



金属面と沸騰水との間の伝達熱の極大値 並びに極小値決定の実験（抜山 四郎）*

武山斌郎

1. 研究の背景・動機とその過程

多くの化学工学の読者は図1のような沸騰曲線については周知のことであろう。この図は図9が原典であり、縦軸と横軸を対数目盛りに修正したものである。この修正により、とくに対流熱伝達部分が明示され、沸騰曲線は四つの領域から成立つことが理解できる。たまたま、化学工学の原典シリーズとして、本論文の紹介ができることを著者は光榮に思う。

1.1 プロlogue

Mc Adams; "Heat Transmission"¹⁾

The existence of several regimes of boiling was first clearly discussed by Nukiyama in 1934.

Max Jakob; "Heat Transfer"²⁾

Nukiyama [1934], using a platinum wire, 0.14 mm in diameter, seems to have been the first to succeed in obtaining a substantially complete boiling curve with a maximum boiling rate at $\theta_s \approx 45^\circ\text{C}$.

上記の二冊の書物は、伝熱学にとって有名な教科書である。いずれにも出てくる“first”という文字と，“regimes of boiling”(対流熱伝達・核沸騰・遷移沸騰そして膜沸騰)および“boiling curve”(沸騰曲線)という文字に着目していただきたい。抜山先生はまさに沸騰曲線の発見者であった。しかし、著者の弟子入りは昭和20年であ



Toshiro Takeyama
大正 13 年 5 月 25 日生。
昭和 21 年 東北大・工・機械工学科
卒。
現在、東北大学教授
趣味：開基 等

* 昭和55年7月7日 受理

The Maximum and Minimum Values of the Heat Q Transmitted from Metal to Boiling Water under Atmospheric Pressure

るので、この研究はすでに完成しており、当時の研究の状況については先輩の言葉を借りることしかできない。

抜山教授の沸騰曲線の発見は、欧米の研究にさきがけること十数年であったが、表題の論文一篇を報告しただけで、沸騰の研究ははたとやめてしまわれた。英文の発表にいたっては、実に 623 語と三つの図のみである。本文の最後にその全文を紹介したい。

何故研究をつづけなかったかの理由を伺ったら、本質は全部終った、あとは付録だけだという。そして、弟子のもの誰一人にも沸騰の研究をすることを許さなかつた。この辺、寺田寅彦と似ている。物理学者寅彦は、こんどは光の研究だ、次は音というように、面白そうなところは自分で勝手にやり、弟子には研究を制限したと、先生の兄貴の抜山大三教授からうかがっている。著者は、「似ていますね」とお答えしたことがある。

さて、現在はどうであろうか。沸騰の研究者は雨後の筈のように輩出し、沸騰の論文は百花爛漫である。何がそうさせたか。もちろん、原子力ボイラの出現であろう。

1.2 研究の発想は「三面記事」

著者は先生に沸騰の研究の動機または発想をおたずね

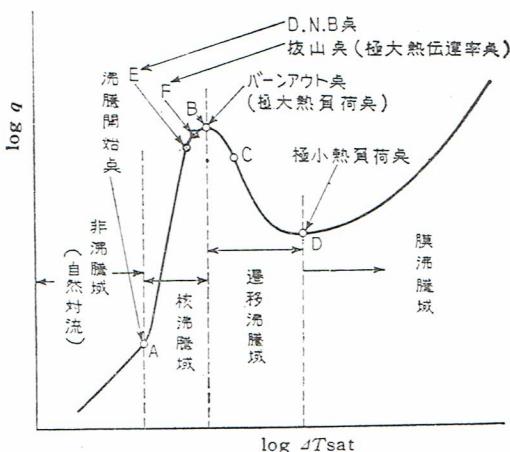


図 1 沸騰曲線の形状と諸領域の定性図

したことがある。先生は即座に「三面記事だよ」と答えられた。その頃、新聞にボイラ・蒸気タービンののっている船舶が難破した記事があったそうである。港に仮碇泊でもしていたのであろうか。台風情報をラジオで掴みながらも、ボイラの蒸気発生が時間的に立ち遅れ、待避の脱出が不可能であったためといふ。

先生は、脱出の方法を真剣に考えられた。たとえば、蓄熱式の蒸気発生器である。いざ鎌倉のときに、その上に水を散らし、瞬時に大量の蒸気を発生させたい。それが一体可能であろうかどうか。それにしても高温面から水への熱伝達率が全く解っていない。はたまた、ボイラの蒸発管の熱負荷をどこまで上げることが可能なのであろうか。これも解っていない。以上が先生の沸騰の研究の発想であった。

結果は、現状のボイラの熱負荷は理論的に可能な沸騰熱伝達の極大値（抜山ポイント）の二ケタも小さい値なのである。すなわち沸騰の熱伝達率の素晴らしい大きさは、石炭・石油による加熱方式では到底足もとにも及びつかなく、実現ができない。

しかし、遂に人類のつかまえた核燃料への中性子の衝突による連鎖反応は抜山ポイントの熱伝達の実現を可能にしているのである。

1.3 長靴をはいていた実験助手

“実験を担当した助手が、水だらけになったコンクリートの床の上を、長靴をはき、懐中電灯を手に、蓄電池用の厚いガラスの水槽中のニッケル線や白金線をてらす。白衣の抜山教授は細線から発生する蒸気泡をじっと見つめる。数多くの細線は極大点に達せずに惜しいところで焼切れる。砂浴で加熱された厚いガラスの水槽は時折音を立てて真二つに割れる。それごとに何巻かのオシログラムが無駄になるが、これらの失敗が重なるにつけ、困難な実験のコツが会得され、遂に予想どおりの極大点と極小点が、多数の実験点によって裏付けられたのである”。

以上が抜山四郎論文集「熱」³⁾の序文に書かれている棚沢泰教授の文章である。

文中、なぜ厚いガラス（むかしの蓄電池用の容器は厚さが一様でない 10 mm 厚位のものであった）が割れたかはその理由が解らないと先生は云っておられた。そして次の日、実験をはじめようと思うとよく容器は割っていたという。また、オシログラムは核沸騰から膜沸騰への移行とバーンアウトにいたる過程の電流と電圧の変化を記録する研究であったが、実験的には失敗であったことにな

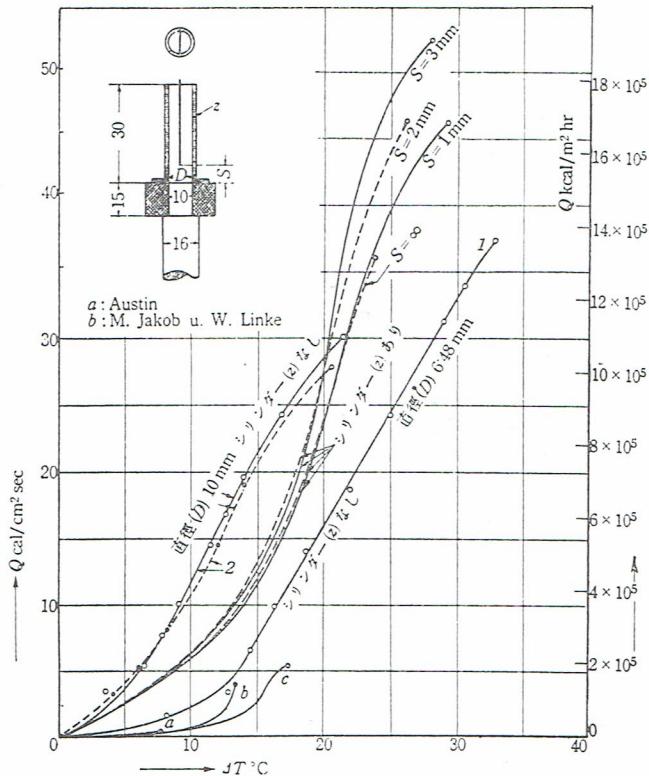


図 2 水平面の温度差 ΔT と Q との関係、水温 100°C

る。実験結果が発表されていない。しかし、現在も未だ不明である。

2. 原典の解説とその周辺

2.1 論文の書き出しがまず結論

沸騰曲線の全貌については、大方の読者の理解するところであろうから、詳細な紹介は省略するが、まず驚いたことに、論文の最初のページに結論と書いてあり、しかも図面が二つ入っている。先生の 200 篇にも及ぶ論文で結論が真先に書かれている論文はあとにもさきにもこれしかない。結論ではなく序論のミスプリントではないかと質問したら、否との答が返って来ている。現在ならば、論文構成が悪いとの理由で、査読落ちというところであろうか。

原典には平面と細線による二つの沸騰実験がなされているが、細線の実験で核から膜、膜から核への履歴現象が観察されている。しかし、平面においても同じ履歴あるいは遷移があったにもかかわらず、膜沸騰の実験点がないのは惜しい。

2.2 熱は川の流れのように

図 2 と図 3 が結論の中にある二つの絵である。図 2 左上の供試平面伝熱面の斜線のところが、水密と断熱をか

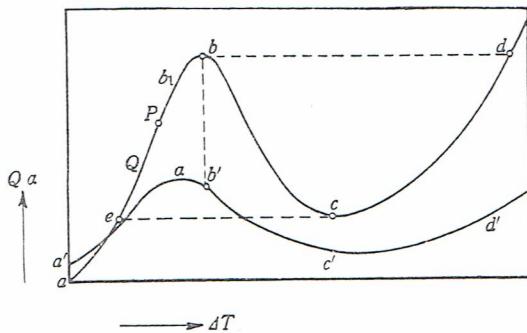


図 3 飛躍的遷移現象の説明

ねたエボナイトであるが、これが、核から膜への遷移過程で高温のため溶けたり燃えたりして、くちゃくちゃになってしまい、ために膜沸騰の実験点がなかったと聞いている。先生の机上の硯箱の中にこの部分が大切に保存されているのを見たことがある。

しかし、図 2 で a , b , c などの Austin あるいは Jakob の実験点の熱流束を図の縦軸で比較して欲しい。1~2ケタの熱流束の差異である。供試伝熱部の直径が 16 mm から 10 mm と縮小され、熱を川の流れのように集めたすばらしい実験技術によるものである。この手法は現在では常識的に採用されている。

しかも、現在、エネルギー問題に対応すべく、高性能の伝熱面の研究が行われているが、この時代すでに、沸騰熱伝達の促進を気液交換の観点から検討されていることも注目に値する。図 2 の伝熱面上にある細長い小さい箇がそれである。

2.3 飛躍的遷移現象の発見

現在、数多い飛躍的遷移現象が発見され、工学に応用されているが^{4,5)}、その原点ともいいくべき沸騰現象の飛躍的遷移の説明を図 3 は示している。熱流束と温度を上げることによる a から b への核沸騰、その後 b から d への膜沸騰への飛躍、 d から c への膜沸騰の熱流束と温度の低下、そして c から e への飛躍の説明図である。

これらのことから、数多い実験によって確認された自信が、論文の真先に結論と書かせる衝動力となったのに違いないのである。

以下、実験の主力である細線の実験を述べなければならない。

3. 実験装置および結果とその考察

3.1 手づくりのホイート・ストーン電橋

図 4 が針金に対する実験装置である。(甲) の ab が供試金属細線である。沸騰曲線を画くためには、熱流束とその温度を知らなければならない。熱流束は直流電圧と電流を測定すれば直ちに求まるが、その温度は簡単には

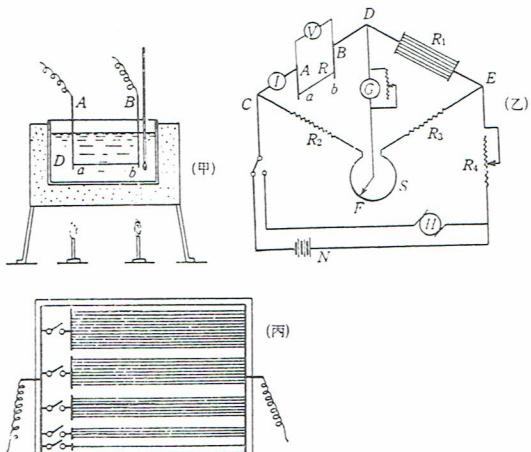


図 4 針金に対する実験装置

求まらない。ために、金属細線は伝熱面であると同時に抵抗温度計として採用された。ここで、電流と電圧からその抵抗値は簡単に計算できるはずであるが、指針式の電流と電圧計では、精度が低くて、とても細線の温度を表わす抵抗値の測定には不適当である。著者も経験があるが、すべて同じような値となる。すなわち、金属の電気抵抗の温度係数を測定することになるので、ホイート・ストーン電橋の四つのアームの一つとして、伝熱面は(乙)の ab のように組み込まれなければならない。現在のような精度の高い指示式の電流電圧計ならばその必要はないかもしれない。しかも、もう一つのアーム R_1 にはこの金属細線と同じ大きい電流を流さなければならない。 R_1 は数十本のマンガニン線によって、(丙)のように手づくりで製作せざるを得なかった。 R_2 と R_3 は既存の抵抗をそのまま用い、ほとんど電流を流さない設計もできる。ガルバノメータ G の震点を決めるために、長さ 1 m 以上の針金 S が、机の横のところに張られ、その上を F なるクリップが線上をすべることになる。沸騰容器はしばしば割れたといわれる蓄電池用のガラス容器であった。

この実験装置の費用を考えてみると、おどろくべきほど安価ではなかろうか。先生はよく云われる、「研究費はいらない。研究費があると研究しなければならないからなあ」と。

3.2 飽和沸騰とサブクール沸騰

白金線・ニッケル線およびニクロム線による数多い測定値が、飽和沸騰の核沸騰部として六つの線図に示されているが、ここでは紙面の都合上その中の三つを図 5, 6, 7 として掲げる。著者はこれらの図から数多く繰り返さなければならない実験の本質を学び、同時にバラツキの多い沸騰現象の神秘さを、先生ご自身で感ぜられていたに違いないと思っている。

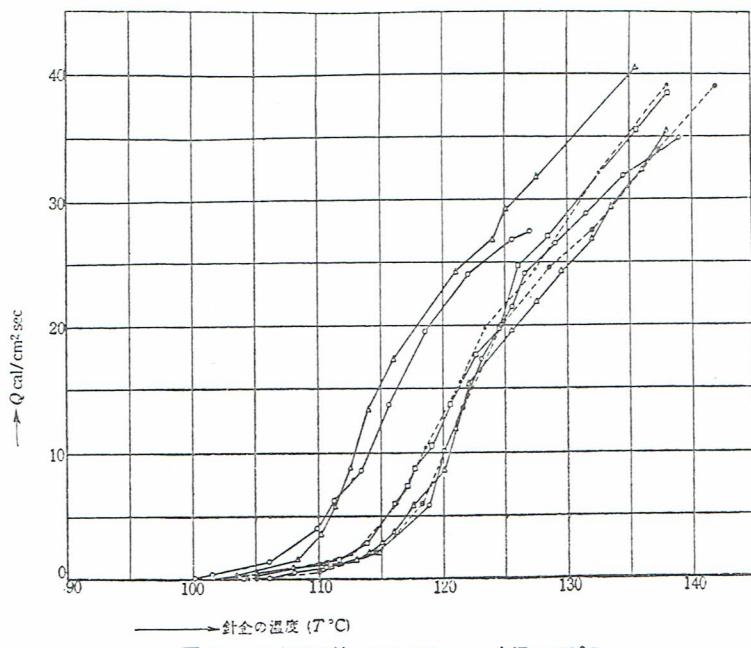


図 5 ニクロム線 $d=0.535\text{ mm}$ 水温 $\approx 100^\circ\text{C}$

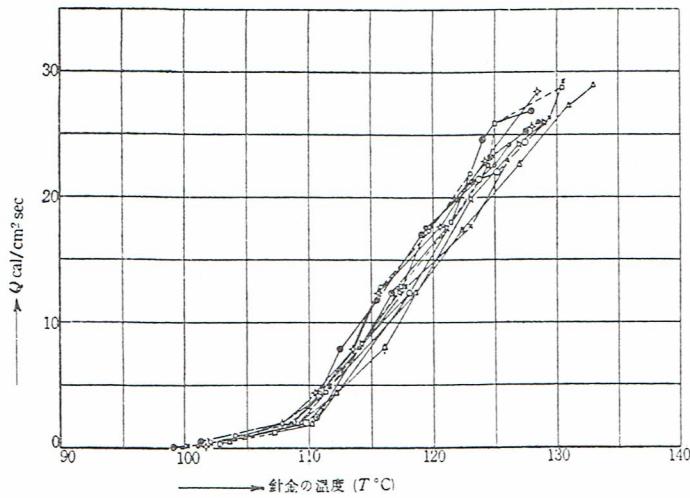


図 6 ニッケル線 $d=0.40\text{ mm}$ (No. 11~No. 20) 水温 $\approx 100^\circ\text{C}$

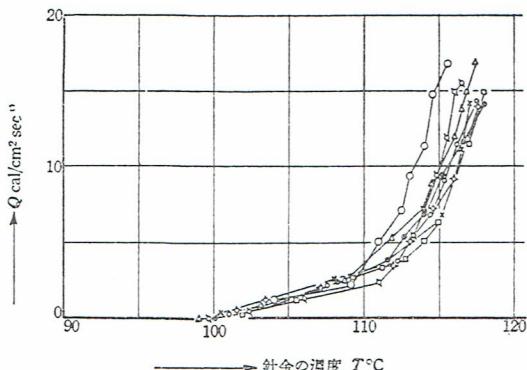


図 7 白金線 $d=0.14\text{ mm}$, 水温 $\approx 100^\circ\text{C}$

さらに、サブクール沸騰の実験がすでに図 8 のように行われていたことは敬服のはかはない。

因みに本実験の全測定は、金属細線の材料を三種類、直径を四種類、長さは 200 mm の一定、そして実験数は合計 54 本の線でおこなわれている。

3.3 水中で金色に輝く白金線

図 9 が遂につかまえた沸騰曲線の全貌である。300°C 以上の領域は膜沸騰部であり、とくに 800°C 以上になると、白金線は水中で金色に輝く。そしてその周りからおだやかな膜沸騰の気泡が立ち上がる。この美しさは直接実験してはじめて知ることのできる感激であろう。

この辺の苦労は、本論文の先生のナマの声をきく方が理解し易いと思い、ピックアップしてみよう。

“第 4 図の R_4 を小にして置けば、第 3 図の d と b との高さの差は小になる。この理由で図 5, 6, 7 の Q_{\max} の決定の際は電流の可変範囲を広くするため R_4 を大にしたので、太い白金線も焼き切れたが、此處では出来るだけ小さい R_4 を用いて焼き切れを防いだ。それでも尚は幾分高い位置へと飛ぶ事は第 9 図上に矢で示した通りであった。実験では高温度に急変せしめた後、さらに高温部をしらべ次に電流を減じて極小値を求めた。極小値付近になると白金線は白色に輝いて居たものが赤色から暗赤色と赤色のブチになり Q_{\min} の点を越えると温度が急降しガルヴァノメータは急振して針金の光は

消えて最初の状態に帰へる”とある。

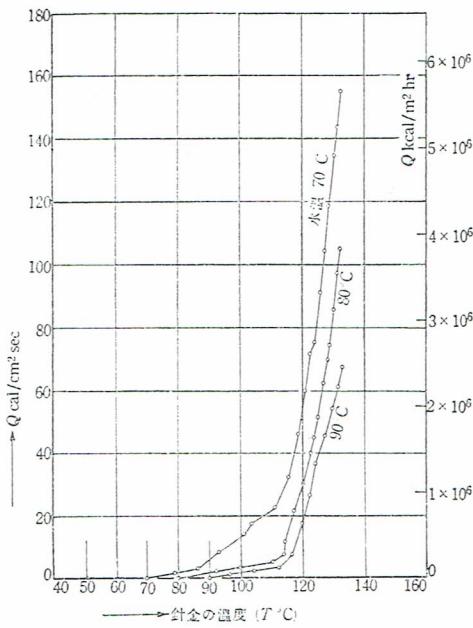
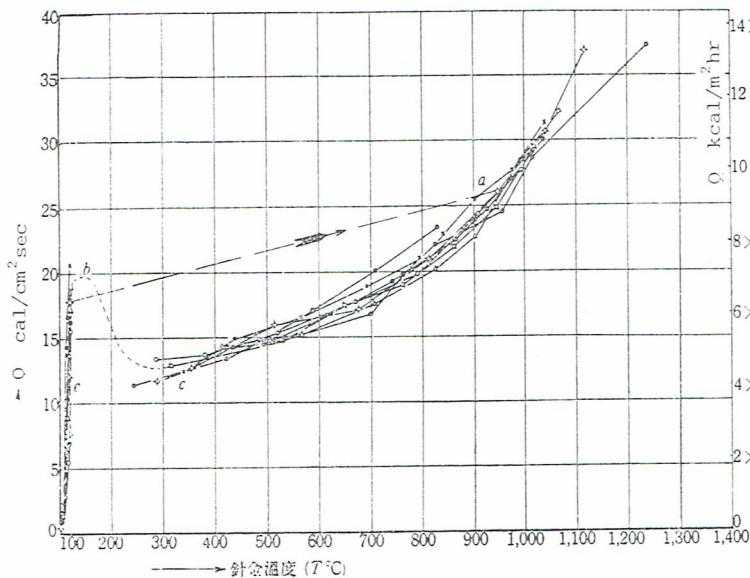
図 9 の沸騰曲線こそ、永久に伝熱学の殿堂で燐然と光を放ちつづけるに違いない。

3.4 抜山ポイントが間違って伝承された

1959 年、棚沢 泰教授が内燃機関の燃焼の研究において、液滴が高温壁上で蒸発する速度と壁温との関係が、まさに沸騰曲線と同じであることを求め⁶⁾、ロンドンで講演された。著者もその録音を聞いたが、沸騰の極小値の Leidenfrost 点（この点は高温面上の液滴が蓮の葉の上の水滴のように転がり踊ることから、すでにライデンフロスト・ダンスと名付けられ、沸騰曲線の膜沸騰の実現する最小温度すなわち極小値と一致する）に対して「皆様の御賛成を得て、

表 1 ニッケル線 No. 6 の実験結果 (直径=0.40 mm)

amp.	volt	watt	cal	$\frac{Q}{\text{cm}^2 \cdot \text{sec}}$	ΔT	$\frac{a}{\text{cal}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^\circ\text{C}}$	$\frac{a'}{\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{hr} \cdot ^\circ\text{C}}$
1.2	0.25	0.3	0.0715	0.0284	0.8	0.0355	1,277
4	0.8	3.2	0.763	0.303	4.7	0.0645	2,320
8	1.6	12.8	3.05	1.214	9.3	0.130	4,680
10	2.0	20	4.76	1.896	10.5	0.181	6,500
15	3.1	46.5	11.07	4.41	12.5	0.353	12,700
20	4.1	82.0	19.52	7.775	14.3	0.544	19,560
25	5.2	130	30.96	12.33	17.0	0.726	26,100
30	6.1	183	43.57	17.35	19.3	0.913	32,900
34	7.0	238	56.68	22.57	23.5	0.965	34,800
35	7.3	255.5	60.85	24.23	26.5	0.915	32,900
38	7.9	300	71.5	28.46	30.3	0.949	34,200
39.4	8.2	323	76.9	30.6	32.5	0.942	33,900

図 8 水温 100°C 以下の場合の Q 図 9 $d=0.14 \text{ mm}$ の白金線による Q_{\min} 以上の部分の測定結果

沸騰曲線の極大値を抜山点と名付けたい。」といって万場の拍手をうけられた。この時が抜山点の誕生であったが、果して、沸騰曲線の熱流束の極大値か、熱伝達率の極大値を指すのか不明確であった。

先生も棚沢 泰教授も、当然熱流束の最大値すなわち膜沸騰に移行する核沸騰の極大値、現在バーンアウト点と称される点を抜山点と思われているようであったが、事実は図 1 のように誤解されて伝承されている。先生の論文にも責任があった。すなわち、題目が“伝達熱の極

大値”となっていざれか不明である。さらに、表 1 のような実験結果の一部として整理された測定値があり、その中で熱伝達率の極大値のところの数値が太い活字で印刷されている。いつのまにか、抜山点は熱伝達率の極大値となってしまった。しかも、原典を読めば読むほど、この極大値を実現するための実験技術上の努力(図 4 の R_4 の決定の仕方)があつたことがうかがえるし、また図 10,

11 の縦軸が熱伝達率である線図の極大値の存在を明示するゆるやかな曲線が大きくそれを主張しているかのように見えた。すなわち、図 1 が沸騰曲線の説明として定着してしまったのである。

さらに、先生は主張される。“バーンアウト点という言葉は非常にいけない。この言葉のために沸騰熱伝達の抜山点の工業的利用が遅れている。バーンアウト点は図 3 の d 点であって b 点ではない。 d 点ですら必ずしもバーンアウトする点ではない。外国の論文がよく使用するものだから、日本人が真似をしてしまった”。最近では限界熱流束(critical heat flux)と呼ば

れている。沸騰曲線では極大熱流束点も極大熱伝達率点も位置的に非常に近い場所にあるので、そう腹も立たない。

3.5 過熱水存在の反省

水中で気泡が発生するためには、表面張力に打ち勝つだけの過熱が必要であることは現在では常識である。先生は本研究の以前に、この過熱度を測定しようと思ったが、永い間失敗をくり返し、しかも、Jakob⁷⁾は 1932 年すでにこれを測定していると本論文に述べているが、後

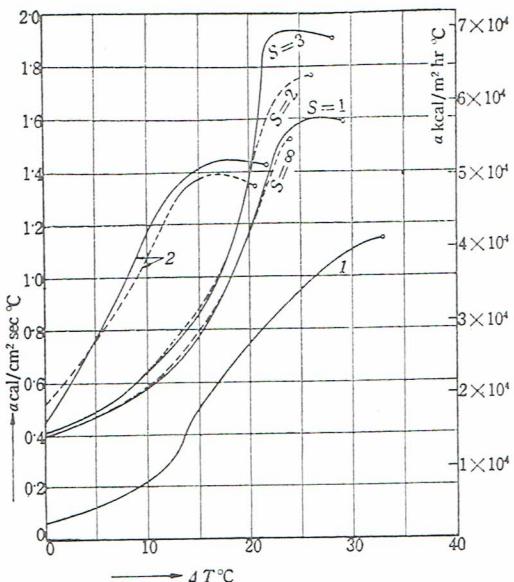


図 10 水平面の ΔT と α の関係、水温 100°C

日、先生の「沸騰の研究の思い出」⁸⁾の中に次の謙虚な文章があるので研究者の心得として掲げておきたい。

“この実験を始めたころ、水が沸騰を始めないでも、針金の温度は容易に 105°C くらいになるので、「水は 100°C で沸騰する」との鉄則（過熱水はあるが、これは容易にできるものではない）に反するので、内心おおいに得意であったが、Clerk Maxwell や Lord Rayleigh 等の書いた古い教科書 Theory of Heat を読んだら、その中に、水はその圧力に相当する温度の上に、さらに接触面と水との cohesion に打勝つだけ高い温度になってから沸騰する、とこどもなげに繰返して書いてあるのを見て、彼らは知っていたなと思った。以来、私は自分の書く論文の初めに、従来何々が知られていなかったから自分がやったなどと、うっかり書かないことにしている。”

4. エピローグ

4.1 百花爛漫

現在の沸騰の研究は百花どころでなくまさに千花以上であろう。九州大学西川兼康教授の核沸騰の研究、東京大学甲藤好郎教授の限界熱流束に関する研究、東工大一色尚次教授の沸騰実験への斬新なる発想、そして後へ続けとばかりの日本の各地における沸騰熱伝達に関する若い研究者群の研究成果は、決して世界に遅れをとるどころか、むしろこの論文のようにリードをつづけていると云って過言ではない。そしてそれらの研究が、エネルギー問題の解決の一助として、機械工学に化学工学に活躍しつづけているのである。

4.2 少しく手前味噌を

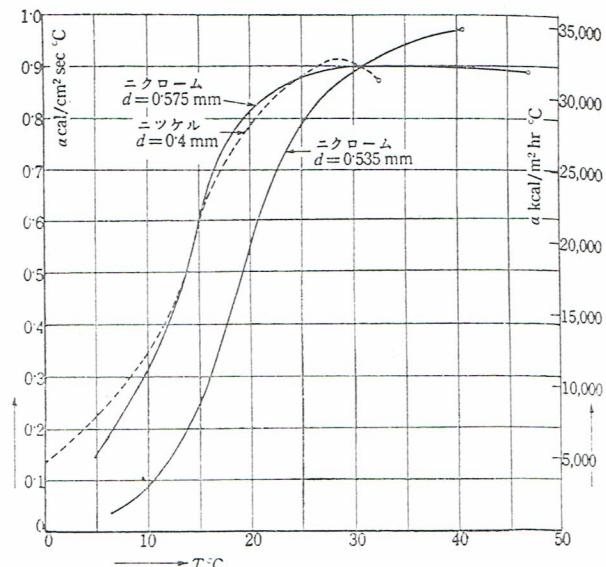


図 11 各種針金に対する平均の α (水温 100°C)

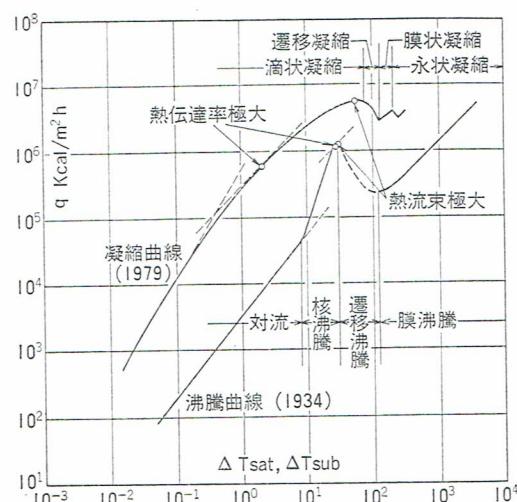


図 12 凝縮曲線と沸騰曲線の対応

昭和 35 年、先生の退官の間近い頃から、著者も禁を破って沸騰の研究を始めていた。研究をやっていることが、先生に発覚したが叱られはしなかった。ただ、一つだけ沸騰研究に対する信念をもっている。それは抜山教授の研究のように、必ず沸騰の各領域を含む研究をおこなうということであった。そして、熱流束とは何か、熱伝達率とは何かについて考察をつづけている。さらに抜山教授が発見された抜山点（バーンアウト点として危険視されている）の高い熱流束と熱伝達率を安定に実現し、それを工学に応用することが弟子としての役目ではないかと考えている。

さらに、少しく手前味噌をつけ加えさせていただきたい。抜山教授の沸騰曲線の発見後約 40 年にして、著者

は初めて凝縮曲線を発見した⁹⁾。沸騰と凝縮は表裏一体であることが予想されながらも凝縮曲線の測定は困難であつたと思われていた。ある夜、突然“熱は川の流れ”を想い出し、約一ヶ月で凝縮曲線を完成した。その図を図12に示す。皮肉なことに抜山点に対応する熱伝達率の極大値と熱流束の極大値は、沸騰曲線に比べて、大部分その位置が離れていた。物理現象としての沸騰と凝縮の宿命であり、いわゆる熱伝達は凝縮の方が大きい。凝縮曲線の発見を最も喜んでくれたのが研究室の先輩と後輩であったことは非常に楽しい。

4.3 623 words の英文論文

最後に本論文の英文の全文を紹介してこの稿を終えたい。

It is a well known fact that the heat Q transmitted from a metallic surface to boiling water increase with their temperature difference ΔT . But it is not yet known whether it has a maximum and minimum values. It was impossible, for determining experimentally the maximum value of Q , to use a plane boiling surface of moderate size because the value Q_{\max} was so large that no device can supply this heat to the metal surface from behind it.

The author, therefore, adopted the following two kinds of boiling surface:

1) The surface of wire stretched in boiling water.

The length of the wire was about 20 cm and its diameter was 0.14 to 0.4 mm. The test wire was introduced in a branch of a Wheatstone electric bridge and the relation of its temperature and the reading of the bridge was formerly calibrated with a small current from a battery.

Next, by supplying strong current (up to 50 amperes) from a D.C. generator, ebullition was caused at the surface of the wire. The heat generated in the wire which is equal to Q multiplied by its surface area was determined by a voltmeter and ammeter, and the wire temperature by the bridge. At the point when Q reached its maximum value (at this point $\Delta T \approx 40^\circ\text{C}$ or the wire temperature $\approx 140^\circ\text{C}$) the wire melted, because by the smallest change beyond this point the wire temperature must change suddenly to a very high value, as the decreasing Q at this region cannot balance the electric heat which is maintained approximately constant. Fig. 5 shows the relation between ΔT and Q . It must, however be expected that though Q decreases due to the increasing volume of steam in the vicinity of the surface, it must have its minimum value where it begins to increase again. For, at a very high temperature of the surface Q can be very large due to the radiation. This is experimentally proved to be correct by using platinum test wire of 0.14 mm diameter. The temperature of this wire, after having reached its Q_{\max} point, rose suddenly several hundred degrees of centigrade without melting. At this state the wire was seen bright in the water. By the decreasing of the heating current the state of the wire did not go back

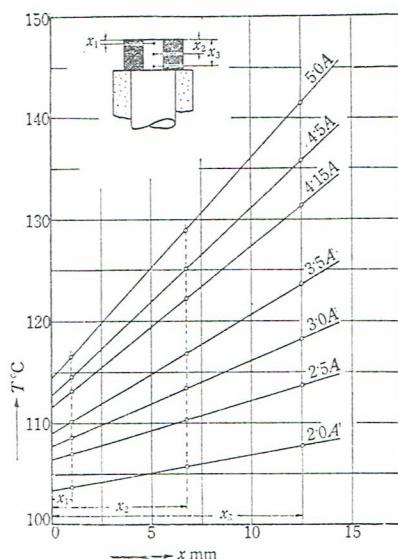


図 13 加熱電流と温度分布の関係

to the Q_{\max} point but its change occurred along a smooth curve towards the origin until it reached the Q_{\min} point. At this point of minimum Q , ΔT decreased suddenly and the state came to a point on the initial curve between the origin and the point of Q_{\max} . Fig. 9 shows the relation between Q and ΔT for platinum wire ($d=0.14$ mm) during this process. The state between Q_{\max} and Q_{\min} is unstable and is shown by a dotted line on the figure. It must, however be remarked, that the result on Fig. 9 is not accurate and has rather a qualitative meaning due to the difficulty of the experiment.

2) The second boiling surface adopted was a circular plane surface of 10 mm diameter marked by ab in Fig. 2. This surface is a sectional plane of a cylindrical copper piece of which lateral surface was heated by a heating wire. By this arrangement it was possibly to supply sufficient heat to the boiling surface ab. The heat Q transmitted to water through ab was calculated from the thermal conductivity of copper and the temperatures T_1 , T_2 in the copper piece. The temperature of the boiling surface is determined by extending the temperature gradient between T_1 , T_2 to the surface. The result from this apparatus is shown in Fig. 13 which does not differ much from Fig. 5.

文 献

- 1) Mc Adams: "Heat Transmission", (1942), McGraw-Hill
- 2) M. Yakob: "Heat Transfer", (1950), Wiley
- 3) 抜山四郎論文集:「熱」, 美覧堂
- 4) 岡本: 化学工学, 第38巻, 第4号, (1969) 23
- 5) 武山: 沸騰曲線とその周辺, 日本機械学会誌, 第77巻, 第662号, 昭和49
- 6) Z. Tamura and Y. Tanazawa: 7th Symposium on Combustion, (1959), 502
- 7) M. Jakob, U. W. Fritz: Forschung, (1931), Dez., S. 441
- 8) 抜山: 沸騰の研究の思い出, 日本機械学会誌, 第63巻, 第498号
- 9) T. Takeyama and S. Shimizu: 5th International Heat Transfer Conference, 1974