

＜分析・測定＞

着色排水の測定評価の方法について*

宇都宮 高 栄**・山 口 慎 一**・青 木 啓 子**
沢 田 稔之佑**

1. はじめに

こんにち、日常生活で目に映る都市河川が、身近な水辺環境として、注目されてきている。しかし、着色排水によって大汚水溝になった状態の中小河川があり、着色排水等の規制が必要である。現在、各県の条例では、「放流先で支障をきたすような着色」排水の放流を禁止しているが、この場合の判定概念が不明確で、実質的運用は行われていないのが実情であるかと思う。この状況のなかで、着色排水の測定評価法を示す例としては、標準色票を基準として色汚染度を求める川崎市条例の方法と、排水の透過光の色差を着色指標として用いる日本色彩研究所¹⁾や太田ら²⁾の方法がある。このたびわれわれはコントラスト板を用いる透視度法を検討して、消散係数と透視度の関係式（以下、透視度式と記す）を作成し、また、ウェーバー・フェヒナー則を用いて三点比色管法を考案した。以上、四つの方法を用いて着色排水の測定を行い、方法の比較を行った。一方、排水の外観については心理物理量の測定（以下、印象評点と記す）を多数の人で行い、評点値は正規分布することを見いだした。また、印象評点値と着色水の測定値とを対比させ、評価判定基準作成を試みた。

2. 実験方法

実験は、着色量の客観的な測定と、人が着色水を外観するときの主観的な印象評点の測定とに分けられる。

2・1 試料について

試料は、実験室に持ち帰った工場排水を用いた。透視度式の検討には、工場排水の他に、濁度用カオリン液、色素液（酸性の塩化第二鉄液—シキソ Fe と記す）、およびそれらの混合液を用いた。

2・2 着色量の測定

20試料を用いて、4種類の測定を行った。なお、肉眼を用いる測定法については、北側窓においた台上で、昼光のもとで実験を行った。

2・2・1 透視度法

標識板を二重十字板から図1に示すとおりコントラスト板に替えて、工場排水試験法に従って測定した。なお一部は、二重十字板法を用い、コントラスト板法と並行測定した。

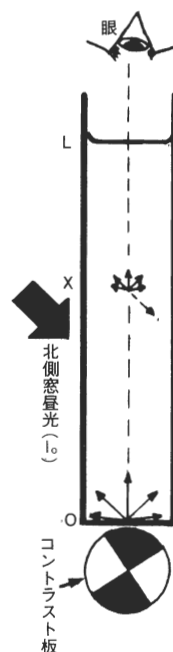


図1 コントラスト板を用いる透視度法

* Estimating Methods of Colored Waste Water

** Takae UTSUNOMIYA, Shin-ichi YAMAGUCHI, Keiko AOKI, Toshinosuke SAWADA（福井県公害センター）
The Environmental Pollution Research Center of Fukui Prefecture

2・2・2 三点比色管法

上水試験法の色度濁度測定で用いる 100 ml 比色管を 3 本用意し、図 2 に示すとおり 2 本には標線まで純水を

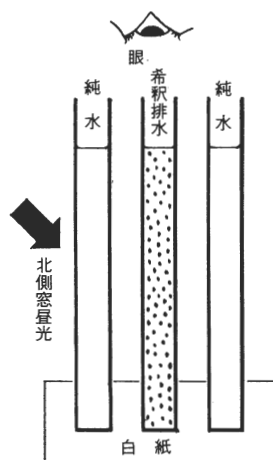


図2 三点比色管法

入れ、他の 1 本には試料を入れる。3 本の比色管を白紙のうえで、上から覗いて比較し、試験者が試料の入った比色管を正しく区別できなくなるまで、純水を用いて試料を 3 倍・10 倍・30 倍と順次希釈して行き、区別できなくなったところを測定の終点とし、その希釈倍率を用いて着色指標を求めた。

2・2・3 川崎市条例の方法

500 ml 磁製ピーカーに水深 8 cm まで試料を入れ JISZ 8721 準拠標準色票に照合し、 HV/C を求め、 $3(V_b - V_s) + (C_s - C_b)$ の値を色汚染度 (O_k) とする。 b は純水、 s は試料を示す。

2・2・4 色差法

光路長 3 cm のガラスセルに試料を入れ、光電色彩計 (東京電色 TCA-1) で透過光測定を行い、純水を基準として、CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 系の色差、明度差、クロマチェックネス差を求めた。

2・3 印象評点測定の方法について

試料を無色の 100 ml ピーカーに 100 ml 採取し、白色

バットの上に乗せて外観し、図 3 に示す印象評点用紙のうえに評点する。評点者は 13~16 名であった。

3. 結果と考察

3・1 透視度法について

透視度法は簡便な方法であり、工場排水処理管理に多用されている。一方、水質汚濁苦情においては、文字どおり色や濁りの視覚的なものが一般であり、放流先において川底が見えないような事柄は典型的苦情である。透視度法はこの状況のモデルを測定方法としているため、着色水の評価のためには良い方法であると考えられる。

3・1・1 コントラスト板を標識板として用いる理由

透視度法は簡便な方法であるが、測定の終点到個人差が生じやすいため、精度が欠けると思われてきた。理由は、二重十字の標識板に原因があると考え、コントラスト板を標識板に用い、二つの方法の比較を行った。各透視度における個人差変動係数は図 4 に示すとおり、二重十字板では約 10% であるが、コントラスト板では約 6% になり、精度が改善された。これは二重十字の終点判別に比べて、コントラスト板の白・黒判別の方が容易であるためと考えられる。

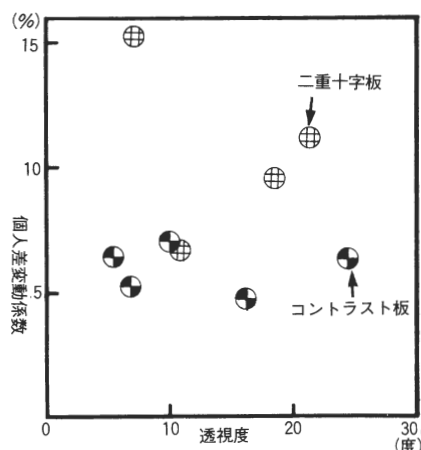


図4 コントラスト板と二重十字板の個人差変動係数

これは、廃水処理されて後河川に放流されている工場排水です。目で見ても、感じた印象を、良い方を 100 点側にして、五段階の点数ではかり、○印をつけて、お答え下さい。

印象点	no すんだ					yes					no きれいな					yes					no 好きな					yes					色の有無				
	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	有	無			
1	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100					
2	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100					
3	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100	0	25	50	75	100					

図3 印象評点用紙

3・1・2 消散係数 A と透視度値 L との関係

透視度測定は、コントラスト板を完全拡散反射面とし、北側窓から採り入れた光は、試料中の吸収散乱体に入射する直前に強度 I_0 であるとし、反射された光は Lambert-Beer の法則に従うものとする。

$$I_w = I_0 \cdot R_w \exp(-AL), \quad I_b = I_0 \cdot R_b \exp(-AL)$$

$$I_s = \int_{x=0}^L I_0 R_s \exp(-A(L-X)) dx$$

I_w , I_b , I_s はそれぞれ、白色面、黒色面、散乱体からの反射光量。 R_w , R_b , R_s はそれぞれ、白色面、黒色面、散乱体の反射率である。

透視度計を上から覗いたとき、白色面からくる光量 W は $I_w + I_s$ 、黒色面からくる光量 B は $I_b + I_s$ である。その時のコントラスト C_r は、一般に $(W-B)/B$ で表わされる。

この関係に、 I_w , I_b , I_s を代入すると、透視度値 L は

$$L = \frac{1}{A} \ln \left[\frac{A(R_w - R_b)}{C_r \cdot R_s} - \frac{AR_b}{R_s} + 1 \right] \text{ となる。}$$

ここで、[] の中の第 2, 第 3 項は寄与が小さいため省略すると

$$L = \frac{1}{A} \ln \frac{A(R_w - R_b)}{C_r \cdot R_s} \text{ となる。}$$

積分球を用いて求めた値では $R_w=0.858$, $R_b=0.018$, また、 $R_s=0.00884$ (カオリン25度 10 mm セル) であった。 C_r は透視度測定終点 (最小可知差異) のコントラストで 0.052~0.52 が妥当である。われわれは上式の形式を保つ実用的な定数として、カオリン濃度に関係なく一般の排水に適用可能な値として、 $R_s=0.00884$, $C_r=0.286$ を定数とし⁴⁾

$$L = \frac{1}{A} \ln 332.4 A \cdots \cdots (1)$$

を作成した。

一方、従来から海洋の透明度で用いられている式³⁾ $C_r = \frac{C_0 \exp(-AL)}{R_w - R_b}$ から、 $L = \frac{1}{A} \ln \frac{C_0}{C_r}$ を導き、 $C_0 = \frac{R_w - R_b}{R_b}$ から、 $C_0=46.66$, また $C_r=0.286$ を用いて

$$L = 5.094/A \cdots \cdots (2)$$

を作成した。なお、 $A=A_0 \cdot X + E \cdot C + R \cdot N$ の加成性がなりたつものと仮定した。この場合、 A_0 は排水試料の消散係数で X はその希釈係数、 E は色素のモル濃度あたりの消散係数で C はそのモル濃度、 R はカオリンの濁度あたりの消散係数で N はその濁度である。表 1 に測定結果を示した。単一成分の場合、(1)式、(2)式の計算値 L が実験値 L_0 に適合するように消散係数 a を最

表 1 試料濃度と透視度

試料	濃度	単位	透視度	濃 度	単位	透視度*
カオリン	20	N	39.3	*は混合試料を示す N：カオリン濁度 C：シキソ Fe モル濃度 X：排水の希釈係数		
	25		31.5			
	40		21.1			
	50		17.4			
シキソ Fe	1.85 0.925	C	9.6 20.7			
1	1.00	X	13.8			
	0.666		17.4			
	0.500		21.4			
	0.333		27.3			
	0.333		25	N	18.2	
	0.333		16.7		20.2	
	0.333		8.33		24.5	
2	1.00	X	11.0			
	0.666		15.5			
	0.500		20.1			
	0.333		27.2			
	0.333		25	N	17.1	
	0.333		16.7		19.2	
	0.333		8.33		22.5	
3	1.00	X	18.3			
	0.666		23.2			
	0.500		28.2			
	0.500		25	N	17.4	
	0.500		16.7		21.4	
	0.500		8.33		24.0	
4	0.500	X	7.1			
	0.333		10.8			
	0.200		16.3			
	0.125		24.3			
	0.125		0.463	C	16.0	
	0.125		0.278		17.5	
	0.125		0.139		20.4	
	0.125		0.0694		21.8	
0.125		0.0370		23.6		
5	1.00	X	18.0			
	0.666		24.2			
	0.500		28.8			
6	1.00	X	17.5			
	0.666		22.7			
	0.500		28.4			

小二乗法 ($\partial S / \partial a = 0$, $S = \sum (L_0 - L)^2$) で求め、実測値の式からの標準誤差 $(S/n-1)^{1/2}$ を求め、 b とした。 a は A_0 , E , または R である。一方、混合成分の場合は、排水試料にカオリンまたは色素を添加して調整しており、 $A = A_0 \cdot X + R \cdot N$ または、 $A = A_0 \cdot X + E \cdot C$ とし、単一成分と同様に b を求め、その結果を表 2 に示した。排水試料 (No. 1 ~ 6) において (2) 式よりも (1) 式の方が b の値は小さく良好な適合を示し、透視度の標準誤差はおおよそ 1 以下であった。(1) 式は排水試料の透視

表2 透視度式の適合性

成 分	単 一 成 分				混 合 成 分			
	n	a		b		n	b	
		(1)式	(2)式	(1)式	(2)式		(1)式	(2)式
カオリン	4	0.00458	0.00639	1.65	1.15	—	—	—
シキソ Ee	2	0.237	0.269	2.08	0.67	—	—	—
1	4	0.339	0.505	1.18	3.10	3*	0.71	2.46
2	4	0.431	0.531	0.43	1.48	3*	0.23	1.67
3	3	0.261	0.337	0.98	2.69	3*	0.57	2.34
4	4	1.354	1.601	0.64	1.09	5**	0.76	1.09
5	3	0.254	0.330	0.66	2.44	—	—	—
6	3	0.265	0.341	0.51	2.10	—	—	—

成分1～6は工場排水である。a：消散係数 A_0 、EまたはR、b：式値と実測値との標準誤差、*：カオリンを混合、**：シキソFeを混合、n：試料数

度をよく説明できる式であると思われる。

3・2 三点比色管法について

排水が良好に処理されているかどうかの指標として透視度法が一般的である。一方、排水が普通の水、たとえば水道水と区別できないくらいきれいな排水が最良であるという発想もなりたつ。そこで、われわれは、色や濁りが知覚されなくなるまで排水を純水で希釈したときの希釈倍率に基づいて指標を作り、カラーインデックスと名づけた。これは、悪臭測定 の三点臭袋法の原理の準用である。

試料を、3倍、10倍、30倍と希釈していき、そのときの正解である最大希釈倍率を a 、不明または不正解になったときの希釈倍率を b とし、 $CI = 5 \log ab$ とする。測定者間の変動係数は7～8%と良好であった。ここで CI は表現が5ごとの穴長な値であるが、試料をさらに細かい段階で希釈することは不便であるので、希釈単位が1となるように $CI_0 = \log \frac{10ab}{3}$ とし、 CI_0 をカラーインデックスと名づけた。

3・3 着色指標の比較

透視度法、三点比色管法、および、川崎市条例の方法と、色差法の測定を行い、色差 ΔE 、明度差 ΔL 、クロマツクネス差 ΔC 、カラーインデックス CI_0 、色汚染度 O_k 、透視度 L の6着色指標について、主成分分析を行った結果を表3および図5に示した。いずれの項目も第一主成分に負荷量が高く、おおむね同様な指標といえる。色彩科学的尺度である ΔE 、 ΔL 、 ΔC に注目すると、 ΔC は彩度スケール、 ΔL は明度スケールであるから、原点から ΔC への方が有色軸、原点から ΔL への方が明度軸と考えられる。第一主成分軸は両軸の中間に位

表3 試料の着色指標値と「クレイナ」評点値 (平均)

No.	ΔE	ΔL	ΔC	CI_0	O_k	L	クレイナ
1	14.7	13.5	5.3	3	1	43.3	53.1
2	23.4	21.4	9.1	3	10	38.0	43.8
3	23.0	22.2	5.3	3	5	56.0	50.0
4	79.8	79.6	4.9	6	21	3.9	9.4
5	29.9	27.0	12.4	4	10	14.9	21.9
6	39.0	37.9	8.1	5	23	13.2	7.8
7	35.1	31.6	14.9	6	21	11.5	21.2
8	38.4	37.1	9.7	4	13	17.5	21.2
9	17.3	15.7	7.1	4	3	21.5	48.1
10	44.7	42.4	13.8	5	21	15.5	15.4
11	33.2	26.3	19.9	4	15	13.0	17.3
12	0.0	0.0	0.0	0	0	56.0	94.2
13	38.4	32.7	19.7	5	18	14.0	13.5
14	10.8	9.2	5.4	4	5	37.0	48.1
15	36.1	26.6	24.0	5	18	17.0	21.2
16	41.7	39.0	14.2	5	22	9.5	11.5
17	35.8	31.2	16.3	6	24	21.5	26.9
18	4.4	3.7	2.0	2	1	56.0	57.7
19	0.0	0.0	0.0	0	0	56.0	100
20	26.0	22.3	13.1	5	16	23.0	25.0

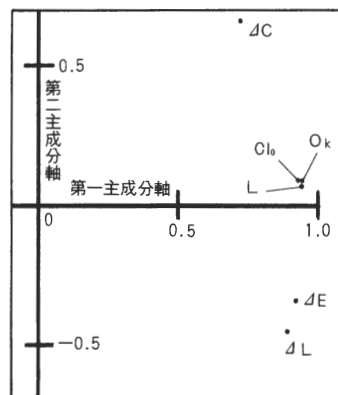


図5 着色指標の主成分分析による比較

置しているので、試料による有色光または白色の減光が、純水とは異なって試料の中に何かあることを示している存在感の軸と思われ、 L 、 CI_o 、 O_i いずれも着色の存在を示す良い指標であることがわかる。また、簡単のために、色素水にカオリンを添加した場合を考えると、彩度が減少し明度が増加することから、第二主成分軸はマンセル色立体の頂点からの距離のような色と濁りをあわせた尺度の軸と考えられる。

3・4 着色水の印象評点について

印象評点用紙の作成にあたり、次の四点に注意した。

- (1) 評点者間で分散の小さい印象形容詞の方が望ましい。
- (2) 評点者が評点しやすいような尺度を用いる。
- (3) 印象は多次示で設問した方が正確に状態を把握できる。
- (4) 試料は工場排水であることを知らせ、評点態度に条件をつける。

3・4・1 印象評点値の分布について

評点が0または100側に極端にシフトしない28評点値群について、試料ごとの標準偏差(σ)を求めたところ23~34点、この平均($\bar{\sigma}$)は28点であった。各群の評点値を $P_i = 50 + 16.7(x_i - \bar{x})/\bar{\sigma}$ 規格化し、各群の P_i の分布を検討した。累積度数分布をプロットすると、図6に示すとおりで、評点値群は直線状に分布し、正規分布す

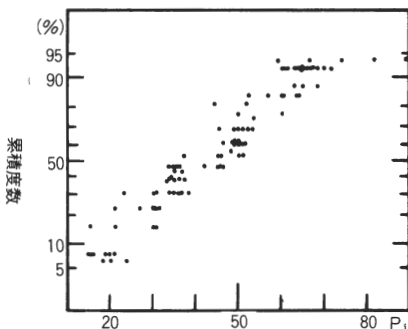


図6 印象評点値(P_i)の累積度数分布

ることがわかった。印象評点での個人差は、この分布の広がりに対応し、また、評点値群は、その平均値($\bar{x}$)で代表できるものと思われる。

3・4・2 印象形容詞相互の比較について

14試料、10名の評点者の印象評点結果について、印象形容詞ごとに試料の平均値を求め、主成分分析を行った結果を表4に示す。第一主成分寄与率が93%であり、またいずれの印象形容詞も第一主成分の負荷量が大きく、言葉の表現が異なる四つの印象形容詞は、同一の意味を指標としていることがわかった。また、3・4・1で記したように、評点値の標準偏差は23~34点で大きな差はなく、いずれの印象形容詞も評点の個人差による分散は同

表4 印象形容詞の主成分に対する因子負荷量

主成分寄与率		第1 93.8%	第2 5.4%	第3 0.7%	第4 0.1%
印象形容詞	すんだ	0.949	-0.301	0.090	0.015
	きれいな	0.996	-0.047	-0.046	-0.057
	好きな	0.993	0.007	-0.108	0.039
	色の有無	0.934	0.350	0.073	0.004

じ程度である。このことから、印象評点のための形容詞は一次元で十分であり、以後の考察では、「きれいな」を印象評点の尺度として用いることにした。

3・5 着色量と印象形容詞「きれいな」との相関および判定基準

印象評点の平均値と6項目の着色量の相関係数を求めたところ、図7、8に示すとおり、透視度 L とカラーインデックス CI_o が最高の相関を示した。一次回帰式は

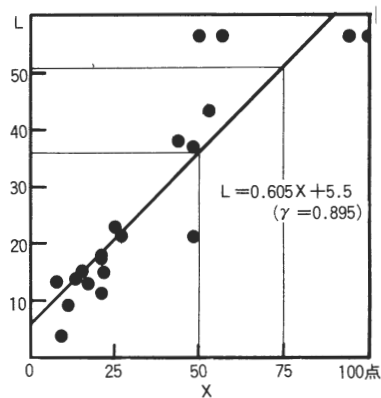


図7 印象評点値 X と透視度 L の関係(コントラスト板)

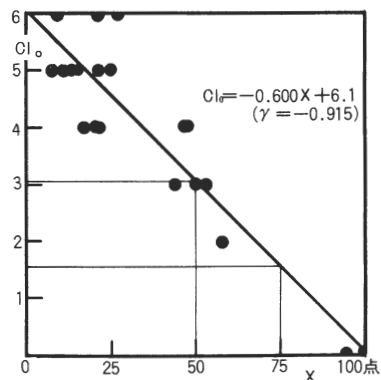


図8 印象評点値 X とカラーインデックス CI_o の関係

$$L = 0.605 X + 5.5 \quad \gamma = 0.895$$

$$CI_o = -0.0600 X + 6.1 \quad \gamma = -0.915$$

となった。

一つの排水試料を多数の評点者によって印象評価するとき、その評点には、甘い厳しいの差が生じ、平均値を中心に正規分布することがわかった(3・4・1)ので、この分布の性質を用いて、判定基準の作成を試みた。

かりに、評点者個人の受忍(満点足)点を50点とするならば、大多数の人が苦情を言わない印象評点値は、「大多数」の概念を図9に示すように決めると、そのときの

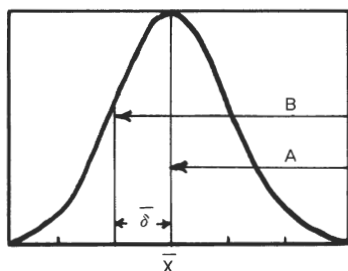


図9 正規分布を用いる「大多数」概念の決定

A：大多数を50%の人とする場合， $\bar{x} = 50$ 点

B：大多数を84%の人とする場合， $\bar{x} = 78$ 点

$\bar{\delta} = 28$ 点

受忍点がきまり、上記の回帰式から、判定基準値を求めることができる。結果は表5に示した。なお、透視度法

表5 印象評点値と着色指標判定基準値の関係

大多数の概念	印象評点値	L_1	L_2	CI_o
84%の人	$50 + \bar{\delta} = 78$ 点	55	36	1.4
50%の人	50点	36	23	3.1

L_1 ：透視度値(コントラスト板)， L_2 ：透視度値(二重十字板)

CI_o ：カラーインデックス

は、現在一般に二重十字板を用いているので、コントラスト板法(L_1)と二重十字板法(L_2)との一次回帰式 $L_2 = 0.65 L_1$ ($r = 0.967$, $n = 15$) から、二重十字板法の判定基準を求めた。

3・6 染色排水の実態と河川への放流

透視度式(1)を用いて河川への排水放流を検討した。県内の中小支派川の調査結果では、透視度が平均58、標準偏差32($n = 24$)であり、排水の印象評価の受忍(50%の人)限界 $L_1 = 36$ の河川が約25%あると推定する。この $L_1 = 36$ の川水に $L_1 = 15$ または6の排水が流入し、10倍に希釈される場合を(1)式により推定すると、川水はそれぞれ $L_1 = 30$ または22となり、印象評点は50点から

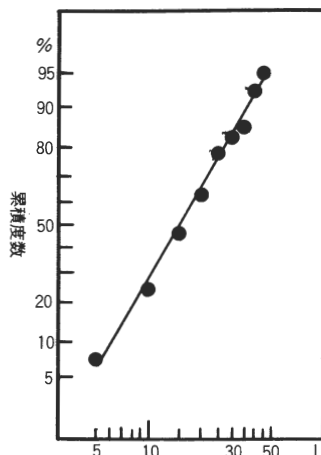


図10 染色排水の透視度Lの累積度数分布 ($n = 41$)

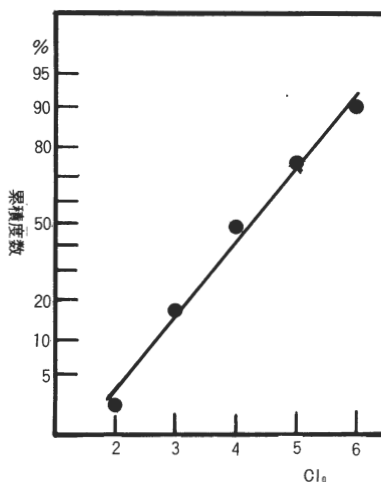


図11 染色排水のカラーインデックス CI_o の累積度数分布 ($n = 41$)

40点または27点へと急激に悪化することが予想される。県内染色排水($n = 41$)の透視度、カラーインデックスの累積度数分布を求めたところ、図10、11に示すとおり透視度は対数正規分布、カラーインデックスは正規分布を示し、中央値はそれぞれ、15、4.2であり、大多数(50%)の人の受忍する割合(適合率)は、それぞれ11%、16%であった。排水は川水で希釈されるとしても、中小支派川の維持水量は少なく、また、川水の層は、われわれが印象評点で用いたピーカーよりも厚く、したがって、フィールドでの印象評価は厳しいものと予想される。排水の十分な脱色処理が望まれる。

(以下 p. 53 へ)

(p. 22 よりつづく)

4. まとめ

①透視度計の標識板をコントラスト板に替えることにより、終点判別を容易にし個人差を小さくし、透視度式を作成した。②三点臭袋法の原理を準用し、三点比色管法を作り、着色指標カラーインデックスを作った。③透視度、カラーインデックス、色汚染度は、同じ意味あいの着色指標である。④着色排水の評価において、印象形容詞は一次元で十分である。⑤多人数による印象評点値は正規分布し、印象評点と透視度およびカラーインデックスを対比させ、判定基準作成を試みた。

—引用文献—

- 1) 日本色彩研究所：「有色排水に関する調査研究，Ⅰ，Ⅱ，Ⅲ」，1974～1976.
- 2) 太田 敏，他：染色工場廃水を含む都市下水の脱色処理，水質汚濁研究，Vol. 1, No. 1, 71, 1978.
- 3) 菱田耕造：海洋科学基礎講座「海洋物理Ⅰ」，p. 110, 東海大学出版会，1970.
- 4) 宇都宮高栄，他：着色水に関する調査研究（第3報）透視度法による着色水の測定に関する検討，福井県公害センター年報，Vol. 12, 196, 1982.