

ディスク型静電コロナモータの開発とオゾン水生成装置への応用

高橋克幸*, 大泉哲哉, 和泉健吉**, 服部正行

Improvement of a Multi-Disk Corona Motor and Application for an Ozonic Water Generation System

TAKAHASHI Katsuyuki*, OIZUMI Tetsuya, IZUMI Kenkichi**
and HATTORI Masayuki

In our previous report, a multi-disk-type corona motor that consists of several multi-DVDs rotor and a dual-printed circuit board stator was proposed and applied for an ozonic water generation system. In this report, suitable lengths of discharging electrodes were examined and have been adopted. An air-gap between the stator and rotor was modified to a variable type. Consequently, then the number of DVDs was increased to more than 10 pieces. Results clarified that a corona motor with more than 8 DVDs drove the centrifugal pump used in this ozonic water generation system. Moreover, we proposed an ozone density regulator to treat higher density gaseous ozone.

Keywords:

Multi-disk corona motor, Lengths of discharging electrodes, DVD type rotor, Ozonic water generation system

1. はじめに

コロナモータは静電型モータの一種であり、研究の起源は古いが、電磁型モータが主流となって以来、その発生トルクが小さいのがため、基礎研究は行われても実用化研究の試みは殆ど見られないのが現状である([1]-[3])。しかし、コロナモータはオゾンが発生することから、発生トルクを高トルク化できれば、オゾン水を生成するための循環ポンプ駆動用モータとしての応用などが考えられる([4]-[6])。オゾン水の用途はその濃度によって、高濃度であれば殺菌や消毒用に、また低濃度であれば観賞魚の成長促進薬などへと、その応用は多岐に渡っている。

これまで我々は、両面使用可能な DVD 型回転子およびスリット入り両面プリント基板型放電電極(固定子)を用いて、マルチディスク型コロナモータについて検討を行ってきた。また、コロナモータをオゾン水生成装置に応用する方法も提案し、基礎実験も行っている([7]-[11])。

本報告では、固定子の電極長の検討、回転子の加工による、コロナモータの放電特性の改善と共に、コロナモータのさらなる構造の簡易化を行った。また、これまでのオゾン水生成装置を更に改良し、高濃度のオゾンも扱えるようにした。

2. ディスク型静電コロナモータの構成

2. 1 ディスク型静電コロナモータの回転原理

図 1 はディスク型コロナモータの動作原理図である。

図 1 において、放電電極間に高電圧が印加されると、コロナ放電により極性に応じて正または負の空間電荷群が形成され、これらは裏打ちされた導体との間でキャパシタを形成し、回転子表面に拘束される。この拘束された電荷と電極との間に働くクーロン力によって、コロナモータは回転力を得る。

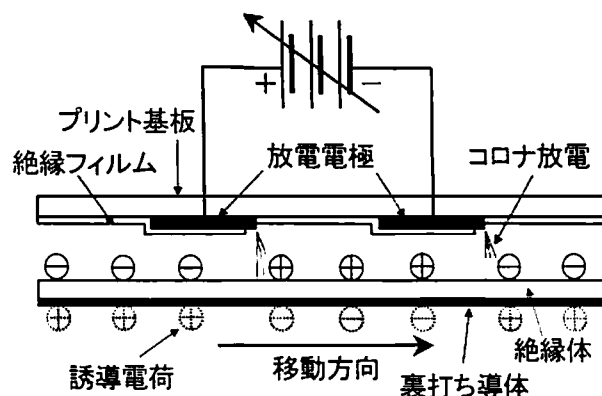


図 1 ディスク型コロナモータの動作原理

*電子システム工学専攻 2 年,

**シンド静電気(株)

具体的には、放電部は同図のように各電極の片側の角部だけとし、もう一方の角部は絶縁フィルムで被覆しておく。

その結果、電荷密度ならびに電界分布が非対称となり、放電の無い被覆側から放電している角部の方向(図1の矢印方向)に推力が発生し、一方向に回転する。この原理を回転子・固定子の両面で使用できる構成にしたものがマルチディスク型コロナモータである。

2. 2 試作した回転子の構成

回転子としては、誘電体(絶縁体)と裏打ち導体を組み合わせた構成が必要である。両面仕様のDVDは、その構造を、裏と表に接着部により張り合わせて構築しているため、マルチディスク型回転子の構成要素として採用が可能である。DVDはステンレス製の長方形の金具を用い、軸に固定し、構築している。図2はその構成方法(ディスク2枚の例)を示している。

しかし、回転子5枚以上になると、回転子のたわみ等によって、回転中に固定子と接触するようになり、組み立てが困難になることが判明した。この主な原因としては、回転子を固定する面が小さい等がある。そのため、回転子軸を太くすることによって、固定部の面積を増やし、回転方向へのたわみを改善できるものと考えられる。

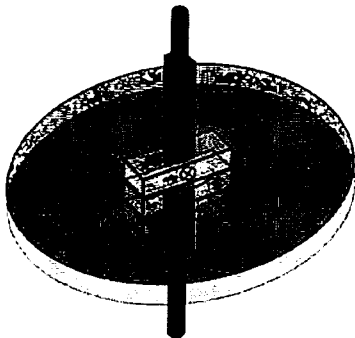


図2 回転子の構成例

2. 3 放電電極(固定子)の構造

図3にプリント基板型放電電極(電極数 $N_E=20$ 極、厚さ1.5 mm、一辺140 mmの正方形基板)の概観を示す。プリントパターンは表裏で鏡面对称の構造である。また、基板の一部に見られるスリットはマルチディスク型回転子を分解せずに着脱できるように工夫されたものである。

この放電電極のプリントパターン部分にポリプロピレン製の薄い絶縁フィルムを貼付しておき、放電部分のみを長さ L_E 、幅約1 mmだけ切り取る方法を採用している。この電極は両面基板に同じパターンを形成しているため、両面を放電電極として使用できる構造となっている。

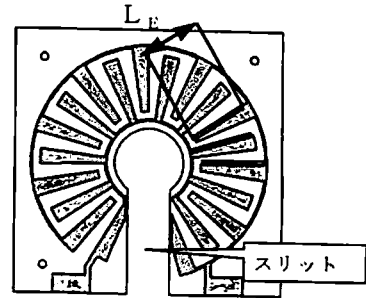


図3 放電電極(固定子)の構造

3. コロナモータの特性測定法について

3. 1 トルク測定法の原理

コロナモータのトルク特性測定の原理を図4に示す。図4の場合は、左側の電極が奥の方に、右側の電極が手前にある構成なので、回転方向は矢印方向(ω_m)となる。

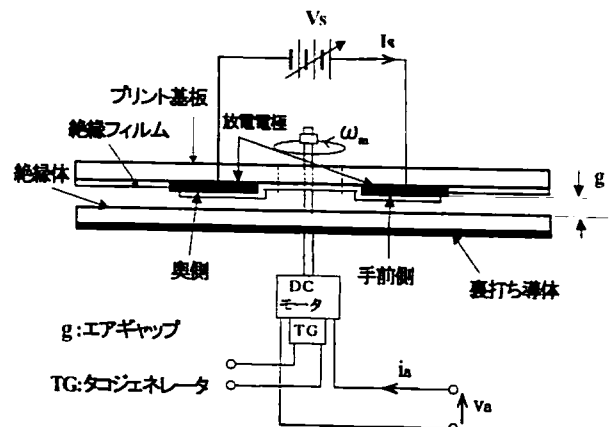


図4 トルク測定法の説明図

図4における各変量は、 V_s :コロナモータの印加電圧、 I_s :コロナモータ電流、 ω_m :回転角速度、 T_m :コロナモータの発生トルク、 i_a :DCモータの電機子電流、 v_a :DCモータの電機子電圧、TG:タコジェネレータである。

コロナモータの入力電力 P_i および、発生トルク T_m は次式から求める。

$$P_i = V_s I_s \quad (1)$$

$$T_m = K_T (i_{a0} - i_a) \quad (2)$$

ただし、式(2)の K_T はDCモータのトルク定数、 i_{a0} は $V_s=0$ の時のDCモータ電流であり、コロナモータとDCモータの合成摩擦トルク F を駆動するための電流に相当し、 ω_m の関数である。また、コロナモータの出力は摩擦トルク等の機械的な状態に依存しその値は温度や回転軸の接触状況によって変動するため、次式で定義されるような発生動力 P_m で評価することにする。

$$P_m = T_m \omega_m \quad (3)$$

3. 2 DC モータの速度制御と電流測定法

ところで、コロナモータのトルクを測定する際には、速度を一定に保った状態での発生トルクの値を測定する必要があるため、図5のようなパソコンと制御ボードによる速度制御系を構成しなければならない。コロナモータの回転角速度 ω_m を、DCモータに直結したタコジェネレータにより制御ボードに取り込み、PI制御信号をDCモータのパワーアンプに出力する方式で速度一定制御(V_a)を実現している。この状態でのDCモータ電流 i_a を測定すれば、式(2)よりコロナモータのトルクの測定が可能となる。なお、本研究で用いているDCモータの K_T は20.8 mNm/Aである。

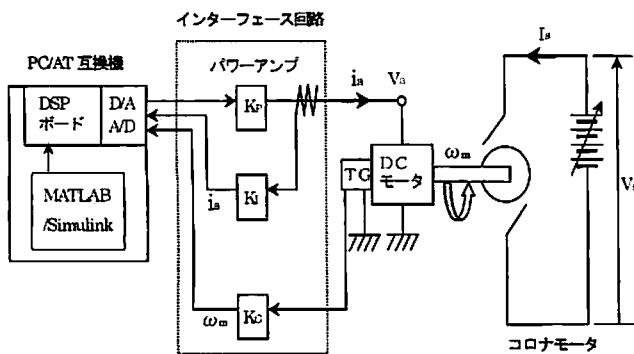


図5 DCモータの速度制御システム

4. 放電電極構造パラメータの改良

固定子の絶縁フィルムを切り取り、露出している電極長 L_E は30 mmとしている。 L_E が長い程、放電部が多くなり、発生トルクの増加が期待できる。そこで、 L_E をプリントされている電極の全長である、35 mmとし、以前のものと比較した結果を図6に示す。

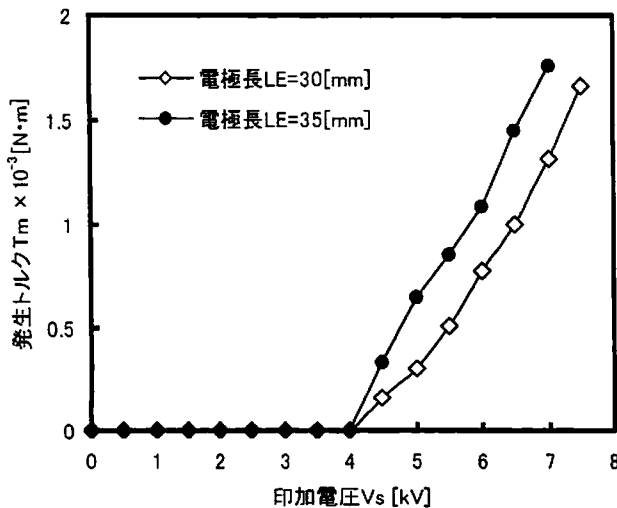


図6 L_E 延長時の発生トルク

これから、 L_E を35 mmへ延長することによって発生トルクが増加することが判明した。しかし、電極長の延長に

よって、7 kV程度の電圧の印加で、DVD接着部と電極間、両極の電極間で火花放電が生じてしまい、それ以上のトルクの発生が不可能となる。

接着部への火花放電は、放電部分が外側へ拡張されたことにより、DVD側面付近で放電が起き、側面から接着部を介し、DVD内部へその放電が進入するために生じる。そこで、DVD側面部へセメダイン製ABS用接着剤を塗布することにより、接着部への放電の進行を防止した。

電極間での放電は、電極長を内側まで延長したことにより、露出されている電極間の最短距離が以前より小さくなったことに起因している。そこで、図7に示すように、内側に配置されている電極の電極長を L_{EI} 、外側を L_{EO} とし、この長さを変えることにより、その最短距離を変化させ、火花放電の防止を試みた。 L_{EI} を35 mm一定とし、 L_{EO} と最短距離、回転子をはずした際の火花開始電圧の関係を表1に、 L_{EO} と発生トルクの関係を図8に示す。

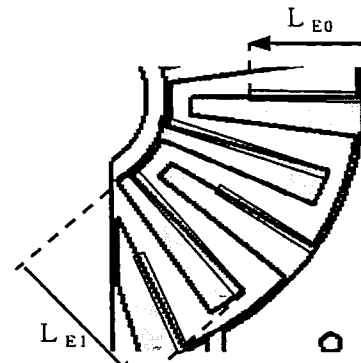


図7 電極長 L_{EI} と L_{EO}

表1 L_{EO} の検討

L_{EI} [mm]	L_{EO} [mm]	最短距離[mm]	火花開始電圧[kV]
35	32	4.3	11.2
35	30	4.6	11.5
35	28	4.9	12

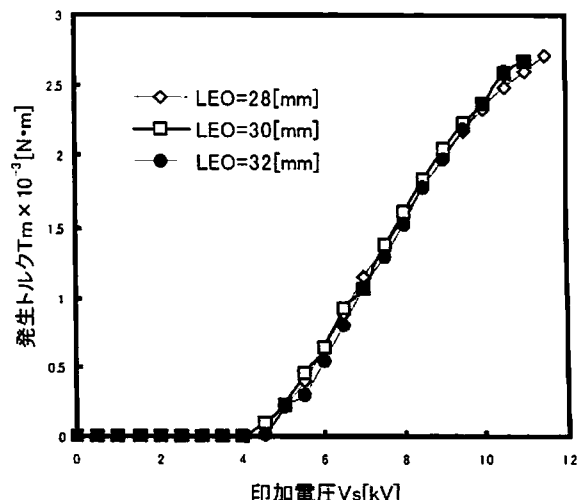


図8 L_{EO} 検討

これより、 L_{EO} を 32~28 mm で変化させた場合の、印加電圧に対する発生トルクの違いはほとんど無い。そこで、 L_{EO} は最も火花開始電圧が高い 28 mm を採用する。なお、この火花開始電圧は、回転子の表面や放電空間の状態、回転子と固定子の間隔であるエアギャップ g (図 4)の若干の違いなどにより変化する。

5. 構築方法の改善

5.1 回転子軸の改良

図 3 のような 20 極の放電電極(固定子)と図 2 のようなマルチディスク型回転子を組み合わせた場合、エアギャップ g は 0.55 mm となる。電極面数 N_s が 10 面(回転子 5 枚)以上になると固定子と回転子が回転中に接触するようになり、組み立てが困難になることが判明した。この主な原因としては、回転子を固定する面が長方形(9.0 mm × 21.0 mm)であること、回転子軸が細い(6.0 mm ϕ)こと等による固定金具の工作精度に依ることが分かった。また、金具の材料には、ステンレスを用いているため、重量が増し、高速回転時での制御が困難となっている。

そこで改善として、回転子軸の径を大きくし、DVD の固定面を増やすことによって、回転子の偏心の防止と、軽量化を行った。

回転子軸となる部品は、ステンレス製のモータ主軸(6.0 mm ϕ)、アクリル製の DVD 固定用軸(15.0 mm ϕ)とスペーサ(20.0 mm ϕ 厚み 7 mm)であり、すべて丸棒とする。また、DVD 固定用軸にはモータ主軸と同形状の、スペーサには DVD 固定用軸と同形状の穴を開けている。これらを図 9 に示すように、順番に挿入し固定することによって回転子軸の構築を行う。

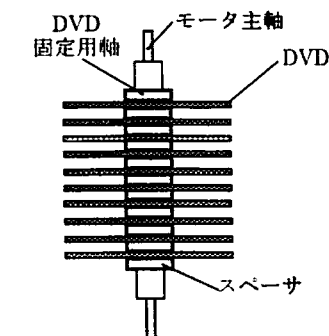


図 9 回転子軸構築図

5.2 固定子の構築方法の改善

従来のコロナモータの構築方法では、エアギャップ g が一定のため、回転子と固定子が接触してしまった場合、モータの再構築が必要であった。そこで、 g を可変とすることにより、回転子と固定子の接触の防止を可能とする構築方法の検討を行った。

従来の固定子では、一枚のプリント基板両面に図 3 に示すように放電電極が配置されていた。これを、片面のみ放電電極が配置された、二枚の別々のプリント基板を用い、この二枚の間にスペーサを挿入し、その厚さを変更するこ

とにより、固定子全体の厚さの変更を可能とした。これにより、回転子と固定子の間隔であるエアギャップ g を可変とし、固定子と回転子の接触を防止することができる。また、固定子とスペーサの交換は、いつでも容易に可能である。

また、放電電極への高圧電源の供給方法として、ステンレス板にバネが垂直に固定されたものを挿入方向の奥面に設置した。これより、固定子を一方向から挿入することにより、バネを介して放電電極へ電源の供給が可能となっている。固定子の構築図を図 10 に示す。

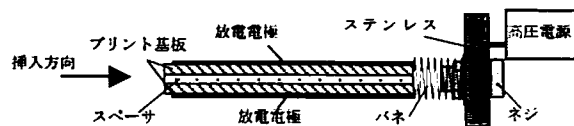


図 10 固定子構築図

5.3 コロナモータの概形とその特性

これらの改善を適用させたコロナモータの製作を行った。構成したコロナモータは図 11 のようになっており、回転子を 10 枚まで構築でき、 g は 0.5~1.5 mm で可変である。

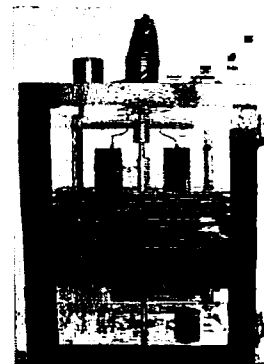


図 11 コロナモータ概形

ここで、放電面数を 2 面とし、 g を 0.5, 0.75, 1.5 mm とした際の放電実験を行った。印加電圧に対する、発生トルクの関係を図 12 に示す。これより、 g が大きくなるにつれ、発生トルクが小さくなっている事が分かる。ここで、0.5 mm と 0.75 mm の比較を行うと、0.75 mm は発生トルクの低下が見られる。また、回転数を 4 枚程度以上の多段化する際、回転子と固定子が依然、接触してしまう場合がある。そこで、ギャップが広く、より容易に構築が可能である 0.75 mm を選択する。

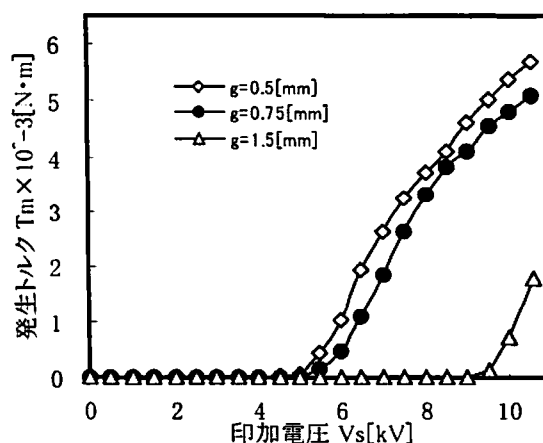


図 12 発生トルク特性への g の影響

次に、 g を 0.75 mm とし放電面数を $1 \sim 20$ 面とした際の、発生トルク特性を図 13 に示す。ここで、放電面数が 10 面以上で、最大印加電圧が他の面数と比べ低くなっている。これは、現在トルクの測定に用いている DC モータの最大発生トルクに至っているため、これ以上のトルクは測定が不可能になっているためである。また、放電面数 15 面以上では、オゾン水生成装置に使用している、揚水用の遠心ポンプの駆動に十分なトルクを発生しており、コロナモータのみでの駆動が可能となっている。

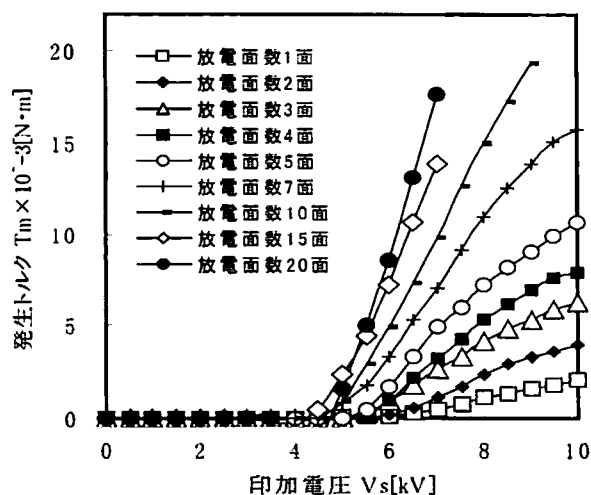


図 13 発生トルク特性

6. オゾン水生成装置

6.1 オゾン水生成実験

コロナモータの応用として、これまで発生するオゾン及び、トルクを利用したオゾン水生成装置の検討を行ってきた ([7]・[11])。このオゾン水生成装置を用いて、オゾン水生成実験を行った。まず、放電面数を 1 面、印加電圧 $V_s = 7 \text{ kV}$ 、放電電流 $I_s = 0.29 \text{ mA}$ とし溶解実験を行った。溶媒としては 4 L 、 19°C の水道水を利用し、溶解方式は水中で気泡を発生させオゾンを溶解させる気泡発生式を用いている。ここで、 60 分後の気中オゾン濃度は 190 ppm に達していたが、溶存オゾンを検出することができなかった。

そこで、気中オゾン濃度を高めるため、放電面数を 4 面、 $V_s = 7.5 \text{ kV}$ 、 $I_s = 0.52 \text{ mA}$ と変更し、溶解実験を行った。溶媒に関しては、オゾンの溶解を容易とするために、 800 mL の水道水を 2 度煮沸させ脱気を行い、 5°C まで冷却したものを用いた。このとき、気中オゾン濃度は、 15 分後に 678 ppm に達している。これは、現在使用している気中オゾン濃度測定器の最大測定範囲である。溶解時間と、水中オゾン濃度の関係を図 14 に示す。

これから、オゾンは溶け始めに時間がかかること、溶解には高濃度のオゾンが必要であることが判明した。また、

43 分以降は、溶媒へのオゾンの注入を停止しており、溶存オゾンは直ちに分解することが分かる。

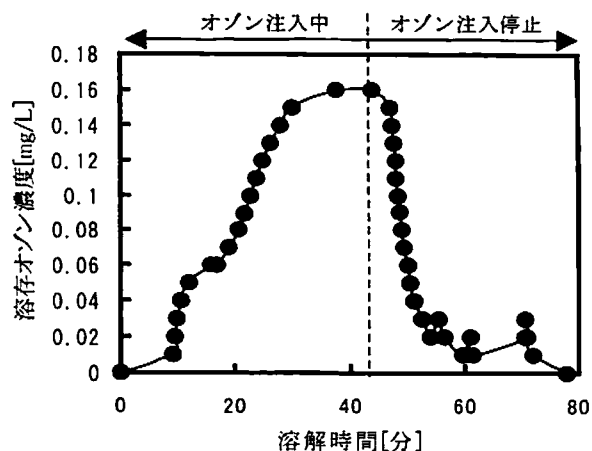


図 14 水中オゾン濃度の推移

6.2 オゾン濃度調整器の試作

オゾン水の生成には、現在使用している気中オゾン濃度計の測定範囲以上の気中オゾンが必要である。そこで、この測定範囲を広げるために、気中オゾン濃度計に取り入れるオゾンの濃度を調整する機器の製作を行った。

構造は図 15 のようになっており、塩化ビニールパイプと、コックを用いている。ここで、コックの回転角を絞り角 θ_c とする。コックは、 θ_c が大きいほど空気を通過させない構造となっている。そして、コロナモータから発生したオゾンは、大気によって薄められ、気中オゾン濃度計に内蔵されている吸引ポンプによって吸引される。 θ_c と吸引される気体のオゾン含有率との関係を図 16 に示す。

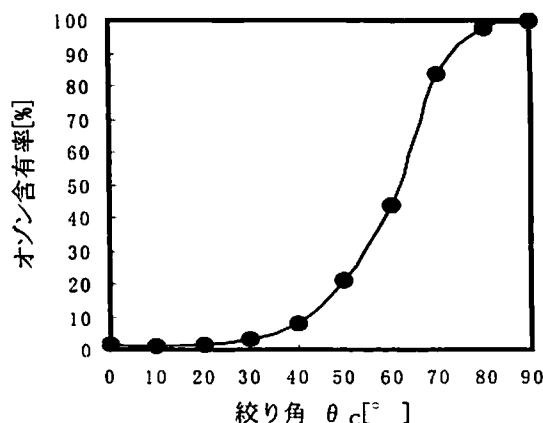
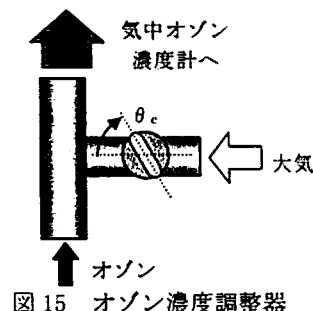


図 16 θ_c と気体のオゾン含有率

ここで、 θ_c を 40° とした時、吸引される気体のオゾン含有率が、およそ 10 分の 1 になっている。そこで、この

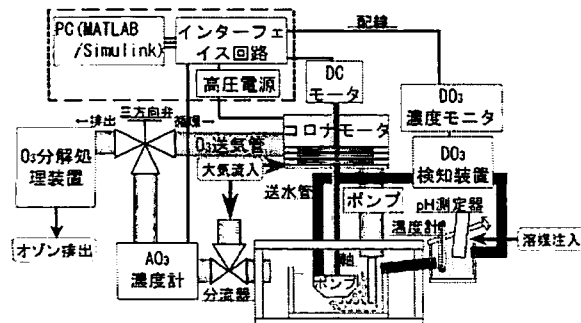
θ_0 を用い、気中オゾン濃度計の測定範囲を10倍へ拡張し使用する。

6.3 オゾン水生成装置の改良

以上のコロナモータ、オゾン水生成装置の改善を適用した新型オゾン水生成装置の概略図を図17に、その外観を図18に示す。

コロナモータはトルクを測定するためのDCモータ、水を循環させるための遠心ポンプと直結しており、PCにより制御されている。コロナモータで発生したオゾンは、吸引ポンプによりオゾン溶解部に吸引され、水槽内で気泡を発生させる事によりオゾンを溶媒へ溶解する。水槽内の溶媒は遠心ポンプにより溶存オゾン検知装置へ揚水され、溶存オゾン濃度を測定する。溶解部に存在するオゾンは、オゾン濃度調整器を介し大気と薄められ気中オゾン濃度計内蔵のポンプにより吸引される。気中オゾン濃度計で濃度を測定されたオゾンは、活性炭を用いたオゾン分解処理装置で分解され、大気に排出される。

この改良によりオゾン水生成装置のシステム全体の大方の確立をすることができたと言える。



*AO₃ = Aerial Ozone: 気中オゾン

*DO₃ = Dissolved Ozone: 溶存オゾン

図17 新型オゾン水生成装置概略図



図18 新型オゾン水生成装置外観

7. まとめ

コロナモータの構造上の問題の解決と簡易化、効率の改善とともに、発生する気中オゾン濃度の上昇、オゾン水の生成を行うことができた。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1). 放電電極長の検討により最適なパラメータを選択したことによって発生トルクを増加させることができた。
- (2). 回転子軸の構造の改良と、固定子の構築方法を改善することにより、コロナモータの構築が容易となり、回転子10段まで構成することが可能になった。これにより、コロナモータのみでの揚水用遠心ポンプの駆動が可能であることを確認した。
- (3). オゾン濃度調整器によって高濃度のオゾンが扱えるようになり、これからオゾン水生成装置のシステム全体の確立を行った。

以上より、今後は、生成したオゾン水の、種々の応用が可能になるものと期待される。なお、現在直流電源を使用しているが、パルス加電での放電の方は一般にオゾン生成効率が良いとされており、そのような電源方式を用いることによる、オゾン生成効率の改善が期待できる。

参考文献

- [1] H. Fischbach・Nazario: "The Electrostatic Corona Motor", West Virginia Univ., Dissertation Abstract, Vol. 35, No. 3, pp.1-196, (1971)
- [2] M. Hattori, K. Asano and Y. Higashiyama: "The Fundamental Characteristics of a Cylindrical Corona Motor with Multi-Blade Electrodes", Journal of Electrostatics, Vol.27, pp.223-235, (1992)
- [3] 静電気学会編: 新版 静電気ハンドブック, pp.9759-978, オーム社 (1998)
- [4] 服部正行, 後藤雅史, 大泉哲哉, 和泉健吉: 「多段構成ディスク型コロナモータの試作とその特性改善」, 仙台電波高専研究紀要, No.28, pp.83-90, (1998)
- [5] 服部正行, 猪股広一, 青木俊之, 和泉健吉: 「電磁力関係のダイナミクス」シンポジウム講演論文集'01 pp.453-459 機械学会 (2001)
- [6] 服部正行, 猪股広一, 和泉健吉: 「ディスク型コロナモータの特性改善とその応用」, 仙台電波高専研究紀要, No.31, pp.39-46, (2001)
- [7] 高橋克幸, 和泉健吉, 大泉哲哉, 服部正行他 2『ディスク型静電コロナモータの特性改善とその応用』平成16年度電気関係学会東北支部連合大会, 2C11, pp.105, (2004)
- [8] 高橋克幸, 和泉健吉, 大泉哲哉, 服部正行: 「ディスク型静電コロナモータの特性改善とその応用(第2報)」平成17年度電気関係学会東北支部連合大会, 1C12, pp.85, (2005)
- [9] 服部正行, 高橋克幸, 大泉哲哉, 和泉健吉: 「マルチディスク型コロナモータの特性改善とオゾン水生成装置への応用」, 仙台電波高専研究紀要, No.35, pp.31-36, (2005)
- [10] 服部正行, 高橋克幸, 大泉哲哉, 和泉健吉: 「ディスク型コロナモータの基礎的研究 (IX)」, 静電気学会講演論文集'05, pp.145-148, 静電気学会 (2005)
- [11] 高橋克幸, 三浦祥太, 齊藤秀太, 和泉健吉, 大泉哲哉, 服部正行: 「ディスク型静電コロナモータの特性改善とその応用(第3報)」平成18年度電気関係学会東北支部連合大会, 2H25, pp.323, (2006)