

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公表特許公報(A)

(11) 特許出願公表番号

特表2004-503767

(P2004-503767A)

(43) 公表日 平成16年2月5日(2004.2.5)

(51) Int. Cl.<sup>7</sup>

G O 1 N 11/14

G O 1 N 25/20

F I

G O 1 N 11/14

G O 1 N 25/20

F

J

テーマコード (参考)

2 G O 4 0

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 52 頁)

(21) 出願番号 特願2002-510912 (P2002-510912)  
 (86) (22) 出願日 平成12年6月9日 (2000.6.9)  
 (85) 翻訳文提出日 平成14年12月9日 (2002.12.9)  
 (86) 国際出願番号 PCT/US2000/015967  
 (87) 国際公開番号 W02001/096832  
 (87) 国際公開日 平成13年12月20日 (2001.12.20)  
 (81) 指定国 AP (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZW), EA (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE), O A (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CU, CZ, DE, DK, E E, ES, FI, GB, GE, GH, GM, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, UA, UG, UZ, V N, YU, ZW

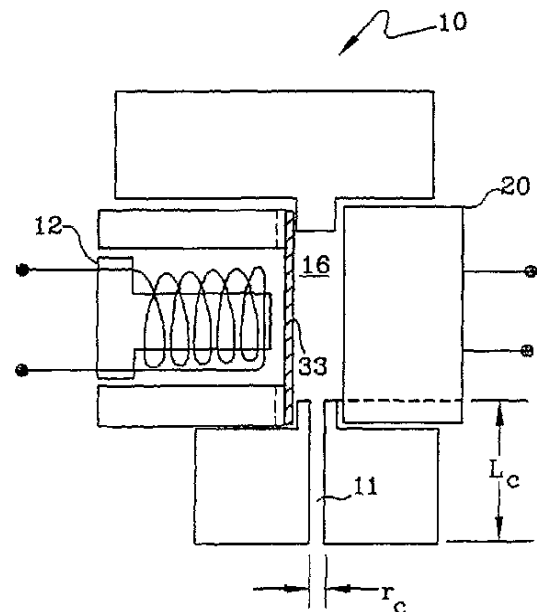
(71) 出願人 501178525  
 ハネウェル・インターナショナル・インコーポレーテッド  
 アメリカ合衆国・07962-2245・ニュージャージー・モリスタウン・ピーオー・ボックス・2245・コロンビア・ロード・101  
 (74) 代理人 100089705  
 弁理士 社本 一夫  
 (74) 代理人 100076691  
 弁理士 増井 忠式  
 (74) 代理人 100075270  
 弁理士 小林 泰  
 (74) 代理人 100080137  
 弁理士 千葉 昭男

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 準静的粘度計

## (57) 【要約】

粘度計は、たとえばスピーカ・メムブレンのような流体容積変位装置または駆動装置と、たとえばマイクロフォン・メムブレンのような圧力センサまたは検出器とを有する。両メムブレンは、粘度計のキャビティの内面を構成する。キャビティの内面は、制御された漏れ口たとえば毛管チューブを除き、粘度計の周囲環境からシールされている。圧力センサまたは検出器からの電気信号は、処理されて、キャビティ内の流体の粘度を表示する。粘度計はさらに、流体の発熱量、酸素消費量、およびその他の熱物理特性を測定する。また粘度が測定された後に絶対圧力も得られる。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

ダイヤフラムを有する駆動装置と、  
前記駆動装置のダイヤフラムから第 1 の距離で配置されたダイヤフラムを有するセンサと、  
前記駆動装置およびセンサのダイヤフラムの周縁どうしの間および周縁の周りに、ダイヤフラム間のキャビティを形成すべく形成されたフィッティングと、  
キャビティに対する漏れ口を設けるために前記フィッティングに形成された開口部と、を備える準静的粘度計。

## 【請求項 2】

前記駆動装置のダイヤフラムと前記センサのダイヤフラムとの間の前記キャビティ内に位置するインターフェースをさらに備え、前記キャビティは 2 つのサブ・キャビティに分割されている請求項 1 に記載の粘度計。

## 【請求項 3】

前記インターフェースが複数の孔を有している請求項 2 に記載の粘度計。

## 【請求項 4】

前記駆動装置はスピーカであり、  
前記センサはマイクロフォンである、請求項 3 に記載の粘度計。

## 【請求項 5】

前記駆動装置に接続された信号発生器と、前記センサに接続されたプロセッサと、をさらに備える請求項 4 に記載の粘度計。

## 【請求項 6】

前記プロセッサが、前記センサからの信号を処理して、前記キャビティ内の流体の粘度の表示にするようになされている請求項 5 に記載の粘度計。

## 【請求項 7】

前記プロセッサが、粘度の表示を処理して、キャビティ内の流体の発熱量  $D_{O_2}$  の表示にするようになされている請求項 6 に記載の粘度計。

## 【請求項 8】

前記開口部は長さ  $L_c$  および半径  $r_c$  の毛管チューブであり、  
前記信号発生器は周波数  $f$  の信号を前記駆動装置へ出力するようになされており、  
前記駆動装置は、圧力変化  $p$  でキャビティに出入りする容積  $V_c$  の流体をもたらすようになされており、  
前記キャビティ内の流体の粘度は、 $(p r_c^4) / (4 V_c f L_c)$  に等しくされている、請求項 7 に記載の粘度計。

## 【請求項 9】

粘度は流体の発熱量の表示である請求項 8 に記載の粘度計。

## 【請求項 10】

粘度は流体の酸素消費量  $D_{O_2}$  の表示である請求項 8 に記載の粘度計。

## 【請求項 11】

流体に対して粘度に基づいて酸素消費量を表示する装置であって、  
ダイヤフラムを有する駆動装置と、  
前記駆動装置のダイヤフラムに隣接するダイヤフラムを有するセンサと、  
前記駆動装置に並置された第 1 の開口端と前記センサに並置された第 2 の開口端とを有するフィッティングであって、前記駆動装置およびセンサとともにキャビティを形成するフィッティングと、  
前記フィッティング内に形成された漏れ口と、を備える表示装置。

## 【請求項 12】

前記センサからの信号を前記漏れ口内の流体の酸素消費量の表示に変換するプロセッサをさらに備える請求項 10 に記載の粘度に基づく酸素消費量表示装置。

## 【請求項 13】

10

20

30

40

50

前記駆動装置はスピーカであり、  
 前記センサはマイクロフォンであり、  
 前記フィッティング内に形成された前記漏れ口は毛管チューブである、請求項 1 2 に記載の粘度に基づく酸素消費量表示装置。

【請求項 1 4】

キャビティを有する構造物と、  
 前記構造物上に位置するアクチュエータと、  
 前記構造物上に位置し、前記アクチュエータに隣接する検出器と、  
 前記キャビティと流体を有する環境との間の漏れ口と、を備える準静的粘度計。

【請求項 1 5】

前記アクチュエータと前記検出器との間の前記構造物の前記キャビティ内に位置するインターフェースをさらに備える請求項 1 4 に記載の準静的粘度計。

【請求項 1 6】

前記アクチュエータはダイヤフラムを有し、  
 前記検出器は、前記アクチュエータのダイヤフラムとほぼ同じ面に位置するダイヤフラムを有している、請求項 1 5 に記載の準静的粘度計。

【請求項 1 7】

前記インターフェースは、前記アクチュエータと検出器との間に位置し、かつ同じ面にほぼ垂直である、請求項 1 6 に記載の準静的粘度計。

【請求項 1 8】

流体が前記漏れ口を通して前記キャビティに入ることができ、  
 流体は前記アクチュエータと検出器との間の前記インターフェースを通過することができるようになされている、請求項 1 7 に記載の準静的粘度計。

【請求項 1 9】

前記漏れ口は長さ  $L_c$  および半径  $r_c$  の毛管チューブであり、  
 前記アクチュエータのダイヤフラムは、圧力変化  $p$  でキャビティに出入りする容積  $V_c$  の流体をもたらすことができ、  
 前記検出器のダイヤフラムは圧力変化  $p$  を検知し、  
 キャビティ内の流体の粘度は  $(p r_c^4) / (4 V_c f L_c)$  である、請求項 1 8 に記載の準静的粘度計。

【請求項 2 0】

流体の粘度を表示する信号を処理して流体の酸素消費量  $D_{O_2}$  を測定するようになされている、前記検出器に接続されたプロセッサをさらに備える請求項 1 9 に記載の準静的粘度計。

【請求項 2 1】

流体の酸素消費量  $D_{O_2}$  を測定するための処理は、 $D_{O_2} = A + B^C$  に基づき、  
 $A$ 、 $B$ 、 $C$  は相関係数である、請求項 2 0 に記載の準静的粘度計。

【請求項 2 2】

流体のボンヌ数  $B_n$  を測定するための処理は、 $B_n = A' + B'^{C'}$  に基づき、  
 $A'$ 、 $B'$  は相関係数であり、  
 $C'$  は約 0.5 である、請求項 2 0 に記載の準静的粘度計。

【請求項 2 3】

前記プロセッサが絶対圧力  $p_a$  を測定するようになされている、請求項 2 0 に記載の準静的粘度計。

【発明の詳細な説明】

【0001】

(背景)

本発明は、粘度検出器に関し、詳細にはデルタ圧力に基づくセンサに関する。より詳細には、本発明は、燃焼を目的とするガスまたは液体燃料の酸素消費量 (oxygen demand) (完全燃焼の場合) を測定するための粘度センサに関する。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 0 2 】

既存のおよび最近提案された準静的粘度計はどちらも、流体（すなわちガスまたは液体）密度および圧力に依存し、高価である（振動ワイヤーまたは水晶振動子に基づく粘度計など）。その他の粘度計は、さらなる流体特性の依存性があるという欠点を有し（たとえば熱駆動される毛管フローを伴うもの）、劣化し漏れやすいバルブのせいでドリフトする傾向があるか（加圧ガス源からの周期的な再充填によって駆動される毛管フロー、バルブ閉鎖、および減衰観察に依存する粘度計の場合）、またはその方位に依存する（落球式粘度計の場合）。

## 【 0 0 0 3 】

提案されているセンサは、流体の既知の特性、粘度を測定する。センサを燃焼制御システムに適用すれば、フィード・フォワード（*feed-forward*）動作および激しくない予燃焼環境での検知が可能になる。センサは、特性が測定データに単純に比例することができるため（1つの好ましい測定アプローチにおいて）、また燃料のウォッベ（*Wobbe*）数、酸素消費量、または発熱量（*heating value*）との関係も単純であるため、低コストであり、そのため検知誤差による全体の燃焼制御誤差への寄与は比較的小さい。

## 【 0 0 0 4 】

本発明は、既知の特性である粘度を燃焼制御へと利用または応用することに関する。また本発明は、粘度測定への好ましいアプローチをこの応用に用いることにも関する。

## 【 0 0 0 5 】

粘度は、毛管（半径  $r_c$  および長さ  $L_c$ ）内の層流容積流量（*laminar volumetric flow*）（ $dV/dt$ ）および圧力降下  $p$  に対する直線関係によって最も良く知られる。これを式（1）に示す。

## 【 0 0 0 6 】

$$dV/dt = p r_c^4 / (8 L_c) \quad (1)$$

最初に注意すべきことは、天然ガスの組成がさまざまであるにもかかわらず、その事実を補うように、どんな組成であっても低コストで燃焼させることのできる手段を探す場合に、燃焼制御に対する個別の特性としての粘度の可能性、および、燃焼させずに発熱量を測定する方法であって、 $k(T_1)$ 、 $k(T_2)$ 、および  $k$  を含む相関関係を介した、すなわち他の特性と関連した分析的な測定が含まれる方法に対する個別の特性としての粘度の可能性である。

## 【 0 0 0 7 】

燃料の粘度、また、以前は煙道  $O_2$  濃度も、燃料の酸素消費量  $D_{O_2}$  の、予測されるかまたは実際の変化を表示するためのものであった。図1に、（曲線23）と、燃料ガスの他の熱物理（ $Q_i$ ）特性、すなわち、密度（曲線26）、および  $k$ 、熱伝導度（曲線24）、および  $C_p$ 、比熱（曲線25）、および  $C_v$ 、熱線式風速計（*thermal anemometer*）の補正因子（曲線27）との間の比較、およびこれらの特性が個別に燃料の酸素消費量、 $D_{O_2}$  といかに良く相関しているかを図で示す。 $D_{O_2}$  が増加したとき、 $C_p$  も有望であるように見えるが、 $k$  が最も都合の良い単調な減少を示す。不燃性  $CO_2$  の  $C_p$  値（ $8.83 \text{ cal} / (\text{mol} \cdot K)$ ）、 $H_2O$  では  $8.60$  である）は、 $C_{H_4}$  および  $C_{C_2H_6}$  の  $C_p$  値（ $8.50$  および  $12.42$ ）の間にあるが、不燃性ガス  $O_2$ 、 $N_2$ 、 $CO_2$ （ $H_2O$  を除いて）の  $C_p$  値は全て、 $C_{H_4}$  の  $C_p$  値を上回っている。

## 【 0 0 0 8 】

2つ以上の燃料特性を、発熱量または  $D_{O_2}$  との相関関係に含めることによって、達成可能な精度は著しく増加するが（後で引用する従来技術に注意されたい）、 $C_p$  を測定するのにデジタル処理を行なう必要があるためコストも著しく増加するという犠牲を伴う。上述したことは、排気の制御および効率 は全ての燃焼制御の最も重要な目標であるという仮定に基づく。この目標に最も近づくには、一定の煙道  $O_2$  または過剰空気の下で操業する。このような操業は、一定の空気フローを維持し、燃料フローをその組成変動（ $D_{O_2}$  および  $m^*$  を変える）に対応して調整することによって満足される。その濃度変化の半分は

、因子 $m$ によって処理される。と言うのは、 $m$ はオリフィス制御またはベンチュリー制御のフロー制御状況の全てに作用するからである。燃料フローを調整して $Wb$ （ウォッペ数）の変動に対抗するという目的は同様であるが、それほどの正確性はなく（ $A/F$ （空燃比）および排気を一定に保とうとした場合）、次のようなウォッペ数の定義に戻ることになる。 $Wb = H / m^*$ 、ここで  $H = O_2$  消費量ではなく発熱量であり、 $m^* = (M_{gas} / M_{air})^{0.5}$  である。 $M$ はモルであり、 $Wb$ は、非炭化水素燃料成分たとえば  $H_2$  および  $CO$  が無い限り、 $Bn$ （ボンヌ（Bonnet）数  $= D_{O_2} / m^*$ ）と密に連結している。 $D_{O_2}$  または  $Bn$  と粘度との相関関係は、式  $D_{O_2} = A + B^C$  または  $Bn = A' + B'^{0.5}$  によって、それぞれ求めることができる。 $A$  および  $B$  は相関係数であり、 $C$  は相関指数である。 $A'$  および  $B'$  は同様に相関係数である。相関関係は自然の法則のそれに似ている。関連する情報は、「Microsensors for Fluid Properties」、U. Bonnet および D. Kubisiak 著、Scientific Honeywell, Sensors Issue (1996) の 21 ページの図 6 にある。さらなる情報は、米国特許第 5,486,107 号（U. Bonnet、1996 年 1 月 23 日に付与）の発明名称「Determination of Fuel Characteristics」にある。なおこの文献は、本明細書において参照により取り入れられている。

#### 【0009】

提案する粘度計に基づく燃焼制御システムの意義を説明するために、表 1 において、熱伝導度センサに基づいた燃焼制御システムの特性と関係のあるいくつかのパラメータを、粘度センサに基づいたシステムの場合に対して比較する。示したように全ての点において、粘度に基づいたシステムの方が、センサ出力の圧力および温度に対する依存性が小さいなどの有利な値を示すが、燃料 + 空気混合物中の燃料 - ガス組成または燃料濃度に対する依存性はより大きい。後者のパラメータは、燃料 + 空気混合物の熱物理特性を直接測定する利点を定量化するために含めた。示したように、予め混合した燃料 + 空気混合物の粘度または熱伝導度を測定した場合、圧力、温度、および湿度の影響が、求める燃料特性の影響よりも非常に大きくなる。同様の状況が、煙道ガス中の  $k$  を測定する場合に形成される。

#### 【0010】

表 1 に、 $D_{O_2}$  または  $\lambda$ 、波長のセンサとしての熱伝導度に対する粘度の利点を示す。 $\lambda = (\text{実際の空燃比}) / (\text{化学量論的空燃比})$  である。この表によれば、粘度は  $\lambda$  および  $D_{O_2}$  の変化に対して熱伝導度よりも約 2 倍敏感であるが、圧力および温度の変動に対しては 30% 感度が低いことが示される。これは、 $D_{O_2}$  または  $\lambda$  の測定に対しては、粘度の検出によって熱伝導の場合よりも数倍正確なセンサが得られることを意味する。ガス  $G_{20}$  はメタンであり、 $G_{271}$  は 74% のメタンと 26% の窒素からなるガス混合物である。 $p$  は圧力 (bar) であり、 $T$  は温度 (°C) である。 $W$  は、所望の特性 ( $\lambda$  または  $D_{O_2}$ ) を測定する従属変数である。 $k$  および  $\lambda$  の感度は、空気と混合された燃料の窒素含有量、 $T$ 、 $p$ 、および純粋燃料ガスの窒素含有量の変動に対するものである。

#### 【0011】

#### 【表 1】

従属	条 件	$\partial W / \partial x$	
		$W=k$ %	$W=\eta$ %
1. $\partial W(\lambda) / \partial (\text{燃料} + \text{空気})$	G20+空気 vs G271+空気 $\lambda=1.05; 15^\circ\text{C}$	0.2687	-0.3532
2. $\partial W(\lambda) / \partial \lambda$	$\lambda=1.05$ vs. 1.10 G20+空気	0.0930	-0.1229
3. $\partial W(D_{O_2}) / \partial \text{ガス}$	G20 vs G271 (26%N <sub>2</sub> ) 15°C; 1 bar	6.7490	-13.782
4. $\partial W(D_{O_2}) / \partial T$	T=20 vs T=15°C; G20	1.6320	1.3860
5. $\partial W(D_{O_2}) / \partial p$	p=2 vs 1 bar; G20;	0.1938	0.1043

10

【0012】

最も好ましい特性 (k または ) に対しては、1 ~ 3 列の W 値は最も高く 4 ~ 5 は最も低くなければならない。粘度が好ましい選択であることは明らかである。

【0013】

20

(発明の概要)

本明細書で開示する粘度計は、加圧ガス、マイクロセンサの入手のしやすさ、または熱駆動装置 (thermal driver) に依存せず、その出力は絶対圧力とは無関係である (粘度が無関係である範囲で)。本粘度計は方位の影響を受けず、低コストで製造することができる。本粘度センサは、種々のガス混合物の酸素消費量を測定するために用いられる。本センサは、流体容積の変位装置、アクチュエータまたは駆動装置たとえばスピーカ・メンブレン、および圧力センサまたは検出器たとえばマイクロフォンを、チャンバまたはキャピティ、およびキャピティと粘度センサの周囲環境との間の制御された漏れ口 (leak) とともに有する。駆動装置、漏れ口、およびセンサ・エレクトロニクスは、市販される安価なコンポーネントから組み立てることができる。要約して言えばセンサは、製造コストが低く、精度、信頼性、本質的安全が良好で、耐用寿命が長い。

30

【0014】

(実施形態の説明)

図2の粘度計10では、圧力差 p における、制御された漏れ口 (最初に毛管 (C) 11 (半径  $r_c$ 、長さ  $L_c$  の毛管チューブ 11) を選択する) を通る層流容積流量 ( $dV/dt$ ) と粘度 との間の直線関係を用いている。これらのパラメータの数学的関係を下式 (2) に示す。

【0015】

$$dV/dt = p r_c^4 / (8 L_c) \quad (2)$$

熱源を用いる代わりにパルプまたは機械的フローを用いて、再現性があるが時間に依存するフローを起こし、圧力降下 (または上昇) p、時定数、または位相のずれの観察ができるようにする。本明細書で開示する粘度計10は、再現性があるが時間に依存しないフローを起こして、アクチュエータ12による容積変位速度 (rate of volumetric displacement) と実際の漏れフローとが数ミリ秒 (ms) の間等しくなるときに、安定した p の観察ができるようにデザインされている。これを図2および3に概略して示す。3種類のガス、Ar、N<sub>2</sub>、およびC<sub>3</sub>H<sub>8</sub>に対する p 信号に、曲線13、14、および15としてそれぞれ印をつけ、のこぎり歯曲線17で示したキャピティ16の容積変化 V<sub>c</sub> (パーセント) によって、アクチュエータまたは駆動装置12によって引き起こされた容積変化を示す。

40

【0016】

50

十分に強いアクチュエータの変位がガスの種類に依存せず、アクチュエータ 12 を「のこぎり歯」モードおよび一定の周波数  $f$  で駆動することができ、上式 (1) が実際に成立すると仮定できるならば、全ての種類のガスは最終的にチャンバー内でその特有の  $p$  に達するが、同じ毛管 11 の流量において、 $p$  を測定し式 (2) を用いることで各流体の粘度を測定することができる。上述した最初の 2 つの仮定を満足するように粘度計 10 がデザインされているならば、残る問題は、上述の等式が成立するのに十分な時間が半周期の間に存在するかどうかである。毛管半径  $r$  が小さすぎる場合には、 $p(t)$  ものこぎり歯のような関数である ( $V_c$  が小さい場合には断熱加熱効果は無視できる)。しかし毛管 11 が十分に大きい場合には、そのフローおよび  $p$  は、粘度計 10 内のガスの粘度に拘わらず、 $dV/dt = V_c f / 2$  となるまで増加して、のこぎり歯 17 のピリオドの終わりまでその値に留まるだけである。その結果、粘度は下式 (3) から得られる。

【0017】

$$p = p_r c^4 / (4 V_c f L_c) \quad (3)$$

この関係を、数値モデルを用いた計算結果によって図 3 および 4 に示す。このモデルでは、所定の  $r_c$ 、 $L_c$ 、および  $f$  に対して、キャピティ容積を時間ステップ  $z = 0.1 \text{ ms}$  に対応する小さな量ずつ増加させることによって、キャピティ圧力を  $P V = n R T$  に対応する量だけ変化させる。その結果、毛管を通るフローが開始して  $z$  の間の圧力変化の一部を取り除く。これは  $dV/dt = dV_c/dt = V_c f / 2$  と、 $p$  との間の平衡状態に達するまで続く。これらの図から、次のことが分かる。(1) 安定した  $p$  値が、のこぎり歯のピリオドの終わりの方で実現される。(2) このような安定した  $p$  のピリオドの値は、表示したガス  $C_3H_8$ 、 $N_2$ 、および  $Ar$  の粘度 (20 および 1 atm において、それぞれ 83、178、および  $224 \mu P$  である) に比例する。(3) レイノルズ数  $Re = 2rv$  / で表示したときに、毛管内における安定した  $p$  ピリオドおよび層流 ( $Re < 2300$ ) の両方が実現されるように、124 および 324 Hz の周波数、および / が最も低いガス (図 3 および 4 ではプロパンであった) に対して、 $R_v = V_c / V_c$ 、 $r_c$ 、および  $L_c$  の値を選択する必要がある、また選択することができる。324 Hz の周波数を選択したのは、50 Hz および 60 Hz の比較的高い高調波からほぼ同じように離れるようにするためである。(4) 安定した  $p$  のピリオドに達する時定数は、流体の粘度が高くなりガス圧力が低くなるにつれて長くなる。時定数の結果を図 5 に示す。

【0018】

図 3 は、 $p$ 、圧力振幅 (cm 水柱 (WC)) 対  $z$  または時間 (ms) のグラフである。このグラフは、振動容積 17 と、3 種類のガス  $Ar$ 、 $N_2$ 、および  $C_3H_8$  に対する漏出キャピティ 16 の  $p$  とを示しており、曲線 13、14、および 15 によってそれぞれ表わされている。キャピティ 16 の振動容積 17 は、アクチュエータ 12 へ電気入力した結果である。曲線 13、14、および 15 で示される圧力センサの変化は、センサ 20 によって検出される。これらのプロットは、22 および 0.7 bar の圧力で取った。周波数  $f$  は 132 Hz である。 $R_v$  は 1 パーセントである。最終的な  $p$  の 63% に達する圧力平衡時間は、3 種類のガスに対して、それぞれ 0.40、0.23、および 0.153 ms である。停止しているときのキャピティ容積  $V_c$  は、 $0.15 \text{ cm}^3$  であり、毛管の長さ  $L_c$  および半径  $r_c$  は、それぞれ 0.3 cm および 0.17 cm である。最大レイノルズ数  $Re_{max}$  は 752 である。

【0019】

図 4 は、圧力振幅  $p$  (cm WC) 対時間  $z$  (ms) のグラフである。このグラフは、振動容積 17 と、3 種類のガス  $Ar$ 、 $N_2$ 、および  $C_3H_8$  に対する漏出キャピティ 16 の  $p$  とを示しており、曲線 13、14、および 15 によってそれぞれ表わされている。これらのプロットは、22 および 0.7 bar の圧力で取った。周波数  $f$  は 323 Hz であり、図 2 の場合の周波数  $f$  よりも約 2.447 倍速い。 $R_v$  は 0.5%、 $z$  は 0.05 ms であり、直線励起 (linear excitation) は 0.18 ms である。 $V_c$  および  $L_c$  は図 3 の場合と同様である。毛管の半径  $r_c$  は、より大きくて 0.

2 mmである。最大レイノルズ数は785である。対応する曲線13、14、および15の振幅は、図3の曲線の場合の約半分であることに注意されたい。しかし曲線13、14、および15の間の振幅の差は、図4の方が、図3よりも識別できるように見える。

#### 【0020】

図5は、 $p$ 、圧力振幅 (cmWC) 対  $Z$ 、時間 (ms) のグラフである。このグラフは、振動容積17と、3つの異なる絶対圧力  $p_a$  の  $N_2$  に対する漏出キャビティ16の  $p$  とを示している。曲線14は0.7 barの  $N_2$  の場合であり、曲線18は1.0 barの  $N_2$  の場合であり、曲線19は1.5 barの  $N_2$  の場合である。このデータはデバイス10から、22 および122 Hzの周波数で取ったものであり、 $R_v$  は1%に等しい。 $V_c$  は0.15 cm<sup>3</sup>、 $L_c$  は0.3 cm、 $r_c$  は0.14 mm、 $Re_{max}$  は846である。図5のこれらの曲線は、到達される  $p$  - 平衡状態が絶対圧力に依存しないことを示している。しかしこれらの曲線は、平衡状態に達する時定数が圧力に依存することも示している。約0.29、0.23、および0.194 msの時定数が、0.7、1.0、および1.5 barの圧力に対してそれぞれ得られた。このことは、粘度を測定した後に絶対圧力を測定することにも役立ち得る。 $p_a$  一定である。

#### 【0021】

粘度計10を実現するためには、容積駆動装置 (volumetric drivers) 12、圧力センサ20、および可能性のあるシステム制約を考慮する必要がある。図6および7に、駆動装置12とセンサ20との間のバッフルまたは少なくとも部分的なバリアであり得るインターフェースまたはカップリング・デバイス28および29をそれぞれ特徴とするさらなる実施形態21および22を示す。バリア28または29は、駆動装置12からセンサまたは検出器20へのいかなる物理的エネルギー (すなわち機械的、電気、および/または熱) の輸送も防ぐためである。このエネルギーは、駆動装置12から検出器20への  $p$  情報の伝達を妨げるか、遅らせるか、または抑制する可能性がある。バッフル28または29は、このような可能性のある歪みまたは破損 (dilatation) を、拡散、減衰、またはその他の適切に作用する機能を行なうことによって防ぐことができる。

#### 【0022】

粘度計21は、アクチュエータ12とセンサ20との間のキャビティ16内に配置されたバッフル28を有する。バッフルまたはディヒューザー・プレート28は開口部または孔32を有するため、駆動装置12はセンサ20に、試験用ガスおよび開口部32を介して作用することができる。ガスは毛管11を通してキャビティ16に入る。開口部32を示すために、ディヒューザー・プレート28の正面図を示す。ダイヤフラム33に面して配置されたプレート28が1つだけある。粘度計22は、アクチュエータ12とセンサ20との間のキャビティ16内に配置されたバッフル、バー、または減衰経路29を有する。通路または孔30によって試験用ガスの通路が与えられるため、駆動装置12はセンサ20に作用してガスの粘度を測定することができる。制御されたキャビティの漏れ口は、毛管開口部11を通る。

#### 【0023】

アクチュエータは、いくつかの種類であり得る。一定速度の容積膨張または収縮を発生させるために、バルク (圧電性) PZT膨張、PZTバイモルフ・アクチュエータ (ツイータで使用されている)、および電磁スピーカを、駆動装置12として検討することができる。圧電トランスデューサの容積膨張は、変位は非常に小さいがガス密度の変化の影響を受けない大きな力を伴うため魅力的である。PZT膨張およびPZTバイモルフのアクチュエータの両方とも、温度補償する必要がある。これは電磁スピーカの場合には必要でない。

#### 【0024】

測定される中央の偏位を、バイモルフ・アクチュエータ (PZT / 真鍮の積層、Mallory Sonalet社 (インディアナポリス、インディアナ州) 製、25 ~ 99の数量において1個あたり\$0.55) で形成した。このアクチュエータは、15 mm OD



／ 0.11 mm 厚みの真鍮支持体 + 10 mm O D ／ 0.11 mm 厚みの P Z T + 9 mm O D ／ 0.02 mm 厚みの A g 電極フィルムからなる。定格電圧 25 V の下で、中央の偏位は約 0.8  $\mu$ m / V R M S であった。また中央の偏位の測定を、電磁スピーカ ( B R T 1209 P - 01、I n t ' l . C o m p o n e n t s 社 (メルビル、ニューヨーク州) 製、25 ~ 99 の数量の場合の価格は 1 個あたり \$ 0.60 ) によっても行ない、1 ~ 2 V D C の最大入力および 10 m A 最大に対して評価した。この 50  $\mu$ m 厚みスピーカ・ディスクの中央の偏位は、入力電圧に対してかなり直線的であることが分かった ( 図 8 の曲線 31 を参照 )。変位は、- 6 ~ + 6 V D C において約 7.5  $\mu$ m / V であった。すなわち電圧 ( V ) あたりのこの変位は、P Z T パイモルフからの変位と比べて約 10 倍大きい。スピーカ・メンブレン 33 の支持については、多少注意深く考慮する必要がある ( 図 2 および 6 のデザイン 10 および 21 のメンブレン 33 にそれぞれ注意されたい )。

10

#### 【 0 0 2 5 】

スピーカ・メンブレン 33 からの漏れをなくするためにチャンバーまたはキャビティ 16 をシールする場合には、その  $V_c$  側と反対の側を周囲 / 外部の流体に対して開放して、周囲の圧力または温度が変化したときの変則的な影響を避ける必要がある。キャビティ 16 と反対側のメンブレン 33 における容積が、キャビティ 16 からの漏れに対して気密にシールされていない場合 ( B R T 1206 P - 01 の場合 ) には、毛管 11 に匹敵しかつ / またはオリフィスとしての漏れ機能に匹敵する。

#### 【 0 0 2 6 】

センサはいくつかの種類であり得る。粘度計 10 に必要な他の機能は、周囲と  $V_c$  との間  
の p センサ 20 である。マイクロフォンが、要求を満足する最も低価格の選択であり得る。理想的なセンサ 20 は、硬いマイクロフォンである。すなわち変形による  $V_c$  への影響がなく、出力は周波数に依存しない。エレクトレット・マイクロフォン ( P a n a s o n i c o f S e c a u c u s (ニュージャージー) 製、または G e n t e x o f C a r b o n d a l e (ペンシルベニア州) 製、変形可能なメンブレンを有する) を、位相のずれの測定に用いた。これは、1.2 cm の  $H_2O$  の約 50 ~ 60 H z の圧力変化に対して 200 m V の非増幅の出力をもたらした。ノイズ・レベルは 2 m V であった。これは、( 1.2 / 1000 ) ( 2 / 200 )  $\cdot 10^6 = 12$  p p m のキャビティ 16 内の圧力変化、または 0.012 cm の  $H_2O$  に相当する。

20

#### 【 0 0 2 7 】

電磁スピーカ ( B R T 1209 P - 01、I n t ' l . C o m p o n e n t s 社製 ) を、駆動装置 12 として機能する類似のユニットと背中合わせにして、センサ 20 としてテストした。しかしそれらの磁界が干渉したので、良好な結果を得るにはシールディングが必要であろう。

30

#### 【 0 0 2 8 】

マイクロ・スイッチ 24 P C 圧力センサ・チップ ( H o n e y w e l l 社 (フリーポート、イリノイ州) 製 ) を T O 5 ヘッド (わずかな背圧も生じないように中央の孔の上) に搭載してシールしたところ、アクチュエータ 12 として機能する B R T 1206 P - 01 スピーカの 1 つとともに動作して、センサ 20 として良好に機能した。センサ 20 の出力は、毛管 11 に栓をしたときに駆動装置 12 の励起形状 (サイン、矩形、のこぎり歯形状) に従うことが確かめられた。毛管の栓を抜いた後に、キャビティ 16 の容積変化速度と毛管 11 の流速との間の釣り合いが実現し、本発明が実証された。この動的に釣り合う間、確立された p は流体の粘度を表わしていた。毛管 11 チューブの L / D 比は、4 よりも大きくなければならない。毛管 11 の入口は、乱流を最小限にするために、内部およびエッジで滑らかでなければならない。

40

#### 【 0 0 2 9 】

駆動装置 12 は同じであるが、圧電スピーカをセンサ 20 として機能させた実験では、理論的に予想されていた圧力に依存しない関係、 $G p^0$  (ここで  $G$  = 圧力センサの出力、 $p$  = 絶対圧力) が、 $\pm 5\%$  の範囲の測定誤差内で得られた。この粘度センサは、市販の \$ 0.60 駆動装置 12 と \$ 0.55 センサ 20 とを単に背中合わせでエポキシ樹脂

50

で接着したものから構成され、これらを60Hzで動作させた。要約して言えば、非常に低価格の在庫コンポーネントであることから、本発明の粘度計10、21、または22の製造を非常に費用対効果の高いものにできることが分かる。

#### 【0030】

粘度計10には、いくつかの制限があり得る。第1に、可能性のある1つの制限は、フローの反転によるヘッド圧力である。フロー・駆動装置の周波数が増加するにつれて、それぞれの往復するフロー反転で生じる内部圧力が増加する。このような影響を避けるために、下式(4)に示すように、毛管11の圧力降下  $p_c$  が内部圧力降下  $p_i$  に等しくなる周波数を計算することができる。

#### 【0031】

$$p_c = (V_c f / 2) \cdot 8 L_c / (r^4) \text{ および } p_i = 2 v^2 / 2 = (V_c f / (2 r^2))^2 \quad (4)$$

各方向の安定した容積フロー  $V \cdot f / 2$  によって、平均速度  $v = V_c f / (2 r^2)$  と反転時の内部圧力パルス  $2 v^2 / 2$  とが生じると仮定すれば、 $p_c = p_i$  に対して、下式が得られる。

#### 【0032】

$$8 L_c = V_c f / (2) \text{ および } f = 16 L_c / (V_c) \quad (5)$$

$= 0.000178 \text{ g} / (\text{cm} \cdot \text{s})$  または  $= / = 0.153 \text{ cm}^2 / \text{s} (20$  で1barの $N_2$ に対して)、 $L_c = 1 \text{ cm}$  および  $V_c = 0.0001 \text{ cm}^3$  の場合、 $f = 77 \text{ kHz}$  が得られる。したがって殆どの用途において、この影響は低い周波数では概ね小さく各フロー反転でのみ生じるため、無視することができる。

#### 【0033】

第2に、毛管11チューブ内における乱流の出現を避ける必要がある。上述の実施例の場合、 $r = 0.008 \text{ cm}$  であれば、 $N_2$  に対して  $Re = 2 r_c v / = 1909$  が得られる(しかしプロパンに対しては6935である)。しかし  $r_c$ 、 $V_c$ 、および  $f$  の変化の適切な組み合わせによって、実際に広い層流の範囲が得られる。乱流の開始を最小限にするためには、毛管11の先端のエッジを滑らかに作らなければならない。

#### 【0034】

第3に、アクチュエータ、 $p$ 、センサ、および制御された漏れ口(時間が経過しても詰まらない)の安定性は、長期間に渡る信頼性の高い稼動に対して明らかに重要である。安定した変位を回路により維持し、安定した漏れを多孔性プレート内の多数の漏れ口により維持する方法、およびセンサの適切な動作および精度の自己点検を、安定性の限界を克服するために推奨する。

#### 【0035】

準静的粘度計10のコンポーネントおよびそれらのコストには、以下のものがある。のこぎり歯発生器が\$0.4、スピーカ(10~15mmの直径)が\$0.22~0.25(DAI社製)、マイクロフォン(6~10mmの直径)が\$0.22~0.25、マイクロフォン増幅器およびデジタル出力用のアナログ・デジタル変換器(A/D)が約\$2.00、1つまたは複数の0.2~0.4mmの孔/長さ3~6mmの毛管、または多孔性材料からなる複数の同等な制御された漏れ口が\$0.10、さらに組み立て、較正、および種々雑多な材料が約\$3.00である。このようにセンサの総費用は\$6.00を下回り得るため、その用途およびビジネスの可能性は非常に広い。

#### 【0036】

本発明の特徴には、キャビティ16へのまたはキャビティ16からの毛管11フロー(粘度に比例することが知られている)と、電気機械式流体変位装置/アクチュエータ12と、のこぎり歯電子駆動装置34とを組み合わせ、各AC駆動周期の2つのピリオドの少なくとも一方の間にキャビティ16内の  $p$  が安定することを可能にすることが含まれる。(少なくとも一方または)それぞれののこぎり歯ピリオドの終わりに確立される  $p$  の測定値が、所望する粘度の表示である。絶対圧  $P_a$  に大きく依存するのは、 $p$  である(

10

20

30

40

50

しかし  $p/p_a$  ではない)。  $p$  はセンサ 20 によって検知され、センサ 20 は出力をアナログ・デジタル変換器 35 へ送る (図 9 に示す)。デジタル出力は、プロセッサ 36 へ送られて処理される。プロセッサ 36 は、燃焼制御装置または調整装置などの何らかの装置へ送られ得るデジタルまたはアナログ出力を有する。また出力は、直接測定された粘度および相関する特性たとえば試験用ガスの酸素消費量またはその他のパラメータについての読み取り可能な情報を提供できる表示装置 37 へ送られる。その代わりにセンサ 20 の出力を、アナログ表示装置、プロセッサ、またはインターフェースへ直接送っても良い。

#### 【0037】

一実施形態においては、圧電ツイータまたは静電スピーカではなく、低電圧のアクチュエータ 12、電磁イヤホン・スピーカを有していても良く、  $p$  センサ 20 は、圧電性 (好ましい)、圧電抵抗性、電磁的、エレクトレット、炭素接触、または容量の効果の何れかに基づくマイクロフォンである。本発明では、粘度を検知するだけでなく、測定された粘度と、初期時定数またはアクチュエータ 12 の入力とセンサ 20 の出力との間の位相のずれ (図 3 ~ 5 に示す) とをさらに処理することによって、絶対圧力を検出しても良い。

#### 【0038】

粘度計 10、21、および 22 は、絶対圧力に全く依存しないため、圧力の減衰または位相のずれがある振動ワイヤーおよび水晶発信器に基づく関連技術の粘度計よりも有利である。また粘度計 10、21、または 22 は、測定される流体の熱伝導度または比熱に全く依存しないため、熱励起に基づく粘度計よりも有利である。また加圧流体の定供給源によって駆動される毛管フローに基づくか、または物体落下のタイミングに基づく従来の粘度計よりも有利であり、すなわち定圧流体の高価な供給源、重力の一定の大きさおよび方向、または落下物体を供給し測定するための機器が全く必要でない。本粘度計は、その取り付け方位の影響を受けない。本デバイスを用いれば、前述したように粘度に加えて、初期時定数またはアクチュエータ入力とセンサ出力との間の位相ずれを用いることによって、絶対圧力を検知することもできる。これは関連技術の粘度計からは得られない特徴である。

#### 【0039】

本明細書で開示されていない本発明の他の実施形態および変形が、特許請求の範囲に包含され、本発明の全ての均等物を含む特許請求の範囲によってのみ限定される。

#### 【図面の簡単な説明】

【図 1】 燃料の酸素消費量と燃料の熱物理特性との間の関係を示す図である。

【図 2】 粘度計を示す図である。

【図 3】 3 種類の異なるガスに対する漏出キャビティの振動容積とデルタ圧力とを示すグラフである。

【図 4】 3 種類の異なるガスに対する漏出キャビティの振動容積とデルタ圧力とを示すグラフである。

【図 5】 3 種類の異なるガスに対する漏出キャビティの振動容積とデルタ圧力とを示すグラフである。

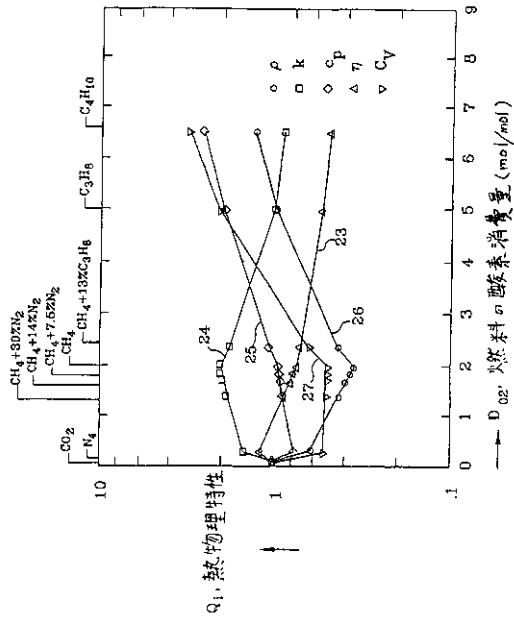
【図 6】 粘度計のさらなる実施形態を示す図である。

【図 7】 粘度計のさらなる実施形態を示す図である。

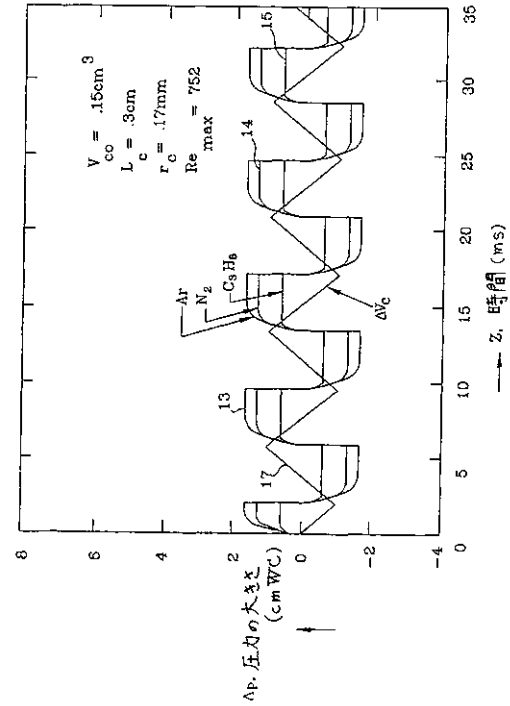
【図 8】 粘度計のアクチュエータに対する駆動電圧対偏位を示すグラフである。

【図 9】 種々の用途で用いる粘度計および関連するコンポーネントを示す図である。

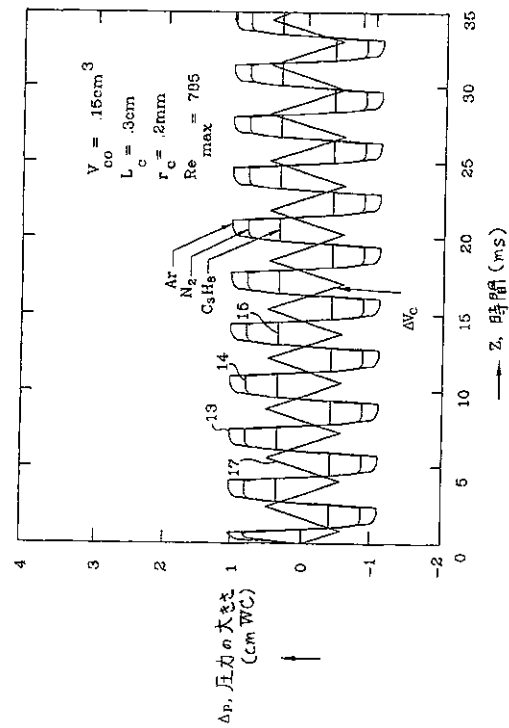
【図 1】



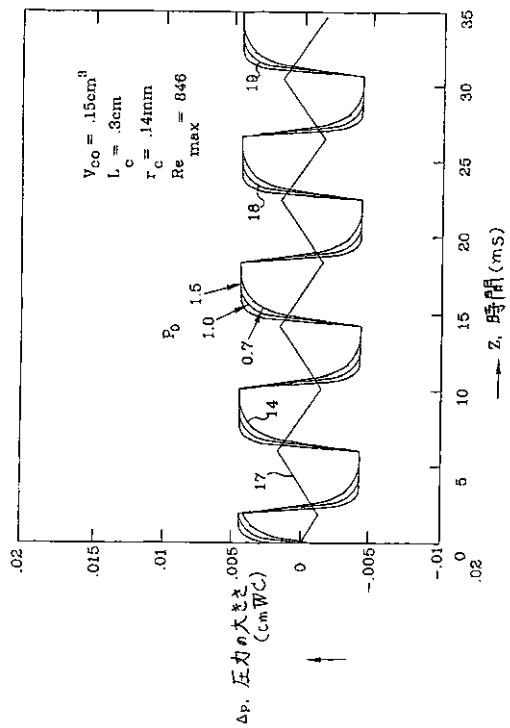
【図 3】



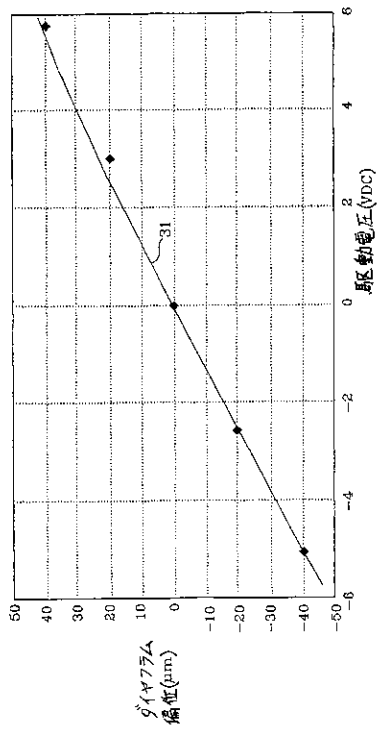
【図 4】



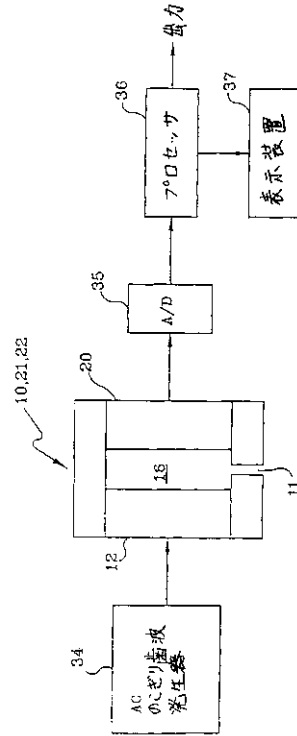
【図 5】



【図 8】



【図 9】



## 【国際公開パンフレット】

(12) INTERNATIONAL APPLICATION PUBLISHED UNDER THE PATENT COOPERATION TREATY (PCT)

(19) World Intellectual Property Organization  
International Bureau(43) International Publication Date  
20 December 2001 (20.12.2001)

PCT

(10) International Publication Number  
WO 01/96832 A1

(51) International Patent Classification: G01N 11/00

(21) International Application Number: PCT/US00/15967

(22) International Filing Date: 9 June 2000 (09.06.2000)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(71) Applicant: HONEYWELL INC. (US/US); 101 Columbia Road, P.O. Box 2245, Morristown, NJ 07962-2245 (US).

(72) Inventors: BONNE, Ulrich, 4936 Shady Oak Road, Hopkins, MN 55343 (US); REZACHEK, Tom, M., 6337 82nd Street S., Cottage Grove, MN 55016 (US); KUBISIAK, David, 1461 Haron Drive, Chanhassen, MN 55317 (US).

(74) Agents: CRISS, Roger, H. et al., Honeywell Inc. (Law Dept.), Attn: A. Ollinger, 101 Columbia Road, P.O. Box 2245, Morristown, NJ 07962-2245 (US).

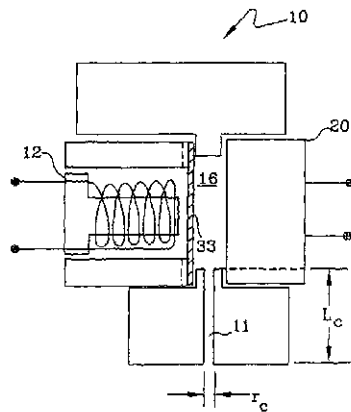
(81) Designated States (national): AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, CA, CH, CN, CU, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, GB, GE, GR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LU, LV, MD, MG, MK, MN, MW, MX, NO, NZ, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TR, TT, UA, UG, UZ, VN, YU, ZW.

(84) Designated States (regional): ARIPO patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, UZ, UG, ZW); Eurasian patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM); European patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE); OAPI patent (BF, BI, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Published:  
— with international search report

For two-letter codes and other abbreviations, refer to the "Guidance Notes on Codes and Abbreviations" appearing at the beginning of each regular issue of the PCT Gazette.

(54) Title: QUASI-STATIC VISCOMETER



(57) Abstract: A viscometer having a fluid volume displacer or driver, such as a speaker membrane, and a pressure sensor or detector, such as a microphonic membrane, forming the inside surfaces of a cavity that is sealed from the ambient environment of the viscometer except for a controlled leak such as a capillary tube. An electrical signal from the sensor or detector is processed to indicate viscosity of the fluid in the cavity. Additionally determined from the viscosity are heating value, oxygen demand and other thermophysical properties of the fluid. Also, absolute pressure is derived after viscosity is determined.

WO 01/96832 A1

WO 01/96832

PCT/US00/15967

## QUASI-STATIC VISCOMETER

BACKGROUND

The present invention pertains to viscosity detectors and particularly to delta-pressure-based sensors. More particularly, the invention pertains to viscosity sensors for determining the oxygen demand (for complete combustion) of a gaseous or liquid fuel for combustion purposes.

Existing and recently proposed quasi-static viscometers are either fluid (i.e., gas or liquid) density and pressure-dependent and costly (such as vibrating wire or quartz crystal-based viscometers). Other viscometers suffer from additional fluid property dependencies (e.g., those involving thermally-driven capillary flow), are prone to drift due to deteriorating and leaky valves (as in viscometers dependent on capillary flow driven by periodic refill from a source of pressurized gas, valve closure and decay observation), or depend on their orientation (as with the falling ball viscometer).

The proposed sensor measures a known property of fluids, viscosity. When applied to a combustion control system, it enables feed-forward operation and sensing in the mild pre-combustion environment; it is low-cost because the property can be simply proportional to the measured signal (in one preferred measurement approach) and it relates also simply to Wobbe number, oxygen demand or heating value of the fuel, so that the sensing error

WO 01/96832

PCT/US00/15967

makes a relatively small contribution to the total combustion control error.

This invention involves the use or application of a known property, viscosity, to combustion control. It is also about using a preferred approach to viscosity measurement to that application.

Viscosity,  $\eta$ , may be known best for its linear relation to laminar volumetric flow ( $dV/dt$ ) and pressure drop,  $\Delta p$ , in a capillary (of radius,  $r_c$ , and length,  $L_c$ ), as shown in equation (1).

$$dV/dt = \pi \Delta p r_c^4 / (8 L_c \eta) \quad (1)$$

One first notes the potential of viscosity as an individual property for combustion control when searching for low-cost means to compensate for variabilities in natural gas composition, and for a way to determine heating value without combustion, which includes analytical determination via correlations involving  $k(T_1)$ ,  $k(T_2)$  and  $\eta$ , i.e., in conjunction with other properties.

Here, the viscosity of the fuel, and, previously, the stack  $O_2$  concentration were for indicating predicted or actual changes in the fuel's oxygen demand,  $D_{O_2}$ . Figure 1 shows graphically a comparison between  $\eta$ , curve 23, and other fuel gas thermophysical ( $Q_i$ ) properties, i.e.,  $\rho$ , density, curve 26;  $k$ , thermal conductivity, curve 24;  $c_p$ , specific heat, curve 25; and  $C_v$ , thermal anemometer correction factor, curve 27; and how well they correlate



WO 01/96832

PCT/US00/15967

individually with oxygen demand of fuel,  $D_{O_2}$ .  $\eta$  exhibits a most advantageous, monotonic decrease as  $D_{O_2}$  increases, although  $c_p$  appears promising as well. The  $c_p$  value of noncombustible  $CO_2$  (8.83 cal/(mol·K); 8.60 for  $H_2O$ ) lies between that of  $CH_4$  and  $C_2H_6$  (8.50 and 12.42), but all  $\eta$ -values of noncombustible gases  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  (except  $H_2O$ ) lie above that of  $CH_4$ .

By including two or more fuel properties into a correlation with heating value or  $D_{O_2}$ , the achievable accuracy increases significantly (note cited art below), but at the penalty of significant cost increases as well, because of the need for digital processing for determination of  $c_p$ . The above is based on the assumption that control of emissions and efficiency are prime goals of any combustion control; this is most closely achieved by operating under constant stack- $O_2$  or excess air, which in turn is met by maintaining a constant air flow and adjusting fuel flow in response to its composition variations, which change  $D_{O_2}$  and  $m^*$ . Half of its density variations is taken care of by the factor  $m$ , as it affects all orifice- or venturi-controlled flow control situations. The aim of adjusting fuel flow to counter variabilities in  $Wb$ , Wobble number, is similar but less correct (if one aims at conserving the A/F (air-to-fuel ratio) and emissions) and goes back to the definition of the Wobbe number,  $Wb = \Delta H/m^*$ , with  $\Delta H$  = heating value

WO 01/96832

PCT/US00/15967

rather than  $O_2$  demand and  $m^* = (M_{gas}/M_{air})^{0.5}$ .  $M$  is moles,  $\eta b$  is closely aligned with  $Bn$  (Bonne number =  $D_{32}/m^*$ ), as long as non-hydrocarbon fuel constituents such as  $H_2$  and  $CO$  are absent. A correlation of  $D_{32}$  or  $Bn$  with viscosity may be determined with a formula  $D_{32} = A + B\eta^C$  or  $Bn = A' + B'\eta^{0.5}$ , respectively.  $A$  and  $B$  are correlation coefficients and  $C$  is a correlation exponent.  $A'$  and  $B'$  are similarly correlation coefficients. The correlation is like that of natural law. Related information is in figure 6, page 21, of "Microsensors for Fluid Properties", by U. Bonne and D. Kubisiak, Scientific Honeywell, Sensors Issue (1996). Additional information is in U.S. Patent 5,486,107 by U. Bonne, issued January 23, 1996 and entitled "Determination of Fuel Characteristics", which is herein incorporated by reference.

To illustrate the significance of the proposed, viscometer-based combustion control system, Table 1 compares some parameters relevant to the quality of a combustion control system based on thermal conductivity versus viscosity sensors. As shown, on all counts, the viscosity-based system lists more advantageous values such as smaller sensor output dependence on pressure and temperature but larger dependence fuel-gas composition or fuel concentration in a fuel + air mixture. The latter parameter was included to quantify the merits of direct measurement of thermo-physical properties of the fuel + air mixtures; as shown, measurement of viscosity or

WO 01/96832

PCT/US00/15967

thermal conductivity in a premixed fuel + air mixture makes the pressure, temperature and humidity effects much larger than the sought fuel property effects. A similar case can be made for the measurement of  $\eta$  or  $k$  in the stack gases.

Table 1 indicates advantages of viscosity versus thermal conductivity as  $D_{O_2}$  or  $\lambda$ , wavelength, sensors.  $\lambda =$  (actual fuel/air ratio) + (stoichiometric air/fuel ratio). This table indicates that viscosity is approximately two times more sensitive to changes in  $\lambda$  and  $D_{O_2}$  than thermal conductivity, but thirty percent less sensitive to variations in pressure and temperature. That means viscosity detection results in a several times more accurate sensor than thermal conductivity, for  $D_{O_2}$  or  $\lambda$  measurement. The gas G20 is methane and G271 is a gas mixture of 74 percent methane and 26 percent nitrogen.  $p$  is pressure in bars, and  $T$ , temperature, is in degrees Celsius.  $W$  is the dependent variable, measuring the desired property ( $\lambda$  or  $D_{O_2}$ ). Sensitivities of  $k$  and  $\eta$  are relative to variability in nitrogen content of fuel mixed with air,  $\lambda$ ,  $T$ ,  $p$  and nitrogen content of pure fuel gas.

WO 01/96832

PCT/US00/15967

Table 1

Dependence	Conditions	$\partial W / \partial x$	
		$W=k$	$W=\eta$
		$\frac{\%}{\%}$	$\frac{\%}{\%}$
1. $\partial W(\lambda) / \partial (\text{fuel+air})$	G20+air vs G271+air $\lambda=1.05$ ; $15^\circ\text{C}$	0.2687	-0.3532
2. $\partial W(\lambda) / \partial \lambda$	$\lambda=1.05$ vs. $1.10$ G20+air	0.0930	-0.1229
3. $\partial W(D_{O_2}) / \partial \text{Gas}$	G20 vs G271 (25%N <sub>2</sub> ) $15^\circ\text{C}$ ; 1 bar	6.7490	-13.782
4. $\partial W(D_{O_2}) / \partial T$	T=20 vs T=15°C; G20	1.6320	1.3860
5. $\partial W(D_{O_2}) / \partial p$	p=2 vs 1 bar; G20;	0.1938	0.1043

For the most desirable property ( $k$  or  $\eta$ ), the values of  $W$  for rows 1-3 should be the highest and 4-5 the lowest. Viscosity is obviously the preferred choice.

## SUMMARY OF THE INVENTION

The viscometer disclosed here does not rely on the availability of pressurized gas, a microsensor or on thermal drivers, and its output is independent of absolute pressure (to the extent that viscosity is). It is not sensitive to orientation and can be fabricated at low cost. The present viscosity sensor is used for determining the oxygen demand of various gaseous mixtures. It has a fluid volume-displacer, actuator or driver, such as a speaker membrane, and a pressure sensor or detector, such as a microphone, with a chamber or cavity and a

WO 01/96832

PCT/US00/15967

controlled leak between the cavity and the ambient environment of the viscosity sensor. The driver, the leak and sensor electronics can be assembled from commercially available and inexpensive components. In sum, the sensor has low manufacturing costs, and good accuracy, reliability, intrinsic safety and long service life.

#### BRIEF DESCRIPTION OF THE DRAWING

Figure 1 is a graph of the relationship between oxygen demand of fuel and thermophysical properties of the fuel.

Figure 2 shows a viscometer.

Figures 3, 4 and 5 are graphs of an oscillatory volume and the delta pressure of a leaky cavity for three different gases.

Figures 6 and 7 show additional embodiments of the viscometer.

Figure 8 is a graph of drive voltage versus deflection for an actuator of a viscometer.

Figure 9 shows a viscometer and associated components for use in various applications.

#### DESCRIPTION OF THE EMBODIMENT

A viscometer 10 of Figure 2 makes use of a linear relationship between laminar volumetric flow ( $dV/dt$ ) through a controlled leak, for which we shall choose at first a capillary (C) 11, (of radius,  $r_c$ , and length,  $L_c$ ,

WO 01/96832

PCT/US00/15967

of capillary tube 11) and viscosity,  $\eta$ , for a pressure difference,  $\Delta p$ . The mathematical relationship of these parameters is shown in equation (2).

$$dV/dt = \pi \Delta p r_c^4 / (8 L_c \eta) \quad (2)$$

Instead of using a thermal source, a valve or a mechanical flow is used to induce a repeatable but time-dependent flow and enable the observation of a pressure drop (or rise),  $\Delta p$ , time constant,  $\tau$ , or phase lag,  $\delta$ . Viscometer 10 disclosed here is designed to induce a repeatable but time-independent flow to enable the observation of a steady  $\Delta p$  when the rate of volumetric displacement by an actuator 12 and the actual leakage flow become equal for a few milliseconds (ms). This is sketched out and represented in Figures 2 and 3. The  $\Delta p$  signals for three gases, Ar, N<sub>2</sub> and C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, are marked as curves 13, 14 and 15, respectively, and the volume change  $\Delta V_c$ , in percent, of cavity 16, shown by saw-tooth curve 17, represents the volumetric change induced by actuator or driver 12.

If it can be assumed that the displacement of a sufficiently strong actuator is independent of the type of gas, actuator 12 can be driven in a "saw tooth" mode and at constant frequency,  $f$ , and the above equation (1) indeed establishes itself; then all types of gases will eventually reach their own  $\Delta p$  in the chamber, but at the same capillary 11 flow rate, thus enabling the

WO 01/96832

PCT/US00/15967

determination of each fluid's viscosity via measurement of  $\Delta p$  and use of equation (2). If one designs viscometer 10 to meet the first two above-noted assumptions, the remaining question is whether there will be enough time in one half-cycle to establish the above equality. If the capillary radius  $r_c$  is too small, the  $\Delta p(t)$  will also be a saw-tooth-like function (one may neglect adiabatic heating effects for small  $\Delta V_c$ ); but if capillary 11 is large enough, its flow and  $\Delta p$  will only increase until  $dV/dt = \Delta V_c f/2$ , regardless of the viscosity of the gas in the viscometer 10, and then remain at that value until the end of the saw-tooth 17 period. The viscosity then results from equation (3).

$$\eta = \pi \Delta p r_c^4 / (4 \Delta V_c f L_c) \quad (3)$$

This relationship is illustrated by the results of calculations with a numerical model in Figures 3 and 4, whereby for a given  $r_c$ ,  $L_c$  and  $f$ , the cavity volume would be incremented by a small amount corresponding to a time step,  $\Delta z = 0.1$  ms, which would change the cavity pressure by an amount corresponding to  $PV = nRT$ , which in turn would start the flow through the capillary and remove some of the pressure change during  $\Delta z$ , until a balance between  $dV/dt = dV_c/dt = \Delta V_c f/2$  and  $\Delta p$  is reached. These figures show that: (1) steady  $\Delta p$  values can be achieved towards the end of the saw-tooth periods; (2) the values of such

WO 01/96832

PCT/US00/15967

steady  $\Delta p$  periods are proportional to the viscosities of the indicated gases  $C_3H_8$ ,  $N_2$  and Ar (83, 178 and 224  $\mu P$  at  $20^\circ C$  and 1 atm, respectively); (3) the  $R_v = \Delta V_c/V_c$ ,  $r_c$  and  $L_c$  values used to be and can be chosen to both achieve a steady  $\Delta p$  period and laminar flow ( $Re < 2300$ ) in the capillary, as indicated by the Reynolds Number,  $Re = 2r_{vp}/\eta$ , for the frequencies of 124 and 324 Hz, and the lowest  $\eta/p$ -gas, which was propane in Figures 3 and 4; the 324 Hz frequency was chosen to be away about equally from higher harmonics of 50 and 60 Hz; and (4) the time constants to reach the steady  $\Delta p$ -period are longer for higher viscosity fluids and lower pressure gases. The time constant results are illustrated in Figure 5.

Figure 3 is a graph of  $\Delta p$ , pressure amplitude in cm water column (WC) versus  $z$  or time in ms. This graph shows an oscillatory volume 17 and  $\Delta p$  of a leaky cavity 16 for three gases Ar,  $N_2$  and  $C_3H_8$ , as represented by curves 13, 14 and 15, respectively. The oscillatory volume 17 of cavity 16 is the result of electrical input to actuator 12. The pressure sensor changes, as indicated by curves 13, 14 and 15, are detected by sensor 20. These plots were taken at  $22^\circ C$  and a pressure of 0.7 bar. The frequency,  $f$ , is 132 Hz.  $R_v$  is one percent. The pressure equilibration times to 63% of the final  $\Delta p$ ,  $\tau$ , are 0.40, 0.23 and 0.153 ms for the three gases, respectively. The



WO 01/96832

PCT/US00/15967

cavity volume at rest,  $V_{cc}$ , is  $0.15 \text{ cm}^3$ , and capillary length  $L_c$  and radius  $r_c$  are at  $0.3 \text{ cm}$  and  $0.17 \text{ cm}$ , respectively. The maximum Reynolds number,  $Re_{max}$ , is 752.

Figure 4 is a graph of  $\Delta p$ , pressure amplitude in cm WC versus time in ms,  $z$ . This graph shows an oscillatory volume 17 and  $\Delta p$  of leaky cavity 16 for three gases Ar,  $N_2$  and  $C_3H_8$ , as represented by curves 13, 14 and 15. These plots were taken at  $22^\circ \text{C}$  and a pressure of 0.7 bar. Frequency  $f$  is 323 Hz, which is about 2.447 times faster than  $f$  for figure 2.  $R_v$  is 0.5%,  $\Delta z$  is 0.05 ms and the linear excitation,  $\tau$ , is 0.18 ms.  $V_{cc}$  and  $L_c$  are the same as for figure 3. The capillary radius,  $r_c$ , is larger at 0.2 mm. The maximum Reynolds number is 785. Note that the amplitudes of corresponding curves 13, 14 and 15 are about half of those for the curves in figure 3. However, the amplitude differences between curves 13, 14 and 15 appear to be more distinguishable in figure 4 than figure 3.

Figure 5 is a graph of  $\Delta p$ , pressure amplitude in cm WC versus  $z$ , time in ms. This graph shows an oscillatory volume 17 and  $\Delta p$  of leaky cavity 16 for  $N_2$  at three different absolute pressures,  $p_a$ . Curve 14 is for  $N_2$  at 0.7 bar, curve 18 is for  $N_2$  at 1.0 bar and curve 19 is for  $N_2$  at 1.5 bar. This data was taken from device 10 at  $22^\circ \text{C}$  and a frequency of 122 Hz, and  $R_v$  is equal to 1%.  $V_{cc}$  is  $0.15 \text{ cm}^3$ ,  $L_c$  is  $0.3 \text{ cm}$ ,  $r_c$  is  $0.14 \text{ mm}$  and  $Re_{max}$  is at 846.

WO 01/96832

PCT/US00/15967

These curves in figure 5 show that the  $\Delta p$ -equilibria reached are independent of absolute pressure. But they also show that the time constants to reach equilibrium,  $\tau$ , are pressure dependent: time constants of about 0.29, 0.23 and 0.194 ms were derived for the pressures of 0.7, 1.0 and 1.5 bar, respectively, which may also serve to determine absolute pressure after viscosity has been determined:  $p\tau^2 \approx \text{constant}$ .

To implement viscometer 10, one needs to consider volumetric drivers 12, pressure sensors 20 and possible system limitations. Figures 6 and 7 show additional embodiments 21 and 22, respectively, featuring interfaces or coupling devices 28 and 29 that may be baffles or at least partial barriers between drivers 12 and sensors 20. Barrier 28 or 29 is for preventing transport from driver 12 to sensor or detector 20 any physical energy (i.e., mechanical, electrical, and/or thermal) which may hinder, delay or inhibit the transfer of  $\Delta p$  information from driver 12 to detector 20. Baffle 28 or 29 may prevent such possible distortion or dilapidation by effecting diffusion, attenuation or other appropriately affecting function.

Viscometer 21 has a baffle 28 situated in cavity 16 between actuator 12 and sensor 20. Baffle or diffuser plate 28 has apertures or holes 32 so that driver 12 can affect sensor 20 via the tested gas and apertures 32. The gas enters cavity 16 via capillary 11. A front view of

WO 01/96832

PCT/US00/15967

diffuser plate 28 is shown to illustrate apertures 32. There is only one plate 28, which is situated facing diaphragm 33. Viscometer 22 has a baffle, bar or damping channel 29 situated in cavity 16 between actuator 12 and sensor 20. A passage or hole 30 provides for passage of the tested gas so that driver 12 can affect sensor 20, for viscosity determination of the gas. The controlled cavity leak is through capillary opening 11.

Actuators may be of several kinds. To generate constant rate of volumetric expansion or contraction, one can consider a bulk (piezoelectric) PZT expansion, PZT bimorph actuators as used in tweeters and electromagnetic speakers as drivers 12. Volumetric expansion of piezoelectric transducers is attractive because of the large forces involved, which would not be affected by changes in gas density, although the displacements would be very small. Both PZT expansion and PZT bimorph actuators would need to be temperature-compensated, which would not be required in the instance of electromagnetic speakers.

Measured center deflections were made of a bimorph actuator (PZT/brass lamination by Mallory Sonalert of Indianapolis, IN, at \$0.55/each at a 25-99 quantity) consisting of a 15 mm OD/0.11 mm-thick brass support + a 10 mm OD/0.11 mm-thick PZT + 9 mm OD/0.02 mm-thick Ag electrode film. Under the rated voltage of  $\leq 25$  V, the center deflection was about 0.8  $\mu\text{m}/\text{VRMS}$ . Center

WO 01/96832

PCT/US00/15967

deflection measurements were also made of an electromagnetic speaker (BRT1209P-01, from Int'l. Components Co. of Melville, NY, at a price for a quantity of 25 99 at \$0.60/each) and rated at for a maximum input of 1-2 VDC and 10 mA maximum. The center displacement of this 50  $\mu\text{m}$ -thick speaker disc was found to be fairly linear with input voltage (see curve 31 of Figure 8). The displacement amounted to about 7.5  $\mu\text{m}/\text{volt}$  from -6 to +6 VDC. This displacement per volt (V) is thus about 10 times greater than the one from a PZT bimorph. Support of the speaker membrane 33 merits some careful consideration (note membrane 33 of designs 10 and 21 of Figures 2 and 6, respectively).

If chamber or cavity 16 is sealed to eliminate leaks across speaker membrane 33, then the side opposite to its  $V_c$  side needs to be opened to an ambient/external fluid to avoid anomalous effects when the ambient pressure or temperature changes. If the volume on the membrane 33 side opposite of the cavity 16 side is not sealed leak-tight from cavity 16 (as in BRT1206P-01), then it competes with capillary 11 and/or the leak functions as an orifice.

Sensors may be of several kinds. Another function needed for viscometer 10 is the  $\Delta p$  sensor 20 between ambient and  $V_c$ . Microphones may be the lowest-cost choice to meet that need. The ideal sensor 20 would be a rigid microphone, i.e., lack of influence on  $V_c$  via deformation, with a frequency-independent output. An electret

WO 01/96832

PCT/US00/15967

microphone (by Panasonic of Secaucus, NJ, or Gentex of Carbondale, PA, with a deformable membrane) was used in phase lag measurements. It provided an unamplified output of 200 mV for about 50-60 Hz pressure variations of  $\leq 1.2$  cm of  $H_2O$ . The noise level was at 2 mV, which is equivalent to  $(1.2/1000)(2/200) \cdot 10^6 = 12$  ppm of pressure change in cavity 16, or 0.012 cm of  $H_2O$ .

An electromagnetic speaker (BRT1203P-01 by Int'l. Components Co.), was tested as a sensor 20, back-to-back to a similar unit serving as a driver 12. However, their magnetic fields interfered, and thus shielding would be needed for good results.

A MICRO SWITCH 24PC pressure sensor chip, from Honeywell Inc. of Freeport, IL, mounted and sealed on a T05 header (over a center hole to avoid any back-pressure build-up) served well as a sensor 20, in operation with one of the BRT1206P-01 speakers serving as an actuator 12. It was verified that the sensor 20 output followed the shape of the driver 12 excitation (sine, square or saw-tooth shape) with capillary 11 plugged. After unplugging the capillary, a balance between rate of cavity 16 volume change and capillary 11 flow was achieved, demonstrating the invention. During this dynamic balance, the established  $\Delta p$  was representative of the fluid viscosity. The L/D ratio of the capillary 11 tube should be greater than four. The capillary 11 inlet should be smooth internally and at the edges to minimize turbulence.

WO 01/96832

PCT/US00/15967

Experiments with the same driver 12, but a piezoelectric speaker serving as sensor 20, yielded a pressure-independent relationship that was as expected theoretically,  $\eta \approx \Delta G p^6$  (where  $\Delta G$  = pressure sensor output and  $p$  = absolute pressure) within a  $\pm 5\%$  scope measurement error. This viscosity sensor consisted of simply epoxying an available \$0.60 driver 12 and \$0.55 sensor 20 back-to-back, and being operated at 60 Hz. In summary, very low-cost, off-the-shelf components show that fabrication of the present viscometer 10, 21 or 22 can be very cost-effective.

Viscometer 10 may have several limitations. First, one possible limitation is head pressure due to flow reversal. As the frequency of a flow driver increases, the inertial pressure generated at each reciprocating flow reversal increases. In order to stay away from such effects, one may calculate the frequency at which the capillary 11 pressure drop,  $\Delta p_c$ , would equal the inertial pressure drop,  $\Delta p_i$ , as shown by equation (4).

$$\Delta p_c = (\Delta V_c f / 2) \cdot 8 \eta L_c / (\pi r^4) \text{ and } \Delta p_i = 2 \rho v^2 / 2 = \rho (\Delta V_c f / (2 \pi r^2))^2 (4)$$

With the assumption that the steady volume flow in each direction,  $\Delta V \cdot f / 2$ , generates an average velocity,  $v = \Delta V_c f / (2 \pi r^2)$ , and an inertial pressure pulse upon reversal of  $2 \rho v^2 / 2$ , then for  $\Delta p_c = \Delta p_i$ , one gets

WO 01/96832

PCT/US00/15967

$$8\eta L_c = \rho \Delta V_c f / (2\pi) \text{ and } f = 16\pi\eta L_c / (\rho \Delta V_c). \quad (5)$$

For  $\eta = 0.000178 \text{ g/(cm}\cdot\text{s)}$  or  $\nu = \eta/\rho = 0.153 \text{ cm}^2/\text{s}$  for  $N_2$  at  $20^\circ\text{C}$  and 1 bar,  $L_c = 1 \text{ cm}$  and  $V_c = 0.0001 \text{ cm}^3$ , one gets  $f = 77 \text{ kHz}$ . For most applications, one will therefore be able to neglect this effect because it is generally small at low frequencies and it only occurs at each flow reversal.

Second, the appearance of turbulence in a capillary 11 tube needs to be avoided. For the above example, with  $r = 0.008 \text{ cm}$ , one gets  $Re = 2r_c\nu/v = 1909$  for  $N_2$  (but 6935 for propane). However, appropriately combined changes in  $r_c$ ,  $\Delta V_c$  and  $f$ , provide a laminar range that is wide indeed. To minimize the onset of turbulence, the edges at the ends of capillary 11 should be made smooth.

Third, The stability of the actuator,  $A_p$ , sensor and controlled leak (no plugging with time) are clearly critical to long-term, reliable service. The way to maintain stable displacement via circuitry, stable leak via a multiplicity of leaks in porous plate, and self-checking the sensor for proper operation and accuracy are recommended to overcome stability limitations.

The components of the quasi-static viscometer 10 and their costs, include a saw-tooth generator at \$0.4, a speaker (10-15 mm diameter) at \$0.22-0.25 (from DAI Ltd.), a microphone (6-10 mm diameter) at \$0.22-0.25, a microphone amplifier and an analog-to-digital converter

WO 01/96832

PCT/US00/15967

(A/D) for a digital output, at about \$2.00, one or more 0.2-0.4 mm holes/capillaries of 3-6 mm in length, or equivalent controlled leaks made of porous materials, at \$0.10, plus assembly, calibration and miscellaneous materials at about \$3.00. Thus, the total cost of the sensor may be less than \$6.00, so that its use and business potential is great.

Features of the invention involve the combination of capillary 11 flow (known to be proportional to viscosity) to or from a cavity 16, an electro-mechanical fluid displacer/actuator 12 and a saw-tooth electronic drive 34 to enable the  $\Delta p$  in cavity 16 to stabilize during at least one of the two periods of each AC actuation cycle. The measurement of the established  $\Delta p$  at the end of (at least one or) each saw-tooth period is an indication of the desired viscosity. It is the  $\Delta p$  (but not  $\Delta p/p_a$ ) which is largely independent of absolute pressure,  $p_a$ .  $\Delta p$  is sensed by sensor 20, which provides an output to an analog-to-digital converter 35, as shown in figure 9. The digital output goes to processor 36 for processing. Processor 36 has a digital or analog output that may be provided to some apparatus such as a combustion control or regulator. Also, an output is provided to indicator 37 that may provide readable information about the directly measured viscosity, as well as correlated properties such as oxygen demand or other parameters of the tested gas. The output



WO 01/96832

PCT/US00/15967

of sensor 20, instead, may go directly to an analog indicator, processor or interface.

An embodiment may have an actuator 12 that is a low-voltage, electro-magnetic earphone speaker, rather than a piezo-electric tweeter or electro-static speaker, and in which the Ap sensor 20 is a microphone based on either piezo-electric (preferred), piezo-resistive, electro-magnetic, electret, carbon-contact or capacitance effects. The present invention may sense not only viscosity but also absolute pressure by further processing the determined viscosity and the initial time constant or phase lag between actuator 12 input and sensor 20 output, as shown in figures 3-5.

Viscometers 10, 21 and 22 have advantages over related art viscometers based on vibrating wires and quartz crystal oscillators, having pressure decays or phase lags, because they have no dependence on absolute pressure. Viscometers 10, 21 or 22 also has advantages over viscometers based on thermal excitation, because it has no dependence on thermal conductivity or specific heat of the fluid being measured. It also has advantages over traditional viscometers based on capillary flow driven by a constant source of pressurized fluid, or based on timing of the fall of an object, in that there is no need for a costly source of constant pressure fluid, constant gravity magnitude and direction, or equipment for providing and measuring the falling object. The present viscometer is

WO 01/96832

PCT/US00/15967

not sensitive to its mounting orientation. As noted above, besides viscosity, the present device can also be used to sense absolute pressure by using the initial time constant or phase lag between actuator input and sensor output, which is a feature not available from related art viscometers.

Other embodiments and variants of the present invention, not disclosed here, are covered by the claims and only limited in scope by the claims, which includes all equivalents thereof.

WO 01/96832

PCT/US00/15967

THE CLAIMS

1. A quasi-static viscometer comprising:  
a driver having a diaphragm;  
a sensor having a diaphragm situated at a first  
distance from the diaphragm of said driver;  
a fitting formed between and around peripheries of  
the diaphragms of said driver and sensor to form  
a cavity between the diaphragms; and  
an opening formed on said fitting to provide a leak  
for the cavity.
2. The viscometer of claim 1, further comprising an  
interface situated in the cavity between the diaphragm of  
said driver and the diaphragm of said sensor, wherein the  
cavity is divided into two subcavities.
3. The viscometer of claim 2, wherein said interface has  
a plurality of holes.
4. The viscometer of claim 3, wherein:  
said driver is a speaker; and  
said sensor is a microphone.
5. The viscometer of claim 4, further comprising:  
an signal generator connected to said driver; and  
a processor connected to said sensor.

WO 01/96832

PCT/US00/15967

6. The viscometer of claim 5, wherein said processor processes signals from said sensor into indications of viscosity of a fluid within the cavity.
7. The viscometer of claim 6, wherein said processor processes the indications of viscosity into indications of heating value,  $D_{o2}$ , of the fluid within the cavity.
8. The viscometer of claim 7, wherein:  
 said opening is a capillary tube having a length,  $L_c$ ,  
 and a radius,  $r_c$ ;  
 said signal generator outputs a signal having a frequency,  $f$ , to said driver;  
 said driver causes a volume,  $\Delta V_c$ , of a fluid to enter and leave the cavity at a pressure variation,  $\Delta p$ ;  
 and  
 the viscosity,  $\eta$ , of the fluid within the cavity is equal to  $(\pi \Delta p r_c^4) / (4 \Delta V_c f L_c)$ .
9. The viscometer of claim 8, wherein the viscosity,  $\eta$ , is an indication of heating value of the fluid.
10. The viscometer of claim 8, wherein the viscosity,  $\eta$ , is an indication of oxygen demand,  $D_{o2}$ , of the fluid.

WO 01/96832

PCT/US00/15967

11. A viscosity-based oxygen demand indicator for a fluid, comprising:
- a driver having a diaphragm;
  - a sensor having a diaphragm proximate to the diaphragm of said driver;
  - a fitting having a first open end juxtaposed to said driver and a second open end juxtaposed to said sensor, and wherein said fitting, driver and sensor form a cavity; and
  - a leak formed in said fitting.
12. The viscosity-based oxygen demand indicator of claim 10, further comprising processor for converting signals from said sensor into indications of oxygen demand of the fluid in the leak.
13. The viscosity-based oxygen demand indicator of claim 12, wherein:
- said driver is a speaker;
  - said sensor is a microphone; and
  - said leak formed in said fitting is a capillary tube.
14. A quasi-static viscometer comprising:
- a structure having a cavity;
  - an actuator situated on said structure;
  - a detector situated on said structure and proximate to said actuator; and

WO 01/96832

PCT/US00/15967

a leak between said cavity and an environment having  
a fluid.

15. The quasi-static viscometer of claim 14, further  
comprising an interface situated in the cavity of said  
structure between said actuator and said detector.

16. The quasi-static viscometer of claim 15, wherein:  
said actuator has a diaphragm;  
said detector has a diaphragm situated approximately  
in a same plane as the diaphragm of said  
actuator.

17. The quasi-static viscometer of claim 16, wherein said  
interface is situated between said actuator and detector,  
and is approximately perpendicular to the same plane.

18. The quasi-static viscometer of claim 17, wherein:  
fluid can enter the cavity via said leak; and  
fluid can pass via said interface between said  
actuator and detector.

19. The quasi-static viscometer of claim 18, wherein:  
said leak is a capillary tube having a length,  $L_2$ , and  
a radius,  $r_0$ ;

WO 01/96832

PCT/US00/15967

the diaphragm of said actuator can cause a volume,  
 $\Delta V_a$ , of the fluid to enter and leave the cavity at  
 a pressure variation,  $\Delta p$ ;  
 the diaphragm of said detector senses the pressure  
 variation,  $\Delta p$ ; and  
 the viscosity,  $\eta$ , of the fluid in the cavity, is  
 $(\pi \Delta p r_c^4) / (4 \Delta V_c L_c)$ .

20. The quasi-static viscometer of claim 19, further  
 comprising a processor connected to said detector, which  
 processes a signal indicating viscosity,  $\eta$ , of the fluid  
 and determines an oxygen demand,  $D_{O_2}$ , of the fluid.

21. The quasi-static viscometer of claim 20, wherein:  
 the processing to determine the oxygen demand,  $D_{O_2}$ , of  
 the fluid is in accordance with  $D_{O_2} = A + B\eta^C$ ;  
 and  
 A, B and C are correlation coefficients.

22. The quasi-static viscometer of claim 20, wherein:  
 the processing to determine the Bonne number,  $Bn$ , of  
 the fluid is in accordance with  $Bn = A' + B'\eta^{C'}$ ;  
 A' and B' are correlation coefficients; and  
 C' is approximately 0.5.

WO 01/96832

PCT/US00/15967

23. The quasi-static viscometer of claim 20, wherein said processor determines absolute pressure,  $p_a$ .



WO 01/96832

PCT/US00/15967

1/9

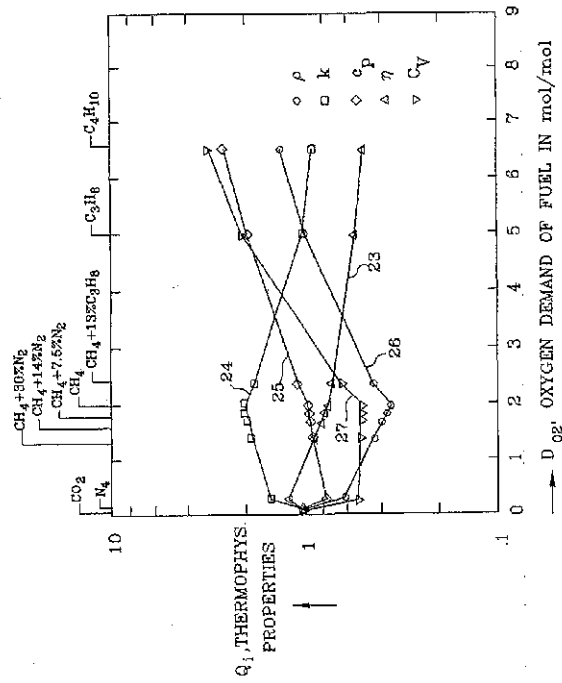
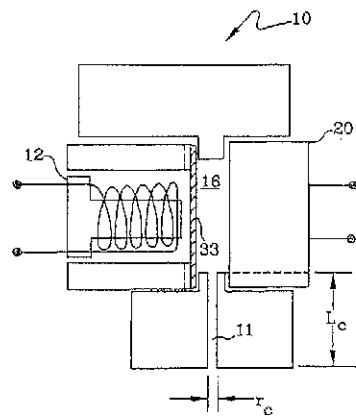


Fig. 1

2/9

*Fig.2*

3/9

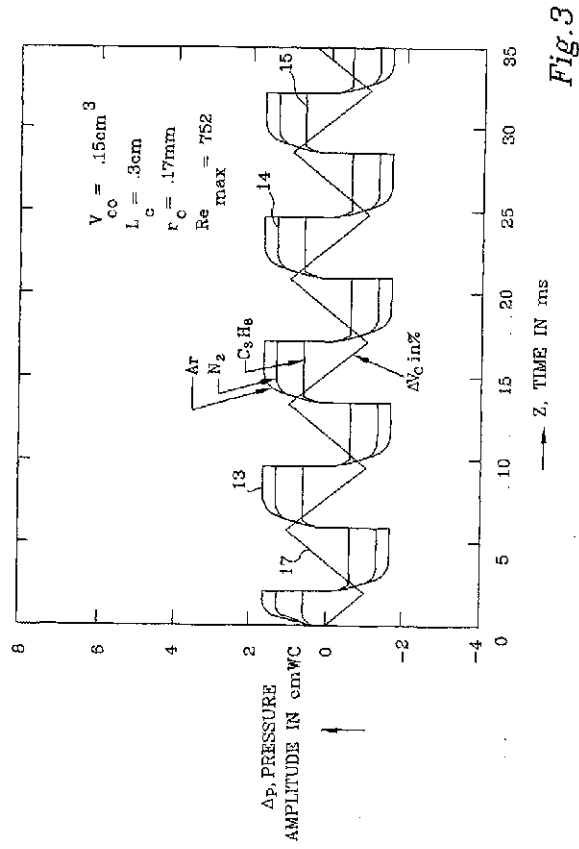


Fig. 3

4/9

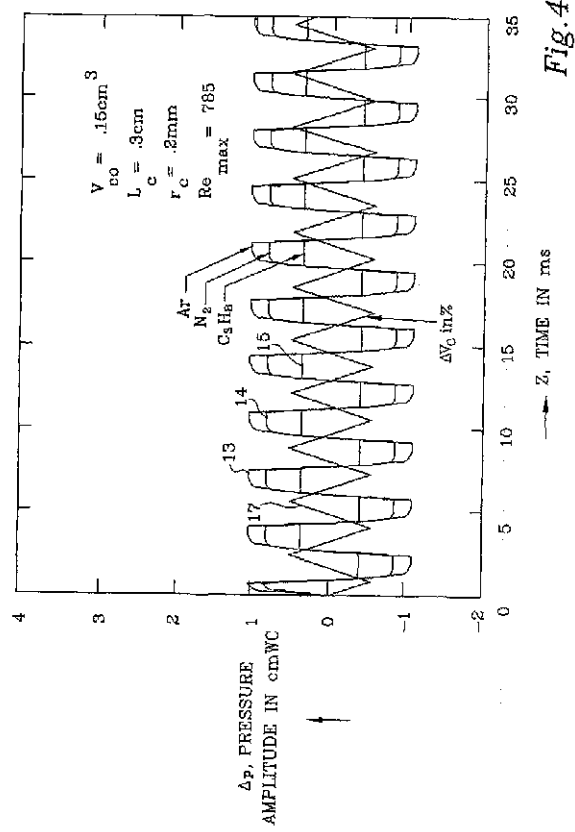


Fig. 4

5/9

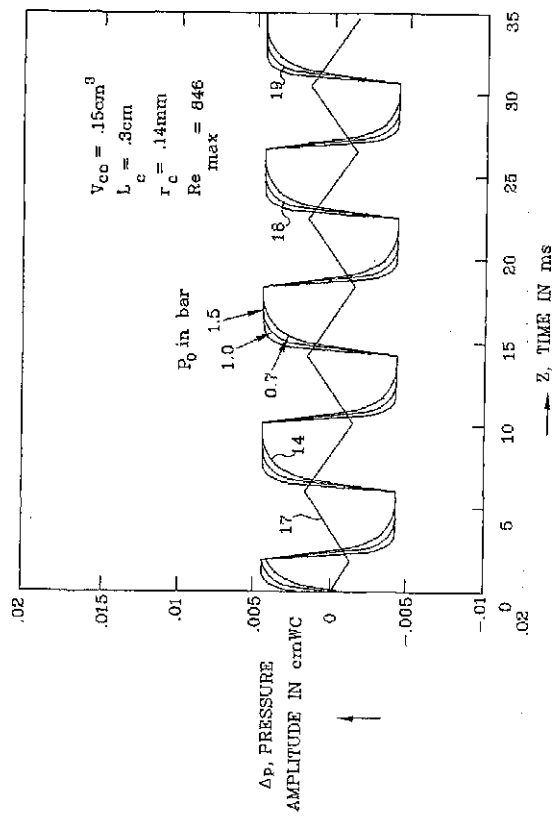
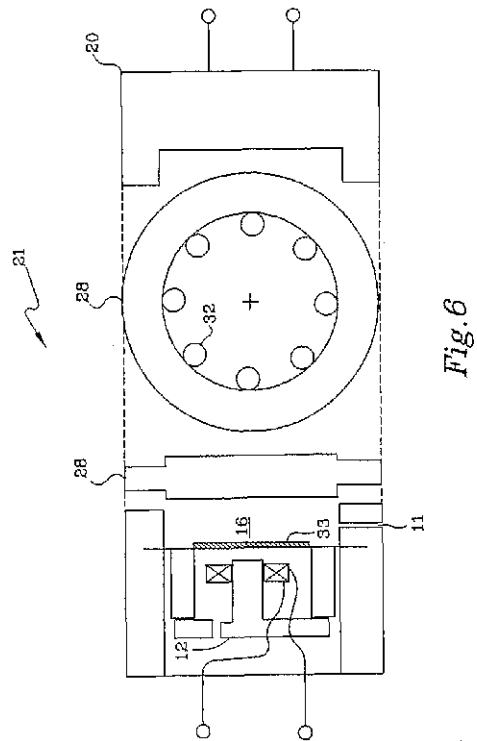


Fig.5

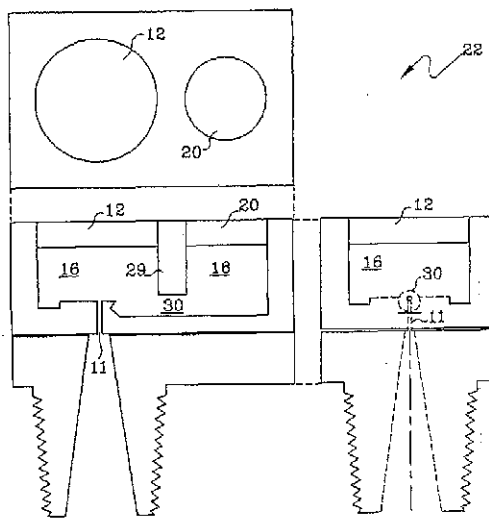
6/9



WO 01/96832

PCT/US00/15967

7/9

*Fig. 7*

WO 01/96832

PCT/US00/15967

8/9

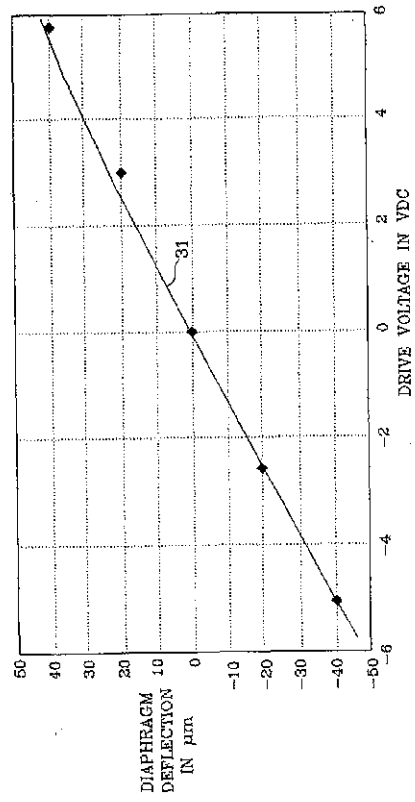


Fig. 8



WO 01/96832

PCT/US00/15967

9/9

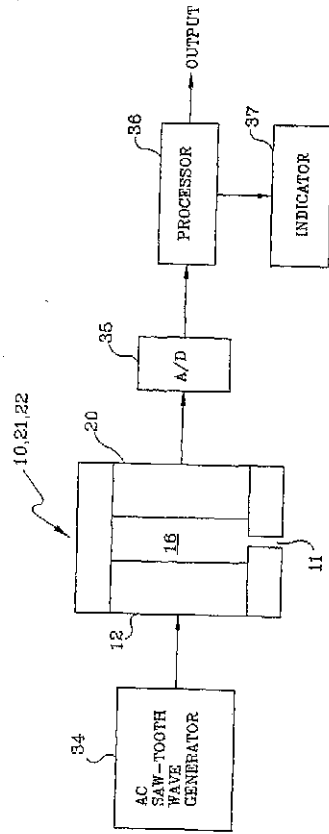


Fig. 9

## 【国際調査報告】

INTERNATIONAL SEARCH REPORT		International Application No. PCT/US 00/15967
A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER (PC 7 601N11/00)		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED (Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) IPC 7 601N		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched		
Electronic data base consulted during the International search (name of data base and, where practical, search terms used) EP0-Internal, WPI Data		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	US 5 486 107 A (BONNE ULRICH) 23 January 1996 (1996-01-23) abstract; claims; figures 1,2	1,11
A	RUSSIAN PATENTS ABSTRACTS Section E1, Week 199326 Derwent Publications Ltd., London, GB; Class 503, AN 1993-212540 XPO02901269 & SU 1 746 256 A (MORDASOV M M), 7 July 1992 (1992-07-07) abstract	1,11,13
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of box C. <input checked="" type="checkbox"/> Patent family members are listed in annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "B" prior document but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation at other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other cited documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "Z" document member of the same patent family		
Date of the oral completion of the international search 4 September 2000		Date of mailing of the international search report 13. 09. 00
Name and mailing address of the ISA European Patent Office, P.O. 5518 Patentplan 2 NL-2280 HV Rijswijk Tel: (+31-70) 340-2047, Fx: 31 605 400 nl, Fax: (+31-70) 549-3016		Authorized officer Erber

Form PCT/ISA/210 (unofficial sheet) July 1999

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No.  
PCT/US 00/15967

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5486107	A	23-01-1996	EP 0554095 A	04-08-1993
SU 1746256	A	07-07-1992	NONE	

Form PCT/ISAC/0 (patent family search) (4/4) (1993)

---

フロントページの続き

(74)代理人 100096013

弁理士 富田 博行

(74)代理人 100093713

弁理士 神田 藤博

(72)発明者 ボンネ, ウルリヒ

アメリカ合衆国ミネソタ州 5 5 3 4 3 , ホブキンズ, シャディ・オウク・ロード 4 9 3 6

(72)発明者 レザチェック, トム・エム

アメリカ合衆国ミネソタ州 5 5 0 1 6 , コティッジ・グロウヴ, エイティセカンド・ストリート・サウス 6 3 3 7

(72)発明者 クビシアク, デイヴィッド

アメリカ合衆国ミネソタ州 5 5 3 1 7 , チャンハッセン, ヘロン・ドライブ 1 4 6 1

F ターム(参考) 2G040 AA00 AB00 BA23