

II-42 配水管内付着物の挙動

札幌市水道局	亀海 賢一
札幌市水道局	盛田 祐一
札幌市水道局	正員 佐々木 春代

1. はじめに

近年、水道水質に対する市民の要求は厳しく、トリハロメタンに代表される安全性への疑問、カビ臭に対する嫌悪感、濁水に対する不快感等、様々な苦情となって現われている。本市の場合には、水源環境が良好であることから大きな問題はないが、それでもなお、管路における水質劣化に起因した濁水の発生を時折経験している。濁水は視覚的なものだけに苦情件数に占める割合が多い。

濁水の発生原因は配水管内面に付着する濁質分、鉄、マンガンによるものと推定されているが、通常使用している状態（流速、流向）では発生せず、使用水量の増大（流速の増大）、配水調整等に伴う流向の変化等に伴って発生する。本市ではこのような濁水を防止するため、無ライニング管の解消、計画的な洗管、エポキシ樹脂粉体ライニング異形管の採用等の対策を実施してきており、一定の効果をあげている。しかし、配水管延長が4000kmを越え、従来の管理方法では作業量的にもはや限界と言えるところまで来ており、配水管内付着物の挙動及び、流速・流向の変化と濁水発生との関係について、より科学的手法を用いて、対策を立案する段階にきているが、詳細に調査した事例はほとんど無いのが現状である。

ここでは「濁らない水道」を目指すための一環として、今回、配水管内付着物の挙動及び流速変化と濁水発生との関係について、データを定量的に調査・解析したので以下に報告する。

2. 調査方法

(1) 調査地点

流速の変化による濁水発生調査を定量的に行うため、調査地点はブロック配水実施地点とした。ブロック配水とは、災害対策並びに水圧調整対策として用いられているクローズドシステムの配水方式で、水量の1点注入を行っており、コンピュータによる管網計算で、構成管路の流速・流向の推定を行った。

本市では給水区域内の管路を3配水事務所（北部、東部、西部）により管理している。ブロック配水実施区域は各事務所の管理区域内に分散していることから、それぞれ3～4箇所、合計10箇所の地区において平成元年度に調査を実施した。また、配水管との比較のため白川浄水場からの送水管についても調査した。

調査条件は以下のとおりである。

(2) 調査条件

- ① 付着物の挙動をより明確にするため、管路の洗管を1～2年以上実施していない地区を対象とした。
- ② 時間最大流量は超音波流量計により計測し、その流量により、管網計算を実施し、洗管を行う部分の流速・流向を推定した。
- ③ 流速増による水質変化を調べるため、夜間、単口消火栓に軸流羽車式ポータブルメータを取付け、流速増に見合った水量を消火栓から放水し、管路内の水が最低1替わりするまで一定時間毎に採水を行い、成分を分析した。
- ④ 濁水発生条件を同じにするため、準幹線（ $\phi 200\text{mm} \sim \phi 350\text{mm}$ ）からの取り出しで、かつ、同一口径（ $\phi 100\text{mm}$ ）、モルタルライニング管、同一流向の管路を選定した。この管路を弁で仕切り、単一・長管路（200～400m）を設定した。

The behavior of attachment in distribution pipe lines
by Kenichi KAMEGAI, Yuichi MORITA and Haruyo SASAKI

(3) 調査項目

従来から行なわれている管内付着物のかき取り調査結果を踏まえて、濁度、色度に大きな影響を及ぼす項目として以下を選定した。

- ① 濁度 ② SS (懸濁物質) ③ 色度 ④ 総マンガン ⑤ 総鉄
⑥ 総アルミニウム ⑦ 管内流速

総マンガン及び総鉄は原子吸光光度法、総アルミニウムはフレイムレス原子吸光光度法により測定した。

3. 調査結果

(1) 管内付着物

洗管排水中の成分と、洗管流量との積を管内付着物量とした。

表-1は管内付着物の調査結果である。表-1の結果から、洗管後の経過年数と付着物量との関係を図に表したのが、図-1、2、3である。今回調査した範囲では近似的に直線関係(最小二乗法)で表すことが出来た。

その結果、図-1、2より、洗管後の経過年数と管壁へのSS付着量及びマンガン付着量は1%の危険率で有意水準にあり、高い相関関係があるといえる。即ち、SSは年当たり 1.155 g/m^2 の割合で、マンガンは年当たり 0.100 g/m^2 の割合で管壁に付着・蓄積される。しかし、図-3より、洗管後の経過年数と鉄の場合には相関関係は認められず、洗管後の経過年数に無関係に 1 g/m^2 前後で一定であった。

表-2は表-1の値を酸化物の

形、即ち、マンガンは MnO_2 (二酸化マンガン)、鉄は Fe_2O_3

(酸化第二鉄)、アルミニウムは Al_2O_3 (酸化アルミニウム)

と仮定し、SS中に占めるこれら金属成分の割合を計算したものである。表-2の結果を図に表したのが図-4、5、6、7である。

SS中に占める成分中、 MnO_2 の割合は図-4に示すとおり年毎に増加し、3年程度までは、直線的に増加する。図-5はSS中に占める鉄の割合を示したものであるが、3年目までは直線的に減少し、3年目以降(試算値)は減少割合が漸減するものと推定される。

図-6、図-7はそれぞれ、SS中に占める金属成分の割合を洗管

後の経過年数との関係で表したものであるが、これらもSS中の Fe_2O_3 の割合と同様の傾向を示した。表-3は、それぞれの項目間の1%の危険率で有意水準にある相関係数を計算したものである。これから、

表-1 管内付着物調査結果

	SS (g/m^2)	Mn ^T (g/m^2)	Fe ^T (g/m^2)	Al ^T (g/m^2)	洗管後の経過 年数 (年)	布設年度 (年度)
北部 1	3.79	0.201	1.08	—	3.0	S61
北部 2	4.15	0.213	0.796	(0.349)	3.0	S56
北部 3	4.32	0.234	1.10	(0.339)	3.0	S56, 60
西部 1	5.61	0.298	1.31	—	3.3	S54
西部 2	4.22	0.238	0.821	0.233	3.3	S53
東部 1	3.31	0.074	1.31	—	1.5	S49, 51
東部 2	2.75	0.077	1.26	—	1.5	S52
東部 3	2.58	0.207	0.789	0.193	1.5	S50, 54, 61
東部 4	2.14	0.055	1.01	0.040	1.5	S54, 55
東部 5	2.17	0.099	0.859	0.183	1.5	S55

注: () は、原子吸光光度法 (高温バーナー法) により測定した。

図-1 SS付着量と経過年数

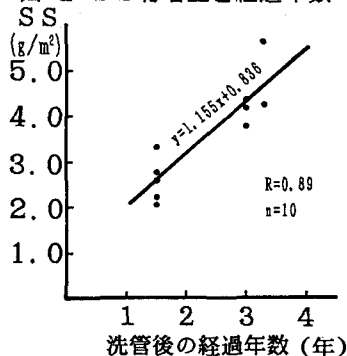


図-2 Mn付着量と経過年数

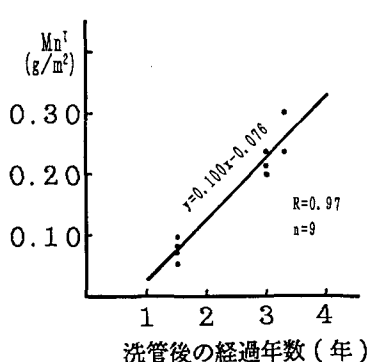


図-3 Fe付着量と経過年数

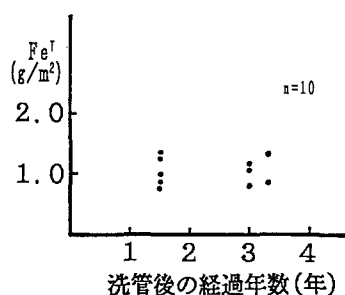


表-2 SS中の金属酸化物の割合

	MnO ₂ (g/m ²)	Fe ₂ O ₃ (g/m ²)	Al ₂ O ₃ (g/m ²)	MnO ₂ /SS (%)	Fe ₂ O ₃ /SS (%)	Al ₂ O ₃ /SS (%)	(MnO ₂ +Fe ₂ O ₃)/SS (%)	(MnO ₂ +Fe ₂ O ₃ +Al ₂ O ₃)/SS (%)
北部 1	0.32	1.54	—	8.4	40.6	—	49.1	—
北部 2	0.34	1.14	(0.66)	8.1	27.5	15.9	35.7	51.5
北部 3	0.37	1.57	(0.64)	8.6	36.3	14.8	44.9	48.3
西部 1	0.47	1.87	—	7.4	33.3	—	41.7	—
西部 2	0.38	1.17	0.44	9.0	27.7	10.4	36.7	47.2
東部 1	0.12	1.87	—	3.6	56.8	—	60.1	—
東部 2	0.12	1.80	—	4.4	65.4	—	69.8	—
東部 3	0.33	1.13	0.36	12.8	43.8	14.0	56.6	70.5
東部 4	0.087	1.44	0.076	4.1	67.3	3.6	71.4	74.9
東部 5	0.16	1.23	0.35	7.4	56.7	16.0	64.1	80.2

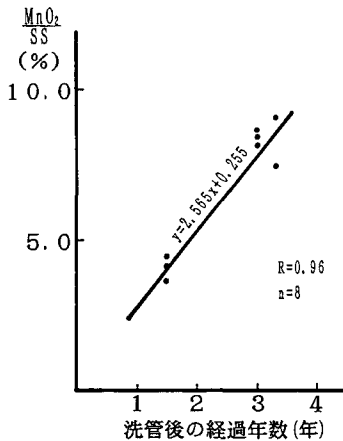
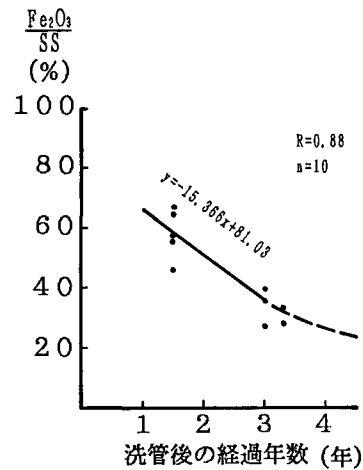
図-4 SS中のMnO₂の割合と経過年数図-5 SS中のFe₂O₃の割合と経過年数

図-6 SS中の金属成分の割合①

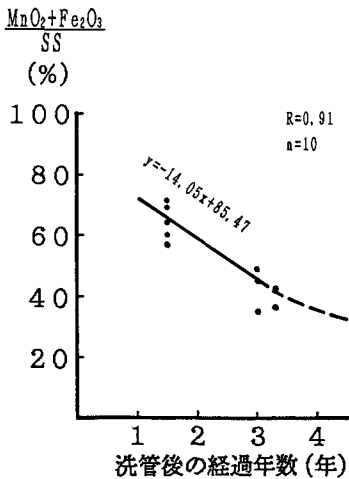


図-7 SS中の金属成分の割合②

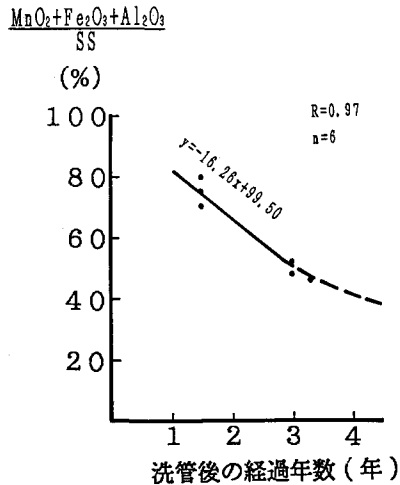


表-3 各項目間の相関係数（1%の危険率で有意水準） n=61~119

	濁度 -SS	濁度 -色度	濁度 -MnO ₂	濁度 -Fe ₂ O ₃	濁度 -Al ₂ O ₃	SS -色度	SS -MnO ₂	SS -Fe ₂ O ₃	SS -Al ₂ O ₃	色度 -MnO ₂	色度 -Fe ₂ O ₃	色度 -Al ₂ O ₃	MnO ₂ -Fe ₂ O ₃	MnO ₂ -Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ -Al ₂ O ₃
北部1	0.74	0.44	0.52	0.98	—	0.66	0.94	0.71	—	0.64	0.42	—	0.48	—	—
北部2	0.82	0.60	0.72	0.96	0.73	0.61	0.97	0.68	0.98	0.54	0.53	0.55	0.54	0.98	0.57
北部3	0.84	0.62	×	0.87	0.34	0.75	0.67	0.75	0.72	0.51	0.62	0.51	×	0.79	0.33
西部1	0.73	0.39	×	0.99	—	0.71	0.79	0.70	—	0.66	0.39	—	×	—	—
西部2	0.70	0.62	0.45	0.85	0.66	0.72	0.73	0.57	0.84	0.66	0.42	0.68	×	0.98	0.59
東部1	0.98	0.36	×	0.99	—	0.41	×	0.99	—	0.50	0.34	—	×	—	—
東部2	0.99	0.69	×	0.85	—	0.75	×	0.83	—	0.64	0.57	—	×	—	—
東部3	0.64	0.61	×	0.80	×	0.77	0.76	0.72	0.68	0.59	0.52	0.61	0.26	0.89	×
東部4	0.90	0.29	×	0.94	×	0.33	×	0.76	×	0.62	0.24	0.62	×	0.94	×
東部5	0.92	×	×	0.98	×	0.41	0.36	0.90	0.37	0.90	×	0.90	×	0.99	×

注：×印は、相関が無い。

特徴的なのは、マンガンとアルミニウムとの相関係数が高く、表-4より、重量比でMnO₂:Al₂O₃=1:0.8~1.4の関係があった。

(2) 流速増による管内付着物の剝離

表-5は時間最大流速と濁水発生流速との関係を表したものである。濁水発生開始時点の水質の特定は難しいが、色度3以上で、

表-4 MnO₂(x)とAl₂O₃(y)の関係

	回 帰 直 線
北部2	$y = 1.34x + 0.904$
北部3	$y = 1.39x + 0.160$
西部2	$y = 1.29x - 0.123$
東部3	$y = 0.90x + 0.060$
東部4	$y = 0.82x + 0.015$
東部5	$y = 1.29x + 0.115$

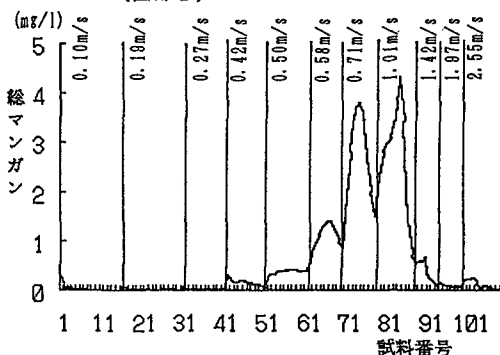
表-5 時間最大流速と濁水発生流速との関係

	色 度 (度)		濁 度 (度)		Mn ⁺ (mg/l)		Fe ⁺ (mg/l)		(a) 時間最大流速 (m/s)	(b) 濁水発生流速 (m/s)	b-a (m/s)
	3	5	2	10	0.3	1.0	0.3	1.0			
北部1	0.30m/s 以下	0.68	0.30m/s 以下	0.30m/s 以下	0.30m/s 以下	0.30m/s 以下	0.30m/s 以下	0.30m/s 以下	0.094	≈ 0.1~0.2	≈ 0~0.1
北部2	0.26m/s 以下	0.68	0.26m/s 以下	0.26m/s 以下	0.26m/s 以下	0.26m/s 以下	0.26m/s 以下	0.26m/s 以下	0.11	≈ 0.1~0.2	≈ 0~0.1
北部3	0.22	—	0.22	0.32	0.22	0.22	0.22	0.22	0.13	0.22	0.09
西部1	0.58	—	0.10	0.58	0.50	0.58	0.10	0.58	0.60	0.58	≈ 0
西部2	0.40	0.40	0.31	0.80	0.31	0.40	0.31	0.40	0.46	0.40	≈ 0
東部1	0.44	—	0.29	0.44	0.44	—	0.09	0.44	0.16	0.44	0.28
東部2	0.30	0.69	0.21	0.69	0.51	—	0.21	0.69	0.16	0.30	0.14
東部3	0.30	—	0.20	0.30	0.20	0.30	0.20	0.30	0.13	0.30	0.17
東部4	0.31	—	0.19	0.31	0.19	—	0.31	0.31	0.10	0.31	0.21
東部5	0.32	0.32	0.21	0.41	0.32	0.41	0.21	0.32	0.15	0.32	0.17

濁度、マンガン、鉄の値が急激に増えてきた時点をも濁水発生開始流速とした。洗管後の経過年数が3年以上の北部、西部では時間最大流速（管網計算による）から0~0.10m/sの流速増で濁水が発生するのに対して、1年半の東部では平均約0.20m/sの流速増で濁水が発生する。

また、濁水発生流速とマンガン剝離流速とは密接な関係があり、濁水に先立って、少量のマンガン剝離の発生か、濁水とマンガン剝離が同時に発生する現象が見受けられた。図-8に示すとおり、西部-1の場合には濁水発生流速0.58m/sに先立って、0.50m/sで水質基準値（0.3mg/l）以上のマンガン剝離の現象が見られる。

表-6は濁水発生流速時における金属成分の排水量とその比率を表したものである。表-2より、洗管後の経過年数が3年以上の北部、西部では鉄がマンガンの3~5倍程度であるが、濁水発生流速時には

図-8 管内流速の変化とマンガンの剝離
(西部1)

平均すると 1.3 倍程度である。また、アルミニウムもマンガンの 1.3 倍程度である。しかし、経過年数の短い東部では鉄の比率は高い。

(3) 配水管と送水管

表-7 は白川第 1、第 2 送水管洗管排水の金属成分の分析結果を示したものである。SS 中に MnO_2 、 Al_2O_3 及び Fe_2O_3 が占める割合はほぼ 1 に近い。また、SS 中の金属成分の内、マンガンとアルミニウムの割合が非常に高く、 $MnO_2 : Al_2O_3 = 1 : 0.8 \sim 1.2$ となる (表-8 参照)。この比率は配水管の比率 $MnO_2 : Al_2O_3 = 1 : 0.8 \sim 1.4$ と同程度である。また、鉄の比率 Fe_2O_3 / SS は数%以下であり、配水管の 20~70% に比べて著しく比率が低いのが特徴的である。

4. 考察

(1) 今回調査した範囲での、洗管後の経過年数と SS 付着量は 1% の危険率で有意水準にあり、高い相関関係が認められ、年当り約 $1.16 g / m^2$ の SS が付着していた。濁水の発生は、管内単位面積当りの SS 付着量と流速の変化に密接に支配されており、付着量が $4 g / m^2$ を越えた時点、即ち、洗管後 3 年以上経過すると時間最大流速 ($0.10 \sim 0.60 m / s$) の $0 \sim 0.10 m / s$ 増程度で濁水が発生した。しかし、洗管 1 年半の $2.5 g / m^2$ では時間最大流速 ($0.10 \sim 0.16 m / s$) の約 $0.20 m / s$ 増とならなければ濁水が発生しなかった。

従って、洗管後 3 年以上では流速が少しでも上昇すると濁水発生の危険性が高くなるといえる。

(2) 今回調査した範囲での、洗管後の経過年数とマンガン付着量は 1% の危険率で有意水準にあり、高い相関関係が認められ、年当り $0.100 g / m^2$ のマンガン (MnO_2 換算では $0.158 g / m^2$) が付着していた。このことから、水質基準値を大幅に下まわる過マンガン酸カリウム法の処理限界である $0.01 mg / l$ 程度の浄水中の微量溶存マンガンでも、配水管内でマンガン酸化物を触媒として塩素により酸化・蓄積され、濁水の大きな要因となっている。

(3) 鉄は洗管後の経過年数の長短に関係なく、単位面積当りの付着量は同じ傾向を示した。これは、マンガンと違って、溶存鉄が酸化を受け管内に蓄積されるというメカニズムではなく、鉄の発生源が水道管路中 (直管部分はモルタルライニング) に占める異形管、仕切り弁等の鉄部の錆からのものが卓越しているからと推定される。また、その鉄部の占用する割合もほぼ一定であることから、同程度の値になったものと思われる。なお、付着量は一定であるが、その量はマンガン、アルミニウムに比較して 5~10 倍程度多い。しかし、濁水発生流速時においては鉄、マンガン、アルミニウムの比率は同程度であることから、濁水発生に寄与する割合も同じと推定される。

(4) 配水管及び、送水管の洗管排水中に含まれるマンガンとアルミニウムの割合は、重量比で $MnO_2 : Al_2O_3 = 1 : 1$ 程度であった。このことは、マンガンが浄水中に Mn として $0.01 mg / l$ 弱程度含まれてい

表-6 濁水発生流速時の金属成分の割合

	MnO_2 (g)	Fe_2O_3 (g)	Al_2O_3 (g)	$MnO_2 : Fe_2O_3 : Al_2O_3$
北 部 1	12.0	15.8	—	1 : 1.3 : —
北 部 2	15.4	13.2	20.6	1 : 0.86 : 1.3
北 部 3	3.5	7.7	5.0	1 : 2.2 : 1.4
西 部 1	4.3	5.3	—	1 : 1.2 : —
西 部 2	11.7	8.7	13.8	1 : 0.74 : 1.2
東 部 1	1.7	6.9	—	1 : 4.1 : —
東 部 2	0.62	2.1	—	1 : 3.4 : —
東 部 3	4.1	7.2	4.3	1 : 1.8 : 1.0
東 部 4	2.5	7.0	2.1	1 : 2.8 : 0.84
東 部 5	2.0	4.0	2.4	1 : 2.0 : 1.2

表-7 送水管洗管排水 SS 中の金属成分の割合

	データ数	$(Al_2O_3 + MnO_2 + Fe_2O_3) / SS$ の平均
白川第 2 送水管 (上流部分)	77	0.95
白川第 2 送水管 (下流部分)	62	0.79
白川第 1 送水管	53	0.95

表-8 送水管の $MnO_2(x)$ と $Al_2O_3(y)$ の関係

	回 帰 直 線
白川第 2 送水管 (上流部分)	$y = 1.17x + 0.235$
白川第 2 送水管 (下流部分)	$y = 0.83x + 0.258$
白川第 1 送水管	$y = 0.99x + 0.161$

ることから、アルミニウムもA1として同程度（検出限界 $0.01\text{mg}/\ell$ ）残留しているものと推定される。凝集剤としてのアルミニウム注入率は年平均 $1\text{mg}/\ell$ （ポリ塩化アルミニウム： $20\text{mg}/\ell$ ）、原水中のアルミニウム濃度は年平均 $0.1\text{mg}/\ell$ 程度であることから、このアルミニウムの大部分は凝集剤由来のものと推定され、これが送・配水管壁に付着・蓄積されたものと考えられる。

（5）送水管では付着する金属成分の内、大部分がマンガンとアルミニウムであり鉄はわずかである。逆に配水管では鉄が大部分を占めているのが特徴的である。送水管の付着物かき取りによる調査では Fe_2O_3 として約 $1\sim 2\text{g}/\text{m}^2$ という結果を得ており、今回の配水管の結果とも一致した。アルミニウムとマンガンの付着量が著しく高い理由は、送水管が浄水場から位置的に近く、それらの濃度が高いこと、流量が多いこと等の理由からと思われる。また、マンガン、アルミニウム、鉄等金属酸化物の合計とSSの比が $0.8\sim 1.0$ であるのは、付着物かき取り調査から判明している送水管の付着成分の内、酸不溶分（ケイ酸分）の割合が25％程度で、残りの75％が酸可溶分、即ち、金属成分であるという結果とほぼ一致している。

5. おわりに

水道管の「濁り」の原因は管壁に付着しているSS成分によるものであり、金属成分がそのうちの主要部分を占めている。今回調査した流速範囲（ $0.10\sim 0.60\text{m}/\text{s}$ ）では、モルタルライニング配水管に付着したSS成分の内、洗管後3年でSS中に占める金属成分は50％、濁水の危険性が高くなる4～5年では30～40％位と推定される。従って、「濁らない水道」を実現するためには色度、濁りの大きな要因であるSS中の金属成分を減じることがぜひ必要である。本市ではこの対策として、管路については無ライニング管の布設替、エポキシ樹脂ライニングによる管路の更正、適正な管網の形成による滞留の防止、計画的な洗管作業の実施等を行っている。また、弁については、ソフトシール仕切弁、エポキシ樹脂ライニング仕切弁等の採用も検討している。一方、浄水場での処理対策としては、マンガン対策として過マンガン酸カリウム法によるマンガン除去に替えて、溶存マンガン濃度をさらに一桁程度減ずることが出来るマンガン砂による接触酸化法を小規模浄水場に採用し、本市主力浄水場にも順次採用する予定である。また、配水管に付着している金属成分では鉄分が卓越しており、配水管鉄部からの鉄の溶出を抑制するため、鉄部を被覆する方向で対策を実施しているが、浄水場での後アルカリ処理も今後の検討課題となろう。アルミニウムについては、浄水場で使用している凝集剤に由来すると推定されることから、浄水場での処理と浄水中に残留するアルミニウム濃度の関係を調査し、その対策を考慮したい。以上、配水管の洗管調査結果から配水管内付着物の挙動について考察した。

今回の調査では、調査地点が10箇所にとどまったが、今後は調査地点をふやし、精度の向上を図ると共に、流向の変化による影響、準幹線及び幹線規模での調査も実施し、「濁らない水道」を実現するための濁水発生メカニズムについて検討していきたい。

参考文献

「水道施設における微量マンガンの挙動と収支」 星野、盛田、亀海 （札幌市水道局） 第41回全国水道研究発表会