

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 4月 26日現在

機関番号：17201
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2008～2011
 課題番号：20360101
 研究課題名（和文）ライデンフロスト温度以上の高温面急速冷却中の自発核生成と濡れ開始について
 研究課題名（英文）Homogeneous nucleation generation and stable wetting during quenching high temperature surface higher than Leidenfrost temperature
 研究代表者
 門出 政則（MONDE MASANORI）
 佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授
 研究者番号：80109222

研究成果の概要（和文）：

均一自発核生成による蒸氣的な相変化に対する新しいモデルを構築した。更に、このモデルによって、3つの異なる急速加熱（1） 10^8 K/s レベル以上の急激な温度上昇、（2）高温面上での固液接触、（3） 100 MW/m^2 レベルでのパルス加熱で生じる均一自発核生成現象が矛盾なく説明されることを明らかにした。

応答時間 10^{-6} 秒レベルの温度センサーを開発し、著者らが開発した逆問題解析を適用することによって、急速冷却中の冷却曲線を精度良く求めることが可能となった。

研究成果の概要（英文）：

A new model has been developed to analyze boiling explosion due to homogeneous nucleation. Boiling explosion caused by three different types of rapid heating such as (1) linearly temperature rise higher than 10^8 K/s, (2) contact of liquid with high temperature surface (3) pulse heating of high heat flux of 100 MW/m^2 level, can be explained and understood correctly by applying the new model.

A temperature sensor with high response time of 10^{-6} second is newly developed. Its sensor makes it possible that a cooling curve obtained by quenching high temperature surface with liquid is much improved together with inverse solution developed by us.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2009年度	3,500,000	1,050,000	4,550,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	2,200,000	660,000	2,860,000
年度			
総計	14,000,000	4,200,000	18,200,000

研究分野：熱工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：(1) Quench (2) High Temperature (3) Homogeneous Nucleation (4) Jet cooling (5) Spray cooling (6) Heat Transfer (7) Phase Change

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たが、その物理的意味が不明確であった。申請者らは、安定な固液接触が確立されるメカニズム、換言すると均一自発核生成の下限界を支配するメカニズムを明らかにする。そして、この下限界以下の条件では、安定な固液の接触が確立されるので、その安定な固液接触面が拡大しながら、急速冷却現象を追跡することによって、これまで曖昧なままになっている急速冷却中の伝熱特性がより正しく理解することが可能になるだろうと推察した。

2. 研究の目的

ライデンフロスト温度（正確には、均一自発核生成温度）以上の高温面を液体で急冷するときの冷却特性を固液の連成問題という視点から高温面の急速冷却過程を再構築する。特に、均一自発核生成の発生限界や固液の安定な接触開始温度と熱流束の関係や冷却中の最大熱流束を支配するパラメーターの確立を目指す。実験は、固体側の熱物性として、3種類（銅、黄銅、炭素鋼）、液側の熱物性として水とアルコールを用いて高温面の急速冷却を行う。

3. 研究の方法

均一自発核生成温度以上に加熱された高温面に液体を接触させたときの冷却特性を3つの異なる観点、①安定な固液接触が生じない条件、②安定な固液接触が得られるがその接触面が拡大しない条件、③固液接触面が拡大する条件、に注目して検討した。

具体的な方法は、

- (1) 冷却中の表面温度と表面熱流束の測定精度を飛躍的に改善するための温度センサーの開発と著者によって開発された逆問題解の適用する。
- (2) 固液接触時の流動状況をより正確に観測するために、1,000,000コマ/秒の超高速ビデオカメラの導入とその開発、更にはその画像解析方法を検討し、流動状況変化と表面温度や熱流束との関係の検討する。
- (3) 均一自発核生成に対するモデルの構築を行い、理論解析結果の妥当性を高温面の表面温度や熱流束変化及び流動状況変化を基に検討する。
- (4) 安定な固液接触状況が確立された後、その固液接触面積が拡大を開始する条件の検討を行う。

4. 研究成果

ライデンフロスト温度以上の高温面に液体(水あるいはアルコール)が接触した瞬間に固体表面で激しい相変化によって蒸気爆発が発生する。この蒸気爆発現象は、液体中に生成される均一自発核生成によるもので

あると言われている。この均一自発核生成に対する新しい非定常モデルを提案し、蒸気爆発の下限界を明らかにした。更に、本モデルを高速温度上昇に伴う均一自発核生成やパルス加熱による均一自発核生成に適用し、従来の観察結果が統一的に説明できることを明らかにした。固液の連成問題という視点から急速冷却問題を再構築するためには、固液接触時の短時間での非常に激しい温度変化を測定するための温度センサー（応答時間 10^{-6} 秒レベル）を開発した。

開発した温度センサーと著者らが開発した逆問題解析を適用することによって、急速冷却中の冷却曲線を精度良く求めることが可能となった。この結果、衝突噴流冷却における最大熱流束に及ぼす、噴流速度や噴流温度の影響を明らかにすることが出来た。

均一自発核生成に対する新しいモデルの構築を行い、モデルの妥当性を高温面の表面温度や熱流束変化及び流動状況変化から検証した。そして、均一自発核生成によって生じる蒸気爆発について、3ケースについて検討を行った。

- (1) 高温面の温度を 10^8 K/s 以上という高速温度上昇をさせたときに突然出現する蒸気泡が、本モデルを適用することによって推定されることが実証された。
- (2) 下限界温度以上の高温面と液体が接触するとき、均一自発核生成が生じる接触時間と接触中の蒸発熱流束の大きさを接触時の高温面温度で整理することが出来た。また、均一自発核生成蒸発による蒸気爆発が生じる下限界を本モデルから計算できるようになった。
- (3) 熱流束 10^7 W/m²という超高熱流束をパルスのように液体に印加したときに発生する均一自発核生成に対しても本モデルが適用できることを検証した。構築された均一自発核生成モデルは、非定常状態に対して適用可能であり、従来の平衡状態下で構築された均一自発核生成モデルよりも一般性があり、今後一層の発展性が期待されることが分かった。

高温面を急速冷却するときの冷却プロセスが、3つの領域に分類されることを明らかにした。

- (1) 高温面温度が、下限界温度以上の領域；安定な固液の接触が確立されず、液体が高温面に接触した瞬間に蒸気爆発が生じる。蒸気爆発が生じる時間は固液の温度大きく依存するが、大凡数 $10\ \mu\text{m}$ となること、モデル計算から推定された。
- (2) 高温面温度が下限界温度以下の領域；固液の安定な接触が確立されるが、その固

液接触面は拡大せず、そのまま高温面上に留まっている。

- (3) 高温面から供給される熱流束がある熱流束以下(この境界値は未解決のままになっている)の領域: 安定な固液接触面が激しい沸騰を伴いながら拡大を開始し、急速冷却が始まる。安定な濡れ面の移動速度と熱流束の関係を予測する式を提案することができた。そして、濡れ面の移動開始時刻は、高速度ビデオ撮影から特定することはでき、その時の熱流束は逆問題解から推定することは可能である。しかし、研究期間内で濡れ面の拡大開始を決定する熱流束の支配方程式を求めるまでには至らなかった。

この3領域の流動状況は、高速ビデオカメラを用いて、領域(1)から(2)への推移や領域(2)から(3)への推移に関する詳細な観察がなされた。領域(1)から(2)への推移するときの支配パラメータが観測結果との比較から厳密には熱流束であることを明らかにした。しかし、均一自発核生成に伴う蒸気爆発が生じる熱流束の下限界に対応する温度は、非常に狭い温度域であることから下限界温度という指標を用いた方が分かり易いので、下限界温度という表示をすることにした。

本研究で得られた研究成果を10件の論文としてまとめ、著名な雑誌にて公表している。また、国際会議に、研究成果の一部を発表し、その中で、3件 Keynote lecture として講演している。

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10件)

1. 門出政則, Mohammad Nasim HASAN, 光武雄一
均一自発核生成モデルの高温面の噴流急速冷却への適用
日本機械学会論文集, Vol.76. No.776B,(2011), pp.1158-1164
2. Hasan, M., Monde, M. and Mitsutake, Y.
Lower Limit of Homogeneous Nucleation Boiling Explosion in Water,
International Journal of Heat and Mass Transfer. 54, 2011, pp. 3226-3233.
3. Hasan, M., Monde, M. and Mitsutake, Y.
Homogeneous Nucleation Boiling during Jet Impingement Quench of Hot Surfaces above Thermodynamic Limiting Temperature
International Journal of Heat and Mass Transfer. 54, (2011), pp.2837-2843

4. Hasan, M., Monde, M. and Mitsutake, Y.
Model for Boiling Explosion during Rapid Liquid Heating,
International Journal of Heat and Mass Transfer. 54, 2011, 2844-2853

5. Hasan, M., Monde, M. and Mitsutake, Y.
Homogeneous Boiling Explosion during High Heat Flux Pulse Heating of Water
Thermal Science and Engineering, Vol. 19, No.4, (2011), pp. 95-102.

6. Woodfield, P.L., Mozumder, A.K., and Monde, M.
On the Size of Boiling Region in Jet Impingement Quenching
International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol.52, (2009), pp.460-465.

7. 光武雄一, 門出政則, 日高真一郎
スプレー冷却中の高温面のぬれ開始温度特性 (第1報, 高温面全体を均一にスプレー冷却した場合)
日本機械学会論文集, Vol. 75, No.758B, (2009), pp.1917-1924

8. 光武雄一, 門出政則, 高木英斗
スプレー冷却中の高温面のぬれ開始温度特性 (第2報, 高温面の一部をスプレー冷却した場合)
日本機械学会論文集, vol.75, No.76 0B(2009), pp. 1925-1931.

9. Islam, Md.A., Monde, M., Woodfield, P.L., and Mitsutake, Y.
Jet Impingement Quenching Phenomena for Hot Surfaces well above the Limiting Temperature for Solid-Liquid Contact
Int. J. Heat Mass Transfer, 2008, Vol.51, pp.1226-1237.

10. Monde, M.
Heat Transfer Characteristics during Quench of High Temperature Solid
Journal of Thermal Science and Technology, Vol.3, No.2. (2008), pp.292-308.

[学会発表] (計5件)

国際会議:

1. Monde, M. (Keynote Speaker)
Characteristics of Quenching High Temperature Surface and Vapor Explosion
The 8th KSME-JSME Thermal and Fluids Engineering Conference, Incheon, Korea, (March 18-21, 2012)

2. Monde, M.(KeynoteSpeaker), HASAN, M.
Homogeneous Nucleation Boiling Explosion
Phenomena under Non-equilibrium Condition
International Conference on Mechanical
Engineering 2011(ICME2011), Dhaka,
Bangladesh, (December 18-20, 2011)

3. Hasan, M., Monde, M. and Mitsutake, Y.
Homogeneous Nucleation Boiling During Jet
Impingement Quench of Hot Surfaces
The 14th International Heat Transfer Conference,
Washington, U.S.A.,(August 7-13,2010)

4.Masanori M. (Keynote Speaker) and Mitsutake,
Y.
Characteristics of Heat Transfer During
Quenching High Temperature Material
7th ECI International Conference on Boiling Heat
Transfer, Florianopolis-SC, Brazil, (May. 3-7,
2009)

5. Monde, M. and Mitsutake, Y.
Characteristics of Wetting Temperature during
Spray Cooling
9th International Symposium on Experimental
and Computational Aerothermodynamics of
Internal Flows,
Gyeongju, Korea, (September 8-11, 2009)

国内会議：

1. Hasan Nasim, 門出 政則, 光武雄一
Cooling Phenomena at the Early Stages of
Jet Impingement Quenching of High
Temperature Surfaces
第 48 回伝熱シンポジウム
岡山市・2011.6.1～3.

2.門出政則, Hasan Nasim, 光武雄一
高温面接触時の均一自発核生成発生の下限
界温度
日本機械学会 2010 年度年次大会
名古屋工業大学にて 2010.9.5～9

3.Hasan Nasim, 門出 政則, 光武 雄一
均質核生成沸騰の数値シミュレーション
熱工学コンファレンス 2009
山口大学にて 2009.11.7-8

〔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)
佐賀大学・海洋エネルギー研究センター・教授
研究者番号：8010222

(2) 研究分担者 光武 雄一 (MITSUTAKE YUICHI)
佐賀大学・工学系研究科・准教授
研究者番号：20253586

(3) 連携研究者
なし