

薄鋼板の無酸化加熱の生起条件と最適温度の予測

石橋 一 弘*・柘 植 俊 一*2

Aerothermochemical Considerations on Direct Reductive Heating of a Flat Steel Plate

Kazuhiro ISHIBASHI and Shunichi TSUGÉ

Synopsis :

The Direct Reductive Heating (DRH) was great practical advantage in continuous heating of thin steel plates compared with the conventional indirect heating conducted under nitrogen environment. DRH has been so far employed experimentally with some success at the level of know-hows. However, its theoretical background has not been given as to what aerothermochemical conditions necessary for reduction at a steel surface to be realized. An computational approach for the 2-D flame held in the boundary layer of a steel surface shows some evidence of DRH judging from the concentration profiles of chemical species. In fact, the ratio of CO_2/CO the most crucial measure for the reduction goes down to less than 0.1 on the surface just behind the flame foot, for a narrow wall temperature range around 900°C . It is concluded thereby that a fuel-rich hydrocarbon-air mixture can generate a reductive region behind the flame front where the oxygen is depleted if the cooling effect due to the wall is favorable for formation of more CO rather than CO_2 .

Key words : heating ; plate ; computer ; simulation ; reduction ; direct reductive heating ; surface ; boundary layer.

1. はじめに

無酸化加熱が可能であることの理論的根拠を探る目的で、鋼板の平板境界層で保炎され、かつ鋼板により冷却される火炎の構造についての数値解析を行った。その結果、火炎面背後に鋼板表面温度の最適値 900°C を中心としてある狭い温度範囲において CO_2 よりも CO がきわめて多く生成することを確認した。これは鋼板による冷却が燃焼反応に大きく影響し、反応経路において通常の火炎よりも多くのラジカル (CH_2O , CHO 等) が発生した結果である。還元機構はこれらのラジカルが酸素を捕捉し、(CO_2 でなく) CO の生成に寄与すると考えられる。これらのラジカルの生成に必要な最適温度を予測することができ、還元燃焼の生起条件を示すことができた。

薄鋼板の加熱方式は、現在酸素を含まない雰囲気中での間接加熱が主流であるが、この方式は、加熱能力が低く、炉温の応答性が悪く、板幅対応加熱ができない等の問題点も多い。これに代わる技術として燃焼火炎の持つ

還元作用を利用した高い加熱能力を有し、かつ表面品質を全く損なわない直接加熱方式が注目され、実用化されようとしている。しかしながら、直接加熱方式に用いるバーナーの火炎がいかなる条件下で還元作用を持つかははっきり特定されていなかった。

通常、薄鋼板をバーナーで直接加熱すると、鋼板表面は燃焼ガス中の酸化性物質 (H_2O , CO_2 または未反応の O_2 等) によって黒く酸化してしまう。しかし、さまざまな実験により次のことが確認されている^{1)~3)}。

1) 空気比 0.7~0.9 で燃焼する火炎内に還元領域が存在する(ただし火炎外は弱酸化性雰囲気、火炎中の還元範囲はバーナー形式により異なる)。

2) 還元する表面温度の範囲は $450\sim 900^\circ\text{C}$ である(低温でいったん弱酸化後還元する)。

3) 燃焼がバーナーの形式によって鋭敏に影響される。

4) 空気-ガスの混合状態は予混合でなくても可能。そのほかに、空気予熱の効果及び試料板厚の影響等も調べられている。ただし、無酸化加熱の評価としては酸化

平成元年 5 月 10 日受付 (Received May 10, 1989)

* 筑波大学大学院 (Graduate School, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennoudai Tsukuba 305)

*2 筑波大学構造工学系 工博 (University of Tsukuba, Institute of Engineering Mechanics)

量の定量化が困難なため、テストピース表面の酸化皮膜の厚さが 100 \AA 以下で無酸化すなわち還元作用あり、としてある。燃料は COG (コークス炉ガス) を用いた。COG と空気との混合ガスの組成 (空気比 0.8) を Table 1 に示す。

COG 燃焼ガスが鉄に対して酸化性であるか還元性であるかは、それが平衡状態にあるとして $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 比と CO_2/CO 比をパラメーターとして決められている⁴⁾ (Fig. 1)。そこで、最も還元作用が安定した空気比 0.8 の場合について、まず COG 燃焼ガス組成を化学平衡計算のプログラム⁵⁾を用いて計算した。バーナーノズルからテストピース (実験用銅板片) までの温度域 ($1400 \sim 700^\circ\text{C}$) での燃焼ガスの平衡組成を Table 2 に示す。Fig. 1 と比較してみると $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 比及び CO_2/CO 比とも Fig. 1 の範囲を超えているが、すべての点は完全な酸化域にあると予想され、この還元の現象は平衡理論では説明できないことがわかった。

次に、還元作用の原因として考えたのは、テストピース直前の急激な冷却による燃焼ガスの化学組成変化 (非平衡状態) である。すなわち、非平衡状態において、 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ 比と CO_2/CO 比が変化する、または還元触媒性の強い中間生成物 (CH_2O , CHO 等) が生成する、と

Table 1. The composition of mixed gas COG and air.

Species	Mole fraction
O_2	0.1620
N_2	0.6550
H_2	0.1040
CO	0.0143
CO_2	0.0046
CH_4	0.0601

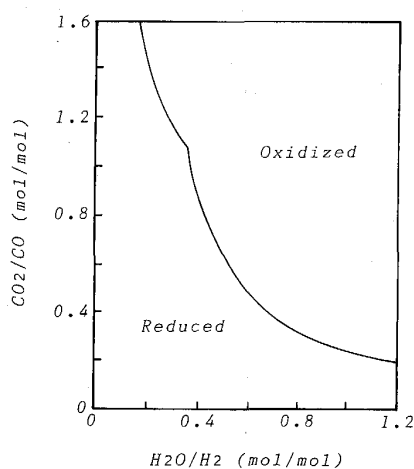


Fig. 1. Criterion on oxidation/reduction of the steel surface based on the COG combustion product.

考えた。

バーナーノズルより噴出された燃焼ガスはテストピース直前までは平衡状態にあると仮定し、燃焼ガスの定常1次元流支配方程式を数値的に解いた。その結果、中間生成物に関しては、強い還元触媒性を示すホルムアルデヒド (CH_2O) がモル分率にして 10^{-6} のオーダーで生成しているが (平衡理論では $10^{-9} \sim 10^{-10}$)、安定化学種 (CO_2 , CO , H_2O , H_2 等) の組成は平衡理論とほとんど変わらず、還元現象は説明できなかった。

以上の結果から、化学/熱平衡に達した燃焼ガスには還元能力はなく、火炎自体に無酸化加熱の原因があることが判明した。したがって、火炎内部の還元域の存在を調べるため、COG の定常1次元火炎の構造を調べた⁶⁾。

得られた温度・安定化学種の分布を Fig. 2 に示す。火炎構造の特徴としては、メタン CH_4 の火炎構造に水素 H_2 の火炎構造を付加した形態となっており、中間生成物並びに最終生成物ともこれといて特異な点はない。温度が急激に上昇する領域 (火炎帯または反応帯) の厚さは約 0.3 mm で、計算により燃焼速度を求めてみると約 0.4 m/s であった。

Table 2. The mole fractions and the mole ratios of the species at equilibrium.

Species	700°C	900°C	1100°C
CO_2	0.0781	0.0693	0.0627
CO	0.0177	0.0265	0.0330
H_2O	0.1771	0.1859	0.1924
H_2	0.0650	0.0562	0.0496
CO_2/CO	4.4224	2.6190	1.8995
$\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$	2.7254	3.3095	3.8804

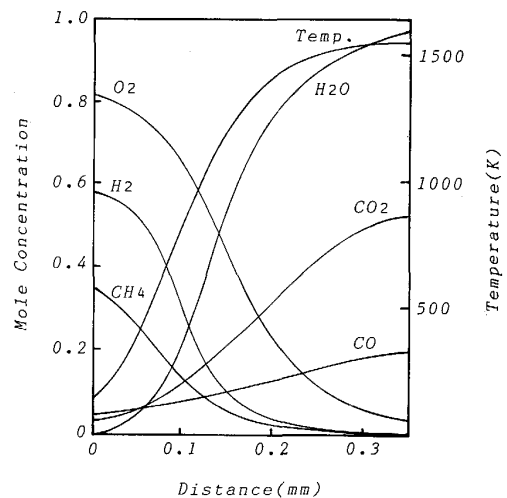


Fig. 2. Distributions of species concentrations and temperature in 1-D flame of a COG/air premixed gas.

火炎内部の後方領域（未燃側）においては H_2O/H_2 比と CO_2/CO 比が小さいが、未反応の酸素が多く存在しており、これによる鋼板の酸化が起り、還元作用はなくなってしまうと考えられる。つまり、熱損失のない火炎の中では燃焼反応のどの非平衡段階でみても還元作用は起こっていないことがわかった。

残った唯一の可能性として、還元作用は火炎構造が個体壁の冷却によって変化することに関係すると考えられる。そこで、鋼板壁面による火炎の冷却の影響に注目し、火炎表面が壁面による冷却を受け、その火炎構造が変化する2次元の過程を調べた。

2. 解析モデル

従来、検証実験はいずれも火炎を含む流れがテストピースに直角に当たるので、COGの2次元流れの様相は淀み点流れ⁷⁾となる。このとき、壁面近傍における淀み点流れは平板境界層と定性的に同じであることがわかっており、さらに酸化還元現象は鋼板壁面近傍に限られているので、火炎と冷熱源としての鋼板壁面の干渉を最も厳密に扱える層流平板境界層について解析する。

2.1 支配方程式系

壁面に沿って流れている予混合ガスが壁面近くの低速部で保炎され、壁面 ($T=T_w$) によって冷却される過程は、境界層近似を用いて次のような支配方程式系によって記述される⁸⁾。

連続の式：

$$\frac{\partial}{\partial x} \rho u + \frac{\partial}{\partial y} \rho v = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

運動方程式：

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad \dots\dots\dots (2)$$

エネルギー式：

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho C_p} \sum h_a W_a \quad \dots\dots\dots (3)$$

化学種の保存式：

$$u \frac{\partial Y_a}{\partial x} + v \frac{\partial Y_a}{\partial y} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_a \frac{\partial Y_a}{\partial y} \right) + \frac{1}{\rho} W_a \quad \dots\dots\dots (4)$$

状態方程式：

$$p = \rho R T \sum \frac{Y_a}{m_a} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、流れ方向に x 軸、壁面に垂直な方向に y 軸をとり、おのおのの速度成分を u, v とする。 p, T, ρ はそれぞれ圧力、温度及び密度、 μ, λ, C_p はそれぞれ粘

性係数、熱伝導係数及び定圧比熱、 Y_a, D_a, W_a, h_a はそれぞれ a 成分の質量分率、拡散係数、生成速度及び生成エンタルピーである。また、今考えている温度域では、輻射による熱損失はよほど大きな系（例えば山火事）を除いて無視できるので考慮していない。

壁温を一定としてこれを与える ($T=T_w$) ことの妥当性について一言しておく。実験では火炎を鋼板に吹きつけるので、 T_w は一定ではなくある時定数で上昇する。しかし、この上昇時間は反応時間と流れの特性時間（板の長さ/吹きつけ速度）に比べるとはるかに大きく、このことは支配方程式(1)~(4)にあらわれる非定常項 ($\partial/\partial t$) を無視し、 T_w をパラメーターとして定常流を解けばよいことを示している。 T_w を断熱火炎温度に比べて小さい値に強制することが冷却効果を代弁しており、これが解析で最も重要なパラメーターとなる。

2.2 独立変数の変換

次のようにして定義される流れ関数 ψ を導入して、独立変数を (x, y) から (τ, ψ) に変換する。この時、連続の式(1)式は自動的に満足される。

$$x = \tau \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$\psi : \left(\frac{\partial \psi}{\partial x} \right)_v = -\rho v \left(\frac{\partial \psi}{\partial y} \right)_x = \rho u \quad \dots\dots\dots (7)$$

すると、式(2)、式(3)及び式(4)は以下のような方程式に帰結する。

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\rho u \mu \frac{\partial u}{\partial \psi} \right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{1}{C_p} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\rho u \lambda \frac{\partial T}{\partial \psi} \right) + \frac{1}{\rho u C_p} \sum h_a W_a \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\frac{\partial Y_a}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\rho^2 u D_a \frac{\partial Y_a}{\partial \psi} \right) + \frac{1}{\rho u} W_a \quad \dots\dots\dots (10)$$

この支配方程式系は放物形の偏微分方程式なので、与えられた境界条件の下で初期値から出発して流れ方向に陽的に解くことができる。

2.3 支配方程式の数値計算

Fig. 3 に境界条件及び初期条件を示す。一様流速度 U_0 は 1.5 m/s とした。数値計算の結果は U_0 の（言いかえるとレイノルズ数の）選択にきわめて鈍くしか依存しない。また現実の流れは乱流であるが、それは(8)~(10)式の中で輸送現象（レイノルズストレス、乱流熱伝達、乱流拡散）を数倍大きくする効果がある。しかし、このような流れは、現在、あいまいな半経験定数を用いず、これによって結論の明確さがばやけることを恐れたので「第一原則」のみを用いて議論のできる層流に話を限定した。

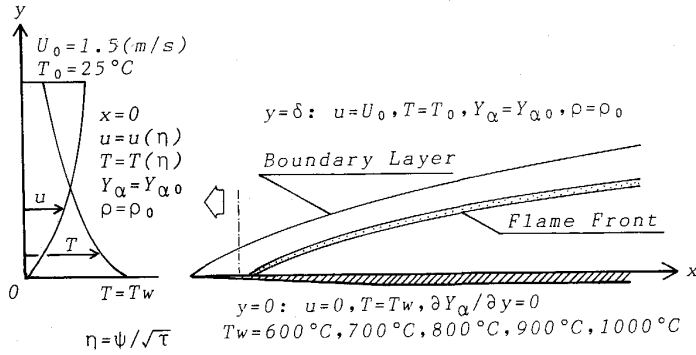


Fig. 3. Boundary and initial conditions.

Table 3. The elementary reaction mechanism and associated rate coefficients.

No.	Reaction	A*	a*	E*
1	O ₂ +H→OH+O	2.00×10 ¹⁴	0.00	70 300
2	OH+O→O ₂ +H	1.40×10 ¹³	0.00	3 200
3	O+H ₂ →H+OH	1.50×10 ⁷	2.00	31 600
4	H+OH→O+H ₂	6.73×10 ⁶	2.00	22 350
5	OH+H ₂ →H+H ₂ O	1.00×10 ⁸	1.60	13 800
6	H+H ₂ O→OH+H ₂	4.62×10 ⁸	1.60	77 500
7	OH+OH→H ₂ O+O	1.50×10 ⁹	1.14	420
8	H ₂ O+O→OH+OH	1.49×10 ¹⁰	1.14	71 140
9*2	H+O ₂ +M→HO ₂ +M	2.30×10 ¹⁸	-0.80	0
		(4.485×10 ¹⁶)	(-1.8)	
10	HO ₂ +H→OH+OH	1.50×10 ¹⁴	0.00	4 200
11	HO ₂ +H→H ₂ +O ₂	2.50×10 ¹³	0.00	2 900
12	HO ₂ +H→H ₂ O+O	3.00×10 ¹³	0.00	7 200
13	HO ₂ +OH→H ₂ O+O ₂	6.00×10 ¹³	0.00	0
14	CO+OH→CO ₂ +H	4.40×10 ⁶	1.50	-3 100
15	CO ₂ +H→CO+OH	4.96×10 ⁸	1.50	89 710
16	CH ₄ +H→H ₂ +CH ₃	2.20×10 ⁴	3.00	36 600
17	H ₂ +CH ₃ →CH ₄ +H	8.83×10 ²	3.00	33 530
18	CH ₄ +OH→H ₂ O+CH ₃	1.60×10 ⁶	2.10	10 300
19	CH ₃ +O→CH ₂ O+H	7.00×10 ¹³	0.00	0
20	CH ₃ +OH→CH ₂ O+H+H	9.00×10 ¹⁴	0.00	64 800
21	CH ₃ +OH→CH ₂ O+H ₂	8.00×10 ¹²	0.00	0
22	CH ₃ +H→CH ₄	6.00×10 ¹⁶	-1.00	0
23	CH ₂ O+H→CHO+H ₂	2.50×10 ¹³	0.00	16 700
24	CH ₂ O+OH→CHO+H ₂ O	3.00×10 ¹³	0.00	5 000
25	CHO+H→CO+H ₂	2.00×10 ¹⁴	0.00	0
26	CHO+OH→CO+H ₂ O	1.00×10 ¹⁴	0.00	0
27	CHO+O ₂ →CO+HO ₂	3.00×10 ¹²	0.00	0
28	CHO+M→CO+H+M	7.10×10 ¹⁴	0.00	70 300
29	CH ₃ +H→CH ₂ +H ₂	1.80×10 ¹⁴	0.00	63 000
30	CH ₂ +O ₂ →CO ₂ +H+H	6.50×10 ¹²	0.00	6 300
31	CH ₂ +O ₂ →CO+OH+H	6.50×10 ¹²	0.00	6 300
32	CH ₂ +H→CH+H ₂	4.00×10 ¹³	0.00	0
33	CH+H ₂ →CH ₂ +H	2.79×10 ¹³	0.00	12 610
34	CH+O ₂ →CHO+O	3.00×10 ¹³	0.00	0
35	CH ₃ +OH→CH ₂ +H ₂ O	1.50×10 ¹³	0.00	20 930
36	CH ₂ +OH→CH ₂ O+H	2.50×10 ¹³	0.00	0
37	CH ₂ +OH→CH+H ₂ O	4.50×10 ¹³	0.00	12 560
38	CH+OH→CHO+H	3.00×10 ¹³	0.00	0
39	H ₂ +O ₂ →OH+OH	8.00×10 ¹⁴	0.00	88 287
40	OH+OH→H ₂ +O ₂	2.76×10 ¹³	0.00	112 554

* Here Cm, mol, K, and J are the units with the notation : W=A×T_a×exp(-E/RT)
 *2 () : Catalytic efficiencies were taken

速度分布, 温度分布の初期値は層流境界層における相似解を用いた. 各成分濃度の y 方向分布の初期値は一樣とした. 壁面での各成分濃度については濃度勾配がない(∂Y_α/∂y=0, 触媒作用なし)とした. 壁面温度 T_w は一定とし, 600, 700, 800, 900 及び 1000°C の五つの場合をおのこの計算した.

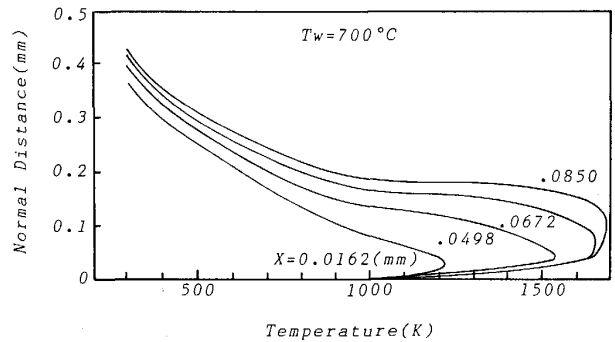


Fig. 4. Distribution of the temperature across the boundary layer near ignition point.

燃焼生成物としては O₂, O, H₂, H, OH, HO₂, H₂O, CO, CO₂, HCO, CH₂O, CH, CH₂, CH₃, CH₄ の 15 成分を考慮し, 素反応式については正・逆合わせて 40 式を採用した (Table 3)⁹⁾. C_p 等の熱化学定数は JANAF 数表による. D_α 及び μ については HIRSCHFELDER, λ については EUCKEN の近似式を用いて求めた¹⁰⁾.

計算にはスタガードグリッドを用いた. グリッドの幅は壁面付近で狭く, 一樣流側にいくにしたがって広くなるようにして, 最も温度勾配のきつい壁面近傍での誤差を小さくするように考慮した. 支配方程式を差分化するにはあたっては, 対流項には風上差分を, その他の項には中心差分を用いた. τ 方向に計算を進め, 火炎帯最上部が境界層外に出たときに計算を止めるようにした.

3. 結果と考察

3.1 温度分布について

各壁面温度について数値計算を行った結果, 断熱火炎温度は約 1400°C となり, 実験で測定された値約 1300°C よりおよそ 100°C ほど高い.

Fig. 4 に発火点付近の温度分布 (壁面温度: T_w = 700°C の場合) を示す. 各パラメーターは発火点からの距離 (下流へ向かって) を示す. 火炎は壁面で保炎され, 境界層内を伝播していく.

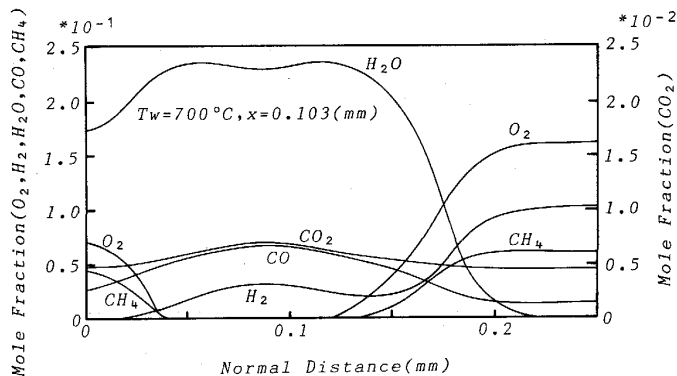


Fig. 5. Distributions of the species concentrations across the boundary layer at 0.103 mm downstream of the ignition point.

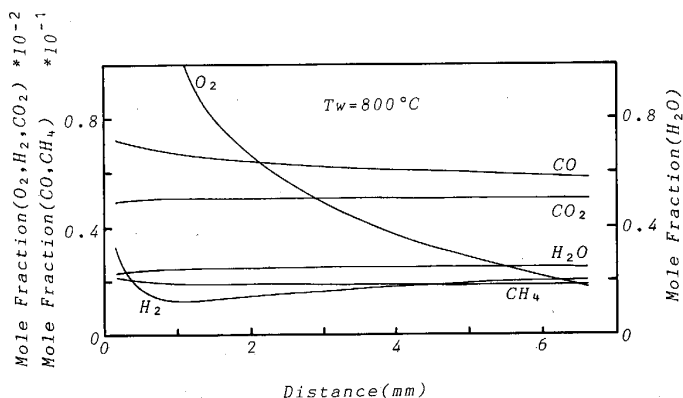


Fig. 6. Streamwise distribution of the species concentrations along the surface.

主流方向に計算を進めていくと、最高温度付近の温度分布曲線は鈍い傾きとなり、火炎帯は立ち上がり、境界層を突き抜けて一様流内を一定の傾きで無限上方に伝播する。

3.2 化学種の挙動

Fig. 5 は安定化学種の壁面に対して垂直方向の分布を示したものである。火炎帯上部 ($y=0.13$ mm 付近) から壁面に至る範囲で、 H_2O/H_2 比は平衡組成と大差なく、 H_2 の燃焼はほぼ完結しているが、 CH_4 の燃焼は完結していない。 CH_4 の燃焼においては壁面の冷却効果により CO_2 の生成が阻害され、 CO の生成が促進されている。

Fig. 6 は安定化学種の流れ方向 (壁面上) の分布を示したものである。 O_2 は主に残存の CO の酸化に使用され減少していく。 CH_4 の燃焼は壁面からの冷却効果を受けたままゆっくりと進行し、完結していく。

壁面近傍における化学種の挙動を発火から燃焼完結に至るまで調べてみると次のようなことがわかる¹¹⁾。まず、発火後急速に H_2 の燃焼が進行する。火炎帯は壁面より上方へ成長していき、この内部では H_2 , CH_4 ともに燃焼が進行する。同時に壁面近傍では火炎帯により O_2 が遮断され、 CH_4 の燃焼が火炎空気比よりも O_2 不足の状態で行進している。壁面から冷却の効果を継続し

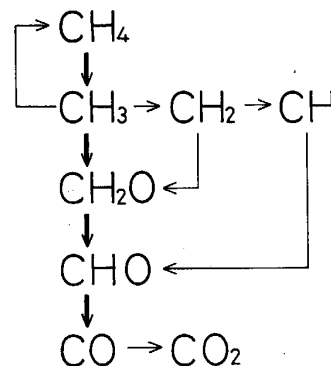


Fig. 7. CH_4 decomposition process dominated at low temperatures.

て受ける CH_4 の分解反応過程においてはホルムアルデヒド CH_2O が多く生成し、この時 O_2 を捕捉する。そして、 CH_2O は O_2 を捕捉したまま $CH_2O \rightarrow CHO \rightarrow CO$ と反応し燃焼が完結する¹²⁾¹³⁾ (Fig. 7)。壁面温度の違いによる冷却効果の差異はこの反応過程に直接関与し、ラジカル (CH_2O , CHO 等) の発生を促すことにより還元能力の強さを左右すると考えられる。そこで CO の生成に注目すれば還元最適温度範囲が決定できると考え、壁面温度の違いによる CO 生成への影響を調べた。

Fig. 8 は酸化・還元指標となる CO_2/CO 比 (壁面

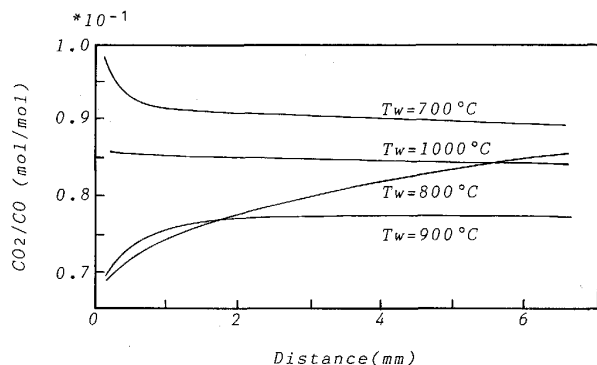
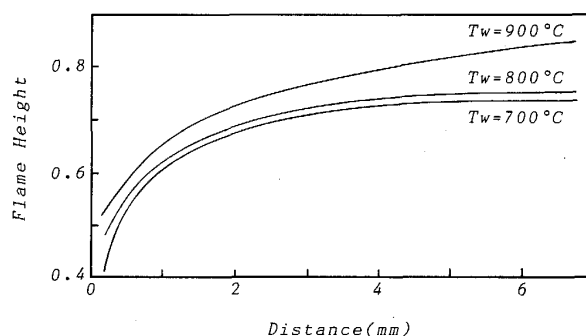


Fig. 8. Streamwise distribution of CO_2/CO ratio on the surface within the 'sensitive' wall temperature range.



Flame height : Nondimensionalized by thickness of boundary layer
Fig. 9. Loci of the flame front in the boundary layer as dependent on the wall temperature.

上)を壁面温度をパラメーターとして示したものである。H₂O/H₂比については、各壁面温度において平衡組成と大差なく、流れ方向への変化もほとんどない。ラジカルの発生状況を考えてみると、壁面温度が700~1000°CにおいてはCO₂/CO比が極めて小さいので(0.1以下)ラジカルの発生が促され、十分な還元能力を有すると考えられる。さらに、壁面温度の100°C程度の違いが還元能力の差に鋭敏に反映していることが認められ、実験で還元最適温度範囲が存在するという事実と符合している。Fig. 8によると最も好ましい温度は900°Cである。実験により得られた最適温度範囲は700~800°Cであり、100°Cほどの開きがある。壁面温度が700°C未満または1000°Cを超えるときはCO₂/CO比が大きくなるので(0.1以上)、十分な還元能力を有し得ないと考えられる。また、壁面温度に対するCO₂/CO比の変化率も大きくなり、還元域から大きくはずれてしまう。

Fig. 9は、境界層厚さで無次元化した火炎帯の高さを壁面温度をパラメーターとして示したものである。壁面温度が高くなると火炎帯の成長が早くなり、短い距離において境界層外に出てしまう。そうすると壁面による冷却の効果が及ばなくなり、還元域が縮小すると考えられる。

3.3 考察

平板境界層で保炎される火炎構造の解析により、無酸化加熱が可能であることが理論的に示された。壁面の触媒作用を考慮せずに肯定的結論が得られたということは、還元が気体(Bulk)反応であって表面反応でないことを示している。つまり鉄以外の金属でも還元が同じように起こることを言っており、これは銅について実験的に確かめられている¹⁴⁾。ラジカル(CH₂O, CHO等)の発生が促されることにより還元能力の強さが左右され

るとすれば、未反応O₂の存在下でも還元できる領域が存在する可能性がある。またH₂の燃焼速度はC₁系及びC₂系炭化水素の燃焼速度に比べ非常に大きいので、H系のイオン・ラジカルよりもC系のラジカル(CH₂O, CHO等)の方が存在時間が長く、還元能力を強く支配すると思われる。

検証実験において最も説明のつかなかった現象、すなわち、鋼板の表側(火炎側)は還元されるが裏側は酸化されるという現象も、これらのことを考えると容易に説明できる¹⁵⁾。表側においては火炎が平板境界層で保炎され、それが酸素を遮断しているので無酸化加熱が可能となるが、裏側では火炎の流れと共に境界層が剥離して、通常の酸化性雰囲気となる。

4. 終わりに

還元機構はラジカル等の反応中間体によるものと考えられているが、火炎中のラジカル等を直接測定することは困難である。したがって、ラジカルの代わりにCOの生成に注目することにより、ラジカルの生成に必要な最適温度を予測することができ、還元燃焼の生起条件を示すことができた。

今後は冷却を受ける火炎の温度境界層内でCO等を測定し、検証実験等を行っていく方針である。

文 献

- 1) 福田脩三, 阿部正広: 工業加熱, **23** (1986) 4, p. 25
- 2) 田草川元一: 工業加熱, **24** (1987) 2, p. 58
- 3) 新日鉄(株)君津製鉄所(私信)1986年10月
- 4) R. MEYER: Gaswarme, **13** (1964) 10, p. 387
- 5) S. GORDON and B. J. McBRIDE: NASA Lewis Research Center, Computer Program for Calculation of Complex Chemical Equilibrium Compositions, Rocket Performance, Incident and Reflected Shocks, and Chapman-Jouguet Detonations (1973)
- 6) 石橋一弘(私信)(第88回熱流体セミナー)1988年4月

-
- 7) H. SCHLICHTING: *Boundary Layer Theory* (1986), p. 87 [McGraw Hill]
- 8) F. A. WILLIAMS 著, 柘植俊一監訳: *燃焼の理論* (1987), p. 509 [日刊工業新聞社]
- 9) N. PETERS and F. A. WILLIAMS: *Combust. Flame*, **68** (1987), p. 185
- 10) R. H. PERRY and C. H. CHILTON: *Chemical Engineer's Hand Book* (1973) [McGraw Hill]
- 11) 石橋一弘, 柘植俊一: 第 26 回燃焼シンポジウム予稿集 (1988), p. 112
- 12) T. COFFEE: *Combust. Flame*, **55** (1984), p. 161
- 13) J. WARNATZ: *Combustion Chemistry* (1984), p. 197
- 14) 上仲基文, 柘植俊一, 石橋一弘: 未発表論文
- 15) 石橋一弘: 筑波大学博士課程工学研究科修士論文 (1989)
-