

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 28 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560238

研究課題名(和文)高温面の急速冷却中に形成される安定な固液接触面の拡大開始に関する熱的特性の解明

研究課題名(英文) Understanding of thermal characteristics of expansion of stable solid-liquid contact during quench of high temperature solid surface

研究代表者

門出 政則 (Monde, Masanori)

九州大学・水素材料先端科学研究センター・特任教授

研究者番号：80109222

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：液体の沸点よりも十分高い温度の固体面(高温面と呼ぶ)を液体で冷却するとき、この高温面が液体によって安定的に濡らされるかどうかは、高温面を冷却するときの伝熱特性を理解する上で非常に重要な問題となる。即ち、高温面が安定的に濡らされるとそこでの熱流束が濡らされない場合と比較して100倍以上大きくなる。

本研究では、安定な濡れ開始条件を測定するために必要な特殊な温度測定法を開発し、その条件を実験的に検討した。同時に濡れ開始条件に対して均一自発核生成(マイクロ秒以下で蒸気が爆発的に生成される現象)という視点から理論解析し、その特性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：When a solid surface at a temperature much higher than boiling temperature of a liquid is quenched by the liquid, it is very important whether the surface can be stably wetted by the liquid or not, to understand heat transfer characteristics. The reason is that the heat transfer for the wetted surface becomes about 100 times larger than that for the instable wetted one. A new technique to measure whether the stable wetted condition was reached or not, had been developed. In the technique, a couple of temperature sensors which are installed at 0.005 mm below the surface can measure a temperature change at a frequency of 100 KHz. The surface temperature and heat flux can be accurately calculated by applying newly developed inverse solution to the measured temperature. A homogeneous nucleation theory had also developed to explain a start of stable wetted condition, predicting its condition correct.

研究分野：熱工学

キーワード：均一自発核生成 急速冷却 固液接触 蒸気爆発 相変化

### 1. 研究開始当初の背景

高温面を急速非定常冷却する場合、表面は、非常に短い時間で濡れと乾きが繰り返されていることが高速度ビデオ観察で明らかにされているにもかかわらず、温度計測は、その応答性能からその高速現象を追跡することが不可能であった。また、Lidenfrost 温度や Lidenfrost 現象という用語が安易にかつ非常に曖昧な用語として広く利用されているが、その物理的意味が不明確であった。

申請者は、安定な固液接触が確立される状態は、固液が接触した瞬間に蒸気が爆発的に生成されなくなる条件であるとの仮説を基に、非平衡均一自発核生成の理論を提案した。しかし、均一自発核生成が発生する固体温度の下限値については、実験的な検証を得るには至っていなかった。

一方、産業界では、例えば鉄鋼業界では高品位の抗張力鋼が自動車用ハイテンなどとして活用されているが、熱間圧延鋼板の加工熱処理過程において、結晶成長を制御する必要があるにもかかわらず、この制御温度が丁度 Lidenfrost 温度近傍で、沸騰冷却における不安定領域となっているため、学術的説明が残されたままで、現場での経験に頼っていたため、品質のばらつきが大きかった。この冷却過程で、安定な固液接触が確立される温度、更に安定な固液接触域が拡大を開始する条件、更には、最大熱流束点(定常状態では、限界熱流束に対応)の通過をより正確に理解出来れば、高温面の急速冷却に対する新しい物理モデルの展開となると同時に、冷却過程での固液界面の境界条件が明確になることによって、シミュレーション解析に必要な境界条件が規定され、冷却中の固体内の温度履歴を追跡することが可能となり、固体内の結晶構造と温度との関連を明らかにすることが期待出来る。

### 2. 研究の目的

高温面を液体で急冷する場合、固体表面温度がある温度以下になって初めて固液の安定な接触が確立されることが申請者のこれまでの研究で明らかになった。本研究では、①安定な固液の接触が可能となる温度と均一自発核生成発生時の下限温度との関係を検討する。②安定な固液の接触が確立され、更にその接触領域が拡大し始める条件について、固液の熱的特性と液体の流動特性との連成問題であるという視点から、検討する。具体的には、安定な固液接触中の蒸発に伴う固体からの熱移動量、更に生成蒸気によって液

飛散後に出現する乾き面の継続中に回復する表面温度を正確に把握することが必要となる。安定な固液の接触に伴う急冷と乾き面出現中の温度回復を繰り返しながら表面温度は徐々に低下し、遂に固液接触面の拡大を開始し、高温面の急冷が進行・完了すると申請者は推定している。ms オーダーで生じる固液の濡れと乾きの繰り返し中の熱的特性を流動観察と固体表面温度の同時計測を基に濡れ面の拡大に及ぼす、液体速度、サブクール度、固液の熱物性の各パラメータの影響を明らかにする。

### 3. 研究の方法

高温面に液体が接触した直後の固体の温度変化を追跡可能な熱電対(図①参照)を製作した。

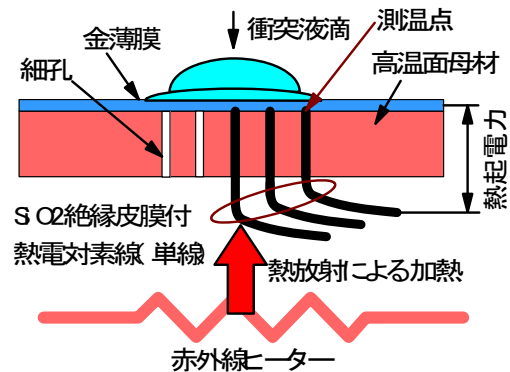


図 1 表面温度計

この温度計の開発によって、約 10 kHz の応答性をもつ表面温度計を作成することが出来た。ただ、最大耐温度が 400°C 以下でしか使用できなかった。

固液接触中の高温面上の流動状況の観察と固体温度変化を連成させるために、最速 140 万 fps の高速ビデオ装置と温度計測を同期させた測定システムを開発した。

実験は、高温面に液滴を滴下するという方法で行われた。この実験は、温度計測が 400°C 以下という制約のため、水を用いた実験は出来なかったため、エタノールを試験液体として使用した。濡れ面の拡大に関する実験は、高温面に噴流を衝突させるという方法で実験を行い、従来の温度計測法(応答時間 100 Hz 程度)を適用して、主に濡れ面の拡大と表面温度や熱流束の関係について検討した。

### 4. 研究成果

(1) 均一自発核生成温度と濡れ開始温度との関連について

均一自発核生成理論を奥山らが報告している実験結果「静止(プール)液中のエタノールを高速に加熱した時の爆発的な蒸気時間」に適用し、測定された蒸気生成時間がこの理論から得られた蒸気発生時間とほぼ一致す

ることを確認した。なお、水を急速加熱したときの爆発的な蒸気生成時間については、既に理論から推定された時間といろいろな条件に対してほぼ一致することが確認されていた。

落下液体が高温面に衝突後、安定な固液の接触が可能となる上限温度（爆発的な蒸気生成が消滅する下限界温度）を均一自発核生成理論から導出した。

更に、固液の表面条件（酸化膜の熱物性と高温面の熱物性が上限温度に及ぼす影響を明らかにした。

(2) 液滴接触時の表面温度と熱流束について

本研究で開発した表面温度計（図 1）を用いて、液滴接触時の非正常高速測定を行うことが出来た。図 2, 3 は、高温面温度（約 170°C と 240°C）に液滴を接触させたときの温度変化と熱流束変化を示す。図 2 は、高温固体温度が、液体の過熱限界温度以下で、図 3 は過熱限界温度以上の場合を示す。また、図中の温度  $T_i$  は、固液接触時の瞬間表面温度を示す。

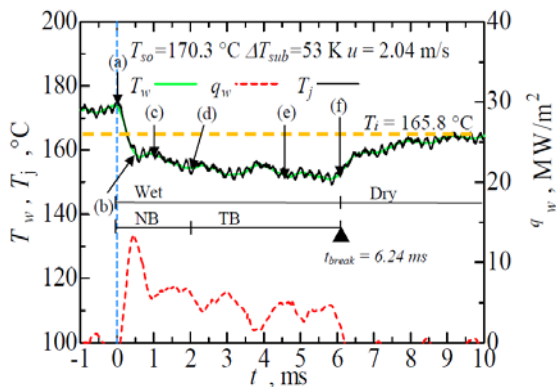


図 2 表面温度と熱流束変化（図中 (a)-(f) は、図 4 の写真 (a)-(f) に対応

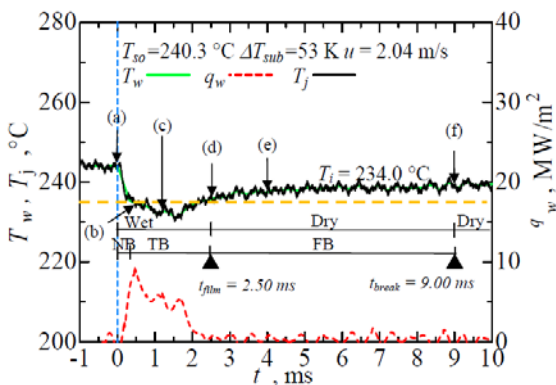


図 3 表面温度と熱流束変化（図中 (a)-(f) は、図 6 の写真 (a)-(f) に対応

図 2 から、測定点での表面温度は微小な変化をしながら変化しているが、表面熱流束は 6 ms まで高い値で推移している。一方、図 3 では、衝突直後に大きい温度降下が出現し、高い熱流束値を示しているが、1 回のみで、

それ以降熱流束値は、ほぼ 0 に近い値となっている。図 2, 3 の比較から、図 2 では表面温度は固液接触時の温度  $T_i$  以下で、濡れた状態となっているが、図 3 では、表面温度は固液接触時の温度上まで直ぐに温度回復している。即ち、図 3 では、安定な固液の接触が確立されないことが分かる。本研究で作成した高速温度計測装置の有効性と温度変化から表面熱流束を推定する逆問題解析の有効性が確かめられた。

(3) 高速ビデオによる流動状況の観察

図 4, 5 は、図 2, 3 に示される温度変化に同期した流動状況の様子を示す。

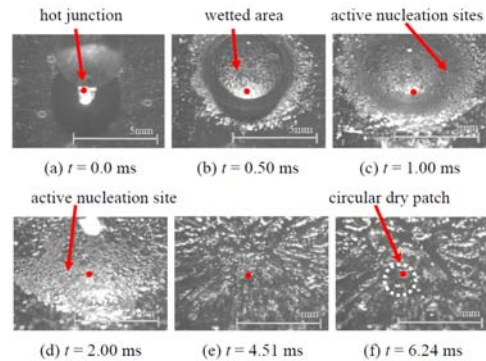


図 4 図 2 の温度変化中の流動状況

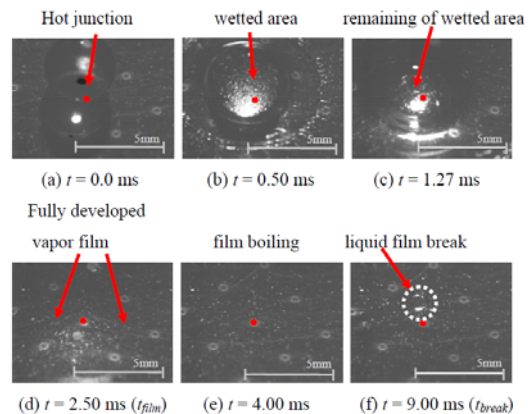


図 5 図 3 の温度変化中の流動状況

図 4 から、液滴落下直後から微小な蒸気泡がランダムに形成されている。一方、図 5 では、衝突直後に蒸気泡が生成され、その蒸気泡は表面全体を覆い尽くすように成長している。遂に、図 5 (d) では、表面全体が蒸気泡で覆われている。ただ、蒸気泡で覆われている状況下でも、短時間の固液の接触が、微小な温度変化から生じているものと推察される。

(4) 高温面上の流動特性と濡れについて

均一自発核生成理論から推定された固液の安定接触開始下限温度以上に固液の接触時温度がなっている場合、安定な固液の接触は生じないということになっているが、実験的にこの下限温度を特定することは出来なかったが、図 3 に示される固体温度の場合、安定な固液接触の下限温度以上に保たれていたために、1 回の衝突後液滴は爆発的な蒸

気生成で表面温が即座に蒸気泡で覆われたと解釈される。一方、図2の固体温度の場合、この下限温度以下であったために、衝突後安定な固液の接触連続的に保たれたものと考えられる。

#### 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 4 件)

- ①Kumar, M., A., Mitsutake, Y., Monde M., Experimental Study of Heat Transfer for a Rotating Cylinder Water Jet Impingement Quenching, Journal of Energy and Power Engineering, (査読有)Vol.7, No.3, 2013, pp.411-422.
- ②Kumar, M., A., Mitsutake, Y., Monde M., Subcooled water jet quenching phenomena for a high temperature rotating cylinder, International Journal of Heat and Mass Transfer(査読有), 68, 2014, pp.466-478.
- ③Suhaimi, I., Hasan, M., N., Mitsutake, Y. and Monde, M., Generation time of stable vapor film during impact of a droplet on hot surface Thermal Science & Engineering (査読有), 32-2, 2014, pp.21-41.
- ④Monde, M., Review of boiling explosion due to homogeneous nucleation in theoretical and experimental approach, Journal of Thermal Science and Technology(査読有), 10-1, 2015, pp.1-12.

[学会発表] (計 5 件)

- ①Kumar, M., A., Mitsutake, Y., Monde M., Cooling propagation and its effectiveness for a rotating cylinder jet quenching, 3rd Int. Forum on Heat Transfer(IFHT2012), Nagasaki, (November 13-15, 2012)
- ②Suhaimi, I., Hasan, M., N., Mitsutake, Y. and Monde, M., High speed observation and measurement of surface temperature and surface heat flux during impact of a droplet on hot surface, Proc. of IHTC15, August 10-15, (2014), Kyoto, Japan
- ③Hasan, M., N., Suhaimi I., Mitsutake, Y. and Monde, M., Homogeneous boiling explosion condition: From an energy point of view Int. Conf. of Mechanical Engineering(ICME 2013), June 20-21, (2014), Dhaka, Bangladesh.
- ④Hasan, M., N., Suhaimi I., Mitsutake, Y. and Monde, M., Characteristics of homogeneous boiling explosion in ethanol during rapid linear boundary heating, Int. Conf. of

Mechanical Engineering (ICME 2013), June 20-21, (2014), Dhaka, Bangladesh.

- ⑤Suhaimi, I., 光武, 門出 他3名, 高温面上の単一液滴及び液滴列衝突時の安定蒸気膜の生成時間に関する実験的研究, 第51回日本伝熱シンポジウム講演論文集 (2014-5)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

門出政則 (MONDE, Masanori)

九州大学・水素材料先端科学研究センター・特任教授

研究者番号：80109222