

(1) 内燃機関の熱効率向上に貢献するエンジンオイルの低粘度化技術

写真 候補者 1	写真 候補者 2	写真 候補者 3	写真 候補者 4	写真 候補者 5
植松 裕太*1	山守 一雄*1	平野 聡伺*1	金子 豊治*2	宮田 奮*1

1. 概要

地球温暖化防止のため、内燃機関の熱効率向上は、最重要課題の一つである。エンジンオイルの改良は、内燃機関の摩擦損失や攪拌損失を大幅に低減する手段の一つであり、HVなどの電動化車両の燃費向上にも有効である。エンジンオイルの低粘度化は、攪拌損失の低減に寄与する一方、油膜が薄くなり摩耗などの信頼性低下の懸念がある。また、ダウンサイズにより省燃費化を達成する直噴過給などエンジンの進化に合せ、エンジンオイルも新しい技術開発を進める必要がある。そして、適した品質の製品をお客様に選択いただくための指標となる ILSAC GF-6 や JASO などの業界品質規格の整備も重要である。

受賞者は、直噴過給エンジンの課題である異常燃焼(LSPI)を抑制しつつ、低摩擦化を両立する技術を開発し、従来 0W-20 比較で 0W-16 は 1.0%、0W-20 は 0.5%の燃費向上を達成した(図 1, 2)。

さらなる低粘度化として 0W-8 開発に挑戦し、背反となる金属接触を抑制する油膜形成ポリマーなどの技術を開発した。これにより、更に 0.7%の燃費向上と信頼性を両立した。一方で、0W-8 に対応する世界初の規格である JASO GLV-1 の、わずか 2 年間での制定に大いに貢献した。



図 1. 開発オイル

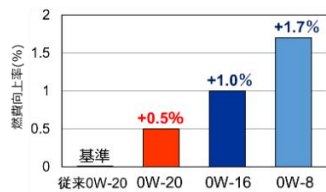


図 2. 開発品の燃費向上率

2. 技術の内容

2.1 GF-6 0W-16/0W-20 エンジンオイル技術

LSPI を増加させる Ca 系清浄剤の一部を Mg 系清浄剤に置き換えることで発生頻度を抑制。Mg 系清浄剤が、摩擦低減効果のある添加剤 MoDTC (モリブデンジチオカーバマイト) の表面吸着を阻害する課題に対しては、MoDTC と相性の良いホウ素系分散剤が有効である事を見出した。摩擦試験後の表面分析から以下の作用メカニズムを明らかにした。

(1)MoDTC は、摩耗防止剤の ZnDTP (ジアルキルジチオリン酸亜鉛) 由来のリン酸被膜(POx)上に MoS<sub>2</sub> 被膜を形成することで摩擦低減効果を示す。(2)Mg 系清浄剤を使用すると、清浄剤に含まれる硬質な MgCO<sub>3</sub> がリン酸被膜を摩擦させ、MoS<sub>2</sub> の形成を阻害する。(3)ホウ素系分散剤を使用することで、より硬質なリン酸-ホウ酸被膜(POx-BOx)が形成され、MoS<sub>2</sub> の形成による摩擦低減効果を維持出

来る。(図 3)

図 4 の通り、Mg 系清浄剤を使用した場合、摩擦係数が増加するが、ホウ素系分散剤を併用すると Mg 系清浄剤使用時でも Ca 系清浄剤と同等の低摩擦を示している。これらの添加剤技術の採用により、LSPI 抑制性、エンジン清浄性、省燃費性の両立を実現した。

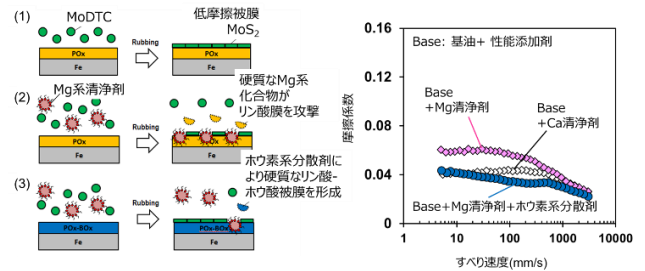


図 3. 摩擦低減作用メカニズム

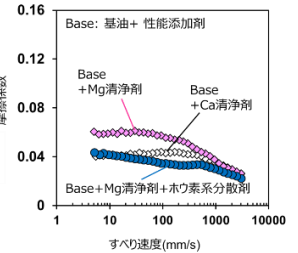


図 4. 摩擦試験結果

2.2 GLV-1 0W-8 エンジンオイル技術

GF-6 開発で見出したホウ素系添加剤と MoDTC の相互作用の知見を活かし、低粘度化により増加する境界潤滑環境部位の低摩擦被膜の形成を最大限に促進するため、新規にホウ素系清浄剤を開発。また、境界潤滑の割合を低減させるために、摺動面に入り込み支える油膜形成ポリマーを新規開発した(図 5, 6)。2 つの技術開発により、前述の 0W-16 比で約 25%の低粘度化を進めた 0W-8 は、更に 0.7%の燃費向上を達成した。2019 年 10 月に自動車技術会から発効された新規格「JASO GLV-1」を世界初取得している。

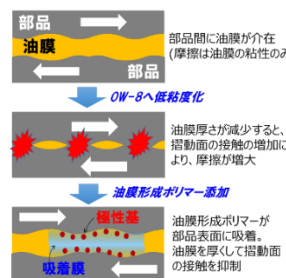


図 5. 油膜形成作用メカニズム

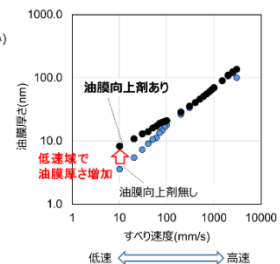


図 6. 油膜厚さ計測結果

3. まとめ

開発した 0W-16, 0W-20 オイルは 2017 年に市場に導入し、その後発行された ILSAC GF-6 規格も取得した。JASO GLV-1 0W-8 オイルは 2020 年に導入し、さらなる内燃機関の熱効率向上に寄与している。エンジンオイルは、新車のみならず、既に販売された旧モデルの車にも使用可能で適用範囲が広く、CO<sub>2</sub>削減にも大きく貢献している。最後に、開発に際しご協力頂いた関係者各位に心より御礼申し上げます。

\*1 正員, トヨタ自動車(株) (〒471-8572 愛知県豊田市トヨタ町 1)

## (2) 火花点火制御圧縮着火を導入した新型ガソリンエンジンの開発

写真 候補者 1	写真 候補者 2	写真 候補者 3	写真 候補者 4	写真 候補者 5
漆原 友則 <sup>1</sup>	遠藤 孝次 <sup>2</sup>	江角 圭太郎 <sup>3</sup>	井上 淳 <sup>2</sup>	末岡賢也 <sup>2</sup>

### 1. 概要

地球温暖化への対応として CO2 排出量の削減が求められる中、乗用車の動力源である内燃機関の熱効率に継続的な改善が必要である。本エンジンの開発においては熱効率向上のために高圧縮比化に加えて希薄・希釈燃焼を実現するため、ガソリン圧縮着火燃焼を導入した。商品化にあたって火花点火制御圧縮着火燃焼を開発し、圧縮着火燃焼の課題を独自の技術でブレイクスルーすることで乗用車用量産ガソリンエンジンとしては世界で初めて市場導入した。

### 2. 技術の内容

#### 2.1 エンジン開発の狙い

オットーサイクルの理論式であらわされるように、熱効率向上の制御因子は圧縮比と比熱比である。比熱比向上は燃料量に対して、空気または EGR で作動ガス量を増やす希薄／希釈燃焼によって実現可能である。

#### 2.2 リーン燃焼の課題

NOx の発生を抑えつつ十分な燃費効果を得られる高空燃比下で燃焼安定性を確保するためには、短時間で燃焼を完結させる必要がある。このための手段として火炎伝播に依らず温度と圧力で燃焼反応を起こす予混合圧縮着火燃焼 (HCCI 燃焼) が知られているが、本開発ではスパークプラグを圧縮着火の制御手段として利用することで圧縮着火制御の課題を克服した。点火による伝播燃焼が燃焼室内の混合気を追加圧縮し圧縮自己着火に最適な温度と圧力を形成することで、自己着火時期を可変にする機能により実現した。(火花点火制御圧縮着火: Spark Controlled Compression Ignition, SPCCI)

図 1 に示すように HCCI 燃焼の代表的な外乱の 1 つである吸気温度の変化に対して、SPCCI 燃焼では点火時期の調整により狙いの熱発生率へコントロールすることが可能である。

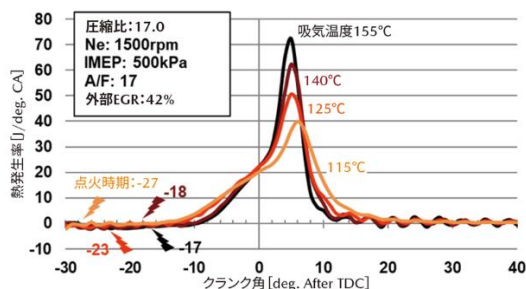


図 1. 火花点火時期による吸気温度影響の補正例

#### 2.3 エンジン諸元とシステム

高圧縮比下とリーン燃焼下の伝播燃焼速度を促進するために、高流動燃焼室形状と高流動吸気ポートを採用した (図 2)。また狙いの混合気形成を実現するための高燃圧噴射系、中高負荷でも EGR に

よる高希釈状態を維持するための高応答エアサプライ、筒内圧センサー等のエンジン技術を採用し、理想の燃焼実現に近づけた。

圧縮比は、出荷地域の燃料オクタン価特性を考慮し、欧州仕様は 16.3、国内仕様は吸排気オーバーラップを拡大して内部 EGR による筒内温度制御機能を強化し圧縮比への依存度を下げることで 15.0 とし、広範囲な燃料オクタン価への対応を可能とした。

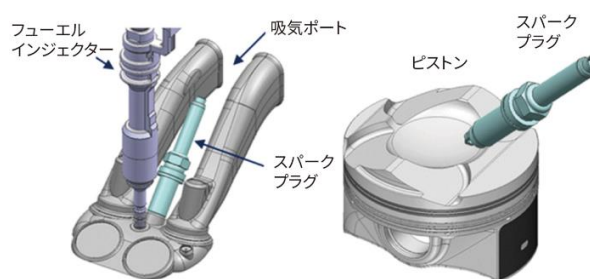


図 2. 燃焼室形状

#### 2.4 エンジン性能

SPCCI とエアサプライの組み合わせにより、自社従来型ガソリンエンジンに対して、全域でおおよそ 10%以上のトルク向上を実現した。

図 3 に燃費率マップの比較を示す。SPCCI 燃焼により軽負荷域の燃費を大幅に改善し、実用走行において低燃費領域を広く使うことが可能となった。

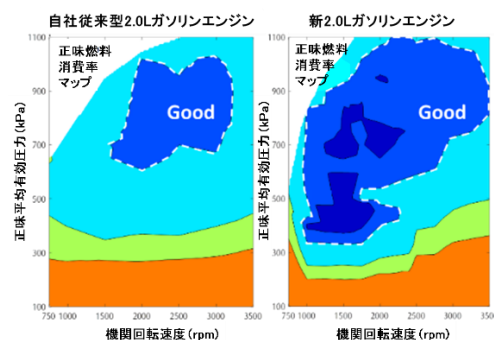


図 3. 正味燃料消費率マップの比較 (95 RON 燃料)

### 3. まとめ

本開発では、高圧縮比化と希薄・希釈燃焼の実現に取り組んだ。特に軽中負荷は SPCCI 燃焼により、燃費性能を大幅に高めることができた。本開発で得られたガソリン圧縮着火の技術を磨き、更なる熱効率の改善に挑んでいく。

<sup>1</sup> 正員、マツダ㈱ エンジン性能開発部 (〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地 3-1)

<sup>2</sup> マツダ㈱ エンジン性能開発部 (〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地 3-1)

<sup>3</sup> マツダ㈱ P T制御システム開発部 (〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地 3-1)

### (3) 新世代スプリット駆動CVTの開発

写真 候補者 1	写真 候補者 2	写真 候補者 3	写真 候補者 4	写真 候補者 5
奥平 総一郎 <sup>*1</sup>	松本 恭太 <sup>*2</sup>	米田 雄紀 <sup>*2</sup>	岸 大輔 <sup>*2</sup>	大治 直樹 <sup>*2</sup>

#### 1. 概要

世界的に地球環境保護への要求が高まっている中で、各社電動化が進んできているが、高価であるがゆえに、安価な小型ガソリン車は将来も多く残ると予想される。そのため、その車両に搭載される金属ベルト式無段変速機（以下、CVT）の燃費改善技術は非常に重要である。

従来のCVTの課題は、ベルト駆動により高変速比域の動力伝達効率が低いことでの燃費悪化である。また発進の駆動力向上とエンジン低回転化による燃費向上の両立のための変速比幅の拡大が、プリー径の拡大により、変速機の大規模化を招くことである。

受賞者は、それらを解決するため、通常のCVTにおけるベルト駆動に加え、動力分割（以下、スプリット）駆動を行うこと、また要素部品の構成、配置を工夫することで、高効率・ワイドレシオ・小型・軽量を実現するCVTを開発した。（図1）



図1. 新開発CVT

#### 2. 技術の内容

##### 2.1 基本断面とパワーフロー

新開発CVTの基本断面とパワーフローを図2に示す。ベルトモード（変速部をベルトのみで駆動）とスプリットモード（変速部をベルトとギヤ両方で駆動）の2モードを有する。低速時はベルトモードで走行し、高速になると、湿式多板クラッチを切り替えることで、モード移行し、スプリットモードで走行する。

また主要諸元を表1に示す。

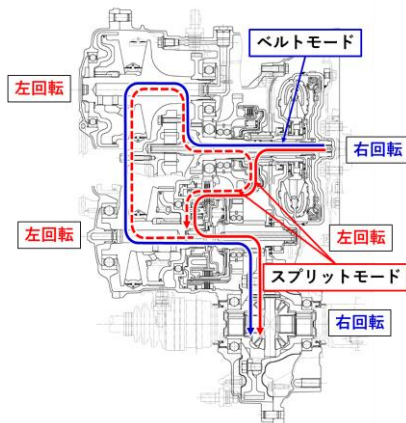


図2. 基本断面図と各軸回転方向

表1. 主要諸元

		新開発CVT		
		100Nm	150Nm	
立形級	トルク容量	100Nm	150Nm	
	変速比幅	6.7 (7.3※)	6.6 (7.3※)	
	前減速比	1.487	1.255	
	無段変速	ベルトモード	2.230~0.444	2.230~0.444
		スプリットモード	0.445~0.336	0.447~0.338
	終減速比	5.444	5.105	
坂ヤ	プリー間距離	136mm	136mm	
	入出力間距離	167.7mm	167.7mm	

※機械的に取りうる変速比

##### 2.2 スプリット駆動とトルク分担比

従来CVTのハイ変速比領域では、トランスミッション全体のトルク損失の内、オイルポンプ（以下、ポンプ）とベルト部の損失が約8割を占め、その部分の改善が重要である。

ポンプ部ではベルトがトルクを摩擦力で伝達するために、プリーを挟む油圧を発生させることにより、トルク損失が発生する。ベル

ト部ではその油圧やトルク、またその反力により、ベルト各部に荷重が働く。また前述のように、回転時に各部に相対すべりが発生する。それらによる摩擦力でトルク損失が発生する。

以上の改善として、遊星歯車機構を用いたベルトとギヤのスプリット駆動とすることにより、ベルトの伝達トルクを減少させ、ポンプの必要発生油圧を減少させた。これにより、ベルト、ポンプによるトルク損失を低減させた。

図3にスプリットモード中のベルトとギヤのトルク分担比を示す。この分担比は遊星歯車に連結する要素、遊星歯車ギヤ比、変速比で決まる。

構造の検討、選択やギヤ比の調整により、ベルト駆動は-0.2~-0.6（マイナスは被駆動状態）の低分担比とした。

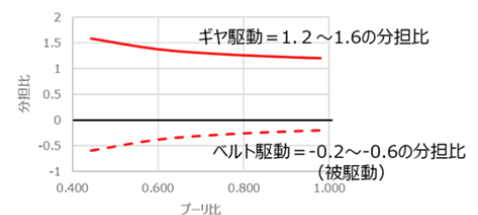


図3. スプリットモード中のトルク分担比

##### 2.3 平行軸式前減速ギヤ

新開発CVTの構造において、平行軸式前減速ギヤが重要な役割を果たしている。従来弊社CVTでは遊星歯車式の前減速ギヤを採用し、3軸構造を実現している。スプリット駆動CVTの場合、入力をそのままプリーに連結すると、3軸構造に対して、動力分割用ギヤの回転方向合わせ、出力の回転方向合わせのために2軸必要で5軸になってしまうところを、平行軸式前減速ギヤにより、図2のように、それぞれ回転方向合わせが可能となり、4軸で構成できる。この最少要素構成により、伝達損失の低減、低コスト化、コンパクト化を実現した。

##### 2.4 クランク同軸小型オイルポンプ

駆動時のオイルのせん断抵抗低減を目的に、前減速ギヤとプライマリプリーの間のスペースを活用したクランク同軸シャフト駆動の小型ポンプを開発した。各社では小型オイルポンプの採用はチェーン駆動が大半であるが、それ対しトルク損失の少ない構造を安価に実現した。

##### 2.5 動力伝達効率と変速比幅

従来弊社CVTの世界最小軸間距離を維持し、軽自動車に搭載可能としながら、図4に示すように従来CVTに対し、変速比幅を約25%向上し、変速比全域の伝達効率向上、特にスプリットモードのハイ変速比領域については、約8%の効率向上を実現した。

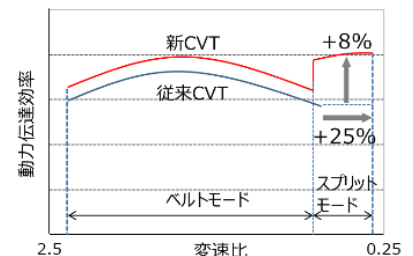


図4. 変速比と伝達効率

#### 3. まとめ

スプリット機構とその独自レイアウトの開発、クランク同軸小型オイルポンプ等の開発により、軽自動車にも搭載可能なサイズで、高効率・大変速幅を実現するCVTの開発に成功し、商品力向上によるお客様への貢献と地球環境保護に貢献できた。

\*1 特別員、ダイハツ工業㈱（〒563-8651 池田市ダイハツ町 1-1）

\*2 ダイハツ工業㈱（〒563-8651 池田市ダイハツ町 1-1）

(4) 高品質・高耐久の細径人工筋肉の商品化

写真 候補者 1	写真 候補者 2	写真 候補者 3	写真 候補者 4
鈴森 康一 <sup>*1</sup>	脇元 修一 <sup>*2</sup>	清板 祝士 <sup>*3</sup>	河野 一俊 <sup>*3</sup>

1. 概要

少子高齢化などの社会情勢の変化に伴い、工学・技術には「よりヒトに身近なフィールド」で活用されることが求められてきている。このニーズに応えるためには、本質的な安全性を備えた機械が必要となり、「柔軟性」、「形状適応性」といった特長をもつ駆動要素（ソフトアクチュエータ）が重要となる。マッキベン型空気圧人工筋肉はゴムチューブとその外周に繊維を編み込んだ構造をもつソフトアクチュエータで、現在実用レベルにある代表的な人工筋肉の一つである。本技術では、このマッキベン型人工筋肉の細径化(最小直径 2mm〜)と長尺化、量産化を達成した。一般に、マッキベン型人工筋肉は、細径化にともない駆動量が低下するとともに、耐久性が著しく低下する。本技術は、繊維やゴムの種類、繊維の編み方を綿密に検討・試作していくことで、高い動作性能と耐久性をもつ細径マッキベン型人工筋肉を実現した。受賞者らは、大学での産学連携研究の成果を基に、大学発ベンチャー企業を設立し、本技術を社会に普及・展開している。

2. 技術の内容

2.1 細径・長尺化

マッキベン型人工筋肉はゴムチューブとそのまわりに編み込んだ繊維から構成される空気圧ソフトアクチュエータで、ゴムチューブ内部に空気圧をかけるとゴムチューブが変形して繊維の編角が変化することで径方向に膨張しながら軸方向に収縮する。この人工筋肉は1950年ごろにドイツで開発され今日に至るまで約70年にわたって、福祉機器を中心に様々な応用が試みられてきた。現在も複数の企業から人工筋肉の販売が行われているが、いずれもセンチメートルオーダーの外径で、長さも数10センチメートル程度である。

受賞者らは、直径2〜5mmの細径人工筋肉を連続生産し、量産化に成功した。この細径人工筋肉を用いることで、従来不可能だった様々な新しい駆動機構が開発されている。動作原理と構造は従来のものと同じだが、細径化と長尺化により従来不可能だった様々なしなやかな駆動機構が実現できるようになった。

細径化に伴い、通常のサイズの人工筋肉では問題にならないさまざまな現象が生じる。一つは収縮量や収縮力の低下である。細径化に伴い、ゴムチューブと繊維、および繊維間に摩擦の影響が非常に大きくなり動作性能が低下する。また、ゴムチューブのわずかな偏肉やゴム硬度の不均一があると、ゴムチューブが不均一に膨張したり編組内で蛇行し、人工筋肉は動作しなくなる。耐久性に関しても、繊維とゴムチューブ表面の接触応力および摩擦の増加により、ゴム表面を傷つけて破損につながる頻度が顕著に上昇する。

受賞者らは、これらの問題を、ゴム材料の改良、繊維材料および繊維構成の改良、編組構成の最適な設計、徹底した品質管理、といった工夫で解決し、細径でありながら20%以上の収縮特性・100万回以上駆動耐久性という通常のマッキベン型人工筋肉と同程度以上の特性を実現した。数100mレベルの連続生産も可能にした。現在、ロール状の長尺細径人工筋肉(左左)、および空圧ワンタッチコネクタ付きの細径人工筋肉(下右)の形で、数種類のスペックの人工筋肉の販売を行っている。



2.2 応用

細径・長尺化により、人工筋肉を編みこんだり、束ねたりすることで、さまざまな形状のしなやかなメカニズムが実現できるようになった。特に、着心地の良いパワーサポートスーツ(下図右)やリハビリ器具(下図左)など、さまざまな応用研究が現在国内外の研究機関や民間企業で現在進められている。



<sup>\*1</sup> フェロー，東京工業大学工学院（〒152-8550 東京都目黒区大岡山2丁目12-1）、株式会社 s-muscle（〒711-0905 倉敷市児島唐琴二丁目4番24号）

<sup>\*2</sup> 正員，岡山大学大学院自然科学研究科（〒700-8530 岡山市北区津島中1-1-1）、株式会社 s-muscle（〒711-0905 倉敷市児島唐琴二丁目4番24号）

<sup>\*3</sup> 株式会社 s-muscle（〒711-0905 倉敷市児島唐琴二丁目4番24号）

(5) スキャン方式によるハイビーム配光可変ヘッドランプの開発と量産化

写真 候補者 1	写真 候補者 2	写真 候補者 3	写真 候補者 4	写真 候補者 5
滝井 直樹 <sup>*1</sup> (1974 年生)	山村 聡志 <sup>*2</sup> (1971 年生)	田中 秀忠 <sup>*2</sup> (1976 年生)	加藤 靖礼 <sup>*2</sup> (1977 年生)	櫻井 一利 <sup>*2</sup> (1976 年生)

1. 概要

交通死亡事故は日没後の視界が低下し始める薄暮の時間帯に昼間の約4倍と最も多く発生している。これに対し、ヘッドランプをハイビームにしていれば車両と歩行者の事故は56%が回避できた可能性があるという調査結果もあり、交通事故の低減にはドライバーの視認性の向上が鍵となる。

このような中、ハイビームでありながら先行車や対向車に対して眩しさを与えないように、部分的に自動で遮光できる配光可変技術:ADB (Adaptive Driving Beam; 図1) の車両搭載が始まっている。



図1. ADBによる視認性向上効果(同一シーンでの比較)

現在のADBの主流は、ランプ内に配置された複数のLEDを部分的に点消灯させることで狙いの照射パターンを形成する方式である。しかし、この方式ではLED数そのまま照射エリアの分割数となることから、性能アップを図るために分割数を多くしてキメを細かくしようとすると、LED数増加によるコストアップやランプ内ユニットの大型化などの背反によってADBの普及は妨げられてしまう。

そこで今回、LED光を高速で左右にスキャンさせるという新たな発想によって、少ないLED数でコストを抑えつつ、絶えず変化する走行シーンに対し滑らかに追従できる配光可変ヘッドランプを世界で初めて量産化した。

2. 技術の内容

2-1. スキャン方式による配光形成の原理

スキャン方式によるADB(ブレードスキャン®ADB)では、LED光をブレードと称するらせん形状の回転リフレクタに照射し反射させることでスキャン配光を形成する(図2)。

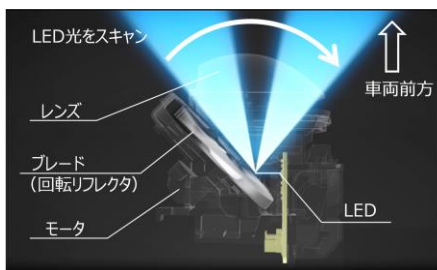


図2. ブレードスキャン®ADBユニットの構成

この方式では、モータに直結するブレードの回転位相とLEDの点消

灯とを同期させることで、狙いのエリアにのみスキャン配光を照射できる。また、点消灯のタイミングを徐々に変えていくことで照射エリアの拡縮や遷移を自在且つ滑らかに行えることが大きな特長である。使用しているLED数はわずか12個にも関わらず、300個のLED配置の特性に匹敵するキメ細かさを得ることができる。これにより、夜間の走行中に早い段階で道路脇の歩行者検知が可能となる(図3)。

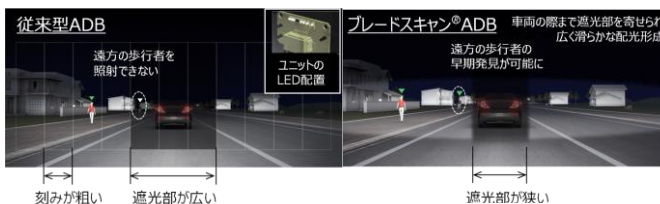


図3. 従来方式とブレードスキャン®ADBとの比較

2-2. 高耐久小型モータの開発

ブレードスキャン®ADBにおいて、ユニットの心臓部となるのがモータである。耐使用環境/ちらつき性能/長期信頼性という3つの技術課題に対し、それぞれに車載に対応した高耐熱/高速回転/高耐久の目標スペックを設定した。開発段階において、これらのスペックを満足できる小型モータは世の中に無かったことから、新規でモータ開発に着手することになった。中でも困難を極めたのが高耐久の実現であった。モータが回転中に発生するわずかな振動でも、回転体を支持する軸受にはダメージとなりこれが蓄積されていくため、力学的要因の他に磁気的要因に至る全ての振動要因を抽出し、これらを大幅に低減させた。その結果、Φ20mmクラスの低コストの小型モータで全ての目標スペックを満足し、スキャン方式による配光可変技術を確立させることができた。

2-3. ブレードスキャン®ADBによる交通事故低減効果

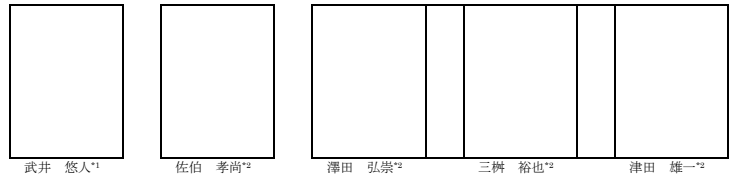
仮想交通シミュレータによる解析において、ロービーム使用時と比べた交通事故件数の低減効果は、従来型のADBでは▲81%、ブレードスキャン®ADBでは▲94%となった。これにより同じADBでも配光の分割数の増加がさらなる交通事故低減につながる事が立証された。

3. まとめ

自動車用ヘッドランプは、車両デザインを決定付ける意匠部品であると同時に、安全性向上に大きく寄与する重要保安部品である。今回開発・量産化した“光をモータで操る”というスキャン方式による新たな配光可変技術が、ドライバーの視認性向上につながり、交通事故低減の一助となることを願っている。

\*1 正員, (株)小糸製作所(〒424-8764 静岡県清水区北脇500)

\*2 (株)小糸製作所(〒424-8764 静岡県清水区北脇500)



1. 概要

2014年に打上げられた小惑星探査機はやぶさ2は2018年6月に人類未踏の小惑星リュウグウへ到着し、約1年5ヶ月の滞在期間を通じて7つの世界初を含め、宇宙探査の概念を一新する数多くの成果を挙げた。小天体の表面物質は長期間に渡る宇宙空間への露出によって宇宙風化が進むことから、地下物質の露出および採取が大きな課題とされていた。申請者らは特殊な火工品による自己加速能力を持つ全く新しい小型の可搬型衝突装置によって小天体表面に人工クレーターを生成し、その過程を小型分離カメラによる記録に成功した。また、誤差60cmの高精度自律着陸制御とサンプル採取機構によって地下物質の採取に成功し、世界に類を見ない我が国独自の新たな未踏天体探査手法を確立した。

2. 技術の内容

本技術は「衝突装置を用いた未踏天体地下物質の表出および小型分離カメラによる観測技術」と、それを支えた「ロバスタな遠隔運用、自律ロボティクス技術」を中核とする。

衝突装置 (SCI: Small Carry-on Impactor) は直径300mm、質量14kgの円筒状の機器として開発され、爆薬による金属衝突体の加速をそのコア技術とし、円錐形のケースに充填された高性能爆薬の爆豪によって前方に張られた金属ライナが変形しつつ前方へ打ち出される仕組みとなっている。ライナは延性の高い純銅で作製することで変形し易さと衝突体としての硬さを両立し、かつ天然には存在しないことから小惑星由来の物質との区別が容易でありサンプルリターンミッションに非常に適している。小型分離カメラ (DCAM3: Deployable CAMera 3) は人工クレーター生成時の様子を確実に記録し、かつ理学的目的での観測にも適うため、低分解能だがリアルタイム画像伝送が可能なアナログカメラと、数秒に1枚の伝送に限定されつつも高分解能画像を取得可能なデジタルカメラが独立して内蔵された設計となっている。DCAM3本体は直径およそ80mm、高さ80mmの円筒形をしており、重さは580gと宇宙機としては超小型軽量であることが特徴である。分離カメラは、探査機本体がSCIを分離後に安全な領域まで退避する過程で分離し、人工クレーター生成実験を横から観測する。得られた画像データを無線通信により退避中の探査機本体まで伝送し、探査機本体が観測できない人工クレーター生成実験の一部始終を観測可能となる。

はやぶさ2の探査対象である小惑星リュウグウは、探査期間の地球距離が2.4億kmから3.6億kmの深宇宙に位置し、衝突装置運用を実施した2019年4月上旬の片道伝搬時間は約15分と大きいため、

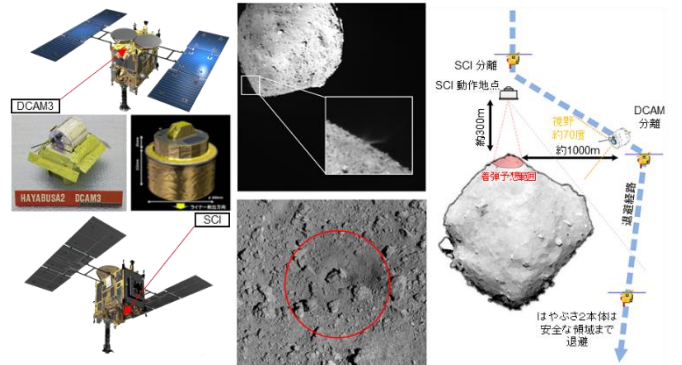


図1 SCIおよびDCAM3の外観と配置(左)、DCAM3によるイジェクタ撮像(中上)、生成された人工クレーター(中下)、衝突装置運用シーケンスの概略図(右)

個々の指令を逐一地上から送信する遠隔操作は時定数が小さい探査機運動が求められる局面では成立しない。そのため申請者らは、遠隔操作と自律動作を組合せたはやぶさ初号機の手法を継承し、初号機には無い衝突装置運用へと応用・発展させた。リュウグウ上空500mまでは地上ループの遠隔操作運用、以降のSCI分離から退避完了に至るシーケンス(図1)は自律動作として設計した。これら複雑な運用全体の頑強化を図るべく、アジャイル型開発を参考に運用手順書および探査機設定の“イタレーション”を陽に考慮した運用計画手法を考案した。まず、はやぶさ2実機と電氣的に等価なハードウェアシミュレータ(HIL)を用いた実時間の運用訓練をリュウグウ到着前1年間に渡って行い、課題の早期発見と修正を繰り返した。リュウグウ到着後には、確定した小惑星諸元に伴う差分や他運用の課題を後続の運用へ確実に反映した。これら繰り返プロセスを通して運用品質を早期に高く維持した上で、フライトデータに基づく徹底的な自律機能のチューニングを実施した。

以上の技術を総合し、申請者らは2019年4月5日に衝突実験運用を遂行した。衝突装置は小惑星の上空250mで動作し、人工クレーター生成過程で生じた飛散物(イジェクタ)が舞い上がる様子がDCAM3によって捉えられ、また小惑星表面に直径10m、深さ3mほどの人工クレーターが生成された(図1)。目標点に対する衝突位置誤差はわずか20m程度であった。その後、人工クレーター周辺の地形や飛散物分布の調査を行い、申請者らは2019年7月11日に人工クレーター近傍への着陸に成功。これは人類で初めて小惑星の地下物質の採取に成功するという快挙となった。

\*1 正員, 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 はやぶさ2プロジェクトチーム (〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1)

\*2 宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所 はやぶさ2プロジェクトチーム (〒252-5210 神奈川県相模原市中央区由野台3-1-1)

## (7) 負荷追従性を格段に向上させた低質量速度設計 USC ボイラ

写真 候補者 1	写真 候補者 2	写真 候補者 3	写真 候補者 4	写真 候補者 5
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

堂本 和宏<sup>\*1</sup>

中橋 博之<sup>\*2</sup>

山本 健次郎<sup>\*1</sup>

垣見 宗洋<sup>\*1</sup>

山崎 義倫<sup>\*3</sup>

### 1. 概要

再生可能エネルギーは日照、風況といった自然環境で変動するため、将来大量に導入された際には需給アンバランスが大きく損なわれる可能性があり、電力供給の安定化を図ることは大きな社会課題である。今後、従来火力発電設備にはベースロード電源としてだけでなく調整電源としての高い負荷追従性が期待されている。

大型ボイラは大きな熱慣性を有する構造物であり、負荷追従性向上には燃焼室の火炉壁管群の温度(流動)の安定化対策が重要である。

今回開発した超々臨界圧変圧貫流(USC)ボイラは低質量速度設計という新しい視点で、USC ボイラの流動安定性の改善と、安定した火炉壁管内の冷却能力確保と言う二律背反のジレンマを解決し、高い負荷追従性を実現した。単機出力が大きな USC ボイラは大きな変化出力が供給可能であり(いわゆる  $\Delta kW$ )、日中の需給アンバランスを補正する主力調整電源の一つとして一層の活躍が期待される。

### 2. 技術の内容

#### (1) 高い負荷追従性を実現するための課題

図 1 に示すように、ボイラの火炉内ではバーナによる火炎が形成されており、その周囲を高さが数十メートル・幅が三十メートル規模の火炉壁で囲まれている。火炉壁は溶接された数百本の垂直管で構成されており、ボイラは非常に大きな熱慣性を有する構造物であるため、高速に負荷を変化させると、火炉壁に大きな熱応力が発生し、変形や損傷による運用障害が懸念される。

#### (2) 自然循環力強化による負荷追従性の向上

高速な負荷変化に対して火炉壁管の温度を安定させるためには、熱流束が高い管に選択的に多くのボイラ水が供給されることが理想である。そこで、ヘッドで接続された多数の伝熱管に対して熱流束に応じた適切な流量分配を自動的に行う「自然循環力」の強化に着目した。この自然循環力を得るには、管内質量速度を低減し、摩擦損失を低減することが有効な手段である。しかし USC ボイラの火炉管群内は 9~30MPa の高压でかつ最大 600kW/m<sup>2</sup> の非常に高い熱流束を考慮する必要があり、質量速度を引下げた際に発生し易い「超臨界圧伝熱劣化現象」や「膜沸騰現象(DNB)」といった伝熱阻害現象を抑制する必要がある。また、「密度波振動」などの流動不安定の発生も確実に防止しなければならない。

#### (3) 低質量速度運転を実現するための高性能伝熱管の開発

本開発では、管内面に螺旋状の溝を有するリブド管を用い、その溝形状を最適化することで、質量速度引下げ時に発生する各種の伝熱阻害現象の抑制に成功した。具体的には、超臨界圧流体の精緻な CFD 解析と世界有数の大規模試験設備(図 2)による検証を組み合わせることで、超臨界圧と亜臨界圧の両方において冷却能力に優れた高性能リブド管形状を見出した。また、リブド管の開発に際しては形状寸法が非常に重要であり、製造上実現可能な公差や、製品化に関して品質と作りやすさの観点からも、鋼管メーカーの協力を得て製造品質を安定化させた。

### 3. まとめ

今後、負荷追従性を格段に向上させた低質量速度設計 USC ボイラの特徴を生かし、発電原価の安い石炭火力を調整電源の柱の一つとしてつつ、原子力、GTCC のそれぞれの特性とも協調しながらエネルギーセキュリティを確保し、再生可能エネルギーの連続的増加を受け入れ可能とし、経済合理性のある CO<sub>2</sub> 排出総量の低減を実現することで、ネットゼロカーボン達成に向けた準備を行っていく。本研究開発は再生可能エネルギー大量導入時代の課題を解決する大きな一助になると考える。

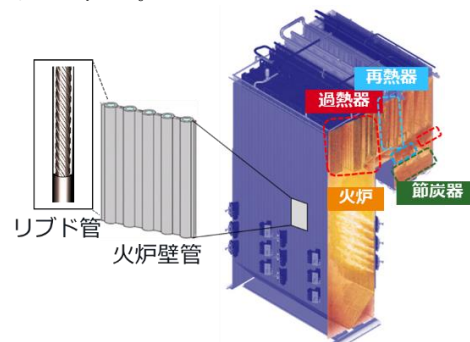


図 1 超々臨界圧変圧貫流(USC)ボイラの構造

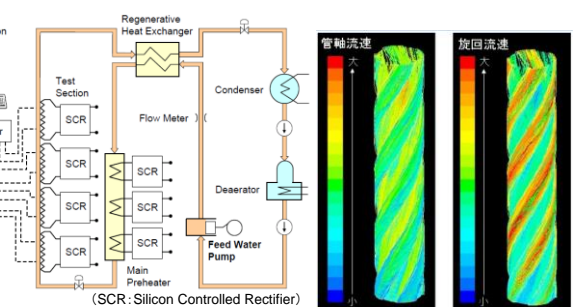
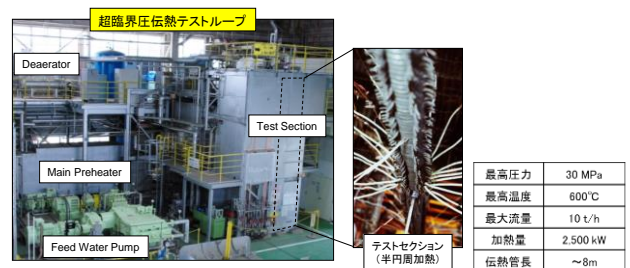


図 2 大規模試験設備の外観とリブド管の CFD 解析例

<sup>\*1</sup> 正員, 三菱パワー株式会社  
(〒220-8401 神奈川県横浜市西区みなとみらい 三丁目 3 番 1 号)

<sup>\*2</sup> 正員, 三菱重工株式会社  
(〒851-0392 長崎県長崎市深堀町 五丁目 717 番地 1)

<sup>\*3</sup> 正員, Mitsubishi Power(Philippines)Inc. (AG&P Special Economic Zone Brgy. San Roque, Bauan, 4201, Batangas, Philippines)

(8) パウダ DED 方式 3 次元金属積層造形機の開発

写真 候補者 1	写真 候補者 2	写真 候補者 3	写真 候補者 4	写真 候補者 5
-------------	-------------	-------------	-------------	-------------

二井谷 春彦<sup>1)</sup>

石井 浩<sup>2)</sup>

倉本 博久<sup>2)</sup>

若名 智宏<sup>2)</sup>

吉村 仁<sup>2)</sup>

1. 概要

金属積層造形のパウダ DED 方式 (Directed Energy Deposition) はノズルから金属粉末を溶融部に効率よく供給する方式である為、造形速度が PBF (Powder Bed Fusion) に対して 10 倍程度早く、装置の大形化が容易で大型部品の造形に適しているという特徴を持つ。その一方で、溶融・凝固プロセス中の金属酸化による材料の劣化防止や、造形中に刻々と変化する過熱冷却の程度に合わせた造形条件 (レーザー出力や送り速度など) の最適制御が課題である。

これらの課題を解決するため、不活性ガスの最適噴射により溶融部への大気流入を遮断するローカルシールドノズルと、インプロセスで金属溶融部を観察して造形条件をリアルタイムに制御できるモニタリングフィードバック機能を搭載したパウダ DED 方式 3 次元金属積層造形機を世界で初めて開発した。



図 1 パウダ DED 方式 3 次元金属積層造形機「LAMDA」外観

2. 技術の内容

パウダ DED 方式はノズルから金属粉末を照射供給し、レーザーにより基材とともに溶融・凝固させながら造形していく方式である (図 2)。

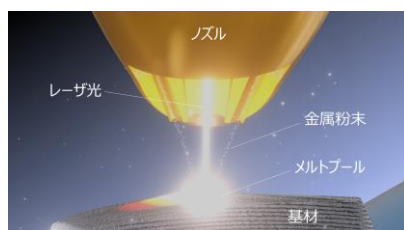


図 2 パウダ DED の原理

2. 1 ローカルシールドノズル

チタン合金等の活性な金属を造形する際は、材料中の酸素濃度が機械的特性に大きな影響を与えるため酸化防止が必要となる。このため、金属積層装置をチャンバ構造にして不活性ガスに置換、または真空引きを行い低酸素環境にして造形する場合が多いが、造形物の大きさがチャンバ寸法に制限され、また置換・真空引きに時間がかかり生産性が低いという課題があった。そこで、大型の造形物の製造を可能とし、さらにタクトタイムの短縮により生産性の向上を図るため、造形部のみをシールドできるローカルシールドノズルを開発した。

このローカルシールドノズルはノズルの外周から不活性ガスを噴射して金属溶融部に対してシールドをつくることで、外気の流入を防ぎ、ひいてはチャンバ構造を不要とすることができる (図 3)。自由形状の造形を可能にするため、移動方向に制限を設けない円環状の構造とし、ガスの吹出速度やガス流路の形状等のパラメータを最適化することで、大気の巻込を防止して溶融部とその周辺を目標酸素濃度以下としている。本機能を使用して大気環境下で活性金属である Ti-6Al-4V 試験片を造形した結果、航空宇宙材料規格 AMS4928 で規定されている酸素含有率 0.2%以下を達成していることを確認した。

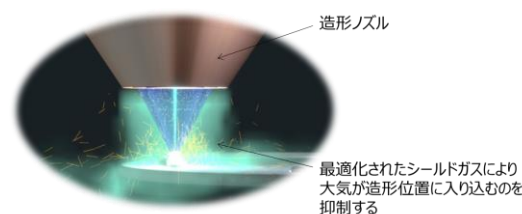


図 3 ローカルシールドノズル

2. 2 モニタリングフィードバック

レーザー光軸に近赤外線カメラを設置することにより、造形方向によらず金属溶融部を真上から観察できるようにしている。更に観察画像から溶融部 (メルトプール) を正確に識別・計測できる技術を開発することで、外乱の影響を受けずにメルトプールの状態をインプロセスでリアルタイムに計測することが可能となった。計測した状態変化に応じて高速に造形条件を制御することで、飛躍的に造形精度を向上させることが可能となった (図 4)。



図 4 モニタリングシステム構成とフィードバック効果

3. まとめ

本技術によりパウダ DED による大型部品造形の生産性と造形品質を飛躍的に向上できた。金属積層技術の向上を通じて国内ものづくり産業の競争力向上に貢献できるよう、技術開発を推進していく。

<sup>1)</sup> 正員, 三菱重工工作機械㈱ (〒520-3080 滋賀県栗東市六地藏 130)

<sup>2)</sup> 三菱重工工作機械㈱ 技術本部 (〒520-3080 滋賀県栗東市六地藏 130)