

# 境界層埋没型ボルテックスジェネレーター一周りの流れ解析に関する数値的研究

## Numerical study of flow analysis around sub-boundary layer vortex generators

- 渡邊 翔太郎, 東北大, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, watanabe@cfm.mech.tohoku.ac.jp  
澤田 恵介, 東北大, 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, sawada@cfm.mech.tohoku.ac.jp:  
Shotaro Watanabe, Tohoku university, 6-6-01, Aramaki aza aoba, Aoba ward, Sendai city, Japan  
Keisuke Sawada, Tohoku university, 6-6-01, Aramaki aza aoba, Aoba ward, Sendai city, Japan

The flowfield over a pair of doublets type submerged vortex generators (sub-boundary layer vortex generators) placed in tandem on the backward facing ramp is computed by solving the RANS equations. A second order Discontinuous Galerkin solver for hybrid unstructured meshes is utilized. It is shown that the computed  $C_p$  profile along the symmetric flow of the ramp surface agrees reasonably well with the experimental data given by J.C. Lin (1991). It is also shown that a pair of longitudinal vortices from the submerged vortex generators are merged behind the second vortex generator to yield a bigger one, which further introduces streamwise momentum effectively toward the ramp surface in the downstream region..

### 1. 緒言

航空機の翼は、流れが壁面に沿うことを前提に設計される。しかし、過大な迎え角では翼壁面付近の遅い流れが逆圧力勾配に耐えきれなくなり剥離するので、失速と呼ばれる揚力が急激に減少してしまう現象が生じる場合がある。

剥離を遅らせる手段としてボルテックスジェネレーター(Vortex Generator, VG)を剥離が生じる領域の上流側に設置する場合が多い。VGは境界層厚さ程度の高さを持つ空力デバイスであり、気流中に縦渦を形成して境界層内外の速度を攪拌する。その結果、境界層内部の遅い流れに運動量が供給され、剥離抑制が可能となる。また、近年では遷音速領域で生じるパファットの緩和にも効果があるため、様々な航空機で採用されている。しかし、VGは強い縦渦を形成して大きな総圧損失を生み、有害抵抗の原因となる。

この有害抵抗を低減するために近年、境界層埋没型ボルテックスジェネレーター(Submerged vortex generator, Sub-boundary layer vortex generators, SVG)が注目されている。従来のVGに対して、SVGは高さが境界層の0.1~0.6倍であり、SVGが生成される縦渦はVGに比べ弱いため総圧損失を小さくすることができる。しかしSVG1つあたりの効果はVGに比べて小さいため、VGと同等の効果を得るために複数のSVGを組み合わせている。

1999年にJ.C. LinはBackward rampに様々なタイプのSVGを取り付けてその効果と抵抗の関係を調査した。境界層厚さの0.1倍の高さで図1のようにSVGを直列に2つ並べたDoublets型SVGと長方形の薄板を主流に対し角度を持たせて並列に並べたvane型SVGが効率的に剥離を抑制する効果があることを明らかにした<sup>(1)</sup>。また、SVGを設置することで生じる有害抵抗はその高さに関係することを示し、同じ高さのvane型SVGとDoublets型SVGではDoublets型VGが同程度の有害抵抗で、およそ2倍剥離を遅らせる効果があることを示した。

近年、航空機に対しても省エネルギー化の波が押し寄せている。航空機に用いられているのは多くがVGであり、SVGに関しては発展途上と言える。特にDoublets型SVGではデバイスの小ささから翼のスケールに合わせた実験は困難である。また、その形状の複雑さから数値計算においても構造格子での格子生成が困難である。

本研究では、低抵抗で効率的に渦を生成することができると言われているDoublets型SVGについて非構造格子を用いた数値解

析を行い、流れ場および効果の確認を行うことを目的とする。

### 2. 計算手法

支配方程式はレイノルズ平均された三次元圧縮性 Navier-Stokes (RANS) 方程式であり、2次精度不連続ガレルキン法を用いて空間離散化を行った、時間積分はセル緩和型陰解法を、対流流束評価には AUSM-DV 法を、粘性流束評価には BR2 法を用いた。乱流モデルには SVG で生成した縦渦での拡散を抑えるため、Rotation-correction を施した Spallart-Allmaras モデルを用いた。また、METIS による領域分割を行い、MPI ライブラリを用いた並列化を行った。

### 3. 計算条件

NASA のラングレー研究所で行われた風洞試験<sup>(3)</sup>における  $C_p$  分布と計算結果との比較を行う。風洞の形状を図2に示す。主流速度は40.23[m/s]。ランプ入り口での境界層厚さ及び排除厚さはそれぞれ32.512[mm]、3.302[mm]、排除厚さを基準としたレイノルズ数は9000である。

風洞試験では、助走区間での静圧勾配をゼロとするように上壁面形状を定めてある。この条件を再現するため、CFD 解析では上壁面を滑り壁としランプ入り口まで下面における排除厚さの成長分だけ流路を拡大した。そしてランプ部において助走区間で拡大した分だけ流路を縮小し、ランプ下流領域では流路の面積を一定とした。SVGを取り付けていない時の  $C_p$  分布を図3に示す。横軸は剥離点(風洞入り口からの距離  $x = 2090.9[mm]$ )を基準とし、ランプ入口における境界層厚さを用いて無次元化した主流方向距離、縦軸は圧力係数  $C_p$  である。図3から、SVGを設置していない場合の  $C_p$  分布をよく再現できたと見え、上壁面をこの形状に固定してSVGを設置し、計算を行った。

設置した SVG 設計パラメータを表1に示し、それぞれのパラメータの位置を図4で表す。設置する SVG は2枚の Doublet 型 SVG を直列に二枚取り付けたものである。SVG の高さは境界層厚さの約9%であり、SVGを取り付けない時の剥離点を基準として境界層厚さの0.6倍だけ上流の位置に後端が一致するように取り付けた。また2枚のSVGは長さ方向に25%だけ重ねた。

図5,6,7に作成したDoublets型SVG1枚の半裁モデル、計算格子全体、ランプ部での計算格子を示し、表3に各セルのセル数を示す。SVG中心面及びSVG間の中心で対称境界を用い、総セル数を削減した。最小格子幅は0.05[mm]( $y^+ = 1$ )、格子成長率は1.15

と設定し計算格子を作成した。

Table.1 Doublets 型 SVG 設計パラメータ

高さ h [mm]	長さ l [mm]	幅 s [mm]	間隔 λ [mm]
2.8	31.75	10.67	12.7

Table.2 各形状セル数

セル形状	セル数
四面体格子	891,663
六面体格子	1617
プリズム格子	652,617
ピラミッド格子	4329

#### 4. 計算結果

図 8 に隣接する SVG 間の対称面における  $C_p$  分布を、図 9 に壁面  $C_p$  分布および壁面流線を示す。図 8 からランプ入り口および設置した SVG 周辺の圧力が低くなる領域を再現できていると言え、全体的に良く一致したと判断する。 $x/d = -0.1 \sim 1$  において局所的に圧力が高くなる場所を確認できる。これは図 9 に示す SVG 後端およびランプ後端付近で生じている循環領域の最上流側で局所的に流れが淀んでいる影響であると考えられる。

図 10 は SVG 周りの流れ場の様子を表しており、等値面は速度勾配テンソルの第二不変量 ( $Q = 2 \times 10^7$ ) である。ここで等値面は主流方向速度で色づけされている。図 10 より、上流側 SVG 側面にて発生した縦渦が下流側 SVG の上面を通っていることが分かる。また、下流側 SVG 側面でも上流側と同様に縦渦が発生し、後端付近で一つの渦にまとまっていることが確認できる。この渦の軌跡は 1993 年に Ron らが行った Doublets 型 SVG 周り流れ可視化実験<sup>(4)</sup>の結果と定性的に一致する。次に縦渦周辺の流れ場を詳細にみるため、図 11 に SVG 中心での対称面及び各 yz 平面 ( $x = 2040 \sim 2075$  [mm] まで 5 [mm] 間隔) における主流方向渦度分布を示す。図 10 と同様に、上流側 SVG および下流側 SVG 側面から渦が発生していることが確認できる。また、発生した渦は上流側から見て時計回りとなっており、隣接する SVG の間に吹き下ろしの効果を与える方向となっていることが分かる。

$x = 2050$  [mm]における下流側から見た渦度分布および yz 平面に射影した速度ベクトルを図 12 に、主流方向速度分布を図 13 に示す。図 12 から上流側 SVG 側面で生成される渦は SVG 間の対称面に吹き下ろしとなる方向に回転していることがわかる。これにより渦の左側の領域では壁面から離れた位置を流れる速度の大きい流れを壁面付近に引き込むことができる。よって図 13 の渦左下部において壁面付近まで主流方向速度の大きい領域が存在することとなる。

$x = 2060$  [mm]における下流側から見た渦度分布および yz 平面に射影した速度ベクトルを図 14 に、主流速度分布を図 15 に示す。図中に見える SVG は 2 枚のうち下流側に設置したものである。図 14 において SVG 上面に存在する渦は上流側の SVG で生成された縦渦が流れてきたものであり、SVG 側面にある渦は下流側 SVG で作られた渦である。2 つの渦はどちらも隣接する SVG 間に吹き下ろしの効果を与える方向に回転している。図 14 から SVG 上面を流れる渦は、SVG 側面で発生した渦へも速度の速い流れを引き込んでいることが分かる。したがって上流側 SVG で生成された渦は、ランプ壁面だけでなく、下流側 SVG で発生する渦に対しても運動量を供給していることが分かる。

$x = 2070$  [mm]断面での下流側から見た渦度分布および yz 平面に射影した速度ベクトルを図 16 に、主流速度分布を図 17 に示す。図 16 で確認できる渦は、隣接する SVG 間に吹き下ろしの方向で回転しているもの 1 つだけである。図 17 でも同様の結果が確認で

き、渦の左側では吹き下ろしの効果で壁面付近まで速度の速い領域が存在するが、渦の右側では吹き上げの効果により速度の遅い領域が広く確認できる。したがって下流側 SVG 後端付近では図 10, 11 で示されたように、上流側 SVG で生成された渦と下流側 SVG で生成された合計 2 つの渦が一体になっていると言え、図 9 の SVG 後端で発生した循環領域は SVG 中心面付近での速度の遅い領域が逆圧力勾配に耐えられずに発生したものと考えられる。

#### 5. 結言

非構造格子法を用いた Doublet 型 SVG 周りの流れ解析を行った。実験で行われた風洞上壁面の調整による助走区間での静圧勾配ゼロ条件の再現は、滑り壁を各 x 断面での流路を排除厚さ分だけ拡大することで達成した。Doublets 型 SVG を設置した解析では、ランプ入り口および設置した SVG 周辺での圧力の低い領域を捉え、全体的に良く一致を示した。渦は上流側・下流側の両 SVG 側面で発生することを明らかにした。上流側 SVG 側面で生成された渦は下流側 SVG の上面へと流れていくことを確認し、過去の実験と定性的な一致を示した。この渦は SVG 間の壁面付近へ運動量を供給するだけでなく、下流側 SVG で生成される渦に対しても速度の大きい流れを引き込むことが分かった。そして下流側 SVG で生成された渦は SVG 後端付近で上流側 SVG によって生成された渦と合さり 1 つの大きな渦となり、SVG 間に吹き下ろしの効果を生じる方向となった。

#### 参考文献

- (1) J. C. Lin, "Control of Turbulent Boundary Layer Separation using Micro-Vortex Generators" AIAA 99-3404
- (2) John. C. Lin "Review of research on low-profile vortex generators to control boundary layer separation" Progress in Aerospace Science, 38(2002), pp. 389-420.
- (3) J. C. Lin, "Exploratory Study of Vortex-Generating Devices for Turbulent Flow Separation Control" AIAA 91-0042
- (4) Ron Barrett and Saeed Farokhi, "ON THE AERODYNAMICS AND PERFORMANCE OF ACTIVE VORTEX GENERATORS" AIAA 93-3447-CP



Fig. 1 Doublets type SBVG geometry.<sup>(2)</sup>

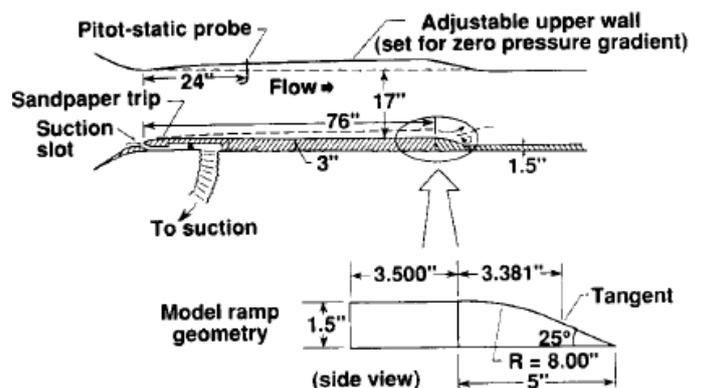


Fig. 2 Test configuration in wind tunnel.<sup>(3)</sup>

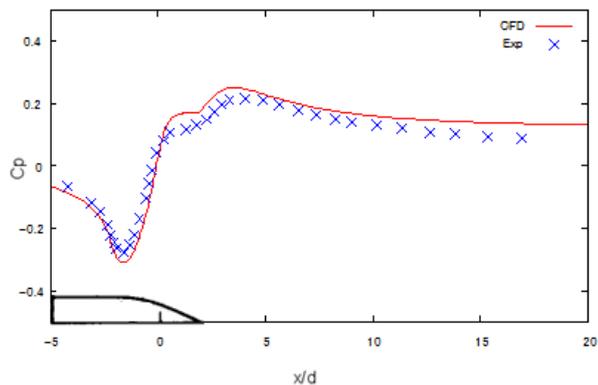


Fig. 3 Pressure distribution of Baseline.

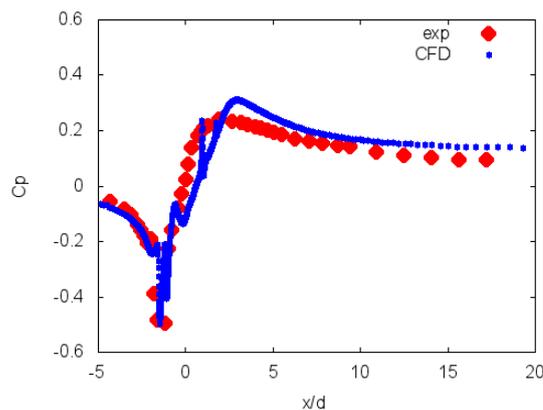


Fig. 8 Pressure distribution at center line between Doublet VGs .

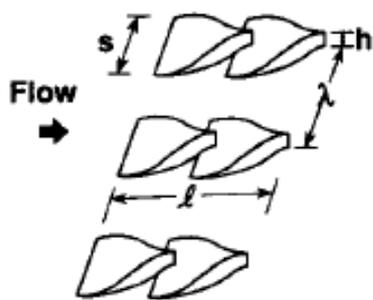


Fig. 4 Geometry of Doublet SVG<sup>(3)</sup>

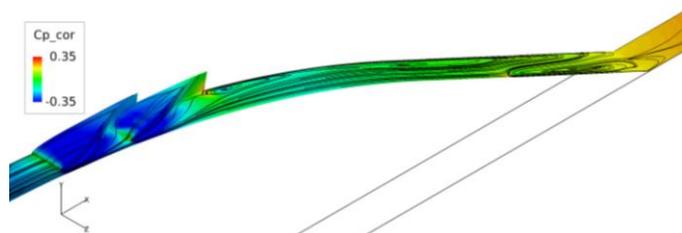


Fig. 9 Pressure distribution and streamline on the wall.

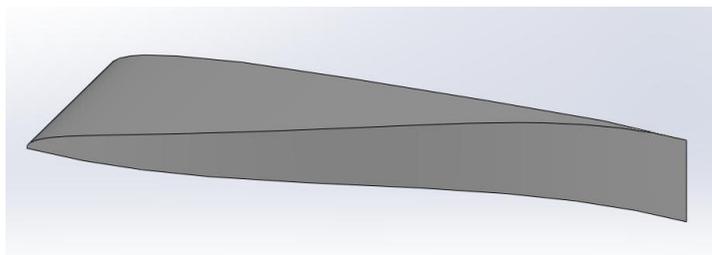


Fig. 5 CAD data of Doublet SVG

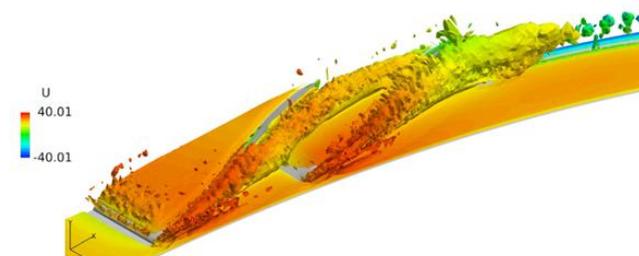


Fig. 10 Iso-surface of the second invariant of the gradient tensors (colored with streamwise velocity).

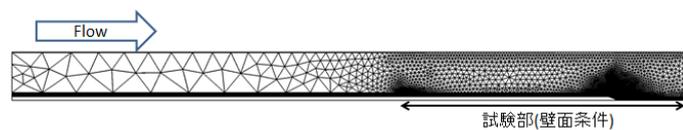


Fig. 6 Computational Grid (General view).

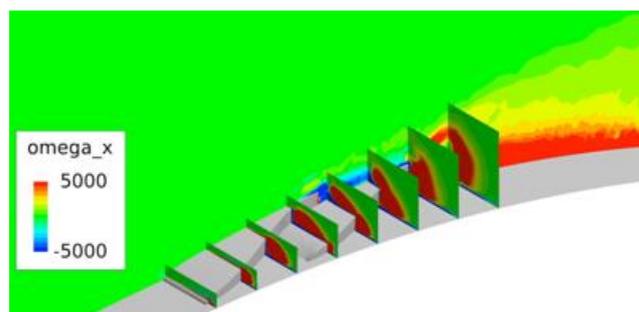


Fig. 11 Streamwise vorticity distribution .

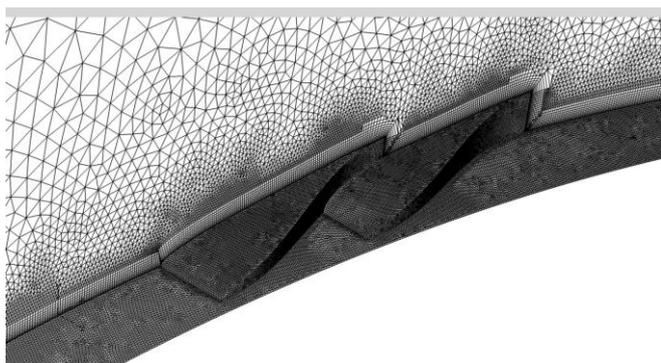


Fig. 7 Computational Grid (near Doublet SVG).

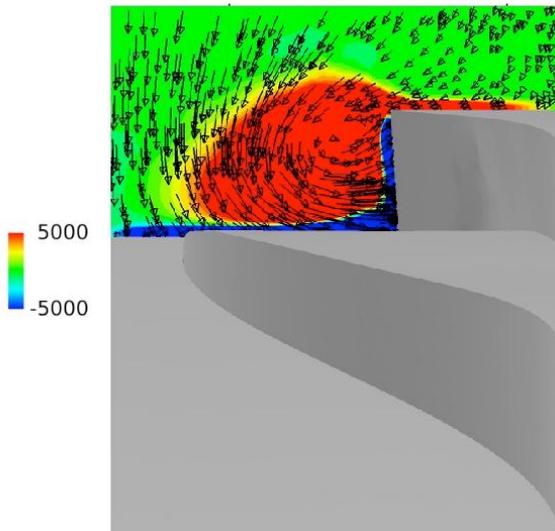


Fig. 12 Streamwise vorticity distribution and speed vector(x=2050).

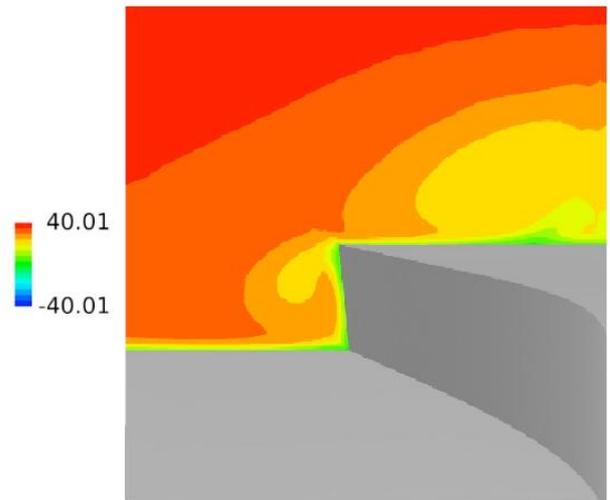


Fig. 15 Streamwise velocity distribution (x=2060).

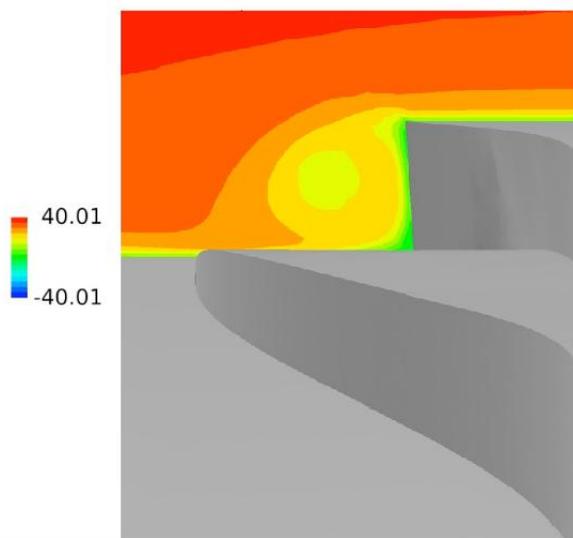


Fig. 13 Streamwise velocity distribution (x=2050).

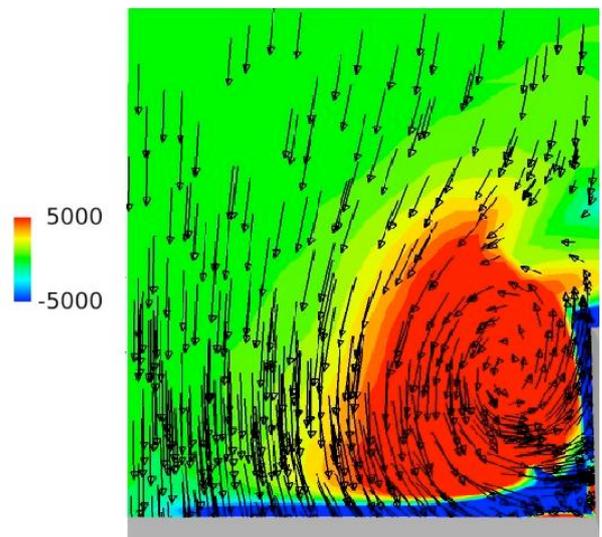


Fig. 16 Streamwise vorticity distribution and speed vector(x=2070).

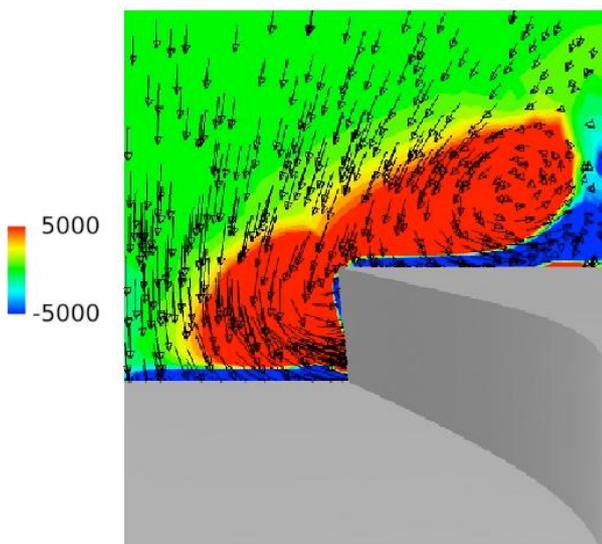


Fig. 14 Streamwise vorticity distribution and speed vector(x=2060).

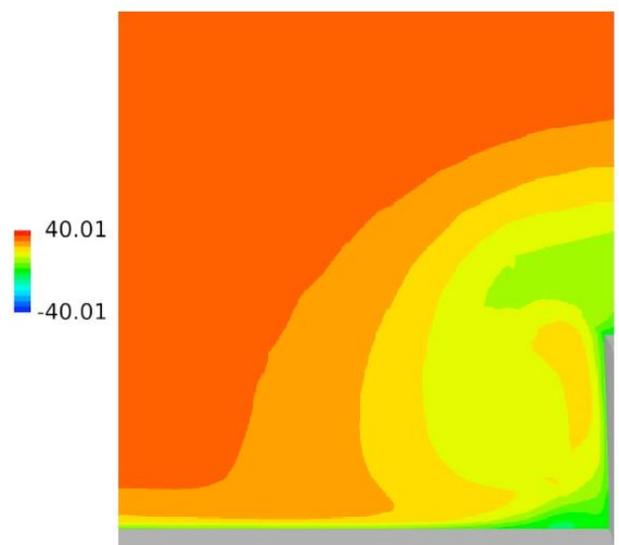


Fig. 17 Streamwise velocity distribution (x=2070).