

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5105292号  
(P5105292)

(45) 発行日 平成24年12月26日(2012.12.26)

(24) 登録日 平成24年10月12日(2012.10.12)

(51) Int.Cl.	F 1
F 1 7 D 1/14 (2006.01)	F 1 7 D 1/14
F 1 5 D 1/02 (2006.01)	F 1 5 D 1/02 C
F 1 6 L 55/00 (2006.01)	F 1 6 L 55/00 G

請求項の数 7 (全 17 頁)

(21) 出願番号	特願2009-536063 (P2009-536063)	(73) 特許権者	504132881 国立大学法人東京農工大学 東京都府中市晴見町3-8-1
(86) (22) 出願日	平成20年10月1日(2008.10.1)	(74) 代理人	100122884 弁理士 角田 芳未
(86) 国際出願番号	PCT/JP2008/067802	(74) 代理人	100133824 弁理士 伊藤 仁恭
(87) 国際公開番号	W02009/044764	(72) 発明者	岩本 薫 東京都府中市晴見町3-8-1 国立大学 法人東京農工大学内
(87) 国際公開日	平成21年4月9日(2009.4.9)	(72) 発明者	河村 洋 東京都新宿区神楽坂1-3 学校法人東京 理科大学内
審査請求日	平成22年7月28日(2010.7.28)	審査官	渡邊 洋
(31) 優先権主張番号	特願2007-259187 (P2007-259187)		
(32) 優先日	平成19年10月2日(2007.10.2)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 流体移送装置及び流体移送方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

管路と、

前記管路内を流れる流体の速度を変化させて前記流体に脈動を発生させる手段と、を備え、

前記脈動を発生させる手段が、

前記管路内に設けられている前記管路内の前記流体を加圧して速度を変化させる加圧手段と、

前記加圧手段を駆動する駆動手段と、

前記駆動手段を制御して、前記流体の加速期間と減速期間の脈動周期、及び、前記流体の加速期間と減速期間との圧力勾配差を制御することによって乱流状態の前記流体を層流化させる制御手段と、を有する

ことを特徴とする流体移送装置。

【請求項2】

前記脈動を発生させる手段は、前記流体の速度を減速するとき前記流体からエネルギーを回収することを特徴とする請求項1に記載の流体移送装置。

【請求項3】

前記駆動手段に接続された蓄電手段を備えることを特徴とする請求項2に記載の流体移送装置。

【請求項4】

前記流体の速度を減速するとき、前記蓄電手段に前記流体からエネルギーを回収することを特徴とする請求項 3 に記載の流体移送装置。

【請求項 5】

管路内を流れる流体を加圧することにより、前記流体の流速の加速と減速とを繰り返し、前記流体の加速期間と減速期間の脈動周期、及び、前記流体の加速期間と減速期間との圧力勾配差を制御して前記流体を脈動させ、乱流状態の前記流体を層流化して移送することを特徴とする流体移送方法。

【請求項 6】

前記流体を減速するとき前記流体からエネルギーを回収することを特徴とする請求項 5 に記載の流体移送方法。

10

【請求項 7】

前記流体を減速するとき、前記管路内に設けた加圧手段と駆動手段とにより発電し、前記駆動手段と接続した蓄電手段に蓄電することを特徴とする請求項 6 に記載の流体移送方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、管路内を流れる流体を移送するための流体移送装置及び流体移送方法に関する。

【背景技術】

20

【0002】

パイプライン輸送等による流体の移送において、移送する際の流体のエネルギー損失を抑制する技術が提案されている。

例えば、流体が流れる管路内に、リブレットと呼ばれる微小な突起を管の内壁に貼り付け、又は、管の内壁を微小な突起に加工することによって形成し、管の内壁と流体との摩擦抵抗係数を低減する方法が提案されている（例えば、非特許文献 1 参照）。

【0003】

また、管路内を流れる流体に対してポリマーを添加することにより、管の内壁と流体との摩擦抵抗係数を低減する方法が提案されている（例えば、非特許文献 2 参照）。

【非特許文献 1】M.J.walsh, AIAA Paper, 82-0169 (1982)

30

【非特許文献 2】P.S.Virk, AiChE J., 21, 625 (1975)

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、管の内壁にリブレットを形成する方法では、最大でも 8 % 程度しか摩擦抵抗を抑制することができない。また、リブレットが微小な突起であるためゴミ等が付着しやすく、ゴミ等が付着した場合には、抵抗を低減するという効果がなくなってしまう。このため、管の内壁にリブレットを形成する方法は、実用化には至っていない。

【0005】

また、流体にポリマーを添加する場合には 30 % 程度の抵抗低減率が得られる。しかし、この方法は、ポリマーを添加することが可能な石油等の液体を移送する場合に、適用できる範囲が限定されてしまう。また、添加されたポリマーは、ガソリン等の最終製品においても混入されたままとなるため、内燃機関の性能が低下する等の問題がある。

40

【0006】

上述した問題の解決のため、本発明においては、液体や気体等の状態に係わらずに適用でき、エネルギー損失を低減することが可能な流体移送装置及び流体移送方法を提供するものである。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の流体移送装置は、管路と、管路内を流れる流体の速度を変化させて流体に脈動

50

を発生させる手段とを備え、脈動を発生させる手段が、管路内に設けられている管路内の流体を加圧して速度を変化させる加圧手段と、加圧手段を駆動する駆動手段と、駆動手段を制御して、流体の加速期間と減速期間の脈動周期、及び、流体の加速期間と減速期間との圧力勾配差を制御することによって乱流状態の流体を層流化させる制御手段とを有することを特徴とする。

【0008】

また、本発明の流体移送方法は、管路内を流れる流体を加圧することにより加速と減速を繰り返し、流体の加速期間と減速期間の脈動周期、及び、流体の加速期間と減速期間との圧力勾配差を制御して流体を脈動させて移送することを特徴とする。

【0009】

本発明の流体移送装置及び流体移送方法によれば、管路内を流れる流体に速度変化を与えて脈動させることにより、管路と流体との壁面摩擦抵抗が少ない状態を作り出すことができる。

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、脈動させなければ乱流状態にある管路内の流体に対し、脈動させることで摩擦抵抗を軽減させることができるため、少ないエネルギーで流体を移送することが可能である。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】A、Bは、本発明の一実施の形態に係わる流体移送装置の概略図である。

【図2】流体の駆動圧力の波形特性を示す図である。

【図3】シミュレーションを行う計算領域を説明するための図である。

【図4】Aは、時間と流速の関係を示す図である。Bは、時間と流体の乱れの関係を示す図である。

【図5】Aは、加速時の流速分布を示す図である。Bは、減速時の流速分布を示す図である。

【図6】Aは、加速時の流速分布を示す図である。Bは、減速時の流速分布を示す図である。

【図7】壁面摩擦係数とレイノルズ数との関係を示す図である。

【図8】実験例における圧力勾配差と脈動周期 $T^*$ との関係を示す図である。

【図9】実験例における圧力勾配差及び脈動周期 $T^*$ と、動力低減率 $[R_w]_T$ との関係を示す図である。

【図10】実験例における圧力勾配差及び脈動周期 $T^*$ と、動力低減率 $[R_D]_T$ との関係を示す図である。

【図11】実験用の循環管路の概略構成を示す図である。

【符号の説明】

【0012】

11 管路

12, 21 ポンプ

13 モータ

14 インバータ

15 電源

16 蓄電池

20 循環管路

22A, 22B 圧力計

23 試験区間

24 流量計

25 空気孔

26 給水孔

10

20

30

40

50

## 【発明を実施するための最良の形態】

## 【0013】

本発明の一実施の形態に係わる流体移送装置を説明するための概略図を図1に示す。

図1Aは、流体移送装置において管路内を流れる流体を加速させている状態を示し、図1Bは、管路内を流れる流体を減速させている状態を示す。

## 【0014】

図1A, Bに示す流体移送装置は、流体が流れる管路11と、この管路11内を流れる流体の速度を変化させて脈動を発生させる手段とから構成される。そして、この脈動を発生させる手段として、管路11内に設けられた流体を加速させるための加圧手段であるポンプ12と、ポンプ12を駆動するための駆動手段であるモータ13が備えられる。また、このモータ13を制御するための制御手段としてインバータ14が備えられる。さらに、モータ13を駆動するため、インバータ14を介してモータ13に電力を供給する電源15と蓄電池16とを備える。

10

## 【0015】

上述の流体移送装置において、管路11内の流体を加速する際には、図1Aに示すように、電源15及び蓄電池16からインバータ14を介してモータ13に電力を供給する。そして、モータ13を駆動することにより、ポンプ12内に設けられた羽根状の回転子を回転させて管路11内の流体に駆動圧力を加える。

このように、管路11内の流体に駆動圧力を加えることにより、流体を加速することができる。

20

## 【0016】

また、流体を減速させる際には、モータ13を停止して流体へ駆動圧力を止める。そして、図1Bに示すようにポンプ12内に設けられた回転子を流体の抵抗として作用させて流体を減速することができる。

また、減速する際に、管路11内において抵抗として作用させたポンプ12内の回転子が、管路内の流体の流れによって回転することにより、モータ13を発電機として利用することができる。このため、ポンプ12及びモータ13により流体の運動エネルギーを電気エネルギーに変換し、蓄電池16に蓄えることができる。

このように流体移送装置に蓄電池と発電手段を備えることで、流体移送において減速する際の流体のエネルギーを回収し、回収したエネルギーを再び流体を加速する際に利用することができる。このため、より少ないエネルギーで流体を移送することができる。

30

## 【0017】

上述のように流体を加速状態と減速状態とに変化させることで、流体を脈動させることができる。このとき、モータ13をインバータ14によって制御することで、流体の加速と減速とを任意に制御することができる。そして、インバータ14の制御によって、流体の加速と減速とを繰り返して行うことにより、流体の脈動を自由に制御することができる。

そして、流体の加速と減速を制御し、流体の脈動を任意に制御することにより、管路11内の脈動する流体を乱流から層流に変えることが可能である。

## 【0018】

上述のように、流体の加速と減速を繰り返し、流体に脈動性を与えることで流体の乱流を弱めて層流化(再層流化)する際、流体の再層流化を実現するには、流体の加速期間と減速期間の脈動周期、及び、流体の駆動圧力を制御することが特に重要である。

40

ここで、図2に流体の駆動圧力の波形特性を示す。図2において縦軸 -  $dP^* / dx^*$  は、駆動圧力の流れ方向の平均勾配を  $\rho u^2$  で除した無次元数を表す。例えば、モータ13の駆動圧力を一定とした場合、 $-dP^* / dx^*$  は1となる。

また、 $r$  は管路11の半径[m]、 $\rho$  は流体の密度[kg/m<sup>3</sup>]、 $u$  は、下記式(1)に示す摩擦速度[m/s]、 $\tau_w$  は管壁面摩擦応力[N/m<sup>2</sup>]を表す。

## 【0019】

【数 1】

$$u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho} \quad (1)$$

【0020】

また、図 2 において横軸  $t$  は、時間を  $u$  で除した無次元時間を表す。

また、 $a$  は加速時の圧力勾配を  $(u^2)$  で除した無次元圧力勾配、 $b$  は減速時の圧力勾配を  $(u^2)$  で除した無次元圧力勾配、 $T^*$  は加速期間と減速期間の繰り返し

10

周期における一周期の時間を  $u$  で除した無次元時間、 $T_a$  は一周期の加速期間を  $u$  で除した無次元時間、 $T_b$  は一周期の減速期間を  $u$  で除した無次元時間を表す。

【0021】

図 2 において、縦軸  $-dP^*/dx^*$  が 0 より大きい期間を加速期間  $T_a$  とし、0 より小さい期間を減速期間  $T_b$  とする。そして、加速期間  $T_a$  と減速期間  $T_b$  の合計を脈動周期  $T^*$  とする。

また、図 2 は一周期平均の圧力勾配を 1 に固定した状態を示している。このため、加速期間の圧力勾配  $a$  と減速期間の圧力勾配  $b$  との平均は 1 となる。そして、加速期間及び減速期間の圧力勾配差は  $a - b$  として表すことができる。

20

【0022】

図 2 に示した波形特性のパラメータ、脈動周期  $T^*$ 、圧力勾配差  $a - b$ 、及び、加速期間と減速期間の比  $T_a / T_b$  を、流体が再層流化するための条件内とすることにより、流体を再層流化することができる。そして、各パラメータが上述の範囲内となるように、図 1 A, B に示した流体移送装置の電源 15、蓄電池 16、モータ 13、ポンプ 12 を制御する。これにより、管路 11 内の流体の再層流化を実現することができる。

【0023】

次に、下記に示す連続の式 (2) と、ナビエ・ストークス方程式 (3) を連立して解くことにより、乱流の直接数値シミュレーション (DNS: Direct Numerical Simulation) を行った。このシミュレーションは、基礎方程式に特別なモデル化を加えず直接解く方法である。この方法により上述の再層流化を実現するための各パラメータの範囲を求めることができる。

30

【0024】

【数 2】

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial x_i^*} = 0 \quad (2)$$

【0025】

40

【数 3】

$$\frac{\partial u_i^*}{\partial t^*} + u_j^* \frac{\partial u_i^*}{\partial x_j^*} = - \frac{\partial p^*}{\partial x_i^*} + \frac{1}{Re_{\tau 0}} \frac{\partial^2 u_i^*}{\partial x_j^{*2}} + \frac{\partial \overline{P^*}}{\partial x_1^*} \delta_{i1} \quad (3)$$

【0026】

また、上記式 (2) (3) において各項を以下の式 (4) で示す無次元化を行った。

【0027】

50

## 【数4】

$$x_i^* = \frac{x_i}{\delta}, t^* = \frac{u_{\tau 0} t}{\delta}, u_i^* = \frac{u_i}{u_{\tau 0}}, Re_{\tau 0} = \frac{u_{\tau 0} \delta}{\nu} \quad (4)$$

## 【0028】

上記式(2)(3)(4)において、各記号は以下を定義するものである。

：チャンネル半幅

$u_{\tau 0}$ ：初期の壁面摩擦速度

：粘性係数

$Re_{\tau 0}$ ：初期の摩擦レイノルズ数

10

## 【0029】

上述のシミュレーションは、日立製作所社製のスーパーコンピュータSR8000及びSR11000を用いて行った。

また、シミュレーションの計算領域を図3に示す。計算領域は、図3に示す2枚の平行平板間に流体を通すモデルに適用する。また、シミュレーションは、レイノルズ数 $Re_{\tau 0}$ を110として、表1に示す領域及び格子点数で行った。

## 【0030】

## 【表1】

20

$Re_{\tau 0}$	領域 ( $L_x \times L_y \times L_z$ )	格子点数 ( $N_x \times N_y \times N_z$ )
110	$5\pi\delta \times 2\delta \times 2\pi\delta$	$96 \times 65 \times 96$

## 【0031】

また、上述のシミュレーションにおいて空間微分の近似及び時間進行は以下の方法を用いて計算した。

(計算法)

時間進行 粘性項：2次精度Crank-Nicolson法

対流項：4次精度Runge-Kutta法

空間離散化 x, z方向：フーリエスペクトル法

y方向：チェビシェフ・タウ法

境界条件 x, z方向：周期境界

y方向：滑りなし

30

## 【0032】

上述のシミュレーションを下記の実験例1で示す条件によって行い、平均流速 $u_b^*$ と時間 $t^*$ との関係、及び、流体の乱れ $k^*$ と時間 $t^*$ との関係を求めた。図4にこのシミュレーションの結果を示す。

## 【0033】

(実験例1)

$Re_{\tau 0} = 110$

脈動周期 $T^* = 11.2$

圧力勾配差  $a - b = 8$

$T_a / T_b = 1$

40

## 【0034】

50

図 4 A において縦軸  $u_b^*$  は、流体の平均流速を表し、図 4 B において縦軸  $k^*$  は、流体の乱れを数値化したものである。また、図 4 A において破線は  $Re = 110$  の流体の定常状態での平均流速である。

また、図 4 A , B において横軸  $t^*$  は上述の無次元時間を表し、同一時間  $t^*$  において図 4 A と図 4 B とを比較することにより、流体の速度と乱れの関係を表すことができる。

【 0 0 3 5 】

図 4 A に示す流体の平均流速  $u_b^*$  の増加と減少を繰り返し、脈動を開始した直後では、平均流速  $u_b^*$  の上昇とともに図 4 B に示す乱れ  $k^*$  が低下し、平均流速  $u_b^*$  の減少とともに流体の乱れ  $k^*$  が上昇する。

そして、脈動を繰り返すことにより、ある時間から流速の増減にかかわらず流体の乱れ  $k^*$  の値が低下してほぼ 0 に近い状態で安定する。このように、脈動を繰り返すことで、流体の加速や減速等の状態に係わらず流体に乱れが発生しない状態となる。図 4 B において、この乱れ  $k^*$  をほぼ 0 で安定させた状態が、流体を再層流化した状態である。

【 0 0 3 6 】

また、図 4 A に示すように、脈動の開始直後では、加速時には流速  $u_b^*$  が上昇し、減速時には流速  $u_b^*$  が低下する。このため、流体の平均流速が  $Re = 110$  の定常状態での平均流速とほぼ同じとなる。

これに対して、脈動を繰り返した後、流体の乱れ  $k^*$  がほぼ 0 で安定化した状態では、加速時、減速時にかかわらず平均流速  $u_b^*$  が、 $Re = 110$  の流体の定常状態での平均流速以上の値を示す。そして、図 4 B において流体の乱れ  $k^*$  がほぼ 0 で安定した後は、図 4 A に示すように流体の速度  $u_b^*$  が脈動しながら上昇した状態で安定する。

つまり、流体を脈動させることにより、流体を再層流化することができ、速度  $u_b^*$  を  $Re = 110$  の流体の定常状態での平均流速以上で安定させることができる。また、流体が脈動により再層流化することで流体が流れやすくなり、定常状態の流体と同じ駆動力を加えた場合でも高い流速が得られることがわかる。

従って、図 4 A , B から流体を脈動させることにより、流体を再層流化して流速が上昇することがわかる。このため、乱流状態での流体の移送に比べ、より少ないエネルギーで流体の移送が可能となる。

【 0 0 3 7 】

次に、図 5 , 6 に上述のシミュレーションによって求められた流体の流速分布の変化を示す。図 5 は、上記実験例 1 の条件によってシミュレーションを行った結果であり、図 6 は下記の実験例 2 の条件によってシミュレーションを行った結果である。また、図 5 , 6 において、縦軸は、流体の流速  $u^*$  を表し、横軸は時間  $y$  方向のチャンネル幅  $y / \quad$  を表す。

【 0 0 3 8 】

( 実験例 2 )

$$Re = 110$$

$$\text{脈動周期 } T^* = 9.6$$

$$\text{圧力勾配差 } a - b = 8$$

$$T_a / T_b = 1$$

【 0 0 3 9 】

図 5 A 及び図 6 A は、上述の条件の流体において流速が増加した状態を示し、図 5 B 及び図 6 B は、流速が減少した状態を示す。

また、図 5 A 及び図 6 A は、流速が増加した状態において時間  $t^* / T^*$  を  $1 / 20 \sim 10 / 20$  まで 10 分割し、分割したそれぞれの状態での流速分布を示している。図 5 B 及び図 6 B は流速が減少した状態において、時間  $t^* / T^*$  を  $11 / 20 \sim 20 / 20$  まで 10 分割し、分割したそれぞれの状態での流速分布を示している。

【 0 0 4 0 】

図 5 A , B に示す流速分布は、ほぼ放物線を示す。流体が層流状態のとき、流速分布は放物線を示すため、図 5 A , B に示す実験例 1 の条件では加速時と減速時ともに流体が層

10

20

30

40

50

流化していることがわかる。

これに対して、図 6 A , B は、流速分布が台形状を示す。この台形状の流速分布は乱流状態であることを示すため、実験例 2 の条件では、加速時、減速時ともに乱流状態であることがわかる。

【 0 0 4 1 】

また、図 5 と図 6 において、それぞれ同一時間における流速を比較すると、壁面から離れた位置、 $y / \quad = 1$  付近では各時間  $t^* / T^*$  において、実験例 1 の流速が実験例 2 の流速を上回ることが分かる。なお、壁面である  $y / \quad = 0$  及び  $y / \quad = 2$  では、実験例 1、実験例 2 とともに流速は 0 である。

このように図 5 , 6 に示した結果から、実験例 1 の条件で流体を脈動させることにより再層流化を行うことができ、流速の増加が可能であることがわかる。

【 0 0 4 2 】

次に、上述の実験例 1 及び実験例 2 の条件において、壁面摩擦係数  $C_f$  とレイノルズ数  $Re_m$  の関係についてのシミュレーション結果を図 7 に示す。

図 7 において、縦軸は壁面摩擦係数  $C_f$  の対数を示し、横軸はレイノルズ数  $Re_m$  の対数を示す。なお、横軸のレイノルズ数  $Re_m$  は管径が同じであれば速度に比例するため、図 7 において  $Re_m$  の増加は流速の増加と同じを意味を表す。

また、実験例 1 において脈動の一周期を 2 2 分割した位相平均を  $\quad$  で示し、一周期全体の平均を  $\quad$  で示す。同様に、実験例 2 において脈動の一周期を 2 2 分割した位相平均を  $\quad$  で示し、一周期全体の平均を  $\quad$  で示す。さらに、 $Re = 110$  の流体の定常状態での壁面摩擦係数  $C_f$  とレイノルズ数  $Re_m$  の関係を  $\quad$  で示す。

また、図 7 に下記式 ( 5 ) ~ ( 7 ) を表す。式 ( 5 ) は層流曲線であり、式 ( 6 ) は Dean の相関式である。

【 0 0 4 3 】

【数 5】

$$C_f = 12 / Re_m \quad (5)$$

【 0 0 4 4 】

【数 6】

$$C_f = 0.073 Re_m^{-0.25} \quad (6)$$

【 0 0 4 5 】

【数 7】

$$C_f = A Re_m^{-2} + B \quad (7)$$

【 0 0 4 6 】

図 7 において  $\quad$  で示した  $Re = 110$  の流体の定常状態では、流体を脈動させず乱流であるため、壁面摩擦係数  $C_f$  が Dean の相関式上に位置する。

【 0 0 4 7 】

これに対して、実験例 1 では脈動により再層流化しているため、 $\quad$  で示した各位相平均が層流曲線の周囲に分布している。

また、加速区間において壁面摩擦係数  $C_f$  が減少し、さらに減速区間においても壁面摩擦係数  $C_f$  の両方で壁面摩擦抵抗が減少するという結果が得られた。

これは、図 7 に示した壁面摩擦係数  $C_f$  に対応する、上述の図 5 B における壁面  $y / \quad$

10

20

30

40

50



= 0 及び  $y / r = 2$  における流速分布の勾配が、減速区間において放物線よりも、やや緩やかになり、流体と壁面との摩擦係数が低下するためと考えられる。

【 0 0 4 8 】

また、実験例 2 では、 $y / r = 2$  で示した各位相平均が Dean の相関式の周囲に分布している。そして、加速期間において壁面摩擦係数  $C_f$  が減少し、減速期間において壁面摩擦係数  $C_f$  が徐々に増加する。また、一周期の壁面摩擦係数  $C_f$  は、平均流速が Dean の相関式に対して少し低く、 $Re = 110$  における定常状態の壁面摩擦係数  $C_f$  よりも低い値を示すという結果が得られた。

【 0 0 4 9 】

従って、上述の図 7 に示した結果より、実験例 1 の条件によって流体を脈動させて乱流から層流に変える（再層流化）ことで壁面摩擦係数  $C_f$  が低下し、層流と同程度の壁面摩擦係数が得られることがわかる。つまり、脈動させなければ乱流状態にある管路内の流体に対し、脈動させることで摩擦抵抗を軽減させることができる。このため、少ないエネルギーで流体を移送することが可能である。

10

【 0 0 5 0 】

次に、実験例 1 及び実験例 2 の条件と同様に、脈動の条件を下記表 2、表 3 及び表 4 に示すように変更してシミュレーションを行い、仕事率  $W$  の動力低減率  $[R_W]_T$  (%) 及び上述の壁面摩擦係数  $C_f$  の摩擦抵抗低減率  $[R_D]_T$  (%) を求めた。動力低減率は下記式 (8) を用いて求めた。

また、摩擦抵抗低減率は、下記式 (9) を用いて求めた。

20

【 0 0 5 1 】

【数 8】

$$[R_W]_T = \frac{W_{Dean} - [W]_T}{W_{Dean}} \times 100 \quad (8)$$

【 0 0 5 2 】

【数 9】

$$[R_D]_T = \frac{C_{fDean} - [C_f]_T}{C_{fDean}} \times 100 \quad (9)$$

30

【 0 0 5 3 】

式 (8) において  $W_{Dean}$  は、式 (6) の Dean の相関式から算出した乱流状態での流体の仕事率である。また、式 (9) において  $C_{fDean}$  は、式 (6) の Dean の相関式から算出した乱流状態での流体の壁面摩擦係数である。

40

【 0 0 5 4 】

また、表 2、3 における  $DPDX_{ave}$  は、下記式 (10) を用いて求められる一周期平均の圧力勾配である。

【 0 0 5 5 】

【数10】

$$DPDX_{ave} = \frac{1}{T} \int_0^T \left( - \frac{dp^*}{dx^*} \right) dt \quad (10)$$

【0056】

なお、上述の式(8)において、 $[W]_T$ は、下記式(11)によって求められる脈動乱流状態の流体の仕事率である。また、上述の式(9)において、 $[C_f]_T$ は、下記式(12)によって求められる脈動乱流状態の流体の壁面摩擦係数である。

【0057】

【数11】

$$[W]_T = \frac{\left[ u_m^* \left( - \frac{d \overline{P^*}}{dx^*} \right) \right]_T}{[u_m^*]_T^3} \quad (11)$$

【0058】

【数12】

$$[C_f]_T = \frac{[\tau_w]_T}{\frac{1}{2} \rho [u_m^*]_T^2} \quad (12)$$

【0059】

上述のシミュレーションを行った各脈動の条件と結果を表2, 3に示す。

【0060】

【表2】

	Re	T*	$\alpha_a$	$\alpha_b$	$\alpha_a - \alpha_b$	DPDX <sub>ave</sub>	T <sub>a</sub> /T <sub>b</sub>	動力低減率	摩擦抵抗低減率
実験例1	110	11.2	5	-3	8	1	1	79.23	80.50
実験例2	110	9.6	5	-3	8	1	1	13.05	20.87
実験例3	110	8	5	-3	8	1	1	14.46	18.78
実験例4	110	6.4	5	-3	8	1	1	11.93	14.50
実験例5	110	4.8	5	-3	8	1	1	6.49	9.14
実験例6	110	3.2	5	-3	8	1	1	4.27	5.69

【0061】

10

20

30

40

【表 3】

	Re	T*	$\alpha_a$	$\alpha_b$	$\alpha_a - \alpha_b$	DPDX <sub>ave</sub>	T <sub>a</sub> /T <sub>b</sub>	動力低減率	摩擦抵抗低減率
実験例4	110	6.4	5	-3	8	1	1	11.93	14.50
実験例7	110	6.4	2	0	2	1	1	6.06	6.06
実験例8	110	6.4	4	-2	6	1	1	9.08	10.49
実験例9	110	6.4	7	-5	12	1	1	15.55	23.33
実験例10	110	6.4	8	-6	14	1	1	7.75	21.39
実験例11	110	6.4	9	-7	16	1	1	78.32	80.47

10

【0062】

【表 4】

	Re	T*	$\alpha_a$	$\alpha_b$	$\alpha_a - \alpha_b$	DPDX <sub>ave</sub>	T <sub>a</sub> /T <sub>b</sub>	動力低減率	摩擦抵抗低減率
実験例12	110	12.8	5	-3	8	1	1	65.96	70.63
実験例13	110	11.2	6	-4	10	1	1	51.28	58.63
実験例14	110	9.6	7	-5	12	1	1	54.40	61.79
実験例15	110	8	8	-6	14	1	1	60.82	66.15
実験例16	110	8	9	-7	16	1	1	54.85	62.90

20

【0063】

上記表 2 は、上述の実験例 1, 2 の条件と同様に流体の脈動周期 T\* を変更してシミュレーションを行った結果である。

脈動周期 T を 1.1, 1.2 とした実験例 1 は、再層流化により 80% 近い動力低減率を達成することができた。また、実験例 1 では再層流化により 80% 程度の摩擦抵抗低減率を達成することができた。

30

このように、脈動周期 T\* を大きくすることにより、脈動による層流化が可能となり、理論上の最小値である層流の約 80% の動力低減率及び摩擦抵抗低減率を達成することができる。

これに対して、脈動周期 T\* を 9.6 とした実験例 2 では、脈動による再層流化がおこらないため、動力低減率が 13% 程度、摩擦抵抗低減率が 20% 程度に留まる。さらに、脈動周期 T\* を 8 ~ 3.2 まで小さくした実験例 3 ~ 6 では、動力低減率及び摩擦抵抗低減率を実験例 2 と同程度以下までしか低減することができない。

このように、脈動周期 T\* が小さくなることにより乱流の影響が大きくなり、動力低減率及び摩擦抵抗低減率の値が小さくなる。

40

【0064】

また、上記表 3 は、上述の実験例 4 の条件から圧力勾配差  $\alpha_a - \alpha_b$  を変更し、シミュレーションを行った結果である。

実験例 4 の条件から圧力勾配差を小さくした実験例 7 及び実験例 8 では、動力低減率及び摩擦抵抗低減率が実験例 4 よりも小さくなった。このため、圧力勾配差を小さくすることにより、乱流の影響が大きくなり、壁面摩擦抵抗 C<sub>f</sub> が大きくなること分かる。

また、実験例 4 の条件から圧力勾配差を大きくした実験例 9 及び実験例 10 では、脈動による再層流化がおこらないため、動力低減率が 7 ~ 15% 程度、摩擦抵抗低減率が 20% 程度に留まる。

50

## 【 0 0 6 5 】

そして、実験例 9 及び実験例 10 の条件からさらに圧力勾配差を大きくした実験例 11 では、脈動による再層流化が可能となり、実験例 1 と同様に、80%近い動力低減率を達成することができ、また、80%程度の摩擦抵抗低減率を達成することができる。

このように、圧力勾配差  $a - b$  を大きくすることにより、脈動による層流化が可能となり、理論上の最小値である層流の値約 80%の動力低減率及び摩擦抵抗低減率を達成することができる。

## 【 0 0 6 6 】

また、上記表 4 において、実験例 12 は、上述の実験例 1 から脈動周期  $T^*$  を大きくした場合のシミュレーション結果である。そして、実験例 13 は、上述の実験例 1 から圧力勾配差  $a - b$  を大きくした場合のシミュレーション結果である。

実験例 12 及び実験例 13 では、脈動により再層流化が発生した実験例 1 から更に脈動周期又は圧力勾配差を大きくした場合でも、脈動による再層流化がおり、動力低減率及び摩擦抵抗低減率を大きく低減することができた。

## 【 0 0 6 7 】

また、実験例 14 は、上述の実験例 2 から圧力勾配差  $a - b$  を大きくした場合のシミュレーション結果である。

実験例 15 及び実験例 16 は、上述の実験例 3 から圧力勾配差  $a - b$  を大きくした場合のシミュレーション結果である。

実験例 14 ~ 16 においては、上記表 1 に示した再層流化が起らなかった実験例 2 及び実験例 3 の条件から、圧力勾配差  $a - b$  を大きくすることにより再層流化が起り、動力低減率及び摩擦抵抗低減率を大きく低減することができた。

## 【 0 0 6 8 】

以上の結果から、例えば、乱流状態の流体を再層流化するためには、流体に与える脈動の圧力勾配差と脈動周期を大きくすることが重要であると考えられる。

図 8 ~ 10 に上記表 2 ~ 4 の結果をまとめたものを示す。

なお、図 8 において横軸は圧力勾配差  $a - b$  を示し、縦軸  $T^*$  は脈動周期を示す。

また、図 9 は、図 8 に示す圧力勾配差及び脈動周期  $T^*$  と、動力低減率  $[R_w]_T$  との関係を示す。図 10 は、図 8 に示す圧力勾配差及び脈動周期  $T^*$  と、摩擦抵抗低減率  $[R_D]_T$  との関係をしめす。

## 【 0 0 6 9 】

図 8 に示すように、圧力勾配差と脈動周期  $T^*$  とがともに大きい実験例において、脈動による流体の再層流化が発生している。

そして、図 9 及び図 10 に示すように、脈動により再層流化が発生した実験例では、再層流化が発生していない実験例に比べて、動力低減率  $[R_w]_T$ 、摩擦抵抗低減率  $[R_D]_T$  とともに大きな値が得られた。

従って、圧力勾配差及び脈動周期  $T^*$  を一定以上の値に大きくすることにより、流体の再層流化が可能であると考えられる。

## 【 0 0 7 0 】

なお、上述のシミュレーションでは、一周平均の圧力勾配  $DPDX_{ave}$ 、及び、加速期間と減速期間の比  $T_a / T_b$  を常に 1 としてシミュレーションを行っている。また、加速期間  $T_a$  と減速期間  $T_b$  との流体の駆動圧力の波形特性は、図 2 に示すような形状でシミュレーションを行っている。

$DPDX_{ave}$  や  $T_a / T_b$  を変更することにより、また、駆動圧力の波形特性を変えることにより、流体を再層流化するための圧力勾配差と脈動周期  $T^*$  の適正值は、上記のシミュレーション結果とは異なる場合があると予測される。しかし、その場合にも圧力勾配差と脈動周期  $T^*$  を適宜変更することにより、流体の再層流化が可能となる。

## 【 0 0 7 1 】

次に、実際に実験用の装置を作製して動力低減率及び摩擦抵抗低減率を測定した。

実験で使用した装置の循環管路の概略構成を示す上面図を図 1 1 にしめす。この装置は、循環管路 2 0、ポンプ ( Pump ) 2 1、圧力計 ( Pressure Tap ) 2 2 A、2 2 B、流量計 ( Flow meter ) 2 4 とを備える。

循環管路 2 0 は、管の内径が 2 0 mm である。また、管路の直線部分において、圧力計 2 2 A と圧力計 2 2 B との間を試験区間 ( Test section ) 2 3 とした。

また、装置内を流れる流体は水である。水は、空気孔 ( Air vent ) 2 5 から管路内の空気を抜きながら給水孔 ( Water supply ) 2 6 から装置内に供給した。

#### 【 0 0 7 2 】

ポンプ 2 1 を駆動することにより、図面に矢印で示す方向に水を流して、管路内を循環させた。また、ポンプ 2 1 の駆動は、図 2 に示す波形特性と同様に、一周平均の圧力勾配  $DPDX_{ave}$ 、及び、加速期間と減速期間の比  $T_a / T_b$  を 1 とし、脈動周期  $T^*$  を 3 ~ 1 0 s として駆動した。

10

#### 【 0 0 7 3 】

そして、図 1 1 に示す循環管路の圧力計 2 2 A と圧力計 2 2 B との間の試験区間 2 3 を 2 0 0 0 mm として、試験区間前後での圧力差 (  $P$  ) を測定した。また、流量計 2 4 により、管路内を流れる流体の流量 (  $u_m$  ) を測定した。

圧力差 (  $P$  ) 及び流量 (  $u_m$  ) は、0 . 1 s ごとに測定した。

#### 【 0 0 7 4 】

実験により測定した圧力差 (  $P$  ) 及び流量 (  $u_m$  ) の結果を上述の式 ( 8 ) 及び式 ( 9 ) に導入して、摩擦抵抗低減率と動力低減率を求めた。実験の結果、上記式 ( 9 ) から求められる壁面摩擦係数  $C_f$  の摩擦抵抗低減率  $[R_D]_T$  は、3 4 % であった。また、上記式 ( 8 ) から求められる仕事率  $W$  の動力低減率  $[R_W]_T$  は、2 6 % であった。

20

この結果から、実験では装置と条件の最適化が充分ではないため、上述のシミュレーションで示した再層流化程の効果を得ることができていないが、流体を脈動させることにより管路と流体との壁面摩擦抵抗が少ない状態を作り出すことができ、少ないエネルギーで流体を移送することができた。

#### 【 0 0 7 5 】

上述した本発明は、石油や天然ガスのパイプライン輸送に代表される管内流れにおいてエネルギー消費量のほとんどを占めている乱流摩擦抵抗によるエネルギー損失を抑制し、省エネルギーに寄与することができる。

30

例えば、従来のパイプライン輸送においては、流体の駆動源であるポンプ等を更新することにより本発明を適用することができる。

#### 【 0 0 7 6 】

また、本発明は上述の石油や天然ガスのパイプライン輸送に限らず、水道管や都市ガス管などの管内流れにも同様に適用することができる。

また、地球温暖化ガスを削減するための対策として、 $CO_2$  を分離回収したのち地中に貯留することが計画され、この  $CO_2$  の輸送にもパイプラインの使用が予想される。このような  $CO_2$  輸送のパイプラインにも本発明を適用することができる。

さらに、脈動流れは産業界において、例えば、燃焼系エンジンの吸気系、熱交換器、排水管、ターボ機械、油空圧機器等いろいろな分野で存在するが、これらの脈動流れに対しても、本発明を適用することにより流動抵抗を減少させて、機器効率を高くすることができる。

40

#### 【 0 0 7 7 】

本発明は、上述の構成に限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲でその他様々な構成が取り得る。

【 図 1 】

FIG. 1A

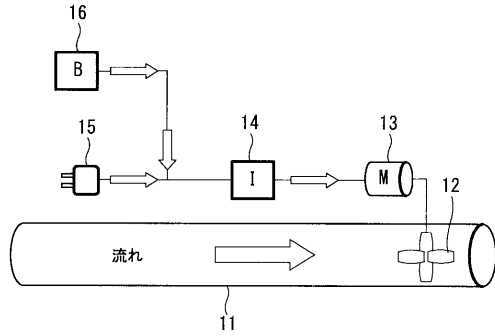
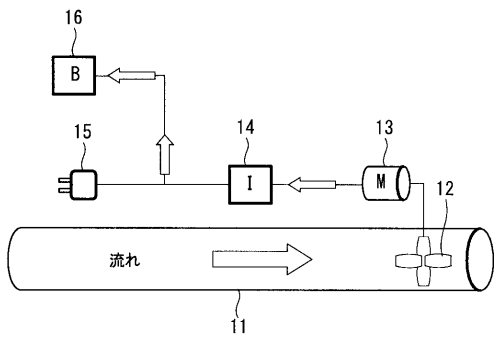
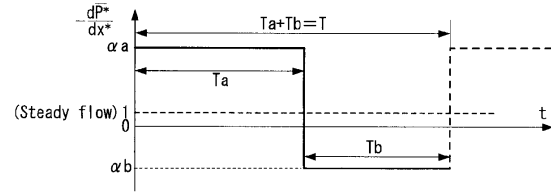


FIG. 1B



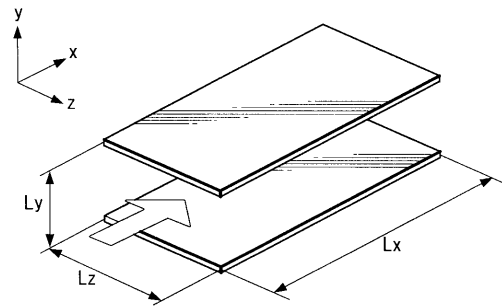
【 図 2 】

FIG. 2



【 図 3 】

FIG. 3



【 図 4 】

FIG. 4A

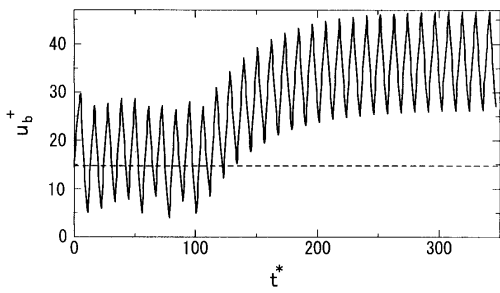
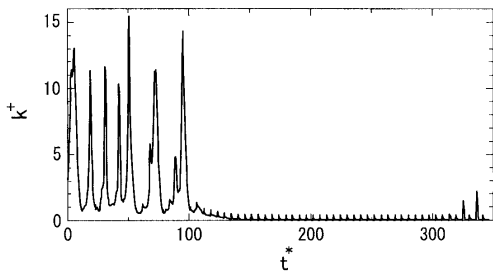


FIG. 4B



【 図 5 】

FIG. 5A

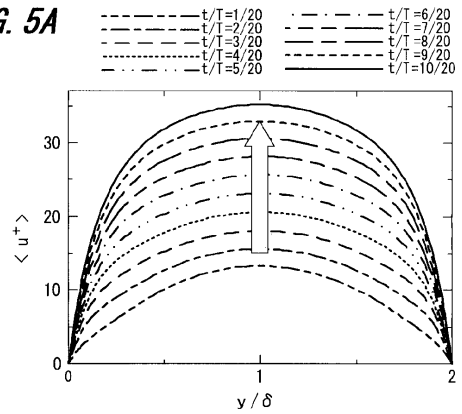
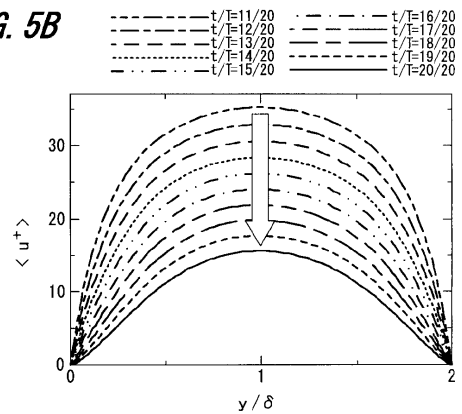


FIG. 5B



【 図 6 】

FIG. 6A

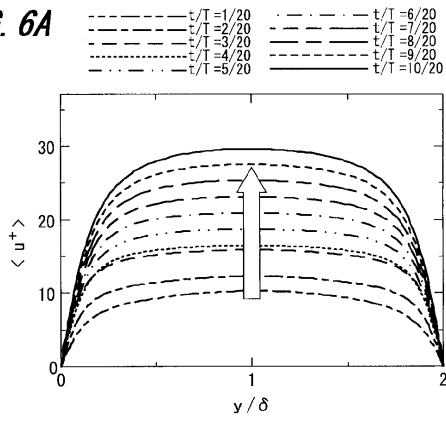
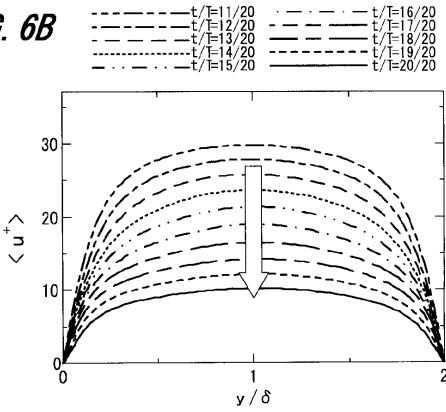
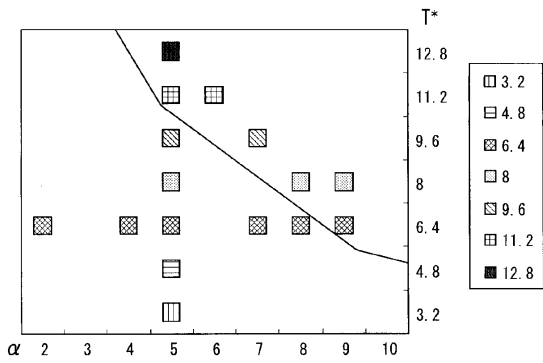


FIG. 6B



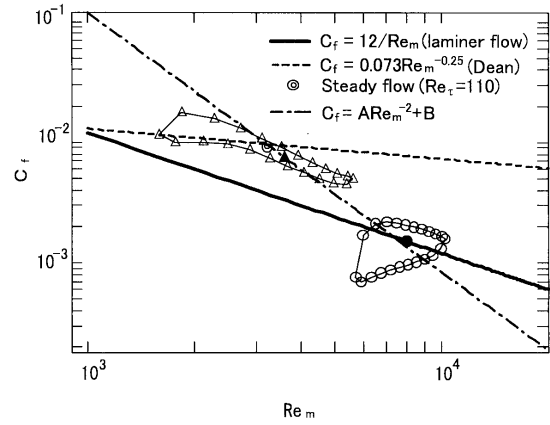
【 図 8 】

FIG. 8



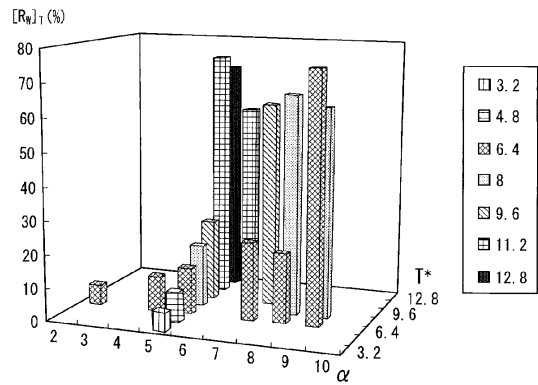
【 図 7 】

FIG. 7



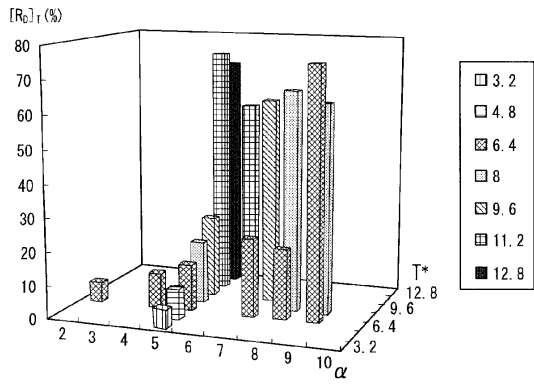
【 図 9 】

FIG. 9



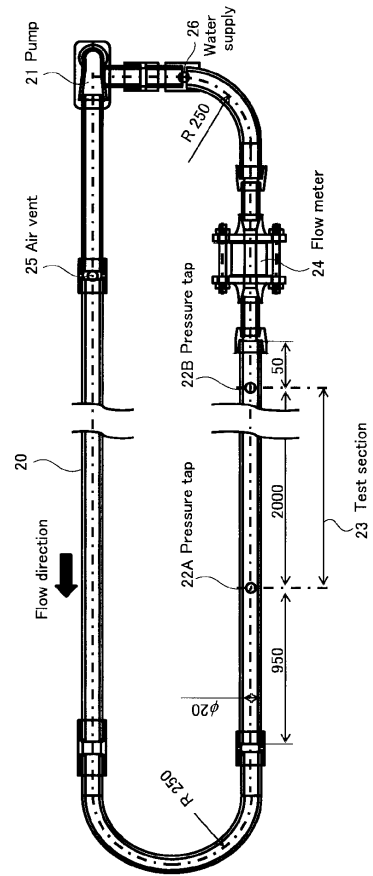
【 10 】

FIG. 10



【 11 】

FIG. 11





---

フロントページの続き

- (56)参考文献 特開平 1 1 - 3 1 5 9 9 9 ( J P , A )  
特許第 2 8 0 2 8 2 0 ( J P , B 2 )  
特開 2 0 0 5 - 0 1 6 4 7 6 ( J P , A )  
特開平 1 1 - 1 0 9 0 7 8 ( J P , A )  
特公平 0 4 - 0 6 8 5 2 0 ( J P , B 2 )  
特公平 0 4 - 0 4 5 6 8 8 ( J P , B 2 )  
特公平 0 2 - 0 5 0 3 6 0 ( J P , B 2 )

(58)調査した分野(Int.Cl. , D B 名)

F17D 1/14  
F15D 1/02  
F16L55/00