

論 文

静電式霧消去ネットの開発と釧路市郊外 における海霧消去実験

十文字 正憲*, 内山 晴夫**

(1995年3月8日受理)

The Development of Electrostatic Fog Liquefier and the Experiment of Sea Fog Dissipation in the Suburb of Kushiro City

Masanori JYUMONJI* and Haruo UCHIYAMA**

(Received March 8, 1995)

The dense fog causes many troubles in our life,—in traffic, home life, agriculture, and so on. In order to solve these problems, we have invented a new type fog dissipation apparatus,—the electrostatic fog liquefier, as one hopeful method, and demonstrated that this newly invented apparatus is very effective to dissipate fog, not only in the laboratory but in the field also. Furthermore, we tried to verify the effectiveness of the fog liquefier at Kushiro city which is very famous dense fog area in all of Japan. This paper describes the optimization of the parameters of fog liquefier, and the experimental results of fog dissipation in the suburb of Kushiro city.

1. はじめに

三陸沿岸から下北半島にかけて吹き込む「やませ」は濃い霧を発生させ、低温・多湿・日照不足を伴うことから、稲作などの農作物に大きなダメージを与える。また、この霧は視界を悪くするため、一般道路や高速道路、さらには海上での衝突事故を引き起こす場合がしばしばある。特に、飛行機にとって霧は大問題であり、せつかくの高速交通手段の役をなさないこともたびたびある。

霧対策としては、これまで様々な提案や実験が行われてきた。しかしながら、その多くはコストや騒音、環境破壊などの問題があるため、実用化は難しかった。

そこで、我々は、霧対策として、これまでの方法とは全く異なる新たな霧消去装置を考案し、まず、室内実験により、その効果を確認した¹⁻⁴⁾。さらに、十和田市郊外の相坂⁵⁾、一戸町高森高原⁶⁾、釧路市郊外⁷⁾、関越自動

車道⁸⁾などにおいて霧消去の野外実験を試み、良好な結果を得た。

本報告は、我々が考案した静電式霧消去装置（静電式霧消去ネット）の原理および装置パラメータの最適化について述べ、さらに、釧路市郊外における霧消散の野外実験結果について述べるものである。

2. 静電式霧消去ネットの原理及び構造

静電気による霧消去の原理図を図1(a)に示す²⁾。金属網（霧凝集電極）に近接して、金属細線（放電線）が張られていて、侵入した霧はコロナ放電でプラスに帯電され、クーロン力により負極ネットに引きつけられ、凝集して、水滴となる。いわゆるコットレル集塵装置⁹⁾とよく似た原理によるものであるが、これまでは霧を浮遊粒子とみためたての実験は試みられていなかった。

我々の考案した静電式霧消去装置（静電式霧消去装置ネット）の具体的な構造は図1(b)のとおりである²⁻⁴⁾。平行に配置した2枚のメッシュ電極の間に金属細線を等間隔に張り、そこに高電圧を印加する。外側のメッシュ電極をアースとしているため、高電圧による感電事故を防げる上、霧がどちら側から侵入しても消すことができる。さらに、高電圧が印加される放電電極が負極のメッシュ電極によってシールドされているため、高周波ノイズの発生も低く抑えることが可能である。

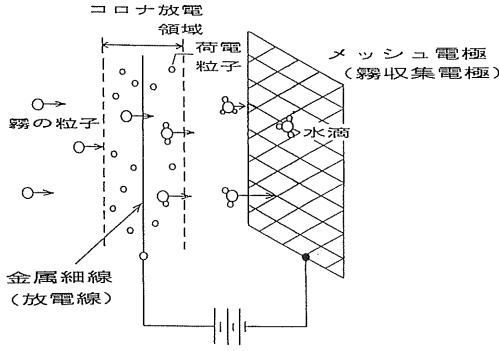
キーワード：静電気，コロナ放電，霧消去

* 八戸工業大学工学部電気工学科 (031 八戸市大字妙字大開 88-1)

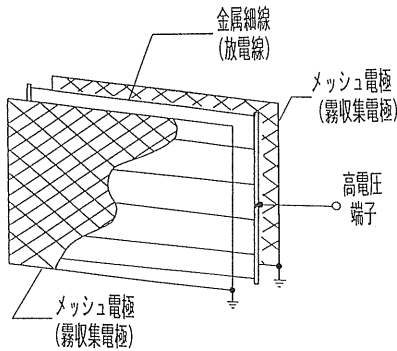
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Hachinohe Institute of Technology, 88-1 Ohbiraki, Myo, Hachinohe, 031 Japan

** 八戸工業大学工学部エネルギー工学科 (031 八戸市大字妙字大開 88-1)

Department of Energy Engineering, Faculty of Engineering, Hachinohe Institute of Technology, 88-1 Ohbiraki, Myo, Hachinohe, 031 Japan



(a) 原理図
(a) Principle.



(b) 具体的構造
(b) Structure.

図1 静電気による霧消去の原理図と静電式霧消去装置(静電式霧消去ネット)の構造

Fig. 1 Principle of fog dissipation by static electricity and schematics of electrostatic liquefier.

3. 静電式霧消去装置の設計

3.1 コロナ開始電圧の見積り

コロナ発生に必要な電圧は放電電極の構造と太さにより決まる。地上 h の高さ一本の金属細線 (半径 r) を張ったときのコロナ開始電圧 V_c は、

$$V_c = 2.30 \times X_c \cdot r \log \frac{2 \cdot h}{r} \quad [\text{kV}] \quad (1)$$

で与えられる¹⁰⁾。ここで、 X_c はコロナ開始発生電界であり、

$$X_c = 29.8 \left(1 + \frac{0.301}{\sqrt{r\delta}} \right) \delta \quad [\text{kV/cm}] \quad (2)$$

である¹⁰⁾。ただし、 δ は気圧、温度による補正係数である。

いま、金属細線 (放電線) の直径を $2r = \phi 1.0 \text{ mm}$ 、高さを $h = 20 \text{ mm}$ とすると、

$$\left. \begin{aligned} X_c &= 28.4 \text{ kV/cm} \\ V_c &= 10.5 \text{ kV} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

と求まる。ただし、 $\delta = 1.0$ とした。これより、 $\phi 1 \text{ mm}$ の放電線を使っても 10 kV 程度でコロナ放電が発生し、霧消去の実験が可能ながわかる。

3.2 絶縁破壊強度

金属細線-メッシュ電極の組み合わせで装置を構成する場合、理想的にはその絶縁破壊電圧を求めて設計すればよいわけであるが、金属細線にキックがあったり、金属メッシュに突起があったりすることも考えられるので、ここでは安全をとって、部分的に針電極になっているものと想定して設計する。針電極の火花電圧は、1気圧の大気では 6 kV/cm と言われているので⁹⁾、 10 kV で動作させるには、金属細線とメッシュ電極間隔が 2 cm 以上あれば十分ということになる。

3.3 消費電流及び消費電力

コロナ放電電流 I は、一般に次式で与えられる¹⁰⁾。

$$I = k \cdot V(V - V_c) \quad [\text{mA}] \quad (4)$$

ここで、 k は定数、 V_c はコロナ開始電圧、 V は印加電圧である。 V_c は計算で求められ、定数 k は実験的に求められる。線対平板電極系のコロナ開始電圧 V_c およびコロナ開始電界 X_c は既に、(1)、(2)式で与えられている。したがって、消費電力 P は、

$$P = k \cdot \{V^2(V - V_c)\} \quad [\text{W}] \quad (5)$$

である。

(4)式の定数 k を求めるために、金属平板の上に金属細線を張った簡単なモデルで実験を行った。大きさ $400 \times 1,000 \text{ mm}$ の平面電極 (材質: 鉄) にベーク板で支柱を立て、アクリル棒で絶縁してステンレス線を張っ

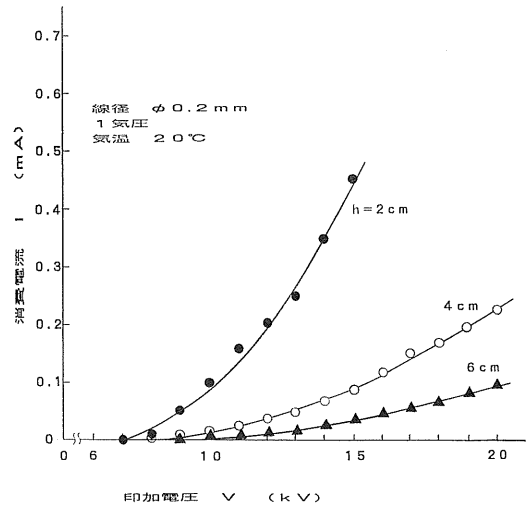


図2 簡易モデルによる消費電流の実験結果

Fig. 2 Result of discharge current as a function of applied voltage, by using a simplified model.

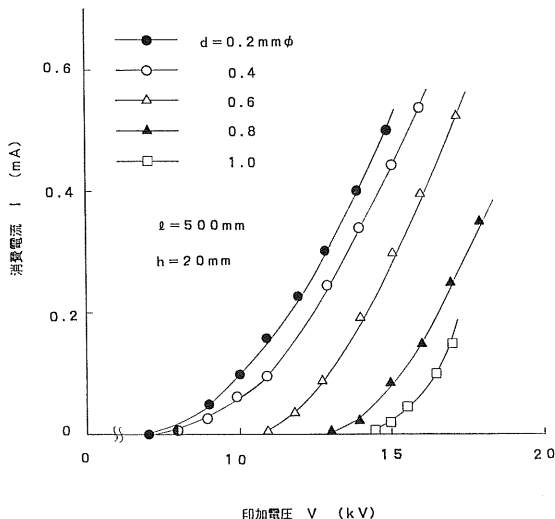


図3 線径の太さの違いによる消費電流の比較

Fig. 3 Comparison of discharge current versus diameter of discharge wire for simplified model.

た。アクリル棒は長さ 5 cm, ステンレス線は線径 $\phi 0.2$ mm, 長さ 50 cm である。放電線のステンレス線にはプラスの直流高電圧を印加し, 線径と電極間の間隔を変えて消費電流を測定した。ステンレス線と平板電極との間隔を 2 cm, 4 cm および 6 cm と変えたときの消費電流の印加電圧依存性の測定結果を図 2 に示す。電極間隔を変えてもコロナ開始電圧はほぼ一定であるが, 間隔を大きくするほど電圧電流曲線の傾きは小さくなる。これは, (4) 式で示した k の値が変わるためである。

つぎに, 線径を $\phi 0.2$ mm から $\phi 1$ mm まで 0.2 mm 間隔で変えた時の消費電流の印加電圧依存性を図 3 に示す。線径が大きくなるにつれてコロナ開始電圧が高くなるが, いずれの場合も曲線の傾きはほぼ一定のようである。コロナ開始電圧は (1) 式より求めた理論値とほぼ一致した。また, 電圧と電流の関係は (4) 式で予想されたとおりほぼ 2 次関数になっている。この実験より, $h = 2$ cm, $d = 0.2$ mm ϕ , $l = 50$ cm のとき, $V_c = 7.15$ kV だから, 単位長さ当たりの k の値は,

$$k = 7.2 \times 10^{-3} \text{ [mA/kV}^2 \cdot \text{m]} \quad (6)$$

と求まる。

静電式霧消去装置の室内モデルでは定数 k の値としては, 単位長さ [m] あたりでは,

$$k = 6.4 \times 10^{-4} \text{ [mA/kV}^2 \cdot \text{m]} \quad (7)$$

単位面積 [m²] あたりでは

$$k' = 3.0 \times 10^{-2} \text{ [mA/kV}^2 \cdot \text{m}^2] \quad (8)$$

であった。静電式霧消去装置の方が同一電圧での電流値が簡易モデルよりやや低い値となっている。

4. 室内実験

4.1 人工霧発生装置の霧の粒径・移動速度の測定

超音波式霧発生装置で発生させた霧粒子を透明グリーンを塗ったプレパラートに附着させ, 顕微鏡で観察した。粒径にはばらつきがあり, 直径 5~20 μm であって, 頻度分布の中心は 10 μm であった。霧粒子の直径が 10 μm の場合の霧粒子の体積 V , および質量 m は,

$$V = 4/3 \cdot \pi \cdot r^3 = 5.23 \times 10^{-10} \text{ [cm}^3],$$

$$m = 5.23 \times 10^{-10} \text{ [g]} \quad (9)$$

である。

静電式霧消去装置は霧の移動速度の大小により霧消去効果が大きく変化するので, 霧の移動速度を知ることが重要である。霧粒子の移動速度は霧を水平に吹き出し, 高さ $h = 25$ cm まで落下するまでの水平方向到達距離 x から霧の移動速度 v を求めた。実験に用いた超音波式霧発生装置では $x = 0.15 \sim 0.55$ m であったので, 霧の移動速度 v は $v = 0.66 \sim 2.4$ m/s である。

4.2 霧消去室内実験

4.2.1 装置パラメータの実験的検討

静電式霧消去装置の最適形状を明らかにするため, 次の 4 種類のパラメータを変化させた実験を行った。

- 1) 最適電極間隔
- 2) 放電電極の形状
- 3) 放電線の間隔

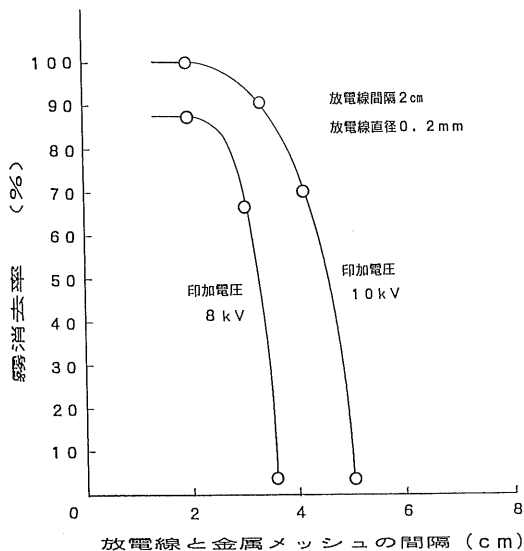


図4 放電線とメッシュ電極との間隔を変えたときの霧消去率の測定結果

Fig. 4 Fog dissipation rate as a function of distance between discharge wire and metal mesh.

4) 放電線の太さ

図4に印加電圧を8kVまたは10kV一定として放電線とメッシュ電極の間隔を変えたときの霧消去率の測定結果を示す。霧消去率は装置に電圧を印加したときと印加しないときの突き抜けた霧の霧水量の比率から求めた。図より放電線とメッシュ電極の間隔が狭いほど霧消去率が高くなっており、間隔2cm以下、すなわち電界にして5kV/cm以上にすれば、ほぼ100%霧消去が可能と結論できる。逆に、放電線とメッシュ電極の間隔が狭すぎると、霧を消す前にアーク放電が生じ、具合が悪い。

従来のコットレル集塵装置で白煙・霧の除去ができなかったのは、放電線と集塵電極の間隔が離れていて十分な電流が流れず、粒子が十分に帯電されず、霧粒を吸引・凝集できなかったためと思われる。

つぎに、放電電極の形状を変えた時の霧消去率を図5に示す。9種類の放電電極の形状について実験をしたが、図にはそのうちの主なもの3種類の結果を示す。シンプルな構造の金属細線を平行に張ったものが最も効率が良いことがわかった。

放電線の間隔は2cm、4cmの2種類について調べたところ、間隔2cmの方が4cmのときに比べて2kV程度低い電圧で霧を消すことができた。間隔が狭いほど良好のようだが、1cm以下にしても効果は変わらなかった。したがって、放電線間隔は2cm程度が適当と思われる。

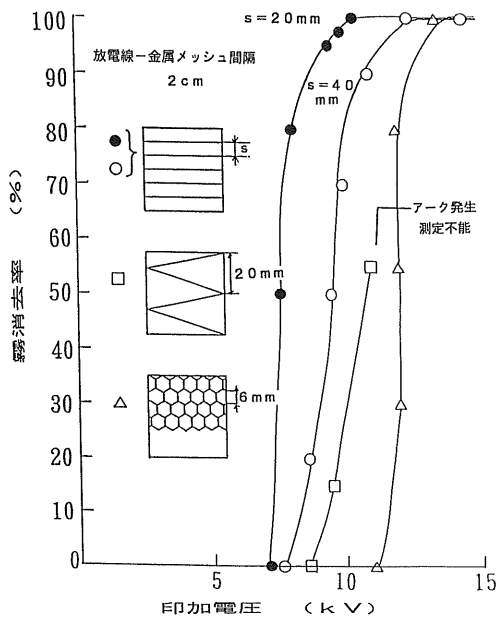


図5 放電電極の構造と霧消去率の関係
Fig. 5 Fog dissipation rate versus shape of discharge electrode.

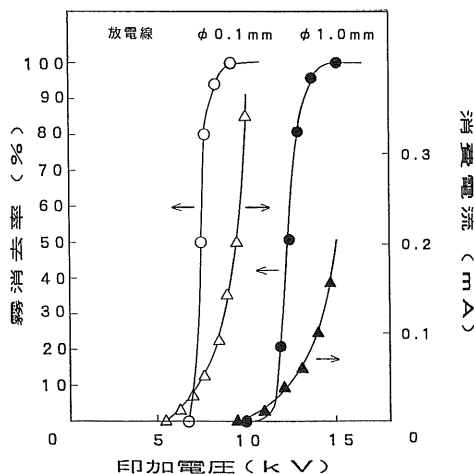


図6 放電線の太さを変えたときの霧消去率
Fig. 6 Fog dissipation rate as a function of discharge wire diameter.

表1 最適化した静電式ネットの構造定数
Table 1 Optimized parameters of an electrostatic fog liquefier.

放電電極の形状	平行ワイヤ型
放電電極とネットの間隔 d	2 cm
放電線の間隔 s	2 cm
放電線の太さ phi	0.1 mm phi

さらに、放電電極を目が詰まった金属網にしたところ、霧消去率は大幅に低下した。これは、金属細線の放電電極の場合よりも放電電極近傍の電界分布が均一になり、コロナが発生しにくくなるためと思われる。

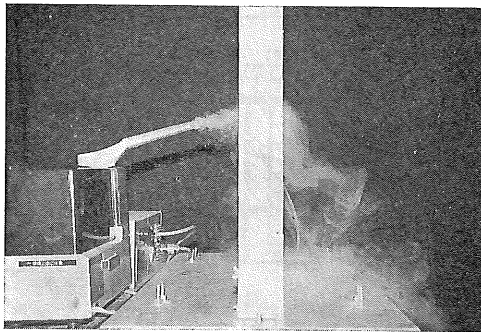
放電線の線径を phi 0.1 mm および phi 1.0 mm としたときの霧消去率の印加電圧依存性を図6に示す。グラフより、放電線の線径が phi 0.1 mmの方が phi 1.0 mmより印加電圧にして5kV程度低い電圧で霧を消すことができた。しかしながら、線径が細いと風による断線事故などを生ずる恐れがある。

以上の実験より求めた静電式霧消去装置の最適構造定数を表1に示しておく。

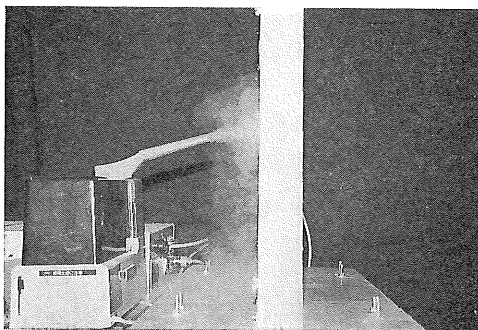
4.2.2 霧消去室内実験

図7は試作した装置で霧消去実験をしている様子である。(a)は通電していないときで、霧がそのまま通り抜けている。(b)は通電しているときで、完全に霧を消去できていることがはっきりわかる。

なお、霧が弾き返されるように消去されるのは、①イオン風の効果や、②侵入した霧が放電線手前で先に帯電され、霧侵入側の金属網に引き寄せられる効果の、2つの効果によるものと考えられる。どちらのファクターが



(a) 通電していないとき
(a) No applied voltage.



(b) 通電しているとき
(b) With applied voltage 11 kV.

図7 静電式ネットによる霧消去室用実験の様子
Fig. 7 Experimental result of fog dissipation by an electrostatic liquefier.

大きいかは現在検討中である⁸⁾。

4.2.3 霧粒子への荷電量の推定

荷電数, すなわち霧粒子に帯電した量を素荷電数で表した数 N は, 粒子のおかれた電界 E と粒径 D によって決まることが知られている. ここでは前述したコロナ開始電位傾度の $X_c = 120 \text{ kV/cm}$ (ただし, 線径 $\phi 0.2 \text{ mm}$) を採用し, 霧の移動速度を 2 m/s (霧粒子のコロナ領域滞在時間 $t = 2.5 \text{ ms}$), 荷電時定数 τ を 7.5 ms と仮定して文献 12) の粒径と飽和荷電数の関係のグラフより読み取った飽和荷電数 N_0 の値を採用すると, 荷電数 N は,

$$N = N_0 \times \frac{t}{t + \tau} = 10^5 \quad (10)$$

と求まる. 従って, 帯電量 q は,

$$q = e \cdot N = 1.6 \times 10^{-14} \text{ (C)} \quad (11)$$

である.

放電線 (プラス極) と金属網 (マイナス極) の間隔を d , 印加電圧を V , 霧粒子の質量を m , 速度を v_0 とし, クーロン力と風の力のつり合う条件より霧消去条件

を求める. 初速度 v_0 の霧が帯電によりクーロン力で減速され, 金属網付近で速度が 0 となり, 金属網にトラップされると考えると, 運動方程式は次式で与えられる.

$$\frac{dx^2}{dt^2} = \frac{q}{m} E, \quad \frac{dv}{dt} = \frac{q}{m} E \quad (12)$$

これより,

$$\frac{1}{2} m v_0^2 = q E \cdot d \quad (13)$$

と求まる. 電界 E を平等電界として考えて, $E = V/d$ とおくと, 消去可能な霧のスピードは,

$$v_0 = \sqrt{\frac{2qV}{m}} \quad (14)$$

と求まる. 上で述べたパラメータでは, $v_0 = 1.17 \text{ m/s}$ となる. この値は前に述べた実験結果よりやや小さい値となっているが, 逆に実験結果から, $V = 12.5 \text{ kV}$ で $v_0 = 1.77 \text{ m/s}$ の霧を消せたから, 荷電数 N は,

$$N = 10^5 \times \left(\frac{1.77}{1.17} \right)^2 = 2.29 \times 10^5 \text{ 個} \quad (15)$$

と逆算できる.

5. 釧路郊外における海霧の消散実験

5.1 装置の試作

図 8 に屋外実験用静電式霧消去装置の構造を示す. 図 9 は釧路に設置した同装置の外観写真である. 構造定数は表 2 に示すとおりであり, 施工のしやすさを考え, 室内実験用とは多少異なる値とした.

静電式霧消去装置の側には電源ボックスを用意し, 直流高電圧電源を収納した. 高電圧電源は, 短絡保護機能付きの出力 15 kV , 15 mA の装置を試作し用いた. さらに, 静電式霧消去装置の前後には光透過率計方式の霧センサを 1 組取り付け付けた^{15,16)}.

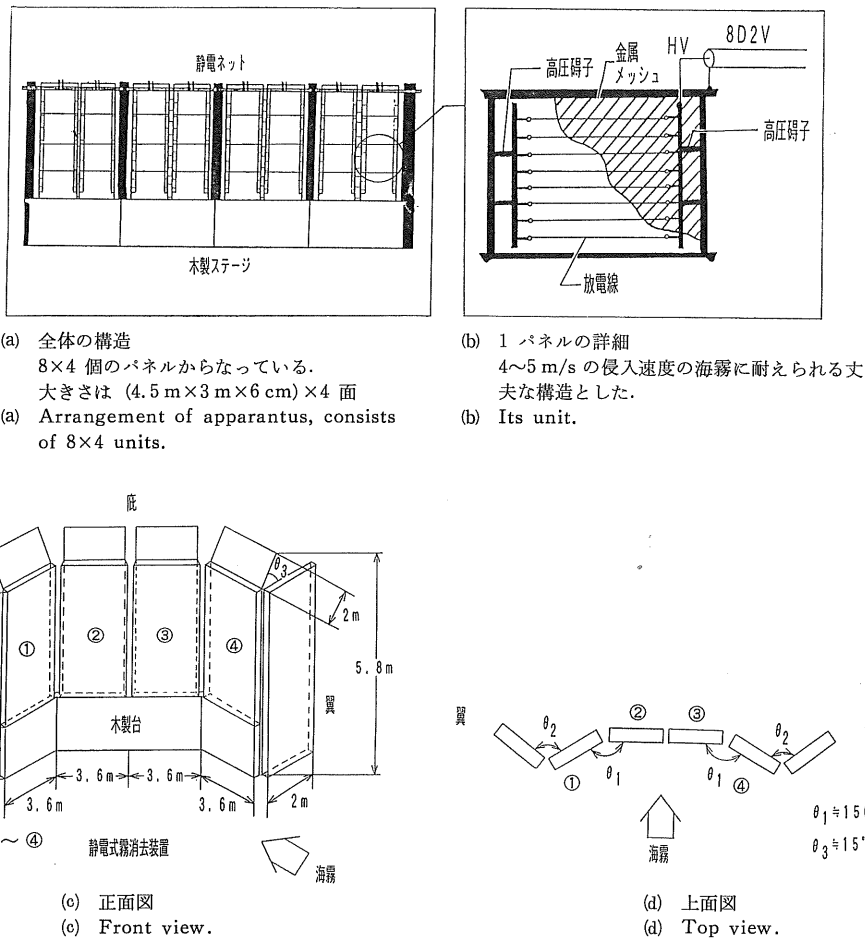
5.2 設置場所の決定

設置場所の条件としては, 次のことが挙げられる.

- 1) 海霧が多く侵入してくるところ
- 2) 海霧の侵入に対し, さえぎる物がないこと

設置場所は, これらの条件を考慮して, 図 10 に示す釧路郊外の桂恋のこんぶ干し場とした.

さて, 釧路の濃霧の発生原因は次のように考えられている. 同図に示すように, 夏になると北海道南東の沖合いに太平洋高気圧が発達し, 北海道内陸に向かって南風が吹き込む. 北海道東部の海は冷たい親潮と暖かい黒潮がぶつかる所であり, 黒潮で暖められ湿り気を帯びた太平洋の風が親潮で冷やされ過飽和の水蒸気となり, 海上で濃い霧を発生させる. それが南風に乗り次々と陸地に侵入してくる. すなわち, 釧路の霧は太平洋高気圧によって発生する移流霧であり, これに対し, やませの霧は太平洋高気圧よりずっと北のオホーツク高気圧の張り出



(a) 全体の構造
8×4 個のパネルからなっている。
大きさは (4.5 m×3 m×6 cm)×4 面
(a) Arrangement of apparatus, consists of 8×4 units.

(b) 1 パネルの詳細
4~5 m/s の侵入速度の海霧に耐えられる丈夫な構造とした。
(b) Its unit.

図 8 海霧消去実験に用いた静電ネットの構成方法および基本ユニットの構造

Fig. 8 Arrangement of electrostatic liquefier for sea fog dissipation and detail of its fundamental unit.

しによるものであって、発生上大きな違いがある^{11,13,17}。

5.3 海霧の消散実験

釧路の海霧の粒径分布は、沢井らによると 3~50 μm であり、また霧水量は 0.01~0.8 g/m³、風速は 2~10 m/s とのことなので¹²、我々の試作・開発した静電式霧消去装置で十分消去可能と考え、実験を実施した。なお、霧の個数密度は、霧水量として粒径分布頻度のピークのとときの値を採用すると、約 1.9×10⁸ 個/m³ となる。

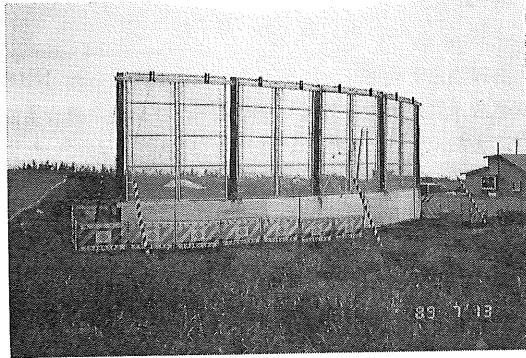
釧路における海霧の消散実験は図 11 に示す装置で、7月上旬から8月下旬までの間、計4回行った。

1回目の実験は気象条件をみはからって、装置への印加電圧を変えながら実験を行ったが、海霧が装置の上や横から回り込んでくるため、消えているのかどうか確認できなかった。そのため、図9(b)に示すように装置の上部には底を、横にはウイングを取り付けた。大きさは、いずれも幅 1 m である。2回目の実験は、このように

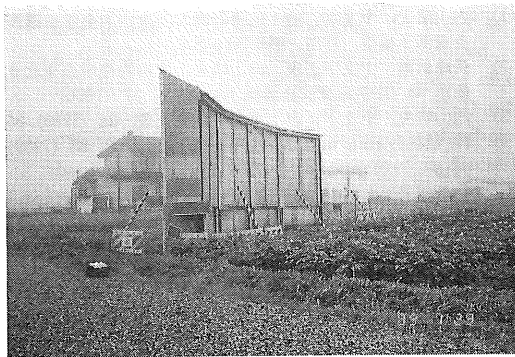
回り込み対策をした上で実施した。この場合は、放電線間の隙間からは少し霧が漏れるものの、放電線の近傍は霧が消え、縞模様ながら霧を消えることが明瞭に確認できた。その様子を図 12 に示す。この時の風向は静電式霧消去装置に対してほぼ直角方向、風速は 2~3 m/s であった。

3回目以降の実験は、2回目の実験の放電線の間から霧が通り抜けることに対する対策として、放電線の数を2倍、すなわち、放電線間隔を半分とし、また、高電圧電源の容量を 15 mA から 30 mA へ増力して実験を行った。しかし、この時期は霧が発生するものの、かなり弱くなっており、第2回目以上の良好なデータは得ることができなかった。さらに4回目は、第2回目と同様の結果であった。

さて、霧が消える様子は図 13 に示すように、縞模様の所と、それが混じりあって濃さが半分になった所があ



(a) 改良前
(a) Original.



(b) 改良後
(b) After improvement.

図 9 釧路に設置した静電式霧消去ネットの外観

Fig. 9 Outlook of an electrostatic liquefier settled at Kushiro city.

表 2 釧路に設置した静電式ネットの構造定数

Table 2 The parameters of an electrostatic liquefier settled at Kushiro city.

装置の大きさ	4.5 m×12 m
放電線の形状	平行線ワイヤ型
放電電極とネットの間隔 d	3 cm
放電線の間隔 s	4 cm
放電線の太さ ϕ	0.5 mm ϕ

る。霧がはっきりと縞模様に見える所の霧消去率を求めてみると、おおよそ 56% であった。この消去率は第 4 章で $V=12.5$ kV, 荷電数 2.29×10^5 個として求めた霧消去条件の見積りとほぼ一致している。

この縞模様部分の視程は、ほぼ霧がないときの視程に近くなっているわけであるが、混じりあった部分の所も霧が消去されていて有効領域と考えられ、その場合の視程は次のようになる。霧の密度を n , 光吸収断面積を σ とすると、距離 l を通過する光の透過率は、

$$T = e^{-n\sigma l} \quad (16)$$

で与えられる。 $T=-17$ dB のときの l を視程という¹⁴⁾。いま、 $n \rightarrow n/2$ のときの l の変化を見ればよいから、対策後は対策前に比べ視程は 2 倍ということになる。

もし、対策前が、非常にひどい濃霧で、視程 150 m であったとしても、それが、この静電式霧消去装置によって 300 m にまで改善されるわけであり、試作した装置の現在の構造パラメータでも、高速道路や空港の霧対策に十分有効であるといえる。

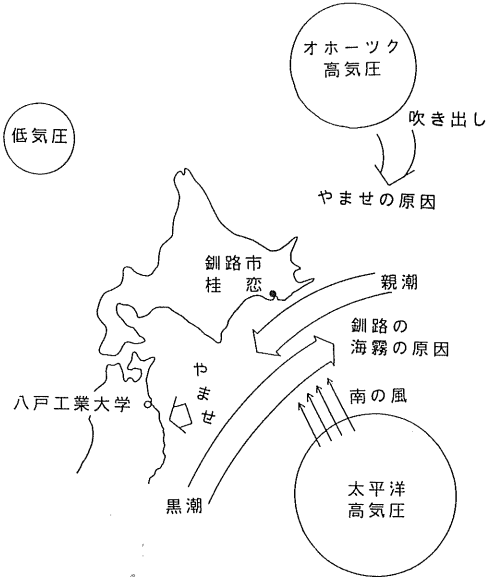


図 10 釧路地方の海霧発生モデル図および実験場所
Fig. 10 A model of the cause of dense sea fog in Kushiro district, and the point of sea fog dissipation experiment.

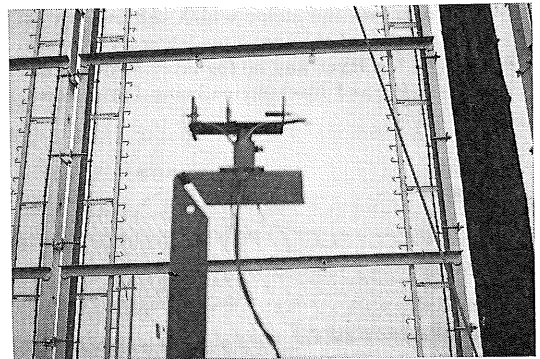


図 11 静電ネットの様子
中央手前は霧センサー

Fig. 11 Shape of an electrostatic fog liquefier.
The apparatus in the center is a fog sensor.

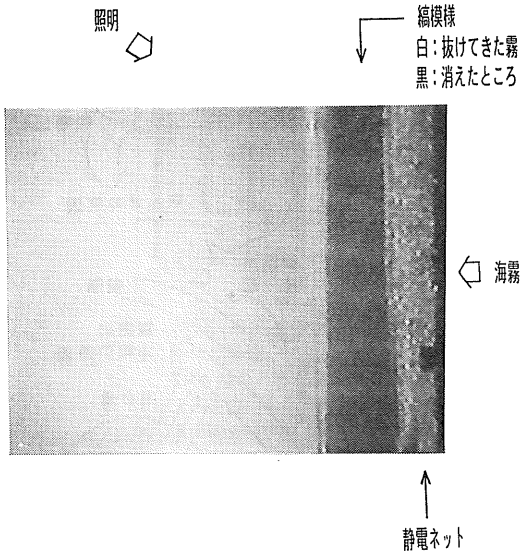


図 12 釧路における野外実験の様子
一番右側が静電ネット。その左側に縞模様が見えるが、白い所が霧、黒い所が消えている所であり、縞模様に消えていることがわかる。

Fig. 12 Result of sea fog dissipation experiment in Kushiro city.

The right hand is an electrostatic fog liquefier, and the stripe which can be seen at the left of the apparatus, shows a mixture of fog layer and no fog layer, white stripe is fog and black stripe being fog rejected area.

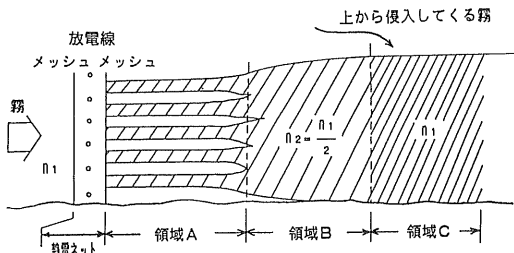


図 13 野外における静電ネットによる霧消去効果のモデル図

Fig. 13 Model for the estimation of effective area of a fog liquefier in the field experiment.

6. おわりに

海霧消去実験を行うに当たり、お世話になった NHK 釧路放送局の竹田正信ディレクター及び釧路市建設業協会、また、実際に装置の試作・施工をしていただいた伊勢屋金網工業(株)ほか、関係各位に深く感謝いたします。また、室内実験において装置の試作や実験に協力してくれた十文字研究室の卒研生杉野彰仁君(現在(株)CKD)、鈴木尚昭君((株)東北リコー)、工藤真之君((株)CKD)、高圧電源の試作や釧路での実験に協力してくれた榎波正明君(日本マランツ(株))に深く感謝する。

参考文献

- 1) 内山晴夫, 十文字正憲: 応用物理学学会全国大会学術講演会講演予稿集 (1987, 春) 30 p-S-6
- 2) 長峰信雄, 十文字正憲, 内山晴夫: 応用物理学学会東北支部第 45 回学術講演会講演予稿集, p. 87 (1990)
- 3) 内山晴夫, 十文字正憲: 東北の農業気象, 34 (1989) 56
- 4) H. Uchiyama and M. Jyumonji: JJAP, 28 (1989) 2319
- 5) 内山晴夫, 十文字正憲: 八戸工業大学 紀要, 8 (1989) 120
- 6) 十文字正憲, 長峰信雄, 内山晴夫: 東北の農業気象, 35 (1990) 14
- 7) 長峰信雄, 十文字正憲, 内山晴夫: 電気関係学会東北支部連合大会講演論文集, p. 133 (1991)
- 8) H. Uchiyama and M. Jyumonji: Proc. of Intern. Symp. on Electrostatics, Stanford Univ., pp. 97-104 (1994.6)
- 9) 静電気学会編: 静電気ハンドブック, p. 223, 473, オーム社 (1986)
- 10) 鳥山四男, 稲田金次郎: 高電圧工学, pp. 43-45, 53, コロナ社 (1959)
- 11) 十文字正憲: 気象研究ノート, 183 (1995) 139
- 12) W.C. ハインズ, 早川一也監訳: エアロゾルテクノロジー, p. 286, 井上書院 (1985)
- 13) 柳沢善治, 石原正仁, 沢井哲滋: 天気, 33 (1986) 603
- 14) 清水 浩, 小林喬郎, 稲場文男: 気象研究ノート, 116 (1974) 419
- 15) 十文字正憲, 内山晴夫: 東北の農業気象, 34 (1989) 60
- 16) 十文字正憲, 内山晴夫: 東北の農業気象, 34 (1989) 62
- 17) 児玉安正, 力石國男, 卜蔵建治, 十文字正憲, 渡辺 明, 中村晃三, 加藤内蔵進, 沢井哲滋: やませ時の冷害の原因となる下層雲の発生機構とその発現予測の可能性に関する研究, 文部省科学研究費重点領域研究「自然災害の予測と防災力」ワーキンググループ 研究成果報告書 (1990)