〈論 文〉

分散分析による水質測定計画の測定頻度の最適化に関する研究

Study on optimization method of sampling frequency by
analysis of variance for water quality surveillans

岡 敬 一* 吉 見 洋* 井 口 潔* 小森谷 廣 子**
Keiichi OKA Hiroshi YOSHIMI Kiyoshi IGUCHI Hiroko KOMORIYA

Abstract

This study was aimed to present the procedure to obtain the optimized intervals of the seasonal and diurnal sampling in "Measurement Program" that the Governmental and prefectural agencies have been performing for more than ten years. In order to obtain the optimum sampling frequencies, the equation for maximizing the amount of information on the seasonal and diurnal variation was derived from an analysis of variance.

This method was successfully applied to the analysis of the rivers in the Kanagawa prefecture and the results showed that the attentions to the areal characteristics should be paid to intend the reasonable sampling strategies.

Key words: sampling frequency, analysis of variance, sampling program

1. はじめに

1970年に水質汚濁防止法が制定されて以来、国及び各地方公共団体は、水質測定計画に基づき、公共用水域の水質汚濁の状況を恒常的に監視してきている。水質測定計画の当初目的は、工場、事業場排水の公共用水域への影響の監視及び発生源規制施策の効果把握に重点が置かれていた。しかし、現在ではその内容も、個別発生源や限定支川を対象としたものではなく、流域面全体を対象とした、広域的かつ総合的な水質改善施策の企画、立案に活用できる基礎データの収集へと、重点が移行しつつあるものと考えられる。

こうした水質汚濁問題の変遷とともに、水質測定計画における調査地点数、測定項目数は増加し続けている。例えば、神奈川県では、1972年から1983年の間に、河川における調査地点数は62から79へ、また、測定項目数は22から32へと、それぞれ増加した。しかも、採水の頻度が全地点同一のため、データ量は増加の一途をたどっている。

このようなデータ量の増加にもかかわらず、現行の水質調査では、流域特性から生ずる水質変動の地点間

差異を考慮したものとはなっていない。すなわち、各地点の水質を統計的に比較してみる時、データ量は同じだが、平均値の信頼区間が異なる等、得られた統計量には質的な差があり、一律に評価することは適当ではないと言える。

従来の採水頻度に関する検討では、年平均値と標準偏差から求めた変動係数を一定の大きさに収めるように年間の採水頻度を求める方法等^{1)~4)}が採られて来ている。しかし、こうして得られた年間の採水頻度を、1日当たり何回採水し、それを年に何日行うか割り振るとき、季節変動や時間変動を適確に捕えるための、最適頻度に関する理論的検討はなされていない。

そこで、本研究では、分散分析から出発することにより、測定地点及び測定項目ごとに季節変動と時間変動の大きさを比較し、これらの変動を適確に捕えるための採水頻度を求める式を導出し、地点間で平均値の信頼区間を同一にする方法を検討した。

2. 使用データ

生活環境項目を中心として、1979~81年度の3ヶ年

* 神奈川県公害センター 〒241 横浜市旭区二俣川1-87-1, Kanagawa Prefectural Environmental Center, 1-87-1, Futamata-gawa, Asahi-ku, Yokohama, 241 Japan

** 神奈川県工業試験所 〒236 横浜市金沢区昭和町3173, Industrial Research Institute of Kanagawa Prefecture, 3173, Shouwa-machi, Kanazawa-ku, Yokohama, 236 Japan

分の測定結果^{5)~7)}から、河川71地点、11項目を選び解析に用いた。項目および現行の採水頻度を **Table 1** に示した。また、筆者らが提案している河川の総合水質指標 (WQI)^{8),9)} も利用して解析を行った。

3. 解析方法

水質変動は、人間活動や自然要因による各種の周期的な変動が、その大部分を占めているものと考えられる。その中でも、採水間隔の影響を受ける周期的な変動として、時間変動と季節変動が考えられる。そこで、分散分析を行い、時間変動と季節変動を分離することを試みた。

年変動は、長期的には傾向変動を表していると考えられるが、短期的には季節変動の繰り返しと考えられ、また、神奈川県における BOD 等生活環境項目の河川水質は、最近数年間は横ばいの状況にあるので、3年を繰り返しとする分散分析を、地点別、項目別に行った。

分散分析から最適頻度を求める解析手順を、**Fig. 1** に示した。

4. 式の導出

4.1 最適頻度式の導出

本研究で用いた、時間および季節を要因とする分散分析の二元配置モデル式は、

$$x_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

ここに、

x_{ij} : i 月の測定日の j 回目のデータ

μ : 母平均値

α_i : i 月の効果

β_j : j 回目の効果

ε_{ij} : x_{ij} に含まれる残差

と表される。(1)式のモデルによる分散分析表は **Table 2** に示す通りである。以下、**Table 2** から最適頻度式を導出する。

Fig. 1 Analytical procedure.

Table 1 Parameters used in the analysis and the present sampling frequencies

Parameter	Sampling frequency
pH, DO, BOD, COD, SS	4 times at 6-hour intervals/day × 1 day/month × 12 months/year = 48 times/year
PO ₄ -P, T-N, NH ₄ -N, NO ₂ -N, NO ₃ -N, Cl ⁻ , (WQI)	2 times at 12-hour intervals/day × 1 day/month × 12 months/year = 24 times/year

Table 2 Analysis of variance table corresponding to the model in this study

Factor	S	F	V	E(V)
A	S _A	F _A = k - 1	V _A = S _A / F _A	$\sigma_E^2 + l \times \sigma_A^2$
B	S _B	F _B = l - 1	V _B = S _B / F _B	$\sigma_E^2 + k \times \sigma_B^2$
E	S _E	F _E = (k - 1) × (l - 1)	V _E = S _E / F _E	σ_E^2
T	S _T	F _T = k × l - 1		
A : seasonal				
B : diurnal				
E : residual				
T : total				
S : sum of square				
F : degree of freedom				
V : mean square				
E(V) : expectation of mean square				
k : seasonal sampling frequency				
l : diurnal sampling frequency				
σ^2 : population variance				

総変動 S_T は次式で表される。

$$S_T = S_A + S_B + S_E \quad (2)$$

不偏分散 V の期待値は $E(V)$ だから、季節変動の不偏分散 V_A に期待値 $\sigma_E^2 + l \times \sigma_A^2$ を代入し、さらに季節変動の自由度 F_A に $k-1$ を代入すると、季節変動の平方和 S_A は(3)式で表される。

$$S_A = (k-1) \times (\sigma_E^2 + l \times \sigma_A^2) \quad (3)$$

同様に時間変動の平方和 S_B と残査の平方和 S_E を求めると(4)、(5)式となる。

$$S_B = (l-1) \times (\sigma_E^2 + k \times \sigma_B^2) \quad (4)$$

$$S_E = (k-1) \times (l-1) \times \sigma_E^2 \quad (5)$$

(3)、(4)、(5)式を(2)式に代入すると、総変動 S_T は(6)式で表される。

$$S_T = l \times (k-1) \times \sigma_A^2 + k \times (l-1) \times \sigma_B^2 + (k \times l - 1) \times \sigma_E^2 \quad (6)$$

ここで、各要因の母分散 σ_A^2 、 σ_B^2 、 σ_E^2 は、母集団では採水頻度 k と l によらない変数なので、総変動 S_T は k と l の関数と考えることができる。そこで、1年間の採水頻度を n ($n = k \times l$) とし、 S_T を連続関数と考え、 $ds_T/dk = 0$ と置き、 S_T を最大にする k と l を求めると(7)、(8)式となる。

$$k = \sqrt{n \times \sigma_A^2 / \sigma_B^2} \quad (7)$$

$$l = \sqrt{n \times \sigma_B^2 / \sigma_A^2} \quad (8)$$

(7)、(8)式の k と l の値のとき、 S_T は最大となるが、実際には k と l は整数値をとり、 $k \times l = n$ を満たすため、適当な値に近似することになる。

4.2 信頼限界を一定にする採水頻度式の導出

(7)、(8)式から求められる、 S_T を最大にする k と l を(6)式に代入し、現行の水質調査から予測される最大の総変動 $S_{\max}$ を求める。次に、平均値の95%信頼区間は、 t 分布で $t(0.05, N-1) \div 2$ とすると、

$$\bar{x} - 2 \times \sigma / \sqrt{N} \leq \mu \leq \bar{x} + 2 \times \sigma / \sqrt{N} \quad (9)$$

と表される。ここで、

N : 平均値の信頼区間を一定にするときの1年間の

採水頻度

$\bar{x}$: 年平均値

μ : 母平均値

σ : 母標準偏差

である。信頼限界を平均値の10%にするためには、

$$\text{原データの場合} : 2 \times \sigma / \sqrt{N} = 0.1 \bar{x} \quad (10)$$

$$\text{対数変換データの場合} : 2 \times \sigma / \sqrt{N} = 0.05 \quad (11)$$

と置き、 N を求める。ただし、対数変換データの場合、信頼限界は、平均値の10%強となる。(10)、(11)式を変形すると、それぞれ(12)、(13)式となる。

$$N = 400 \times \sigma^2 / \bar{x}^2 \quad (12)$$

$$N = 1600 \times \sigma^2 \quad (13)$$

ここで、現行の水質調査から予測される最大の総変

動 $S_{\max}$ を使い、母標準偏差 σ は、

$$\sigma = \sqrt{S_{\max} / (n-1)} \quad (14)$$

と推定できる。

(14)式で求めた σ を(12)、(13)式に代入すると、

$$N = 400 \times S_{\max} / \{(n-1) \times \bar{x}^2\} \quad (15)$$

$$N = 1600 \times S_{\max} / (n-1) \quad (16)$$

となり、この式を用いて平均値の95%信頼限界を平均値の10%とする1年間の採水頻度を求める。

5. 結果と考察

5.1 分散分析の結果

(1)式は、採水した月が同じならば α_i が同じ値をとり、採水した時間が同じならば β_j が同じ値になることを意味している。残査 ε_{ij} の原因には、降雨等の不規則な変動の他に、潮の干満のように本来は規則的な変化をしているが、採水間隔とは周期がずれるため、見かけ上不規則な変動を示しているものもある。このような理由で、(1)式がモデルとして妥当でない項目に、SSと塩素イオンがある。また、調査目的が、異常値の検出を目的とするpHも、(1)式に当てはまらない項目と言える。残査について正規性と等分散の検定を行った結果、pHとDO以外の項目は、対数変換を行うこととした。

分離された時間変動と季節変動の例を、Fig. 2に示した。Fig. 2はDOの例で、この地点では、時間変動は日照により、季節変動は水温により変動していた。

分散分析の結果をTable 3に示した。Table 3から、1日4回の調査項目は、SSを除き時間変動が有意となる地点が多かったが、1日2回の調査項目は、有意となる地点が少なかった。季節変動を見ると全ての項目とも年12回の測定を行っているため、有意となる地点が多かった。季節変動と時間変動の結果から、変動が有意とならない原因は、項目の特質ではなく、採水頻度にあると言え、1日2回の調査では、時間変動を十

Fig. 2 Change of DO at Sagami-Ohhashi.

Table 3 Number of locations with significant seasonal and diurnal variation⁺

Factor \ Parameter	pH	DO	BOD	COD	SS	WQI
Seasonal	54	69	71	63	66	60
Diurnal	51	67	47	41	20	52

Factor \ Parameter	PO ₄ -P	T-N	NH ₄ -N	NO ₂ -N	NO ₃ -N	Cl ⁻
Seasonal	53	63	63	57	60	51
Diurnal	6	12	14	20	9	17

⁺The number of sampling stations is 71. Significance level of the F test is 1%.

分に捕えられないためと言える。この理由は、生活系排水の汚濁排出パターンが2山型になっており、12時間の採水間隔では同じ程度の汚濁水を採水してしまうためと考えられる。また、生活系排水による汚濁以外にもこのような例は見られ、感潮域の塩素イオンは典型的な例である。しかし、1日2回の調査結果を使って求めたWQIは、時間変動が有意となる地点が多く、WQIの有効性を示していると言える。

5.2 現状の採水頻度におけるkとlの最適な組合せ

(7), (8)式は、季節変動の分散 σ_a^2 と、時間変動の分散 σ_b^2 を比較して、変動の大きい要因の採水頻度を多くすることを意味している。このため、年間の採水頻度が同一の場合には、(7), (8)式のkとlの値のとき水質変動の大きさを示す総変動 S_T は最大となり、その地点における水質を適確に把握することができる。

(7), (8)式により、現状の年間の採水頻度を固定して求めた、水質を適確に捕えるkとlの最適な組合せの例として、DOとBODの結果をTable 4に示した。DOは、組合せの種類が多様で、全体にわたっているが、BODでは、季節変動を多く測定する方に偏っている。これは、DOが飽和度の決まった項目で、水量にはあまり影響されず、水温、日照量やBOD等により増減するのに対し、BODは、水量に影響されるため、人為汚濁による時間変動よりは、水量の季節変動による濃度変化が大きいと考えられる。

5.3 平均値の信頼限界を一定にするためのkとlの最適な組合せ

Table 5に、(15)式から求めた、DOの年平均値の95%信頼限界を、年平均値の10%にしたときの最適な組合せを示した。Table 6には、(16)式から求めたBODの結果を示した。表を見やすくするため、採水頻度に上下限を設け、組合せの数を限っている。

組合せを見ると、5.2の結果と同様に、DOは多様な組合せになっており、BODは季節変動を多く測定する

Table 4 Number of locations corresponding to each set which makes variation maximum under the present program

Frequency	days/ year	1	2	4	6	12	24
	times/ day	48	24	12	8	4	2
Number of locations	DO	2	5	12	12	25	15
	BOD			1	8	18	44

Table 5 Number of locations corresponding to each set of the optimum seasonal and diurnal frequencies which makes variation maximum and confidence limit to be 10% (DO)

times/day	days/year	2	4	6	12	24
1		2	2	8	1	5
2		1	2	4	2	0
4		1	0	10	6	2
8		2	5	1	2	0
12		4	7	2	2	0

Table 6 Number of locations corresponding to each set of the optimum seasonal and diurnal frequencies which makes variation maximum and confidence limit to be 10% (BOD)

times/day	days/year	2	4	6	12	24
1		0	0	0	2	22
2		0	0	0	7	11
4		0	0	1	8	7
8		0	1	2	6	0
12		0	0	2	2	0

方に偏っている。また、BODの方がDOの2倍ほど多く測定する結果となっており、水質変動の大きい項目と言える。

6. ま と め

水質変動を季節変動と時間変動に分離し、従来行われていなかった、変動の大きさを考慮した解析方法を示し、神奈川県の水質データを利用して採水頻度の解析を行った。その結果、地点や項目により多様な採水頻度の組合せが得られた。

地点により採水頻度に差をつけることは、平均値の信頼区間を各地点同一にするために必要なことと言える。しかし、項目毎の採水頻度については、同一の汚濁源によると思われる項目や相互に関連のある項目は、汚濁原因の解明や水質予測等のデータ利用の面から考え、同一の採水頻度にする方が望ましいと言える。そのためには、関連のある項目のグループ化を行い、結果を平均したり、WQIのような総合指標により、最適な組合せを求めることが必要と考えられる。

今回は、地点間の比較をしやすいするため、平均値の信頼区間を同一にする採水頻度について解析を行ったが、最終的な採水頻度の決定には、利水目的や費用効果等も含めた総合的な検討が必要であり、今後の課題である。

(原稿受理 昭和59年 5月25日)

引 用 文 献

- 1) J.C. Loftis, R.C. Ward (1980) Water Quality Monitoring Some Practical Sampling Frequency Conciderations, *Environmental Manegement*, 4, No. 6, 521-526.
- 2) R.C. Ward, J.C. Loftis, K.S. Nielsen, R.D. Anderson (1979) Statistical Evaluation of Sampling Frequencies in Monitoring Network, *Journal WPCF*, 51, No. 9, 2292-2300.
- 3) R.C. Ward, K.S. Nielsen (1978) Evaluating The Sampling Frequencies of Water Quality Networks, USEPA, EPA-600/7-78-169.
- 4) 松岡譲, 内藤正明 (1983) 水質監視システムの合理化に関する研究の現状と問題点—観測の時間的空間的配置の適正化を中心として—, 水質汚濁研究, 6, 1-13.
- 5)~7) 神奈川県 (1979, 1980, 1981) 神奈川県水質調査年表.
- 8) 吉見洋, 岡敬一, 井口潔, 関野廣子 (1982) 相模川水系の水質解析について, 水質汚濁研究, 5, 193-200.
- 9) 岡敬一, 吉見洋, 井口潔, 小森谷廣子 (1983) 総合水質指標による神奈川県内河川水質の解析, 水質汚濁研究, 6, 407-413.