

資 料

細線式霧水捕集装置の試作

瀬戸 信也 大原真由美

Experiment with an active string fogwater collector

SINYA SETO and MAYUMI OOHARA

(Received Sep. 30, 1996)

はじめに

霧の発生機構や物理的性質についてはこれまでに多く研究され多くの報告がある(たとえば[1], [2]など)が, 最近では酸性霧が酸性雨と同様に大気環境の汚染現象として憂慮されている。霧は発生して消滅するまでの大気中での滞留時間が雨に比べて長いためガスやエアロゾルを多く取り込み, 霧水中のイオン成分濃度が高くなりpHも低くなることがわが国の多くの地域で報告されている。たとえば, 赤城山[3], 乗鞍岳[4], 三次盆地[5], 三郡山[6]などでpH 3-5の酸性霧が観測されている。

酸性霧の実態を把握しその要因を解明するためには, 霧水の化学組成について検討しなければならないが, 霧水の主要イオン成分濃度の分析には少なくとも50ml程度の試料を捕集する必要がある。多量の霧水を短時間で捕集するには動力を使用するアクティブな型が, 自然の風を利用するパッシブな型よりも有利である。アクティブな型の霧水捕集装置としてはこれまでにいくつかの方式が提案され, フィールドでの比較実験も行われている[7]。捕集できる霧の粒径範囲は方式毎に異なり, 50%捕集径と比較すると, たとえば細線式捕集法が約 $5\mu\text{m}$, 回転アーム式捕集法が約 $20\mu\text{m}$ と報告されている[8]。本報で試作した霧水捕集装置は内陸部で発生する放射霧の捕集を目的にしており, 放射霧の平均粒径は海霧のそれよりも小さい[1]ので, 小粒径の霧粒が効率よく捕集できる細線式捕集法を採用している。

最初に, 装置の構造について述べ, 捕集できる霧粒の粒径範囲と霧水の捕集効率について流体力学的に検討する。次に, この装置をフィールドに応用した結果について述べ, 最後をまとめとする。

装置の設計

霧水捕集装置の概略図を図1に示す。面積が 0.0914m^2 , 内側の幅が267mmのステンレス製の外枠に, ポリカーボネイト製の直径0.50mmの細線を250回巻き付けてネットにしたものを捕集体とし, ダクトの前方に設置した。ダクトの後方に風速を強めるため2基のファンを搭載して空気を吸引し, 細線に慣性衝突した霧粒を落下させて装置の下部に置いた捕集瓶を集める。捕集ネットは水平面から 55° 傾けている。その理由は下方への空気力学的な引力が働くので捕捉された霧粒が短時間で落下し, さらに霧粒の再飛散防止の効果もあるからである[9]。ダクトの上部には風速計のプロープを挿入するための測定孔を設けた。この測定孔は霧水のサンプリング時には密閉できる構造にしている。ネット上の風速は 7m/s 以下の範囲で任意の値に設定でき

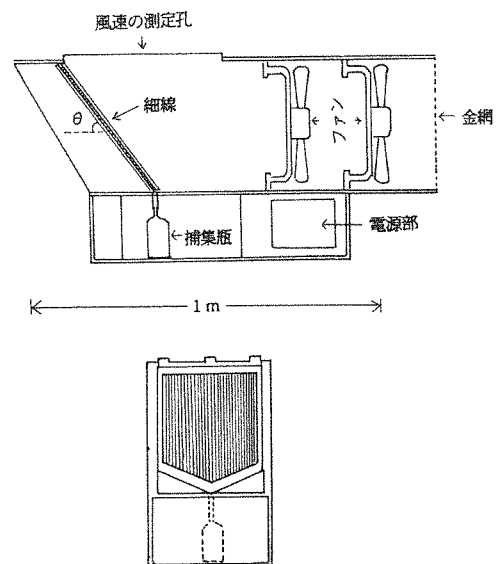


図1 細線式霧水捕集装置 (上図: 側面図, 下図: 正面図)

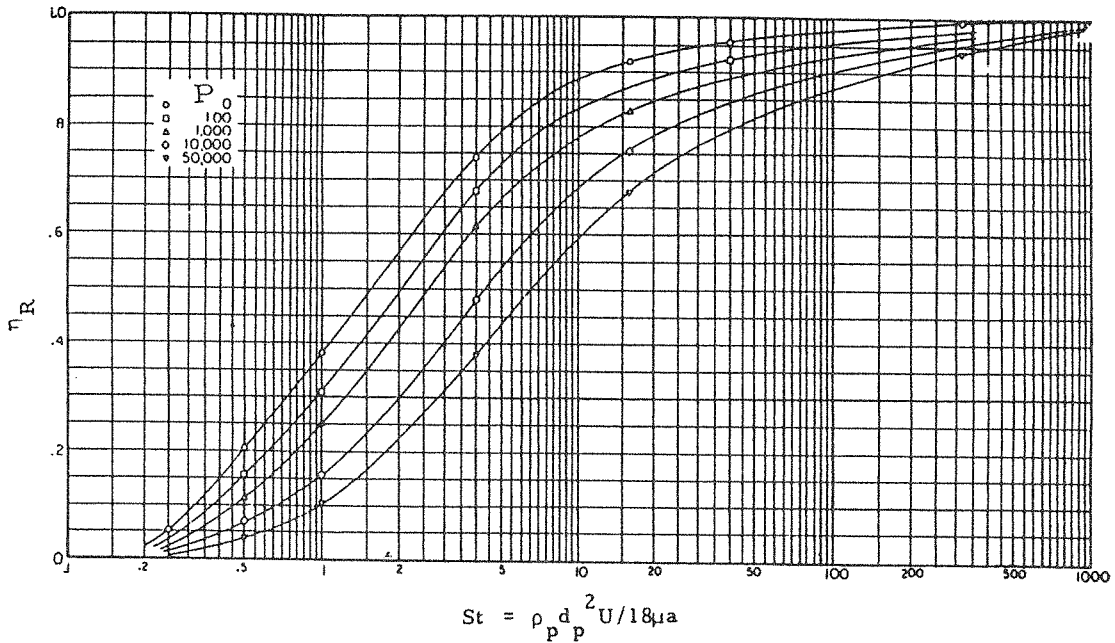


図2 非粘性流中での円筒に対する点粒子の衝突効率
(文献[10]から引用). 横軸はストークス数, 縦軸は衝突効率を表す.

る. ネットは洗浄のため取り外しできるようにダクト内のスリットにはめ込んでいる. 霧水の捕集量を増やすため, 最大5個のネットまで装着できるようにした.

ここではネットを1個装着し, ダクト内の風速を5 m/sに設定したときの, 捕集できる霧粒の粒径範囲と霧水の捕集量について検討する. 外枠の面積に対する細線全体の面積比率Rは

$$R = 0.50 \text{ (mm)} \times 250 / 267 \text{ (mm)} = 0.47$$

である. 両側の2本の細線をあわせると吸引空気量に対する有効な面積比率 R_A は

$$R_A = R + (1-R) \times R = 0.72 \quad (1)$$

となる. いま, 単位体積の空気に含まれる霧水量を 0.1 g/m^3 , 霧粒密度を 1 g/ml とし, すべての霧粒を捕集できると仮定すれば, 1時間当りの霧水捕集量 W_0 は

$$W_0 = 5 \text{ (m/s)} \times 0.0914 \text{ (m}^2) \times 3600 \text{ (s)} \times 0.1 \text{ (g/m}^3) \times 0.72 / 1 \text{ (g/ml)} = 118 \text{ (ml)} \quad (2)$$

と見積られる. ただし, 後で述べるように捕捉できる霧粒の大きさには下限があるので, 実際の霧水捕集量はこの値よりも少なくなる.

次に, 霧粒の衝突効率について検討する. 大きい円筒状の細線に小さい球状の霧粒が衝突する場合を考える. 霧粒の慣性力は粒径の増大に伴い大きくなるので, 粒径がある値を超えると細線に衝突する. この衝突過程は慣性力と粘性力がつりあうストークス流の領域では, 空気の流れと捕集面が直角のときのストークス数

Stは

$$St = \frac{\rho_p D_p^2 U}{18 \mu a}$$

で与えられる[10]. ここで, ρ_p は霧粒密度, D_p は霧粒の粒径, U はダクト内の流速, μ は空気の粘性係数, a は細線の半径を, それぞれ表す. 図1に示すように空気の流れと捕集面との角度を θ とすると, Stは

$$St = \frac{\rho_p D_p^2 U}{18 \mu a} \times \sin(\theta) \quad (3)$$

となる[9]. レーノルズ数が低い範囲では気体中で加速された霧粒に働く抗力はストークス則で近似できるが, 捕集面周辺の流速が大きくなるに伴いこの近似が成り立たなくなる. また, 霧粒が捕集面に近づいたときには平均自由行程の効果やvan der Waals力などの影響により霧粒の動きは複雑になる[9]. このような場合には, 霧粒の大きさに依存しない無次元数Pと, 霧粒のレーノルズ数 Re_p を用いて衝突効率が決定できる[10]. ここで, Pと Re_p は

$$P = \frac{Re_p^2}{St}, \quad Re_p = \frac{D_p U}{\nu} \quad (4)$$

と定義される. $\nu (= \mu / \rho, \rho$ は空気の密度)は空気の動粘性係数を表す. (3)式と(4)式から

$$P = \frac{18 \rho^2 U a}{\mu \rho_p \sin(\theta)} \quad (5)$$

が得られる.

非粘性流中での円筒状の細線に対する粒子の衝突効率 η_R は図2に示されるようにPをパラメータとしてStの関数として表される[10]。ここで、1気圧、10℃の空気では $\rho = 1.25 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$, $\mu = 1.76 \times 10^{-4} \text{ g/(cm}\cdot\text{s)}$ であり、 $\rho_p = 1 \text{ g/ml}$, $a = 0.025 \text{ cm}$, $U = 500 \text{ cm/s}$ および $\theta = 55^\circ$ を (5) 式に代入すると、 $P = 2.4$ と求まる。この値を用いて図2から粒径毎の η_R を計算した結果を表1に示す。 $P = 2.4$ のもとで $\eta_R = 0.5$ のときのSt値は図2から約1.65となるので、この値を (3) 式に代入し整理すると、細線に対する霧粒の50%捕集径 D_{p50} は

$$D_{p50} = \sqrt{\frac{18 \mu a \text{St}}{\rho_p U \sin(\theta)}} = 5.6 (\mu\text{m}) \quad (6)$$

と求まる。また、衝突の下限値に相当する臨界ストークス数は捕集体の形状が円筒のときは1/8となるので[10]、衝突し得る霧粒子の最小径は (3) 式のStにこの値を代入すると $1.6 \mu\text{m}$ と算出される。

表1 霧粒の粒径別衝突効率

$D_p (\mu\text{m})$	St	$\eta_R (\%)$
1	0.052	—
2	0.21	2.5
5	1.3	43
10	5.2	79
20	21	93
50	130	98
100	520	100

D_p : 粒径, St: ストークス数, η_R : 衝突効率

捕捉された霧粒子の再飛散がないとき、細線1本当りの全粒径に対する平均捕集効率 $E[\eta_R]$ は

$$E[\eta_R] = \int_0^\infty \eta_R(d_p) f(d_p) d(d_p)$$

と与えられる。ここで、 $\eta_R(d_p)$ は粒径 d_p の霧粒に対する衝突効率、 $f(d_p)$ は粒径 d_p の霧粒に対する確率密度関数を表す。したがって、装置全体の霧水捕集効率

η_a は $E[\eta_R]$ に (1) 式の R_A を乗じて

$$\eta_a = R_A \times E[\eta_R] = R_A \times \int_0^\infty \eta_R(d_p) f(d_p) d(d_p) \quad (7)$$

と計算される。いま簡単のために、霧粒が $20 \mu\text{m}$ の粒子のみから構成される場合を考えると、表1から $\eta_R = 0.93$ となるので、この値を (7) 式に代入すると

$$\eta_a = 0.72 \times 0.93 = 0.67$$

と求まる。1時間当りの霧水捕集量 W は η_a に (2) 式の W_0 を乗じて

$$W = W_0 \times \eta_a = 118 (\text{ml}) \times 0.67 = 79 (\text{ml})$$

と見積もられる。この値は霧水に含まれる主要イオン成分濃度の分析には十分な量である。一般には、 η_R はパラメータPにも依存するので (7) 式の積分の解を得ることは難しい。

上で述べた霧水捕集効率の誤差要因について検討する。誤差要因としては、①本装置の設置場所付近の風向・風速による影響、②細線に高速で衝突した霧粒の粉碎、③捕捉された霧粒の蒸発損失、④捕捉された霧粒の成長に伴う捕集面の増大、などが考えられる。①の誤差については[9]で詳しく考察されている。風向がファンの吸引方向と一致しないときには霧粒の流跡線が曲がるため生じる誤差と、本装置の付近の風速がダクト内の風速を変化させるため生じる誤差とがある。通常、中国山地の内陸部で放射霧が出現するときには接地逆転層が形成され、その下層では風が弱まり 1 m/s 未満の弱風となることが多い[11]ので、衝突効率に対するこれらの誤差の影響は比較的小さいものと推測される。②の誤差についても[9]で検討されており、 $d_p = 100 \mu\text{m}$ の粒子に対して計算されたウェーバー数(慣性力と界面張力の比を表す無次元数)が粉碎の臨界値よりも小さいので粉碎は起きないと推論されている。三次盆地の放射霧は $D_p < 50 \mu\text{m}$ の場合が多く[12]、かつ本装置の霧粒を吸引するときの風速 ($U = 5 \text{ m/s}$) は[9]の風速 ($U = 9 \text{ m/s}$) よりも弱いので、ウェーバー数は[9]のものよりも小さくなる。したがって、霧粒の

表2 霧水捕集量と霧粒の粒径分布

月日	霧水量 (ml)	$D_p (\mu\text{m})$					
		<10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-100
12/08	690	554	1405	1344	1294	1198	481
		(8.8)	(22.4)	(21.4)	(20.6)	(19.1)	(7.7)
12/17-18	140	37	158	214	176	110	30
		(5.2)	(22.1)	(29.9)	(24.6)	(15.4)	(4.2)

D_p は霧粒の粒径、上段の数値は霧粒の個数、下段のカッコ内の数値は百分率を、それぞれ表す。

粉碎は起こらないと考えてよい。③の誤差について考えると放射霧の発生期と消滅期を除き空気はほとんど飽和しているので蒸発損失による影響は小さい。④の誤差は捕集効率を増大させると予想されるが、詳細に検討することは難しい。

フィールドでの応用例

中国山地の三次盆地に発生する霧についてはこれまでにその空間構造、変動特性および発生機構について詳しく調べられている[11]。そこで三次盆地において本装置による霧水の捕集を試みた。県立林業試験場の構内に本装置を地上約1mの高さに設置し、霧水を1夜毎に捕集するとともに、霧粒子自動撮影装置[13]を用いて霧粒の粒径についても観測した。霧が発生していないときに本装置を運転すると細線に吸着されたエアロゾルにより霧水が汚染されるので、本装置を霧センサーに接続し、霧発生時のみファンが動作するようにした。

結果の一例を表2に示す。霧粒子自動撮影装置の記録によると、12月8日には早朝の5時33分から10時4分にかけて霧が発生した。この期間の平均風速は0.4 m/sの微風で平均相対湿度は99.1%，平均気温は1.4℃であった。霧水は690 ml捕集され、1時間当りの霧水捕集量は約150 mlとなった。10-20 μmの霧粒が最も多く出現しており、10-50 μmの霧粒が全体の83%を占めていた。また、12月17日の22時11分から18日の10時40分にかけても霧が発生した。この期間の風向は南寄りまたはcalmで平均風速は0.6 m/s、平均相対湿度は96.8%，平均気温は-3.4℃であった。霧水は140 ml捕集され、1時間当りの霧水捕集量は約11 mlとなった。20-30 μmの霧粒が最も多く出現しており、10-50 μmの霧粒が全体の91%を占めていた。このように、両ケースともに霧粒自動撮影装置により観測された霧粒粒径のほとんどは10-50 μmの範囲にあり、粒径分布にはケース間の顕著な差異がみられない。

以上の結果から、本装置は霧水の化学組成を調べるための捕集装置として実用的であることが確認できた。なお、霧水の化学組成については他の観測結果とあわせて考察し、別の稿で論じたい。

まとめ

細線式霧水捕集装置を試作し、流体力学的な考察に基づき霧粒の衝突効率を算出した。衝突効率はダクト内の風速を5 m/s、霧粒密度を1 g/mlと仮定すると、粒径が5 μmで43%，10 μmで79%，50 μmで98%と算出された。なお、1.6 μm以下の霧粒は捕集できない。

さらに、衝突効率から霧水の捕集量を見積もった。たとえば、単位体積の空気に含まれる霧水量を0.1 g/m³とすると、粒径が20 μmの霧粒のみから構成される場合には、1時間当りの霧水捕集量は79 mlと求められた。さらに、捕集効率の誤差要因についても検討した。

三次盆地において本装置による放射霧の捕集を試みた。霧発生時に本装置を作動させた結果、霧水は2例捕集でき、ともに主要イオン成分濃度の分析には十分な量であった。このことから、本装置は霧水の化学組成を調べるための捕集装置として実用的であることが確認できた。なお、2節で検討した粒径毎の衝突効率と霧水捕集量についての検証が今後の課題として残された。

謝 辞

本研究の動機は前保健環境センター所長の木原敏博氏に与えていただきました。県立林業試験場の田辺紘毅さのこ林産部長と福原世津子研究員（現：三次農林事務所）はフィールド観測の場所の提供とサンプリングの協力をしてくださいました。本装置の製作にあたっては(株)堀場製作所の永井 博氏および(株)旭製作所の平野純夫氏と杉尾英二氏にお世話になりました。ここに記して感謝の意を表します。本研究の経費の一部として、平成8年度文部省科学研究費補助金基盤研究(B)(1) 課題番号08308020から援助を受けました。

文 献

- [1] 黒岩大助, 大喜多敏一: 最近の霧の研究とその展望, 気象研究ノート, **10**, 247-294 (1959).
- [2] 大喜多敏一: 霧の測定法, 気象研究ノート, **13**, 28-44 (1962).
- [3] 池田有光, 安田龍介, 東野晴行, 渡辺竜馬, 畠山史郎, 村野健太郎: 赤城山で発生する酸性霧と大気汚染の解析, 大気汚染学会誌, **30**, 113-125 (1995).
- [4] 鶴田治雄, 太田正雄, 渡辺善徳, 矢本てるみ, 前田裕行, 平野耕一郎, 石坂 隆, 銭公望: 乗鞍岳(高度2,770 m)における夏期の霧水, 雲水および雨水中のイオンと過酸化水素の測定(第1報), 第31回大気汚染学会講演要旨集, 408 (1990).
- [5] 大原真由美, 村野健太郎, 瀬戸信也, 福山 力, 溝口次夫: 中国山地に発生する放射霧の化学組成, 第29回大気汚染学会講演要旨集, 326 (1988).
- [6] 福岡県: 福岡県における酸性雨の現状及びその森林植生影響 (1995) 35-37.
- [7] Hering, S. V., Blumenthal, D. L., Brewer, R. L., Gertler,

- A., Hoffmann, M., Kadlec, J. A. and Pettus, K. : Field intercomparison of five types of fogwater collectors, *Environ. Sci. Technol.* **21**, 654-663 (1987).
- [8] Johnson, C. A., Sigg, L. and Zobrist, J. : Case studies on the chemical composition of fogwater : the influence of local gaseous emissions, *Atmos. Environ.*, **21**, 2365-2374 (1987).
- [9] Jacob, D. J., Waldman, J. M., Haghi, M., Hoffmann, M. R. and Flagan, R. C. : Instrument to collect fogwater for chemical analysis, *Rev. Sci. Instrum.*, **56**, 1291-1293 (1985).
- [10] Friedlander, S. K. : *Smoke, dust and haze*, Wiley, New York (1977) 95-109.
- [11] 宮田賢二 : 三次盆地の霧の研究, 溪水社, 広島 (1994) 108-130.
- [12] 大原真由美 : 中国山地沿に位置する地域に発生する放射霧の霧粒粒径分布, 第34回大気汚染学会講演要旨集, 554 (1993).
- [13] 大原真由美 : 霧粒子自動撮影装置の試作, 第33回大気汚染学会講演要旨集, 542 (1992).

