

平成26年度
学位論文（博士）

板上水を伴う鋼材の冷却不安定現象の解明と
制御冷却技術の開発

氏名 芹澤 良洋

論文の概要

論文題目 板上水を伴う鋼材の冷却不安定現象の解明と制御冷却技術の開発

氏名 芹澤 良洋

本論文は「板上水を伴う鋼材の冷却不安定現象の解明と制御冷却技術の開発」と題し、6章から成っており、鉄鋼における熱処理において重要なスプレー冷却に関して、冷却不安定の原因の一つである、冷媒に水を用いた際の沸騰現象における冷却面姿勢の影響に関し、基礎的な静止状態でのスプレー冷却試験と移動状態でのスプレー試験によりその特性を明らかにするとともに、実際の冷却装置の開発までを取り扱ったものである。

第1章では、序論として、鉄鋼業における冷却技術の重要性、鋼材冷却における不安定現象の種類と実際の冷却時に与える影響に関して説明し、特に冷却面姿勢の影響因子について述べている。そして、従来研究について概説し、本研究の目的について述べている。

第2章では、冷却面姿勢の影響因子の解明と姿勢の影響の解消を狙った開発に用いた試験装置について述べている。基礎的な静止実験に関しては、伝熱特性に影響を与えるスプレー時の噴霧特性の評価方法、噴霧後の液体が構成する液膜状態の観察方法、そして、伝

熱特性の評価方法について述べている。特に、本論文では、発表例が少ない鋼材の移動状態における伝熱特性の調査を行っており、その試験装置、試験方法について述べている。

第3章では、基礎的静止実験の結果とその考察に関して述べている。具体的には、静止実験系において、上向き平面、下向き平面、鉛直平面を伝熱面として噴霧冷却を行い、噴霧中心近傍および中心からの距離がスプレー領域半値幅の2倍以上までを測定可能とするために従来に比較して大きい伝熱面を用いた実験の結果について述べている。また、その結果を考察するために液膜挙動をそれぞれの姿勢に関して観察定量化し、伝熱特性との関連について述べている。そして、噴霧中心近傍での伝熱特性に関しては、高温の膜沸騰域では姿勢の影響は少ないが、噴霧中心から離れた地点においては、伝熱面過熱度が300K近傍の限界熱流束域で姿勢の影響が現れることを明らかにした。

第4章では、実際の鋼材冷却設備を想定した鋼板が移動する系での上下面の伝熱実験を行い、下向き面の高温域では冷却が噴流衝突域近傍に限定されることを示した。また、同様に上向き面では、下向き面に比較し、水量が少ない場合でも冷却能力が高いことを示し、板上水の影響であることを推定している。さらに上面においては、幅広鋼板の場合、板上水深が増加することを考慮した実験を行い、大きく冷却能力が増加することを示した。

一方、下向き面に関しては、上向き面との同様の冷却を行うことを考慮して、冷却水量としては同一であるが、下向き冷却面に対して噴霧面積を拡大して冷却する実験を行った結果、上向き面の冷却形態に近付けることが可能であることを示すとともに、冷却能力における面積効果について考察している。

第5章では、これまでの結果を踏まえて、新たな冷却装置の開発を行い、上下面での伝熱特性を調査した結果を述べている。ここでは、冷却能力増加の観点から、冷却全面をスプレーで覆うことを意図した配置としており、その開発の考え方について述べている、また、冷却装置を製造プロセスで使用する際に多くみられる冷却能力調整のための通板速度変化、水量変化時が伝熱特性に与える影響について調査し、上下面冷却の均一性を達成するための基礎データの提示を行っている。

第6章は、本論文の結論を述べている。

概要

目次

1. 序論

- 1. 1 研究の背景－鉄鋼業における冷却技術の重要性－
- 1. 2 鋼材冷却における冷却均一性の必要性
- 1. 3 スプレー冷却の特性と従来の研究
- 1. 4 本研究の目的と内容

2. 実験装置及び実験方法

- 2. 1 静止状態での伝熱面姿勢に関する実験装置及び方法
 - 2. 1. 1 噴霧諸量の測定
 - 2. 1. 2 液膜の評価
 - 2. 1. 3 噴霧流の観察とモデル化
 - 2. 1. 4 スプレーによる伝熱実験装置、実験方法
- 2. 2 鋼板移動時の上下面伝熱特性の研究に関する実験装置及び方法
 - 2. 2. 1 通板実験装置
 - 2. 2. 2 試験片
 - 2. 2. 3 各冷却試験における冷却系
 - 2. 2. 4 鋼材冷却試験方法
 - 2. 2. 5 熱伝達特性の評価方法
 - 2. 2. 6 スプレーノズル特性の評価

3. 静止状態での伝熱面姿勢の影響に関する実験結果および考察

- 3. 1 伝熱面姿勢変化時の噴霧液膜状態のモデル化
- 3. 2 伝熱面姿勢変化時の伝熱特性
 - 3. 2. 1 冷却曲線と噴霧冷却熱伝達特性
 - 3. 2. 2 高温域熱伝達率, 遷移域熱伝達率
 - 3. 2. 3 高温域下限界温度、限界熱流束上限温度
- 3. 3 静止伝熱面姿勢変化時の試験のまとめ

4. 鋼板移動時の上下面伝熱特性

- 4. 1 鋼板移動時の下面伝熱特性
- 4. 2 鋼板移動時の上下面伝熱特性の比較
- 4. 3 鋼板移動時の下面伝熱特性の検討

4. 4 鋼板移動時の上下面伝熱特性のまとめ

5. 鋼板冷却装置の検討
 5. 1 冷却に用いる水流の考え方
 5. 2 冷却系設置の考え方
 5. 3 鋼材冷却時の上下面での冷却特性に与える水量, 通板速度の影響
 5. 4 鋼板冷却装置の検討結果

6. 結論
7. 謝辞
8. 参考文献

第 1 章 序論

1 . 1 研究の背景－鉄鋼業における冷却技術の重要性－

1 . 2 鋼材冷却における冷却均一性の必要性

1 . 3 スプレー冷却の特性と従来の研究

1 . 4 本研究の目的と内容

第 1 章 序論

1.1 研究の背景

微粒化した液滴群を高温面に衝突させ、顕熱および潜熱移動により高温面を冷却するスプレー冷却は、表 1.1 に示すように液滴流量密度の制御により気相流から液相沸騰流までの広範囲の熱伝達を実現できるとともに、噴霧法によっては熱伝達分布を均一化する事が出来るため、供給液量に対する高効率な熱流束の除去と加熱面温度の制御性に優れた冷却技術である。[1] なお、本論文では、ガス体を液体とともに噴射しない、液体のみの一流体スプレーを対象とする。スプレー冷却は、鋼材製造プロセス、軽水炉緊急炉心冷却系等に利用されており、また、強化ガラス、宇宙往還機のヒートシンク、電子デバイス冷却、資源リサイクルあるいは高機能気相流熱交換器等への利用を目的とした研究が行なわれている。

図 1.1 に示す実際の製鉄所のライン工程 [2] においても、水による冷却は、多くの工程で使用されている。高温物を扱う、製鉄（コークス、焼結、高炉）、製鋼（溶鉄予備処理、転炉、二次精錬）工程では設備保護のための水冷が行われている。たとえば、転炉内部に装入して酸素を溶鋼に吹き込むランスと呼ばれる酸素吹き込み装置は、酸素吹き込みによる溶鋼の高温化（1500℃以上）に耐えるための水冷が行われている。また、製鋼工程の連続鋳造では、

溶鋼を凝固させるための水冷を行っている。こうした冷却の多くは溶鋼凝固以外では対流冷却を使用している。熱間圧延工程以降では、製鉄・製鋼工程と同様に設備保護（圧延ロール冷却）に用いられるほかに、最終製品である鋼材の機械的特性を発揮させるための冷却をおこなっている。図 1.2 に示す連続熱延工程 [3] では、製鋼工程で凝固したスラブと呼ばれる鋼塊を加熱炉で約 1200℃ まで加熱したのち、粗圧延、仕上げ圧延を経て厚みを造り込まれたのちに、冷却されて機械的特性の制御を行う。図 1.3 に示した厚板工程 [4] でも同様である。

鉄材料は、溶解状態から凝固したのち、冷却速度や冷却停止温度を制御することにより、図 1.4 [5] に示すように結晶組織がオーステナイト、フェライト、パーライト、ベイナイト、マルテンサイトと変化する。そして、こうした結晶組織や細かい析出物などを組み合わせることによって、図 1.5 [6] に示す 1970 年代から高度化してきた鋼材の機械的特性への要請にこたえ、図 1.6 [7] に示す強度延性特性を強くて延びやすい鉄となるようグラフの右上の領域に入る材料を開発してきている。従来は、鋼材の成分調整や、析出物の投入による制御が多かったが、近年鉄の結晶組織の違いを生かした機械的材質の造り込みが行われている。図 1.7 では、柔らかいフェライトとベイナイトの複合組織鋼を製造する際の熱延における冷却時の温度履歴を示している。この例では、仕上げ圧延により板厚を造り込んだ後に冷却を開始し、初期の

急速冷却でフェライトが析出しやすい温度にまで低下させ、保持してフェライト分率を冷却一時停止温度と保持時間で制御したのち、再度急例して冷却停止温度の制御により、残分をベイナイトにしたり、あるいはオーステナイトが残留できるようにしている。図 1.8[8]では、厚板製造工程での冷却速度により異なる組織とその特性を示している。たとえばもっとも冷却速度を速くすると、強度が高いが、やや脆いマルテンサイトができる。また、冷却速度を遅くするとフェライト・パーライトの組み合わせだった組織となり、強度はマルテンサイト程高くはないが、延性に優れた材質を造ることができる。このように、近年鉄鋼材料に要請されるさまざまな機械的特性を実現するには、冷却技術が必須となってきている。

1.2 鋼材冷却における冷却均一性の必要性

先に述べたように鋼材冷却技術が鋼材の機械的特性を制御するようになると、冷却中の温度履歴（冷却開始温度、冷却速度、冷却停止温度）や、鋼板内温度分布を各処理材料間、あるいは鋼板内で均一にする必要がある。これらが均一でないと、次のような問題が発生する。ここで、鋼板内としたのは、1枚の鋼板内部での均一性であり、材料間としたのは、同じ冷却条件で冷却処理される何枚かの鋼板の中での各鋼板を比較した場合の均一性である。

まず、冷却時の温度履歴が異なる、すなわち、冷却速度や冷却停止温度が異なると、鉄の金属組織比率が異なったり、結晶粒径が異なったりするので、機械的特性が均一にならない。この場合、機械的特性が十分でないと、再度加熱し熱処理を行う必要がある。均一性がそれほど悪くない場合でも、鋼材が加工される場合には、加工度の差が鋼材内で発生し、当初予期した加工形状などが得られない場合がある。また、鋼材形状に関しても、冷却時の温度履歴が異なると、冷却状態での発生熱応力による変形、変態塑性による変形が発生し、変形が著しい場合は、製造ライン内の搬送すらできない状態となってしまう。特に変形挙動は、温度の最終値が同じでも温度の経過履歴が異なれば、履歴が異なる時間帯で変形が発生してしまうので、留意する必要がある。こうした鋼材の変形はそれほどひどくなくても、お客様の要求水準に満たない場合は、矯正という形状修正処理を施す必要がある。鋼板温度分布

に関しても同様であり、温度分布の相違に従い、上記と同様、形状の修正を行う必要がある。なお、鉄材料では、冷却中に組織の変態が生じるために、変態の際に応力が働くと大きな変形を生じる変態塑性現象がある（図 1.9[9]）。図 1.9 によれば、わずか 10 [MPa] 程度でも変形することがわかる。通常の変形発生がいわゆる降伏応力で発生し、常温では 400 [MPa] 以上あることを考えると、いかに小さい応力で変形してしまうのかがわかる。これにより、SUS304 などの変態がない鋼種に比較すると大きく変形する場合があります、冷却技術を困難にしている。

参考に、図 1.10[10]に鋼材の温度分布と変形の関係を示した。図のように、上下面での冷却履歴差、冷却後の温度分布差は、上下の反りとなるが、凸型に反れば、搬送ロール間に板先端が刺さりこんでしまい、通板不能となり、凹型に反れば、搬送ロールとの接触が小さく搬送が不安定になる、あるいは通板ライン上を横断するデッキに当たるなどの不具合を起こすことになる、など製造プロセスの大きな障害となる場合もある。また鋼板の先尾端での温度偏差は、同様に先尾端での局所変形を発生させる。また、幅方向での温度偏差は、端部の波形状、中心部の膨れなどの変形を発生させる。

以上のように鋼材冷却においては、冷却時の温度履歴を、個々の鋼板内の各場所で均一にすること、各材料ごとに均一にすることが重要である。

1.3 スプレー冷却の特性と鋼材冷却の課題および従来の研究

スプレー冷却の熱伝達特性は、沸騰曲線と同様のN字曲線となることが知られている。従って、このスプレー冷却熱伝達特性の解明には沸騰現象が基礎になるものと考えられる。この冷却曲線とスプレー伝熱特性を図1.11[11]に示した。スプレー伝熱特性は、図1.11に示したように伝熱面過熱度によって4つの領域に分けられる。すなわち、高温側から冷却する場合を考えると熱流束は過熱度の低下とともに徐々に低下し後極小値をとり、その後、過熱度の低下とともに増加して極大値をとり、その後、過熱度の低下に伴って低下していく。高温領域では、液体が高温面に接触すると瞬時に蒸発するために液体と伝熱面が運動量による押しつけ力がないと接触しがたい、膜沸騰状態となっている。この膜沸騰状態では、蒸気層が断熱層の役割を果たすために熱流束が低くなっている。そして伝熱面温度が低下すると極小熱流束点を通り、液体と伝熱面が接触を始めるために、伝熱面温度低下とともに熱流束が増加する遷移沸騰域となる。液体と伝熱面の接触が気泡発泡点以外の全域になると熱流束は極大値、限界熱流束を取り、その後、伝熱面過熱度の低下とともに熱流束が低下する核沸騰領域となり、沸騰しない強制対流域となる。一方、図に示す冷却曲線においては、伝熱面が高温から低下していく際に膜沸騰域は、下に凸の曲線となり、傾きが極小となる極小熱流束点を変曲点として、遷移沸騰域を徐々に冷却速度を増加させて通過し、冷却速度が最

大となる限界熱流束点を通過した後、核沸騰域、そして強制対流域に至る。

このスプレー冷却においては、高温から冷却する際に、遷移沸騰域を通過するために、冷却履歴を均一化することはわずかな外乱があるだけでも、非常に難しくなっている。図 1. 12 に模式的に冷却時に遷移沸騰域で温度バラツキが発生する様相を示した[12]。図 1. 12 (a) に示すように、たとえば、冷却曲線が同じでも冷却開始の温度がわずかにちがう場合、冷却時間①では、温度偏差は冷却初期のままであるが、冷却時間②では、先に遷移沸騰領域に入った最も低い温度の箇所と他の2か所は大きく温度が異なってしまう。さらに、時間が進んで冷却時間③になると最も高い温度と最も低い温度、中間の温度の3か所で大きく温度が異なってしまう。同様に、図 1. 12 (b) では、冷却曲線がほぼ同じで、遷移沸騰に入る温度が違う場合の様相を示している。この場合も冷却時間①では、温度は同じであるが、冷却時間②になると、先に遷移沸騰領域に入った最も低い温度の箇所と他の2か所は大きく温度が異なってしまう。さらに、時間が進んで冷却時間③になると最も高い温度と最も低い温度、中間の温度の3か所で大きく温度が異なってしまう。このように、冷却において遷移沸騰域が始まる温度領域では、温度偏差が非常に大きくなりやすいのである。このため、鋼材の冷却においては、温度域によって、冷却停止温度を一定化することが非常に難しくなってくる。ことが課題の一つである。

そして、このスプレー冷却の伝熱特性に影響する因子としては、大久保ら [13] が報告しているように種々調べられており、表 1. 2 に示すさまざまな要因と変化の大きさ、変化の方向が研究されている。これらの要因の中で冷却媒体側因子は冷却能力を制御する因子であるが、被冷却物体側因子は鋼材により変化する因子であり、その影響について以下に示す。

これらの因子のうち、伝熱面熱伝導性、表面粗さ、表面の濡れ性に関しては、著者も研究している [14] が主として極小熱流束点を変化させる因子である。すなわち、表 1. 2 にあるように伝熱面熱伝導性が低下する、表面粗さが大きくなる、表面の濡れ性が良くなると、極小熱流束点温度、熱流束は増加し、冷却能力は高くなる。一般に鋼材表面は、冷却前には高温であるために酸化鉄 (FeO) 層が数 μm から数 mm 付着している。この酸化鉄は単離されて、人工的に作成されたものでは、熱物性値は測定されており、図 1. 13 に示すように、 $1 \sim 3 [W/mK]$ [15] と鉄 (軟鋼 $38.2 [W/mK]$ 、 $800 K$) [16] に比較して小さく断熱層として機能するために、酸化鉄面は鉄の裸面より極小熱流束点温度は増加する。これを断熱層のパラドックスと称することがある。これは、熱伝導性の高い材料に断熱性、すなわち、熱伝導率の低い層を付加すると極小熱流束点温度が高くなり、図 1. 12 (b) の冷却曲線における極小熱流束点の増加からわかるように冷却能力が高くなるためである。なお、この現象では図 1. 14 に示すように、表面の層厚みに応じて極小熱

流束点温度が変化することが示されている [14]。

実際の鉄鋼プロセスでは、酸化鉄層は、種々の条件で変化することが知られている。たとえば、連続熱延プロセスでは、製造サイズ、あるいは鋼種により異なる温度履歴により、冷却時の酸化鉄層厚みが異なる。また、酸化鉄層の熱伝導率などの物性値についても、酸化鉄層の成長速度、圧延による圧縮などにより変化する。また、酸化鉄層が多いと熱間圧延時に傷になることもあるため、デスクーリングという高圧水による除去工程も設けられていることから、酸化鉄層の除去状況が異なり、鋼板内で酸化鉄層の厚み分布を発生させることもある。このように、酸化鉄層の状態が異なれば、表面の伝熱面熱伝導性、表面粗さ、表面の濡れ性が異なるために、冷却能力の正確な予測を行うことが困難であり、冷却の不安定現象の一つとなっている。

この酸化鉄層による不安定の問題については現在、物性値の測定などのアプローチが学会などでも行われており、物性が不確実であるため本論文では触れない。なお、本論文における各実験に際しては、酸化鉄層の影響を抑制するために、加熱時間、加熱雰囲気、加熱炉取り出し後から冷却までの時間を管理することによって、酸化層厚み・状態を一定にした実験を行っている。

表 1. 2 にはこのほかに、伝熱面姿勢の影響、伝熱面寸法・非定常性の影響が挙げられている。伝熱面寸法・非定常性の影響は、伝熱面を定常的なある沸騰状態に維持して、徐々に沸騰状態を変化させた場合の定常実験結果と、

伝熱面をある温度に加熱したのち、スプレーにより冷却しながら非定常実験結果との差異を示すものである。この影響は伝熱面が小さい、あるいは薄くなるなど熱容量が小さくなった場合に現れる影響であり、図 1. 15 に示すように材料に十分な熱容量がない場合、冷媒の冷却能力に足る熱供給をできず、冷却能力が低く現れることを示している[17]。本論文では、これらは、冷却装置が特定された後、各板厚に関する試験を行うことにより定量化されるものであると考え、不安定というよりは定量化が必要な要因として検討の対象とはしない。

伝熱面姿勢の影響は、伝熱面の向きが上向き、下向き、鉛直面向きの場合に、伝熱面に衝突した後の水の挙動が異なることなどに起因するものと考えられる。鉄鋼製造プロセスにおける鋼材の冷却に関しては、薄板、厚板では上下面、H形鋼では上下面、鉛直面など様々な姿勢の面があるので、冷却制御のためには冷却に及ぼす伝熱面姿勢の影響を把握する必要がある。

スプレー冷却の熱伝達特性に及ぼす冷却面姿勢の影響に関する研究はこれまでにも行われているが、基礎的な理解は十分でないのが現状である。三塚ら[18]は図 1. 16 に示す移動実験系を使い、図 1. 17 に示すように伝熱面温度が 100 ~ 500 °C の範囲で試験片の大きさが 550 [mm] × 1000 [mm] と大きい面では、上面冷却のほうが下面冷却よりも熱伝達率が大きいこと、上面の乗り水の影響と推測していることを報告している。また、田中ら

[19]は図1.18に示す実験系を使い、図1.19に示すように高温域では上面冷却と下面冷却の差は無いと報告している。三塚らの実験はノズル仕様は開示されていないが移動鋼板試験であるため、田中らの実験では実験方法・条件が明示されていないため局所的な液滴流量状況、姿勢と熱伝達率の関係については不明である。さらに、田中らの実験観察結果では、上面には液滴が残らない状態とされており、スプレー衝突面だけのデータと思われる。また、三塚の試験では、伝熱面温度が一般的な鋼材の冷却開始温度80～900℃より低く、高温の膜沸騰域のデータは取られていない。一方、Choiら[20]の低液滴流量密度域の研究では、図1.20に示すように鉛直平面よりも水平上向き平面のほうが高温域熱伝達率は若干ではあるが高くなることを報告している。なお、Choiらの用いた伝熱面は図1.21に示すように小さく噴霧直下の領域に限定された実験であると推察される。Rybickiら[21]は、フルコーンスプレーを用いて上下面の冷却実験を行い、単相流、核沸騰域、限界熱流束について調査し、上下の熱伝達率に差がないことを報告している。Rybickiらの実験では、図1.22に示すように伝熱面の大きさとスプレーの広がりほぼ同じであり、Choiらと同様に噴霧直下領域の特性を示していると推察される。

上記に挙げたものでは、三塚以外は単一スプレーの狭い領域における実験である。そこで、三塚の他に、上面のスプレー後の乗り水に関する研究を調

査した。

中田ら[22][23]は、図1.23に示すような高温鋼材の移動冷却試験を従来にない $0.1 \sim 0.4$ [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{sec}$]という高水量で高密度化された棒状水流による 1000°C 領域での試験を行い、図1.24に示すように下面の冷却能力が上面より小さいこと、図1.25に示すように上下面の冷却能力は移動速度には影響されないこと、図1.26に示すように水量が 0.4 [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{sec}$]程度の高水量域では上面では滞留する水により冷却能力の増加が停滞し、下面とほぼ同じになることを示している。なお、中田らの試験では、図1.27に示すように伝熱面は 300 [mm] \times 300 [mm]であり、噴流は鋼板に衝突後跳ね返って鋼板上には残らないとしている。また、上下面の冷却能力の定量的な評価がなされておらず、たとえば、 1000°C 域での上下の冷却能力の水量に伴う変化についても言及されていない。金[24]らは、上面だけであるが、図1.28に示すように液膜上に噴霧流を吹いた試験を行っており、噴霧液滴流量密度 $0.002 \sim 0.009$ [$\text{m}^3/\text{m}^2/\text{sec}$]、液膜厚さ $5, 10$ [mm]、液膜流速 $0.1 \sim 0.85$ [m/sec]では、図1.29に示すようにスプレー直下においても、液膜流が存在する場合には、液膜流が存在しない場合に比較して低下することが示されている。

このように、伝熱面姿勢の影響は、上向き面における滞留水存在の影響を含めて、研究者によって異なっている。これらの差は、姿勢の差に伴う局所

的な液滴流量状況と熱伝達特性の関係、滞留水とスプレーの量的関係の範囲により生じたと推察される。すなわち、滞留水に関する影響に関しては、中田らの実験では、定常的に滞留水が生じる実験系になっていないこと、金らの実験では、スプレー液滴流量範囲が小さい範囲に限られていることによると推察される。

鋼材の製造プロセスの中では、連続熱延工場における冷却では、板幅が2 m以下と狭く、冷却水を拘束するものとしては冷却水流しがないために目視でも50 mm程度の水膜厚みと推定されるが、厚板においては、たとえば、鋼板を拘束するために900～1000 [mm]ピッチで通板方向にロールがあり、その間に冷却装置が設置されている。また、板幅は4.5 [m]以上になる場合もあるために、図1.30に示すように水膜厚みが100 [mm]以上になる場合が示されている[25]。したがって、滞留水がたまった状態での冷却能力の定量化が必要である。

1.4 研究の目的と内容

以上のことをふまえ、本研究は、実際の製鉄所のライン工程での水による上面および下面からのスプレー冷却を想定し、伝熱面姿勢による伝熱特性の影響を明らかにするとともに、その特性を考慮した冷却装置を製作して、上下面の冷却均一にすることが可能な条件を提示することを目的とする。

上記目的のために、本研究では、以下の実験的研究を行う。

① 冷却面姿勢の影響に関する基礎的な伝熱特性を明らかにするために、伝熱面姿勢が変更可能で、スプレー後の排水の伝熱特性についても測定可能な従来にないスプレー衝突領域の2倍の大きさの試験片で実験できる静止試験装置を製作し、それを用い、冷却面姿勢を変更させた噴霧冷却実験を行う。そして、その結果を比較すると共に、デジタルビデオカメラを用いた室温系での噴霧観察を行い、姿勢の変化による噴霧の挙動を観察し、実験結果と共に考察する。

② 移動鋼板における基礎的な伝熱面姿勢の影響を調査するために、移動状態での下面の伝熱特性について、加熱した試験片を移動架台に設置して往復通板冷却する試験を行い、その特性について考察する。合わせて、上面においては冷却後の滞留水が存在する状態を模擬するために、移動架台の全長を冷却帯の3倍以上として、往復通板時、試験片が冷却帯から外れた場所にあっても、冷却帯に設置した滞留水模擬用の水槽内に定常的に滞留水を維持可

能な試験装置での伝熱試験を行い、上下面の伝熱特性比較を行い、考察する。

③①②の知見より実際の鋼板冷却における上下面均一冷却を可能とする冷却装置を製作することを狙い、冷却水流の形式を検討し、試験用の冷却装置を製作した。さらに、上下面での通板速度変化時、水量変化時の伝熱特性を調査して、上下面均一冷却を提供するための条件を提示する。

表 1.1 各種冷却方の冷却能力の概略値

冷却法	熱伝達係数 (kcal/m ² ·h·°C)			
	10 ¹	10 ²	10 ³	10 ⁴
自然放冷	-----			
冷却管	-----			
気体噴射	-----			
気液混合	-----			
固気流動層	-----			
水スプレー	-----			
水シャワー	-----			
水ジェット	-----			
ラミナー	-----			
液体浸漬	-----			
熔融塩	-----			

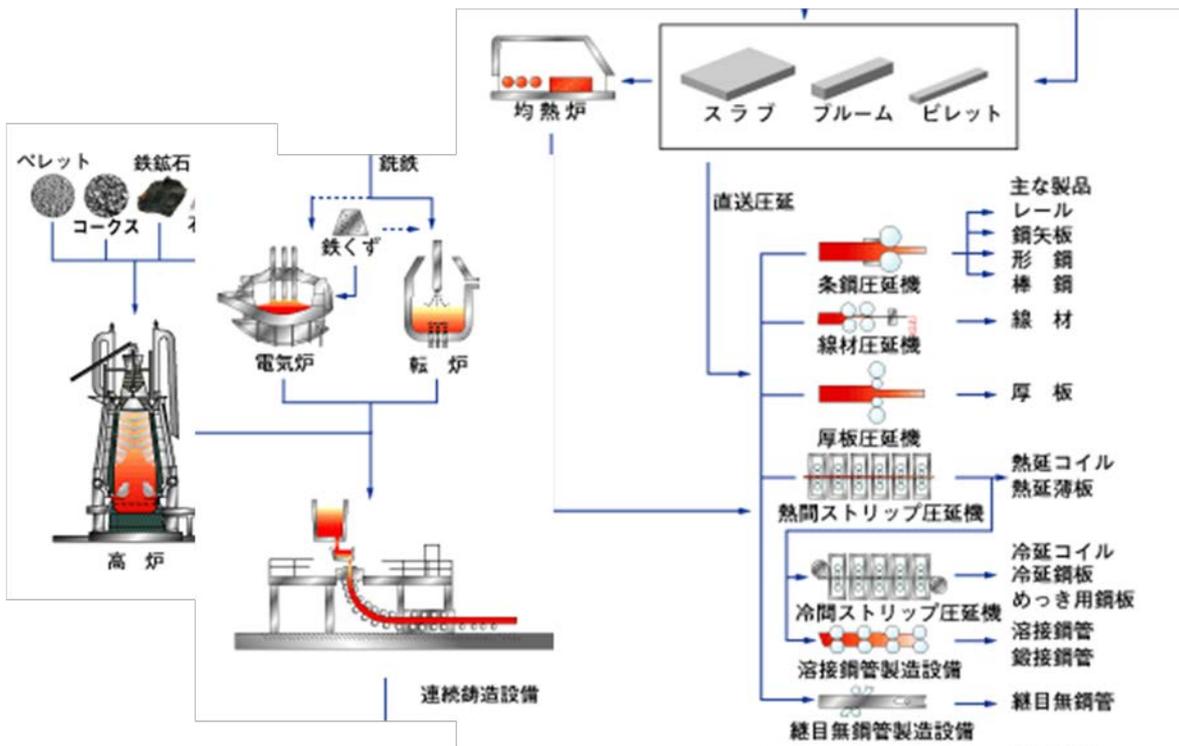


図 1. 1 製鉄所のライン工程概略図

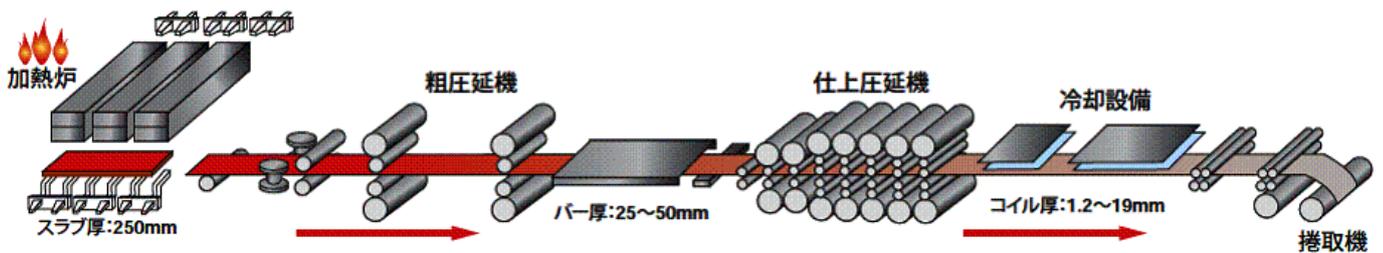


図 1. 2 連続熱間圧延ラインの概要

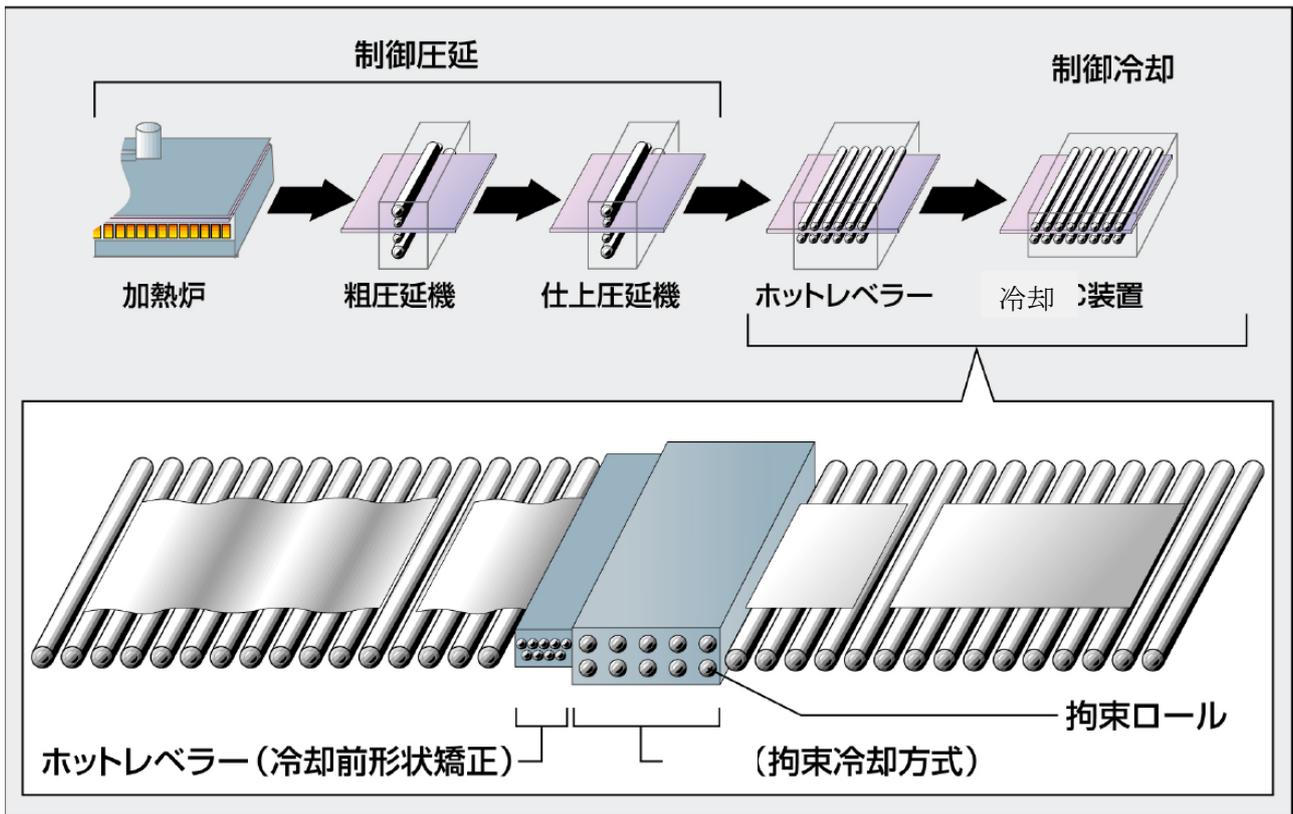


図 1. 3 厚板圧延ラインの概要

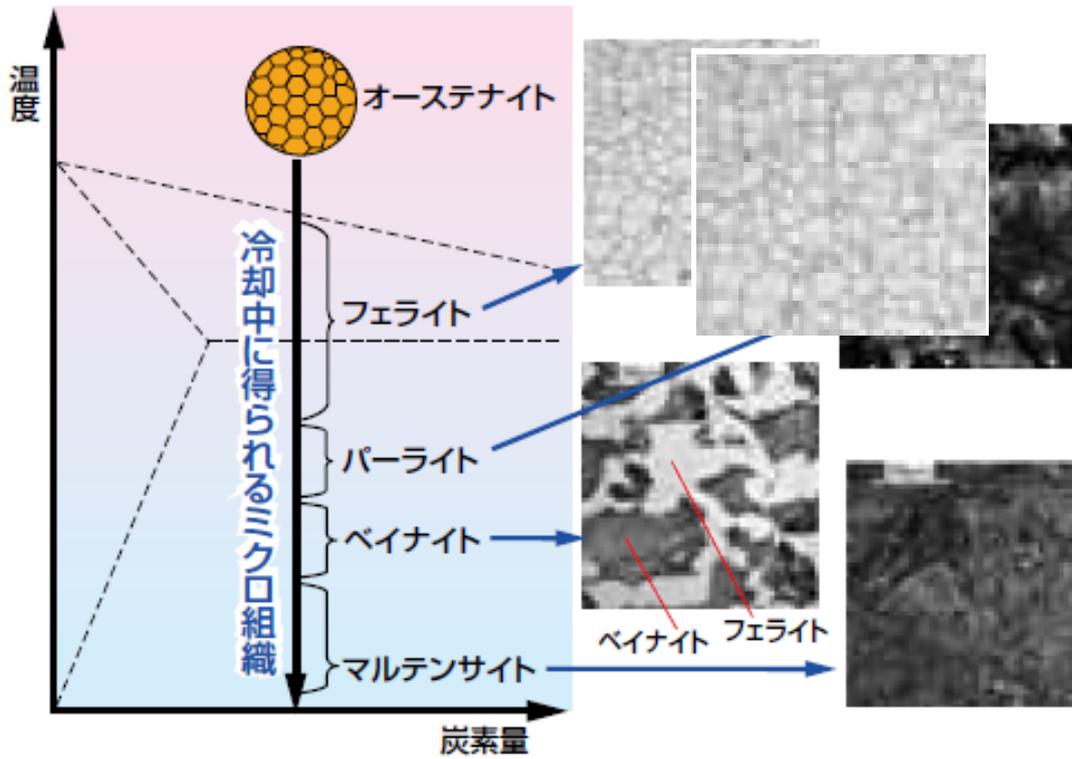


図 1. 4 鉄の結晶組織と状態図

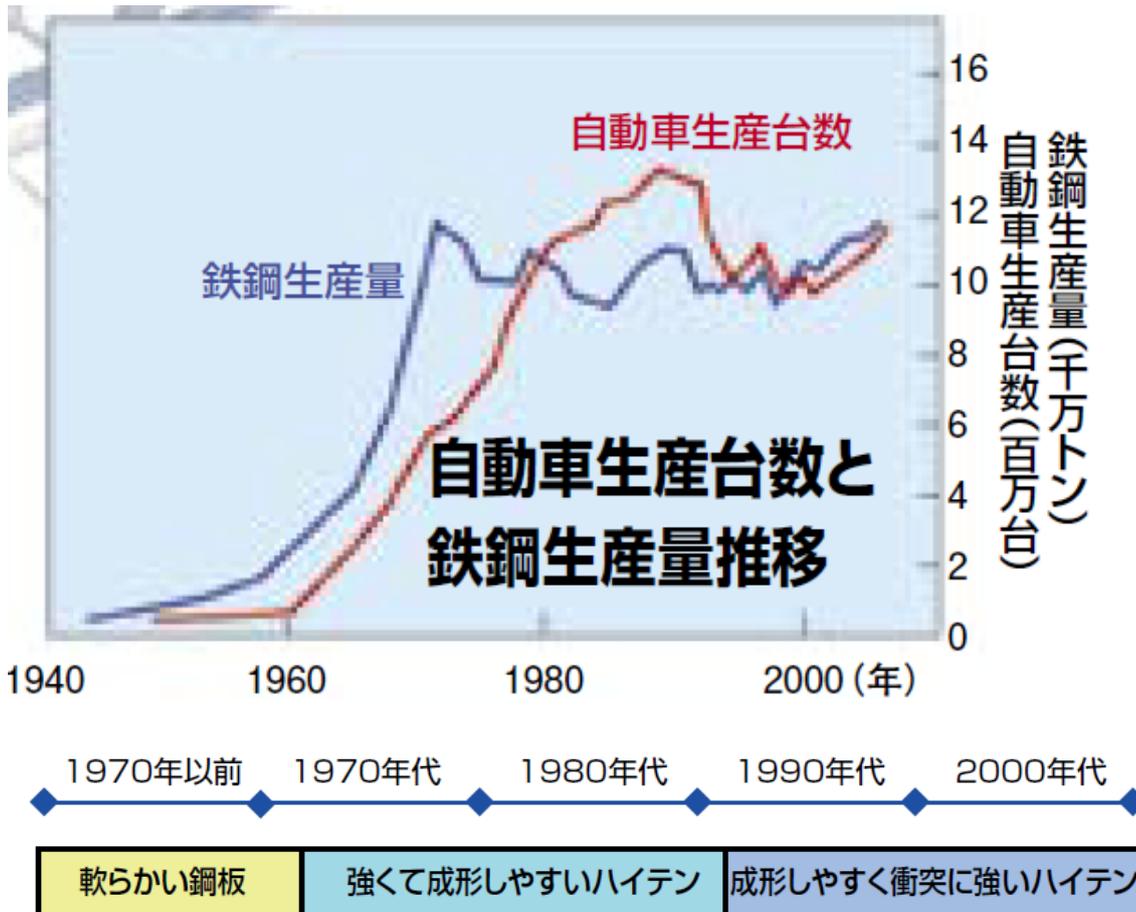


図 1. 5 鉄鋼の生産量変化と要求される材質の変化

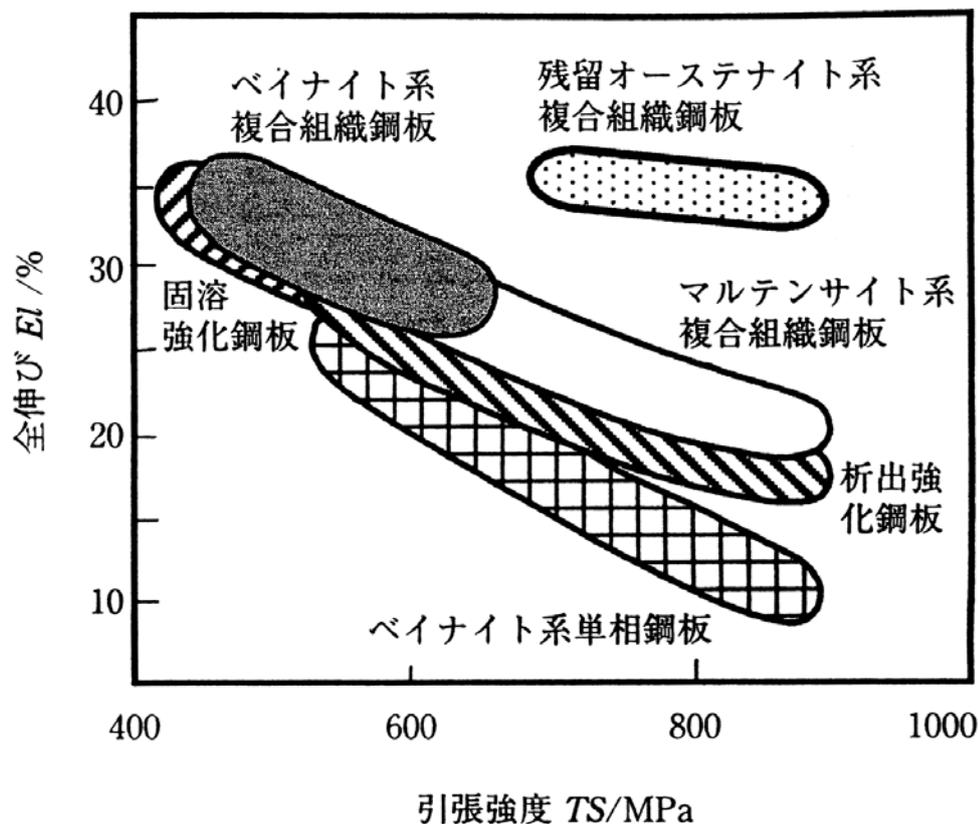


図1. 6 鋼材の強度延性バランスマップ

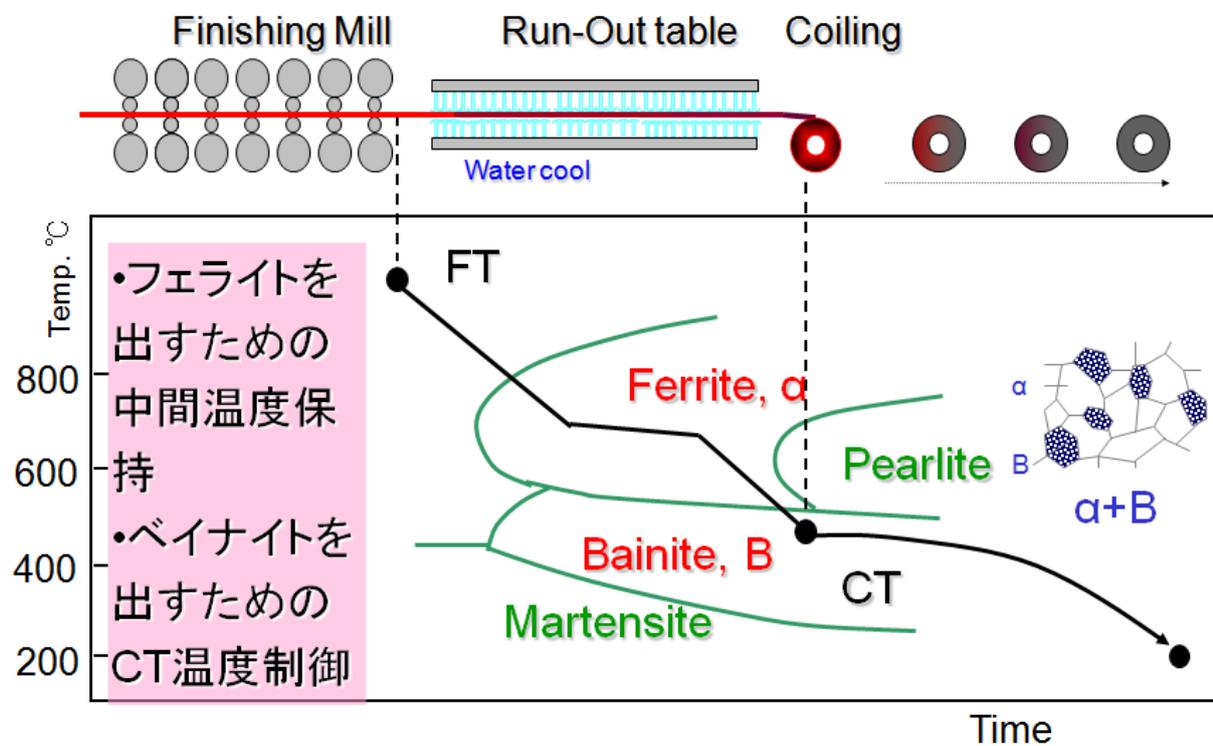
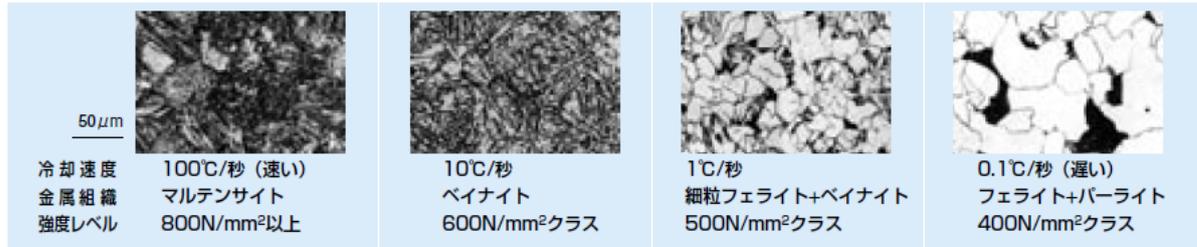
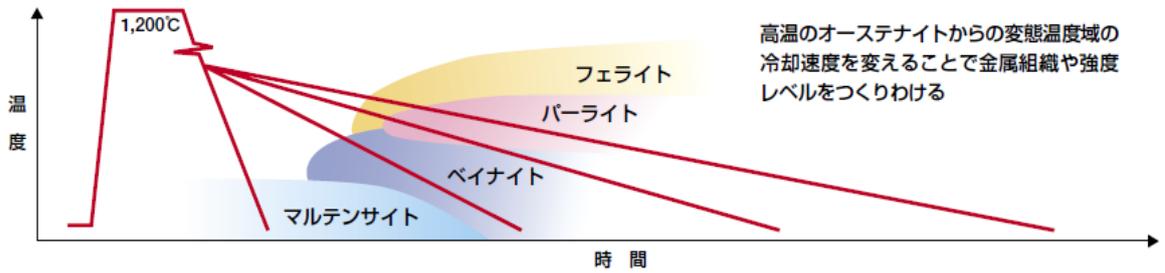


図1. 7 熱延における冷却制御(二段冷却)の例



- (※ 5) フェライト：炭素をほとんど含まない軟らかく変形しやすい組織
- (※ 6) パーライト：鉄と炭素の化合物（セメントライト）とフェライトが交互に層状になっている組織
- (※ 7) ベイナイト：微細なフェライト中にさらに微細なセメントライトが分散している組織
- (※ 8) マルテンサイト：炭素を非常に多く含み硬く脆い組織。フェライトの中に炭素が原子の状態で分散している

図 1. 8 厚板製造工程での冷却速度による製造材質の特性

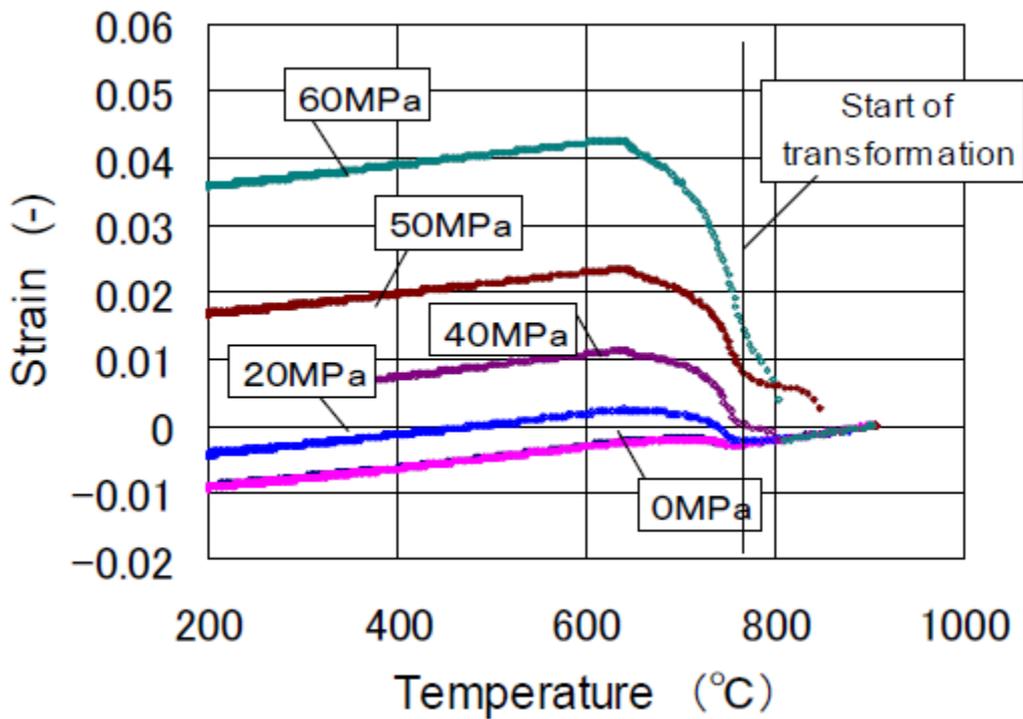


図 1. 9 変態時に応力が働いた場合の変態塑性変形

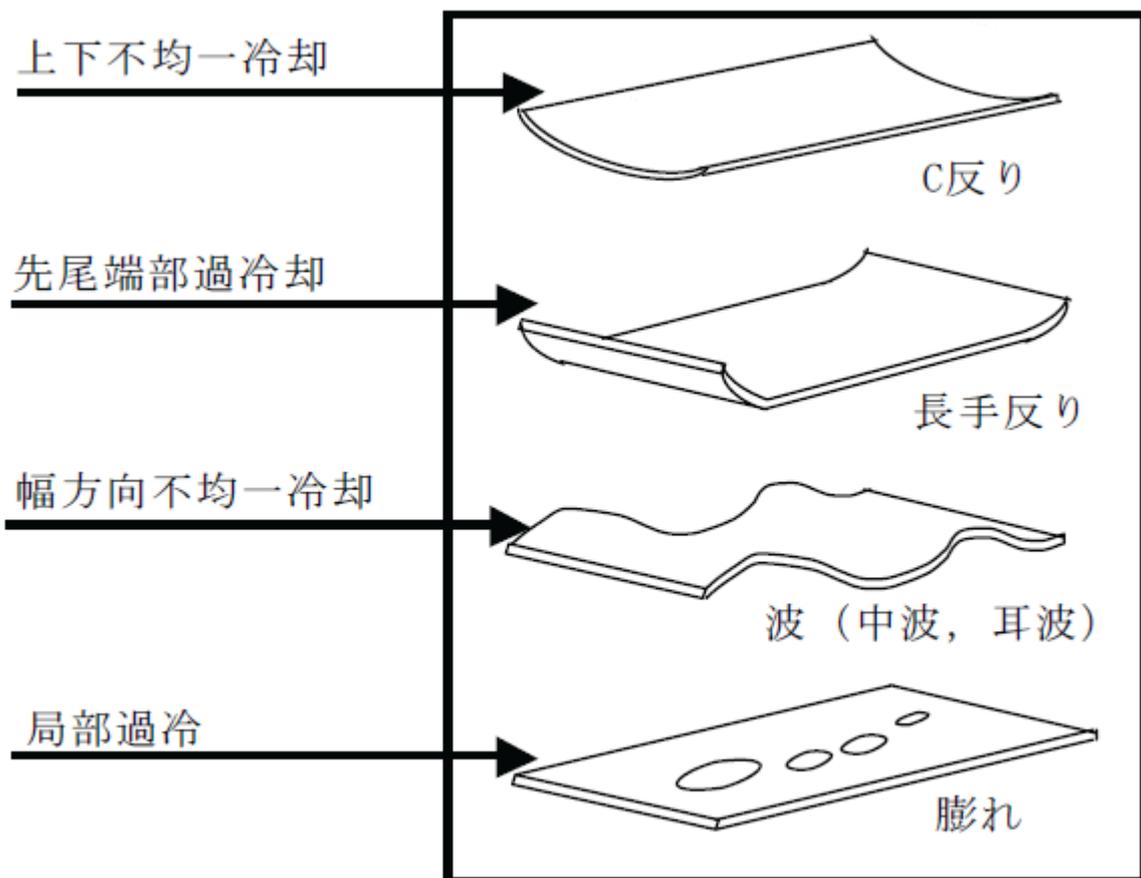
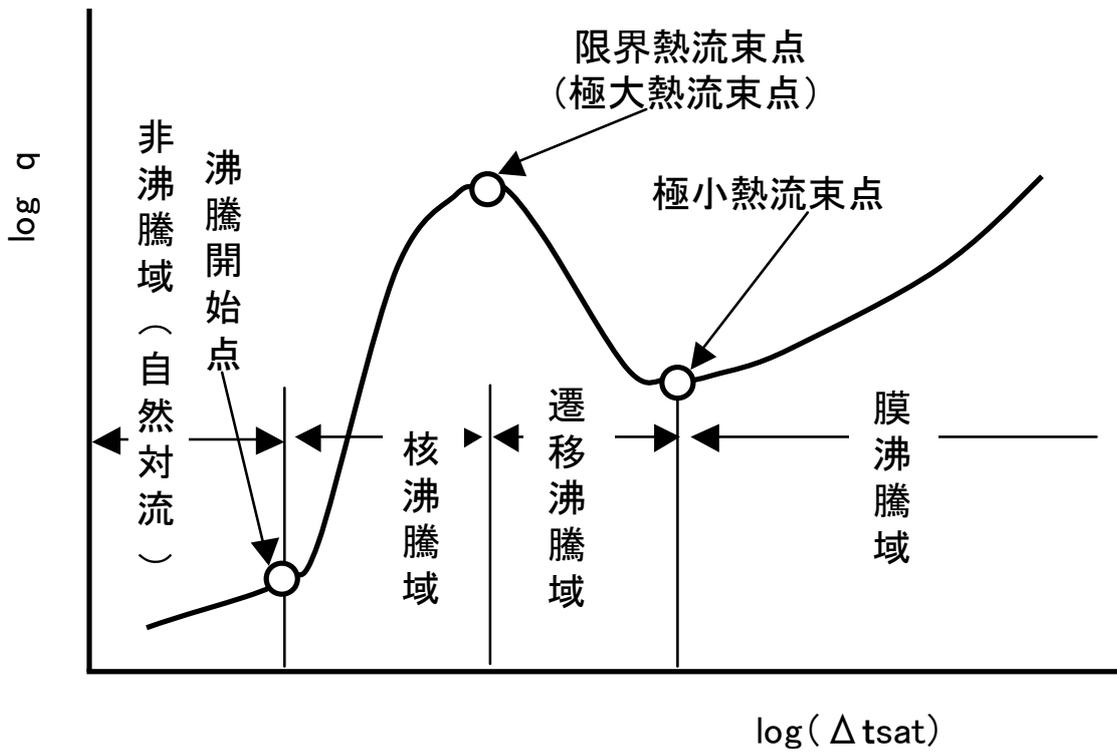
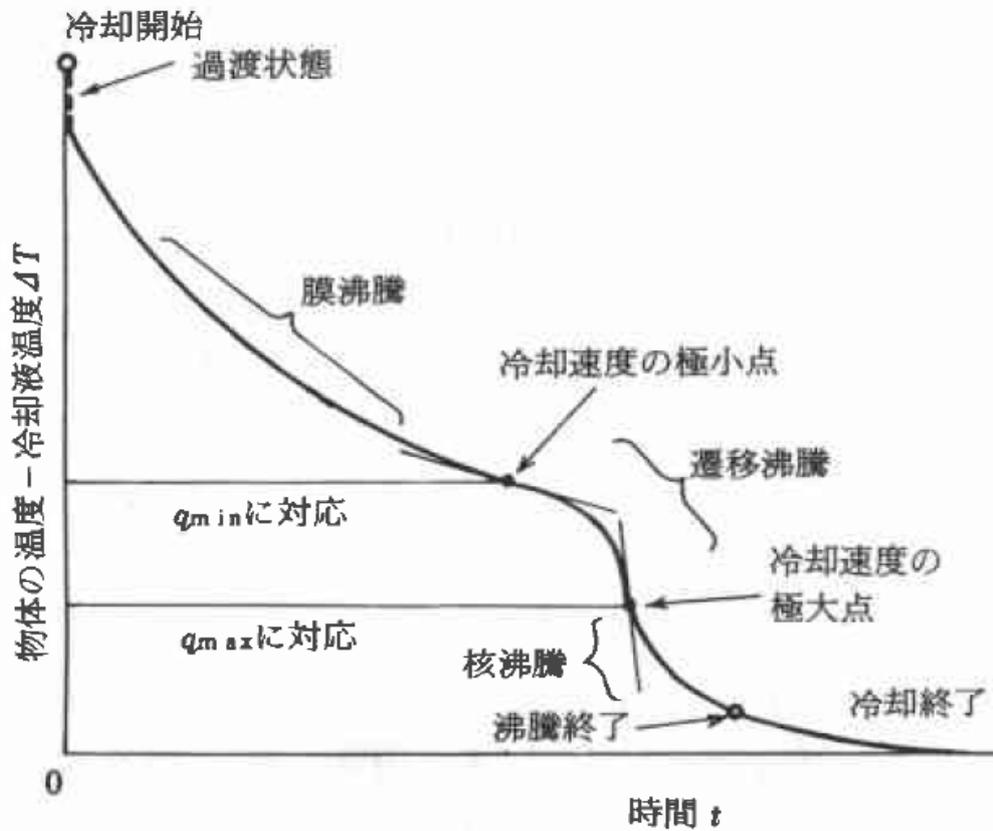


図1. 10 冷却不均一に伴う鋼板の変形

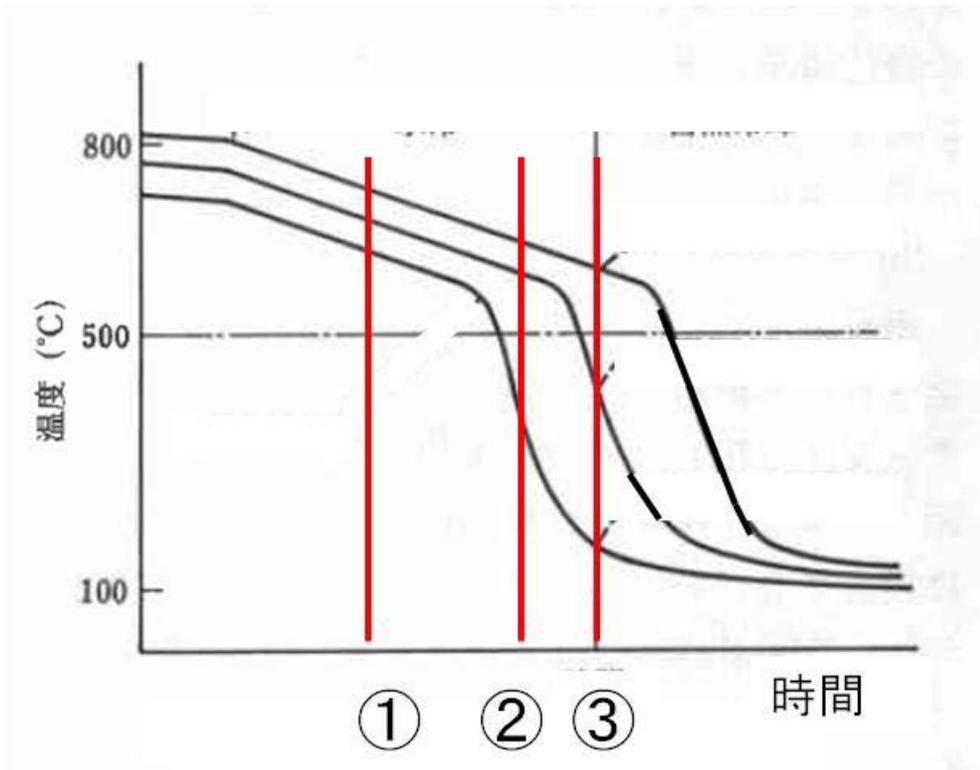


(a) 沸騰曲線

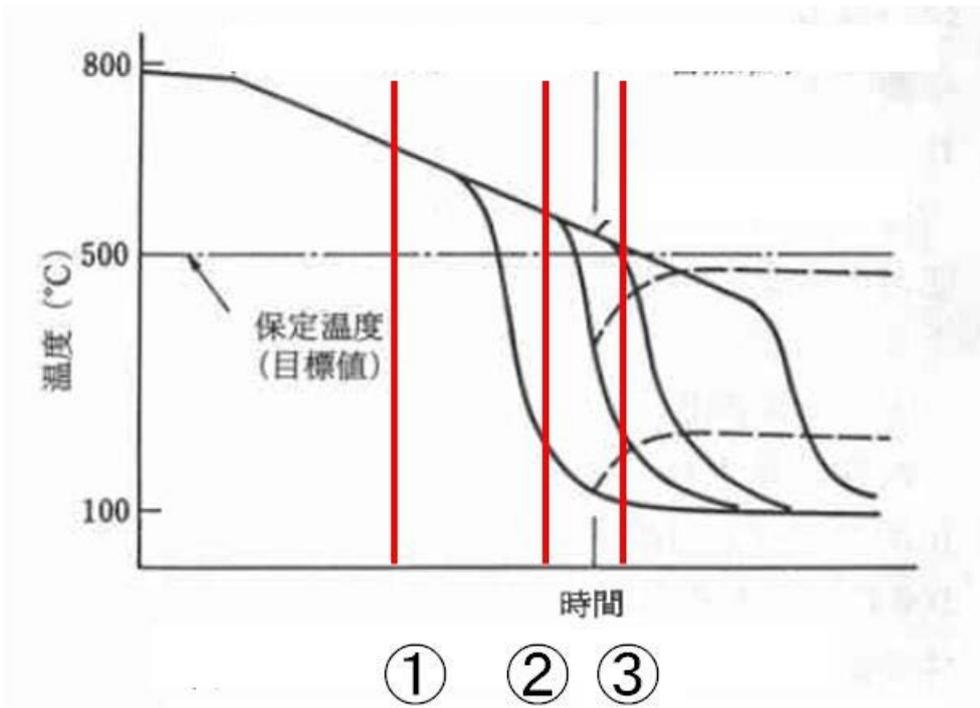


(b) 冷却曲線

図 1. 11 沸騰曲線と冷却曲線



(a) 初期温度不均一時



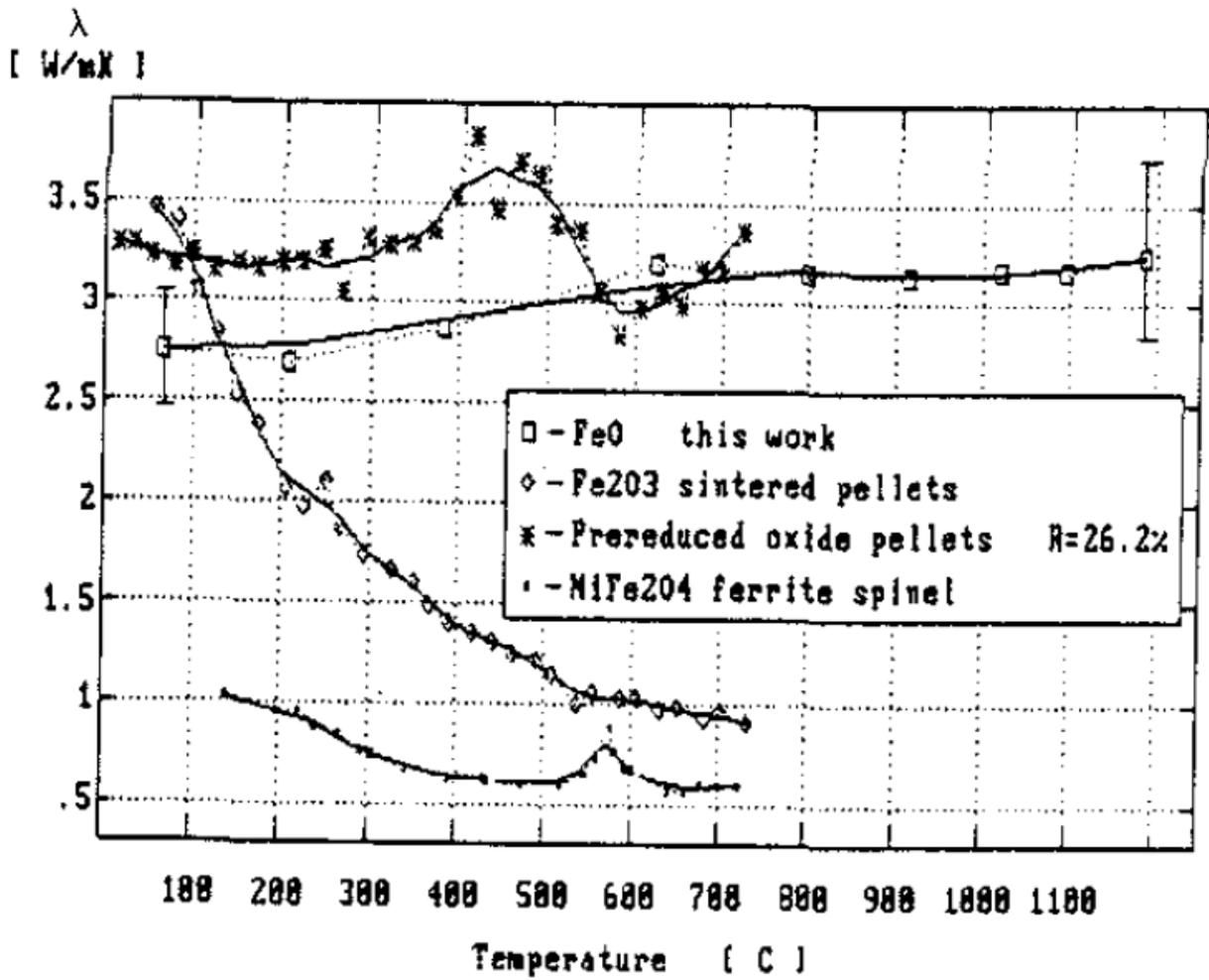
(b) クエンチ点不均一時

図1. 12 冷却不均一の発生状況

表 1. 2 高音域冷却熱伝達特性に及ぼす系構成因子の影響 (大気圧、水系)

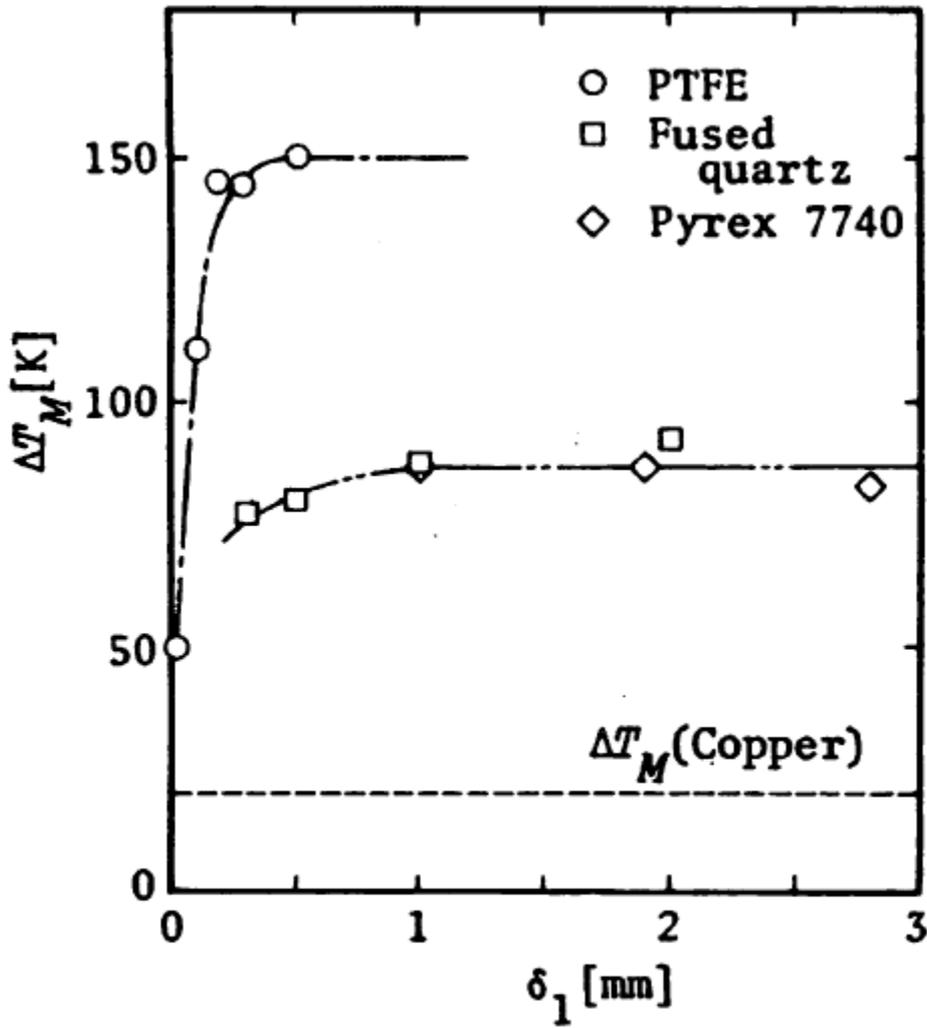
	被冷却物体側パラメータ						冷却媒体側パラメータ					
	冷却面材料 熱伝導性→低	表面粗さ →大	ぬれ性 →良	非定常性 →大	寸法 →大	姿勢	流量密度 →大	液滴温度 →低	液滴速度 →大	液滴直径 →大	気流流速 →大	
高温域下限界過熱度 [$\Delta T_m, K$]	β [-] α [m^2/s]	H [mm] P/H [-]	θ [deg.]	Ω [mm]	d [mm]	Θ [deg.]	D [m^3/m^2s]	T_l [°C, K]	V_d [m/s]	d_l [mm]	V_a [m/s]	
高温域熱伝達率 [$h_c, W/m^2K$]	→大 顕著 (x1)	影響小 (x2)	→大 顕著	影響無	影響有 (x3)	影響有 (x4)	一定 →大	影響有 (x5)	影響小	影響無	影響小	

- *1. 水平上向き平面系では、高温域熱伝達率への影響は小、鉛直平面系では、熱伝導性の低下とともに高温域熱伝達率は増加する。
- *2. 冷却面材料と粗さの幾何学的パラメータの組合わせによっては、高温域下限界過熱度が高くなる可能性がある。
- *3. $7A3-3/A3$ では、 $d \rightarrow$ 大のとき $h_c \rightarrow$ 低、一流体均等扇形ノズルでは、影響小。
- *4. 水平上向き平面系の方が鉛直平面系よりも高温域熱伝達率が高い。
- *5. 現段階では、高温域下限界過熱度に関する信頼できる測定結果が得られていない。



Thermal conductivities for $Fe_{1-x}O$, for Fe_2O_3 ⁸⁾, for Fe_3O_4 rich oxide samples⁹⁾, and for $NiFe_2O_4$ ferrite spinel⁹⁾

図 1. 13 酸化鉄の熱伝導率



極小熱流束点過熱度と1層表面層厚さ

図1. 14 断熱層厚みによる極小熱流束点温度変化

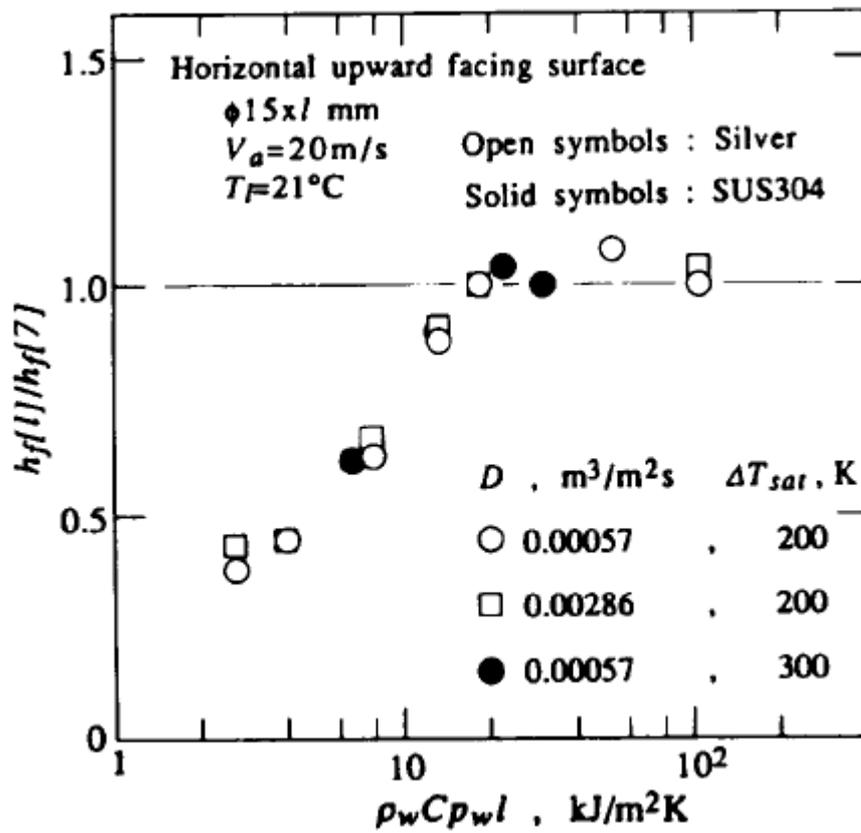
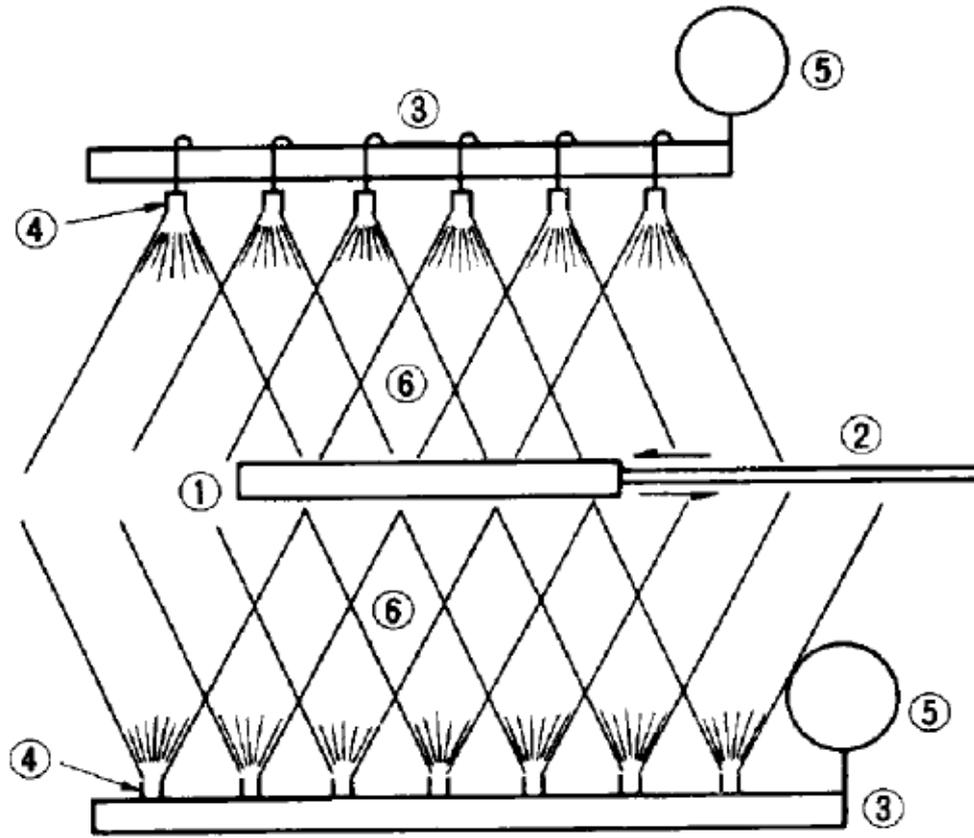


図 1. 15 高温域熱伝達率と伝熱面熱容量の関係



- | | |
|----------------|-----------------|
| ① Specimen | ④ Spray nozzle |
| ② Thermocouple | ⑤ Pressure gage |
| ③ Header | ⑥ Water spray |

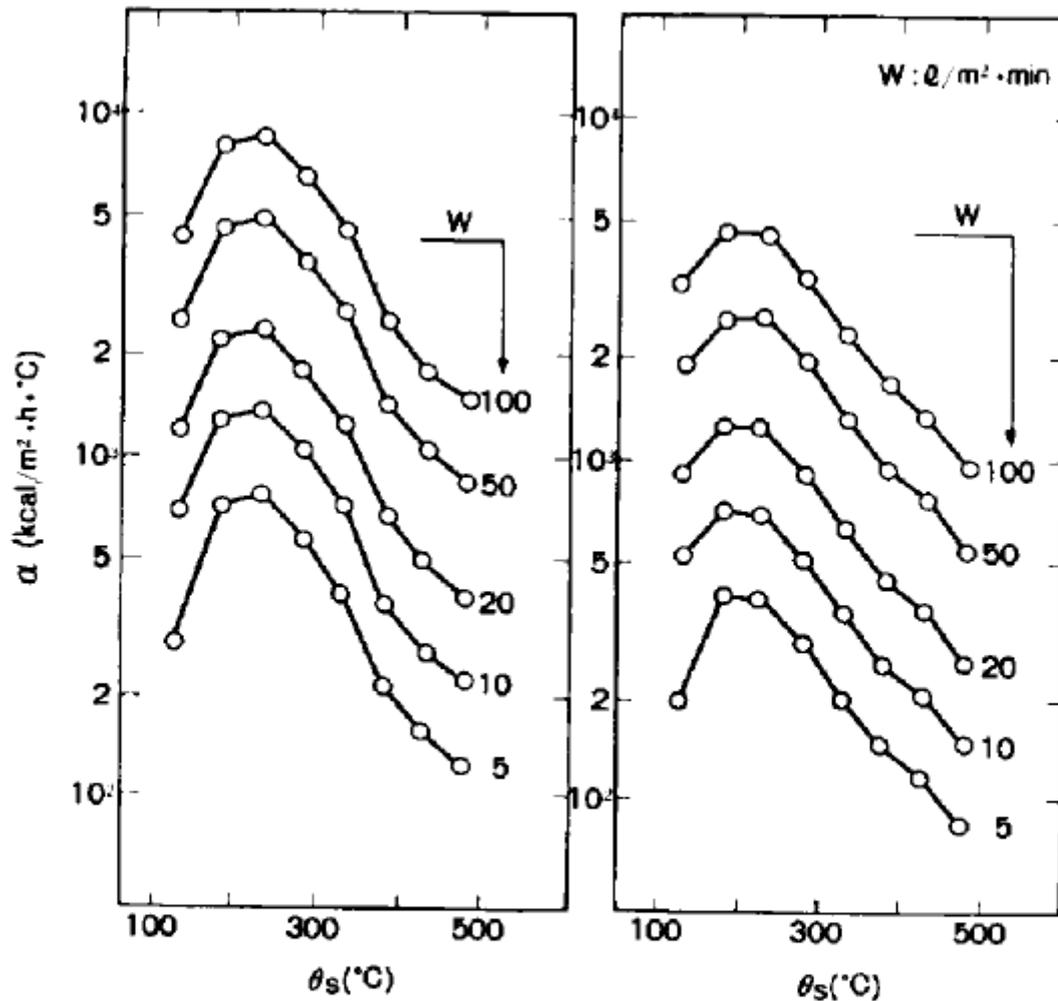
Test conditions :

Water temperature : 11 to 33°C

Water pressure : 0.6 to 8 kg/cm²-G

Fig. 1. Outline of test apparatus.

図 1. 16 三塚らの実験系



(1) Upper surface cooling

(2) Lower surface cooling

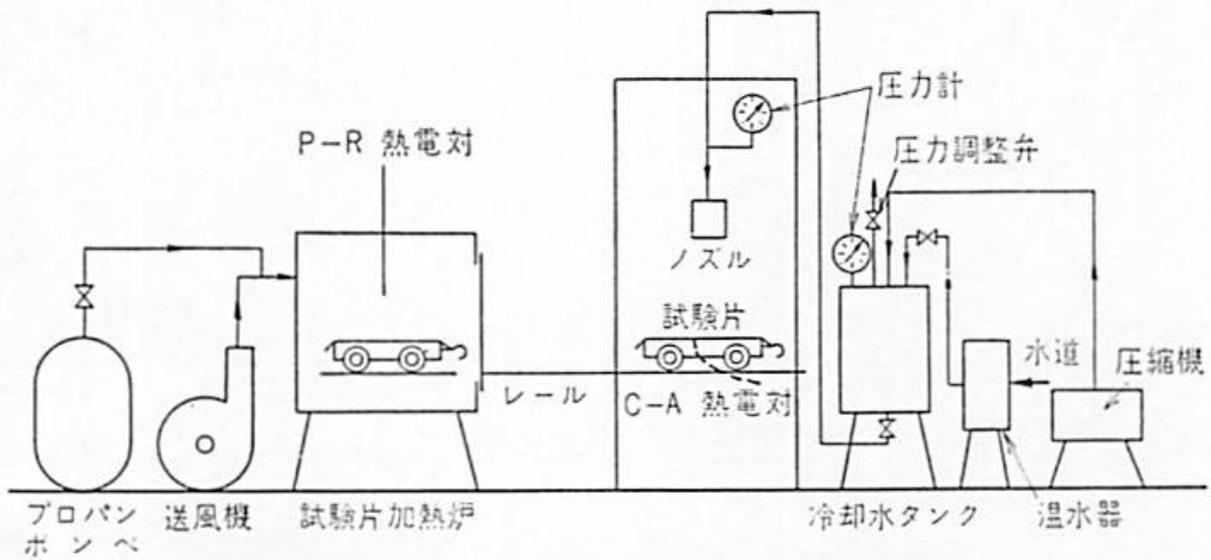
W, θ_s, α : Same as in Fig. 3

Heat transfer coefficients during water spray cooling.

W : Impinged water flux ($l/m^2 \cdot min$)

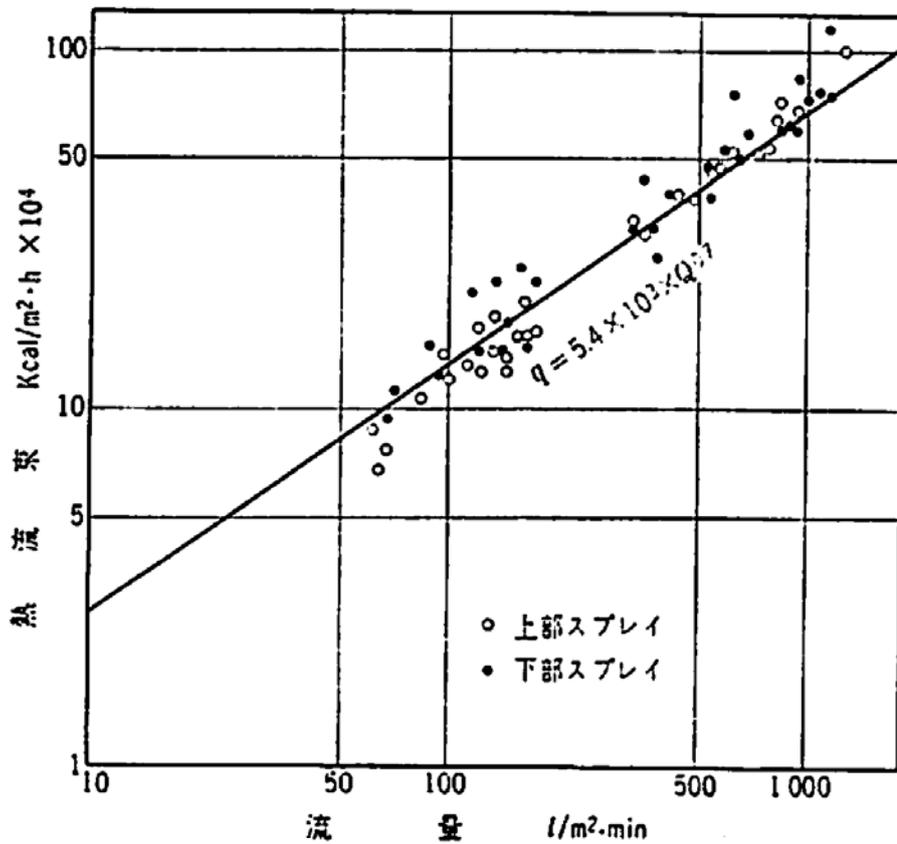
θ_s : Specimen surface temperature ($^{\circ}C$)

図1. 17 三塚らの実験結果 上下面冷却能力の比較



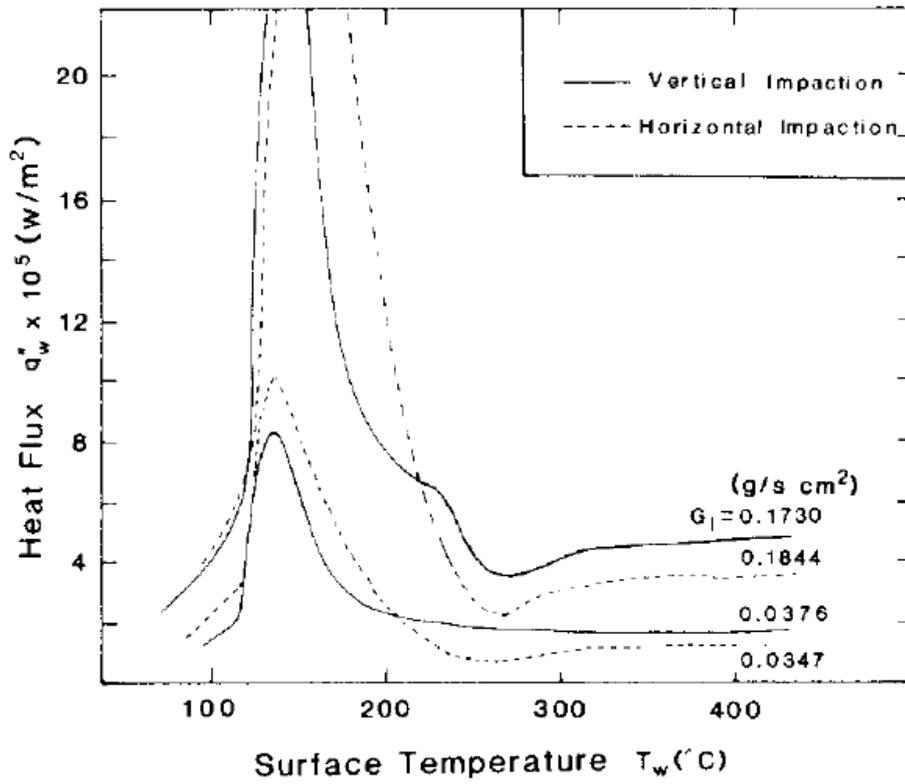
鋼板冷却試験装置概略図

図 1. 18 田中らの実験系



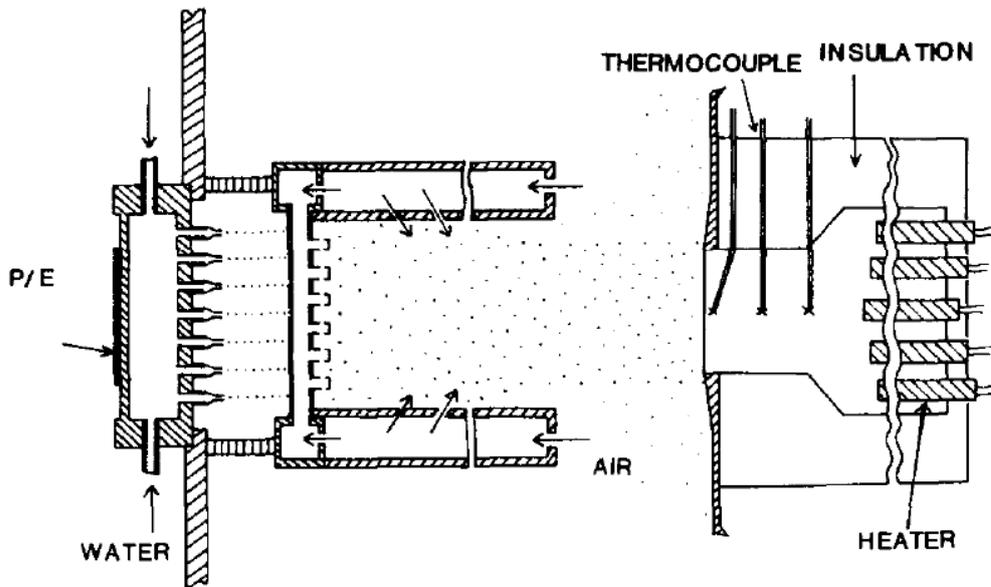
上下スプレイ比較試験結果

図 1. 19 田中らの上下面の冷却能力比較



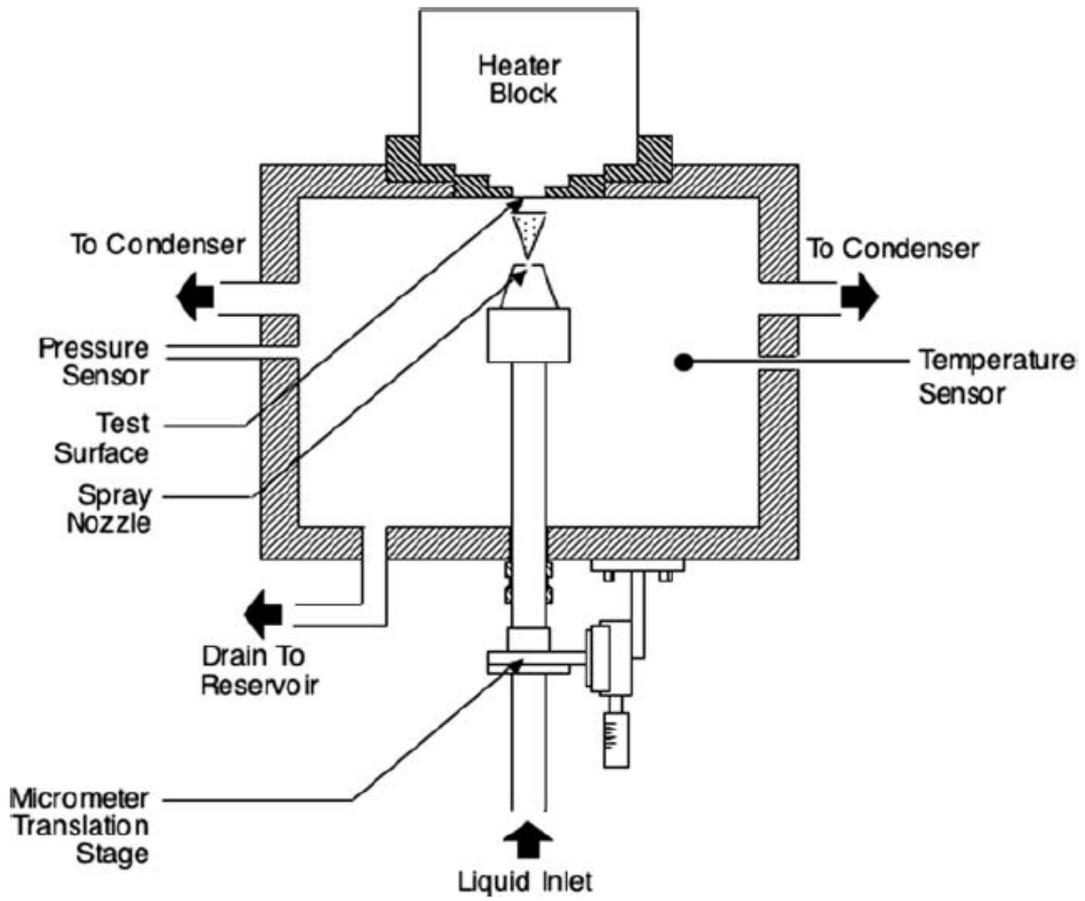
Comparison of the heat transfer of horizontal and vertical impacting sprays.

図1. 20 Choiらの実験結果



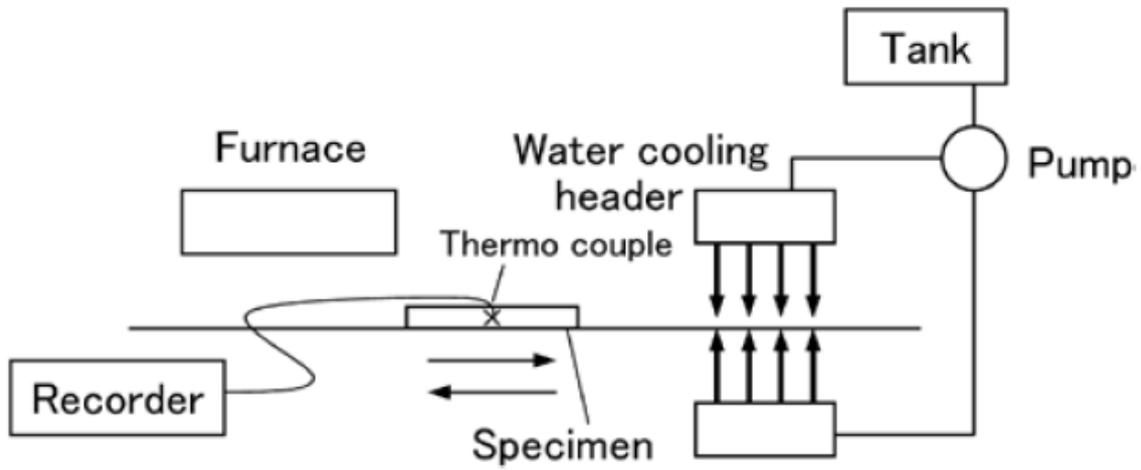
Liquid spray generator and heated target.

図1. 21 Choiらの実験系



Schematic of spray chamber.

図1. 22 Rybickiらの実験系



Schematic illustration of laboratorial intensive cooling test.

図 1. 2 3 中田らの実験系

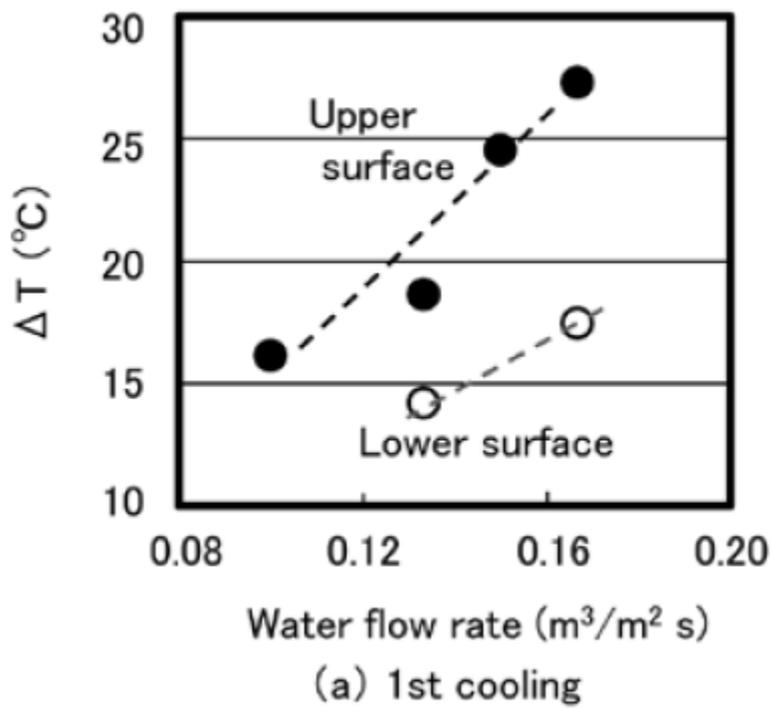
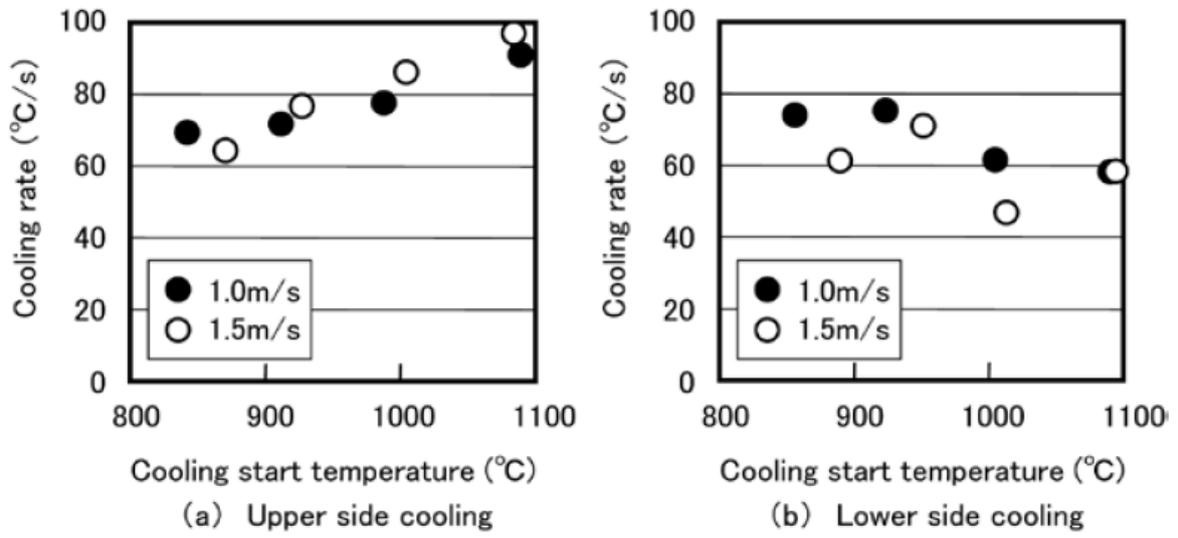


図 1. 2 4 上下面の冷却能力比較

Fig. 6. Effect of water flow rate on cooling performance. (transfer speed 1.0m/s)



Effect of transfer speed on cooling rate. (Water flow rate 0.17m³/m²s)

図 1. 2 5 移動速度の影響

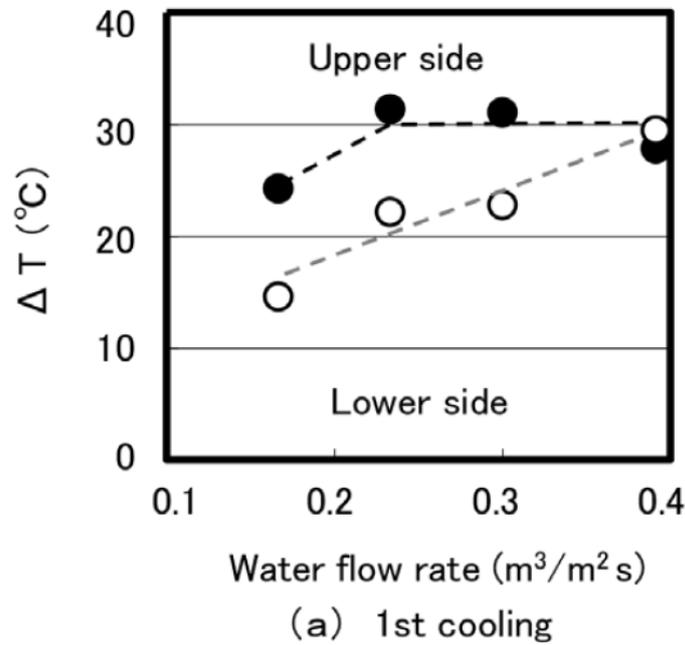
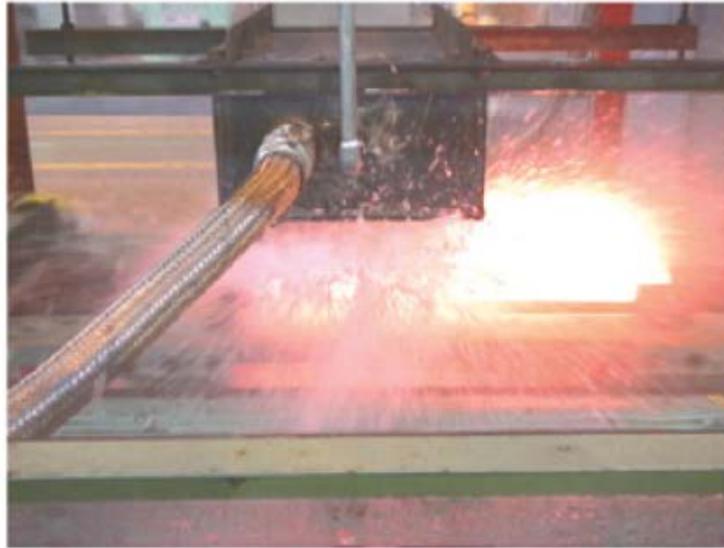


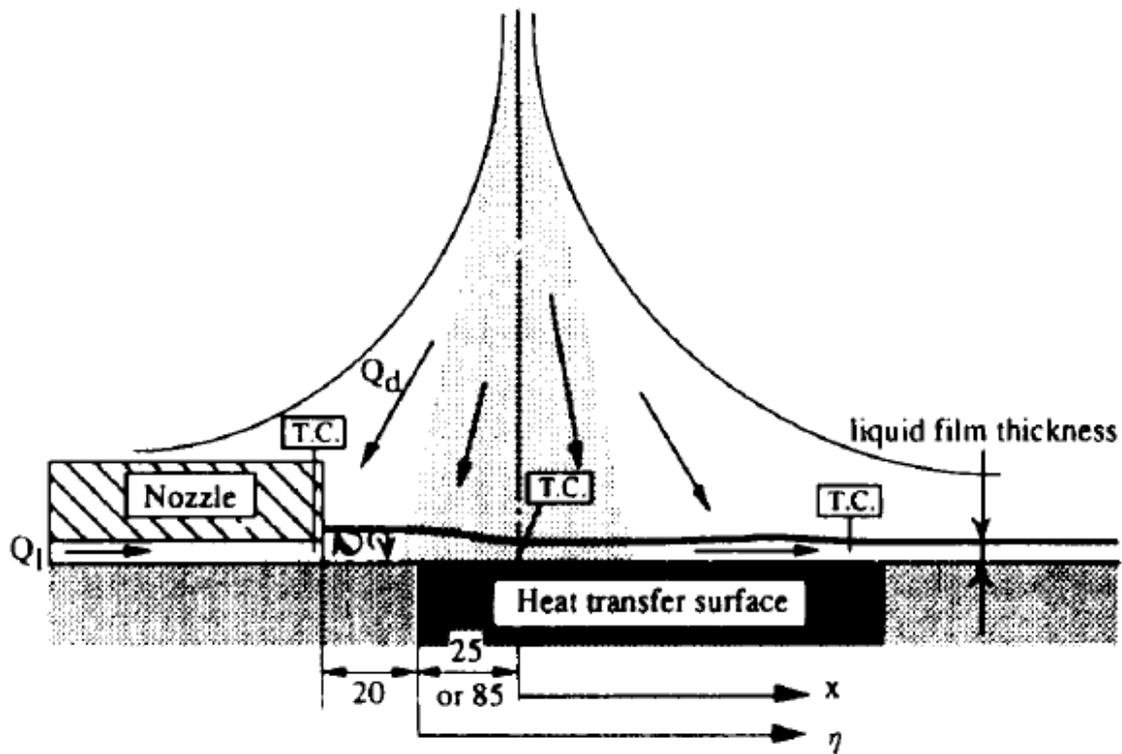
図 1. 2 6 大水量時の上下面の冷却能力



(b) On water cooling

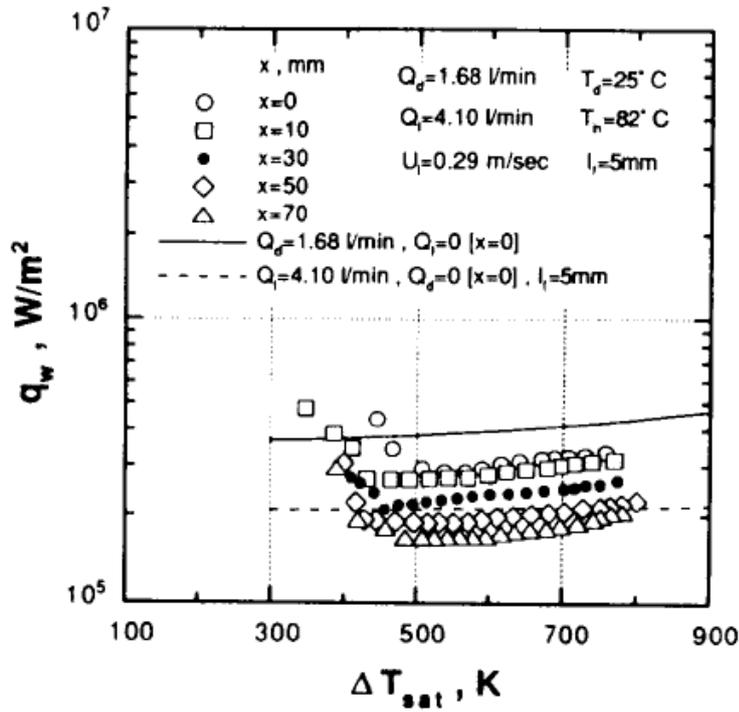
Intensive water cooling in laboratory test. (Upper side cooling, Transfer speed 1m/s, Water flow rate 0.17m³/m²s)
(Online version in color.)

図 1. 27 中田らの実験状況

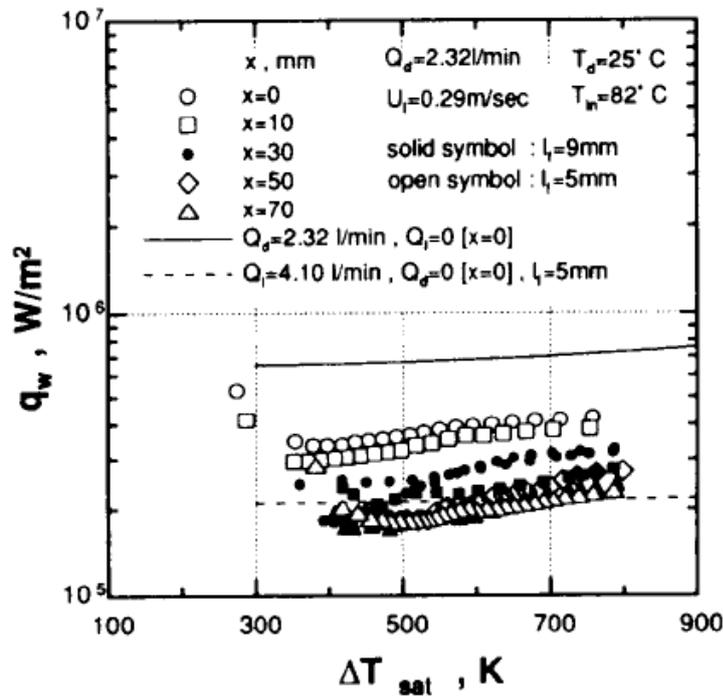


Schematic view of droplet and film flows

図 1. 28 金らの実験状況

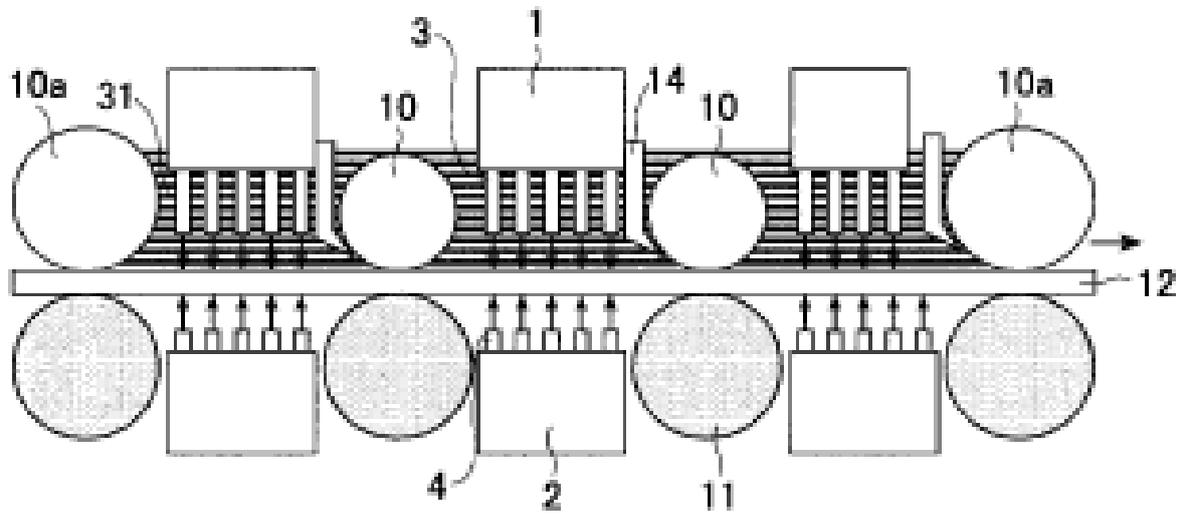


Comparison among predicted results for droplet and film flows, and experimental data ($Q_d = 1.68$ l/min)



Comparison among predicted results for droplet and film flows, and experimental data ($Q_d = 2.32$ l/min)

図 1. 29 金らの実験結果



- | | | | |
|---|------------------|------|-----------------------|
| 1 | 上ヘッド | 9 | 排水 |
| 2 | 下ヘッド | 10 | 水切りロール |
| 3 | 上冷却水噴射ノズル（円管ノズル） | 10 a | 大径水切りロール |
| 4 | 下冷却水噴射ノズル（円管ノズル） | 10 b | 水切りロール（バックアップロールを有する） |
| 5 | 隔壁 | 11 | テーブルロール |
| 6 | 給水口 | 12 | 厚鋼板 |
| 7 | 排水口 | 13 | バックアップロール |
| 8 | 噴射冷却水 | 14 | ガイド |
| | | 31 | 滞留水 |
| | | 32 | 漏れ水 |

図1. 30 厚板冷却装置における滞留水状況

第 2 章． 実験装置及び実験方法

2 . 1 静止状態での伝熱面姿勢に関する実験装置及び方法

2 . 1 . 1 噴霧諸量の測定

2 . 1 . 2 液膜の評価

2 . 1 . 3 噴霧流の観察とモデル化

2 . 1 . 4 スプレーによる伝熱実験装置、実験方法

2 . 2 鋼板移動時の上下面伝熱特性の研究に関する実験装置及び方法

2 . 2 . 1 通板実験装置

2 . 2 . 2 試験片

2 . 2 . 3 各冷却試験における冷却系

2 . 2 . 4 鋼材冷却試験方法

2 . 2 . 5 熱伝達特性の評価方法

2 . 2 . 6 ノズル特性の評価

第 2 章 実験装置及び方法

本章では本論文における実験系の装置及び測定方法、結果の処理方法について述べる。

2.1 静止状態での伝熱面姿勢に関する実験装置及び方法

2.1.1 噴霧諸量の測定

2.1.1.1 冷却面の座標とスプレーノズルの特性

冷却面とスプレーノズルの位置関係の概略説明図を図 2.1 に示す。本研究では、ノズル直下を原点とし、冷却面の長手方向を x 方向、スプレーパターンの長手方向を y 方向とし、図のように座標を定義した。スプレーノズルは、フラット（扇形）スプレーノズルを使用し、図のようなスプレーパターンになっている。ノズルと冷却面の距離を H とし、本研究では実験に応じて 300mm と 180mm とした。今回使用したスプレーノズルは株式会社いけうち製の均等扇形ノズル、1/4VE65157S303W で、その特性を図 2.2 に示す [26]。

2.1.1.2 液滴流量密度測定

単位面積、単位時間当たりの噴霧量である液滴流量密度、 $D [m^3/(m^2/s)]$ は熱伝達率に影響を及ぼす主要な要因のひとつである。

本研究では、図 2. 3 に示すように、内径 3.55mm、外径 4.00mm のステンレス管を用い、アクリル板に一定間隔（8mm もしくは 10mm 間隔）で配置し、そこに噴霧をさせることにより、ステンレス管を通過する液滴を一定時間メスシリンダに捕集し、捕集した液滴の体積を求め、次式によって液滴流量密度を算出した。

$$D = V / (A \cdot \tau) \quad (2.1)$$

D : 液滴流量密度 (m³ / m² · s)

V : シリンダ一捕集体積 (m³)

A : 捕集管(内径)断面積 (m²)

τ : 捕集時間 (s)

また、本研究では実験条件を示す値として流量 Q (l/min) を用いている。この Q はノズルを通過する液体の全流量である。

本実験では液体流量 Q は 7.5 ~ 15.8 [l/min] の間で変化させた。また、ノズルと冷却面の距離を H とし、本研究では 300mm, 180mm とした。図 2. 4 に本研究の液滴流量密度分布を示す。また、大久保 [13] の提案した整理式(式 2.2) を併記した。なお、半値幅 b は実験値から読み取った。

$$D = \exp [-0.693 \cdot (x/b)^2] \cdot D_{\max} \quad b = \text{func.} [D] \quad (2.2)$$

噴霧中心の液滴流量密度 D_{\max} は以下の通り

$$Q [\text{l/min}] \quad H [\text{mm}] \quad D_{\max} [\text{m}^3 / \text{m}^2 \text{ s}]$$

2.1.1.3 液滴平均温度の測定

液滴平均温度は液滴流量密度に並び、噴霧冷却に影響を及ぼす主要な要因である。本実験では液滴平均温度は室温とし、ノズル直前で配管の中にシース熱電対温度計を差込み測定した。また、冷却面の位置に熱電対温度計を取り付けたベークライト製の受け止め皿を配置し、そこに噴霧することで、噴霧された後の液滴平均温度を測定した。ノズル側の測定温度と受け止めた側の測定温度の図を図2.5に示す。図2.5において横軸が噴霧されてからの時間(分)、縦軸は測定温度(°C)である。噴霧前の測定温度をTime=0(min)とした。この結果からノズル側の測定温度と噴霧後受け止めた側の測定温度では最大4%ほどの誤差しかなく、さらに噴霧時間が5分以上経過するとほぼ同じになることが確認された。したがって、噴霧冷却実験を行う際は、噴霧開始後5分以上経過してから行った。

2.1.1.4 液滴径、液滴速度の測定

本実験において、液滴径は、ノズルのカタログ(株式会社いけうち社製)に記載されているものを参考にした。

流量 15.8[l/min]時、液滴径(D_1): 約 520[μ m]

液滴速度は、吐出圧 0.3MPa が吐出圧損として、速度に変換されるとして次式で算出した。

$$V = (2P / \rho)^{0.5} \quad (2.3)$$

P : ノズルの吐出圧力 [MPa]

ρ : 液体質量 [kg/m³]

V : 吐出液滴速度 [m/sec]

2.1.2 液膜の評価

2.1.2.1 We 数による噴霧後液滴の分裂、非分裂

液滴が蒸気膜を介して高温の固体面に衝突する場合、衝突液滴は分裂することなく固体面からリバウンドする時と、衝突後分裂する時があることが明らかになっている。この分裂および非分裂の条件は以下の式で定義される We 数によって領域に分けられる。We (ウェーバー) 数は、慣性力と表面張力の比を表す無次元数である。

$$We = \rho V_f^2 d_l / s \quad (2.4)$$

ここで、 ρ : 液体の密度 [kg/m³]、 V_f : 液滴速度 [m/sec]、 d_l : 液滴径 [m]、 s : 表面張力 [N/m] である。

そこで、ここでは、前節までに述べてきた噴霧流諸量の測定結果を元に、We 数を求め、本実験での噴霧後液滴の分裂、非分裂の検討を行う。

We 数と分裂、非分裂の領域の関係は研究者により若干の違いはあるが、一般的に、単一液滴の研究より以下の3つの領域に分類できる[27]。

① $We \leq 50$: 伝熱面衝突後液滴は、薄膜流が収縮するのみで分裂する事なく跳ね飛ぶ。

② $50 < We < 80$: 収縮した薄膜流は、数個の液滴を排出しながら収縮し、跳ね飛ぶ。

③ $We \geq 80$: 薄膜流はほとんど収縮過程に移行せず、多数の小滴に分裂し跳ね飛ぶ。

2.1.1.4 で求めた液滴速度と液滴径をもとに We 数を算出すると 80 よりも大きく、分裂領域にあることがわかる。

2.1.2.2 液膜形成条件

次に、沸騰曲線の膜沸騰域に相当する高温域において衝突液滴が液膜を形成する条件を検討する。本研究で得られた噴霧流諸量の測定結果を大久保[28]の提案している液膜形成条件に当てはめてみる。

大久保は時間・空間的平均冷却面被覆率 p を予測する次式を提案しているが、 $p=1$ の場合、冷却面は常に液膜で覆われる。

$$p = (A_{d,m} / L_c^2) \times (t_d / t_c) = 6Dt_d A_{d,m} / (pd_l^3) \quad (2.5)$$

$$A_{d,m} = \{3/20 - 5/4(a^{-0.2} - 1)\} \cdot \pi \cdot d_{max}^2 / a \quad (2.6)$$

$$d_{\max} / d_1 = 0.87 \cdot (We/6+2)^{1/2} \quad (2.7)$$

なお、 d_{\max} : 液滴が衝突した時の最大液滴径（広がり直径）[m]、 Ad, m : 1個の液滴による時間平均被覆面積[m²]、 L_c : 修正立方格子モデルに基づく1液滴の占める空間の一片の長さ[m]、 t_d : 衝突した液滴の冷却面上での滞在時間[sec]、 t_c : 液滴供給サイクルの1周期の時間[sec]、 a の値は液滴が分裂することから、千田ら[29]の測定結果に基づき $a=0.6/0.27$ とする。

(2.7)式の Ueda et al. の式[30]は、液膜の変形抵抗によるエネルギー損失を無視し、衝突前の液滴の保有エネルギー（運動エネルギー+表面エネルギー）が最大液膜径になったときの表面エネルギーに等しいとみなすことによって得た式に、補正係数を掛けた式である。 $p=1$ として計算した結果を図 2. 6 に示す。

2.1.3 噴霧流の観察とモデル化

本研究では室温噴霧流の姿勢に対する影響を観察するために、厚み 5mm のアクリル板を用い、室温で噴霧流の衝突する様子を DV カメラ、デジタルカメラでアクリル板裏面側から撮影した。さらに、得られた映像、画像から噴霧流のモデル化を行った。本実験では、室温で挙動の観察を行っているが、高温伝熱面においては、液滴が発生蒸気により濡れがたくなることを考慮して、水との接触角が大きく、濡れにくいアクリル板を用いている。

観察の条件は流量 $Q = 7.5 \sim 15.8$ [l/min]、使用した DV カメラは SONY の Digital Handycam DCR-PC100 (有効画素数 カメラモード時 69 万)、デジタルカメラは FUJIFILM の Fine Pix 4800Z, Fine Pix 420F (共に画素数約 200 万) を使用した。なお、ノズルは $Q = 7.8 \sim 15.8$ [l/min] 観察時は、1/4 VE65157S303W を使用した。

また、アクリル板の接触角の測定も行った。測定方法は直接方法と呼ばれる手法で、水平に置いたアクリル板に液滴を一滴静かに垂らし、その輪郭を真横からデジタルカメラで撮影し、接触界面から気液界面の平衡接触角 θ_e (deg) を目視により測定した。ただし、この手法は簡便であるが、気液界面の接線の引き方により測定値が変わるため、測定誤差がやや大きくなるという欠点がある、図 2.7 にそれにより得られた画像とその角度の一例を示す。測定は数回行い、平均値である 66.0° を平衡接触角 θ_e として採用した。そして、 θ_e の値により、濡れ状態は次のように分類されている。

- ① $\theta_e = 0^\circ$: 完全濡れ
- ② $0^\circ < \theta_e \leq 90^\circ$: 濡れ領域
- ③ $90^\circ < \theta_e < 180^\circ$: 非濡れ領域
- ④ $\theta_e = 180^\circ$: 完全非濡れ

この分類によると本観察は②の濡れ領域の非濡れ領域に近い領域で行われたことが分かった。

また、接触角測定は上向き面に加え、下向き面での測定も行い、一滴の液滴の場合、姿勢の影響がほとんど無いことを確認した。

2.1.4 スプレーによる伝熱実験装置、実験方法

2.1.4.1 噴霧冷却実験装置、実験方法

実験装置の概要を図 2. 8 に示す。実験装置は噴霧の姿勢を変更出来ることを目的として製作したものであり、軸を中心にノズルと冷却面の相対位置をずらすことなく回転できる実験小室⑮、その中に設置されているスプレーノズル⑦、冷却面⑨、またその外には、赤外線加熱炉⑫、スプレーを行うための配管等、ポンプ②、測定器⑭などから構成されている。液体を微粒化し、噴霧流を形成させるノズルには、加圧した液体をノズルより噴出させる一流体ノズルと加圧空気によって液体噴流を微粒化する二流体ノズルがあるが、本研究では一流体ノズル(株霧のいけうち製 1/4VE65157S303W)を使用した。分散媒体である液体は、イオン交換水を使用し供給管よりポンプ②、フィルター③、流速計④、レギュレーター⑤、ストレーナー⑥を介してノズル⑦に供給され、噴霧量はレギュレーター⑤によって、圧力と流量計による流量[l/min])で調節される。流体はイオン交換水を使用(非脱気)。温度は室温である。噴霧された液体は排水タンクに集められ、ポンプによって排水した。

冷却面は⑦ノズルより鉛直下方 300[mm]もしくは 180[mm]の位置に水平に

設置されている。冷却面は赤外線ヒータ⑫によりアルゴン雰囲気中で加熱した。加熱時の冷却面姿勢は水平上向きであり、冷却面が所定の温度（約 820℃～1000℃）に達した後に所定の冷却位置に移動し、シャッター⑧を開くことにより噴霧冷却を開始した。また、姿勢を変更させて冷却する場合は、冷却面⑨を冷却位置に移動させた後、回転式の実験小室⑮全体を任意角度に回転させることによって冷却面姿勢を固定し、シャッター⑧を開いて噴霧冷却を開始させた。

実験装置に使われた主な装置、器具、商品の型番は以下の通り。

ノズル : 株式会社霧のいけうち、均等扇形ノズル、1/4VE65157S303W

赤外線ヒーター : アルバック理工株式会社、放物面反射形 RHL-P、高密度平面放射 Pss34VP (200V、最大 6kW) および、RHL-Ps310V

電源 : アルバック理工株式会社、HPC-5000 MODULE UNIT, THERMAL PROGRAM CONTROLLER MODEL HPO-3084 (200V, 40A)

ペンレコーダー : 横河電機株式会社、LR12000E シリーズ、型名 370216

断熱材 : 新日化サーマルセラミック株式会社、SCセラミックペーパー 1260-I および、SCボード 1400

熱電対 : 福音特殊金属株式会社、スプリング式 CA シース熱電対、SF50-K-1.0x(30+70)x3000-U-316-2-G

高温潤滑剤 : ダウコーニング株式会社、モリコート 1000 ペースト

2.1.4.2 冷却試験片

冷却試験片の概略図を図2.9, 2.10、写真を図2.11に示す。冷却試験片は240[mm]×50[mm]×20[mm]のステンレス鋼(SUS304)製矩形板である。本実験では、冷却面表面に沿った熱伝達分布を、ペンレコーダーで測定した冷却面温度履歴に基づき、Beck[31]と同様の熱伝導の逆算法を用いて、表面温度 T_w と熱流束 q_w を算出した。従って、図2.10に示すように、 x 、 y 、 z 座標における、冷却面内 z 方向一次元性を可能な限り保つために、冷却面には、冷却面広さ方向(x 方向および y 方向)の熱伝導を防止する工夫を施した。すなわち、冷却面表面から幅0.5[mm]、深さ19[mm]のスリットを切り、スリット内の空気層およびセラミック繊維性ペーパーの断熱性により x 方向および y 方向の熱伝導を低減した。スリットにより区分された四角柱の部分をブロックと呼ぶと、各ブロック中央に裏面から直径1[mm]、深さ18[mm]の孔を設け、各孔に冷却面表面から2mmの位置までスプリング式のCAシース熱電対(シース径0.9[mm])を挿入した。なお、シース部の酸化防止および熱電対測温部と冷却面との間の熱的接触を保つために、各孔には高温潤滑剤を充填した。表面は耐水ペーパーで鏡面に仕上げ、実験ごとにアセトンで脱脂した。

2.2 鋼板移動時の上下面伝熱特性の研究に関する実験装置及び方法

2.2.1 通板実験装置

通板実験装置の概要を図2.12に、図2.13に外観写真を示す。移動状態での冷却試験は、図2.12、2.13に示すようにロールによる正逆回転が可能な通板装置と試験片架台、試験片と冷却帯から成っている。試験片は、通板実験装置横の加熱炉で図2.14に示す試験片設置場所に置かれる。図は下面用であり、下面からの水流噴射により、試験片が動かないように押さえ金具で固定される。なお、上面用試験では試験片の鋸部を設置場所にはめ込むだけである。なお、鋸部には噴射水が裏面に回り込まないように3mm厚のセラミックシートを鋸の形状に合わせて切り出し設置している。なお、加熱炉仕様は以下である。

加熱炉仕様：山田電機（株）製 卓上型高速昇温炉 MSFT2030

内寸法 200 [mm]W x 200 [mm]H x 300 [mm]D

電気容量 10 [kW] 最高 1500℃、常用 1400℃

2.2.2 試験片

試験片図面を図2.15（下面用）、2.16（上面用）に示す。試験片の周囲は段状になっており、鋸部を有する。この鋸部を利用して試験片を移動

台に固定している。また、試験片の側温部には溝が切っており、側温部の熱移動を一次元的にして、逆算の精度を上げるようにしている。側温深さは表面 1 [mm]、板厚中心部 9.5 [mm]である。熱電対は、鐳ツキとして、ボルトと板により熱電対孔奥に押し付けている。試験片材料は、SM490という引っ張り強さ 490 N の溶接構造用圧延鋼材を用いている。これは、SS400などの一般鋼材を用いると、炭素量やマンガン量の規格がなく、変態熱などの不安定が測定データのばらつきに影響すると考えられるためである。

2.2.3 各冷却試験における冷却系

2.2.3.1 下面伝熱特性測定試験時の冷却系

冷却用ノズルは、扇形スプレーノズルであり、図 2.17 に示す位置に幅方向 1 本で通板方向に垂直に扇形が広がるようにしている。ノズルは、スプレーイングシステムズ製の口径 1 インチ、真鍮製、広がり角度 100 度、100 [L/min] (0.3 [MPa]時) のノズルを使用した。このノズルを下面からノズル高さ 145 [mm] に設置した。その際に、アクリル板を通板材として設置し、噴射時の液膜の広がり状況を図 2.18 に示すように観察した。一次液膜の広がり、片側 200 [mm] 以上あり、図 2.17 の位置のようにノズル間も離れていても冷却可能と推定された。

2.2.3.2 上下面伝熱特性比較試験時の冷却系

上下面冷却時の試験装置においては、上面ではスプレー冷却後の水が上滞留する状況を実現させる必要がある。このため、図2.19に示すように、冷却ヘッダー周辺に水槽を設置した。水槽は通板方向には固定壁とし、通板方向の側方は、壁高さが変更できるように着脱式とした。水槽の下部と試験片架台の隙間は硬質ゴムにより漏水を防止している。試験片架台の長さは、試験片が往復通板時の待機位置にあっても定常的に滞留水を保持できるような長さとした。図2.20に水槽側方の様子を示した。

なお、下面試験時には図2.19(c)に示すように冷却面が架台の下面と同じになるようにしている。

上面下面の熱伝達特性の比較に際の図2.21に上面側のノズル配置、図2.22に下面側のノズル配置を示す。ノズル列はいずれも4列とし、ノズル種類を各2種類水量の違うものを配置している。ノズルはいずれもスプレーイングシステムズ製の口径1インチ、真鍮製、広がり角度100度、水量はそれぞれ23, 54, 78, 100 [L/min] (0.3 [MPa]時)のノズルである。ロールピッチは900 [mm]である。なお、ノズルと試験片の距離は上面とも145 [mm]となっている。

さらに、下面の冷却能力向上検討の試験では、図2.23に示すようなノズル主およびノズル配置とした。なお、ここでは、下面前面をスプレー衝突

域でカバーするためにノズルの長径を進行方向と平行に配置した。

2.2.3.3 鋼板冷却装置の検討時の冷却系

鋼板冷却装置の検討に当たっては、図2.24に示すように冷却帯長を760mmとして検討した。図2.25にノズルの配置を示している。図2.26には、冷却帯の下部の側面図を示す。ここでは、鋼板搬送時にロール間に鋼板の先端が落ち込むことを回避するためのエプロン板を模擬する天板を配置した。なお、表2.1には実験の際の試験条件を示した。試験に使用したノズルはいずれもフルコーンノズルであり、口径は3/4インチである。なお、上面側の試験においては下面と同じ水槽ノズル板を使用し、ノズルのみを交換しているため、配置は下面と同じである。なお、下面側ノズルと試験片の距離は80[mm]、上面側では600[mm]となっている。上面側は、鋼板の先端が反りなどして変形した場合に回避することを考慮した高さである。図2.27, 2.28に外観写真を示している。また、図2.29は鋼板の代わりにアクリル板をおき、噴流衝突時の様子を観察したものであり、円形の白い部分が噴流衝突部である。線状に見えるのはノズル間で噴流が衝突している部分である。図2.30は上面から噴射している様子である。

なお、本装置は鋼板温度が1000℃以上と高い場合を想定している。

2.2.4 鋼材冷却試験時の試験方法

試験時は、試験片を加熱炉に入れて所定の温度（900℃、1100℃）まで加熱し10分間保持した後、炉から取り出し、試験片題に設置して、あらかじめ水量をセットした冷却帯に通して冷却を行う。

加熱炉に試験片を入れる際には、図2.31に示すように、SUS304の15[mm]厚で200[mm]×300[mm]の大きさの板を加熱炉内にセットして、試験片の冷却面をSUS304板に合わせておき、炉内雰囲気暴露しないようにして酸化を抑制している。なお、加熱炉には窒素を導入し、試験片の酸化を抑制しているが、冷却面を炉内雰囲気暴露すると、酸化膜厚みは900℃時で70[μm]以上になり、冷却時の熱応力による酸化膜剥離が起こる個所が発生することがある。SUS304面に冷却面を合わせておくと酸化膜厚みは20～30[μm]と薄く、剥離することはほとんどなかった。これにより、試験片内での酸化膜厚みによる冷却能力ばらつきを抑制している。

試験片は、1回使用の後、酸化膜を#250のペーパーで落として、3回まで使用している。試験片は酸化膜の付着研削により、熱電対の表面までの距離が変化するのと、片面冷却であるために、反り変形が激しく、試験片と架台の隙間から水が漏れるようになるためである。

冷却架台に乗せた試験片は図2.32に示すように、冷却帯で所定の速度になるように冷却帯から加速時間を確保できる位置に設置され、通過後は3

0 [sec]保持して復熱させてから次の冷却に入る。なお、運転は自動運転として、復熱時間が不安定にならないようにしている。この際、停止位置は前出のように冷却帯までの加速時間を確保できる位置で停止するようにしている。なお、設定は加減速時間を1[sec]とし、所定の通板速度までの加減速距離を下式で計算した距離以上としている。

$$L_c = V \cdot (1 + 0.2) / 2 \quad (2.8)$$

L_c : 冷却帯からの試験片停止位置 [m]

V : 通板速度 [m/sec]

2.2.5 熱伝達特性の評価方法

試験片の冷却を行った際の温度推移を図 2.33 に示す。表層から 1 [mm] 点は冷却の際の温度低下が大きく、9.5 [mm] 点は表層冷却の効果がやや遅れて現れている。この温度推移から熱伝達特性に変換するために、Beck の方法に基づく逆算により表面の熱流束・表面温度を求める方法と、図 2.34 に示すように、冷却帯を 1 回通過した際の中心部の温度降下を復熱時の表面輻射や自然対流による温度降下を差し引いて評価した。なお、この温度降下を冷却帯における平均的な表面熱伝達率を用いたコントロールボリューム法による熱伝導計算から求めた値と比較して熱伝達率も求めている。図 2.35 にその一例を示す。

2.2.6 ノズル特性の評価

2.2.6.1 噴流衝突圧力分布測定方法

鋼板冷却装置の開発においては、水を鋼板に噴射させる際に用いる水ノズルの特性を定量化することが必要である。たとえば、現在、日本では水ノズルを製造する会社は 3 社あり、購買上、性能上の理由から比較することを求められる場合がある。あるいは、ノズルの仕様として、広がり角度や、水量を最適化する必要がある。また、同じ水量を使用してもノズル構造によっては、冷却能力を向上させることも可能になる場合がある。また、水量が少な

い場合は衝突圧力が小さく測定が困難であるが、冷却能力には水量分布ではなく衝突圧力分布の影響が大きいと推定される。山本ら[32]は、単一ノズル内での衝突圧力分布、水量分布と静止板における限界熱流束域の冷却能力を測定し、特に斜めに水流が当たる部分においては水量分布ではなく、衝突圧力分布と冷却能力の関係が対応していることを示している。

そこで、ここでは、図 2. 37 に示すような山本らの装置を用い、ノズルの衝突圧力測定を行った。装置は、下面からのノズル噴射を下向きに設置した圧力センサーで測定できるようにしており、圧力センサーを X Y テーブル上で動かすことにより測定している。そして、サンプリング時間を 10 [msec] として走行速度をたとえば、5 [mm/sec] とすることにより、5 [mm] 走行内のデータ数を約 100 点として平均化して圧力分布を求めている。

2.2.6.2 ノズルの構造と衝突圧力分布

鋼板の冷却装置の開発においては、向上において限られた水供給能力を有効に生かすために極力少ない水量で冷却能力を向上させることが求められる。このため、ノズル内の圧力損失を低減することによって、ノズル入口圧力、水量が同一でも、ノズルからの吐出速度を向上させることを考え、ノズル内構造を変更した。ここでは、フルコーンノズルに関する検討を行っている。従来のフルコーンノズル構造は、図 2. 39 に示すようにフラットベーンが

用いられている。ベーンとは、薄い板の円周上に斜めに流路が設けられており、その流路を水が通過することによって水流に旋回が与えられて、先端部から吐出する際にフルコーン（充円錐）状に水流が広がるのである。このベーンの出側の中央部は流れがないために、周囲の旋回流により、渦が生じ、その分流体の持つエネルギーを損失させてしまう。そこで、図 2. 4 0 に示すように、ベーンの出側中央部に突起を設置し、渦の発生を抑制する構造とした。この構造を図 2. 4 1 に示した、ノズル広がり角度 15 度、高さ 450 [mm]、ノズル水量 23 [L/min]（0.3 [MPa]時）という条件のノズルに適用し、圧力分布を測定したところ、最大圧力部の面積が向上していることが判別できたので、以降本構造を採用している。ただし、広がり角度の広いノズルではベーン中央部に開口部を設けて中心部に水を供給しないと充円錐ではなく、円錐内部に水が流れないホローコーン状の流れになってしまう。したがって、本構造は広がり角度の狭いノズルにのみ適用される。

次に、フルコーンノズルの広がり角度の影響について測定した結果を図 2. 4 2 に示した。わずか 5 度の広がり角度の違いであるが、広がり角度 10 度のノズルの方が衝突圧力が高いことが分かる。衝突面積としては 1.2 kPa 以上の領域はほぼ同じであるため、広がり角度 10 度のものを選定している。これは広がり角度の違いにより、中心部の平面への衝突角度が大きい領域が増えたためと考えられる。

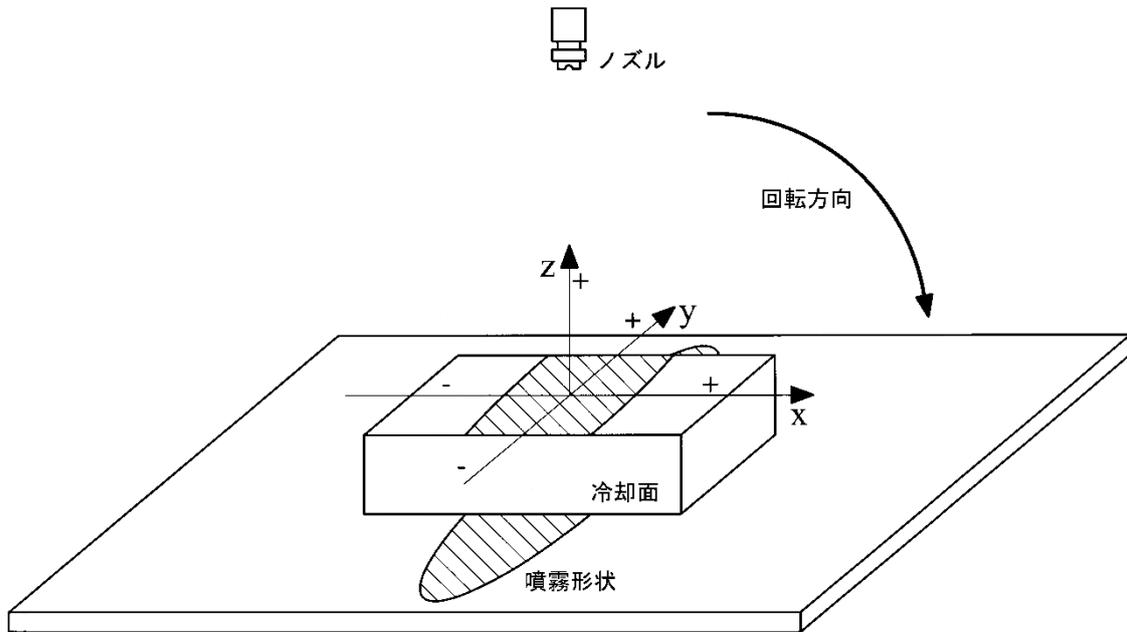


図 2. 1 ノズルと冷却面の位置関係と座標軸

VE
シリーズ

均等扇形ノズル

Even Flat Spray Nozzles

【特 性】

- スプレーパターン全域にわたり均等な流量分布の扇形噴霧を発生。
- 単位面積当たりの打力が均一。

【標準圧力】
3kg/cm²

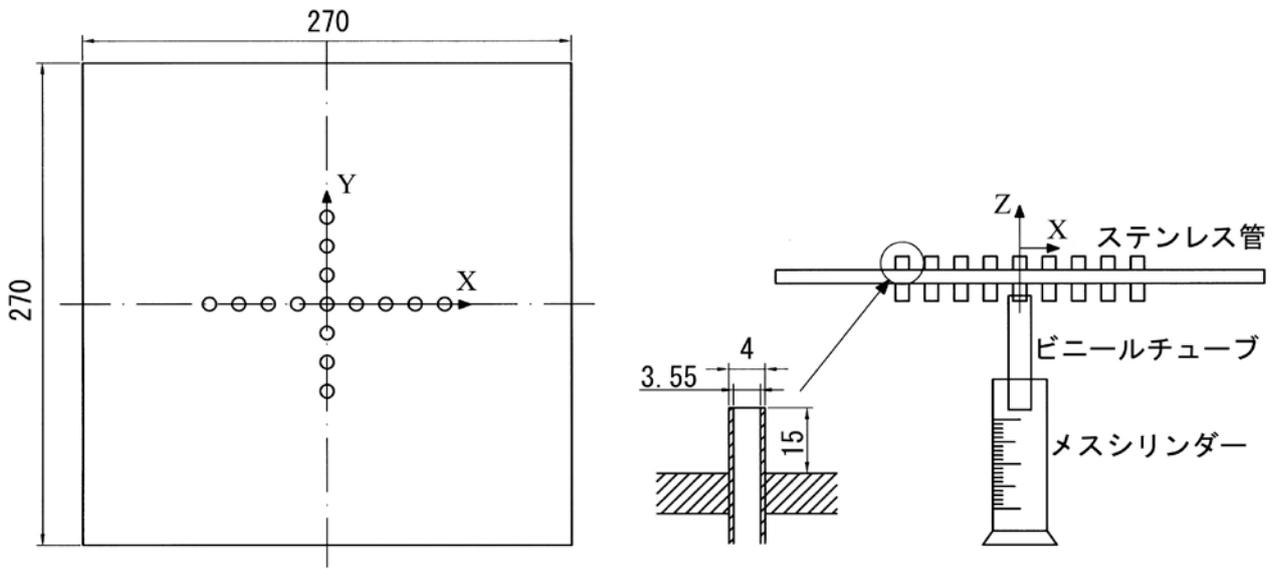
【主用途】
 洗浄：自動車、車輪、コンテナ、フィルム、フィルター、フェルト、スクリーン、びん、土砂、砕石、金属、金属部品、機械、銅板、銅片、撥材、各種容器など。
 散布：エッチング液、油、洗剤、薬液、酸液、防虫・防除剤、除草剤、水溶液など。
 冷却：ガス、煙、熱交換器、タンク、銅板、銅片、屋根など。
 水霧：防火、消火、防熱、防塵、防臭など。

噴霧形状の均等性を示すグラフ

【スプレーパターン】

【流量分布】

図 2. 2 均等扇形ノズル、ノズル特性⁽¹²⁾



(a) 平面図

(b) 側面図

図 2. 3 液滴流量密度測定器

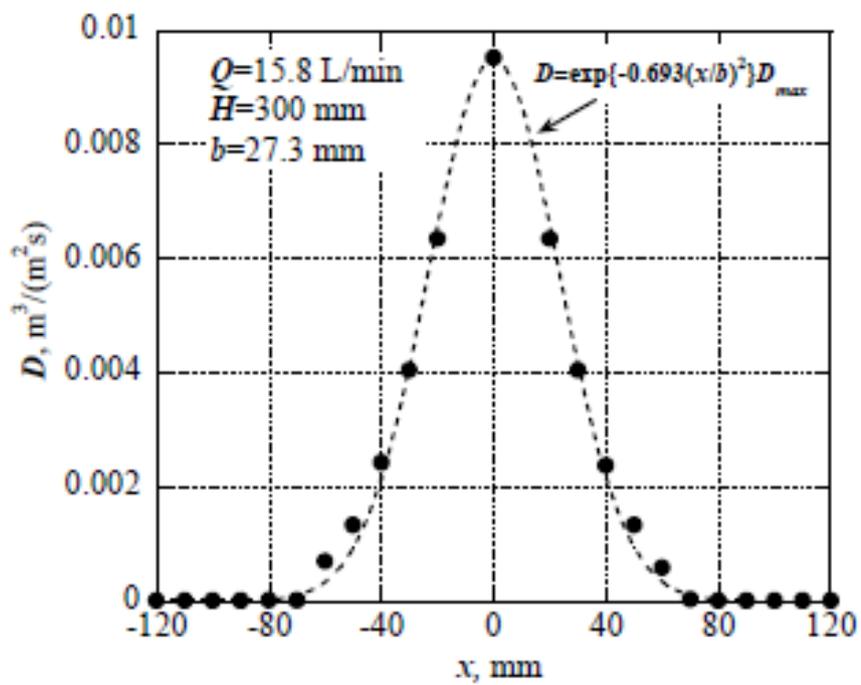


図 2. 4 液滴流量密度分布 ($Q=15.8\text{ l/min}$, $H=300\text{ mm}$)

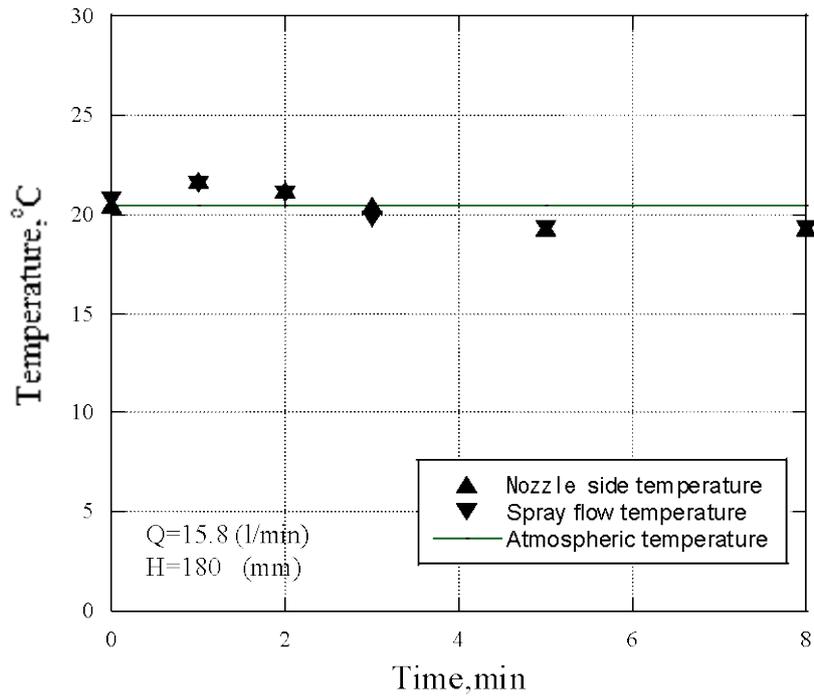


図 2. 5 時間と液滴平均温度の関係

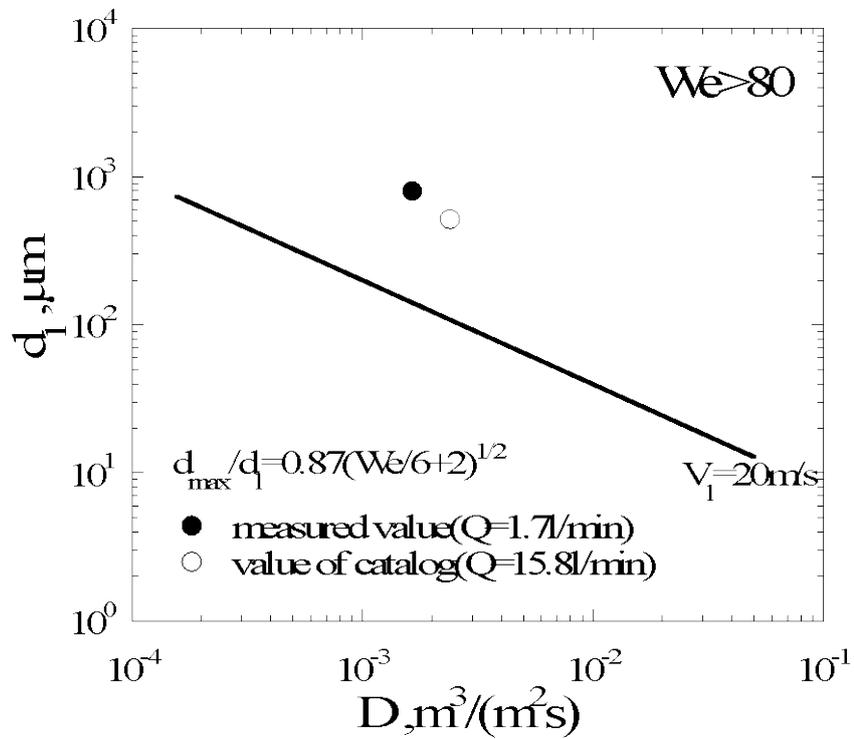


図 2. 6 液膜形成条件

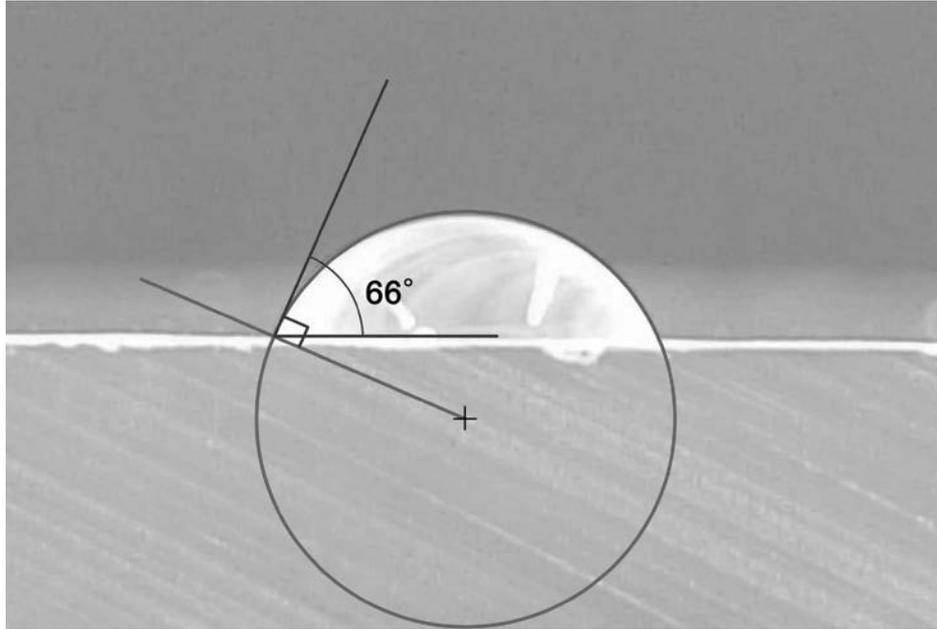
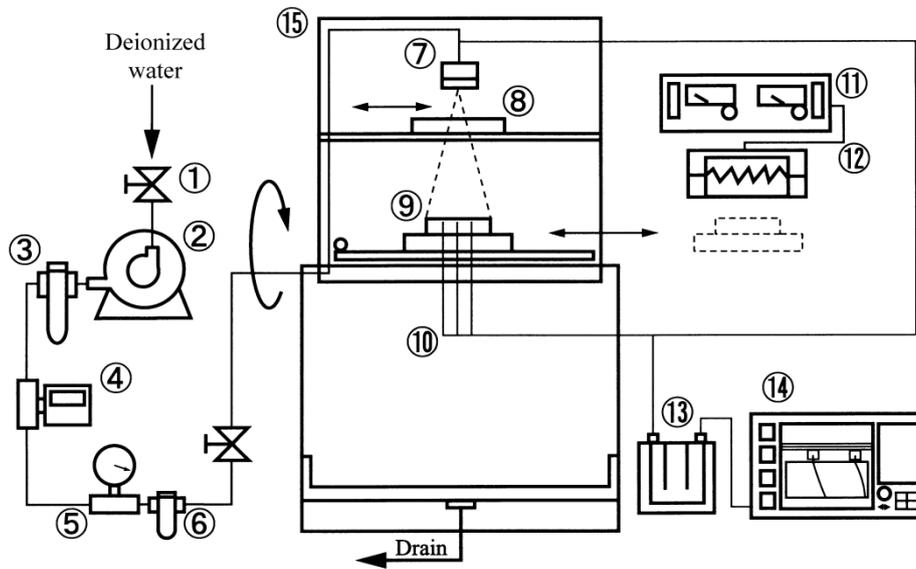


图 2. 7 接触角测定状况



- | | |
|-----------------|-------------------------------|
| 1. Valve | 9. Heat transfer plate |
| 2. Pump | 10. Thermo-couple |
| 3. Filter | 11. A.C. power supply |
| 4. Flow meter | 12. Infrared heater |
| 5. Regulator | 13. Cold junction |
| 6. Strainer | 14. Pen recorder |
| 7. Spray nozzle | 15. Rotating experimental box |
| 8. Shutter | |

图 2. 8 实验装置概略图

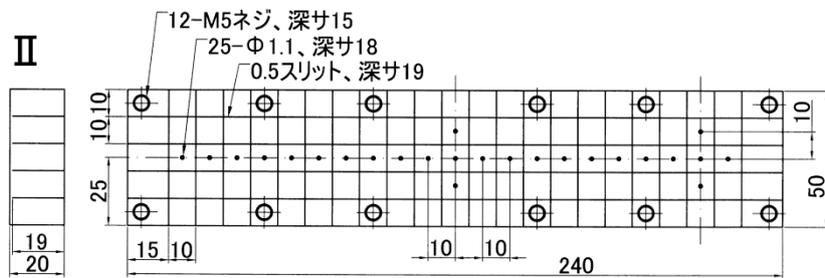


図 2. 9 冷却板概略図

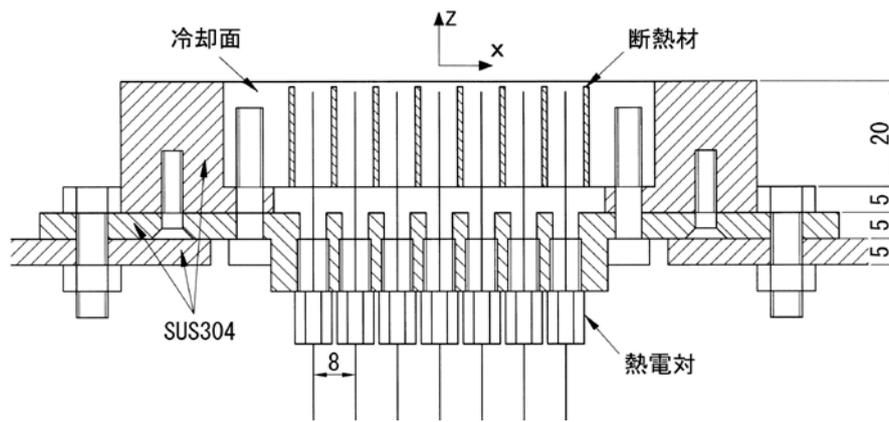


図 2. 10 冷却部概略図

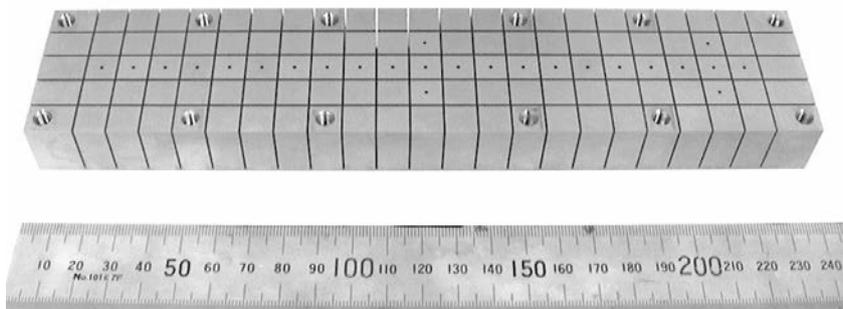
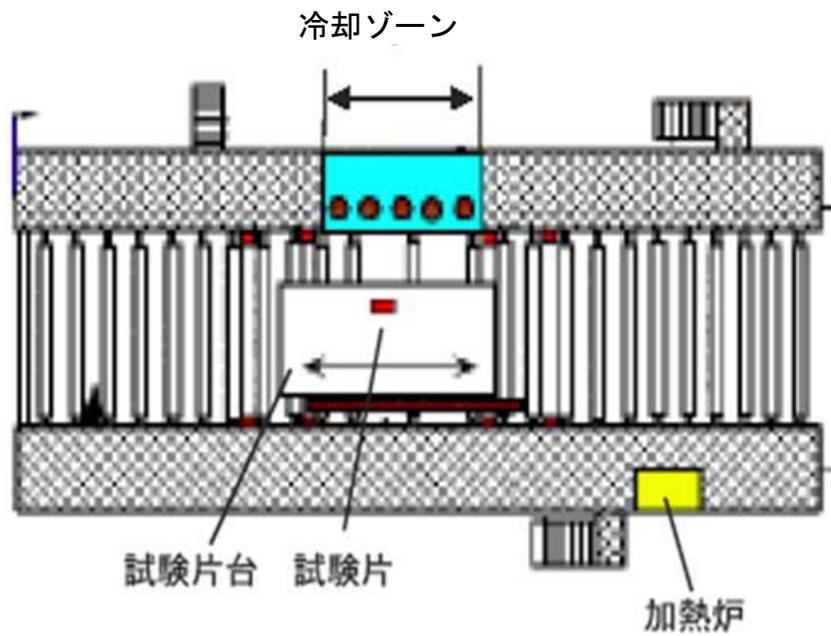


図 2. 11 冷却面 (冷却板)



冷却テーブル	チェーン駆動往復式
通材速度	最大 2.5m/sec
テーブル幅	1100mm
冷却水供給	ポンプにて屋外貯水池と循環

図2. 12 移動鋼板冷却試験装置概要



図 2. 1 3 試験装置外観写真

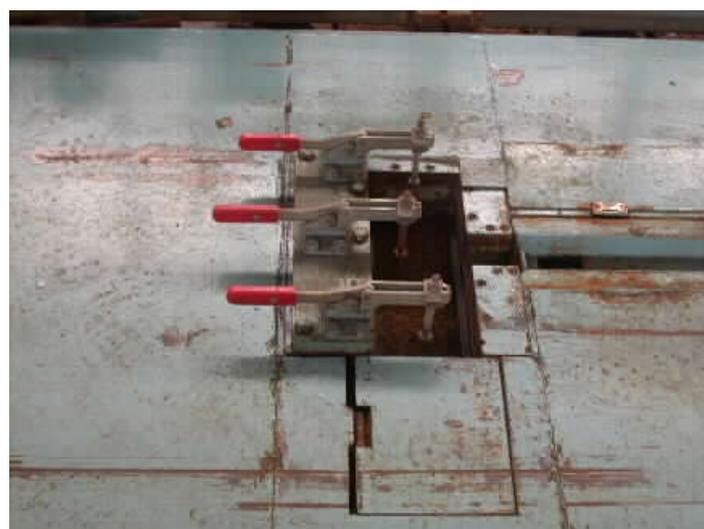


図 2. 1 4 試験片設置位置拡大

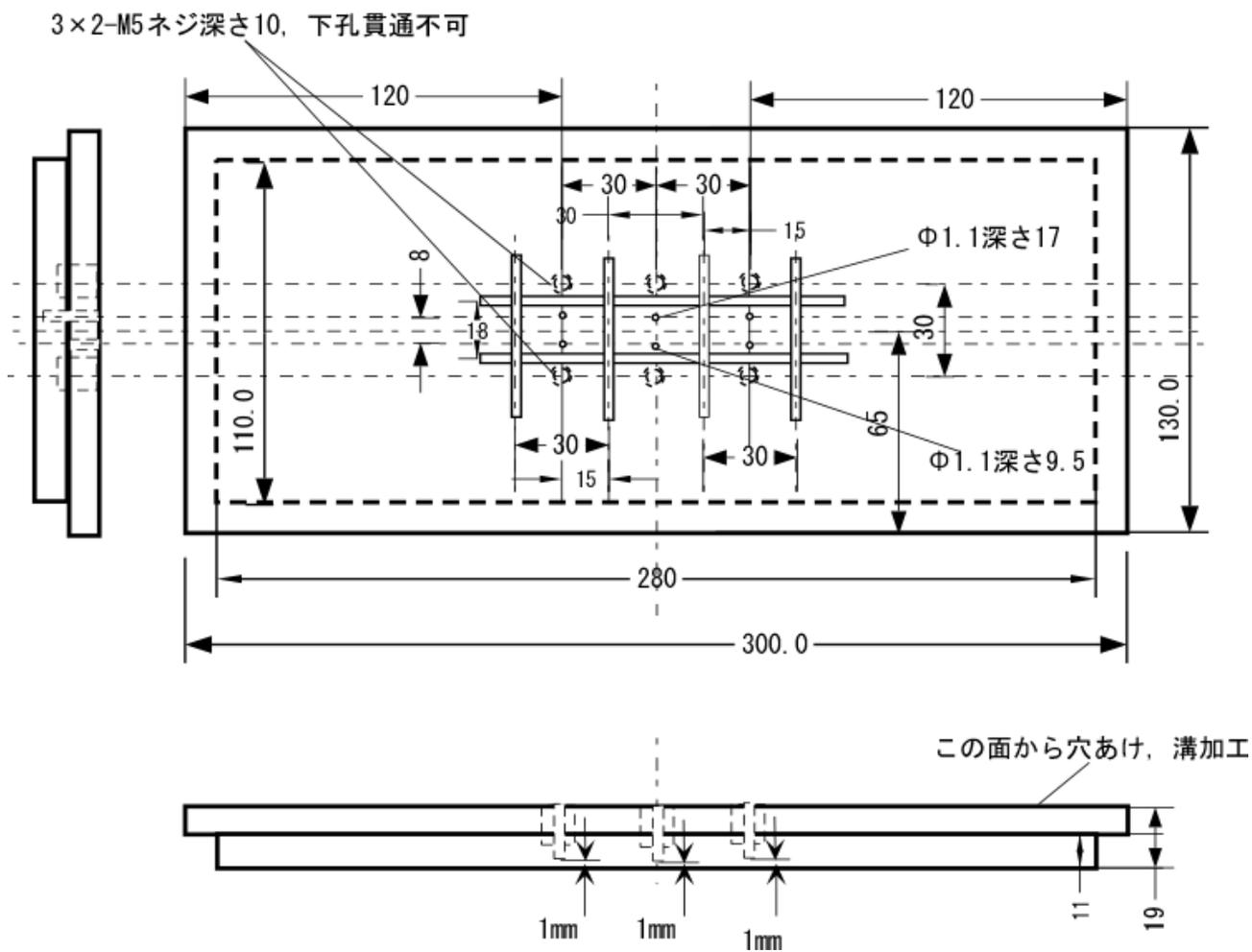


図2. 15 下面用試験片

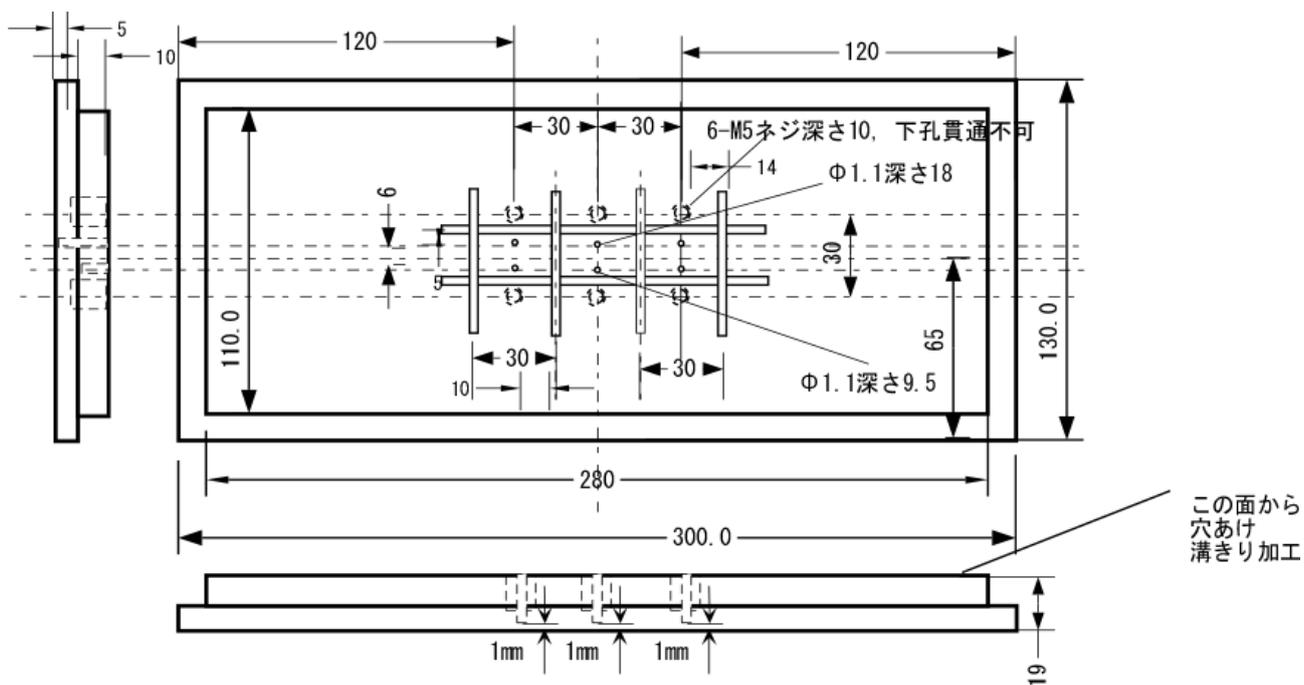


図2. 16 上面用試験片

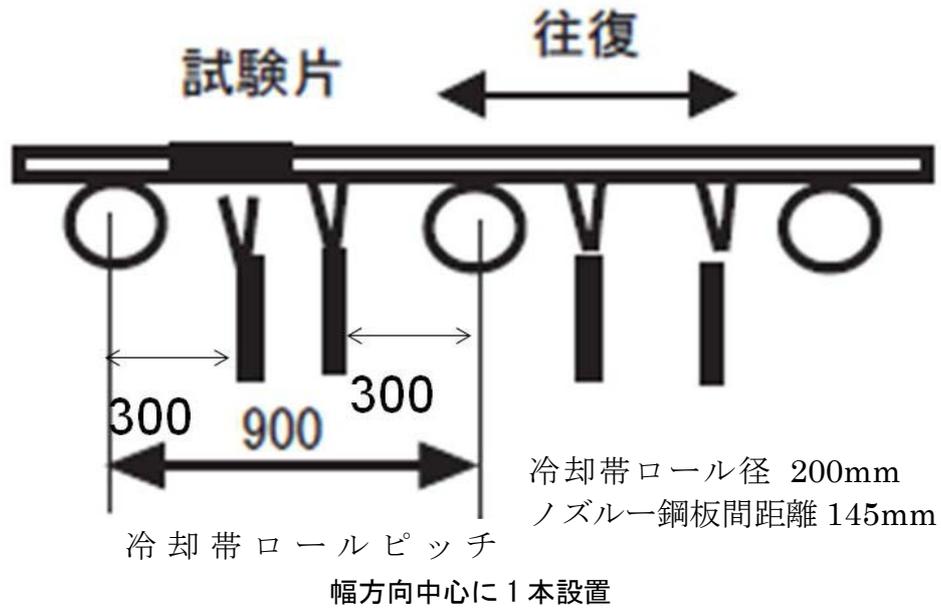
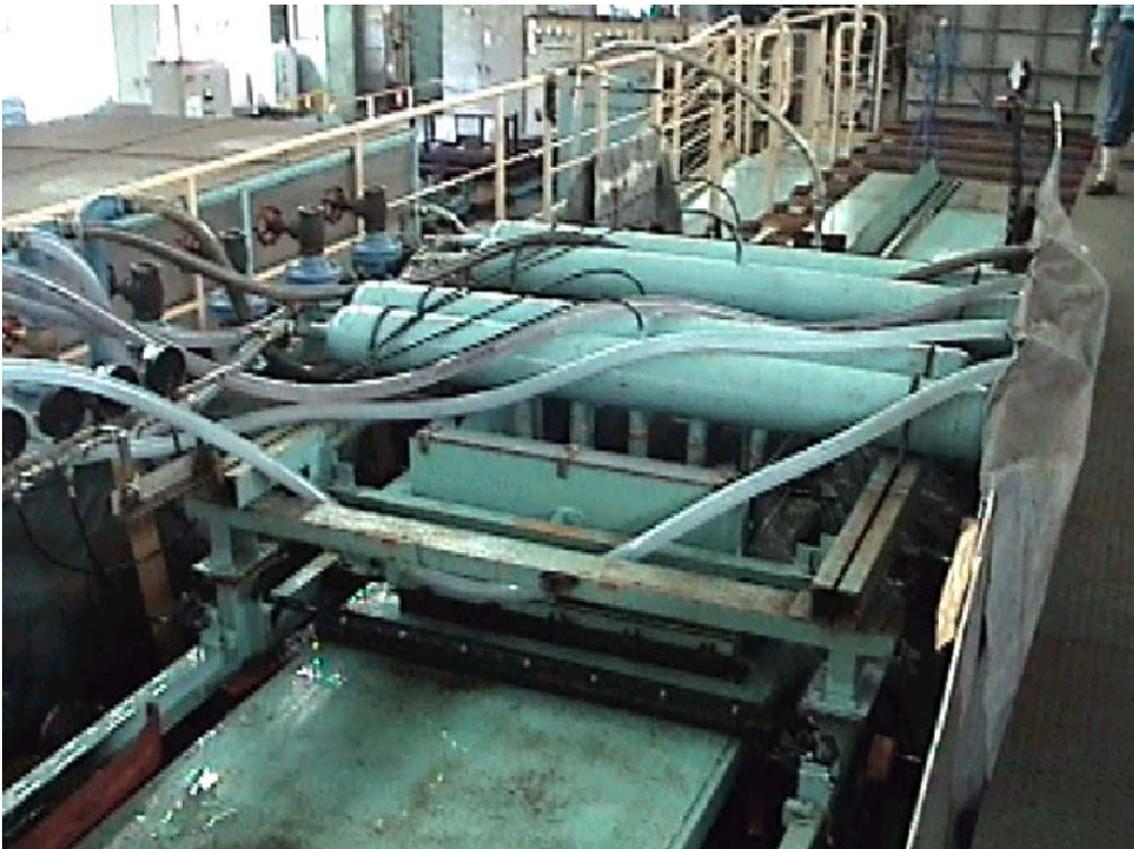


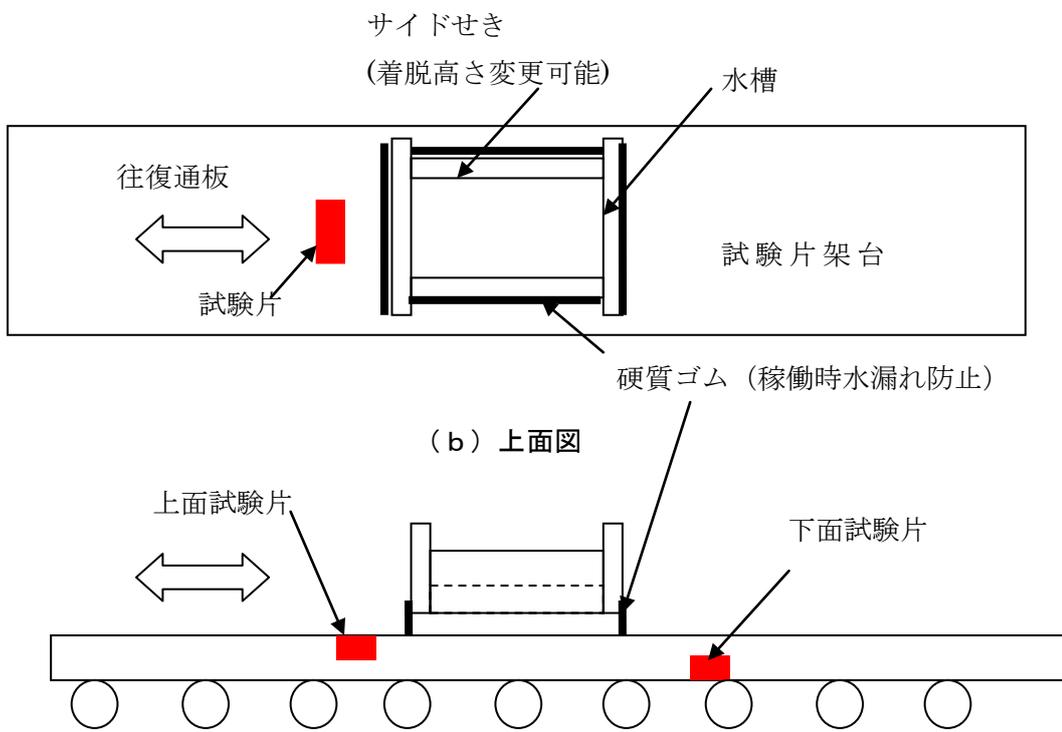
図2. 17 下面移動鋼板試験時ノズル位置



図2. 18 下面噴流衝突状況

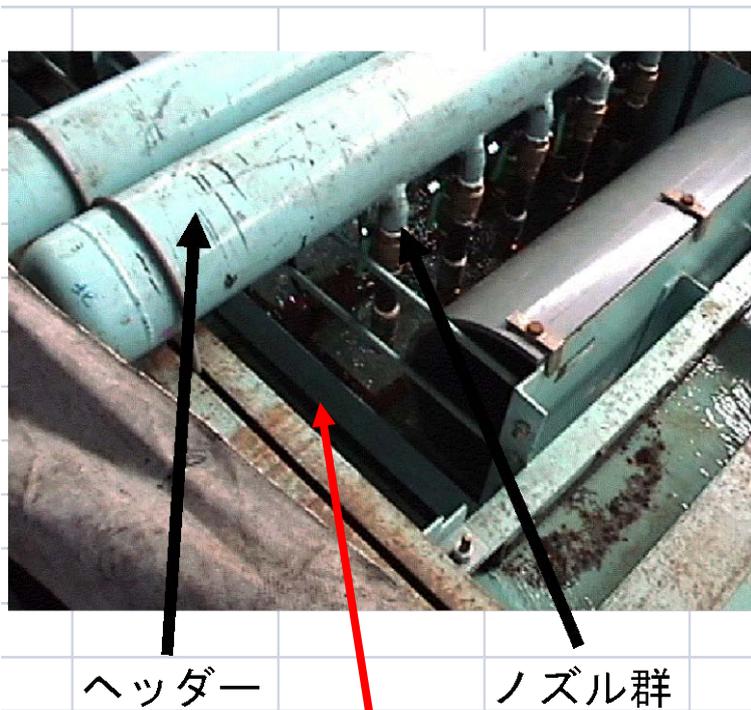


(a) 外観写真



(c) 側面図

図 2. 19 上面冷却時の水槽設置状況

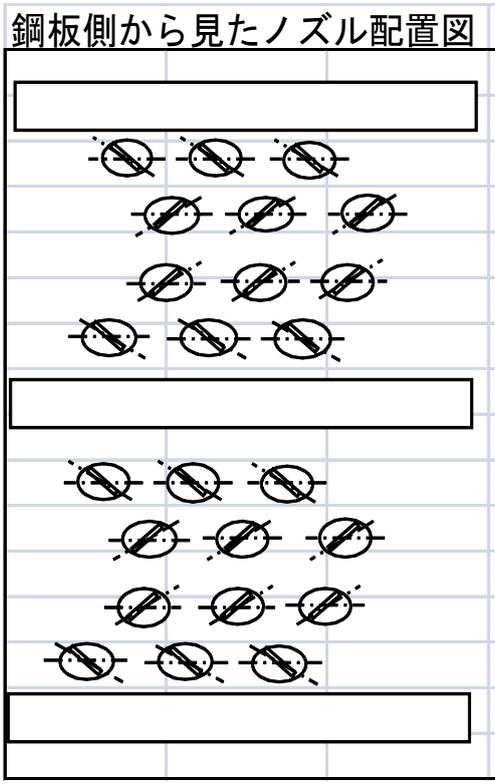


ヘッダー

ノズル群

サイドセキ(着脱高さ変更可能)

図2. 20 ヘッダーおよびノズル設置外観



スプレーノズル

図2. 21 上面側ノズル配置

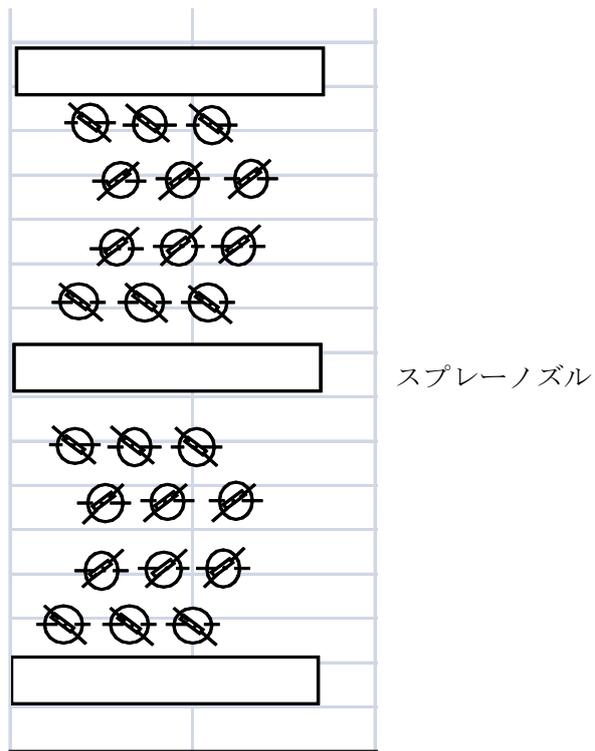


図 2. 2 2 下面側ノズル配置

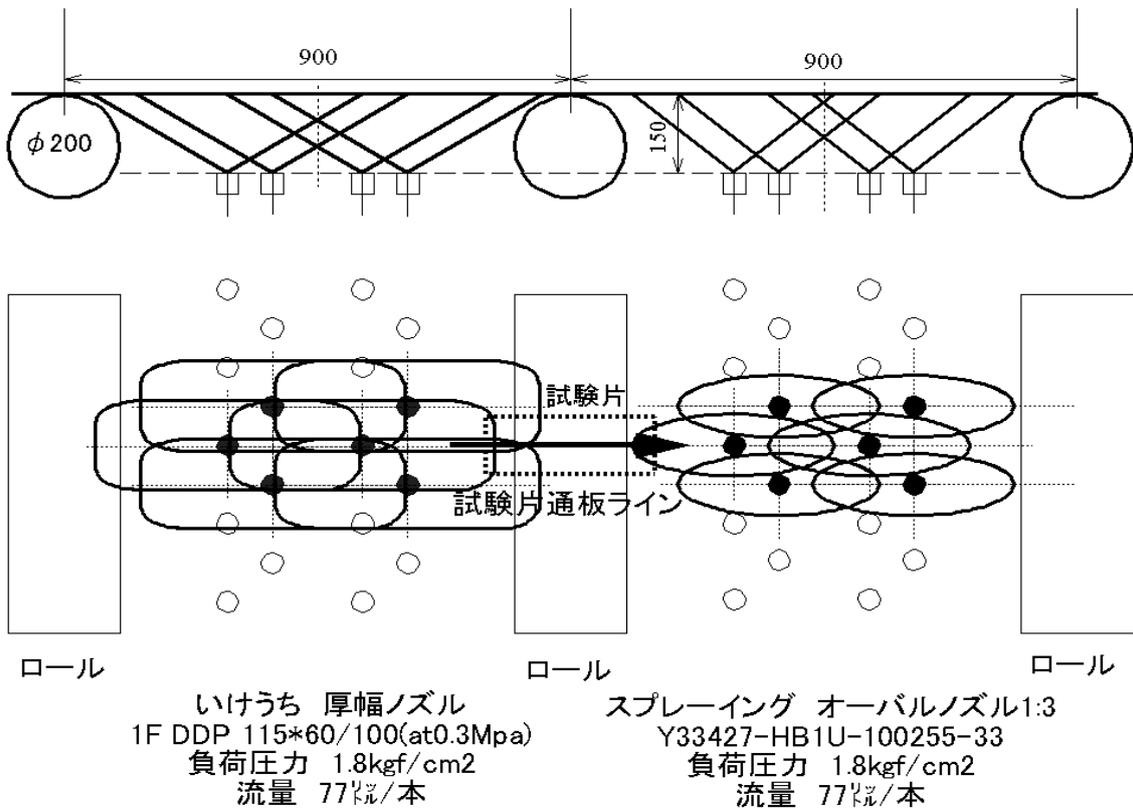


図 2. 2 3 下面冷却能力向上探索試験時 ノズル配置

冷却ゾーン 760mm

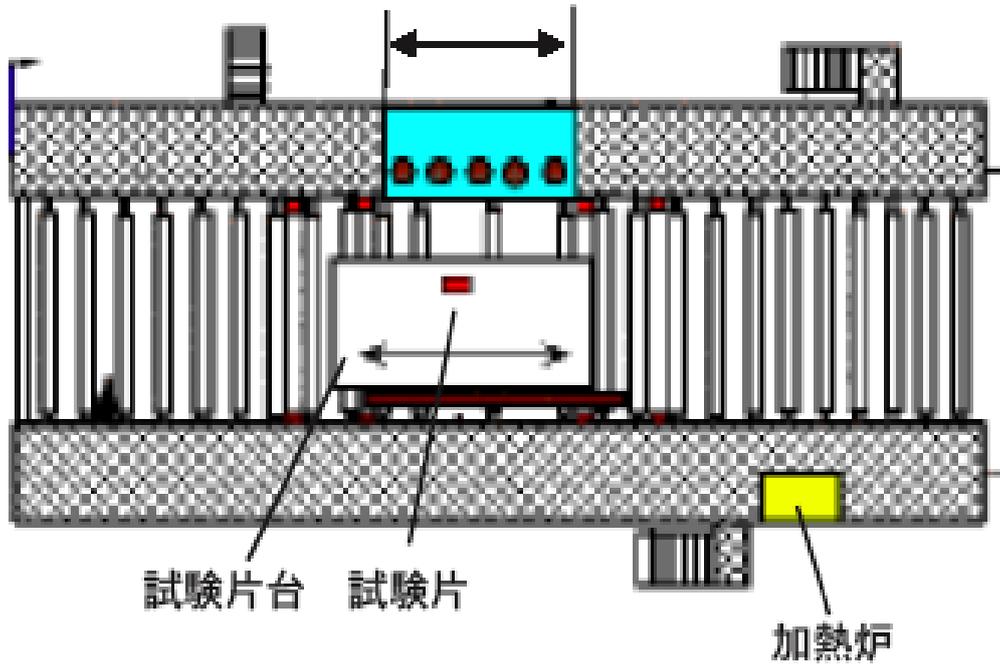


図2. 24 冷却装置開発時の冷却帯長

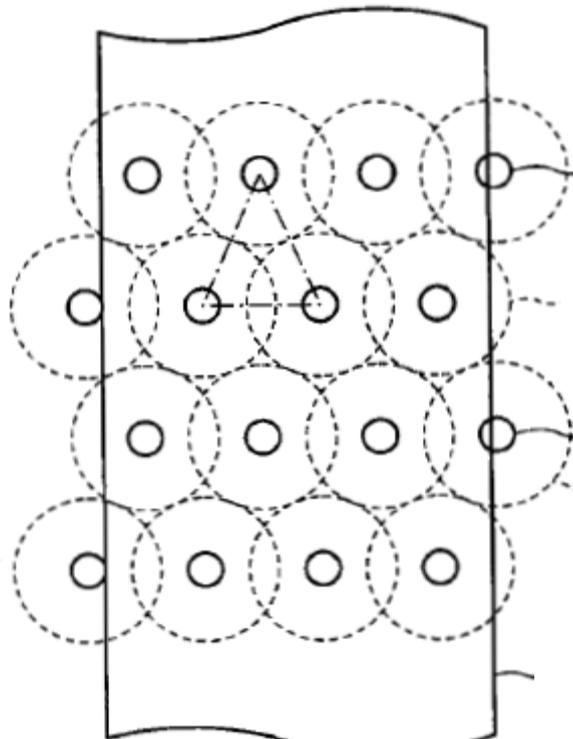


図2. 25 冷却ノズルの配置

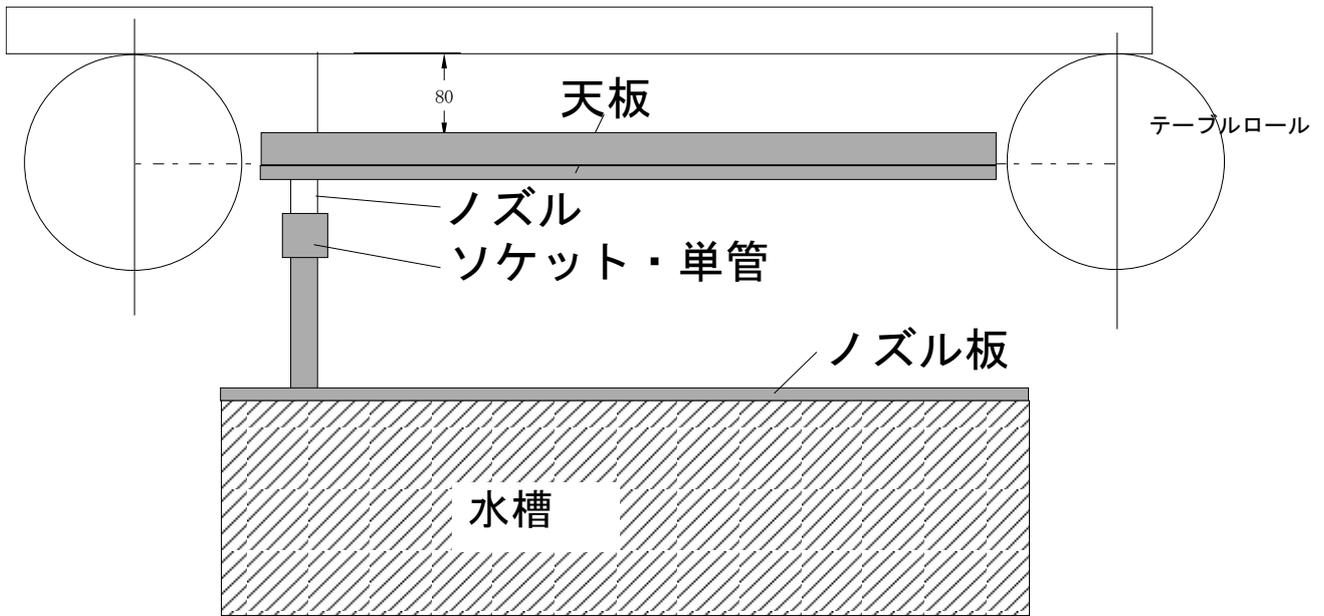


図 2. 26 下面試験時の側面図

表 2. 1 冷却装置検討試験条件

①下面広がり角度変更後の冷却能力試験				
・下面角度変更に伴う試験を行う.				
	広がり角度	ノズル水量	ノズル水圧	水量密度
	度	L/min	Mpa	m ³ /m ² /s
	60	42	0.3	7.4X10 ⁻²
	75	42	0.3	7.4X10 ⁻²
・上面水量変更時の冷却能力把握(下面との均一性検討)				
	広がり角度	ノズル水量	ノズル水圧	水量密度
	度	L/min	Mpa	m ³ /m ² /s
	10	19	0.3	3.3X10 ⁻²
	10	25	0.3	4.4X10 ⁻²
	10	34	0.3	6.0X10 ⁻²

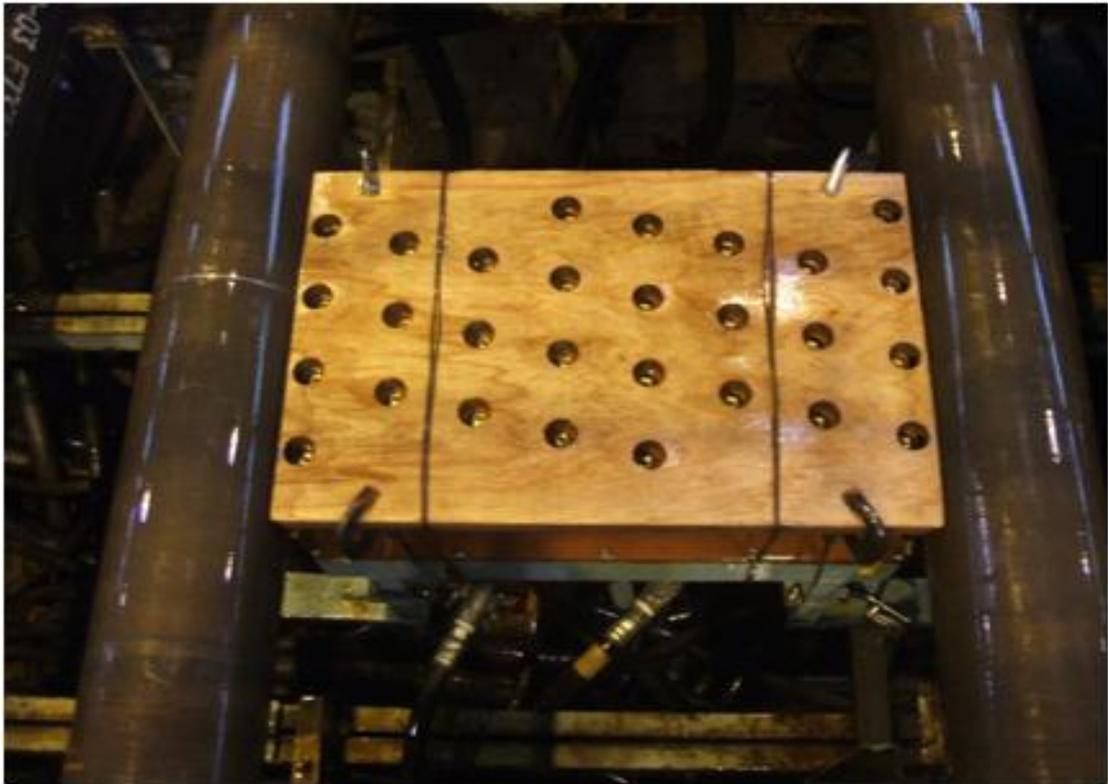


図 2. 27 下面の試験用ノズル設置状況（上面からみた様子）



図 2. 28 下面の試験用ノズル設置状況（側面からみた様子）



図 2. 29 下面の試験用ノズル噴射状況（上面）



図 2. 30 上面の試験用ノズル噴射状況（側面）

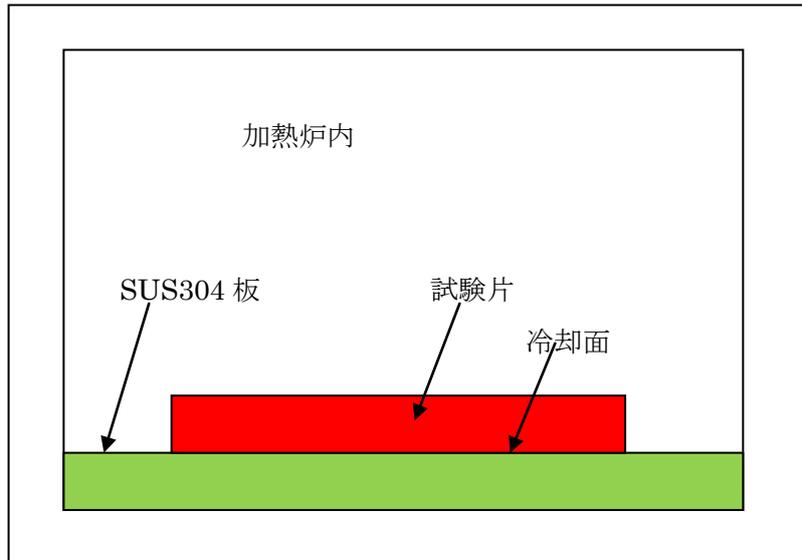


図 2. 3 1 加熱炉内での試験片設置図

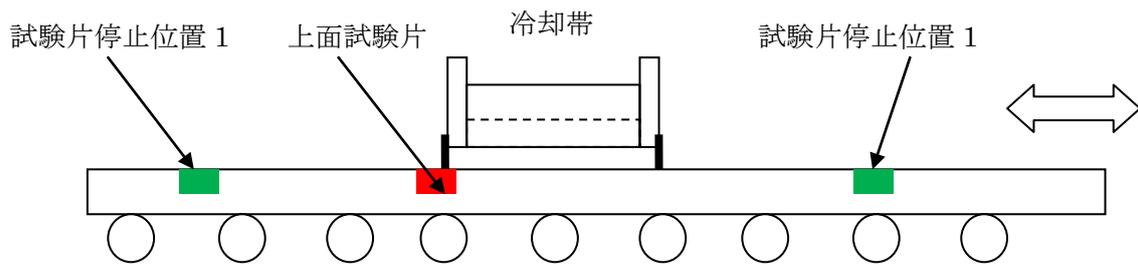


図 2. 3 2 試験片停止位置

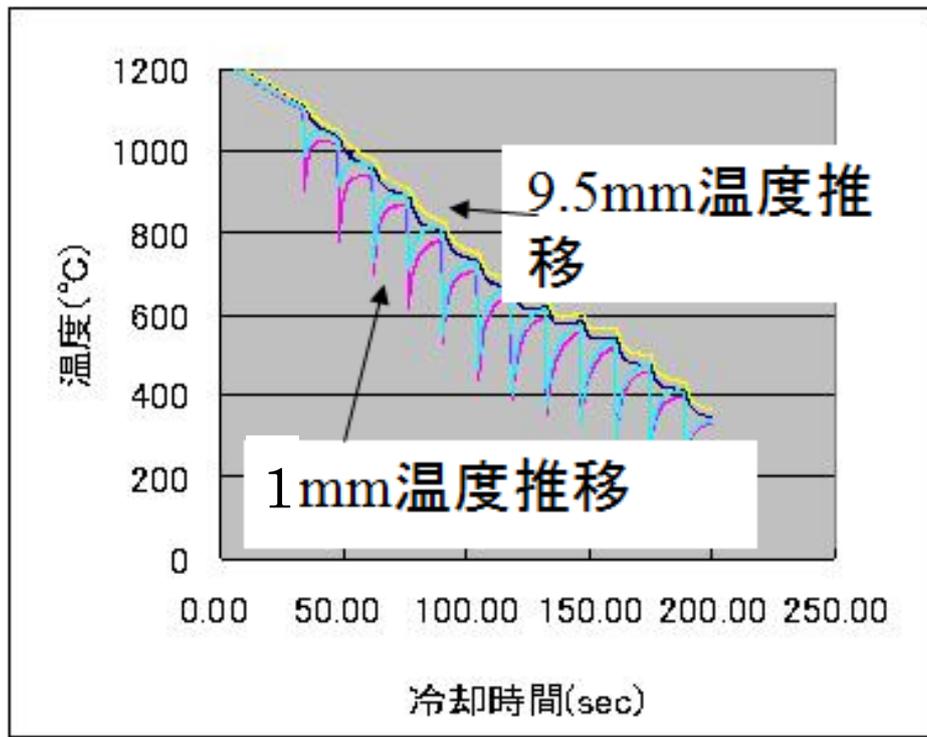


図2. 3.3 試験時の試験片の温度降下の時間推移の例

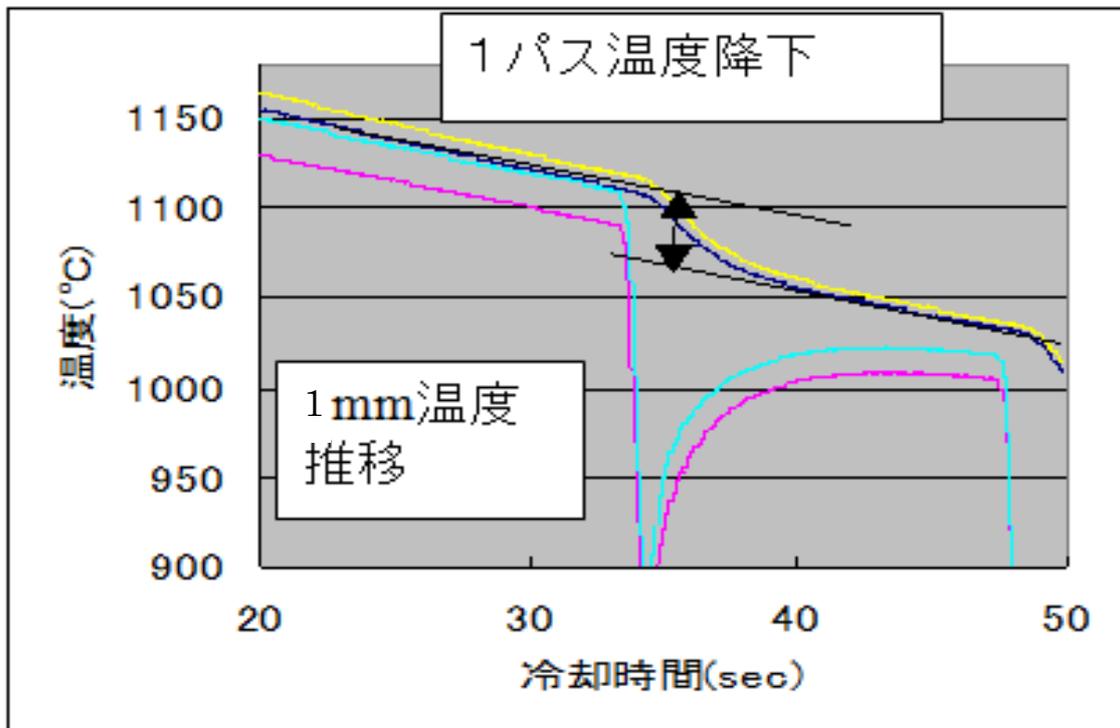


図2. 3.4 試験片の1パス後の待機時の温度降下から冷却温度降下を求める説明図

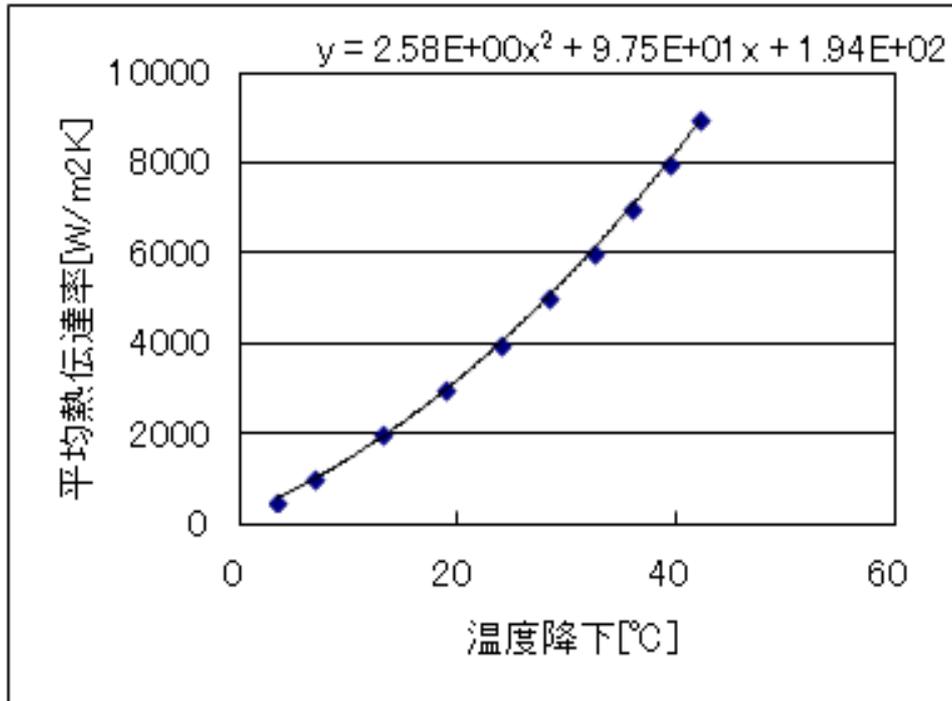
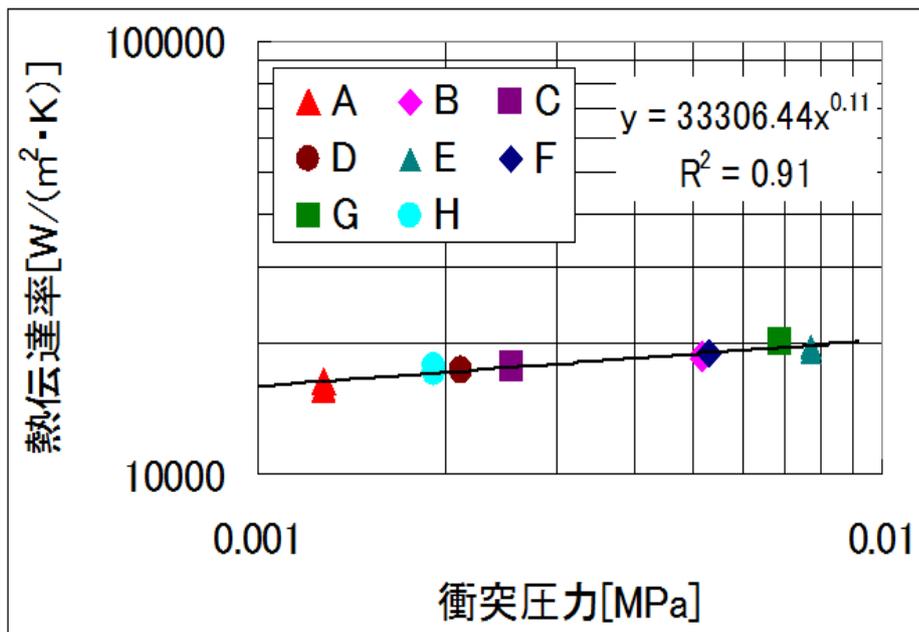


図2. 35 温度降下と熱伝達率の変換例



	ノズル種類	流量	ヘッド圧力		ノズル種類	流量	ヘッド圧力
A	オーバル(衝突型)	100 l/min	0.3MPa	E	フルコーン	100 l/min	0.3MPa
B	オーバル(オリフィス型1)	100 l/min	0.3MPa	F	オーバル(オリフィス型4)	50 l/min	0.3MPa
C	オーバル(オリフィス型2)	100 l/min	0.3MPa	G	オーバル(オリフィス型4)	65 l/min	0.5MPa
D	オーバル(オリフィス型3)	33 l/min	0.3MPa	H	オーバル(オリフィス型2)	65 l/min	1.25MPa

図2. 36 衝突圧力と冷却能力の関係

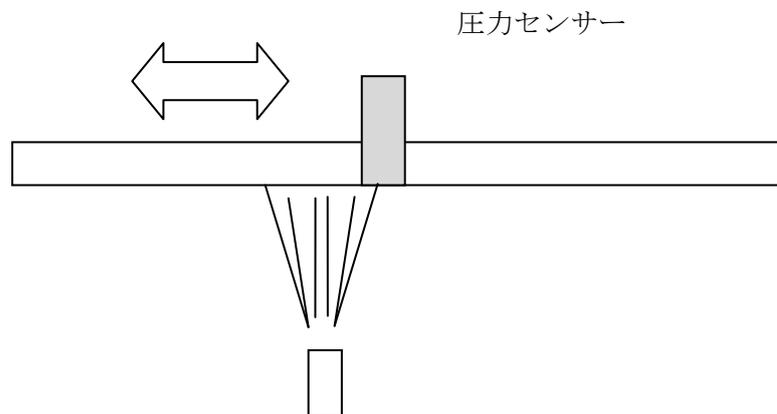
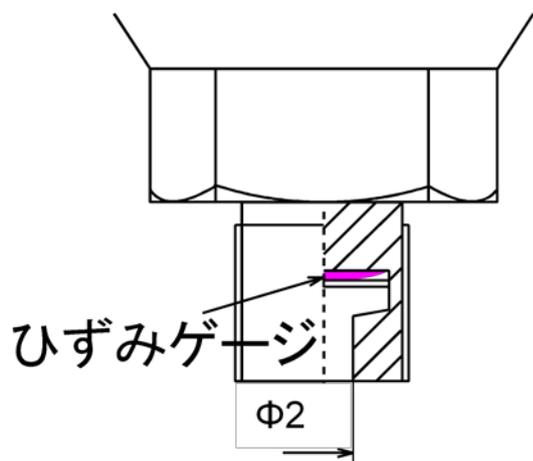


図 2. 3 7 ノズル衝突圧力測定装置



長野計器製 圧力センサKH15

レンジ:0~0.1MPa

公称精度:1%=0.001MPa

ノズル-センサ間距離 150mm

サンプリング間隔:0.01sec

図 2. 3 8 使用した圧力センサーと仕様

フラットベーン

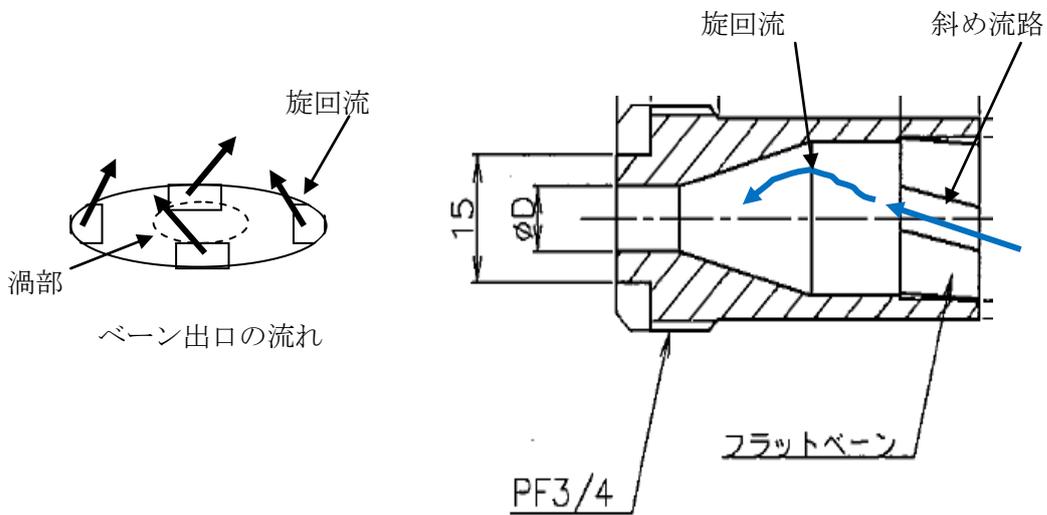


図2. 39 従来フルコーンノズルイメージ図

トップベーン

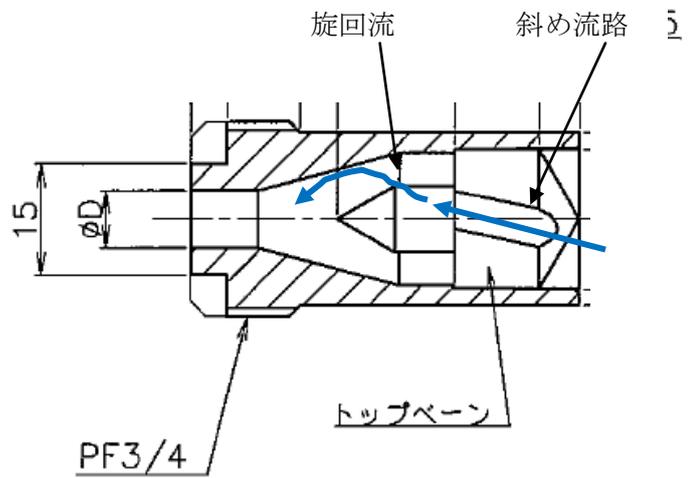
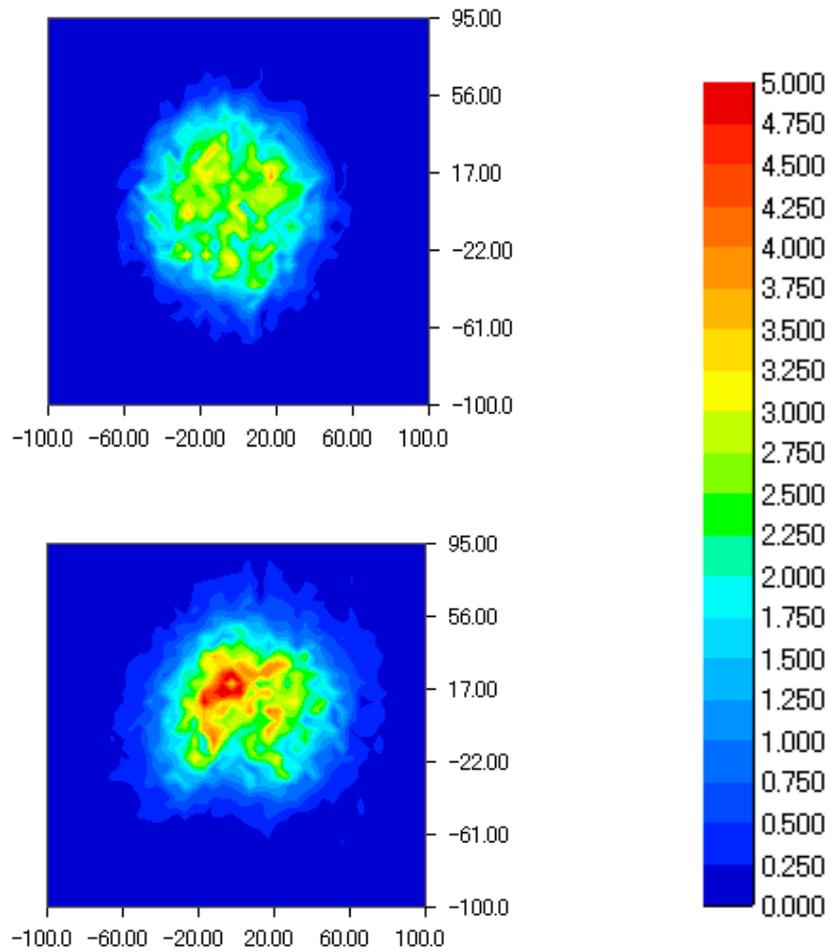
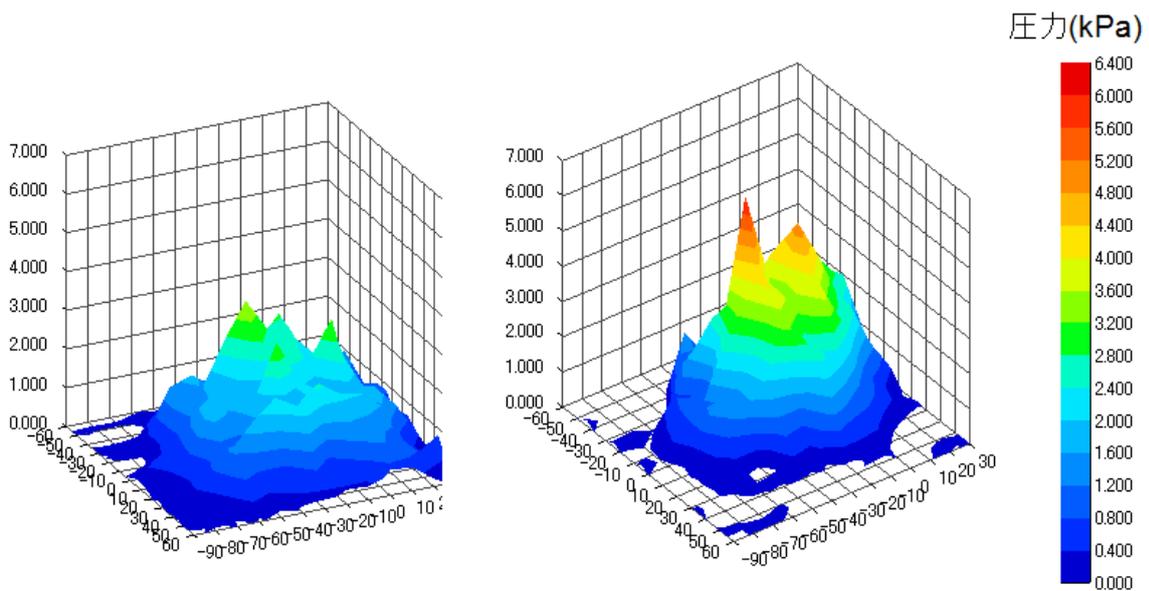


図2. 40 開発したフルコーンノズルイメージ図



ノズル広がり角度 15 度、高さ 450mm、ノズル水量 23 L/min (0.3MPa時)

図 2. 4 1 内部ペーン改造時の衝突圧力測定結果



(a) 広がり角度 15 度 (b) 広がり角度 10 度

ノズル水量 23 L/min (0.3MPa時)

図 2. 4 2 高さ 600mm 時のノズル角度による衝突圧力変化

第 3 章． 静止状態での伝熱面姿勢の影響に関する実験結果および考察

3. 1 伝熱面姿勢変化時の噴霧液膜状態のモデル化

3. 2 伝熱面姿勢変化時の伝熱特性

3. 2. 1 冷却曲線と噴霧冷却熱伝達特性

3. 2. 2 高温域熱伝達率，遷移域熱伝達率

3. 2. 3 高温域下限界温度、限界熱流束上限温度

3. 3 静止伝熱面姿勢変化時の試験のまとめ

第 3 章 静止状態での伝熱面姿勢の影響に関する実験結果および考察

本章では、静止状態での伝熱面姿勢の影響に関する実験結果および考察について述べる。

3.1 伝熱面姿勢変化時の噴霧液膜状態のモデル化

観察結果の一例を図 3. 1, 3. 2, 3. 3 に示す。なお、観察時の写真は、撮影状態の良い低流量時のものである。噴霧流は伝熱面上の $x = 0$ に衝突して広がっていく。

観察した結果、噴霧中心より距離が離れるにしたがって形成される液膜の状態が違ふことから図 3. 4, 3. 5, 3. 6 に示すようなモデル図を提案した。また、それに従い、 x_1, x_2, x_3, x_4, x_5 という境界を定義し、中心からの距離を求めた結果を図 3. 7, 3. 8, 3. 9 に示す。

水平上向き平面系の場合、図 3. 4 に示したように、噴霧流中心近傍の衝突域では、肉眼では厚さを認識できない程度の薄液膜が形成される（図中の $x=0 \sim x_1$ ）。噴霧中心位置から離れるにしたがって、滴状の液膜が形成され、この滴状の液膜同士が合体しながら成長し（図中の $x = x_1 \sim x_2$ ）、肉眼でも液膜厚さが確認できる二次液膜を形成する（図中の $x = x_2 \sim$ ）。

また、下向き平面系では、図 3. 5 に示したように、板上水が重力の影響で

落下する領域が出現する（図中の $x=x3\sim$ ）。この系では、液膜が落下するために二次液膜は確認できなかった。

これらに対して、鉛直平面系では、図 3. 6 に示したように、 x の + 方向と - 方向で現象が異なる。+ 方向では、滴状の液膜同士が合体する領域は確認できなかったが、筋状の液膜がほぼ等間隔に形成される（図中の $x=x4\sim$ ）。筋状の液膜の間には滴状の液膜の存在が認められたが、合体し成長する過程で板状から離脱することが確認できた。一方、 x の - 方向では、流量 $15.8[l/min]$ での観察時にのみ筋状の液膜が形成される前に液滴が跳ね飛ぶ現象が確認できた。この現象を反跳現象と名づけ、確認できた位置を $x5$ とする。

この $x1$, $x2$ の噴霧流量密度に伴う変化を図 3. 7 に示す。水平上向き平面系においては、噴霧流量密度が変化しても $x1$, $x2$ は大きく変化していない。この $x1$, $x3$ の噴霧流量密度に伴う変化を図 3. 8 に示す。下向き平面系では、水平上向き平面系と異なり、噴霧流量密度の変化に伴い $x1$, $x3$ は大きく変化している。また、一次液膜領域、合体領域は低流量領域で水平上向き平面系より小さくなっている。この $x1$, $x4$, $x5$ の噴霧流量密度に伴う変化を図 3. 9 に示す。鉛直平面系では、水平上向き平面系と異なり、下向き平面系と同様に噴霧流量密度の変化に伴い $x1$, $x4$ は増加している。また、一次液膜領域を噴霧到達点の $x1 + x4$ で考えると、 $10[l/min]$ 以下の低

流量領域で水平上向き平面系より小さくなっており、下向き平面系より大きくなっている。

3.2 伝熱面姿勢変化時の伝熱特性

3.2.1 冷却曲線と噴霧冷却熱伝達特性

冷却板（図 2. 9）を用いて以下の実験条件で行った実験結果を示す。

Q : 15.8[L/min] ノズル吐出流量

H : 300[mm] ノズルの伝熱面からの高さ

θ : 0、90、180[°]

x : ±100、±80、±60、±40、0[mm]

ΔT_{sub} : 83 K（液温 17°C） サブクール度（飽和温度から液温を引いた値）

図 3. 10, 3. 11, 3. 12 に水平上向き平面系, 水平下向き平面系, 鉛直平面系で得られた各測温位置における伝熱面の温度履歴をそれぞれ示す。図 3. 10, 3. 11 によれば, 水平上向き平面系, 水平下向き平面系では, 噴霧衝突点に対してほぼ対称な冷却曲線となっているが, 図 3. 12 の鉛直平面系では, 上側で冷却速度が下側より遅くなっている。図 3. 7, 3. 8, 3. 9 によれば鉛直平面系では, $x \geq 80$ [mm] において上側に反跳現象が見られ, 反跳現象が現れる領域では液滴流量密度の低下から熱流束が低下しているものと考えられる。また, 図 3. 10, 3. 11 によれば, 水平上向き平面系, 水平下向き平面系では, 噴霧衝突点から $x \leq 80$ [mm] において, 冷却曲線はほぼ同様であるが, $x = 100$ [mm] においては, 水平下向き平面系で温度低

下が遅れている。さらに、図 3. 10, 3. 11, 3. 12 によれば、 $x=100$ [mm]において、冷却時間を $T_w=200^\circ\text{C}$ で比較すると、鉛直平面系下側 (164 [sec]), 水平上向き平面系 (170, 178 [sec]), 水平下向き平面系 (180, 190 [sec]), 鉛直平面系上側 (220 [sec]) の順に大きくなっている。

また、図 3. 13, 3. 14, 3. 15 に温度履歴から逆算法によって算出した熱流束の時間変化をそれぞれ示す。各図は各測定点が温度 800°C の時を 0 秒とし、 200°C になるまでの熱流束をプロットした。

図 3. 13, 3. 14, 3. 15 によれば、 $x=100$ [mm]においては、極小熱流束点はいずれも 90-100 [sec]であるが、その後の遷移沸騰域での熱流束に差が生じていることがわかる。また、図 3. 7, 3. 8, 3. 9 によると、鉛直平面系下側での一次液膜領域 x_4 は、他の一次液膜領域に比較して最も長くなっており、遷移沸騰域での熱流束増加に寄与しているものと考えられる。同様に、鉛直平面系上側での一次液膜領域 x_5 は、他の一次液膜領域と比較して最も短くなっており、遷移沸騰域での熱流束低下の原因になっていると考えられる。

次に熱流束と ΔT_{sat} の関係を図 3. 16, 3. 17, 3. 18 にそれぞれ示す。

高温域下限界温度は、鉛直面系の上側、噴霧衝突点でやや低くなっているが、それ以外の測定点でほぼ同じとなっている。これは、金ら [31] が述べて

いるクエンチの伝搬現象に基づくことを観察により確認している。また、図 3. 16 の上向き平面系の噴霧直下の熱伝達特性として金ら [33] の式に基づく計算結果を併記した。

$$h_f = h_{fl} + h_{aj} \quad (3.1a)$$

1a)

$$h_{fl} = 9.07 \times 10^6 \cdot D \cdot \Delta T_{sat}^{-0.5}, \quad \text{for } D \leq D^* \quad (3.1b)$$

1b)

$$h_{fl} = 9.87 \times 10^5 \cdot D^{0.7} \cdot \Delta T_{sat}^{-0.5}, \quad \text{for } D > D^*$$

(3.1c)

$$q_w = h_f \cdot \Delta T_{sat} \quad (3.2)$$

2)

ここで、 h_f は熱伝達率 [W/(m²K)] である。

ただし、 h_f は噴霧冷却熱伝達率、 h_{fl} は液滴による熱伝達率、 h_{aj} は空気流および放射による熱伝達率（ここでは、伊藤ら [34] の実験結果に基づき $h_{aj} = 100$ [W/(m²K)] とした）であり、 $D^* = 0.0006$ [m³/(m²s)] である。

この図に示すように、今回の上向き平面系での噴霧直下の伝熱特性は金らの熱伝達特性式と 500 [K] $\leq \Delta T_{sat}$ で 20% 以下の分散で対応しており、ノズルの高さや水量が異なっても、噴霧直下の伝熱特性は液滴流量密度で整理で

きることがわかる。これより、本研究結果は液膜が形成される噴霧冷却で、
金らの液滴流量密度、 $10^{-3} [\text{m}^3/\text{m}^2/\text{sec}] \leq D \leq 10^{-2} [\text{m}^3/\text{m}^2/\text{sec}]$ の条件下に
おいて適用可能であると推察している。

3.2.2 高温域熱伝達率，遷移域熱伝達率

図3.19に高温域($\Delta T_{sat} = 600[K]$)，遷移域($\Delta T_{sat} = 300[K]$)における熱伝達率分布を次の

$$h_f = q_w / \Delta T_{sat} \quad (3.3)$$

式より求め、液滴流量密度と共に示す。各条件とも液滴流量密度分布に従い中心に関して対称となっている。また、水平上向き平面系の熱伝達率で無次元化した鉛直平面系と水平下向き平面系の高温域熱伝達率分布を伝熱面姿勢をパラメータとして図3.20に示す。これらの図から、高温域では、スプレー流量密度の半値幅内の噴霧流衝突が主たる伝熱特性を決定すると推定される領域だけでなく、半値幅を超えた領域においても、伝熱面姿勢の影響は顕著ではない。

図3.21に鉛直平面系と水平下向き面系の遷移域熱伝達率分布を水平上向き平面系の熱伝達率で無次元化して示す。高温域熱伝達率分布と比較した場合、姿勢の影響が無視できないことが分る。特に、鉛直平面系では、噴霧流中心位置の上下方向で熱伝達率分布が非対称となっており、姿勢の影響が顕著である。また、 $x = 100 [mm]$ においては水平下向き平面系においても熱伝達率が低下しており、姿勢の影響がみられる。

3. 2.3 高温域下限界温度、限界熱流束域上限温度

前節まで伝熱面姿勢の伝熱特性にあてる影響を示したが、ここでは、高温域した限界温度、限界熱流束域上限温度を整理する。限界熱流束点上限温度とは、図3.16に示される熱伝達特性のN字型の曲線をモデル化して、図3.22に示すように3つの領域（高温域、遷移域、低温域）を直線近似した際の ΔT_{CU} を示すものである。

まず、高温域下限界過熱度 ΔT_M に関しては、図3.23に実験値の分布を示した。なお、この中には金ら、大久保ら[35]のデータを合わせて示した。そして、高温域下限界温度の予測式として次式を提案する。

$$\Delta T_M = 6x + 450 \quad (x \leq 30 [\text{mm}]) \quad (3.4)$$

$$\Delta T_M = 0.034x^2 - 5.3x + 738 \quad (x \geq 30 [\text{mm}]) \quad (3.5)$$

低温域の限界熱流束域上限温度 ΔT_{CU} に関しては、西尾・上村[36]が提案した模式化を用いることとした。図3.24に大久保ら[37]がアルミ製伝熱面を用いて実験を行い提案した式と本実験の ΔT_M と ΔT_{CU} の関係を示した。これより、次式を作成した。

$$\Delta T_{CU} = 0.65 \Delta T_M + 35 \quad (3.6)$$

3.4 静止伝熱面姿勢変化時の試験のまとめ

噴霧冷却熱伝達特性に影響を及ぼすと考えられている因子のひとつである伝熱面姿勢の影響を検討し以下の結果を得た。

(1) 非加熱面に噴霧流を衝突させ、板上に形成される液膜の挙動の観察および分類を行い、伝熱面姿勢の違いによる液膜状態のモデル化とマップの作成を行った。

(2) 高温域における噴霧冷却熱伝達特性に及ぼす伝熱面姿勢の影響は顕著では無いが、鉛直平面系では、特性が上方と下方側で非対象であることを示した。

(3) 鉛直平面系では、遷移域熱伝達率に及ぼす姿勢の影響が無視できないことが明らかになり、その原因として液膜の反跳現象などの液膜挙動が考えられることを示した。

(4) 下向き平面系では、遷移域熱伝達率において、噴霧衝突点から離れた領域で熱伝達率が上向き平面系より低下しており、姿勢の影響が無視できないことが明らかになった。

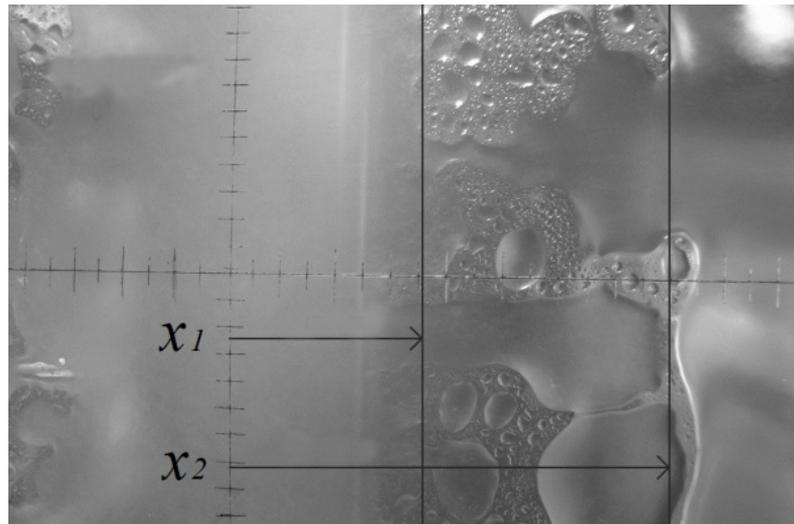


图 3. 1 噴霧觀察 ($Q=3.3$ [l/min], $\theta=0^\circ$)

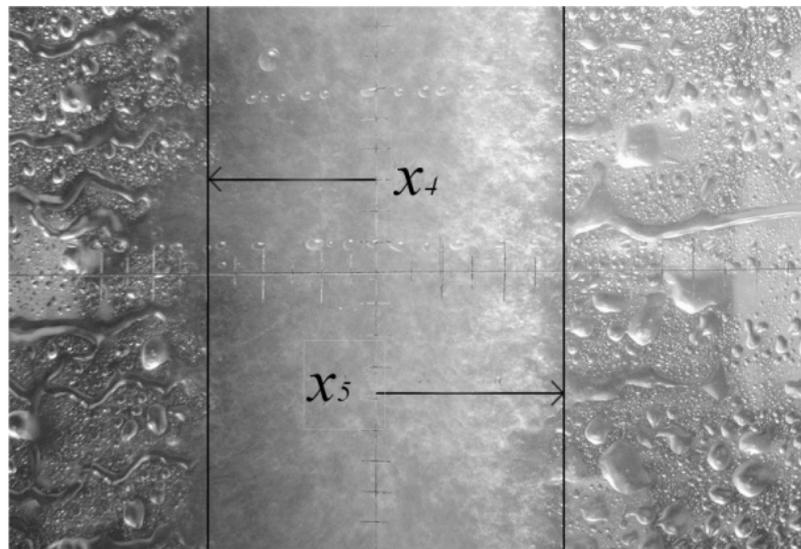


图 3. 2 噴霧觀察 ($Q=3.3$ [l/min], $\theta=180^\circ$)

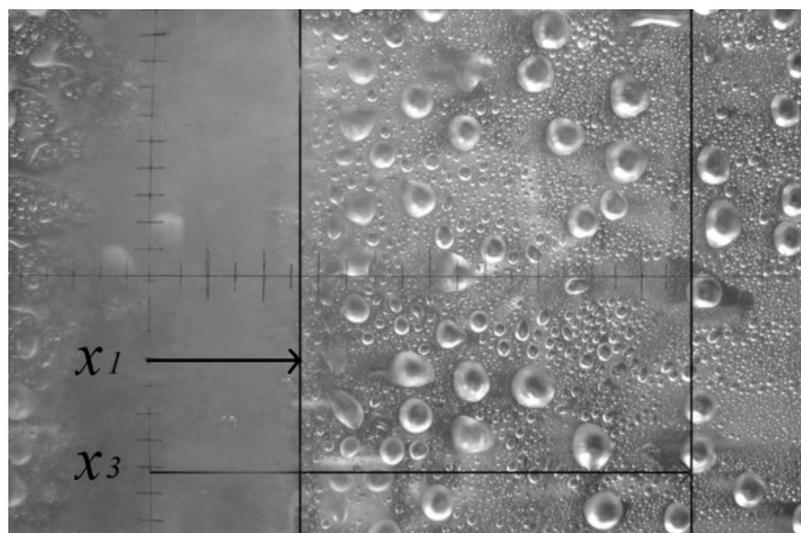
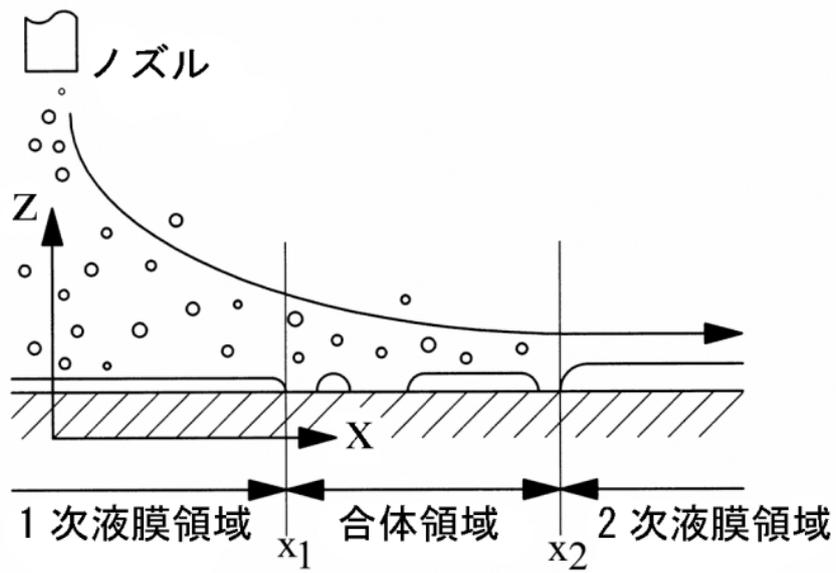
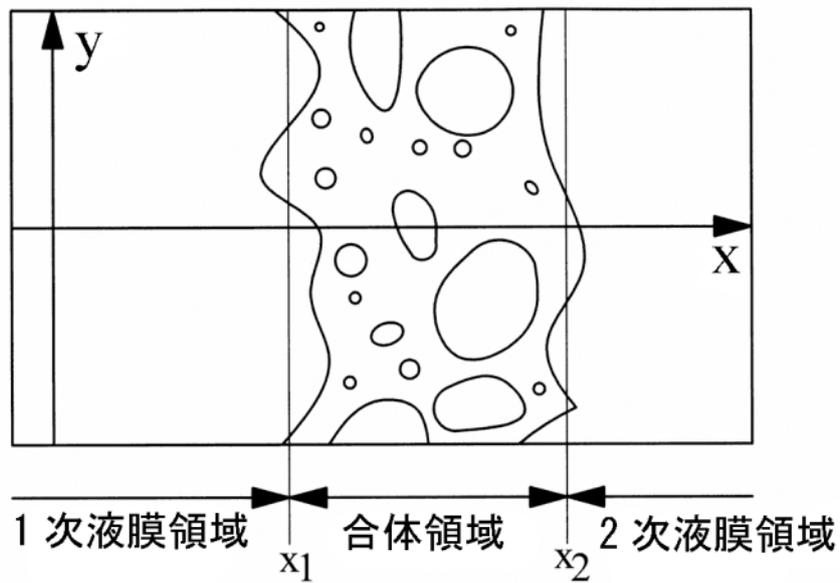


图 3. 3 噴霧觀察 ($Q=3.3$ [l/min], $\theta=90^\circ$)

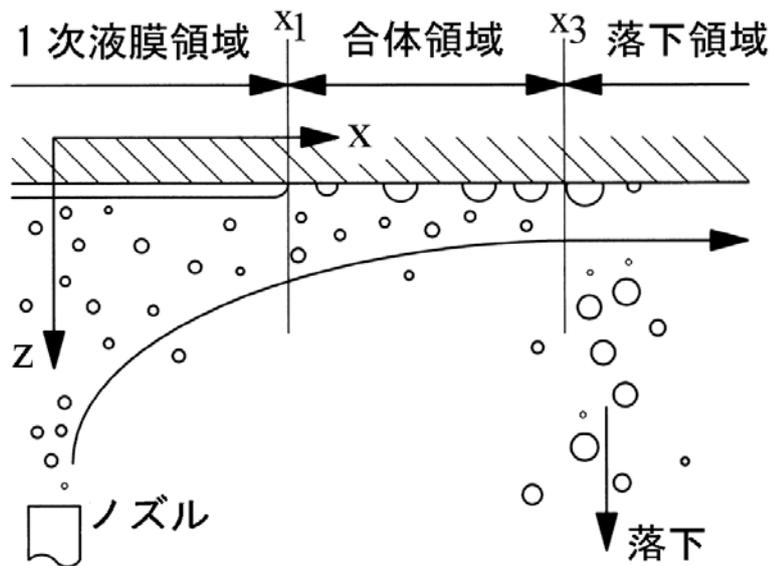


(a) 側面図

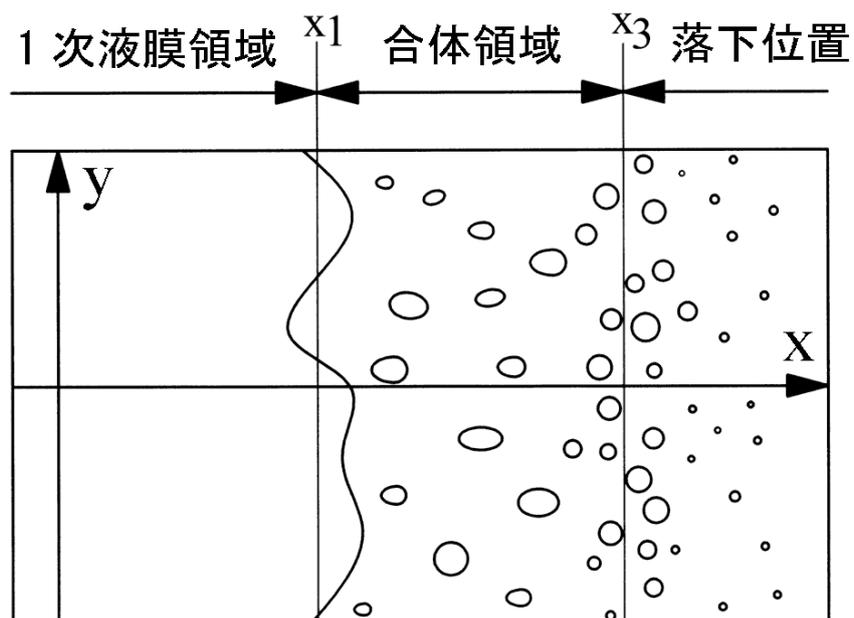


(b) 平面図

図 3. 4 噴霧モデル ($\theta=0^\circ$)

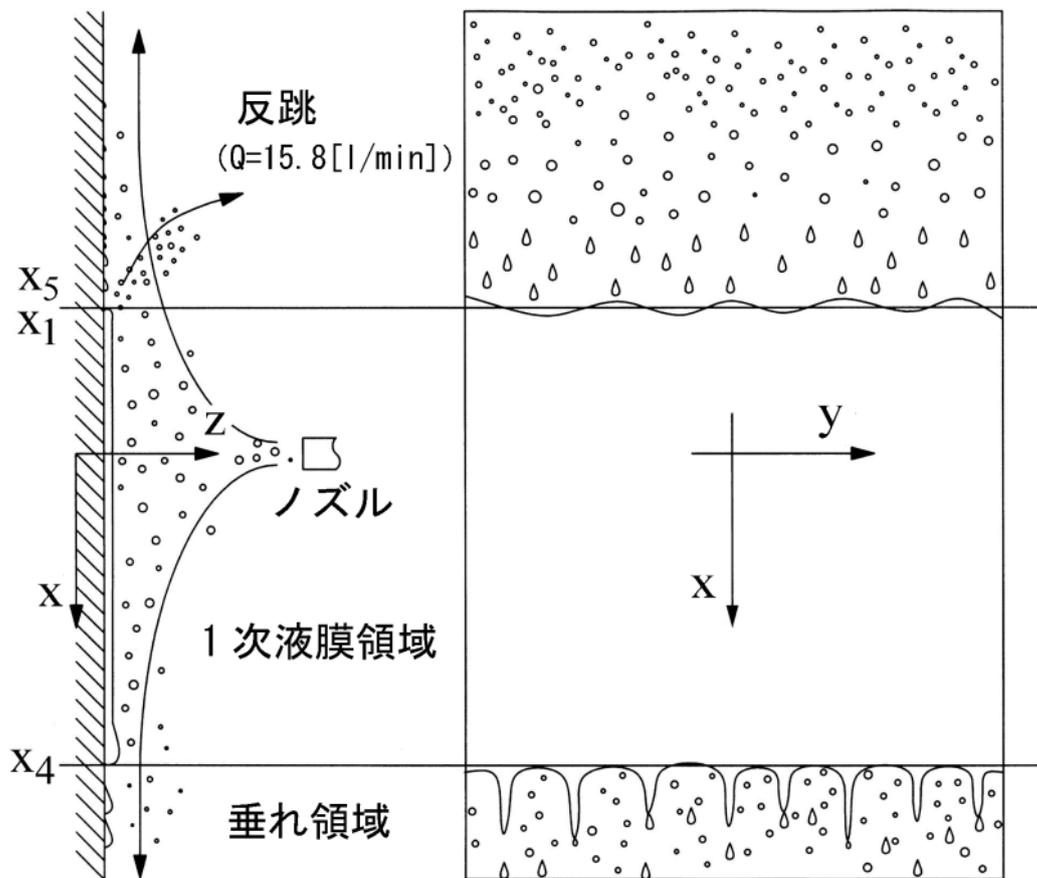


(a) 側面図



(b) 平面図

図 3. 5 噴霧モデル ($\theta=180^\circ$)



(a) 側面図

(b) 平面図

図3.6 噴霧モデル ($\theta=90^\circ$)

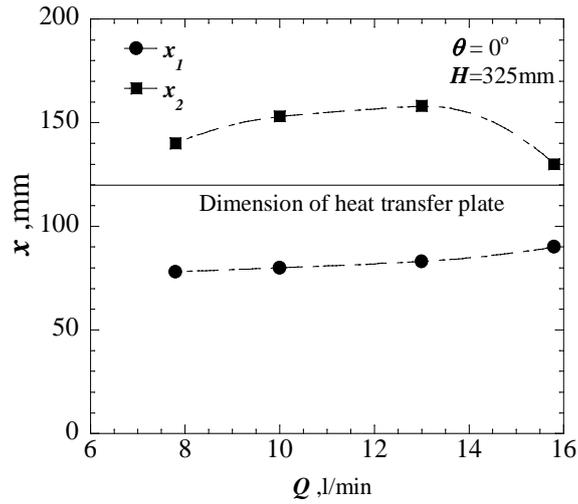


図 3. 7 噴霧観察結果 ($\theta = 0^\circ$)

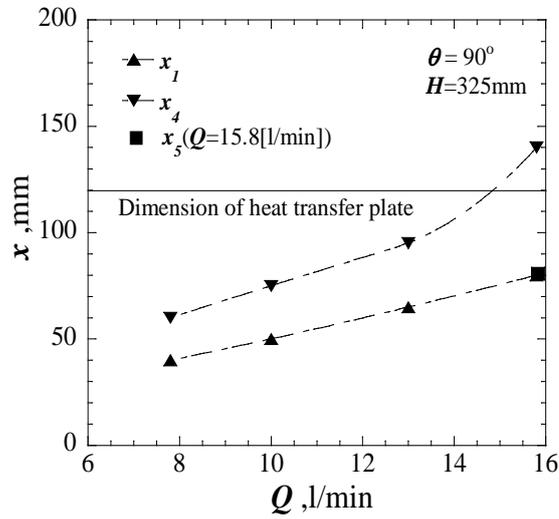


図 3. 8 噴霧観察結果 ($\theta = 90^\circ$)

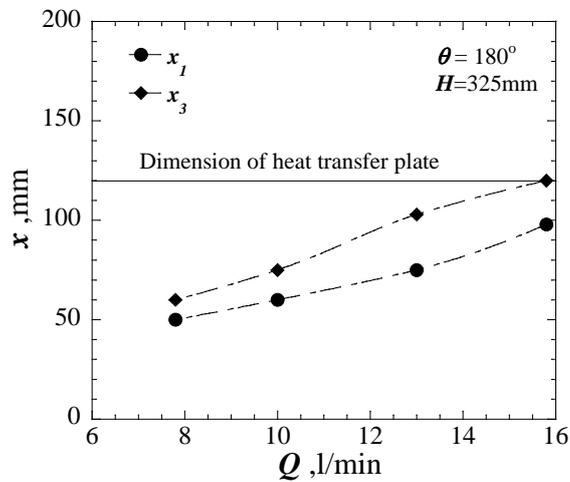


図 3. 9 噴霧観察結果 ($\theta = 180^\circ$)

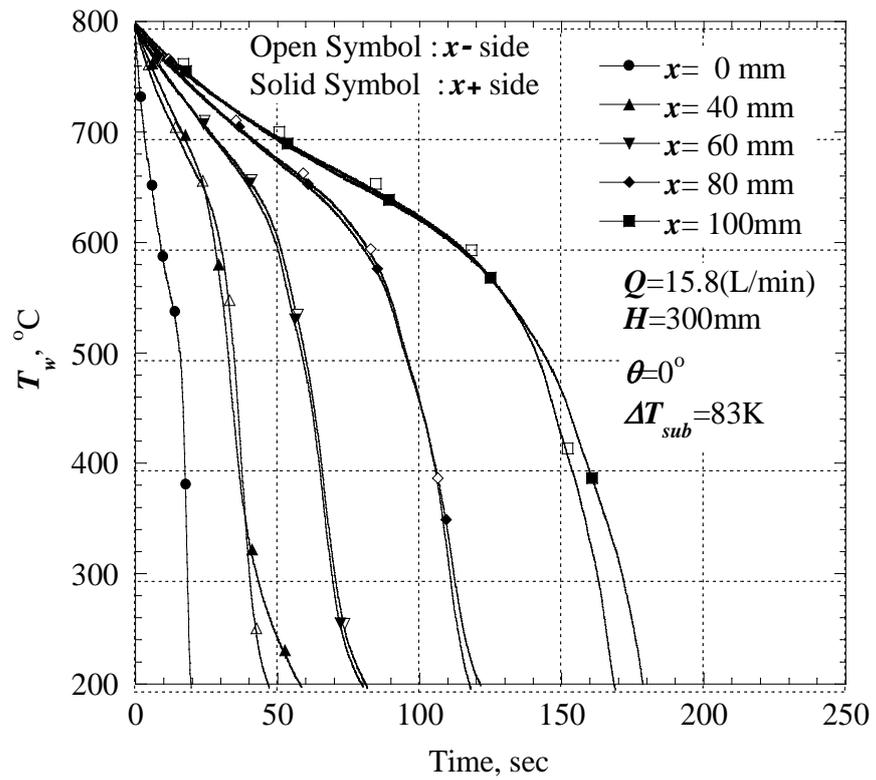


図3. 10 上向き平面系の冷却曲線 ($\theta = 0^\circ$)

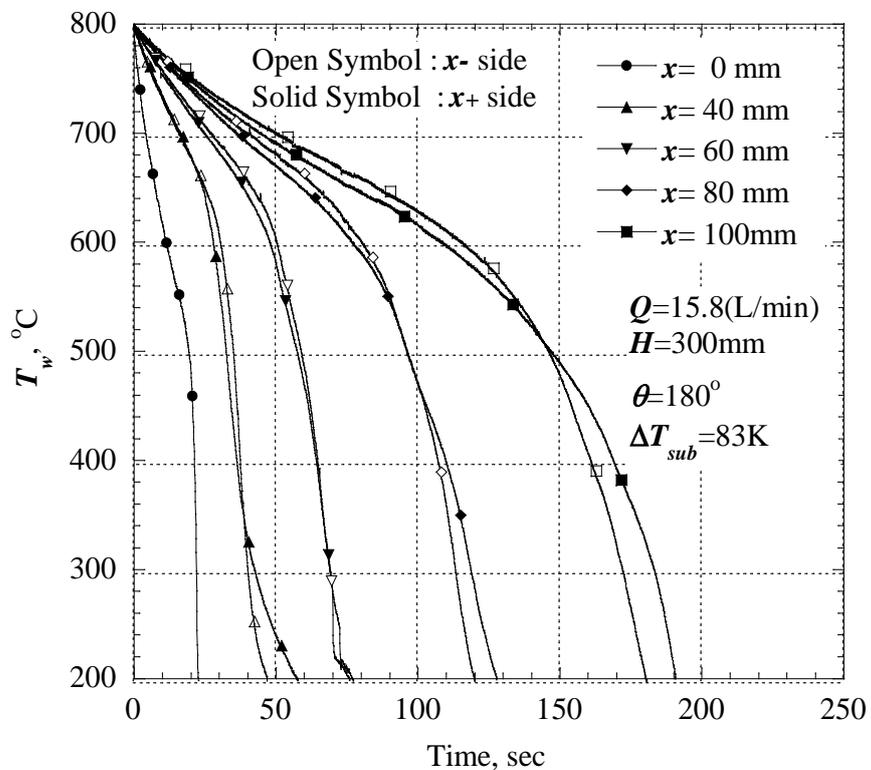


図3. 11 下向き平面系の冷却曲線 ($\theta = 180^\circ$)

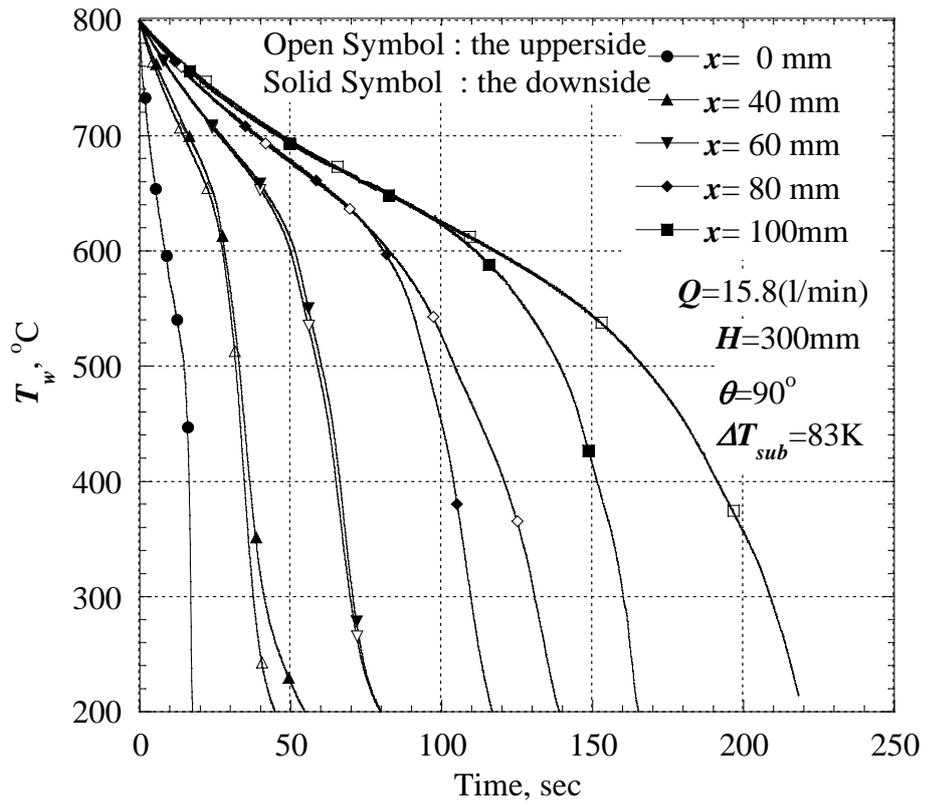


図3. 12 鉛直平面系の冷却曲線 ($\theta = 90^\circ$)

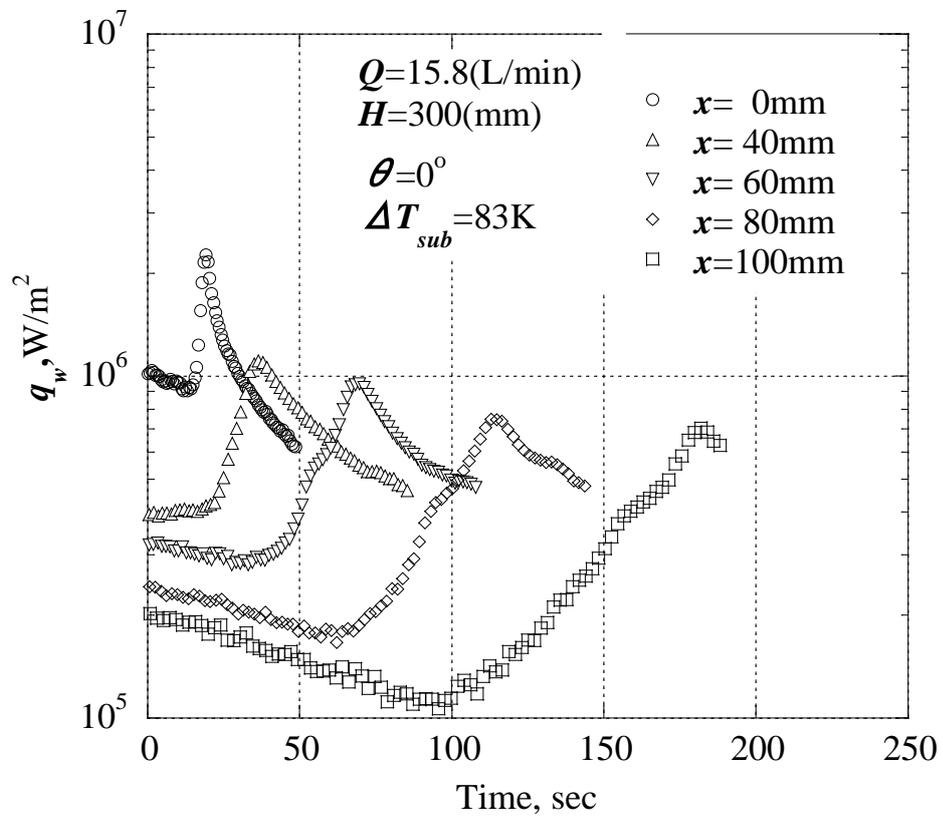


図3. 13 上向き平面系の熱流束時間推移 ($\theta = 0^\circ$)

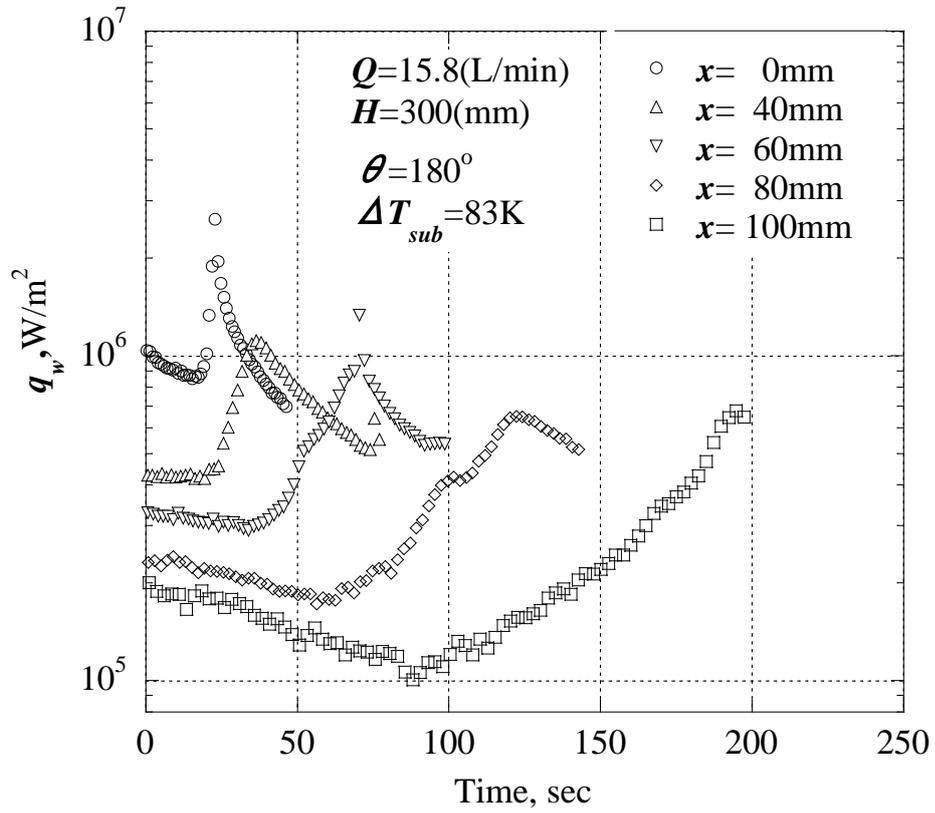


図3. 14 下向き平面系の熱流束時間推移 ($\theta = 180^\circ$)

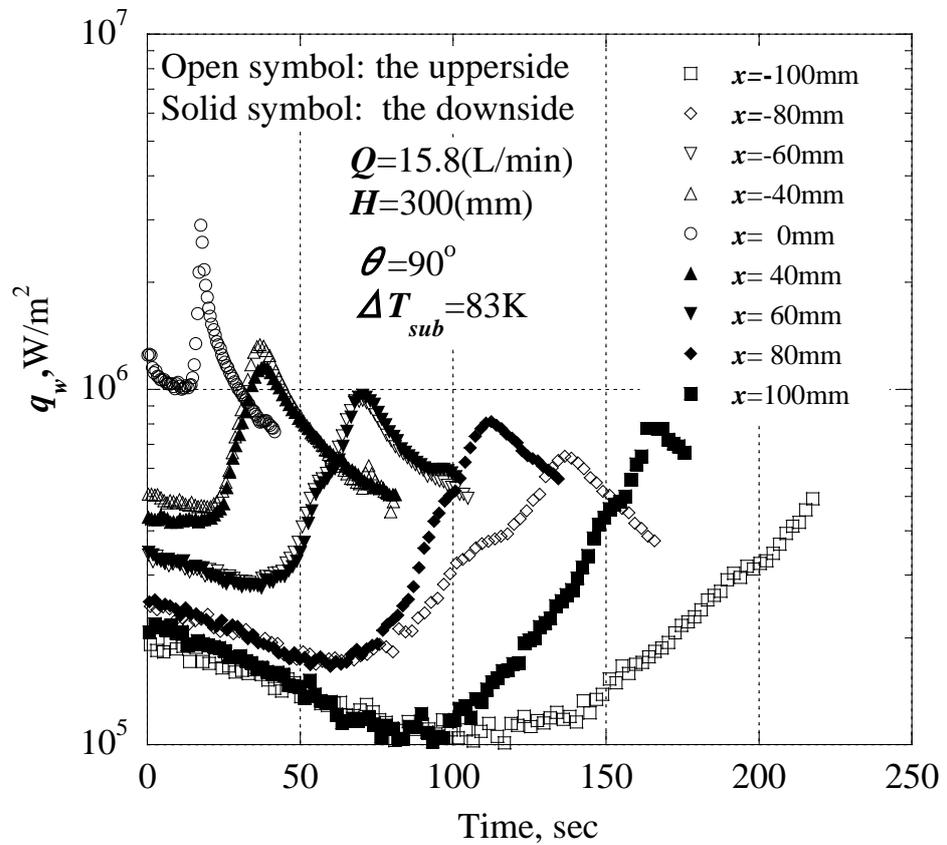


図3. 15 鉛直平面系の熱流束時間推移 ($\theta = 90^\circ$)

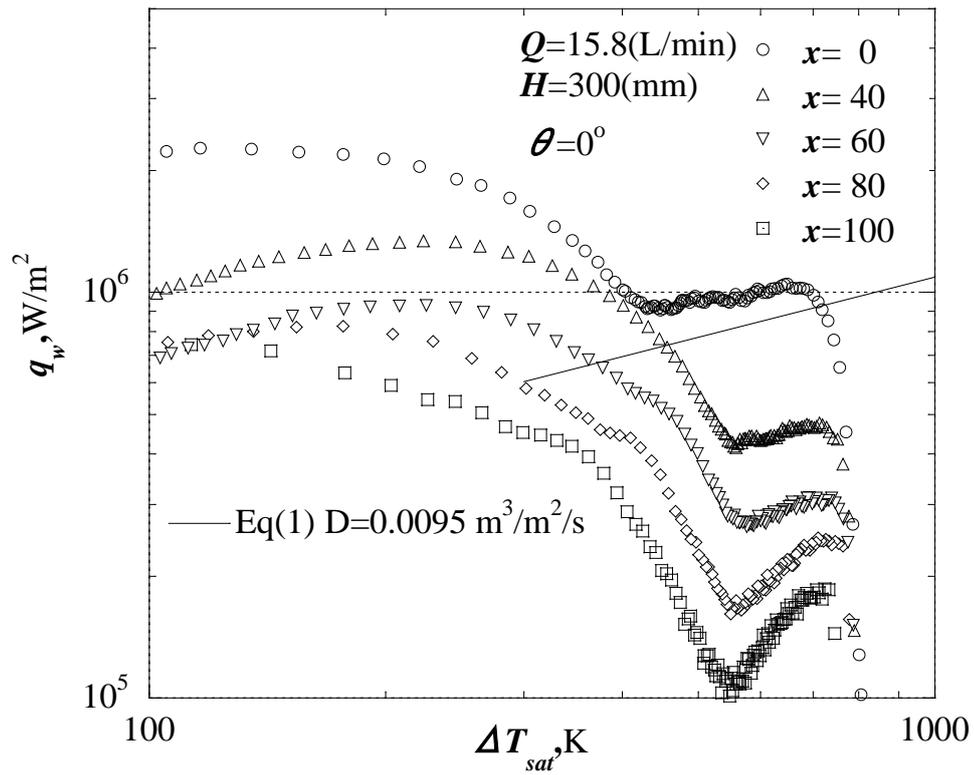


図3. 16 上向き平面系の熱伝達特性 ($\theta = 0^\circ$)

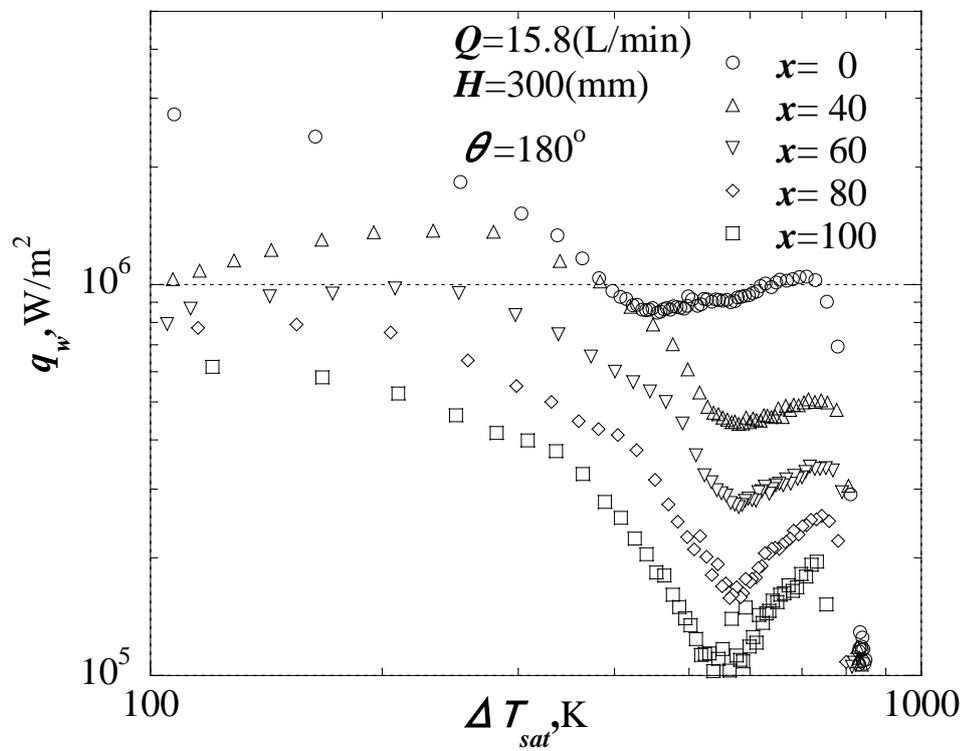


図3. 17 下向き平面系の熱伝達特性 ($\theta = 180^\circ$)

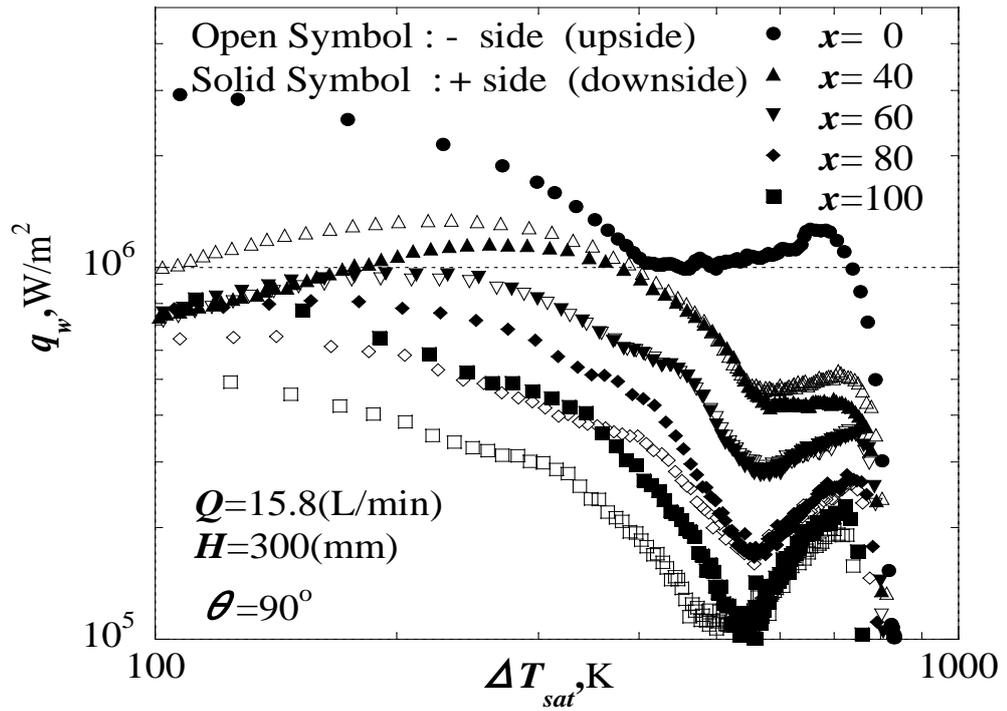


図3. 18 鉛直平面系の熱伝達特性 ($\theta = 90^\circ$)

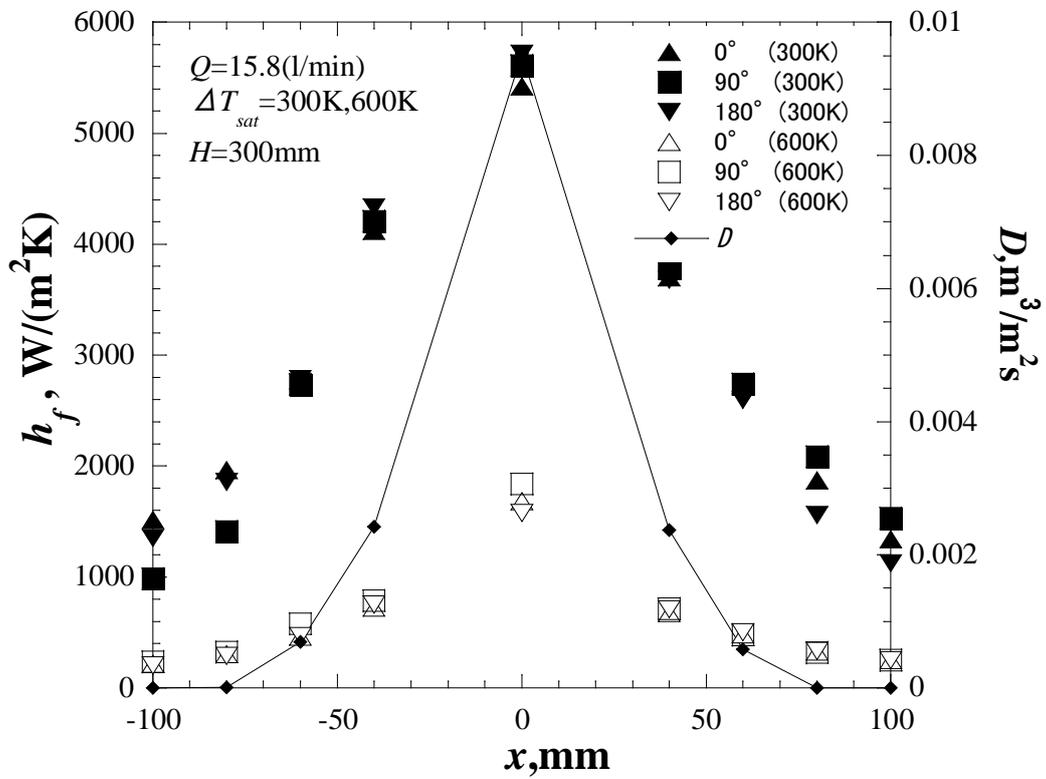


図3. 19 熱伝達率分布 ($Q=15.8[\text{l}/\text{min}]$)

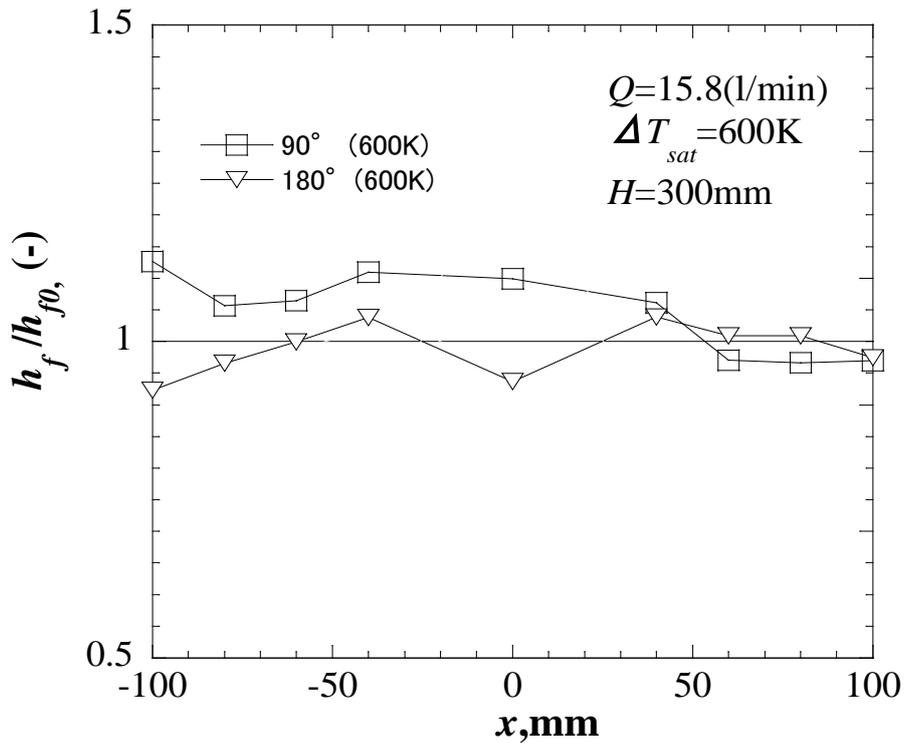


図 3. 2 0 熱伝達率分布 (無次元) ($\Delta T_{sat}=600\text{K}$, $Q=15.8[\text{l/min}]$)

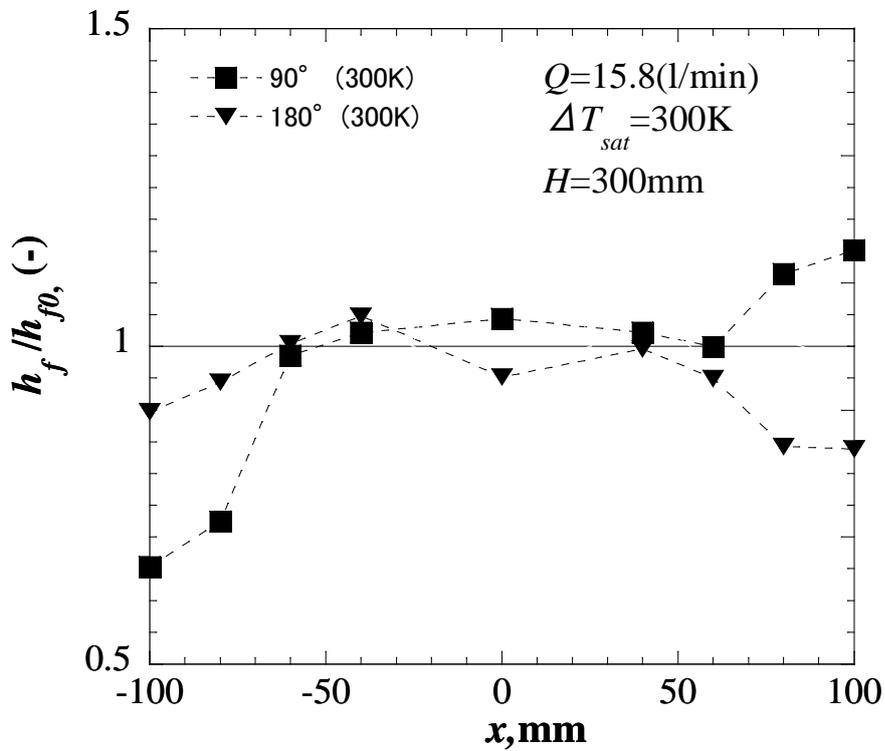


図 3. 2 1 熱伝達率分布 (無次元) ($\Delta T_{sat}=300\text{K}$, $Q=15.8[\text{l/min}]$)

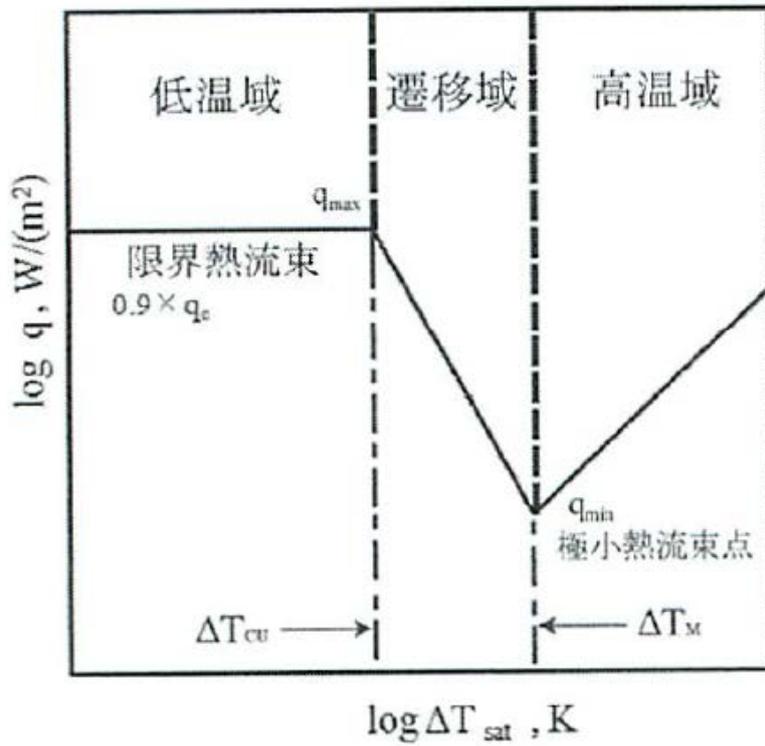


図3. 22 熱伝達特性のモデル化

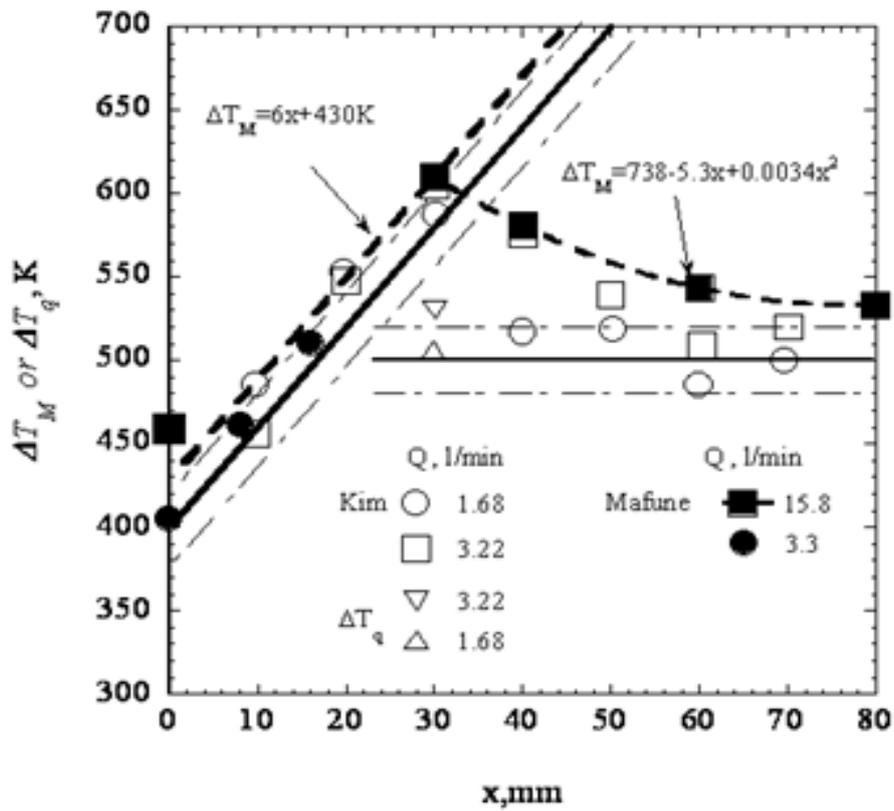


図3. 23 ΔT_M とノズル直下からの距離との検討

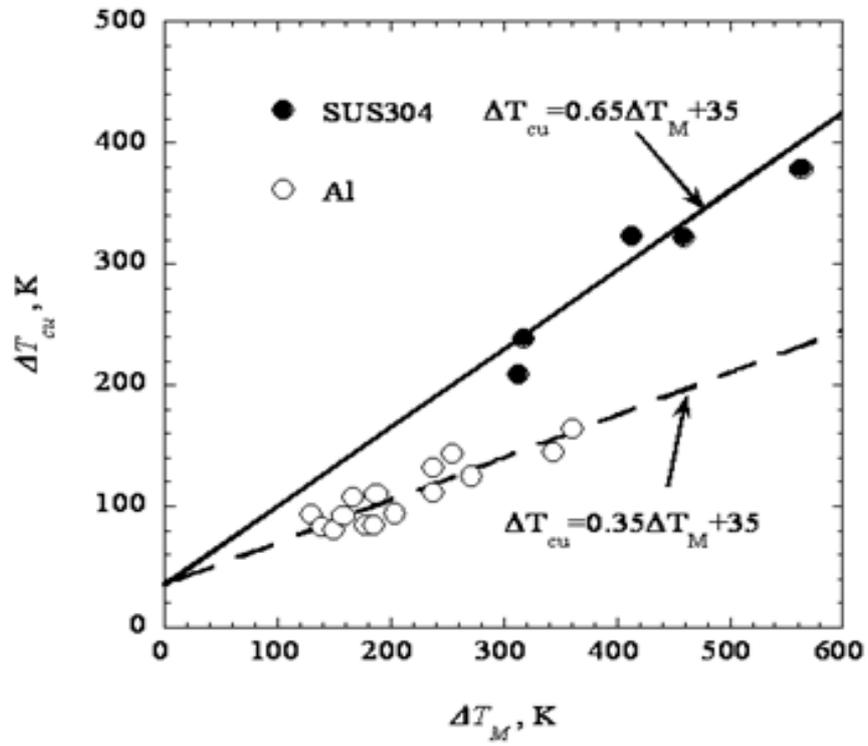


図3. 24 ΔT_{cu} と ΔT_M との関係

第 4 章 . 鋼板移動時の上下面伝熱特性

4 . 1 鋼板移動時の下面伝熱特性

4 . 2 鋼板移動時の上下面伝熱特性の比較

4 . 3 鋼板移動時の下面伝熱特性の検討

4 . 4 鋼板移動時の上下面伝熱特性のまとめ

第4章 鋼板移動時の上下面伝熱特性

本章では第3章での静止状態での実験を発展させて、移動鋼板系における伝熱面姿勢の影響について実験的に調査した。

4.1 鋼板移動時の下面伝熱特性

ここでは、静止実験時では、過熱度600[K]の高温領域では、ほぼ同じであった上下面、特に下面での冷却状況を調査するために、図2.17の冷却系で通板速度を0.5[m/sec]とかなり遅い条件での通板試験を行った。これは、速度が速いと冷却ノズルが短時間の間に鋼板に衝突し、現象が分かりにくいと考えて設定した。実際の製造工程では、図1.2の連続熱延工程の仕上げ圧延前では0.7~2[m/sec]、仕上げ圧延後では3~25[m/sec]であり、厚板工程の冷却では0.5~2[m/sec]程度である。

冷却は、冷却帯を往復通板させ、冷却後には復熱時間を入れて冷却した。

図4.1に表層1[mm]部の熱電対の冷却曲線を示す。図4.1のように、1回通過ごとに冷却が行われ、次第に試験片温度が低下していく。この各冷却回をA~Eと称し、各部の経過時間を引き延ばした図を温度域ごとに図4.2、4.3、4.4に示した。図4.2によれば、1回の冷却帯通過時に温度低下部が4か所観察される。これは図2.17に示すように、冷却ノズル

が4か所設けられているためである。各ノズルによる冷却時間は短く、冷却後に復熱が起こっているのが分かる。図4.3は700-300℃域の推移であるが、ここでは、D部において、冷却される部分がA, B, C部に比較して1か所多くなっている。また、同様に図4.4においては、E部においては、D部に比較しても冷却部が1か所増加している。

次に、図4.5、4.6、4.7に図4.2～4.4の温度推移を熱伝達率に逆算により変換した図を示す。図4.5～図4.7によれば、図4.2～図4.4に示された冷却部位の増加がさらに良く分かる。すなわち、D部においては冷却される部分がA, B, C部に比較して1か所多くなっており、また、E部においては、D部に比較しても冷却部が1か所増加している。これは、その時間的位置から、図4.8に示すように通板方向後部側のロールと鋼板と接触部の周辺に滞留した水による冷却と推定される。高温域のA, B, C部では発生しなかったロール近傍での冷却が発生した理由は、以下によるものと推定される。第3章静止試験における図3.20に示されるように過熱度300[K]においては、伝熱面温度の低下により、遷移沸騰域に入り、水が伝熱面と接触し始めたために熱伝達率が、全域で下面においても向上している。特に水量密度分布がほぼ0になる噴霧中心から80[mm]の地点をみると、過熱度600[K]においては、中心部の25%程度まで上下面とも熱伝達率が低下している。これは、伝熱面に対する垂直方向の速度がないと膜沸

騰域による蒸気の発生で冷却能力が低下していると思われる。過熱度 300 [K]においても、噴霧中心から 80 [mm]の地点においては、中心部の 25%程度まで上下面とも熱伝達率は低下しているが、その絶対値は過熱度 600 [K]の中心部の熱伝達率とほぼ同等となっている。これは、下向き面(180度)においても噴霧による垂直方向の速度成分がなくても液膜が存在し、遷移沸騰域になり熱伝達率を高めていると推定される。特に、冷間の水が接触する条件のモデル化図 3.8によれば、液が存在する領域は伝熱実験と同じ水量 Q の 15.9 [L/min]であれば、噴霧中心から 140 [mm]となっており、上記の推定を示唆している。すなわち、伝熱面温度が低温化して、遷移沸騰域になることにより、伝熱面と水との接触が可能になれば、スプレーされた水は、スプレー時の垂直速度成分がない領域においても伝熱面と接触して冷却能力を向上させる。移動鋼板においては、遷移沸騰域になり、スプレーされた水が伝熱面と接触するようになると、図 4.8のように接触し始めた水は進行方向のロールと伝熱面の間に滞留し、その滞留部ではロールの回転や伝熱面移動時の流れにより熱伝達率が向上することになったと推定される。特に、今回の試験に用いたノズルでは、一次液膜は、図 2.18に示すように、200 mm以上でほぼロール直下まで広がっており、上記の推定を支える事項の一つとなっている。

4.2 鋼板移動時の上下面伝熱特性の比較

4.1 では、下面の冷却特性に関する実験結果について示したが、この項では、上下面の比較、特に上面における板上水の影響についても検討を行う。

試験時の上下面でのノズル配置は図 2. 2 1, 2. 2 2 に示すものであり、水量密度は上面 $1.5 \text{ [m}^3/\text{m}^2/\text{min}]$ ($0.025 \text{ [m}^3/\text{m}^2/\text{sec}]$)、下面 $2.3 \text{ [m}^3/\text{m}^2/\text{min}]$ ($0.035 \text{ [m}^3/\text{m}^2/\text{sec}]$)、ノズルからの吐出圧力は 0.3 [MPa] 、通板速度は 1 [m/sec] と 4.1 より速い速度で実験を行った。これは、上下比較実験ではノズル数および水量密度が増加したため、通板速度を上げて、冷却速度を低下させ、冷却状況を判別しやすくするためである。また、上面に関しては、せき高さを $0, 100, 200 \text{ [mm]}$ と変更させて板上水の深さを変更した実験を行った。なお、ノズル高さが 145 [mm] であるので、せき高さ 200 [mm] 時はノズルの先端が完全に埋没した状態となっている。

さらに、下面の冷却能力向上を狙って、噴流衝突面積を向上させた実験を行った。

4.2.1 上面せき高さ変更試験

図 4. 9 にせき高さ 0 [mm] 、図 4. 10 にせき高さ 100 [mm] 、図 4. 11 にせき高さ 200 [mm] の冷却曲線を示した。図 4. 9 では、約 $600 \text{ }^\circ\text{C}$ のところから、平均的な傾きが急になっており、膜沸騰域と遷移沸騰域の境界

と推定される。しかし、図 4. 10、4. 11 の板上水深さが 100 [mm]、200 [mm] では初期の冷却時から表面温度は 400 °C、300 °C まで低下しており、図 4. 9 に見られるような変曲点は見られない。図 4. 12 に板上水深さと表面温度が 600 °C 時の熱伝達率の関係を示した。今回の実験系では、板上水深さが深くなると、金らの実験結果とは異なり、熱伝達率は向上している。金らの実験においてもノズルサイズは異なるが吐出圧力はノズル型番から推定される限り、同じ 0. 3 [MPa] となっており、水噴流の吐出流速は同等である。しかしながら、水量が 2. 3 [L/min] と今回の試験のサイズの 10 % 以下であり、液滴径は小さいと思われる。ノズル高さも 300 [mm] と高く、液滴粒径が小さいと液滴速度の減速も著しいと推定される。このため、水量が小さいこと、液滴径が小さいために液滴速度が減衰していることから、噴流としての運動量が小さく、たとえば、液膜を攪拌するほどの運動量がなかったものと推定される。今回の著者らの結果では、板上水が深くても、噴流の運動量が大きいために①板上水層を攪拌、すなわち壁面近傍の流速を向上させる効果、あるいは、②噴流に板上水層の水を随伴させてあたかも噴流の水量密度を増加させるなどの効果を得ることができたものと推定される。また、図 4. 13 に示すように、噴流の運動量が大きいために、伝熱面に衝突したのちに壁面に沿って流れる際に板上水層の抵抗で流速が減衰され、その際に③伝熱面方向への速度成分が発生することによる熱伝達率の向上効果

なども考えられる。

今回の結果によれば、板上水深さによって、上面側の熱伝達特性が影響され、この意味では、上面側も姿勢の影響を大きく受けているといえる。また、先に述べたように厚板の冷却装置内では、鋼板の幅が広く、冷却後の水は鋼板の端部から排水されるため、幅方向で板上水深さが異なる可能性があり、熱伝達特性を幅方向で均一にするためには、幅方向での板上水深さの差を小さくするか、スプレー水の水量を幅方向で変える必要があることを示唆している。

4.2.2 下面の冷却曲線と上面の冷却曲線の比較

図4.14に下面の冷却曲線を示す。図に示されるように急冷開始点が550℃に見られる。これは、図4.9の上面のせきなし時の値とほぼ同じである。ただし、急冷開始までの到達時間は、図4.9の70秒と比較して90秒と遅くなっている。しかしながら、急冷が始まるとその後の冷却速度は図4.9に比較して大きくなっている。すなわち、上面のせきなし時の冷却曲線と比較すると、下面の水量密度は今回の実験では、上面の1.5倍にも関わらず、膜沸騰域では遅く、遷移、核沸騰域では速くなっているということである。これは、膜沸騰域では下面は水流衝突部の冷却能力は高いが、冷却面積が小さいが、上面せきなし時でも上面には壁面に沿って流れる板上水があり、相対的に平均熱伝達率が上面側で高くなっていると推定される。し

かし、遷移沸騰域に入ると、下面でも伝熱面と水の接触が始まるために、水量の多い下面の方の熱伝達率が高くなるものと推定される。

また、上面のせきあり時、すなわち、板上水深さが100 [mm]になった場合と比較すると、上面のせきなし時に比較しても速い冷却速度に大きく劣っている。このように上下面の冷却能力が温度域により異なると、鋼材の冷却停止温度によっても、応力、鋼材変態履歴が上下面で異なり、反り変形の大きな要因となってしまう。

上記をかながみると、第3章の静止系の実験の際には、上面と下面の水量が同じ場合、膜沸騰域では噴霧流周辺ではほぼ同じ熱伝達特性であったが、さらに噴霧中心から離れた領域では、上面では板上水が残っていることによる伝熱が行われるが、下面ではそうした板上水による伝熱が行われることないために、冷却面が広がるほど上下面の伝熱特性は異なってくると推定される。また、遷移沸騰域以下の温度域では、上下面の差は静止実験における噴霧流周辺でも発生しているので、冷却面の拡大に伴い、その差は顕著になる。なお、移動鋼板における遷移沸騰域での伝熱特性は、4.1でも記載した、噴流の進行方向上流側と下流側の差異は、図4.15のようになっており、鉛直面の上部、下部の特性に類似したところがある。なお、移動速度が速くなると、この傾向は顕著となり、噴流衝突点の鋼板進行方向上流側の冷却面積は小さくなり、下流側の面積は広くなるものと推定される。

この下面の冷却特性の膜沸騰域から遷移沸騰域における変化も姿勢の影響の一つであり、鋼材冷却の不安定に寄与している。

4.3 移動鋼板時の下面伝熱特性向上の検討

これまで述べてきたように、下面の伝熱は噴流衝突部周辺で行われ、膜沸騰域から遷移域になるに従い、冷却面積が変化することが想定される。そこで、これを解消するために、下面全域を図4.16に示すように、これまでの扇形状噴流による線状衝突から、衝突噴流で覆うように変更することを考える。このようにすると、板上水がある上面の冷却面積に近付けることができる、また、膜沸騰域から遷移沸騰域への沸騰様式の変化による冷却面積の変化を緩和あるいは解消できるなどの利点があると推定される。

また、一般に沸騰の有無にかかわらず、衝突噴流の冷却能力、熱伝達率は衝突面の冷媒の質量流量密度に対して、次式であらわされる。

$$h = A W^B \quad B < 1 \quad (4.1)$$

h : 熱伝達率 [W/m²K]

W : 冷媒質量流量密度 [kg/m²/sec]

A, B : 定数

そして、伝熱能力は、これに伝熱面積をかけて求められる。

$$Q = h S \Delta T \quad (4.2)$$

S : 伝熱面積 [m²]

Δ T : 伝熱面と襟倍の温度差 [K]

Q : 伝熱能力 [W]

冷媒質量密度は伝熱面積とは使用質量流量が一定の場合、以下の関係にある。

$$W S = C \quad (4.3)$$

C : 定数

今、現在の状態を 1 として、冷媒質量流密度を低下させて、伝熱面積を広げること考える。分かりやすくするために、 $B = 0.7$ 、 $W_2 = 0.5 W_1$ とすると、

$$S_2 = 2 S_1$$

$$h_2 = W_2^{0.7} = (0.5 W_1)^{0.7} = 0.6 W_1^{0.7} = 0.6 h_1$$

h_1

$$Q_2 = h_2 S_2 \Delta T = 0.6 h_1 \times 2 S_1$$

$$= 1.2 h_1 S_1 = 1.2 Q_1$$

となり、20%伝熱能力を向上させることが可能である。これは、式(4.1)のBが1より小さいためで、伝熱能力の低下率が冷媒の質量流量密度の低下率より小さいためである。すなわち、伝熱面積を増加させる方が一般的には伝熱能力の増加につながるということである。

そこで、冷却能力面の効果と上面冷却面関に近付けること、沸騰様式の変化により下面の冷却面積の変化の抑制を狙って、図2.23に示すような冷却様式による試験を行った。ここでは、ノズルの配置は図2.22と同じでノズルのみを変えている。この際、水量は図2.22に示すノズル水量(100+54)[L/min]が77[L/min]2本と同じにしている。なお、吐出水圧は0.3[MPa]から0.18[MPa]に落ちているので、実際には冷却能力はやや低下していることになる。この配置での冷却曲線を図4.17に示す。このように、噴流を下面前面に衝突させることにより、水量を変更しなくても、図4.10の上面せき高さ100[mm]の冷却曲線に近付けられ、冷却能力も増加することが可能であることが判明した。

4.4 第4章のまとめ

本章での移動鋼板を用いて上下面の伝熱面姿勢の影響を調査する実験により以下のことが判明した。

- 1) 移動鋼板下面における冷却では、膜沸騰域ではスプレー近傍が冷却され、遷移沸騰域では冷却面積が進行方向下流側に拡大する。
- 2) 上面において板上水深さが変化すると伝熱特性が変化する。その変化は各沸騰域の熱伝達率の大きさとともに、急冷変化点、極小熱流束点も変化する。
- 3) 下面の噴流の衝突域を広げることにより、伝熱特性を上面に近付け、伝熱能力を向上させることが可能である。

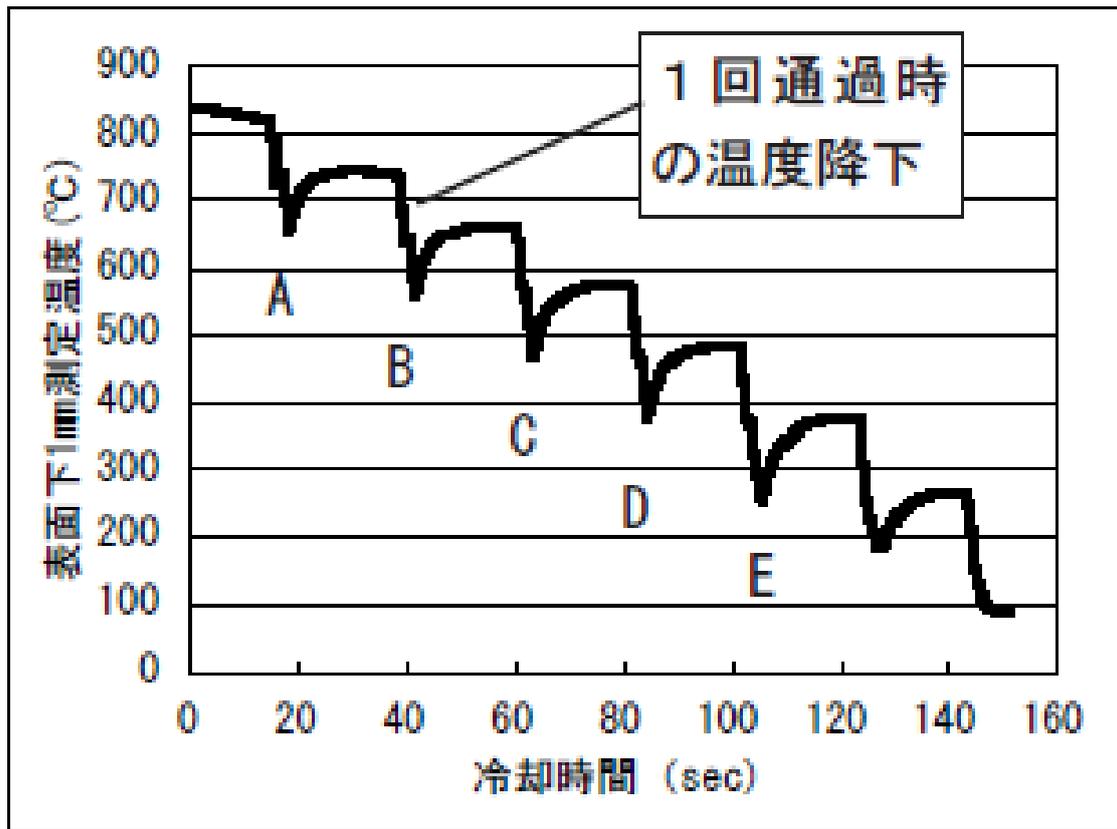


図 4. 1 冷却時の温度降下概要

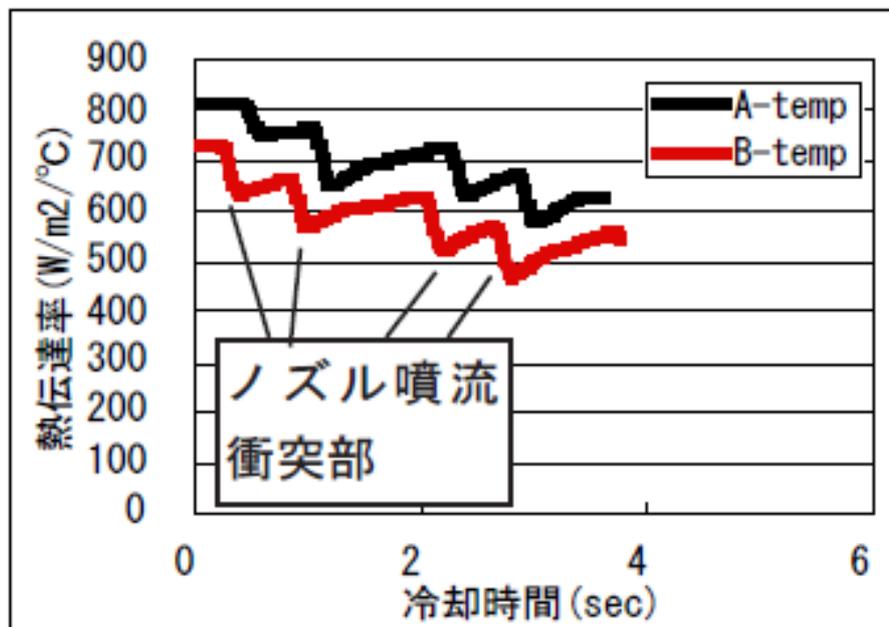


図 4. 2 800-500°Cでの温度降下の詳細

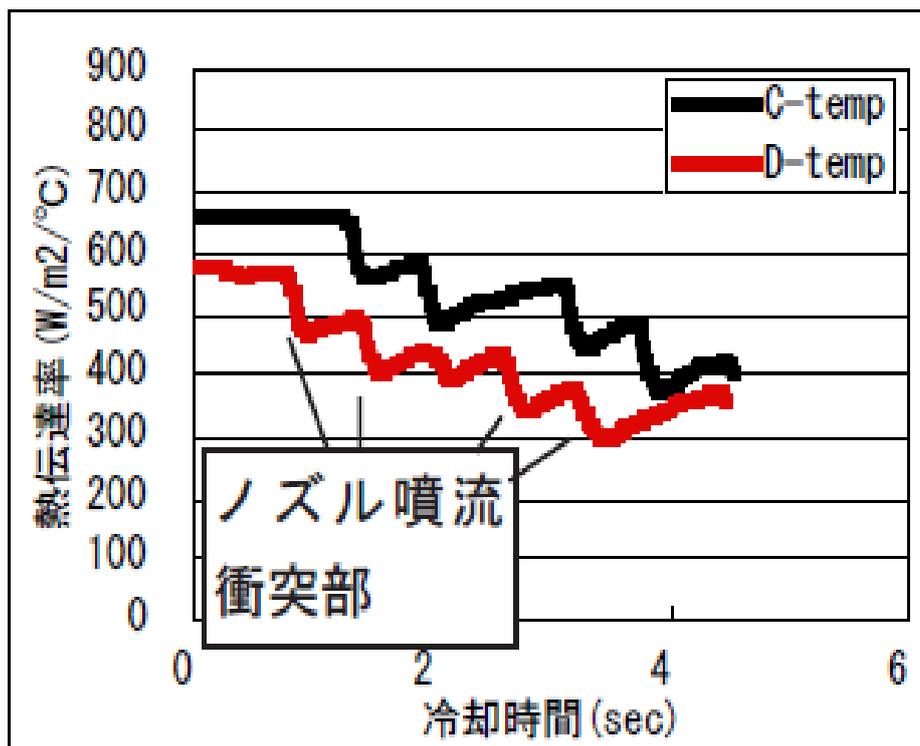


図 4. 2 700-300°Cでの温度降下の詳細

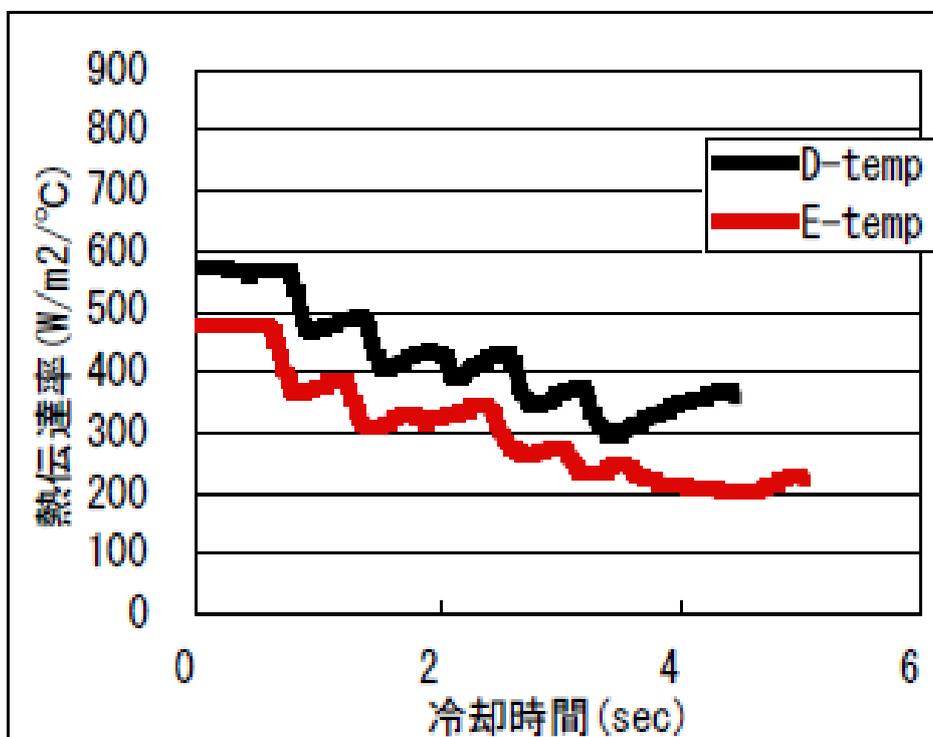


図 4. 4 600-200°Cでの温度降下の詳細

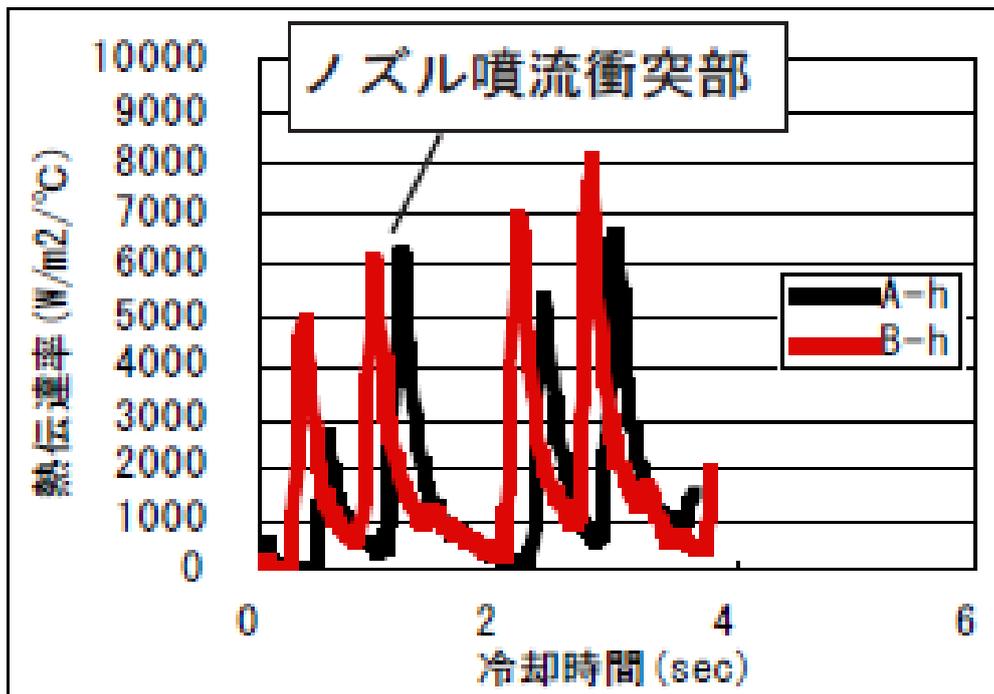


図 4. 5 800-500°C時の熱伝達率の時間推移

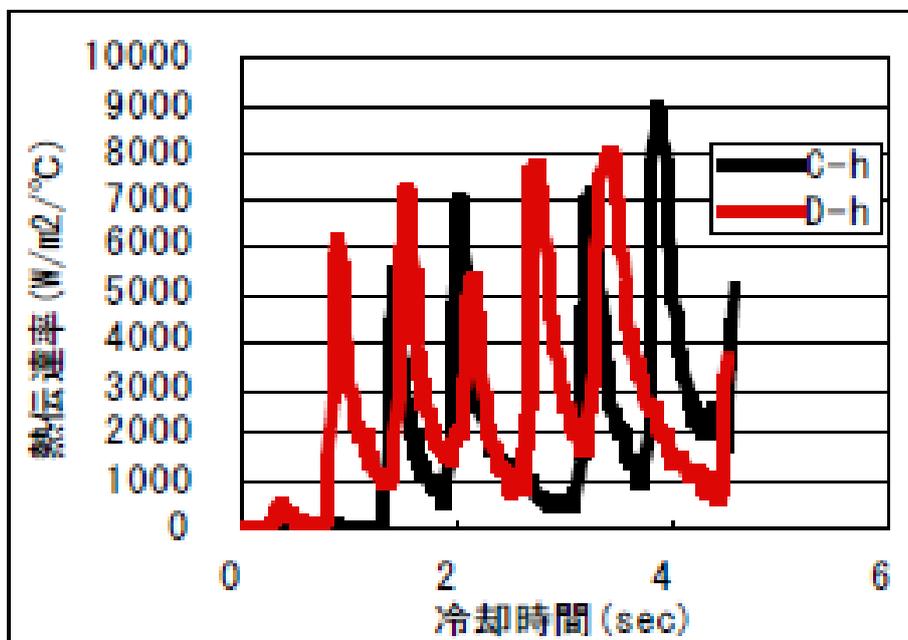


図 4. 6 700-300°C時の熱伝達率の時間推移

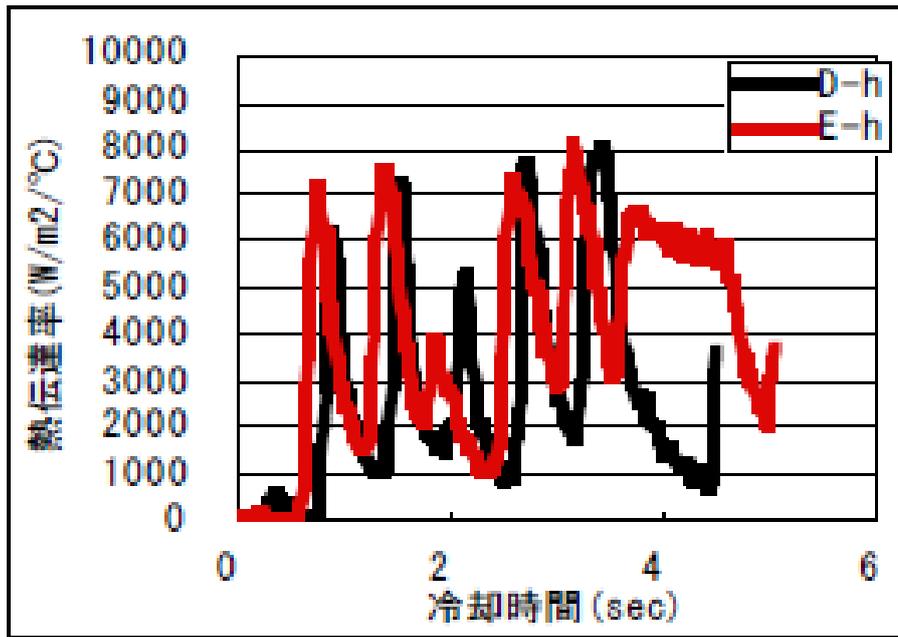


図4.7 600-200°C時の熱伝達率の時間推移

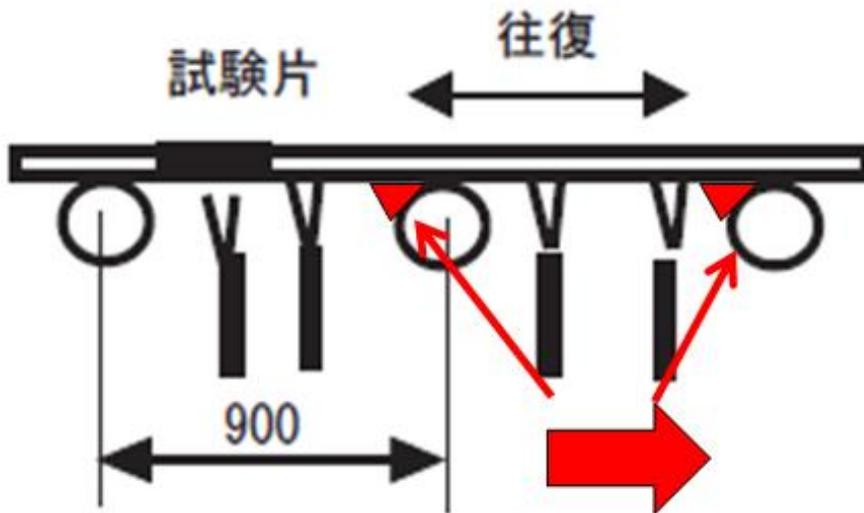


図4.8 冷却時のテーブルロール近傍滞留水の説明図

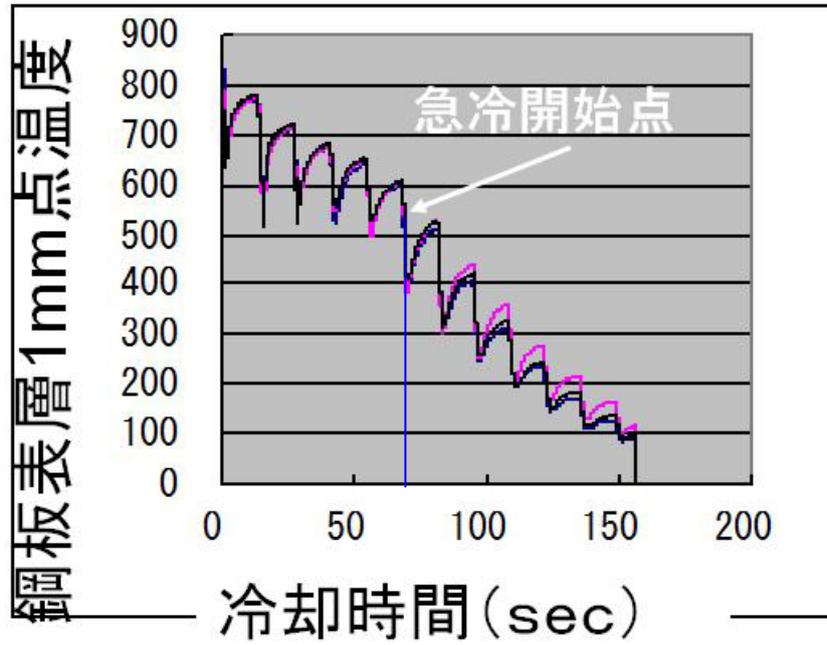


図4. 9 上面せき高さ0mm時の冷却曲線

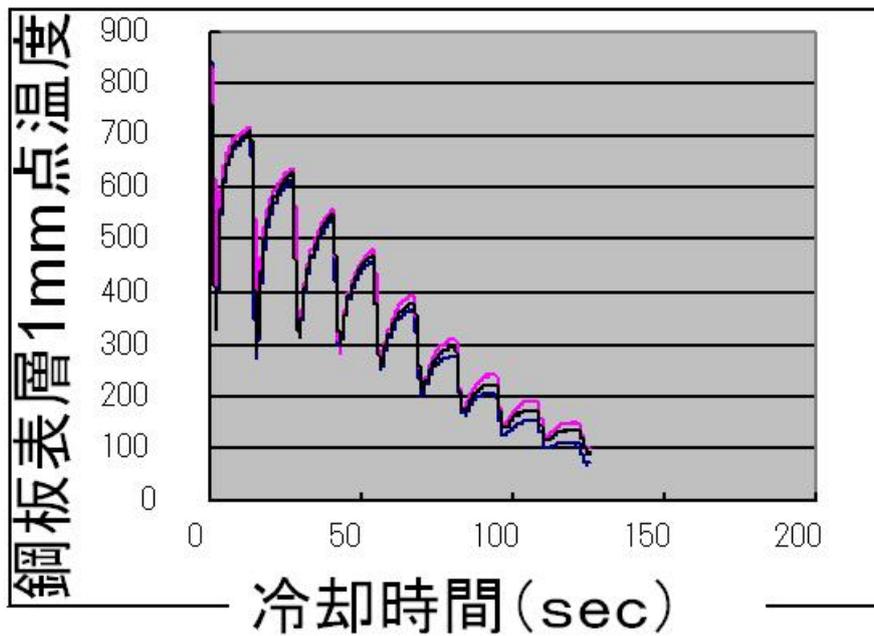


図4. 10 上面せき高さ100mm時の冷却曲線

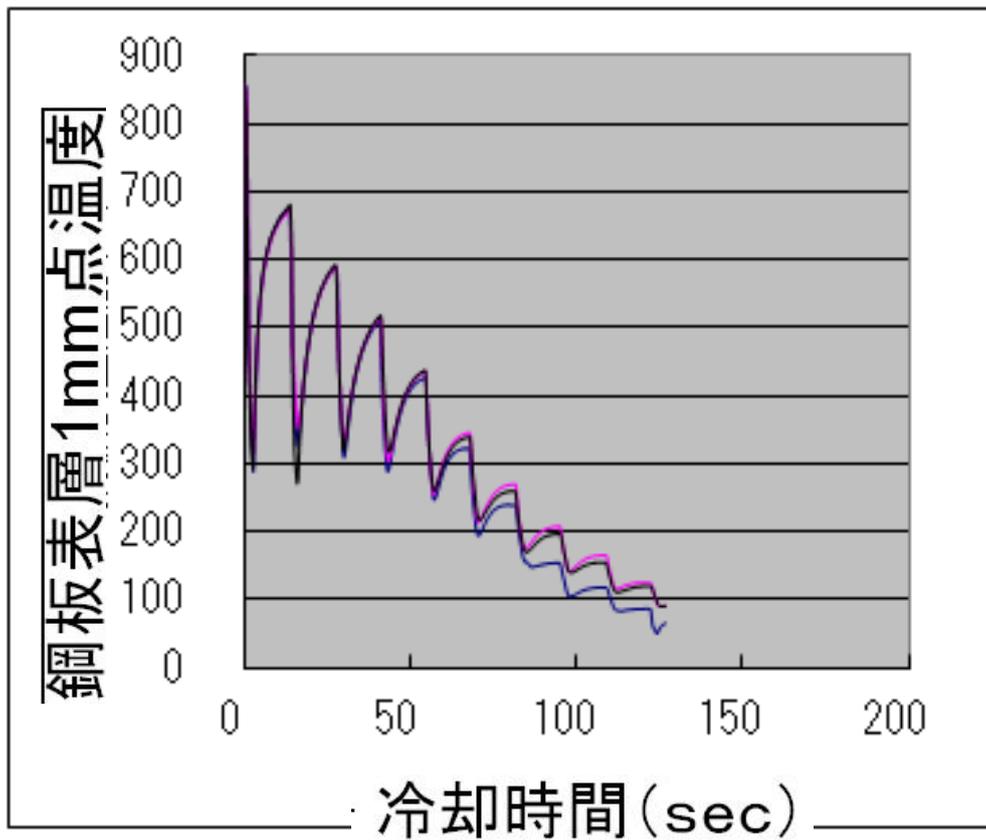


図4. 11 上面せき高さ200mm時の冷却曲線

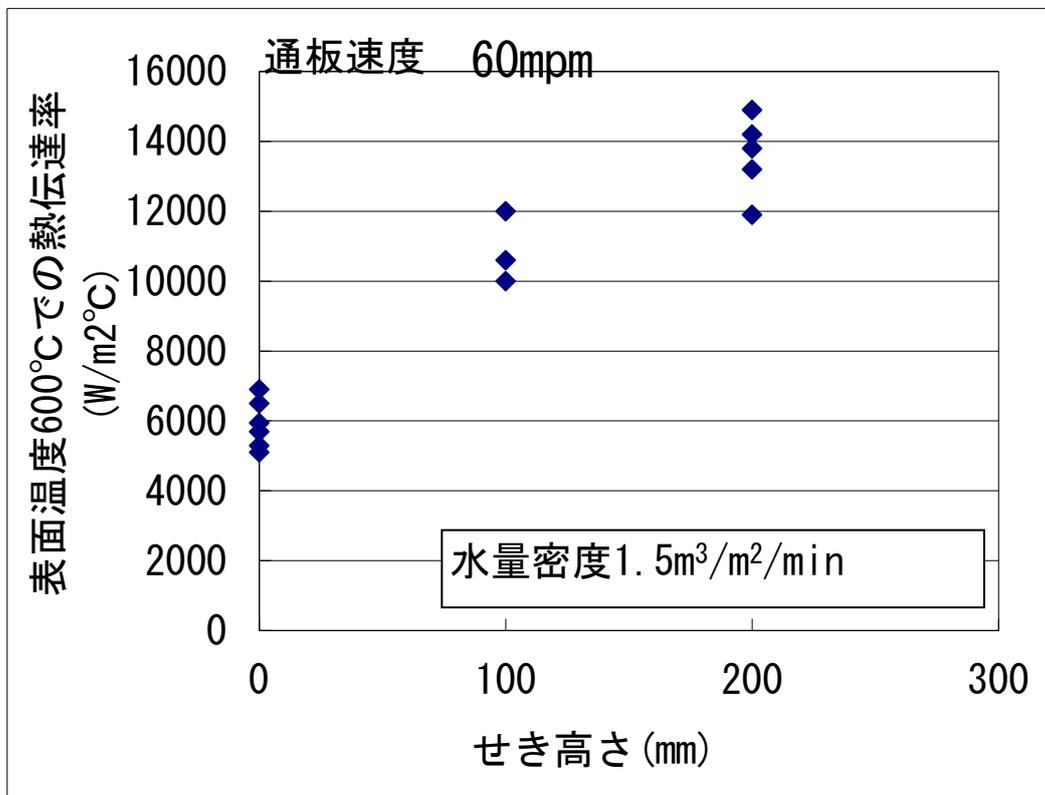


図4. 12 せき高さと表面温度600°C時の熱伝達率の関係

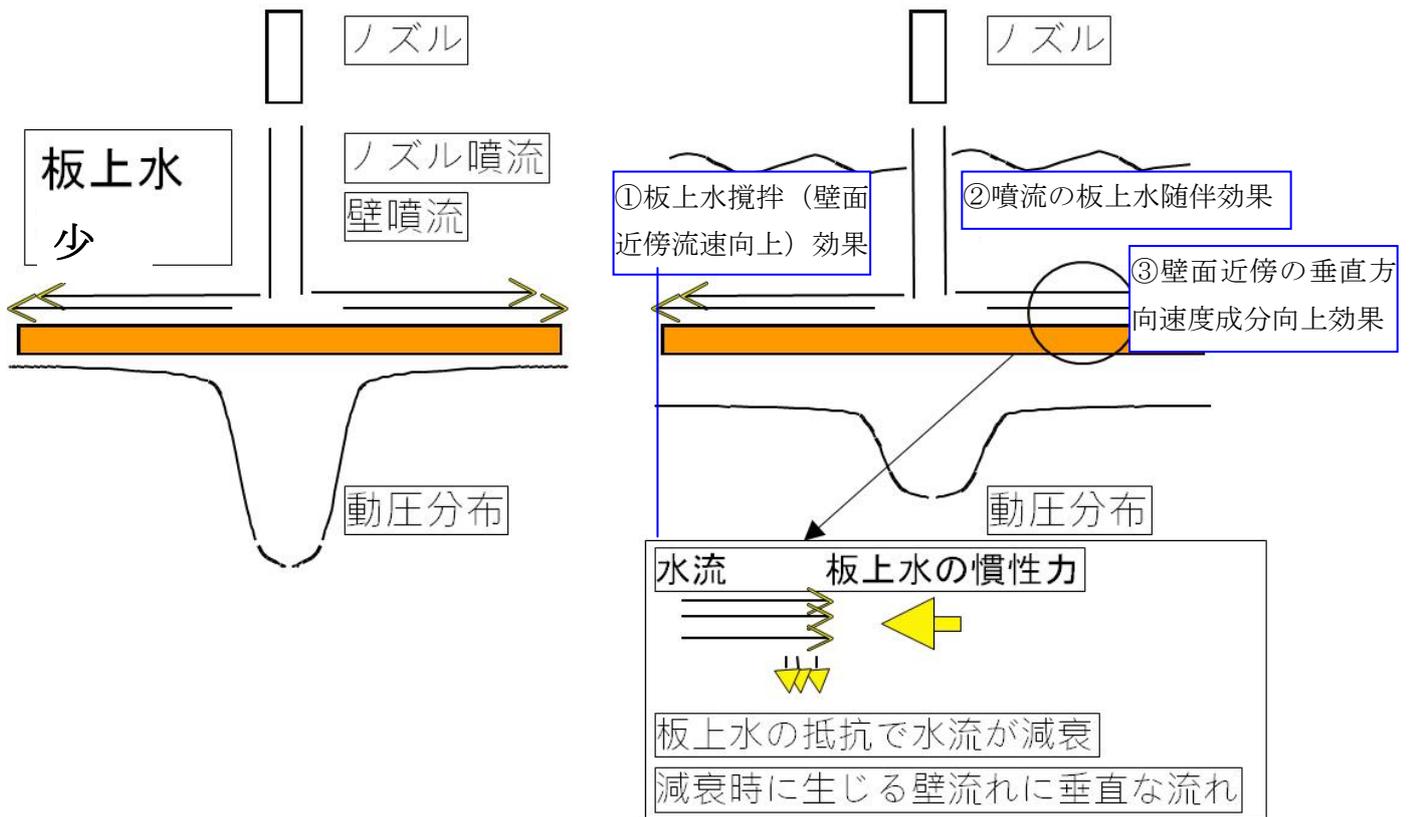


図4. 13 滞留水深さ増化時の熱伝達率向上効果説明図

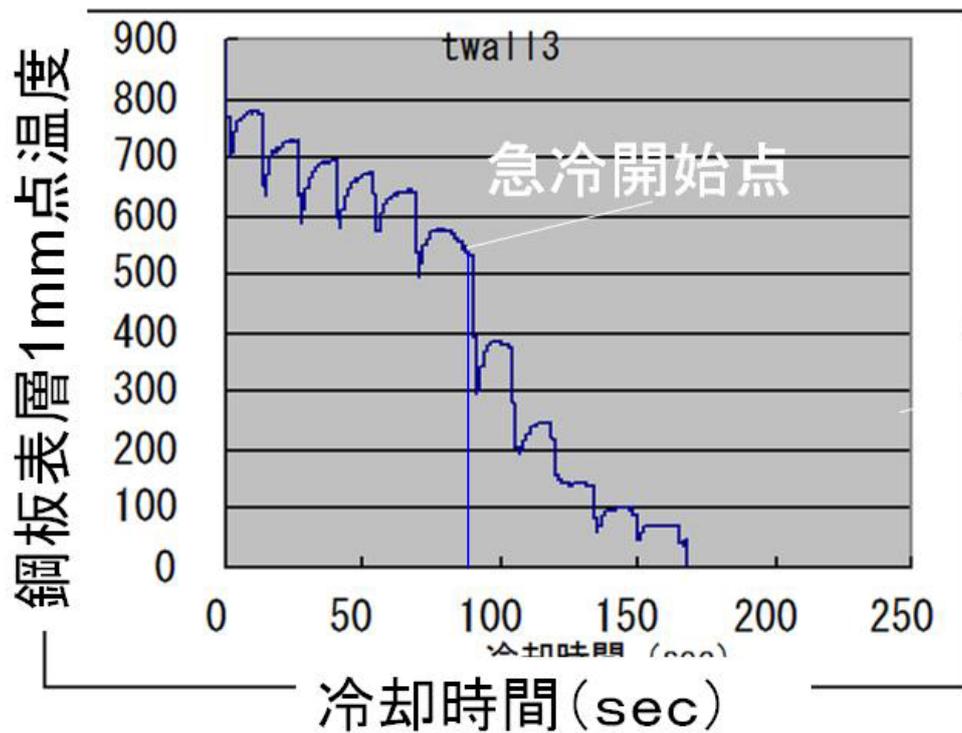


図4. 14 下面（水量密度2.3 [m³/m²/min]）の冷却曲線

進行方向上流側では、鋼板の速度に、押し戻されて冷却面積が縮小鉛直面の上側に類似

進行方向下流側では、鋼板の速度に、押し流されて冷却面積が拡大鉛直面の下側に類似

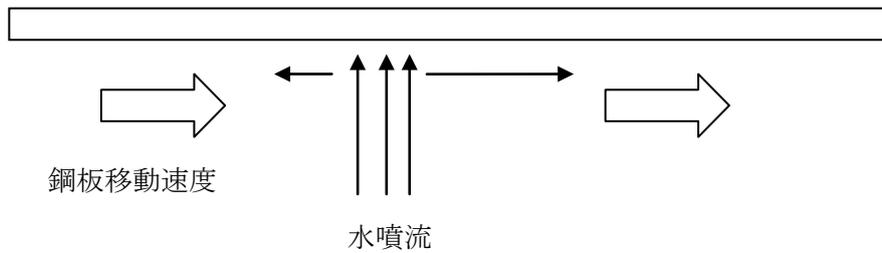


図4. 15 移動鋼板の下面側での伝熱様態

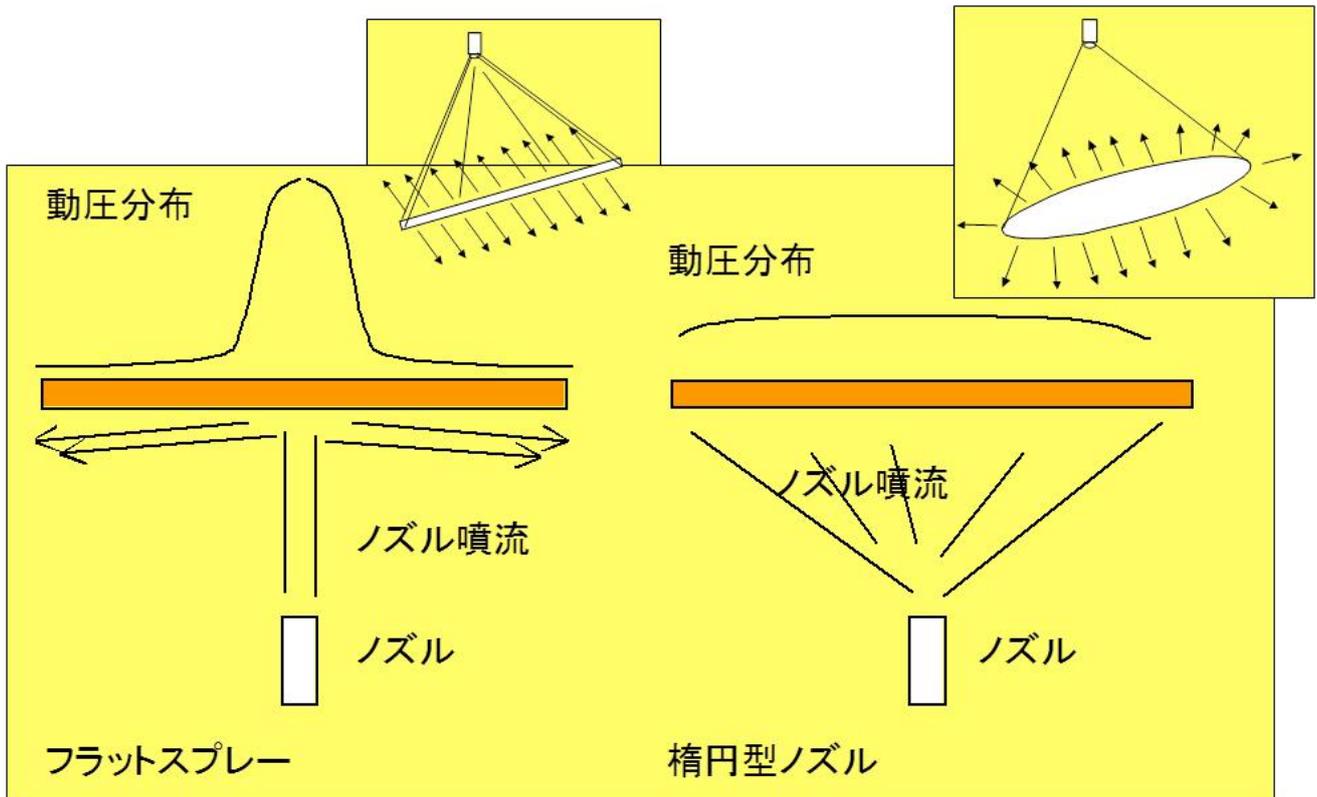


図4. 16 下面における噴流方式

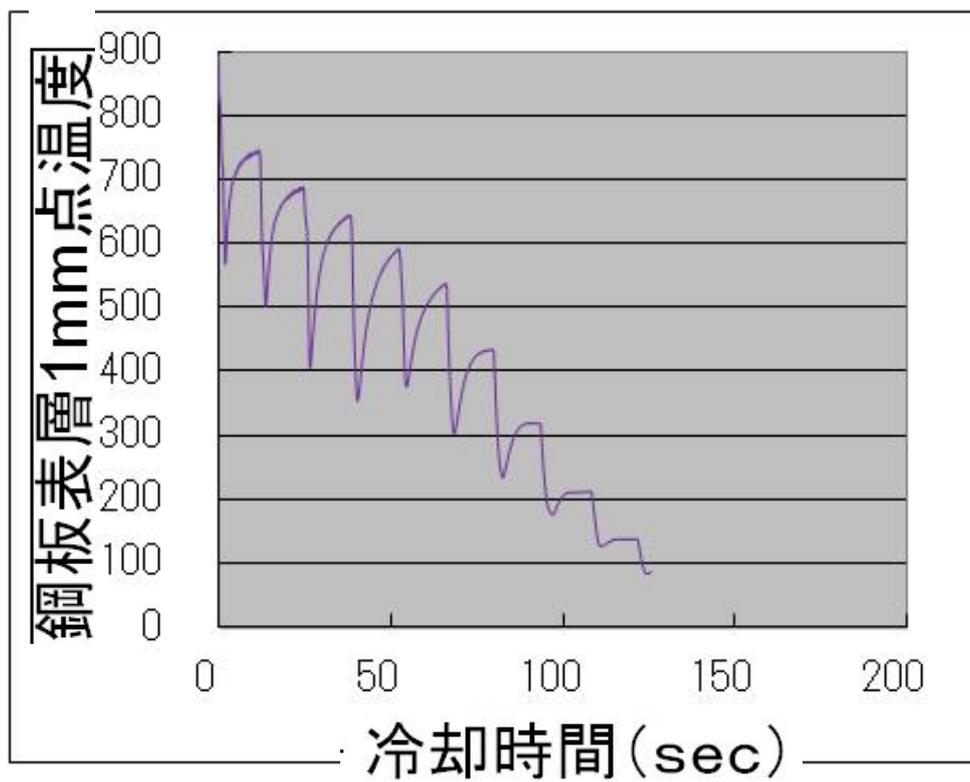


図4. 17 図2. 23配置ノズルでの冷却曲線

第 5 章 . 鋼板冷却装置の検討

5 . 1 冷却に用いる水流の考え方

5 . 2 冷却系設置の考え方

5 . 3 鋼材冷却時の上下面での冷却特性に与える水量 , 通板速度の影響

5 . 4 鋼板冷却装置の検討結果

第 5 章 鋼板冷却装置の検討

本章では第 3、4 章での実験結果を元に、移動鋼板系における冷却装置を製作し、上下面伝熱特性データを採取し、上下面均一冷却条件の提示を行う。なお、ここで想定しているのは板幅が狭く板上水量が少ない、高温鋼板の冷却である。

5.1 冷却に用いる水流の考え方

鋼板の冷却装置の製作に当たっては、まずスプレー流の形状を選定する必要がある。第 4 章では、下面においては全面を衝突噴流で覆うことが良いことが分かった。図 5. 1 にスプレーの噴流形状を示す。面を覆うということから衝突面積が広い、フルコーンスプレー、楕円型スプレー、長円型スプレーが選択される。また、第 2 章の 2. 6 において、噴流の広がり角度が小さい、すなわち、伝熱面への衝突角度が大きいほうが衝突圧力が高く、熱伝達率が高くなることが分かっているので、ここでは、フルコーンスプレーノズルを選択する。上面においても下面との対称性考慮し、ここではフルコーンスプレーを選択する。なお、上面においても図 5. 2 に示すように板上水が滞留した場合、噴流角度が狭いほうが滞留水を透過しやすいと推定される。

次に、フルコーンスプレーを用いる際の均一性に関する検討を行う。図 5.

3 にフルコーンスプレー内での噴流が鋼板に当たった場合の鋼板に垂直な法線方向の速度のイメージ図を示し、図 5. 4 に噴流広がり角度によるもっとも外側の噴流と中心部の垂直な噴流の法線方向速度比を示した。広がりが広がれば、噴流は鋼板に斜めに衝突することになり、法線方向速度は低下していく。速度比で 95% 以上の範囲は噴流法線速度に基づく伝熱能力が均一であるとする、広がりは片側で 15 度～20 度であり、いわゆる広がりがり角度としては 30～40 度以内が良いことになる。

これまでの議論はノズル 1 個の噴流範囲内での均一性であるが、広い面を冷却する場合には、フルコーンスプレー衝突面の配置を考える必要がある。図 5. 5 にフルコーンスプレー衝突面の重なり状況を定義する説明図を示した。重なり比率を衝突部の重なり長さを d として衝突部の直径 D との比としている。図 5. 6 は各重なり状態での鋼板を進行させた場合に各部を通る法線方向速度を積算させるルートを示した図である。最大値は図 5. 6 における A ルートでこれは一方衝突部の縁の中心を通るルートである。最小値のルートは重なり部の中心を通るルートとしている。図 5. 7 に B ルートを通る際の噴流法線方向速度成分を計算する場合のパラメータを示した。これらのパラメータを用い、A、B 各ルートの法線方向速度を積算する式を次式で示す。

$$A \text{ ルート} \quad A = V \int_{-\alpha}^{\alpha} \cos \theta d\theta = 2V \int_0^{\alpha} \cos \theta d\theta = 2V [\sin \theta]_0^{\alpha} \quad (5.1)$$

$$B \text{ ルート} \quad B = 2V \int_{\beta}^{\alpha} \cos \theta d\theta \quad (5.2)$$

$$\beta = a \tan(\tan \alpha \times \sin \gamma) \quad (5.3)$$

この法線方向速度成分の積算値の最大値 A と最小値 B の比をとったのが図 5. 8 である。図 5. 8 に示すようにフルコーン噴流の広がり角度が広くなるに従い、重なり比率を上げないと冷却能力の最大最小比率は大きくできない。広がり角度 60 度程度であれば、重なり比率を 0. 5 にすることで最大最小比を 0. 9 とほぼ均一にすることができる。

上記の考え方に沿って、図 2. 25 に示すようなノズル配置としている。

5.2 冷却系設置の考え方

ここでは、冷却装置の上下面の構成として、下面のノズルの選定、下面のノズルを 2.2.3.3 に示したように、鋼板から近い位置について設置した場合にヘッダーと鋼板間に滞留する水の影響、さらには上下面の水量比率について検討した。

下面においては、ノズルの広がり角度の影響と下面のノズルヘッダー上に滞留する水の冷却に与える影響について実験を行った。実験結果はいずれも冷却帯 1 回通過時の降下温度を実際の製造ラインで使用する板厚 30 [mm] の値に (30 / 19) 倍して換算した値を示した。

図 5.9 にノズル広がり角度変更時の降下温度を示した。広がり角度が 60 度と小さいほうが約 8 % 程度温度降下が大きく、広がり角度が伝熱特性に影響することが分かった。また、図 5.10 にヘッダー上の滞留水とフルコーンスプレー噴流の関係を図示した。図 5.11 は滞留水有無での実験結果を図 5.9 と同様 1 回冷却時の温度降下で示した図である。滞留水がない状態は、図 2.26 の天板を外した状態で行った。図 5.11 に示すように点板があり、滞留水がある方が冷却能力は約 20 % 上昇している。これは、滞留水を噴流が吹き上げて水量密度を高くする効果と推定される。

図 5.12 に上面ノズル水量と冷却能力としての 1 回冷却時の温度降下を示す。点線は下面試験時の冷却能力である。図に示すように上面フルコーン

ノズルのベーン改造有無によるデータを示している。ベーン改造時のデータはややばらついているが、同じ水量で約10%冷却能力が向上している。これはベーン改造により同一水量でも伝熱面衝突圧力が向上した効果である。

5.3 鋼材冷却時の上下面での伝熱特性に与える水量，通板速度の影響

本項では、上下面の伝熱特性に与える水量通板速度の影響を整理し、上下均一冷却を可能とする制御の基礎となるデータを提供する。

試験範囲は、通板速度で0.7～1.5 [m/sec]、ノズル水圧で0.03～0.3 [MPa]（上下面で水量は異なる）としている。図5.13に下面冷却時の、図5.14に上面冷却時の1回冷却時の温度降下を示した。いずれも通板速度に関してはほぼ比例した値となっている。ここで、冷却能力を整理して評価するために、各通板速度ごとに、2.2.5に述べた手法で図5.15、5.16を用いて冷却時の平均熱伝達率を求めた。その結果を図5.17（下面）、図5.18（上面）に示す。なお、表5.1にヘッダー圧力と水量密度の関係を示した。水量密度はベルヌーイの定理より、ヘッダー圧力の比の平方根に比例する。

図5.17では下面の熱伝達率を示しており、0.7，1.5 [m/sec]の熱伝達率はヘッダー圧力（水量密度に対する変化状況）もほぼ同じであり、下面の熱伝達率は通板速度の影響を受けていないことが分かる。これは、下面における噴流衝突部面積を増加した効果もあると推定される。たとえば、線状の衝突部により冷却された場合、通板速度が速いと衝突部を移動する間に冷却部は復熱しないで次の冷却に入る可能性があり、その場合、通板速度が

遅く、冷却部間で十分復熱してから冷却される状態と同じになるとは考え難い。

図5.18では上面の熱伝達率を示しており、こちらでは、通板速度が速くなると熱伝達率が低下する。この2つの事象は、下面では板上水の影響が少なく、上面はせきはないが板上水の影響を受けていると推定される。特に、上面では通板速度が遅い場合は、水量が増加しても熱伝達率の増加率が低く、板上水の冷却が効いていると推定される。一方、通板速度が速い場合は、盤上水の噴流に対する横向き相対速度が速く、噴流の衝突を阻害する方向に影響を与えていると推定され、このため、通板速度が遅い場合に比較して熱伝達率が低くなるとともに、ヘッダー圧力が増加し、水量が増加して、噴流の衝突圧力が増加すると熱伝達率の増加率（熱伝達近似式の指数）が大きくなっていると推定される。

なお、図5.17、5.18に提示されたデータをもとに上下面のヘッダー圧力を制御すれば、上下面を均一冷却することができ、鋼板のそりなどの発生がない冷却を行うことができる。

5.4 鋼板冷却装置の検討結果

第5章では、鋼板冷却装置を新規に検討し、3、4章で得られた結果を考慮した冷却装置を製作した。すなわち、上下面の噴流衝突部を極力多くして鋼板冷却帯の全面を覆うように設置した。また、フルコーンスプレーの導入に関しては、衝突圧力を高くし、冷却能力を向上させる手法、幅方向の均一性を往生させるための配置に関する考え方を導入して冷却装置を製作した。その結果、

- 1) 下面は通板速度の影響をほとんど受けない冷却装置とすることができた。
- 2) 上下面の熱伝達特性について、水量・通板速度の影響を整理した式を提示し、これを使って制御することにより上下面の均一冷却が可能となる。

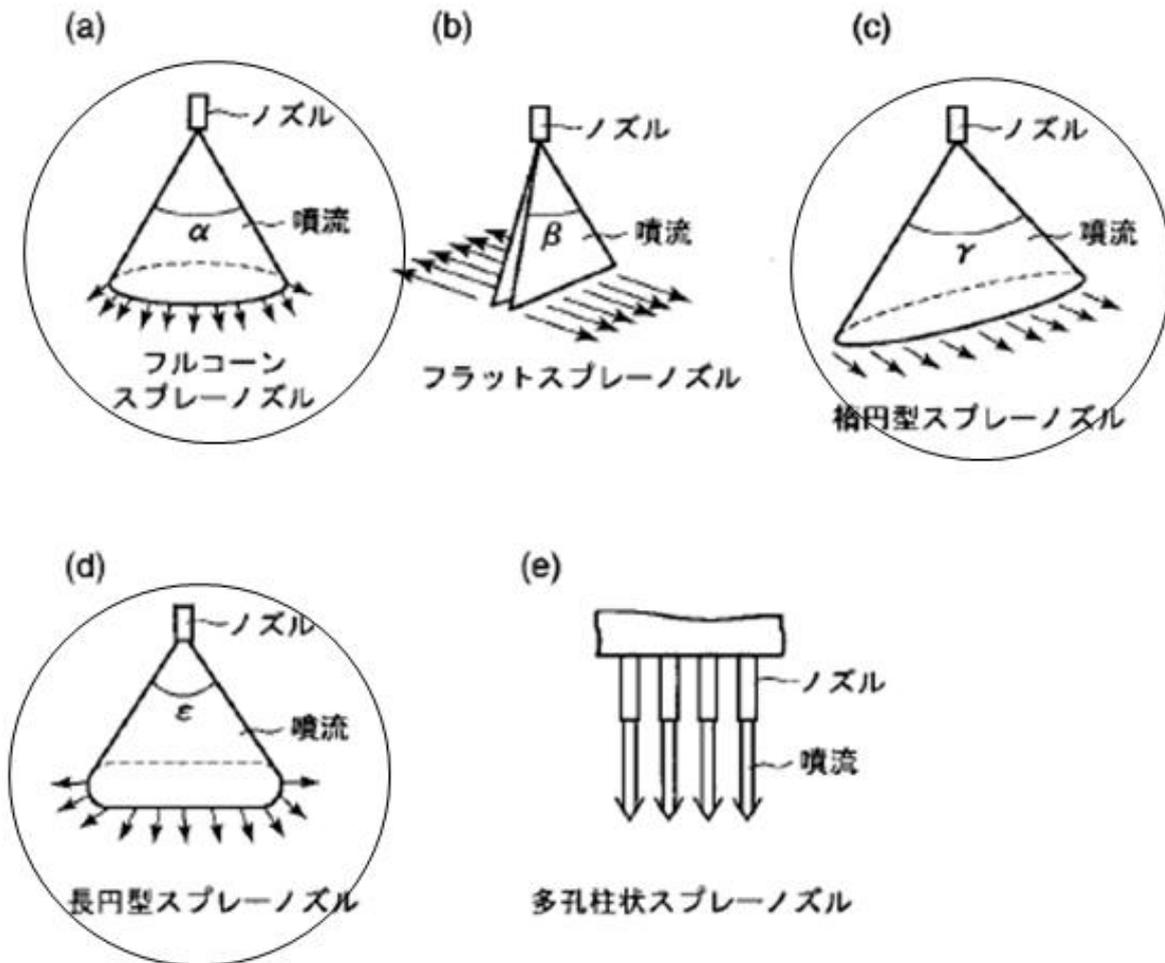


図5. 1 スプレーノズルの噴流形状

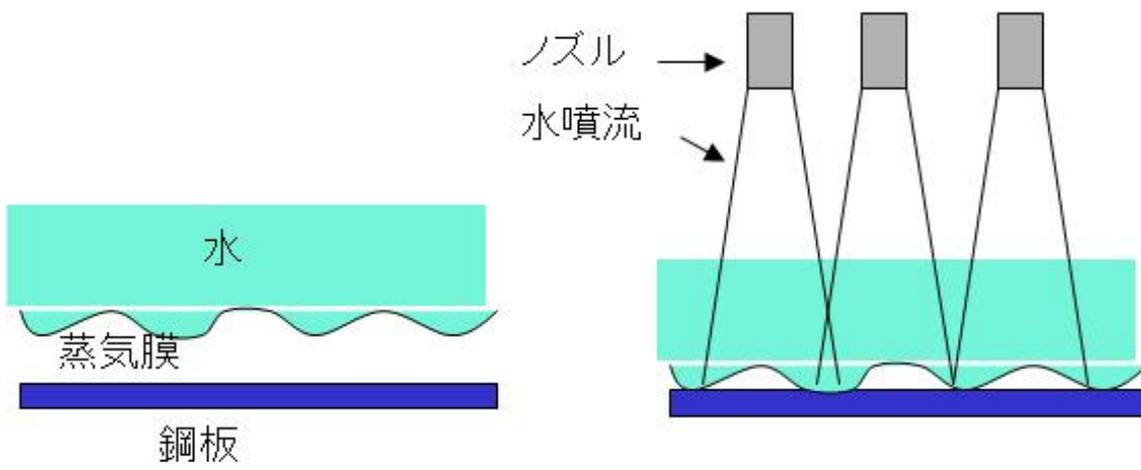


図5. 2 噴霧観察 ($Q=3.3$ [l/min], $\theta=180^\circ$)

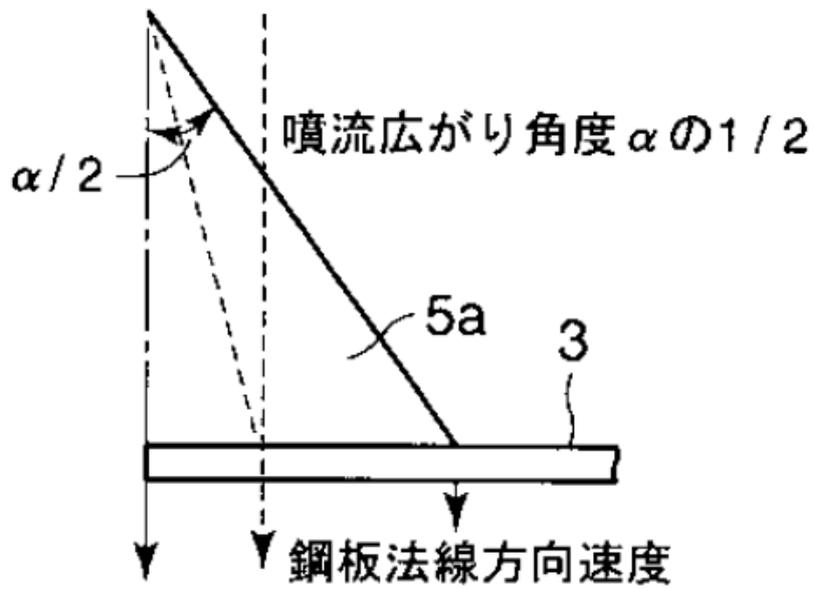


図5. 3 フルコーン（充円錐）スプレーノズルにおける冷媒噴流の広がり角度 α と冷媒噴流の鋼板法線方向の速度分布を示す説明図

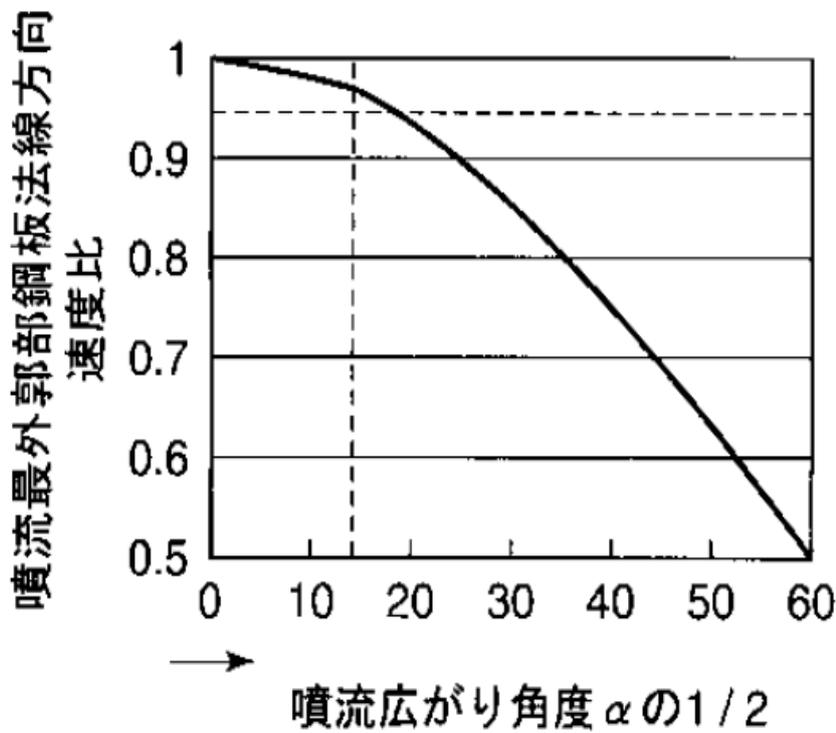
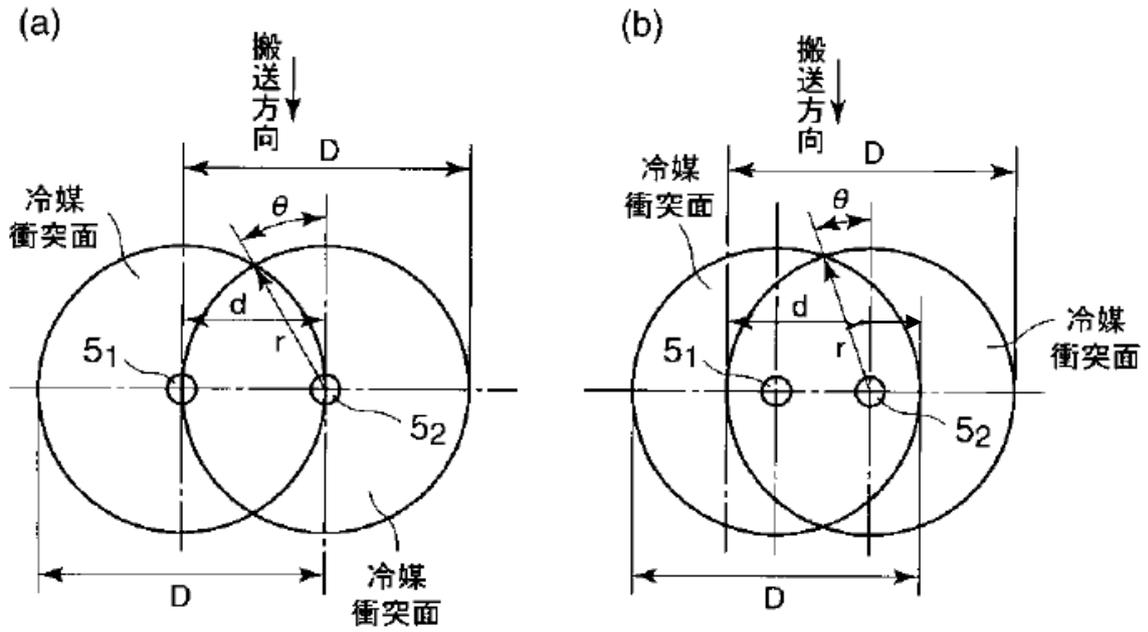


図5. 4 充円錐スプレーノズルの冷媒噴流の広がり角度 α と、冷媒噴流の鋼板法線方向の速度比との関係



1/2ラップ=重なり比率($d/D=0.5$)
 $r=30\text{mm}$

1/2ラップ以上($2/3$)=重なり比率($d/D=0.67$)
 $r=30\text{mm}$

r :半径

θ :重なり角度

図5. 5 搬送方向で隣接する充円錐スプレーノズル間での冷媒噴流の衝突面の干渉（オーバーラップ）例

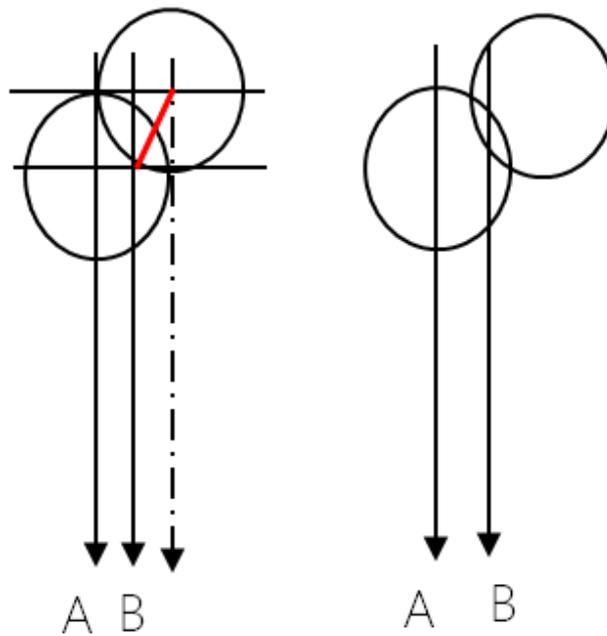


図5. 6 オーバーラップ部を評価する際の評価時に通るルート例

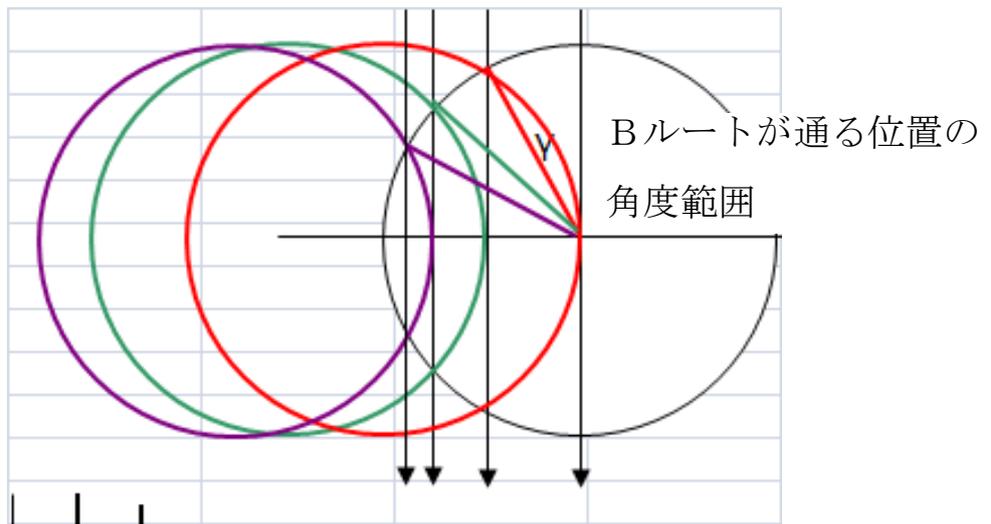
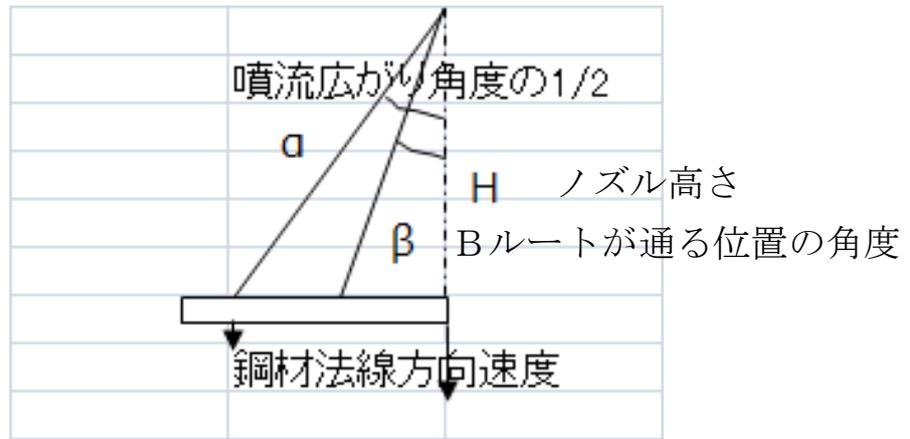


図5. 7 Bルートの噴流法線速度成分計算時のパラメータ

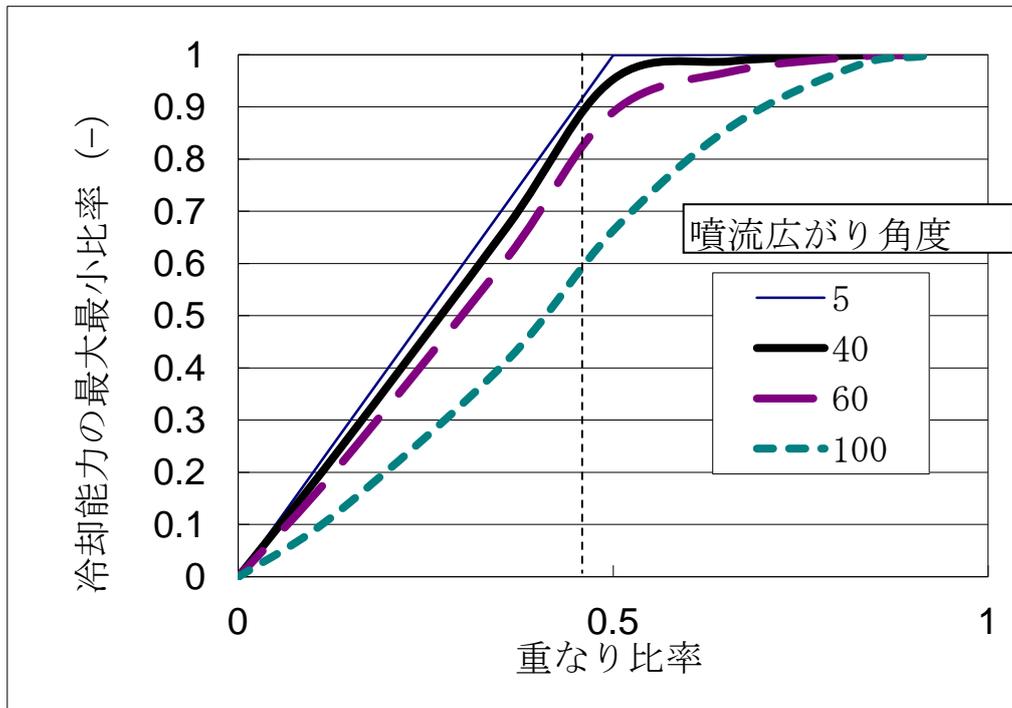


図5. 8 オーバーラップ部を評価する際の評価時に通るルート例

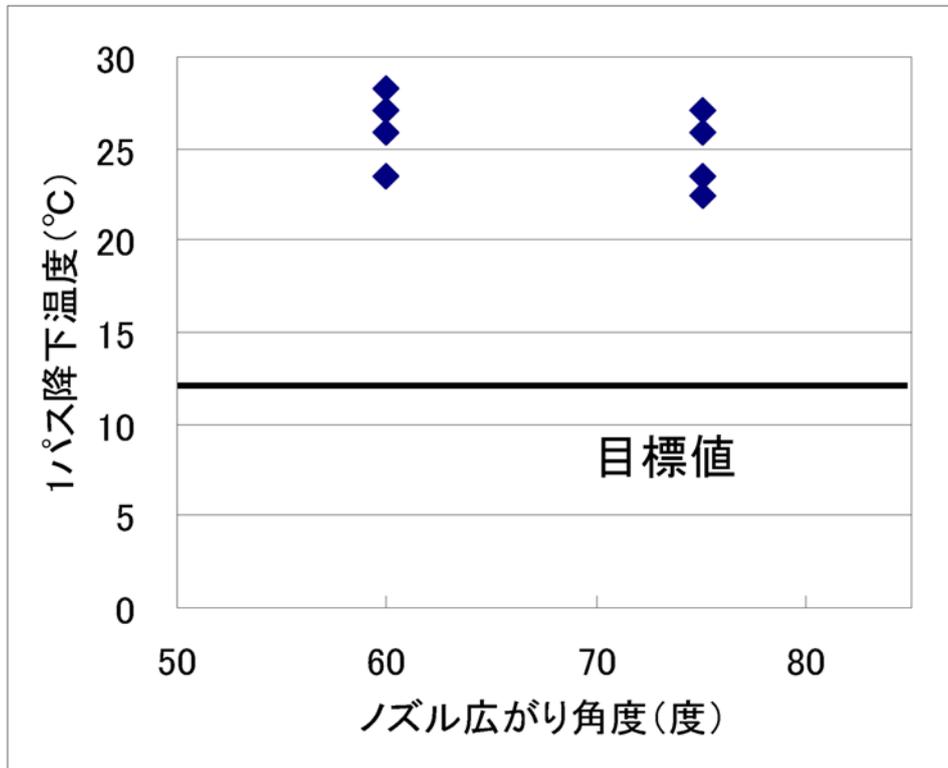


図5. 9 ノズル広がり角度に関する試験結果

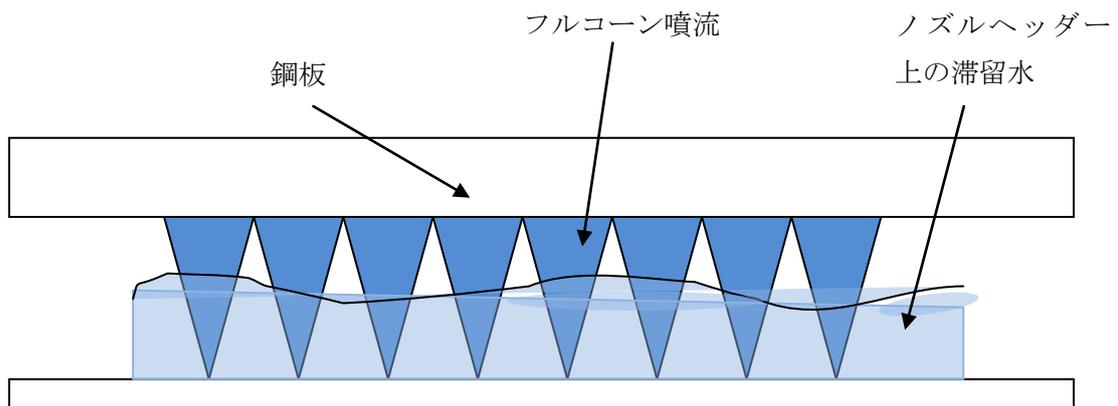


図5. 10 滞留水吹きあげ効果説明図

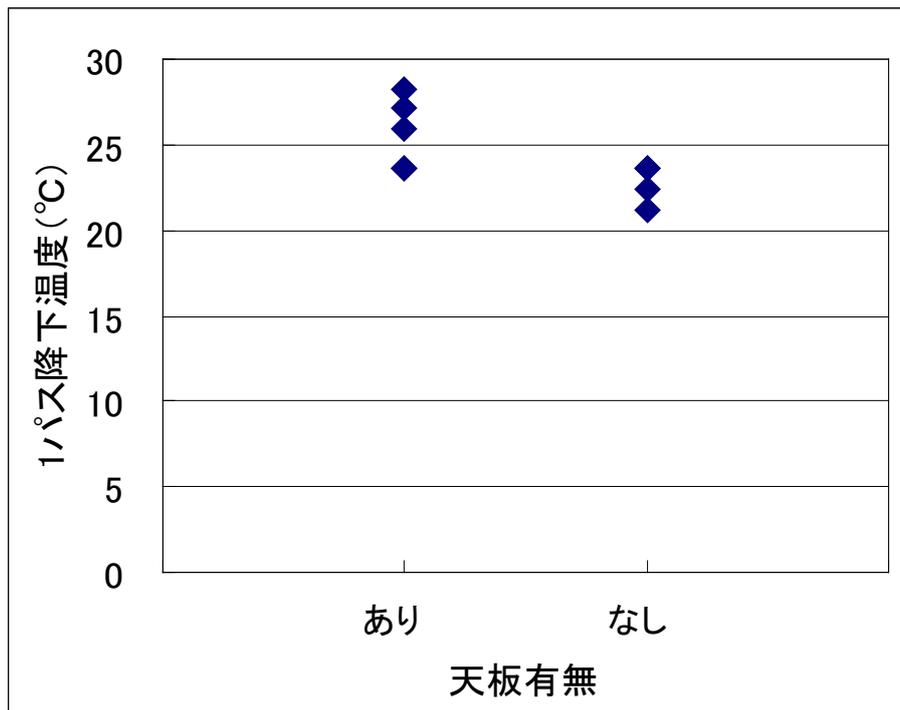


図5. 1 1 ノズル部滞留水吹きあげ効果に関する試験結果

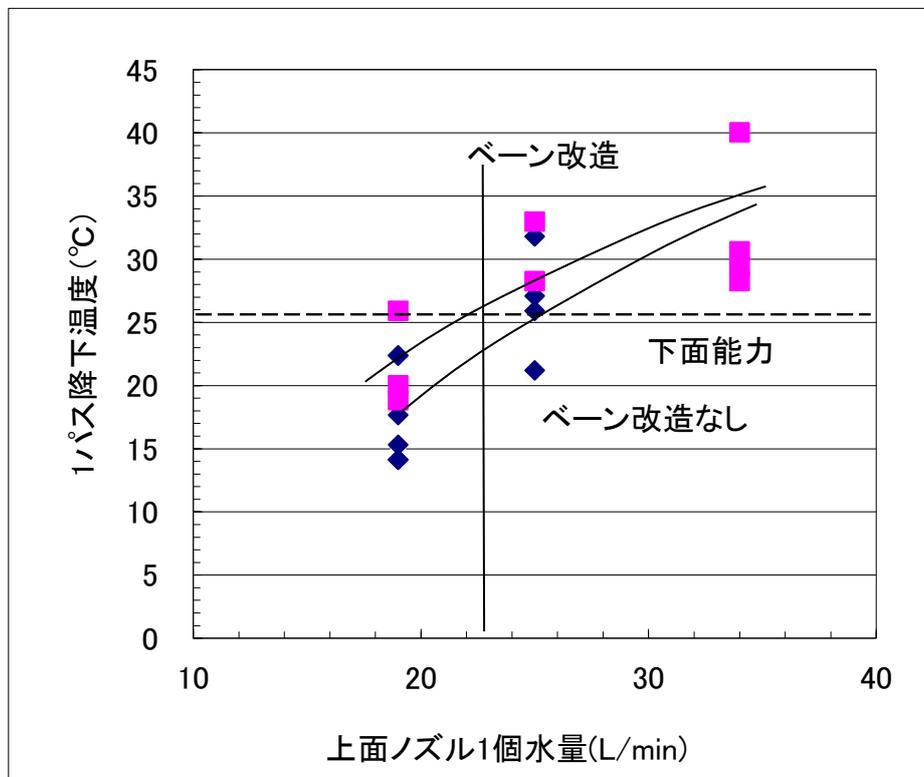


図5. 1 2 上面ノズル水量と冷却能力の関係

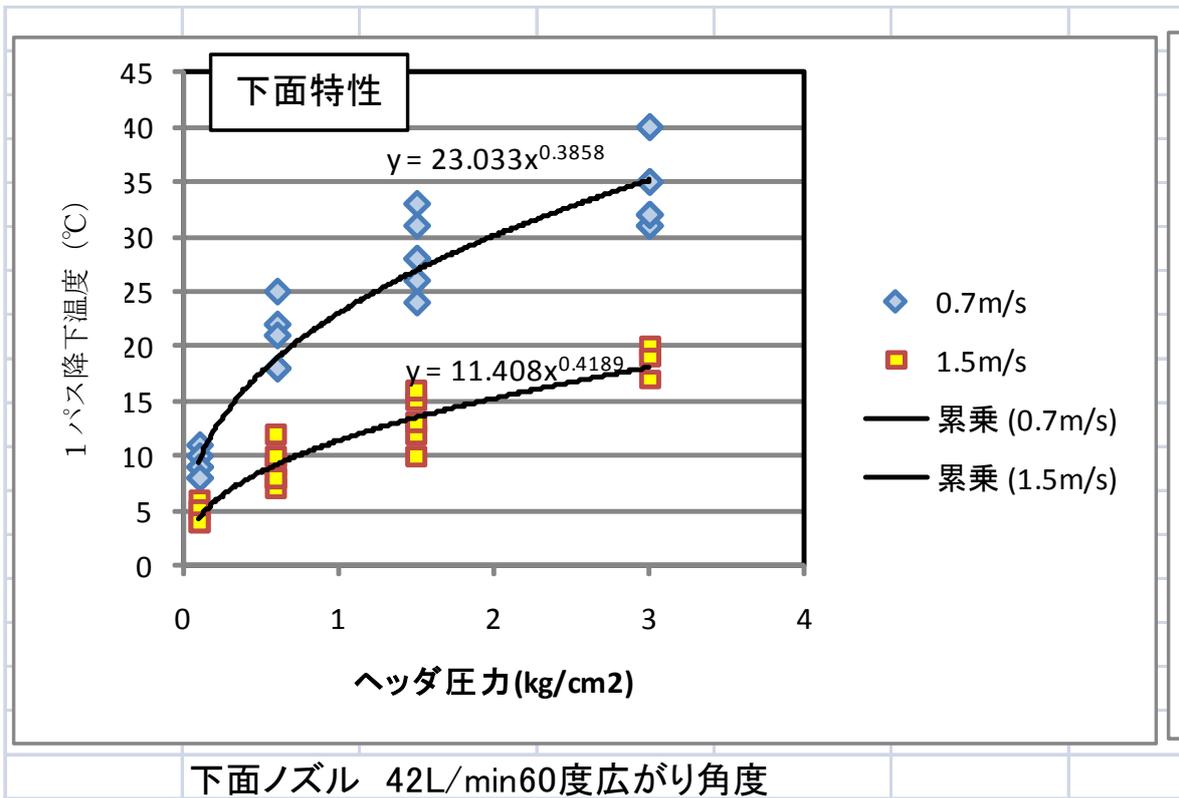


図5. 13 下面冷却時の冷却能力

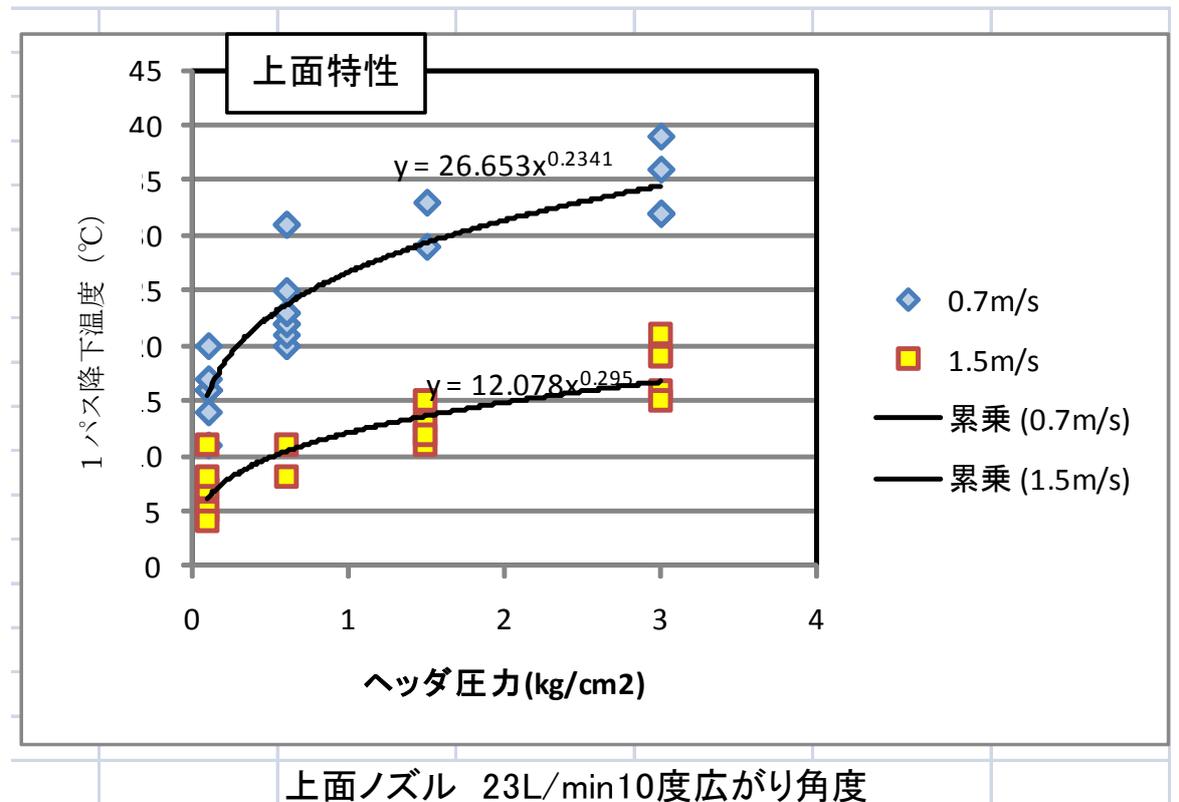


図5. 14 上面冷却時の冷却能力

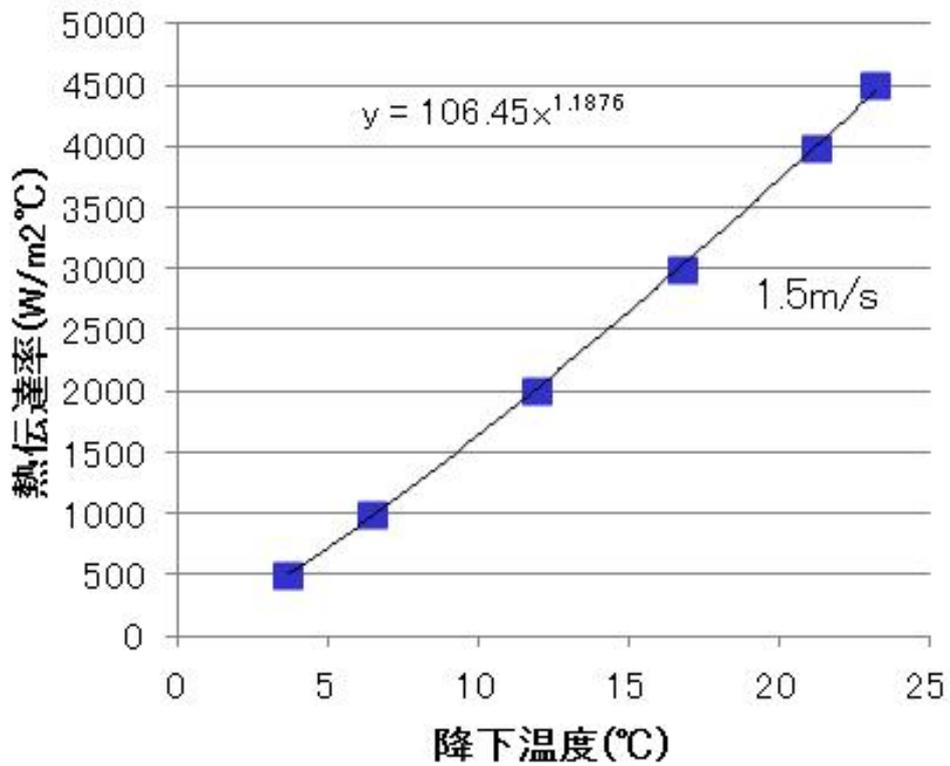


図5. 15 通板速度 1.5m/sec 時の試験片温度降下と冷却時平均熱伝達率の関係

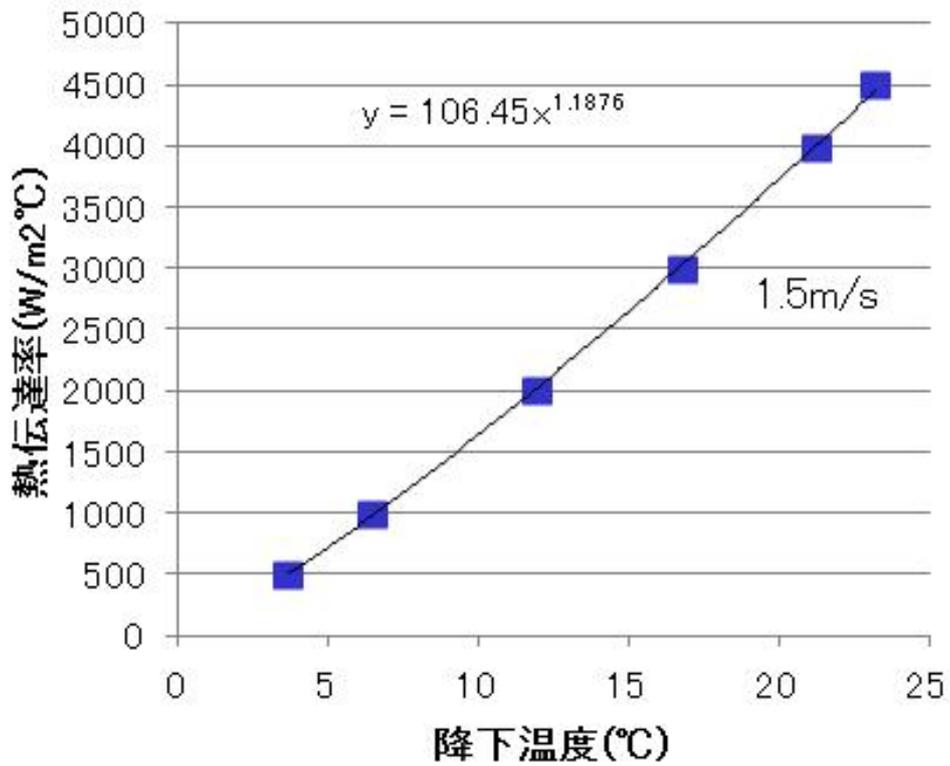


図5. 16 通板速度 0.7m/sec 時の試験片温度降下と冷却時平均熱伝達率の関係

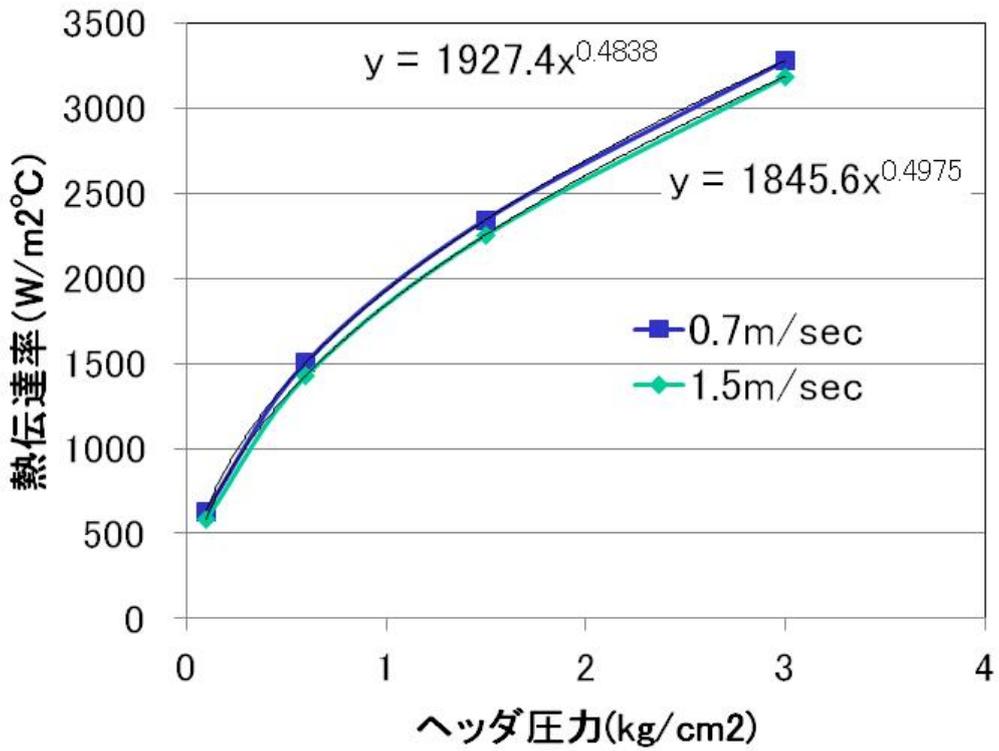


図5. 17 下面の冷却時熱伝達率の水量変更時、速度変更時の変化

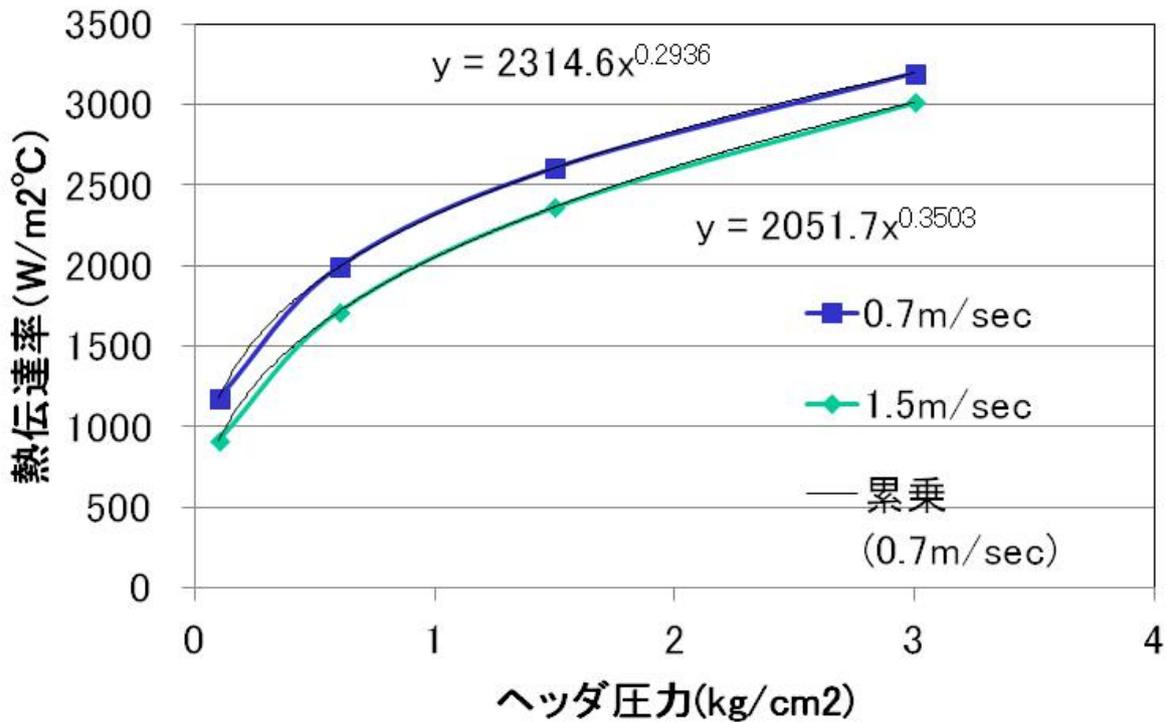


図5. 18 上面の冷却時熱伝達率の水量変更時、速度変更時の変化

表 5. 1 ヘッダー圧力と上下面水量密度の関係

ヘッダー圧力	下面水量密度	上面水量密度
Mpa	$\times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{sec}$	
0.01	1.35	0.74
0.05	3.02	1.65
0.10	4.27	2.34
0.15	5.23	2.86
0.20	6.04	3.31
0.30	7.40	4.05

第 6 章 . 結 論

第 6 章 結論

本論文では、板上水を伴う鋼材の冷却不安定現象の解明と制御冷却技術の開発に関して、まず、基礎的な静止実験系で伝熱面の姿勢を変えた実験を従来に例がない噴流衝突部に比較して広い面で行い、伝熱面上の液膜状態のモデル化を図るとともに、伝熱特性の測定を行って、次のような結論を得た。

(1) 高温域における噴霧冷却熱伝達特性に及ぼす伝熱面姿勢の影響は顕著では無いが、鉛直平面系では、特性が上方と下方側で非対象であることを示した。

(2) 鉛直平面系では、遷移域熱伝達率に及ぼす姿勢の影響が無視できないことが明らかになり、その原因として液膜の反跳現象などの液膜挙動が考えられることを示した。

(3) 下向き平面系では、遷移域熱伝達率において、噴霧衝突点から離れた領域で熱伝達率が上向き平面系より低下しており、姿勢の影響が無視できないことが明らかになった。

さらに、移動鋼板系において、板上水を定常的に維持しながら伝熱特性を求めることができる実験系を開発して、上面の板上水を伴った場合の伝熱特性、下面の伝熱特性を比較して、以下の結論を得た。

(4) 移動鋼板下面における冷却では、膜沸騰域ではスプレー近傍のみが冷

却され、遷移沸騰域では冷却面積が進行方向下流側に拡大する。一方上面においては、板上水に伴う冷却が行われうため、冷却面積は下面より広がっている。

(5) 上面において板上水深さが変化すると伝熱特性が変化する。その変化は各沸騰域の熱伝達率の大きさとともに、すなわち、極小熱流束点も変化する。

(6) 下面の噴流の衝突域を広げることにより、伝熱特性を上面に近付け、伝熱能力を向上させることが可能である。

そして、以上の結果に基づき、鋼板の冷却装置をスプレーノズルの構造、配置をも含めて、上下面の伝熱特性を調査することにより、以下の結論を得た。

(7) 下面の冷却に関しては下面全域を噴流衝突部で覆うことにより、通板速度の影響をほとんど受けない冷却装置とすることができた。

(8) 上下面の熱伝達特性について、水量・通板速度の影響を整理した式を提示し、これを使って制御することにより上下面の均一冷却が可能となる。

謝 辭

參 考 文 獻

謝辞

本論文は著者が新日本製鉄株式会社に入社してから、東京大学生産技術研究所とともに行った研究成果、勤務先で行った研究成果をまとめたものである。この期間に多くの方々から賜りましたご指導、ご協力に対してここに深く感謝いたします。中でも本論文をまとめるに当たり、東京大学生産技術研究所における大学院課程では今日の礎を築いていただき、また、現在まで長期にわたりご指導、助言をいただいた、

玉川大学 大久保 英敏 教授

東京大学 西尾 茂文 名誉教授

に心より感謝いたします。

また、論文をまとめるに当たり、貴重なご意見とご助言、励ましをいただいた、

横浜国立大学 宇高 義郎 教授

玉川大学 相馬 正宜 教授

川森 重弘 教授

に深く感謝いたします。

また、新日鉄住金株式会社のプロセス技術部、圧延研究開発部の方々には、仕事の面でご指導をいただき、感謝いたします。中でも、

小川 茂 顧問、松永 久義氏、村上 英樹 部長、には種々の助言とご指導をいただき、本研究の根本についてもご指導をいただきました。

そして、本研究の実験を支えていただいた、

上村 光弘 氏、真船 潤 氏、高口 賢一氏、米田 輝彦氏に深く感謝いたします。本研究を遂行し、まとめるまではここにあげた方以外にも数多くの方々のご支援とご協力があったことをここに感謝いたします。最後に研究生活を支えてくれた家族、特に妻と両親に心から感謝いたします。

2015年1月 芹澤 良洋

文献

- [1] 三塚, 日本鉄鋼協会会誌, 79-6(1993), 405
- [2] 新日本製鐵株式会社, 君津製鐵所パンフレット, (2000), 3
- [3] 新日本製鐵株式会社, 鉄と鉄鋼がわかる本, (2004), 94
- [4] 新日本製鐵株式会社編, N i p p o n S t e e l M o n t h l y , 163(2006), 11
- [5] 新日本製鐵株式会社, 鉄の薄板厚板がわかる本, (2009), 30
- [6] 新日本製鐵株式会社, 鉄の薄板厚板がわかる本, (2009), 22, 26
- [7] 十代田哲夫, 塑性と加工, 46(2005), 570
- [8] 新日本製鐵株式会社, 鉄の薄板厚板がわかる本, (2009), 73
- [9] 芹澤、明石、他、材料とプロセス、18-2(2005)、420
- [10] 日本鉄鋼協会, 鉄鋼便覧第4版, (2002)
- [11] 日本機械学会編、沸騰熱伝達と冷却、(1989), 8, 195
- [12] 日本機械学会編、沸騰熱伝達と冷却、(1989), 231
- [13] 大久保, 生産研究, 46-12(1994), 635
- [14] 西尾、芹澤、日本機械学会論文集、53-487、B(1987), 1061
- [15] Kohler, C, Jescher R. Steel Research, 61-7(1990), 295
- [16] Incropera, F. P., et al., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, (2001)
- [17] 大久保、西尾、日本機械学会論文集、57-539、B(1991), 2349
- [18] 三塚, 福田, 鉄と鋼, 62-2(1983), 262.
- [19] 田中, 他, 三菱重工技報, 2-2 (1965), 192
- [20] Choi, K. J. and Yao, S. C., Int. J. Heat and Mass Transfer, 30(1987), 311
- [21] Rybicki, J. R. , Mudvar I., Int. J. Heat and Mass Transfer, 49(2006), 5
- [22] 中田、黒木、他、鉄と鋼、99-11(2013)、635
- [23] 中田、黒木、他、鉄と鋼、100-8(2014)、958
- [24] 金、西尾、他、日本機械学会論文集、62-597、B(1996), 1991

- [25] 藤林、福田、他 2 名、公開特許公報 2 0 1 0 - 6 4 0 9 8 号
- [26] 株式会社いけうち、1 流体ノズル製品カタログ、24
- [27] 森山 昭・荒木 和男、化学工学、47-9、(1983)、565.
- [28] 大久保、生産研究、46-12(1994)、641.
- [29] 千田、他、、日本機械学会論文集、52-481、B(1986)、3372
- [30] T.Ueda, et al., Bull. JSME, 22-167, (1979), 724.
- [31] Beck, J. V., Int. J. Heat Mass Transf., 13(1970), 703.
- [32] 山本、芹澤、材料とプロセス、18-2(2005)、418
- [33] 金、西尾、他、日本機械学会論文集、60-574、B(1994)、2158
- [34] 伊藤・ほか 2 名、日本機械学会論文集(B)、55-511(1989)、805.
- [35] 大久保、真船、ほか 3 名、伝熱シンポジウム講演論文集、40(2003)、E111
- [36] 西尾、上村、熱処理、23-5(1983)、260
- [37] 大久保、東京大学博士論文、(1992)、209