モータースポーツにおける最新技術と展望

世良耕太*

大きな力や高い温度に長時間さらされた状態で走るモータースポーツは、エンジンや車体にとって過酷なため、その性質を利用して、将来の量産車に適用する技術を鍛える場として機能してきた。開発の中心となる領域は、時代の要求に合わせて変化しており、近年は、高効率エンジンに電動コンポーネントを組み合わせたハイブリッドが主流である。電気自動車のレースも始まった。本稿では、モータースポーツにおける最新のエンジン、電動化技術に加え、空力、車両運動性能技術について紹介し、今後の展望について論じる。

The Latest Technologies and Outlook in Motorsports

Kota SERA*

In motorsports, vehicles run in a condition exposed for long periods to large forces and high temperatures, and this is punishing for engines and bodies. By using these characteristics, motorsports have functioned as an arena for forging the technologies used in future mass-produced vehicles. The focal points of development have changed according to the requirements of the times, and in recent years, the mainstream has been hybrids combining electrically-driven components with high-efficiency engines. Electrical automobile racing has also started. This paper introduces the latest engines and electrification technology in motorsports, as well as aerodynamic and vehicle maneuverability technology. It also discusses the outlook for the future.

1. はじめに

モータースポーツが「走る実験室」に例えられたのは、高速道路網が整備される前までのことだと考える。速度無制限のサーキットで連続高速周回や急加速、急減速を繰り返すことにより、エンジンやブレーキ、サスペンションや車体が鍛えられた。モータースポーツを通じて得た知見は、クルマを構成する各種コンポーネントの性能や信頼性向上に反映され、やがては、それが量産車の技術に生かされた。

技術の進化と歩調を合わせるように、モータースポーツで扱う技術は、将来の量産車のためではなく、純粋にレースに勝つための手段に性質を変えていった。例えば、F1は一時期、最高出力を高めるためにエンジンを高回転化する開発が盛んになった。高回転化を進めていくと、開いた吸排気バルブを元に戻すリターンスプリングが素早い動きに追従できなくなった。そこで、圧搾空気を利用して、バルブを元の位置に戻すニューマチック・バルブ・リターン・システム（PVRS）が1980年代に考案され、1990年代にかけて一般化した[1)]。

PVRSは、最高回転数が15,000rpmを超えるF1エンジンにとって欠かせない技術になったが、最高回転数が7,000-8,000rpmの量産エンジンには、意味のない技術である。モータースポーツで扱う技術と量産車で用いる技術の乖離をなくし、両者の技術が交

＊ モータリングライター／エディター
Motoring Writer ／ Editor
原稿受付日　2019年1月28日
掲載決定日　2019年3月19日

流できるような技術規則にするのが、近年のトレンドとなっている。同時に、開発コストを抑制する観点から、技術開発が可能な領域を狭める流れがみられる。

2. F1のハイブリッドシステム

2-1 過給ダウンサイジング

2013年までのF1は、2.4L・V8自然吸気エンジンを搭載する決まりだった。レギュレーションで上限が定められていたとはいえ、最高回転数は18,000rpmで、量産エンジンとは比較にならないほどの高回転エンジンだった。

量産技術との結びつきを強くする目的で、2014年にレギュレーションが変更され、1.6L・V6直噴ターボエンジンの搭載が義務づけられた。量産分野で浸透していた「過給ダウンサイジング」のコンセプトを取り入れた格好だった。過給ダウンサイジングは排気量を小さく、時に気筒数も少なくして機械抵抗をはじめとする損失を小さくする技術である。排気量を減らしたことによる出力の低下は、過給機（排気エネルギーを利用して吸気の圧力を高めるターボチャージャーが主流）で補って、同等の出力を確保する。

この技術を量産車に適用した場合は、低回転域から十分なトルクが出るので気持ち良く走れるようになる。また、高回転まで回さなくても十分に走れるようになるので、燃料の消費が抑えられ、燃費が良くなる。F1は、このコンセプトに飛びついた。

自由に開発できる領域とそうでない領域は、明確に分けられている。Vバンク角は90度と決められており、それ以外に選択肢はない。ターボチャージャーは1基のみに規定され、Vバンクの内側か前後に配置する決まりになっている。量産エンジンでは、排気干渉を防ぐために、タービンハウジングを2つの経路に分けたツインスクロールターボや、可動式ベーンで排気の流路を可変制御する可変容量ターボの採用例が増えているが、F1では、開発コスト抑制の観点から禁止されている。やはり、量産エンジンでは一般的な吸排気バルブの開き／閉じタイミングや、リフト量を制御する可変バルブタイミング＆リフト機構も禁止されている。さらに、最大ボア径は80mm、インジェクターは気筒当たり1本など、多くの制約が設けられている[2)]。

2-2 燃料流量規制の導入

一方で、技術開発の余地は残している。2014年のレギュレーション変更では、燃料流量規制とレース中の燃料使用量規制が導入された。2013年まではどちらも規制されておらず、最高出力に影響を与える最大燃料流量は160kg/h前後が実態だった。これが2014年には、100kg/hに規制された。また、2013年はレース中に170kg前後の燃料を消費していたが、2014年に100kgに制限されることになった（2019年は110kg）。技術開発を行わなければ、大幅な出力の低下は必至であり、スピードは低下してしまう。燃費に手を打たなければ、レースを走り切ることができなくなってしまうし、燃料をもたせようとすれば、スピードの低下を余儀なくされる。

モータースポーツの頂点にふさわしい速さを維持し、高めていくため、熱効率の向上に的を絞った開発を行っているのが、2014年以降の技術開発の中身である。熱効率は、単位時間当たりに投入されたエネルギーのうち、クランクシャフトから取り出せる仕事（軸出力）の比率を指す。言い換えれば、ピストンを押し下げる力を強くする開発であり、その開発の過程でリーンブーストと呼ぶ技術が現れた[3)]。

2-3 リーンブーストによる熱効率の向上

リーンブーストとは、燃料流量が一定の状態に対して、過給（ブースト）によって空気の割合を増やし、混合気に占める空気と燃料の質量の比である空燃比を薄い状態（リーン）にしていく技術を指す。内燃機関は原理的に、空燃比をリーンにするほど熱効率は向上することがわかっている。ただし、リーンにするほど着火しにくくなり、燃焼が遅延しやすくなる。これらの課題を解決する技術が、プレチャンバー（副室あるいは副燃焼室とも呼ぶ）を用いたジェットイグニッションとなっている。

混合気全体としては極めてリーンにするが、プレチャンバー内にある点火プラグ周りにだけ濃い（リッチな）混合気を形成して着火する。すると、プレチャンバーとメインの燃焼室を仕切る微細な孔を通じて、メインの燃焼室に火炎が噴き出す。その噴き出した炎が、リーンな混合気を一気に燃焼させる。F1には、2014年の段階でメルセデスAMG、フェラーリ、ルノーのエンジンコンストラクターが参戦し、2015年にはホンダが参戦を開始した。リーンな混合気を急速燃焼させるジェットイグニッションは、全コンストラクターにとって標準的な技術となっている[4)]。

量産エンジンで世界トップレベルの熱効率を達成しているのは、トヨタが2018年2月に発表した

Dynamic Force Engine（2.0L・直4自然吸気）で、最大熱効率は41％である。メルセデスAMGは、2016年の時点でF1エンジンの最大熱効率は47％以上に達していると公表した。2013年の最大熱効率は29％だったというから、大幅な進化といえる。CO_2排出量削減に結びつくエンジンの熱効率向上は、量産車にとって永遠の課題であり、ジェットイグニッションの量産エンジンへの展開に期待がかかる。

2-4　2種類のエネルギー回生システム

2014年に導入されたレギュレーションでは、エンジンに2種類のエネルギー回生システム（ERS）を組み合わせたハイブリッドシステムにすることが義務付けられた。一つは運動エネルギー回生システム（ERS-K）で、もう一つは熱エネルギー回生システム（ERS-H）である（**Fig.1**）。

ERS-Kは、制動時にブレーキユニットで熱に変換して大気に放出していた運動エネルギーを、モーター／ジェネレーターユニット（MGU-K）の抵抗力を利用して電気エネルギーに変換し、バッテリーに蓄えるシステムである。トヨタ・プリウスに代表される量産ハイブリッド車が搭載するシステムと同じ原理と考えていい。バッテリーに蓄えたエネルギーを後の加速の際に利用してMGU-Kを駆動すると、その分、エンジンの負担が減って燃料の消費を抑えることができる。F1の場合は、燃料の消費を抑えることよりもむしろ、MGU-Kのパワー上乗せによるパフォーマンス向上を期待した使い方をしている。

MGU-Kは、レギュレーションにより最高出力は120kW、最高回転数は50,000rpmに制限されている。従って高出力化を追求する開発ではなく、小型・軽量化を追求する方向で開発は行われている。

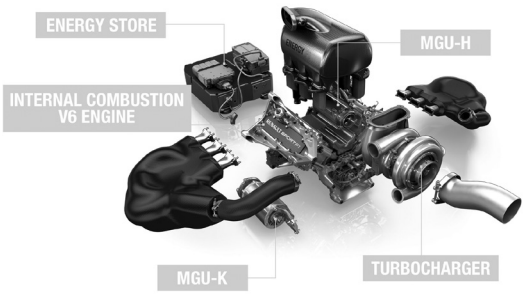

Fig.1　ルノーF1のハイブリッドシステム
写真提供）ルノー

熱エネルギー回生システム（ERS-H）は、ターボチャージャーと同軸に配置したモーター／ジェネレーターユニット（MGU-H）で回生を行うシステムである。回生したエネルギーをバッテリーに蓄えるのはERS-Kと同じだが、量産車への適用例はなく、F1で鍛えた技術の量産分野への適用に期待がかかる。

MGU-Hの最高回転数は、125,000rpmに上限が設けられている。ターボチャージャーと同軸であることが義務づけられているため、長いシャフトが必要となる。量産分野では考えられない高回転で回るため、耐久信頼性の確保が技術的な課題となっている。

2-5　エネルギーマネジメント

2014年以降のF1は、エンジンの熱効率を高めていくのと同時に、ERS-KとERS-Hを含めたハイブリッドシステムの効率を高める技術開発が行われている。開発の目標は、レースで定められた周回数を誰よりも速く走り、フィニッシュすることである。そのためには、エンジンの最高出力だけを追求すればいいわけではなく、そこが技術的な難しさになっている。

バッテリーからMGU-Kへのエネルギー供給は、1周当たり最大4MJに定められている（120kWで出力した場合、最大33.3秒間のアシストが可能）。一方、MGU-Kからバッテリーに送れるエネルギーは、1周当たり最大2MJに規定されている。MGU-Kだけに頼ったのでは、毎周4MJのエネルギーを賄うことはできず、その差を埋めるのがMGU-Hの役割である。

ところが実際は、MGU-Kで1周当たり2MJ以上を回生している。MGU-H～バッテリー間でやりとりするエネルギー量が規定されていないことに着目した技術で、MGU-Kで回生したエネルギーをいったんMGU-Hに送って力行し、瞬時に回生してバッテリーに送る仕組みを取り入れている。

運動エネルギーの回生は、減速時に行うのが一般的だが、加速時に発電してバッテリーにエネルギーを蓄える技術も適用している。限られたエネルギーを効率良く速さに結びつける観点で検討した結果、エンジン出力に変換するより、電気エネルギーとして蓄えておき、MGU-Kのアシストに使った方が、ラップタイムが速くなることが判明した。

だから現在のF1では、必ずしもエンジン出力を高めることが正解ではない。エンジンの燃焼効率を高めていくと、排気に残されたエネルギーは減って

いく。エンジン単体だけの性能を考えれば正義だが、MGU-Hの働きを考えた場合は悩ましい。MGU-Hは、排気が持つエネルギーを電気エネルギーに変換するのが主な役割なので、排気のエネルギーが減ると働きが弱くなってしまうからである。

トレードオフの関係にあるエンジン出力とMGU-Hの効率が最大になる開発を進めつつ、ハイブリッドシステム全体として効果的な使い方を追求していくのが、現在、F1で展開している技術開発の内容となっている。

3. WEC LMP1のハイブリッドシステム

3-1 排気量や気筒数は自由

伝統のル・マン24時間レースをシリーズの一戦に含むWEC（FIA世界耐久選手権）も、F1と同様、2014年に大がかりなレギュレーション変更を行った。自動車メーカーが自社チームで参戦することを義務づける最上位カテゴリーのLMP1クラスは、2013年まで吸気リストリクターの装着を義務づけて最高出力を規制していた。吸気リストリクターとは、エンジンの吸気系統上流に取り付ける筒状の部品である。吸入できる空気量は、筒の径によって決まる。エンジンの出力は空気量に比例するので、空気量を規制することで最高出力を規制する考えである。ガソリンエンジンの排気量は、自然吸気が最大3.4L、過給機付きは、最大2.0Lに定められていた。ディーゼルエンジンの排気量は最大3.7Lで、ガソリン／ディーゼルとも、気筒数は自由に選択できた。

2014年からは、F1と同様に燃料流量規制を導入した。F1はレース中の燃料搭載量を規定したが、LMP1は、1周当たりに消費できるエネルギー量を規定した。エンジンに関しては、ガソリン／ディーゼルとも排気量や気筒数、過給の有無を自由にした。そのため、F1に比べて技術開発の自由度は高い。

また、エネルギー回生システムの搭載を義務づけた。F1は運動エネルギー回生システムと熱エネルギー回生システムの２つのシステムの搭載を義務付けたが、LMP1の場合は、どちらか一方を選択してもいいし、両方搭載してもいい規則にした。ただし、モーター／ジェネレーターユニット（MGU）の数は、最大2基に制限している。運動エネルギー回生システムのMGUをフロントとリヤに搭載した場合は、熱エネルギー回生システムを採用できないことになる。回生したエネルギーを蓄える貯蔵装置は、バッテリーに限定せず、自由にしたのも、LMP1の特徴となっている。

1周当たりに放出できるエネルギー量は、2MJ／4MJ／6MJ／8MJの4つの枠から任意に選択できる。大きな数字を選ぶほど、1周当たりに使用できる燃料のエネルギー量と最大燃料流量が減らされる考えで枠が組まれている。ただし、大きなエネルギー放出量を選ぶほど、ラップタイム面でメリットのある設定がなされている[5)]。

3-2 アウディのハイブリッドシステム

規則変更が行われた2014年は、アウディとトヨタ、ポルシェがLMP1に参戦した（アウディは2016年限りで、ポルシェは2017年限りで撤退した）。アウディは、4.0L・V6ディーゼルエンジンと運動エネルギー回生システムの組み合わせを選択、フロントにMGUを搭載し、回生したエネルギーは、電動フライホイールに蓄える仕組みだった。

減速時にMGUが回生した電気エネルギーが電動フライホイールに送られると、内蔵するMGUがフライホイールを高速回転させ、運動エネルギーに変換して貯蔵する。エネルギーを放出する際は、逆の流れをたどる。エネルギーを出し入れするスピードが速い（パワー密度が高い）のが特徴で、引き換えに大量のエネルギーを蓄えるのは苦手とする（エネルギー密度が低い）。アウディは、2016年にエネルギー密度が高いリチウムイオンバッテリーに切り替えた[6)]。

3-3 トヨタのハイブリッドシステム

トヨタは、3.7L・V8ガソリン自然吸気エンジンを選択、運動エネルギー回生システムのMGUは、フロントとリヤに搭載した。エネルギー貯蔵装置には、キャパシタを選んだ。キャパシタは、電動フライホイールと同様、パワー密度の高さと引き換えにエネルギー密度は低い性質を持つ。

競争力を高めるため、トヨタは、2016年にハイブリッドシステムを一新し、エンジンは2.4L・V6直噴ターボにした。燃料流量が規制された条件では、リーンブースト（2-3節参照）の概念を取り入れて開発した方が性能の伸び代があると判断した結果である。また、エネルギー貯蔵装置はリチウムイオンバッテリーに切り替えた。トヨタは、キャパシタを実戦投入しながら、並行してリチウムイオンバッテリーの開発を進めていた。キャパシタをしのぐパワー密度が達成できたため、満を持して切り替えを行ったのだった。同時に、容量は格段に増えている。

その後も、バッテリーの開発は継続的に行い、

2017年仕様では、作動温度の上限を引き上げた。2016年の上限は60℃と、量産向けリチウムイオンバッテリーと同等だったが、2017年には85℃まで引き上げた。バッテリーが高い温度で作動すれば、冷却システムの性能を落とすことができ、システムの小型・軽量化につながる。冷却システムが小さくなれば、ボディワークをスリムにすることができ、空力性能に効く。2016年のバッテリーは、走行距離を重ねるごとに充放電効率が落ちていったが、2017年は、新品時とほぼ同じ性能を保ったまま、24時間走れるようになった。2016年には、電流や電圧の変換を行うパワーコントロールユニット（PCU）に、PCUの小型軽量化に効くSiCパワー半導体を採用した。

バッテリーの高温対応や高い充放電効率を長時間維持する技術、それにSiCパワー半導体はいずれも、将来の量産車への適用が期待される技術であり、WEC LMP1で先行開発している格好になる[7]。

3-4　ポルシェのハイブリッドシステム

ポルシェは、車両パッケージングの観点から、コンパクトな2.0L・V4直噴ガソリンターボエンジンを選択した。運動エネルギー回生システム（MGUはフロントに搭載）と熱エネルギー回生システムの2種類のエネルギー回生システムを選択した唯一の自動車メーカーとなった（**Fig.2**）。エネルギーを貯蔵する装置には、リチウムイオンバッテリーを選んだ。

ポルシェが熱エネルギー回生システムを選んだのは、ル・マン24時間レースを重視したからだった。1周約13.6kmのル・マン24時間サーキットは、ストレートの比率が極端に高く、コーナーが少ない。運動エネルギー回生システムだけに頼った場合、数少ない減速機会で確実にエネルギー回生を行わなければならず、その場合は、高出力のMGUが必要になる。短時間に大量に発生するエネルギーを漏らさず受け入れるエネルギー貯蔵装置も必要になる。

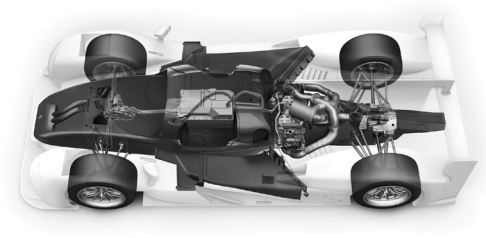

Fig.2　ポルシェLMP1車両のハイブリッドシステム
運転席後方にある円筒形の部品が熱エネルギー回生システム
写真提供）ポルシェ

ポルシェは、運動エネルギー回生システムの負担を軽減させるため、熱エネルギー回生システムを併用する選択をした。後者は長いストレートで時間を費やして回生するので、エネルギー貯蔵装置に極端に高いパワー密度を求めなくて済む。

3-5　エネルギーマネジメント

エネルギーの回生（発電）と力行（放出）をサーキットのどこでどの程度行うかは、ラップタイムが最も速くなるよう、あらかじめプログラムしておく。各サーキットでは、設備側からの信号を車両が受け取ることにより、車両がサーキットのどこを走っているかを正確に把握することができる。コントロールラインからの距離で車両がどこを走っているかを把握し、回生量と力行量を制御するのが基本となっている。ドライバーはただ、普段どおりアクセルペダルやブレーキペダルを踏めばいい。

ただし、周回遅れを抜きたいときや、後ろから追い上げてくるライバルの攻めを防ぎたいといったケースでは、ドライバーがボタン操作をすることで、MGUのパワーを一時的に上乗せすることができる。1周当たりのエネルギー放出量は決められているので、ドライバーが任意にエネルギーを放出した場合は、次の周回に入るまでに収支の帳尻を合わせる制御を自動で行う。周の前半でエネルギーを使いすぎてしまうと、後半は、アシストが効かない状態で走らなければならない[8]。

4.　電気自動車のレース：フォーミュラE

フォーミュラEは、電気自動車によるレースシリーズで、「シーズン1」と呼ぶ最初のシーズンは、2014年に始まった。2018年から2019年にかけて行われるシーズン5で、Gen2（ジェン・ツー）と呼ぶ第2世代の車両が導入された。

シリーズを安定的に運営するため、シーズン1は、運営側が用意した共通の車両で競技を行った。シーズン2（2015/2016年）で、モーター／ジェネレーターユニット（MGU）、PCU、トランスミッションの開発が解禁され、現在に至っている。バッテリー（リチウムイオン）の性能は、車両全体の性能を大きく左右するし、開発コストの高騰を招くため、共通部品に指定されている（つまり開発できない）。

そのバッテリーは、Gen2で新型に切り替わった。Gen1が搭載するバッテリーの供給可能エネルギー

は28kWhだったが、Gen2では54kWhに増えた。シーズン4（2017/2018年）までは、エネルギー量の関係から、レース中に充電済みの車両に乗り換えてレースを続行する必要があった。Gen2に切り替わったシーズン5（2018/2019年）では、乗り換えることなく45分＋1周に設定されたレースを走り切る（**Fig.3**）。

Gen2ではMGUの規定も変わり、最高出力は200kWから250kWに引き上げられた。ただし、最高出力を引き出せるのは、フリープラクティスと予選だけで、レース時の最高出力は200kWに規定されている（Gen1は180kWだった）。また、回生時の最高出力は、Gen1の150kWから250kWへと引き上げられた。これに伴い、油圧ブレーキの配分と回生ブレーキの配分を自動制御する協調回生ブレーキが導入された。量産電動車（電気自動車およびハイブリッド車）では、一般的な技術である[9]。

レギュレーションでは、MGUは最大2基までと定められている。ただし、MGUを後輪左右それぞれに充てがってダイレクトに駆動することは禁止されており、機械式デフを介するよう義務付けられている。トランスミッションの変速段数は、最大6である。全車共通だったシーズン1のトランスミッションは5速だったが、開発が解禁されたシーズン2以降は、変速段数を減らす方向に推移しており、変速なしのシングルギヤに収れんする方向となっている[10]。

変速する際は、いったんクラッチを切って再度つなぐ動作が必要になり、その間、駆動力は路面に伝わらず、ロスになる。変速時の空走によるロスを考えた場合、変速段数は少ないほうがいい。ただし、変速なしで低速から高速までカバーしようとすると、低速時に大きなトルクが必要になるため、モーターの体格は大きくなってしまう。

低速から高速まで柔軟に対応できる複数ギヤと小型モーターの組み合わせがいいのか、空走ロスはないけれども大きくなってしまうモーターがいいのか、シーズン2からシーズン4にかけての経験を踏まえ、シングルギヤに落ち着きつつあるのが現状である。

PCUにSiCパワー半導体を使用して小型・軽量化を図ろうとしているのは、LMP1と同じである。限られたエネルギーを効率良く使うエネルギーマネジメントや、バッテリー、MGU、PCUの温度管理に関する技術が競争力を左右する要素となっている。

5.　自動運転車両によるレース：ロボレース

ロボレース（Roborace）と呼ばれる、ドライバーが乗り込まない完全自動運転車両によるレースが、フォーミュラEとの併催で計画されている。自動運転技術の開発促進を狙いとしている。当初は、シーズン3（2016/2017年）から開始される予定だったが、技術の確立が遅れており、現時点では、2021年からの本格スタートを見込んでいる。

2016年には、ロボカー（Robocar）と呼ぶ共通車両が発表された（**Fig.4**）。この車両は、車両周辺の状況を把握するためのカメラや長距離用レーダー、短距離用超音波センサー、全方位スキャナーといった、量産車で自動運転を実用化する際に必要とされる機器を搭載している。さらに、高精度な自車位置測定装置に加え、車車間および車両～ピット間の通信機能も備える。

これらのセンサーで得た情報をもとに、参戦チームが独自に人工知能（AI）のアルゴリズムを構築し、

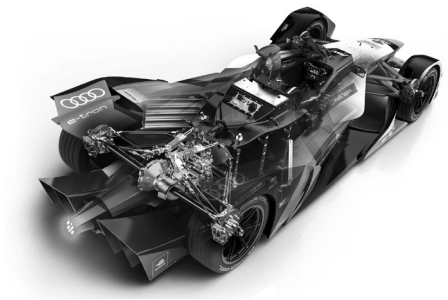

Fig.3　Gen.2車両の透視図
運転席の背後がバッテリー。その後方にMGUとトランスミッションを搭載
写真提供）アウディ

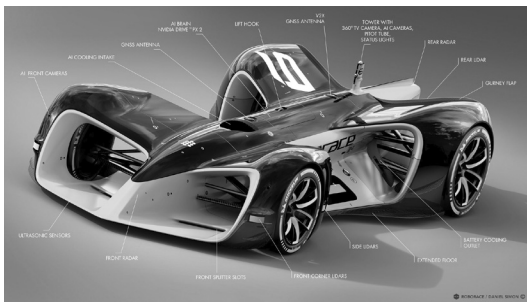

Fig.4　自動運転車両の「ロボカー」
4基の高出力MGUを搭載した電気自動車
写真提供）ロボレース

その技術力をコース上で競うことになる。通常のレースのように、サーキットを走って速さを競うのか、課題をクリアする正確さで優劣をつけるのかなど、レースのフォーマットは確定していない。

これまでのフォーミュラEでは、自動運転が可能なテスト車両を用いたデモンストレーション走行が複数回行われた。2018年11月には、DevBot 2.0と呼ぶ新しいテスト車両が公開された。この車両は、ドライバーレスの自動運転が可能だが、運転席を設け、ドライバーによる操作も可能としている。2019年以降の2年間は、DevBot 2.0を使って技術力を高め、2021年に運転席を持たないロボカーで、本格的なシーズンのスタートを見込んでいる。

6. 空力開発

6-1 空力は車両開発の最上位

レーシングカーの開発は、サーキットをより速く走るために行う。次の年に投入する車両を開発する際は、現行車両をベースに性能を上乗せするのが一般的となっており、その上、乗せた分を機能ごとに振り分ける。パワートレーンで何割、空力で何割、シャシーで何割といった具合である。与えられた時間と必要な工数やコストを勘案した結果として、F1やWEC LMP1のようなトップカテゴリーでは、空力の比重が極めて高くなっている。極論すれば、F1は空力を最優先して設計が成り立っている。

F1では、車体をスリムにするため、排気管のボリュームを最小限にするようエンジン開発側に求めることがある。エンジンの性能にとって最適な長さの排気管を設計するより、エンジンカウルの容積を小さくして空力性能を向上させた方が、ラップタイム短縮に寄与するからである。サスペンションも同様で、車両運動性能面で最適なレイアウトよりも、空気の流れを邪魔しない位置にアーム類を配置することが優先される。空力最優先の考えである。

6-2 ダウンフォースとドラッグ

カテゴリーによって求める方向は異なるが、F1を例にとった場合、空力開発の最大の狙いは、ダウンフォースを増やすことである。ダウンフォースとは、空気の圧力差を利用して発生させる「下向きの力」のことで、発生手法は大まかに2種類に分類できる。

一つは、「ウイング」と呼ぶ、車両の前端と後端に配置した翼を利用することで、ウイングの上を流れる空気よりも下を流れる空気が速く流れるようにしてダウンフォースを発生させる。

もう一つは、フロアを利用することで、ベンチュリ効果を利用する。流体の流れを絞ることによって、絞り部で流速を増加させ、低い圧力、すなわちダウンフォースを発生させる。車両全体が発生するダウンフォースに占める割合は、前後のウイングよりもフロアの方が大きい[11)]。

F1では、減速時やコーナーからの脱出時など、車速が低くてダウンフォースの効果が薄くなる状況で、排気のエネルギーを利用する「エキゾーストブローイング」という技術が、2010年に登場した。高速の排気をフロア後端に向けて吹きつけ、フロア下の空気の流れを促進し、低速域でも十分なダウンフォースを発生させる技術である（後にレギュレーション変更で事実上、禁止される）。この結果、制動時とコーナー脱出時の安定性が増し、ラップタイム短縮に寄与した。

減速時はスロットルがオフになっているので、通常のエンジン制御では、排気は弱い。空力的な効果を引き出すには強い排気が必要なので、エンジンの燃焼を制御することで、強い排気を発生させていた。燃料の消費量は増えるが、それを差し引いても価値がある技術だと判断されたのである。

2010年には、前後のサスペンションユニットを連結させるFRIC（Front and Rear Inter-Connected）という技術が出始めた（2014年シーズン中に禁止された）。サスペンションの技術なので、車両運動性能の向上に効く技術と思いがちだが、狙いは空力である。空力性能の車高に対する感受性は、リヤよりもフロントの方が高く、フロントウイングは、可能な限り路面に近い状態で走らせたい。

ところが、車速の上昇に伴ってダウンフォースが増えると車高が下がり、フロントウイングやフロアが路面に接触してしまう。こうなると空気の流れを妨げて空力性能が一気に悪化するし、プランクと呼ばれるフロア底面に取り付けられた部品が一定以上摩耗すると、規則違反となって重いペナルティが科されることになる。

前後の油圧ユニットを連結し、ダウンフォースが増えてリヤの車高が下がると、リヤの油圧ユニットのオイルがフロントの油圧ユニットに伝わって、フロントの車高が上がるようにしたのが、FRICである。これなら、低速から高速までフロントウイングを低い位置に保つことができ、理想に近い空力性能を維持することができる。

6-3 空力開発のプロセス

F1は、シーズン中の空力開発を認めているが、開発コスト抑制の観点から、WEC LMP1は、年間2仕様までに空力パッケージを制限している。カテゴリーを問わず、開発可能な領域を限定するのが一般的で、これもコスト抑制の観点からである。

F1は、シーズン中の実走テストの機会が制限されていることもあり、縮尺モデルを用いた風洞テストに力を入れている（**Fig.5**）。その風洞テストに関しても、試験時の風速や稼動時間に制限を設けている。限られた稼動時間を有効に使うため、1回の試験で多くの姿勢を計測できるよう設備開発を行っている。量に制限があるので、質を高める考えである。

風洞試験の前段階では、CFD（Computational Fluid Dynamics：数値流体解析）を行う。コンピューターによるシミュレーションの一種で、空気の流れを再現する技術である。CFDを用いることにより、開発アイテムの空力的な効果が、数値や線や色で視覚的に捉えることができる。F1の場合、CFDにも計算負荷の制限が設けられている。

CFD～風洞～実走テストのループを繰り返すのが空力開発の基本だが、CFDと風洞、風洞と実走の相関がとれていないと、精度の高い空力開発を行うことはできない。CFDと風洞の相関どりに用いる技術の一つが、PIV（Particle Image Velocity：粒子画像流速測定法）である。特殊なオイルとレーザー光を用いて空気の流れを可視化する技術で、可視化で得られたデータとCFDのデータを突き合わせ、CFDの計算条件を修正し精度向上に役立てている。

レースウイークエンドのフリープラクティスでは、車両に計測装置を搭載して、CFDや風洞と実走との相関どりを行う。車両周りの気になるエリアに計測装置を搭載（**Fig.6**）して圧力や速度を計測し、CFDや風洞試験の結果と照らし合わせる。

空力開発には「最適解はない」といわれる。空力エンジニアが経験に裏打ちされた感覚で「いい」と思ったアイデアを試し、いい数値が出たアイテムを採用しているのが実状となっている。その開発プロセスの効率を高める技術開発が行われている。

7. 車両運動制御技術

量産車の世界では、車両運動性能を向上させる制御技術の開発が活発だが、それらの技術は、モータースポーツではドライバーアシストとみなされ、原則的に禁止される。車両姿勢を最適に保つアクティブサスペンションや、旋回性を高めるアクティブヨーコントロール、後輪操舵は禁止されている。一部カテゴリーでABSやトラクションコントロールが認められている程度である。

2017年シーズン限りでWEC LMP1から撤退したポルシェは、参戦車両である919ハイブリッドをレギュレーションの縛りを解いて仕立て直し、スパ・フランコルシャン（ベルギー）やニュルブルクリンク北コース（ドイツ）のコースレコード記録更新に挑戦した（**Fig.7**）。その際、四輪のブレーキを独立して制御する機能を搭載してヨーをコントロールし、旋回性を高めた。この機能を採用すれば、車両運動性能が向上するのはわかっていたが、LMP1参戦時代は、レギュレーションがそれを阻んでいた。

Fig.5 60%縮尺モデルによる風洞試験の様子
写真提供）ザウバーF1チーム

Fig.6 2018年のルノーF1車両
フロントタイヤの後方に空力計測装置を取り付けている
写真提供）ルノー

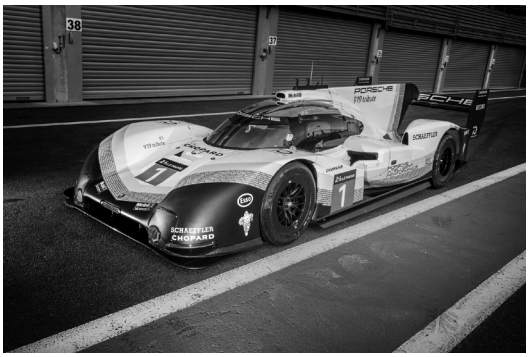

Fig.7　ポルシェ919ハイブリッド・エボ
レギュレーションの縛りから技術を解き放ち、純粋に速さを追求した
写真提供）ポルシェ

レギュレーションが阻んでいる関係で、車両運動制御技術に関しては、モータースポーツよりも量産車の方が進んでいる。

8.　今後の展望

モータースポーツは、量産車への適用が期待される技術を先行開発的に鍛える場としての性質を備えている。しかし、主にコスト抑制の観点から、開発領域は強く制限される傾向にある。パワートレーンに関しては、量産車の開発の方向性と歩調を合わせるように、ハイブリッドを含めた電動化の流れが加速している。エネルギーを無制限に使うのではなく、限られたエネルギーを効率良くスピードに転換する技術が求められている。これは、量産車に適用する技術が進む方向と合致している。

2014年に、新しいレギュレーションが導入されて以来、F1エンジンの熱効率は飛躍的に向上した。技術開発の成果である。しかし、熱効率が向上したのと引き換えに、排気管から放出される音のボリュームは大きく低下した。高回転エンジンがもたらす独特の排気サウンドは、F1の大きな魅力だっただけに、小さな音はファンを落胆させることになった。技術開発の成果がファンを喜ばせるとは限らず、シリーズ運営側にとってはジレンマである。

フォーミュラEは、SNSなどを通じたファン投票により、上位5人のドライバーにレース中、追加のエネルギー使用を認めるルールを導入した。ステアリング上のスイッチ操作により機能をオンにすると、MGUの出力が一定の時間向上し、追い抜きの（あるいは追っ手から逃れる）チャンスが訪れる。ドライバーがエネルギー放出の操作を行うと、頭部保護装置に並んだLEDが点滅して、観客やテレビ視聴者に機能がオンになったことを知らせる仕組みを採用している。

ファンの支援があってこそのモータースポーツである。技術開発は、技術者の自己満足に終わってはならない。最先端の高度な技術をどう見せ、支持を得るかが、モータースポーツに課された課題だろう。

参考文献

1）『モータースポーツのテクノロジー 2016-2017』三栄、2016年
2）畑村耕一、世良耕太『図解 自動車エンジンの技術』ナツメ社、2016年
3）世良耕太『F1機械工学大全』三栄、2014年
4）世良耕太『F1テクノロジー考』三栄、2018年
5）『ル・マン／ WECのテクノロジー』三栄、2014年
6）『ル・マン／ WECのテクノロジー 2016』三栄、2016年
7）『ル・マン／ WECのテクノロジー 2017』三栄、2017年
8）世良耕太『トヨタ ル・マン24時間レース制覇までの4551日』三栄、2018年
9）『モータースポーツのテクノロジー 2018-2019』三栄、2018年
10）『モータースポーツのテクノロジー 2017-2018』三栄、2017年
11）『Motor Fan illustrated Vol.79 レーシングカーエアロダイナミクス』三栄、2013年