

甲藤好郎先生ご遺稿
「沸騰の科学 (9)」
Science of Boiling (9)

甲藤 好郎 (東京大学名誉教授)

Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)

9. 奇妙な沸騰アラカルト

加熱なしの蒸発や沸騰の不思議

前章まで、私たちは一般に加熱面のある(もつと広く言えば外部からの加熱のある)沸騰現象を見て来ました。この沸騰は気体と液体の二相がからみ、なかなか複雑な現象ですが、これまでの説明でその大切なポイントは一応わかって頂けたと思います。そこで本章では少し気楽になって、加熱がまるで無いとか、あるいは有ってもほとんど無いに等しいような状態で起こるなど、一見、奇妙な形の沸騰の話をして、2, 3追加して、全体の結びにしたいと思います。

さて液体が蒸発して気体になる時、蒸発熱の必要なことはすでに1章で話しました。そしてこの蒸発熱は普通、加熱面などを通して液体を外部から加熱する形で液体に与えられており、前章まで述べて来た沸騰でもずっとそうでした。なお読者の皆さんの中には、電子レンジの中でものを加熱する時、加熱面が無いのに温度が上がるのは何故かと疑問を抱く人がいるかも知れません。しかしこの時はレンジ内に置かれた食物にマイクロ波をあて、食物内の分子と分子をこすり合わせることで内部から加熱をしているのであって、加熱に必要なエネルギーがやはり食物の外から与えられているのです。また曇りの日であっても、濡れた洗濯ものが自然に乾くのは、実は洗濯ものの温度が周囲の気温より少し低くなり、周囲からの伝熱で蒸発熱を貰っているのだからです。その状況は、湿度を計るのに使う乾湿球温度計の温度の様子を見ればすぐ分ることで、つまり二本ついている温度計のうち、球部の乾いた温度計(乾球温度計)の方は周囲の気温を示しているのに対し、水に濡れたガーゼに球部を包まれた温度計(湿球温度計)

の方は常に気温より低い温度を示します。

そしてこのように見て来ると、液体が蒸発するのは、外から何等かの方法で液体に熱やエネルギーが与えられる場合だけに限られるように見えます。しかしここに一つ、外からエネルギーを与えることなしに蒸発や沸騰をさせる方法があるのです。そしてその基礎になるのは、液体と蒸気が同じ圧力、温度で平衡する飽和状態では、圧力に応じて飽和温度がひとりできまるという性質(2章「発泡の開始」の項参照)です。

①「加熱なしの蒸発」

いま、水について圧力と飽和温度の対応の様子を、圧力が350ミリバールから50ミリバールの間で見てみますと次のようになります。

飽和圧力 (mbar)	350	300	250	200	150	50
飽和温度 (°C)	72.7	69.1	65.0	60.1	54.0	32.9

そして、いま大気圧(1013ミリバール)のもとに仮に温度70°Cの水があつて、この水を圧力200ミリバールの低圧容器内にノズルを通して連続的に流し込んでおくとします。この時、容器内に流入した水に接するまわりの圧力は200ミリバールですから、水はその圧力における飽和温度60.1°C(前の表参照)で平衡することになります。従って、水は最初の温度70°Cの状態から60.1°Cの状態に移り、そのぶんだけ余分のエネルギーを放出、それは水自身の蒸発に使われる結果、水の一部がひとりで蒸気になります。これを普通「フラッシュ蒸発」または自己蒸発と言いますが、ここでフラッシュ蒸発と言うのは、写真のフラッシュ(閃光)と同じような感じで瞬間的な蒸発という意味です。言うまでもなく、水自身が内部に持つエネルギー(俗に言う熱)を使って蒸発しているのです。

このフラッシュ蒸発は、今から少し以前、海水から塩をとるとか、真水を作るなどに利用されたものです。つまり「多段フラッシュ蒸発法」と言っていて、いくつかの段に分けて圧力を順次下げて行くようにし、各段で発生する水蒸気（前の表に見るように圧力の高い段ほど蒸気温度が高い）を順次利用して海水を次第に加熱（海水を通す管の外表面に蒸気を凝縮させ、その凝縮熱で海水を加熱）して行くのです。そして十分に温度の高くなった海水を、最後に燃料で所定の温度（現在の例では70°C）まで加熱、この海水を最初の段に流し込むようにするので、燃料の使用量が少なく済み、非常に経済的です。

②「加熱なしの沸騰」

次は沸騰の話に移りましょう。いま圧力 P_1 、温度 T_1 の液体を貯蔵するタンクがある時、タンク内の圧力を P_2 に急に低下させたとしましょう。この際、圧力が P_2 （これに対応する飽和温度は T_{2s} とします）に低下した瞬間、タンク内の液体の温度はもとの温度 T_1 のままですから、もしそれが現在の飽和温度 T_{2s} より高い場合は、タンク内の液体全体が過熱度 $T_1 - T_{2s}$ の過熱液体になるわけです。

従って、もし液体の中に微細なゴミなどがあれば、その気泡核を中心に発泡する形で沸騰が起こり得るでしょうし、また液体に触れているタンク内壁面上の凹み内の気泡核からの沸騰も起こり得ます。この両者のうち、どちらの沸騰が生じるか、あるいは先行するかは気泡核の条件次第ですが、いずれにせよ、現在は壁面が外部から加熱するのでなく、タンク内の液体全体が過熱状態になるのですから、普通の沸騰とは多少様子の違う沸騰になる筈です。

なおタンク内に、もし前述のような気泡核が少ないときは、突沸的な沸騰（2章「少し変わった状態の核沸騰」の項参照）を生じることも考えられますし、また仮に減圧後の圧力 P_2 にある液体において、その過熱限界（その値は少なくとも圧力 P_2 によって変わるでしょう）を越えた過熱液体の状態が出現するようなことがある時は、6章（「接触面温度および液体の過熱限界温度」の項参照）で話をした自発核生成（液体中の高エネルギー分子の作用で液中に自然に気泡核が出来る現象）に基づく沸騰が生じる可能性もあり得ます。

③「非常に急激な減圧の場合」

本項の以上の説明では、流体の圧力変化後、その流体の飽和温度は変化後の流体圧力に対応して自然にきまるものとして来ました。しかし技術上の問題いかんによっては、圧力の降下速度がきわめて大きい場合があります。そしてこのような場合には、その急激な変化期間中、液体内できわめて大きい場合があります。そしてこのような場合には、その急激な変化期間中、液体内で圧力や温度が均一の値を取り得ず、圧力振動などを起こす他、圧力降下中の液体内にフラッシュ蒸発が生じれば発生蒸気のため流体はかなりの圧縮性を持つことになってしまいます。

また液体のまわりを完全に断熱した上で減圧して行く場合を考えると、その最終圧力は②の項目に記した液体の初期温度 T_1 に対応する飽和圧力 P_{1s} にほぼ落ち着く筈ですが、しかしもし非常に急激に減圧した直後には、系の圧力が一時的に前記の圧力 P_{1s} より低下（圧力アンダーシュートと言います）してしまうことがあるでしょう。

火山の爆発的噴火

火山の噴火は非常に複雑な現象ですから、問外漢があまり軽率なことも言えませんが、大まかに言って3種類に分けられているようです。すなわち第1は、地下のマグマが関係して生じる「マグマ噴火」、第2は、地下水が加熱されて水蒸気となり、表層を吹き飛ばす「水蒸気爆発」、そして第3は、1章の終わりにちょっと触れた「マグマ水蒸気爆発」です。しかし、なんと言っても主流は最初にあげたマグマ噴火のようで、以下の話もそれを中心に考えて行きましょう。

①「噴火の様相」

マグマは地下の深いところで岩石のある部分が、何等かの原因で熱せられて融けて出来た流動体で、無水珪酸 (SiO_2) を多く含んでいます。そしてその成分組成の違いによって、粘りけの少ないものから多いものまであり、その順に言って玄武岩質マグマ、安山岩質マグマ、デーサイト質マグマ、流紋岩質マグマ（これらが地表に出て固まれば、それぞれ玄武岩、安山岩、デーサイト（石英安山岩）、流紋岩になるものです）などと分類されています。なおマグマが地表に吹出した時の温度は、マグマの種類によって多少差があり、玄武岩質マグマが高く、安山岩質マグマ、デーサイト質マグ

マ、流紋岩質マグマの順に減って行くようですが、この全体を通してほぼ 1200°C から 800°C にわたっています。

一方、噴火の形態は多様かつ複雑ですが、爆発的噴火に関し、大まかにはマグマの種類によって次のような違いが出るようです。すなわち、流動性に富んだ玄武岩質マグマが比較的小さな爆発噴火を繰り返すストロンボリ式噴火（三原山など）、次いで安山岩質マグマが引き起こすところの、少し激しいヴェルカノ式噴火（浅間山、桜島など）、それか粘りけの多いデーサイト質マグマや流紋岩質マグマが引き起こすところの、激しいプリニ式噴火（ポンペイで有名なベスビオ火山など）、およびもっと激しいプレ式噴火（西インド諸島のマルチニック島のプレ火山など）などがあります。

さてここで重要な問題は、こうした爆発的噴火を引き起こす原動力が一体どこから来るかです。普通の火山の解説書や科学便覧などには、次のようなことが書かれています。すなわち、マグマが地表近くに上がるにつれて、圧力の低下や結晶作用の進行などから水分（またその他の揮発成分）が分離し、水は高温のため水蒸気となり、その急激な体積膨張による力が、上から押さえつける力に打ち勝つ時に噴火が起こる。また粘りけの多いマグマのときは、それだけ大きな噴火圧力が必要であって、噴火までに十分なエネルギーを蓄える時間が必要であると言ったようなことです。

②「噴火を惹き起こすもの」

もちろん、噴火発生の静的な解釈としては、恐らく前述のような枠組みになろうかと思われまふ。しかし動的な本当のメカニズムとなると、いろいろのプロセスが多様に組み合わせられたものに違いありません。例えば、観察の結果によると、爆発噴火の前に火口など開口部から赤熱の溶岩が見えることもあり、これはマグマの上に強固な蓋が無い場合でも爆発的噴火が起こり得ることを意味しています。また地下のマグマの圧力は、必ずしも徐々に上昇して来るものでなく、噴火の前に急速な上昇が観測されることもあるようです。

そこで最近では噴火の引き金の一つとして、「沸騰」による急速な蒸気発生も考えられているようで（下鶴大輔著、火山をとらえる、東京大学出版会）、これは読者の皆さん方にとって、大変興味ある事柄だろうと思います。しかし噴火を起こす前

に、マグマその他が地下で起こす物理的プロセスの詳細が現状では必ずしも明確ではありませんし、また噴火の門外漢が勝手なモデルを考えても有害無益でありまふ。ただそれにしても、火山の中で水の沸騰があると仮定すると、大まかにどんな状況になるか位のことは考えられます。

さて一般に、流体には臨界圧力、臨界温度と言って、それらを越えた圧力、温度では液体と気体の区別が無くなる値が決まっています、水の場合は、それぞれ 218.3 気圧、および 374°C です。つまり、少なくとも圧力、温度がそれぞれ、これらの値以下の水でないと沸騰は起こり得ないこととなります。前にマグマの温度は 1200°C から 800°C 位と述べましたが、このマグマと同じ温度の水（例えばマグマから分離し、マグマ溜まりに閉じ込められている水など）では沸騰は決して起こらず、そのような水はすでに蒸気の状態にあるのです。

③「沸騰の発生状態」

一方、圧力が 218 気圧以下、温度が 374°C 以下の水であれば沸騰が可能になります。そして、このような水が地下にあって、それを外部から加熱する形の沸騰としては、地下の深い所から高温のマグマが上がって来て、この水に接触するような場合が考えられます。この時、マグマが比較的ゆっくり水に接触するなら、多くの場合、初め「膜沸騰」を生じ、やがて接触部近傍のマグマ温度の低下によって「核沸騰」に移り、比較的急速な蒸気発生が始まるでしょう。またもし、水（特にサブクール水）のなかに融けたマグマが貫入する形なら、6章（「蒸気爆発の起こる状態」の項参照）でお話した「蒸気爆発」のようなものが生じる可能性がない訳ではなく、この時は突発的な形の沸騰になり、また多分、火山灰を生成するでしょう。

次に、圧力 218 気圧以下、温度 374°C 以下の水が地下にあって、それが何らかの原因で急速に減圧されることがあるとすると、これは前項の②「加熱なしの沸騰」の状況、つまり減圧沸騰を起こし得る状態になります。この時、もし圧力、温度が高い所に大きな圧力低下があったりすると、過熱度の大きな過熱水が出現します。従って、このような時は、6章で述べた「自発核生成」によって水中に自ら多数の発泡点を発生させ、各発泡点周囲の過熱度の大きな過熱水から、非常に急速な沸騰を起こす可能性があり、この時も突発的な形の

沸騰になります。

ただここで忘れてならぬことが2つあります。第1に、もしこの沸騰が臨界圧力に近い高圧力で起こる時は、蒸気の体積は水のそれに近いので、それほど大きな体積膨張の効果は期待出来ません。第2に、もし発生蒸気が地中に閉じこめられて218気圧以上に圧力上昇をきたせば、沸騰は停止してしまいます。従ってこれらのことを考えると、もし水の沸騰が引き金の時は、爆発圧力が218気圧より相当低い状態の噴火になると思われます。

なおついでながら、地下のマグマ溜まりなどで発生する蒸気やガスが、溶融マグマなどと共に長い火道を通して火口に達し、噴出するような場合、その火道の流れは随分複雑だとしても、その基本では7章や8章で述べた二相流の流れと関係を持っています。また噴火口外の問題としても、例えば噴火口から流れ出る火砕流（かさいりゅう）も気体、液体、固体の3相が混在する流れです。そしてそんな訳で、沸騰や二相流に関する実験室内の基礎的な研究が、火山の噴火というような巨大な自然現象とかかわりを持ち得るということは大変興味あることではないでしょうか。

潜水艦のプロペラの音

読者の皆さんは、航空機の翼の形が流線形で、そして上側の面が少しふくらんだような独特の断面形になっているのを知っておられるでしょう。このような形の翼が水平に近い姿勢（普通、前の方が上がるように少し傾け、その傾き角度を「迎え角」と言います）で空気中を進む時、翼の上側に沿って流れる空気の流速は、下側面に沿う空気の流速より速くなるので、翼面に働く空気の圧力は上側面の方が下側面より低くなります。そしてそのため翼を上を持ち上げようとする揚力が生じて、航空機を空中に浮かすことが出来るのです。

①「船舶のプロペラとキャビテーション」

一方、船舶を動かすには、もちろん特殊なものとは別として、普通は水中でプロペラを回転させています。そしてこの船舶プロペラは普通、回転軸から放射状に何枚かの翼が付いていて、プロペラの回転に伴い、これらの翼が水中を動く時、前述の航空機の翼と同じような原理で力が生じ、その力によって船を前進させているのです。このプロペラは回転しながら、船と共に前進しますからプ

ロペラ翼の先端は水中にらせん形の軌跡を描きます。従ってプロペラの近くの水は少し複雑になるでしょうが、いずれにせよプロペラ翼の背面の水圧が周囲より低くなる現象を伴っているわけです。そして船の推進力を大きくするため、プロペラの回転数を上げたり、翼の迎え角を大きくしたりすると、翼背面における水圧の低下が大きくなります。

さて、いま船の周囲の水の圧力を P_1 、温度を T_1 としましょう。そしてその水がプロペラ翼まで流れて来て翼背面で圧力 P_2 （これに対応する飽和温度を T_{2s} とします）にまで低下するとしますと、この場所の水の状況は、前項で述べた減圧タンク内の状況と同じことになります。つまり、この場所の水は $T_1 > T_{2s}$ であれば過熱水になって、 $T_1 - T_{2s}$ だけの大きさの過熱度を持つわけです。従って、ここでもやはり加熱なしに沸騰が起こり、そのため翼背面が微小な蒸気泡群に覆われたり、時には翼面上に蒸気による大きな空洞部分が定常的に出来たりすることになります。そしてこの現象を「キャビテーション」と言いますが、ここで蒸気泡群が出来るものは核沸騰（2章参照）、蒸気空洞が定常的に出来るものは膜沸騰（6章参照）にたとえられるかも知れません。

ところで、こうして翼の背面で作られた蒸気（温度は T_{2s} ）が水に流されて、再び圧力の高い所に来ると、蒸気は過飽和蒸気（その温度 T_{2s} に対応する飽和圧力 P_2 より高い圧力にある蒸気のこと）の状態になります。そして過飽和蒸気は安定に存在出来る状態ではありませんから急につぶれ、その圧力変動がプロペラ翼に激しい衝撃を与え、翼を腐食させたり、音を発生させたりします（圧力低下域で発生した蒸気泡が、後流の圧力回復域で崩壊するときの現象は複雑で、例えば一度収縮した気泡が再膨張し衝撃波を発生したりします）。話がやや古くなりましたが少し以前（1987年）、2本の高性能工作機械で旧ソ連の原子力潜水艦のプロペラ音が減少したというようなことがアメリカで問題にされ、キャビテーションという言葉がマスコミにも登場したことは皆さんも知っておられる所でしょう。

それにしても、このキャビテーション現象は、前々項でお話して減圧タンク内の沸騰などに比べると、きわめて複雑です。例えばプロペラ翼背面

にある水の圧力は、遠方の圧力 P_1 から流れに伴い次第に低下した後、再びもとの圧力 P_1 へ回復するという動的な変化を見せるだけでなく、蒸気が水中に発生すると流れの様式が変わるので圧力変化も前とは違ったものになります。また海や河川には一般に空気が溶解していますから、その析出の問題もあります。

②「キャビテーションの気泡核」

しかし、沸騰という立場から見る場合、キャビテーションで特に留意すべきは、これが普通、低温の液体中で起こっているということです。例えば海の表面の水温 T_1 を調べてみますと、世界中、年間を通して 30°C 以下（東京天文台編纂，理科年表参照）であり、こうした水温ではそれに対応する飽和圧力の値が随分低くなります。実際、いま通常の水温 T_1 に対応する飽和圧力 P_{1s} の値を例示してみますと

水温 T_1 ($^\circ\text{C}$)	5	10	15	20	25	30
飽和圧力 P_{1s} (mbar)	8.7	12.3	17.0	23.3	31.6	42.4

この圧力の値は、前に2章（「少し変わった状態の核沸騰」の項参照）で述べた「低圧沸騰」で例示した圧力 101 ミリバールより、さらにまだ低い値です。従って「低圧沸騰」の特徴である不安定、不規則な発泡などの性格がさらに増幅されて現れるわけですが、それはそれとしてキャビテーションの場合は、温度ではなく水圧変化で問題を考えるのが便利です。

すなわちいま、水圧 P_1 、温度 T_1 の水が周囲からプロペラの所に流れて来て翼背面で水圧 P_2 まで下がるとしましょう。そして、この水圧 P_2 が前の表の温度 T_1 の飽和圧力 P_{1s} の値より低くなると、水は過熱水の状態になるわけですが、しかしそれだけでは気泡が発生することにはなりません。すでに2章（「発泡の開始」の項参照）で見たように、ここで半径 r の気泡核から泡が成長出来るためには、気泡内の蒸気圧力 P_{1s} と気泡まわりの水圧 P_2 の差 $P_{1s} - P_2$ が、表面張力による $2\sigma/r$ の値より高くなければならぬからです。ところで前表のような狭い水温範囲内で表面張力 σ の値はあまり変化しませんから、いま仮に水温を平均的に 17.5°C として、その時の $2\sigma/r$ の値を計算してみますと

気泡核半径 r (μm)	1	50	100	150	200
$2\sigma/r$ (mbar)	1460	29.2	14.6	9.7	7.3

従って例えば半径 r が 100 マイクロメートル（すなわち 0.1 ミリメートル）の気泡核から蒸気泡の成長が起こるためには、気泡核内外の圧力差 $P_{1s} - P_2$ がこの表の $2\sigma/r$ の値 14.6 ミリバールより高くなければならぬことになります。そして、このようなことを考慮しながら前記の二つの表を眺めてみると、条件にもよりけりですが、大まかに言って半径 r が 100 マイクロメートル程度ないしそれ以上はかなり大きい気泡核でない泡の成長が起こりそうにないことが分ります。もちろん以上の計算は近似的（2章参照）なものですが、それでも普通のキャビテーションで泡を作る気泡核は、普通の沸騰に比べると随分大きいものに限ると言えましょう。

③「その他のこと」

それから、もう一つ忘れてならないことは、普通のキャビテーションで発生する蒸気は、前々表のように非常に低い飽和圧力のものです。従って例えば飽和圧力が 17.0 ミリバールの時を考えると、水のなんと約 77,900 倍の体積の蒸気が生じ、これはごく僅かな量の水が蒸発しても、流れの状況にきわめて大きな影響をもたらすことを意味します。

ともあれここでは、船舶のプロペラを例にして来ましたが、キャビテーションの現象はそれだけでなく、水車、ポンプ、管路、弁など液体を扱ういろいろの装置の中で、液体が高速で流れ、そのため非常に低圧になる場所に発生しますし、また流体潤滑すべり軸受の隙間をまわっている油の中にさえ起こることがあるのです。

海洋の温度差による発電

われわれの家庭や工場に電気を送っている発電所のうち火力発電所では普通、低い温度 T_L の水をポンプで加圧してボイラーに入れ、加熱沸騰させて温度 T_H の蒸気にした後、この高压高温の蒸気で発電用タービンをまわします。そして仕事を終ってタービンから出て来る低圧蒸気を海水などで冷やして元の水の状態（温度は T_L ）に戻し、それからあと前と同じ循環を繰り返させています。このように動力設備（または装置）の中を循環し仕

事をさせる流体のことを「作動流体」と言い、普通はそれに広く水を使っている訳です。そして、この作動流体の加熱のために通常は燃料の燃焼熱を使い、また原子力エネルギーも利用されたりしているわけですが、なお太陽熱や地下熱源で加熱してもよく、また原理の面からだけ言えば実は混合熱（例えば硫酸に水を混ぜると温度が上がることを皆さんは知っておられるでしょう）、その他、温度が上げられるものなら何でもいいのです。

①「海洋温度差発電の原理」

ところで、地球の北半球側で言えば、北極から冷たい水が海洋の底の方を南方へ流れて来る一方、赤道の方からの暖かい海水が海面近くを北方へ流れて来て、海の深い所と海面近くの間で温度差が自然に作られています。そして日本では沖縄あたり、アメリカではハワイ島付近などの海では、一年を通して十数℃くらいの温度差が得られるので、これを使って発電をしようとする研究や実験が行われています。その原理自体は普通の火力発電所と同様ですが、ただ海面近くの暖かい海水で作動流体を加熱して蒸気を作り、またタービンから出た蒸気を深海（数百ないし千メートル位の深さ）から吸い上げた冷たい海水で冷却することになります。

そこで、もし太陽熱などの補助熱源を使わず、海面近くの暖かい海水だけによる時は、その海水の温度、つまり 15 ないし 20℃位の大変低い温度で作動流体を沸騰蒸発させて蒸気にせねばならぬという問題が生じます。そして、普通の発電所のように、仮に水を作動流体に使うとすると、前項の最初の表からもすぐ分かるように、20 ミリバール（つまり大気圧の約 50 分の 1）程度という驚くほど低圧の水蒸気でタービンをまわさねばなりません。もちろんこれは極めて困難なことです。そこで、もし作動流体に水以外の物質、例えばアンモニアを使うとすれば、前と同じ温度条件で大気圧

の 8 倍位の圧力のアンモニア蒸気でタービンをまわすことが出来るようになります（アンモニアの使用に伴う環境問題は別として）。

②「高性能加熱面」

また普通の火力発電所では作動流体の働く温度の範囲 $T_H - T_L$ が 300℃位の広い幅であるのに対し、現在の海洋温度差発電所の温度範囲は、前述のように最大でも僅か十数℃しかなく、なお現実にはまだそれより小さな値になってしまいます。なぜなら、作動流体を海水で加熱し、また冷却するのに、それぞれ作動流体と海水の間に温度差がどうしても必要だからです。従って作動流体を加熱や冷却する時、その伝熱に必要な温度差を極力小さくすることが至上命令の一つになって来ます。

そこでいま、海水を使って作動流体を加熱沸騰させる蒸気発生器の加熱面について考えてみましょう。この場合、核沸騰は一般に優れた熱伝達性能を持つものですが、それでも加熱面が沸点以上に過熱されて十分な沸騰にならないと熱伝達は強くないことです。そしてその必要過熱度は普通の加熱面では 5、6℃位になりますが、海洋温度差発電の場合、そんな温度差をとる余裕がありません。どうしても 1℃以下の僅かな過熱度で沸騰し、しかも熱伝達の優れた高性能加熱面を人工的に作り出すことが必要になります。

そしてそういう加熱面としては、作動流体として使用する流体が前述のような小さな過熱度で、十分な沸騰を起こすように適当な寸法の微小の凹み（2章参照）を加熱壁面上に人工的に作り出す他ありません。そして凹みの形状、凹み内の気泡核の保持、凹みへの液体侵入あるいは凹み内の蒸気の凝縮防止、壁面上の凹みの分布密度、その他、すべて壁面上の微細（ミクロ的）な構造にかかわるもので、その設計に必要な伝熱機構、またその製作に必要な加工技術などを組織的に研究することが大切になります。

（終わり）