

感温液晶を用いた過渡応答熱伝達率計測法の精度 (数値実験による評価)

船崎健一 (岩手大工)

1 緒言

航空エンジンや発電プラント等で使用されるガスタービンでは、出力増強やサイクル効率向上のため、タービン入口温度(TIT)の上昇が著しい⁽¹⁾が、このような高温化の実現は、タービン翼内部冷却技術の進歩によりもたらされたものである。今後も更なるTITの上昇が想定されている⁽²⁾が、熱応力の低減、冷却空気の効果的な利用、という観点から、これからのタービン翼の冷却設計には、流路の平均熱伝達特性に基づく設計だけでなく、局所的な熱伝達分布にまで配慮した設計が必要になるなど、従来以上に高度な技術が要求されてくる。翼内部の限られた空間内に設けられる冷却流路は複雑な流路断面形状を有し、さらに突起列などの伝熱促進機構を伴っている。そのような翼内部流路内面の熱伝達分布をより詳細に把握するためには、実機翼モデルに基づく翼内部流路熱伝達特性に関する詳細な計測が不可欠である。また、CFD(計算流体力学)の冷却設計への応用が今後一層進むと思われるが、CFDの予測精度検証のためのデータベース提供という観点からも、高精度の実験の重要性は高い。

著者は、物体表面温度の時間的変化を観測して熱伝達率を推定する方法を導入・改良し、矩形ダクトや実機翼モデルの内部流路熱伝達率分布を計測した⁽³⁾。この計測法(過渡応答法)では、流れの温度をステップ状に変化させた後、表面温度の時間的変化を感温液晶により計測し、半無限物体表面上における非定常次元熱伝導方程式の解との対比から表面熱伝達率を推定する。この過渡応答法は、感温液晶の塗布が可能で、液晶の色の変化を観測できる状況であれば、表面形状が多少複雑であっても比較的簡単に熱伝達率を推定できる、という利点を有している。そのため、主としてタービン翼表面⁽⁴⁾⁽⁵⁾やタービン翼内部流路⁽⁶⁾での熱伝達特性計測に利用されている。しかし、その計測精度に関する議論は十分に行われていたとは言えない。感温液晶を用いた定常熱伝達率計測法での計測精度については、例えば、Hippensteeleら⁽⁷⁾やBehleら⁽⁸⁾の研究で詳細に検討されているが、過渡応答法特有の問題点⁽³⁾の克服にも留意しながら、計測精度向上に関する研究の推進が必要である。

本研究では、感温液晶を用いた場合の過渡応答熱伝達率計測法に関して、計測精度に対する影響因子についての数値実験による定量的な議論を行い、計測精度の向上に関する方策について検討する。

2 計測法

2.1 過渡応答法

過渡応答法による熱伝達率計測法の原理を簡単に説明する。半無限物体(密度 ρ ,比熱 c ,熱伝導率 λ)及びそれに接する流れの温度がそれぞれ T_i である状態から、流れの温度をステップ状に T_g まで上昇させたとすると、半無限物体の表面温度 T_w に関する無次元温度 θ は次のような時間的変化を示す。

$$\theta = \frac{T_w - T_i}{T_g - T_i} \quad (1)$$

$$\theta = 1 - \exp\left(-\frac{h^2 t}{\rho c \lambda}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h \sqrt{t}}{\sqrt{\rho c \lambda}}\right) \quad (2)$$

ここで、 T_g :主流温度、 T_w :表面温度、 T_i :物体初期温度、 h :熱伝達率、 t :経過時間。実際の計測では、流れの温度をステップ状に変化させることは困難であり、温度上昇の時間の遅れを評価する必要がある。Duhamelの定理を適用し、流れの温度上昇を図1のような開始時刻から時間遅れ τ_j 後に発生する微小な温度上昇の積み重ね($T_{g,j}$, $j=1, \dots, N$)で近似することで、表面温度の時間変化に関する次式を得る⁽³⁾。

$$T - T_i = \sum_{j=1}^N U(t - \tau_j) (T_{g,j} - T_i) \quad (3)$$

$$U(t - \tau_j) = 1 - \exp\left(-\frac{h^2 (t - \tau_j)}{\rho c \lambda}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{h \sqrt{t - \tau_j}}{\sqrt{\rho c \lambda}}\right) \quad (4)$$

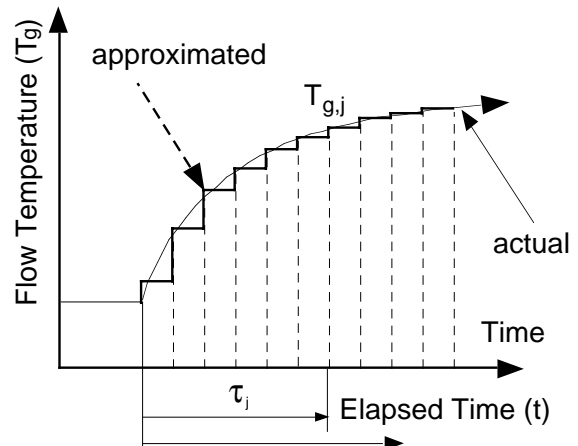


Figure 1 Approximation of temperature rise by a series of steps

温度上昇曲線の分割数 N が熱伝達率の推定値に与える効果に関しては、石澤の研究がある⁽⁹⁾。図2には、式(3)及び(4)で算定した熱伝達率（参照熱伝達率で無次元化している）が、 N によってどのように変化するかを調べた例を示す。この例では、 N が約20以上でほぼ熱伝達率が一定になっている。何回かの調査結果を元に、 $N=40$ を採用した。

2.2 不確かさの評価式

過渡応答法による熱伝達率計測における誤差に関しては、熱伝達率 h が陽に与えられないので、従来の方法⁽¹⁰⁾が使えない。ここでは、Saabasら⁽¹¹⁾の手法を用いる。それによれば、式(1)(2)で計測される熱伝達率 h の不確かさは、下記の式で評価することができる。

$$\frac{\Delta h}{h} = \frac{\frac{\partial \theta}{\partial T_w} \Delta T_w + \frac{\partial \theta}{\partial T_g} \Delta T_g + \frac{\partial \theta}{\partial T_i} \Delta T_i - \frac{\partial \theta}{\partial t} \Delta t - \frac{\partial \theta}{\partial k} \Delta k}{h \frac{\partial \theta}{\partial h}} \equiv S_{T_w} \Delta T_w + S_{T_g} \Delta T_g + S_{T_i} \Delta T_i + S_t \Delta t + S_k \Delta k \quad (5)$$

ここで、式(5)の右辺に現れる項 S_f ($f: T_w, T_g, \dots$) はそれぞれの因子 f の誤差に対する熱伝達率 h の相対感度係数に相当する。式(2)から、時間 t 及び物性値 k ($= \rho c \lambda$) に関する感度係数は、下記の式で解析的に計算できる。

$$S_t \equiv \frac{1}{h} \frac{\partial \theta / \partial t}{\partial \theta / \partial h} = \frac{1}{2t} \quad (6)$$

$$S_k \equiv \frac{1}{h} \frac{\partial \theta / \partial k}{\partial \theta / \partial h} = -\frac{1}{2k} \quad (7)$$

その他の感度係数は、例えば

$$S_{T_w} = \frac{1}{h} \frac{\partial \theta / \partial T_w}{\partial \theta / \partial h} = \frac{1}{T_g - T_i} \frac{1}{h \frac{\partial \theta}{\partial h}} \quad (8)$$

のように計算される。しかし、この係数には計算結果として求まる熱伝達率 h が含まれるため、係数を陽的には評価できない。そのため、全ての感度係数を評価する場合には、温度差 $T_g - T_i$ 、表面温度（ここでは発色温度） T_w や経過時間 t などを与えて h を算出する必要がある。

図3には、3種類の温度条件での感度係数の比較の結果を示す。なお、物性値に関する感度係数は他の係数と比べ桁違いに小さいのでここでは示していない。図中(a)のグラフから、発色までの経過時間が短い場合（即ち、同じ温度条件下で熱伝達率が高い場合）、時間誤差に対する感度係数が他の感度係数よりもかなり高い値を示しているが、経過時間が延びるとともに、温度に関する感度係数、特に表面温度（即ち発色温度） T_w の誤差に関する感度係数が支配的になってくるのがわかる。(b)のグラフは(a)での条件から主流温度と発色温度の差を小さくした場合の結果で、発色温度の誤差に関する感度係数が約15%増になっている他、残りの感度係数も微増している。主流温度や供試体初期温度の計測誤差は、計測プローブ（熱電対など）の精度やその設置方法に注意を払うことで低く抑えることは可能であるが、表面温度

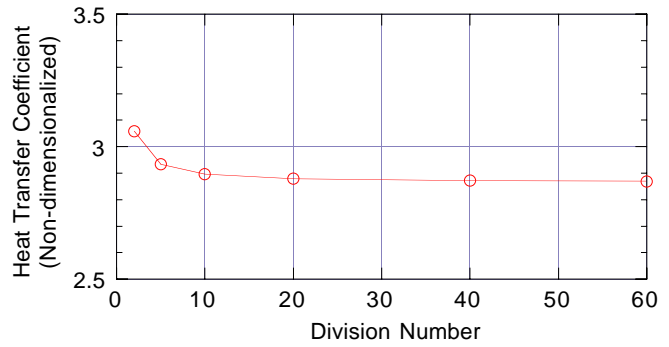


Figure 2 Effect of division number N upon the estimation

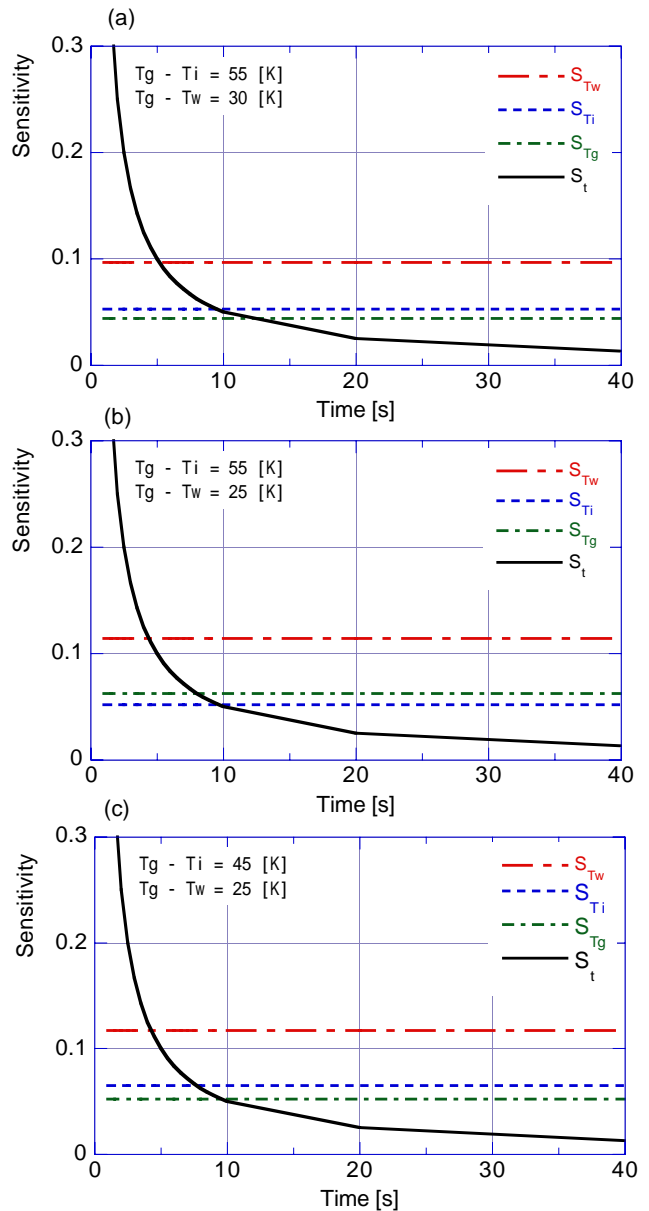


Figure 3 Sensitivities for three temperature conditions

(即ち発色温度)は、最も誤差が混入する可能性の高い感温液晶で計測されるので、十分な注意が必要である。また、(c)のグラフは(b)の条件から主流温度と供試体初期温度の差を下げた場合の結果であり、供試体初期温度の誤差に関する感度係数が主流温度誤差に関する感度係数をわずかに上回っていることがわかる。

感温液晶による物体表面温度の計測誤差については、すでにいくつかの報告例⁽³⁾⁽⁸⁾があるが、さらに詳細な調査が必要である。また、サーペントイン流路のような内部流路での熱伝達率の計測においては、流れ方向への主流温度(Bulk Temperature)の変化が不可避であり⁽³⁾⁽⁶⁾、その影響の評価も重要である。これらの点についての考察結果等については、次報以降で明らかにしていく。

3 不確かさの要因

上記の感度係数に関する議論を踏まえ、以下では、推定された熱伝達率の不確かさに強く影響する因子のいくつかについて検討を加える。

3.1 二次元性の影響

過渡応答法では表面からの熱流入が一次元熱伝導方程式に従うことを前提としている。実際には計測対象物は通常三次元形状であり、また、表面の熱伝達率も表面上で一様ではない。このような非一次元性がどのような熱伝達率の評価にどのような影響をもたらすかを明らかにすることは重要である。以下にこの点を議論する。なお、議論を統一して行うために、式(2)内での変数を下記のように無次元化する。

$$\theta = 1 - \exp(-Bi^2 Fo) \operatorname{erfc}(Bi \sqrt{Fo}) \quad (9)$$

ここで、 $Bi (= hl/\lambda)$ はビオー数、 $Fo (= Fo = at/l^2)$ はフーリエ数、 $a (= \lambda/\rho c)$ は熱拡散率、 l は代表長さである。供試体がアクリル製であるとする、 $a = 0.12$ (mm²/s)である⁽¹²⁾。

3.1.1 突起部の効果 非一次元的な熱伝導の例として、タービン冷却流路における乱流促進体をモデルにした平板上の突起について検討する。簡単のため、正方形断面の突起を考え、突起のピッチは突起高さの10倍とする。二次元非定常熱伝導解析は、差分法による計算コードを使用した。時間積分にはオイラーの陽解法を用いた。計算に用いた格子の概略図と境界条件を図4に示す。実際の格子点数は突起部以外では、 301×121 点、突起部では 31×31 点である。なお、時間刻みや空間刻みの効果については十分検討しており、それらに対する温度変化の依存性がほとんどないことを確認している。

計算結果の例を図5に示す。熱伝達率 h は主流側の各面(A, B, C, D)で一定値(100[W/m²K])を与えている(突起高さ e に関する Bi 数は1.12)。この図で、隣接する突起間の中間点(M)での表面温度は、式(2)で与えられる温度変化とほとんど一致していることから、一次元的な熱伝導の状態が得られていることがわかる。一方、突起上での温度は、 Fo が0.04に達する手前で、一次元的な温度変化の状態からより高温側

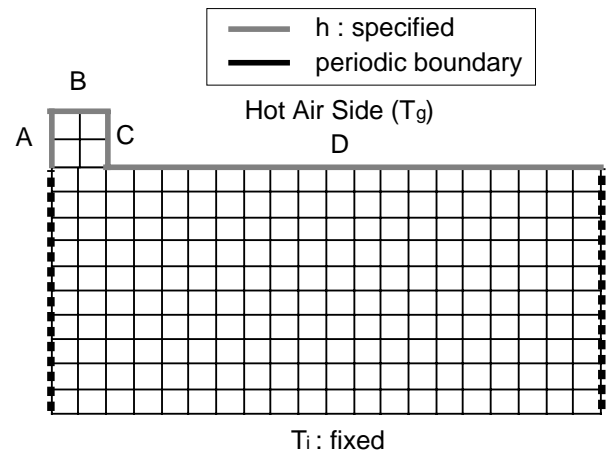


Figure 4 Grid system for heat conduction calculation

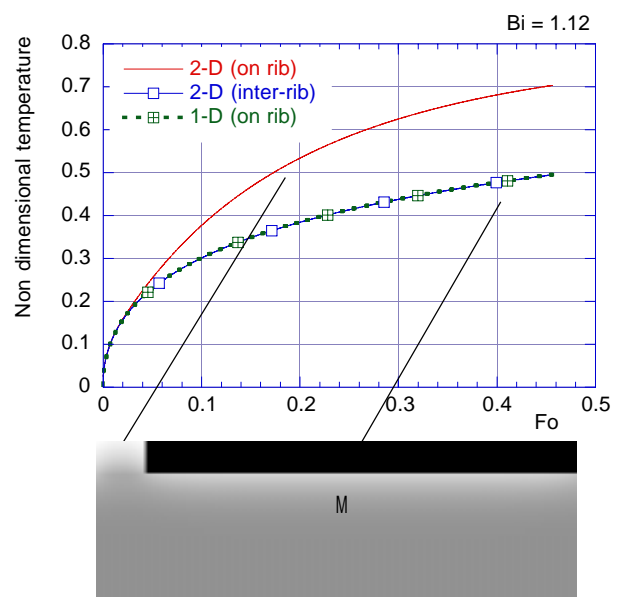


Figure 5 Timewise temperature variations on the top of the rib and the inter-rib point, with a snapshot of the temperature distribution in the test model

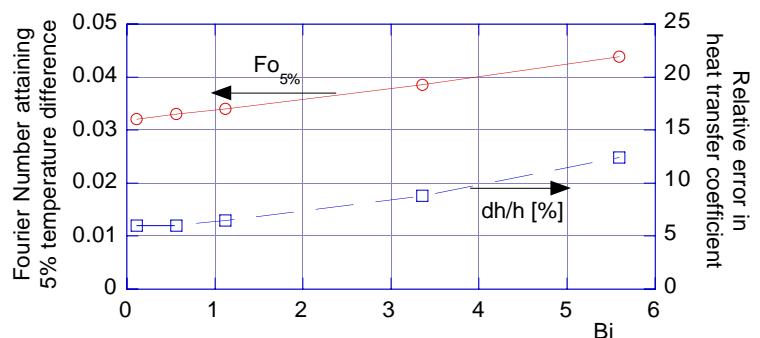


Figure 6 Relationship between Fo5% and Bi number

へ逸脱し始めている。このような変化は、突起の両サイド(A,C)からの熱流入が原因であると思われる。実際にA及びC面を断熱条件に変更した場合、一次元的熱伝導の状態から逸脱する Fo 数は約0.16にまで延び、その後の温度差も小さいことが確かめられている。

突起面での熱伝達もタービン翼冷却に貢献しており、そこでの熱伝達を把握することは重要である。さて、式(9)のように熱伝導の一次元性を仮定した方法での計測を試みる場合、一次元性が成立している間に発色するするような温度域の感温液晶を選ぶことで、突起面上での熱伝達率の計測がある程度可能になる。そこで、温度変化の二次元効果が現れるまでの時間(一次元性が保持される時間)を、 Bi 数を変化させて算出した。図6に、突起面上での温度と式(9)で与えられる温度との差が後者の5%になるまでの時間(フーリエ数) $Fo_{5\%}$ とその時の Bi 数との関係を示す。また、その時の突起表面温度と到達時間を元に式(9)から熱伝達率を逆算し、境界条件として与えた熱伝達率との差の比率 (dh/h) も算出した。その結果も図6に併記する。 $Fo_{5\%}$ は Bi 数の増加により緩やかに増加するが、ほぼ0.03 ~ 0.04の値を示している。熱伝達率の推定誤差は、 Bi 数が低い場合には6%程度であるが、 Bi 数の増加により次第に増加している。二次元性による突起上熱伝達率推定誤差を、例えば6%に留めるための条件を次のように求めた。式(9)で熱伝達率を6%増加させた場合の無次元温度を計算し、その結果を二次元解析の結果と比較し、両者が交差する Fo^* を図7のように求める。二次元解析の結果が実際の温度上昇に相当すると仮定した場合、 Fo^* 以降のデータから熱伝達率を算出すると、実際の熱伝達率よりも6%以上も高い値を推定することになる。何種類かの Bi 数について同様の検討を行った結果、 Bi によらず発色時間に関する Fo は0.033程度に抑える必要があること

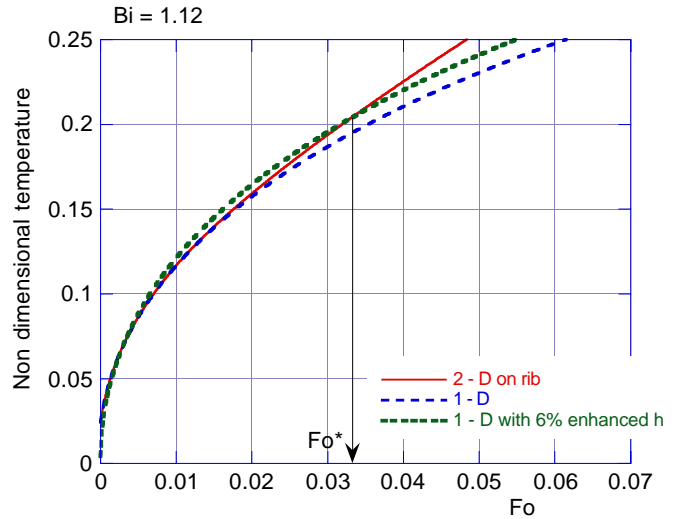


Figure 7 Determination of time limit on over-rib measurement

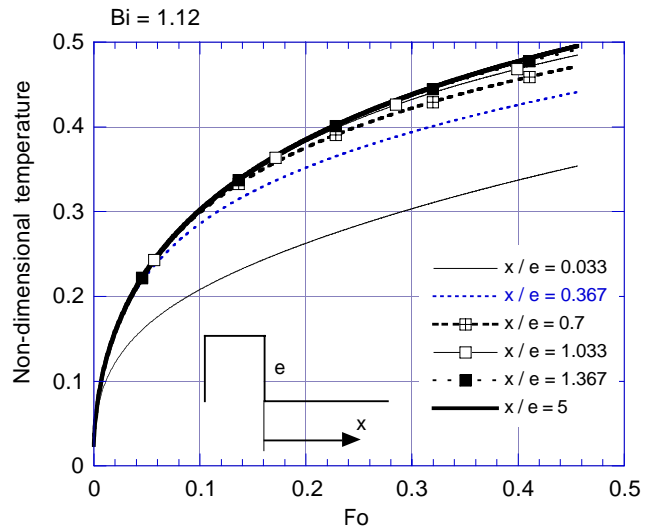


Figure 8 Temperature variations near the rib

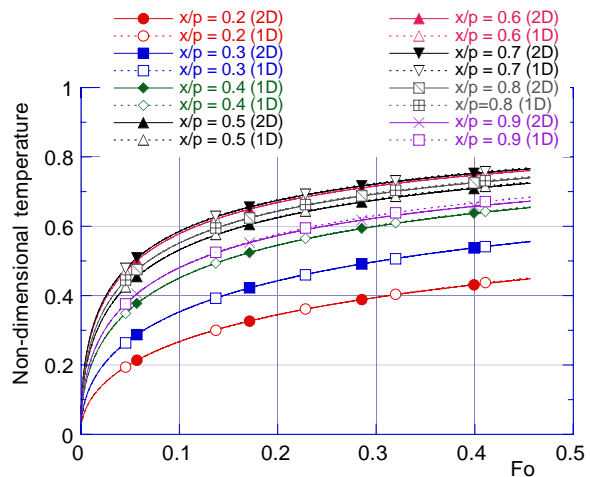
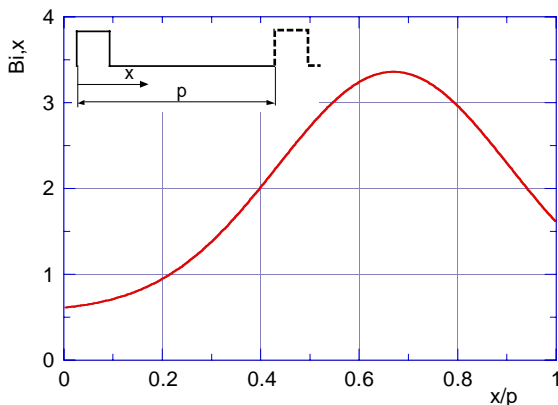


Figure 9 Effect of surface heat transfer distribution upon one-dimensionality of the heat conduction (left : Biot number distribution on the test surface right : resultant temperature variations with time)

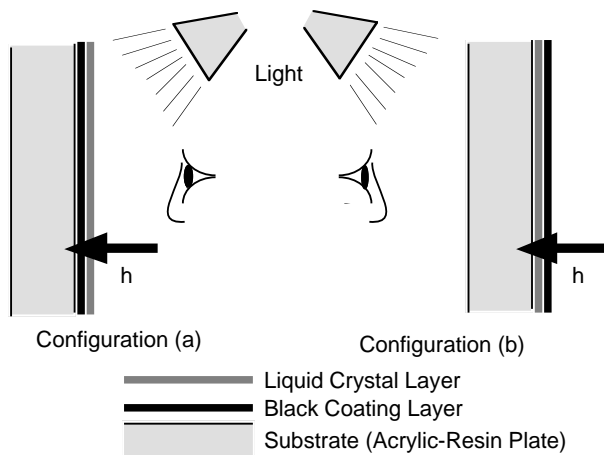


Table 1 Thermal Properties

	λ [W / m K]	ρ [kg / m ³]	c [kJ / kg K]	κ [mm ² / s]
Liquid Crystal	0.223	900	9.910	0.025
Black Paint	0.446	1000	8.920	0.050
Substrate (Acrylic)	0.21	1190	1.400	0.126

Figure 10 Coating layers and the substrate

がわかった．実際の時間に換算すると，アクリルの供試体の場合には2秒弱となる．これは，約2秒間の間に発色する温度域の液晶を使うことで，突起表面での熱伝達率が計測可能であることを意味する．この結果は突起3面とも等しい熱伝達率で加熱されたという，実際とは異なる状態に対する結果であり，さらには突起表面中央部に限定されたものではあるが，液晶の発色域の設定や実験装置の設計上有益なデータである．

突起の存在が周辺の温度変化に与える影響について調べた結果を図8に示す．突起部の熱容量の効果により，突起のごく近傍の温度上昇は突起から離れた位置 ($x/e=0.5$) での温度上昇よりも緩やかである．また，この図から，突起の影響が及ぶ領域は突起高さ程度であることもわかる．

3.1.2 熱伝達率の二次元性 ここでは，表面の熱伝達率分布が二次元的に変化する場合に，温度上昇がどのように変化するかを調べる．計算で境界条件として与えた熱伝達率分布 (Bi 数分布) を図9左に，突起から x の位置における表面温度変化の計算結果を図9右にそれぞれ示す．なお，ここで与えた Bi 数分布は，突起列を伴う流路での典型的な分布である．また，後者の図中には，式(9)で算出される温度変化(一次元計算)も併せて示している．ここでの比較の結果より，二次元的な熱伝達率を与えた場合でも，突起のごく近傍を除いてその表面温度の上昇曲線は一次元計算による結果と大きな差がないことを確認した．

3.2 コーティングの影響

過渡応答法では表面温度の時間的変化を何らかの方法で計測する必要がある．表面温度分布の時間的変化を二次元情報として取得する方法としては，感温液晶を代表とする特殊なコーティングを計測面に塗布する方法と，放射温度計を使用する方法が考えられるが，実験室レベルの研究用としては，コストパフォーマンスなどの面で優れているコーティング塗布法が一般的であろう．しかし，その場合には，主流と計測面との間に液晶層や反射光以外を吸収するための黒色塗料層が介在し，それらが温度変化の緩衝層として作用することが予想される．以下には，感温液晶を過渡応答法での温度計測に使用した場合の影響について検討する．

上述の様に，感温液晶は黒色塗料と組み合わせて計測対象面に塗布される．これらの層の厚みは十分薄いと考えられるが，いくらかの熱容量を有しているため，感温液晶の温度変化と計測面での温度変化に若干の時間差が発生する．2.2節で議論した様に，時間誤差は計測開始直後においては熱伝達率の計測誤差の中で大きな割合を占めることから，この

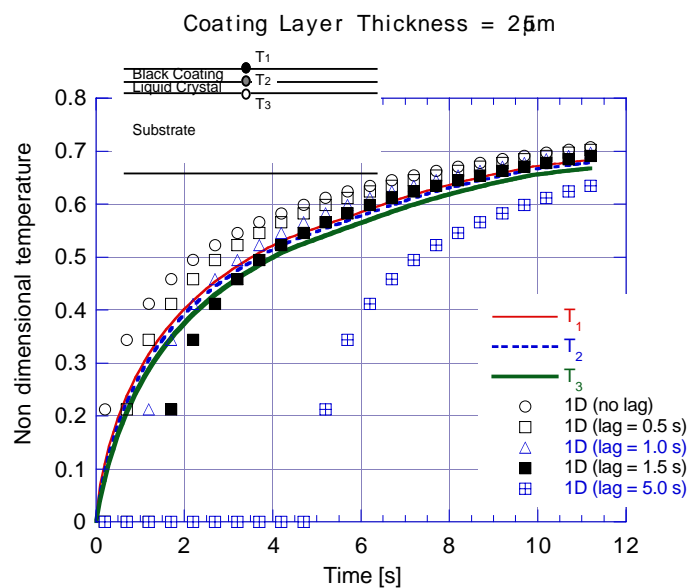


Figure 11 Effect of coating layers upon temperature rise (Coating thickness : 25 μ m)

時間誤差の見積りは重要である。以下にこの点を検討する。

図10には、テストモデルの上に塗布される液晶層及び黒色塗料層とモデル母材(アクリル板)との関係を示す。Configuration (a)では母材の上に黒色塗料層があり、その上に液晶を塗布する形態になっている。この場合、母材と感温液晶との間には黒色塗料層が存在する。一方、Configuration (b)では、母材と感温液晶が直接接触しているが、主流との間には黒色塗料層が存在している。計測上はConfiguration (b)の方が鮮明な画像を得やすい。以下ではConfiguration (b)の塗布方法の場合の各層の温度変化を、上で用いた熱伝導解析コードを用いて計算した。計算の際に使用した物性値は表1の通りである。感温液晶の熱物性値は笠木のデータ⁽¹³⁾から推測した値が用いられている。なお、黒色塗料については正確なデータが不明だったので、熱伝導率、熱拡散率が感温液晶の2倍と仮定し、密度、比熱は推定した。時間遅れの程度を理解するため、時間等の表示は有次元とする。表面熱伝達率は $300\text{ [W/m}^2\text{K]}$ である。

図11に、黒色塗料層及び感温液晶層の厚みをそれぞれ $25\ \mu\text{m}$ として算出した場合の各境界面上における温度変化を示す。この場合、コーティング層の表面や塗料層-液晶層の界面、また液晶層-アクリル母材の界面温度(T_1, T_2, T_3)の差異はわずかではあるが、コーティング層の熱物性値の違いなどにより、それぞれの温度上昇が必ずしも式(2)で与えられる温度上昇曲線とは一致していない。式(2)の時間 t に時間遅れ(lag) τ を導入して算出した結果も同じ図中に併記している。その結果、母材表面の温度上昇は、温度の立ち上がりを除いて $\tau=1.5\text{ [s]}$ 程度の解析解とほぼ一致することがわかった。

実際の計測では時間遅れは熱伝達率の過小評価に繋がる。そこで、式(2)で熱伝達率をいくつか変えた場合の温度変化を算出し、それらと母材-感温液晶の界面温度 T_3 との比較を行うことで、推定される熱伝達率が真値(この場合は $300\text{ [W/m}^2\text{K]}$)からどの程度過小評価されるかを考える。図12に計算結果を示す。図中でシンボル \bullet で与えられる温度変化が T_3 であり、その他は解析解を示す。この図は、例えば、 T_3 が無次元温度0.5(これを参照温度と呼ぶ)に達した時の経過時刻を基に一次元の解析解から熱伝達率を推定した場合、そのときの熱伝達率は $220\text{ [W/m}^2\text{K]}$ になることを示している^{*1}。図12を詳しく見ると、参照温度が比較的低い場合(経過時間は短くなる場合)には、解析解で推定される熱伝達率は真値よりもかなり低い値になり、参照温度を高く設定し、経過時間を長くとるほど熱伝達率の推定値が真値(この場合は $300\text{ [W/m}^2\text{K]}$)に近くなることがわかる。しかし、真値との差は10%以上とかなり誤差は大きい。図13にはコーティング層の厚みをそれぞれ $10\ \mu\text{m}$ として算出した温度上昇を時間遅れを伴う解析解とともに示す。この場合には、 T_3 は

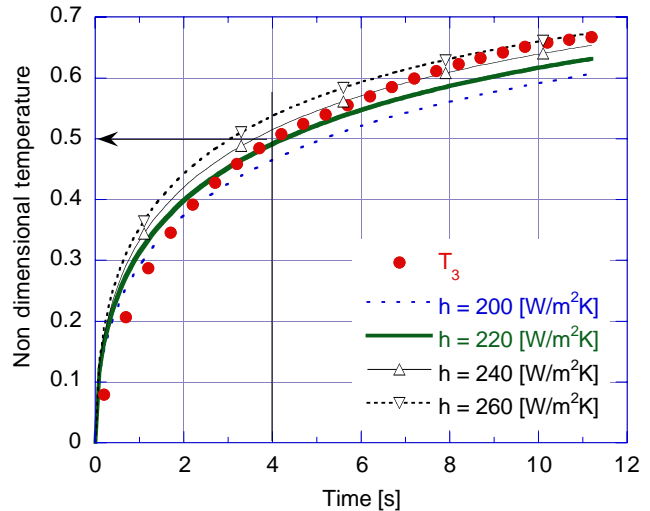


Figure 12 Effect of coating layers upon temperature rise (Coating thickness : $25\ \mu\text{m}$)

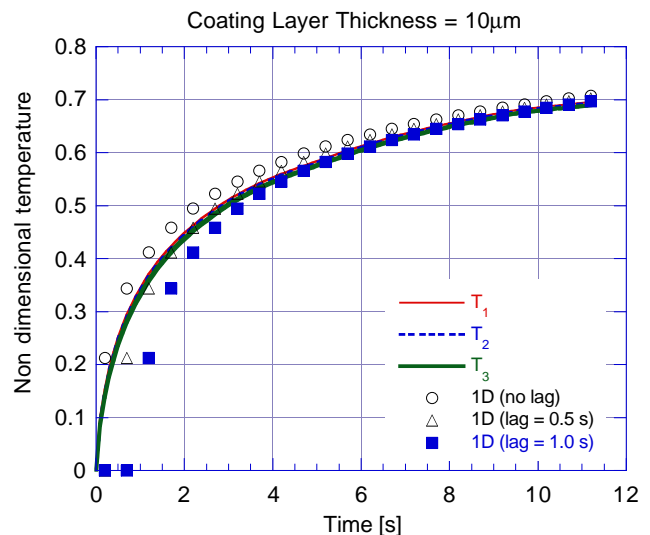


Figure 13 Effect of coating layers upon temperature rise (Coating thickness : $10\ \mu\text{m}$)

*1 ここでの議論においては、簡単のため感温液晶の発色温度が界面温度 T_3 と同じである、と仮定している。この仮定に基づけば、母材表面の温度上昇は感温液晶の色から決定できることとなる。しかし、観測している感温液晶の色が実際にはどの温度に支配されているのか、現時点では判然とはしていない。液晶の塗布の仕方にも影響されられると思われるが、図10のconfiguration(b)の場合には、観測者から見える側の液晶の温度、即ち T_3 によって決まる色が最も強く発現するものと考えられる。

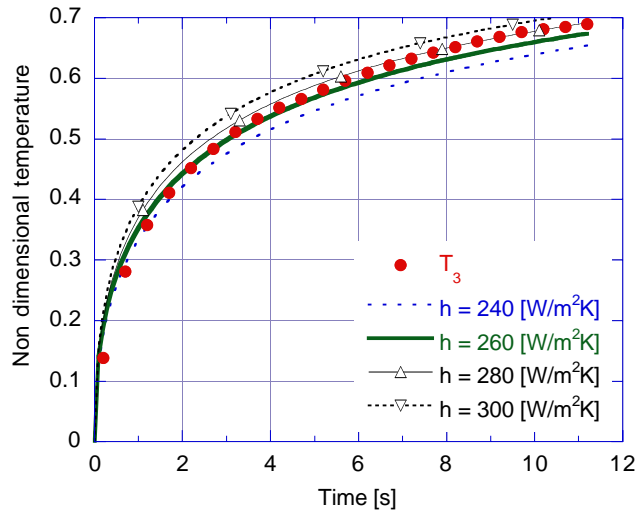


Figure 14 Effect of coating layers upon temperature rise
(Coating thickness : 10 μm)

解析解とかなり一致している．また図 14 から，解析解に基づく熱伝達率の推定値は280 ~ 300 [W/m²K]の間になり，各層の厚みが25 μm の場合と比べ誤差は半分以下に減少している．

境界条件として与えた熱伝達率の違いが，推定値の誤差にどの程度影響するかを数値実験で調べた．熱伝導解析で与えた主流側熱伝達率 h_o は 100, 300 及び 500 [W/m²K] である．そこでの計算結果の例を図15に示す．なお，議論を簡単化するため，黒色塗料層の物性値を感温液晶層の物性値と同じにしている．解析解における熱伝達率を変化させて熱伝導解析での T_3 と一致する温度変化を与える熱伝達率を各条件で探索したところ， h_o の大きさにほぼ無関係に，各コーティング層の厚みが10 μm の場合には約5%，25 μm の場合には約13%の誤差をもたらすことがわかった．コーティング層厚みによる推定誤差の増加の割合は，今回の数値実験の範囲ではほぼ厚みに比例していることも明らかになった．以上の議論では，感

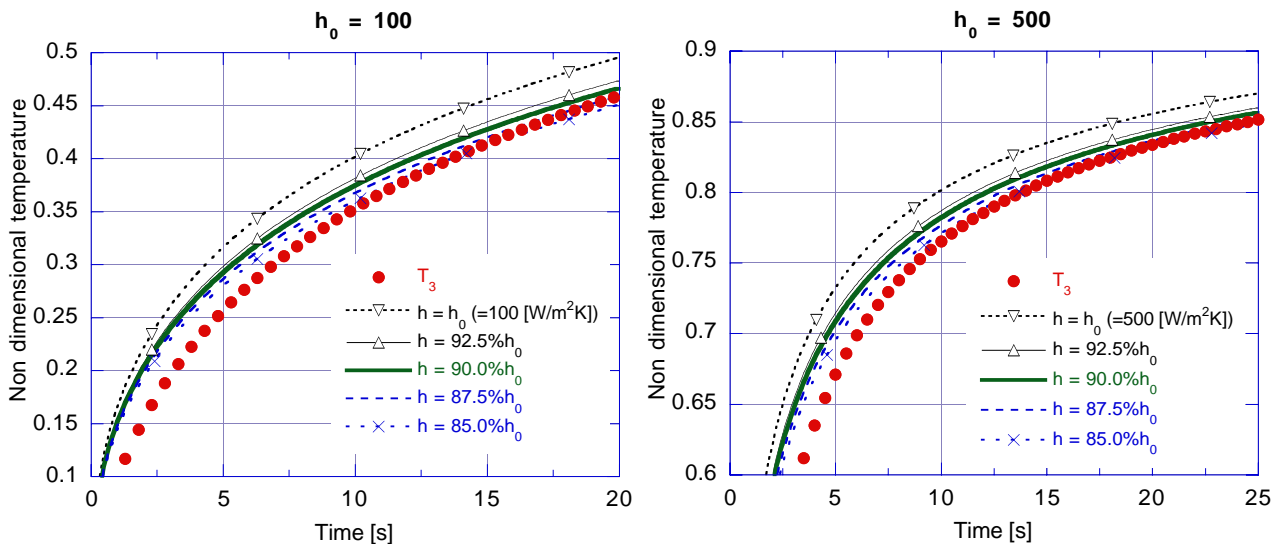


Figure 15 Error estimations for different heat transfer coefficients
(Coating thickness : 25 μm)

温液晶や塗料の熱物性値が必ずしも正確ではない．そこで，試みとしてコーティング層の熱拡散率を半減して上述の計算と同様の計算を行い，推定誤差を評価した．その結果，例えば各コーティング層の厚みが25 μm の場合では熱伝達率の推定誤差は約10%となり，熱物性値の影響が比較的小さいことが確認された．このことは，2.2節で述べたように，物性値に関する感度係数が極めて小さいことに起因していると思われる．

以上の結果から，感温液晶による熱伝達率計測実験を行う際に，コーティング厚みの正確な把握が重要であることが明らかになった．これに加えて，先にも述べたが，図15などの結果から，熱伝達率推定の際の表面温度データは，ある程度時間経過後のデータを利用する必要があることも容易に理解できる．このことは，1次元熱伝導が成立する状況においては，比較的高温で発色する感温液晶を選択すること，別の言い方をすると，発色温度と供試体初期温度との差が大きくなるように設定することが望ましいことを示唆している．

本論文では直接には取り扱わなかったが，この他にも計測精度に影響する要因がいくつかあり，今後実験も数値解析と平行して行い，計測精度の更なる高精度化に必要な知見を収集するとともに，高精度化に関する具体的方法について，次報以降で検討する．

結論

感温液晶を用いた過渡応答法による熱伝達率推定方法について、二次元非定常熱伝導解析を通じて、計測精度に影響を及ぼす要因のいくつかを定量的に検討した。その結果、突起などのごく近傍を除いては、表面温度はほぼ一次元非定常熱伝導方程式の解析解とよく一致することがわかった。また、コーティング層が厚い場合には、それによる母材表面での温度変化の時間遅れなどが顕在化し、結果として熱伝達率の推定値に大きく影響することも明らかになった。加えて、1次元熱伝導が十分に成立すると認められる場合には、発色温度の高い感温液晶を利用することが必要であることも示した。

謝辞

本研究の遂行に当たっては、本学卒業生小貫亜希子氏のご協力を得たことをここに記し、感謝の意を表す。また、本論文に対する貴重なご意見を寄せられた査読委員にも深く感謝する。

参考文献

- (1) 塚越ら, 機構論, No.98-1, VI, 1998, 788
- (2) 玉木, 機構論, No.98-1, VI, 1998, 702
- (3) 船崎ら, 日本ガスタービン学会, Vol.26, No.101, 76, 1998
- (4) Hoffs, A. et al., ASME Paper 95-GT-8, 1995
- (5) Drost, U. et al., ASME Paper 97-GT-26, 1997
- (6) Chyu, M.K. et al., ASME Paper 97-GT-489, 1997
- (7) Hippensteele, S.A., et al., J. Eng. Gas Turbines and Power, 107, 1985, 953
- (8) Behle, M., et al., Applied Scientific Research, 56, 1996, 113
- (9) 石澤, 岩手大学修士論文, 平成9年度
- (10) Kline, S.J. and McClintock, F.A., Mech. Eng., Vol. 75, pp. 3-8, 1953
- (11) Saabas, H. J. et al., ASME Paper 87-GT-212, 1987
- (12) 日本機械学会編, 伝熱工学資料(改訂第4版), p. 321, 昭和61年
- (13) 笠木, 伝熱研究における温度測定の基礎, 棚沢ほか共著, 養賢堂, 1985

