

論 文

ラッパ管状 EHD 最適発電ダクトの負荷特性

佐藤 正毅*

(1995年4月4日受理)

Load Characteristics of Electrohydrodynamical Power Generator Using Trumpet-shaped Optimal Duct

Masaki SATO*

(Received April 4, 1995)

This paper presents load characteristics of an incompressible type electrohydrodynamical (abbreviated as EHD) power generator using the trumpet-shaped optimal duct. It had been theoretically clarified that the configuration of the energy conversion duct became slender trumpet-shaped as the output power increased if the total duct volume was fixed. From the results of an experimental check of generator duct for optimality, it was found that the trumpet-shaped optimal duct produced 1.4 times as large an output as the constant cross sectional area duct as used by Secker.

1. はじめに

電気流体力学（略して EHD）発電は、構造簡単、低コストの上、容易に直流高電圧を取り出せるなどの長所をもつ直接発電の一形態である。

この EHD 発電の実用化を目指して、これまで、流体エネルギーから電気エネルギーへの高効率変換過程を理論的に考察してきた。具体的には、マックスウェル方程式と流体力学方程式で構成される EHD 方程式を準一次元近似で表現し、エネルギー変換効率を最大にするダクトの最適形状と最適変換過程を、変分法、最大値原理によって明らかにしてきた^{1,2)}。この場合、ダクト全容積は一定とし、ダクトの出入口では、作業流体の単位質量当たりのエネルギーと、作業流体速度に対する荷電粒子のドリフト速度の比、すなわち、すべりを与えていた。理論計算の結果、エネルギー変換ダクトの最適形状は、ラッパ管状になるという結論を得たが、この最適ダクトを使った EHD 発電機の実負荷特性は部分的にしか報告していなかった³⁾。従ってラッパ管状ダクトの最適性の検討が残されていた。

そこで、本論文では、理論的に得られたラッパ管状ダクトを用いる EHD 発電機の負荷特性と短絡特性の特徴

を、一定断面積ダクトの特性と比較しながら、系統的に述べる。EHD 発電機は、電荷注入域、エネルギー変換域および集電域から成るが、電荷注入用インジェクタと集電用コレクタ電極を共通にして、変換域だけをラッパ管状の最適ダクトから一定断面積ダクトに取り替えた場合について、負荷特性を比較する。この結果から、ラッパ管状最適ダクトが性能において一定断面積ダクトに秀でていることを述べる。

2. EHD 発電機の原理

作業流体として絶縁油を用いる EHD 発電機の原理を述べる。EHD 発電機は、図 1 のように、電荷注入域、エネルギー変換域、集電および再結合域から成る。絶縁油が流れている状態で、カミソリ刃から成るインジェクタに直流高圧（-15 kV 程度）を印加すると、電界放射によって電子が流動油中に供給される。この電子が、油の分子の一部に付着して負イオンとなり、油の分子と衝突を繰り返しながら、集電用コレクタに運ばれてくる。コレクタには負荷を接続してあるので、この電極に次第に電荷が蓄積され、電位は下がっていく。その結果、電荷注入域のアトラクタ電極、すなわち接地電極からコレクタに向かう電界が、エネルギー変換域に形成される。この電界と油中の負イオンとの相互作用により、負イオンには、作業流体の流れ方向とは常に逆向きのクーロン力が働く。従って、負イオンは電荷注入域に向かってドリフトするが、作業流体がクーロン力に打ち勝って、負イオンをコレクタに輸送する。この過程で、作業流体エ

キーワード：EHD 発電、ラッパ管状最適ダクト、一定断面積ダクト、負荷特性

* 八戸工業大学工学部電気工学科 (031 八戸市妙大開 88-1)
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Hachinohe Institute of Technology, 88-1, Myo Ohbiraki, Hachinohe, 031 Japan

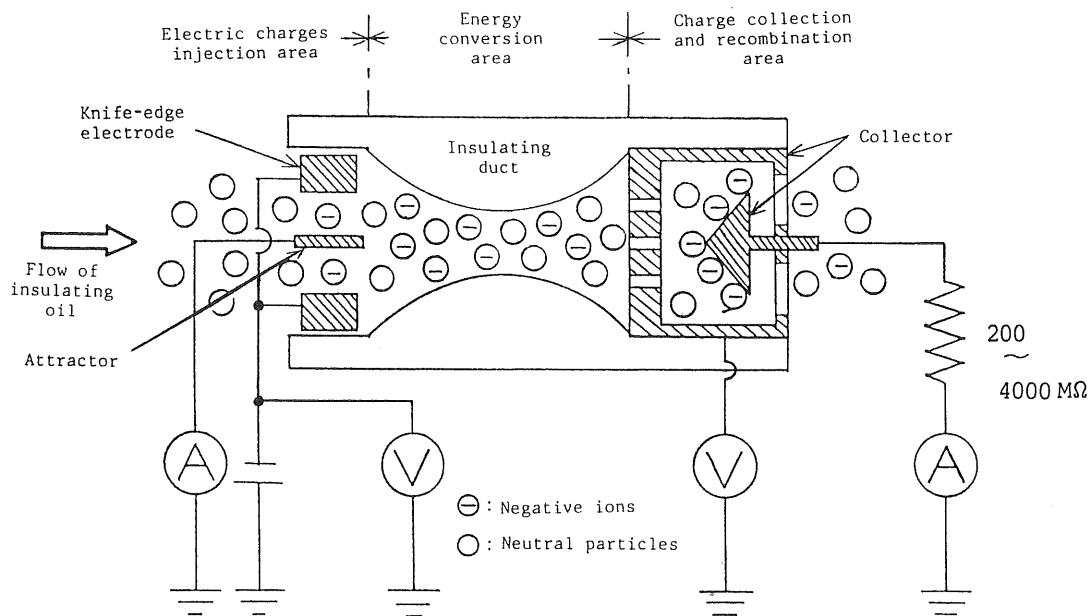


図 1 電気流体力学発電機の概念図

Fig. 1 Schematic diagram of an electrohydrodynamic generator.

エネルギーの何割かが電気エネルギーに変換され、負荷で消費される。

3. 実験装置および方法

3.1 作業流体の循環経路

実験には作業流体として高圧用 2 号絶縁油を用いた。図 2 が作業流体の循環経路である。はじめ、オイルタンクを絶縁油で十分に満たし、バルブを開いた後に、3 相誘導モータでポンプを駆動して、絶縁油を EHD エネルギー変換ダクトに流した。

ダクトとしては、図 3 に示すような、ラッパ管状最適ダクトと Secker が実験に用いた一定断面積ダクト⁴⁾を使用した。図 3(a)は、ダクトの最適形状で、ラッパ管状を呈する。ダクト入口からの距離 x とダクト内半径 R の関係式を、図の下に記してある。ダクト全容積を 15.5 cm³ とすると、ダクト全長は 93.0 cm となり、図のように、 $0 \leq x \leq 2.5$ cm と $2.5 \text{ cm} \leq x \leq 9.3$ cm の区間でダクト断面の式が異なる。先の論文²⁾で述べたように、前の区間には電界が一様なダクトを用いている。変分法、最大値原理から得た最適ダクトを、ダクト内の電界強度が作業流体の絶縁破壊電界強度を越えてはならないという発電条件を満足するように、実用的に修正した結果である。ここで、断面の式に使われている記号²⁾を次に説明しておく。

E : 電界強度, S : すべり, ϵ : 誘電率, M_e : 流量,

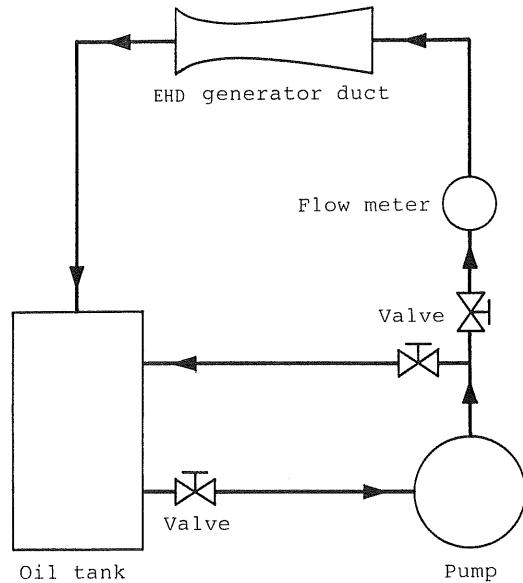
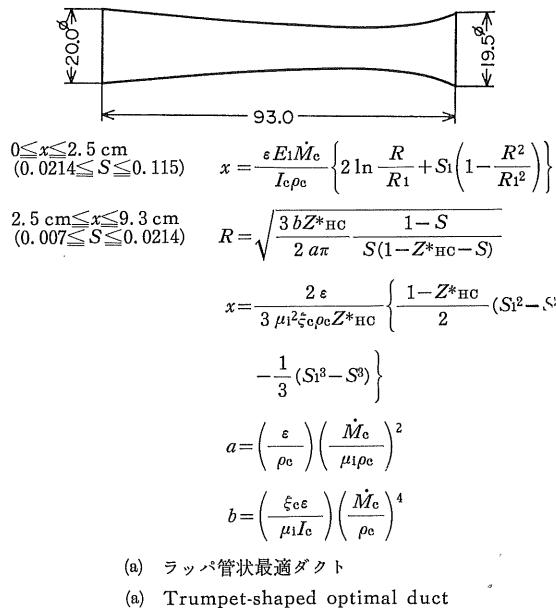


図 2 作業流体の循環経路

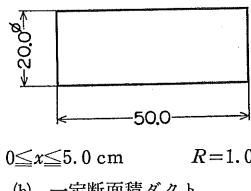
Fig. 2 Course of recirculating flow of working fluid.

I_e : 負荷電流, ρ_e : 作業流体密度, μ_i : イオン移動度, ξ_c : 摩擦係数

また、サフィックス c と 1 は、それぞれ、定数とダクト入口を表す。断面の式には $Z^* H_0$ が見られるが、



(a) ラッパ管状最適ダクト
(a) Trumpet-shaped optimal duct



(b) 一定断面積ダクト
(b) Constant area duct.

図 3 ラッパ管状最適ダクトと一定断面積ダクト

Fig. 3 Trumpet-shaped optimal duct and constant area duct.

表 1 数値例

Table 1 Numerical example used in calculation.

$E_1 = 5.0 \times 10^7 \text{ V/m}$	$I_c = 3.0 \times 10^{-5} \text{ A}$
$S_1 = 1.15 \times 10^{-1}$	$\rho_e = 9.20 \times 10^2 \text{ kg/m}^3$
$\epsilon = 2.50 \times 10^{-11} \text{ F/m}$	$\mu_1 = 9.20 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$
$\dot{M}_c = 1.16 \text{ kg/s}$	$\xi_c = 9.40 \times 10^{-1} \text{ m}^{-1}$

$Z^{*}_{HC} = Z_{HC}/\dot{M}_c$ であり、 Z_{HC} は最大値原理で使われる補助変数²⁾ である。図 3(b) は一定断面積ダクトを表し、ダクト全容積はラッパ管状最適ダクトと同じである。表 1 には、ダクト形状を描くために用いた数値例を示す。

ダクトに絶縁油を流すポンプの出口には、フィルタを取り付けて、絶縁油中の塵埃を除去した。絶縁油の流量測定のために、ポンプとダクト間には、積算流量計と毎分流量計を併設した。流量の調整は、バルブの開閉度を変えて行った。作業流体の温度がインジェクタからの電荷供給量に大きく影響を与えるので、絶縁油の温度測定を、オイルタンクに水銀温度計(1/10 目盛)を挿入して

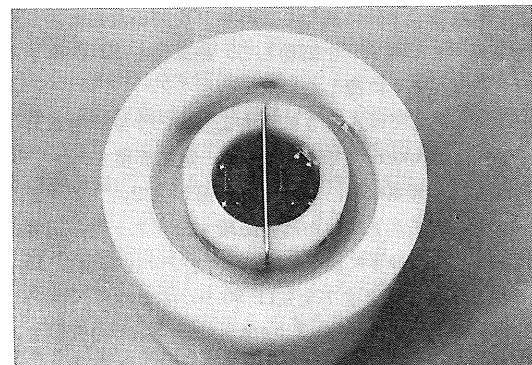


図 4 インジェクタ
Fig. 4 Injector.

行った。

3.2 EHD 発電実験装置

流动絶縁油中に電荷を注入するために、市販のカミソリ刃と真鍮板からなるインジェクタを試作した。図 4 にこのインジェクタを示す。内径 32 mm で長さ 40 mm の

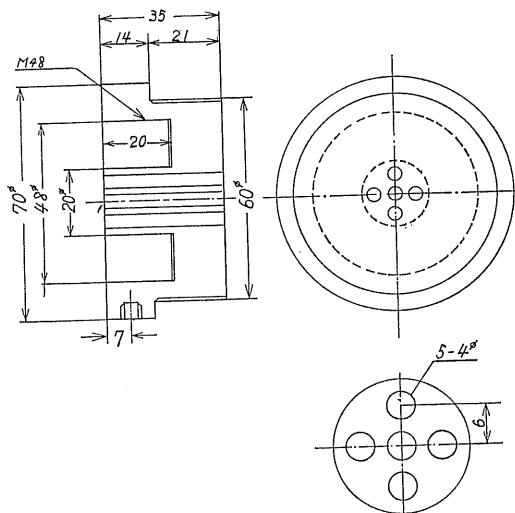


図 5 コレクタ
Fig. 5 Collector.

ナイロン樹脂の筒の中央に、縦 50 mm、横 40 mm、厚さ 1 mm の真鍮板を取り付けてある。この真鍮板から左右に、4 mm 離して、縦 8.1、横 37.5 mm、厚さ 0.3 mm のカミソリ刃を重ねて設置した。真鍮板は、カミソリ刃から電子を引き出す電界を形成するので、アトラクタ電極ともいわれる。ここに電子管式マイクロアンメータを接続して、エネルギー変換域に流入できずに、この電極に吸収された負イオンによる電流を測定した。本論文では、この電流をアトラクタ電流と呼ぶことにする。カミソリ刃の枚数は、ラッパ管状ダクトと一定断面積ダクトをそれぞれ使う場合、変換域に毎秒注入される電気量を可能な限り等しくするために、前者では 32 枚、後者では 28 枚とした。負イオンは、絶縁油によりダクトを通って輸送され、コレクタに至る。図 5 は、実験に用いた真鍮製のコレクタである。エネルギー変換ダクトに直接接する部分は蜂の巣状になっていて、直径 2 mm で 7 か所くり抜いてある。この狭い通路を絶縁油が流れる際に負電荷の一部をコレクタが受け取り、残りの負イオンは絶縁油とともに、図 1 の円錐状コレクタに吹き飛ばされ、ここにも集められる。コレクタには、抵抗を 26 本用いて 200 MΩ から 4,000 MΩ まで可変できる負荷抵抗を接続した。負荷抵抗に流れる電流は、マイクロアンメータで測定し、コレクタ電圧、すなわち出力電圧は、静電電圧計で測定した。

4. 実験結果

4.1 変換域流入電流と作業流体温度の関係

ラッパ管状最適ダクトと一定断面積ダクトの発電出力

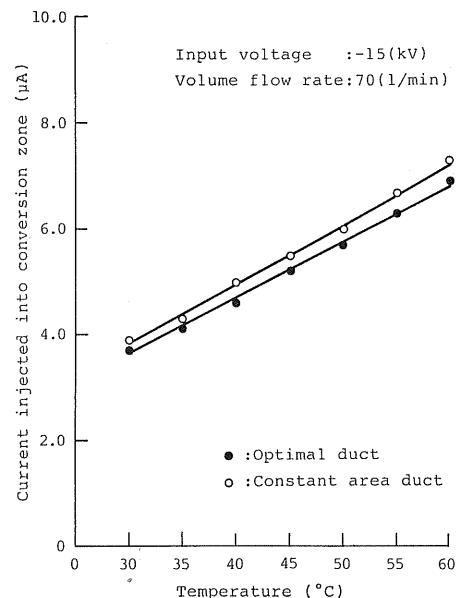


図 6 変換域流入電流と作業流体温度の関係

Fig. 6 Relation between current injected into conversion zone and temperature of working fluid.

を実験的に求めて比較するためには、ダクト形状以外のパラメータを共通にしなければならない。わけても、インジェクタからエネルギー変換域への流入電流を、可能な限り共通にする必要がある。しかしながら、電荷注入域とエネルギー変換域の境界で、変換域流入電流を直接測定することは困難である。そこで、コレクタ電極の短絡時に、変換域流入電荷のほとんどがコレクタ電極に到達するという実験結果⁵⁾から、コレクタ短絡時の電流を、インジェクタへの印加電圧に対応するエネルギー変換域流入電流と見なした。始め、インジェクタのカミソリ刃の枚数を 32 枚とし、絶縁油の流量、印加電圧も共通にし、2 本のダクトについて、変換域流入電流と絶縁油の温度の関係を明らかにした。その結果、双方のダクトでこの電流をほぼ等しくするために、一定断面積ダクトを用いる際には、前章で述べたように、カミソリ刃の枚数を 28 枚に減らさざるを得なかった。

図 6 に変換域流入電流と作業流体温度の関係を示す。インジェクタに負電圧 15 kV を印加し、電界放射によって電子を絶縁油中に供給した結果である。プロットした点は、各温度で 10 回測定した値の平均である。絶縁油の温度上昇と共に、変換域流入電流は増加し、一定断面積ダクトの電流がラッパ管状最適ダクトの電流をわずかに上回っている。2 本のダクトの発電出力を比較するためには、現実的には、変換域流入電流を共通にしなけ

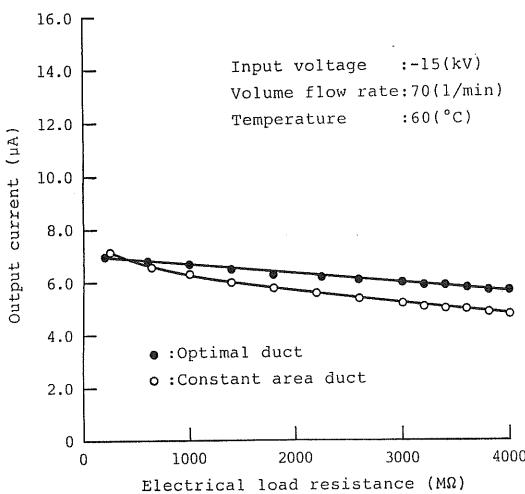


図 7 一定断面積および最適ダクトの出力電流の負荷抵抗依存性

Fig. 7 Electrical load resistance dependence of output current for constant area duct and optimal duct.

ればならないが、カミソリ刃の枚数の調整だけでは、この共通条件は実現できなかった。エネルギー変換ダクトをラッパ管状にすると、一定断面積ダクトよりも発電出力を大きくできるという結論を、理論的にはすでに得ていたので、2本のダクトの発電出力を比較する際には、最適ダクトにやや劣勢を強いておく方が無難である。このようなわけで、以後の実験では、カミソリ刃の枚数を、ラッパ管状ダクトで32枚、一定断面積ダクトで28枚とした。図6で、作業流体として用いる絶縁油の流量を70 l/minとしてあるが、流量をこの値に設定したのは、エネルギー変換ダクト入口の油圧が、ラッパ管状最適ダクト、一定断面積ダクト双方において、ほぼ等しくなったからである。双方のダクトで、入口の断面積を共通に設計したので、連続の原理から、ダクト入口の絶縁油の流速も等しくなり、双方のダクトで、入口から供給される流体入力エネルギーはほぼ等しくなる。この条件のも、2本のダクトの発電出力を比較するためには必要である。

絶縁油の流量を設定したので、次にダクト内の流れの状態について述べる。そのために、レイノルズ数 Re を求めよう。ダクトの内直徑を d 、絶縁油の流速を u 、動粘性係数を ν で表すと、 $Re = du/\nu$ となる。今、 $d = 2.0$ cm, $u = 4.0$ m/s, $\nu = 7.0 \times 10^{-6}$ m²/s 程度なので、 $Re = 1.15 \times 10^4$ となる。 $Re > 2,300$ なので、絶縁油の流れは乱流状態にある。しかも今の場合、 Re は $3 \times 10^3 < Re < 10^5$ を満足するので、エネルギー変換ダクトの乱流状態

における管摩擦係数 f は、ブラジウスの式、 $f = 0.3164 \times Re^{-0.25}$ から決定される¹¹。図3(a)のダクト形状を表す式で、摩擦係数 ξ_c が用いられているが、 $\xi_c = f/2d$ である。前論文¹¹では、今述べた諸式から得た ξ_c の値を用いて最適化計算を行っていたので、理論には乱流を考慮してあった。

4.2 出力電流と負荷抵抗の関係

コレクタに抵抗を接続し、200 MΩ から 4,000 MΩ まで抵抗値を変えたときの出力電流を、一定断面積ダクトとラッパ管状最適ダクトについて図7に示す。抵抗値は、200 MΩ から 3,000 MΩ までは 400 Ω ずつ増やし、3,000 MΩ から 4,000 MΩ までは 200 Ω ずつ増やした。コレクタ流入電流、すなわち出力電流は、実験の度にばらついたので、各負荷抵抗で出力電流を 10 回測定し、その平均を求めてプロットした。インジェクタへの印加電圧、すなわち入力電圧が -15 kV、絶縁油の流量と温度が、それぞれ 70 l/min, 60°C のときの結果である。絶縁油の温度を 60°C に設定したのは、次の理由による。油が図2の循環経路を流れる間に、経路を構成する管とエネルギー変換ダクトの内壁との摩擦および粘性による損失のために油温が上昇したが、最終的には 60°C に落ちついたからである。すなわち油温 60°C で、損失による発熱と、実験装置からの熱の放散が平衡したということである。今の場合、作業流体は非圧縮性の絶縁油なので、熱エネルギーは電気エネルギーにほとんど変換されない。いずれにしても、今述べたパラメータを一貫して共通にし、非圧縮性 EHD 発電機の負荷特性を明らかにする。

図6に示すように、ラッパ管状最適ダクトの変換域流入電流が、一定断面積ダクトのそれを明らかに下回っているが、出力電流については、図7から明らかなように、ラッパ管状最適ダクトが一定断面積ダクトを凌いでいる。すなわち、負荷抵抗 4,000 MΩ で、一定断面積ダクトの出力電流は 4.8 μA で、最適ダクトの出力電流は 5.7 μA となった。図8はコレクタの電荷収集効率である。図のパラメータのもとで測定された変換域流入電流でコレクタ電流を割った値である。同一のインジェクタとコレクタを用いる場合、最適ダクトが一定断面積ダクトよりも高い電荷収集効率を与えることを確認できた。

4.3 出力電圧と負荷抵抗の関係

前述の共通パラメータにおける出力電圧と負荷抵抗の関係を、図9に示す。負荷抵抗が増えるにつれて、ラッパ管状最適ダクトの出力電圧が、一定断面積ダクトの出力電圧よりも高くなる。負荷抵抗 4,000 MΩ で、一定断面積ダクトの出力電圧が 19.2 kV であるのに対し、

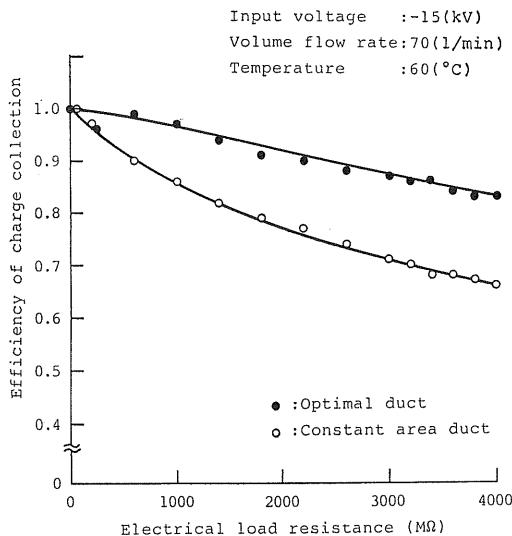


図 8 電荷収集効率と負荷抵抗の関係

Fig. 8 Relation between efficiency of charge collection and electrical load resistance.

ラッパ管状最適ダクトでは、出力電圧が 22.5 kV となり、この値は一定断面積ダクトの 17% 増である。最適ダクトの出力電圧は、入力電圧の 1.5 倍にもなる。負荷抵抗を 4,000 MΩ よりも増やすと、入力電圧はさらに増加し、やがて飽和すると思われる。

4.4 出力電流と出力電圧の関係

図 10 に、ラッパ管状最適ダクトと一定断面積ダクトの、出力電流と出力電圧の関係を示す。いずれの場合も、出力電圧の増加につれて、出力電流が徐々に減少する。これは、負荷抵抗を増やし、出力電圧を高くすると、コレクタ表面近傍の電界強度が大きくなり、クーロン力によってコレクタからはじかれる負イオンが増加するためである。今述べたことはラッパ管状最適ダクトを用いる際にもいえるが、出力電流の減少率が、一定断面積ダクトの減少率を下回る。この結果、Secker が提案した一定断面積ダクトよりも、ラッパ管状最適ダクトが内部抵抗と負荷抵抗とのマッチングが良いといえる。ここで、内部抵抗とは、ダクト内部で発生する摩擦損失と負イオンのドリフトによるすべり損失の和を、ダクトを流れる電流の 2 乗で割った値である。

4.5 アトラクタ電流と出力電圧の関係

出力電流と出力電圧の関係が、垂下特性を示すことに関して、前節で述べた以外の、もう一つの原因を記す。図 1 に示すように、電荷注入域のインジェクタは、電界放射によって絶縁油に電子を供給するカミソリ刃電極と、この電子を引き出す役目を果たすアトラクタ、すな

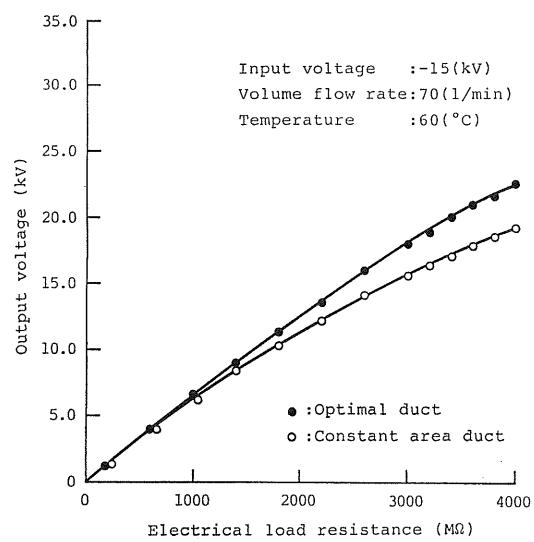


図 9 出力電圧と負荷抵抗の関係

Fig. 9 Relation between output voltage and electrical load resistance.

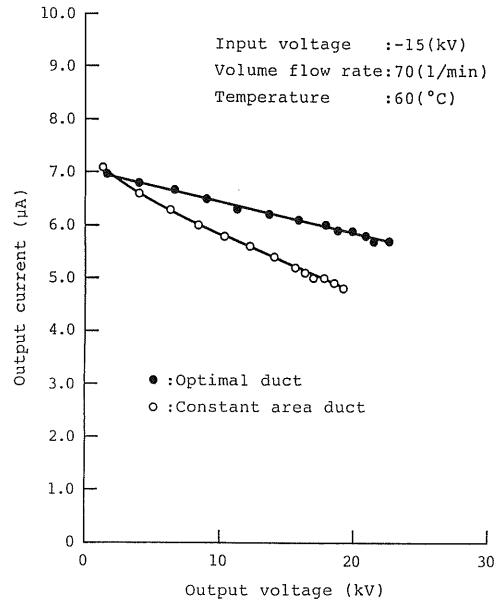


図 10 出力電流と出力電圧の関係

Fig. 10 Relation between output current and output voltage.

わち真鍮板からなる。カミソリ刃から電界放射で供給される電子のすべてが、エネルギー変換域に流入するわけではなく、この中でアトラクタに吸収されるものもある。本論文では、アトラクタに吸収される負電荷による電流をアトラクタ電流と呼ぶことにしていた。図 11 がアトラクタ電流と出力電圧の関係である。出力電圧の上昇と

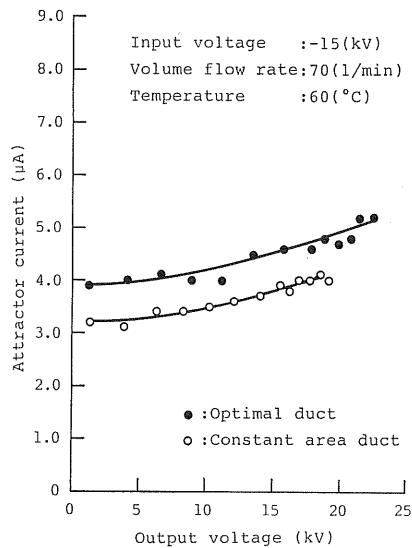


図 11 アトラクタ電流と出力電圧の関係

Fig. 11 Relation between attractor current and output voltage.

ともに、ラッパ管状最適ダクト、一定断面積ダクトの双方において、アトラクタ電流は増える。これは、出力電圧が高くなると、エネルギー変換ダクトの入口で電界強度が大きくなり、作業流体の流れ方向と逆向きの、コレクタからインジェクタに向かう方向に、負電荷がドリフトする速度が大きくなるからである。そのため、電荷注入域の負電荷は、作業流体によってエネルギー変換域に輸送されながらも、出力電圧、すなわちコレクタ電圧の上昇とともに大きくスリップして、アトラクタに押し戻され、この電極に吸収される。この結果、出力電圧が上昇するにつれて、変換域流入電流も減少する。そして、この電流を形成する負電荷がコレクタに到達できずに、この電極を素通りする割合も大きくなるので、結果として、図 10 のように出力電流は垂下特性を示す。

図 11において、ラッパ管状最適ダクトのアトラクタ電流が一定断面積ダクトのそれよりも大きい。これは、変換部のダクト形状を変えると、インジェクタとダクト入口の境界付近で、作業流体の乱れの程度が変わってくるためと思われる。結局、この事実が、図 6 に示すように、ラッパ管状最適ダクトの変換域流入電流が一定断面積ダクトより少ないことにつながる。

4.6 出力と負荷抵抗の関係

ラッパ管状最適ダクトは、Secker が実験に供した一定断面積ダクトよりも、大きな出力電流、出力電圧を与えることが明らかにされたので、当然ながら出力も大きくなる。図 12 は、ラッパ管状最適ダクト、一定断面積

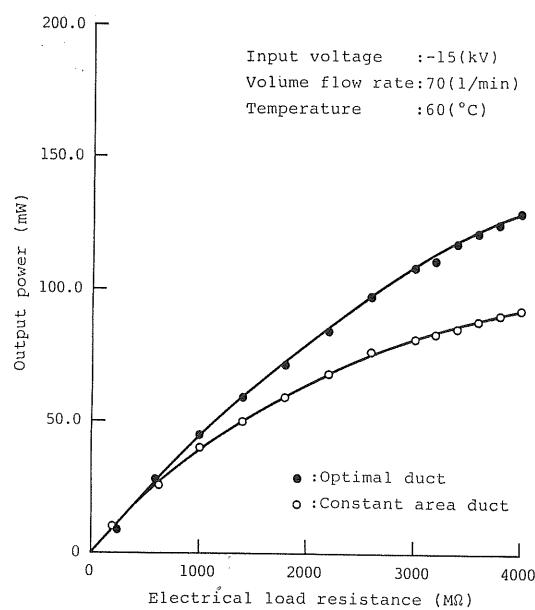


図 12 出力と負荷抵抗の関係

Fig. 12 Relation between output power and electrical load resistance.

ダクトの出力と負荷抵抗の関係であり、今述べた事実を示している。双方のダクトとも、負荷抵抗が増加するにつれて、出力も増加している。負荷抵抗 4,000 MΩ で、ラッパ管状ダクトは一定断面積ダクトの出力の約 40% 増である 130 mW を与える。

4.7 出力に与える作業流体流量の影響

図 13 に、出力と負荷抵抗の関係に及ぼす作業流体流量の影響を示す。流量を 60, 70, 80 l/min と変えた結果である。明らかに、流量が増えるにつれて出力は増加する。流量が増えるにつれて、変換域流入電流が増え、作業流体によって変換域を輸送される負イオンの量も増加するからである。流量が 60 l/min の場合、出力は早々に飽和の傾向を見せてしまう。これは、作業流体の速度で負イオンのドリフト速度を割って得るすべりが増えたためと考えられる。

4.8 電気出力最大化の条件

エネルギー変換ダクトの全容積を共通にして、出力の最大化を図るには、出力電圧の最大化を図れば良い。EHD 発電機は基本的には定電流源だからである。次に、出力電圧を増やすには、ダクト内の電界強度を、作業流体の絶縁破壊電界強度を越えない範囲で、可能な限り大きくし、電界の線積分の区間を可能な限り長くする必要がある。そのため、ダクトをラッパ管状に細長く設計するわけである。

ダクトの中央部まで、入り口から徐々にダクト内径を

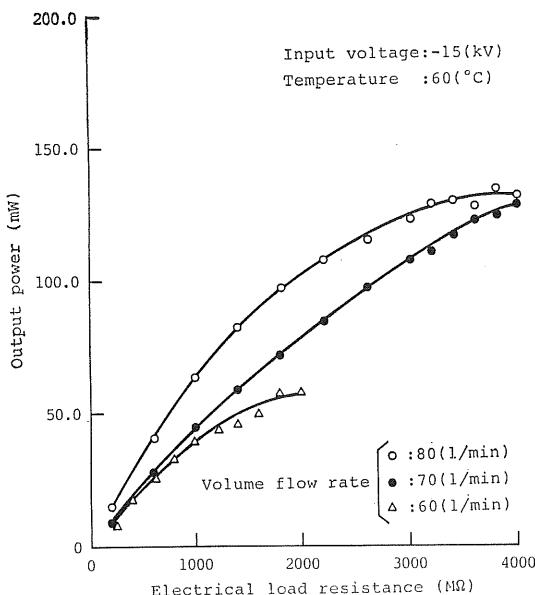


図 13 出力と負荷抵抗の関係に与える作業流体流量の影響
Fig. 13 Effects of volume flow rate of working fluid on relation between output power and electrical load resistance.

絞るのは、ダクト内の電界強度を可能な限り最大かつ一定に保つためである。次に、ダクトの中央部から出口に向かって末広に設計するのは、ダクト前半で増加してきた作業流体の運動エネルギーを、電気エネルギーに変換すると同時に、圧力エネルギーにも変換するためである。このことにより、ダクト前半で急減した圧力を回復できるので、出力増加の割にはダクト出入口間の圧力降下が低めに抑えられ、ダクト入り口の圧力も低めに設定でき、入り口の流体入力エネルギーで電気出力を割った全効率も高くなる²⁾。

5. おわりに

作業流体として絶縁油などを用いる非圧縮性 EHD 発電機において、電荷注入部と集電部を共通にし、エネルギー変換部に、それぞれラッパ管状最適ダクト、一定断面積ダクトを接続した場合について、コレクタ短絡時ににおける変換域流入電流の作業流体温度特性および負荷特性を実験的に比較検討した。その結果、すでに理論的に得ていたラッパ管状最適ダクトの発電出力が、通常よく用いられる一定断面積ダクトの発電出力を上回ることを、実験的に明らかにできた。電荷注入部からラッパ管状最適ダクトへの流入電流は、一定断面積ダクトへの流入電流を下回っていたが、出力電流、出力電圧とともに、ラッパ管状最適ダクトは一定断面積ダクトを凌いだ。これまで、EHD 発電機の変換部の最適形状と最適エネルギー変換過程を、準一次元近似を施した流体力学方程式とマックスウェル方程式を用いて汎関数を構成する変分法により理論的に考察していた。本論文で述べた実験結果は、これまでの最適性の理論的取扱いに妥当性を与えた。

終わりに、本論文の図面の作成に協力された八戸工業大学電気工学科電力工学講座 馬場 誠技術員に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐藤正毅、小沢保知：電気学会論文誌B, 96 (1976) 23
- 2) 佐藤正毅：電気学会論文誌B, 105 (1985) 65
- 3) 佐藤正毅、馬場 誠：昭和 56 年電気学会全国大会講演論文集, p. 1241, 電気学会 (1981)
- 4) P.E. Secker and J.F. Hughes : Proc. Inst. Elec. Engrs., 116 (1969) 1785
- 5) J.F. Hughes and P.E. Secker : Brit. J. Appl. Phys., 2 (1969) 1115