17 蛍光ミニタフト法による流れの可視化

東大生研 佐賀 徹雄^{*}、小林 敏雄^{*} 日本自動車研究所 湊 清之^{**}

Flow Visualization By The Use Of Fluorescent Minituft

Testsuo SAGA^{*}, Toshio KOBAYASHI^{**} and Kiyoyuki MINATO^{**}

The fluorescent minituft method is applied to (1) surface flow on a 3-D vehicle model, (2) flow around a 2-D vehicle model, (3) inlet flow of a centrifugal blower with high speed revolution. The fine nylon monofilament (minituft) are treated with fluorescent dye and are rendered visible by ultraviolet flash lamp. The technique allows flow visualization during other aerodynamic tests without interference.

1. はじめに

流れの可視化技術は流体の複雑な運動を直観的および包括的に理解できるため工学工業をはじめ広い範囲にわたり応用され、機器などの性能向上にしばしば貢献している。また、近年では電子計算機の発達に伴ないその実用化が期待されている流れの数値シミュレーションの結果を検証する手段の一つとしても流れの可視化が用いられている¹⁾。この可視化技術は一応の体系化がなされているが²⁾、可視化対象の多様化に応じて種々の改良・工夫が加えられている。その一つの方向に可視化のためのトレーサの大きさの改善がある。これをタフト法に適用したものが蛍光ミニタフト法で³⁾、極めて細いナイロン単繊維のタフト(以下ミニタフトと呼ぶ)を蛍光染料で染色しこれに紫外線を照射してミニタフトから発生する蛍光をタフトの動きとしてとらえる方法である。本報ではこの蛍光ミニタフト法で比較的小さな供試体を対象として(1)自動車模型表面付近の流れ、(2)二次元車体まわりの流れ、(3)高回転・小型プロアの入口付近の流れのミニタフトによる可視化を試みるとともに、ミニタフトが流れ場に与える影響を考察する。

2. 可視化方法と撮影方法

図1に本報で用いた蛍光ミニタフトの撮影方法を、表1に従来のタフトと蛍光ミニタフトの比較を示す。ミニタフトは取り扱いの上から直径 d を約 0.03mm 程度に選んでいるが、狭い場所での可視化ではさらに d の小さいものを用いることも可能である。表2に実験条件と可視化条件を示す。蛍光染料(kaycoll:us)で染色したナイロン単繊維(東レ:7デニール)を適当な長さに切断してミニタフトにし、それを流れ場に配置して紫外線を照射し動きを観察する。光源は大部分の放射線を紫外外部にもつ紫外線放電管、水銀ランプ等を用いる。紫外線は不可視光線であるが図2に示すよう可視光線と波長域が近いので、多くの紫外線光源からは紫外線とともに可視光線も放射されることが多い。

紫外線照射によりミニタフトで発光する蛍光は微弱な可視

Fig.1 Typical setup for fluorescence photography using ultraviolet excitation

^{*} Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo: Minato-ku, Tokyo 106

^{**} Japan Automobile Research Institute, Inc. : Tsukuba-Gun, Ibaragi 305

光線であるので、鮮明な可視化を行なうためには紫外線光源からの可視光線あるいは光源以外の外部からの可視光線等がミニタフトへあたらないよう極力遮断する必要がある。このため光源には図2に示すような紫外線通過・可視光線遮断フィルタ (KODAK L18等) を取り付け、可視光線を遮断しながら紫外線をミニタフトに照射する。光源以外の外部からの可視光線も暗幕等で遮断しタフトからの蛍光効果を増大させる⁴⁾。本実験に用いた紫外線光源は最大出力2000ジュール(出力可変)、発光時間50msで、発生する熱を除去するため常時冷却空気を供給できる構造になっている。図1に示すようにタフトの動きは35ミリカメラや16ミリカメラ等でいわゆる紫外線写真として撮影・記録する。高感度のTVカメラで撮影・記録することもできる。ミニタフトの蛍光は微弱であるため高感度なフィルム(白黒またはカラーフィルム:ASA 400~1600)を使用する。一般にフィルムは紫外線にも感光する。このためカメラには光源のフィルタとは逆の特性をもつ可視光線通過・紫外線遮断フィルタ (KODAK 2A, 2B等) を取り付け、光源からの紫外線を遮断しミニタフトで発光した可視光線をカメラ内へ取込んでいる。図3に紫外線写真の効果の一例を示す。(a)は上述の紫外線写真により自動車模型表面に取り付けたミニタフトを撮影したもので細いタフトの動きが鮮明に可視化されている。(b)はフラッドランプを用いた通常の写真撮影による可視化結果でミニタフトはその存在をほとんど確認することができず、紫外線を用いた蛍光ミニタフト法の有効性が十分に認められる。

Fig.2 Transmittance curve for excitation filter and barrier filter

(a) Ultraviolet photography

(b) Normal photography

Fig.3 Effect of excitation

Table 1 Comparison of tuft

Tuft	Traditional-tuft		Mini-tuft
Material	Embroidery thread	Woolen yarn	Nylon monofilament
Diameter	0.4~0.9mm	1.2~3.2mm	0.01~0.03mm

Table 2 Condition of visualization

Model	3-D Vehicle	2-D Vehicle	Centrifugal Blower	Model	3-D Vehicle	2-D Vehicle	C. Blower
Size	Length : 206mm	: 228mm	Impeller diameter : 105mm	Mini-tuft	Diameter : 0.03mm	: 0.03mm	: 0.03mm
	Height : 69mm	: 67mm		Length : ~8mm	: ~15mm	: ~3.3mm	
	Width : 80.5mm	: 400mm		Film	ASA 400	ASA 1600	ASA 400
Fluid	Air			Camera	35mm Leica size camera		
Apparatus	Göttingen type wind tunnel		High speed blower	Conditions	F8, 1/60s	F5.6, 1/30s	F11, 1/60s
	Test section:400mm×400mm×900mm		Inlet diameter:30mm	Illuminator	U V Flash lamp		
Velocity	27.5m/s	25 m/s	45m/s	Flash time : 5/100s , Power : 2000joule/Lamp			
Re	1.83×10 ⁵	1.01×10 ⁵	9.3×10 ⁴	Sensitization	× 3	× 1	× 3

3. 適用例

上述の蛍光ミニタフト法を自動車模型まわりの流れおよび小型プロア流入口付近の流れに適用した。

3.1 自動車模型表面周辺の流れ 自動車模型まわりの流れを表面タフト法で可視化した。実験に用いた供試模型は実車の1/20の精巧な乗用車模型で、力の測定を併せて行なうため車体をバルサ材で作り重量を軽くしてある。模型には底面と一方の側面を除く模型表面上に10 mm × 10 mmの格子を描きその格子点上に360本のミニタフトを配置した。ミニタフトはビニール系接着剤をシンナーで希釈した液を用いて模型の表面に接着してある。このタフト取付け部の接着剤の厚みはミニタフトの d の約1/3で取付け部が表面付近の流れに与える影響が小さくなるよう考慮している。ミニタフトはナイロン製であるため静電気を帯びて供試体の表面に付着することがある。したがって実験開始前に市販の静電気防止器で静電気を除去している。図4に自動車模型の表面付近の流れの可視化結果を示す。(a)は偏揺角 $\theta = 0^\circ$ 、(b)は $\theta = 15^\circ$ の場合で、ボンネットの終端やリヤウィンド付近で流れの剥離が生じていること、流れに対する車の姿勢角により車の表面付近の流れが著しく異なることが観察される。蛍光ミニタフトによる可視化は力の測定や圧力の測定と併行して行なっても、これらの測定にほとんど影響を与えないことも特徴としてあげられる。図5に表面にミニタフトを取付けた場合とミニタフトのない場合の力の測定に及ぼす影響を示す。風洞測定部は600mm × 600mm × 1200mmで、主流の速度は30m/sである。供試体のうける空気力は約70gと小さいものであるにもかかわらず、抗力係数 C にはミニタフトの有無による差はほとんど認められず力の測定に及ぼす影響が極めて小さいことが分かる。

3.2 二次元車体まわりの流れ タフトグリッド法により二次元車体まわりの流れを可視化した。実験に用いた供試模型は二次元の車体模型で全長228mmである。供試体が二次元であることから、図6に示すように供試体まわりに二つのタフトグリッド面の流れと平行に25mmの間隔で構成したタフト同士の干渉の影響を減少させている。タフト取付け糸は0.5mmφのナイロン製の糸で、ミニタフトはこの取付け糸に接着した。ミニタフトのタフトグリッド面内での配置は車体近傍では密に車体から離れた場所では粗くなるよう配置してある。図7に可視化結果を図8に同一

(a) $\theta = 0 \text{ deg.}$

(b) $\theta = 15 \text{ deg.}$

Fig.4 Example of fluorescent minitufts on surface of a vehicle model

Fig.5 Effect of minitufts on a vehicle model

Fig.6 Arrangement of minituft-grids around a two-dimensional vehicle model

形状の車体まわりの流れを $k-\epsilon$ モデルで数値計算し時間平均の流れ方向として表示した結果を示す⁵⁾。数値シミュレーション結果は車体背後のウェーク部を含め流れ場を定性的によく表現していることが検証される。

3.3 高回転・小型プロア入口付近の流れ 図9に示す遠心式高回転小型プロアの流入口付近の流れをミニタフトで可視化した。ミニタフトはプロア入口に約 120° ごとに配置した太さ 0.8mm の金属製のタフトスティック先端に取付けられる。タフトスティック先端位置は羽根車底面からの高さが $H=4\text{mm}, 6\text{mm}, 8\text{mm}$ である。図10に 25000rpm で高速回転するプロア入口付近で、流れが羽根車へ流入する様子を可視化した例を示す。流入口から羽根車へ流入する流れの角度が観察される。この可視化方法を用いて羽根の入口角度等に検討が加えられた。

4. まとめ

小さな模型、狭い領域に対して直径 0.03mm のミニタフトを使用し、流れ方向の可視化を試みた。特に、(1) 供試体に大量のミニタフトを取付けても力の測定や圧力の測定に与える影響は少なく可視化実験を併せて行なうことができること、(2) タフトグリッドにより流れ方向、断面内の流向分布を観察することが可能であることを示した。一方、この方法の問題点としては強力な紫外線光源を必要とすること、低速域での可視化では静電気の影響を無視できなくなることなどがあげられる。

本研究にあたり蛍光写真法に関して航空宇宙技術研究所石田洋治室長、野口正芳技官、東京大学生産技術研究所岡宮誠一技官の助力を得た。タフト材の提供を 東レ(株)水品正博氏より受けた。記して謝意を表する。

参考文献

1. 小林, 流れの可視化とコンピュータ, 機械学会第129回講習会(1985, 2), 93.
2. 浅沼 編, 流れの可視化ハンドブック, 浅倉書店(1977).
3. Crowder, J.P., et.al., Selected wind tunnel testing techniques at the Boeing aerodynamics laboratory, AIAA paper 80-0458(1980), 262.
4. Ultraviolet and fluorescence photography, Kodak technical information M-27(1981), 12.
5. 小林, 諸岡, $k-\epsilon$ モデルを用いての二次元車体まわりの乱流予測, 機械学会論文集 B 51-466(1985, 6), 1962.

Fig.7 A typical example of fluorescent minitufts around a two-dimensional vehicle model

Fig.8 Numerical simulation of the flow direction around a two-dimensional vehicle model ($k-\epsilon$ Model)

Fig.9 Arrangement of tuft sticks for inlet flow visualization of a blower

Fig.10 Example of fluorescent minitufts in high speed centrifugal blower