

卒業論文

高温鋼板の水噴流冷却実験

通し番号 1 - 67 完

平成15年2月7日提出

指導教官 庄司 正弘 教授

丸山 茂夫 助教授

03004 岩本 厚

## 目次

<b>1.序論</b> .....	3
1.1研究の背景.....	4
1.2過去の研究.....	5
1.3研究の目的.....	5
1.4.シミュレーションについて.....	6
<b>2.実験</b> .....	7
2.1実験装置.....	8
2.2実験方法.....	11
2.3実験条件.....	11
2.4熱電対の配置.....	12
<b>3.結果と考察</b> .....	14
3.1非沸騰実験.....	15
3.1.1冷却時の様子.....	15
3.1.2冷却曲線.....	15
3.1.3シミュレーションとの比較.....	16
3.2沸騰実験 (層流) .....	18
3.2.1沸騰の様相.....	18
3.2.2沸騰現象解析.....	21
3.2.3領域分け.....	28
3.2.4水温 (サブクール度) の影響.....	30
3.2.5シミュレーションとの比較.....	36
3.3沸騰実験 (乱流) .....	38
3.4局所水温測定実験.....	40
<b>4.結論</b> .....	42
4.1結論.....	43
4.2今後の課題.....	43
付録A.....	44
A - 1 実験データ.....	45
A - 2 記号表(シミュレーション).....	64
参考文献.....	65
謝辞.....	66

# 第一章

## 序論

# 1.序論

## 1.1 研究の背景

鉄鋼業における鋼板の冷却は、圧延直後に引き続くインラインでの水冷に代表されるように、主に製品の強度や加工性、および靱性の確保のための熱処理を目的として行われる。

この熱処理においては、極力同じ温度で変態させることにより、均一な処理組織を得ることを目的として、変態開始直上の温度から冷却を開始し、所定の処理温度(変態温度等)までは急冷する。

この急冷により、降温間の変態開始や変態進行は抑制されるが、その反面、位置により冷却に差が生じ、温度分布不均一が発生する。

薄板製造においても厚板製造においても、圧延後の水冷における近年の課題はほとんど、この冷却時の温度分布不均一による塑性変形起因の、冷却後(常温時)の変形、残留応力の問題である<sup>[1]</sup>。鋼板の水冷過程における鋼板内の温度分布不均一を減じることは、現在の鋼板冷却技術の最も大きな課題である。

その問題解決のためには、鋼板の温度分布を知る必要があるが、実情としては、熱間圧延直後の冷却ということから、熱電対による冷却中の継続的な温度測定が困難なため、冷却設備出口での非接触式温度計による測温値が参考になるのみで、実機での測定は困難という状況にある。

そこで、鋼板表面の温度分布を予測できるシミュレーションソフトが必要になってくる。このシミュレーションソフトにより時間的・空間的な温度分布が予測できれば、最適な冷却条件を見つけ出すことができ冷却の制御が可能になる。

しかし、現在の鉄鋼業界においても、有効なシミュレーションソフトは開発されていない。なぜならば、沸騰現象は相変化を含み、固液接触の問題があるなど、シミュレーションするのが非常に困難な現象だからである。

普遍的なシミュレーションソフトを作るには、鋼板表面で実際に起きている沸騰現象を解析する必要がある。

## 1.2 過去の研究

表 1.1 主な衝突噴流の研究

報告者	報告年	冷却面	冷却	沸騰	定常性	噴流			流水部	
		材質				形態	流量l/min	Tsub	流れ	跳水
永井ら	1955	銅(部分埋込)	水	-	定常	円形	3~8	76	射流	有
石谷ら	1971 1976	ステンレス(部 分埋め込み)	水	-	定常	円形	3~30	(70~80)	射流 常流	有
石谷ら	1980	SUS316	水	全体	非定常	2次元	12~59	5~55	-	-
中西ら	1982	SUS316	水	全体	非定常	円形	2~130	5~80	(射流)	(無)
門出ら	1987	銅	R113	核	定常	円形	0.09~0.2	2以下	(射流)	(有)
熊谷ら	1994	銅	水	全体	非定常	2次元	3~6	0	(射流)	(無)
西尾ら	1994	SUS304	水	膜	非定常	2次元	1.7~3.7	10~40	(射流)	(無)
西尾ら	1996	SUS304	水	膜	非定常	-	-	-	-	-
西尾ら	1996	SUS304	水	膜	非定常	2次元	1.7~3.7	10~40	(常流)	(無)
鈴木	1999	SUS304	水	全体	非定常	扇形, 円形	5~30	70	射流 常流	(有)

衝突噴流による沸騰冷却は、その高い熱流束ゆえに工業的に広く利用されており、そこでの熱伝達についても、多数の研究が行われてきている。これらの研究の多くは、衝突点近傍に注目したものであり、また、比較的大きい伝熱面を用いた場合でも、定常的熱除去を目的としているためか、加熱量を増加していく方向での熱伝達を議論したものがほとんどである。

しかし、シミュレーションソフト作成のためには、衝突点のみならずその周囲表面での熱伝達が重要になる。

## 1.3 研究の目的

本研究の目的としては、単一ノズルによる衝突噴流冷却を対象とし、まず1つ目に、冷却中の時間的・空間的な沸騰現象の解析を行うこと。2つ目に、解析結果とシミュレーションとの比較を行い、シミュレーションと現実の間でずれの生じる原因を考えること。3つ目に、シミュレーションをあわせこむために必要な実験データを得ることとする。

## 1.4 シミュレーションについて

本研究は企業との共同研究であり，私は実験とシミュレーションソフト作成のうち，実験を担当したが，作成したシミュレーションソフトについて簡単に述べる．(詳しくは参考文献〔2〕を参照)

鋼板冷却のシミュレーションにはVOF法を用いた．VOF法とは，液体の体積から界面形状を間接的に追跡する方法である．

・支配方程式

連続の式

エネルギー保存式(流体)

$k$  の輸送方程式

F値の移流方程式

エネルギー保存式(鋼板)

気液界面における物性値

運動方程式

F値:各セルにおける液相の体積割合

(F=0:気相, F=1:液相,  $0 < F < 1$ :気液界面存在)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (ru) + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (rFu) + \frac{\partial Fv}{\partial y} = 0$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (ru^2) + \frac{\partial uv}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r\tau_{xx}) + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} - \xi \frac{\tau_{\theta}}{x} \right) + f_x$$

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial u}{\partial x} \quad \tau_{xy} = \mu \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (ruv) + \frac{\partial v^2}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left( \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (r\tau_{xy}) + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} \right) - \rho g + f_y$$

$$\tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial v}{\partial y} \quad \tau_{\theta} = 2\mu \frac{u}{x}$$

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (ruT) + \frac{\partial vT}{\partial y} \right) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left( r\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_s \frac{\partial T}{\partial y} \right)$$

$$\rho_s c_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left( r\lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (ruk) + \frac{\partial vk}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left( r(v_l + v_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (v_l + v_t / \sigma_k) \frac{\partial k}{\partial y} \right) + P_k - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} (ru\varepsilon) + \frac{\partial v\varepsilon}{\partial y} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial x} \left( r(v_l + v_t / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (v_l + v_t / \sigma_\varepsilon) \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \varepsilon)$$

$$v_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \lambda_t = \frac{c\rho v_t}{Pr_\xi} \quad P_k = v_t \left( \frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \quad \nu = \nu_l + \nu_t \quad \lambda = \lambda_l + \lambda_t$$

$$C_\mu = 0.09 \quad C_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.3 \quad Pr_\xi = 3.0$$

$$\rho_l = \rho_w F + \rho_v (1-F)$$

$$\nu_l = \nu_w F + \nu_v (1-F)$$

$$\lambda = \lambda_w F + \lambda_v (1-F)$$

直交座標:  $r=1, \quad =0$ , 円柱座標:  $r=x, \quad =1$

## 第二章

### 実験

## 2.実験

### 2.1 実験装置

本研究の実験装置を下図に示す。

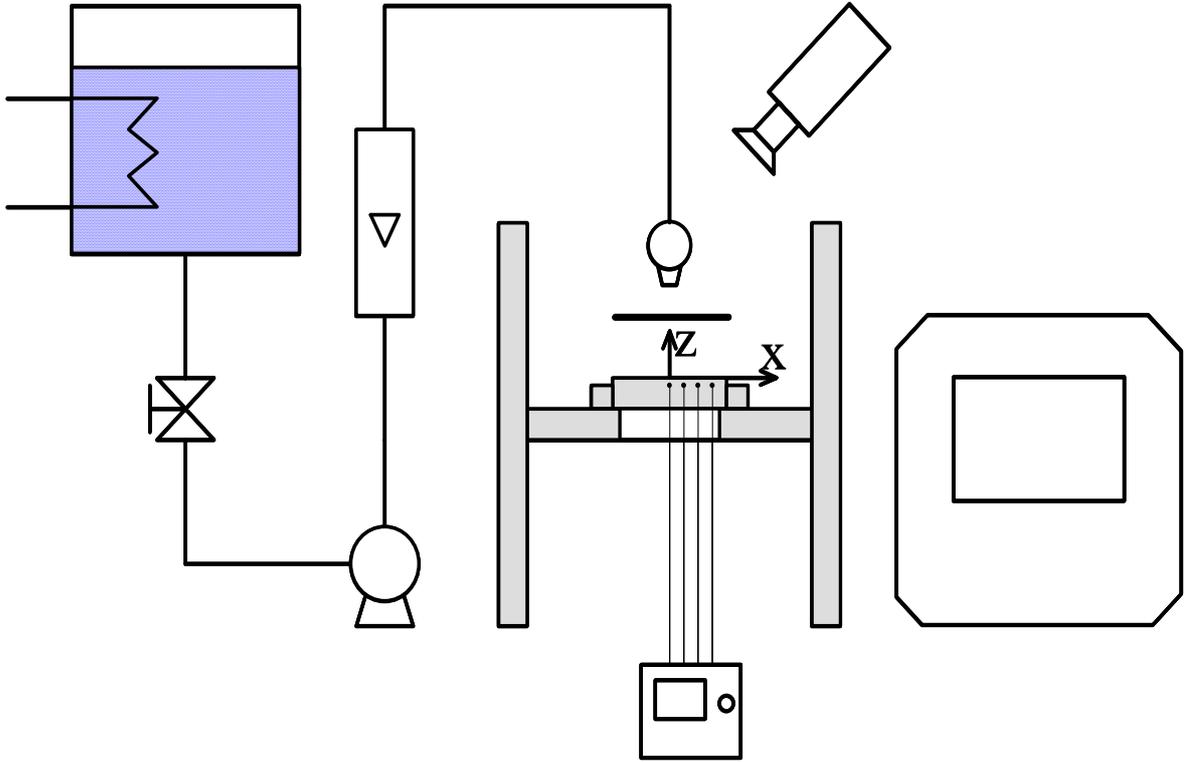


図 2.1 水噴流冷却実験装置

実験装置は、試験材を加熱する炉、冷却水を供給する配管系、そして測定系からなる。

各部の名前と仕様

試験材

SUS304                      ・寸法 150×150×10mm  
表面バフ仕上げ(十点平均粗さ Rz=4mm)



図 2.2 試験材

表 2.1 SUS304 化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
0.08 以下	1.00 以下	2.00 以下	0.045 以下	0.030 以下	8.00 ~ 10.50	18.00 ~ 20.00

## 加熱炉(ヤマザキ電機製)

- ・ 雰囲気ガス N<sub>2</sub> ガス ・ 電気容量 39kW
- ・ 相数 3 50Hz ・ 最高温度 1450
- ・ 常用温度 1400 ・ 製造年月日 1993年4月

## タンク

蒸気混入により所定の温度まで水温調節を行う。

## ビデオカメラ (SONY 製)

## バルブ

流量を調節。

## ポンプ (HITACHI 製)

MULTI-STAGE CENTRIFUGAL PUMP

- ・ Q 0.2m<sup>3</sup>/min ・ H 150m
- ・ 15kW ・ S Y N C 3000rpm

## 流量計 (RYUTAI KOGYO 製)

- ・ 0~50l/min ・ 最小目盛り 2 l/min

## ノズル

- ・ 円形噴射型ノズル ・ 6, 16.8

## シャッター

## 熱電対

- ・ シース K 型熱電対 ・ 素線径 1mm
- ・ 型式 TS4 - K 10C S - G - 1000 - VXD 4000
- ・ 適用規格 JIS C 1605 - 1995 クラス 2



図 23 加熱炉



図 24 タンク及び配管系



図 25 ポンプ

表 2.2 熱電対の偏差

	温度 100		温度 300		温度 500	
	熱起電力 mV	偏差 mV	熱起電力 mV	偏差 mV	熱起電力 mV	偏差 mV
製造番号	4.096 mV±0.104 mV ±2.5		12.209 mV±0.104 mV ±2.5		20.644 mV±0.160 mV ±3.8	
077401	4.117	+0.021	12.204	-0.005	20.618	-0.026
001~026	100.5	+0.5	299.9	-0.1	499.4	-0.6

レコーダ(YOKOGAWA製)

ORM1300 OSCILLOGRAPHIC RECORDER

- ・チャンネル数 16CH
- ・入力形式 フローティング不平衡入力, 入出力間絶縁
- ・A-D分解能 12ビット
- ・最大サンプリング数 100ks/sec

試験材支持台



図 2.6 流量計



図 2.7 レコーダ



図 2.8 噴流衝突部概観

## 2.2 実験方法

- (1)熱電対先端を試験材裏面より挿入し、折り曲げて、アルミ箔で固定する。そして、他方(補償導線側)をレコーダに接続する。
- (2)ノズルの位置決め、ビデオカメラのセット、流量・水温の確認などを行う。
- (3)試験材を加熱炉に入れ、初期温度以上(例 800 開始の場合は 870 )まで加熱する。
- (4)所定の温度まで試験材が加熱されたのを確認したら、炉から取り出し、試験材を台にセットする。(ノズルからの水流が、試験材にかからないように、シャッターにより防いでおく。)
- (5)冷却開始温度になったと同時にシャッターをはずし、冷却を開始する。(レコーダは、冷却開始温度付近に試験材の温度がなったのを見計らって、あらかじめ記録開始スイッチを入れておく。)
- (6)冷却終了確認後、試験材をはずす。

## 2.3 実験条件

静止鋼板の単一ノズル冷却

流量 10 l/min

ノズル設置高さ 鋼板表面から 150mm( 6ノズル使用時)  
300mm( 168ノズル使用時)

サンプリング周波数 20Hz

まず、相変化を生じない非沸騰域での冷却を行い、実験データとシミュレーションの結果が一致することを確かめる。

その後、沸騰域での冷却について、噴流の乱れの影響が少ない層流での沸騰現象を解析し、シミュレーションとの比較を行う。

そして、ノズル径を変えて乱流にし、その影響を層流と比較する。

また、液膜が鋼板上を流れていく間に液膜温度は上昇していくが、その温度上昇が沸騰現象にどのような影響を及ぼすかを調べるために、冷却中の鋼板上各位置での局所的な水温を測定する。

表 2.3 に各実験の条件を示す。

表 2.3 実験条件

	水温( )	ノズル径(mm)	ノズル Re 数	冷却開始温度( )
非沸騰実験	30	16.8	15682	100
沸騰実験 (層流)	30	16.8	15682	800
	50	16.8	15682	800
	70	16.8	15682	800
沸騰実験 (乱流)	30	6	43955	700, 800
	50	6	43955	700, 800
	70	6	43955	700, 800
局所水温測定実験	30	16.8	15682	800

ノズル出口 Re 数 < 20000 ならば層流<sup>[3]</sup>

## 2.4 熱電対の配置

(裏面から見たところ． 1.1の穴に表面から - z 方向 1mm まで挿入)

非沸騰実験 (測温点数 5点)

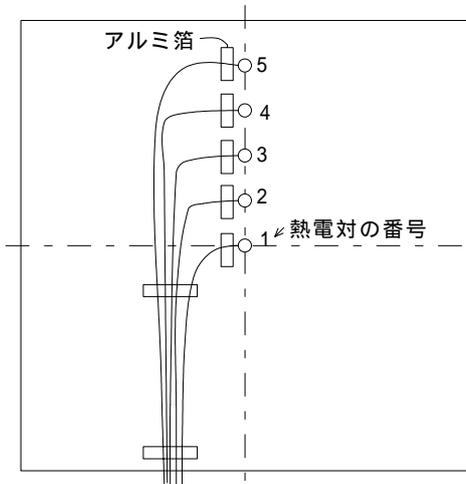


図 2.9 非沸騰実験熱電対配置

沸騰実験(層流) (測温点数 1点)

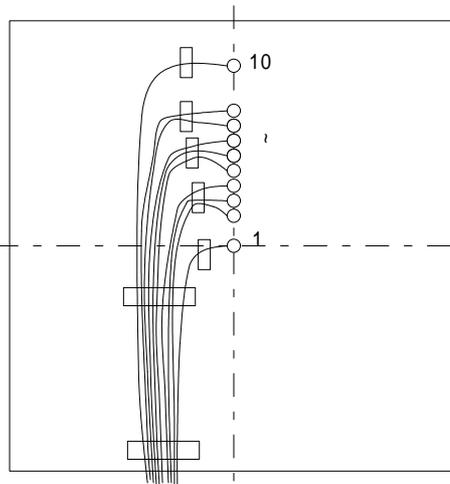


図 2.10 沸騰実験(層流)熱電対配置

表 2.4 非沸騰実験熱電対位置

熱電対番号	鋼板中心からの距離 x (mm)
1	0
2	15
3	30
4	45
5	60

表 2.5 沸騰実験(層流)熱電対位置

熱電対番号	鋼板中心からの距離 x (mm)	熱電対番号	鋼板中心からの距離 x (mm)
1	0	6	30
2	10	7	35
3	15	8	40
4	20	9	45
5	25	10	60

沸騰実験(乱流) (測温点数 4点)

非沸騰実験の熱電対番号 5 を除いたもの

局所水温測定実験

局所サブクール度を測定するため、熱電対番号 2~5 は熱電対の先端を、貫通させた穴を通して鋼板表面から z 方向 1.2mm 突き出す。(熱電対の測温部の長さが約 1mm あり、液膜厚さが約 0.5mm なので、液膜の 0.2mm 付近を測定できるように、1.2mm 突き出した。)

熱電対番号 1 は、初期温度と冷却開始時刻を判断するために用いる。

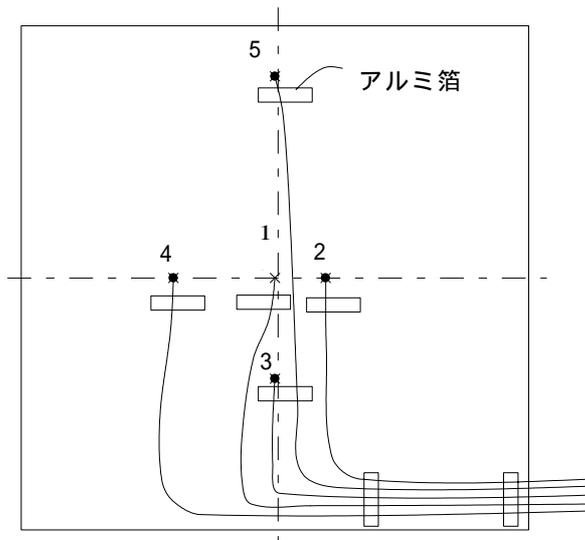


図 2.11 局所水温測定実験熱電対配置

表 2.6 局所水温測定実験熱電対位置

熱電対 番号	鋼板中心 からの距離 x (mm)
1	0
2	15
3	30
4	45
5	60

## 第三章

### 結果と考察

## 3. 結果と考察

### 3.1 非沸騰実験

#### 3.1.1 冷却時の様子

噴流は鋼板に衝突後、なめらかな液膜流となり鋼板上を流れる。(図 3.1)



図 3.1 冷却時の様子

#### 3.1.2 冷却曲線 (X : 鋼板中心からの距離 (mm))

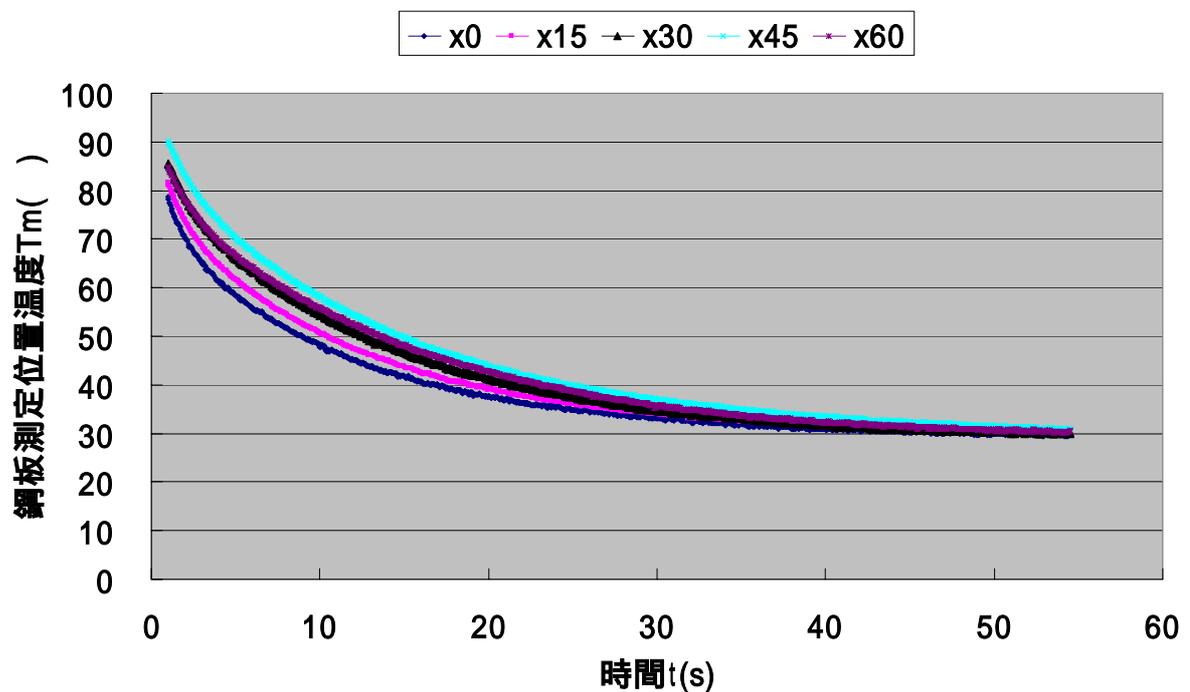


図 3.2 冷却曲線

図 3.2 は、各熱電対位置において得られた温度データを、時間の経過とともにプロットしたものである。液膜流が、鋼板表面上をなめらかに流れることからわかるように、噴流衝突後、鋼板全体の温度が一様に下がっている。

噴流衝突点に近いほど温度降下が大きいが、鋼板中心からの距離  $x=45$  mm と  $x=60$  mm の位置においてその傾向が逆転しているのは ( $x=60$  mm の方が  $x=45$  mm より温度降下が大きい)、 $x=60$  mm は鋼板の端に近いので、外側からの熱の供給が少ないため、温度降下が  $x=45$  mm に比べ大きくなるからだと考えられる。

### 3.1.3 シミュレーションとの比較

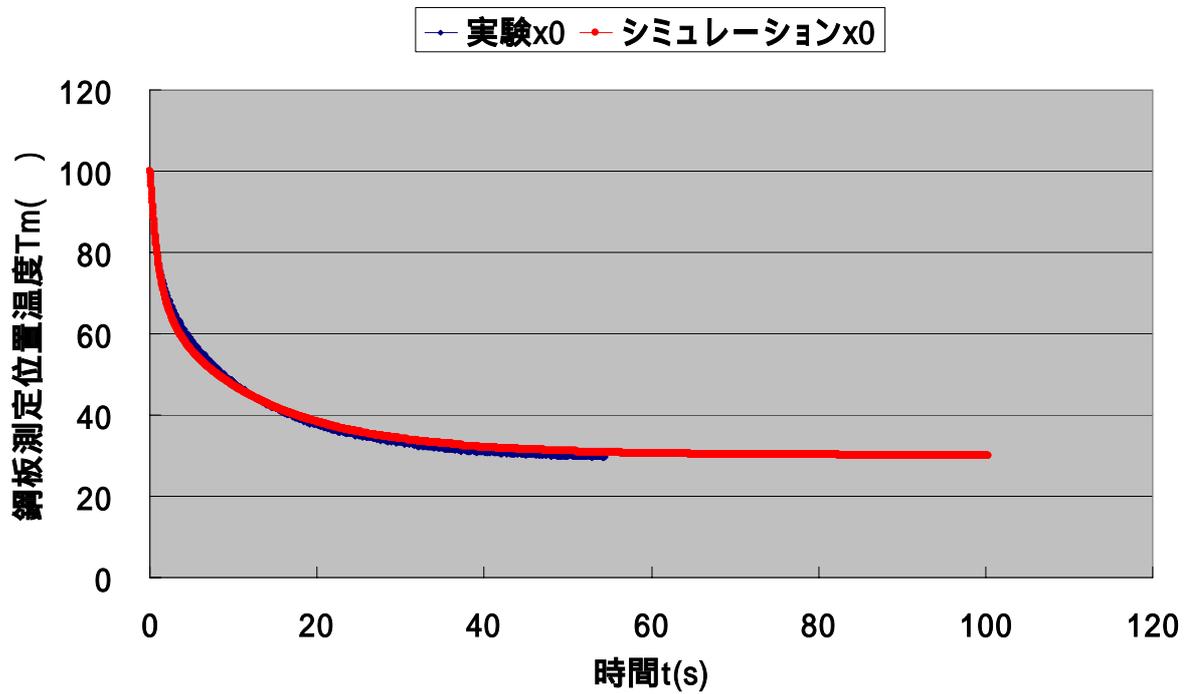


図 3.3 実験とシミュレーションの比較 ( $x=0\text{mm}$ )

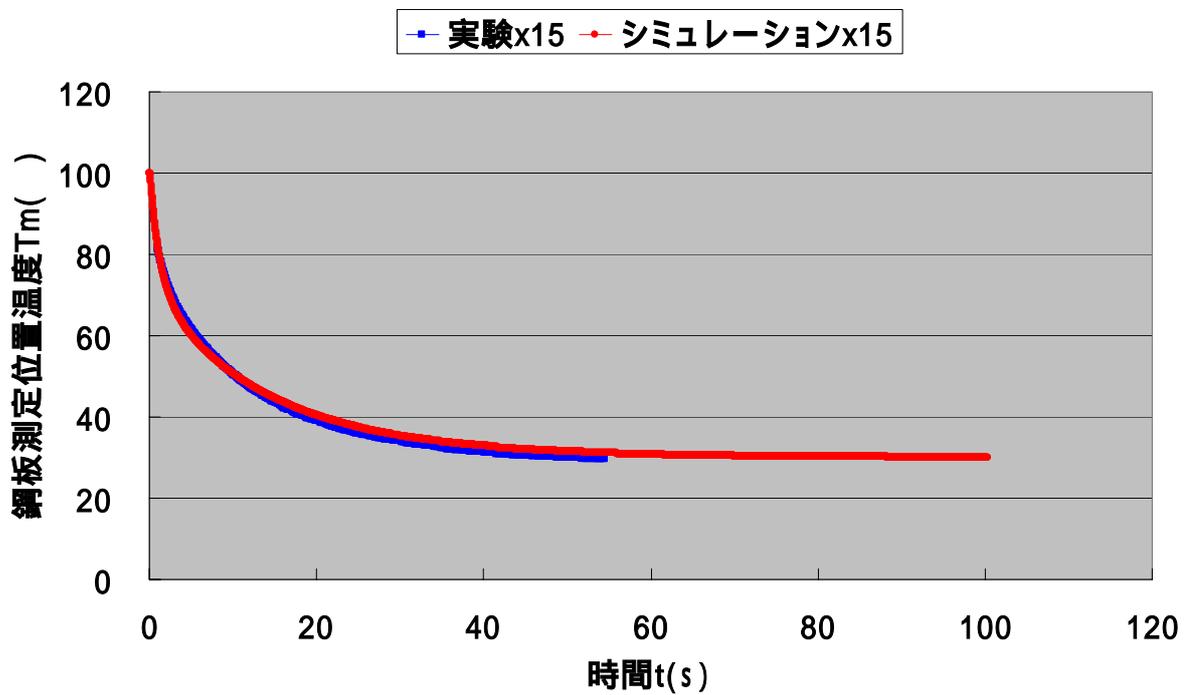


図 3.4 実験とシミュレーションの比較 ( $x=15\text{mm}$ )

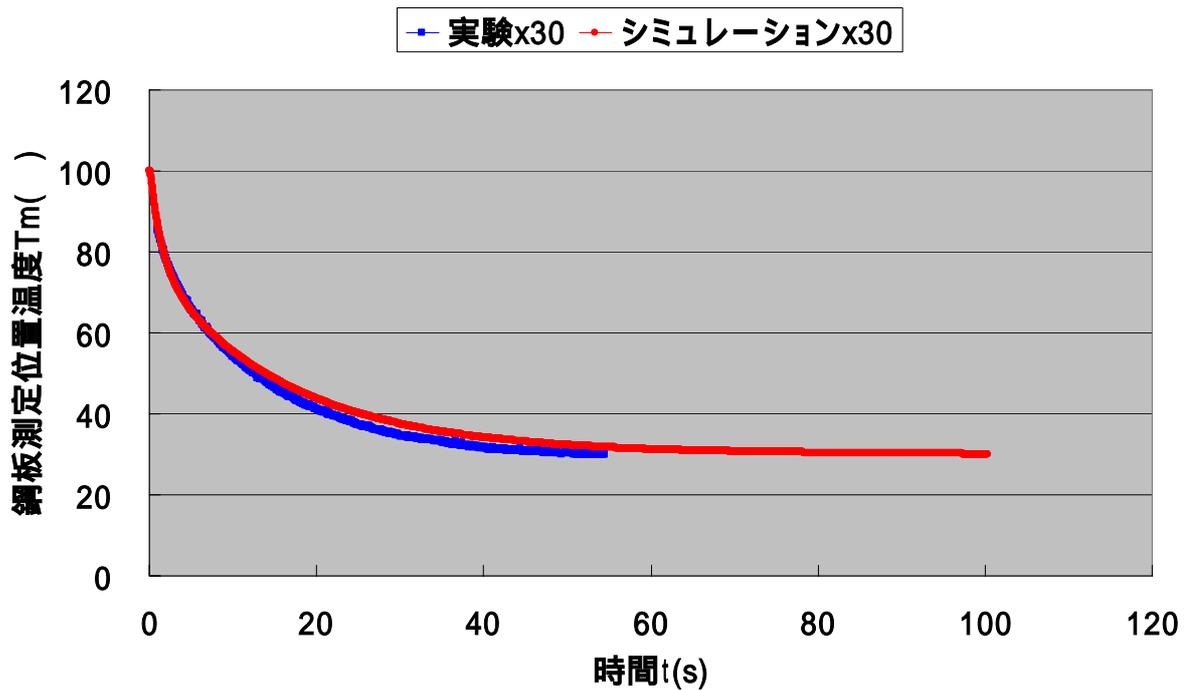


図 3.5 実験とシミュレーションの比較 ( $x=30$  mm)

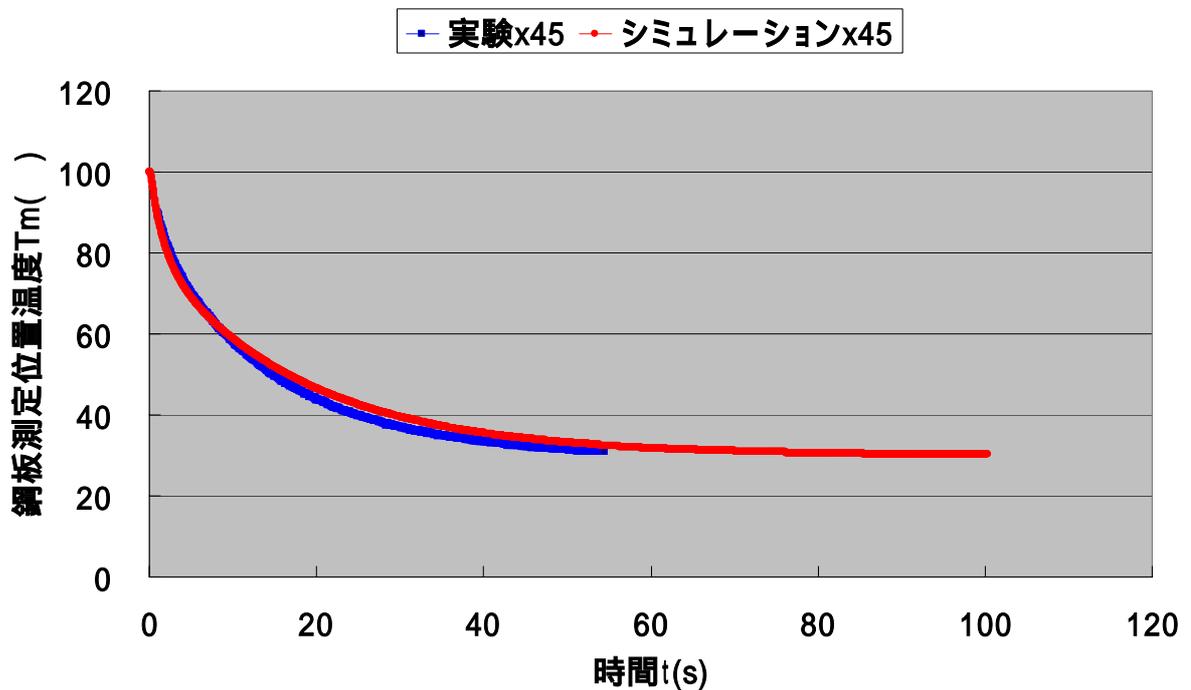


図 3.6 実験とシミュレーションの比較 ( $x=45$  mm)

実験による結果とシミュレーションによる結果は、 $x$ が大きくなると、時間が経過するにつれて多少のずれ(3 ~4 )が生じているが、ほぼ一致していることがわかる。

よって非沸騰域では、シミュレーションができることを確認できた。

## 3.2 沸騰実験 (層流)

### 3.2.1 沸騰の様相



図 3.7 膜沸騰域



図 3.8 固液接触不安定域



図 3.9 固液接触開始域



図 3.10 固液接触拡大域

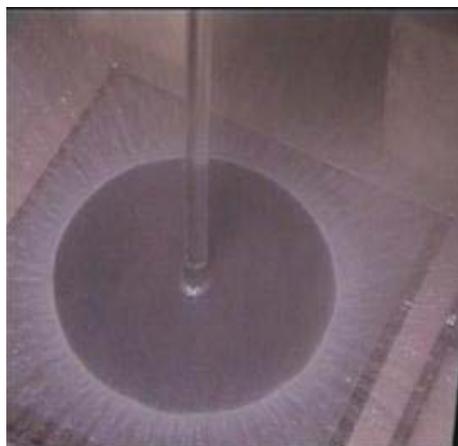


図 3.11 固液接触拡大域

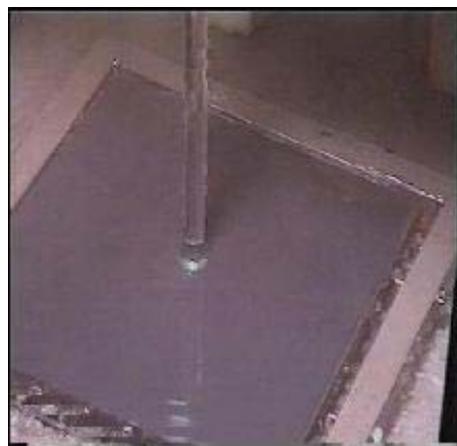


図 3.12 单相強制対流冷却域

図 3.7～図 3.12 は、冷却時の鋼板表面での沸騰の様子を時間とともに追ったものである。  
(水温 30 。ただし図 3.7 のみ水温 70 )

#### (0)膜沸騰域 (図 3.7)

水温 70 の時のみ、噴流が鋼板に衝突時にキューという高音がし、鋼板上を液膜がなめらかに流れる状態が観察された。

これは水温 70 は飽和温度に近いいため、噴流衝突直後に蒸気膜が形成され、膜沸騰が起こったものと思われる。

#### (1)固液接触不安定域 (図 3.8)

冷却開始直後の数百 msec 程度の短時間、噴流は鋼板に衝突後、鋼板に沿って広がり飛散する。鋼板表面は高温なため、噴流と鋼板の間は蒸気により分離され、固液接触は起きていないと考えられる。よどみ点近傍には白い領域が観察されるが、そこは、ぬれと乾きが交互に現れる不安定な固液接触状態にあるものと考えられる。

この現象の持続時間は水温が低いほど短い。これは、供給される液と鋼板の条件による、鋼板表面での蒸発する液の量の違い(蒸気膜厚さ)が関係あるものと思われる。すなわち、供給される液の温度が飽和温度に近いと、鋼板表面に衝突後すぐに蒸発し、蒸気膜厚さは厚くなるので、安定な固液接触が起きるまで時間がかかるが、液の温度が低いと蒸発するまで時間がかかり、蒸気膜厚さは薄くなるので、すぐに蒸気膜が破れ、安定した固液接触が起きるのだろう。

#### (2)固液接触開始域 (図 3.9)

その後、白い領域のなかよどみ点近傍から、激しい沸騰音とともに液膜の跳ね上げが見られ、その外側には液体はほとんど供給されなくなる。液膜の跳ね上げ位置より内側の領域では、固液接触が継続して行えるようになったものと考えられる。

#### (3)固液接触面拡大域 (図 3.10, 図 3.11)

よどみ点近傍での固液接触が継続して存在するようになると、その後は時間の経過とともに固液接触面が鋼板中心から外周部に向かって拡大を開始する。

そのときの鋼板上には図 3.13 のように、よどみ点中心より単相強制対流熱伝達、沸騰熱伝達領域(白く見える環状部分)が存在する。

ただし、単相強制対流域と沸騰領域との境界位置は、実際は図のように明確なものではなく、徐々に遷移しているものと思われる。境界付近での正味の蒸気発生はみられないが、(水温 70 では気泡らしきものは観察された。) その理由として、伝熱面表面に形成された蒸気泡は伝熱面に付着したままか、あるいはバルク液体内を移動中に完全に凝縮するということが考えられる。

沸騰域の外周の固液接触線上では、激しい沸騰により液膜流が鋼板に対して 10～20° の角度で液滴として飛散され、固液接触線の外側は乾燥面のままと思われるが、液膜の流動など鋼板上の状態は、蒸気などにより観察することができなかった。

沸騰領域の幅  $X_b$  は、約 1mm で水温による変化は見られなかった。

Black zone の定義は、「衝突点近傍のぬれ領域」とあいまいなものだが、本研究では、衝突点を中心に広がる沸騰領域後縁部までの黒く見える領域を Black zone とし、その半径を  $X_b$  とする。

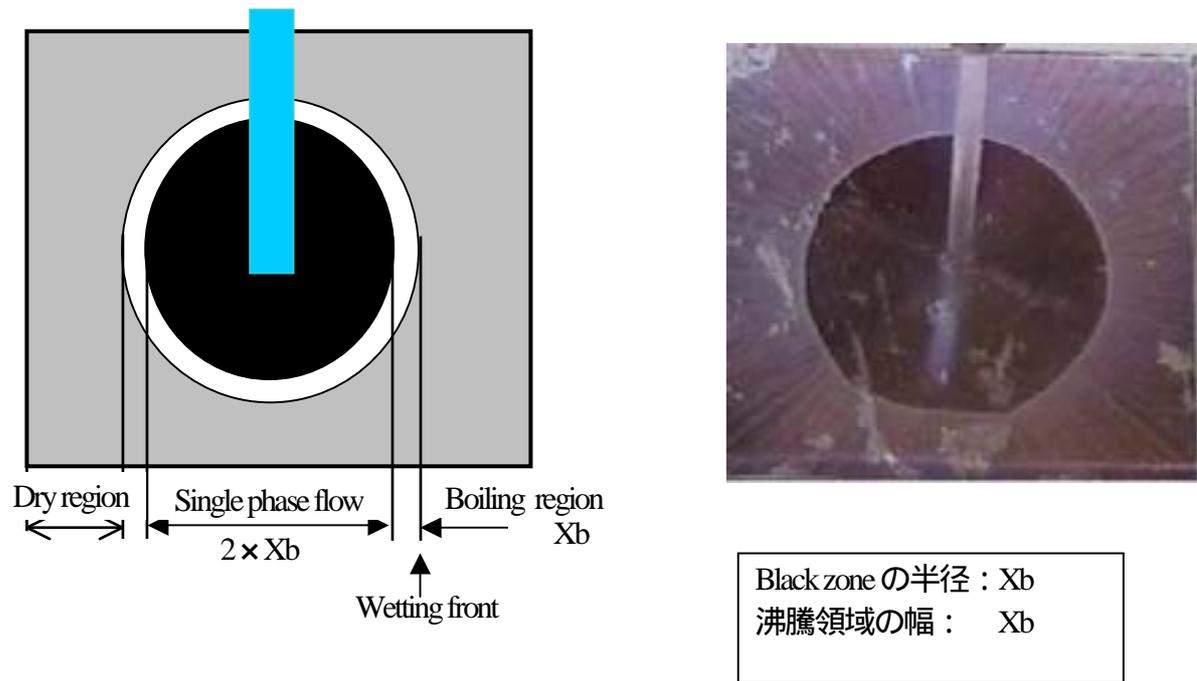


図 3.13 画像からの領域分け

(4) 单相強制対流冷却域 (図 3.12)

固液接触領域が加熱面外周領域部に到達後、加熱面上は单相液膜流で覆われた。

### 3.2.2 沸騰現象解析

・鋼板温度分布

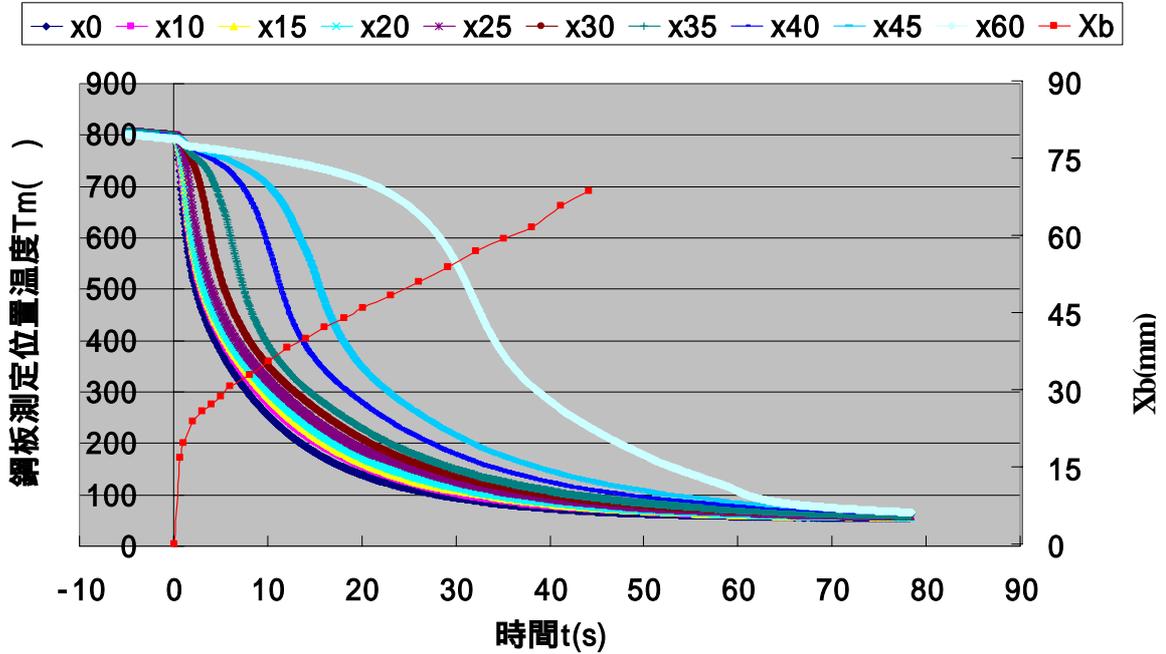


図 3.14 冷却曲線(水温 50 )

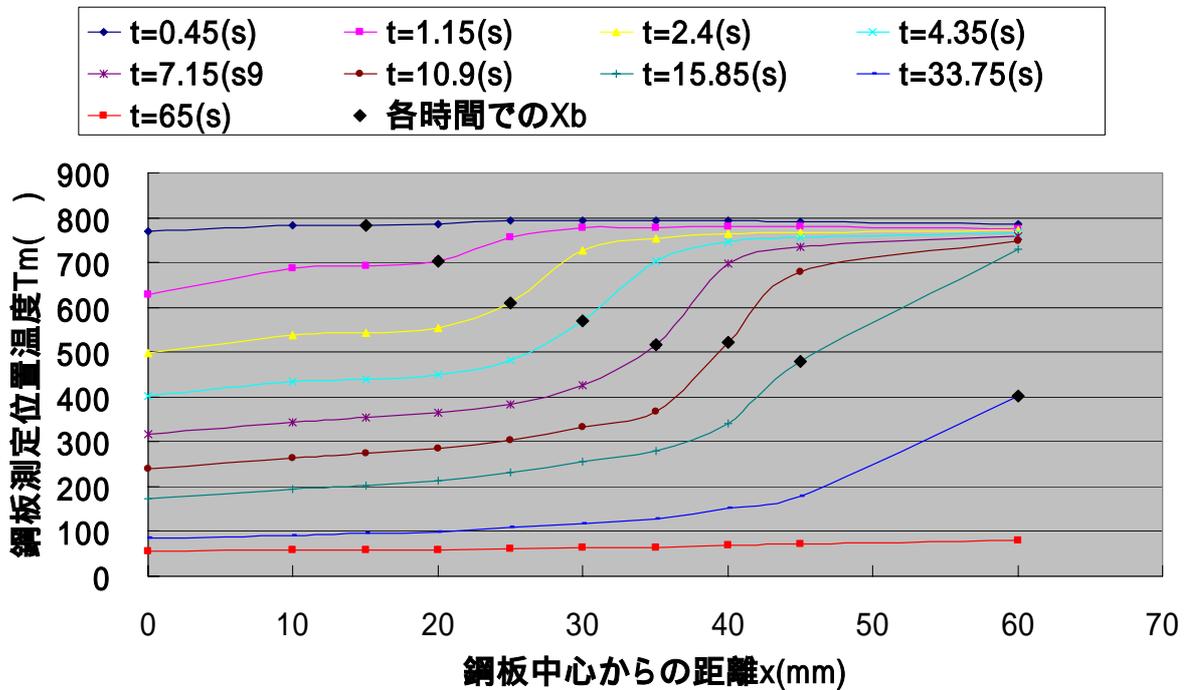


図 3.15 鋼板 x 方向温度分布(水温 50 )

図 3.14 は、冷却時の熱電対より得られた温度データを、時間の経過とともに示したものである。噴流衝突直後、衝突点近傍のある半径位置までの温度は急激に下がるが、(温度急降下域、図 3.14 では x25 まで) その外側は、液膜の跳ね上げの影響により温度降下は緩やかである。

その後、時間の経過とともに、急激な温度降下の範囲は外側に向かって広がっていき、その温度降下の範囲が鋼板の端まで達したあと、鋼板全体が対流領域へと移行し、鋼板温度はほぼ一樣になる。

また、図 3.15 は冷却開始から各時間 (Black zone が各熱電対位置に到達した時間) 経過した時の、鋼板各位置での温度を示したものである。

Black zone の位置を境界にして、温度降下した部分と依然高温な状態のままの部分に分かれていることが確認できる。よってこの境界部分近傍では、横方向の熱伝導が大きくなり、それが Black zone 到達前の温度降下 (先行冷却) に関係すると思われる。

しかし、更に外側の領域では、横方向位置による温度差は小さいので、横方向の熱伝導による温度降下は小さくなり、鋼板表面からの熱流束による温度降下が起きていると考えられる。

・表面熱流束

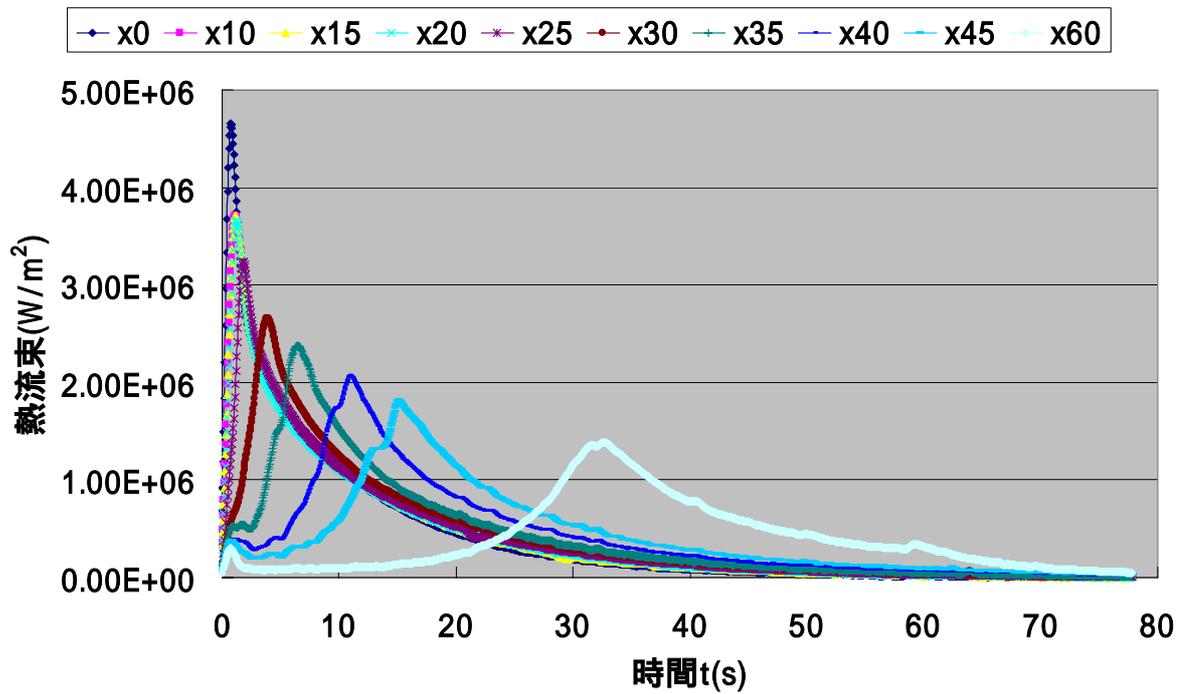


図 3.16 表面熱流束(水温 50 )

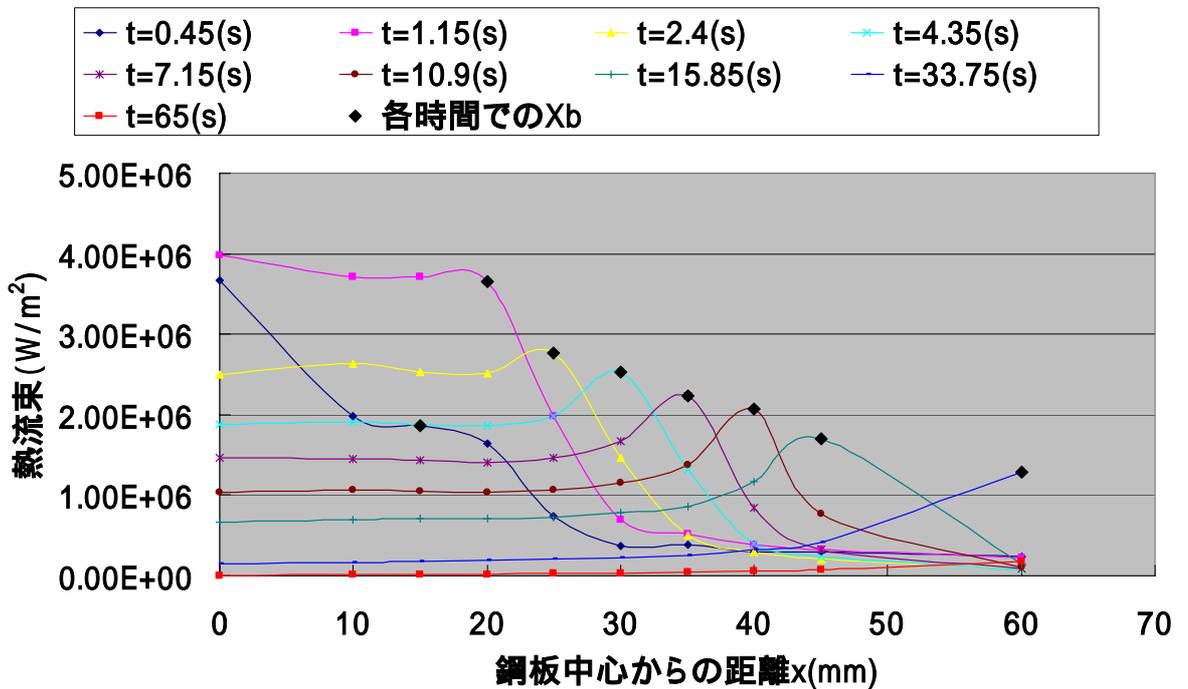


図 3.17 鋼板 x 方向熱流束分布(水温 50 )

本研究では、得られた温度データから非定常一次元逆問題<sup>[4]</sup>を解くことによって表面熱流束、表面温度を算出した。

表面熱流束分布は、噴流衝突後、 $x=0$  mm で最大値を示す。そして、各時刻における最大熱流束の位置は、鋼板中心から周囲へ移動し、その値は周囲に行くほど小さくなる。(図 3.16)

また、図 3.17 は、冷却開始から各時間(Black zone が各熱電対位置に到達した時間)での、鋼板測定位置での熱流束を示したものである。

この図より、衝突中心から進むにつれて強制対流領域から核沸騰に移り、熱流束が大きくなっていき、Black zone 付近で最大熱流束が生じることが分かる。

図 3.13 の強制対流領域と沸騰領域の境界部分は、やはり図のように明確なものではなく、正味の蒸気発生が見られないだけで徐々に遷移していくことが、境界付近での熱流束上昇の様子から分かる。

Black zone 位置より更に外側の位置では、熱流束は中心からの距離が大きくなるにつれて小さくなっていくが、依然熱流束の大きさは  $10^5$  W/m<sup>2</sup> 以上あるので、鋼板上の状態を推測すると、沸騰領域で飛散されなかった液膜が鋼板上を流れ、遷移(膜)沸騰状態になっているか、飛散された液膜の一部が液滴となって、鋼板上に落下していると考えられる。

もし、液膜が流れていず、鋼板表面がむきだしのままだと仮定すると、表面熱流束は熱放射と空冷(自然対流)によるものになるが、その大きさは最大でも  $0.8 \times 10^5$  W/m<sup>2</sup> 程度なので、その可能性は低い。

また、飛散されなかった液膜が鋼板上を流れていたとしても、その厚さは非常に薄いと考えられ、画像からの判断は難しい。(鋼板上を流れる液膜厚さは 0.5 mm 以下であり、その大部分が飛散される。)

## ・ 沸騰曲線

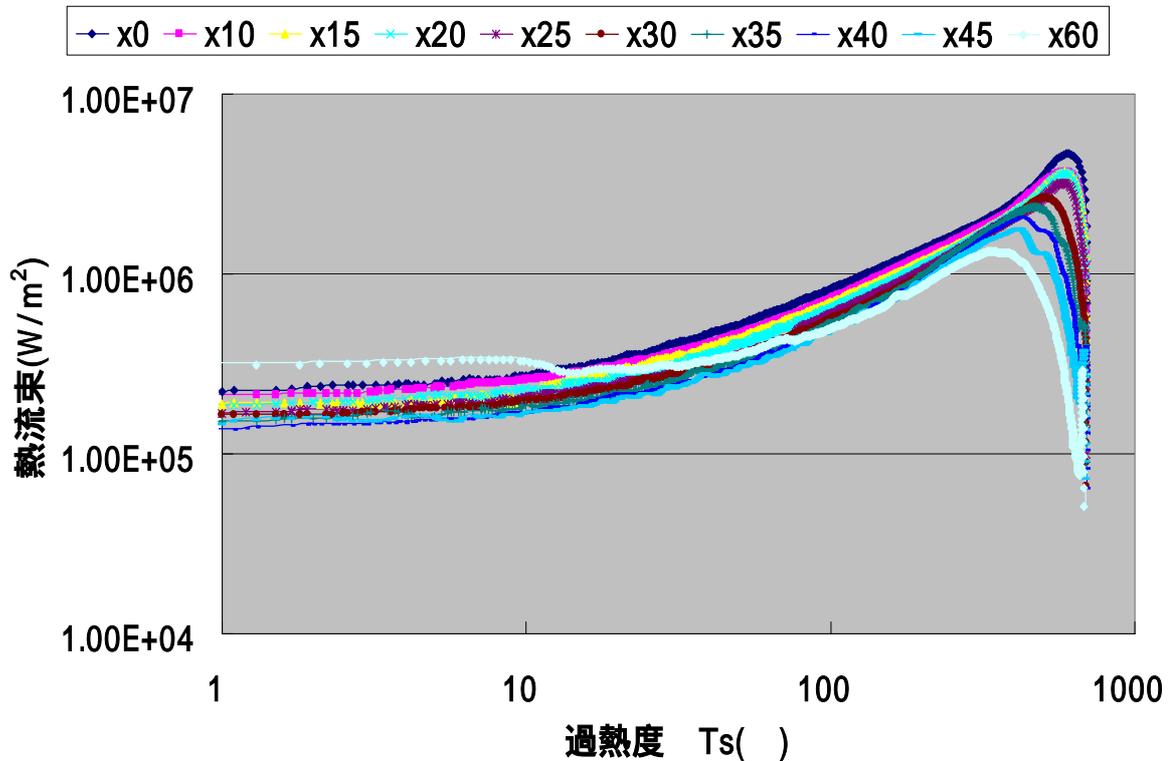


図 3.18 沸騰曲線(水温 50 )

図 3.18 は、鋼板各位置での沸騰曲線であるが、過熱度が高いほうから、遷移沸騰領域、核沸騰領域、強制対流領域となっていて、はっきりとした膜沸騰領域はないと思われる。その理由として、サブクールされた水を使用したので、蒸気膜ができてその厚さは薄く、非常に破れやすいということが考えられる。ただし、 $x=60\text{mm}$  においては、膜沸騰らしきものが現れた。

よどみ点から離れるにつれて、遷移沸騰から核沸騰に移る所の、局所伝熱面過熱度が低くなり、それに伴い、最大熱流束も低下していることが分かる。これは、冷却が進んで鋼板の温度が下がり、高温での接触の可能性が低くなったことに加え、噴流による強制的な液体の供給(強制的な液体の供給により、鋼板表面に蒸気膜ができてそれが無理矢理破られたり、鋼板表面近傍の沸騰部分に液体が多く送られ、核沸騰が激しくなる。)やサブクール効果(サブクール度が高いと、伝熱面表面で気泡が発生しても、移動中に凝縮され液体となり、再び鋼板表面近傍に供給され、核沸騰が激しくなる。)による熱伝達の促進が、よどみ点から離れるにつれて弱くなったことによると考えられる。

・ Black zone の広がり

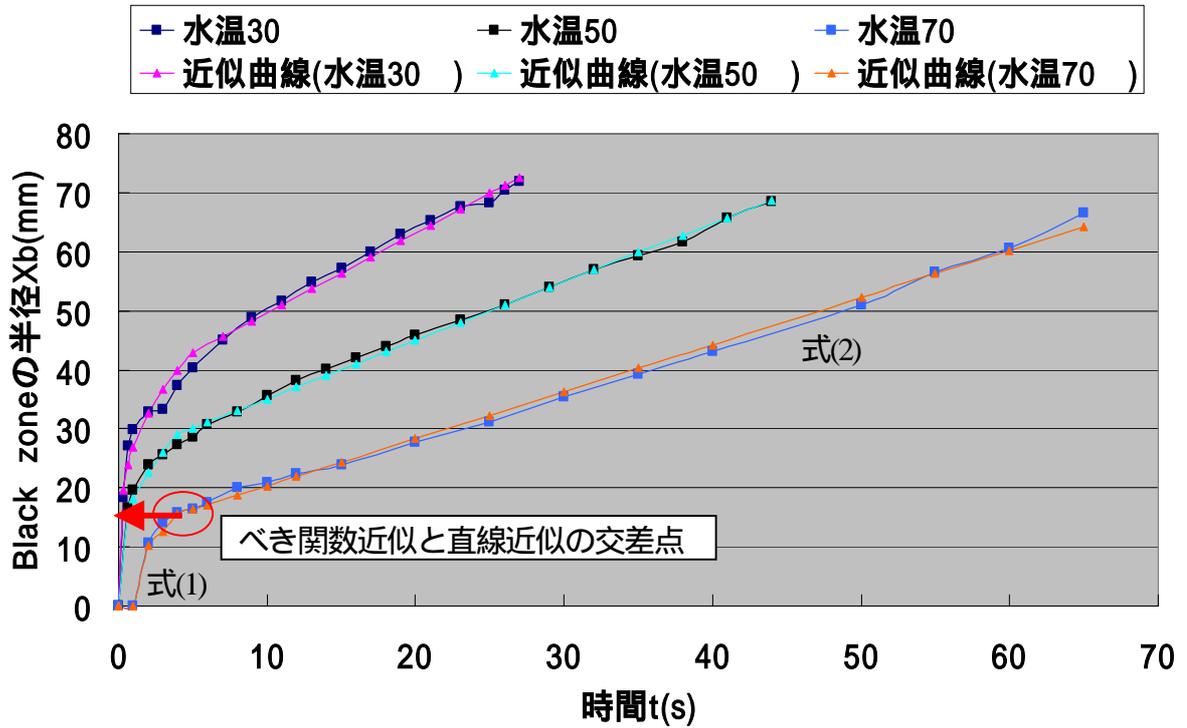


図 3.19 Black zone の広がり

図 3.19 のように Black zone の広がりは、冷却初期は、式 (1) で示される時刻のべき関数による近似関数で、その後は式 (2) の直線近似によって表すことができた。その比例定数  $a, b$  は最小二乗法によって決定した。

$$X_b = t \quad (1)$$

$$X_b = at + b \quad (2)$$

なお、式の形は物理的な理由に基づいたものではなく、もっとも  $X_b$  の傾向を示すものとして選択されたものである。

べき関数近似と直線近似の交差した点の  $X_b$  の値と図 3.8 の白い領域の半径、冷却曲線より得られた衝突点近傍の衝突直後に温度が急激に落ちる範囲の半径を比較すると表 3.1 のようになる。

表 3.1 衝突領域の関係

水温 ( )	交差した点の $X_b$ (mm)	白い領域の半径(mm)	温度急降下域(mm)
30	40	30	35
50	27	23.6	25
70	15	13.7	15

上表のように、これら 3 つの値にはなんらかの関係がありそうなので、更に調べる必要があるが、非常に短い時間の現象なので、測定が困難である。

・ 温度降下，表面熱流束，Black zone の関係

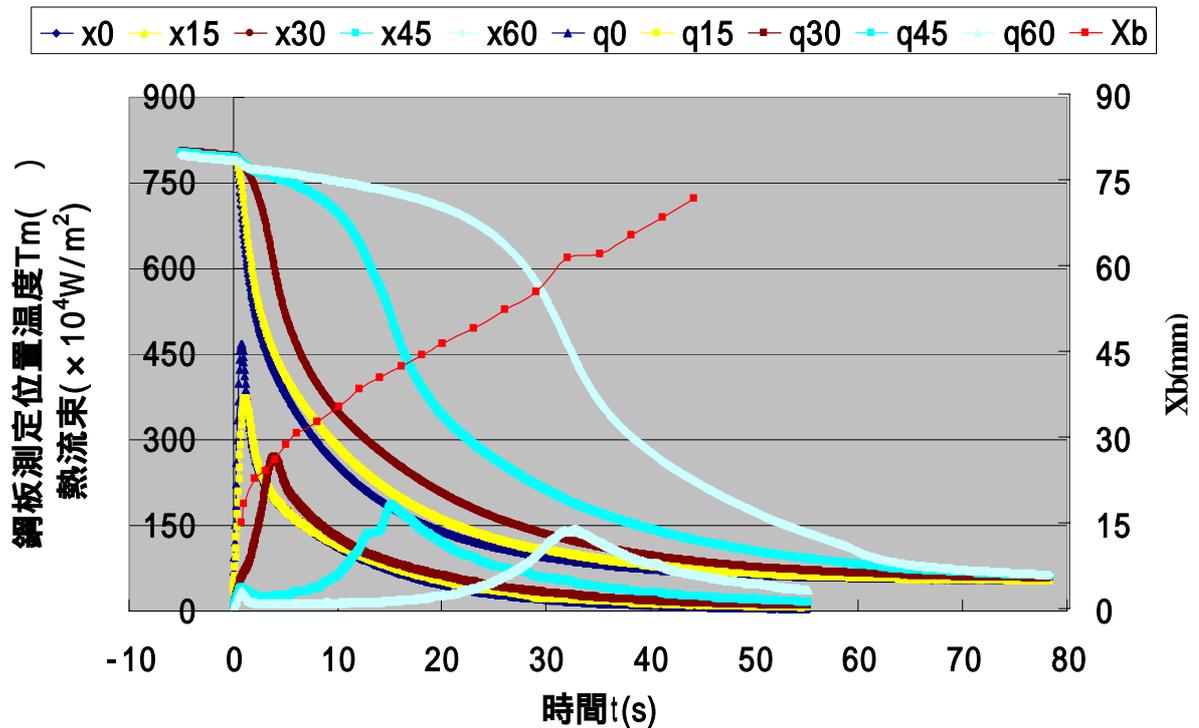


図 3.20 温度降下，表面熱流束，Black zone の関係(水温 50 )

図は水温 50 の時の各位置での冷却曲線，表面熱流束を Black zone の広がりとともに示したものである。この図より，Black zone 到達前に温度降下(先行冷却)を生じていることが確認できる。これは上述のように，乾燥部である外周部から中心部への半径方向の熱伝導により，温度降下が起きているものと思われる。

そして，Black zone 到達直前の表面熱流束上昇分の一部は，この熱流束が 1 次元非定常逆問題を解くことによって求めたものであるので，本来横方向の熱伝導による熱流束にあたるものが，表面熱流束として加えられたものだと考えられる。

表面熱流束の最大値は，沸騰領域  $X_b$  の中で生じるものと思われるが，この図では沸騰領域到達前に最大熱流束が生じている。これは，冷却開始のスタート時間を温度降下から求める際の時間のずれや熱電対の応答性，熱流束を求める際の逆問題の精度などによる影響が出ている。

### 3.2.3 領域分け

3.2.2 をもとに鋼板表面上の沸騰伝熱の領域分けを行うと図 3.21 ~ 図 3.23 のようになる。

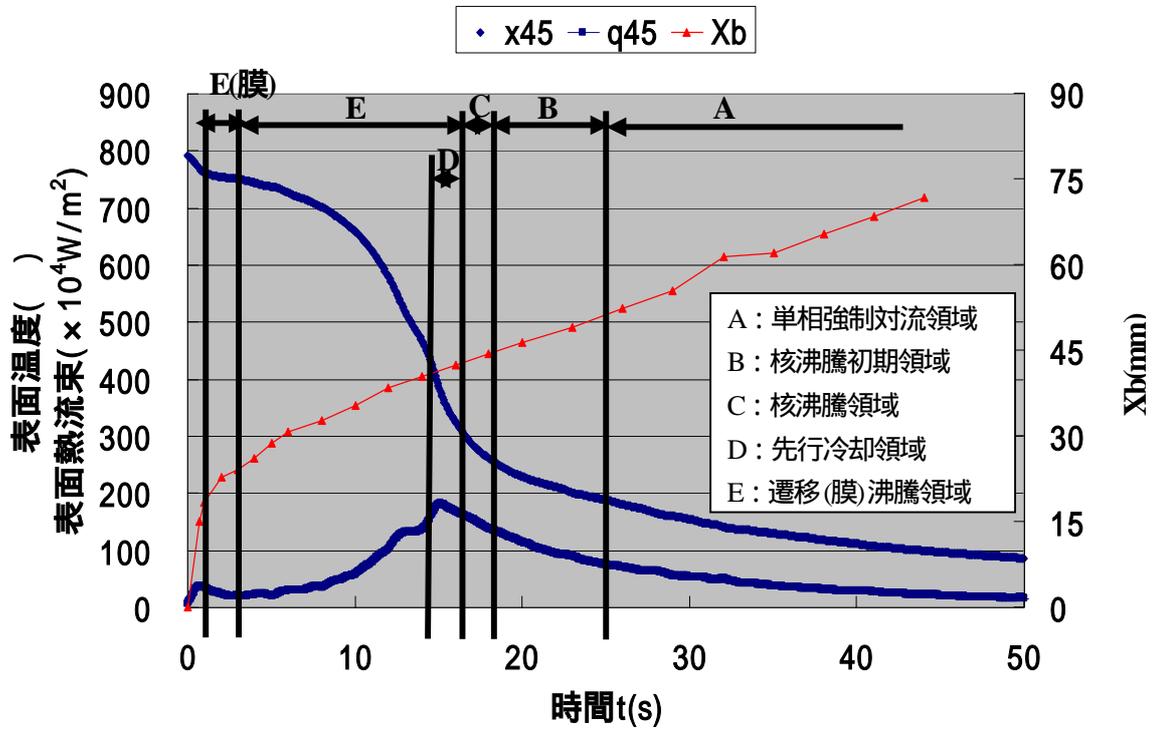


図 3.21 冷却曲線の領域分け (水温 50 , x=45mm)

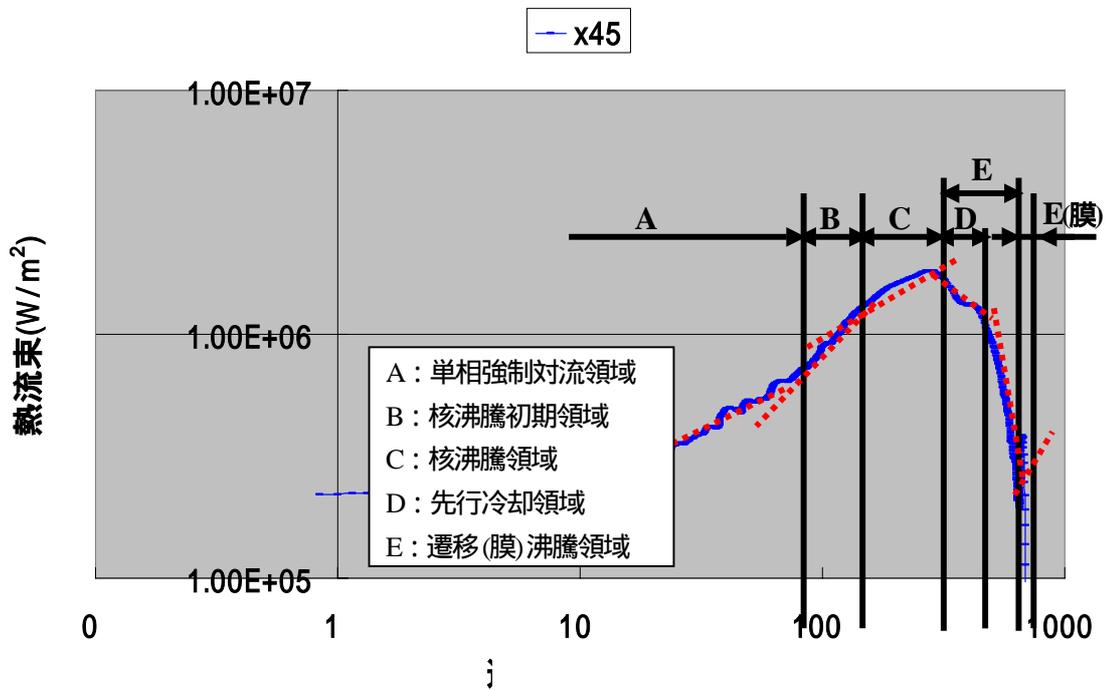


図 3.22 沸騰曲線の領域分け (水温 50 , x=45mm)

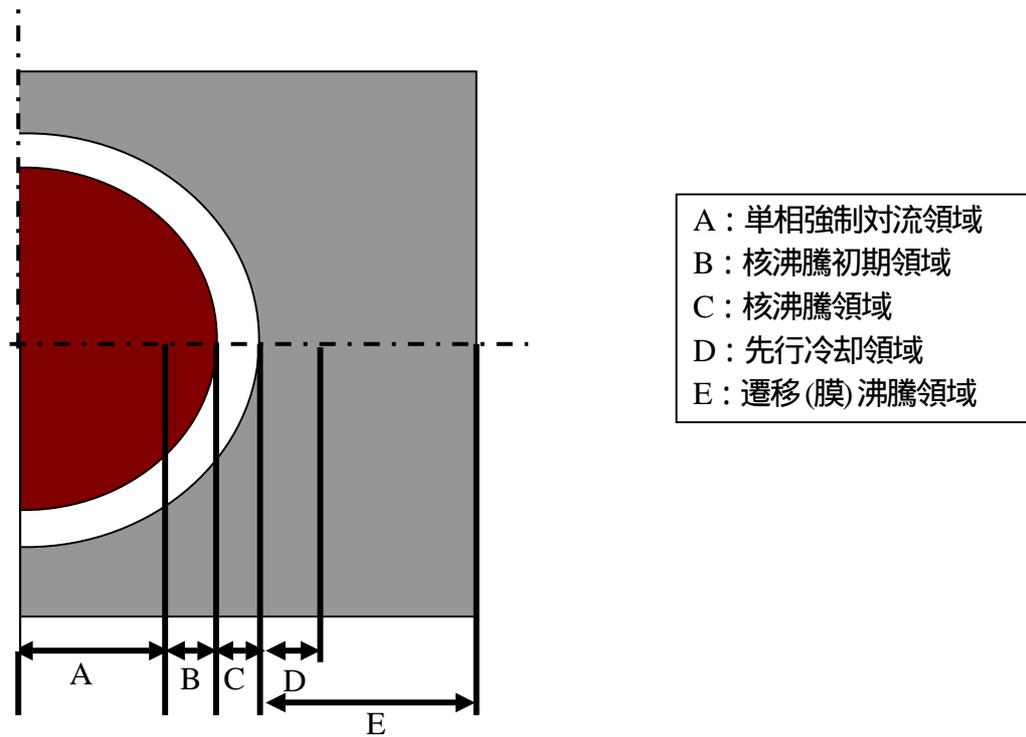


図 3.23 鋼板上での領域分け

図 3.23 のように、衝突点からなめらかに液膜が広がり、まず単相強制対流領域がある。

そして鋼板上を液膜が流れていくうちに、表面近傍の液層が加熱され、飽和温度に達し気泡が発生し始め、それに伴って、熱流束が上昇し始める核沸騰初期領域がある。

その周りに、激しい沸騰が生じる核沸騰領域が白い環状部分となって観察される。

液滴飛散が観察される外側の領域では、非常に薄い液膜が鋼板上を流れ遷移(膜)沸騰領域が広がるが、鋼板の端に近づくとつれて安定した蒸気膜が作られるようになり、その厚さも厚くなるので、熱流束が小さくなっていくのだと思われる。

核沸騰領域の外側近傍では、位置による温度差が大きいため、横方向による熱伝導による先行冷却領域が存在する。

### 3.2.4 水温 (サブクール度) の影響

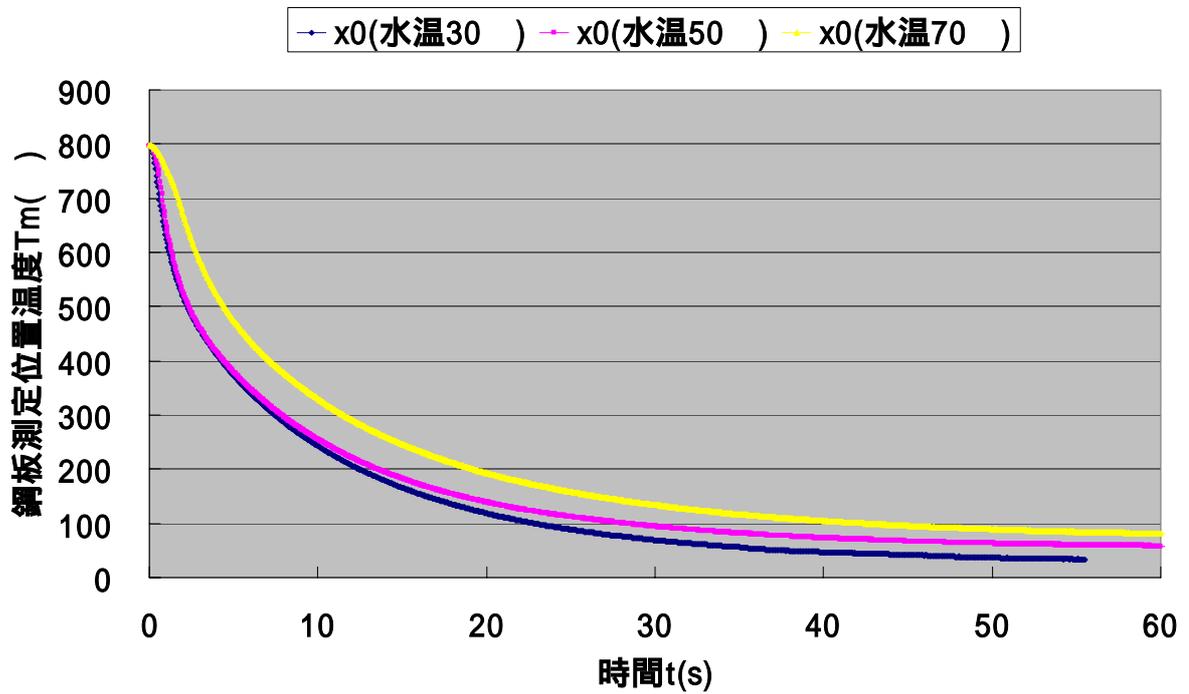


図 3.24 冷却曲線( $x=0$  mm)

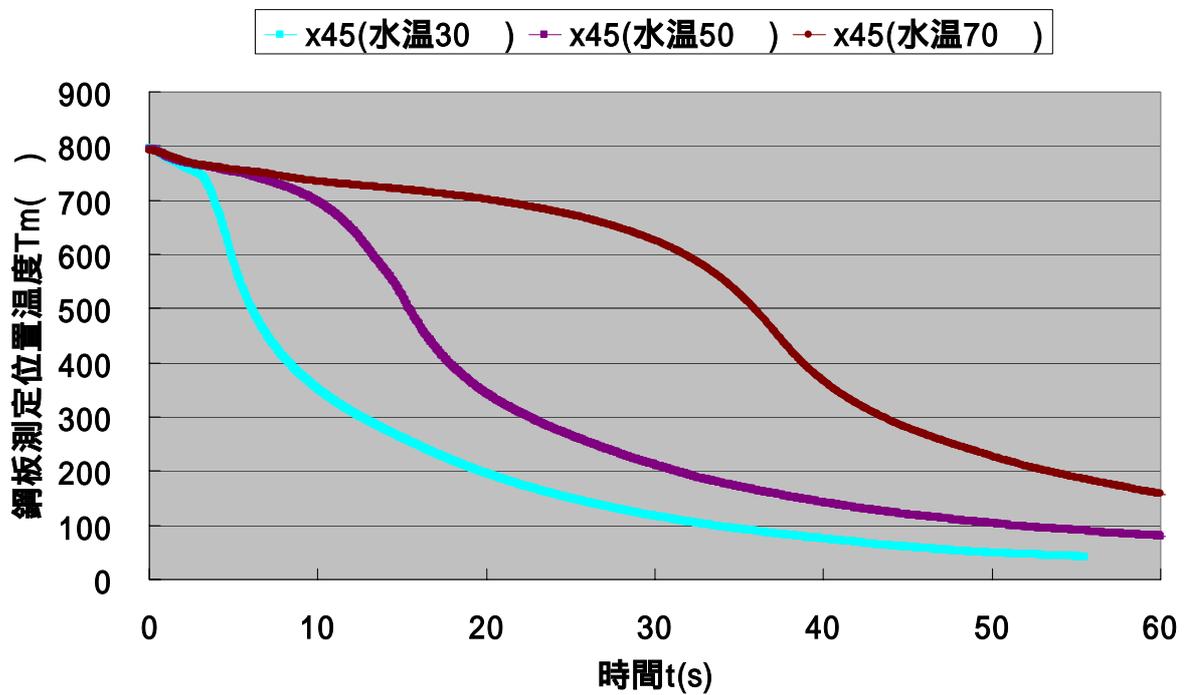


図 3.25 冷却曲線( $x=45$  mm)

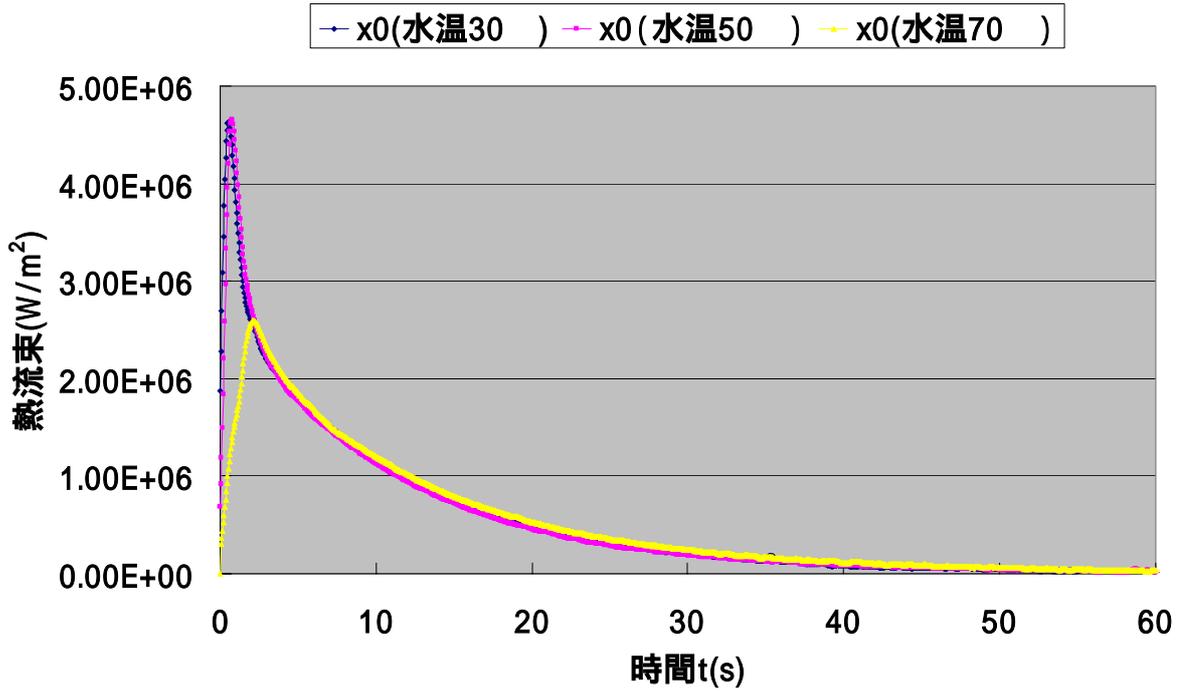


图 3.26 表面熱流束( $x=0mm$ )

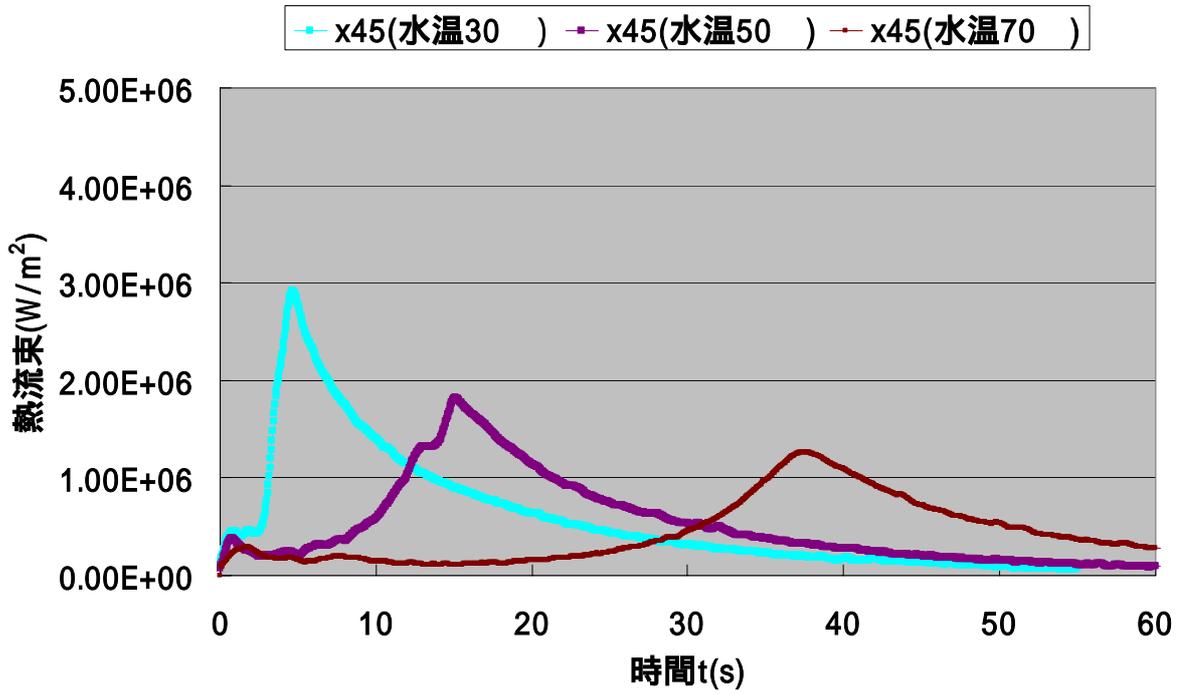


图 3.27 表面熱流束( $x=45mm$ )

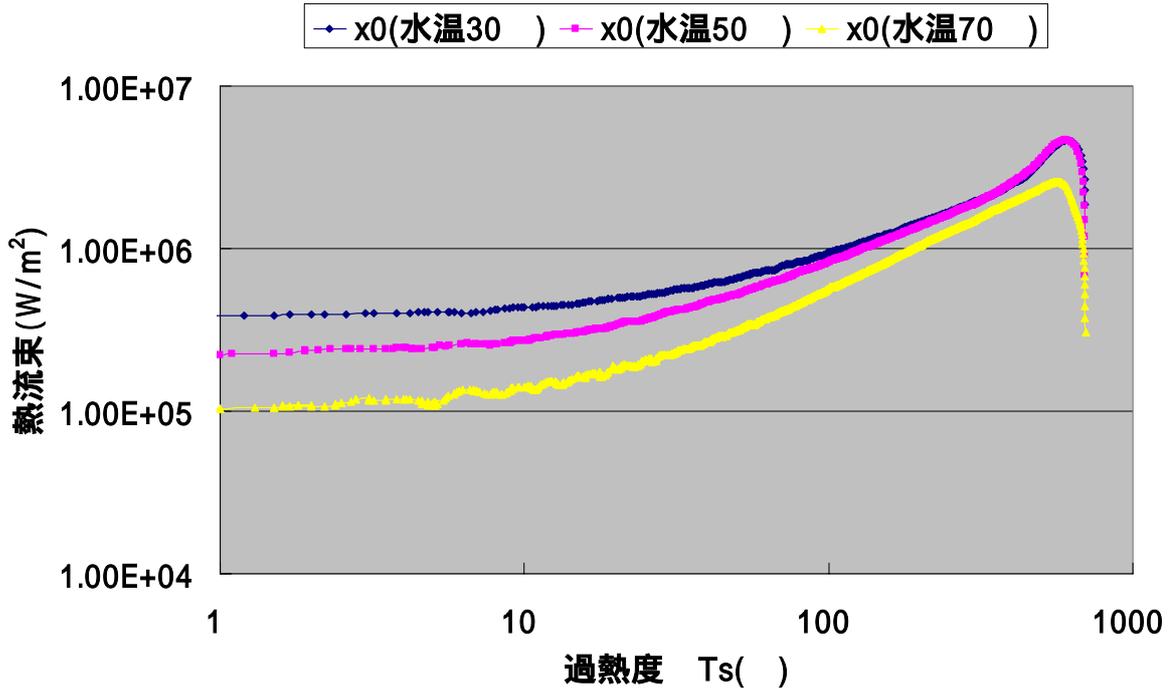


图 3.28 沸腾曲线( $x=0\text{mm}$ )

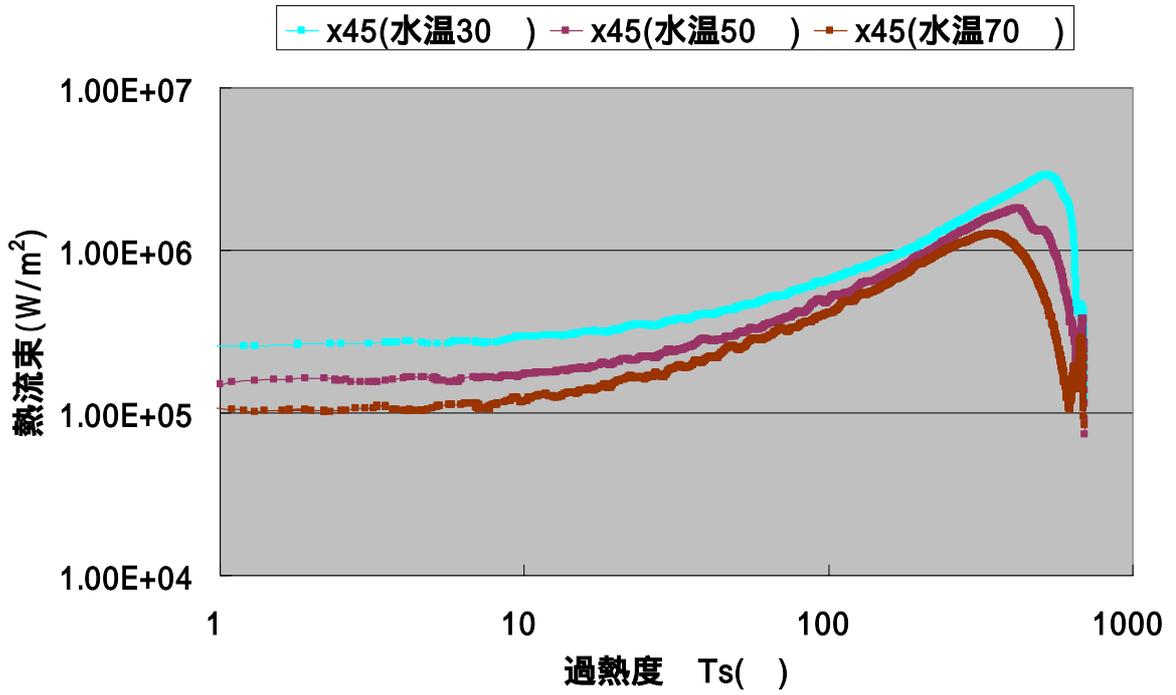


图 3.29 沸腾曲线( $x=45\text{mm}$ )

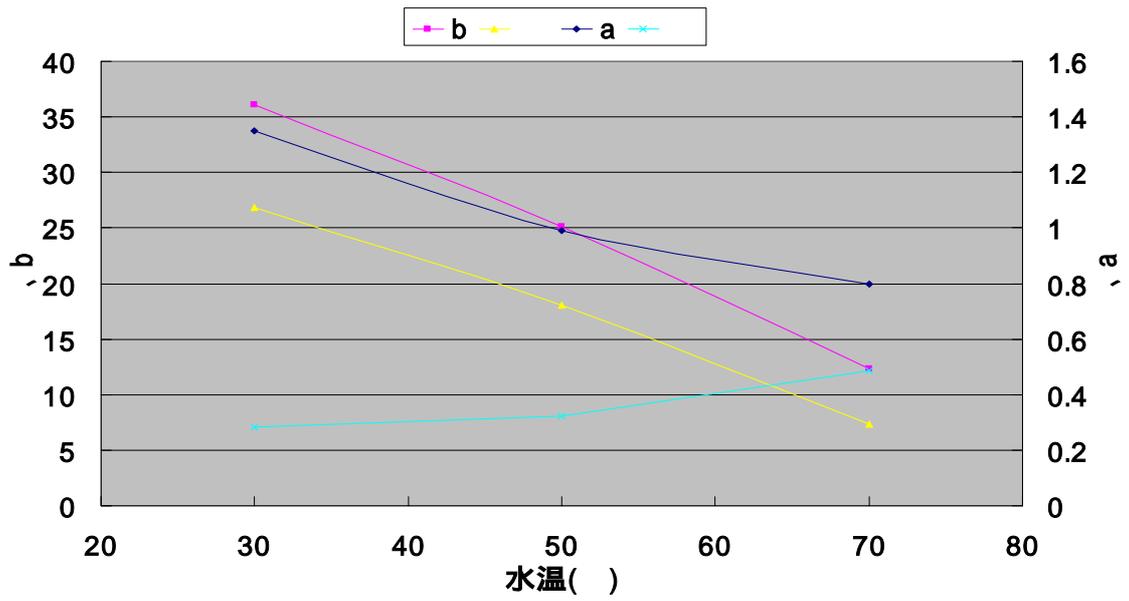


図 3.30 Black zone の定数

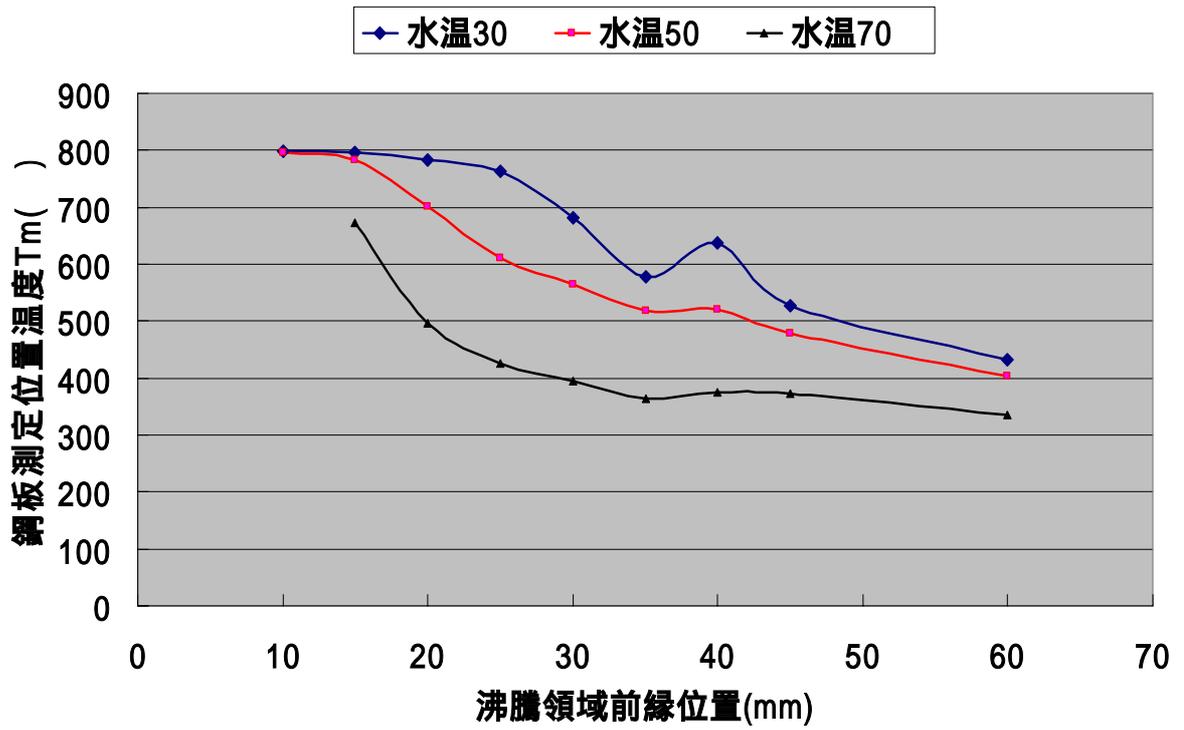


図 3.31 沸騰領域前縁位置温度

### ・衝突領域 ( $x=0$ mm)

衝突領域では、水温 30 と水温 50 は、図 3.24, 図 3.26, 図 3.28 のようにほぼ同じ形をしているが、水温 70 の時は、熱流束が小さくなっている。

水温 30 と水温 50 がほぼ同じ傾向を示すのは、この水温における熱伝達の限界を決めているのが、水の冷却能力によるものではなく、鋼板内部の熱伝導によるからだと思われる。

つまり、水自体にまだ熱を奪う能力があり、その余力に差があっても、SUS304 は熱伝導率が銅などに比べ小さいので、鋼板内部の熱移動がそれに追いついていけないので、水温 30 でも水温 50 でも同じになってしまうのだということである。

そして、水の冷却能力と鋼板内熱伝導がつりあう水温は 50 ~ 70 の間にあり、水温 70 では飽和温度に近いので、水の冷却能力の限界により伝熱量が小さくなっているのだと考える。

単相強制対流域ではっきりと差が出始めるのは、熱流束が小さくなり、鋼板内部の熱伝導が水の冷却能力に追いついてきて、水の冷却能力による差が出始めるからだと思われる。

### ・流水領域 ( $x=45$ mm)

流水領域では水温が高いほど、温度降下が緩やかな時間(遷移(膜)沸騰領域)が長くなり、その後の温度降下もなだらかになる。

沸騰曲線は水温が高いほど、低熱流束・低過熱度側へ移動し、遷移沸騰領域の傾きがなだらかになり、膜沸騰らしきものが現れる。これは、水温が高いほど、蒸気膜の厚さが厚く、形成されやすくなるからだと思われる。

### ・Black zone の広がり近似式の定数

式(1), 式(2)で近似したデータについて検討するため、べき関数の  $Xb$  と一次関数の  $a, b$  を水温で整理した結果を図 3.30 に示す。

式を再掲すると、

$$Xb = t \quad (1)$$

$$Xb = at + b \quad (2)$$

である。

図より、定数  $a, b$  と水温には直線関係が成り立つことがわかる。に対するサブクール度の影響は小さい。

### ・沸騰領域前縁位置の温度

沸騰領域前縁位置(Black zone の半径  $Xb$  + 沸騰領域の幅  $Xb$ )を固液接触の開始点とし、鋼板の中心から各位置に、沸騰領域前縁が到達した時の鋼板温度をプロットしたものが図 3.31 である。

よどみ点近傍では前縁位置温度は高温なのに対し、鋼板中心から離れるにつれてその温度は低くなっていることが分かる。

その理由は、よどみ点近傍ではサブクールされた液体の強制的な供給により、液体が蒸発して蒸気膜を形成する前に固液接触を開始してしまうことや、もし蒸気膜ができてその蒸気膜は不安定ですぐに破れしまうのでしまう可能性が高いということが考えられる。そして、よどみ点からの距離が大きくなるにつれて、その効果が弱くなり、前縁位置温度が低くなるものと思われる。

また、サブクール度が高い(水温が低い)ほど前縁位置温度が高いのは、蒸気膜厚さが、サブクール度が高いほど薄くなるので、蒸気膜を破って固液接触を開始する可能性が高いためだと考えられる。

水温 70 において、前縁到達位置 20mm と 25mm を境界にして、前縁位置温度が異なった傾向を示すのは、噴流による強制的な液体の供給による伝熱の促進が、25mm より内側に限られるという理由によるものだと考えられる。

### 3.2.5 シミュレーションとの比較(水温 70 )

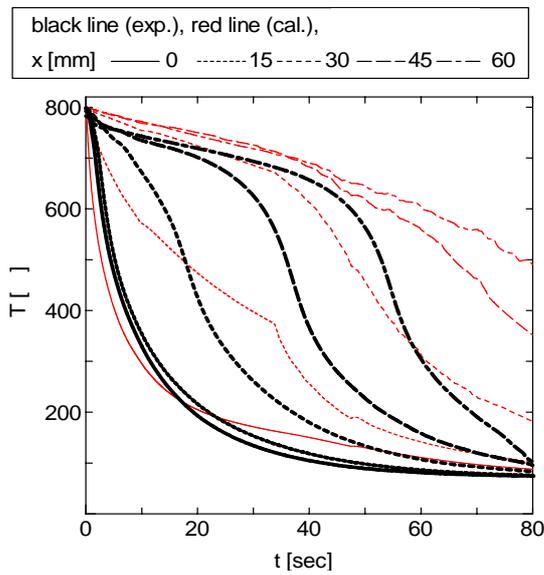


図 3.32 冷却曲線比較

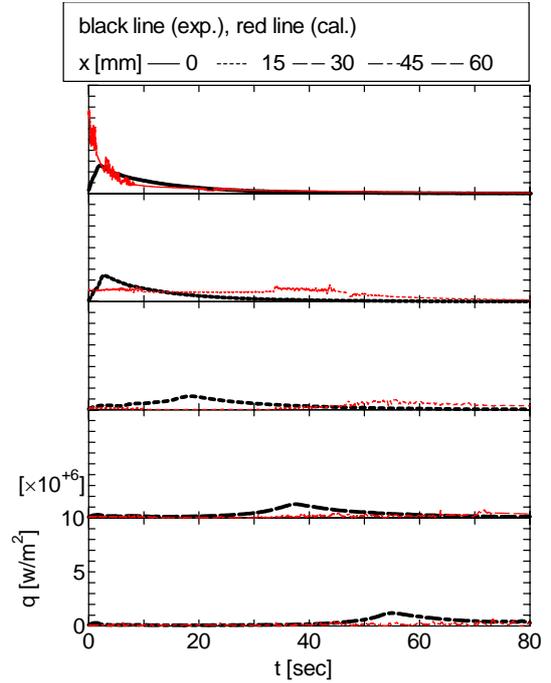


図 3.35 表面熱流束比較

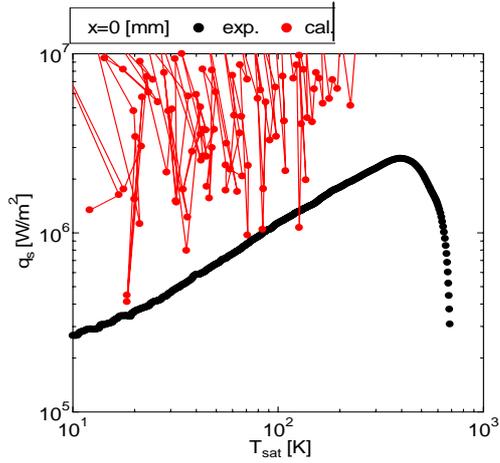


図 3.33 沸騰曲線比較(x=0mm)

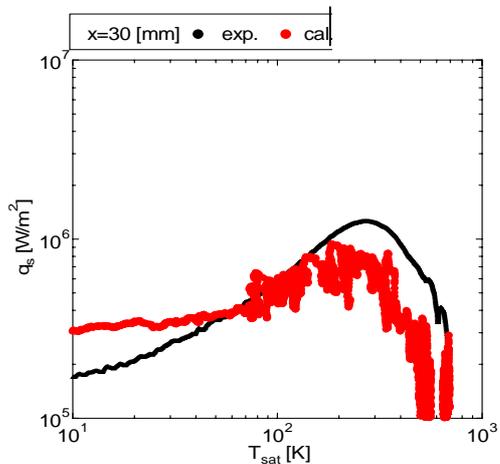


図 3.34 沸騰曲線比較(x=45 mm)

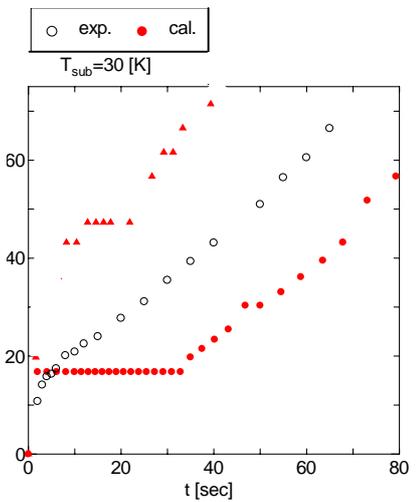


図 3.36 Black zone の広がり比較

実験結果とシミュレーションの結果の比較を図 3.32～図 3.36 に示す。

シミュレーションの結果は、 $x=0\text{mm}$  以外の位置では遷移(膜)沸騰の状態が長く続き、熱流束の上昇がみられないので、急激な温度降下の起きる時間が実際よりも大分遅れていることが分かる。

このことから、遷移(膜)沸騰状態から核沸騰状態への移行の条件を合わせる必要があると思う。

実験では、遷移(膜)沸騰領域と核沸騰領域の境界付近で激しい液滴飛散がみられ、大部分の液体が鋼板上から飛ばされる。よって、遷移(膜)沸騰領域の液膜厚さは、例えば 90%の液体が飛ばされ、速度の変化がないと仮定すれば約  $0.02\text{mm}$  となり、また、ビデオの映像でも確認が難しいほどなので、非常に薄いものとなっていると思われる。

その非常に薄い液膜の中に蒸気膜が発生しているので、現実とシミュレーションの蒸気膜厚さに差があるのではないかとと思われる。シミュレーションでは、蒸気膜厚さが厚くて安定しているので、なかなか破れずに核沸騰に移行できないのではないかと予想する。

また、蒸気膜の条件が、現実よりも発生しやすく、また破れにくくなっているのではないかと考える。

実験では、噴流衝突付近 ( $x=0\text{mm} \sim x=30\text{mm}$ ) ではすぐに固液接触が起こり温度が急降下するが、シミュレーションでは蒸気膜ができてしまうので強制的に、周期的な固液接触をさせて温度を降下させている。蒸気膜の発生初期は、周囲の水からの冷却により凝縮してしまうので、ある一定の大きさ以上の熱流束が加えられないと蒸気は発生しないようにするなど、蒸気発生条件を考える必要がある。

核沸騰部における熱流束の大きさ自体は、(実験の熱流束は、横方向の熱伝導分が含まれることを考慮すれば) 実験とシミュレーションでそれほど違いがないので、やはり遷移(膜)から核への移行の条件決めが重要である。

### 3.3 沸騰実験 (乱流) D:ノズル径

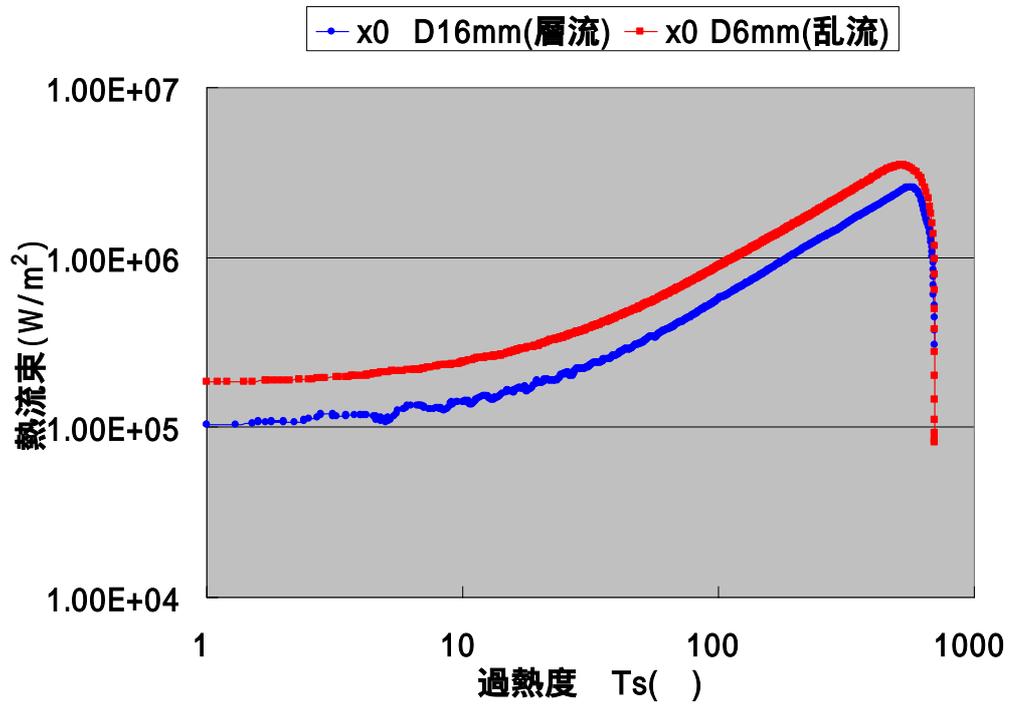


図 3.37 沸騰曲線(水温 70 , x=0mm)

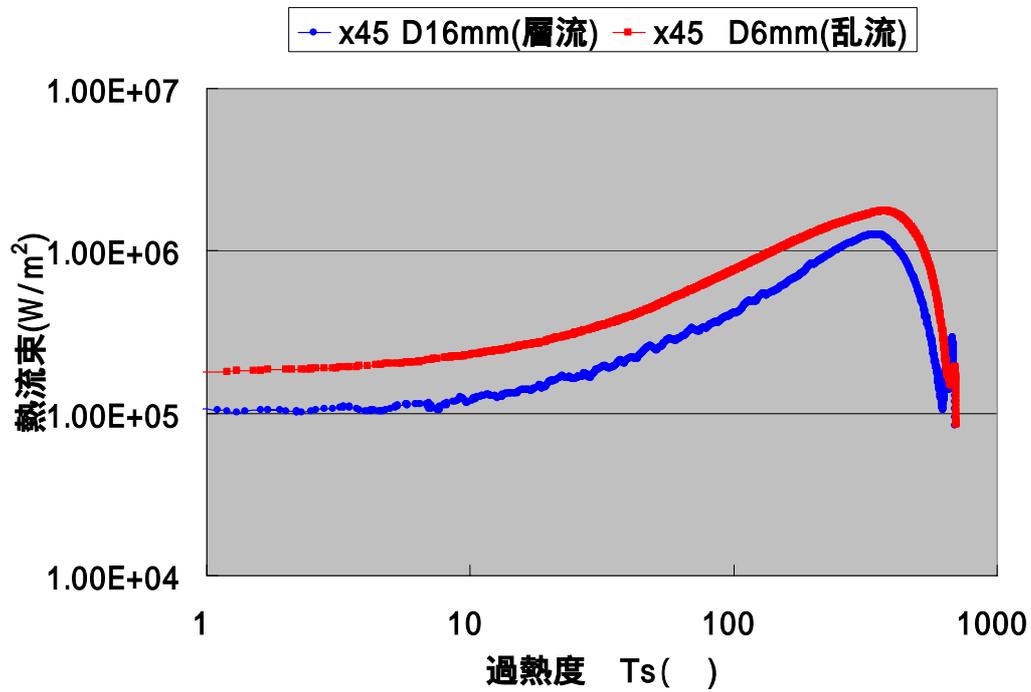


図 3.38 沸騰曲線(水温 70 , x=45 mm)

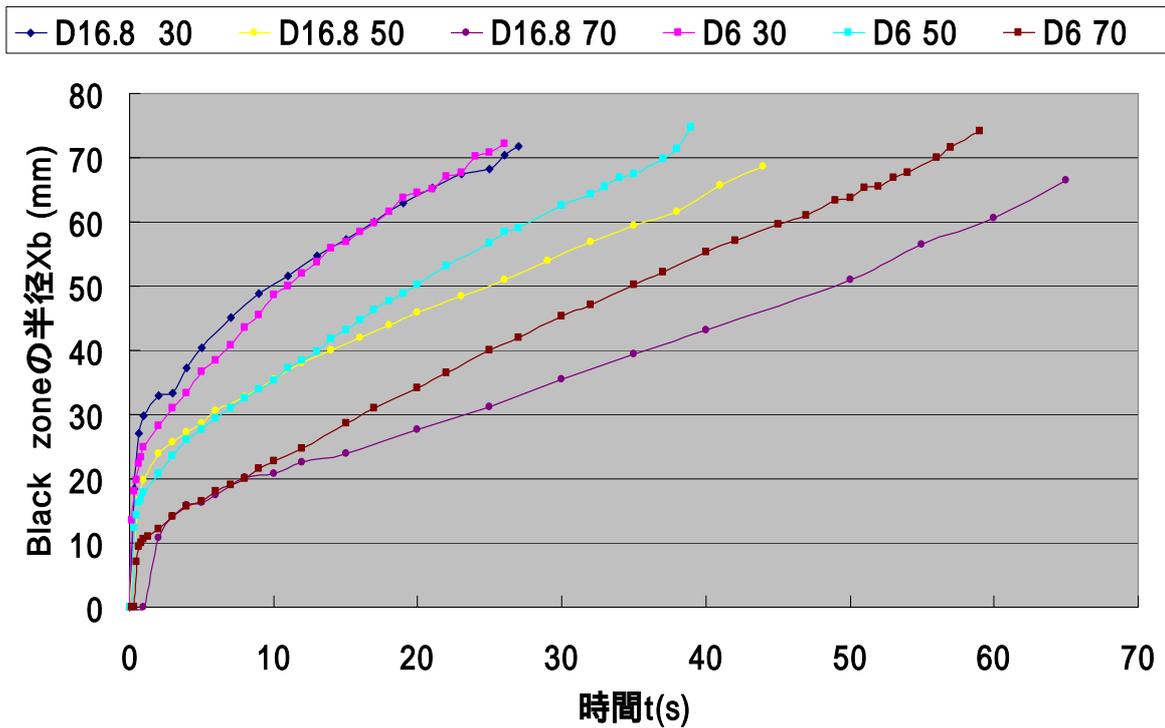


図 3.39 Black zone の広がり

衝突領域 ( $x=0$  mm), 流水領域 ( $x=45$  mm) とともに沸騰曲線は, ノズル直径  $D=6$  mm の方が高熱流束側に移動していることが分かる. 特に流水領域においてその差が大きく, Black zone の広がり方を見ても, 直線近似部分で広がり方に差が大きいことが分かる.

$D=6$  mm が,  $D=16.8$  mm に比べ流水部分で熱流束が大きいのは, 鋼板上を流れる液膜の速度が  $D=6$  mm の方が大きく, 温度境界層厚さが薄くなるためだと思う.

また,  $D=6$  mm の方が Black zone の広がり速度が大きいのは, 蒸気膜と液体との界面が, 流速が大きいことにより不安定になり, 固液接触が起きやすいという理由も考えられる.

### 3.4 局所水温測定実験

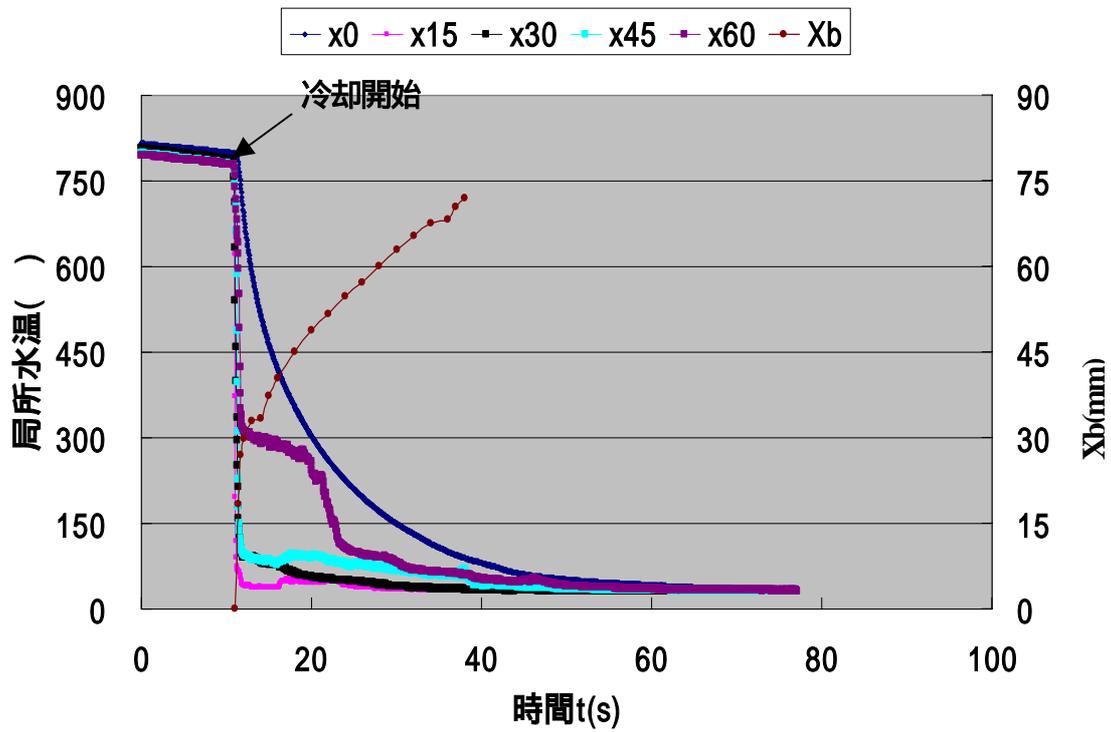


図 3.40 局所水温測定結果

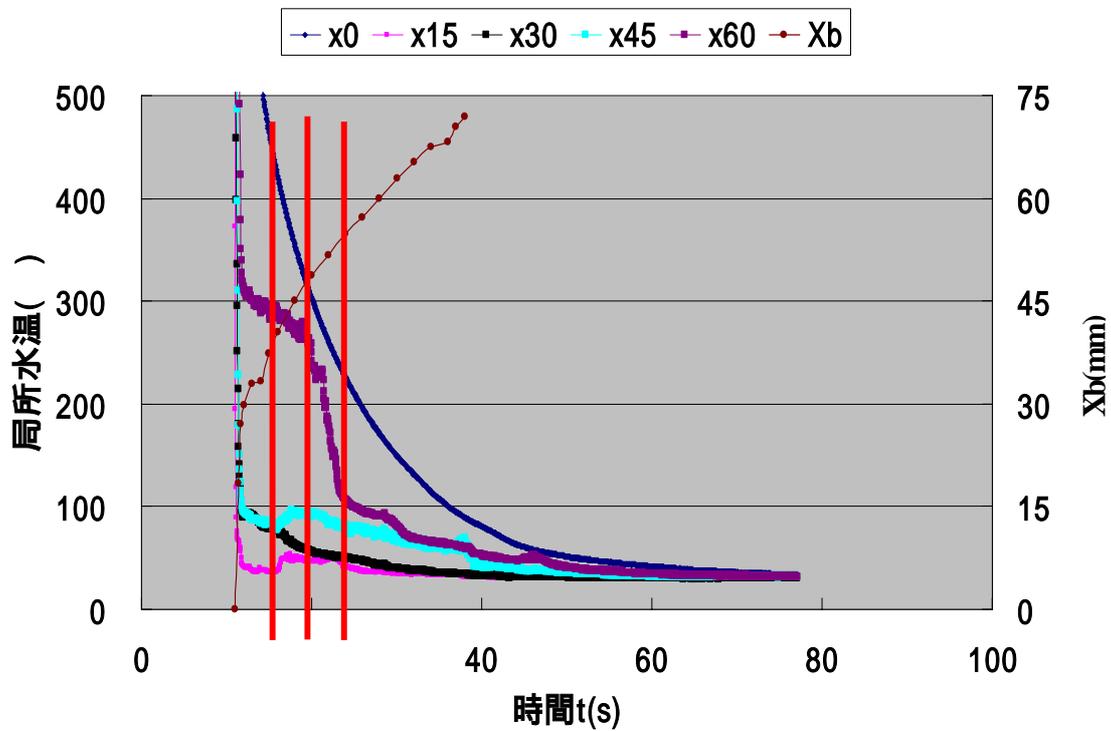


図 3.41 局所水温測定結果(0 ~ 500 の範囲を拡大)

図 3.40 は、各熱電対位置での温度データを局所水温として、時間の経過とともに示したものであり、図 3.41 は、同じデータの 0~500 の範囲を拡大したものである。

今回の方法では、その温度はいったいどの温度を測っているのかなど信頼性に問題があるが、Black zone が各熱電対位置に到達した時とほぼ同時刻に、局所水温は 100 以下になっているので、液膜がその熱電対位置にあるかどうかの判断には用いることができるのではないかと考えて、本来の目的の局所水温測定とは異なるが、遷移(膜)沸騰領域の存在についてあえて考察する。

図 3.41 の時刻  $t_1$  において位置  $x=45\text{ mm}$  には、液滴飛散によって飛ばされなかった液体が存在し、液膜となって鋼板上を流れている(遷移沸騰領域)ことが映像により観察されたが、 $x=60\text{ mm}$  においては、液膜の存在は映像により確認することができなかった。

一方同時刻の温度を見ると、 $x=45$  では 100 以下なので液膜は存在すると言えるかもしれないが、 $x=60\text{ mm}$  においては、300 と高温なので液膜が存在するかは判断できない。

時刻  $t_3$  において、 $x=60\text{ mm}$  の位置の水温が 100 以下になったので、ここには液膜が存在するかもしれないが、映像からの確認はできなかった。

$x=60\text{ mm}$  の局所水温を時間とともに見ていくと、次のような可能性が推測される。

時刻  $t_1$  (300 の高温)

- ・ 液膜が届かず(手前で蒸発してしまう)、鋼板近傍の温度を測っている。
- ・ 液膜が非常に薄いので、測定することができない。
- ・ 飛散された液体が、液滴となって鋼板上に落下している。

時刻  $t_2$  (水温が降下し始める)

- ・ 液膜が届き始める。
- ・ 液膜の厚さが厚くなり、熱電対が感知でき始める。
- ・ 飛散液滴の液滴落下密度が大きくなり始める。

時刻 (水温 100 以下)

- ・ 液膜が存在する。
- ・ 液滴落下密度が非常に大きくなる。

以上のことから、図 3.23 の核沸騰領域の外側のある領域(10mm くらい)には液膜が存在し、遷移(膜)沸騰状態にあることは確認できたが、その外側にも液膜が存在するかは今回の実験では確認できなかった。

## 第四章

## 結論

## 4.結論

### 4.1 結論

- ・非沸騰域においては、実験結果とシミュレーション結果が一致することが確認できた。
- ・鋼板上における領域分けを行ったが、膜沸騰はほぼ生じてないと思われる。
- ・水温が低くなり、噴流速度が大きくなると、沸騰曲線は高熱流束側に移動する。
- ・シミュレーションとの比較を行ったが、シミュレーションを合わせこむ条件を得ることはできなかった。

### 4.2 今後の課題

- ・非定常冷却中の時間的・空間的な水温変化，蒸気膜厚さ変化を測定することによって，鋼板上の沸騰の状態がより詳しくつかむことができるのではないかと考える。
- ・液滴飛散が起きている位置より更に外側の領域における液膜の流動状態を調べ，シミュレーションにおける膜沸騰との比較を行うことにより，膜沸騰から核沸騰への移行の条件が求められるのではないかとと思われる。

## 付録 A

# 付録 A

## A-1 実験データ

表 A.1 水噴流実験条件

No	冷却開始温度( )	水温( )	ノズル径(mm)
001	800	30	16.8
002	800	50	16.8
003	800	70	16.8
004	700	30	6
005	700	30	6
006	700	50	6
007	700	50	6
008	700	70	6
009	700	70	6
010	800	30	6
011	800	50	6
012	800	70	6

上表の条件により冷却を行った No.001 ~ No.012 について、得られた冷却曲線・表面熱流束・沸騰曲線を示す。

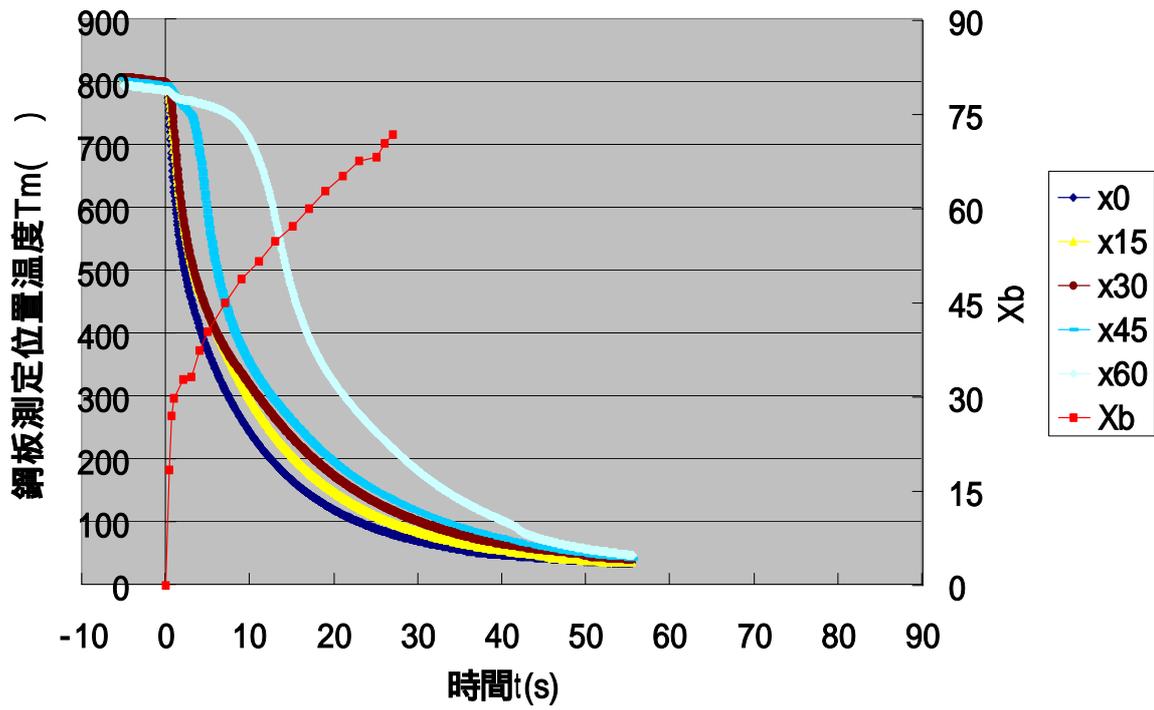


圖 A.1 冷却曲線(001)

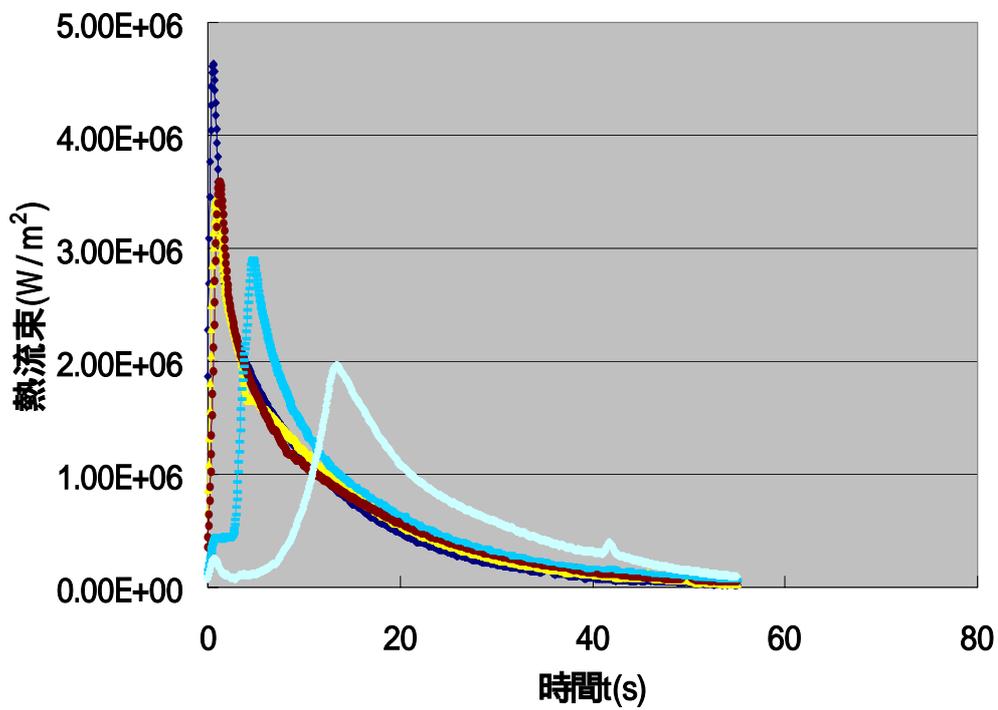


圖 A.2 表面熱流束(001)

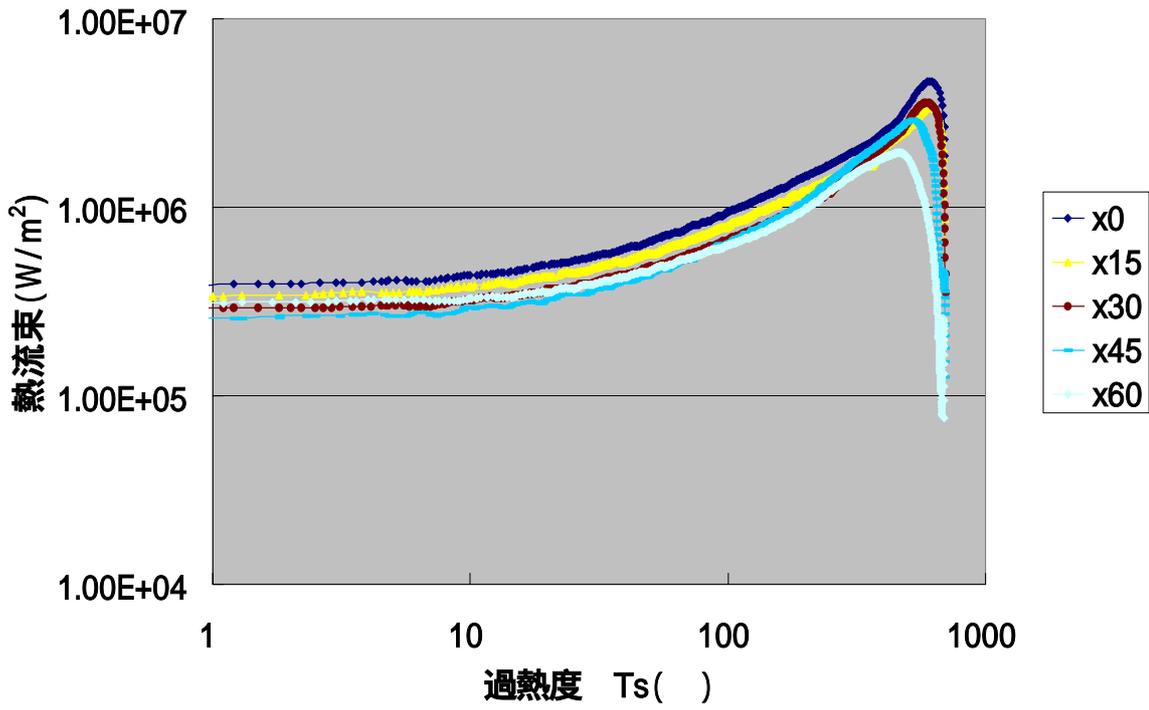


圖 A.3 沸騰曲線(001)

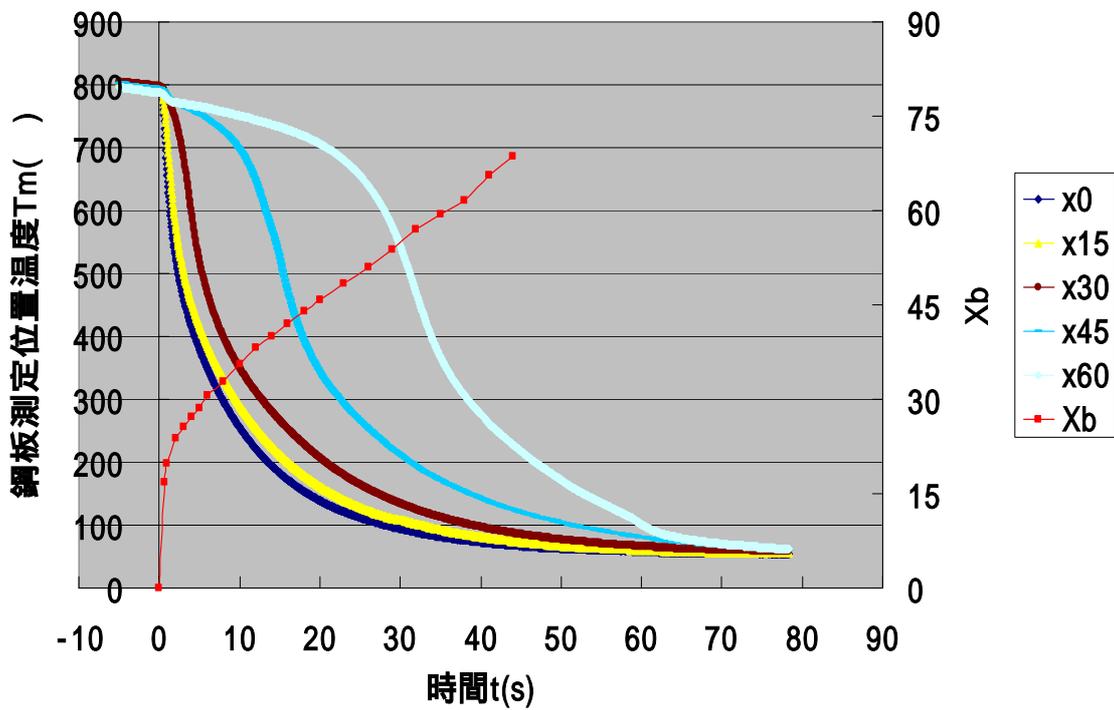


圖 A.4 冷卻曲線(002)

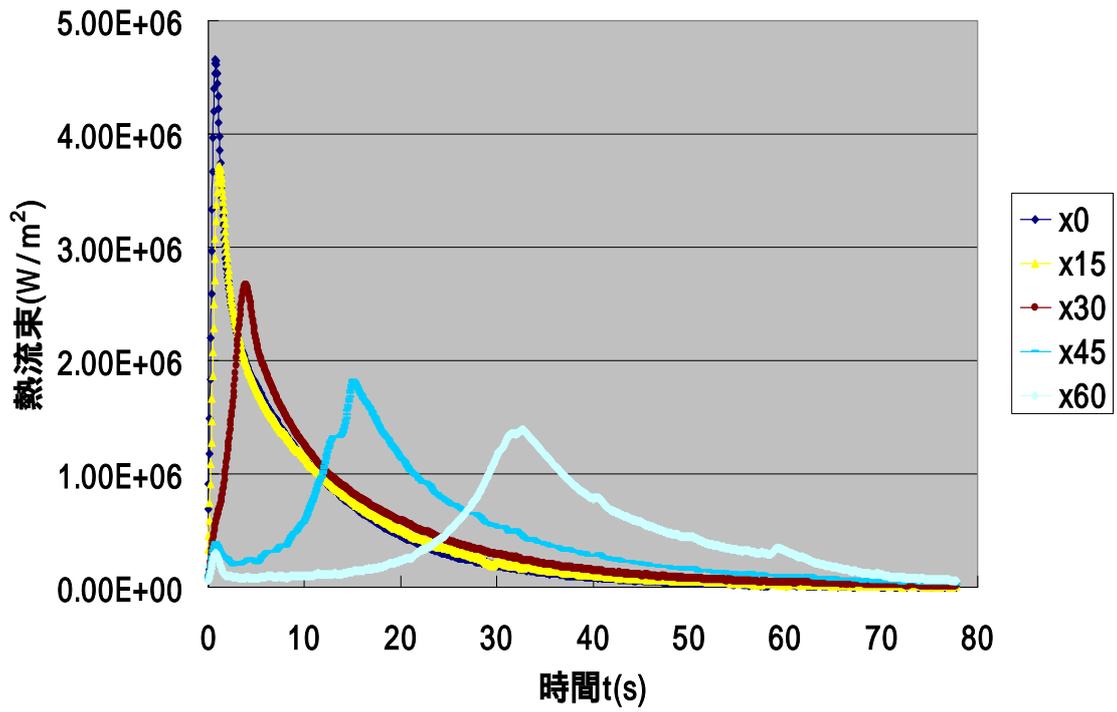


圖 A.5 表面熱流束(002)

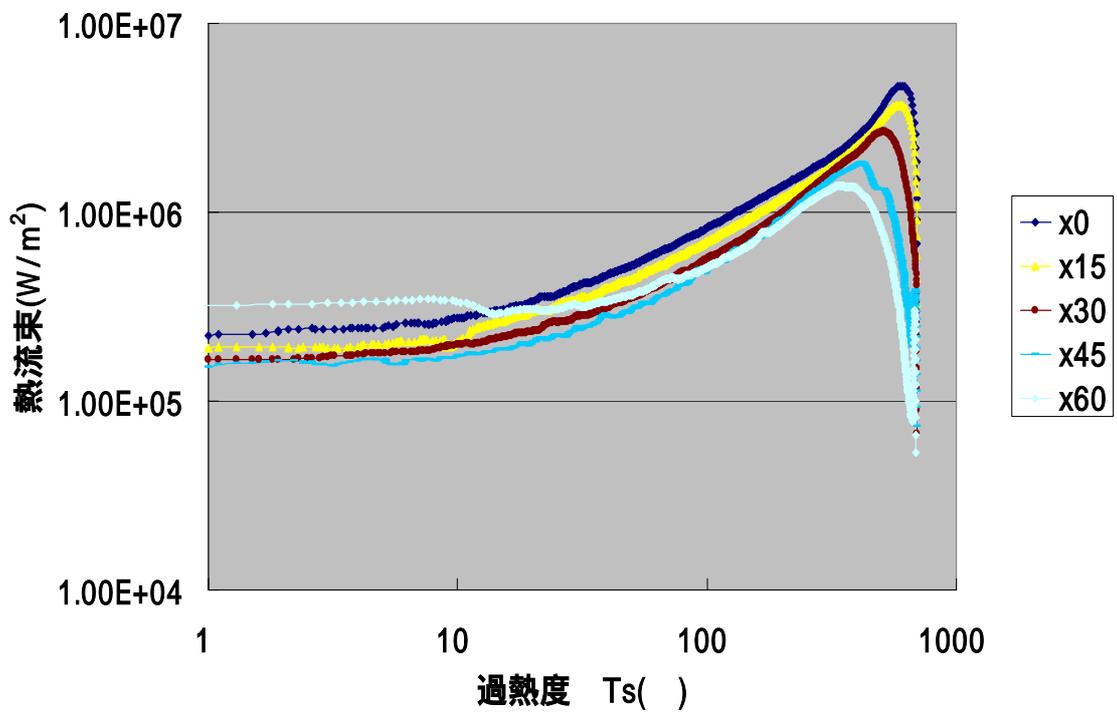


圖 A.6 沸騰曲線(002)

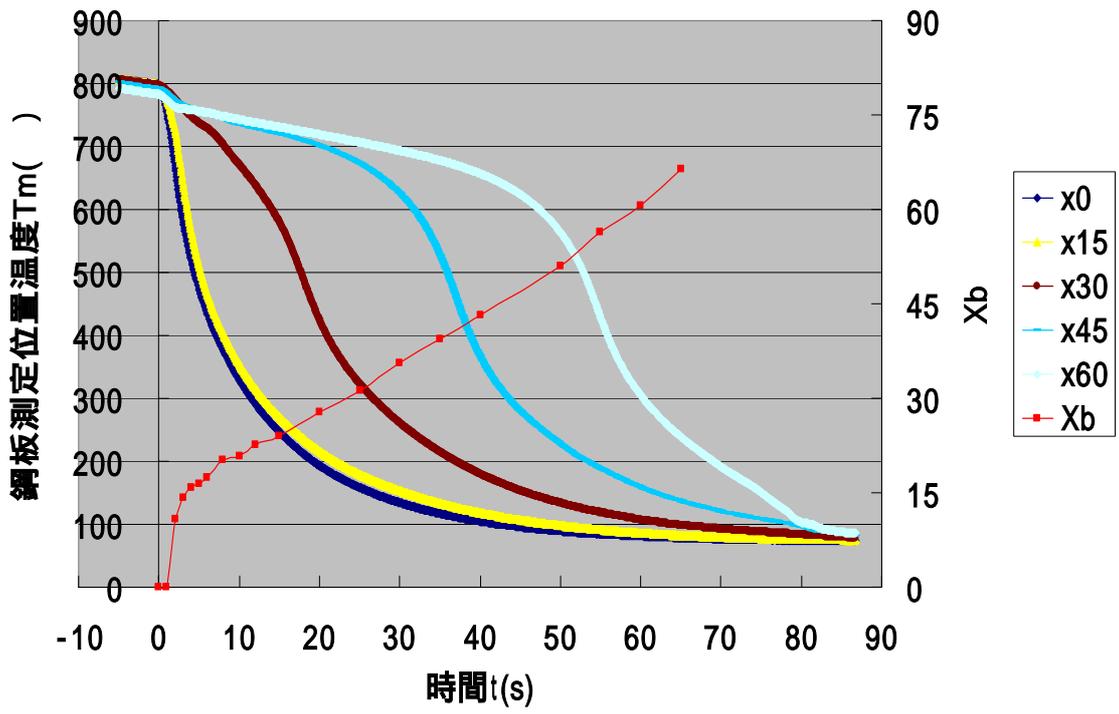


圖 A.7 冷却曲線(003)

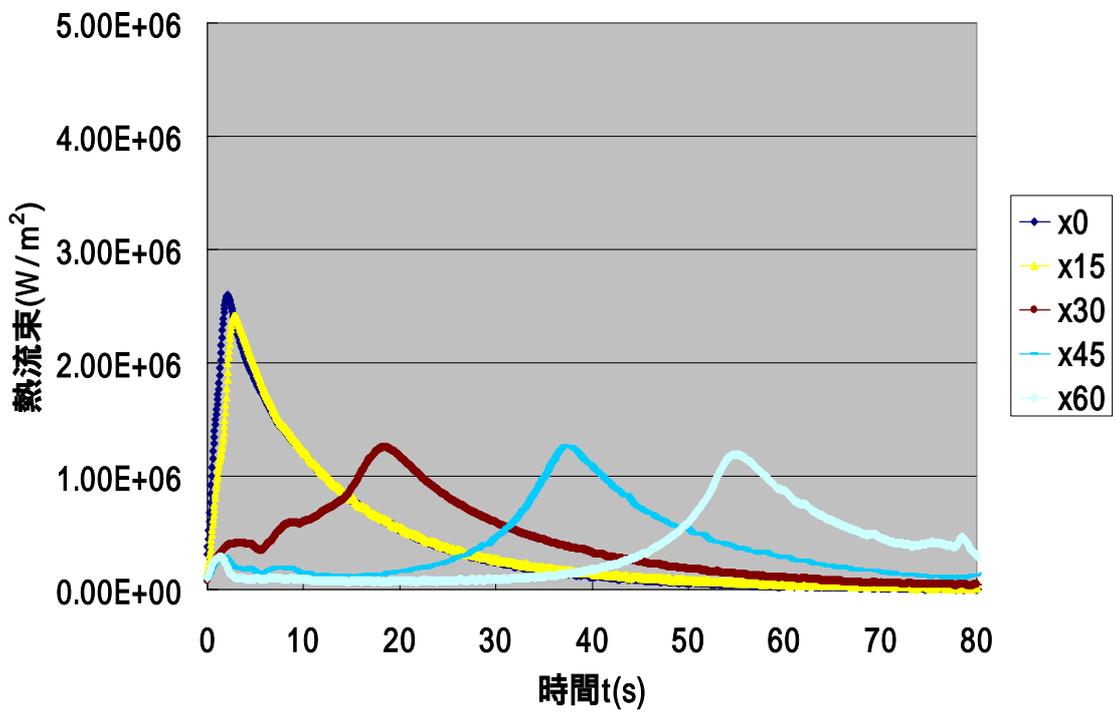


圖 A.8 表面熱流束(003)

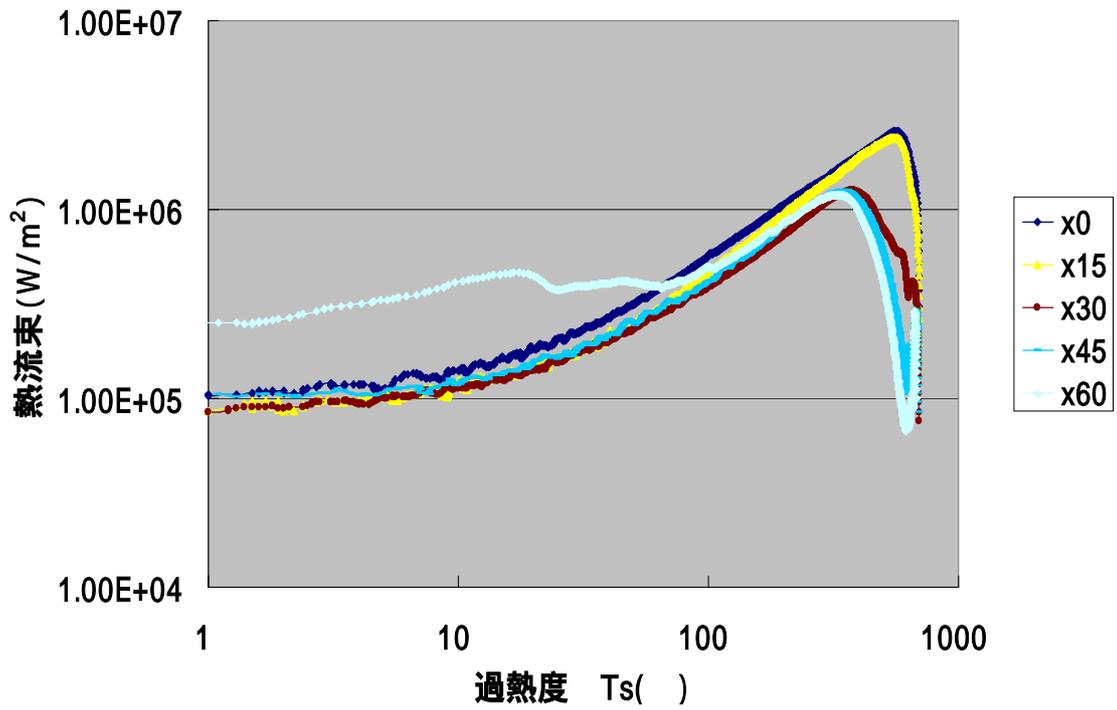


圖 A.9 沸騰曲線(003)

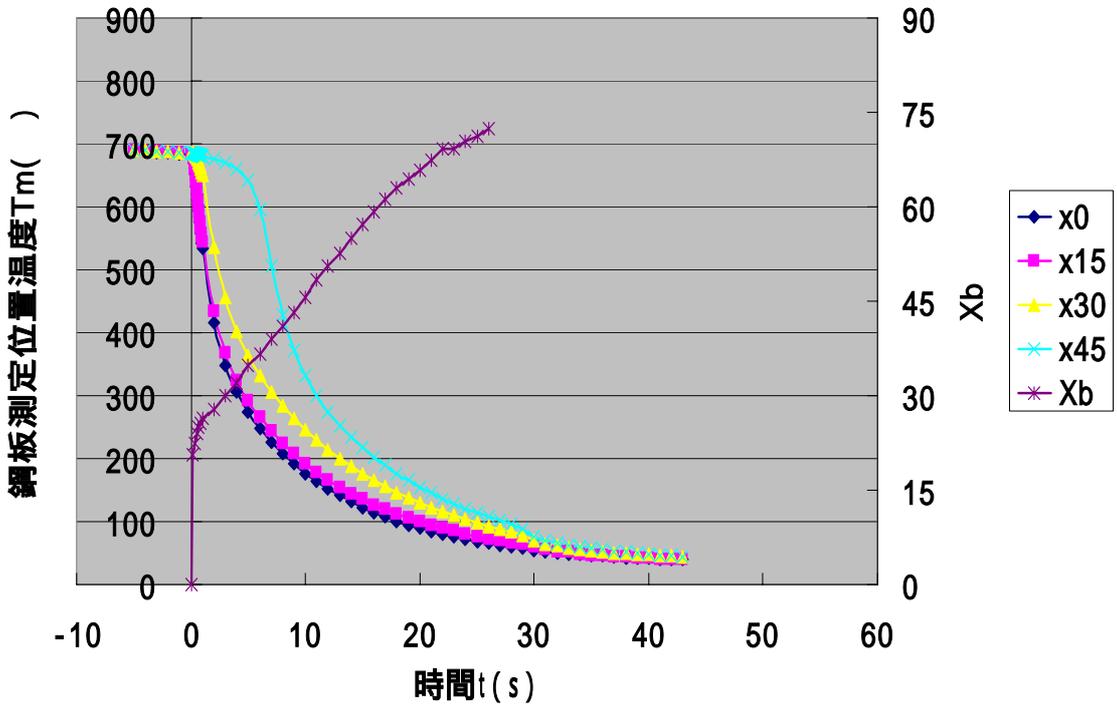


圖 A.10 冷卻曲線(004)

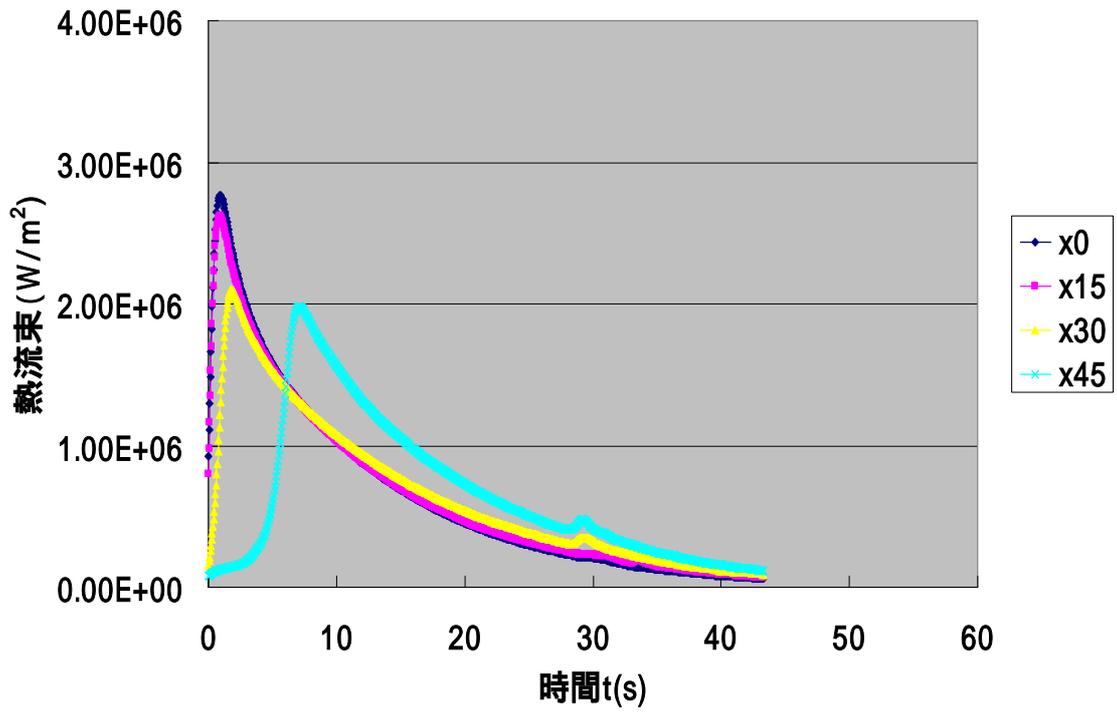


圖 A.11 表面熱流束(004)

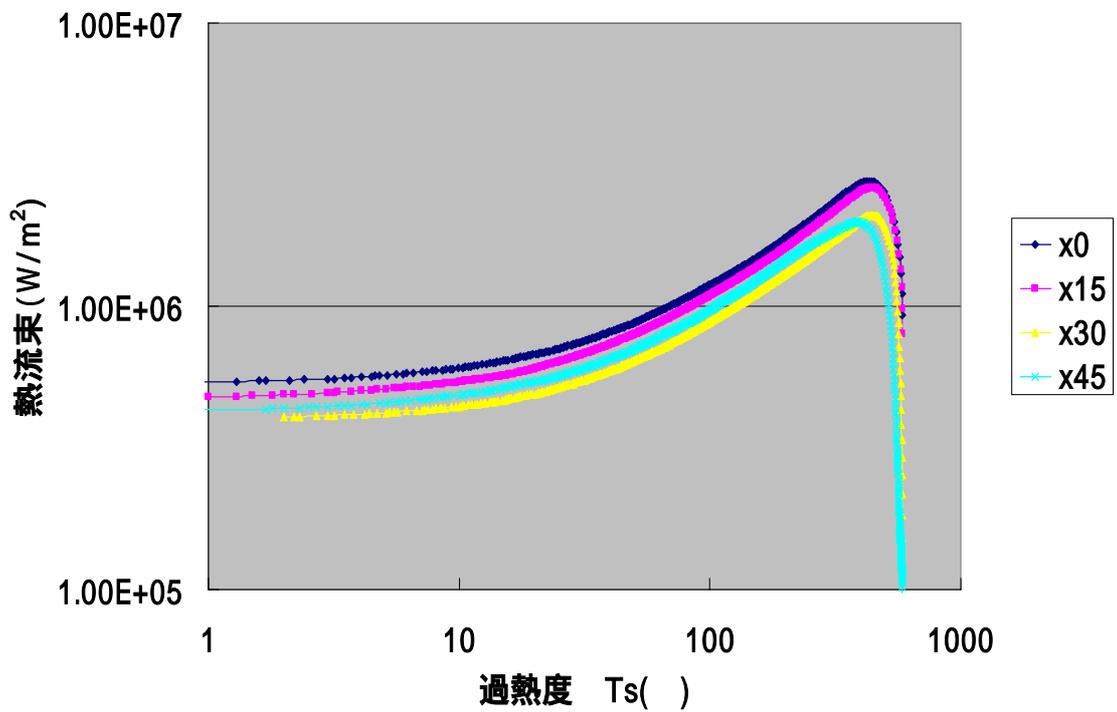


圖 A.12 沸騰曲線(004)

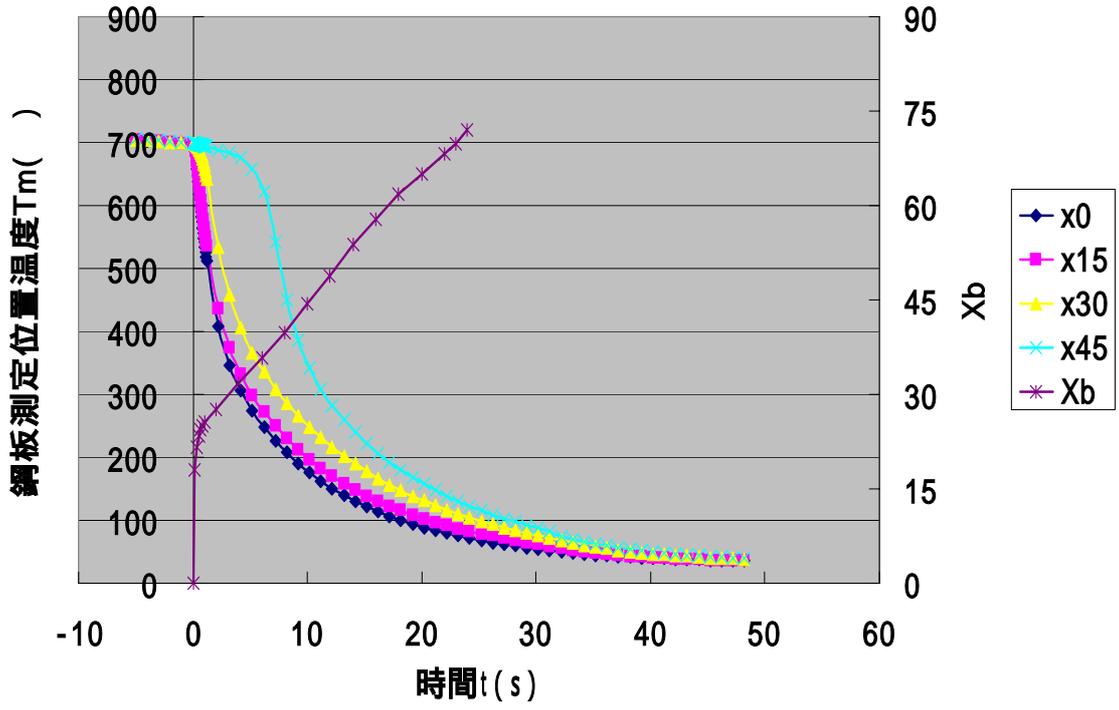


圖 A.13 冷却曲線(005)

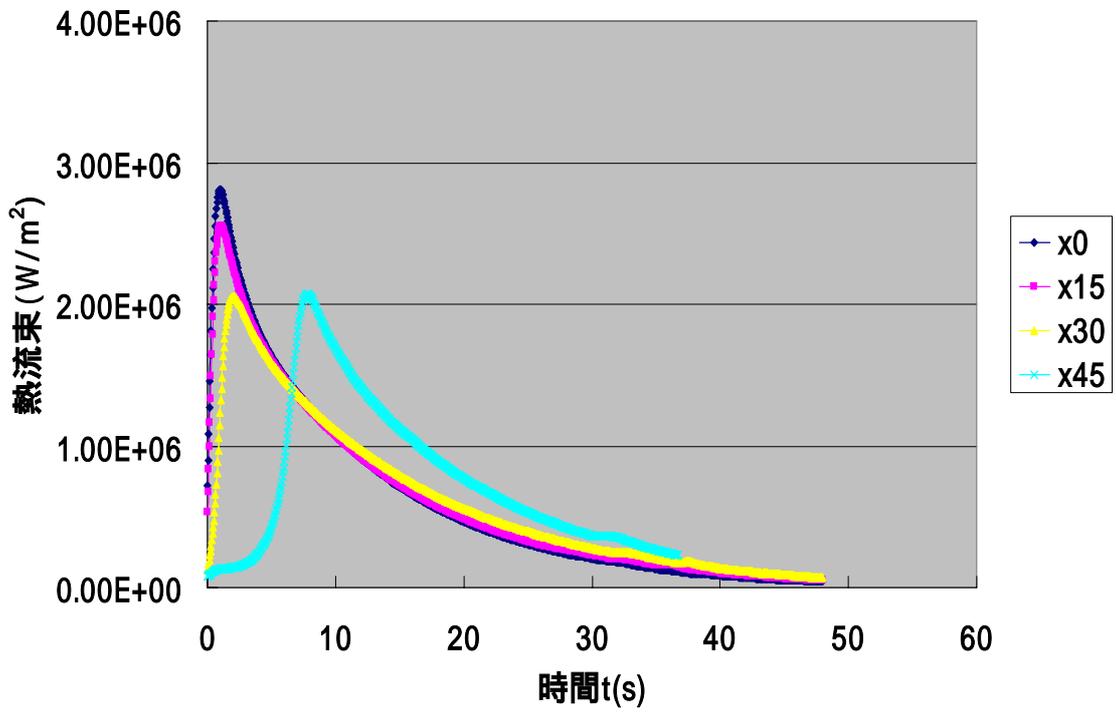


圖 A.14 表面熱流束(005)

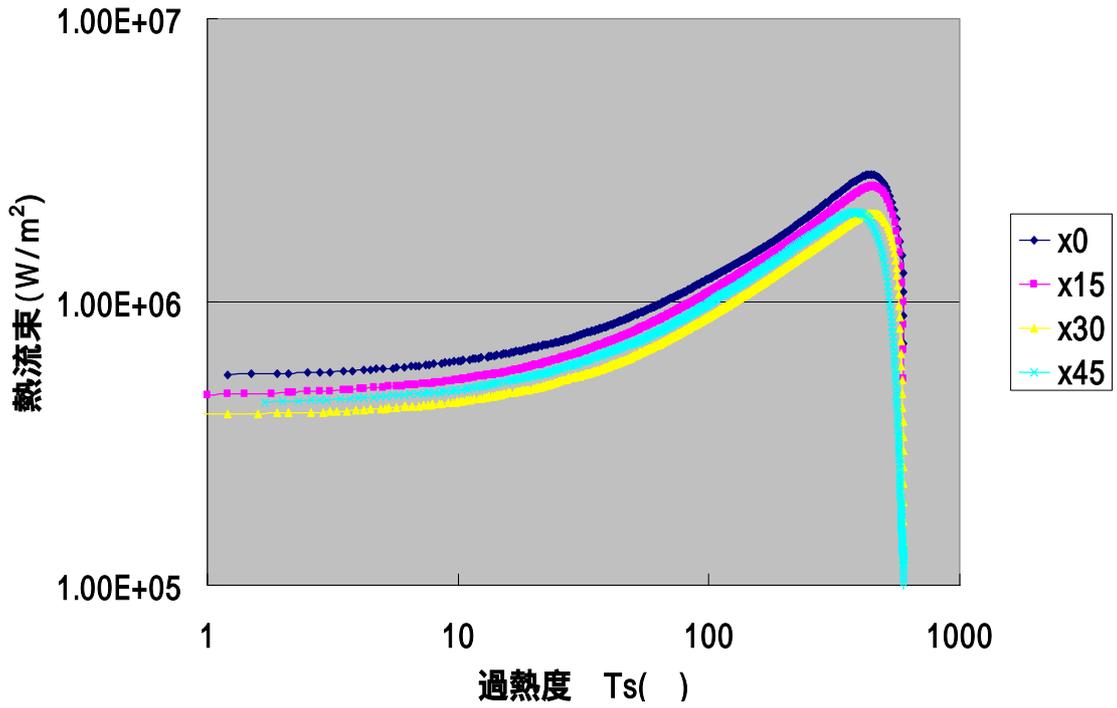


図 A.15 沸騰曲線(005)

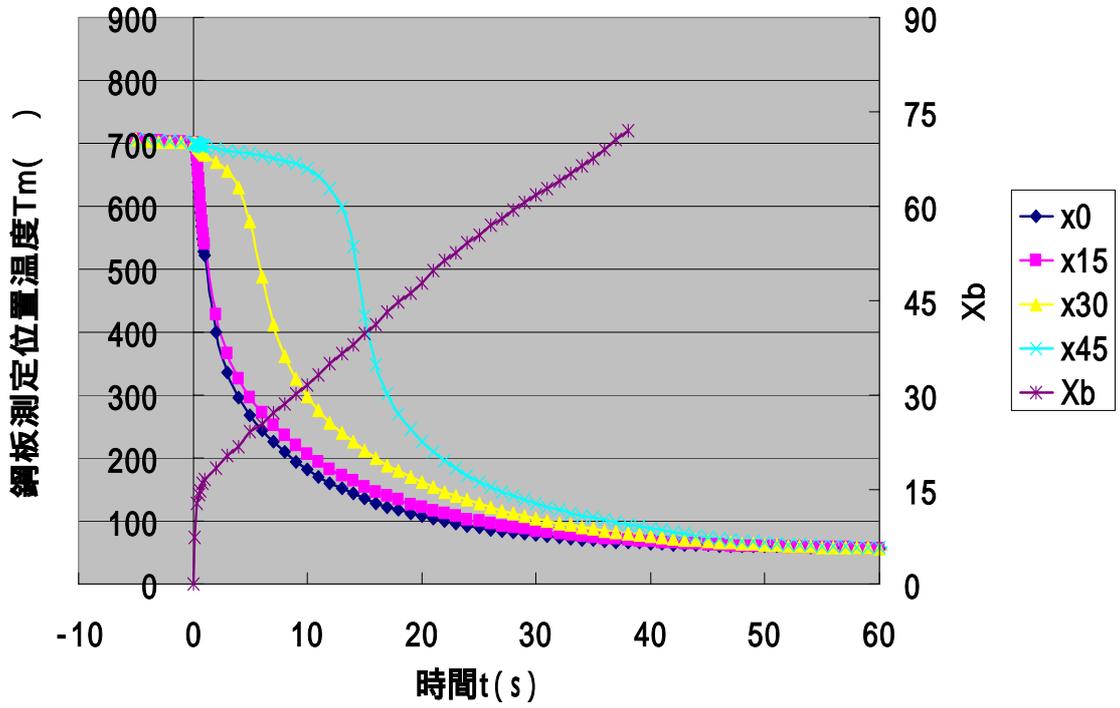


図 A.16 冷却曲線(006)

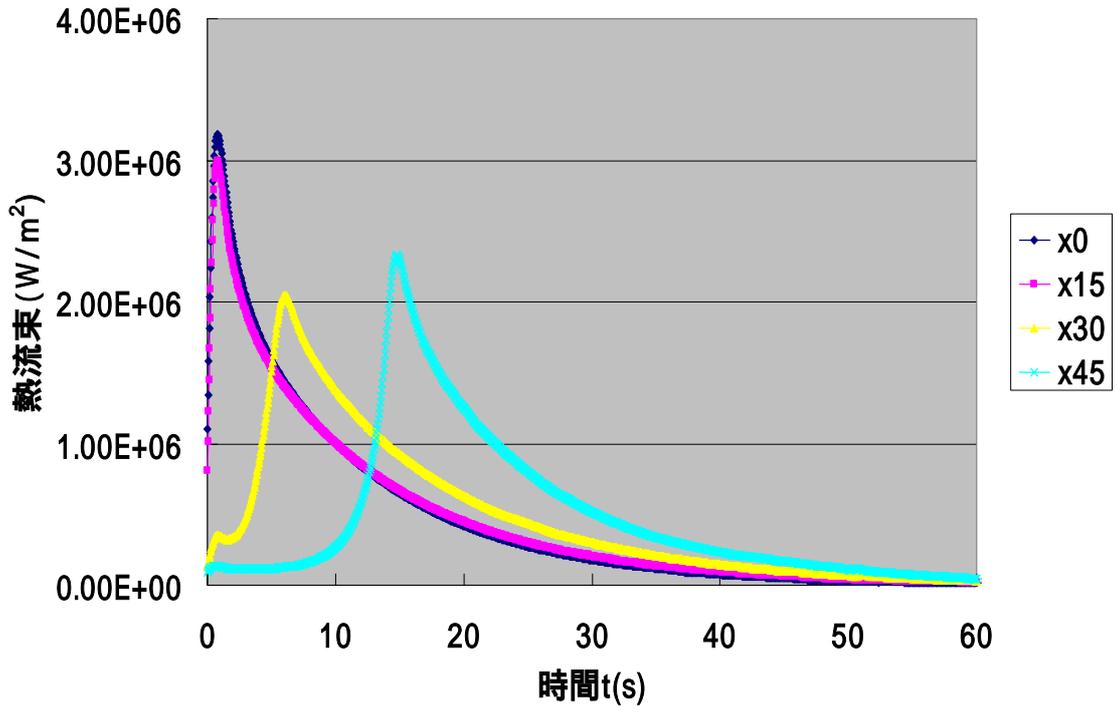


圖 A.17 表面熱流束(006)

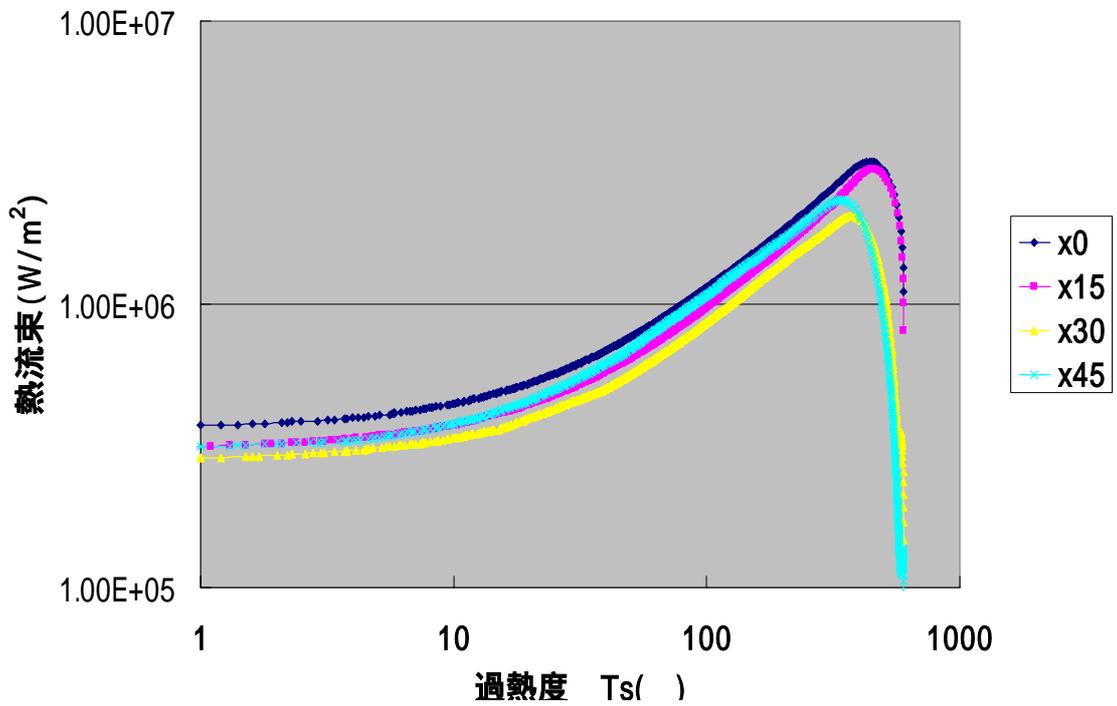


圖 A.18 沸騰曲線(006)

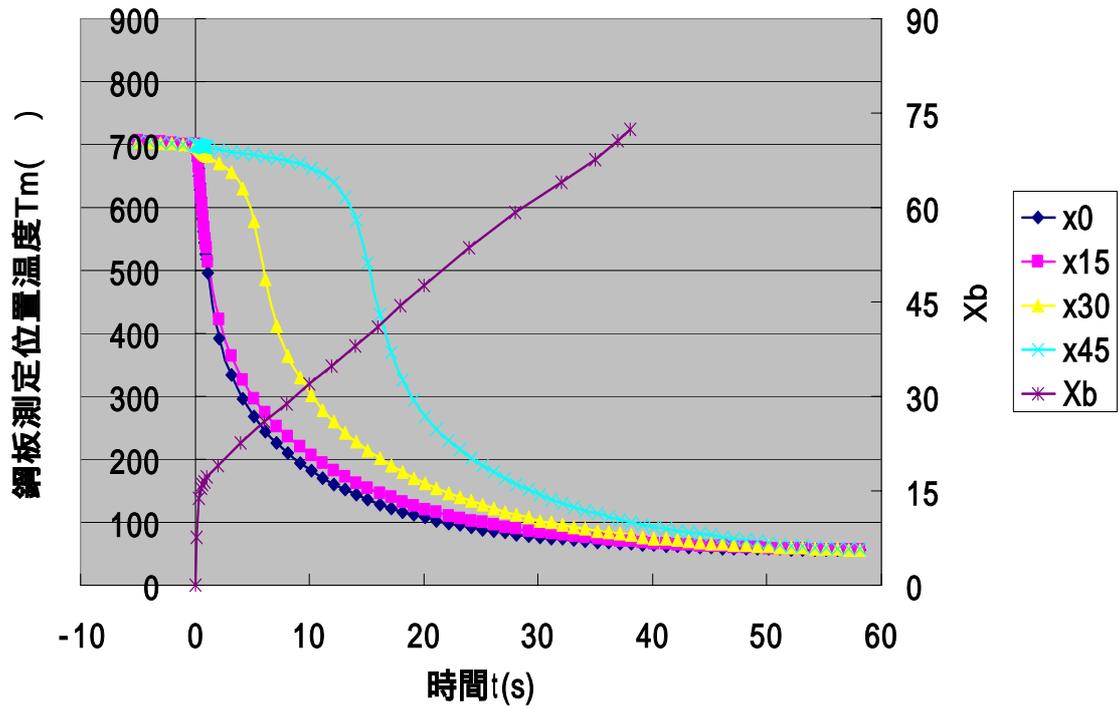


圖 A.19 冷卻曲線(007)

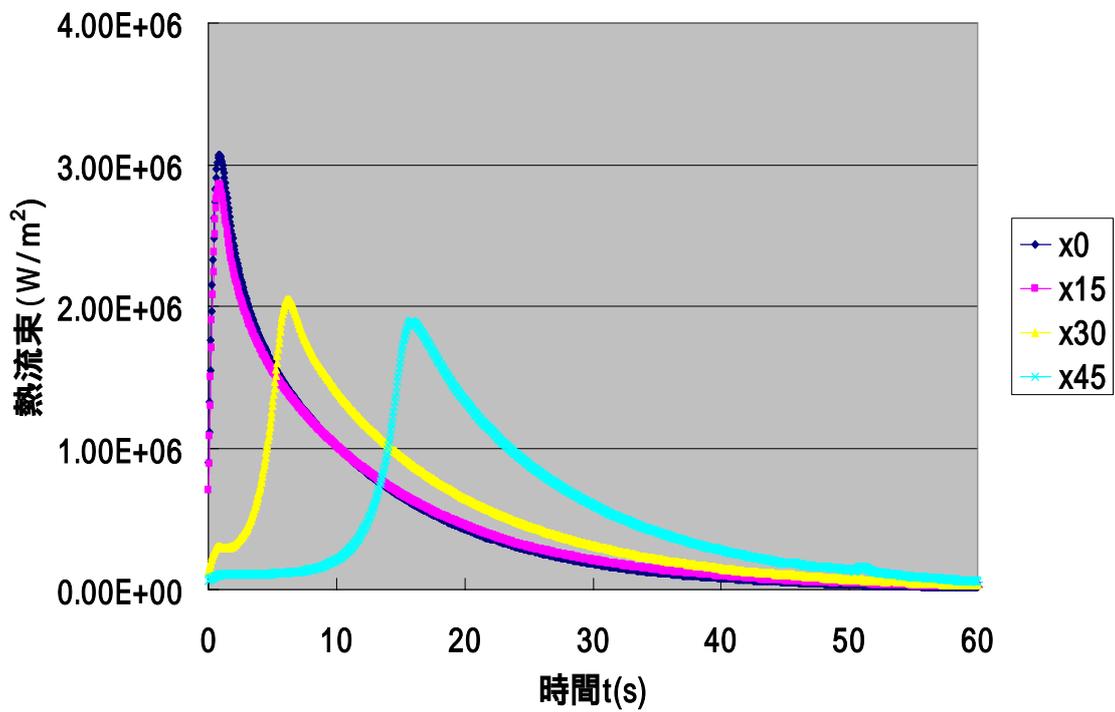
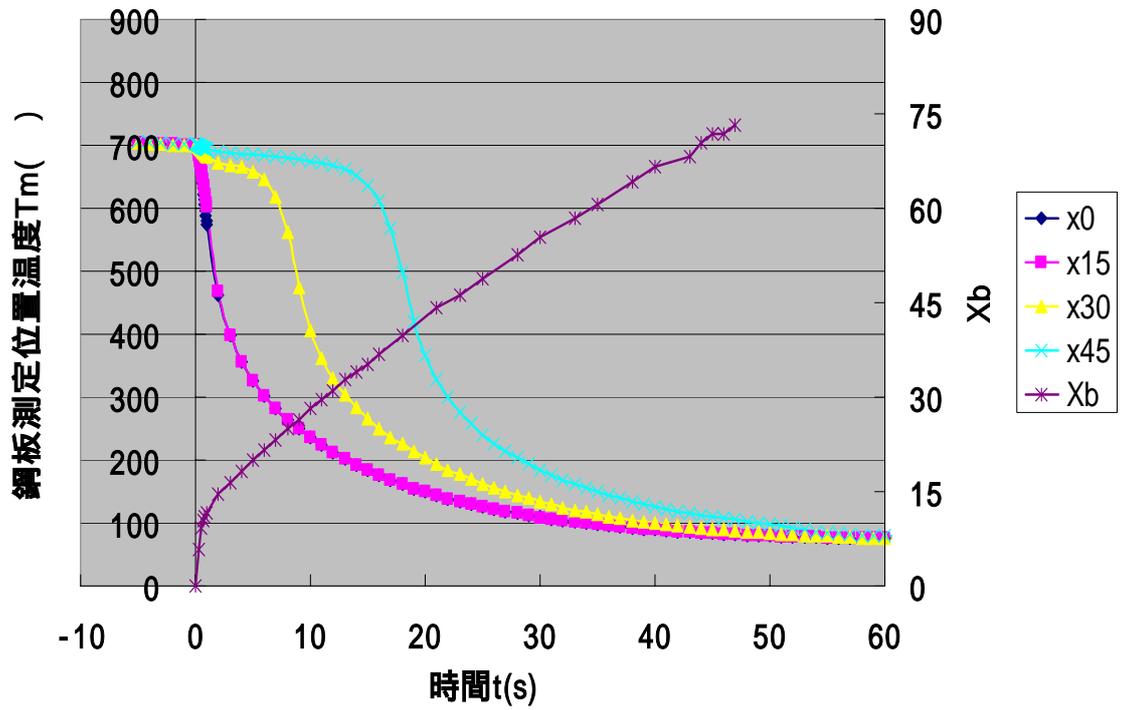
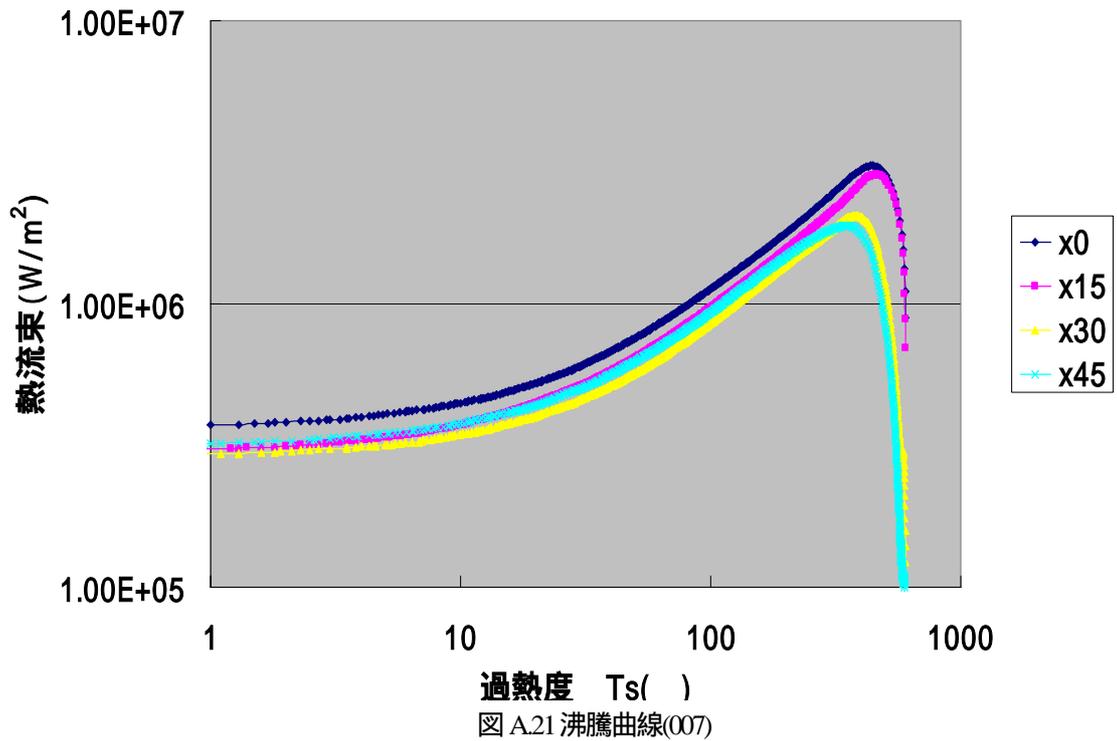


圖 A.20 表面熱流束(007)



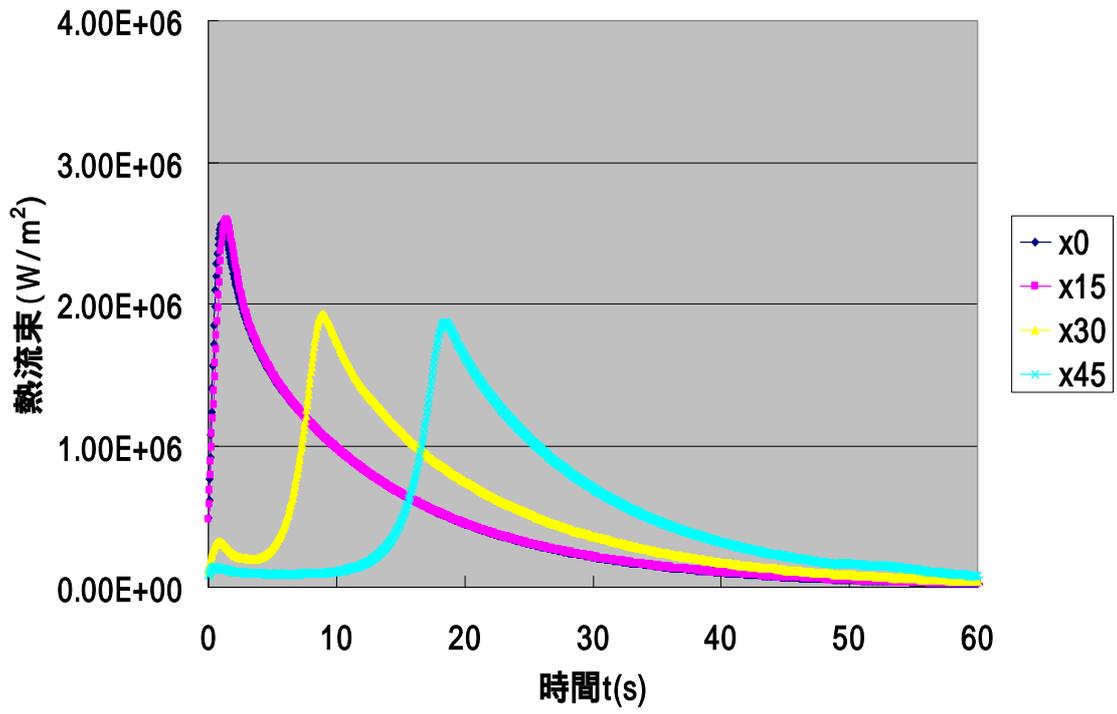


圖 A.23 表面熱流束(008)

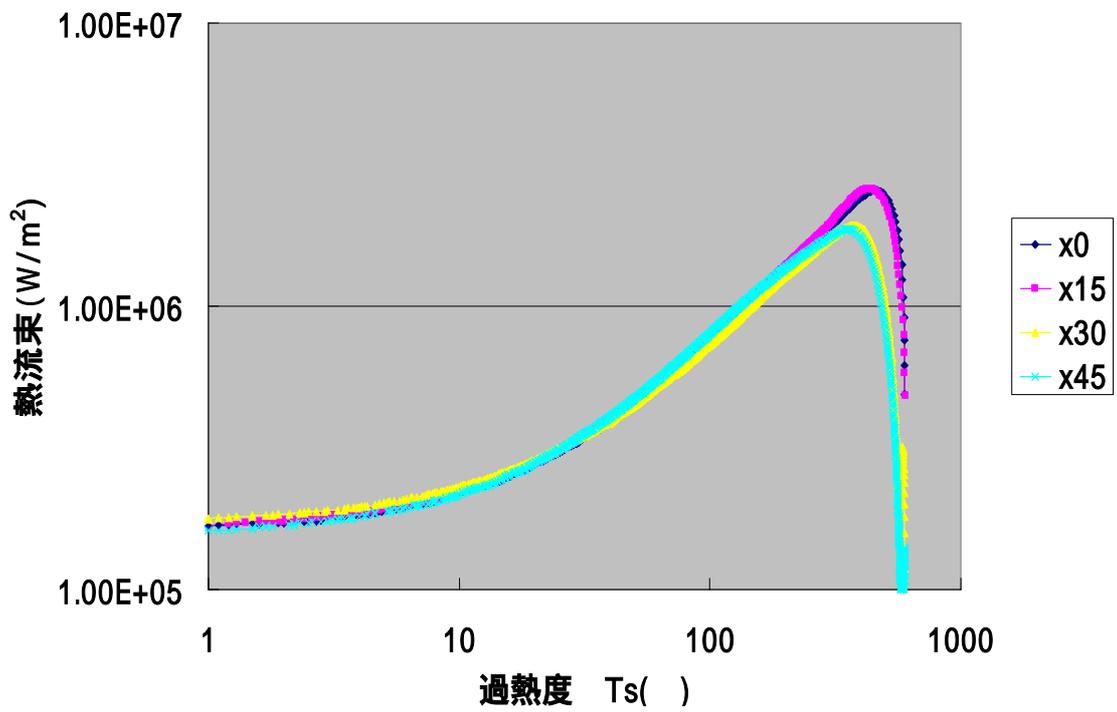


圖 A.24 沸騰曲線(008)

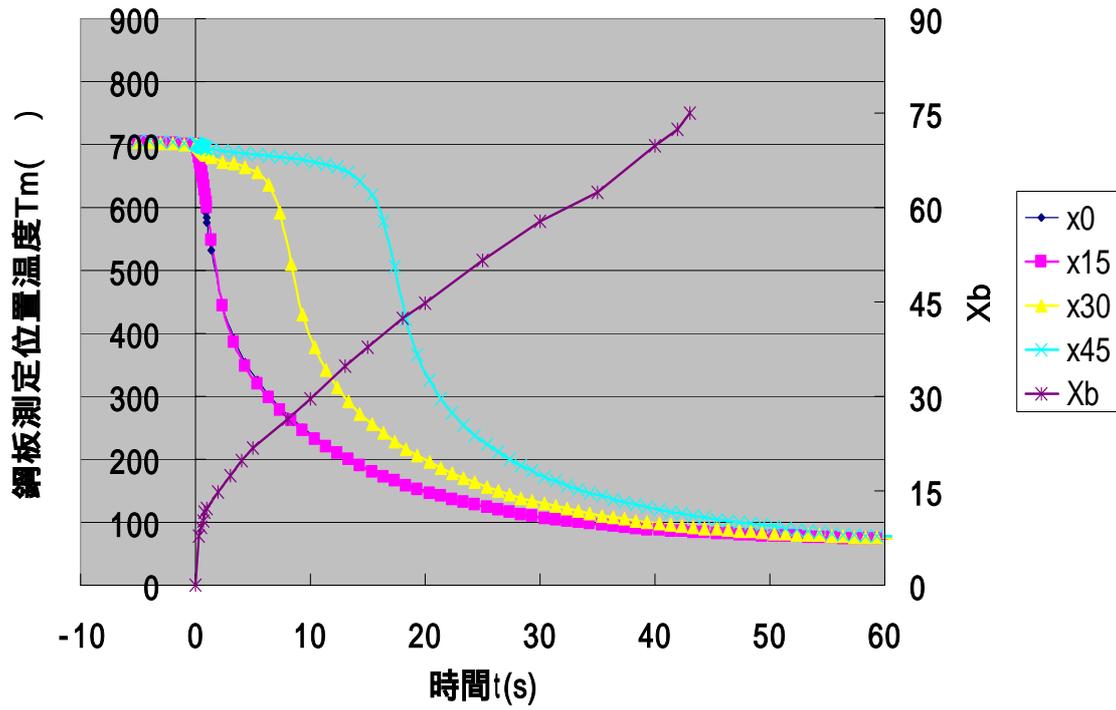


圖 A.25 冷却曲線(009)

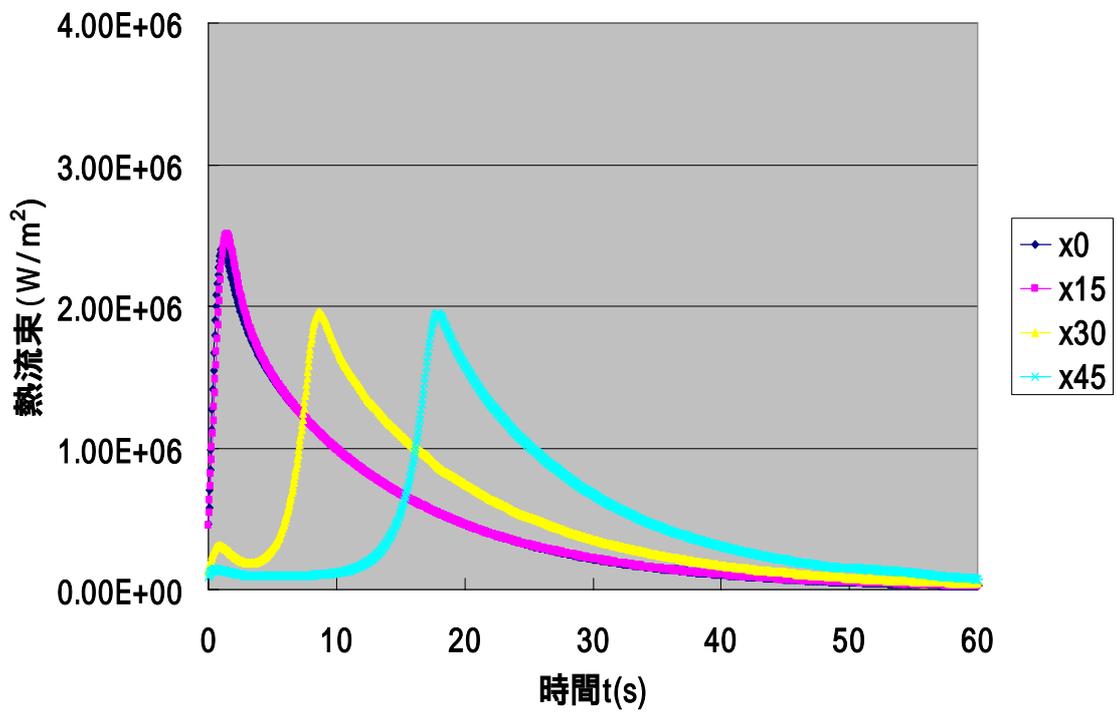


圖 A.26 表面熱流束(009)

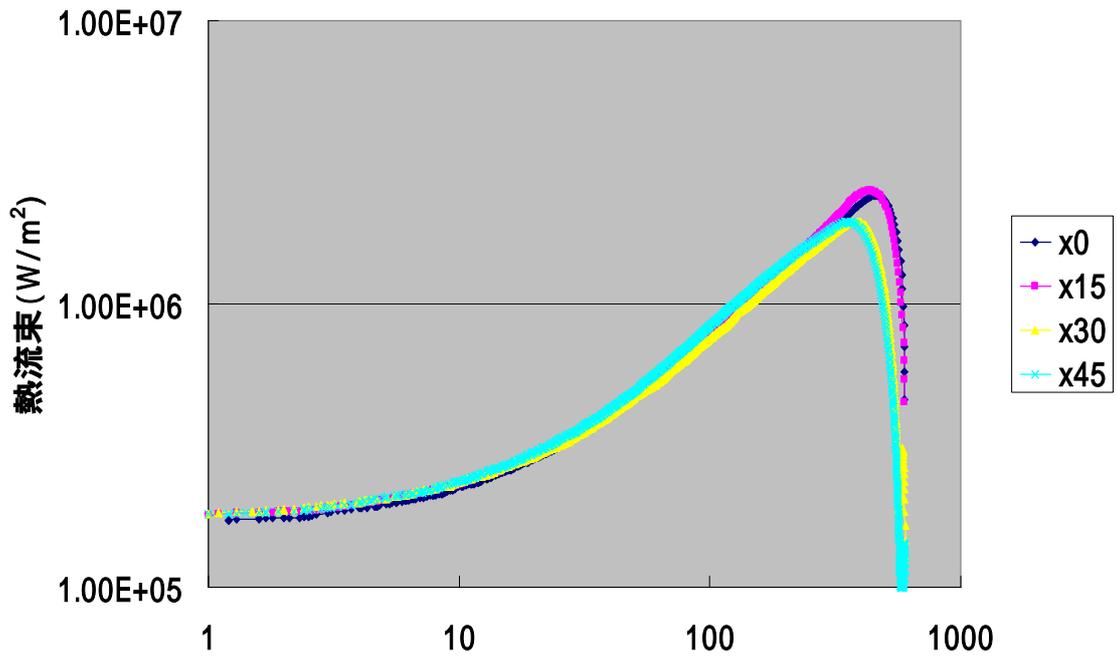


图 A.27 沸腾曲线(009)

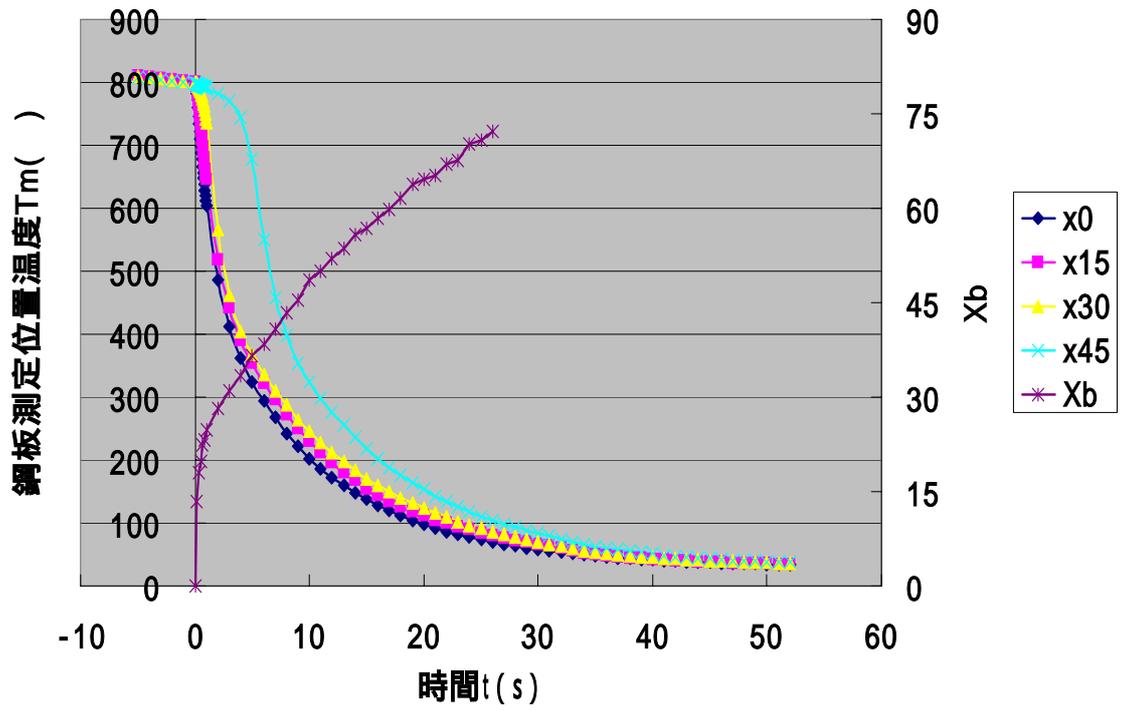


图 A.28 冷却曲线(010)

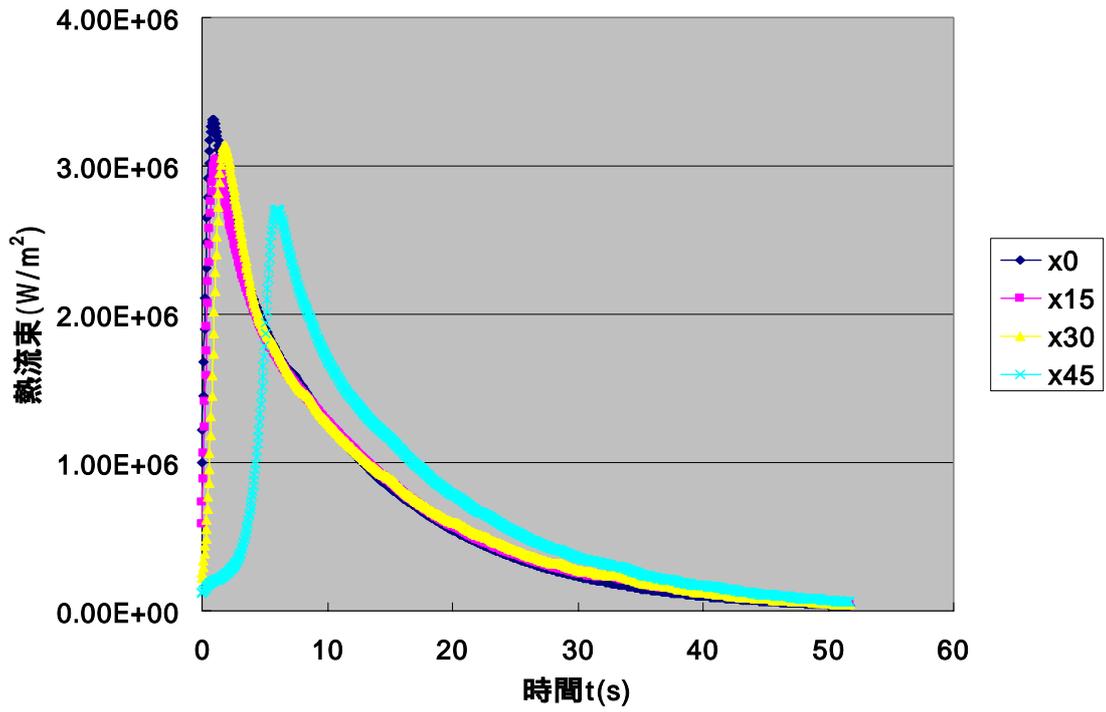


圖 A.29 表面熱流束(010)

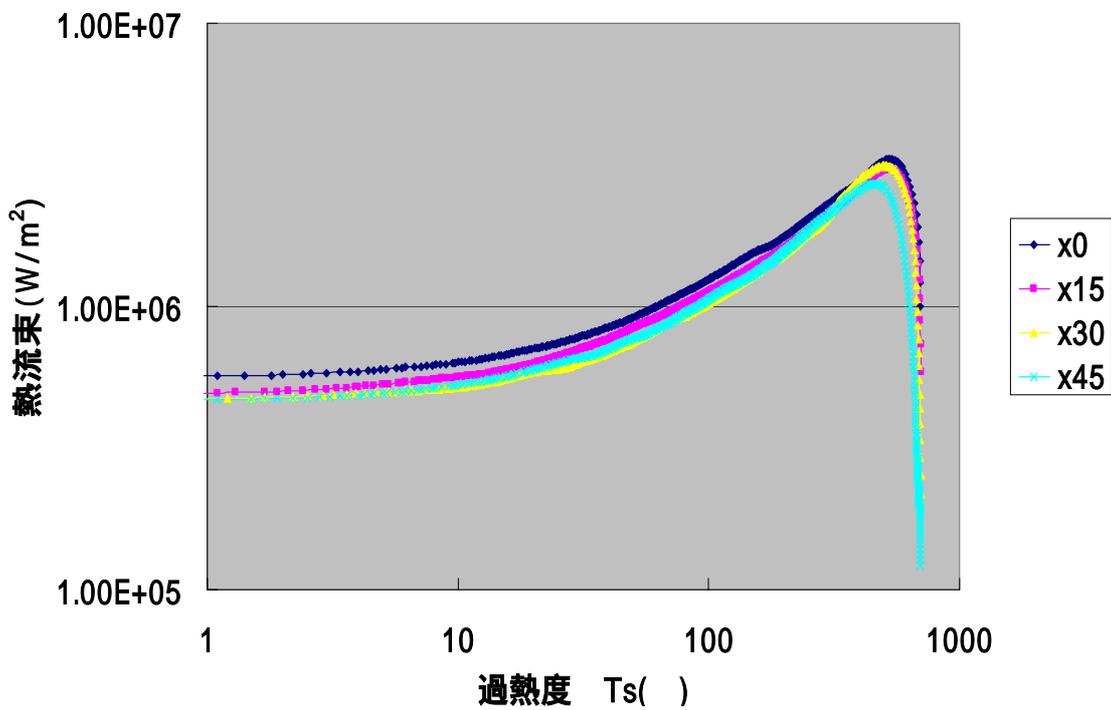


圖 A.30 沸騰曲線(010)

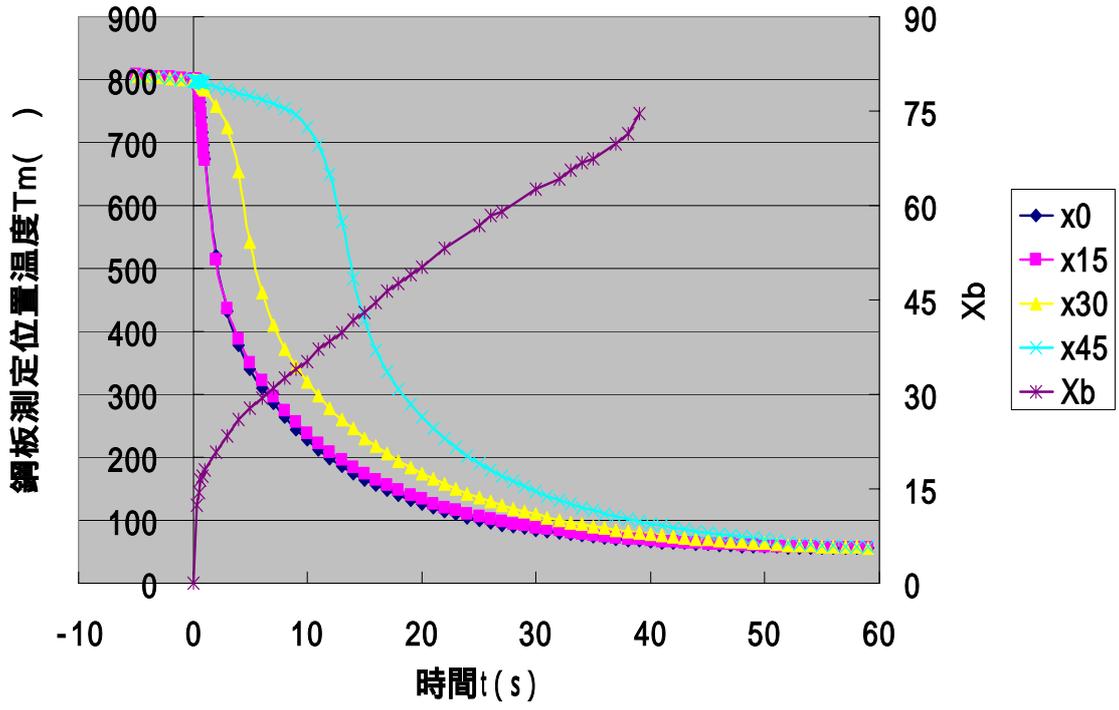


圖 A.31 冷却曲線(011)

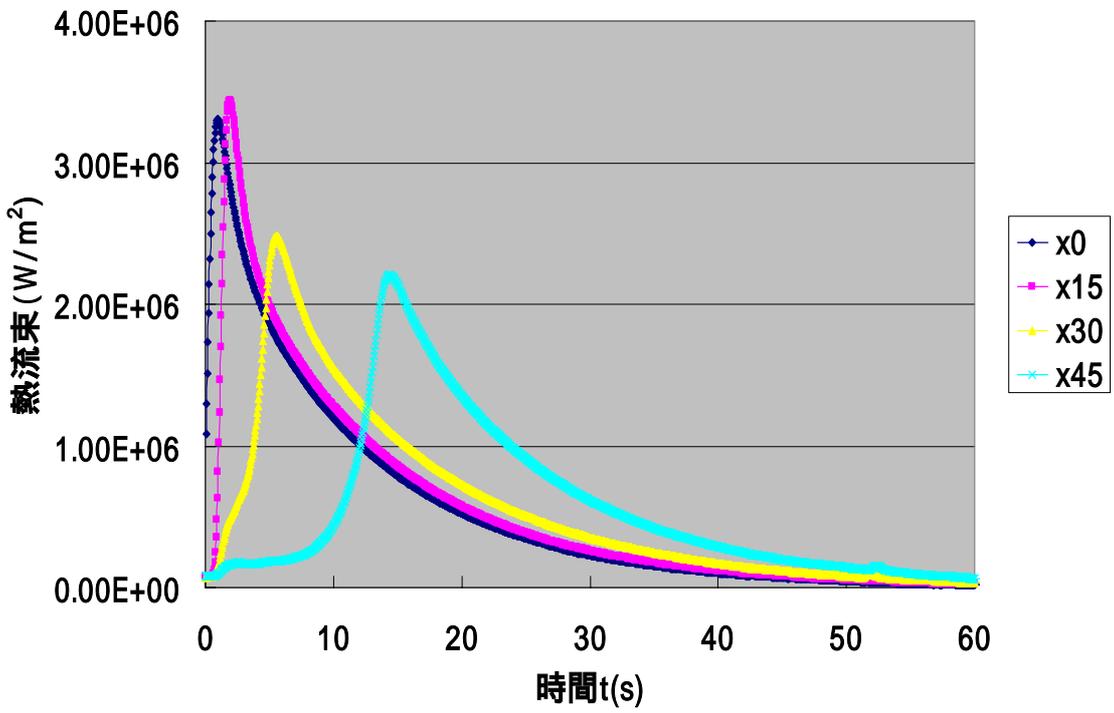


圖 A.32 表面熱流束(011)

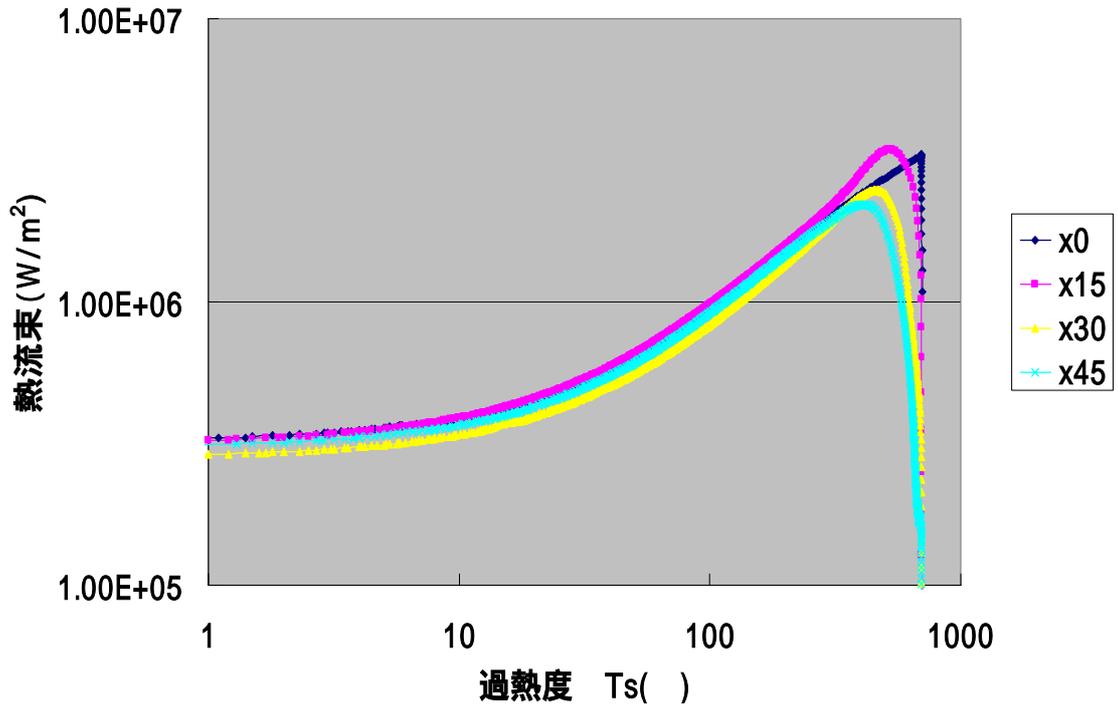


図 A.33 沸騰曲線(011)

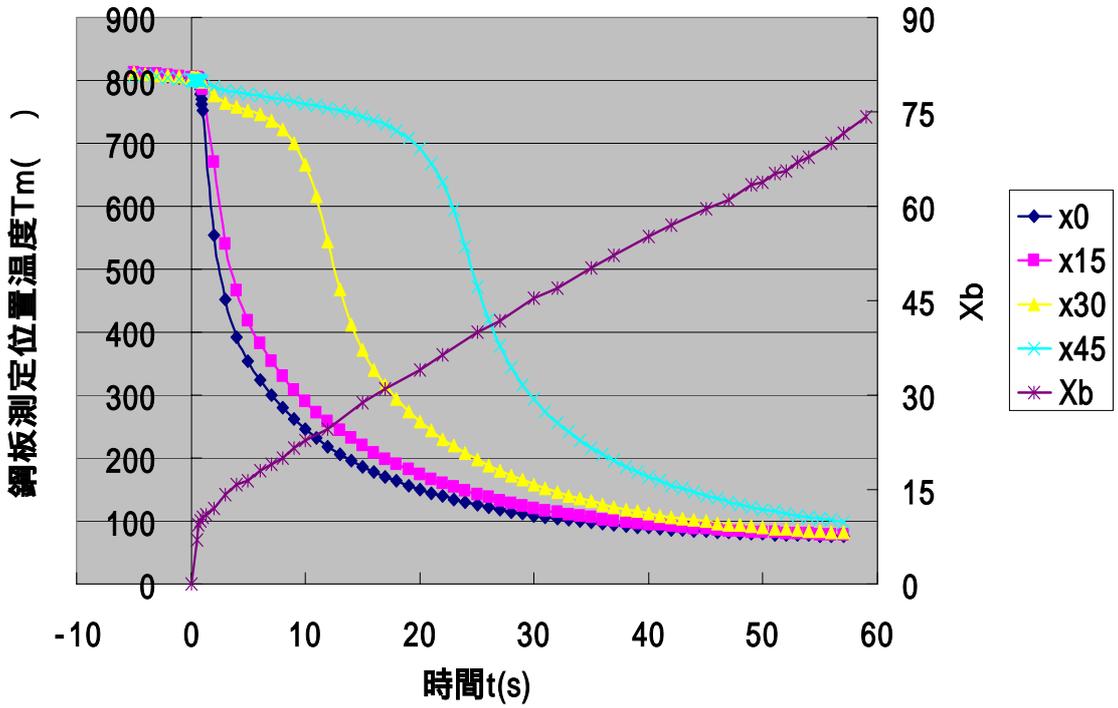


図 A.34 冷却曲線(012)

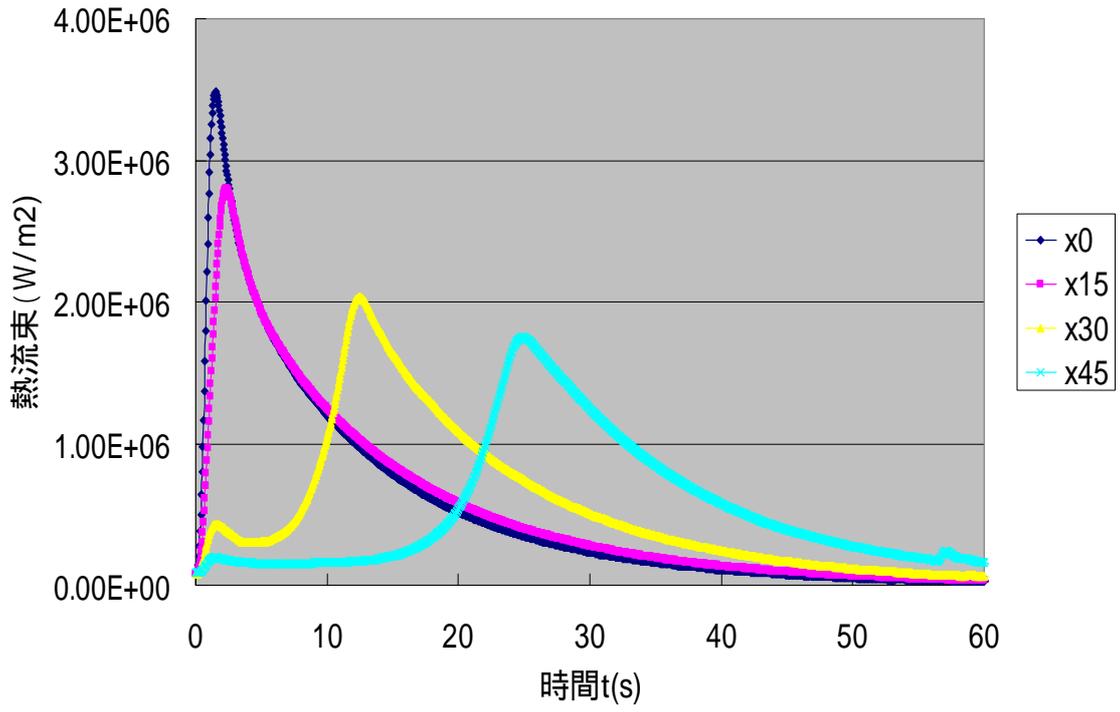


圖 A.35 表面熱流束(012)

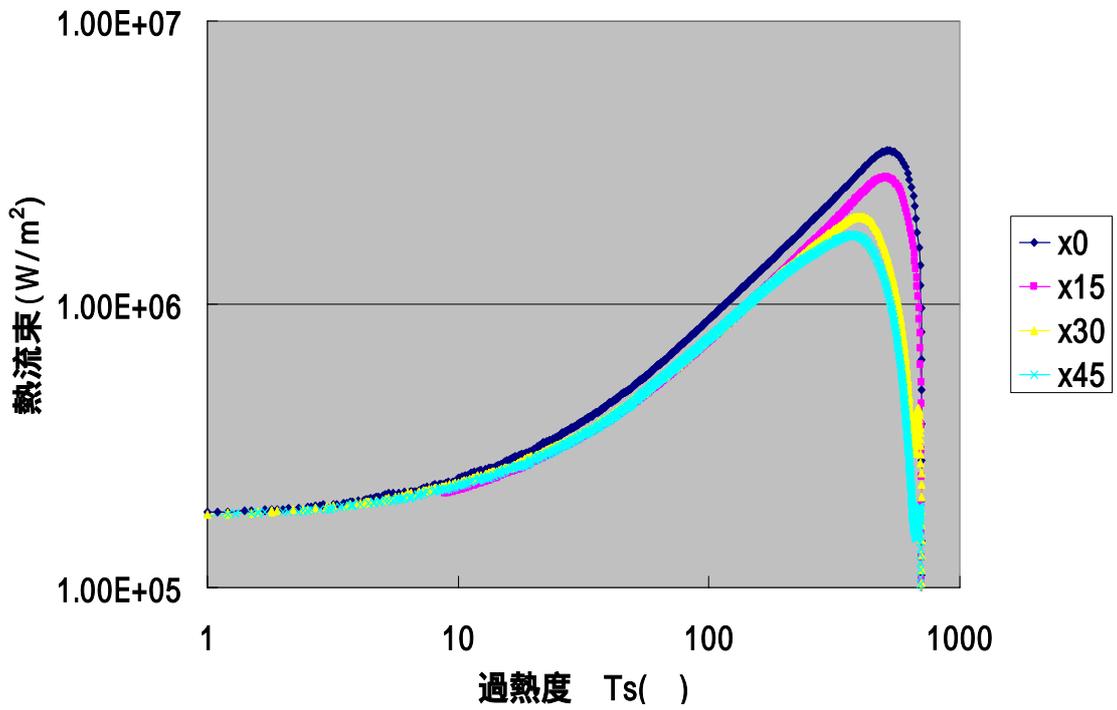


圖 A.36 沸騰曲線(012)

## A - 2記号表(シミュレーション)

t	: 時間(s)
u	: 水平方向座標(m)
v	: 垂直方向座標(m)
u	: 水平方向速度(m/s)
v	: 垂直方向速度(m/s)
p	: 垂直方向圧力(Pa)
F	: F関数(流体占有率)(-)
T	: 温度( )
f	: 体積力(N/m <sup>3</sup> )
	: 応力テンソル(N/m <sup>2</sup> )
k	: 乱流エネルギー(m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup> )
	: 乱流散逸(m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup> )
y <sup>+</sup>	: 垂直方向無次元座標(-)
μ	: 粘性係数(kg/(m·s))
	: 熱伝導率(W/(m·K))
	: 密度(kg/m <sup>3</sup> )
c	: 比熱(J/(kg·K))
	: 表面張力(N/m)
u	: 摩擦速度(m/s)
Pr <sub>t</sub>	: 乱流プラントル数(-)
Pr <sub>B</sub>	: ステファン・ボルツマン定数(W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )
Pr <sub>c</sub>	: 水冷面の放射率(=0.8)(-)
g	: 重力加速度(m/s <sup>2</sup> )
U <sub>in</sub>	: 噴流速度(m/s)
T <sub>in</sub>	: 噴流温度( )
T <sub>air</sub>	: 雰囲気温度( )

## 添え字

w	: 水(液体)
v	: 蒸気
s	: 鋼板
l	: 層流
t	: 乱流(渦)
x	: 水平成分
y	: 垂直成分

**参考文献**

- 〔1〕 鈴木, “鋼板の水冷過程における温度分散に関する実験的研究”, 1~15, 1999.
- 〔2〕 山神成正, “高温鋼板の円形水噴流冷却のVOFシミュレーションと検証実験”, 東京大学修士論文, 2003.
- 〔3〕 社団法人鉄鋼協会編, “鋼材の強制冷却”, 26, 1978.
- 〔4〕 Beck, J. V., Int. J. Heat Mass Transf., 13, pp703, 1970.

## 謝辞

まず、本研究を行うにあたりご指導をいただいた東京大学工学系研究科、庄司正弘教授に感謝の意を表したいと思います。若輩者で無知な私に、様々な面でご助言をいただきました。今後の益々のご発展をお祈りいたします。

また、丸山茂夫助教授には研究会等で助言をいただき、新たな視点で研究を継続することができました。深く感謝いたします。

渡辺誠技官には、実験装置製作はもとより、研究活動のあらゆる面においてご協力いただき、本当にありがとうございました。

庄司・丸山研究室の先輩方には、右も左も分からない状態の私に親切に接していただき、充実した研究室生活を送ることができました。皆様の研究に対する真摯な姿勢を見習って、今後の研究生生活をがんばっていききたいと思います。

ともに研究室で苦楽を共にした庄司・丸山研の4年生の皆様にも心から感謝したいと思います。みな進む研究室はそれぞれですが、皆様のご活躍を期待しています。

住友金属工業(株)総合技術研究所の原口洋一氏には、遠い所から何度も足を運んでいただき、様々なアドバイスをご頂戴しました。そして、実験を行うに当たり、植村久富氏、向後久義氏にもご協力いただきました。実験の合間の雑談などとても参考になりました。ここに感謝いたします。

最後に、この研究を一緒に行なってくださった修士2年の山神成正氏に、深く感謝の意を表します。一年間大変お世話になりました。いつも思いつきでいいかげんなことばかり言っていた私を、文句ひとつ言わず、温かく見守りご指導いただきました。今後の活躍を楽しみにしています。

皆様の更なるご活躍、ご発展をお祈りして、感謝の言葉としたいと思います。

以上

通し番号1 - 67 完

卒業論文

平成15年2月7日提出

03004 岩本 厚