

解説

研究会成果報告-3

高温鋼材の急速冷却時における過渡沸騰現象

Transient Boiling Phenomena During Rapid Cooling of Hot Steel

大久保英敏

Hidetoshi Ohkubo

玉川大学 工学部
機械情報システム学科
教授

1 はじめに

鋼材の熱処理技術の一つであるTMCP (Thermo-Mechanical Control Process) 技術は、熱間圧延における制御圧延 (Controlled Rolling) 技術に圧延ライン上で圧延後の冷却過程を制御する制御冷却 (Controlled Cooling) 技術を組み合わせる技術であり、これまで合金添加と熱処理によって製造されていた高張力鋼板などを省合金、省工程で製造することが可能になった。鋼材は、初期温度一定の条件下で鋼材冷却ゾーンを通過する過程でラミネー冷却やスプレー冷却によって所定の温度まで冷却される。「熱延ROT冷却モデル構築」研究会では、高精度の冷却制御を実現することを目的として、実機サイズの冷却プロセスをモデル化し、移動鋼板冷却過程の数値解析を行った。

2 沸騰冷却の特徴

ラミネー冷却およびスプレー冷却の熱伝達特性は、図1に示すような沸騰曲線と同様のN字曲線となる。したがって、これらの熱伝達特性の解明には沸騰現象が基礎となる。横軸の ΔT_{sat} [K] は冷却面表面温度と液体の飽和温度との差、縦軸の q_w [W/m²] は表面熱流束である。図1の温度領域は膜沸騰域に相当する高温域、遷移沸騰域に相当する遷移域、核沸騰域に相当する低温域および強制対流域の4領域に分類される。鋼材の熱処理の場合、鋼材表面に付着する酸化膜 (スケール) によって表面粗さや表面のぬれ性などの表面性状が変化するが、この表面性状の変化は沸騰現象に影響を及ぼすことが知られている。また、熱延ROT冷却の場合、被冷却物体である鋼材は高速度で移動することから、沸騰冷却に及ぼす通板速度の影響も検討する必要がある。さらに、冷却媒体である水は、鋼板に衝突した後、未蒸発のまま鋼材表面上で板上水と呼ばれる液膜を形成する。この液膜流は水噴流や噴霧流

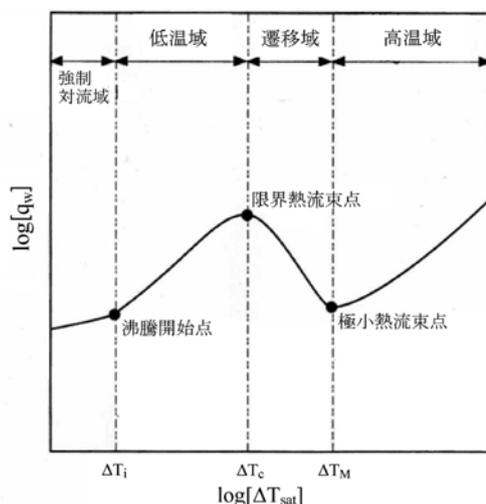


図1 スプレー冷却熱伝達特性

と干渉し、複雑な流れになる。鋼材の冷却に及ぼす液膜流の影響も無視できないことから、移動鋼板の冷却を制御するためには、複雑な液膜流を予測し、制御する必要がある。

3 ラミネー冷却の熱伝達特性^{1,3)}

沸騰冷却に及ぼす通板速度の影響に関する系統的な知見は得られていないことから、光武・門出¹⁾は移動鋼板を模擬した高温ラミネー冷却試験装置を製作し、ラミネー冷却非定常冷却特性に及ぼす水量、水温、移動速度の影響を検討した。図2 (a) は、高温面上の回転軸方向から撮影したラミネー冷却中のSUS304製高温ローター上の流動状況変化の一例である。ローターは時計方向に回転しており、図中に示した時刻は、冷却水が衝突開始時刻からの経過時間である。図2 (a)、(b) は、それぞれ $z = 0$ mm (よどみ点直下)、 $z = 15$ mm の測温位置で評価された表面温度 T_w 、表面熱流束 q_w および表面熱伝達率 h_w (代表温度差は $T_w - T_i$ 、 T_i は冷却水の液温) の時

間変化である。図2 (a) から分かるように、高温面の移動方向に対して非対称となる固液接触面形状が明らかになった。また、よどみ点近傍に安定な固液接触面が存在可能となるぬれ開始の表面温度が明らかになった。図3、4、5 に非定常冷却中の代表的な測定温度、表面温度 T_w および表面熱流束 q_w の時間的变化、沸騰曲線の一つをそれぞれ示した。実験条件は、回転速度 $N = 30$ rpm、初期温度 $T_{bo} = 751^\circ\text{C}$ 、冷却水量 $Q_f = 10$ L/min、冷却水温度 $T_l = 30^\circ\text{C}$ である。よどみ点通過時刻に対応して q_w の急増と T_w の急冷が繰り返されていることが明らかとなった。鋼材の冷却特性の評価法として、三塚²⁾ によって定式化された高温面上の平均熱伝達率の式があり、現在でも鉄鋼冷却で重要な役割を果たしている。光武・門出¹⁾ によって得られた知見は、鋼板の冷却温度の均一性と冷却終了温度の精度向上を実現するためには、面平均ではなく局所の熱伝達特性の知見に基づく冷却制御が必要であることを示唆している。

ラミナー冷却時に発生する局所的固液接触状況は、永井³⁾ によって検討された。永井³⁾ は図6に示した実験装置を作成し、全反射を利用してサファイア製高温面裏面からの固液接触の可視化を行い、局所的固液接触状況を検討した。図7に観察結果の一例を示した。実験条件は、流量 $\dot{V} = 480$ ml/min、流速 $\dot{V}_l = 1.26$ m/s、試験液温度 $T_l = 38^\circ\text{C}$ 、初期温度 $T_{wi} = 140^\circ\text{C}$ である。固液接触が観察できない膜沸騰状態からノズル直下の位置に固液接触が発生し、固液接触部が円形に広がっていく様子が観察された。

4 スプレー冷却の熱伝達特性^{4,5,6)}

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噴霧冷却は、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、噴霧方法によっては熱伝達分布を均一化する

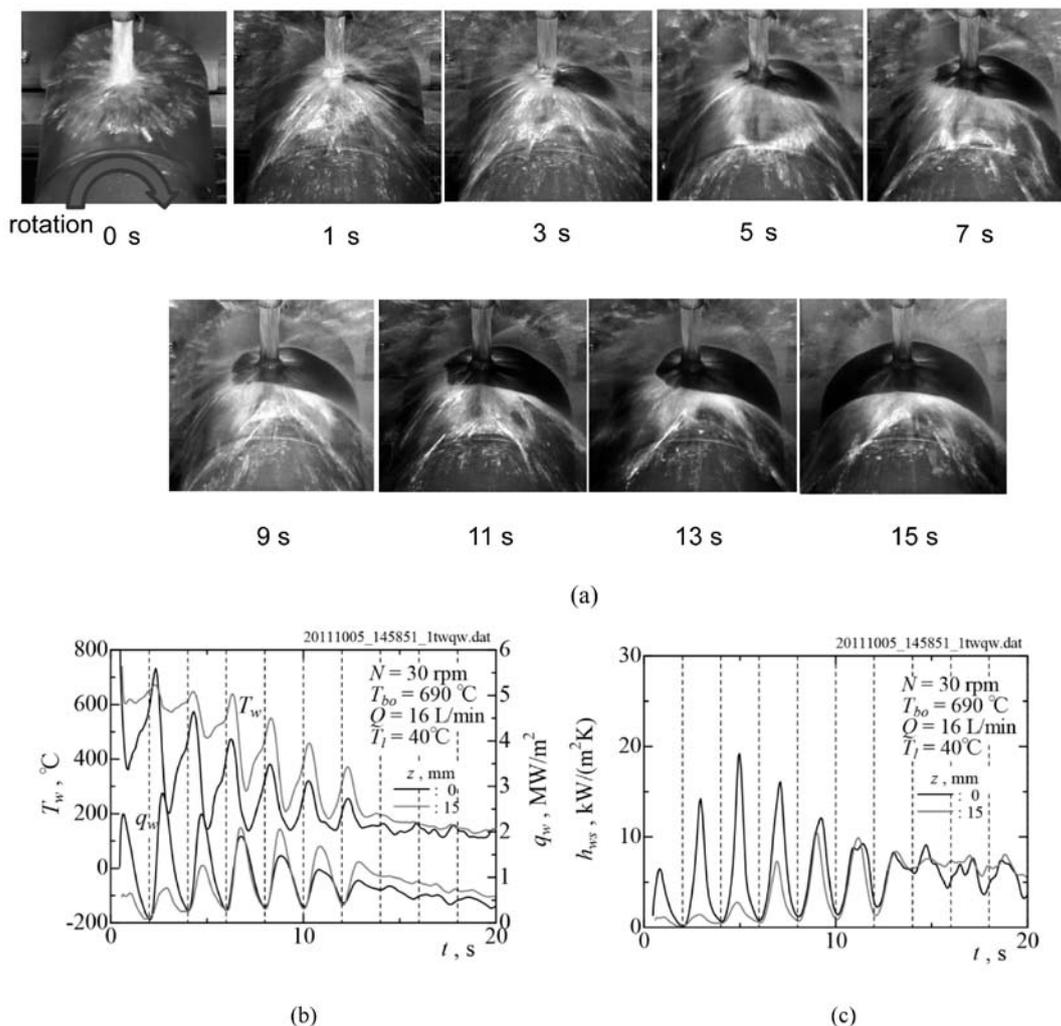


図2 冷却中の試験ローター上の流動状況写真 (a) と表面温度・表面熱流束変化 (b)、表面熱伝達率変化実験 (c)¹⁾ 回転数 $N = 30$ rpm、初期温度 $T_{bo} = 690^\circ\text{C}$ 、液温 $T_l = 40^\circ\text{C}$ 、冷却水量 $Q = 16$ L/min

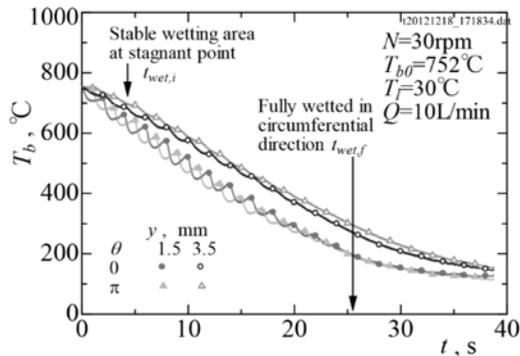


図3 温度測定結果の一例¹⁾

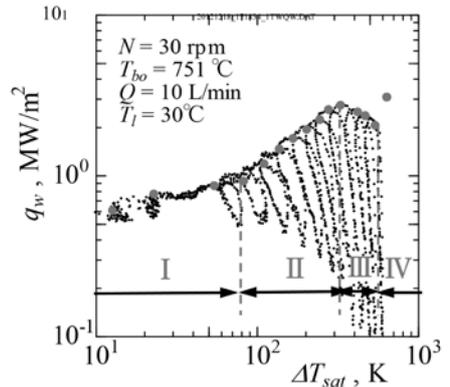


図5 沸騰曲線¹⁾

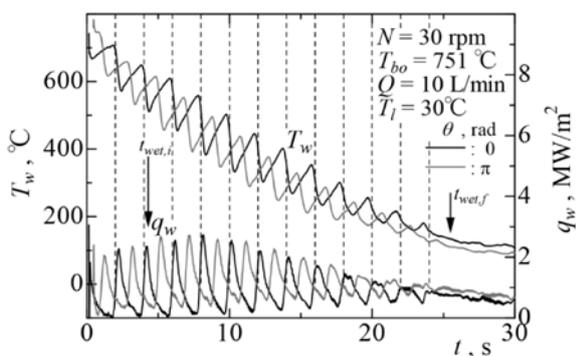


図4 表面温度・表面熱流束の時間的変化¹⁾

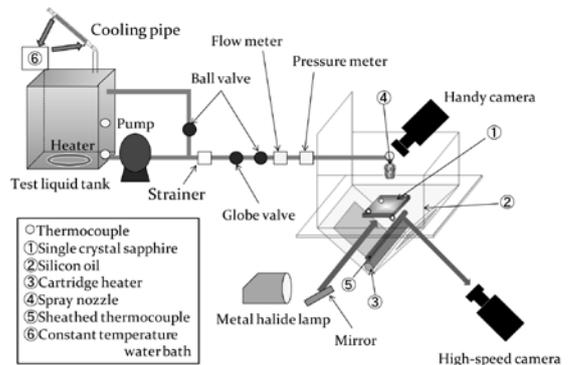


図6 実験装置概略図³⁾

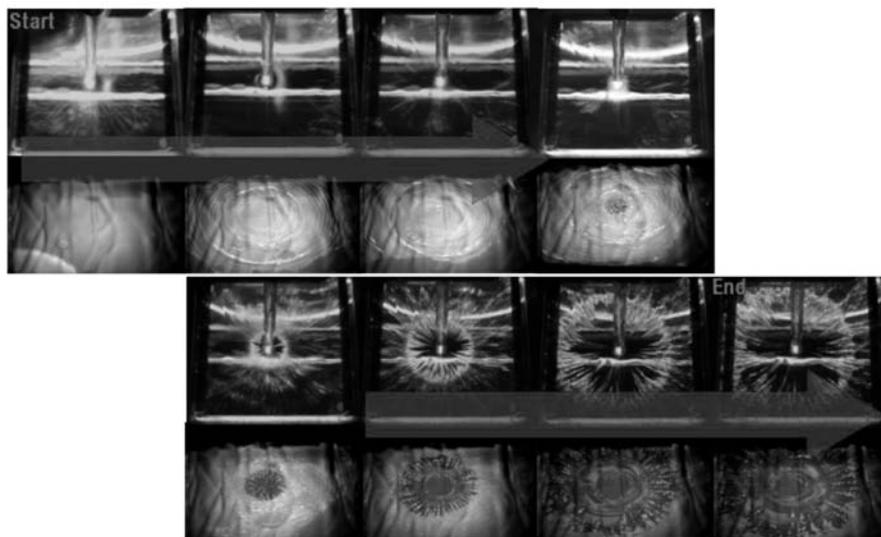


図7 ラミナー冷却時の固液接触状況³⁾

ることが可能であり、供給液量に対する高効率な熱流束の除去と冷却面温度の制御性に優れた冷却技術である。噴霧冷却はフォグ冷却、ミスト冷却、スプレー冷却等の呼称があるが、噴霧流は液滴径および液滴速度が不均一な液滴群で形成されており、噴霧冷却熱伝達特性に及ぼす液滴径および液滴速度の影響を系統的に理解することは困難であった。高田⁴⁾は、

図8、9に示した装置を開発し、スプレー冷却を模擬した実験を行った。実験装置は液滴を制御する Micro Jet Dispenser、液滴の個数を制御する Frequency Controller、高速度カメラ、ライト、および温度を測定する PC から構成されており、流量 (水量密度)、衝突速度、液滴径を独立に制御することが可能である。図10、11に高温面衝突時の液滴の挙動を液滴径

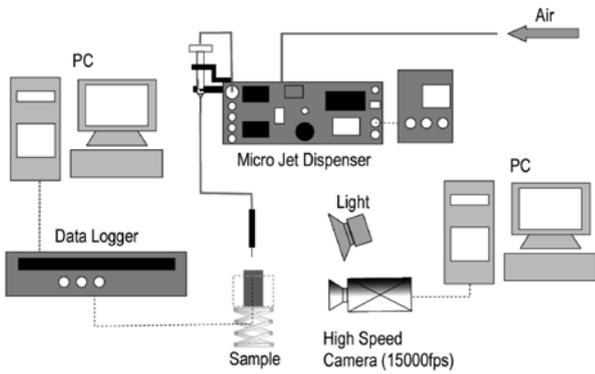


図8 液滴蒸発実験装置⁴⁾

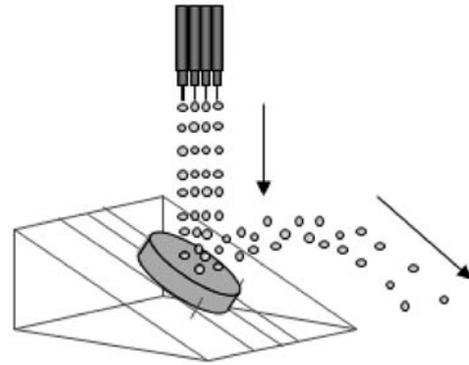


図9 試料とノズル部分⁴⁾

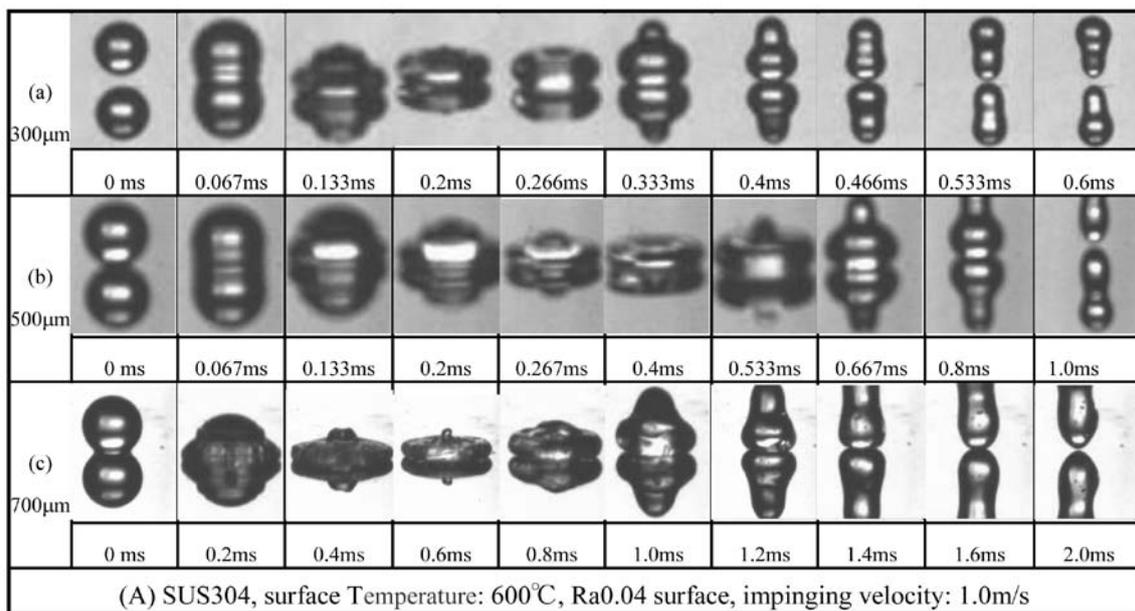


図10 液滴径の影響 (液滴速度 1.0m/s 表面温度 600 $^{\circ}$ C 表面粗さ Ra0.04)⁴⁾

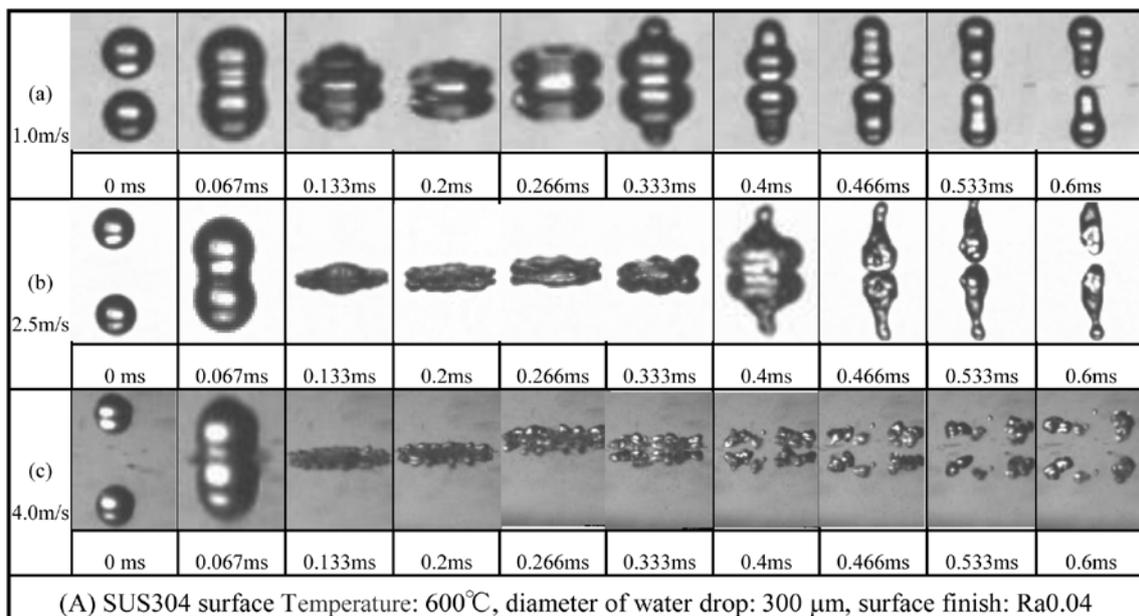
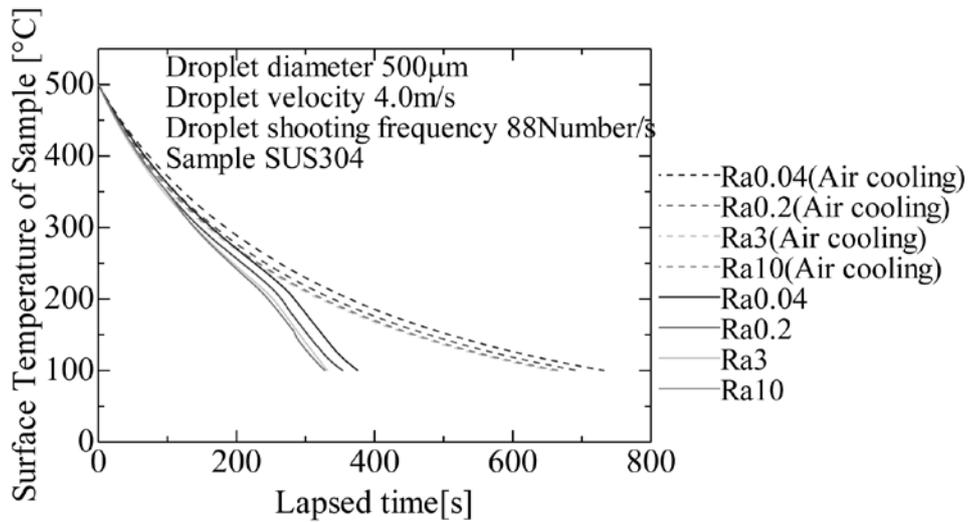


図11 液滴速度の影響 (液滴径 300 μ m 表面温度 600 $^{\circ}$ C 表面粗さ Ra0.04)⁴⁾



液滴速度：4.0m/s

図12 冷却曲線（液滴径約500µm, 液滴射出頻度88個/s, 材質SUS304）⁴⁾

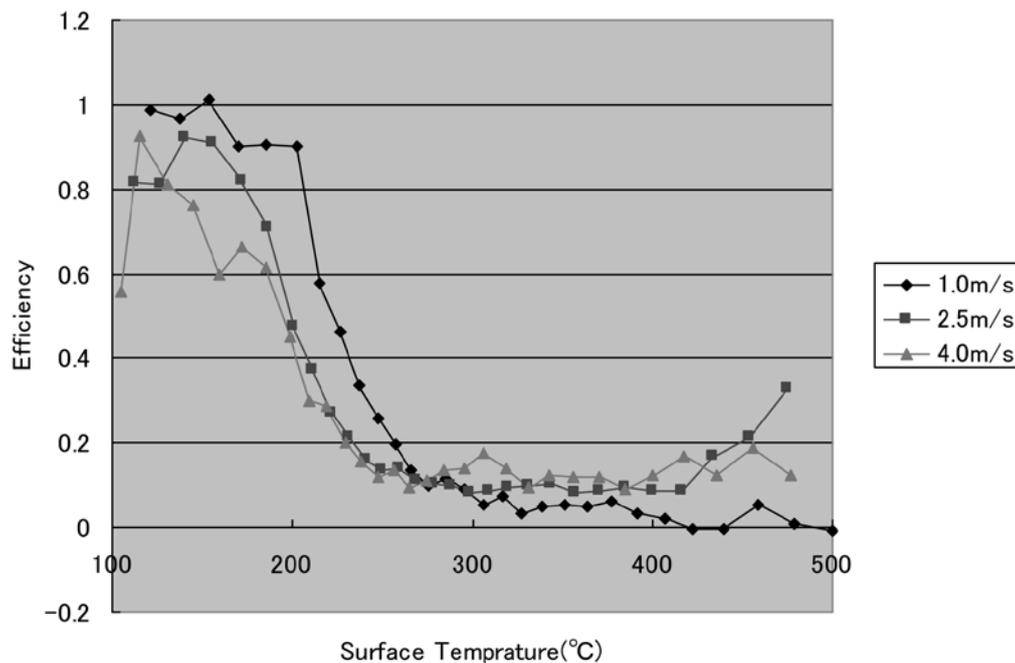


図13 熱伝達効率に及ぼす衝突速度の影響（液滴径700µm, 表面粗さRa0.2, 射出頻度32個/s）⁴⁾

および液滴速度をパラメータとしてそれぞれ示した。高田⁴⁾は、これらの高速度撮影結果および図12、13にそれぞれ代表例を示した冷却曲線および熱伝達効率から、液滴径の影響はほとんど無いが、液滴速度が大きい方が冷却速度は大きいこと、および表面の粗い方が冷却速度は小さくなることを明らかにした。

永井⁵⁾は、図14に示した高温のサファイア面に液滴または液滴列を衝突させたときの局所的固液接触の高温面裏側からの撮影を行い、局所的固液接触領域の直径の時間変化の測定

および発泡点密度の測定に成功した。さらに永井⁵⁾は、観察結果に基づき、図15に示した①空気と固体との接触境界条件、②固気接触境界条件（気泡内部）、③固液接触境界条件、④三相界線の4つの境界条件を設定し、高温面に液滴列が衝突した後の局所的固液接触時の過渡伝熱プロセスを数値解析によって明らかにした。図16に計算結果の一例を示した。高温の表面は固液接触の発生と消滅を繰り返しながら冷却され、冷却面の材質によって温度履歴が異なることが示された。高田および永井の基礎的研究によって、過渡沸騰現象に

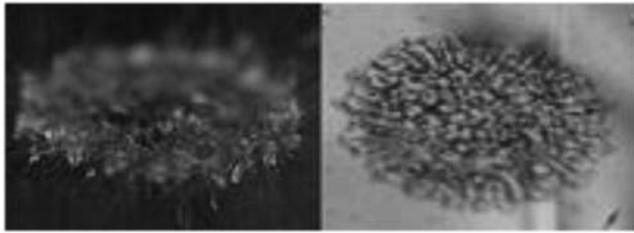


図14 衝突液滴の局所的固液接触⁵⁾

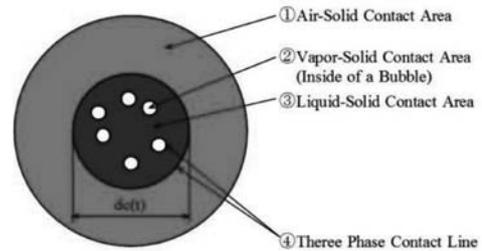


図15 境界条件⁵⁾

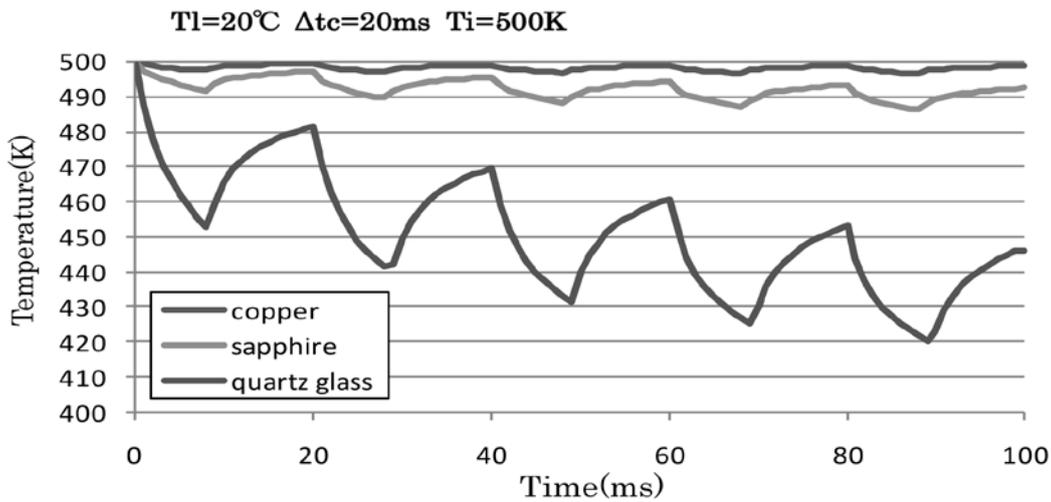


図16 表面温度履歴⁵⁾

及ぼす諸因子の影響を把握することが可能になったが、鋼材の冷却では、酸化膜の熱物性および表面性状を把握する必要があることも明らかになった。

スプレー冷却熱伝達特性の数式化は大久保・亀ヶ谷⁶⁾によって行われた。スプレー冷却の場合、衝突液滴および液膜流の挙動は、図17に示したように3領域に分類してモデル化されている。モデル化では、肉眼では確認できない薄液膜を形成する領域 (x_0 から x_1) を第1次液膜領域とした。次に、滴状の液膜を形成する領域 (x_1 から x_2) を第2次液膜領域とした。最後に、肉眼で確認できる液膜を形成する領域を第3次液膜領域 (x_2 以降) とした。各領域の境界は噴霧流の流量によって変化する。図18に高温域熱伝達率分布を示した。図中には計算値が併記されているが、第3次液膜領域では、液膜流の温度 $t_f = 88$ [°C] の計算値と実験値との対応が比較的良好であった。ノズル出口流量をパラメータとして、各液膜領域における限界熱流束を図19に示した。局所の限界熱流束に関する測定例は少ないが、数式化が実現でき、計算値と実験値との対応も示された。

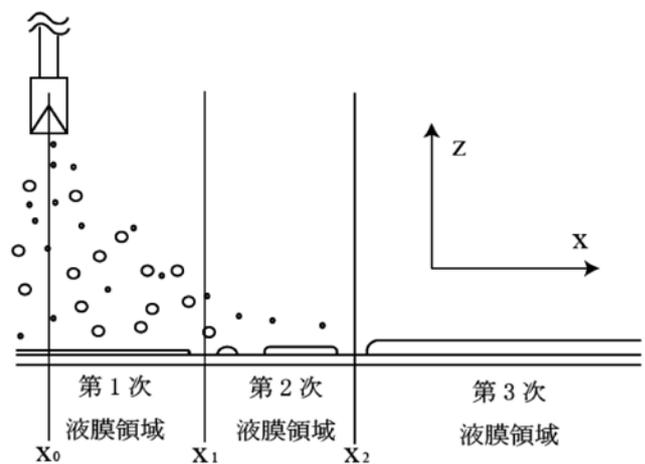


図17 液膜流のモデル⁶⁾

5 移動高温鋼板の温度解析

大久保・亀ヶ谷⁶⁾はスプレー冷却熱伝達特性の数式化を行うとともに、数式化した式を境界条件として用い、移動高温鋼板の温度解析を行った⁶⁾。また、ラミネー冷却熱伝達特

性の数式化は光武・門出¹⁾によって行われた。藤本⁷⁾は、光武・門出¹⁾によって数式化された整理式を用いてモデル操業条件(仕上げ圧延終了時温度 896 °C、ROT長160.0m、板厚 3.22 mm、通板速度 739 m/min、パイプラインの幅方向ノズルピッチ 67 mm、ヘッダーピッチ 460 mm)での数値計算を行った。図20 に移動高温鋼板の3次元の計算結果を示した。パイプライン衝突点で温度が急激に降下しており、冷却ゾーンに配置されたノズル群によって複雑な温度分布になることが分かる。計算結果から、鋼板表面温度は、よどみ点

直下で急激に降下するが、鋼板が移動するため、板内部からの熱伝導により復熱し、冷却と復熱を繰り返しながら冷却が進行することが明らかになった。

6 板上水の流動解析⁷⁾

藤本⁷⁾はパイプライン冷却によって鋼板上で形成される板上水の非定常流動特性を検討した。図21、22に示した実験装置を用いて単一および二本の棒状噴流と移動液膜流

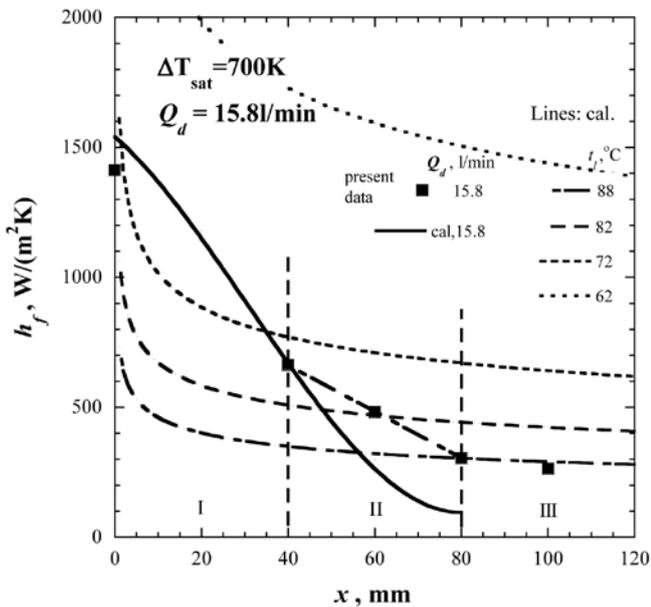


図18 高温域熱伝達率分布⁶⁾

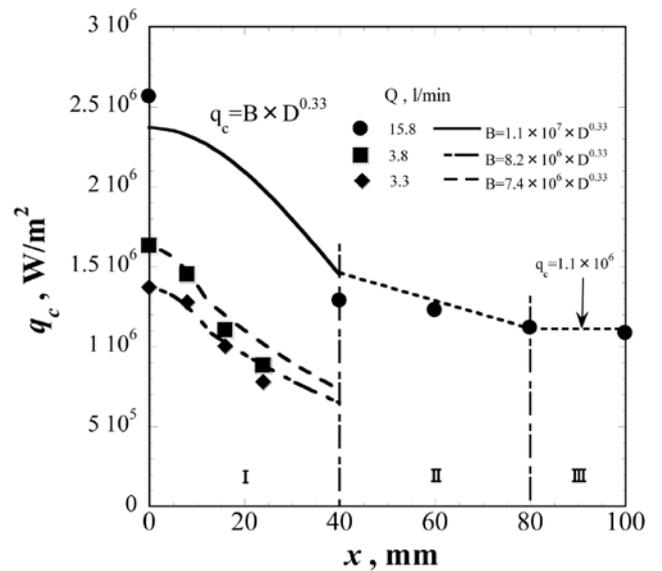


図19 限界熱流束分布⁶⁾

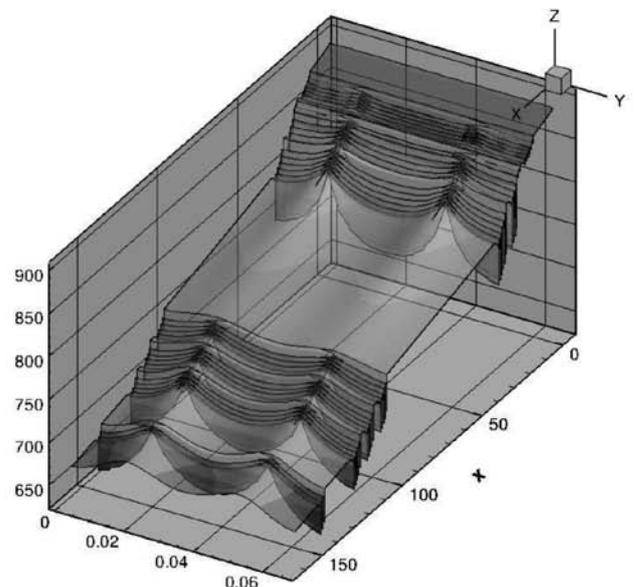
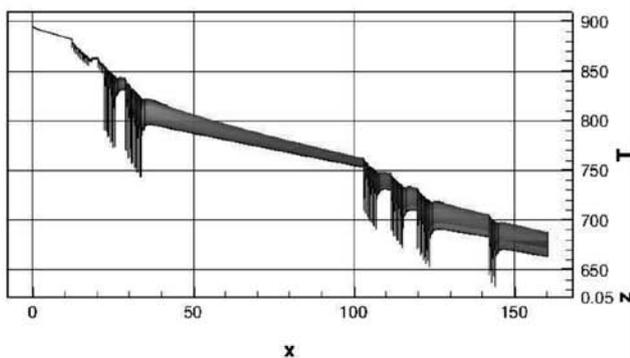
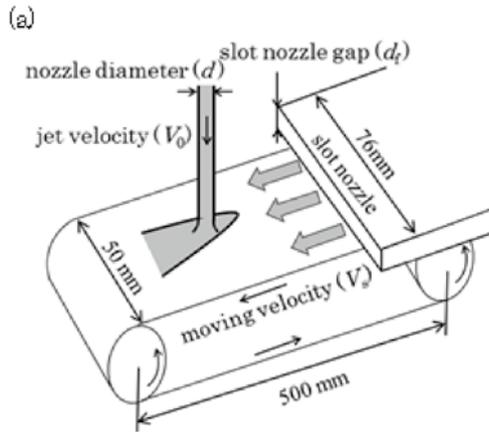
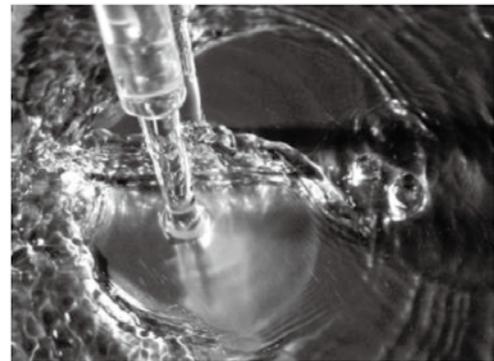


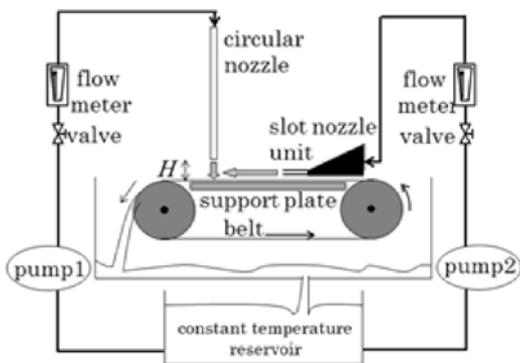
図20 計算例⁷⁾



(a) 0.2 m/s



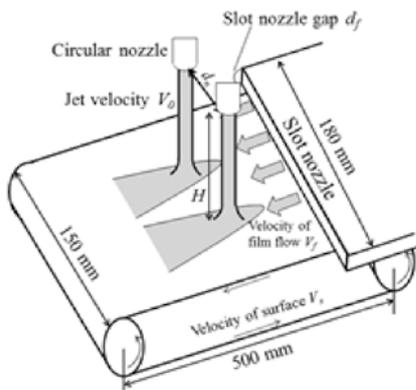
(b)



(b) 0.4 m/s



図21 実験装置の概要 (単一衝突噴流)



(c) 0.8 m/s

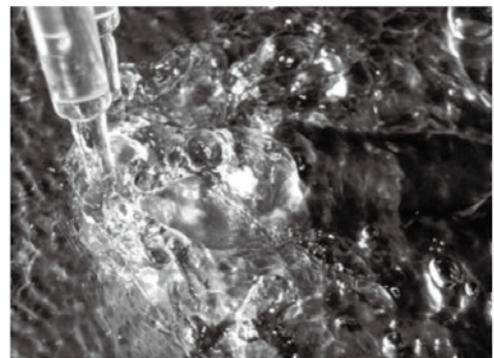


図22 実験装置の概要 (2本の衝突噴流)

図23 液膜速度が噴流衝突点近傍の流動に及ぼす影響 (2本の棒状衝突噴流)⁷⁾

の衝突による流動現象を観察した。さらに、VOF (Volume-Of-Fluid) 法⁸⁾の一種であるVOF/PLIC (Piecewise Linear Interface Calculation) 法^{9,10)}を適用して数値解析を行い、3次元非定常数値解析モデルで計算された流れが実験結果と概ね良好に対応することを確認した。図23は、ノズル出口噴流速度 $V_0 = 0.8 \text{ m/s}$ 、ノズル-平板間距離 $H = 40 \text{ mm}$ 、ノズル直径 $d = 7.0 \text{ mm}$ 、ノズル間距離 $dn = 20 \text{ mm}$ 、および水膜厚さ 2.3 mm における実験結果であり、水膜速度 0.8 m/s である。衝突点前方に1対の弓型の跳水と、2つの噴流の間に跳

水が発生する。衝突噴流と上流側跳水とが接触し、自由表面形状も大きく乱れている。図24は水膜流に2本の棒状噴流が衝突した直後の過渡的流動現象の実験と計算結果の比較である。条件は、図23 (c) と同一であり、図中の時間は噴流が液膜に衝突後の経過時間である。実験と計算は定性的に一致しており、噴流と液膜が衝突すると、円弧状の跳水が形成され、射流域が下流側に発達していく様子が確認できる。図24の条件で過渡的な流動現象が終了した後の自由表面形状および固体面圧力分布の計算結果を図25に示した。2本の衝突噴流

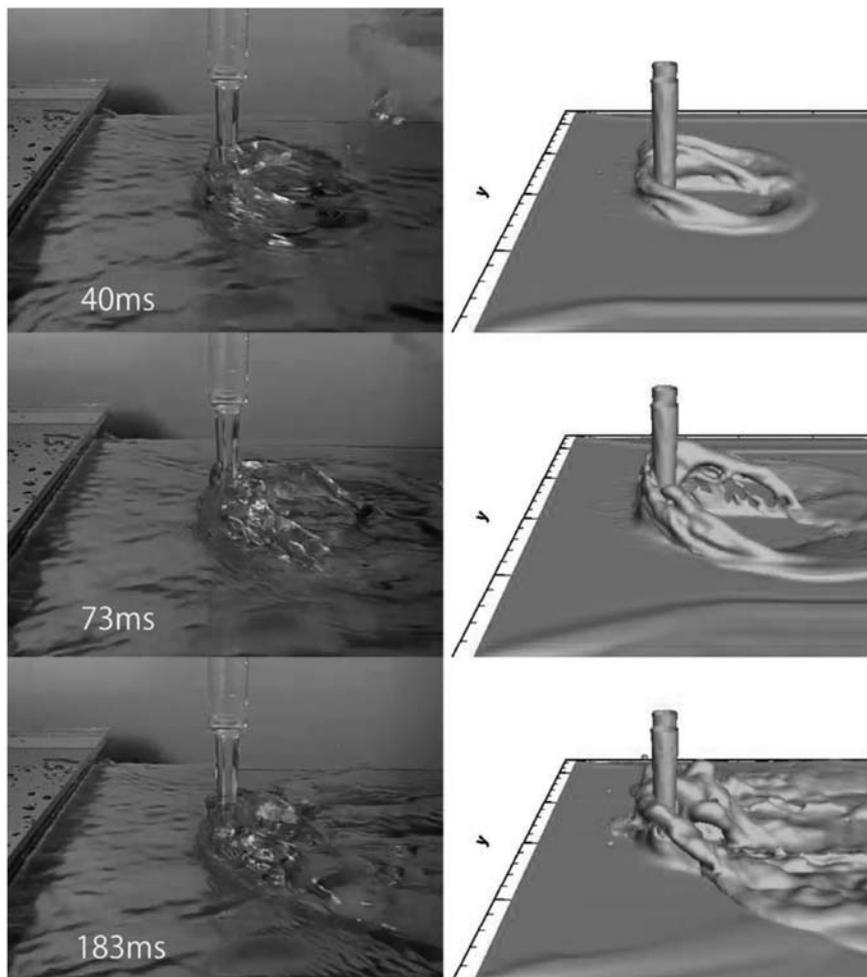


図24 液膜流に2本の棒状噴流が衝突した直後の過渡的現象 (左：実験, 右：計算)⁷⁾

と、それらの前方や中間点に形成された跳水とが絶えず干渉しており、自由表面形状は時々刻々変化している。

7 おわりに

「熱延ROT冷却モデル構築」研究会の活動成果として得られた研究内容を中心に、実機を考慮した移動鋼板冷却過程の冷却特性の把握とモデル化、ラミナー流動の数値解析およびこれらの冷却特性を導入した三次元温度解析モデル化について解説した。

本解説は、筆者が主査を務めた「熱延ROT冷却モデル構築」研究会平成22-24年度成果報告書に基づいて作成した。共同研究者である委員の方々の名前を記して謝意を表す。

門出政則 (佐賀大、現九大)、高田保之 (九大)、光武雄一 (佐賀大)、大竹浩靖 (工学院大)、永井二郎 (福井大)、藤本仁 (京大)、亀ヶ谷博 (玉川大)

芹沢良洋 (新日鉄住金)、上岡悟史 (JFE スチール)、木村義久 (新日鉄住金)、今成宏幸 (TMEIC)、柳修介 (神鋼)、久保達博 (日新)、原口洋一 (新日鉄住金)

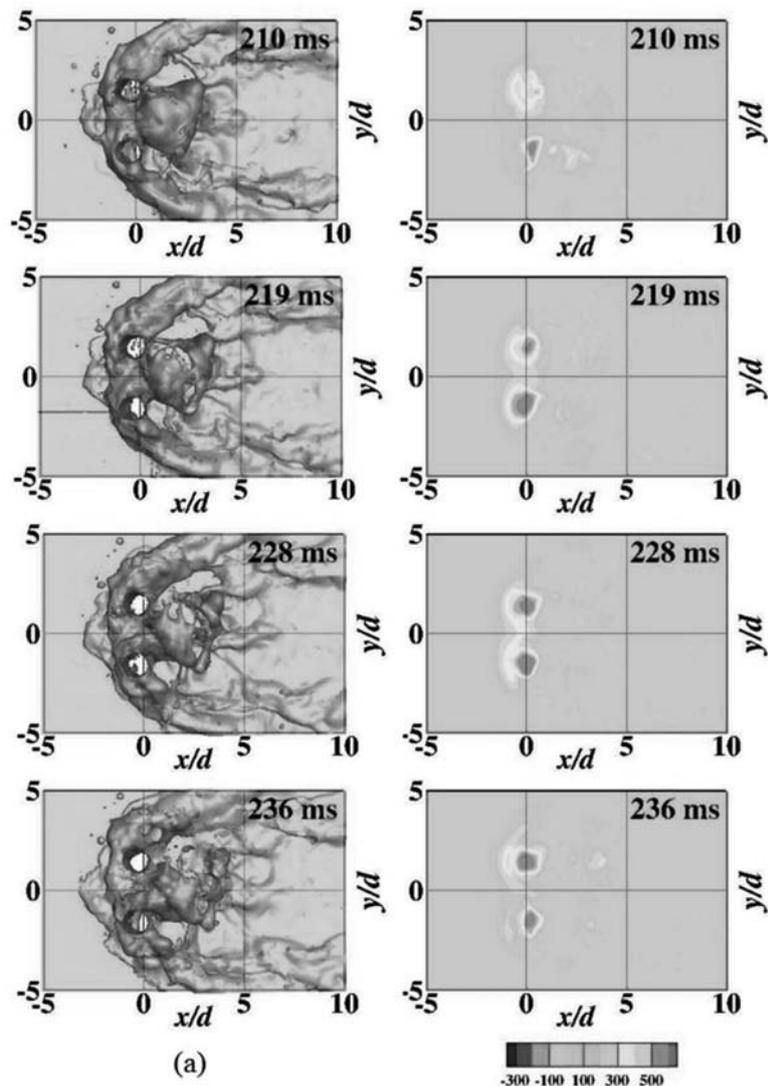


図25 自由表面形状と固体面圧力分布の時間変化⁷⁾

参考文献

1) 光武雄一, 門出政則: 「熱延ROT冷却モデル構築」研究会平成22-24年度成果報告書, (2014.3)
 2) 三塚正志: 高温鋼板のスプレー冷却に関する研究, 鉄と鋼, 54 (1968) 14, 1457.
 3) 永井二郎: 「熱延ROT冷却モデル構築」研究会平成22-24年度成果報告書, (2014.3)
 4) 高田保之: 「熱延ROT冷却モデル構築」研究会平成22-24年度成果報告書, (2014.3)
 5) 永井二郎: 「熱延ROT冷却モデル構築」研究会平成22-24年度成果報告書, (2014.3)

6) 大久保英敏, 亀ヶ谷博: 「熱延ROT冷却モデル構築」研究会平成22-24年度成果報告書, (2014.3)
 7) 藤本仁: 「熱延ROT冷却モデル構築」研究会平成22-24年度成果報告書, (2014.3)
 8) C.W.Hirt and B.D.Nichols: J.Comput.Phys., 39 (1981) 201.
 9) D.Gueyffier, J.Li, A.Nadim, R.Scardovelli and S.Zaleski: J.Comput.Phys., 152 (1999) 423.
 10) R.Scardovelli and S.Zaleski: J.Comput.Phys., 164 (2000) 228.

(2014年7月1日受付)