

ISSN 0452-2982

UDC 533.6.011.3

533.6.04

533.6.69

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-679

遷音速における二次元LFC翼の感温液晶による 遷移点の可視化試験

野口正芳・石田洋治・須谷記和
佐藤衛・神田宏

1995年3月

航空宇宙技術研究所

NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

遷音速における二次元LFC翼の感温液晶による 遷移点の可視化試験*

野口正芳*¹ 石田洋治*¹ 須谷記和*¹
佐藤衛*¹ 神田宏*¹

Measurement of the boundary layer transition point over a 2-D LFC airfoil in transonic flow using liquid crystals

Masayoshi NOGUCHI*¹, Yoji ISHIDA*¹, Norikazu SUDANI*¹
Mamoru SATO*¹, Hiroshi KANDA*¹

ABSTRACT

In the study of laminar-flow-control airfoils, accurate measurement of the boundary layer transition point over the airfoil is quite important to deepen our understanding of its drag characteristics. Flow visualization using temperature-sensing liquid crystals is one of the most useful techniques for detecting the transition point. However, there are some inherent difficulties in its practical applications for wind tunnel testings: mismatching between the airfoil surface temperature and the liquid crystals temperature range is the one we encountered in the present blowdown wind tunnel test. With great effort to avoid mismatching, we used it to measure the transition points of a two-dimensional hybrid laminar-flow-control airfoil in high subsonic, high Reynolds number flow at the NAL 2-D wind tunnel.

In the present paper, we describe the results of the test showing a way to avoid the temperature range mismatching with stagnation temperature in the blowdown wind tunnel test.

Keywords : Aerodynamics, HLFC Airfoil, Flow visualization, Transition point, Liquid crystals.

概 要

層流制御翼の研究において環境層遷移点を正確に知ることは、その抵抗特性に対する理解を深めるために必要不可欠である。感温液晶による流れの可視化は遷移点測定法として非常に有効な方法であるが、その実際の応用に際しては、幾つかの困難がある。翼表面の温度と用いた感温塗料の発色温度の不一致は、我々が航技研二次元風洞における二次元ハイブリッド層流制御(HLFC)翼の試験において経験した困難の一つである。本報告ではこのような温度の不一致を避ける有効な方法について検討し、集合胴温度の情報が感温液晶の選択において有意義な情報であることを示すとともに、得られた遷移点位置の結果を、ウェーク抵抗の測定結果と関連づけて論じる。

1. はじめに

我々は平成元年度以来、高亜音速、高レイノルズ数流れにおいて二次元ハイブリッド層流制御(HLFC)翼の吸い込み特性風洞試験を実施してきた¹⁾²⁾。しかしながら、

* 平成7年1月9日受付(received 9 January 1995)
* 1 空力性能部(Aircraft Aerodynamics Division)

これらの研究では境界層の遷移位置の測定を行わなかったため、吸い込みあり、なしの様々な抵抗データの特徴ある特性について、十分な解析ができなかった。また文献2では数値解析を行ったがその精度の詳細な検証ができなかった。このように層流制御の研究において遷移点を正確に知ることは、HLFC翼の抵抗特性を正しく、かつ深く理解するために、また実験研究と平行に進められている理論的研究の精度を検証するために必要不可欠である。

我々は遷移点の可視化法として低速ではチャイナクレイ法を用いたが、高亜音速流ではチャイナクレイ法は、境界層が薄くなって溶剤の乾燥が早くなり、層流域と乱流域の区別が明瞭に出にくい、などの困難を持つため、余り使われていない。そこで我々は近年良く使われている感温液晶法による遷移点の可視化法を試みた。

感温液晶法は、液状の溶剤を直接試験に使用するのはなく、翼面に塗布した後十分に乾燥させて使用すると気流によって飛ばされることはない。そのためウェークトラバース法による抵抗測定が遷移点の可視化試験と同時に行えること、一度の塗布で何回でも試験が可能であることなどの利点があり、本研究においてもその利点が確認された。

本報告は、今回行った感温液晶による遷移点の可視化試験の方法のいくつかの改良点と、その方法により得られたHLFC翼の高亜音速、高レイノルズ数における遷移位置について報告するとともに、文献1で示した抵抗データの特徴について若干の検討を行った。

2. 記号

- C : 翼弦長
 C_D : ウェーク抵抗(測定値)

- C_Q : 吸い込み流量係数
 M_∞ : 一様流のマッハ数
 R_c : レイノルズ数(翼弦長基準)
 T : 温度(°C)
 T_0 : 集合胴温度(°C)
 t : 通風経過時間(秒)
 U_∞ : 一様流の速度
 V_w : 吸い込み速度
 X : 翼の前縁からの距離
 X_{tr} : 遷移位置
 α : 迎角(°)
 ρ_w : 翼表面における空気密度
 ρ_∞ : 一様流の空気密度

3. 実験

本試験は前報¹⁾と同時に航空宇宙技術研究所の二次元高レイノルズ数風洞²⁾を使用して行った。この風洞は加圧型の吹き出し式風洞である。測定部の断面は、幅30cm、高さ1mである。試験可能なマッハ数は0.2~1.2であり、プリナム室を加圧することによりレイノルズ数は 40×10^6 まで実現可能である。図1に同風洞の概略図を示す。また同風洞の詳細な内容については、文献3を参照のこと。以下試験に使用した模型、感温液晶、測定法、試験範囲について述べる。

3.1 模型

試験は、文献1で報告した多溝表面模型を用いて行った。その模型の緒元と平面図を図2に示す。この模型の基本翼型としては、自然層流翼のNLAM78⁴⁾を使用している。模型の大きさは、弦長250mm、翼幅300mmである。模型の上表面は、弦長方向40%~80%、翼幅方向に

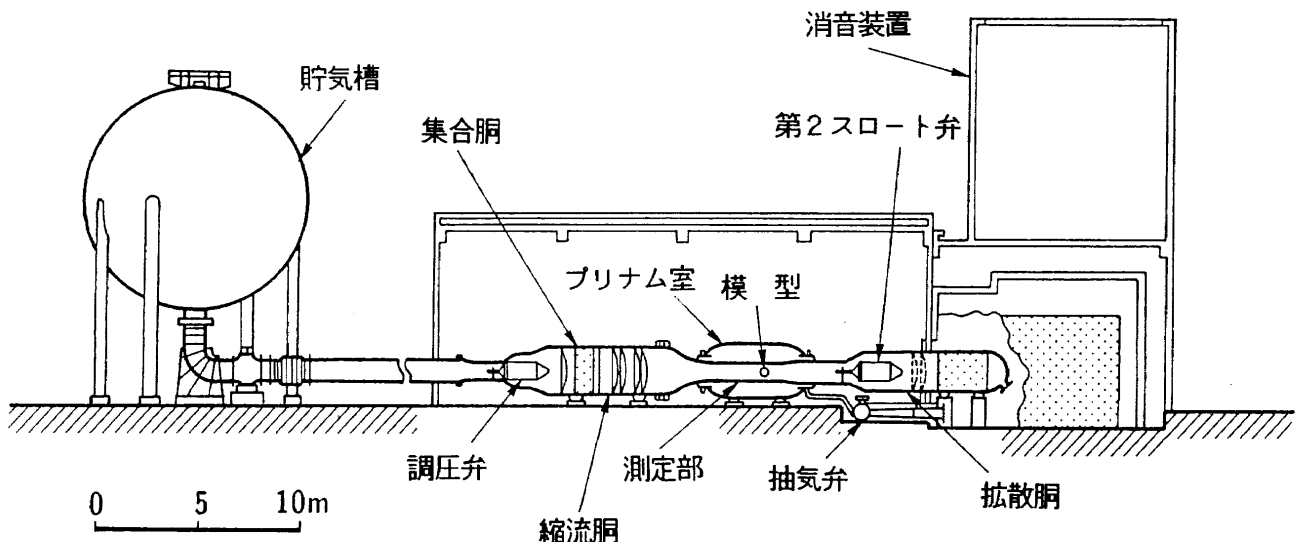


図1 二次元高レイノルズ数風洞

諸元
基本翼型：NLAM78 設計マッハ数：0.77 設計揚力係数：0.5

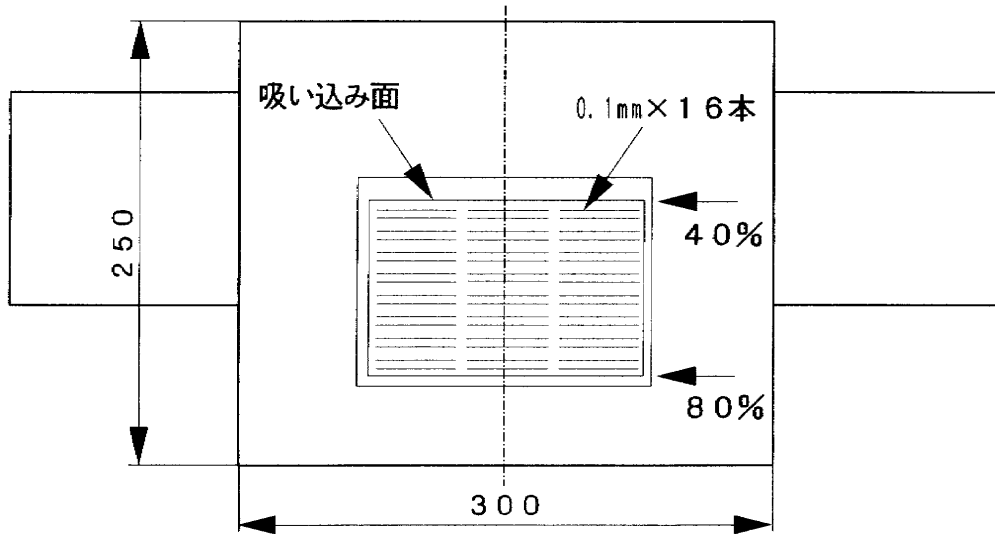


図2 多溝表面模型平面図

は中心線をはさんで±75mmの範囲を吸い込み表面としてある。この吸い込み表面には、0.1mmの溝が弦長方向に5～7mmの間隔で16本開けられている。

3.2 試験で用いた感温液晶

試験で使用した感温液晶はコレステリック型液晶であり、他の化学物質からの汚染防止と事後の加工を容易にする目的でポリマー皮膜によって粒子径10～20ミクロンのマイクロカプセルに封入されたものである。

コレステリック型液晶は、分子の各層内で分子の長軸が一方向に配列しているが、その向きは各層ごとに少しずつねじれて螺旋構造に成っている。その螺旋構造のピッチの間隔は温度によって可逆的に変化する。通常螺旋ピッチは温度の上昇によって小さくなり、反射光の波長が短波長の方に移行する。反射光の波長が可視化光のときには赤・橙・黄・緑・青・紫と色彩を示す。温度の変化の範囲は、複数の液晶を配合することによって定めることができる⁵⁾⁶⁾。

3.2.1 感温液晶の発色温度の選定

今回用いた感温液晶の発色中心温度は、吸い込みのない試験では14℃、吸い込みを行った試験では20℃である。このように発色温度が異なるのは試験を行った時期が違うからである。即ち発色温度の選定にあたっては、通風中の模型表面温度とほぼ等しい集合胴温度の推定が必要であるが試験に使用した二次元風洞は、吹き出し式風洞であり集合胴温度制御は行っていないため集合胴温度は、試験を行う時期の気温によって左右されるからである。本試験時期の気温を予測するにあたり前年度の風洞試験

記録と試験日3週間前から気温の調査を行ない上記の温度を選んだ。なおこの感温液晶は温度の上昇とともに赤→緑→青と変化する。今回使用した感温液晶の発色中心温度では緑色を示し、発色温度幅は±1.25℃のものである。

3.2.2 感温液晶の使用方法

選択した感温液晶を試験で使用するに当り次の順序で模型表面に塗布を行った。

- ①模型表面の清掃：模型表面に付着している油、ゴミ等の除去のために清掃を行った。
- ②黒色つやけし塗料の吹き付け：黒色つやけし塗料を塗布する目的は、感温液晶の接着力が弱いため塗布する模型表面に細かい凹凸を設け接着力を増すこと、また発色機構が特定波長の選択反射によるものであり塗布面の背景は黒色にする必要があるためである。この黒色つやけし塗料の吹き付け作業には、スプレーを使用し塗装厚が均一かつ薄くなるように塗布した。
- ③黒色つやけし塗料の乾燥：塗装内部まで乾燥させるために約12時間自然乾燥を行った。
- ④感温液晶の吹き付け：感温液晶を蒸留水で1対1の割合で希釈した液をノズル径が0.4mmφのスプレーを用いて模型表面から約40cm離れた位置から薄く均一に模型表面に塗布した。またこの作業は、一度に指定量を塗布するのではなく8回に分けて行った。今回使用した感温液晶の量は、合計で20ccであり模型の上面のみ塗布した。
- ⑤感温液晶の乾燥：感温液晶の内部まで乾燥させるために約24時間自然乾燥を行った。

⑥感温液晶面の研磨：感温液晶を塗布した表面にはこまかい凹凸が有り、それを取り除くためにラッピングフィルム研磨材を用い、弦長方向に軽く時間をかけて研磨した。また模型表面にある吸い込み溝(0.1mm)が感温液晶によって塞がるような事はなかったが、吸い込み溝における液晶のつき方を均一にするため、模型内部から空気を吹き出しながらすきまゲージで清掃を行った。

通風中に、気流中の微小なゴミが特に前縁部に付着し、傷をつけるため、そのゴミの除去と感温液晶面にできる傷を取除くために上記の研磨材を用いて通風毎に磨いた。

試験終了後、模型表面の感温液晶をはがしマイクロメータで測定した結果、塗布厚さ(黒色つやけし塗料含む)は0.05mm程度であった。

3.3 測定法

図3-1に風洞測定部の模式図を示す。模型は、風洞中心位置にあるシュリレン観測用窓に取り付けられる。感温液晶による可視化のデータは、風洞測定部の上部にある可視化用窓から模型上面の感温液晶の塗布面の色変化をビデオカメラで記録することにより得られた。このビデオカメラは、プリナム室内が高圧になるため、圧力が大気圧とバランスされた耐压ケース内に納められている。

ウエーク抵抗の測定は、模型から模型弦長の約2倍の下流の位置にある後流測定レークを高さ方向に移動し静圧、総圧を計測する方法により行った。そのデータ処理には、同風洞の処理装置を使用した。その他に通風中の集合胴の温度変化のデータ収集も行った。

吸い込み試験では、模型表面からの吸い込みを行うために吸い込み特性試験(文献1)で使用したものとほぼ同様な吸い込み装置を使用した。異なる点は、流量制御弁の手前に外部から操作ができる電磁弁を設けたことである。この電磁弁を設けたことにより、風洞通風中に吸い込みのON/OFFが可能となり、ウエーク抵抗値の増減が

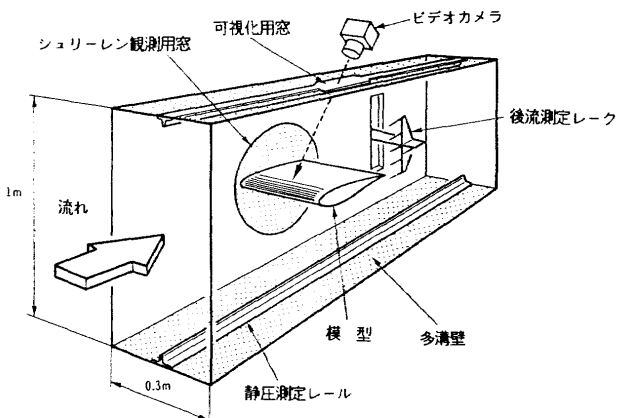


図3-1 風洞測定部 模式図

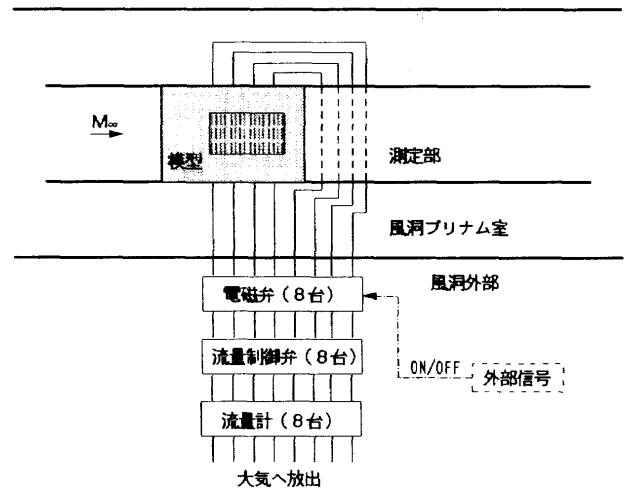


図3-2 吸い込み装置模式図

吸い込みによるためであることと、またその値の再現性の確認が可能となった。その吸い込み装置の模式図を図3-2に示す。文献1で述べたようにこの風洞は、加圧式風洞であり特別に真空ポンプ等の吸い込み装置を設けずとも模型表面(風洞測定部)と風洞外部との圧力差により吸い込みは可能であった。

3.4 試験条件

風洞試験は、吸い込み無しと吸い込み有りの二つの試験を行った。

吸い込み無しの試験では、次の条件に対して行った。

M_∞ : 0.6~0.77

R_c : $6 \times 10^6 \sim 20 \times 10^6$

α : $-1^\circ, 0^\circ, 1^\circ$

しかし感温液晶の可視化試験結果は、上記の全て範囲で得られたわけではなく主にマッハ数0.6から0.77、レイノルズ数 $6 \times 10^6 \sim 8 \times 10^6$ の範囲で得られた。ウエーク抵抗の測定は、文献1の吸い込み特性試験の結果と比較するためにマッハ数0.77でレイノルズ数 20×10^6 まで行った。

吸い込み有りの試験は、吸い込みによる効果を明らかにするために乱流くさびの発生が少なく、しかも遷移位置が吸い込み表面の境目である翼弦長40%附近にあるマッハ数0.7、レイノルズ数 7×10^6 の条件について主に行った。

4. 試験結果

4.1 可視化写真

今まで述べてきた感温液晶の可視化方法で得られた試験結果の一例であるビデオ写真を図4に示す。試験条件は、レイノルズ数 8×10^6 、迎角は -1° であり同図(a), (b), (c)はそれぞれマッハ数0.6, 0.7, 0.75のものである。

$$Rc = 8 \times 10^6 \quad \alpha = -1^\circ$$

$$M_\infty = 0.60$$

$$M_\infty = 0.70$$

$$M_\infty = 0.75$$

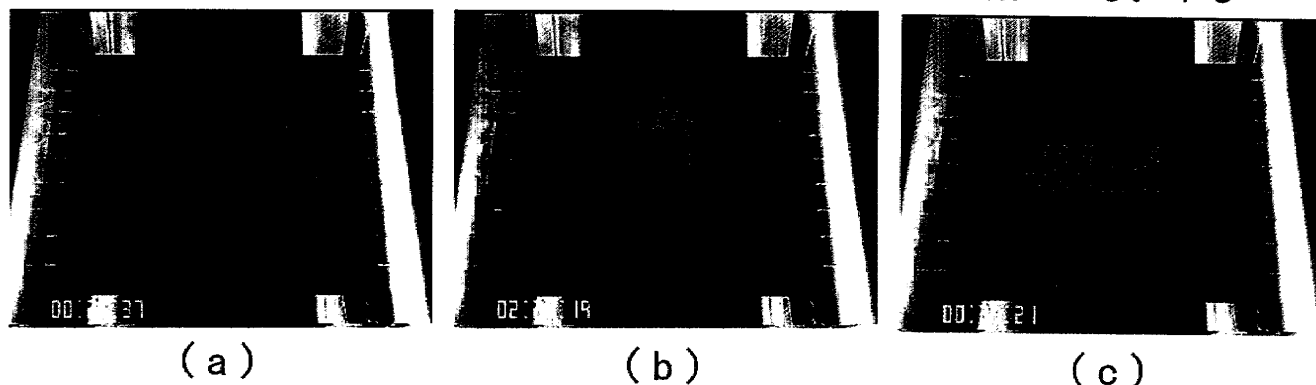


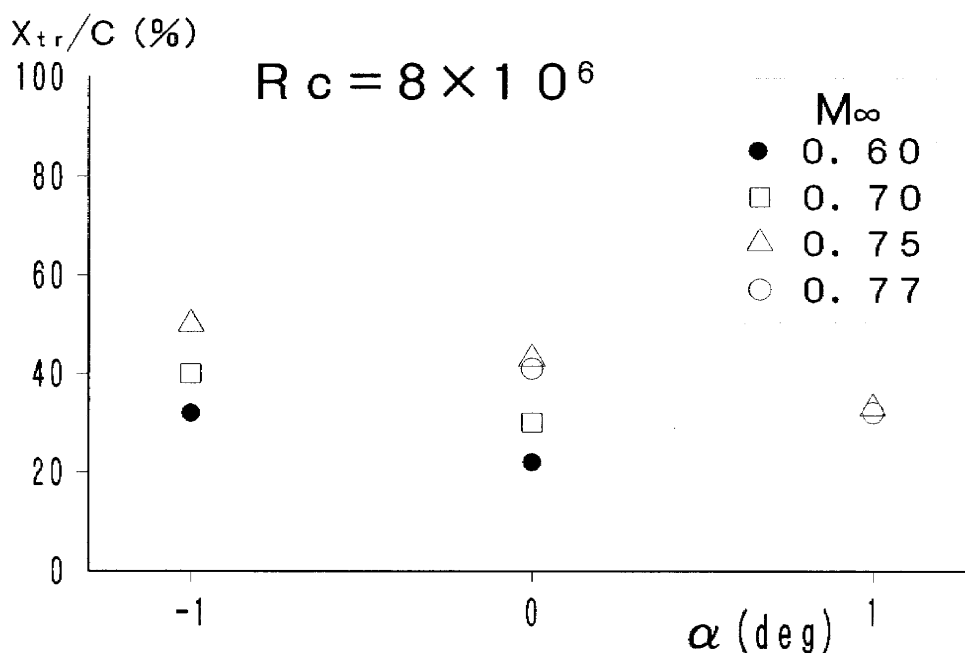
図4

同図の前縁部に青く見えるところが層流域であり、茶色に見えるところが温度が低く乱流域である。乱流域で温度が層流域より低くなっているのは、乱流混合による熱伝達が大きいため境界層外気流の温度(静温度)が模型表面温度より低いことによる影響を受け、液晶表面における温度が熱伝達の大い乱流域の方がより下がるためである。同図において各マッハ数共に前縁より乱流くさびの発生が認められる。またレイノルズ数 10×10^6 以上の試験では、感温液晶による可視化では遷移点の位置は判別できなかった。その理由は4.2項で述べる。

4.2 遷移位置とウェーク抵抗値の解析

図5-1, 2に感温液晶の可視化試験で確認された遷移位置を迎角 α について整理したグラフを示す。横軸に迎角,

縦軸は無次元遷移位置 X_{tr}/C を示してある。図5-1の試験条件は、レイノルズ数 8×10^6 、マッハ数0.6~0.77であり、図5-2はレイノルズ数 7×10^6 である。同図に示した遷移位置の判別は乱流くさびを除いた青色と茶色の境目とした。レイノルズ数 7×10^6 、 8×10^6 では遷移位置はほぼ同じであるが各迎角ともマッハ数が大きくなるにつれてむしろ遷移点が後退しているのがわかる。この現象は、図6(文献1より引用)に示すこの模型のレイノルズ数 8×10^6 でのウェーク抵抗の特性に対して明確な説明を与える。すなわちレイノルズ数 20×10^6 では、マッハ数が0.6から0.77までは抵抗はゆるやかな上昇を示しているが、一方レイノルズ数 8×10^6 では、それとは反対にマッハ数0.6から0.77までは下がる傾向がある。この特性は上述の翼模型の遷移位置の変化(後退)によるものであるこ

図5-1 $X_{tr} \sim \alpha$

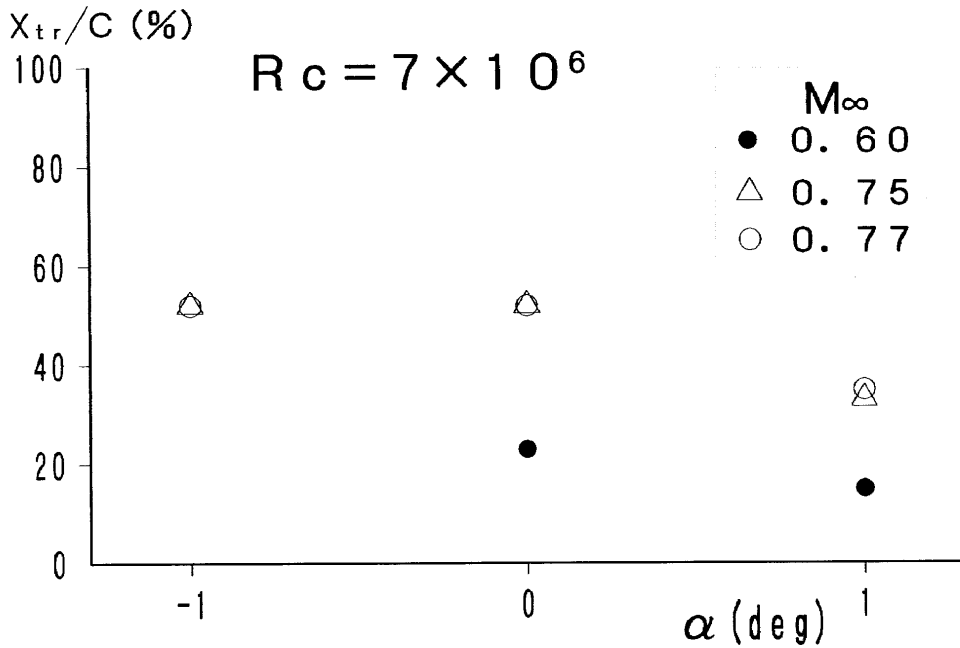


図5-2 $X_{tr} \sim \alpha$

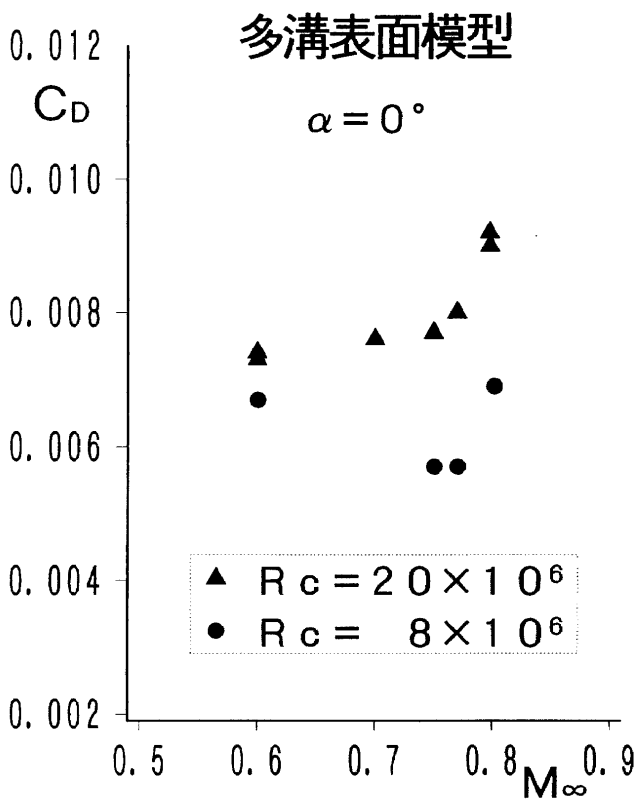


図6 $C_D \sim M_\infty$

とがわかった。

図7はウェーク抵抗係数のレイノルズ数効果を示したグラフである。縦軸はウェーク抵抗係数、横軸は翼弦長基準のレイノルズ数 R_c を示す。試験条件はマッハ数0.77、迎角 0° である。記号の▲は多溝表面模型、●は多溝表面模型の感温液晶を塗布した時のデータであり、○は固体表面模型のものである。なお固体表面模型は、表

面に静圧孔を設けたもので翼断面は多溝表面模型と全く同一であるが吸い込み表面を有していない。まず固体表面模型と多溝表面模型の液晶の無いウェーク抵抗係数を比較すると多溝表面模型は模型表面に吸い込み溝があるために若干値が大きく現れている。また多溝表面模型の感温液晶有り無しを比較すると塗布したその厚み分(厚さ約0.05mm)によりウェーク抵抗は大きくなることもこの図からわかる。また固体表面模型と多溝表面模型の感温液晶の無いデータでは、レイノルズ数 8×10^6 附近で同一のレイノルズ数に対するデータのバラツキが大きい。この現象はレイノルズ数 8×10^6 以上になると境界層が薄くなり、特に模型前縁部に付着する気流中の微小なゴミの付きかたとそのゴミの大きさの違いにより、乱流くさびの発生の仕方に違いが生じることによるものと考えられる。この原因を明らかにする事がこの感温液晶による可視化試験を実施した一つの大きな目的である。感温液晶を塗布したデータにも同様な特徴が現れている。同図中に示されている①~④のウェーク抵抗を測定した時、得られた可視化写真を図8に示す。この図の①~④は図7の①~④に対応している。同図①は、レイノルズ数 6×10^6 、②は 7×10^6 である。この①、②の可視化写真からは、顕著な乱流くさびの発生は見られない。従って抵抗値 C_D も低い。同図の③、④は同じレイノルズ数 8×10^6 の時の写真とそのスケッチである。レイノルズ数は同じであるがウェーク抵抗値が違っており、③の方が小さく($C_D = 0.0079$)、④の方が大きい($C_D = 0.0089$)。これは③では明瞭な乱流くさびが発生しているが、そこを除いては流れは吸い込み表面までは層流的であるのに対し、④では③より乱流くさびの発生が多く、全体的にはほぼ乱流

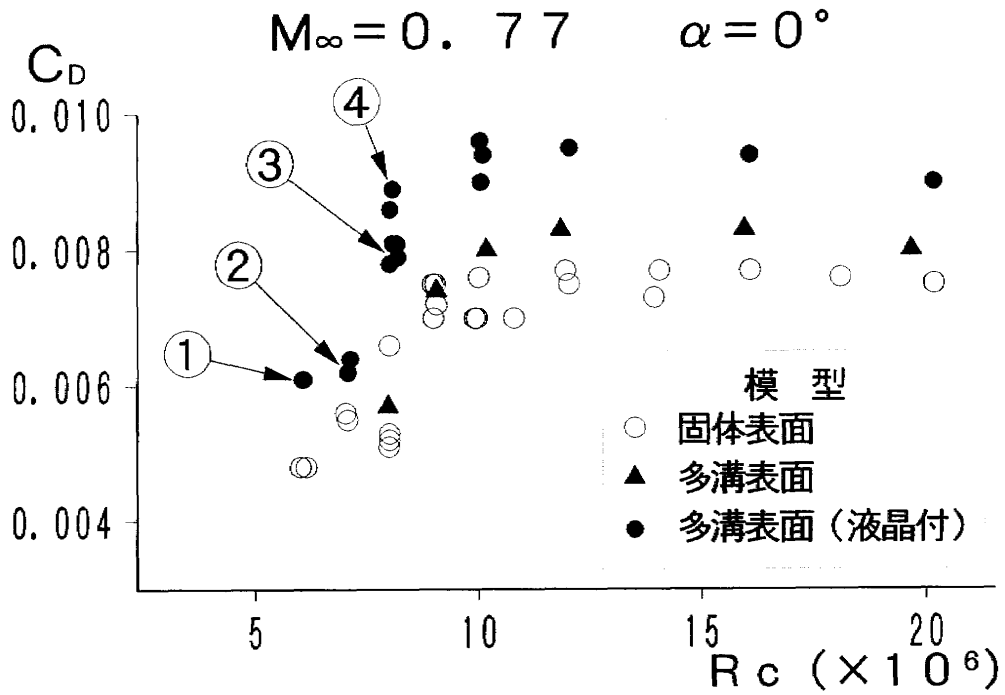


図7 $C_D \sim R_c$

$M_\infty = 0.77$ $\alpha = 0^\circ$

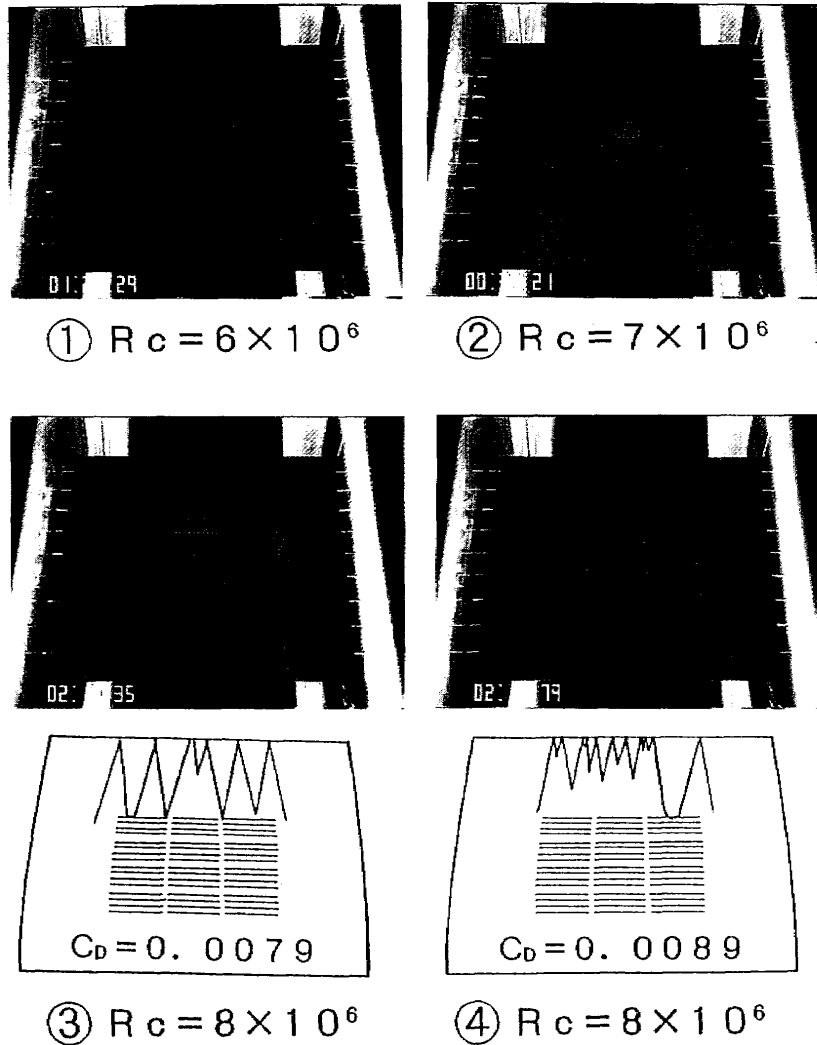


図8

的になっていることによるものと考えられる。このように乱流くさびの発生が試験ごとに違い、それがレイノルズ数 8×10^6 附近でのウェーク抵抗値のバラツキの主な原因であることが今回の試験からわかった。またレイノルズ数 10×10^6 以上になると試験を行った範囲の迎角 ($-1^\circ \sim 1^\circ$) ではすべて翼の前縁部の全スパンに渡り写真④より細かい間隔で乱流くさびの発生が多数確認され明確な遷移位置は判断できなかったが、遷移は前縁のごく近くで発生している。

4.3 吸い込み効果

図9は、感温液晶による可視化試験において吸い込みを行った場合のウェーク抵抗係数を示したものである。試験条件は、レイノルズ数 7×10^6 、マッハ数0.7、迎角は -1° と 0° である。縦軸にはウェーク抵抗係数、横軸には、吸い込み流量係数 C_q を示す。ここで C_q は

$$C_q = \int_{0.4}^{0.8} (\rho_w V_w / \rho_\infty U_\infty) d\left(\frac{x}{c}\right)$$

から計算した値である。この図に示されているウェーク抵抗係数は一通風時に吸い込みONからOFF、OFFからONを行った値も含まれている。この図から吸い込みによるウェーク抵抗の減少がわかる。

図10, 11に図9のウェーク抵抗値を測定した時の感温液晶による可視化試験のビデオ写真を示す。図10は迎角が -1° の場合でありビデオ写真とそのスケッチ図が示してある。同図(a)は吸い込みなしの場合で遷移位置46%弦長である。同図(b)は吸い込み流量制御弁全開で最大吸い込み ($C_q = 0.00067$) を行った場合であり遷移位置が51%弦長と後退が見られる。この遷移の後退はウェーク抵

抗値の吸い込みによる抵抗の減少 ($C_D = 0.00767 \rightarrow 0.00671$) に対応している。しかし抵抗値の減少量に対して遷移位置の後退が少ないように思われる。このことは本翼模型の場合境界層の吸い込みを行っても遷移位置が大きく後退はしないが、乱流域でも吸い込みによって境界層の成長が押さえられ抵抗の減少に繋がっているものと推測される。図11は、遷移位置が吸い込み表面より前方にある場合(即ち、吸い込み面ではすでに乱流になっている場合)に吸い込みを行った時の可視化写真である。試験条件は、レイノルズ数 7×10^6 、マッハ数0.7、迎角 0° である。同図(a)は吸い込みなしであり、(b)は最大吸い込み ($C_q = 0.00067$) の時のものである。通風経過時間の違いがあり感温液晶の色の変化が異なるが遷移位置は両方ともに32%である。しかし図9に示したように、 C_D は(b)の場合の方が小さい。これは図10の迎角 -1° の場合と同様に乱流境界層内での吸い込みは、乱流境界層の発達を遅らせることにより抵抗の減少へつながったものと推測される。これらの推測を確認するには、例えば大きい模型を使った、より詳細な試験(境界層内の速度、乱れ分布等の測定)を行う必要がある。

5. 感温液晶による可視化試験の検討

感温液晶による遷移点の可視化試験でもっとも重要なことは、感温液晶の発色中心温度と感知温度幅の選定である。発色中心温度の選定は、通風中の模型表面温度とほぼ同じにすることが望ましく、この設定を大きく外すと通風の開始から終了まで感温液晶面の色の変化が現れない。感知温度幅が小さいと色の変化の時間が短く、感知温度幅が大きいと温度変化に対し色変化が少なく、ど

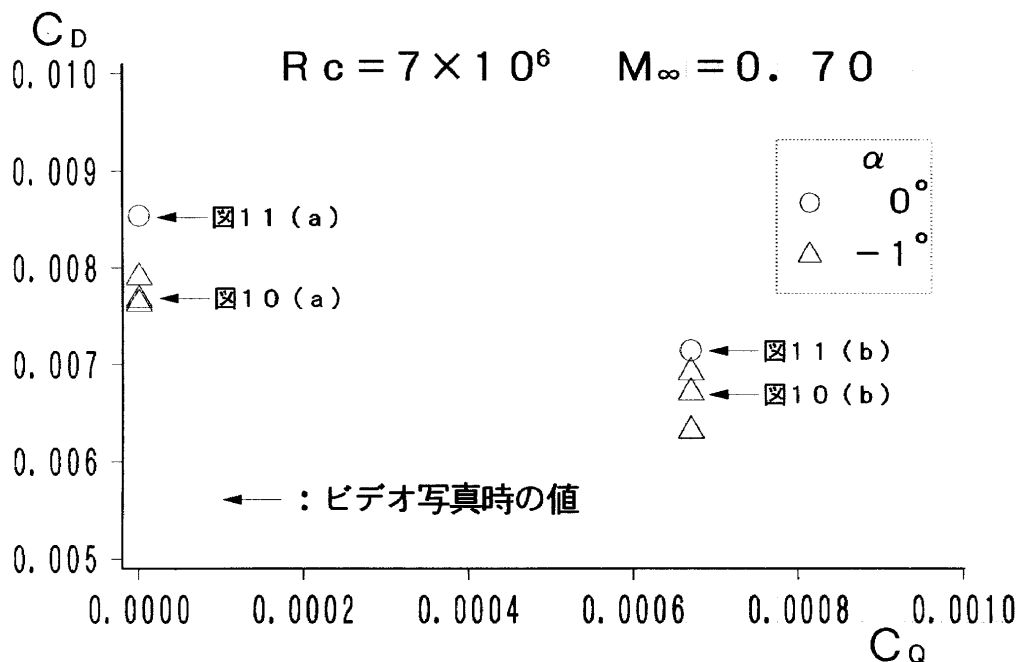
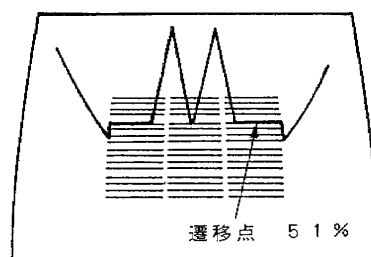
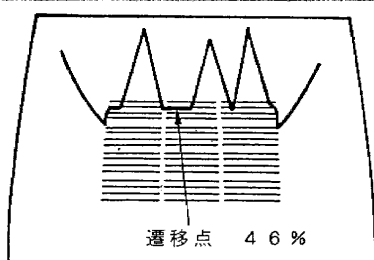
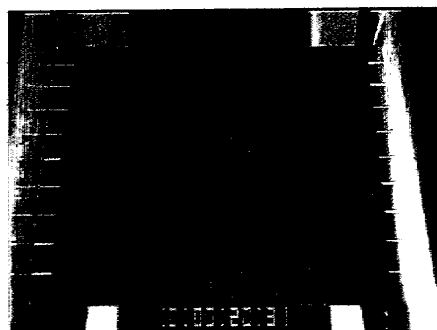
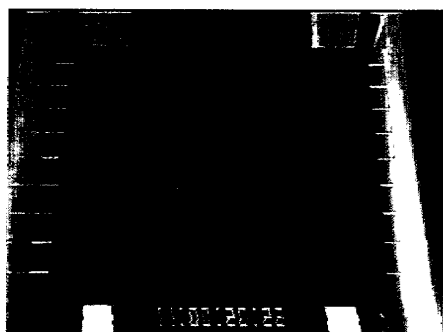


図9 $C_D \sim C_q$

$$R_c = 7 \times 10^6 \quad M_\infty = 0.70 \quad \alpha = -1^\circ$$

$$C_o = 0 \quad C_o = 0.00067$$



$$C_D = 0.00767$$

$$C_D = 0.00671$$

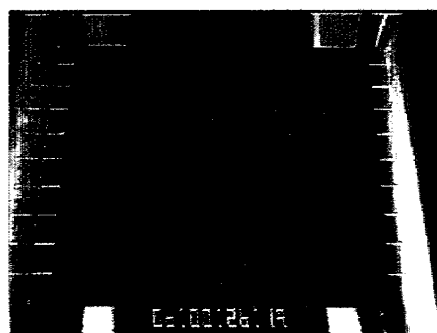
(a)

(b)

図10

$$R_c = 7 \times 10^6 \quad M_\infty = 0.70 \quad \alpha = 0^\circ$$

$$C_o = 0 \quad C_o = 0.00067$$



(a)

(b)

図11

ちらも遷移位置の判定がむずかしい等の問題点がある。

吹き出し式風洞でこの可視化試験を行うには上記の問題点を解決しなければならない。そのためには、通風経過時間に対する集合胴温度の変化を知ることが重要である。図12(a)にレイノルズ数 7×10^6 、マッハ数0.77における試験の通風中の集合胴温度の変化と模型表面の色の時間的变化を示した。このデータは、感温液晶の発色中心温度が 14°C で試験を行った時のものである。同図の横軸

には、通風経過時間(t)、縦軸には温度(T)が示してあり●印が集合胴温度(T_0)である。また感温液晶の感知温度範囲が示してある。図中の①～④の写真は、通風経過時間①～④に対する可視化写真である。この試験ケースは、感温液晶の発色温度(範囲)と風洞の集合胴温度がほぼ等しく、集合胴温度の時間変化が小さい場合で、試験に成功した例である。すなわちこの場合には、気流静温度と模型表面温度との差が適正で、通風経過時間が $t=20 \sim 65$

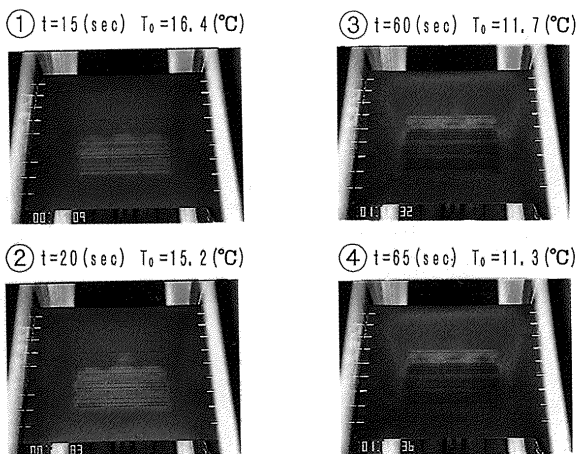
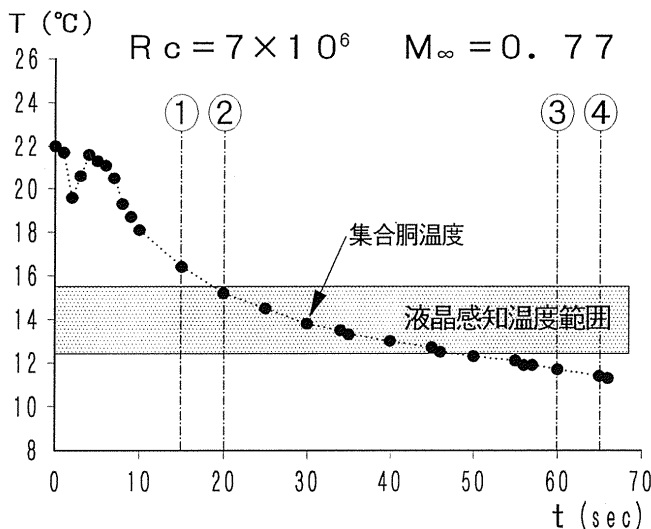


図12-(a)

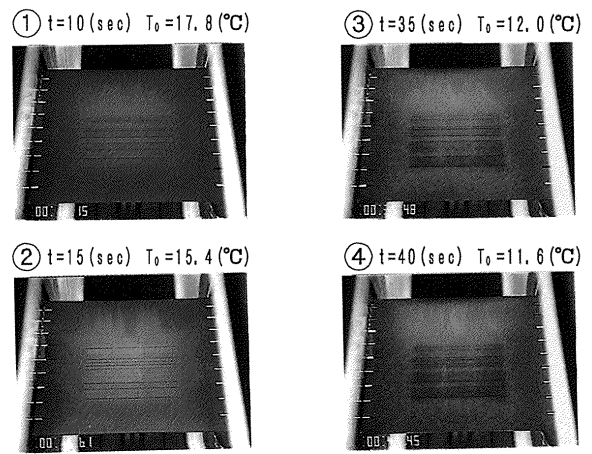
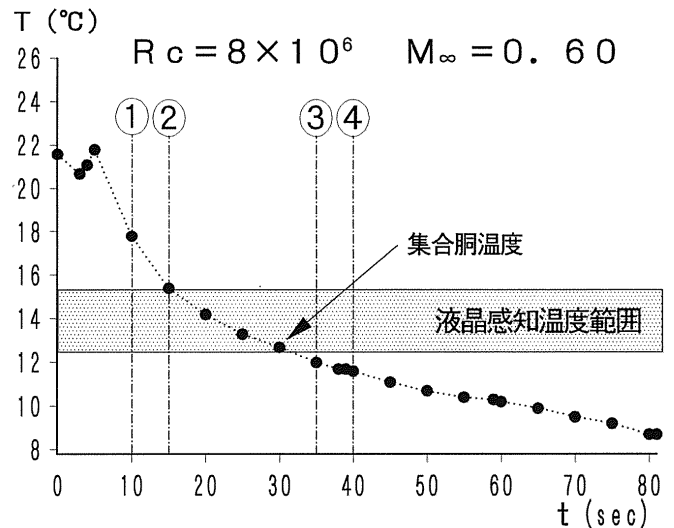


図12-(b)

秒と45秒間に渡り層流域，乱流域の表面温度が液晶の発色温度内にあるため，可視化試験が可能であった。次に図12(b)の試験条件はレイノルズ数 7×10^6 ，マッハ数0.6である。この場合は集合胴温度の変化が急なため $t=15\sim 35$ 秒の約20秒間は色変化が現れ可視化できたが， $t=40$ 秒では色の違いの位置が不明瞭になり可視化する事ができなかった。このように集合胴温度の時間的変化を知ることにより，最適な感温液晶の発色中心温度の選定ができ，測定時間が長く保つ事ができるようになり測定精度が向上する。従って感温液晶を用いた可視化試験では集合胴の温度変化が，必要な予測(把握)すべき項目であると言える。

6. まとめ

本実験において感温液晶を用いた可視化により高亜音速，高レイノルズ数流れにおいても遷移点の測定ができた。今回の吹き出し式風洞での試験から，感温液晶法はより一般的な遷移点の可視化の風洞試験法として期待できる。

感温液晶による可視化試験の主な利点は，可視化試験

とウェーク抵抗測定の同時計測が可能であることであり，本試験でもウェーク抵抗値のふるまいを遷移位置のそれと関連づけることができた。一方欠点としては，感温液晶の発色中心温度，感知温度幅の選定がむずかしいこと，塗布に時間を要すること等が挙げられる。本報告では前者の欠点については集合胴の温度変化の把握からある程度解決できることを示した。

7. 文献

- 1) 野口正芳，佐藤衛，神田宏，石田洋治；吸い込みのある二次元自然層流翼の高亜音速，高Re数風洞試験，航空宇宙技術研究所報告TR-1204(1993)
- 2) Yoji ISHIDA, Masayoshi NOGUCHI, Mamoru SATO, Hiroshi KANDA；Numerical and experimental study of drag characteristics of two-dimensional HLFC airfoils in high subsonic, high Reynolds number flow：TECHNICAL REPORT OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY TR-1244T(1994)
- 3) 空気力学第二部；航技研二次元遷音速風洞の構造と

- 特性, 航空宇宙技術研究所報告TR-647(1980)
- 4) 野中修, 石田洋治, 佐藤衛, 神田宏; 高亜音速流における二次元ハイブリッド層流制御翼の研究(その1) 基本翼型NLAM78の空力特性, 航空宇宙技術研究所報告TR-1076(1990)
 - 5) 鷺谷昭二郎; 液晶温度センサ, センサ技術Vol. 9. No 7 1986/6 P 50-54
 - 6) 結晶工学ハンドブック編集委員会; 結晶工学ハンドブック, 共立出版
 - 7) N. Sudani, M. Sato, H. Kanda, K. Matsuno; Flow Visualization Studies on Sidewall Effects in Two-Dimensional Transonic Airfoil Testing; AIAA Paper 93-0090(1993)
 - 8) 浅沼強編; 流れの可視化ハンドブック: 朝倉書店

航空宇宙技術研究所資料679号

平成7年3月発行

発行所 航空宇宙技術研究所
東京都調布市深大寺東町7-44-1
電話 三鷹(0422)47-5911(大代表) 〒182
印刷所 株式会社実業公報社
東京都千代田区九段北1-7-8

Printed in Japan