

論文の内容の要旨

論文題目 超音速3次元境界層の遷移予測法の高精度化に関する研究
(Study on Improvement of Transition Prediction Method
for Three Dimensional Supersonic Boundary Layers)

氏 名 井手 優紀

本研究は超音速3次元境界層の遷移予測技術の高精度化を目指して遂行されたものである。ここで、「遷移予測」とは境界層遷移の開始位置とその遷移を導く不安定機構の予測を意味している。研究の題材にはJAXAが開発した超音速自然層流翼（通称：NEXST-1）¹⁾に形成される境界層を選んだ。2005年、JAXAはNEXST-1の飛行試験により抵抗低減化を可能とする設計技術の有効性を実証した。しかし遷移位置の予測技術に関しては飛行試験と数値解析により予測された遷移位置との間に定量的な差違が一部認められており、詳細な遷移機構の分析と遷移点予測技術の改善が求められている。超音速3次元境界層の遷移に関する飛行試験データは世界的にも非常に少ないことから、その成果を利用した研究を進めることは今後、遷移予測法を構築していく上で重要と考えられる。これを踏まえて、本研究では従来の解析法にはない物理的効果を考慮した新たな解析を実行することによって、遷移機構の詳細な分析を通じて構築した手法の遷移点予測に対する工学的有用性を検討することを目的と定めた。特に、3つのトピックを設定して研究を遂行した。第2章から第4章ではそれぞれ以下の内容について議論が展開されている。

第2章ではLPSE（Linear Parabolized Stability Equations）のモデルに基づく遷移解析法にNEXST-1主翼全域への適用が可能となるよう改良を施し、それを用いて飛行試験における遷移特性について分析した。その際、前縁直交座標系での解析が可能で、かつ固有関数が取得しやすいよう従来の解析コードとは異なる数値解析法を用いた固有値解析コードLST（Linear parallel Stability Theory）も構築した。これによって非平行性および壁面曲率の安定特性に対する効果を明確にし、飛行試験結果との比較によって e^N 法を用いた遷移点予測法に対するLPSE解析の有効性について検討した。また飛行試験環境においては特に重要な定在波に対する分析も行った。本章で得た結果をまとめると次のようになる。

- ・ NEXST-1自然層流翼が持つ複雑な超音速3次元境界層においてはその非平行性による攪乱の不安定化が壁面曲率の安定化を卓越して、総合的にはLPSE解析による N 値がLST解析のものより大きくなることが示された。また、横流れ不安定による定在波は進行波に比べて壁面曲率の影響に対して敏感であることも明らかとなった。
- ・ 主翼全域にわたる等 N 値マップの結果から、LST解析の結果において存在していた断面間の N_{tr} 値の差が非平行性と壁面曲率の効果によって小さくなり、全体として飛行試験で

計測した遷移位置との一致度が改善された．さらに外翼側の断面でのLST解析による結果において生じたPathological問題が本解析によって解消できることが示され，予測法への有効性が示された．

第3章では攪乱のモデルに関する研究成果について述べた．これまでのNEXST-1に対する遷移解析において，微小攪乱は固有の波数と周波数で伝播する平面波，単色波と仮定された．さらに層流が時刻とスパン方向の座標に依存しないことから，それらの方向に関する波の消長は無視された（これは周波数を ω ，スパン方向の波数を β とするとそれらの虚数部に $\omega_i = \beta_i = 0$ （振動リボン型）を課すことに相当する．ただし下付文字 i は複素数の虚数部を表す）．しかしながら自然遷移過程における攪乱はむしろ局所的に発生するものと考えられ，また単色波を構成するとも限らない．このような波束型攪乱を扱う理論の1つとしてItohはWhithamの運動学的波動理論に基づく複素特性曲線法CRT（Complex Ray Theory）²⁾を創出した．複素特性曲線法の特徴は数学的にシンプルで流れ場に応じた拡張を施しやすい点や，攪乱が観測点で満たすべき方程式を利用して未知数を低減できる点にある．Itohは本手法を非圧縮性3次元境界層の流線曲率不安定性や回転円盤流の絶対不安定性に関する研究などに応用している．一方で，これまでの複素特性曲線法を利用した研究の多くは局所平行流近似を仮定した（あるいはその一部に非平行性を付け加えた）層流に対する固有値問題によって分散関係を得ており，流れ方向の不均質性をより良く表現するPSEを用いた遷移解析はなされていない．そこで，本研究では複素特性曲線法を用いたLSTとLPSEによる遷移解析を飛行試験条件下で実行し，遷移領域において観測可能な攪乱の特徴について調査した．また本手法の e^N 法に基づく遷移点予測精度に対する有効性も検討した．本章で得た知見を以下にまとめる．

- ・飛行試験でのNEXST-1境界層の遷移現象について，遷移領域にて支配的な攪乱は外翼側の断面ではくさび型，内翼側の断面では2次元波束型攪乱であることが明らかとなった．これは過去のLST解析結果に対する考察と同じく内翼断面では1stモード，外翼断面では横流れ不安定モードが支配的であることを支持している．
- ・ e^N 法による遷移点予測の観点では従来の仮定に基づく解析結果において存在した N_{tr} 値のばらつきが，LPSE解析に複素特性曲線法を組み合わせた場合にはさらに小さくなることが示された．

第4章では超音速3次元境界層の非線形機構に関して研究を行った．解析手法にはNPSE（Nonlinear Parabolized Stability Equations）のモデルを採用した．NPSE解析を利用して飛行試験結果を分析した例にはATTASの飛行試験やFokker100の飛行試験に対する研究などがある．なお，いずれも亜音速・遷音速領域で実施された飛行試験である．本研究では各不安定機構が特徴的であった2つの断面での境界層に対して非線形解析を実行した．その際，これまでの非圧縮性/圧縮性2次元平板境界層，非圧縮性3次元境界層の研究において判明して

いる有効な非線形機構を参考にして、斜行崩壊機構、非対称分調波共鳴機構、分調波2次不安定機構、横流れ定在波と進行波による非線形機構などの様々な遷移シナリオを考えた。また1stモードが支配的なケースでは他の研究と同じく攪乱の波数や周波数、また中立安定点によらない標準初期振幅の存在を仮定して、NEXST-1の飛行試験におけるその振幅を決定した。本章で得た結果をまとめると次のようになる。

- ・内翼断面での卓越モードを解析に含んだ様々な遷移機構について分析したところ、多くのケースで支配的な攪乱は計測した遷移位置までほとんど線形成長に従っていた。また計算終了点付近では遷移の開始を示唆する平均摩擦係数の急上昇が見られた。

- ・様々な遷移シナリオにおいて試験結果と整合する初期振幅を見積もったところ、内翼断面ではシナリオによらず標準初期振幅はおおよそ 8.5×10^{-7} であることが明らかとなった。これはATTAS飛行試験のTollmien-Schlichting不安定が支配的なケースの場合の振幅とほぼ同じである。

- ・1stモードが卓越する非線形過程について、定在波が励起されるとその成長は主に非線形性によるものであり、振幅形状にもそれによる捻じれが生じやすいことが確認できた。定在波は線形の場合よりもかなり大きな成長率で発達することから、線形解析(LST解析, LPSE解析)ではやはりその成長が過小評価されてしまうことが分かった。

- ・本研究の解析によると、微弱な横流れ定在波と強い1stモードにおいては有効な非線形機構は存在しなかった。

- ・外翼断面における解析では、多くのケースで振幅が10%を超える高いレベルで準飽和状態となった。これは横流れ不安定が支配的な遷移機構に特徴的なふるまいである。しかしながら、内翼断面において見られたような遷移の開始を示す平均摩擦係数の急上昇は観察できなかった。この一要因としては本解析のフーリエ空間における解像度が高周波2次不安定を捉えられるほど高くなかったためと考えられる。進行波と定在波間の相互作用を解析したケースでは、微妙な範囲の振幅を有する進行波が定在波の振幅のピーク値を抑制する様子が見られた。

- ・初期振幅に関する検討では進行波は 7.5×10^{-5} 以上、定在波は 8.0×10^{-4} 以上の振幅を中立安定点付近で持てなければ、計測した遷移位置付近で振幅の飽和は達成されないことが明らかとなった。

最後に第5章において本研究で得た知見についてまとめた。

- 1) Yoshida, K.: Supersonic Drag Reduction Technology in the Scaled Supersonic Experimental Airplane Project by JAXA, Progress in Aerospace Sciences, 45, 2009, pp. 124-146.
- 2) Itoh, N.: Development of Localized Disturbances in Flat Plate Boundary Layer, *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, 44, (2001), pp. 24-30.