

甲藤好郎先生ご遺稿  
沸騰の科学 (1)  
*Science of Boiling (1)*

甲藤 好郎 (東京大学名誉教授)  
*Yoshiro KATTO (Professor Emeritus of The University of Tokyo)*

ご遺稿掲載に至る経緯について

本原稿は、今から20数年前の1980年、故甲藤好郎先生が東京大学を定年退官される際、「こんなものを書いてみたよ」と小生に手渡されたものです。先生のご意向がいずこにあったのか確かでなく、先生もその後何もおっしゃらなかったこともありすっかり忘却しておりました。そして小生自身が東大を退くにあたり資料を整理しておりましたとき本原稿を見出し、長きにわたり貴重なものを放置してきた責任を痛感した次第であります。その時既に先生のご病状悪く、先生にご相談することはかないませんでした。ここ数年、研究室学生諸君の勉学のための輪講資料として用いておりましたが、今年になり甲藤先生ご逝去の後、ある席で高田保之先生(九州大学、現本会出版部会長)にお目にかかった際、ふと斯々の未公表のご遺稿があると洩らしましたところ、是非一度読んでみたいとのことでお目かけました。高田先生からは大変貴重なものなので、出版部会の

先生方のご意見もうかがい、できれば本会誌に掲載したいとお申し出があり、甲藤先生の奥様のご了解を得て、今回の掲載に至った次第です。お読みいただければわかりますように、本稿は伝熱の専門家のために書かれたものではなく、沸騰現象とそれに関連した現象について一般向けに平易に書かれたものです。しかも20年以上前のご著作であり、先生がご存命なら、加筆修正なさる部分もあろうかと思えます。このことに関し、必要な注記を入れてはどうか、との意見もございましたが、著作責任の問題もあり、フォーマットを整える他は先生の原稿そのままを掲載させていただくことと致しました。ただし、先生は数多くの美しい沸騰実験の写真を残されておりますので、各号の余白の埋め草として、それらの幾つを挿入しました。しかし、その写真や図はその号の記述内容とは対応しておらず順不同です。これらの点をお含みの上お読みいただければと思います。

庄司正弘 (産業技術総合研究所)

沸騰の科学

甲藤好郎 著

目次

- 1 沸騰入門
- 2 弱い核沸騰
- 3 強い核沸騰
- 4 蒸気の脱出と波
- 5 核沸騰の限界
- 6 液体と加熱面間の絶縁と復縁
- 7 気液の密月旅行
- 8 加熱管内の流れと沸騰
- 9 奇妙な沸騰アラカルト

1. 沸騰入門

お湯を沸かす

水をポットに入れて、ガスや電気ヒーターにかけておくと、お湯が沸くことは誰でも知っています。この沸くという言葉は、特に「風呂を沸かす」というような、ただ単に水を加熱するだけの意味に使うこともないではありませんが、普通はお湯が沸き立つことを意味しています。つまり、容器に入れた水を次第に加熱していくと、水の底の方

から蒸気の泡が発生、勢いよく立ちのぼるようになり、これを一般に沸騰（ふっとう）と言います。そしてその混乱を含んで激しくふき出る状態の例えから日頃、議論が沸騰するとか、世論が沸騰するといった表現にも広く利用されているわけです。

けれども、世の中の人々が、この沸騰という現象を科学的によく理解しているかということ、それは話が別でありましょう。もともと人類の特徴は火の使用にあると言われる位で、私たちは有史以来、沸騰をすぐ身近に見ながら暮らして来た筈です。でも、驚くべきことですが、人類がこの沸騰現象に科学的な関心を持ち始めたのは、実は今から5、60年来のことに過ぎないのです。もう少し詳しく言うと、ドイツに生まれ、後にアメリカに移ってイリノイ工科大学の教授になったヤコブ教授（1879–1955）が、アメリカへ移る直前の数年間、ベルリンの国立研究施設でおこなった沸騰伝熱や気泡の挙動などについての研究の最初の論文が世に出たのが1931年です。また、東京大学を出て、東北大学の教授になられた抜山教授（1896–1983）もこの頃、沸騰伝熱の基本的特性にかかわる非常に重要な研究をしており、その論文が日本機械学会誌に発表されたのが1934年です。なお、この頃、アメリカのマサチューセッツ工科大学などからも沸騰の実験の報告が少し出ているようです。

そしてこれらが沸騰についての科学的な研究の先駆と言えるものですが、その後すぐに沸騰の研究が盛んになって行ったわけではありません。アメリカ、旧ソ連、西欧、日本を中心に沸騰について多くの研究が発表されるようになるのは実は第二次大戦後、特に1950年代以降と言ってよく、日本では九州大学の山根教授（1901–1973）の研究が端緒になっています。従って、沸騰について私たちが持っている知識は随分新しいものとも言えるかも知れません。

### 沸騰と蒸発潜熱

さて地上で私たちが大気から受ける圧力の大きさは、天気予報でお馴染みのミリバールを使うと1013ミリバールになりますが、この圧力下に水が沸騰する時の温度は一定に定まっているので、それを大気圧下の水の沸点（ふってん）と呼び、摂氏温度目盛ではその値が100度（ただし最新の

温度目盛りでは100度の代わりに99.974度とされています）となっているわけです。なお水以外の液体でも、純粋な液体であれば大気圧下に沸騰する温度はそれぞれ決まっています、その物質の大気圧下の沸点と呼ばれています。

歴史的に振り返ってみると、これらのことが分かったのは17世紀の頃になります。まずイタリアの有名な物理学者ガリレイ（1564–1642）が1593年、空気の熱膨張を利用した簡単な温度計を考案しました。しかしこれは気圧の影響をうけるもので、まだ正確なものとは言えませんでした。気圧というものの存在を発見したのは、その後ガリレイの下で働いたトリチェリ（1608–1647）なのです。やがて1657年イタリアの都市フィレンツェで、実験を通して自然を研究しようとする実験アカデミーが設立されましたが、そこで液体温度計が改良され（温度計のガラス管内から空気を抜出してから管を閉じるように工夫）、これを使って氷の融解温度の一定なことが見出されたのです。そして物理学の研究のみならず振り時計の発明でも有名なオランダのホイヘンス（1629–1695）が1665年、水の沸騰温度が一定なことを発見、なおイギリスのボイル（1627–1691）は水の沸点が圧力によって変化することを見出しています。

さて、どんな液体でも加熱すると最初は温度が上がりますが、いま述べた沸点に到達すると、それから後は液体が全部蒸発しきるまで温度が一定に保たれます。液体が蒸気になる、つまり液体内に密に詰っている分子がばらばらに離れて自由に飛び回る気体分子の状態になるためには、ある量のエネルギー（例えば、大気圧の水1キログラムを蒸気にするためには2257キロジュール）が必要で、液体に加えられる熱量はそれに全部使われてしまうからです。そして、この液相から気相への状態変化に必要な熱量のことを蒸発潜熱（あるいは簡単に蒸発熱）と言います。潜熱（せんねつ）というのは、液相から気相への相変化（そうへんか）のために使われてしまい温度上昇にはあずからない熱を指す言葉で、なお蒸発だけでなく、氷（固相）が融解して水（液相）になる時の潜熱などもあります。そしてこの潜熱の概念はイギリスのブラック（1728–1799）によって1761年に導入され、それは彼がグラスゴー大学の教授をしていた時代（1756–66）のことでした。

ところで、大気圧の水が蒸発して蒸気になると、体積がなんと 1603 倍も大きくなります。実は前述のブラック教授と同じグラスゴー大学のなかで、蒸気機関の改良に腐心していたワット（1736－1819）は、水の蒸発の際の体積増加を測定して当時すでに 1800 倍という値を得ていますが、現在の正確な知識では 1603 倍という訳です。ともあれ、僅かの水が水中で蒸発しても、それによって発生する蒸気はまわりの水を大きく押し退け、多くの場合、流体の激しい運動状態を出現させることとなります。

### 沸騰と沸点

さて、いま沸騰の簡単な実験をすることにして、新品のビーカーを買って来るものとしましょう。そのガラスの面は傷一つなく滑らかで、ピカピカです。そんなビーカーにきれいな水を入れ、温度計を水中に漬けて下から適当なヒーターでゆっくり加熱すると、水の温度が次第にあがって行くのがわかります。そしてやがて水の温度が摂氏 100 度、つまり沸点を明らかに超えますが、予期に反してビーカー内に見えるのは静かな水だけで沸騰は全然起こりません。不審に思っているうち、水の温度が 100 度よりかなり高くなってから、激しい沸騰が突然起こりビーカーから水が飛散するまでになって、いわゆる突沸（とっぷつ）と呼ばれる現象を生じます。

この事実は、一般に沸騰という現象が、沸点だけで理解出来るような単純なものではないことをはっきり示しています。本当のところ、「沸点」は実際の「沸騰」と少し掛け離れた概念なのです。もともと沸点は、ある圧力のもとで液体と蒸気が同じ温度につりあって変化を生じないでいる時の平衡温度を指すのに対し、沸騰の方は、沸点より高い温度の加熱面から液体に熱が伝わり、加熱された液体中で蒸気が絶えず発生しているという変化の状態なのです。

とは言え、前の水の実験でも、ビーカーの底に例えば多孔質の素焼のかけらを入れてやりますと、素焼の面の微小な孔がそれぞれ核になって、そこからたくさんの蒸気泡が連続して発生するようになります。そして素焼片より上の方の水蒸気と水が混在する部分は実質上、ほとんど沸点の温度に保たれます。従って沸点は沸騰とまったく無縁な

ものとも言い切れませんが、しかし科学的に沸騰現象を見て行く上で、「沸点」は必ずしも良い言葉とは言えないことを記しておきましょう。あとでお話するように、沸点よりずっと低い温度の液体に起こる沸騰もあるのです。

### 沸騰と人間

私たちの食物の調理に沸騰がいろいろの形で関係していることは言うまでもありません。この際の沸騰は、普通は大気圧下のものですが、時には圧力釜など、もっと高圧下の沸騰も利用され、要するに人間は日常生活で随分、沸騰の世話になっています。また昔から、日本刀をはじめ鋼に焼きを入れる時など、熱した鋼を水に入れ沸騰独特の強い冷却作用で急冷したりしているわけです。

しかし沸騰は、さらに近代の工学技術の上で実に大きな役割を果たしています。もともと現代の起点とも言うべき 18 世紀の産業革命を可能にしたのはワットに始まる蒸気機関ですが、これに必要な蒸気はボイラーで作られ、ボイラーを強いて訳せば沸騰装置ということです。そして現在では、火力発電所の蒸気タービンをまわすために、一つの巨大なボイラーで一時間に何と 2000 トンもの高圧高温の水蒸気を作っているものがあります。

また原子力発電所で使う原子炉をみると、そのタイプの一つに沸騰水型軽水炉があります。ここに「軽水」というのは普通の水のことであって、「重水」という特別な水と区別するための用語です。この型の炉は、1959 年アメリカのデレスデン発電所で運転されたのが世界最初で、日本では 1970 年、日本原子力発電の敦賀発電所に始まっています。この炉では沸騰水型という名前が示すとおり、炉心に送り込まれた水がそこで燃料棒の発生熱をうけて沸騰し、発生した蒸気が直接、蒸気タービンに送られるようになっています。

一方、原子力発電所には加圧水型軽水炉を使うものもあります。この炉は初め原子力潜水艦用に開発されたのですが、原子力発電所としては 1957 年アメリカの SHIPPINGPORT 発電所で運転されたのが世界最初で、日本では 1970 年、関西電力の美浜原子力発電所に始まっています。そして、これは炉内で水が沸騰を起こさないようにした炉で、そのため水の圧力を前の沸騰水型軽水炉の二倍（約 150 気圧）に高くしてあります。また将来の

原子炉として高速増殖炉（普通の原子炉と違い高速の中性子を使って核分裂を持続させます）というものもありますが、ここでは炉心から熱を取り出すのに水を使わず、代りに液体ナトリウムを流します。このナトリウムやカリウムなどはアルカリ金属と呼ばれる物質で、電気や熱を非常によく伝えます。そしてナトリウムは、大気圧下の融点が摂氏 98 度、沸点が摂氏 881 度の物質ですから、その間の温度で運転すれば、ずっと液体のままの状態です。しかも水のように高圧にする必要がなくなります。ともあれここで話した加圧水型軽水炉や高速増殖炉では、炉内で沸騰が起きませんが、その代り蒸気発生器という大きな装置がどうしても必要で、この装置の中で水を沸騰させ、蒸気タービンをまわすための蒸気を作るのです。

ところで、こうしてボイラーや原子炉で利用される沸騰は、加熱面と流体間のごく僅かな温度差で非常に多量の熱を取る能力があり、従って加熱面の温度を低く保つことが出来るうえ、加熱面の面積を随分小さくすることが出来ます。けれども、この加熱面をよぎる熱の強さが、ある限界値を超えると、今まで持っていた優れた冷却能力を突然失ってしまうという不思議な現象があるのです。その詳しい話は後の 5 章にゆずりますが、原子炉や蒸気発生器など熱が強く伝わる装置の設計には、沸騰による熱除去の限界値について十分な知識が必要なことになります。なお宇宙空間で熱源として利用される小型原子炉の中には、液体カリウムの沸騰が使われるものもあります。

一方、いま仮に何かの原因で、原子炉に水がなくなる事故（冷却材喪失事故と言います）が起こったとしますと、炉内の温度は急に上昇するでしょう。このとき炉内を冷やし、炉を元の状態に戻すためには、急いで炉の中に水を注入しなければなりません。高温になった炉壁に沿って水が炉内に入って行く時に生じる沸騰や急激な状態変化、また炉内で発生する多量の蒸気の逆流が水の流入を妨げる問題などについての科学的な知識が必要になる訳です。

### 沸騰と先端技術

各種の先端技術でも、その重要な箇所に沸騰の関係しているものが少なくありません。例えば、絶対零度の近くで金属の電気抵抗が完全に零にな

る超伝導という現象は有名ですが、これによって現在では実用的な超伝導マグネット（磁石）が作られ、将来の核融合炉、また磁気浮上列車、荷電粒子を加速するシンクロトロンなど強い磁場を必要とする装置をはじめ、超伝導発電機などにいろいろ使われるようになってきました。そして、このマグネットは、絶対零度の近くで働くため液体ヘリウムで冷却し、しかも多くの場合、沸騰で冷却する必要があります。

また最近のコンピューターや電子機器の発達には誠にめざましいものがありますが、小さく限られたチップ面の上に非常に多数の電子素子（超大规模集積回路では 10 万個以上）が集積され、また計算の高速化のため電気の通る回数が急増し、両相まって集積面からの熱の発生密度が非常に大きくなって行く訳です。従って、これをうまく冷却する手段が重要になりますが、現在のところ、フッ化炭素（炭化水素中の水素をフッ素で置き換えた化合物で安定かつ電気絶縁性の高い物質）などの液の中にチップを直接入れて沸騰で冷却する方法が最も性能が高いようです。なおこの時もコンピューターの信頼性を保つためには、前に原子炉で話した事柄、つまり沸騰にはその熱除去に限界を与える現象のあることをわきまえている必要があります。そしてこの限界現象がどんなメカニズムで起こるのかを解明し、熱除去の限界値をもっと上げる方法を探すことも重要なことになるのです。それに実は、前に触れた核融合炉なども非常に厳しい冷却を必要とする箇所が多々あり、そのため沸騰による非常に強い特殊な除熱冷却方法の研究が鋭意行われていることも付記しておきたいと思います。

### 蒸気爆発

さて最後に、沸騰と人間との関係に関連し少し変わった話の一つ付け加えておきましょう。最近（1986 年）、伊豆大島の三原山が激しく噴火し全島民一万三百人と観光客二千人が島から脱出したとき、蒸気爆発の危険性もあるというような意見がテレビで放送されたことを覚えている人も少なくない筈です。そしてここで言っている蒸気爆発は、恐らく高温のマグマが海水中に吹き出したり流入したりして、多量の水蒸気が爆発的に発生する、いわゆる「マグマ水蒸気爆発」のことを言っ

ているのだと思います。

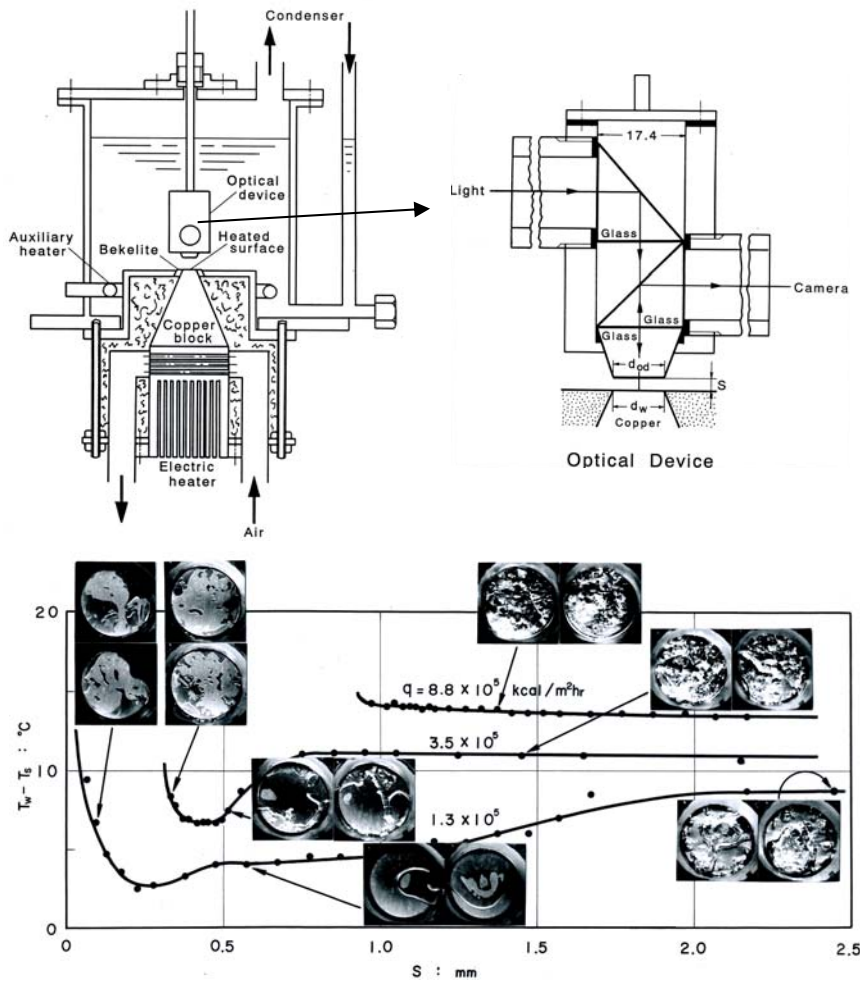
しかし、こうした自然界の特殊状況だけではなく、工業技術の世界にもひろく蒸気爆発と呼ばれる現象があります。例えば、高温の溶けた金属を扱っている工場で、それを水の中にこぼしてしまった時など、大爆発が起こって大きな災害を引き起こした例があります。また最近では原子炉の仮想事故（高温のため溶けた原子燃料が下方の水中に落ちる）などを考えると、この蒸気爆発がどんな機構で発生するのかという問題が特に重要になります。ちょっと考えると、溶けた金属の落ち込む水の温度が高く、沸点に近いほど沸騰しやすく爆発の規模が大きくなりそうに見えます。しかし実

際はそうではなく、後に6章でお話するように本当は水の温度がもう少し低い時が大きくなるという奇妙な事実があるのです。

ともあれ、以上、沸騰と私たちのかかわりあいの一部を、ごく簡単に見て来たわけですが、少なくとも沸騰は私たちと非常に深い関係を持つ現象であることに気付かれた筈です。それに、この現象をもっと広い立場から眺めてみると、すなわち気液二相が微妙にからみあいながら変貌万化の姿を見せるものであって、純粋にそれだけでも大変面白い自然現象です。従って、これからしばらく読者の皆さんと共に、この沸騰現象について科学的な観察を進めてみようと思います。

(次号に続く)

(写真及び図は元東京大学伝熱工学研究室横谷定雄氏提供)



上図の実験装置で観察用の光学プリズム（干渉板）を加熱面に近づけていったときの伝熱特性への影響を調べたもの。高熱流束下ではプリズムが加熱面の近くに及ばない限り影響が現れておらず、沸騰伝熱が加熱面のごく近傍の現象に支配されていることがわかる。