

温度による粘度変化を補正した油膜干渉法

栗田 充, 飯島秀俊
宇宙航空研究開発機構

Oil-film interferometry using correction for variation of oil-viscosity with temperature

by

Mitsuru Kurita, Hidetoshi Iijima (JAXA)

Abstract

This paper describes a method to improve accuracy of quantitative local skin friction measurement by oil-film interferometry in a wind tunnel testing. The proposed method has a correction for variation of oil-viscosity with temperature. In order to validate the proposed method, the method is applied to a flat plate test model in a low speed wind tunnel and is compared to other conventional local skin friction measurement methods. As the result, the proposed method successfully improves accuracy of the oil-film interferometry for the local skin friction measurement.

1. はじめに

空気抵抗を低減させ、燃費の良い航空機を開発する技術の獲得は、我が国の航空機開発における国際競争力確保において重要である。原油価格が高騰し環境への意識が高まる中、空気抵抗低減技術は益々重要な意味を持つ。

これからの航空機の機体設計は、従来のトータルの空気抵抗での評価ではなく、各抵抗成分(Profile Drag, Induced Drag, Wave Drag)の発生をコントロールする周到な設計技術が必須になると考えられる。旅客機は、全抵抗の内、表面摩擦抵抗の占める割合が最も高い¹⁾。そのため、最も低減を効率良く下げる方法のひとつは表面摩擦抵抗を低減させることである。

表面摩擦抵抗を低減させるためには、まずは表面摩擦抵抗を調べるための計測技術が必要である。しかし、表面摩擦抵抗は風洞計測の中で最も難しい計測項目のひとつであり、世界的に見ても計測技術が成熟しているとは言えない。

本研究は、風洞模型の表面摩擦抵抗を定量的に計測する手法の開発を目的としている。ここでは、オイルフロー法を基礎技術とした油膜干渉法を使用する²⁻⁶⁾。油膜干渉法は、複雑な装置を必要とせず、カメラ撮影及び照明が可能な範囲であれば模型の任意の位置に適用できるため広く使用されている表面摩擦抵抗計測手法のひとつである。しかし、オイルの温度による粘度変化により大きな計測誤差が生じるという課題がある²⁾。そこで、本研究は、油膜干渉法のオイル膜厚が非常に薄いことから、オイル温度がオイル塗布面の模型表面温度と等しいと仮定した上で、オイル塗布面の模型表面温度を非接触のIR温度計で計測することにより、オイルの温度による粘度変化の影響を補正する手法を提案する。本手法の検証のため、平板模型による風洞試験を実施する。ここでは、本研究で提案する温度補正を加えた油膜干渉法による局所表面摩擦抵抗計測データを他の手法による局所

表面摩擦抵抗計測データと比較することにより、本研究の手法の妥当性を確認する。

2. 温度による粘度変化を補正した油膜干渉法

2-1 油膜干渉法

模型表面に塗布されたオイルは表面摩擦力によって流され、オイルの厚みは時間とともに減少していく。油膜干渉法はこの原理を利用して表面摩擦抵抗係数 C_f を次式から算出する²⁾。

$$C_f = \frac{\tau}{q_\infty} = \frac{(2n_0/\lambda)\cos(\theta_r)(\Delta s_{n+1}-\Delta s_n)}{\int_{t_n}^{t_{n+1}}(q_\infty/\mu)dt} \quad (1)$$

ここで、 τ は表面摩擦力、 n_0 はオイル屈折率、 θ_r はオイル屈折角、 λ は光源の波長、 Δs は干渉縞の間隔、 q_∞ は主流動圧、 μ はオイルの粘性係数であり温度に依存する。添え字 n 、 $n+1$ は、計測の順番を示しており、計測時刻 t と Δs が対応する。

2-2 干渉縞の間隔

干渉縞の間隔は通風中に計測した画像データから求める。

まず、画像の干渉縞部分の輝度データを抽出する。この際、ノイズ低減のために一定ピクセル幅の輝度データを抽出し平均化する。

次に、画像から抽出した干渉縞の波形データの極大位置及び極小位置から干渉縞の間隔を求める。ここでは波形データを部分的に切り出したうえで、2次曲線によって近似することで極大及び極小のピクセル位置を算出する。

2-3 温度を考慮したオイルの粘性係数

各温度におけるシリコンオイルの動粘度は信越化学工業社のカタログに示されている次式から求める⁷⁾。 ν_{7T} は T °C、 ν_{25} は25°C (298.15K)における動粘度である。なお、オイル密度は0°Cと50°Cのオイルの比重から線形内装により求め、また、オイル屈折率は $n_0 = 1.402$ の一

定とする⁷⁾。

$$\log_{10} \nu_T = \frac{763.1}{273.15+T} - 2.559 + \log_{10} \nu_{25} \quad (2)$$

3. 実験装置

3-1 風洞

風洞はJAXAの研究用の低速風洞を使用した。吹き出し口は304 mm×304 mmである。

3-2 模型

模型はピトーレイク計測やプレストン管計測等、油膜干渉法以外にも比較のための局所摩擦抵抗計測手法が存在する平板模型を使用する。模型は第1図に示す幅304 mm×長さ約800 mm×厚み10 mmの平板である。材質はアルミ合金であり、先端断面は半円形になっている。境界層の乱流遷移を促進させるため、平板模型の前縁部にカーボランダムによるラフネスを設置している。平板模型は風洞の左右の黒色の側壁により水平に支えられており、模型の上下は解放されている。風速は41.5 m/s とした。

模型には試験面として50 mm×50 mmのアルミ合金のプレートが埋め込んである(ここでは試験プレートと呼ぶ)。試験プレートの裏側(模型内部)には電気ヒータが設置されており、T型熱電対で温度を計測しながら試験プレートを最高約40℃(約313 K)まで任意の温度に設定できる。

油膜干渉法で明確な干渉縞を観測するためには、鏡面の模型表面が必要である。しかし、アルミ合金は、表面に付着する薄い酸化被膜のため、干渉縞を観測することが難しい。そこで、本研究では試験プレート表面にクリアコートを塗装することにより試験プレート表面を鏡面化している。

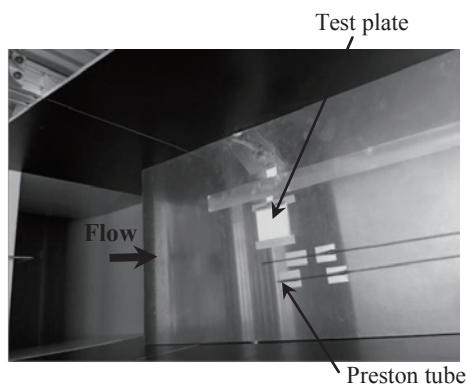
3-3 オイル

オイルは信越化学工業社の透明なシリコンオイルKF-96-50csを使用する。25℃でのオイルの動粘度は50 mm²/sである。干渉縞はオイル厚みが薄くないと観測できない。そのため、オイルは模型表面に小型のヘラで微量のみを局所的に塗布する。なお、本研究で干渉縞を観測できるのは風洞を起動し気流が十分に静定した後からである。

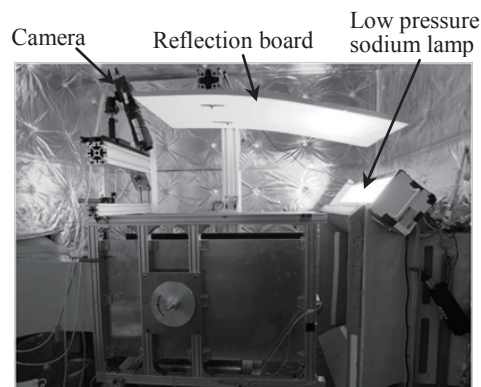
3-4 画像計測システム

油膜干渉法の画像計測システムを第2図に示す。画像計測システムは干渉縞を発生させるための光源と干渉縞を計測するためのカメラで構成される。

光源は発光波長約590 nmの低圧ナトリウムランプを使用する。また、模型の広範囲を照射できるように風洞上に反射板を設置している。カメラはAllied Vision Technologies社のProsilica GX6600モノクロカメラである。画像データの階調は14 bitとする。カメラの画素数は6576×4384である。油膜干渉法は、画像に写った干渉縞



第1図 平板模型



(a) 光学計測システム



(b) IR温度計

第2図 油膜干渉法の光学計測システム

の間隔から表面摩擦抵抗を計測するため、計測精度の確保には高い空間解像度を持つカメラが有利である。ズーム撮影のために接写リングを介した焦点距離180 mmのレンズを使用する。レンズのしぼりは11である。また、低圧ナトリウムランプ以外の光を入射させないようにするため、低圧ナトリウムランプの波長と同じ590 nmのバンドパスフィルタをレンズに設置して撮影を行う。

3-5 IR温度計

IR温度計は第2図に示すRaytek社のMX2を使用し、シリコンオイルが塗布された試験プレートの表面温度を真上から非接触で計測する。

クリアコートが塗布された試験プレートの放射率は不明なので、IR温度計が示す値は仮設定された放射率（今回は $\epsilon = 0.78$ に設定）での温度であり正確な温度ではない。そこで、試験プレートにおけるIR温度計データとT型熱電対温度計データの関係からIR温度計の較正を行う。

4. 油膜干渉法との比較データ

4-1 境界層速度分布の計測

試験面上流が乱流境界層であることを確認するために、第3図に示すピトーレイクにより境界層内の速度分布を計測する。

まず、ピトーレイク計測データから、境界層厚さ δ 、排除厚さ δ_1 、運動量厚さ δ_2 、消散エネルギー厚さ δ_3 、形状係数 H_{12} 及び H_{32} を求める^{8), 10)}。

$$\delta_1 = \int_0^\delta \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (3)$$

$$\delta_2 = \int_0^\delta \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (4)$$

$$\delta_3 = \int_0^\delta \frac{u^3}{U^3} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad (5)$$

$$H_{12} = \frac{\delta_1}{\delta_2}, \quad H_{32} = \frac{\delta_3}{\delta_2} \quad (6)$$

4-2 ピトーレイクによる局所表面摩擦抵抗計測

油膜干渉法のデータと比較するために、ピトーレイクによる局所表面摩擦抵抗計測を行う。ここでは一般に使用される式(7)のKármán-Schoenherrの方法と式(8)のLudwig-Tillmannの方法を使用する⁸⁾。

$$\frac{1}{C_f} = 17.08(\log_{10} Re_{\delta_2})^2 + 25.11 \log_{10} Re_{\delta_2} + 6.012 \quad (7)$$

$$C_f = 0.246 \cdot 10^{-0.678 H_{12} Re_{\delta_2}^{-0.268}} \quad (8)$$

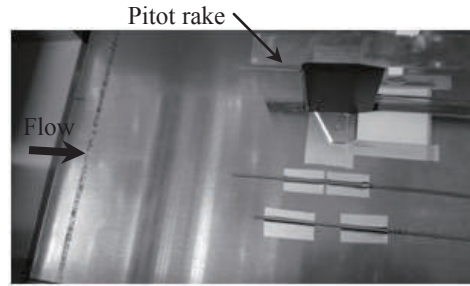
4-3 プレストン管による局所表面摩擦抵抗計測

油膜干渉法のデータと比較するために、第1図のプレストン管による局所表面摩擦抵抗計測も同時に行う。プレストン管は外径 $D = \phi 1.59 \text{ mm}$ のステンレス管である。静圧は主流方向においてプレストン管と同位置に、先端を止めて横側に小孔を設けた同じ外径のステンレス管により計測している。

プレストン管による局所表面摩擦抵抗は次式のPatelの方法から求める^{8), 9)}。ここでは、計測結果から $x^* = 6$ 程度であったため、完全乱流領域 ($5.6 < x^* < 7.6$) の式を使用している。

$$x^* = y^* + 2 \log_{10}(1.95y^* + 4.10),$$

$$x^* = \log_{10} \left(\frac{\Delta p D^2}{4\rho v^2} \right), \quad y^* = \log_{10} \left(\frac{\tau D^2}{4\rho v^2} \right) \quad (9)$$



第3図 ピトーレイク計測

5. 結果

5-1 境界層

試験プレートの境界層は、ピトーレイクでの計測結果から乱流であると判断した。これは、一般的に乱流境界層における形状係数は $H_{12} =$ 約1.4（この場合 $H_{32} =$ 約1.73）であり^{8), 10)}、今回の流れ場は第1表に示すように形状係数が数%以内の差でほぼ一致しているためである。

5-2 温度による粘度変化を補正した油膜干渉法

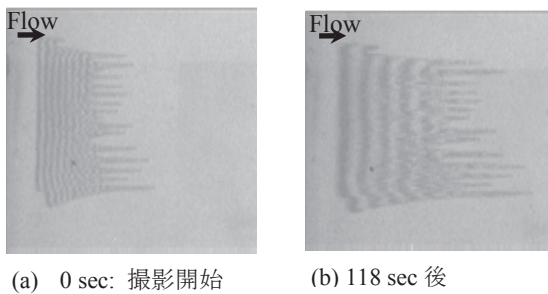
油膜干渉法における画像の例を第4図に示す。時間の経過とともに油膜厚さが薄くなり干渉縞の間隔が大きくなっていることが観察できる。

油膜干渉法で計測した局所の表面摩擦抵抗を第5図にKármán-Schoenherrの方法及びLudwig-Tillmannの方法並びにプレストン管の計測結果とともに示す。試験面のアルミプレートの温度は約15℃～約40℃（約288 K～約313 K）の範囲で変化させている。なお、オイルの温度による粘度変化の補正を適用しない場合のオイル温度は25℃（298.15 K）一定としている。

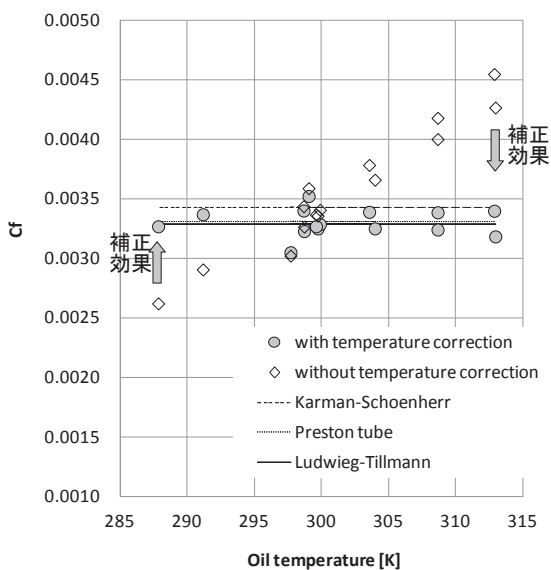
第5図のピトーレイク計測によるKármán-Schoenherrの方法及びLudwig-Tillmannの方法並びにプレストン管計測で得た局所の表面摩擦抵抗係数はほぼ同じ値を示すことから、本風洞試験での試験プレートにおける局所の表面摩擦抵抗係数はこれらが示す値の範囲にある。

第1表 境界層の状態

項目	試験面上流	試験面
排除厚さ δ_1 mm	1.12	1.37
運動量厚さ δ_2 mm	0.781	0.968
消散エネルギー厚さ δ_3 mm	1.40	1.74
形状係数 H_{12}	1.44	1.41
形状係数 H_{32}	1.80	1.79
運動量厚さでのレイノルズ数 Re_{δ_2}	2.17×10^3	2.63×10^3



第4図 油膜干渉法の計測画像



第5図 温度による粘度変化補正の効果

これに対し、油膜干渉法では、オイル温度を25℃(298.15K)の一定とすると、オイルの温度が低い場合、オイルの粘度が大きくなりオイル膜厚変化が小さくなるためにより小さい局所表面摩擦抵抗として計測されている。反対に、オイルの温度が高い場合、オイルの粘度が小さくなりオイル膜厚変化が大きくなるためにより大きい局所表面摩擦抵抗として計測されている。一方、オイル温度による粘度変化を考慮して補正した場合、油膜干渉法は全ての温度範囲においてKármán-Schoenherrの方法、Ludwig-Tillmannの方法及びプレストン管計測による局所の表面摩擦抵抗係数の値とほぼ一致する。

以上から本手法は、一般的な低速風洞における広い温度範囲(本研究では約15℃～約40℃で確認)で油膜干渉法の計測精度向上に効果的である。さらに、複雑な装置を必要とせず簡単に適用できることも有利な点である。

6. 結論

本研究は、IR温度計でオイル塗布面の模型表面温度を計測してオイルの温度による粘度変化を補正することで油膜干渉法の計測精度を向上させる手法を開発した。

本手法は、一般的な低速風洞における広い温度範囲(本研究では約15℃～約40℃で確認)で油膜干渉法の計測精度向上に効果的である。また、複雑な装置を必要とせず簡単に適用できることも有利な点である。

謝辞

本研究の遂行において多大なご協力をいただいた、JAXAの浜本 滋氏、加藤裕之氏、中北和之氏、満尾和徳氏、渡辺重哉氏に感謝します。

参考文献

- 1) Szodrach, J., “Viscous Drag Reduction on Transport Aircraft,” AIAA Paper-91-0685, 1991.
- 2) Driver, D. M., and Drake, A., “Skin-Friction Measurements Using Oil-Film Interferometry in NASA’s 11-Foot Transonic Wind Tunnel,” *AIAA Journal*, Vol. 46, No. 10, pp. 2401-2407, 2008.
- 3) Naughton, W. J., and Sheplak, M., “Modern Developments in Shear-Stress Measurement,” *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 38, pp. 515-570, 2002.
- 4) 飯島秀俊, 栗田充, 満尾和徳, Henny Bottini, 深湯康二: オイルを用いた表面摩擦抵抗計測について, 日本航空宇宙学会北部支部2015年講演会, 2015.
- 5) Bottini, H., Kurita M., Iijima, H., Fukagata, K., “Effects of Wall Temperature on Skin-Friction Measurements by Oil-Film Interferometry,” *Measurement Science and Technology*, Vol. 26, 2015.
- 6) Squire, L. C., “The motion of a thin oil sheet under the steady boundary layer on a body,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 11, pp. 161-179, 1961.
- 7) 信越化学工業株式会社, “シリコンオイル KF-96 性能試験結果,” https://www.silicone.jp/catalog/pdf/kf96_j.pdf
- 8) 中村育雄, 大坂英雄: 工学系流体力学, 共立出版株式会社, 1997.
- 9) Patel, V. C., “Calibration of the Preston Tube and Limitations on its Use in Pressure Gradients,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 23, Part 1, pp. 185-208, 1965.
- 10) Schlichting, H., “Boundary-Layer Theory Seventh Edition,” McGRAW-HILL BOOK COMPANY, 1979.