液体の模型実験による炉内のガスの流れの基礎的研究

功 刀 雅 長・神 野 博

(京都大学工学部工業化学教室)

Fundamental Studies on the Gas Flow Problems in Furnaces by Model Techniques Using Liquids

By Masanaga KUNUGI and Hiroshi JINNO

(Department of Industrial Chemistry, Kyoto University, Kyoto)

Abstract

Flame length, flow patterns, and the degree of mixing of Jets in furnaces, were studied by liquid model experiments.

The dilute solutions of caustic soda, and of hydrochloric acid were used to stand for, respectively, fuel gas and air in the model. The former was coloured by phenolphthalein to visualize the end point of the neutralizing reaction between the solutions supplied in two separate streams. The point at which the colour of the caustic soda solution just vanishes indicates the position of the tip, and thus the length of flame. In Fig. 2 and 3 are plotted the flame lengths under various excess air rates. The curves make it clear that the flame lengths decreases with an increasing excess air rate. The flame length was also affected by the relative port velocity as shown in Fig. 5. Some examples of liquid model flames in a scale model were shown in Fig. 6.

A series of experiments was carried out to observe the flow patterns from the photographic records of the tracks of tracer particles moving in the illuminated area of the water jets in a box. When there is a difference between the velocities of two jets one having a lower velocity is drawn into the other, so that, after a little while, both flow as a single unit as it is seen in Fig. 7 b. The intensity of turbulence in the jets was evaluated from the records of the tracks described by the tracers.

緒 言

燃焼および窯炉に関する研究を、燃焼を行わずに冷気体や液体を利用して行なうことが最近しばしば試みられ、主として英国の鉄鋼関係を中心にして 1945 年頃より多くの研究が発表され¹⁾、1952 年以後にはガラスタンク窯に関しても、この種の研究が発表されるようになってきた^{2), 3)}。

このような研究方法は、燃料ガスや重油と空気とをあらかじめよく混合してから燃焼させる予混合式の燃焼には不適当であるが、炉内の焰がいわゆる拡散焰である場合には有効である。すなわち、燃料と空気との混合速度が系の燃焼速度を支配するような焰では、燃料および空気の代わりに 2 種類の液体を使用して、それらの流体の力学的相似を考慮において、両者の混合過程を観察すれば、燃料の燃焼率を判断する上に有効な結果がえられる。この種の研究の意義、利点および欠点に関して、筆者はすでに「燃焼と模型実験」と題

して総説として本誌⁴⁾に記述したので、ここで繰り返すことはやめるが、液体を利用する模型実験はとくに流れの状態を観察することが容易であるという利点がある。

本報では、前報²⁾以後に得た液体の模型実験結果について以下報告することとする。

I. 焰 の 長 さ

焰の長さとはポートから噴出する流体相互間の相対速度との関係を究明する目的で、次の模型実験を行なった。

流体としては、燃料ガス（都市ガスおよび発生炉ガス）および空気の代わりに、それぞれ苛性ソーダ水溶液（フェノルフタレンを添加して着色）および塩酸を使用した。これら液体の濃度は著者の総説⁴⁾に記述したように都市ガスに対応する場合には、苛性ソーダ溶液は 0.06 N、塩酸は 0.024 N としたが、濃度の絶

対値はあまり問題ではなく、この両液の濃度比 $0.06/0.024=2.5$ の値を都市ガス 1 mol を完全燃焼させるために必要な空気の mol 数と一致するように考慮した。したがって燃焼ガスが発生炉ガスである場合には、この比は 1~1.2 程度となる。両ポート（バーナー）に相当する細長い矩形噴出口は、その寸法が、長さ 20 mm で一定とし、幅を 0.5, 1.0, 2.0 mm と種々変更できるものを使用した。

これらのポートから、それぞれの流体を種々の流速および過剰空気率で模型の燃焼室内 ($5 \times 7 \times 30 \text{ cm}^3$) へ並行に上向きに噴出させ、着色部の長さ（モデルの焰の長さ）を肉眼および写真撮影によって観察測定した。なお空気ポートとガスとの間の隔壁の厚さは 0.5 mm と 2.0 mm との 2 種類を使用した。

第 1 図にモデルの焰の写真例を示す。いずれも発生炉ガスの焰に相当する場合であり、ガスポートの幅 b は $b=2.0 \text{ mm}$ 、空気ポートの幅 $b'=2.0 \text{ mm}$ 、第 1 図 (a) では過剰空気率 12%、(b) では 33% である。(b) の焰の長さの方が (a) のそれよりかなり短いことが認められる。噴出口から流れが乱れはじめる点 (Breaking point) までの距離を S として図中に示した。

Fig. 1 Liquid model flames with limited HCl supply established in a confined space.

発生炉ガスに相当するモデルの焰の長さと過剰空気率との関係を、種々のアルカリ流量について測定した結果を第 2 図に示す。

ポートの幅は第 1 図の焰の場合と同様にそれぞれ $b=2.0$, $b'=2.0 \text{ mm}$ と等しい幅とした。図の曲線からわかるように過剰空気率が増加すると焰の長さは短

Fig. 2 Influence of the excess air rate on the flame length.

Fig. 3 Length of model flame.

くなり、一定の長さに達する傾向にあること、またアルカリ量 V_g を 440~1020 cc/min と変化してみても、過剰空気率が一定であれば、焰の長さはほとんど変化しないことが認められる。

次に都市ガスに相当するモデルの焰についての測定結果を示す。測定結果の代表として、アルカリ流量 V_g をほぼ 350 cc/min で一定とし、ポート間の隔壁の厚さを 2.0 mm とし、両ポートの幅 $b(\text{mm})$, $b'(\text{mm})$ および塩酸の量を種々変化した場合の焰の長さ L の測定結果を第 3 図に示す。

実験番号 No. 1 と No. 2, No. 3 と No. 4, No. 5 と No. 6 をそれぞれ比較すると、ガスポートの噴出速度はほぼ等しく、過剰空気率が等しい場合においても、空気ポートの噴出流速 u_a と u_g との差、すなわち相対速度が相違しており、この相対速度の大きい方が焰の長さはやや短くなっていることがわかる。同様の結果は、アルカリ流量 160 cc/min, 640 cc/min およびそれぞれの流量について隔壁の厚さが 0.5 mm の場合にも得られた。

これらの実験結果について、上記の相対速度 $4u = |u_a - u_g|$ が焰の長さ L におよぼす影響をさらに検討する目的で、過剰空気率が 15~16% の場合について、

Fig. 4 S vs. Δu Fig. 5 $(L-S)$ vs. Δu

Δu とポートから乱れまでの長さ S との関係 および Δu と $L-S$ との関係を図示すれば第4図および第5図のようである。

両図より S および $L-S$ の値はいずれも相対速度が大きくなれば短くなる傾向にあること、ポートの間の隔壁の厚さを 0.5 と 2.0 mm とに変化しても S の長さはほとんどその影響をうけないことがわかる。また $(L-S)/S$ の比はほぼ 3~4 である。ポートから乱れ点までの部分 S は、両流体の混合がまだあまりよく行なわれていない部分である。実際の焰について考えると、 S の部分は低温であるから、伝熱の見地からも S の長さをなるべく短くすること、またこの部分は加熱室内にはない方が望ましい。例えばガラスタンク窯の場合であれば、このような部分はポート内の混合部に位置するように中仕切りからポートの噴出口 (Port opening) までの距離を適当に決めるべきであ

ると思う。

この種の液体の実験では、反応によって温度が上昇して流体の膨脹を起すことはほとんどないので、モデルの焰の長さの絶対値はもちろん実物の焰のそれより短いのであるが、空気や燃料ガスを 1000°C にも予熱して炉内に供給するような場合には、温度上昇による長さの補正係数は 1.1 程度であり、この点については前報²⁾で説明した。

II. 重油の焰について

模型として実物のガラスタンク窯とほぼ幾何学的に相似で 1/40 の縮尺の模型をメタクリル樹脂板で製作した。ただしポート1つから噴出する焰のみを取りあげることとし、模型の幅はポートの噴出口の3倍とした。

重油のような高発熱量の燃料を高速度でバーナーから噴出させて燃焼する場合の模型実験の例を次に示す。

重油燃焼では、微粒化された重油は急速に蒸発ガス化してから燃焼を開始し、気体燃料の燃焼とほぼ同様の機構と考えられるので⁵⁾、バーナーから噴出する一次空気中に重油が均質に分散してガス化しているものとみなす。

いま、必要な空気量の 20% を一次空気としてバーナーより供給し、残りの 80% は二次空気としてポートより供給することとし、重油の体積は無視して、重油に相当する苛性ソーダ溶液の濃度と空気としての塩酸の濃度との比は二次空気量と一次空気量との比に等しくとり 0.04 N の苛性ソーダ溶液および 0.01 N の塩酸を使用した。また焰の温度上昇による浮力の影響を表わすために、塩酸中に塩化カルシウムを少量添加してその比重を 1.06 程度として、苛性ソーダ溶液より重くした。重油バーナーとしては口径 1 mm のガラス管を用いたが、この口径の寸法は、バーナーのノズルのそれに対応するものではなく、バーナータイルの中で着火しはじめるとして、バーナータイルの口径にほぼ対応させた。

本実験では、バーナーの取り付け位置と両流体の混合度との関係を明らかにする目的で、その取り付け位置として第6図に示すように3ヶ所をえらんだ。

使用したアルカリ流量は 650 cc/min、塩酸は 2.9~3.6 l/min であり、バーナーからのアルカリ噴出流速は 2.2 m/sec、その吹出口でのレイノルズ数は 5400 (乱流の範囲) とした。実験結果の代表例を第6図に示す。なお図中には発生炉ガスに対応する焰の写真を比較のために示してある。以上の実験結果から (1) 重油の焰では噴出流速が大きいので、流れの方向がはっきりしていること、(2) ポートの側壁に取り付けた場

Fig. 6 Liquid model flames in a scale model, (a), (b), (c) oil flames, (d) gas flame.

合が両流体の混合が良く、焰の長さが短いこと（第6図 a）、（3）天井よりの噴流は底面に衝突してから後に急に乱れて底面を広い範囲におおい易いこと、（4）下部から噴出した場合には比較的焰の長さ、揺れが大きいこと（第6図 c）、（5）第6図 b および c ではとくに吸込み口に近くで天井方向への逆流がみとめられること、（6）ただしこれらの逆流は過剰空気が大きく数十パーセントになると、あまりはっきりしないことなどを認めた。

III. 噴出流の流線模様について

隔壁をへだてて吹出口から噴出する2つの並行流が、どのような状態で混合するかを、さらにはっきり観察する目的で次の実験を行なった。

流体としては水を使用し、その中にメタアクリル樹脂の微粒子（表面にアルミニウム箔を密着させたもので、粒度はタイラーの篩 100~150 メッシュ、その比重は1.0のもの）を混合しておき、この水を第I節に記述したポートと同じ寸法のポートから種々の流速で下向きに噴出させ、ポート附近の状態を撮影した。光源にはアーク灯を使用し、光をスリットを通して二次元的とし、次に細隙を備えた円板を高速度で廻転させて光を断続的にあてるようにした。このようにして撮影した写真例を第7図に示す。

第7図の(a)は2つのポートの噴出流速 $u_a = u_g = 11 \text{ cm/sec}$ で相等しい場合であり、層流の模様を呈し

Time between interruptions: (a) 0.17 sec, (b) 0.12 sec, Port velocities: (a) same port velocity $u_g = u_a = 11 \text{ cm/sec}$, (b) $u_g = 22 \text{ cm/sec}$, $u_a = 57 \text{ cm/sec}$.

Fig. 7 Flow patterns of two liquid jets in an enclosed space.

ている。図中に点線がたくさん認められるのは、光を断続的にあてたからである。第7図の(b)では、一方の流速 $u_a = 57 \text{ cm/sec}$ で他方の流速 $u_g = 22 \text{ cm/sec}$ の約2.6倍であり、速い流速の方へ遅い流速の流れが吸込まれていることがよくわかる。このように室内の流れでは流速に大きな差があると吸引される現象がおこり易い。炉内のガスの流れにおいてもこのような現象がおこり、2つの流れの混合が良くなって効果的の場合もあるし、また反対に2つの流れを分けて別々に流したいときに1つの流れにかたよってしまう原因となるときもある。

IV. 流体の乱れについて

乱れた流れにおいては、ある1点においても、例えばその流速は一定ではなく、時間的に変動して種々の流速を示すことが普通である。したがって炉内の拡散焰のように乱れた焰では、燃焼ガス流の乱れの強さや大きさを知ることが焰の性質を解明する上に必要である。

ここでは液体の模型実験によってまず流体の乱れの強さの測定を行なってみたので、その結果を報告する。

$30 \times 12 \times 3 \text{ cm}^3$ の箱の中の底部中央に $1 \times 10 \text{ mm}^2$ の矩形の吹出口を 10 mm の間隔をおいて2個とりつけ、これらの吹出口から一定の流速で水を噴出させ、前節の実験とほぼ同様に目印粒子の動きを写真撮影によって観察した。露出時間は $1/8 \sim 1/4$ 秒とし、同じ条件の写真を約1分間に20駒撮影した。実験条件としては両ポートよりの流量がいずれも 640 cc/min で相等しいとき、およびそれぞれ 480 cc/min および 960

cc/min である場合の 2 種類を行なった。

このようにして撮影した写真から各部の流速の時間的平均値 $\bar{u}$ および変動 u' を求めるために次のような方法をとった。

装置の表面 (ガラス面) にあらかじめ 1 cm おきに基盤目に分割線を入れておき、撮影後写真にみられるそれぞれの区分内の目印粒子は、すべてその区分の中心にあるものとする。つぎに粒子の飛跡を示す曲線の中点で切線をひき、その上に飛跡の曲線の長さに等しい長さをとり、これを、その時刻におけるその点の速度ベクトルとする。20 駒の写真から 20 の時刻における各区分内の点の流速が求められるから、これらの瞬間値から時間的平均値 $\bar{u}$ 、変動 u' および乱れの強さ $u'/\bar{u}$ を算出することができる。

原点を模型の底部の中央にとり、底辺に沿って x 軸を、流れの方向に y 軸をとり、第 8 図に流速の時間的平均値の x 成分 $\bar{u}_x$ および y 成分 $\bar{u}_y$ を、第 9 図にこれらの乱れの強さ $u'_x/\bar{u}_x$ 、 $u'_y/\bar{u}_y$ を示す。

これらの測定結果から、2つの流れが等速の場合と流速の相違する場合とについて、乱れの強さを比較してみても、大きな差はみとめられないこと、乱れの強さは数パーセント程度であり、噴出口に近い部分 ($y=3.5$ cm) では流れの中心部すなわち 2つの流れの合流する部分の乱れの強さが大きい、噴出口からはなれた部分 ($y=12.5, 17.5$ cm) では噴流とその周辺との境界にも比較的強い乱れがその y 成分にみとめられ

(a) $V_g = V_a = 640$ cc/min,
(b) $V_g = 480$ cc/min, $V_a = 960$ cc/min,
 x : Horizontal distance from the center of bottom,
 y : Vertical distance from the nozzle,
 V_g, V_a : Volume flow rate of nozzle liquid.

Fig. 8 Velocity traverse through jets.

(a) $V_g = V_a = 640$ cc/min,

(b) $V_g = 480$ cc/min, $V_a = 960$ cc/min.

Fig. 9 Intensity of turbulence.

ることなどがわかる。また肉眼的にも 2つの流れは合流して 1つの流れとしてみとめられ、その周辺の室壁との間に逆流の渦が観察される。

このような実験によって、焰についてのあらゆる乱れを解明することはできないが、多くの焰は噴流焰であり、噴出流速にもとづく乱れが問題となるので、その強さが吹出口付近の条件、室の大きさなどによって、どのように影響されるかを検討することは可能であると思われる。

総 括

液体を使用して炉内のガスの流れに関する基礎的研究を行ない、次の結果を得た。

(1) 燃料ガスおよび空気の代わりにそれぞれ苛性ソーダ溶液 (フェノルフタール溶液) および塩酸を使用し、別々に種々の流速で室内に並行に噴出させ、着色部の長さ L と両流体の吹出口よりの噴出流速間の相対速度 du との関係を究明し、着色部全体の長さ L および吹出口から乱れ始め点までの長さ S にも du がわずかではあるが影響を与え、 du が大きい方が L および S が小さいことをみとめた。(2) 重油の焰について、このような模型実験の方法を解説し、実験例としてガラスタンク窯の 1/40 寸法の模型について、バーナーの取り付けの相違による重油噴流と空気流との混合度の差を定性的ではあるが明らかにした。(3) 目印粒子を流体に入れ、その粒子の運動を写真撮影によって観察し、炉内の流れの様態および流れの乱れの強さを究明する実験方法を述べ、二・三の実験結果として、流速の速い流れは遅い流れを吸引して一つの流れを形成し易いこと、噴出口に近い部分では噴流の中心部に強い乱れがみとめられるが、噴流とその周辺との境界部に比較的強い乱れがその y 成分 (流れの方

向)にみとめられることなどを明らかにした。

文 献

- 1) M.W. Thring. *Science of Flames and Furnaces*, 302, 324 (1952); J.H. Chesters, A.R. Philip. *J. Iron & Steel Inst.*, **162**, 385, 392, 401 (1949); J.H. Chesters, M.W. Thring. *Iron & Steel Inst., Special Report* No. 37 (1946); R.D. Collins, J.D. Tyler. *J. Iron & Steel Inst.*, **162**, 457 (1949); **166**,

235 (1950); J.H. Chesters, M.W. Thring. *Iron & Steel Inst., Special Report* No. 56 (1956)

- 2) 沢井・功刀・窯協, **59**, 440 (1952); **61**, 149 (1953); 燃料協誌, **31**, 558 (1952)
- 3) S. Kruszewski, *Atti III Congresso Internl. del Vetro*, 462 (1952); R. Günther. *Glastechn. Ber.*, **29**, 417 (1956)
- 4) 功刀, 窯協, **63**, 110 (1955)
- 5) 矢木・国井, 工業窯炉, 258 (1953) (9/15/58 受付)

チタニウム—スピネル系顔料

高橋 健太郎・大塚 淳

(横浜国立大学工学部化学工業科)

Studies on Titanium Spinel Pigments

By Kentaro TAKAHASHI and Atushi OTSUKA

(Faculty of Engineering, Yokohama National University)

Abstract

Magnesium and zinc titanium spinels are the white compounds with the basic formulas 2MgOTiO_2 and 2ZnOTiO_2 , in which Mg^{2+} and Zn^{2+} can partly or wholly be replaced by other bivalent ions such as Co^{2+} and Ni^{2+} . The ternary and the quaternary compounds thus obtained are coloured producing a great variety of hues.

For the purpose of studying the properties of such pigments each constituents were mixed by dry process, calcined at the temperatures $1000^\circ\sim 1350^\circ\text{C}$. The reflectance between $400\sim 750\text{m}\mu$ were measured by a photo-electric spectrometer to represent the result by C.I.E. colour specification, and also X-ray analyses were made. The results are summarized as follows:

(1) CoO-MgO-TiO_2 system showed a wide variety of hues, ranging from light blue, through greenish blue, to medium and dark green. Pigments in this series had good brilliance, and the samples calcined at a temperature higher than 1200°C had the spinel structure.

(2) NiO-MgO-TiO_2 system gave no spinel structure in the samples heated at 1200°C , indicating that the formation of spinel was more difficult to occur than in the systems MgO-TiO_2 and CoO-MgO-TiO_2 . The spinel structure was not found in NiOMgOTiO_2 calcined at 1400°C , but NiOZnOTiO_2 gave a light green pigment by calcining at 1200°C .

(3) The spinel structure was not found in the system NiO-CoO-MgO-TiO_2 when heated at 1200°C , but at 1350°C , and with increasing content of CoO , spinel was observed in the pigment whose colour changed from yellowish to brilliant green.

(4) Pigments of the system CoO-ZnO-TiO_2 gave colours ranging from light to dark yellowish brown, so that in NiO-CoO-ZnO-TiO_2 series a clean brilliant hue could not be obtained with increasing amount of CoO .

緒 言

チタニウム, スピネル系顔料としては実用化されているものはまだないが, 予備実験の結果, チタニウ

ム, スピネル 2MgOTiO_2 および 2ZnOTiO_2 の Mg と Zn をそれぞれ Ni と Co で置換したとき, 淡黄緑色から青緑色系の広い範囲の呈色をすることが認められ