

## 陰極電解水素チャージを施した鋳鉄の摩耗挙動 Wear behavior of cathodic hydrogen-charged cast iron

都市大・理工（正）\*亀山 雄高 都市大・理工（非）田山 りく 都市大・理工（非）波塚 柊哉

都市大・理工（非）藤村 謙太郎 リケン（正）臼井 美幸樹 リケン（正）佐藤 雅之

Yutaka Kameyama \*, Riku Tayama\*, Shuya Namiduka\*, Kentaro Fujimura\*, Miyuki Usui\*\*, Masayuki Sato\*\*

\*Tokyo City University, \*\*RIKEN Corp.

### 1. 緒言

自動車業界において水素エンジンへの注目が高まっている。すなわち、バッテリー容量の観点から EV 化が行いにくい大型貨物車のカーボンニュートラル対応策として水素エンジンが有力視されており、エンジン自体の研究開発や実用化が世界的に加速している。一方、水素エンジンでは必然的に水素に曝露される環境で機械が稼働することから、しゅう動部材を含めて種々の材料に対して水素が及ぼす影響を明確にしておくことも重要といえる。

水素に係るトライボロジーについてはこれまでも多くの研究がなされており、水素雰囲気下でしゅう動部材が受ける影響について多くの知見が得られている。それによれば、水素それ自体がしゅう動部材の構成材料と反応や拡散を生じるばかりではなく、むしろ水素ガス中の不純物<sup>2)</sup>や水素による還元作用<sup>3)</sup>の寄与によって摩擦摩耗特性が強く影響を受けている場合もある。一方、水素が材料中に侵入した場合に懸念される水素脆性の影響については、主に軸受部材における転がり疲労に着目した研究<sup>4)</sup>が行われている。それと比べるとすべり摩擦下での摩耗現象に及ぼす水素脆性の影響についての知見は必ずしも多くはない。産業界におけるしゅう動部の耐水素脆性に関する設計指針を充実させるためには、各種の材料において水素脆性が摩耗に影響を及ぼすのか否かという点について、基礎的な評価を行うことが重要といえる。

水素脆性は材料中に侵入した水素によって引き起こされるが、水素環境中でのしゅう動では前述の通り表面に吸着した水素や、水素以外の成分による関与もあり、現象が複雑である。そこで本研究では、材料強度学の分野で水素脆性の評価にしばしば用いられる陰極電解水素チャージ法を摩耗試験システムに組み込むことにより、水素をしゅう動部材へ吸蔵させつつ摩耗挙動を評価することが可能な試験システムの構築を試みた。さらに、構築した試験システムを用いて鋳鉄材の摩耗現象について検討を加えた。

### 2. その場水素チャージ摩擦摩耗試験システムの概要

本研究で着目した陰極電解水素チャージとは、電解液を電気分解して水素イオンを発生させ、その際に用いた陰極上で水素イオンを還元して得た原子状水素を陰極材料へと拡散させる方法である<sup>5)</sup>。本研究で構築した試験システムを図1に示す。本システムは、往復しゅう動式摩耗試験機上に電解用セルを設置することで構成されており、セルに取り付けた試験片に対して摩耗試験と水素チャージとを並行して行える機能を具備している。試験片の摩擦摩耗試験へ供する面は電解液の液面よりも高い位置に来るように設定されているため、浸液されていない状態の面で摩耗試験を実施することができる。水素は試験片の浸漬面より材料へ侵入して内部に拡散することを想定している。

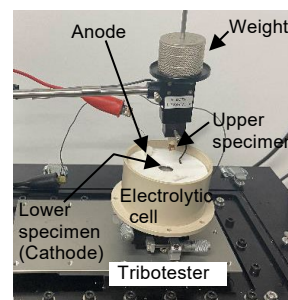


Fig.1 Outlook of *in-situ* hydrogen-charge tribotester.

### 3. 実験方法

供試材料はエンジンのシリンダライナ材を想定したねずみ鋳鉄 FC250 相当材 (□20×t5) で、あらかじめしゅう動面を研磨した状態で摩耗試験の下部試験片とした。この下部試験片をその場水素チャージ摩擦摩耗試験システムへ設置し、次に詳述する条件で陰極電解水素チャージを行った。すなわち、クエン酸 (45mmol/L)、りん酸水素二ナトリウム (11mmol/L) およびチオシアン酸アンモニウム (0.01mass%) の混合溶液を電解液として用いて、電流密度 500A/m<sup>2</sup> の条件のもと、白金板を陽極として行った。チャージ時間は摩耗試験を行う場合は最大で 24h とした。元素分析用の試験片では、これよりも長く最大 72h のチャージも行った。水素チャージ最終盤の約 420 分にわたって、ピストンリング (曲率半径 57.5mm) より切り出した試験片を相手材とした往復しゅう動式摩耗試験を市販エンジンオイルによる油潤滑下で行った。その試験条件は、垂直荷重 2.94N、ストローク 5mm、すべり速度 500mm/min である。試験中には試験機内蔵のロードセルで摩擦力を測定し、摩擦係数を算出した。さらに、摩耗痕を直交するように触針式粗さ計で断面曲線を採用し、摩耗量の比較指標とした。

### 4. 実験結果および考察

水素チャージの有無による鋳鉄の摩擦摩耗特性の差異について論じるため、図2に摩耗痕観察結果と摩耗痕断面曲線をまとめて示す。水素チャージを行っていない試験片 (未チャージ材、同図(a), (b)) と比較して、水素チャージを

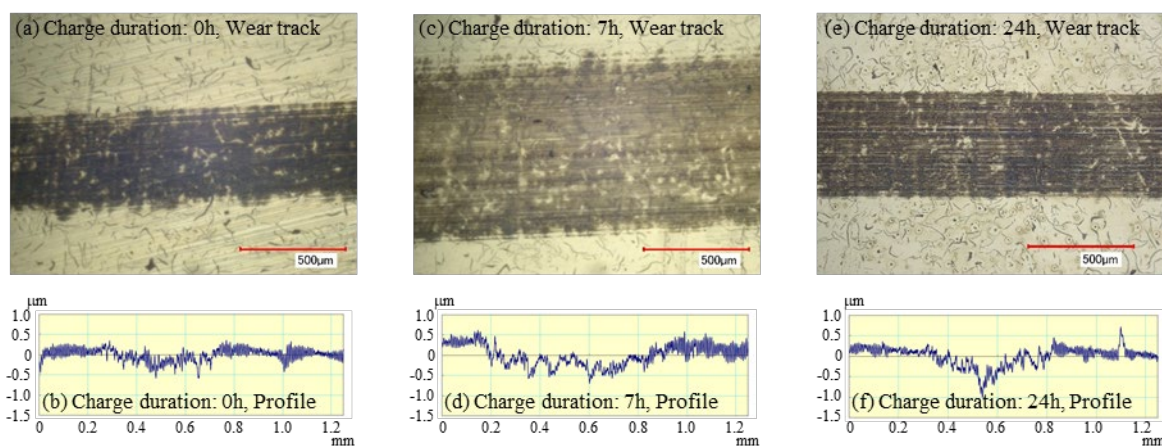


Fig.2 Appearance of the wear tracks and corresponding profile curves.

行った試験片（同図(c)~(f)）の摩耗痕は広く、深さも大きいことが見て取れる．いずれの条件とも、摩耗痕は黒色を呈しており黒鉛の移着膜が形成されているものと思われたが、水素チャージを行った試験片の場合には白色の擦過痕も目立った．これは、深く摩耗した領域で移着膜の形成が及ばなかったことを示唆する結果である．これらの特徴より、水素チャージを施すことにより鋳鉄の摩耗が促進された可能性が見出された．

以上で述べた摩耗挙動の差異が水素の影響と関連するものであるか否かについて検討を加えるため、しゅう動試験面の水素分布状態についてグロー放電発光分光法（GD-OES）を用いて分析を行った．ここでは、摩耗試験は実施せずに水素チャージのみを行った試験片を分析対象とした．得られた水素濃度の分布を図 3 に示す．表面から十分内部では水素チャージの有無にかかわらずいずれの試験片の水素濃度とも同程度であった．一方、最表面からおよそ  $2\mu\text{m}$  の範囲では、水素チャージを行った試験片の水素濃度は、二度分析を行った未チャージ材のそれらと比べて高かったことがわかる．また、チャージ時間の短い（24h）試験片の方が水素濃度は高かった．チャージ時間と表面の水素量が単純に対応しているわけではないことがうかがわれた．

なお、試験片表面で水素濃度が高かった点を鑑みると、水素は（当初設計していた）浸液面ではなく試験面から材料へ侵入していることが示唆された．

今回の水素濃度分布には、最表面ナノレベルの範囲では吸着気体などの影響も含まれるものと推察されるが、それよりも内部であっても水素量に差が認められたことから、水素チャージ処理を施した結果試験片表面近傍の領域が水素リッチな状態となっていたと判断された．水素濃度の増加は十～百 ppm オーダーであったが、これは材種によっては水素脆性が現れるのに十分な水準である．今回の摩耗試験結果に対しても、水素による何らかの影響が及ぼされていた可能性はあるといえる．

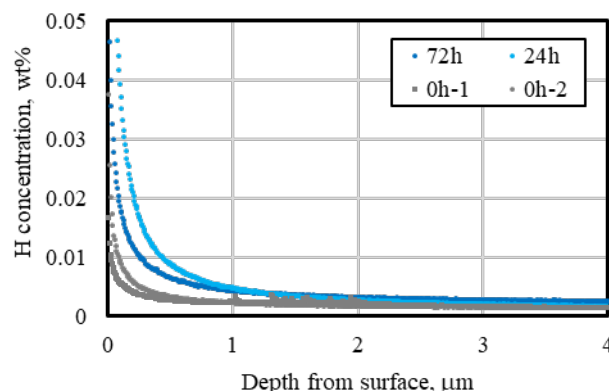


Fig.3 GD-OES depth profiles of H obtained on hydrogen-charged and unworn specimens

## 5. おわりに

摩耗試験と同時にその場で電気化学的に水素を発生させ材料に付加することを狙いとした実験装置「その場水素チャージ摩擦摩耗試験システム」を試作し、鋳鉄へ水素チャージしながら摩耗特性の評価を行った．水素の侵入経路については引き続き精査が必要であるが、しゅう動面で十～百 ppm オーダーの水素濃度増加が生じた状態で摩耗試験を実施することが可能であったことから、水素脆性による摩耗への影響を検討するための実験プラットフォームとしての一定の意義があると考えられる．引き続き試験の妥当性についての検証を進めていきたい．

## 参考文献

- 1) 杉村：水素社会の実現に貢献するトライボロジー研究，トライボロジスト，67，6 (2022) 402-410.
- 2) 福田：水素雰囲気における金属の摩擦・摩耗，トライボロジスト，60，10 (2015) 632-637.
- 3) Yin：Tribology of PTFE in Hydrogen Atmosphere, Tribol. Int. 204 (2025) 110481.
- 4) 宇山：転がり軸受に及ぼす水素の影響，トライボロジスト，60，10 (2015) 658-663.
- 5) 中谷：薄肉形状を持つ高強度鋼材の遅れ破壊について，日本機械学会論文集 A，64，626 (1998) 2561-2566.