火災時におけるトンネル内熱気流の温度成層特性*

薛 宏^{*1}, 飛原 英治^{*2}, 斎藤 孝基^{*2}

Temperature Stratification of Heated Air Flow in a Fire Tunnel

Hong XUE, Eiji HIHARA and Takamoto SAITO

The temperature stratification of heated air flow in a fire tunnel is investigated by the two- and three-dimensional experiments and numerical models described in previous papers. It is found that the heated air flow can appear to be either a stratified or a mixed flow pattern in accordance with different ventilation velocities, heat release rates, and downstream positions. To deal with tunnel fire circumstances, the mixed convection is evaluated by a macro nondimensional variable $Gr^*/Re_H^{5/2}$, and a quantitative relationship between $Gr^*/Re_H^{5/2}$ and a parameter which identifies the varying degrees of the stratification at each tunnel crosssection has been established. By comparing the results from two- and three-dimensional analysis, the effects of secondary flow on temperature stratification are discussed. The conclusions obtained are directly relevant to the safety considerations in tunnel fires.

Key Words: Stratified Flow, Numerical Analysis, Environmental Engineering, Fire, Tunnel Ventilation, Secondary Flow

1. 緒言

換気された長大トンネル内で火災時に発生する熱気流の挙動を解明することは、実用上、大きな意義を持つ。著者ら^{(1),(2)}は火災時のトンネル内の気流を模擬するため、2次元及び3次元非定常乱流実験を行い、それらに基づき、数値解析モデルを確立し、火災の初期段階に対して十分な予測精度があることを示した。

他方、このような実験結果と数値解析モデルを利用して実用に供し得るトンネルの換気及び防災システムを設計するには、実際のトンネル内の環境条件、または火災の程度によって、火災時における熱気流の挙動などをあらかじめ予測する必要がある。その中でも、熱気流の温度成層特性は熱気流の拡散、火災の探知、コントロール、消火及び人の避難に対し、非常に重要である。しかし、それに関する研究はまだ少なく、温度成層の程度を評価する適切なパラメータは分かっていない。特に、火災の発生した直後における加熱量と換気流の変化が熱気流の成層特性に及ぼす影響についてはほとんど未知である。

トンネル火災に関するモデリングは、2次元または3次元の取扱いに分けられる。一般的に、3次元の解析は実際の現象にもっとも近いアプローチであるが、トンネル形状の複雑さと膨大な計算量に悩まされることが多い。それに対し、2次元の解析は簡略化され、計算量の大幅な減少ができる。しかし、その結果が実際のトンネル火災における熱気流の挙動の予測にどこまで適用できるかなどの問題を残している。

本研究は2次元と3次元のトンネル実験と数値解析の結果を用いて、換気流流速と加熱量を変数として、トンネル内の熱気流の温度成層特性を調べた。また、それらの熱気流の温度成層の程度を無次元パラメータで評価し、火災時における非定常熱気流の成層の予測について有用な情報を得た。その成層特性パラメータを用いて、換気流流速や加熱量などのマクロな環境変数と温度成層の形成との関係を見出した。3次元トンネル断面内の二次流れが熱気流の成層特性に与える影響についても吟味した。

2. 主な記号

C_f : 壁面摩擦係数

D_H : トンネルの水力直径

* 原稿受付 平成3年7月1日。

*¹ 学生員, 東京大学大学院。

*² 正員, 東京大学工学部 (〒113 東京都文京区本郷 7-3-1)。

g : 重力加速度
 Gr^* : 修正グラスホフ数 $= g\beta q H^4 / \nu^2 \lambda$
 H : トンネルの高さ
 q : ヒータによる加熱熱流束
 Re_D : レイノルズ数 $= D_H u_0 / \nu$
 Re_H : レイノルズ数 $= H u_0 / \nu$
 S_h : 加熱面の大きさ
 T : 平均温度
 ΔT : 温度上昇 $= T - T_0$
 ΔT_c : $= T_c - T_0$
 ΔT_{cf} : $= T_c - T_f$
 t : 時間
 u : x 方向の平均速度
 u_* : 摩擦速度
 v_h : 高温ガスの流出速度
 x : 加熱源から下流方向への位置座標
 y : 下壁から上方への位置座標
 z : 幅方向位置座標
 β : 空気熱膨張係数
 λ : 熱伝導率
 ν : 動粘度
 τ_w : 壁面剪断応力

添字

c : 上壁面に近い高さの値
 f : 下壁面に近い高さの値
 avg : 断面平均値
 0 : 初期値

3. 温度成層特性の解析

実験と数値解析モデルは既報^{(1),(2)}と同じものを用いた。2次元の実験装置はアクリル板で作られた矩形断面(高さ0.1m, 幅0.5m)の風洞で、テストセクションの長さは2.95mである。風洞の上流端にはファンを設置し、一定の速度の換気流を与える。加熱源として螺旋状ニクロム電熱線を下壁から上方9mmの位置に置いている。数値解析は実験に基づき、2次元非定常乱流 $k-\epsilon$ モデルを用いて行われた。3次元の実験装置は亜鉛鉄板で作られ、実際のトンネル断面形状を有する模型トンネルで、テストセクションの長さは8.45mである。断面は半径0.25mの水平円筒の下端を切断した形状になっており、高さは0.406mである。トンネルの上流端にファンを設け、一定の速度でトンネル中に空気を流す。加熱源としてガスバーナをトンネルの下壁内に設置した。数値解析は実験に基づき、3次元非定常乱流 $k-\epsilon$ モデルを用いて行われた。なお、断面の形状を模擬するため、数値解析に一般座標系を導入した。

図1 モデルトンネル図

図1はモデルトンネル図である。換気されたトンネル内に局所的に火災が起こると、火災ブルームにより形成された熱気流が火災源の下流に流れてゆく。ここで温度成層特性とは、熱気流の熱が下壁近くまで十分拡散してゆくか、拡散が不十分で温度成層が形成されるかなどの特性を意味する。従って、それを解析するためにはまず温度成層の形成を客観的に評価する無次元パラメータを見出し、そして、換気流流速と加熱量を含めたマクロな環境変数との関係を明らかにしなければならない。

3・1 温度成層特性パラメータ S

トンネルの下流側における熱気流の挙動は火災発生後の時間経過とトンネル位置座標により変化する。火災が発生した直後の段階では、トンネル内の温度分布が激しく変化する。しかし、一定の時間がたてば、温度成層の特性を一種の準定常現象として取扱うことが可能である。われわれはまず準定常に達した時点で温度成層特性を解析し、加熱量と換気流流速を含めた環境変数とトンネル内の熱気流の成層特性パラメータとの相関関係を求める。そして、それらの結果を火災発生後の初期段階に応用し、時間履歴全体の温度成層特性を検討する。

トンネル内における熱気流の温度成層特性の解析において、本研究では、各 $y-z$ 平面ごとに温度成層の程度を評価することとし、成層の程度は x 方向にのみ変化すると考える。また、火災源より上流の逆流の生成領域では温度成層が容易に形成されるので⁽³⁾、本研究では火災源から下流領域での熱気流の温度成層特性に注目した。トンネル断面の温度成層の特徴を表す上壁近くと下壁近くの二点の代表温度の差を ΔT 、二点の間の距離を Δy とし、無次元温度成層特性パラメータ S を式(1)のように定義した。

$$S = \frac{1}{\Delta T_{avg}} \frac{\Delta T_{cf}}{\Delta Y} \dots\dots\dots (1)$$

但し、式(1)において、 $\Delta Y = \Delta y / H$, $\Delta y = y_c - y_f$.

断面上部と下部の温度を代表させる位置 y_c と y_f を定めるために換気のあるトンネル内の乱流境界層を考える。乱流境界層内の速度分布とのアナロジーから温度分布も粘性底層、緩和層及び対数領域に分割することが

できる。熱気流の断面代表温度は乱れによる熱輸送が卓越する対数領域に置く必要がある。つまり、壁からの距離として

$$y^+ \geq 30 \quad \dots\dots\dots (2)$$

が必要⁽⁴⁾である。但し、

$$y^+ = \frac{yu_w}{\nu} = \frac{y\sqrt{\tau_w/\rho}}{\nu} = \frac{yu_0\sqrt{C_f/2}}{\nu} \quad \dots\dots\dots (3)$$

である。一方、熱気流の全体的な成層特性を反映するために代表点の壁からの距離は $y^+ = 30$ 程度の値を取ることが望まれる。管内の完全発達した乱流境界層において、壁面摩擦係数 C_f とレイノルズ数 Re_D の間には次の経験式⁽⁵⁾がある。

$$C_f/2 = 0.039Re_D^{-0.25} \quad \dots\dots\dots (4)$$

例えば、2次元の実験 ($H=0.1\text{m}$, $D_H=0.17\text{m}$) で換気流流速が $u_0=0.37\text{m/s}$ の時、 $y^+ = 30$ として、式(3)、(4)を解くと、代表点の壁からの距離は $y=0.018\text{m}$ が得られる。

表1 2次元実験条件における
パラメータ $Gr^*/Re_H^{5/2}$ の値

$q(\text{W/m}^2)$	$u_0(\text{m/s})$	$Gr^*/Re_H^{5/2}$
8.49×10^3	0	∞
8.49×10^3	0.13	2.31×10^2
8.49×10^3	0.37	1.69×10^1
8.49×10^3	0.74	3.02
2.92×10^4	0	∞
2.92×10^4	0.13	7.94×10^2
2.92×10^4	0.37	5.84×10^1
2.92×10^4	0.74	1.03×10^1
5.44×10^4	0.37	1.08×10^2
5.44×10^4	0.75	1.91×10^1

表2 3次元実験条件における
パラメータ $Gr^*/Re_H^{5/2}$ の値

$q(\text{W/m}^2)$	$u_0(\text{m/s})$	$v_h(\text{m/s})$	$Gr^*/Re_H^{5/2}$
1.42×10^5	0.46	0.01	1.33×10^3
1.42×10^5	0.92	0.01	2.36×10^2
1.42×10^5	1.28	0.01	1.03×10^2
1.42×10^5	1.45	0.01	7.53×10^1
2.13×10^5	0.46	0.02	2.0×10^3
2.13×10^5	0.92	0.02	3.54×10^2
2.13×10^5	1.28	0.02	1.54×10^2
2.13×10^5	1.45	0.02	1.13×10^2
2.56×10^5	0.46	0.03	2.40×10^3
2.56×10^5	0.92	0.03	4.25×10^2
2.56×10^5	1.28	0.03	1.86×10^2
2.56×10^5	1.45	0.02	1.36×10^2

2次元実験で換気流流速が 0.13m/s の時には換気流が層流になるが、その時には、 $y^+ \geq 30$ の指針は意味がないので、 y_c と y_f の値は Newman⁽⁶⁾ が用いた経験値を採用し、 $y_c = 0.88H$, $y_f = 0.12H$ とした。実際の換気されたトンネル内では層流である場合はほとんどない。また、助走領域の乱流境界層の厚さは完全に発達した乱流境界層より薄く、壁面摩擦係数は式(4)で計算した値より大きいので、以上の位置の予測で十分である。

3次元トンネル内における熱気流の温度成層特性は $z=0$ における $x-y$ 断面の温度分布を用いて、それを代表として無次元温度成層特性パラメータ S を式(1)と同じく定義して解析した。但し、3次元の場合は $y-z$ 断面内の二次流れの影響で等温線に勾配が存在するので、断面全体の成層特性を把握するのは難しい。そのため、われわれは数値解析で $y-z$ 断面の温度分布を調べて、求められた温度成層特性の適用性を確かめた。

3・2 複合対流パラメータ $Gr^*/Re_H^{5/2}$

異なる換気流流速及び加熱量による強制対流と自然対流の関係の変化を表すために複合対流のパラメータが必要となる。乱流の場合、浮力が平均流だけでなく、流れの変動成分にも影響するので、層流に対する取扱方法で複合対流の支配パラメータを求めることはできない。田中ら⁽⁷⁾ は等熱流束加熱鉛直円管内上向流の複合対流において半理論的に複合対流領域の判別式を示したが、それは限られた条件のもとにしか適用できない。一方、実験または数値解析に基づき、Petukhov ら⁽⁸⁾ は水平円管内乱流を一様な熱流束で加熱する場合において現象がほぼパラメータ $Gr^*/Re^{2.6}$ で支配されることを示した。また、Wang ら⁽⁹⁾ は水平矩形チャンネル内の一様熱流束加熱で、チャンネル高さを代表長さとして、パラメータ Gr^*/Re_H^2 を用いたが、理論的に乱流複合対流領域の支配パラメータを定めることは難しい。本論文では複合対流パラメータを $Gr^*/Re_H^{5/2}$ にした。表1は2次元実験、表2は3次元実験における複合対流パラメータ $Gr^*/Re_H^{5/2}$ の値を示し、加熱部の面積 S_h はそれぞれ 0.0377m^2 , 0.0216m^2 である。

表1と表2から分かるようにパラメータ $Gr^*/Re_H^{5/2}$ は加熱量の変化よりも換気流の変化に大きく影響される特徴を持っている。

3・3 温度成層の判別

トンネル内に火災が起きた際に、例えば、人の避難環境を保つには、強い安定成層が要求される。安定成層の程度を示すために Newman⁽⁶⁾ は無次元温度 $\Delta T_{cf}/\Delta T_c$ を提唱した。 $\Delta T_{cf}/\Delta T_c$ は特定のトンネルに対し、1になれば成層とし、0になれば混合しているとするという簡易な推定基準になるが、スケールに関連していないの

で、その一般性を欠く。そのため、本研究では T_c と T_f の位置を改めて壁面から $y^+ = 30$ の所に定義し、表 1 と表 2 の各実験における無次元温度 $\Delta T_{cf}/\Delta T_c$ と S の相関を図 2 と図 3 に求め、成層の強さに対する判別基準の一般化を試みた。また、図 3 に 3 次元の整理結果との比較のため、2 次元の整理結果を破線で示した。図 2 と図 3 はともに $\Delta T_{cf}/\Delta T_c$ と S の良い相関を示す。

図 2 実験による 2 次元トンネル内の温度成層

図 3 実験による 3 次元トンネル内の温度成層

図 2 と図 3 に示すように、 S の値によって三つの成層領域が定義される。 $S > 1.5$ (2 次元の実験では $\Delta T_{cf}/\Delta T_c = 0.85$, 3 次元の実験では $\Delta T_{cf}/\Delta T_c = 0.92$) の第 1 領域では熱気流が完全に成層化している。 $S < 0.24$ (2 次元の実験では $\Delta T_{cf}/\Delta T_c < 0.19$, 3 次元の実験では $\Delta T_{cf}/\Delta T_c < 0.28$) の第 3 領域では、熱気流は混合している。その間の第 2 領域は中間領域である。領域 1 と 2 の違いは S に対する無次元温度 $\Delta T_{cf}/\Delta T_c$ の勾配が不連続になった時の S の値で判定し、領域 2 と 3 の違いは温度成層の悪化を $\Delta T_{avg}/\Delta T_c > 1$ となることで判定し、その境界の S の値で区別する。2 次元実験と 3 次元実験の整理結果を比較すると、限界の $\Delta T_{cf}/\Delta T_c$ の値は両者で異なるが、 S の値は変わらない。 S が熱気流の温度成層の程度を反映し、また、異なるスケールのトンネルに適用できることが確認された。

4. 結果及び検討

4.1 熱気流の温度成層のパターン

熱気流の温度成層特性を定性的に把握するために、まず数値シミュレーションの解析結果に基づき、温度成層の様子を調べた。図 4 は加熱熱流束 $q = 2.92 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ 、換気流流速 $u_0 = 0.13, 0.37, 0.74 \text{ m/s}$ の条件における、加熱後 40 秒経過した時点での等温線図で、2 次元解析結果である。同様に、図 5 は加熱熱流束 $q = 1.42 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 、換気流流速 $u_0 = 0.46, 0.92, 1.28 \text{ m/s}$ の条件での 3 次元解析の結果である。図 4 と図 5 から分かるように、換気流流速が大きい時には、換気流に抑えられて、高温ブルームの中心が天井壁に衝突する点は火災源の位置からかなり離れた下流側にある。加熱源近傍の広い領域で温度分布は不安定状態にある。この

図 4 異なる換気流流速における等温線図 (2 次元数値解析の場合, $t = 40 \text{ s}$, 単位: $^{\circ}\text{C}$)

図5 異なる換気流流速における等温線図 (3次元数値解析の場合, x-y 平面, $t=40\text{s}$, 単位: $^{\circ}\text{C}$)

図6 速度ベクトル図 (3次元数値解析の場合, y-z 平面, $t=40\text{s}$, 単位: $^{\circ}\text{C}$)

ような流動状態は内部拡散状態とも呼ばれる。換気流流速が小さい時には、温度分布は上流側に逆流が現れ、火災源のごく近傍を除き、トンネル内に安定な成層が形成され、いわゆる層状流動状態となる。

3次元解析の等温線図では熱がトンネル内に広がり、特に火災源近傍に広い高温域が存在している。その原因として、一部は数値解析による過大な評価にあるが、その他、断面の二次流れが熱気流の流動拡散に大きな影響を与えたことも十分考えられる。図6に火災源近傍断面内の二次流れの速度ベクトルはそれより下流側の断面内の速度ベクトルに比べ、数倍程度高くなっていることを示す。

また、ここには示していないが、換気流流速を一定にして、異なる加熱量による温度分布の変化も調べた。その結果として熱気流の温度成層パターンは加熱量よりも換気流流速の変化によって大きく左右される。この特性は複合パラメータ $Gr^*/Re_H^{5/2}$ によく反映されている。

4.2 $Gr^*/Re_H^{5/2}$ と S の相関関係

図7は2次元のトンネル実験で準定常に達した時に求められた下流方向の四つの断面における $Gr^*/Re_H^{5/2}$ と成層特性パラメータ S との関係である。それによると、火災源の近傍 ($x/H = 2.1$) では成層が得にくく、 $Gr^*/Re_H^{5/2} < 20$ になると、 $S < 0.24$ となり、不安定な

図7 $Gr^*/Re_H^{5/2}$ が成層特性パラメータ S における影響 (2次元実験の場合) 図8 $Gr^*/Re_H^{5/2}$ が成層特性パラメータ S における影響 (3次元実験の場合)

温度成層を形成する。一方, $x/H = 6.6$ の断面では, $Gr^*/Re_H^{5/2} < 3$ となると, 温度成層が悪化する。しかし, $x/H > 10$ であれば, $Gr^*/Re_H^{5/2} = 3$ の時にも, $S > 0.8$ なので, 安定した成層が得られる。また, 図7から $Gr^*/Re_H^{5/2} > 10^2$ であれば, $x/H = 2.1$ でも, $S > 0.9$ となり, かなり安定した成層が得られる。

図8は同じく $Gr^*/Re_H^{5/2}$ と成層特性パラメータ S との関係性を3次元のトンネル実験から求めた結果である。

図7と比べると, 加熱源近傍で安定温度成層が得られにくい傾向は類似している。しかし, 図8で, 例えば火災源に近い断面 ($x/H = 2.46$) では $Gr^*/Re_H^{5/2} < 2 \times 10^2$ となると, $S < 0.24$ となり不安定な温度成層を形成する。 $x/H = 4.93$ の断面でも, $Gr^*/Re_H^{5/2} < 7 \times 10^1$ となると, 温度成層が悪くなる。つまり, 同程度の温度成層を得るために2次元の実験より3次元の実験のほうがより大きな $Gr^*/Re_H^{5/2}$ の値を要求している。しか

も、温度成層が悪化する時に $Gr^*/Re_H^{5/2}$ に対する S の勾配が大きい。それは3次元の場合にトンネルの断面内、特に加熱源近傍の断面において、二次流れが顕著となり、その流動が断面内の熱気流の混合に寄与したと思われる。一方、図8で加熱源から遠い、 $x/H = 9.85$ と $x/H = 12.32$ の両断面では、 $Gr^*/Re_H^{5/2} = 75.3$ の場合でも、 $S > 1.2$ となり、かなり安定した成層が得られる。

4・3 非定常時の温度成層

実際のトンネル火災の際に避難環境などを考える時には、火災発生後の初期段階における熱気流の温度成層の挙動の時間変化が重要である。

図9は2次元の数値解析モデルで、 $Gr^*/Re_H^{5/2}$ をパラメータとして、 S のトンネルの下流方向の分布の時間変化を計算したものである。図7に示したように定常

時の $Gr^*/Re_H^{5/2}$ と S の量的な対応関係は図9からもはっきり見られる。但し、非定常の場合、 $Gr^*/Re_H^{5/2} = 7.94 \times 10^2$ の時、安定な成層は非常に速い時点で加熱源近傍から現れる。 $Gr^*/Re_H^{5/2} < 10^2$ になると、加熱源近傍で不安定な成層が現れる。

また、図9の各ケースにおける時間変化を追ってみると、同じ実験条件において加熱してから時間がたつに従って、 S の値が変化し、特に $Gr^*/Re_H^{5/2} = 5.84 \times 10^1, 1.03 \times 10^1$ の場合、加熱源近傍に存在する不安定温度成層の範囲は徐々に小さくなる傾向がある。しかし、その程度はそれほど大きくない。トンネル内の熱気流の温度成層は初期段階から複合対流パラメータ $Gr^*/Re_H^{5/2}$ によってほぼ推定することができる。

このような特徴は3次元の解析においても同様である。

図9 時間経過に伴う成層特性パラメータ S の変化 (2次元数値解析の場合)

図10 異なる換気流速における等温線図 (3次元数値解析の場合、 y - z 平面、 $t=40s$, 単位: $^{\circ}C$)

4・4 断面内の温度成層

図10は、3次元の数値シミュレーションによる加熱熱流束 $q = 1.42 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ 、換気流流速 $u_0 = 0.46, 0.92, 1.28 \text{ m/s}$ の条件で、加熱後 40s を経過した時点の断面内温度分布である。

加熱源に近い断面 ($x/H = 2.46$) ではブルームより生成された熱気流が断面の中心に集中している。その断面では同じ断面の高さにおいて、中心部分の温度が両側の温度より高く、温度成層も劣っている。その時、中心断面の温度を使って成層特性を評価すると、両側の成層状況にとっては、厳しい評価をすることになる。そして、下流方向の断面に行くに従って、熱気流が拡散され、トンネルの天井壁面に沿った高温領域が形成され、ある断面になったら、等温線がほぼ平行になる。この温度分布の様式では断面温度成層は全体に一樣な評価が得られる。それより、更に下流側に行くと、逆方向の温度勾配が現れ、同じ断面の高さにおいて、中心部分の温度が両側の温度より低い。それらの断面において、成層特性パラメータ S を用いて評価しても結果が大きく変わらないと推定できる。

以上の分析は、加熱源が断面の中心にある時の結果であり、3次元トンネル内の温度成層特性は中心断面の温度を使って評価することはおおよそ妥当であることが分かった。もちろん、加熱源が断面の中心にない場合も予想される。その場合は別途の詳細な検討が必要である。

5. 結 言

火災時におけるトンネル内の気流の成層特性について、換気流流速と加熱量が熱気流に与える影響を調べた。それらの結果から、以下の知見を得た。

(1) トンネル内の熱気流の温度成層はトンネル断面における二つの特徴温度を使って定義される成層特性パラメータ S で定量的に判断できる。 $S > 1.5$ の時、非常に安定な成層が得られ、 $S < 0.24$ の時には、熱気流の成層が悪化あるいは不安定成層になる。

(2) 温度成層特性パラメータ S と複合対流のパラメータ $Gr^*/Re_H^{5/2}$ の関係を実験と解析によって得た。3次元の場合に、 $Gr^*/Re_H^{5/2} > 2 \times 10^2$ の時には、加熱源のごく近傍まで常に安定した温度成層が得られる。また、 $x/H > 10$ であれば、 $Gr^*/Re_H^{5/2} < 10^2$ になっても、依然強い安定な温度成層が得られる。

(3) 温度成層は換気流流速と加熱量によって変わり、しかも、場所によっても、時間によっても変化する。熱気流の温度成層は加熱量より換気流流速に大きく影響される。言い替えれば、換気流流速を変えることにより、トンネル内の温度成層の状態をコントロールすることが可能である。従って、予測される加熱量に対して、換気流流速を制御することにより安全な避難環境を確保することが可能であろう。

文 献

- (1) 薛・飛原・斎藤, 機論, 57-536, B(平3), 1457.
- (2) 薛・飛原・斎藤, 第28回日本伝熱シンポジウム講演論文集, (平3-5), 688.
- (3) Hwang, C. C., Wargo, J. D., *Combust. Flame.*, 66(1986), 171.
- (4) 甲藤・ほか4名, 伝熱学特論, (昭59), 34, 養賢堂.
- (5) Kays, W. M., Crawford, M. E., *Convective Heat and Mass Transfer*, (1980), 199, McGraw-Hill Book Company.
- (6) Newman, J. S., *Combust. Flame.*, 57(1984), 33.
- (7) 田中・羽田野・丸山, 機論, 52-484, B(昭61), 4014.
- (8) Petukhov, B. S., Polyakov, A. F., Martynenko, O. G., *Heat Transfer*, Vol.1(1982), 343.
- (9) Wang, G. S., Incropera, F. P., Viskanta, R., *Trans. ASME, J. Heat Transf.*, 105-4 (1983), 817.