赤外線画像解析による加熱液膜流の表面温度分布測定^{*}

Measurement Technique for Determining the Surface Temperature Distribution along a Heated Liquid Film Using Thermography

伊 藤 昭 彦^{**}
ITO Akihiko

森 永 真 二[†]
MORINAGA Shinji

Abstract This paper describes an application of thermography to determine surface temperature of liquid which is moving along a heated wall surface. Breakdown of a thin liquid film is known to cause a problem in the heat transfer surface leading to a serious burnout phenomenon. To develop a technique to prevent the burnout phenomena, the mechanism of the burnout needs to be understood. Thus, we measured transient surface temperature of a thin liquid film using a thermography. Emissivity and absorption coefficients of water, a silicon oil and 1-propanol were determined by comparing its thermocouple measurement. As a result: (1) emissivity of water, a silicon oil and 1-propanol was approximately 0.95 and (2) transient temperature profiles on a liquid surface of wavy flow were obtained.

Keywords: Heated Liquid Film, Surface Temperature, Thermal Visualization, Thermography, Marangoni Force

1. 緒 言

蒸発や凝縮など気液界面を通しての物質あるいはエネルギーの輸送現象は多くの工業機器にみられるもので、波を含めた気液界面の性状がこれらの輸送過程に多大な影響を与える。波の生成には重力や表面張力(界面に働く法線応力)の他に、状況によっては液表面に沿う温度勾配や濃度勾配に基づくマランゴニ力(界面に働く接線応力)も関与する。著者らは、加熱される傾斜面上を自由流下する薄い液膜を対象に液表面温度の変動に伴うマランゴニ効果を考慮した不安定解析[1]と実験[2]から、低流量下での波の発生には粘性力とマランゴニ力が重要であること、それよりわずかに低い流量で生じる液膜破断が、液界面の凹凸によつて助長されたマランゴニ力に起因している可能性があ

ること、などを示唆した。マランゴニ力は微小重力場はもとより、重力場においても液面が不均一に加熱される際に生じる対流の駆動力となる。これを液面が線状に加熱される系[3]で調べてきたが、従来の熱電対による探針法や干渉法[4]のような光学的方法ではマランゴニ力を求めるのに不可欠な液表面温度分布の測定が著しく困難であった。一方、透明な液体といえども波長の長い赤外線に関しては放射率は1に近い。すなわち、液膜内を通過する赤外線は極めてわずかであるから液膜からの放射エネルギーのほとんどが液膜表面からのものと推察される。

非接触測定の一つである赤外線画像計測法は装置の高速化と共に定常現象のみならず非定常現象の測定にも利用されるようになってきているが、

^{*} 1996.1.12受付

^{**} 大分大学工学部生産システム工学科 〒870-11 大分市旦野原700
TEL(0975)54-7812 FAX(0975)54-7812

[†] ㈱日野自動車工業

その対象はおもに固体面の温度測定[5]で、気液界面の測定に応用した例は少ないようである。これらの点を踏まえ、本研究では赤外線画像解析による加熱液膜流の液表面温度分布の測定法について検討を行う。まず静止した液膜が下方より均一に加熱される簡単な系を用いて熱電対による温度測定の結果と比較し、液面の放射率、液体の吸収係数および液膜厚さの影響などの特性および測定の精度について検討を行う。ついで自由流下する加熱液膜流の表面温度分布測定に応用した結果を述べ、本測定法の有用性について検討を行う。

2. 静止液膜の表面温度測定

2. 1 実験装置および方法

静止した液膜を下方より均一に加熱する際の液表面温度の時間変化を測定対象としたが、その実験装置の概略をFig. 1に示す。 $\phi 15\text{cm}$ のバイレックス容器に液体を張り、その底部をシリコン樹脂層を介してヒータで加熱する。加熱量はスライダックを用いて調節した。液膜からの赤外線を金蒸着ミラーを介して赤外線画像解析装置(日本電気三栄株式会社製)で検出し、放射率を与えることにより温度に換算する。本装置の検知波長域は $8\sim 13\mu\text{m}$ 、応答速度は最大 $1/4$ 秒、温度の分解能は 0.1°C である。また、空間分解能は測定機器との最近接距離 20cm において約 0.3mm である。

本測定法の検定は線径 $25\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ および $75\mu\text{m}$ の銅・コンスタンタン(T-type オメガ社製)を用いて行った。熱電対をU字形ブリッジに線状

Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus.

に張り、これが液面に接するように固定した。熱電対の出力はペンレコーダにより記録された。当然のことながら、熱電対は大きさを持つので接点の径の平均的な温度を示し、正確には液表面温度とはいえない。熱電対の線径が小さいほど理想的と考えられるが、実際は線径が細いと加熱中に生じる微少な液面の変動に敏感となり、温度変動も大きくなるため、必ずしも良好な測定結果が得られない[6]。本実験ではおもに線径 $50\mu\text{m}$ の熱電対を使用した。測定対象とした液体は水、シリコンオイル(東芝シリコン、TSF451)および1-ブロパノールの3種とし、液膜厚さ $1\sim 20\text{mm}$ 、液温 $20\sim 80^\circ\text{C}$ の範囲で測定を行った。

2. 2 実験結果および考察

2. 2. 1 液面の放射率

検出した放射エネルギーから温度を算出するのに、あらかじめ放射率 ϵ を与える必要がある。液体の放射率は波長 λ にも依存するが、一般に1に近い値である。放射率 ϵ の設定を $0.85\sim 1$ の間で数通り変えて行った赤外線画像解析の結果と熱電対による測定値と比較してそれぞれの液体についてFig. 2~Fig. 4に示す。水(Fig. 2)に対しては破線で示した $\epsilon = 0.95$ の値が最も良く熱電対の値($\circ$ 印)と一致しているが、この値は他の文献の値(水膜厚さ 0.1mm 以上で 0.95)[7]とも一致している。それでも放射率が $0.85\sim 1$ の範囲であれば、液温が 30°C 以上で放射率の違いによる液温の差は約2%以内と小さい。シリコンオイル(Fig. 3)は常温付近では放射率 $\epsilon = 0.93$ の値が熱電対の値とよく一致するが、液温が高くなると $\epsilon = 1$ としても

Fig. 2 Surface temperature histories of water for three different emissivity.

Fig. 3 Temperature histories of dimethyl silicone oil for three different emissivity.

(a) heating condition

(b) cooling condition

Fig. 4 Surface temperature histories of 1-propanol for three different emissivity.

全体的に前者の方が高めとなる。これは水や1-プロパノールでは液膜内部からの放射エネルギーの影響が十分小さいのに対してシリコンオイルでは赤外線の吸収係数が小さく、液面のみならず液膜内部からの放射エネルギーが加わったことに起因すると考えられる(次節参照)。一方、1-プロパノールの場合(Fig. 4 (a))では $\epsilon = 0.95$ の値が熱電対の値と良く一致しているが、それでも液温が高い程、赤外線の結果の方が熱電対の結果よりも低めに表示する。特に加熱時では両者の差は最大約9%となる。水とシリコンオイルでは赤外線画像による温度測定結果への蒸発の影響が小さいこと、1-プロパノールでも冷却時(Fig. 4 (b)参照)では、加熱時より赤外線画像と熱電対との差が小さいこと、などから水やシリコンオイルに比べて、1-プロパノールの赤外線画像の結果が熱電対のそれより低めになるのは液表面からの蒸発の影響と考えられる。

2. 2. 2 液膜厚さの影響

水に対して液膜厚さ h を1、2、3、5、10および20mmの6通りについて測定したが、代表的な結果をFig. 5に示す。図中の○、△、▽、□印は熱電対より得た液表面の温度を、また記号に付した縦線は瞬時の温度を挟んで約5秒間の時間変動幅を示している。実線は赤外線画像解析で1秒毎の瞬時値を読んだものである。赤外線より得た温度は、液表面に設置した熱電対のデータと良く一致している。液表面温度が高くなると、いくつかのデータで、熱電対の温度が高い値を示すのが見られた。これはおもに液表面への熱電対の設置に間

Fig. 5 Surface temperature histories of water for four different film thickness.

題があったと思われる。すなわち、加熱後しばらくして、液膜底部あるいは容器側壁との温度差によって対流が生じ、それに伴って温度は時間的に変動する。加熱前には液に接するように熱電対を設定しても、液面の流動により熱電対が液中に入り、その後は表面張力で熱電対の回りに液体が保持され易くなる。これが実際の液表面温度よりも高く表示された理由と考えられる。一方、赤外線画像解析の応答速度は最大1/4秒であり、対流による表面温度の時間変動が0.3Hz程度であることを考えると、本実験については現象に追従しているといえる。以上の実験からは、赤外線画像解析の結果は十分に液表面温度に近いといえるが、1 mm以下の薄い液膜や、液膜内部からの放射の影響については以下で理論的に検討する。

厚さ h の液膜を通過後の放射強度 I と初期放射強度 I_0 との比 I/I_0 を次式で与えられるものとする。

$$I/I_0 = \exp(-\alpha h) \quad (1)$$

ここで、 α は液体の吸収係数で、波長 λ の関数である。

水に対する α と λ の関係[8]をFig. 6に示す。これより各波長に対する α の値を用いて求めた透過率 I/I_0 と波長の関係を $h=1$ mmと0.1 mmについてFig. 7に示す。2 μ m以上の長波長の放射はほとんど水膜を通過しない。Fig. 8は I/I_0 と液相厚さ h との関係を波長をパラメータとして示したものである。ウィーンの変位則 $\lambda_{\max}T=0.002897$ [mK]から、本研究で対象としている加熱液膜流では、最大波長 $\lambda_{\max}$ が10 μ m $\sim$ 7.7 μ m($T=290\sim 373$ K)の範囲を考えれば十分と思われる。7 $\sim$ 10 μ mの波長範囲に対して透過率1%となる液膜厚さを求めると80 μ m程度となる。すなわち、液膜内部からの放射エネルギーは十分に小さく、水に対して検出された赤外線はほとんどが液表面からのものと考えられる。

同様にして得たシリコンオイルの赤外線画像と熱電対の結果をFig. 9に示す。液膜が薄くなるほど赤外線と熱電対との測定結果に相違が生じる。そのおもな理由は、液膜内部および加熱面からの放射の影響が考えられる。すなわちシリコンオイルの赤外線の吸収係数が水に比べて小さく、液表面よりも温度の高い液膜内部あるいは加熱面からの放射も一部検出したため、熱電対よりも高めの温度を表示したものと推察される。シリコン

Fig. 6 Relationship between the absorption coefficient of water and wavelength.

Fig. 7 Relationship between the transmissivity of water and wavelength.

Fig. 8 Change of the transmissivity with water film thickness for five different wavelength.

Fig. 9 Surface temperature histories of dimethyl silicon oil for three different film thickness.

オイルに対しては本赤外線画像解析から得られた温度は熱電対よりも最大で12%程度高めに表示する可能性があることを考慮しておく必要がある。

一方、1-プロパノールではFig. 4に示したように、赤外線画像の結果は熱電対のそれと比べ低めに表示する。1-プロパノールの吸収係数 α は波長 $9 \sim 10 \mu\text{m}$ に対して $1.3 \times 10^5 \sim 2.2 \times 10^5 (\text{m}^{-1})$ [8]であり、赤外線の透過率が1%となる液膜厚さは約 $36 \sim 20 \mu\text{m}$ となる。この値は水に対する値約 $80 \mu\text{m}$ よりさらに小さく、より液表面に近い温度を検出しているといえる。したがって赤外線の方が熱電対よりも蒸発による表面温度の低下を敏感にとらえているものと思われる。

3. 加熱流下液膜の表面温度分布測定

前章での静止液体層で表面温度分布測定の結果を踏まえて、ここでは加熱傾斜面上を自由流下する液膜の表面温度分布測定に応用した結果について述べる。

3. 1 実験装置および方法

加熱傾斜面上を自由流下する液膜実験の装置概略をFig. 10に示す。供試流路は幅40mm、深さ5mmの長方形断面を持つ、長さ1060mmの黄銅製で、流路の傾斜角は水平から垂直まで任意の角度に設定できるようにしてある。定水位タンクより供給された流体は、流量調節バルブをへて流路入口部にいたる。ここで、多孔質板により流路幅方向にほぼ均一になった液膜が流下し、約700mm下流の測定部を通過して出口端に至る。液膜の加熱は、供試流路下部に設置したシリコンラバーヒータ

Fig. 10 Schematic of the experimental apparatus for heated liquid film flow.

で行い、加熱量はスライダックで調節した。流動する液膜の温度は流れ方向に上昇するのみでなく、波の生成にともなってその表面温度は時々刻々変化する。このような系を測定対象とする場合、まず時間分解能が問題となる。すなわち画像データを取り込む間に波も移動するため、画像は流れ方向に縮小されたり、場合によっては波の前後が逆転することもある[9]。そこで前節の赤外線画像解析装置(最大応答速度1/4秒)の他に、取り込み速度の速い赤外線画像解析装置(AVIO製)も使用した。後者では画像取り込み速度1/250秒、最大応答速度1/60秒、空間分解能 320×240 ドット、温度分解能 0.025°C の性能を有し、波を伴う液膜に対しても画像をほぼ凍結できると考えられる。一方、波による液表面の凹凸のため液面と赤外線カメラの測定角が変化するが、物体面の全指向放射率の減少は物体面から $0^\circ \sim 60^\circ$ の範囲で $0 \sim 8\%$ である。2. 1節で述べたように液面の放射率は1に近く、たとえこの値が10%程度減少しても液表面温度に与える影響(Fig. 3参照)は小さいことを考え合わせると、液面の凹凸による温度測定への影響は小さいと推定される。本実験では作動流体としてシリコンオイル(TSF451-100)を用い、傾斜角 $\phi = 30^\circ$ および $\phi = 45^\circ$ 、液体の単位幅あたりの体積流量 $\Gamma = 10^{-5} \sim 10^{-3} \text{m}^2/\text{s}$ 、壁面熱流束 $2 \text{W}/\text{cm}^2$ の実験条件で測定を行った。なお、シリコンオイルの主な物性値[10]は以下の通りである。密度 $965 \text{kg}/\text{m}^3$ 、動粘性係数 $10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ 、熱伝導率

0.155W/mK、表面張力 2.09×10^{-2} N/m、表面張力温度係数 -0.5×10^{-5} N/mK。

3. 2 実験結果および考察

Fig. 11は加熱される傾斜面上を流下する液膜流の流動様式線図とおもな測定点を示したものである。 Γ_c は流路中央部の液体の単位幅当たりの体積流量、 ϕ は傾斜角である。図中の記号はS：平滑面流れ、T：二次元波流れ、D：じょう乱波流れ、M：マランゴニ波流れ、NW：液膜破断を伴う流れを表す。液膜は波のない平滑面流れから傾斜角を一定に保った状態で液体流量を増加させると、比較的均一で波高の小さい二次元波流れから波高の高い波が高速で移動するじょう乱波流れと移行する。一方、平滑面流れから液体流量を下げると、極めて薄い液膜に小さな三次元的な波が生じるマランゴニ波流れとなり、さらに流量を下げると液膜の一部が破断する。以下に各流動様式の代表的な結果について述べる。

S領域 S流れの赤外線画像写真と流路幅中央部における流れ方向温度分布をFig. 12($\phi = 30^\circ$ 、 $\Gamma_c = 1.1 \times 10^{-4}$ m²/s)に示す。液膜の表面温度は流れ方向に上昇(0.5°C/cm)しているものの、視覚からの印象と同様にその温度変動は微少で比較的均一である。

Fig. 11 Flow patterns and experimental conditions.

T領域 S領域より液流量を増加させるとT波が発生するがFig. 13($\phi = 45^\circ$ 、 $\Gamma_c = 1.0 \times 10^{-4}$ m²/s)に示すように液膜の表面温度は液面に対応して変化する。その変動量は上流から下流に向かって次第に増加しており、T波が流れ方向に発達する様子がうかがえる。

D領域 D領域では波高の高いじょう乱波(D波)が高速で液面上を通過する。Fig. 14は従来の単素子赤外センサーによるD波の画像($\phi = 45^\circ$ 、 $\Gamma_c = 2.4 \times 10^{-4}$ m²/s)と流れ方向の温度分布(Fig. 14(b))である。D波のように高速で移動すると、

Fig. 12 Infrared photograph and surface temperature distribution for smooth surface flow, $\phi = 30^\circ$ and $\Gamma_c = 1.1 \times 10^{-4}$ m²/s.

Fig. 13 Infrared photograph and surface temperature distribution for two dimensional wave flow, $\phi = 45^\circ$ and $\Gamma_c = 1.0 \times 10^{-4}$ m²/s.

Fig.14 Infrared photograph and surface temperature distribution for disturbance wave flow, $\phi = 45^\circ$ and $\Gamma_c = 2.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Fig.16 Photograph of disturbance wave flow, $\phi = 45^\circ$ and $\Gamma_c = 5.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

Fig.15 Infrared photograph and surface temperature distribution for disturbance wave flow, $\phi = 45^\circ$ and $\Gamma_c = 5.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$.

画面の走査速度と波速度との相対速度(画面の走査中に波が移動する)に応じて実際の波との対応が崩れ、その画像は流れ方向に縮小されたり、場合によっては波の前後が逆転することもある[9]。

いま、走査速度を V 、波速度を C_D 、時間を t 、流れ方向の座標を x とすると、実際の像の位置 X は

$$X = x + (V - C_D) t$$

で表せる。D波の速度はおおよそ 0.5 m/s 、走査速度は約 0.3 m/s であり、明らかに波の上流と下流

Fig.17 Infrared photograph and surface temperature distribution for Marangoni wave flow, $\phi = 30^\circ$ and $\Gamma_c = 3.0 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

が逆になっている。一方、Fig.14の(c)は上式を用いて座標変換して得られた温度分布である。したがって、D波のように高速で移動する波に対して赤外線画像を凍結するには高速度で撮影可能な赤外線カメラが要望される。Fig.15は最近開発された2次元赤外線センサーによる、画像取込み速度 $1/250$ 秒で得たD波($\phi = 45^\circ$, $\Gamma_c = 5.4 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$)の赤外画像と流れ方向温度分布である。この画像は直接写真(Fig.16)とも比較的良好に対応(実験条件は同一であるが、赤外線画像と直接画像とは同一の波ではない)している。厳密に言えば、D波の速度おおよそ 0.5 m/s に対して画像取込み速度 $1/$

250秒であるから、D波の1波長約40mm(Fig.16参照)に対して約2mm画像が流れていると推定されるが、この流れ方向の位置誤差は最大5%程度であり、D波はほぼ凍結されていると考えられる。この画像より得たD波の流れ方向の表面温度分布は波の前面(上流側)で温度が急激に減少し、その後徐々に増加している様子がわかる。

M領域 Fig.17に $\phi=30^\circ$ 、 $\Gamma=3\times 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$ の条件に対するマランゴニ波(M波)の赤外線画像と流路幅方向中央部の流れ方向温度分布を示す。理論解析[2]によるとこの波の生成にはマランゴニ効果($M=\sigma_T dT/dX$ 、M; マランゴニ力、 σ_T ; 表面張力の温度係数($\equiv d\sigma/dT$)、T; 温度、x; 流れ方向の座標)が深く関与しているため、マランゴニ波と定義した。M波は小さな突起とくぼみが組となって極めて薄い液膜(平均液膜約1.2mm)に乗って移動するものでその波高はD波に比べてずっと小さい。それにもかかわらず波の谷から山に向かう温度勾配(dT/dX)は最大 $7\times 10^3\text{K/m}$ となり(Fig.17の表面温度分布参照)、この領域でのマランゴニ効果が大きいことがわかる。

4. 結 論

非接触測定法の一つである赤外線画像解析法を静止液体層の表面温度測定を対象として、その特性を調べ、ついで加熱傾斜面上を流下する液膜の温度測定に応用した。得られた知見は以下のとおりである。

1. 水、シリコンオイル(TSF451-100)および1-プロパノールの3種の液体の表面放射率は、それぞれ20~80℃、20~140℃および20~60℃の温度範囲でいずれも0.95と1に近い値である。

2. 水に対する赤外線の吸収係数から赤外線の透過率が1%となる液膜厚さは本測定で対象とした波長域7~10 μm に対して約80 μm となり、検出された赤外線のほとんどが液表面からのものといえる。赤外線画像解析と熱電対による表面温度の測定結果を比較すると、水に対しては両者は6%以内の差で一致している。シリコンオイルでは液膜が薄くなるほど熱電対による測定結果より高くなり両者の差は最大12%程度である。一方、蒸発しやすい1-プロパノールでは熱電対よりも低めに表示し、両者の差は最大約9%である。

3. 加熱傾斜面上を自由流下するシリコンオイル膜の表面温度測定に応用した結果、それぞれ

の流動様式に対して液膜表面の温度特性を把握できることがわかった。近年装置の高速化により、じょう乱波を伴う液膜流のような非定常温度測定に対しても赤外線画像解析の適用が可能となった。

終わりに、本研究費の一部は、文部省科学研究費補助金(06650262)によるものであることを記して、謝意を表する。

Nomenclature

C_D	: Velocity of disturbance wave	[m/s]
h	: Liquid film thickness	[m] or [mm]
I	: Radiation intensity	[W/m ² str]
T	: Temperature	[℃]
X	: Coordinate in flow direction	[mm]

Greek letters

α	: Absorption coefficient	[1/m]
Γ	: Liquid volumetric flow rate per unit width of duct	[m ² /s]
ϵ	: Emissivity	[-]
ϕ	: Inclination angle	[°]
λ	: Wavelength	[μm]
σ	: Surface tension force	[N/m]

Flow pattern symbols

D	: Disturbance wave flow
M	: Marangoni wave flow
NW	: Nonwet flow
S	: Smooth surface flow
T	: Two-dimensional flow

参考文献

- [1] 伊藤・河野・深野、日本機械学会論文集B編、Vol.57、No.538、2046-2053(1991-6)。
- [2] 伊藤・奥、日本機械学会論文集B編、Vol.60、No.576、2868-2874(1994)。
- [3] 伊藤・CHOUDHURY・深野、日本機械学会論文集B編、Vol.55、No.509、36-40(1989)。
- [4] 伊藤・CHOUDHURY・深野、日本機械学会論文集B編、Vol.56、No.529、194-199(1990)。
- [5] 岡本・稲垣・関谷、日本機械学会論文集B編、Vol.59、No.568、3932-3937(1993)。
- [6] 伊藤・奥・森永、日本機械学会九州支部第46期総会講演会、252-254(1993)。
- [7] 内田秀雄、技術資料「流体の物性値表」、日本機械学会、497(1983)。
- [8] ヴィ・エム・ゾロタリョフ、ヴィ・エヌ・モロゾフ、イエ・ヴェ・スミルノワ、天然および人工媒質の光学定数、レニングラード〈ヒミヤ〉レニングラード支部日ソ通信社、(1984)。
- [9] 伊藤・森永、第12回混相流シンポジウム講演論文集、253-256(1993)。
- [10] 鹿目、シリコンとその応用、東芝シリコン(1983)。