

水素サプライネットワークで用いられるシール材料の LCA による環境適合性評価

Evaluating Environmental Compatibility by LCA Method for Sealing Materials Used in Hydrogen Supply Network

NOK (正) *青柳 彩子 NOK (正) 村上 渉 NOK (非) 北川 敦沙比 NOK (正) 本田 重信

九大 (正) 田中 宏昌 九大 (正) 新盛 弘法

BAM (非) Géraldine Theiler FTI (非) Emiel Dobbelaar 九大 (正) 澤江 義則

Ayako Aoyagi*, Wataru Murakami*, Asahi Kitagawa*, Shigenobu Honda*, Hiroyoshi Tanaka**, Hironori Shinmori**

Géraldine Theiler***, Emiel Dobbelaar****, Yoshinori Sawae**

*NOK CORPORATION, ** Kyushu University,

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, *Freudenberg Technology Innovation

1. はじめに

摩擦を制御することによりシステムのエネルギー効率を上げ損失エネルギーを減らす、摩耗を少なくすることにより部品の長寿命化に貢献するなど、トライボロジーという学問はそれそのものが環境問題への直接的なアプローチとなり得るという意味で重要である。近年では、世界がカーボンニュートラルへ舵を切ったことでその重要性はさらに増している。先に挙げた摩擦や摩耗の制御に加えて、電動化など動力源の変化が機械に用いられる要素部品の使用環境に影響し、その潤滑状態に合わせた設計指針の提示が望まれている。その際には、新たな課題への対処が必要となりトライボロジーの知見の積み上げが役に立つ。

本研究は、カーボンニュートラルへの対応として研究開発の進む水素エネルギー社会実現のために必要不可欠な水素サプライネットワークで用いられるシール材料を対象としている。シール材料の中でも、シールリングに用いられる樹脂材料、O リングなどに用いられるゴム材料をそれぞれ対象とし、水素中での摩擦摩耗試験および環境適合性評価を行なった。その中でも、本発表では、環境適合性の数値化について報告する。この環境適合性評価は CO₂ 排出量の LCA (Life Cycle Assessment) により行った。得られた LCA 結果と各材料の摩擦摩耗特性を合わせてマッピングすることでカーボンニュートラルに貢献する材料選定の指針の一例を示す。合わせて環境負荷低減の方法の一つとして PFAS (Perfluoroalkyl Substances) 規制対応¹⁾を想定し、フッ素フリー材についても検討を行った。

2. 評価手法

2.1 CO₂ 排出量算出方法

本プロジェクトにおける原料製造時の CO₂ 排出量の評価は ISO14040:2010 及び ISO14044:2010 に定められる評価段階を参照した。Cradle-to-gate モデル (原料製造から製品製造までを計算対象とする手法) を採用し、製品の原料製造段階における CO₂ 排出量と製品製造段階における CO₂ 排出量をそれぞれ計算し足し合わせることで、その製品の LCA を行った。ゴム材料については体積 0.87 cm³ の O リングを、樹脂材料については体積 0.90 cm³ のシールリングを想定して算出を行った。

各原料製造段階における CO₂ 排出量は PEEK を除き主に AIST-IDEA (Inventory Database for Environmental Analysis) (ver.3.4) (以下、IDEA データベース) を参照し、これは本研究において用いた原料の含まれるカテゴリー数を比較し、網羅性が高かったため採用した。IDEA データベースに対応したカテゴリーが存在しない原料は、製造方法が近い原料カテゴリーの値を用いた。PEEK (Polyetheretherketone) の数値は、データベースに製造方法が近い原料のカテゴリーが含まれていないため、GaBi (Ganzheitliche Bilanzierung) データベースを用いた業界の平均値であり、IDEA データベースとは異なる方法で算出されたものである。環境適合材に使用した植物由来原料については、IDEA データベースに記載がないため、製造方法が近い原料におけるカテゴリーの数値の計算式に用いられる数値のうち、植物由来成分の原料製造に由来する CO₂ 排出量が 0 となるように再計算した値を用いた。例えば、植物由来のモノマー A を用いて製造されるポリマーの場合、データベースからそのポリマーの製造の各段階における CO₂ 排出量を抽出し、そのうちモノマー A を製造した際の CO₂ 排出量を 0 とするように減算し、その他のポリマー製造にかかる CO₂ 排出量はそのまま足し合わせることで値を計算した。

これらデータベースから抽出した CO₂ 排出量の数値を基に各材料の原料製造の段階における合計値を出すことで環境負荷を数値化した。それぞれのシールサンプルの原料製造段階における CO₂ 排出量計算式を以下に示す。

Table 1 Considered process for calculating electric consumption

(a) Rubber samples

1. Production of raw materials
2. Compound production by mixing with kneader and roll
3. Curig

(b) Resin samples

1. Production of raw materials
2. Blending
3. Molding
4. Baking (only for PTFE)

(原料製造における CO₂ 排出量, kg-CO₂/個)
 $= \Sigma \{ (\text{各原料の生産における CO}_2 \text{ 排出量, kg-CO}_2/\text{kg}) \times (\text{各原料の重量含有率, \%}) \times (\text{サンプルの体積, cm}^3/\text{個}) \times (\text{比重, kg/cm}^3)$

各シールサンプル作成における CO₂ 排出量を算出するために、その工程における電力消費量を測定した。該当する工程を Fig. 1 に示す。その電力量に、環境省電気事業者別排出係数一覧記載の全国平均係数（令和 7 年）を乗ずることにより CO₂ 排出量を求めた。それぞれのシールサンプルの作成段階における CO₂ 排出量の計算式を以下に示す。

(サンプル作成における CO₂ 排出量, kg-CO₂/個)
 $= \Sigma (\text{サンプル 1kg あたりを生産するときの各作成工程の使用電力量, kWh/kg}) \times (\text{全国平均係数, kg-CO}_2/\text{kWh}) \times (\text{サンプルの体積, cm}^3/\text{個}) \times (\text{比重, kg/cm}^3)$

Table 2 Materials	
Material	Filler
PTFE	CF + Bronze
PEEK-A	CF
PEEK-B	CF + PTFE
PEEK-C	CF + Graphite
PEEK-D	CF + MoS ₂
PEEK-E	CF + Graphite + PTFE
PA66	GF
PAX	CF

2.2 摩擦摩耗評価

摩擦摩耗評価を行った樹脂材料に含まれる主な原料を Table 2 に示す。表中の略語は PTFE (Polytetrafluoroethylene), PA (Polyamide), PAX (植物性原料を用いた Polyamide), CF (Carbon Fiber), GF (Glass Fiber) をそれぞれ示す。試験条件は Table 3 に示す。大気圧 (0.1 MPa)・室温水素雰囲気として、ピン・オン・ディスク型摩擦試験機でしゅう動試験を行い、ピン試験片 (φ6 mm・15 mm) を用いた。比摩耗量の算出のために、試験前後で重量計測を行った。

Table 3 Experimental conditions					
	Gas pressure, MPa	Temperature, °C	Sliding velocity, m/s	Contact pressure, MPa	Sliding distance, m
1	0.1	RT	0.5	3.0	1800

3. 結果と考察

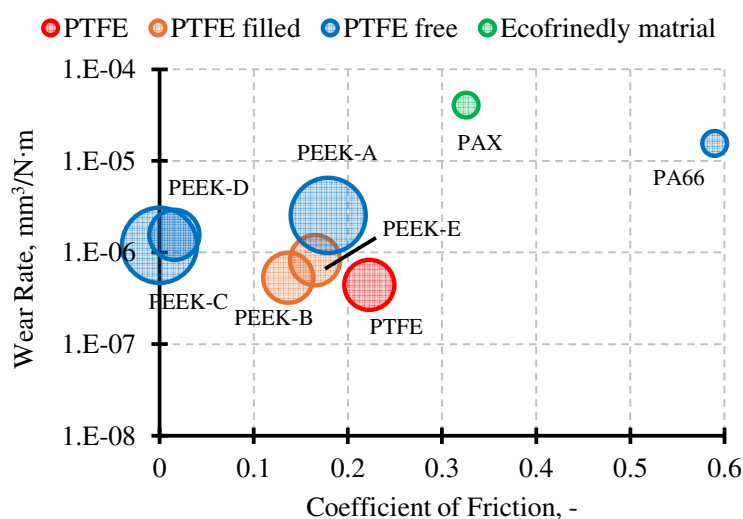


Fig. 1 Wear map

樹脂材料の摩擦・摩耗マップを Fig. 1 に示す。縦軸を比摩耗量、横軸を摩擦係数として評価結果をまとめ、材料間の比較を行った。プロットのバブルの大きさは CO₂ 排出量に比例する。ベンチマーク材である PTFE 複合材および PTFE を充てん材として含む PEEK 複合材がマップ中の左下に位置しており、水素ガス中において優れた耐久性（低摩耗）と機能性（低摩擦）を示した。今回開発したフッ素フリー材のうち、PEEK 系複合材のいくつかはベンチマーク材に近い結果を示した。また環境適合性向上材である PAX は LCA による CO₂ 排出量がベンチマーク材よりも低いことが確認されたが、性能評価では摩擦係数はベンチマーク材に近いものの、比摩耗量が大きく対策が必要ことが明らかとなった。

4. まとめ

水素中での摩擦摩耗特性の良い環境適合材料の開発のために、その特性評価として水素中摩擦摩耗試験を、環境適合性評価として LCA および PFOA 含有の有無についても考察を行ったところ、植物由来成分を含有する PA は LCA で良好な結果を示したが PA は耐摩耗性の向上が課題であることが、PEEK は摩擦摩耗特性が良好であることから PFOA 対応の候補材料となり得ることがそれぞれわかった。

本研究は、国立研究開発法人科学技術振興機構（JST）戦略的国際共同研究プログラム（SICORP）グラント番号 JPMJSC2121 の支援を受けたものであることを付記する。

文献

- 1) 環境省：PFAS に関する今後の対応の方向性、PFAS に対する総合戦略検討専門家会議（2023）。