

集合住宅の給水・給湯用銅配管のマイクロジェット 潰食機構の解明：給湯用銅管の潰食現象に及ぼす マイクロバブルの影響

著者	世利 修美, 境 昌宏, 山田 豊
雑誌名	室蘭工業大学地域共同研究開発センター研究報告
巻	20
ページ	1-5
発行年	2009-12
URL	http://hdl.handle.net/10258/00009098

集合住宅の給水・給湯用銅配管の マイクロジェット潰食機構の解明

— 給湯用銅管の潰食現象に及ぼすマイクロバブルの影響 —

世利 修美^{*1}・境 昌宏^{*1}・山田 豊^{*2}

1 緒言

強制循環式給湯システムの銅配管に発生する潰食現象に関しては、これまでに多くの研究^{(1)~(6)}がなされている。著者らは、銅管の潰食は給湯水中の溶存酸素濃度が給水中のそれより高い場合に発生しやすいことを報告し⁽⁷⁾⁽⁸⁾、潰食は過飽和溶存空気の影響が大きいことを示した。すなわち、過飽和溶存空気が管内の圧力変化によって気泡化し、発生した気泡による皮膜破壊が潰食の主要因と推定された。このことから、十分な脱気は銅管の潰食抑制に有効とされ、実機強制循環式給湯システムへの気水分離機設置によって溶存空気を除去することで潰食の発生あるいは進行が抑制できることを明らかとした⁽⁷⁾。しかしながら、潰食の主因である気泡挙動について、これまで詳細に検討された報告は見当たらない。

本研究では、CFD 解析および通湯試験を実施して気泡径の違いと潰食発生の関係を調査した。

2 実験方法

2.1 CFD 解析

CFD 解析には市販ソフトの FLUENT ver.6.3 を用いた。外径 22.22mm、肉厚 0.81mm の銅管とこれに適合するエルボ継手を配管した内部を計算領域とし、これを約 15 万メッシュに分割した。計算では液流れ方向に沿った配管中心面について対称とし、液流

れを連続相、気泡を分散相として取り扱った。液速度分布の計算は、非圧縮性粘性流体の基礎方程式として質量保存の式⁽⁹⁾および運動量保存の式⁽⁹⁾を用いた。本計算条件（後述）による配管内のレイノルズ数は 64,640 であり、液流れは乱流と見込まれたので、乱流モデルとして標準 $k-\epsilon$ モデル⁽¹⁰⁾を適用した。

気泡の軌跡の計算は次のように行った。まず、気泡の位置および速度を設定し、気泡が存在する位置での液速度を用いて流体抵抗力を求める。次いで、圧力勾配力、重力、浮力、付加質量力を考慮した気泡の運動方程式を、気泡径をパラメータとして Euler-Lagrange 法⁽¹⁰⁾によって計算した。ただし、気泡の存在比（ボイド率）は極めて低いので、気泡の存在は液速度場に影響を与えないとした。液に対する気泡の追従性が高いことや、微細気泡の内圧は高いので、気泡の合一や分裂は起こりにくく、気泡同士の相互作用は無視できるとした。以上の仮定の下に、配管壁に衝突するまでの気泡の軌跡を計算した。計算条件は以下の通りである。

液：水 (333K)、液粘度： $0.47 \times 10^{-3} \text{Pa}\cdot\text{s}$ 、液密度： 983.2kg/m^3 、入口における平均液速度： 1.5m/s 、出口圧力： 0Pa-gauge 、気体：空気、気体密度： 1.204kg/m^3 、気泡径： $20 \mu\text{m} \sim 2 \text{mm}$ 、導入気泡数：1,000 個、気泡導入箇所：配管の入口。

2.2 通湯試験

Fig.1 に通湯試験装置の概略図を示す。通湯試験装置は高架水槽、加熱式密閉型貯湯槽、給水管、往管、還管、膨張管、供試配管部および管内確認用のポリカーボネート製透明配管から構成されている。高架水槽および加熱式密閉型貯湯槽はいずれも 0.5m^3 の

*1 もの創造系領域

*2 ショーワ(株)・(元住友軽金属(株))

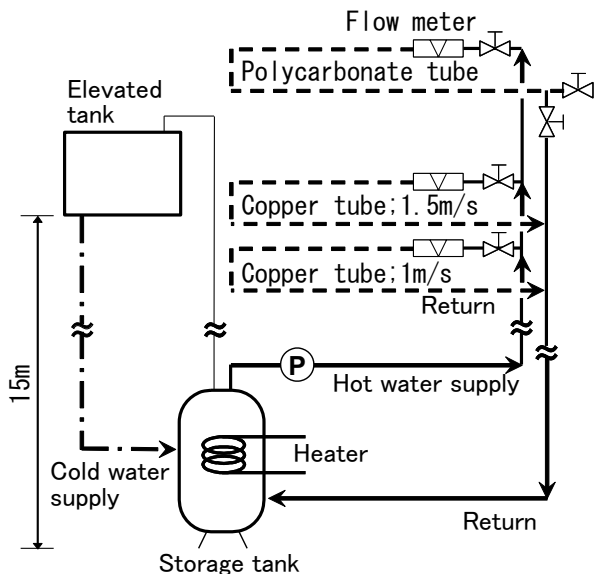


Fig.1 Schematic diagram of model plumbing system of hot water forced circulating.

Table 1 Typical analysis of test water.

pH	6.8
Conductivity (μ S/m)	81
Total hardness (CaCO_3 mg/L)	20.0
Ca hardness (CaCO_3 mg/L)	16.1
M alkalinity (CaCO_3 mg/L)	17.3
SO_4^{2-} (mg/L)	8.0
Cl^- (mg/L)	7.0
SiO_2 (mg/L)	9.8

容積を有し、高架水槽は貯湯槽よりも 15m 高所に設置した。供試材には外径 22.22mm、肉厚 0.81mm のリン脱酸銅管硬質材を用い、試験水として名古屋市水道水を使用した。Table 1 に試験水の水质分析結果の一例を示す。

試験では、試験水を貯湯槽内で 333K に加温し、これを往管、供試配管部、還管の順にポンプにて循環させた。供試配管部では 3 系統に分配され、各供試管入側のバルブによって流速を 1m/s および 1.5m/s に調整した。溶存空気の指標となる溶存酸素濃度は、試験期間を通して高架水槽内では 7.5~8.4ppm、供試管出側給湯水では 7.4~9.4ppm であり、給湯水の方が高い傾向であった。これは、潰食が発生する強制循環式給湯システムでの傾向と同一であった。なお、溶存酸素の分析は JIS K 0101.24.2 に従ったウインクラアジ化ナトリウム変法によって実施した。ポリカーボネート製透明配管にて管内の流動状態を確認するとともに、試験開始 6 ヶ月後の供

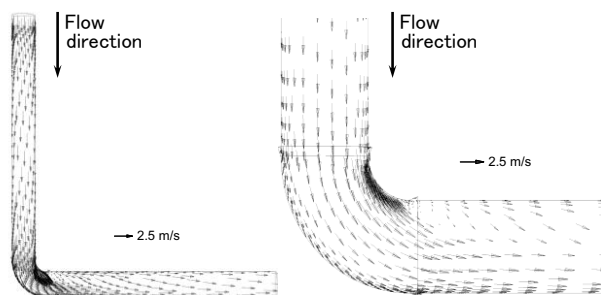


Fig.2 Velocity vector of liquid for 20A downward pipe system, temp. : 333K, flow rate : 1.5m/s, pressure of outlet : 0Pa-gauge.

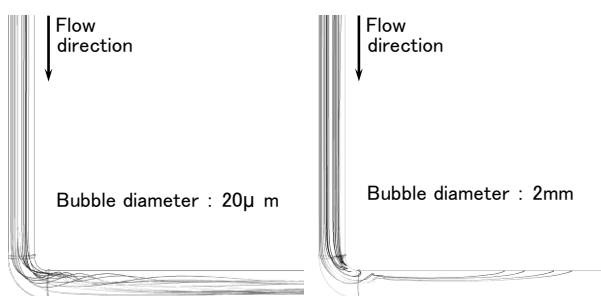


Fig.3 Bubble trajectories for 20A downward pipe system temp. : 333K, flow rate : 1.5m/s, pressure of outlet : 0Pa-gauge.

試管の腐食状況を調査した。

3 結果

3.1 CFD 解析結果

Fig.2 に下向きの液流れに対する配管中心面の液速度ベクトルを示す。計算の結果、エルボ継手の内 R 部の液速度 2.4m/s に対して外 R 部のそれは 0.2m/s と低くなった。また、内 R 部の高液速度部分の先では急激に液速度が低下した。次に、Fig.3 に、この液速度場に径の異なる気泡を導入した場合の気泡軌跡を示す。なお、気泡径は 20 μ m~2mm まで変えて計算したが、ここでは微細気泡（以後、本報ではマイクロバブルと称す）、粗大気泡（以後、本報ではミリバブルと称す）の代表として、それぞれ 20 μ m と 2mm の気泡径による軌跡を示した。マイクロバブルは、管内を垂直に降下し、その多くがエルボ継手内 R 側へ流れた。そして、エルボ継手下流側近傍の配管に接近した後、下流側直管にて配管全体に広がって流れた。一方、ミリバブルではエルボ継手まではマイ

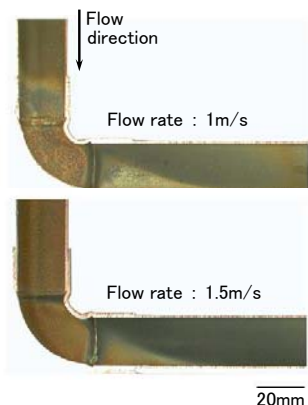


Fig.4 Inner surface of test tubes.

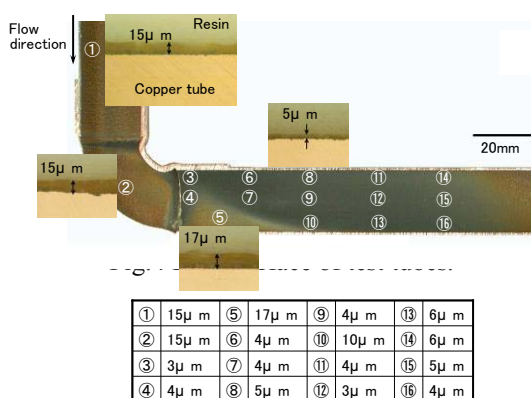


Fig.5 Thickness of scale on test tube at flow rate of 1.5m/s.

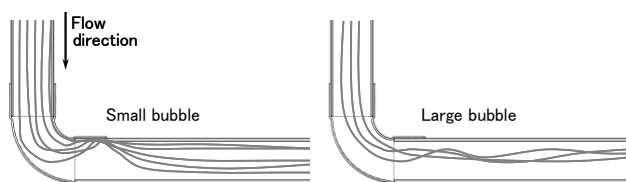


Fig.6 Typical visualization of bubbles flow nearby elbow in the transparent tube at flow rate of 1.5m/s.

クロバブルと同様の流れを示したが、エルボ継手下流側の直管部では配管の上部に気泡が集積して流れる挙動が示された。なお、マイクロバブルの軌跡は200μmの気泡径まで同様であった。

3.2 通湯試験結果

Fig.4に試験開始6ヵ月後の各供試材の内面状況を示す。いずれの供試材もエルボ継手下流側を境界として内面変色の差異が観察された。すなわち、同位置より上流側の配管およびエルボ継手ではほぼ全面で黄土色のスケールが見受けられ、下流側の配管で

は黒色スケールが観察された。この様相の差異の調査としてスケール厚さを確認した。Fig.5に流速1.5m/s 供試材の各位置におけるスケール厚さを示す。エルボ継手上流側配管、エルボ継手ならびにエルボ継手下流側配管の一部に見られる黄土色部のスケール厚さは15μm以上であった。一方、エルボ継手下流側配管の黒色部のスケール厚さは6μm以下と黄土色部より薄かった。なお、スケールの成分は、X線回折分析ならびに赤外分光分析によって、黄土色部がオルトケイ酸銅、黒茶色部が酸化銅、亜酸化銅と同定された。

透明配管による管内流動状態の観察では、透明配管出側のバルブを循環から放流に切り替えると、管内の圧力が低下してミクロンサイズのマイクロバブルが発生し、管内が白濁した。また、白濁水には若干のミリサイズのミリバブルも混在していた。なお、管内で観察されたマイクロバブルは気泡の上昇速度から60~100μmと推定された。Fig.5に流速1.5m/sにおける90°エルボ継手近傍での異なる気泡径による特徴的な気泡軌跡の目視確認結果の概略図を示す。流れ方向は下向きである。マイクロバブルは、管内を下向きに流れ、その一部はエルボ継手内R部に漸近した。そして、50~100mm程度の範囲で渦を巻くような乱れた流動を示し、その後は乱れが治まって管内に広がって流れた。一方、ミリバブルは、マイクロバブルと同様に管内を下向きに流れ、その後のエルボ継手下流では合一して管中央部から上部を線上に流れた。これらの気泡軌跡はCFD解析結果と概ね一致するものであった。

4 考察

4.1 潰食発生の要因

通湯試験における流速1m/sおよび1.5m/s 供試材では潰食の発生は認められなかったが、供試材各部でのスケール厚さが異なった。Fig.6に漏洩事故の多かったエルボ継手近傍での内面状況の一例を示す。通湯試験供試材では、潰食発生事例の潰食発生部位と同位置にてスケール厚さが3~6μmと薄く、これは、潰食の兆候を示唆するものであった。一方、通湯試験での管内の流動状態の観察において、エルボ継手下流側では特異的な状況が観察され、マイクロバブルは同位置にて乱れた流動状態を示した。CFD解析における液速度分布によれば、エルボ下流側では液速度に急激な低下が確認されており、この部分では液流れに乱れが発生していることを示唆してい

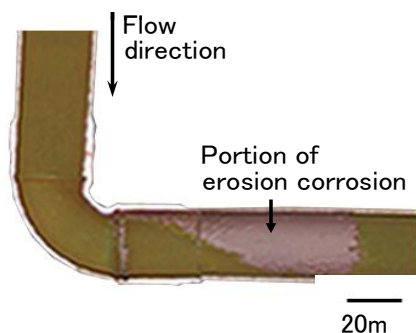


Fig.7 Typical erosion corrosion of copper tube nearby elbow

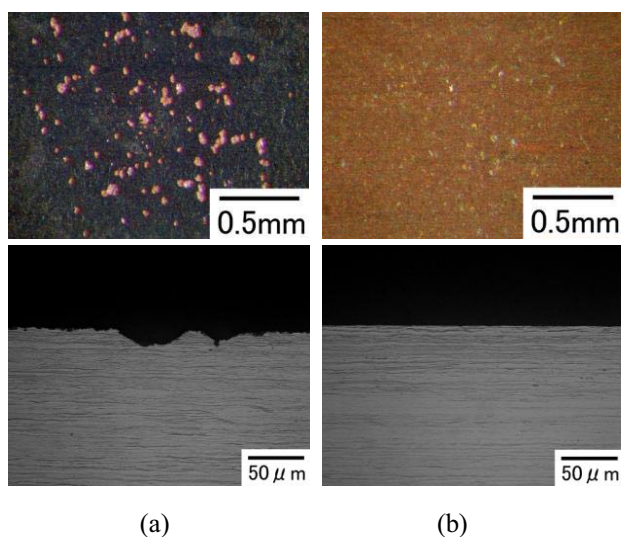


Fig.8 Inner surface and cross section of test tubes, (a) with micro-bubbles, (b) without micro-bubbles.

る。すなわち、マイクロバブルでは浮力より流体抵抗が支配的となり、その軌跡は液流れの影響を強く受けるため、エルボ継手下流側にて乱れた流動状態が示されたものと考えられる。

以上のことから、マイクロバブルではエルボ継手下流側での液の乱れに従って同位置での配管管壁への衝突頻度も多いものと推測され、潰食発生に対して大きな要因であることが伺われた。さらに、潰食発生事例では縦管、横引管の配管設置方向とは無関係に、Fig.7に示した腐食発生状況と同形態での腐食がエルボ継手下流側配管で観察されている。潰食の発生頻度の高い 20A や 25A 等の細径の銅管⁽¹¹⁾⁽¹²⁾では、CFD 解析による液速度分布は配管設置方向とは無関係に同一であるため、マイクロバブルの軌跡も配管の設置方向に寄らず同様の傾向を示すものと考えられる。このこともマイクロバブルが潰食発生に関与している裏付けと考えられた。

4.2 潰食発生に及ぼすマイクロバブルの影響

潰食発生に及ぼすマイクロバブルの影響を検証するため、孔径 2mm のノズルから噴出させたマイクロバブル含有あるいは無含有ジェット流を銅管表面に衝突させる試験（以後、ジェット試験）を、名古屋市水道水を使用し、液温 328K、流速 10m/s で 3 ヶ月間行った。Fig.8 に試験後の供試管の内面および断面状況を示す。マイクロバブル含有ジェット流では黒色の内表面の中に銅色の部位が観察され、同部位の断面では潰食が確認された。一方、マイクロバブルが無い場合には若干表面が変色している程度であり、断面観察からも潰食の兆候は認められなかった。これらの結果から、潰食発生に対してはマイクロバブルの影響が強いものと考えられた。なお、ジェット試験においてマイクロバブルの無い場合の流体せん断応力は 271Pa であり、潰食が頻発する細径銅管のその 15 倍以上である⁽¹²⁾。このことも、潰食の主要因が、流体せん断応力、すなわち、流速でないことを示している。

4.3 潰食発生メカニズム

強制循環式給湯システムにおいて給湯水の溶存空気が給水のそれより多い場合、使用環境により配管内に圧力変化が生じてマイクロバブルが発生する。気泡の内外圧差は気泡径に反比例し⁽¹²⁾、マイクロバブルでは内圧は高く気泡同士の合一や破泡も少ないため、気泡の状態が維持される。潰食は、このマイクロバブルが管内の流動状態に従って管壁へ衝突し、酸化皮膜やスケールを継続的に破壊して発生、進行するものと考えられた。なお、流体力学的解析や通湯試験（管内圧力 0.4MPa）の管内流動状態の観察からも⁽¹²⁾、マイクロバブルの発生はエルボ継手での圧力差に起因する可能性は低いものと考えている。さらに、マイクロバブルによる酸化皮膜およびスケールの破壊メカニズムが、気泡そのものによるものか、あるいは気泡破壊時の圧力伝播⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾に起因するものであるかは今後の検証が必要である。

5 結言

潰食発生に関して、CFD 解析によって気泡軌跡を計算し、通湯試験による管内流動状態の観察ならびに腐食状況を調査して潰食現象に及ぼす気泡の影響を調べ、以下の結論を得た。

- (1) ミクロンサイズの微細気泡（マイクロバブル）はエルボ継手下流側にて特異的な流動を示すため、管壁への衝突頻度が高い。

- (2) マイクロバブルを含む水流にて潰食が再現された。
- (3) 潰食は、マイクロバブルが管内流動状態によって管壁へ衝突し、酸化皮膜、スケールが継続的に破壊されて発生、進行するものと推定された。

謝辞

流体力学的解析の実施にあたり、名古屋大学大学院工学研究科・坂東芳行元准教授、安田啓司准教授ならびに同研究室の学生の方々のご協力に感謝いたします。

文献

- (1) M.F.Obrecht, Corrosion, 18(1962), 189-196.
- (2) 佐藤史郎, 匂坂喜代治: 住友軽金属技報, 12(1971), p231-244.
- (3) L.Knutsson, E.Mattsson and B.E.Ramberg, Br.Corros J.7 (1972), p208-211.
- (4) 佐藤史郎, 永田公二, 下野三樹雄: 伸銅技術研究会誌: 19(1980), p50-63.
- (5) H.Yamamoto and H. Kunieda : Proceeding of the International Symposium on Corrosion of Copper and Copper Alloy in Building, Tokyo (1982), p146-156.
- (6) (社) 日本銅センター建築用銅管腐食対策委員会 : 建築配管用銅管腐食対策指針(1987), p14-16.
- (7) 河野浩三, 山田 豊, 中野 稔: 銅と銅合金, 46(2007), p212-215.
- (8) 山手利博, 大久保泰和, 表 幸雄, 山田 豊, 河野浩三, 木村隆則: 空気調和・衛生工学会大会学術講演論文集(2008), p753-756.
- (9) R.B.Bird, W.E.Stewart and E.N.Lightfoot, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons(1960), p83-84.
- (10) FLUENT 6.3 User's guide, Fluent Inc(2006).
- (11) 山田 豊, 河野浩三, 渥美哲郎: 伸銅技術研究会誌, 36(1997), p154-160.
- (12) 鈴木 忍, 山田 豊, 河野浩三: 材料と環境, 58(2009), p99-104.
- (13) 矢部 彰, 後藤瑞希: 特開 2004-121962A.
- (14) 矢部 彰, 森松達昌: 伝熱, 43(2004), p16-18.