

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年6月21日現在

機関番号：32613

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560224

研究課題名（和文） 高張力鋼板（ハイテン・超ハイテン）製造プロセス改善に関する熱工学的検討

研究課題名（英文） Examination based on Thermal Engineering for Improvement of Manufacturing Process of High Tensile Strength Steel

研究代表者

大竹 浩靖（OHTAKE HIROYASU）

工学院大学・工学部・教授

研究者番号：40255609

研究成果の概要（和文）：本研究は、主として自動車車体に用いられる高張力鋼板（ハイテン）の製造プロセスラインの熱工学的改善のため、沸騰熱伝達特性の高精度予測およびこの知見に基づく鋼材の冷却特性を明らかにすることを目的とする。その結果、高温加熱壁面での液体の濡れ開始時の局所温度が熱力学的過熱限界温度に近いことを示した。また、熱伝導と沸騰熱伝達に基づく冷却モデルの構築を行い、温度変動等、冷却の様相の定量化に成功した。

研究成果の概要（英文）：

In order to improve manufacturing process of High Tensile Strength Steel for vehicle body, the purposes of the present research was prediction of boiling heat transfer and clarification of cooling process under manufacturing steel. The present experimental results showed that sputtering temperature was close to the thermodynamic limit of liquid superheat, 300°C. The behavior of rewetting on high superheated surface was also simulated by using the transient heat conduction with the conventional correlations of boiling heat transfer.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	2,900,000円	870,000円	3,770,000円
2010年度	500,000円	150,000円	650,000円
2011年度	500,000円	150,000円	650,000円
年度			
年度			
総計	3,900,000円	1,170,000円	5,070,000円

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：対流、沸騰、鉄鋼製造プロセス、クエンチ

1. 研究開始当初の背景

(1)自動車分野では、「環境負荷低減のための軽量化」と「衝突安全性向上」という相反する課題を解決するため、強だけでなく成形性にも優れる鋼板が望まれている。主として自動車車体に用いられる高級鋼材、高張力鋼

板（ハイテン・超ハイテン）は、近年の自動車の「環境負荷低減のための軽量化」と「衝突安全性向上」とを解決するための強だけでなく成形性にも優れる車体骨格に使用される鋼板である。

(2) この高張力鋼板の製造に欠くことのできない技術が、TMCP 技術である。この技術は、熱間圧延における制御圧延技術をさらに発展させ、圧延ライン上で圧延後の冷却過程を制御する制御冷却技術を組み入れることにより金属組織をコントロールする技術である。この冷却の際には、鋼材品質の安定化に影響を与える鋼材温度の時間的空間的均一性はその許容温度範囲が $400^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$ 程度と言われている。しかしながら、鋼材表面の酸化膜の発生を主因とする影響により、その許容範囲温度が数百 $^{\circ}\text{C}$ にも及び、これを埋める方法として合金元素の添加や再加熱再圧延工程の付加に委ねられている。

(3) この冷却不安定の主因は熱工学的には沸騰熱伝達における極小熱流束点付近の不安定性であり、上記の改善にはこの高精度の予測が必要とされる。

(4) 昨今、MEMS 技術、赤外線サーモグラフィおよび汎用数値計算コードが広く利用できるより、沸騰熱伝達特性の高精度予測およびこの知見に基づき鋼材の冷却特性を検討する環境が整いつつある。

2. 研究の目的

鉄鋼の製造工程、特に金属組織の生成は、水冷時の冷却特性と密接な関わりを持つ。多くの場合、この冷却には沸騰現象を伴い、沸騰熱伝達の詳細な理解、特に高温面上での濡れ開始条件の把握が必要である。過去、濡れ開始条件及び濡れの挙動、即ち膜沸騰崩壊条件と遷移沸騰熱伝達に関して多くの報告が行われてきたが、詳細な理解に至っておらず、未だ不明瞭な点が多い。

本研究は、主として自動車車体に用いられる高級鋼材、高張力鋼板（ハイテン・超ハイテン）の製造プロセスラインの改善を熱工学、すなわち冷却技術的に探ることを目的とする。具体的には、昨今広く利用される赤外線サーモグラフィおよび数値計算コードを利用し、沸騰熱伝達特性の高精度予測およびこの知見に基づき鋼材の冷却特性を明らかにすることを目的とする。

本研究では膜沸騰崩壊温度条件の定量的把握として、水平上向伝熱面に液ジェットを衝突させ、高温加熱面上での濡れの挙動を実験的に検討し、固液接触の温度条件及びその熱伝達特性を得ることを目的とした。特に、赤外線放射温度計を用いた非接触型の温度計測および高速度ビデオカメラによる液挙動の計測を行った。また、スポット冷却時の温度変動について数値計算を行った。また、被冷却物体の動きも取り入れた熱伝導解析を行い、温度変動等、冷却の様相の定量化を行った。

3. 研究の方法

図 1 に実験装置概要図を示す。

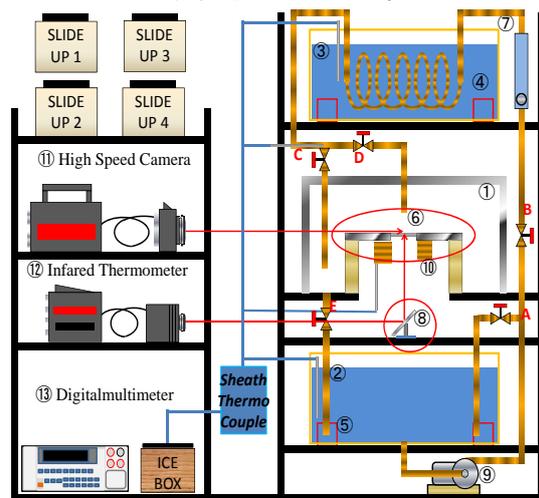


図 1. 実験装置概略図

本実験装置は、⑥加熱面、①試験容器、⑨循環ポンプから構成される大気解放のループ系である。試験液体には脱気した純水を使用した。加熱面は厚さ 0.525mm の Si ウェハ（熱伝導率:約 61.9W/mK, Bi 数:約 1.2×10^{-3} ）あるいは厚さ 2mm の Ag ウェハ（熱伝導率:約 405W/mK, Bi 数:約 7.4×10^{-4} ）を幅 20.5 × 20.5mm もしくは 41.5 × 41.5mm に加工した薄板であり、この加熱面は SUS303 製支持円盤中央部に耐熱性セラミック系接着剤で接着された後、水平上向きに試験容器内部に固定される。次に実験手順を示す。Main Tank 内の試験液体を⑤ヒータ 2 で 100°C まで加熱する。Sub Tank 内の液体を所定の温度まで加熱した後、バイパス経由で試験液体を循環させ、試験液体を所定の液温度、液流量に設定する。この際、試験液体の液温度は Sub Tank と④ヒータ 1 を用いた間接加熱により調整する。熱風器にて、加熱面を 350°C 以上まで加熱し、液ジェットにより加熱面を冷却する。この冷却時の加熱面の二次元温度場を市販の鏡を介し、赤外線放射温度計を用いて計測する。同時に、加熱面上の液挙動を高速度ビデオカメラにて記録する。なお、計測速度は最大 60 面/s、高速度撮影は 3000fps にて行った。二次元温度場の温度計測点は中心より 0mm、6mm、13mm、19mm の位置である。また、実験条件である液サブクール度は 0K~30K、液流速は 0.80m/s~4.00m/s である。本実験に使用した赤外線放射温度計の性能を表 1 に示す。

表 1. 赤外線放射温度計仕様

Measurement temperature range	-40~500 $^{\circ}\text{C}$
Measurement distance	30cm~ ∞
Viewing angle	26.4 $^{\circ}$ (H)~20.0 $^{\circ}$ (V)
Space resolution	1.5mrad
Temperature resolution	Below 0.05 degree
Recorded speed	Up to 60frame/sec

4. 研究成果

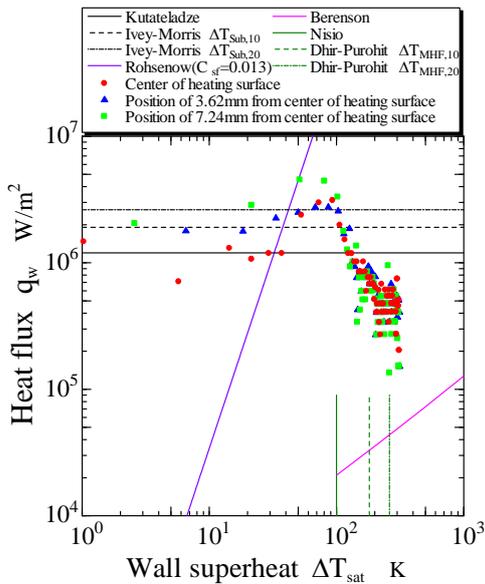
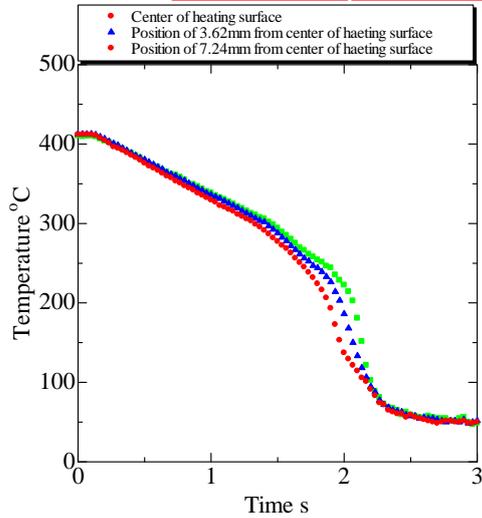
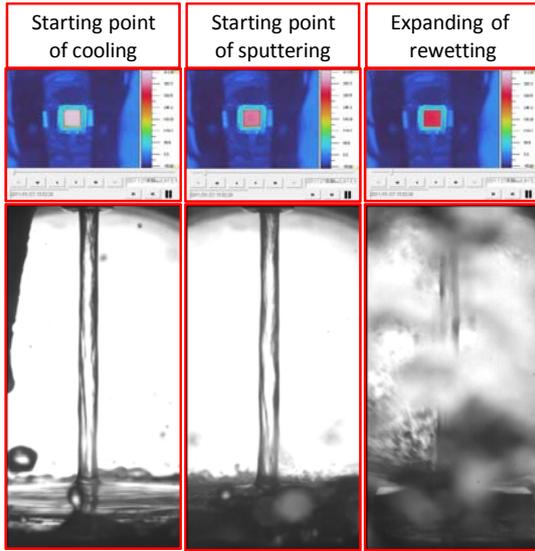


図2 加熱面形状 $20.5 \times 20.5 \text{ mm}$ 実験結果
冷却曲線、沸騰曲線、液挙動画像と熱画像
(サブクール度 10 K, 液流速 4.00 m/s,
加熱面材質 銀)

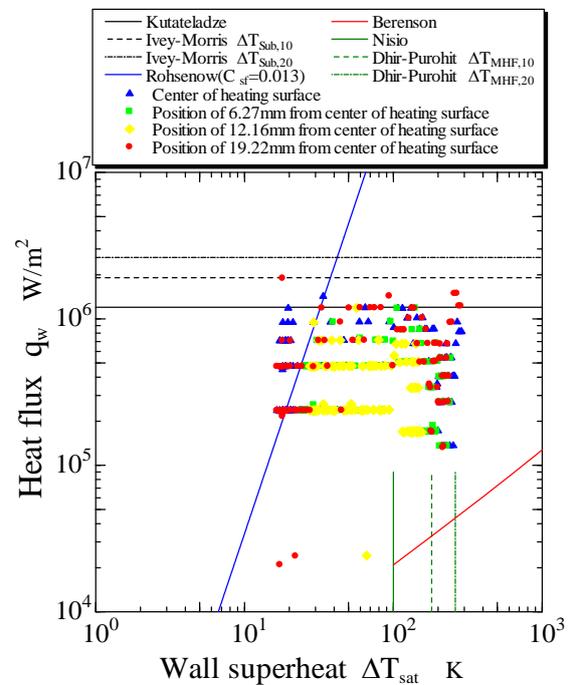
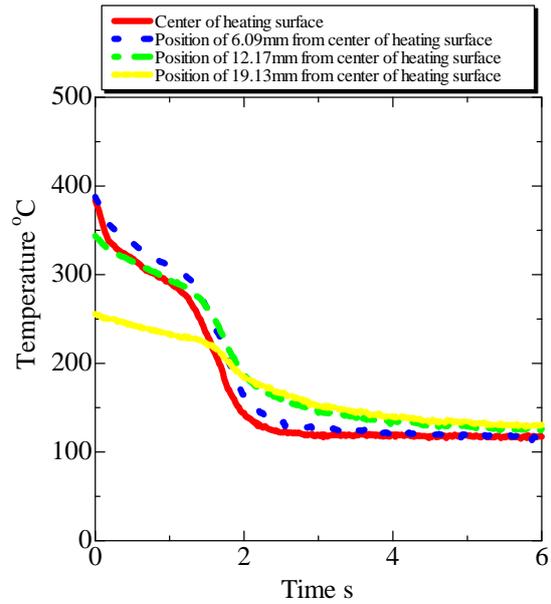
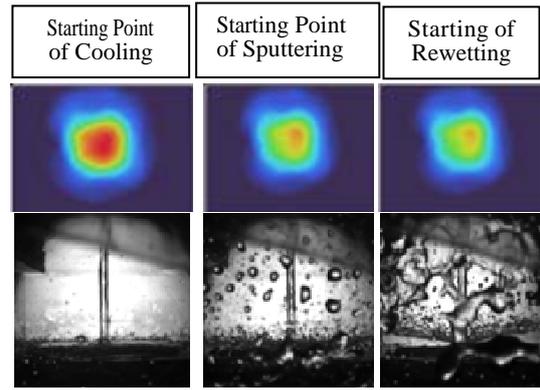


図3 加熱面形状 $41.5 \times 41.5 \text{ mm}$ 実験結果
冷却曲線、沸騰曲線、液挙動画像と熱画像
(サブクール度 10 K, 液流速 4.00 m/s,
加熱面材質 銀)

(1) 沸騰熱伝達

図 2 に、加熱面寸法 20.5×20.5mm での実験から得られた冷却曲線（温度履歴）と沸騰曲線の一例、赤外線放射温度計による温度可視化画像、高速度カメラによる液挙動画像を示す。また、図 3 は加熱面寸法 41.5×41.5mm での実験結果である。この温度計測に際し、放射率を較正実験により 0.1 に設定した。図 2 に示すように、冷却曲線及び液挙動画像より、膜沸騰期間、クエンチ点（急冷開始点、すなわち最小膜沸騰温度）、急冷期間が確認できる。図 2 より、 $\Delta T_{sub}=10K$, $v=0.87m/s$ 条件の MHF 点温度は 347.5°C であると確認できる。なお、本実験条件では、 $Bi<0.1$ であるため、壁面熱流束は集中熱定数近似式を利用して求めた。

$$q = \rho c \delta (\Delta T / \Delta t) \quad (1)$$

沸騰曲線中には既存の相関式による計算値を各直線にて併記した。MHF 点温度は Dhir-Purohit の式⁽²⁾よりも約 130°C 高温であることが確認された。

$$T_{MHF} = 201 + 8\Delta T_{sub} \quad (2)$$

MHF 点温度の定量的な一致が確認できなかったのは、液ジェットの影響により、伝熱面を覆う蒸気膜の破壊が促進されたことが原因として考えられる。また、図 3 では中心点より 0mm, 3.62mm での位置では CHF 点温度は Ivey-Morris の相関式と定量的な一致が確認できなかったが、中心部より 7.24mm の位置では Ivey-Morris の相関式と定量的な一致が確認できた。液膜先端の進展開始時に、中心部より 0mm, 3.62mm の点では既に伝熱面が濡れてしまっていることが原因として考えられる、一方、中心部より 7.24mm の点では、液膜先端の進展開始時に濡れていなかったことが理由として考えられる。

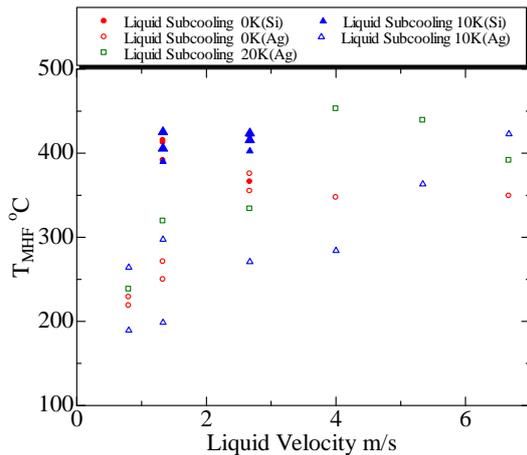


図 4 クエンチ点温度と液流速の関係

(2) MHF 点温度：クエンチ温度

図 4 に、本実験により得られた液サブクール度と MHF 点温度の関係を示す。また、図 5 に液流速と MHF 点温度の関係を示す。ここ

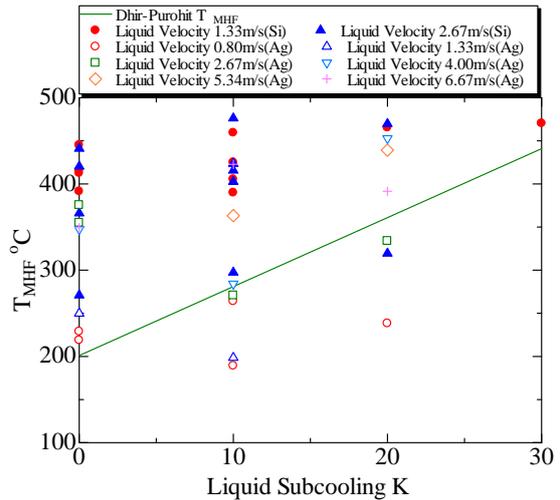


図 5 クエンチ点温度とサブクール度の関係

で、MHF 温度は、スパッタリング開始時の伝熱面中心温度として定義した。図 5 より、液サブクール度の増加に伴いクエンチ温度が増加することが確認された。また、図 4 より液流速 0.18m/s ~ 0.58m/s の範囲では Dhir-Purohit の相関式に傾向として一致していることが確認され、0.87m/s 以上では MHF 点温度が高温化していることが確認された。低い液流速では伝熱面を覆う蒸気膜の破壊には至らず、高い液流速では蒸気膜の破壊を促進することが原因であると考えられる

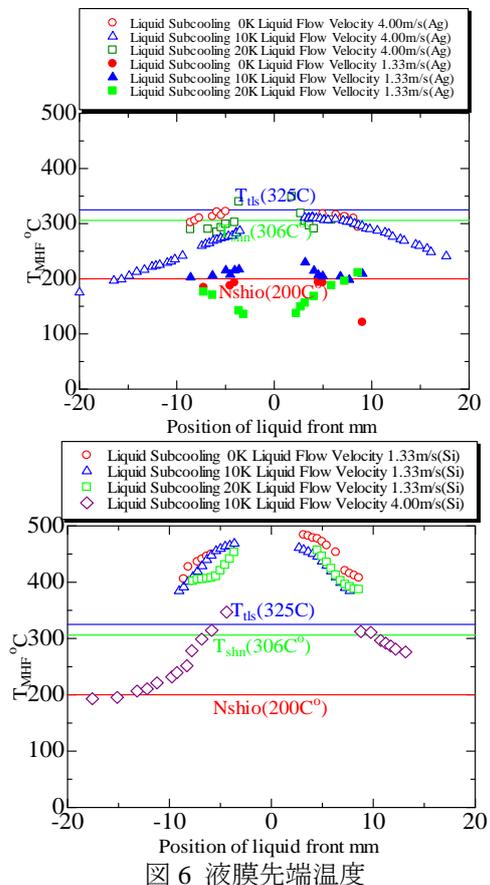


図 6 液膜先端温度

(3) 液膜先端温度：局所的 MHF 点温度

図 6 は液膜先端の移動に注目し、横軸に中心からの液膜先端の位置、縦軸に液膜先端の温度を示したものである。Ag 条件、Si ウェハ条件共に中心付近で固液接触温度が高い値を示しており、中心から離れるに従って、徐々に Nishio の式である 200°C に近づく。中心付近では、噴流の影響により蒸気膜の破壊が促進されたため、高い値を示し、中心から 15mm 程度離れた位置から噴流の影響が小さくなり、温度が低下し 200°C に落ちついたと考えられる。これは、Ag 条件の実験結果でも顕著に表れている。液流速が高いほど、噴流の影響を強く受けるため、流速 4.00m/s では、中心付近の温度が熱力学的過熱限界温度に近い値を示し、噴流の影響が小さい液流速 1.33m/s では、中心付近でも 200°C に近い値を示している。

(4) スポット冷却時の温度変動の解析

図 7 に沸騰熱伝達と三次元非定常熱伝導に基づく Rewetting のモデルの概略を示す。本報では、厚さ 2mm、幅 40×40mm の銀平板を初期温度 350°C としてスポット冷却した場合の温度変動について、以下の条件で計算を行った。平板内の三次元熱伝導を利用し、乾いた領域内の熱流束に Berenson の式を使用し、濡れ領域内の熱流束を Kutateladze の限界熱流束の相関式および Rohsenow の核沸騰熱伝達の相関式を使用した。また、冷却液は飽和温度の水とし、伝熱面を除く他の境界条件は断熱壁とした。本モデル解析の計算結果を図 8 に示す。中心から 1mm, 6mm, 12mm, 19mm の位置での計算結果、すなわち冷却曲線である。図 2.3 に示す実験結果と定性的に同様な計算結果を得ることができた。

(5) 移動壁冷却モデル

移動する壁の効果を検討するため、図 9 に示すように冷却点を移動させるモデルを、さらに構築した。

図 10 に、本移動壁冷却モデルによる解析結果を示す。また、図 11 に、その拡大図を示す。図 10 および 11 に示すように、

- ・冷却点が移動することで、均一温度冷却が可能である、
- ・冷却点が移動することで、クエンチ点温

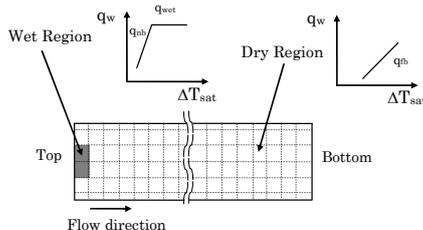


図 7 リウエットングモデル

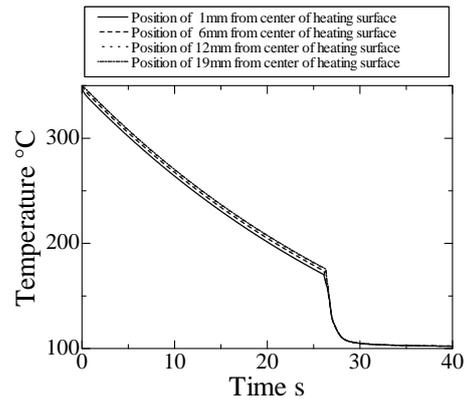


図 8 冷却曲線

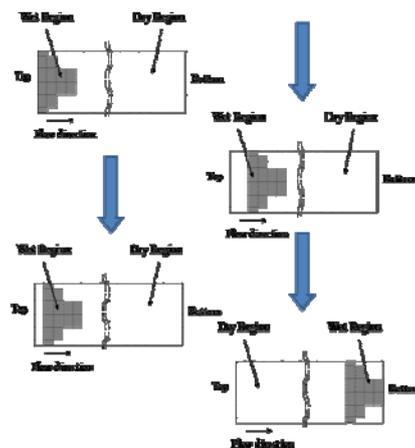


図 9 移動壁冷却モデル

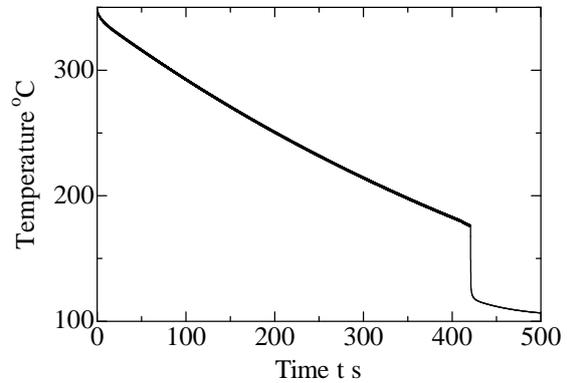


図 10 移動壁冷却モデルの解析結果

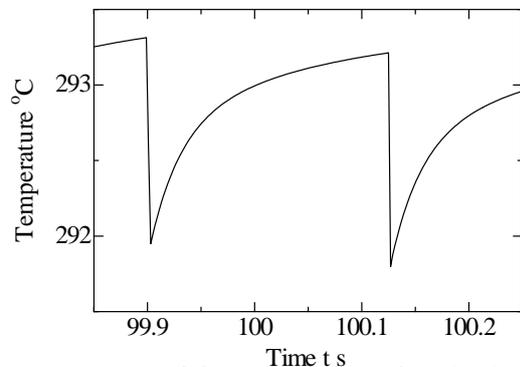


図 11 移動壁冷却モデルの解析結果 (拡大図)

度は低温度化する、
・冷却点による表面温度の低下は1°C程度、
・冷却点が移動することに伴う復熱による温度上昇量は0.8°C程度である、
ことがわかった。なお、図10および11の計算条件は、冷却ピッチ225mm、板速度1m/s (3.6km/h) である。

(6) 結論

以上のように、高温加熱壁面での液体の濡れ開始時の局所温度が熱力学的過熱限界温度に近いことを示した。また、熱伝導と沸騰熱伝達に基づく冷却モデルの構築を試みた。特に、被冷却物体の動きも取り入れた熱伝導解析を行い、温度変動等、冷却の様相の定量化に成功した。

なお、現在までの達成は、『おおむね順調に進展している』と考えられる。その理由は下記である。すなわち、交付申請書に記載した「研究の目的」の内、赤外線サーモグラフィにて、加熱面二次元温度分布の時間変動の計測を行った。同時に、側面より超高速ビデオカメラを用いて、加熱面上の液膜挙動を高速撮影にて記録した。この実験を通して、高温壁面での“濡れ開始の局所温度”の定量化に成功した。併せて、これらの実験結果を受けて、解析モデルの構築を進めた。特に、被冷却物体の動きも取り入れた熱伝導解析を行い、冷却の様相（温度変動）の定量化に成功した。

また、今後の研究の推進方策としては、交付申請書に記載した「研究の目的」の内、MEMS技術（マイクロファブリケーション）を利用した薄膜熱電対温度センサーによる温度計測は実現できなかった。しかしながら、高速収録可能かつ空間分解能の高い購入設備品である赤外線サーモグラフィによる加熱面の二次元温度分布の時間変動の計測により、本研究目的である“濡れ開始の局所温度”の定量化という主たる目的は達成できた。今後は、より高速な計測が可能な赤外線サーモグラフィの導入を検討し、より詳細な濡れ開始の局所温度と濡れ域の熱伝達特性の定量化を行う予定である。かつ、汎用熱流体数値計算コード（STAR-CD等）を利用した、より詳細な冷却モデルの構築を進める予定である。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計0件）

〔学会発表〕（計7件）

(1) 大堀 哲矢 (大竹 浩靖)、高温加熱面の濡れ開始機構に関する研究、第49回日本伝

熱シンポジウム、平成24年5月30日、富山。

(2) 大竹 浩靖、二次元温度場計測を通じた高温加熱面膜沸騰崩壊温度条件の定量化と膜沸騰崩壊条件のモデル解析に関する研究【招待講演】、日本混相流学会 第15回オーガナイズド混相流フォーラム(OMF2011)『相変化を含んだ界面現象-実験と数値解析の最先端-』、平成23年12月8日、別所温泉/上田市/長野。

(3) 永嶋 望 (大竹 浩靖)、Measurements Of Rewetting Temperatures Of Hot Dry Surface In Saturated And Subcooled Film Boiling、第8回日米熱工学合同会議 (8th ASME-JSME Thermal Engineering Joint Conference)、平成23年3月16日、オアフ島・ハワイ・USA。

(4) 大竹 浩靖、Mechanism and Modeling of Rewetting Initiation of Hot Dry Surface in Saturated and Subcooled Film Boiling、第14回国際伝熱会議 (The 14th International Heat Transfer Conference)、平成22年8月12日、ワシントンDC・USA。

(5) 永嶋 望 (大竹 浩靖)、高温加熱面の膜沸騰崩壊温度に関する研究、日本機械学会熱工学コンファレンス2010、平成22年10月30日、長岡/新潟。

(6) 小泉 安郎 (大竹 浩靖)、二次元温度場計測を通じた高温加熱面膜沸騰崩壊温度条件に関する研究、第48回日本伝熱シンポジウム、平成23年6月2日(予定)、岡山。

(7) 永嶋 望 (大竹 浩靖)、高温加熱面の膜沸騰崩壊温度に関する研究、社団法人日本鉄鋼協会 第159回春季講演大会、平成22年3月29日、筑波大学/茨城。

〔図書〕（計0件）

〔産業財産権〕

○出願状況（計0件）

○取得状況（計0件）

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大竹 浩靖 (OHTAKE HIROYASU)

工学院大学・工学部・教授

研究者番号：40255609

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者