紫外線吸収を利用した気体の可視法[†]

森 永 智 昭*・山 本 圭 治 郎**・倉 石 達 夫***

* 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** 大阪大学工学部 大阪市都島区東野田町 9

*** 日本鋼管(株)福山製鉄所 福山市鋼管町 1

(昭和 46 年 1 月 5 日 受付)

Visualization of Gas Flow by Ultraviolet-Absorption

Tomoaki MORINAGA*, Keijiro YAMAMOTO**, Tatsuo KURAISHI***

(* Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo
** Osaka University, Osaka
*** Nippon Kokan Co. Ltd., Fukuyama)

(Received January 5, 1971)

Visualization of gas flow is a very important technique for the study of fluidic elements, but it is far more difficult than the visualization of liquid flow. Except some impractical optical methods, most methods for gas flow visualization utilize some tracer in the flow, and in most cases the tracer undesirably changes the flow characteristics. It is desirable, therefore, that the tracer and the operating gas possess the closest resemblance in their flow characteristics.

Ozone absorbs very strongly the ultraviolet radiation of 200 to 300 millimicron wavelength. Therefore, by illuminating a fluorescent plate with parallel ultraviolet radiation through the gas flow, the flow containing ozone can be visualized as a dark silhouette on the plate. The visualization technique based upon this principle was applied to the wall attachment fluidic elements, and it was revealed that the amount of ozone necessary to visualize the air flow is so small that it can hardly affect the flow characteristics. It is also possible to observe the transient state of the flow by adding ozone intermittently into the flow.

1. は じ め に

気体流れ、特に純流体素子内の空気の流れの可視化は、その特性の解析および開発の両面において必要とされる。従来可能であったのは主として定常流れの可視化であり、しかも定性的なものが多かったが、とうぜんこれだけでは十分とはいえず、非定常流れの可視化とその定量的測定が必須である。特に非定常流れの可視法においては、流れの中に混合するトレーサとしては、その流れに影響する特性が使用流体になるべく近いものが望ましく、しかもその発生を制御することが望ましい。純流体素子の場合、特に流れの局部とともに全体を観測する必要がある。

これらの要求を満たす可視法として、オゾンが紫外

線を強く吸収する性質を利用する方法が考えられる。すなわちトレーサとしてオゾンを用いるもので、このオゾンは放電によって空気中に空間的にも時間的にも一様に発生させることができる。このオゾンを含んだ空気流を観測する流路に供給し、この流路を平行紫外線で照射して、透過光をけい光板で可視光線に変換すれば、空気の流れが影となって見える (Fig. 1)。

この原理による装置を試作し、純流体素子の流れの観測に適用して、良好な結果を得た。

2. 原 理

2.1 オゾンの紫外線吸収特性

オゾンは波長 2000~3000 Å に吸収帯を持ち、その極大点は 2537 Å 付近にある。Lambert-Beer の法則によれば、強さ I_i の入射光が、濃度 C mg/l で

† 第5回純流体素子シンポジウムで発表 (昭 45・9)

Fig. 1 Principle of visualization of gas flow by ultraviolet-absorption

厚さ b cm の吸収物質層を透過した場合、その透過光の強さを I_t ; a を吸収係数 [$l/mg \cdot cm$] とすると、次の関係がある。

$$\log_{10} \frac{I_t}{I_0} = abc \quad (1)$$

ここで、 a の値は入射光の波長と吸光物質によって決まる定数であり、入射光が $2537 \text{ \AA}$ 、物質がオゾンの場合は 0.078 である。よって、オゾンを含んだ流れの厚さ b が一定であれば、オゾンによる $2537 \text{ \AA}$ 付近の光束吸収率の対数とオゾンの濃度とが比例する。

2.2 けい光物質

(1) $\text{CaWO}_4\text{-W}$ (2) $\text{ZnSiO}_4\text{-Mn}$
(a) emission bands

(1) $\text{CaWO}_4\text{-W}$ (2) $\text{ZnSiO}_4\text{-Mn}$
(b) excitation bands

Fig. 2 Characteristics of fluorescent materials

けい光物質は、外部からの光エネルギーの刺激によってそのエネルギーを吸収し、このエネルギーを受けている間だけエネルギーの放射（けい光）を行なう物質であるが、Stokes の法則により、けい光の波長は吸収光の波長よりも長い。Fig. 2 に、 $2537 \text{ \AA}$ 付近に励起帯を持ち残光性のきわめて短い各種けい光物質の励起帯とけい光帯を示す。

けい光物質が照射光から吸収した光量とけい光強度とが比例することから、けい光板のけい光強度は、照射光強度に比例する。

2.3 オゾンの特性

気態オゾンの密度は現在まで直接実験的には求められておらず、完全気体として、 20°C において 2.144 g/l とされている。安定性に関しては、ある濃度のオゾンガスを完全密閉した箱内に自然放置した場合、濃度は時間に関して指数的に減じ、約 1 時間で濃度が $1/2$ になることが知られている。オゾンの分解速度は温度に正比例し、また、水蒸気存在によって大きくなる。

2.4 オゾンの生成方法

能率が良く生成量の多いものとしては、現在無声放電法が唯一のものである。無声放電はガラスのような絶縁物を通した空げき内の放電をいい、ガラスが安定層となり、放電が局部に集中するのをさまたげ、発達した放電形成に移行することを抑制する。したがってこの放電形成は過渡的な段階であって、そのさいの衝突電離は、通常の方法では困難な化学反応を能率良く起こさせることができる。オゾンは、空気または酸素を原料として無声放電場を通過させることにより得られる。この方法によってオゾン生成する装置をオゾナイザと呼んでいる。

2.5 オゾナイザの設計法

オゾナイザ内におけるオゾン生成条件がまだ完全にわかっていないため、実験データを基にして電気工学的設計法によっているのが現状である。

設計において一番問題となる点はオゾナイザの収率 [$\text{O}_3\text{g/kWh}$] であるが、これについての十分なデータがそろっていない（特に円筒形のものを除くは見当たらない）。ここではオゾナイザとして、並ガラスを用いた二重円筒管で内径 30 mm 、外径 45 mm 、長さ 380 mm 、空げき長さ 5 mm 、ガラス厚 1.25 mm 、空げき容積 220 cm^3 のものを用いた、E. Briner^{(1), (2)} の発表した値 (Fig. 3) から収率を求める。したがって以下に述べるのは円筒形オゾナイザの設計法である。

まず、原料ガスと電源周波数 $f \text{ Hz}$ を選び、必要と

Fig. 3 Characteristics of the ozonizer (experimental results of E. Briner)

する流量から Fig. 3 により収率を求める。次に必要なオゾン濃度 $[g/l]$ と流量からオゾン生成量 $[g/h]$ を決め、これと収率からオゾナイザの放電電力 W が求まる。 W が決まれば、オゾナイザに用いる誘電体の最大許容電位傾度 V_{ws} V/cm, 誘電率 ϵ_g , 厚さ d_g cm, 原料ガスによって決まるオゾナイザの臨界電位傾度 v V/cm, ガスの誘電率 ϵ_a , 誘電体の機械的強度に関する安全率 s を与えて、必要にして最小のオゾナイザの空げき長 d_a cm と有効放電面積 S cm² を次式によって求めることができる。

$$d_a = \left(\frac{V_{ws}}{s \cdot v} - \frac{\epsilon_a}{2 \epsilon_g} \right) d_g$$

$$S = \frac{W}{f \cdot v^2 \cdot d_a^2 \cdot \frac{1}{d_g} \cdot \frac{\epsilon_g}{4\pi} \cdot \frac{1}{9} \times 10^{-11}} \quad (2)$$

数値例として、主ノズル幅 1.2 mm, アスペクト比 3 の純流体素子の主噴流の可視化に必要なオゾナイザを設計してみる。2.2 で述べたように、けい光強度と照射光強度が比例するから、けい光板上でノズル出口付近の主噴流の明るさが周囲の明るさの約 1/10 になるようにするには、(1) 式から、主噴流のオゾン濃度として約 40 mg/l を必要とする。素子への供給流体を空気とし、流量を最大 14 l/min とし、 f を 50 Hz とすれば、Fig. 3 から収率は約 70 g/kWh となる。必要なオゾン生成量は 36.6 g/hW となり、けっきょく 520 W の放電電力を持つオゾナイザが必要となる。誘電体を厚さ 0.15 cm の軟質ガラスとすれば、 $V_{ws} = 150 \times 10^3$, $\epsilon_g = 10$, $\epsilon_a = 1$, $v = 60 \times 10^3$ となり、 $s = 1$ とすれば (2) 式から空げき長 0.74 cm, 有効放電面積 651 cm², 放電空間容積 482 cm³ を得る。原料に酸素を用いれば収率が空気の場合の約 2 倍となり、有効放電面積も約 1/2 ですむ。

以上述べた設計法では、特に交流電圧を印加した場合に起こりやすい沿面放電の問題、絶縁破壊電圧に対する温度、電極面積、機械的圧力などの影響を考慮していないので、実際オゾナイザを製作する場合は、特

にこれらの点に留意する必要がある。

3. 実験

3.1 実験装置

Fig. 4 に観測装置を示す。紫外線の光源は 6 W 形低圧水銀灯で、スペクトル分布を Fig. 5 に示す。観測する流路を照射する紫外線をできるだけ平行にするために光源背面に反射鏡を置き、さらに直径 7 cm, 長さ 50 cm の筒 (内壁での反射を防ぐためカーボンを塗布) で紫外線を導いている。流体は、2 枚の紫外線透過フィルタの間に流す。用いたフィルタはコーニング社製コードナンバー 7910 と 9863 の 2 枚で、それぞれの紫外線透過特性を Fig. 6 に示す。

Fig. 4 Arrangement of experimental apparatus

Fig. 5 Spectrum of low-pressure mercury lamp emission

けい光板は、厚さ 1.5 mm のガラス板にけい酸亜鉛 ($ZnSiO_4-Mn$) を沈殿法によって塗布したもので、塗布膜厚は発光効率が最大となる 4 mg/cm² にした。けい光の強さの測定はサンドイッチ形 CdS 光導電素子

(1) 7910 (number of corning filter glass code)
(2) 9863

Fig. 6 Transmission curves of the filters

を用いて行なった。その分光感度特性と照度-明抵抗特性を Fig. 7, Fig. 8 にそれぞれ示す。本実験における測定範囲である照度 0.1 Lx 付近では、照度と明抵抗

Fig. 7 Spectral response of CdS photoconductive cell

Fig. 8 CdS photoconductive cell resistance vs. illumination

の間に良好な直線性がある。受光面直径は 1 mm である。けい光板の直径 1 mm の部分のけい光のみを CdS 素子に導くために内径 1 mm 長さ 6 mm の内壁が無反射の筒を受光面上に垂直に取付けた。

試作したオゾナイザの構造を Fig. 9 に

示す。製作の容易さから平板形にした。誘電体には厚さ 0.2 cm のソーダガラスを用い、電極にはアルミはくを用いている。空げき長は 0.15 cm, 有効放電面積は 190 cm² のものを 12 層重ねてあり、計 2280 cm², 放電空間容積 342 cm³ である。昇圧変圧器は漏えい変圧器で、50 Hz 100 : 9000 V, 250 VA のものである。

配管はオゾンに直接触れる部分に塩化ビニルパルプを用いた。原料ガスの脱湿は主として空気の場合問題になるが、酸素の場合もシリカゲルによって行なった。

Fig. 9 Structure of the ozonizer

3.2 観測装置の特性

試作した観測装置において、透過紫外線の強さと CdS 光導電素子によって測定したけい光強さとの間の比例関係を確かめるために、光路途中に紫外線透過フィルタ (透過率約 80% のもの) を 1~7 枚そう入して、紫外線の強さを変えることによって行なった実験結果を Fig. 10 に示す。良好な直線性がみられた。

Fig. 10 Intensity of fluorescence vs. intensity of ultraviolet ray

この結果と Lambert-Beer の法則から、オゾン濃度と、CdS 光導電素子によるけい光強さの測定値をもとにした紫外線吸収率の対数との間に比例関係があると考えられ、これについての実験結果を Fig. 11 に示す。

3.3 オゾナイザの特性

試作したオゾナイザについて、印加電圧と流量とをそれぞれ変化させ、オゾナイザを通過させた空気または酸素を、幅 1.2 mm, 深さ 3 mm の流路に導き、

Fig. 11 Ultraviolet absorptive characteristics of ozone

- (1) raw gas : O₂ ; 50 Hz 5 400 V
- (2) " : O₂ ; 50 Hz 4 000 V
- (3) " : O₂ ; 50 Hz 3 200 V
- (4) " : air ; 50 Hz 5 400 V
- (5) " : air ; 50 Hz 4 000 V
- (6) " : air ; 50 Hz 3 200 V

Fig. 12 Characteristics of the ozonizer

けい光板のけい光強さを CdS 光導電素子によって測定した。

Fig. 12 は空気または酸素がオゾンナイザ内に滞留した時間と、紫外線吸収率 $(I_t - I_d) / (I_t - I_a)$ の対数との関係を示している。 I_t は流路内にオゾンがないときの CdS 素子の光電流値、 I_t はオゾンを含んだ流れのあるときの光電流値で、 I_d は暗電流である。 $\log (I_t - I_d) / (I_t - I_a) = abc = 0.078 \times 0.3 \times c$ の関係から得たオゾン濃度 c の目盛を併記した。

原料ガスが空気の場合と酸素の場合では、オゾンナイザの能率が約 2.5 倍違っている。試作したオゾンナイザの場合、平板形のため沿面放電を起こしやすく、ガラ

Fig. 13 Current-voltage characteristics of the ozonizer

スの材質の不均一さのために絶縁破壊電圧が低下する傾向にあったので、印加電圧の最高値は 5 400 V にとどめた。Fig. 13 は試作オゾンナイザへの印加電圧と電流との関係を示したものである。

3.4 流れの観測

試作したオゾンナイザの能力の制約により、原料ガスとして酸素を用いた。なお、酸素の空気に対する比重は、標準状態で 1.105 である。動粘度は空気 13.22 cSt に対して酸素は 13.43 cSt である。

写真撮影は、ASA 400 のフィルムを用い、絞り 3.5 ～ 5.6、シャッタースピード 1/15 ～ 1/30 で接写した。

3.4.1 平行平板の間を流れる噴流の観測 観測に用いたノズルは幅 1.2 mm、アスペクト比 3 である。

Fig. 14-1 は 2 次元自由噴流で、噴流のレイノルズ数 (ノズル幅を代表長さとした) をそれぞれ 630, 740, 1 520 付近に変化させたものである。この自由噴流に側壁が与える影響を見たのが Fig. 14-2 であり、噴流のレイノルズ数は約 750 である。(c) は側壁角を大き

Fig. 14-1 Visualization of two dimensional free jet flow

Fig. 14-2 Effect of wall on the jet flow ($R_e = 750$)

くしていったときの噴流付着限界付近の流れである。

Fig. 14-3 は、スプリッタと側壁の影響を示している。噴流レイノルズ数は約 740 で、(a)はくさび形のスプリッタの場合である。(b)は先端にカスプを持つものの場合で、側壁がないと噴流は激しく振動し、側壁を付加すると付着噴波の一部がカスプによってそがれ、それが再び噴流にぶつかり、渦を形成して付着を強める働きをしていることが見られる。

Fig. 14-3 Effect of wall and splitter on the jet flow ($Re=740$)

3.4.2 側壁付着要素子内の流れの観測 観測に用

Fig. 15 Pattern of wall-attachment amplifier for the experiments

いたモデル素子の形状、寸法を **Fig. 15** に示した。供給ノズル幅は 1.2 mm でアスペクト比が 3 である。

Fig. 16 は供給圧力をゼロから徐々に上げていき、主噴流が付着流になるまでの過程を示す。(a)は噴流レイノルズ数が 630 付近の場合で、主噴流はややかたよりを示しているが、まだ付着が安定せず、両出力口に流出している。(b)は 810 付近のときで、かなり安定した付着を示しているが、スプリッタ先端に主噴流の端が触れて、渦が生じている。さらに噴流レイノルズ数を増して 1040 付近にすると、(c)に示すように主噴流は安定した付着流となり、スプリッタ先端の渦は生じない。

Fig. 17 は制御流をゼロから徐々にふやしていき、主噴流が切替わるまでの過程を示している。供給圧力は 17 mmHg で、主噴流のレイノルズ数は約 6500 である。(a)は制御口を開放した場合で、(b)は制御口圧力 125 mmAq、(c)では 170 mmAq でかろうじて付着を保っている。この制御圧力を越えると切換えが

Fig. 16
Effect of supply pressure on main jet flow in wall-attachment amplifier

(a) $Re=630$

(b) $Re=810$

(c) $Re=1040$

Fig. 17 Effect of control jet flow on the main jet flow ($P_s=17 \text{ mmHg}$, $R_s=6500$) Fig. 18 Effect of load resistance on the main jet flow ($P_s=12 \text{ mmHg}$, $R_s=3500$)

Fig. 19 Effect of supply pressure on the main jet, when ozone is contained in entrained flow through control nozzleless

起きる。(d)はその切換えが起きた直後である。Fig. 18は負荷をゼロから徐々に増していき、主噴流が切換わる直前までの過程を示している。供給圧力は 12 mmHg で、主噴流のレイノルズ数は約 3520 で、(a)は両出力ともに負荷がかかっていない状態である。(b)では主噴流付着側出力に比較的小さな負荷がかかっている場合で、すでに主噴流の端がスプリット先端に触れて大きな渦を生じているが、主噴流はまだ非付着側に流出してはいない。(c)はさらに負荷を増して行き、主噴流の切換えに必要な最小の負荷がかかっている状態であり、この直後に主噴流の切換えが起きた。

Fig. 19では、3台のオゾナイザの入口を開放して、出口をそれぞれ左右の制御口、非付着側出力口に接続し、吸込み流にオゾンを混入した。供給流を通常の空気流として、この供給圧力を種々変えたものである。各ポートへのオゾナイザの接続が主噴流に与える影響は無視できる程度であった。

4. お わ り に

本方式による気体流れの可視化の特長をあげる。

1) トレーサであるオゾンが気体で、かつ必要な混入量がきわめて少量 ($2 \text{ Vol} \%$ で十分) であり、また混入のために流れの温度が変わることもないので、流れを乱さない。

2) 原寸モデルに適用できる。

3) 観測窓をよごさないので非定常流れの観測が可能である。

4) トレーサの混合が空間的にも時間的にも一様であるから、噴流の巻き込みなどの定量的観測が可能である。

5) 写真撮影が可能である。

6) 流れの全体および局所の観測が可能である。

7) トレーサの発生、混入が容易である。

本方式をさらに完全なものにするために、トレーサであるオゾンを実験室に導入し(照射紫外光も同様

にパルス状に変化させれば両者の相関がとれる), 流れの完全な定量的観測を可能とすることが考えられる。

これを可能にするためには, 非常に強力な放電現象により瞬間的にオゾンが発生する技術の開発, あるいは空気と高濃度のオゾンガスを交互に流路に供給し, しかも供給圧を変化させることなく一定に保つ技術の開発が必要である。後者の技術の開発の可能性をすでに確かめ, 現在実験中である。これは, 低圧水銀灯が 100 Hz で点滅すること (電源に 50 Hz を用いた場合) を利用したものであり, 2つの側壁付着形素子のおのにおにオゾンガスと空気を供給し, これらに 100 Hz の切換え信号を同期して加え, おのおの出力流を合流させたものを, 観測流路への供給流とする方法である。これにより, けい光板上に現われた流れの中のしまの間隔, 形状から流速, 速度分布が得られる。現在,

肉眼では観測できているが, コントラストの不足のため満足な写真が得られていない。

気体, 液体を問わず, 流れの可視法として, 本方式の原理, すなわち非可視光線を吸収する物質をトレーサとして用い, 光ルミネッセンスを利用して可視化する方法は, 非常に有効なものと思われる。

最後に, 本実験に協力された東京工業大学学生佐瀬昭君に感謝致します。またけい光物質と資料をこころよく提供された大日本塗料株式会社, ならびに Cds 光導電素子と資料を提供された松下電気産業株式会社に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) B. Kovaliv et E. Briner : Helv. Chim. Acta, **35**, 2283 (1952)
- 2) オゾナイザハンドブック (1960-コロナ社)

第 7 卷 第 2 号 正 誤 表

(須藤二全・戸恒 明著「2相サーボモータの振動トルクの解析」)

ページ	欄	行	誤	正
107	右	(15) 式の一部	$=2\left(\frac{B_m}{2}\right)^2(lr)^2N_r\left[\frac{1+K^2}{2}\right]$	$=2\left(\frac{B_m}{2}\right)^2(lr)^2N_r\left[\frac{1+K}{2}\right]^2$
108	左	(16) 式の一部	$-\frac{\left(\frac{1-K^2}{2}\right)\left(\frac{R_r}{2-s}\right)}{\left(\frac{R_r}{2-s}\right)^2+(\omega L_r)^2}$	$-\frac{\left(\frac{1-K}{2}\right)^2\left(\frac{R_r}{2-s}\right)}{\left(\frac{R_r}{2-s}\right)^2+(\omega L_r)^2}$
108	右	(18) 式の一部	$-\frac{ \dot{V}_{mb1} ^2\left(\frac{r_2}{2-s}\right)}{\left(\frac{r_2}{2-s}\right)^2+x_2^3}$	$-\frac{ \dot{V}_{mb1} ^2\left(\frac{r_2}{2-s}\right)}{\left(\frac{r_2}{2-s}\right)^2+x_2^2}$
108		(20) 式分母の一部	$+\left\{r_1(x_2+x_m)+(x_1+x_m)\left(\frac{r_2}{s}\right)^2\right\}$	$+\left\{r_1(x_2+x_m)+(x_1+x_m)\left(\frac{r_2}{s}\right)\right\}^2$
110		(41) 式分母の一部	$+\left\{r_1x_m+(x_1+x_m)\left(\frac{r_2}{s_1}\right)\right\}$	$+\left\{r_1x_m+(x_1+x_m)\left(\frac{r_2}{s_1}\right)\right\}^2$