

## 透視度比による水質汚濁の評価法

伊藤 隆広・溝口 勝

三重大学生物資源学部

### An Estimation Technique of Water Pollution with Transparency Ratio

Takahiro ITO, Masaru MIZOGUCHI

Faculty of Bioresources, Mie University

#### Abstract

It is difficult to estimate water pollution objectively with transparency because the transparency is affected sensitively by the subjectivity of an observer and sunshine in a observing place. However the transparency ratio, which is here defined as a ratio of the transparencies of each sample measured on the same condition, can be a objective standard for estimating turbidity. In the present paper, the concept of transparency ratio is derived from the Beer-Lambert's law and the validity of the transparency ratio is verified by field data. Geometrical calculation for the intensity of incident ray through a transparency apparatus brought a practical table for modifying transparency and led to the conclusion that the modified transparency should be used to obtain the transparency ratio for turbid water.

**Key words :** water pollution, transparency, transparency ratio, turbidity

#### はじめに

一般市民にとっての水質とは何であろうか。1994年1月、我々は水質浄化実験<sup>1)</sup>を実施したお堀の前で一般市民を対象に水質の判断基準についてのアンケート調査を行った。その結果をFig.1に示す。市民のほとんどの回答は透明の程度、一種の透視度であった。透視度は水の透明の程度を示すもので、透視度計に水を入れて上部から透視したときに、底部に置いた標識板の二重十字が初めて明らかに認識できる水層の高さで表現される。光源は原則として、直射日光を避けた昼光とし、その単位は水の高さ10mmに対して1度と定義されている<sup>2)</sup>。確かに透視度は現場で簡単に測定でき、感覚的にも分かり易

い。実際マスコミなどが一般市民に水質について報道するような場合にはしばしば透視度を表示している。しかし透視度は測定者の主観と日照条件に大きく影響され、得られる数値は必ずしも客観的で信頼できるものとはいえない。このため水質を測定する側では透視度を軽視し、目安として利用しているのが現状である。本来水質測定は一般市民のために行われるべきにも拘らず、水質測定項目の中で市民に最も浸透している透視度を信頼できない尺度のままにしておくことは問題であると思われる。そこで本研究では透視度をより客観的な水質測定の尺度に結びつける方法を検討した。本報告では同一条件で測定された透視度の比をとることで現場条件を相殺し、透視度を水質汚濁の客観的な評価に利用できることを述べる。

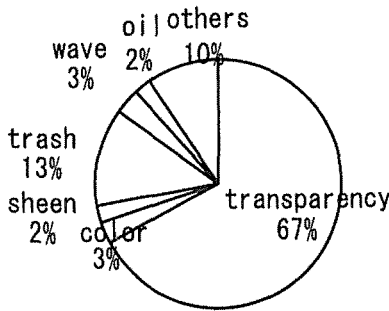


Fig. 1 Standard used for water pollution by citizen.

理 論

1. Beer-Lambert の法則

水中を透過する光の強度と水中に含まれる吸光成分の濃度、および光路長の関係は Beer-Lambert の法則<sup>9)</sup>に従う。このとき透過光の強度  $I$  の変化量  $dI$  は、強度  $I$ 、水中の吸光成分濃度  $C$ 、光路長  $dx$  に比例し、吸収係数  $\alpha$  を用いて、

$$dI = -\alpha C I dx \quad \dots (1)$$

と表される。ここで吸収係数  $\alpha$  は吸光成分と光の波長によって決まる定数である。ただし吸光成分が  $n$  種類存在するときは、光の強度  $I$  の変化量  $dI$  は各吸光成分による変化量の和となり、各成分の濃度、および吸収係数をそれぞれ  $C_1, C_2, C_3, \dots, C_n$ 、および  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$  とすると

$$dI = -I \cdot \sum_{i=1}^n (\alpha_i C_i) dx \quad \dots (2)$$

となる。

初期光強度  $I_0$  の光が距離  $x$  進んだときの強度は(1)(2)式を積分して、それぞれ吸光成分が 1 種類のとき:

$$I = I_0 \times \exp(-\alpha C x) \quad \dots (3)$$

吸光成分が  $n$  種類のとき:

$$I = I_0 \times \exp \left\{ -x \sum_{i=1}^n (\alpha_i C_i) \right\} \quad \dots (4)$$

が得られる。(4)式は透過光強度  $I$  が、各成分の濃度と係数の積の和  $\sum \alpha_i C_i$  と、光路長  $x$  の指数関係となることを示している。

2. 透視度と透視度比

透視度の測定では、光が透視度計の側面から入射し、試料水中を通り標識板に到達する。この到達光は標識板により反射され、この垂直成分が再び試料水を通って水面を経て目に届く。この光の経路のうち標識板から水面までの過程に(4)式を適用すると、試料水の水深  $h$  が光路長、標識板反射強度  $I_1$  が初期光強度となる。また濁度を試料水中に含まれる複数の成分の濃度の代表値として用いることにすると、濁度  $t$  は濃度  $t$  のカオリナイト水溶液と同程度の濁りとして定義されている<sup>10)</sup> ので、その吸収係数として昼光に対するカオリナイトの吸収係数(これを  $\beta$  とする)を用い(4)式中の  $\Sigma$  の項を次式のように書き換えることにする。

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i C_i = \beta t$$

すると、目に届く光の強度  $I_r$  は

$$I_r = I_1 \exp(-\beta t h) \quad \dots (5)$$

と表現できる。透視度はこの  $I_r$  が目の感知できる最小の光の強度(これを認識限界強度  $I_v$  とする)に等しいときの水深  $h$  に相当するから(5)式から透視度は

$$h = \frac{\ln \frac{I_1}{I_v}}{\beta t} \quad \dots (6)$$

となる。この式は日照条件と測定者の視力が常に等しい条件下で  $I_1, I_v$  を一定と仮定すると、透視度が濁度に反比例することを意味する。ところが日々の条件によって日照や視力は変化するため、測定される透視度は日々変化する。そこで同一条件下で測定された2つの試料の透視度を  $h_1, h_2$  とし、透視度比( $R$ )を以下のように定義する。

$$R = \frac{h_1}{h_2} = \frac{\frac{\ln \frac{I_{11}}{I_{v1}}}{\beta t_1}}{\frac{\ln \frac{I_{12}}{I_{v2}}}{\beta t_2}} \quad \dots (7)$$

このとき2つの透視度測定における  $I_1, I_v, t$  は透視度と同じ添え字 1, 2 によって区別した。また同様に濁度比 ( $R_t$ ) を次のように定義する。

$$R_t = \frac{t_1}{t_2} \quad \dots (8)$$

同一人物が同時刻に同じ場所で透視度  $h$  を測定すれば、(7) 式中の  $I_{11}$ ,  $I_{12}$  と  $I_{21}$ ,  $I_{22}$  はそれぞれ等しいと考えられるので、(7) 式は次式となる。

$$R = \frac{t_2}{t_1} = \frac{1}{R_1} \quad \dots (9)$$

この式は透視度の比をとることにより測定条件  $I_1$ ,  $I_2$  の影響を相殺し、透視度比 ( $R$ ) が濁度比 ( $R_t$ ) に反比例することを意味する。

現場測定値による透視度比の有効性の検証

前節で導入した透視度比を現場測定値に適用してみる。測定値としてお堀の浄化実験<sup>1)</sup>の2地点(試験区と対照

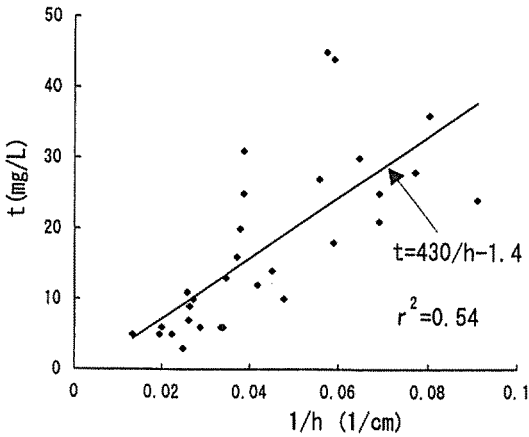


Fig. 2 Transparency ( $h$ ) vs turbidity ( $t$ ) in a treatment area.

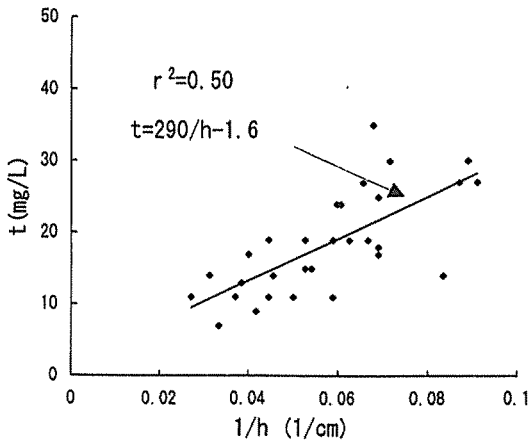


Fig. 3 Transparency ( $h$ ) vs turbidity ( $t$ ) in a non-treatment area.

区)の透視度と濁度を用いた。透視度は自作した透視度計により現場の同じ場所で同じ測定者によって測定したもので、濁度は採水試料を吸光光度法(測定波長 450nm)により測定したものである。

Fig. 2 および Fig. 3 はそれぞれ試験区および対照区において測定された、透視度の逆数 ( $1/h$ ) と濁度 ( $t$ ) の関係である。濁度は透視度の逆数の増加に伴い増加する傾向はあるものの、 $1/h$  と  $t$  の相関係数は試験区で 0.54、対照区で 0.50 と  $1/h$  と  $t$  の間に直線関係があるとはいえない。

Fig. 4 は (7) (8) 式に基づいて2地点の測定値から求めた試験区の対照区に対する透視度比の逆数 ( $1/R$ , 対照区/試験区) と濁度比 ( $R_t$ , 試験区/対照区) である。図中の実線は回帰式  $R_t = 1.7/R - 0.3$  である。Fig. 2, 3 に比べてばらつきは小さくなり、相関係数も 0.73 と高くなっている。このことは (9) 式で示したように比をとることによって  $I_1$ ,  $I_2$  の影響が相殺され、単なる透視度よりも透視度比の方が客観的な尺度となり得ることを示すものである。今回は試験区と対照区の透視度比を用いたため試験区と対照区の違いだけしか得られなかったが、調製した標準液を現場に持ち込めば、より絶対的な尺度として透視度の信頼性が増すとと思われる。

Fig. 5, 6, 7 は透視度比の逆数 ( $1/R$ , 対照区/試験区) と SS, BOD, COD のそれぞれの比 (試験区/対照区) との関係である。濁度と同様 SS, BOD, COD との間にも比をとることによって透視度とある程度の相関が得られる。

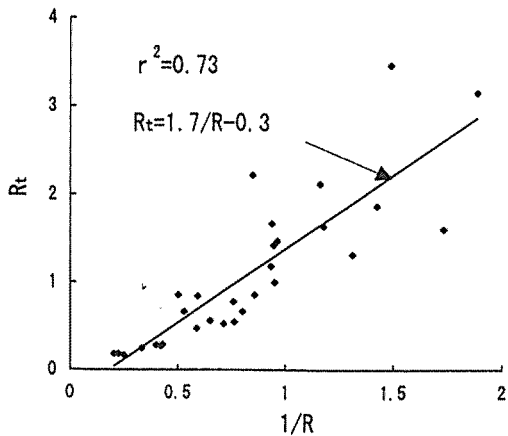


Fig. 4 Transparency ratio ( $R$ ) vs turbidity ratio ( $R_t$ ). The ratio is of treatment to non-treatment area.

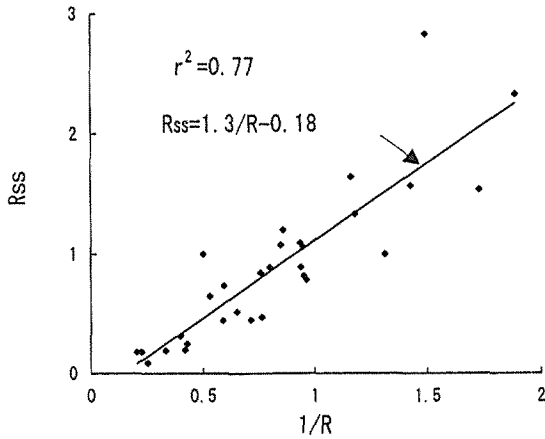


Fig. 5 Transparency ratio (R) vs SS ratio ( $R_{ss}$ )  
The ratio is of treatment to non-treatment area.

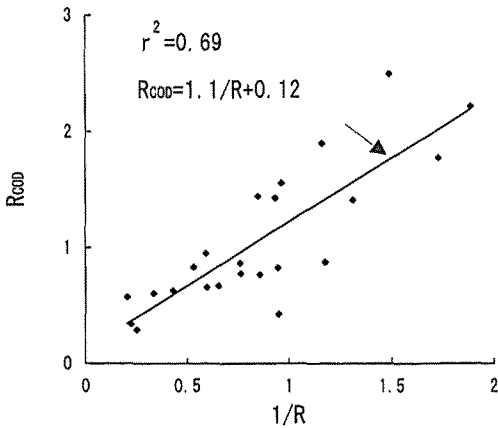


Fig. 6 Transparency ratio (R) vs COD ratio ( $R_{cod}$ )  
The ratio is of treatment to non-treatment area.

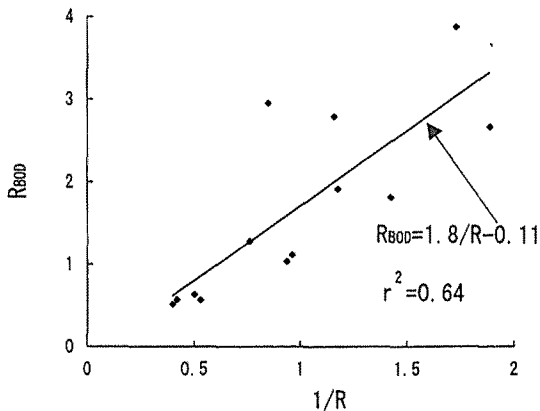


Fig. 7 Transparency ratio (R) vs BOD ratio ( $R_{bod}$ )  
The ratio is of treatment to of non-treatment area.

光路長に関する幾何学的考察

透視度比を導く過程で標識板から水面までの光路に対して Beer-Lambert の法則を適用し、同時刻に同じ場所測定したとき (7) 式中の  $I_{11}$ ,  $I_{12}$  は等しいと仮定した。しかしながらこのとき等しいのは日照強度であり、この光は透視度計の側面から試料水を通過して底面に到達する過程ですでに光の減衰が生じ、日照強度が等しくても到達光強度 (すなわち標識板反射光強度  $I_1$ ) は等しいとは限らない。そこで本章では幾何学的モデルを用いて、透視度計の側面から標識板に到達する過程も含めた光路に対して Beer-Lambert の法則を適用し、標識板に到達までの光路が透視度に与える影響について検討する。

1. 幾何学的モデル

Fig. 8 で  $xy$  平面と線分  $OP$  がなす角を  $\theta$ 、線分  $OP$  の  $xy$  平面への正射影が  $x$  軸となす角を  $\gamma$  とする。いま頂点が  $O$ 、中心軸が  $z$  軸、頂角が  $(\pi/2 - \theta)$ ,  $(\pi/2 - \theta - \Delta\theta)$  である 2 つの円錐側面と、 $z$  軸を含み  $xz$  平面となす角が  $\gamma$ ,  $\gamma + \Delta\gamma$  である 2 つの平面が切り取る、中心  $O$ 、半径 1 の球面を考える。このときこの球面は  $\Delta\theta$ ,  $\Delta\gamma$  が十分小さいならば、辺の長さが  $\Delta\theta$ ,  $\cos\theta \cdot \Delta\gamma$  の長方形とみなすことができるので、その面積  $\Delta S$  は、

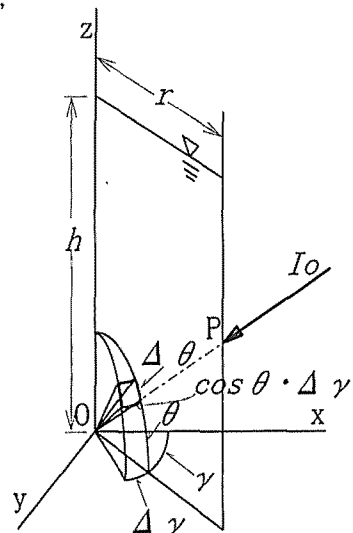


Fig. 8 Incident ray ( $I_0$ ) through a transparency apparatus.

$$\Delta S = \cos \theta \cdot \Delta \theta \cdot \Delta \gamma$$

で与えられる。ところで半径1の球面上に描いた閉曲線の面積（立体角と呼ばれる）は球の中心からみた視覚的な広がりを表し、 $\Delta S$ はこの立体角に相当する。 $I_0$ を単位立体角当たりの日照量（日照強度）と定義すると、 $\Delta S$ を通して標識板中心（O）に到達する光の量（ $\Delta \phi$ ）は  $0 \leq \theta \leq \tan^{-1}(h/r)$  のとき：

$$\Delta \phi_s = I_0 \cdot \exp\left[-\beta t \frac{r}{\cos \theta}\right] \cdot \cos \theta \cdot \Delta \theta \cdot \Delta \gamma \quad \dots (10)$$

$\tan^{-1}(h/r) \leq \theta \leq \pi/2$  のとき：

$$\Delta \phi_s = I_0 \cdot \exp\left[-\beta t \frac{h}{\sin \theta}\right] \cdot \cos \theta \cdot \Delta \theta \cdot \Delta \gamma \quad \dots (11)$$

となる。よってこれらを半球面全体で積分すると、底面の標識板中心に到達する光の全合計量  $\phi_c$  が求まる。

$$\begin{aligned} \phi_c &= \int_0^{2\pi} \left[ \int_0^{\arctan \frac{h}{r}} I_0 \cdot \exp\left(-\beta t \frac{r}{\cos \theta}\right) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\gamma \right. \\ &\quad \left. + \int_{\arctan \frac{h}{r}}^{\frac{\pi}{2}} I_0 \cdot \exp\left(-\beta t \frac{h}{\sin \theta}\right) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \cdot d\gamma \right] \\ &= 2\pi I_0 \left[ \int_0^{\arctan \frac{h}{r}} \exp\left(-\beta t \frac{r}{\cos \theta}\right) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \right. \\ &\quad \left. + \int_{\arctan \frac{h}{r}}^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\beta t \frac{h}{\sin \theta}\right) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \right] \quad \dots (12) \end{aligned}$$

この標識板に到達した光は半球面（立体角  $2\pi$ ）へ散乱されるので、単位立体角当たりの反射光量すなわち標識板反射光強度  $I_1$  は

$$I_1 = \frac{\phi_c}{2\pi} = I_0 \times \left[ \int_0^{\arctan \frac{h}{r}} \exp\left(-\beta t \frac{r}{\cos \theta}\right) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \right. \\ \left. + \int_{\arctan \frac{h}{r}}^{\frac{\pi}{2}} \exp\left(-\beta t \frac{h}{\sin \theta}\right) \cdot \cos \theta \cdot d\theta \right] \quad \dots (13)$$

となる。ここで

$$\frac{I_1}{I_0} = \left[ \int_0^{\arctan \frac{h}{r}} \cos \theta \cdot \exp\left(-\beta t \frac{r}{\cos \theta}\right) d\theta \right. \\ \left. + \int_{\arctan \frac{h}{r}}^{\frac{\pi}{2}} \cos \theta \cdot \exp\left(-\beta t \frac{h}{\sin \theta}\right) d\theta \right] = f(h, t) \quad \dots (14)$$

とし (13) を (5) 式に代入すると、目に届く光の強度  $I_r$  は、

$$I_r = I_1 \exp(-\beta th) = I_0 \cdot f(h, t) \cdot \exp(-\beta th) \quad \dots (15)$$

と表わすことができる。

次にいま考えた透視度計と同じだけ光が減衰する水柱を考える。(Fig. 9) この水柱の水深すなわち光路長をもとの透視度計の水深  $h$  を用いて  $kh$  と表す（ここで  $k$  を光路長係数と定義する）と光路長  $kh$ 、濁度  $t$ 、日照強度  $I_0$ 、目に届く光の強度  $I_r$  の関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} I_r &= I_0 \exp(-\beta thk) \\ &= I_0 \cdot \exp[-\beta th(k-1)] \cdot \exp(-\beta th) \quad \dots (16) \end{aligned}$$

(15)式と(16)式を比較すると透視度  $h$  と光路長係数  $k$  の関係は次のようになる。

$$\begin{aligned} f(h, t) &= \exp[-\beta th(k-1)] \\ \therefore k &= 1 - \frac{\ln f(h, t)}{\beta th} \quad \dots (17) \end{aligned}$$

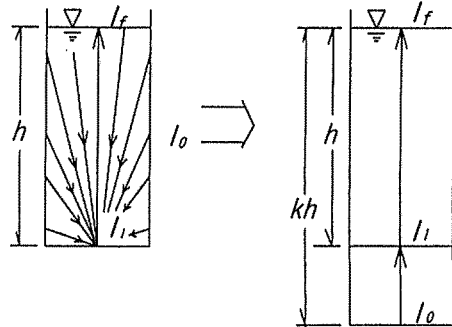


Fig. 9 Concept of light path length coefficient, k.

## 2. 計算方法

(17)式を用いて様々な条件 ( $I_0, t$ ) における  $h$  と  $k$  の関係を計算する。

まず吸収係数  $\beta$  ( $\text{mg} \cdot \text{cm}/\text{L}$ ) と、認識限界強度  $I_r$  ( $lx$ ) を決めるために、室内実験により様々な日照強度 ( $I_0$ ) と濁度 ( $t$ ) における透視度 ( $h$ ) を測定し（測定結果を Table 1 に示す）、これらを (6) 式で回帰した。ただしここでは  $I_0$  を室内の照度 ( $lx$ ) で代用した。この結果回帰式は

Table 1 Transparency for each turbidity and illuminance.

Turbidity, $t$ (mg/L)	33	33	33	65	65	65	325	325	325
Illuminance, $I_0$ (lx)	230	10	1.3	230	90	9	230	0.5	0.1
Transparency, $h$ (cm)	17	14	12	10	9	7.8	3	2.3	1.5

Table 2 Modified transparency ( $h'$ ) for a transparency apparatus with 1.55 cm radius

Transparency, $h$ (cm)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	30	50
Light path length coefficient, $k$	2.3	1.8	1.6	1.4	1.4	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.1	1.1	1.0
Modified transparency, $h'$ (cm)	2.3	3.6	4.8	5.6	7.0	7.8	9.1	9.6	11	12	17	33	50

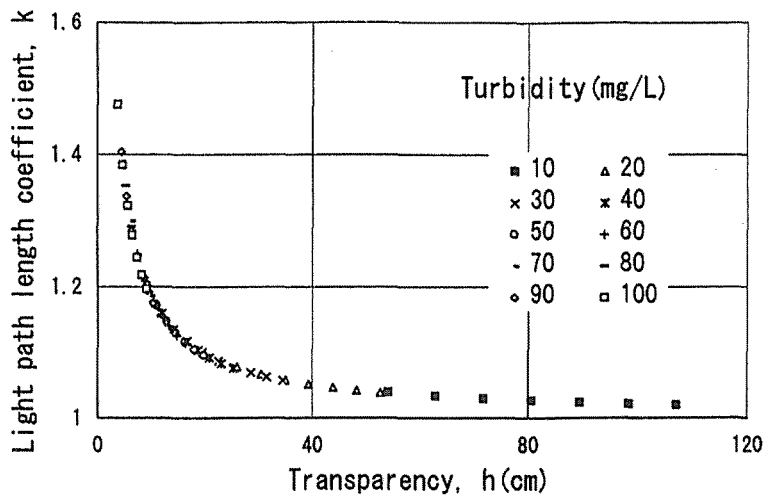


Fig. 10 Relationship between transparency ( $h$ ) and light path length coefficient ( $k$ ).

$$h = \frac{38 \times \ln(I_0) + 380}{t}, \sigma_h = 0.84 \quad \dots (18)$$

となり、(6)式、(18)式を比較して係数

$$I_0 = 4.7 \times 10^{-5} \text{ (lx)} \quad \beta = 0.026 \text{ (mg} \cdot \text{cm/L)}$$

を得た。

次に(15)式に $I_0$ 、 $t$ を与え、数値計算により $h$ を求める。パラメータとして上記の $I_0$ (= $I_t$ )、 $\beta$ 、さらに透視度計の底面半径 $r = 1.55$ (cm)(標準透視度計半径)

を用いて計算した。このとき $I_0$ を1から $10^6$ まで10倍ごとに、 $t$ を10から100まで10刻みに与え、計 $7 \times 10$ の( $I_0$ 、 $t$ 、 $h$ )の組合せを求めた。

そしてここで求めた( $t$ 、 $h$ )を(17)式に代入し( $t$ 、 $h$ 、 $k$ )を求めた。

### 3. 計算結果と検討

Fig. 10は以上の計算を行って(17)式をグラフに表

した結果である。凡例に示した濁度  $t$  (mg/L) について  $x$  軸に透視度  $h$  (cm),  $y$  軸に光路長係数  $k$  をとった。この図から次の3点の特徴が読み取れる。(1)  $h$  が大きい範囲では  $k \approx 1$  ( $h > 15$  で  $k$  は約 1.1 以下となる) となっている。(2)  $h$  の減少に伴い  $k$  は増加している。(3)  $k$  は  $t$  の影響はほとんど受けず、ほぼ  $h$  のみの関数となっている。このうち (1) の結果から、 $h$  が大きい範囲では透視度計の側面から標準板に到達するまでの光路を無視でき、透視度比をとる際に (7) 式中の  $I_{11}$ ,  $I_{12}$  を等しいと仮定できることがわかる。それに対して (2) の結果からは、 $h$  が小さい範囲では透視度計側面から標準板までの光路を無視できないから、(7) 式中の  $I_{11}$ ,  $I_{12}$  を等しいとは仮定できないことがわかる。しかしながら  $h$  が小さい範囲に対して (19) 式で定義する補正透視度 (光路長)  $h'$  の比をとると、この比は (20) 式に示すように濁度比  $R_t$  の逆数となり現場条件の影響を受けない。

$$h' = kh = \frac{\ln \frac{I_0}{I_t}}{\beta t} \quad \dots (19)$$

$$R' = \frac{h_1'}{h_2'} = \frac{t_2}{t_1} = \frac{1}{R_t} \quad \dots (20)$$

Table 2 は底面半径  $r=1.55$ (cm) 透視度計で測定した場合の、Fig. 10 に示した ( $h, k$ ) を (19) 式に代入して得られた補正透視度  $h'$  である。この表を使えば測定した  $h$  に対する補正透視度を簡単に求めることができる。

### ま と め

透視度は測定者の主観や日照条件に大きく影響され、

これを用いて水質汚濁を客観的に評価するのは難しい。しかし同一条件で測定された個々の試料の透視度の比をとることによって濁度を推定するための客観的な尺度となり得る。本論文では Beer-Lambert の法則から透視度比の概念を誘導し、現場測定値を用いてその有効性を確認した。加えて、透視度測定における光路を幾何学的に計算し、透視度比による水分汚濁評価の精度について考察した。その結果、透視度が小さいときには Table 2 に示した補正透視度を用いて比を求めることで透視度比の精度が向上することがわかった。こうした透視度比は一般市民の感覚を損なわない上に慣用的な透視度以上に水質汚濁の指標になりうると思われる。

### 謝 辞

本研究を進めるにあたり三重大学生物資源学部 岩切敏教授に貴重な助言を頂いた。現場測定は田島慶子さん (現 日本技研株式会社) と共同で行った。ここに謝意を表す。

### 引用文献

- 1) 溝口勝・田島慶子・伊藤隆広：土壌菌を利用したお堀の環境浄化過程の観察，農業土木学会講演要旨集，pp. 404 - 405 (1994)
- 2) JIS ハンドブック 1993 環境測定 K0102
- 3) P. W. ATKINS 著，千原秀昭・中村巨男 訳：物理化学下 (第2版)，東京化学同人，p.682 (1985)
- 4) 日本分析化学会北海道支部編：水の分析 (第3版)，化学同人，p.157 (1981)