

1. はじめに

河川の水質に影響する要因は様々あるが、雄物川のような人為的汚濁源が少なく、従って自然汚濁の影響の大きい河川では、降雨量や流量、水温などの水文、気象因子が、水質変動に大きく関係していると思われる。そこで著者は、水分因子と河川の水質変動との関係について、季節毎に一ヶ月程度の水質調査をくり返し、変動特性やそのモデル化について検討して来た。¹⁾

本研究では、これらの水質調査データと新たに行なった調査データを基に、特に春と秋の二季節について簡単な水質モデルを用い、水分因子により河川の水質変動をどの程度評価することができるかを検討してみた。水質を、流量との基礎的關係に基づく傾向成分とその他の成分とにできるだけ分離し、この残差成分の構造を評価するのに統計的方法を用いた。即ち、主として重回帰分析と発見的自己組織化法 (GMDH) を用い、カルマンフィルターによる方法も試みた。これらの方法による観測値との適合の良否については、相関係数や残差の標準偏差で考察し、用いる方法の違いについても弱干の検討を行なった。

2. 雄物川流域と調査方法

雄物川流域は、面積約 4,600km²、人口約66万人で、その概要を図-1に示した。流域には、31市町村があるが、最大の人口(約25万人)を持つ秋田市が臨海部に位置するのでこれを除けば、人口4~5万人の3市が比較的大きな汚濁源と言える。工場などもほとんど臨海部に位置し、河川の水質に与える影響は少ないと思われる。

水質調査は、1日1回、ほぼ正午±1.5時間内に採水し測定する方法とした。昭和49年と同52年の10月14日~11月13日までの31日間を秋期とし、同じく50年と53年の3月24日~4月23日までの31日間を春期(融雪期)と呼ぶことにする。2回の調査の間には、上述のように3年の開きがあり、水質調査項目も弱干異なっている。

降雨量と気温については、流域内9ヶ所の測候所の同日の平均値を用いた。調査期間内の流量、降雨量及び気温については、まとめて表-1に示した。

3. 水質の評価方法

雄物川の水質が、流量などの水文因子により大きく影響されることはこれまでの調査から明らかに認められる。

このような河川について、時間的な水質変動は、tを短期間として周期成分を除いて考えると一般に次のように表わすことができる。

図-1 雄物川流域

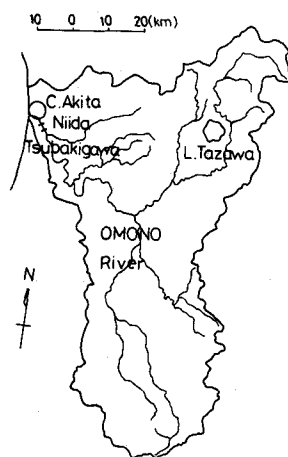


表-1 水文因子の季節別平均値

季節	水文因子	流量 (m ³ /sec)				降雨量 (mm/日)			気 温 (°C)			
		min	max	av	sd	降雨日数 (日)	max	av	min	max	av	sd
春 期	50 年	281	1,100	567	208	17	22.6	3.1	-0.76	13.5	7.16	3.66
	53 年	253	1,046	544	184	20	12.0	2.4	-0.47	12.5	5.37	3.05
秋 期	49 年	107	303	171	53.5	22	33.3	5.6	0.83	14.6	8.67	3.33
	52 年	59.2	174	83.2	33.6	17	21.1	3.1	1.40	16.3	10.5	3.60

$$W(t) = W_T(t) + W_R(t) \quad (1)$$

ここに、 $W(t)$: t 日の水質、 $W_T(t)$: 水質の中の傾向成分、 $W_R(t)$: 同じくランダム成分。

$W_T(t)$ は、河川の持つ物理的な流送作用や溶解機構などにより持たせられる成分である。この関数表示には多くの未解決の問題があるが、ここでは一応 t の関数型で表現できるものとし、水質と流量との基礎的關係から次の式を用いるものとした。係数 a 、 b については、これまでの水質調査を基に、年間を通した全ての季節のデータから求めた回帰直線を使用した。¹⁾

$$W_T(t) = a \cdot Q(t)^b \quad (2)$$

これに対し $W_R(t)$ は、これを全てランダムなものと考え、不規則に変動する成分を表わす。また、水質の中でも無機物や有機物、あるいは溶解性物質や浮遊性物質などにより、水質に占める両成分の割合が異なることも考えられる。河川の水質評価や予測には、 $W_T(t)$ と同様に $W_R(t)$ の構造を明らかにすることも重要と考えられる。そこで $W_R(t)$ については、この構造を統計的に求めることにし、重回帰分析 (MR と略、以下同様) と発見的自己組織化法 (GMDH) を用い比較検討してみた。

Hins²⁾ らは、水質に対する独立変数として流量、水温と水路の形態の三つが水文的に重要な因子と考えている。本研究では、資料の入手の難易や表面流出の性質などから流量、降雨量、気温の三つを選択した。

a) 重回帰分析

$$W_R(t) = f(\bar{Q}(t), \bar{R}(t), \bar{T}(t)) \quad (3)$$

$\bar{Q}(t)$ は、影響流量を表わし、当日を含めた過去 3 日間のデータから求めた。即ち

$$\bar{Q}(t) = \sum_{\tau=0}^2 W(\tau) \cdot Q(t-\tau), \quad W(\tau) = \frac{\phi_{WQ}(\tau)}{\sum_{\tau=0}^2 \phi_{WQ}(\tau)} \quad (4)$$

ここに、 $W(\tau)$: τ 日の重み、 $\phi_{WQ}(\tau)$: 水質と流量との相互相関係数、 τ : 時間遅れ
影響降雨量 $\bar{R}(t)$ 、影響気温 $\bar{T}(t)$ についても同様である。

b) GMDH

$$W_R(t) = f(Q(t), Q(t-1), Q(t-2), R(t), R(t-1), R(t-2), T(t), T(t-1), T(t-2), W(t-1), W(t-2)) \quad (5)$$

GMDH の場合、下記のような基礎関数が考えられるが、何を使うかも重要な問題である。

$$f = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2 + a_4 x_1^2 + a_5 x_2^2 \quad (6)$$

$$f = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_1 x_2 \quad (7)$$

$$f = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 \quad (8)$$

本研究では、主に(6)式の二次多項式を用いた。また、最適構造式の決定は、残差の大小のみによらずなるべく簡単な構造式を用いることにした。これは、構造式が複雑になる程訓練データへの適合性は良くなるがこれを用いた評価や予測は逆に悪くなる傾向があるためである。³⁾

c) カルマンフィルター (KF)

元来カルマンフィルターは、予測に用いる方法⁴⁾であり、従ってここでも、水質データを傾向成分やランダム成分などに分離せず当てはめて検討してみた。

$$W(t) = f(Q(t-1, t-2, t-3), R(t-1, t-2, t-3), T(t-1, t-2, t-3), W(t-1, t-2, t-3)) \quad (9)$$

なお、傾向成分として流量との明確な関係が認められず、関数表示が困難な水質項目については、上述のそれぞれの方法をそのまま当てはめて水質の評価を行なった。

4. 結果と考察

(1) 水文因子の相違について

春期、秋期ともに、年度は異なるが月日の同じ期間を選んでいるが、流量、降雨量、気温などの水文、気象因子はかなり異なることが認められた。秋期の場合、49年は周期的に降雨がくり返されて、流量もそ

れに応じて変動し、平均流量も比較的大きな値を示したが、52年は、前半にほとんど降雨がなく、流量は減少して渇水流量に近づき、最大流量も200 m³/sec以下と49年と比べて大巾に下回った。春期の場合、流量はほとんど同じような変動を示したが、50年と比べて53年は、平均気温がかなり下回り、融雪が1～2週間位遅れる傾向が認められた。そしてこのことが、水質にも大きな影響を与え、水質によっては変動のパターンがかなり異なるものも見られ、全体として幾分高い濃度を示す傾向が認められた。

(2) 溶解性無機物質

a) 総アルカリ度

図-2に、アルカリ度と流量との関係を季節別、年度別に示した。これによると、アルカリ度については、年度毎の相違もあまり認められず、流量との関係で水質を求めることが可能と思われる。

図の直線は、全ての季節のデータから求められたもので、¹⁾次のように表わされる。

$$W_T(t) = 49.7 \cdot Q(t)^{-0.278} \quad (9)$$

秋期の場合、52年は比較的流量の安定した時期であったが、図-2に示されるようにアルカリ度は、ほぼ(9)式を満足して増減しており、これ以上水質の構造を明らかにする必要は少ないと思われる。

春期について、アルカリ度は、融雪にもあまり

影響を受けない項目で53年にもこの傾向が見られるが、50年と比べて弱干高い値を示す傾向が認められた。従って、この傾向を構造式で表現できるかどうかを検討するために、50年のデータにより構造式を決定し、この式に53年の水文因子データを当てはめてアルカリ度の評価を行なってみた。傾向成分として(9)式を用い、ラムダム成分の評価に重回帰式とGMDHを使用し、結果を春期について図-3に示した。用いた構造式は次の通りである。

$$\begin{aligned} \text{GMDH: } W_R(t) = & 1.15 + 0.178W(t-2) - 2.79T(t-2) - 0.0398W(t-2) \cdot T(t-2) - 0.0480 \\ & W(t-2)^2 + 1.50T(t-2)^2 \end{aligned} \quad (10)$$

ただし、流量は1/100、降雨量と気温は1/10してある。

$$\begin{aligned} \text{MR: } W_R(t) = & 1.36 - 0.000655\bar{Q}(t) - \\ & 0.0303\bar{R}(t) - 0.0993\bar{T}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \bar{Q}(t) = & 0.552Q(t) + 0.274Q(t-1) + \\ & 0.174Q(t-2), \quad \bar{R}(t) = R(t-2), \\ \bar{T}(t) = & 0.413T(t) + 0.338T(t-1) + \\ & 0.249T(t-2) \end{aligned}$$

図-3より、評価値は、53年の弱干高い水質を必ずしも十分に表現できてはいないが、GMDHとMRの両方法ともに水質変動によく追従して変化しており、50年のデータによる構造式が53年にも比較的良く当てはまることが認められる。また、構造式の中では、平均気温が選択されていることも注目される。

図-2 アルカリ度と流量

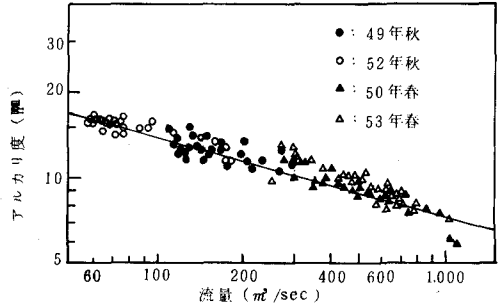


図-3 アルカリ度の評価

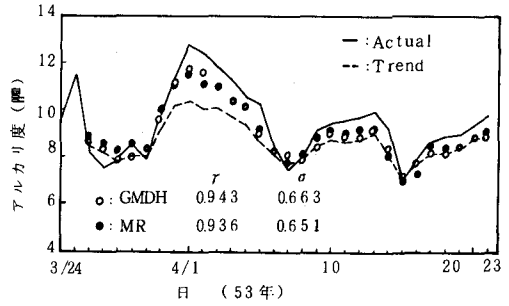
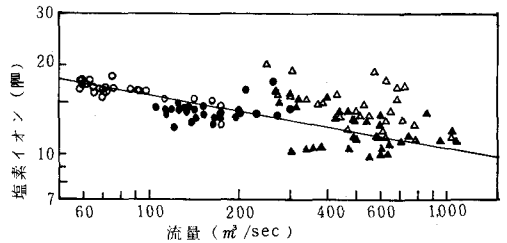


図-4 塩素イオンと流量



b) 塩素イオン

図-4に塩素イオンと流量との関係を示した。

これによると、52年の秋期は、塩素イオンが回帰直線にはほぼ一致しており、これ以上の構造の決定は不必要と思われた。

回帰直線の方程式は次の通りである。

$$W_T(t) = 3.6.6 \cdot Q(t)^{-0.182} \quad (12)$$

春期については、50年と53年ではかなりの相違があり、一般に53年の方が幾分高い値を示している。特に53年の前半は、これまでにない高い値を示し、全体としても(12)式を下回る値はほとんど見られなかった。従って、アルカリ度と同様に、50年の構造式から53年の水質評価を試み、結果を図-5に示した。用いたGMDHの構造式は次の通りである。

$$\begin{aligned} W_1(t) &= -0.205 + 1.66W(t-2) + 1.84T(t-2) - 0.887W \\ &\quad (t-2)T(t-2) - 0.245W(t-2)^2 - 1.78T(t-2)^2, \\ W_2(t) &= 2.83 - 0.818Q(t) + 1.26W(t-2) - 0.0224Q(t) \\ &\quad W(t-2) + 0.0525Q(t)^2 - 0.209W(t-2)^2, \\ W_R(t) &= -0.0639 + 1.09W_1(t) - 0.0948W_2(t) - 0.429 \\ &\quad W_1(t)W_2(t) + 0.173W_1(t)^2 + 0.282W_2(t)^2 \quad (13) \end{aligned}$$

53年3月末までの塩素イオンの高い濃度は、他の水質とも異なり特異な傾向であった。そのため、水質の評価も3月末まではほとんど一致せず、構造式そのものが合っていないためと考えられたが、4月以降は、かなり高い傾向を示した実測値の変動にはほぼ完全に追従しており、前述のような水文因子のずれが水質変動に大きく影響していることが認められる。MRについては、傾向はほぼ合っているが絶対値にかなりの差があり、十分に評価しきれていない。

総硬度や硝酸性窒素についても、53年の方がかなり高い値を示し、GMDHでもMRでも十分に評価することは困難であった。従って、水質によっても、また季節によっても水文因子で比較的良く評価できるものとそうでないものに分かれ、これらは水質の汚濁源や流出構造の違いによるものと思われ、更に検討が必要である。

(3) 浮遊性物質

a) 濁度

流量と濁度との関係を、春期の場合について図-6に示した。図中の回帰直線式は、次の通りである。

$$W_T(t) = 0.0349 \cdot Q(t)^{1.04} \quad (14)$$

53年のデータに(14)式が良く当てはまっているこ

図-5 塩素イオンの評価

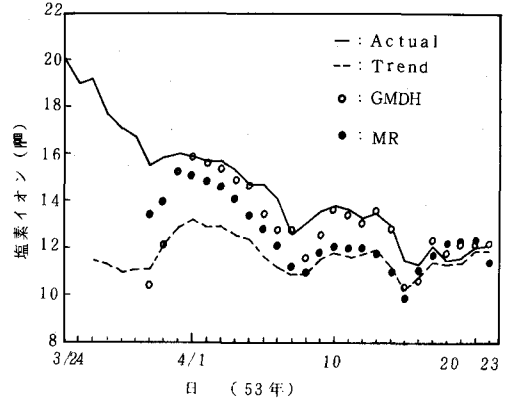


図-6 濁度と流量

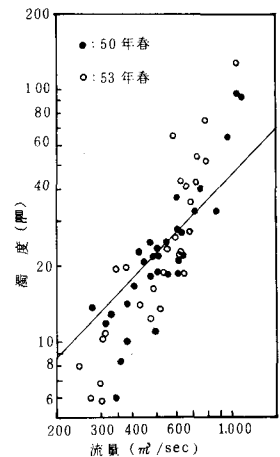
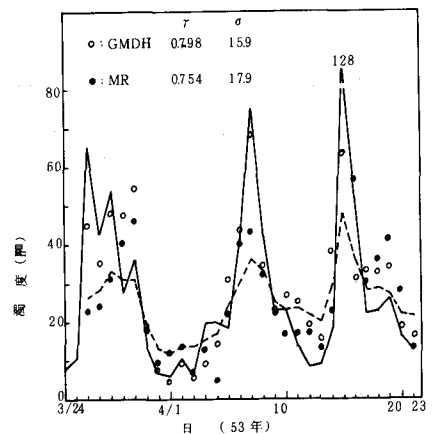


図-7 濁度の評価



とが認められる。図-7には、50年の構造式を基に53年のデータに当てはめた場合の結果を示す。

この時のGMDHの構造式は次の通りである。

$$\begin{aligned} W_1(t) &= -41.1 + 1.9Q(t) + 4.79T(t-2) \\ &\quad - 10.1Q(t)T(t-2) + 0.0662 \\ &\quad Q(t)^2 + 19.6T(t-2)^2, \\ W_2(t) &= -1.03 + 8.98T(t-2) - 2.70R(t-1) \\ &\quad + 19.0T(t-2)R(t-1) - 1.09T \\ &\quad (t-2)^2 - 3.49R(t-1)^2, \\ W_R(t) &= -1.57 + 0.883W_1(t) + 0.375W_2(t) \\ &\quad + 0.0150W_1(t)W_2(t) + 0.00903 \\ &\quad W_1(t)^2 + 0.0658W_2(t)^2 \quad (15) \end{aligned}$$

これによると、この期間の最大値に対する評価値は、約半分と良くないが、これを除けば水質変動によく合致しており、極大と極小値への追従性もかなり良くなっている。

従って、50年の構造式が53年の水質変動を良く評価できており、水文因子による方法が有効なことを示していると思われる。

構造式には、流量の他に降雨量と気温が選択されており、融雪期の流出機構を考える上でこれらの変数が重要なことを示している。

秋期についても、ほぼ良く合うことが認められた。MRについても同様の結果が得られたが、弱干適合性が良くなかった。

b) SS

図-8には、同じくSSについて秋期の結果を示した。

これによると、SSが約5 μ 以下についてはGMDH、MRともに評価値がマイナスとなり、分散の大きい水質の評価が困難なことを示している。この期間の評価値を $W_T(t)$ によるものとするとかかなり改善されている。また、極大値の評価は、GMDHよりも2変数によるMRの方が良く、幾分大きめであるがほぼ適合する値を示した。

(4) COD

図-9に、CODと流量との関係を示した。図の回帰直線式は次の通りである。

$$W_T(t) = 0.10.0Q(t)^{0.523} \quad (16)$$

これによると、52年の秋期は流量がかなり少なく、この時のCODは(16)式を大きく外れている。また、降雨時の極値は、ほぼ49年と同程度の値であった。

前述のように、秋期については流量がかなり異なったので評価は外挿部分が多くなったが、(16)式を基本として49年の構造式により、傾向成分からの変動をどの程度水文因子で表現できるかを52年について検討してみた。用いた構造式は、GMDH、MRについてそれぞれ次の通りである。

図-8 SSの評価

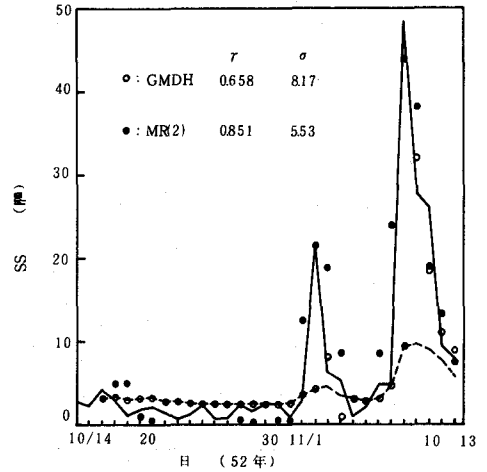


図-9 CODと流量

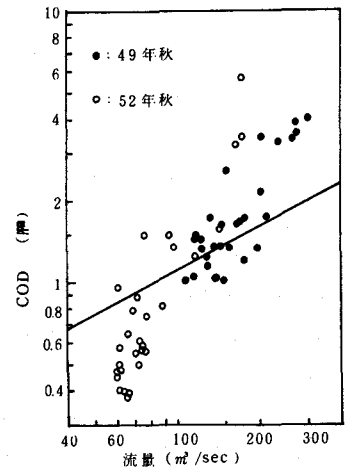


図-10 CODの評価(秋期)

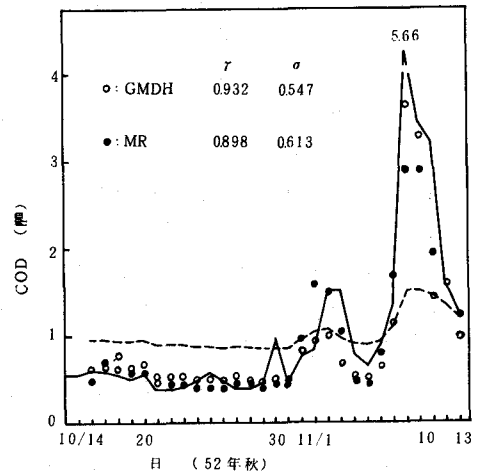


図-11 CODの評価(春期)

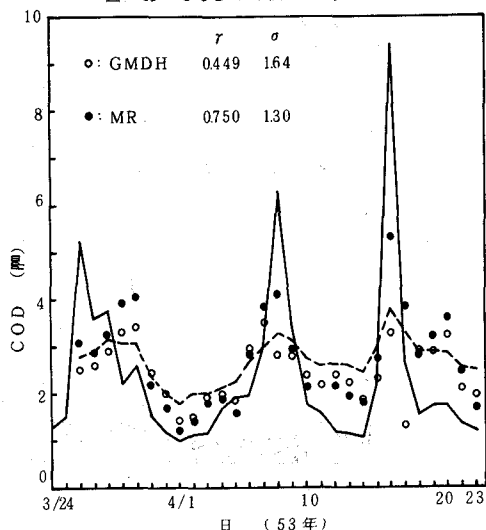
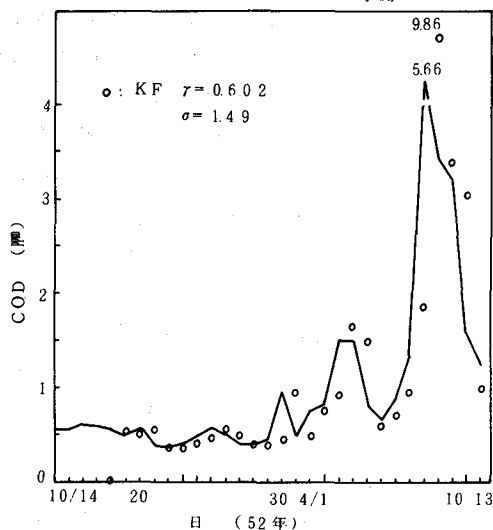


図-12 KFによるCODの予測



$$\begin{aligned}
 \text{GMDH: } W_R(t) &= -0.122 + 1.12W_1(t) - 0.655W_2(t) - 5.29W_1(t)W_2(t) + 2.46W_1(t)^2 + 3.09W_2(t)^2, \\
 W_1(t) &= -1.52 + 0.171Q(t-2) + 1.66Q(t) - 0.681Q(t-2)Q(t) + 0.0739Q(t-2)^2 + 0.174Q(t)^2, \\
 W_2(t) &= -0.994 + 0.707Q(t) + 0.410W(t-2) - 0.617Q(t)W(t-2) + 0.0714Q(t)^2 + 0.142W(t-2)^2 \quad (17) \\
 \text{MR: } W_R(t) &= -0.609 + 0.00371\bar{Q}(t) + 0.0921\bar{R}(t) - 0.00591\bar{T}(t) \quad \bar{Q}(t) = Q(t), \\
 \bar{R}(t) &= 0.399R(t-1) + 0.601R(t-2), \quad \bar{T}(t) = 0.259T(t) + 0.390T(t-1) + 0.351T(t-2) \quad (18)
 \end{aligned}$$

結果を図-10に示したが、これによると、評価値は、降雨後のピーク値に対しては良くないが、特に降雨のない時の非常に小さな値によく追従して変化しており、全体としてよく水質変動を表わしていると思われる。MRについても、無降雨後の濃度の極大値に対してずれはあるが良く合っており、全体として良く表現していると考えられる。従って秋期については、流量はかなり異なったが水質の流出構造は年度は異なっても類似していると思われ、このような方法が水質変動の評価にかなり有効であると思われる。

同様に春期の場合について、結果を図-11に示す。春期のCODは、50年と53年ではかなり変動の傾向が異なり、全体として53年はかなり小さな値を示した。が一応秋期と同じように50年の構造式を基に53年の水質評価を行なってみた。図-11によると、評価値はどちらかと言えば前半の適合性が良く、後半には極大極小ともにあまり合わない傾向が見られる。この中でもMRの方が弱干適合性が良くなっている。これは、後半になってCODの実測値が傾向成分よりかなり小さめになったため、水質評価に当っては、傾向成分の把握も大きな意味を持つことを示していると思われる。

以上、水質や季節によって、水文因子による水質評価がかなり良く合う場合とまだ不十分な場合とあることがわかったが、雄物川のような人為汚濁の少ない河川については、水文、気象条件が同じであればある程度水質の評価が可能であり、基本的に有効な方法であると思われる。

(5) カルマンフィルターの適用

図-12に、KFを秋期のCODに当てはめて予測した結果を示した。これによると、予測値はかなり良く実測値に合致しており、有効な方法と思われる。が、単位時間だけ予測値がずれることや、日単位で水質を考える時分散の大きい項目はピーク値に対する適合性が悪くなるなどの問題もある。従って、時間単位の水質に用いる方がより有効になるものと思われる。他の水質についても同様のことが言える。

5. まとめ

年度は異なるが同じ月日の1ヶ月の水質調査データを基に、水質を傾向成分とその他の成分に分け、それ

ぞれに関数型を与えて一方から構造式を導き、これを他方に当てはめて水質評価を行なった結果を要約すると次の通りである。

- 1) 季節や水質により、年度毎に傾向成分がほとんど同じ場合とかなり異なる場合とがあり、水質評価にはこの傾向成分の把握がかなり重要である。季節、水質及び水文条件が類似していれば、傾向成分だけで水質評価を行なうことも可能である。
- 2) ラムダム成分の評価は、季節と水文条件が類似している構造式を用いればかなり有効である。が、水質毎の変動特性を十分に把握し、それぞれの水質に合致した方法が必要である。
- 3) 用いる方法の相違については、MRは一般的に良く適合するというわけではないが平均的に適合しており、それに対しGMDHは、かなり良く適合するものと比較的あまり合わないものとに分かれる。この原因の一つは、用いる構造式の次数の違いによるものであろう。

複雑な原因から成る河川の水質を評価するのに、GMDHなどの統計的方法を用いて構造式を決めてゆくという方法は重要と思われ、今後とも水質や季節による相違について検討を進めてゆくつもりである。

参考文献

- 1) 羽田守夫：雄物川の水質の変動特性とそのモデル化、土木学会論文報告集、No.265、pp. 73~81、1977
- 2) Hines W. G., et al. :Hydrologic analysis and river - quality data programs, Journal WPCF, Vol. 49, No.9, pp. 2031~2041, 1977
- 3) 田中雅史他：水質データへのGMDHの適用、農業土木学会論文集、No.74、pp. 24~31、1978
- 4) 寺島泰：河川水質日変動特性の解析ならびに重回帰分析、Kalman filterによる日変動の予測、第11回衛生工学研究討論会講演論文集、pp. 130~135、1975