

大気汚染濃度分布の空間的一様性に関する一考察

国立公害研究所 飯倉善和、田村正行
溝口次夫、内藤正明

1. はじめに

大気汚染を防止するためには、汚染状況の測定・データの表示・蓄積とその分析、それらの知見に基づいた予測と制御を一連の流れとして体系的に把握する必要がある。特に広域的な汚染状況を適確に把握することは、公害防止のための効果的な施策を考える上で、あるいは施策の効果を判定する上での基本的な条件と考えられる。しかしこれまでのところ、測定局の配置をも含めた形で大気汚染管理の体系的な取扱いについてはあまり議論がなされていないように思われる。

点状する測定データ、ないし予測モデルを用いて求められる汚染濃度分布を二次元パターンとして効率的に処理する方法として、著者は既にフーリエ変換等の数理的方法を用いたモデルを提案している。(1)(2)ところで大気汚染状況を二次元パターンとして定量的に解析しようとする場合、まず測定データから空間的な汚染濃度分布を推定しなければならない。ここで推定された濃度分布パターンが現実の濃度分布パターンほどの程度忠実に再現しているかが問題となる。再現性に影響を与える要因としては、測定値自身の持つ誤差の他に、測定局の配置および測定値から二次元パターンへの内外挿によって生じる誤差が考えられよう。さらに現実の濃度分布パターンが未知なものであるため、推定された濃度分布パターンの再現性を評価すること自体がかなり難しい問題となる。

以上の問題点をふまえて、本論では測定局配置の適正化について、2つの観点から検討を加える。始めに一つの測定点における汚染物質濃度の連続的な変動パターンを用いて、標本化(サンプリング)の間隔と時間的な変動パターンの再現性の関係をスペクトル解析の立場から定式化する。ここでの定式化は空間的な変動パターンにおける測定点の配置の問題にも形式的には適用が可能である。しかし空間的な濃度分布を直接的に測定はできないため、予測モデルを用いて空間的な変動を推定する必要がある。次に測定点近傍における

汚染物質濃度の空間的な変動の特性を測定点における時間的な変動から推定することにより、空間的な変動の指標を示す。さらにこの指標を用いた測定局配置の適正化の方法を提案する。

2. 汚染物質濃度の時間的な変動の解析

国立公害研究所では所内にあるモニタリング施設により、 No_x 、 SO_x 、オキシダント等の大気汚染濃度の連続測定を行っている。図1にオキシダント濃度の日変動パターンの典型的な例を示す。図より明らかなよ

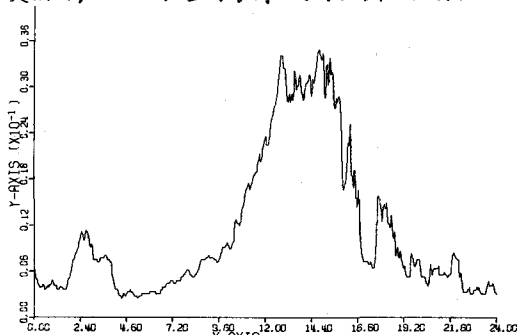


図1 オキシダント濃度の測定データ
(1978年12月2日)

うにオキシダントの濃度は昼間に高く、夜間に低い。このような非定常な時系列データをいかに効率よくサンプリングするかは、それ自体興味のある問題であるとともに、現実の空間的な汚染濃度分布の測定局の配置を考える上でも検討を要する問題であろう。ここでは1978年12月におけるオキシダント濃度の時系列データ(29日分)をスペクトル解析することによって、サンプリングの問題とパターンの再現性の関係を定式化する。

測定データ $x(t)$ とその周波数成分 $X(f)$ との関係は次のフーリエ変換およびその逆変換により与えられる。

$$X(f) = \int_0^T x(t) \exp(-2\pi f t / T) dt \quad (1)$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) \exp(2\pi f t / T) df \quad (2)$$

(2)式における積分の範囲を、低周波成分の領域($-f_0 < f < f_0$) だけに限って逆変換した日変動パターンを $X_{f_0}(t)$ としよう。

$$X_{f_0}(t) = \int_{-f_0}^{f_0} X(f) \exp(2\pi f t / T) df \quad (3)$$

図2に低周波成分から再現した日変動パターンの例を示した。図1と比べてみると、その基本的な変動は低周波成分によってよくあらわれていることがわかる。さらに一時間周期($f_0=1.0$)の周波数成分を用いれば日変動パターンのかばりの部分が再現できるといえよう。図2においては24時間(1日分)の濃度変化を示しているが、計算をする場合には、周辺の部分の再現性をよくするために1.7日分のデータをFFTを用いてフーリエ変換している。

次に低周波成分によって再現されたパターンと元の日変動パターンとの誤差を検討してみよう。図3に逆変換に用いた周波数成分の範囲(横軸)と再現されたパターンの平均二乗誤差(縦軸)を示した。但し縦軸は対数目盛で示してある。平均二乗誤差を計算するにあたって、まず24日分のデータから(4)式を用いて信号のパワースペクトルを求めた。

$$S(f) = \langle \frac{1}{T} X(f) \cdot X^*(f) \rangle \quad (4)$$

対応する周波数成分に対して、パワースペクトルを積分した値が平均二乗誤差となる。

$$\sigma^2(f_0) = \frac{1}{T} \int_0^T \langle (X(t) - X_{f_0}(t))^2 \rangle dt$$

$$= \int_{f_0 < |f|} S(f) df \quad (5)$$

但し $\langle \rangle$ は母集団における平均をあらわすものとする。図3より2時間周期($f_0=0.5$)までとった場合の再現誤差の標準偏差は約0.00/ppm($\alpha=10^{-6}$)であることがわかる。

ところでサンプリングと周波数帯域との関係については、標準化定理により次のようなことが知られている。すなわち信号波形の最高周波数成分を f_0 とすると $1/2f_0$ hour またはそれより短い時間ごとのサンプル値から信号波形を再現することができる。(3)したがって図2(b)程度の濃度変動のパターンを把握するためには、 $1/f_0=1.0$ (hour) の間隔でサンプリングすればよいと考え

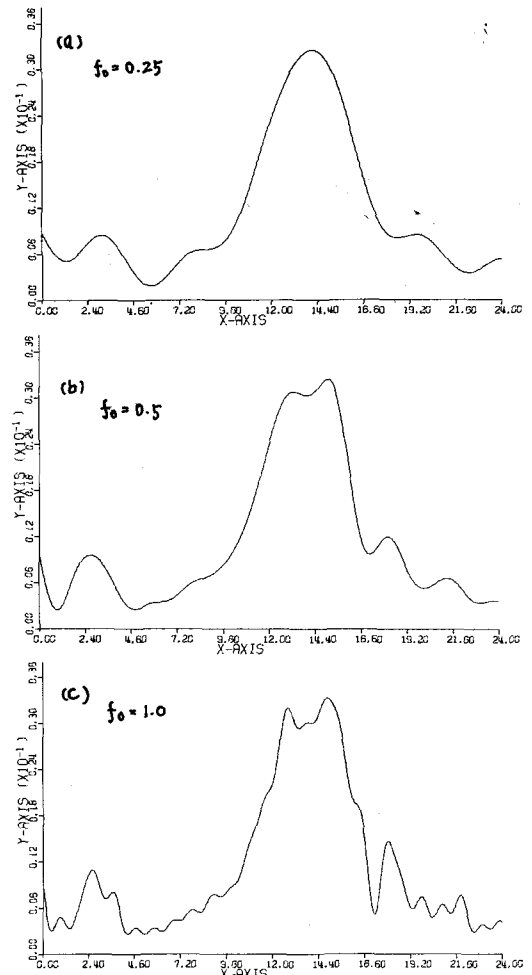


図2 低周波成分から再現した濃度パターン

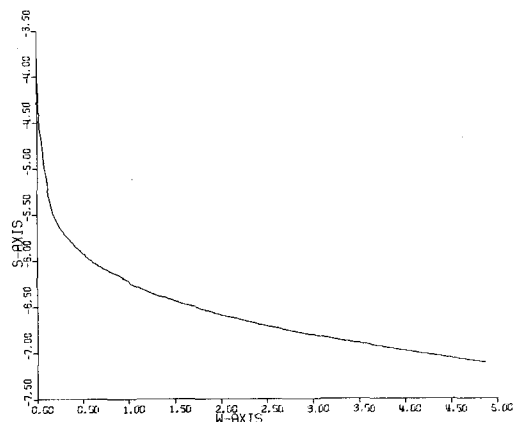


図3 再現した濃度パターンの誤差評価

られる。もちろん直接図1の濃度変動をサンプリングしても、エイリアシング等の影響があるため図4で評価した誤差がそのまま保証されるわけではない⁽⁴⁾しかし、サンプリング間隔を決める場合の指標として $\alpha^2(f)$ を示すことは有効であると考えられる。

3. サンプリングの効率化

前節において、サンプリング間隔と再現の誤差との関係を高周波成分の積分 $\alpha(f)$ によって定式化した。その場合、サンプリング間隔は一定であるという条件が前提になっており、誤差としての評価 $\alpha(f)$ も一日の平均的な値として示されている。しかし、図1のような非常時に濃度変化の場合、時刻によって各周波数成分のパターン再現に対する寄与の程度は違ってくると思われる。例えば午前4時頃の濃度変化と午後4時頃の濃度変化の速度は明らかに違っている。

このような視点から時刻別の再現誤差 $\alpha(t)$ を次の式を用いて求めてみた。

$$\alpha^2(t) = \langle \sum (x(t) - x_f(t))^2 \rangle \quad (6)$$

図4にその結果を示した。2時間周期($f=0.5$)の場合の平均的な誤差 $\alpha(f)$ は約 10^{-4} であることは先に示した。それを時刻別にみると午前中は 10^{-4} 以下の場合がほとんどであるのに対して、午後になると誤差がかなり大きくなっていくことがよくわかる。

これをサンプリングの方法という観点からみれば、時刻別にサンプリング間隔を変えた方がより効率的にパターンを再現できるということになろう。すなわち、午前中のサンプリング間隔を大きくとり、その分午後特に14時から18時にかけてのサンプリング間隔を小さくした方がよいと考えられる。

この考えをより体系的な方法として示せば次のようになる。

手順1. 帯域制限された再現パターンから時刻別の誤差を求める。

手順2. 要求される誤差に対応した周波数 $f(t)$ を時刻別に求める。

手順3. 周波数 $f(t)$ に対してサンプリング間隔 $\Delta t(t) = 1/2f(t)$ を割りあてる。

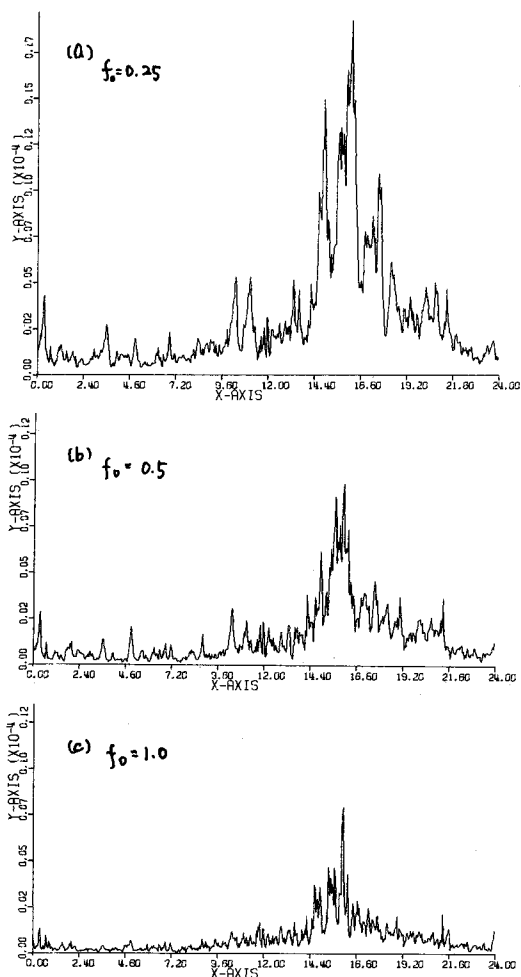


図4 再現した濃度パターンの時刻別誤差評価

手順4. 求められた時刻別サンプリング間隔 Δt に整合するようにサンプルポイントを設定する。

但し、時刻別の誤差 $\alpha(t)$ の変動が大きい場合、それを平滑化して用いないと安定した解が得られない。

4. 測定点配置の適正化

これまで時間軸上におけるサンプリングの問題について検討してきた。オノ節で示したサンプリングの効率化の手順は、空間的な測定局配置の問題にも原理的には適用が可能である。しかし現実の空間的汚染濃度分布は未知なものであるため、帯域制限することによって生ずる誤差を広域的な地域全体にわたって評価することは難しい。

ところで測定局の近傍における空間的な変動の大きさに関しては、測定局の時間的変動を解析することによってある程度その特性を把握することができるとはならないだろうか。すなわち測定データの時間的変動は汚染質の移流・拡散によって生じるものであり、測定局近傍の空間的変動を近似的にあらわしていると考えることができるとは。例えば風速が $1m/sec$ のときの測定データの1時間にわたる時間的変動は、測定局近傍約 $6 \sim 8m$ 程度の空間的変動を近似的に示していることになる。

本節では上述の観点から既存の測定局の時間的変動の指標を用いて測定局の配置を適正化する方法を提案する。測定局近傍の空間的変動の指標としてはオノ節で示した帯域制限することによって生ずる時間的変動パターンの再現誤差 $\sigma(f_0)$ を用いることができよう。もちろん測定局によって $\sigma(f_0)$ が異なってくるはずである。適正化の手順としては前節で示した時間軸上のサンプルポイントの選定と同様な方法が考えられる。

手順1. 各測定局ごとに時間的変動の指標 $\sigma(f_0)$ を計算する。

手順2. 要求される誤差に対応した周波数 f_0 を各測定局ごとに求める。

手順3. 周波数 f_0 に対して、測定局が代表する地域の範囲を推定する。

手順4. 空間上の各点が、ある測定局が代表する範囲に含まれるように、測定局が代表する範囲が重なりあわないように、測定局の増設廃止を決定する。

ほとんどすべての地方自治体において既に多くの大気汚染の測定局が設定されている現状を考えると、上で示した既存の測定局のデータを用いた測定局配置の適正化の方法は有効であろうと考えられる。但し、対

象とする汚染質によっても、測定局が代表する地域の範囲が異なること、あるいは一般に測定データが1時間値で記録されていることなど、実際の適用に関してはまだ解決すべき問題がいくつか考えられる。

5. おわりに

我々の国の大気汚染測定網は極めて充実し、貴重な情報を集積しつつある。しかしこれら測定網の設計が十分データの利用目的を踏まえた合理的なものであるかという点に関しては、まだ大いに検討の余地がある。特に多量のデータの収集、蓄積には人的にも物的にも多大の負担を要するので、その適正化（適切な観測地点と時点の選定）の方針を見出すことは重要であろう。この為に、測定局を空間的にどう配置するかについては、いくつかの研究がみられるが、一方時間的サンプルの適正密度を検討した例は少ないようである。

本報告は環境測定のサンプリング密度の決定について、時空間領域を統一的に扱ってその適正化の方策を見出そうとした一報である。したがってまだ考察の不十分な点は御了解頂きたい。

参考文献

- (1) 飯倉、安岡、内藤：広域汚染分布のパターン把握
環境問題シンポジウム、土木学会（昭和52年）
- (2) 飯倉：フーリエ変換を用いたブルーム式の重合計算、大気汚染学会（昭和53年）
- (3) 寺尾満：工業計画 P69
オーム社（昭和41年）
- (4) 日野幹雄：スペクトル解析 P176
朝倉書店（昭和52年）