

風洞実験にまつわる話題

Topics on Wind Tunnel Testing

進藤 章二郎

Shojiro SHINDO

川田工業㈱技術開発本部
風洞試験室長

原 幸久

Yukihisa HARA

川田工業㈱技術開発本部
風洞試験室

譚 安忠

Anzhong TAN

川田工業㈱航空事業部開発室
技術開発課課長

宮地 真一

Shin-ichi MIYACHI

川田工業㈱技術開発本部
技術研究室係長

境界条件が全く異なる2カ所の測定部を有する当社の多目的風洞設備を利用するには、橋梁事業に携わる技術開発本部とヘリコプタ業務に関連する航空事業部です。こうした異業種が共有する大型実験設備であるという特殊事情を踏まえて、両測定部で行っている実験手法を数式を使わずに解説的に概略説明し、当設備に対する読者のご理解に供したいと思います。

当社多目的風洞設備の特徴

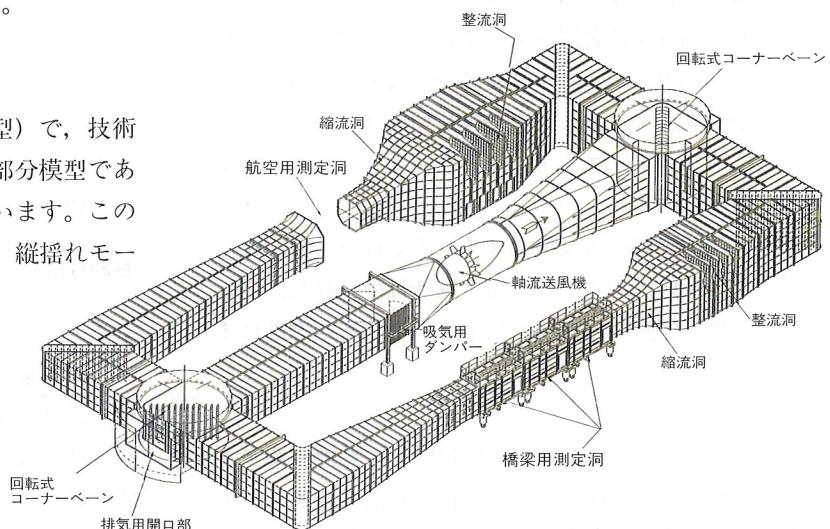
当社の多目的風洞設備は、1992年に完成した大型低速風洞です。当風洞は並列式に2カ所の測定部を設備していて、1基の送風機でどちらか一方の測定部に送風できるように設計されています。並列測定部の一大特徴は、一方の測定部で実験中に、他方の測定部では次の実験の準備ができることです。これは、設備の効率的利用として強調されるべき特徴で、既存風洞設備の単一測定部を並列測定部に改修した例は2,3アメリカに見受けられますが、当風洞は新規設備として設計製作された唯一の並列測定部低速風洞であると言えます。当風洞の詳細仕様は参考文献1)に詳しく報じられています。

測定部

当風洞の一方の測定部は固定壁型(開鎖型)で、技術開発本部技術研究室が主として実橋の縮尺部分模型である2次元剛体橋梁模型の風洞実験を行っています。この測定部には模型に働く風による揚力、抗力、縦揺れモーメントを測定する天秤と模型の振動応答特性を測定するばね支持装置を装備しています。模型は後に述べる理由から比較的軽い上質ヒノキ、バルサなどを用いて適切な縮尺で製作しており、模型の両端には2次元流を確保するための端版を取り付けます。風の流れ方向の模型幅は、

実橋の1/30ないし1/60(縮尺)程度で模型の橋軸方向の長さは1.62mです。

もう一方の測定部は自由壁型(開放型)で、航空事業部開発室がヘリコプタ模型あるいはロータ模型を主な対象物体として実験を行っています。供試体が3次元模型であることから模型に働く風による揚力、抗力、横力、縦揺れモーメント、横揺れモーメント、偏揺れモーメントを計測する天秤を装備しています。ヘリコプタは空中を前後左右自由に飛行するので、風洞でも模型は模型支持支柱と共に360度方向に転換でき、横向き後ろ向きの飛行もシミュレートできます。当測定部で実験できるロータ最大直径は1.5mないし2.0mです。ヘリコプタが揚力を発生するには、ロータが大量の空気を下方に吹き下ろさせなければなりません。この吹き下ろしの角度は前進速度が遅いほど垂直に近くなります。このような実験状態を固定壁測定部内で再現すると、吹き下ろしが床や側壁に当たって不測の2次循環流が発生し²⁾、問題が複雑化します。したがって、ロータのような模型実験には壁や床のない自由壁測定部が適しています。



風洞設備概要図

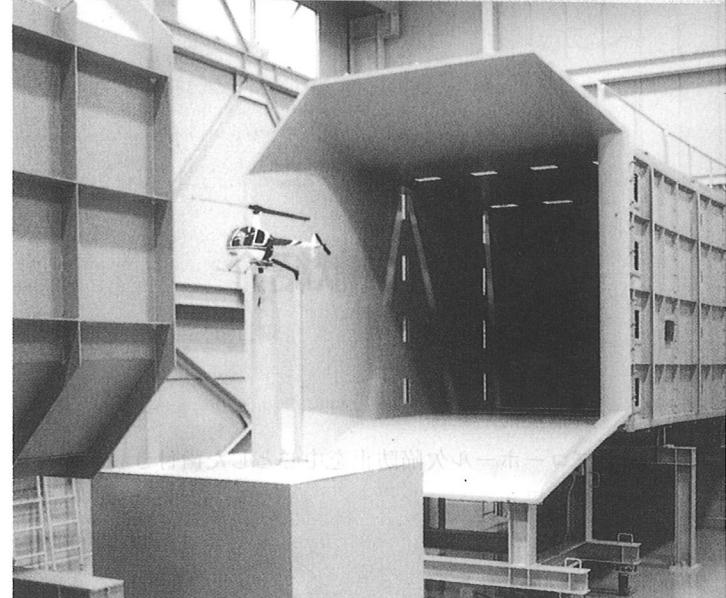
相似則

大きな建造物あるいは飛翔体を、それぞれの物体が受ける風速よりも低い風洞風速で、実物の数十分の1の模型を用いて実験を行う場合、模型が実物の動的反応や物理的現象をシミュレートしているかどうかを判断する基準法則があります。この法則を相似則と呼び、まず、模型の形状を実物に沿って忠実に製作します。そして、風洞実験では、主として次の相似則条件を風洞模型と実物の間で一致するように努力が払われています。はじめに橋梁実験について取り上げると、模型の振動応答特性の実験を行うばね支持模型風洞実験では、慣性パラメータ、構造減衰を相似させます。

慣性パラメータには、質量（鉛直たわみ振動に対する慣性力に相当する）分布と橋軸周りの極慣性モーメント（ねじれ振動に対する回転モーメントであり、航空の実験の縦揺れモーメントに相当する）分布があります。質量分布を相似するには、実橋の単位長さあたりの質量と模型の単位長さあたりの質量（ばねや支持アーム等を含む）を縮尺の2乗に比例させる必要があります。たとえば、実橋の質量が1mにつき2500kgとすると、1/50の模型の質量は1/2500、つまり1mにつき1kgで、当風洞の模型の長さは1.62mであるから質量は1.62kgになります。具体的には、模型本体は材料に木材やバルサを使用して極力軽く製作し、ばねや支持アーム等を含めた振動系の質量を付加重りで調整する方法が一般に用いられています。また、模型対実橋の極慣性モーメントの比は縮尺の4乗に比例させる必要があります、模型本体にヒノキやバルサのように軽い木材を使用しないと、極慣性モーメントの方で相似則パラメータの一致が非常に困難となります。

風速パラメータはストローハル数と呼ばれる無次元パラメータの逆数で表され、その値を模型と実橋で一致させることによって、風洞実験で予測できます。ここに、ストローハル数とは、物体表面の流れが剥離して後流に規則的に発生する渦の時間当たりの発生度数（つまり振動数）と前方から見た物体の厚さに比例し、その時の風速に反比例する無次元パラメータです。つまり、ある風洞風速において発生した振動数が、たとえば、実橋の振動数の5倍で模型の縮尺を1/50と仮定すると、その時の実橋風速は実験風速の10倍と換算されるので、低風速で実験しても高風速での実橋の対風挙動を推測できることになります。

構造減衰は、構造物材料の固有の粘性や部材間どうしの摩擦などによる物体そのものが持っている振動減衰特性です。この構造減衰を模型と実橋で相似させるには、電磁ダンパーなどの加減衰装置が必要になります。



航空側実験状況

航空側測定部で、実機に働く風による空気力学的特性を風洞模型で再現するには、両者の物理的現象が共通になるような流れの相似性を確保しなければなりません。この条件を満足させるのは境界層の発達や遷移の相似性を表すレイノルズ数であり、空気密度、風速、代表長さに比例し空気の粘性係数に反比例します。したがって、実機のレイノルズ数を風洞実験で一致させようとすると、両者の間の空気密度と粘性係数を同じと仮定すれば、縮尺に従って縮小された模型の風洞風速を、縮尺に反比例して大きくしなければなりません。たとえば、模型を1/10で製作すれば、実機速度の10倍で風洞実験を実施しなければならないので、模型を使って実機レイノルズ数で風洞実験を行うことは、通常の手段ではおよそ不可能です。しかし、自動車業界では、超大型風洞において実車を実走速度で実験することによって、この相似則を満足させています。なお、橋梁模型のように断面が角張って、流れが剥離しやすい場合は、レイノルズ数による効果は少ないので橋梁実験では通常このパラメータを無視しています。

ヘリコプタ・ロータの風洞模型実験で、ブレードを含むロータ・システムの振動特性あるいは空力弾性特性などを動的に検証するには、ブレード表面の圧力分布、すなわち空気密度分布の相似性が必要であり、ブレード先端速度が音速の0.6近くに達する実機のブレード先端マッハ数を一致させることが望ましい。このためには、直径を1.5mに限定すると回転数を2600rpm（直径を2mにすると2000rpm）付近で回転翼模型を操作しなければなりません。こうした高回転数における実験は危険を伴うので、この種の実験には模型の設計製作も含めて、慎重に対応する必要があります。

参考文献

- 1) 米田・宮地・望月・川田・譚・原：多目的風洞施設の概要、川田技報、Vol.13, 1994.
- 2) 進藤章二朗：低速風洞実験法、コロナ社、東京, 1992, および正誤表。