論文

流体発振形冷却装置の開発* (流れと冷却過程の可視化)

中島 正弘**, 野崎 勉***, 田畑 隆英**

Development of Fluid Oscillating Cooling Device (Visualizations of Flow and Cooling Process)

Masahiro NAKASHIMA, Tsutomu NOZAKI, and Takahide TABATA

ABSTRACT

This paper is concerned with the cooling unit, where the flow mechanism of fluidics called the vortex chamber oscillation device is applied. The water jet issuing from this cooling device impinges on the heated plate with swinging by itself. The flow aspect in the cooling device and the impinging patterns of the water jet have been studied by means of the high speed digital video camera and the image processing system. As a result, the oscillating period is estimated by the sequential frames from this camera. The large scale vortex is recognized in the vector diagram obtained by the PIV system. The discussions about the oscillating mechanism has been conducted by using this large vortex. Moreover, the cooling process is also visualized by using the temperature-sensitive liquid crystal film. The effects and the merits of this cooling device have been discussed.

Key words : Impinging jet, Cooling device, Fluidics, High speed camera, Flow visualization

1. 緒言

衝突噴流は高い熱伝達率や物質輸送が望めることおよび制御性に優れているため、製鉄や塗装プロセスにおいて広く利用されている。したがって、流体力学および伝熱工学的観点から衝突噴流の特性^{1)~5)}がこれまで活発に研究されている。しかしながら、衝突噴流はよどみ点から離れて壁面噴流に移行すると、熱伝達率が急速に低下するという欠点がある。これを改善するために、衝突噴流を一系列に配置⁶⁾したり、衝突点近傍に角柱を配置⁷⁾するなど種々な試みがなされている。

一方、中山ら^{8),9)}は流体の自己発振機構を応用した散水装置を開発し、これを新幹線軌道上での融雪に利用している。また、中島ら¹⁰⁾は太陽熱温水器や太陽光発電装置などの屋外設置機器のパネル面上の固形物を除去する目的で、この種の散水装置を改良している。そして、この散水装置の散水特性は圧力回復孔直径や散水装置出口幅などの幾何学的諸元に大きく依存し、さらに散水角が最大になる直径や出口幅が存在することを明らかにして

いる¹¹⁾。

本研究は上述の散水装置から流出する発振水噴流を加熱平板に衝突させて冷却を行う流体発振形冷却装置に関するものである。この装置から流出する水噴流は自己発振しながら加熱平板に衝突するので冷却面積が非発振の水噴流と比較して大きくとることが可能であり、機械的可動部をもたないので製鉄所など塵埃の多い場所でも使用可能で保守も簡便である、などの特長を有している。

本研究では、高速度デジタルビデオカメラ、画像処理システムおよび感温液晶などを用いて、水噴流の発振機構、衝突特性や加熱平板上の冷却過程の可視化を行う。そして、流体発振形冷却装置の特性、特に流体力学的特性を明らかにする。

2. 実験装置および方法

本研究で用いる流体発振形冷却装置を Fig.1 に示す。この種の装置は中山ら⁸⁾によって開発され、「渦室発振素子」と名付けられている。彼らはこれと同様な装置を散水器として利用し、新幹線軌道上や駅構内屋根の融雪に利用し、有効であることを実証している。また、この装置から流出する水噴流の発振原理の説明は中山ら⁸⁾によってなされているので、ここではこれを省略する。

* 原稿受付 1998年8月25日

** 正会員 鹿児島工業高等専門学校

*** 正会員 鹿児島大学工学部

Fig. 1 Cooling device

Fig. 1 に示した冷却装置は、大きな水滴が得られるように中山らの装置の出口部分を若干、改良したものである。なお、散水角度や散水量分布といった散水特性については、中島ら¹¹⁾によって画像処理技術などを用いて、すでに明らかにされている。

Fig. 1 に示す冷却装置は直径 $D = 48$ mm のアクリル樹脂製の渦室、および矩形の真鍮製ノズル（幅 5 mm、深さ 8 mm）で構成されている。また、大気が交互に流入して渦室内の圧力を制御する小孔である圧力回復孔の直径 d および出口幅 b はそれぞれ、6 mm および 8 mm である。これらの幾何学的パラメータ d および b は散水特性に大きく影響を与えることが明らかになっている^{10), 11)}。したがって、本研究では最大散水角度を与える上述の値に特定して実験を行っている。

本研究で用いた実験装置を Fig. 2 に示す。ポンプ①により下部タンク②から汲み上げられた水は冷却装置③の出口から自己発振しながら平板④に衝突する。冷却装置出口から衝突平板までの距離を衝突高さ h と呼び、これは任意の高さに変化できるようにしてある。

冷却装置内部の流れ挙動および流出水噴流の衝突の様子は、高速度デジタルビデオカメラ⑤によって観察され、これからのデジタル信号はレーザービデオデスク (CRV) ⑥およびビデオカセットレコーダー⑧に保存される。さらに、高速度カメラからの信号はパーソナルコンピュータ⑦内の画像処理システム (PIV) によって処理される。

衝突平板④にはステンレス箔（厚さ $30\mu\text{m}$ 、幅 300 mm、長さ 500 mm）が貼付しており、これに交流電通することにより衝突平板は加熱される。このようにして得られた熱流束は 740 W/m^2 である。また、加熱された衝突平板の表面には発振水噴流による冷却過程を可視化するために、感温液晶（日本カプセルプロダクツ製コレステロール誘導体液晶、最低温度 303 K、最高温度 313 K）も貼付されている。そして、この感温液晶の色彩変化はデジ

Fig. 2 Experimental apparatus

タルビデオカメラ⑨で観察され、ビデオプリンター⑩に出力される。

なお、本実験において冷却装置への水供給流量 Q_w は 0.285 l/s であり、圧力 p_w は 0.196 MPa である。なお、流出水噴流の温度は 298 K である。

3. 実験結果および考察

3.1 高速度カメラによる流れの可視化

冷却装置から流出する水噴流の様子を連続写真の形で Fig. 3 に示す。この画像は高速度カメラ (FASTCAM-ultima) によって、 $1/4500\text{ sec}$ の録画時間で得られたものである。なお、この図において各フレーム間の時間間隔は 1.3 ms であり、総撮影時間は 21.3 ms である。また、各フレームにおいて水噴流は上方から冷却装置内部へ流入し、下方から流出している。そして装置内部で水噴流は黒く、後述する冷却装置内部の大規模渦は白く、さらに流出後の水噴流は白く写っている。さらに、この図における撮影開始フレームは左側最上部であり、時間の経過とともに右側へ進み、撮影終了フレームは右側最下部である。

この図の最初のフレームにおいて、水噴流は冷却装置出口から左方向に流出し、その後、次第に右方向に変わっていくのがわかる。そして、2 段目右端フレームで右方向に流出した後、再び流出方向を変え、最終フレームにおいて最初のフレームと同じ流出方向に戻っているのが認められる。したがって、この連続した 16 フレームの観察結果から、水噴流が自己発振していることがわかる。さらに、これらの連続フレームから得られた流出水噴流の発振周波数は、約 48 Hz である。中山ら⁹⁾は半導体圧力変換器を用い、その記録された出力波形から 75 Hz の発振周波数を得ている。彼らは供給圧力 p_w を 0.3 MPa としており、この相違が本実験の周波数の違いとなっている。

画像処理技術を用いた流れ解析では、YAG レーザーと CCD カメラが一般に用いられている。本研究でもこ

Fig. 3 Sequential frames of swinging jet

Fig. 4 Vector diagrams in cooling device

のYAGレーザー（出力15 mJ/パルス、繰り返し周波数30 Hz）を用いた撮影を当初、試みた。しかし、この冷却装置内の流動がこの様なシステムに対して高速であるので、これらを用いた解析は困難であることが明らかになった。したがって、本研究においては高速度デジタルカメラからの連続した2フレームを直接、画像処理システム（PIV）に入力する方法を採用した。この場合、2フレーム間の時間間隔は上述したように1/4500 secである。なお、画像処理が容易に行えるよう、供給水に微

小粒子（MCI GEL, CHP 20 P 粒径75~150 μ m）を混入している。

この様な可視化システムによって得られた冷却装置内部の流れの様子をベクトル線図として表し、Fig. 4に示す。さらに画像処理において用いた高速度カメラからの原画像を同図上方にあわせて示す。

Fig. 4(a)において、冷却装置内部の左側に大規模渦が、また右側に小規模な渦が発生していることがこのベクトル線図から認められる。そして、水噴流は冷却装置内部

Fig. 5 Flow patterns for various impinging heights

を直進することなく、左側に偏りながら流れている。そして、冷却装置の左側壁に沿って流出していることがわかる。つぎに、約 5 ms 程度経過した画像から得られた Fig. 4(b)においては、冷却装置内部の両側にほとんど同規模の渦が形成された結果、水噴流は左右に偏ることなく直進している。さらに、約 5 ms 程度経過した画像から得られた Fig. 4(c)においては、Fig. 4(a)とは逆の流れパターンが冷却装置内部で認められる。その結果、水噴流は右側に偏りながら流れ、装置から左方向に流出していることがわかる。

前述したように、この種の散水器において散水特性は中山や著者らによってすでに研究されているが、装置内部の流れの様子はここで初めて明らかにされた。

つぎに、衝突高さを種々変化させて水噴流が平板に衝突する様子を高速カメラで撮影した。この様子を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a)が $h/b = 25$ 、Fig. 5(b)が $h/b = 12.5$ の場合である。これらのフレームにおいては水噴流ではなく、大きな水滴が平板に衝突していることがわかる。これは衝突高さがかなり大きいために、水噴流が表面張力の影響を強く受け、分裂したためである。しかしながら、この場合の水滴はかなり大きいので、ここで提案した冷却装置は比較的、高温壁面の冷却にも適していると考えられる。

一方、Fig. 5(c)および Fig. 5(d)はそれぞれ、 $h/b = 7.5$ および 5.0 の場合の水噴流が衝突する様子を示したものである。これら 2 つのフレームより、水噴流が水滴を形成することなく、水噴流の状態を保持したまま直接、平板に衝突していることがわかる。したがって、工業用

冷却として通常用いられている非発振の衝突水噴流と比較して、本装置の冷却面積はかなり増加していると考えられる。衝突噴流における熱伝達はよどみ点付近で最大になることがこれまでの研究で明らかとなっている。このことを考慮すれば、本冷却装置においては水噴流が左右に発振することにより、よどみ点が自動的に移動するので、熱伝達が促進されていることも考えられる。

3.2 感温液晶による可視化

本研究で提案した冷却装置の有用性を感温液晶を用いて確認した。

水噴流が衝突して加熱平板を冷却するとき、この液晶の色彩が連続的に変化する。本研究では、前述のステンレス箔に交流電圧をすることにより、衝突平板を 303 K から 313 K まで加熱した。そして、液晶の色彩の変化は加熱平板に対して 30° 傾けられたデジタルカラービデオカメラで撮影した。

この様にして得られた冷却過程を Fig. 6 に示す。この図において、各フレーム間の時間間隔は、0.667 sec である。さらに液晶の色彩と温度との関係を同図中にあわせて示している。なお、熱電対を用いた予備実験によれば、冷却過程は約 5 sec 程度で定常状態に達していることが確認されている。したがって、Fig. 6(a)および(b)の各最終フレームでは冷却過程の定常状態を表していると考えてもよい。

衝突高さが比較的低い例として、 $h/b = 7.5$ の場合の冷却過程の様子を Fig. 6(a)に示す。衝突開始直後では感温液晶は全体にわたって青色を呈し、衝突平板が高温であることを示している。そして、散水が進むにつれて感

Fig. 6 Cooling process visualized by liquid crystal film

温液晶の色は緑青色から茶色に次第に変化していき、加熱平板が冷却されていることがわかる。

この衝突高さの場合、前節で述べたように流出水噴流は分裂せずに直接、加熱平板に衝突する。したがって散水面積は比較的小さく、冷却が促進されていることを表す茶色の領域は、狭い範囲にとどまっている。

一方、衝突高さが比較的高い $h/b = 25$ の場合を Fig. 6 (b) に示す。 $h/b = 7.5$ の場合と比較して、かなり早い散水時間で濃い茶色の領域が現れていることがわかる。これは、衝突高さが増大したために大きな水滴による散水領域が広がり、冷却過程が急速に促進されていると思われる。

発振水噴流が直接、加熱平板に衝突することにより、最も熱伝達が促進されるよどみ点が左右に移動する。したがって、局所熱伝達促進の点から見れば衝突高さは小さい方が望まれる。一方、伝熱面積の増加の観点から考えれば、大きな水滴で広い散水・冷却が可能な大きい衝突高さが適当であると考えられる。以上のことから、冷却すべき壁面の温度高低と冷却面積の大小に応じた、最適な衝突高さが存在すると思われる。

4. 結 言

渦室発振素子と呼ばれる流体素子の発振原理を応用した冷却装置に関する研究を高速度カメラ、画像処理システム、および感温液晶フィルムを用いて行った。その結果、以下の結論が得られた。

- (1) 水噴流の発振周期がこのカメラからの連続写真によって計算された。また、高速度カメラからの連続した2フレームの画像を画像処理システムに入力することによって、冷却装置内の速度ベクトルを得た。これにより大規模渦が交互に現れることを明らかにし、これが水噴流の自己発振の起源となることを明らかにした。
- (2) 衝突高さが大きい場合、水噴流から分裂した大きな水滴が平板に衝突すること、これに対して、衝突高さが小さい場合には、水噴流が直接、平板に衝突することを明らかにした。
- (3) 感温液晶フィルムを用いて、発振水噴流による冷却過程を可視化した。その結果、ここで提案した冷却装置は熱伝達の促進と冷却面積の増加に貢献していることが明らかになった。

なお、本研究で用いた高速度カメラ、画像処理システムおよびYAGレーザーは、平成8年度文部省教育先端設備（先端的設備）として鹿児島高専に導入したものであり、導入に当たってご協力いただいた関係各位に深く謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) R.VISKANTA, Heat Transfer to Impinging Isothermal Gas and Flame Jets, Experimental Thermal and Fluid Science, 6 (1993), pp. 111-134.
- 2) 横堀・ほか2名, 軸対称衝突噴流のよどみ域における輸送機構に関する研究, 日本機械学会論文集, 46-410, B (1980-10), pp. 2010-2022.
- 3) D.A.ZUMBRUNMEN and M.BALASUBRAMANIAN, Convective Heat Transfer Enhancement Due to Gas Injection into an Impinging Liquid Jet, Trans. ASME, J.Heat Transfer, Vol.117 (1995-11), pp.1011-1017.
- 4) 親川・ほか5名, 十字形噴流の衝突熱伝達, 日本機械学会論文集, 63-607, B (1997-3), pp. 979-985.
- 5) 一宮・ほか3名, 感温液晶による乱流環状衝突噴流の局所熱伝達特性の測定, 日本機械学会論文集, 62-599, B (1996-7), pp. 2737-2744.
- 6) 森・ほか2名, 衝突噴流群による高温壁の冷却, 日本機械学会論文集, 54-502, B (1988-6), pp.1434-1438.
- 7) 琴・ほか2名, 角柱列を利用した衝突噴流系の伝熱促進に関する研究, 日本機械学会論文集, 61-589, B (1995-9), pp. 3289-3295.
- 8) 中山・ほか3名, 渦室発振素子の特性, 日本機械学会論文集, 52-474, B (1986-2), pp.727-732.
- 9) 中山・ほか2名, 渦室発振素子の特性解析, 可視化情報, 14-2 (1994), 137-140.
- 10) 中島・ほか4名, 桜島火山からの降灰除去を目的とした流体発振形除去装置の開発, 平成5・6年度文部省科学研究費補助金研究成果報告書, 1995.
- 11) 中島・野崎, 各種パネル面除塵用流体発振形散水器具の特性, 日本機械学会論文集, 63-612, B (1997-8), pp. 2745-2751.