

平成 28 年 5 月 25 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420105

研究課題名(和文)境界層埋没型ボルテックスジェネレーターによる境界層剥離抑制の数値的研究

研究課題名(英文) Numerical study of suppressing boundary layer separation using submerged vortex generator

研究代表者

澤田 恵介 (Sawada, Keisuke)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80226068

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：複雑形状を有する境界層埋没型ボルテックスジェネレーター(SVG)周りの圧縮性粘性流れ場解析のために、不連続ガレルキン法に基づく非構造格子法を構築した。既存の風洞試験結果の再現によって解析手法の検証を行ったのちに、ベーン型や2段直列のダブルレット型とウィッシュボーン型SVGの解析を行ない、SVGで生成される縦渦の融合や渦核位置について検討した。

2段直列型のSVGでは、初段で形成された縦渦が後段で生成された渦と融合することによって渦度を保つとともに、後段のSVGを乗り越える際に渦核位置が壁面からリフトアップすることによって壁面近くの強い散逸領域を逃れ、縦渦の効果が下流側に及ぶことを見出した。

研究成果の概要(英文)：A discontinuous Galerkin method for unstructured mesh for solving viscous compressible flow is developed for examining flows over submerged vortex generators (SVG) which have complicated geometries. Validation of the present numerical method is accomplished by comparing the computed results with the existing wind tunnel data. Then, flows over SVGs having either vane, doublet, and wishbone geometries are closely examined.

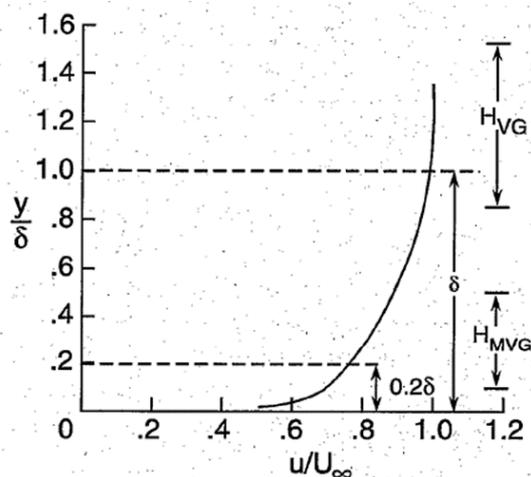
The computed flowfield over a pair of doublet SVGs in series configuration shows that a longitudinal vortex generated at the first doublet SVG is merged with another longitudinal vortex from the second one to strengthen the overall longitudinal vortex in the downstream region. It is also shown that the vortex core of the merged vortex lifts up from the wall region when it leaves from the trailing edge of the second SVG for escaping from the highly dissipative region close to the wall surface.

研究分野：計算空気力学

キーワード：ボルテックスジェネレーター 境界層埋没型 不連続ガレルキン法 非構造格子法 縦渦融合 渦核位置制御

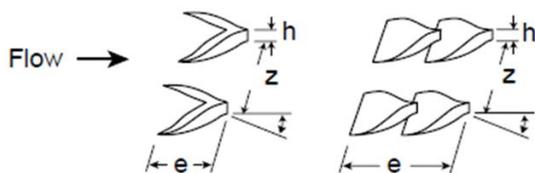
1. 研究開始当初の背景

航空機の離着陸時高迎え角時の境界層剥離や、遷音速域飛行時の衝撃波と境界層干渉による境界層の剥離は、離着陸性能や高速飛行時の飛行可能境界を決定づける。境界層剥離発生を抑制するために、翼面上に複数のボルテックスジェネレーター(以下、VG)がしばしば配置される。通常VGは、境界層厚さ程度の高さを持ち、シャープなエッジで縦渦を生成して境界層内部に流れ方向の運動量を供給することによって、逆圧力勾配下の境界層剥離を抑制する。VGのエッジ位置が境界層から突き出るほうが縦渦は強くなり境界層剥離抑制効果は高まるが、縦渦による総圧損失も同時に大きくなる。境界層剥離を抑制しながら縦渦による空気抵抗増加を低減するために、境界層厚さの0.1~0.5倍程度の高さしかない境界層埋没型VG(以下、SVG)の利用が検討されている。



J.C.Lin. AIAA 1999-3404

SVGは境界層内の流速が低下した領域で縦渦形成するために、縦渦による損失は小さくなるが剥離抑制効果は当然低下してしまう。しかし、ダブルレット型やウィッシュボーン型と呼ばれる複雑形状のSVGを複数個配置することによって、生成される縦渦は相対的に弱いものの、剥離抑制効果は通常のVGと遜色のないSVGが提案されている。



Wishbone Doublets

J.C.Lin. Progress in Aerospace Science 2002

従来型のVGに替えてSVGの利用が進めば、小さな空気抵抗と広い飛行可能領域が実現して航空機の価値や商品力が高まる。SVGの実用化を目指すには、なぜSVGが相対的に弱い渦を使っているにも関わらず境界層

剥離抑制効果を維持できるのかを解明しなければならない。しかし、SVGは翼弦長に比べて1/1000程度の高さに過ぎず、風洞で用いるスケールモデルにSVGを設置することは困難である。SVGの効果を確認して最適形状、最適配置を見出していくには、数値解析の活用が不可欠であるが、スケール比の大きさやSVGの複雑形状は構造格子利用を前提とした高次精度解法の利用を困難なものとしており、数値解析自体も容易ではない。

2. 研究の目的

- (1) 代表的長さとのスケール比が1000程度ある微小かつ複雑な形状を有するSVG周りの圧縮性粘性流れ場を精度よく与える数値解析手法の開発を行う。
- (2) 構築された数値解法の検証を行う。微小なSVG周りの流れ場を解像できるか、同時に代表長さの物体と組み合わせた場合に全体の流れ場の様子や剥離抑制効果を再現できるのかを調べる。
- (3) SVG周り流れ場の解明を行う。また、境界層埋没型でありながら、通常のVGと遜色のない剥離抑制効果を生み出す秘密を解明し、新たなSVG形状を創出する重要な設計パラメータを見出す。

3. 研究の方法

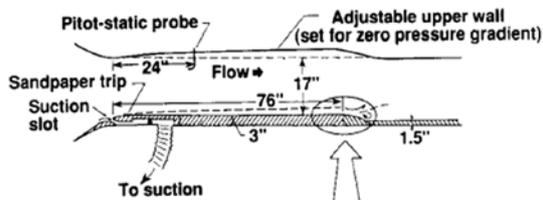
- (1) 高い形状適合性を得るために非構造格子法を採用する。また、一般に高々空間2次精度にとどまる非構造格子法の空間精度を定式通りの精度に高めるために、不連続ガレルキン法に基づく非構造格子法を構築する。さらに、高い計算効率を得るために、並列計算効率の高いセル緩和型陰解法を導入する。
- (2) 風洞試験データの存在するダブルレット型SVGを配置した後方ランプ形状の解析を行い、風洞内流れ場の静圧勾配の再現、SVG周りの静圧分布の比較と、SVGによる剥離域長さ変化を求め、風洞試験データとの比較より構築された数値解析手法の検証を行う。
- (3) 単体のダブルレット型とウィッシュボーン型SVG周り流れ場、直列に配置したダブルレット型SVG周り流れ場を求めて、縦渦がどのように生成されるのか、直列形状のダブルレット型SVGから生じる縦渦の融合がどのように起こるのか、ダブルレット型とウィッシュボーン型のSVGでは渦核の壁面からの高さがどのように変化するかなどの解明を行い、新たなSVG形状創成につながる設計パラメータを見出す。

4. 研究成果

- (1) 非構造格子用のセル緩和型陰的不連続ガレルキン法を構築した。異なる計算セル形状が混在するハイブリッド型非構造格子に対して、空間精度4次精度を実現した。空間3次精度についての研究成果はジャーナル論文に発表している。また、空間4次精度のセル緩和型陰解法については、計算効率をさら

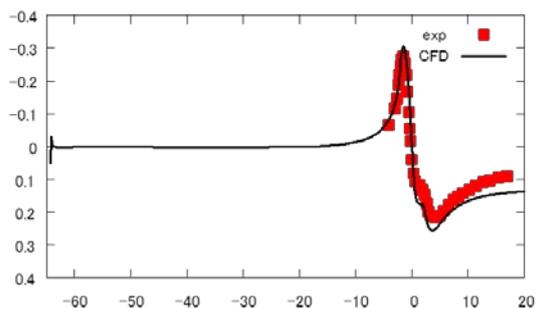
に高めるために、従来のヤコビ行列簡略化や凍結法に代わって、既定関数の直交性に基づく高速化法を提案している。構築されたセル緩和型陰的不連続ガレルキン法は3次元翼周り流れ場解析に適用され、風洞試験データとの比較から空間精度向上が実証された。

(2) 風洞の風路下壁が後方ランプ形状であり、風路上壁を傾斜させて壁面に発達する境界層の排除厚さを補正し、ゼロ静圧勾配を実現した風洞が実験では用いられた(下図)。

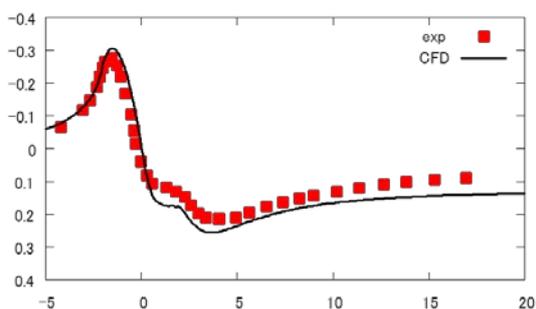


J.C.Lin. Progress in Aerospace Science 2002

計算では、実際の風路形状に対して格子を生成し、上壁の開き具合を変えて静圧勾配の有無と、後方ランプ付近の静圧分布の一致を比較検討したところ、以下のように静圧勾配がなく、後方ランプ付近の静圧分布が程よく再現できることを見出された。



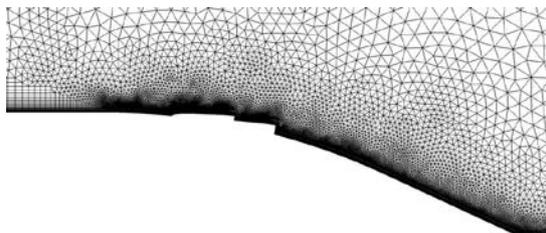
風路全体の静圧分布と風試データとの比較



後方ランプ周辺の静圧分布比較

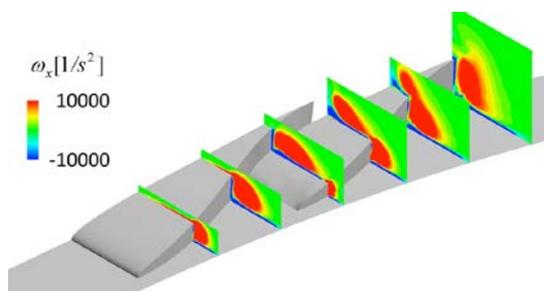
次に、後方ランプ部に直列に2個のダブルレット型 SVG を配置した場合の計算を行った。ダブルレット型 SVG については、Lin の論文にすべての形状パラメータが示されているわけではない。例えば、直列に配置したダブルレット型 SVG の重なり具合や、平面形状、あるいは側面形状が記載されていない。このため、これらの形状パラメータは本研究で独自に決定されており、必ずしも風洞試験形状と一

致していない。下図に対称面内の非構造格子を示す。後方ランプ部に直列配置された2個のダブルレット型 SVG の断面形状がみられる。



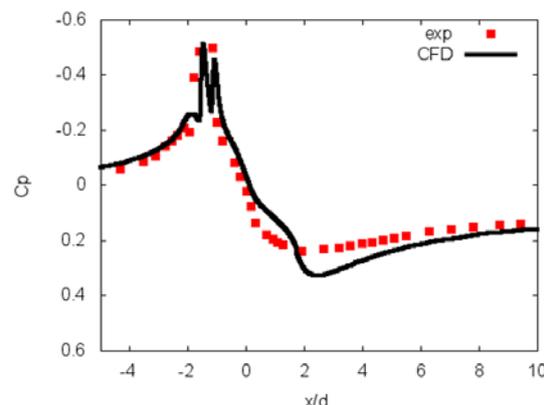
対称面内後方ランプ部の非構造格子分布

また、1/2 対称性を仮定した場合の流れ方向渦度分布を下図に示す。初段 SVG の側面エッジで形成された縦渦は後段 SVG の上面に乗って対称面に寄って行くが、同時に後段の側面エッジで形成された二つ目の縦渦と後縁手前で融合する様子がわかる。



直列ダブルレット型 SVG 周り流れ方向渦度分布

対称面内の静圧分布について風試データとの比較を行った。このとき、対称性を仮定した1/2解析モデルと両側を考慮した完全形状解析モデルの二種類を検討したが、1/2対象を仮定した場合は静圧分布に差異が生じてしまい、対称性を仮定しない完全形状で風刺データとの良好な一致を得られることが判明した。以下では1/2対称性を仮定しない完全形状に対する計算結果を示す。

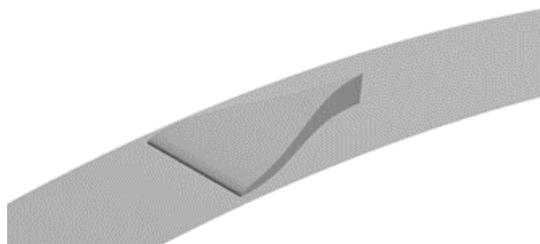


完全形状に対する静圧分布比較

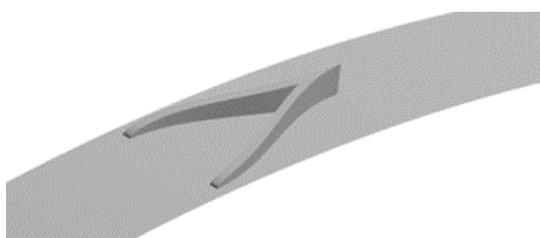
直列配置した二つのダブルレット型 SVG に対応して、対称面内に二つの膨張域が現れている。また、後段 SVG の後縁下流側でまずまず

の一致を示していることが分かる。剥離域の長さも風試データと程よい一致を示した。

次に単体のダブルレット型 SVG 及び単体のウィッシュボーン型 SVG 形状周り流れ場の比較を行った。ウィッシュボーン型の SVG の平面形状と側面形状はダブルレット型 SVG と同一形状とした。一方、ウィッシュボーン型では、ダブルレット型 SVG の内側をくり抜いている。下図に形状データを示す。

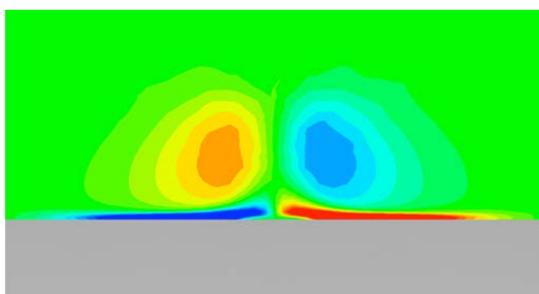


単体のダブルレット型 SVG

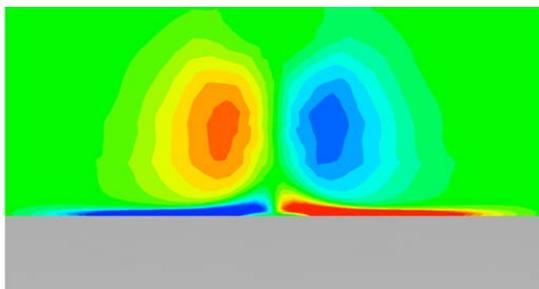


単体のウィッシュボーン型 SVG

計算で得られた SVG 後縁下流側位置における主流方向渦度分布を比較すると、

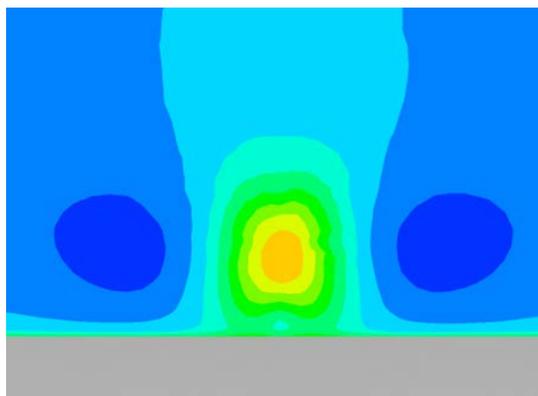


主流方向渦度分布(ダブルレット型 SVG)

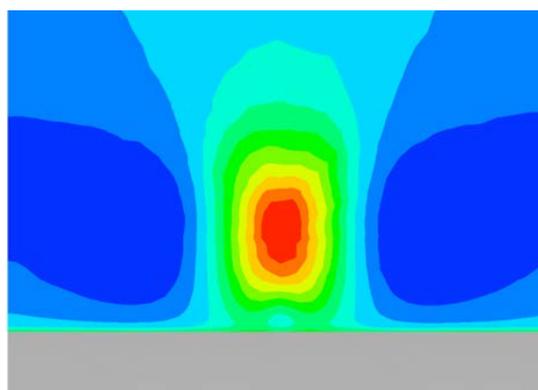


主流方向渦度分布(ウィッシュボーン型 SVG)

これらの比較から、ウィッシュボーン型 SVG では生成された縦渦が強く、また、上下に伸びた断面形状を有することが分かる。一方、同一断面内における壁面垂直方向速度分布を以下に示す。



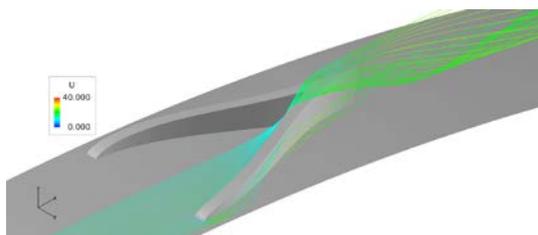
壁面垂直速度分布(ダブルレット型 SVG)



壁面垂直速度分布(ウィッシュボーン型 SVG)

ウィッシュボーン型 SVG では、縦渦の外側では壁面に向かう速度成分が大きく、縦渦が流れ方向運動量を持つ流れを供給している様子がわかる。一方、対称面(中央部)では、ウィッシュボーン型 SVG の壁面から離れる方向の速度成分が大きくなっており、渦が上下に伸びる原因となっている。

ウィッシュボーン型 SVG はダブルレット型 SVG に対して境界層剥離抑制効果が高く、剥離抑制長さも長いことが知られている。以上の解析結果は、ウィッシュボーン型 SVG 後縁位置での上方速度成分に乗って縦渦の渦核位置が壁面から離れることを示唆している。このとき、壁面近傍の強い散逸域から縦渦が逃げて下流域まで届くことが理解される。このような流れ場の様子は、ウィッシュボーン型 SVG に対する下図の流線分布においても示されている。これより、縦渦の渦核位置の軌跡が重要な設計パラメータであることが示された。



引用文献

① J. C. Lin, "Control of Turbulent Boundary Layer Separation Using Micro-Vortex Generators," AIAA Paper 99-3404, 1999.

② J.C. Lin, "Review of research on low-profile vortex generators to control boundary-layer separation," Progress in Aerospace Sciences, 38:389-420, 2002.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 1 件)

① H. Asada, K. Yasue, Y. Ogino and K. Sawada, "A Third Order Accurate Cellwise Relaxation Implicit Discontinuous Galerkin Scheme for Unstructured Hybrid Meshes," Mathematical Problems in Engineering, Vol. 2014, Article ID 176752, 2014. doi:10.1155/2014/176752

[学会発表] (計 5 件)

① 澤田恵介, 渡邊翔太郎, "境界層埋没型ボルテックスジェネレーター周り流れ場の数値解析(その2)," 平成27年度航空宇宙空力シンポジウム, 指宿いわさきホテル, 指宿市, 1月22日, 2016.

② 渡邊翔太郎, 澤田恵介, "境界層埋没型ボルテックスジェネレーター周りの流れ解析に関する数値的研究," 第29回数値流体力学シンポジウム, 九州大学筑紫キャンパス, 福岡市, 12月16日, 2015.

③ 澤田恵介, "境界層埋没型ボルテックスジェネレーター周り流れ場の数値解析," 平成26年度航空宇宙空力シンポジウム, 皆生グランドホテル天水, 米子市, 1月23日, 2015.

④ H. Asada, K. Yasue, Y. Ogino and K. Sawada, "A Fourth Order Accurate Cellwise Relaxation Implicit Discontinuous Galerkin Scheme for Solving RANS Equations," AIAA Paper 2015-0057, Kissimmee, Florida, USA, January 5, 2015.

⑤ H. Asada, K. Yasue, Y. Ogino and K. Sawada, "Improvement of Cellwise Relaxation Implicit Discontinuous Galerkin Scheme," COMPSAFE2014, Sendai International Center, Sendai, Japan, April 16, 2014.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：

国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

[その他]  
ホームページ等  
<http://www.cfd.mech.tohokua.ac.jp>

6. 研究組織  
(1) 研究代表者  
澤田 恵介 (SAWADA, Keisuke)  
東北大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号：80226068

(2) 研究分担者 ( )

研究者番号：

(3) 連携研究者 ( )

研究者番号：