

feature article

# 自動車システムを支える材料プロセス・解析技術

Material Processing and Simulation Technologies for Automotive Systems

平工 賢二 Kenji Hiraku

西原 淳夫 Atsuo Nishihara

岡本 和孝 Kazutaka Okamoto

朴 勝煥 Seung Hwan C. Park

自動車機器・システム開発を支える基盤技術として、  
 低摩擦損失と軽量化を実現する材料プロセス技術、小型化を可能にする熱設計・解析技術、  
 開発期間短縮と製品品質向上を実現する油圧解析技術の開発と製品への適用を推進している。  
 材料プロセス技術では、TiNやDLCなどの表面処理技術のポンプやリフタへの適用を進めており、  
 FSWを接合技術に用いて世界最軽量のブレーキキャリパを開発した。  
 また、熱設計・解析技術では、直接水冷構造によるインバータ・ヒートシンクを、  
 油圧解析技術では、独自の流量制御機構による世界最大流量の高圧燃料ポンプをそれぞれ開発した。

## 1. はじめに

自動車の省エネルギー化は必須改善項目であり、特に摺(しゅう)動部の摩擦損失低減や機構部品の軽量化が要求されている。また、環境対策の決め手とされるハイブリッド自動車を小型車にまで普及させるには、部品の小型・軽量化が必要であり、特に小型化には冷却の高効率化が必須となる。さらに、自動車の開発期間短縮への要求は増しており、解析主導設計の技術がきわめて重要になっている。

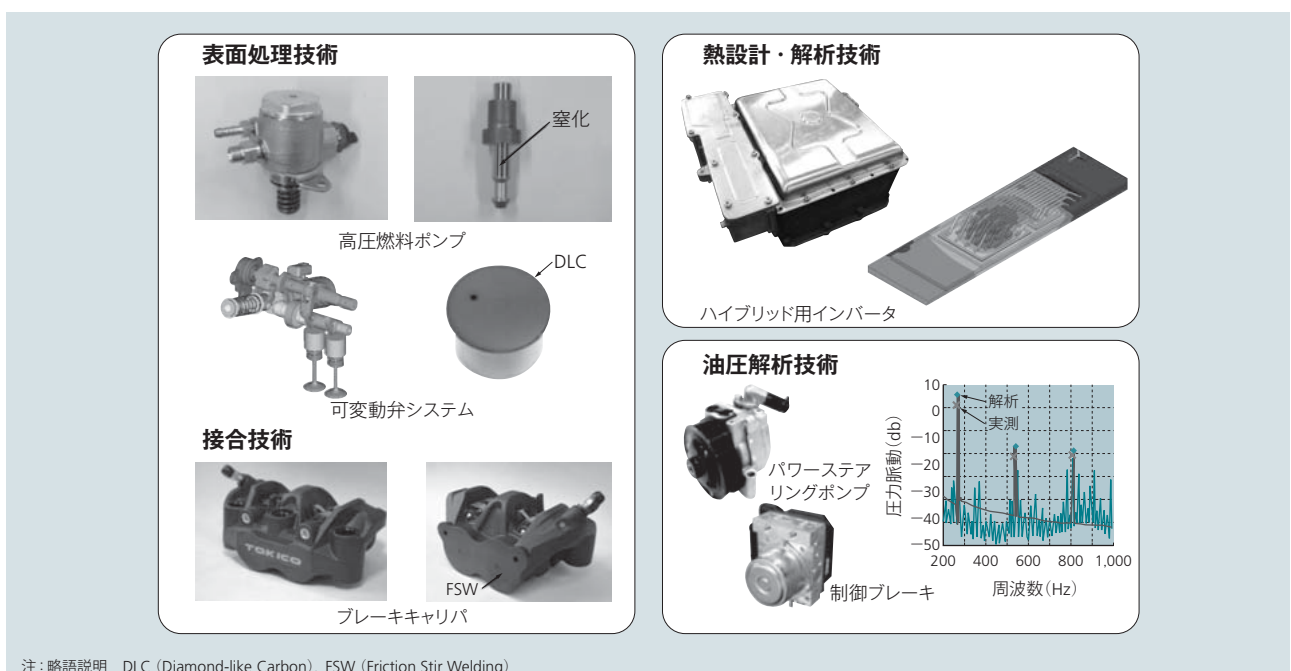
このようなニーズに応え、日立グループは環境性能に優

れ、安全・快適をめざした自動車システムの技術開発を進めている(図1参照)。

ここでは、自動車システムを支える材料プロセス・解析技術への日立グループの取り組みと、製品への適用事例について述べる。

## 2. 材料プロセス技術

自動車に投入される燃料のうち、運動エネルギーとして出力されるのは一部であり、残りはエンジン自体の損失、



注：略語説明 DLC (Diamond-like Carbon), FSW (Friction Stir Welding)

図1 材料プロセス・解析技術が支える製品群の一例

日立グループは、材料プロセス・解析技術を駆使して、自動車用のエンジン制御機器、走行制御機器、エレクトリックパワートレイン機器を開発している。

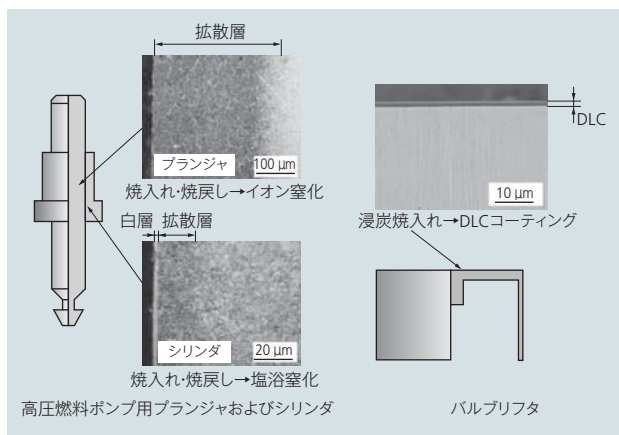


図2 各種摺（しゅう）動部品の表面熱処理

鉄鋼基材の表面を熱処理した後、浸炭焼入れや窒化による拡散処理、硬質皮膜コーティングで表面をさらに強固に仕上げる。

駆動系の機械損失、排気系の熱損失などとなる。エネルギー効率の向上には、筒内噴射システムや可変動弁システムなどによるエンジン効率の向上に加えて、摺動部の機械・摩擦損失の低減や機構部品の軽量化による走行抵抗の低減などがコストバランスを考慮して行われる。摩擦低減や軽量化には、機器や部品を構成する材料の使いこなし技術、すなわち表面処理技術や接合技術などの材料プロセス技術が重要である。

## 2.1 表面処理技術

エンジン機器には各種摺動部があり、摺動圧力、速度や潤滑オイル量などを適正化して設計される。摺動材料は過酷な動作環境下に曝（さら）されるため、耐摩耗性や耐食性に加え、低摩擦性が要求される。一般にこれらの部品には炭素鋼や合金鋼の焼入れ・焼戻し材や調質材が用いられる。また耐焼付き性や摩擦係数に限界がある場合は、材料のごく表面層を浸炭焼入れや窒化などの拡散処理で硬化したり、さらに硬度の高いCrN（窒化クロム）、TiN（窒化チタン）やDLC（Diamond-like Carbon：ダイヤモンドライクカーボン）などをコーティングする表面処理技術が不可欠となる（図2参照）。

表面処理技術は、工具や金型など耐摩耗性、潤滑性および耐熱性を要求される分野を中心に開発されてきた。より高い信頼性、耐久性が必要とされる自動車部品への応用においては、摺動部材質、表面熱処理および面粗さの組み合わせ選定が重要となる。

筒内噴射システムの高圧燃料ポンプは、当初は燃料圧縮室の数が5筒であったが、小型化および高燃圧化に伴い3筒、単筒となり、燃料を圧縮するプランジャとそれをガイドするシリンダへの負荷が増大している。これらの機械加工精度や耐摩耗性は、ポンプ吐出し流量を保証するうえで特に重要であり、それを実現する材料表面熱処理の高度

化が進められてきた。単筒型ポンプの場合、プランジャおよびシリンダには、快削性に優れた合金工具鋼ARK1（アークワン）焼入れ・焼戻し材を用いると同時に、耐摩耗性を確保するためイオン窒化および塩浴窒化を施した。

今後はE85に代表されるエタノール燃料など、燃料の多様化に対応した耐腐食摩耗性も合わせて要求されるため、耐食性にも優れたDLCコーティングの適用も検討していく。

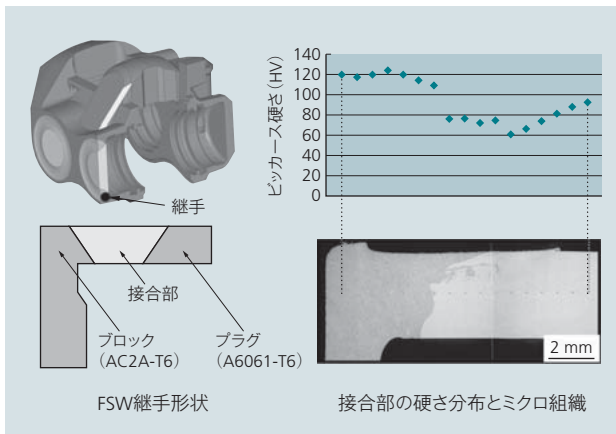
高圧燃料ポンプのプランジャや吸入／吐出弁は、カムシャフトの回転運動によってリフトを介して往復運動する。カムには球状黒鉛鋳（ちゅう）鉄、リフトには冷間鍛造性および浸炭焼入れ性に優れたSCM420合金鋼がそれぞれ用いられる。これらの部品はエンジンオイル中で摺動するが、きわめて小さい接触部に高荷重が作用され、材料表面の弾性変形が無視できないため、弾性流体潤滑（Elasto-hydrodynamic Lubrication）を考慮した油膜厚さ設計が重要となる。しかし機器の動作環境が過酷になると、摺動面の表面粗さを考慮しても部分的に油膜切れを起し、油膜を介した流体潤滑から固体接触の境界潤滑の摺動状態となり、耐焼付き性や耐摩耗性の低下が危惧（ぐ）される。さらに摺動部の摩擦抵抗の低減を考慮し、摩擦係数が0.4程度のCrNやTiN、0.1程度のDLCなどの硬質皮膜コーティングを検討した。SCM420合金鋼の焼戻し温度が200℃程度と低いため、コーティング処理温度が比較的低いアークイオンプレーティング法を用いて、プランジャリフトにはTiNを、バルブリフトにはDLCをそれぞれ処理した。このプロセスによって成膜されるDLCは、水素を含まない水素フリーDLCであり、膜硬度は7,000 HV相当と他のDLC膜と比較して顕著に高い。

今後は、エンジンオイルやその添加剤などの多様化が進むため、化学的安定性に優れた硬質皮膜を検討していく。

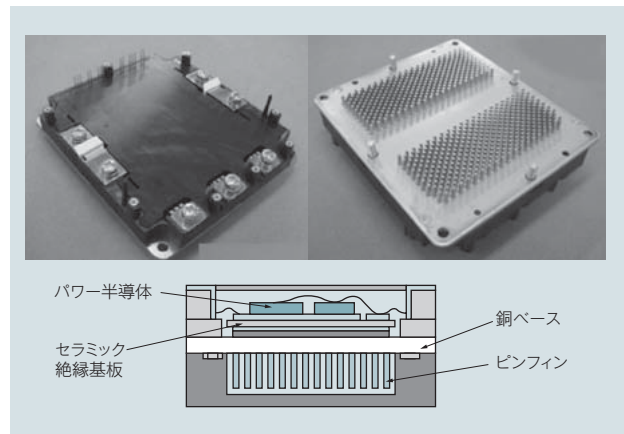
## 2.2 接合技術

自動車部品には多くのアルミ鋳物が用いられ、それらはボルトやねじなどの締結で組み立てられる。従来の二輪車用アルミ製ブレーキキャリパは、ボルト締結による2ピース構造であったが、運転性能の向上に伴うブレーキ性能への要求が高まり、小型・軽量化、高剛性化に加えて、フィーリングの向上が求められている。そこでプラグ式のモノブロック構造を検討し、接合による部材の一体化で部品の高機能化、高性能化を図った（図3参照）。

一般にアルミ鋳物を熔融溶接すると、鋳物内部に残留するガス成分が凝集した気孔が発生するため、高効率な接合が難しい。一方、すでに鉄道車両のアルミ合金製の押し出し材ボディに適用されているFSW（Friction Stir Welding：



**図3 モノブロックキャリバの継手特性**  
 鋳物と展伸材の異なる材料を溶かさずにかき混ぜて接合するため、接合部の硬さ低下を最小限に抑える。



**図4 直接水冷型パワーモジュール**  
 モジュールの底面にピンフィン型ヒートシンクが一体成形されており、冷却水の流れに直接接触させて熱を逃がすことによって冷却性能を高めた。

摩擦かくはん接合)は、材料の融点以下の低温で固相接合するため、気孔の発生がなく、アルミ鋳物の接合に好適である。ブロックはAC2A-T6鋳物材、プラグはA6061-T6展伸材で、FSWによる異材接合となる。固相接合と言えども、その最高到達温度は450℃程度となる。モノブロックは小型で熱容量も小さいため、接合入熱による接合部の硬度低下やシリンダ部の熱変形が危惧される。FSWは回転工具と材料の摩擦熱で材料を軟化・攪拌(かくはん)して接合する方法であり、その入熱は工具回転数と接合速度に依存する。それらの最適化に加えて、抜熱を促進する目的で接合部のエア冷却を行い、接合部位近傍での温度を50℃程度低下する工夫を施した。

このように接合による一体化でボルトレス構造とし、さらに鉄製ピストンをアルミA6061-T6材とすることで、従来品に比較して約20%軽量化した世界最軽量のブレーキキャリバを開発した。

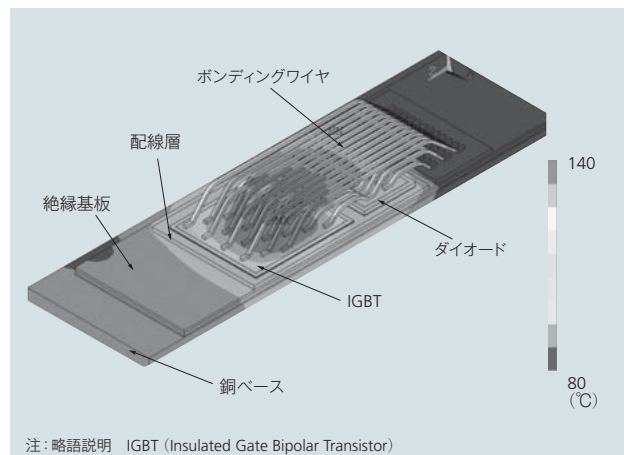
今後はこの技術を四輪車用のアルミ製ブレーキキャリバへ展開するとともに、さらなる軽量化のためにピストンの樹脂化もあわせて検討していく。

### 3. 熱設計・解析技術

ハイブリッド自動車向け電気品の冷却技術について述べる。特にインバータにおいては冷却能力の向上によって小型軽量化に貢献し、また、半導体チップサイズの小型化に伴って低コスト化を図ることができる。

#### 3.1 直接水冷技術

パワー半導体 [IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) とダイオード]、セラミック製絶縁基板および銅製モジュールベースは互いにはんだ接続され、パワー半導体からピンフィン型ヒートシンクまでの熱抵抗は低く保たれる(図4参照)。一方、稼動時にモジュールの温度が上がる



**図5 電流・熱連成解析結果(温度分布)**  
 電流と熱の連成解析により、詳細な温度分布のシミュレーションを実施した。

部材の熱膨張係数差によってはんだに熱応力が発生するが、セラミック基板の両面に接合する銅配線層の厚さを最適値に設定することで、絶縁基板の等価熱膨張率をシリコンと銅の中間の値に制御し、熱応力を低く抑えられる。

#### 3.2 熱解析技術

パワー半導体の損失(発熱)はモータに供給する電流の大きさと力率、インバータの変調率とスイッチング周波数などで変化するため、それに伴う温度変動によって熱応力が発生し、接続部の疲労破壊の原因となる。したがって、信頼性の保証のためにはインバータの動作に伴う温度変化の正確なシミュレーションが不可欠である。

そこで、図5に示すような電流と熱の連成解析によって熱抵抗と時定数を算出し、それらのパラメータを用いて実車走行時の電流パターンに伴う温度変化のシミュレーションを実施している。

### 4. 油圧解析の技術と適用例

自動車には、パワーステアリング、ブレーキ、オイルポンプ、燃料ポンプなど、油圧または流体圧を用いた機器が

多く存在する。油圧解析は、これらの機器を開発するためのキー技術であり、開発期間の短縮と製品完成度の向上に寄与している。

高圧燃料ポンプの事例を以下に述べる。ポンプ構造と油圧解析例を図6に示す。

このポンプは燃料を100気圧程度に加圧してコモンレール経由でインジェクタに供給する。

油圧解析ではMATLAB/Simulink<sup>※</sup>)を用いたシミュレータにより、ポンプ内の部品や配管まで精密にモデリングする<sup>1)</sup>。同図下はエンジン2,000min<sup>-1</sup>時の解析結果であり、各部の圧力、変位、流量の時間応答を示してある。この解析により、ポンプの内部挙動を詳細に把握して、ポンプ自体の性能向上や、圧力脈動を低減する配管構成、ポンプの制御方式の開発などに役立てることができる。

このシミュレータを活用して電磁弁の応答時間を解析し、これに基づいて駆動信号を最適化することで、ポンプ

の運転領域を拡大した事例を図7に示す。電磁弁はプランジャ往復ごとに開閉するが、往復流動する燃料の流体力の影響を受けて応答時間が変化する。そこで、解析で応答時間を求め、必要な駆動信号の長さを検討した。その結果、駆動信号は高回転・小流量ほど短くて済むことがわかり、駆動信号を短くすることで、電磁弁の消費電力を減らしつつ、より高速回転までの流量制御を実現した。

## 5. おわりに

ここでは、自動車機器開発における材料プロセス技術と解析技術への日立グループの取り組みと、製品への適用事例について述べた。

これらの技術は、システム効率の向上、開発期間の短縮、製品信頼性の確保、小型・低コスト化のために必須となっている。

今後、各技術の高度化を進め、より優れた製品をより早く開発することをめざして取り組んでいく。

※) MATLAB, およびSimulinkは、米国The MathWorks, Inc.の登録商標である。

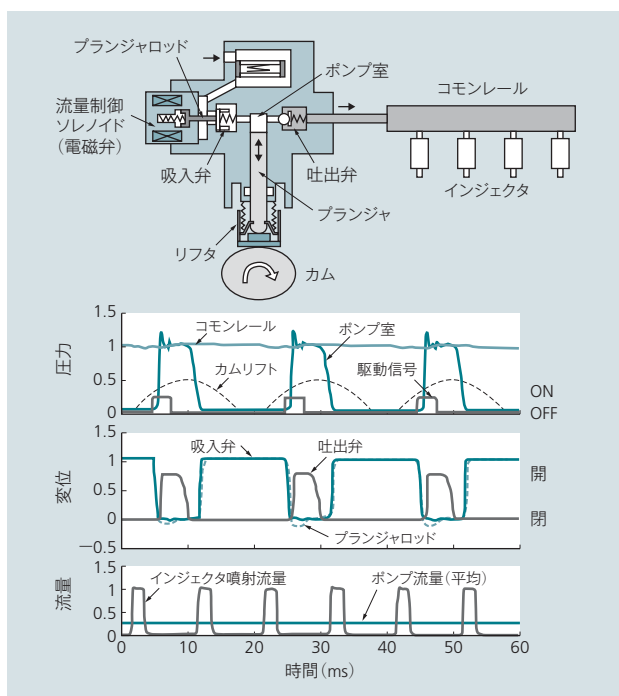


図6 高圧燃料ポンプと油圧解析例

ポンプ内の圧力や弁の挙動など、計測が困難な物理量を可視化して、ポンプの一連の動作を詳細に把握することができる。

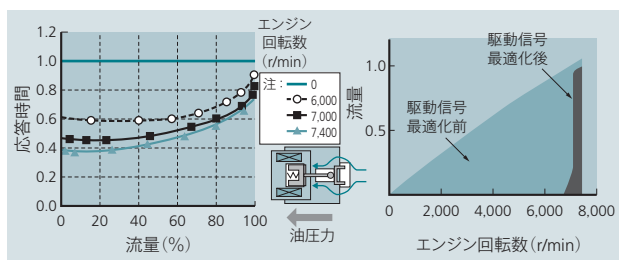


図7 電磁弁の応答解析結果とポンプ運転領域の最適化結果

油圧解析で電磁弁の応答時間を求め、回転数に応じて駆動信号の長さを最適化することで、高回転までポンプの流量制御が可能になる。

## 参考文献

- 1) K.Hiraku: Development of High Pressure Fuel Pump by using Hydraulic Simulator/SAE annual congress 2005, SAE, 05P/85 (2005)

## 執筆者紹介



### 平工 賢二

1991年日立製作所入社、機械研究所 車両システム研究部 所属  
現在、自動車の燃料系機器、油圧機器の開発に従事  
日本機械学会会員、自動車技術会会員、日本フルードパワーステム学会会員



### 西原 淳夫

1989年日立製作所入社、機械研究所 車両システム研究部 所属  
現在、ハイブリッド自動車向けインバータの開発に従事  
日本機械学会会員、日本伝熱学会会員



### 岡本 和孝

1995年日立製作所入社、日立研究所 材料研究所 エネルギー材料研究部 所属  
現在、金属・無機材料プロセスの研究開発に従事  
博士(工学)  
日本金属学会会員、TMS会員、SAE会員



### 朴 勝煥

2005年日立製作所入社、日立研究所 材料研究所 エネルギー材料研究部 所属  
現在、摩擦攪拌接合の研究開発に従事  
博士(工学)  
溶接学会会員、TMS会員