

## 論 文

## ディスク型コロナモータの多段構成に関する基礎的研究

服 部 正 行\*, 後 藤 雅 史\*, 大 泉 哲 戯\*,  
和 泉 健 吉\*\*, 浅 野 和 俊\*\*\*

(1999年3月11日受付, 2000年1月18日受理)

## Fundamental Study on a Multi-Disk Electrostatic Corona Motor

Masayuki HATTORI\*, Masafumi GOTO\*, Tetsuya OIZUMI\*,

Kenkichi IZUMI\*\* and Kazutoshi ASANO\*\*\*

(Received March 11, 1999; Accepted January 18, 2000)

Since a corona motor can produce relatively large torque among the variety of electrostatic motors, we have investigated the cylindrical type corona motor for many years. In order to improve the space utilization and fabrication procedure, a multi-disk type corona motor has been investigated. The improved torque measuring system was also developed to measure the effect of various motor parameters on the generated torque, such as the number of rotors and electrodes, motor speed, air gap length and so on. The generated torque of the corona motor with constant speed was evaluated by using a digital PI velocity control system. A DSP board was used to adjust the rotational speed of the dc motor with which torque was measured. The control programs were developed by MATLAB-SIMULINK. It is confirmed that a single-disk corona motor is capable of self-starting and multi-disk type can have large generating torque in proportion to the number of surface of disks. It is also clarified that the air gap length is extremely sensitive to the generated torque and efficiency of the corona motor. The data shown in this paper could be used for designing and manufacturing the disk type corona motor.

## 1. はじめに

コロナモータは電荷間のクーロン力を利用した静電モータの一種であるが、比較的大きな機械出力を取り出しうるモータであり、比較的多くの研究例が見られる<sup>1-3)</sup>。

またコロナモータは、電荷の供給にコロナ放電を用いているため、オゾンが発生することも知られており<sup>4,5)</sup>、これらを積極的に利用したコロナモータ型オゾン発生器や空気清浄器への応用の試みも見られる<sup>6,7)</sup>。

コロナモータは、円筒型とディスク型に大別されるが<sup>8)</sup>,

**キーワード:** ディスク型コロナモータ, 多段構成, コロナ放電, トルク測定法, PI速度制御系

\* 仙台電波工業高等専門学校 (989-3124 仙台市 青葉区上愛子字北原1)

Sendai National College of Technology, Kitahara-1,Aoba-ku, Sendai 989-3124, Japan

\*\*シンド静電気株式会社横浜工場 (230-3124 横浜市鶴見区元宮 1-10-8)

Yokohama Plant, Shishido Electrostatic, Ltd., 1-10-8, Motomiya , Tsurumi-ku, Yokohama 230-3124 , Japan

\*\*\* 山形大学工学部 (992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16)  
Faculty of Engineering, Yamagata University, 4-3-16, Jonan, Yonezawa, Yamagata 992-8510, Japan

これまでの試みは円筒型コロナモータが主で、ディスク型コロナモータはその段階に至ってはいない。しかし、円筒型は回転子の外表面だけがトルク発生に寄与するのに対し、ディスク型では表裏を利用でき、かつ多段構造にすればモータの構成空間の有効利用が可能になると考えられる<sup>9,10)</sup>。

本研究ではこのような観点からディスク型コロナモータの多段構成法について検討し、試作機による実験を通じてディスク型コロナモータの設計資料を得ることを主目的としている。なお、コロナモータのトルク特性の測定の際に要求される速度調整は従来手動で行われてきたが、本研究では測定時間の短縮のため、DSP (Digital Signal Processor)ボードを用いたデジタルPI制御方式を採用し、測定法の改善を図っている<sup>11)</sup>。

## 2. 多段構成に適したディスク型コロナモータの検討

## 2. 1 ディスク型コロナモータの動作原理

ディスク型コロナモータの動作原理を図1に示す。放電電極間に高電圧が印加されると、コロナ放電により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

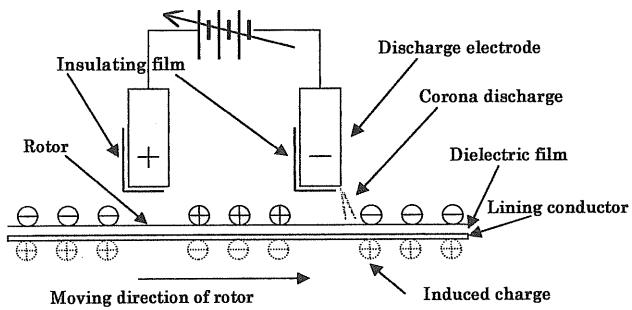


図1 ディスク型コロナモータの動作原理  
Fig.1 Rotational mechanism of the corona motor

て、コロナモータは回転力を得る。その際、放電部は図のように各電極の片側の角部だけとなるように、もう一方の角部は絶縁テープで被覆する。こうすることで電極の被覆側では放電が起こらず、電荷密度ならびに電界分布が非対称性になり、回転方向に一意性を与えていく。

## 2.2 回転子の構造

回転子は、絶縁体フィルムに導体箔を裏打ちしたもので構成されている。本研究で用いた回転子の直径は 180mm であり、表裏が銅箔のガラスエポキシ基板の両面を裏打ちに必要な銅箔部分だけを残してエッチングし、その基板の両面に、絶縁フィルム (SS PVC 100B)を貼り付けることで、図 2 のような厚さ 0.8 mm の回転子を構成した。この回転子は構造が簡単で、同じ形状のものを量産するのに向いており、多段構成の回転子への適用が容易である。

## 2.3 放電電極の構造

放電電極としては厚さ 8 mm のステンレス板を図 3 のように加工した電極数  $N_E = 8$  のものを用いた。外側電極の正方形部分の一辺の長さは 200mm である。これらの放電電極を多段構成に適用するため、設計製作に際しては以下のような点に留意した。

内側の電極（高圧側）は外側の電極と電気的に絶縁された状態で空間に設置する必要性から、外側電極とアクリルねじで固定した。また電極の一部を絶縁テープで被覆するため、テーピングし易いように直線部分の多い形状とし、角部が直角であることからN C放電加工機で一度に複数枚作製する方法を採用した。このような構造によって、放電電極の表裏両面に対向する回転子への放電が可能となり、多段構成が容易になる。

なお、図3に示すように電極①では、電極⑧側に近い方だけをテープングし、電極②に近い側の角部が放電部となるようにした。以下、各電極を同様の向きにテープングすることにより、回転方向が反時計方向となるようにした。

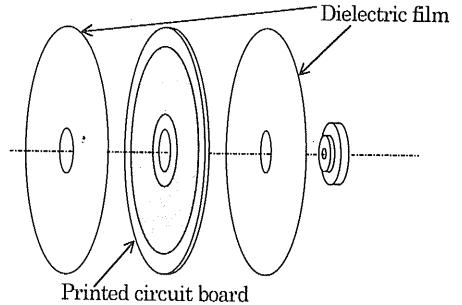


図2 回転子の構成  
Fig.2 Structure of the rotor.

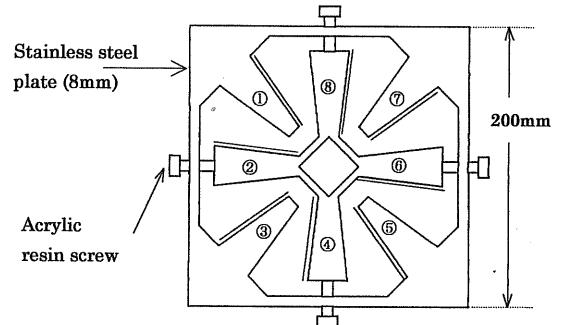


図3 放電電極の概略図  
Fig.3 The discharge electrode pattern.

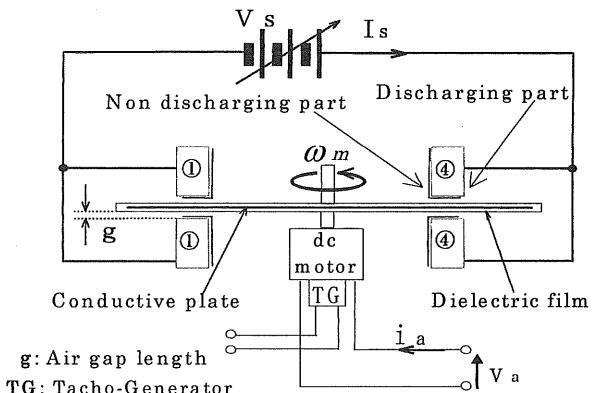


図4 トルク測定法の説明図  
Fig.4 Torque measuring method of the corona motor

### 3. ヨロナモータの特性測定法について

### 3.1 トルク特性測定法の原理

図3に示した角型電極を用いたディスク型コロナモータのトルク特性測定法の原理を図4に示す。同図の場合は、左側の電極①が奥の方に、右側の電極④が手前にある構成なので、回転方向は矢印方向となる。

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。

$$P_i = V \cdot s \cdot I \cdot s \quad (1)$$

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

ここで、 $V_s$  : コロナモータへの印加電圧、 $I_s$  : コロナモ

ータ電流,  $K_T$ : DCモータのトルク定数,  $i_a$ : DCモータの電機子電流,  $i_{ao}$ :  $V_s = 0$  の時のDCモータの電機子電流である。 $i_{ao}$ はコロナモータと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する。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するため、次式のような発生動力  $P_m$ で評価することにする。

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

ここで  $\omega_m$  は回転角速度である。

### 3.2 コロナモータの特性測定法の改善

コロナモータの印加電圧に対する発生トルクの関係を測定する際には、回転数を一定に保って測定する必要があるが、これまでDCモータの電機子電圧を手動で調整する方法を採用してきた。

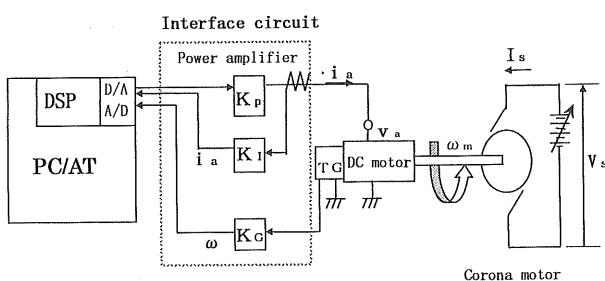


図5 改良型特性測定システムの構成図

Fig.5 Schematic diagram of improved torque measuring system.

図5は、比例・積分(P I)補償要素を用いた速度制御系をDSPボードにより構成し、ディスク型コロナモータの特性測定をより能率的に行えるように改善したシステムの構成図である。

制御用プログラムはMath Works社のMS-Windows対応のMATLAB/SIMULINKを用いて開発し、dSPACE社のDSPシングルボードシステム(TMS320C30+A/D+D/A+etc.)に直接ダウンロードして使用している。また、DSPボードによる測定系のユーザインターフェイスとしてはdSPACE社のCOCKPITというグラフィック操作パネルソフトを用いている。COCKPITはDSPボードとリアルタイムに通信が可能で、PCのモニタ上でDSPの状態を図6の例のように表示したり変更したりする機能を有している。

コロナモータへの速度指令がステップ状に変化する際の速度調整の例として、コロナモータへの印加電圧  $V_s$  を0Vとし、図4の電機子電圧  $v_a$  を手動で制御した場合と、図5に示す改良型測定システムを用いて速度制御を行った場合の結果を図7および図8に示す。

図7の結果より、500rpmの速度変化を実現するのに、手動制御ではオーバーシュートも見られ、同図に矢印で示したように、約15秒程度の調整時間が必要という結果とな

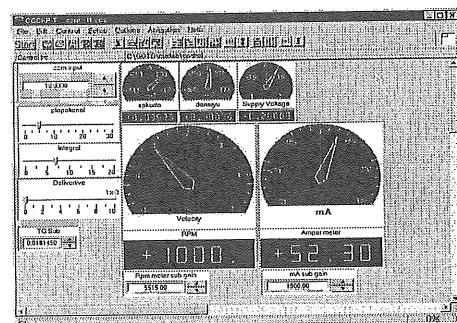


図6 コロナモータ特性測定系の操作画面の例  
Fig.6 Display of user interface software "COCKPIT"

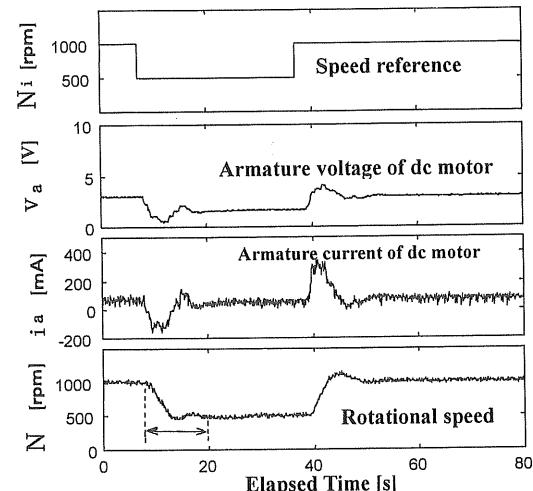


図7 ステップ入力に対する手動速度追従特性の例  
Fig.7 Example of manual velocity control.

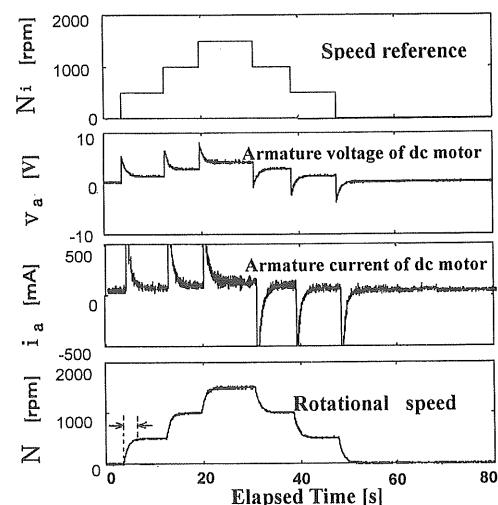


図8 DSPボードを用いた速度制御特性  
Fig.8 Automatic velocity control by the PSP board.

っている。一方、デジタルP I制御を用いた図8の結果にはオーバーシュートも見られず、矢印の範囲で示したように、速度指令入力の2~3秒後には、各状態量の測定が可能な定常状態になっていることが分かる。

次に、回転数が1000rpmで回転しているコロナモータへ、印加電圧をステップ状に0Vから10kVへ変化させた場合

と、逆に 0V に戻した場合の各部の応答波形を図 9 に示す。

同図より、回転数への影響はある程度表れるがやはり 2 ~ 3 秒程度で元の 1000rpm に戻っており、この段階で DC モータの電流を読みとることが可能であることを示している。このことは手動による速度の調整に比べて測定時間が約 1 / 5 程度に短縮できることを意味している。

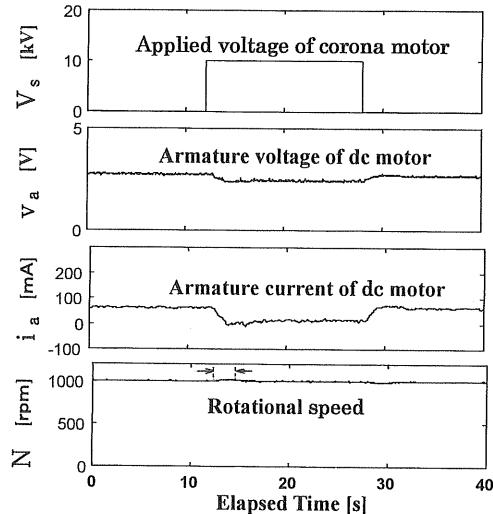


図 9 ステップ状負荷トルクに対する各部の応答  
Fig.9 Transient response for stepwise disturbance torque.

#### 4. ディスク型コロナモータの特性

##### 4.1 多段化した場合のコロナモータの特性

図 10 は、回転子の枚数を変化させた時の回転数 N に対するコロナモータと DC モータの合成の摩擦トルク F との関係を示す。摩擦トルクは、コロナモータへの印加電圧 Vs を零とした時のトルク測定用 DC モータの電機子電流  $I_{ao}$  を回転数を変化させながら測定し、その値に DC モータのトルク定数  $K_T$  を乗じた値を採用している。同図より、F は速度および回転子の枚数と共に増加するが、低速度領域では枚数によらず、十分小さな値となっていることがわかる。

図 11 は、ディスク型コロナモータの回転数 N を 1000rpm とし、回転子の有効面数を変化させた場合の発生トルク特性を示す。ここで、例えば有効面数 1 とは、回転子が 1 枚でその片側だけに放電電極を配置したという意味である。同図より、コロナ放電開始電圧（約 8.5kV）より大きい印加電圧 Vs の変化に対する発生トルクの変化率は、使用面数の増加に伴って大幅な増加の傾向にあることがわかる。

図 12 は、図 11 を印加電圧 Vs をパラメータとして整理し直したものであるが、同図はコロナ開始電圧以上の印加電圧に対して、発生トルクが使用面数に対してほぼ比例的に変化する傾向のあることを示している。

なお、コロナモータ電流も回転子の有効面数に対して比例的に増加することが容易に推測されるが、このことも実験によって確認されている。

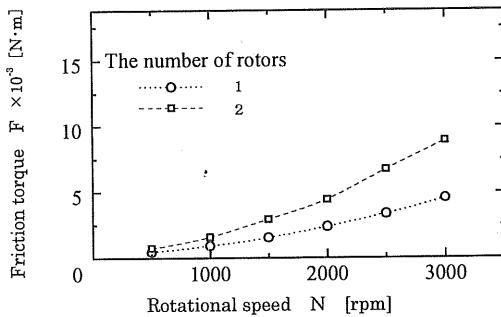


図 10 回転子枚数と摩擦トルクの関係  
Fig.10 Friction torque vs. the number of rotors

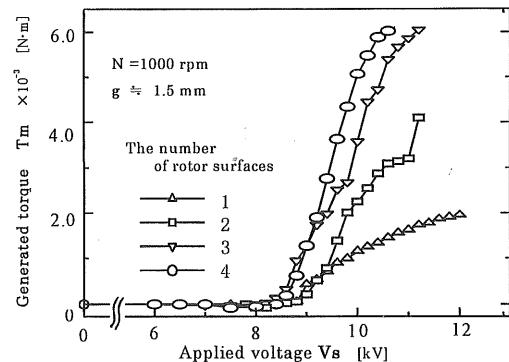


図 11 印加電圧と発生トルクの関係  
Fig.11 Generated torque vs. applied voltage.

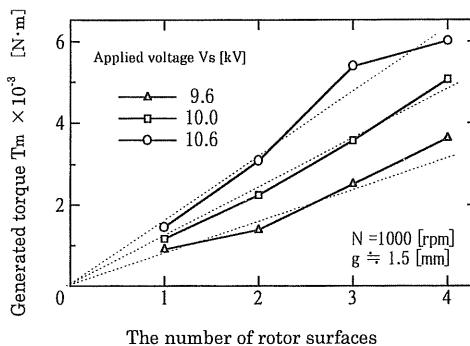


図 12 回転子有効面数と発生トルクの関係  
Fig.12 Generated torque vs. the number of rotor surfaces.

これらのことから、多段構成のディスク型コロナモータの特性は、1 面だけを用いたコロナモータ特性から計算によってほぼ推定できることがわかる。

##### 4.2 エアギャップ長の影響

前述のように、多段構成のディスク型コロナモータの特性は、一段構成でかつ回転子の一面のみを使用したコロナモータの特性からほぼ推定できることが明らかとなった。ここでは、実験の便宜上、一段構成のコロナモータの回転子の一面のみを用いて、エアギャップ長 g の影響について検討を行った。

図 13 に回転数 N を 1000rpm とし、エアギャップ長 g を変化させた時の印加電圧 Vs に対する発生トルク Tm の関係を示す。同図より、g が大きくなるとコロナ開始電圧が高く

なり、したがって同一の印加電圧に対する  $T_m$  が減少していくことがわかる。このことを明確にするために  $V_s$  をパラメータとして、 $g$  に対する発生トルク  $T_m$  の関係を示したのが図 14 である。各印加電圧において、 $g$  の増加と共に、 $T_m$  が減少することを示している。このことからエアギャップ長  $g$  は、できるだけ小さい方が望ましいことがわかる。

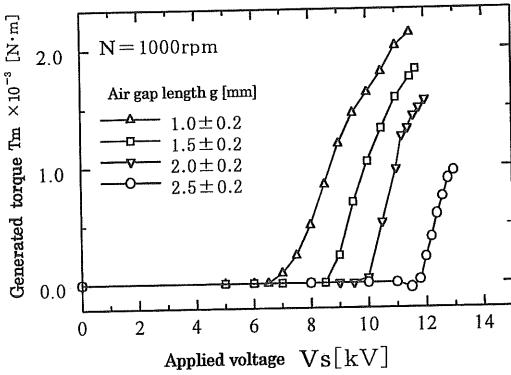


図 13 印加電圧と発生トルクの関係  
Fig.13 Generated torque vs. applied voltage.

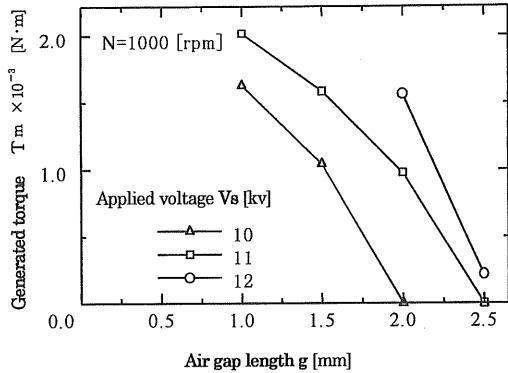


図 14 エアギャップ長と発生トルクの関係  
Fig.14 Generated torque vs. air gap length.

次にエアギャップ長  $g$  がコロナモータの効率に及ぼす影響を調べるために、入力電力  $P_i$  と発生動力  $P_m$  の関係を示したのが図 15 である。同図から、エアギャップ長が小さい方がコロナモータの効率( $\eta = P_m / P_i$ )が高くなることがわかる。

#### 4.3 回転数の影響

コロナモータは電磁型のモータとは異なり、速度起電力を生じないので、発生トルクは回転数によらずほぼ一定であることが予想される。これまで回転数  $N = 1000$  rpm のみの実験を行ってきたが、ここでは上述のことを確認するため、回転数を変化させた場合のコロナモータの特性を測定した。エアギャップ長  $g \approx 1.0$  mm とした時の測定結果を図 16 および図 17 に示す。

図 16 の結果より、コロナモータは回転速度に関係なく同じ印加電圧に対しては殆ど同じトルクを発生できることから、負荷トルクが小さければ、高速回転の実現が可能であ

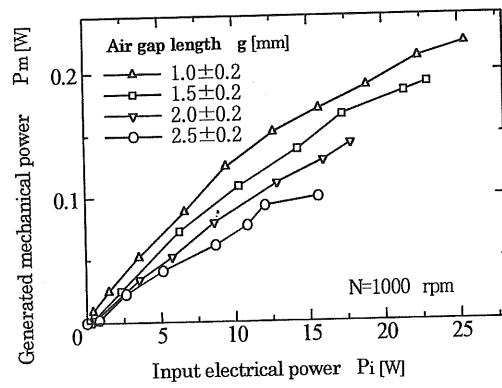


図 15 入力電力と発生動力の関係  
Fig.15 Generated mechanical power vs. input electrical power.

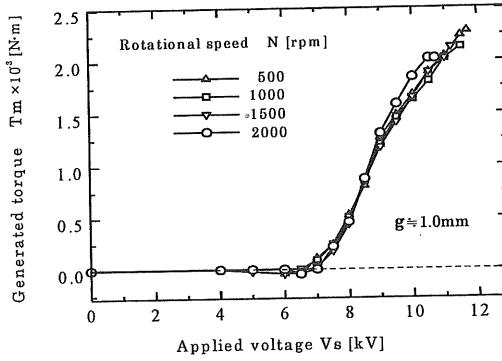


図 16 印加電圧と発生トルクの関係  
Fig.16 Generated torque vs. applied voltage.

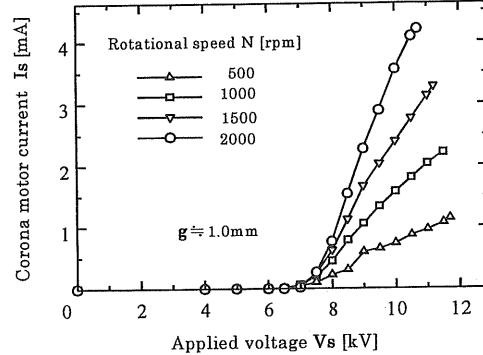


図 17 印加電圧とコロナモータ電流の関係  
Fig.17 Corona motor current vs. applied voltage.

ると推測できる。また、図 17 の結果のように、回転数に比例してコロナモータ電流  $I_s$  が増加することは、印加電圧によって定まる一定量の電荷が回転子とともに移動していると考えることで説明できる。

これらの結果を実験式で表すと、発生トルク  $T$  は、コロナ開始電圧を  $V_0$ 、任意定数を  $K_v$  として、 $T \approx K_v(V_s - V_0)$ 。また、任意定数を  $K_1$  を用いて  $I_s \approx K_1 \omega_m(V_s - V_0)$  と近似できる。この近似式と式(1), (3)を考慮すると、効率  $\eta \approx K_v/(V_s K_1)$  となり、 $V_s$  が一定の下では効率が回転数に依らずほぼ一定となる性質がある。このことは、コロナモータの可変速動作への応用に際して実用上のメリットがあるといえる。

#### 4.4 放電電極数の影響

放電電極数がコロナモータに与える影響を検討するため、図 18-(a), (b)に示すような電極数  $N_E$  が 8 と 12 のものを用いた。電極材料は図 2 と同様厚さ 8mm のステンレス板である。なお、電極の形状が図 3 のような扇形と図 18 のような平行形状での有意な差は見られず、また電極の幅もコロナモータの発生トルクに殆ど影響を与えないことが実験的に得られたので、製作のし易い平行形状の放電電極を用いた。

測定結果の例として、印加電圧  $V_s$  に対する発生トルク  $T_m$  関係を図 19 に、また、入力電力  $P_i$  と発生動力  $P_m$  の関係を図 20 に示す。これらの結果から、電極数の多い方が発生トルクも大きく、また効率も高くなることがわかる。

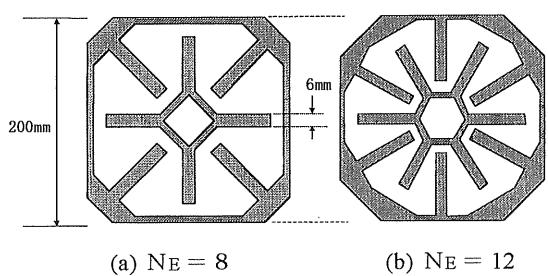


図 18 放電電極数を変化させた場合の外観  
Fig.18 Variation of discharging electrodes.

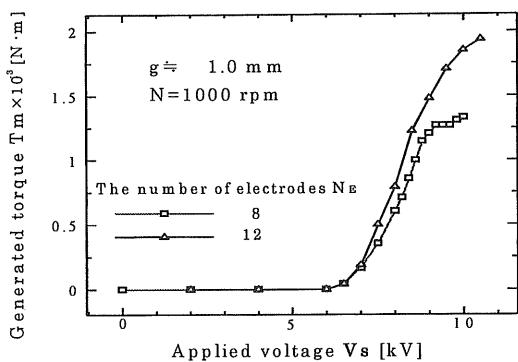


図 19 印加電圧と発生トルクの関係  
Fig.19 Generated torque vs. applied voltage.

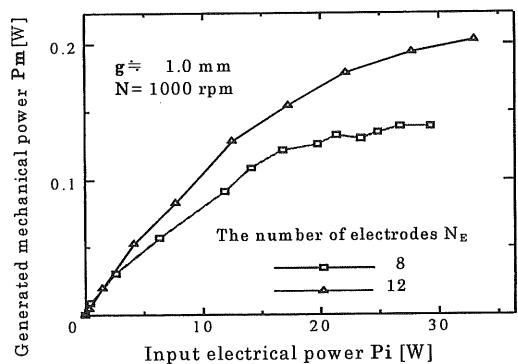


図 20 入力電力と発生動力の関係  
Fig.20 Generated mechanical power vs. input electrical power.

#### 5.まとめ

本研究では多段構成ディスク型コロナモータの試作機を用いた実験を通じて以下のような知見を得た。

- ①一段構成かつ回転子の一面使用のコロナモータの特性が分かれれば、多段構成時の特性が推定可能である。
- ②エアギャップ長は 1mm 程度と、小さいことが望ましい。
- ③発生トルクは回転数に依らず、ほぼコロナモータへの印加電圧によって定まる。また、発生トルクは電極幅には殆ど依存しないが、電極数にはほぼ比例して増加する。
- ④発生トルク特性測定の際に要求される速度調整法として、DSP ボードを用いたデジタル P I 制御方式を採用し、十分実用的な方法であることを確認した。

以上の結果は、ディスク型コロナモータの設計の際に十分活用できると考えられる。今後は、電極の放電部分の形状等についての検討も必要であると考えている。

最後に、本研究を進めるに当たり回転子の製作に御協力戴きました小糸樹脂㈱営業部長高橋正典氏、放電電極の製作でお世話になりました本校技官遠藤雄定氏、山内誠氏に深謝申し上げます。また、空気清浄器の性能評価に際して御協力戴きました本校山川昇教授、コロナモータのトルク発生機構のメリットに関する議論を戴いた熊谷和志助教授に深く感謝致します。なお、本研究の一部は文部省科学研究費補助金基盤研究(B)の援助を受けて行っていることを付記し、ここに謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) O.Jefimenko and H.Fischbach-Nazario: Proc. West Virginia Acad. Sci., **42**(1971)21
- 2) M.Hattori,K.Asano and Y.Higashiyama: J. Electrostatics, **27** (1992)223
- 3) 亀山滋, 村田雄司: 静電気学会誌, **19**(1995) 155
- 4) 服部正行, 浅野和俊: 静電気講演論文集'83 ~'95, 静電気学会(1983-1995)
- 5) 和泉基輝, 村田雄司: 静電気学会誌, **19**(1995) 62
- 6) 菅野功, 司建敏, 和泉健吉, 服部正行: 静電気学会講演論文集'97, p.137, 静電気学会(1997)
- 7) 菅野功, 司建敏, 和泉健吉, 服部正行: 静電気学会講演論文集'98, p.349, 静電気学会(1998)
- 8) 静電気学会編: 新版 静電気ハンドブック, p.975 , オーム社(1998)
- 9) 服部正行, 遠藤直樹, 後藤雅史, 浅野和俊: 静電気学会講演論文集'96, p.355, 静電気学会(1996)
- 10) 服部正行, 後藤雅史, 大泉哲哉, 和泉健吉, 浅野和俊: 静電気学会講演論文集'97, p.127, 静電気学会(1997)
- 11) 服部正行, 後藤雅史, 大泉哲哉, 和泉健吉, 浅野和俊: 静電気学会講演論文集'98, p.345, 静電気学会(1998)