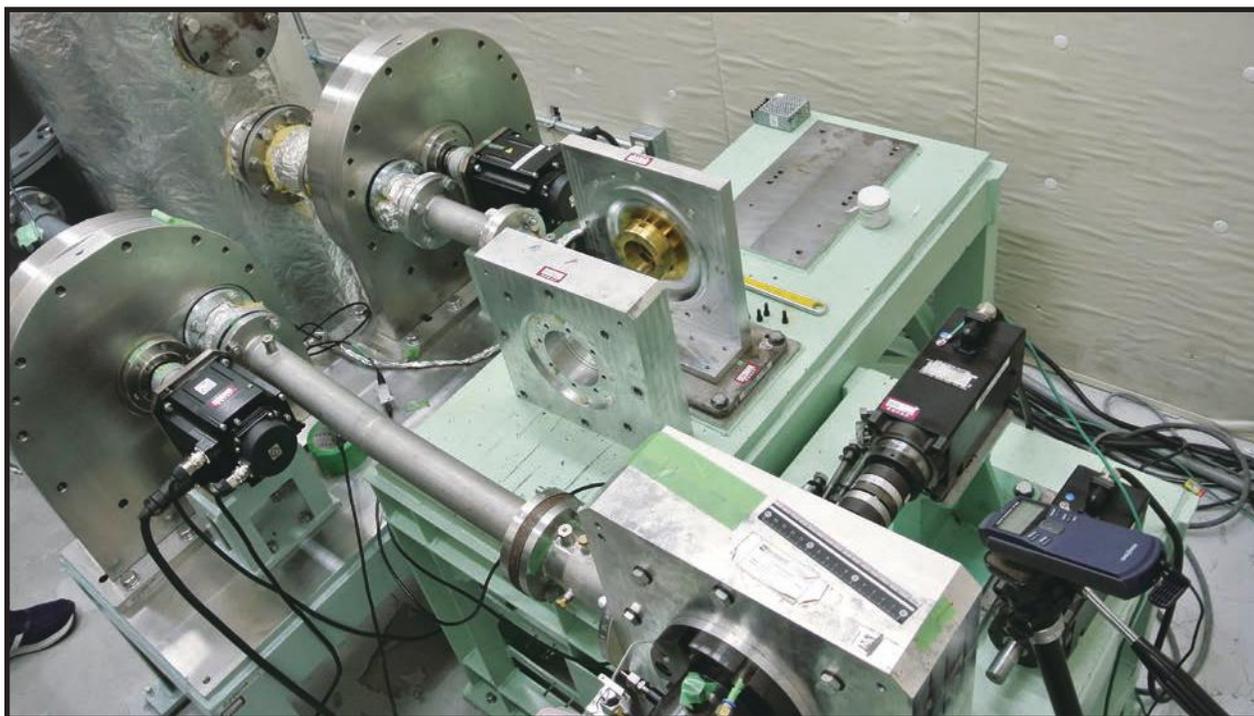


流体の性質が支配する タービン内の現象解明に挑む

脈動流が生み出す自動車用ターボの難しさ

SIP(戦略的イノベーション創造プログラム)第1期/革新的燃焼技術のプロジェクトにおいて、早稲田大学の研究チームは自動車用ターボの実態にメスを入れた。とくに注力されたのが脈動流下のタービンで起きる現象の解明である。

TEXT:高橋一平(Ippey TAKAHASHI) PHOTO:MFI FIGURE:SIP/相田 悟(Satoru AIDA)



Introduction | 観測困難なターボ内部の流体の振る舞いを捉える

自動車のエンジンに用いられているターボチャージャー(以下ターボ)、その歴史は思いのほか長く、登場は20世紀初頭であり、第二次世界大戦を迎える頃には高高度を飛行する航空機用途として大量生産されるに至っている。自動車用としてもすでに50年以上に渡って使われ、とくに近年においてはエンジンの高効率化を支える存在にもなっているのだが、じつは技術的に明らかになっていない部分が少なくない。

排ガスの流れを捉えるタービンを動力源にコ

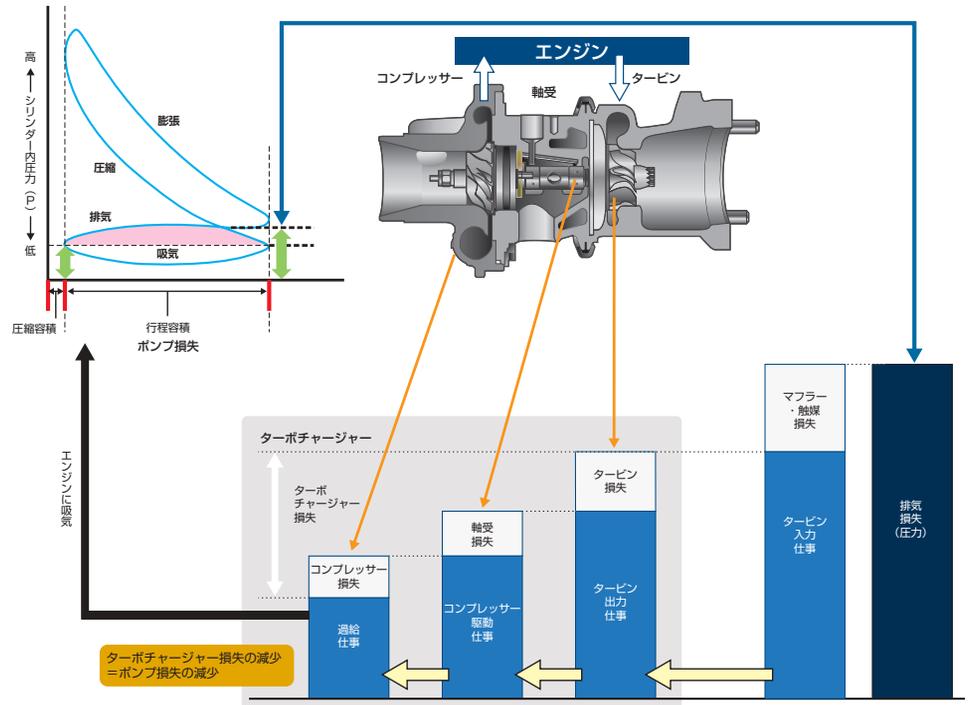
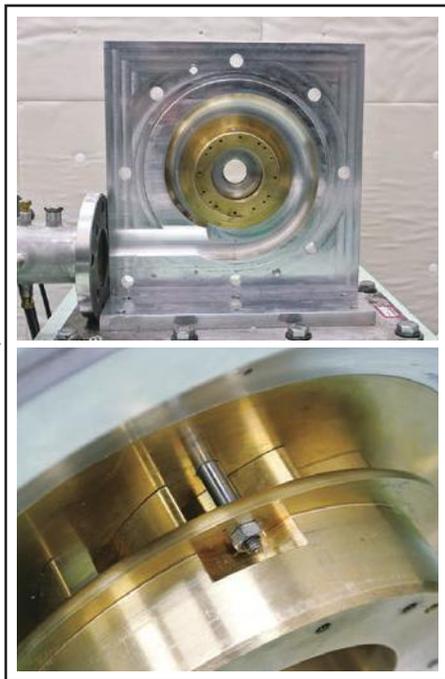
ンプレッサーを作動させるという点は、ターボの利点を生み出す、もっとも特徴的な部分のひとつだが、同時にターボにまつわる“謎”が集まる場所でもある。というのも、この技術(タービン)はもともと水車やガスタービン(蒸気タービンも含む)のものであり、作動に用いる流体(液体や気体)の流速や流量、圧力などが一定となる定常流という状態が基本前提となっている。水力発電所の水車(水力タービン)からジェットエンジンまで、タービンは数多くの機

械装置に用いられるが、“非”定常の脈動流下で使用されるタービンはターボだけなのだ。

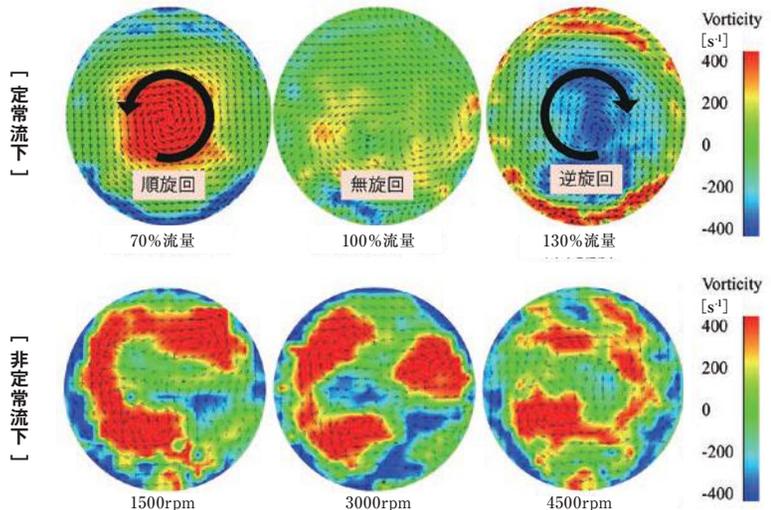
自動車のレシプロエンジンでは、排気バルブ開閉にともない排ガスが断続的に排出されることで、流速や流量、圧力が常に目まぐるしく変動する脈動流となるが、この脈動流はタービン周辺でさまざまな現象を引き起こす。基本的に無色透明の排ガスは目に見ることのできない流体であり、そこには粘性という性質(水のように接する物体の表面にまとわりつく性質)もつ

ターボチャージャーの効率とポンプ損失の関係

右の図はエンジンのP-V線図においてターボの関わる領域と、そこで生じる損失の内訳を関連づけるかたちで示したもの。吸気行程と排気行程の圧力差、つまりP-V線図下側の線で囲まれた領域の面積がエンジンのポンプ損失にあたる。ターボはエンジンの排気損失となる(排気行程時の)圧力から仕事を取り出し、過給によりエンジンの吸気を助け、吸気工程の筒内圧力を高めることで、ポンプ損失を低減していることがわかる。ターボ内部の損失を抑えて過給仕事を増やすことができれば、ポンプ損失はさらに小さくできるということだ。



非定常内部流れの計測



エンジン回転数(タービン回転数一定)

自動車に用いられるターボは、脈動する排ガスの流れでタービンを駆動するが、これはタービンにおいては異端ともいえる極めて特殊な使い方。宮川研究室ではこの脈動流下のタービンで起きる実現象を捉えるべくロータリーディスクバルブ(左ページの写真左側に並ぶアルミブロック部)で脈動流を再現する装置を製作(SIPプロジェクトによるもの)、実験を繰り返しながらシミュレーションとのすり合わせを行なっている。

タービン出口下流の様子をレーザーを用いて断面で捉えるというPIV計測の結果を示したもの。タービンの設計値通りの(最適な)運転状態(流量と回転数)としたものが中央で、上が定常流、下が非定常の脈動流下となっている。定常流下では設計値通りの運転で旋回のない状態となっており、設計値よりも流量が少ない場合(回転数はすべて同じ)はタービン回転と同方向に、流量が多い場合は逆方向に旋回が生じるが、脈動流下では運転状態に関わらず不規則な旋回が生じていることがわかる。

いてまわる。これは車体の空力設計で対象とされる空気でも同様であるものの、数百℃以上の温度を持ち、少なくとも数十Hz、場合によっては数百Hzに及ぶ周期で脈動する排ガスには、車体の空力検討に用いられる風洞実験のような可視化手段の適用は極めて困難、現実的には不可能と思って間違いない。

これは温度や圧力の計測についても同様で、ターボには効率や特性といった仕様を知るうえで重要な圧力比と流量、そして温度の関係を示

したマップと呼ばれるグラフが用意されるが、じつは実測ではなく推定値で表されている領域も少なくない。例えばエンジンの部分負荷などにあたる運転領域では圧力比も低いことから、コンマ数℃の精度で温度を検出する必要があるのだが、これを正確にしかも高応答でピックアップできる温度センサーは存在しない、つまり計測ができないのだ。

脈動流下で運転されるターボの特殊性は古くからある程度認識されてはいたのだが、このよ

うな技術的背景のもと、脈動流下のタービンで起きる現象については、解明以前に全容すらつかめていなかったといっても過言でない。そして、この分野に果敢に挑んでいるのが、今回お話を伺った、早稲田大学の宮川教授率いる研究チームである。同チームではエンジンの脈動流を再現する装置を用いた模型実験と、コンピューターによる流体シミュレーションを併用することで、これまででない精度でこれらの現象をモデル化することに成功している。

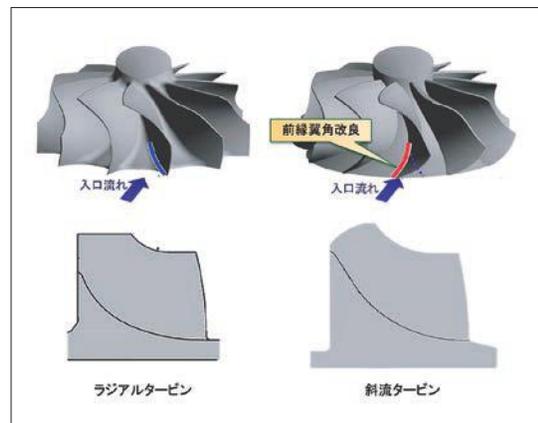
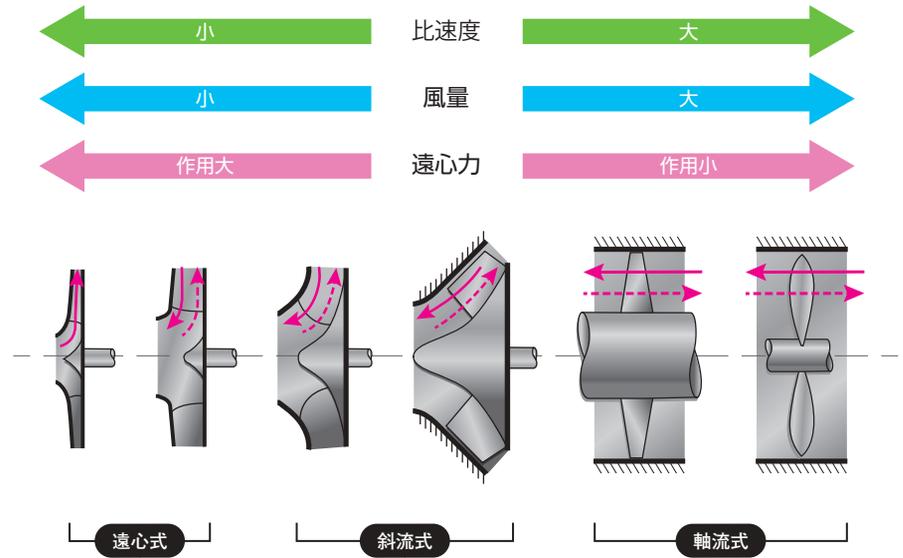
タービン分類に見る自動車用ターボの“立ち位置”

ターボに用いられるタービンは“ラジアル式”とも呼ばれる“遠心式”に分類されるというのが一般的だが、近ごろ耳にすることが増えている“斜流タービン”とはどのようなものなのだろうか。

TEXT:高橋一平 (Ippey TAKAHASHI) PHOTO:山上博也 (Hiroya YAMAGAMI) FIGURE:Mitsubishi Heavy Industries/SIP/相田悟 (Satoru AIDA)

斜流式は遠心式と軸流式の間 自動車用ターボの主流は……

右に示すのは主なタービンの形態を、軸に対する(流体の)流れの方向から三種に分類したもの(赤い矢印が流れの方向で、点線の矢印はコンプレッサーとして使う場合を示す)。自動車用ターボはコンプレッサー／タービンともに遠心式に分類されるのが一般的だが、遠心式とは図中に示すようにタービン内の流れが半径方向のみとなるものであり(そのため半径流式やラジアル式とも呼ばれる)、少なくとも純粋な遠心式ではないことがわかる。じつは入口で半径方向、出口では軸方向(タービンの場合)とタービン内部で流れの向きを変える自動車用ターボのタービンには“混流式”という呼び名もあって、どちらかというとき斜流式の一種といえるものなのだ。右側の軸流式とは文字通り軸に沿って流体を流すもので、遠心式や斜流式よりも大流量(風量)を必要とするジェットエンジンなどに使われる。

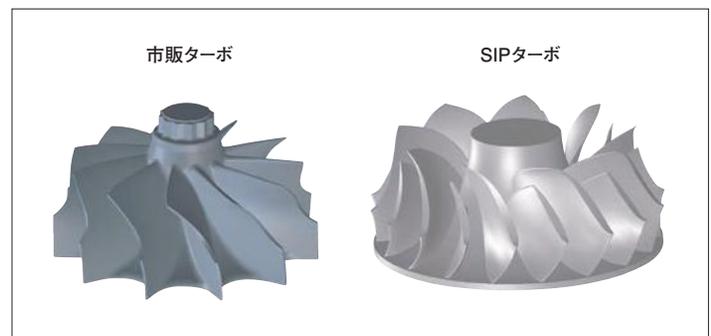


斜流タービンとはなにか

一般的な自動車用ターボのタービンが斜流式に分類されるとすれば、あえて“斜流タービン”を名乗るタービンはどのようなものかという、一般的なものをさらに軸流方向に近づけたものと思えば良い。タービン内を斜めに抜ける流れをより直線的なものとするために、軸方向の寸法が長くなっていることがわかる。

排ガスのエネルギーをより効率的に回収する次世代型斜流タービン

SIP 革新的燃焼技術の活動において宮川教授率いるターボ過給グループが開発した斜流式のタービン。きちんとした翼断面を持つブレードと、スプリッターを持つ構成が特徴的だ。脈動流下の損失を徹底的に排除することで、温度の低い高効率エンジンの排ガス流下でも効率的な運転が可能となっている。

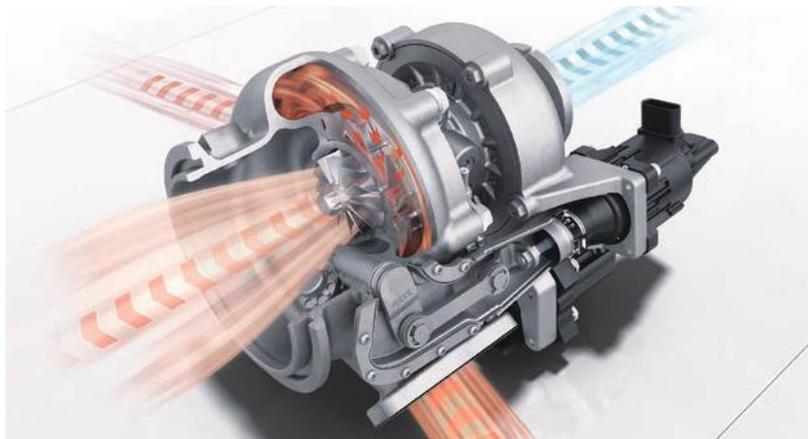


複雑なブレード形状により 脈動流下での損失を最小限に抑え 高いタービン効率を確保

三菱重工の斜流タービン。左から世代順に並べたもので、右端が最新世代のものとなっている。左上に示すイラストの右半分もこの最新世代のもので、ガスの入り口に当たるタービンブレード前縁の翼角(方向)をガスの流れに揃えていることがわかる。複雑な形状は脈動流を意識したものだ。

タービンをどのように駆動させるのか

ターボはエンジンの排ガス中に残されたエネルギーを“原資”に作動している。
タービンに対して働く流体の振る舞いと、タービンの持つ構造との関係などを紐解いてみる。
TEXT:高橋一平 (Ipey TAKAHASHI) PHOTO:山上博也 (Hiroya YAMAGAMI) / PORSCHE FIGURE:SIP



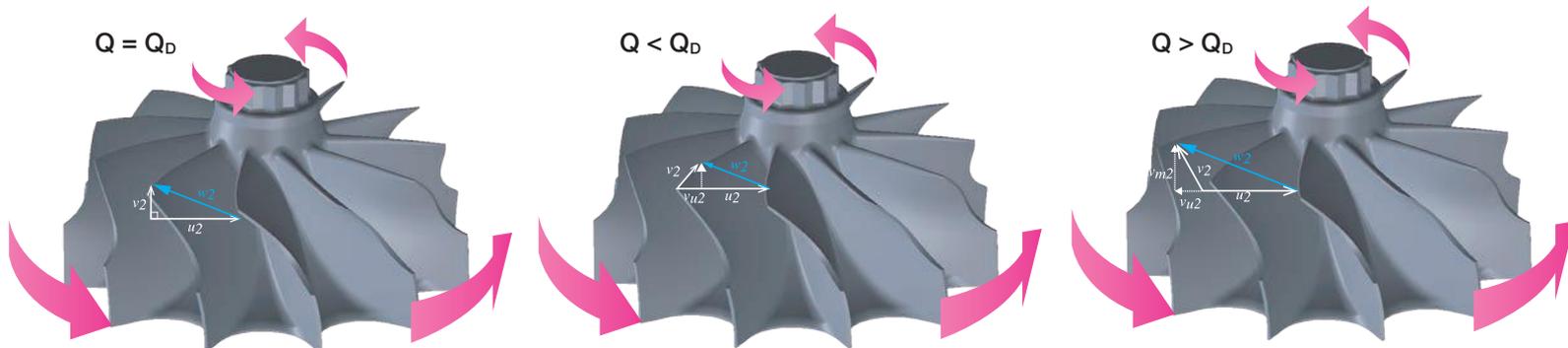
タービンにまつわる3つのエネルギー

- ・運動エネルギー
- ・圧力差
- 遠心力
- 翼力

タービンの回転には、おもに上に掲げた3つのエネルギーが関係している。このうち翼力とは、航空機の翼でいうところの揚力であり、羽根の両面における流速の差から生まれる圧力差に起因する力。ジェットエンジンなどで多く見られる軸流式ではこの翼力のみが振りどころとなっている。この場合、流速の差を生むためにはブレード(羽根)の断面形状を翼と同様に作り込む必要があるのだが、これに対して自動車用ターボで使われる遠心/ラジアル式のタービンではこの翼力にあまり依存しないため、ブレードは薄い板状となっている。なお、遠心/ラジアル式では遠心力により作動流体(排ガス)には外に向かう力が働くが、圧力差で押し込むかたちとしている。

入口と出口の角運動量の差がタービンを回す

円周方向に配置されたスクロール部で形成された旋回流がタービンに流入するかたちとなる自動車用のターボでは、右上の3つのなかでも運動エネルギーが大きい意味を持つ。運動エネルギーの源ともいえるのが旋回流の持つ角運動量で、(遠心/ラジアル式の)タービンは流体の入口となる外周部と、出口となる中心部における角運動量の差で動く、つまり入口のほうが出口側よりも角運動量が大きく、入口と出口の半径差がエネルギーを生み出していると思って良い。左のページで触れたように、流れとしては斜流式に近いかたちをとりながら遠心/ラジアル式に分類されるのはこのためだが、出口付近ではガスの膨張による反動(これも運動エネルギー)も利用している。



流量によって変化するタービン出口の流れ

- w_2 = 相対流出速度
- u_2 = タービンの周速 (m/s)
- v_2 = 噴流 (≒流量) の速度 (m/s)

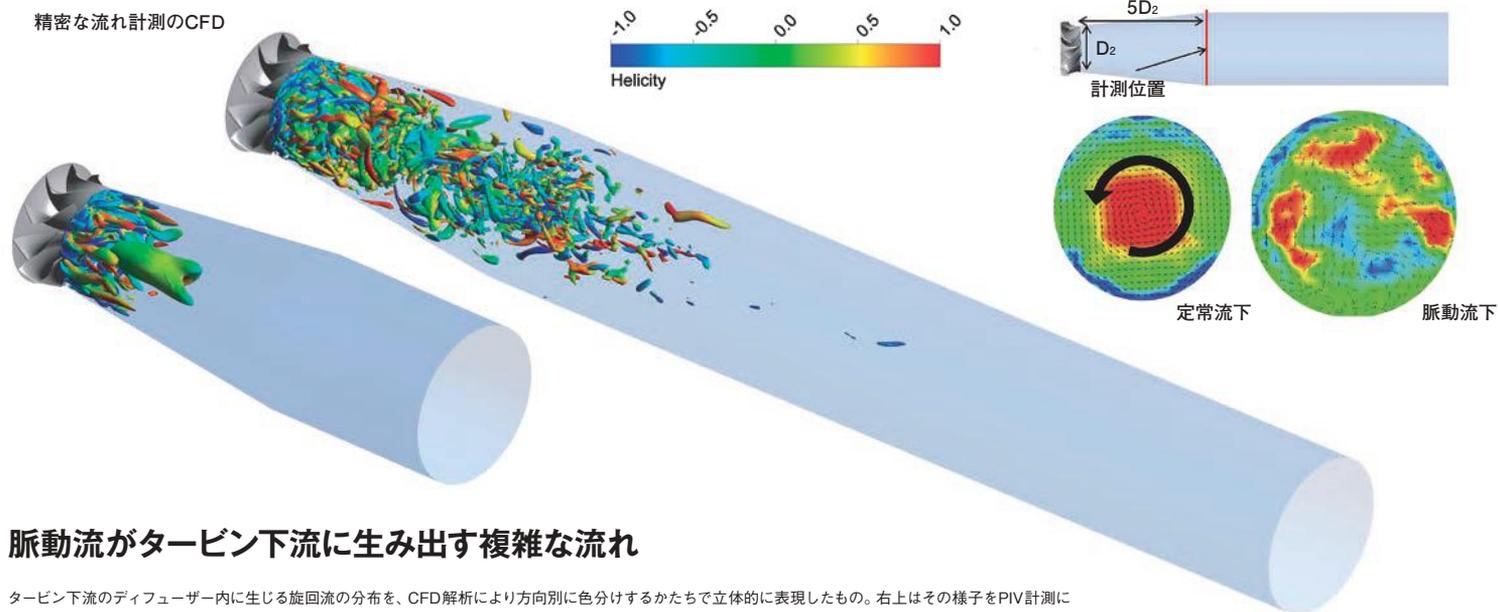
タービン出口の流れを“速度三角形”と呼ばれるベクトル線図で示したものの。タービンの回転数、つまりブレードの周速は3つともすべて同じことが前提となっている。回転するタービンから噴出する(排)ガスの流れは、タービン側から見る場合と外部の定点から見る場合では異なって見える。この両者の関係を統合的に表すのが速度三角形だ。左が設計点にあたる流量としたもので、タービンの羽根出口部(エクスデューサーと呼ばれる)に導かれた流れ(w_2)と周速(u_2)の関係が直角三角形を形成、これはガスの噴流(v_2)が旋回せずに真っ直ぐに流れることを意味する。これに対し、中と右のふたつでは噴流の方向が垂直にならず、噴流に旋回成分が生まれている。これらは損失を生み出す原因となるわけだが、脈動流下ではこの現象が目まぐるしく変化しながら起きることで、次ページに示すようにタービン下流に複雑な流れを生み出している。

遠心力による流体(ガス)の振る舞い

タービン内の流体がみせる振る舞いは極めて複雑なものだが、その一因として挙げられるのが遠心力だ。

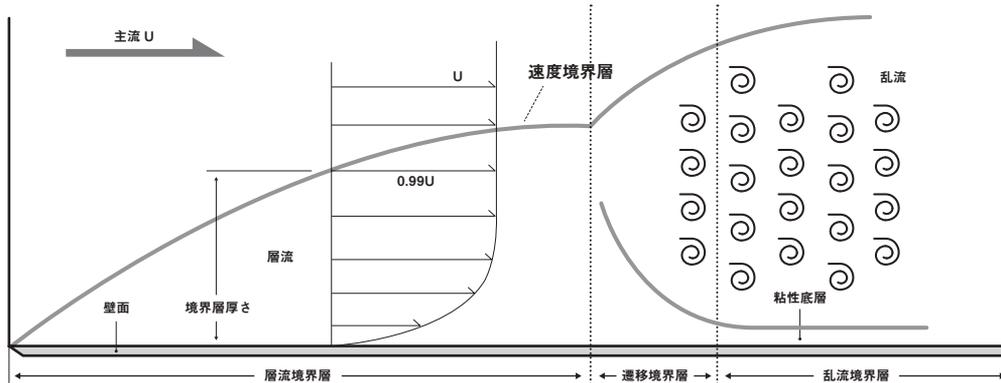
高速回転するタービンホイールはもとより、遠心力の影響はさまざまな部位で見ることができる。

TEXT:高橋一平(Ippey TAKAHASHI) PHOTO:澤田優樹(Yuki SAWADA) FIGURE:SIP/BMW/相田悟(Satoru AIDA)/萬澤琴美(Kotomi MANZAWA)



脈動流がタービン下流に生み出す複雑な流れ

タービン下流のディフューザー内に生じる旋回流の分布を、CFD解析により方向別に色分けするかたちで立体的に表現したもの。右上はその様子をPIV計測によりディフューザーの断面で捉えたもので、左側が定常流下(設計点よりも流量が少ない場合)、右側は脈動流下のもの。前者では中心付近にタービン回転と同方向に大きな旋回がひとつだけ生じているのに対し、後者では複数の小さな渦が全体に偏在。SIP革新的燃焼技術の研究で行われたこの解析により、脈動流下の損失は定常流下とは異なる発生メカニズムであることが確認された。



思わぬ挙動を引き起こす 目に見えない 「境界層」という存在

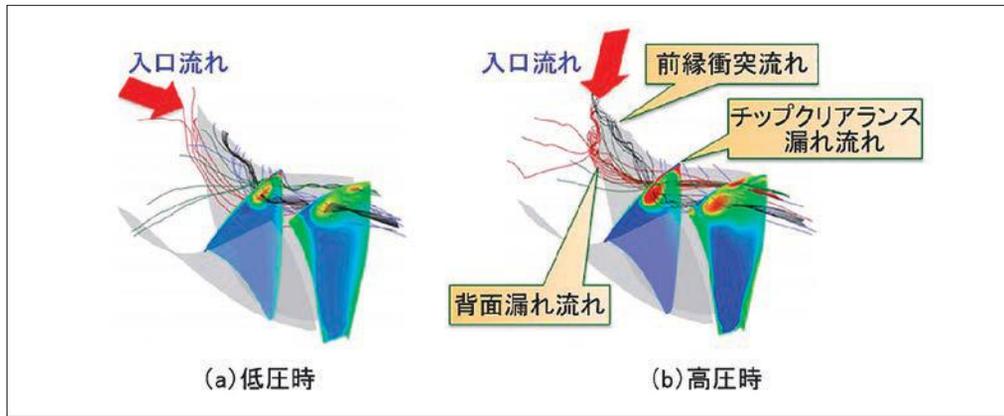
空気のような粘性を持った流体が物体近傍を流れるとき、物体表面には左のような“境界層”と呼ばれる状態が形成される。境界層内は主流(U)とは異なる流れの状態となっており、上流側では主流よりも流速の遅い層流(渦のない澄んだ流れ)だが、下流に向かって厚さを増し、ある程度まで厚くなると遷移状態を経て乱流に転じる。その最下層となる表面付近では流速がほぼゼロの静止した状態となっており、基本的にこの状態は粘性流体の流れに接する物体表面にあまねく存在すると思えば良い。

74ページ下で示したように、タービンの回転数と流量の関係が設計点から外れるとタービン下流に旋回流が生じるわけだが、流量が目まぐるしく変動する脈動流下では方向も速度も異なる旋回流が次々と発生し、上で示す3Dで描いたCGのように複雑に入り乱れた流れを作り出す。ここ(上)で示しているのはANSYS-CFX(数値流体解析ツール)を用い、DESと呼ばれる高度な解析手法によるシミュレーションを実行した結果だが、このDESには膨大な計算時間がか

かるという。じつは身近に電子技術が溢れる現在にあっても、シミュレーションが困難な分野はまだまだまだ少なくないのだが、流体シミュレーションはその代表例ともいえる分野なのだ。

とはいえ理論的にはわかっていても、実現象を捉えることが難しいのが同分野でもある。例えばタービンホイールにおいては、遠心力により外に向かおうとする力に逆らい、ガスが圧力で押し込まれるのだが、タービンブレード表面(翼表面)には境界層という主流の影響をほと

んど受けない薄い層が存在し、この部分が遠心力の影響を受けて外側へと滑り出ていく(これも右ページで示す2次流れのひとつ)。境界層は粘性を持つ流体が物体表面に“まとわりつく”ことで起きる現象であり、もともと目視が難しいわけだが、高速回転するタービン内で起きるとあっては実現象の観測は不可能といっても過言でない。まだまだ不完全とも言われる流体シミュレーションだが、これらを駆使することで新たな世界が見えてきたのも、また事実なのだ。



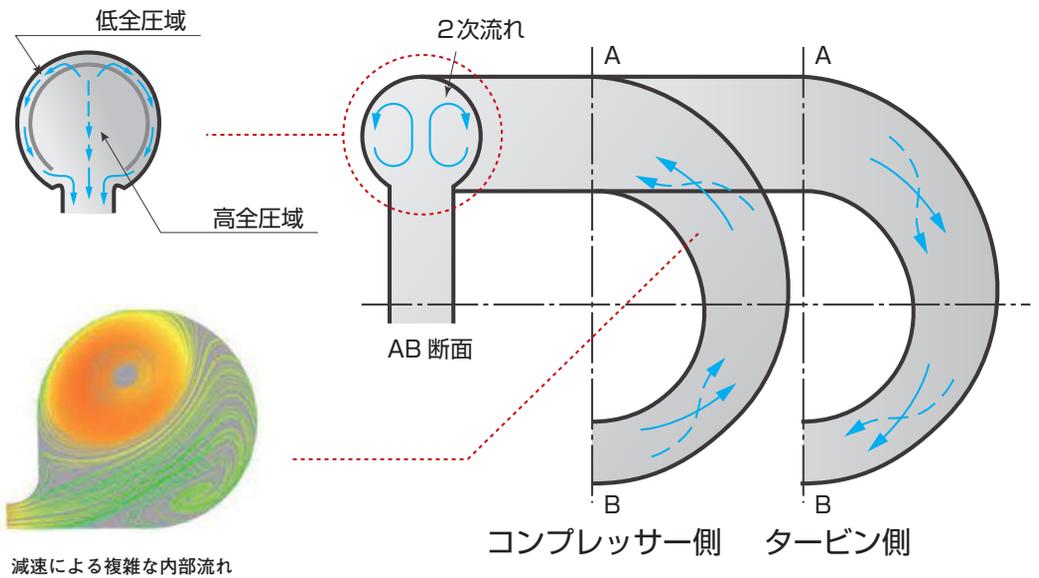
タービン内の損失を生み出すイレギュラーな流れ

遠心/ラジアル式タービン内部において主な損失の原因となる3つの流れ要素を、ブレード(動翼)間の流路に示すイラスト。色分けされている面は流路断面の圧力分布を表しており、(青色部分が低圧、赤色部分が高圧)、手前側がタービン出口で、下側にシャフト、つまり回転中心がある。低圧時よりも高圧時のほうが損失が大きくなる傾向で、とくに高圧時においてはブレードに対し、入口の流れの方向が相対的に変化する影響で、ブレード前縁部で角度の不一致による剥離が起きており、ブレード背面からは圧力差による漏れ流れが生じている。

ケーシング内の流れの曲がりと2次流れ

ケーシング、すなわちコンプレッサー/タービンホイールの外周部に設けられたスクロール(ポリウレタン)部はガス(排ガスまたは空気)の流れにおいて重要な役割を果たすが、曲がりを持った流路では遠心力の働きにより、圧力の不均衡状態と外径側へと押しやる流れが発生、この流れはケーシング壁面近傍の境界層内を通過して内周側に戻っていく。このように意図せず発生する主流とは別の流れを“2次流れ”と呼ぶ。2次流れは主流の妨げとなるだけでなく、損失に繋がるような流体挙動を引き起こすことも少なくないため、発生を見越した設計が重要。こうした条件まで網羅的に検証するためにはCFDなどの流体シミュレーションが必要だ。

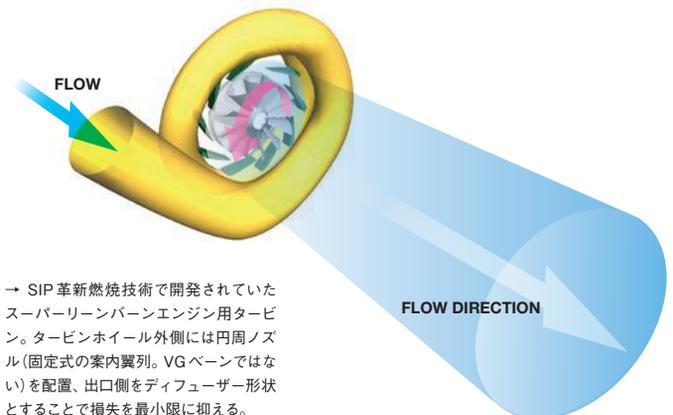
↓ 遠心力は高速回転するコンプレッサー/タービンホイール部だけでなく、湾曲した流路にも影響を及ぼす。当然ながら曲率が小さいほど、流速が速いほどその影響は顕著。典型的な例がコンプレッサー/タービンハウジングのスクロール部だ。



→ コンプレッサーハウジングのディフューザー部では、流路が突然拡大されるかたちとなり、急激に減速されていく流れが複雑な内部流れを形成、“拡大管損失”と呼ばれるロスに繋がる。ディフューザー出口の角度が損失を抑えるカギとなる。

タービン出口はディフューザー形状とするのが理想

近年のターボではタービンハウジングの出口に直接キャタライザーを取り付けるものが増えており、タービンホイール出口直後で流路が一気に大きく広がる形状(左写真)が少なくない。もちろん、さまざまな条件を吟味したうえでこうした形状が選択されているわけだが、効率面でいうなら下のイラストに示すような、タービンのエクステンダー部の開口部から徐々に流路の断面積を広げていくディフューザー形状が理想だ。流路が急角度で広がる際に生じる剥離とそれにとまらぬ乱流の発生を抑制し、損失を最小限に抑えるためだが、少なくとも車載にはレイアウトの工夫が必要不可欠だろう。



→ SIP革新燃焼技術で開発されていたスーパーリーンバーンエンジン用タービン。タービンホイール外側には円周ノズル(固定式の案内翼列。VGベーンではない)を配置、出口側をディフューザー形状とすることで損失を最小限に抑える。

超高回転で流体を扱う タービンを支える基本要素

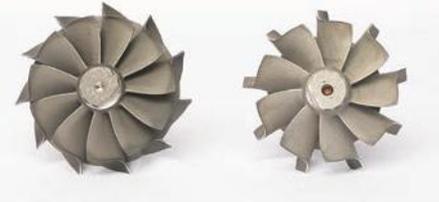
多くの機械がそうであるように、ターボ各部の造りにはそれぞれ意味と狙いが込められている。
なかでも重要なのが超高回転の運転を成立させるうえで必要不可欠なローターダイナミクスである。

TEXT:高橋一平(Ippey TAKAHASHI) PHOTO:山上博也(Hiroya YAMAGAMI)/MFI FIGURE:SIP/相田悟(Satoru AIDA)

高ボス比、短スパンがタービン設計の基本

高ボス比とはコンプレッサー／タービンホイールの中心のボス部分(羽根を支える“土台”部分)の直径をホイール径で除算した値で、この値が小さいほどホイール径に対し羽根の占める割合が大きいことを意味する。コンプレッサー／タービンともに遠心式が用いられるターボではボス部分の形状が流路の形成にも重要なうえ、形状ゆえに直径の定義が難しいところだが、要は羽根以外の“余肉”を最小限とすると思えば間違いない。また短スパンはコンプレッサー／タービンにおける寸法を最小限に抑えること。この部分の寸法が長くなると下で述べるローターダイナミクスの難易度が高くなる。

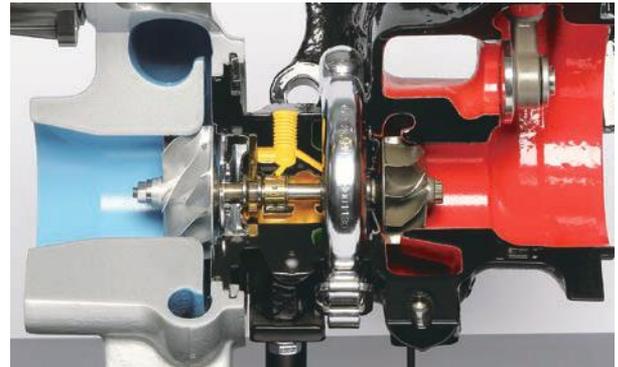
▼ タービンの羽根枚数が多いほど損失やトルクの変化は少ないが……



タービンでは基本的に羽根の枚数が多いほど高い効率を得られるが、ターボの回転にともなう遠心力に耐える強度を確保するために羽根にはある程度の厚みが必要であり、羽根が増えればそれぞれの厚みのぶんだけ流路が狭くなることから、小径のタービンでは(枚数の)選択肢が限られることになる。

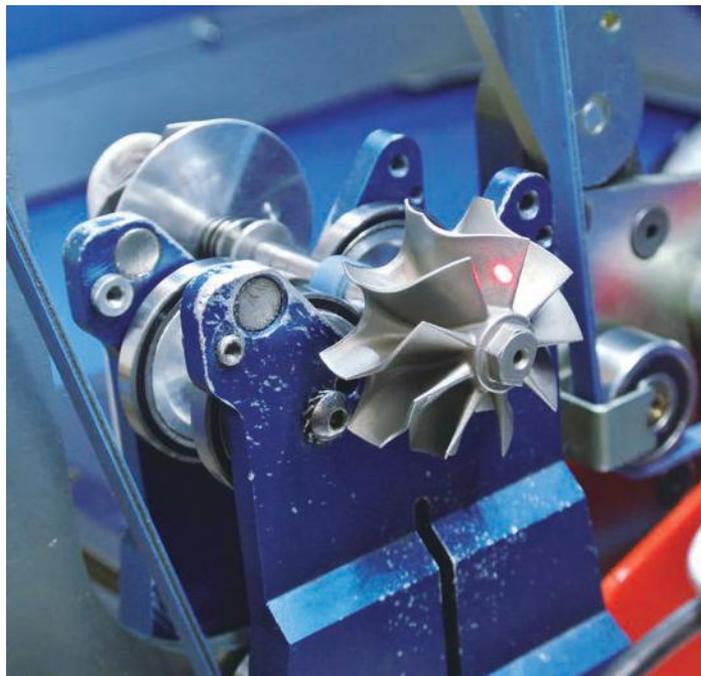
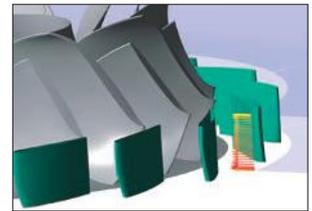
▶ ローターダイナミクスの成立は 斜流タービン技術のカギのひとつ

軸流に近い流れを持つ斜流タービンでは、軸方向の寸法が伸びる傾向となる。それゆえにローターダイナミックにおいて技術的ハードルが高くなると思っ間違いない。具体的には動的なバランスの調整を入念に行なう必要がある(つまり手間がかかる)。



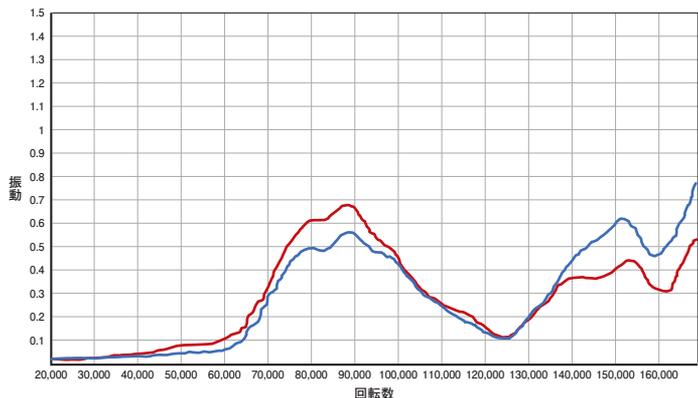
▼ SIPで検討されたタービン入口の円周ノズル

SIP革新的燃焼技術の活動においてターボ過給グループが検討した円周ノズル(増速翼列)。スクロール流路からタービンに向かうガスの流れを適切な方向に導きながら、流速分布を均一化するよう形状が工夫されており、タービン効率の向上に大きく寄与することとなった。73ページの実験装置にも同様の構造が採用されている。



超高回転のタービンシャフト特有の 振動現象を抑え込む

10万rpmを超える回転域では、素材内部の密度分布などに起因するわずかな重量の偏りに遠心力が働き、シャフトの弾性変形を引き起こす。変形はさらなる不釣り合い要素を生み出すために、下に示すグラフのように回転域によって異なるレベルの振動ピーク(山)が現れる。これがローターダイナミクスだ。ターボチャージャー軸の振動は軸方向と半径方向に起こる。このうち、羽根車などの重さの不均衡によるアンバランスは半径方向推力となる。すべての山を“均す”ことは不可能に近く、バランスよく山が低くなるように重量バランスを調整するのだが、これには手間がかかることはもちろん、経験も必要。



過給機はこれからどこへ向かうのか？

かつて“パワーデバイス”としてもはやされたターボの立ち位置はこの20年で大きく変化した。そしていま、高効率化に不可欠ともいえる存在となったターボに、再び新たな波が訪れようとしている。

TEXT:高橋一平(Ippey TAKAHASHI) PHOTO:山上博也(Hiroya YAMAGAMI) / DAIMLER



早稲田大学理工学術院教授
SIP損失低減チーム
ターボ過給ワーキンググループリーダー
宮川 和芳 Kazuyoshi MIYAGAWA

近年、ターボでは小型化が進んでいる。その目的はレスポンス、つまり応答性の向上。タービンホイールとコンプレッサーホイールを小径にしてイナーシャを小さくすれば、運転状態の変動にも素早く対応でき、俗にいう“ターボラグ”を最小限に抑え込めるためだ。

「タービンが小さくなると効率を稼ぐことが難しくなります。相対的に、ホイールとケーシングの間隙が大きくなること、流路に対する羽根厚みの影響が大きくなるのが主要因ですが、レイノルズ数が小さくなることも影響します。レイノルズ数は慣性力と粘性力の比で表される無次元数で、代表的な物体の長さ、流体の物性（動粘性係数）、流れの速さという3つのパラメーターから成ります。例えば（微生物の）ゾウリムシは繊毛で水中を泳ぐことができますが、これは（体長×物体の長さ）0.1mmほどのゾウリムシの周囲では、水があたかも水飴のような振る舞いをみせるためです。レイノルズ数が小さいがゆえの現象ですが、タービンサイズが小さ

くなるということは、このような傾向をもった変化が現れやすくなることを意味します」

つまり小型化、小径化されたレイノルズ数が小さい条件で設計されたタービンにとって、空気はより“粘っこい”存在となるということで、このことは76ページで触れた境界層の形成や、剥離などの現象に大きく影響することになる。いずれもタービンの効率を左右する要素である。ここで宮川教授の助手を務める中村揚平博士が興味深い一例を挙げてくださった。

「ターボのタービンホイールには板状の翼が使われますが、前縁部（先端部）を丸めるように曲面にすれば剥離などにもなう損失を抑えることができます。小さなタービンでは加工の自由度が限られるうえ、超高回転の遠心力に耐えるため、またイナーシャを小さくするためにも羽根を極力薄くする必要があり、こうした形状が作りにくいのですが、サイズが大きくなれば、そうした制約もいくらか緩くなってくる。最近話題になっている電動アシストターボなら、多少イナーシャ

が大きくても回転上昇を電動で補えますから、タービンサイズを大径化することで、より高効率な形状が作り込めるようになるかもしれません」

中村博士はSIP革新的燃焼技術のターボ過給ワーキンググループ（宮川教授がリーダーを務めた）にも参加、74ページで紹介したタービンの設計は同氏が手がけている。そこでは最新となるさまざまな手法のシミュレーションが用いられていたとのことだが、シミュレーションを走らせるコンピューターの性能的な限界を感じることも少なくなかったという。例えばタービンが回り始めたり、回転上昇するときの流体挙動の再現には至っておらず、一体で回転しているはずのタービン、コンプレッサーについても、それぞれを単体で回転させるかたちでしかシミュレーションできていない。脈動流下での流体計算も実施しているが、いまだ膨大な時間が必要とされる。このことは、同時に自動車用ターボに伸びしろが存在するということも意味する。脈動流への対応は始まったばかりなのだ。



小径化はターボラグの対策に有効だが……

上は、水平配置となる右バンクのシリンダー下に収まるほど小さな（小径の）ターボを採用するスバルのCB18型。回転部分のイナーシャを小さくすることで応答性を高めることが可能な小径ターボは近年の主流だが、じつはターボの効率面で有利とはいえないことに加え、風量（流量）を稼ぐためには高回転化が避けられず、ローターダイナミック（軸系の共振回避）にも高度な技術が求められるという。



過渡状態を電動で補うことのできる電動アシストターボでは大径化と動翼形状の最適化により高効率化が可能

ターボラグの解消に加え、排ガスの流れを利用した回生発電による排気損失の回復手段としても注目を集める電動アシストターボだが、コンプレッサー／タービンホイールを小径化せずとも過渡状態を電動でアシスト運転できるという特徴により、サイズの最適化、つまり大径化が図れる可能性があるという。動翼形状も作り込みやすくなるうえ、レイノルズ数という条件でも有利、基本性能の向上にもつながるはずだ。