

人工霧による防冷防霜法の研究

三原義秋*・泊 功・林 堯・斎藤隆幸

農業技術研究所

Protection against Cold and Frost by an Artificial Fog

By Y. MIHARA*, I. TOMARI, T. HAYASHI and T. SAITO

National Institute of Agricultural Sciences, Tokyo

Summary

The prevention of frost during calm nights has long been desired to be obtained by producing an artificial fog from water, but has not yet been realized owing mainly to the fact that water droplets dry up rapidly in unsaturated air. Y. Mihara proposed in 1964 the possibility of forming and maintaining a fog of water droplets. The droplets, according to his report, are covered with a monomolecular film of an evaporation suppressant and keep their size for several hours in the unsaturated air.

The purpose of the present investigation was to verify the possibility of forming a fog layer through the proposed method and the effect of such fog on the protection against cold during the night.

Laboratory investigations were made on both the evaporation rate of water droplets under various temperatures and the improvement of emulsion to be used. Rate of evaporation from the surface of droplets covered with the emulsion remarkably falls, with decrease of the temperature of surrounding air, down to nearly 0°C. Fine droplets, 30 microns or so in diameter, live more than ten hours in the cold and unsaturated air of 3°C and 90% relative humidity.

Theoretically, the amount of evaporation suppressant to cover the entire surface of every water droplet with monomolecular film is about one thousandth of the amount of water. The emulsion, however, containing large particles of suppressant, was prepared for the fog test in a concentration 2—4 times as much as the theoretical amount.

Outdoor investigations were done in a square shelter and in a small basin. Fog was successfully formed by spraying the thin emulsion with temporary use of a cleaning machine for automobiles. In the basin, an artificial fog layer was formed at each of the four nights. Each time the outgoing radiation under the fog layer was reduced by 20—50% from that before being covered with fog. The effect on temperature, however, was not clearly recognized, owing to the affection of inflowing air to the basin from outside. The effect on radiation described above suggests that a vast fog layer will undoubtedly modify the air temperature under the layer, protecting the ground surface against cold and frost.

* 本論文についての質疑応答担当者 (The person in charge of answering the questions about this paper)

目 次

1. はじめに……………34
 2. 従来の研究……………34
 3. 研究の計画……………35
 4. 研究の成果……………35
 4.1 蒸発防止剤の温度特性……………35
 4.1.1 微水滴蒸発速度の測定装置の試作 ……35
 4.1.2 温度と水滴の蒸発速度……………35
 4.2 乳化液の微粒化の促進……………36
 4.3 人工霧発生装置……………37
 4.3.1 動力噴霧器の改良……………37
 4.3.2 加熱式噴霧装置……………37
 4.4 遮蔽垣による人工霧防冷力の実験……………38

4.4.1 地面からの夜間放射を減少させるに
 必要な霧水量の推定……………38
 4.4.2 遮蔽垣と測器……………40
 4.4.3 実験結果……………41
 4.5 人工霧現地実験……………41
 4.5.1 実験地と気象観測……………41
 4.5.2 実験地の気象特性……………43
 4.5.3 人工霧の効果……………44
 5. 残された問題点……………45
 6. 謝辞……………46

1. はじめに

昭和39年夏期、北海道は異常気象の連続で、道北、道東の稲作および畑作は強度の冷害に見舞われ、被害総額は600億円に達した。この冷害は、不良天候の継続下で作物の生育が遅延したことが主要因であるが、被害を決定的としたのは9月27～28両日の降霜であった。成熟直前の水田地帯では、雑草や古タイヤを燃やす煙霧法を広範囲に実施して被害の軽減につとめたがその成果は不十分であり、また発煙法を行わなかった道東畑作地帯の豆類のごときはこの降霜で壊滅的な被害を受けた。

早冷、あるいは初霜害は、北海道の冷害の特長といえるもので、39年度に限られたことではない。古くから、煙霧法が水田地帯の共同防霜作業としてあるのはそのためである。しかしながらこの方法の採用は防霜効果の高さによるのではなく、他に適当な手段がないために、効果微弱と知りながら実施しているのが実情である。

39年度、農業技術研究所において、三原はその単分子膜利用の研究から、微水滴の単分子膜被覆法に着目し、不飽和空気中において微水滴を数時間以上維持できることを確かめた。この事実は、人工的に霧を形成できることを示唆するものであった。人工霧が、広面積を対象とする防霜手段としては最上のものであることは周知のことであった。

39年度北海道冷害を対象とする異常気象防災総合研究において、人工霧防冷法が一課題となったのは、冷害に対する一つの積極的防災手段としてその緊急開発が期待

されたことによる。

人工霧防冷法は、その着想からまだ日浅く、多くの問題点を含んでいるが、それらの解明への仕事と併せて小規模ながら野外実験まで進展することができた。次にそれらの概要を報告したい。

2. 従来の研究

天然の霧や雲については多くの知見が気象学の領域で古くから得られている。また、夜間の地球放熱と雲による放熱の阻止についても、定量的に測定が数多くなされている。

霧や雲を作る水滴の長波放射の吸収に関しては、実験室内の測定も少くない。わが国においては、山本義一、斎藤隆幸によって、人工的な雲滴の赤外線吸収力が、種々の煙との比較において測定されており、また小沢行雄によっても同様に測定が反覆拡大され、いずれも水滴の赤外線吸収力が格別に大きいことが確かめられた。

一方、水滴の不飽和空気中における蒸発速度については、萩原哲二や辻幹男の理論式があり、山本義一、三浦晃の裏書の実測が加わって、蒸発の早さは明確にされている。

人工的に霧粒水滴を屋外で作る試みは、幾度か試みられたようであるが、霧層を形成させることに成功した例はない。水滴雲の代りに、種々の化学煙霧の屋外実験が行われ、有効放射の阻止力が調べられている。その結果は、いずれも、化学的煙霧の放射阻止力は微弱であること、したがって、夜間防冷手段としては無力に近いことが指摘されている*。

* 小沢行雄(1961)：農技研報，A 8号，158～242。

水滴の蒸発防止によって霧層の形成を計ろうとする着想の下で試みられた三原の実験は1955年以來の単分子膜による水面蒸発抑制の研究の成果を根拠として、極めて有望な結果を得るに至った。水に不溶性の高級アルコール誘導体を水和乳化してこれを微滴とする方法である。水滴内に含まれるこの蒸発防止剤は、水滴化と同時にその表面を単分子膜で包み、その蒸発を阻止する。現在の剤では、 $5\sim 6^{\circ}\text{C}$ 以下では蒸発を数百分の一程度に低下させる。その結果として、水滴の寿命は数時間ないし十数時間に延長される。零度付近では、やや寿命が短縮される傾向が見られたが、その原因は不明で今後の検討が待たれる。

3. 研究の計画

本研究において実施を意図した事項は次のとおりである。

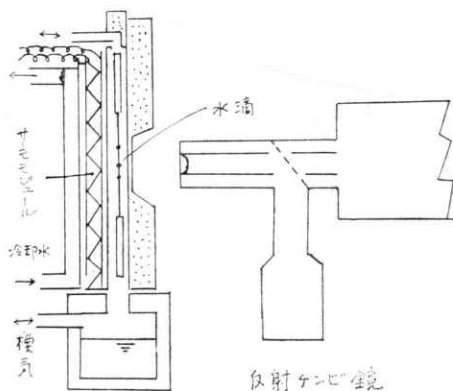
- (1) 蒸発防止剤の人工霧用としての改良
 - a 蒸発防止剤の温度特性の改良
 - b 剤の微粒化
 - c 水和乳化液の表面張力の低下法
- (2) 放射冷却の人工霧による防止効果試験
 - a 人工霧の赤外線吸収力
 - b 遮蔽垣による夜間防冷効果測定
 - c 現地防冷試験

4. 研究の成果

4.1 蒸発防止剤の温度特性

4.1.1 微水滴蒸発速度の測定装置の試作

人工霧滴の蒸発速度は、細いクモ糸を滴を吊して顕微鏡で大きさを測る方法による。そのために機械的振動の入らない恒温槽が必要である。最近開発されたThermo-



図—1 蒸発速度測定装置の略図
Scheme of the apparatus for measuring the evaporation rate of fine droplets.



写真—1 蒸発速度測定装置
Apparatus for measuring the evaporation rate of fine droplets.

module を利用して図-1に示す恒温恒湿室を持つ装置を新たに作った。室の大きさは $50\times 50\times 4\text{mm}$ で3室並列とした。各室にクモ糸を張ったSlide holder (35mm型) を1枚入れる。クモ糸に吊した水滴は、恒温室の一面につけられた硝子窓を透して検鏡され、写真撮影される。

サーモジュール恒温室は $-10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ の範囲で任意の温度に極めて短時間に調節される。温度制御の幅は 0.4mm ビード型サーミスター温度計によると $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ である。

湿度の調節には、恒温槽の下部に調湿用の液槽を置き液面上の空気は恒温室内と絶えず交流する方法を採用した。図-1は本装置主要部の断面を示し、写真-1は写真測定装置を加えた全景である。

4.1.2 温度と水滴の蒸発速度

既往の実験によると、蒸発防止剤MF-1では、蒸発抑制力は気温が低いほど増大するが 4°C 辺りから抑制力が低下し、寿命がやや短くなる傾向が見られた。しかし、実験が通常の冷凍室内で行われたので、機械的震動が誘引されて水滴が激しく動揺した影響も考えられた。この点の解明に重点をおいて、上記測定装置を使って、 $20^{\circ}\text{C}\sim -15^{\circ}\text{C}$ の範囲で、水滴の蒸発速度を測った。

水槽がおかれる恒温槽内の湿度調節が当初不十分であったために、今なお完全な結果を得るに至っていないが次のような傾向はほぼ確かめられた。

MF-1剤の乳化液を噴霧した微水滴の蒸発速度は、気温低下と共に急激に減少し、前に述べたように $4\sim 5^{\circ}\text{C}$ を境に再び蒸発し易くなるという傾向は認められない。また、零下 5°C までは、単分子膜で包まれた水滴は、

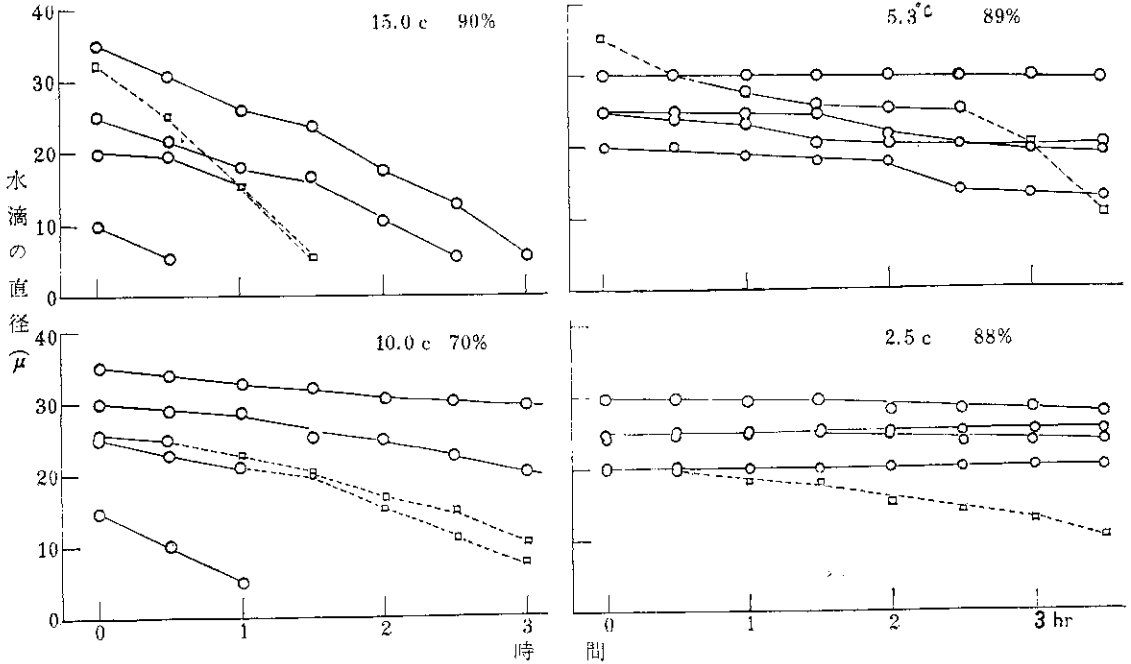


図-2 単分子膜で包まれた水滴の蒸発速度

Evaporation rates of water droplets covered with monomolecular film in different conditions.

恒温槽内では氷結しなかった。

単分子膜で包まれた微水滴は、その蒸発について正球を維持しながら、径が小さくなるのが通常であるが、多角形に変形するものも少くない。形状が不斉形になる滴は蒸発速度が大きい点から見て、完全に表面が包まれるほどに剤を含まなかった水滴のようである。温度 15°C、10°C、6°C、2.5°C の4条件下の微水滴数例の蒸発経過を図-2に示すが、破線は水滴が変形したもの、実線は正球が経過したものである。

本実験において水滴は、0.5 μ 以下の直径を持つクモ糸に懸垂された。この大きさの糸は、水滴の中心を通るのが普通で、しかもそれが水面を貫通するときほとんどメニスカスを作ることがない。糸の大きさが1 μ を越すときは貫通点は突起を作り水滴の球形が乱される。

4.2 乳化液の微粒化の促進

微水滴の表面を単分子膜で包むに必要な単分子膜物質の水に対する比率は水滴の大きさで異なる。いま蒸発防止剤 MF-1 の主成分である高級アルコールの単一分子の長さを3m μ として、その重量比率を求めると図-3のとおりとなり、水滴の直径が10 μ で600分の1、30 μ では約1,600分の1の剤であり。

このように理論上の単分子膜物質量は微量であるが、

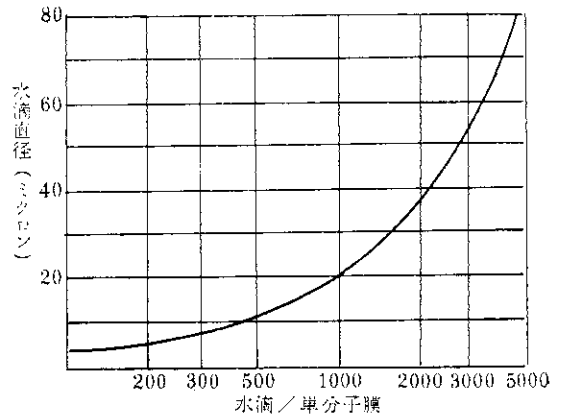


図-3 微水滴とその表面単分子膜との比率

Volume ratio of water drop to the monomolecular film on its surface.

全水滴に均等に理論量が含まれるためには、蒸発防止剤は水に溶解していなければならない。実際は、本剤は不溶性であって、乳化によって微粒が懸濁しているにすぎない。現状ではその粗大なものは、5~6 μ にも達する。このような粗粒は、40 μ 以下の霧滴を包む量としては著しく過剰であり、したがって現場量の濃度では剤を含まない水滴が作られることを意味する。

以上の理由から、不乾性の人工霧発生に使用する蒸発防止剤は、出来るだけ微粒として水中に乳化することが望ましい。理想としては、剤の粒子は 1μ を最大の径とすることが理想である。

上述の目標の下に、MF-1 の原剤である OED-70 (以下OEDと呼ぶ) を供試して、次の3点を中心に微粒化の向上を試みた。現段階では乳化剤を添加しない機械乳化方法のみで試みられたものである。

- a) OED濃度調整による微粒化促進
- b) 乳化過程での温度条件による微粒化促進
- c) 新鋭乳化機による微粒化促進

以上を中心に微粒化試験の結果、OED10%濃度(これは従来蒸発散防止に使用されている原液濃度)でも粒径の 1μ 乳化液ができるが、低濃度にする程容易であった乳化過程での温度条件は重要で乳化機の加熱装置の改良が必要になった。以上の試験には、種々の乳化機の中から従来使用されてきたディスパースミル、その改良ディスパースミル、新鋭振動ボールミルの3種の乳化機が使用され比較された。いずれも条件が揃えば 1μ の微粒化は可能であるが、かなりの欠点も見出された。比較的 1μ 粒子が揃ってできる振動ボールミルが目玉されたが、これとても小型のため製造量が小さく、加熱装置の不備という欠点が見出された。しかしこれまでの試作の結果から 1μ 粒子を 80% 含む乳化液の製造が可能となったので、今後はさらに濃度条件を組合せた多量製造の方法が検討されねばならない。

4.3 人工霧発生装置

4.3.1 動力噴霧器の改良

人工霧発生装置として当初農薬等の散布用動力噴霧器を使用することを考え、その改良に着手した。動力噴霧機にも型式は多いが、ここで検討の対象としたものは共立農機製のスピードスプレーヤーで噴口の口径は 2mm 圧力は $10\text{kg}/\text{cm}^2$ である。このままでは噴霧滴のほぼ全量がごく短い時間に地上に落下して、空中に滞留しないので、口径を 0.5mm 、圧力を $30\text{kg}/\text{cm}^2$ まで変えてみたが遂によい結果をうる事ができなかった。一般に空中に浮遊する霧として適当な粒子の大きさは 40μ 以下とされているが、現在市販の動力噴霧機には 20μ 付近にモードを持つものは皆無で、上記のように口径および使用圧力を改良しても、霧として必要な粒径を多量に得ることは困難であることがわかった。次に丸山製の動力噴霧機クライスシリーズについても若干の検討を行なった。この機械は常用で $20\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度、

最高で $31\text{kg}/\text{cm}^2$ で使用する機械であるが、噴口に改良を加え粒径のモードを 20μ 付近にもっていくことを試みたところ、ともすれば噴口がつまりがちとなり期待した結果がえられなかった。このタイプの場合には噴口を改良することによって 20μ 程度の大きさの粒子を数多く作ることは可能のようであるが、吐出量を著しく制限する要があって、はたして多量噴霧に適するか極めて疑問に思われる。

4.3.2 加熱式噴霧装置

動力式噴霧機について種々検討を加えてみたが所期の成果をおさめることができないので他の種類の噴霧装置について調査していたところ、たまたま自動車の洗滌用に使われているスチームクリーナーが人工霧発生装置としてまさるものように考えられたのでこの機械について若干の改良を行なった。この機械は吸込口から吸込んだ水を往復ポンプで加圧し、加圧された水が円管式ボイラーの中の管内を通過する間に灯油バーナーで加熱し $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度の圧力にして銃口から噴射されるいわば加圧加熱式の噴霧装置である。霧発生装置として使用する場合には銃口の先に噴霧口を接続して使用するが、この接続する噴霧口によって噴霧された霧粒の大きさやその量的分布が変わってくる。噴霧口として一穴式のもの



写真—2 スチームクリーナーと噴霧状況
Spraying with a steam cleaner.

(写真-3のB) Y字形として二穴式としたもの(同A)一穴式ではあるが調節ネジ付で噴口の大きさをいろいろ変えられるようにしたもの(同C)長さ1m程度の銅製パイプに10cm間隔に溝をきったもの(同D)等を試作したが、実験の結果では一番最後のものが最もよい結果を示した。一方同一噴霧口についても圧力が低いと滴の直径が大きく圧力が高くなると水滴がより粉碎される傾向が見られるので標準品の圧力 6kg/cm^2 より高い 10kg/cm^2 程度を常用とする改良が施こされた。その結果はまだ十分ではないが一応噴霧量の約 $1/4$ 程度が滞留しているものと考えられ、今年度の遮蔽垣内実験および現地防冷実験にはこの機械を使用した。この機械は写真-2に示すような機械である。この機械について今後改

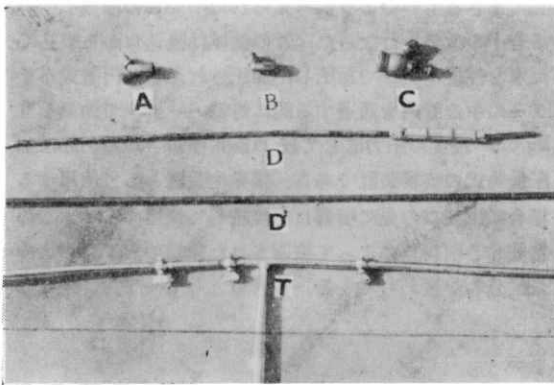


写真-3 スチームクリーナー用の噴霧 Test nozzles for the steam cleaner.

良を必要とする点は前項であげた動力式噴霧機と同様噴霧口を改良することによってより効果的に適当な粒径の霧滴を多量に発生させることであろう。ただスチームクリーナーというその名の示すように噴霧量の1割内外は吐出時気化したのち再凝結して微滴化する。この滴には蒸発防止剤が含まれていないので短時間に蒸発消失するという特性がある。

4.4 遮蔽垣による人工霧防冷力の実験

屋外実験の前段階として、研究所構内に遮蔽垣を設けそのなかに霧を滞留させて、霧の濃度や滴の大小と防冷力の関係を明かにしようとした。適当な気象条件が得られないうちに、寒冷期が終って、所期の目的はまだ達していないが、前駆的に行なわれた理論的な考察と、実験設備等について概略述べる。

4.4.1 地面からの夜間放射を減少させるに必要な霧水量の推定

霧の層の下の地面の長波放射量が霧水量によってどのように変るかを大ざっぱな計算によって推定してみる。

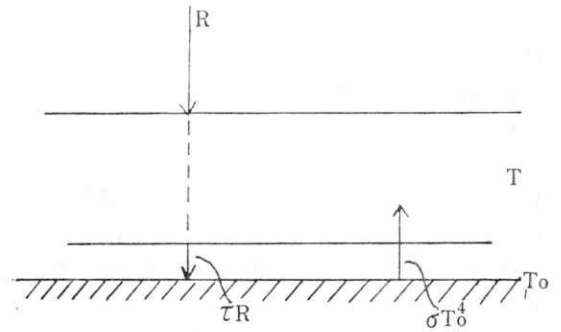


図-4 霧層の放射 Radiation of fog layer.

図-4において大気からの下向き放射量を R 、霧の透過率を τ 、霧の温度(等温とする)を T 、とすると地面のうける上方からの長波放射は

$$\tau R + (1 - \tau)\sigma T^4$$

である。ただし上式は放射の散乱は全く考えない場合である。一方地面温度を T_0 とすると、地面からの上向き放射量は σT_0^4 であるから、地表面の純放射量 R_n' は

$$R_n' = \sigma T_0^4 - \{\tau R + (1 - \tau)\sigma T^4\} \quad (1)$$

となる。

(i) 普通 T と T_0 とは大体等しいので、 $T = T_0$ とすると

$$R_n' = \sigma T^4 - \{\tau R + (1 - \tau)\sigma T^4\} = \tau(\sigma T^4 - R) \quad (2)$$

または $\frac{R_n'}{R_n} = \tau$ 、ただし $R_n = \sigma T^4 - R$

となる。

(2)の $(\sigma T^4 - R)$ は、霧の層が全く存在しないときの放射量を示している。つまりこのような場合には霧のないときと霧のあるときの放射量の比は、その霧の層の透過率をあらわしており、霧の下の地面での放射量はその霧の層の透過率のみでできてしまうことになる。1例として霧のある場合の放射量を霧のない場合の 0.8 、 0.5 、 0.2 倍とするに必要な霧水量を求めてみると(図-5のグラフよりよみとる)表-1のようになる。

表—1 霧層の厚さと透過率

Relation between the depth of fog layer and the transmissivity.

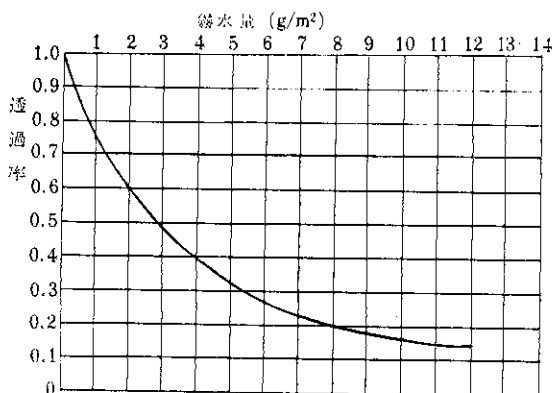
R_n'/R_n	霧が必要とする透過率	霧水量 g/m ³	霧層の厚さ(m)		
			濃度0.5g/m ³	1.0g/m ³	1.5g/m ³
0.8	0.8	0.8	1.6	0.8	0.53
0.5	0.5	2.8	5.6	2.8	1.86
0.2	0.2	8.0	16.0	8.0	5.3

R_n : 霧のないときの放射量 R_n' : 霧のあるときの放射量

次に風がある場合に、霧の状態を一定に保つために噴霧機より噴出するのに必要とする水の量を求めてみる。

風速を 0.5m/s とすると

R_n'/R_n	噴出量(1sec, 地面 1m ² 当り)
0.8	0.4g
0.5	1.4g
0.2	4.0g

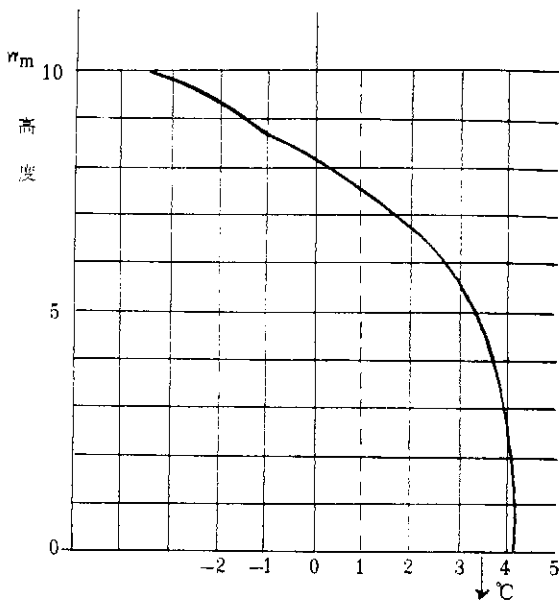


図—5 霧水量と赤外線透過率

Relation between the liquid water content of fog and the transmissivity of infrared rays.

(ii) 次に T_0 と T が等しくない場合を考えてみる。もし霧が長時間停滞し、霧の層が放射冷却し、その温度が下る場合には霧の量は変らなくても、霧の層から出る下向き放射量が減少するために放射量は小さくなり、霧による放射量を小さくする効果はそれだけ減少することになる。霧の層の放射による冷却は上面付近が最も大きく又それは霧の濃度によっても異なる。図—6は、冬季の普通の状態を仮定し 1g/m³ の濃度の霧が10mの厚さの層

をなし、はじめ霧の中は至るところで 5°Cとしたとき10分後の放射冷却の作用により温度降下したときの温度分布を示すものであって、このような温度分布によって



図—6 霧の上面が冷却するときの温度
Estimated temperature gradient in a fog layer, of which the upper part is cooling.

も、地面の放射量は、はじめの温度分布の場合と殆ど変わらなかった。これは放射冷却は霧の上面で大きく、又地面に達する霧からの放射は霧の下層の温度が大きく作用するためである。実際は放射による冷却と同時に、気流による加熱も作用するので、冷却は放射のみの場合よりも小さく、又温度分布もそのこう配は急激ではないものとみてよい。放射と拡散とによる熱の出入を考えた霧の中の温度変化およびそれによる地面での放射量の変化は計算されていない。

ここでは霧の層の温度が一律に降下し、地面温度と霧の温度との差が 3°C, 6°C, 9°Cある場合 R_n'/R_n が前と同様 0.8, 0.5, 0.2 となるために必要とする霧の量を推定する。

$$\frac{R_n'}{R_n} = \frac{\sigma T_0^4 - \{\tau R + (1-\tau)\sigma T^4\}}{\sigma T_0^4 - R} \quad (3)$$

となり R_n'/R_n はそのみではきまらず T_0 , R の値によって変わってくる。そこで一応、地面温度 = 5°C, $R = 0.340 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ (これは冬の普通の状態と思われる) と仮定して(3)を用いて計算をすすめる

表—2 霧水量と透過率

Relation between the liquid water content of fog and the transmissivity.

R_n'/R_n	必要とする霧の透過率 τ	必要とする霧水量 m	τ	m	τ	m
0.8	0.77	1.0g/m ²	0.73	1.2	0.66	1.6
0.5	0.42	3.7	0.30	5.5	0.15	30以上
0.2	0.064	20.0以上	—	—	—	—
	$T_0-T=3^\circ\text{C}$		$T_0-T=6^\circ\text{C}$		$T_0-T=9^\circ\text{C}$	
			この場合 $m=\infty$ としても		この場合 $m=\infty$ としても	
			$R_n'/R_n=0.28$ より小さくすることはできない		$R_n'/R_n=0.38$ より小さくすることはできない	

表—1, 2 を比べると分るように R_n'/R_n を同一の値に保つためには T_0-T が大きくなればなる程, 霧の量を多くしなければならないことが分る。なお, $T_0-T=6^\circ\text{C}$, 又は 9°C のように霧の温度が非常に地面より低くなると, 霧をいくら多量にしても, ある値以下には放射量を小さくすることは不可能になることも分る。

(i) の場合と同様に 50cm/s の風で霧が流出するとして霧の状態を一定に保つために補給するに必要な水の量は (1sec 地面 1m² 当り) 次のようになる。

R_n'/R_n	噴出量 (g/sec, 地面1m ² 当り)		
0.8	0.5g	0.6	0.8
0.5	1.8	2.8	15以上
0.2	10.0以上	—	—
	$4T=3^\circ\text{C}$	$4T=6^\circ\text{C}$	$4T=9^\circ\text{C}$

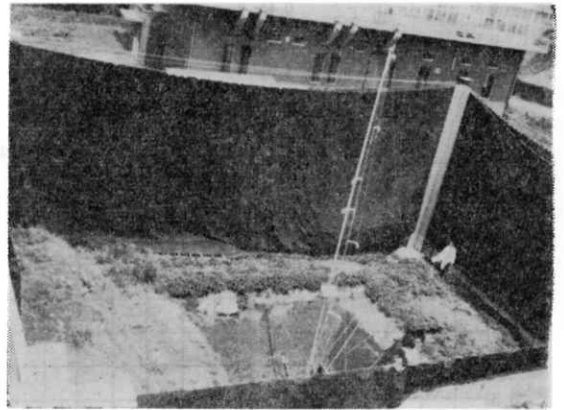
4.4.2 遮蔽垣と測器

面積約 700m² の平たんな空地で4辺のうち2面は既設の6m高のコンクリート壁を利用し残りの2面をキャンパスシートで作ったカーテンで仕切ることとした。研究の目的から人工霧の厚さを種々変えて放射量の変化をはかる必要があるのでさし当り10m高さを確保することとし内3mは地下に底幅縦横3m地表面での上幅4m四方の穴をほり, 残りの7mについては高さ7mの開閉式カーテンと前記よう壁 (不足分についてはカーテンを補助的に使用) によることとした。この遮蔽垣内の穴の底に純放射計を置くことにより穴の底から10mまでの高さに種々な状況で滞留する人工霧の影響を検知できる。な

お壁面に当たるカーテンからの放射の影響を防ぐためには少くともカーテンとよう壁との間に15m程度の距離が必要であり, そのため東西方向のカーテンは17m, 南北方向のカーテンは15mの長さとしてある。また穴の中に湧出する地下水を処理するため穴の隅にピットを設けピット内の水位によって自動的に電源が接続切断される排水ポンプを設備している。写真—4は遮蔽垣の全景を示す。霧の効果測定に関して用意した測定器具は次の通りである。

(a) 放射計

この実験でもっとも必要な長波放射量の測定には遮蔽垣の中心部, 地面上1mの高さに感度のよい純放射計 (東亜技術センター製) を設置し, 放射計の周囲からは上向の風を送って霧による計器の濡れを防いで測定が行われた。測定記録は自記記録計 (日立 QPD-33) に書かせた。これと比較測定のために遮蔽垣の外の裸地上で



写真—4 遮蔽垣
Closed shelter for fog tests.

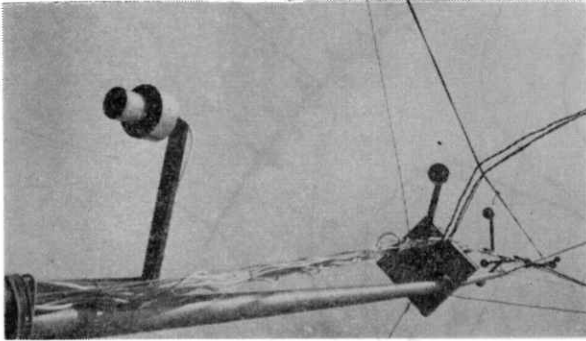
もベックマン型純放射計を設置して, 電子管式電位差計で放射量の自記記録を行った。

(b) 温度計

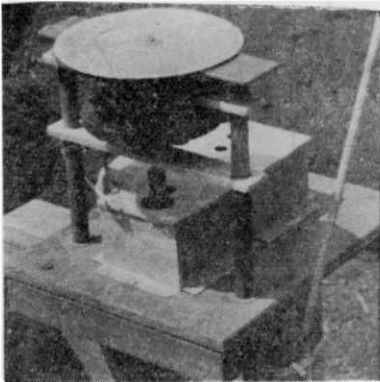
人工霧実験前および実験中の垂直気温分布を知るために熱電対温度計を使用し, あらかじめ理論式から計算された垂直気温分布に従い, 遮蔽垣内のセンターポールに9点, 垣外の裸地上1.5mの高さに1点を配置した。霧の濡れによる誤差を少なくするために各点ともにアルミ板のシェルターを取付け, さらに熱電対の受感部の大きさを線径 0.2mm にして誤差を少なくした。この10点の熱電対は電子管式電位差計で記録させるようにした。

(c) 湿度計

気温測定と同じセンターポールと遮蔽垣外にそれぞれ1点の湿度計(YED ER-102)を配置し、温度計と同様霧の濡れを防ぐ傘が取り付けられた。



写真—5 遮蔽垣内の温度計・湿度計の配置
Instrumentation in the fog test shelter.



写真—6 ウォーターブルーフィルム法
による霧滴採取装置

Fog collector by the water-blue
film method.

(d) 霧粒濃度測定装置

ウォーターブルーフィルム法

バネ駆動による回転円板に一辺 1.5cm の四角形の霧粒採取窓を作り、10秒間に採取窓から落ちる霧粒をウォーターブルーフィルム法でとらえ、顕微鏡下で霧粒径と濃度を計算で求めた。この装置はセンターポールを取付け、高度の異なる数点で測定が行われた。(写真—6)

(e) 霧水量測定管

この測定器は吸収管を使用し毎分 5l 定量の空気吸入を4分間行ないその中に含まれる霧噴をグラスファイバーと P₂O₅ でとらえ、秤量による濃度測定を行った。

4.4.3 実験結果

実験設備の完成に予期しない障害が二、三生じたのと現地防冷実験の日程との関連、しかもその中で実験に都合のよい気象条件の日が非常に少なかったため、2回程度の実験しか行なえなかった。第1回は3月11日の夜半から12日の未明にかけて行なった。この時は比較的気象条件にも恵まれてはいたが、霧発生に用いたスチームクリーナーが試作品で小型であったため遮蔽垣内に十分に人工霧を充満することができず、あまり大きな成果を得ることはできなかった。しかし放射計の直上に霧を噴射させた場合は明らかに放射量の減少がみられ(10~40%程度)遮蔽垣内に配置された温度計の記録はせいぜい1度程度の差しか認められなかったが噴射された霧の中に入った湿度計の記録は、外部の湿度が73%位に対し90~100%程度を示している。

第2回は3月15日の夜半に行なった。この時はまず所要の厚さの霧を遮蔽垣内のひろがり(15m×17m)にわたって作ることを目的とした。しかし、カーテンがかなりゆれる程度の風が時々あり、また第1回の実験の時と同様遮蔽垣内の容積に比し霧発生装置の大きさが必ずしも大きくない等の理由のため目的を果すことはできなかった。なおこの回には参考として相当強力な重油煙霧(oil fog)発生機も使用したがその機械ですら遮蔽垣内に煙を充満することができない程の気象条件となり好転が望めなかったので未明の実験は中止した。

4.5 人工霧現地実験

4.5.1 実験地と気象観測

現地実験地としては、周囲の閉じた深い窪地が望まれ各地を調査した結果、伊東市八幡野町の小盆地が選ばれた。

現地は、図—7に示されるように、南北に走る約200m高の山脈と海岸との間に広がる熔岩台地の中に残された小窪地である。窪地の底は、細長い三角形をなして畑地約50aがある畑地の西側は150m高の山脈が急傾斜で迫っており、南側もやや急な丘につづき、北と東は緩い傾斜で区切られている。東側は、元来は谷となって海へ流れていたのであるが、鉄道線路の構築で、完全に閉ざされたものである。

このように四周がこまれた理想的盆地であったが、海岸線から数百mという位置にあったために、海陸の大きい温度差にもとづくと思われる攪乱のため静穏が期待される気圧配置下でも窪地のなかでかなりの風が吹込むことが多かった。このため人工霧の長時間滞留の期待は著

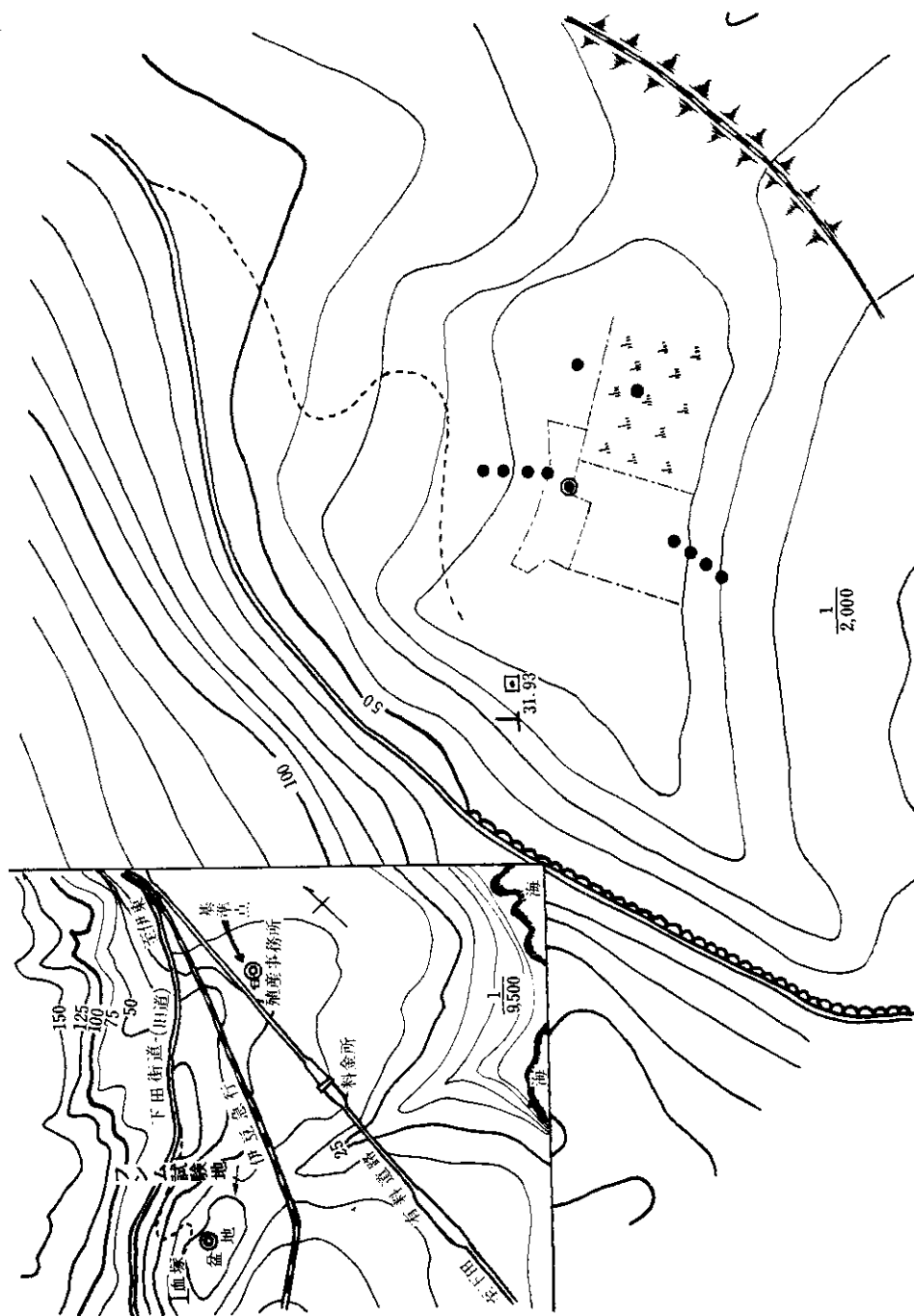
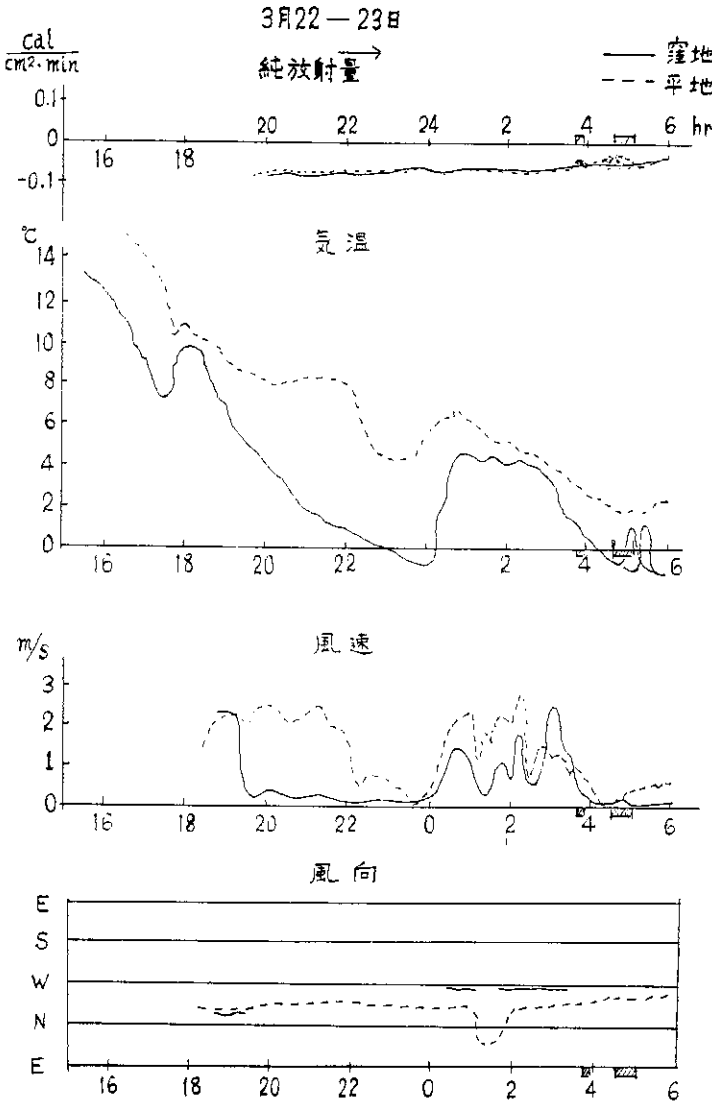


図-7 人工霧現地実験地
Site of artificial fog experiment.



図—8 窪地（噴霧試験地）と平地（基準点）の気象比較
Comparison of weather conditions in the basin (fog test site) and the flat land (base point).
しく妨がられた。

この窪地から約400m離れた塔岩台地上の1地点で基準的気象観測を行なった。これを基準点と呼ぶ。

基準点では、風向、風速（高さ2m）、純放射、気温、湿度の5要素の連続測定と気温の最高最低観測を行った。

窪地内では、中央点で基準点と同一測定を行ったほか24点の観測温度計を5点に配置して、気温の水平鉛直分布を求めた。そのほか、Beckman式の自記風向風速計を3台窪地内に適宜配置して、夜間の気流を調べた。中央の15m高さのポールには1m間隔で豆電球を取付け、

霧の高さと濃度の判定に使用した。

4.5.2 実験地の気象特性

人工霧による昇温効果の判定は、前もって実験地の気象観測を行ない、各気象要素の特性を検討のうえ、人工霧の効果を調査する必要がある。このような予備観測は1月15日から始め実験前日の3月20日まで気温、湿度、風向風速、純放射の各気象要素について測定された。観測点は実験地である盆地を中心に比較観測点として盆地周囲の台地に1地点、海岸に1地点の3地点についてルーチンならびに5日間の終夜観測がなされた。

(1) 盆地内と台地の比較観測結果

気温の測定結果は観測期間中最低気温は盆地内が最も低温であった（表—3参照）、1月中旬から2月上旬にかけて $-2\sim-3^{\circ}\text{C}$ を示す日が盆地内で多い。最高気温では1月中旬から2月中旬にわたり、盆地内が台地よりむしろ $2\sim3^{\circ}\text{C}$ 高温を示すが、2月中旬以降両者の差は減少した。盆地と台地の比較観測でとくに差を示したのは夜間の気温変化であ

表—3 冬季晴天日における3地点の最高最低気温月平均

Monthly means of maximum and minimum air temperatures at 3 points on clear winter days.

		1月*	2月	3月
盆地	Max	14.2	11.7	15.7
	Min	-2.2	-1.5	-0.5
台地	Max	12.7	11.1	12.4
	Min	4.3	0.3	3.2
海岸	Max	—	13.3	14.4
	Min	—	2.7	4.5

* 1月15～31日の平均値

った。図—8は3月22～23日の夜間の各気象要素の変化であるが、とくに盆地の気温では18時と9時付近に急上昇の変化がみられた。図でも示された台地と盆地内での純放射量は殆んど同じ $0.07\sim0.08\text{cal}/\text{cm}^2\text{min}$ を示しているにもかかわらず、盆地内で昇温変化がみられ、気温降下の緩和がみられた。同時刻台地にもわずかに気温変動がみられたが、盆地程著しくない。このような変動は予備観測日にも多くみられ、一夜に数回繰返れている。この気温変動は図に示された風向、風速に関連があると

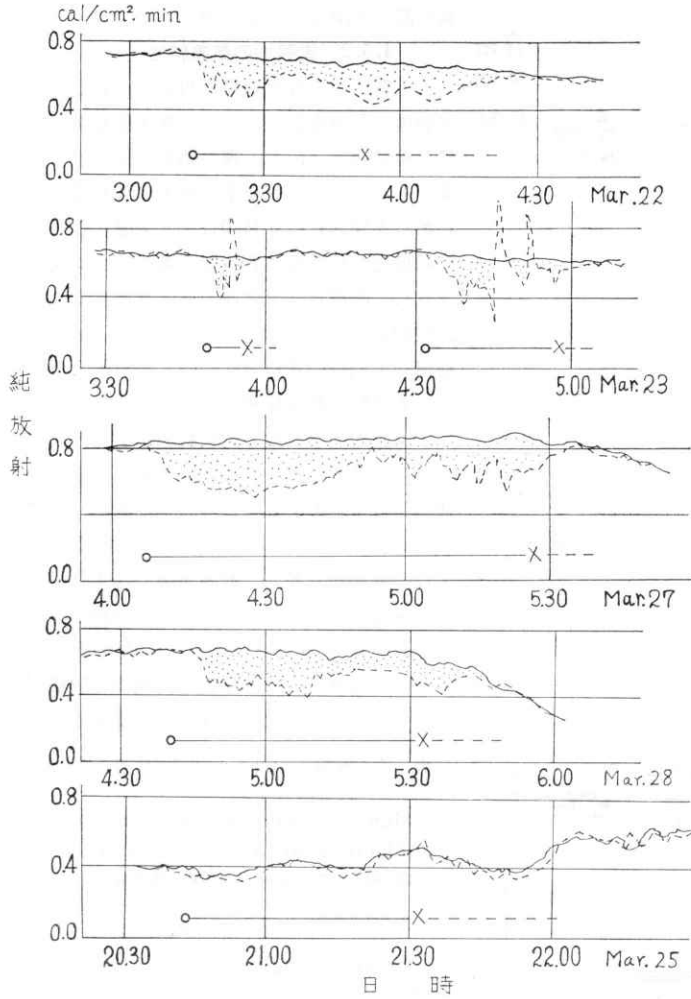


図-9 人工霧による純放射の低下 (実線は基準点の純放射) 上4例、最下段は重油煙霧の例
Lowering of net outgoing radiation from the ground surface of the basin, due to an artificial fog, shown by full line indicating net radiation at the base point. The lowest curve shows a case of oil smoke fog.

考えられ、盆地内では 2~3m/s の風速によって、冷え込んだ盆地の安定な気層が乱され、一時昇温するが、風速が 1m/s以下となって再び降温すると考えられる。夜間台地と盆地で風速比は平均して 1:0.6 で盆地が低風速であったにもかかわらず、風による気温の上昇は大きい。したがって台地、盆地に同時に数時間の風があると盆地の気温は台地の気温に次第に近づくことがわかる。このように海岸に近いところにある台地や盆地では、静穏な快晴日であっても夜間断続的に低風速の風があり、このために気温に変動を示し、とくに盆地内ではこの変

動が著しいために人工霧による昇温効果の判定にはかなり困難な条件となることがわかった。

(2) 盆地内の気象特性

図-8 にふれたように夜間盆地内の気温は周囲斜面および盆地内植被層の放射冷却によって次第に降温し、冷気は盆地にたまって安定した気層を生じた。盆地の中でも北面斜面は気温の日較差が少ないが、快晴時の夜間では北斜面の麓一带に盆地内の最低気温が現れ早朝 5時付近で -5°C 以下になることも観測された。

人工霧実験では 1m/s以下の微風の風向、風速観測は重要であったが、盆地上空 5mと 2mの高さで風向が逆に現われるようかなり複雑な現象があった。しかし西風の強い風が上空を卓越する場合には、西部の小さな谷から盆地内に流れる風も強く、風向も上空と顕著な差はなかった。



写真-7 窪地を埋めた人工霧
Artificial fog filling the basin.

4.5.3 人工霧の効果

盆地気象の特性がおうかた調査されたのち、3月21日から噴霧実験が表-4の通りの経過で実施された。

いずれの噴霧口を使った場合も、噴霧量は約 5 l/min である。3種のうちDが滞留性の微細水滴を最も多く出したが、その量は噴霧量の2~3割、すなわち 1~1.5 l/min と推定された。残余のうち大部分は、粗粒で噴霧直後に地面に落下し、約 1割は噴霧時に気化、凝結、再気化の経

過をたどって数十秒以内で消失した。

この表に示されるように、25日の実験 No. 5 の重油噴霧以外はすべて、水に MF-1 を約 0.2% 混じらした

表—4 人工霧実験
Experiment of artificial fog.

実験番号	月	日	時間	気象	使用機械噴霧口	備 考
1	3	21	23.00—	快晴	スチームクリーナー T D	運転給水タンクと機械の落差が少ないためとかく給水不十分となりがち
			24.00			
2	22		3.10—	快晴	D'	噴霧40分でボイラーが空焚となりホース破損実験中止
			4.30			
3	22			快晴	D'	故障箇所を修理し注意しながら運転落差は大きくなる
4	23		3.50—	晴	D'	噴霧口が傷み補強しながら運転したが遂に折れる
			5.30			
5	25		20.30—	晴	モトフォグ	重油煙霧
			22.00			
6	27		4.00—	快晴	D'	噴霧口 D と同様のものを現地で製作して使用
			5.30			
7	27		19.00—	晴曇	D'	
			22.00			
9	28		4.30—		D'	運転休止中にホースの中の水が凍り運転開始に手間どる
			6.00			

噴霧口の T,D,D' については 4・3・2 を参照。

のを噴霧した人工霧の実験である。いずれの実験も夜間の氷点付近で行われたために、水管の凍結その他の小事故に加えて、前述のような擾乱気流の発生で噴霧時間は2時間を越えた例はなかった。

(1) 人工霧による純放射の低下

上記噴霧は、盆地内平坦部の北側道路上から発射された。発射点は、気流の方向に応じて常に風上側に置かれた。噴霧は写真—2に示されたようになんかの速度で発射されるのに加えて、気温よりもやや高温であるので上昇力は十分で、無風のときは地上 20m ぐらいまでは容易に霧層を形成することが認められた。しかし、前述のように、無風の継続した時間が短かったために、窪地が霧で全面的に埋められた例はほとんどなかった。わずかに、実験番号4の後半は静穏でかなりの濃度で窪地の大半の面積が被覆された。写真—7は、日出直前になお残っていた霧の状態である。

この程度の霧の下で、地面から空に向う純放射量がどのように変化したかを図—9に示そう。実験 No. 2では、基準地の純放射（この値は、前項で述べたように、霧がない場合の窪地の純放射にほぼ等しい）に比べて20~30%減少している。No. 4は上述の無風の例であるが放射の記録は、受感部が粗大な水滴を受けて濡れたために、正常な値を示していない。しかし、濡れる直前はほ

ぼ半減しているのので、この半減値がその後もしばらく続いたものと推定される。

No. 6, No. 7 はいずれもやや強い気流を受けて、霧の滞留が少なかったために、純放射の低下は30%前後に止まっている。

以上の放射減少時の霧量は測定されていないが、放射計上の霧の厚さは No. 4 が最も厚く約15mその他の3例は5~10mであった。霧の濃度は、濃い自然霧のときに近かったことから 2~3g/m³ 前後と推定される。

(2) 人工霧による気温の変化

前述のように純放射の減少は、当然気温低下の緩和を結果するはずである。人工霧被覆中に、それらしい傾向も時に見受けられたが、前述のような本来の気温変動と区別することは困難であった。（図—8に噴霧と同時に気温の急昇が認められた例が示されている）ほとんど絶えず山側の下降気流を受けているこの窪地では、そこだけ霧で被覆しても明確な気温変化は起らないのはむしろ当然のことであろう。

(3) 重油煙霧の効果

図—9の最下段は、ドイツ製 Nebelgerät (Motofog MN 300) を使って、重油を煙霧化して窪地に充満させたときの記録である。21.05~21.30の時間は濃煙が立ちこめて15m離れた100Wの電球が全く認められないほどであったが、純放射の低下はほとんど認め難い。あっても数%程度に過ぎなかった。図に見られるように基準地の純放射記録とほとんど完全に重ねられる記録を描いている。重油等の煙霧の赤外線吸収力の低いことは室内実験では既に知られていたのであるが、約20mの濃厚な煙層も放射阻止の力が極めて微弱なことを屋外で確認した結果となった。

5. 残された問題点

本研究の成果を要約するとき、人工霧による防冷法の可能性は十分に認められるということが出来る。極めて貧弱な噴霧量ではあったが、10m前後の厚さの霧層を地上に滞留させた結果、その下の地面放射は著しく抑制された。この事実は、ほぼ予期されたとおりであって、今後、いかにこの事実を量的に時間的に拡大するか問題にかかっている。

今回の野外実験では、約 2HP の動力をもって、毎分 5ℓ の水を噴出させ、そのうち 1.5ℓ が滞留性の細滴であった。この霧量では、50 a の谷を埋めるのにも時間を要し、また風があるときは濃密な霧層の形成が望めなくなる。したがって、第一の問題点は毎分 30~40ℓ の水を霧化する装置の開発であろう。この値は、10 a の地面

上に 30~40 μ の霧量を絶えず存在させることを目標としている。すなわち、今仮に 0.5m/s の夜間気流が吹くとき、毎分30mの移動が起るから、拡散の幅を30mとして、1分間に発射される霧は 30m \times 30m \approx 10 a 上に拡がるとするのである。

このような大量噴霧装置を連続運転して、広範囲に霧層を形成させることが、その下で温度効果を確保する条件であることを今回の試験結果は示している。狭い局地を覆うときは、放射は抑制出来ても、その外部からの冷気移流の影響で、昇温効果は少いのである。移流冷気の影響が微弱となる広さ、たとえば一つの盆地全体あるいは谷の上下全般を被覆するといった大きい規模が、この防冷法には必要条件に思われる。

第二の問題点は霧滴形成維持のための蒸発防止剤の検討である。本実験の結果、既開発の蒸発防止剤（MF-1、その他）で一応人工霧滴は形成されること、特に零度付近でもよく水滴を被覆してその寿命を延長していることを確認した。しかしながら、現状の乳化程度では、水に加える剤量を理論値よりかなり大きくしない限り、単分子膜で被覆されない水滴がかなり噴出して、それらは早急に蒸発消失しているようである。理論値である1/1000前後にするためには、本蒸発防止剤の乳化を一段と向上して、最大の懸濁粒子が 1 μ 位の径とすることが必要である。このような微粒乳化を剤の限度10%以上において成功させることは、乳化剤の使用が限定される時は決して容易ではない。残された一つの大きな改善課題である。

乳化法の他に、完全被覆滴の寿命の検討が一つの問題点として残されている。MF-1を用いると、その単分子膜被覆滴は、室内では数時間ないし十数時間の寿命を持つことは確かである。この寿命が果して自然の大気中でも維持されているかの確認が果されていない。今回の実験

では、窪地の霧は長くて1時間程度で消失したが、その理由には気流による窪地外への搬出と、日射による上昇拡散が加わっているの、真の寿命時間が自然気流中で何程であるかを知ることが出来ず、問題は今後に残されてしまった。

その他、夏期の夜間防冷を目的とする場合の高温用の蒸発防止剤開発も今後の研究課題の一つである。現在のMF-1は 10 $^{\circ}$ C 以下特に 5 $^{\circ}$ C 以下の低温域では優れた機能を示すが、夏期の低温 10~18 $^{\circ}$ C の範囲ではそれほど効果的でない。この温度域において蒸発の抑制率が99%台のものが創り出されることが望まれる。

なお、付随的な問題として、霧の密度と粒形を簡単に測定する携帯用装置の開発も本研究の進展のためには急がねばならない。

6. 謝 辞

本研究は、その経費の大部分を科学技術庁 国立防災科学技術センターの総合研究費に負うもので、発想後日が浅く、稚苗にも例えられる題目を育てられた井上新一氏に深い敬意を表したい。さかのぼっては、単分子被覆滴についての研究の進展を助けられた農技研前所長河田党博士、噴霧装置の改良に設備と技術の提供を惜しまれなかった共立農機KKおよびスチームクリーナー方式を提供された晶和工業KK多々良省三博士、現地試験に当たっての静岡県農試、田方改良普及所伊東市農産課、地元八幡野町当局、試験地提供と気象観測に協力と援助を惜しまれなかった殖産住宅KK等の各位に心からの謝意を表するものである。

本研究の遂行は、上記の外に気象科の同僚その他多くの方の協力と後援に負うところ多く、また米高信雄、向井武、横田公夫、増田剛志、池田実、荒木悦子氏等の数回の徹夜作業の結果として本成果が生れていることを記して感謝する。