

吹出式三次元煙風洞による 三次元物体周りの流れの可視化

倉元 靖夫*・吉岡 英樹*

Visualization of Flows around 3-D Bodies by a Blow-down Type 3-D Smoke Wind Tunnel

Yasuo KURAMOTO and Hideki YOSHIOKA

Abstract

In order to investigate flow field around a 2-D or a 3-D body, a blow-down type smoke wind tunnel with a 500 mm×500 mm test section was constructed. The range of the wind speed in the test section is 1.5 ~ 25 m/s and its distribution is within $\pm 0.8\%$. The turbulence intensity of the wind flow in the test section is less than 0.2%. These characteristics of the wind flow show that the wind tunnel is suitable for smoke flow tests. Liquid paraffin smoke is generated and sent into the test section by smoke wire method or smoke nozzle method. Five kinds of lighting are applied for clear flow visualization and its good recording. Some photos of wake flow patterns behind several kinds of bodies are shown; for instance, wakes of a circular cylinder, a square bar, tracks with and without wind deflector and so on.

Key Words: 3-D Smoke Wind Tunnel, Flow Visualization, Flow around 3-D Body

1. はじめに

流体の流動現象が関与する機器や構造物の性能・信頼性の向上は、省資源・省エネルギー時代の今日、ますます重要である。流動現象が絡む問題の解決には次の4項目の実施が必要不可欠である。すなわち、①当該流動現象の詳細な把握、②目的達成に必要な流動現象改善策の案出、③新流動現象実現のための当該機器・構造物の具体的改良、④目標通りの流動現象の改善と効果の達成状況の確認。最近これらの検討に数値流体力学が盛んに適用されているが、条件や精度上の制約で最終的には実験を要する場合が多い。特に①と④では流動現象の鮮明な可視化が効果的であり、圧縮性やレイノルズ数効果が小さい場合には煙による可視化が適している。

久留米工業大学では、平成3年度より本格的な煙風洞の建設計画を検討し始めた。初年度は既存の斜流ファン

を使い、吸込式二次元煙風洞（観測部断面：50mm×60mm）を学生に手作りさせ、煙の発生方法、照明法、写真撮影法等を勉強した。しかし、研究対象となる流れは、ほとんど三次元物体に関する三次元流れであることを考慮し、平成4年度には吸込式三次元風洞を、さらに、平成5年度には吹出式三次元風洞（観測部断面：200mm×200mm）を学生に手作りさせ、風速の調整法や流れの可視化・画像記録法を種々研究した。

平成6年度、実験棟の移転・新築を契機に、流れの可視化のみでなく、エネルギー分布や流体力の計測等種々の実験を考慮し、500mm×500mmの試験断面を有する本格的吹出式煙風洞を建設した。

本報ではこの平成6年度末に完成した風洞の構造、特性、可視化方法および数例の可視化実験結果につき報告する。

* 交通機械工学科
平成11年9月30日受理

2. 風洞の仕様と特性

煙による可視化実験を重視し、風洞仕様は500mm×500mmの試験断面において風速範囲が1.5~25m/s、風速分布は±1%以下、乱れ度は観測部断面中心で0.2%以下とした。また、500mm×500mmの吹出口に二次元縮流胴を接続すると500mm×150mmの二次元試験断面が構築出来るようにした。

図1は風洞の立面図、図2は風洞の全景写真、図3は

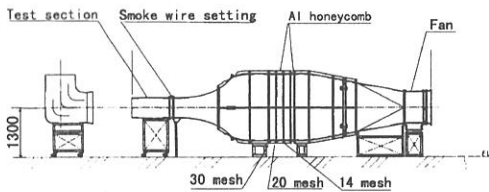


図1 吹出式三次元煙風洞

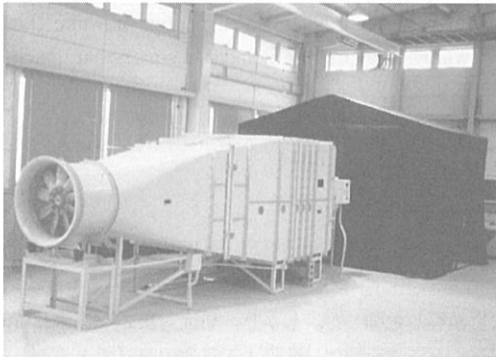


図2 風洞全景

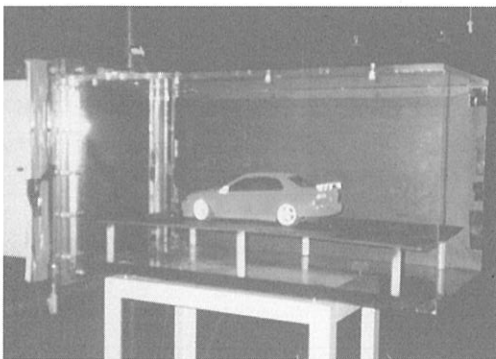


図3 風洞観測部と暗室

暗室内の風洞観測部である。500×500mmの亚克力製観測部(長さ1m)を含め全長8.1m、絞り比約11である。完成後の計測結果では、平均風速10m/sの時、吹出口下流200mmの断面で中央の流速を基準にする風速分布は図4の如く-0.4~+0.8%の範囲にあり、乱れ度は図5に示す如く使用風速の全域で0.2%以下で、いずれも仕様を満足するものであった。さらに吹出口中央にスモークワイヤを水平に張り、風速2m/sで煙をながしたところ図6の如くきれいな水平面をなし、煙風洞として十分な性能を有している事が確認された。

3. 可視化の方法

煙発生法は、スモークワイヤ法と外部で発生させた煙を楯形ノズルで風洞縮流部に送り込む方法を採用した。

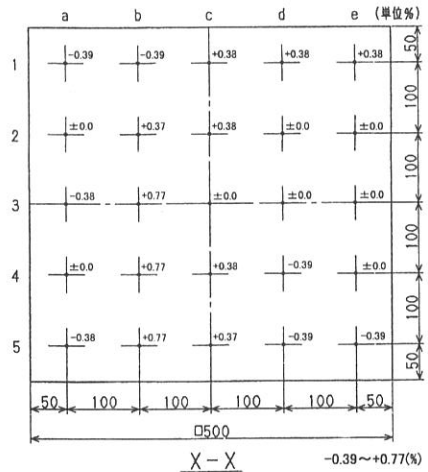


図4 観測部の風速分布

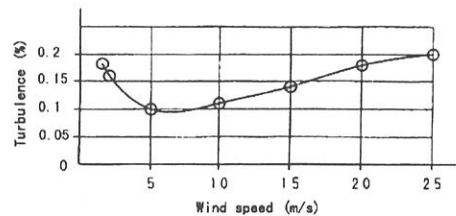


図5 観測部内の気流乱れ度

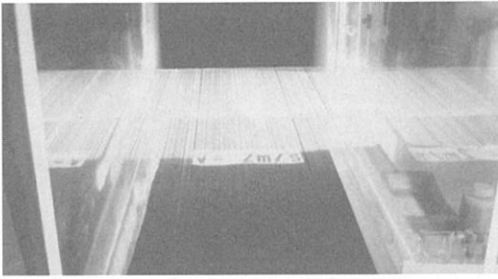


図6 完成時の気流状況 (風速 2 m/s)

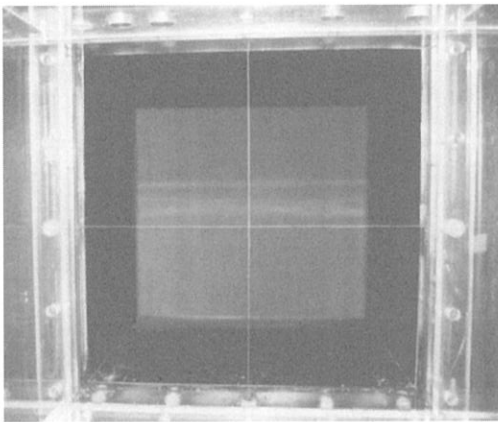


図7 スモークワイヤの取付状況

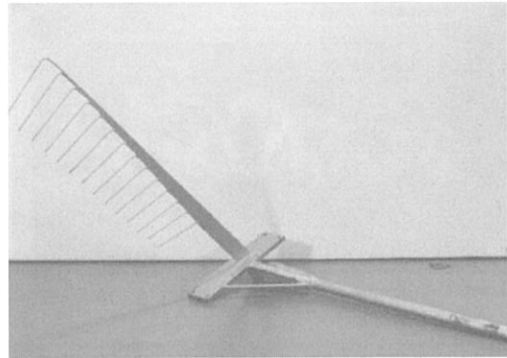
スモークワイヤには、直径0.07~0.10mmの素線を7本撚った外径0.21~0.30mmのステンレス線を使っている。煙発生剤には流動パラフィンを用い、スモークワイヤに塗る時には鉄粉を混ぜている。図7はスモークワイヤを吹出口中央に水平および垂直に張った状況を示す。また、図8はスモークノズルとそれの風洞への装着状況を示す。照明法としては、1kWスライドプロジェクタ、300Wおよび500Wハロゲンランプ、100Wスリットストロボ、4Wアルゴンイオンレーザシート光の5種類の光源を使い分けている。

可視化した流れの記録にはカメラとビデオを使っているが、写真撮影で高感度を必要とする時にはコニカGX3200のフィルムを使用している。

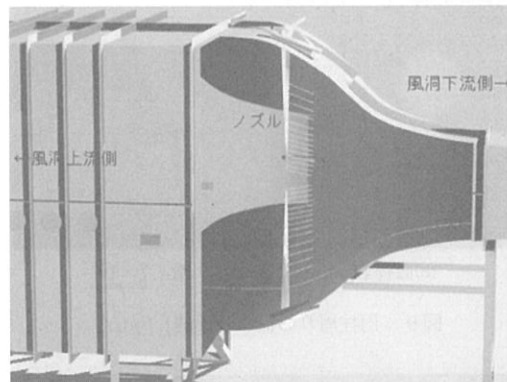
流れ場全体の定量化には、上記のレーザシート光を光源としCCDカメラにより画像をパソコンに取り込み、PIVにより画像処理を行っている。

4. スモークワイヤ法による可視化実験結果

図9は風速1.5m/sの気流中に置かれた直径20mmお



(a)スモークノズル



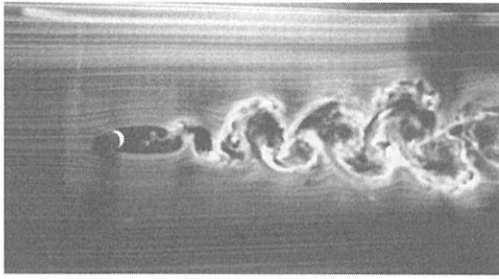
(b)スモークノズル装着状況

図8 スモークノズルと風洞への装着状況

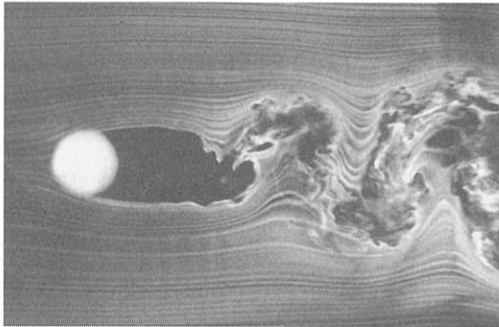
よび49mmの円柱後方のカルマン渦列である。典型的な流動状況が良く観察される。レイノルズ数は 1.9×10^3 および 4.7×10^3 である。円柱は水平に取り付けられ、直径0.27mmのスモークワイヤを垂直に張り、光源には500Wハロゲンランプを使ったスリット光を上下より当て、さらにスライドプロジェクタからのスリット光を下流側より当てている。フィルムはISO3200でカメラの絞りは1.8、シャッタースピードは1/250である。

図10は円柱後方の流れをより明確にするため、スモークワイヤを円柱の50mm下流に張り、カルマン渦列内部に濃い煙を送り込んだ写真である。シャッタースピードは1/125、他の試験条件はいずれも図9と同じである。図より円柱直後の流れは渦を巻きながら逆流しており、50mm下流で発生した煙が円柱部に到達しているのが良くわかる。

図11は1辺45mmの正方形断面を有する角柱の後流で、(a)は面の流れに正対させた場合、(b)は角部を流れに正対

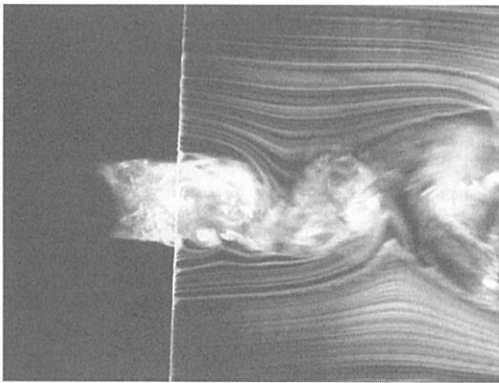


(a)直径20mm, レイノルズ数 1.9×10^3



(b)直径49mm, レイノルズ数 4.7×10^3

図9 円柱周りの流れ (風速1.5m/s)

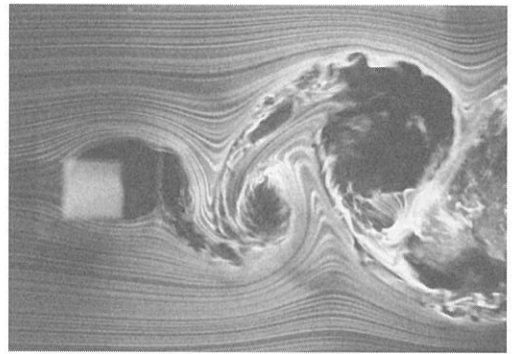


直径49mm, レイノルズ数 4.7×10^3

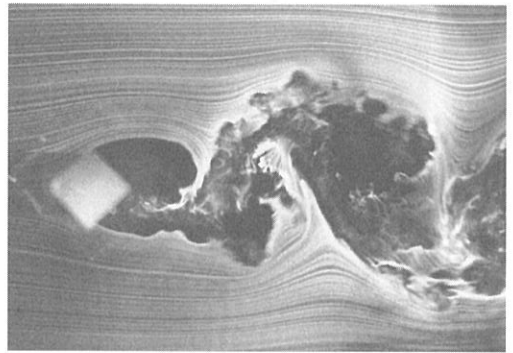
図10 円柱の後流 (風速1.5m/s)

させた場合である。辺の長さを代表長さとした場合のレイノルズ数は 4.2×10^3 , 試験条件は図9と同じである。(a)の場合, 流れに平行な二つの面上で流れは付着と剥離が交互に現れるので, カルマン渦の振れ巾が円柱の場合よりかなり大きくなるが, (b)では剥離点が固定されているので, カルマン渦の振れ巾は(a)の場合より小さい。

図12はスモークワイヤを角柱の10mm 下流に張り, シ



(a)面を流れに正対させた場合



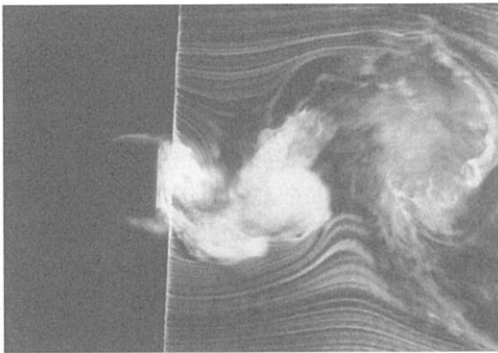
(b)角部を流れに正対させた場合

図11 角柱の周りの流れ (風速1.5m/s)

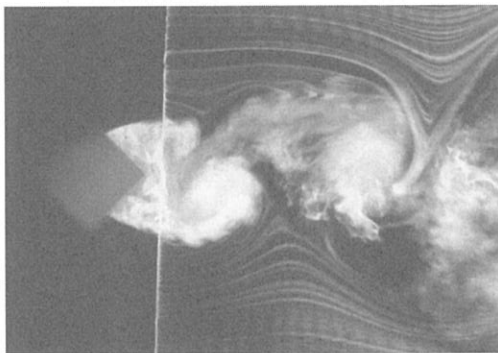
ャッタスピード1/125で撮影した後流の写真である。

図13は直径60mm, 高さ200mmの円柱を観測部内に立て, 後方50mmの位置にスモークワイヤを縦に張り, 1.5 m/sの気流を当てた時の円柱後方の流れである。円柱上端より円柱後方へ回り込む縦渦の状況が良くわかる。スライドプロジェクタからのスリット光を下流側より当て, シャッタスピード1/30で撮影した写真である。スモークワイヤを縦に張ると塗布した流動パラフィンが融けて流れ落ちるので, 煙発生時間が非常に短くなる。したがって, ワイヤへの通電電圧を上げ濃厚な煙を一気に発生させて写真を撮影する方がよい。ビデオ撮影などで煙発生時間を長くする必要がある場合には, ワイヤ上部より流動パラフィンを供給する工夫を行っている。

図14はトラックの車体周りの流れで, (a)はウィンドデフレクタを付けた場合, (b)はウィンドデフレクタ無しの場合である。車体上部の流れは(a)の方が剥離部分が小さく, 車体後方の巻き込み渦も小さいように見え, ウィンドデフレクタの効果が想定出来る。風速2.0m/s, 照明は



(a)面を流れに正対させた場合



(b)角部を流れに正対させた場合

図12 角柱の後流 (風速1.5m/s)

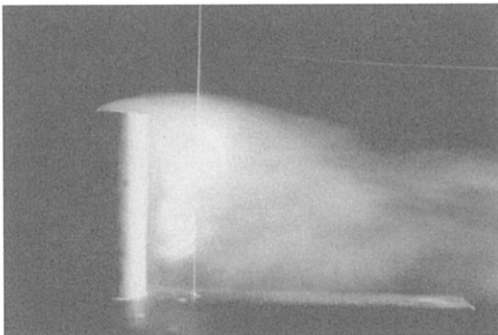
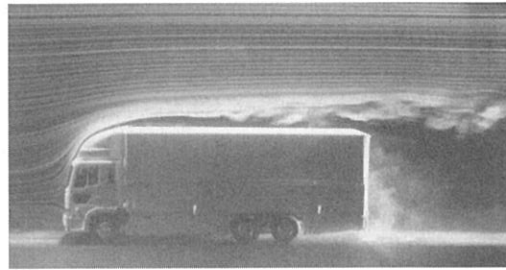
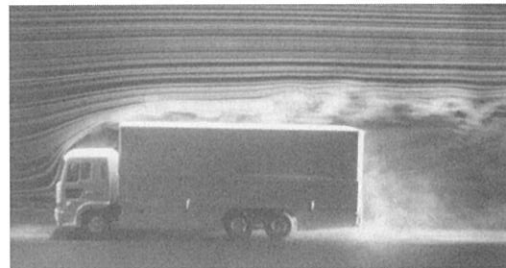


図13 有限長円柱の後流 (風速1.5m/s)

上部より500W ハロゲンランプのスリット光を当て、下流側よりスライドプロジェクタのスリット光を当てている。絞りは1.8、シャッタースピードは1/125である。レイノルズ数は車高を代表長さとした場合 1.1×10^4 である。ちなみに、実車が60km/hで走行している時のレイノルズ数は 3.9×10^6 である。

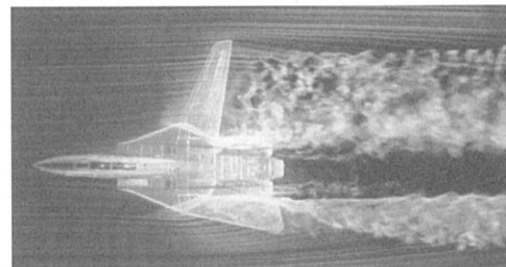


(a)ウィンドディフレクタ付



(b)ウィンドディフレクタ無

図14 トラック車体周りの流れ (風速2.0m/s)



(a)翼後流



(b)翼端渦

図15 後退翼機の周りの流れ (風速1.5m/s)

図15は可変後退翼機の翼面上および翼後方の流れであ

る。(a)は飛行機の右側の可変翼を広げた状態にし、左側は可変翼を閉じた状態にした場合の翼後流を、飛行機の上方より撮影したものである。風速1.5m/s、機体の迎角は 10° 。気流の翼への流入状況を含め翼周りの流動状況が良くわかる。シャッタースピードは $1/250$ である。(b)は後退翼を閉じた場合の翼後方に出る一対の翼端渦である。スモークワイヤは模型の上流に張り、光源はレーザーシート光を模型後方50mm位置で流れに直角に当てている。また、模型には上方より懐中電灯で光を当てている。絞りは1.8、シャッタースピードは $1/30$ である。

5. まとめ

- (1) 三次元物体周りの流れを研究するため、500mm×500mmの試験断面を有する吹出式煙風洞を建設した。風速範囲1.5~25m/s、風速分布 $\pm 0.8\%$ 以下、乱れ度0.2%以下（観測部断面中心）で、煙風洞として十分な性能を確認した。
- (2) 煙発生法としてスモークワイヤ法とノズル法を採用し、5種類の照明法を適宜使い分け、流れの鮮明な静止画像および動画の記録が可能となった。また、アルゴンイオンレーザーのシート光を光源としCCDカメラで画像をパソコンに取り込み、PIVによる画像処理を行うことで流れ場全体の定量化も可能になった。
- (3) 可視化実験結果の例としてスモークワイヤ法を用いた円柱、角柱、トラック、可変後退翼機の後流の写真を報告した。