

〈一般研究課題〉 微風速の実現が可能な簡易卓上型
小型風洞の開発
助成研究者 豊橋技術科学大学 中村 祐二



微風速の実現が可能な簡易卓上型 小型風洞の開発

中村 祐二
(豊橋技術科学大学)

Development of A Portable Wind Tunnel for Scale Model Experiment of Fire

Yuji Nakamura
(Toyohashi University of Technology)

Abstract :

A portable wind tunnel for small-scale fire experiment was developed. This work is motivated to perform the high-precision of steady fire test in a laboratory scale, at which extremely low velocity field (~ 0.1 m/s) in relatively large cross-sectional tunnel should be realized. The existing small-wind generator (invented by Sekimoto SE, Japan) was used as the wind generator and stratified part was developed for the present purpose. Velocity in the tunnel was carefully measured by anemometer to ensure the uniformity. Flow visualization is made by aligned incense sticks doped with a paraffin liquid, which enables to generate clear streak of the flow. It is found that arrangement by 5-mech screens after the honeycomb works excellently to achieve the uniform wind in the test section with small pressure drop, even in very slow wind velocity (~ 0.1 m/s). Insertion of incense sticks for visualization was somehow tricky because it produced the vortex streak in the test section. Additional work to manage the vortex generated by the incense sticks has been successfully made and eventually very clear straight flow streak was visualized. To ensure the flow stability, slight disturbance was added in the front and streak line was temporary distorted. However, distorted part was found to move downward without affecting surroundings, showing that the present developed system is very solid.

1. はじめに

巨大構造物周囲の流れ場を調べるには模型実験が極めて有効であるが、一般にスケールを小さくした場合、流れ場の相似則に従えば流速は著しく小さくなるのが珍しくない。このように模型実験をしようとするとき必ずといってよいほど「微流速の実現」に悩まされる。一定風速状態は風洞によってもたらされるが、微流速ともなると大きな風洞での実現は難しいため卓上サイズの小型風洞によってそれを実現しようとするのが一般的である。しかしながら大型風洞の作成においては数々の古典資料があるものの、小型(且つ微流速)風洞に関する知見は著しく限られている。現状は研究者によって様々な風洞がデザインされ使用されているが、誰もがアクセスできる技術資料として風洞設計の骨子をまとめた資料はなく、ハニカムとメッシュの効果ですら十分にまとめられたものすら存在しない。

本研究開発の主旨は、模型実験の際に多用される微流速風洞を得るため、風洞後段にできるだけ簡素でコンパクトな整流部を設け、0.1 m/sレベルの低流速をテストセクションに一様にもたやすための工夫を検討し、卓上の簡易小型風洞に必要な情報を提供することにある。

2. 試料および実験方法

本事業では、風洞内の流れの一様性、絶対強度を改善することを目標としているため、それらを計測する必要がある。流速の絶対値評価には熱線風速計を用いて平均および変動成分の解析を行うことで対応する。流れの一様性については、流れ場を可視化することで評価した。流れ場の可視化には粒子追跡法を適用する(具体的には上流に煙発生装置を取り付け、その煙の軌跡を観察することで一様性を判断する)。観察はデジタルビデオカメラにて行う。煙の可視化を効果的に行うため、外部光を当てることで得られる散乱を利用した。



図1. 熱線風速計の設置(風洞出口のハニカム直後に設置している様子)

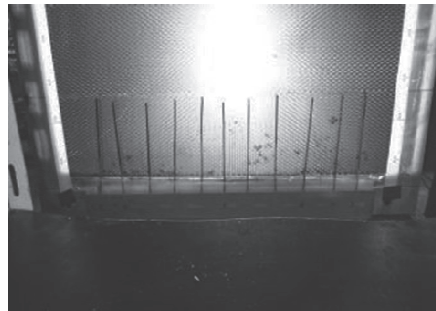
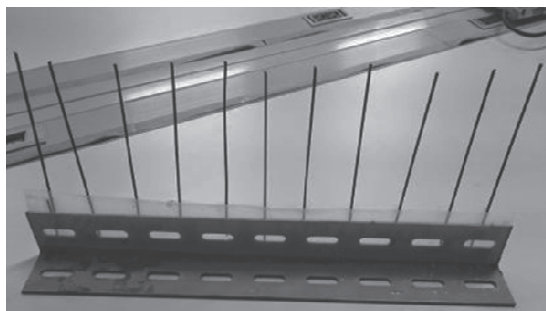


図2. 煙追跡法に用いた煙発生装置(線香) (左: 線香固定、右: ハニカム出口に設置した様子)

本研究室に既存の低速小型風洞(小型火災試験のために試作された特注品。送風部断面積：600mmx600mm)があるため、これをベース素材にして後段に改良を施すことにする。もともとの風洞で発生させる圧力差は換気扇用のファン2つでもたらされるため著しく小さい。したがって後段の整流部に求められる能力とは、「小型で圧力損失が少ない」ことである。改善前の風洞原型の出口にはアルミハニカムが敷き詰められており、そこでファンにより発生する大きな回転成分は除去される。一方、この過程において圧力損失はほとんどない(=流洞抵抗はハニカムの内壁にできる粘性層のみである)。この意味においてハニカムの効果は絶大である。ところが、実際に煙追跡してみると、ハニカム出口直後は整流されているものの、約100mm後流あたりから煙が「蛇行」しはじめ、風洞内のテストセクションに入ると大規模な乱れが発生している。(図3参照)。このことは、風速計による速度分布からも明確である(図4)。なお、この図には含めていないが別途計測したRMS値は主流速度が増加するほど増えており、主流よりも大きな変動が現れ、むしろ乱れが発達しているといえる。

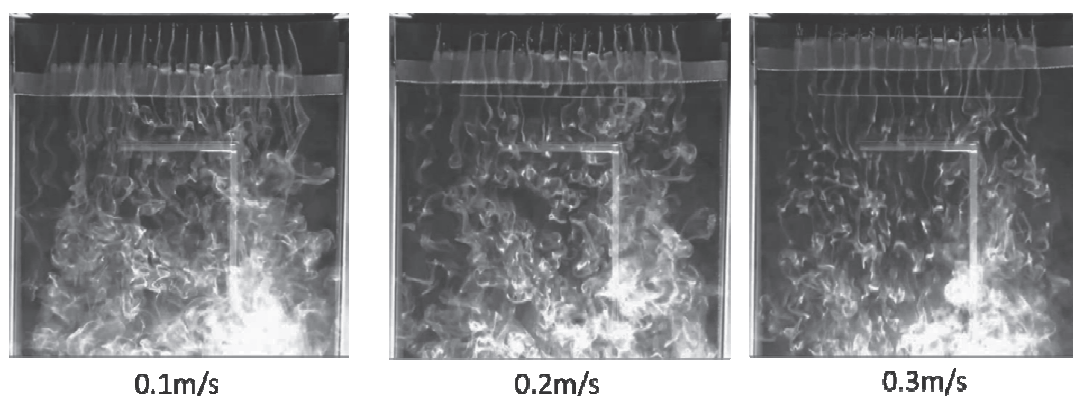


図3. 改良前の風洞にて形成される流れ場：上から観察(画面上：風洞出口)

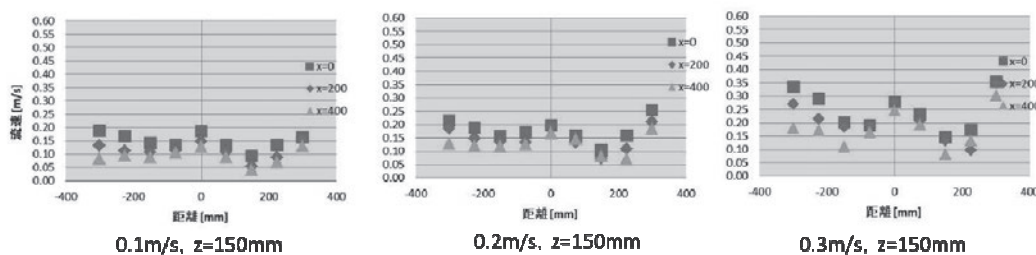


図4. 各位置における平均流速(x：流れ方向、Y：幅(奥行)方向、Z：高さ方向)

流速分布から、流れは一様ではなく緩やかな分布(中央および両端に山を持つ)を持つことがわかる。その最大値は図4(主流速度0.3 m/s)から200mm間にて0.2m/sであり、相当する速度勾配はおおよそ 1 s^{-1} である。空気の動粘性係数は常温で約 $1.5 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ であることから、粘性による運動量輸送速度はわずか 3.8 mm/s にすぎない。主流速度がそれよりも3桁大きいことから、アスペクト比が1:1000の風洞でようやく出口付近で(粘性の力を借りて)一様になることを意味する。このように、ハニカムは前述のとおり渦を消失させるには効果的であるが、そこを通じる途中で流れは成層化されてゆくものの「緩やかな分布」を打ち消す効果はない。また、ハニカムの長さが不十分であると成層化が完全になされないうちにテストセクションに出てしまうことになる。テストセクショ

ンには弱い乱れ場が挿入され、それが(減衰する効果がなければ)増幅してゆく可能性がある。図3の結果から、改良前の風洞では(残念ながら)そのようなことが起きているものと推察できる。

上記のような緩やかな分布を除去するには網目シート(メッシュ)が有効である。本事業では、風洞改良に向けてメッシュを配列することで整流を試みる。網目シートにはさまざまな番手が存在するが、上流から粗目のものから下流に向けて細目のものを順々に配列させることで微小かく乱を抑えつつ整流化させ、最終的には一様流に近づくものと期待できる。

3. 実験結果

3.1 本風洞改良に用いた網目シート(メッシュ)

表1に本検討で用いた網目シート詳細を示す。ここではステンレス製のものをを用いており、目の細かさを4段階のものを用いる。表中の「メッシュ」とは1インチ中に含まれる目の数であり、この数が大きいほど網目のサイズが小さくなる(いわゆる細目のメッシュと呼ばれるものに近づく)。

表1. 網目シート(メッシュ)の詳細

材質 メッシュ	ステンレス		
	線形(mm)	空間(mm)	空間率(mm)
10	0.5	2.04	64.5
12	0.5	1.62	58.4
18	0.25	1.16	67.7
24	0.25	0.81	58.4

表1で示した4種類の直接写真(近影)を以下(図5)に示す。図には比較のため1円玉を中央に配置している。

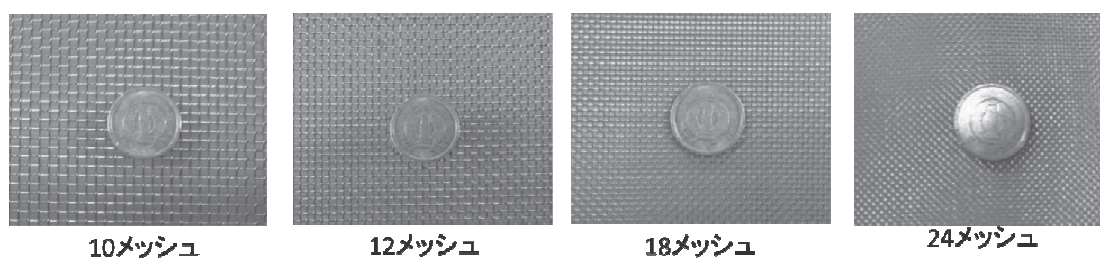


図5. 本検討で用いた4段階メッシュの写真(比較のため1円玉を中央に配置)

ここで用いたメッシュのうち最も細かい目でも24メッシュにとどめた理由は、圧力損失をできるだけ小さくするためである。メッシュの整流効果は枚数が増えるほど増加するが、その一方で圧力損失は大きくなる。ここでは4種類のメッシュをさまざまな方法で配置した結果、それらの間隔をあけて4枚配置することで、本風洞に必要な性能を得ることができた。以下、その詳細を示す。

3.2 改良された風洞詳細

図6および図7に送風部直後に配置されたハニカムの後段にメッシュによる整流部を配置し、テストセクションにおける整流効果を向上させた改良風洞詳細を示す。

ここでわかるように、整流部として今回追加した部分は若干450mmにとどまり、その内部構造は図7のように段階的にメッシュを100mm間隔で配置した簡素なものである。メッシュ枚数および配置距離などは数々の試作を重ねた最適値である。もちろん整流部の距離を長くすることでより優れた整流効果が期待できること、メッシュ枚数を増加させることで緻密な整流が可能になるなどはあるが、もともとの開発目標が「簡易卓上型風洞」を目指すことであるため、ここでの最適条件

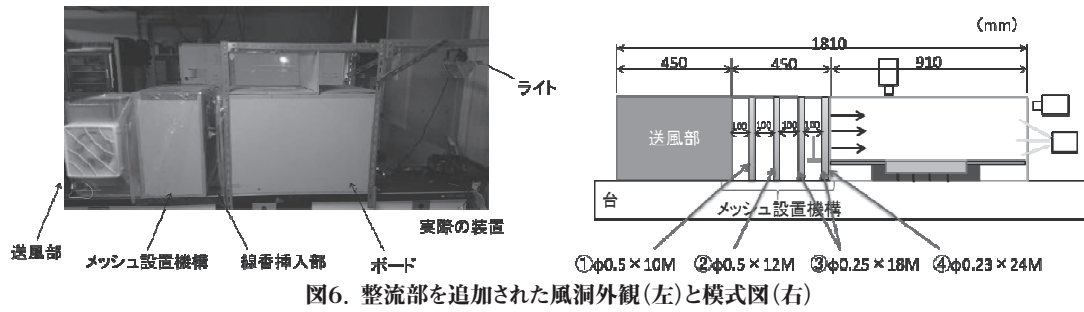


図6. 整流部を追加された風洞外観(左)と模式図(右)

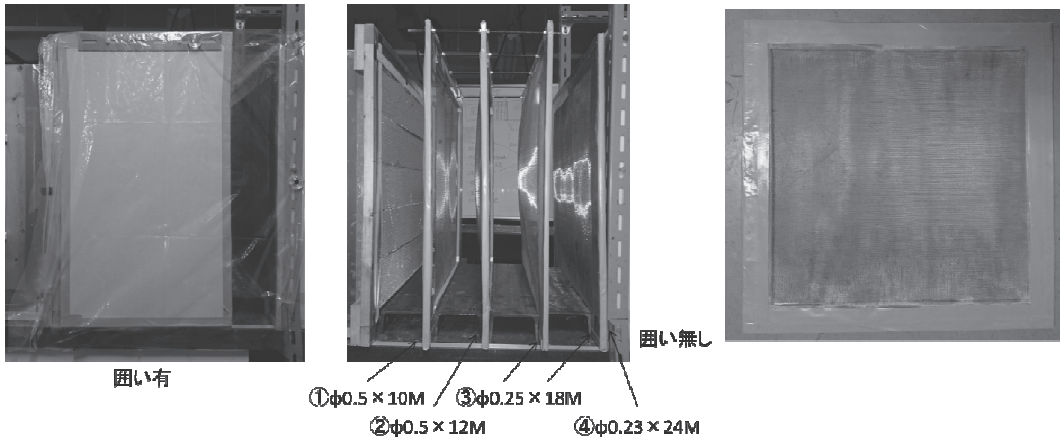


図7. 整流部詳細(左:外観拡大、中央:整流部の内部構造(横から撮影)、右:メッシュ固定法)

とは送風部の距離ができるだけ短く、メッシュ枚数をできるだけ少ない状態で、火災模型実験で必要な流速レンジ(0.1 m/s~0.5 m/s)で整流が可能なものとしている。

改良前後における流速分布を図8に比較して示す。図4のような「ある高さでの速度分布」ではなく、風の出口部を16分割し、各々の区分された領域における平均速度を整流部直後(0mm)および200mm後流位置にて示すことで、空間的な差がわかるようにしている。なお、得られた流速値のうち最大値の色を濃くし、速度が下がるとともに色を薄く表示している(なお、図4と同じ比較をしたものを参考までに図9に示す)。図から明らかなように、改良前は中央部左において速度が

改良前						改良後					
0mm, 0.1m/s						0mm, 0.1m/s					
0.173	0.080	0.177	0.223	0.147	0.193	0.06	0.051	0.05	0.0515	0.06	0.051
0.203	0.147	0.203	0.197	0.113	0.140	0.071	0.09	0.072	0.0815	0.0905	0.076
0.150	0.113	0.223	0.183	0.110	0.123	0.061	0.1015	0.089	0.0915	0.0985	0.06
0.160	0.150	0.207	0.210	0.127	0.150	0.062	0.12	0.1	0.1015	0.108	0.08
0.197	0.183	0.237	0.180	0.153	0.220	0.09	0.109	0.12	0.1115	0.1145	0.0885
0.263	0.227	0.270	0.213	0.200	0.210	0.086	0.121	0.138	0.1205	0.1115	0.091
200mm, 0.1m/s						200mm, 0.1m/s					
0.110	0.080	0.197	0.177	0.157	0.227	0.05	0.041	0.04	0.0415	0.04	0.05
0.210	0.163	0.227	0.153	0.117	0.140	0.074	0.09	0.064	0.082	0.089	0.081
0.100	0.113	0.230	0.180	0.120	0.130	0.06	0.0965	0.0695	0.08	0.0895	0.0635
0.180	0.157	0.227	0.193	0.130	0.150	0.073	0.105	0.08	0.09	0.09	0.0715
0.203	0.173	0.237	0.177	0.147	0.227	0.071	0.085	0.095	0.102	0.096	0.071
0.240	0.227	0.287	0.213	0.210	0.220	0.0485	0.0705	0.1	0.086	0.0735	0.056

図8. 改良前後の風洞断面での速度分布(16分割)。上段(0mm):整流部直後、下段(200mm):整流部より200mm後流の位置にて測定

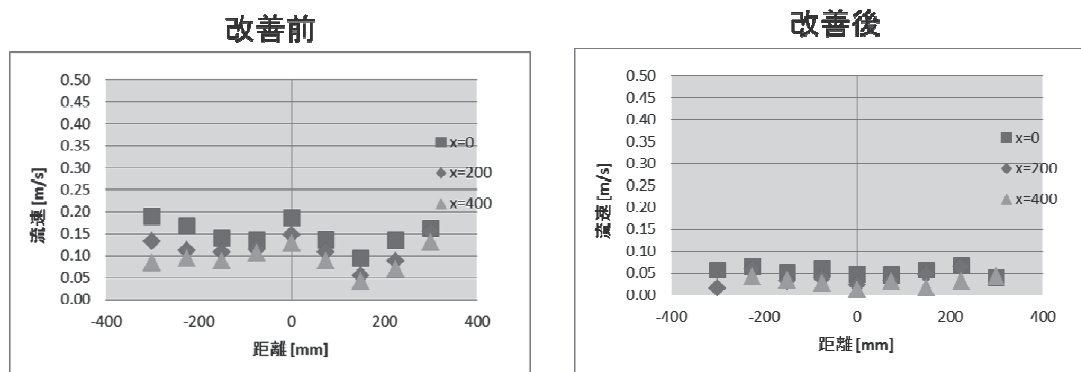


図9. 改良前後の高さ150mmにおける速度分布

最大(極大)を持ち、その周囲(y方向)に向かって速度勾配が生じ、壁面付近で再度増加する(図4で示した傾向と同様)。一方、改良された風洞においては全体的に速度差は抑えられており、流速が最大になる領域が広い。さらに壁面付近での速度増加が抑えられており、なだらかな分布になっていることがわかる。最大速度を示す位置は、改良前後共に底面側にあり、上面に向かって平均的に速度が低下する。整流部に依存しないこの特性は、整流是前段にあたる送風部に起因するものと思われる。より均一性を向上させるためには、送風ファンからの送風方向を微調整するなどが対策として考えられる。

3.3 煙追跡による困難さ

本風洞は小型火災試験のために開発するものであるため、熱線流速計は「凍結流」を調べるにはよいが、テストセクションに試験体(この場合は燃焼部)を設けると利用できない。そのため、煙流動により可視化する手法を採用しているが、ここにも工夫が必要である。煙を発生させるためには定点においてスモークジェネレータを取り付け、そこから出される煙の軌跡をたどればよいが、複数の軌跡があると流管の増減も調べることができ、現象の理解を助ける。そのため、テストセクション手前に(必要なだけ)複数のスモークジェネレータを取り付ける必要があるが、もちろん複数取り付けるとせっかく整流した流れを乱す原因にもなる。スモークジェネレータとしてよく用いられるのが煙を含んだ空気を流すための管であるが、煙源としてスモークリキッドなどを用いると管内で凝集・液化してしまうことを考えると、管は極細にはできない。スモークワイヤ法はある短時間の流れ場のみを可視化するには適するが、観察したい火災現象は比較的長時間にわたるため、その方法も適さない。そこで本研究では、線香(ただし煙量を増やすためにパラフィンをしみこませた)を用いることでこれに対処する。線香は直径2mmであり、その先端からくん焼により煙を発生させるが、煙発生の際の慣性力は無視できるほど小さい。線香のくん焼速度も穏やかであるため、煙発生位置は(時々刻々と低下するものの)火災模型実験に必要な時間範囲(条件にも依存するが数十秒～1分程度)ではほぼ定点として扱うことに支障はない。

ところが、線香を風洞後面に配置しても、そこから得られる煙の軌跡は単純にまっすぐにはならない。なぜなら「流れ場と線香そのもの(円筒形の障害物)とが干渉して場に回転渦を発生させるから」である。その回転渦とは図10のように進行方向に対して左右に逆回転をするもので、上から見るとその回転半径の分だけ煙の軌跡が揺れる。それだけでなく煙の回転半径が流れとともに大きくなり、場の乱れとして記録されてしまう。このような現象は線香を用いた煙生成に付随する本質的

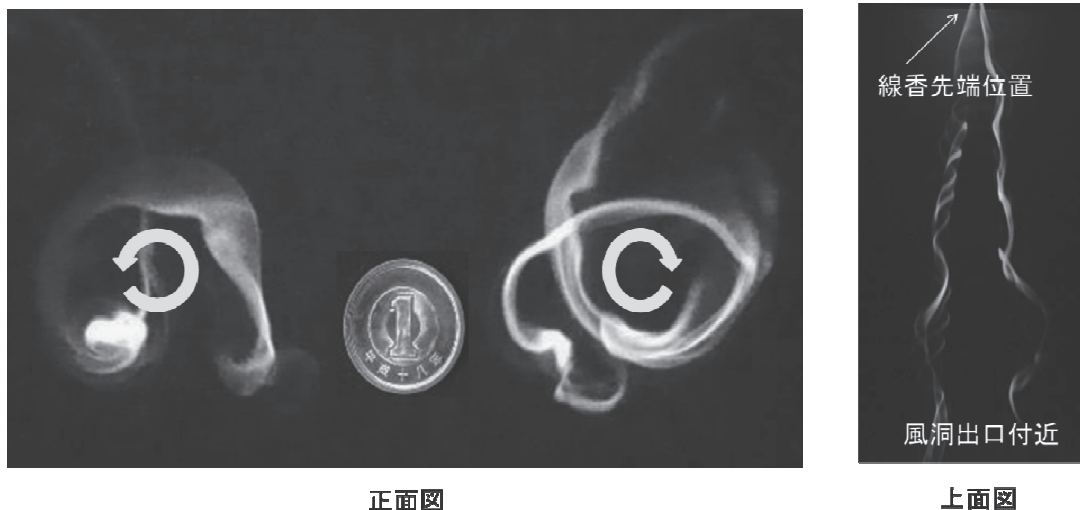


図10. 線香の煙の動き(正面図および上面図)

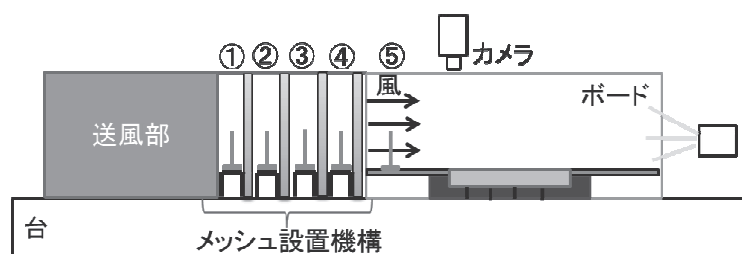


図11. メッシュ挿入検討位置(①～⑤)

な問題点であり、何らかの方法で対応することが必須である。

この回転運動を阻止するためには、線香の太さを変えて場の回転成分を弱くするなどが効果的であるが、そうするとくん焼速度が変化し、定点からの煙生成と言えなくなる可能性もある。したがって、上記で考案した整流部によって流れ方向を除去する必要がある。具体的には線香を配置する位置をメッシュ前後の5か所(図11の①～⑤)に配置し、最も回転渦が出にくい箇所を検討した。その結果、④、すなわち最もテストセクションに近いメッシュの内側に線香を配置することで最も効果的に渦の排除が可能であることがわかった。

3.4 最終結果：改良風洞による流れ場検討

上記のとおり、さまざまな検討を施して改良を重ねて熟成された火災の模型実験用風洞において得られる流れ場可視化例を図12に示す。

左は凍結流における流線(流れは画面上から下へ)であり、右は中央に見える燃料パンから鉛直上方に渦を伴って急激に成長する「火災旋風」の周囲に形成される流れ場可視化の一例(風洞出口から観察)である。凍結流の結果から、流れ場はほぼ一様であることがわかる。動画で確認すると明確であるが、わざと入り口に擾乱を加えても、その擾乱が「そのまま」下流に流れ出てゆくため、システムとしての安定性は高いと判断できる。この状態で火災の模型実験の一例として火災旋風における流れ場可視化をした例(右)からは、整流部出口左からは炎に向かって巻き込む渦巻き流れ(上から見た場合に反時計回り)の存在を認めるとともに、その下流に逆回転の渦が明確に存在することがわかる。このような渦対の形成が火災旋風の研究で重要になってくるため、今後の活用に期待



図12. 改善された風洞における流れ場(左:凍結流、右:火災旋風の模型実験における後流に存在する渦を明確に可視化した一例)

ができる。

参考文献

1. Shiino, K., and Nakamura, Y., "Mobility of Fire Whirl formed over L-shape Ethanol Tray embedded in Small-scale Wind Tunnel", Proc. The 10th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology (AOSFST-10), Poster Session, Tsukuba, Japan (2015.10), FP-8 (on USB).
2. Nakamura, Y., Shiino, K., and Nakashima, T., "How Well We Can Predict the Occurance of Large Fire Whirl through Scale Model Experiment?", ICFD 2015 Invited Speaker, Sendai (2015.10)