F1車両空力解析の紹介

Aerodynamics Analysis of Formula One Vehicles

小川　厚*　Atsushi OGAWA
真塩　享*　Susumu MASHIO
中村大輔*　Daisuke NAKAMURA
益満尉貴*　Yasutaka MASUMITSU
皆川真之*　Masayuki MINAGAWA
中井祐輔*　Yusuke NAKAI

要　旨

F1 車両にはいくつもの空力デバイスが装着されており，その車両周りの流れは複雑に干渉し合い，非線形性が強い流れとなっている．空力デバイスの最適化をおこなう上で，これらの空力現象を解明することにより，最適化を効率良くおこなうことができる．本稿では，風洞試験と CFD により得られた，それら F1 車両周り流れに関する知見の一部を紹介する．

ABSTRACT

Formula One vehicles are fitted with a variety of aerodynamic devices. This produces complex mutual interference in the air flows around the vehicles, generating highly nonlinear flows. The clarification of these aerodynamic phenomena helps to enable efficient optimization of aerodynamic devices. This paper will provide some examples of findings regarding the air flows around Formula One vehicles obtained using wind tunnels and CFD.

1．まえがき

F1車両の空力デバイスは，主にダウンフォースとその前後バランス，そして空気抵抗の３要素のトレードオフを考慮し，50%モデル風洞試験と CFD により形状最適化がおこなわれる[1]．F1車両周りの流れは，空力デバイス周りの流れが互いに干渉し非線形性が強いことから，すべての空力現象のメカニズムを解明するのは事実上不可能である．しかし，そのなかでも核となる空力現象に関して CFD を用い解析をおこなうことにより，F1車両周り流れについての新しい知見を得ることができた．そのいくつかを本稿では紹介する．

2．車両周り全体流れ

2.1. 地面効果について

まず，地面効果の二次元的効果と三次元的効果について簡単に説明する．二次元的効果としては，主に翼の鏡像による動圧の増加とアップウォッシュ（後流の上方への角度変化）の減少がある（Fig. 1）．特に後流角度は後方部品の流入角そのものであるため，F1のような多物体空力において重要な役割を果たす．三次元的効果としては，翼端渦の鏡像によるアップウォッシュの減少，および誘導抵抗の減少が挙げられる（Fig. 2）．

そのため，RWのドラッグの大部分が誘導抵抗であり，必然的にダウンフォースの増加は，ドラッグの増加を伴う．また，RW の発生するダウンフォースとドラッグは，車体全体のそれに対して大きな割合を占めているため，最高速とコーナリング性能のバランスの調整に用いられている．つまり，すべてのサーキットの速度特性をカバーするためには，複数の異なるダウンフォースレベルの RW を使い分ける必要がある．そのさまざまなダウンフォースレベルで，効率の良い翼型，Y方向荷重分布，RW エンドプレート等々の開発をおこない，車体全体の揚抗比を向上させることが，RW 開発の目的となる．

＊四輪R&Dセンター

2.2. 車両周り全体流れ

2.1. 節で述べた理由より，地面付近でダウンフォースを出すことはもちろんだが，逆に地面から離れたところでは一見不利と思われるリフトを積極的に出すことも重要である．つまり，地面効果の少ないところでは，小さいリフトで多くのダウンウォッシュを発生させられるため，後方部品のダウンフォース増加を図ることができる．そのため，車体上部には Bunny Ear や Fox Ear（4章参照）といった，リフトを発生させる部品が付いており，フロントウィング（以下，FW）からのアップウォッシュを下向きに偏向し，フロア，ディフューザ，リヤウィング（以下，RW）などの性能を向上させている（Fig. 3）．また，フロントサスペンションアームやノーズ自体も同様にダウンウォッシュを発生させる役割を担っている．これらは，車両上下面の静圧分布からも見て取れる（Fig. 4）．

ここでは，大まかな車両周りの流れを述べたが，実際の流れは大小無数にある流体現象の組み合わせであるので，その一部を次項より紹介する．

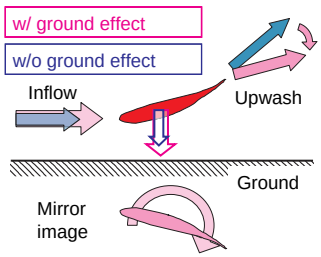


Fig. 1　2D ground effects

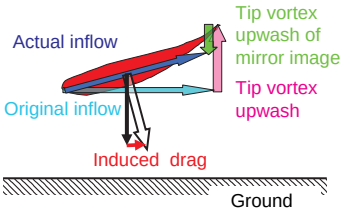


Fig. 2　3D ground effects

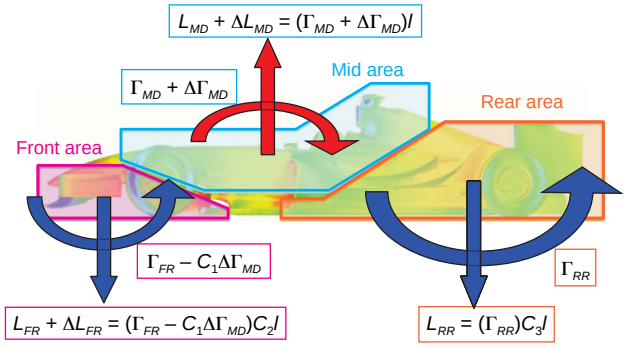


Fig. 3　Ideal chassis circulation

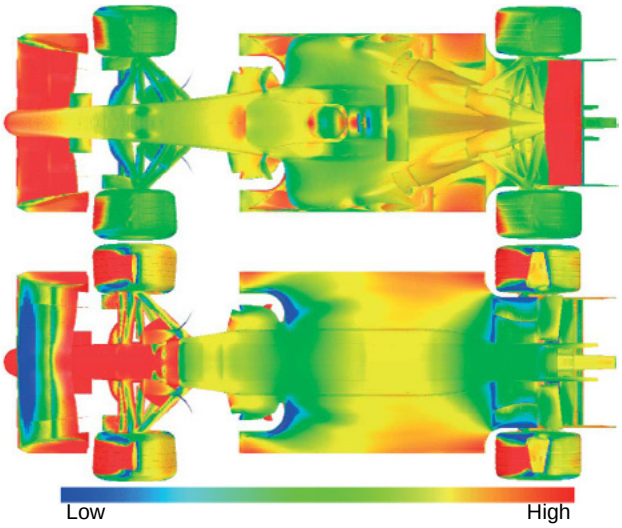


Fig. 4　Surface static pressure

3．フロントウィング（FW）

FW（Fig. 5）において発生するダウンフォースは，車体全体のおよそ 20 - 25%を占める．さらに，FW ダウンフォースに対する空力バランス（以下，CoP）の感度が大きいため，フラップ角によって車体全体の CoP を調整するという役割がある．

FW は車体上流に位置するため，そのアップウォッシュや翼端渦などが車体後部流れに与える影響が大きく，さらにステアやピッチなどの姿勢変化に対する感度も大きい．また，前述の CoP の調整幅を確保する必要もあるため，風洞開発の中でもっとも多くの時間が費やされるデバイスである．

3.1. FW ダウンフォースとそれに伴うアップウォッシュの影響

FW は地面効果により揚抗比に優れ，ある程度アップウォッシュも抑えられている．しかし，FW ダウンフォースが大きすぎると，サスペンションアーム等が発生するリフトの限界により，アップウォッシュがそのまま後部デバイスの迎角減少に繋がり車体ダウンフォースが減少する．また，FW やサスペンションアームの後流により RW 付近

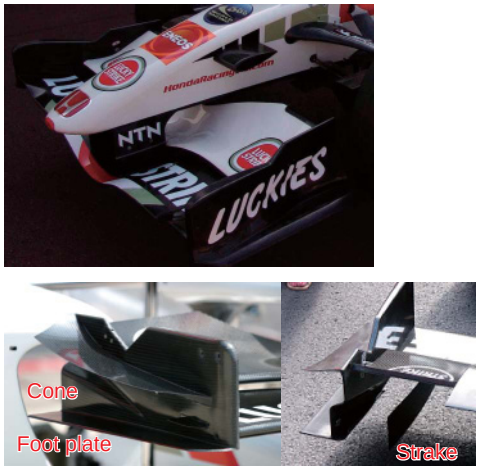


Fig. 5　Front wing

の動圧が減少しRWダウンフォースが低下することもある(Fig. 6)．このことから，FWダウンフォースは最大化するのではなく，ある値以下に抑える必要がある．それによってできるレギュレーションボックス[1]の余剰分を，ステア感度低減などに利用しているのが現状である．

具体的には，FW 翼高や翼型をY方向に変化させることにより，アップウォッシュ分布やステア感度の改善をおこなっている．翼端については，後述するエンドプレート(以下 FWEP)と合わせて最適化をおこなう必要がある．

3.2. FW 翼端渦とタイヤ

FW 開発のもうひとつの課題は，FWEP から放出される翼端渦の扱いにある．2008 年までの FWEP 渦はタイヤ内側下面へと放出される．また，タイヤ下面内側の前縁からは圧力損失の大きい剥離渦が放出される(Fig. 7)．一つの可能性として，その剥離渦が FWEP 渦と交わりその場(YZ 位置)に留まることで，車体内側への入り込みが抑制され，車体床下動圧の損失を防いでいると考えられる(Fig. 8)．安定したFWEP渦を適正な位置に渦崩壊しない強さで放出することが求められる．

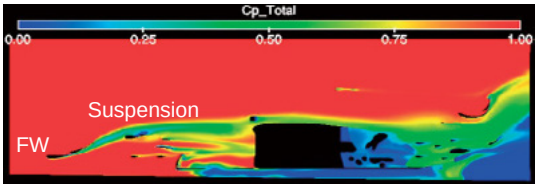


Fig. 6　Suspension stall (CpT, Y=300 mm)

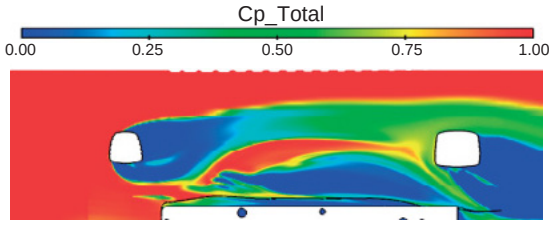


Fig. 7　Tire LE separation wake (CpT, Z=0 mm)

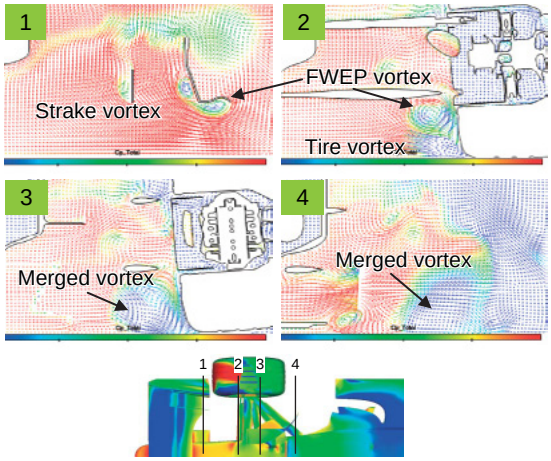


Fig. 8　FWEP and tire vortices (CpT, velocity vector)

また，FW の開発では特にステア時の影響を無視することができない．ステア時は流れのヨー角が伴うが，特に風上側のタイヤ内側下面の剥離渦とFWEP渦の位置関係が，直進状態でのそれから逸脱しないように最適化される．

具体的には，FWEP翼端渦は，FWEP付加物やフットと呼ばれる下面の平板およびコーンと呼ばれるFWEP後端の半円錐形状により制御可能である．また，ストレーキと呼ばれるFWの中程に配置された垂直板からの縦渦によっても，その強さおよび位置を調整することができる(Fig. 5)．

この他，車高変化によって変化するフロントサスペンション周りの流れが，FWEP 渦位置に影響を与えないように，フロントサスペンションのロワアーム外側取り付け位置を高くとるなどの対策もとられている．

4．シャシーアッパデバイス

シャシーアッパ領域とは，ノーズ，モノコック上面から側面およびその周辺を指す．厳密には，レギュレーション上に記載される高さ方向の制限は無いに等しいが，ドライバの視認性とコクピット周りの安全要件からフロントロールループの高さが最大高とされる．

この領域のデバイスは主に，リフトによるダウンウォッシュによって，床下や RW などの後部デバイスのダウンフォース向上に貢献している．

4.1. フロントサスペンションアーム

FW のアップウォッシュ流れをリフトによって下向きに偏向する役割を最も多く担っているのが，フロントサスペンションアームである(Fig. 9)．また，フロントサスペンションアームがないと，バージボードの渦位置(5.2節参照)などは全く機能しなくなってしまう．

しかし，サスペンションは，空力デバイスとして認められておらず，翼弦長に対する翼厚の比率や取り付け角に制限がある．このため，FWからのアップウォッシュにより，サスペンションアーム上面が失速する可能性がある．そこで，サスペンションアームの断面形状やサスペンションジオメトリーを調整するなどして空力効果を最大限に引き上げるよう工夫がなされている．

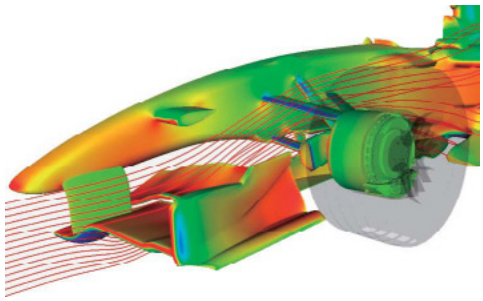


Fig. 9　FW upwash deflection by suspension arm

4.2. Bunny Ear と Fox Ear

ノーズ上面に取り付けられた Bunny Ear(Fig. 10)もダウンウォッシュを作り出すデバイスである．しかし，床下の負圧向上よりも RW の流入角を増す効果が特に大きいことから，ダウンフォースは増加するが，車体揚抗比は RW のそれに依存するため，優れていない．以上の理由から，Bunny Ear は高ダウンフォースサーキットで特に有効なデバイスといえる．また，車体上面には空力デバイスが少ないことから，Bunny Ear の翼端渦は車両姿勢や外乱に対して安定した位置を維持でき，横風時でも効果を発揮する(Fig. 11)．Bunny Ear によって２%程度の最大ダウンフォース向上を達成した．

Fox Ear(Fig. 12)は，ミラー前に取り付けられたフィン状のデバイスで，Bunny Ear と同様，RW への流入角を増加させる他，フロアへのダウンウォッシュの増加にも寄与している．また，このダウンウォッシュにより，バージボードの縦渦の位置も影響を受ける．その他，レギュレーションによりフロア面に車体部品が存在する上方のみ空力デバイスの設置が許可される(シャドー規制)ため，直下にあるWater Wing(Fig. 13，以下，WW)の XY 投影面を超えてはならないといった制限も加わる．さらに，本来は外端が高いほど効果を発揮するデバイスであるが，ドライバの視界を遮ることになり，形状の自由度がかなり制限される．

Fig. 10　Bunny ears

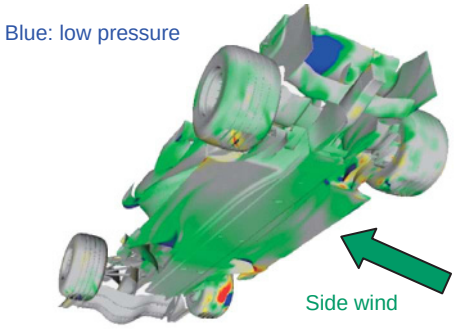


Fig. 11　Effect of bunny ears (delta Cp)

Fig. 12　Fox ear

5．シャシーロワデバイス

シャシーロワ領域とは，フロントアクスルからサイドポッド前端までの下側範囲を指す(Fig. 13)．この範囲はレギュレーションにより最低高や最大幅の制限が多い．さらにほぼ全域にわたりシャドー規制が適用されており，形状規制の多い領域である．シャシーアッパデバイスのようなリフトによるダウンウォッシュの増加に加え，縦渦によってもダウンウォッシュを発生させている．これにより，床下流量を向上させるとともに，床前のデバイスでもダウンフォースを発生させている．このことから，FW からディフューザまで，ほぼすべてのデバイスとの干渉を考慮する必要があり，性能貢献度も高いことから，車体空力性能上重要な領域である．

5.1. バージボードの縦渦制御について

自身の発生させる縦渦の制御により，床下手前でダウンウォッシュを発生させる働きをするのがバージボードである(Fig. 14)．バージボードの形態はチームによりさまざまではあるが，その役割は大体どれも同じものである．

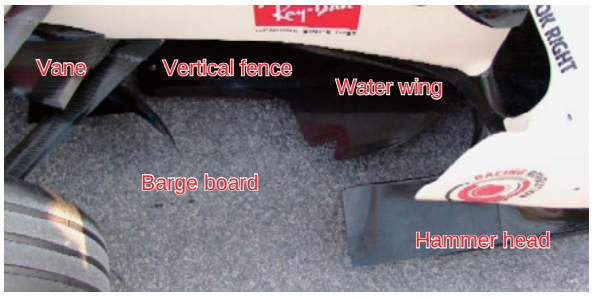


Fig. 13　Devices on chassis lower section

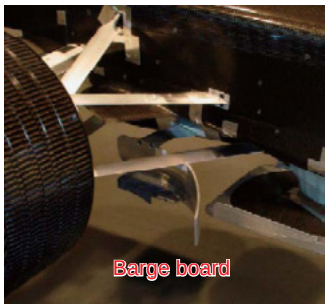


Fig. 14　Barge board

キャンバのついたバージボードからは，上下に一対の翼端渦が出る(Fig. 15)．バージボード直後では，渦間に誘起される流れは車体外側を向いている．下流に行くに従い，上渦は下渦やベーン，サスペンション，サイドポッドなどによって外側下向きに移動する．一方，下渦はVertical fenceとWWの縦渦を誘起することにより，増強されながら下流へと進む．そのことと，地面効果によって，下渦はバージボードから放出されたYZ位置に留まり続ける．こうして上下渦にY方向の変位差が生じ，渦間に誘起される流れは下側を向く．これがバージボード縦渦によるダウンウォッシュであり，床下への流入角を増し，フロア前縁の負圧を向上させている．さらに，多少であるが床下へ流れ込む下渦自体の負圧によってもダウンフォースが増加する．しかし，過大なフロア前縁の負圧や下渦中心部の圧力損失は，床下の境界層を発達させディフューザ性能の低化につながるため，最適化をおこなう順番と優先付けが重要である．

この他，縦渦によるダウンウォッシュ効果ほど影響は大きくないが，バージボードにはもう一つの役割がある．まず，バージボード有無での流線の比較をFig. 16に示す．バージボードの作り出す外側に向かう流れは，フロントタイヤ下面内側前縁の剥離渦を車両外側に追いやり，ディフューザ性能の低化を防いでいることがわかる．ただし，タイヤ背面の大きな剥離流れに関しては，バージボード有無での変化はあまり見られない．この前縁からの剥離渦とFW翼端渦との干渉は既に述べた通りであり，これからもバージボードが前後の空力デバイスと強く影響しあっていることがわかる．

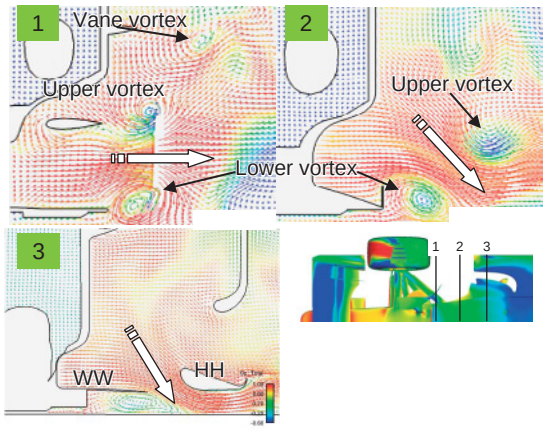


Fig. 15　BBD vortices

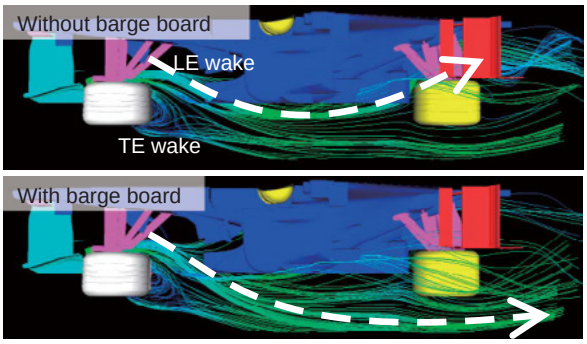


Fig. 16　Tire wake direction

5.2. O-nose Fence 開発

バージボードの縦渦制御効果に加え，それ自体の発生させる負圧によりダウンフォース向上をねらったものがO-nose Fence(以下，ONF)である(Fig. 17)．

ONFはノーズから下方に伸びた左右のフェンス間の縮流効果によりノーズ下面に強力な負圧を発生させる(Fig. 18)．さらに，フェンス下端を地面に近づけ，フェンスと地面の隙間流れを抑えることにより，その効果は一層強まる．しかし，ノーズ下面に大きな負圧を発生させれば，反作用としてのアップウォッシュが発生してしまい，床下性能の低下を招いてしまう．さらに，バージボードにもいえることであるが，フェンスの負圧によってタイヤ下面内側の前縁剥離渦をフェンスの下渦に巻き込み，床下性能の低下を招くことがある．

これらの対策として，高リフトベーンによるダウンウォッシュの補強，ONFの二枚翼化および局所ハイキャンバ化，シャドープレート追加により強い縦渦の生成，ONFフラップ高さとベーン位置関係の調整による上渦放出位置の制御等をおこない，アップウォッシュの発生を抑えることができた．また，流れ方向のキャンバ最適配置により，タイヤ前縁剥離渦の吸い込みも緩和されている．

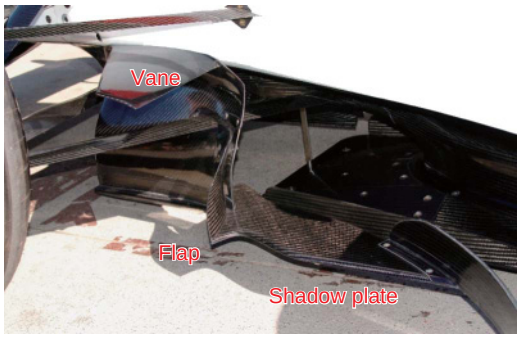


Fig. 17　O-nose fence

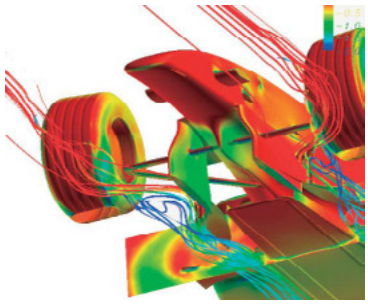


Fig. 18　ONF suction

これらにより，ノーズ下面の負圧を損なうことなく，バージボードと同等のダウンウォッシュを作り出すことができた(Fig. 19)．その結果，当時 ONF は車両揚抗比の 1.5%向上を達成した．

5.3. HH と WW によるダウンウォッシュの有効活用

バージボード等のダウンウォッシュを最大限利用するために付けられているのが，Hammer Head(以下HH)である．HH は有効アスペクト比を稼ぐために，レギュレーションで最大車幅が決まっているY方向の代わりに，X方向前方に延長されている．またダウンウォッシュが外側に向って流れることも，前縁が内向きの HH が有効な理由の一つである．さらに，後縁上面には循環を増すためガーニー等が付けられている．

次に，先に触れた WW の役割をもう少し詳しく解説する．バージボードの下渦がWW下面を通ることで，上下面に圧力差が生じ，その結果できる翼端渦によりバージボード下渦が増強されている．この他に，WW にはもう一つ重要な役割がある．Fig. 20 のように，WW と HH の間隙を狭めることで，HH 前縁の流れを加速し，HH 負圧を向上させていることである．ただし，ダウンフォースを出し過ぎるとアップウォッシュと床下境界層の発達により，後部空力デバイスのダウンフォース低下に繋がってしまう．

5.4. SPLEF によるダウンウォッシュ

Sidepod Leading Edge Flickup(以下 SPLEF)はサイドポッド外側に立てられた垂直板でL字の YZ 断面を持つ

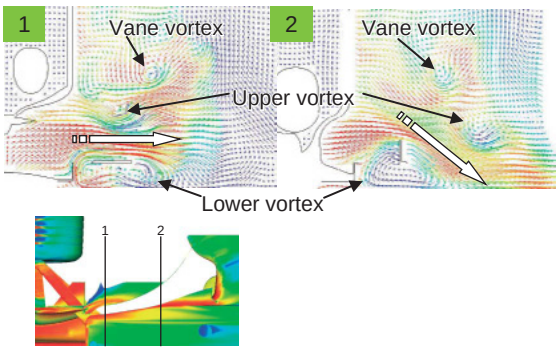


Fig. 19　ONF vortices

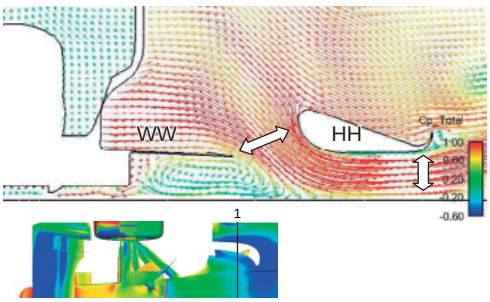


Fig. 20　Channel flow

Fig. 21　SPLEF

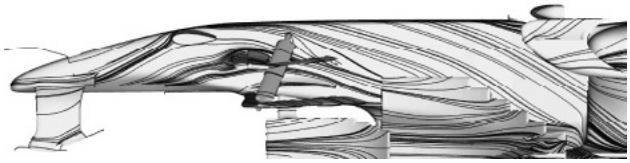


Fig. 22　Surface streamlines

(Fig. 21)．SPLEF の役割は，自身のブロッケージと循環によって，HHへのダウンウォッシュを増強することである．SPLEF により HH のダウンフォースは向上するが，自身の誘導抵抗と圧力抵抗も同時に大きくなってしまう．しかし，垂直板前縁の処理や，形状による最適化で揚抗比の向上を図ることができた．

5.5. 理想的流れ

最後に，ノーズからシャシー表面の流線を Fig. 22 に示す．シャシーアッパ & ロワデバイスにより，FWのアップウォッシュが床下へ向け急激に偏向され，2.2. 節で述べた F1 車体の理想的な流れを実現しているのがわかる．

6．ボデーワーク

ボデーワークはサイドポッド(以下，SP)とカウル周辺を指す．

6.1. サイドポッドアンダカットの効果

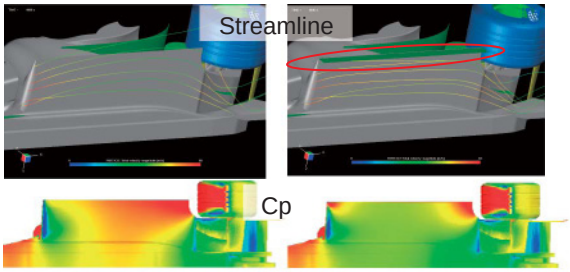
SP 前半下部の形状は，2000 年以降，多くのチームがアンダカットと呼ばれる湾曲した形状を採用するようになった〔Fig. 23 (b)〕．

(a) Flat SP　　(b) Undercut SP

Fig. 23　Side pod variations

アンダカットSPの効果として，大きく3点挙げられる．まず一つめに床下のシール効果を説明する．仮にフロアの側端から地面に垂直に繋がるように側壁〔Fig. 24 (b)，実線丸部〕を付けたとする．側壁が無い場合，SP前縁から流入した流れは一度床下から流出し，再度床下に流入，ディフューザへ流れていくが，一部はリヤタイヤ方向に流出する流れとなっている〔Fig. 24 (a)〕．一方，側壁を設けた場合，床下から流出する流れがシールされ，直線的にディフューザへと流れていくため，床下での流れが加速され負圧が向上，ダウンフォースの増加へと繋がる〔Fig. 24 (b)〕．ただし，リヤタイヤ方向に流出する流れを遮ることになるため，SP前縁での負圧は弱まる傾向となる．つまり，フロア前方部はシールせず，後部だけシールすれば，最大限シールの効果を発揮できることになる．

この効果をレギュレーションの範囲で実現するのがアンダカットSPである．まず，アンダカットにより車両前半部からのダウンウォッシュの影響がフロア中央部まで及ぶようになる(Fig. 25)．そこでのダウンウォッシュがフロア側壁の役割をし，フロアのシール効果を生み出し，床下負圧が向上する(Fig. 26)．さらに，SP側面負圧が増すことによってもダウンウォッシュは加速され，シール効果は強まる．



(a) Without side fence　　(b) With side fence

Fig. 24　Floor seal effect

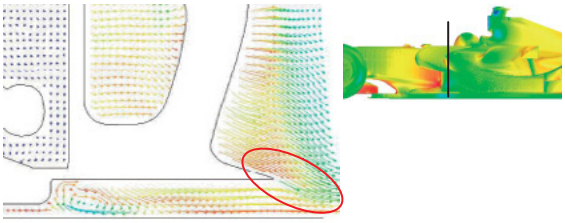


Fig. 25　Downwash flow

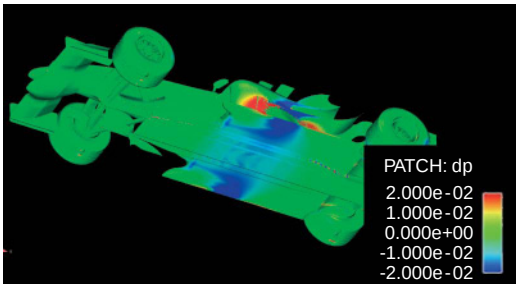


Fig. 26　Undercut SP effect (delta Cp)

逆に，シール効果のいらないフロア前方部はHHの延長として使え，HH後縁ガーニー等によりHH下面負圧の向上が可能になる．これが，アンダカットの二つ目の効果である．

バージボードの種類によっては，その上渦がアンダカット部を直接通過するものがある(Fig. 27)．この上渦によるシール効果もあるが，それ以上に上渦の通過位置により，HH下面負圧をスパン方向に最適化する効果が大きい．これが，アンダカットの三つ目の効果である．また，バージボードの種類によって上渦の強さや高さが異なり，HHスパン方向の最適通過位置も違ってくるため，効果も一様ではない．一般的に，ほとんどのチームが採用している大型のバージボードの方が，アンダカットの効果がよく表れる．

モデル風洞試験では，直線的なサイドポッドからアンダカット形状を適用することで，1.5%程度のダウンフォースの向上があった．床下の圧力分布も予測通りの改善が見られた．また，バージボードがない状態でも，アンダカット形状が有効であることが確認されている．

6.2. チムニー排気流れの解析

SP内部に設置されたラジエータおよびオイルクーラを通過した流れは，カウル側面および後端の開口部より排出される．また，冷却性能の調節は，この側面開口部の面積変更によっておこなわれるが，排気流が空力性能に与える影響は少なくない．

2000年代の初頭よりチムニー(Fig. 28)と呼ばれる煙突型の排気口が採用され始めた．冷却性能の調節はチムニー上端部の開口部でおこなう．モデル風洞試験より，開口部を全

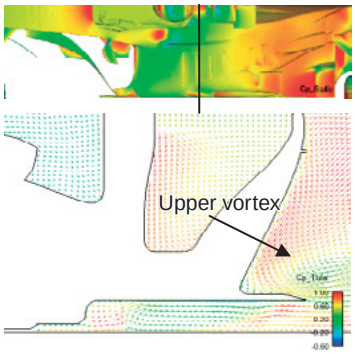


Fig. 27　BBD upper vortex path

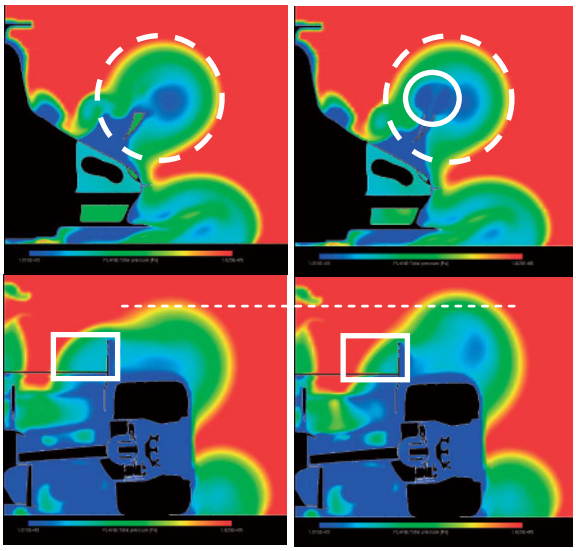
Fig. 28　Chimney and upper flick-up

閉から全開にすることで，車体ダウンフォースが４％，ドラッグが５％それぞれ増加する．これらの増加分の内，半分は RW の荷重変化によるもので，排気流が RW 負荷に影響を与えている．

Fig. 29は，チムニー開口部が全閉と全開時の全圧分布である．点線丸で囲んだ部分は，フロントタイヤ背面からの後流で，Cpt=0.3程度の強い圧力損失領域を含んでいる．この後流はチムニー開口部の上方を通過し，その一部が RW 翼端付近(図中，実線四角)に流入する．開口部が全開のとき，フロントタイヤ後流はチムニーからの排気流(図中，実線丸)によって，上方外側に移動する．それにより，RWに掛かる圧損領域が減少し，RW荷重の増加に繋がる．ただ，この荷重変化は動圧変化によるものであるため，RW の揚抗比はあまり変化しない．

この他，チムニーからのアップウォッシュそのものによるダウンフォースおよび誘導抵抗の増加や，冷却流量の増加による圧力抵抗の増加も考慮する必要がある．さらに，チムニーにより SP 側面で負圧が生じるため，アンダカット SP 同様，床下のシール効果も得られる(Fig. 30)．

また，ブロッケージの影響を CFD により確かめたところ，フロントタイヤ後流の方向がブロッケージの大きさによって影響を受け，チムニー開口による RW の増加代が変化することがわかった．このことから，風洞試験では，この点について十分注意した開発が必要である．



(a) Closed　　(b) Open

Fig. 29　Total pressure distribution in section around chimney trailing edge and RW leading edge

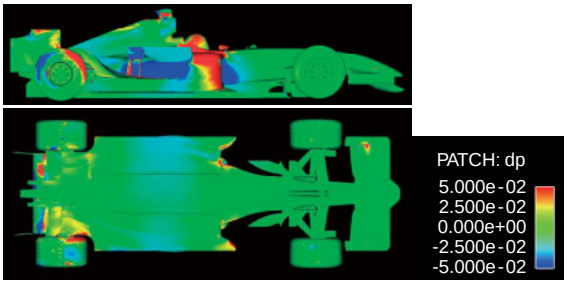


Fig. 30　Chimney effect (delta Cp)

7．ディフューザ

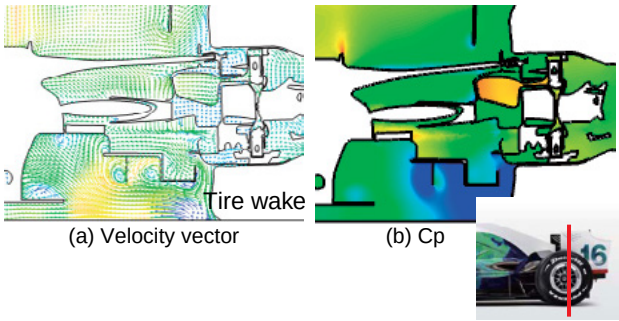
ディフューザ(Fig. 31)はレギュレーションにより寸法が厳しく制限されている．その中で，出口の有効断面積を最大化し，出口静圧を最小化することで，ディフューザ自身と床下負圧の向上を図っている．

7.1. 出口有効断面積最大化

出口の有効断面積が減少する原因として挙げられるのが，圧力回復領域での剥離，端部での上面からの廻り込み流れ，および，リヤタイヤ前縁剥離渦の進入である〔Fig. 32 (a)〕．

圧力回復は，立ち上がり形状，断面形状，フェンス等により，局所的な剥離を起こすことなく，Y方向にできるだけ均等な負圧分布になるよう最適化される(Fig. 33)．端部で

Fig. 31　Diffuser



(a) Velocity vector　　(b) Cp

Fig. 32　Flow around diffuser

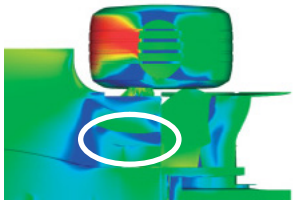


Fig. 33　Diffuser Cp

の回り込みやタイヤ剥離渦の進入は，主にフット部形状によりある程度抑制することができる〔Fig. 32 (b)〕.

7.2. 出口静圧最小化

Fig. 34に車両後部の静圧分布を示す．ディフューザ出口の静圧はサスペンション類，ロワリヤウイングの位置によって影響を受けることがわかる．さらに，これらとアッパリヤウィングの負圧ピーク位置を最適に配置することにより，ディフューザ出口静圧を下げ，ディフューザ流量を増加することができる．

7.3. 車両前半部の影響

車体後方に位置するディフューザは前方の流れ場の影響を受ける．例えば，フロア入口で負圧が向上したり，バージボードの下渦が強くなると，床下の境界層が増し，ディフューザの剥離耐力が低下するなどである．そのため，車体のどの領域からどのタイミングで空力開発を進めるかが，車両空力特性に大きく影響する．

7.4. 車高変化による空力特性

ディフューザの入口と出口の面積比は車高によって変化し，また，サスペンションとの相対位置も変わってくる．それによって，発生するダウンフォースも変化する．

車高によるダウンフォース特性は，低速，高速コーナや減速時のCoP特性などを考慮して決められるが，一般的には，ブレーキ安定性のために，減速中CoPを後方に移動させることが多い．つまり，ブレーキングによりリヤ車高が高くなるにつれて，無次元リヤダウンフォースが大きくなるよう，空力開発がおこなわれる(Fig. 35，点線).

この特性を得るために，リヤ低車高でディフューザが部分的に剥離し，ダウンフォースが下がるような手法が取られるが，剥離が大き過ぎると，ヒステリシスによりブレーキ中もダウンフォースが回復しないことがあるため，注意が必要である(Fig. 35，実線).

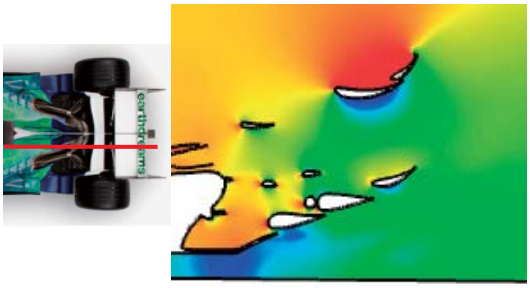


Fig. 34　Diffuser exit static pressure

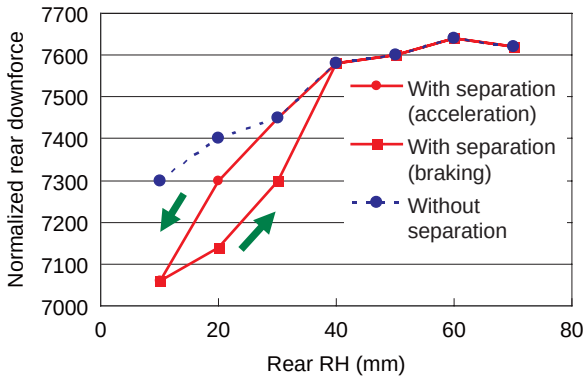


Fig. 35　Ride height aero characteristics

8．リヤウィング

RW は，車体のリヤアクスル後ろの，車体底部の基準平面から測定してZ方向300 mmより高い場所の，レギュレーションで制限されたエリアに位置する．2004 年以降のレギュレーションでは，上部に2枚，下部に1枚のエレメントを設置できる．

RW はアスペクト比が小さいため，翼端渦により流れ方向にアップウォッシュ分布が形成され(Fig. 36)，強いキャンバをもつ翼型であっても大剥離を起こすことはない．

8.1. 翼端持ち上げウィング

Fig. 37 に，CFD より得られた RW なし状態の流入上下方向角度分布を示す．RW 翼端部では大きなアップウォッシュがついていることがわかる．

一方，Fig. 38 に RW 翼端付近の全圧分布の YZ 断面を示す．RW翼端部が車両前半部からのウェイクにさらされ，全圧が低下している．そのため，翼端の翼荷重が低下する．その急激なY方向の荷重変化を緩和するために，Y300 mm

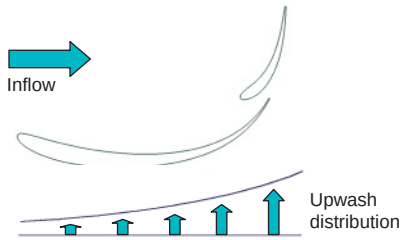


Fig. 36　Upwash by tip vortices

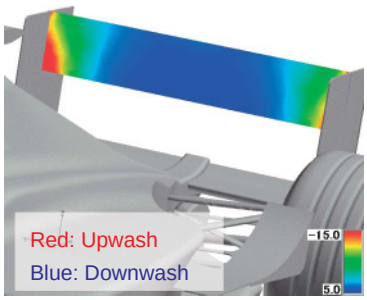


Fig. 37　Inflow angle for RW

付近ではアップウォッシュ，翼端付近ではダウンウォッシュが発生する(Fig. 39)．このことは，翼端ではRWがない状態での流入角がアップウォッシュであるにも関わらず，流れ方向の圧力分布(Fig. 40)をみると前縁でピークが立っている(Y=50mm)など，翼端の方が高迎角時の特徴を示していることからも判断できる．

そこで，翼端部ではキャンバを減らし，負荷を軽減することで圧力抵抗を軽減し，揚抗比の向上が期待できる．実際のRW開発では，これに誘導抵抗の変化も考慮し最適化される．

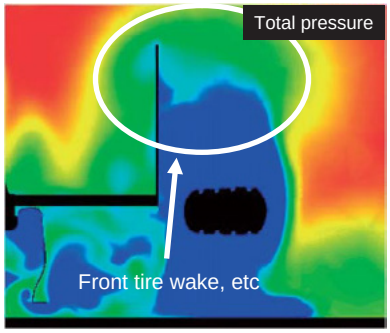


Fig. 38　Cp total around RW

Fig. 39　Secondary vortex due to RW load distribution

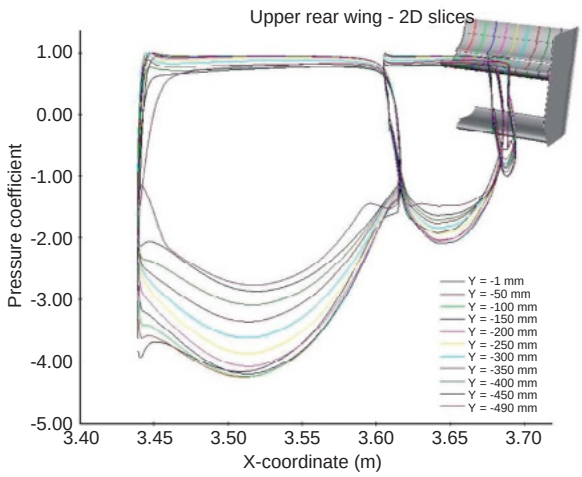


Fig. 40　Sectional Cp distribution

8.2. ピラー形状によるロバスト性向上

多くのRW中央部には，RWを支えるピラーがあり，RW全体構造の軽量化に役立っている．しかしながら，流れは，左右のピラーの間で急激に加速するため，急激な圧力回復が必要となる．また，Fig. 42 にある RA107 のように，後傾しているピラーでは，その後傾に伴った負圧分布によって境界層内流れが上方に転向され，境界層が発達する距離が長くなると同時に，境界層と主流とのクロスフローも生じてしまう．これらが要因となり，RW の剥離安定性を低下させていたと考えられる．

RA108 用に開発されたウイングでは，ピラーによる不安定性を解決するため以下の変更をおこなった．まず，ピラー間隔をレギュレーション最大幅にとることと，断面形状を変更することにより，ピラーの圧力回復を緩和した．次に，ピラーをウイング前縁に移動することにより，RW の圧力回復部とピラーのそれとをずらした．次に，ピラー間に小型の翼を配置することで RW 自体の圧力回復を緩和した．最後に，後傾を最小限に留めることで，ピラー境界層流れの上方への偏向も抑えることができた．

Fig. 41　RW with raised tip

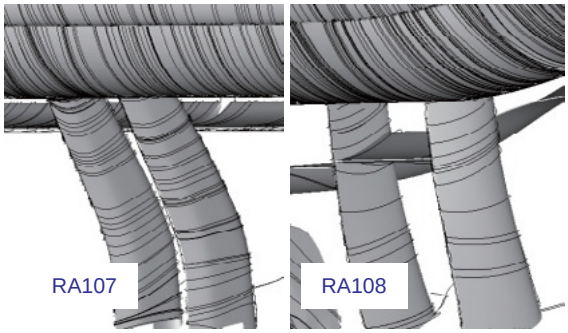


Fig. 42　Boundary layer shear direction on pillars

9．あとがき

F1車体のような多物体周りの流れは非線形性が強く，細部まで空力現象のメカニズムを解明することは事実上不可能である．しかし，その中でも核となる空力現象についてCFDにより定性的に解析し，風洞で定量的な裏付けをおこなうことで，空力開発を効率良くおこなうことができた．また，それにより実走との相関についても，精度の向上を図ることができた．

謝　　辞

長年に渡って共に空力開発をおこなってきた，旧 BAR, HRF1 の皆様，さらに多岐に渡って開発に御協力頂いた社内外の方々に深く感謝の意を表します.

参考文献

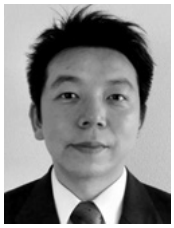
（1）小川厚，矢野修二郎，真塩享，滝口貴，中村信介，新谷満：F1 空力開発手法の紹介，Honda R&D Technical Review, F1 Special (The Third Era Activities), p.134-143

■著　者■

小川　厚

真塩　享

中村大輔


益満尉貴

皆川真之

中井祐輔