

レーシングオン 5月号 No.366 2003年5月1日発行 第18巻第6号
昭和61年8月2日 第3種郵便物認可
レーシングオン

[No.366]

Racing on

Motorsport magazine

2003
5
880yen

レーシングエアロダイナミクス研究

風と共に疾れ!

レーシングマシン解体新書
SUBARU
IMPREZA WRC2003



マシン開発に欠かせない風洞とは?

今やレーシングカーの素性、パフォーマンスを語る時、エアロダイナミクスは欠かせないものとなった。大気を切り裂きレーシングカーが突き進むとき、粘性を持つ流体・空気は車体に見えない力を与える。その力を見極めるための場所、マシンが産声を上げる場所が、自動車用模型風洞実験施設、いわゆる“風洞”なのだ。

Text/Tomonori Taguchi, Racing on Photos/Hiroaki Inada, Dome

近年のレーシングカー開発において、もっとも大きなウエイトを占めるといわれる空力。ダウンフォースやドラッグなど、空気という流体が移動する物体にもたらす様々な影響が、レーシングカーの素性を決まると言っても過言ではない。しかし、空気は目で見えないうえに、オープンエアの状況では風や気温、湿度など周囲の環境によって影響を受けやすく、レーシングカー開発に求められるようなシビアな見極めは非常に難しい。そこで、つねに一定の条件下でエアロダイナミクスの開発・評価を行なうために考え出されたのが風洞実験施設である。

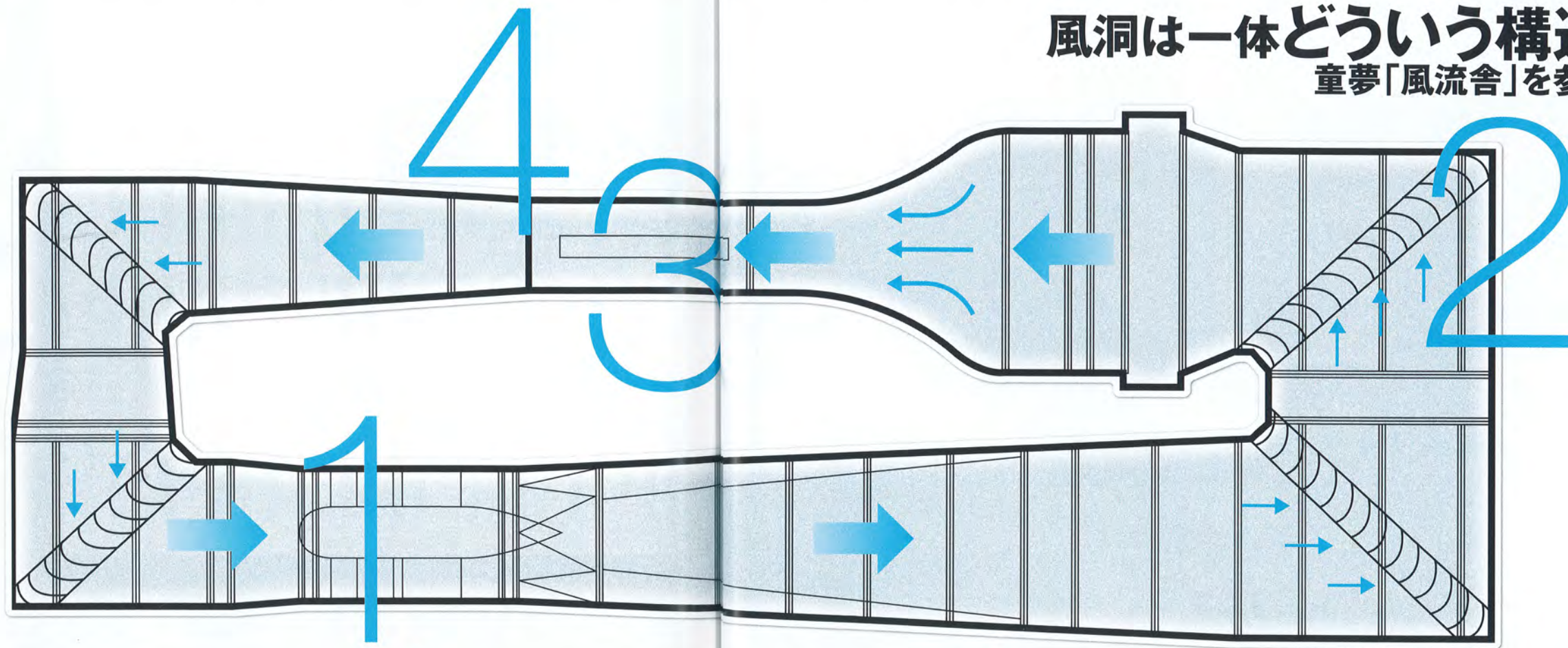
風洞には発生する風速に応じて様々な種類があるが、主に鉄道車両やレーシングカー開発が行なわれるのは亜音速（低速）風洞。亜音速風洞はさらに風路の形式によって、回流式（ゲッチングン型）と開回路式（エッフェル型）に分けられるが、国内最大規模の自動車レーシングカー用風洞実験施設として知られる滋賀県・米原の風流舎は、供試モデルが50%スケール（実車の1/2サイズ）、最大風速60mで風管長99mというゲッチングン型。レーシングカーの空力開発に不可欠なムービングベルト装置、斜め方向からの流れを模擬するための偏ヨ一角装置、年間を通して気流温度を一定にする温調装置など最新鋭の設備を有するほか、主送風機のベーンをカーボンコンポジット化するなど、童夢独自の技術とノウハウが数多く盛り込まれている。建設費用は30億円ともいわれ、その数字からも大がかりな施設であることがうかがえる。

実際にはレーシングカーは静止した大気中を疾走するものだが、風洞実験の場合はその逆で、人工的に起こした風の中に静止した精巧な模型を置き、結果的に実際の走行と同じ状況を創り出す。こうした風洞実験に使われる模型を風洞モデルといい、このモデルに空気の流れが及ぼす力を正確に計測することで空気抵抗やダウンフォースを知ることができ、モデルの形状や地上高を変えながら実験を繰り返して性能を高めていく。またモデル表面にタフト（細い糸）を付けたり煙を流すことにより、空気の流れを可視化し、車体周辺の空気の流れや剥離の状況を調べ、空力的改良の手がかりを掴んでいる。モデルの素材は実際の車体同様に、軽量化と高剛性が要求されることからカーボンやアルミが使われ、50%スケールモデルの場合は一台1千万円以上の製作コストがかかるという。

レーシングカー開発において風洞実験は、ある一定の開発段階にのみ活用されるのではない。童夢の奥明栄氏によれば、「レーシングカー開発は風洞実験に始まり風洞実験に終わるといっていい。直接流れに晒されるボディに留まらずレーシングカーのあらゆるコンポーネントの形態と配置は風洞実験で導き出されるべき」と語る。

また奥氏は、「流体力学的には風洞モデルが実車サイズに近づくほど、空気の粘性を示すレイノルズ数が実車に近づき、実験で起こる現象も現実と近くなる。モデルの製作精度もスケールに比例して上がる。以前使っていた25%から50%にスケールが倍になったことと実験風速が増したことのそれぞれが二乗で作用し、モデルに生じる空気力は約10倍にもなり、そのぶん計測誤差が減少し、より正確な見極めができるようになった」と、50%という大きなスケールの風洞の有用性を説明してくれている。低倍率では現実的に見えてはいない物体が、倍率が上がると手に取るように見える。例えば風洞は顕微鏡のようなものなのかもしれない。

風洞は一体どういう構造なのか？ 童夢「風流舎」を参考に内部を検証



風路の内側から送風機を見る。手前に見える羽根はカーボン製の静翼で、整流板の役割を果たす。抵抗を発生させないため、風路は滑らかに広がる

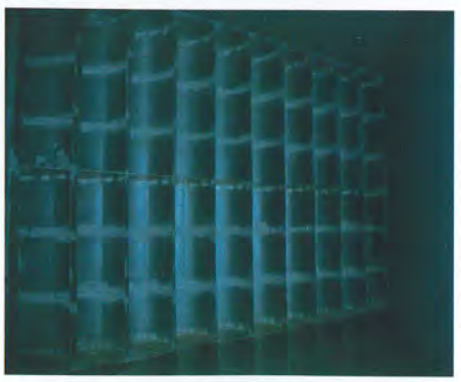


1 送風機
カーボン製フィンを装着
風速60mを発生させる
出力600kwの送風機は
なんと外径4.3mの巨大なもの



風洞に風を供給する送風機は、定格出力600kw（1時間稼働させると600kw/h、つまり一般家庭約250戸分の電力！）のモーターで駆動される。この送風機に取り付けられるフィンは8枚。童夢が独自に設計、製作したカーボン製のものだ。従来、送風機の羽根はスチールやアルミで製作されるのが一般的だったが、風流舎ではアルミ製ではなくカーボン製にすることで一枚あたり105kgあった重さを約24kgまで軽くすることに成功、省エネルギー化や低振動化に大きく寄与している。風流舎を一周して戻ってきた風を再加速し、測定部での風速を60m以上まで上げることが可能となっている。回転中は大きな振動が発生するため、風管とのつなぎ目は振動を吸収するような素材を利用して接続してある。

2 整流板
回流式風洞には欠かせない
風の向きを90度曲げる
コーナーベーンは
最適な形状に設計



送風機から生みだされた風は回転した流れとなっているため、流速がどうしても一様ではなくなってしまう。それをそのまま測定部に流してしまえば緻密な試験を行なうことができない。そこで、風管内でできる限り安定した空気の流れを作る必要が出てくる。特に風流舎のようなゲッチングン型の風洞では4隅の曲がり角で風の向きをいかにスムーズに変えるかがカギとなる。そのために何枚もの整流板が設けられている。そこである程度まで整えられた風は、気流を速めるための縮流部の手前に設けられた細かい目の網によりさらに均質化され、安定した風となって測定部に流れ込む。こうして速さにムラのないまっすぐな風を生み出す技術によって、正確な計測を可能にしているという。

3 ムービングベルト
ここが風流舎の真骨頂
流速の遅い地面付近の風を
吸い込む境界層吸込装置と
±5°偏ヨ一角装置を装備



空気は粘性（物に引きずられる性質）を持っているため、一定の風速で吹いている風も地面付近では遅くなってしまふ。実際にレーシングマシンが走る場合と違い、試験体を固定して風を当てる風洞では車体全体に当たる風を正確に測定することができない。この影響を解消するために考えられたのがムービングベルト。風の流れる速度と同じ速度で地面を動かすことで、粘性の影響を最小限にとどめる効果を発揮する。童夢風流舎の場合はレーシングカーの床面に発生する負圧でベルトが吸い上げられてしまうのを防ぐために、テンションを均一に保つ工夫がされている。さらに、風流舎ではベルトにタイヤが接地して一緒に回転するため、ここで発生する熱を取り除く冷却にも気が遣われているとのこと。

4 測定室
目視観察のために
計測胴の真横に設置
一面ガラス張りの隔壁も
童夢の手によるもの



試験体（風洞実験のため精巧に作られた縮尺モデル）を風に当てて測定するためのエリア。この計測胴は幅2.75m、高さ2.5m、長さは8mと十分な断面積と長さを持つ。この計測胴の真横につく計測室は隔壁にガラスを用いている。スモークを流して試験体に作用する空気の流れを可視化する装置を使用している場合や細い糸を車体に貼り付けている場合に、目視での観察を容易にするためだ。この隔壁も童夢の自社設計のこと。もちろん内部にはカメラが設置されており、上部に設置された大型モニター3基で実験中のモデルの様子を事細かにチェックすることが可能。さらに情報の漏洩を防止するためのセキュリティー機能も完璧。指紋を利用した電子キーによる入室管理がなされている。

50%風洞実験施設「風流舎」

施設構造	鉄骨鋼板構造
風洞形式	水平回流式ゲッチングン型
風管長	99m
計測胴	幅2.75m、高さ2.5m、長さ8m
主送風機	軸流式送風機
主送風機出力	定格出力600kw、外形4.3m
最大風速	60m/s
ムービングベルト	幅2m、長さ5.5m
計測装置	モデル内蔵式六分力天秤

計測室の奥には広々とした作業準備室が。さらに奥には特定のクライアント向けの保管庫が。それぞれの機密保持は万全の体制であるという

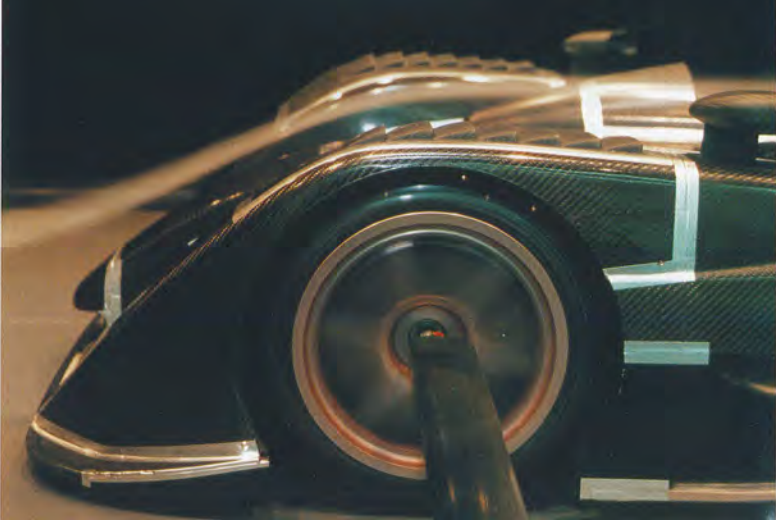
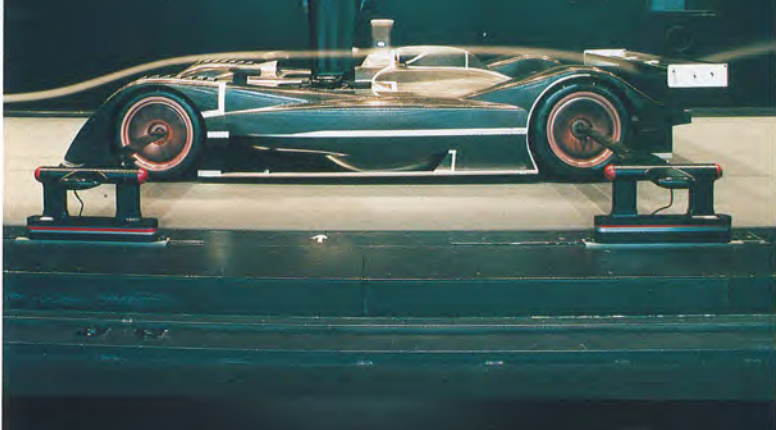




風洞基礎講座

なんとなく風洞のことは分かってきたような気がするけど、まだまだ残る素朴な疑問。ここでまとめてお答えします！

Photos/Hiroaki Inada, Dome



1 主な風洞の種類とは？

風洞には、型式や風速によってさまざまな種類がある。童夢風流舎のように一度測定部を経た風が送風機に戻ってくるゲッチェンゲン型風洞(回流式風洞)と、一方から風を送る(または吸い込む)エッフェル型風洞(単回路吹出式)が主な風洞の型式である。前者は現代流体力学の祖と言われるルドビク・プラントルがゲッチェンゲン大学で発案(1916年)した回流式風洞に由来する。後者はパリのエッフェル塔を設計したギュスターブ・エッフェルが製作したもの。彼は自分の設計した橋が風のせいで落橋するという苦い経験を持っていたため、塔の完成後、風についての研究を進めて直径2mの吹出式風洞を製作(1912年)、以来エッフェル型風洞と呼ばれている。



風流舎内部の様子。巨大な風路が横たわり、回流式の風洞であることがよく分かる。その下には童夢「零」など歴代のマシンが並ぶ

風速については、マッハ数0.0〜0.7程度のもを亜音速風洞、0.7〜1.0くらいまでのものを遷音速風洞、1.0〜5.0を超音速風洞、5.0〜10.0以上のものを極超音速(マッハ)風洞という。音速を超える風洞では、亜音速風洞のような低速風洞に用いられている送風機ではその条件

2 世界で最初に風洞が製作されたのは？

世界最初の風洞については諸説あるが、有力なものには1871年、イギリス航空協会(現在は王立航空協会)のフランク・H・ウェンハムが製作した風洞だと言われている。幅、高さはそれぞれ18インチ(約45cm)、長さ12フィート(約3.6m)という比較的小型の風洞である。蒸気機関を利用した送風機は時速40マイル(約64.4km/h)を発生したと言われている。整流のためには板は何もついていなかったため、現在からみればその結果は必ずしも正確なものではなかったかもしれないが、まだ航空力学が未発達だった当時としては貴重なデータを得ることができたに違いない。ウェンハムはこの風洞を利用して、翼の形状による揚力、抗力の違いをそれぞれ計測していたという。そのほかでは、あのライト兄弟も風洞を使用して実験を重ねており、1901年にはオハイオ州デイトンで幅、高さ約40cm、長さ150cm程度の風洞を作り、さまざまなモデルでグライダーの翼の研究を重ねていたという。ちなみに、ライト兄弟が作ったと言われる風洞の復元モデルは、ノースカロライ

な速くなる。それとは反対に、風路が広くなるにしたがって風の速度は遅くなる。送風機から生み出された風を、徐々に広がっていく風路に通すことで流れを緩やかにし、整流板や金網で流れを整えられた質の高い風は縮流部(風流舎の縮流比は8.3〜1)で一気にとり込まれて加速され、測定部へ向かって流れ込んでゆく。回流するゲッチェンゲン型風洞の場合、測定部を通過した風は広い風路によって速度を下げられ、再び送風機へとつながっていく仕組みとなっている。

それぞれ18インチ(約45cm)、長さ12フィート(約3.6m)という比較的小型の風洞である。蒸気機関を利用した送風機は時速40マイル(約64.4km/h)を発生したと言われている。整流のためには板は何もついていなかったため、現在からみればその結果は必ずしも正確なものではなかったかもしれないが、まだ航空力学が未発達だった当時としては貴重なデータを得ることができたに違いない。ウェンハムはこの風洞を利用して、翼の形状による揚力、抗力の違いをそれぞれ計測していたという。そのほかでは、あのライト兄弟も風洞を使用して実験を重ねており、1901年にはオハイオ州デイトンで幅、高さ約40cm、長さ150cm程度の風洞を作り、さまざまなモデルでグライダーの翼の研究を重ねていたという。ちなみに、ライト兄弟が作ったと言われる風洞の復元モデルは、ノースカロライ

イナ州キティホークのライト記念館に所蔵されている。日本では最初の風洞が開発されたのは明治41年(1908年)にまでさかのぼる。日本の航空学の創始者と言われる日本式ローマ字の発案者でもある田中館愛橋大教授によるものが、日本初の風洞と言われている。物理学者である彼の製作した風洞は、衣類などを収納する「長持ち」の両端を開いたものの側面にガラス窓を取り付け、扇風機で風を流すといった簡単なものだった。田中館教授は明治37年(1904年)の日露戦争で軍に請われて気球の研究に参加し、航空学の研究を開始しており、それが風洞を製作する契機になったと思われる。

3 日本で最初の風洞は？

日本では最初の風洞が開発されたのは明治41年(1908年)にまでさかのぼる。日本の航空学の創始者と言われる日本式ローマ字の発案者でもある田中館愛橋大教授によるものが、日本初の風洞と言われている。物理学者である彼の製作した風洞は、衣類などを収納する「長持ち」の両端を開いたものの側面にガラス窓を取り付け、扇風機で風を流すといった簡単なものだった。田中館教授は明治37年(1904年)の日露戦争で軍に請われて気球の研究に参加し、航空学の研究を開始しており、それが風洞を製作する契機になったと思われる。

日本における風洞はその後、東京・深川越中島の帝国大学航空研究所に直径2mの風洞が作られたが、関東大震災で焼失。航研が新たに駒場へ場所を移した昭和5年(1930年)には吹出口の直径が3mという大型風洞が作られた。当時の日本では最大のもので、ノズルなどは木板を使用してきちんと整流されていたという。

4 熱や騒音にはどのような対策を採っているのか？

低速風洞運転時に発生する熱や騒音は当然、大きなものとなる。風洞内部を流れる大量の空気の温度を安定させるのは容易なことではないが、その温度が安定しなければ、正確な計測結果を得ることはできない。そして、風洞

本体が発生させる騒音(これを暗騒音という)もさることながら、試験体からは風切り音が発生する。風切り音が発生するのは、その部分に空気の抵抗が存在している証拠。したがって、騒音を減らすことができれば、ドラッグの少ないボディが出来上がるということになる。風切り音がどこで発生しているのか、また、その音圧を正確に測定するためには、暗騒音もできる限り減らさなければならぬ。

もちろん、これら温度や騒音の誤差はデータにより補正することも可能だが、できるだけ補正の範囲を狭めるために、風路内には大型の冷却器や消音機が設置され、吸音コンクリートや吸音材などで騒音を消すような工夫がなされている。

風流舎では、45m/sの常用試験風速域では25±1℃という安定した温度帯で試験を行なえるように、強力なクーリングシステムを備えている。これは夜間電力で作られた冷水を蓄熱槽に蓄え、それを冷却システムとして利用することで、省エネルギー化を実現しているという。さらに、すべての施設を屋内に設置することによって、周辺の防音などにも配慮した構造になっているとのこと。

5 風路が広がったり狭まったりしているのは？

低速風洞の風路が広がったり狭まったりしているのは、流速のコントロールと質の高い風を得るため。例えば、「ビル風」を思い浮かべてもらって分かるが、ビル風とはビルとビルとの間にある狭い路地に風が入り込んで、とても強い風が発生する現象のこと。一定の強い風が吹いているならば、風路が狭まってくると、その速度は

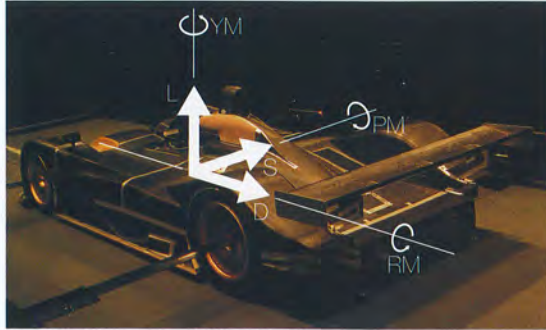
6 「六分力天秤」とは？

「六分力」とは、X軸、Y軸、Z軸にかかる力と、それぞれの軸を中心として働く回転力のこと。下の写真で説明すると試験体の上に引く張る揚力(L)、後ろに引く張る抗力(D)、横に押し出す横力(S)に加え、L軸を中心回転するヨーイングモーメント(YM)、D軸を中心回転するローリングモーメント(RM)、S軸を中心回転するピッチングモーメント(PM)の6つを指す。いわゆるダウンフォースとは揚力と逆の向きに働く力で、ドラッグというのは抗力のことを表している。このダウンフォースとドラッグをどうバランスさせていくのがマシン製作において重要なプロセスとなる。

天秤は風洞の種類によってさまざまな場所に設置される。ワイヤーで計測モデルを釣り上げる風洞の場合そのワイヤーの付け根に、ターンテーブルの中に逆ピラミッド型で内蔵されるものもある。風流舎では試験体を上から柱によって支えているため、試験体との結合部に6分力天秤を取り付け、逐一データをモニターしている。この六



この支柱でモデルを上から下げる形をとる風流舎。ちょうどコックピットとの接続部分に六分力天秤が内蔵されている



分力天秤によって、走行中のマシンにかかる空気を細かく把握できるようになり、空力的な改良の手がかりも掴みやすくなった。

7 クルマ以外の用途は？

もちろん最初が航空力学の分野で生み出された風洞だが、現代における風洞の用途は航空機や車だけではなく、風荷重が時に地震荷重を上まわることもあるという高層建築物、橋梁や高圧線鉄塔、パラポラアンテナなどの耐風安定性試験に代表される建築分野、ピルの建設に伴う風害の調査、雪などを

8 風洞の使用料とは？

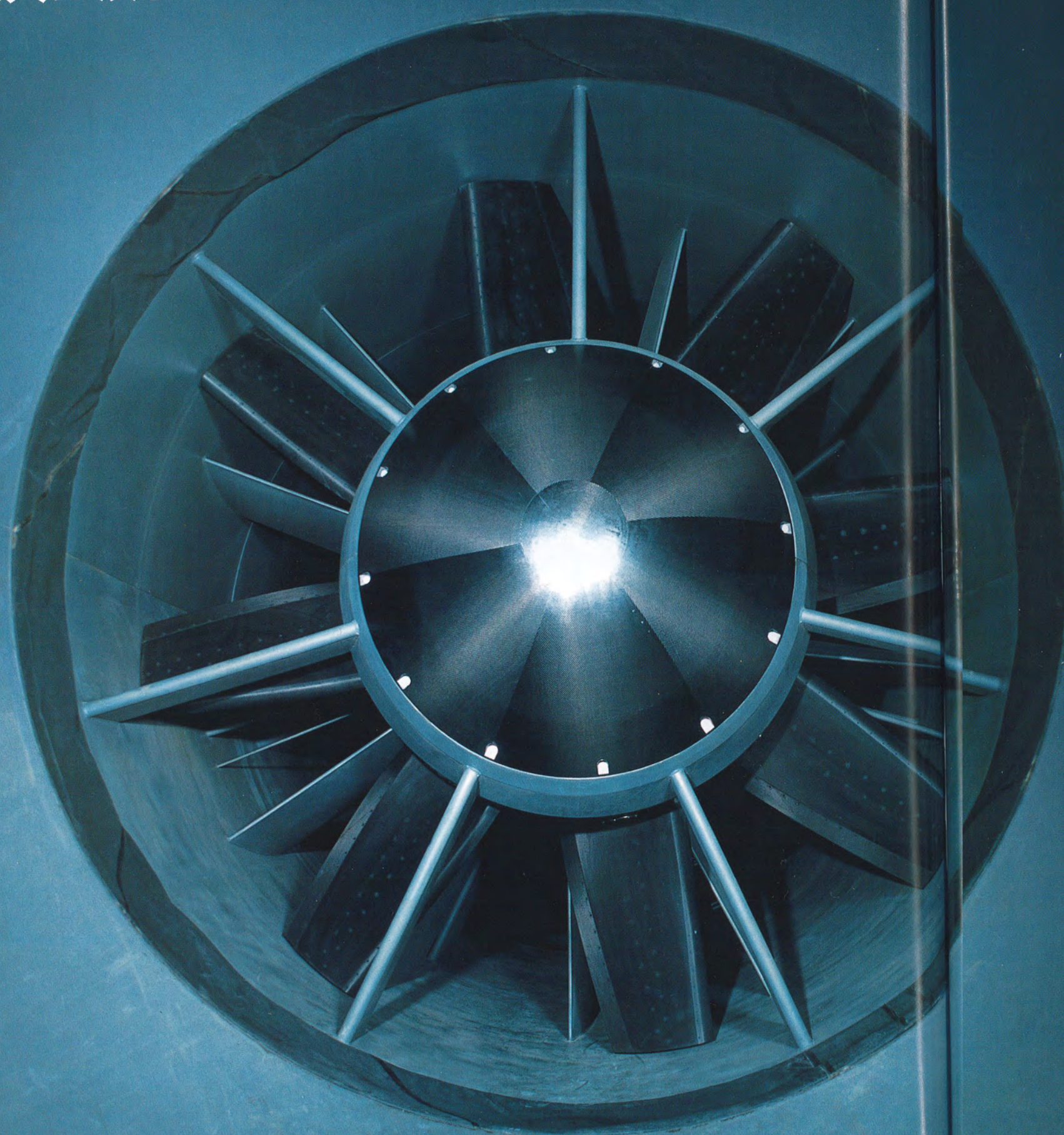
一度に多大なエネルギーを消費する風洞の使用料は、風速や計測測の大きさ、稼働時間や設備によっても差が出るが、風流舎では「外部のクライアントさんには、稼働時間にもよりますが、だいたい1日150万円前後でお貸ししております」との回答をいただいた。大型の送風機、ムービングベルトなど最新の設備を備えた風流舎はそれだけ費用をかける価値のある風洞だといつたところだろう。外部クライアントに風洞施設を貸し出している企業は多いが、一般的な低速風洞では1時間2万円前後、遷音速風洞が1時間10万円前後、超音速風洞は1回の稼働で10万円前後、極超音速風洞では1回25万円以上というがおおよその相場となっているようだ。



外部に設置される冷却水のプラント。夜間に冷水を作っておくことで、1年中内部の温度を一定に保つことができる



大型の水冷ラジエーターは風路内部の温度が上昇するのを防ぎ、風洞実験に最適な環境を作りだすことに貢献



フォーミュラカー、スポーツカーからツーリングカーまで、今やレーシングマシンにとって空力がすべてであると言っても過言ではない。

そして現代のレーシングマシン開発に欠かせないのが風洞の存在だ。今まで机上の理論やアイデアだけに頼っていたレーシングカーのデザイン技術は、風洞が登場してからより具体的に現実的なものとなり、空力デザイン技術は飛躍的に向上した。

その一方でダウンフォース獲得の技術競争とレギュレーションはイタチこ

Drive with the wind

つこの関係にある。レギュレーション改正でダウンフォースを減少させられ、それも素早く対応し、速やかにダウンフォースを獲得しなければならぬ。そのためにも風洞実験は欠かせない。それができないのだ。そしてまたレギュレーションが改正されて、とマシン改良が続く……。このイタチこっちは終わることはないだろう。

「風を如何に利用するか?」このテーマのために今日もレーシングマシンの開発は続けられている。そう絶え間なく回り続ける風洞の羽根のように。