熱線を用いた CO₂ 軸対称噴流拡散場の二成分瞬間速度・瞬間濃度の同時計測*酒井康彦^{*1}, 長田孝二^{*2}, 久保貴^{*3},
市野修平^{*4}, 堀内健二^{*4}Simultaneous Measurement of Instantaneous Two-Component Velocities and Concentration in an Axisymmetric CO₂ Turbulent Jet Diffusion Field by Using Composite Hot-Wire ProbeYasuhiko SAKAI^{*1}, Kouji NAGATA, Takashi KUBO, Shuhei ICHINO and Kenji HORIUCHI^{*1}Department of Mechanical Science and Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-8603 Japan

Simultaneous measurements of instantaneous two-component velocities and concentration are conducted in an axisymmetric CO₂ turbulent jet diffusion field. Three probes are used. The first is the 'double probe' consisting of two concentration-sensitive I-type hot-wire probes for the simultaneous measurement of instantaneous axial velocity and concentration. The second is the 'Chassaing type' X hot-wire probe, which is insensitive to local concentration, for measurement of instantaneous two-component velocities in the CO₂ diffusion field. The third is the composite probe consisting of the double and Chassaing-type X probe for simultaneous measurement of instantaneous two-component velocities and concentration. The results show that instantaneous two-component velocities and concentration of CO₂ can be measured by using the present composite probe.

Key Words : Jet, Turbulence, Axisymmetric Flow, Turbulent Mixing, Hot-Wire Anemometry

1. 緒 言

気中におけるガスの拡散現象を明らかにすることは, ガス混合装置の設計や大気中での汚染物質の拡散予測等と関連して重要である。また, 気中における局所の瞬時ガス濃度を測定できるセンサーを開発することは, 工業的に非常に重要である。熱線あるいは熱膜プローブを用いてガスの瞬間濃度を測定する試みは古くから行われており, ヘリウムガスと空気の混合に関しては, Way & Libby⁽¹⁾⁽²⁾によって干渉プローブと呼ばれるプローブが提案された。このプローブは熱膜プローブと熱線プローブで構成され, 加熱された熱膜と熱線を熱的に干渉する程度まで近接して設置することにより, 熱線と熱膜の出力からヘリウムガスの瞬間速度と瞬間濃度を決定するものである。その後, この干渉プローブは二成分瞬間速度と瞬間濃度の同時測定⁽³⁾⁽⁴⁾にも応用されている。一方, Brown & Rebollo⁽⁵⁾は熱線と超音速ノズルを組み合わせたプローブ(熱線濃度計)を用いて混合気体の瞬間濃度を測定する方法を提案している。このプローブと通常の熱線プローブを組み合わせることにより, 混合気体の一成分瞬間速度と瞬間濃度を同時測定する試みもなされている⁽⁶⁾。しかし, 熱線濃度計と熱線プローブの干渉を避けるためにプローブ同士を 2 mm 程度離さなければならず⁽⁶⁾, 超音速ノズルで構成される熱線濃度計の大きさを考えると, 二成分速度測定用の X 型プローブとの組み合わせは難しいと思われる。

CO₂ ガスと空気の混合に関しては, Chassaing⁽⁷⁾は熱線出力の濃度依存性と加熱比依存性が大きいという特性を利用して, CO₂ ガスの瞬間濃度と一成分瞬間速度の同時測定を行っている。しかしながら, この方法では, 一本

* 原稿受付 2010 年 5 月 26 日

^{*1} 正員, フェロー, 名古屋大学大学院工学研究科 (〒 464-8603 愛知県名古屋市千種区不老町)^{*2} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科^{*3} 正員, 名城大学理工学部 (〒 468-8502 愛知県名古屋市天白区塩釜口 1-501)^{*4} 名古屋大学大学院工学研究科

Email: ysakai@mech.nagoya-u.ac.jp

Fig. 1 Schematic of the probes: (a) the ‘double probe’ for simultaneous measurement of instantaneous axial velocity and CO₂ concentration, (b) the Chassaing type X-probe for measurement of instantaneous two-component velocities and (c) the composite probe for simultaneous measurement of instantaneous two-component velocities and CO₂ concentration

Fig. 2 Calibration nozzle

の熱線の加熱比を濃度感度がなくなるように調整、固定するため、もう一本の熱線の加熱比をどのように設定しても、二本熱線プローブとしての濃度感度の向上が望めないという欠点があった。そのため著者ら⁽⁸⁾はさらなる濃度感度向上のために、加熱比が大きく異なり、かつどちらも濃度依存性をもつ二本の熱線プローブを用いて、それらの出力電圧から速度・濃度への変換方向を考案し、実際に格子乱流中の CO₂ 噴流拡散場を測定し、その有効性を確かめている。ただし、速度については一成分のみであり、二成分速度測定との組み合わせについては、これまでのところ、その試みはなされていない。

そこで、本研究では、熱線法により、二成分瞬間速度と CO₂ ガスの瞬間濃度を同時測定するシステムを開発し、CO₂ ガス噴流拡散場で測定を行った。まず、I 型熱線を二本用いることで一成分瞬間速度と瞬間濃度の同時測定を行った。次に、加熱比を調節することで濃度感度をなくした X 型熱線プローブを用いて噴流の速度場を計測した。最終的には、I 型熱線二本と X 型熱線プローブを組み合わせた複合プローブを作製し、二成分瞬間速度と瞬間濃度の同時測定を行った。本報では、これらのプローブを用いた CO₂ 噴流拡散場の測定結果について報告する。

2. 熱線による瞬間速度・瞬間濃度の同時測定方法

2.1 各加熱比における熱線出力電圧の濃度依存性

まず、一本の I 型熱線プローブについて考える。その場合、熱線からの出力電圧は、気種の物性と濃度に依存する（温度一定の場合）ことが知られている。CO₂ と空気の混合気体の場合、熱線の加熱比 $\varepsilon_R = (R_w - R_0)/R_0$ （ここで、 R_w : 熱線の抵抗、 R_0 : 常温での熱線の抵抗）を変えることによって出力電圧と濃度の関係を変化させることが可能であり⁽⁷⁾、低加熱の場合には空気流中のほうが CO₂ 流中よりも同じ風速に対する出力電圧が高く、加熱比が高くなるにつれてその大小関係が逆転する⁽⁸⁾。また、加熱比を適度に調節すれば CO₂ 濃度に関係なく熱線の出力電圧から一意的に流速を決定することができる。この方法は Chassaing⁽⁷⁾によって提案されており、本研究では CO₂ に対して濃度感度のない加熱比を有する熱線のことを Chassaing 式熱線と呼ぶ。また、Chassaing 式熱線よりも高加熱の熱線を高加熱比熱線、Chassaing 式熱線よりも低加熱の熱線を低加熱比熱線と呼ぶこととする。

Fig. 3 Calibration of hot-wire probes: (a) for the low overheat-ratio probe and (b) for the high overheat-ratio probe

Fig. 4 Determination of (a) instantaneous velocity and (b) instantaneous concentration

2.2 二本熱線プローブ

軸方向瞬間速度と瞬間濃度の同時測定には、図 1(a) に示す I 型プローブ二本を平行に並べたプローブを用いた。以降、このプローブを「二本熱線プローブ (double probe)」と呼ぶ。熱線には銀でコーティングされた白金線 (ウォラストン線) を用い、真鍮製のブロングにはんだ付けした後、硝酸でエッチング処理を行い、銀を取り除いて受感部 (直径 $5\ \mu\text{m}$ 、長さ $1\ \text{mm}$) とした。二本の熱線間の距離は互いに干渉しない約 $0.4\ \text{mm}$ とした。二本の熱線のうち一方を低加熱比 $\varepsilon_R = 0.2$ 、他方を高加熱比 $\varepsilon_R = 1.2$ とした。

プローブの較正には図 2 に示すような出口直径が $10\ \text{mm}$ のノズルを使用した。ノズルの側面にはノズル内の静圧を測定するために直径 $0.7\ \text{mm}$ の穴がけられており、圧力センサーを用いてノズル内の静圧を測定した。ノズル内静圧と出口流速の関係をあらかじめ検定しておくことにより、ノズル出口における流速を求めた。プローブをノズル出口に設置し、ノズル出口流速を徐々に変化させ圧力センサと熱線の出力を同時にサンプリングすることにより、熱線出力と流速の関係が得られる。熱線からの出力は CO₂ 濃度に依存するため、ノズルから噴出させる空気・CO₂ 混合気の濃度を変えて較正を行い、各濃度における熱線出力と速度の関係を求めた。

2.3 瞬間速度と瞬間濃度の決定方法

空気および CO₂ ガス中での較正曲線が加熱比により逆転する性質を利用して、以下の方法で速度と濃度を決定した。図 3(a), (b) は各々、I 型の低加熱比熱線および高加熱比熱線の出力電圧と速度の関係を CO₂ の体積濃度をパラメータとして示したものである。図 3(a) に示すように、まず、低加熱比熱線の較正曲線と測定した低加熱比熱線の出力電圧 E_1 から各 CO₂ 濃度に対応する流速 $U'_0, U'_{20}, U'_{40}, U'_{60}, U'_{80}, U'_{100}$ を求める。ここで、下付添字 (0 ~ 100) は CO₂ の体積濃度を表す。これらの値と高加熱比熱線の較正曲線を用いて高加熱比熱線の各濃度に対する熱線出力電圧 $E'_0, E'_{20}, E'_{40}, E'_{60}, E'_{80}, E'_{100}$ の値を求める。すると、 $E'_{0\sim 100}$ と濃度を仮定したときの速度 $U'_{0\sim 100}$ の関係が得

Fig. 5 Calibration curve for Chassaing-type probe

Fig. 6 Schematic of experimental apparatus

られる．そして，図 4(a), (b) のように，それらの電圧と速度および電圧と濃度の関係を直線近似し，測定された高加熱比熱線の出力電圧 E_2 から瞬間速度 U_1 および瞬間濃度 C_1 を決定する．同じ操作を高加熱比熱線を基準にして行い，低加熱比熱線の出力から瞬間速度 U_2 および瞬間濃度 C_2 を決定する．最終的には， U_1 と U_2 ， C_1 と C_2 をそれぞれ平均して，瞬間速度 U と瞬間濃度 C を決定する．

2.4 Chassaing 式熱線プローブによる二成分瞬間速度測定

加熱比を調節することにより濃度感度をなくした X 型熱線プローブ (Chassaing 式 X 型熱線プローブ: 図 1(b)) を用いて二成分瞬間速度の測定を行った．熱線にはタングステン線を用いた．受感部は直径 $5\ \mu\text{m}$ ，長さ $1\ \text{mm}$ である．加熱比を $\varepsilon_R = 0.78$ とした場合の検定曲線を図 5 に示す．較正には前述の較正用ノズルを用いた．図 5 より，CO₂ 濃度に依らず検定曲線が一致することがわかる．

2.5 四本熱線プローブによる二成分瞬間速度と瞬間濃度の同時測定

作製した四本熱線プローブ (X-double probe) の概略を図 1(c) に示す．このプローブは濃度測定用の二本熱線プローブと速度測定用の Chassaing 式 X 型熱線プローブで構成され，X 型熱線プローブの中心点から $0.5\ \text{mm}$ 後方 (下流側) に二本熱線プローブを配置したものとなっている．プローブには直径 $0.4\ \text{mm}$ のピアノ線を用い，先端は鋭利にしてある．二本熱線プローブ部分の受感部の詳細は前述の通りである．Chassaing 式 X 型熱線プローブ部分については，二本熱線プローブと組み合わせるためにプローブの間隔が $1\ \text{mm}$ となっている．したがって，X プローブの熱線には受感部 (直径 $5\ \mu\text{m}$ ，長さ $1\ \text{mm}$) を除いて銅メッキされたタングステン線を用いた．二本熱線プローブの熱線は低加熱比 ($\varepsilon_R = 0.2$) と高加熱比 ($\varepsilon_R = 1.2$) に，X 型熱線プローブの熱線の加熱比は濃度感度がなくなる $\varepsilon_R = 0.78$ に設定した．X 型熱線プローブと二本熱線プローブによって得られる測定値の間にはわずかな時間遅れが存在するが，この遅れ時間は Taylor の凍結仮説を用いて時系列をずらすことで補正した．

3. 実験装置および実験条件

3.1 実験装置

実験装置 (テストセクション) の概略を図 6 に示す．風洞は吹出し型であり，送風機，ディフューザ，整流部，縮流胴，テストセクション，および排気部で構成される．縮流胴出口の寸法は $0.31\ \text{m} \times 0.31\ \text{m}$ であり，縮流胴で発生した境界層を排除するために，縮流胴とテストセクションの間には $5\ \text{mm}$ の隙間が存在する．したがって，テストセクションの断面は $0.3\ \text{m} \times 0.3\ \text{m}$ である．テストセクション入口から $0.2\ \text{m}$ の位置に乱流格子を設置した．乱流格子を構成する棒 (円柱) の直径は $3\ \text{mm}$ ，格子間隔は $M = 15\ \text{mm}$ である．乱流格子の閉塞率は 0.36 である．格子面の中央を通る格子棒の一本を格子棒と外径が同一の中空のパイプとし，流れ方向に長さ $15\ \text{cm}$ の CO₂ 噴出用パイプ (内径 $d = 3\ \text{mm}$ ，外径 $3.2\ \text{mm}$) を設けた．座標系は CO₂ 噴出用パイプ出口中心を原点とし，下流方向に x ，

Fig. 7 Axial variations of mean values

Fig. 8 Radial variations of mean values

半径方向に r とした。

3.2 実験条件

本研究では、CO₂ ガスがテストセクション内に蓄積するのを防ぐために周囲流（主流）を設けた。主流の流速を $U_0 = 6.0$ m/s、CO₂ ガスの噴流出口速度を $U_j = 19.0$ m/s とした。このとき、噴流出口速度 U_j の主流に対する相対速度を用いた噴流レイノルズ数は $Re_j = (U_j - U_0)d/\nu_{CO_2} = 5,000$ 、格子間隔に基づく主流のレイノルズ数は $Re_M = U_0M/\nu_{air} = 6,000$ である。ここで、 ν_{CO_2} および ν_{air} はそれぞれ CO₂ ガスと空気の動粘性係数である。

測定は中心軸上 ($r = 0$) および噴流出口下流の三断面 ($x/d = 15, 30, 45$) で行われた。ただし、四本熱線プローブによる測定は $x/d = 30$ の断面でのみ行われた。サンプリング周波数を 10 kHz、サンプリング点数を 262,144 (約 26 秒) とした。

4. 結果および考察

4.1 平均値

軸上平均流速 U_c の中心軸上変化を図 7(a) に示す。横軸は噴流出口直径 d で無次元化された下流方向距離 x/d を、縦軸は軸上平均速度 U_c の主流に対する相対速度 $(U_c - U_0)$ を噴出速度 U_j の主流に対する相対速度 $(U_j - U_0)$ で無次元化した値、およびその逆数を示している。図 7(a) より、二本熱線プローブと Chassaing 式 X 型熱線プローブによる測定値が良好に一致することが確認できる。なお、分布が直線となる $x/d = 10$ 以降において最小二乗近似した場合の傾き (図中の実線) は 0.161 であった。参考として、山崎⁽⁹⁾による CO₂ 噴流の測定結果 ($Re_j = 18, 100$)、Panchapakesan & Lumley⁽¹⁰⁾による空気噴流の測定結果 ($Re_j = 11,000$) および Papanicolaou & List⁽¹¹⁾による水中噴流の測定結果 ($Re_j = 11,000$) も図中にプロットした。ただし、 U_c の中心軸上変化は噴出ガス密度に依存する⁽⁹⁾の

Fig. 9 Axial variations of rms values

で注意が必要である．本実験で用いた CO₂ の場合，空気に対する比重はおよそ 1.53 である．

平均濃度 C の中心軸上変化を図 7(b) に示す．縦軸は噴流出口濃度 C_j で無次元化された平均濃度およびその逆数である．参考として山崎ら⁽⁹⁾および Papanicolaou & List⁽¹¹⁾による測定結果もプロットした．図 7(b) より，平均濃度の逆数の分布も下流方向に直線的に増加することが確認できる．分布が直線となる $x/d = 10$ 以降において最小二乗近似した場合の傾き (図中の実線) は 0.189 であった．なお， C の中心軸上変化も噴出ガス密度に依存することが報告されている⁽⁹⁾．

軸方向平均流速 U ，半径方向平均流速 V および平均濃度 C の半径方向変化を図 8 に示す．縦軸は中心軸上における平均相対速度あるいは平均濃度で無次元化された平均流速および平均濃度であり，横軸はそれぞれの断面における軸方向平均流速あるいは平均濃度の半値幅 (それぞれ b_u, b_c) で無次元化された半径方向距離である． U および C に関しては，経験的近似曲線として知られる Gauss 分布によく一致し，各断面とも相似な分布となった．一方， V は原点を中心とした点対称の分布となり，噴流出口に近い $x/d = 15$ で下流の $x/d = 30$ や 45 よりも大きな値をもつ傾向が見られた．なお，いずれの分布においても，異なるプローブを用いた測定結果はほぼ一致しており，測定が精度よく行われていることが確認できる．

4.2 rms 値

軸方向および半径方向速度変動の rms 値の下流方向変化を図 9(a), (b) にそれぞれ示す．縦軸は相対速度 $(U_j - U_0)$ で無次元化された rms 速度およびその逆数である．参考として，山崎ら⁽⁹⁾による CO₂ 噴流中の u' の測定結果も図中にプロットした (山崎らの実験では，鉛直方向 rms 速度 v' と rms 濃度 c' の測定は行われていない)． u' の逆数は下流方向に直線的に増加し，Chassaing 式 X 型熱線プローブによる測定結果ともよく一致した．分布が直線となる $x/d = 10$ 以降において最小二乗近似した場合の傾き (図中の実線) は 0.325 であった．ただし，速度変動 rms 値の主流方向減衰は噴出ガス密度に大きく依存する⁽⁹⁾ことに注意が必要である． v' の逆数も u' の逆数と同様の分布傾

Fig. 10 Radial variations of rms values

向を示した．rms 濃度 c' の下流方向変化を図 9(c) に示す．縦軸は噴流出口濃度 C_j で無次元化された rms 濃度 c' ，およびその逆数である． c' の逆数は下流方向に直線的に増加し，分布が直線となる $x/d = 10$ 以降において最小二乗近似した場合の傾き（図中の実線）は 0.312 であった．

rms 速度 u' , v' ，および rms 濃度 c' の半径方向変化を図 4.1 に示す．縦軸は中心軸上におけるそれぞれの値 u'_c , v'_c , c'_c で無次元化されている．横軸は図 8 と同様である．図 4.1 より，いずれの分布においても，異なるプローブを用いて測定された結果はほぼ一致しており，変動値の測定も精度よく行われていることが確認できる．図 4.1(a) より， u' は中心軸からやや離れた場所でピークをもち，測定した三断面ともほぼ相似な形状であった．また， u' は他の研究者による測定値⁽⁴⁾⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾と比べてやや大きな値となったが，噴出ガス密度等の実験条件が異なるために定量的に比較することはできない．一方， v' (図 4.1(b)) は， u' の分布とは異なり，明確なピークを持たない分布となった．測定した三断面でほぼ相似な形状となることは u' の場合と同様である．なお，本研究では周囲流が格子乱流なので，噴流外縁部でも格子乱流の乱れのために，速度の rms 値は零とならない．図 4.1(c) より， c' に関しては u' と同様に中心軸からやや離れた場所でピークをもち， $x/d = 30$ 以降で相似な分布となった．実験条件が異なるため定量的な比較はできないが，本研究で得られた c' の分布傾向は，他の研究者による測定値⁽⁴⁾⁽¹²⁾と同様であった．

4.3 レイノルズ応力

レイノルズ応力 $\langle uv \rangle$ の半径方向変化を図 11 に示す．縦軸の $\langle uv \rangle$ は，中心軸上における変動の rms 値で無次元化されている．横軸は図 8 と同様である．参考として Panchapakesan & Lumley⁽¹⁰⁾による結果もプロットした．レイノルズ応力の分布は原点に対して点対称な分布となり， $x/d = 30$ 以降で相似な分布となった．また，Chassaing 式 X 型熱線プローブと四本熱線プローブによる測定結果はほぼ一致しており，レイノルズ応力の測定が精度よく行われていることが確認できる．

Fig. 11 Radial variation of Reynolds stress

Fig. 12 Axial variation of axial turbulent mass flux

(a) Axial turbulent mass flux

(b) Radial turbulent mass flux

Fig. 13 Radial variations of turbulent mass flux

4.4 乱流物質フラックス

軸方向乱流物質フラックス $\langle uc \rangle$ の中心軸上変化を図 12 に示す．縦軸の $\langle uc \rangle$ は中心軸上の軸方向平均流速と平均濃度の積 $U_c C_c$ で無次元化されている．また，こう配拡散の概念が成立する際に x/d に比例することが予測される $\sqrt{U_j C_j / \langle uc \rangle}$ の分布もあわせて示す．図 12 より， $x/d = 10$ 以降では $\sqrt{U_j C_j / \langle uc \rangle}$ は直線分布を示すことがわかる．なお，中心軸上では常に $\langle vc \rangle = 0$ である．

軸方向乱流物質フラックス $\langle uc \rangle$ および半径方向乱流物質フラックス $\langle vc \rangle$ の半径方向分布を図 13 に示す．縦軸の無次元化は図 12 と同様である．図 13 中には，Panchapakesan & Lumley⁽⁴⁾によるヘリウムガスの乱流物質フラックス，Chevray & Tutu⁽¹²⁾，Pietri et al.⁽¹³⁾による乱流熱フラックスの測定値も参考としてプロットしている． $\langle uc \rangle$ に関しては，測定値にばらつきが大きいものの，相似に近い分布が得られた．また，その分布傾向は，他の研究者による測定値^{(4) (12) (13)}と同様である．一方， $\langle vc \rangle$ は原点に対して点対称な分布となった．また，他の研究者による測定値^{(4) (12) (13)}と同様の分布傾向を示した．なお，乱流フラックスの分布は噴出ガス密度やレイノルズ数に依存するため，既往データと定量的な比較をすることはできない．

4.5 結合確率密度関数

結合確率密度関数は乱流中でのスカラーの混合現象を明らかにするうえで，また，乱流のモデリングの観点からも非常に重要な乱流統計量の一つである⁽¹³⁾． $x/d = 30$ の $r/b_u = 0, 0.54, 1.08, 1.35$ において測定された半径方向速度変動 v と濃度変動 c の結合確率密度関数を図 14 に示す．縦軸と横軸の変動はそれぞれの rms 値で無次元化されている． v と c は中心軸上においては相関をもたないが (図 14(a))，中心軸から外縁部に向かうに従い，正の相関をもつようになることが確認できる．また，中心軸から離れるに従い間欠性が強くなるため，ピークが負の速

Fig. 14 Joint PDF of v and c Fig. 15 Axial variations of cospectra of u and c

度変動・負の濃度変動の領域に移っていき、その値も大きくなることからわかる。

4.6 コスペクトル

中心軸上における軸方向速度変動 u と濃度変動 c のコスペクトル K_{uc} の分布を図 15 に示す。横軸は周波数 f (Hz)，縦軸は軸方向乱流物質フラックス $\langle uc \rangle$ で無次元化されたコスペクトルを示す。図 15 より、噴流の上流部ではコスペクトルは-2 乘に近い傾きを示し、下流では-7/3 乘に近い傾きを示すことがわかる。ただし、図を省略するが、上流部では u と c のパワースペクトルに-5/3 乗を示す領域が現れなかったため、本実験結果からコスペクトルのべき乗則を議論する際には注意が必要である。

5. 結 言

本研究では、I 型熱線二本と Chassaing 式 X 型熱線プローブを組み合わせた複合プローブを作製し、CO₂ ガス噴流拡散場で二成分瞬間速度と瞬間濃度の同時測定を行った。平均値や変動 rms 値、レイノルズ応力、乱流物質フラックス、結合確率密度関数等を評価した結果、二成分瞬間速度と瞬間濃度が十分な精度で測定できていること

が確認された．今後，本測定法が噴流拡散場のみならず，様々な拡散場に対して応用されることが期待される．

謝 辞

本研究は，科研費 (22360076 および 22360077) および独立行政法人日本学術振興会と英国 RS との二国間交流事業 (共同研究) による支援を得て行われた．

文 献

- (1) Way, J. & Libby, P. A., “Hot-Wire Probes for Measuring Velocity and Concentration in Helium-Air Mixtures”, *AIAA Journal*, Vol.8, No.5 (1970), pp.976-978.
- (2) Way, J. & Libby, P. A., “Application of Hot-Wire Anemometry and Digital Techniques to Measurements in a Turbulent Helium Jet”, *AIAA Journal*, Vol.9, No.8 (1971), pp.1567-1573.
- (3) Stanford, R. A. & Libby, P. A., “Further Applications of Hot-Wire Anemometry to Turbulence Measurements in Helium-Air Mixtures”, *The Physics of Fluids*, Vol.17, No.7 (1974), pp.1353-1361.
- (4) Panchapakesan, N. R. & Lumley, J. L., “Turbulence Measurements in Axisymmetric Jet of Air and Helium. Part 2. Helium Jet”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.246 (1993), pp.225-247.
- (5) Brown, G. L. & Rebollo, M. R., “A Small, Fast-Response Probe to Measure Composition of a Binary Gas Mixture”, *AIAA Journal*, Vol.10, No.5 (1972), pp.649-652.
- (6) 江良嘉信, “熱線利用による気体の濃度・速度の同時測定 (第 1 報, 測定原理)”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.56, No.528 (1990), pp.2358-2363.
- (7) Chassaing, P., “Heat Transfer from Cylindrical Anemometer Probes in CO₂-Air Mixtures”, *The Physics of Fluids*, Vol.20, No.8 (1977), pp.1260-1262.
- (8) Sakai, Y., Watanabe, T., Kamohara, S., Kushida, T. & Nakamura, I., “Simultaneous Measurements of Concentration and Velocity in a CO₂ Jet Issuing into a Grid Turbulence by Two-Sensor Hot-Wire Probe”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 22 (2001), pp. 227-236.
- (9) 山崎正和, 平沢信三, 城戸伸夫, 大屋正明 & 永田勝也, “乱流自由噴流の拡散過程における密度の効果”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.49, No.446 (1983), pp.2043-2052.
- (10) Panchapakesan, N. R. & Lumley, J. L., “Turbulence Measurements in Axisymmetric Jet of Air and Helium. Part 2. Air Jet”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.246 (1993), pp.197-223.
- (11) Papanicolaou, P. N. & List, E. J., “Investigation of Round Vertical Turbulent Buoyant Jet”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.195 (1988), pp.341-391.
- (12) Chevray, R. & Tutu, N. K., “Intermittency and Preferential Transport of Heat in a Round Jet”, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.88 (1978), pp.133-160.
- (13) Pietri, L., Amielh, M. & Anselmet F., “Simultaneous Measurements of Temperature and Velocity Fluctuations in a Slightly Heated Jet Combining a Cold Wire and Laser Doppler Anemometry”, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol.21 (2000), pp.22-36.