

川崎重工低速風洞におけるラフネス効果試験の紹介

山口 洋一、柴田 欣幸、高橋 賢一、生越 博景、金子 進一（川崎重工業株式会社）

A Study of Boundary-Layer-Transition Trips on KHI-LWT

Youichi Yamaguchi, Yoshiyuki Shibata, Kenichi Takahashi, Hirokage Ogoshi, Shinichi Kaneko (KHI)

概要

当社低速風洞において、「テープ」ラフネスの効果进行调查する風洞試験を実施した。貼付の容易さと境界層遷移の確実さを両立させるラフネスとして、適切な高さや幅の「テープ」に適切な間隔のスリットを設ける方法が有効であることが分かった。

1. 背景

航空機の実機飛行状態を風洞試験結果より予測するにあたっては、通常風洞試験結果は実機に比べ小さなレイノルズ数であることから、そのレイノルズ数効果をどのように見積もるかが重要な問題の一つとなる。その解決策の一つとして風洞試験においては、

- ・遷移位置を任意の位置に固定し、レイノルズ数変化に伴う抗力の変化量の推算を容易にする
- ・境界層の厚みや性質を一致させ、境界層の振る舞いを実機に近づける

等といった様々な目的から、その目的に応じた適切な位置にラフネスを配し、境界層を強制的に乱流へと遷移させることが行われる。

また、翼模型等の風洞試験を実施する場合、模型形状・形態によっては、Laminar Bucket等、迎角によって遷移位置が大きく移動することによる6分力特性の変化が生じることがある。このような特性変化は風洞試験にのみ生じる現象であり、実機飛行特性の推算精度を低下させる要因となる。このような場合においてもラフネスにより遷移位置を固定することで、Laminar Bucket等を抑える事が可能である。

しかしながら、ラフネス自身が、風洞試験にて評価される様々な空力デバイスと干渉し、空力特性に影響を与える可能性も否定できない。このためラフネスの機能としては、風洞試験に特有な現象だけを抑えるばかりでなく、再現性が高くかつ貼付/除去が容易であることも重要な要求となる。特に評価すべき項目が多岐にわたる低速風洞試験では、貼付/除去の容易さは重要である。

当社にて使用実績のあるラフネスのうちの主

なものについて、表1に示す。

「粒子」ラフネスは、1980年代までは風洞試験で用いられる最も一般的なラフネスであった。これはガラスビーズなどの適切な大きさに揃った粒子を、適当な密度で必要な場所に貼付するもので、粒子によって作られる表面粗さを利用して境界層遷移を引き起こす。しかしながら、粒子の貼付密度の管理が難しいこと、位置によっては（模型下面等）貼付するのが難しいこと、などから現在はほとんど利用されていない。

「粒子」ラフネスに替わって現在多用されているラフネスは、「テープ」「ディスク」等のラフネスである。これらは、適切な高さや大きさ（径や幅）を持つ带状又はディスク形状のものを必要な場所に貼付するもので、これによって作られる段差により境界層遷移を引き起こす。これらには高さや大きさといった、管理の容易なパラメータにより設定が可能であるという利点がある。

また、小さなディスク状のテープ片を多数貼付するか、樹脂などを型紙に流し込んで硬化後に型紙を取り外すといった手間のかかる「ディスク」ラフネスに比べ、「テープ」ラフネスは必要な厚みを持つ粘着テープを適切な幅に加工した物を貼付するという簡便な方法によっても準備できるため、形態管理の複雑な低速風洞試験では利便性の高いラフネス形式の一つである。

本論文では、上記のような特質を持つ「テープ」ラフネスについて、大きさおよび形状が境界層へ与える影響および「ディスク」ラフネスとの違い等を調査する風洞試験を、川崎重工業（株）低速風洞において実施したので以下に報告する。

2. 試験内容

2.1 供試体、計測項目等

供試体には、Laminar Bucket を生じやすいと考えられる、比較的アスペクト比の大きなテーパつき後退翼を持つ翼胴形態の模型を使用した。この翼の前縁より 5%*c* の位置にラフネスを貼付し、翼上面の境界層遷移位置によりラフネスの効果を判定した。

風速は、当風洞では 40~60m/sec. の条件が多用されることから、低速側である 40m/sec. を選択した。このときのレイノルズ数は空力平均翼弦長基準で 6.5×10^5 である。また、迎角は 0 度を評定とした。

試験実施状況を図 1 に示す。

2.2 境界層遷移位置の判定方法

境界層遷移位置は、フィルムシート化された感温液晶を翼表面に貼付し、表面温度の変化を可視化した結果により判定した。境界層が乱流境界層であれば気流との熱伝達率が大きく、層流境界層であれば熱伝達率は小さい。この違いにより物体表面の温度は両者で異なる変化を見せるため、境界層遷移位置が判定可能となる (図 2)。

また補助手段として、50%*c* 位置にプレストン管を固定し、この位置での境界層の層流/乱流を判定した。プレストン管による境界層判定の原理を図 3 に示す。層流境界層と乱流境界層とは、表面近傍での速度勾配が異なり、層流の場合は乱流に比べ小さいという特徴がある。このため物体表面近傍での総圧も層流では小さく乱流に遷移すると増大する。この現象を利用して、境界層の低層における総圧を計測することで境界層の判定を行うのがプレストン管である。

2.3 試験パラメータ

ラフネスの形状を定義するパラメータとして、以下のそれぞれに関する効果を調査することとした。

- ・サイズ効果 高さ、幅
- ・形状効果 「テープ」「ディスク」他

3. 試験結果

3.1 サイズ効果

「テープ」の高さが遷移に与える効果を調査した結果を図 4 および図 5 に示す。また、幅が遷移に与える効果を調査した結果を図 6 および図 7 に示す。

まず、高さ効果について調査した結果 (図 4、図 5) について見てみる。図 4 の感温液晶による

可視化結果をみると、高さ 0.16mm の場合は変色する領域は非常に小さい。0.24mm の場合はラフネスの後方の領域は全てそれ以外の領域と異なる温度を示している。これより 0.24mm の場合、ラフネス後方の領域は全て乱流境界層へと遷移しているものと予測される。0.16mm の場合は遷移を引き起こすのに十分な高さではなく、ラフネスの後方はほとんど層流境界層のままとなっていると思われる。

ここで図 5 に示すプレストン管の結果を見ると、0.16mm の場合では迎角 0° 以下は総圧が低く、 0° を超えたところで総圧が上昇する。0.24mm では 0° より低い迎角から総圧は高くなっている。これより迎角 0° の場合、0.24mm では乱流境界層に遷移しているが、0.16mm では層流境界層のままであると考えられる。これは、感温液晶の可視化結果から得られた結論を裏付けている。

以上より、この条件での確実な境界層遷移に必要なラフネス高さは 0.24mm 程度である、と言える。

次にラフネスの幅に関するサーベイ結果 (図 6、図 7) について見てみる。感温液晶による可視化結果 (図 6) をみると、ラフネス幅 3mm の場合にはラフネスから液晶の変色領域まで若干距離があり、またその距離にばらつきがある。1mm のケースでは 3mm のケースに比べ距離が縮み、且つ一定に近い。図 7 にプレストン管の出力のうち、最も小さい迎角で遷移した場所と最も大きな迎角で遷移した場所とでの境界層低層総圧を重ねて表示したが、こちらでも 1mm の方が僅かにばらつきが小さくなる結果となった。このことから、ラフネスの幅は今回の条件では 1mm の方が良好である、と言える。

3.2 形状効果 (1) …「テープ」と「ディスク」

「テープ」と「ディスク」の 2 種類のラフネスについて、境界層に与える影響の違いについて、感温液晶により可視化した結果を図 8 に示す。これをみると、「テープ」ではラフネスの後方に層流域と同色の領域が存在し、遷移位置はラフネスのある程度後方となっているのに対し、「ディスク」では筋状の領域が残るもののほぼラフネス直後から変色が始まっている。

この遷移パターンの違いは、両者の境界層に与える擾乱の違いではないかと考えられる。「テープ」では境界層に与えられる擾乱が 2 次元的となり、遷移に至るまでに若干の助走領域が必要となっているためと考えられる。これに比較して「ディスク」では状況は全く異なっており、ラフネス

の隙間が擾乱源となって3次元的に遷移を誘発している可能性が考えられる。

この結果からは、遷移位置を確実に固定するという意味では「テープ」には若干の工夫すべき余地が残されている、と考えることが出来る。

3.3 形状効果 (2) …「テープ」のスリット効果

「テープ」ラフネスについて、貼付の容易さを損なわない範囲で「ディスク」の持つ3次元な遷移誘発能力を付与するため、適切な間隔のスリットを加える方法について調査した。感温液晶による可視化結果を図 9、図 10 に示す。

図 9 では、「テープ」にスリットを設けることにより、スリットを設けた部分の直後の領域で変色が始まる様子が確認でき、スリットの直後で境界層遷移が始まっているものと考えられる。またこのスリットの幅については、ある程度の幅を必要とするが、広すぎるとスリットの直後の部分に液晶が変色しない領域が残ることが確認できた (図 10)。本条件では、間隔 5mm 程度が最も適切であろうと判断される。

3.4 特性への影響

以上の結果から得られた「スリット付きテープ」ラフネスを模型全面に貼付し、3 分力特性を取得した (図 11)。Laminar Bucket は充分抑えられており、また特性への不必要な影響はほとんど見られない。

4.まとめ

以上の結果より、以下の知見を得ることが出来た。

- KHI 低速風洞における必要ラフネスサイズの指針を取得し、ラフネス形状と遷移状況との関係を把握した。
- 境界層遷移を確実に引き起こすために、適切な厚みおよび幅とスリットを設けた「テープ」ラフネスが有効であることが分かった。
- ラフネスの有無による空力的影響は充分で、かつ不必要な影響はほとんど見られなかった。

表 1 ラフネスの種類と得失

種類	粒子 適切な大きさの粒子を均一に貼付	テープ 適切な幅・厚みのテープを貼付	ディスク 適切な大きさ・厚みのディスクを 形成/貼付
遷移の 確実性	○	○	○
再現性	粒子の密度の 再現が難しい	○	○
貼付の 容易さ	垂直面や裏面への 貼付が難しい	○	樹脂による型抜き等 硬化時間が必要

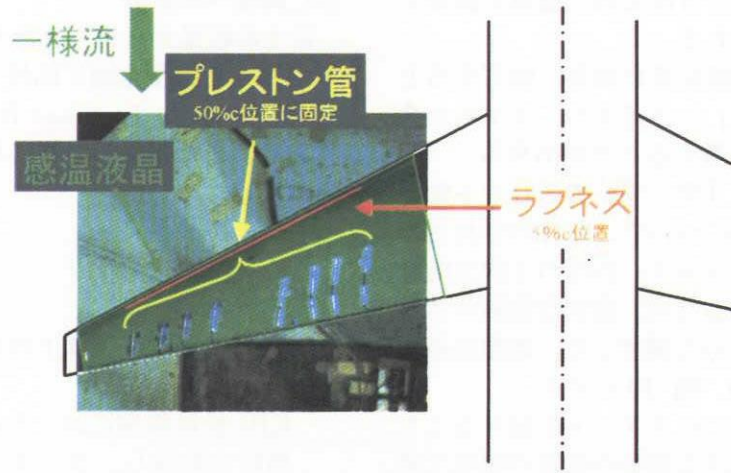


図 1 風試実施状況

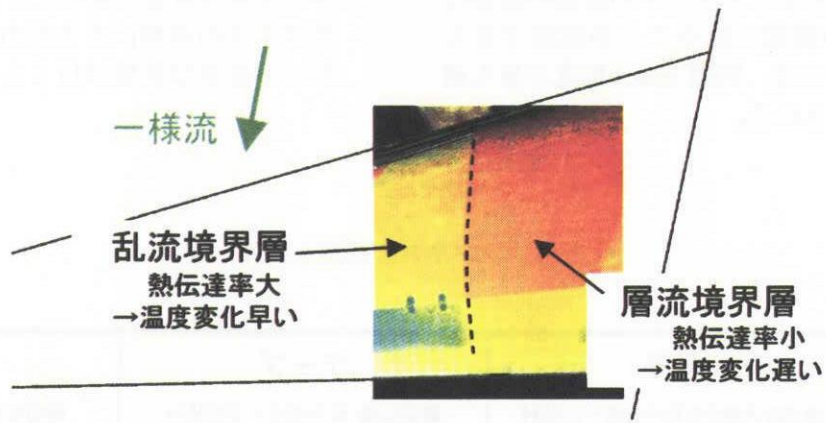


図 2 感温液晶による境界層遷移位置判定

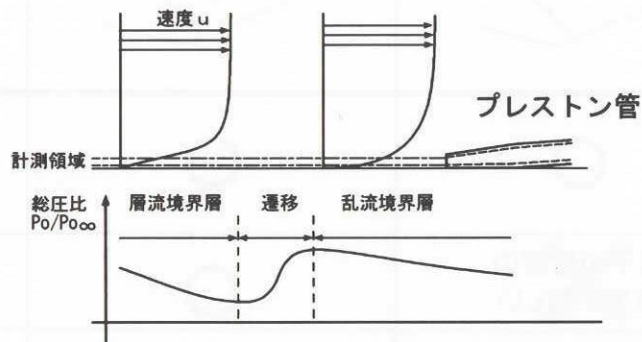


図 3 プレストン管の原理

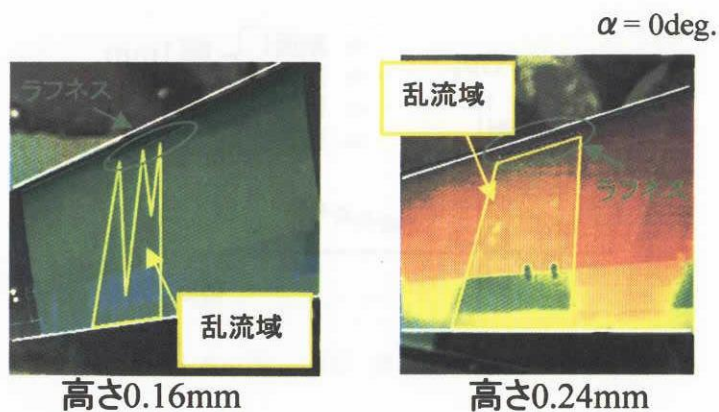


図 4 ラフネス高さ効果 (1) 感温液晶結果

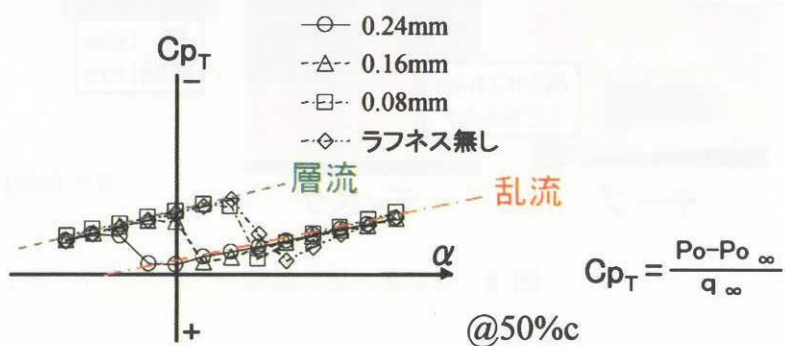


図 5 ラフネス高さ効果 (2) プレストン管結果

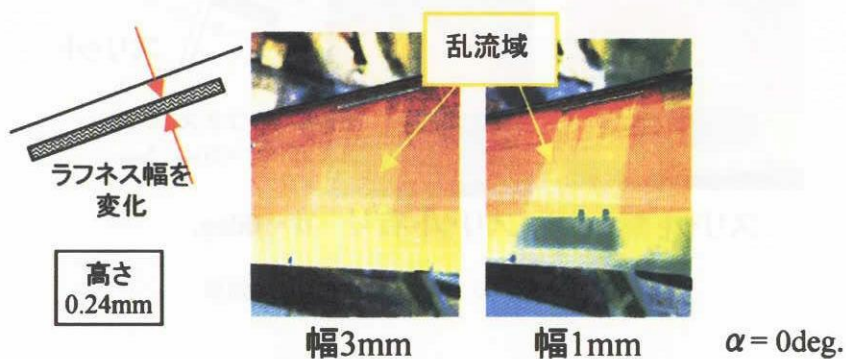


図 6 ラフネス幅効果 (1) 感温液晶結果

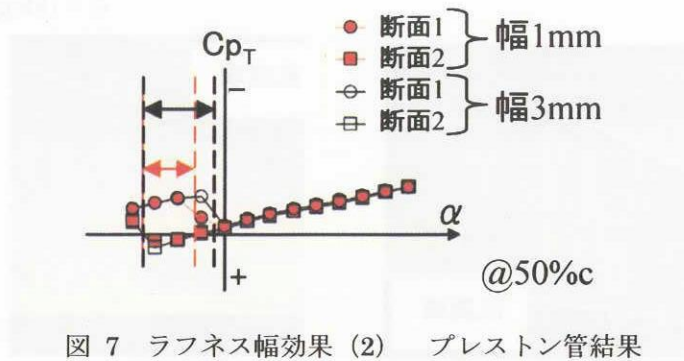


図 7 ラフネス幅効果 (2) プレストン管結果

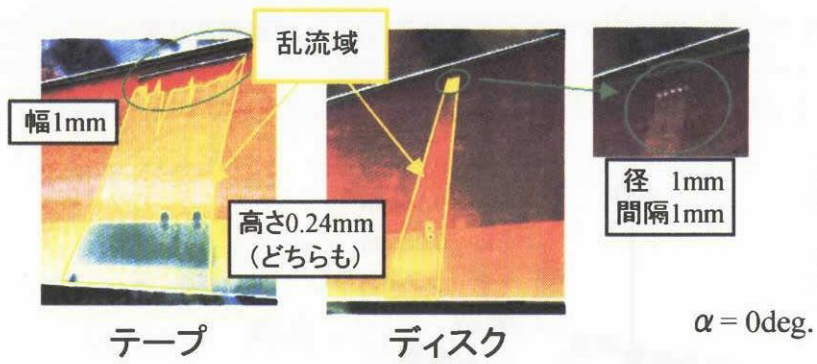


図 8 ラフネス形状効果

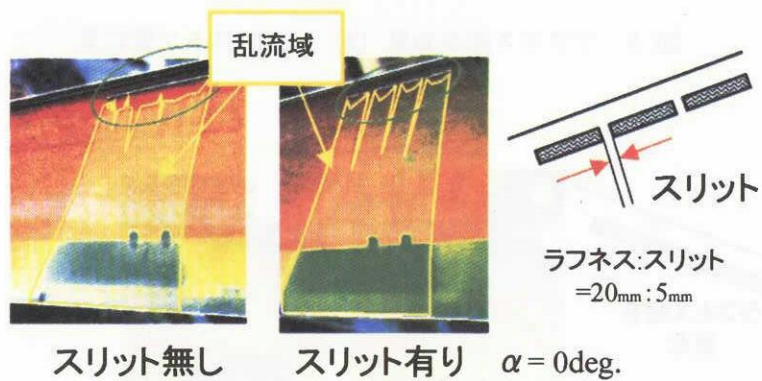


図 9 テープラフネスのスリット効果

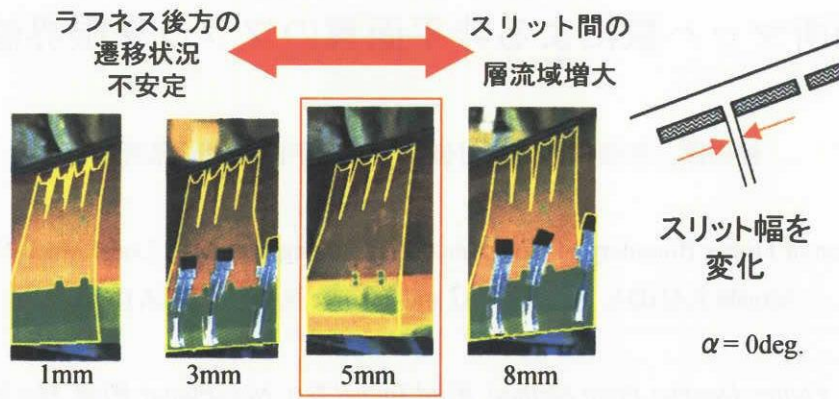


図 10 テープラフネスのスリット幅効果

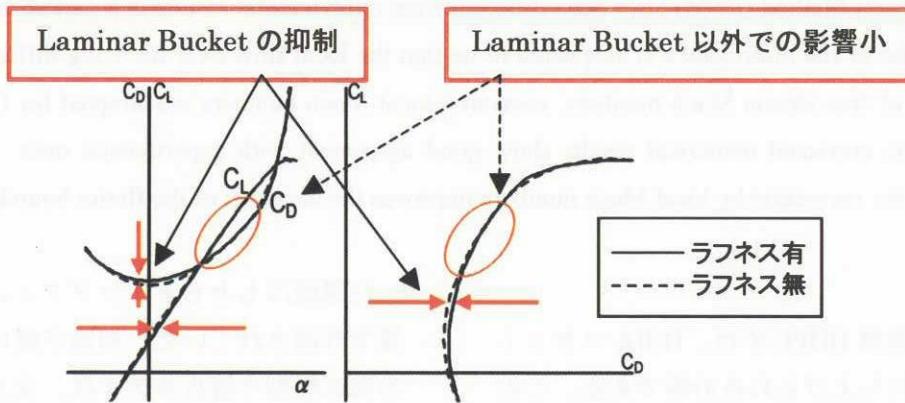


図 11 3分力特性への影響