

[B27] 水の吸収スペクトル変化を用いた流量計

知能機械工学専攻 山田研究室
0334055 桃木 秀幸

1. 緒言

半導体製造プロセスにおける洗浄液や薬液には、純度を保ちつつ高精度な流量管理が要求される。現在この分野には、非接触式流量計である超音波流量計などが使用されている。近年、プロセスの高度化・微細化に伴い、更なる微量流量制御が要求されてきているが、10ml/min 以下の領域で実用的な非接触流量計は存在していない。そこで我々は、食品や生体などに対する無侵襲測定法として応用例の広い近赤外分光技術をもとに、水を主成分とする液体を対象とした新しい非接触流量測定法を提案した。まず管路内の流体を加熱し、温度マーカとする。次に、一定距離離れた下流にて温度マーカの移動による温度変化を検出するまでの時間を計測する。この移動時間から流量を算出する。ここで、加熱および温度変化の検出に光を用いることで、非接触式流量計を実現する。

本研究では流量計の構成要素となる光による温度測定、および光による加熱のメカニズムを明らかにするとともに、求められる性能を満たすための最適な条件(特に加熱条件)を実験および数値計算により検討する。

2. 水の吸収スペクトル変化を用いた温度測定

2.1 原理

物質はその構造に応じて特定の波長の光(電磁波)を吸収する。近赤外領域では主に分子内振動に基づく吸収が観察される。水の場合、これに加えて水素結合の影響があり、温度が変化すると図1(a)に吸収スペクトルはその形を変える。この変化量が図1(b)のように特定の波長で大きくなっており、かつ温度に対し単調に変化していることを利用し温度を推定する。

2.2 実験

水およびイントラリピッド希釈溶液を用いてそれぞれ吸光度スペクトルの温度変化を測定した。水の場合、変化の大きい2波長での吸光度から誤差0.1°Cで温度が推定できた。イントラリピッド希釈溶液の場合、水による吸収に加え散乱が生じるため、誤差は0.8°Cと大きくなった。複数波長を用いれば誤差を小さくすることが可能であるが、温度の大小判定は1波長で十分に行うことが可能であることがわかった。

3. 光による流体の加熱

3.1 光加熱の特徴

通常、物体を加熱するためには発熱体を物体に接触させることで、熱伝導・熱伝達によって熱が伝えられる。このため、加

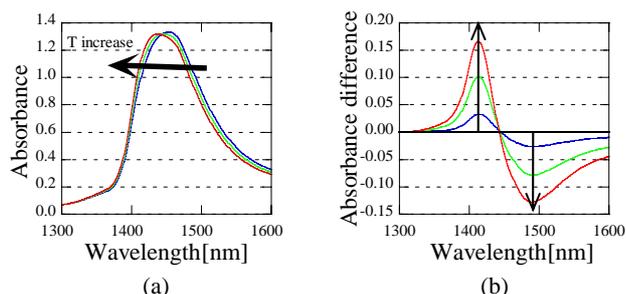


図1(a) 水の近赤外吸収スペクトルの温度依存性
図1(b) 20°Cを基準とした吸光度差スペクトル

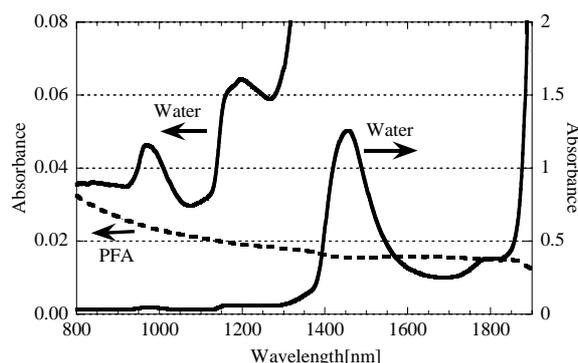


図2 水とPFAの吸光度スペクトルの比較

熱は物質を問わず発熱体に接した部分から順に加熱が進む。これに対し、光加熱では物質に吸収されて初めて加熱されるため、吸収係数の波長依存性を有効に利用することで、複数の物質が混在する中で必要な物質だけを加熱することができる。このとき、吸収されたエネルギーが即時に熱に変換されるため、短時間で加熱を行うことができる。

3.2 加熱に用いる光源の検討

3.2.1 波長

壁面を加熱せずに流体を効率よく加熱するためには、光源の波長を選択する必要がある。図2に水と、フッ素樹脂の一種であるPFA(Perfluoro Alkoxy)の吸光度スペクトルの測定結果を示す。PFAでは弱い散乱が見られるものの、目立った吸収バンドは存在していないことがわかる。散乱によって熱が生じることはないので、この波長範囲においてPFAは水の加熱を阻害することなく、波長選択の自由は水の吸光度スペクトルにのみ制限を受ける。

Beer-Lambert 則によると、媒体に入射された光は深さ方向

に対し指数関数的に吸収されるため、温度分布もまた指数関数的になる。ここでは壁面へ逃げる熱が多くなってしまい光加熱の利点が薄れてしまう。吸収の比較的弱い光を入射すれば、絶対的な温度差は小さくなり一様加熱に近づくが、効率は悪くなる。これらの問題を解決するため、媒体を反射膜で覆い媒体内を往復させることで、一様加熱と高効率を両立させる。図3は厚さ2mmの水の層に対し光を往復させたときの吸収量分布である。縦軸は、全吸収時を1としたときの各層(厚さ0.1mm)ごとの吸収割合である。吸収が比較的弱い波長1200nmでは、往復させることで一様な吸収分布が得られていることがわかる。このことから一様加熱に用いる光の波長は、この波長と同等以下の吸収強度を持つ、おおよそ波長1300nm以下が有効であると考えられる。

3.2.2 出力

壁温一定の条件で、流体の密度を ρ 、定圧比熱を c_p 、平均流速を u_m 、円管内径を d_0 とすると、管内を移動する温度マーカの壁温との温度差 $\Delta T_m(x)$ は以下の式で求められる。

$$\frac{\Delta T_m(x)}{\Delta T_m(0)} = \exp\left(-\frac{4h}{\rho c_p d_0 u_m} x\right) \quad (1)$$

これに加熱時間 Δt および加熱領域の幅 l_0 を考慮して求めた加熱量 P_p を加えたときの加熱点での温度差 $\Delta T_m(0)$ を代入すると、以下の式が得られる。

$$\Delta T_m(x) = \frac{P_p}{\frac{\pi}{4} d_0^2 \rho c_p \cdot \max\left(u, \frac{l_0}{\Delta t}\right)} \exp\left(-\frac{4h}{\rho c_p d_0 u_m} x\right) \quad (2)$$

$\max(a,b)$ は大きいほうの値をとる。式より $d_0=2\text{mm}$ ・ $\Delta t=0.2\text{s}$ ・ $l_0=0.2\text{mm}$ ・流量 10ml/min のとき、おおよそ1Wの出力があれば $x=1.5\text{mm}$ の位置で約1Kの温度上昇が得られる。

3.2.3 光源の選択

ハロゲンランプ・キセノンランプ・LED・半導体レーザについて波長・出力のほか価格や扱いやすさなども検討した結果、半導体レーザによる加熱が最適と判断した。

3.3 実験

内径2mmのPFAチューブの外部に、導光用に $\phi 0.5\text{mm}$ の穴を開けた3mm幅のアルミニウム箔を反射膜として巻き付けた。管内に水を流し、波長808nmの半導体レーザによる加熱を行い、加熱点の上流と下流の温度差を測定し、図4のような温度上昇を確認した。また、サーモグラフィによる観察を行ったところ、一様加熱とはなっていないかった。これは入射点近傍で光が集中しているためだと考えられる。光の照射方法については更なる工夫が必要である。

4. 光による熱移動測定

4.1 実験方法

実験装置の構成を図5に示す。測定対象は純水とし、脈動が比較的少ないダブルプランジャ式マイクロポンプを用いて送液された。校正時の基準として用いるため、流路の終端において電子天秤を用いて質量流量を測定した。電子天秤内のピーカーの水面にはシリコンオイルによる油膜を形成し、蒸発による質量変化を抑制した。

流量計内では2箇所て流路の透過光測定を行う。光源は波長1490nmの半導体レーザである。ビームスプリッタにより2分

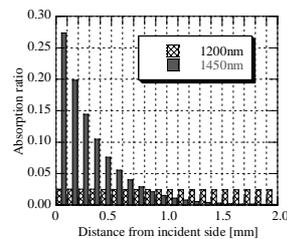


図3 一様吸収分布例

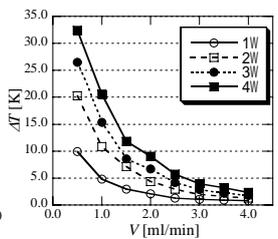


図4 光を用いた加熱による温度変化

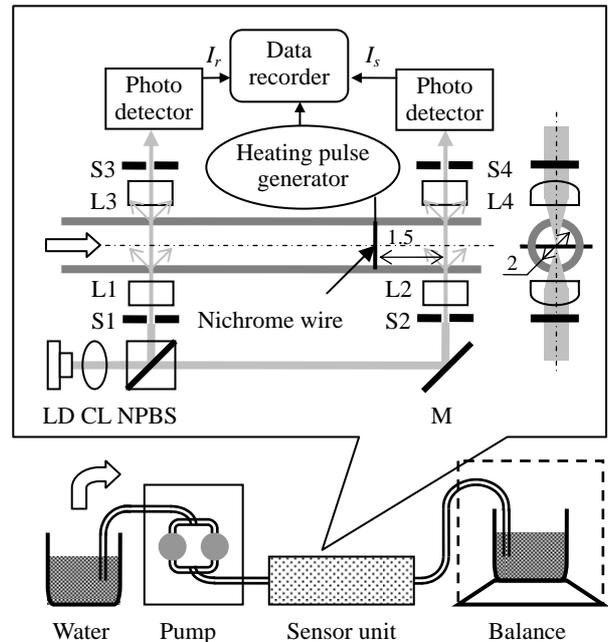


図5 実験装置の構成と流量計の概要

割された光はそれぞれ加熱点の上流と下流で流体中を透過する。スリットSおよびシリンドリカルレンズLを通すことで、直進光を選択的に光検出器で受光する。透過光強度をそれぞれ I_r 、 I_s と置くと、吸光度差 ΔA は以下の式で計算される。

$$\Delta A = -\log\left(k \frac{I_s}{I_r}\right) \quad (3)$$

ここで、係数 k は検出強度の補正を行うためのものであり、非加熱時に吸光度が0となるように定める。

透過光強度は加熱パルスと一緒にデータレコーダに記録された。サンプリング周波数は1kHzとした。

加熱には $\phi 0.2\text{mm}$ のニクロム線を用いた。加熱量は 58mJ ($0.29\text{W} \times 0.2\text{s}$)とした。

4.2 数値解析

4.2.1 計算モデル

実験と同じニクロム線加熱の場合、ニクロム線と検出光の光軸が直角に交わることから、それぞれの軸における対称性を考慮し、計算領域を図6のように1/4円筒とした。光加熱の場合は、流路断面内で一様加熱を仮定しているため、 θ 方向の対称性を考慮し2次元円筒座標系とした。

4.2.2 基礎方程式

ニクロム線による加熱を考える場合、以下の3本の式が得られる。

・流体部(水)

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + u \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{1}{\rho_w c_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\lambda_w}{r} \frac{\partial T_w}{\partial \theta} \right) \right] \quad (4a)$$

・管壁部(PFA)

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\lambda_f}{\rho_f c_f} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial \theta} \right) \right] \quad (4b)$$

・加熱部(ニクロム線)

$$\frac{\partial T_n}{\partial t} = \frac{\lambda_n}{\rho_n c_n} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T_n}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_n}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_n}{\partial \theta} \right) \right] + \frac{S_n}{\rho_n c_n} \quad (4c)$$

光による加熱を考える場合、以下の2本の式が得られる。

・流体部(水)

$$\frac{\partial T_w}{\partial t} + u \frac{\partial T_w}{\partial x} = \frac{1}{\rho_w c_w} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda_w \frac{\partial T_w}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\lambda_w}{r} \frac{\partial T_w}{\partial \theta} \right) \right] + \frac{S_w}{\rho_w c_w} \quad (5a)$$

・管壁部(PFA)

$$\frac{\partial T_f}{\partial t} = \frac{\lambda_f}{\rho_f c_f} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_f}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T_f}{\partial \theta} \right) \right] \quad (5b)$$

これらの基礎式をコントロールボリューム法により数値的に解いた。各式はコントロールボリュームで積分し時間発展させた。対流項には一次の風上差分を用いた。r方向は0.1mm, θ方向は1°刻みに等間隔で格子を作成した。x方向は不等間隔とした。

4.2.3 境界条件

出入口では自由流出, 対称面では断熱とした。管外部では Fujii et al の式により水平円筒まわりに生じる自然対流による熱伝達率を計算し与えた。

4.2.4 計算条件

計算に用いた物性値を表1に、計算の際に変化させたパラメータを表2に示した。計算パラメータの太字は実験を行った条件である。

4.3 結果と考察

流量計の原理と照らし合わせると、温度マーカー速度 v [mm/s] と管内平均流速 u_m は線形な関係にあると考えられる。しかし、流速が小さいと、壁面への熱損失のために必ずしも線形とは

表1 数値計算に用いた物性値

	熱伝導率 λ [W/(m·K)]	定圧比熱 c_p [J/(kg·K)]	密度 ρ [kg/m ³]	粘性係数 μ [μPa·s]
水	0.6104	4179	996.66	854.4
PFA	0.24	960	2170	
ニクロム	17.4	444	8670	
空気	0.02614	1.007	1.1763	18.62

表2 計算パラメータ

パラメータ	内容
入射検出距離 L [mm]	0.5, 1.0, 1.5 , 2.0, 2.5, 3.0
管内径 D [mm]	1.0, 2.0 , 3.0
加熱量 Q [W]	0.145, 0.290 , 0.580
加熱時間 Δt [s]	0.05, 0.10 , 0.20
加熱方法	ニクロム線 , 光

ならない。以下では、この線形性の優劣で各パラメータの変化を評価する。 v の u_m に対する傾きが1より大きいのは、流体の移動速度よりも熱移動速度のほうが速いことを示している。流速が速い中心付近ではより多く熱が運ばれるので、温度マーカー速度もそれに影響されて速くなるのである。また、この傾きは流体によって異なる値を取る。

温度マーカー速度 v は加熱パルスが Δt [s] という時間幅を持っていることを考慮し、加熱部と検出部の距離 L [mm]、加熱開始からピークが検出されるまでの時間 t [s] から、

$$v = \frac{L}{t - \Delta t / 2} \quad (6)$$

となる。これを用いて図7に実験結果および計算結果をプロットした。加熱を続けている間は検出温度が増加することは無いと考えられるので、計算値では $L=1.5$ mm, $\Delta t=0.2$ s のとき、 u_m が増加するにつれて線形な関係から外れ、 $v_{max}=15.0$ mm/s に漸近する。しかし、実験では $v_{max}>15.0$ mm/s となっている。これは計算において考慮されていない流れの乱れが原因となっていると考えられる。

4.3.1 加熱検出距離 L

加熱部と検出部の距離 L を 0.5mm 間隔で 0.5~3.0mm まで変化させたときの計算結果を図8に示す。勾配が大きいため測定精度が高くなることから、微小流量を精度よく求める際には L を小さくし、逆に流量測定範囲を広げたい場合には L を大きくすれば良いことが分かる。しかし L は加熱検出時間 t の大きさにほぼ比例するため、 L を小さくした場合には測定の時間分解能を高くする必要があり、大きくすると応答性が悪く

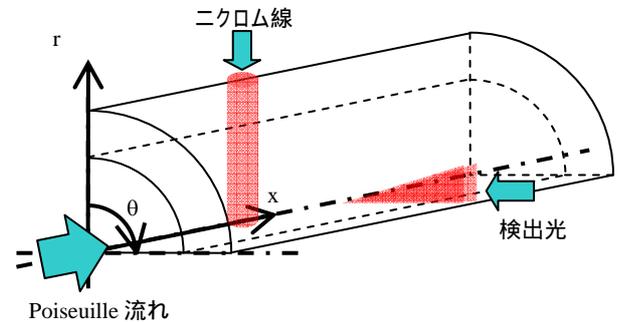


図6 計算モデル

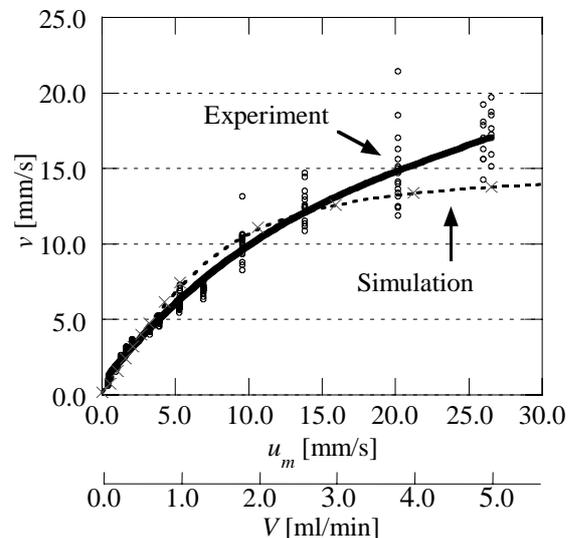


図7 計算結果と実験結果の比較

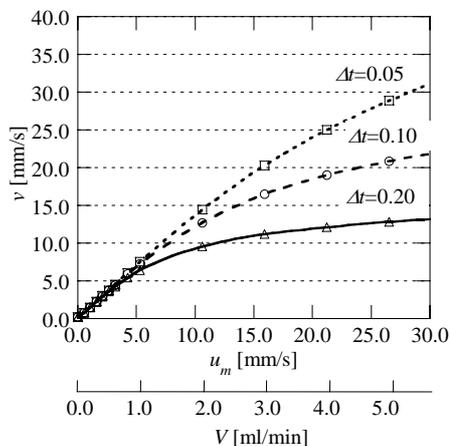
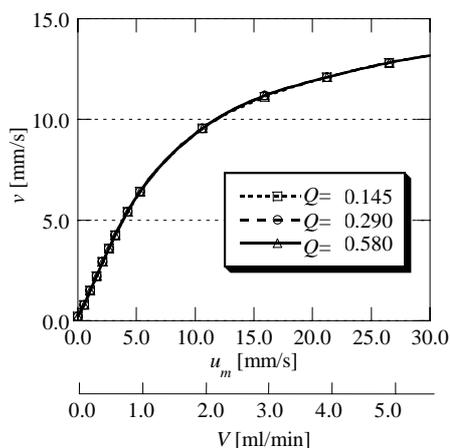
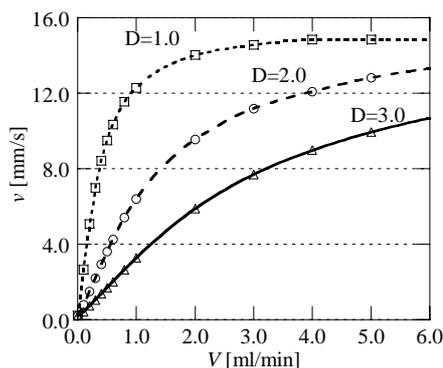
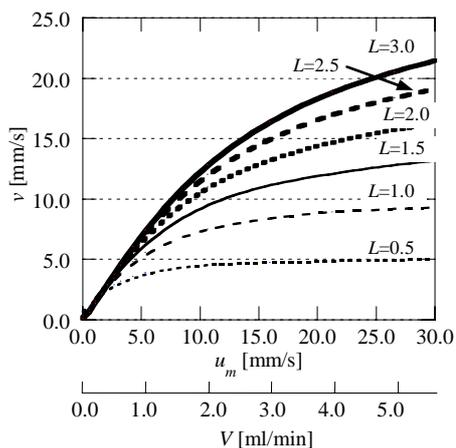


図8 マーカ速度 v と管内平均流速 u_m の関係 (光加熱)

上から加熱検出距離 L , 管内径 D , 加熱量 Q , 加熱時間 Δt

なることを覚悟しなければならない。

4.3.2 管内径 D

管内径を変化させると流量が同じでも流速が変化してしまう。そのためこの場合のみ流量とマーカ速度の関係を図8に示した。流速に対する感度とは逆に、流量に対する感度は管内径が小さいほうが良い。しかし線形な関係が得られる流量範囲は管内径に比例して広がる。

また、管内径を変化させると加熱・検出に用いる光の光路長が変化する。この結果、加熱時の温度分布が変化してしまう・透過光強度が小さくなり検出できなくなるといった問題が生じる。これを避けるには加熱・検出に用いる光の波長を変える必要がある。

4.3.3 加熱量 Q

図8から加熱量の変化の v への影響はほとんど見られない。よって、他のパラメータを変化させることで v と u_m の関係を決定した後、必要に応じてマーカの温度を独立に変更できる。

4.3.4 加熱時間 Δt

図8にあるように線形性に改善が見られた。これは、 v_{max} が加熱時間に反比例して大きくなるのが原因である。ただし加熱時間を短くすると、その分マーカ温度は低下してしまうので、加熱出力を上げてマーカの温度を確保する必要がある。

5. 結言

流量計の構成要素である光による温度変化検出部と加熱部それぞれに対し、実験を通して検討を行い、以下の結果を得た。

- 水が持つ特徴的な吸収スペクトルの温度依存変化を用いた温度推定を行い、 1.0°C 程度の温度差が十分に測定可能であることを示した。
- 高出力の半導体レーザーを光源として光による流体の加熱を行い、PFA樹脂製のチューブ内を流れる水を加熱する簡単な実験を行い、比較的吸収が弱い波長でも多数回反射を繰り返すことで吸収効率を向上させることができた。また、壁面を通して流体のみを効果的に加熱できることが確認できた。
- 流量計を試作し、実験および数値解析による検討を行った。特に数値計算により、加熱検出距離 L 、管内径 D 、加熱量 Q 、加熱時間 Δt といったパラメータ間の関係を明らかにした。それぞれのパラメータが流量計の性能に与える影響を考察した。また、光加熱の場合、ニクロム線加熱より検出温度が高くなることがわかった。

以上より、流量計の基本的な原理が明らかとなり、更なる性能向上への糸口をつかむことができた。

参考文献

- ・桃木 秀幸, 有本 英伸, 角田 直人, 山田 幸生: 「近赤外光を用いた無侵襲温度測定」, 電気学会論文誌 C, Vol. 124, No. 9, pp. 1725-1730 (2004)
- ・山田 幸生, 桃木 秀幸, 角田 直人: 「流量測定方法およびそれに用いる測定装置」, 特開 2004-271523
- ・S. V. Patankar: 「コンピュータによる熱移動と流れの数値解析」, 森北出版 (1985)
- ・「伝熱工学資料 改訂第4版」, 日本機械学会 (1986)