

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6627911号
(P6627911)

(45) 発行日 令和2年1月8日(2020.1.8)

(24) 登録日 令和1年12月13日(2019.12.13)

(51) Int.Cl.	F I
GO 1 C 19/5712 (2012.01)	GO 1 C 19/5712
HO 1 L 41/113 (2006.01)	HO 1 L 41/113
HO 1 L 41/053 (2006.01)	HO 1 L 41/053
HO 3 H 9/17 (2006.01)	HO 3 H 9/17 F
B 8 1 B 3/00 (2006.01)	B 8 1 B 3/00

請求項の数 21 外国語出願 (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2018-98265 (P2018-98265)	(73) 特許権者	000006231
(22) 出願日	平成30年5月22日(2018.5.22)		株式会社村田製作所
(65) 公開番号	特開2019-49522 (P2019-49522A)		京都府長岡京市東神足1丁目10番1号
(43) 公開日	平成31年3月28日(2019.3.28)	(74) 代理人	100189430
審査請求日	平成30年9月6日(2018.9.6)		弁理士 吉川 修一
(31) 優先権主張番号	20175469	(74) 代理人	100190805
(32) 優先日	平成29年5月24日(2017.5.24)		弁理士 傍島 正朗
(33) 優先権主張国・地域又は機関	フィンランド(FI)	(72) 発明者	ヘイッキ・クイスマ
			フィンランド共和国、00420 ヘルシ
			ンキ、ハヌリポルク 5 エー 5
		審査官	川村 大輔

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 圧電回転MEMS共振器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

1以上のアンカ点を有する基板と、第1の長手方向端部および第2の長手方向端部を有する慣性マスとを備える回転共振器であって、前記慣性マスは、前記1以上のアンカ点から前記慣性マスの前記第1の長手方向端部に向かって延在する1以上の懸架部によって、および、同じ前記1以上のアンカ点から前記慣性マスの前記第2の長手方向端部に向かって延在する1以上の懸架部によって、前記1以上のアンカ点から懸架され、各懸架部は、第1の取付点からアンカ点に、および、第2の取付点から前記慣性マスに取り付けられ、1以上の懸架部は、前記慣性マスの振動回転運動を駆動または検出するように構成された圧電変換器構造体でコーティングされている回転共振器であって、

1以上のコーティングされた懸架部は、第2の取付点から前記慣性マスにたわみ部を用いて取り付けられ、

前記たわみ部は、前記慣性マスと前記第2の取付点との間に作用する曲げモーメントを吸収するのに十分な可撓性を有する

回転共振器。

【請求項2】

各たわみ部は、前記慣性マス面外の並進運動に対して剛性を有するが、前記慣性マス面内の曲げに対して可撓性を有し、前記たわみ部の長さ方向と平行な軸を中心とするらせん状ねじれに対して可撓性を有する

請求項1に記載の圧電回転共振器。

【請求項 3】

前記たわみ部の高さ / 幅アスペクト比は 2 ~ 6 の範囲にあり、前記たわみ部の長さ / 幅アスペクト比は 2 ~ 6 の範囲にある

請求項 1 に記載の圧電回転共振器。

【請求項 4】

前記慣性マスは、3 以上の懸架部によって 1 以上のアンカ点から懸架されている

請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の圧電回転共振器。

【請求項 5】

1 のアンカ点から前記慣性マスの前記第 1 の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の少なくとも 1 つの圧電変換器構造体の長さは、同じ前記 1 のアンカ点から前記慣性マスの前記第 2 の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の少なくとも 1 つの圧電変換器構造体の長さとは異なる、または、1 のアンカ点から前記慣性マスの前記第 1 の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の少なくとも 1 つの圧電変換器構造体の幅は、同じ前記 1 のアンカ点から前記慣性マスの前記第 2 の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の少なくとも 1 つの圧電変換器構造体の幅とは異なる

請求項 1 ~ 4 のいずれか 1 項に記載の圧電回転共振器。

【請求項 6】

1 のアンカ点から前記慣性マスの前記第 1 の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の各変換器は、面内曲げ用に構成され、1 のアンカ点から前記慣性マスの前記第 2 の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の各変換器は、面外曲げ用に構成されている

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の圧電回転共振器。

【請求項 7】

各コーティングされた懸架部は、面内曲げ用に構成された 1 つの圧電変換器構造体と、面外曲げ用に構成された 1 つの変換器構造体とでコーティングされている

請求項 1 ~ 5 のいずれか 1 項に記載の圧電回転共振器。

【請求項 8】

1 以上のコーティングされた懸架部上の前記圧電変換器構造体は、前記第 1 の取付点から、前記第 1 の取付点からの距離が懸架部の長さの 50 % ~ 70 % に相当する点まで前記懸架部に沿って延在する

請求項 1 ~ 7 のいずれか 1 項に記載の圧電回転共振器。

【請求項 9】

1 以上の第 1 のアンカ点および 1 以上の第 2 のアンカ点を有する基板と、互いに機械的に結合されている第 1 の慣性マスおよび第 2 の慣性マスを備える回転共振器システムであって、前記第 1 の慣性マスは、1 以上の第 1 の懸架部および 1 以上の第 2 の懸架部によって前記第 1 のアンカ点から懸架され、前記第 2 の慣性マスは、1 以上の第 3 の懸架部および 1 以上の第 4 の懸架部によって前記第 2 のアンカ点から懸架され、前記第 1 の懸架部および前記第 3 の懸架部は、それぞれのアンカ点から前記共振器システムの第 1 の長手方向端部に向かって延在し、前記第 2 の懸架部および前記第 4 の懸架部は、それぞれのアンカ点から前記共振器システムの第 2 の長手方向端部に向かって延在し、さらに、前記第 1 の懸架部および前記第 2 の懸架部は、それぞれの第 1 の取付点から前記第 1 のアンカ点に取り付けられ、前記第 3 の懸架部および前記第 4 の懸架部は、それぞれの第 1 の取付点から前記第 2 のアンカ点に取り付けられ、さらに、前記懸架部の少なくとも 1 つは、前記懸架部の少なくとも 1 つが取り付けられている前記慣性マスの振動回転運動を駆動または検出するように構成された圧電変換器構造体でコーティングされている回転共振器システムであって、

前記コーティングされた懸架部の少なくとも 1 つは、第 2 の取付点から、前記第 1 の慣性マスまたは前記第 2 の慣性マスのいずれかにたわみ部を用いて取り付けられ、

前記たわみ部は、前記慣性マスと前記第 2 の取付点との間に作用する曲げモーメントを

10

20

30

40

50

吸収するのに十分な可撓性を有する

回転共振器システム。

【請求項 10】

前記たわみ部は、前記慣性マス面外の並進運動に対して剛性を有するが、前記慣性マス面内の曲げに対して可撓性を有し、前記たわみ部の長さ方向と平行な軸を中心とするらせん状ねじれに対して可撓性を有する

請求項 9 に記載の回転共振器システム。

【請求項 11】

前記たわみ部の高さ / 幅アスペクト比は 2 ~ 6 の範囲にあり、前記たわみ部の長さ / 幅アスペクト比は 2 ~ 6 の範囲にある

請求項 9 に記載の回転共振器システム。

【請求項 12】

2 つの前記慣性マスは、単一のねじりばねまたは単一の曲げばねで機械的に結合され、同期している

請求項 9 ~ 11 のいずれか 1 項に記載の回転共振器システム。

【請求項 13】

2 つの前記慣性マスは、ばねシステムで機械的に結合され、同期しており、前記ばねシステムは、前記第 1 の慣性マスと前記第 2 の慣性マスとの間の第 3 のアンカ点と、前記第 3 のアンカ点から第 1 の横断バーまで延在する第 1 の長手方向ばねと、前記第 1 の横断バーから前記第 1 の慣性マスまで延在する第 2 の長手方向ばねと、前記第 1 の横断バーから前記第 2 の慣性マスまで延在する第 3 の長手方向ばねとを備える

請求項 9 ~ 11 のいずれか 1 項に記載の回転共振器システム。

【請求項 14】

前記ばねシステムは、さらに、前記第 1 の慣性マスと前記第 2 の慣性マスとの間の第 4 のアンカ点と、前記第 4 のアンカ点から第 2 の横断バーまで延在する第 5 の長手方向ばねと、前記第 2 の横断バーから前記第 1 の慣性マスまで延在する第 6 の長手方向ばねと、前記第 2 の横断バーから前記第 2 の慣性マスまで延在する第 7 の長手方向ばねとを備える

請求項 13 に記載の回転共振器システム。

【請求項 15】

第 1 の慣性マスに取り付けられた前記懸架部は、面内変換器のみを備え、第 2 の慣性マスに取り付けられた前記懸架部は、面外変換器のみを備える

請求項 9 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の回転共振器システム。

【請求項 16】

各懸架部の横断幅は、当該懸架部の垂直厚さにほぼ等しく、すべての懸架部の前記横断幅および前記垂直厚さの両方は、ほぼ等しい

請求項 15 に記載の回転共振器システム。

【請求項 17】

各慣性マスに取り付けられた第 1 の懸架部は、少なくとも 1 つの面内変換器を備え、同じ前記慣性マスに取り付けられた第 2 の懸架部は、少なくとも 1 つの面外変換器を備える

請求項 9 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の回転共振器システム。

【請求項 18】

各懸架部は、少なくとも 1 つの面内変換器および少なくとも 1 つの面外変換器を備える

請求項 9 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の回転共振器システム。

【請求項 19】

前記共振器システムは、さらに、前記第 1 の慣性マスまたは前記第 2 の慣性マスの前記振動回転運動を駆動または検出するように構成された圧電変換器構造体でコーティングされた少なくとも 1 つの外部懸架部を備え、前記外部懸架部の一端部はアンカ点に取り付けられ、前記外部懸架部の他端部は前記第 1 の慣性マスまたは前記第 2 の慣性マスにたわみ部を用いて取り付けられている

請求項 9 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の回転共振器システム。

10

20

30

40

50

【請求項 20】

請求項 9 ~ 14 のいずれか 1 項に記載の回転共振器システムを備えるクロック発振器。

【請求項 21】

請求項 15 ~ 19 のいずれか 1 項に記載の回転共振器システムを備えるジャイロスコープ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、MEMS 共振器に関し、より詳細には、圧電作動によって 1 以上のマス要素を回転運動させる、または圧電手段によって 1 以上のマス要素の回転運動を検出する MEMS 共振器に関する。本開示は、さらに、圧電回転 MEMS 共振器と共に実装するジャイロスコープおよびクロック発振器に関する。

10

【背景技術】

【0002】

本開示に記載する共振器は、少なくとも 1 つのばね構造体から懸架されている慣性マス要素を備える。周期的な作動力によって、慣性マス要素を一次振動運動させる。慣性マス要素は、他のマス要素に機械的に結合することができる。

【0003】

図 1 は、MEMS 共振器構造体の簡略化された図を示す。慣性マス 11 は、懸架部 13 によって、固定フレーム 12 から懸架されている。本開示において、「固定」物体とは、上に MEMS 構造体が形成される支持台などの、MEMS 共振器構造体よりはるかに大きな物体、あるいは、はるかに大きな構造体に確実に取り付けられ、この構造体に対していかなる方向にも動くことができない物体を意味する。「アンカ点」という用語は、懸架部などの部分的に可動の物体が固定物体に取り付けられ得る部位を指す。「取付点」という用語は、固定または可動の 2 つの物体が互いに取り付けられている部位を指す。

20

【0004】

本開示において、「懸架」物体とは、ばねまたは梁などのフレキシブル手段によって、固定台に取り付けられている物体を意味する。シリコン系 MEMS 用途では、これらのばねおよび梁は、典型的には少なくとも 1 つの寸法において薄いシリコンの部位を含み、その結果、ばねおよび梁はアクチュエータの動作によって、または、ばねおよび梁が取り付けられている慣性マスの動作によって曲がる、またはねじれるのに十分な可撓性を有する。圧電 MEMS 用途では、これらのばねおよび梁は、圧電変換器によって曲がる、またはねじれるのに十分な可撓性を有するべきである。本開示において、「懸架部」という用語は、可動の慣性マスを固定物体に取り付けるばねまたは梁の一般的な用語として使用する。

30

【0005】

図 1 の慣性マス 11 は、2 つの異なるモードで、図示したその初期休止位置に対して x y 平面内で回転してもよい。本開示において、「面内振動」という用語は、図 1 の z 軸を中心とする回転振動を指す。「面外振動」という用語は、例えば y 軸などの、 x y 平面内の任意の軸を中心とする回転振動を指す。慣性マス 11 の休止位置によって画定される平面（図 1 のフレーム 12 の平面と一致する）は、「マス面」または「慣性マス面」とも呼ぶ。

40

【0006】

本開示の図に示す座標系は、慣性マスの長手方向と平行な y 軸と、 y 軸に直角であり、かつマス面内にある横断方向の x 軸とを含む。本開示において、慣性マスの長手方向の寸法は、典型的にはその横断方向の寸法より大きい。垂直方向の z 軸は、 y 軸および x 軸の両方に直角である。上述のように、マス面は、慣性マスの休止位置によって画定される。言い換えれば、共振器内のマス面は、慣性マスが運動していない時の慣性マスの上面と平行である。本開示において、「面内」回転とはマス面内の回転運動を指し、「面外」回転とはマス面外の回転運動を指す。

50

【 0 0 0 7 】

M E M S 共振器内で慣性マスを運動させる作動力は、典型的には電磁気、静電気または圧電気のいずれかである。圧電作動のセットアップの例を図 2 に示す。この場合、慣性マス 2 1 は、中央開口部と、中央開口部内の固定アンカ点 2 2 とを有するフレームのような形状をしている。慣性マスは、懸架部 2 3 1 および 2 3 2 によってアンカ点 2 2 から懸架されている。各懸架部の一端部は、その第 1 の取付点 2 4 1、2 4 2 でアンカ点 2 2 に取り付けられ、他端部は、その第 2 の取付点 2 5 1、2 5 2 で慣性マスに取り付けられている。懸架部 2 3 1 および 2 3 2 は、より詳細に以下に説明するように、面内振動および面外振動の両方を発生させることができる圧電変換器で少なくとも部分的にコーティングされている。これらの変換器には、例えばアンカ点 2 2 または本目的専用の別個の緩いばねを介して、電気接点が引き付けられてもよい。

10

【 0 0 0 8 】

懸架部上の圧電変換器を使用して、(第 1 に) 慣性マスを運動させ、それを維持し、(第 2 に) 慣性マスの運動を検出することができる。本開示において、「駆動」という接頭語は、慣性マスを回転振動させ、それを維持することに関係する、すべての機械的および電気的手段および方法に用いる。

【 0 0 0 9 】

「感知」という接頭語は、慣性マスの回転振動を検出することに関係する、機械的および電気的手段および方法に用いる。

【 0 0 1 0 】

本開示において、共振器を駆動する圧電変換器を駆動変換器と呼ぶ。駆動変換器の駆動電極に駆動電圧が印加されると、変換器は、変換器が位置する懸架部を曲げる。この曲げ動作によって、慣性マスを運動させる。交流駆動電圧が適切な周波数に設定されると、慣性マスは共振回転振動を受ける。

20

【 0 0 1 1 】

慣性マスの運動を感知する圧電変換器は、本開示において、感知変換器と呼ぶ。感知変換器は、駆動変換器が取り付けられている同じ慣性マスに連結されている懸架部、または、駆動変換器によって駆動される慣性マスに機械的に結合されている他の慣性マスに連結されている懸架部のいずれに取り付けられてもよい。慣性マスの振動運動により、感知変換器が位置する懸架部が曲がり、これによって、変換器の両側にある感知電極に反対符号の電荷蓄積が生じる。振幅が慣性マスの振動運動の振幅に比例し、かつ周波数が慣性マスの共振周波数と同じである感知電圧信号を、感知電極から読み取ることができる。

30

【 0 0 1 2 】

より詳細に以下に説明するように、圧電駆動変換器および圧電感知変換器は、別個の懸架部または同じ懸架部のいずれに位置してもよい。変換器は、時には駆動変換器として、また時には感知変換器として使用されてもよい。本開示において、変換器は、前者の場合には「駆動モード」で、後者の場合には「感知モード」で動作すると言える。

【 0 0 1 3 】

図 3 は、面外曲げ用の曲げ圧電変換器の 3 つの断面図を示す。変換器は、圧電材料の層と、シリコン懸架部 3 1 に配置された 2 つの電極層とを含む。変換器は、x y 平面において長方形の形状を有する。変換器は、第 1 の電極層 3 4 と、圧電材料の層 3 2 と、第 2 の電極層 3 3 とを含む。層 3 4、3 2 および 3 3 は共に、圧電変換器を形成する。駆動電圧が電極に印加されると、シリコン梁 3 1 は x y 平面外に曲がる。反対に、懸架部 3 1 が外力によって x y 平面外に曲がると、電極層 3 3 および 3 4 から感知電圧信号を読み取ることができる。

40

【 0 0 1 4 】

図 4 は、面内曲げ用の曲げ圧電変換器の 3 つの断面図を示す。この変換器は、シリコン梁 4 1 と、1 組の第 1 の電極層 4 4 1 および 4 4 2、すなわち、圧電材料の層 4 2 の上側にある電極層および下側にある電極層とを含む(この場合、上下とは、z 軸の方向を指す)。図に示すように、これらの電極は、それぞれ第 2 の電極層 4 3 1 および 4 3 2 と対を

50

なしている。層 4 4 1、4 2 および 4 3 1 は共に、第 1 の圧電変換器を形成し、層 4 4 2、4 2 および 4 3 2 は共に、第 2 の圧電変換器を形成する。

【 0 0 1 5 】

2 つの変換器に極性が逆の駆動電圧が印加される場合、平均 y 軸ひずみは 0 であり、そのため、変換器は x y 平面外に曲がらない。しかしながら、2 つの変換器は x y 平面内に逆のひずみを生み、これにより、シリコン梁 4 1 がこの平面内で曲がる。変換器が感知変換器として使用される場合、面内曲げにより、2 つの変換器間に電圧差が生じるが、面外曲げでは生じない。

【 0 0 1 6 】

本開示全体にわたって、図 3 および図 4 の図面規約を使用して、それぞれ面外曲げおよび面内曲げの変換器を示す。言い換えれば、懸架部上の単一の長方形を用いて面外変換器を示し、懸架部上の反対色の 2 つの平行な長方形を用いて面内変換器を示す。上に説明したように、実際に構造体が 2 つの変換器を備える分割構造でも、これら 2 つの平行な長方形は主に、単一の「面内変換器」と単数で呼ぶ。変換器の灰色および白色は、極性を示す。

10

【 0 0 1 7 】

圧電層 (3 2、4 2) は、窒化アルミニウム (A l N) 層であってもよく、典型的には数マイクロメートル以下の厚さである。シリコン梁 (3 1、4 1) の厚さは、例えば 5 0 μ m であってもよい。

【 0 0 1 8 】

M E M S 共振器では、慣性マスは剛性が高すぎるため、圧電変換器は典型的に、慣性マスに直接取り付けることができない。その代わりに、上で説明したように、慣性マスが懸架されているばねまたは梁を圧電変換器でコーティングしてもよい。したがって、容量性変換器が典型的に変換しているように、圧電変換器は、慣性マスではなく、ばねもしくは梁への、または、ばねもしくは梁からの運動エネルギーを変換する。これは、懸架部の寸法が圧電共振器において非常に重要になることを意味する。

20

【 0 0 1 9 】

圧電材料の層が外力によって曲げられると、層の一方側に正電荷、他方側に負電荷が蓄積する。周期的に振動する曲げ動作により振動電界が生じ、この振動電界は、感知変換器からの交流感知電圧信号として測定することができる。

30

【 0 0 2 0 】

国際公開第 2 0 1 1 / 1 3 6 9 7 2 号には、慣性マスを中央アンカ点から懸架する懸架部に圧電変換器が配置されている圧電回転共振器が開示されている。

【 0 0 2 1 】

慣性マスが共振振動している場合、感知変換器を保持する懸架部は、必ずしもそれらの全長に沿って一様な曲率で曲がらない。感知変換器の曲げモードは、共振器の共振周波数、懸架部の寸法、および振動する慣性マスへの懸架部の取付方法に依存する。

【 0 0 2 2 】

図 5 は、図 2 に示した従来技術の共振器において、慣性マス 2 1 が x 軸を中心とする面外回転を受け、懸架部 2 3 1 および 2 3 2 が第 1 の取付点 2 4 1、2 4 2 および第 2 の取付点 2 5 1、2 5 2 で可撓性なく取り付けられている場合のそれら懸架部の曲がり方を示す。第 2 の取付点 2 5 1、2 5 2 における可撓性のない取付けにより、懸架部 2 3 1 および 2 3 2 の外側端部はガイド端として運動する。言い換えれば、第 2 の取付点 2 5 1、2 5 2 において、回転する慣性マスから生じる点荷重力によってだけでなく、懸架部を慣性マス 2 1 に対して一定の角度で維持する曲げモーメント荷重によっても、懸架部 2 3 1 および 2 3 2 は影響を受ける。これにより、懸架部 2 3 1 および 2 3 2 は、図 5 に示すように、取付点 2 4 1、2 4 2 と 2 5 1、2 5 2 との間の 2 / 3 のところに、懸架部の表面応力における符号逆転、ひいては対応する変換器の両側における電荷の符号逆転を生じさせる S 字形状に曲がる。図 5 の符号は、懸架部に沿ったその各側の表面応力の符号を表す。懸架部の上面が変換器によってコーティングされている場合、符号は、変換器の各側にお

40

50

ける電荷の符号も表し得る。これは、反対符号の電荷が各感知電極において打ち消される場合、感知電圧信号が低下し、信号対雑音比が低下するため、最適な曲げモードではない。この課題は、1つの懸架部を2つの別個の感知変換器でコーティングし、電荷逆転に対処することによって軽減されてもよいが、これには複雑な接触配置が必要である。あるいは、懸架部の一部分のみが感知変換器でコーティングされてもよいが、これにより、発生した電荷の一部を損失し、ひいては信号対雑音比が低下する。同じ課題が面内回転中にも生じる。可撓性なく取り付けられた懸架部231および232は、慣性マスがz軸を中心として回転する際、xy平面においてS字形状をとる。

【0023】

可撓性のない取付けおよびS字曲げから生じる別の課題は、外力と懸架部の変位との関係が非線形になることである。言い換えれば、曲げは、単一のばね定数で特徴付けられない。駆動変換器で、共振時に高い振幅振動が生じる場合には、振幅が増加すると、この非線形により振動の共振周波数が低下する。この効果は、基準発振器およびジャイロセンサの場合のように、周波数安定性または2つの共振器間の周波数トラッキングを目的とする用途には望ましくない。また、エネルギー損失が増加し、そのため、振動のエネルギーの一部が不可逆的に高調波周波数に変換されるため、非線形により有効Q値は低下する。

【0024】

従来技術の懸架部および取付け部に関する第3の課題は、懸架部の曲げのS字モードによって生じる比較的高いばね定数である。所与のばね寸法に対してばね定数を低下させることは、デバイス面積の縮小を可能にし、より小さいデバイスで同じ共振周波数を達成すると考えられるため有益であろう。懸架部の曲げモードに関係する第1の技術的課題について、感知変換器の観点から上に記載してきた。言い換えれば、慣性マスは、ある特定の方法で懸架部を曲げる外力を生じさせると仮定した。しかしながら、慣性マスの共振振動が決定する曲げモードを懸架部がとらない限り、慣性マスを共振振動させることができないため、同じ技術的課題が駆動変換器に生じる。慣性マスの振動が共振に近づき、最終的に共振に達すると、この振動によって、懸架部の曲げおよび結果として生じる電荷蓄積がほぼ完全に決定される。

【0025】

言い換えれば、駆動変換器の機械的作動、および共振している慣性マスから生じる力は常に、共に作用し、懸架部を共に曲げるが、慣性マスが共振振動する場合、共振している慣性マスから生じる力は、はるかにより強い決定要因である。曲げモードは、共振運動に適合しなければならない。

【0026】

上で概説した技術的課題により、一部において、圧電回転共振器の開発が遅れている。静電駆動共振器および静電感知共振器は、高いバイアス電圧を必要とし、圧電共振器より広い表面積を消費し、動作周波数に反比例する容量性出力信号を生成するにもかかわらず、主流となっている。圧電変換により、これらの点すべてにおいて共振器の性能を改善することができるであろうが、懸架部の設計が非常に重要となる。懸架部の共振曲げモードが、変換器の長さに沿ってより一様な電荷分布を示すならば、圧電変換は、駆動変換器および感知変換器の両方の動作に有益であろう。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0027】

本開示の目的は、上記の欠点を軽減するための装置および方法を提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0028】

本開示の目的は、独立クレームに記載することを特徴とする装置によって達成される。本開示の好ましい実施形態を従属クレームに開示する。

【0029】

本開示は、少なくとも1つのたわみ部を用いて懸架部を慣性マスに取り付け、これによ

10

20

30

40

50

り、慣性マスが運動している時に、慣性マスに取り付けられている懸架部の端部が、この取付点において慣性マスに対して回転することができるという考えに基づく。

【図面の簡単な説明】

【0030】

本開示について、添付図面を参照して、より詳細に説明する。

【図1】図1は、単純な共振器を示す。

【図2】図2は、単純な圧電駆動共振器を示す。

【図3】図3は、懸架部上の面外圧電変換器を示す。

【図4】図4は、懸架部上の面内圧電変換器を示す。

【図5】図5は、慣性マスが共振振動する場合の従来技術の懸架部における曲げモードを示す。 10

【図6】図6は、第1の共振器の実施形態に係る回転共振器を示す。

【図7】図7もまた、第1の共振器の実施形態に係る別の回転共振器を示す。

【図8】図8は、たわみ部の3つの例を示す。

【図9】図9は、たわみ部を示す。

【図10】図10は、慣性マスが面内振動する場合のたわみ部の曲げを示す。

【図11】図11は、慣性マスが面外振動する場合のたわみ部の曲げを示す。

【図12】図12は、慣性マスが共振振動する場合の、たわみ部を用いて慣性マスに取り付けられている懸架部の曲げモードを示す。 20

【図13】図13は、面内回転用共振器を示す。

【図14】図14は、面外回転用共振器を示す。

【図15】図15は、面内回転用共振器を示す。

【図16】図16は、面外回転用共振器を示す。

【図17】図17は、面内回転用共振器を示す。

【図18】図18は、面外回転用共振器を示す。

【図19】図19は、2組の懸架部を有する共振器を示す。

【図20】図20は、2組の懸架部を有する共振器を示す。

【図21】図21は、異なる幅の2つの懸架部を備える共振器を示す。

【図22】図22は、異なる長さの2つの懸架部を備える共振器を示す。

【図23a】図23aは、1つの懸架部に面内変換器を、別の懸架部に面外変換器を備える共振器を示す。 30

【図23b】図23bは、各懸架部に面内変換器および面外変換器の両方を備える共振器を示す。

【図24a】図24aは、面外振動用に構成された共振器システムを示す。

【図24b】図24bは、面内振動用に構成された共振器システムを示す。

【図25】図25は、代替機械的結合の共振器システムを示す。

【図26】図26は、第1のジャイロスコープの実施形態に係るジャイロスコープを示す。

【図27】図27もまた、第1のジャイロスコープの実施形態に係るジャイロスコープを示す。 40

【図28】図28もまた、第1のジャイロスコープの実施形態に係るジャイロスコープを示す。

【図29】図29は、第2のジャイロスコープの実施形態に係るジャイロスコープを示す。

【図30】図30もまた、第2のジャイロスコープの実施形態に係るジャイロスコープを示す。

【図31】図31もまた、第2のジャイロスコープの実施形態に係るジャイロスコープを示す。

【発明を実施するための形態】

【0031】

(第1の共振器の実施形態)

第1の共振器の実施形態では、本開示は、1以上のアンカ点を有する基板と、第1の長手方向端部および第2の長手方向端部を有する慣性マスとを備える回転共振器に関する。慣性マスは、1以上のアンカ点から慣性マスの第1の長手方向端部に向かって延在する1以上の懸架部によって、および、同じ1以上のアンカ点から慣性マスの第2の長手方向端部に向かって延在する1以上の懸架部によって、1以上のアンカ点から懸架されている。各懸架部は、第1の取付点からそのアンカ点に、および、第2の取付点から慣性マスに取り付けられている。1以上の懸架部は、慣性マスの振動回転運動を駆動または検出するように構成された圧電変換器構造体でコーティングされている。1以上のコーティングされた懸架部は、その第2の取付点から慣性マスにたわみ部を用いて取り付けられている。

10

【0032】

本開示に記載する圧電変換器が感知モードで使用される場合、変換器静電容量が、通常数pFとなる、外部接続の静電容量と増幅器の入力静電容量との合計に等しい時に、最良の信号対雑音比が達成され得る。変換器の静電容量は、その面積および圧電層の厚さによって決定される。圧電層が0.8μm厚のAlN層である場合、xy平面における変換器のアスペクト比(言い換えれば、x方向のその横断幅で割ったy方向のその長手方向の長さ)は、10~30の範囲、好ましくは15~25の範囲とし、アスペクト比(2~20、好ましくは5~10)および厚さ(20μm~50μm)が実用範囲にある慣性マスをを用いて、典型的なMEMS共振器周波数(20kHz~50kHz)において2pF~5pFの範囲の変換器静電容量を達成すべきであることが示され得る。xy平面における必要変換器面積は、0.8μm厚のAlN層で5pFの静電容量を達成するためには約0.05mm²となる。この面積は、例えば、1000μm×50μmの寸法で得られてもよい。したがって、本開示に記載する圧電変換器、および、圧電変換器がコーティングされている懸架部は、アスペクト比が10~30の範囲、好ましくは15~25の範囲の長方形の形状を有する。

20

【0033】

本開示で示すように、慣性マスが大きい場合、複数の懸架部をマスに取り付けることができるため、慣性マスのサイズおよび寸法はより自由に選択されてもよい。また、本開示で描いた慣性マスは長方形の形状を有するが、それらのアスペクト比は、変換器および懸架部のアスペクト比より小さくてもよい。慣性マスは、アンカ点の両側にある2つの長手方向端部を有してもよい。長手方向端部は、y方向に長手方向の長さだけ離れている。また、慣性マスは、x方向に横断幅だけ離れた、アンカ点の両側にある2つの横断方向側面を有してもよい。しかしながら、いくつかの実施形態では、慣性マスは、非対称であってもよく、その結果、アンカ点の片側にある1つの横断方向側面のみ有する。

30

【0034】

図6は、この第1の共振器の実施形態に係る回転共振器を示す。共振器は、2つの懸架部631および632によってアンカ点62から懸架された慣性マス61を含む。アンカ点62は、慣性マスの中央開口部内に位置する。懸架部631および632は、対をなしている。慣性マスは、第1の長手方向端部691および第2の長手方向端部692を有する。

40

【0035】

各懸架部631、632は、その第1の取付点641、642からアンカ点62に取り付けられている。各懸架部631、632は、その第2の取付点651、652から慣性マス61にたわみ部661、662で取り付けられている。懸架部631および632上の圧電変換器は、図4の上部に示すように面内回転用に構成されている。

【0036】

図7は、同じ構成要素を有する回転共振器を示し、圧電変換器は、図3の上部に示すように面外回転用に構成されている。懸架部731および732上の変換器の色付けによって示すように、変換器の両方に電圧信号が印加されると、慣性マス71の一端部が上がり、他端部が下がるように、変換器は逆の極性を有する。繰り返すが、各懸架部731、7

50

32は、その第1の取付点741、742からアンカ点72に取り付けられ、各懸架部は、その第2の取付点751、752から慣性マス71にたわみ部761、762で取り付けられている。慣性マスは、第1の長手方向端部791および第2の長手方向端部792を有する。

【0037】

「たわみ部」という用語は、曲げまたはねじりによって、慣性マスと第2の取付点との間に作用する曲げモーメントを吸収するのに十分な可撓性を有するエッチングされたシリコン構造体を指す。言い換えれば、たわみ部661、662および761、762により、第2の取付点651、652および751、752と、慣性マス61および71との間の曲げモーメントが、それぞれほぼ0まで低下する。そのため、図5に示したように、たわみ部によって、表面応力の符号逆転、ひいては電荷の符号逆転をなくすことで感知変換器の両側間の電荷分布の差が縮まる。

10

【0038】

z方向のたわみ部の高さは、 Z_F と表してもよい。この高さは、慣性マスおよび懸架部の厚さと等しくてもよい。いくつかの実用的な構成では、これらの高さは50 μm 程度である。

【0039】

X_F は、ここではx方向のたわみ部の長さを示す。図8は、たわみ部の3つの例を示す。たわみ部861は、慣性マス811の中央開口部の幅にわたる。たわみ部862は、慣性マス812の中央開口部の幅の半分にわたる。たわみ部863は、長さ X_F が慣性マス813の中央開口部の幅の半分以上を越える蛇行形状を有する。取付点に近い慣性マスの中央開口部の幅は、例えば、慣性マス811、812、813の幅の30%~70%であってもよい。 Y_F は、y方向のたわみばねの幅である。図8に示したたわみ部のいずれも、以下に示す実施形態に使用することができる。

20

【0040】

たわみ部の厚さ Z_F は、xy平面外の並進運動に対してたわみ部の剛性を高める。それらの狭い幅 Y_F によって、懸架部631および632の面内曲げが第2の取付点651、652を介して慣性マスに伝わる場合、たわみ部はxy平面内でたわみ（またはその逆）、懸架部731および732の面外運動が第2の取付点751、752を介して慣性マスに伝わる場合、たわみ部はx軸を中心としてらせん状にねじれる（またはその逆）。

30

【0041】

言い換えれば、たわみ部はマス面外の並進運動に対して剛性を有するが、マス面内の曲げに対して可撓性を有し、また、たわみ部の長さ方向と平行な軸を中心とするらせん状ねじれに対して可撓性を有する。

【0042】

Z_F / Y_F アスペクト比および X_F / Y_F アスペクト比によって、たわみ部が第2の取付点で曲げモーメントを吸収し得る程度が決まる。アスペクト比が大きければ、曲がりやすく、ねじれやすいが、 Y_F は、製造しやすく、かつ、曲がったり、ねじれたりした時に生じる機械的なひずみにたわみ部が耐え得るほど十分大きいままでなければならぬ。したがって、アスペクト比は、最適な下限値および上限値の両方を有する。

40

【0043】

図8の蛇状たわみ部863の場合、適切なアスペクト比は、 Z_F / Y_F および X_F / Y_F として計算されてもよい。ここで、 $X_F = X_{F1} + X_{F2} + X_{F3} \dots$ は、蛇状たわみ部のすべての構成要素のx方向における長さの合計である。

【0044】

本開示では、 Z_F / Y_F アスペクト比を高さ/幅アスペクト比と呼び、 X_F / Y_F アスペクト比および X_F / Y_F アスペクト比を長さ/幅アスペクト比と呼ぶ。

【0045】

第2の取付点における曲げモーメントの部分的な吸収は、高さ/幅アスペクト比および長さ/幅アスペクト比が2に等しい場合に達成されてもよい。曲げモーメントのほぼ完全

50

な吸収は、高さ／幅アスペクト比および長さ／幅アスペクト比が4よりも大きい場合に達成されてもよい。高さ／幅アスペクト比は、製造可能性または応力耐久性を損なうことなく、10まで増加させることができる。長さ／幅アスペクト比は、そのような製造限界値または強度限界値を有しないが、ここで、全ばね係数が影響を受けないように、長さは懸架長さよりはるかに短くしなければならないという決まりがある。高さ／幅アスペクト比が10よりも大きければ、第2の取付点における曲げモーメントをすべて吸収するが、製造可能性は低下し、応力耐久性も低下し、歩留まり損失および耐衝撃性の低下を引き起こし得る。

【0046】

たわみ部のたわみおよびねじれ運動の機構は、たわみ部の寸法および第2の取付点の寸法に依存する。これについて、図8のたわみ部861を描いた図9～図11に概略的に示す。この場合、たわみ部861はz方向において慣性マスと同じ厚さであり、そのため、第2の取付点はz方向において点851から点852まで延在し、一方、たわみ部861は881から882まで、および871から872まで、慣性マス811に取り付けられている。89は、懸架部831の端部にある任意選択の狭いシリコンブリッジである。懸架部831は、狭いブリッジなしで、その全幅に沿ってたわみ部に取り付けることもできるであろう。

【0047】

図10は、xy平面で見た、慣性マスが面内回転を受ける場合のたわみ部861の曲げを概略的に示す。第2の取付点の幅は、明瞭さを高めるために誇張しており、同じ理由により、図10に示す回転角は、慣性マスがMEMS共振器内で通常得るであろう角度よりはるかに大きい。たわみ部861は、点871～872および点881～882において、運動している慣性マスに取り付けられたままであるが、曲げモーメントが慣性マスから第2の取付点851～852まで、および懸架部831まで前方へ伝わらないように、中間で曲がる。

【0048】

図11は、図9と同じ角度から見た、慣性マスがx軸を中心とする時計回りの面外回転を受けている場合のたわみ部861の曲げを概略的に示す。たわみ部861は、x軸を中心としてらせん状にねじれ、その結果、第2の取付点の上部851および下部852は、y軸上の異なる方向に移動する。たわみ部861の両端部には、たわみ部の上部コーナー871、881が、下部コーナー872、882と整列したままである。図11に示した回転角は、慣性マスがMEMS共振器内で通常得るであろう回転角より大きい。たわみ部861は中間でねじれ、その結果、曲げモーメントが慣性マスから第2の取付点851～852まで、および懸架部831まで前方へ伝わらない。面内変換器を有する懸架部831を図8に示すが、意図される回転モードである場合、懸架部831は面外変換器でコーティングされるであろう。

【0049】

たわみ部761、762のらせん状ねじれにおける技術的效果を図12に示す。たわみ部761、762および懸架部731、732の両方は、y方向において慣性マス71と実際同じ厚さであってもよいが、明瞭化のために、たわみ部は黒い点のみで示し、懸架部は比較的薄く描いた。たわみ部761、762のらせん状ねじれにより、懸架部731は、曲率が懸架部の全長に沿って同じ方向にある形状をとることができる。

【0050】

その結果、変換器の両側の懸架部にかかる表面応力、ひいては蓄積電荷は、懸架部の全長に沿って同じ符号を有する。これにより、慣性マスをより有効に駆動することができ、反対に、簡略化された変換器形状で、より強い感知信号を感知モードで検出することができる。変換器は、曲げモードの懸架部の長さにおける大部分に強く結合されており、懸架部の振動は、変位が大きくても線形である。線形性により、機械損失が増加したり、発振周波数が変化したりすることなく、慣性マスの振動振幅を増大させやすくなる。

【0051】

10

20

30

40

50

図12の「+」および「-」の符号は、懸架部の各側の表面応力の符号を示す。図5のように、符号は電荷分布の符号も示す。明瞭化のために、懸架部の全厚にわたって示したが、実際には、電荷分布は変換器の厚さにわたってのみ延在する。

【0052】

本開示の装置で得られる利点には、懸架部の長さに沿った符号逆転を示さない懸架部電荷分布、ばね定数の低い懸架部曲げモード、ひいては所与の共振周波数における高い圧電変換器静電容量、共振器の小型化が挙げられる。ジャイロスコープおよびクロック発振器の用途では、これらの利点により、低い運動抵抗、高い結合係数、確実かつ高速の振動スタートアップ、および感知電圧信号の高い信号対雑音比が容易になる。また、たわみ部は、懸架部の長さ方向に（図12のy方向に）たわむため、懸架部の応力緩和が容易になり、これにより、共振器の線形性が大幅に向上する。

10

【0053】

表面応力、電荷分布、応力緩和および線形性についての同じ考察が、慣性マス61をz軸を中心として面内回転させる場合の図6における共振器および懸架部に当てはまる。

【0054】

図12に示すように、変換器の電荷密度は、示した曲げモードにおいて、第2の取付点751の近くよりも第1の取付点741に近い方が高くてもよい。これは、懸架部731が第2の取付点の近くで曲がるよりも第1の取付点の近くで曲がる方が曲率が大きい場合に起こる。この理由により、変換器が、第1の取付点により近い端部から始まり、例えば懸架部の長さの50%~70%を覆うように変換器を短くするのが有益であり得る。言い

20

【0055】

懸架部と慣性マスとの間のたわみ部は、異なる形の慣性マスで実装されてもよい。慣性マスの重心は、所望の回転軸上に位置することが好ましいが、これは絶対条件ではない。図13は、重心が、長手方向軸に垂直な方向において、懸架部1331、1332およびアンカ点132からずれている面内回転用共振器を示す。図14は、面外回転用の同様の共振器を示す。参考番号131~132、1331~1332、1341~1342、1351~1352、1361~1362、1391~1392、141~142、143

30

【0056】

1~1432、1441~1442、1451~1452、1461~1462および1491~1492は、それぞれ図6および図7の番号61~62、631~632、641~642、651~652、661~662、691~692、71~72、731~732、741~742、751~752、761~762および791~792と同じ要素を示す。

アンカ点は、図13および図14に示した共振器の重心と一致しない。慣性マスは、アンカ点および懸架部が位置する中央開口部を有する。重心は、図14に示した共振器の回転軸上にあるが、図13に示した共振器の回転軸上にはない。したがって、図13に示した共振器の振動運動に線形並進が重なる。慣性マスが対称で、重心が回転軸上にあることは一般に好ましいが、面積最小化または共振器のすぐ近くにある他の構成要素に関係する理由により、時には図13および図14の構造などの非対称構造がより好ましくなり得る。

40

【0057】

他の代替的な非対称形状を図15および図16に示す。繰り返すが、参考番号151~152、1531~1532、1541~1542、1551~1552、1561~1562、1591~1592、161~162、1631~1632、1641~1642、1651~1652、1661~1662および1691~1692は、それぞれ図6および図7の番号61~62、631~632、641~642、651~652、661~662、691~692、71~72、731~732、741~742、751

50

～752、761～762および791～792と同じ要素を示す。慣性マス151および161は、アンカ点の片側に1つの横断方向側面150、160しか備えていないため、非対称である。アンカ点は、負のx方向に長手方向端部を延在させることによって、重心と一致させることができる。

【0058】

さらなる代替形状を図17および図18に示す。繰り返すが、参考番号171～172、1731～1732、1741～1742、1751～1752、1761～1762、1791～1792、181～182、1831～1832、1841～1842、1851～1852、1861～1862および1891～1892は、それぞれ図6および図7の番号61～62、631～632、641～642、651～652、661～662、691～692、71～72、731～732、741～742、751～752、761～762および791～792と同じ要素を示す。これらの共振器は、重心がアンカ点172および182と一致する任意の形状を示す。慣性マス171および181は、各コーナーに突部を有し、これらの突部により、慣性マスのサイズは大きくなる。アンカ点172および182に対して対称であることは、依然として重心がアンカ点に存在することを意味する。回転軸もまた、重心を通る。

10

【0059】

上に例示した様々な形状のたわみ部および慣性マスのいずれも、本開示に記載する実施形態のいずれにも使用することができる。

【0060】

(第2の共振器の実施形態)

第2の共振器の実施形態では、回転共振器内の慣性マスは、3以上の懸架部によって1以上のアンカ点から懸架されている。第1の共振器の実施形態のように、懸架部は、第1の取付点から1以上のアンカ点に取り付けられ、懸架部の少なくとも1つは、慣性マスの振動回転運動を駆動または検出するように構成された圧電変換器構造体でコーティングされている。たわみ部により、コーティングされた懸架部の第2の取付点が慣性マスに取り付けられている。

20

【0061】

圧電変換器構造体でコーティングされた懸架部の数を増やすことにより、慣性マスを広げてそのサイズを大きくすることができる。例えば図7にあるような2つの懸架部を用いると、懸架部の長手方向軸の周りの回転慣性は、慣性マスを広げることにより増加し、垂直の面外モードの共振周波数は低くなり、共振器の意図した動作に干渉し得るであろう。面内でそれら同士がいくらか離れている3以上の懸架部によって、このモードの有効ばね定数をはるかに高くすることができ、そのため、妨害の影響を緩和することができる。また、圧電変換器構造体でコーティングされた懸架部の数を増やすことは、変換器が共振器の駆動に使用される場合には作動振幅を増大させ、反対に、変換器が共振器の振動の感知に使用される場合には信号を強くする。

30

【0062】

懸架部間が面内で離れていることで面内回転モードのばね定数が非常に大きくなるため、懸架部の数を3以上に増やすことは、面外共振器にのみ実用的である。

40

【0063】

図19は、第2の共振器の実施形態における1つの実装を示す。慣性マス191は、2つのアンカ点1921および1922が位置する2つの開口部を備えてもよい。この例では、圧電変換器構造体でコーティングされた4つの懸架部1931、1932、1933および1934が、アンカ点1921および1922から慣性マス191を懸架している。懸架部1931および1932が1つの対をなし、懸架部1933および1934が別の対をなしている。他の共振器の実施形態のように、図19において、すべての懸架部がコーティングされているが、実施形態はまた、懸架部のうちの1つまたはいくつかのみをコーティングすることによって実装されてもよい。図19のすべての取付点1941～1944および1951～1954は、第1の共振器の実施形態に記載した任意の方法で実

50

装されてもよい。慣性マスは、第1の長手方向端部1991および第2の長手方向端部1992を有する。

【0064】

図20は、慣性マス201が1つのアンカ点202を有する開口部を1つのみ備える第2の共振器の実施形態における代替実装を示す。この例では、繰り返すが、4つの懸架部2031~2034が、アンカ点202から慣性マス201まで延在し、2つの対をなしている。しかしながら、この構成では、懸架部の数はまた、アンカ点202の第1の側では2、アンカ点202の第2の側では1にもすることができるであろう。第1の側または第2の側のいずれかに、1を超えない懸架部が使用されている場合、この懸架部は、他方側の2つの懸架部のいずれかよりx方向に広くてもよい。懸架部の数は、対応する変更により任意の奇数または偶数に増加してもよい。図20のすべての取付点2041~2044、2051~2054およびたわみ部2061~2064は、第1の共振器の実施形態に記載の任意の方法で実装されてもよい。慣性マスは、第1の長手方向端部2091および第2の長手方向端部2092を有する。

【0065】

図3に対応する色付けによって示すように、図19および図20に示す圧電変換器は、面外曲げを駆動および/または検出してもよい。アンカ点の少なくとも1つの側に複数の懸架部を有する構造は、典型的に、低周波数での面内回転共振に対して剛性が高すぎる。

【0066】

(第3の共振器の実施形態)

第3の共振器の実施形態では、アンカ点から慣性マスの第1の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の少なくとも1つの圧電変換器構造体の長さは、同じアンカ点から慣性マスの第2の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の少なくとも1つの圧電変換器構造体の長さとは異なる。あるいは、アンカ点から慣性マスの第1の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の少なくとも1つの圧電変換器構造体の幅は、同じアンカ点から慣性マスの第2の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の少なくとも1つの圧電変換器構造体の幅とは異なる。懸架部は、第1の取付点から少なくとも1つのアンカ点に取り付けられ、懸架部の少なくとも2つは、慣性マスの振動回転運動を駆動または検出するように構成された圧電変換器構造体でコーティングされている。たわみ部により、コーティングされた懸架部の第2の取付点が慣性マスに取り付けられている。

【0067】

前述の2つの共振器の実施形態では、アンカ点は、慣性マスの重心、ならびに/または懸架部および他の構造体を含んだ共振器全体の合成重心にほぼ位置していた。回転軸もまた、前述の2つの実施形態では重心を通過していた。しかしながら、また、回転軸を重心に保持しながら、アンカ点を共振器の重心から離して配置してもよい。これは、ばね定数が異なる懸架部を共振器の両側に実装することによって、この第3の共振器の実施形態で達成される。

【0068】

図21は、1つは面内曲げ用、1つは面外曲げ用である、第3の共振器の実施形態における2つの実装を示す。この場合、重心は、アンカ点212の片側に位置し、懸架部および変換器は、アンカ点の当該側の方が対向側よりも幅広くてもよい。懸架部2131および2132は、対をなしている。両方の共振器において、アンカ点212の右側の懸架部2131は、アンカ点212の左側の懸架部2132よりx方向に広い。それに対応して、懸架部上にコーティングされた変換器の寸法に差があってもよい。幅の差は、ばね定数、ならびに懸架部および変換器の変換強度の差につながる。幅を適切に選択することで、重心がアンカ点と一致しなくても、図示した共振器を、共振器の重心を通る軸を中心として回転振動させてもよい。回転軸は、図21において点線で示す(上部共振器では、回転軸はy軸と平行である)。言い換えれば、異なる幅の変換器により、アンカ点を通らない回転軸に対する非対称慣性マスのバランスのとれた回転が容易になる。

【 0 0 6 9 】

第3の共振器の実施形態を実装する別の方法を図22に示す。両方の共振器では、アンカ点222の右側の懸架部2231は、アンカ点222の左側の懸架部2232よりy方向に短い。それに対応して、懸架部上にコーティングされた変換器の寸法に差があってもよい。長さの差は、ばね定数、ならびに共振器の両側の懸架部および変換器の変換強度の差につながる。長さを適切に選択することで、アンカ点が重心になくても、図示した共振器を、共振器の重心を通る軸を中心として回転振動させることができる。回転軸は、図22において点線で示す（上部共振器では、回転軸はy軸と平行である）。言い換えれば、異なる長さの変換器により、アンカ点を通らない回転軸に対する非対称慣性マスのバランスのとれた回転が容易になる。

10

【 0 0 7 0 】

第3の実施形態は、第2の実施形態と組み合わせてもよく、その結果、ある特定の長さ/幅の複数の変換器がアンカ点の一方側に実装され、異なる長さ/幅の1以上の変換器が他方側に実装される。

【 0 0 7 1 】

（第4の共振器の実施形態）

第4の共振器の実施形態では、アンカ点から慣性マスの第1の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の各変換器は、面内曲げ用に構成され、アンカ点から慣性マスの第2の長手方向端部に向かって延在するコーティングされた懸架部上の各変換器は、面外曲げ用に構成されている。あるいは、各コーティングされた懸架部は、面内曲げ用に構成された1つの圧電変換器構造体と、面外曲げ用に構成された1つの圧電変換器構造体とでコーティングされてもよい。懸架部は、第1の取付点から少なくとも1つのアンカ点に取り付けられ、たわみ部により、コーティングされた懸架部の第2の取付点が慣性マスに取り付けられている。

20

【 0 0 7 2 】

これらの配置により、圧電回転共振器を作動させ、面内モードおよび面外モードで同時に振動させることができる。面内変換器および面外変換器は、図23aに示すように別個の懸架部上に、または、図23bに示すように同じ懸架部上に配置されてもよい。図23aでは、面外振動用変換器が懸架部2331上にコーティングされ、面内振動用変換器が懸架部2332上にコーティングされている。図23bでは、各種類1つの変換器が各懸架部2333および2334上にコーティングされている。各図では、慣性マス231は、第1の長手方向端部2391および第2の長手方向端部2392を有する。

30

【 0 0 7 3 】

面内振動モードおよび面外振動モードの共振周波数は、少なくとも懸架部の厚さおよび幅に依存する。懸架部の厚さおよび幅がアンカ点232の両側で等しい場合、通常、共振周波数もほぼ等しい。しかしながら、各振動モードにおけるたわみ部2361～2364の挙動により、わずかなずれがあり得る。2つの振動モードにおける共振周波数の検出されずれば、共振周波数が等しくなるように、懸架部の幅および厚さを少し調整することで補償されてもよい。

【 0 0 7 4 】

（第1の共振器システムの実施形態）

第1の共振器システムの実施形態では、回転共振器システムは、1以上の第1のアンカ点および1以上の第2のアンカ点を有する基板と、互いに機械的に結合されている第1の慣性マスおよび第2の慣性マスとを備える。第1の慣性マスは、1以上の第1の懸架部および1以上の第2の懸架部によって第1のアンカ点から懸架され、第2の慣性マスは、1以上の第3の懸架部および1以上の第4の懸架部によって第2のアンカ点から懸架されている。第1の懸架部および第3の懸架部は、それぞれのアンカ点から共振器システムの第1の長手方向端部に向かって延在し、第2の懸架部および第4の懸架部は、それぞれのアンカ点から共振器システムの第2の長手方向端部に向かって延在する。第1の懸架部および第2の懸架部は、それらの第1の取付点から第1のアンカ点に取り付けられ、第3の懸

40

50

架部および第4の懸架部は、それらの第1の取付点から第2のアンカ点に取り付けられている。懸架部の少なくとも1つは、懸架部の少なくとも1つが取り付けられている慣性マスの振動回転運動を駆動または検出するように構成された圧電変換器構造体でコーティングされ、コーティングされた懸架部の少なくとも1つは、その第2の取付点から第1の慣性マスまたは第2の慣性マスのいずれかにたわみ部を用いて取り付けられている。

【0075】

単一の慣性マスを有する共振器は、外部振動から生じる乱れに弱い。回転共振器は、線形外部振動に影響を受けないが、依然として回転振動に弱い。回転共振器はまた、慣性懸架部と共振器の固定台とが機械的に結合されているため、音響損失を生じ得る。この結合は、懸架部によってアンカ点、ひいては固定台にかかるトルクによるものであり、固定台は、実際には全体的に固定されておらず、大きいが無限ではない質量、ひいては有限の慣性モーメントを有する。固定台が多少でも回転することができる場合、エネルギーが共振器から漏れ、固定台の支持部が、接着剤または他の消音材料によって取り付けられているか、プラスチックまたは複合材料などの消音材料に取り付けられているならば、熱に変換され得る。その結果、取付材料の特性に応じて、共振器のQ値は低下し、大きく変化し得る。これらの課題は、2つの慣性マスを含む共振器システムで解決されてもよい。2つの慣性マスは、互いに機械的に結合され、同期して振動してもよい。ロバスト性の向上および損失の低減は、2つの慣性マスを逆位相振動させることによって得られてもよく、この場合、いかなる時も一方のマスが所与の軸を中心として時計回りに回転すると、他方が等しい角速度で、平行な軸を中心として反時計回りに回転し、逆の場合も同じである。2つの共振器によって固定台にかかるトルクは、等しいが逆であり、打ち消し合う。圧電変換器から差動信号を読み取ることによって、同じ利点が感知側で得られてもよい。各共振器への外部振動の影響は等しく、外部振動は差動読取値によって打ち消し合う。

【0076】

図24aおよび図24bは、2つの共振器システムを示す。各共振器システムは、第1の長手方向端部2491および第2の長手方向端部2492を有する。図24aの共振器システムは、面外振動用に構成されている。第1の懸架部2431および第4の懸架部2434は、一方の極性の変換器でコーティングされており、第2の懸架部2432および第3の懸架部2433は、逆の極性の変換器でコーティングされている。2つの慣性マス2411および2412は、例えば単一のねじりばね2471で互いに機械的に結合され、同期してもよい。また、他の結合機構が使用されてもよい。すべての変換器が同じ駆動電圧信号で駆動されると、この変換器セットアップは、2つの慣性マス2411および2412の逆位相振動を引き起こし、その結果、一方のマスがx軸を中心として時計回りに回転する場合、他方のマスが反時計回りに回転し、逆の場合も同じである。次いで、差動感知電圧信号を変換器から読み取ることができる。あるいは、第1の懸架部2431および第3の懸架部2433が一方の極性の変換器でコーティングされ、第2の懸架部2432および第4の懸架部2434が逆の極性の変換器でコーティングされている場合、第3の懸架部また第4の懸架部上の変換器に印加される信号と180°の位相差で分離されている駆動電圧信号を第1の懸架部および第2の懸架部上の変換器に印加することによって、2つの慣性マス2411および2412を逆位相振動させてもよい。

【0077】

反対に、図24bの共振器システムは、面内振動用に構成されている。変換器は、第1の懸架部2435および第3の懸架部2437上にはある順番に、第2の懸架部2436および第4の懸架部2438上には逆の順番にコーティングされている。2つの慣性マス2413および2414は、例えば単一の曲げばね2472で互いに機械的に結合され、同期してもよい。駆動電圧を適切に選択することで、一方のマスがz軸を中心として時計回りに回転する場合、他方が反時計回りに回転し、逆の場合も同じである。駆動電圧がそれに応じて調整される場合、4つの懸架部すべてが同じ順番に変換器でコーティングされてもよい。

【0078】

10

20

30

40

50

前述の共振器の実施形態に記載したいかなる共振器およびたわみ部の構成も、第1の共振器システムの実施形態および第2共振器システムの実施形態に実装することができる。

【0079】

(第2の共振器システムの実施形態)

また、共振器システム内の共振器は、例えば、両方の共振器が同じ位相で振動する共通モード振動を抑制するために、より複雑な相互連結構造で互いに機械的に結合され、同期してもよい。

【0080】

第2の共振器システムの実施形態では、2つの慣性マスは、ばねシステムで機械的に結合され、同期しており、ばねシステムは、第1の慣性マスと第2の慣性マスとの間の第3のアンカ点と、第3のアンカ点から第1の横断バーまで延在する第1の長手方向ばねと、第1の横断バーから第1の慣性マスまで延在する第2の長手方向ばねと、第1の横断バーから第2の慣性マスまで延在する第3の長手方向ばねとを備える。ばねシステムは、さらに、第1の慣性マスと第2の慣性マスとの間の第4のアンカ点と、第4のアンカ点から第2の横断バーまで延在する第5の長手方向ばねと、第2の横断バーから第1の慣性マスまで延在する第6の長手方向ばねと、第2の横断バーから第2の慣性マスまで延在する第7の長手方向ばねとを備える。

【0081】

図25は、この第2の実施形態に係る共振器システムを示す。ばねシステムは、共振器システムの一方の長手方向端部のみに、または両端部に構造体を備えてもよい。後者の代替案を図25に示す。

【0082】

第1の慣性マス2511は、第1の懸架部2531および第2の懸架部2532からの第1のアンカ点2521から懸架されている。第2の慣性マス2512は、第3の懸架部2533および第4の懸架部2534からの第2のアンカ点2522から懸架されている。前述の実施形態のように、懸架部は、それらの第2の取付点2551~2554から第1の慣性マス2511および第2の慣性マス2512にたわみ部2561~2564で取り付けられてもよい。

【0083】

この場合、ばねシステムは、追加の中央アンカ点2523および2524を備え、図25に示すように、これらのアンカ点には、第1の長手方向ばね2571および第4の長手方向ばね2574の一端部が取り付けられてもよい。第1の長手方向ばね2571および第4の長手方向ばね2574の他端部は、それぞれ第1の横断バー2581および第2の横断バー2582に取り付けられてもよい。第2の長手方向ばね2572は、一端部から第1の横断バー2581に、および、その他端部から第1の慣性マス2511に取り付けられてもよい。第3の長手方向ばね2573は、一端部から第1の横断バー2581に、および、その他端部から第2の慣性マス2512に取り付けられてもよい。第5の長手方向ばね2575は、一端部から第2の横断バー2582に、および、その他端部から第1の慣性マス2511に取り付けられてもよい。第6の長手方向ばね2576は、一端部から第2の横断バー2582に、および、その他端部から第2の慣性マス2512に取り付けられてもよい。

【0084】

第2、第3、第5、および第6の長手方向ばね2572~2573および2575~2576は、それぞれ慣性マス2511~2512の、第3のアンカ点および第4のアンカ点とは反対の側面に取り付けられてもよい。これを図25に示す。あるいは、第2、第3、第5および第6の長手方向ばね2572~2573および2575~2576は、慣性マス2511~2512の、各慣性マスの長手方向中央線により近いところに取り付けられてもよい。

【0085】

図に示すように、ばね2571~2576および横断バー2581~2582は、一方

10

20

30

40

50

向において狭い。それらのアスペクト比が高いほど、共通モードの抑制の効率が良い。また、アスペクト比が高い場合、所望の振動モードの総ばね定数が同期の影響をあまり受けないため、高アスペクト比が好ましい。ばねおよび横断バーのアスペクト比は、8～12の範囲が好ましいが、3.4のアスペクト比であっても、ばね定数を10%を超えてまで変更することなく、共通モード振動を著しく抑制することができる。

【0086】

長手方向ばね2571～2576は、y軸を中心とする面内曲げおよびねじりに対して可撓性を有し得るが、面外曲げに対して剛性を有する。横断バー2581～2582は、すべての曲げモードおよびねじりモードでは剛性を有してもよいが、面内曲げにはある程度の可撓性が与えられてもよい。特に、ばね2572～2573および2575～2576の取付点が各慣性マスの長手方向中央線上にない場合、面内曲げに対する可撓性が必要とされてもよい。また、横断バーの可撓性により、面内ばね作用の線形性が改善され得る。

【0087】

(第1のジャイロスコープの実施形態)

前述した2つの共振器システムの実施形態のいずれかに係る共振器システムは、2つの直交共振モードを可能にするように構成される場合、および、少なくとも2つの変換器、すなわち、駆動運動させるための変換器と、ジャイロスコープが角運動を受ける際のコリオリの力から生じる二次回転振動運動を感知するための変換器とを備える場合、ジャイロスコープに実装されてもよい。前述の共振器の実施形態に記載したいかなる共振器およびたわみ部の構成も、以下のジャイロスコープの実施形態に実装することができる。一般的に、前述の実施形態に係る共振器をジャイロスコープに使用する利点は、駆動変換器内で高い結合係数が得られ、感知変換器内で大信号が得られることである。

【0088】

いくつかの変換器構成がジャイロスコープにおいて可能である。図26～図28は、第1のジャイロスコープの実施形態に係るジャイロスコープ内の3つの代替変換器構成を示す。

【0089】

図26は、第1の懸架部2631および第2の懸架部2632上の駆動変換器によって、第1の慣性マス2611を回転面内振動させることができる共振器システムを有するジャイロスコープを示す。曲げばね267は、この面内振動を第2の慣性マス2612に結合する。また、他の結合機構が使用されてもよい。慣性マス上の白色矢印で示すように、両方の慣性マス2611および2612は、同じ面内回転振幅を得てもよい。次いで、ジャイロスコープがy軸を中心とする回転を受ける場合、コリオリの力は、x軸を中心とする二次回転振動を引き起こす。この振動は、第3の懸架部2633および第4の懸架部2634上の感知変換器によって検出および測定されてもよい。この場合、第1の慣性マス2611に取り付けられた第1の懸架部2631および第2の懸架部2632は、面内変換器のみを備え、第2の慣性マス2612に取り付けられた第3の懸架部2633および第4の懸架部2634は、面外変換器のみを備える。

【0090】

また、第3の懸架部2633および第4の懸架部2634上の変換器は駆動変換器として使用されてもよく、第1の懸架部2631および第2の懸架部2632上の変換器は感知変換器として使用されてもよい。しかしながら、面外変換器は、通常、面内変換器より良好な電気機械的結合を有するため、感知変換器として使用することが好ましい場合がある。言い換えれば、感知信号は、面内変換器より面外変換器においてより強い傾向があり、感知信号を最大化することは、通常、駆動力を最大化するより重要な考えである。

【0091】

面内共振周波数および面外共振周波数は、互いに近いことが好ましい場合がある。少なくとも、重心がアンカ点と一致し、回転軸がアンカ点を通る場合、回転軸に対する回転慣性は、面内振動および面外振動において同じである。懸架部の厚さをそれらの幅に極めて

近づけるか、等しくすることによって、共振周波数を極めてほぼ等しくしてもよい。言い換えれば、各懸架部の横断幅は、その懸架部の垂直厚さにほぼ等しくてもよく、すべての懸架部の横断幅および垂直厚さの両方は、ほぼ等しくてもよい。

【0092】

この第1のジャイロスコープの実施形態に係るジャイロスコープでは、各慣性マスに取り付けられた第1の懸架部は、少なくとも1つの面内変換器を備えてもよく、各慣性マスに取り付けられた第2の懸架部は、少なくとも1つの面外変換器を備えてもよい。

【0093】

図27は、両方の共振器が、第2の懸架部2732および第4の懸架部2734上の面内変換器と、第1の懸架部2731および第3の懸架部2733上の面外変換器とを備えるジャイロスコープを示す。ばね277は、駆動変換器として使用される変換器に応じて、曲げばねまたはねじりばねであってもよい。また、他の結合機構が使用されてもよい。図27では、両方の面外変換器が右側に位置し、両方の面内変換器が左側に位置する。この構成では、第1の懸架部2731および第3の懸架部2733上の面外変換器は逆の極性を有し、そのため、両方の変換器の低い方の電極同士が同じ電位になり得る。また、第2の懸架部2732および第3の懸架部2733上の面外変換器を構成し、第1の懸架部2731および第4の懸架部2734上の面内変換器を構成することが可能である。次いで、面外変換器の上部電極は同じ極性を有し、差動検出にはより複雑な配線が必要となる。

【0094】

図28は、面内変換器および面外変換器の両方が各懸架部2831、2832、2833および2834上に配置されているジャイロスコープを示す。言い換えれば、各懸架部は、少なくとも1つの面内変換器および少なくとも1つの面外変換器を備える。図28に示すように、面内変換器を第2の取付点2851～2854の近くに、面外変換器を第1の取付点2841～2844の近くに配置し、また、面内変換器を駆動変換器として使用し、面外変換器を感知変換器として使用することが好ましい。しかしながら、両方の点において反対の構成が可能である。

【0095】

完全なジャイロスコープはまた、一次振幅の検出および感知モードでのフォースフィードバックまたは直交位相信号キャンセリングなどの追加の機能を含んでもよいことを、当業者であれば理解する。これらの機能は、追加の変換器で実現することができ、それら変換器は、図26～図28に示した懸架部または補助懸架部構造体のいずれかの上に配置することができる。しかしながら、そのような追加の機能、懸架部および変換器については、本開示においてさらに詳細には述べない。

【0096】

この第1のジャイロスコープの実施形態の変形例はすべて、前述の共振器の実施形態および共振器システムの実施形態のうちいずれかと共に実装されてもよい。

【0097】

(第2のジャイロスコープの実施形態)

図29～図31は、第1のジャイロスコープの実施形態と共に実装されてもよい第2のジャイロスコープの実施形態に係る共振器システムを示す。この実施形態では、共振器システムは、さらに、慣性マスの振動回転運動を駆動または検出するように構成された圧電変換器構造体でコーティングされた少なくとも1つの外部懸架部を備え、外部懸架部の一端部はアンカ点に取り付けられ、外部懸架部の他端部は慣性マスにたわみ部を用いて取り付けられている。

【0098】

図29は、前述の実施形態で述べた手段によって、第1の懸架部、第2の懸架部、第3の懸架部および第4の懸架部2931～2934が、それぞれ第1のアンカ点2921および第2のアンカ点2922、ならびに、慣性マス2911および2912に取り付けられた共振器システムを示す。懸架部2931～2934は、慣性マス2911および29

10

20

30

40

50

12の中央開口部内に位置するため、「内部」懸架部と呼んでもよい。

【0099】

図示した共振器システムでは、第5の懸架部2935および第6の懸架部2936が、慣性マス2911および2912に隣接して配置されている。これらの第5の懸架部および第6の懸架部は、慣性マスの中央開口部内に位置しないため、「外部懸架部」と呼んでもよい。図示したシステムでは、内部懸架部2931～2934システムは面外変換器でコーティングされ、外部懸架部2935～2936は面内変換器でコーティングされている。この構成は、懸架部2931～2934が面内変換器で、懸架部2935～2936が面外変換器でコーティングされるように逆にしてもよい。いずれの場合も、追加の懸架部により、共振器システムの駆動、およびコリオリ効果から生じる振動の感知の両方のために、変換器のより広い面積が使いやすくなる。

10

【0100】

慣性マス2911および2912の中央開口部内における第1のアンカ点2921および第2のアンカ点2922に加えて、図29に示したジャイロスコープは、第3のアンカ点2923および第4のアンカ点2924を備える。各外部懸架部2935および2936は、第3の取付点2995、2996で第1の端部から第2のアンカ点に取り付けられてもよい。第5の懸架部2935および第6の懸架部2936のそれぞれの第2の端部は、第4の取付点2975、2976で第5のたわみ部2965および第6のたわみ部2966に取り付けられてもよい（第1、第2、第3および第4のたわみ部2961～2964は、図示するように慣性マス内にある）。懸架部2935または2936の端部2975または2976の面内角および面外角と、対応する慣性マス2911または2912の対応する角とが異なるため、たわみ部2965および2966によって面内回転および面外回転に対する可撓性が付与されるべきであり、また、たわみ部によって取付点でトルクが発生すべきではない。また、懸架部2935および2936が、それらの曲げ、ひいては非線形によって張力がかからないように、y軸に沿った並進に対する可撓性が付与されるべきである。しかし、たわみ部2965および2966は、x方向またはz方向に力を伝達することができるように、x軸またはz軸に沿った並進に対する剛性を有するべきである。駆動および感知に使用される変換器に応じて、これらの剛性形態のうちの1つが必要とされる。内部懸架部2931～2934上の変換器が駆動変換器として使用されてもよく、外部懸架部2935～2936上の変換器が感知変換器として使用されてもよく、またはその逆が行われてもよい。

20

30

【0101】

図30は、外部懸架部3035および3036が内部懸架部3031～3034より短いジャイロスコープを示す。外部懸架部3035および3036はまた、内部懸架部より長くてもよく、それに応じて第2のアンカ点3023および3024の位置は変わってもよい。たわみ部3065～3066は、慣性マス3011および3012の長さに沿って慣性マスのどこに取り付けられてもよい。図31は、第2のアンカ点3123および3124が、共振器システムの重心を通る対称軸 a_1 および a_2 の両方を挟んで位置する代替構成を示す。

【0102】

この第2のジャイロスコープの実施形態のすべての変形例は、前述の共振器の実施形態および共振器システムの実施形態のうちのいずれと実装されてもよい。

40

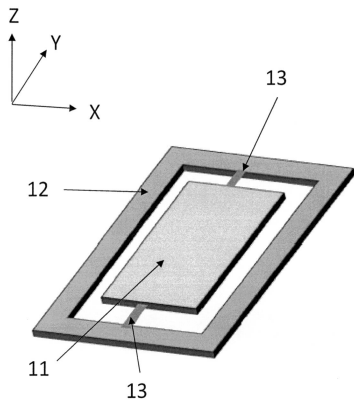
【0103】

（クロック発振器）

前述の共振器の実施形態および共振器システムの実施形態に記載したいかなる共振器およびたわみ部の構成も、従来技術から既知の付加物と共に、クロック発振器に実装することができる。一般的に、前述の実施形態に係る共振器をクロック発振器に使用する利点には、少なくとも高い結合係数、小さな運動抵抗、確実なスタートアップおよび低騒音がある。

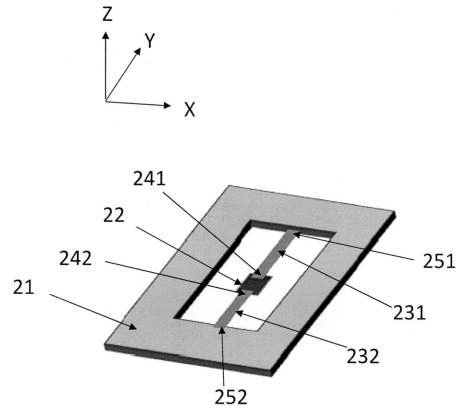
【图 1】

图1 (従来技術)



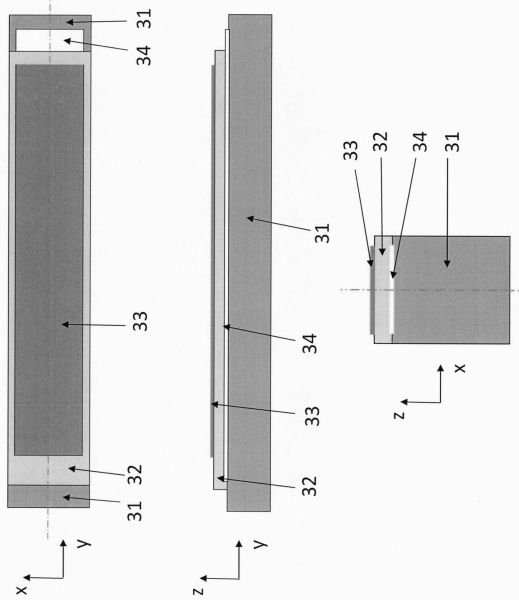
【图 2】

图2 (従来技術)



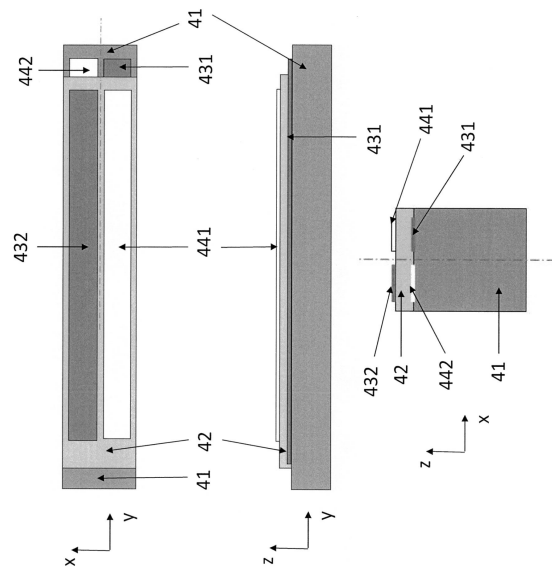
【图 3】

图3 (従来技術)



【图 4】

图4 (従来技術)



【 図 5 】

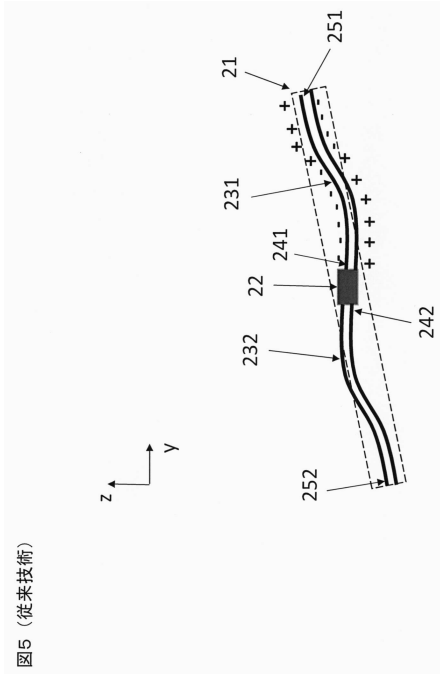
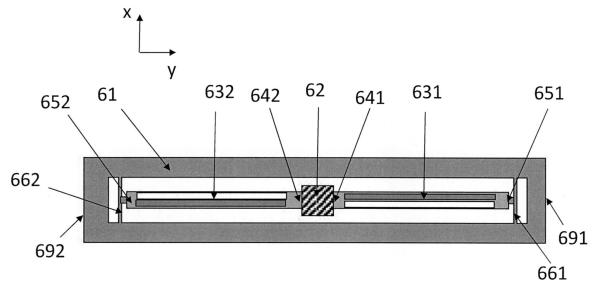


図5 (従来技術)

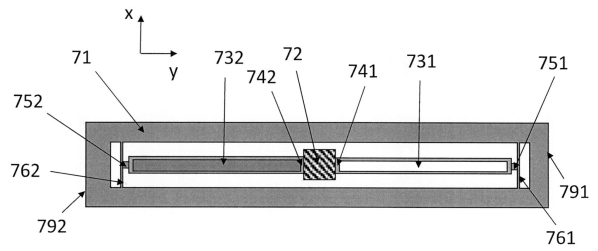
【 図 6 】

図6



【 図 7 】

図7



【 図 8 】

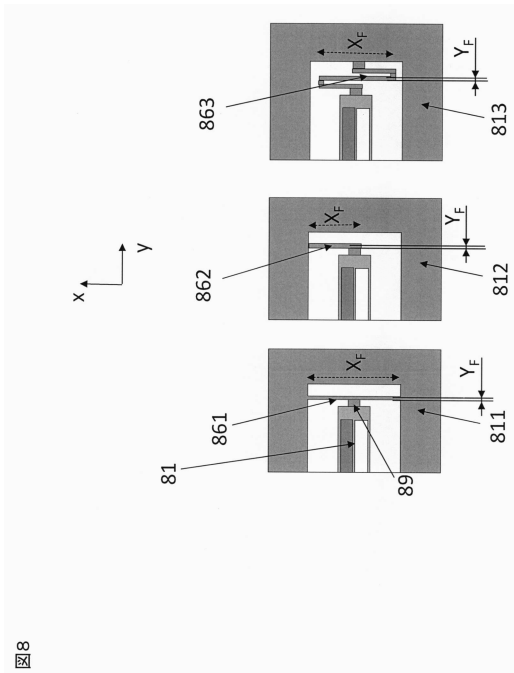
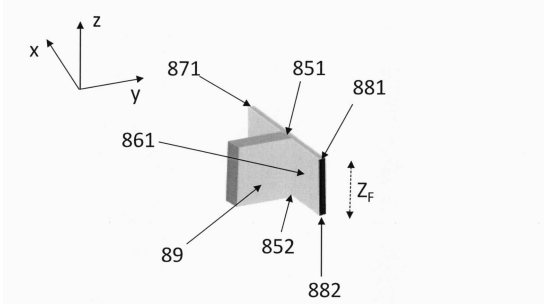


図8

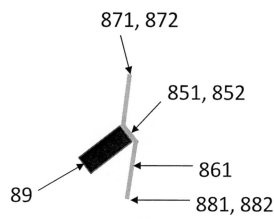
【 図 9 】

図9



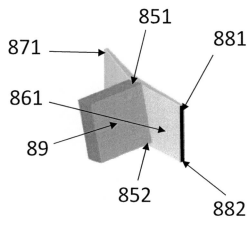
【 図 10 】

図10

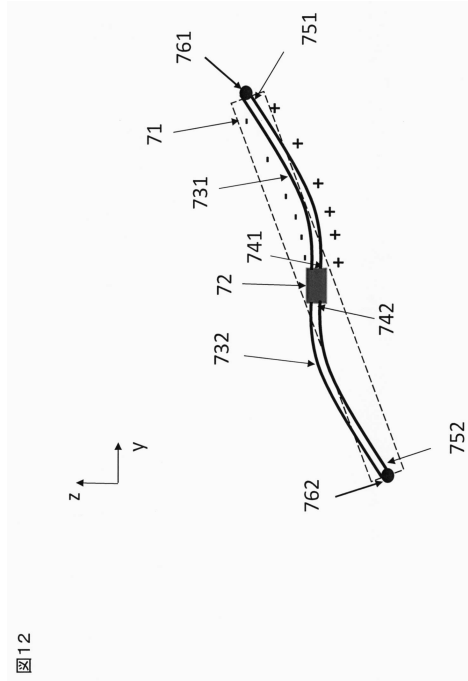


【图 1 1】

图11

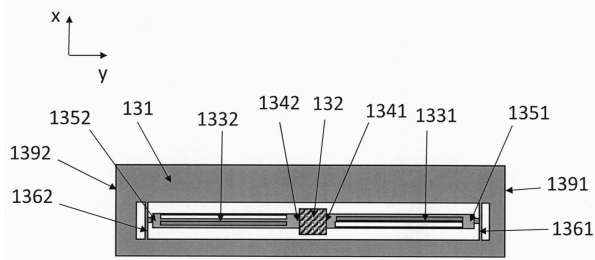


【图 1 2】



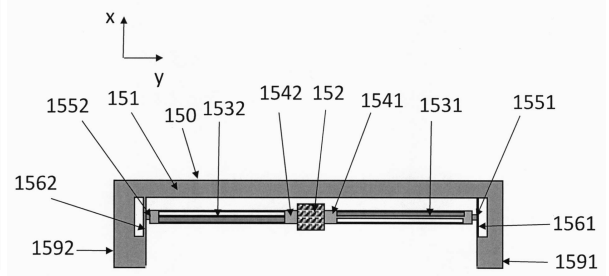
【图 1 3】

图13



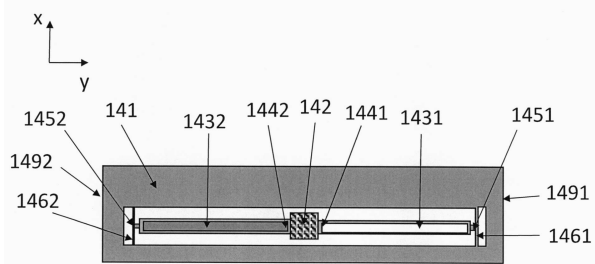
【图 1 5】

图15



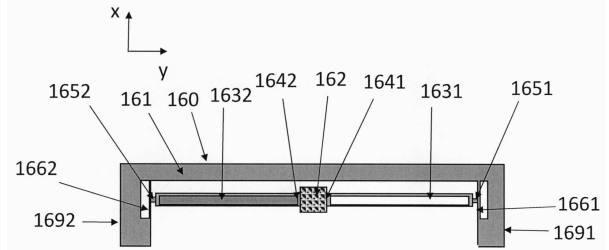
【图 1 4】

图14

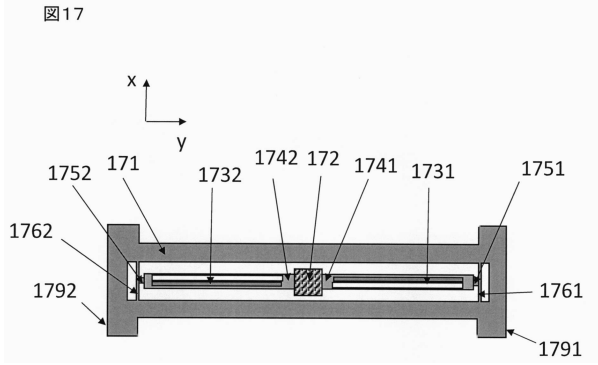


【图 1 6】

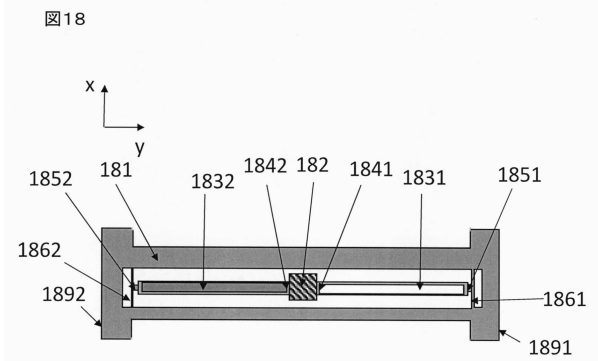
图16



【 図 17 】



【 図 18 】



【 図 19 】

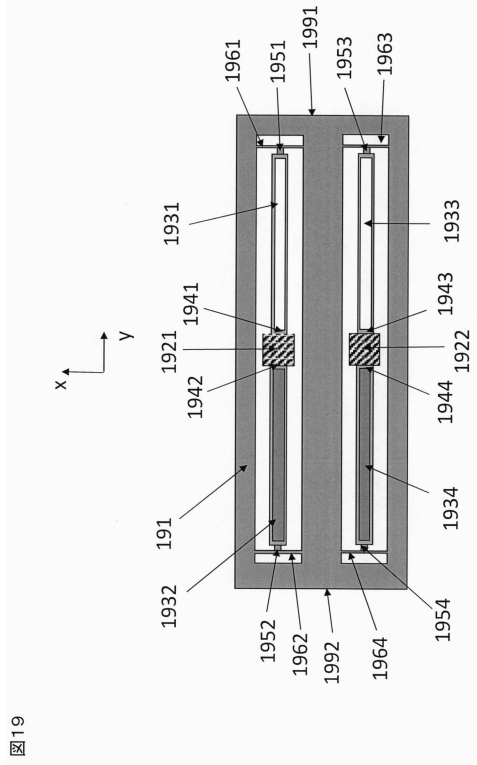


図 19

【 図 20 】

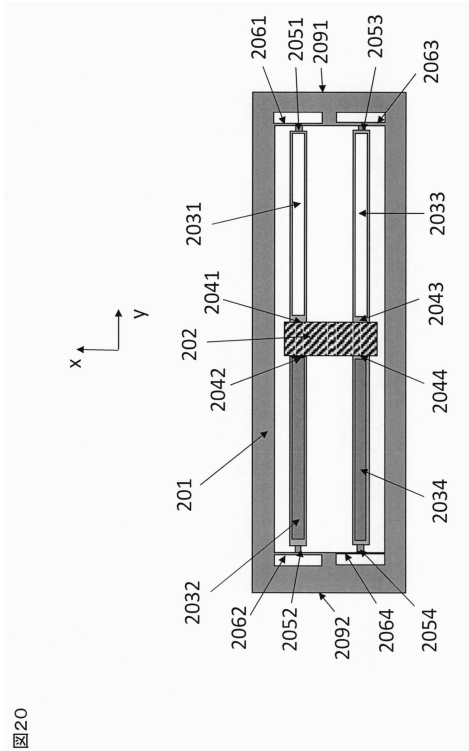


図 20

【 図 21 】

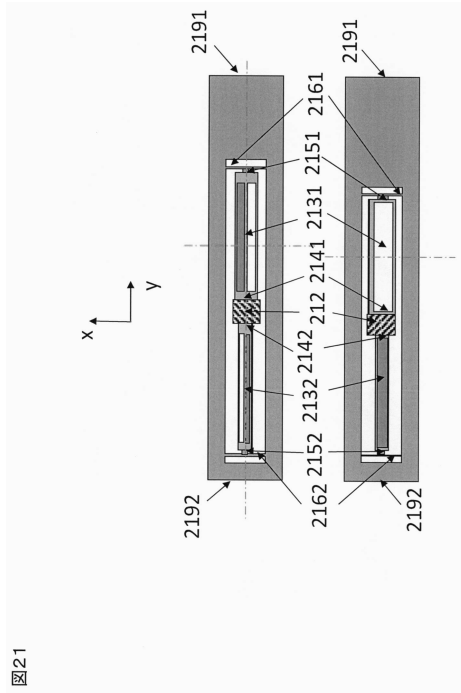
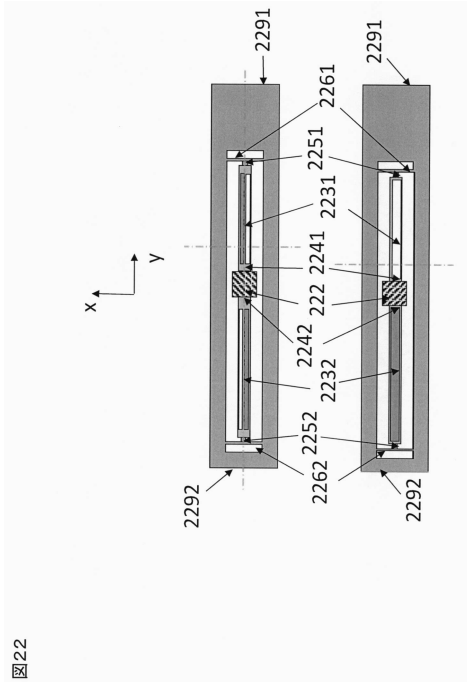


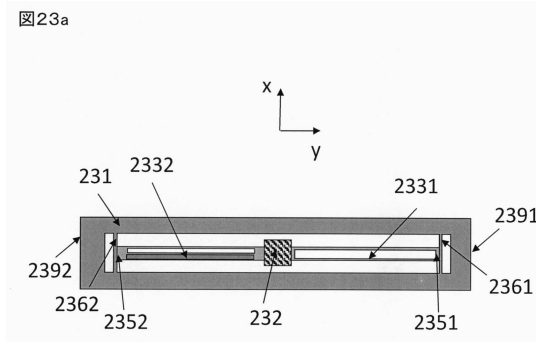
図 21

【 2 2 】



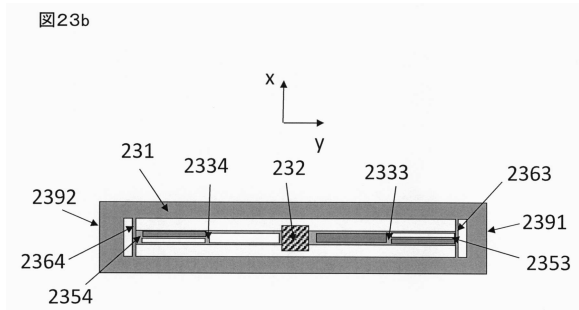
22

【 2 3 a 】



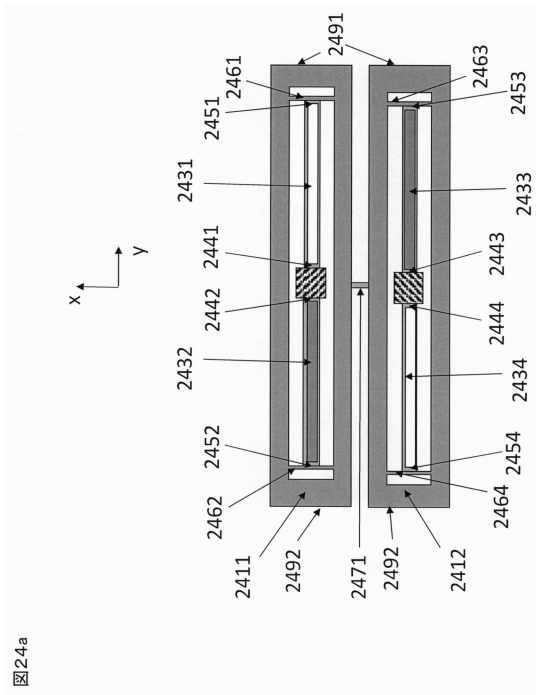
23a

【 2 3 b 】



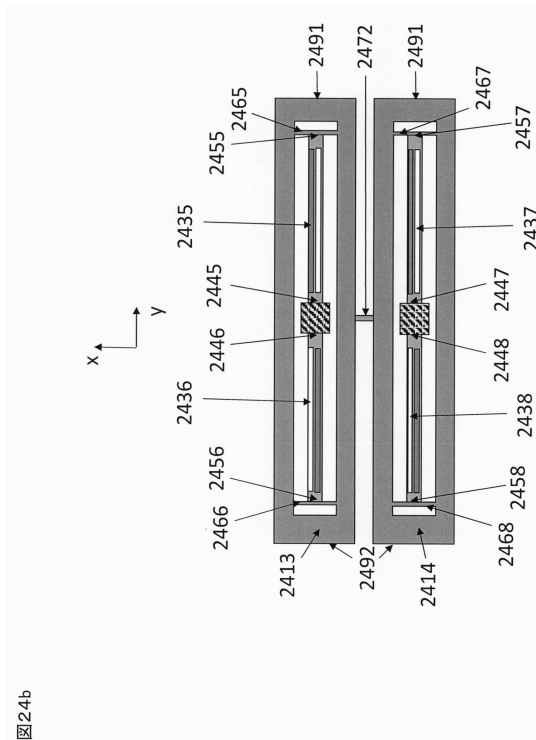
23b

【 2 4 a 】



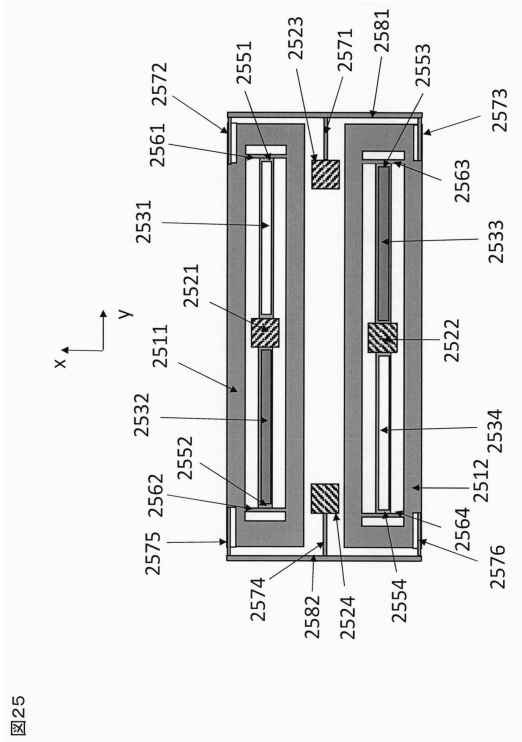
24a

【 2 4 b 】



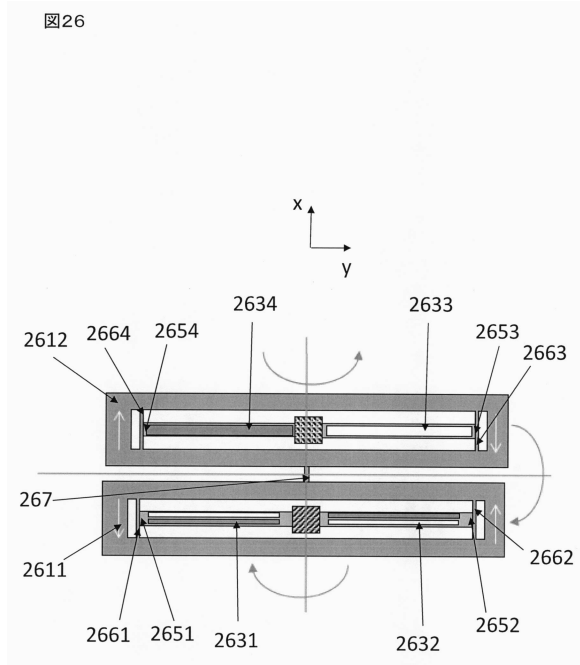
24b

【 25 】



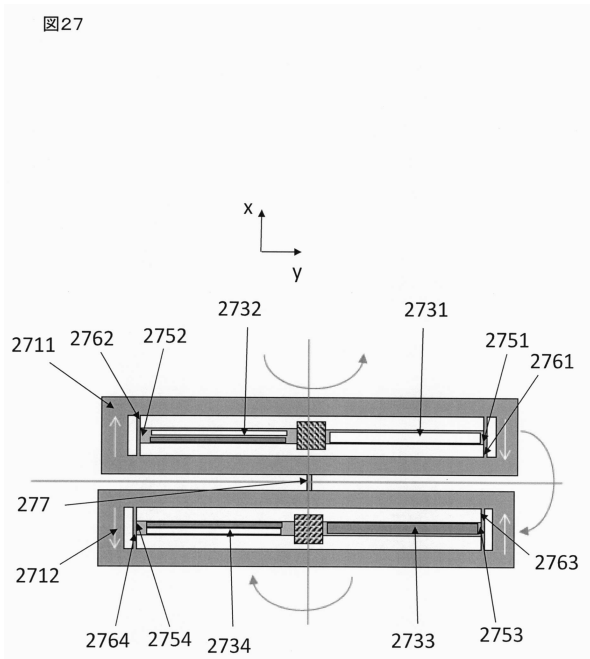
25

【 26 】



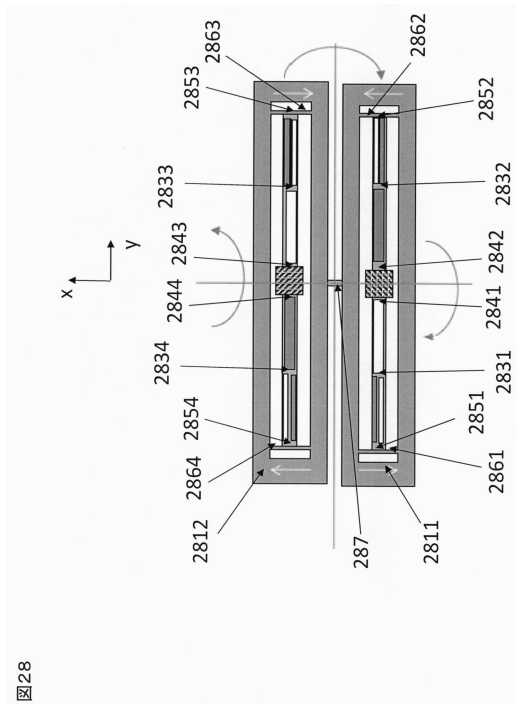
26

【 27 】



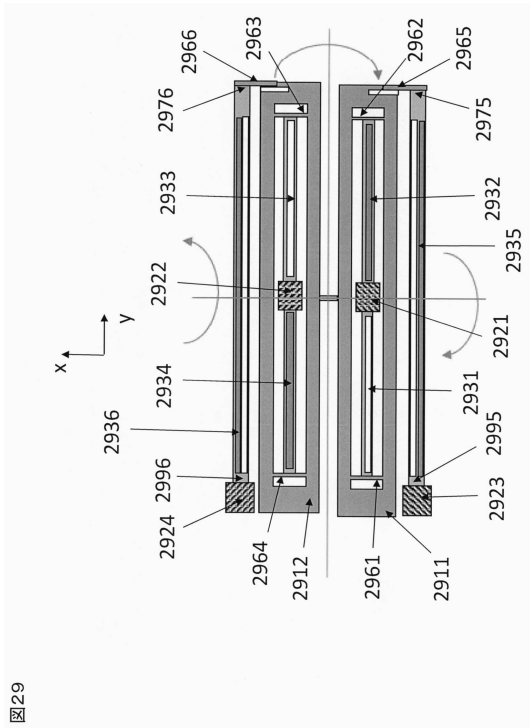
27

【 28 】



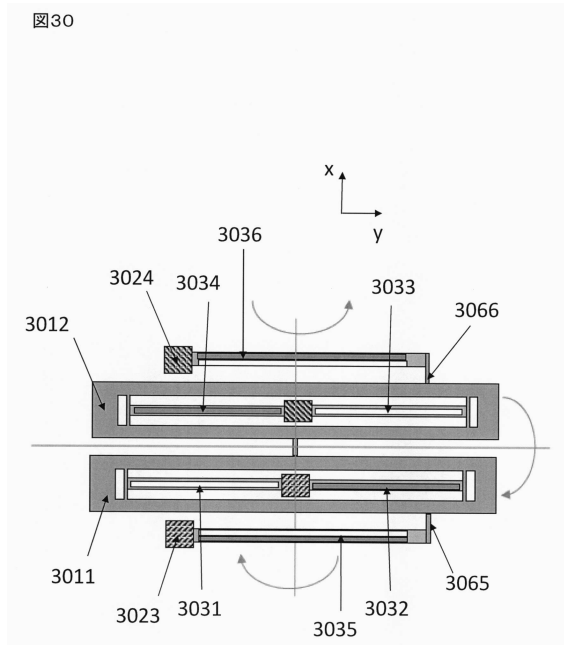
28

【 29 】



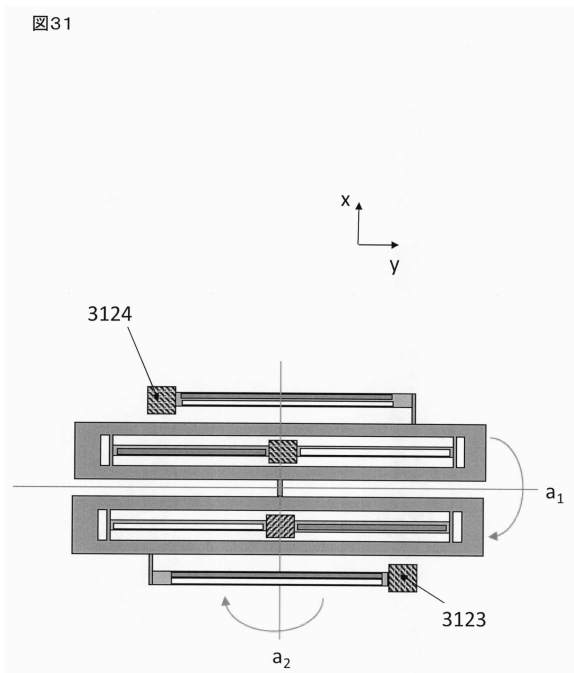
29

【 30 】



30

【 31 】



31

フロントページの続き

(56)参考文献 特表2013-529300(JP,A)
特開2015-061737(JP,A)
特開2010-089254(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
G01C 19/00-19/72