(19)日本国特許庁(JP)　(12)公開特許公報(A)　(11)公開番号
特開2023-8895
(P2023-8895A)
(43)公開日　令和5年1月19日(2023.1.19)

(51)国際特許分類	FI			テーマコード（参考）
Ｆ１５Ｂ　15/10　(2006.01)	Ｆ１５Ｂ	15/10	Ｈ	３Ｈ０８１

審査請求　未請求　請求項の数　20　ＯＬ　外国語出願　（全29頁）

(21)出願番号　特願2022-103924(P2022-103924)
(22)出願日　令和4年6月28日(2022.6.28)
(31)優先権主張番号　17/364,142
(32)優先日　令和3年6月30日(2021.6.30)
(33)優先権主張国・地域又は機関
米国(US)

(71)出願人　000003207
トヨタ自動車株式会社
愛知県豊田市トヨタ町１番地
(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　100092624
弁理士　鶴田 準一
(74)代理人　100147555
弁理士　伊藤 公一
(74)代理人　100123593
弁理士　関根 宣夫
(74)代理人　100133835
弁理士　河野 努

最終頁に続く

(54)【発明の名称】　真空結合された電極絶縁体を有する人工筋肉及びその製造方法

(57)【要約】
【課題】電極アセンブリの製造方法を提供すること。
【解決手段】電極アセンブリの本製造方法は、電極絶縁体と支持ポリマーとの間に配置された電極を含む層スタックを真空バッグ内に配置することと、真空バッグから空気を除去することによって電極を電極絶縁体に真空結合させることと、真空バッグから層スタックを除去することと、を含み、真空バッグから層スタックを除去すると、電極が電極絶縁体に真空結合された状態を保ち、電極絶縁体が電極に直接接触し、それによって電極アセンブリが形成される。
【選択図】図５Ａ

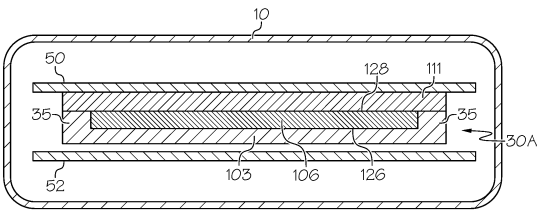


FIG. 5A

【特許請求の範囲】
【請求項１】
電極絶縁体と支持ポリマーとの間に配置された電極を備える層スタックを真空バッグ内に配置することと、
前記真空バッグから空気を除去することによって前記電極を前記電極絶縁体に真空結合させることと、
前記真空バッグから前記層スタックを除去することと、
を含み、
前記真空バッグから前記層スタックを除去すると、前記電極が前記電極絶縁体に真空結合された状態を保ち、前記電極絶縁体が前記電極に直接接触し、それによって電極アセンブリが形成される、
電極アセンブリの製造方法。
【請求項２】
前記真空バッグから前記層スタックを除去すると前記支持ポリマーが前記電極に結合するように、前記層スタックが前記真空バッグ内に配置されている間に、前記支持ポリマーを前記電極にヒートシールすることをさらに含む、請求項１に記載の方法。
【請求項３】
前記真空バッグから前記層スタックを除去すると、前記支持ポリマーが前記電極絶縁体に結合されるように、前記支持ポリマーが張り出し部分を備える、請求項２に記載の方法。
【請求項４】
前記電極絶縁体と前記真空バッグとの間に第１の放熱層が配置され、
前記支持ポリマーと前記真空バッグとの間に第２の放熱層が配置され、
前記支持ポリマーを前記電極にヒートシールした後に、前記第１及び第２の放熱層が前記層スタックから除去される、
請求項２に記載の方法。
【請求項５】
前記電極絶縁体が高誘電率ポリマーを含む、請求項１に記載の方法。
【請求項６】
前記高誘電率ポリマーが、ハロゲン化ポリマーを含む、請求項５に記載の方法。
【請求項７】
前記ハロゲン化ポリマーがＰＶＤＦを含む、請求項６に記載の方法。
【請求項８】
前記電極が、２つ以上の放射状に延びる部分と、２つ以上のブリッジ部分と、を備え、
前記２つ以上のブリッジ部分の各々が、隣接する放射状に延びる部分を相互接続する、請求項１に記載の方法。
【請求項９】
前記支持ポリマーが二軸延伸ポリプロピレン（ＢＯＰＰ）を含む、請求項１に記載の方法。
【請求項１０】
第１の電極アセンブリ及び第２の電極アセンブリを形成することを含み、各電極アセンブリを形成することが、
電極絶縁体と支持ポリマーとの間に配置された電極を含む層スタックを真空バッグ内に配置することと、
前記真空バッグから空気を除去することによって前記電極を前記電極絶縁体に真空結合させることと、
前記真空バッグから前記層スタックを除去することであって、前記真空バッグから前記層スタックを除去すると、前記電極が前記電極絶縁体に真空結合された状態を保ち、前記電極絶縁体が前記電極に直接接触し、それによって電極アセンブリが形成されることと、

前記第１の電極アセンブリ及び前記第２の電極アセンブリを、第１のフィルム層と第２のフィルム層との間の積層構成に配置することと、
前記第１のフィルム層を前記第２のフィルム層にシールし、それによって、前記第１のフィルム層及び前記第２のフィルム層から形成されるハウジング内に収容された前記第１の電極アセンブリ及び前記第２の電極アセンブリを備える人工筋肉を形成することと、
を含む、人工筋肉の製造方法。
【請求項１１】
各電極アセンブリを形成することが、前記真空バッグから前記層スタックを除去すると前記支持ポリマーが前記電極に結合するように、前記層スタックが前記真空バッグ内に配置されている間に、前記支持ポリマーを前記電極及び前記電極絶縁体にヒートシールすることをさらに含み、
前記支持ポリマーが、前記真空バッグから前記層スタックを除去すると、前記電極絶縁体に結合される張り出し部分を備える、
請求項１０に記載の方法。
【請求項１２】
前記第１の電極アセンブリと前記第２の電極アセンブリとの間の前記人工筋肉内に誘電性流体を注入することをさらに含む、請求項１０に記載の方法。
【請求項１３】
前記第１のフィルム層を前記第２のフィルム層にシールすることが、前記人工筋肉の前記ハウジングのシール部分を画定し、前記ハウジングが、前記シール部分によって囲まれた未シール部分をさらに備え、前記ハウジングの電極領域及び拡張可能な流体領域が前記未シール部分に配置される、請求項１０に記載の方法。
【請求項１４】
前記第１の電極アセンブリ及び前記第２の電極アセンブリの各々の前記電極が、２つ以上の放射状に延びる部分と、２つ以上のブリッジ部分と、を備え、
前記２つ以上のブリッジ部分の各々が、隣接する放射状に延びる部分を相互接続する、請求項１０に記載の方法。
【請求項１５】
前記第１のフィルム層を前記第２のフィルム層にシールすることが、前記第１のフィルム層を前記第２のフィルム層にヒートシールすることを含む、請求項１０に記載の方法。
【請求項１６】
電極領域及び拡張可能な流体領域を備えるハウジングと、
前記ハウジング内に収容された誘電性流体と、
前記ハウジングの前記電極領域内に配置され、第１の電極及び第２の電極を備える電極対と、
前記第１の電極に直接接触した状態で前記第１の電極に真空結合された電極絶縁体と、
を備え、
前記第１の電極絶縁体が高誘電率ポリマーを含み、
前記電極対が、非作動状態と作動状態との間で作動可能であり、前記非作動状態から前記作動状態への作動によって、前記誘電性流体が前記拡張可能な流体領域内に導かれ、前記拡張可能な流体領域が拡張する、
人工筋肉。
【請求項１７】
前記電極絶縁体が、第１の電極絶縁体と、
前記第２の電極に真空結合され、前記第２の電極に直接接触する第２の電極絶縁体と、
を備え、
前記第２の電極絶縁体が高誘電率ポリマーを含む、
請求項１６に記載の人工筋肉。
【請求項１８】
前記高誘電率ポリマーが、ハロゲン化ポリマーを含む、請求項１６に記載の人工筋肉。

【請求項１９】
前記ハロゲン化ポリマーがＰＶＤＦを含む、請求項１８に記載の人工筋肉。
【請求項２０】
前記第１の電極及び前記第２の電極が、各々、２つ以上の放射状に延びる部分と、２つ以上のブリッジ部分と、を備え、
前記２つ以上のブリッジ部分の各々が、隣接する放射状に延びる部分を相互接続し、
前記第１の電極及び前記第２の電極の少なくとも一方が、前記２つ以上の放射状に延びる部分の間に配置され、前記拡張可能な流体領域を取り囲む中央開口部を備える、
請求項１６に記載の人工筋肉。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、概ね、人工筋肉、特に、真空結合された(vacuum coupled)電極絶縁体を有する人工筋肉に関する。
【背景技術】
【０００２】
現在のロボット技術は、構造化された環境でよく見られる、タスクを実行するサーボモータなどの剛性の構成要素に依拠している。この剛性によって、少なくとも部分的に、サーボモータ及びその他の剛性ロボットデバイスの重量対動力比が原因で発生する、多くのロボット用途における制約が生まれる。ソフトロボット工学の分野は、人工筋肉及びその他のソフトアクチュエータを使用することにより、上記の制約を改善する。人工筋肉は、生物学的筋肉の汎用性、性能及び信頼性を模倣しようと試みる。人工筋肉の一部は、流体ベースのアクチュエータに依拠している。例えば、ある種の人工筋肉は、流体を一定の容積分だけ導入及び排出して人工筋肉を膨張／収縮させて、負荷に抗して機械的作業を行うことができる。ただし、これらの人工筋肉は、ヒートシール及び接着剤に依存しているために、いくつかの材料上の制約事項を有する。
【０００３】
したがって、ヒートシールが困難な材料の使用を容易にする人工筋肉の製造方法の必要性が存在する。
【発明の概要】
【０００４】
一実施形態では、電極アセンブリを製造する方法は、電極絶縁体と支持ポリマーとの間に配置された電極を含む層スタックを真空バッグ内に配置することと、真空バッグから空気を除去することによって電極を電極絶縁体に真空結合させることと、真空バッグから層スタックを除去することと、を含み、真空バッグから層スタックを除去すると、電極は電極絶縁体に真空結合された状態を保ち、電極絶縁体は電極に直接接触し、それによって電極アセンブリが形成される。
【０００５】
別の実施形態では、人工筋肉を製造する方法は、第１の電極アセンブリ及び第２の電極アセンブリを形成することを含む。各電極アセンブリを形成することは、電極絶縁体と支持ポリマーとの間に配置された電極を含む層スタックを真空バッグ内に配置することと、真空バッグから空気を除去することによって電極を電極絶縁体に真空結合させることと、真空バッグから層スタックを除去することと、を含み、真空バッグから層スタックを除去すると、電極は電極絶縁体に真空結合された状態を保ち、電極絶縁体は電極に直接接触し、それによって電極アセンブリが形成される。この方法は、第１のフィルム層と第２のフィルム層との間に第１の電極アセンブリ及び第２の電極アセンブリを積層構成に配置することと、第１のフィルム層を第２のフィルム層にシールし、それによって、第１のフィルム層及び第２のフィルム層から形成されたハウジング内に収容された第１の電極アセンブリ及び第２の電極アセンブリを含む人工筋肉を形成することと、をさらに含む。
【０００６】

さらに別の実施形態では、人工筋肉は、電極領域及び拡張可能な流体領域を有するハウジングを含む。誘電性流体がハウジング内に収容されている。電極対が、ハウジングの電極領域内に配置され、電極対は、第１の電極及び第２の電極を含む。電極絶縁体が、第１の電極に直接接触した状態で第１の電極に真空結合されている。電極絶縁体は、高誘電率ポリマーを含み、電極対は、非作動状態と作動状態との間で作動可能であり、非作動状態から作動状態への作動によって、誘電性流体が拡張可能な流体領域内に導かれ、拡張可能な流体領域が拡張する。

【０００７】

本明細書に記載される実施形態によって提供される上記及び追加のフィーチャは、図面を参照しながら以下の詳細な説明を読むことによってさらに深く理解されよう。

【図面の簡単な説明】

【０００８】

図面に示す実施形態は、本質的に実例に過ぎずまた例示的なものであって、特許請求の範囲によって定義される主題を限定することを意図するものではない。好ましい実施形態の以下の詳細な説明は、同様の構造が同様の参照番号で示される以下の図面と関連して読むことによって理解することができる。

【０００９】

【図１】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、真空結合工程を用いて形成された例示的な人工筋肉の概略分解図である。

【図２】本明細書に図示し記載する実施形態に係る、図１の人工筋肉の概略上面図である。

【図３】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、図２の線３－３に沿った、非作動状態にある図１の人工筋肉の概略断面図である。

【図４】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、図２の線３－３に沿った、作動状態にある図１の人工筋肉の概略断面図である。

【図５Ａ】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、第１の電極絶縁体と第１の支持ポリマーとの間に配置された第１の電極を含む、真空バッグ内に配置された層スタックの概略断面図である。

【図５Ｂ】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、第２の電極絶縁体と第２の支持ポリマーとの間に配置された第２の電極を含む、真空バッグ内に配置された第２の層スタックの概略断面図である。

【図６】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、真空バッグ内に配置された図５Ａの第１の層スタックの概略図である。

【図７】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、ヒートシール工程を受ける、図５Ａ及び６の第１の層スタックの概略図である。

【図８】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、図５Ａ～７に示す工程を用いて形成された第１の電極アセンブリ及び第２の電極アセンブリの概略図である。

【図９】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、第１のフィルム層と第２のフィルム層との間に配置された第１の電極アセンブリ及び第２の電極アセンブリの概略断面図である。

【図１０】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、非作動状態にある別の例示的な人工筋肉の概略断面図である。

【図１１】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、作動状態にある図１１の人工筋肉の概略断面図である。

【図１２】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、別の例示的な人工筋肉の概略分解図である。

【図１３】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、図１２の人工筋肉の概略上面図である。

【図１４】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、別の人工筋肉の概略上面図である。

【図１５】本明細書に図示し記載する１つ又は複数の実施形態に係る、人工筋肉を動作させるための作動システムの概略図である。
【発明を実施するための形態】
【００１０】
本明細書に記載する実施形態は、人工筋肉及び人工筋肉の製造方法に関する。本明細書に記載する人工筋肉の製造方法は、真空シール工程を含み、真空シール工程は、効果的にヒートシールすることができないある種の高性能な電極絶縁体の使用を容易にする。理論によって限定されるものではないが、誘電エラストマーアクチュエータの分野では、電気絶縁性ポリマー（例えば、本明細書に記載の人工筋肉の電極絶縁体）の誘電率を増加させると、アクチュエータの性能が向上する。ただし、ポリフッ化ビニリデン（ＰＶＤＦ）などの高誘電率ポリマーは、電極への効果的なヒートシールができない。接着剤層を高誘電率ポリマーと電極との間に配置してもよいが、接着剤を導入すると、直列容量が複雑になる。したがって、電極絶縁体が電極に真空結合された人工筋肉を形成することによって、高誘電率ポリマーの使用が容易になり、人工筋肉の性能が増加する。人工筋肉及び人工筋肉の製造方法の様々な実施形態を本明細書で詳述する。可能な限り、全図面を通して、同一又は同様の部品を参照するために、同一の参照番号を使用する。
【００１１】
図１～４は、図５Ａ～９に示す製造方法を用いて形成できる人工筋肉１０１を示す図である。特に、図１～４に示す人工筋肉１０１は、電極領域１９４と拡張可能な流体領域１９６とを有するハウジング１１０を含む。第１の電極１０６及び第２の電極１０８を含む電極対１０４は、ハウジング１１０の電極領域１９４内に配置され、誘電性流体１９８は、ハウジング１１０内に収容されている。動作時には、電極対１０４は、非作動状態と作動状態との間で作動可能であり、非作動状態から作動状態への作動によって、誘電性流体１９８は拡張可能な流体領域１９６に導かれて拡張可能な流体領域１９６を拡張させ、それによって、拡張可能な流体領域１９６は作動力を提供できる。さらに、人工筋肉１０１は、第１の電極１０６に直接接触した状態で第１の電極１０６に電気的に結合された第１の電極絶縁体１１１と、第２の電極１０８に直接接触した状態で第２の電極１０８に真空結合された第２の電極絶縁体１１２と、を含む。ただし、第２の電極絶縁体１１２を有しない第１の電極絶縁体１１１を有する実施形態が企図されていることを理解されたい。以下に詳述するように、図５Ａ～９に関して、第１の電極絶縁体１１１を第１の電極１０６に真空結合し、第２の電極絶縁体１１２を第２の電極１０８に真空結合することによって、ＰＤＶＦなどの高誘電性ポリマー材料を電極絶縁体として使用することが可能になり、これらの高誘電性ポリマー材料は、ヒートシールが不可能であるが、人工筋肉の作動性能を向上させることができる。
【００１２】
図１及び２を参照すると、人工筋肉１０１は、ハウジング１１０と、第１の電極１０６及び第２の電極１０８を含み、ハウジング１１０の相対する面に結合された電極対１０４と、第１の電極１０６に固定された第１の電極絶縁体１１１と、第２の電極１０８に固定された第２の電極絶縁体１１２と、を含む。特に、第１の電極絶縁体１１１は、第１の電極１０６に直接接触した状態で第１の電極１０６に真空結合され、第２の電極絶縁体１１２は、第２の電極１０８に直接接触した状態で第２の電極１０８に真空結合されている。いくつかの実施形態では、ハウジング１１０は、第１の内面１１４及び第２の内面１１６などの１対の相対する内面と、第１の外面１１８及び第２の外面１２０などの１対の相対する外面と、を含むワンピースモノリシック層である。別の実施形態では、ハウジング１１０は、第１のフィルム層１２２及び第２のフィルム層１２４などの個別に製造された１対のフィルム層であってもよい。したがって、第１のフィルム層１２２は、第１の内面１１４と第１の外面１１８とを含み、第２のフィルム層１２４は、第２の内面１１６と第２の外面１２０とを含む。ハウジング１１０の第１の内面１１４及び第２の内面１１６はヒートシールが可能である。
【００１３】

図１に示すように、人工筋肉１０１は、ハウジング１１０の第１の電極１０６と第１の内面１１４との間に配置された第１の支持ポリマー１０３と、ハウジング１１０の第２の電極１０８と第２の内面１１６との間に配置された第２の支持ポリマー１０５と、をさらに含んでいてもよい。本明細書に記載するように、第１及び第２の支持ポリマー１０３、１０５は、第１及び第２の電極絶縁体１１１、１１２として高誘電性ポリマーを使用することを可能にする真空結合工程を支援する。いくつかの実施形態では、第１の支持ポリマー１０３及び第２の支持ポリマー１０５は、概ね、同じ構造及び組成を含む。例えば、いくつかの実施形態では、第１の支持ポリマー１０３及び第２の支持ポリマー１０５は、各々、二軸延伸ポリプロピレン（ＢＯＰＰ）を含む。

【００１４】

本明細書に記載する実施形態は、基本的に、ハウジング１１０について、ワンピースハウジングとは対照的な、第１のフィルム層１２２及び第２のフィルム層１２４を含むものとして記載しているが、いずれの構成も企図されていることを理解されたい。いくつかの実施形態では、第１のフィルム層１２２及び第２のフィルム層１２４は、概ね、同じ構造及び組成を含む。例えば、いくつかの実施形態では、第１のフィルム層１２２及び第２のフィルム層１２４は、各々、ＢＯＰＰを含む。

【００１５】

第１の電極１０６及び第２の電極１０８は、各々、第１のフィルム層１２２と第２のフィルム層１２４との間に配置されている。いくつかの実施形態では、第１の電極１０６及び第２の電極１０８は、各々、例えば、マイラー（登録商標）、すなわち二軸延伸ポリエチレンテレフタレート（ＢｏＰＥＴ）などのアルミニウム被覆ポリエステルである。ただし、第１の電極１０６及び第２の電極１０８は、マイラー（登録商標）などのポリエステルで被覆が可能な、銅、銀、チタン、白金又は同種のものの電気結合材料を含んでいてもよいことを理解されたい。第１の電極１０６及び第２の電極１０８は、可撓性材料又は非可撓性材料（例えば、剛性材料）を含んでいてもよく、いくつかの実施形態では、伸縮性材料を含んでいてもよい。さらに、第１の電極１０６及び第２の電極１０８がヒドロゲル材料を含む実施形態が企図される。また、第１の電極１０６及び第２の電極１０８の一方は負帯電電極であり、第１の電極１０６及び第２の電極１０８の他方は正帯電電極である。本明細書に記載する目的のために、いずれかの電極１０６、１０８は、人工筋肉１０１の他方の電極１０６、１０８が負に帯電している限り、正に帯電していてもよい。

【００１６】

第１の電極１０６は、フィルムに相対する面１２６と、反対側の内面１２８と、を有する。第１の電極１０６は、第１のフィルム層１２２、具体的には、第１のフィルム層１２２の第１の内面１１４に近接して配置されている。すなわち、第１の電極１０６は、第１のフィルム層１２２の第１の内面１１４に接触していてもよく、又は第１の電極１０６と第１のフィルム層１２２の第１の内面１１４との間に配置された第１の支持ポリマー１０３に接触していてもよい。さらに、第１の電極１０６は、第１の電極１０６から第１のフィルム層１２２の縁部を越えて延びる第1の端子１３０を含み、第１の端子１３０を電源に接続して第１の電極１０６を作動させることができる。具体的には、端子は、図１５に示すように、直接又は直列に、作動システム４００の電源及びコントローラに結合されている。同様に、第２の電極１０８は、フィルムに相対する面１４８と、反対側の内面１５０と、を有する。第２の電極１０８は、第２のフィルム層１２４、具体的には、第２のフィルム層１２４の第２の内面１１６に近接して配置されている。すなわち、第２の電極１０８は、第２のフィルム層１２４の第２の内面１１６に接触していてもよく、又は第２の電極１０８と第２のフィルム層１２４の第２の内面１１６との間に配置された第２の支持ポリマー１０５に接触していてもよい。第２の電極１０８は、第２の電極１０８から第２のフィルム層１２４の縁部を越えて延びる第２の端子１５２を含み、第２の端子１５２を作動システム４００の電源及びコントローラに接続して第２の電極１０８を作動させることができる。

【００１７】

第１の電極１０６は、２つ以上のタブ部分１３２と、２つ以上のブリッジ部分１４０と、を含む。各ブリッジ部分１４０は、隣接するタブ部分１３２の間に配置され、これらの隣接するタブ部分１３２を相互接続する。各タブ部分１３２は、第１の電極１０６の中心軸線Ｃからタブ部分１３２の反対側の第２の端部１３６まで放射状に延びる第１の端部１３４を有し、第２の端部１３６は、第１の電極１０６の外周１３８の一部分を画定する。各ブリッジ部分１４０は、第１の電極１０６の中心軸線Ｃから、第１の電極１０６の外周１３８の別の部分を画定する、ブリッジ部分１４０の反対側の第２の端部１４４まで放射状に延びる第1の端部１４２を有する。各タブ部分１３２はタブ長Ｌ１を有し、各ブリッジ部分１４０は、第１の電極１０６の中心軸線Ｃから放射状に延びるブリッジ長Ｌ２を有する。タブ長Ｌ１は、タブ部分１３２の第１の端部１３４から第２の端部１３６までの距離であり、ブリッジ長Ｌ２は、ブリッジ部分１４０の第１の端部１４２からの第２の端部１４４までの距離である。各タブ部分１３２のタブ長Ｌ１は、各ブリッジ部分１４０のブリッジ長Ｌ２よりも長い。いくつかの実施形態では、ブリッジ長Ｌ２は、タブ長Ｌ１の２０％～５０％、例えばタブ長Ｌ１の３０％～４０％である。

【００１８】

いくつかの実施形態では、２つ以上のタブ部分１３２は、タブ部分１３２の１つ又は複数の対として配置されている。タブ部分１３２の各対は、直径方向で互いに逆側に配置された２つのタブ部分１３２を含む。いくつかの実施形態では、第１の電極１０６は、第１の電極１０６の相対する辺又は端部に配置された２つのタブ部分１３２のみを含んでいてもよい。いくつかの実施形態では、図７に示すように、第１の電極１０６は、４つのタブ部分１３２と、隣接するタブ部分１３２を相互接続する４つのブリッジ部分１４０と、を含む。この実施形態では、４つのタブ部分１３２は、直径方向で互いに逆側にある２対のタブ部分１３２として配置されている。さらに、図示のように、第１の端子１３０は、タブ部分１３２の１つの第２の端部１３６から延びた状態で第２の端部１３６と一体に形成されている。

【００１９】

第１の電極１０６と同様に、第２の電極１０８は、少なくとも１対のタブ部分１５４と２つ以上のブリッジ部分１６２とを含む。各ブリッジ部分１６２は、隣接するタブ部分１５４の間に配置され、これらの隣接するタブ部分１５４を相互接続する。各タブ部分１５４は、第２の電極１０８の中心軸線Ｃからタブ部分１５４の反対側の第２の端部１５８まで放射状に延びる第１の端部１５６を有し、第２の端部１５８は第２の電極１０８の外周１６０の一部分を画定する。第１の電極１０６と第２の電極１０８とが互いに同軸であるため、第１の電極１０６及び第２の電極１０８の中心軸線Ｃは同一である。各ブリッジ部分１６２は、第２の電極の中心軸線Ｃから、第２の電極の外周１６０の別の部分を画定する、ブリッジ部分１６２の反対側の第２の端部１６６まで放射状に延びる第１の端部１６４を有する。各タブ部分１５４はタブ長Ｌ３を有し、各ブリッジ部分１６２は、第２の電極１０８の中心軸線Ｃから放射状に延びるブリッジ長Ｌ４を有する。タブ長Ｌ３は、タブ部分１５４の第１の端部１５６から第２の端部１５８までの距離であり、ブリッジ長Ｌ４は、ブリッジ部分１６２の第１の端部１６４から第２の端部１６６までの距離である。タブ長Ｌ３は、各ブリッジ部分１６２のブリッジ長Ｌ４よりも長い。いくつかの実施形態では、ブリッジ長Ｌ４は、タブ長Ｌ３の２０％～５０％、例えばタブ長Ｌ３の３０％～４０％である。

【００２０】

いくつかの実施形態では、２つ以上のタブ部分１５４は、タブ部分１５４の１つ又は複数の対として配置されている。タブ部分１５４の各対は、直径方向で互いに逆側に配置された２つのタブ部分１５４を含む。いくつかの実施形態では、第２の電極１０８は、第１の電極１０６の相対する辺又は端部に配置された２つのタブ部分１５４のみを含んでいてもよい。いくつかの実施形態では、図１及び２に示すように、第２の電極１０８は、４つのタブ部分１５４と、隣接するタブ部分１５４を相互接続する４つのブリッジ部分１６２と、を含む。この実施形態では、４つのタブ部分１５４は、直径方向で互いに逆側にある

２対のタブ部分１５４として配置されている。さらに、図示のように、第２の端子１５２は、タブ部分１５４の１つの第２の端部１５８から延びた状態で第２の端部１５８と一体に形成されている。

【００２１】

図１～４を参照すると、第１の電極１０６及び第２の電極１０８の少なくとも一方は、タブ部分１３２の第１の端部１３４とブリッジ部分１４０の第１の端部１４２との間に形成された中央開口部を有する。図３及び４では、第１の電極１０６は中央開口部１４６を有する。ただし、第１の電極１０６は、図１０及び１１に示すように、中央開口部が第２の電極１０８内に設けられている場合には中央開口部１４６を含む必要はないということを理解されたい。或いは、第２の電極１０８は、中央開口部１４６が第１の電極１０６内に設けられている場合には中央開口部を含む必要はない。さらに図１～４を参照すると、第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２は、第１の電極１０６及び第２の電極１０８に概ね対応する幾何学形状をそれぞれ有する。したがって、第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２は、各々、第１の電極１０６及び第２の電極１０８の同様の部分に対応するタブ部分１７０、１７２及びブリッジ部分１７４、１７６を有する。ただし、第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２は、各々、第1の電極１０６及び第２の電極１０８上に配置された場合に、第１の電極１０６の外周１３８及び第２の電極１０８の外周１６０を越えて短手方向に延びる外周１７８、１８０をそれぞれ有する。この構成によって、第１の電極絶縁体１１１と第１の支持ポリマー１０３との間、及び第２の電極絶縁体１１２と第２の支持ポリマー１０５との間の結合が容易になる。ただし、第1の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２が第1の電極１０６及び第２の電極１０８上に配置された場合に、第1の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２の外周１７８、１８０が、第１の電極１０６の外周１３８と第２の電極１０８の外周１６０とにそれぞれ対応する実施形態が企図されていることを理解されたい。

【００２２】

いくつかの実施形態では、第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２は、概ね、同じ構造及び組成を含むことを理解されたい。したがって、いくつかの実施形態では、第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２は、各々、第１の面１８２、１８４及び反対側の第２の面１８６、１８８をそれぞれ含む。いくつかの実施形態では、第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２は、各々、第１の電極１０６の内面１２８と第２の電極１０８の内面１５０とにそれぞれ真空結合されたポリマー材料である。例えば、本明細書に詳述するように、第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２は、高誘電率ポリマーを含んでいてもよい。

【００２３】

次いで、図２～４を参照すると、人工筋肉１０１が、第１の電極１０６の第１の端子１３０及び第２の電極１０８の第２の端子１５２が、ハウジング１１０の外周、すなわち、第１のフィルム層１２２及び第２のフィルム層１２４を越えて延びた状態で組み立てられた形態で示されている。図２に示すように、第１の電極１０６上には第２の電極１０８が積層されているため、第１の電極１０６及び第１のフィルム層１２２は図示されていない。組み立てられた形態において、第１の電極１０６、第２の電極１０８、第１の電極絶縁体１１１、第２の電極絶縁体１１２、第１の支持ポリマー１０３、及び第２の支持ポリマー１０５が、第１のフィルム層１２２と第２のフィルム層１２４との間に挟まれている。第１のフィルム層１２２は、第１の電極１０６の外周１３８及び第２の電極１０８の外周１６０を囲む領域において、第２のフィルム層１２４に部分的にシールされている。いくつかの実施形態では、第１のフィルム層１２２は、第２のフィルム層１２４にヒートシールされている。具体的には、いくつかの実施形態では、第１のフィルム層１２２は、第２のフィルム層１２４にシールされて、第１の電極１０６及び第２の電極１０８を囲むシール部分１９０を画定する。第１のフィルム層１２２及び第２のフィルム層１２４は、接着剤、ヒートシール、又は同種のものを使用するといった任意の好適な方法でシールすることができる。

【００２４】
第１の電極１０６、第２の電極１０８、第１の電極絶縁体１１１、第２の電極絶縁体１１２、第１の支持ポリマー１０３、及び第２の支持ポリマー１０５は、第１のフィルム層１２２が第２のフィルム層１２４をシールすることを防止するバリアを提供して、未シール部分１９２を形成する。シール部分１９０は、未シール部分１９２を取り囲む。ハウジング１１０の未シール部分１９２は、電極対１０４が設けられた電極領域１９４と、電極領域１９４に囲まれた拡張可能な流体領域１９６と、を含む。第１の電極１０６及び第２の電極１０８の中央開口部１４６、１６８は、拡張可能な流体領域１９６を形成し、互いに軸線方向に積層されるように配置されている。図示されていないが、ハウジング１１０は、電極対１０４の幾何学形状に適合するように切断して、人工筋肉１０１の大きさ、すなわち、シール部分１９０の大きさを減少させることができる。

【００２５】
誘電性流体１９８が未シール部分１９２内に提供され、第１の電極１０６と第２の電極１０８との間を自由に流れる。本明細書で使用する「誘電性」流体は、導電によらずに電力を伝達し、したがって、電気伝導率が低い媒体又は材料である。いくつかの非限定的な誘電性流体の例は、パーフルオロアルカン、変圧器油、及び脱イオン水を含む。誘電性流体１９８は、針又はその他の好適な注入デバイスを用いて人工筋肉１０１の未シール部分１９２内に注入してもよいことを理解されたい。

【００２６】
次いで、図３及び４を参照すると、人工筋肉１０１は、非作動状態と作動状態との間で作動可能である。非作動状態では、図９に示すように、第１の電極１０６及び第２の電極１０８は、第１の電極１０６及び第２の電極１０８の中央開口部１４６，１６８及びタブ部分１３２、１５４の第１の端部１３４、１５６の近接位置では互いに部分的に離間している。タブ部分１３２、１５４の第２の端部１３６、１５８は、ハウジング１１０が第１の電極１０６の外周１３８及び第２の電極１０８の外周１６０にシールされているため、互いに同じ位置関係にある。作動状態では、図１０に示すように、第１の電極１０６及び第２の電極１０８が互いに接触し、互いに平行に配向されて、誘電性流体１９８を拡張可能な流体領域１９６内に押し込む。これによって、誘電性流体１９８は、第１の電極１０６及び第２の電極１０８の中央開口部１４６、１６８を通って流れ、拡張可能な流体領域１９６を膨張させる。

【００２７】
次いで、図３を参照すると、人工筋肉１０１が非作動状態で示されている。電極対１０４は、ハウジング１１０の未シール部分１９２の電極領域１９４内に設けられている。第１の電極１０６の中央開口部１４６及び第２の電極１０８の中央開口部１６８は、拡張可能な流体領域１９６内で同軸に整列されている。非作動状態では、第１の電極１０６及び第２の電極１０８は互いに部分的に離間し、非平行である。第１のフィルム層１２２が電極対１０４の周囲の第２のフィルム層１２４にシールされているため、タブ部分１３２、１５４の第２の端部１３６、１５８は互いに接近し、又は接触する。したがって、誘電性流体１９８は、第１の電極１０６と第２の電極１０８との間に提供され、それによって、タブ部分１３２、１５４の第１の端部１３４、１５６は拡張可能な流体領域１９６の近接位置で分離する。言い換えれば、第１の電極１０６のタブ部分１３２の第１の端部１３４と第２の電極１０８のタブ部分１５４の第１の端部１５６との間の距離は、第１の電極１０６のタブ部分１３２の第２の端部１３６と第２の電極１０８のタブ部分１５４の第２の端部１５８との間の距離よりも大きい。これによって、作動時に電極対１０４は拡張可能な流体領域１９６に向かってジッパーする（ファスナ様に閉じる）。いくつかの実施形態では、第１の電極１０６及び第２の電極１０８は可撓性であってもよい。第１の電極１０６及び第２の電極１０８は、第１の電極１０６及び第２の電極１０８のタブ部分１３２、１５４の第２の端部１３６、１５８が互いに接近した状態のままである一方、中央開口部１４６、１６８の近接位置では互いに離間しているように、凸状であってもよい。非作動状態では、拡張可能な流体領域１９６は第１の高さＨ１を有する。

【００２８】
作動時には、図４に示すように、第１の電極１０６及び第２の電極１０８は、第１の電極１０６及び第２の電極１０８のタブ部分１３２、１５４の第２の端部１４４、１５８に向かってジッパーし、それによって、誘電性流体１９８を拡張可能な流体領域１９６内に押し込む。図示のように、作動状態では第１の電極１０６及び第２の電極１０８は互いに平行である。作動状態では、誘電性流体１９８は、拡張可能な流体領域１９６に流入して拡張可能な流体領域１９６を膨張させる。したがって、第１のフィルム層１２２及び第２のフィルム層１２４は反対方向に拡張する。作動状態では、拡張可能な流体領域１９６は、第２の高さＨ２を有し、Ｈ２は、非作動状態にあるときの拡張可能な流体領域１９６の第１の高さＨ１よりも大きい。図示されていないが、電極対１０４は、非作動状態と作動状態との間の位置で部分的に作動可能であることに留意されたい。これにより、拡張可能な流体領域１９６を部分的に膨張させ、必要に応じて調整することができる。

【００２９】
第１の電極１０６及び第２の電極１０８を互いに接近させるために、電源（図１５の電源４８０などの）によって電圧が印加される。いくつかの実施形態では、最大１０ｋＶの電圧を電源から提供して、誘電性流体１９８を介して電界を誘導することができる。その結果として発生する第１の電極１０６と第２の電極１０８との間の引力によって、誘電性流体１９８が拡張可能な流体領域１９６内に流れ込む。拡張可能な流体領域１９６内の誘電性流体１９８からの圧力によって、第１のフィルム層１２２、第１の支持ポリマー１０３、及び第1の電極絶縁体１１１は、第１の電極１０６の中心軸線Ｃに沿って第１の軸線方向に変形し、第２のフィルム層１２４、第２の支持ポリマー１０５、及び第２の電極絶縁体１１２は、第２の電極１０８の中心軸線Ｃに沿って逆向きの第２の軸線方向に変形する。第１の電極１０６及び第２の電極１０８に供給される電圧が停止すると、第１の電極１０６及び第２の電極１０８は、非作動状態の初期の非平行位置に戻る。

【００３０】
本明細書に開示する人工筋肉１０１の本発明の実施形態、具体的には、相互接続ブリッジ部分１７４、１７６を備えるタブ部分１３２、１５４は、Ｅ．　Ａｃｏｍｅ，　Ｓ．　Ｋ．　Ｍｉｔｃｈｅｌｌ、Ｔ．　Ｇ．　Ｍｏｒｒｉｓｓｅｙ、Ｍ．　Ｂ．　Ｅｍｍｅｔｔ、Ｃ．　Ｂｅｎｊａｍｉｎ、Ｍ．　Ｋｉｎｇ、Ｍ．　Ｒａｄａｋｏｖｉｔｚ、及びＣ．　Ｋｅｐｌｉｎｇｅｒによる「Ｈｙｄｒａｕｌｉｃａｌｌｙ　ａｍｐｌｉｆｉｅｄ　ｓｅｌｆ－ｈｅａｌｉｎｇ　ｅｌｅｃｔｒｏｓｔａｔｉｃ　ａｃｔｕａｔｏｒｓ　ｗｉｔｈ　ｍｕｓｃｌｅ－ｌｉｋｅ　ｐｅｒｆｏｒｍａｎｃｅ」（Ｓｃｉｅｎｃｅ　０５　Ｊａｎ　２０１８：　Ｖｏｌ．　３５９，　Ｉｓｓｕｅ　６３７１，　ｐｐ．　６１－６５）と題された論文に記載の油圧増幅自己修復静電（ＨＡＳＥＬ）アクチュエータなどの、タブ部分１３２、１５４を含まないアクチュエータに対する多くの改善策を提供することを理解されたい。第１の電極１０６及び第２の電極１０８の各々の上の２対のタブ部分１３２、１５４を含む人工筋肉１０１の実施形態は、それぞれ、人工筋肉１０１の全体の質量及び厚さを減少させ、作動中に必要な電圧の量を減少させ、均一な放射状に延びる幅を有するドーナツ型電極を含む周知のＨＡＳＥＬアクチュエータと比較して、作動後の結果として生じる力の量を減少させることなく人工筋肉１０１の総体積を減少させる。詳細には、人工筋肉１０１のタブ部分１３２、１５４は、ドーナツ型電極を含むＨＡＳＥＬアクチュエータと比較して、人工筋肉１０１の局所的で均一な油圧作動を提供することによって、増大した作動力を生むジップフロントを提供する。具体的には、タブ部分１３２、１５４の１つの対は、ドーナツ形のＨＡＳＥＬアクチュエータと比較して、単位体積あたり２倍のアクチュエータ電力量を提供し、一方、タブ部分１３２、１５４の２つの対は、単位体積あたり４倍のアクチュエータ電力量を提供する。タブ部分１３２、１５４を相互接続するブリッジ部分１７４、１７６は、作動中に隣接するタブ部分１３２、１５４間の距離を維持することによって、タブ部分１３２、１５４の座屈を制限する。ブリッジ部分１７４、１７６は、タブ部分１３２、１５４と一体に形成されているため、ブリッジ部分１７４、１７６はまた、破断のリスクを増大させる装着位置を解消することによって、タブ部分１３

２、１５４間の漏れを防止する。

【００３１】

動作時には、人工筋肉１０１を作動させると、拡張可能な流体領域１９６の拡張によって、アクチュエータ体積立方センチメートルあたり３ニュートンミリメートル（Ｎ．ｍｍ）、以上の力、例えば、６Ｎ.ｍｍ／ｃｍ^{3}以上、１０Ｎ.ｍｍ／ｃｍ^{3}以上、１５Ｎ.ｍｍ／ｃｍ^{3}以上、２５Ｎ.ｍｍ／ｃｍ^{3}以上、５０Ｎ.ｍｍ／ｃｍ^{3}以上、１００Ｎ.ｍｍ／ｃｍ^{3}以上、又は同種のものなどの力が発生する。実際、理論によって限定されるものではないが、第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２の誘電率を増加させることにより、人工筋肉１０１によって達成可能な作動力がこれに対応して増加する。すなわち、第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２の誘電率は、第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２の誘電率を２倍にすることにより、人工筋肉１０１の達成可能な作動力を２倍にできるように、人工筋肉１０１の達成可能な作動力との線形関係を有する。

【００３２】

さらに、第１の電極１０６及び第２の電極１０８の大きさは、誘電性流体１９８の変位量に比例する。したがって、拡張可能な流体領域１９６内のより大きな変位を望む場合には、電極対１０４の大きさが、拡張可能な流体領域１９６の大きさに対して増加させられる。拡張可能な流体領域１９６の大きさは、第１の電極１０６及び第２の電極１０８の中央開口部１４６、１６８によって画定されることを理解されたい。したがって、拡張可能な流体領域１９６内の変位の程度は、中央開口部１４６、１６８の大きさを増加又は減少させることによって、代替策として又は追加的に制御できることを理解されたい。

【００３３】

次いで、図５Ａ～９を参照しながら、第１の電極１０６などの電極を第１の電極絶縁体１１１などの電極絶縁体に直接結合するための真空結合工程を含む、図１～４の人工筋肉１０１などの人工筋肉を製造する方法について説明する。図５Ａ及び５Ｂは、第１の電極アセンブリ４０Ａ及び第２の電極アセンブリ４０Ｂ（図８及び９）にそれぞれ形成できる材料の層を含む第１の層スタック３０Ａ及び第２の層スタック３０Ｂの概略断面図である。第１の電極アセンブリ４０Ａ及び第２の電極アセンブリ４０Ｂは、図１～４の人工筋肉１０１、又は図１０～１４に関して以下に記載する人工筋肉２０１、３００、３００’などのその他の人工筋肉を形成するために使用できる。第１の層スタック３０Ａは、第１の電極絶縁体１１１と第１の支持ポリマー１０３との間に配置された第1の電極１０６を含み、真空シール工程及びヒートシール工程を受けて第1の電極アセンブリ４０Ａを形成する。第２の層スタック３０Ｂは、第２の電極絶縁体１１２と第２の支持ポリマー１０５との間に配置された第２の電極１０８を含み、真空シール工程及びヒートシール工程を受けて第２の電極アセンブリ４０Ｂを形成する。

【００３４】

第１の電極絶縁体１１１及び第２の電極絶縁体１１２は、各々、高誘電率ポリマーを含んでいてもよい。本明細書で使用される高誘電率ポリマーは、３以上の誘電率を含むポリマーである。いくつかの実施形態では、高誘電率ポリマーは、６以上の誘電率を含んでいてもよい。高誘電率ポリマーは、ハロゲン化ポリマー、例えばＰＶＤＦなどのフルオロ重合体ポリマーを含んでいてもよい。理論によって限定されるものではないが、ＶＤＦ（ビニリデンジフルオリド）モノマーを含むポリマーは、通常、高い誘電率を有する。ＰＶＤＦポリマーの例は、ＰＶＤＦホモポリマー、Ｐ（ＶＤＦ－ＨＦＰ）（ヘキサフルオロプロピレン）コポリマー、Ｐ（ＶＤＦ－ＣＴＦＥ）（クロロトリフルオロエチレン）コポリマー、Ｐ（ＶＤＦ－ＴＦＥ）（テトラフルオロエチレン）コポリマー、Ｐ（ＴＦＥ－ＨＦＰ－ＶＤＦ）ターポリマー、Ｐ（ＶＤＦ－ＴｒＦＥ）コポリマーを含む。追加の高誘電性ポリマーは、Ｐ（ＶＤＦ－ＴｒＦＥ－ＣＦＥ）及びＰ（ＶＤＦ－ＴｒＦＥ－ＣＴＦＥ）ターポリマーなどの、誘電率が２０～５０である高誘電率ターポリマーを含む。さらに別の高誘電率ポリマーは、物理架橋されたフルオロポリマー、化学架橋が可能なフルオロポリマー、及び強誘電性ポリマーを含むフルオロポリマー熱可塑性エラストマーを含む。本明細

書に記載の方法は、高誘電率ポリマーの製造上の困難の克服に有効であるが、本明細書に記載の方法は、３未満の誘電率を有するポリマーを含む、様々な電極絶縁ポリマーを有する人工筋肉を形成するために使用できることを理解されたい。

【００３５】

さらに、第１の支持ポリマー１０３及び第２の支持ポリマー１０５は、各々、第１の電極１０６及び第２の電極１０８を越えてそれぞれ短手方向に延びる張り出し部分３５を含む。張り出し部分３５は、電極絶縁体１１１、１１２と支持ポリマー１０３、１０５との直接的な接触を容易にする。これによって、電極絶縁体１１１、１１２が第１の電極１０６と第２の電極１０８とにそれぞれ真空結合されると、支持ポリマー１０３、１０５の張り出し部分３５が電極絶縁体１１１、１１２にヒートシールされる。

【００３６】

図６を参照すると、第１の層スタック３０Ａが真空バッグ１０内に配置された状態で示されている。図６に示すように、真空バッグ１０は、チューブ１４を真空バッグ１０に接続するための開口部を有するチューブコネクタ１２を含む。また、チューブ１４は流体ポンプ１６に接続されている。したがって、流体ポンプ１６は、チューブ１４を用いて真空バッグ１０に流体結合されている。動作時には、流体ポンプ１６は、真空バッグ１０から空気を除去し、これによって、第１の層スタック３０Ａの第１の電極１０６を第１の電極絶縁体１１１に真空結合させるように構成されている。理論によって限定されるものではないが、第１の電極１０６及び第１の電極絶縁体１１１の両方は、ミクロンレベルのいくつかの面欠陥を含む。空気が真空バッグ１０から除去され、したがって、第１の電極１０６と第１の電極絶縁体１１１との界面から除去されると、第１の電極１０６と第１の電極絶縁体１１１との界面における、第１の電極１０６及び第１の電極絶縁体１１１の両方の面欠陥の存在に起因するミクロンレベルの隙間に持続的な真空が保持される。第１の電極１０６と第１の電極絶縁体１１１との間に保持された持続的な真空によって、第１の電極１０６及び第１の電極絶縁体１１１を真空バッグ１０から除去すると、第１の電極１０６及び第１の電極絶縁体１１１を真空結合状態に保つことができる。

【００３７】

第２の層スタック３０Ｂを同様に真空結合して、第２の層スタック３０Ｂの第２の電極１０８と第２の電極絶縁体１１２との間に持続的な真空を保持できることを理解されたい。いくつかの実施形態では、第１の層スタック３０Ａ及び第２の層スタック３０Ｂの両方は、真空シール動作中に真空バッグ１０内に一緒に配置されていてもよく、別の実施形態では、第１の層スタック３０Ａ及び第２の層スタック３０Ｂは、別々に真空シールされていてもよい。さらに、本明細書に記載の真空結合技法によって、第１及び第２の電極絶縁体１１１、１１２としての高誘電率ポリマーの使用が容易になるが、これらの技法はまた、第１及び第２の電極絶縁体１１１、１１２間の均一な密着と、それぞれの第１及び第２の電極１０６、１０８間の均一な密着と、を容易にし、それによって、さらに人工筋肉の性能を向上させる。

【００３８】

次いで、図７を参照すると、ヒートシールデバイス１８を用いたヒートシール工程が示されている。図５Ａ及び５Ｂの第１及び第２の層スタック３０Ａ、３０Ｂは、真空バッグ１０内に配置され、空気が真空バッグ１０から除去された状態でヒートシールすることができる。いくつかの実施形態では、第１の層スタック３０Ａ及び第２の層スタック３０Ｂの両方は、ヒートシール動作中に真空バッグ１０内に一緒に配置されていてもよく、別の実施形態では、第１の層スタック３０Ａ及び第２の層スタック３０Ｂは、別々にヒートシールされてもよい。動作時には、第１及び第２の層スタック３０Ａ、３０Ｂをヒートシールすることで、第１及び第２の支持ポリマー１０３、１０５が、それぞれ第１及び第２の電極１０６、１０８にシールされる（すなわち、ヒートシールされる）。したがって、真空バッグ１０から第１及び第２の層スタック３０Ａ、３０Ｂの各々を除去すると、第１の支持ポリマー１０３及び第２の支持ポリマー１０５を、第１の電極１０６及び第２の電極１０８にそれぞれ結合することができる。さらに、第１及び第２の支持ポリマー１０３、

１０５の張り出し部分３５は、第１及び第２の電極絶縁体１１１、１１２にそれぞれ直接接触することができる。ヒートシール工程の間に、第１の支持ポリマー１０３の張り出し部分３５は、第１の電極絶縁体１１１にヒートシールすることができ、第２の支持ポリマー１０５の張り出し部分３５は、第２の電極絶縁体１１２にヒートシールすることができる。実際、第１及び第２の電極絶縁体１１１、１１２は、電極への効果的なヒートシールができない高誘電性ポリマーを含んでいてもよいが、支持ポリマー１０３、１０５の材料（例えば、ＢＯＰＰ）はヒートシールしやすく、第１及び第２の支持ポリマー１０３、１０５の張り出し部分３５を第１及び第２の電極絶縁体１１１、１１２にそれぞれ容易に結合することができる。したがって、真空バッグ１０から第１及び第２の層スタック３０Ａ、３０Ｂの各々を除去すると、第１及び第２の支持ポリマー１０３は、第１及び第２の電極１０６、１０８及び第１及び第２の電極絶縁体１１１、１１２の両方にそれぞれ結合される。

【００３９】

次いで、図８を参照すると、第１の電極アセンブリ４０Ａ及び第２の電極アセンブリ４０Ｂが示されている。第１の電極アセンブリ４０Ａ及び第２の電極アセンブリ４０Ｂは、図５～７に関して前述した真空シール及びヒートシール工程を用いて形成される。例えば、第１の電極アセンブリ４０Ａは、第１の層スタック３０Ａを真空シールし且つヒートシールすることにより形成され、第２の電極アセンブリ４０Ｂは、第２の層スタック３０Ｂを真空シールし且つヒートシールすることにより形成されている。実際、真空バッグ１０の第１及び第２の層スタック３０Ａ、３０Ｂを除去すると、各電極１０６、１０８は、それぞれの電極絶縁体１１１、１１２に真空結合された状態を保ち、この状態で、層スタック３０Ａ、３０Ｂは、第１の電極アセンブリ４０Ａ及び第２の電極アセンブリ４０Ｂを含む。

【００４０】

図５Ａ及び５Ｂを再度参照すると、本明細書に記載の方法の真空シール及びヒートシール工程の間に、第１の放熱層５０及び第２の放熱層５２を真空バッグ１０内に配置してもよい。図５Ａで、第１の放熱層５０は、第１の電極絶縁体１１１と真空バッグ１０との間に配置され、第２の放熱層５２は、第１の支持ポリマー１０３と真空バッグ１０との間に配置されている。図５Ｂで、第１の放熱層５０は、第２の電極絶縁体１１２と真空バッグ１０との間に配置され、第２の放熱層５２は、第２の支持ポリマー１０５と真空バッグ１０との間に配置されている。実際、第１及び第２の放熱層５０、５２は、各層スタック３０Ａ、３０Ｂの両側に配置されている。動作時に、第１の放熱層５０及び第２の放熱層５２は、真空シール及びヒートシール工程中に層スタック３０Ａ、３０Ｂが真空バッグ１０に結合するのを防止する。ヒートシール工程後に、第１及び第２の放熱層５０、５２を、層スタック３０Ａ、３０Ｂとの接触から除去してもよい。第１及び第２の放熱層５０、５２は、炭素繊維樹脂又は紙などの限定されたテクスチャを有する材料を含む。さらに、第１及び第２の放熱層５０、５２は、一定の空気流を透過させる多孔質材料を含んでいてもよい。

【００４１】

次いで、図８及び９を参照すると、第１の電極アセンブリ４０Ａ及び第２の電極アセンブリ４０Ｂは、図１～４の人工筋肉１０１などの人工筋肉を形成するために使用できる。図８は、第１のフィルム層１２２と第２のフィルム層１２４との間に配置された第１の電極アセンブリ４０Ａ及び第２の電極アセンブリ４０Ｂの概略断面図である。特に、人工筋肉１０１を形成するために、第１及び第２の電極アセンブリ４０Ａ、４０Ｂが製造されると、第１の電極アセンブリ４０Ａ及び第２の電極アセンブリ４０Ｂは、第１のフィルム層１２２と第２のフィルム層１２４との間に積層構成に配置されてもよい。積層構成においては、第１の電極アセンブリ４０Ａの第１の電極絶縁体１１１が第２の電極アセンブリ４０Ｂの第２の電極絶縁体１１２に相対し、第１の電極アセンブリ４０Ａの第１の支持ポリマー１０３が第１のフィルム層１２２に相対し、第２の電極アセンブリ４０Ｂの第２の支持ポリマー１０５が第２のフィルム層１２４に相対している。

【００４２】
図１～４の第１の人工筋肉１０１などの人工筋肉を形成するために、第１のフィルム層１２２は、第２のフィルム層１２４にシールされて、第１及び第２の電極アセンブリ４０Ａ、４０Ｂを収容するハウジング１１０を形成する。第１のフィルム層１２２を第２のフィルム層１２４にヒートシールすることによって、第１及び第２のフィルム層１２２、１２４を第１及び第２の電極アセンブリ４０Ａ、４０Ｂが、第１及び第２の支持ポリマー１０３、１０５にそれぞれヒートシールされる。さらに、第１のフィルム層１２２を第２のフィルム層１２４にシールすることによって、ハウジング１１０のシール部分１９０によって囲まれた未シール部分１９２を囲む、ハウジング１１０のシール部分１９０が画定される。第１の電極アセンブリ４０Ａが第２の電極アセンブリ４０Ｂにシールされて人工筋肉１０１が形成されると、誘電性流体１９８（図１～４）は、第１の電極アセンブリ４０Ａと第２の電極アセンブリ４０Ｂとの間の人工筋肉内に注入することができる。
【００４３】
次いで、図１０及び１１を参照すると、図５Ａ～図９の方法を用いて形成できる人工筋肉２０１の別の実施形態が示されている。人工筋肉２０１は、人工筋肉１０１と実質的に同様である。したがって、同様の構造が同様の参照番号で示されている。ただし、図示のように、第１の電極１０６は、中央開口部を含まない。したがって、第２の電極１０８のみが当該電極に形成された中央開口部１６８を含む。図１０に示すように、人工筋肉２０１は、第１の電極１０６が平面状であり、第２の電極１０８が第１の電極１０６から突起している非作動状態にある。非作動状態において、拡張可能な流体領域１９６は、第１の高さＨ３を有する。作動状態においては、図１１に示すように、拡張可能な流体領域１９６は、第１の高さＨ３よりも大きい第２の高さＨ４を有する。第１の電極１０６及び第２の電極１０８の両方とは対照的に、第２の電極１０８内にのみ中央開口部１６８を設けることによって、人工筋肉２０１の一方の側に総変形が形成され得ることを理解されたい。さらに、人工筋肉２０１の片側のみに総変形が形成されるため、人工筋肉２０１の拡張可能な流体領域１９６の第２の高さＨ４は、誘電性流体のその他の全ての寸法、向き、及び体積が同じである場合に、人工筋肉１０１の拡張可能な流体領域１９６の第２の高さＨ２よりも、人工筋肉２０１の中心軸線Ｃに対して垂直な長手方向の軸線からさらに先へ延びている。
【００４４】
図１２～１４に示すように、図５Ａ～９の方法を用いて形成できる人工筋肉３００の別の実施形態が示されている。人工筋肉３００は、人工筋肉１０１（図１）と同様の構造を含み、したがって、動作時に人工筋肉１０１（図１）と同様に動作することを理解されたい。特に、人工筋肉３００は、人工筋肉１０１（図１）に関して説明したタブ部分１３２（図１）の代わりにファン部分３３２を含む。ただし、人工筋肉３００のファン部分３３２とタブ部分１３２の両方は、各々が、概ね、人工筋肉の電極の放射状に延びる部分であり、ブリッジ部分に隣接して配置され、人工筋肉１０１及び２０１に関して前述し、人工筋肉３００に関して以下に記載するように、ジッピング機能を提供することを理解されたい。実際、これらの放射状に延びる部分（例えば、タブ部分及びファン部分）は、各々、動作中の座屈及び破裂を最小限にとどめながら、単位体積あたりのアクチュエータ電力を増加させる。
【００４５】
図１２及び１３を参照すると、人工筋肉３００は、ハウジング３０２と、ハウジング３０２の反対側の面に固定された第１の電極３０６及び第２の電極３０８を含む電極対３０４と、第１の電極３０６に固定された第１の電極絶縁体３１０と、第２の電極３０８に固定された第２の電極絶縁体３１２と、を含む。いくつかの実施形態では、ハウジング３０２は、第１の内面３１４及び第２の内面３１６などの１対の相対する内面と、第１の外面３１８及び第２の外面３２０などの１対の相対する外面と、を含むワンピースモノリシック層である。いくつかの実施形態では、ハウジング３０２の第１の内面３１４及び第２の内面３１６はヒートシールが可能である。別の実施形態では、ハウジング３０２は、第１

のフィルム層３２２及び第２のフィルム層３２４などの個別に製造された１対のフィルム層であってもよい。したがって、第１のフィルム層３２２は、第１の内面３１４及び第１の外面３１８を含み、第２のフィルム層３２４は、第２の内面３１６及び第２の外面３２０を含む。

【００４６】

上記の理由付けの説明を通して、ワンピースハウジングとは対照的な、第１のフィルム層３２２及び第２のフィルム層３２４を含むハウジング３０２に言及してもよい。いずれの構成も企図されることを理解されたい。いくつかの実施形態では、第１のフィルム層３２２及び第２のフィルム層３２４は、概ね、同じ構造及び組成を含む。例えば、いくつかの実施形態では、第１のフィルム層３２２及び第２のフィルム層３２４は、各々、ＢＯＰＰを含む。

【００４７】

図１２に示すように、人工筋肉３００は、ハウジング３０２の第１の電極３０６と第１の内面３１４との間に配置された第１の支持ポリマー３０３と、ハウジング３０２の第２の電極３０８と第２の内面３１６との間に配置された第２の支持ポリマー３０５と、をさらに含んでいてもよい。前述したように、第１及び第２の支持ポリマー３０３、３０５は、第１及び第２の電極絶縁体３１０、３１２として高誘電性ポリマーを使用することを可能にする真空結合工程を支援する。いくつかの実施形態では、第１の支持ポリマー３０３及び第２の支持ポリマー３０５は、概ね、同じ構造及び組成を含む。例えば、いくつかの実施形態では、第１の支持ポリマー３０３及び第２の支持ポリマー３０５は、各々、ＢＯＰＰを含む。

【００４８】

第１の電極３０６及び第２の電極３０８は、各々、第１のフィルム層３２２と第２のフィルム層３２４との間に配置されている。いくつかの実施形態では、第１の電極３０６及び第２の電極３０８は、各々、例えば、マイラー（登録商標）などのアルミニウム被覆ポリエステルである。ただし、第１の電極３０６及び第２の電極３０８は、マイラー（登録商標）などのポリエステルで被覆が可能な、銅、銀、チタン、白金又は同種のものの電気結合材料を含んでいてもよいことを理解されたい。第１の電極３０６及び第２の電極３０８は、可撓性材料又は非可撓性材料（例えば、剛性材料）を含んでいてもよく、いくつかの実施形態では、伸縮性材料を含んでいてもよい。さらに、第１の電極３０６及び第２の電極３０８がヒドロゲル材料を含む実施形態が企図される。また、第１の電極３０６及び第２の電極３０８の一方は負帯電電極であり、第１の電極３０６及び第２の電極３０８の他方は正帯電電極である。本明細書に記載する目的のために、いずれかの電極３０６、３０８は、人工筋肉３００の他方の電極３０６、３０８が負に帯電している限り、正に帯電していてもよい。

【００４９】

第１の電極３０６は、フィルムに相対する面３２６と、反対側の内面３２８と、を有する。第１の電極３０６は、第１のフィルム層３２２、具体的には、第１のフィルム層３２２の第１の内面３１４に近接して配置されている。すなわち、第１の電極３０６は、第１のフィルム層３２２の第１の内面３１４に接触していてもよいし、第１の電極３０６と第１のフィルム層３２２の第１の内面３１４との間に配置された第１の支持ポリマー３０３に接触していてもよい。さらに、第１の電極３０６は、第１の電極３０６から第１のフィルム層３２２の縁部を越えて延びる第1の端子を含み、第１の端子３３０を電源に接続して第１の電極３０６を作動させることができる。具体的には、端子は、直接又は直列に、作動システム４００の電源及びコントローラに結合されている（図１５）。同様に、第２の電極３０８は、フィルムに相対する面３４８と、反対側の内面３５０と、を有する。第２の電極３０８は、第２のフィルム層３２４、具体的には、第２のフィルム層３２４の第２の内面３１６に近接して配置されている。すなわち、第２の電極３０８は、第２のフィルム層３２４の第２の内面３１６に接触していてもよく、第２の電極３０８と第２のフィルム層３２４の第２の内面３１６との間に配置された第２の支持ポリマー３０５に接触し

ていてもよい。第２の電極３０８は、第２の電極３０８から第２のフィルム層３２４の縁部を越えて延びる第２の端子３５２を含み、第２の端子３５２を作動システム４００の電源及びコントローラに接続して（図１５）、第２の電極３０８を作動させることができる。

【００５０】

次いで、第１の電極３０６について述べると、第１の電極３０６は、人工筋肉３００の中心軸線Ｃから放射状に延びる２つ以上のファン部分３３２を含む。いくつかの実施形態では、第１の電極３０６は、第１の電極３０６の相対する辺又は端部に配置された２つのファン部分３３２のみを含む。いくつかの実施形態では、第１の電極３０６は、３つ、４つ、又は５つのファン部分３３２などの３つ以上のファン部分３３２を含む。第１の電極３０６が偶数のファン部分３３２を含む実施形態では、ファン部分３３２は、２つ以上の対のファン部分３３２に配置されていてもよい。図１２に示すように、第１の電極３０６は、４つのファン部分３３２を含む。この実施形態では、４つのファン部分３３２は、２対のファン部分３３２に配置され、各対の２つの個々のファン部分３３２は、互いに直径方向に逆側にある。

【００５１】

各ファン部分３３２は、第１の辺縁部３３２ａと、反対側の第２の辺縁部３３２ｂと、を有する。図示のように、第１の端子３３０は、ファン部分３３２の１つの第２の端部３３６から延びた状態で第２の端部３３６と一体に形成されている。チャネル３３３は、隣接するファン部分３３２の相対する辺縁部３３２ａ、３３２ｂによって少なくとも部分的に画定され、したがって、中心軸線Ｃに向かって放射状に延びている。チャネル３３３は、隣接するファン部分３３２を相互接続するブリッジ部分３４０の端部３４０ａで終端する。

【００５２】

図１２に示すように、ファン部分３３２とブリッジ部分３４０との境界を描くために分割線Ｄが含まれている。分割線Ｄは、ファン部分３３２の辺縁部３３２ａ、３３２ｂから辺縁部３３２ａ、３３２ｂと同一直線上にあるファン部分３３２の第１の端部３３４まで延びている。図１３では図を見やすくするために分割線Ｄが示され、ファン部分３３２はブリッジ部分３４０と一体であることを理解されたい。ファン部分３３２の第１の端部３３４は、隣接するブリッジ部分３４０の間に延び、ファン部分３３２の内側長を画定する。ファン部分３３２の幾何学形状は、第１の辺縁部３３２ａと第２の辺縁部３３２ｂとの間の中心軸線Ｃに向かって先細になっているため、ファン部分３３２の第２の端部３３６は、ファン部分３３２の内側長よりも大きいファン部分３３２の外側長を画定する。

【００５３】

さらに、各ファン部分３３２は、ファン部分３３２の第２の端部３３６と第１の辺縁部３３２ａ及び第２の辺縁部３３２ｂの各々との交点によって画定される１対の角部３３２ｃを有する。実施形態では、角部３３２ｃは、９０度以下の角度で形成されている。別の実施形態では、角部３３２ｃは鋭角に形成されている。

【００５４】

図１２に示すように、各ファン部分３３２は、ファン部分３３２の第１の端部３３４とファン部分３３２の第２の端部３３６との間の、第１の辺縁部３３２ａと、第１の辺縁部３３２ａと同一線上にある分割線Ｄと、に沿った距離によって画定される第１の辺長を有する。また、各ファン部分３３２は、ファン部分３３２の第１の端部３３４とファン部分３３２の第２の端部３３６との間の、第２の辺縁部３３２ｂと、第２の辺縁部３３２ｂと同一線上にある分割線Ｄと、に沿った距離によって画定される第２の辺長を有する。実施形態では、第１の辺長は、第１の電極３０６が楕円体の幾何学形状を有するように、ファン部分３３２の第２の辺長よりも大きい。

【００５５】

各ファン部分３３２の第２の端部３３６、第１の辺縁部３３２ａ及び第２の辺縁部３３２ｂ、並びにファン部分３３２を相互接続するブリッジ部分３４０が、第１の電極３０６

の外周３３８を画定する。実施形態では、中央開口部３４６が、ファン部分３３２とブリッジ部分３４０との間の第１の電極３０６内に形成され、中心軸線Ｃと同軸である。各ファン部分３３２は、中央開口部３４６の外周３４２からファン部分３３２の第２の端部３３６まで延びるファン長を有する。各ブリッジ部分３４０は、中央開口部３４６の外周３４２からブリッジ部分３４０の端部３４０ａ、すなわちチャネル３３３まで延びるブリッジ長を有する。図示のように、ブリッジ部分３４０の各々のブリッジ長は、実質的に互いに等しい。各チャネル３３３は、ブリッジ部分３４０の端部３４０ａとファン部分３３２の第２の端部との間の距離によって画定されるチャネル長を有する。ブリッジ部分３４０の各々のブリッジ長が実質的に互いに等しく、ファン部分３３２の第１の辺長がファン部分３３２の第２の辺長よりも大きいため、相対するチャネル３３３の第１の対は、相対するチャネル３３３の第２の対のチャネル長よりも大きいチャネル長を有する。図示のように、隣接するファン部分３３２の相対する辺縁部３３２ａ、３３２ｂ間に延びるチャネル３３３の幅は、相対する辺縁部３３２ａ、３３２ｂが実質的に互いに平行であるため、実質的に一定のままである。

【００５６】

実施形態では、中央開口部３４６は、２センチメートル（ｃｍ）～５ｃｍの半径を有する。実施形態では、中央開口部３４６は３ｃｍ～４ｃｍの半径を有する。実施形態では、ファン部分３３２の各々の総ファン面積は、中央開口部３４６の面積の２倍以上である。ファン部分３３２の総ファン面積と中央開口部３４６の面積との比は、人工筋肉３００が作動されたときの第１のフィルム層３２２の総撓み量に直接関係することを理解されたい。実施形態では、ブリッジ長は、ファン長の２０％～５０％である。実施形態では、ブリッジ長は、ファン長の３０％～４０％である。第１の電極３０６が中央開口部３４６を含まない実施形態では、ファン長及びブリッジ長は、中心軸線Ｃと同軸の仮想円の外周から測定することができる。

【００５７】

第１の電極３０６と同様に、第２の電極３０８は、人工筋肉３００の中心軸線Ｃから放射状に延びる２つ以上のファン部分３５４を含む。第２の電極３０８は、第１の電極３０６と実質的に同じ構造を含み、したがって、同じ数のファン部分３５４を含む。具体的には、第２の電極３０８は、４つのファン部分３５４を含むものとして図示されている。ただし、第２の電極３０８は、任意の好適な数のファン部分３５４を含んでいてもよいことを理解されたい。

【００５８】

第２の電極３０８の各ファン部分３５４は、第１の辺縁部３５４ａと、反対側の第２の辺縁部３５４ｂと、を有する。図示のように、第２の端子３５２は、ファン部分３５４の１つの第２の端部３５８から延びた状態で第２の端部３５８と一体に形成されている。チャネル３５５は、隣接するファン部分３５４の相対する辺縁部３５４ａ、３５４ｂによって少なくとも部分的に画定され、したがって、中心軸線Ｃに向かって放射状に延びている。チャネル３５５は、隣接するファン部分３５４を相互接続するブリッジ部分３６２の端部３６２ａで終端する。

【００５９】

図１２に示すように、ファン部分３５４とブリッジ部分３６２との間の境界を描くために追加の分割線Ｄが含まれている。分割線Ｄは、ファン部分３５４の辺縁部３５４ａ、３５４ｂから辺縁部３５４ａ、３５４ｂと同一直線上にあるファン部分３５４の第１の端部３５６まで延びている。図１３では図を見やすくするために分割線Ｄが示され、ファン部分３５４はブリッジ部分３６２と一体であることを理解されたい。ファン部分３５４の第１の端部３５６は、隣接するブリッジ部分３６２の間に延び、ファン部分３５４の内側長を画定する。ファン部分３５４の幾何学形状は、第１の辺縁部３５４ａと第２の辺縁部３５４ｂとの間の中心軸線Ｃに向かって先細になっているため、ファン部分３５４の第２の端部３５８は、ファン部分３５４の内側長よりも大きいファン部分３５４の外側長を画定する。

【００６０】
さらに、各ファン部分３５４は、ファン部分３５４の第２の端部３５８と第１の辺縁部３５４ａと第２の辺縁部３５４ｂとの交点によって画定される１対の角部３５４ｃを有する。実施形態では、角部３５４ｃは、９０度以下の角度で形成されている。別の実施形態では、角部３５４ｃは鋭角に形成されている。人工筋肉３００の作動中、第１の電極３０６の角部３３２ｃ及び第２の電極３０８の角部３５４ｃは、第１の電極３０６及び第２の電極３０８の残りの部分と比較して低い電圧で互いに引き付けられるように構成されている。したがって、最初に角部３３２ｃ、３５４ｃで人工筋肉３００を作動させると、第１の電極３０６の外周３３８及び第２の電極３０８の外周３６０がより低い電圧で引き付けられ、人工筋肉３００の作動後に第１の電極３０６と第２の電極３０８との間に形成されるエアポケット又は空隙発生の可能性が減少する。

【００６１】
図１２及び１３に示すように、実施形態では、各ファン部分３５４の第１の辺縁部３５４ａは、ファン部分３５４の第１の端部３５６とファン部分３５４の第２の端部３５８との間の、第１の辺縁部３５４ａと、第１の辺縁部３５４ａと同一線上にある分割線Ｄと、に沿った距離によって画定される第１の辺長を有する。また、各ファン部分３５４は、ファン部分３５４の第１の端部３５６とファン部分３５４の第２の端部３５８との間の、第２の辺縁部３５４ｂと、第２の辺縁部３５４ｂと同一線上にある分割線Ｄと、に沿った距離によって画定される第２の辺長を有する。実施形態では、第１の辺長は、第２の電極３０８が第1の電極３０６の幾何学形状に対応する楕円体の幾何学形状を有するように、ファン部分３５４の第２の辺長よりも大きい。

【００６２】
各ファン部分３５４の第２の端部３５８、第１の辺縁部３５４ａ及び第２の辺縁部３５４ｂ、並びにファン部分３５４を相互接続するブリッジ部分３６２が、第２の電極３０８の外周３６０を画定する。実施形態では、中央開口部３６８が、ファン部分３５４とブリッジ部分３６２との間の第２の電極３０８内に形成され、中心軸線Ｃと同軸である。各ファン部分３５４は、中央開口部３６８の外周３６４からファン部分３５４の第２の端部３５８まで延びるファン長を有する。各ブリッジ部分３６２は、中央開口部３６８からブリッジ部分３６２の端部３６２ａ、すなわちチャネル３５５まで延びるブリッジ長を有する。図示のように、ブリッジ部分３６２の各々のブリッジ長は、実質的に互いに等しい。各チャネル３５５は、ブリッジ部分３６２の端部３６２ａとファン部分３５４の第２の端部との間の距離によって画定されるチャネル長を有する。ブリッジ部分３６２の各々のブリッジ長が実質的に互いに等しく、ファン部分３５４の第１の辺長がファン部分３５４の第２の辺長よりも大きいため、相対するチャネル３５５の第1の対は、相対するチャネル３５５の第２の対のチャネル長よりも大きいチャネル長を有する。図示のように、隣接するファン部分３５４の相対する辺縁部３５４ａ、３５４ｂの間に延びるチャネル３５５の幅は、相対する辺縁部３５４ａ、３５４ｂが実質的に互いに平行であるため、実質的に一定のままである。

【００６３】
実施形態では、中央開口部３６８は、２ｃｍ～５ｃｍの半径を有する。実施形態では、中央開口部３６８は３ｃｍ～４ｃｍの半径を有する。実施形態では、ファン部分３５４の各々の総ファン面積は、中央開口部３６８の面積の２倍以上である。ファン部分３５４の総ファン面積と中央開口部３６８の面積との比は、人工筋肉３００が作動されたときの第２のフィルム層３２４の総撓み量に直接関係することを理解されたい。実施形態では、ブリッジ長は、ファン長の２０％～５０％である。実施形態では、ブリッジ長は、ファン長の３０％～４０％である。第２の電極３０８が中央開口部３６８を含まない実施形態では、ファン長及びブリッジ長は、中心軸線Ｃと同軸の仮想円の外周から測定することができる。

【００６４】
本明細書に記載のように、第１の電極３０６及び第２の電極３０８の各々は、中心軸線

Ｃと同軸の中央開口部３４６、３６８を有しているが、第１の電極３０６は、中央開口部３６８が第２の電極３０８内に設けられている場合には中央開口部３４６を含む必要はないことを理解されたい。或いは、第２の電極３０８は、中央開口部３４６が第１の電極３０６内に設けられている場合には中央開口部３６８を含む必要はない。

【００６５】

図１２を再度参照すると、第１の電極絶縁体３１０及び第２の電極絶縁体３１２は、各々、第１の電極３０６及び第２の電極３０８の幾何学形状に概ね対応する実質的に楕円体の幾何学形状を有する。したがって、第１の電極絶縁体３１０及び第２の電極絶縁体３１２は、各々、第１の電極３０６及び第２の電極３０８上の同様の部分に対応するファン部分３７０、３７２及びブリッジ部分３７４、３７６を有する。ただし、第１の電極絶縁体３１０及び第２の電極絶縁体３１２は、各々、第１の電極３０６の外周３３８及び第２の電極３０８の外周３６０を越えて短手方向に延びる外周３７８、３８０を有する。これによって、第１の電極絶縁体３１０と第１の支持ポリマー３０３との間及び第２の電極絶縁体３１２と第２の支持ポリマー３０５との間の結合が容易になる。ただし、第１の電極絶縁体３１０及び第２の電極絶縁体３１２の外周３７８、３８０が、第1の電極３０６及び第２の電極３０８上に配置された場合に、第１の電極３０６の外周３３８と第２の電極３０８の外周３６０とにそれぞれ対応する実施形態が企図されていることを理解されたい。

【００６６】

いくつかの実施形態では、第１の電極絶縁体３１０及び第２の電極絶縁体３１２は、概ね、同じ構造及び組成を含むことを理解されたい。したがって、いくつかの実施形態では、第１の電極絶縁体３１０及び第２の電極絶縁体３１２は、各々、第１の面３８２、３８４と、反対側の第２の面３８６、３８８と、を含む。いくつかの実施形態では、第１の電極絶縁体３１０及び第２の電極絶縁体３１２は、各々、第１の電極３０６の内面３２８と第２の電極３０８の内面３５０とにそれぞれ真空結合されたポリマー材料である。例えば、第１の電極絶縁体３１０及び第２の電極絶縁体３１２は、高誘電率ポリマーを含んでいてもよい。

【００６７】

次いで、図１３を参照すると、人工筋肉３００が、第１の電極３０６の第１の端子３３０及び第２の電極３０８の第２の端子３５２が、ハウジング３０２の外周、すなわち、第１のフィルム層３２２（図１２）及び第２のフィルム層３２４を越えて延びた状態で組み立てられた形態で示されている。第１の電極３０６上には第２の電極３０８が積層されているため、第１のフィルム層３２２（図１２）は図示されていない。次いで、図１２及び１３を参照すると、組み立てられた形態において、第１の電極３０６、第２の電極３０８、第１の電極絶縁体３１０、第２の電極絶縁体３１２、第１の支持ポリマー３０３、及び第２の支持ポリマー３０５が、第１のフィルム層３２２と第２のフィルム層３２４との間に挟まれている。第１のフィルム層３２２は、第１の電極３０６の外周３３８及び第２の電極３０８の外周３６０を囲む領域において、第２のフィルム層３２４に部分的にシールされている。いくつかの実施形態では、第１のフィルム層３２２は、第２のフィルム層３２４にヒートシールされている。具体的には、いくつかの実施形態では、第１のフィルム層３２２は、第２のフィルム層３２４にシールされて、第１の電極３０６及び第２の電極３０８を囲むシール部分３９０を画定する。第１のフィルム層３２２（図１２）及び第２のフィルム層３２４は、接着剤、ヒートシール、真空シール、又は同種のものを使用するといった任意の好適な方法でシールすることができる。

【００６８】

さらに図１２及び１３を参照すると、第１の電極３０６、第２の電極３０８、第１の電極絶縁体３１０、及び第２の電極絶縁体３１２、第１の支持ポリマー３０３、並びに第２の支持ポリマー３０５は、第１のフィルム層３２２が第２のフィルム層３２４にシールされるのを防止するバリアを提供して、未シール部分３９２を形成する。ハウジング３０２の未シール部分３９２は、電極対３０４が設けられた電極領域３９４と、電極領域３９４に囲まれた拡張可能な流体領域３９６と、を含む。第１の電極３０６及び第２の電極３０

８の中央開口部３４６、３６８は、拡張可能な流体領域３９６を画定し、互いに軸線方向に積層されるように配置されている。図示されていないが、ハウジング３０２は、電極対３０４の幾何学形状に適合するように切断して、人工筋肉３００の大きさ、すなわち、シール部分３９０の大きさを減少させることができる。誘電性流体が未シール部分３９２内に提供され、第１の電極３０６と第２の電極３０８との間を自由に流れる。

【００６９】

次いで、図１４を参照すると、人工筋肉３００’の別の実施形態が示されている。人工筋肉３００’は、本明細書に記載の人工筋肉３００と同様であることを理解されたい。したがって、同様の構造が同様の参照番号で示されている。人工筋肉３００’の第１の電極３０６及び第２の電極３０８は、本明細書に記載の人工筋肉３００の第１の電極３０６及び第２の電極３０８の楕円体幾何学形状とは対照的に円形の幾何学形状を有する。図１４に示すように、第２の電極３０８に関して、第１の辺縁部３５４ａの第１の辺縁長は、第２の辺縁部３５４ｂの第２の辺縁長に等しい。したがって、ファン部分３５４の相対する辺縁部３５４ａ、３５４ｂ間に形成されるチャネル３５５は、各々、等しい長さを有する。図１５では、第１の電極３０６は、第２の電極３０８の下に隠れて見えないが、第１の電極３０６もまた、第２の電極３０８の幾何学形状に対応する円形の幾何学形状を有することを理解されたい。

【００７０】

次いで、図１２及び１３を参照しながら、人工筋肉３００の作動について説明する。非作動状態では、第１の電極３０６及び第２の電極３０８は、第１の電極３０６及び第２の電極３０８の中央開口部３４６、３６８及びファン部分３３２、３５４の第１の端部３３４、３５６の近接位置で互いに部分的に離間している。ファン部分３３２、３５４の第２の端部３３６、３５８は、ハウジング３０２が第１の電極３０６の外周３３８及び第２の電極３０８の外周３６０にシールされているため、互いに同じ位置関係にある。これが、同様に動作する人工筋肉１０１に関して図３に示されている。作動状態では、第１の電極３０６及び第２の電極３０８が互いに接触し、互いに平行に配向されて、誘電性流体３９８を拡張可能な流体領域３９６に押し込む。これによって、誘電性流体３９８は、第１の電極３０６及び第２の電極３０８の中央開口部３４６、３６８を通って流れ、拡張可能な流体領域３９６を膨張させる。これが、同様に動作する人工筋肉１０１に関して図４に示されている。

【００７１】

非作動状態では、第１の電極３０６のファン部分３３２の第１の端部３３４と第２の電極３０８のファン部分３５４の第１の端部３５６との間の距離は、第１の電極３０６のファン部分３３２の第２の端部３３６と第２の電極３０８のファン部分３５４の第２の端部３５８との間の距離よりも大きい。これによって、作動時に電極対３０４は拡張可能な流体領域３９６に向かってジッパーする。作動時には、第１の電極３０６及び第２の電極３０８は、第１の電極３０６及び第２の電極３０８のファン部分３３２、３５４の第２の端部３３６、３５８から互いへ向かってジッパーし、それによって、誘電性流体３９８を拡張可能な流体領域３９６内に押し込む。作動状態では、第１の電極３０６及び第２の電極３０８は互いに平行である。作動状態において、誘電性流体３９８は、拡張可能な流体領域３９６に流入し、拡張可能な流体領域３９６を膨張させる。したがって、第１のフィルム層３２２及び第２のフィルム層３２４は反対方向に拡張する。

【００７２】

次いで、図１５を参照すると、人工筋肉１０１、２０１、３００、３００’を動作させるための作動システム４００を設けることができる。作動システム４００は、コントローラ５００と、操作デバイス４６０と、電源４８０と、表示デバイス４２０と、ネットワークインタフェースハードウェア４４０と、これらの構成要素を通信可能に結合する通信経路４１０と、を含んでいてもよい。コントローラ５００は、プロセッサ５２０と、様々な構成要素が通信可能に結合された非一時的電子メモリ５４０と、を含む。いくつかの実施形態では、プロセッサ５２０及び非一時的電子メモリ５４０及び／又はその他の構成要素

は、単一のデバイス内に含まれる。別の実施形態では、プロセッサ５２０及び非一時的電子メモリ５４０及び／又はその他の構成要素は、通信可能に結合された複数のデバイス間に分散されていてもよい。コントローラ５００は、１組の機械可読命令を記憶する非一時的電子メモリ５４０を含む。プロセッサ５２０は、非一時的電子メモリ５４０内に記憶された機械可読命令を実行する。非一時的電子メモリ５４０は、ＲＡＭ、ＲＯＭ、フラッシュメモリ、ハードドライブ、又は機械可読命令がプロセッサ５２０からアクセスできるように機械可読命令を記憶することができる任意のデバイスを含んでいてもよい。したがって、本明細書に記載の作動システム４００は、事前にプログラミングされたハードウェア要素として、又はハードウェアとソフトウェア構成要素との組み合わせとして、任意の従来のコンピュータプログラミング言語で実施することができる。非一時的電子メモリ５４０は、１つのメモリモジュール又は複数のメモリモジュールとして実施することができる。いくつかの実施形態では、非一時的電子メモリ５４０は、作動システム４００の機能を実行するための命令を含む。当該命令は、人工筋肉１０１、２０１、３００、３００’を作動させるための命令を含んでいてもよい。

【００７３】

プロセッサ５２０は、機械可読命令を実行することができる任意のデバイスであってもよい。例えば、プロセッサ５２０は、集積回路、マイクロチップ、コンピュータ、又は任意のその他のコンピューティングデバイスであってもよい。非一時的電子メモリ５４０及びプロセッサ５２０は、作動システム４００の様々な構成要素及び／又はモジュール間の信号の相互接続性を提供する通信経路４１０に結合されている。したがって、通信経路４１０は、任意の数のプロセッサを相互に通信可能に結合し、通信経路４１０に結合されたモジュールが分散コンピューティング環境内で動作できるようにする。具体的には、モジュールの各々は、データを送信及び／又は受信することができるノードとして動作できる。本明細書で使用する、「通信可能に結合された」という用語は、結合された構成要素が、例えば、導電性媒体を介した電気信号、空気を介した電磁信号、光導波路を介した光信号及び同種のものなどのデータ信号を相互に交換できることを意味する

【００７４】

図１５に概略を示すように、通信経路４１０は、プロセッサ５２０とコントローラ５００の非一時的電子メモリ５４０とを、作動システム４００の複数の他の構成要素に通信可能に結合する。例えば、図１５に示す作動システム４００では、プロセッサ５２０及び非一時的電子メモリ５４０は、操作デバイス４６０及び電源４８０に通信可能に結合されている。

【００７５】

操作デバイス４６０は、ユーザが人工筋肉１０１、２０１、３００、３００’の動作を制御することを可能にする。いくつかの実施形態では、操作デバイス４６０は、スイッチ、トグル、ボタン、又はユーザ操作を提供するコントロールの任意の組み合わせであってもよい。操作デバイス４６０は、通信経路４１０が操作デバイス４６０を作動システム４００の他のモジュールに通信可能に結合するように、通信経路４１０に結合されている。

【００７６】

電源４８０（例えば、バッテリ）は、人工筋肉１０１、２０１、３００、３００’に電力を供給する。いくつかの実施形態では、電源４８０は再充電可能な直流電源である。電源４８０は、人工筋肉１０１、２０１、３００、３００’に電力を供給するための単一の電源又はバッテリであってもよいことを理解されたい。電源アダプタ（図示せず）を、電源４８０を介して人工筋肉１０１、２０１、３００、３００’に電力を供給するためのワイヤハーネス又は同種のものを介して提供し、電気的に結合してもよい。実際、電源４８０は、１つのレベル（例えば、１つの電圧、電力レベル、又は電流）の電力を受信し、第２のレベル（例えば、第２の電圧、電力レベル、又は電流）の電力を出力することができるデバイスである。

【００７７】

いくつかの実施形態では、作動システム４００は、表示デバイス４２０も含む。表示デ

バイス４２０は、通信経路４１０が、表示デバイス４２０を作動システム４００の他のモジュールに通信可能に結合するように、通信経路４１０に結合されている。表示デバイス４２０は、人工筋肉１０１、２０１、３００、３００’の作動状態、又は人工筋肉１０１、２０１、３００、３００’の作動状態の変化の表示に応答して通知を出力してもよい。さらに、表示デバイス４２０は、光学的な情報を提供することに加えて、表示デバイス４２０の面上の、又は隣接するタクタイル入力の存在及び位置を検出するタッチスクリーンであってもよい。したがって、表示デバイス４２０は、操作デバイス４６０を含み、表示デバイス４２０によって提供される光出力信号上で直接機械的入力を受信することができる。

【００７８】

いくつかの実施形態では、作動システム４００は、ネットワーク５６０を介して作動システム４００を可搬デバイス５８０に通信可能に結合するためのネットワークインタフェースハードウェア４４０を含む。ポータブルデバイス５８０は、これに限定されないが、スマートフォン、タブレット、パーソナルメディアプレーヤー、又は無線通信機能を含む任意のその他の電気デバイスを含んでいてもよい。ポータブルデバイス５８０が提供される場合には、ポータブルデバイス５８０は、操作デバイス４６０の代わりに、コントローラ５００にユーザコマンドを提供する役割を果たし得ることを理解されたい。したがって、ユーザは、操作デバイス４６０の各コントロールを用いて、人工筋肉１０１、２０１、３００、３００’を制御するためのプログラムを制御又は設定することができる。したがって、人工筋肉１０１、２０１、３００、３００’は、ネットワーク５６０を介してコントローラ５００と無線通信する可搬デバイス５８０を介して遠隔制御されてもよい。

【００７９】

本明細書に記載の実施形態は、効果的にヒートシールができないある種の高性能電極絶縁体の使用を容易にする人工筋肉と、真空シール工程を用いて人工筋肉を製造する方法と、に関する。特に、本明細書に記載の真空シール技術は、人工筋肉のアクチュエータ性能を高めるために、電極材料としてＰＶＤＦなどの高誘電性ポリマー材料の使用を容易にする。

【００８０】

「実質的に」及び「約」という用語は、本明細書では、任意の定量比較、値、測定又は他の表現に起因し得る固有の不確実性の度合を表すために使用できることに留意されたい。これらの用語はまた、本明細書において、問題になっている主題の基本的機能の変化をもたらす結果を生じることなく、定量的表現が記載された基準から変化し得る度合を表すためにも利用される。

【００８１】

本明細書で特定の実施形態を図示し説明してきたが、請求対象の主題の範囲から逸脱することなく、様々な他の変更及び修正を加えることが可能であることを理解されたい。さらに、請求対象の主題の様々な態様を本明細書で説明してきたが、そのような態様を組み合わせて使用する必要はない。したがって、添付の特許請求の範囲は、特許請求の主題の範囲内に入るこのような変更及び修正の全てを網羅することを意図している。

【図面】

【図１】

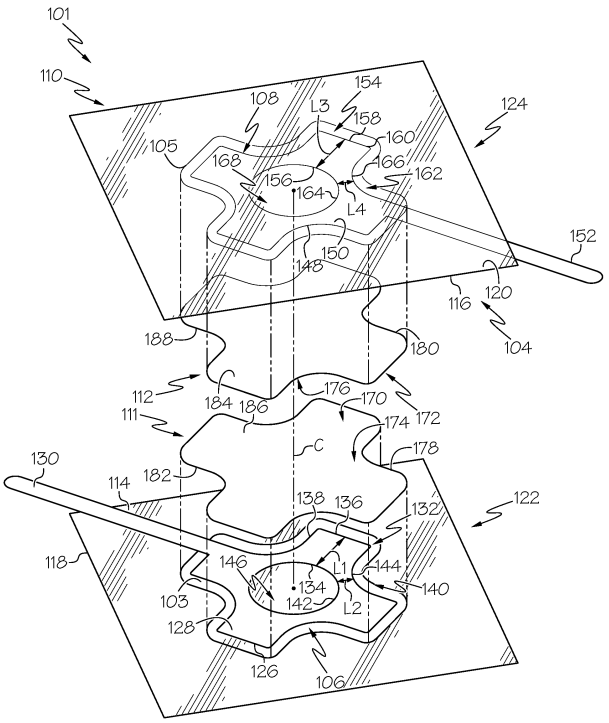


FIG. 1

【図２】

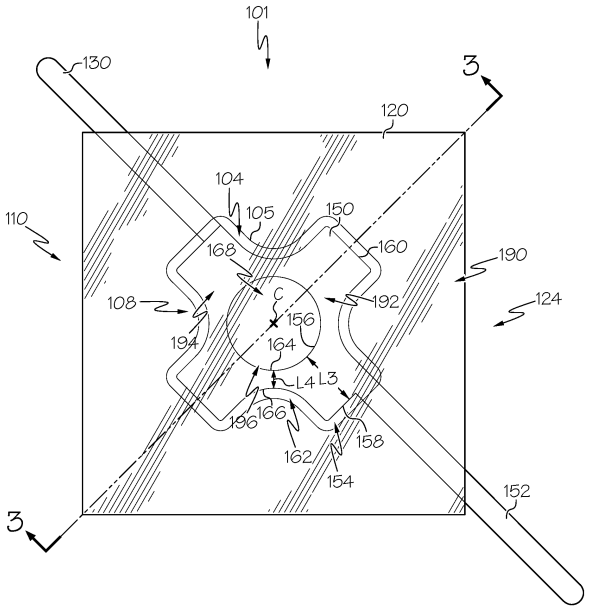


FIG. 2

【図３】

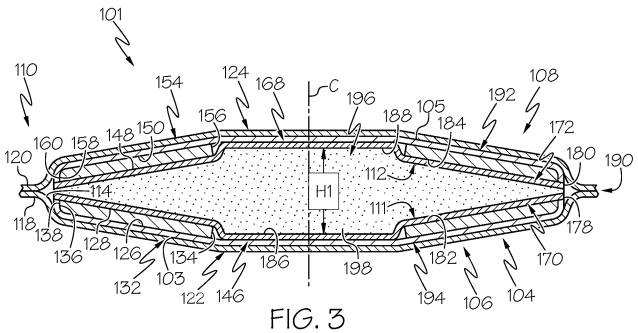


FIG. 3

【図４】

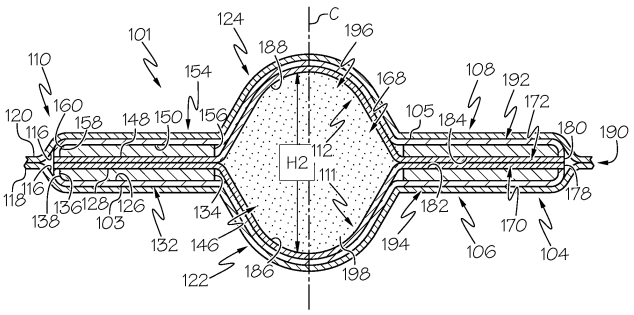


FIG. 4

【図５Ａ】

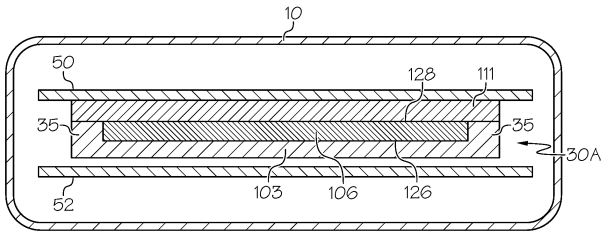


FIG. 5A

【図５Ｂ】

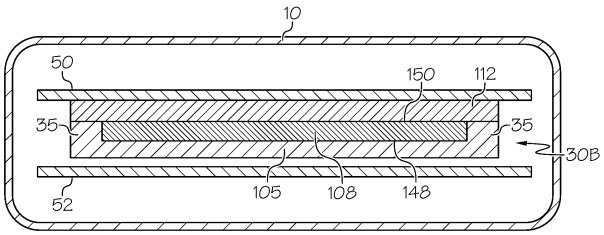


FIG. 5B

【図６】

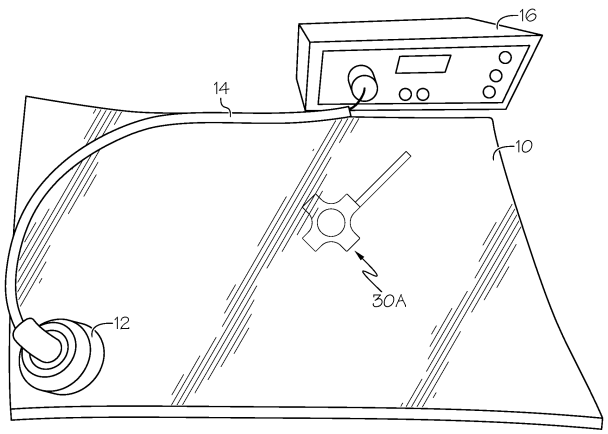


FIG. 6

【図７】

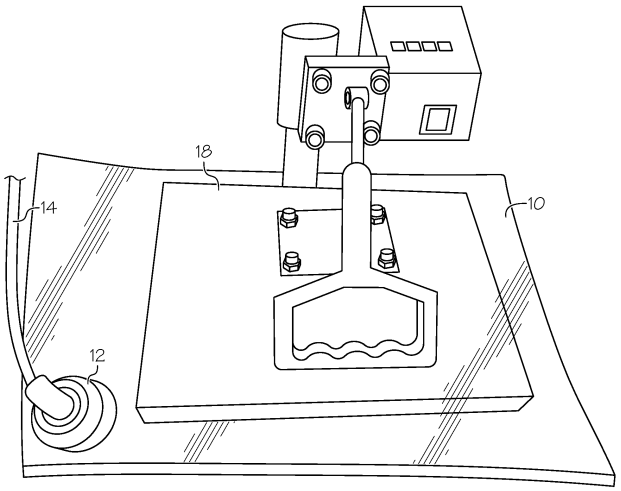


FIG. 7

【図８】

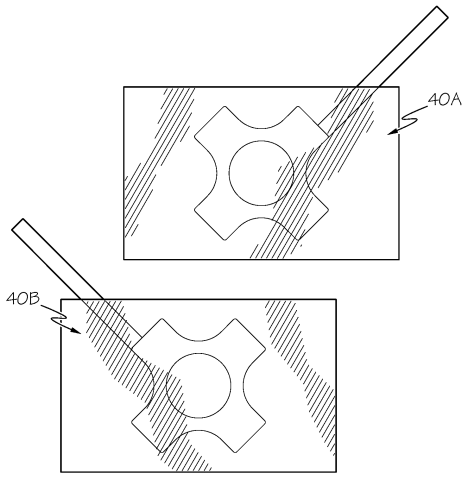


FIG. 8

【図９】

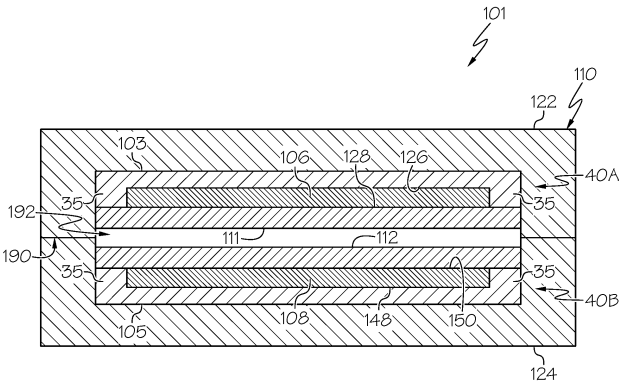


FIG. 9

【図１０】

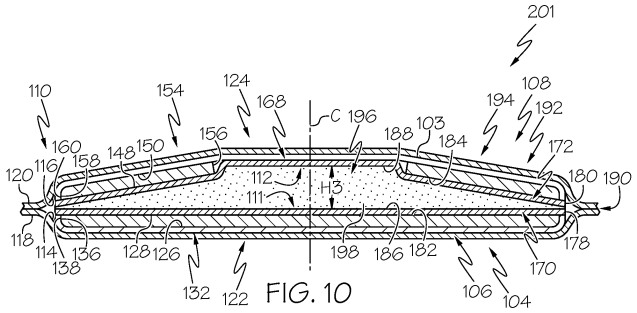


FIG. 10

【図１１】

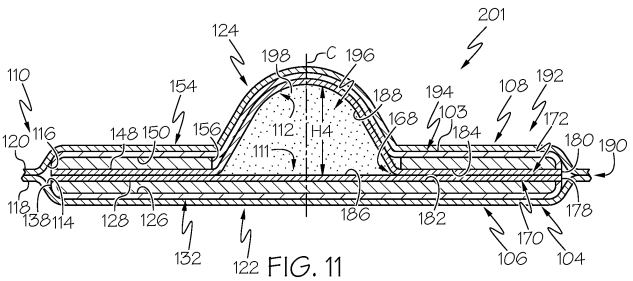


FIG. 11

【図１２】

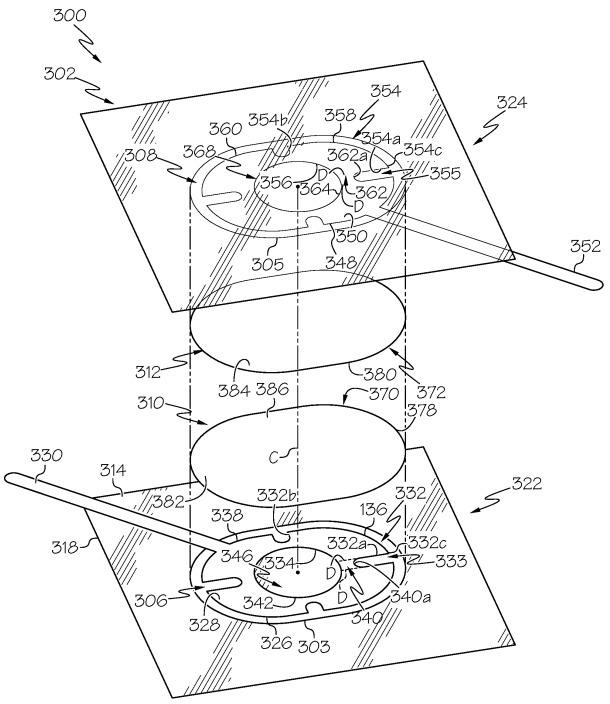


FIG. 12

【図１３】

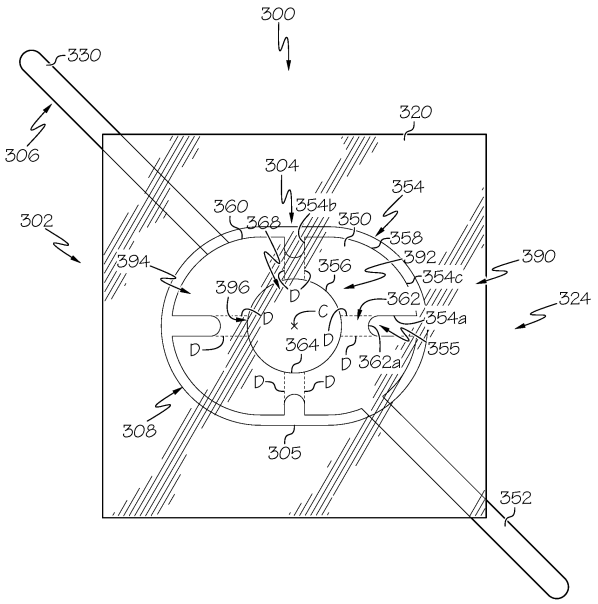


FIG. 13

【図１４】

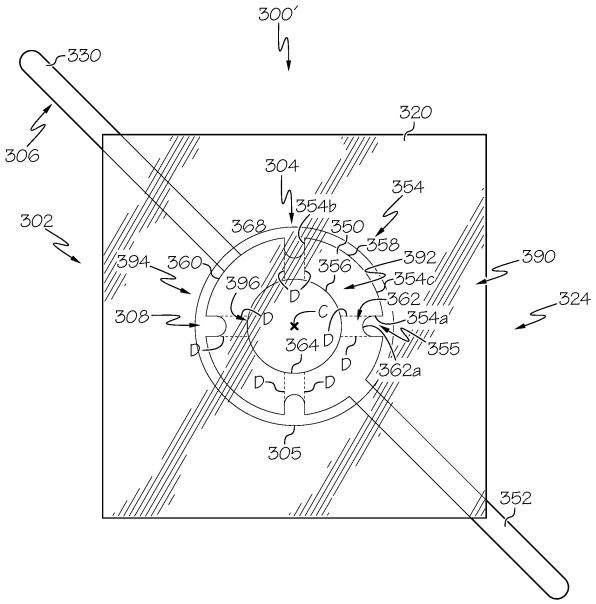


FIG. 14

【図１５】

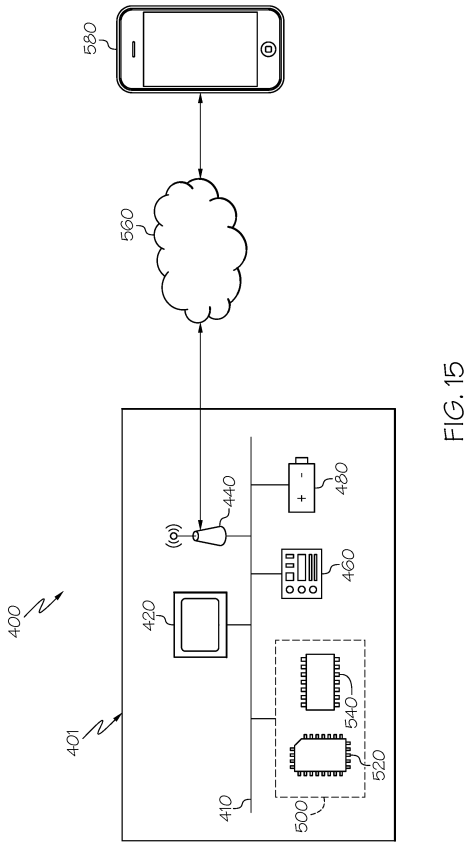


FIG. 15

【外国語明細書】
20230088950000018.pdf

フロントページの続き

(72)発明者　マイケル ピー． ロウ
アメリカ合衆国，テキサス ７５０２４，プレイノ，ヘッドクォーターズ ドライブ ダブリュ１－３シー ６５６５，シー／オー トヨタ モーター エンジニアリング アンド マニュファクチャリング ノース アメリカ，インコーポレイティド
(72)発明者　弦田 遼平
アメリカ合衆国，テキサス ７５０２４，プレイノ，ヘッドクォーターズ ドライブ ダブリュ１－３シー ６５６５，シー／オー トヨタ モーター エンジニアリング アンド マニュファクチャリング ノース アメリカ，インコーポレイティド

Ｆターム（参考）　3H081　AA18