

高温塩化水素ガス雰囲気における PPS 製ろ布の劣化挙動評価

藤原 萌子, 深澤 智典, 石神 徹, 福井 国博*

Evaluation of the Degradation Behavior of PPS Filter Media Exposed to Hydrogen Chloride at High Temperature

Moeko Fujiwara, Tomonori Fukasawa, Toru Ishigami and Kunihiro Fukui*

Received 14 November 2025; Accepted 16 December 2025

In this study, the influence of hydrogen chloride (HCl) gas and water vapor contained in HCl gas on the chemical and mechanical properties of polyphenylene sulfide (PPS) filter media at a high-temperature of 200°C were investigated. Exposures to HCl gas, with or without water vapor, hardly changed the elemental composition and elemental ratios of the PPS fibers, nor induced any chemical structural changes. In contrast, the crystallinity of PPS fibers slightly increased by exposure to HCl gas, whereas this increase in the crystallinity was suppressed in the presence of water vapor. Consequently, PPS filter media exposed to HCl gas provided consistently lower elastic modulus and tensile strength than those exposed to HCl gas with water vapor. These results indicate that PPS filter media exhibit a high chemical durability against HCl gas and that with water vapor at high temperature, and that which is comparable to against inert gas atmospheres.

Keywords: Hydrogen Chloride gas, Polyphenylene sulfide, Bag-filter media, Mechanical property, Crystallinity.

1. 緒 言

大気汚染を防止するためには、工場などから排出される有害ガス成分を含む排ガス中のばいじんを分離・除去する必要があることから、集じん装置の使用が不可欠である。バグフィルタシステムは、ろ布と呼ばれる不織布を用いて粒子分離を行う乾式ろ過集じん装置である。このシステムは 100~200°C という幅広い温度範囲で使用可能で、NO_x, SO_x, Cl₂ などの腐食性ガスを含む環境下でも安定して運転できることから、高い捕集性能を有する集じん装置として広く利用されている[1,2]。また、消石灰を併用することで排ガス中の塩素を除去し、ダイオキシン類の生成を抑制できることから、ダイオキシン類の主要な発生源であるごみ焼却設備において、特にバグフィルタシステムがもっとも一般的に採用されている[3–6]。

耐熱バグフィルタとしてもっとも広く用いられているろ布として、ポリフェニレンサルファイド (PPS) 樹脂を繊維化して作製された PPS 製ろ布が挙げられる。スーパー

エンジニアリングプラスチックである PPS 樹脂は、耐熱性、耐薬品性に優れ、コストパフォーマンスも高い。このため、PPS 樹脂をフィラーで強化した複合材料は自動車、電子部品、航空宇宙などの幅広い分野で使用されている[7–9]。しかし、短炭素繊維で強化された PPS 複合材料は、熱水浸漬により PPS と強化材の界面で劣化が生じ、引張強度が低下することが報告されている[10,11]。

PPS 製のろ布であっても、その特性は使用期間に伴い徐々に変化し、目詰まりや破損が生じる。このような劣化が生じると、機械的強度の低下、圧力損失の増加および捕集性能の低下に起因する排気ダスト濃度の増大を招き、ろ布はやがて寿命に至る[12,13]。よって、ろ布の物理的・化学的耐久性に関する情報を踏まえたろ布の設計および選択が非常に重要である。

Tanthapanichakoon らは PPS 不織布が 90°C の HCl 溶液や H₂SO₄ 溶液に対して高い耐久性を示す一方で、高濃度の HNO₃ 溶液に対しては、PPS の化学組成変化や脆化が進行し、不織布の強度が著しく低下することを明らかにしている[14]。また当研究室では、ISO16891:2016[15]に規定された連続通気型曝露槽を用いて、PPS 製ろ布の劣化挙動に与える NO₂ ガス濃度と曝露温度の影響を検討し、NO₂ ガスによる PPS の酸化形態を明らかにした[16,17]。さらに、高温 NO₂ に曝露した時の PPS 製ろ布の酸化反応速度および強度劣化を表現するモデルを提案した[18]。

廃棄物の燃焼で発生する排ガスには、有害腐食性ガス

粉体工学会 2025 年度春期研究発表会, 2025 年 5 月 21 日, フォレスト仙台, BP 賞受賞

広島大学大学院 先進理工系科学研究科 化学工学プログラム
(〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1-4-1)

Chemical Engineering Program, Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

(1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima, Hiroshima 739-8527, Japan)

* Corresponding Author kfukui@hiroshima-u.ac.jp

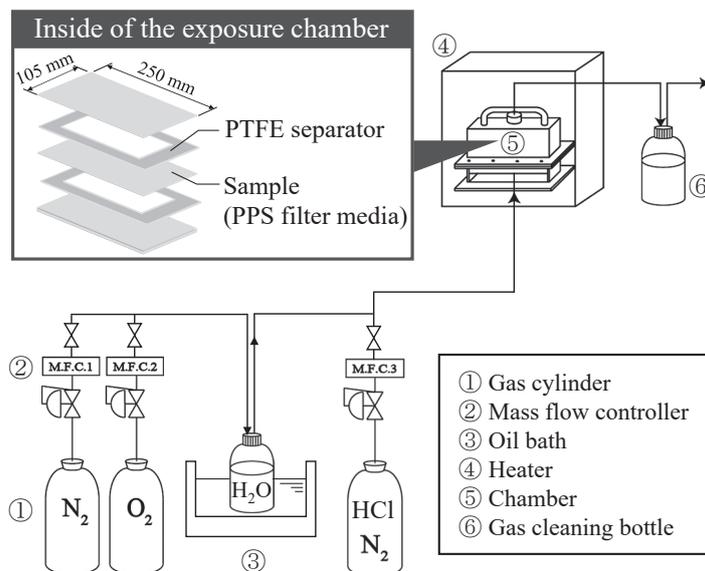


Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

の一種である HCl ガスおよび同時に水蒸気が含まれることが多い。しかし、HCl 水溶液に対する PPS 製ろ布の耐性に関する報告はあるものの[19]、これらガス成分が高温環境下で PPS 製ろ布の劣化に与える影響は十分には明らかにされていない。そこで本研究では、PPS 製ろ布の使用限界とされる 200°C において HCl ガスおよび HCl ガス中の水蒸気が PPS 製ろ布の機械的・化学的劣化挙動に与える影響を分析検討した。HCl ガスおよび水蒸気による PPS 製ろ布の劣化メカニズムを明らかにすることで、実際の産業現場における PPS 製ろ布の設計・選択の指針を与えることを目的とする。

2. 実験方法

PPS 不織布ろ布 (東洋紡社製 Procon; 目付 500 g/m², 厚さ 1.76 mm) を試料として使用した。PPS 繊維の直径と密度は、それぞれ 15.0 μm および 1340 kg/m³ である。

ISO16891:2016 に準拠して作製された曝露試験装置の概略を Fig. 1 に、実験条件を Table 1 に示す。試験ガス I, II の 2 種類を使用した。試験ガス I は HCl 濃度 1000 ppm, O₂ 濃度 10 vol%, バランスガスとしての N₂ から構成された混合ガスである。マスフローコントローラ (KOFLOC 8500MC) で、それぞれのガスシリンダーからの流量を調整することで各成分ガスの濃度を調整した。試験ガス II は、試験ガス I の組成に 20 vol% の H₂O を加えたものとした。なお、O₂ と N₂ の混合ガスを水で満たしたねじ口洗浄瓶に通気バブリングすることで試験ガス中に水蒸気 (H₂O) を同伴させた。また、H₂O 濃度は、オイルバスに浸漬した洗浄瓶の温度によって制御した。機械方向 (MD) および横方向 (TD) で測定できるように、ステンレス製曝露チャンバー内に PPS ろ布 (250 mm × 105 mm) 各 2 枚を PTFE セパレーターを介して MD と TD 交互に配置した。試験ガスを流量 0.5 L/min で PPS ろ布に連続的に通気させた。曝露チャンバー内の温度は 200°C で一

Table 1 Experimental conditions

Test gas	Reference
Gas I	HCl; 1000 ppm, O ₂ ; 10 vol%, N ₂ ; Balance gas
Gas II	HCl; 1000 ppm, H ₂ O; 20 vol%, O ₂ ; 10 vol%, N ₂ ; Balance gas
Reference	O ₂ ; 10 vol%, N ₂ ; 90 vol%
Temperature	200°C
Flow rate	0.5 L/min
Exposure time	0–200 h

定に保持した。曝露チャンバーから排出されたガスは、ガス洗浄瓶を通じてドラフトへと排出した。曝露時間は 0~200 時間とした。

なお、比較のため、O₂ 濃度 10 vol%, N₂ 濃度 90 vol% から構成された混合ガスを Reference ガスとして用いた実験もあわせて行った。

曝露終了後、N₂ ガスのみを 1 時間通気して曝露装置内を洗浄しながら常温まで冷却されたろ布を取り出し、以下の方法で分析評価した。元素分析はエネルギー分散型 X 線分光法 (EDS, エダックジャパン, Genesis XM 2) で行い、各ろ布について 4 測定点の平均値で評価した。また、CHNS 分析装置 (パーキンエルマー, CHNS/O 2400II) を用いても元素組成を定量した。分子構造の解析は全反射測定法 (ATR 法) による赤外分光光度計 (FT-IR, サーマフィッシャー, Nicolet Summit X) を用い、各ろ布について 4 測定点の平均値として評価した。示差走査熱量計 (DSC, 日立ハイテック, EXSTAR6000) を用いて、N₂ ガス雰囲気下、10°C/min で 20~400°C の 1 サイクルで熱分析を行った。形態観察には、電界放出型走査電子顕微鏡 (FE-SEM, 日立ハイテック, S-5200) を用いた。ろ布の機械的特性 (引張強度および弾性率) は、曝露させたろ布 1 枚につき 2 本切り出して作製した試験片 (200 mm × 25 mm) で、引張試験機 (島津, SBL-500 K-350) を用いて MD および TD の両方向に対して測定し、合計 4 本の試験片

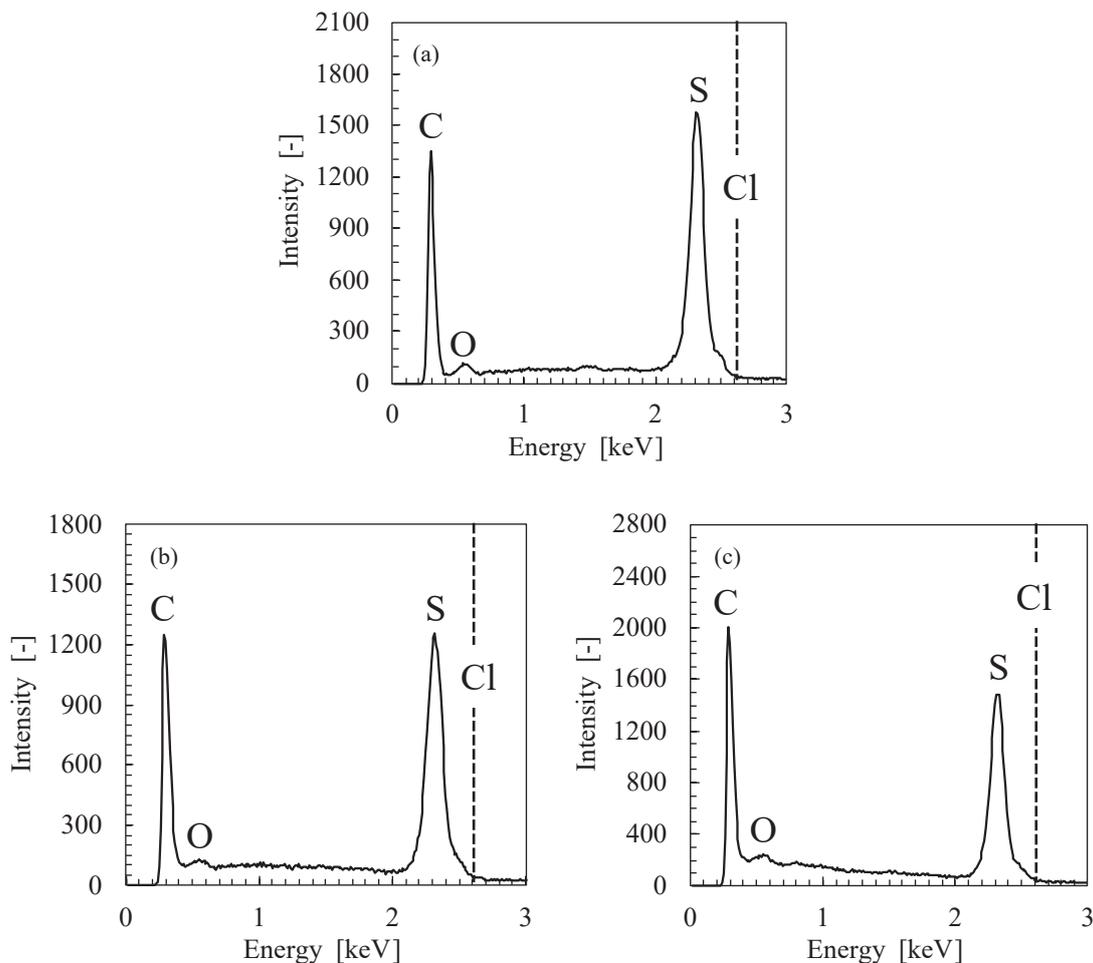


Fig. 2 EDS spectra of the PPS filter media exposed to the different test gases for 200 h: (a) The original specimen, and those exposed to (b) Gas I and (c) Gas II

の平均値で評価した。なお、引張速度は 100 mm/min に、試験片の掴み手間距離は 100 mm にそれぞれ設定した。得られた応力-ひずみ曲線の比例限界までの範囲を直線近似することで弾性率を算出した。破断点での最大荷重を試験片の幅 (25 mm) で除することで引張強度を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 化学的特性への影響

曝露前のオリジナルの PPS ろ布、試験ガス I, II に 200 時間曝露したろ布の EDS スペクトルを Fig. 2 に示す。いずれのろ布も PPS の構成元素である C と S のピークがそれぞれ 0.27 keV および 2.30 keV の位置に明確に検出された。また、曝露前のろ布には PPS 構成元素でない O のピークが 0.52 keV の位置に微かに検出された。これは繊維加工中に混入した微量の異物や表面処理剤に起因すると考えられる。NO₂ ガスに曝露した PPS ろ布において O のピークの著しい増加が認められ、200 時間曝露後には C に対する O のピーク強度比が約 0.45 にまで達する PPS の酸化が進行したことを、筆者らはすでに報告している[18]。一方、試験ガス I, II に曝露したろ布の EDS スペクトルは、NO₂ ガス曝露の結果と大きく異なり、いずれも曝露前のろ布とほぼ同様で、ほとんど変化は確認されなかった。

また、2.62 keV の位置で検出される Cl のピークも、試験ガス I, II に曝露したいずれのろ布でも検出されなかった。以上より、本曝露温度において HCl ガスは PPS 繊維表面に対して Cl の付加反応や酸化反応を引き起こさないこと、さらに HCl ガス中の水蒸気の存在が PPS ろ布のこれら反応に影響をおよぼさないことが示された。すなわち、HCl ガスおよび水蒸気を含む HCl ガスに対して PPS ろ布は 200°C においても高い化学的耐久性を有することが確認された。この結果は、90°C で 37% の HCl 水溶液へ浸漬した場合でも PPS ろ布の構成元素比がほとんど変化しないことを CHNS 分析によって確認した先行報告[14]とも定性的に一致している。

Table 2 にオリジナルの PPS ろ布および試験ガス I, II に 24 時間または 200 時間曝露したろ布を CHNS 分析した結果を基に算出した元素組成比を示す。なお、いずれも、PPS の構成元素である炭素 (C)、水素 (H)、硫黄 (S) の 3 元素の質量割合の合計が 100% に達しなかったことと、Fig. 2 に示した EDS 分析の結果とあわせて考察すると、100% からの不足分はおもに酸素 (O) 元素の質量に相当すると推察される。よって、構成元素を炭素 (C)、水素 (H)、硫黄 (S)、酸素 (O) の 4 種類と仮定し、硫黄 (S) を 1 として元素組成比を算出した。曝露前の PPS ろ布の

Table 2 Result of CHNS elemental analysis of the PPS filter media exposed to the different test gases

Test gas	Exposure time [h]	C [-]	H [-]	S [-]	O [-]
Original	-	6.08	4.08	1	0.06
Gas I (HCl)	24	6.08	4.08	1	0.06
	200	6.09	4.07	1	0.08
Gas II (HCl+H ₂ O)	24	6.09	4.09	1	0.07
	200	6.09	4.09	1	0.07

元素比はほぼC:H:S = 6:4:1であり、理論的なPPSの組成式と一致した。NO₂ガスに200時間曝露したろ布のC:H:Sの元素比は、元のPPSとほぼ等しく6:4:1を保持したまま、Oの元素比が0.41という高い値まで増加することを筆者らはすでに報告している[16]。一方、試験ガスI、IIに曝露したろ布は、NO₂ガス曝露の結果と大きく異なり、試験ガス中の水分の有無によらず、24時間、200時間いずれの曝露時間でもC:H:S = 6:4:1を保持したまま、Oの元素比も曝露前の0.06とほぼ等しかった。ここでEDS分析は繊維表面近傍のみの元素情報を計測するのに対し、CHNS分析は繊維試料全体に含まれる元素割合を計測している。本曝露温度においてHClガスはPPS繊維内部も繊維表面も酸化することはなく、さらにHClガス中の水蒸気存在がPPSろ布のこれら酸化反応に影響をおよぼさないことが示された。

Fig. 3に曝露前と各試験ガスに200時間曝露したPPSろ布の赤外吸収スペクトルを示す。すべての試料のFT-IRスペクトルにおいて、フェニル環のC-C面内伸縮振動の吸収ピークが1397 cm⁻¹、1481 cm⁻¹および1579 cm⁻¹で、ベンゼン骨格のC-S面内伸縮振動とC-H振動に対応するピークがそれぞれ1092 cm⁻¹および830 cm⁻¹で観察された[20-22]。これらピークはPPSが元来有している構造に起因するものである。Referenceガスおよび試験ガスI、IIに曝露したいずれの試料にも、これら以外の新たな赤外吸収スペクトルは観察されなかった。よって、腐食性ガスを含まない高温環境、HClガスおよび水蒸気を含むHClガスは、PPSろ布の構造変化を引き起こさないことが明らかになった。これは、EDS分析およびCHNS分析においてもPPSの構成元素に変化が認められなかった結果とも一致している。

Fig. 4に各試験ガスに曝露したPPSろ布の結晶化度と曝露時間の関係を示す。FT-IRの結果から、曝露試験に伴うPPSの分子構造の変化がないことが確認されたため、ろ布の結晶化度は、完全結晶化PPSの融解熱(146.2 J/g) [23]に対する試料の融解熱量の比として算出した。曝露前のろ布の結晶化度は18.4%であったのに対し、いずれの試験ガスに曝露した場合も曝露初期に結晶化度が急激に増加し、その後はおおむね一定の値を示した。試験ガスIに曝露したろ布の漸近値は約25.3%であり、Referenceガスに曝露した場合の漸近値約24.0%よりもわずかに高かった。よって、200°Cという高温がPPSろ布の結晶化度をおもに増加させ、高温環境におけるHClガスの存在は

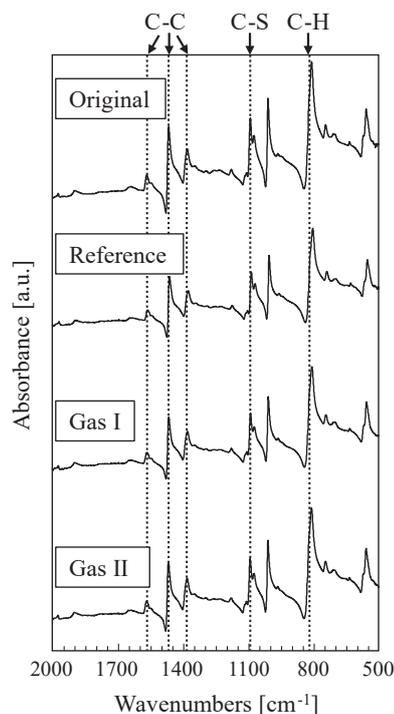


Fig. 3 FT-IR absorbance spectra measured by the ATR method of the PPS filter media exposed to the different test gases for 200 h: (a) The original specimen, and those exposed to (b) Reference gas, (c) Gas I, and (d) Gas II

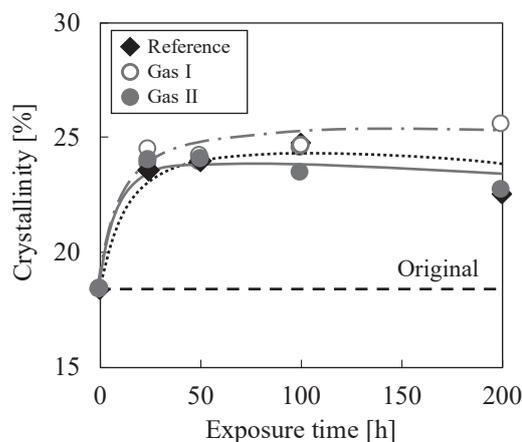


Fig. 4 Changes in crystallinity of the PPS filter media with exposure time for exposure to the different test gases

PPSの結晶化度をさらに増加させることが示された。EDS分析およびFT-IRの結果から、HClガス存在下では、明確な化学反応の進行は確認できなかったものの、HClガスの存在はPPS分子鎖の相互作用をわずかに緩和し、非晶領域の分子鎖を再配列しやすくすることにより、結晶度の上昇をわずかに促進することが示唆された[24]。また、試験ガスIIに曝露した場合は、試験ガスIに曝露した場合の結晶化度よりも低く、Referenceガスに曝露した場合と同程度であった。PPSは80°Cの水に浸漬するとわずかに水分を吸着することが報告されており[25]、水分分子がPPS高分子鎖間に入り込むことで物理的に分子鎖の

再配列，すなわち PPS の結晶化をわずかに阻害したと考えられる。よって，HCl ガス中の水蒸気の存在は，HCl ガスによる結晶化度の上昇をわずかに抑制すると考えられる。

3.2 機械的特性への影響

Fig. 5 に，曝露前のオリジナルの PPS 試験片と Reference ガスおよび試験ガス I, II に 200 時間曝露した試験片の外観を示す。Fig. 5 (a) に示す曝露前の試験片が白色を呈していたのに対し，Fig. 5 (b) の Reference ガスに曝露した試験片は淡褐色に変化した。さらに，Fig. 5 (c), (d) に示す試験ガス I, II に曝露した試験片は，Reference ガスに曝露したそれよりも顕著な褐色を呈した。また，試験ガス II よりも試験ガス I に曝露した試験片の方が濃い褐色を呈した。このことは，高温環境および試験ガス中の HCl, 水蒸気が PPS ろ布の特性変化を引き起こす可能性を示しているが[16,17]，前項で示したように EDS 分析，CHNS 分析および FT-IR 測定の結果からは，HCl ガスと PPS との明確な化学反応を確認することはできなかった。したがって，これらろ布外観の相違は，前項で示した分析では現れないほどの軽微な反応の進行に起因するものであると予想される。

各試験ガスに曝露した PPS ろ布中の繊維の SEM 画像を Fig. 6 に示す。曝露前の PPS の繊維は直径約 15.0 μm で一定の円筒形であり，滑らかな表面を有していた。NO₂ ガスに曝露した場合，亀裂や剥離などの顕著な形態損傷が観察されたことが報告されているのに対して[16-18]，試験ガス I, II に曝露した PPS 繊維は Fig. 6 (b), (c) にそれぞれ示すように，観察した多くの繊維において繊維表面に浅い亀裂が観察され，その程度は水蒸気の有無に依存しなかった。しかし，この亀裂損傷は，既報の NO₂ ガスに曝露した時[16-18]ほど深刻な損傷には至っていない。以上より，曝露環境における HCl ガスの存在は，NO₂ ガスほど顕著な PPS ろ布の機械的特性の劣化を引き起こすものではないが，ある程度の劣化を誘発することが示唆される[16-18]。また，高温 HCl ガス中の水蒸気の存在は，PPS 繊維表面の損傷には影響を与えないことが示された[10,11]。

Fig. 7 に各試験ガスへの曝露時間と PPS ろ布の弾性率の関係を MD と TD について示す。なお，相対誤差の最大値は 6%であった。繊維自身の特性が支配因子となる MD，繊維間の絡み合いや結合状態が支配因子となる TD のいずれも，ろ布の機械的特性として重要であるため，両方向で評価した[26]。試験ガス種によらず MD の弾性率は曝露初期に増加し，その後ほぼ一定値に漸近した。Reference ガスと試験ガス II に曝露した場合，漸近値は約 130 N/mm でほぼ等しかったのに対し，試験ガス I に曝露した場合の漸近値は約 137 N/mm であり，これらよりもわずかに高い漸近値を示した。したがって，HCl ガス中の水蒸気の存在は，HCl ガスによる弾性率の増加を抑制したといえる。この傾向は Fig. 4 に示した結晶化度の結果と符合しており，曝露に伴う結晶化の進行が PPS の弾性率上昇つまり剛性増大に寄与したと考えられる[13,24,27]。

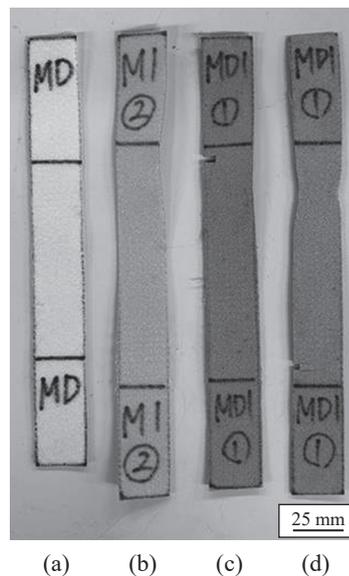


Fig. 5 Appearance of PPS filter medium: (a) The original specimen, and the PPS specimens exposed for 200 h to (b) Reference gas, (c) Gas I, and (d) Gas II

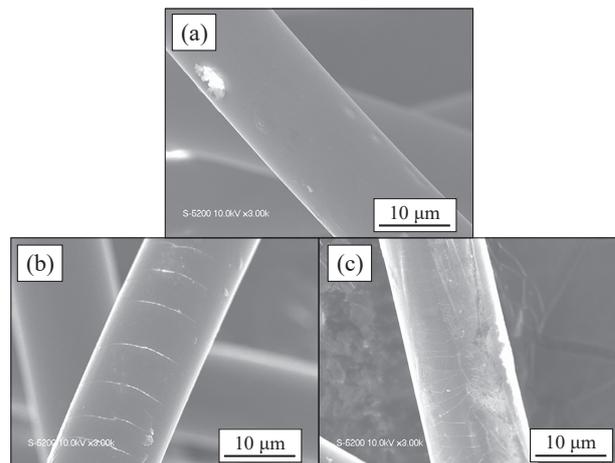


Fig. 6 SEM images of the PPS fibers: (a) The original specimen, and the PPS specimens exposed for 200 h to (b) Gas I and (c) Gas II

一方，Reference ガスと試験ガス I に曝露した場合，TD の弾性率は曝露初期にわずかに低下し，その後は緩やかに増加し続けた。それに対し，試験ガス II に曝露した場合，TD の弾性率は MD の弾性率と同様の挙動を曝露時間に対して示した。さらに，HCl を含む試験ガスに曝露した場合の方が，HCl を含まない Reference ガスに曝露した場合よりも常に高い弾性率を示した。HCl による TD の弾性率増加は，繊維自身の硬化に加えて，Fig.6 に示した繊維表面の損傷による繊維間の摩擦抵抗の増大に起因すると考えられる。つまり，曝露環境における HCl ガスの存在は，高温による結晶化を促進することに加え，繊維表面の形態損傷を誘発するため，PPS ろ布全体としての剛性を増加させると考えられる。

各試験ガスへの曝露時間と PPS ろ布の引張強度の関係を MD と TD について Fig. 8 に示す。なお，相対誤差の

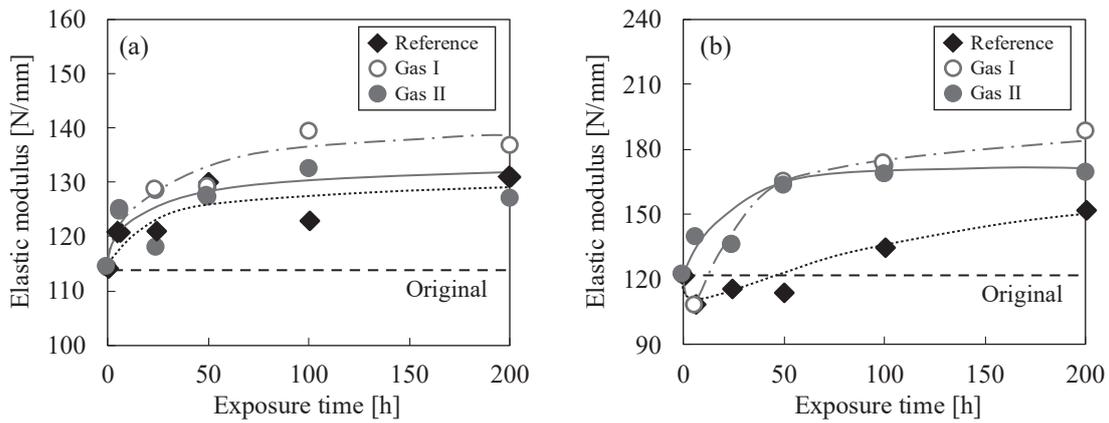


Fig. 7 Changes in the elastic modulus of the PPS filter media exposed to the different test gases with exposure time for (a) the MD and (b) the TD

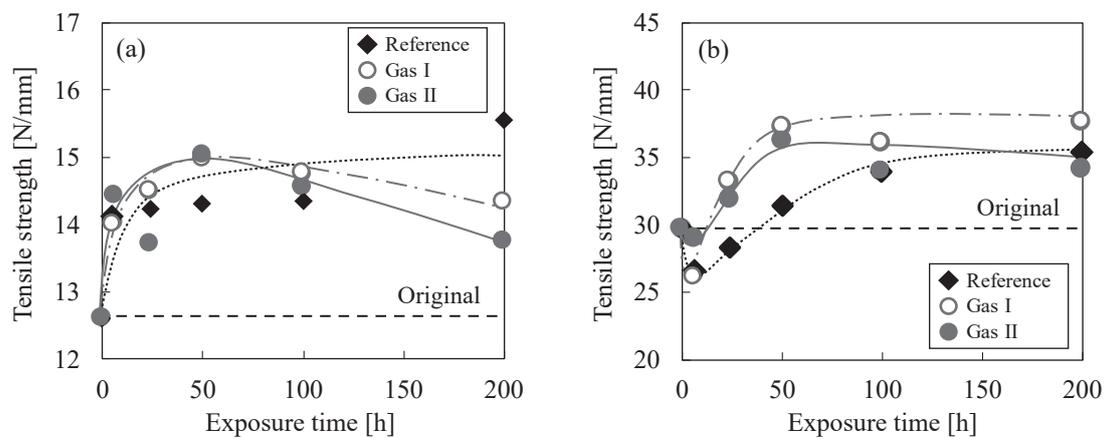


Fig. 8 Changes in the tensile strength of the PPS filter media exposed to the different test gases with exposure time for (a) the MD and (b) the TD

最大値は15%であった。MDではReferenceガスに曝露した場合、曝露初期に強度が増加し、その後強度は約14.5 N/mmでほぼ一定の値を示した[16]。それに対し、試験ガスI、IIに曝露したろ布の強度はMDで曝露初期に急激に増加し、Referenceガスに曝露した場合よりも高い強度を示した。その後、曝露時間50時間以降で強度は一定の割合で低下した。曝露時間100時間以降におけるこれらろ布の強度の方が、Referenceガスに曝露したそれよりも低くなり、試験ガスI、IIに200時間曝露したろ布の強度はそれぞれ約14.3 N/mm、13.8 N/mmであった。一方TDでは、Referenceガスに曝露した場合、曝露初期に強度がいったん低下した後に緩やかに増加し続けた。試験ガスI、IIに曝露した場合も強度は曝露初期に一時的に低下した後に増加し、曝露時間50時間以降でほぼ一定値に達した。さらに、HClガスを含む試験ガスI、IIに曝露したろ布の強度はReferenceガスに曝露した場合よりも常に高い値を示すことが示された。PPSろ布の引張強度は結晶化進行により増加すること[28]、ろ布の強度劣化は、摩擦係数の変化と繊維の損傷による強度低下の両方によって引き起こされることが報告[14,17]されていることから、曝露初期ではPPSの結晶化の進行によりPPSろ布

強度が上昇し、その後、MDでは繊維表面の損傷によりろ布の引張強度が低下した一方、TDでは繊維の強度低下と繊維表面損傷による摩擦係数の増大が同時に進行したことでろ布の引張強度は一定値で推移したと考えられる。また、いずれの方向についても、試験ガスIよりも試験ガスIIに曝露したPPSろ布の強度の方が曝露時間によらずやや低い値を示した。よって、HClガス中の水蒸気はPPSの結晶化進行をわずかに抑制するため、引張強度の増加もわずかに抑制したと考えられる。また、Referenceガスおよび試験ガスI、IIに曝露したろ布の強度の方がオリジナルのろ布のそれよりもおおむね高かった。既報の通り、NO₂ガスに曝露したろ布の強度はMD、TDいずれも曝露時間とともに減少していた[16-18]。よって、PPSろ布はHClガスおよび水蒸気を含むHClガスに対する機械的耐久性が高いことが示された。

したがって、HClおよび水蒸気がPPSの上限使用温度域である200°C近傍で深刻といえるほどの特性劣化を引き起こさないことが明確に示された。これら知見は実産業環境におけるバグフィルターろ布の設計や選択、寿命予測に貢献できると考えられる。

4. 結 言

PPS 製ろ布の使用限界温度 200°C において、PPS 製ろ布の機械的・化学的特性の劣化挙動に与える HCl ガスおよび HCl ガス中の水分の影響を検討した結果、以下の知見が得られた。

1. 高温 HCl ガスは PPS ろ布に対して、Cl の付加反応や酸化反応に起因する顕著な化学構造変化を与えなかった。また、HCl ガス中の水蒸気の存在はこれら反応にほとんど影響を与えなかった。

2. 高温環境により PPS ろ布の結晶化度および弾性率は曝露初期に急増し、その後一定値に漸近した。HCl ガスはこれらをわずかに増加させたが、HCl ガス中の水蒸気の存在はこれらの増加を抑制した。

3. 高温 NO₂ ガスほど顕著ではないものの、高温 HCl ガスは PPS 繊維表面に一部軽度の損傷を与えた。また、HCl ガス中の水蒸気の存在はこの損傷にほとんど影響を与えなかった。

4. 曝露前の PPS ろ布よりも HCl ガスおよび水蒸気含有 HCl ガスに曝露したろ布の方が高い引張強度を示した。また、HCl ガスよりも水蒸気含有 HCl ガスに曝露した PPS ろ布の方が常に低い引張強度を示した。引張強度の変化は、結晶化の進行および摩擦係数の増加による強度上昇と繊維の損傷による強度低下の関係で説明できた。

[謝辞] 本研究は、(一社)日本粉体工業技術協会集じん技術委員会から一部支援を受けた。記して謝意を示す。

References

- [1] M. Tsukada, N. Nishikawa, A. Horikawa, M. Wada, Y. Liu, H. Kamiya, Emission potential of condensable suspended particulate matter from flue gas of solid waste combustion, *Powder Technol.* 180 (2008) 140–144. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.03.024>.
- [2] X. Liu, Y. Xu, B. Fan, C. Lv, M. Xu, S. Pan, K. Zhang, L. Li, X. Gao, Field measurements on the emission and removal of PM_{2.5} from coal-fired power stations: 2. studies on two 135 MW circulating fluidized bed boilers respectively equipped with an electrostatic precipitator and a hybrid electrostatic filter precipitator, *Energy Fuels* 30 (2016) 5922–5929. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.6b00424>.
- [3] A. Iizuka, Y. Morishita, E. Shibata, C. Takatoh, H. Cho, Basic study of the reaction of calcium hydroxide with hydrogen chloride using single crystals, *Ind. Eng. Chem. Res.* 59 (2020) 9699–9704. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.9b06967>.
- [4] A. Dal Pozzo, R. Moricone, G. Antonioni, A. Tugnoli, V. Cozzani, Hydrogen chloride removal from flue gas by low-temperature reaction with calcium hydroxide, *Energy Fuels* 32 (2018) 747–756. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03292>.
- [5] A. T. Sobczyk, A. Marchewicz, A. Krupa, A. Jaworek, Ł. Śliwiński, M. Kobylańska-Pawlisz, W. Pawliczek, G. Boryczko, A. Kozera, Acid gases removal by dry sorbent injection to hybrid electrostatic agglomeration-filtration system, *Sep. Purif. Technol.* 376 (2025). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2025.134113>.
- [6] K. Inoue, K. Yasuda, K. Kawamoto, Atmospheric pollutants discharged from municipal solid waste incineration and gasification-melting facilities in Japan, *Waste Manag. Res.* 27 (2009) 617–622.
- [7] Y. Yu, S. Xiong, H. Huang, L. Zhao, K. Nie, S. Chen, J. Xu, X. Yin, H. Wang, L. Wang, Fabrication and application of poly (phenylene sulfide) ultrafine fiber, *React. Funct. Polym.* 150 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2020.104539>.
- [8] M. Zhang, Y. Gao, Y. Zhang, M. Zhang, Y. Gao, B. Cheng, Z. Li, Preparation and properties of polyphenylene sulfide/oxidized-polyphenylene sulfide composite membranes, *React. Funct. Polym.* 160 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2021.104842>.
- [9] P. Zhao, J. Yan, C. Chen, H. Zhang, M. Wu, S. Yao, Y. Jia, H. Wang, S. Xiong, L. Wang, PPS ultrafine fiber enhanced aramid fiber filter with superior thermal stability and excellent chemical resistance for efficient PM_{2.5} removal, *React. Funct. Polym.* 188 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2023.105605>.
- [10] W. J. Wang, Y. Dong, Z. M. Wei, S. R. Long, J. Yang, J. C. Yang, X. J. Wang, Hydrothermal aging of short glass fiber reinforced polyphenylene sulfide composites and property prediction, *Polym. Degrad. Stab.* 217 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110503>.
- [11] T. Kawaguchi, H. Nishimura, K. Ito, T. Kuriyama, I. Narisawa, Hot water resistance of glass-fiber and glass-bead reinforced thermoplastics, *Polym. Compos.* 24 (2003) 181–191. <https://doi.org/10.1002/pc.10018>.
- [12] W. He, Y. Guo, R. Shen, F. Dai, X. Zhou, J. Liu, In-situ leakage detection of single bag filter in baghouse based on the resistance change of conductive polymer fibers, *J. Appl. Polym. Sci.* 140 (2023). <https://doi.org/10.1002/app.54453>.
- [13] W. Tanthapanichakoon, M. Furuuchi, K. Nitta, M. Hata, Y. Otani, Degradation of bag-filter non-woven fabrics by nitric oxide at high temperatures, *Adv. Powder Technol.* 18 (2007) 349–354. <https://doi.org/10.1163/156855207780860264>.
- [14] W. Tanthapanichakoon, M. Hata, K. Nitta, M. Furuuchi, Y. Otani, Mechanical degradation of filter polymer materials: Polyphenylene sulfide, *Polym. Degrad. Stab.* 91 (2006) 2614–2621. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2006.05.005>.
- [15] ISO16891-2016, Test methods for evaluating degradation of characteristics of cleanable filter media (2016).
- [16] M. I. F. Rozy, K. Ito, K. Une, T. Fukasawa, T. Ishigami, M. Wada, K. Fukui, A continuous-flow exposure method to determine degradation of polyphenylene sulfide non-woven bag-filter media by NO₂ gas at high temperature, *Adv. Powder Technol.* 30 (2019) 2881–2889. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.08.032>.
- [17] K. Fukui, G. Ichiba, M. I. F. Rozy, K. Ito, T. Fukasawa, T. Ishigami, Effects of NO₂ gas concentration on the degradation of polyphenylene sulfide non-woven bag filter at high temperature, *Adv. Powder Technol.* 32 (2021) 3278–3287. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.07.016>.
- [18] K. Fukui, M. Yamada, G. Ichiba, F. A. Prasetya, H. P. Kuo, A. N. Huang, T. Fukasawa, T. Ishigami, Effects of exposure temperature on degradation of polyphenylene sulfide non-woven bag-filter media by NO₂ gas at high temperature, *Adv. Powder Technol.* 34 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.apt.2023.105605>.

- 2023.104195.
- [19] G. Yang, W. Liu, B. Feng, W. Song, M. Zhang, K. Su, H. Yang, Z. Li, Polyphenylene sulfide nonwoven filter modified with peracetic acid and its usage in emission control under extreme conditions, *ACS Appl. Polym. Mater.* 6 (2024) 10509–10518. <https://doi.org/10.1021/acsapm.4c01662>.
- [20] C. Weilong, H. Gongren, Oxidation degradation of polyphenylene sulfide needle felt at different sulfuric acid dew point temperatures, *High Perform. Polym.* 27 (2015) 94–99.
- [21] G. Zhang, Q. Wang, X. Yu, D. Su, Z. Lr, G. Zhang, FTIR-PAS investigation on polyphenylene sulphide, *Spectrochim. Acta A* 47 (1991) 737–741.
- [22] P. Zuo, A. Tcharkhtchi, M. Shirinbayan, J. Fitoussi, F. Bakir, Multiscale physicochemical characterization of a short glass fiber-reinforced polyphenylene sulfide composite under aging and its thermo-oxidative mechanism, *Polym. Adv. Technol.* 30 (2019) 584–597. <https://doi.org/10.1002/pat.4495>.
- [23] W. Xueshi, W. Haibing, Z. Jin, F. Xingzhong, Study on thermal properties and crystallization behavior of blends of poly(phenylene sulfide)/poly(ether imide), *Polym. Plast. Technol. Eng.* 49 (2010) 1506–1514.
- [24] W. Badeghaish, A. Wagih, S. Rastogi, G. Lubineau, Effect of high-temperature acid aging on microstructure and mechanical properties of PEEK, *Polym. Test.* 134 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108429>.
- [25] W. J. Wang, Y. Dong, Z. M. Wei, S. R. Long, J. Yang, J. C. Yang, X. J. Wang, Hydrothermal aging of short glass fiber reinforced polyphenylene sulfide composites and property prediction, *Polym. Degrad. Stab.* 217 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2023.110503>.
- [26] L. Maduna, A. Patnaik, R. Nayak, The use of the Box–Behnken experimental design to model tensile strength of spunlaced fabrics and evaluating fabrics behaviour in acidic condition, *J. Ind. Text.* 51 (2022) 837–855. <https://doi.org/10.1177/1528083719894640>.
- [27] W. Tanthapanichakoon, M. Furuuchi, K. Nitta, M. Hata, S. Endoh, Y. Otani, Degradation of semi-crystalline PPS bag-filter materials by NO and O₂ at high temperature, *Polym. Degrad. Stab.* 91 (2006) 1637–1644. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2005.12.008>.
- [28] Y. Ye, Z. Wang, Effect of corona discharge on polyphenylene sulfide filter material of electrostatic-bag composite precipitators, *Ind. Eng. Chem. Res.* 57 (2018) 1319–1330. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03829>.