

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5658244号  
(P5658244)

(45) 発行日 平成27年1月21日(2015.1.21)

(24) 登録日 平成26年12月5日(2014.12.5)

(51) Int.Cl.

G O 1 N 15/02 (2006.01)

F I

G O 1 N 15/02

F

請求項の数 30 (全 14 頁)

(21) 出願番号	特願2012-516456 (P2012-516456)	(73) 特許権者	510309064
(86) (22) 出願日	平成22年7月2日(2010.7.2)		ザ ガヴァナーズ オブ ザ ユニヴァー
(65) 公表番号	特表2012-531577 (P2012-531577A)		シティ オブ アルバータ
(43) 公表日	平成24年12月10日(2012.12.10)		カナダ国 ティー5ジェイ 4ビー6 ア
(86) 国際出願番号	PCT/CA2010/000995		ルバータ, エドモントン, ジャスパー・ア
(87) 国際公開番号	W02011/000088		ヴェニュー 10230, スイート 40
(87) 国際公開日	平成23年1月6日(2011.1.6)		00, ティーイーシー・エドモントン内
審査請求日	平成25年5月29日(2013.5.29)	(74) 代理人	100070150
(31) 優先権主張番号	61/222, 890		弁理士 伊東 忠彦
(32) 優先日	平成21年7月2日(2009.7.2)	(74) 代理人	100091214
(33) 優先権主張国	米国 (US)		弁理士 大貫 進介
		(74) 代理人	100107766
			弁理士 伊東 忠重

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 粒子分級器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

流体中に浮遊した粒子を分級するための装置であって：

1 つまたは複数の担体流路を規定する 1 つまたは複数の要素と；

前記 1 つまたは複数の担体流路に流入する担体流体のソースと；

前記粒子を前記 1 つまたは複数の担体流路の前記担体流体に懸濁状態に供給するよう接続された粒子のソースと；

前記 1 つまたは複数の担体流路を規定する要素に 1 つまたは複数の前記担体流路を通じて前記流体の流れに対して角度をなして加速度を供給するために前記 1 つまたは複数の担体流路を規定する要素を回転させるように接続された駆動部と；

前記浮遊した粒子が前記回転の軸と平行な速度の成分を持って移動するとき、前記浮遊した粒子をその軌跡に応じて分級するための分級システムと；を有する、装置。

【請求項 2】

前記担体流体が気体であるとともに前記粒子がエアロゾル粒子である、請求項 1 に記載の装置。

【請求項 3】

前記担体流体が空気である、請求項 2 に記載の装置。

【請求項 4】

10

20

前記担体流路を規定する前記 1 つまたは複数の要素は、中心回転軸周りに回転面を実質的に形成する、

請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 5】

前記粒子のソースが、実質的に前記担体流路の内側回転面の開口により、前記担体流路内に与えられる、

請求項 2 に記載の装置。

【請求項 6】

前記担体流路は略円筒形である、

請求項 1 乃至 5 のいずれか 1 項に記載の装置。

10

【請求項 7】

前記担体流路を規定する要素は、円筒である、

請求項 6 に記載の装置。

【請求項 8】

前記 1 つまたは複数の担体流路を規定する 1 つまたは複数の要素は、中心回転軸周りの扇形の表面を形成する、

請求項 1 乃至 3 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 9】

前記 1 つまたは複数の担体流路を規定する 1 つまたは複数の要素は、略扇形円筒状として形成される、

20

請求項 8 に記載の装置。

【請求項 10】

前記駆動部は、モータを有する、

請求項 1 乃至 9 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 11】

前記粒子を前記 1 つまたは複数の担体流路の前記担体流体に懸濁状態に供給するよう接続された前記粒子のソースは、前記 1 つまたは複数の担体流路と交差する 1 つまたは複数の懸濁流路を規定する要素を有し、前記 1 つまたは複数の懸濁流路は前記浮遊した粒子を含む前記流体を前記 1 つまたは複数の担体流路に向かわせることができる、

請求項 1 乃至 10 のいずれか 1 項に記載の装置。

30

【請求項 12】

前記分級システムは、前記 1 つまたは複数の担体流路の 2 つ以上の流路への分割を規定する要素を有する、

請求項 1 乃至 11 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 13】

前記分級システムは、前記担体流路内の前記流体内に浮遊する前記粒子がその軌跡に応じて衝突し得るそれぞれの前記担体流路の表面を有する、

請求項 1 乃至 11 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 14】

前記表面は、前記担体流路を規定するまたは前記担体流路を部分的に規定する要素である、

40

請求項 13 に記載の装置。

【請求項 15】

前記分級システムは粒子検出器に接続されたまたは粒子検出器と組み合わせた出口を有し、前記駆動部は可変回転速度を有する、

請求項 1 乃至 14 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 16】

前記粒子のソースは前記粒子を帯電させる帯電手段を有するとともに、前記分級システムは前記流路に沿って配置された少なくとも 1 つの導電検出器を有し、前記少なくとも 1 つの導電検出器は電位計回路に接続される、

50

請求項 1 に記載の装置。

【請求項 17】

前記分級システムは、前記粒子を最大サイズと最小サイズの間の粒子サイズの範囲内に分級することにより作動する、

請求項 1 乃至 16 のいずれか 1 項に記載の装置。

【請求項 18】

流体中に浮遊した粒子の分級方法であって：

流体の担体流を提供するステップであって、前記流体の速度が、少なくとも求心加速度を生じさせる回転成分及び前記回転の軸と平行な並進成分を有する、ステップと；

前記担体流に粒子を懸濁状態で供給するステップと；

前記求心加速度及び前記流体により生じる前記粒子への抵抗によって決定される前記粒子の軌跡に応じて前記粒子を分級するステップと、を有する、方法。

【請求項 19】

前記流体が気体であるとともに前記粒子がエアロゾル粒子である、

請求項 18 に記載の方法。

【請求項 20】

前記流体が空気である、

請求項 19 に記載の方法。

【請求項 21】

前記担体流に前記粒子を懸濁状態で供給するステップは、浮遊した粒子を含んでいる流体の流れを前記担体流に合流させることを含む、

請求項 18 乃至 20 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 22】

前記粒子の前記軌跡に応じて前記粒子を分級するステップは、前記担体流を 2 つ以上の流れに分けることを含む、

請求項 18 乃至 21 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 23】

前記粒子の前記軌跡に応じて前記粒子を分級するステップは、前記粒子が前記軌跡に応じて衝突し得る表面を提供することを含む、

請求項 18 乃至 22 のいずれか 1 項に記載の方法。

【請求項 24】

前記流れにもたらされた前記加速度を変化させるとともに、前記流れにもたらされた前記加速度が変化するにつれて前記 2 つ以上の流れの少なくとも 1 つの前記粒子の濃度を測定するステップをさらに有する、

請求項 22 に記載の方法。

【請求項 25】

前記流れにもたらされた前記加速度を変化させるとともに、前記流れにもたらされた前記加速度が変化するにつれて前記表面から下流方向の継続する流れの中の前記粒子の濃度を測定するステップをさらに有する、

請求項 23 に記載の方法。

【請求項 26】

変化する前記加速度における前記濃度の測定が、空気力学的粒径又は粒子緩和時間に対する濃度のスペクトルを得るために使用される、

請求項 24 または 25 に記載の方法。

【請求項 27】

前記粒子を分級するステップは、前記粒子が前記軌跡に応じて衝突し得る 1 つまたは複数の検出器を提供することおよび前記 1 つまたは複数の検出器に衝突する前記粒子の数を測定することを含む、

請求項 23 に記載の方法。

10

20

30

40

50

## 【請求項 28】

前記粒子を帯電させるステップをさらに有し、前記検出器は、導電性であるとともにそれぞれ電位計回路に接続される導電性の部分を有する、

請求項 27 に記載の方法。

## 【請求項 29】

前記担体流は内側回転表面を有する流路を通して提供され、前記粒子は前記内側回転表面を通して前記担体流内に供給される、

請求項 18 乃至 28 のいずれか 1 項に記載の方法。

## 【請求項 30】

前記粒子は、最大サイズと最小サイズの間の粒子サイズの範囲内に分級される、

請求項 18 乃至 29 のいずれか 1 項に記載の方法。

10

## 【発明の詳細な説明】

## 【技術分野】

## 【0001】

エアロゾル粒子分級器。

## 【背景技術】

## 【0002】

エアロゾル分級器は単分散エアロゾルの生成のために使用され、すなわち、それらはより広い粒子分布から狭い範囲の粒子を選ぶ。この方法は、ナノ粒子生成、空気中の粒子の分布の測定、フィルタおよび他の装置の粒子の沈着の測定、大気エアロゾルのサンプリング、他多数を含む、多くの用途で使用されている。これらの測定は、ナノテクノロジー、薬剤研究、健康への影響の研究、吸入毒性、バイオエアロゾル検出、フィルタ試験、室内空気の質の研究、産業衛生、エネルギーおよび燃焼の研究、自動車排出物測定、および大気と気候変動の研究のように多様な研究領域でしばしば行われる。

20

## 【0003】

現在、最も一般的に使われる分級器は、微分型移動度分析器 (DMA、Knutson and Whitby 1975) と呼ばれる。DMA は粒子をその電気移動度、すなわち、静電場中の荷電粒子の動きに基づいて分級する。2つの円筒間の静電場および流れを制御することにより、粒子はそれらの電気移動度により分級され、この電気移動度は粒子上の電荷の数および粒子が受ける抵抗に関連し、粒子のサイズおよび形状の関数である。非球状粒子のために、電気移動度等価直径とよばれる等価直径がこれらの粒子に対して規定され、これらの粒子は同じサイズの球状粒子と同じ電気移動度を有する。この装置を用いて粒子を分級するために、電荷が放射線源電荷中和器またはコロナ放電のような帯電方法を用いてこれらの粒子に置かれなければならない。しかし、すべての方法で単一の電荷がそれぞれの粒子に置かれるのではなくむしろ電荷の分布が粒子の集団に置かれる。たとえば、粒子は 1、2、3、またはそれより多くの正の電荷を得る；1、2、3、またはそれより多くの負の電荷を得るまたは全く帯電しないかもしれない。粒子の電気移動度は、粒子上の電荷の数および抵抗の関数である。したがって、1つの電荷を持つ小さい粒子は2つの電荷を持つ大きい粒子と同じ電気移動度を有する。このため、DMA により分級されたエアロゾルサンプルは、粒子サイズに関して正確に単分散ではなく、むしろそれは荷電粒子の整数に対応するサイズの混合物を有する。荷電状態の数を最小化するために技術が使用されるが、DMA は正確に単分散のエアロゾルを作り出すことはできない。(サイズ分布の測定のような) 幾つかの応用では、電荷分布によりもたらされる誤差は反転技術を使用して訂正され得るが、完全に除去することはできない。他の用途および実験では、これらの余分な粒子サイズは性能を低下させるまたは結果を歪め得る。

30

40

## 【0004】

質量対電荷比により粒子を分級するために使われているほかの技術は、エアロゾル粒子質量分析器 (APM; Ehara 他 1996; Ehara 1995) またはクエット遠心粒子質量分析器 (クエットCPMA; Rushton and Reavel

50

1 2004; Olfert and Collings 2005)と呼ばれる装置である。これらの装置を用いて、荷電粒子は、2つの回転する円筒の間で静電気および遠心力により分級される。同様の帯電機構が粒子を帯電させるために適用される。したがって、同じ質量対電荷比の粒子が分級される。例えば、1つの電荷を有する粒子は同時に2倍の質量かつ2倍の数の電荷を有する粒子として分級される。したがって、APMまたはクエットCPMAは正確に単分散のエアロゾルを作り出さない。

#### 【0005】

他のエアロゾルおよび粒子装置は、粒子の「空気力学的」直径とよばれるものの測定に基づいている。空気力学的等価直径は、実際の粒子と同じ終端速度を有する水の密度を持つ球状粒子の粒径として定義される。粒子の空気力学的サイズを測定する装置は、様々な種類のインパクタ(Marple他、1991; Keskinen他、1992)、仮想インパクタ(Conner、1966)、および空気力学的レンズ(Liu他、1995a、1995b)を有する。しかし、これらの方法は、エアロゾルサンプルを半分に分割する手段を提供するのみであり、カットオフ点より大きい粒子は一方向に分級される(すなわち、衝突板上に衝突させられる)とともにカットオフ点より小さい粒子は流れ続ける。しばしば、これらのステージの幾つかは、幾つかの大きい容器に分級を提供するために一緒に積み重ねられる。今のところ、粒子を空気力学的直径により分級するとともに単分散エアロゾルを作り出す装置はない。

#### 【発明の概要】

#### 【発明が解決しようとする課題】

#### 【0006】

出願人は、粒子の分級をもたらす空気力学的粒子分級器(APM)と呼ばれる新しい装置を発明した。

#### 【課題を解決するための手段】

#### 【0007】

実施形態では、流体の担体流を提供するステップと、粒子を担体流に懸濁状態に供給するステップと、流体により生じた粒子の加速度および抵抗により決定される軌跡に粒子を従わせるように流れの速度に対してある角度をなして流れに加速度をもたらすステップと、粒子の軌跡に応じて粒子を分級するステップとを有する、流体中に浮遊した粒子の分級方法が提供される。粒子は、例えば粒子を含んでいる流れを分けることによりまたは流れを含んでいる流路の境界上への粒子の衝撃を検出することにより分級され得る。

#### 【0008】

以下は、いずれかあるいは全てが上述の粒子の分級方法と組み合わせて提供され得る特徴である。流体は空気のような気体であり得る。担体流体は、1つまたは複数の搬送流路の回転により軸周りに回転させられ得る。加速度は求心化速度であり得る。粒子を担体流に懸濁状態に供給するステップは、浮遊した粒子を含んでいる流体の流れを担体流に合流させることを含み得る。粒子の軌跡に応じて粒子を分級するステップは、担体流を2つ以上の流れに分けることを含み得る。粒子の軌跡に応じて粒子を分級するステップは、粒子がその軌跡に応じて衝突し得る表面を提供することを含み得る。

#### 【0009】

流体中に浮遊した粒子を分級するための装置も提供され、装置は：1つまたは複数の担体流路を規定する要素と、担体流路に流入する担体流体のソースと、粒子を担体流路の担体流体に懸濁状態に供給するよう接続された粒子のソースと、担体流路を規定する要素に担体流路を通じて流体の流れに対して角度をなして加速度を供給するために担体流路を規定する要素に作用するように接続された駆動部と、浮遊した粒子をその軌跡に応じて分級するための分級システムと、を有する。

#### 【0010】

以下は、いずれかあるいは全てが上述の粒子を分級するための装置と組み合わせて提供され得る特徴である。担体流体は気体であり得る。担体流は、軸周りに回転させられる1つまたは複数の流路を通じて流れるようにされ得る。流路は、回転軸に近接した軸周りの

回転面である内壁および外壁により規定される扇形または完全な環状空間であり得る。回転面は略円筒形状であり得る。駆動部は、担体流路を規定する要素の回転を生じさせるように接続されたモータを有し得る。粒子を1つまたは複数の担体流路の担体流体に懸濁状態に供給するよう接続された粒子のソースは、担体流路と交差する1つまたは複数の懸濁流路を規定する要素を有することができ、懸濁流路は浮遊した粒子を含む流体を担体流路に向かわせることができる。分級システムは、それぞれの担体流路の2つ以上の流路への分割を規定する要素を有し得る。分級システムは、担体流路内の流体内に浮遊する粒子がその軌跡に応じて衝突し得るそれぞれの担体流路の表面を有し得る。表面は、担体流路を規定または部分的に規定する要素であり得る。

【0011】

10

装置および方法のこれらのおよび他の態様は特許請求の範囲に記載され、これらはこの参照により開示に含まれる。

【0012】

実施形態が例示として図面を参照して記載され、図面中同じような参照符号は同じような要素を示す。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】図1は、円筒状流路を有するエアロゾル粒子分級器（APC）（正確な縮尺ではない）の概略図である。

【図2】図2は、図1の実施形態の円筒間の粒子の軌跡および流れの詳細を示す図である

20

。

【図3A】図3Aは、図1のAPCの正規化された伝達関数のグラフである。

【図3B】図3Bは、説明中に与えられた動作条件の空気力学的粒径に関しての図1のAPCの伝達関数のグラフである。

【図4】図4は、部分的な円筒状流路を有するAPC（正確な縮尺ではない）の概略である。

【図5】図5は、回転面として形成された境界を有する湾曲した流路を有するAPC（正確な縮尺ではない）の概略である。

【図6】図6は、流路を規定する外側円筒に検出器を有するAPC（正確な縮尺ではない）の概略である。

30

【図7A】図7Aは、粒子カウンタを有する空気力学的分級器を示す概略である。

【図7B】図7Bは、図6の実施形態の空気力学的分級器を有する粒子荷電器を示す概略である。

【発明を実施するための形態】

【0014】

図1および2は、通常100で示されるAPCの例示的实施形態の図を示す。ここに開示されたAPCは、担体流路を規定する要素、ここでは2つの同心円筒、同じ方向および同じような回転速度（通常2つの円筒は同じ回転速度で回転するが異なる速度も使用することができる、下記参照）で回転する内側円筒102および外側円筒104、を有する。円筒以外の回転面（軸方向に対称な形状、回転面の同意語）もまた使用され得る。実施形態では、流路は、例えば、円筒の中心軸周りに一周しない扇形の円筒、または部分的な回転表面等の部分的な円筒により、および内側表面と外側表面との間の実質的な半径方向表面により規定され得る。流路が部分的な円筒または部分的な回転面により規定される場合、表面は流路を規定する単一の要素を形成することができる。図1を参照すると、実施形態に示された円筒は、ベアリング122に取付けられるとともにプーリ124を介して回転される回転軸120に取付けられる。これらの要素は、担体流路を通じて流体の流れに角度をなして流路を規定する要素に加速度（ここでは求心加速度）を提供するために担体流路を規定する要素に動く（この実施形態ではそれらを回転させることにより）駆動部として作用する。図2を参照すると、粒子のソースが粒子を担体流体に懸濁状態で供給するために接続され、この実施形態ではスリット118がソースの機能を果たす。流速 $Q_0$ を

40

50

有するエアロゾル流 106 により運ばれる粒子は、内部円筒壁のスリット 118 を通って 2 つの円筒の間のギャップに入る。流速  $Q_{sh}$  を有するシース流 108 もまた担体流体流のソースから 2 つの円筒の間の担体流路に導入される。この実施形態では、初期流路 126 がシース流を担体流路に導入することにより担体流体のソースとして働く。流れは層流であるとともに非圧縮性であると仮定され、これは通常の作動において使用される形状、流速および気体圧力に対して妥当な想定である。この実施形態では、流れは、回転円筒座標系の軸方向であるとともに、円筒にまたは円筒と同軸の仮想円筒に接線方向である。異なる速度で回転する円筒の実施形態では、流れはまだ接線方向であり得る。(粒子を含む流体の求心加速度により) 如何なる遠心力もない場合、粒子は、2 つの円筒の間の内側円筒壁とエアロゾル流線 110 との間を移動する。しかし、円筒が回転するとき、粒子は外側円筒の方向の遠心力および回転の中心に向かう抵抗力を受ける。遠心力は、粒子を担体流に供給するとともに担体流を横切る速度成分を受けもする。したがって、この例では、粒子は予め混合されない。粒子はまた、エアロゾル流およびシース流により運ばれる軸方向にも移動する。したがって、半径方向 ( $r$ ) および軸方向 ( $z$ ) の粒子の速度は以下のようになる:

【0015】

【数 1】

$$v_r = \frac{dr}{dt} = \frac{C_c}{3\pi\mu d_p} m \omega^2 r = \tau \omega^2 r \quad \text{および} \quad v_z = \frac{dz}{dt} = u_z, \quad (1)$$

ここで  $r$  は粒子の半径方向の位置、 $\omega$  はシリンダの回転速度、 $m$  は粒子の質量、 $d_p$  は粒子の粒径、 $\mu$  は担体ガスの粘性係数、 $C_c$  は粒子に対するカニンガムの滑り補正係数、 $u_z$  は担体ガスの軸方向の速度である。速度分布は一定 (すなわち  $u_z$  は定数である) であると仮定される。粒子緩和時間  $\tau$  は次のように定義され、

【0016】

【数 2】

$$\tau = \frac{C_c}{3\pi\mu d_p} m = \frac{C_c \rho_p d_p^2}{18\mu} = \frac{C_c \rho_0 d_{ae}^2}{18\mu}, \quad (2)$$

ここで  $\rho_p$  は粒子密度、 $\rho_0$  は単位密度 ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )、 $d_{ae}$  はいわゆる粒子の空気力学的粒径である。

【0017】

連鎖律および微分することを用いて、粒子の半径方向位置は軸方向位置の関数として見ることができ、

【0018】

【数 3】

$$r(z) = r_{in} \exp\left(\frac{\tau \omega^2 z}{u_z}\right), \quad (3)$$

ここで  $r_{in}$  は粒子が分級器に入ったときの初期位置である。

【0019】

分級システムは、浮遊した粒子をその軌跡に応じて分級する。示された実施形態では、粒子は、粒子の軌跡が粒子を動かしてサンプリング出口 114 を通過させるかどうかに応じて分級される。装置の伝達関数 (任意の与えられた条件での分級器を離れる粒子の分布) が、粒子の軌跡を決定することにより見つけることができる。流速  $Q_s$  を有するサンプル流 112 が、サンプリング出口 114 を通って分級器から出る。この示された実施形態

10

20

30

40

50

では、サンプル流はシース流の一部である。シース流およびエアロゾル流の残りは、排出流 116 として分級器から出る。 $r_1$  を内側円筒の外側半径、 $r_2$  を外側円筒の内側半径、 $r_3$  をエアロゾル流の外側半径、 $r_4$  をサンプル流の内側半径と定義し、分級器を通過し、分級器を出るサンプル流 112 中の最大粒子（すなわち最大）は、 $r_{in} = r_1$  においてスタートするとともに分級器の端部（ $z = L$ ）において  $r_2$  に達する。したがって、

【 0 0 2 0 】

【 数 4 】

$$\tau_{\max} = u_z \frac{\ln(r_2/r_1)}{\omega^2 L} = \frac{(Q_{sh} + Q_a) \ln(r_2/r_1)}{\pi(r_2^2 - r_1^2) \omega^2 L} \quad (4)$$

10

分級される最小の粒子  $m_{in}$  は、 $r_{in} = r_3$  において分級器に入るとともに分級器の端部において  $r_4$  に達する。半径  $r_3$  および  $r_4$  は、半径  $r_1$  および  $r_2$  に関連付けることができ、一様流を実現し、

【 0 0 2 1 】

【 数 5 】

$$u_z = \frac{Q_{sh} + Q_a}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} = \frac{Q_{sh}}{\pi(r_2^2 - r_3^2)} = \frac{Q_a}{\pi(r_2^2 - r_4^2)} \quad (5)$$

20

したがって、

【 0 0 2 2 】

【 数 6 】

$$\tau_{\min} = \frac{(Q_{sh} + Q_a)}{\pi \omega^2 L (r_2^2 - r_1^2)} \ln \left( \frac{Q_{sh} + Q_a + Q_a(1 - r_1^2/r_2^2)}{Q_{sh} + Q_a - Q_{sh}(1 - r_1^2/r_2^2)} \right) \quad (6)$$

>  $m_{ax}$  の粒子は、出口スリットに到達する前に外側円筒壁に衝突するとともに円筒表面に付着する一方、<  $m_{in}$  の粒子は、出口スリットを通過して排出流とともに装置の外に運ばれる。粒子は、ファンデルワールス力により外側円筒に付着する（Friedlander、2000）とともに円筒が掃除されるまでそこにとどまる。（DMA と同じように、通常の運転条件およびエアロゾル濃度の下において、円筒は数ヶ月に一度掃除されるだけでよい。）最大および最小緩和時間の間に、粒子のごく一部のみが分級される。粒子は、粒子が分級器の端部に到達する時間までに、サンプル流線（ $r_4 < r < r_2$ ）で定義されるサンプル流に移動しなければならない。>  $m_{ax}$  の粒子に対して、初期位置  $r_c < r_3$  を有する粒子のみが分級され、 $r_c$  は臨界半径と呼ばれる。

>  $m_{in}$  に対する制限軌跡は、 $r_c$  でスタートするとともに  $r_4$  に到達する粒子である。この条件を式 3 に代入するとともに、エアロゾル比  $f_1$  について解くと、分級される  $f_1$  は次のようになる。

【 0 0 2 3 】

【 数 7 】

$$f_1 = \frac{Q_{sh} + Q_a - \exp\left(\frac{-2\pi\omega^2 L \pi(r_2^2 - r_1^2)}{Q_{sh} + Q_a}\right)(Q_{sh} + Q_a - Q_a(1 - r_1^2/r_2^2))}{Q_a(1 - r_1^2/r_2^2)} - \frac{Q_{sh}}{Q_a} \quad (7)$$

同様に、<  $m_{ax}$  の粒子に対して、臨界半径  $r_c$  でスタートする粒子は、分級器の端部で  $r_2$  に到達しなければならない。

50



この場合、分級されるエアロゾル比  $f_2$  は、

【 0 0 2 4 】

【 数 8 】

$$f_2 = \frac{Q_{sh} + Q_a}{Q_a} \left( 1 - \frac{1 - \exp\left(\frac{-2\tau\omega^2 L \pi(r_2^2 - r_1^2)}{Q_{sh} + Q_a}\right)}{1 - r_1^2/r_2^2} \right) \quad (8)$$

10

である。さらに、サンプル流速がエアロゾル流速より小さい場合、伝達関数は  $f_3 = Q_s / Q_a$  より大きくなることはできない。

【 0 0 2 5 】

伝達関数はこれらの3つの比の最小値または1である。したがって、伝達関数は、 $= \max[0, \min(f_1, f_2, f_3, 1)]$  として表すことができる。

【 0 0 2 6 】

正規化された伝達関数が図3Aに示され、正規化された粒子緩和時間は  $\tau^*$  として定義される。 $\tau^*$  の値は、伝達関数の中央における粒子緩和時間であり、 $\tau^* = (\tau_{max} + \tau_{min}) / 2$  として定義される。伝達関数の半値幅は、 $\tau^* = (\tau_{max} - \tau_{min}) / 2$  として定義される。

20

【 0 0 2 7 】

シリンダの間のギャップが小さく  $Q_a = Q_s$  であるとき、伝達関数の相対幅  $\tau^* / \tau$  がちょうどエアロゾルとシース流の流速の比である、 $\tau^* / \tau = Q_a / Q_s$  ことが示され得る。高度な単分散エアロゾルを生成するために、この比はほぼ0.05から0.1の範囲であるべきである。

【 0 0 2 8 】

例として、大抵の用途によく適合されるいくつかのサンプルの寸法および作動条件は、 $r_2 = 37 \text{ mm}$ 、 $r_1 = 35 \text{ mm}$ 、 $L = 200 \text{ mm}$ 、 $Q_{sh} = 3 L / \text{min}$ 、および  $Q_a = Q_s = 0.3 L / \text{min}$  である。概して、より小さいギャップは伝達関数の高さを増加させるので、円筒の間ギャップは比較的小さく（すなわち、 $(r_2 - r_1) \ll r_1$ ）に維持されることが有利である。作動中、流速は、流れが層流に留まる限り要求通りに伝達関数の幅を変化させるために変化され得る。与えられた寸法を使用しているAPCの伝達関数の例が、図3Bに示される。この例では、回転数が5650 rpmのとき、非拡散伝達関数の中心は、 $d_{ae}^* = 100 \text{ nm}$  であり、分級される最小および最大サイズ92 nm および108 nmをそれぞれ有する。分級領域内の粒子の拡散による効果を考慮するより複雑なモデルもまた開発された。拡散伝達係数もまた図3bに示されるとともにそれは拡散が含まれるときに伝達関数が幅広くなるとともにより低くなることを示す。この影響は、より小さい粒子サイズに対してより多くなる。

30

【 0 0 2 9 】

したがって、APCのこの実施形態は、非常に狭いまたは単分散の寸法分布を生成する。このような同じ寸法を利用して、APCは、例えば10 nmから10  $\mu\text{m}$ の非常に幅広い範囲に渡る粒子を20,000から95 rpmの回転速度範囲を使用して分級することができるとともにより小さい粒子サイズはより速い回転速度を使用することにより分級され得る（比べると、DMAが通常約2.5から1000 mmの範囲に対して使用される）。

40

【 0 0 3 0 】

ここで用いられた解析は、APCが粒子を分級するための静電気力の変わりに遠心力を有することを除いて、DMAに用いられた証明された理論的な解析と非常に似ていることに留意すべきである。したがって、試作品が開発されるとAPCの理論的モデルが実験的データに厳密に一致することを予測する確固とした基礎がある。

50

## 【 0 0 3 1 】

図 1 の A P C の実施形態の上述の記載は、装置が設計され得るまたは構成され得る単なる 1 つの方法である。他の代替の設計が、用途または要求に応じて想定され得る。これらは、1) 連続円筒部分の代わりの回転路の使用、2) 2 つの円筒の僅かに異なる回転速度での回転、および 3) エアロゾルのサイズ分布を測定する方法を含む。

## 【 0 0 3 2 】

図 1 の実施形態は、粒子を分級するために同心円筒を使用している。しかし、他の回転形状も使用され得る。例えば、円筒の扇形のような部分的な円筒セクションが、1 つまたは複数の担体流路を規定する要素として使用され得る、または回転軸に取り付けられた他の長い流路が単体流路として使用され得る。しかし、伝達関数の解析はこれらの異なる形状により変化し、円筒形状が解析するために最も単純である。図 4 を参照すると、回転流路（複数の流路が中心軸周りに含まれるが、図には 1 つのみが示される）を有する A P C 2 0 0 が示される。流路は、内側部分円筒セクション 2 0 2 および外側部分円筒セクション 2 0 4 により規定され得るが、部分円筒セクション以外の形状も可能である。実施形態は、流路が中心軸周りを一周しないことを除いて、図 1 の実施形態と同様の方法で動作し得る。特に、回転軸 2 2 0、ベアリング 2 2 2、プーリ 2 2 4、シース流 2 0 8、エアロゾル流 2 0 6、初期流路 2 2 6、サンプル流 2 1 2 および排出流 2 1 6 は、分級器の回転部品内のシース流およびサンプル流の部分が中心軸周りに一周して延びないことを除いて、図 1 の対応物と同様であるとともに同じように協働する。図 5 を参照すると、円筒ではない内側表面および外側表面により規定された流路を有する A P C 3 0 0 が示される。表面は回転面であり得る。しかし、図 4 のように中心軸周りに途中までしか延びない部分的な回転面を含む異なる形状を使用することもできる。部分的な回転面以外のさらなる形状もまた使用され得る。図 5 に示された実施形態は、異なる形状の流路を除いて図 1 の実施形態と同じような方法で動作する。特に、回転軸 3 2 0、ベアリング 3 2 2、プーリ 3 2 4、シース流 3 0 8、エアロゾル流 3 0 6、初期流路 3 2 6、サンプル流 3 1 2 および排出流 3 1 6 は、異なる形状が流路の形状に適合するように適しているところを除いて、図 1 の対応物と同様であるとともに同じように協働する。

## 【 0 0 3 3 】

図 1 および 2 に関する解析では、円筒が同じ回転速度で回転していることが仮定された。しかし、僅かに異なる速度で回転する円筒も使用され得る。この場合、内側円筒を外側円筒より僅かに速く回転させることが好ましい。これが実行されるとともに速度の差が十分大きいとき、遠心力は半径方向位置が増加するにつれて減少する。これは、分級器内の粒子の軌跡を、分級器の端部の近くに僅かに「収束」させ、より高い伝達関数をもたらす。同じような方法が伝達関数を向上させるためにクエット C P M A で使用され、それは A P M との間の重要な違いである。しかし、上述の例（図 3 B）に示されたように、速度差の無い伝達関数のピークは既に 0.95 であるので、僅かに異なる速度で円筒を回転させることによる追加された複雑さは、伝達関数の僅かな向上に恐らく価値がない。異なる回転速度が使用された場合、速度比が、それを超えると流れが不安定になり、粒子の分級を妨げるレイリー基準を満足しなければならない（すなわち、 $(r_1 / r_2)^2 > 2 / 1$ ）の場合になってはいけない）ことに留意すべきである。

## 【 0 0 3 4 】

第 3 に、上述の記載は、どのように D M A が粒子の電気移動度粒径に基づいて準単分散エアロゾルを生成するために使用されるかに良く似て、どのように A P C が粒子の空気力学的粒径に基づいて単分散エアロゾルを生成するために使用され得るかを記載している。D M A はしばしば、準単分散エアロゾルの個数濃度を測定するために凝縮粒子カウンタ（C P C）と組み合わせられる。典型的には、D M A の静電界を制御する電圧が装置の範囲に渡って「スキャン」されるとともに C P C データのデータ反転を完了することにより、エアロゾルのサイズ分布が決定され得る。D M A および C P C のこの組み合わせは通常、操作型移動度粒径測定器（S M P S）と呼ばれる。同じ方法が、A P C と C P C またはその他の粒子係数装置を組み合わせることにより、および連続的に回転速度を「スキャンする

」または断続的に回転速度を変えることにより使用され得る。すなわち、粒子カウンタは、粒子が粒子カウンタに到達することを可能にする空気力学的粒径または他に由来する距離の粒子の濃度を検出するために、粒子分級システム内に配置され得る或いは粒子分級システムにまたは粒子分級システムの出口に接続され得る。流れに提供される加速度は連続的にまたはステップ状に変化されることができ、粒子カウンタに到達するために必要な空気力学的粒径（または空気力学的粒径に関連した他の距離）は流れに提供される加速度とともに変わるので、粒子カウンタは、流れに提供される加速度が変化するにつれて空気力学的粒径（または空気力学的粒径に関連した他の距離）対濃度のスペクトルを測定する。図7Aを参照すると、上述の実施形態のいずれかであり得る空気力学的分級器500が粒子カウンタ540とともに示される。初期エアロゾル流536は、初期エアロゾル流に存在するエアロゾル粒子の選択された部分を含む分級された流れ538を作り出すようにエアロゾル流に作用する分級器に入る。分級された流れは例えばサンプリング流であり得る。粒子カウンタは例えば、凝縮粒子カウンタであり得る。図7Aに示された実施形態は、空気力学的粒径対濃度のスペクトルを測定するために使用される実施形態または他の実施形態を含む。

#### 【0035】

APCがエアロゾルのサイズ分布を測定するために使用され得る他の方法は、エアロゾル出口スリットを取り除き、流路に粒子がその軌跡に応じて衝突することができる1つまたは複数の検出器を配置し、1つまたは複数の検出器に衝突する粒子の数を数えることによる。実施形態では、検出器は電位計回路に接続されることができ、例えば環状実施形態では、検出器は電位計に接続された導電リングを有し得る。リングは、流路の規定する表面の残りの部分および存在し得る他の検出リングのいずれからも電氣的に絶縁される検出器は、流路の最も外側の表面に沿って軸方向の異なる位置に配置され得る。図6を参照すると、APC400が示され、軌跡に応じて粒子が衝突し得る流路内に配置された検出器428を有する。示された実施形態では、流路は図1のように円筒により規定されるが、他の形状も正常に作動する。この実施形態では、検出器は、電位計回路に電氣的に接続され、外側円筒の内側の周りに延びるリングであり得る。検出器が衝突する粒子を検出するために使用されるとき、サンプル出口は粒子を分級するために必要とされないが、検出器はサンプリング出口を有する実施形態にも使用され得る。図6に示された実施形態は、その他の点では、図1の実施形態と同様に作動することができ、特に、回転軸420、ベアリング422、プーリ424、シース流408、エアロゾル流406、初期流路426および排出流416は、エアロゾル粒の粒子が帯電（荷電）されることを除いて、図1の対応物と同様であるとともに同じように協働する。このシステムでは、測定される粒子は（最も可能性のあるコロナ放電タイプの荷電装置または他の粒子荷電方法を用いて、Hinds, Aerosol Technology, Wiley, 1999 参照）帯電される。荷電粒子は分級セクションを移動するとともに外側円筒の電位計リングに衝突し、したがって、電位計リングに測定可能な電流を生じさせ、電流は電位計に衝突する粒子の個数濃度に比例する。大きい粒子はエアロゾル入口に近い電位計リングに衝突し、小さい粒子はエアロゾル出口に近いリングに衝突する。図7Bを参照すると、例えば図6のAPCのような、電位計を有するAPC400が、粒子荷電装置430とともに示される。非荷電エアロゾル流432が、荷電エアロゾル粒子を含む荷電エアロゾル流434を生成するために粒子荷電装置430に入る。APC400は、荷電エアロゾル流を分級するために荷電エアロゾル流434に作用する。データ反転ルーチンを使用することにより、エアロゾルサイズ分布が決定され得る。同様の手法は、微分型移動度スペクトロメータ（Reavell他、A fast response particulate spectrometer for combustion aerosols, Society of Automotive Engineers, 2002）のようなDMA様装置、およびエンジン排気粒径分析器（Johnson他、An engine exhaust particle sizer spectrometer for transient emission particle measurement, So

10

20

30

40

50

ciety of Automotive Engineers、2004)で使用され、電位計リングはDMA様分級円柱内に配置される。

【0036】

このように、出願人は空気力学的粒子分級器(APC)と呼ばれる新しい装置を発明した。示されたように、詳細な理論的モデルがこの装置のために開発された。モデルは、装置が粒子を帯電させる必要なしに優れた分級性能(すなわち、広範囲、高分解能、高透過率)を有し得ることを示す。これは、実施形態の装置が、DMA、APM、またはCPMAのように多重荷電粒子を分級することなしに真の単分散エアロゾルを生成することができることをもたらす。APCは、移動度粒径、粒子質量、有効密度、フラクタル様次元、および動力学的形状因子を含むほかの重要な粒子特性を測定するために、DMAまたはCPMAと直列に組み合わせることができる。

10

【0037】

本質的でない変更が、特許請求の範囲に含まれることから離れることなくここに記載された実施形態に行われ得る。

【0038】

特許請求の範囲において、用語「有する」、「含む」(comprising)は包括的な意味で用いられ他の要素が存在することを除外するものではない。クレームの特徴の前の「1つの(a)」なる不定冠詞は、複数のその特徴が存在することを除外するものではない。それぞれのここに記載された特徴のひとつは、1つまたは複数の実施形態で使用され得るとともに、特許請求の範囲により定義されたように、ここに記載されることのみによって、全ての実施形態に必須であると解釈されない。

20

【図1】

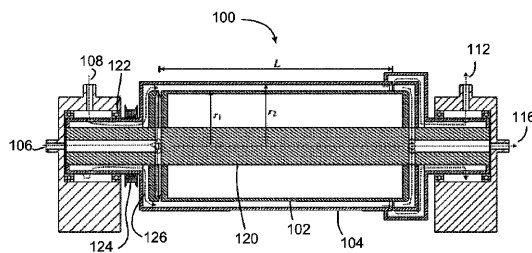


Fig. 1

【図2】

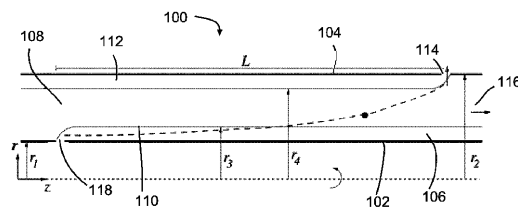
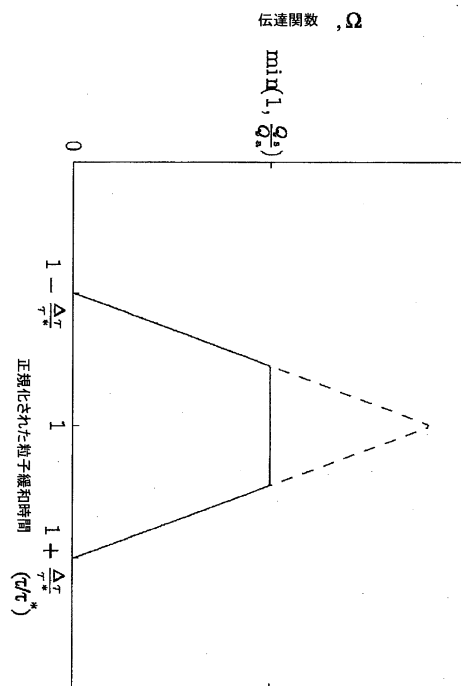
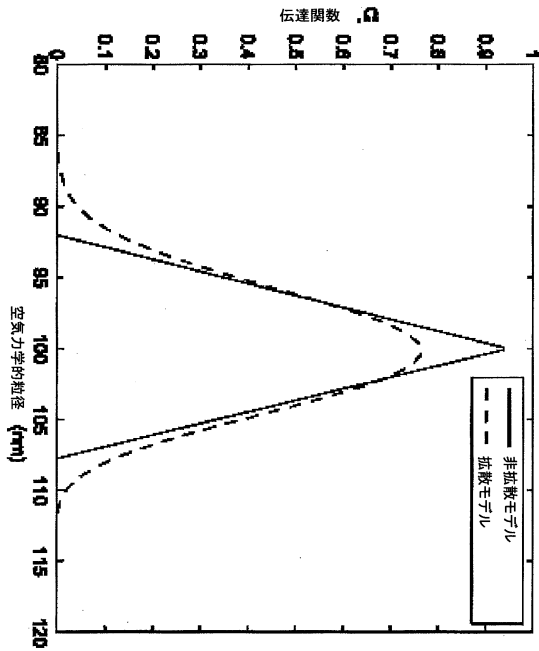


Fig. 2

【図3A】



【図 3 B】



【図 4】

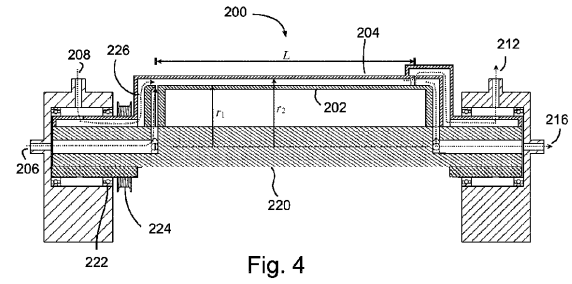


Fig. 4

【図 5】

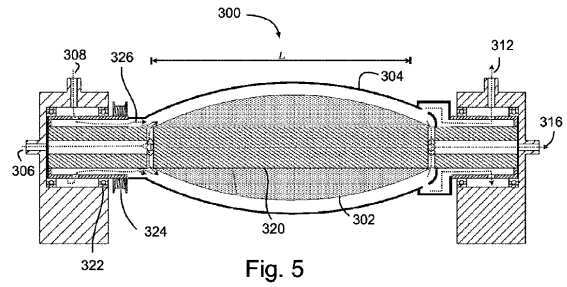


Fig. 5

【図 6】

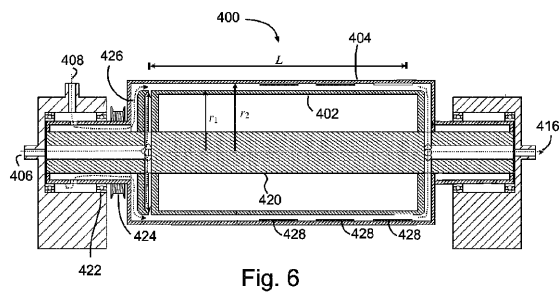
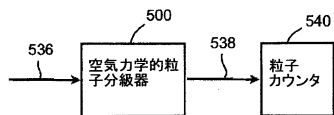
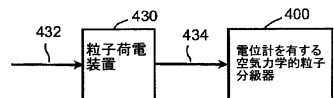


Fig. 6

【図 7 A】



【図 7 B】



---

フロントページの続き

(72)発明者 オルファート, ジェイソン

カナダ国 アルバータ ティー 6 ジー 2 ジー 8, エドモントン, ユニヴァーシティ オブ アル  
バータ, メカニカル・エンジニアリング・ビルディング 5 - 1 シー

審査官 清水 督史

(56)参考文献 特開平 0 2 - 2 3 7 6 5 7 ( J P , A )

特開 2 0 0 1 - 1 8 3 2 8 4 ( J P , A )

(58)調査した分野(Int.Cl., D B 名)

G 0 1 N 1 5 / 0 0 - 1 5 / 1 4