

工業製品の長もちの科学

繊維学系 西村寛之

（2019年3月11日原稿受理 2019年10月8日採用決定）

要約：

長もちの科学とは、特別な新規技術ではなく、既存の技術を組み合わせて工業製品が設計通りの機能、信頼性、耐久性を有すことを確認する陰で支える技術である。長もちの科学は工業製品全般に応用できる幅広い技術と言える。ここでは、教育研究プロジェクトセンターの一つとして設置された長もちの科学開発センターでの活動内容の紹介と具体的な研究事例であるガスメーター用計量膜（ダイヤフラム）の耐久性評価、ガラス繊維強化樹脂の耐水性評価について記述する。

キーワード：工業製品、インフラ設備、耐久性評価、長もちの科学

1. はじめに

大量生産・使い捨ての時代から、良い製品を長く大事に使っていく時代になりつつある。日本の工業製品は安心して、長く使用できる大きな強みを持っている。工業製品は、多くの材料や部品を組み合わせて作られている。そこで、これら部品の一つひとつに気配りされた材料選定や構造設計と、使用環境を考慮した部品の品質評価が重要である。日本製品は、日本人の気質に基づいて細かいところにまで気配りされており、世界で高い評価を受けている。特に地中に埋設されるインフラ設備、住宅、住宅設備機器などは、一旦設置すると取り替えや修繕が容易ではないので、高い信頼性や耐久性が求められている。ここでは、主に高分子材料を使用した工業製品の長もちの科学の研究事例を紹介する。

2. 長もちの科学開発センターの活動

本学では、教育研究プロジェクトセンターの一つとして、GFRP等の熱硬化性複合材料の基盤研究を行う「複合材料長期耐久性評価研究センター」が平成19年に設立されて、研究活動が進められてきた。平成22年8月には、「複合材料長期耐久性評価研究センター」の研究内容を含め、熱可塑性複合材料、樹脂成形品、ゴム材料等の工業製品全般に研究対象を広げて、各種使用環境下における長期劣化機構を解明するとともに、促進耐久試験方法を確立し、促進耐久試験方法をJIS規格等に盛り込むためのデータ蓄積を図ることを目的とした研究開発組織「長もちの科学研究センター」が設立された。教育研究プロジェクトセンターは、本学の目標を戦略的、重点的に推進するため期限を定めて設置するもので、先進的な教育研究の拠点形成を目指している。この長もちの科学研究センターでは、学内のプロジェクト研究員、学外の大学・公的研究機関のプロジェクト特別研究員および民間会社の特任教授等が横串的に一体となって研究課題の解決を図ってきた。平成25年3月末までを第一ステップとして2年半が経過したので、長もちの科学研

究センターの活動内容をまとめて報告し、平成 27 年 7 月末までの第二ステップとして長もちの科学研究センターの活動の継続が認められた。更に 3 ヶ月間の活動延長が認められた後、第三ステップとして、平成 27 年 11 月より長もちの科学開発センターとして再スタートした。団塊の世代の退職に伴い重要な共通基盤技術の継承が困難になっており、こうしたプラットフォーム技術の継承・維持やそれらをベースにした革新技術の創出に取り組む長もちの科学開発センターの継続的な発展が求められた[1]。

平成 25 年 4 月に日刊工業新聞社からおもしろサイエンス『長もちの科学』が出版された。長もちの科学の考え方を学生や一般の技術者に理解してもらうために、イラストや写真を増やして、分かりやすく、専門的な記述はできるだけ除いた入門書である[2]。

平成 29 年 4 月には株式会社エヌ・ティー・エスから『工業製品・部材の長もちの科学』（設計、評価技術から応用事例まで）が出版された。大学院生や会社で実際に工業製品の設計や開発に携わっている方々のための技術書である。プラスチックや金属の材料に関する書籍は、たくさん出版されている。これらの書籍は大学院の学生が基礎的な学問を勉強するには適しているが、実際に会社で、技術者がプラスチックや金属の材料を組み合わせる工業製品を設計する場合や、開発品の耐久性評価や寿命予測する場合の手引書は少ない。特にインフラ設備、住宅、住宅設備機器などは期待される使用期間が長いので、長い耐久性や高い信頼性が求められる。本書は長もちの科学開発センターや伝統みらい教育研究センターのシニア・フェローの方々が分担して、第 I 編で長もち設計・耐久性評価技術、第 II 編で応用事例について記述されている[3]。

また、日本ガス協会のガス工作物等技術基準調査委員会委員、水素ネットワーク構築導管保安技術調査の特別専門委員、化学研究評価機構の高分子劣化解析評価技術開発調査研究 WG 委員会の委員、日本規格協会の極微量酸化検出 JIS 原案作成委員会の委員および製品評価技術基盤機構の電気用品の安全に関する技術基準等に係る調査検討会の技術基準性能規定化分科会、自己適合性証明 WG（ガス）の委員等を務めた。

京丹後キャンパスを長もちの科学開発センターの活動の拠点にしていきたいと考えて、実機使用材料や工業製品の劣化機構に関する検討を行うために、実際の使用環境を再現した給湯用樹脂管の塩素水循環試験装置、熱間内圧クリープ試験機、常圧浸漬試験機、加圧式浸漬試験装置、大気放置試験装置、引張試験機等を設置した。京丹後キャンパスには、産業界や製品の現場ニーズに対応して、ライフライン事業やインフラ設備に関する事業を行っている多数の企業からの訪問者があった。

また、長もちの科学開発センターのシニア・フェロー、他大学や公設研究機関の教職員、メーカー各社の社員等から構成される情報交換組織『長もちの研究会』を併設して、海外等からの有用情報のメール発信、個別の技術コンサルティング（長もちの研究会の午前中に開催）、講演会や情報交換会の企画運営を行ってきた。平成 22 年 8 月から約 8 年半で 40 回の長もちの研究会と 10 回の長もちの科学シンポジウムを開催した。長もちの研究会のメーリングリストに登録された人数は、約 400 名に達した[4][5]。

3. 研究事例の紹介

工業製品を長もちさせるための設計方法と長期耐久性を評価する技術は、以下のようにいくつか分類される。

①工業製品が主に単一材料で構成されて、使用寿命に達した現場使用品や市場不具合品が入手で

きる場合、②工業製品が主に単一材料で構成されて、使用寿命までは達していないが、現場使用品や市場回収品が入手できる場合、③工業製品が主に単一材料で構成されて、比較的長い期間、機能性の維持が求められる場合、④工業製品が複数の材料から構成されており、使用環境に応じて、複数の故障モードを有し、使用寿命までは達していないが、現場使用品や市場回収品が入手できる場合、⑤工業製品が複数の材料から構成されており、使用環境に応じて、複数の故障モードを有し、新規用途で、現場使用品や市場回収品が入手できない場合、ここでは、分類される構造物や部品、機能材料の代表的な工業製品を事例にして、設計・耐久性評価技術および設計・機能性評価技術について述べる。

3. 1 ガスメーター用計量膜の耐久性評価

3. 1. 1 ガスメーター部品の設計と耐久性評価技術

工業製品は一般に複数の材料から構成されており、使用環境に応じて、複数の故障モードを有する。故障がどんな使用環境によって発生したのか見極めて、劣化機構を加速評価する試験方法を確立しないとイケない。今回、使用寿命までは達していないが、現場使用品や市場回収品が入手できる場合の事例として、ガスメーターの部品、特に計量膜(ダイヤフラム)について解説する。ガスメーターは計量法で規定される特定計量器であるため、家庭用を主とする 16 号以下のガスメーターの場合、設置後 10 年以内に全数回収されて検定が行われる。ガスメーターの部品はこの 10 年間、屋外の設置環境で故障せずにメンテナンスもなしで機能しなければならない。また、ガスメーターは計量器であるので、計量法の規定により検定を受け、これに合格したものでなければ使用できない。このような厳しい使用環境での耐久性評価技術が蓄積されてきた[6]。

3. 1. 2 ガスメーターの要求仕様

・家庭用ガスメーターの計量範囲

ガスメーターは計量法上の計量機能に加えて、ガス事業法で定められる保安機能を備える必要がある。保安機能の 1 つはガスメーターより下流側の内管(灯内内管)でのガス微小漏れを検出するものであり、30 日間連続して 3 L/h の微小ガス流量を検知し続けた場合には、ガスメーターはガス漏洩の疑い有りとして判定して警報を表示する。また、大流量側の保安機能として、ガスメーターより下流側のガス栓の誤開放やゴム管外れを検出するため、過大なガス流量(ガスメーターの使用最大流量の 2 倍)を検知した場合には、ガスメーターはガス漏洩の疑い有りとして速やかにガス遮断および警報表示する機能がある。6 号のガスメーターであれば、3L/h~12000 L/h がガス流量の計量範囲であり、4000 倍の広いレンジアビリティが必要となる。図 1.1 に家庭用ガスメーターの計量範囲を示す。図中の Q_{max} はガスメーターの使用最大流量である。日本の家庭用ガスメーターは一般にマイコンメーターと呼ばれて、3 L/h の微小ガス流量の検知と過大なガス流量(ガスメーターの使用最大流量の 2 倍)の検知を行う機能を有している。

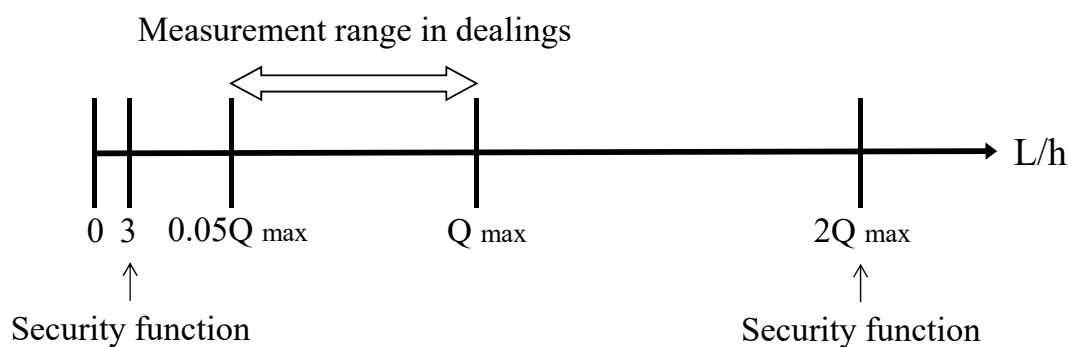


図 1.1 ガスメーターの計量範囲[7]

・ガスメーターの検定公差と使用公差

計量器自体の有する誤差を器差といい、次の式において表される。ここで、E は器差（%）、I は被検定ガスメーターの指示量（L）、Q は基準器の指示量（L）である。

$$E = \frac{I - Q}{Q} \times 100 \quad (\%) \quad (1-1)$$

この器差の計量法上の許容範囲が“公差”と呼ばれ、検定を受ける際の許容器差を“検定公差”、需要家に取り付けて使用中のガスメーターの許容器差を“使用公差”という。家庭用を主とする16号以下のガスメーターは検定を受けた翌月1日から起算して10年間は検定有効期限であり、その期間中は器差が使用公差から外れることは許容されない。ガスメーターの検定公差および使用公差を図1.2に示す。ガスメーターは計量器として高い計量精度が求められている。

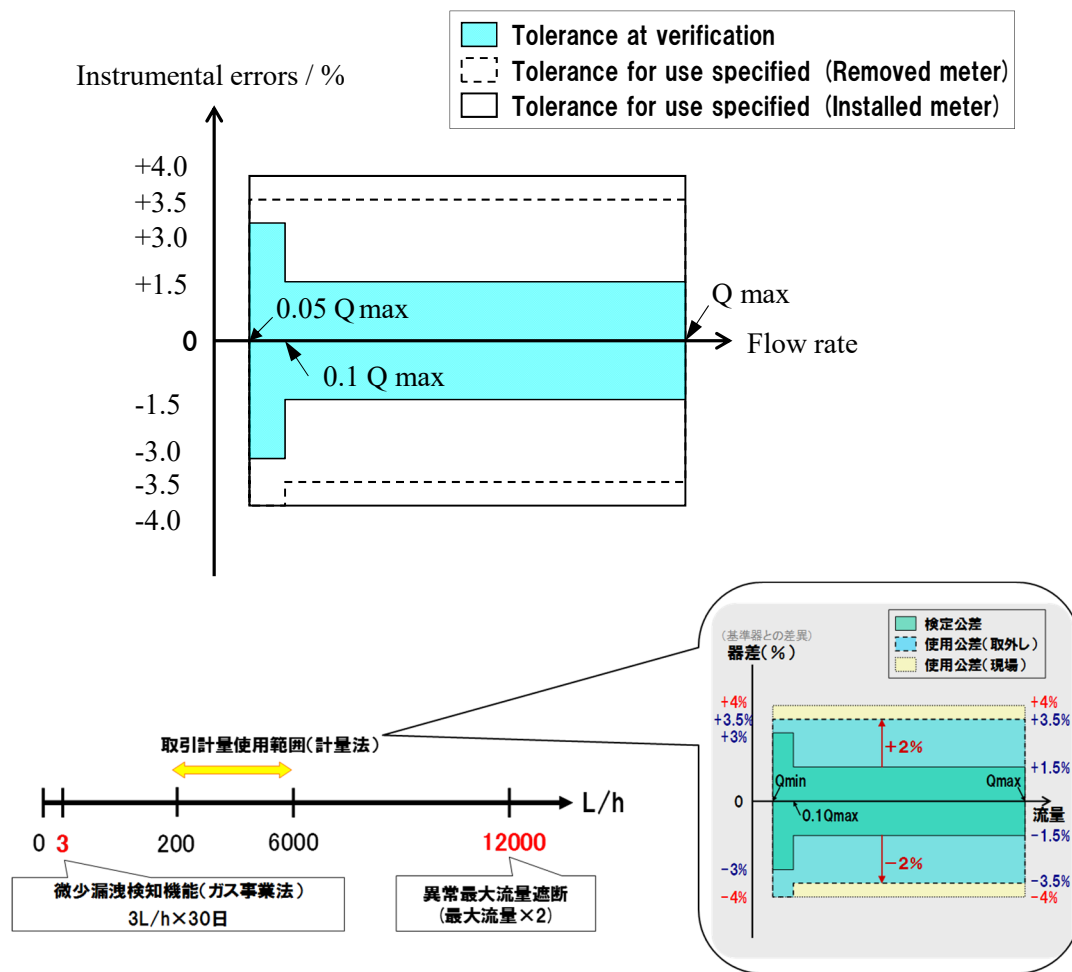


図 1.2 ガスメーターの検定公差と使用公差[7]

・ガスメーターの設置環境

ガスメーターは計量法に規定される特定計量器であり、検定有効期間ごとに交換される。家庭用を主とする 16 号以下のガスメーターの場合、検定を受けた翌月 1 日から起算して 10 年間は検定の有効期限であり、その 10 年間はメンテナンスフリーで、しかも直射日光や雨水に晒される屋外で使用されることが多い。そのため、ガスメーターは-10℃～60℃の広い温度範囲で前述の計量性能を満たす必要があり、厳しい設置環境下で長期間高い信頼性を維持しなければならない。直射日光や雨水に晒される屋外環境で、リチウム一次電池のみによる計測で、10 年間メンテナンスフリーの使用条件で、家電・電子機器の一般的な故障率の 10 分の 1 の非常に低い値を維持している[8]～[11]。

3. 1. 3 ガスメーター器差変化と劣化機構の関係

ガスメーターの耐久試験は、図 1.3 に示されるように最大流量 (Qmax) による駆動耐久試験が従来の評価手法として実施されてきた。図 1.4 に示されるように市場回収品のガスメーター器差分布を求めると、新品に比較して、器差がマイナス側とプラス側に広がる。マイナス側の器差変

化は従来の駆動耐久試験にて再現される。最大流量（ Q_{max} ）で長期間駆動させることによって、連動機構を主とする構成部品の機械的摩耗やガスメーター用計量膜（ダイヤフラム）が全体的に延伸したためと考えられる。一方、プラス側の器差は従来の駆動耐久試験では再現できなかった。

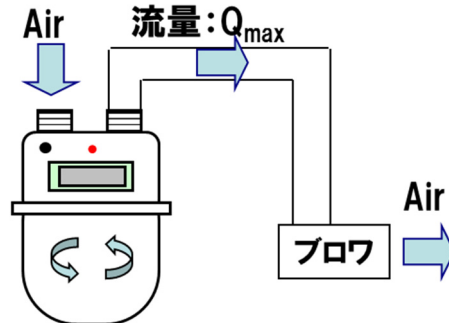


図 1.3 従来のガスメーターの駆動耐久試験

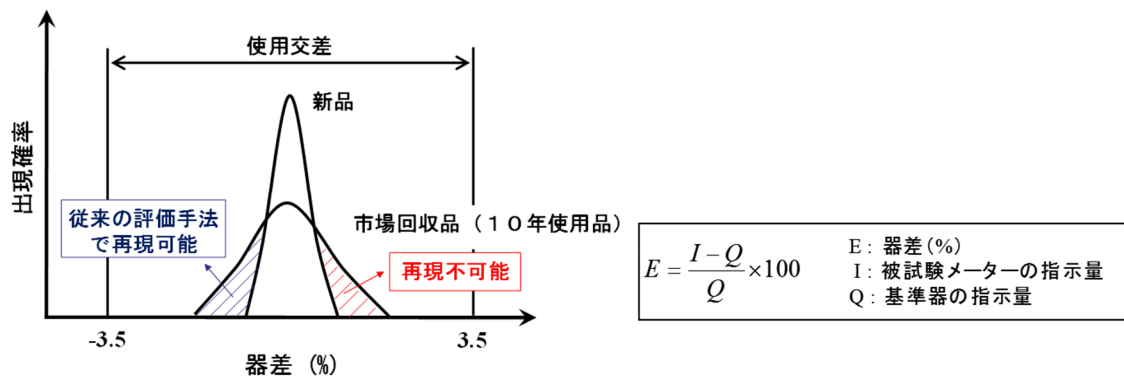


図 1.4 市場回収品のガスメーター器差分布[7]

図 1.5 に新品、市場回収品（10 年間使用品）、駆動耐久試験品のダイヤフラムの写真を示す。市場回収品（10 年間使用品）ではダイヤフラムの周辺部にしわが発生していることがわかった。新品や駆動耐久試験品のダイヤフラムの周辺部にはしわは見られなかった。また市場回収品（10 年間使用品）でダイヤフラムの周辺部にしわが発生した場合、機器内部の計量体積が減少して、プラス側の器差変化が発生することがわかった。これは、ガスメーター内にガスがほとんど流れずに長期間屋外に放置された場合、高温下でゴム中の可塑剤の揮発やゴムの架橋が進行したためと考えられる。ダイヤフラムは PET 製基布によりゴムの伸縮を抑える構造で、駆動耐久試験などの疲労に対する耐久性は高いが、しわの発生にはあまり効果がなかった。

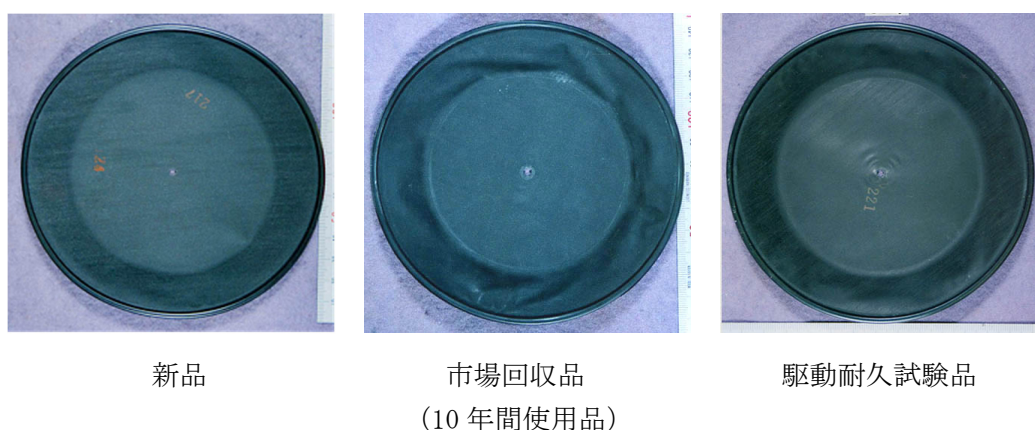


図 1.5 新品、市場回収品（10 年間使用品）、駆動耐久試験品のダイヤフラムの観察[7]

図 1.6 に新品、20 年間使用した市場回収品（20 年間使用品）および 70℃での熱加速試験品のダイヤフラムの動的粘弾性測定の結果を示す。 $\tan\delta$ の高温側ピーク温度（NBR のガラス転移温度に相当）について、新品と比較して、20 年間使用した市場回収品では、ピーク温度が -6°C 付近まで上昇することが確認された。高温側ピーク温度の上昇は、NBR の二重結合部の切断・再架橋による硬化および可塑剤の揮発が進行し、ゴムの低温特性が低下したためと考えられる。また、市場回収品の劣化状態を再現するために、70℃での熱加速試験が実施された。70℃、2,000h の熱加速試験品は、20 年使用品と同等の $\tan\delta$ であることが確認された。プラス側のガスメーターの器差変化は、熱加速試験により再現することができた。

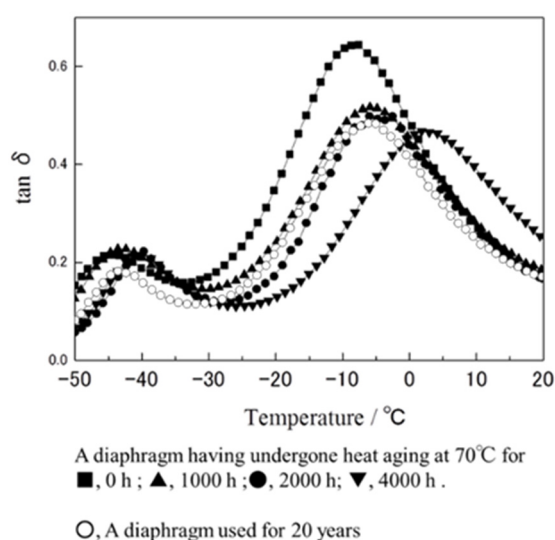


図 1.6 新品、市場回収品（20 年間使用品）および 70℃での熱加速試験品のダイヤフラムの動的粘弾性測定結果[7]

図 1.7 に熱加速試験における試験時間とゴム中の可塑剤の残存量の関係を示す。ガスメーターの器差変化の加速試験評価パラメータとして、 $\tan\delta$ の高温側ピーク温度（ガラス転移温度）以外に、ゴム中の添加剤残存量に着目した。市場回収品（20 年間使用品）の最小値を図 1.7 に赤線で示

す。20年間の使用相当品としては、60℃で6,000h、70℃で2,000h、80℃で500hが加速時間と言える。

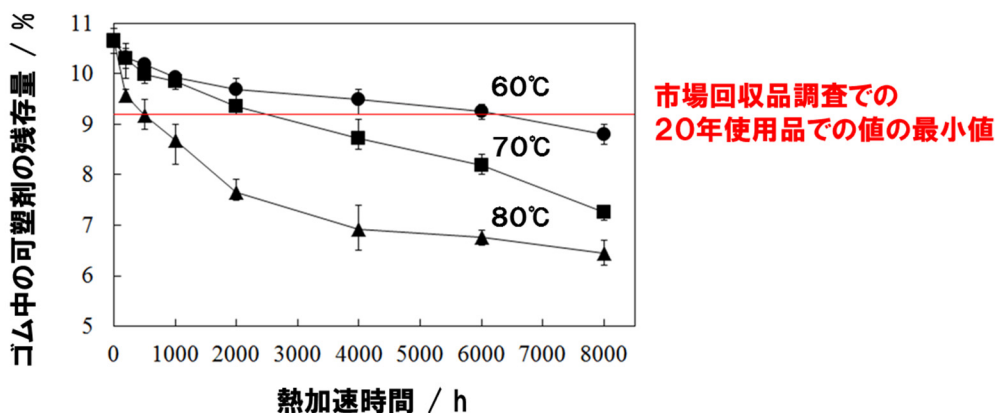


図 1.7 熱加速試験における試験時間とゴム中の可塑剤の残存量の関係[7]

熱加速試験評価パラメータとして、ゴム中のガラス転移温度や添加剤残存量に着目し、70℃、2,000hの熱加速試験品は、20年使用品と同等であることが確認された。20年間使用相当品のガスメーター計量膜（ダイヤフラム）の促進劣化試験条件を定めることができた[12]。

ガスメーター部品としては、計量膜（ダイヤフラム）だけではなく、圧力スイッチ、感震器、遮断弁、電装基板などの機能部品に対しても、使用環境を反映させた促進試験方法が確立しており、信頼性の評価に活用されている。

3. 2 ガラス繊維強化樹脂の耐水性評価

3. 2. 1 ガラス繊維強化ポリフェニレンスルファイド（PPS）の温水浸漬試験や高温大気放置試験

温水給湯暖房機器の金属部品は、主に銅合金の鍛造品や切削加工を実施した加工品が主流であったが、軽量化やコストダウンの要請により、樹脂部品が普及している。特にバルブ、電磁弁や分流量器等には、ガラス繊維強化エンジニアリングプラスチックが適用されている。そこで、ガラス繊維強化ポリフェニレンスルファイド（PPS）を射出成形によりダンベル試験片を作製して、温水浸漬試験や高温大気放置試験を実施した。PPSは強度、寸法安定性、耐熱性に優れており、成形加工の容易であるために、自動車や電気・電子分野の精密工業部品に広く適用されている。近年は、温水給湯暖房機器の金属部品の代替としても適用されている。ただし、温水に接する環境での評価をしっかりと行う必要がある[13]～[16]。

図 2.1 に各温度にて一定時間大気放置したダンベル試験片の引張強度を示す。引張強度は大気放置時間に寄らずにほぼ一定値を示す。また、大気放置のごく初期段階で引張強度が少し上昇する傾向を示した。これは PPS が結晶性の樹脂であるために、高温大気放置下で結晶化が進んだと考えられる。一方、図 2.2 に各温度にて一定時間温水浸漬したダンベル試験片の引張強度を示す。引張強度は浸漬時間と共に低下した。また、浸漬温度が高いほど引張強度の低下の程度が大きかった。これはガラス繊維強化 PPS が温水と接触することにより、劣化が進行することを示唆している。

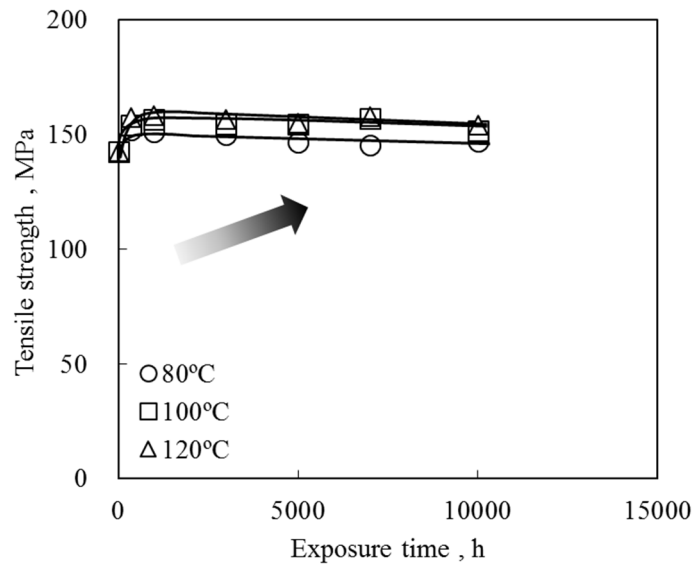


図 2.1 ガラス繊維強化 PPS の高温大気放置試験後の引張試験結果[17]

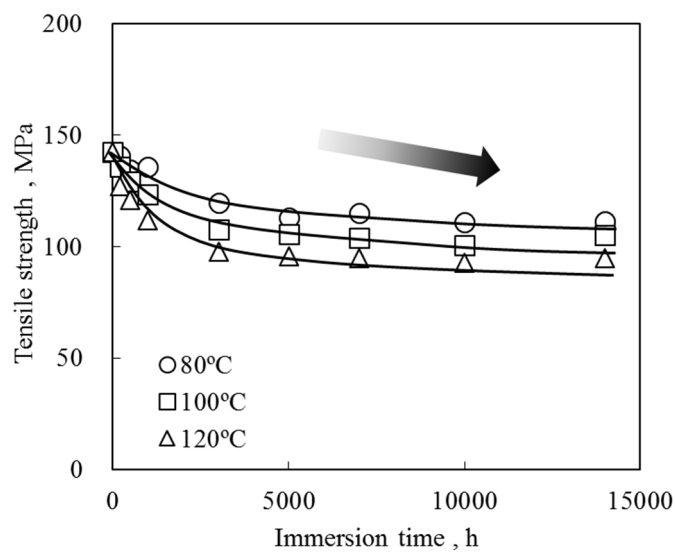


図 2.2 ガラス繊維強化 PPS の温水浸漬試験後の引張試験結果[17]

劣化の原因を調べるために、引張試験後の破断面観察を実施した。図 2.3 にガラス繊維強化 PPS の新品の引張試験後の SEM 写真を示す。ガラス繊維の引き抜けは比較的少なく、ガラス繊維の表面も樹脂が付着しており、ガラス繊維の破断面は鏡面ではなかった。図 2.4 にガラス繊維強化 PPS の 100°C高温大気放置品の引張試験後の SEM 写真を示す。新品と類似してガラス繊維の引き抜けは比較的少なく、ガラス繊維の表面も樹脂が付着しており、ガラス繊維の破断面は鏡面ではなかった。図 2.5 にガラス繊維強化 PPS の 100°C温水浸漬品の引張試験後の SEM 写真を示す。新品や 100°C高温大気放置品とは明らかに異なり、ガラス繊維の引き抜けや剥離が多く見られて、ガラス繊維の表面に樹脂が付着しておらず、ガラス繊維の破断面も鏡面に近かった。この理由と

しては、温水の浸漬過程において、温水がガラス繊維と樹脂の界面に浸透して、密着性を低下させていると考えられる。また、温水によりガラス繊維の表面に微細な欠陥が発生して、ガラス繊維自体の強度も低下していると考えられる。

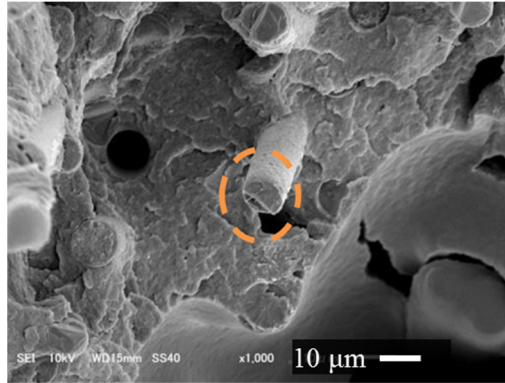


図 2.3 ガラス繊維強化 PPS の新品の引張試験後の破断面観察[17]

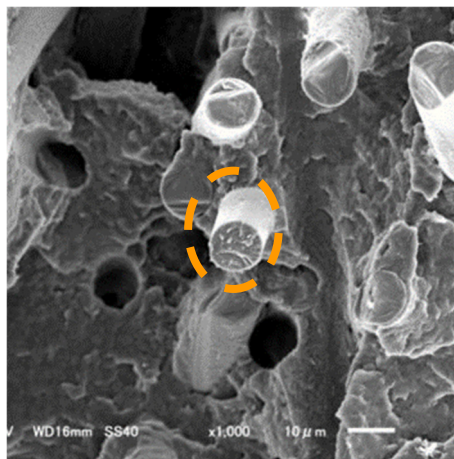


図 2.4 ガラス繊維強化 PPS の高温大気放置品（10,000h）の引張試験後の破断面観察[17]

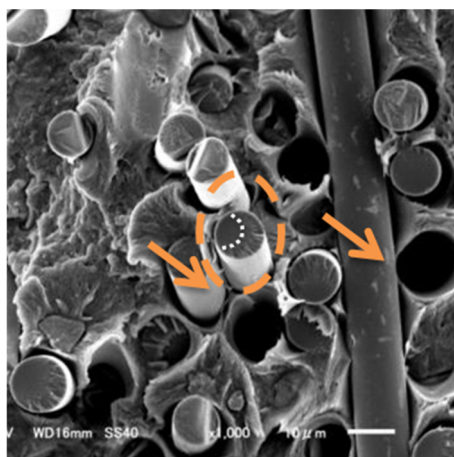


図 2.5 ガラス繊維強化 PPS の温水浸漬品（10,000h）の引張試験後の破断面観察[17]

4. おわりに

大量生産・使い捨ての時代から、良い製品を長く大事に使っていく時代が変わりつつある。日本の工業製品は、一つひとつの小さな部品にも材料選定や設計思想を反映させて、日本人の気質に合った作り方をしている。世界からも品質が高く、信頼性があり、故障しにくいとの高い評価を受けてきた。ガスメーターはその典型的な工業製品ではないかと思う。使用者に売り渡す資産ではなく、ガス事業者の資産として維持管理していかないといけない。製造者だけが品質を担保するのではなく、製造者とガス事業者が一体となって、品質の向上に努めてきた。計量器と保安機能を併せ持ち、屋外使用で電池駆動でありながら、10年間ノーメンテナンスで一般の家電・電子機器よりも一桁以上故障率が低いと言われている。また、環境に配慮して、リユースやリサイクルも積極的に導入されている。ガスメーター部品には、長もちの科学の精神が隅々まで反映していると言える。また、ガラス繊維強化樹脂も使用環境を十分に配慮した耐水性評価が重要であることがわかった。

参考文献

- [1] 西村寛之、工業材料、Vol.62, No.5, pp.1-5(2014)
- [2] おもしろサイエンス「長もちの科学」、日刊工業新聞社(2015)
- [3] 京都工芸繊維大学 長もちの科学開発センター編「工業製品・部材の長もちの科学」、(株)エヌ・ティー・エス(2017)
- [4] 長もちの科学研究センター活動報告書 (2011～2015)
- [5] 長もちの科学開発センター活動報告書 (2016～2018)
- [6] 日本ガス協会、マイコンメーター普及型 V3(1～16号) 技術資料、pp. 4-72 (2002)
- [7] 小澤由規、学位論文「ガスメーター部品の耐久性評価に関する研究」、(2014)
- [8] 小澤由規、川口隆文、山口秀樹、40th 信頼性・保全性シンポジウム発表報文集、pp.149(2010)
- [9] Y. Ozawa, H. Nishimura, T. Kawaguchi, H. Yamaguchi, International Gas Research Conference 2008, pp.254-258(2008)
- [10] 小澤由規、浅田昭治、西村寛之、“ガスメーター部品のリユース評価”、マテリアルライフ学会誌、Vol.25, No.1, pp.12-18 (2013)
- [11] 小澤由規、浅田昭治、西村寛之、“ガスメーター用遮断弁のリユース評価”、マテリアルライフ学会誌、Vol.26, No.1, pp.1-7(2014)
- [12] 小澤由規、山口秀樹、浅田昭治、西村寛之、“ガスメーター用ダイヤフラムの長期信頼性評価”、日本ゴム協会誌、Vol.86, No.7, pp.227-233(2013)
- [13] Takafumi Kawaguchi, Hiroyuki Nishimura, Kazunori Ito, Takashi Kuriyama, Ikuo Narisawa, “Hot Water Resistance of Glass-Fiber and Glass-Based Reinforced Thermoplastics”, Polymer Composites, Vol.24, No.1, pp181-191(2003)
- [14] Takafumi Kawaguchi, Hiroyuki Nishimura, Kazunori Ito, Hidemitsu Sorimachi, Takashi Kuriyama, Ikuo Narisawa, “Impact fatigue properties of glass-reinforced thermoplastics”, Composites Science and Technology, Vol.64, pp1057-1067(2004)

- [15] Takafumi Kawaguchi, Hiroyuki Nishimura, Kazunori Ito, Takashi Kuriyama, Ikuo Narisawa, “Resistance of glass fiber-reinforced thermoplastics to water hammer”, Vol.22, Issue3, pp.327-333(2003)
- [16] 大武義人監修、「高分子材料の劣化と寿命予測」、S&T 出版 (2009)
- [17] Hiroyuki Yamamoto, Kazushi Yamada, Hiroyuki Nishimura, “EVALUATION OF DEGRADATION CHARACTERISTICS AT THE INTERFACE BETWEEN GLASS FIBER AND RESIN OF GLASS FIBER REINFORCED PLASTICS FOR HOT WATER APPLICATION”, SPE-ANTEC2013, Cincinnati(2013)