

明 細 書

発明の名称： 固液分離装置及び固液分離システム

技術分野

[0001] 本開示は、固液分離装置及びそれを用いた固液分離システムに関する。

背景技術

[0002] 従来、工業や医学等の各種分野では、製造又は分析処理等において、流体中に分散している固体粒子を所望の条件で分離する技術が利用されている。特許文献1は、上流側に設けられた配列用流路と、下流側に設けられた分離用流路との2種類の流路を用いて微粒子を分離させる固液分離装置に関する技術を開示している。配列用流路は、慣性力により、流体中の微粒子を配列させる。一方、分離用流路は、配列用流路から微粒子が配列された流体を受け入れ、多数の支柱で規定された軌道により、最終的に所望の粒子径ごとに微粒子を分離する。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：特開2018-89557号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 特許文献1に開示されている固液分離装置では、分離用流路は、多数の支柱が形成された複雑な幾何形状を有する。一方、配列用流路の横断面形状は、分離用流路の横断面形状とは別に、微粒子を配列させるという観点から様々な設定されるものである。したがって、固液分離装置に設けられている流路全体としては、決して簡易的な形状又は構成であるとは言えない。

[0005] そこで、本開示は、簡易的な形状又は構成で分離効率を向上させるのに有利な固液分離装置及び固液分離システムを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0006] 本開示の一態様は、固体粒子が分散された流体から固体粒子を分離させる

固液分離装置であって、流体が導入される直線状の流路が形成されている流路部と、流路の上流側を流通している流体に横断面方向の二次流れを発生させる二次流れ発生機構と、を備え、流路は、流路幅と当該流路幅に対して垂直な流路高さとして規定される矩形の横断面を有し、流路における少なくとも二次流れ発生機構よりも下流側の横断面では、流路幅と流路高さとの比で表されるアスペクト比は、10から100までの範囲にある。

[0007] 上記の固液分離装置では、固体粒子の粒子径が $1\mu\text{m}$ から 1mm までの範囲にある場合、流路高さは、分離対象としての固体粒子の粒子径の10倍以上かつ100倍以下の寸法に設定されてもよい。流路における二次流れ発生機構よりも下流側の延伸方向の長さは、流路幅の100倍以上かつ10,000倍以下の寸法に設定されてもよい。また、二次流れ発生機構は、流路部に設置され、流路の長辺側の側壁から流路の内部に向けて超音波を発する超音波振動子であってもよい。又は、二次流れ発生機構は、流路部に形成され、流路の延伸方向に進むにつれて少なくとも一部の横断面の形状を変化させる流路形状変更部であってもよい。

[0008] 本開示の他の態様に係る固液分離システムは、固体粒子が分散された流体から固体粒子を分離させる固液分離装置と、流体を貯留する貯留槽と、貯留槽から固液分離装置に流体を送る送液部と、少なくとも、送液部の動作を制御することで流体の少なくとも流量又は速度を調整させる制御部と、を備え、固液分離装置は、流体が導入される直線状の流路が形成されている流路部と、流路の上流側を流通している流体に横断面方向の二次流れを発生させる二次流れ発生機構と、を備え、流路は、流路幅と当該流路幅に対して垂直な流路高さとして規定される矩形の横断面を有し、流路における少なくとも二次流れ発生機構よりも下流側の横断面では、流路幅と流路高さとの比で表されるアスペクト比は、10から100までの範囲にある。

[0009] 上記の固液分離システムでは、流体に分散されている固体粒子は、二次流れに誘起された抗力と、流体の主流に誘起された揚力とを受け、揚力は、分離対象としての固体粒子の粒子径を基準として求められてもよい。流路高さ

は、分離対象としての固体粒子の粒子径を基準として求められた揚力に基づいて決定されてもよい。抗力は、流体の境界層の内部の横断面方向において揚力とつり合うように決定されてもよい。また、二次流れ発生機構は、流路部に設置され、流路の長辺側の側壁から流路の内部に向けて超音波を発する超音波振動子であり、固液分離システムは、超音波振動子に電力を供給する超音波発振器を備え、制御部は、超音波発振器に対して超音波振動子の振動数又は音圧を変更させて二次流れの速度を変化させることで、抗力を調整してもよい。

発明の効果

[0010] 本開示によれば、簡易的な形状又は構成で分離効率を向上させるのに有利な固液分離装置及び固液分離システムを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0011] [図1]図1は、本開示の第1実施形態に係る固液分離装置の構成を示す概略図である。

[図2]図2は、第1実施形態に係る固液分離装置による固液分離の原理を説明する図である。

[図3]図3は、輝度値を基準とした流路幅方向での粒子濃度を示すグラフである。

[図4]図4は、固体粒子の粒子径と、固体粒子が受ける揚力との関係を示すグラフである。

[図5]図5は、流路高さと、固体粒子が受ける揚力との関係を示すグラフである。

[図6]図6は、固体粒子の粒子径に対する揚力及び抗力の設定範囲を示すグラフである。

[図7]図7は、本開示の第2実施形態に係る固液分離装置の構成を示す概略図である。

[図8]図8は、本開示の第3実施形態に係る固液分離装置の構成を示す概略図である。

[図9]図9は、本開示の第4実施形態に係る固液分離装置の構成を示す概略図である。

[図10]図10は、図9のC-C断面に対応した、流路部の一部を切断した断面図である。

[図11]図11は、邪魔板の形状及び配置関係を説明するための概略図である。

[図12]図12は、複数の邪魔板を通過した流体中の固体粒子の挙動を示す流体画像である。

[図13A]図13Aは、本開示の固液分離システムとしての細胞培養装置の構成を示す概略図である。

[図13B]図13Bは、本開示の固液分離システムとしての析出装置の構成を示す概略図である。

発明を実施するための形態

[0012] 以下、いくつかの例示的な実施形態について図面を参照して説明する。ここで、各実施形態に示す寸法、材料、その他、具体的な数値等は例示にすぎず、特に断る場合を除き、本開示を限定するものではない。また、実質的に同一の機能及び構成を有する要素については、同一の符号を付することにより重複説明を省略し、本開示に直接関係のない要素については図示を省略する。

[0013] (固液分離装置)

図1は、第1実施形態に係る固液分離装置1の構成を示す概略図である。固液分離装置1は、固体粒子pが分散された流体から固体粒子pを分離させる。固体粒子pが分散された流体とは、一般的な意味として、多数の固体粒子pを包含する液体（粒子分散液）である。本実施形態において、固液分離とは、流体には様々な粒子径 D_p （粒子サイズ）の固体粒子pが予め分散していることを前提として、基本的には、その中から特定の粒子径 D_p の固体粒子pを分離することをいう。また、本実施形態では、固体粒子pとして、粒子径 D_p が微小である微粒子が想定されている。具体的には、固液分離装置1が

分離対象とする固体粒子 p の取り得る粒子径 D_p は、 $1\ \mu\text{m}$ から $1\ \text{mm}$ までの範囲にある。

[0014] 固液分離装置 1 は、流路部 2 と、二次流れ発生機構とを備える。

[0015] 流路部 2 は、流体が導入されて流通する直線状の流路 7 を有する本体部である。本実施形態では、流路部 2 は、横断面が矩形である流路 7 を有する直線管である。ここで、流路 7 の全体形状を表す直線状とは、流路 7 の延伸方向が、一方向である図中の X 方向に沿っていることをいう。ただし、ここで直線状とは、厳密に一直線であることには限定されず、若干の曲がりを許容する。例えば、流路 7 を流通する流体が流路形状に起因した二次流れが誘起する抗力の影響を受けづらいという限度の上で、流路部 2 は、若干の曲がりを有する管でもよい場合もあり得る。また、横断面の形状について、ここでの矩形とは、幾何学的に厳密に解釈される形状ではなく、辺自体での若干の曲がり、又は、辺同士の連続部分での若干の曲部の存在を許容する。

[0016] また、図 1 では、流路 7 への流体の導入方向（I N）と、流路 7 からの流体の排出方向（O U T）とを、白抜きの矢印で表記している。流体が導入する側の流路部 2 の開口部は、流体の供給機構に接続される。一方、流体が排出される側の流路部 2 の開口部は、少なくとも、分離された固体粒子 p の受け入れ機構に接続される。なお、図 1 では、流体の供給機構、及び、固体粒子 p の受け入れ機構については、図示を省略している。

[0017] 流路部 2 は、流路 7 の形状を規定する 4 つの側壁、すなわち、第 1 側壁 2 a、第 2 側壁 2 b、第 3 側壁 2 c 及び第 4 側壁 2 d を有する。流路部 2 は、本実施形態では直線管であるので、これらの側壁は、それぞれ管壁である。これらの側壁のうち、第 1 側壁 2 a と第 2 側壁 2 b とは、互いに対向し、横断面でのそれぞれの長辺側に相当する側壁である。一方、第 3 側壁 2 c と第 4 側壁 2 d とは、互いに対向し、横断面でのそれぞれの短辺側に相当する側壁である。流路 7 の延伸方向が X 方向に沿っているとすると、これらの側壁によって規定される流路 7 の横断面は、Y Z 断面である。この場合、流路 7 の横断面での長辺は、Y 方向に沿っており、以下、流路幅 w と定義する。一

方、流路7の横断面での短辺は、Z方向に沿っており、以下、流路高さhと定義する。つまり、流路高さhは、横断面上では流路幅wに対して垂直である。以下、Y方向を流路幅方向と、Z方向を流路高さ方向と、それぞれ表現する場合がある。

[0018] ここで、本実施形態では、流路幅wと流路高さhとの比で表されるアスペクト比 A_R ($A_R = w/h$) は、10から100までの範囲にある。また、分離対象としての固体粒子pの粒子径 D_p が1 μm から1 mmまでの範囲にある場合、流路高さhは、粒子径 D_p の10倍以上かつ100倍以下の寸法に設定される。なお、流路幅wは、アスペクト比 A_R と流路高さhとの具体的な値から導き出される。

[0019] 二次流れ発生機構は、流路7の上流側を流通している流体に横断面方向の二次流れを発生させる。本実施形態では、二次流れ発生機構は、流路7の内部に向けて超音波を発する超音波振動子3である。二次流れ発生機構が超音波振動子3である場合、固液分離装置1は、更に、超音波振動子3に電力を供給する超音波発振器（超音波増幅器）4と、超音波発振器4から超音波振動子3に電力を供給する電力ケーブル5とを備える。その他、固液分離装置1は、超音波発振器4に電力を供給する電源ケーブル等を備える。

[0020] 超音波振動子3は、例えば、流路部2の外側面に設置することができ、また、MHz帯の超音波を発生させることができる平板型圧電素子である。超音波振動子3は、流路7の横断面の長辺側の側壁に相当する少なくとも第2側壁2bの外側面で、かつ、流路7の上流側に設置される。ここで、本実施形態では、一例として、第2側壁2bの外側面に、1つの超音波振動子3が設置されるものとする。ただし、例えば、第2側壁2bの外側面に加えて、同じく流路7の横断面の長辺側の側壁に相当する第1側壁2aの外側面にも、もう1つの超音波振動子3を設置してもよい。また、一方の側壁、例えば第2側壁2bの外側面には、1つの超音波振動子3だけでなく、複数の超音波振動子3が設置されてもよい。また、超音波振動子3は、流路幅方向では、流路幅wの中央領域に設置されることが望ましい。

- [0021] また、二次流れ発生機構である超音波振動子3の設置位置、すなわち、流体に二次流れが発生する位置を基準として、流路7の延伸方向の長さのうち超音波振動子3よりも下流側の長さ L を規定する。この長さ L は、流路幅 w の100倍以上かつ10,000倍以下の寸法に設定される。
- [0022] 次に、固液分離装置1による固液分離の原理について説明する。
- [0023] 図2は、固液分離装置1による固液分離の原理を説明するための概念図である。図2では、流路7のうち超音波振動子3よりも下流側の領域における流体の流れと、流体に分散している固体粒子 p の状態とが示されている。また、図2では、流路7内の各方向がアスタリスク付きの3軸方向で示されている。特に、流路幅方向に相当する y^* 方向と、流路高さ方向に相当する z^* 方向との長さについては、具体的な寸法値ではなく、比率で示されている。
- [0024] まず、超音波発振器4が超音波振動子3に対してMHz帯の正弦波の電圧信号を負荷すると、流路7の上流側を流通する流体では、流路高さ方向に超音波の進行波が生成される。そして、進行波の粘性減衰による音圧の空間勾配を駆動力として、流路7内の流体には、渦状の音響流が発生する。この音響流が横断面方向の二次流れである。横断面方向の二次流れにより、流体に分散されている固体粒子 p は、二次流れに誘起された抗力 F_D を受ける。これにより、超音波振動子3が設置されている部分よりも下流側の流路7では、固体粒子 p は、二次流れが誘起した抗力 F_D により、徐々に短辺側の側壁である第3側壁2c又は第4側壁2dに向けて輸送される。
- [0025] 一方、流路7の横断面は、アスペクト比 A_R が10から100までの範囲にあるように予め設定されているので、直線状の流路7を流通する流体の主流は、揚力 F_L を誘起する。これにより、流体に分散されている固体粒子 p は、主流に誘起された揚力 F_L を受けて、流路7における短辺側の双方の側壁である第3側壁2c及び第4側壁2dの近傍に捕捉される（チューブラ・ピンチ効果）。なお、図2では、任意の横断面C1における境界層の中央での速度分布を例示している。
- [0026] つまり、固液分離装置1では、流体中の固体粒子 p は、二次流れに誘起さ

れた抗力 F_D によって第3側壁2c又は第4側壁2dの方向に輸送され、更に、主流に誘起された揚力 F_L によって第3側壁2c又は第4側壁2dの近傍に捕捉されることになる。

[0027] 以下、固液分離装置1による固液分離の原理についての個々の検証について説明する。

[0028] まず、横断面のアスペクト比 A_R が上記のような高アスペクト比に設定されている場合の流路7における固体粒子pの挙動については、以下の検証から明らかである。

[0029] 検証用の装置として、流路7が形成されている流路部2を想定した、透明の亚克力製の矩形断面の直線管を準備した。この直線管における流路は、流路部2における流路7の形状条件を満たしており、以下、各部に同一の符号を付して説明する。ただし、ここでは流路7の横断面形状に依拠した固体粒子pの挙動について検証するため、二次流れ発生機構は採用していない。

[0030] 検証時の各種の設定条件としては、以下のとおりである。分離対象とする固体粒子pは、粒子径 D_p が $10\mu m$ の中立浮遊粒子である。この固体粒子pが多数分散された流体を、流量を $250 mL/min$ の一定とし、かつ、レイノルズ数 Re を 1500 とした状態で、検証用の流路7内に流通させる。検証用の流路7に関して、流路幅 w を $5 mm$ 、流路高さ h を $0.4 mm$ 、流路7における流体の入口から下流側への延伸方向の長さを $1200 mm$ と設定する。この場合、アスペクト比 A_R は、 12.5 である。流路高さ h は、粒子径 D_p の 40 倍である。また、流路7の延伸方向の長さは、上記規定した二次流れ発生機構よりも下流側の長さ L と同等とみなすと、流路幅 w の 240 倍である。したがって、これらの寸法値は、すべて、図1を用いた説明で提示した各種条件を満たしている。

[0031] 上記の設定条件のもと、固体粒子pが分散された流体を流路7内に流通させている間、流路7に対して光を照射して、輝度を計測した。

[0032] 図3は、輝度値を基準とした流路幅方向での粒子濃度を示すグラフである。図3の横軸は、流路幅方向の位置 y であり、図2に示した y^* 方向の定義に

従い、第3側壁2 cの位置を0、第4側壁2 dの位置を5 mmと規定している。図3の縦軸は、輝度値である。輝度値は、粒子濃度に比例する。凡例として、xの各値は、図2に示したx*方向の定義に従い、流路7における流体の入口から下流側への延伸方向の距離を示している。

[0033] 図3を参照すると、流路7における流体の入口($x=0$)から下流側に向けて流体が進むにつれて、第3側壁2 c($y=0$)の近傍及び第4側壁2 d($y=5\text{ mm}$)の近傍の輝度値が上昇し、すなわち、粒子濃度が增大していることがわかる。このとき、高濃度領域と低濃度領域との濃度比は、最大で3~4程度である。また、流体の境界層厚さは、流路高さhと同等である。このことから、アスペクト比 A_R が10から100までの範囲にある矩形断面の直線状の流路7では、第3側壁2 cの近傍及び第4側壁2 dの近傍で急峻な速度勾配が発現すると考えられる。そして、流体の境界層の内部では、固体粒子pに対して流路幅方向の揚力 F_L が作用し、第3側壁2 cの近傍及び第4側壁2 dの近傍に固体粒子pが集中すると予測される。

[0034] また、主流に誘起される揚力 F_L と、二次流れに誘起される抗力 F_D とは、以下のような関係性がある。

[0035] 二次流れに誘起される抗力 F_D の有効範囲は、流体の粘性による減衰により、二次流れ発生機構である超音波振動子3の位置から流路7の延伸方向に有限である。この点、本実施形態では、抗力 F_D を誘起する二次流れは、揚力 F_L を誘起する主流が流通する領域と同じ横断面である直線状の流路7の一部で発生される。したがって、固体粒子pに対して、抗力 F_D が作用している間に揚力 F_L を効果的に作用させる点で有利である。

[0036] 図4は、固体粒子pの粒子径 D_p と、固体粒子pが受ける揚力 F_L との関係を示すグラフである。固体粒子pの流体中の位置は、図2に示すように境界層の中央に設定され、かつ、流路7を流通する流体の流量が 100 mL/min で一定であるものとする。主流に誘起される揚力 F_L は、図4に示すように、粒子径 D_p の4乗に比例して増加する。一方、二次流れに誘起される抗力 F_D は、以下の図6に関連して示されるが、粒子径 D_p に比例して増加する。

- [0037] 図5は、流路高さ h と、固体粒子 p が受ける揚力 F_L との関係を示すグラフである。この場合の流量等の各条件は、図4における各条件と同一である。揚力 F_L は、流路高さ h の約 -6 乗に比例して減少する。つまり、図4及び図5を参照することでわかるとおり、分離対象である固体粒子 p の粒子径 D_p を基準としつつ、流路高さ h を適切に設定することで、揚力 F_L を効果的な大きさに調整することができる。
- [0038] 図6は、固体粒子 p の粒子径 D_p に対する揚力 F_L 及び抗力 F_D のそれぞれの設定範囲を示すグラフである。図6では、粒子径 D_p の4乗に比例する揚力 F_L を、主流のレイノルズ数 Re を3段階に変化させて示している。第1揚力 F_{L1} は、レイノルズ数 Re が0.01に調整されたとき、第2揚力 F_{L2} は、レイノルズ数 Re が0.05に調整されたとき、また、第3揚力 F_{L3} は、レイノルズ数 Re が0.1に調整されたときのそれぞれの揚力 F_L である。一方、図6では、粒子径 D_p に比例する抗力 F_D を、二次流れの代表速度 U を2段階に変化させて示している。第1抗力 F_{D1} は、代表速度 U が0.05 m/sに調整されたとき、また、第2抗力 F_{D2} は、代表速度 U が0.01 m/sに調整されたときのそれぞれの抗力 F_D である。
- [0039] ここで、図6において、第1揚力 F_{L1} と第3揚力 F_{L3} との間を、揚力 F_L の設定範囲である第1設定範囲 $R1$ と規定する。一方、第1抗力 F_{D1} と第2抗力 F_{D2} との間を、抗力 F_D の設定範囲である第2設定範囲 $R2$ と規定する。このとき、第1設定範囲 $R1$ と第2設定範囲 $R2$ との重複範囲が、揚力 F_L と抗力 F_D とが釣り合う範囲、すなわち、力学的に平衡となる範囲である。つまり、固液分離に二次流れを利用する場合には、主流に誘起される揚力 F_L 又は二次流れに誘起される抗力 F_D に依存して、分離対象である固体粒子 p に関する平衡径や平衡位置が定まる。ここで、平衡径とは、力学的平衡にある揚力 F_L と抗力 F_D とを基準として定められる、流路7内の特定の位置に集中する固体粒子 p の粒子径 D_p をいう。一方、平衡位置とは、分離対象である固体粒子 p の特定の粒子径 D_p を基準として定められる、力学的平衡にある揚力 F_L と抗力 F_D との取り得る値（それらの値によって固体粒子 p が集中する位置）をい

う。

[0040] つまり、分離対象である固体粒子 p の粒子径 D_p を考慮しつつ、揚力 F_L と抗力 F_D とが力学的平衡となるように、主流のレイノルズ数 Re や二次流れの代表速度 U を適切に設定すれば、流路 7 の短辺側の側壁近傍に固体粒子 p をより集中させやすくなる。

[0041] 次に、本実施形態に係る固液分離装置 1 の効果について説明する。

[0042] 固体粒子 p が分散された流体から固体粒子 p を分離させる固液分離装置 1 は、流体が導入される直線状の流路 7 が形成されている流路部 2 と、流路 7 の上流側を流通している流体に横断面方向の二次流れを発生させる二次流れ発生機構とを備える。流路 7 は、流路幅 w と当該流路幅 w に対して垂直な流路高さ h とで規定される矩形の横断面を有する。流路 7 における少なくとも二次流れ発生機構よりも下流側の横断面では、流路幅 w と流路高さ h との比で表されるアスペクト比 A_R は、10 から 100 までの範囲にある。

[0043] まず、流路部 2 に形成されている流路 7 の横断面は、アスペクト比 A_R が上記の範囲にあるように予め設定されているので、流路 7 を流通する流体の主流は揚力 F_L を誘起し、流体に分散されている固体粒子 p は、主流に誘起された揚力 F_L を受ける。これにより、流路 7 における短辺側の側壁である第 3 側壁 2 c 及び第 4 側壁 2 d の近傍に固体粒子 p を捕捉させることができる。

[0044] また、二次流れ発生機構により、流路 7 の上流側を流通する流体には横断面方向の二次流れが発生するので、流体に分散されている固体粒子 p は、二次流れに誘起された抗力 F_D を受ける。これにより、二次流れ発生機構が設置又は形成されている部分よりも下流側の流路 7 では、短辺側の側壁である第 3 側壁 2 c 及び第 4 側壁 2 d に向けて固体粒子 p を輸送させることができる。したがって、固液分離装置 1 によれば、例えば、単に流体の主流が誘起する揚力 F_L のみで固体粒子 p を分離させる場合よりも、分離効率を向上させることができる。

[0045] 更に、従来の固液分離装置では、例えば、揚力と抗力とを流路内の同一領域で誘起させて固体粒子を分離したり、流路の幾何形状が複雑化していたり

する場合がある。これらの場合、所望の分離の分解能を得る、すなわち、分離させたい固体粒子の粒子径の選択範囲を広げようとするれば、処理量が減少し、反対に、処理量を増加させようとするれば、所望の分解能を得ることが難しくなることも考えられる。これに対して、固液分離装置 1 では、流体に抗力 F_D を誘起させる部分と、流体に揚力 F_L を誘起させる部分とは、流路 7 の上流側と下流側とで互いに独立している。つまり、固液分離装置 1 は、揚力 F_L と抗力 F_D とをそれぞれ独立して調整することができるので、処理量を維持しつつ、所望の分解能を得やすくすることができる。例えば、固液分離装置 1 によれば、原理的には、粒子径 D_p が $1\ \mu\text{m}$ から 1mm までの範囲にある固体粒子 p を、 $100\text{mL}/\text{min}$ の処理量で分離することができる。

[0046] 一方、流路 7 における少なくとも二次流れ発生機構よりも下流側の横断面は、一定の寸法で統一された簡易的な形状となる。また、二次流れ発生機構の構成又は形状によっては、流路 7 において、二次流れ発生機構により二次流れが発生する領域の横断面形状を、揚力 F_L を誘起させる主流が流通する領域の横断面形状と同一とすることもできる。したがって、固液分離装置 1 では、流路部 2 の形状又は構成が簡易化される。

[0047] このように、本実施形態によれば、簡易的な形状又は構成で分離効率を向上させるのに有利な固液分離装置 1 を提供することができる。

[0048] また、固液分離装置 1 では、固体粒子 p の粒子径 D_p が $1\ \mu\text{m}$ から 1mm までの範囲にある場合、流路高さ h は、分離対象としての固体粒子 p の粒子径 D_p の 10 倍以上かつ 100 倍以下の寸法に設定されてもよい。

[0049] この固液分離装置 1 によれば、流体の主流が誘起する揚力 F_L と、流体の二次流れが誘起する抗力 F_D とによる分離効果をより向上させることができる。

[0050] また、固液分離装置 1 では、流路 7 における二次流れ発生機構よりも下流側の延伸方向の長さ L は、流路幅 w の 100 倍以上かつ 10,000 倍以下の寸法に設定されてもよい。

[0051] この固液分離装置 1 によれば、流体の主流が誘起する揚力 F_L と、流体の二次流れが誘起する抗力 F_D とによる分離効果をより向上させることができる。

- [0052] また、固液分離装置 1 では、二次流れ発生機構は、流路部 2 に設置され、流路 7 の長辺側の側壁（第 1 側壁 2 a 及び／又は第 2 側壁 2 b）から流路 7 の内部に向けて超音波を発する超音波振動子 3 であってもよい。
- [0053] この固液分離装置 1 によれば、流路 7 を流通する流体に対して二次流れを発生させるに際して、二次流れの速度を簡易的な構成で変化させることができる。この場合、固液分離装置 1 では、超音波振動子 3 が、いわゆるアクティブ型の固液分離機構として機能し、超音波振動子 3 が設置されている部分よりも下流側の流路 7 自体が、いわゆるパッシブ型の固液分離機構として機能する。したがって、二次流れを誘起する抗力 F_D を調整しやすくなるなど流体の制御性が向上し、分離対象とし得る固体粒子 p の幅が広がる。結果として、固液分離装置 1 の汎用性を向上させることができる。
- [0054] （第 2 実施形態）
- 図 7 は、第 2 実施形態に係る固液分離装置 10 の構成を示す概略図である。上記の第 1 実施形態に係る固液分離装置 1 では、二次流れ発生機構として、流路部 2 に設置される超音波振動子 3 を例示した。これに対して、二次流れ発生機構は、超音波振動子 3 に代えて、例えば、流路部 12 に形成され、流路 17 の延伸方向に進むにつれて少なくとも一部の横断面の形状を変化させる流路形状変更部であってもよい。
- [0055] 固液分離装置 10 は、上記の固液分離装置 1 において直線管であった流路部 2 に代えて、例えばマイクロデバイスを想定したブロック状の流路部 12 を備える。流路部 12 は、第 1 平板 13 と第 2 平板 14 との 2 つの平板を Z 方向で重ね合わせることで形成されてもよい。この場合、下段の第 2 平板 14 には、上面側に、上記の流路部 2 に設けられていた流路 7 と同一の設定条件を満たす流路 17 が、溝部として形成されている。これに対して、上段の第 1 平板 13 は、いわゆる蓋体であり、流路 17 を下面で覆うように第 2 平板 14 に接合される。流路部 12 では、上記の流路部 2 における第 3 側壁 2 c、第 4 側壁 2 d 及び第 2 側壁 2 b が、第 2 平板 14 の溝部の一部である第 1 側壁 14 a、第 2 側壁 14 b 及び底壁 14 c に対応する。また、流路部 1

2では、上記の流路部2における第1側壁2aが、第1平板13の下面側の一部に対応する。

[0056] また、固液分離装置10では、二次流れ発生機構を構成する流路形状変更部は、複数の支柱である。本実施形態における複数の支柱は、第2平板14の底壁14c上で、かつ、流路17内に位置するように形成される3つの支柱、すなわち、第1支柱14d、第2支柱14e及び第3支柱14fである。これらの支柱は、例えば円柱であり、各支柱の上面は、第1平板13の下面と接触する。流路17内にこれらの複数の支柱が設けられることで、流路17の形状、すなわち、流路17の横断面の形状は、流路17の延伸方向に進むにつれて、支柱が存在する部分で変化する。このような複数の支柱の形状、大きさ、配列又は設置数などを適宜変更することで、固体粒子pが分散されている流体が流路17に導入されたとき、これらの支柱によって、流体に二次流れを発生させることができる。

[0057] このような固液分離装置10によっても、上記の固液分離装置1と同様に、簡易的な形状又は構成で分離効率を向上させることができる。特に、固液分離装置10によれば、例えば、二次流れ発生機構を、電力を用いることなく簡易的な構成とすることができる。

[0058] (第3実施形態)

図8は、第3実施形態に係る固液分離装置20の構成を示す概略図である。上記の第2実施形態に係る固液分離装置10では、二次流れ発生機構を構成する流路形状変更部として、複数の支柱を例示した。しかし、流路形状変更部は、このような流路部12に形成される支柱に限定されない。

[0059] 固液分離装置20が備える流路部22は、第2実施形態に係る固液分離装置10における流路部12と同様にブロック状である。流路部22は、固液分離装置10における第1平板13及び第2平板14に対応する、第1平板23及び第2平板24で形成されてもよい。ここで、第2平板24の上面側には、固液分離装置10の第2平板14と同様に、溝部として流路27が形成されているが、流路27の形状が、固液分離装置10の流路17の形状と

異なる。

- [0060] まず、流路部 22 では、上記の流路部 12 における第 1 側壁 14 a、第 2 側壁 14 b 及び底壁 14 c が、第 2 平板 24 の溝部の一部である第 1 側壁 24 a、第 2 側壁 24 b 及び底壁 24 c に対応する。また、流路部 22 では、流路 27 の Z 方向上側の側壁は、第 1 平板 23 の下面側の一部である。
- [0061] その上で、固液分離装置 20 では、流路形状変更部として、上記の固液分離装置 10 における複数の支柱に代えて、流路 27 の一部に横断面が縮小する領域を設けることでベンチュリ効果を生じさせるベンチュリ構造部が用いられる。例えば、本実施形態におけるベンチュリ構造部 24 d は、第 2 平板 24 の底壁 24 c 上で、第 1 側壁 24 a の一部として Y 方向に突出する 3 つの突出壁、すなわち、第 1 突出壁 24 e、第 2 突出壁 24 f 及び第 3 突出壁 24 g で囲まれる突出部である。ベンチュリ構造部 24 d の上面は、第 1 平板 23 の下面と接触する。
- [0062] 第 1 突出壁 24 e は、流路 27 の延伸方向である X 方向に対して垂直な壁部であり、第 2 側壁 24 b とは接触しない。第 2 突出壁 24 f は、第 1 側壁 24 a 及び第 2 側壁 24 b と並行な壁部であり、第 1 突出壁 24 e と連続し、かつ、第 2 側壁 24 b とは接触しない。また、第 3 突出壁 24 g は、X 方向の一端が第 2 突出壁 24 f と連続し、X 方向の他端が、ベンチュリ構造部 24 d よりも下流側の第 1 側壁 24 a と連続する壁部である。つまり、第 3 突出壁 24 g は、流路 27 の延伸方向に進むにつれて第 2 突出壁 24 f 側から第 1 側壁 24 a 側に徐々に寄る。
- [0063] ベンチュリ構造部 24 d によれば、上流側に、流路幅 w よりも狭い流路幅 w_1 で規定される横断面（流路幅 $w_1 \times$ 流路高さ h ）となる縮小部 27 a が形成される。縮小部 27 a は、流路 27 の延伸方向では、第 2 突出壁 24 f の X 方向の長さ分の領域となる。そして、縮小部 27 a よりも下流側では、第 3 突出壁 24 g により、流路 27 の延伸方向に進むにつれて徐々に流路幅が拡大していき、最終的に流路幅 w と流路高さ h とで規定される横断面に戻る拡大部 27 b が形成される。なお、縮小部 27 a は、流路 27 を流通する

流体の流速を一時的に増加させるための領域であるので、縮小部 27 a を形成する第 2 突出壁 24 f の X 方向の長さは、拡大部 27 b を形成する第 3 突出壁 24 g の X 方向成分の長さよりも十分に短くてよい。流路 27 内にベンチュリ構造部 24 d が設けられることで、流路 27 の横断面の形状は、流路 27 の延伸方向に進むにつれて、縮小部 27 a と拡大部 27 b とで変化する。このようなベンチュリ構造部 24 d の形状又は大きさなどを適宜変更することで、固体粒子 p が分散されている流体が流路 27 に導入されたとき、ベンチュリ構造部 24 d によって、流体に二次流れを発生させることができる。

[0064] このような固液分離装置 20 によっても、上記の固液分離装置 10 と同様に、例えば、二次流れ発生機構を、電力を用いることなく簡易的な構成とすることができる。

[0065] (第 4 実施形態)

図 9 は、第 4 実施形態に係る固液分離装置 30 の構成を示す概略図である。二次流れ発生機構を構成する流路形状変更部は、第 2 実施形態における第 1 支柱 14 d 等の複数の支柱、又は、第 3 実施形態におけるベンチュリ構造部 24 d に代えて、複数の邪魔板 35 であってもよい。

[0066] 固液分離装置 30 が備える流路部 32 は、第 2 実施形態に係る固液分離装置 10 における流路部 12 と同様にブロック状である。流路部 32 は、固液分離装置 10 における第 1 平板 13 及び第 2 平板 14 に対応する、第 1 平板 33 及び第 2 平板 34 で形成されてもよい。ここで、第 2 平板 34 の上面側には、固液分離装置 10 の第 2 平板 14 と同様に、溝部として流路 37 が形成されているが、流路 37 の形状が、固液分離装置 10 の流路 17 の形状と異なる。なお、図 9 では、流路 37 の形状を全体的に明示させるために、第 1 平板 33 が二点鎖線で描画されている。

[0067] 流路部 32 では、固液分離装置 10 の流路部 12 における第 1 側壁 14 a、第 2 側壁 14 b 及び底壁 14 c が、第 2 平板 34 の溝部の一部である第 1 側壁 34 a、第 2 側壁 34 b 及び底壁 34 c に対応する。また、流路部 32

では、流路 37 の Z 方向上側の側壁は、第 1 平板 33 の下面側の一部である。更に、流路 37 の横断面についても、上記の各実施形態と同様に、（流路幅 $w \times$ 流路高さ h ）で規定される。

[0068] 固液分離装置 30 では、二次流れ発生機構を構成する流路形状変更部は、複数の邪魔板 35 である。例えば、本実施形態における邪魔板 35 は、第 2 平板 34 の底壁 34c から第 1 平板 33 の下面に向けて突出する突出部である。邪魔板 35 の上面は、第 1 平板 33 とは接触しない。複数の邪魔板 35 は、互いに同一形状で、以下で詳説するような一定の規則性をもって流路 37 内に配置される。図 9 では、第 1 板 35a、第 2 板 35b、第 3 板 35c、第 4 板 35d 及び第 5 板 35e で表される五つの邪魔板 35 が例示されている。なお、図 9 では、二次流れ発生機構の入口又は出口と交差する邪魔板 35 は、描画上の例示として、当該交差位置又はその近傍から二次流れ発生機構の外方に向かう一部位が存在しない形状で表されている。

[0069] 図 10 は、図 9 中の C-C 断面に対応し、流路 37 の延伸方向である X 方向に対して垂直な面で流路部 32 の一部を切断した断面図である。図 10 では、流路 37 内を流通する流体の当該切断面における流れの様子がベクトルで例示されている。また、図 11 は、複数の邪魔板 35 を Z 方向に沿って見た、邪魔板 35 の形状及び複数の邪魔板 35 の配置関係を説明するための概略平面図である。

[0070] 邪魔板 35 の形状は、XY 平面に沿った底壁 34c と平行で、かつ、X 方向に対して傾斜角 θ で傾いた方向を延伸方向とする棒状である。ただし、各々の邪魔板 35 の両先端部は、XZ 平面に沿って切り欠かれていてもよい。邪魔板 35 の延伸方向での長さを邪魔板長さ L_p とすると、流路幅方向である Y 方向での邪魔板 35 の長さ成分 L_y は、 $L_p \sin \theta$ で表され、流路幅 w よりも短い。また、邪魔板 35 は、第 1 側壁 34a 及び第 2 側壁 34b のいずれとも接触しない。流路 37 では、このような形状を有する n 個の邪魔板 35 が、ピッチ P_i の等間隔で、X 方向に沿って配列されている。

[0071] 邪魔板 35 の延伸方向に対して垂直となる断面の形状は、およそ矩形で

ある。以下、邪魔板 35 の断面に関して、高さを邪魔板高さ h_p と、幅を邪魔板幅 w_p と、それぞれ表記する。

[0072] 邪魔板高さ h_p は、例えば、流路 37 の流路高さ h を基準として、以下のように設定される。まず、流路 37 を流通する流体に関する流速を、次のように規定する。 V_0 は、流路 37 の延伸方向である X 方向に沿って流路 37 に導入される流体の主流流速である。 V_1 は、邪魔板 35 の延伸方向に沿った方向での第 1 流速である。 V_2 は、流路幅方向である Y 方向での第 2 流速であり、主流速度 V_0 を用いて、式 (1) で表される。

[0073] [数1]

$$V_2 = V_0 \tan \theta \quad (1)$$

[0074] また、複数の邪魔板 35 が設けられている区間を流体の主流が通過する時間 t は、式 (2) で表される。

[0075] [数2]

$$t = \frac{p_i n}{V_0} \quad (2)$$

[0076] 更に、流体中に分散されている固体粒子 p を第 1 側壁 34 a 又は第 2 側壁 34 b の近傍に捕捉させるためには、複数の邪魔板 35 が設けられている区間を流体の主流が通過する間に、流路幅方向の流れが流路 27 の横断面を少なくとも一周する必要がある。したがって、式 (3) が成り立つ。

[0077] [数3]

$$V_2 t > 2w \quad (3)$$

[0078] ここで、第一に、邪魔板高さ h_p が、流路高さ h の半分の高さ、すなわち、 $0.5h$ であるとき、複数の邪魔板 35 は、最も効率的に二次流れを生成することができる。

[0079] 第二に、邪魔板高さ h_p が $0.5h$ よりも低いときには、二次流れの流量が少なくなる。したがって、邪魔板高さ h_p が低くなるに従って二次流れの流量が比例的に少なくなることを想定して、流路幅方向の流れが流路 27 の横断

面を少なくとも一周するという上記の条件は、少なくとも $(0.5h/h_p)$ 周するという条件に変更されてもよい。この場合、式(3)は、式(4)に修正される。

[0080] [数4]

$$V_2 t > 2w \times \frac{0.5h}{h_p} \quad (4)$$

[0081] 式(4)に式(1)及び式(2)を代入して整理すると、式(5)が導かれる。

[0082] [数5]

$$\tan\theta > \frac{wh}{P_i n h_p} \quad (5)$$

[0083] したがって、邪魔板高さ h_p が $0.5h$ よりも低いときには、任意の流路幅 w 及び流路高さ h を有する流路37に対して、式(5)の条件を満たすように、邪魔板35の配列に係るピッチ P_i 、邪魔板35の設置数 n 及び邪魔板高さ h_p が設定されればよい。

[0084] 第三に、邪魔板高さ h_p が $0.5h$ よりも高いときも、二次流れの流量が少なくなる。したがって、邪魔板高さ h_p が高くなるに従って二次流れの流量が比例的に少なくなることを想定して、流路幅方向の流れが流路27の横断面を少なくとも一周するという上記の条件は、少なくとも $(0.5h/(h-h_p))$ 周するという条件に変更されてもよい。この場合、式(3)は、式(6)に修正される。

[0085] [数6]

$$V_2 t > 2w \times \frac{0.5h}{h-h_p} \quad (6)$$

[0086] 式(6)に式(1)及び式(2)を代入して整理すると、式(7)が導かれる。

[0087]

[数7]

$$\tan\theta > \frac{wh}{P_in(h-h_p)} \quad (7)$$

[0088] したがって、邪魔板高さ h_p が $0.5h$ よりも高いときには、任意の流路幅 w 及び流路高さ h を有する流路 37 に対して、式 (7) の条件を満たすように、邪魔板 35 の配列に係るピッチ P_i 、邪魔板 35 の設置数 n 及び邪魔板高さ h_p が設定されればよい。

[0089] つまり、二次流れ発生機構として複数の邪魔板 35 が採用される場合の邪魔板高さ h_p の上限値は、式 (7) に基づいて規定され、邪魔板高さ h_p の下限値は、式 (5) に基づいて規定され得る。

[0090] また、邪魔板幅 w_p は、例えば、流路 37 内での圧損を低減させるためには流路 37 の横断面の閉塞率を 0.5 以下とすることが望ましいという条件に基づいて、以下のように設定される。邪魔板 35 が存在しないと仮定した場合の流路 37 の横断面は、(流路幅 $w \times$ 流路高さ h) で表される。そこで、ある横断面における邪魔板 35 の数を m 個とすると、閉塞率が 0.5 以下であるという条件を満たすためには、邪魔板幅 w_p の上限値を、式 (8) を満たすように設定すればよい。一方、邪魔板幅 w_p の下限値は、可能な限り小さく設定されることが望ましい。

[0091] [数8]

$$w_ph_pm < 0.5w \times h \quad (8)$$

[0092] 更に、邪魔板 35 の傾斜角 θ は、式 (5) 及び式 (7) に基づいた上限値及び下限値で規定される範囲を決定し、当該範囲に含まれる値に設定されてもよい。ただし、傾斜角 θ が大きすぎる場合、流れの剥離が起こり、二次流れが意図しないものとなることも考えられる。そこで、傾斜角 θ は、 45° 以下であることが望ましく、更には 30° 以下であることがより望ましい。

[0093] 固液分離装置 30 では、流路形状変更部として複数の邪魔板 35 を採用することで、図 10 に示す流路 37 内での各位置におけるベクトルの向く方向

から明らかなように、流路 37 を流通する流体には、横断面方向での二次流れが生じていることがわかる。また、流路形状変更部として、第 2 実施形態において例示した第 1 支柱 14 d 等の複数の円柱を採用する場合、二次流れは、円柱の直後では強く生じるものの、下流側に向かうにつれて徐々に減衰する。これに対して、流路形状変更部として複数の邪魔板 35 を採用する場合には、二次流れが減衰しにくいという利点がある。

[0094] 図 12 は、二次流れ発生機構を通過した流体中の固体粒子 p の挙動を示す流体画像である。この流体画像は、流路 37 の一部を流通する流体を Z 方向に沿って撮影することで得られたものである。ここで、複数の邪魔板 35 で構成される二次流れ発生機構は、X 方向に沿った流路 37 の上流側に位置している。なお、図 12 では、流体画像が取得された流路 37 中の位置に対する二次流れ発生機構の位置を例示するために、二次流れ発生機構に相当する部位が、流体画像に隣接して二点鎖線で示されている。

[0095] 図 12 に示すように、固液分離装置 30 においても、固体粒子 p が分散されている流体が流路 37 を流通することで、固体粒子 p は、少なくとも、第 1 側壁 34 a 又は第 2 側壁 34 b の近傍に捕捉されることがわかる。一例として、図 12 に示す流体画像が得られたとき、流路 37 の入口領域 R_{IN} での粒子濃度は、0.55 vol % であった。これに対して、流路 37 の出口側において、固体粒子 p が集まってきた高濃度領域 R_H での粒子濃度は、1.33 vol % であった。一方、流路 37 の出口側において、固体粒子 p が少ない低濃度領域 R_L での粒子濃度は、0.11 vol % であった。

[0096] また、固液分離装置 30 は、二次流れ発生機構として複数の邪魔板 35 を採用することで、固体粒子 p を、第 1 側壁 34 a 又は第 2 側壁 34 b の近傍のみならず、図 12 に示すように流路 37 の流路幅方向の中央領域にも捕捉させることができる可能性がある。

[0097] 更に、固液分離装置 30 によっても、上記の固液分離装置 10 等と同様に、例えば、二次流れ発生機構を、電力を用いることなく簡易的な構成とすることができる。

- [0098] なお、上記の固液分離装置 30 の例では、複数の邪魔板 35 が、流路床側である第 2 平板 34 の底壁 34 c に設けられ、底壁 34 c から第 1 平板 33 の下面に向けて突出する。これに対して、複数の邪魔板 35 は、天井側である第 1 平板 33 に設けられ、第 1 平板 33 から底壁 34 c に向けて突出するものであってもよい。又は、複数の邪魔板 35 は、流路床側である第 2 平板 34 の底壁 34 c と、天井側である第 1 平板 33 との双方に設けられるものであってもよい。
- [0099] また、上記の固液分離装置 30 の例では、二次流れ発生機構全体において、複数の邪魔板 35 が一つの値のピッチ P_i で配列されている。これに対して、複数の邪魔板 35 は、二次流れ発生機構全体において複数の値のピッチ P_i で配列される、すなわち、途中でピッチ P_i の値が変更されて配列されるものであってもよい。ただし、ピッチ P_i の値が小さすぎる場合、粘性抵抗が大きくなるため、ピッチ P_i の値は、流路高さ h よりも大きく設定されることが望ましい。
- [0100] 更に、上記の固液分離装置 30 の例では、複数の邪魔板 35 が、流路 37 の流路幅 w の中央部に設けられている。つまり、流路幅方向において、邪魔板 35 から第 1 側壁 34 a までの距離と、邪魔板 35 から第 2 側壁 34 b までの距離とは、同一である。これに対して、複数の邪魔板 35 は、流路幅方向において、第 2 側壁 34 b の側よりも第 1 側壁 34 a の側に寄るように設けられてもよいし、反対に、第 1 側壁 34 a の側よりも第 2 側壁 34 b の側に寄るように設けられてもよい。
- [0101] また、図 7 に示す固液分離装置 10、図 8 に示す固液分離装置 20 及び図 9 等に示す固液分離装置 30 では、流路形状変更部がブロック状の流路部 12、流路部 22 又は流路部 32 に形成される場合を例示した。これに対して、例えば、固液分離装置 1 における直線管である流路部 2 に、二次流れ発生機構として、超音波振動子 3 に代えて流路形状変更部が設けられてもよい。また、図 7 に示す固液分離装置 10、図 8 に示す固液分離装置 20 及び図 9 等に示す固液分離装置 30 では、ブロック状の流路部 12、流路部 22 又は

流路部 3 2 が共に 2 つの平板の組み合わせで構成される場合を例示した。これに対して、例えば、三次元金属積層造形技術を利用することで、流路 1 7 を有する流路部 1 2、流路 2 7 を有する流路部 2 2、又は、流路 3 7 を有する流路部 3 2 が一体的に形成されてもよい。

[0102] (固液分離システム)

次に、上記実施形態に係る固液分離装置（固液分離装置 1 等）の応用例として、少なくともいずれかの固液分離装置を採用した固液分離システムについて説明する。

[0103] 図 1 3 A 及び図 1 3 B は、上記実施形態に係る固液分離装置（固液分離装置 1 等）を備える固液分離システムの構成を示す概略図である。なお、図 1 3 A 及び図 1 3 B では、固液分離システムが固液分離装置 1 を備える場合を例示する。

[0104] 図 1 3 A は、本実施形態に係る固液分離システムの一例としての細胞培養装置（動物細胞連続培養装置）1 0 0 を示す概略図である。細胞培養装置 1 0 0 では、固体粒子 p が分散されている流体として培養液が想定されている。細胞培養装置 1 0 0 は、培地を貯留する貯留槽としての培養槽 1 0 2 と、培養液を培養槽 1 0 2 から固液分離装置 1 に送る送液部としてのポンプ 1 0 6 a とを備える。培地は、第 1 供給バルブ 1 0 4 a を備える培地追加配管 1 0 4 を介して培養槽 1 0 2 に供給される。培養槽 1 0 2 は、攪拌器 1 0 2 a を備え、培地を培養する。培養槽 1 0 2 内の培養液は、ポンプ 1 0 6 a に接続された培養液供給配管 1 0 6 を介して固液分離装置 1 に供給される。固液分離装置 1 は、流路 7 に導入された培養液を濃縮液と清澄液とに分離することができる。清澄液は、そのまま回収される。一方、濃縮液は、第 2 供給バルブ 1 0 8 a を備える濃縮液返送配管 1 0 8 を介して培養槽 1 0 2 に戻される。また、細胞培養装置 1 0 0 は、少なくとも、ポンプ 1 0 6 a の動作を制御することで培養液の少なくとも流量又は速度を調整させる制御部 1 1 0 を備える。制御部 1 1 0 は、その他、攪拌器 1 0 2 a の動作や、第 1 供給バルブ 1 0 4 a 又は第 2 供給バルブ 1 0 8 a の開閉動作などを制御してもよい。

[0105] 図13Bは、本実施形態に係る固液分離システムの一例としての析出装置200を示す概略図である。析出装置200では、固体粒子pが分散されている流体として、結晶化した大径粒子や小径粒子を含む流体が想定されている。析出装置200は、析出液を貯留する貯留槽としての析出槽202と、流体を析出槽202から固液分離装置1に送る送液部としてのポンプ206aと、固液分離装置1により分離された濃縮液から大径粒子のみを抜き出す分離膜207aとを備える。析出液は、第1供給バルブ204aを備える析出液追加配管204を介して析出槽202に供給される。析出槽202は、攪拌器202aを備え、析出を促す。析出槽202内の流体は、ポンプ206aに接続された流体供給配管206を介して固液分離装置1に供給される。固液分離装置1は、流路7に導入された流体を、主に大径粒子を含有する濃縮液と、主に小径粒子を含有する清澄液とに分離することができる。濃縮液は、濃縮液供給配管207を介して分離膜207aに送られる。分離膜207aによって濃縮液から抜き出された大径粒子は、そのまま回収される。その後、大径粒子が抜き出された流体は、清澄液として、第2供給バルブ209aを備える清澄液返送配管209を介して析出槽202に戻される。一方、固液分離装置1で分離された清澄液は、バイパス配管208を介して直接的に清澄液返送配管209に送られ、析出槽202に戻される。また、析出装置200は、少なくとも、ポンプ206aの動作を制御することで流体の少なくとも流量又は速度を調整させる制御部210を備える。制御部210は、その他、攪拌器202aの動作や、第1供給バルブ204a又は第2供給バルブ209aの開閉動作などを制御してもよい。

[0106] 次に、細胞培養装置100や析出装置200のような本実施形態に係る固液分離システムの効果について説明する。

[0107] 固液分離システムは、上記実施形態に係る固液分離装置と、流体を貯留する貯留槽と、貯留槽から固液分離装置に流体を送る送液部と、少なくとも、送液部の動作を制御することで流体の少なくとも流量又は速度を調整させる制御部とを備える。

- [0108] この固液分離システムによれば、上記実施形態に係る固液分離装置を備えるので、システム全体として、分離効率を向上させ、又は、処理量を維持しつつ、所望の分解能を得やすくすることができる。
- [0109] また、固液分離システムでは、流体に分散されている固体粒子 p は、二次流れに誘起された抗力 F_D と、流体の主流に誘起された揚力 F_L とを受け、揚力 F_L は、分離対象としての固体粒子 p の粒子径 D_p を基準として求められてもよい。
- [0110] この固液分離システムによれば、分離対象としての固体粒子 p に対して、流路（流路 7 等、以下同様）において短辺側の側壁近傍に集中させやすくするのにより適切な揚力 F_L を作用させることができる。なお、短辺側の側壁とは、固液分離装置 1 では、第 3 側壁 2 c 及び第 4 側壁 2 d に相当し、固液分離装置 10 では、第 1 側壁 14 a 及び第 2 側壁 14 b に相当する。
- [0111] また、固液分離システムでは、流路高さ h は、分離対象としての固体粒子 p の粒子径 D_p を基準として求められた揚力 F_L に基づいて決定されてもよい。
- [0112] この固液分離システムによれば、流路の流路高さ h を適切な寸法に設定することで、流路において流体の主流から誘起される揚力 F_L を所望の大きさに調整することができる。
- [0113] また、固液分離システムでは、抗力 F_D は、流体の境界層の内部の横断面方向において揚力 F_L とつり合うように決定されてもよい。
- [0114] この固液分離システムによれば、流体の境界層の内部の横断面方向における揚力 F_L に対して抗力 F_D が力学的に平衡となるので、流路の短辺側の側壁近傍に、分離対象としての固体粒子 p をより集中させやすくすることができる。
- [0115] また、固液分離システムでは、二次流れ発生機構は、流路部 2 に設置され、流路 7 の長辺側の側壁から流路 7 の内部に向けて超音波を発する超音波振動子 3 であってもよい。この場合、固液分離システムは、超音波振動子 3 に電力を供給する超音波発振器 4 を備えてもよい。制御部 110 は、超音波発

振器 4 に対して超音波振動子 3 の振動数又は音圧を変更させて二次流れの速度（例えば代表速度 U ）を変化させることで、抗力 F_D を調整してもよい。

[0116] この固液分離システムによれば、二次流れを誘起する抗力 F_D を調整しやすくなるなど流体力の制御性が向上し、分離対象とし得る固体粒子 p の幅が広がる。また、このように二次流れが音響流であり、特に、液相と固体粒子との音響インピーダンス差が大きい場合には、固体粒子 p に対して音響反射力が作用する。したがって、流体に分散されている固体粒子 p には、揚力 F_L 及び抗力 F_D に加えて音響反射力 F_R が加わることになるので、制御部 110 は、流路 7 において流体の主流の横断面方向での固体粒子 p の平衡位置をより調整しやすくなるという利点もある。

[0117] なお、ここでは、本実施形態に係る固液分離システムとして、細胞培養装置 100 や析出装置 200 を例示したが、適用例はこれらの装置に限定されるものではない。例えば、上記実施形態に係る固液分離装置を採用するものであれば、固液分離システムは、カメラやレーザー機器などの検査機器と組み合わせた、医薬品や食品等の品質検査を行う検査装置であってもよい。

[0118] いくつかの実施形態を説明したが、上記開示内容に基づいて実施形態の修正又は変形をすることが可能である。上記の実施形態のすべての構成要素、及び請求の範囲に記載されたすべての特徴は、それらが互いに矛盾しない限り、個々に抜き出して組み合わせてもよい。

[0119] 本出願は、2020 年 12 月 21 日に出願された日本国特許願第 2020-211418 に基づく優先権を主張しており、この出願の全内容が参照により本明細書に組み込まれる。

符号の説明

[0120]	1	固液分離装置
	2	流路部
	2 a	第 1 側壁
	2 b	第 2 側壁
	3	超音波振動子

4	超音波発振器
7	流路
1 0	固液分離装置
1 2	流路部
1 4 d	第 1 支柱
1 4 e	第 2 支柱
1 4 f	第 3 支柱
1 7	流路
2 0	固液分離装置
2 2	流路部
2 4 d	ベンチュリ構造部
2 7	流路
3 0	固液分離装置
3 2	流路部
3 5	邪魔板
3 7	流路
1 0 0	細胞培養装置
1 0 2	培養槽
1 0 6 a	ポンプ
1 1 0	制御部
2 0 0	析出装置
2 0 2	析出槽
2 0 6 a	ポンプ
2 1 0	制御部
A_R	アスペクト比
D_p	粒子径
F_D	抗力
F_L	揚力

h	流路高さ
p	固体粒子
w	流路幅

請求の範囲

- [請求項1] 固体粒子が分散された流体から前記固体粒子を分離させる固液分離装置であって、
- 前記流体が導入される直線状の流路が形成されている流路部と、
- 前記流路の上流側を流通している前記流体に横断面方向の二次流れを発生させる二次流れ発生機構と、を備え、
- 前記流路は、流路幅と当該流路幅に対して垂直な流路高さとの規定される矩形の横断面を有し、
- 前記流路における少なくとも前記二次流れ発生機構よりも下流側の前記横断面では、前記流路幅と前記流路高さとの比で表されるアスペクト比は、10から100までの範囲にある、固液分離装置。
- [請求項2] 前記固体粒子の粒子径が1 μm から1 mmまでの範囲にある場合、前記流路高さは、分離対象としての前記固体粒子の前記粒子径の10倍以上かつ100倍以下の寸法に設定される、請求項1に記載の固液分離装置。
- [請求項3] 前記流路における前記二次流れ発生機構よりも下流側の延伸方向の長さは、前記流路幅の100倍以上かつ10,000倍以下の寸法に設定される、請求項2に記載の固液分離装置。
- [請求項4] 前記二次流れ発生機構は、前記流路部に設置され、前記流路の長辺側の側壁から前記流路の内部に向けて超音波を発する超音波振動子である、請求項1～3のいずれか1項に記載の固液分離装置。
- [請求項5] 前記二次流れ発生機構は、前記流路部に形成され、前記流路の延伸方向に進むにつれて少なくとも一部の前記横断面の形状を変化させる流路形状変更部である、請求項1～3のいずれか1項に記載の固液分離装置。
- [請求項6] 固体粒子が分散された流体から前記固体粒子を分離させる固液分離装置と、
- 流体を貯留する貯留槽と、

前記貯留槽から前記固液分離装置に流体を送る送液部と、
少なくとも、前記送液部の動作を制御することで流体の少なくとも
流量又は速度を調整させる制御部と、を備え、
前記固液分離装置は、
前記流体が導入される直線状の流路が形成されている流路部と、
前記流路の上流側を流通している前記流体に横断面方向の二次流れ
を発生させる二次流れ発生機構と、を備え、
前記流路は、流路幅と当該流路幅に対して垂直な流路高さとして規定
される矩形の横断面を有し、

前記流路における少なくとも前記二次流れ発生機構よりも下流側の
前記横断面では、前記流路幅と前記流路高さとの比で表されるアスペ
クト比は、10から100までの範囲にある、固液分離システム。

[請求項7] 前記流体に分散されている前記固体粒子は、前記二次流れに誘起さ
れた抗力と、前記流体の主流に誘起された揚力とを受け、

前記揚力は、分離対象としての前記固体粒子の粒子径を基準として
求められる、請求項6に記載の固液分離システム。

[請求項8] 前記流路高さは、分離対象としての前記固体粒子の粒子径を基準と
して求められた前記揚力に基づいて決定される、請求項7に記載の固
液分離システム。

[請求項9] 前記抗力は、前記流体の境界層の内部の横断面方向において前記揚
力とつり合うように決定される、請求項7又は8に記載の固液分離シ
ステム。

[請求項10] 前記二次流れ発生機構は、前記流路部に設置され、前記流路の長辺
側の側壁から前記流路の内部に向けて超音波を発する超音波振動子で
あり、

前記固液分離システムは、前記超音波振動子に電力を供給する超音
波発振器を備え、

前記制御部は、前記超音波発振器に対して前記超音波振動子の振動

数又は音圧を変更させて前記二次流れの前記速度を変化させることで、前記抗力を調整する、請求項 7 ～ 9 のいずれか 1 項に記載の固液分離システム。