

## ホログラフィー干渉を応用した液相内非定常温度分布の測定法\*

伊藤 昭彦\*<sup>1</sup>, Sirajul Karim CHOUDHURY\*<sup>2</sup>, 深野 徹\*<sup>3</sup>A Technique for Measuring an Unsteady Temperature Distribution  
in a Liquid Using Holographic Interferometry

Akihiko ITO, Sirajul Karim CHOUDHURY, and Tohru FUKANO

The application of a holographic interferometry technique for measuring the steady and unsteady state temperature distributions in two liquids, water and n-propanol, were demonstrated. The deflection and temperature errors caused by refraction, which is the most important source of errors within a steep temperature field such as the thermal boundary layer were discussed and estimated. Estimated errors in the measured temperature of the liquid phase under spreading flame conditions for a 0.5 cm path length of n-propanol with 250 °C/cm temperature gradient is within 2% below 36 °C. The technique required: (1) transparency of the liquid, and (2) availability of the relation for the thermo-optic coefficient of the liquid with temperature. If these requirements are satisfied, the temperature distribution of the liquid phase can be measured with a high spatial resolution of 20 μm.

**Key Words:** Temperature Measurement, Holographic Interferometry, Liquid Phase, Refractive Index, Spatial Resolution

## 1. 緒 言

対流や沸騰, 凝縮熱伝達, 混相流などの流体を含むさまざまな伝熱問題あるいは液体燃料の燃焼などにおいて, 現象の特性や機構を解明するうえで液相内温度分布が必要となることがある。これらの温度計測に簡便で精度の高い測定ができることから, 熱電対がよく利用されている。しかし, 熱電対を用いた非定常場の温度分布測定での空間分解能は挿入した熱電対の数によって決まるから, 素線径を小さくしたとしてもその限界はそれほど高くないし, また場を乱す可能性もあり, 薄い境界層のような温度こう配の急な場の温度分布測定は困難である。

一方, 透明な流体に対しては非接触で温度場の全ほら瞬間的に測定できる利点から, 干渉法が利用されている<sup>(1)(2)</sup>。しかし, 液体の温度計測への適用は, 気体に対するほど多くないようである。例えば, Chen-Mayinger<sup>(3)</sup>らは単一気泡周りの水の温度計測に, 大辻<sup>(4)</sup>は強制対流沸騰に, 柏木<sup>(5)</sup>らは水溶液中の濃度分

布測定にホログラフィー干渉法を応用している。最近, 著者らは加熱される液体の表面張力流れ<sup>(6)</sup>や液体燃料表面上の火炎伝ば時の液相内温度分布<sup>(7)</sup>の測定にホログラフィー干渉法を利用している。周知のとおり, ホログラフィー干渉法はマッハツェンダ干渉法などに比べ高品質な光学装置を必要としない, 測定対象の途中にガラス板などがあっても光学的な補償の必要がない, などからより実用的である。それにもかかわらず液相内の測定となると定性的な可視化にとどまることが多く, 定量測定にまでなかなか至らないようである。その理由は, (1)液体の屈折率と温度の関係が気体ほど単純ではなく, 信頼できるデータが得にくい, (2)屈折が大きくそれに伴う誤差の評価が難しい, などによるものと考えられる。

本研究はホログラフィー干渉法による液体の温度分布の定量測定を確立することを目的として, まず水槽内定常一次元温度分布を対象として, 測定精度を評価する。次いで液体燃料表面上を火炎が伝ばするときの液相内温度境界層を例として, 温度こう配の大きい非定常温度分布測定について検討する。

## 2. 干渉じまの解析と誤差の推定

## 2.1 しま次数と温度の関係 図1に解析の対象

\* 平成元年10月14日 第67期全国大会講演会において講演, 原稿受付 平成元年3月16日。

\*<sup>1</sup> 正員, 大分大学工学部 (☎870-11 大分市旦野原700)。

\*<sup>2</sup> 正員, 九州大学大学院 (☎812 福岡市東区箱崎6-10-1)。

\*<sup>3</sup> 正員, 九州大学工学部。

とした系および液体の屈折率と温度との関係を模擬的に示す。液体容器の内寸法の幅を  $L$ 、深さを  $H$ 、容器の側板の厚さを  $l$  とする。液温を  $T$  とし、加熱前の基準状態でのそれを  $T_0$  で表す。レーザー光は直進し、進行方向 ( $y$  方向) に温度変化がない、と仮定すると、温度としま次数との関係は次のように表せる。

$$\left| L \int_{T_0}^T \frac{dn_i}{dT} dT + 2l \int_{T_0}^T \frac{dn_s}{dT} dT \right| = N\lambda \quad (1)$$

$$\left( N = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots \dots \text{二重露光法} \right)$$

$$(N = 1, 2, 3, \dots \dots \text{実時間法})$$

ここで、 $dn/dt$  は屈折率の温度係数 (Thermooptic co-efficient),  $N$  はしま次数,  $\lambda$  は光の波長である。式 (1) の左辺第 1 項と第 2 項は、それぞれ液体とガラスの屈折率  $n_i$  と  $n_s$  の変化に基づく光路長の変化を表す。

光学的測定用に通常ガラス板やアクリル板 (PMMA) などが用いられる。屈折率の差に基づくこれらの温度分布への影響は、式 (1) から

$$(dn_s/dT)/(dn_i/dT) \times 2l/L$$

の程度となる。水を例にとると、ガラス板 (Fused silica) と水の屈折率の温度係数の比は 0.1 程度<sup>(8)</sup> であるから、測定幅  $L$  を 1 の 10 倍程度とればガラス板の影響は 2% 以下となる。一方アクリルの  $dn/dt$  の値は水と同程度<sup>(9)</sup> であり、その影響は  $2l/L$  の程度となるから、アクリル板を用いる場合は測定幅  $L$  に十分注意する必要がある。

**2.2 光の屈折による誤差** 本測定法での誤差のうち、温度こう配が大きい場合に重要なものは光の屈折によるもので、これには (1) 位置の誤差, (2) 光路に沿う温度誤差, (3) 光路長の増加に基づく温度誤差が関与する。

図 1 に示すごとく、温度こう配のある媒体内を光が進むときの光路は次式から算出される<sup>(10)</sup>。

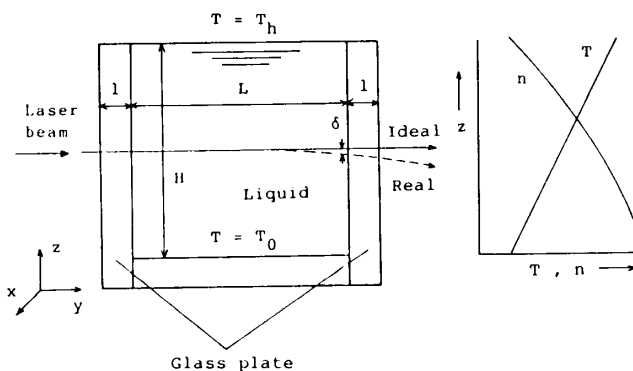


図 1 対象とする系と座標および屈折率と温度の関係

$$\frac{d^2z}{dy^2} \approx \frac{1}{n_i} \frac{dn_i}{dT} \cdot \frac{dT}{dz} \quad (2)$$

液体の屈折率の温度係数は、後で述べるように、温度の一次式で近似される。

$$\frac{dn_i}{dT} \approx a + bT \quad (3)$$

温度こう配が一定とみなせる範囲においては、式 (3) を用いて式 (2) は積分され、解が得られる。さらに級数展開し高次の項を省略すると、 $y=L$  で  $z=\delta$  から測定幅  $L$  の液体に対する干渉じまの位置誤差  $\delta$  は次式で表される。

$$\delta = \frac{AL^2}{2} \left( 1 + \frac{BL^2}{12} \right) \quad (4)$$

ここで、 $A = dT/dz \cdot (a + bT_0)/n_i$ ,  $B = (dT/dz)^2 b/n_i$  であり、 $T_0$  は  $z=0$  における温度である。

干渉じまから得られる温度は光路に沿って平均化されたものであるから、屈折による温度誤差  $\Delta T_e$  は式 (4) を用いると次のようになる。

$$\Delta T_e = \frac{AL^2}{6} \frac{dT}{dz} \left( 1 + \frac{BL^2}{20} \right) \quad (5)$$

水に対する屈折による位置と温度の誤差の計算結果を図 2 に示す。本実験での測定幅 2 cm、温度こう配 10~30°C/cm の水に対しては、これらの誤差は十分小さい。また、光路長の増加による温度誤差も式 (4) から概略求まるが、これは  $\Delta T_e$  よりさらに小さい。

一方、水以外の液体では、例えばアルコールや炭化水素系液体の  $dn/dt$  の値は水のおよそ 4~6 倍 (表 1) 大きく、かつ液面燃料時のような温度こう配が約 250°C/cm と大になると、屈折による誤差は大となるが、これについては後で検討する。

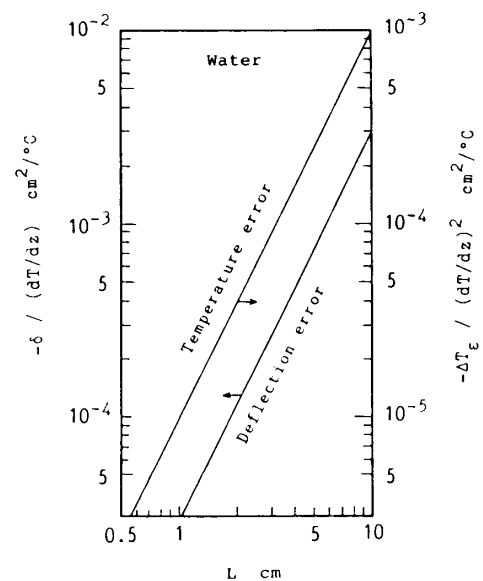


図 2 屈折による位置と温度の誤差

3. 屈折率の温度係数

水の屈折率について、これまでに多くの測定データや、それらに基づく経験式が報告されている<sup>(11)-(13)</sup>。それらのうち、Dobbins-Peck<sup>(12)</sup>は Tilton<sup>(11)</sup>らのデータを用いて、波長 632.8 nm, 温度 0~60°C の範囲で、水の屈折率  $n_w$  の温度変化として次式を得た。

$$n_w = 1.33317 - (1.936T + 0.1699T^2) \times 10^{-5} \dots\dots\dots (6)$$

Hauf-Grigull<sup>(1)</sup>は 632.8 nm, 25°C の水に対する屈折率の温度係数を次式で与えている。

$$dn_w/dT = -0.985 \times 10^{-4} \dots\dots\dots (7)$$

最近、Thormählen<sup>(13)</sup>らは水に対する多くの測定データを整理し、波長、温度、圧力の依存性を含む屈折率の整理式を提案している。この式には実験定数が 14 も含まれ複雑である。そこで著者らは、彼らのデータのうち波長 632.8 nm, 圧力 1 atm についての屈折率を温度の二次関数で近似し、さらに温度で微分して次式を得た。

$$dn_w/dT = -(2.26 + 0.284T) \times 10^{-5} \dots\dots\dots (8)$$

著者らが測定した水の値も上式に十分近い(表 1 参照)。

水以外の屈折率の温度係数に関してはデータが極めて少ない。Hauf-Grigull<sup>(1)</sup>によりまとめられた種々の液体の  $dn/dt$  を表 1 に示すが、これらはいずれも液温 25°C の値で  $dn/dt$  の温度依存については不明である。著者らは、アッペの屈折計を用いて、その測定部に加熱の際の液の蒸発を防ぐように工夫して、種々の液体の  $dn/dt$  の測定を行っている。これらの結果を Hauf らのデータと比較して表 1 に示しておく。なおこの測

表 1 各種液体の屈折率の温度係数

Liquid fuels	$-dn/dT \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} (\lambda = 632.8 \text{ nm})$	
	Hauf&Grigull(1970) At 25°C	Present work [Temperature range 2~80°C]
Water	$0.985 \times 10^{-4}$	$(3.6 + 0.256T) \times 10^{-5}$
Methyl alcohol	$4.0 \times 10^{-4}$	$(3.7 + 0.0105T) \times 10^{-4}$ **
Ethyl alcohol	$4.0 \times 10^{-4}$	$(3.8 + 0.0106T) \times 10^{-4}$ **
n-Propyl alcohol	.....	$(3.8 + 0.0137T) \times 10^{-4}$
Iso propyl alcohol	$4.15 \times 10^{-4}$	.....
n-Butyl alcohol	.....	$(4.0 + 0.0072T) \times 10^{-4}$
n-Hexane	$5.4 \times 10^{-4}$	$(5.3 + 0.0122T) \times 10^{-4}$
n-Heptane	.....	$(5.0 + 0.0075T) \times 10^{-4}$
n-Octane	$4.76 \times 10^{-4}$ *	$(4.8 + 0.0069T) \times 10^{-4}$
n-Decane	$4.48 \times 10^{-4}$ *	$(4.5 + 0.0034T) \times 10^{-4}$

(\* )  $\lambda = 546.1 \text{ nm}$ , (\*\* )  $T = 5 \sim 80^\circ\text{C}$

定についての詳細は別の機会に述べる。

4. 実験装置と方法

4.1 定常温度分布測定 定常一次元温度分布の測定のための実験装置の概略を図 3 に示す。試験部は 3 層の水槽よりなり、その中央部に測定すべき純水が満たされ、厚さ 3 mm の黄銅板を介してその上部を温水が下部を冷却水が流れる。加熱用の温水と冷却水のそれぞれの温度は、恒温水槽により一定に保たれている。測定用水槽の大きさは長さ(x 方向) 25 cm, 幅(y 方向) 2 cm, 高さ(z 方向) 1 cm であり、幅方向の両側面は厚さ 1 mm のガラス板で作られている。中央水槽の上下壁面と高さ方向中央部の 3 点に線径 50  $\mu\text{m}$  の銅-コンスタンタン熱電対(図 3 中 T.C.)が取付けられている。

図 4 にホログラフィー干渉計の光学系を示す。光源は 5 mW の He-Ne レーザであり、物体光と参照光の分離は可変のハーフミラー(BS)を使用した。測定用水槽(TS)とホログラム乾板との間に凸レンズLを入れ、像を拡大して写真フィルム上のしまの空間分解能を高めている。ホログラム乾板は Agfa-Gevaert 社製の 10 E 75 ガラス乾板で、現像はレフィナルで 3 min, 定着はフジフィクスで 10 min 行った。

定常温度分布測定には二重露光法を用いた。すなわ

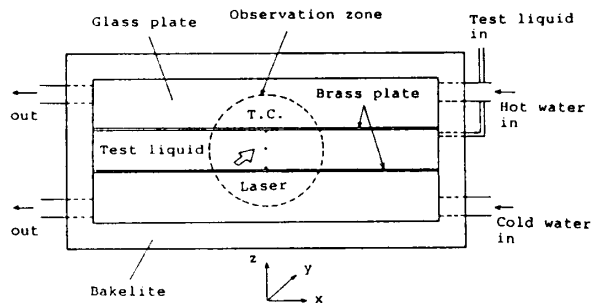
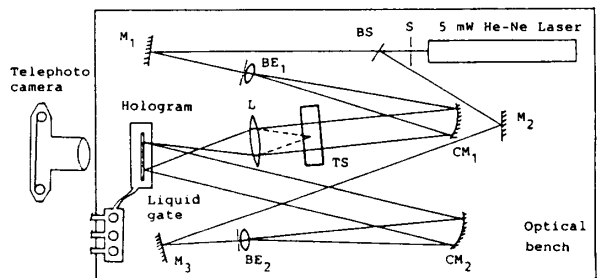


図 3 定常温度分布測定用装置の概略



S: Shutter BS: Beam splitter BE: Beam expander  
CM: Concave mirror M: Mirror L: Lens

図 4 ホログラフィー干渉計の光学系

ち、試験槽内の一定温度の水を基準状態として第1回目の露光をした後、一定温度の温水と冷却水を流して、約8~12h経過して定常状態に達してから第2回目の露光をした。露光時間はともに1/250である。なお試験槽内の水温は低温側20°C以上、恒温側76°C以下の範囲で変えられた。

**4.2 非定常温度分布の測定** 例としてアルコール液表面上の火炎伝ば時の液層内温度分布を測定した。その装置を図5に示す。液槽の幅は0.5~2cm、深さ1cm、長さ40cmである。容器の両側面は厚さ1mmのパイレックスガラスで、下面を黄銅板で作成した。その下部の流路を温度一定に保った冷却水を流す。

本実験では実時間法を用いているが、ホログラムの脱色などは行わず参照光を90%として回折像を強め、物体光(直接光)とのバランスをとった。ホログラム作成のため基準状態の撮影を露光時間1sで行い、火炎

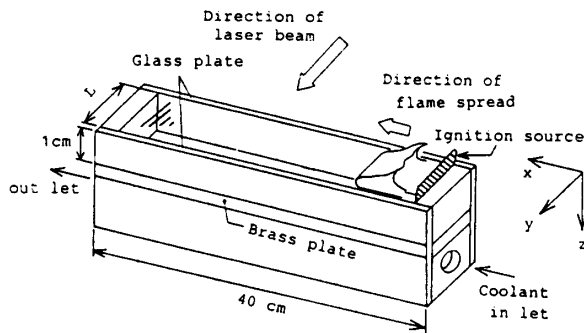


図5 非定常温度場測定(液体燃料燃焼)装置の概略

伝ば時の撮影はモータドライブカメラを用い、露光時間1/500、10コマ/sで行った。使用したアルコールは*n*-プロパノールであり、燃焼前の液温は引火点温度(25°C)以下であった。

## 5. 実験結果と考察

**5.1 水の定常温度分布** 代表的な干渉じま写真を図6(a)に示す。熱電対により測定された上下壁面の温度で $T_h$ と $T_0$ を図6(a)中に記している。しま1本あたりの温度差は例えば測定幅2cm、温度20°Cの水に対して約0.4°Cである。この値は一般に $-dn/dt$ が温度に依存するため、水温が高くなるほど小さくなる。したがって、液相内の温度こう配が深さ方向に一定であっても、液温が高くなるほどしまの間隔は密になる。本実験の水での干渉じまの本数は、約20本/mm、後述の*n*-プロパノールでは約30本/mmであり、熱電対に比べて非常に高い空間分解能をもって測定できる。

熱電対の位置に対応した断面における深さ方向( $z$ 方向)温度分布を図6(b)に示す。干渉じまから式(1)を用いて温度を絶対評価するのに参照温度がいる。観察された視野の中に零次のしま(基準状態)が明確である場合、この温度 $T_0$ を参照温度とすることができ。本実験では最低温度 $T_0$ が基準温度 $T_0$ より高いので、熱電対による下壁面温度を参照温度としてしま次数を決定して温度分布を求めた。

図6(b)中の○記号は水の屈折率の温度係数に式(8)を、△記号は式(6)を、さらに破線は式(7)( $dn_w/dt = \text{const}$ )を用いて算出した結果である。また□

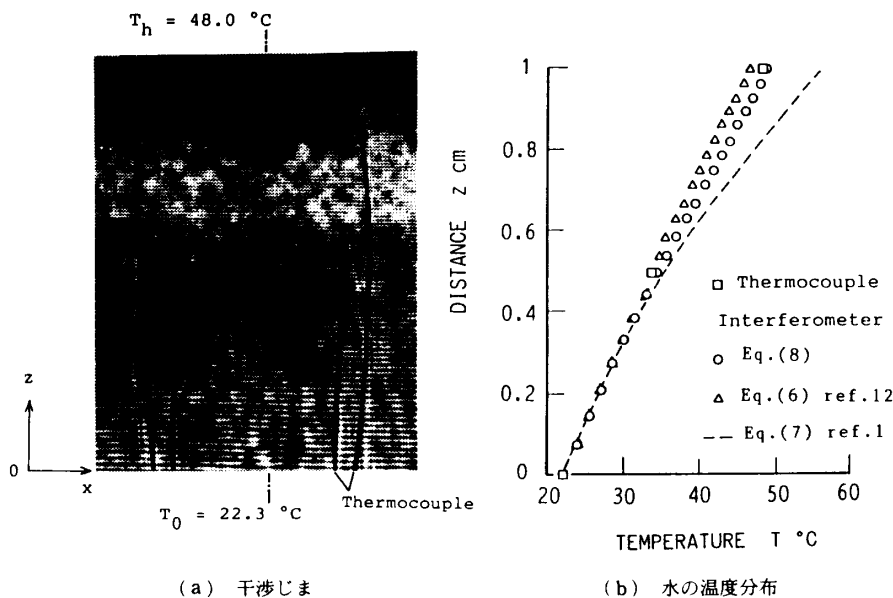


図6

記号は熱電対による測定値である。図6(b)に示すように測定温度が30°C以下と比較的低い場合それらの差は微小で、屈折率の温度係数の温度依存性はほとんどみられないが、それ以上の温度になると、破線で示した $dn_w/dt = \text{const}$ の結果は高めの温度を与える。本実験での測定幅2 cm 温度こう配10~30°C/cmの水に対する屈折による誤差は最大0.03°Cと十分小さい。

一方図6(b)では、定常状態にもかかわらず○印または□印で示した温度はわずかに直線からはずれており、側面から熱損失があることがうかがえる。この端効果により、液体内の温度はレーザの進行方向(y方向)に一様ではない。緩和法により液体内のy方向温度分布を大略計算し、液相の幅方向中央部の温度とy方向の平均温度との差 $\Delta T_e$ を求めたところ、 $\Delta T_e$ は測定温度に対して最大0.2%程度と小さかった。

本実験では、上述のごとく屈折や熱損失による二次元的欠如に伴う温度誤差は小さく、干渉じまからの算出値と熱電対による測定値との差はおもに算出に使用した水の屈折率の温度係数の差異による。式(6)を温度で微分して得た $dn_w/dT$ の温度の一次の微係数が式(8)のそれと比べてわずかに大きく、それを積分する結果式(6)から算出した温度がやや低めの値となる。総合的に判断して、水の屈折率の温度係数としては式(8)が妥当と言える。本実験での熱電対による測定値と干渉じまからの算出値[式(8)を使用]は76°C以下で約2%以内の差で一致した。

**5.2 温度こう配の急な場の非定常温度分布** 非定常の場合は、5.1節までに述べた定常な場合の手法を基礎としておりこれらが準定常的に連続した現象として解析する。例として液体燃料の温度が引火点温度よりも低い場合の伝ば火炎近傍の現象を対象に説明する。この現象はおもに液体の表面張力流れに起因した対流による伝熱過程に支配され、その解明には移動する火炎先端近傍の薄くしかも温度こう配の急な液相の境界層内温度分布を知る必要がある。一例として、図7(a)~(c)にバルク温度22°Cのn-プロパノールの火炎伝ば時の干渉じま連続写真と図7(d)に図7(c)に対応する等温線図を示す。測定幅(容器内寸法)を0.5 cmと比較的に小さくしているが、温度こう配( $dT/dz$ )が最大250°C/cmに対して干渉じまは約30本/mmとなる。本装置での分解能は最大でも50本/mm程度であるから、測定幅を1 cmにすると、干渉じまのしま数も倍に増加するため解像が困難な箇所が生じる。

図7(b), (c)中の火炎先端直下の液表面近傍に暗

い影が生じているが、これはおもに光の屈折による影響と思われる。式(4)と式(5)と表1の屈折率の温度係数 $dn/dt$ を用いて光の屈折による位置と温度の誤差を求めると次のようになる。

$$\delta_{\max} = -9.1 \times 10^{-3} \text{ cm}, \Delta T_{\max} = 0.75^\circ \text{ C}$$

測定幅0.5 cmの容器での温度誤差は本実験では最大2%程度となる。測定幅Lが倍になるとこれらの誤差は4倍となる。一方、液相の温度境界層内では、深さ方向あるいは火炎の進行方向の温度こう配が大きいので、温度測定に与える両側面からの熱損失の影響は少ないものと考えられる。

上述のことから、温度こう配が大きかつ $dn/dt$ が大きな液体の温度場測定では測定幅をあまり大きくとることではできない。そのことにより側壁の流れ場へ

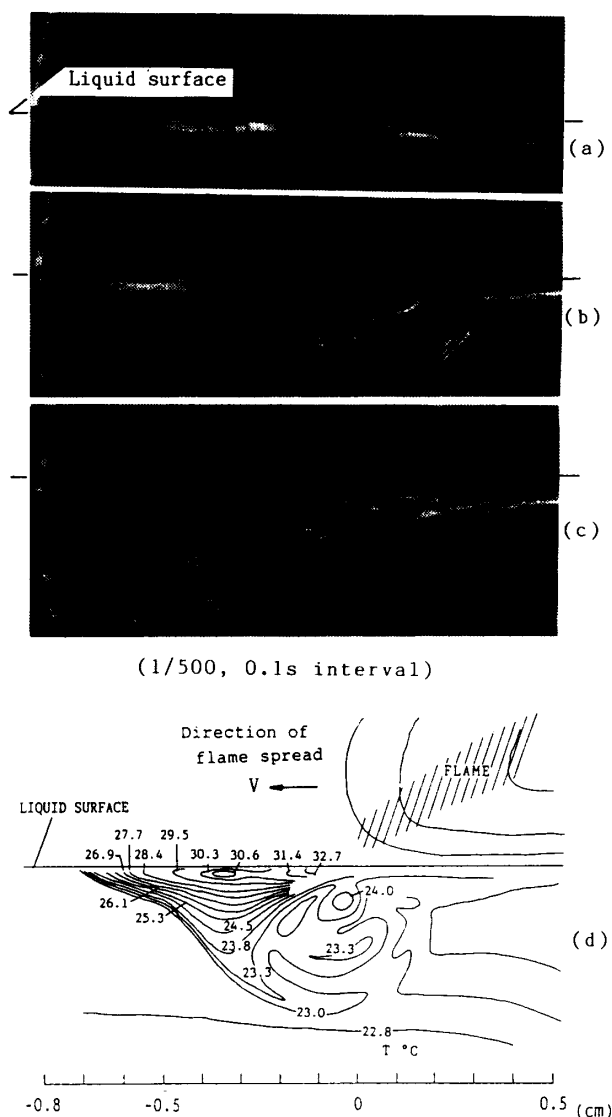


図7 アルコール液面上火炎伝ば時の干渉じま[(a)~(c)]と等温線図(d)

の影響の存在は否めないが、それでも図7から熱電対などでは測定困難な火炎先端直下の渦による温度場の変化や液表面から約0.05 cmの薄い層に存在する表面張力流れが観察され、この温度分布から未燃料部への熱流束分布を知ることが可能となる。

## 6. 結 論

(1) ガラスや透明板製の液槽中の液体の温度を干渉しまから測定する式を提案した。本測定法では、(1)液体が光を通すこと、(2)液体の屈折率の温度係数が既知であることが要求される。本方法によれば、条件にもよるが、空間分解能約20  $\mu\text{m}$ で温度分布の測定が可能である。

(2) 水と数種類の液体の屈折率の温度係数の実験式を広い温度範囲にわたって提示した。

(3) 光の屈折による位置と温度の測定誤差を式(4)と式(5)で推定した。温度の測定誤差は屈折率の温度係数に比例し、測定幅と温度こう配の二乗に比例する。例えば温度こう配250°C/cm、測定幅0.5 cmの*n*-プロパノールの温度測定での誤差は2%以内である。

(4) 準定常の干渉法による非定常温度場の測定例

について可能性と問題性を明らかにした。

## 文 献

- (1) Hauf, W. and Griggull, U. Hartnett, J. P. and Irvine, T. F., Jr., Eds. *Optical methods in heat transfer, in Advances in Heat Transfer*, 6(1970), 267, Academic Press, New York.
- (2) Vest, C. M., *Holographic Interferometry*, (1979), John Wiley Sons, New York.
- (3) Chen, Y. M. and Mayinger, F. (Pichal, M., ed.), *Optical Methods in Dynamics of Fluids and Solids, Proceeding IUTAM Symp.*, Liblice, Czechoslovakia, (1984), (1985), 13, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- (4) 大辻, 機構論, No814-11, (1981), 93.
- (5) 柏木・ほか2名, 機論, 51-463, B(1985), 1002.
- (6) 伊藤・ほか2名, 機論, 55-509, B(1981), 36.
- (7) 伊藤・増田, 第25回燃焼シンポジウム講論集, (1987), 322.
- (8) Waxler, R. M. and Cleek, G. W., *J. Res. Natl. Bur. Stand(U.S.)-A. Phys. Chem.*, 77 A(1973), 755.
- (9) Waxler, R. M., Horowitz, D. and Feldman, A., *Appl. Opt.*, 18(1979), 101.
- (10) 文献(2)の329ページ.
- (11) Tilton, L. W. and Taylor, J. K., *J. Res. Natl. Bur. Stand. (U.S.)* 20(1938), 419.
- (12) Dobbins, H. M. and Peck, E. R., *J. Opt. Soc. Am.* 63-3(1973), 318.
- (13) Thormählen, I., Straub, J. and Griggull, U., *J. phys. Chem. Ref. Data*, 14-4(1985), 933.