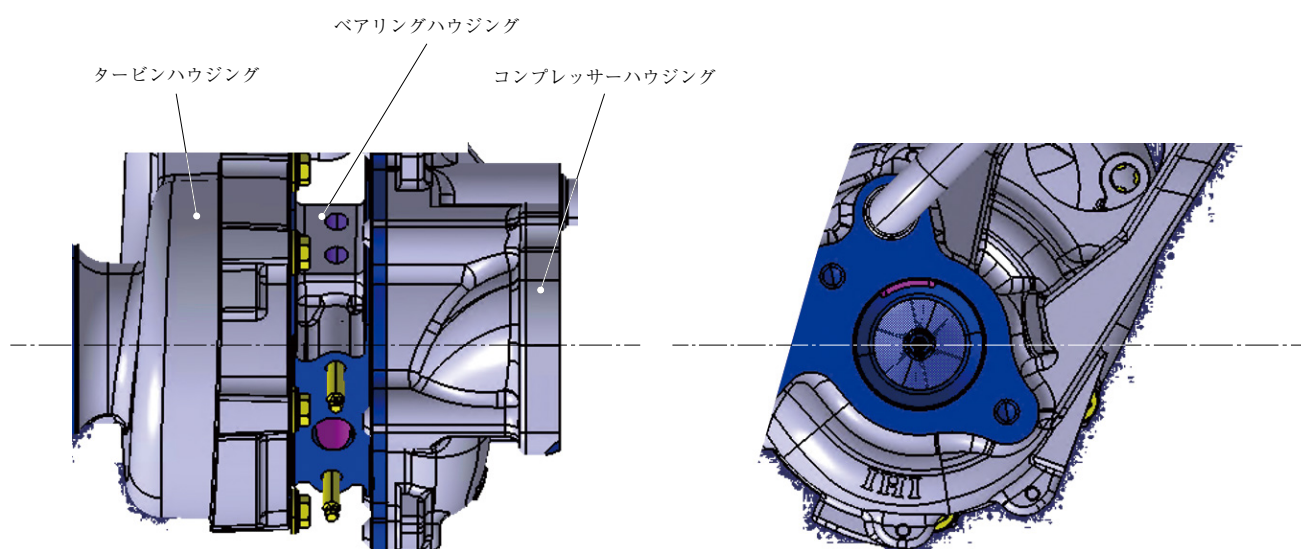


水素エンジン向けターボチャージャーの開発

ガソリン，ディーゼルエンジンでは経験のない課題を解決

IHI グループは、カーボンニュートラルに貢献する技術の一つとして期待される水素エンジン用ターボチャージャーの開発に取り組んだ。従来エンジンには見られなかった凝縮水によるコンプレッサーインペラの羽根欠けと、水素燃料による材料の水素脆化^{せいけ}に対する評価を行った。



水素エンジン向けターボチャージャー外観

はじめに

近年、地球温暖化対策としてカーボンニュートラルへの取り組みが世界的に加速している。その中で、自動車用水素燃焼レシプロエンジン（以下、水素エンジン）は、持続可能な社会の実現に向けた注目技術の一つである。水素エンジンは、従来のガソリンやディーゼルエンジンと異なり、燃料として水素を使用する。水素は燃焼しても主な排出物は水蒸気であり、二酸化炭素の排出がほぼない。これにより、温室効果ガス削減に大きく貢献できると期待されている。さらに、再生可能エネルギー由来の水素を利用すれば、製造過程も含めてカーボンニュートラルなエネルギー循環

が可能となる。一方、水素エンジンの性能向上にはターボチャージャーの活用が欠かせない。水素はガソリンや軽油に比べ体積当たりのエネルギー密度が小さいため、同じ排気量では出力が低くなるという課題がある。ターボチャージャーは、吸入空気量を増やし、より多くの水素を効率良く燃焼させることで、エンジン出力やトルクを大幅に向上させる。また、燃焼効率の改善やエンジンの小型化にも寄与し、実用性の高い水素エンジンの実現に貢献する。水素エンジンとターボチャージャーの組み合わせは、カーボンニュートラル社会への移行を加速する革新的な技術として、今後発展が期待されている。

開発過程で発生した課題

水素エンジン向けターボチャージャーの開発では、従来のエンジンとは異なる新たな技術課題に直面した。第1の課題は、燃焼ガス中に水分が多く含まれることによる影響である。水素エンジンでは、燃焼の結果としてガソリンに比べ約6倍の水蒸気が発生する。この水分はブローパイガス（ピストンとシリンダ壁の隙間から漏れ出す燃焼ガス、吸気側に戻すことが求められている）にも凝縮水として含まれる。このブローパイガスをコンプレッサー上流に戻すと、コンプレッサーインペラと凝縮水が衝突する事態が生じる。その結果、インペラの表面にエロージョン（欠けや摩耗）が発生し、部品寿命や性能に悪影響を及ぼす。

第2の課題は、水素環境下での耐久性評価である。水素エンジンでは、ターボチャージャーの部品が直接水素にさらされる環境となる。水素は金属材料に対して水素脆化と呼ばれる現象を引き起こすことがあり、材料の強度低下や破損のリスクが高まる。そのため、ターボチャージャー部品が実際のエンジン使用環境下で水素脆化を起こさないかどうかを評価する必要がある。

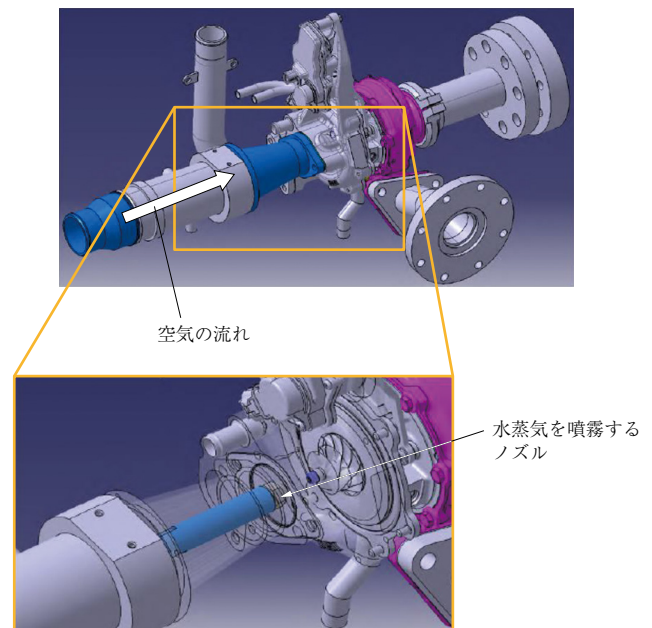
それぞれの課題に対する評価と結果を以下に示す。

エロージョンに対する評価

コンプレッサーインペラのエロージョンに対する耐久性向上を目的として、めっきをインペラ表面に適用し、従来よりも高い耐摩耗性の実現を目指した。

社内での評価試験に当たっては、既存のテストベンチに幾つかの改造を加えた。具体的には、コンプレッサー吸込配管内に凝縮水を噴霧するノズルを設置し、さらに、試験中に吸込口の様子をリアルタイムで確認できるよう工業用内視鏡を配管に取り付けた。これにより、凝縮水がコンプレッサーインペラと衝突する状態を再現し、運転中の水の動きを確認できるようになった。

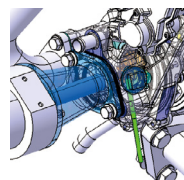
試験では、「水滴の粒径」、「噴霧する水の総量」、「ターボチャージャー回転数」の三つのパラメーターを設定してターボチャージャーの運転を行った。その結果、以下の知見が得られた。



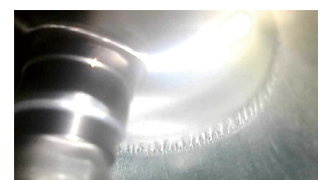
エロージョン評価時のテストベンチ外観モデル



(a) 凝縮水をコンプレッサーインペラに噴霧する様子



(b) 試験中の様子を観察するための工業用内視鏡

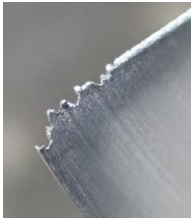


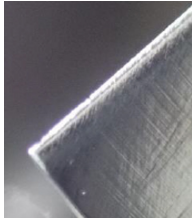
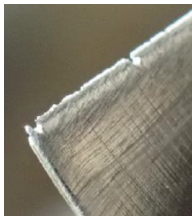


(c) 試験中のコンプレッサーインペラ前縁近傍の水の流れ

コンプレッサーインペラのエロージョン評価試験の様子

水滴の粒径を変更してもインペラの欠け量に大きな差は認められなかったが、噴霧する水の総量を増やすと、インペラの欠け量が増加する傾向が現れた。また、ターボチャージャーの回転数が異なるとエロージョンの形態が変化することが示された。低回転ではインペラ先端が欠けているのに対して、高回転ではインペラ先端から数mm径方向の範囲に欠けが見られた。

噴霧する水の総量が多いほどインペラの欠け量は増加し、ターボチャージャーが長時間使用されるほど欠

項 目	試験 1	試験 2	試験 3	試験 4	試験 5
めっき有無	な し	あ り	あ り	あ り	あ り
水 蒸 気 粒 径	a (mm)	a (mm)	a (mm) × 2	a (mm)	a (mm)
総 噴 霧 量	b (L)	b (L)	b (L) × 1.2	b (L)	b (L) × 4
ターボチャージャー回転数	c (rpm)	c (rpm)	c (rpm)	c (rpm) × 1.8	c (rpm) × 1.8
エロージョン (インペラ前縁)					

エロージョン評価結果一覧

け量が蓄積することが示唆された。また、めっきの効果を確認するため、めっきの有無でも試験を実施した。試験後のインペラの欠け状態をめっきの有無と比較すると、めっきを施すことで欠け量を抑えられていることが分かった。この結果から、めっきがエロージョンに対する有効な対策になり得ることが示された。

水素脆化評価

ターボチャージャーは、エンジン排気ガスに含まれる水素、クランクケースから漏れる水素、さらに排気ガス再循環 (Exhaust Gas Recirculation : EGR) によって、構成部品の多くが水素環境下にさらされる。これらの水素が各部品内部に吸蔵されることで、突発的な破壊を引き起こす水素脆化の発生が懸念される。この問題を解決しない限り、水素エンジンへの適用は困難であり、水素脆化評価は極めて重要な課題である。

これまで、各製品および研究機関においてさまざまな水素脆化評価方法が採用されてきた。代表的な手法として、以下が挙げられる。

① 定ひずみ試験法 (Constant Strain Test : CST)

試験片に力を加えてひずみを生じさせた状態で、水素環境や硫酸・塩酸などの腐食溶液中にさらし、破断時間の短縮や割れの発生・進展を評価する方法。

② 定荷重試験法 (Constant Load Test : CLT)

水素添加しながら、一定の荷重を負荷し破断まで

の時間、あるいは遅れ破壊限度応力を評価する方法。

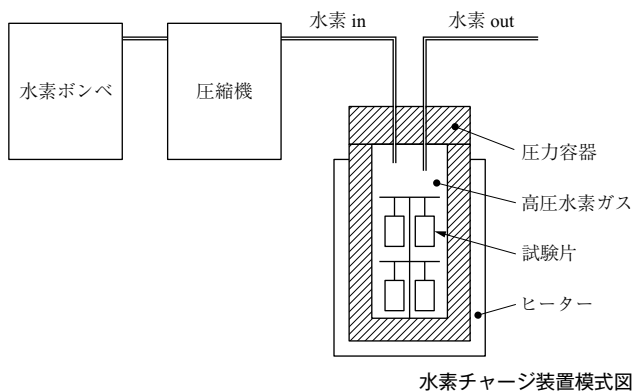
③ 低ひずみ速度引張 (Slow Strain Rate Tensile : SSRT) 試験法

試験片に水素を吸蔵させながら低速度で引張試験を行うことで、破断に至るまでの挙動を評価する方法。

① CST や ② CLT は、比較的簡便に実施可能であるが、評価に時間を要し、条件によっては破断に至らない場合や、多数のサンプルが必要となる場合がある。③ SSRT 試験法は、引張荷重で強制的に破断させるため、短時間での評価が可能であり、得られる情報も多いことから、水素脆化の研究において広く用いられている。

しかし、SSRT 試験法は、水素を多く含む環境下で、材料の塑性変形が進行する過程で著しい応力集中が生じるような極めて過酷な条件下で行われる。実際のターボチャージャーの使用環境を考慮すると、材料は弾性域内で使用されており、著しい応力集中が生じる箇所は存在しない。また、水素濃度も数%程度 (一度エンジンで水素が燃焼されているため) である。したがって、SSRT 試験法は、水素エンジンのターボチャージャーが置かれる比較的穏やかな水素環境とは異なり、より厳しい水素環境下で行われる試験であるといえる。

そこで本研究では、実機環境に近い条件での評価を目的として、SSRT 試験法ではなく、水素浸漬後の常温環境下での引張試験を実施することで、実機環境を模擬した水素脆化評価方法を考案した。



手順は以下のとおりである。

- (1) 試験片を水素チャンバーに投入。
- (2) チャンバー内に置いて、想定される環境温度および圧力にて、試験片中心まで水素が浸漬するまで保持する。
- (3) 試験片を常温にすばやく戻して、大気中にて引張試験を実施。

この手法で、水素脆化を評価した。

以下にステンレス鋼 (SUS) 3 種類の結果を示す。温度の影響により材料強度が変化する可能性もあるため、水素環境ではなくアルゴン (Ar) 環境下に置いた試験も比較として実施した。

一般的には、SSRT 試験法で評価した SUS 系の材料は水素脆化を起こすが、我々が実施した試験方法では 3 種類とも、アルゴン環境下の試験片と比較して、

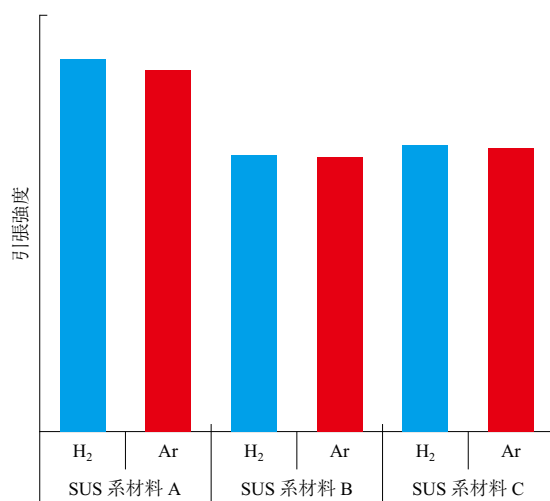
引張強度に変化がないことが確認できた。さらに破面観察も実施し、両者に差がないことから、排気ガス程度の水素濃度および温度であれば水素脆化は発生しないことを確認できた。また、本試験と破面観察をターボチャージャーの翼車材、シャフト材とハウジング材に対しても実施して、水素環境下とアルゴン環境下で引張強度と破面に変化がないことを確認できた。以上の結果から、ガソリンやディーゼルエンジン用ターボチャージャーと同じ部品が、水素エンジン用として使用できることが分かった。

おわりに

今回の課題解決を通して以下の知見を得ることができた。

- ・ めっきがインペラのエロージョンに対して対策となり得る
- ・ 水素エンジンの環境下ではターボチャージャーの部品は水素脆化しない

今後、本知見を活用して信頼性の高いターボチャージャーを自動車会社に提供し、カーボンニュートラル社会の発展に貢献する。



(注) SUS 系水素 (H₂) 処理 V.S. アルゴン (Ar) 処理

水素浸漬後の引張試験結果