

## 研究要旨

紫外線消毒における濁度の影響として、紫外光透過率という単一指標だけでなく、紫外光の散乱特性を含めた評価を行うことを目的として、積分球式吸光度測定値を利用した散乱分率という指標を提案した。モデル濁質においては濃度に関わらず物質固有の散乱特性を表すことがわかった。しかし水道原水などの低濁度水では測定誤差が大きくなることから、代替となる指標を検討した。結果として 2 種類の濁度測定法、即ち透過光方式と透過+90° 散乱光方式による測定値の比（濁度比）を用いれば、散乱分率の代替指標として利用できると考えられた。一年間にわたって 2 か所の浄水場原水の散乱特性評価に、この濁度比を用いたところ、原水濁度値と濁度比に正の相関が見られ、即ち濁度が増すのは散乱特性が高い濁質の増加によるものと示唆された。モデル濁質においては可視光の散乱分率と紫外光の散乱分率において良い関係性が見られているため、この結果を併せて考察すると、浄水場原水の濁度が高い場合でも紫外光散乱が高い濁質が多く含まれることになるため、紫外線消毒への負の影響は紫外透過率で評価されるよりも低くなると考えられた。

また浄水原水の濁度比が変動するということは濁度値が、測定法によって異なるということであるが、さらに校正用標準液の種類によって測定値への影響があるのかどうかについて検討した。カオリン標準液を基準と考えると、特にホルマジン溶液を標準液とすると測定値は透過光方式では 1.8 倍、積分球方式では 2 倍以上の値となることがわかった。

## A. 研究目的

紫外線処理に影響を与える因子として濁質の影響が重要視されるが、その負の影響として光透過率の低下が一般的に挙げられるが、濁質による紫外光の散乱による正の影響については評価されていないのが現状である。そこで本研究では濁質の光散乱特性を適切に評価する指標を提案し、かつ浄水場原水に対して適用することで、現場において紫外線消毒を行う際に、濁質が消毒効果に与える影響をより正確に把握することを試みた。浄水場原水については約一年間の変動を観察し、その傾向を探ることとした。

また研究を進める過程において、同一サンプルでも濁度測定法によって濁度値が変わることが判明した。濁度値の相違が測定法だけでなく、校正用の標準液によって生じることが考えられたため、上水試験方法に記載されている 3 つの標準液を用いてその濁度測定値への影響を調べた。

## B. 研究方法

## B.1) 濁質の光散乱特性指標としての散乱分率の検討

濁質による光透過率の低下は吸光度測定によって評価できるが、この減少が生じる理由としては、濁質による吸光、濁質による光散乱、の 2 つが考えられる。吸光度計に積分球式測定装置を付加することで、濁質による吸光のみの減少光量が測定できる。(図 1 参照)。

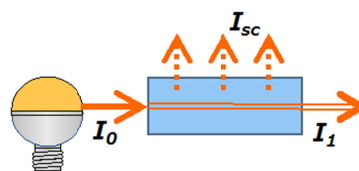


図 1 吸光度測定原理 ( $I_0$ : 入射光強度,  $I_1$ : 透過光強度,  $I_{sc}$ : 散乱光強度)

この図 1 において通常の吸光度測定値  $A_1$  は  $\log(I_0/I_1)$  である。また積分球式吸光度値  $A_2$  は  $\log(I_0/(I_1 + I_{sc}))$  である。そこで通常の吸光度測定値と積分球式吸光度測定値から、光散乱によって生じる光透過量の減少割合を示すことができると考え、以下の式 (1) のように散乱分率を定義した。

$$\text{散乱分率} = \frac{\text{散乱により透過しない光強度}}{\text{透過しない光強度}} \quad (1)$$

図 1 に示される値を用いて表すと以下の式となる

$$= \frac{I_{sc}}{I_0 - I} = \frac{I_0 10^{-A_2} - I_0 10^{-A_1}}{I_0 - I_0 10^{-A_1}} = \frac{10^{-A_2} - 10^{-A_1}}{1 - 10^{-A_1}} \quad (2)$$

この散乱分率が物質固有の散乱特性を示すのか検

討するために、特性が異なると考えられるモデル濁質としてカオリンと活性炭を用いた。カオリン（白陶土）は濁度標準液（和光純薬製）を希釈した試料を用いた。活性炭は粉末活性炭（和光純薬、粒径 150  $\mu\text{m}$  以上 10%、149 ~ 50  $\mu\text{m}$  20~40%、49  $\mu\text{m}$  以下 55~75%）を純水に懸濁させて用いた。それぞれ濃度として 50、70、80、100 mg/L となるように調整した。その懸濁液について、分光光度計（島津製作所製、UV-2550）にて 660 nm における吸光度を測定し、通常の吸光度測定値  $A_1$  とした。660 nm は濁度測定に用いられる可視光波長である。また同分光光度計に積分球式検出器（島津製作所製、ISR-2200）を付加して、660 nm における吸光度を測定し、積分球式吸光度測定値  $A_2$  とした。それらの測定値を用いて式(2)より散乱分率を求めた。

#### B.2) 散乱分率と濁度比の相関の検討

吸光度測定によって求められる散乱分率は、散乱特性を直接把握出来る方法ではあるものの、吸光度測定の精度に依存する方法である。1) にて用いた高濁度の懸濁液であれば、吸光度測定値の精度は高いが、本研究で対象としたい浄水場原水などでは濁度は数度程度であり、吸光度値も非常に低い値(0.01  $\text{cm}^{-1}$  程度)となる。また積分球式吸光度値は一般的にさらに低い値(0.005  $\text{cm}^{-1}$  以下)となるため、Twyman-Lothian の法則から、その誤差は大きく散乱分率の誤差は非常に大きいことから適用できない。そこで、散乱分率と相関が高く、かつ低濁度においても適用できる指標として、濁度比を提案した。これは測定方式の異なる濁度値の比によって求められ、散乱光を使用しない透過光方式と、散乱光を使用する透過 + 90° 散乱光方式もしくは積分球方式との比を指標とするものである。

対象試料としてカオリン、活性炭、ベントナイトの懸濁液を用いた。カオリン、活性炭は 1) と同様のものを、ベントナイトはベントナイト試薬（和光純薬、粒径 3 ~ 5  $\mu\text{m}$ ）を純水に懸濁させて用いた。それぞれ濃度として 50、70、80、100 mg/L となるように調整した。その懸濁液について以下の 3 方式にて濁度を測定した。透過光測定方式による濁度測定には、吸光光度計（島津製作所製、UV-2550）を用いて 660 nm の吸光度を測定し、カオリン標準液において検量線を作成することによって測定した。透過 + 90° 散乱光方式には濁度系（HACH 社製、100P）を用いて測定した。積分球方式は、濁度計（三菱化学株式会社製、SEP-PT-706）を用いて測定した。濁度比としては / もしくは / の 2 通りにて検討することとした。これらの濁度比と 1) に述べ

る方法で測定した 660 nm 光における散乱分率との関係性を検討した。

#### B.3) 可視光と紫外光の散乱分率の関係の検討

上述の B.2) で用いたモデル濁質、すなわちカオリン、活性炭、ベントナイトの懸濁液を用いて、散乱分率を 660 nm と 254 nm において測定し、それらの相関を調べた。モデル濁質の懸濁液濃度としては、B.2) と同様の 50、70、80、100 mg/L となるように調整した。

#### B.4) 浄水場原水における濁度比の測定

東京近郊の 2 箇所の浄水場（A 浄水場および B 浄水場）から原水を月に一度の頻度で採水し対象水とした。採水期間は 2014 年 12 月 ~ 2015 年 10 月とした。A 浄水場は河川水を原水として取水している浄水場であり、B 浄水場は湖沼を水源とする河川水を原水として取水している浄水場である。

これらの対象水に対して 2) に示した透過光方式および透過 + 90° 散乱光方式にて濁度を測定し、濁度比を求めた。

#### B.5) 濁度測定法、校正用標準液の違いによる濁度値への影響

上水試験法（2011 年版 理化学編）によると濁度計の校正用標準液としては、主に 3 種類が用いられている。そこで濁度計を校正する際に用いる標準液の違いによって濁度測定値に与える影響の有無について調べた。用いた標準液は以下のとおり

##### カオリン懸濁液

従来から用いられてきた濁度標準液。成分は自然由来なので粒径分布等の均質性が低い。

##### ポリスチレン懸濁液

日本で濁度標準液として使用され始めたもの。化学合成物質なので均質かつ安定な粒径分布である。

##### ホルマジン懸濁液

米国で主に使用されている。ポリスチレンと同様に、化学合成物質なので均質かつ安定。

3 種類の濁度測定方法（透過光方式、透過 + 90° 散乱光方式、積分球方式）について、以上 ~ の濁度標準液で校正した場合の濁度値の相対比を算出した。

まずカオリン標準液にて校正した装置にて、ポリスチレン標準液およびホルマジン標準液の濁度を測定した。用いた各標準液は 0.5、1、5、10 度とした。

#### C. 研究結果

##### C.1) 濁質の光散乱特性指標としての散乱分率の検討

図 2 に各濃度におけるカオリンと活性炭の 660 nm

における散乱分率の測定結果を示す。

また表 1 に浄水場原水サンプルのうち 3 つの試料に対し、660 nm の吸光度および積分球式吸光度を測定した結果を示す。通常の吸光度値は 0.01 cm<sup>-1</sup> 前後であり、積分球式吸光度値は 0.005 cm<sup>-1</sup> 以下の値となっていた。

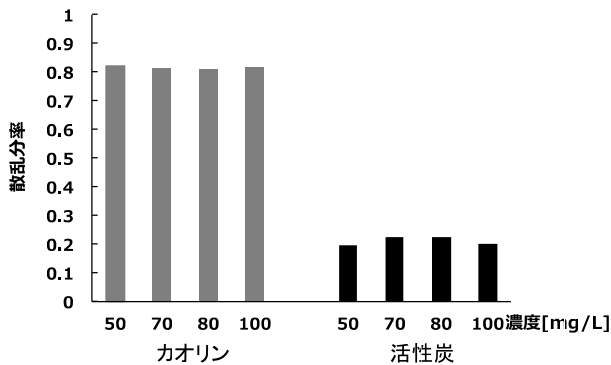


図 2 カオリン・活性炭懸濁液の 660 nm の散乱分率

表 1 浄水場原水の 660 nm での吸光度および積分球式吸光度の測定結果 (cm<sup>-1</sup>)

採水月 (2015年)	A1: 吸光度	A2: 積分球式吸光度
4	0.007	0.002
5	0.012	0.004
6	0.012	0.004

### C.2) 散乱分率と濁度比の相関の検討

カオリン、活性炭、ベントナイトの各モデル濁質懸濁液について、3 つの測定方法によって濁度を測定した。図 3 に散乱分率と濁度比 (積分球方式測定値 / 透過光方式測定値) の関係を示した。図 4 は散乱分率と濁度比 (透過 + 90° 散乱光方式測定値 / 透過光方式測定値) の関係を示した。

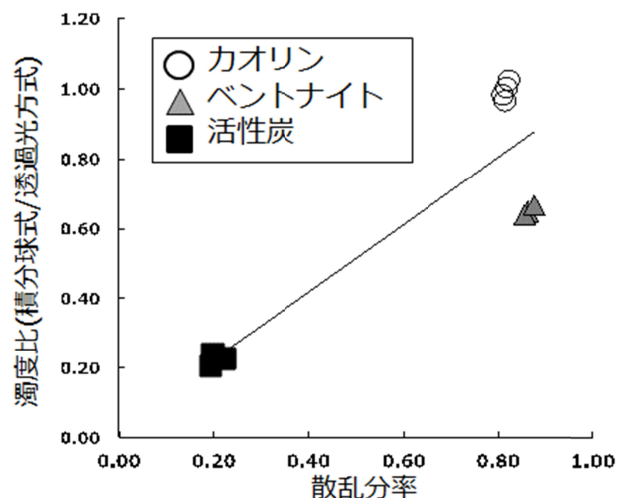


図 3 散乱分率と濁度比(積分球方式/透過光方式)の相関

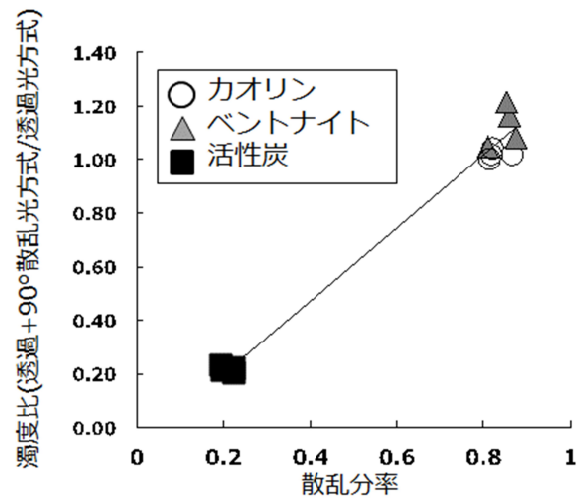


図 4 散乱分率と濁度比(透過+90°散乱方式/透過光方式)の相関

### C.3) 可視光と紫外光の散乱分率の関係の検討

カオリン、活性炭、ベントナイトの各モデル濁質懸濁液について、UV 光 (254 nm) と可視光 (660 nm) において散乱分率を測定し、それらを図 5 にプロットした。

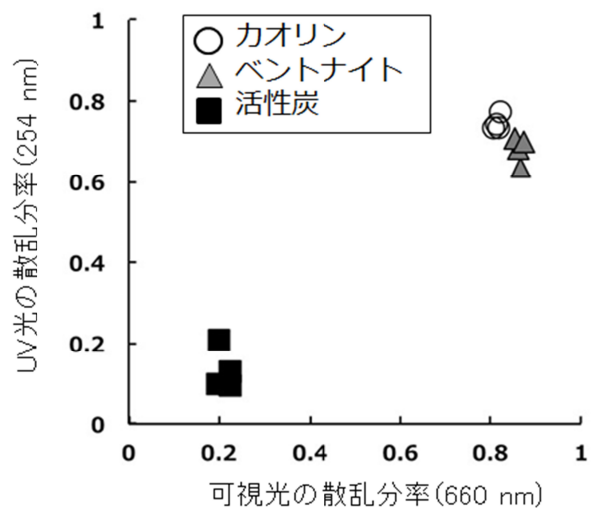


図 5 モデル濁質の可視光の散乱分率と UV 光の散乱分率の関係性

### C.4) 浄水場原水における濁度比の測定

東京近郊の 2 箇所の浄水場 (A 浄水場および B 浄水場) から月に一度の頻度で採水した原水の濁度を 2 つの測定方式 (透過光方式、透過 + 90° 散乱光方式) で測定した。

図 6 に A 浄水場と B 浄水場における 2 方式の濁度測定結果を示す。B 浄水場においては 2015 年 6 月に定期採水日以外にも台風によって原水の濁度が上がったために緊急採水を行った試料も合わせて測定結果として示した。

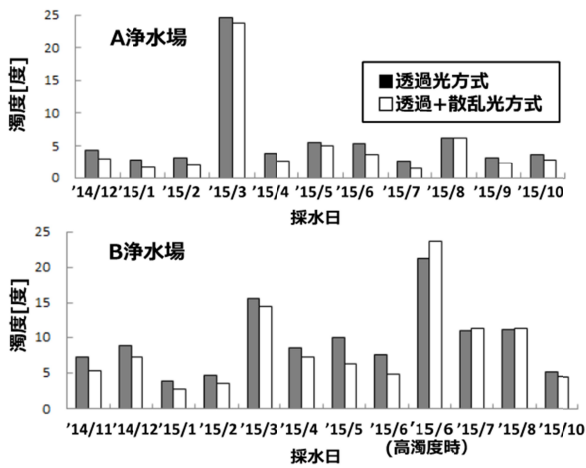


図 6 浄水場原水における 2 つの方式による濁度測定結果

C.5) 濁度測定法，校正用標準液の違いによる濁度値への影響

濁度計の校正用濁度標準液を 3 種類用意して，カオリン標準液にて校正した濁度計を用いて同じ濁度数のポリスチレン，ホルマジン標準液を測定した結果から，各々の標準液を用いた場合の濁度値を算定した。図 7 は，カオリン標準液を用いて校正した場合の濁度値を 100%とした場合の，その他の標準液を用いた場合の濁度値の相対比で示した。濁度測定法は透過光方式，透過+90° 散乱光方式，積分球式の 3 方式である。

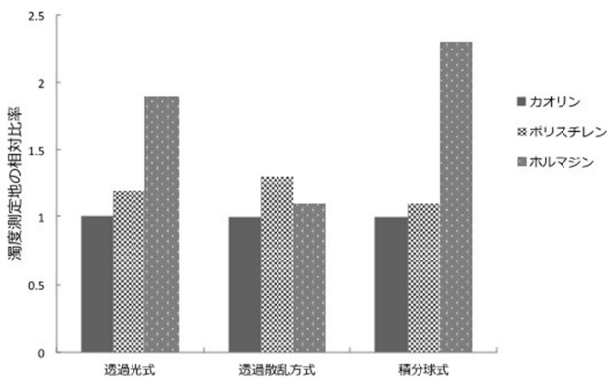


図 7 各濁度標準液にて校正した場合の濁度値の相対比（カオリン標準液の場合を 100%とした）

D. 考察

1) 濁質の散乱特性の評価方法について

図 2 に示されるように，カオリン，活性炭共に濃度による散乱分率の違いはほとんど無く，かつカオリンと活性炭とでは，散乱分率の値が大きく異なっていた。このことから，濁質の散乱特性を評価する指標として散乱分率は良い指標であると考えられた。しかし一方で表 1 に示されるように，浄水場原水へ適用する場合，吸光度および積分吸光度ともに測定値が低くなっており，Twyman-Lothian の法則から，その誤差は両者ともに大きく，その二つを基に算定される散乱分率の誤差は非常に大きくなると考えられる。したがって，この散乱分率を浄水原水に適用することはできないと判断した。

そこで濁度比を代替指標として検討することにした。図 3 には積分球方式と透過光方式によって測定された濁度値から求めた濁度比を求め，散乱分率との相関を調べた結果を示す。図に示されるように，カオリンとベントナイトで，その関係性が逆になっていた。従って，この濁度比は適しないと考えられた。図 4 には積分球式に代えて透過+90° 散乱方式と透過方式の測定値から濁度比を求め，散乱分率との相関を調べた結果を示す。図に示されるように，この場合では，散乱分率と良い相関があると考えられ，散乱分率の代替指標として低濁度水である浄水場原水に適用できると考えられた。

さらに図 5 に示されるように，可視光の散乱分率は UV 光の散乱分率との相関が高いことが示唆された。つまり濁度比が高いということは，可視光散乱分率が高く，かつ UV 光の散乱分率も高くなるという関係が成立することが示唆された。

図 6 に示した浄水場原水における濁度値から濁度比を算定し，横軸として各試料における濁度値（透過+90° 散乱光方式）として，プロットした図を図 8 に示す。

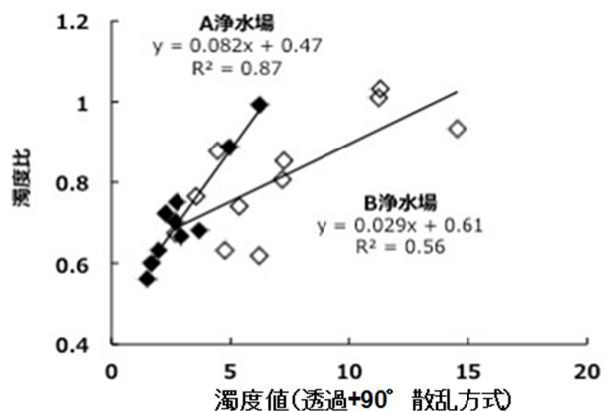


図 8 浄水場原水の透過+90° 散乱光方式濁度と濁

## 濁度の相関

どちらの浄水場原水においても、濁度が上がるに伴い濁度比が大きくなっていった。これは散乱特性が大きくなることを意味している。従って浄水場原水における濁度の増減は、可視光を散乱する特性をもつ物質の増減によるものと示唆される。先に示した濁度比と UV 光散乱との相関を考えれば、浄水場原水の濁度が高くなり、浄水への濁質混入が懸念される場合でも、その増大は UV 光散乱の高い物質の増加によるものであるため、UV 消毒への負の効果は大きくならないのではないかと考えられた。

### 2) 濁度測定における測定法、校正用標準液の影響

図 7 に示されるように、校正用標準液としてはカオリンを用いる場合が最も低い濁度測定となることがわかった。またポリスチレン、ホルマジンともに標準液として使用する場合は、濁度値が高くでることがわかった。特に透過光方式と積分球方式においてはホルマジン標準液で校正した場合の違いが最も大きく、この点濁度測定において留意すべき点と考えられる。

## E. 結論

- 1) 吸光度値と積分球式吸光度値から求める散乱分率によって濁質の散乱特性が評価できることがわかった。またモデル濁質においては可視光の散乱分率と UV 光の散乱分率において良い関係性が見られており、両散乱分率には高い相関があるものと考えられた。
- 2) 2 種類の濁度測定法、即ち透過光方式と透過 +90° 散乱光方式による測定値の比（濁度比）を用いれば、散乱分率の代替指標として利用できることが考えられた。
- 3) 一年間にわたって 2 か所の浄水場原水の散乱特性評価に、この濁度比を用いたところ、原水濁度値と濁度比に正の相関が見られた。即ち濁度が増すのは散乱特性が高い濁質の増加によるものと示唆された。上記、1)の結果を併せて考察すると、浄水場原水の濁度が高い場合でも UV 光散乱が高い濁質が多く含まれることになるため、紫外線消毒への負の影響は紫外透過率で評価されるよりも低くなると考えられた。
- 4) 校正用標準液の種類によって濁度測定値への影響があるのか検討した結果、カオリン標準液を基準と考え、特にホルマジン溶液を標準液とすると測定値は透過光方式では 1.8 倍、積分球方式では 2 倍以上の値となることがわかつ

た。

## F. 健康危険情報 特になし

## G. 研究発表

### 1. 論文発表

無し

### 2. 学会発表

- 1) 木下由紀子, 大瀧雅寛, 島崎大 (2016) 濁質の光散乱特性を考慮した UV 消毒への影響評価, 第 50 回日本水環境学会年会講演集, p.362

## H. 知的財産権の出願・登録状況

### 1. 特許取得

無し

### 2. 実用新案登録

無し

### 3. その他

無し