

3D01 二配置型クルーガーフラップ支持展開機構の コンポーネントが空力騒音発生に与える影響の評価

○村山光宏（宇宙航空研究開発機構），古谷龍太郎（菱友システムズ），伊藤靖（宇宙航空研究開発機構）

Evaluation of the Contribution of Components in the Two-position Krueger Flap Deployment Tracks
to the Aerodynamic Noise Generation

Mitsuhiro Murayama (JAXA), Ryutaro Furuya (Ryoyu Systems Co., Ltd.), and Yasushi Ito (JAXA)

Key Words : Subsonic Flow, Aeroacoustics, High-lift, Airframe Noise

Abstract

In this study, unsteady-flow simulations are performed around a leading-edge Krueger flap for a natural laminar flow airfoil developed by JAXA. The simulations are conducted on infinite wing configurations with a Krueger flap to investigate the influence of Krueger track noise. To assess the influence, simulations are performed both with and without a simplified Krueger track. The influence of each component of the Krueger tracks on noise generation is investigated by systematically removing each component from the baseline Krueger track geometry. The results indicate that the component located near the gap between the Krueger flap and the main wing significantly contributes to increased noise. In contrast, the component around the cavity used for retracting the Krueger flap has a minor effect.

1. はじめに

二酸化炭素排出量に関する国際的な目標への対応や運航機数の増加に伴う空港周辺の騒音対策など、航空機に求められる燃費効率の向上や騒音低減などの環境適合性は航空機開発において重要な課題の一つである。

航空機の燃費を大幅に改善する技術の一つとして、機体表面の境界層の乱流遷移を遅らせて摩擦抵抗を低減する自然層流翼化による抵抗低減技術の研究が進められている[1-2]。層流を維持するためには、翼表面が平滑であることが重要であるが、虫などの付着による主翼前縁付近表面の汚染を防ぐことが求められる。また、多くの旅客機で採用されている離着陸時の失速を遅らせる前縁スラットは、巡航格納時にスラット後縁と主翼上面の間に段差が生じ、これが乱流遷移を引き起こす原因ともなる[3]。

これらの課題を解決する前縁高揚力装置として、クルーガーフラップが注目されている[4-6]。クルーガーフラップは、主翼下面側から展開されるため、主翼上面には段差が生じない。また、離着陸時に主翼前縁を覆うように展開する事により、虫の付着などによる主翼前縁の汚染を防ぐ効果も期待できる。

近年では旅客機エンジンの低騒音化が進み、特に着陸進入時には機体から生じる空力騒音がエンジン騒音を上回ることもある。そのため、空港周辺の騒音被害を減らすためには、機体の空力騒音を減らす事が重要な課題の一つとなっている。前縁スラットは

主要な空力騒音源の一つであり、その騒音発生メカニズムや特性について多くの研究が行われている。著者らの研究を含めたこれまでの研究例[7-10]において、スラットを支持・展開する機構が主要な騒音源の一つであることも示されている。一方、クルーガーフラップから生じる空力騒音に関する研究はまだ少ない。

Pott-Pollenskeら[6]は、風洞試験において三次元高揚力翼を用いてスラットといくつかのクルーガーフラップから生じる騒音比較を行った。クルーガーフラップの騒音レベルは必ずしもスラットよりも低いわけではなく、詳細な空力・音響最適化が必要であることが示された。また、風洞試験用に簡略化したクルーガーおよびスラットの支持・展開機構を用いたものの、それぞれの機構から非常に大きな騒音が発生することも示された。

著者らはこれまでに、JAXA自然層流翼型[1-2]に対し、離陸と着陸時の各条件に対して高い空力性能を実現するとともに、主翼前縁の虫等による汚染を減らすことができる離陸・着陸二配置型の低騒音クルーガーフラップを提案してきた[11-12]。2次元RANS CFD解析により、従来のスラットと同等の空力性能を有する事を確認し、無限後退翼近似を用いた非定常空力音響CFD解析により、スラットよりも低騒音性に優れる事を確認できている。また、離陸・着陸に応じて配置を変更できる二配置型クルーガーフラップの支持・展開機構を検討し、CFD解析により、支持

・展開機構を含めた場合でも、スラットと比較し低騒音性に優れる事を示してきた。

一方、クルーガーフラップの支持・展開機構は構造が複雑であり、その各コンポーネントが騒音発生に与える影響についてはこれまで十分に分析できていなかった。本研究では、支持展開機構の構成を変更したCFD解析を行い、それぞれの騒音変化に関して調査した結果を報告する。

2. 解析対象

図1に今回用いたクルーガーフラップの解析形状 (Case0)を示す。JAXA自然層流翼型に対し設計された、高い空力性能を実現するとともに、主翼前縁の虫等による汚染を減らすことができる離陸・着陸二配置型の低騒音クルーガーフラップの着陸配置である [11-12]。クルーガーフラップから発生する空力騒音に注目するために、もう一つの大きな騒音発生源となりうる後縁フラップは収納した形状を用いる。図2はCFD解析用に2次元的な形状に単純化した支持・展開機構付きの解析形状 (Case1)である。今回、図3(a)に示すように、支持・展開機構の構成要素をtrackA, B, Cと名付け、それぞれの構成要素が騒音発生に与える影響を調べるために、Case0: 支持・展開機構無(図1)、Case 1: 全コンポーネント付 (図2 及び 図3(a))、Case2: Case1からtrackAを除去(図3(b))、Case3: Case1からtrackBを除去(図3(c))、Case4: Case1からtrackCを除去(図3(d))の5形態に関して、無限後退翼近似を用いた非定常空力音響CFD解析結果を比較する。

3. 数値計算法および解析条件

非定常CFD解析は格子ボルツマン法ベースの商用熱流体解析コードであるSIMULIA社のPowerFLOWを用いて行った。直交格子ベースの格子を用い、壁面近傍に発達する境界層を直接解像するのではなく拡張壁モデルを用い、流束ベースの境界条件を介して詳細な形状の効果を模擬している。遠方場騒音は、物体を取り囲む閉曲面(音響面)を定義し、その面上での時間履歴の値を用いたFW-H (Ffowcs Williams and Hawkins)法により求める。後流が音響面を通過する際に生じる非物理的な音の発生を抑制するために、後流部分に複数の音響面の平均を取ることで影響を緩和させるShurらの方法を適用している。

計算条件や計算格子などの設定は著者らのこれまでの研究[12]と同じとする。計算領域でのスパン幅はクルーガーフラップと後縁フラップを収納した主翼コード長の40%とし、無限後退翼を仮定して周期境界条件を課す。後退角は34.1度である。主翼収納コード長は10.26%の風洞試験条件を仮定して457.2mmとする。主流マッハ数は0.256、参照温度は288.15K、主翼

収納コード長基準のレイノルズ数は 2.7×10^6 である。クルーガーフラップから発生する空力騒音に注目するために後縁フラップは収納した形状での解析を行うが、クルーガーフラップ周りの表面圧力が後縁フラップを展開した時と近くなる迎角15.2度にて解析を行った。CFD解析は10.26%風洞試験を仮定した条件にて行い、得られた騒音スペクトルの周波数とレベルは実機(100%)スケール、距離は120m離れた位置、大気吸収による騒音減衰量を考慮したスペクトルに変換した結果を示す。

図4に支持・展開機構無クルーガーフラップ解析形状 (Case0)に対する計算格子を示す。クルーガーフラップの後縁やカスプに配置した最小Voxelサイズ (Level0)は0.089 mm、コブ付近はLevel1 = 0.179mmの格子を配置し、総Voxel数は約6千万Voxel、支持・展開機構有の場合は約7千万Voxelである。

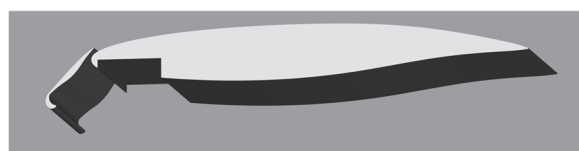


図1 支持・展開機構無クルーガーフラップ解析形状 (Case0)

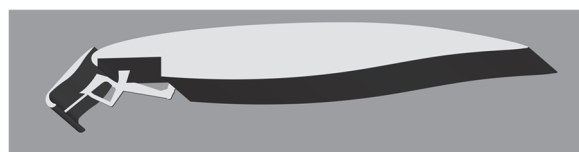
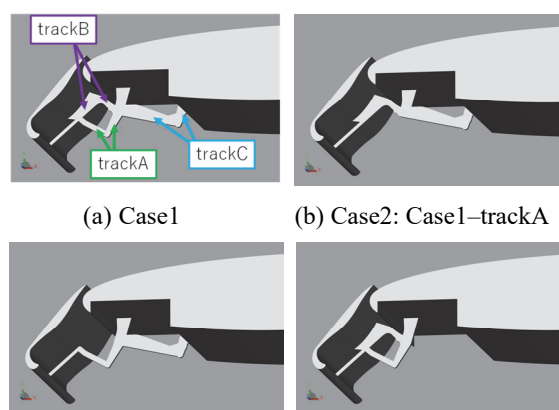
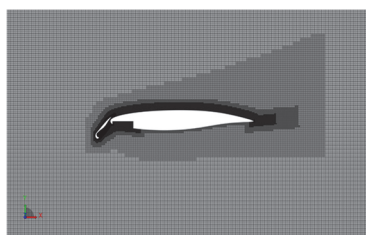


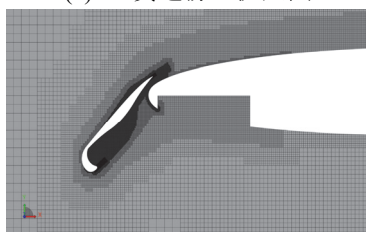
図2 支持・展開機構有クルーガーフラップ解析形状 (Case1)



(a) Case1 (b) Case2: Case1-trackA
(c) Case3: Case1-trackB (d) Case4: Case1-trackC
図3 支持・展開機構を変更したクルーガーフラップ解析形状



(a) 主翼近傍の拡大図



(b) クルーガーフラップ近傍の拡大図

図4 支持・展開機構無クルーガーフラップ解析形状(Case0)に対する計算格子

4. 計算結果

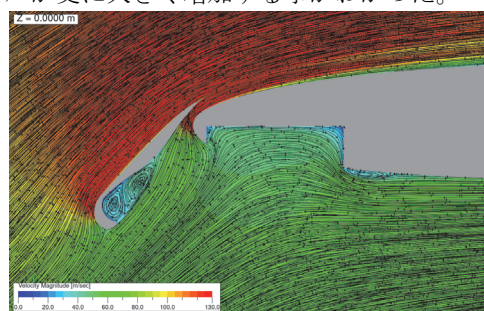
図5(a)にCase0 支持・展開機構無クルーガーフラップ周りの平均速度の大きさと面内流線分布、図5(b)に乱流運動エネルギー(TKE)分布を示す。クルーガーフラップ前縁ブルノーズのカスポ部から流れが剥離してせん断層が形成される。せん断層はコーブ下面側に再付着し、コーブ内で再循環領域を形成する。また、クルーガーフラップと主翼前縁の間のギャップ部では、流れが加速している様子が確認できる。カスポ部から発生するせん断層および再付着点ではTKEが大きい領域が見られる。

また、この解析条件では、主翼下面のよどみ点はクルーガーフラップを収納する主翼下面側のキャビティ内部に位置している。しかし、キャビティの開き口部は、流れが主翼前縁に沿って上面へ回り込む際に流れの剥離は引き起こさず、流れに大きな影響を及ぼしていない。キャビティの奥行きが浅く、よどみ点が内部にあるため、流れがキャビティ内で循環し、せん断層が振動してキャビティトーンを生じるような、典型的なキャビティ流れとは異なる流れ場である。一方、キャビティ内部から流れが下流側に向かう際に、キャビティ後部の角部で剥離し、開口部の下流側にTKEが大きい領域が見られる。

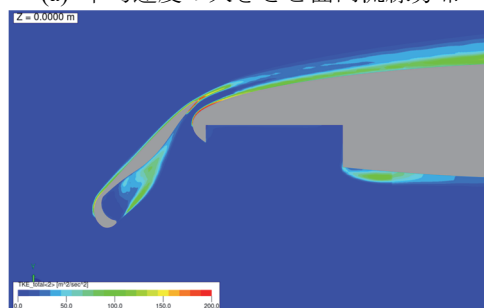
図6に支持・展開機構の有無、支持・展開機構の構成要素を変更した際の直下(90度)方向120m位置における1/3オクターブバンド騒音スペクトル[dBA]の比較を示す。また、図7にそれぞれの形態に対する実機換算後1kHz周辺の圧力変動分布を示す。Case0とCase1の支持・展開機構無/有の比較により、支持・展開機構により200Hz以上の周波数帯で大きく騒音レベルが増加している事がわかる。図7(b) Case1の圧力

変動分布をみると、クルーガーフラップと主翼のギャップ部周辺に大きな圧力変動が見られ、また、指向特性として上方前方側及び下方・下流側に騒音レベルが大きくなる指向特性が確認できる。

Case1と下方側の構成要素track Aを除去したCase2、ギャップ近くの構成要素track Bを除去したCase3を比較すると、track Aの除去により500Hz以下の低周波領域で差が見られるものの、track Bを除去したCase3はCase1と比べて大きく騒音レベルが下がる。また、Case1とキャビティ内に構成要素があるtrack Cを除去したCase4を比較すると騒音レベルに大きな差は見られない。クルーガーフラップキャビティ部にあるtrack Cは他の構成要素と比べて騒音レベルに与える影響は小さい事がわかる。これらのことから、ギャップ近くの構成要素track Bが騒音発生の主要因の一つであり、track Bに加えてtrack Aが下方側にあると騒音レベルが更に大きく増加する事がわかった。



(a) 平均速度の大きさと面内流線分布



(b) 乱流運動エネルギー(TKE)分布

図5 Case0 支持・展開機構無クルーガーフラップ形状の解析結果

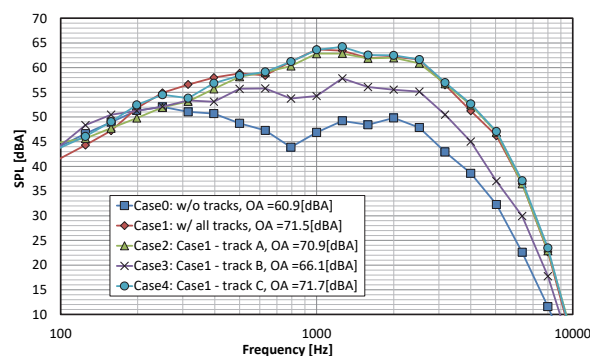
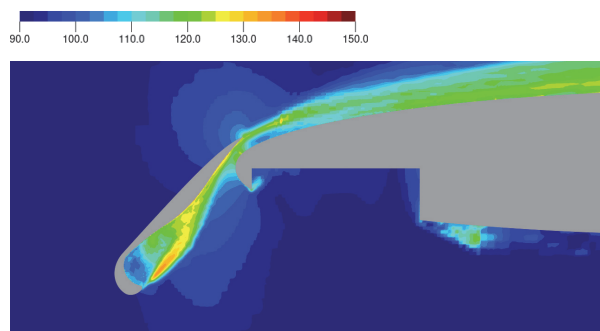
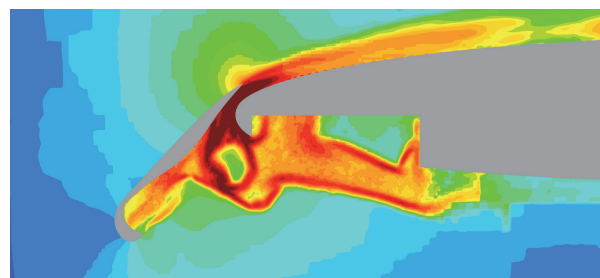


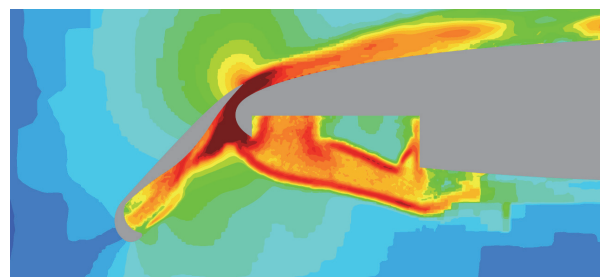
図6 直下(90度)方向120m位置における1/3オクターブバンド騒音スペクトルの比較



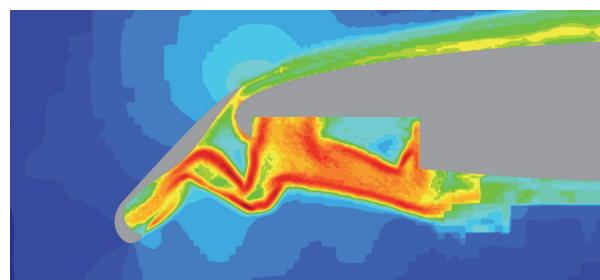
(a) Case0: 支持・展開機構無



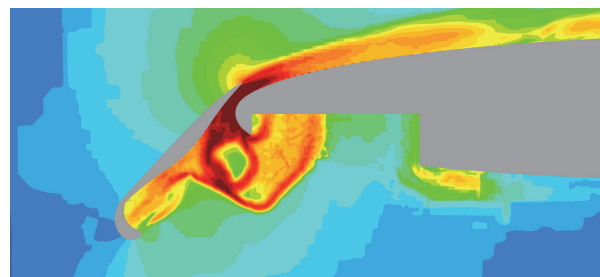
(b) Case1: 支持・展開機構有



(c) Case2: Case1-trackA



(d) Case3: Case1-trackB



(e) Case4: Case1-trackC

図7 実機換算後1kHz周辺の圧力変動分布

5. おわりに

高い空力性能を実現するとともに、自然層流翼の実用化に必要な主翼前縁の虫等による汚染を減らすことができる離陸・着陸二配置型の低騒音クルーガーフラップについて、その支持・展開機構の各コンポーネントが騒音発生に与える影響を調査するために、支持展開機構の構成を変更した非定常流CFD解析を実施した。

下方側の構成要素を除去したケースと、クルーガーフラップと主翼前縁のギャップ付近の構成要素を除去したケースの比較により、ギャップ付近の構成要素が騒音発生の主要因の一つであることが分かった。さらに、その構成要素に加えて下方側の構成要素が存在すると、騒音レベルが更に大きく増加する事がわかった。また、クルーガーフラップのキャビティ部に存在する構成要素は、他の構成要素と比べて騒音レベルに与える影響は小さい事がわかった。今後、本結果を活用し支持・展開機構の騒音低減設計を進める。

参考文献

1. Tokugawa, N., Osada, T., Ueda, Y. and Ishikawa, H., “Natural Laminar Flow Design of Fuselage Nose for Small Supersonic Civil Transport,” 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, St. Petersburg, Russia, 2014.
2. Tokugawa, N., Toyoda, K., Kuroda, F., Ueda, Y. and Ishida, T., “Natural Laminar Flow Design for Highly Swept Wing,” The Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT), P00234, 2021.
3. Kok, M., Smith, J. G., Wohl, C. J., Siochi, E. J. and Young T. M., “Critical Considerations in the Mitigation of Insect Residue Contamination on Aircraft Surfaces,” Progress in Aerospace Sciences 75 (2015) 1-14, 2015. doi: 10.1016/j.paerosci.2015.02.001
4. Krueger, W., “Systematic Wind-Tunnel Measurements on a Laminar Wing with Nose Flap,” NACA Technical Memorandum No. 1119, 1947.
5. Bahr, C. J., Hutcheson, F. V., Thomas, R. H. and Housman, J. A., “A Comparison of the Noise Characteristics of a Conventional Slat and Krueger Flap,” AIAA Paper 2016-2961, 2016. doi: 10.2514/6.2016-2961
6. Pott-Pollenske, M. and Delfs, Y., “Krueger Noise Generation and its Comparison to Slat Noise,” AIAA Paper 2023-4480, 2023. doi: 10.2514/6.2023-4480
7. Murayama, M., Yokokawa, Y., Ito, Y., Yamamoto, K., Takaishi, T., Ura, H., and Hirai, T., “Study on Noise

- Generation from Slat Tracks Using a High-Lift Wing Model,” AIAA Paper 2015-3141, June 2015. doi: 10.2514/6.2015-3141
8. Murayama, M., Yokokawa, Y., Ito, Y., Yamamoto, K., Takaishi, T., Ura, H., and Hirai, T., “Study on Change of Noise Generation by Slat Track Shape,” AIAA Paper 2016-2959, June 2016. doi: 10.2514/6.2016-2959
 9. Murayama, M., Sakai, R., Ito, Y., Masataka, K., Yokokawa, Y., Ura, H., Yamamoto, K., Takaishi, T., Hayashi, K., Ueno, Y., and Isotani, K., “Noise Reduction Design for High Lift Devices of Regional Jet,” AIAA Paper 2022-2955, 2022. doi: 10.2514/6.2022-2955
 10. Yamamoto, K., Tanaka, K., Hirai, T., and Murayama, M., “A Numerical Study on Noise Generation Caused by Slat tracks,” AIAA Paper 2023-4478, 2023. doi: 10.2514/6.2023-4478
 11. Furuya, R., Murayama, M., Sakai, R., and Ito Y., “Aerodynamic Shape Design and Aeroacoustics Evaluation of Krueger Flap for Two-Dimensional Natural Laminar Flow Airfoil,” Proceedings of the 59th Aircraft Symposium, 3D14, 2021, (in Japanese).
 12. Murayama, M., Ito, Y., and Furuya, R., “Computational Study on Noise from Natural Laminar Flow Infinite Wing with Krueger Flap and Comparison to Slat Noise,” AIAA Paper 2024-3349, 2024. doi: 10.2514/6.2024-3349