

繋げる事を目的とする。具体的にはSJによる剥離制御メカニズムについて、主流方向運動量の交換過程（4章）；最適な駆動周波数と流れの不安定周波数の関係（5章）；SJ由来の擾乱の持つ3次元性が剥離制御性能に及ぼす影響（6章）を議論する。また最後に、DBDPAを用いた剥離制御流れとの比較を行い、これらの剥離制御メカニズムのマイクロデバイス全般に対する適用可能性（7章）を議論する。なお本研究では、SJにより投入される擾乱が非定常性の強い微細な渦構造を持つ事から、高精度な非定常計算を可能とするlarge-eddy simulation（LES）に基づき、SJのキャビティ変形を移動変形格子により表現した数値解析を行う。本研究の制御対象とする剥離流れは、NACA0015翼型・迎角12度・翼弦長に基づくレイノルズ数63,000の低レイノルズ数流れであり、前縁から大きく剥離した失速直後の流れである。SJの形状は、スパン方向に2次元形状を持つ単純なキャビティとし、翼前縁に取り付けるものとした。

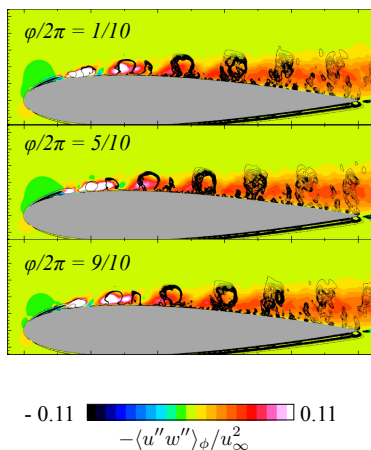


図1：位相平均場におけるレイノルズ応力の非周期成分と大規模渦構造（黒色の等高線）

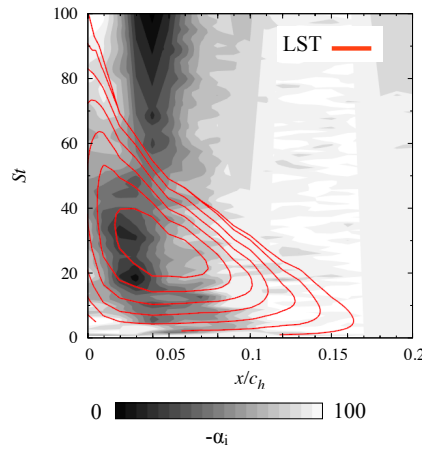


図2：前縁付近の速度変動の空間成長率（赤線：線形安定性解析の結果；白黒の等高線：LESの非定常データ）

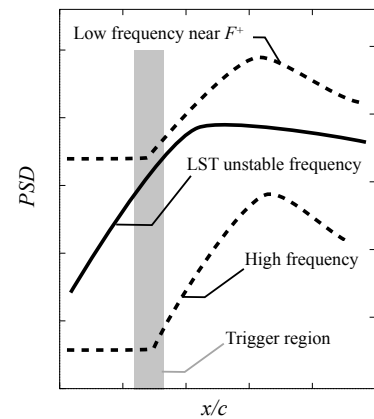


図3：剥離制御流れにおける前縁付近の速度変動の空間成長の模式図

4章では、駆動周波数を $F^+=1\sim 30$ 、駆動強さを $C_\mu=2.0\times 10^{-3}, 2.0\times 10^{-5}$ （ C_μ はSJにより誘起される流れと一様流の単位長さ時間辺りの運動量比）と変化させ、剥離制御性能における駆動周波数・駆動強さ依存性を整理した。なお、本研究での剥離制御性能は準定常状態における揚抗比の時間平均値に基づく。まず駆動強さについては既往研究で示されている通り、 C_μ が大きいく程、剥離制御性能が高い事を示した。一方、駆動周波数は $F^+=6\sim 20$ の範囲で特に高い剥離制御性能を示した。これは主に、前縁付近に形成される層流剥離泡を小さく保ち、前縁の負圧値を下げ抗力を低下させる事による。続いて剥離制御流れにおける主流方向運動量の交換過程を、翼弦・鉛直方向の速度変動成分から構成されるレイノルズ応力の空間分布から定量的に評価した。駆動周波数に基づく位相平均解析によりレイノルズ応力を周期・乱流（非周期）成分に分解すると、いずれの剥離制御流れにおいても乱流成分が支配的と分かった。また同時に、スパン方向に軸を持つ2次元的な大規模秩序渦が翼面上に周期的に分布してお

り,このような大規模秩序渦によってレイノルズ応力の乱流成分が翼面全体に運搬される事(図1参照)を明らかにした.

5章では,剥離制御性能の高い駆動周波数($F^+=6\sim 20$)と流れの不安定周波数の関係を明らかにした.まず非粘性・局所平行流近似(Rayleigh方程式)の下で,前縁付近の剥離剪断層における擾乱の空間発展に対し,最大増幅率を与える線形不安定周波数を求めた.これを,LESにより得られた非定常データに基づき算出した不安定周波数と比較すると,いずれの剥離制御時の流れ場においても前縁付近で両者が一致(線形成長領域が存在)する事が分かった($St=30\sim 40$;図2参照).一方,剥離泡後方付近では線形不安定周波数と異なる低・高周波数域で強い増幅率を示した.特に低周波数域での強い増幅率は,4章で特定した駆動周波数に同調する大規模秩序渦の生成(剥離泡から放出される小さな渦同士のコア合体)を示すと考えられる.なお擾乱のスペクトルの空間発展を比較すると,線形不安定周波数に相当する擾乱が十分に成長した後,高・低周波数域での擾乱の成長(非線形成長)が始まる(図3参照).ゆえに,これらの非線形成長をより上流側で生じさせる為には,線形不安定周波数の擾乱をより上流側で大きなエネルギー状態まで成長させる必要がある.以上から,前縁付近の剥離剪断層の線形不安定周波数と,大規模秩序渦の生成を促す低周波数の双方を刺激する事が剥離制御の観点で重要である. SJから投入される擾乱は駆動周波数成分だけでなく,駆動周波数に近い高調波成分も強いエネルギーを持つ為,より線形不安定周波数に近い駆動周波数である $F^+=6\sim 20$ で高い制御性能を示すと考えられる.

6章では, SJ由来の擾乱の持つ3次元性が剥離制御性能に及ぼす影響を議論した. その為, 5章まで用いたSJのキャビティモデルに加え, 翼表面の速度境界条件でSJの効果を模擬する境界条件モデルを導入した. 境界条件モデルは, スパン方向に速度分布が変化しない2次元的なモデル($k_{span}/2\pi=0$)と, スパン方向に波数を変化させたモデル($k_{span}/2\pi=10, 20, 30, 95$)を用意した. これらのモデルを用いた剥離制御流れでは, $k_{span}/2\pi=30$ の境界条件モデルにおいて翼面上の3次元性が最も強く現れた. これはキャビティモデルによる剥離制御流れにおいて, 翼面上で卓越するスパン方向波数に相当する. しかし, $k_{span}/2\pi=30$ の境界条件モデルは他のケースに比べ剥離制御性能が低く, 揚力向上の観点では必ずしも優れない事が分かった. これは, 剥離剪断層の3次元化を促進する事は乱流遷移の観点では優れるが, 4章で抽出した大規模秩序渦の強度を弱めてしまい後縁付近での剥離領域が大きくなる為である事を示した. 以上のように, 本流れ条件での剥離制御メカニズムは乱流混合による運動量交換と大規模秩序渦による連行作用の双方に基づく事が裏付けられた.

最後に7章では、同程度の駆動条件を持つDBDPAを用いた剥離制御流れとの比較を行い、6章までに示した剥離制御メカニズムのマイクロデバイス全般に対する適用性を議論した。まず、SJとDBDPA共に、優れた制御性能を与える駆動周波数が $F^+=6\sim 20$ の範囲に局在するという点は共通し、また4章・5章と同様の解析を行う事で両デバイスに共通する剥離制御メカニズム（乱流混合による主流方向運動量の交換・大規模秩序渦による乱流渦の連行作用）が存在する事を示した。一方、SJとDBDPAの誘起する擾乱の違いを同程度の投入運動量の下で議論し、A) 投入運動量が多い時、主流方向に直接運動量を付加する効果はDBDPAの方が強い；B) 投入運動量が多い時、スパン方向の変動成分（流れの3次元性）はSJの方が強い；C) SJの方が局所性の強い流速分布を有する；D) バースト駆動を行うDBDPAでは、交流電圧を使用する事に伴い $St=100$ 以上の高周波成分が強く投入されるという4つの知見を得た。実際、剥離制御性能の観点では、投入運動量が多い場合にはデバイスから直接運動量（A）を投入するDBDPAの方がわずかに高い剥離制御性能を示し、また投入運動量が少ない場合には誘起流速の局所性（C）に優れたSJがより高い制御性能を示した。このように、各デバイス特性の違いに起因して制御性能がわずかに異なる事も示したが、高い剥離制御性能を与える最適な駆動周波数の観点では、デバイスに依存しない統一的な剥離制御メカニズムが存在する事を明らかにした。

本研究では、低迎角・低レイノルズ数の前縁剥離流れに対し、前縁にSJを取り付けた剥離制御の高精度非定常数値解析を行った。本流れ条件では、剥離制御性能の観点で最適な駆動周波数が $F^+=6\sim 20$ 程度に局在する事が分かった。このような駆動条件は、擾乱の空間成長に関する線形不安定周波数成分と大規模秩序渦の生成に寄与する低周波成分の双方を投入するという特徴があり、主流方向運動量の交換を促進する観点から最適である事を定量的に示した。一方、SJによる擾乱の3次元性が乱流遷移の促進に寄与する事を数値実験により明らかにしたが、大規模秩序渦の強度を弱めてしまい剥離制御性能を高める観点では優れない事を示した。また、このような乱流混合・大規模秩序渦による連行作用が運動量交換を促進するという剥離制御メカニズムは、同等の駆動条件を持つDBDPAの剥離制御流れにも見られる事を明らかにし、低迎角・低レイノルズ数剥離流れを制御するマイクロデバイス全般に共通するメカニズムである事を示した。