

論 文

風向検知機能を有するかご型イオン風速計のイオン流解析

東山禎夫*, 日塔正彦*, 八塚京子*, 浅野和俊*

(1991年5月14日受理)

Ion Flow Analysis in a Cage-type Ion-flow Anemometer Detecting Wind Direction

Y. HIGASHIYAMA, M. NITTOH, K. YATSUZUKA and K. ASANO

(Received May 14, 1991)

The characteristics of a cage-type ion-flow anemometer were analyzed by numerical calculation of ion-flow in the probe. The anemometer whose characteristics have already been reported has a capability of detecting wind velocity and two dimensional wind direction simultaneously, which is based on detection of orthogonal wind components. Ion flow in the anemometer probe was calculated by the combination of the charge simulation method and the upwind finite element method. Though calculated output signal of both anemometer with the eight- and four-collector probe was smaller than experimental results, it showed good linearity with wind velocity. The signal wave form of output to the change of wind direction showed almost complete sinusoidal profiles for an 8-collector probe and trapezoidal sinewave was produced for 4-collector probe. The difference of wave shape for both types showed good agreement with experimental results.

1. まえがき

室内空気の流れは生活環境あるいは作業環境を決める一つの因子であり、局所的な汚染空気の滞留を防ぎ、快適な環境を実現するためには、室内全体の気流状態を握り適切な空気調和を行う必要がある¹⁾。その際、気流の速度だけでなく方向も同時に知る必要があるが、風速と風向を同時に検出できる性能を有する小型風速計はまだ開発されていない。筆者らは風向・風速を同時に検出することを目的としてコロナ放電によりイオンを発生させる差動型イオン風速計の基礎特性を調べてきた。

差動型イオン風速計は直流コロナ放電を用いてイオンを連続的に発生させ、風下と風上に設置したイオンコレクタに流れ込む電流の大きさの変化により風速を求めるもので、その出力は風速に対しては直線的に変化する²⁾。放電線の周りに多数のコレクタ対を配置したかご型イオン風速計は風速に対する直線性だけでなく、風向に対してはその出力が正弦波状に変化することが確かめられており³⁾、これらの特性から風向および風速の同時

検出が可能であることが明らかになった。風速・風向を同時に求めるために、8本のコレクタを有するかご型イオン風速計プローブとパーソナルコンピュータからなるシステムを構築した。風速ベクトルの直交する2成分をそれぞれ検出し、これらを合成して精度よく風速、風向を同時に測定できることを確かめた^{4),5)}。

風ベクトルによる風向検知法は風向変化に対する風速計出力が正しく正弦波的に変化することを前提にしている。実験的に得られたこの特性を解析的に示すことができるならば、風速計プローブを設計するうえで、特に、プローブの小型化を図る場合に大きな助けとなる。

本研究ではかご型イオン風速計プローブ内におけるコロナ放電場のイオン流を解析し、8本のコレクタを有するかご型イオン風速計の風向特性が正弦波状に変化することを明らかにした。イオン流の解析には上流有限要素法⁵⁾を用いた。

2. 風向・風速同時測定の原理

かご型イオン風速計プローブの基本構成図を図1に示す。接地コレクタ電極群の中央に位置する放電線に直流高电压を印加すると、コロナ放電により放電線周囲にイオンが生成される。イオンはコレクタ電極に捕捉され、コレクタ電流として検知され、とくに、無風状態であるならば4本のコレクタに向かうイオンの量は等し

* キーワード：イオン風速計、風向検知、イオン流、数値電界計算

* 山形大学工学部電気工学科 (992 米沢市城南 4-3-16)
Department of Electrical Engineering, Faculty of
Engineering, Yamagata University, 3-16, Jonan
4-chome, Yonezawa, 992 Japan

い。この状態で風が吹くとイオン流の対称性がくずれ、各コレクタで検知される電流の大きさに差が生じる。これらの差から風速が検出できる。

図1においてY方向の風速計出力 V_Y 、X方向の出力 V_X は式(1)、(2)で与えられる³⁾。

$$V_Y = A(I_Y - I_{Y'}) / (I_Y + I_{Y'}) \quad (1)$$

$$V_X = A(I_X - I_{X'}) / (I_X + I_{X'}) \quad (2)$$

出力 V_Y は風ベクトルのY成分、 V_X はX成分に相当する。定数 A は電流電圧変換器を含む電流信号処理回路の利得である。

実験的にはコレクタ電流を電圧信号に変換した後、A/Dコンバータを介してパーソナルコンピュータに取

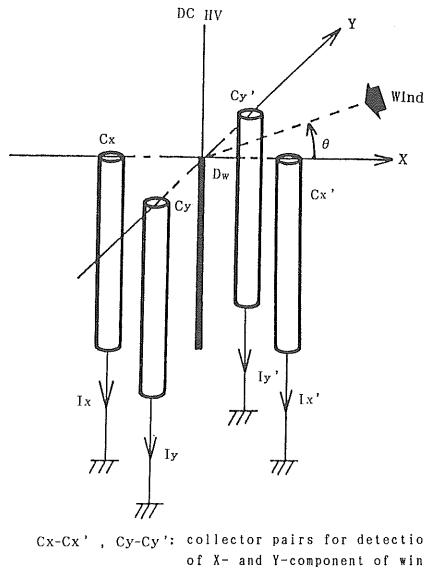
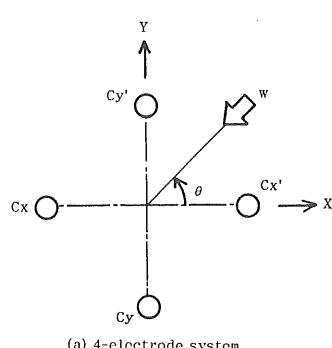


図1 かご型イオン風速計の構成

Fig. 1 Configuration of a cage-type ion-flow anemometer.



り込み、式(1)、(2)の加減算と除算および式(3)、(4)の演算を行うことにより、風向および風速を同時に求めた⁵⁾。

$$W = (V_X^2 + V_Y^2)^{1/2} / K \quad (3)$$

$$\theta = \begin{cases} \tan^{-1}(V_Y/V_X) & (V_Y \geq 0, V_X \geq 0) \\ \tan^{-1}(V_Y/V_X) + \pi & (V_Y < 0, V_X \geq 0) \\ \tan^{-1}(V_Y/V_X) - \pi & (V_Y < 0, V_X < 0) \end{cases} \quad (4)$$

式(3)の K は $\theta=0$ のときの V_X 、あるいは $\theta=\pi/2$ のときの V_Y と風速 W との関係を表す定数である⁵⁾。また、式(4)において V_X および V_Y の極性に応じて π を加算あるいは減算しているのは、風向 θ として、 $-\pi$ から π までの値を得るためにある。

イオン風速計のプローブとして、図2に示すように4本のコレクタを用いる4電極型と8本のコレクタの2本ずつを対にする8電極型の2通りの電極配置を用いた。実験で使用した風速プローブの放電線およびコレクタ直径はそれぞれ 0.1 mm および 1 mm であり、両電極間距離は 12 mm、放電線の長さは 30 mm である。

3. イオン流解析

3.1 基本式

解析の対象となる場は風速プローブ放電線に一定の電圧が印加されて、一定量の電荷が連続的に生成している状態で、風速 W の一様な風がプローブに垂直方向に一向方に吹いているときの単極性イオン流場である。この場を表す基本式は電界 E と電荷密度 ρ を未知変数とした次の2式で表すことができる。

$$\operatorname{div} E = \rho / \epsilon_0 \quad (5)$$

$$(\mu E + W) \cdot \operatorname{grad} \rho = -\mu \rho^2 / \epsilon_0 \quad (6)$$

ただし、 ϵ_0 は真空の誘電率であり、 μ は正イオンの移動度である。イオンの移動度は雰囲気条件により変化するが、ここでは $2.3 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ⁷⁾ を用いた。

電荷密度 ρ として最初に適当な値を仮定し、解析空間

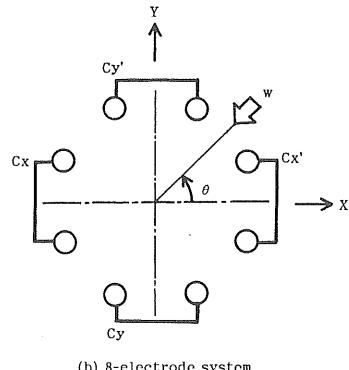


図2 風速計プローブのコレクタ配置

Fig. 2 Two types of collector arrangement.

の全領域で E と ρ の値が収束するまで反復計算を行う。ただし、式(5)における電界 E は静電界 E_1 、空間電荷による電界の変化分 E_2 に分解しておき、静電界 E_1 は電荷重畠法、変化分 E_2 は有限要素法を用いて計算した。静電界だけを電荷重畠法で求めたのは、任意の場所の電界の強さが精度よく求められるからである。電荷密度 ρ は上流有限要素法を用いて求めた。

3.2 静電界の計算

3.2.1 電荷重畠法

実験で設定したようにコレクタを接地し、放電線に正極性の電位 V を与えた場合、4本あるいは8本の接地電極に与える影像電荷が複雑になるので、この計算では、便宜上放電線を接地し、コレクタに負極性の電位 $-V$ を与えた。

電荷重畠法での仮想電荷配置を図3に示す。仮想電荷として1本のコレクタ当たり8本の無限長線電荷を、また、放電線内にはそれらに対する影像電荷を配置した。仮想電荷はコレクタ内ではその半径の0.3倍の円周上に対称に置いた。ここで、コレクタ内の仮想電荷と放電線中心との距離を d 、放電線半径を r としたとき、 r^2/d で表される放電線内の位置に影像電荷を置くことにより放電線表面を接地電位とすることができる⁸⁾。

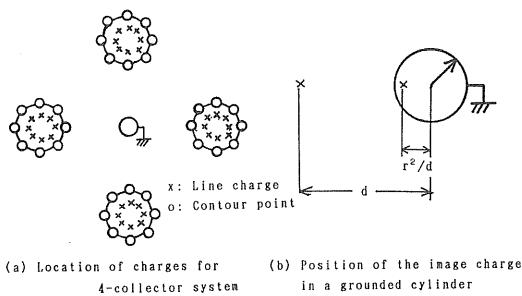
3.2.2 有限要素法

図4は有限要素法により電界計算するための4電極および8電極プローブに対する1/4領域の三角形一次要素の分割図である。実際の計算では全領域について解析した。解析領域として、プローブ領域からのイオンの流出の程度を考慮して、4電極型では放電線-コレクタ間距離の3倍の長さ、8電極型では2倍の長さを半径とする円周を境界として設定した。この境界の電位として、電荷重畠法により求められた値を与えた。全要素および全節点数は4電極配置では1,416要素、748節点、また、8電極型では1,456要素、784節点である。

上流有限要素法を用いて電荷密度を計算する際には、各節点における電界の値が必要になる。しかし有限要素法は原理上、電界は要素内で一定で節点では不連続である。ここでは、池田、河本氏らの方法を踏襲した⁹⁾。すなわち、任意の節点 i での電界の強さとして、節点 i を囲む要素内の電界の強さにそれぞれの要素の節点 i に対する角度に応じた重みをかけて加え合わせたもので代表させた。

3.2.3 電極表面における電界の強さの補正

解析空間に電荷があるときの静電界からの電界の増分を有限要素法で求めるが、有限要素法により得られる静電界の強さの精度を予め把握しておく必要がある。上記の有限要素法で得られる節点における電界の強さと電荷



(a) Location of charges for 4-collector system (b) Position of the image charge in a grounded cylinder

図3 電荷重畠法における電荷の配置

Fig. 3 Location of charges for calculation by the charge simulation method.

重畠法により得られた値を示したものが図5である。電極から離れたところの電界の強さは一致しているが、電極表面における電界の強さだけは有限要素法で得られる値が常に小さくなる。

電極周囲の法線方向の電界の強さについて、図4の分割を用いた有限要素法による値と電荷重畠法により得られた値の比を表1に示す。放電線の表面電界はその表面の位置に関わらず一定であり、両計算法により得られた値の比は一定となる。一方、コレクタ表面においては電界の強さは位置により異なり、両計算法で得られた電界の強さの比は4電極型では0.695～0.78の範囲、8電極型では0.388～0.74の範囲にある。放電線と相対する角度 $\psi=0$ の位置でその値は最も大きく、電極裏側で小さくなる。有限要素法では有限の大きさを持つ要素内の電界の強さは電荷重畠法に比べて常に小さくなる。

放電線表面の電界の強さは、3.3節で述べるように電荷密度の初期値 ρ_0 を決定するために使用され、また、コレクタ表面の電界の強さはコレクタ電流を求める計算に使われるので、電界の強さの計算精度がイオン電流の計算結果に大きく影響することになる。したがって電極表面での電界の強さをできるだけ精度のよい電荷重畠法で求めた値に近い値にしておく必要がある。ここでは便宜上、電極構成に関わらず、有限要素法で得られた電極表面節点の値を上記の比の最も大きな値0.78で除することにより電極表面の電界の強さとした。

イオン流の計算においてはイオンが存在するときの電界の変化分だけを有限要素法を用いて求めるので、その場合の電極表面の電界の変化分についても同様の補正を行った。

3.3 電荷密度とイオン電流

イオン流の計算を行うため、最初に各節点の電荷密度を与えておく必要がある。ここでは実際の状況と同様に放電線表面だけに電荷密度 ρ_0 を与え、他の節点では0とした。式(5)、(6)の繰り返し計算により、他の節点

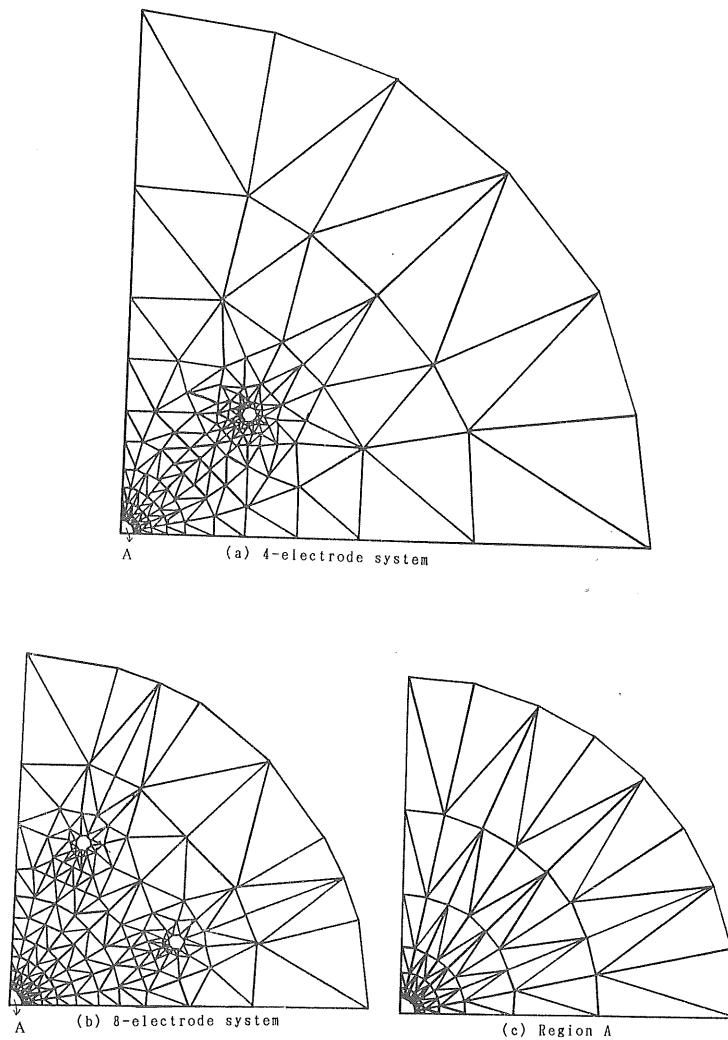


図4 三角形有限要素の分割図

Fig. 4 Triangles for finite element method.

の電荷密度が求められることになる。ただし、 ρ_0 を理論的に与える方法や測定する方法は確立されていないので、コロナ損の解析に用いられる仮定を採用した。すなわち、コロナ放電開始後の電極表面の電界の強さはコロナ開始電界に維持されるように電荷密度 ρ_0 を求めた。

まず、放電線表面においてコロナ放電が開始するときの電界の強さを求める。放電線表面からコレクタに向かう半径方向の電界分布を求め、放電線表面からの距離と電位の関数として電界の強さを表した。コロナ開始の条件は式(7)で与えられる⁹⁾。

$$\int_{x_m}^{x_0} (\alpha - \eta) dx = k \quad (7)$$

ここで、 α および η はそれぞれ、電離係数および付着係数であり、 x_0 および x_m はそれぞれ、 $\alpha = \eta$ となる位置および最大電界の位置である。 $\alpha - \eta$ は電界 E の関数であり、次式のように表されている。

$$\alpha - \eta = 0.211 p(E/p - 24.0)^2 \quad (8)$$

式(8)において、 E および p の単位はそれぞれ kV/cm および atm である。

コロナ開始電圧は式(7)において $k=11$ を満足するような印加電圧として求めた。コロナ開始電圧はコレクタ数が 4 および 8 本の電極配置に対して、それぞれ 4.73 および 4.49 kV となり、実測値のそれぞれ、4.8 および 4.5 kV とよく一致した。得られたコロナ開始電圧の値を用いて放電線表面上での電界の強さを計算した結果、

表1 有限要素法と電荷重畠法による電界の比較

Table 1 Comparison of electric field strength calculated by two methods.

Position of electrode surface	Electric field strength E (MV/m)					
	4-electrode			8-electrode		
	FEM	CSM	FEM/CSM	FEM	CSM	FEM/CSM
Discharging wire	1.65	2.03	0.813	1.54	1.78	0.865
collector	$\phi=0$	0.483	0.619	0.780	0.216	0.314
	$\phi=\pi/4$	0.451	0.581	0.776	0.208	0.281
	$\phi=\pi/2$	0.361	0.500	0.722	0.131	0.215
	$\phi=3\pi/4$	0.318	0.431	0.738	0.081	0.165
	$\phi=\pi$	0.283	0.407	0.695	0.057	0.147

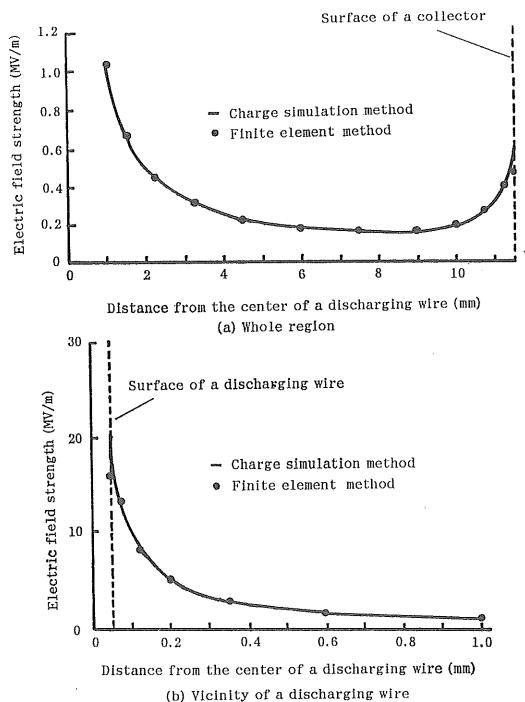
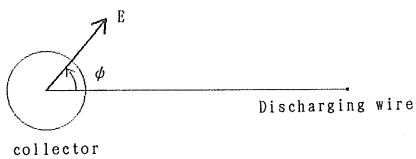


図5 放電線とコレクタとの間の電界の強さ

Fig. 5 The electric field strength in the space between discharging wire and collectors.

両電極配置とともに 16 MV/m という値が得られた。

本計算ではこの電界の強さを維持するように、電極間に与える電荷密度を決定する必要がある。その ρ_0 を求めるために、ここでは、放電線への印加電圧を一定に

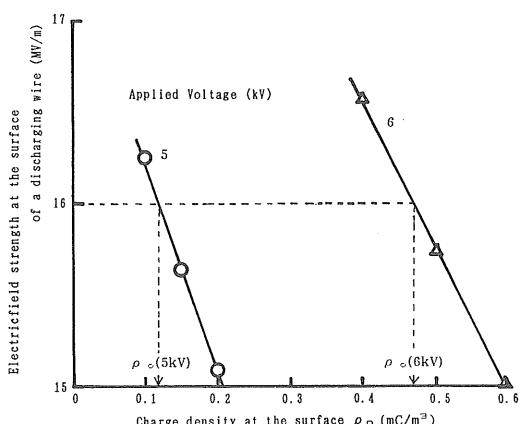


図6 放電線表面における電荷密度と表面電界の強さ

Fig. 6 Relations between charge density and the electric field strength at the wire.

した状態で逆に ρ_0 を適当に与え、放電線表面での電界の強さ E_0 を計算する。 E_0 が上記の 16 MV/m になるように ρ_0 を決める。例えば、8電極配置において印加電圧を 5 kV および 6 kV に設定した場合、電荷密度 ρ_0 と E_0 との関係は図6で示される。放電線表面に電荷を与えたとき、電荷密度が大きいほど表面の電界の強さは低下する。これは、電極と同極性の電荷によって電界が緩和されるためである。

図6からコロナ開始電界の強さ 16 MV/m に対応する ρ_0 を読み取り、その値を放電線表面における電荷密度として採用した。この ρ_0 を用いて式(5), (6)を計算し、各節点における E と ρ を求めた。 E と ρ は繰り返し計算

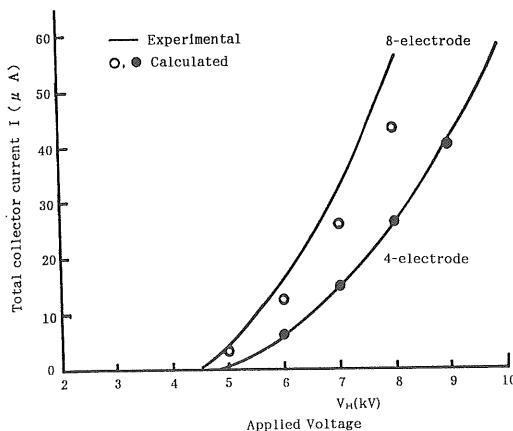


図7 放電線印加電圧とコロナ放電電流

Fig. 7 Relation between corona current and applied voltage.

によって求まり、5回以内の繰り返しで収束した。

コレクタ表面の節点における電界と電荷密度から、隣合う節点間のそれぞれの平均値を用いて電流密度を求め、放電線長30mmに対するコレクタ電流を算出した。各コレクタの電流値から任意の風速および風向に対する風速計出力を式(1)、(2)を用いて求めた。

4. 解析結果と検討

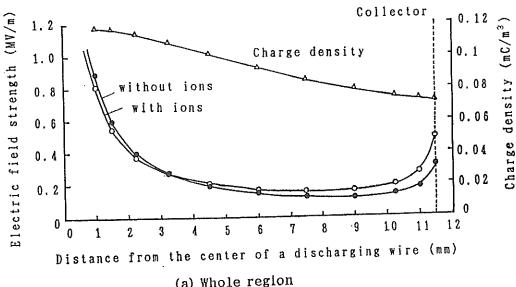
4.1 コロナ放電特性

放電線への印加電圧を4電極型のプローブにおいては6, 7, 8および9kV, 8電極型においては5, 6, 7および8kVに設定したときの ρ_0 を求め、それぞれの場合の全コレクタ電流を算出した結果を図7に示す。4電極型では実験値とよく一致しているが、8電極型では実験値よりも20%程度小さい値になった。電極上の電界の強さの補正係数0.78が8電極配置では若干大きく、電界の強さが過小評価され、これが電流の大きさに影響したものと考えられる。

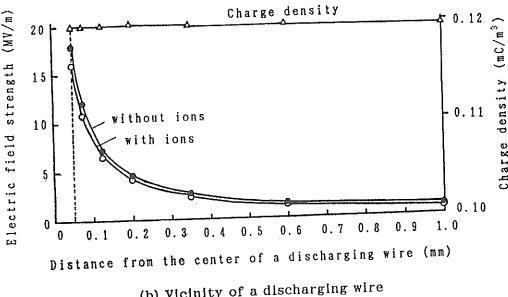
4.2 イオン流場の電界

イオン流は実際の風速プローブに用いる電圧で計算した。放電線への印加電圧は風速計出力の直線性からみて、コロナ開始付近の電圧が望ましい。これは電圧が高くなるとコロナ風の影響で出力の直線性が損なわれるためである。本イオン流の計算にはコロナ風は考慮していない。4電極および8電極のプローブに対して、それぞれの放電線に印加する電圧は6kVおよび5kVに設定した。これは図7で明らかなように、実験における全コレクタ電流が約5μAとなる印加電圧である。

8電極型のプローブにおいて、5kVを印加した放電



(a) Whole region



(b) Vicinity of a discharging wire

Fig. 8 Influence of presence of ions on the electric field strength.

線でコロナ放電が起きている場合の放電線とコレクタとの間の電界の強さを静電界と比較して図8に示す。コロナ放電が起きているとき、すなわち、空間にイオン流がある場合には放電線近傍の電界の強さは静電界に比べて弱くなり、逆にコレクタ近傍では強くなることが明確に示されている。

イオンの流れの風による影響を調べるために、風がない場合および風速5m/sのときの等電荷密度分布と等電位分布を図9から図12に示す。放電線表面の電荷密度は4および8電極に対して、それぞれ0.22および0.12mC/m³に設定している。放電線電位および電荷密度を100%として、等電位線を2%ごとに50本、電荷密度線を5%ごとに20本引いた。

風がない場合の等電荷密度分布は、両電極配置ともに放電線近傍では同心円状であるが、コレクタ付近ではコレクタを結ぶように等電荷密度線が形成されるようになる。すなわち、4電極配置の場合には等電荷密度線は4角形になり、8電極では8角形になる。等電位線は8電極ではコレクタ近傍まで同心円状の等電位分布が保たれ、おおよそプローブ内に等電位線が収まる。これに対して、4電極ではコレクタ近傍では等電位線は4角形になり、電極間に等電位線が入り込むようになる。

風がある場合、等電荷密度線が風下の方に偏っており、

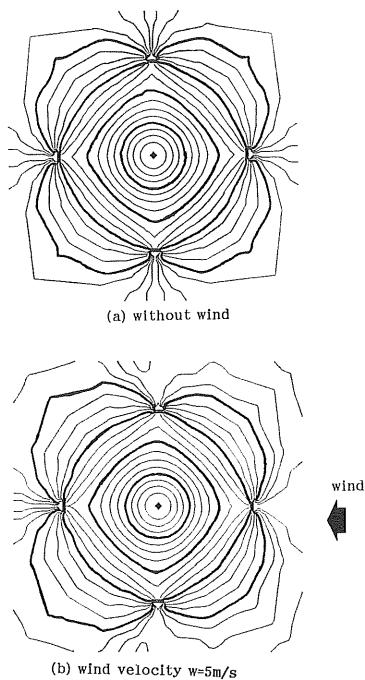


図 9 4電極型プローブの電荷密度分布

Fig. 9 Distribution of charge density in the 4-collector probe.

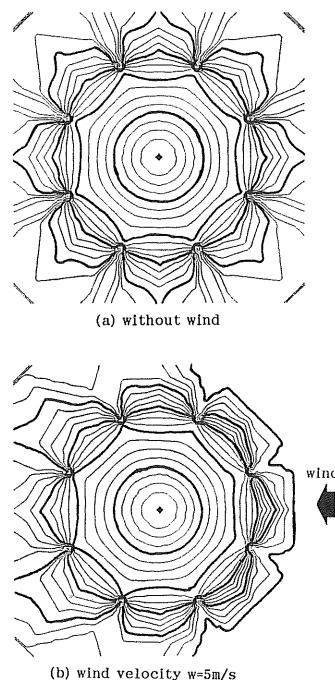


図 11 8電極型プローブの電荷密度分布

Fig. 11 Distribution of charge density in the 8-collector probe.

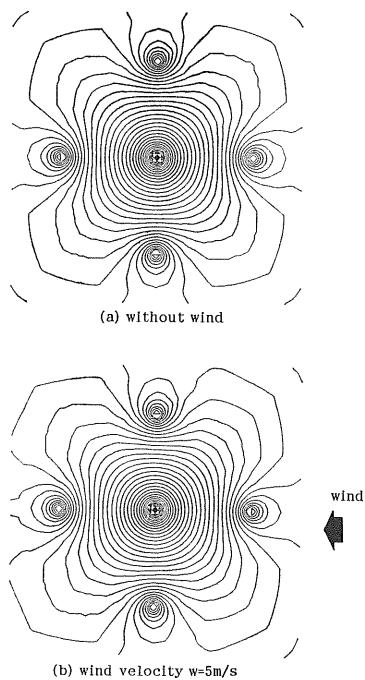


図 10 4電極型プローブの等電位分布

Fig. 10 Equipotential lines in the 4-collector probe.

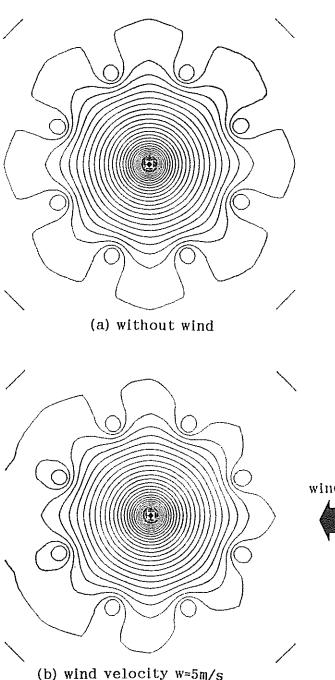


図 12 8電極型プローブの等電位分布

Fig. 12 Equipotential lines in the 8-collector probe.

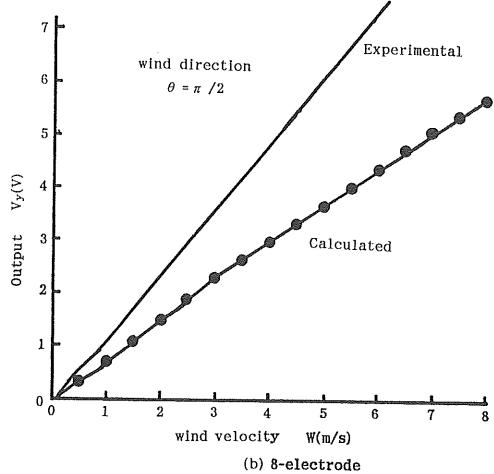
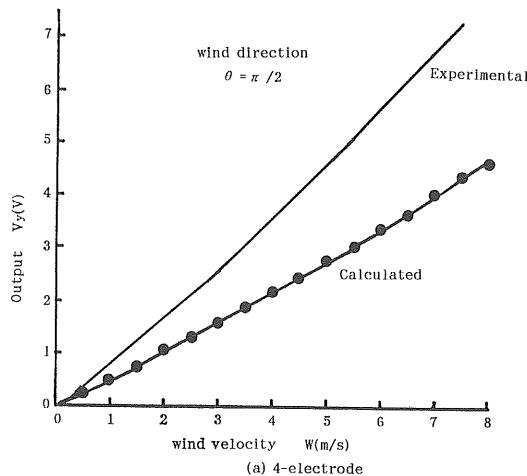


図 13 風速変化に対する風速計出力特性

Fig. 13 Signal output of the anemometer to the change of wind velocity.

イオンが流されている様子が示されている。結果として、等電位線は風下方向に移動している。

4.3 風速計出力

図 1において風向が $\theta = \pi/2$ の Y 方向からの風速を変化させたとき、式(1)で求められる出力 V_Y を図 13 に示す。計算で求められた出力の絶対値は実験値とは異なるが、風速に対して直線的に変化することがわかる。

4 電極型で 6 kV、8 電極型で 5 kV を放電線に印加したとき、風速を 5 m/s 一定にして風向を変化させた場合の出力の計算結果を実験値と比較して図 14 に示す。4 電極型プローブでは、正弦波状変化のうち波高部での出力低下が計算結果に明瞭に現れており、実験結果とよく類似した特性を示している。一方、8 電極型プローブでは実験結果と同様のほぼ完全な正弦波状の変化を示

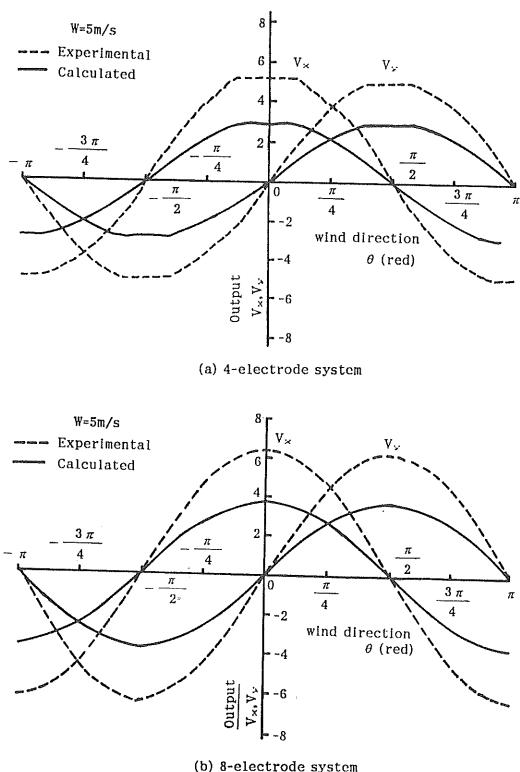


図 14 風向変化に対する出力特性

Fig. 14 Signal output of the anemometer to the change of wind direction.

す。

4 電極型の見かけ上の出力低下は風向変化に対する感度の悪さを示すものである。その原因としてはコレクタの配置に起因する電位分布そのものがあげられる。

図 10 に示した 4 電極配置のプローブの等電位線の形状を見ると、コレクタの間に等電位線が入り込んでいる。電極背後から吹いていた風の向きが少し変化した場合、風下側のイオンの一部は風下側のコレクタに捉えられるが、一部はコレクタに捉えられずにプローブから出てゆく。このような状況では風上側と風下側のコレクタ電流の大きさの差に大きな変化が現れず、出力の変化は小さい。

これに対して 8 電極配置では、風下側には対になる 2 本のコレクタが存在するので、わずかの風向変化によっても風下側のコレクタが流れてきたイオンを確実に捉えることができ、結果として、風速変化が風速計の出力に敏感に現れるものと考えられる。したがって、風向特性を正弦波状に変化させるためにはコレクタ数を多くして、イオンがプローブから逃げ出る量を少なくし、イオンを確実に捉えることが必要である。このことは文献

3) で示したように実験的事実と一致する。

5. ま と め

直流コロナ放電をイオン源とするかご型イオン風速計におけるイオン流解析を電荷重畳法と上流有限要素法を用いて行い、実験値との比較を行った。出力の風速、風向に対する変化の様子は実験値とよく一致し、また、実験で得られた4電極型と8電極型における風向依存性の違いが明瞭に把握できた。

現在のかご型イオン風速計プローブは熱線式風速計と比較するとかなり大型であり、実用化のためにはさらに小型化する必要がある。その際に本研究で示した計算法により特性をある程度まで予測できるものと考えられる。

謝 辞

イオン流の計算に際し、電力中央研究所泊江研究所送

配電部放電研究室、専門役須永孝隆氏、主査研究員河本正氏の貴重な助言に対して謝意を表す。なお、本研究における計算は、山形大学情報処理センター ACOS-4 および東北大学大型計算機センター SX-2 N を使用した。

参 考 文 献

- 1) 井上宇市：空気調和ハンドブック，p. 136，丸善 (1982)
- 2) 浅野和俊、衣川利光：静電気学会誌，10 (1986) 123
- 3) 浅野和俊、東山禎夫、奥山英樹：静電気学会誌，12 (1988) 441
- 4) 浅野和俊、日塔正彦、東山禎夫：静電気学会講演論文集，pp. 337-340 (1989)
- 5) Y. Higashiyama and K. Asano : J. Electrostatics, 25 (1990) 245
- 6) 池田 勉、河本 正：電力中央研究所報告：679001, p. 14 (1979)
- 7) 電気学会：放電ハンドブック，pp. 52-54，電気学会 (1974)
- 8) 河野照哉、宅間 董：数值電界計算法，p. 101，コロナ社 (1980)
- 9) 宅間 董：電気学会雑誌，91 (1971) 148