

## 5. 下水処理水再利用システムの技術基準に関する調査

下水処理研究室 室 長 中島英一郎  
主任研究官 田 陽 淳

### 1. はじめに

下水処理水は低質の水資源として、様々な用途に利用可能であると考えられており、我が国では、都市の様々な用途に下水処理水の再利用が図られている。しかし、それらの中には、再生水の水質に基づく施設の障害など重大な問題に直面しているものも出てきている。再生水を都市の水資源として活用していくためには、水質に適合した材料・構造の採用や適切な維持管理の実施が必要不可欠である。本調査は、下水処理水再利用に伴う障害や事故を未然に防止するための手法を検討し、安全・快適かつ安定した再利用システムを構築するために必要な技術を再利用形態別に明らかにすることを目的としている。

平成 14 年度は、下水処理水を再利用する際に受水槽やロータンク内等における付着物生成に関与する諸因子やその影響について実験による検討を行った。また、受水槽では滞留時間が長くなりやすいため、受水槽での残留塩素の消費が特に大きくなり、末端の給水施設での付着物生成に繋がる可能性が考えられることから、受水槽での水質変化に関する通年調査も併せて行った。また、再生水による金属の腐食に関する調査を行い、再生水の腐食性評価指標としてランゲリア指数を用いることの妥当性についての検討を行った。

### 2. F市再生水を用いた付着物生成に関する実験

#### 2-1. 実験装置

図-1 に示す実験装置を用いて、試験片を設置した恒温水槽に、所定の残留塩素濃度に調整した下水処理水を定期的に供給し、試験片を下水処理水と接触させて付着物を生成させる実験を行った。実験は秋期～冬期（実験期間 112 日間）及び春期～夏期（実験期間 188 日間）の 2 回に分けて行った。なお、試験片には一般に使用されているロータンクの内面を模したものとして、陶器板及び発泡スチロールの 2 種類を用いた。

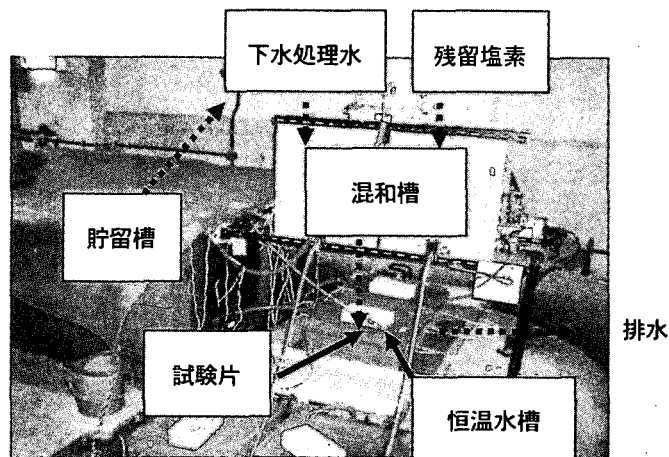


図-1 実験装置

#### 2-2. 実験条件

処理水には、受水槽やロータンク内において付着物による汚損の問題が発生した F 市 C 処理場の処理水を脱塩素したものを用い、表-1 に示す 8 条件の供試水をそれぞれ個別の実験装置に供給した。なお、恒温水槽内の水温は秋期～冬期は 15℃、春期～夏期は 25℃に管理した。

#### 2-3. 分析項目

恒温水槽流入水質及び試験片付着物質の分析を行うとともに、試験片の着色を目視により確認し、着色度合いを「着色していない」「少し着色している」「着色してい

表-1 供試水の条件

処理水	供試水		
	初期残留 塩素	交換頻度	
		1日毎	1週毎
砂ろ過水	0.5mg/l	○	○
	2.0mg/l	○	○
凝集沈殿+オゾン+ 砂ろ過（再生水）	0.5mg/l	○	○
	2.0mg/l	○	○

る」の3段階で評価した。なお、分析日及び分析項目は以下の通りとした。

<流入水質>

TOC、T-Fe（秋期～冬期のみ）、T-Mn（秋期～冬期のみ）、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N

<付着物質>

TS、VS、一般細菌数、T-Fe、T-Mn

<分析日>

実験開始より 21 日後、56 日後、83 日後、112 日後（秋期～冬期）

実験開始より 35 日後、63 日後、98 日後、127 日後、154 日後、188 日後（春期～夏期）

## 2-4. 結果と考察

### 2-4-1. 付着物による汚損と付着成分の関係

付着物生成実験終了時の付着物質の平均成分比（重量ベース）を図-2 に示す。VS が約 50%、Fe 及び Mn がそれぞれ約 1% を占めており、VS が占める割合が特に大きい。また、VS、Fe 及び Mn 以外の成分も多く含まれていることも示唆された。また、試験片の着色具合と Fe、Mn、VS 各付着物重量分布の関係を示したものが図-3~5 である。付着物成分 VS、Fe、Mn のうち試験片の着色と最も相関関係が大きい成分は Mn であり、壁面の着色は主として付着物中の Mn に起因することが示唆された。また、Mn 付着重量が 3mg/m<sup>2</sup> 以上になると着色が明確に認められた。

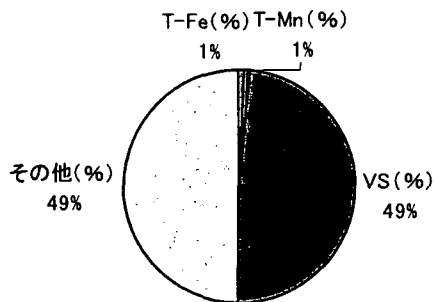


図-2 試験片付着物平均成分比(重量比)

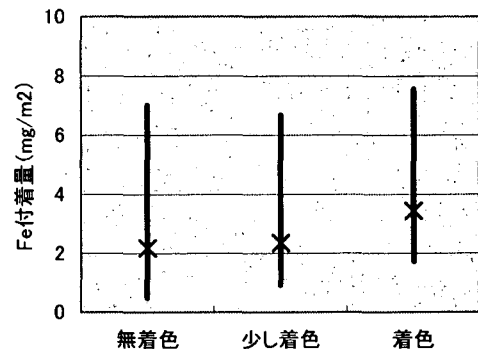


図-4 試験片着色と付着物重量分布の関係 (Fe)

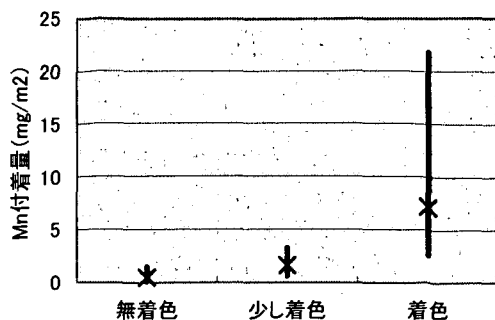


図-5 試験片着色と付着物重量分布の関係 (Mn)

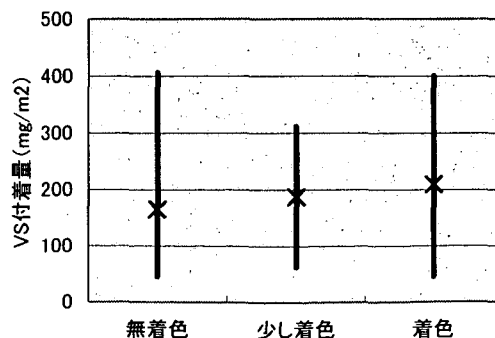


図-6 試験片着色と付着物重量分布の関係 (VS)

### 2-4-2. 処理水水質が付着物生成に与える影響

付着物生成実験における処理水平均水質は表-3の通りである。ここで平均水質とは実験期間中に測定した処理水水質の平均値とした。再生水と砂ろ過水の実験終了時の Mn 付着量を比較したものが図-6である。表-3及び図-6より、処理水中 T Mn 濃度と Mn 付着量は比例関係にあり、壁面の着色に寄与する Mn 付着物の供給源は処理水中の Mn であることが分かった。表-3に示すように、現在C処理場で導入されている再生水処理法（凝集沈殿+オゾン+砂ろ過）による Mn 濃度は水道水質基準の Mn 濃度（0.05mg/l）を下回っており、壁面着色防止のためには有効な処理法であると考えられる。

同様に実験終了時の Fe 付着量と処理水の平均 T Fe 濃度との相関関係は大きく、Mn の場合と同様に、処理水中の T Fe が付着物中 Fe の供給源となっていることが分かった。

一方、付着物重量の多くを占める VS 付着量について、TOC 濃度で評価した場合、VS 付着量と TOC 濃度との間には明確な相関関係は得られなかった。また、図-7に示すように VS 付着量と付着物中の一般細菌数の間にも明確な相関関係が見出せず、VS 付着量抑制のためには再生水中 TOC 濃度を低減させるだけでは不十分である可能性があることが示唆された。

表-3 付着物生成実験における処理水平均水質  
(単位: mg/l)

	砂ろ過水		再生水	
	秋~冬	春~夏	秋~冬	春~夏
TOC	7.3	5.9	3.0	4.2
NH <sub>4</sub> -N	14.8	8.3	3.8	6.8
NO <sub>2</sub> -N	0.4	0.5	0.1	1.8
NO <sub>3</sub> -N	3.3	4.2	9.4	5.7
T Fe	0.83		0.35	
T Mn	0.39		0.025	

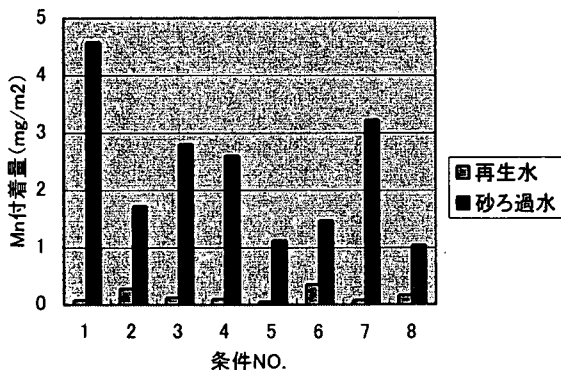


図-6 再生水と砂ろ過水の Mn 付着量の比較  
(秋期~冬期、112日後)

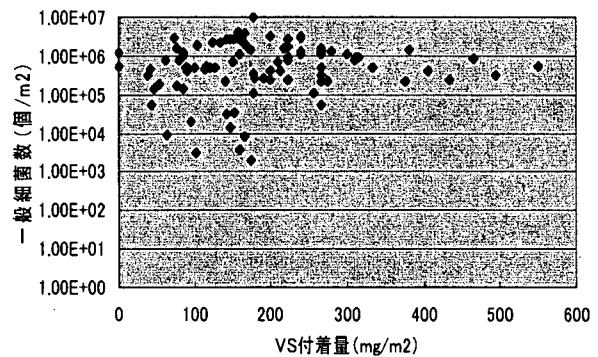


図-7 VS 付着量と付着物中一般細菌数の関係

### 2-4-3. 残留塩素が付着物生成に与える影響

実験期間中に採取した付着量の平均値を平均付着量とし、残留塩素 0.5ppm 条件及び残留塩素 2.0ppm 条件の VS 平均付着物量を比較したが、両者の VS 付着量には明確な違いは見られなかった。しかし、前年度までの調査では、残留塩素濃度 0~4ppm の範囲では残留塩素濃度が高いほど付着量が小さくなるとの結果が得られており、残留塩素と VS 付着量の関係を更に調べる必要がある。

同様に、Mn 及び Fe 付着物について残留塩素 0.5ppm 条件と残留塩素 2.0ppm 条件を比較したところ、Fe 付着物については、残留塩素濃度の違いによる付着量の違いは特に見られなかった。これは、Fe は残留塩素により速やかに酸化される性質を持っており、処理場における塩素消毒により Fe の酸化が終了しているためと思われる。

一方、Mn 付着物については、水温 15℃条件では残留塩素濃度の違いによる付着量の違いは特に見られなかった(図-8)。これは、Mn の残留塩素による酸化反応は Fe に比べ極めて遅く、実験での塩素添加による酸化量が微量であるためと推測される。また、水温 25℃条件では残留塩素濃度増加に伴い Mn 付着量が減少する傾向が見ら

れたが、これは水温上昇による Mn 酸化量の増加により却って剥離が頻繁に発生し、逆に Mn 付着量の減少へと繋がったのではないかと考えており、付着物生成における剥離も考慮に入れる必要があると考えられる。

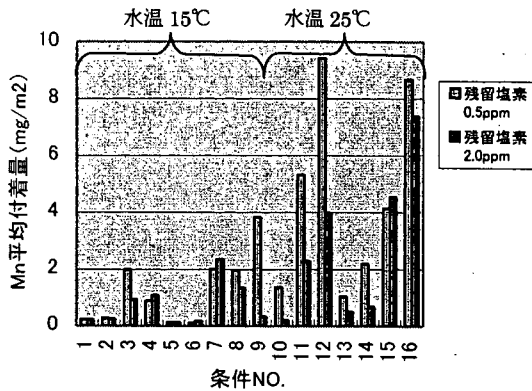


図-8 残留塩素 0.5ppm と残留塩素 2.0ppm の Mn 付着量の比較

#### 2-4-4. 水温が付着物生成に与える影響

水温 15°C 条件の VS 付着量 (112 日後) と水温 25°C 条件の VS 付着量 (98 日後と 127 日後の平均) を比較したものが図-9 であり、付着物重量の大半を占める VS 付着量は水温上昇とともに増加する傾向が見られた。

また、Mn 及び Fe 付着量について、水温 15°C 条件 (112 日後) と水温 25°C 条件 (98 日後と 127 日後の平均) を比較したところ、壁面着色の原因である Mn 付着量については、水温の上昇に伴い増加する傾向が見られた (図-10) が、Fe 付着量については、水温の間には明確な相関関係が見られなかった。この結果の違いは、前節でも述べたように、Fe については処理場における塩素消毒により実験開始時には Fe の酸化が終了しているが、Mn は塩素消毒による酸化が遅く、水温の上昇により Mn 酸化が促進されることを示すのではないかと考えているが、今後更なる検討が必要である。

また、図-10 及び Mn 付着重量が 3mg/m² 以上になると試験片に明確な着色が発生するとの実験結果から、水温 15°C 条件では砂ろ過水の T-Mn 濃度 (0.39mg/l) レベルでも付着物による壁面着色の可能性が低い、水温 25°C 条件では再生水の T-Mn 濃度 (0.025mg/l) レベルでも壁面着色の可能性があると示唆された。

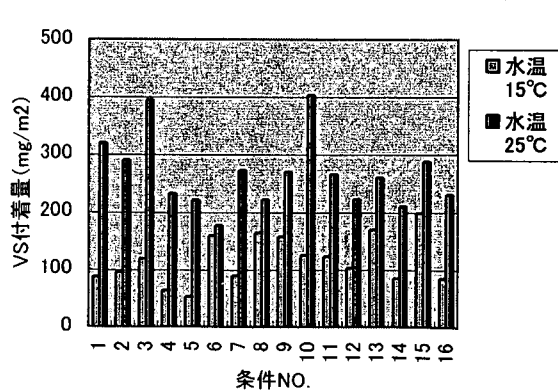


図-9 水温 15°C と水温 25°C の VS 付着量の比較

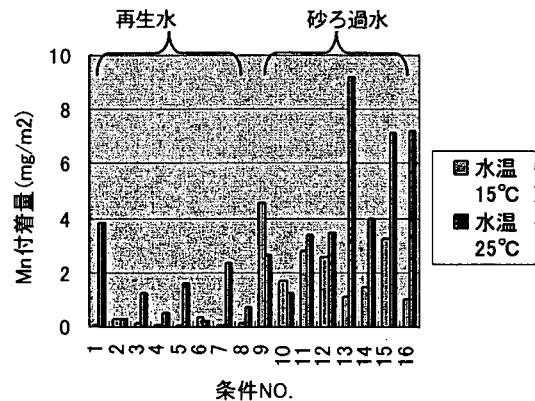


図-10 水温 15°C と水温 25°C の Mn 付着量の比較

#### 2-4-5. 滞留時間が付着物生成に与える影響

VS 付着物及び Mn 付着物について、滞留時間 1 日条件の平均付着量と滞留時間 7 日条件の平均付着量を比較したが、滞留時間の違いによる付着量の明確な違いは見られず、今回の実験結果からは、水温や水質に比べ、滞留時間が付着物生成に与える影響は小さいと言える。

### 3. F市受水槽における水質実態調査

#### 3-1. 実験内容

F市庁舎内の再生水受水槽流入水及び受水槽貯留水について、通年（平成13年11月～平成14年10月）にわたって月1回の頻度で水質分析を行い、受水槽内における水質変化について実態調査を行った。なお、分析項目は以下の通りとした。

##### <水質分析項目>

遊離塩素、結合塩素、NH<sub>4</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NO<sub>3</sub>-N、BOD、C-BOD（BOD及びC-BODは平成13年12月～平成14年3月のみ）

なお、平成14年6月以降は受水槽において雨水を混入させており、受水槽貯留水には雨水水質の影響が含まれているため、試料採取前日及び当日の雨水混入率が比較的良かった平成14年9月のデータのみを解析対象とした。

#### 3-2. 結果と考察

水質分析結果を表-4に示す。1月30日～3月27日にかけては、受水槽流入水にはNH<sub>4</sub>-Nは12mg/l以上含まれており、N-BODがほとんど存在しないことから、受水槽流入前の段階では硝化があまり進行していないことが分かった。なお、他の時期でもNH<sub>4</sub>-Nが同程度含まれており、通年にわたり同様の傾向を示すものと考えられる。

一方、受水槽流入水と受水槽貯留水を比較すると、12月19日～3月27日にかけて、N-BODが大きく増加し、NH<sub>4</sub>-Nが減少、NO<sub>x</sub>-Nが増加していることから、受水槽において硝化が進行していることが分かった。なお、その他の期間についても、同様の傾向を示すものと考えられる。

また、遊離残留塩素及び全残留塩素については、受水槽内の残留塩素は0.1～0.8mg/l程度（殆ど全て結合塩素）であり、この条件で硝化が進行していることから、硝化菌は0.1～0.8mg/l程度の結合塩素に対しては耐性があることが分かった。また、受水槽内では1.5～2.2mg/l程度の残留塩素が消費されており、受水槽流入水中の残留塩素の7割以上が受水槽内で消費されていることが分かった。

表-4 受水槽流入水及び受水槽貯留水の水質（単位：mg/l）

調査日	受水槽流入水					受水槽貯留水				
	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>x</sub> -N	N-BOD	遊離残塩	全残塩	NH <sub>4</sub> -N	NO <sub>x</sub> -N	N-BOD	遊離残塩	全残塩
11/28	12.0	4.2		0.06	2.30	9.2	6.5		0.04	0.76
12/19	14.0	3.0	8	0.04	1.85	11.3	4.8	29	0.00	0.38
1/30	14.5	3.2	0	0.04	2.10	11.8	4.9	22	0.02	0.64
2/27	18.7	3.0	1	0.04	2.30	17.5	4.3	7	0.02	0.62
3/27	17.7	3.0	0	0.20	2.40	14.9	4.7	35	0.00	0.40
5/28	11.7	6.4		0.18	2.30	9.0	11.2		0.02	0.12
9/24	13.8	4.1		0.08	2.20	6.4	6.3		0.00	0.20

### 4. 再生水利用による管路腐食に関する実験

#### 4-1. 実験内容

前年度までの調査結果によれば、鉄の腐食は伝導度や残留塩素が促進し、pHの上昇（アルカリ度の増加）は抑制する方向に作用することが示されている。本年度は昨年度に引き続き、室内実験において、電気伝導度、残留塩素及び水温の各因子が金属の腐食に与える影響を調べた。また、ランゲリア指数を統一した再生水及びイオン交換蒸留水を用いて金属の腐食に関する比較実験を行い、再生水の腐食性の評価指標として、ランゲリア指数を用いることの妥当性について検討を行った。

#### 4-2. 実験方法

物理的な環境条件を同一にし、水質（電気伝導度、残留塩素）及び水温による影響が把握できるように、各実験ケースにおける流速、ランゲリア指数及び再生水交換頻度を等しくし、腐食量を把握するために、金属試験片の試験前後の重量変化を測定し、再生水中の鉄濃度及び再生水量を定期的に分析した。実験は図-11 に示す実験装置を用いて表-5 に示す実験条件で行うこととし、試験片には、鑄鉄管の材質として使用される鑄鉄を用いた。また、イオン交換蒸留水には消石灰を投入し、砂ろ過水とランゲリア指数が概ね同一（-0.8）となるように調整したものをを用いた。各実験ケースにおける水温、残留塩素及び電気伝導度の設定値を表-6 に示す。なお、流出水採取時期は、通水開始後 3hr、7hr、1d、4d、6d、7d、13d、14d とした。

表-5 再生水利用による管路腐食に関する実験条件

試験片	材質	寸法
鉄	JIS FC20	2.1mm□100mmL
原水	水質設定	
イオン交換蒸留水	残留塩素濃度 (0.05、0.5、5mg/l)	電気伝導度 (150、300、950 μS/cm)
砂ろ過水	" (0.5mg/l)	" (560 μS/cm)
(原水は1日1回、週末等は休前日に次回補給までの所要量を調整して供給した)		
接触部	内径 3mm シリコンチューブ (長さ約 110mm)	
	接液部設定温度：10、20、30℃ (反応後の流出水は4℃で保存)	
再生水交換頻度	供給速度	
約 527 回/日	3.2ml/分 (間欠供給：1サイクル 164 秒、供給 34 秒、停止 130 秒)	

表-6 水質と温度の組み合わせ

残塩濃度	伝導度	10℃	20℃	30℃
0.05	300		○	
0.5	150		○	
	300	○	○	○
	560	◎	◎	
	950		○	
5.0	300		○	

(○はイオン交換蒸留水、◎は砂ろ過水)

#### 4-3. 結果と考察

##### 4-3-1. 鉄の腐食に影響を与える因子

試料としてイオン交換水を用いた場合について、水温と鉄の腐食率の関係を図-11 に、電気伝導度と鉄の腐食率の関係を図-12 に、残留塩素と鉄の腐食率の関係を図-13 に示す。なお、腐食率は、再生水中の鉄濃度の増加及び再生水量から推定した鉄溶出量と、試験片重量の増加を酸化第二鉄生成によるものと仮定して求めた鉄の酸化反応量との和を腐食された重量とし、実験前の試験片重量に対する百分率で表した値である。図-11~13 より、鉄、電気伝導度及び水温は鉄の腐食率と正の相関関係にあるが、残留塩素や電気伝導度の水質因子に比べ、水温が鉄の腐食に与える影響が大きいことが分かった。

残留塩素濃度の減少が付着物の増加を招くことを考え合わせると、再生水による管路腐食抑制対策として、再

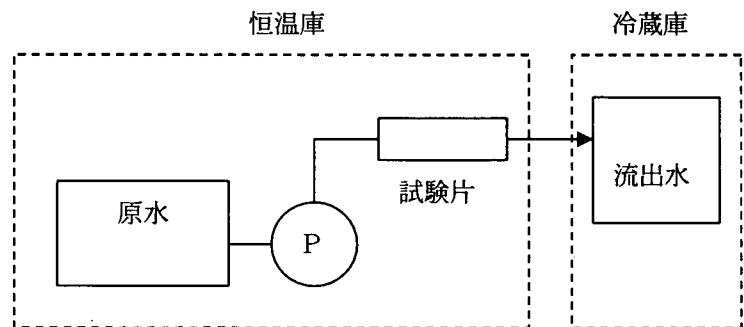


図 11 腐食実験装置

生水中の残留塩素濃度の低減を図ることは必ずしも適切ではなく、管路材質の適切な選定や、適切な配管施工の実施等による対応を行っていくことが現実的であると考えられる。

#### 4-3-2. 再生水の腐食性評価指標

図-14 は、試料としてイオン交換水を用いた場合と下水処理水を用いた場合について、両者の腐食率の比較を行ったものである。イオン交換水と下水処理水のランゲリア指数は概ね同一であるにも関わらず、下水処理水による腐食率はイオン交換水による腐食率よりも明らかに低くなっており、本実験結果からは、ランゲリア指数のみで下水処理水の腐食性を評価することはできない可能性が示唆された。

但し、実験データ数が十分ではないため、今後更に実験データを蓄積し、再生水腐食性評価指標としてランゲリア指数を用いることの妥当性について検討を進める必要がある。

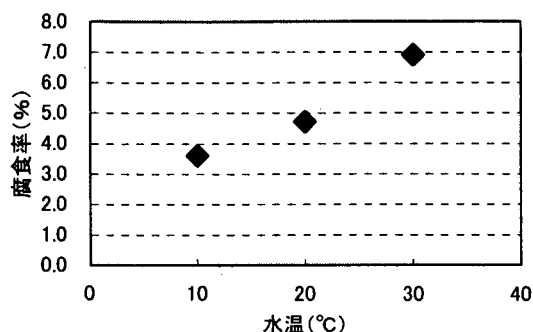


図 11 水温と腐食率の関係  
(残留塩素 0.5mg/l、伝導度 300  $\mu$ S/cm)

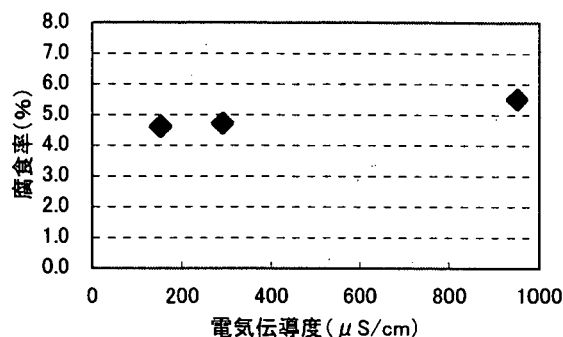


図 12 電気伝導度と腐食率の関係  
(残留塩素 0.5mg/l、水温 20°C)

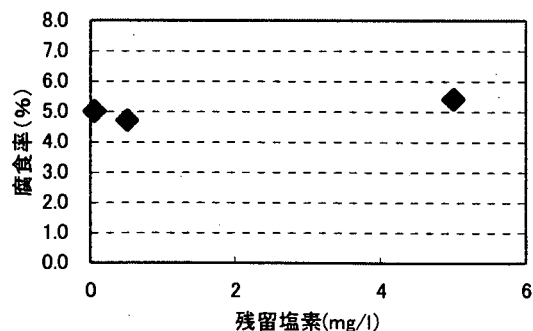


図 13 残留塩素と腐食率の関係  
(水温 20°C、伝導度 300  $\mu$ S/cm)

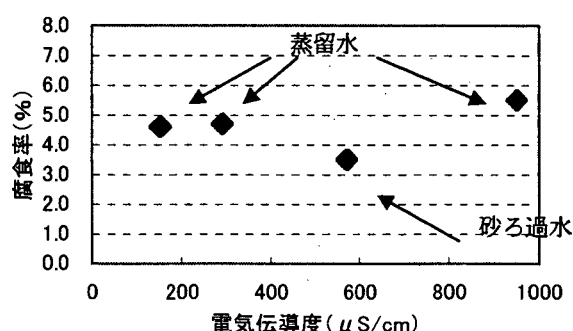


図 14 イオン交換蒸留水と砂ろ過水の腐食率の比較  
(残留塩素 0.5mg/l、水温 20°C)

## 5. まとめと今後の課題

下水処理水再利用による付着物生成に関しては以下のことが明らかとなった。

- ①付着物による試験片の着色は付着物中の Mn が主な原因であり、Mn 付着量が 3mg/m<sup>2</sup> 以上になると試験片の着色が明確に認められた。
- ②処理水中 Mn 濃度の増加に伴い Mn 付着量が増加する傾向が見られ、付着物による壁面着色を防止するためには処理水中の Mn 濃度を低減させることが重要であることが分かった。今回の実験で用いた再生水（凝集沈殿+オゾン+砂ろ過）の Mn 濃度は水道水質基準の Mn 濃度を下回っており、有効な処理法であると考えられる。一方、VS 付着量と処理水 TOC 濃度の間には相関関係は見られなかった。
- ③水温の上昇に伴い、壁面着色の原因である Mn 付着量が増加する傾向が見られ、水温 15°C 条件では実験で用

いた砂ろ過水（T-Mn 濃度 0.39mg/l）レベルでも付着物による着色の可能性が低い一方、水温 25℃条件では実験で用いた再生水（T-Mn 濃度 0.025mg/l）レベルでも付着物による着色の可能性があることが示唆された。

④滞留時間が付着物量に与える影響は小さかった。

また、受水槽における水質変化に関しては以下のことが明らかとなった。

⑤F市C処理場処理水の再利用システムでは、受水槽において硝化が進行するとともに、残留塩素が大きく減少しており、遊離残留塩素は殆ど保持されていなかった。

下水処理水再利用による管路腐食に関しては以下のことが明らかとなった。

⑥水温、電気伝導度及び残留塩素が大きいほど、鉄の腐食を促進するが、水温の影響が特に大きく、電気伝導度及び残留塩素の影響はあまり大きくない。

⑦ランゲリア指数を再生水の腐食性評価指標として用いることは適切ではない可能性が示唆された。

しかし、付着物に関する実験や腐食に関する実験における条件数が十分ではないため、付着物生成や腐食に及ぼす影響についての定量的な評価は困難であり、今後は条件数を増やし定量的な評価を行っていく必要がある。

#### 参考文献

- 1) 日本下水道協会「日本の下水道（平成 14 年）」pp224
- 2) 鈴木、小越、山縣、藤井「都市基盤整備のための下水処理水再利用システムの確立に関する調査」平成 12 年度下水道関係調査研究年次報告書集、pp163-180、国土技術政策総合研究所資料 No.10、2002/1
- 3) 丹保、小笠原共著「浄水の技術（技報堂出版）」pp90-94、147-148、320-322
- 4) 日本水道協会「水道維持管理指針」、pp129-133