



特集記事・3

寿命100年に挑む水道管

水道用塗覆装鋼管の寿命100年への挑戦

Challenge of Coated Steel Pipe for Water Service to 100-year Lifetime

住友金属工業(株) 総合技術研究所 主任研究員 **上村隆之**
Takayuki Kamimura

新日本製鐵(株) 技術開発本部 主任研究員 **吉崎信樹**
Nobuki Yoshizaki

JFE エンジニアリング(株) 総合研究所 主任研究員 **北川尚男**
Takao Kitagawa

JFE エンジニアリング(株) 水道事業部 技術室長(部長) **今井俊雄**
Toshio Imai

1 緒言

水道用塗覆装鋼管は、靱性・延性に富む鋼の材料特性ならびに溶接による一体構造管路の形成を特徴とする耐震管として、上水道分野においては主に導・送水管や配水本管等の比較的大口径・高水圧の基幹管路に多く採用されてきた。水道用鋼管は土壌中へ埋設された環境下で使用されるのが一般的であるため、防食対策が極めて重要である。特に近年では、アセットマネジメントの観点から、管材料の期待耐用年数の長期化に関する需要家の要求が著しく高まりつつある。水道用鋼管においても、外面被覆として従来の瀝青質系に替えて防食性の高い材料のポリウレタン及びポリエチレン被覆(以下、プラスチック被覆鋼管と呼ぶ)を採用するなど、長期耐久性の確保・長寿命化が図られているほか、構造面においても鋼管路の耐震性能を確保するための新技術に関する研究開発が進められている。

本報告では、上記の水道用プラスチック被覆鋼管について、劣化メカニズムから整理した防食寿命の推定方法と、それに基づいて実施された防食寿命推定結果について概説するとともに、鋼管の特性を利用して新たに開発された、断層面のような大規模地盤変状に対応できる耐震管について紹介する。

2 水道用鋼管の防食と寿命の考え方

水道用鋼管で使用される外面被覆には、地中・水中環境での長期耐久性(耐水性、耐塩水性、耐薬品性)は言うまでもなく、鋼管の運搬や埋戻し時において容易に損傷しない衝撃強さ、及び埋設後に腐食性土壌環境から鋼管を保護する電気絶縁性能等が要求される。表1に埋設環境下での被覆材の要求性能を示す¹⁾。土壌中での鋼の平均腐食速度は一般に大きいものでなく、米国における長期埋設試験の結果²⁾や日本にお

ける長期試験の解析結果³⁾からも、腐食が均一に進行するとすれば無防食でも長期に鋼管の性能を維持できることが想定される。特定のある範囲の土壌で使用される鋼管杭等の土木建材^{3,4)}とは異なり、水輸送鋼管は広範囲にわたり異なった土壌にまたがって敷設されるため大きな土壌変化も予想されるために、特に局所的な腐食を引き起こす、いわゆるマクロセル腐食⁵⁾が問題となる。垂鉛めっき配管において1.5年程度で貫通する例も報告されており⁵⁾、マクロセルによる腐食を如何に防止するかが重要となる。マクロセル形成を防止するには、マクロセル間の電流の遮断、すなわち電氣的に絶縁することが極めて重要であり、この観点から電気絶縁性が高いポリウレタンやポリエチレンが長年にわたり水道用鋼管の防食技術として使用されてきている所以である。図1に各種被覆材料の電気絶縁性と衝撃強さ(ASTM G14準拠)を示す。現在、水道用被覆として使用されているポリウレタン、ポリエチレン被覆は、両特性のバランスがよく、優れた被覆材料といえることができる。水道用のプラスチック被覆の構造断面を図2に示す。被覆の膜厚が厚い(2~3mm)ことが特徴であり、有機系のプライマー塗装を施す多層構造となっている。

表1 埋設環境下での要求性能¹⁾

時期	要求性能
運搬時・埋設時	・耐衝撃性 ・耐疵付き性
供用時	化学的性能 ・耐水性 ・電気絶縁性
	機械的性能 ・硬さ ・密着力 ・引張強さ

プラスチック被覆銅管の寿命に関係する要因は、以下の3つが考えられる⁶⁾。

- (1) 被覆材料の酸化劣化：空気中もしくは水中の酸素と結びつくことによって被覆材料の分子が切断され、強度や伸びが低下する。
- (2) 被覆材料への水・酸素透過に伴う銅面腐食：ポリウレタン、ポリエチレン被覆は、水と酸素をほとんど透過しないが、長期に亘り使用する場合は徐々に透過し、その結果、銅面が腐食する。
- (3) 被覆材料の紫外線劣化：太陽光、特にその中でも紫外線により被覆材料の分子が切断され、塗膜表面のチョーキング（白亜化による消失）や伸び率の低下が発生する。

プラスチック被覆銅管が使用される環境は、「気中」、「埋設」、「屋外暴露」に分類することができる。「気中」は、屋内配管や共同溝内配管など太陽光（紫外線）が直接あたらない場所、「埋設」は、地中埋設され地下水など周囲に常時、水がある場所、そして「屋外暴露」は、水管橋や屋外配管など紫外線が直接あたる場所である。寿命に関連して3つの要因を環境別にみると、「気中」は周囲に水が存在せず太陽光も届かないため（1）被覆材料の酸化劣化が、「埋設」は水が存在し太陽光は届かないため（1）被覆材料の酸化劣化と（2）被覆材料へ

の水・酸素透過に伴う銅面腐食が、「屋外暴露」は水が存在しないが太陽光が届くため（1）被覆材料の酸化劣化と（3）被覆材料の紫外線劣化がそれぞれ影響すると考えられる。すなわち（1）酸化劣化は全ての環境で影響するものである。（3）の紫外線劣化についてはプラスチック被覆では、耐候性（紫外線照射）試験の結果から黒色のプラスチック被覆は極めて長期の寿命を有することが報告されており⁶⁻⁸⁾、ここでは詳細に述べない。紫外線劣化によりポリウレタンはチョーキング（白亜化）による減厚現象、ポリエチレンは劣化により物性（伸び）が低下することになるが、特に黒色のプラスチック被覆は紫外線の透過が抑制されるため極表層のみが劣化することになり被覆の物性が損なわれるものではない。

上述のように、プラスチック被覆の寿命を支配する要因は（1）被覆材料自体の酸化劣化と（2）被覆を透過する水・酸素による腐食であるため、要因別の寿命推定試験が実施されており、次章にて詳細に説明する。

3 プラスチック被覆の防食寿命

3.1 プラスチック被覆の酸化劣化

プラスチックの酸化劣化は、酸素と反応することにより分子が切断され、強度や伸びが低下することにより破壊に至る。そこで高温における促進試験を行い、その結果から被覆の使用温度に外挿して寿命を推定することになる。

ポリウレタンの単離シートを高温のオープン中に保持した際の引張り強度の経時変化を図3⁷⁾に示す。初期の引張強度は上昇するが、その後下降に転ずる。初期強度の上昇は、分子間の架橋反応が進むためであり、その後の強度低下は分子切断反応が優勢になるものと考えられる。従って引張強度が最大になる時点を、その温度における寿命と考え、高温での寿命から使用温度に外挿することによって寿命を推定することになる。

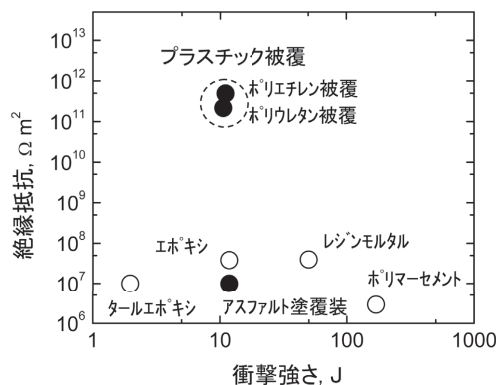


図1 各種被覆材料の物性¹⁾

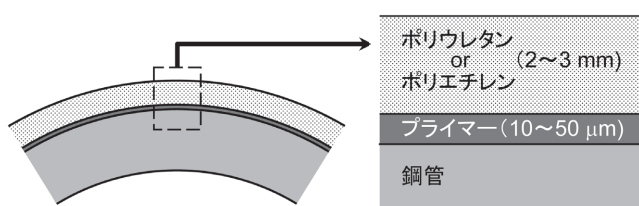


図2 プラスチック被覆の断面概略図

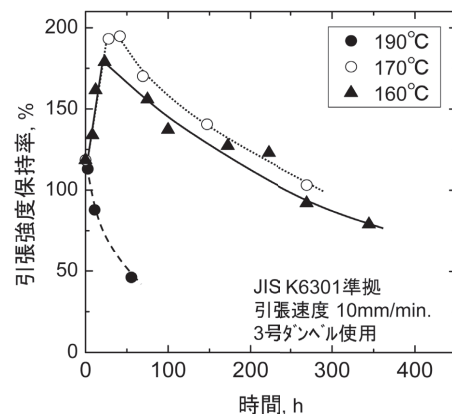


図3 ポリウレタンの引張強度保持率の経時変化⁷⁾

ポリエチレンもポリウレタン同様、実用温度よりも高温で酸化劣化を促進させて寿命を推定する。ポリエチレンの酸化劣化はフリーラジカル生成に続く、ラジカル連鎖反応により進行するため、添加されている酸化防止剤（ラジカル生成防止剤、ラジカル連鎖反応防止剤、過酸化分解剤など）の消費反応で律速される。そこで、酸化防止剤残存量を酸化誘導時間（OIT）で測定する寿命推定⁹⁻¹¹⁾方法が報告されている。OITは示差走査熱量計（DSC）を用いて測定される。窒素雰囲気中で所定温度にまで昇温し、酸素雰囲気に変更後、ポリエチレンの酸化発熱開始までの時間をOITとするものであり（図4）、有効残存酸化防止剤が消費されるとポリエチレンの酸化劣化が急激に始まることになる。

ポリウレタン、ポリエチレンの劣化は化学反応であり、(1) 式に示すアレニウス型の反応になることが報告されている^{7,9-12)}。

$$k = Ae^{-E/RT} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 k ：反応速度定数、 A ：定数、 E ：見かけの活性化エネルギー、 R ：気体定数、 T ：絶対温度である。すなわち各温度で実施した際の寿命の対数と試験温度（絶対温度）の逆数をプロット（アレニウスプロット）し、低温の実使用温度に外挿する方法である。

図5にポリウレタンの引張強度に関するアレニウスプロットの一例を、図6にポリエチレンのOITに関するアレニウスプロットの一例を示す。ポリウレタン、ポリエチレン被覆ともに、適切に設計された被覆は70℃という高温でも100年の寿命が期待できることを示しており、埋設時の温度域ではさらに長期間の寿命が期待される。なおポリエチレンについてはオープンエージング試験においても、同様に長期の耐久性が示されている^{10,11)}。

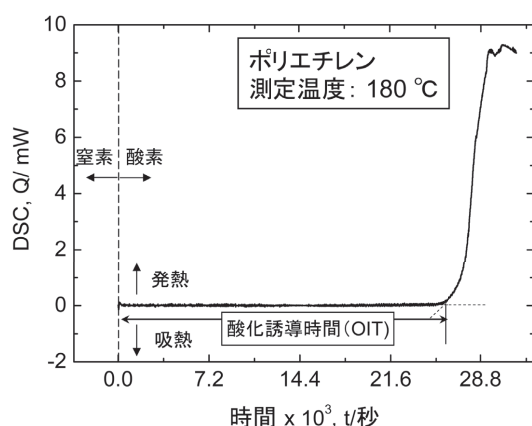
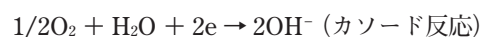


図4 ポリエチレンの酸化誘導時間測定

3.2 プラスチック被覆の水・酸素透過に伴う腐食

プラスチック被覆された鋼材は、被覆が2 mm以上と厚くその腐食量は汎用塗膜に比べて極めて小さいことが予想されるが、長期間の使用を考慮すると厚膜のプラスチック被覆においても水、酸素は透過し腐食が生じるものと考えられる。プラスチックの透過に関して水は酸素に比べて大きいため、腐食は酸素の透過速度に依存する¹³⁾と言われており、以下を前提として酸素の透過からプラスチック被覆鋼材の腐食量の概算を行った^{1,13)}。

- 1) 被覆をプラスチック被覆の単一層とする。
- 2) 被覆厚みは1mmとする
- 3) 反応は $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}$ （アノード反応）



とする。すなわち Fe ：1mol腐食するためには、酸素：0.5molが必要となる。透過した酸素が全て腐食反応で消費されるものとして計算する。酸素分圧は0.2気圧、鉄の比重は $7.86\text{g}/\text{cm}^3$ を用いた。

- 4) Cl^- イオンの透過は、酸素や水の透過に比べて小さいことが報告されており^{14,15)}、 Cl^- の透過は無視する。

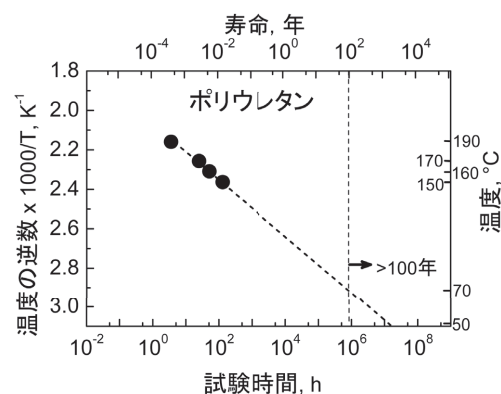


図5 酸化劣化によるポリウレタンの寿命推定例

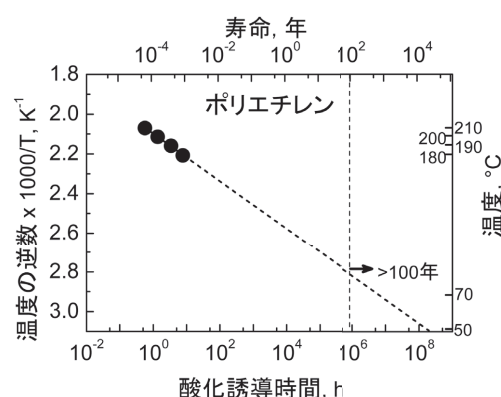


図6 酸化劣化によるポリエチレンの寿命推定例

透過係数は、実際に使用されているプラスチック被覆に関してJIS K7126の差圧法により求めた値を用いた^{1,6,16)}。測定方法はポリウレタン、ポリエチレンのフリーフィルムを作製し、一定測定温度に調整した低圧側チャンバーを排気し真空にした後、高圧側チャンバーに酸素ガスを約1気圧導入し低圧側の圧力増加を測定するものである。

得られた測定結果から透過した酸素が鋼材表面において全て腐食反応で消費されるとして計算された年間最大腐食推定量結果を表2に示す。計算により求められた年間最大腐食推定量は30℃で4 μm /年、15℃で2 μm 程度であった。鋼材表面に腐食反応が生じるためには十分なイオンが存在する必要（電気伝導性）があり、さらにプラスチック被覆は、図2に示したようにプライマーが用いられており、実際の腐食速度は、得られた腐食速度よりもさらに小さい値になるものと推測される。

ポリエチレン1mm厚の被覆を8年間土中暴露した後に腐食量調査を実施した事例¹⁷⁾において、その腐食量は4.5 μm の腐食（0.6 μm /年）であることが報告されており、これは上述の酸素透過からの鋼材の腐食速度の計算値に比べても1/10程度の低い値である。さらにポリエチレン被覆（厚み：4.6mm）鋼管を外洋に21年間暴露し調査した事例（阿字ヶ浦海水暴露試験）¹⁸⁾では、ポリエチレンが密着している部分では腐食は観察されなかったが、粘着剤（接着剤）が付着しておらず鋼材が腐食した部分の腐食量を測定すると、ポリエチレン厚み1mmあたりに割り戻すと0.2～0.3 μm /年の腐食速度であり^{6,19)}、酸素透過からの鋼材の腐食速度の計算値に比べて1/10以下の値であった。このことは、透過した酸素が全て腐食反応に寄与するものでなく、被覆が鋼と強く付着し鋼表面積が限定されている上、被覆下の鋼表面において強固な不働態被膜の形成に寄与し、むしろ腐食を抑制する可能性が指摘できる²⁰⁾。また長期間に埋設、暴露されることにより水が被覆中に侵入し、被覆内部の気体状酸素を含めた酸素の拡散を抑制するものと考えられる²⁰⁾。上述のように損傷が無い健全な状態では塗膜下の腐食は十分に小さく、例えば100年使用したとしても、数十 μm 程度と見積もることができ、プラスチック被覆鋼管の素地調整時のブラスト処理の粗度と同程度のレベルで収まるものと推定される。

3.3 プラスチック被覆の耐水性・電気絶縁性

長期耐久性維持のためには、電気絶縁性を長期間保持することが重要である。ポリウレタン、ポリエチレン被覆の絶縁性は図1に示すように極めて高く、食塩水に長期間浸漬した場合、アスファルト被覆は徐々に絶縁抵抗が低下するが、プラスチック被覆は長期にわたり絶縁抵抗を維持すること（図7）¹⁾、さらに海洋における暴露の結果からも少なくとも20年の良好な耐久性を示すことが報告されており²¹⁾、低い吸水率^{7,22)}のために長期の絶縁特性を維持できるものと考えられる。

4 新たな耐震技術

現行の耐震設計基準²³⁾における水道用鋼管の耐震安全性照査においては、鋼管は管軸引張方向のひずみに対しては破断までに25～30%程度の余裕がある一方、軸圧縮方向では座屈発生が懸念されることから、実験²⁴⁾により求めた座屈開始ひずみに安全率を考慮して、表3のように許容ひずみが設定されている。レベル2地震動における埋設鋼管路の管ひずみが高々0.2%程度であることを考慮すれば、腐食による著しい減肉等、管の構造健全性に著しい問題が無い場合には、地盤震動に対して鋼管の耐震安全性は十分担保されていると考えられる。しかしながら、大規模な地盤変状、とりわけ活断層を横過する部位における埋設管路の耐震安全性確保は、

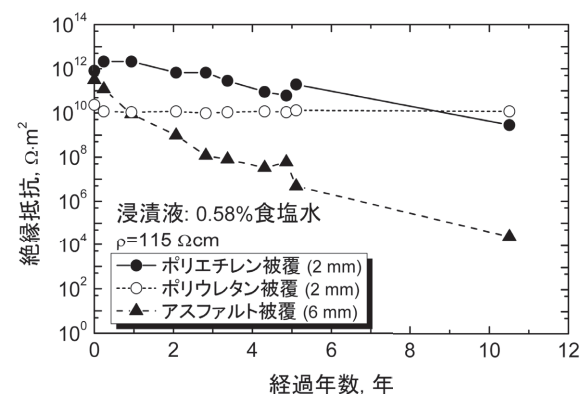


図7 プラスチック被覆及びアスファルト被覆の絶縁抵抗の変化¹⁾

表2 酸素透過係数と最大腐食推定量（プラスチック1mm厚み）

被覆材料		ポリウレタン		ポリエチレン	
測定温度		15℃	30℃	15℃	30℃
酸素透過係数	$\times 10^{-16} \text{ mol} \cdot \text{m} / \text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa}$	1.73	3.83	2.16	4.42
最大腐食推定量	$\mu\text{m} / \text{year}$	1.6	1.5	2.0	4.0

従来技術では極めて対応が困難であった。わが国には2,000以上の活断層の存在が確認され²⁵⁾、その多くは逆断層型であり、断層変位量は平均で3.5mにも及ぶ大きなものとなっている。したがって鋼管路といえども、活断層を横過して布設されている場合には、断層面の前後で曲げ座屈を生じ、亀裂・漏水に至る懸念がある。

そこで、鋼管に予め初期変形を与えることで、図8に示すように座屈変形位置・変形量を制御し、断層面で大変位が生じた場合においても、鋼管の塑性変形能を活かして通水機能を確保する「断層用鋼管」²⁶⁾が開発された。同鋼管には、予め直管部と同厚の凸部を当該断層面の想定変位量に対応した個数分設けておき、断層面のずれに伴う曲げ変形を同部で吸収する構造とされている。凸部においては意図的に座屈を生じさせるため、座屈波形を最適形状と考え、凸部の管長を円筒シェルの座屈波長の理論式から求める一方、凸部の高さは板厚の数倍程度に設定して、構造実験ならびにFEM解析により最適な寸法・形状が決定された。図9にφ600mmの断層用鋼管を用いた曲げ実験結果とFEM解析結果との比較を示す。両者の荷重－変位曲線は概ね一致しており、FEMモデルによって断層用鋼管の大変形挙動をシミュレートできることが判る。凸部は曲げ変形によって管内面同士が接触するため、FEM解析結果から、1箇所あたりの最大曲げ角度は15°

表3 水道用鋼管の許容ひずみ

地震動	許容ひずみ(%)
レベル 1	23 t/D
レベル 2	46 t/D

tは鋼管厚、Dは鋼管径

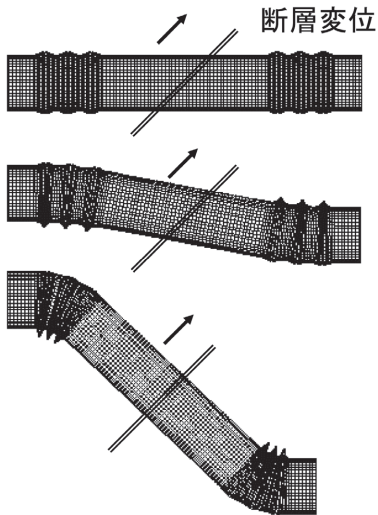


図8 断層用鋼管の変形挙動

程度と想定していたが、実験では17.1°とやや大きい値となり、一層の安全性が確認された。また、実験では载荷装置の最大ストロークから約30°超まで曲げ変形を与えたが、図10に示すように亀裂等の発生は認められなかった。同鋼管は、断層横過部に複数配置することで、地震時における基幹管路の通水機能確保に貢献できるものと考えられる。今回の東北地方太平洋沖地震において脱管被害の生じた伸縮可とう管²⁷⁾の代替管としての適用についても期待される。

5 結言

以上、劣化メカニズムから整理した水道用プラスチック被覆鋼管の防食寿命推定方法ならびに推定結果について概説し、さらに新たに開発された活断層のような地震時大規模地盤変状に対する耐震鋼管について紹介した。

水道用プラスチック被覆は、優れた電気絶縁性のため、埋設環境においてマクロセル腐食等の局所的な腐食を抑制し長期の耐食性を有する。また耐酸化性も適切な樹脂設計により100年以上の極めて長期の耐久性が期待される。近年は系統的埋設試験も実施^{1,16)}され、その長期耐久性が実証されている。さらに碎石埋戻し試験^{16,28)}も行われ施工条件が厳し

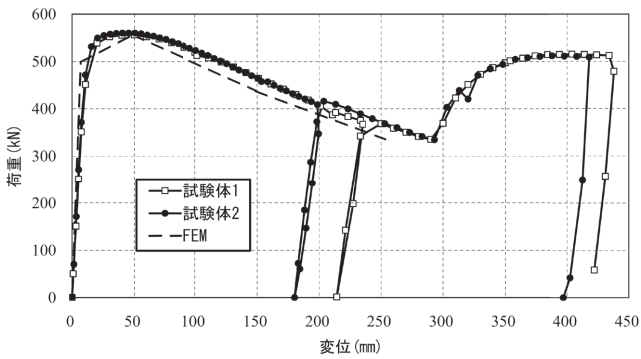


図9 φ600断層用鋼管の曲げ試験結果



図10 φ600断層用鋼管の曲げ試験状況

い碎石埋戻しにも適用が可能であり十分な耐久性をもつことが実証された。今後は、水道施設の更新・耐震化ニーズに対応し、耐震管として鋼管が本来有する構造安全性と併せて、水道施設の長期寿命を支える重要な管材としての展開が期待される。

防食技術に関する2章、3章は、上村、吉崎、北川が、耐震技術に関する4章は今井が執筆担当しました。

謝 辞

本報告をまとめるにあたり、増子昇 東京大学名誉教授に多大なご指導を頂きました。記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 工業用水, 日本水道鋼管協会, 606 (2011) 5-12, 第46回日本工業用水協会研究発表会講演要旨, 日本水道鋼管協会, (2011), 43-51.
- 2) Melvin Romanoff : Underground Corrosion, National Bureau of Standards, Circular 579 (1957)
- 3) 大崎順彦 : 鋼杭の腐食, 鋼材倶楽部, (1980)
- 4) 守屋進, 村瀬正次, 中野啓真 : 土木技術資料, 47-3 (2005), 52-57.
- 5) 松島巖 : 防食技術, 25 (1976), 563-570.
- 6) 神崎真美, 磯部悦四郎, 渡辺正明, 笠原一郎, 作本敏和, 山下礼二 : 日本工業用水協会第42回研究発表会講演要旨, (2007), 49-52.
- 7) 高松輝雄, 石田雅巳, 鈴木和幸, 新藤芳雄, 大槻富有彦, 田中満生 : 製鐵研究, 316 (1984), 85-93.
- 8) 上村隆之, 岸川浩史 : 色材, 66 (1993), 579-584.
- 9) 荒川晴美, 安井俊之, 木田昭夫, 森岡芳之 : 配管技術, 34 (1992), 76-81.
- 10) 宮嶋義洋, 石田雅巳, 船津真一, 仮屋園義久, 遠藤英一 : 配管技術, 37 (1995), 62-67.
- 11) 岸川浩史, 上村隆之, 大北雅一, 曾我好孝, 岡本浩一 : 住友金属, 48 (1996), 53-58.
- 12) 向原文典, 今津司, 栗栖孝雄, 西山昇 : 川崎製鉄技報, 19 (1972) 2, 111-118.
- 13) 海洋環境における鋼構造の耐久・耐荷性能評価ガイドライン, 土木学会構造工学委員会編, (2009.3), 57.
- 14) M.Yaseen : Permeation Properties of Organic Coatings in the Control of Metallic Corrosion, Corrosion Control by Organic Coating, H. Leidheiser, Jr., ed., NACE, Houston, (1981), 24-27.
- 15) R.T.Ruggeri and T.R.Beck : The Transport Properties of Polyurethane Paint, Corrosion Control by Organic Coating, H. Leidheiser, Jr., ed. by NACE, Houston, (1981), 62-69.
- 16) 水と土, 日本水道鋼管協会, (2006) 146, 104-114.
- 17) N.Schmits-Planghe, W.Meyer and W.Schwenk : Pipe Line Industry, 44 (1976) 3, 40-43.
- 18) 明嵐政司, 守屋進, 鳥居謙一, 山本幸次 : 土木研究所資料, (2000) 3687.
- 19) 大槻富有彦, 吉崎信樹, 唐沢順市, 友松邦彰 : 日本工業用水協会第40回研究発表会講演要旨, (2005), 34-37.
- 20) 田辺弘往, 篠原稔雄, 星野稔, 伊丹慶輔, 佐藤靖 : 防食技術, 30 (1981), 622-626.
- 21) 海洋環境における鋼構造の耐久・耐荷性能評価ガイドライン, 土木学会構造工学委員会編, (2009.3), 22.
- 22) 桜内雄二郎著 : プラスチック材料読本, 工業調査会, (1971.11), 108.
- 23) 水道施設耐震工法指針・解説, 日本水道協会, (2009)
- 24) WSP 060 水道用鋼管圧縮座屈試験, 日本水道鋼管協会, (1996)
- 25) 中田高, 今泉俊文 : 活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, (2002)
- 26) N.Hasegawa, T.Imai and N.Suzuki : Development of high seismic performance pipe for crossing active faults, Proceedings of the 6th Taiwan-US-Japan Workshop on Water System Seismic Practice, (2009), 353-363.
- 27) 鋤田泰子, 片桐信ら : 土木学会東日本大震災被害調査団緊急地震被害調査報告書, 土木学会, (2011), 10-1.
- 28) 嶋津寛, 大槻富有彦, 笠原一郎 : 42回研究発表会講演要旨, (2007), 53-56.

(2011年9月14日受付)