



風洞装置・模型づくりの「匠の技」

Craftsmanship in Wind Tunnel Equipment and Model Fabrication

吉田 智哉*1

Tomoya YOSHIDA

1. はじめに

風洞をはじめとする風に関する実験機器づくりを生業としてから、気づけば20年が経ちました。このたび、編集・広報委員会より、風洞装置・模型づくりの「匠の技」というテーマで、技術的な経験知や苦労話の紹介をしてみたいというお話をもらいましたので僭越ながら投稿いたします。風洞装置について流体工学的解説は東北大学高速力学研究所の報告書¹⁾など先達の研究結果を参照頂くとして、本稿では私自身の設計および製作経験に基づいた、実務的な知見を述べたいと思います。

私が風洞装置という存在を初めて知ったのは、東京工芸大学・田村幸雄先生の研究室に所属していた学生時代でした。当時、風洞実験を経験したことは、現在の業務において大きな強みとなっています。卒業後は、大学の風洞を作ったのが当社ということもあり株式会社風技術センターに入社することができました。入社当初は、風洞の点検業務、気流測定、ビル風観測データの整理など、設計とは異なる業務に従事していましたが、元々もの作りが好きだったことから、次第に設計業務にも関わるようになりました。現在では、「発注者との仕様相談」から「機械設計」「電気仕様の検討」「協力会社への手配」「装置の組立」「制御ソフト作成」「性能試験」「使用方法説明」に至るまで、風洞装置および実験補助機器の製作に関するほぼ全ての工程を担うことが出来るようになりました。設計業務では装置を使用される方にとって使いやすいものとなるよう取り組んできました。本稿を通じて皆様にとって何かしらの参考になれば幸いです。

2. 風洞装置の設計時注意事項

当社では設立以来、これまでに50件を超える風洞装置を製作してきました。対象とする風速は最大でおよそ30m/s程度のいわゆる低速風洞であり、主に建築・土木分野向けの装置が中心ですが、機械工学分野、気象研究分野、さらにはスポーツ用途の風洞も手がけています。図1に示すように、年代別にみると1990年代の製作件数が多く、測定部に人が入れる規模の大型風洞の約半数はこの時期に製作されました。私自身が設計を担当した風洞装置はそのうち10件にも満たない件数ですが、その経験から得た設計上の留意点や工夫について、以下に述べていきます。

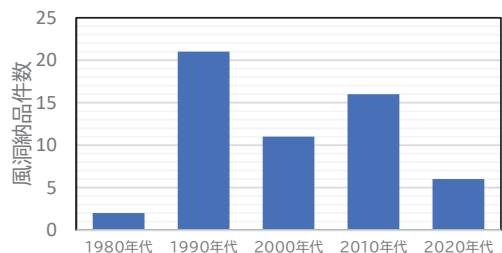


図1 年代別風洞製作数

風洞装置を設計するにあたっては、まず実験空間の通風断面面積および目標とする風速を決定する必要があります。これらの条件は、発注者から明示されることもあります。これらの条件をもとに予算や設置スペースの制約を加味しながら調整していくこともあります。

併せて、風路構成を「回流式」(図2)にするか、「吹き出し式」あるいは「吸い込み式」の室内循環式(図3)に

* 1 株式会社風技術センター 技術部担当部長 tomoya@windec.co.jp
Deputy Manager, Wind Engineering Center Co., Ltd.

するかも、装置性能や製作費用に大きく影響する重要な検討項目です。それぞれの構成方式の特徴について、以下に示します。

回流式
・広い設置スペースが必要 ・製品の製作コスト、設置工事費用が高い ・風路圧力損失が小さいのでファン容量は小さくなり、運用電力コストが抑えられる ・気流精度は安定しやすい ・基本的には軸流送風機を使うことになる ・送風時に風路内温度が上がりやすいので、必要に応じて気流冷却装置を取り付ける必要がある ・測定部の内部静圧は外部と近い ・送風時に点検扉を開けると風路内圧力バランスが変わり、テーブル模型が浮き上がることがある ・測定部が開放型だと脈動対策が必要

吹き出し式・吸い込み式（室内循環式）
・省スペース ・製品の製作コスト、設置工事費用が安価 ・風路圧力損失が大きいためファン容量は大きくなり、運用電力コストは高くなる ・部屋の扉開閉や空調の影響を受けると気流が変動する可能性がある ・軸流送風機と遠心送風機どちらも選択可能 ・送風時の温度上昇が緩やか ・吸い込み型では測定部が負圧となり、隙間があると気流の乱れが大きくなりやすい ・吸い込み型の方が押し出し型に比べて気流精度が良い（気密性が高ければ）

測定部の構造は「開放型」または「閉鎖型」から選定する必要があります。建築・土木分野向けの風洞装置では、通常は閉鎖型の測定部が採用されます。また、測定断面全体にわたって高い気流精度が求められる試験においても、閉鎖型が適しています。

一方で、大型の試験体を使用するなどして通風断面に対する閉塞率が高くなる場合は、開放型の測定部を採用する必要があります。私はこれまで設計に携わったことはありませんが、航空・自動車分野向けの風洞では「半開放型」として、吹き出し口に対して測定空間を広く取った拡張型の測定胴や、壁面・天井にスリットウォールを設けた構造が用いられる例もあるようです。

最後に、実験の目的に応じて必要となる付帯装置の検討を行います。具体的には、分力計や圧力計のような計測機器に加え、ターンテーブル装置やトラバース装置、さらに気流加熱装置、乱流発生装置といった実験補助機器の導入について検討します。

次に風路の主要構成部品について特徴を示します。

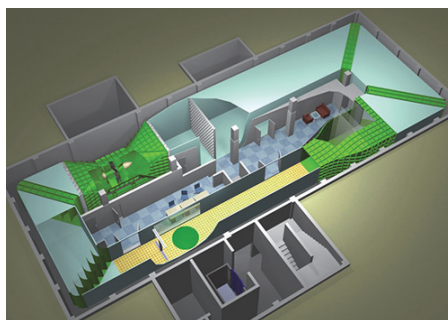


図2 回流式風洞装置

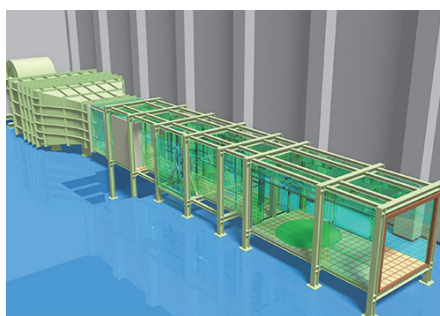


図3 吹き出し式風洞装置

2. 1 送風機

風路構成や整流部の配置が決まると、風路全体における圧力損失を見積もることが可能となります。これに基づき、必要な風量および静圧性能を満たす送風機を選定します。送風機は大きく分けて「軸流送風機」と「遠心送風機」の2種類があります。以下に示すように、それぞれ一般的な特徴がありますが、実際の性能は羽根の形状や回転数、さらにはメーカーごとの設計仕様によっても大きく変動する点に留意が必要です。

軸流送風機	遠心送風機
・大風量を得やすい ・静圧が低い ・性能曲線の傾きが急 ・吸い込み口と吹き出し口が直線上配置	・中～大風量 ・静圧が高い ・性能曲線の傾きが緩やか ・吸い込み口と吹き出し口が直角配置

例えば、風量 1000 m³/min、静圧 300 Pa の条件で軸流送風機と遠心送風機をそれぞれ選定した場合、図 4 に示すように両者の性能曲線（風量—静圧特性）には大きな違いが見られます。この違いにより、もし流れを遮るような試験体を設置した場合、軸流送風機よりも遠心送風機の

方が風速の低下が大きくなる傾向があります。そのため試験体に対する風向や迎角を変化させながら風速を測定するような実験では、送風機の回転数を一定にしていると迎角によって風速にばらつきが生じやすくなります。また、電動ダンパーを用いて脈動風や突風を再現する装置と組み合わせる場合、同じ開閉操作を行っても、軸流送風機では風速変動が小さくなります。

ただ、今回選定した送風機は両方とも同じような風量範囲にサージング領域（不安定脈動が生じ、送風機が疲労破壊される）が存在します。大きな速度変動を得ようとするとサージング領域に入ってしまうため使用出来ません。実際に脈動風・突風発生装置と組み合わせて使う場合はサージング領域がない送風機を選定する必要があります。

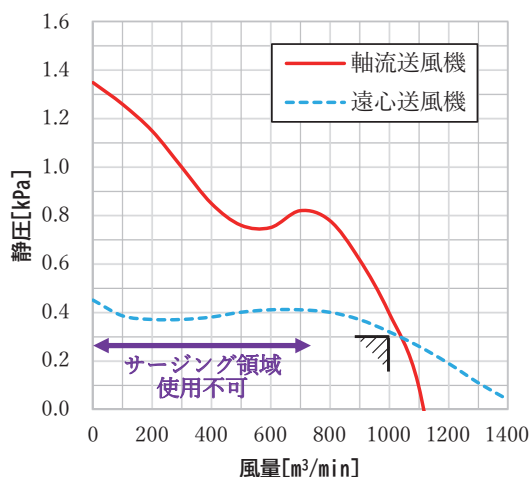


図4 送風機性能曲線の一例

大風量が求められる場合、複数の送風機を並列配置する場合があります。大型の送風機は特注品となるため市販品サイズの送風機を利用することで費用を抑えることが出来ます。また、軸流送風機を使う風洞では全長を短くすることが出来ます。注意点としては、送風効率は低下するため単体送風機を使うよりも消費電力は増加します。また適切な配置間隔を取らないと吸い込み不良が発生し想定通りの風速を得ることが出来ません。

2. 2 整流部

(1) 整流メッシュ

均一な風速分布、低い乱れの強さを得るために重要な部品です。大型風洞ですと整流部の幅が6mを超えることもあります。継ぎ目があると気流に影響が出るため1枚もののステンレスメッシュを使います。線径0.2~0.3mm程度、目の細さは#20~#30程度のものを使うことが多いです。整流部に3枚程度貼ることが多いですが、急拡大風

路がある場合には途中で設置することもあります。

メッシュに弛みがあると振動の原因になったり、気流精度の悪化につながったりします。メッシュを弛み無く貼り付けるためには設計の工夫が必要で、特に大きな断面では貼り付け作業も慎重に行う必要があります。メッシュを貼り付ける製缶胴にはメッシュの張力に負けない剛性が必要です。

風速分布の非一様性が大きい場合、部分的にメッシュを2重にして調整することがあります。その際は乱れの強さに影響が出にくいようになるべく風上側のメッシュに取り付けます。

室内循環式の風洞では、風上側最初のメッシュに埃がたまりやすく、長年使用された装置では数cmもの堆積が確認されることもあります。このような状態では圧力損失が増大し、風速が低下します。したがって、整流メッシュは定期的に清掃できるよう、点検扉を設ける、あるいは小型風洞では着脱可能な構造とするなど、保守性を考慮した設計が求められます。

(2) 整流ハニカム

軸流送風機で生じる旋回流を減少させたり、主流直交方向の流れを減少させたりするために設置します。アルミハニカムを使うことが多いですが、小さい風洞ではプラスチック製のものを使うこともあります。アルミハニカムは製作出来る幅が2m程度なので、整流部断面が大きい際は枠にはめ込んだ複数のハニカムを並列設置することになります。送風時に面外変形しないように縦桟などを設けることもあります。

(3) 縮流胴

個人的には縮流胴の有無が送風装置と風洞装置の違いかと思っています。小さい風洞では3Dプリンターで造形することもあります。基本的に鋼板を曲げ加工して製作します。曲げる際に折り目が付かないようにローラーベンダーと呼ばれる機械を使います。ただ加工会社によっては持っていない機械なので、プレスプレーキ（汎用板金ベンダー）を使う際は細かいピッチで曲げる必要があります。大きな板を細かいピッチを手作業で加工するのは現実的ではないのでNC（数値制御）機械を使うことになります。

カーブ形状は3次関数を利用することが多いです。ただ本来の設計的命題は「流れを剥離させずなるべく短い長さで吹き出し口の風速分布が均一になる滑らかなカーブ形状で設計する」ということです。本来であればCFDを利用し最適設計したいところなのですが、現状そこまでは至っておらず今後の課題です。縮流比は4~9のものを作ってきましたが、大型風洞では設置スペースの都合

で縮流比は4～6程度が多いです。

2. 3 コーナーペーン

回流式風洞では風路内に4か所のコーナーが存在しますが、閉鎖型測定部直後のコーナーでは通風断面積が小さく高風速となることから、圧力損失が大きくなり注意が必要です。

通常、コーナーペーンには薄鋼板を使用します。コーナーペーンの設計に関しては、

- ・曲げ半径を風路幅の0.2～0.3倍程度とする
- ・ペーン風上側の迎角を0度ではなく約4度に設定する
- ・円弧+直線部の長さに対して、0.2～0.25倍の間隔でペーンを配置する

といった理論的指針が知られています²⁾。ただし実際の設計では、装置全体の大きさや溶接加工時の作業性も考慮しながら、ペーン形状や枚数を調整することが多いです。また、静音用途の風洞でコーナー部に消音機能を持たせたい場合には、コーナーペーンを翼型断面とし、表面をパンチングメタル、内部にグラスウールを充填するといった設計も行われます。

2. 4 測定部

測定部は実験者にとっての使い勝手を左右する極めて重要な構成要素であり、単に気流精度が高いだけでは不十分で、作業性や安全性にも配慮した設計が求められます。

測定部の構造には「開放型」(図5)と「閉鎖型」(図6)があります。開放型は壁面や天井を持たないため構造的にシンプルですが、吹き出し口から流出する気流が周囲の静止空気を巻き込み、外周部において乱れの強さが急激に大きくなる特性があります。特に層流が必要な実験では注意が必要です。開放型を採用する主な理由は、閉塞率が高い大型試験体を設置するためです。試験体の搬入や固定作業に対しても考慮が必要となります。レールの設置、水平架台の配置、台車の導線確保、あるいは天井クレーンの導入などにより、大型試験体の搬入・設置が容易に行えるような設計上の工夫が求められます。



図5 開放型測定部（押し出し式風洞）

また、回流式風洞で開放型測定部（半開放型でも）がある際は、測定部で巻き込まれた静止空気が吸い込み口に入り、吹き出した風量よりも吸い込まれた風量が増えてしまい、送風機で処理しきれず行き場所のなくなった空気が逆流するなどして負荷が変動し結果的に脈動が起きることがあります。脈動を防止するためには

- ・吸い込み口～送風機の間で開口（ブリーザー）を設け吸い込み過ぎた空気を逃がす
- ・吸い込み口の断面積を可変にして吸い込み過ぎないようにする

などの工夫が必要です。

閉鎖型測定部は小型のものであれば実験状況を観察しやすいようにアクリルで作り、大型のものであれば主に木材で作って観察窓を設けることが多いです。最近は風洞に機能拡張性を求められることもあります。後から脈動風発生装置や走行装置・加振装置などを追加できるようにすることが求められる場合もあります。壁面がパネル構造とし簡単に取り外せるようにしておくことで開口を追加するにしても固定治具取り付けにしても作業性に優れているため、後の機能拡張が容易になります。

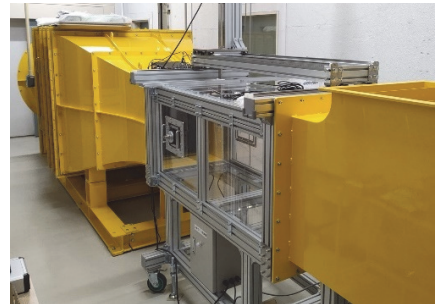


図6 閉鎖型測定部（アクリル+アルミフレーム）

閉鎖型測定部は試験体を取り付けるのに複雑な手順になることがあります。具体的に1段階ずつ手順を検討し、シャフトの差し込む向きやボルトを締める作業スペースまで想定しておく必要があります。例えば建築用風洞だとターンテーブル装置に直径2m程度の市街地模型円盤を取り付けて実験するのにどのようにしたら安全に省力で作業できるかを想定し、「トラックから模型を降ろす→フォークリフト、風路の中どこから入れる→模型用リフターがあり閉鎖測定部壁に搬入扉から入れる、床に開いた大きな開口の上を人落させずに作業するには→取り付けが簡単な仮設足場を設置、模型を開口の中心に運ぶには→取り外し可能なレールに模型を乗せる、模型固定支柱の昇降機構を省力化→昇降ねじ部を電動ドライバー回

す、多点風速計を挿すには→模型底面に手が届きやすい床下高さとし模型固定支柱高さも風速計の邪魔にならないようにする」といったことを考えます。測定部設計においては単に構造的強度や気流精度を満たすだけでなく、実験運用時の安全性・作業性まで見据えた検討が不可欠です。

2. 5 電動機・インバータ

かつての大型風洞では送風機を回すのに直流電動機が使われ、その制御にはサイリスタという平均出力電圧を調整する部品が用いられていました。最近は電子技術の発達(高速な周波数切り替えが可能になった)やブラシという消耗品が不要になることから、交流電動機とインバータという組み合わせに置き換えられてきました。電気的ノイズが発生しづらいという理由でいまだ直流電動機とサイリスタを要望されることもあります。現在では多くのメーカーがこの方式から撤退しており、装置としての調達や修理対応が難しくなっています。

インバータでは高速で回路切り替えを行っているため高周波電気ノイズが生じます。制御盤にノイズフィルターを入れても計測機器用 100V 電源にノイズが重畳することがあり計測に影響を与えます。そのようなときには電動機を動かす高圧電源と汎用 100V 電源のアースを分けたり、ノイズカットトランスを利用したりします。

仕様上は最大風速のみを定義する場合もありますが、試験内容によっては最小風速の安定性が重要となるケースも少なくありません。送風機の回転数を制御する範囲は、主に使用するインバータの性能に依存します。インバータ出力は周波数に比例しており、通常は電動機の定格を超える回転数では使用しないため、上限は 50Hz または 60Hz となります。一方で、安価なインバータでは最低周波数が 5Hz 程度に制限されており、低風速の細かい調整が難しくなることがあります。高機能なインバータであれば 1Hz 以下まで制御可能な製品も存在します。ただし、送風機の羽根形状によっては低回転時に安定した風流が得られない場合があります。そのようなときには、送風機を安定領域で回転させたまま、風量をダンパーにより絞る制御方式が採用されます。

2. 6 操作盤・PC 制御

50 年ほど前に作られた大型風洞では計測室の壁一面に計器類が取り付けられた操作盤が並んでいるという形式もありましたが、現在では付帯装置の操作も一緒にタッチパネルで行うことが多いです。実験中に風速や迎角といった条件を変化させる必要がある場合には、事前に作成した実験条件ファイルを PC から読み込ませ自動制御

を行うこともあります。従来は LabVIEW や MATLAB といった商用ソフトウェアが多く使用されていましたが、近年では Python などのオープンソース言語による制御・データ収録・解析への移行も進んでおり、その柔軟性やコストメリットから今後ますます普及が進むものと考えられます。また、スマートフォンやタブレット等を用いた遠隔操作も技術的には可能となっていますが、非常停止処理や異常検知時の安全対応については、設計上の十分な対策が必要です。

2. 7 据付工事

小型風洞装置であれば事前に組み立てたものを運び入れるだけですが、中型～大型風洞装置であれば現地にて据付工事が必要です。大型の場合は工期が数カ月かかります。建屋内に天井クレーンがあれば作業しやすいですが、無い場合はクレーン車を用いて組み立てを行う必要があります。その際には建物の床構造が風洞装置自体の重量だけでなく、使用する重機の荷重にも十分耐えられるかを予め確認しておく必要があります。また、部品を工場から現地に輸送する際には、トラックやトレーラーに積載可能なサイズ・重量であることを考慮して設計を行う必要があります。さらに、搬入した部品を仮置きするスペースが作業中に確保されていないと、現場での作業遅延の原因となるため、現地の作業動線や組立順に合わせた搬入計画も重要です。

風洞装置導入から 20～30 年が経過すると、電動機や軸受けといった駆動部品の交換が必要になる場合があります。初回据付時には容易だった作業が、装置全体が完全に組み上がった後では実施困難になるケースもあるため、将来的な保守・交換作業を見越した設計・配置を行うことが望まれます。

2. 8 性能測定

風洞装置の基本的な性能指標としては、「風速範囲」「風速分布」「乱れの強さ分布」などが挙げられます。これらの項目を評価するために、ピトー管と差圧計、熱線風速計、およびデータ収録装置を用います。トラバース装置がない時は社内の備品を使って手動もしくは電動の簡易移動治具を使って分布を測定します。

風速計や差圧計などの校正用として風洞が使用される場合は、測定機器の「校正証明書」「検査成績書」「トレーサビリティ体系図」などの文書類の整備が求められることもあります。

2. 9 風洞付帯装置

風洞装置は実験内容に応じて多様な計測機器や補助機器を組み合わせることで、はじめて目的に応じた風洞実

験が可能となります。図 7 は吹き出し口に水噴霧ノズルを取り付けたもので、実物大試験体の水密性の試験を行います。

計測機器の例

ピトー管、多孔管、差圧計、熱式風速計、熱線風速計、超音波風速計、多点風速計、多点圧力計、温度計、測温抵抗体、熱電対、気圧計、湿度計、分力計、力覚センサー、ロードセル、レーザー変位計、加速度計、傾斜計、マイクロフォンアレイ、PIV、LDV、高速度カメラ、データ収集装置

実験補助機器の例

ターンテーブル装置、トラバース装置、加振装置、試験体回転・移動装置、昇降装置、バネ支持装置、振動天秤、可視化煙発生装置、気流冷却・加熱装置、乱流発生装置、脈動風・突風発生装置、散水・噴霧装置、ムービングベルト、境界層除去装置、磁力支持装置



図 7 散水装置

実験補助装置に動力を与える際には、基本的に電動モーターが使用されます。まれに空圧機器を用いるケースもありますが、空圧は高出力を得やすい反面、繊細な位置制御には不向きです。

モーターは必要とされる位置決め精度や負荷条件に応じて選定します。高精度な位置制御や高トルクが求められる場合にはサーボモーターを使用する必要がありますが、それほど精度が要求されず低負荷で済む場合には、より安価なステッピングモーターを選定することも可能です。位置決め動作を必要とせず、単に回転数の調整だけを行いたい場合には、エンコーダ付きのインバータ用モーターが有効です。

複雑な動作制御を行う場合には、PLC を用いてモーターやセンサーを統合的に制御することが一般的です。一方で、単純な動作に限れば、PLC を用いず PC からモーターを直接制御の方がコストを抑えられる場合もあります。ただし、PC から直接制御できるモーターには種類や

通信条件に制限があるため、使用機器の選定にあたっては事前の検証が重要です。

3. 模型製作



図 8 風洞実験模型

当社では、建築・土木分野における風洞実験用模型の製作に長年携わってきました。かつてはアクリル板や木材を手加工により成形していましたが、近年では熱溶解積層方式の 3D プリンターを活用する案件が増加しておりおよそ 7 割程度の案件で使用しています。ただし、この方式では造形物の表面に積層痕が残りやすく、エッジ形状の再現性も十分とはいえません。そのため風洞模型に求められる形状精度を確保するには、研磨やパテ処理といった人手による仕上げ作業が不可欠です。光硬化方式は高精度造形が可能なものの、素材が紫外線や湿気により劣化しやすいため、当社では採用頻度は少ないです。

模型の縮尺は通常 1/300～1/500 程度ですが、近年の建築物はファサード形状が複雑化しており、0.1mm 単位の部品調整が求められる場面も少なくありません。薄板部品のはめ込みや微細な支柱の接着など、3D プリンターでは再現が難しい工程も多く、最終的な完成度は模型製作者の技術と経験に大きく依存しています。私自身は模型製作には直接関与していませんが、完成した模型を見るたびに、その緻密な技巧には感嘆させられます。

風環境実験用の市街地模型を製作する際には、製作者が実際に現地を歩いて建物の形状を一軒ずつ確認することが基本となっています。オンライン地図や航空写真で補完することもあります。常緑樹と落葉樹の区別や低層階の吹き抜け構造の有無など、実地でなければ判別が難しい要素も多く存在します。こうした地道な現地調査によって、模型の精度とそれに基づく実験の信頼性が支えられています。

風力実験用模型や振動実験模型には「軽量かつ高強度」といった特性が求められるため、バルサ材や CFRP（炭素繊維強化プラスチック）などの素材が選ばれることがあ

ります。パルサ材は以前から模型材料として使用されてきましたが、ここ数年では風力発電用プロペラへの利用増加により特に長材品の入手が困難になっています。CFRP はその軽さと剛性の高さから模型の構造部材として有用です。近年ではカット加工済・穴開け済の部品も通販で手軽に入手可能となり、取り扱いやすさが向上しています。ただし、複雑な形状で使用する場合には専用の型を製作する必要があり、その分コストは高くなります。

4. 3DCAD による設計と部品製作

現在社内では Solidworks・Vectorworks・Rhinoceros の 3 種の 3DCAD を使用しています。各 CAD の特徴としては下記のとおりです。

Solidworks
・面の集合ではなく、閉じられたボリウム=ソリッドの組み合わせで形を作って設計するミドルクラスの機械設計用 CAD ・寸法値を明確に入力しながら設計していくので正確に部品を設計できる ・寸法値を変更することで形状の変更が可能なので、類似形状寸法違いの設計がしやすい ・部品同士の穴位置合わせや面合わせなどを指定するので正確に組み立てを設計できる (拘束条件設定) ・部品同士の干渉不良を自動検査が可能 ・高性能ライセンスでは FEM 構造解析や簡易 CFD を行える ・正確な設計が出来る反面、設計に時間がかかる ・予め完成状態をイメージしておく必要があり、試行錯誤の設計には向かない

Vectorworks
・ソリッドの組み合わせで設計するタイプ ・建築意匠設計で使われることが多い ・マウス操作のみでソリッドを作れるので短時間で設計可能 ・ソリッドの合成や切り抜きの履歴が残るので、後から変更が可能 ・部品同士の位置合わせもマウス操作なので、誤操作によりズレが生じやすい ・構造解析は出来ない ・試行錯誤しながら設計するのに向いている

Rhinoceros
・三角形平面や曲面を組み合わせで形状を作るタイプ ・建築意匠設計や 3D プリンター用モデルデータ作成で使われることが多い ・比較的安価 ・剛性や切り抜きの履歴が残らないので、例えば穴位置を変更しようとする一度穴を埋めてから別の穴を作成 (切り抜き) する必要がある

私自身は 3 種の CAD すべてを扱いますが、日常業務における機械設計には主に Vectorworks を使用しています。発注者の要望を具現化するために、部品の形状や配置を試行錯誤することが多く、マウス操作で直感的にモデルを変更できる Vectorworks は、短時間で構想を練るのに適しているからです。また、発注者との打ち合わせ時にもその場で形状やレイアウトを調整しながら説明できるため、イメージの共有がしやすく、大きな利点となっています。

他の機械設計者は Solidworks を使っています。チームで設計する際は私が Vectorworks で書いた全体的な構想図をもとに機械設計者が Solidworks で詳細設計・部品設計を行うということもあります。模型製作者は 3D プリンター用のモデル作成のために Rhinoceros を使っています。面同士に隙間やズレがあったとしても自動修正コマンドで埋めることが可能です。自動修正をするとなぜか寸法誤差が生じる事にはなりますが、造形した後にヤスリ掛けやパテ埋めをするので問題になることはありません。

作業内容によって適性が異なるので、CAD ソフトの特性を理解し、最適なツールを選定・分担することが業務効率と品質の両立において重要です。

数年前までは 3D で設計しても部品製作を依頼する協力会社へ発注する際は 2D 図面に落とし込んでいました。その作業が手間だったのですが、最近はレーザーカット加工、切削加工、簡単な板金溶接加工であれば 3D データを自動形状認識・自動見積もりしてくれるサービス (図 9) があります。風洞の風路製缶部や大型部品だと対象外になってしまいましたが、実験補助機器で使うような数 10cm 程度の部品であれば数分で製作費用が分かるので重宝しています。



図9 自動見積もりサービス (引用: ミスミ)

装置部品の製作を依頼している金属加工会社では、近年、熟練工による手作業から NC (数値制御) 機械による加工への移行が急速に進んでいます。その背景には、熟練技術者の高齢化と引退による技能継承の難しさ、および複雑な形状や高精度加工への対応ニーズの増加があります。

NC 機械による加工では、事前に加工手順を人がプログ

ラミングする必要がある、その工数は材料費や機械稼働費に同程度になる場合もあります。つまり、試作や1点モノの部品の場合、プログラム作成にかかる工数がコストの大きな割合を占めることになります。

こうした背景から、近年ではAIの活用が検討され始めており、加工プログラムの自動生成や最適化が進みつつあります。これにより、プログラミングに要する人的工数が大幅に削減され、将来的にはより短納期・低コストでの対応が期待されています。

加工依頼をする立場としてコスト低減は歓迎すべきことですが、一方で工場から人が減っていく状況には一抹の寂しさを感じることもあります。

5. 風洞装置製作工事での苦労話

風洞装置は一品一様で同じものではなく、毎回毎回何の問題もなく順調というわけでもありません。ここからはより実体験に基づいた話をしたいと思います。

(1) 気流加熱装置の性能測定作業

私が入社してすぐに大型風洞装置の性能測定をしている現場作業に参加することとなり、その後3か月間現場近くのマンスリーマンションで生活することになりました。測定項目は複数あったのですが、一番苦労したのは100℃の気流を吹き出せる気流加熱装置の吹き出し口での温度分布を測定する業務でした。

温度測定には支柱に取り付けた複数の測温抵抗体を使用しましたが、縦の分布測定しかできず、横方向の分布を測定するためには支柱を手動で横に移動させなければなりませんでした。測定胴の長さは約10mあり、唯一の出入口は下流側にしかないうえ、床面には加熱装置も設置されていたため、測定作業は体力的に過酷なものでした。測定のために支柱を何度も移動させることになり、作業時には肌を極力露出しないよう長袖で、顔はタオルで覆って対応しました。加熱装置の温度分布はなかなか仕様値に収まらず、装置の調整と測定位置の変更を繰り返すことになりました。

たいへん厳しい現場でしたが、この入社直後の経験があったことで、その後に直面した困難も「なんとかなる」と前向きに受け止められるようになり、技術者としての自信と精神的な支えになった出来事です。

ただ、次回同じような装置を手掛けることになったら高温環境下でも自動で分布を測れる装置も組み込もうと思います。

(2) 送風機前後の間仕切り壁の隙間

ある縦回流式風洞装置の性能測定時、想定よりも測定

部の風速が低いという問題が発生しました。この装置では送風機を地下階に設置しており、計画段階では十分な風量を確保できる設計となっていたため、送風機的能力不足が原因とは考えにくい状況でした。原因を調査した結果、送風機前後に設置された間仕切り壁の送風機貫通部に隙間が存在し、そこから風が漏れてショートサーキットのような状態となっていることが判明しました。この風洞装置の地下風路部分は、コスト削減の観点から軽量型鋼とケイ酸カルシウム板(ケイカル板)を組み合わせで構成されており、間仕切り壁も同様の材料で製作されていました。送風機の直径は2mありましたが、その隙間をコーキング材と発泡ウレタンスプレーを用いて丁寧に封止することで漏れを防止し、測定部での風速は所定の設計値を満たすようになりました。

(3) 長周期の風速ゆらぎ

吹き出し式風洞装置の性能測定を行っていると風速に1~2秒周期のゆらぎがあり乱れの強さが仕様値に納まらないという問題が生じました。この風洞装置では吹き出した風が建屋壁に当たるのでそこでの乱れが原因かと当初は考えていました。そこで壁に直接風を当てず流れをスムーズに左右へ分けるために単管とベニヤ板で三角形の分流ガイドを設けました。分流ガイドの高さが3mほど必要だったので組み立ては苦労しましたが、ゆらぎは解消しませんでした。その後、根拠はなかったのですが逆の発想で送風機吸い込み口に分流板を設置してみたらゆらぎを解消することが出来ました。後から送風機メーカーの技術資料を見たら吸い込み量を安定化させるためには有効と知られている手段だったようです。まだまだ勉強不足・経験不足だと痛感させられた出来事です。この後他の風洞で2回同様の事象が発生した際には経験を活かしました。

(4) 突風発生装置

吹き出し型風洞装置において、突風発生装置(電動ダンパー式)を用いた性能測定を実施した際、サーボモーターによる開閉動作には問題がなかったにもかかわらず、ダンパーを閉じた状態でも風速が十分に低下しないという問題が発生しました。

通風断面の立面図上では、ダンパーを閉じた際にはほぼ全閉に見える構造でしたが、実際の3次元構造においてはダンパーを支持する支柱周辺にダンパー翼との隙間が存在し、そこを通過して気流が漏れることで遮蔽効果が損なわれていました。

問題発覚後、他の性能測定作業と並行してダンパー構造の修正設計を行い、協力会社にて追加部品を迅速に製

作・納入してもらうことで現場での対策を講じました。

本案件では、私自身が設計・組立管理・性能測定を一貫して担当していたことに加え、部品製作と据付工事ともに1つの協力会社に依頼していたため、設計変更から製作、施工、確認作業までを短期間で完結させることが可能でした。結果として要求仕様を満たす装置を納期どおりに納めることが出来ました。

6. 風洞以外の実験装置紹介

弊社で製作実績のある装置を3種紹介します。

(1) 動風圧実験装置



図10 動風圧実験装置

建築物の外装材・開口部（サッシ、シャッター、外壁材など）に対して、風が急激に変化したときの荷重がどのように影響するかを再現・評価するための装置です。送風機2台と切り替えダンパーにより試験体に正と負の変動圧力を与えることが出来ます。写真は角度を変更できるタイプですが、角度固定のものもあります。耐荷重試験・気密試験・水密試験を行えます。JISA 1514（建具の動風圧性能）など規格に基づいた試験も行えます。

(2) 飛来物衝突試験装置

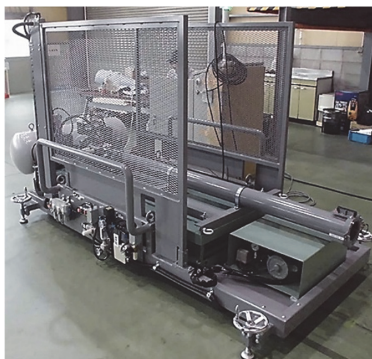


図11 飛来物衝突試験装置

台風や竜巻など強風時に飛ばされる物体が建物外装材

に衝突した場合の被害を再現・評価する装置です。高さ調整用の電動リフターに空圧によって試験体を発射する砲台が載っています。2×4材や鉄球などを発射することが出来ます。JIS R 3109（建築用ガラスの飛来物衝突試験方法）に基づいた試験を行えます。

(3) 走行式竜巻状旋回流発生装置



図12 走行式竜巻状旋回流発生装置

竜巻による建物被害や風圧挙動を模擬・再現するための実験装置です。装置内部の送風機と可変ベーンによって下部に竜巻状旋回流を作りだします。レールとチェーンにより装置を走行させ移動する竜巻を模擬することが出来ます。

7. 最後に

使用者にとって使い勝手の良いものとことん考えるというのが設計者として大切だと思っています。今後もその矜持を忘れず、より良いものづくりに励んでいきたいと思っています。

風洞装置の設計・製作には、使用者視点の配慮と現場での対応力が求められます。本稿が、風洞技術の設計現場における実務の一端を伝える手がかりとなれば幸いです。

注記

装置写真はすべて当社ホームページに掲載されているものです。<https://www.windec.co.jp/>

参考文献

- 1) 伊藤 英寛, 小林 隆二, 弓削 達雄, 他, 「東北大学高速力学研究所附属気流計測研究施設低乱流熱伝達風洞設備および風洞性能について」, 高速力学研究所報告, 第44巻, 第395号, pp.93-151, (1980)
- 2) Ahmed, N. A. (Ed.), “Wind Tunnel Designs and Their Diverse Engineering Applications”, IntechOpen, (2020)