ガラス槽爐内の焰について(第1報)

焰の温度分布の計算について

功 刀 雅 長

(京都大學工學部)

FLAMES IN GLASS TANK FURNACES, (I)

On the Calculation of Temperature Distributions of Flames

By Masanaga Kunugi

緒 言

ガラス熔解爐や平爐のような大型の工業窯爐では燃料ガスの燃焼は所謂界面擴散燃焼の形式をとり、燃料ガスと空氣とは別々にポートから噴出し、兩者の流れの接觸面から徐々に混合して燃焼が進行する。このような燃焼形式の場合に、燃料ガスの組成・發熱量・流速、空氣の流速、ポートの大きさ等と焰の長さ、燃焼状態、温度分布との關係を豫め算出することが出来れば、窯爐を合理的に設計するためにも、又作業條件を改善するためにも有効である。しかし從來このような焰に關する研究は比較的少なく、關連のある主な文献を挙げると次の通りである。(但し輝焰に關するものも含む)

Haslam; *Ind. Eng. Chem.*, 1925, **17**, 1236. S. P.

Burke; J.E.W. Shumann, *Ind. Eng. Chem.*, 1928,

20, 998. R. Pistor; *Arch. Eisenhüttenw.*, 1931, **4**,

565. K. Rummel; *Arch. Eisenhüttenw.*, 1937, **10**,

505, 541; **11**, 19, 63, 113, 163, 215.

矢木: 工化, 昭18, **46**, 608, 821, 873; 化學機械

昭18, **7**, 47. K. Metzger; *Glastech. Ber.*, 1931,

9, 458.

W. Schneekloth; *Glastech. Ber.*, 1935, **13**, 185.

F.G. Schwalbe; *J. Amer. Cer. Soc.*, 1940, **23**, 173.

K. Rummel; *Stahl u. Eisen*, 1941, **61**, 364.

吉田: 化學機械, 昭23, **12**, 124.

著者も擴散焰に關する研究を續けており、本報ではガラス槽爐の焰について温度分布の計算結果を報告する。

焰の温度分布を表わす式について

窯爐内の焰の温度を求めるために、まず第一に焰各部において可燃ガスがどの程度燃焼して發熱するかを求める必要がある。すなわちポートから噴き出した燃

料ガスの燃焼がどのような速さで進行するかを知らなければならぬ。

ガラス槽爐内の焰をひらたい焰(Flat flame)と見做し、次のような假定をおいて焰中での可燃ガスの濃度變化を示す式を誘導することとした。すなわち、(イ) ガスと空氣との混合は流れに垂直な方向に擴散(主として混流擴散)によつて行われ、(ロ) 流れの方向の擴散は無視し、(ハ) ガスの燃焼反應の速度はきわめて速いので燃焼はガスと空氣との混合速度によつて支配されるこれらの假定は著者が圓管から噴出させたガスの焰について適用し、實驗結果と一致することを認めている。(日本化學會, 第2年會, 昭24年4月講演; 化學機械協會講演會, 昭24年10月) 焰中の任意の點において焰の長さの方向(y)に燃焼ガスは平均流速 $\bar{u}_m$ で流れ、流れに垂直な x 方向にガスと空氣とは $\bar{\epsilon}_m$ と云う平均混流擴散係數に支配される割合で混合する¹⁾。かくして可燃ガスの濃度 c の變化は

$$\bar{u}_m \frac{\partial c}{\partial y} = \bar{\epsilon}_m \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \dots\dots\dots (1)$$

によつて表わされる。いまガスのポートの幅を b_0 、空氣のポートの幅を $a_0 - b_0$ とすれば、 $y=0$ (すなわちポートの噴出口の所) では $0 < x < b_0$ で $c=c_1$, $b_0 < x < a_0$ で $c=c_2$ となる。但し c_1 は噴出口を出る燃料ガス中の可燃ガスの濃度であり、 c_2 は噴出する空氣中の酸素の濃度を示す。可燃ガス 1mol に酸素 i mol が結合して完全燃焼が行われるとき、濃度の變數を一つにするために、酸素の濃度 c_2 を $-c_2/m$ というガスの濃度で表わすこととする。更に限界條件として $x=0$ 及び $x=a_0$ では $\partial c / \partial x = 0$ である。これらの條件によつて(1)式を解くことが出来るが、ポートから噴出したガスは噴流であり且焰となつて温度も上昇するので、流れの擴り a, 平均流速 $\bar{u}$, 平均混流擴散係數 $\bar{\epsilon}$ は焰の長さの方向 y の函數とすべきである。そこで

微小な長さ y_1 の間ではこれらの値は一定であるとし、長さ y を細分して (1) 式を解けば $y=my$, (m は正整数) では

$$c = c' + c'' \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \sin \frac{n\pi b_0}{a_0} \cdot \cos \frac{n\pi x}{a_m} e^{-\frac{y_1}{0} p_0} dy \cdot e^{-\frac{y_1}{0} p_1} dy \dots e^{-\frac{y_1}{0} p_{m-1}} dy \dots (2)$$

となる。

$$\text{但し } c' = \frac{b_0 \bar{u}_0 C_1 - (a_0 - b_0) \bar{i} \bar{u}_0'}{(a_0 - b_0) \bar{u}_0' + b_0 \bar{u}_0}, \quad c'' = \frac{2(c_1 + \bar{i})}{\pi}$$

$$p_{m-1} = \frac{n^2 \pi^2 \bar{E}_{m-1}}{\bar{u}_{m-1} \cdot a^2_{m-1}}, \quad \bar{u}_0 \text{ 及び } \bar{u}_0' \text{ は夫々噴出口}$$

におけるガス及び空気の平均噴出速度を表わす。

(2) 式によつて焰各部の點における可燃ガスの濃度を知ることが出来るが、焰の温度は長さ垂直な断面についての平均値を求めればよいわけであるから、濃度に関しても平均値 $\bar{c}$ を求めなければならない。なお計算を簡単にするために $n=1$ のみを取り $n=2$ 以下は省略し⁽²⁾ まず $\partial \bar{c} / \partial y$ を算出すれば

$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial y} = -\bar{p}(\bar{c} - c') \dots (3)$$

但し $\bar{p}$ は $p_0, p_1 \dots p_{m-1}$ の平均値を示す。従つて

$$\bar{c} = c' + (c_1 - c') e^{-\bar{p}y} \dots (4)$$

を得る。すなわち (4) 式によつて焰の長さの方向に垂直な断面についての可燃ガスの平均濃度を簡単に知ることが出来る。

燃焼率を表わす $\bar{p}$ は $\bar{p} \propto \frac{\bar{E}}{\bar{u} \cdot a^2}$ で示され、混流擴散係数、流速、流れの擴りそれぞれの平均値によつて支配されることが分る。

さて燃料ガスの發熱量を q (kcal/Nm³)、ガスのはじめの濃度 c_1 を Nm³/sec の単位にあらためれば、焰中の發熱量 dq_1 は

$dq_1 = -q d\bar{c} = q \cdot \bar{p} \cdot \bar{u} (c_1 - c') e^{-\bar{p}y} dy$ となる。次に焰からの放熱量 dq_2 は*

$$* dq_2 = A\{(\theta + 273)^4 - (\theta' + 273)^4\}$$

で表わされる。但し A は輻射係数、焰及び被熱物の輻射黒度、焰と被熱物との間の角關係等を一括した係数 θ は焰の温度 (°C), θ' は被熱物の温度 (°C) であり、放熱量として對流による傳熱は省略した。

かくして焰の温度は θ は

$$\frac{d\theta}{dy} = [q \cdot \bar{p} (c_1 - c') e^{-\bar{p}y} - A\{(\theta + 273)^4 - (\theta' + 273)^4\}] / \sum c_{pm} \cdot v_m \dots (5)$$

解いて求めることが出来る。但し $\sum c_{pm} \cdot v_m$ は燃焼ガスの熱容量を表わす。ルンゲ (Runge) の方法によつて數値積分して (5) 式を解くこととした。

焰の温度の計算方法及び計算例

第 1 圖に示すような形式のガラス槽爐を例にとつてその焰の温度分布を算出してみよう。

第 1 圖

この種のガラス槽爐ではまず次の條件が成り立つと見做してよい。すなわち (i) 吹出口から焰が槽爐内に噴き出す所及び吸込口へ入る所では焰の温度はガラス面の温度より低くしてはならない。従つてガスの燃焼はポートの中で起つており、ガスはガス及び空気の豫熱温度 (例えば 1100°C) より高い温度になっている筈である。 (ii) ポートの中と槽爐中とは空間部の大きさが相違することによつてガスの燃焼率も相違する。 (iii) 焰からの放熱量は連續加熱爐であるからバッチを熔融してガラスにするために必要な熱量とポート部及び槽爐部における天井・底・側壁よりの輻射・對流・冷却による損失熱との和に等しい。

計算を行つた四つのガラス槽爐の寸法は第 1 表の通りである。

第 1 表 ガラス槽爐の寸法 (表中の b, c は第 1 圖参照)

槽爐の記號	熔解槽 (m)		ガス・ポート (cm)		空氣ポート (cm)		ポートの 數 (片側)	b (m)	c (cm)	
	幅	長さ	幅	高さ	幅	高さ			幅	高さ
A	8.40	23.40	120.0	30.0	120.0	40.0	6	2.65	120.0	45.0
B	5.40	12.30	60.0	30.0	60.0	40.0	5	1.25	60.0	40.0
C	4.85	7.57	76.5	24.0	76.5	29.0	3	1.51	76.5	32.0
D	2.72	1.97	30.0	13.4	30.0	16.7	3	0.77	30.0	16.7

これらの槽爐では燃料として發生爐ガスを使用しており、その性質及びガスの發生量を算出するために必

要な値を第 2 表、第 3 表に示す。

第 2 表

爐の記號	石炭中の炭素及灰分(%) 炭 素 灰 分	ガス中のタール分と ダストの量 g/Nm ³	燃焼中の炭 素量 (%)	石炭使用量 ton/day	タール・ダスト 中の c の量 (%)
A	67.23 12.58	102	9.00	75.0	75.0
B	62.56 16.18	101	13.61	28.0	70.0
C	65.86 15.70	101	13.10	15.1	75.0
D	62.30 16.50	101	11.00	3.0	70.0

第 3 表

爐の記號	Co ₂	發 生 CnHm	生 O ₂	ガ ス CO	の H ₂	組 成 (%) CH ₄ N ₂	ガスの眞發熱量 q・kcal/Nm ³	ガス發熱量 Nm ³ /kg coal
A	4.2	0.0	0.2	27.8	12.7	4.2 50.9	1528	3.01
B	4.1	0.4	0.5	26.2	10.3	3.1 55.4	1460	2.95
C	8.1	0.6	0.3	22.7	11.6	4.7 52.0	1470	2.85
D	6.4	0.4	0.4	20.0	12.6	3.8 56.4	1340	3.24

表中のガス發熱量は炭素精算より算出した。次にこの發生爐ガスは10%の過剰空氣で完全に燃焼するとすれば發生爐ガス 1Nm³ 當りの空氣量、燃焼ガス量、

燃焼ガス中の炭酸ガス、水蒸氣の割合及びガスポートより噴出するガスの流速は第4表の通りである。

第 4 表

爐の記號	空氣量(Nm ³)	燃焼ガス量 (Nm ³)	CO ₂ (%)	H ₂ O(%)	ガスの噴出平均 速度 (m/sec)	Re
A	1.49	2.29	15.8	9.1	6.05	11900
B	1.32	2.12	15.0	8.4	5.33	7510
C	1.47	2.28	15.4	9.7	3.36	5530
D	1.29	2.13	14.5	9.9	4.41	3010

ポートより噴出するガスの流速はそのガスが蓄熱室で 1100°C に豫熱されるとして算出した。またガス・ポートの相當直径及び豫熱されたガスの活動粘度を求めてレイノルズ數を算出すれば上表の通りであり、何れも亂流の値を示している。空氣の平均噴出流速は空氣のポートの大きさがガスポートのそれの1.2~1.3倍であることより考えて、ガスの平均噴出流速の約 1.1 倍と見做してよい。

第3表から分るように發生爐ガス中の可燃ガスは一酸化炭素、水素及びメタンであるが、メタンは次の反應によつて

$\text{CH}_4 + 1/2 \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + 2\text{H}_2$ 一酸化炭素と水素になると考えれば⁽⁴⁾、1モルの可燃ガスを完全燃焼させるのに必要な酸素のモル數 i は $i=1/2$ となり、計算に必要な $c_1, c_2/i, c'$ は第5表の通りである。

第 5 表

記號	c_1	c_2/i	c'
A	0.531	0.42	-0.037
B	0.470	0.42	-0.036
C	0.502	0.42	-0.047
D	0.452	0.42	-0.039

次に焰からの放熱量の dq_2 を計算するためには次の條件を採用した。(i) 被熱物 (ガラス面及び爐の内壁) の輻射黒度は 0.9, (ii) 焰の黒度は Schack の式⁽⁴⁾

でガス輻射の黒度を、吉田氏の式⁽⁶⁾で輝焰輻射の黒度を算出すれば夫々0.14及び0.16となり、兩者の和をとり 0.3 とする。(iii) 焰と被熱物との角關係については、ポートの中では焰は周圍全部壁に囲まれているが槽爐内では受熱面は平行な二平面と見做し得るので、従つて角關係の因子は 0.9 とする⁽⁷⁾。(iv) 傳熱面積については各ポートの直面するガラス面、天井、側壁の表面積をそのポートの受けもつ傳熱面積と見做す。前記四つの槽爐のガラスバッチ投入口の近い側のポート No.1, No.2 についての傳熱面積は第6表の通りである。

第 6 表

記號	ポート内の傳 熱面積 (m ²)	ポート No.1 の 傳熱面積 (m ²)	ポート No.2 の 傳熱面積 (m ²)
A	10.5	60.5	45.4
B	3.3	24.3	21.0
C	4.3	24.0	20.1
D	0.85	4.3	3.2

さて焰の溫度 θ の計算法としては前述のように (5) 式を數値解法によつて解くことが簡便である。すなわち $y=y_1$ の部分の溫度 θ_{y1} を求めるために $y=y_1/2$ における焰の溫度 θ 及び受熱面の溫度 θ' を假定してその點の $d\theta/dy$ を求め、 $\theta_{y1}=\theta_{y0}+d\theta/dy \times y_1$ として θ_{y1} を決定する。例えばポートの中間では $y=0$ で

$\theta_{y0}=1100^{\circ}$ であり壁の温度はポートの中間で約 1200° 程度と假定し燃焼率 $\bar{p}_1$ を第6表のようにとれば、 $y=b$ (槽爐に入る所) で焰の温度はほぼ 1400° となる。尚別にポート中での熱損失 q_2 をガラス槽爐の熱精算の値より算出すれば、この値がポート中で焰から放出する傳熱量とほぼ一致する筈であるから、 $y=b$ における焰の温度 $\theta_b (=1400^{\circ}\text{C})$ 、但しガラス面の温度 θ' を 1400° とした場合) は

$$\theta_b = \frac{q_0 + q(c_1 - c')e - \bar{p}_1 b - q_2}{\sum c_{pm} \cdot v_m}$$

によつて表わされる。但し q_0 は豫熱されたガス及び空気の含熱量である。この式で $\bar{p}_1$ を求めても良いしまた前記の方法で假定した内壁の温度 θ' を補正しても良い。何れにしても trial and error の方法によつ

第 7 表

記號	ポート内平均放熱量 kcal/sec·m	$\bar{p}_1$	q_0 (kcal/sec)	$\bar{p}_2$	ガス量 $\text{m}^3/\text{sec} \cdot \text{port}$	ガラス面温度 ($^{\circ}\text{C}$)	槽爐内平均放熱量 (kcal/m·sec)	焰の長さ (m)	ton/day ガス引上量
A	18	0.20	375	0.40	0.433	1400	40	11.0	100.0
B	16	0.30	165	0.60	0.191	1400	46	6.6	43.0
C	17	0.30	144	0.60	0.163	1400	38	6.4	23.4
D	7	0.60	31	1.25	0.0375	1350	19	3.5	4.0

第 2 圖

- 以上の計算結果からわかることは次の如くである。
- (i) ポートの中で約 35% の可燃ガスが燃焼する。
 - (ii) $\bar{p}$ の値はガスポートの大きさの大きいほど小さい値を示す。
 - (iii) 燃焼率を表わす $\bar{p}$ の値はポートの中と槽爐中とは相違し、槽爐中の方が $\bar{p}$ の値が大きい。
 - (iv) ポートの噴出流速が大きい方が $\bar{p}$ は小さい。
 - (v) 温度の計算値はほぼ實測値と一致している。

第 8 表

記號	ポート内の平均放熱量 kcal/m·sec	$\bar{p}_1$	c_0	$\bar{p}_2$	ガラス面温度	傳熱面の比 ポート No.2 / ポート No.1	槽爐内の平均放熱量 kcal/m·sec
A	18	0.20	375	0.40	1450 $^{\circ}$	0.750	49
C	17	0.30	144	0.60	1450 $^{\circ}$	0.839	41

結 言

ガラス槽爐内の焰の温度分布を求める式を誘導して

て温度を求めることになる。

次にガラス槽爐の内部においては、吸込口 ($y=d$) の所でほぼ燃焼が完了していることが望ましいから、 $y=d$ で可燃ガスの残留率 0.02~0.03 として $\bar{p}_2$ を決定する。このようにして $\bar{p}_2$ を決めて、 $\Delta y=0.5\text{m}$ として (5) 式によつて焰の温度を計算する。但しこの際のガラス面の温度は一定とし (但しポートによつて夫々異なるガラス面温度をとることとする。すなわちバッチ投入口からスロートの方向には矢張り適當なガラス面温度分布がある筈であるから、その温度分布に一致させて、ガラス面温度を適當にとる。)

このようにしてポート No.1 について計算した結果を第7表及び第2圖に示す。なお天井の温度はガラス面の温度より 50°C 高いとして計算を行つた。

第 3 圖

次にポート No.2 についても同様の計算を行つた結果は第8表、第3圖の通りである。この場合にはガラス面の温度が 50°C だけ高くとり、ガス量はポート No.1 は同一である。受熱面の温度が高くなつたために當然焰の温度が上昇してくるが、第6表及び第3圖から分るようにポート No.2 に直面する受熱面の面積を No.1 のポートのときより 15~25% 小さくすることによつて、ガス量を増加することなしに焰の温度を約 50°C 上昇させることが出来る。

實例について温度分布を求めた。次いでこのような計算によつて受熱面積と焰の温度との関係を知り得るこ

とを確めた。

なお更にガラスの引上量、ガラスの温度、ガス量及び焰の温度との相互関係も知ることが出来るが、この點に關しては第2報で記述する。また燃焼率 $\bar{p}$ については前述のように $\bar{p} \propto \frac{\bar{E}}{\bar{u} \cdot \sigma^2}$ で表わされるが、実際にはガスの噴出速度・ポートの大きさ等の函数として表わした方が便利であり、後報においてこの問題を説明する豫定である。

- 1) Re 数は 3000 以上であるから分子擴散係数は省略する。
- 2) $n=2$ 以下を省略してもポートに近い部分以外には餘り問題にならない。

- 3) Schack の應用傳熱 (高橋譯) 中の91頁及び149頁の式によつて計算すれば ガラス槽爐では對流傳熱は輻射傳熱の約 3 %である。
- 4) 著者が擴散焰の實驗によつて確め、化學機械協會講演にて24年10月發表
- 5) Schack: Der industrielle Wärmeübergang, 1940 (高橋譯, 應用傳熱)
- 6) 吉田: 化學機械, 昭23, 12, 124
- 7) 内田: 工業傳熱, 208頁, 昭11; 嚴密には化學工業講義第1輯, 矢木: 輻射傳熱の理論と應用参照終りに 御指導を賜つた澤井教授に厚く感謝の意を表します。(11/28/49 受附)

エメリーの鑛物組成とその人造の可能性について

山 口 悟 郎

(東京大學第一工學部)

MINERAL COMPOSITION OF EMERY AND POSSIBILITY OF ITS ARTIFICIAL PRODUCTION.

By G. Yamaguchi

緒 言

エメリーはギリシャのナキソスに産するものが有名で、戦前わが國にも輸入されていた。その用途は研磨粉として、ニッケル或はクロム鍍金等の鐵下地の研磨に好適とされ、理論的根據は不明であるが、代用品にはよいものがないとされている。このような關係でナキソスエメリーの輸入が要望され、また科學試驗研究の要望課題としても エメリーの人造が問題となっている。ここにおいて著者は戦前輸入されたナキソスエメリーの代表的一例につき、その鑛物組成を検討し人造の可能性につき論じたいと思う。

化學分析結果及び酸處理結果

試料は黒色の極めて強靱な塊であり、粉碎しにくい。これを鐵分の混入しないように注意して少量ずつ碎き、メノー乳鉢で磨碎して分析試料及び比重分離試験試料とした。その化學分析結果を第1表に示す。メノー乳鉢からの SiO_2 分の混入は後の比重分離の結果から問題ないことが判つた。

第1表 ナキソスエメリーの平均化學成分及び比重

灼減%	$\text{SiO}_2\%$	$\text{Al}_2\text{O}_3\%$	$\text{TiO}_2\%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3\%$	$\text{CaO}\%$	$\text{MgO}\%$	比重
3.76	4.28	51.47	1.12	35.61	2.05	0.63	4.01

次に同試料を 1:1 鹽酸で還元剤として金屬錫共存の下に長時間煮沸した。この處理により試料中の酸化鐵分は大部分溶解し去り、試料は白色となつた。この酸處理後の試料の化學成分を第2表に示す。

第2表 エメリー酸處理後の化學成分

灼減%	$\text{SiO}_2\%$	$\text{Al}_2\text{O}_3\%$	$\text{TiO}_2\%$	$\text{Fe}_2\text{O}_3\%$	$\text{CaO}\%$	$\text{MgO}\%$	比重
2.64	5.37	92.51	0.12	0.67	0.65	tr	3.90

この試験によりエメリー中には酸に可溶性の鐵分が分離して存在していることが明かとなつた。

比重分離試験結果

最大徑 0.1mm 以下に粉碎した試料 5.000g をとり重液により比重分離した結果を第3表に示す。但し分離操作中の逸散により最終試料の總量は 4.792g となつた。

第3表の結果から分布密度として比重 0.1 の變化に對する含有率を求め、これを縦軸とし比重を横軸として分布曲線を描くと第1圖のようになる。これにより本鑛物は A, B, C の3種の主要鑛物からなることが想像される。これらの鑛物を確認するため A の代表として比重範圍 3.37~3.62 のもの、B の代表として比重範圍 3.93~4.02 のもの C の代表として比重 4.26 以上のものの化學分析を行つた結果を第4表に示す。