# F1車体の開発における軽量化および高剛性化

Weight Reduction and Stiffness Enhancement Technology in Formula One Chassis Development

渡　辺　　創*　　岩　井　　淳*　　廣　政　直　紀*
Hajime WATANABE　　Jun IWAI　　Naoki HIROMASA
海老澤　輝　一*　　種子田　和　宏*
Terukazu EBISAWA　　Kazuhiro TANEDA

## 要　旨

F1車体の開発において，各部品の持つ機能や要件を満たした上で軽量化を達成することは，車体設計上の課題であった．我々は車体開発の中でサーキットラップタイムへの寄与度を考慮しながら，この機能と軽量化のバランス点を見出してきた．その手法として材料や構造を見直しながら，車体部品の軽量化が実現できた．

本稿では，数々の軽量化事例を紹介する．

## ABSTRACT

When developing Formula One chassis, reducing weight while still satisfying the functions and requirements of each part was an issue for chassis design. The authors took into account the degree of contribution to circuit lap time, and found a balance between functions and weight reduction during chassis development. The method used consisted of reviewing materials and structures, and the weight of chassis parts was successfully reduced.

This paper introduces various examples of weight reduction.

## 1．まえがき

車体の開発において，各部品の持つ機能や要件を満たした上で各部の軽量化や高剛性化を図ることは日々の開発の中で常に技術者が取り組んでいる課題であり，F1車体の開発においてもそれは例外ではない．

レースカーの部品はそのほとんどが，走る，曲がる，止まる機能に関わる．よって，その開発においては安全性には特に留意し，レースからリタイヤする要因とならないことに注意を払いながら開発がおこなわれてきた．

部品の中で特に安全性に直結する部品にはAクラスと呼ばれるランクが与えられ，設計時に応力解析をおこない，定められた安全率を満足した上で出図，製作がおこなわれる．完成した部品は，強度と耐久性を台上試験にて確認した上で，サーキットテストに投入可能となる．サーキットテストで走行状態での安全性を確認された部品がレースに投入される．

このように F1 車体の開発においては，安全と品質の維持に多くの労力が割かれた．しかもその特性として，常に時間というリソースが限られる．通常の年次開発では，前モデルと同等の剛性を確保しながら数グラムの重量低減を図る部品開発と，同等重量のまま数パーセントの剛性向上をねらう部品開発が主となる．

しかし Honda においては，新しい材料や新しい構造によって，このような通常開発の枠を飛び越え軽量化を図ってきた．また，慣性モーメント低減の観点から Fig. 1 に示すマップ等を参考にしながら重心点から遠い部品や高い位置にある部品，ばね下となる部品について重点的に軽量化を図ってきた．さらに，従来 F1 とは違った評価基準で車体剛性の性能に対する寄与を考え，エンジンも含めた車体の要所と考えられる部位の高剛性化にチャレンジする開発もおこなわれた．

＊四輪R&Dセンター

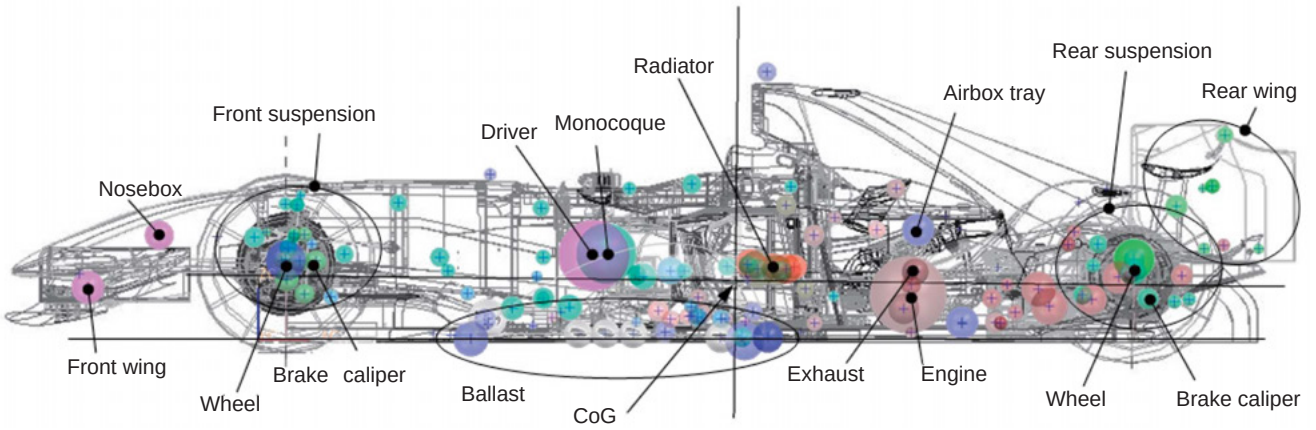



Fig. 1　CG_x versus CG_z plot for each component

## 2．CFRP 部品の軽量化と高剛性化

現在の F1 車体は比強度と比剛性の面で優れる CFRP 複合材を広く採用しており，車体一台あたり約８割の部品が同材料で製作されている．とりわけボデー部品においては，ほとんどの部品が CFRP 複合材で製作されている．

ボデー領域での軽量化と高剛性化への取り組みは，この複合材の特性を活かすために，材料開発をしたり小回りの利く生産技術を使って新しい構造を採用したりすることに他ならなかった．

慣性モーメント低減の観点からフロントノーズやリヤインパクトストラクチャ，ロールフープといった重心点から遠い部品に着目して軽量化検討をおこなった．それらの部品は衝突対応の部品であり，衝突時のエネルギーを，自らが壊れることにより吸収しなければならない．その要件はFIAの定めるレギュレーションに，吸収エネルギーの大きさや初速度，減速Gの大きさ等が定められている．空力的に求められる形状や大きさ，走行時の入力に対する耐久性等を満足させながら衝突要件を達成し，さらに軽量化を実現するには，構造の衝突エネルギー吸収量を高めた上で衝突時の部品のつぶれ方をマネジメントしていく設計が要求された．

CFRP 部品は切削性の良い樹脂ブロックによりマスタモデルを製作し，そこに型製作用の CFRP プリプレグを積層して反転型を作る．その型に製品となる材料を積層し，オートクレーブで成形される．製造工程に手作業が多いことから複雑な形状や構造を作ることも可能である．

しかしながら，部品の作りが簡単で製作時間が短かければ部品設計に多くの時間が割け，より多くの案別検討やテストができる．各シーズンの新車立ち上げ時や，シーズン中の大規模なアップデートの際にはこれが決定的な意味を持つ場合がある．新しい構造による軽量化を図る際には部品の製作時間短縮との両立も課題である．

この章では，CFRP 部品について代表的な開発事例を紹介する．

### 2.1. フロントノーズの開発

フロントノーズは前面からの衝突に対して，形状剛性を確保するために，Fig. 2 (a) に示すような，CFRP，アルミハニカム，CFRPのサンドイッチ断面構造を採っていたが，そのために単位重量あたりのエネルギー吸収効率が小さかった．

そこで，Fig. 2 (b)に示すように，各角部にパイプ断面を持つピラー構造を配置し，ハニカムレスに変更した．形状剛性を確保しながらエネルギー吸収効率の向上が図れ，従来比 13%の軽量化を実現した．

また製造技術の面でも，ハニカムレスとしたことで一体成型が可能となり，従来比工数30%減を達成した．しかしながら予測設計技術の確立に時間がかかり，従来構造の部品を作った後に本構造の部品を製作することとなり，できた頃には外形形状に変更が入るということを繰り返し，レースに適用することはできなかった．

### 2.2. リヤインパクトストラクチャの開発

リヤインパクトストラクチャは元々エネルギー吸収効率の高い部品であった．しかし，レギュレーションで外形形状

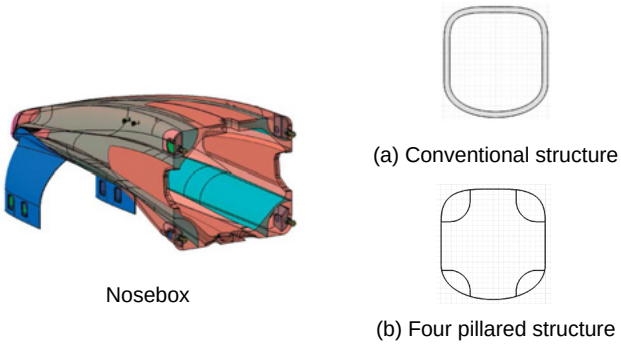



Fig. 2　Nosebox

が規定された際，重量増加を防ぐため一層の効率アップが求められた．

CFRPは自らが壊れることでエネルギー吸収するので，衝突後に細分化されている程エネルギー吸収効率が向上する．この特徴に着眼し，衝突時により部材が細分化されることをねらって，従来〔Fig. 3 (a)〕の厚肉構造に対し，断面内に十字リブを配置した〔Fig. 3 (b)〕薄肉構造を採用した．

この構造は，シリコン製のマンドレルにリブ部の積層をおこない，外周部を積層した外型をその上から被せて一体内圧成型をおこなうことにより成立した．

28%の軽量化を達成してレース適用され，年ごとの空力形状に合わせ，設計を進化させながら採用された．

### 2.3. ロールフープの開発

ロールフープは車体がロールオーバーした際にドライバの頭を守ると共に，エンジンへの空気取り入れ口の面積を確保し，車体の後部に対して空力的に良好な外形形状とすることが求められる．

これらの要件を満たしながら肉厚を下げて軽量化を図るため，前から見た時に五角形となる形状を採用した．この構造においては，五角形の直線部をレギュレーションで規定されているように荷重方向に対し垂直に設定した．この垂直部分に耐力を持たせて変形を抑えることにより肉厚を下げ，要件を達成するロールフープの開発に成功した(Fig. 4)．

これにより従来比18% 軽量化したロールフープをレース適用できた．さらにモノコックが切り替わるタイミングで，モノコック接続部の形状と併せて見直し，16%の軽量化が達成された．

エンジンの開発が進み，開口部の面積を小さくすることが可能となったのを機に，次のステップとしてロールフープの断面積を大きく取ってさらなる軽量化を図ることを考えた．Fig. 5に示すように，荷重を面で受けとめた上で，大きくなった断面の形状剛性を活かし，軽量コア(ロハセル材)を用いて軽量化をおこなった．過去の実績を用いた簡易的な検討で積層の当たり付けをした上で，非線形解析ツールによる破壊進展解析で最大荷重を予測して設計をおこなった．構造体全体に効率的に荷重を分散させることで，レギュレーション規定の荷重を受けても破壊しない構造ができた．

これにより約 20%の軽量化を実現しレース適用した．

### 2.4. エンジンカバーの開発

エンジンカバー(Fig. 6)のような外装部品に対しては，空力的な機能を実現しながら最大限の軽量化をすることが求められる．そのために，部品形状により必要な剛性が確保できる限り，最低限の積層のサンドイッチ構造を採用する．

このサンドイッチ構造の内側および外側表皮を成すCFRP材料の極薄化をおこなうことで，さらなる軽量化を図った．これは材料サプライヤと共同開発した新材料を用いたり，軽量樹脂を適用したりすることにより達成した．この新材料は，束ねた炭素繊維を平らに薄く延ばしてから平織りにし，樹脂を含浸してプリプレグとした開繊材という材料で，通常の材料に対し半分以下の成形後肉厚を実現した．

これによりエンジンカバーは，予選専用仕様において

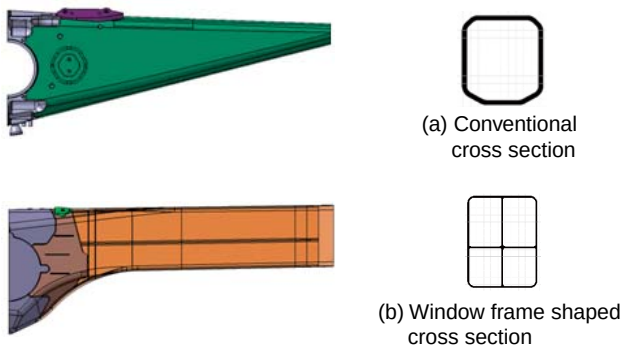



Fig. 3　Rear impact structure

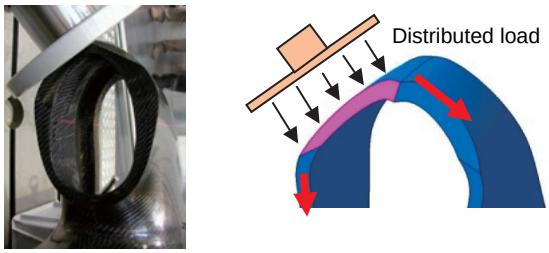



Fig. 4　Pentagonal rollhoop

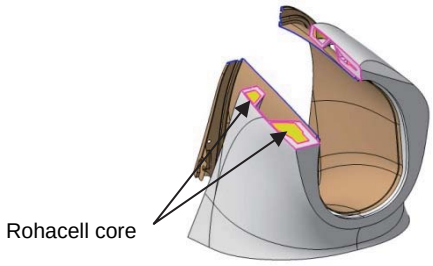



Fig. 5　Rollhoop structure

Fig. 6　Engine cover

60%もの軽量化に成功した．耐久性との両立を図るため使用部位を工夫して，レース仕様についても開繊材料の適用をおこなった．

この開繊材料はその後もさまざまな外装部品の積層に採用され，車体の非構造部品の軽量化に大きく貢献した．

### 2.5. モノコックの開発

車体剛性が運動性能に対してどのようにして寄与しているのかを明らかにすることは，大きな課題であった．エンジンの上に付くエアボックスを剛性部材とし，パワートレインと車体との締結剛性を向上させ運動性能向上を図ったが，運動性能の向上を確認することはできなかった．

そこで，運動性能における剛性寄与度は，全体剛性よりサスペンション取り付け部の局部剛性の影響が高いと仮定し，局部剛性同等という制約のみにすることで，モノコックの軽量化を図った．

軽量化に用いた手段を Fig. 7 に示す．

－全体ねじり剛性については20%の低下を許容することにより補強材料を削除した．

－独自に開発したサイドパネル材料の適用した．

局部剛性評価手法は量産車の開発で採用している評価手法を用いて仕様検討をおこない，Fig. 8に示すようにサスペンション取り付け部を補強した．従来比6.5%の軽量化と 2 mm の重心高ダウンの実現可能性を見出した．

この仕様にて，実走テストで従来仕様との比較をおこない，その結果全体ねじり剛性が低下していても，サスペンション取り付け剛性が確保されれば操縦安定性への影響がほぼ無いことを確認し，この仕様を反映したモノコックをその翌年にレース適用した．

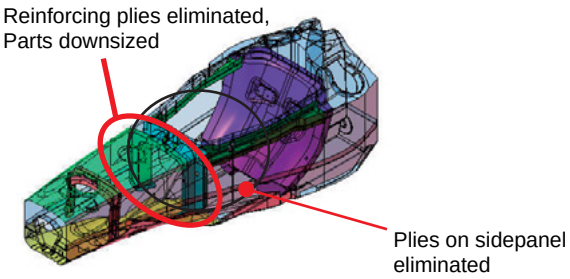



Fig. 7　Weight reduction method

Fig. 8　Reinforcement method

## 3．機能部品の軽量化と高剛性化

サスペンション，ステアリング，アクスル，ブレーキ，フューエル，ラジエータ，エキゾーストパイプの機能部品の軽量化と高剛性化について述べる．

これらの部品開発では，サスペンションジオメトリ適正化によるタイヤパフォーマンスの最大化，スプリング，ダンパ系チューニングによる接地荷重コントロール，パワーステアリングアシスト特性の適正化，ステアリング可変ギヤレシオ，ダイナモを活用したブレーキクーリング技術開発，フューエルスロッシングの低減等，車両運動性能を向上させる部品性能を追求した．

一方で，重量が規定された F1 車両においては，低重心化とバラストによる前後重量配分自由度向上に寄与するために部品の軽量化も重要であった．我々はその両立という課題を，常に目標を定めながら推進した．

本章ではこれらの部品について幾つかの事例を紹介する．

### 3.1. サスペンション部品の開発

#### 3.1.1. アンチロールバーの開発

サスペンションシステムの概略図を Fig. 9 および Fig. 10 に示す．アンチロールバーはロール時のみ作用するス

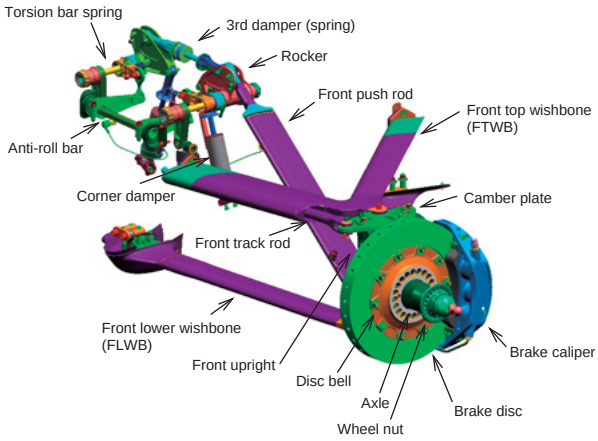



Fig. 9　Front suspension system (2003)

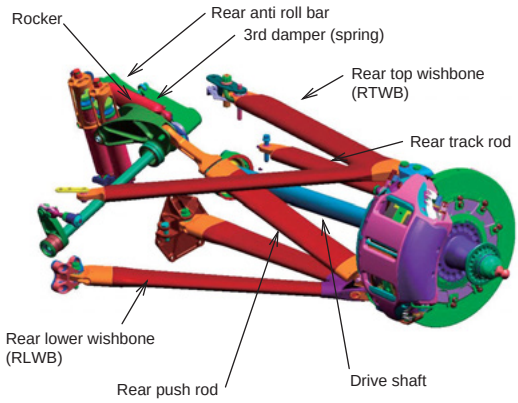



Fig. 10　Rear suspension system (2003)

プリングで，旋回時のロール量を制御すると共に前後ロール剛性バランスを決定する重要な部品である．従来構造は Fig. 9 に示すようにロッカアームよりリンクを介しトーションバーを作用させる構造で，逆相(ロール)時は，左右のリンクがトーションバーを作用させる方向に動き反力を発生させる機構であった．これに対し，Fig. 11 に示すように左右の板ばねを両端スフェリカルジョイントのリンクで結合する構造に変更した．この構造においては，逆相時のみ板ばねに曲げ力が発生し一次曲げモードにて変形することで，従来構造と同等の仕事をさせることが可能となった．機構のシンプル化により，軽量化とスペース効率の向上を達成できた．

3.1.2. ホイールの開発

ホイールに求められる性能は，ばね下重量と回転慣性損失エネルギーを最小化するため軽量であること，またタイヤ入力に対し，高剛性であることが挙げられる．しかしながら，軽量化と高剛性をどこでバランスさせれば良いかは明確になっておらず，まずは，ウェイトを犠牲にせずに形状や材料置換で剛性を向上させる手段を選択し開発をおこなってきた．

その後，台上テストによってサスペンション各部品のキャンバ剛性寄与率を調査したところ，ホイール変形の影響があることがわかった．ウェイトを多少犠牲にしてでも，キャンバ剛性を向上させ対地キャンバを改善することでラップタイムに取り分があると判断し，ホイール単体としては 80%のキャンバ剛性アップを目標に掲げ開発をおこなった．トポロジー最適化手法を用いてスポーク部分の検討をおこない，Fig. 12 (a) の形状を Fig. 12 (b) のように変更した．重量比剛性56%向上を達成し，10%程度の重量増で目標に到達した．これは，実走テストにおいてリヤ横力の増加およびリヤスタビリティの向上できることが確認できたためレース投入された．

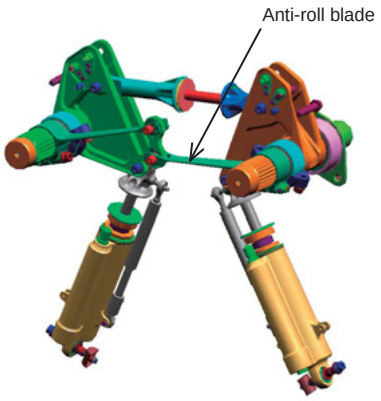
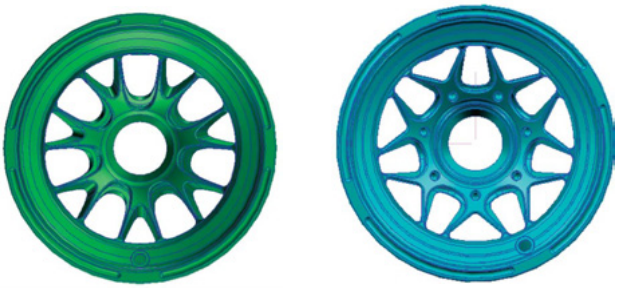



Fig. 11　Front anti-roll blade



(a) Before optimization　　(b) After optimization

Fig. 12　Wheel spoke topology optimization

3.2. ブレーキ部品の開発

ブレーキは初期制動力，制動力の安定性，ドラッグの低減をいかに高次元でバランスさせるかを課題とし開発をおこなった．その中において，キャリパボデーの軽量化を試みた．キャリパボデーの素材は，レギュレーションでヤング率 80 GPa以下の材料と定められており，実質的にアルミ合金に限定されている．アルミ合金の中でも，耐久性(高疲労特性)，低密度，高剛性，高比強度，耐熱強度に優れるA2099材を選択した．キャリパボデーは，ペダルタッチを確保するための液圧剛性が重要であるため，剛性バランスを考慮してセンタブリッジ形状を見直し，シリンダまわりの駄肉を取り除くことで６%の軽量化に成功した(Fig. 13)．

3.3. ウォータラジエータの開発

F1には，ラジエータとして，ウォータラジエータと，オイルラジエータが搭載されている．ウォータラジエータには，量産車と同じく，エンジン冷却水の放熱をおこない，エンジン効率の高い温度領域にする役目がある．冷却水には，圧力が掛けられており，沸点を上げると共に，キャビテーション防止が図られている．現在の F1 では，レギュレーションにて，3.75 barで開放されるプレッシャーリリーフバルブを設けることが規定されており，そのバルブ本体もFIAから支給されている．

圧力の上限が規定されていること，液側放熱面積の影響が小さいことから，まず軽量化を目的として，ラジエータの中でもウォータラジエータ側の開発をおこなった(Fig. 14)．当初は，耐久性を犠牲にしても，軽量化を優先するために，予選専用として開発をスタートした．2001年より適用し始め，その後レース適用のための改良を重ね2006年より全戦にレース投入された．圧力が規定されているとはいえ，量産車に比べ約４倍もの圧力を受けるため，積み重ねたチュー

Fig. 13　Brake caliper

ブの外側は最も変形が大きくなり応力が高くなる．初期型のウォータラジエータは，空気側伝熱面積よりも放熱性能面において寄与の低い水側の伝熱面積に着目し，インナフィンを廃止し，エンジン側から伝わる力や，水圧によるチューブ一本一本の膨張は外枠で押さえ込む形を取った．部分的に応力が高くなる部位のチューブは肉厚を上げ，また耐圧性を考慮しながらフィンの薄肉化等も盛り込んだ．ベースのオリジナル仕様に対し小型化し，性能を約９％上げた上で，37%の軽量化に成功した．しかし，その構造では，空力性能を上げた車体パッケージングを進める中で限界が有り，その後専用チューブの開発をおこなった．ピッチングタフネス向上を視野に入れたルーバフィンの採用もおこない，形状自由度の向上と，高耐久性化を図ると共に，さらなる約７％の軽量化，約4.4%の放熱性能向上が達成された．また，水側の境界層の発達をチューニングし，案別としてさらに放熱性能約８％向上する仕様も適用できるようになっていた．材料は，熱伝導率が高い銅での検討もおこなったが，重量の観点から，アルミが採用された．

### 3.4. チタンエキゾーストの開発

エキゾーストパイプの素材に対する要求は，高温強度，高温耐酸化性，高温疲労強度，低線膨張係数である．エキゾーストは，排気流れにより均一にならない温度分布やエンジン回転数に対する共振による影響も加味された耐久性の解析もおこない，設計がされていた．とはいえ，排気は最高1100 ℃と高温となるため，使用できる材料にも制限が有り，一般的には Inconel が使われている．

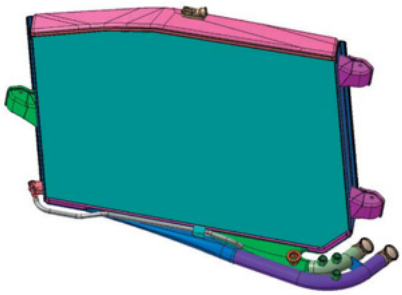


Fig. 14　Water radiator

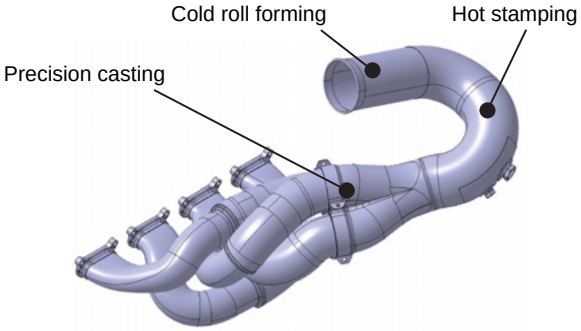



Fig. 15　Titanium exhaust

チタンエキゾーストは，密度 8.5 g/cm$^3$ の Inconel に対し，密度 4.4 g/cm$^3$ と，約半分の低比重である Ti 合金を適用し，約30%の軽量化を目指して開発がおこなわれた(Fig. 15)．Tiは，高温で酸化してしまうため，耐酸化処理の開発が重要な要素となった．耐酸化用表面処理として，アルミメッキを部品に施した後に，アルミとアルミナの粉中に埋める NCC 処理が適用された．この表面処理では，Ti 母材表層に Ti-Al の合金層を均一に生成することが可能であり，高温では酸素とアルミが優先的に反応するため，母材強度を維持することが可能となった．また，表面処理としては，他にも差込部の耐摩耗性向上も必要であり，部位に合わせて，ニッケルクロム系の処理が施された．また，エキゾーストは，排気流れ等により温度分布が異なるため，同じTi系でも部位により適用を変え，製造面も含めた高効率化が図られた．

実走テストにて 600 km 以上の耐久性が確認されたが，必要要件すべてを満たすまで行かずレース投入に至らなかった．

### 3.5. カーボン／カーボン(CC)エキゾーストの開発

先のチタンエキゾーストも主として材料置換による軽量化を目的として推進されたが，さらなる軽量化として，密度 1.6 g/cm$^3$ の CC，つまり，カーボン製のエキゾーストの開発がおこなわれた．良く知られているカーボンは，樹脂により炭素繊維を固めた構造であるが，CCは，炭素繊維を炭素で固めた炭素複合材である．つまり，CCエキゾーストは炭で造られたエキゾーストである．予選で使用されることを目指し，25 ラップの耐久性を目標とした開発がスタートした．

ステップとして，まず，コレクターとテール部分，そして最終的にはプライマリーを含めたすべてを CC エキゾーストにし，約39%の軽量化が目標に置かれた．また，従来のエキゾーストパイプは，Inconelの板材を溶接で繋ぎ製作されている．そのため，板厚を細かく設定することが困難であり，生技性と耐久性上でどうしても無駄な部材が存在する．CCエキゾーストは，型により製作されるため，無駄の無い板厚設定が可能であり，途中断面も形状自由度が高く，最終仕様では，車体の空力特性を向上できるコンパクトなレイアウトでの提示を目指していた．

コレクターとテール部分のみを CC にするステップ１では，金属に比べ，線膨張係数が格段に低い CC と，プライマリーの材料である Inconel との間に，エンジンの高回転時に隙間が開き，燃焼空燃比が安定しないという課題が発生し，高温時にできる隙間を埋めるガスケットの開発もおこなわれた．炭は，耐熱性は高いが耐酸化性が低く，そのままでは燃えて無くなってしまうため，酸化を防ぐための表面のコーティングの開発が重要な要素となる．最終的には，４層からなるコーティングにより 900 ℃ ３時間の表面耐酸

化性を確保することに成功し，エンジンベンチテストにおいても当初の目標を上回る 30 ラップの耐久性が確認され，同時に製造期間短縮も図られたが，予選専用での適用が不可能になったこともあり，開発を休止した．

## 4．まとめ

F1 はレギュレーションにて最低重量がドライバ込みで 605 kg に規定されていることもあり，軽量化は車両絶対重量の低減ではなく，軽量化取り分をバラストに置換えることにより重心高を下げる，ウェイトを車体中央に集中させる，前後重量配分調整範囲を拡大する，といった運動性能向上つまり車体競争力向上に貢献するものである．

また材料に関してもレギュレーションで細かく規定されているため，単なる材料置換による軽量化には限度があり，求められる機能と性能を理解したうえでの構造変更等のアプローチが必要であった．

（1）重心高低減という観点では特に車両重心よりも高い位置にある部品の軽量化が効果的であり，ロールフープ，エンジンカバー，ウォーターラジエータ，エキゾーストパイプ等で達成した．

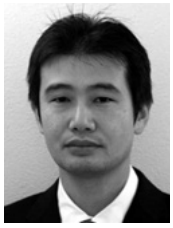
（2）回頭性向上（Z 軸周りモーメント（Izz）削減）という観点では前後輪からオーバーハングした部品の軽量化が効果的であり，フロントノーズ，リヤインパクトストラクチャ等で達成した．

（3）運動性能向上という観点ではサスペンション部品などのバネ下重量の軽減により効果をあげた．対象部品はブレーキキャリパー，アンチロールバー，ホイール等である．以上の部品では軽量化だけではなく高剛性化および機能向上も達成した．

（4）またモノコックに関しては剛性の最適化の観点を盛り込んだ上で軽量化を達成した．

このように，F1 車体の軽量化に関する開発をおこない，一定の成果を上げることができた．軽量化に対して不断の開発をおこなうと共に，サーキットラップタイムに対してより高い寄与を目指し，この中で生まれたアイデアを用いて機能の向上にもつなげていくということが，今後の開発の方向性であり課題であった．

■著　者■


渡辺　創

岩井　淳

廣政直紀

海老澤輝一

種子田和宏