

技術報告

水道管材料が微生物膜形成に及ぼす影響

- 特に米国における研究例 -

張 睿喆*・遠山 忠*・Andrew A. Randall**

高見澤 一裕***・菊池 慎太郎*

キーワード：水道管材料, 残留塩素濃度, 同化性有機炭素, 生物膜

1. はじめに

水質浄化技術の改良などによって今日の水道水の質は著しく向上したが、なお微生物学的安全性など衛生学的観点からの問題点も指摘されている。たとえば水道管の老朽化や腐食によって、管内壁には細菌をはじめとする微生物の増殖に適当な基盤が提供されるため、微生物は薄膜状の微生物膜 (microbial film) を形成する¹⁾。有機酸などの微生物膜代謝産物は水道管の腐食を促進して微生物膜のさらなる肥厚化をもたらし、その結果、微生物膜から剥離して水道水中に混入する微生物細胞数が増加して水道水の生物学的汚染が進行する。また塩素などの殺菌剤は、肥厚した微生物膜内部には浸透しにくいので十分な殺菌効果が発現されず、微生物膜はさらに肥厚化して結果的に異臭の発生や水因性疾病の原因となると考えられている²⁾。事実、微生物膜を構成する菌群には大腸菌や *Cryptosporidium oocysts* のような病原性微生物も高濃度で存在すると報告されている³⁾。

以上から、米国においては新たな水質浄化技術の開発に加えて、微生物の栄養源となる有機炭素が水道水へ混入することを抑制して微生物膜の形成と肥厚化を抑制しようとする試みもなされている。また最近、基盤素材が微生物膜形成に影響を及ぼすことが知られるようになり、水道管材料自体の検討

も非常に重要と認識されている状況にある⁴⁾。

最近、筆者らは米国フロリダ州タンパ市に設置したパイロットプラントにおいて実施した試験で、水道管材料が生物膜形成と微生物学的水質に大きな影響を及ぼすことを示す成果を得たので以下に報告する。

2. 生物膜形成に影響を及ぼす諸因子

2.1 配水管材料及び残留塩素濃度と生物膜形成

米国フロリダ州における一般的な水道管材料は、塩化ビニル樹脂、鋳鉄、コンクリートライニング鋳鉄、あるいは亜鉛メッキ鋼であることを踏まえ、それぞれの材料から成る配水管をパイロットプラントに敷設して試験水を流入させた (写真)。

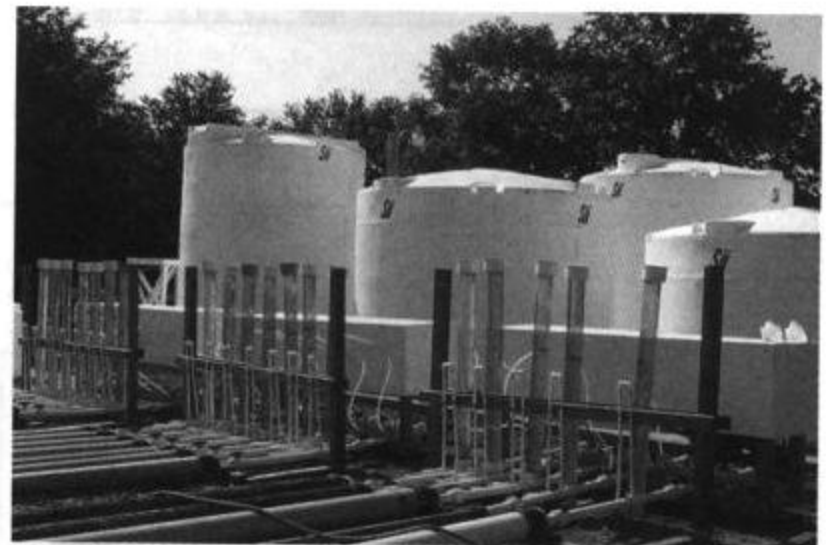


写真 フロリダ州タンパ市に敷設したパイロットプラント
写真奥の槽は試験水貯留槽を示し、写真手前の管は地表に設置した水道管を示す。なお同一の材料から成る水道管をそれぞれ6本ずつ敷設し、それらにおける実測値を平均して測定値とした。

Effects of pipe-materials on microbial film formation in drinking water distribution system; recent examinations in U.S.A.

2007年5月23日受付
2007年7月19日受理

* 室蘭工業大学工学部応用化学科 Young-Cheol CHANG, Tadashi TOYAMA, Shintaro KIKUCHI
** セントラル・フロリダ大学都市環境工学科 Andrew A. RANDALL
*** 岐阜大学応用生物科学部応用生命科学科 Kazuhiro TAKAMIZAWA

なお同州における典型的水道水は地下水、河川水、及び自然ろ過された海水の混合組成であることから、地下水(曝気処理済み)、河川水(凝集、沈殿、オゾン、生物活性炭処理済み)、及び逆浸透膜でろ過した海水を体積比23:45:32で混合した後、さらにナノろ過し供試水とした。この供試水の残留塩素濃度は4.0mg/lであった。供試水の平均水質を表に示した。他方、運転における配水管の滞留時間(HRT)は5日で、配水管内の平均水温が25.6℃、また配水管に供給する前の浮遊菌体濃度は100~800 cfu/mlであった。

試験開始3ヶ月後に、それぞれの材料から成る水道管の内壁単位面積あたりに存在する微生物膜菌数を寒天平板法(R2A固形培地を用いて25℃で一週間培養を行う方法)によって測定し^{1,5)}、その結果から水道管材料が微生物膜形成に及ぼす影響を推定した。

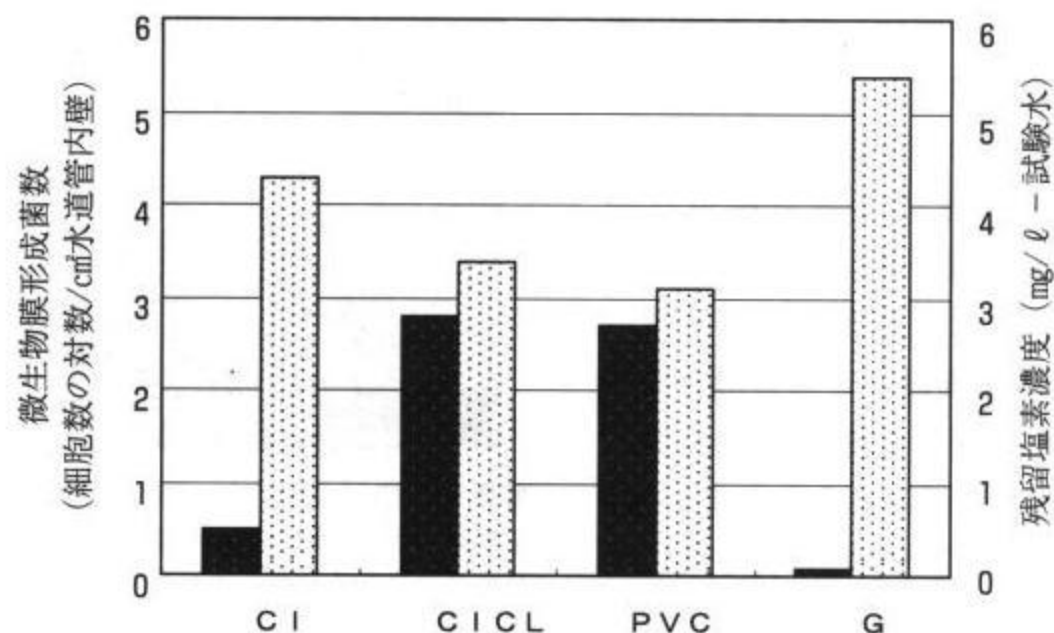
その結果を図1に示したが、検出される菌数は

コンクリートライニング鉄管及び塩化ビニル管で低値であり、他方、鉄管及び亜鉛メッキ鋼管では高値を示したが、この結果は水道管材料が微生物膜形成に直接的に影響を及ぼすことを示すものである。

また、供試水に所定濃度の塩素を添加してそれぞれの水道管に通過させ、水道管出口で採取した試験水に残留する塩素濃度を米国公衆保健協会が定める標準水質分析法⁶⁾に従って測定したところ、微生物膜形成菌数の多い鉄管や亜鉛メッキ鋼管を通過させた供試水では塩素が検出されず、反対に微生物膜形成菌数の少ないコンクリートライニング鉄管や塩化ビニル管を通過させた試験水では高濃度の塩素が検出された(図1)。この結果は、水道管材料が残留塩素濃度を支配する因子の一つであり、結果的に塩素が高濃度で残留する水道管材料では塩素の殺菌効果による微生物膜形成の抑制が観察されることを示すものである。

表 供試水の平均水質

濁度 (NTU)	0.306	pH	7.96
総鉄 (mg/l)	0.045	アルカリ度 (mg/l as CaCO ₃)	148
Ca ²⁺ (mg/l)	68	電気伝導度 (μS/cm)	557
Mg ²⁺ (mg/l)	6.4	総電解物質 (mg/l)	377
シリカ (mg/l)	9	Cl ⁻ (mg/l)	38
Na ⁺ (mg/l)	31	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	66



CI: 非ライニング鉄管, CIDL: コンクリートライニング鉄管, PVC: 塩化ビニル樹脂, G: 亜鉛塗鋼

■: 試験水1ℓあたりに残留する塩素濃度, □: 水道管内壁の単位面積あたりの微生物膜形成

図1 水道管材料が微生物膜形成と残留塩素濃度に及ぼす影響

したがって水道管材料は、直接的及び間接的に水道管内壁の微生物膜形成に影響を与える因子と考えられる。

2.2 同化性有機炭素濃度と生物膜

従来、水道水中の全有機性炭素 (total organic carbon: TOC) は微生物増殖の栄養源となると考えられており、その濃度が微生物膜形成に直接的な影響を及ぼすと理解されてきた。しかし特に米国においては全有機性炭素濃度だけに基づいて生物膜形成を議論することへの疑問も多く、TOCに代えて微生物が実際的な栄養源として利用できる生物分解性有機炭素 (biodegradable organic carbon: BDOC) や同化性有機炭素 (assimilable organic carbon: AOC) の濃度と微生物膜形成について考慮すべきである、とする意見も根強い^{7,8)}。

他方、筆者はすでに、フミン酸やフルボン酸などの比較的高分子有機酸を主要構成物質として TOC 構成炭素の90%以上を占める BDOC が、ろ過によってほぼ完全に水道水から除去されて微生物膜形成には大きな影響を与えないことを報告しており⁹⁾、また微生物膜の肥厚化に伴って膜から剥離する遊離微生物細胞数が増加するため水道水中の遊離微生物濃度は微生物膜の形成程度に比例することを見出した (未発表データ)。

以上に基づき、水道水中の遊離微生物細胞数と同化性有機炭素濃度の相関を調べることにより、

水道管材料が同化性有機炭素濃度及び生物膜形成に及ぼす影響について検討した。

なお AOC の測定は、酢酸ナトリウムを標準同化性有機炭素とした場合の *Pseudomonas fluorescens* P17株及び *Spirillum* 属 NOX 株のコロニー形成数から導いた以下の経験式によって行った。なお、この経験式の詳細については筆者らがすでに発表した論文を参照されたい^{9,10)}。

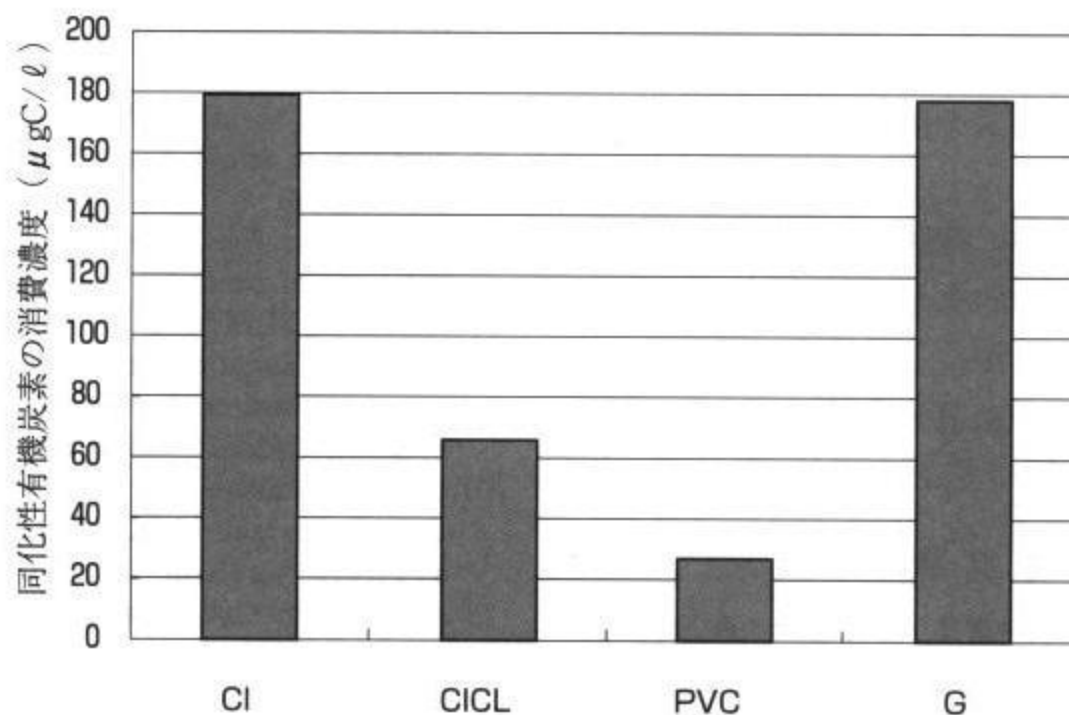
$$\text{AOC } (\mu\text{g}/\ell) = \{(\text{average P17株 cfu}/\text{ml}) / 4.1 \times 10^6 + (\text{average NOX 株 cfu}/\text{ml}) / 1.2 \times 10^7\} \times 10^3$$

それぞれの材料から成る水道管に所定の期間にわたって試験水を通過させた場合の AOC 濃度を図2に示したが、配水管内で消費された同化性有機炭素濃度は鋳鉄管で最も高値であり、塩化ビニル管で最も低値であった。

この結果は、水道管材料が微生物膜構成菌の直接的栄養源となる AOC に影響を与えることを示すものである。

さらに図3にそれぞれの材料から成る管の水道水中の消費された AOC 濃度と遊離菌数を示したが、両者の間には明らかな相関が認められ、消費された AOC 濃度の上昇によって生物膜形成が促進されることが示唆された。

すなわち水道管材料は、水道水中の AOC 濃度に影響を及ぼし、結果的に生物膜形成を支配する



CI: 非ライニング鋳鉄管, C1CL: コンクリートライニング鋳鉄管, PVC: 塩化ビニル樹脂, G: 亜鉛塗鋼

図2 種々の材料の水道管における同化性有機炭素濃度

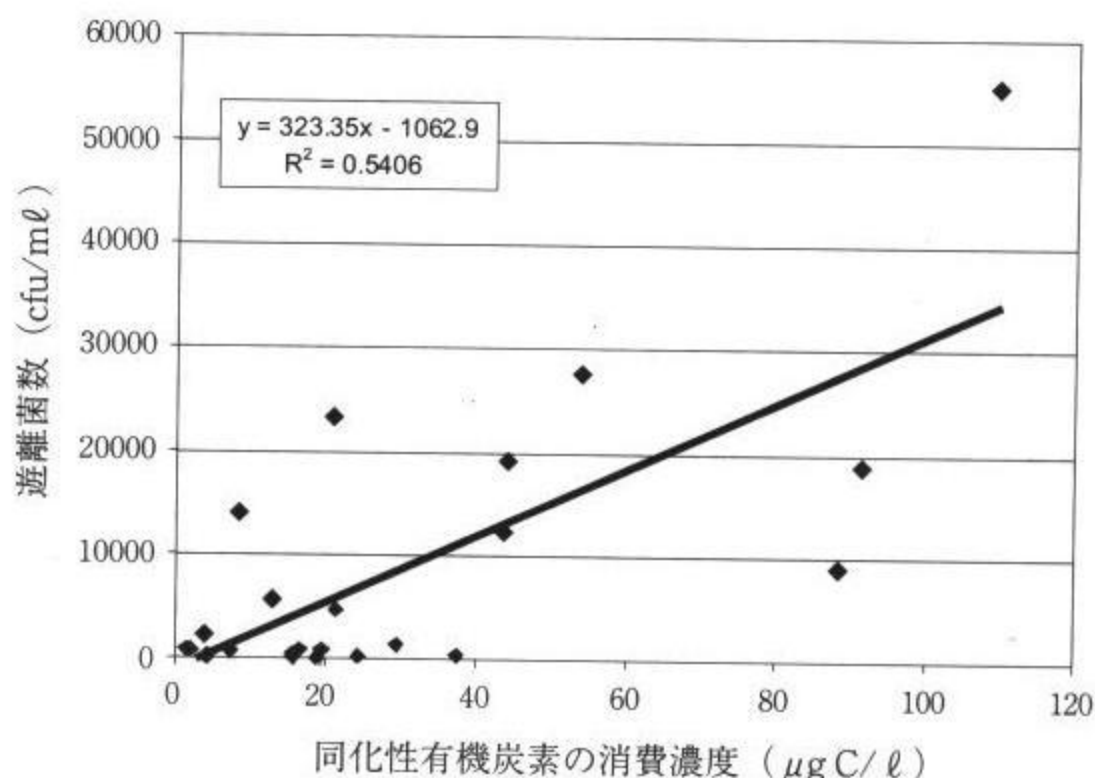


図3 同化性有機炭素濃度と遊離菌数

ことが示唆された。

3. おわりに

以上のように、水道管を構成する材料は管内壁における微生物膜の形成に直接的に作用し、同時に水道水中の残留塩素濃度を支配して間接的に微生物膜形成に影響を与えることが明らかとなったが、このような観点から、米国やカナダなどの北アメリカにおいては、水道管材料の影響を受けにくいモノクロルアミンを塩素に代わる水道水殺菌剤として用いる例も増加しつつある。

さらに TOC 濃度のみから微生物膜形成を論じることは不十分であり、管材料と AOC の関連を含めて考慮する必要がある。水道水の微生物学的水質保持にはこれらの要素を総合的に考慮する必要があると思われる。

もとより微生物工学的に複雑な系である生物膜形成の防除と衛生細菌学的水質保持にはさらなる試験研究が必要であるが、このような米国における試みは日本における水道水供給に係る諸問題を考えるうえで興味深いと思われる。

参考文献

1) 水谷敦司, 相馬英明, 田中壽晃, 島津昌光, 遠山忠, 張裕喆, 菊池慎太郎; レーザー照射による抗酸化チタン材

の作成と海洋汚損生物付着防除への応用可能性, 環境技術, **45**, (10), 756-762, 2006.

- 2) M.R.W.Brown and P.Gilbert: Sensivity of biofilms to antimicrobial agents, *J. Applied Bact.*, **74**, 87-97, 1993.
- 3) J.W.Costerton, K.J.Cheng, G.G.Geeseey, T.I.Ladd, J.C.Nickel, M.Dasgupta and T.J.Marrie; Bacterial biofilms in nature and disease, *Ann. Rev. Microbiol.*, **41**, 435-464, 1987.
- 4) P.Niquette, P.Servais and R. Savoir: Impacts of pipe materials on densities of fixed bacterial biomass in a drinking water distribution system, *Wat. Res.*, **34**, (6), 1952-1956, 2000.
- 5) Y.C.Chang, L.P.Michael, J.Biggerstaff, A.A.Randall, A.Schulte and J.S.Taylor; Diect estimation of biofilm density on different pipe material coupons using a specific DNA-probe, *Molecular and Cellular Probes*, 17, 237-243, 2003.
- 6) American Public Health Association; Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 19th ed. Washington, DC, 1995.
- 7) M. W. LeChevallier, W. Shilz and R. G. Lee; Bacterial nutrients in drinking water, *Appl. Environ. Microbiol.*, **59**, 857-862, 1991.
- 8) D. Van der Kooij; Assimilable organic carbon as an indicator of bacterial regrowth, *J. Am. Water Works Assoc.*, **84**, 57-65, 1992.
- 9) Isabel C. Escobar and Andrew A. Randall; Sample storage impact on the assimilable organic carbon (AOC) bioassay, *Water Research*, **34**, (5), 1680-1686, 2000.
- 10) Isabel C. Escobar and Andrew R. Randall; Assimilable organic carbon (AOC) and biodegradable dissolved organic carbon (BDOC): Complementary measurement, *Water Research*, **35**, (18), 4444-4454, 2001.