

# 航技研入所から 30 年を振り返って

高木 正平（宇宙航空研究開発機構）

## Memoirs of research activities during my tenure of thirty years at NAL

S. Takagi

Japan Aerospace Exploration Agency,  
Aerospace Research and Development Directorate

### ABSTRACT

This brief note presents my research activities since I moved in the National Aerospace Laboratory as a researcher in 1979. During this period, my study was consistently made on the impregnable philosophy of “the basic research leading to promising applied research and the applied research developing on basic research”.

Key Words: LEBU, ASU unsteady wind tunnel, 3-D boundary layer, streamline-curvature instability, cross-flow instability, rotating-disk flow, attachment-line instability

### 1. 序論

航空宇宙技術研究所に入所したのが 1979 年 9 月でしたから、今年で入所から 30 年が経過しました。期間の特に後半、組織は 2001 年 4 月に国立研究機関から独立法人に移行し、そして、2003 年 10 月には、宇宙科学研究所、宇宙開発事業団との統合など、組織のめまぐるしい変化がありました。異文化の融合、さらには合理化を旗印に研究者の削減などで、基礎研究の在り方・進め方に対する考え方が大きく変わりました。しかし、私個人としては、基礎・基盤研究は応用研究を支え、お互い不可分の関係にある、という基本姿勢を貫き通してきたつもりであります。本小論では、この 30 年間の研究の内容を簡単に回顧したいと思います。

### 2. 入所当時(1979/9-1985/10)

入所して配属された先は、新型航空機研究グループで、当時短距離離着陸機「飛鳥」の研究開発の最盛期でした。しかし、そのプロジェクトには直接参加する必要はなく、自由な研究が許されていました。従って、研究テーマの設定にあたっては、上司の了解が得られればそれなりの研究予算も付けて頂きました。そこで当時米国を始めとして多くの国々で乱流境界層の摩擦抵抗を如何に低減するか、技術提案とその実証研究が盛んでした。そこで、この抵抗削減に関する研究テーマを設定することにしました。抵抗削減法として、壁面に溝を付ける方法と乱流境界層の外層の組織構造を薄い板で壊す方法の 2 つの可能性がありました。実用的な観点から、前者を選択し上司に提案しましたが、上司は、『濡れ面積が増えれば抵抗は増えるに決まっている。光を見よ、最短距離を進むではないか』といって、一步も引かず、結局後者のテーマで成果を挙げ、後前者に進む戦略に出ました。後者

のテーマでは、削減のために用いたデバイスの抵抗増加分を入れると収支はトントンであったことり、そうこうしているうちに、米国では前者のテーマで大きな成果が出ていることが判明し、あの時始めていたら、という無念さを残してこの研究テーマは終了しました。

### 3. 米国留学(1985/11-1987/9)

谷先生の紹介で、アリゾナ州立大学の Saric 教授の下で留学する機会が訪れました。当時の留学期間は 1 年が原則であり、研究課題は『層流境界層の制御に関する実験的研究』でした。出発前の Saric 先生との事前調整段階では、秋には風洞も完成する予定を聞いていましたので、11 月の出発を設定しました。しかし出発直前、渡航時期を遅らせることができないかとの申し入れがありましたが、すでに全ての手配が完了し、もう後に引き返せない状態であったので予定通り渡航しました。

行って驚いたことには予想以上の遅れであり、この先完成までにどれほどの時間がかかるか考えると、かなり絶望感に陥りました。風洞は新設ではなく、境界層研究で有名な Klebanoff さんが使っておられた非定常回流風洞を移設し再構築することでした。使えない部分は新たに製作する必要があり、骨組は鉄のアンクルでそれ以外はいわゆる厚いベニア板で風路を作りました。一部プロによる製作依頼はありましたがほとんどは入れ替わり立ち替わりの学生とメカニック 1 名とそれに私で自作しました。完成し通風したのは着任から半年後だったと記憶しています。

さて、本番の実験ができるのを楽しみにしていたところ、どうも気流変動レベルが予想したほど小さくありませんでした。この変動を除去しない限り境界層遷移の実験はできないことから、まずはその原因究明に取り掛か

りました。変動は10Hz程度の低周波数であることは熱線風速計出力の周波数分析から容易に分りましたが、問題はその発生源の特定です。風路一周考えられる個所に熱線を取り付け、周波数分析を繰り返しました。その結果判明したことは、測定部およびその上流と下流どの位置でもこの成分が観測されたことで、大きな剥離が関与しているらしい、という推論です。しかし、結局1本の熱線では発生源を特定するには至りませんでした。ある時には、大学町 Tempe から百マイルほど南に位置する Tucson にあるアリゾナ大学の Wagnonski 教授がしばしばこの風洞を訪れましたので、今までの計測結果を示し、意見をもらいました。しかし、いずれのアドバイスも結局は徒労に終わりました。そうこうしている間に、1年が経とうとしていました。当初の目的を達せず帰国するのはあまりにも無念であり、職場の上司に延長をお願いしました。ようやく11か月の延長が認められました。

長い長い苦悩の末、攪乱源を特定するには2本の熱線を用いればその伝播方向を特定できて、発生源を絞り込むことができるのではないかと、ということです。今思えば単純なことだったのですが、この手法は、気流の残留変動の空間スケールと音波性攪乱のそれは違う性質を利用して、それらを分離しようとするものです。測定部近傍の至る所で観察される攪乱の空間スケールは大きいことから、2本の熱線の流れ方向に大きく離して設置すれば、センサーの時間のずれから伝播方向を特定できるはずでした。このようにして2本の熱線出力の相関計測から明らかとなったことは、攪乱源は上流ではなく、測定部下流からでした。場所は変流ダクトで大きな剥離が起こっていたのです。このような大規模の剥離が起こるのは、非定常風洞に不可欠なバイパス風路の特殊構造に由来するものでした。発生源が特定できましたので、剥離防止の対策を施した結果、見事に解決できました。その結果は文献②に報告し、帰国後新たに建設された回流式風洞の気流評価にも同じ手法を用いて、残留乱れ変動と音響的変動の分離を行いました③。

問題が解決できたことから、いよいよ待ち望んだ後退翼境界層の遷移研究を開始することができました。後退しない境界層の遷移研究は多数ありましたが、後退翼に関する研究は古いにもかかわらず、まだまだ解決すべき問題は山積していました。まずは流れの可視化です。後退翼の流れは二次元境界層にもう一つ速度成分(横流れ)が加わることから、捩じれた三次元境界層が形成されます。この横流れ成分は壁と一様流れで速度成分が0となることから、分布のどこかに必ず変曲点を持つこととなります。従って境界層は二次元境界層に比べて不安定となり、早期に乱流化します。この不安定は横流れ不安定と呼ばれています。その不安定の結果としてはほぼ流れ方向に軸を持つ縦渦が成長することは1954年のStuartの理論的研究で知られていました。

ここでは最初に流れ方向に軸をもつ縦渦列が成長し、その縦渦が成長して平均速度分布を歪めて次の不安定を誘起し、最終的には乱流状態へと遷移するというのが、当時の遷移過程のシナリオでした。縦渦は翼面に定在す

ることから、ナフタリンの昇華法による流れの可視化は有効です。確かに何度繰り返しても同じ場所に縦渦が現れ、しかも乱流に遷移する位置も極めて再現性がありました。さてそこで何を研究課題にするかについて、Saric教授と何度か議論をしました。先生は、『遷移を支配している縦渦を制御できれば、遷移を遅延できるのではないかと』と提案がありました。これに対して、私は何故定在する縦渦が最初に成長するのか、私には極めて大きな疑問であり、線形安定性理論の予測にも反する現象でした。そこで、是非この問題を解決したいと申し入れました。Saric教授から特に反対もなく認めて下さいました。縦渦はそもそも翼表面の粗さに端を発して成長していることは多くの実験で周知となっています。それ故、鏡のような表面を目指してひたすら表面磨きに専念しては、その効果を見るためのナフタリンによる可視化、加えて翼境界層内の時間変動を観察する毎日が続きました。ようやく位相速度を持つ攪乱を翼前縁近傍で見つけその特定に集中しましたが、結論が得られぬまま時間切れとなりました。

それから20年後、Saric教授は先に提案した遷移遅延の実験に成功し、米国の学会で高い評価を得ています。現在は実機を用いてその有効性を実証することに専念しておられます。

#### 4. 留学後(1987/10-1996)

留学先で達し得なかった無念を晴らすためには、帰国後の研究テーマは課題の継続しかありません。縦渦の成長が表面粗さに由来するならば、その成長を抑えるためには、鏡面模型を作るか、模型を可能な限り大きくし、その表面の粗さを相対的に小さくする方法があります。幸い職場には日本で一番大きな低速風洞を所有していましたので、後者用の超大型模型で実験することにしました。模型は、直径500mm、長さ3.2mの軟鋼を旋盤加工し、下流側には流れの剥離を防止するためのフェアリング板を2枚取り付けました。模型の断面は人魂形状で、風洞には後退角50度に設置しました。円柱本体だけで250キロありました。計測は主として熱線風速計を用いました。なぜなら、可視化のための化学材料は表面の粗さとして作用するのを避けるためです。

幾多の問題点もありましたが、予想通り、縦渦ではなく追い求めていた進行波が見つかったのです。これは正に線形安定性理論が予測していた不安定攪乱で、理論との整合性も確認しました。しかし、この結果に対する反論もありました。時間発展型の攪乱は風洞の乱れが大きいためであり、気流乱れの小さい風洞実験なら縦渦が支配的に成長するはずであると。この指摘に反論するために、気流変動の小さい風洞実験も行いました。そのために大型風洞用模型と相似な小型の模型も製作しました。結果は指摘されたとおり、縦渦の成長を確認しましたが、ここで新たな結果も判明しました。模型の設置で汚れた模型の表面をアルコールで吹き去ると縦渦は消滅し、進行波が支配的に成長したのです。驚くことに、手垢程度の汚れで縦渦の成長が確認されました④。正にサブミクロンの粗さが縦渦形成のトリガーとなっていたのです。



以上の成果に勢いづき、後退翼と同じ流れ場が実現できる静止流体中で回転する円盤流についても実験を行うこととしました。1954 年 Gregory と Walker が実施した回転円盤流実験以降、円盤流では縦渦の成長は定番であり、遷移初期段階では進行波型攪乱の報告はほとんどありませんでした。それ故、ここでの狙いも縦渦型の攪乱ではなく進行波です。回転円盤流の局所レイノルズ数 ( $Re$ ) は回転中心からの半径方向の距離に比例し、回転数の  $1/2$  乗に反比例するので、従来の円盤サイズの倍の大きさならば、同じ  $Re$  数を実現する場合回転数は  $1/4$  ですむ事になるので、回転に伴う機械的振動を低く抑えることができます。さらに、境界層厚さも回転数の  $1/2$  乗に反比例するので、遅い回転数は境界層が厚くなることから、表面粗さの点でも有利となります。以上の観点から、円柱と同様な発想で、大きな表面のうねりを許しても、可能な限り大きく表面が滑らかな円盤を作製することとし、円盤の直径を  $1.5\text{m}$  として、表面が滑らかで傷のない生ガラスを用いることとしました。撓み防止のためにガラスは 2 枚重ねにしました。

まずは従来からの手法で縦渦が成長しているかいないか、確認することから計測を開始しました。回転する円盤に対して、静止した熱線で円盤流を計測すると、縦渦は円盤に固定していることから、縦渦を通過するたびに正弦的な信号が得られるはずですが。期待に反して、一周あたり 30 個前後の縦渦の成長が確認されました。どのようにしても縦渦の成長は阻止できないことが判明したので、円盤に固定した熱線で計測する手法に変えました。縦渦は円盤に固定されているので、円盤に固定された熱線計測ならば縦渦に影響されずに進行波型の攪乱を検出できるという狙いです。早速新しい熱線プローブを製作し計測に取り掛かりました。進行波が観察され、大喜びしたが、束の間、観察された位置が、横流れ不安定が発生するレイノルズ数より遥かに小さいレイノルズ数（回転中心に近い位置）で観察されたのです。臨界レイノルズ数だけでなく、空間構造、特性を調べましたが、横流れ進行波でないことは明らかとなりました。早速その進行波の特性に着手しました。この攪乱に関する研究は多数あることが分かりました。まず国内では、北大の小橋先生の門下生が行った実験があり、ここで重要な記述があることが判明しました。円盤一周あたり約 30 個の螺旋渦が観察されるが、その振幅は一周あたり 2-4 回の振幅変調を受ける。その原因として円盤の平坦度に起因していると、結論付けられていました。

一方、この新しい攪乱の発生原因について、伊藤博士と幾度もなく議論を繰り返しました。しばらくして、回転円盤の中心近傍では円盤上方から流入する流れの流線が大きく曲げられ、この流線曲率に起因して境界層の不安定が生じることが理論的に予測されました。一方、Ekman 層や回転円盤流では Viscous, Parallel、あるいは Type II と呼ばれた不安定が以前から知られていましたが、その発生原因については特定されていませんでした。実はこれら

の不安定は、全て流線の曲がりによって起因した遠心力型不安定であることが初めて統一的に解釈できたのです。その後の流線曲率不安定は、自然遷移ではなく周波数を固定して流線曲率攪乱を人工励起し詳細に解析結果との比較がなされた。実験と解析が一致することも確認しました<sup>6)</sup>。

当然の予測として、風洞模型でも前縁近傍で流線の大きな曲がりがあることから、同様な不安定が存在することが期待されます。線形安定解析によると、横流れ不安定と流線曲率不安定の臨界レイノルズ数はほぼ同じであること、後者は前者に比べて不安定性が弱いことから、実験で観察することは難しいとされました。しかし解析によれば二つの不安定攪乱の伝播方向は異なること、境界層方向の位相分布には特徴的な違いがあることから、点源から人工攪乱を導入すれば、2つの不安定攪乱は分離できることが期待されました。このようにして、前縁近傍に空けた小さな孔から攪乱を導入して、2つの攪乱の空間特性を調べ、理論解析の結果と整合することを確認した。この研究は実験と理論解析との比較だけでなく、伊藤氏が構築した独自の攪乱の成長経路（複素特性曲線法）の合理性を確認した重要な実験でもありました<sup>7-11)</sup>。

## 5. 斜め付着線境界層研究(1998/10-2003)

三次元境界層と同様に重要な境界層として、付着線境界層があります。これは高速航空機のような後退角を有する翼の最前縁に形成される境界層で、翼の胴体側から翼端に向かって発達します。そしてこの付着線境界層は、機首から発達する乱流境界層により汚染され、そのため付着線境界層の安定性に関する研究は、外乱に対する安定性などの観点から実用的研究が多くあります。

これまでの微小攪乱に対する安定性の研究では、線形安定解析に基づく解析から二次元境界層の T-S 攪乱と同種の攪乱が成長することが報告されています。しかし臨界値や T-S 攪乱の特性については十分に調べられたとは言いがたいものでした。さらに付着線直上とその下流領域を接合する理論がなく、それぞれの領域を統一的に理解する理論が待たれていました。そこで我々は、理論、実験の両面からこの問題の解明に取り組むこととしました。

後退した付着線から下流に向かって境界層の臨界レイノルズ数は急激に低下することを、伊藤氏は一連の研究から明らかにしました。しかし、伊藤氏が厳密に取り扱える流れ場は、付着線及びそこからかなり離れた三次元境界層に限られるため、この中間領域について、ある種の近似を用いたモデル方程式を提案し、安定性の記述を試みられました。付着線の下流から付着線に向けて漸近解析を行ったところ、これまで空白となっていた付着線近傍の領域について、安定特性を記述することに成功しました。伊藤氏のモデル方程式により得られていることから解析結果の実験的検証作業が不可欠である

こと、またこの中間領域の流れの安定性に関する研究は皆無であることから、そのための詳細な実験が計画された。検証実験には三次元境界層の時と同様に規模の大きな方が有利であることから、模型には以前横流れ不安定研究で用いた円柱模型を用いることとしました。また、付着線不安定の臨界レイノルズ数は、従来の後退角の条件では主流の速度をかなり大きくしないと実現できないことから、測定のしやすさや計測精度の向上を優先して、後退角を20度大きくし、70度としました。線形安定解析では、付着線近傍の粘性型の不安定と付着線近傍には非粘性型の不安定が2種共存していることから、円柱模型の前縁に小さな穴を空け、模型内側に取り付けたスピーカで点源攪乱を導入しました。

導入攪乱の増加減衰特性から臨界値を調べ、線形安定解析の結果と比較しました。良好な一致が見られ、さらに、境界層内の速度分布と攪乱の位相分布も計測し、解析結果と比較も良好な一致が確認されました。その上で付着線からやや下流の位置に人工攪乱を導入して境界層の安定性を詳細に調べました。その結果、臨界特性曲線、またそこにおける不安定機構の同定などに成功するとともに、これらの結果は伊藤氏によるモデル方程式の結果とほぼ一致することを確認しました<sup>12)</sup>。

## 6. 超音速実験機プロジェクト参加(1997-2002)

旧航空宇宙技術研究所の主要プロジェクトであった小型超音速実験機の自然層流翼は新しい概念に基づいて設計され、その検証を飛行試験で確認することが目玉の一つに挙げられていました。プロジェクトがスタートしたのは1997年のことです。これまでの境界層遷移研究の成果をプロジェクトに生かす絶好の機会と捉え、積極的に参加しました。広い主翼の中に僅か20個のHot-filmセンサー、限られた周波数帯域、さらには未経験環境下でのセンサー感度調整など、風洞実験とは異なる厳しい制限下での遷移計測とその診断は、むしろその真価が問われる結果となりました。第1回目(2002)の実験失敗後、職務の関係でプロジェクト参加は叶いませんでしたでしたが、2005年第2回目の実験ではほぼ完全な飛行の下で、境界層遷移計測も無事終了し、分担業務は完遂の運びとなりました。センサーの配置などで、研究会のメンバーから貴重なアドバイスを受けることができました。この場を借りて、感謝する次第であります。

## 7. 空力騒音研究(2002-)

空力騒音の小さい快適空間は、近未来の航空機に求められることを予測しつつ、2002年騒音研究に着手しました。流体運動から発せられる空力騒音は、航空機に限らず私たちを取り巻く環境に広く生じています。最初に着目した課題は、ある周波数に集中する離散騒音で、航空機のスラット、二次元物体後流のカルマン渦列音、あるいは風力発電用ブレードやOA機器の冷却ファンからも大きな離散騒音が放射されていることが知られてい

ます。特にスラットをモデル化した対称翼の後縁から放射される騒音が離散的である理由として、『翼境界層のT-S不安定と後縁騒音との音響を介したフィードバック機構で周波数が選択される』という説明が広く受け入れられています。しかし、その説明では不十分な実験結果もあることから、実験に加えて数値解析も同時に進めているところであります。これまでのところ、模型後縁には時間発展型の不安定が関与し、絶対全体不安定からある特定の周波数を持つ攪乱が選択的に成長していることが明らかにされつつあります<sup>13-16)</sup>。しかし、薄い二次元板の後流と異なり、非平行性の強い流れ場でありますが、外部の応用数学分野との連携で理論的發展も進めているところであります。

## 8. まとめ

米国学留学後は、伊藤博士との共同で研究を進めることができたことは、非常に幸運でした。加えて、帰国後には境界層遷移に関する研究会が立ち上がり、研究会の活動を通して強い刺激と幅広く知識を吸収できたこと、さらに研究者の輪が広がったことは、研究会を支えて下さった先達のご支援の賜物と感謝する次第であります。

## 参考文献

- 1) Takagi, S. and Ohji, M.: *AIAA Paper* 87-0362 (1987).
- 2) Saric, W.S. Takagi, S. and Mousseux, M.: *AIAA Paper* 88-0053 (1988).
- 3) 高木：航空宇宙研究所研究報告 TR-1054, (1990).
- 4) Takagi, S. and Itoh, N.: In *Laminar-Turbulent Transition*, Springer Verlag, (1995) pp.421-428.
- 5) Takagi, S. and Itoh, N.: *Fluid Dynamics Research* Vol.14 (1994) pp.167-189.
- 6) Takagi, S., Itoh, N., Tokugawa N., and Nishizawa A.: In *Laminar-Turbulent Transition*, Springer Verlag (2000) pp.637-642.
- 7) S.Takagi, N.Itoh, N.Tokugawa: Abstracts of 19th ICTAM, Kyoto, Aug. (1996), P.263.
- 8) Takagi, S. and Itoh, N.: *Fluid Dynamics Research*, Vol.22, (1998) pp.25-42.
- 9) 西沢、高木：ながれマルチメディア論文 (<http://www.nagare.or.jp/mm/2002/nisizawa/index.htm>), (2001).
- 10) 徳川、Prijo Kusumo、西沢、高木：ながれマルチメディア論文 ([http://www.nagare.or.jp/mm/2002/tokugawa/index\\_ja.htm](http://www.nagare.or.jp/mm/2002/tokugawa/index_ja.htm)), (2002).
- 11) Tokugawa, N., Takagi, S. and Itoh, N.: *AIAA Journal*, Vol.43, June 2005, pp. 1153-1159.
- 12) Nishizawa, A., N. Tokugawa and Takagi, S.: *Fluid Dynamics Research*. in press.
- 13) 小林、西沢、高木：日本航空宇宙学会誌、11月号, (2007) pp. 527-532.
- 14) Atobe, T., Tuinstra, M., and Takagi, S.: *Trans. of Jap. Soc. of Aeron. and Space Sci.* in press.
- 15) Takagi, S. and Konishi, Y.: *Trans. of Jap. Soc. of Aeron. and Space Sci.* in press.
- 16) Takagi, S. and Konishi, Y.: Submitted to *AIAA J.*