

4. 濁質発生原因究明

4. 濁質発生原因の究明

給水栓で顕在化する水質劣化現象については、前章で示したように様々な報告がある。

本章では、送配水管路で発生する濁質の流出について効果的な対策を講じるため、基礎研究として濁質発生の原因究明を行った。

4.1 研究対象

水質劣化現象とその発生箇所について、次頁の図 4.1.1 に概要を整理した。

送配水管路で発生する水質劣化現象としては、以下の項目が考えられる。

- ・ 残留塩素消失
- ・ 赤水
- ・ 濁り
- ・ 異物
- ・ 高 pH
- ・ 生物
- ・ トリハロメタン等の消毒副生成物 など

事業体に向けたアンケートの結果からは苦情の原因物質の上位として、①鉄錆 (赤水)、②塗膜片 (シールコート*1)、③砂の3種類が抽出されたことから、本章ではそれらの原因について調査するものとした。

*1 モルタルライニング管内面のモルタル表面に塗布される保護膜であり、モルタルライニングを効果的に養生させ強度発現を助成する役割や、通水後モルタル表面から水中にカルシウム分が溶出することを緩和する役割 (pH 上昇の緩和)、モルタルの中性を防止する役割などを持っている。



給水栓で確認される水質劣化現象のうち、送配水管路内で発生する現象でアンケート調査等から関心が高かった項目

『水道維持管理指針(日本水道協会)』より編集

図 4.1.1 水質劣化現象と劣化発生箇所の概要

4.2 濁質流出メカニズムの仮説

一般に苦情として顕在化する濁質発生（流出）現象については、一定濃度以上の濁質が流出した場合に問題となるが、そこに到達するまでには大きく2つの過程を経ているものと推定される。すなわち、濁質そのものが生成する過程（直接要因）と生成した濁質が輸送される過程（間接要因）である。

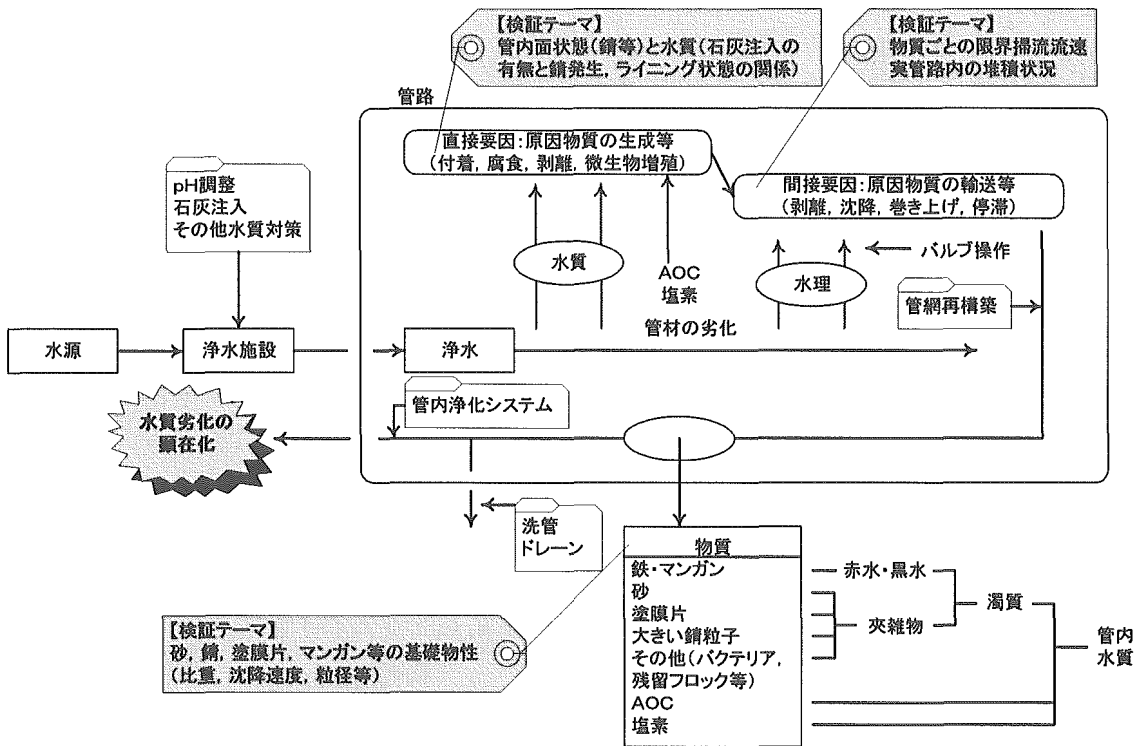


図 4.2.1 水質劣化現象の顕在化

(1) 直接要因（濁質の生成）

濁質の生成については、次のように仮定した。

- ・ 赤水（鉄錆）の生成については、浄水中に含まれる鉄分、管路、消火栓等の腐食により生成した鉄錆等が考えられる。
- ・ 塗膜片（シールコート）については、主にモルタルライニング管の劣化により管内面を被覆しているシールコートが剥離することによって生成される。
- ・ 砂については、浄水中に微量に含まれているもの、管布設工事後の洗管が不十分なため管内に残存しているもの等が考えられる。また、削り取られたモルタル等も考えられる。

(2) 間接要因（濁質の輸送）

濁質の輸送については、次のように仮定した。

- ・濁質の形状（比重、粒径）と流体に関する水理学的な問題と考えられ、一定の流速を超えると濁質が移動をはじめ、一定の流速を下回ると沈降し、管底に堆積すると考えられる。
- ・鉄錆については、管内に生成した錆こぶ中である程度の固着力を有していると考えられるため相応の流速が与えられるか、常態と流向の異なる流速が与えられた場合、剥離が発生すると考えられる。
- ・赤水の原因となるような細かい錆粒子や塗膜片については、沈降が遅く、絶えず水中を漂っていると考えられ、管内を流れる流体と近い挙動を示すものと想定される。
- ・塗膜片は劣化したモルタルライニング管に一定値以上の流速が与えられた場合、管内面から剥離すると考えられる。

(3) 流出

- ・濁質の流出が苦情として発現する場合は濁質濃度が一定値以上の高濃度になっていると考えられ、管網内で特定の管路に堆積するという形で濃縮されたものが、流速変化により一時に流出し顕在化したものと考えられる。

4.3 研究方針

仮説で想定したメカニズムについて、濁質毎にプロセス（生成、輸送等）を検証する方針とした。

(1) 赤水（鉄錆）

①生成

- ・事業体アンケート、ヒアリングにより、生成要因を整理する。（定性的に仮説の確かさを確認する。）
- ・浸漬試験結果から錆が発生するまでの期間、水質による差異等を考察する。

②輸送

- ・文献、室内実験を通じて掃流限界流速を明らかにする。
- ・基本物性試験結果と掃流限界流速の相関を考察する。
- ・管網内の挙動（移動と堆積）について推定方法を検討する。

(2) 塗膜片

①生成

- ・事業体アンケート、ヒアリングにより、生成要因を整理する。（定性的に仮説の確かさを確認する。）

②輸送

- ・文献、室内実験を通じて掃流限界流速を明らかにする。
- ・基本物性試験結果と掃流限界流速の相関を考察する。
- ・管網内の挙動（移動と堆積）について推定方法を検討する。

(3) 砂

①生成

- ・ 事業体アンケート、ヒアリングにより、生成要因を整理する。(定性的に仮説の確かさを確認する。)

②輸送

- ・ 文献、室内実験を通じて掃流限界流速を明らかにする。
- ・ 基本物性試験結果と掃流限界流速の相関を考察する。
- ・ 管網内の堆積状況、移動状況等について実管路で確認する。
- ・ 管網内の挙動（移動と堆積）について推定方法を検討する。

表 4.3.1 原因究明のため実施する調査・実験

	直接要因（生成）	間接要因（輸送）
①赤水（鉄錆）	・ 管内カメラによる確認 ・ 浸漬実験	・ 掃流限界流速測定 ・ 洗管実験
②塗膜片	・ 管内カメラによる確認	・ 掃流限界流速測定 ・ 洗管実験
③砂	・ 管内カメラによる確認	・ 掃流限界流速測定 ・ 洗管実験

この他、文献により基本的な知見を収集する

4.4 濁質発生原因の検討

本項では、濁質の発生原因について検討するが、まず、赤水、塗膜片、砂についての基礎的な物性を整理し、次に、直接要因（生成）と間接要因（輸送）についてとりまとめた。

4.4.1 濁質の基礎物性

本研究で取り上げた濁質については、文献等から得られた知見を整理し、また、それらの知見の確認、補完を目的とした各種基礎物性試験を行ったので、それらの結果を併せて濁質の基礎情報を整理した。

(1) 形状

① 外観

濁質の外観形状について、光学顕微鏡によるマクロ写真あるいは走査電子顕微鏡による SEM 写真を撮影した。なお、鉄錆や砂については、実際の濁水から得たものではない。

ア. 鉄錆

鉄錆の外観については写真 4.4.1、SEM 像については写真 4.4.2 のとおりである。



写真 4.4.1 鉄錆 (1~5mm)

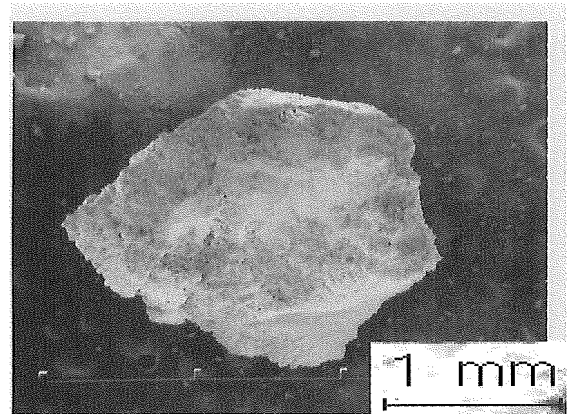


写真 4.4.2 鉄錆の SEM 像

イ. 塗膜片

塗膜片（シールコート）の外観については写真 4.4.3 のとおりである。

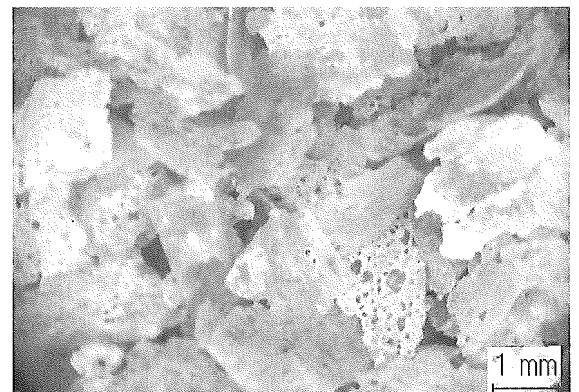


写真 4.4.3 塗膜片（シールコート）

ウ. 砂

砂（モルタルライニング管用）の外観については写真 4.4.4～6 のとおりである。

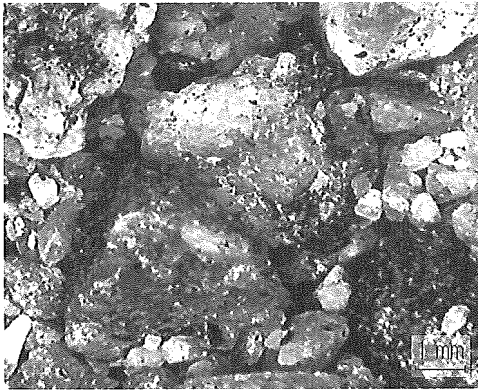


写真 4.4.4 大管用 CL 砂

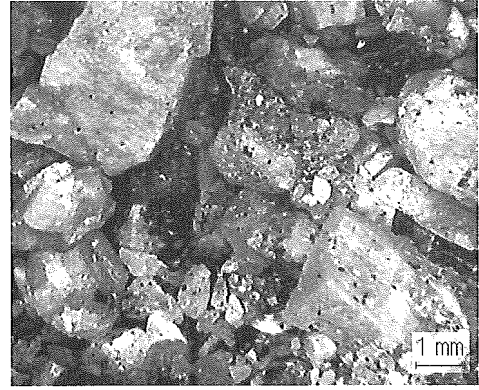


写真 4.4.5 中管用 CL 砂

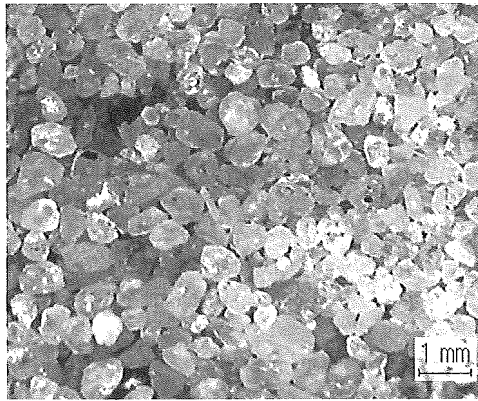


写真 4.4.6 小管用 CL 砂

②大きさ

大きさについては、JIS A 1102「骨材のふるい分け試験方法」に準じて粒度分布の測定を行った。

ただし、塗膜片については、比重が小さくふるい分けによる測定が困難なため実施していない。

試験結果は図 4.4.1 のとおりである。

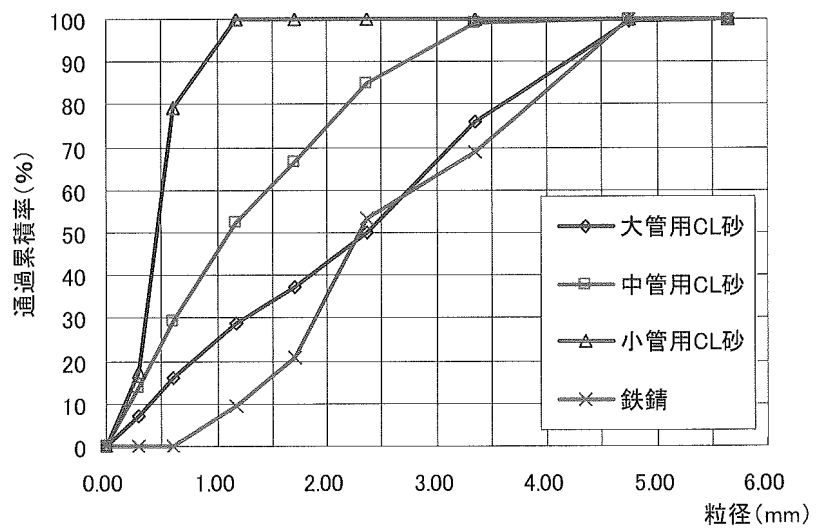


図 4.4.1 濁質の粒度分布

表 4.4.1 均等係数および曲率係数

	大管用 CL 砂	中管用 CL 砂	小管用 CL 砂	鉄鏝
D ₁₀	0.4mm	0.2mm	0.2mm	1.2mm
D ₃₀	1.3mm	0.7mm	0.4mm	1.8mm
D ₆₀	2.8mm	1.5mm	0.5mm	2.8mm
均等係数	7.00	7.50	2.50	2.33
曲率係数	1.51	1.63	1.60	0.96

均等係数からの考察では、小管用 CL 砂と鉄鏝については比較的均等であると考えられる。(土質工学の分野では均等係数が 5 以下の場合、その土が均等である目安となるようである。)ただし、水中の濁質は、場所によって様々な組成、形状となっている場合があり、全ての濁質に当てはまるものではない。

③比重

比重については、JIS A 1109「細骨材の密度及び吸水率試験方法」に準じて測定を行った。比重の測定結果については、表 4.4.2 に示すとおりである。

ちなみに Fe_2O_3 としての比重は 5.12g/cm^3 であることから、サンプルに用いた鉄鏝は粒子中に空隙があるか、他の比重が軽い物質を取り込んでいるため見た目の比重が小さくなっている可能性がある。

表 4.4.2 濁質の比重測定結果

	粒径 mm	比重 g/cm^3
大管用 CL 砂	4.75~3.36	2.54
	2.36~1.70	2.49
	1.18~0.60	2.38
中管用 CL 砂	3.36~2.36	2.47
	1.70~1.18	2.42
	1.18~0.60	2.28
小管用 CL 砂	1.18~0.60	2.05
	0.60~0.30	2.07
鉄鏝	4.75~3.36	2.12 (見掛比重)
	2.36~1.70	1.99 (見掛比重)
塗膜片	—	1.10

(2) 組成

①鉄錆

鉄錆について EPMA による分析を行ったところ下表のような結果となった。鉄、酸素の他、アルミニウム、珪素、マグネシウム、カルシウム、炭素等の物質が含まれている。

表 4.4.3 鉄錆の EPMA による定性分析結果

濁質	元素
鉄錆	Fe、Al、Si、Mg、Ca、O、C

②塗膜片

シールコートについては、その組成は JWWA K 139 等で規定された材料を用いているため、概ね均一であると考えられる。材料は、メタアクリレート、ブチルメタアクリレート等を反応させたアクリル系樹脂あるいは塩ビ系樹脂である。今回、一例として赤外分光分析を行ったところ、アクリルフィルムに類似した組成であった。

③砂

砂については X 線回折を実施したところ図 4.4.2 のような結果となった。主成分は SiO_2 と考えられる。

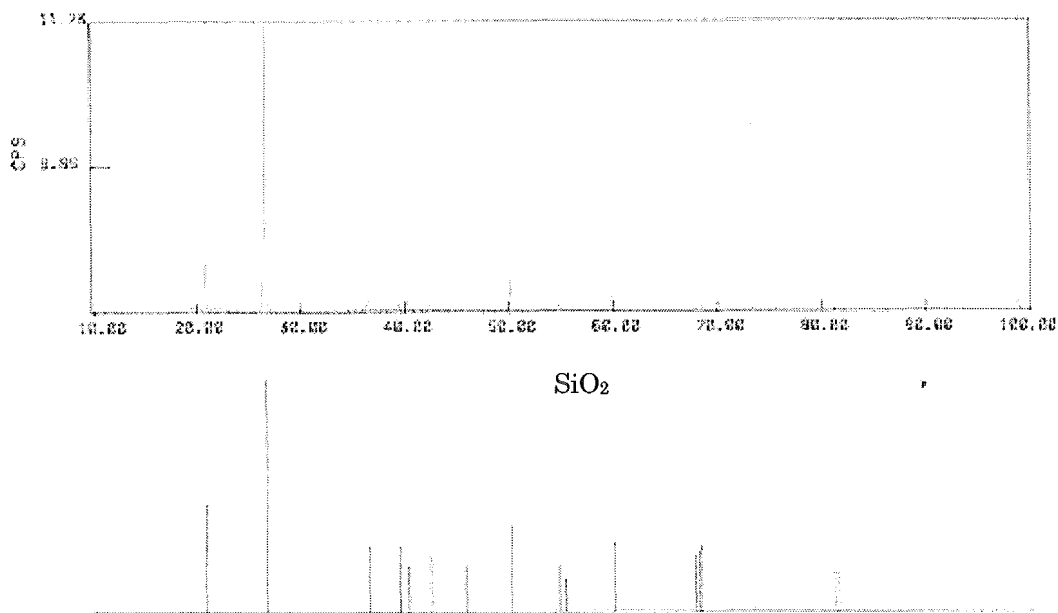


図 4.4.2 砂の X 線回折結果

(3) 水理特性 (沈降速度)

表 4.4.4 に各濁質の沈降速度測定結果を示す。

表 4.4.4 各濁質の沈降速度測定結果

	粒径 (mm)	距離 (mm)	平均沈降時間 (s)	平均沈降速度 (mm/s)	標準偏差
大管用 CL 砂	4.75~3.36	265	0.92	283.53	38.44
	2.36~1.70	265	1.48	180.50	27.71
	1.18~0.60	265	2.60	101.97	22.12
中管用 CL 砂	3.36~2.36	265	1.18	224.20	24.80
	1.70~1.18	265	1.80	146.57	19.14
	1.18~0.60	265	2.43	110.75	16.12
小管用 CL 砂	1.18~0.60	265	2.92	91.60	11.25
	0.60~0.30	265	3.86	68.97	5.67
鉄錆	5	149	0.80	186.85	33.28
	3~4	149	1.01	147.43	21.79
	1	149	1.69	87.91	15.42
鉄錆(細粒子)	0.60~0.30	149	3.41	43.54	11.62
塗膜片	5	149	27.70	5.38	0.85
	3~4	149	38.01	3.92	1.63
	2	149	43.06	3.46	0.49

粒子の沈降形態は、単粒子自由沈降、凝集性自由沈降、干渉沈降、界面沈降、圧縮沈降などに大別される。このうち、単粒子自由沈降については、以下の式が提案されている。

$$w = (4/3 \cdot g / C_D \cdot (\rho_s - \rho) / \rho \cdot d)^{0.5} \quad (\text{一般式})$$

w : 粒子の終末速度、 g : 重力加速度、 C_D : 粒子の抵抗係数、 ρ_s : 粒子の密度、 ρ : 媒体の密度、 d : 粒子の直径

$$w = g / 18 \cdot (\rho_s - \rho) / \mu \cdot d^2 \quad (\text{Stokes の式 : } Re < 10^0)$$

$$w = 0.223 \{ (\rho_s - \rho) 2g^2 / \mu \rho \}^{1/3} d \quad (\text{Allen の式 : } 10^0 \sim Re \sim 10^3)$$

$$w = 1.82 \{ (\rho_s - \rho) / \rho \cdot dg \}^{0.5} \quad (\text{Newton の式 : } 10^3 \sim Re \sim 2.5 \times 10^5)$$

例えば、 $\rho_s = 3.2 \text{g/cm}^3$ 、 $d = 0.5 \text{cm}$ の鉄錆粒子については、Newton の式により、以下のよう
に算定される。

$$w = 1.82 \{ (3.2 - 1.0) / 1.0 \cdot 0.5 \cdot 980 \}^{0.5} = 59.8 \text{cm/s}$$

$$(Re = 59.8 \times 0.5 / 0.01 \approx 3,000)$$

各種沈降速度式により、沈降速度を試算した結果を表 4.4.5 に示す。

表 4.4.5 沈降速度の試算

	粒径 mm	比重 g/cm ³	沈降速度 (mm/s)			レイノルズ数		
			Stokes 式	Allen 式	Newton 式	Stokes 式	Allen 式	Newton 式
大管用 CL 砂	4.06	2.54	13.66	56.22	450.24	55.4	223.9	1325.7
	2.03	2.49	3.31	27.04	313.35	6.7	54.9	636.1
	0.89	2.38	0.59	11.27	199.67	0.5	10.0	177.7
中管用 CL 砂	2.86	2.47	6.49	37.76	369.42	18.6	108.0	1056.6
	1.44	2.42	1.59	18.58	257.64	2.3	26.8	371.0
	0.89	2.28	0.55	10.71	192.30	0.5	9.5	171.1
小管用 CL 砂	0.89	2.05	0.45	9.39	174.17	0.4	8.4	155.0
	0.45	2.07	0.12	4.81	125.02	0.1	2.2	56.3
鉄錆	5.00	2.18	15.93	57.04	487.76	79.6	285.2	2188.8
	3.50	2.08	7.17	37.73	351.00	25.1	132.0	1228.5
	1.00	1.92	0.50	9.69	173.18	0.5	9.7	173.2
鉄錆(細粒子)	0.45	1.89	0.10	4.25	113.93	0.0	1.9	51.3
塗膜片	5.00	1.10	1.35	11.00	127.40	6.7	55.0	637.0
	3.50	1.10	0.66	7.70	106.59	2.3	27.0	373.1
	2.00	1.10	0.22	4.40	80.57	0.4	8.8	161.1

■はレイノルズ数から適用範囲にあることを示す。

試算結果と実測値を比較すると塗膜片については概ね合致しそうであるが、他の濁質については Allen 式と Newton 式の間くらいが実測値となっている。レイノルズ数による検証では、Allen 式が適用範囲であるが、実測値とは乖離が見られた。

また、赤水の原因物質である鉄錆の細粒子については、通常の沈降試験が困難であったため、容器内に溶かし込んだ鉄錆細粒子（平均粒径 7 μm）について溶液の濁度変化を計測した。

これによると、水道水の水質基準値である 2 度に対しては 200 時間以上かかっても到達することはなかった。

細かい鉄錆や塗膜片等は沈降する速度が遅く、生成するとすぐに水流に乗って給水栓に到達しやすいものと考えられる。

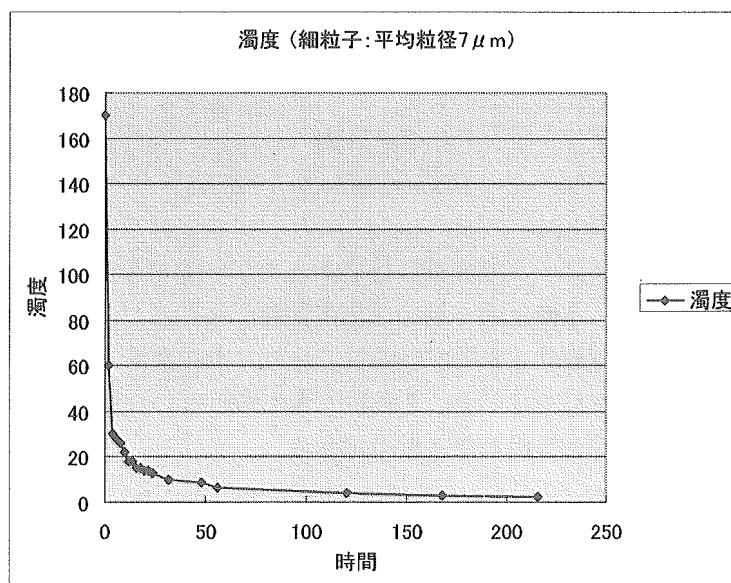


図 4.4.3 鉄錆細粒子の経時での濁度変化(水面から 100mm の位置)

4.4.2 直接要因（生成）

(1) 赤水（鉄錆）

赤水の発生原因については、もともと浄水中に含まれている鉄や鉄バクテリアの影響によって酸化される場合と管内に露出している鉄の部分で生成した錆の場合が考えられる。もともとの浄水中の鉄に起因する場合は少なく、大部分の原因は後者である場合が多い。特にモルタルライニングや粉体塗装のない古い鉄管では、内面に錆こぶが付着していて流速の急変、物理的な振動、流向の変化などにより剥離して赤水を生じる可能性が高い。

① 錆の生成機構

錆は金属（鉄）の腐食により生成する。

一般に、金属の腐食は、電気化学的現象（局部電池作用）として説明される。

金属の表面には、結晶や組織などのわずかな差異により無数の陽極と陰極が存在し、これらの極が、電解質溶液に触れることによって局部電池を形成し、電気化学的作用により腐食が進行する。また、仮に結晶や組織などが均一であっても（純金属等）、その表面が接している環境によって局部電池が形成され腐食が進行する。

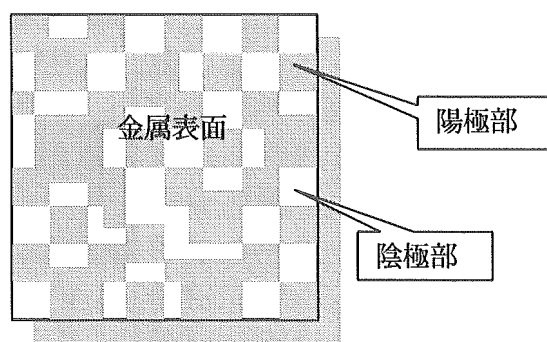


図 4.4.4 局部電池の形成

局部電池を形成して腐食を進行させる要因としては、次のような因子が考えられる。

- ・ 金属側の因子： 表面状態、異種金属の接触、内部応力等
- ・ 環境因子： 溶液の組成、溶存酸素、温度、応力、流速、濃度差、渦流、異物の付着等

右図に鉄の腐食について模式図を示す。

模式図において、金属表面に陽極部（アノード）と陰極（カソード）が構成される。水中でアノードから鉄原子が溶解し、鉄イオン（ Fe^{2+} ）となって水中に移行し、局部電池作用がはじまり腐食が進行していく。

- ・ アノード： $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$
- ・ カソード： $1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{OH}^-$

アノードで生成した Fe^{2+} とカソードに生成した OH^- により、水酸化第 1 鉄の白色沈澱物が生じるが、この水酸化第 1 鉄は酸化されやすい物質であり、溶存酸素と反応して水酸化第 2 鉄を生じる。これは、水に溶けない沈澱物であり赤水や赤錆の原因となるものである。

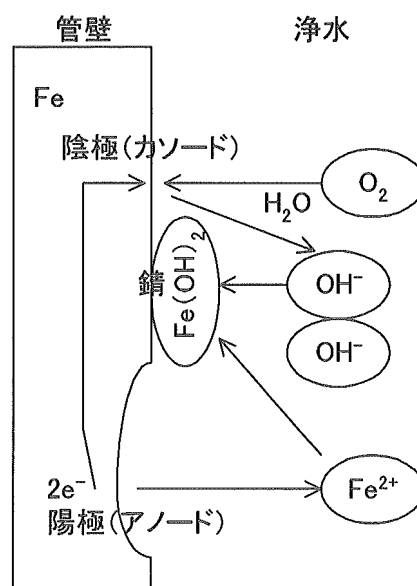


図 4.4.5 鉄の腐食

- ・ $\text{Fe} + 2\text{OH}^- \rightarrow \text{Fe}(\text{OH})_2$
- ・ $2\text{Fe}(\text{OH})_2 + 1/2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Fe}(\text{OH})_3$

②影響因子

金属の腐食に影響する因子については下記のような事項が考えられるが、実際にはこれらの因子が単独で寄与することはなく、相互に関連しながら作用するため複雑な挙動を示す。

a. 溶存酸素

溶存酸素は活性が強く、配管腐食の進行に大きく影響する。

溶存酸素が腐食に及ぼす影響としては次のような促進と抑制の相反する作用が考えられる。

- 鉄錆の下部で溶存酸素が減少し、外部との間に酸素濃淡電池を形成して腐食を促進する。
- 陰極に発生した水素と反応し、復極して腐食を進行させる。
- 金属表面に安定した酸化膜を形成させ腐食を遅くする。

常温において水道水の通常 pH 値範囲では、水中の鉄が腐食するには溶存酸素が必要である。酸素が飽和した水中の鉄においては腐食の初期で 100mg/dm²/日と言われており、数日間で酸化鉄ができると言われている。その後は、生成した酸化鉄が酸素の拡散障壁となって腐食は減少し、10～25mdd になると言われている。

酸素の濃度を高めると最初腐食の速度は増加するが、ある濃度（臨界濃度）以上になると、酸素による鉄の不動態化が起こり腐食速度は逆に低下することがわかっている。

一般に、硫酸還元バクテリア等が存在しない限り、溶存酸素がないところでは腐食は発生しない。

b. pH

水道水の基準では pH 値は 5.8 以上 8.6 以下であり一般に水道水は 7.0 前後の中性であると考えて良い。通常のパH 範囲（4～10 程度）であれば、腐食速度は pH 値と無関係であり、鉄表面に拡散している酸素の復極作用に影響を受けると考えられている。しかし、pH は鉄イオンの酸化のような 2 次的反応に影響を持っていることが報告されている。

また、pH 値は腐食進度を左右するスケールの形成に相当の影響があり、pH4 以下では第 1 鉄の皮膜は溶解し、鉄が直接水と接触することによって腐食は早まる。逆に、pH が 10 以上になると鉄が不動態化するので腐食は低減する。さらに、硬度、アルカリ度等とともに金属表面における炭酸カルシウム被膜の生成にも大きく寄与する。

c. 残留塩素

残留塩素は水道水の滅菌用として添加されたものであり、水中に残存する分子状の塩素である遊離残留塩素と、アンモニア性窒素と結合しクロラミンの様な形になった結合残留塩素の 2 種類がある。水質基準では遊離残留塩素として 0.1mg/l 以上、結合残留塩素で 0.4mg/l 以上が要求されている。塩素は激しい酸化力を有しており、金属に対しては激しい腐食作用がある。

d. 塩素イオン・硫酸イオン等

塩素イオン、硫酸イオン、アンモニアイオン等は金属表面の不動態化を妨げる作用と、電気伝導度を上昇させることによる腐食電流の増加により腐食速度に影響すると考えられる。

e. 電気伝導率(導電率)

水溶液の導電率は、水中に溶けているイオン量と、そのイオンの電気を運ぶ速さによって支配され、水の導電率が大きいほど水に接する金属の電気化学作用が激しくなる。金属の種類、イオンの種類、腐食生成物の特性などにより腐食の進行速度は異なるが腐食の第一段として電気化学作用が大きくなるので、導電率が大きくなると、水の腐食性が高まる恐れがある。近年、大都市の水道水では水環境の悪化に伴い 25mS/m(250 μ S/cm)を超える場合もあり、設備配管の耐用年数に大きな影響を与えていると考えられる。

f. 硬度

硬度とは、水中の Ca イオン及び Mg イオンの量をこれに対応する CaCO₃ 濃度[mg/l]に換算した値である。通常、硬度 179 以下が軟水、357 以上が硬水と呼ばれるが、日本の水は普通軟水であり 60 以下が多い。水質基準では 300 以下とされている。

硬度の高い水は、金属表面に炭酸カルシウムが沈着し保護皮膜を形成するため防食上有利であり腐食性が低く、硬度の低い軟水は逆に腐食性が高い。(硬度が高すぎる場合はスケールが析出し障害となる。)

鉄錆中のカルシウムが 3%以上あると赤水が少ないとの報告もある。水中の炭酸カルシウムが溶解も析出もしない平衡状態にあるときの pH 値 (pH_s) と実際の水の pH 値を比較してその差をランゲリア指数といい、炭酸カルシウムの被膜形成の目安とされている。

すなわち、ランゲリア指数が正の値で絶対値が大きいほど炭酸カルシウムの析出が起りやすく、ランゲリア指数がゼロであると平衡状態であり、負の値では炭酸カルシウム被膜は形成されず、負の絶対値が大きいほど腐食性が強いとされる。

g. アルカリ度

水中にいろいろな形で含まれているアルカリ分、即ち重炭酸塩、炭酸塩、水酸化物、珪酸塩などのアルカリ分を、これを中和するに必要な、酸の量に対応する CaCO₃ の濃度[mg/l]で表したものであり、アルカリ度が大きい程配管の内面に保護皮膜を形成して防食の働きをする。また、炭酸塩が存在する場合には、炭酸水素塩との間で電離平衡が発生し、水の pH 緩衝能力が高くなる。

h. 遊離炭酸

水中の遊離炭酸は、その一部が炭酸 H₂CO₃ になり酸性化する。遊離炭酸がアルカリ度に比し多すぎる場合は、腐食性が高くなり鉄、亜鉛を腐食し、また、銅管から銅イオンの溶出が多くなり青水などの原因となることがある。

i. 水温

水温が腐食に与える影響は複雑であるが、一般的には、高いほど溶存酸素の拡散速度が増え、腐食反応が促進するので、腐食速度が増加するとされている。鉄の腐食速度では、温度が 30℃ 上昇するごとに約 2 倍になると言われている。しかし、開放容器中では、約 80℃ 以上になると酸素の溶解度が著しく低下し、酸素が空気中に逃げて溶存酸素が減少するため腐食速度は低下する。

j. 流速

流速は、溶存酸素の供給・拡散、腐食生成物の堆積、水の流動に伴う機械的作用などに関連することから腐食に与える影響は複雑である。

- 水道水では一般に流速が大きくなると金属表面に達する酸素量が増えるので腐食速度は大きくなる。
- 流速がある程度以上になると、表面に達する酸素量により金属表面に不動態皮膜が形成され、腐食速度は低下する。
- 更に流速が増加すると、腐食生成物の皮膜や不動態皮膜が機械的に損傷を受け、腐食速度は増加する。

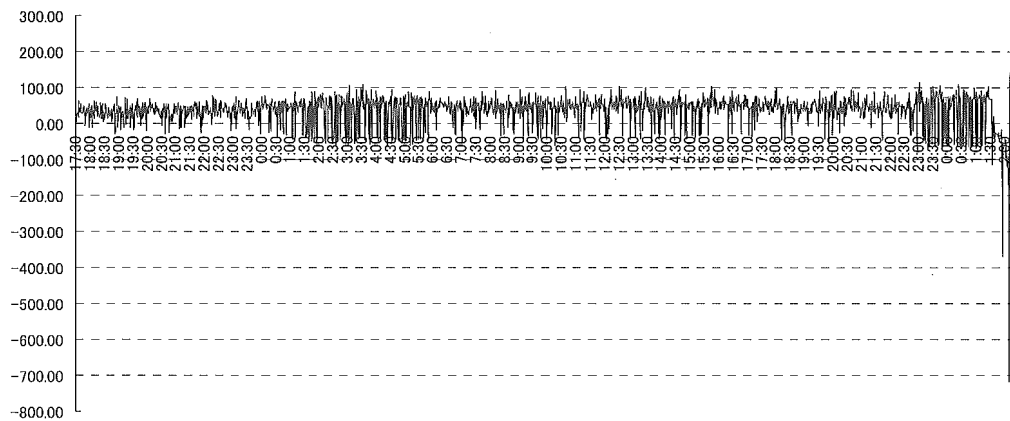
③流速と錆の生成について

流速と鉄錆等懸濁物質濃度について、実管路にて観測を行ったので知見を以下に示す。ある事業体の管網の中で無ライニングFC管が埋設されている2箇所について洗管排水を行い濁度を測定した。また、洗管前の懸濁物質を測定した。

<流速>

I 地点：消火栓の錆こぶが大きく流量計を管内に挿入できなかつたため、測定は出来ていないが、行き止まり管のためほとんど流速変化はないものと考えられた。

II 地点：図 4.4.6 のとおりである。



定日 1月20日17:30~22日2:00 (流速 mm/sec)

図 4.4.6 通常時流速測定結果

<濁度>

洗管流速を段階的に上昇させて排水濁度を測定したところ表 4.4.6 に示す濁度となった。

同じ無ライニングFC管が布設されている箇所でも、多少、流速があるII地点では濁度が低く、ほとんど流速がないI地点では、濁度が高い。

ちなみに、洗管を実施する前に、0.7 μ mのろ紙で懸濁物を捕捉したところ、I地点では30 μ g/L以上の懸濁物が捕捉されたのに対し、II地点では15 μ g/L程度と約半分となっていた。

表 4.4.6 濁度測定結果

洗管流速 (m/s)	濁度 (NTU)	
	I 地点	II 地点
0.1	3.11	1.41
0.2	25.60	1.17
0.3	15.00	2.30
0.4	9.37	0.45
0.5		0.95

②影響因子で述べたように、流速が大きい方が酸素供給量が多く腐食は進行しやすいと考えられる。しかし、流速が大きいということは、それだけ生成した錆が流出しやすいことを意味するので結果的に管内水質としては清澄側に傾くことになる。さらに、他の濁質の堆積も防止できることから、管内濁質量は減少すると考えられる。

④鉄錆生成の速度について

一般に鉄錆は、非常に短い時間で生成し、②影響因子の項でも述べたように溶存酸素が飽和状態でpHが水道水の範囲に有る場合は、その初期腐食速度は100mddに達するとされている。今回の研究プロジェクトにおいては、4.6で示すように、鑄鉄管の試験片を水道水が満たされた容器に浸して錆の発生状況を確認する実験（浸漬実験）を行っており、以下にその結果の一部を報告する。

下の写真は、無ライニング管の内面をショットブラスト処理して金属面が露出した状態の試験片である。

1ヶ月後には全体に錆の発生が確認されており、速やかに錆が発生している様子がうかがえる。したがって、水中に浸された鉄は速やかに錆を生成することから、少なくとも実管路中で鉄が露出した管路および属具は全て錆が発生する可能性があり、錆の組成等によっては水中に懸濁態として混合し、濃度によっては赤水の原因物質となりうると考えられる。

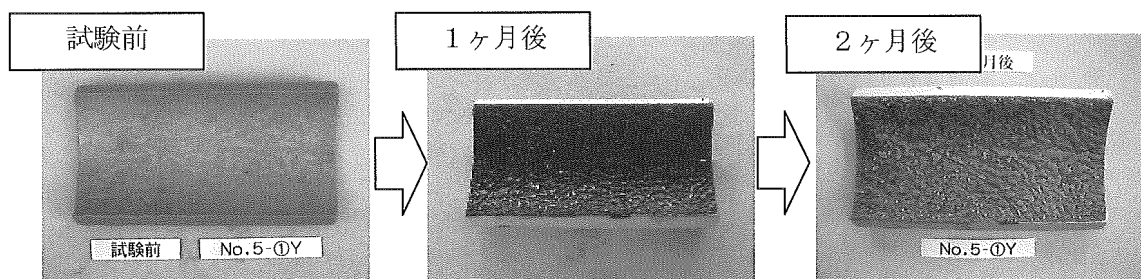


写真 4.4.7 浸漬実験結果

(2) 塗膜片

特に、経年劣化したモルタルライニング管が供給源になっていると考えられる。

事業体アンケート結果でも回答の上位にあり、また、実管路で実施した洗管実験においても排水中に含まれているなど、その存在が確認されている。一般的事項については、下記のとおりである。

①シーラコートの役割

シーラコートの役割は次のとおりである。

- a. モルタルライニングの水和に必要な水分をモルタル中に封入して養生を効果的にし、強度発現を助成する。
- b. モルタルライニング管に通水した場合、水中にモルタル中のカルシウム分が溶出して、水道水のpH値が上昇する傾向を緩和する。
- c. bの効果に関連して、モルタルライニング中のカルシウム分が水中に溶出し、長年月の間にモルタルライニングの表面層が中性化し軟化する傾向があるが、これを阻止することによりモルタルライニングの耐久性を向上させる。

②シールコートの性状

シールコートは液状の塗料であり、蒸気養生の完了したモルタルライニング面にブラッシング、またはグライディングした後ハケまたはスプレーで塗装し、乾燥成膜させるものである。

塗布量としてはライニング面、平方米あたり約 100g と規定されており、乾燥シールコート塗膜はその厚みが数 μm ~ 30 μm * と薄い。また、モルタル中の水分の揮散を有効に抑制する効果を期待するものであって、ピンホール等のない完全な塗膜ではない。

一方、水中では、シールコート膜は半透膜の性状を示す。すなわち、水分は幾分か浸透するが、水に可溶性の塩類のイオンはほとんど透過させない性質がある。そのためモルタル中のカルシウムイオンなどはシールコート膜により透過が抑制されるので、水の pH 値上昇の傾向が緩和される。

一般的には、モルタルライニング管（シールコートなし）に水を封入した場合、小口径管では 24 時間放置で pH 値が 4~5 程度上昇するが、シールコートされた場合は pH 値の上昇は 1~2 程度に抑えられる。

*平成元年からは浸透性シールコートに変更されている。

(3) 砂

管路中の砂については、浄水処理を経た後においても完全に除去することは不可能であり、もともと浄水中に微量に含まれていると考えられる。また、管路布設工事において洗管作業が不十分であった場合など管路中に残存してしまうことも考えられる。

その他、管材のモルタル等が水流により削り取られて細砂として浄水中に混入する可能性もある。

■浄水由来

■管路布設工事における不十分な洗管

■水流により削られたモルタル等

4.4.3 輸送要因

(1) 掃流限界流速

管路内で生成した濁質は、流れ等がなければその生成位置に留まり堆積するが、水使用に伴う流れが発生することによって管路内を移動し、あるものは流出、あるものは別の位置で堆積、といった挙動を示す。移動する／しないの別については、液体の流速に支配されると考えられており、その境界となる流速は掃流限界流速と称されている。

管路中の固体粒子の移動に関しては、以前から掃流限界流速の測定が行われている。一般的には、実験室レベルで一部透明なアクリル管等を用いたモデル管路を設置し、段階的に管内流速を変化させながら固体粒子の移動を確認するといった手法が多いようである。実際に掃流限界流速を測定した事例について結果を表 4.4.7 に示す。

表 4.4.7 管内流速と試料の挙動及び移動速度について

流速 (m/s)	砂	鏽	赤水	塗膜片
0.05	—	—	管内の流れに応じスムーズに流れる	殆ど動かず
0.1	動かず	動かず		少しずつ管底を流れる 〔約 0.05m/s〕
0.2	同上	わずかに動くものがあるが殆ど動かず		管底を流れる 〔約 0.15m/s〕
0.3	少しずつ動く (止→流れる→止の繰り返し)	少しずつ動く (止→流れる→止の繰り返し)		管底付近を多く流れる 〔約 0.25m/s〕
0.4	殆どが絶えず動く (管底を流れる感じ) 〔約 0.2m/s〕	殆どが絶えず動く (管底を流れる感じ) 〔約 0.18m/s〕		—
0.5	同上 〔約 0.27m/s〕	同上 〔約 0.18m/s〕		管底～管中央付近を多く流れる
1.0	管底を流れる 〔約 0.64m/s〕	管底を流れる 〔約 0.71m/s〕		管底付近も比較的多く流れるが均一な分布状態ではない
1.5	同上	同上		—
2.0	殆どが管底を流れる	殆どが管底を流れる		管底から管頂までほぼ均一な分布状態で流れる
3.0	管中央部付近も浮いた状態で流れる	管中央部付近も浮いた状態で流れる		同上

注 1) 流速 0.05～1.00m/s はφ200 管路で、流速 1.5～3.0m/s はφ100 管路で実施した。

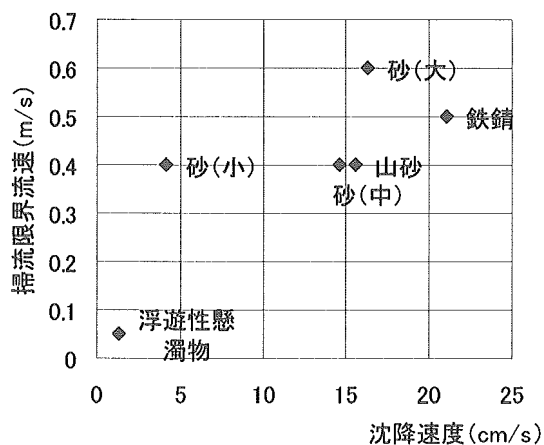
注 2) 試料の移動速度は〔 〕内に示した。

また、参考として大阪市水道局で実測された濁質の沈降速度と掃流限界流速について表 4.4.8 に示す。(H5 水道研究発表会「配水管内濁質物質の効果的な排出方法」より)

表 4.4.8 濁質の沈降速度及び掃流限界流速

濁質の種類	粒子径 (mm)	沈降速度 (cm/s)	掃流限界流速 (m/s)
砂 (小)	0.3	4	0.4
	0.5	4.2	
砂 (中)	1	14	0.4
	2	15.2	
砂 (大)	3	15.8	0.6
	4	17	
山砂	2	15	0.4
	3	16.2	
鉄錆	2	17.5	0.5
	4	24.8	
浮遊性懸濁物	3	1.3	0.05
	5	1.5	

この測定結果を基に、沈降速度と掃流限界流速の関係について相関式を試算した。その結果、ある程度の相関が見られた。



	相関式	R ²
線形近似	$y = 0.0186x + 0.1652$	0.5946
対数近似	$y = 0.15\text{Ln}(x) + 0.0661$	0.7456
累乗近似	$y = 0.0619x^{0.7478}$	0.7617
指数近似	$y = 0.1072e^{0.088x}$	0.5501

図 4.4.7 沈降速度と掃流限界流速の相関