

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2002-62272  
(P2002-62272A)

(43) 公開日 平成14年2月28日 (2002.2.28)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード <sup>*</sup> (参考)		
G 0 1 N	25/18	G 0 1 N	25/18	J	2 F 0 3 5
G 0 1 F	1/69	G 0 1 P	5/12	A	2 G 0 4 0
G 0 1 P	5/12	G 0 1 F	1/68		1 0 3 B

審査請求 有 請求項の数7 OL (全14頁)

<p>(21) 出願番号 特願2000-250832(P2000-250832)</p> <p>(22) 出願日 平成12年8月22日(2000.8.22)</p> <p>特許法第30条第1項適用申請有り 2000年4月2日~6日開催の「Proceedings of the Third International Symposium on Turbulence, Heat and Mass Transfer」において文書をもって発表</p>	<p>(71) 出願人 391012224 名古屋大学長 愛知県名古屋市千種区不老町(番地なし)</p> <p>(72) 発明者 酒井 康彦 愛知県名古屋市緑区篠の風3-252 滝の水住宅10-207</p> <p>(72) 発明者 渡辺 貴勇 愛知県名古屋市名東区名東本町170 ライオンズマンション虹ヶ丘1-19</p> <p>(74) 代理人 100059258 弁理士 杉村 暁秀 (外2名)</p>
--	--

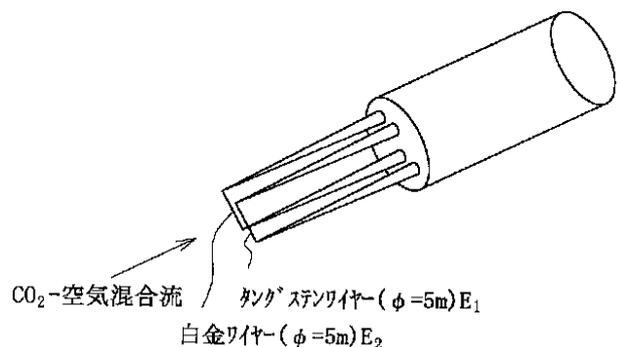
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 気体の濃度及び速度の同時測定法、及び測定用プローブ

(57) 【要約】

【課題】加熱比の微妙な調整が不要で、簡易に気体の濃度及び速度を同時に測定する方法を提供することである。

【解決手段】本発明の気体の濃度及び速度の同時測定用プローブは、熱線の濃度感度がなくなる加熱比より大きい加熱比の熱線と、熱線の濃度感度がなくなる加熱比より小さい加熱比の熱線と、からなることを特徴とする。本発明の気体の濃度及び速度を測定する同時測定方法は、前記プローブを用いて、被測定気体の種々の速度での前記小さい加熱比の熱線の既知の熱線出力電圧E<sub>1</sub>及び前記大きい加熱比の熱線の既知の熱線出力電圧E<sub>2</sub>と、被測定気体の濃度及び速度Uとの関係を示した較正マップを作成し、前記較正マップにより、気体の濃度及び速度を測定することを特徴とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 熱線の濃度感度がなくなる加熱比より大きい加熱比の熱線と、熱線の濃度感度がなくなる加熱比より小さい加熱比の熱線と、からなる気体の濃度及び速度の同時測定用プローブ。

【請求項2】 前記大きい加熱比の熱線が、タングステン、白金、白金イリジウム、白金ロジウムからなる群から選択される少なくとも1種であることを特徴とする請

$$da = \left| \frac{\partial(E_1^2, E_2^2)}{\partial(U, \Gamma)} \right| dU d\Gamma = \left| \frac{\partial E_1^2}{\partial U} \frac{\partial E_2^2}{\partial \Gamma} - \frac{\partial E_1^2}{\partial \Gamma} \frac{\partial E_2^2}{\partial U} \right| dU d\Gamma = |J| dU d\Gamma$$

(但し、式中、 $E_1$ は、被測定気体の種々の速度での小さい加熱比の熱線の出力電圧、 $E_2$ は、被測定気体の種々の速度での大きい加熱比の熱線の出力電圧、 $U$ は、被測定気体の速度、 $\Gamma$ は、被測定気体の濃度であり、 $J$ は、 $(U, \Gamma)$ 平面から $(E_1^2, E_2^2)$ 平面への変換のヤコビアンである。)で示される $da$ の値が、 $da > 0$ を満足する大小異なる加熱比の熱線からなることを特徴とする気体の濃度及び速度の同時測定用プローブ。

【請求項5】 請求項1~4に記載のプローブを用いて、被測定気体の種々の速度での前記小さい加熱比の熱線の既知の熱線出力電圧 $E_1$ 及び前記大きい加熱比の熱線の既知の熱線出力電圧 $E_2$ と、被測定気体の濃度及び速度 $U$ との関係を示した較正マップを作成し、前記較正マップにより、気体の濃度及び速度を測定する同時測定方法。

【請求項6】 前記較正マップが、前記小さい加熱比の熱線の熱線出力電圧 $E_1^2$ を横軸、前記大きい加熱比の熱線の熱線出力電圧 $E_2^2$ を縦軸とし、前記 $E_1$ 及び $E_2$ に対応する被測定気体の濃度及び速度がプロットされていることを特徴とする請求項5記載の方法。

【請求項7】 被測定気体が、二酸化炭素、 $C_2H_6$ 、Ar、Ne、COからなる群から選択されることを特徴とする請求項5又は6項記載の方法。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、気体の濃度及び速度の同時測定用プローブ、及び同時測定方法に関し、特に、2本の熱線を用いた気体の濃度及び速度の同時測定方法に関する。

## 【0002】

【従来の技術】従来において、濃度及び速度の同時測定のための優れた研究がいくらか報告されている。例えば、熱的に干渉した熱線及び熱フィルムセンサーからなる複合プローブを開発し、ヘリウム-空気混合ガスの濃度及び速度を、熱線及び熱フィルムセンサーの2つの出力電圧から決定することができることが知られている(Way & Libby)。

【0003】一方、炭酸ガス(相対的に小さい伝導性を有する)に対しては、異なる加熱比を有する2つの平行熱線センサーからなる別の複合プローブが知られている

請求項1記載のプローブ。

【請求項3】 前記小さい加熱比の熱線が、タングステン、白金、白金イリジウム、白金ロジウムからなる群から選択される少なくとも1種であることを特徴とする請求項1記載のプローブ。

【請求項4】 次式、

【数1】

(Chassaing等)。この方法では、二酸化炭素濃度に対して感度のなくなる熱線を使用することによって二酸化炭素濃度と無関係に速度を測定できることを利用するものである。この方法の原理は、以下のようである。

【0004】 $T_m = 400, 500, 600K (T_m = (T_o + T_w) / 2)$ 、ここで、 $T_o$ は気流の温度、 $T_w$ は熱線の温度である。)での二酸化炭素と空気の物理的性質( $\lambda$ 、Pr、ここで、 $\lambda$ は、気体の熱伝導率、Prは、プラントル数である。)を変えて、 $E^2$ と $U$ との関係を計算によって求める。 $T_o$ を288Kと仮定するならば、 $T_m$ の上記値に対してそれぞれ、 $T_w$ は、512、712、912Kである。そして、

$$\tau = (T_w - T_o) / T_o \quad (1)$$

によって定義される温度加熱比は、それぞれ0.77、1.47、2.17に相当する。図15は、これらの条件における計算結果を示す。図15から、 $\tau$ が小さい場合、二酸化炭素ガス気流における熱線出力電圧は、空気流でのものより小さいことが分かる。しかしながら、加熱比 $\tau$ がより大きくなるにつれて、2つの出力間の違いは、小さくなり、その後、2つの出力電圧の関係は逆転する。加熱比 $\tau = 1.47$ の場合は、電圧の差がほとんどなく、熱線の濃度に対する感度がかなり小さくなると思われる。この熱線の濃度に対する感度がかなり小さいか、ほぼゼロの場合の加熱比を、熱線の濃度がなくなる加熱比という。

【0005】仮に、加熱比 $\tau$ をうまく調整することにより、この電圧差を完全にゼロにすることができたとするならば、この熱線は、濃度変化には反応せず、いかなる濃度においても速度と電圧が一対一に対応する熱線となる。つまり、この熱線で速度を測定することができるというのがこの方法の原理である。この方法によれば、1本の熱線加熱比を調節することにより、熱線濃度感度をなくし、それにより速度を求め、そして、もう一方より低い加熱比の熱線により濃度を決定するものである。

## 【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、前述の熱線及び熱フィルムセンサーを用いる方法は、ヘリウムのような大きい伝導性ガスに対してのみ有益であり、小さい伝導性ガスに対しては測定不能又は困難であるという問題がある。

【0007】また、一本の熱線加熱比を調整する方法では、2本の熱線の電圧差を完全にゼロにしなれば、濃度変化による電圧の応答を無視することができないため、正確な速度の測定が不可能である。加えて、加熱比をうまく調整し、2本の熱線の電圧差を完全にゼロにすることは困難である。したがって、加熱比の微妙な調整が不要で、簡易に気体の濃度及び速度を同時に測定する方法が望まれる。しかし、このような簡易な測定方法は、これまで知られていない。

【0008】そこで、本発明の目的は、加熱比の微妙な調整が不要で、簡易に気体の濃度及び速度を同時に測定する方法を提供することにある。

【0009】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明者らは、熱線の濃度感度がなくなる加熱比に対してそれよりも低い加熱比及び高い加熱比を有するプローブを用いることによって、加熱比の微妙な調整が不要で、かつ、簡易な、気体の濃度及び速度の同時測定方

$$da = \left| \frac{\partial(E_1^2, E_2^2)}{\partial(U, \Gamma)} \right| dU d\Gamma = \left| \frac{\partial E_1^2}{\partial U} \frac{\partial E_2^2}{\partial \Gamma} - \frac{\partial E_1^2}{\partial \Gamma} \frac{\partial E_2^2}{\partial U} \right| dU d\Gamma = |J| dU d\Gamma$$

(但し、式中、 $E_1$ は、被測定気体の種々の速度での小さい加熱比の熱線の出力電圧、 $E_2$ は、被測定気体の種々の速度での大きい加熱比の熱線の出力電圧、 $U$ は、被測定気体の速度、 $\Gamma$ は、被測定気体の濃度であり、 $J$ は、 $(U, \Gamma)$ 平面から $(E_1^2, E_2^2)$ 平面への変換のヤコビアンである。)で示される $da$ の値が、 $da > 0$ を満足する大小異なる加熱比の熱線からなることを特徴とする。

【0014】本発明の気体の濃度及び速度を同時に測定する同時測定法は、請求項1~4に記載のプローブを用いて、被測定気体の種々の速度での前記小さい加熱比の熱線の既知の熱線出力電圧 $E_1$ 及び前記大きい加熱比の熱線の既知の熱線出力電圧 $E_2$ と、被測定気体の濃度及び速度 $U$ との関係を示した較正マップを作成し、前記較正マップにより、気体の濃度及び速度を測定することを特徴とする。

【0015】本発明の気体の濃度及び速度を同時に測定する同時測定法の好ましい実施態様において、前記較正マップが、前記小さい加熱比の熱線の熱線出力電圧 $E_1^2$ を横軸、前記大きい加熱比の熱線の熱線出力電圧 $E_2^2$ を縦軸とし、前記 $E_1^2$ 及び $E_2^2$ に対応する被測定気体の濃度及び速度がプロットされていることを特徴とする。

【0016】本発明の気体の濃度及び速度を同時に測定する同時測定法の好ましい実施態様において、測定対象となる気体が、二酸化炭素、 $C_2H_6$ 、Ar、Ne、COからなる群から選択されることを特徴とする。

【0017】

【発明の実施の形態】本発明の気体の濃度及び速度の同時測定用プローブは、熱線の濃度感度がなくなる加熱比より大きい加熱比の熱線と、熱線の濃度感度がなくなる

法を見出した。

【0010】本発明の気体の濃度及び速度の同時測定用プローブは、熱線の濃度感度がなくなる加熱比より大きい加熱比の熱線と、熱線の濃度感度がなくなる加熱比より小さい加熱比の熱線と、からなることを特徴とする。

【0011】本発明の気体の濃度及び速度の同時測定用プローブの好ましい実施態様としては、前記大きい加熱比の熱線が、タングステン、白金、白金イリジウム、白金ロジウムからなる群から選択される少なくとも1種であることを特徴とする。

【0012】本発明の気体の濃度及び速度の同時測定用プローブの好ましい実施態様としては、前記小さい加熱比の熱線が、タングステン、白金、白金イリジウム、白金ロジウムからなる群から選択される少なくとも1種であることを特徴とする。

【0013】また、本発明の気体の濃度及び速度の同時測定用プローブは、次式、

【数2】

加熱比より小さい加熱比の熱線と、からなる。

【0018】熱線の濃度感度がなくなる加熱比とは、 $E_2$ - $U$ 曲線において、空気流と測定対象となる気体流との出力電圧の差がほぼゼロとなるような加熱比をいう。例えば、空気流及び $CO_2$ 流の場合、図15における $\tau = 1.47$ での加熱比をいう。この加熱比は、測定対象となる気体によって異なる。なお、加熱比としては、主として、温度加熱比 $\tau = (T_w - T_o) / T_o$  ( $T_o$ を288K、 $T_w$ を400、500、600Kとする。)、線抵抗に基づく加熱比 $R = (R_w - R_o) / R_o$ を挙げることができる。

【0019】加熱比の異なる2本の熱線を用いる理由は、気体の温度と速度という2つの未知数を決定するのに不可欠であり、また、精度の高い較正マップを作成するのに必要だからである。

【0020】本発明の気体の濃度及び速度の同時測定用プローブの好ましい実施態様としては、前記大きい加熱比の熱線が、タングステン、白金、白金イリジウム、白金ロジウムからなる群から選択される少なくとも1種である。

【0021】本発明の気体の濃度及び速度の同時測定用プローブの好ましい実施態様としては、前記小さい加熱比の熱線が、タングステン、白金、白金イリジウム、白金ロジウムからなる群から選択される少なくとも1種である。

【0022】なお、電気抵抗 $R$ は、

$$R = L / S$$

(但し、 $R$ は、熱線に固有な量の比例定数であり、 $L$ は、熱線の長さであり、 $S$ は、熱線の断面積である。)で表されるので、用いる熱線の直径 $d$ 、長さ $L$ を変える

ことによって、加熱比を変更することができる。

【0023】したがって、大小異なる加熱比の熱線として同一の材料を用いることができる。例えば、大小異なる加熱比の熱線として、大小異なる加熱比を有するように長さL、断面積Sを調節したタングステンのみを用いても良い。同様に、白金のみ、白金イリジウムのみ、又は白金ロジウムのみを用いて、大小異なる加熱比を有する熱線を設計し、熱線に同種材料を使用しても良い。すなわち、大小異なる加熱比の熱線として、異種材料を用いても良く、同種材料を用いても良い。

【0024】また、プローブの形状は、特に限定されない。例えば、図1のような形状のものを用いることができる。図1は、熱線プローブの概略図を示す図である。線径についても特に限定されず、例えば、2.5~10μm、

$$da = \left| \frac{\partial(E_1^2, E_2^2)}{\partial(U, \Gamma)} \right| dU d\Gamma = \left| \frac{\partial E_1^2}{\partial U} \frac{\partial E_2^2}{\partial \Gamma} - \frac{\partial E_1^2}{\partial \Gamma} \frac{\partial E_2^2}{\partial U} \right| dU d\Gamma = |J| dU d\Gamma$$

(但し、式中、E<sub>1</sub><sup>2</sup>は、被測定気体の種々の速度での小さい加熱比の熱線の出力電圧、E<sub>2</sub><sup>2</sup>は、被測定気体の種々の速度での大きい加熱比の熱線の出力電圧、Uは、被測定気体の速度、Γは、被測定気体の濃度であり、Jは(U、Γ)平面から(E<sub>1</sub><sup>2</sup>、E<sub>2</sub><sup>2</sup>)平面への変換ヤコビアンである。)で示されるdaの値が、da > 0を満足する大小異なる加熱比を有する熱線からなることを特徴とする。

【0028】da > 0としたのは、da > 0を満足する大小異なる加熱比を有する熱線からなるプローブであれば、較正マップを作成できるため、気体の濃度及び速度の同時測定を行え得るからである。

【0029】このプローブを気体の濃度及び速度の同時測定に使用し得ることを、以下に説明する。

【0030】まず、図2に示したように(U、Γ)平面と(E<sub>1</sub><sup>2</sup>、E<sub>2</sub><sup>2</sup>)平面の変換を考える。この場合、(U、

$$J = \frac{\partial(E_1^2, E_2^2)}{\partial(U, \Gamma)} = \begin{vmatrix} \frac{\partial E_1^2}{\partial U} & \frac{\partial E_1^2}{\partial \Gamma} \\ \frac{\partial E_2^2}{\partial U} & \frac{\partial E_2^2}{\partial \Gamma} \end{vmatrix} = \frac{\partial E_1^2}{\partial U} \frac{\partial E_2^2}{\partial \Gamma} - \frac{\partial E_1^2}{\partial \Gamma} \frac{\partial E_2^2}{\partial U}$$

よって、

【数6】

$$da = \left| \frac{\partial E_1^2}{\partial U} \frac{\partial E_2^2}{\partial \Gamma} - \frac{\partial E_1^2}{\partial \Gamma} \frac{\partial E_2^2}{\partial U} \right| dU d\Gamma$$

【0032】したがって、Jが0でなく、da > 0の場合に、(U、Γ)平面と(E<sub>1</sub><sup>2</sup>、E<sub>2</sub><sup>2</sup>)平面の変換が可能となり、特に、daが大きい場合に、感度が良く測定精度が高くなると考えられる。通常的气体流と空気流に対しては、E<sub>1</sub><sup>2</sup> / U > 0、E<sub>2</sub><sup>2</sup> / U > 0であるので、例えば、E<sub>1</sub><sup>2</sup> / Γ < 0、E<sub>2</sub><sup>2</sup> / Γ < 0、という状態、あるいは、E<sub>1</sub><sup>2</sup> / Γ > 0、E<sub>2</sub><sup>2</sup>

好ましくは、2.5~6μmである。より好ましくは、約5μmである。かかる範囲としたのは、10μm以上では、熱容量が大きく、周波数応答が悪いからであり、2.5μm以下では、強度が弱くなる虞があるからである。

【0025】受感部の長さは、特に限定されないが、例えば、0.5~2.0mm、好ましくは、0.5~1.2mmである。かかる範囲としたのは、熱線の長さLと直径dの比L/dが200程度が適当だからである。

【0026】2本の熱線の間隔は、空間分解能の向上という観点から、好ましくは、0.25~0.5mmである。

【0027】本発明の気体の濃度及び速度の同時測定用プローブは、次式

【数3】

)平面状の微小面積

【外1】

dā

は(E<sub>1</sub><sup>2</sup>、E<sub>2</sub><sup>2</sup>)平面上の微小面積daに変換されたとする。daと

【外2】

dā

には、次式の関係が成立する。

【数4】

$$da = \left| \frac{\partial(E_1^2, E_2^2)}{\partial(U, \Gamma)} \right| dā = |J| dU d\Gamma$$

【0031】ここで、J = (E<sub>1</sub><sup>2</sup>、E<sub>2</sub><sup>2</sup>) / (U、Γ)は変換ヤコビアンであり、次式で与えられる。

【数5】

J < 0という状態、すなわち低加熱比と高加熱比に対して熱線出力の温度依存性が逆転している場合、|J|の値は大きくなり、したがって測定精度が高くなると考えられる。例えば、CO<sub>2</sub>流と空気流中については、まさにこのような関係が成り立っており、この事実が2本平行熱線方式が有効である原因の1つとなっている。

【0033】しかし、温度依存性が逆転していなくても、|J|の値が0でなければ、すなわち、da > 0を満足すれば、濃度、速度の同時測定が可能である。なぜなら、da > 0を満足すれば、原理的にE<sub>1</sub><sup>2</sup> - E<sub>2</sub><sup>2</sup>較正マップを作成することが可能だからである。但し、da > 0であってもdaの値が小さい場合、濃度及び速度の測定対

象となる気体流及び空気流との  $E_1^2 - E_2^2$  較正曲線が接近しすぎるため、より正確な瞬時濃度及び瞬時速度を測定することが困難となる。

【0034】このように  $E_1^2 - E_2^2$  較正曲線が接近しているとしても、センサーの精度がそれほど要求されない製品用途に対しては、十分に有効な瞬時濃度及び瞬時速度を測定できる。したがって、精度があまり要求されないセンサーに対しては、 $d_a$ の値が小さい場合であっても、十分に本発明を適用することが可能である。

【0035】本発明の気体の濃度及び速度を同時に測定する同時測定法は、プローブを用いて、前記小さい加熱比の熱線及び前記大きい加熱比の熱線の熱線出力電圧  $E_1$ 、 $E_2$ と、被測定気体の濃度及び速度  $U$ との関係を示した較正マップを作成し、前記較正マップにより、気体の濃度及び速度を同時に測定する。ここで、2つの熱線プローブの同時測定法の原理を説明する。

【0036】2つの熱線プローブの同時測定の原理定常流において電流  $I$ によって加熱された線が、熱平衡にあれば、ジュール熱  $W$ と単位時間あたりの熱損失  $H$ とは、 $W=H$ である。 $W=I^2R_w$  (ここで、線の抵抗は  $R_w$ )であるので、

$$I^2R_w=H \quad (2)$$

を得る。

【0037】円筒管からの全熱損失が、熱伝達によるものと仮定すると、熱損失は、以下のように表すことができる。

$$H=hS(T_w - T_o) \quad (3)$$

$$E^2 = \frac{I^2 R_o}{(T_w - T_o) R_o [1 + b(T_w - T_o)]} (0.42Pr^{0.20} + 0.57Pr^{0.33} Re^{0.50}) \quad (7)$$

式(7)を使用することによって、測定対象となる気体 - 空気流における線出力電圧を予測することができる。

#### 【0042】較正マップの作成

以下では、空気と二酸化炭素の混合気流における、二酸化炭素の速度及び濃度を同時測定する際に用いる較正マップの作成について説明するが、本発明の測定対象となる気体は、二酸化炭素に限定される意図ではない。

【0043】図3は加熱比  $R$ での白金線出力電圧  $E$ と種々の速度  $U$ との実際に測定された関係を示す。この図では、 $R$ は、線抵抗に基づく加熱比であり以下の様に定義される。

$$R = (R_w - R_o) / R_o$$

【0044】発明者らは、 $R$ は単に  $\tau = R / (bT_o)$ として  $\tau$ に関係していることに注目した。電圧の値は、電気回路による増幅のために図15の理想的なものの(式(7)より予測したもの)より全体として大きい。この結果は、質的に図15とほぼ同じ傾向を示した。空気と二酸化炭素ガス混合気流における  $R=0.7$ での出力電圧は、ほとんど同じ値を示した。

【0045】図4(a)及び(b)は、いくつかの異なる二酸化炭素濃度を有するガス混合物(空気 - 二酸化炭素)に対

【0038】ここで熱伝達率は、 $h[W/(m \cdot K)]$ 、熱伝達面積は、 $S = d l [m^2]$  ( $d$ と  $l$ は、それぞれ線直径、線長である。)、線温度及び周囲のガス温度は、それぞれ  $T_w [K]$ 及び  $T_o [K]$ である。また、 $h$ を無次元化したヌッセルト(Nusselt)数  $Nu (= hd / \lambda)$ 、 $\lambda$ は気体の熱伝導率である  $[W/m \cdot K]$ を導入して、まとめると、以下の式となる。

$$I^2 R_w = \frac{h S (T_w - T_o) \cdot Nu}{R_o} \quad (4)$$

【0039】ヌッセルト数は、様々な無次元数(例えば、レイノルズ(Reynolds)数  $Ru = Ud / \nu$ 、プラントル(Prandtl)数  $Pr = C_p \cdot \mu / \lambda$ 、加熱比  $\tau$ など)の関数である(ここで、 $C_p$ は、定圧比熱であり、 $\tau$ は、 $\tau = (T_w - T_o) / T_o$ で定義される。)。しかし、この問題は、熱線を過ぎる粘性流に熱の授受が加わる複雑なものであり、ヌッセルト数を表現する完全な解を得ることはできず、実験結果に頼るしかない。この依存性は、複雑すぎて理論的に決定できない。これに関して、Kramersは、水、空気及び3種類の油に対して、 $0.71 < Pr < 525$ 、 $0.1 < Re < 1.0 \times 10^4$ において、次式が成立するとしている。

$$Nu = 0.42Pr^{0.20} + 0.57Pr^{0.33} Re^{0.50} \quad (5)$$

【0040】また、 $R_w$ の温度依存性は、以下のように表すことができる。

$$R_w = R_o [1 + b(T_w - T_o)] \quad (6)$$

【0041】ここで、 $R_o$ は、気体温度  $T_o$ での線抵抗で、タングステンに対して  $b = 5.2 \times 10^{-3} K^{-1}$ 白金に対して  $3.5 \times 10^{-3} K^{-1}$ であることに着目した。熱電圧を  $E$ とし、式(4)(5)及び(6)から、

する較正結果を示す。タングステン線の結果は、 $R = 0.3$ の場合に図4(a)であり、図4(b)は、 $R = 1.4$ の場合の白金線の結果である。一定速度にて濃度が大きくなるにつれて、 $R = 0.3$ での線電圧は徐々に小さくなるが、逆に  $R = 1.4$ (図4b)での線電圧は大きくなる。

【0046】この2つの熱線の出力電圧に基づき、較正マップを作成することができる。例えば、小さい加熱比の熱線の出力電圧  $E_1^2$ を横軸、大きい加熱比の熱線の出力電圧  $E_2^2$ を縦軸にとり、空気中の二酸化炭素濃度を变化させた場合の  $E_1^2$ 及び  $E_2^2$ をプロットすると、一定の  $E_1 E_2$ 値における気体の濃度及び速度との関係が分かる。

【0047】図5は、図4(a)及び(b)から得られた  $E_1$ (小さい加熱比  $R = 0.3$ でのタングステン線出力電圧)と  $E_2$ (大きい加熱比  $R = 1.4$ での白金線出力電圧)との間の関係を示した図である。この図において、実線が一定濃度のカーブであり、点線が一定速度のものである。図5に示すグラフを使用することによって、一組の  $E_1$ 及び  $E_2$ から独自に濃度及び速度を決定することができる。二酸化炭素気流における濃度及び速度の実際の同時測定のために、もし前もって図5のようなグラフが判明していれば、

ば、ポイント( $E_1, E_2$ )での瞬時の濃度と速度をこのグラフから計算することができる。

【0048】なお、ポイント( $E_1, E_2$ )と気体の濃度及び速度との関係を表すことができる図、図表、表などによっても、較正マップを作成できるので、このような較正マップによって、気体の速度及び濃度を測定することができる。

【0049】通常、較正マップによる気体の速度及び濃度の測定は、デジタル処理によって行われる。すなわち、大小異なる加熱比の2つの導電性部材(プローブ)の瞬時電圧を検出する電圧検出手段と、その電圧検出手段によって検出された大小異なる加熱比の2つの導電性部材の瞬時電圧に基づいて、前記導電性部材に接触する被測定気体の濃度を演算する濃度演算手段と、前記電圧検出手段によって検出された瞬時電圧に基づいて、前記導電性部材に接触する被測定気体の速度を演算する速度演算手段とを具える装置によって行われる。これによって、被測定気体の速度及び濃度の測定を同時に行うことができる。該装置は、例えばCPUによって構成され、フラッシュメモリやDRAMなどのメモリ又は光ディスク、フロッピー(登録商標)ディスク等の記録媒体に格納された較正マップに関するデータをインプットされたプログラムに基づいて、実行される。

【0050】本発明の気体の濃度及び速度を同時に測定する同時測定法において、 $da > 0$ を満たす大小異なる加熱比を有する熱線を用いることができれば、測定対象となる気体は特に限定されない。例えば、気体として、二酸化炭素、Ar、Ne、 $C_2H_6$ 、CO等を挙げることができる。より精度の高い瞬時濃度及び瞬時速度を測定することができるという観点から、気体としては、好ましくは、二酸化炭素である。

#### 【0051】

【実施例】ここで、本発明の一実施例を説明するが、本発明は、下記の実施例に限定して解釈されるものではない。また、本発明の趣旨を逸脱することなく、本発明を適宜変更して使用することが可能である。

#### 【0052】実施例1

二酸化炭素及び空気における2つの熱線プローブの較正較正は、風洞の試験部の内側で行い、研究室内の二酸化炭素ガスの漏れを防いだ。較正のためのノズルを試験部の内側にセットした。送風機によって別の小さい風洞を通してノズルへ空気を導入した。5つの異なる容積容量20, 40, 60, 80, 100%の二酸化炭素ガスを、高压ガスタンクから、圧力制御バルブ、メータ、ラバーチューブを通じてノズルに導入する。二酸化炭素ガスの温度を空気流の温度と同じに調節した。この2つの熱線プローブの構成を図1に示した。2つの熱線プローブは、タングステン線と白金線からなる(各線直径は、 $d_w=5\mu m$ 、センサー長は、約1mmである)。白金線プローブをその耐酸化性のために大きい加熱比の熱線として作動させることができ

る。2つの線の距離は、約0.5mmである。

【0053】較正マップとしては、図5に示すものを用いて、具体的に、以下のように行った。サンプル頻度は、10kHzとした。図6は、較正マップにおける瞬時電圧対( $E_1, E_2$ )(0.04秒、400ポイントに相当する)の分散プロットを示す。2つの瞬時電圧対( $E_1, E_2$ )の瞬時濃度及び速度の変換を以下の方法によって実行した。まず、図4(a)と(b)における較正カーブ、及び図5における一定濃度カーブは、5次式によって見積もられる。次いで、全ての測定点を含む領域において、50の垂直ライン(一定の間隔で)と6つの一定濃度カーブからなる格子を作る。格子ポイントの全数は、300( $50 \times 6$ )である。そして、較正カーブと一定濃度のカーブに対して前もって見積もった式を使用して格子ポイント上の濃度と速度のデータを計算した。最終的に、瞬時電圧対( $E_1, E_2$ )に対応する濃度と速度を、格子ポイント上のデータに基づきパラメータのスプライン曲面インターポレーション法によって決定した。変換した濃度と速度シグナルの例を図7に示した。

【0054】[濃度と速度の同時測定]格子乱流に発生した二酸化炭素気流(初期濃度  $j = 100\%$ )の場合に試験を行った。格子メッシュサイズMは15mmで、格子棒の直径dは3mmであった。実験状態のスケッチを図8に示す。二酸化炭素ガスを格子の中心にガスタンクから格子棒の1つが置換されたパイプを通して導入することができる。さらに直線パイプ(外径  $d_{out p} = 3.2mm$ 、内径  $d_{in p} = 3.5mm$ )を、格子の中心から下流方向にセットする。この直線パイプを、ラバーチューブ(外径  $d_{out} = 3.5mm$ 、内径  $d_{in} = 3mm$ )によって、格子の中心にある短いパイプに取り付けた。二酸化炭素ガスは、このパイプの出口から格子乱流の中に発生させることができる。発生パイプの出口は、格子の中心から下流150mm(15M)に位置する。噴流の座標系に関して、円筒型座標( $x, r$ )をセットする。ここでx及びrは、軸方向と放射方向の座標をそれぞれ示す。座標系の起点はパイプの出口である。試験的な調整は以下の通りである。格子Reynold数( $Re_M = U_0 M / \nu_{air}$ )は7000(主速度 $U_0$ は約7m/sである。)、発生した二酸化炭素流 $Re (= U_j d_{in p} / \nu_{CO_2})$ のReynold数は5000である(パイプ出口から発生した速度、 $U_j = 12m/s$ 、パイプ出口の直径/ $d_{in p} = 3mm$ である)。測定を、気流中央線に沿って、放射方向においてパイプ出口の3つの異なる下流位置、即ち、 $x/d_{eff} = 16.7, 33.3, 50.0$ ( $d_{eff}$ は、 $d_{eff} = d_{in p} (j/100)^{0.5}$ によって定義された有効な直径であり、jは、発生した流体密度、 $\rho_0$ は、周辺流体密度である。)で行った。

【0055】本発明による気体の濃度及び速度の同時測定が良好に行われている否かを確認するために、格子乱流における速度変動強度の減少を調べた。

【0056】図9は、他の実験結果で格子乱流における速度変動強度の下流変化を示す。低パワーにしたがって

下流方向における乱速度変動強度の減少が良くしられている。低パワーは以下のように表現される。

$$u'^2/U_0^2 = A(X/M - X_0/M)^{-n}$$

【0057】ここで、 $X$ は、格子からの下流距離を示し、 $A$ は、定数、 $n$ は、減衰指数、 $X_0$ は、格子からの仮想原点の下流距離である。本実験において、 $A=0.034$ 、 $X_0=1.0M$ 及び $n=1.34$ である。以前の結果は、1.2と1.4との間の $n$ の値を示す。本結果 $n=1.34$ もこの範囲である。

【0058】さらに、本発明の気体の濃度及び速度の同時測定が良好な結果を示している否かを確認するために、平均値の軸方向と半径方向の変化、濃度及び速度のr.m.s値、及び軸方向の乱流スカラー流束について調べた。

【0059】まず、噴流中心線に沿った平均濃度 $c_c$ 及び、平均速度 $U_c$ と主気流速度 $U_0$ との差、 $U_c - U_0$ を調べる。 $c_c$ 及び $U_c - U_0$ は $x/d_{eff} = 10$ の領域において下流距離 $x$ に反比例することを確認した。次に、3つの下流領域断面における平均濃度と速度差 $U_c - U_0$ の半径方向プロフィールを調べた。両方のプロフィールは、優れた相似性を示し、Gaussian分布と非常に良く一致した。図10(a)及び(b)は、r.m.s.濃度 $c'$ 及びr.m.s.軸方向速度 $u'$ の半径方向のプロフィールを示す。これらは、噴流中心線から離れた半径方向位置にてピークを与え、この結果は、他の報告における過去のデータと一致した。図11は、軸方向の乱流スカラー流束に関する $\langle u'c' \rangle$ 及び $\langle u'j' \rangle / \langle u \rangle^{0.5}$ の下流変位を示す。 $\langle u'j' \rangle / \langle u \rangle^{0.5}$ は、 $x/d_{eff} = 5.5$ の下流領域において直線的に変化することを見出した。この直線性と $c_c$ 及び $U_0$ との下流変位を考慮して、軸方向の乱流スカラー流束に対する勾配型拡散モデルは、この領域で有効である。 $X/d_{eff}=16.7, 33.3, 50.0$ での $\langle u'c' \rangle / U_0$ の半径方向のプロフィールを図12に示す。 $x/d_{eff}=50.0$ で、わずかに小さい値が観察されたが、それらは、ほとんど同じプロフィールを示すと考えられる。これらの半径方向のプロフィールは、 $r/b_u=0.6$ ( $b_u$ は、平均速度プロフィールの半値幅である。)近傍にピークを持ち、噴流の外の領域においてゼロに傾く。この傾向は、Panchapakesan及びLumleyによる乱流質量流束の結果、Chevray & Tutuによる乱流熱流束の結果と一致した。

【0060】以上の結果、平均値の軸方向と半径方向の分布、濃度及び速度のr.m.s値、及び軸方向の乱流スカラー流束は、過去の他のデータと一致した。したがって、本方法は、乱流の二酸化炭素-空気混合物における変動する濃度及び速度の同時測定に有効であることが確認された。

#### 【0061】実施例2

次に、各種ガス-空気混合気流の較正曲線について検討する。加熱比 $\tau = 0.77$ 及び2.17に対して、 $Ar$ 、 $N_2$ 、 $C_2H_6$ 、 $CO$ 流の $E_1^2 - U$ 曲線を空気流の $E_2^2 - U$

$U$ 曲線と共に図13(a)~(d)に示す。これらの気体については、二酸化炭素-空気混合流で観察されるような、加熱比の変化に伴う熱線出力電圧の温度依存性についての逆転現象が観察されないことが分かる。

【0062】しかしながら、図2の( $U$ 、 $T$ )平面と( $E_1^2$ 、 $E_2^2$ )平面の変換において、次式

【数7】

$$da = \left| \frac{\partial E_1^2}{\partial U} \frac{\partial E_2^2}{\partial T} - \frac{\partial E_1^2}{\partial T} \frac{\partial E_2^2}{\partial U} \right| dUdT$$

によって示される、 $da$ が大きな値を示す場合、十分精度の高い気体の濃度及び速度の同時測定が可能である。

【0063】例えば、図13(c)で示される $C_2H_6$ 流と空気流については、低加熱比と高加熱比で熱線出力の濃度依存性が大きく変わっている様子が見られる。 $C_2H_6$ 流の $E_1^2 - E_2^2$ の較正マップを図14に示す。この図から $C_2H_6$ 流と空気流との $E_1^2 - E_2^2$ 較正曲線は十分離れているため、較正マップを作成でき比較的精度の高い気体の濃度及び速度の同時測定が可能であることが分かる。

#### 【0064】

【発明の効果】本発明の測定用プローブによれば、気体の濃度及び速度の測定に使用することにより、気体の濃度及び速度の同時測定を行うことができるという有利な効果を奏する。

【0065】また、本発明の測定用プローブによれば、ガス速度の測定や、ガス漏れの検知機として利用することが可能であるという有利な効果を有する。

【0066】また、本発明の測定用プローブによれば、速度について、ポイント測定が可能で、応答特性に優れ、速度変動、急激な速度変動も確実にとらえることができつつ、同時に濃度も測定することができるという有利な効果を奏する。

【0067】また、本発明の気体の濃度及び速度の測定方法によれば、サンプリング周期が10kHzであり、従来の非分散型ガス分析計の周波数応答(せいぜい数百Hz)と比べると、桁違いに時間応答性が良いガス濃度測定を実現できるという有利な効果を奏する。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】図1は、熱線プローブの概略図を示す図である。

【図2】図2は、( $U$ 、 $T$ )平面と( $E_1^2$ 、 $E_2^2$ )平面の変換を示す図である。

【図3】図3は、異なる $r$ 値に対する $E_2^2 - U$ の関係を示す図である。

【図4】図4は、 $CO_2$ -空気混合気流中での較正結果を示す図である。

【図5】図5は、2本の熱線の出力 $E_1^2$ 、 $E_2^2$ と速度、濃度の較正マップを示す図である。

【図6】図6は、較正マップ上に示した瞬時電圧データ

を示す図である。

【図7】図7は、変換された瞬時濃度及び瞬時速度を示す図である。

【図8】図8は、試験の概念図を示す図である。

【図9】図9は、格子乱流における速度変動強度の下流変化を示す図である。

【図10】図10(a)は、噴流を横切る $u'$ の半径方向のプロフィールを示す図である。図10(b)は、噴流を横切る $v'$ の半径方向のプロフィールを示す図である。

【図11】図11は、軸方向の乱流スカラー流束に関する

量の下流変化を示す図である。

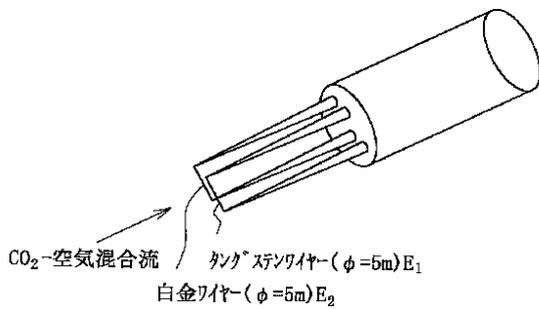
【図12】図12は、軸方向の乱流スカラー流束の半径方向変化を示す図である。

【図13】図13は、各種ガス及び空気の $E^2 - U$ 曲線を示す図である。

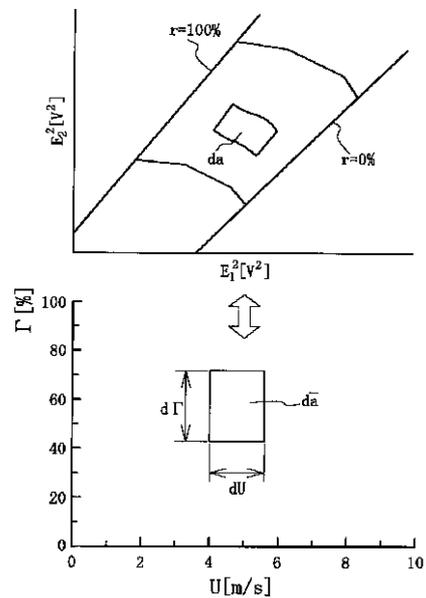
【図14】図14は、 $C_2H_6$ 流と空気流に対する $E_1^2 - E_2^2$ 較正曲線を示す図である。

【図15】図15は、 $CO_2$ と空気の熱線出力電圧と速度との関係を示す図である。

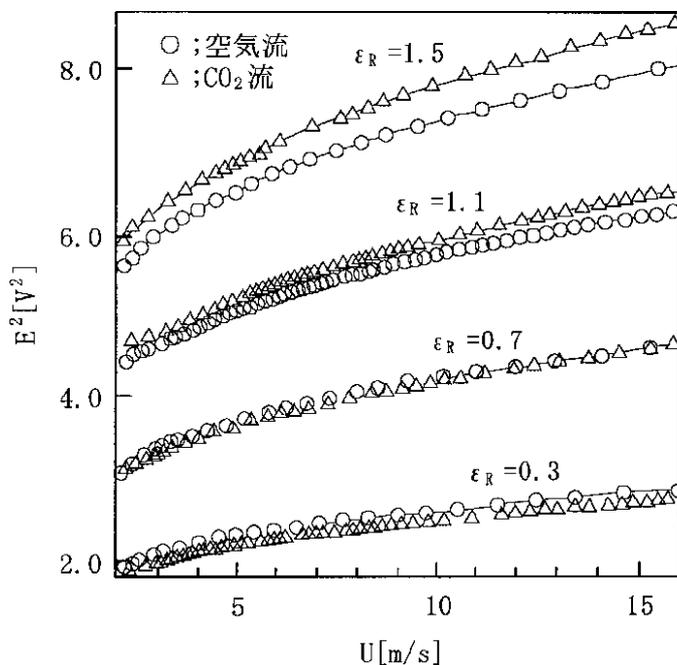
【図1】



【図2】

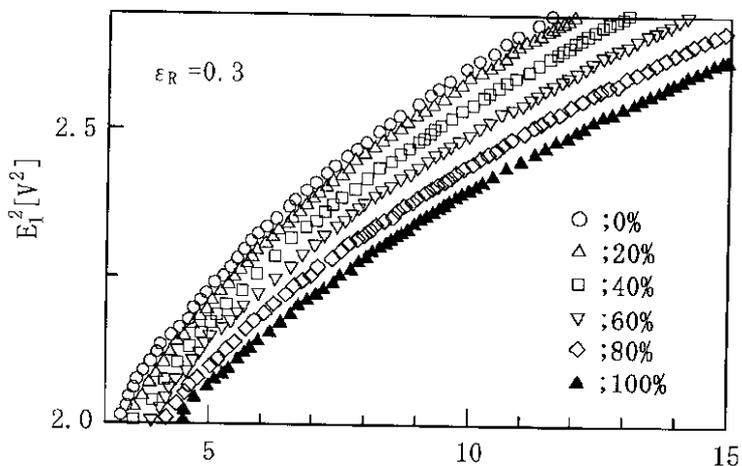


【図3】

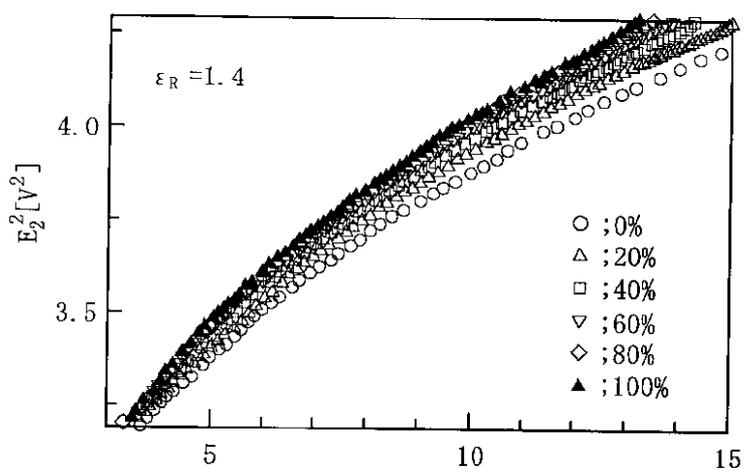


【図4】

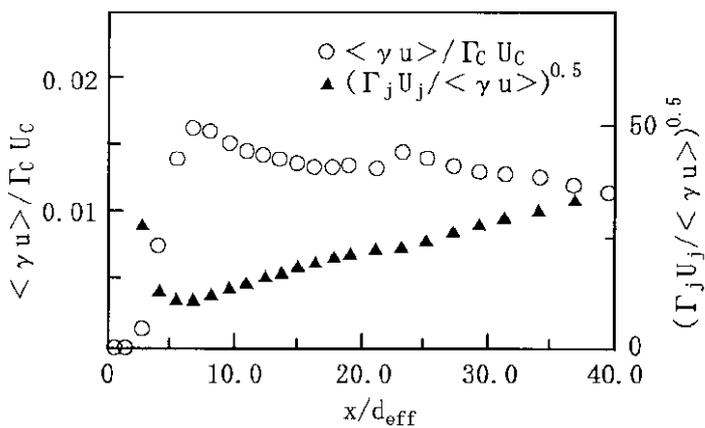
(a) 低加熱比



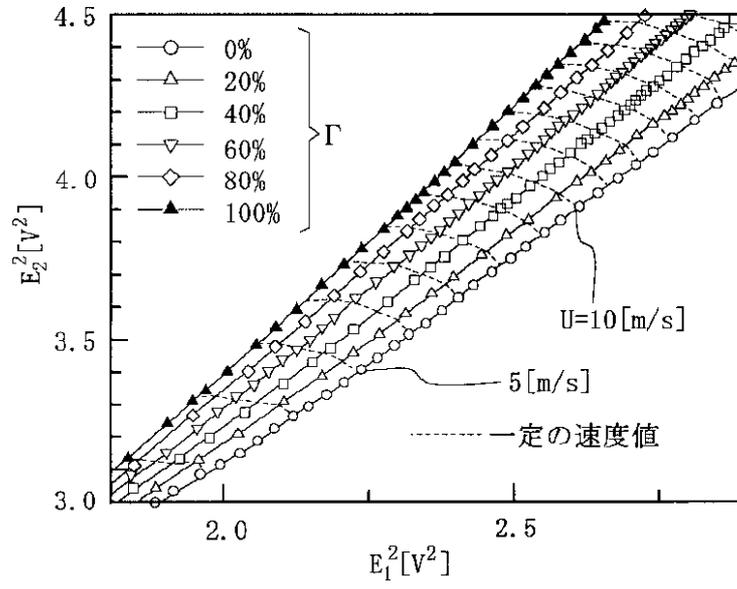
(b) 高加熱比



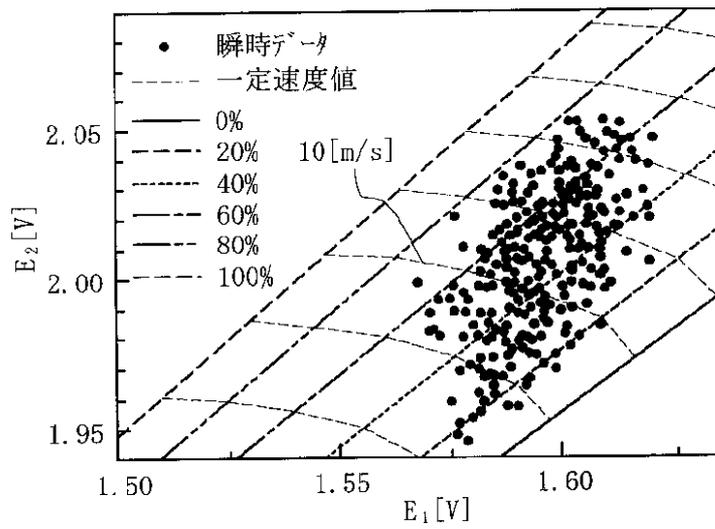
【図11】



【図5】

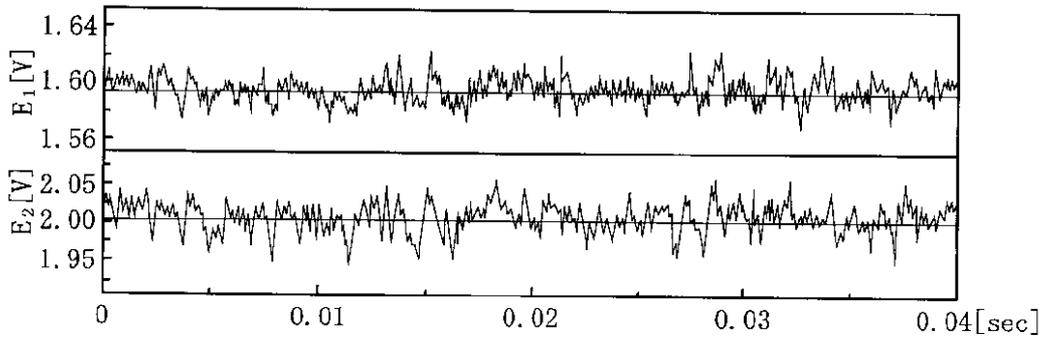


【図6】

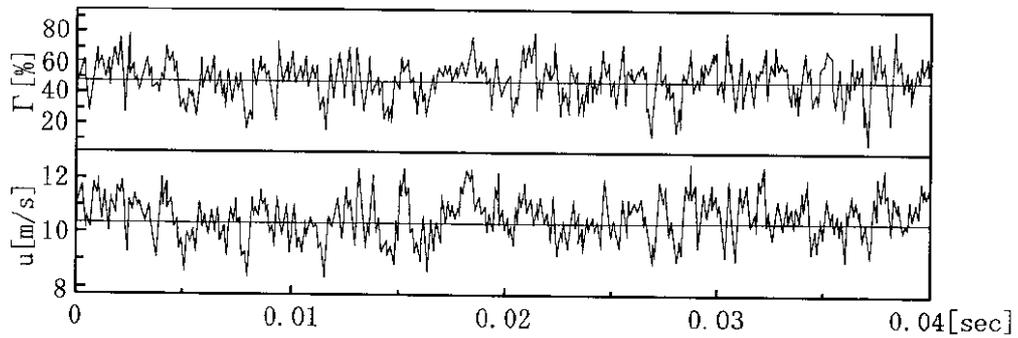


【図7】

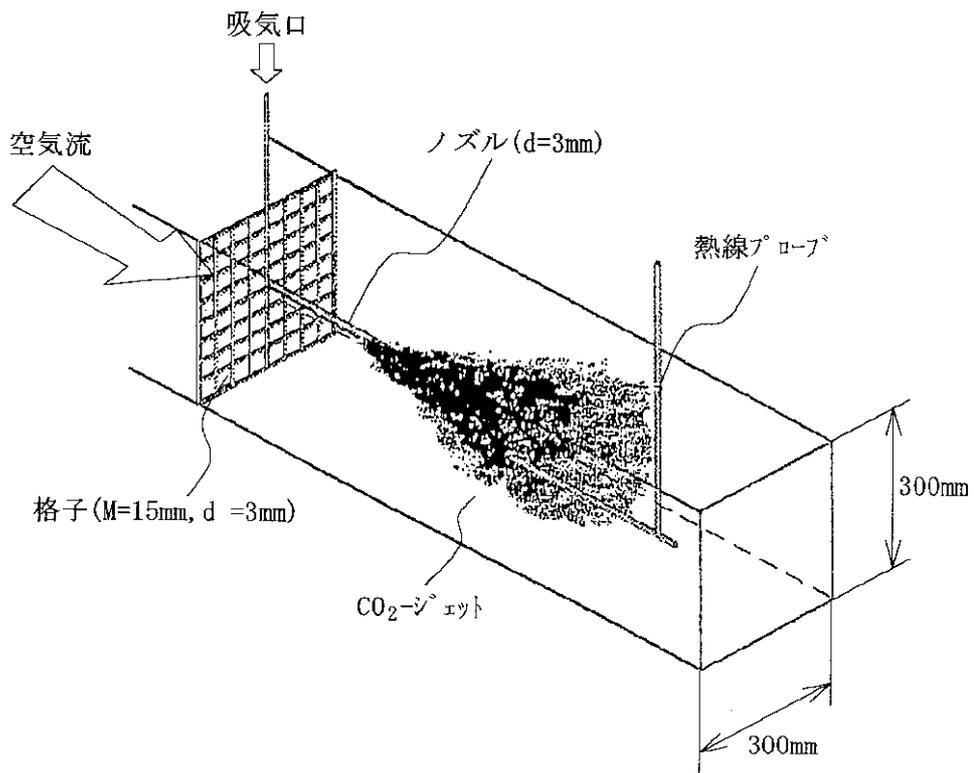
(a) 瞬時電圧



(b) 瞬時濃度(上)と瞬時速度(下)

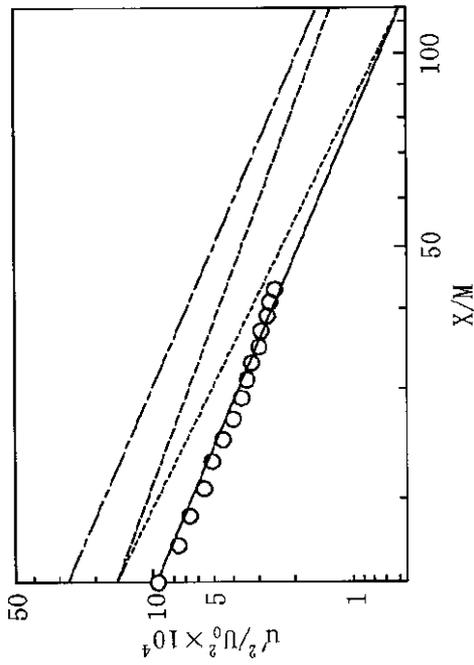


【図8】

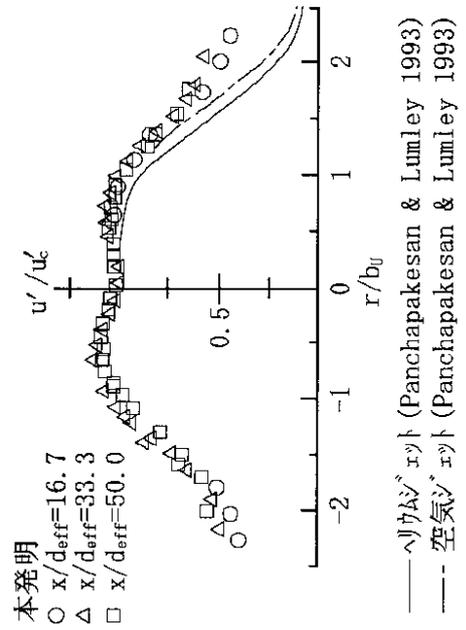


○ ; 本発明  $(0.034 \times (X/M \cdot 3)^{-1.34})$   
 -----; Sreenivasan et al. (1980)  $(0.04 \times (X/M \cdot 3)^{-1.20})$   
 -----; Warhaft (1984)  $(0.121 \times (X/M)^{-1.4})$   
 -----; I. Nakamura et al. (1987)  $(0.0566 \times (X/M \cdot 3)^{-1.45})$

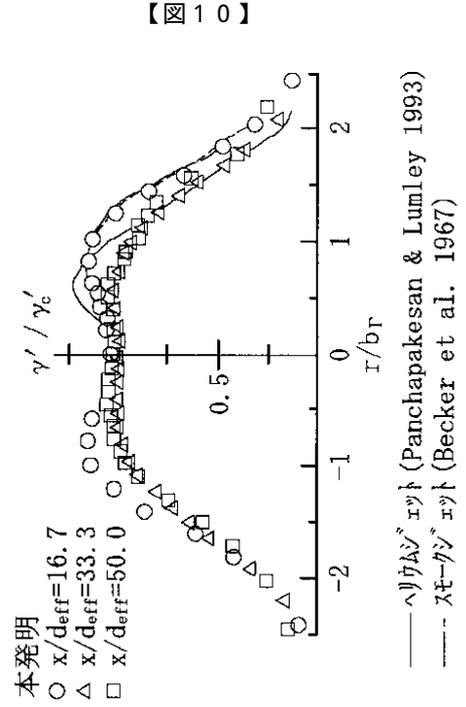
【図9】



(a)

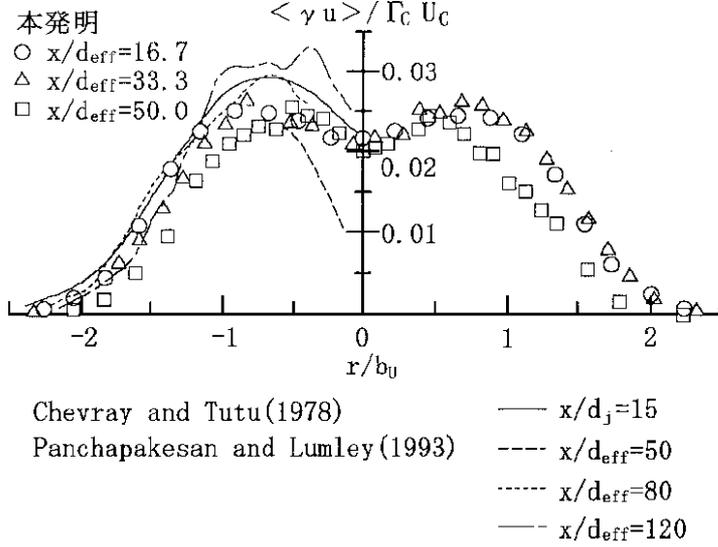


(b)

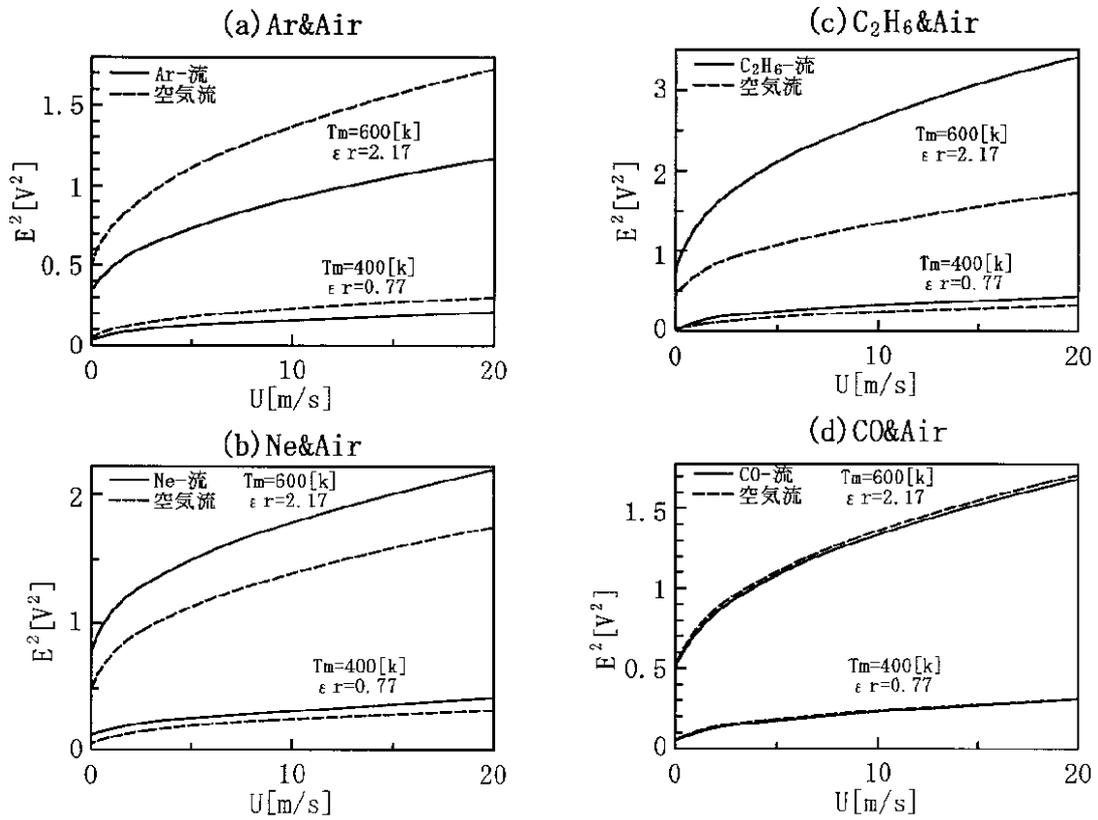


【図10】

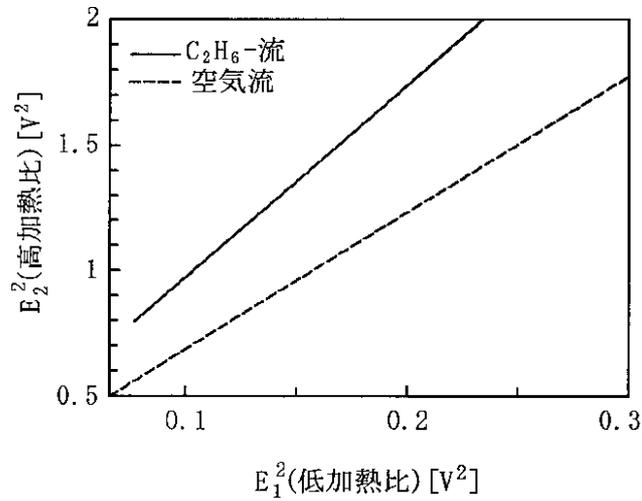
【図12】



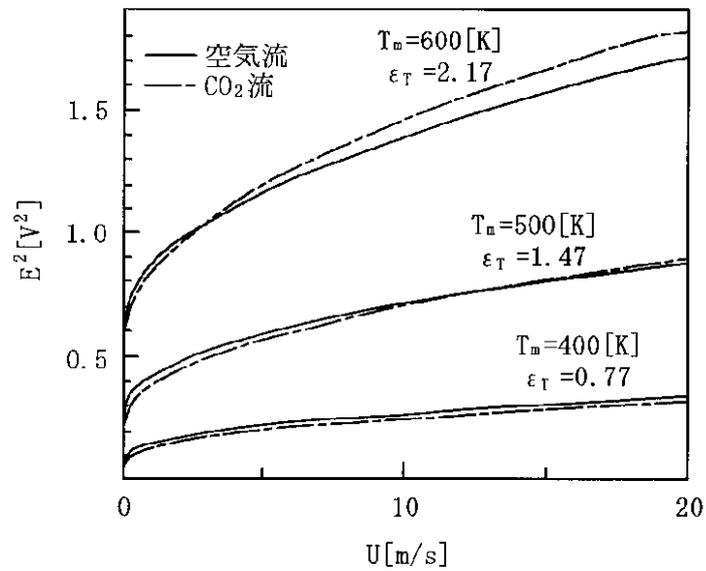
【図13】



【図14】



【図15】



フロントページの続き

(72)発明者 蒲原 覚  
愛知県名古屋市昭和区神村町2-23 ボナ  
ール鏡池105

(72)発明者 榎田 武広  
愛知県名古屋市中村区大正町4-20-4

Fターム(参考) 2F035 EA06

2G040 AB08 BA23 CA02 CB02 CB04  
CB09 DA02 DA15 DA22 EA02  
EB02 GA05 GA07 HA16 ZA05