給湯用銅管の潰食現象に及ぼす気泡挙動の影響

鈴木 忍*, 山田 豊*, 河野 浩三*

* 住友軽金属工業株式会社 研究開発センター

Effects of Bubble Behavior on Erosion Corrosion of Copper Tubes in Hot-Water Supply System

Shinobu Suzuki*, Yutaka Yamada* and Kozo Kawano*

* Research & Development Center, Sumitomo Light Metal Industries, Ltd

The survey results of recent 120 leakage accidents showed that most of erosion corrosion failures of copper tubes in hot-water forced circulation system have been experienced at the downstream of joints of the return tubes. This tendency was the same as that of the research in 1996. The erosion corrosion of copper tube was observed when the concentration of dissolved oxygen in the hot-supply water was supersaturated and higher than that in supplied tap water. Therefore, it was presumed that erosion corrosion of copper tube was caused by the bubbles formed by pressure change in hot-water forced circulation system. The results of Computational fluid dynamics (CFD) simulations and the observation of the flow pattern in the model plumbing equipment showed that the locus of the micro-bubbles affect of the erosion corrosion of copper tube. According to the Young-Laplace equation, more small bubbles have high pressure in inside of the bubble, and maintain as the bubble without coalesce or collapse of bubbles. Consequently, it could be considered that erosion corrosion of copper tube occurred and propagated when the protective films formed on the tubes surfaces were continuously broken by micro-bubbles.

Key words : hot-water forced circulation system, copper tube, erosion corrosion, dissolved air, computational fluid dynamics simulations, micro-bubbles

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ついては、多くの研究^{1)~5)}がなされ、潰食を発生させないためには、流速を1.5 m/s以下とすることが提案されている⁶⁾。そして、著者らは、これまでの研究において、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明らかにするとともに⁷⁾、実配管環境を模擬した通湯試験において、事例と同様な潰食を再現し⁸⁾、潰食は過飽和溶存空気の影響が大きいこと、すなわち、過飽和溶存空気は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因と見込まれ、また、十分な脱気によって銅管の潰食抑制が可能なことを明らかにした。しかしながら、これまでに潰食の発生に及ぼす気泡挙動の影響を詳細に検討した結果は見当たらない。

本研究では、給湯用銅管に生じた潰食の最近の事例調査を行って発生傾向を再確認し、流体力学的解析および通湯試験を実施して銅管の潰食現象に及ぼす気泡挙動の影響を調査した。

2. 事例調査および実験方法

2.1 事例調査

強制循環式給湯システムに使用された銅管において、2004~2006年の3年間で発生した潰食による漏洩事故120件について発生状況を調査した。そして、これらの

潰食発生事例のうちの27例と潰食が発生しなかった事例の31例に関して、給水中および給湯水中の溶存酸素濃度を測定し、潰食発生有無との関係で調査した。溶存酸素濃度は温度などの影響を受けにくいJIS K 0101.24.2に従ったウインクラーアジ化ナトリウム変法によって次の通りに測定した。蛇口より水道水あるいは給湯水を100 mlのフラン瓶に採水し即座に硫酸マンガン溶液および水酸化ナトリウム溶液を各1 ml添加して溶存酸素をマンガンと反応させて水酸化マンガンを沈殿させる。そして、この沈殿をヨウ素イオンの存在下で酸を加えて溶解させ、溶存酸素量に対応して遊離したヨウ素をチオ硫酸ナトリウム溶液にて滴定し溶存酸素を定量した。

2.2 流体力学的解析

解析には市販のソフトであるFLUENT ver. 6.3を使用した。計算領域は外径22.22 mm、肉厚0.81 mmの銅管とこれに適合するエルボ継手を配管した内部とした。計算領域を約15万メッシュに分割し、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、気泡を分散相とした。液速度分布は、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⁾を用いて計算した。配管内の液流れは乱流($Re = 64,640$)であるので、乱流モデルには標準 $k-\epsilon$ モデル¹⁰⁾を適用した。

気泡の軌跡は、気泡の位置および速度を設定し、連続相の局所的な速度、すなわち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、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Euler-Lagrange法¹⁰⁾によって計算した。気泡径をパラメータとして計算を行い、気泡軌跡に及ぼす気泡径の影響を検討した。ただし、気泡の存在比(ボイド率)は極めて

* 〒455-8670 名古屋市港区千年3-1-12 (3-1-12, Chitose, Minato-ku, Nagoya, 455-8670 Japan)

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

2.3 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 0.5 m^3 の高架水槽、 0.5 m^3 の加熱式密閉型貯湯槽、給水管、往管、還管、膨張管、3 系統の供試配管部および管内観察用のポリカーボネート製透明配管から構成されている。供試材は外径 22.22 mm 、肉厚 0.81 mm のリン脱酸銅管硬質材である。なお、高架水槽は貯湯槽よりも 15 m 高所に設置した。Table 1 に試験水として使用した名古屋市水道水の水質分析結果の一例を示す。

試験では貯湯槽内の 333 K に加温した試験水をポンプによって往管、供試管、還管の順に循環させた。管内流

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

Table 1 Typical analysis of test water.

pH	6.8
Conductivity ($\mu\text{S/m}$)	81
Total hardness ($\text{CaCO}_3 \text{ mg/L}$)	20.0
Ca hardness ($\text{CaCO}_3 \text{ mg/L}$)	16.1
M alkalinity ($\text{CaCO}_3 \text{ mg/L}$)	17.3
SO_4^{2-} (mg/L)	8.0
Cl^- (mg/L)	7.0
SiO_2 (mg/L)	9.8

速は各供試管入側のバルブの調整によって 1 m/s 、 1.5 m/s および 3 m/s とした。溶存酸素は、試験期間を通じて高架水槽内では $7.5 \sim 8.4 \text{ ppm}$ 、供試管出側から採取した給湯水では $7.4 \sim 9.4 \text{ ppm}$ であり、給湯水の方が高い傾向であった。試験は 6 カ月間実施して透明配管での管内流動状態を観察するとともに、供試管の腐食状況を調査した。

3. 結 果

3.1 事例調査結果

Fig. 2 に事例調査結果のまとめを示す。120 件の事例中で還管が 66 件、往管が 10 件、その他・不明が 44 件と還管に多く漏洩事故が発生していた。また、配管サイズ別には還管での使用の多い 20 A が 54 件、 25 A が 40 件であった。部位別では継手部近傍が 92 件と最も多く、継手種類としてはエルボ継手が 70 件と最多であった。また、発生箇所は通湯方向に対して継手下流側の銅管での発生が多く、その発生率は 90% 以上であった。今回の調査結果は 1996 年の結果⁸⁾と同様であった。Fig. 3 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。縦管、横引管の配管設置方向とは無関係に、継手下流側銅管部に腐食が発生してスケールの生成も認められずに銅が露出していた。

Fig. 4 に潰食発生有無と給水および給湯水との溶存酸素濃度との関係を示す。溶存酸素濃度は溶存空気を定量化すべくその指標として測定した。潰食が発生した事例においては、給湯水中の溶存酸素濃度は給水中より高い値を示した。溶存酸素濃度は温度の上昇とともに減少す

Fig. 2 Frequency of leakage of copper tube by erosion corrosion in hot water forced circulation system. Leakages were classified according to the position (a) in system, and (b) in plumbing tube. Leakages nearby joints were also classified to (c) kind of joints.

Fig. 3 Typical erosion corrosion of copper tube nearby elbow.

Fig. 4 Leakage occurrence by erosion corrosion under relation between dissolved oxygen concentration in tap water and that in hot water ; Leakage occurred : $\times$, No leakage : $\circ$.

るため、通常の給湯水温度は 333 K 程度で管理されているから同一圧力であれば給湯水の溶存酸素濃度の方が温度の低い水道水より低くなる。しかしながら、調査結果に従えば、溶存酸素濃度は給湯水の方が水道水より高く、潰食が発生する箇所では給湯配管内の圧力が局部的に高くなって、配管システム系内で発生した気泡が加圧溶解されていることが推測される。よって、銅管の潰食発生は、配管システムの影響によって過飽和となった給湯水中の溶存酸素、すなわち過飽和溶存空気が影響していることが確認された。

3.2 流体力学的解析結果

Fig. 5 に配管の中心面における液速度分布を示す。流れ方向は下向きである。計算結果によれば、エルボ継手

Fig. 5 Velocity vector of liquid colored by velocity magnitude on symmetry plane for 20 A downward pipe system, temp. : 333 K, flow rate : 1.5 m/s, pressure of outlet : 0 Pa-gauge.

Fig. 6 Bubble trajectories colored by distance between bubble and wall for 20 A downward pipe system.

の内 R 部分で液速度は 2.4 m/s と高く、それより先では急激に液速度が低下した。次にこの液速度場において気泡を導入してその軌跡を計算した結果を示す。Fig. 6 に気泡径を変えた場合の管内の気泡軌跡を示す。気泡径が 20 μm と微細な場合、管内を垂直に降下した気泡の多くはエルボ継手下流側へ流れ、その後、エルボ継手下流側近傍の配管に漸近し、下流側の直管では気泡が配管全体に広がって流れる挙動を示した。一方、2 mm の粗大な気泡ではエルボ継手までは 20 μm と同様の軌跡を示し、その後、エルボ継手下流側の直管部で配管の上部に気泡が集まって配管壁に衝突する挙動が確認された。なお、20 μm 気泡径にて確認された軌跡は 200 μm 気泡径でも同様であった。

3.3 通湯試験結果

Fig. 7 に通湯試験後の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の直管とエルボ継手上流で管内面スケール生成の違いによる内面変色の差異が観察された。特にエルボ継手下流側では黒茶色の変色の程度が大きく流速 3 m/s 供試材では Fig. 8 に示すようにエルボ継手下流側で深さ 0.08 mm の潰食が観察された。Fig. 9 に流速 1.5 m/s 供試材の各位置におけるスケール厚さを示す。黄土色部分では厚さ 15 μm 以上のスケールが観察されたが、黒茶色部のスケール厚さは 6 μm 以下と薄かった。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、黒茶色部が酸化銅、亜酸化銅、黄土色部がオルトケイ酸銅と同定された。

透明配管での管内の流動状態の観察において、透明配管出側のバルブ切り替えて循環から放流にすると、管内

Fig. 7 Inner surface of test tubes.

Fig. 8 Inner surface and cross section of test tube at flow rate of 3 m/s.

の圧力低下によりミクロンサイズの微細気泡が発生し、管内が白濁する状況が確認された。また白濁水にはわずかにミリサイズの粗大な気泡も混在していた。なお、微細気泡径は管内における気泡の上昇速度から 60~100 μm

Fig. 9 Thickness of scale of test tube at flow rate of 1.5 m/s.

と推定された。Fig. 10 に流速 1.5 m/s における 90° エルボ継手の前後での気泡径の違いによる気泡軌跡の目視観察結果の概略図を示す。微細な気泡は、管内を下向きに降下した後エルボ継手内 R 側に流れ、その後管内に広がって流れた。一方、粗大な気泡は、微細気泡と同様に管内を下向きに流れた後、エルボ継手下流では合一して管上部を流れる状況が観察された。

4. 考 察

4.1 潰食発生の要因

これまでの結果から潰食発生は流速に起因する銅管表面での流体せん断応力および気泡挙動が主要因と考えられた。そこで、流体せん断応力について計算すると、外径 22.22 mm、肉厚 0.81 mm の銅管内を 333 K の水が平均流速 1.5~3 m/s で流れた場合、流体せん断応力 τ_w は Brasius の式 (1) から、6~18 Pa と求められる。

$$\tau_w = 0.03956 \rho \cdot U m^2 \cdot Re^{-0.25} \quad (1)$$

ただし、 $Re = 3 \times 10^3 \sim 10^5$

ρ : 密度, $U m$: 平均流速, Re : レイノルズ数

一方、孔径 2 mm のノズルから噴出させたジェット流を銅管表面に衝突させる試験を、名古屋市水道水を使用し、液温 328 K、流速 10 m/s で 3 カ月間行った。Fig. 11 に試験後の供試管断面状況を示すが、潰食の発生は確認されなかった。この時の流体せん断応力は 271 Pa であり、先の平均流速 1.5~3 m/s の流体せん断応力の 15 倍以上

Fig. 10 Visualization of bubbles flow nearby elbow in the transparent tube at flow rate of 1.5 m/s.

Fig.11 Cross section of test tube in jet test.

Fig.12 Comparison of bubble trajectories and inner surface of test tube at flow rate of 1.5 m/s.

である。また、Fig. 12 に示すように、流体力学的解析による液速度分布から求めた各位置の流速と通湯試験後のスケール厚さとの関係においても、流速が高くなるにつれてスケールが薄くなる傾向は見られない。これらのことから、流体せん断応力、すなわち、流速のみの要因で潰食が発生する可能性は低いものと考えられる。

通湯試験における流速 1 m/s および 1.5 m/s 供試材では潰食の発生は認められなかったものの、供試材でのスケール厚さは、潰食発生事例における潰食発生部位と同位置にて 3~6 μm と薄くなっていた。これは、潰食の兆候を示唆するものであり、さらに長期に試験を行った場合には潰食発生事例と同様の潰食が発生して銅の侵食が生じるものと考えられた。一方、通湯試験装置の透明配管における気泡軌跡と流体力学的数値解析による気泡軌跡は気泡径の違いに応じて同様な差異を示した。目視観察および流体力学的解析結果における気泡軌跡によれば、ミクロンサイズの微細気泡の流れる領域は、通湯試験供試材においてスケールが薄かった部位とおおむね一致する結果となった。このことから、微細気泡は特異的な流動状態の中で潰食発生箇所の管壁への衝突頻度も多いものと推測され、潰食発生に対して微細気泡が関係していることが伺われた。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. 3 に示した腐食発生状況と同形態での腐食が継手部下流側銅管部で観察されている。これは、微細気泡では浮力よりも流体抵抗力が支配的となって配管方向には関係なく潰食が発生するためと推定され、このことも微細気泡が潰食発生に関与している裏付けと考えられた。

以上のことから、潰食発生は流速によるせん断応力の影響に加え、配管システム内に発生した気泡の中で特に管内の流動状態の影響を強く受けるミクロンサイズの微細気泡が大きく影響しているものと考えられた。

4.2 潰食発生メカニズム推定

使用環境として、経験的に給湯水の溶存空気が給水のそれより多い場合、給湯水の使用などにより配管内の圧力変化が生じて主にミクロンサイズの微細気泡が発生する。Young-Laplace の式(2)に従えば、気泡の内外圧差 ΔP は表面張力: σ と気泡径: d で表される。

$$\Delta P = 4\sigma/d \quad (2)$$

333 K の空気に接触する水の表面張力を用いて ΔP を試算すると、2 mm の気泡径では内外圧差が 0.00013 MPa であるが、20 μm では 0.013 MPa となる。したがって、同一条件であれば、気泡径が小さいほど気泡内圧は高くなり、気泡同士の合一や破泡も少なく気泡の状態で維持される。潰食は、この微細気泡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が継続的に破壊されて発生、進行するものと考えられた。なお、気泡発生箇所に関しては、流体力学的解析によるエルボ継手内部で生じる圧力差が 0.03 Pa とわずかであったこと、ならびに透明配管での目視観察でも循環通湯（最高管内圧力: 0.4 MPa）の際にエルボ継手において気泡発生が見受けられなかったことから、エルボ継手での圧力差による気泡発生の可能性は低いものと推測され、配管システム内における気泡発生箇所の探索は今後の検討課題と考えている。さらに、酸化皮膜およびスケールの破壊メカニズムが、高圧の微細気泡の衝突のみに起因するものであるか、あるいは微細気泡が壁面に衝突して崩壊した際の圧力伝播¹¹⁾⁻¹²⁾に起因するものであるかは更なる検証が必要である。

5. 結 言

潰食発生に関して、事例調査によってその発生傾向を確認した。また、市販の流体解析ソフトを使用し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挙動の影響を調べ、以下の結論を得た。

- (1) 事例調査の結果、潰食は還管の比較的細い径にて多く発生し、発生位置は継手部下流の漏洩件数が最多となった。この傾向は 1996 年の調査時と同一であった。
- (2) 流体力学的解析ならびに通湯試験によって、潰食発生に影響を及ぼす気泡はミクロンサイズの微細気泡と考えられた。
- (3) 潰食は、微細気泡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して発生、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。

参 考 文 献

- 1) M. F. Obrecht, *Corrosion*, **18**, 189 (1962).
- 2) S. Sato and K. Sagisaka, *Sumitomo Light Met. Tech. Rep.*, **12**, 231 (1971).
- 3) L. Knutsson, E. Mattsson and B. E. Ramberg, *Br. Corros. J.*, **7**, 208 (1972).
- 4) S. Sato, K. Nagata and M. Shimono, *J. Jpn. Copp. Brass Res. Assoc.*, **19**, 51 (1980).

- 5) H. Yamamoto and H. Kunieda, Proceeding of the International Symposium on Corrosion of Copper and Copper Alloy in Building, Tokyo, p.146 (1982).
- 6) "Anti corrosion guide for copper pipes used in building pipe lines" (建築配管用銅管腐食対策指針), Jpn. Copp. Develop. Assoc., p.15 (1987).
- 7) K. Kawano, Y. Yamada and S. Nakano, *J. Jpn. Res. Inst. Adv. Copp.-base Mat. Tech.*, **46**, 212 (2007).
- 8) Y. Yamada, K. Kawano and T. Atsumi, *J. Jpn. Copp. Brass Res. Assoc.*, **36**, 154 (1997).
- 9) R. B. Bird, W. E. Stewart and E. N. Lightfoot, "Transport Phenomena", John Wiley & Sons, p.83 (1960).
- 10) FLUENT 6.3 User's guide, Fluent Inc (2006).
- 11) A. Yabe, M. Goto, During the pendency of the trial JP 2004-121962A (2004).
- 12) A. Yabe, T. Morimatsu, *J. Heat Trans. Soc. Jpn.*, **43**, 16 (2004).

(Manuscript received August 18, 2008;
in final form November 8, 2008)

要 旨

腐食事例調査において、強制循環式給湯配管システムの銅管に発生する潰食は還管の継手部下流側にて多く発生した。この傾向は '96 年の調査時と同一であった。潰食発生箇所では給湯水の溶存酸素の方が補給水のそれより高く、潰食は管内の圧力変化によって発生した気泡が関与しているものと考えられた。流体力学的解析および透明配管を用いた通湯試験装置での管内流動状態の観察から、ミクロンサイズの微細気泡の軌跡が潰食発生に影響を与えることを確認した。Young-Laplace の式に従えば、気泡径が小さいほど気泡内圧は高くなり、気泡の合一や破泡も少なく気泡の状態が維持される。これらのことから、潰食は、微細気泡によって酸化皮膜やスケールが継続的に破壊されて進行するものと推定した。

キーワード 強制循環式給湯システム, 銅管, 潰食, 溶存空気, 流体力学的解析, 微細気泡