

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2020-32956  
(P2020-32956A)

(43) 公開日 令和2年3月5日(2020.3.5)

(51) Int.Cl.		F I		テーマコード(参考)
<b>B63H</b>	<b>1/32</b>	<b>(2006.01)</b>	B63H 1/32	5D107
<b>B06B</b>	<b>1/06</b>	<b>(2006.01)</b>	B06B 1/06	Z
<b>H01L</b>	<b>41/09</b>	<b>(2006.01)</b>	H01L 41/09	
<b>H01L</b>	<b>41/187</b>	<b>(2006.01)</b>	H01L 41/187	
<b>B63C</b>	<b>11/00</b>	<b>(2006.01)</b>	B63C 11/00	Z

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願2018-163232 (P2018-163232)  
(22) 出願日 平成30年8月31日 (2018.8.31)

(出願人による申告)平成29年度、国立研究開発法人科学技術振興機構、研究成果展開事業「研究成果最適展開支援プログラム(A-STEP)、産業ニーズ対応タイプ、セラミックスの高機能化と製造プロセス革新、「非鉛圧電配向体の焼結しない低温作製法の確立~IoTセンサーおよびエネルギーハーベスター応用に向けて」産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 304021417  
国立大学法人東京工業大学  
東京都目黒区大岡山2丁目12番1号

(74) 代理人 100099759  
弁理士 青木 篤

(74) 代理人 100123582  
弁理士 三橋 真二

(74) 代理人 100147555  
弁理士 伊藤 公一

(74) 代理人 100160705  
弁理士 伊藤 健太郎

(72) 発明者 黒澤 実  
東京都目黒区大岡山2丁目12番1号 国立大学法人東京工業大学内

最終頁に続く

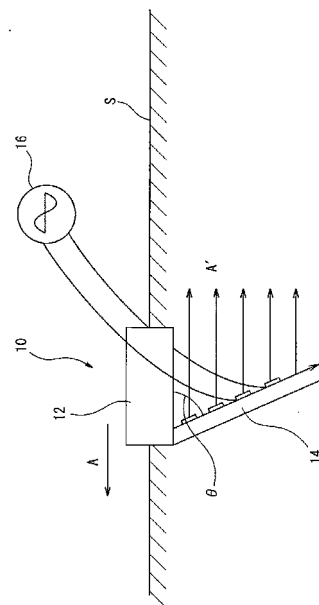
(54) 【発明の名称】 液中推進装置

(57) 【要約】

【課題】基板表面付近を伝搬する弾性波動を推進力発生源とする、全く新しい液中自走型の液中推進装置を提供する。

【解決手段】液中推進装置は、本体と、本体12を液体表面Sまたは液体中に配置したときに、該液体に少なくとも部分的に接するように、本体に取り付けられた高周波振動アクチュエータ14とを具備し、高周波振動アクチュエータにより液体中に超音波を生成し、その際、高周波振動アクチュエータの表面と液体との間の界面に生じる音響放射圧によって推進力を得るようにした。

【選択図】図1



図

## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

本体と、

前記本体を液体表面または液体中に配置したときに、該液体に少なくとも部分的に接するように、前記本体に取り付けられた高周波振動アクチュエータとを具備し、

前記高周波振動アクチュエータにより前記液体中に超音波を生成し、その際、高周波振動アクチュエータの表面と前記液体との間の界面に生じる音響放射圧によって推進力を得るようにした液中推進装置。

## 【請求項 2】

前記高周波振動アクチュエータは、平板状の圧電基板と、該圧電基板において前記推進力によって前記本体が移動する方向に対して後方に面した側面に設けられた弾性表面波素子とを具備し、圧電基板表面に表面波を生成し、該表面波によって前記液体中に縦波を伝播するようにした請求項 1 に記載の液中推進装置。

10

## 【請求項 3】

前記高周波振動アクチュエータは、前記本体に対して斜め後方に傾斜させて延設されている請求項 2 に記載の液中推進装置。

## 【請求項 4】

前記高周波振動アクチュエータは、本体に対して以下の式で示される角度  $\theta$  を形成するように前記本体に対して斜め後方に傾斜させて延設されている請求項 3 に記載の液中推進装置。

20

## 【数 1】

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \theta_R.$$

ここで、 $\theta_R$  は、縦波の進行方向が圧電基板表面に垂直な方向に対して形成する角度であり、以下の式にて求めることができる。

## 【数 2】

$$\theta_R = \sin^{-1} \frac{v_l}{v_R}$$

30

ここで、 $v_l$  は液中における縦波の速度であり、 $v_R$  は圧電基板中を伝播するレイリー波の速度である。

## 【請求項 5】

前記液中推進装置は一对の前記高周波振動アクチュエータを具備し、

該一对の高周波振動アクチュエータは互いに平行に延設されるように、前記本体に取り付けられており、

前記高周波振動アクチュエータの各々は、平板状の圧電基板と、該圧電基板において前記推進力によって前記本体が移動する方向に対して後方に面した側面に設けられた弾性表面波素子とを具備し、

40

圧電基板表面に表面波を生成し、該表面波によって前記液体中に縦波を伝播して音響放射圧によって推進力を発生すると共に、液体中に縦波が伝搬する際に、前記一对の高周波振動アクチュエータの間に直進流を生じさせて、該直進流によって推進力を発生させるようにした請求項 1 に記載の液中推進装置。

## 【請求項 6】

前記本体は有底状の中空部材より成り、

前記高周波振動アクチュエータは、前記本体の開口部を閉鎖するように配設されており、

圧電振動子から後方へ本体の側壁を更に延長して形成したスカート部が設けられ、

50

スカート部において、圧電振動子に隣接させて複数の液体ポートが形成されている請求項 1 に記載の液中推進装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、高周波振動アクチュエータを用いて液中または水中で推進力を得るようにした液中推進装置に関する。

【背景技術】

【0002】

弾性表面波アクチュエータは小型で高速、高推力な駆動並びに精密な位置決めが可能であり、本願の発明者等による出願である特許文献 1 には、弾性表面波アクチュエータを用いた小型リニアアクチュエータが記載されている。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献 1】特開 2007 - 028828 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

発明者等は、弾性表面波アクチュエータを用いた小型リニアアクチュエータの開発から得た知見に基づいて、基板表面付近を伝搬する弾性波動を推進力発生源とする、全く新しい液中自走型の液中推進装置を発明した。

20

【課題を解決するための手段】

【0005】

請求項 1 に記載の本発明は、本体と、前記本体を液体表面または液体中に配置したときに、該液体に少なくとも部分的に接するように、前記本体に取り付けられた高周波振動アクチュエータとを具備し、

前記高周波振動アクチュエータにより前記液体中に超音波を生成し、その際、高周波振動アクチュエータの表面と前記液体との間の界面に生じる音響放射圧によって推進力を得るようにした液中推進装置を要旨とする。

30

【発明の効果】

【0006】

本発明では、高周波振動アクチュエータによる推進力発生の原理は、波動伝搬の非線形現象による直流的な力であり、推進力を生ずる源は、高周波振動アクチュエータ中を伝搬する 20 nm 以下の微小振幅の高周波振動であるので、液中推進装置は、ヒレやスクルーといった可動部を持たない全く新しい液中推進装置である。

【図面の簡単な説明】

【0007】

【図 1】本発明の第 1 の実施形態による液中推進装置の略示側面図である。

【図 2】高周波振動アクチュエータの略示平面図である。

40

【図 3】本発明の第 2 の実施形態による液中推進装置の略示側面図である。

【図 4】図 3 の液中推進装置の平面図である。

【図 5】図 3 の液中推進装置の作用を説明するための略示拡大側面図である。

【図 6】半無限媒体の固体中を伝搬してきた超音波が液中に伝搬するとき、固体と液体との境界面で発生する音響放射圧を説明するための略図である。

【図 7】図 6 の原理に基づき、円板状圧電素子の厚み振動を用いた本発明の第 2 の実施形態による高周波振動アクチュエータの例を示す略示断面図である。

【図 8】本発明の第 3 の実施形態による液中推進装置の略示断面図である。

【発明を実施するための形態】

【0008】

50

以下、添付図面を参照して、本発明の好ましい実施形態を説明する。

図 1 に示す、本願発明の第 1 の実施形態による液中推進装置 10 は、本体を形成する浮体 12 と、高周波振動アクチュエータ 14 とを具備している。浮体 12 は、液体、例えば水に浮くことのできる材料、例えば発泡スチロールや木製の部材とすることができる。液中推進装置 10 は、使用中、図 1 に示すように、浮体 12 が液面または水面 S に配置され、高周波振動アクチュエータ 14 が液中に配置され、矢印 A で示す方向に推進される。

【0009】

図 2 を参照すると、高周波振動アクチュエータ 14 は、矩形板状の圧電基板 18 と、該圧電基板 18 の一側面に貼付された弾性表面波素子 20、30 を具備している。高周波振動アクチュエータ 14 は、圧電基板 18 が、浮体 12 に対して角度  $\theta$  を以て浮体 12 の下面から斜め後方かつ下方へ延びるように、浮体 12 の前端部、特に浮体 12 の下面の前端近傍に取り付けられている。或いは、高周波振動アクチュエータ 14 は、図 1 に示すように、液中推進装置 10 を液体に浮かべたときに、圧電基板 18 が、液面または水平面 S に対して角度  $\theta$  を以て斜め後方かつ下方へ延在するようにしてもよい。より一般的には、高周波振動アクチュエータ 14 は、圧電基板 18 が、液中推進装置 10 の進行方向 A に対して角度  $\theta$  を以て斜め後方に延在するようにできる。

10

【0010】

圧電基板 18 は、例えば 128 度回転 Y 板 X 伝搬のニオブ酸リチウム (LiNbO<sub>3</sub>) によって形成することができる。弾性表面波素子 20、30 の一方、本実施形態では、弾性表面波素子 20 は高周波電源 16 に接続されており、駆動側弾性表面波素子を形成しており、他方の弾性表面波素子 30 は反射側弾性表面波素子を形成する。

20

【0011】

駆動側の弾性表面波素子 20 は、平行に延設されたバス 22、26 と、該バス 22、26 の各々から対向するバス 26、22 へ向けて伸びる指状電極 24、28 を有しており、交差指状電極を形成している。反射側の弾性表面波素子 30 も同様に、平行に延設されたバス 32、36 と、該バス 32、36 の各々から対向するバス 36、32 へ向けて伸びる指状電極 34、38 を有しており、交差指状電極を形成している。こうして、高周波振動アクチュエータ 14 は弾性表面波アクチュエータを形成している。

【0012】

高周波電源 16 による高周波振動アクチュエータ 14 の駆動周波数は、弾性表面波素子 20、30 の指状電極 24、28、34、38 の幅と、ピッチとによって決定される共振周波数となる。一例として、指状電極 24、28、34、38 の幅と隙間を 100  $\mu\text{m}$ 、ピッチを 400  $\mu\text{m}$  とすると、上述のニオブ酸リチウムの圧電基板 18 の場合、共振周波数は約 9.6 MHz となる。

30

【0013】

以下、本実施形態の作用を説明する。

高周波電源 16 から駆動側弾性表面波素子 20 に所定の電圧を印加すると、駆動側弾性表面波素子 20 から、反射側弾性表面波素子 30 へ向けて一方向に伝播する弾性表面波であるレイリー波が生成される。このレイリー波は、進行方向変位成分と、深さ方向変位成分を持った進行波であり、2つの変位成分の位相差は 90 度となっている。従って、進行波によって高周波振動アクチュエータ 14 の表面粒子が楕円軌道を描く。

40

【0014】

液中推進装置 10 を図 1 のように液体表面 S に配置し、高周波振動アクチュエータ 14 が液中に浸漬された状態で高周波電源 16 から駆動側弾性表面波素子 20 に所定の電圧を印加すると、上述の進行波による高周波振動アクチュエータ 14 の表面粒子が楕円軌道を描くように変位するので、液中に漏洩表面波として粗密波または縦波が生成、放射される。この縦波の進行方向が、圧電基板 18 表面に垂直な方向に対して形成する角度を  $\theta_R$  とすると、

【数 1】

$$\theta_R = \sin^{-1} \frac{v_l}{v_R}, \quad (1)$$

で示される。

【0015】

ここで、 $v_l$  は液中における縦波の速度であり、 $v_R$  は圧電基板 18 中を伝播するレイリー波の速度である。一例として、上述の 128 度回転 Y 板 X 伝搬のニオブ酸リチウム場合、 $v_l = 1492 \text{ m/s}$ 、 $v_R = 3980 \text{ m/s}$  であり、 $\theta_R = 22^\circ$  となる。従って、

10

【数 2】

$$\theta = \frac{\pi}{2} - \theta_R. \quad (2)$$

となるように、浮体 12 に対する圧電基板 18 の角度  $\theta$  を決定することによって、縦波は矢印 A で示すように、浮体 12 に対して平行な方向に伝播することとなる。或いは、式 (2) に基づいて、進装置 10 の望ましい進行方向 A に対する圧電基板 18 の角度  $\theta$  を決定することによって、進行方向 A に対して正反対の方向 A に漏洩表面波として縦波を生成、放射可能となる。

20

【0016】

こうして、液中推進装置 10 は、高周波振動アクチュエータ 14 から縦波が放射される際、高周波振動アクチュエータ 14 の表面と液体との間の界面に発生する音響放射圧によって、液面または水面 S に沿って矢印 A で示す方向に移動する。発明者らは、長さ 27 mm、幅 16 mm、厚さ 1 mm の高周波振動アクチュエータ 14 を作成し、弾性表面波素子 20 に周波数 9.61 MHz、電圧約 80 V の駆動電力を印加することによって、約 0.25 N の推進力が得られることを実験により確認している。

【0017】

本実施形態では、このように、推進力発生 の原理は波動伝搬の非線形現象による直流的な力であり、推進力を生ずる源は、固体中を伝搬する 20 nm 以下の微小振幅の高周波振動であるので、高周波振動アクチュエータ 14 は、ヒレやスクリューといった可動部を持たない、全く新しい液中アクチュエータである。上述のように、本実施形態では、他の推進方式より優れた 0.25 N とい大きな推進力を実現している。また、表面波の駆動周波数を高周波化することで、出力密度を低下させることなくマイクロ化が可能である。例えば、駆動周波数を現在の 9.6 MHz から 1 GHz とすれば、寸法を 1/100 にすることができ、サブミリメートルの素子とすることや、マイクロ波によるワイヤレス駆動も考えられ、液中を自由に動き回ることのできる液中推進装置またはアクチュエータへの応用、特に、先進的な医療技術やバイオテクノロジーへの応用が期待できる。

30

【0018】

既述の実施形態では、高周波振動アクチュエータ 14 から縦波が放射される際に、高周波振動アクチュエータ 14 の表面と液体との間の界面に発生する音響放射圧を推進力源として利用している。然しながら、水中に音波が伝搬する際に、直進流を生ずることが知られている。この直進流もアクチュエータの推進力として利用することが考えられる。

40

【0019】

図 3 ~ 図 5 に示す第 2 の実施形態による液中推進装置 40 は、高周波振動アクチュエータから液中に音波が伝播する際に生じる直進流を推進力として利用するようになっている。本実施形態では、表面波素子の表面で発生する音響放射圧に基づく推進力とともに、直進流を推進力に利用することで、推進力、速度ともに増大することが可能となる。

【0020】

図 3 ~ 図 5 において、液中推進装置 40 は、本体を形成する浮体 46 と、該浮体 46 に

50

取り付けられた高周波振動アクチュエータ42、44を具備している。高周波振動アクチュエータ42、44は、図2に示した高周波振動アクチュエータ14と同様に駆動側弾性表面波素子20と、反射側弾性表面波素子30とを有しており、駆動側弾性表面波素子20が高周波電源(図示せず)に接続されている。高周波振動アクチュエータ42、44は、浮体46から後方に互いに平行に延びるように、浮体46の上面および下面に取り付けられている。

#### 【0021】

高周波電源から駆動側弾性表面波素子20に高周波電圧を印加すると、高周波振動アクチュエータ42、44の間で縦波が生成される。この縦波は、図5において矢印D、Dで示すように、他方の高周波振動アクチュエータ44、42へ向けて斜め後方に生成、放射される。それにより、上述したように、高周波振動アクチュエータ42、22の表面と液体との間の界面に音響放射圧が発生する。音響放射圧の高周波振動アクチュエータ42、22の表面に垂直な成分は互いに打ち消し合うので、音響放射圧の液中推進装置40の後方へ向かう成分によって、液中推進装置40を前方(図3~図6で左方)へ移動させる推進力が生成される。

10

#### 【0022】

更に、本実施形態では、高周波振動アクチュエータ42、44から液中に縦波(音波)が伝播する際に生じる直進流によって矢印Bで示すような液体の流れ(ジェット)が生成され、これにより、推進力が得られるようになっている。矢印Bで示すように、水流が生じることから、図4において矢印Cで示すように、高周波振動アクチュエータ42、44の間に周囲から液体が流入する。直進流を利用することで、推進力および速力を増大することが可能となる。

20

#### 【0023】

既述したように、液体中に超音波を放射する際、固体である超音波振動子と流体または水との界面には、放射圧と称される直流的な力が生じる。直流的な力である放射圧を推進力として用いるためには、振動モードは既述したような弾性表面波に限定されない。例えば、円板状圧電素子の厚み共振振動モードを用いても、同様の原理により振動子表面の放射圧が推進力として作用する。

#### 【0024】

円板状圧電素子の厚み振動モード用いた高周波振動アクチュエータとしては、MHz帯の圧電厚み振動子モードの利用が可能である。放射圧の理論からは、図6に示すように、半無限媒体の固体中を伝搬してきた超音波が液中に伝搬するとき、固体と液体との境界面で放射圧が発生する。

30

#### 【0025】

図7に、この原理に基づき円板状圧電素子の厚み振動を用いた高周波振動アクチュエータの例を示す。図7において、高周波振動アクチュエータ50は、有底状の円筒中空本体52、本体52の開口部を閉鎖するように配設された圧電振動子56、本体52と圧電振動子56との間に配設されたシール部材であるリング54を備えている。本体52の中空部52aには空気が充填されている。圧電振動子56の外側の側面は液体に接している。高周波振動アクチュエータ50によれば、液体と圧電振動子56の境界面に作用する放射圧を推進力として取り出すことが可能となる。圧電振動子56は、例えば直径20mm、厚さ3mm、2mm、1mm、0.5mm、0.3mmのPZTバルク素子を用いることができる。厚さの違いで共振周波数(=駆動周波数)が異なり、それぞれ、700kHz、1MHz、2MHz、4MHz、7MHzとなる。

40

#### 【0026】

圧電素子56として、圧電膜による素子を用いることでマイクロ化を図ることが可能となる。例えば、水熱合成法により成膜した $\text{KNbO}_3$ 膜であればPZTバルク材料より10倍程度大きな振動速度が得られ、素子の厚さを数 $\mu\text{m}$ ~100 $\mu\text{m}$ とすることで、駆動周波数を20MHz~数100MHzとすることが可能となる。高周波化により小型化され、直径1mm程度のアクチュエータを実現できる。また、高い周波数を用いることで、水中にお

50

けるキャピテーションの発生を抑制でき、キャピテーション発生による推進力の低下が抑えられるので、効率よく推進力を得ることが可能となる。

【 0 0 2 7 】

既述したように、液中を伝搬する超音波によって直進流が生成される。円板状圧電素子の厚み振動を用いた高周波振動アクチュエータでも、前述した弾性表面波による場合と同様に直進流の利用が可能である。この直進流を発生させる音響放射圧は、水面から噴水のように噴射するほど強力な力であることが分かっている。

【 0 0 2 8 】

図 8 に、この原理に基づき、円板状圧電素子の厚み振動を用いた液中推進装置の例を示す。図 8 において、液中推進装置 6 0 は、有底状の中空本体 6 2、中空本体 6 2 の開口部を閉鎖するように配設された圧電振動子 6 6、本体 6 2 と圧電振動子 6 6 との間に配設されたシール部材としてのリング 6 8、圧電振動子 6 6 から後方へ本体 6 2 の側壁を更に延長して形成したスカート部 6 4 と、スカート部 6 4 において、圧電振動子 6 6 に隣接させて形成された複数の液体ポート 6 4 a を有している。液中推進装置 6 0 によれば、圧電振動子 6 6 の駆動面（液中または水に接する表面）に生ずる音響放射圧（矢印 G）とともに、矢印 F で示す直進流による液体の流れ（ジェット）も推進力として利用可能となる。矢印 F で示すように、液体の流れを生じることから、矢印 E で示すように、液体ポート 6 4 a からスカート部 6 4 内に周囲から液体が流入する。音響放射圧に加えて直進流を利用することで、推進力および速力を増大することが可能となる。

【 符号の説明 】

【 0 0 2 9 】

- 1 0 液中推進装置
- 1 2 本体
- 1 4 高周波振動アクチュエータ
- 1 6 高周波電源
- 1 8 圧電基板
- 2 0 弾性表面波素子
- 2 2 バス
- 2 4 指状電極
- 2 6 バス
- 2 8 指状電極
- 3 0 反射側弾性表面波素子
- 3 2 バス
- 3 4 指状電極
- 3 6 バス
- 3 8 指状電極
- 4 0 液中推進装置
- 4 2 高周波振動アクチュエータ
- 4 4 高周波振動アクチュエータ
- 4 6 浮体
- 5 0 高周波振動アクチュエータ
- 5 2 本体
- 5 2 a 中空部
- 5 4 リング
- 5 6 圧電振動子
- 6 0 液中推進装置
- 6 2 本体
- 6 4 スカート部
- 6 4 a 液体ポート
- 6 6 圧電振動子

10

20

30

40

50

【 図 1 】

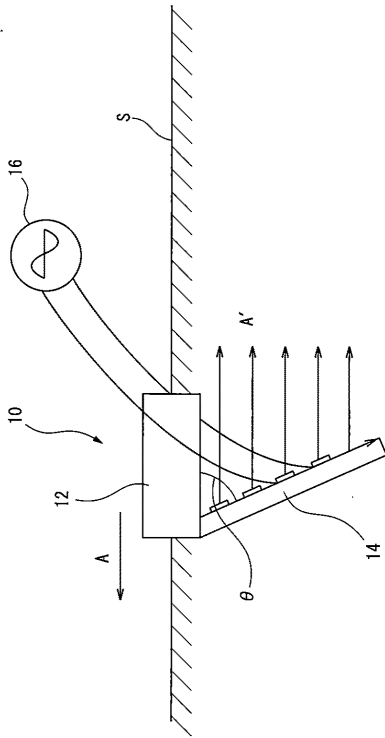
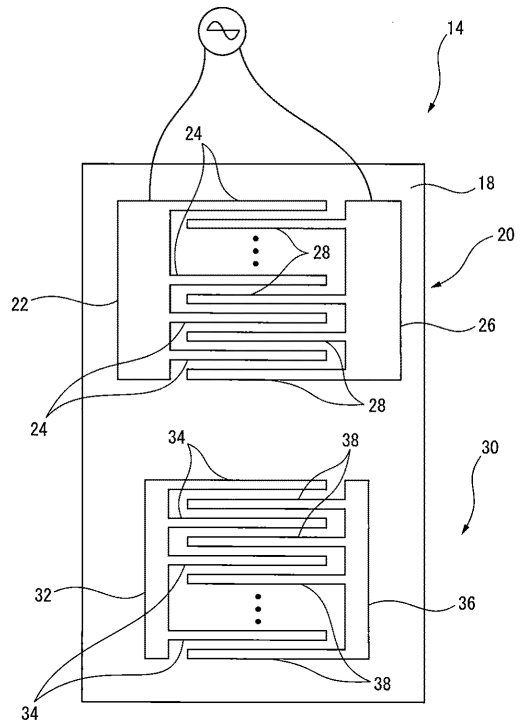


図1

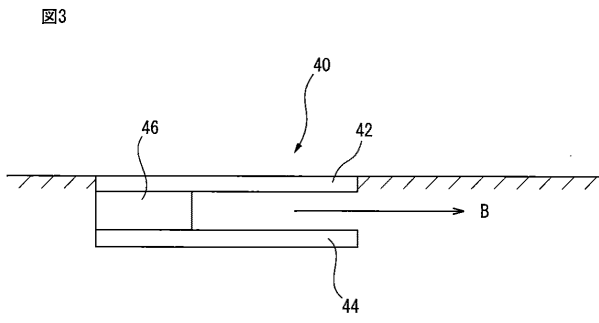
【 図 2 】

図2

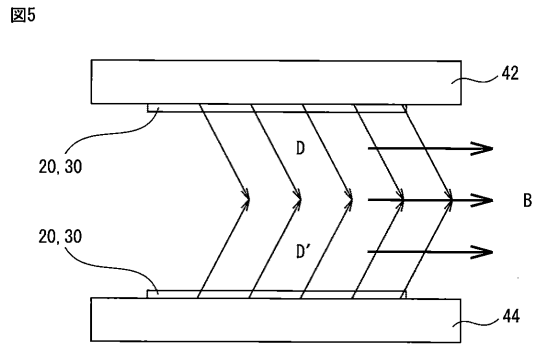




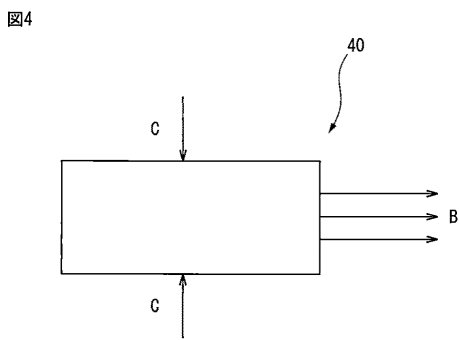
【 図 3 】



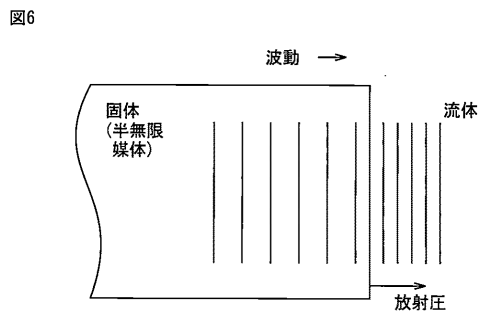
【 図 5 】



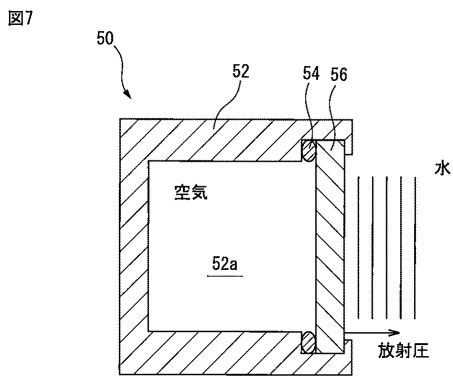
【 図 4 】



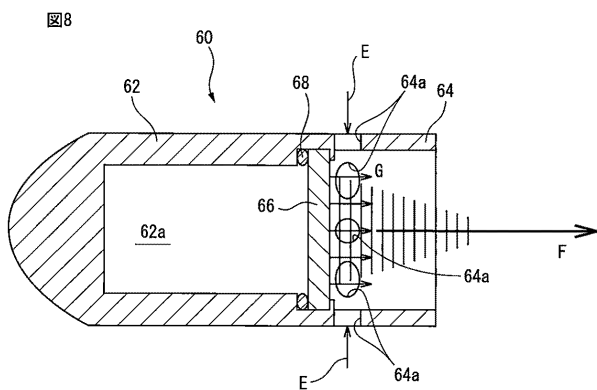
【 図 6 】



【 図 7 】



【 図 8 】



---

フロントページの続き

- (72)発明者 孔 徳 卿  
東京都目黒区大岡山 2 丁目 1 2 番 1 号 国立大学法人東京工業大学内
- (72)発明者 石河 睦生  
東京都目黒区大岡山 2 丁目 1 2 番 1 号 国立大学法人東京工業大学内
- (72)発明者 舟窪 浩  
東京都目黒区大岡山 2 丁目 1 2 番 1 号 国立大学法人東京工業大学内
- (72)発明者 伊東 良晴  
東京都目黒区大岡山 2 丁目 1 2 番 1 号 国立大学法人東京工業大学内
- (72)発明者 館山 明紀  
東京都目黒区大岡山 2 丁目 1 2 番 1 号 国立大学法人東京工業大学内
- Fターム(参考) 5D107 AA20 BB20 CC02 CD01 CD03 DD11 DE03 EE01 EE04