は、かなりの割合の熱量が、発泡のない加熱面の部分から、それに接する液体に伝えられているのです。沸騰と言うと加熱面上で泡が発生するという印象が強いだけに、これは意外に思われるかも知れません。しかし「弱い核沸騰」では加熱面上の発泡点の数がまだ比較的少なく、加熱面の大部分は発泡を伴わずに直接、液体に接触していることを考えれば、そんなに不思議なことではありません。またそのため「弱い核沸騰」では、発泡点の個数が少ない時ほど、容器内の液体が全体的に飽和温度よりやや高く過熱されることになり（ただし前項では簡単のため、これを無視して説明しました）、加熱面から離れた蒸気泡はそんな過熱液体中を通して浮上していくので、上昇中にも泡の内面から泡の中へ蒸発が生じ、蒸気泡の大きさが増加していくのが観察されます。なお同時に容器内の液体上部の広い自由液面からも外部へ蒸発が起こっており、これらの蒸発を全部合計して初めて、加熱面から伝えられた熱が全部蒸発に使われることになるのです。

このことは、「弱い核沸騰」の場合、沸騰と言いつつながら、実は普通の自然対流の形で加熱面から流体側へ多くの熱が伝えられることを示しています。また従って、ある限られた大きさの加熱面を液体

中に入れて沸騰させる場合など、加熱面から流体側への伝熱が、加熱面の大きさ、向き、形、また液体の深さなどによって少し変わることも、このことと関連があります。

ただそれにしても「弱い核沸騰」は普通の自然対流ではなく、あくまで沸騰だということを忘れてはなりません。つまり加熱面から離れて浮上する蒸気泡は、その付近の液体に局部的な強い流れを生じさせ、加熱面と液体の間に強い対流伝熱を生じさせます。そしてこれは一種の自然対流に違いありませんが局部的なもので、加熱面上に発泡点の数が多く、加熱面から流体側への熱の伝わりが強くなりますし、また普通、加熱面が粗い面であるほど発泡点が多く、従って伝熱の性能もずっとよくなるのです。

少し変わった状態の核沸騰

これまで話をしてきた「弱い核沸騰」に関連して、普通とは少し違った状況下の核沸騰について、話を付け加えておきましょう。

（１）突沸

前に1章で、新しいビーカー内の水の突沸の話をしました。今はもう、その発生のプロセスを説明することが出来ます。いまビーカー一面が非常に清浄、かつ滑らかなので、比較的低い過熱度のうちに泡を発生出来るような大きさの凹みが加熱面上にありません。従ってなかなか発泡が起こらぬまま、ビーカー内の水全体が飽和温度以上に過熱（普通の自然対流の伝熱で）されていきます。そして、さらに温度が上がるに従い、いつか遂に1、2の微小な凹み（場合によれば液中の眼に見えない微細なゴミのこともあり得ます）から突然発泡が始まる訳ですが、このとき蒸気泡の周囲には、高温に過熱された液体が多量にあるため、急激な蒸発が続くことになり、こうして激しい突沸現象が現れるのです。従って突沸は、加熱面上の発泡点の数が少ない点で弱い核沸騰に似ていますが、しかし蒸気発生状況は突発的で激しく、つまり過渡的な特殊状態の沸騰と言うべきでしょう。なお、これほどの状況ではないにしても、例えば非常に滑らかに磨き上げた金属加熱面上の核沸騰などでは、発泡点になる凹みが加熱面上に少なく泡が発生しにくいので、いわば弱い突沸現象が不規則な周期をおいて繰り返されるような性格の

不安定な沸騰状態が出現したりするものです。

(2) 低圧沸騰

圧力が非常に低いときの沸騰も、普通の沸騰とかなり様子が違ってきます。例えば、いま大気圧の10分の1（つまり101.3ミリバール）程度の低圧下の水の沸騰を考えてみましょう。ちなみに富士山の頂上の気圧は636ミリバールの低さですが、いま考えているのはそのさらに約6分の1であって、沸点は46.1℃になります。さてこの時、蒸気の飽和圧力自体が非常に低い値ですから、発泡点の凹み内にある蒸気の圧力が、表面張力に打ち勝つのに十分な大きさまで上昇するには、発泡点近くの加熱面の温度が飽和温度よりかなり高く過熱されることが必要です。

実際、この必要過熱度を、前にやったのと同じ方法で計算してみると、凹みの最小限界半径 r_{min} が15.6マイクロメートルの場合、大気圧下の水の沸騰では沸点(100℃)より僅か2.0度高ければよいのに対し、現在は前述の沸点(46.1℃)より12.8度も高い温度になるのです。

つまり、大気圧の場合に比べてそれだけ発泡が起こりにくく、その反面、いったん発泡が始まると、周囲の水が強く過熱されていますから、多量の水が一度に蒸発することになります。その上、いま約10分の1気圧の低圧ですから、発生する蒸気の体積は水の体積の約14,500倍もの大きさになります。従って、蒸気泡は周囲の水を強く押し退けながら成長しますが、その反動で蒸気泡は加熱面に押し付けられるので、特に加熱面上に発泡点が一箇しかないような場合は、加熱面に半球状の非常に大きな気泡が、お碗を伏せたような格好で現れます。しかも、こういう時は、蒸気泡の成長と共に加熱面上を広がっていく気泡面の表面張力に基づく作用で、気泡のかぶさった加熱面上に1ミリメートルの1000分の1から100分の1位の非常に薄い水の膜が作られ、その水膜の表面からの急速な蒸発までが加わります。従ってこの半球状の気泡は、最終的に直径がなんと数センチメートル程の大きさになる(その姿はなかなか壮観です)こともあるのです。そして、このような場合の沸騰は、私たちが常識的に持っている沸騰のイメージ、つまりせいぜい直径2,3ミリメートルか、それ以下の小さな泡が列を作って立ち上る状態とは、随分違ったものになるわけです。またそのような

ことから、非常に低い圧力下の沸騰は、とかく不安定、不規則な状態になりがちです。

サブクール沸騰

この章で今まで述べてきた沸騰は、容器内の大部分の液体の温度が飽和温度に近いもので、一般に「飽和沸騰」という名前と呼ばれています。しかし、冷却水の通るコイル状の管を容器内に入れて、中の液体を冷やすようにしたりすれば、容器内の液体の温度を飽和温度以下に保つことが出来ます。そしてこのような時、飽和温度以下の液体を「サブクール液」、飽和温度と液体温度の差を「サブクール度」、またサブクール液内で起こる沸騰を「サブクール沸騰」と言っています。

沸点より低い温度の水(サブクール水)の中でどうして沸騰が起こるのか、疑問に思う人があるかも知れません。しかし実を言うと読者の皆さん方の中にも、既にサブクール沸騰を見たことのある人がいるかも知れないのです。というのは、例えば大きな鍋に冷たい水をたっぷり入れて強いガスの火にかけ、やがて鍋の底から沸騰が始まった時など、鍋の中の大部分の水はまだ飽和温度以下にあるので、一時的ながらサブクール沸騰の状態が見られるわけです。そしてこのような時、普通の沸騰とは違って、鍋の底からまるで霧かなにかのように多数の微小な気泡に分散した蒸気が水中を浮き上がって行くのを見た人も少なくないでしょう。

(1) 「サブクール沸騰の仕組み」

さてサブクール沸騰がどんな仕組みで発生するかの話ですが、加熱面の周囲がたとい冷たい液体にかこまれていても、加熱面を十分強く加熱して、加熱面とそこごく近くの液体の温度を飽和温度以上に高く過熱してやりさえすれば、加熱面の凹み内の蒸気は気泡として成長を始めることが出来るわけです。そしてサブクール度があまり大きくないうちは、成長した気泡は加熱面を離れ、飽和沸騰の時と同様に液体中を浮上していきます。ただ現在の気泡はサブクール液の中を浮上するのですから、気泡内の蒸気は気泡表面で冷やされて凝縮し、その結果、気泡は浮上中に次第に小さくなっていくのです。そしてサブクール度がもっと大きくなれば、気泡は上方の自由液面まで到達できず、それ以前に消滅してしまうことになります。

そしてさらに、サブクール度が非常に大きくなると、加熱面のすぐ近くまで冷たいサブクール液が来ています。従って、加熱面上の発泡点から成長を始めた気泡が、その成長中すでに頭頂部をサブクール液のなかに突っ込むようになり、当然そこで急速に冷やされるので成長が止められ、その後さらに続く凝縮によって、気泡が加熱面上でそのまま消えて無くなる状況が現れます。つまりこのような時は、加熱面から離れて浮上する気泡はなく、あたかも「もぐら叩き」か何かのように加熱面の上だけで、あちらこちら、小さな気泡が現れては消え、また現れては消えると言った状況が見られることとなります。加熱面の面上だけに沸騰があるかのような状態なので、これをまれに「表面沸騰」と呼んだりすることがあります。

(2)「コンピューター用プリンターへの応用」

コンピューターで使うプリンターの中にバブル

(泡) ジェットと言って、前述の表面沸騰に似た気泡の挙動を利用してノズルから次々に微小なインク滴を紙の上に噴射しながら文字や図面を書いていくものがあります。すなわちこのプリンターでは、インクを送る細管の壁の一部を瞬間的に加熱して、壁面上に気泡を発生させ、その体積膨張でインク液(サブクールしています)をノズルの方へ押出して噴射、次いでこの気泡が周囲の冷たいインク液に触れて直ちに凝縮消滅する結果、今度は新しいインク液をインク管内に引き込む、そういった動きをさせているのです。このバブル・ジェット・プリンターではカラー・プリントも出来ますし、また紙以外の布の上などに美しい絵をプリントしたり、ある意味で驚くほど精密な技術に生長しています。

(次号に続く)

(写真は元東京大学伝熱工学研究室横谷定雄氏提供)



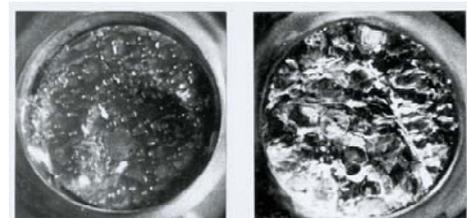
Heat Flux $q=1.6 \times 10^5$ (kcal/m² h), $\Delta T_{\text{sat}}=3.0$ K,
Boiling space: $s=0.4$ mm, Time interval: 1.52 ms.

(注 : Boiling space とは沸騰面と光学プリズムの間隔。前号参照)

マイクロ液膜とマクロ液膜

上の左図は単一気泡の底面に構成されるマイクロ液膜を捉えた高速度写真。中央の白い部分は液膜の蒸発による乾燥部で、時間と共に拡大して広がっている。

右上の写真は合体気泡(蒸気塊)の底部に形成される核沸騰液層(マクロ液膜)の瞬間写真。液層には多数の乾き部分が見られる。



Boiling space:
 $s=1$ mm $s=2$ mm