

(17) 下水処理水の再利用のための臭気物質の分析と同定

ANALYSIS AND IDENTIFICATION OF ODOROUS COMPOUNDS FOR REUSE OF TREATED WASTEWATER

瀧口 博明*・松尾 友矩**・花木 啓祐**・鈴木 規之**

Hiroaki TAKIGUCHI*, Tomonori MATSUO**, Keisuke HANAKI**, Noriyuki SUZUKI**

ABSTRACT; The reuse system of city domestic wastewater are now coming to be rather popular in Tokyo metropolitan area. In the water quality aspects of reuse of treated wastewater, the remained odor problem is one of the most urgent ones to be solved. The purpose of the present study is to initiate the first step to identify the odorous substances themselves, to find the main source of production of the odorous substances, and to investigate the efficient methods of removal of the odorous substances.

It has been reported that the principal odorous substances from sewage treatment plant are sulfur compounds. Gas chromatography with flame photometric detector (FPD), which is sensitive to sulfur compounds, was used for the chemical analyses of the odorous substances. Analyses of head-space gas showed that sulfur compounds were sharply removed through an aeration tank and sludge treatment processes were related to production of odorous substances. Using a purge & trap concentration method, sulfur compounds such as methyl mercaptan, dimethyl sulfide, and dimethyl disulfide are isolated and identified from the final effluent of the conventional activated sludge process. For the removal of the odorous substances, the aerated filtration of the activated carbon bed was found to be effective.

KEY WORDS; Reuse of wastewater, Sensory test, Sulfur compounds,
Head-space gas analysis, Purge & trap concentration method

1. はじめに

近年の都市域における急激な人口の増加と生活の近代化および飛躍的な産業の発展は、水需要の増大と共に、水源の減少、枯渇の原因となり、都市における水の供給は一層厳しいものとなっている。しかし、これ以上の水資源開発は生態系の破壊につながる恐れもあることから、都市における自立的、安定的な水資源の供給として水の循環利用・再利用が求められ、また現在では様々な場所で実施されている。¹⁾ 工業用水の循環利用やビル等の中水道設備、雨水利用施設の導入などであるが、それと共に下水処理水も新たな水資源として期待されており、また実際に再利用されている場も多い。今日の都市において、下水処理水は定常的に発生する、かなりの程度まで浄化された水源であるといえる。下水処理水の再利用において、色や発泡と並んで問題となるのが、処理水特有の「臭い」である。東京都では、下水処理水の再利用のひとつとして、「清流の復活」と銘打って、流水がとだえ空堀となっていた野火止用水や玉川上水に多摩川上流処理場からの二次処理水を砂ろ過したものを放流しているが、このうち昭和61年から下水処理水が放流されている玉川上水を研究対象として選び、周辺の住民の用水路に対して抱くイメージ、下水処理水

*環境庁水質保全局 (Environment Agency, Water Quality Bureau)

**東京大学工学部 (University of Tokyo, Faculty of Engineering)

の放流による清流復活に対しての評価などを把握するためのアンケート調査をおこなった結果²⁾、住民の中には「処理水の臭い」を気にする傾向があり、それが下水処理水の再利用における課題であることが明らかになった。処理水には、どうしても独特の活性汚泥臭が残るが、都市排水の再利用を有効に進めるためにも、これを高度に除去し、資源としての下水処理水の価値を高めることが必要となる。また、下水処理場から放出される臭気は、近隣からの苦情も多く、その対策は重要な課題でもある。

本研究の目的は、下水やその処理水の「臭い」に注目し、それらがどの程度の臭気強度であるのか、原因となっているのはどんな物質でありどれくらい含まれているのか、有効な処理方法はあるのかなどを解明することであり、処理水の臭いに取り組む研究の第一歩となるものである。

2. 下水臭の特徴

下水処理場から発生する臭気物質は、確認されているものだけでも50種類以上にもものぼるとされており³⁾⁴⁾、それらが複合して独特の臭気を形成している。臭気の原因となる物質は、下水処理場に流入する様々な排水中にもともと含まれていたり、あるいは生物処理の過程で、排水中の有機物が微生物によって分解、合成される結果、生産されると考えられる。このため、下水処理場では、臭気の種類や強度が、処理の段階により変化する。

下水処理にともなって発生する下水汚泥の処理の過程においても、有機物は変化して途中の段階で臭気物質が生成され、それらが大気中に放散される。通常の下水処理に比べて、汚泥処理では有機物濃度が高いうえ、嫌気性処理や加熱処理が行われるため、発生する臭気は濃厚になると考えられる。⁵⁾これらの要因により発生する代表的な臭気物質をまとめたものが、Table 1³⁾⁴⁾である。

Table 1 Odorous substances related to sewage treatment

(無機ガス)			
硫化水素	アンモニア	二酸化窒素	二酸化硫黄
(硫黄化合物)			
メチルメルカプタン	硫化メチル	二硫化メチル	
(アルデヒド類)			
ホルムアルデヒド	アセトアルデヒド	プロピオンアルデヒド	
イソブチルアルデヒド	n-ブチルアルデヒド	イソパレルアルデヒド	
(脂肪酸類)			
酢酸	プロピオン酸	n-酪酸	イソ酪酸
		イソ吉草酸	n-吉草酸
(窒素化合物)			
トリメチルアミン	インドール	スカトール	

3. 下水処理水の臭気強度

3.1 臭気の官能試験の方法

臭気の測定方法は、人間の鼻の感覚（嗅覚）を利用して、臭気の強度や不快度の評価を行う官能試験法と、機器を用いて臭気の原因となる物質を定性、定量的に分析する化学成分測定法に大別される⁵⁾。官能試験法は、実際の臭気が多種にわたる低濃度の物質が混合しているものが多いことから、有効な臭気の測定法である。

そこで、下水処理水の臭気強度がどれくらいかを知るために、多摩川上流処理場から玉川上水に放流されている下水処理水、東京都砂町処理場の二次処理水（塩素注入前と注入後）、落合処理場の二次処理水を試料として、次の方法により官能試験をおこなった。

- ① 試料を粗いろ紙に通して、目に見える浮遊物質を取り除き、試料原液とする。
- ② 無臭水として、市販の浄水器（活性炭ろ過器）に蒸留水を通したものを用意する。
- ③ 試料原液を共栓付き三角フラスコ（300ml、茶色）に所定の希釈倍率となるように適量とり、無臭水を加えて全量を200mlとする。茶色の三角フラスコを用いるのは、被験者に色で判断されるのを防ぐためであり、また希釈倍率は×1、×3、×10、×30、×100の5段階とした。
- ④ ③で用意した試料に無臭水2本を加えて1組とする。被験者には、この中から臭いがすると思われる

フラスコを選んでもらう。被験者の数は、約10人とした。

⑤試験結果により、被験者全体の閾希釈倍数を算出する。

3.2 閾希釈倍数の算定方法⁶⁾

①まず、各被験者ごとに個人の閾希釈倍数の常用対数値 X_i を求める。例えば、被験者 i について、

$$X_i = \frac{\log(Y_{i1} \cdot Y_{i2})}{2}$$

Y_{i1} ; 被験者 i の回答が「正解」である最大の希釈倍数

Y_{i2} ; 被験者 i の回答が「不正解」または「不明」である最小の希釈倍数

X_i ; 被験者 i の閾希釈倍数の常用対数値

ここで、例えば、被験者が $\times 1$ 、 $\times 3$ 、 $\times 30$ と正解で、 $\times 10$ 、 $\times 100$ が不正解の場合は $\times 30$ の正解は無効として、正解である最大の希釈倍数を $\times 3$ 、不正解である最大の希釈倍数を $\times 10$ として計算した。また、被験者が $\times 100$ の希釈率まで正解であった場合には、 $\times 300$ で不正解になったと仮定して、個人の閾希釈倍数の常用対数値を算出した。

②①で求めた X_i の被験者全体の平均値 X を算出することにより、被験者全体の閾希釈倍数 Y を求める。閾希釈倍数は、それだけ希釈すると人間の鼻が臭いを感じなくなる希釈倍数を示す。

$$Y = 10^X$$

$$X = \frac{1}{n} \sum X_i \quad n ; \text{被験者数}$$

3.3 官能試験の結果

この試験の結果を Table 2 に、希釈倍率と正解率の関係を Fig. 1 に示す。これより、下水処理水の閾希釈倍数が 6 ~ 25 倍であることがわかる。閾希釈倍数は、処理場毎に異なったが、落合処理場の下水処理水が他の処理場の下水処理水に比べて、閾希釈倍数が低いのは、落合処理場が汚泥処理行程を持たないためではないかと考えられる。また、砂町処理場の処理水では、塩素注入前の方が塩素注入後よりも臭気が強いという結果となった。

Table 2 Threshold odor level of the final effluent from activated sludge process

	Water Temp. (°C)	pH	TOC (mg/l)	COD _{Cr} (mg/l)	Threshold Odor Level
Final effluent supplied to Tamagawa channel	11.1	7.28	13.5	—	12.3
Effluent from second filtration (Sunamachi)	26.4	7.22	—	29.6	24.5
Effluent after chlorination (Sunamachi)	26.8	7.22	—	31.1	11.5
Effluent from second filtration (Ochiai)	18.4	6.73	9.00	24.4	6.43

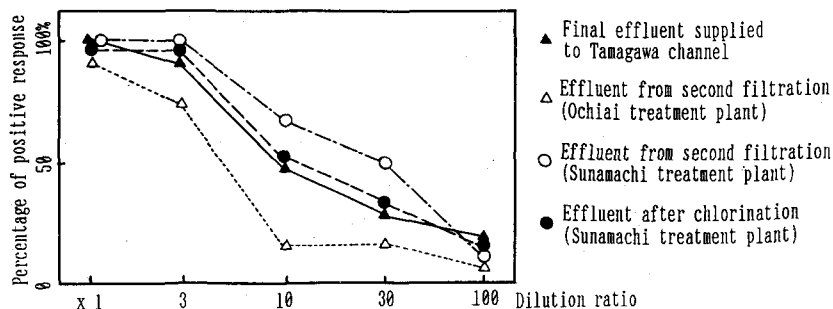


Fig.1 Relationship between dilution ratio and percentage of positive response

4. 下水中の臭気物質の測定

臭気物質の生成機構や除去方法などを検討するには、臭気物質の成分や濃度の測定が必要となる。本研究では、処理水も含めた下水臭の化学成分の測定として、ガスクロマトグラフを用いた分析を行った。Table 1 に挙げた下水臭と関係深い物質の中でも、特に硫化水素 (H_2S)、メチルメルカプタン (CH_3SH)、硫化メチル ($(\text{CH}_3)_2\text{S}$)、二硫化メチル ($(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$) などの硫黄化合物がその寄与が大きいとされている⁷⁾¹¹⁾。そこで、本研究では、下水中の臭気物質として、硫黄化合物（その中でも特に低い閾値を持つ硫化水素、メチルメルカプタン、硫化メチル、二硫化メチル）を対象とし、ガスクロマトグラフの検出器として硫黄化合物に敏感な炎光光度検出器 (FPD) を用いた分析を行った。

一般に、臭気物質には閾値の低い物質が多く、特に下水臭の場合これらが低濃度で存在すると考えられる。したがって、試料の液体をそのまま検出器に導入しても、検出レベルに達せず、十分なデータが得られない。よって、何らかの形で試料の濃縮が必要となるので、濃縮方法として、ヘッドスペース法と低温濃縮・加熱導入を含むバージトラップ法を試みた。

4.1 ヘッドスペース法を用いた分析

ヘッドスペース法 (Head Space Method) は、バイアルびんの中に試料水を入れ、恒温水槽内で一定時間放置した後、上部空間の気体をガスクロマトグラフに注入する方法である。気液平衡状態では、多くの臭気物質は気相濃度が液相濃度よりも高く、実質的に気相への濃縮効果がある⁸⁾。

(1) 実験方法

バイアルびん (内容量130ml) の中に、試料50mlを入れ、上部空間を窒素ガスで置換した後、ゴム栓とアルミキャップで固定する。バイアルびんを30℃の恒温水槽に入れ、30分間放置した後、バイアルびんを取り出し、数秒間激しく振とうする。その後、直ちに上部空間の気体を乾燥したガスタイトシリンジを用いて採取し、ガスクロマトグラフに注入する。試料注入量は1ccとした。

(2) 実験条件

検出器として、FPD 付ガスクロマトグラフ (島津GC-14A) を用い、 β 、 β' -Oxydipropionitrile (ODPN 西尾工業製) を用い、Table 3 に示した分析カラム及び条件で測定した。

Table 3 Column and condition of analysis

Column					Condition of Analysis					
Liquid phases	Solid support	Mesh size	Max. Temp (°C)	Diameter × Length	Carrier gas (kg/cm ²)	H ₂ (ml/min.)	Air (ml/min.)	Oven Temp. (°C)	Injection Temp. (°C)	Detector Temp. (°C)
β 、 β' -Oxydipropionitrile 25%	Chromosorb W AW DMCS	80 100	100	3mm × 3m	2	50	60	70	150	140

(3) 分析した試料

サンプルとして、東京都砂町処理場、落合処理場、多摩川上流処理場の「流入水」、「一次処理水」、「二次処理水」を用いた。

(4) 実験結果と考察

ヘッドスペース法を用いた分析結果により、砂町処理場と多摩川上流処理場の流入水と一次処理水から硫化水素、メチルメルカプタン、硫化メチルの硫黄化合物が検出されたが、二次処理水からは検出されなかった (Fig. 2, 3, 4 に砂町処理場の実験結果を示す)。この実験結果より、CODcrが一沈前 (流入水)、一次処理水、二次処理水と順に減少しているのに比べて、メチルメルカプタンや硫化メチルは、曝気槽の前後で急激に減少している。これは、硫化水素の沸点が-60.3℃、メチルメルカプタンの沸点が5.95℃、硫化メチルの沸点が37.5-38℃とそれぞれ低いので、これらの物質のほとんどが曝気槽

の段階で揮散あるいは分解されたと考えられる。
 また、CODcr(mg/l)とメチルメルカプタン、硫化メチルとの関係をFig. 5, 6に示す。データのばらつきは、メチルメルカプタンや硫化メチルに代表される臭気物質がCODcrで表される有機物の量だけでなく、流入水の構成、水温、pH、塩濃度、各段階での滞留時間、返送汚泥の状況など様々な要因によって影響を受けるためと考えられる。さらに落合処理場の試料からは、硫化メチルは検出されず、メチルメルカプタンの値も1オーダー以上低かった。これは、前者の二つの処理場が汚泥処理工程を持つが、落合処理場は持たないことが原因ではないかと考えられる。

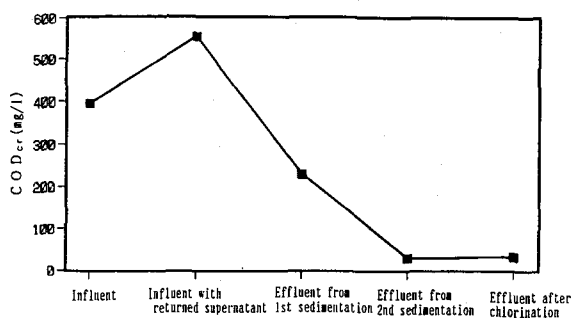


Fig.2 Change of CODcr by progress of treatment

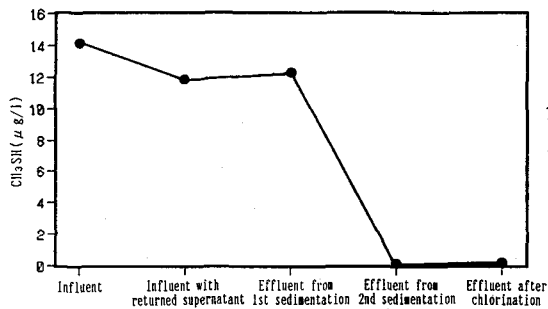


Fig.3 Change of Methyl mercaptan by progress of treatment

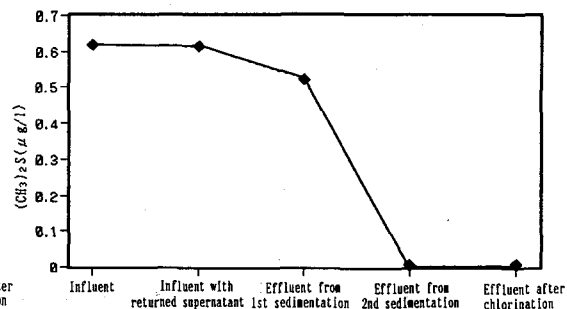


Fig.4 Change of Dimethyl sulfide by progress of treatment

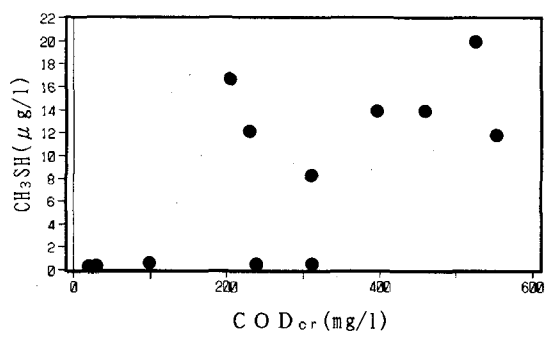


Fig.5 Relationship between CODcr and Methyl mercaptan

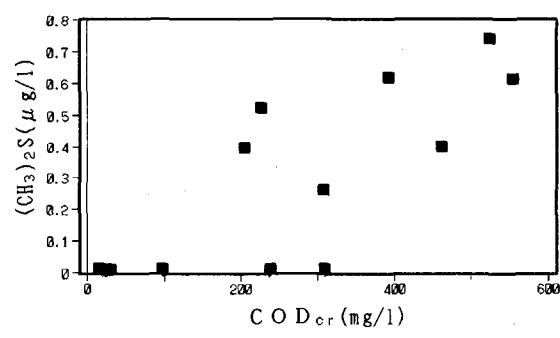


Fig.6 Relationship between CODcr and Dimethyl sulfide

4.2 パージトラップ法を用いた分析

ヘッドスペース法を用いた分析では、二次処理水のレベルでは、臭気物質が検出されなかったが、官能試験の結果からもわかるように二次処理水の臭いは人間の鼻では十分感知されており、何らかの臭気物質がごく微量であれ存在していることは明らかである。そこで、別の濃縮方法として、パージトラップ法（

Purge & Trap Method) と悪臭防止法に用いられている低温濃縮・加熱導入を組み合わせる方法を試みた(9)(12)。

パージトラップ法は、一般に試料水を高純度の窒素ガスで曝気(パージ)して水中に溶けこんでいる物質を追出し、粉末活性炭などを詰めた捕集管で捕集する方法である。また、悪臭防止法での低温濃縮は、寒剤として液体酸素(沸点: -183°C)を用いるが、本研究では不活性、無害性の液体窒素(沸点: -196°C)を用いた。また、液体窒素に浸した濃縮管は低温のため充填剤に試料ガス中の窒素を吸着してしまい、ガスが流れにくくなる。したがって、ガスが流れるようにあらかじめ液体窒素中で濃縮管の充填剤に窒素ガスを通して吸着させておいてから、捕集した気体を注入して、充填剤に臭気物質を吸着させた。

(1) 実験方法 (Fig. 7 参照)

洗浄びん(容量 1 L) の中に試料 750 ml を入れ、上部空間を窒素ガスで置換した後、恒温水槽 (40°C) の中で 30 分水浴させる。次に、試料にポンプで窒素ガスを 100 ml/min. で送り込んで試料をパージし、出てきた気体をガス試料捕集バッグ(テドラバッグ: 1 L) に捕集する。ガス試料捕集バッグを液体窒素に浸した濃縮管に接続しポンプで注入した後、濃縮管を液体窒素から取り出す。低温下から常温中に移すことで、濃縮管の充填剤に吸着した窒素ガスを濃縮管から吹き出させる。この操作によって、濃縮管の温度は -200°C 程度から、 -120°C 程度にまで上昇する。この操作を行う理由は、液体窒素に浸した濃縮管を直接加熱導入装置に接続すると、濃縮管の充填剤に吸着された窒素が温度上昇によって一気に気化し、ガスクロマトグラフ内に入るため、圧力を上げ、検出器の火が消えたり、配管が外れたりしてしまうためである。その後、 -120°C 程度の濃縮管を加熱導入装置に接続して、ヒーターにより濃縮管の温度を 70°C まで上昇させて、ガスクロマトグラフに注入する。

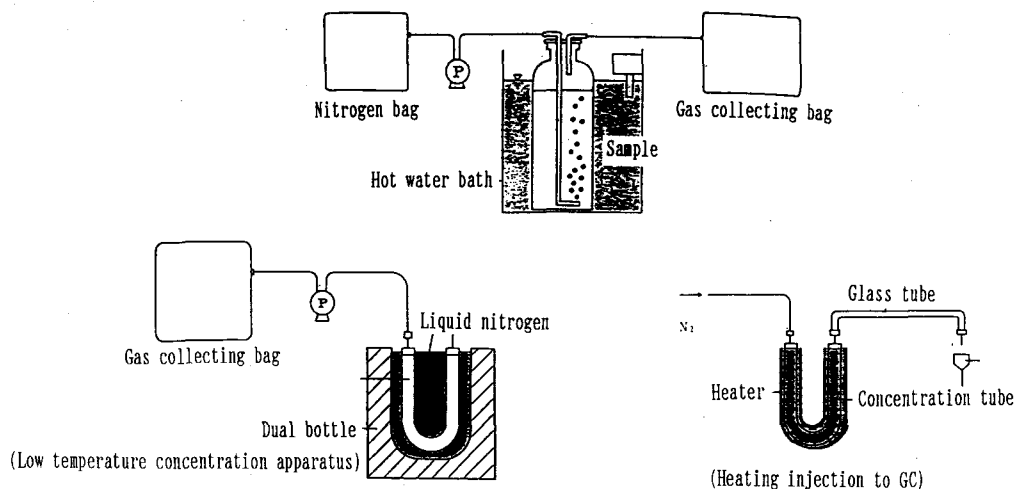


Fig 7. Flow diagram of purge & trap concentration method

(2) 実験条件

ガスクロマトグラフの分析条件は、ヘッドスペース法による分析の際と同じである。加熱導入装置は、島津製作所製 FLS-1 を使い、これを FPD 付ガスクロマトグラフに装着した。また、濃縮管は S 用臭気濃縮管(内径 4mm、島津製作所製)を用い、充填剤としては、ガスクロマトグラフのカラムと同じく、 β, β' -Oxydi propionitrile を用いた。

(3) 分析した試料

サンプルとしてはヘッドスペース法と同じく、砂町処理場、落合処理場、多摩川上流処理場の「二次処理水」を用いた。

(4) 実験結果と考察

実験の結果、ヘッドスペース法では検出されなかった物質を検出することができた。その例として、Fig. 8 に落合処理場の二次処理水の分析例を示す。ヘッドスペース法による分析では小さなピークが一つ現れているだけであるが、パージトラップ法による分析では、いくつかのはっきりとしたピークが得られ、これらはメチルメルカプタン、硫化メチル、二硫化メチルであると確認された。これらが、二次処理水の臭いのに構成する物質の一部であると考えられる。GC (FPD) の検出感度は 1.0×10^{-12} (g) のオーダーで、ヘッドスペースガスでは、1 cc 注入するとして $0.1 (\mu\text{g/l})$ のオーダーである。パージトラップ法では、捕集したガスの臭気濃度が、ヘッドスペースガスとほぼ同じであると考えられ、これを 1 L 濃縮することになるので、単純計算で検出感度が 10^3 倍上がる、すなわち 1.0×10^{-12} (g) のオーダーまで物質を検出できることになる。また、この濃縮方法は、液体窒素に浸した濃縮管を一旦常温中に取り出して、充填剤に吸着した窒素ガスを濃縮管の外に出すため、このときに窒素ガスと一緒に充填剤に捕集された臭気物質が一部外に逃げてしまうことが考えられ、定量性の課題が残る。また、低温の濃縮管を加熱してガスクロマトグラフに注入するため、出現するピークにも多少の時間のずれが生じるなど、再現性についても今後検討する必要がある。

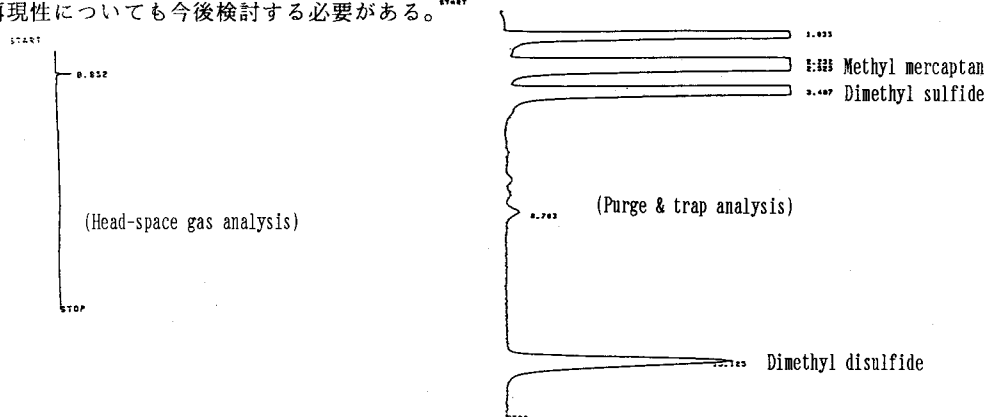


Fig.8 Comparison of sensitivity between head-space gas analysis and purge & trap analysis

5. 臭気対策としての三次処理

落合処理場と多摩川上流処理場では、処理水の再利用を行っており、二次処理水を砂ろ過したものを放流水としている。Fig. 9 に、砂ろ過による TOC (mg/l) の変化を示す。また、砂ろ過前後の試料をパージトラップ分析し、その物質の濃度の変化を Fig. 10 に示す。メチルメルカプタンと二硫化メチルの量は二次処理水と比べて多少減少しているが、硫化メチルの量はそれほど変化していない。

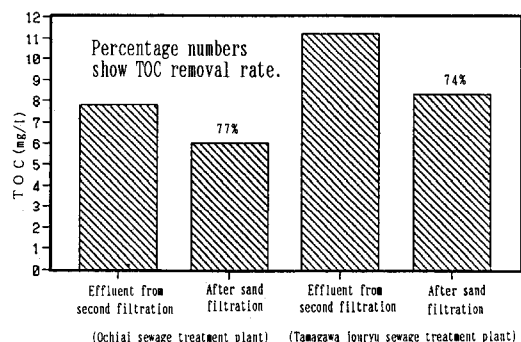


Fig.9 Removal of Total Organic Carbon by sand filtration

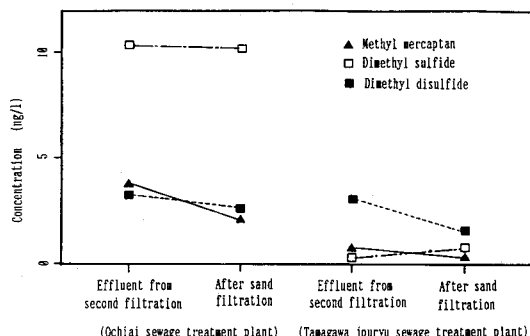


Fig.10 Reduction of odorous substances by sand filtration

また、東京都では落合処理場の二次処理水を様々なろ材（スラッジライト、アンスラサイト、CBろ材、活性炭）を使って、ろ材によるろ過作用とろ材に吸着した生物膜による生物学的処理を組み合わせた生物膜ろ過法で処理する実験が行われている。スラッジライトは下水処理場の污泥焼却灰であり、CBろ材はコンクリートボールろ材を意味する。それぞれのろ材（有効径；2mm）が口径400（mm）のエアレーションが行われているろ過筒に層厚2mで詰め込まれ、二次処理水が通水速度200（m/day）で通されている。この効果について、各ろ過水を試料として、その分析を行った。試料を採取した日は、通水を始めてから2ヵ月以上経過しており、定常状態に達していた。TOC（mg/l）の変化についてはFig. 11、閾希釈倍数を表すTONについては、Fig. 12に示す。

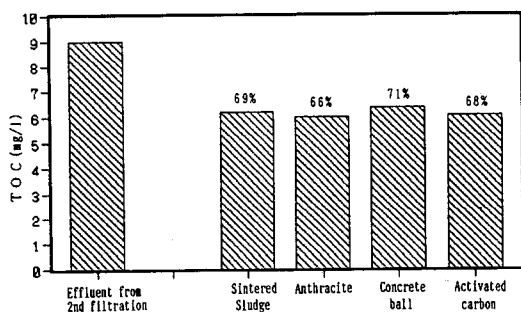


Fig. 11 Comparison of TOC removal efficiency among four filter bed medias

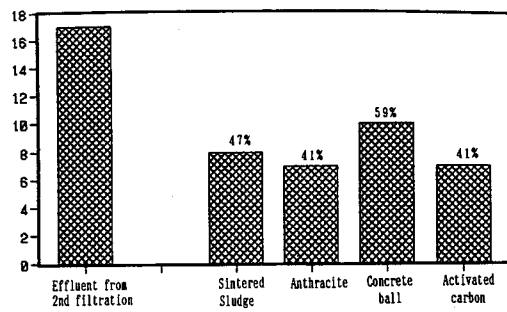


Fig. 12 Comparison of TON removal efficiency among four filter bed medias

さらにこれらの試料をパージトラップ分析した結果をFig. 13に示す。メチルメルカプタンは二次処理水での値が生物膜ろ過法で処理された試料とそれほど変化していないが、硫化メチル、二硫化メチルについては、これらの処理によって砂ろ過よりも濃度が低くなっている。これらにより、TOCで表される有機物の除去率がそれほど変わらなくても、様々なろ材を用いた生物膜処理が、物理的な除去が主な砂ろ過による処理に比べて臭気物質の減少に有効であることがわかる。特に活性炭でその減少が大きく、¹⁰⁾ 臭気物質の除去に効果的であると考えられるが、TONでろ材による差がそれほど生じていないことは、処理水中の臭気物質が硫黄化合物以外にも存在することや、人間の鼻の感覚が存在する臭気物質濃度に比例しないことなどが原因と考えられる。

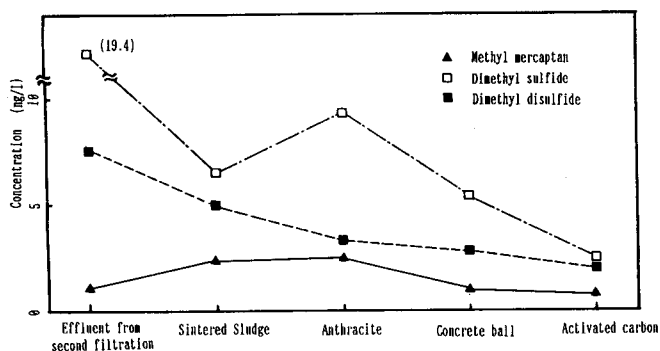


Fig. 13 Comparison of odorous substances removal among four filter bed medias

6. まとめ

- ① 三点比較式法を応用した官能試験により、下水処理水は6～25倍の閾希釈倍数を持つことがわかった。
- また、污泥処理工程を持つ処理場からの処理水が、処理工程を持たない処理場からの処理水よりも、閾希釈倍数で表される臭気濃度が高かった。

- ② FPD付ガスクロマトグラフを用いたヘッドスペースガスの分析により、下水処理過程における流入水、一次処理水の段階で硫化水素、メチルメルカプタン、硫化メチル、二硫化メチルが検出されたが、二次処理水からは検出されなかった。また、これらの臭気物質とCODcrで表される有機物量との相関は、それほど高くなかった。
- ③ 低温濃縮・加熱導入を組み合わせたパージトラップ法により、二次処理水中にもメチルメルカプタン、硫化メチル、二硫化メチルの硫黄化合物を検出することができ、これらが処理水の臭気の一因と考えられる。
- ④ 臭気物質の除去を目的とした三次処理では、物理的な除去が主な砂ろ過による処理よりも、ろ材を使った生物膜ろ過法が有効であり、TONは二次処理水の40～60%となった。また、パージトラップ法を用いた分析でも、処理水中の硫黄化合物は生物膜処理により減少していた。
- ⑤ 今回は、硫黄化合物を中心に下水処理過程における臭気物質の検出を試みたが、下水臭を構成する物質は他にも多く存在することから、これらを含めた研究が今後必要である。また、二次処理水中の臭気物質を検出する方法として、低温濃縮・加熱導入を組み合わせたパージトラップ法による分析を行ったが、これも寒剤の種類・回収率・再現性などの面で更に改善を図る必要がある。

(謝辞)

本研究を行うに際して、試料の提供及び御指導を頂いた東京都下水道局・(株)荏原インフィルコ・官能試験の方法の御指導を頂いた東京都環境科学研究所の関係者並びに臭気物質の分析の御指導を頂いた信州大学医学部の二本安之先生に謝意を表します。

(参考文献)

- 1) 松尾友矩、"都市排水の再利用システム"、化学工業、No. 9、762-768、(1988)
- 2) 瀧口博明、松尾友矩、花木啓祐、"玉川上水の下水処理水の再利用による復活についてのアンケート調査"、環境システム研究、Vol. 16、74-79、(1988)
- 3) 石川旭、"下水道施設における脱臭の現状と対策"、月刊下水道、Vol. 2、No. 8、(1979)
- 4) 安藤茂他、"下水道施設の臭気と脱臭方法"、月刊下水道、Vol. 2、No. 8、(1979)
- 5) 安藤茂、"下水の臭気と対策"、水質汚濁研究、VOL. 8、No. 11、714-720、(1985)
- 6) 西田耕之助、"水の臭気の感覚的測定法"、水質汚濁研究、VOL. 8、No. 11、697-703、(1985)
- 7) 細川和範、加藤隆夫、新井徹、豊嶋真広、"横浜市における土壌脱臭施設の調査報告"、下水道協会誌、Vol. 25、No. 291、7-15、(1988)
- 8) 環境庁大気保全局特殊公害課、"昭和57-59年度排水に含まれる悪臭物質の規制基準設定調査評価報告書"、昭和62年6月、38-52、(1987)
- 9) 石黒智彦、"臭気の測定方法"、下水道協会誌、Vol. 25、No. 291、65-74、(1988)
- 10) H. Van Langenhove, K. Roelstraete, N. Schamp, and J. Houtmeyers、"GC-MS Identification of Odorous Volatiles in Wastewater"、Water Research、vol. 19、No. 5、597-603、(1985)
- 11) Michael J. McGuire, and John M. Gaston、"Overview of Technology for Controlling Off-Flavors in Drinking Water"、Water Science and Technology、vol. 20、No. 8/9、215-228、(1988)
- 12) 梶野勝司、"水道水中のかび臭物質とその測定法"、化学技術誌MOL、昭和63年4月号、(1988)