

# 大気汚染物質のフラックス測定法

栗田 恵子 青木 一幸

## 1 はじめに

大気汚染物質のフラックスとは汚染質が通過する速さと方向を表わすベクトルである。大気汚染物質のフラックス測定が行われれば特定の発生源からの排出を他の発生源の影響を受けずに推定したり、あるいは多くの地点のフラックスのデータから汚染質の流線図を作ることにより主要な発生源を推定することも可能である。又、垂直方向のフラックスを測ることにより、植物による吸収や大地への沈着による汚染質の除去作用を解明できる。

このようにフラックスは、大気拡散の分野における基本的に重要な量であるが、測定が難しいので大気汚染物質に関する測定例は数少ない。従来のフラックス測定法には、

- ① 乱流変動法<sup>1)</sup>
- ② 空気力学的方法<sup>2)</sup>
- ③ ボーエン比法<sup>2)</sup>

などがある。①は風速と濃度の瞬時値の積の平均値からフラックスを求める方法であるが、大気汚染物質については応答の十分に速い測定器が開発されていないので、水蒸気や熱フラックスについて実用となっているに過ぎない。②は温度、濃度、風速のプロフィールからフラックスを求める方法であり、従来の大気汚染物質フラックスの測定例は主としてこの方法によっている。しかしこの方法は1点のフラックスを知るために高度別に数点のデータが必要であり、また垂直方向のフラックスしか得られない。③は放射、地中の温度傾度、地上の一連の高さでの気温、水蒸気圧の測定値から水平面でのエネルギー収支の関係を使いフラックスを求めるものであるが、②と同様、垂直方向のフラックスしか得られない。

一方、直接フラックスを測定する方法としてB. Steenは1977年に煙道中の粉じんフラックスサンプラーを開発している。<sup>3)</sup>これは一次元一方向流のフ

ラックスを測定するものであるが、サンプラー内に流入する空気量が煙道中の風速に比例するように作られており、サンプラー内部での粉じんの採取は静電的に行われるようになっている。従って粉じんの採取量は濃度と風速の積に比例することになり、直接粉じんのフラックスが得られる。

筆者らはこの方法を一般環境でのフラックスの測定へ拡張すべく検討を行ってきたが、ある程度の見通しが得られたので報告する。

## 2 大気汚染物質のフラックスサンプラー

フラックスサンプラーの原理を図1に示す。ADはオリフィスでこれが空気の出入口となっている。オリフィスの開口は円筒の径より充分小さくなっており、サンプラーの外を流れる空気の中のごくわずかな部分がサンプラー内に分流するようになっている。BCには測定物質の吸収剤が配置されている。この時、

- ① A又はDから流入する空気量はサンプラー外部の風速のAD方向の成分に比例する。
- ② Aから流入した空気中の測定物質はBで完全に吸収される。Dから流入したのも同様にCで完全に吸収される。



図1 フラックスサンプラーの原理

このようになっていれば、B、Cでの捕集量はそれぞれA、Dから流入した物質の量となり、これらを定量化してその差を取ることでA、D方向のフラックス成分を求めることができる。このようなサンプラーを

3本用意し各々を  $x, y, z$  方向に向けて設置することによりベクトル量としてのフラックスを測定することができる。

ここで①についてはふたつの条件が考えられる。ひとつはサンプラー内の流速が風向の変化に対して cosine 的に応答することであり、もうひとつはサンプラー内の流速が風速に対して比例的に応答することである。前者についてはサンプラーの外形をいろいろに変えてみて、なるべく cosine 的に応答に近づけるという方法を使った。後者については次のように考えることができる。風速とサンプラー内の流量との関係は、風速によって生じた圧力と管内での圧力降下とを等しいとすることによって得られる。管内の圧力降下は管本体のポアズイユの流れによる圧力降下と取り入れ口における圧力降下に分けて考えることができる。前者はハーゲンポアズイユの式から

$$\Delta P_1 = 8 \mu \ell V / \pi D^4 \quad \mu : \text{粘性係数} \quad (1)$$

$\ell$  : 管の長さ  
 $V$  : 管内の流量  
 $D$  : 管の半径

で表わされる。後者は取り入れ口から噴出した空気が運動エネルギーを失うことによって生ずる圧力降下

$$\Delta P_2 = a \rho v^2 \quad a : \text{定数}, \rho : \text{密度} \quad (2)$$

$v$  : 取り入れ口を通過する流速

が主要なものであるが、この他に粘性による圧力降下  $\Delta P_3$  がある。比  $\Delta P_2 / \Delta P_3$  を考えるとこれは慣性力と粘性力の比と見ることができる。従って

$$\Delta P_2 / \Delta P_3 \propto Re \quad (3)$$

となるであろう。また取り入れ口付近の流れは穴の大きさ  $d$  と流速  $v$  によって支配されると考えられるからレイノルズ数としては

$$Re = v d / \nu \quad (\nu : \text{動粘性係数}) \quad (4)$$

を用いるべきである。従って

$$\Delta P_3 = b \rho v^2 / Re = b \mu v / d \quad (5)$$

風速  $U$  によって両取り入れ口間に生ずる圧力は  $\rho U^2$  に比例するから

$$k \rho U^2 = a \rho v^2 + b \mu v / d + 8 \mu \ell v / \pi D^4 \quad (k : \text{定数}) \quad (6)$$

が得られる。  $U$  と  $v$  が比例するようにするには右辺の第2, 第3項をできるだけ小さくすればよいことがわかる。そのためには、取り入れ口を大きくすること、流量を大にすること、および管径を大に、管長を短くすることが有効である。

しかし一方、ガス吸収は流量が小さく管長が長いほど完全になるという比例性とは両立させにくい性質を持っている。そこでこれらの問題を検討するために、取り入れ口径と風速比例性との関係および流量と吸収効率の関係を実験によって調べた。

### 3 実験方法

#### (1) 風洞実験

風洞の大きさは 10 cm (縦) × 30 cm (横) × 60 cm (長さ) である。風速は送風機の回転数により変化させた。風速の変化範囲は 0.6 ~ 6.6 m/sec である。サンプラー内部の流速の測定はサーミスター風速計を用いて行った。

#### (2) 吸収実験

吸収実験は図2のような装置で行った。これは塩化水素 (以下 HCl とする) を供給する部分、サンプラー中で HCl を吸収する部分、サンプラーを通過したガス中の HCl を捕集する部分とからなっている。ガスを供給する部分では 10% の塩酸水溶液を管内に 10 ml 入れその上を一定流速で空気を通過させた。HCl を捕集する部分は管壁に密着するよう長さ 4 cm の漏紙を置き、これに炭酸カリウム水溶液を浸み込ませたものを用い、入口と出口の HCl 濃度から通過率を求めた。HCl 濃度の測定は 5 ml の水に HCl を吸収させ PHメータで行った。又管壁のろ紙に指示薬 (コンゴレッド) の水溶液を浸み込ませて、ろ紙の変色の仕方からガスの吸収のされ方を観察した。

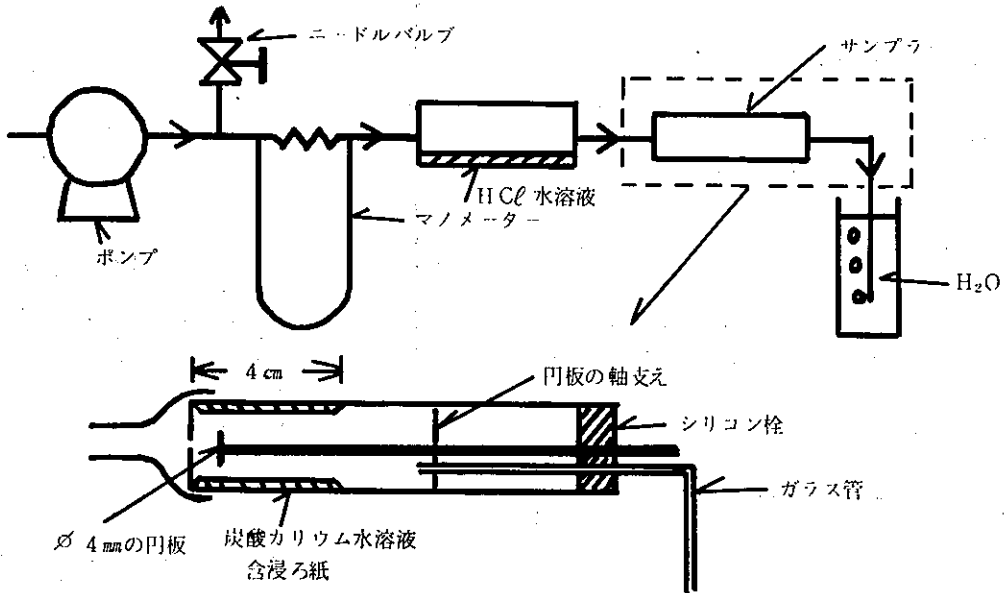


図2 吸収実験装置, 吸収実験に使用したサンプラー

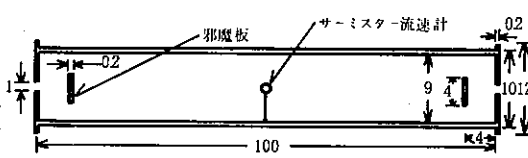


図3 風洞実験で使用したサンプラー

#### 4 サンプラー内部の流量

この実験で使用したサンプラーの形状を図3に示す。ここで取り入れ口には管外径(10 mm)より大きな径(12 mm)の円板が取り付けられており、取り入れ口から4 mmの位置に4 mm径の邪魔板がつけられている。これは内部流速測定用のガラスサーミスターに取り入れ口からの噴流が直接当たらないようにするために設けられたものである。

このサンプラーで取り入れ口の大きさを変化させ(φ0.4, 1.0, 1.5) 風洞内で風速の比例性を見たものが図4である。これより取り入れ口径0.4 mmの場合比例性が悪いことがわかる。図3のような形状の場合  $\Delta P_1$  (〔6〕式の第3項)は最悪の条件下で全圧力降下のおよそ2.2%であるのでこれを無視すると〔6〕式は、

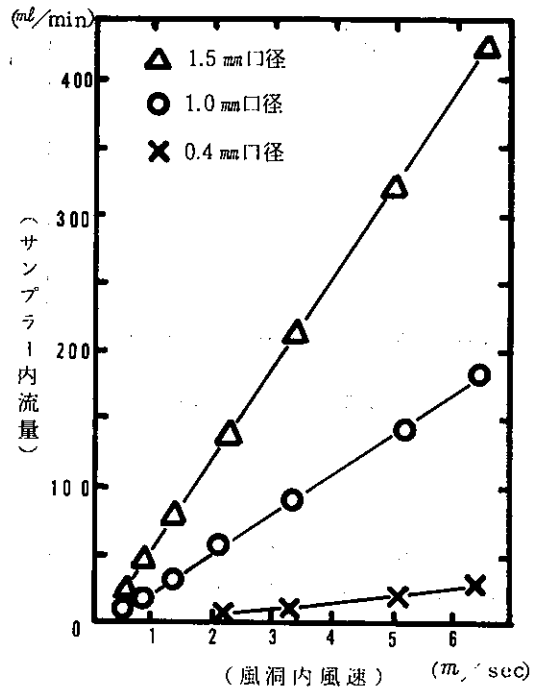


図4 風速比例性 (口径を変化させた場合)

$$k \rho U^2 = a \rho v^2 + b \mu v / d \quad (7)$$

となる。ここで両辺を  $k \rho v^2$  で割ると

$$(U/v)^2 = a' + b' v / d \cdot v \quad (8)$$

( $a'$ ,  $b'$ : 定数)

となり、 $v/d \cdot v (= 1/Re)$  が大きくなると  $U$  と  $v$  が比例しなくなることがわかる。〔8〕式を用いて図4の結果を整理したのが図5である。これはほぼ直線となり、 $(U/v)$  は  $Re$  によって決まることがわかる。従って着目している風速の範囲でサンプラー内部の流量と風速との比例性を得るには取り入れ口径を〔8〕式に従って選ばばよいことがわかる。

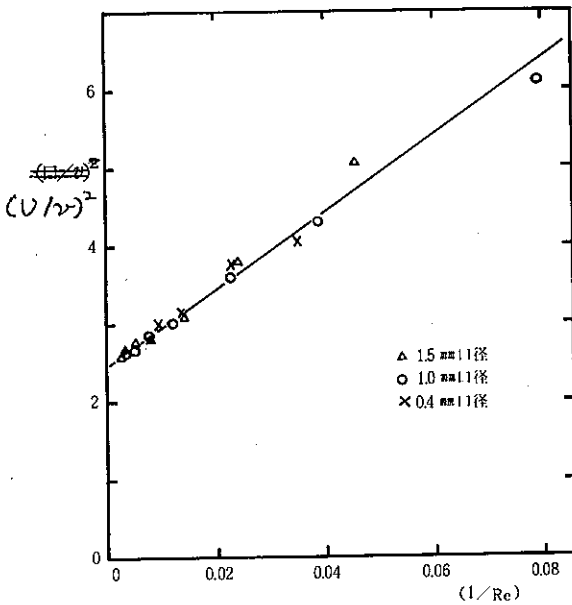


図5  $1/Re$  と  $(U/v)^2$  の関係

サンプラーの軸と風向が一致しない場合でもこの風速の比例性は保たなければならない。風洞内でサンプラー軸を風向に対して傾けて設置し、風速の比例性を見たのが図6である。これは取り入れ口径として1mmを選んで行った。サンプラーの軸と風のなす角を  $\theta$  とすると  $\theta = 75^\circ$  付近で比例性が悪くなっている。これは  $\theta$  を変化させていくと  $75^\circ$  付近で風の流れの様子が変化するためと考えられる。又、風速の比例性が得られなくなるのは  $75^\circ$  付近に限定されている。

ここで風洞内で一定風速のもとでサンプラーを回転

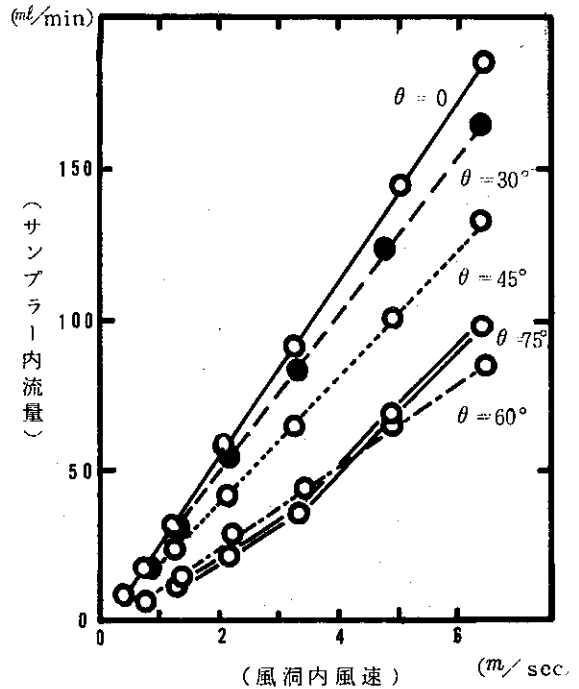


図6 風速比例性 (角度を変化させた場合)

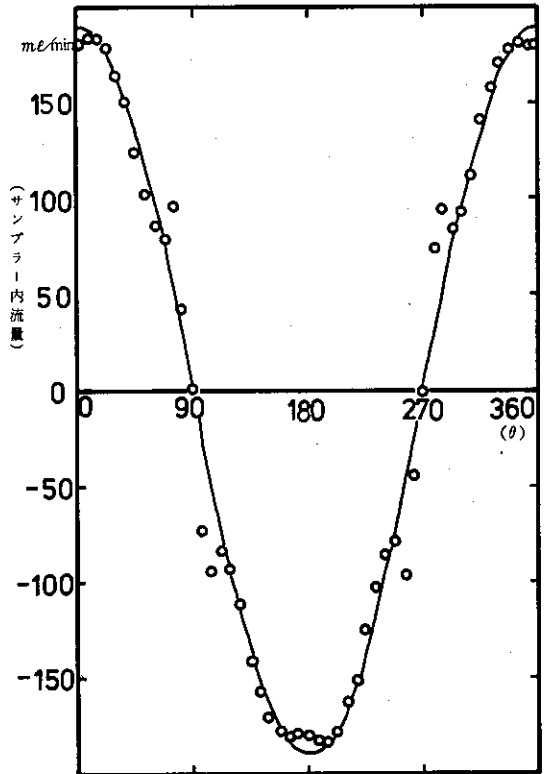


図7 風向依存性 (口径1mm, 風洞内風速6.4 m/sec)

し内部流量の変化を見たものが図7である。これは前述のように cosine カーブに近いことが要求される。図中の実線は cosine 成分である。この結果、実験に使したサンプラーの風向依存性はほぼ cosine カーブに一致し、75°付近でわずかにずれている事がわかる。従ってこのずれが測定値に与える誤差は小さい。このずれは又、図6に見られる75°付近の風速比例性のずれと対応している。

なお、サンプラーの形状を変化させることにより風向依存性のある程度制御できることがわかった。この実験は取り入れ口付近の形状を半球型、凹型、円板などに変化させて行った。この結果、管径より少し大きめの円板を取り入れ口につけることにより風向依存性を cosine カーブに接近させることができ、サンプラーとしてこの形状を選択した。

## 5 吸 収

吸収の際の問題のひとつは吸収試薬の選択であり、もうひとつは吸収試薬をどのように配置するかという形状の決定である。今回は吸収抵抗が問題とならない HCl を反応ガスとして用い、形状だけに着目して検討した。サンプラー内部の流れに対して抵抗を生じないで捕集できる方法としてろ紙に吸収液を浸み込ませる方法を用いた。又サンプラー内には取り入れ口からの噴流に対して障壁として小さな邪魔板を取り付けた。これはサンプラー内に入った空気がこれに当たり、吸収が速くなるように考慮したものである。この邪魔板の効果はろ紙に指示薬を浸み込ませて観察した。この結果、邪魔板がない場合は取り入れ口から管径の1~2倍の距離までは吸収がほとんど行われていないことがわかった。又、邪魔板がある場合は邪魔板付近でよく吸収が行われ、短い管でも効率よく吸収が行われることがわかった。

次に吸収の効果を見るために実験の項で述べた方法でガスの流入速度を変化させて HCl の通過率を見た結果が図8である。ここで通過率とは流入空気中の HCl に対してろ紙に吸収されずに管を通過した HCl の割合である。又、実験で示したものは Kennedy-Gormley の式から求めた通過率で、管内でのポアズイユ流れが仮定されている。<sup>4)</sup>この図からこのような構造のサンプラーではポアズイユ流れの場合よりも有効に吸収が行われていることがわかる。これは管の長

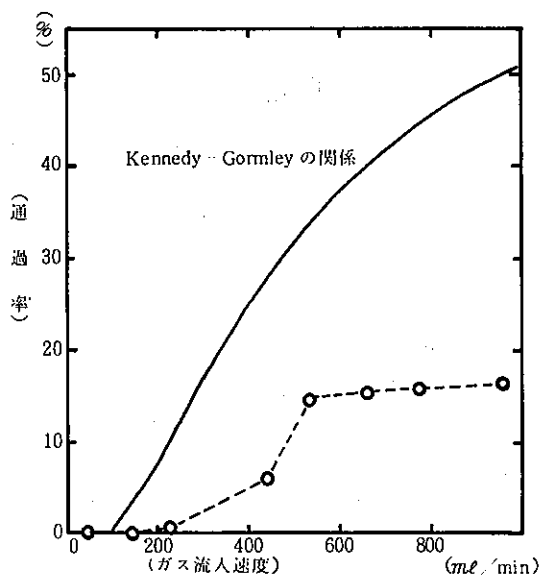


図8 流量と通過率の関係

さが短くても吸収が可能であることを示しており、管内の粘性による圧力降下を小さくし、風速比例性を改善することができ、さらに応答速度を速くするのに有効である。

## 6 ま と め

図2に示した形状のサンプラーでは外界の風速とサンプラー内部の流量はほぼ比例関係にあり、風向依存性も cosine カーブに近く、又取り入れ口に邪魔板を設けることで短い管で吸収が可能となり速い応答速度を得ることができる。これはフラックスを測定するのに必要な条件を満足している。

## 参 考 文 献

- 1) モーニン, アー・エス: 統計流体力学2, 総合図図, 448, (1976).
- 2) Montheith, J. L.: 生物環境物理学, 共立出版, 169, (1975).
- 3) Steen, B., : *Atm. Env.*, 11, 623, (1977).
- 4) 高橋幹二: 基礎エアロソル工学, 東京養賢堂, 58, (1972).