

釧路市及び浜中町霧多布湿原における移流霧の
酸性化メカニズムについての調査結果報告（I）

北海道教育大学 応用理学研究室
三浦 二郎

目次

第一章 緒論	1~2
第二章 道東地域での霧の発生と霧の酸性化機構	3~4
第三章 調査地域概要	5
1. 釧路市	
2. 浜中町霧多布	
第四章 方法	6~10
1. 霧粒採取方法	
(1) 採取地点	
(2) 装置・器具	
2. 霧水分析方法	
3. 霧粒粒径分布測定方法	
4. 霧粒併合成長モデル	
5. その他の測定項目	
第五章 結果	11~12
1. 霧水の水質の地域差	
2. 霧状態の地域差	
第六章 考察	13~14
1. 地域特性による酸性度の変化	
2. 気象要因による酸性度の変化	
第七章 まとめ	15
謝辞	15
参考文献	16
図表一覧	17

第一章 緒論

酸性雨を厳密に定義すると pH5.6 以下の雨となる。これは、現在大気中に存在している約 350ppmv の二酸化炭素と雨水が平衡状態になった場合に、pH 約 5.6 を示すからである。いま、日本で観測される降雨の pH は 5 以下が大半で全国で酸性雨が観測されている。

ここ数年、森林の衰退、湖沼の酸性化と魚の死滅、金属の腐食や建物・彫刻等の崩壊など酸性雨・酸性霧による被害が欧州や北アメリカを中心に大きな問題となっていたが、現在は東アジア諸国の著しい経済発展のためアジア地域が第三の酸性雨被害の中心地になりつつある。この影響を少なからず受けて日本は酸性雨の被害が明らかになってきている。

なかでも、霧は雨に比べ発生が地表付近であり、微小水滴であるため浮遊している時間が長い。よって、大気中物質を降雨に比べ多量に取り込み高濃度に汚染された微小水滴が植物生態系に直接的な影響を与える可能性がある。

多くの植物では pH3.0 以下の人工酸性雨を葉面散布すると葉の表面に壊死斑（ネクロシス）が発生する¹⁾。そしてこの壊死斑の 95% が葉面上の毛や気孔の近辺に局在しており、ガス交換や分泌作用などの生理機能が阻害される。抵抗性の弱い種では pH3.5 程度でも障害が発現する。多くの種類の農作物に対し NO₃-:SO₄²⁻ を 2.5 対 1 の割合で作った模擬酸性霧を 1 日 1 時間日没直後に暴露を行った²⁾。その結果、同様にほとんどの作物は pH3.0 でネクロシスを発生し、pH2.0 に近づくと激しくなり、カリフラワー、ホウレンソウやレタスでは pH2.4~2.6 で商品価値が減少する。これらの室内実験によって酸性霧の植物影響を証明している。

国内での酸性霧の調査は赤城山の滑昇霧の調査（1984~）³⁾があり、低 pH の霧（pH=3 台）が 10 時間続く例が報告されている。また、海霧による酸性霧に関する調査では、苫小牧でのストロブマツの異常落葉に関する調査⁴⁾があるが、この調査によって酸性霧による植物被害が国内でも指摘された。霧の酸性化についての研究は滑昇霧については多く研究されているが、海霧については苫小牧、カナダ大西洋東海岸⁵⁾ くらいで発生地域が限られていることより研究例が少ない。また、海霧は海洋起源の雲粒形成核の主要成分と考えられている DMS の影響を大きく受けると考えられ、海洋起源の硫黄化合物の大気供給を観測する一手段といえる。

本研究室では、1991 年より本校屋上で霧の観測を行ってきた結果、酸性度の高い霧が多く観測され、道東域での霧の酸性化が明らかになってきた⁶⁾。また、1994 年より霧多布で夏期において霧の観測を行ってきたが釧路地域の霧より人為的影響による酸性化原因物質の少ない霧多布の霧のほうが酸性化している事

が多く観測された。

この調査の結果として移流してくる海上で既に酸性化していると考えられ、バックグラウンドレベルの特定及び霧の酸性化プロセスの解明が重要であると考えられた。

よって、本研究では海洋からもたらされる酸性化原因物質を求めバックグラウンドレベルを推定する。また、霧の上陸から消散までを海岸及び内陸で集中的に観測し、1回の霧の発生の中で霧水の水質・粒径の経時変化を調べる。そこから化学的（成分分析）・物理的（粒径とその成長・霧水量から求める付着率）解析より、道東における移流霧の特性理解及び付着効率を算出することを目的としている。

第二章 道東地域での霧の発生と霧の酸性化機構

霧とは無数の微小な水滴が大気中に浮遊していて、1km 以上の距離にある物質の輪郭をぼかしてしまう現象をいい、水滴粒径が1~100 ミクロンにある場合を指す。霧粒と定義されているのは直径が10~100マイクロメートルのもので10マイクロメートルまでは凝結成長、それ以降が併合成長が強い。100マイクロメートルぐらいになると重力落下の影響が大きくなる⁷⁾。

霧の代表的なものとして放射霧や滑昇霧がある。釧路でみられる霧には移流霧と前線霧、層雲・層積雲の降下による霧⁸⁾、陸上での放射霧の四種に大別できる(表.1)。多くは移流霧と思われる。どちらにも言えることは気温の逆転層が出来ることであり、気候の微小な変化に左右されること、湿度・温度の安定と緩やかな風(2~3m/s)が必要である。霧が出来ると安定層が霧の上にできて霧の上部で放射冷却が起こり霧の発生が安定してくる。

霧粒が形成されるには、核となる物質がなくては条件的に難しい。霧粒の核となる粒子は直径が1/100~1マイクロメートルである。このような粒子は陸生のものでは気体からの二次粒子が凝集したものが考えられる。この粒子は今後の凝集効果も重力落下も小さいので長期にわたり大気中に存在できる。海生のものは、第一種膜水滴から出来る海塩粒子(図 1)が対応する。海塩粒子は吸湿性に優れ、電荷を持っている⁹⁾。

大気と霧粒間の物質移動は凝結核化(凝集 微小エアロゾルがブラウン拡散、熱泳動、拡散泳動により既存の水滴に凝結合体)や水滴に対する沈着があり、¹⁰⁾ 以下のようなプロセスを持つ。

- ・慣性衝突 (Inertial impaction)

落下する粒子において粒径サイズと濃度差によって終端落下速度に差が生じてくる。これにより、小粒子が大粒子が衝突し併合する。

- ・乱流等の流れの不等によって生ずる粒子併合

- ・さえぎり効果 (Interception)

- ・熱泳動 (Thermophoresis)

温度勾配のある場所におかれた小粒子は高温より低温の場所に移動する。

- ・拡散泳動(Diffusiophoresis)

- ・粒子のブラウン拡散 (brownian diffusion)

流体内のサブミクロン領域の小さな粒子は、周囲の分子からのランダムな衝突によって、粒子自体もランダムな運動をする。これをブラウン運動といい、この現象によってエアロゾル粒子は水滴に拡散沈着する。

以上のような現象によりエアロゾル粒子もしくはガスの湿性沈着が起こり、降水の酸性化がもたらされる。これらの現象ではエアロゾル粒子、ガス、水滴の濃度と粒径がパラメーターとなり取り込み率を変化させる。

第三章 調査地域概況

北海道東部海域は寒流と暖流が接触しており、この沿岸地域の年間霧日数は100日を越え大西洋北部と共に世界的に海霧の発生頻度が高い地域である。この地域の霧の発生頻度は夏季、特に7月に最大となる。三陸沖に高気圧があると南方の風が吹きやすく海霧が移流しやすい状況になる。

1. 釧路市

北海道道東の太平洋岸に位置する釧路市は背後に日本一大きな釧路湿原をひかえ、人口19万の漁業、工業を中心とした道東の中心都市である。周辺地域は酪農地帯が広がり自然が豊富である。

2. 浜中町霧多布

浜中町霧多布は釧路市から東方に80km離れた太平洋岸の漁村であり人為起源の酸性化原因物質が少なく人為による影響が見られる釧路と対比することで移流霧の酸性化の原因を明確にすることが出来る。また、海岸から湿原が広がり霧の移流に際し障害となるものがなく、移流中における霧の状態変化、粒径分布の推移を観測するのに適している。

第四章 方法

1. 霧粒採取方法

霧粒とガスを分離して霧粒だけを捕集するには、霧粒とガスの慣性の差を利用した慣性衝突法がある。流れに乗った粒子（霧粒：10マイクロメートル）とガス（ $1\sim 5\times 10^{-4}$ マイクロメートル）の混合物では細線などの円柱などの障害物（ ~ 500 マイクロメートル）があったとき、粒子は直進し障害物に衝突しガスは流れに乗って通り抜けるため障害物には衝突しない¹¹⁾。この慣性衝突法には、ファンを用いて空気を強制吸引するアクティブ型と自然風を利用するパッシブ型があるが、本研究では霧粒採取効率の高いアクティブ型を用いた（図.1）。

(1) 採取地点

霧粒採取は図.2、図.3のように霧多布、釧路でそれぞれ海岸と内陸の各2地点（霧多布海岸A cost・霧多布湿原センターA land・釧路市千代ノ浦海岸B cost・釧路市教育大屋上B land）の計4ヶ所で行った。霧多布海岸は海上に突き出た霧多布岬の先端に観測地点を設け、霧多布湿原センターは海岸より0.5km内陸から広がる霧多布湿原の端で海岸から4kmに位置する。釧路市千代ノ浦海岸は南南西に海が広がり釧路市の中央部に近い漁港である。釧路市教育大屋上は千代ノ浦海岸より南方に内陸1.5kmの住宅街に立つ地上3階の屋上で観測した。

(2) 装置・器具

① ネット

五角形のテフロンコートされた枠にテフロン細線を鉛直方向に張っており、幅28cm、長さ30～35cm、細線直径0.4mm、細線総延長13910cmである。

② ファン

風速20m/sの商業用換気扇を流用し釧路、霧多布の海岸2地点ではバッテリー電源を使用し自動車エンジン冷却用ファンを用いた。

2. 霧水分析方法

釧路Blandでは採取後ただちに、pH（東亜電波：HM-1K）、EC（東亜電波：CM-1K）を測定した。他の地点では採取後ただちに冷凍し、後日解凍し同項目を測定した。なお、今回採取された霧水についての主要化学成分の分析結果は第二報として発表する予定である。

3.霧粒粒径分布測定方法

霧粒は直径 1~100 μm 程度の水滴と定義されているが、海霧は 100 μm 以上の大きさのものまで混在している¹²⁾。観測方法としては主に以下の三種類に分けられる。

- (1)油膜法 スライドグラスにワセリン油の中に霧粒を捕捉して顕微鏡で調べる方法
- (2)マグネシウム法 酸化マグネシウムを塗った膜上に捕捉してその痕跡を顕微鏡で調べる方法。この方法は水滴粒径 8~240 μm の範囲まで有効で、衝突速度によって痕跡の大きさは変化しないが、衝突率が変化する。
- (3)光学的方法 光環法や霧粒による光の回折光の測定によって霧粒の大きさを調べる方法

本研究では、野外・多地点の観測で、観測後速やかに読み取ることが不可能であるため資料の保存が必要であり測定準備が容易であるマグネシウム法によって霧粒径を測定した。測定板の作成法は丸山・浜の方法に従いマグネシウムリボンを燃焼させてプレパラートに直接いぶしつけて作成した。小口の報告より正規頻度分布を得るための粒径測定数は 300 以上とした¹³⁾。測定された粒径分布は採取された霧水の水量と共に用いて、空気の単位体積中に存在する霧の水量と霧粒の数、霧の粒径分布を次式のように算出した。

実際に大気中に存在する霧の粒径分布 $f(r)$

$F(r)$ プレパラートに観測された粒径分布

$f(r)$ 実際に大気中に存在する霧の粒径分布

$E(R,r)$ 半径 R と半径 r の霧粒子の衝突効率

とすると

$$\frac{F(r)}{E(R, r)} = f(r)$$

ω [g/m³] 空気の単位体積中における霧粒の水量

$$\omega = \int \frac{3}{4} \pi r^3 \rho f(r) dr$$

ρ : 霧水滴密度

W [g] 採取ネットに捕捉された霧水の水量

$$W = \int \frac{3}{4} \pi r^3 \rho f(r) E(d, r) dr$$

d : 採取装置の細線半径

上の2式より、

$$\omega = \frac{W \int r^3 f(r) dr}{2 d l v t \int r^3 f(r) E(d, r) dr}$$

l : 細線の総延長 v : 吸引風速

4.霧粒併合成長モデル

陸上に移流した場合霧水滴は半径 10 ミクロン以上であることより、水滴の成長過程は主に併合成長による。併合成長モデルによる粒径分布の計算値と実測値の対比より凝結・消散の程度を求める事が可能となる。

併合成長の割合は次のように表わされる¹⁴⁾。

$$\frac{dm}{dt} = E\pi R^2 \omega (V - v)$$

E: 半径 R と r の水滴の付着係数 R: 大水滴の半径 r: 小水滴の半径

v: 水滴の終端落下速度 (半径 r=0.005cm)

水滴の終端落下速度は

$$v = \frac{2r^2 g \rho}{9\mu}$$

μ : 空気の分子粘性係数 ρ : 霧水滴の密度 g: 重力加速度

付着係数についてはベアードとオックスの実験 (1983) より近似的に次のように表わされる。

$$E = \frac{R}{R + r}$$

単位体積の空気中に大きさが順に k 種類 ($r_0 < r_1 < \dots < r_k$) の霧水滴があるとすると、 r_i について

$$\frac{dm}{dt} = \frac{2\pi g \rho}{9\mu} \sum_{n=i-1}^k r_i^3 (r_i - r_n) \omega_n$$

ω_i について

$$\frac{d\omega_i}{dt} = 1 - \frac{4\pi g \rho}{9\mu} \sum_{n=0}^{i-1} r_n^3 (r_n - r_i) N_n V_n$$

この新しい半径、各半径ごとの霧水量を加算し、差分積分し霧の粒径分布の時間変化を計算する。

5.その他の測定項目

①気温・湿度

採取地点において地上1.5mに温度計、湿度計を設置し1時間毎に計測した。

②大気汚染濃度

釧路市による春採で計測されている大気汚染データを使用

第五章 結果

第1回観測（6月27日～6月29日）では、海岸から海洋上に霧を確認できたが、主な風向が西～北西であった為に陸風が主となり、霧が内陸に移流しづらい状況であった。29日は雨が4地点同時に観測された。続く第2回観測（7月11日～12日）では停滞前線より延びる前線の霧が発生。釧路では11日夜半から、霧多布では12日深夜から、いずれも12日朝まで観測され唯一4地点で観測できた。水質分析結果を表.2（第一回採取分）表.3（第二回採取分）にまとめる。

1.霧水の地域差

第1回観測（6月27日～6月29日）

第一回観測で霧を観測出来たのは、霧多布岬のみで6月28日6:30～11:30及び、翌日29日の0:30～2:30の二回であった。このうち、視程が300m前後となり霧水の採取が出来たのは6月28日の9:30～10:30及び、29日の0:30～2:30の間で前者のpHが3.36後者のpHが4.38と高い酸性度を示した。29日は雨が4地点同時に観測された。この時の各地点での降水の酸性度は霧多布では海岸より湿原の方が高く、釧路では海岸の方が内陸より高かった。電気伝導度については両方とも内陸の方が海岸より大きい値を示した。

第2回観測（7月11日～12日）

釧路では11日夜半から、霧多布では12日深夜から、いずれも12日朝まで観測され唯一4地点で観測できた。釧路では分取できたが、霧多布では移流してきては戻り非常に薄くなるなどして一降水採取しかできなかった。

雨と同様に霧も霧多布では海岸より湿原の方が酸性度が高く、釧路では海岸の方が内陸より高かった。

各地点における酸性度の関係

酸性度大 ←————→ 酸性度小
霧多布湿原 > 霧多布海岸 ≥ 釧路海岸 > 釧路市街

2.霧状態の地域差

第1回観測（6月27日～6月29日）図表.4

北海道北部を低気圧が東方に移動し、前線が三陸沖に東西に延びており海霧が道東沿岸部に移流する条件としては難しい気圧配置であった。28日朝の段階では、北部の低気圧の影響で南東方向の風系で霧多布では8～10時に霧が移流してきたが、内陸で採取できる程ではなかった。11時から気温が上昇し霧が晴れてしまう。続く28日深夜から北部にあった低気圧の影響を受けて28日23時～29日1時まで雨が降った。降雨時間は海岸部と内陸部で異なり海岸上に突き出た岬で23時から翌日1時まで、内陸部では0時から2時まで降雨が確認された。その後2時から低気圧の影響を受けたと考えられる霧が海上を覆い海岸で2時から4時まで霧を採取できた。この時の風向は北方であった為に内陸部に移流することは不可能であった。

第2回観測（7月11日～7月12日）図表.5

7月10日には前線が襟裳岬にかかる程まで北上していたが7月11日には、三陸沖まで南下し、前線雲とは別離して霧雲が確認された。

11日15:00から南方の風が一時強まって、収まりだした18:00頃から霧が確認された。その後、釧路の海岸部では翌日10:00まで消えずにいたが、内陸部では12日0:00以降は弱い霧となり6:00まで続いた。これは、11日21:00以降は釧路の風向が北寄であった為に、内陸に移流しづらい条件にあったからである。一方、霧多布では12日1:00頃に一度南風が若干強まりその後の一時間程度内陸まで霧が移流したが、海岸ではすぐに消えてしまった。その後、5:00以降風が強まり始め霧が海岸・内陸へ移流してきたが気温が上昇し海岸部では8:00頃、内陸部では9:00頃に消えてしまった。

第六章 考察

1.地域特性による酸性度の変化

霧多布・釧路各地点において海岸から内陸への移流の前後で一部を除き EC 値が 1.0~1.3 倍に増加していることが分かった (表.6)。これは、霧が陸上で大気中物質を取り込んでいる事、また陸上で消散により霧水成分が濃縮している事を示唆している。

霧粒は 10 マイクロメートル以上であることより凝結に比べ併合による成長が主要となり粒径変化は主に併合と消散に左右される。海岸で観測された霧粒粒径分布を初期値として内陸観測地点までその霧が移流する時間を風速より求め、その時間だけ併合成長モデルによって霧粒を成長させ、海岸の霧が陸上を併合のみで成長して内陸の観測地点に到達した場合の霧粒粒径分布の理論値と実際に観測された内陸での霧粒粒径分布の対比を行った。

7/11 20:00 に観測された釧路の移流霧では、理論値と実測値がほぼ一致した (図.6)。よって、この時点での霧は消散が殆ど起こっていないと考えられた。つまり、その電気伝導度の増加は霧水中への物質の取り込みによるものだと考えられた。

霧多布では、異なるパターンが 7/12 6:00 に確認されている (図.7)。この時の理論値の霧粒粒径頻度ラジアンが 32.5 マイクロメートルであったのに対し、実測値は 15 マイクロメートルと 37.5 マイクロメートルの二山分布を示した。消散が起こった場合、霧粒の減少速度は粒径が小さいほうが速く減少し、15 マイクロメートルの山が起これない。ただし、10 マイクロメートル以下の霧粒は 10 マイクロメートル以上の霧粒に併合されにくく、凝結によって小粒径の均質な霧粒が新たに発生したと場合、このような二山分布が形成されることも考えられる。霧多布では、海岸を上陸した霧はすぐに湿原に入りそこを流れ内陸観測地点に到達するが、湿原上であれば凝結が起こりうる。この時以前の風速は 1m/s 程度で、湿原上で生成された霧は盆地霧のように均一な小粒径の霧粒が発生しうる環境でもあった。

両地域とも霧が陸上で大気中物質を取り込み電気伝導度を増加させ、消散による霧水成分の濃縮はこの場合には小さい事が分かった。

であると、釧路市では大気中物質の取り込みが酸性度を弱め、霧多布ではそれが酸性度を強めたことになる。釧路市では道路粉塵等の中和物質を捕捉し中和する方向にあることが報告されているが、霧多布では釧路と異なり交通量は少なく移流する際に湿原を通過する。湿原内には硫黄化合物等酸性化原因物質を

生産する植物があり、土壌、枯葉等からも硫化メチルが発生することが知られており有機物の分解によって H_2S 等が発生する¹⁵⁾。これが酸素と出会うと直ちに酸化されてしまうが無酸素状態で還元環境であれば起こりうる。今後、このような湿原より発生する生物起源の硫黄化合物の定量が必要である。

第2回観測の7/12朝に釧路、霧多布両海岸でほぼ同時に観測された霧(千代/浦海岸7:00~8:00、霧多布岬6:50~7:50)はpH4.03(千代/浦海岸)、pH4.02(霧多布岬)また電気伝導度も近似しておりこの時点の道東地方における海霧のバックグランドレベルと考えられる。

海上でこれ程酸性化している原因について、このバックグランドレベルを支配する主要成分が何であるかが重要となる。釧路本校で観測された霧水の化学成分分析の結果より陰イオンの主要成分は SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- でありほぼ $[Cl^-] > [SO_4^{2-}] > [NO_3^-]$ の順である(表.7)。 NO_3^- については地上で観測される NO_2 と相関があり(図.8)、主に自動車から発生する $NO_2(g)$ と海塩粒子の反応で生成していると考えられる。 SO_4^{2-} については地上で観測された $SO_2(g)$ との明確な相関は認められなかった(図.9)。これは、光化学反応などが主要酸化経路で $SO_2(g)$ が即酸化しなかったか、長距離輸送、長時間の滞留、海洋起源による事が考えられる。 Cl^- は主に海洋起源、また海塩粒子と硫酸、硝酸エアロゾルとの反応で $HCl(g)$ が発生し霧粒に取り込まれたものが考えられるが、 Cl^-/Na^+ 比が海洋成分のそれより小さい為(図.10)、 HCl ガスとして霧粒外に存在する事が考えられる。よって、 SO_4^{2-} がバックグランドレベルの酸性度を高めている主要因と考えられる。

まとめ

現在、酸性雨酸性霧の被害の中心地はアジアになりつつあり、その影響を少なからず受けている日本では、酸性霧による植物被害が確認されている。霧の酸性化は自然の豊富な道東でも明らかになり、しかも釧路に比べ霧多布の方が霧の酸性度が強かった。よってこの原因が霧のバックグランドにあると考え、そのバックグランド値を特定する為にまず陸上での酸性化への寄与を特定する必要があり、釧路、霧多布両地域に海岸、内陸の観測点を設け陸上での霧の酸性化プロセスについて調査した。

6月27日～29日及び7月11日～12日に観測を行った結果、霧、雨共に降水の酸性度は霧多布では海岸より内陸（海岸より1.5 km）の方が、釧路では内陸（海岸より4 km）より海岸の方が高かった。

ここで、釧路、霧多布両地点において海岸から内陸への移流する前後で電気伝導度が1.0～1.3増加しており、これはイオン量が増加している事を示している。この原因は消散による成分濃縮ではなく大気中物質の取り込みによる事が分かった。釧路では道路粉塵等の中和物質を多く捕捉しており酸性度を緩和させているが、霧多布では湿原移流中に凝結が起こっており湿原域の自然起源による酸性化原因物質を取り込んでいる可能性がある。

7月12日7時から8時に釧路、霧多布両海岸ではほぼ同時に観測された霧水の酸性度は4.02～4.03で電気伝導度も近似しておりこの時点の海霧のバックグランドレベルと考えられた。海上でこれ程に酸性化している原因について、霧水の主要陰イオン SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- があるが NO_3^- は地上の大気中二酸化窒素より供給されており、 SO_4^{2-} は地上の大気中二酸化硫黄と明確な相関がない。また、 Cl^- は Cl^-/Na^+ 比が海水組成のそれより小さく、海上で酸性化している原因は主に SO_4^{2-} によると考えられた。今後は海洋から発生する硫酸化物の定量が必要である。

謝辞

この研究を進めるにあたり、霧多布湿原での雨・霧の採取には霧多布センターの各位に御協力頂いた。釧路地方気象台からは釧路・榊町の気象データを、釧路市からは同市の大気汚染データの提供を受けた。霧の観測・採取には北海道教育大学総合科学課程応用理学研究室の学生諸氏に御協力頂いた。末筆ながらここに感謝の意を記します。

また、この研究は「平成9年度浜中町霧多布湿原学術研究助成」によって費用の一部を支援されたことを明記するとともに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Jacobson, J.S. and P. Van Leuken. (1977) : Effects of acid precipitation on vegetation. In Proc. Forth Int. Clean Air Congress, Tokyo. pp124-127.
- 2) Musselman, R.C., McCool, P.M., and Sterrett, J.L. (1988) : Acid fog injuries California crops, Calif. Agr., 42(4), 6-7
- 3) 村野健太郎, 関口恭一, 寺田信之, 水落元之, 尾崎裕, 福山力, 氏家淳雄, (1985) : 赤城山の南東面に発生する滑昇霧の化学組成, 科研費環境科学研究報告集, R-11-8, B-248, p65~78
- 4) 吉武 孝, 増田久夫 (1986) : 苫小牧地域におけるストローブマツ等の異常落葉に関する考察, 林業試験場研究報告, 337, 1~28
- 5) Schemenauer, R.S. (1986) Atmos-Ocean 24:303-328.2. Environment Canada. EC.283p.
- 6) 西尾文彦・織田伸和・富沢日出夫 : 霧多布湿原に発生する酸性雨 (1995) 路論集 第27号 P169~P184
- 7) 高橋 劭 (1987) : 雲の物理, 東京堂出版
- 8) 川野 浩 (1989) : 北海道南東海上の霧または層雲・層積雲のある気層での熱・水蒸気収支
- 9) 鳥羽良明 (1970) : 海洋物理 I, 東海大学出版
- 10) 大喜多敏一 (1982) : 大気保全学, 産業図書
- 11) Daniel J. Jacob (1985) Instrument to collect fogwater for chemical analysis, Rev. Sci. Instrum. 56 (6) June 1985
- 12) 小島賢治, 大野武敏, 山地健次 (1951) : 霧粒の大きさの測定, 防風林の研究, 2, 223
- 13) 小口八郎 (1949) : 霧粒の大きさ及び数の測定法について, 低温科学, 2, 105
- 14) Mason, B.J. (1962) : Clouds, rain and rainmaking, Cambridge at the University press
- 15) 大田幸雄 (1990) : 大気の科学, 日本化学会編 化学総説 No. 10, p123~146

図表一覧

- 図. 1 霧粒採取装置
- 図. 2 霧多布観測地点
- 図. 3 釧路観測地点
- 図. 4 第一回観測時の天気図
- 図. 5 第二回観測時の天気図
- 図. 6 霧粒の粒径頻度分布と併合成長による理論値（釧路）
- 図. 7 霧粒の粒径頻度分布と併合成長による理論値（霧多布）
- 図. 8 霧水中の硝酸イオン濃度と大気中の二酸化窒素との関係
- 図. 9 霧水中の硫酸イオン濃度と大気中の二酸化硫黄との関係
- 図. 10 霧水中 Cl^-/Na^+ 比の海水との対比
- 表. 1 霧のタイプ別分類表
- 表. 2 今回観測された霧、雨の酸性度
- 表. 3 霧、雨の酸性度（時系列表示）
- 表. 4 第一回観測時の天気
- 表. 5 第二回観測時の天気
- 表. 6 海岸と内陸での電気伝導度の対比
- 表. 7 霧水中の各種イオン濃度

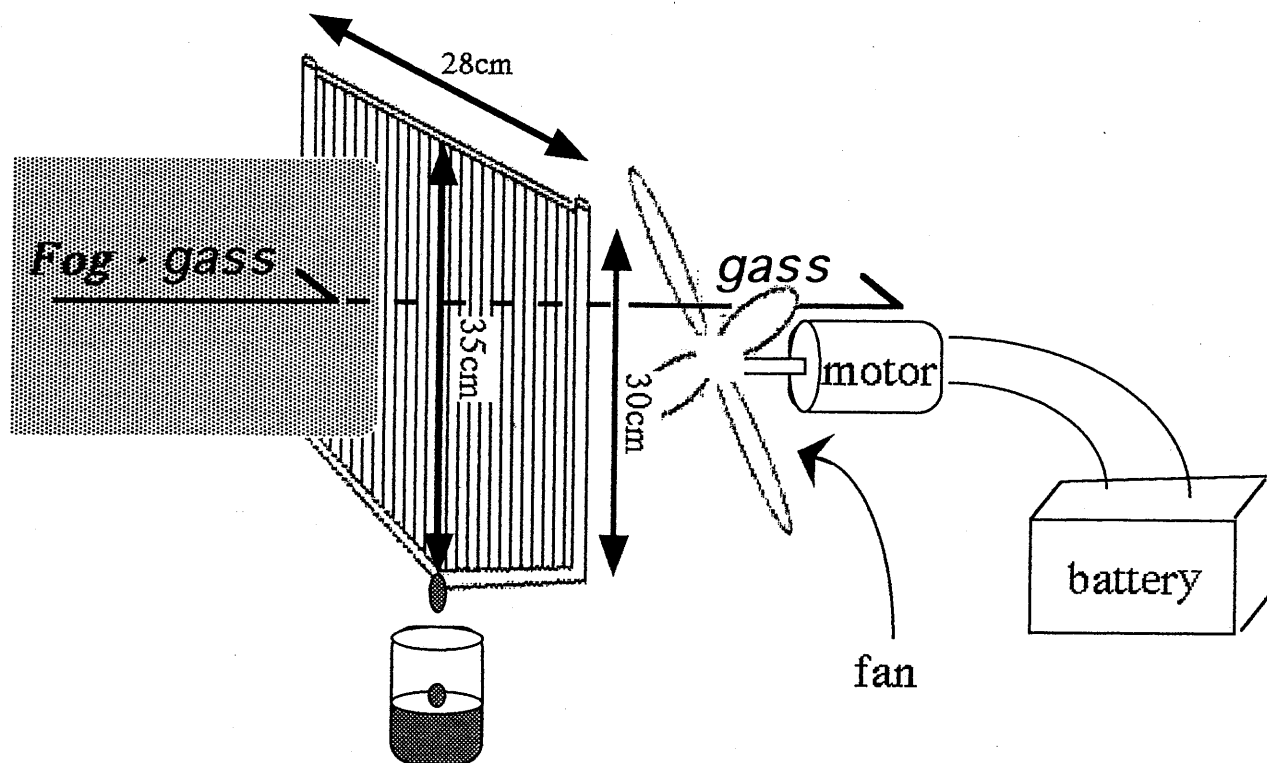


図.1 霧粒採取装置 (慣性衝突式 アクティブ型)

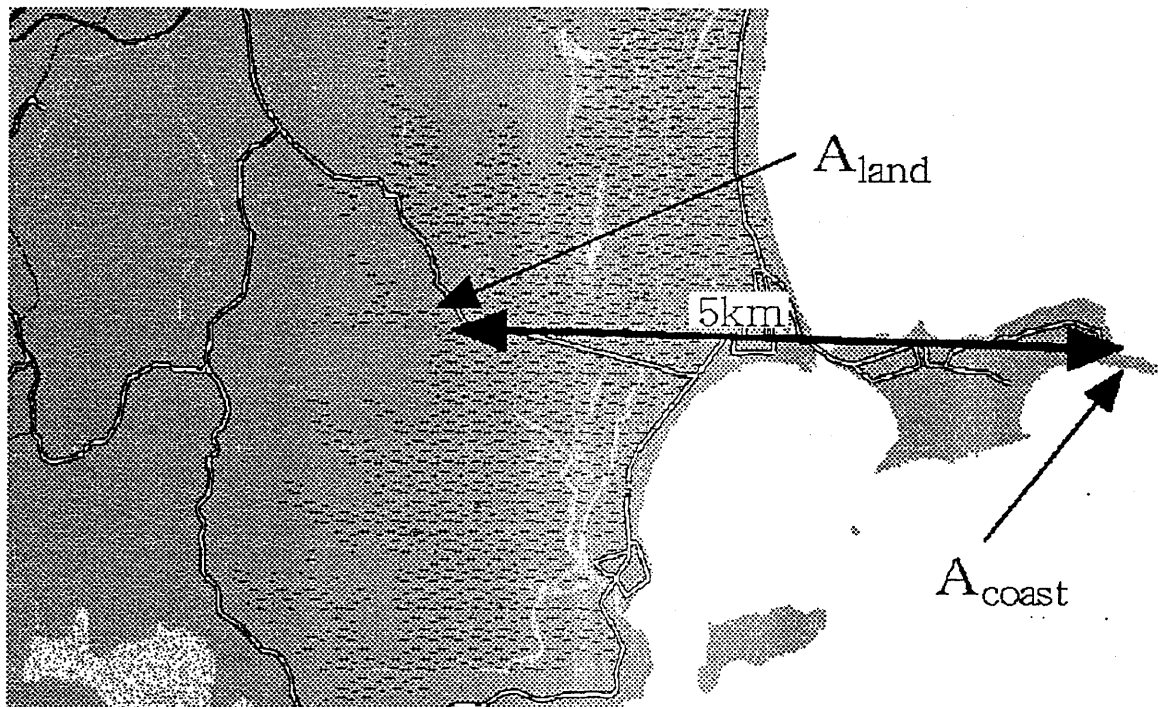


図.2 霧多布観測地点 (A_{land};霧多布湿原センター A_{coast};霧多布岬)

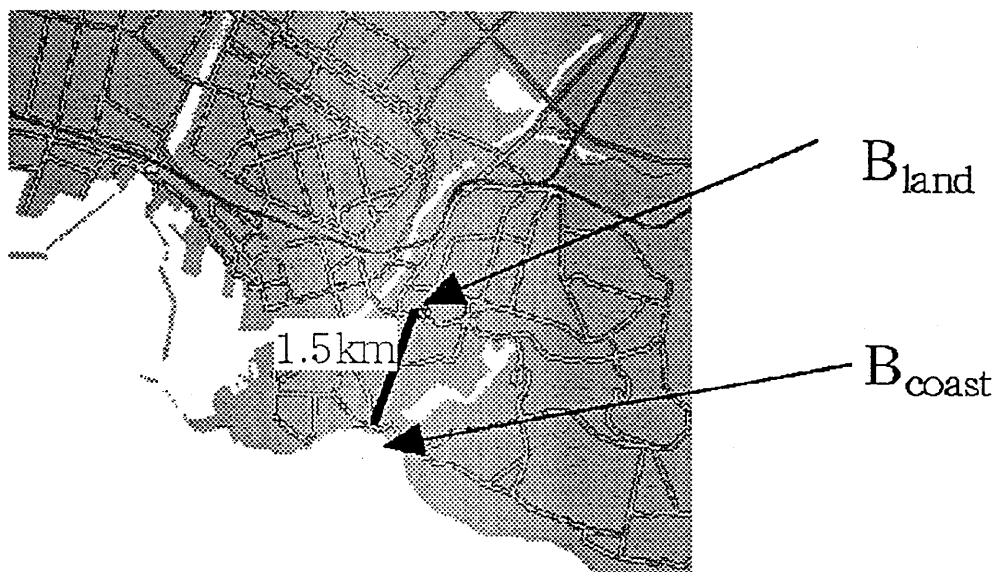
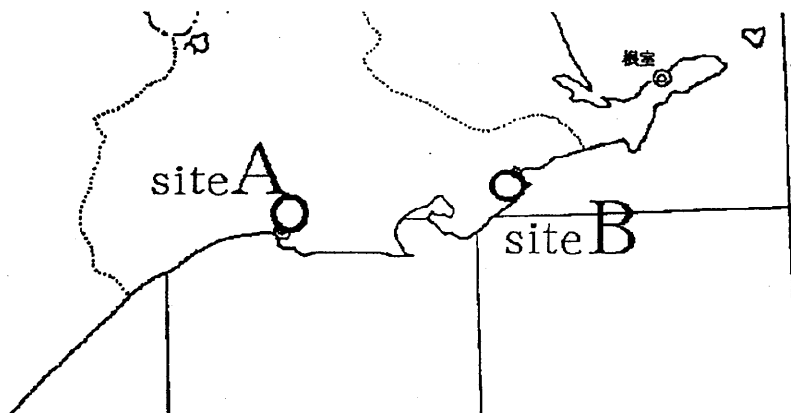


図.3 釧路観測地点 (B_{land};教育大屋上 B_{coast};千代/浦港)

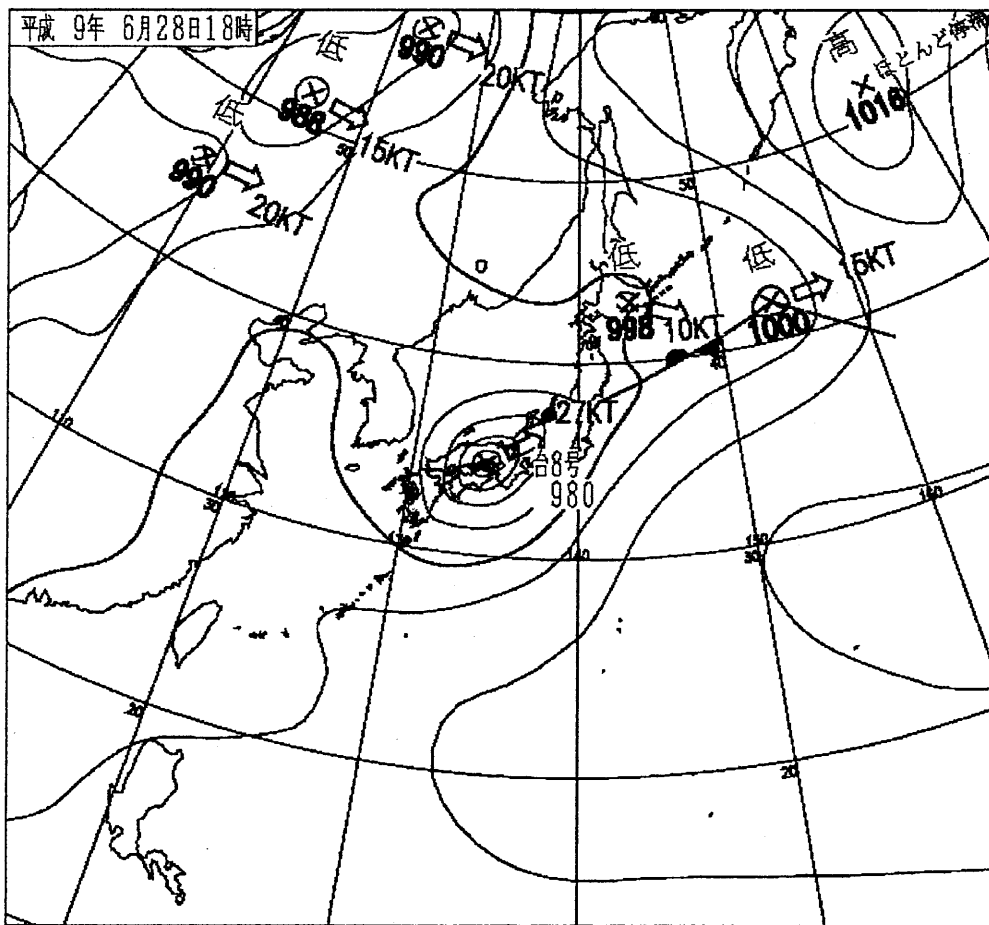


図.4 第一回観測時の天気図 (6月28日 18:00)

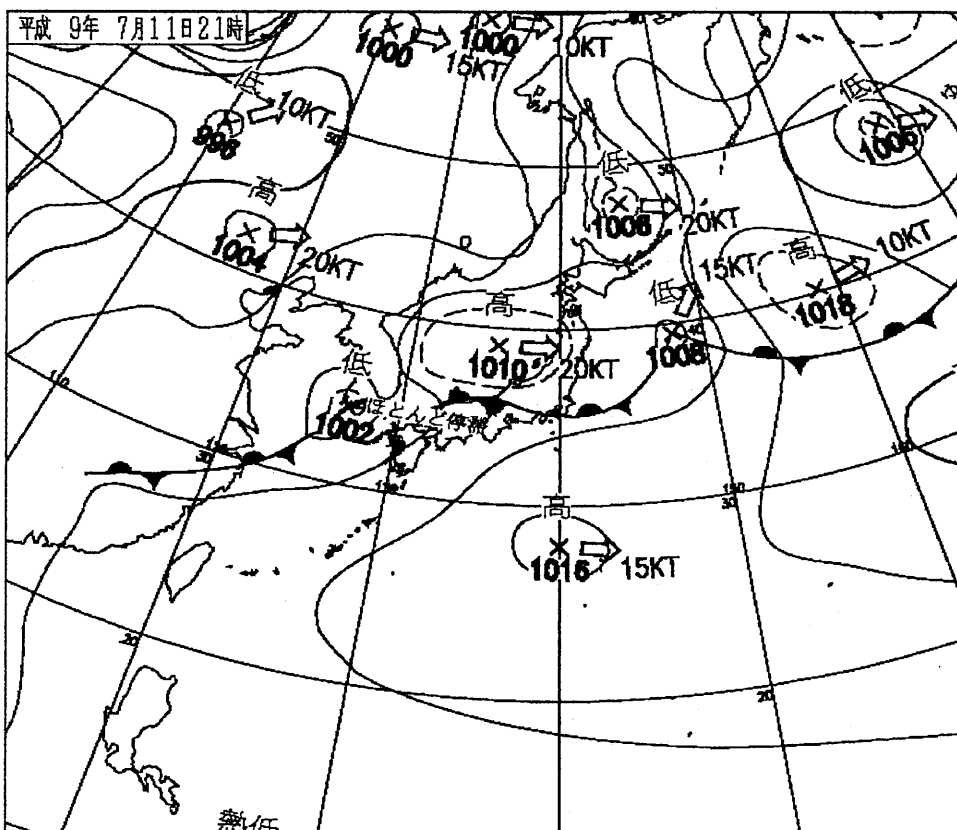
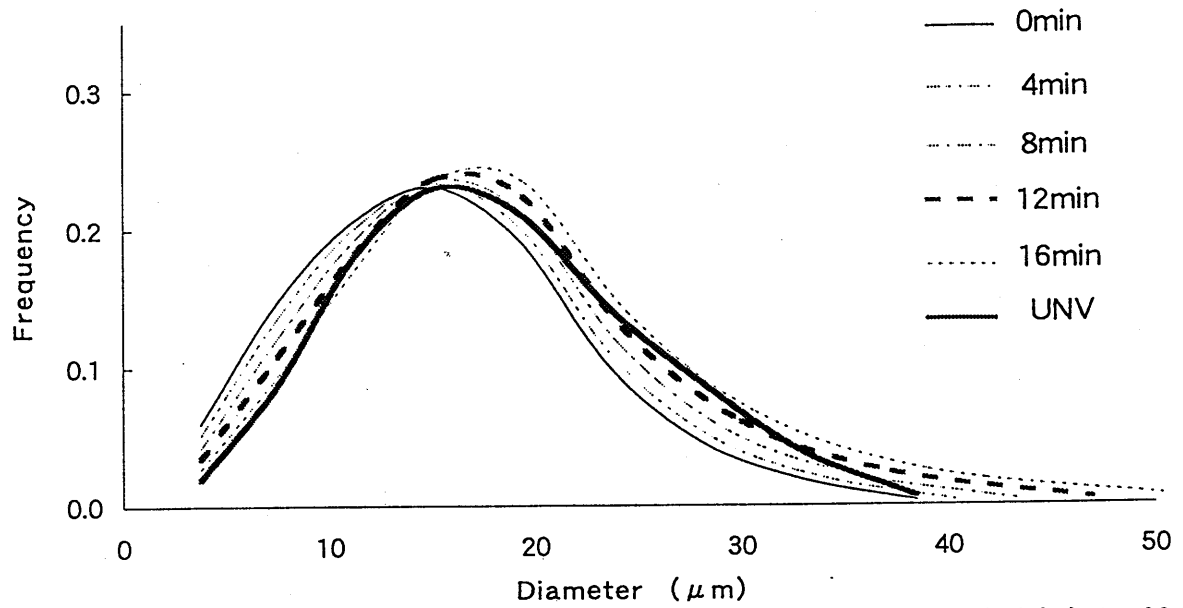


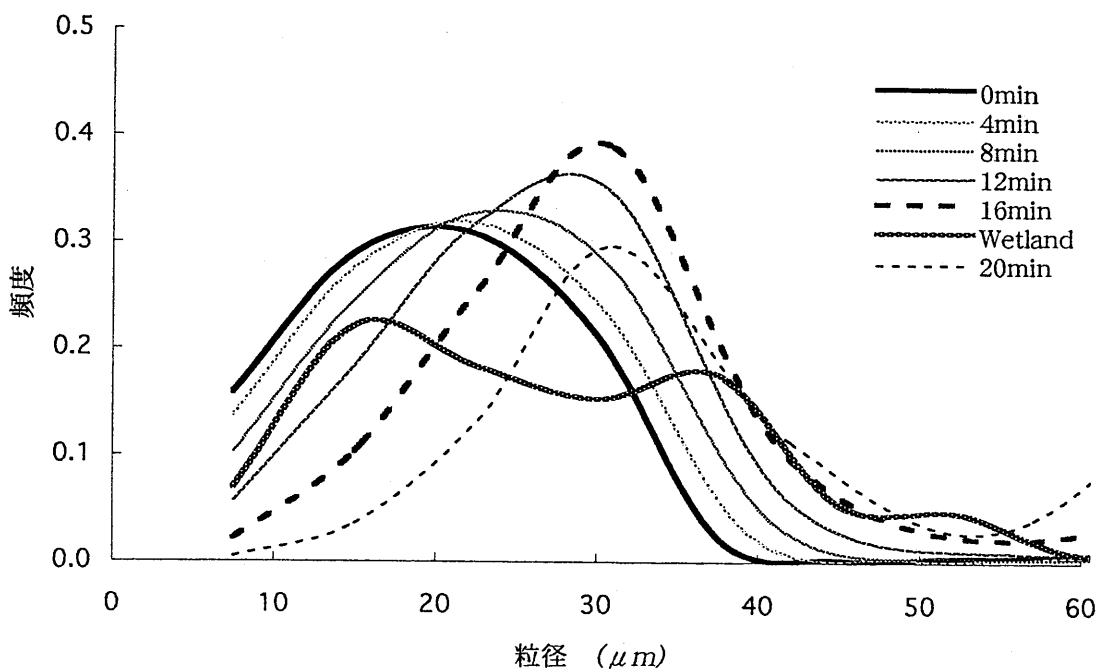
図.5 第二回観測時の天気図 (7月11日 21:00)

霧水滴の粒径頻度分布 ～併合成長による理論値～



釧路市千代ノ浦海岸7/11 20:00を初期値とする併合成長による理論値と大学屋上で観測された8:00の粒径

図.7 霧水滴の粒径頻度分布 ～併合成長による理論値～
霧多布海岸7/12 6:00



霧多布岬7/12 6:00を初期値とする併合成長による理論値と霧多布湿原センターで観測された粒径頻度分布

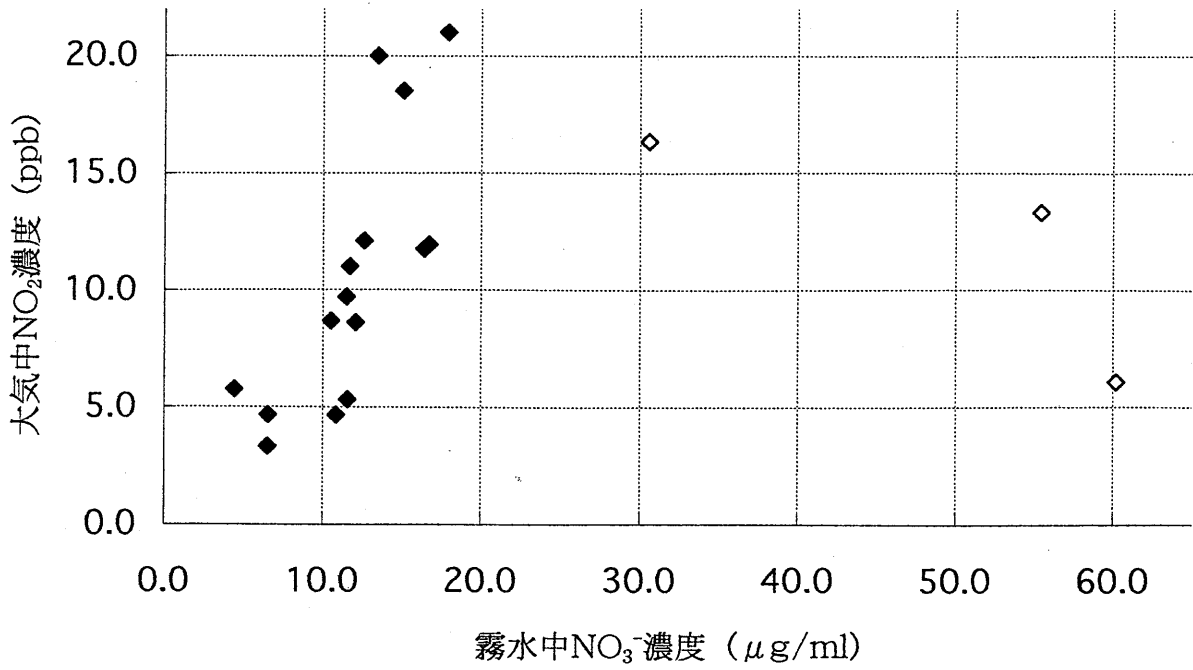


図.8 霧水中の硝酸イオン濃度と大気中の二酸化窒素との関係
 ・ EC<200 μS/cm ◦ EC<200 μS/cm

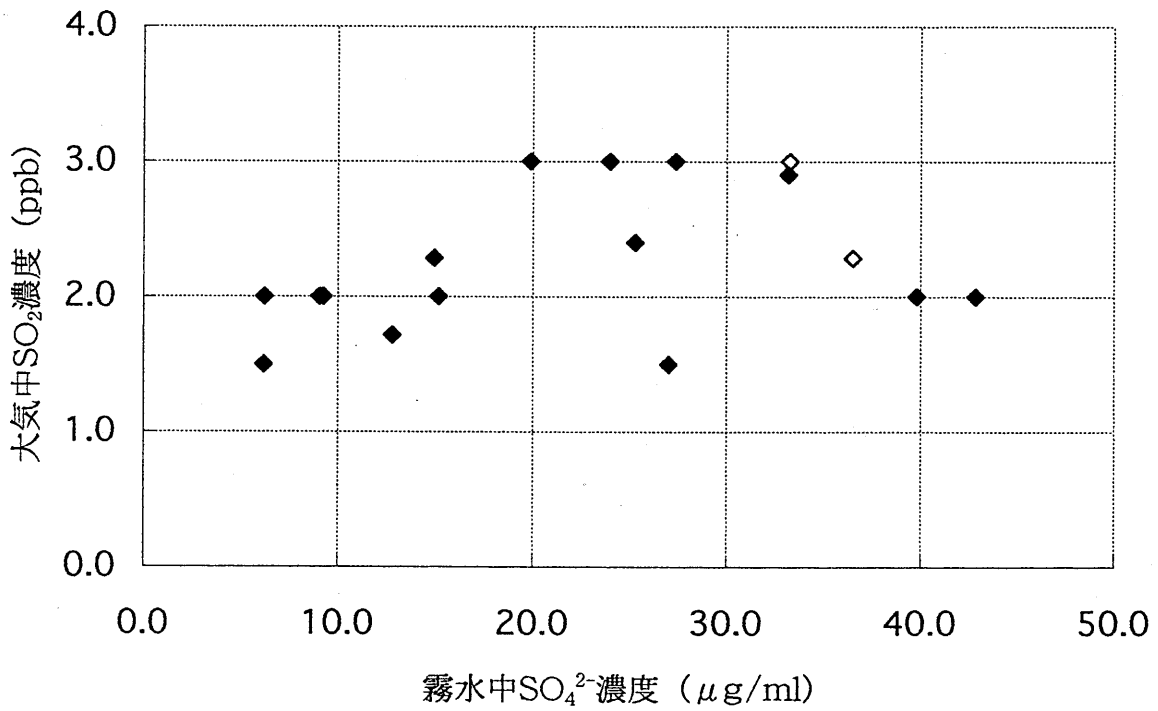


図.9 霧水中の硫酸イオン濃度と大気中の二酸化窒素との関係
 ・ EC<200 μS/cm ◦ EC<200 μS/cm

図.10 霧水中 Cl^-/Na^+ 比の海水との対比

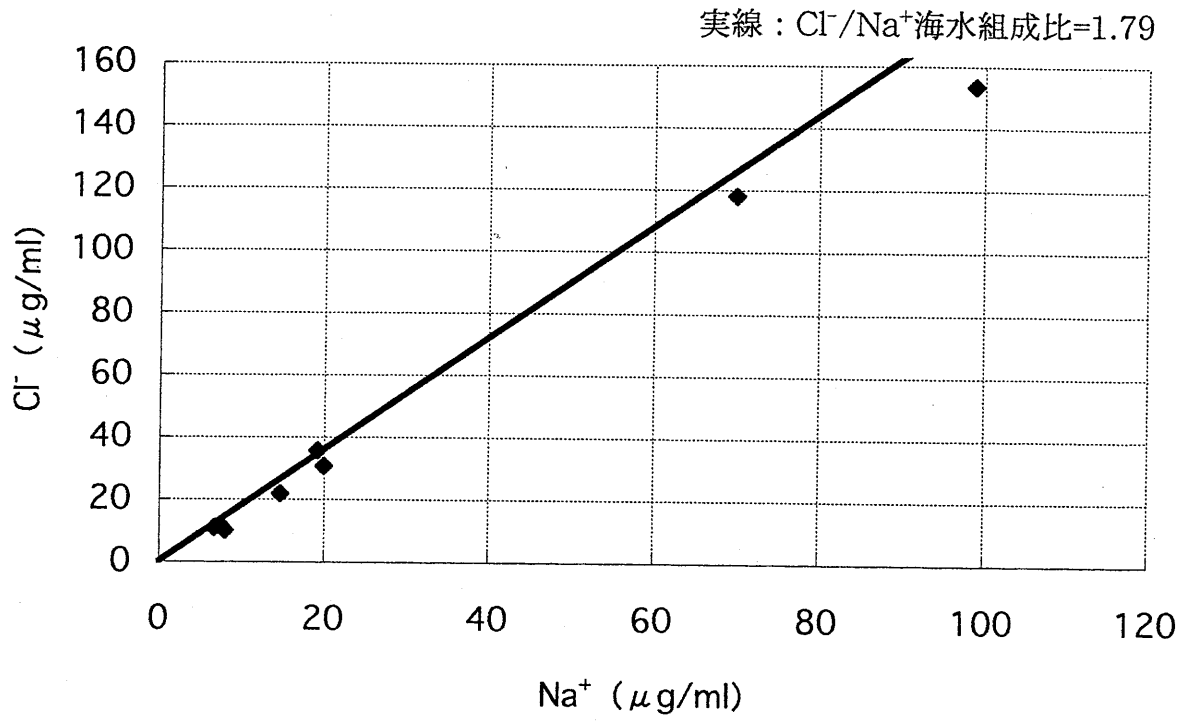


表.1 霧のタイプ別分類表

名称	気温の変化	露点温度変化	移流	混合	放射	交換	膨張	
断熱膨張霧	↓	→	○				○	滑昇霧
放射冷却霧	↓	→			○			放射霧
混合霧				○				前線霧、混合霧
混合冷却霧	↓	↓	○	○		○		移流霧
混合蒸発霧	↑	↑	○	○		○		蒸気霧、蒸発霧
雨蒸発霧	→	↑		○		○		前線霧、蒸発霧

表.2 今回観測された霧・雨の酸性度

※ EC : ($\mu\text{S}/\text{cm}$) W : Weight(g)

type	Date	Kiritapp Coast (A_{coast})					Kiritapp Wetland (A_{land})				
		Start	Off	pH	EC	W	Start	Off	pH	EC	W
Fog	6/28	09:30	10:30	3.36	230.0	68.6					
	6/29	00:45	03:15	4.38	370.0	35.1					
	7/12	06:50	07:50	4.02	68.2	76	02:30	09:30	3.80	205.0	28.5
		18:30	20:10	4.38	99.5	33.3	19:05	21:10	3.91	120.0	43.7
	~13	20:10	01:00	6.27	175.0	29.7	22:00	00:00	3.96	90.0	23.1
Rain	6/28~29	23:30	00:45	4.33	32.0	119.3	00:15	02:00	4	41.0	81.0

type	Date	Kusiro Coast (B_{coast})					Kusiro Unv (B_{land})				
		Start	Off	pH	EC	W	Start	Off	pH	EC	W
Fog	7/11	19:20	20:00	4.32	59.1	105.7	18:00	20:00	5.2	76.2	83.1
		20:00	22:00	4.10	100.5	102	20:00	00:00	5.1	110	75.0
		22:00	23:00	3.8	123.3	92.4					
		23:00	00:00	4.04	70.0	97.4					
	7/12	00:00	01:00	4.25	50.4	107	00:00	03:00	4.9	62.3	95.8
		01:00	02:00	4.17	71.0	85.7					
		02:00	03:00	4.07	77.0	69.2					
		03:00	04:00	4.62	74.4	110	03:00	06:00	4.2	64.5	78.7
		04:00	06:00	3.49	208.0	100					
		06:00	07:00	3.82	92.8	115					
	07:00	08:00	4.03	57.9	118						
	08:00	10:00	3.95	105.5	82.2						

表.3 霧・雨の酸性度 (時系列表示、分割採取の pH 値を単純平均)

釧路・霧多布で 7/11~12 に発生した酸性霧の海岸及び内陸での霧水の酸性度

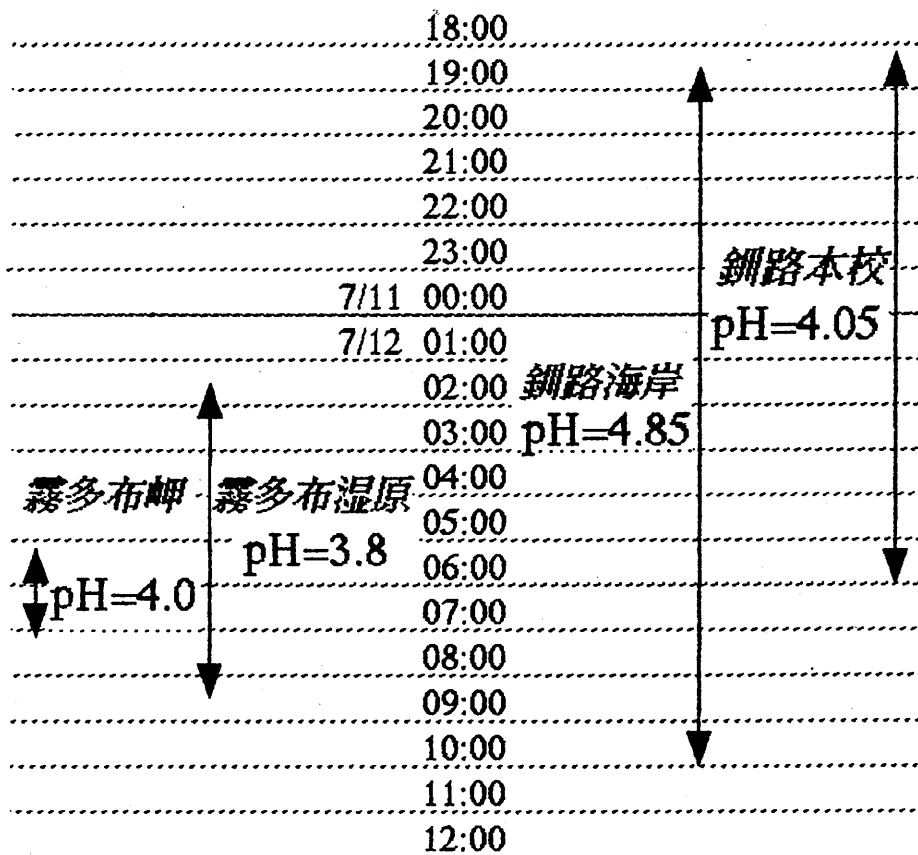


表.4 第一回観測時の気象 (6/28~29)

表.5 第二回観測時の気象 (7/11~12)

太字 は霧が観測された時間帯

風速 : m/s 気温 : °C

		釧路			榊町(霧多布)		
		気温	風向	風速	気温	風向	風速
6/28	6:00	10.8	SSE	4	10.8	ESE	2
	7:00	10.9	S	2	10.9	ESE	2
	8:00	11.3	SSW	3	11.3	ESE	2
	9:00	11.9	S	5	11.9	ESE	3
	10:00	16.5	SSE	4	11.3	ESE	2
	11:00	15.9	S	3	13.3	SSE	3
	12:00	16.1	SSE	2	12.4	ESE	3
	13:00	15.2	S	2	12.8	ESE	1
	14:00	15.9	E	2	13.4	ESE	2
	15:00	15.7	NNE	2	14.4	SE	2
	16:00	15.1	NNE	2	13.3	E	2
	17:00	15.5	NE	2	12.8	ESE	2
	18:00	15.8	NNE	3	12.0	ESE	3
	19:00	16.0	S	1	11.4	ENE	3
	20:00	15.6	NNE	3	11.0	ESE	2
21:00	15.3	NNE	3	10.9	ESE	2	
22:00	14.9	NNE	2	11.0	E	3	
23:00	15.1	NNE	2	10.8	ESE	3	
6/29	0:00	15.1	NNE	3	10.6	E	3
	1:00	16.3	NNE	5	11.3	NE	1
	2:00	19.0	NE	4	11.9	NNW	2
	3:00	17.8	N	2	12.0	NNE	2
	4:00	16.4	SSW	3	11.8	NNE	2
	5:00	15.6	SSW	3	11.4	NNE	2
	6:00	17.1	SSW	3	11.4	NNE	2

太字 は霧が観測された時間帯

風速 : m/s 気温 : °C

		釧路			榊町(霧多布)		
		気温	風向	風速	気温	風向	風速
7/11	12:00	14.7	SSE	4	14.7	S	4
	13:00	14.6	S	2	15.7	SSW	4
	14:00	14.8	SSW	3	15.4	S	5
	15:00	15.0	S	5	16.5	S	4
	16:00	16.5	SSE	4	13.8	SSW	5
	17:00	15.9	S	3	13.2	SSW	2
	18:00	16.1	SSE	2	12.0	S	3
	19:00	15.2	S	2	12.1	SSW	3
	20:00	15.9	E	2	12.2	S	2
	21:00	15.7	NNE	2	12.2	SSW	2
	22:00	15.1	NNE	2	12.7	SSW	1
23:00	15.5	NE	2	12.7	SSW	1	
7/12	0:00	15.8	NNE	3	12.9	E	0
	1:00	16.0	S	1	12.4	S	2
	2:00	15.6	NNE	3	12.7	S	1
	3:00	15.3	NNE	3	12.6	SSW	1
	4:00	14.9	NNE	2	12.4	SSW	1
	5:00	15.1	NNE	2	12.3	S	1
	6:00	15.1	NNE	3	12.4	SSW	3
	7:00	16.3	NNE	5	13.3	SSW	2
	8:00	19.0	NE	4	13.5	SSW	4
	9:00	17.8	N	2	14.6	SSW	3
	10:00	16.4	SSW	3	15.4	SSW	4
	11:00	15.6	SSW	3	15.2	SSE	4
12:00	17.1	SSW	3	14.2	SSE	5	

表.6 霧多布・釧路各地域における海岸と内陸での霧水の電気伝導度の対比
 ※ 採取時間の一致するサンプルのみで、電気伝導度の単位は $\mu\text{S}/\text{cm}$

<Kiritapp Sample>

	Kiritapp Coast			EC(Wet/Co)	Kiritappu Wetland		
	Start	Off	EC		EC	Start	Off
7/12	18:30	20:10	99.5	1.2	120.0	19:05	21:10
~13	20:10	01:00	175.0	0.5	90.0	22:00	00:00

<kusiro Sample>

	Kusiro Coast			EC(Unv/Co)	Kusiro Unv		
	Start	Off	EC		EC	Start	Off
7/12	18:00	20:00	59.1	1.3	76.2	00:15	02:00
	20:00	00:00	97.5	1.1	110	00:15	02:00
7/13	00:00	03:00	64.2	1.0	62.3	00:15	02:00
	03:00	06:00	48.8	1.3	64.5	00:15	02:00

表.7 霧水中の各種主要イオン濃度の最小・最大値および平均値

1991年採取分 17 サンプル,

観測日は 5/22 6/17.18.19.21.22.30 7/10.12.15

EC [$\mu\text{S}/\text{ml}$], Other [$\mu\text{g}/\text{ml}$]	Min — Max	Mean
EC	23.8 — 1205.0	346.4
SO_4^{2-}	4.44 — 104.0	35.83
NO_3^-	1.51 — 63.11	16.12
NO_2^-	0.02 — 0.29	0.06
Cl^-	2.51 — 359.4	53.41
Mg^{2+}	0.35 — 15.14	3.87
Ca^{2+}	0.62 — 11.98	4.96
Na^+	2.18 — 126.30	31.92
K^+	0.39 — 7.92	2.49
NH_4^+	0.94 — 33.52	9.29