

明 細 書

発明の名称：オゾン発生装置

技術分野

[0001] 本発明の実施形態は、オゾン発生装置に関する。

背景技術

[0002] 一般的なオゾン発生装置は、気密容器内に配置された誘電体電極と金属電極とを備えている。そして、誘電体電極と金属電極との間には放電ギャップを形成するためのスペーサが挿入されている。ここで、誘電体電極の内面には導電膜が設けられている。

[0003] このようなオゾン発生装置において、ガス入口から気密容器内に導入された原料ガスは、誘電体電極と金属電極との間に形成された放電ギャップを流れる。そして放電ギャップを流れた原料ガスは、ガス出口から流出される。

この原料ガスの導入と並行して誘電体電極と金属電極との間に高圧電源から交流高電圧をヒューズおよび高圧給電端子を介して印加する。

交流高電圧が印加されると、放電ギャップに誘電体バリア放電が形成され、オゾンが発生する。なお、誘電体バリア放電は単にバリア放電、あるいは無声放電と呼ばれることもある。

[0004] この誘電体バリア放電で発生する熱は、金属電極と気密容器とで形成された冷却水流路内に供給される冷却水により冷却される。これにより、放電ギャップのガス温度上昇を抑制し、効率的にオゾンが得られることとなっていた。

[0005] 従来の一般的なオゾン発生装置では、放電ギャップ長 d は $0.6\text{ mm} \sim 1.3\text{ mm}$ とされていた。また、原料ガスである空気のガス圧 p は $0.17 \sim 0.28\text{ MPa}$ （絶対圧）とされていた。

[0006] ところで、原料ガスのガス圧 p と放電ギャップ長 d との積は、一般に $p d$ 積と呼ばれている。この $p d$ 積を一定にすることで、放電の相似則が成立する。これは、 $p d$ 積が放電ギャップ中のガス分子数を表すためである。

[0007] たとえば、放電ギャップ中を走行する電子の増倍は、ガスの電離係数 α と放電ギャップ長 d の積 αd で表される。

そして、積 αd を次式のように書き換える。

$$\alpha d = (\alpha / p) (p d)$$

ここで、 $/p$ は単一衝突による電離を表し、 $p d$ 積は放電ギャップ中に含まれる分子数を表す。有名な放電開始電圧を与えるPaschenの法則が、 $p d$ 積の関数であるのはこのためである。

[0008] これまで用いられてきた放電ギャップ長 d は先にも述べたように0.6 mm以上の領域にあった。放電ギャップ長 $d = 0.6$ mm以上の領域では、 $p d$ 積のオゾン収率に対する最適値は20 kPa・cm近くの一定値である。このため、オゾン収率のより一層の向上は困難であった。

先行技術文献

特許文献

[0009] 特許文献1：特開平10-182109号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] したがって、オゾン収率を向上させるために放電ギャップ長 d を0.6 mm未満の最適な値とすることが考えられる。

従来放電ギャップを形成するためにステンレス板金製のスペーサ（板金スペーサ）を使用していた。

ところで、強度的な観点から使用可能なリング状の板金スペーサの板厚は0.2 mm程度となる。例えば、放電ギャップ長を0.4 mmにしようとした場合には、実質的に、スペースを全て埋めてしまい、その使用が困難である。

[0011] また、板金スペーサには、誘電体電極が挿入されるが、構造上、両端部の2箇所にしか挿入できないこととなる。ところで、金属電極（例えば、ステンレス管）と、誘電体電極（放電管）は共に多少なりとも曲がっている。こ

のため、板金スペーサが挿入できない中央部において放電ギャップ長 d が所望の値とならず、この結果、オゾン発生効率 (g/kWh) が理論値よりも低下することとなっていた。

[0012] そこで、本発明の目的は、放電ギャップ長を 0.6 mm 未満とした場合でも、放電ギャップ長を長手方向に一定に維持してより高いオゾン収率を達成することが可能なオゾン発生装置を提供することにある。

課題を解決するための手段

[0013] 実施形態のオゾン発生装置は、円筒状の高圧電極に対し、同軸に円筒状の低圧電極を配置し、高圧電極と低圧電極との間に誘電体を介して所定の高電圧を印加して放電させ、放電によりオゾンを発生させる。

ここで、放電ギャップ長 d が $0.3\text{ mm} \sim 0.5\text{ mm}$ とされている。

[0014] さらに、低圧電極あるいは高圧電極のいずれか一方が金属電極として形成され、いずれか他方が誘電体電極として形成されている。

そして、誘電体電極に対向する金属電極の内周面に、当該金属電極を誘電体電極に対し、放電ギャップ長を保持しつつ同軸に保持するための複数の突起を有する突起群を設けている。

図面の簡単な説明

[0015] [図1] 図1は、実施形態のオゾン発生装置の概要構成断面図である。

[図2] 図2は、実施形態のオゾン発生装置におけるオゾン発生原理説明図である。

[図3A] 図3Aは、誘電体電極の加工寸法図である。

[図3B] 図3Bは、突起を形成した金属電極の加工寸法図である。

[図3C] 図3Cは、図3BのA-A断面図である。

[図3D] 図3Dは、金属電極内に誘電体電極を挿入した状態の説明図である。

[図4A] 図4Aは、突起形成の原理説明図（その1）である。

[図4B] 図4Bは、突起形成の原理説明図（その2）である。

[図5A] 図5Aは、金属電極の長手方向における各突起群の配置位置の最適化に際しての検討モデルの説明図（その1）である。

[図5B]図 5 B は、金属電極の長手方向における各突起群の配置位置の最適化に際しての検討モデルの説明図（その 2）である。

[図6A]図 6 A は、誘電体電極及び金属電極の山一つの曲がりの状態の説明図である。

[図6B]図 6 B は、誘電体電極及び金属電極の山が二つ以上の曲がりの状態の説明図である。

[図7A]図 7 A は、誘電体電極の挿入前の金属電極の状態の説明図である。

[図7B]図 7 B は、金属電極が曲がっているときに誘電体電極を金属電極に挿入した場合の放電ギャップの状態の説明図である。

[図8A]図 8 A は、有限要素法モデルの全体図である。

[図8B]図 8 B は、有限要素法モデルの端部拡大図である。

[図8C]図 8 C は、有限要素法モデルの断面説明図である。

[図9A]図 9 A は、突起が誘電体電極に接触している場合（接触時）の点一面接触要素モデルの説明図である。

[図9B]図 9 B は、突起が誘電体電極に接触していない場合（非接触時）の点一面接触要素モデルの説明図である。

[図10A]図 10 A は、有限要素法モデルの一部破断拡大斜視図である。

[図10B]図 10 B は、点一面接触要素の配置説明図である。

[図10C]図 10 C は、図 10 B の A－A 断面図である。

[図10D]図 10 D は、図 10 B の B－B 断面図である。

[図10E]図 10 E は、図 10 B の C－C 断面図である。

[図11A]図 11 A は、有限要素法モデルを用いた解析状態の説明図（その 1）である。

[図11B]図 11 B は、有限要素法モデルを用いた解析状態の説明図（その 2）である。

[図11C]図 11 C は、有限要素法モデルを用いた解析状態の説明図（その 3）である。

[図12A]図 12 A は、金属電極 18 の Y 方向変位量の説明図である。

[図12B]図12Bは、誘電体電極17のY方向変位量の説明図である。

[図13]図13は、有限要素法モデルの部分断面斜視図である。

[図14]図14は、逸脱量の説明図である。

[図15]図15は、長さ L_3 と最大逸脱量の関係の説明図である。

[図16]図16は、金属電極がサインカーブ状に曲がっている場合の長さ L_3 と最大逸脱量の関係の説明図である。

[図17A]図17Aは、誘電体電極の挿入前の金属電極の状態の説明図である。

[図17B]図17Bは、挿入前の誘電体電極の状態の説明図である。

[図17C]図17Cは、金属電極の曲がりに伴う誘電体電極挿入時の摩擦の問題の説明図（その1）である。

[図17D]図17Dは、金属電極の曲がりに伴う誘電体電極挿入時の摩擦の問題の説明図（その2）である。

[図18]図18は、放電ギャップとオゾン収率の関係を示す図である。

[図19]図19は、放電ギャップ長 d を変更したときの突起31で発生する反力の合計値（ N ）を示す図である。

[図20]図20は、突起の高さと、誘電体電極に接触している突起の数（接触点数）と、の関係の説明図である。

[図21]図21は、突起の高さ＝0.39mmの場合における突起の接触状態の説明図である。

[図22]図22は、突起の高さ＝0.41mmの場合の接触状態の説明図である。

[図23A]図23Aは、突起の高さ＝0.41mmの場合の接触状態のシミュレーション結果の説明図である。

[図23B]図23Bは、突起の高さ＝0.41mmの場合の接触状態の実際の状態の説明図である。

[図24A]図24Aは、突起群を構成する突起の数＝3の場合の説明図である。

[図24B]図24Bは、突起群を構成する突起の数＝4の場合の説明図である。

[図24C]図24Cは、突起群を構成する突起の数＝5の場合の説明図である。

[図24D]図24Dは、突起群を構成する突起の数＝5の場合の説明図である。

[図25]図25は、突起の数＝3の場合の反発力計算条件の説明図である。

[図26]図26は、突起数と反力合計の平均値の説明図である。

[図27]図27は、突起数＝3の場合の反力のつり合いを説明する図である。

[図28]図28は、誘電体電極と金属電極との同軸度について検討するための図である。

[図29]図29は、突起の数と、最小ギャップが突起高さより小さくなる度合いと、の関係を説明する図である。

[図30A]図30Aは、より具体的な突起の形状を説明するための金属電極の突起群の形成部近傍の一部破断斜視図である。

[図30B]図30Bは、図30AにおけるA方向矢視拡大断面図である。

[図31]図31は、実施形態の変形例の説明図である。

発明を実施するための形態

[0016] 次に実施形態について図面を参照して説明する。

図1は、実施形態のオゾン発生装置の概要構成断面図である。

実施形態のオゾン発生装置10は、誘電体バリア放電式のオゾン発生装置として構成されている。

オゾン発生装置10は、大別すると、オゾン発生装置本体11と、オゾン発生装置本体11を気密状態で収納する収納容器12と、収納容器12内のオゾン発生装置本体11に高圧碍子13を介して、オゾン発生用電力を供給する高圧電源（高圧交流電源）14と、を備えている。

[0017] 収納容器12内のオゾン発生装置本体11は、高圧碍子13に電氣的に接続された接続板15及びヒューズ16を介してオゾン発生用電力が供給される複数の誘電体電極17と、誘電体電極17の外周面のそれぞれに対向して、所定の放電ギャップ長dが保たれて同軸状態に保持された円筒状かつステンレス鋼製の金属電極18が配置されている。

ここで、誘電体電極17は、図1中、左右の両方向から金属電極18内に同軸に挿入されている。さらに誘電体電極17には、高圧電源が供給されて

いるので、高電位側電極として機能している。

[0018] また、金属電極 18 の誘電体電極 17 が対向している面とは逆の面側には、金属電極 18 と一体に冷却水流路 19 が形成されている。すなわち、全体として、蜂の巣状の金属電極集合体 18A をなしている。ここで、金属電極集合体 18A は、接地されており、金属電極 18 は低電位側電極として機能している。

[0019] この金属電極 18 の背面に設けられた冷却水流路 19 は、収納容器 12 に設けられた冷却水が導入される冷却水入口 21 と、冷却水が導出される冷却水出口 22 と、の間に配置されている。

[0020] さらに収納容器 12 には、原料ガスが導入されるガス入口 23 及び未反応の原料ガス及びオゾン (O_3) が導出されるガス出口 24 が設けられている。

[0021] 図 2 は、実施形態のオゾン発生装置におけるオゾン発生原理説明図である。

。 上述したように、収納容器 12 内には、円筒状の誘電体電極 17 が配置されている。この誘電体電極 17 の外周面に対向して、所定の放電ギャップ長 d が保たれた状態で円筒状の金属電極 18 が配置されている。

[0022] ここで、誘電体電極の詳細構成について説明する。 誘電体電極 17 は、耐熱性および耐電圧性を有する誘電体として、熱膨張係数の小さい石英ガラス等で形成された円筒状（試験管状）に形成された円筒状誘電体 25 を備えている。円筒状誘電体 25 の内周面には、導電電極（高電位側電極）としての電極皮膜層 26 が形成されている。この電極皮膜層 26 には、ヒューズ 16 を介して高圧電源 14 に接続された高圧給電端子 27 が接続されている。

[0023] 上記構成において、円筒状誘電体 25 は、石英ガラス、ホウケイ酸ガラス、高ケイ酸ガラス、アルミのケイ酸ガラス、セラミックスなどにより形成する。

また電極皮膜層 26 は、金、銀、銅、スズ、クロム、錫、亜鉛、ニッケルカーボナーあるいはアルミニウムをスパッタリング、溶射、蒸着、無電

解メッキ、電解メッキ、塗料塗布などにより形成される。

[0024] 上記構成において、放電ギャップ長 d の距離に相当する放電ギャップ長 d は、従来の一般的なオゾン発生装置の放電ギャップ長である 0.6 mm よりも短い $0.3\text{ mm} \sim 0.5\text{ mm}$ に設定されている。

[0025] 次に、ギャップ長 $d = 0.30\text{ mm} \sim 0.50\text{ mm}$ に設定するために金属電極18への突起31の形成方法について詳細に説明する。

以下の説明においては、実験結果に基づいて、放電ギャップ長 d の範囲内において、オゾン収率がより高かった放電ギャップ長 $d = 0.40\text{ mm}$ の場合を主として説明する。

[0026] 本実施形態の金属電極18を形成するに際しては、ステンレス管の内周面に、例えば、4個の凸状の突起31を形成する。

そして4個の突起31の先端に内接する内接円の直径 D を、放電管としての誘電体電極17の直径より少し大きくする。この結果、金属電極18に円筒状の誘電体電極17を挿入することにより、4個の突起31により放電ギャップ長 d が所望の値（上述の例の場合 0.4 mm ）になる。

以下においては、金属電極18を構成するステンレス管に突起31を形成するための加工をスペーシング加工と呼ぶことにする。

上述したように、誘電体電極17は、内周面（内側）に電極皮膜層26が形成された管状（試験管状）の誘電体（ガラスあるいはセラミック）である。

[0027] 図3Aは、誘電体電極の加工寸法図である。

図3Bは、突起を形成した金属電極の加工寸法図である。

図3Cは、図3BのA-A断面図である。

図3Dは、金属電極内に誘電体電極を挿入した状態の説明図である。

図3B～図3Dにおいては、理解の容易のため、金属電極18であるステンレス管の直径に対して、突起31を誇張して図示している。

図3Aに示すように、誘電体電極（放電管）17の外径を $D1$ とし、誘電体電極17には製造上 $\pm 0.15\text{ mm}$ のばらつきがあるとする。

[0028] ここで、突起31の先端と金属電極18内に挿入された誘電体電極17との隙間を α とする。製造上のばらつきを考慮して、製造された全ての誘電体電極17を金属電極18内に挿入可能とするためには、図3B及び図3Cに示すように、全ての突起31の先端に内接する内接円C1の直径Dが(1)式を満たすように突起31を有する金属電極18を加工する必要がある。

$$D = (D1 + 0.15) + \alpha \quad [\text{mm}] \quad (1)$$

[0029] 上述のように加工した金属電極18内に誘電体電極17を挿入すると、金属電極18あるいは誘電体電極17において、製造時に想定される曲がりが生じていたとしても、図3Dに示すように、長手方向中央部CPにおける放電ギャップ長dは、設計範囲内となる。

[0030] 次に突起31の形成方法について説明する。

図4Aは、突起形成の原理説明図(その1)である。

図4Bは、突起形成の原理説明図(その2)である。

まず、図4Aに示すように、金属電極18を構成するステンレス管の中に金型(焼入れ鋼)41を挿入する。そして、例えば、同一円周上に4箇所の突起31を形成する場合には、可動型のポンチP1、P2を90度ずらした位置に配置する。さらにポンチP1、P2のそれぞれに対向する位置に、固定型のポンチP11、P12をそれぞれ配置する。

そして、可動型のポンチP1を矢印A1方向に押圧し、ポンチP2を矢印A2方向に押圧する。

[0031] この結果、金属電極18には、ポンチP1、P2、P11、P12の全てが当接することとなる。そこで、ポンチP1及びポンチP2に対する押圧をそのまま継続する。この結果、突起31が徐々に形成され、図4Bに示すように、形成された突起31の先端を金型41に突き当てる。

このとき、押圧停止後の戻り量を考慮して、金型41の寸法を設定しておく。この設定により、所望の突起31の高さ(例えば、0.40mm)を得ることが可能となる。

[0032] 以上は、突起31の形成方法の説明であったが、この場合において、最適

な突起 31 はどのようなものとする必要があるのか、すなわち、突起 31 の設計最適値を求めることが重要な課題となる。

以下、突起 31 の設計最適値を求める際に考慮すべき事項について検討す

る。

[0033] 本実施形態においては、図 3 に示したように、金属電極 18 の長手方向両端部 C T 1、C T 2 及び長手方向中央部 C P の 3 箇所の同一円周上にそれぞれ複数 (図 3 では、4 個) の突起 31 で構成される突起群を配置している。すなわち、一つの金属電極 18 において、合計 12 個 (3 箇所×4 個) の突起 31 が形成されている。

[0034] 本実施形態においては、次の 3 点について検討する。

(1) 金属電極の長手方向における各突起群の配置位置の最適化
突起群を金属電極 18 の長手方向両端部 C T 1、C T 2 及び長手方向中央部 C P の 3 箇所に設ける場合、長手方向中央部 C P に設ける突起群は放電領域の中央に設けるのが最も好ましい。

[0035] 一方、金属電極 18 の長手方向両端部 C T 1、C T 2 に設ける突起群の位置 (放電領域の両端からの距離) は選択の自由度がある。

これに対して、突起 31 が当接している位置から離れた場所においては、放電ギャップ長 d は突起 31 の高さとは異なる場合がある。特に金属電極 18 あるいは誘電体電極 17 が曲がっている場合には、放電ギャップ長 d は突起 31 の高さとなる。

したがって、金属電極 18 あるいは誘電体電極 17 が曲がっている場合でも、放電ギャップ長 d と突起 31 の高さとの差が最小となるような突起群の位置があると考え、金属電極 18 の長手方向における各突起群の最適となる配置位置について検討した。

[0036] (2) 突起先端と誘電体電極との間の間隔の最適化

誘電体電極 17 あるいは金属電極 18 が曲がっている場合には、誘電体電極 17 を金属電極 18 内に挿入するときに、誘電体電極 17 及び金属電極 18 がそれぞれ弾性変形する。

この結果、突起 31 において反力が発生する。突起 31 に反力が発生した結果、誘電体電極 17 の金属電極 18 への挿入時に摩擦力が発生する。ここで、摩擦力を低減するためには、突起 31 の先端の内接円 C1 (図 3 参照) の直径 D は、誘電体電極 17 の直径 D1 より若干大きくする必要がある。一方、内接円 C1 の直径 D を大きくしすぎると、放電ギャップ長 d が変化する。こととなるため上限がある。

そこで、内接円 C1 の直径 D を誘電体電極 17 の直径 D1 より若干大きくする際の量 (突起先端と放電管の間隔) の最適値について検討した。

[0037] (3) 突起数の最適化

上述したように、本実施形態においては、一つの突起群の突起 31 の数は 4 個である。誘電体電極 17 を金属電極 18 内に同軸に保持するには、少なくとも突起数は 3 個以上設ける必要がある。一方、その上限は、金属電極 18 の寸法に制限されるが、あまり多くすると、加工におけるコストパフォーマンスが低下する。

そこで、突起 31 の数について誘電体電極 17 あるいは金属電極 18 が曲がっているときの誘電体電極 17 の挿入摩擦力の観点から、突起 31 の数が 3 個～10 個の範囲内で突起 31 の個数の最適値について検討した。

[0038] まず金属電極の長手方向における各突起群の配置位置の最適化について検討する。

図 5 A は、金属電極の長手方向における各突起群の配置位置の最適化に際しての検討モデルの説明図 (その 1) である。

図 5 B は、金属電極の長手方向における各突起群の配置位置の最適化に際しての検討モデルの説明図 (その 2) である。

本実施形態においては、突起群は上述したように、金属電極 18 の長手方向両端部 CT1、CT2 及び長手方向中央部 CP の 3 箇所に設けるものとしている。

金属電極 18 の長手方向における各突起群の配置位置の最適化とは、図 5 A、図 5 B において、長さ L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 の最適値を求める問題である。

。

この場合において、対称性から $L_1 = L_2$ 、 $L_3 = L_4$ であるため。長手方向中央部の支持点は、放電空間の中央となる。よって未知数は L_3 ($= L_4$) だけとなり、長さ L_3 と全長 L の比を求める問題となる。

[0039] ここで、誘電体電極 17 及び金属電極 18 について曲がりについて考察する。

図 6 A は、誘電体電極及び金属電極の山一つの曲がりの状態の説明図である。

図 6 B は、誘電体電極及び金属電極の山が二つ以上の曲がりの状態の説明図である。

誘電体電極 17 及び金属電極 18 は大なり小なり曲がっているのが一般的である。経験上、曲がりの状態としては、山一つ（一次成分）の曲がりを有するものがほとんどである。一方、山が二つ以上の曲がりを有するもの（二次成分以上）はほとんどない。また山一つの場合の曲がり具合を振幅 $\delta 1$ とし、山二つの場合の曲がり具合を振幅 $\delta 2$ とすると、

$$\delta 1 \gg \delta 2$$

であり、一般的には、

$$\delta n \gg \delta n + 1$$

である。

[0040] 曲がりの状態における山の数を n としたときの曲がり成分を n 次成分と呼ぶものとする、上記経験則は、「二次成分の振幅 $\delta 2$ は一次成分の振幅 $\delta 1$ より小さい。」と言い換えることができる。この経験則に従えば、山の一次成分である振幅 $\delta 1$ が最も大きい。曲がっている管は、一般的に一次成分（振幅 $\delta 1$ ）から n 次成分（ δn ）まで持っている。

[0041] しかし、実際的には、図 6 B に示すように、曲がりの一次成分（振幅 $\delta 1$ に相当）は、曲がりの全体を支配するほど大きい。このため、二次以上の成分（振幅 $\delta 2$ を含む）は無視しても問題はない。

[0042] なお、少数の割合で山が二つ以上のものが観測されたとしても、その管は

、曲がりの一次成分（振幅 $\delta 1$ ）を持っていないかただけである。また、上
述したように二次成分（振幅 $\delta 2$ ）はもともと一次成分に比較して小さいた
め、放電ギャップ長 d の不均一への影響量は小さいと考えられる。
以上のことから、本実施形態においては、管の曲がりは「山一つ」である
ものとして検討を進めるものとする。

[0043] まず、長さ L_3 が適切でないような問題が発生するかを述べる。

図 7 A は、誘電体電極の挿入前の金属電極の状態の説明図である。

図 7 B は、金属電極が曲がっているときに誘電体電極を金属電極に挿入し

た場合の放電ギャップの状態の説明図である。

図 7 A に示すように、金属電極 18 が曲がった状態であり、このまま、誘
電体電極 17 を金属電極 18 に挿入した場合には、図 7 B に示すような状態
となる。

[0044] すなわち、図 7 B において、破線円内に示すように、突起 31 に誘電体電
極 17 が当接している部分では、放電ギャップ長 d は、突起 31 の高さ t と等
しくなる。一方、実線円内に示すように、突起 31 に誘電体電極 17 が当接
していない部分では、放電ギャップ長 d は、突起 31 の高さ t と異なることと
なる。

[0045] このときの突起 31 に誘電体電極 17 が当接していない各部分における放
電ギャップ長 d の突起 31 の高さ t との差の大きさを逸脱量と呼ぶものとする
。この逸脱量の度合いは、突起 31 の形成位置に相当する放電空間端部から
の長さ（距離） L_3 に依存している。

したがって、製品設計としては、放電ギャップ長 d の逸脱量が最少になる
ような長さ（距離） L_3 を求めることが必要となる。

[0046] ここで、より具体的に検討を行う。

以下においては、誘電体電極 17 及び金属電極 18 をそれぞれ管（パイプ
）として取り扱い、有限要素法を用いて逸脱量と逸脱量が最少となる突起 3
11 の最適な位置を求めた。

[0047] この場合において、計算上は、誘電体電極 17 及び金属電極 18 の断面の

みを考慮し、それぞれ、直線及び関数 $y = f(x)$ で表される曲線として取り扱う。

そして、関数 $y = f(x)$ で表される曲線が直線から離間する量を「反り量」と呼ぶものとする。

金属電極 18 の曲がりによる反り量 y を金属電極 18 の長さ方向の関数 $f(x)$ と表記すると、現実の金属電極の曲がり方を表現する関数 $f(x)$ は、様々考えられる。

以下、代表例として、放物線の場合とサインカーブの場合とについて検討する。

[0048] (A) 放物線の場合

放物線の場合、金属電極の曲がり方を表現する関数 $f(x)$ は、例えば、(2) 式で表される。

[0049] [数1]

$$f(x) = -a(x^2 - Lx) + a(L_3^2 - L \cdot L_3) \quad (2)$$

[0050] ただし、 a は、正の値である。

$x = L_3$ のとき、(2) 式は、以下の通りとなる。

[0051] [数2]

$$f(L_3) = -a(L_3^2 - L \cdot L_3) = 0 \quad (3)$$

[0052] つまり突起 31 の位置における反り量は零である。

反り量が正側において最大値をとるのは、

[0053] [数3]

$$x = \frac{L}{2} \quad (4)$$

[0054] の場合である。

[0055]

[数4]

$$\begin{aligned}
f\left(\frac{L}{2}\right) &= -a\left(\frac{L^2}{4} - L \cdot \frac{L}{2}\right) + a(L_3^2 - L \cdot L_3) \\
&= -a\left(\frac{L^2}{4} - \frac{L^2}{2}\right) + a(L_3^2 - L \cdot L_3^2) \\
&= -a\left(-\frac{L^2}{4}\right) + a(L_3^2 - L \cdot L_3^2) \\
&= \frac{aL^2}{4} + a(L_3^2 - L \cdot L_3) \\
&= \frac{aL^2}{4} - a(L \cdot L_3 - L_3^2)
\end{aligned} \tag{5}$$

[0056] 反り量が負側の最大値は、 $x = 0$ の時である。

[0057] [数5]

$$\begin{aligned}
f(0) &= a(L_3^2 - L \cdot L_3) \\
&= -a(L \cdot L_3 - L_3^2)
\end{aligned} \tag{6}$$

[0058] ここで、 $a > 0$ であり、 $L > L_3$ なので、

[0059] [数6]

$$L \cdot L_3 - L_3^2 > 0 \tag{7}$$

[0060] したがって、 $f(0) < 0$ である。

(B) サインカーブの場合

サインカーブの場合、金属電極の曲がり方を表現する関数 $f(x)$ は、例えば、(8) 式で表される。

[0061] [数7]

$$f(x) = b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{x}{L/2}\right) - b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_3}{L/2}\right) \tag{8}$$

[0062] $x = L_3$ のとき

[0063]

[数8]

$$f(L_3) = b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_3}{L/2}\right) - b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_3}{L/2}\right) = 0 \quad (9)$$

[0064] である。つまり、突起31の位置における反り量は零である。

反り量の正側の最大値は、

[0065] [数9]

$$x = \frac{L}{2} \quad (10)$$

[0066] の時である。

[0067] [数10]

$$\begin{aligned} f\left(\frac{L}{2}\right) &= b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L/2}{L/2}\right) - b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_3}{L/2}\right) \\ &= b - b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_3}{L/2}\right) \end{aligned} \quad (11)$$

[0068] また、反り量の負側の最大値は、 $x = 0$ のときである。

[0069] [数11]

$$f(0) = -b \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{L_3}{L/2}\right) \quad (12)$$

[0070] 図8Aは、有限要素法モデルの全体図である。

図8Bは、有限要素法モデルの端部拡大図である。

図8Cは、有限要素法モデルの断面説明図である。

図8A～図8Cにおいては、誘電体電極17及び金属電極18をシェル要素でモデル化し、突起31については、後述する点一面接触要素としてモデル化している。

また、図8においては、外側の金属電極18のみ放物線状に0.50mm反っている管とし、内側の誘電体電極17は、理想的な直管であるものとしている。

[0071] ここで、管体である誘電体電極 17 及び金属電極 18 をシェル要素でモデル化したため、管の直径は板厚に対する中立面となっている。また誘電体電極 17 は、ガラス製とし、中立面直径 = 42.4 mm、板厚 $T_{17} = 1.6$ mmとしている。また金属電極 18 は、ステンレス鋼製とし、中立面直径 = 46.3 mm、板厚 $T_{18} = 1.5$ mmとしている。

[0072] また、放電ギャップ長 d は、0.40 mmとしている。

これらの結果、有限要素法モデルにおける誘電体電極 17 と金属電極 18 との間の間隔は、図 8 C に示すように、管の板厚を考慮して 1.95 mm となる。よって、数値解析でのギャップは 1.95 mm となる。解析モデルはフルモデルとしたが、図は対称物も表現されている。図 7 A においても、対称物を表示している。

[0073] 解析には、サイバネットシステム社製有限要素法解析ソフト ANSYS Ver. 13.0 を使用した。

突起 31 は、誘電体電極 17 と金属電極 18 とが接触するときは、両者に反力が発生する。しかしながら、誘電体電極 17 と金属電極 18 とが接触していないときは、力のやり取りはない。そこで、本実施形態においては、点一面接触要素を用いて突起 31 をモデル化した。

[0074] 図 9 A は、突起が誘電体電極に接触している場合（接触時）の点一面接触要素モデルの説明図である。

図 9 B は、突起が誘電体電極に接触していない場合（非接触時）の点一面接触要素モデルの説明図である。

図 9 のモデルにおいて、接触要素は、「間隔が 1.95 mm のときに接触した」として機能している。つまり、接触要素の長さが 1.95 mm と解釈できる。

図 9 A に示すように、突起 31 に相当する点一面接触要素 31 E は、誘電体電極 17 に相当するシェル要素 17 S あるいは金属電極 18 に相当するシェル要素 18 S と接触しているときに機能する。そして、発生した反力に従って誘電体電極 17 に相当するシェル要素 17 S あるいは金属電極 18 に相

当するシェル要素 18 S が変形する。

[0075] これに対し、突起 31 に相当する点一面接触要素 31 E が金属電極 18 に相当するシェル要素 18 S と接触していないときは、図 8 B に示すように突起 31 に相当する点一面接触要素 31 E と誘電体電極 17 に相当するシェル要素 17 S 及び金属電極 18 に相当するシェル要素 18 S との間で力のやりとりはない。

[0076] 図 10 A は、有限要素法モデルの一部破断拡大斜視図である。

図 10 B は、点一面接触要素の配置説明図である。

図 10 C は、図 10 B の A-A 断面図である。

図 10 D は、図 10 B の B-B 断面図である。

図 10 E は、図 10 B の C-C 断面図である。

図 10 A ~ 図 10 E において、点一面接触要素 31 E の位置は突起 31 が設けられる位置に相当している。

[0077] 本実施形態においては、誘電体電極 17 あるいは金属電極 18 に相当するシェル要素の両端からそれぞれ L_3 の距離（それぞれ A-A 断面、C-C 断面位置に相当）と中央の位置（B-B 断面位置に相当）の同一円周上に 90 度ピッチで 4 箇所、突起 31 に相当する点一面接触要素 31 E を配置した。

[0078] 図 11 A は、有限要素法モデルを用いた解析状態の説明図（その 1）である。

図 11 B は、有限要素法モデルを用いた解析状態の説明図（その 2）である。

図 11 C は、有限要素法モデルを用いた解析状態の説明図（その 3）である。

この場合において、有限要素法モデルに印加される外力はない。

したがって、図 11 A に示すように、放物線状に 0.50 mm 反っている金属電極 18 内に直管である誘電体電極 17 を挿入したときに突起 31（＝点一面接触要素 31 E）により両者が干渉することとなる。

[0079] より詳細には、図 11 B に示すように、誘電体電極 17 を金属電極 18 内

[0084] 図 1 3 は、有限要素法モデルの部分断面斜視図である。

有限要素法モデルを用いた解析から各節点の変位量が求まる。

そして、節点座標と変位量から、図 1 2 に示す変形後の上側ギャップ UG と下側ギャップ LG を求める。

[0085] 図 1 4 は、逸脱量の説明図である。

図 1 4 において、金属電極 1 8 における放電域の長さは、 1.375 m (1375 cm) であるものとする。

逸脱量 a_1 , a_2 には、上側ギャップ UG に起因するものと下側ギャップ LG に起因するものがあり、計 4 種類になる。

[0086] まず、上側逸脱量 a_1 , a_2 , 下側逸脱量 a_1 , a_2 のうち最も大きい最大逸脱量 c を選択する。

この場合において、最大逸脱量 c は長さ L_3 に従って変化する。

したがって、最大逸脱量 c が最小となるような長さ L_3 が、突起位置の最適値となる。

[0087] 図 1 5 は、長さ L_3 と最大逸脱量の関係の説明図である。

図 1 5 の例の場合、長さ $L_3 = 0.0573\text{ m}$ (57.3 cm) のとき、つまり $L_3/L = 0.042$ のとき最大逸脱量 c が最小となるため、これが長さ L_3 の最適値つまり突起位置の最適値となる。

実用的な長さ L_3 の最適範囲、すなわち、突起 3 1 の位置としては、条件を様々変化させた結果、 $L_3/L = 0.04 \sim 0.06$ の間にあるという結果が得られた。

[0088] 以上の説明は、金属電極 1 8 が放物線状に曲がっているときのものであった。つぎにサインカーブ状に曲がっている場合の突起 3 1 の形成位置の最適値について検討する。

ここで、金属電極 1 8 の曲がりの状態を表す式 $f(x)$ は、上述したように (3) 式として表される。

上述したのと同様の方法で金属電極 1 8 の有限要素法モデルを用いて、放電ギャップ長 d の目標値からの逸脱量を求め、長さ L_3 と最大逸脱量との関

係から実用的な長さ L_3 の最適範囲を算出した。

[0089] 図 16 は、金属電極がサイレンカーフ状に曲がっている場合の長さ L_3 と最大

逸脱量の関係の説明図である。

図 16 に示すように、金属電極 18 がサイレンカーフ状に曲がっているとき

は、 $L_3 = 0$ 、つまり突起位置を端にすると逸脱量を最小化できる。

そして実用的な長さ L_3 の最適範囲、すなわち、突起 31 の位置としては、

条件を様々変化させた結果、 $L_3/L = 0$ 、 $0 \sim 0.1$ の間にあるという結果

が得られた。

[0090] 次に突起 31 の先端と誘電体電極 17 との間の間隔の最適化について検討

する。

まず、誘電体電極 17 を金属電極 18 内に挿入する際の摩擦力について検

討する。

誘電体電極 17 又は金属電極 18 の寸法精度が低い場合、突起 31 を設け

た金属電極 18 内に誘電体電極 17 を挿入するときに、突起 31 により誘電

体電極 17 と金属電極 18 との間に摩擦力が発生し、挿入が困難になること

が考えられる。

[0091] また、オゾンを生成させた後に挿入した誘電体電極 17 引抜くときには、

挿入時より、はるかに大きな力が必要であった。

これは誘電体電極 17 の表面に付着した酸化粉が原因と推測されている。

また、金属電極 18 の異常形状としては、「曲がり」と「円形断面が真円

でないこと」が考えられる。

[0092] しかしながら、誘電体電極 17 は、最初の 2 箇所の突起 31 (突起群) に

対しては容易に通過し、最後の (挿入側から三番目の突起群を構成している

) 突起 31 を通過するときに摩擦が発生した。したがって、誘電体電極 17

の挿入に影響を及ぼす異常形状は、「曲がり」が支配的であると考えられた

[0093] 図 17 A は、誘電体電極の挿入前の金属電極の状態の説明図である。

図 17 B は、挿入前の誘電体電極の状態の説明図である。

図 1 7 C は、金属電極の曲がりに伴う誘電体電極挿入時の摩擦の問題の説明図（その 1）である。

図 1 7 D は、金属電極の曲がりに伴う誘電体電極挿入時の摩擦の問題の説明図（その 2）である。

金属電極 1 8 に設けられた突起 3 1 に内接する内接円の直径を D とした場合に、誘電体電極 1 7 の外径寸法公差は、図 1 7 A に示すように、 $D 1 \pm 0.15 \text{ mm}$ である。

[0094] したがって、誘電体電極 1 7 の外形寸法が外形寸法公差の上限である場合（ $= D 1 + 0.15 \text{ mm}$ ）を想定する。このとき、金属電極 1 8 に突起 3 1 を設けることにより金属電極 1 8 の実効的な内径寸法、つまり、一組の突起群の先端に内接する円の直径 D は、図 1 7 B に示すように、 $D 1 + 0.15 \text{ mm}$ 以上にしなければならない。つまり図 1 7 B における α の値を正の値（プラスの値）としなければならない。

[0095] 一方、 α を大きくしすぎると放電ギャップ長 d が所望の値とならないという不都合が生じる。したがって、この観点からすると、 α の値は限りなく零にしたい。しかし $\alpha = 0$ の場合、上述したように、図 1 7 D に示す○印の領域で発生する挿入時の摩擦力が上昇することが明らかになっている。

[0096] ここで、 α の値の下限値を求める。

以下、 α を突起先端ギャップと呼ぶ。

今回の試作機では、スペーシング加工の突起 3 1 による内径寸法を $D 1 + 0.15 \sim D 1 + 0.20 \text{ mm}$ の範囲に入るよう加工した。

[0097] 具体的には、 $D 1 + 0.15 \text{ mm}$ の円筒形の限界ゲージと、 $D 1 + 0.20 \text{ mm}$ の円筒形の限界ゲージと、を用意した。そして、金属電極 1 8 に突起 3 1 を形成する加工を行った後に、 $D 1 + 0.15 \text{ mm}$ の限界ゲージは通過し、 $D 1 + 0.20 \text{ mm}$ の限界ゲージでは摩擦力を持って通過するか、若しくは、 $D 1 + 0.20 \text{ mm}$ の限界ゲージが通過しないようにした。

[0098] 図 1 8 は、放電ギャップとオゾン収率の関係を示す図である。

放電ギャップの変動を $\pm 0.10 \text{ mm}$ とした場合、放電ギャップを 0.4

0 mmに設定すると高いオゾン収率を確保できることが分かった。

そこで、突起31の高さは、0.40 mmから突起先端ギャップ α を差引いた値となる。

[0099] 図8に示した有限要素法モデルを用いて、突起31の高さを変えて（点一面接触要素31Eのギャップを変えて）、突起31で発生する反力（点一面接触要素31Eの反力）を計算した。

図8Cに示したように、実際の放電ギャップ長dが0.40 mmのときの点一面接触要素31Eのギャップは1.95 mmである。

[0100] 図19は、放電ギャップ長dを変更したときの突起31で発生する反力の合計値（N）を示す図である。

図20は、突起の高さと、誘電体電極に接触している突起の数（接触点数）と、の関係の説明図である。

突起31の高さ0.39 mmの場合、反力合計は88.0 N、接触点数は3である。

[0101] 図21は、突起の高さ＝0.39 mmの場合における突起の接触状態の説明図である。

図21に示すように、3箇所金属電極18（に形成された突起31）と誘電体電極17とが接触して（押しあて）いる。

この結果、誘電体電極17を金属電極18内に挿入するに際して、突起31と誘電体電極17との接触部で摩擦力が発生し、その大きさは反力の合計値に摩擦係数を乗じた値となる。

[0102] 一方、誘電体電極17の金属電極18内への挿入を容易にするためには、反力の合計値を小さくしなければならない。突起31と誘電体電極17との接触部における放電ギャップ長dは突起高さと同しくなる。つまり本例の場合、0.39 mmとなる。また、接触していない部分の放電ギャップ長dは突起31の高さ（＝0.39 mm）より大きい。

[0103] ここで、再び図19及び図20を参照する。

図19において、反力の合計値は、突起31の高さ＝0.39 mmまでは

緩やかに上昇しているが、突起31の高さ=0.39mmを超えると急激に上昇する。また、図20によれば、接触点数も突起高さ0.39mmを超えると急激に増加する。例えば、突起31の高さ=0.41mmでは、接触点数=12である。つまりすべての突起31が接触している。

[0104] 図22は、突起の高さ=0.41mmの場合の接触状態の説明図である。

図23Aは、突起の高さ=0.41mmの場合の接触状態のシミュレーション結果の説明図である。

図23Bは、突起の高さ=0.41mmの場合の接触状態の実際の状態の説明図である。

[0105] 誘電体電極17と金属電極18との間のギャップは、0.40mmであるため、突起31の高さを0.41mmとした場合のシミュレーション結果では、図23Aに示すように、全ての点一面接触要素31Eが接触する。つまり全ての突起31が干渉することが分かる。

[0106] この結果、突起31周辺の金属電極18（金属電極18に相当するシェル要素18S）は外側に変形し、接触点の誘電体電極17（誘電体電極17に相当するシェル要素17S）は内側に変形する。

実際には、図23Bに示すように、全ての突起31が誘電体電極17に接触する。つまり全ての突起31が干渉することが分かる。この結果、突起31の周辺が外側に変形し、接触点の誘電体電極17は内側に変形する。

[0107] 上述したように、局所的な変形に力が費やされるため反力は増大し、反力は突起高さ0.39mmの場合と比較して、約7倍となる。

ところで、突起31の高さ=0.40mmは、上述した突起31の高さ=0.39mmと突起31の高さ=0.41mmと、の中間の状態となる。

[0108] また突起31の高さ=0.40mmでは、金属電極18に0.50mmの曲がりがあるとした場合には、接触点数は9点となり、反力の合計値は、169.0Nとなる。これに対し、金属電極18に曲がりがないとした場合は、突起31の高さ=0.40mmとなると、全ての突起31が誘電体電極17に接触することとなるが、管の変形がないため反力はゼロとなる。

[0109] 以上の検討から、金属電極 18 あるいは誘電体電極 17 に曲がりがあるときは、突起 31 の高さを放電ギャップ長 d より若干小さくする必要がある。

つまり図 17 に示した、突起先端ギャップ α を設定することが必要となる。

[0110] ここで、突起先端ギャップ α の最適値を求める。

例えば、突起 31 の高さが 0.10 mm 低くなり、0.30 mm となると、突起 31 が誘電体電極 17 と接触したときの放電ギャップ長 d は 0.30 mm となる。したがって、接触している突起 31 の反対側においては、誘電体電極 17 との間の放電ギャップ長 d は 0.50 ($= 0.30 + 0.10 \times 2$) mm となる。

[0111] したがって、限界値ではあるが、放電ギャップ長 d の変動を ± 0.1 mm に抑えることができる。一方、突起高さを 0.39 mm より大きくすると、つまり突起先端ギャップ α を 0.01 mm より小さくすると、接触点数が 3 を超える。よって突起先端ギャップ α は 0.01 ~ 0.10 mm が適切であるということがわかる。

すなわち、放電ギャップ長 d の設計値が 0.40 mm のときにおける、突起 31 の高さの最適値は 0.30 ~ 0.39 mm となる。

[0112] 図 10 に示したように、突起群は、金属電極 18 の長手方向に 3 か所設けられている。

[0113] 以下、突起群あたりの突起数の最適値を求める。

突起群を構成する突起数としては、理論上、突起数 = 3 ~ 無限大まで選択の範囲がある。

図 24 A は、突起群を構成する突起の数 = 3 の場合の説明図である。

図 24 B は、突起群を構成する突起の数 = 4 の場合の説明図である。

図 24 C は、突起群を構成する突起の数 = 5 の場合の説明図である。

図 24 D は、突起群を構成する突起の数 = 5 の場合の説明図である。

[0114] 以下同様にして、均等あるいはほぼ均等に突起 31 を配置すれば、物理的な限度の範囲で、突起 31 を形成することが可能である。

ここでは、実際の製造コストなども考慮して、突起 31 の数 = 3 ~ 10 ま
でを評価した。

[0115] 具体的には、図 8 に示した有限要素法モデルで、点一面接触要素 31 E で
発生する反力を評価した。反力が最小となれば、挿入時の摩擦力も最小とな
る。点一面接触要素 31 E のギャップは 1.95 mm とした。これは、実際
の突起 31 の高さとして、0.40 mm に相当する。

突起 31 の高さ = 0.40 mm という値は、誘電体電極 17 と、金属電極
18 とが、それぞれ直管である場合の誘電体電極 17 と、金属電極 18 との
間隔と等しい値である。

しかし、本考察では、上述した場合と同様に、金属電極 18 の有限要素法
モデルは 0.50 mm 放物線状に曲がっているものとする。

[0116] 図 25 は、突起の数 = 3 の場合の反発力計算条件の説明図である。

突起 31 の数 = 3 の場合は、同一円周上に均等に配置した 3 個の突起 31
に相当する 3 個の点一面接触要素 31 E のうち、いずれか一つの位置 ($\theta =$
 0°) を基準として、 $\theta = 15^\circ$ 、 30° 、 45° 、 60° の場合について
反発力の計算を行った。

[0117] 突起 31 の数 = 4 以上の場合には、突起 31 の数 = n (n は、4 以上の整
数) として、 ϕ 、 $\theta_1 \sim \theta_4$ を求めて $\theta_1 \sim \theta_4$ の 4 条件で反発力を計算を
行った。

$$\phi = 360^\circ / n$$

$$\theta_1 = 0^\circ$$

$$\theta_2 = (1/3) \times (\phi/2)$$

$$\theta_3 = (2/3) \times (\phi/2)$$

$$\theta_4 = (3/3) \times (\phi/2)$$

[0118] 例えば、 $n = 4$ の場合には、 ϕ 、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 は次式となる。

$$\phi = 360^\circ / 4 = 90^\circ$$

$$\theta_1 = 0^\circ$$

$$\theta_2 = (1/3) \times (\phi/2) = (1/3) \times (90^\circ / 2) = 15^\circ$$

[0119] 図 2 6 は、突起数と反力合計の平均値の説明図である。

$$\theta_3 = (2/3) \times (\phi/2) = (2/3) \times (90^\circ/2) = 30^\circ$$

$$\theta_4 = (3/3) \times (\phi/2) = (3/3) \times (90^\circ/2) = 45^\circ$$

図 2 6 に示すように、突起 3 1 の数=4 の場合の、反力が最小であることがわかる。

したがって、1 箇所の突起群あたりの突起 3 1 の数の最適値は 4 である。この結果、突起群は長手方向に 3 箇所設けているので、全突起数は 1 2 となる。なお、1 箇所の突起群あたりの突起 3 1 の数=5 であっても 1 箇所の突起群あたりの突起 3 1 の数=5 の場合も 1 箇所の突起群あたりの突起 3 1 の数=4 の場合には及ばないものの、用いることが可能である。

[0120] ここで、突起 3 1 の数=3 の場合の反力が大きい理由を考察する。

図 2 7 は、突起数=3 の場合の反力のつり合いを説明する図である。

誘電体電極 1 7 及び金属電極 1 8 を曲げる力は f_1 だけでよい。しかし 3 点支持の場合、くさび効果により、不必要に大きな反力 f_2 が発生する。これが突起 3 1 の数=3 の場合の反力が大きい理由であると考えられる。

[0121] 次に、突起 3 1 の数=5 以上の場合の反力が大きい理由を考察する。

突起 3 1 の数=5 以上では、突起数の増加とともに接触点数が増えるためと考えられる。つまり、誘電体電極を過剰拘束している。

ところで、反力の観点では突起数は 4 個以上でかつ少ないほうがよい。しかしながら、もう一つ検討しなければならないことがある。誘電体電極 1 7 と金属電極 1 8 との同軸度である。

放電ギャップ長 d の設計値が 0.40 mm のときにおける、突起 3 1 の高さの最適値は 0.30 ~ 0.39 mm となることは、前述した通りである。

[0122] 図 2 8 は、誘電体電極と金属電極との同軸度について検討するための図である。

図 2 8 において、誘電体電極 1 7 の外径= d_g とし、金属電極 1 8 の内径= d_s とし、誘電体電極 1 7 の中心軸と、金属電極 1 8 の中心軸と、のずれ

(偏心量) $= p_y$ とし、突起 31 の高さ $= p_L$ とし、誘電体電極 17 と、金属電極 18 と、の最大ギャップ $= g_{max}$ とし、誘電体電極 17 と、金属電極 18 と、の最小ギャップ $= g_{min}$ としている。

[0123] 突起 31 の高さが下限の 0.30 mm の場合を考察する。

突起 31 の高さが下限の 0.30 mm の場合、突起 31 の高さが低いいため、図 28 に示すように、上側 2 つの突起は誘電体電極と接触しない。また、最小ギャップ g_{min} が突起高さ p_L より小さくなる問題が発生する。

[0124] 図 29 は、突起の数と、最小ギャップが突起高さより小さくなる度合いと、の関係を示す図である。

図 29 においては、最小ギャップ g_{min} が突起高さ p_L より小さくなる度合いを (g_{min}/p_L) としている。
計算条件は、金属電極内径 4.4 mm、誘電体電極外径 4.4 mm、突起高さ 0.3 mm である。

[0125] 図 29 に示すように、度合い g_{min}/p_L は、1 以下となるため、最小ギャップ g_{min} は 0.3 より小さくなる。
例えば、突起の数が 6 点の場合、 $g_{min}/p_L = 0.95$ となり、最小ギャップ g_{min} は、以下の通りとなる。

$$g_{min} = 0.3 \times 0.95 = 0.285 \text{ mm}$$

[0126] よって、ギャップ長さ d を 0.3 mm 以上とするには、突起 31 の高さを 0.315 mm としなければならない。このように、突起の数 (突起点数) により突起 31 の高さの微調整が必要となる。

微調整量 (微調整の大きさ) は、図 29 に示すように突起数に依存する。
ここで、突起数 6 以上では、 g_{min}/p_L に、あまり変化がないことがわかる。

[0127] 以上の考察から、突起数について以下のことと言える。

(1) 誘電体電極ないしは金属電極が曲がっているとき、その反力は、突起数 4 のときが最小で、突起数の増加と共に反力が増える。

(2) 突起数3のときは特別であり、反力が大きい。

(3) 最小ギャップ g_{min} が突起高さ pL より小さくなる度合い g_{min}/pL は、突起数=3のとき0.65となり、上述した突起31の高さの微調整量が大きくなる。突起31の高さの微調整量は突起数が多いほど少なくてすむ。

(4) 突起数=6以上では、突起31の高さの微調整量はあまり変化しない。

[0128] 以上のことから、突起数=3を除外することは明白である。

突起数=4以上では、突起数の増加とともに反力が増加するので、突起数は少ないほうがよい。

一方、 g_{min}/pL の観点では、突起数は少ないほうがよい。そして、突起数6以上で g_{min}/pL の変化はない。

よって、適する突起数=4、5、6である。

[0129] ところで、管を曲げるには、図21に示したように、接触点数が3あれば十分である。

したがって、接触点数の増加は、誘電体電極17と金属電極18を過剰に拘束する条件となり、反力の合計値が増えることになる。

したがって、一つの突起文を構成する突起数は、以上の説明に基づけば、4個あるいは5個となる。

[0130] 図30Aは、より具体的な突起の形状を説明するための金属電極の突起群の形成部近傍の一部破断斜視図である。

図30Bは、図30AにおけるA方向矢視拡大断面図である。

[0131] 突起31は、図30Aに示すように、金属電極18の外周面に4箇所設けられている。各突起31は、図30Bに示すようにドーム形状をしており、外周面側の凹部310は、例えば、曲率半径4mmの球面状をなしている。また内周面側の凸部311は、例えば、曲率半径5.6mmの球面状をなしている。

[0132] 上記構成によれば、突起31は、金属電極18の内面181において、な

めらかに内径を小さくするように形成されているので、誘電体電極 17 の金属電極 18 内への挿入時に摩擦抵抗が急激に増加することなく、スムーズに挿入できるようになっている。

[0133] 図 31 は、実施形態の変形例の説明図である。

図 1 に示したように、本実施形態においては、誘電体電極 17 は、図 1 中、左右の両方向から金属電極 18 内に同軸に挿入されていた。

上記構成において、原料ガスは、ガス入口 23 からガス出口 24 に向かって一方方向に原料ガス及び生成したオゾンガスが流れるため、圧力変化などに伴って誘電体電極 17 が金属電極 18 内で長手方向に移動してしまい、向かい合った誘電体電極 17 同士が当接してしまう虞があった。

[0134] そこで、本実施形態の変形例においては、そのような誘電体電極 17 の動きを抑制している。

誘電体電極 17 の動きを抑制するために、本実施形態の変形例は、図 31 に示すように、誘電体電極 17 の先端部 17T に当接するように移動抑制用突起 31S を複数設けている。

上記構成によれば、何らかの理由により、誘電体電極 17 が先端部 17T 側に移動したとしても、移動抑制用突起 31S に当接して、誘電体電極 17 の移動を抑制し、誘電体電極 17 同士が当接してしまうことを抑制できる。

[0135] 以上説明した実施形態をまとめると以下の通りとなる。

突起群を設ける位置については、誘電体電極 17 あるいは金属電極 18 が曲がっているとは仮定した場合に、放電ギャップ長 d の設計値からの逸脱量が最小となる条件で 3 箇所の突起群の長手方向の位置を算出すると、誘電体電極 17 あるいは金属電極 18 の曲がり角、放射線状であるとした場合には、 $L_3/L = 0.042$ が最適値となった。

また、曲がり角がサイノカーブ状の場合、 $L_3/L = 0$ 、つまり突起位置は放電空間の端が最適である。実際の製品設計値としては、 $L_3/L = 0.0 \sim 0.1$ の範囲であれば十分に実用に耐える。

[0136] また、突起 31 の先端と、誘電体電極 17 との間の間隔は、誘電体電極 1

7あるいは金属電極18が曲がっているとき、誘電体電極17を金属電極18内に挿入したときに摩擦力が最小となる条件で決定した。この結果、突起31の先端と、誘電体電極17との間の間隔は、0.01mm以上必要であることがわかった。

[0137] この場合において、突起31の高さが、0.4mmから0.10mm小さくなると、突起31が誘電体電極17と接触したときの放電ギャップは0.30mmとなり、その反対側は0.50mmとなり、放電ギャップ長dの変動を±0.1mmに抑えることができる。

以上のことから、突起31の先端と、誘電体電極17との間の間隔は、0.01~0.10mmが好ましい。

[0138] さらに、一つの突起群の突起31の数は、誘電体電極17あるいは金属電極18が曲がっていると仮定した場合に、誘電体電極17を金属電極18内に挿入したときに摩擦力が最小となる条件で決定した。

この結果、一つの突起群の突起数=4が最適であることがわかった。

[0139] 以上の説明のように、本実施形態によれば、放電ギャップ長を0.6mm未満とした場合でも、長手方向に少なくとも3箇所以上支持し、放電ギャップ長を長手方向に一定に維持してより高いオゾン収率を達成することができ

る。

より詳細には、放電ギャップ長を0.3mm~0.5mmの範囲内、特に放電ギャップ長を0.4mm近傍とした場合に高い生成後のオゾンの分解を抑制してオゾン収率の向上が図れる。

[0140] 以上の説明においては、一つの突起群を構成する突起31は、同一円周上に設けていたが、必ずしも同一円周上に設ける必要はなく、円環状、かつ、所定の幅を有する帯状の領域内に設けるようにすることも可能である。ここで、帯状の領域は、例えば、金属電極が曲がっている状態でも、突起が設けられている部分においては、実効的に金属電極が理想的な直管と見なせるような範囲として設けるようにすればよい。

[0141] 以上、本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は、

例として提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら新規な実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれるとともに、請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれる。

請求の範囲

- [請求項1] 円筒状の高圧電極に対し、同軸に円筒状の低圧電極を配置し、前記高圧電極と前記低圧電極との間に誘電体を介して所定の高電圧を印加して放電させ、前記放電によりオゾンが発生させるオゾン発生装置において、
- 放電ギャップ長 d が $0.3\text{ mm} \sim 0.5\text{ mm}$ とされ、
- 前記低圧電極あるいは前記高圧電極のいずれか一方が金属電極として形成され、いずれか他方が誘電体電極として形成され、
- 前記誘電体電極に対向する前記金属電極の内周面に、当該金属電極を前記誘電体電極に対し、前記放電ギャップ長を保持しつつ同軸に保持するための複数の突起を有する突起群を設けた、
- オゾン発生装置。
- [請求項2] 前記突起群は、少なくとも、放電空間の長手方向の中央部及びそれぞれ前記放電空間の両端から所定距離 $L/3$ の位置の3箇所に設けられている、
- 請求項1記載のオゾン発生装置。
- [請求項3] 前記所定距離 $L/3$ は、予め設定した基準放電ギャップ長に対する前記放電空間における放電ギャップ長の逸脱量が最小となるように定められている、
- 請求項2記載のオゾン発生装置。
- [請求項4] 前記突起群は、4個または5個または6個の前記突起を備えている、
- 請求項1記載のオゾン発生装置。
- [請求項5] 前記突起群を構成する前記突起は、同一円周上あるいは所定の幅を有する円環状の領域内に配置されている、
- 請求項4記載のオゾン発生装置。
- [請求項6] 前記放電ギャップ長 d に対し、前記突起の高さを $(d - \alpha)$ とした場合に、

$$0.01 \leq \alpha \leq 0.10 \text{ mm}$$

とした、

請求項 1 乃至請求項 5 のいずれかに記載のオゾン発生装置。

[請求項 7]

前記誘電体電極は、前記金属電極内に挿入されており、

前記金属電極は、前記突起の高さよりも高さが高く、挿入された前

記誘電体電極の先端に当接して挿入方向への前記誘電体電極の移動を

規制する移動抑制用突起が複数形成されている、

請求項 1 乃至請求項 5 のいずれかに記載のオゾン発生装置。