

機関番号：82645

研究種目：基礎研究 (A)

研究期間：2008～2010

課題番号：20246122

研究課題名 (和文) 局在流れに着目したプラズマアクチュエータ流れ制御に関する研究

研究課題名 (英文) Research on plasma actuator flow control that pays attention to localization flow

研究代表者 藤井 孝藏 (FUJII KOZO)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構

宇宙科学研究所 教授

研究者番号：50209003

研究成果の概要 (和文)：

DBD プラズマアクチュエータによる流体剥離制御の実用化への鍵となる現象理解を目指し、小型風洞実験と高解像度な非定常流れシミュレーションを相補的に利用した研究を進めた。特に低レイノルズ数流れにおいて、アクチュエータが生成する2次元渦構造が乱流遷移現象を誘起し、それが制御効果に強い影響を及ぼしていること、そのために適正な渦構造を誘起する時空間パラメータ設定が大切であることなどを示すことができた。制御に適した無次元パラメータの適正值が現象に応じて複数あることを明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：

Three-years' research for DBD plasma actuator having strong potential to improve aerodynamic performance successfully revealed detailed flow structure of the induced flow field that is associated with separation flow control. Both the experimental and numerical approach is used for better understanding of the induced flow structure. With both the approach tightly coupled, vortex flow structure induced by the DBD plasma actuator is clearly shown. The study revealed that certain types of the flow structure that promotes laminar to turbulent flow transition are the key essence of the flow separation control by the DBD plasma actuator at relatively low Reynolds numbers. The study also revealed that not the one but a few flow control mechanism may exist depending on the conditions.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
20年度	26,200,000	7,860,000	34,060,000
21年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
22年度	4,600,000	1,380,000	5,980,000
年度			
年度			
総計	36,500,000	10,950,000	47,450,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：総合工学・航空宇宙工学

キーワード：航空宇宙流体力学，流体制御，プラズマ，空気力学

1. 研究開始当初の背景

2000年代後半から、誘導体バリア放電(DBD)を利用したプラズマアクチュエータ(別名:DBDアクチュエータ)による流れ制御が脚光を浴びてきた。DBDアクチュエータは機械的なアクチュエータではなく、電気的な動作によって流体変動を起こす装置である。誘導体を挟んだ電極間に交流高電圧をかけることで電極間の気体をプラズマ化し、電極の作る電場によりプラズマ化された流れを加速させることで、瞬間的な誘起流れ(局時流動, 一数 m/sec)が発生する(図1)この装置は、動的に制御を行えることや可動部がないこと等から将来有望な剥離流れの制御技術として世界中で注目されはじめた。

DBDアクチュエータは、上記の特徴から、より広い流体制御技術としての将来を有している。応用先として航空宇宙分野だけでなく地上のさまざまな流体機器における小型システムとしての期待も膨らむが、具体的な研究はほとんどはじまっていない。

本研究開始時点までの研究における課題は以下の2点に要約される。

(1) アクチュエータの有効性がメカニズム理解により先に示されたために、剥離制御の効果が実験の積み重ねによって経験的に議論されてきた。まずは現象を理解し、メカニズムを明らかにすることによって、効果的に動作条件(動圧の限界、物理サイズの影響など)等の議論を行う必要がある。

(2) 電圧、交流電圧周波数、電極配置、デバイス個数、加えて流速、気流角度、期待密度といった気流条件・デバイス機器パラメータが多数あるためグローバルな視点で全体を把握し、実用に向けたデバイス設計のパラメータを見いだすきっかけがつかめていない。特に、有効なパラメータ領域を示すことができる無次元パラメータを見いだすことが期待されている。

2. 研究の目的

上記の背景から、本研究は、複数の風洞試験装置と高度な数値シミュレーション技術を利用することで局時流動支配の現象理解を進め、直接的な対象である DBD プラズマ



図1 DBDプラズマアクチュエータ：誘電体バリア放電により局所ジェットを発生

アクチュエータの実用化に貢献するとともに、同種のデバイスとの比較等も加えて、このような剥離制御デバイスの剥離制御の流れメカニズムをより汎用的な意味で明らかにすることを旨とする。

特に、プラズマ時空間挙動、誘起流れの時空間挙動、主流流れの時空間変動（局時流動現象）の関連を実験と詳細な時間変動を捉える数値計算により分析する。これにより、効率的なプラズマアクチュエータによる流れ制御の実現とともに、課題となっている実用高レイノルズ数流れ（高動圧流れ）に対する流れ制御実現への道を開くことを目指す。

3. 研究の方法

以下が当初設定した研究方法である。

その1. 数値シミュレーション解析

その2. チャンバー等を利用した基礎実験

(1) 翼周り剥離流れの制御によるパラメータ探索

(2) 超音速キャビティ騒音制御による評価

数値シミュレーションは、局時流動現象を捉えるために不可欠な LES 手法を高次精度で解くことで限られた計算時間でシミュレーションを行い、剥離が制御されるメカニズム理解を目指す。並行して、研究室内に構築した小型風洞により低レイノルズ数（小さなスケール）での性能評価、効果的なパラメータ探索、そしてシミュレーション結果の検証を行う。高速気流試験設備を利用した実験は、騒音低減への可能性と高レイノルズ数におけるこのデバイスの性能評価を行う。

なお、上記(2)に関しては S/N 比の限界と実験機会の制限からいくつかの会議発表に留まったため、限られたスペースでの本報告には含めていない。

4. 研究成果

(1) 各年度の成果(20年度)

研究計画に従って研究を進めた。数値シミュレーションについては、定常翼流れを対象にして、まず基礎となる数値シミュレーションプログラムを開発した。続いて、2次元翼を対象とした実験を元に人工的に翼面付近に DBD アクチュエータによる誘起流れ（体積力）を付加し、その領域や強さを変化させることで、どの領域に、またどの方向に作用させるのが有効なのかを数値シミュレーションによって評価した。その結果、境界層の最

下面付近が効果的であること、領域の広がりよりトータルの体積力が効いていること、実際のアクチュエータにおいて（水平力に加えて）生ずる垂直力は剥離制御に影響を与えていないことなどが明らかになった（参考文献番号）実験面では、安全性の配慮から PIV 装置の設置が年度末の3月になり、基礎誘起流れ計測を集中的に行うこととし、PIV 計測は準備にとどまった。高速休止建設部では予備的な実験を行い、電場の影響などを評価した。（21年度）

計画に従い予定通りに研究を進めたが、特に顕著な成果を記載する。

その1. 数値シミュレーションと実験による誘起流れの現象理解に関しては、予定通り Large Eddy Simulation (LES) のプログラムを開発。これを利用して非定常性を組み込んだ数値シミュレーションを実施した。LES 計算により、乱流モデルを利用したシミュレーションでは表現できなかったバースト波の効果を再現。また基本構造を明らかにすることができた。誘起される二次元的な渦構造からある時間、空間距離で3次元的な構造が生まれ、それが剥離制御効果につながるという示唆を得た（参考文献番号）このような流構造は、DBD アクチュエータに関してはじめて示されたものであり、また別途実施しているシンセティックジェットの計算結果とも類似性の高い構造であることから、これが剥離制御の鍵となっていると予測される。実験面では、PIV 装置のキャリブレーションに時間がかかったため圧力計測を継続して行い、バースト波効果に利用されている F^+ という波数パラメータで現象が記述することを試みた。（22年度）

最終年度なので、これまでの研究成果を元に得られた知見を整理すること、またそれらの知見に基づいて新たな提案に結びつける事に注力した。数値シミュレーション面では、昨年度に得られた現象理解をさらに深めた。特に、これまで多くの論文が揚力を測定することで剥離制御効果の高低を評価していたが、流れ波を観測した結果、剥離泡が作る負圧が揚力に大きく寄与するため、揚力が低くても剥離が十分抑えられているケースがあることが確認された。今後プラズマアクチュエータの効果を議論する際には揚力よりも局所圧力を利用して効果判断をすべきこと、翼型によって効果に違いが出る可能性が高いことが明らかになった。併せて電極等の劣化が結果に影響することを示した。

これまでの知見を活かして、仮想的ではあるが3次元のアクチュエータ配置を試み、それが有効であることを明らかにした。

実験面では、上記の結果を踏まえて、揚力測定と並行して、翼面の特定位置数点の圧力を波数空間で調べることでプラズマアクチュエータ、特にバースト波形印加の影響を調べた。特に、プラズマアクチュエータの有効性の指標となる無次元パラメータの導出を試みた。過去の研究で無次元バースト周波数は1付近で有効との実験結果が示されている一方私たちの実験も含め5から10、それ以上でも有効であることも示されている。これがレイノルズ数や取り付け位置などの違いによるものか、本質的に2つの異なるメカニズムが存在するのかを知ることを目標に実験を進めた。結果、剥離制御のあるバースト周波数には複数の領域が存在することが確認さ

れた。どの領域が最も効果的かについては、実験パラメータが膨大（バースト波数，基本周波数，取り付け位置など）なため，残念ながら現時点で結論づけられない。本科研費研究課題は本年度で終了するが，それらをまとめた段階で新たな研究提案を行い，実験，数値シミュレーションをさらに進めて複数の波数域のメカニズムの違いを明らかにしたい。

(2) 流体制御メカニズム解明（全体成果）

実験的な成果

本来の注目ポイントである「剥離制御可能な無次元パラメータと流れ現象との関係を知る」として，まず実験的な成果について述べる。実験では，主に NACA0015 翼を対象として，煙による可視化での現象把握，定常圧力計測での力計算と剥離状況把握，本科研費で購入した PIV 装置による空間内流れの理解といったパターンで研究を進めた。特にバースト現象の理解が剥離制御効果の理解の鍵と考え，連続的に交流周波数をかけ続けるノーマルモードと一定のデューティサイクルによるバーストモードの効果について観測した。図2に小型風洞における実験の様子を示す。上図は風洞内の計測部に設置された翼型と前縁付近（5%コード長位置）に2次元的に設置された DBD プラズマアクチュエータを，下図は実際に交流電圧をかけたときのプラズマ発光の様子を示している。

図3は流れ制御効果を示した一例で，スモークの様子からアクチュエータの効果が明らかである。DBD アクチュエータはバリア放電を利用しているため蛍光灯一本程度の電力でこのような大迎角での剥離を抑え，抵抗を増やすことなく高い揚力を得ることを可能にする。

図4にバーストの効果調べた結果の一例を示す。PIV

の粒子画像で，アクチュエータな条件で，エータな条件下でのノーマルモード，バーストモードの3つを比較している。なしの場合は前縁付近からの剪断層が確認でき，図3上と同様に翼上面で流れが大きく剥離している様子がわかる。一方アクチュエータをオンにした2つのケースではともに翼面近くに大きな剥離渦構造が見える。このような渦構造は数値シミュレーションでも確認されており，物体近くに停留する場合には安定的な揚力が維持できることがわかっている。特にバーストモードでは比較的小さな渦列が翼面上に並んでおり，時間が変化しても連続的にこのような渦配置が確認できる。さらなる検証は必要であるが，DBD プラズマ

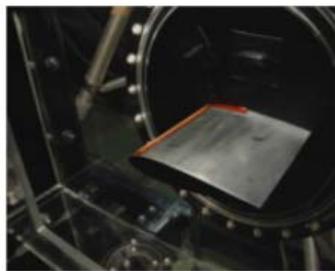


図2 小型風洞における2次元翼の実験
上：風洞内の翼と前縁付近の電極配置
下：プラズマ誘起流れが出ているときの様子



アクチュエータの効果は「流れを付着する」というより，この渦構造を安定的に翼面付近に確保することで揚力をかせいでいるといったことが予想される。このことは後に数値シミュレーションの検証の項で示す低レイノルズ数翼型の揚力特性とも関連した事実である点にも着目したい。

一連の試験の中で，電極の貼り付け具合や時間的な劣化などによる個体差が無視できないことが明らかになったため，これを除くために参照電圧を定義し，その電圧値をもって種々のバースト周波数やバースト比率の効果調べた。後に述べる数値シミュレーションの成果から，剥離制御能力は揚力よりむしろ剥離域を見ることで評価することが望ましいという観点に立って，翼面上の数点での圧力値（出力電圧）に着目して圧力計測を

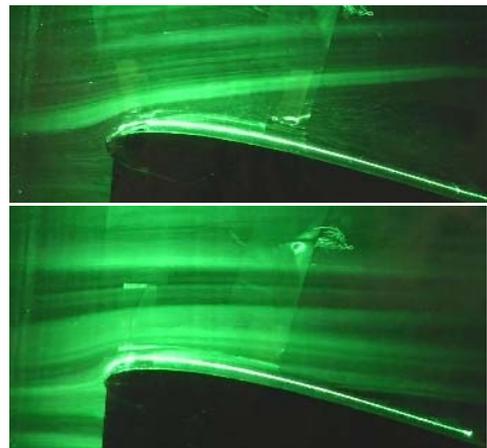


図3 DBDアクチュエータの効果（スモーク写真）：上図 OFF，数ON

行うようにした。

圧力計測から主たる結果を端的に表しているグラフを図5に示す。ある条件下でバースト周波数を変化させたときの前縁付近と後縁位置での圧力係数をプロットしたものである。前縁付近の圧力係数によって前縁で剥離している（負圧が生じない）か，付着している（高い負圧を生み出す）かを確かめることができる。また，後縁位置での圧力係数が0付近に回復していれば付着，いない場合は後縁で大きな剥離状態となっていることが判断できる。結果を見る

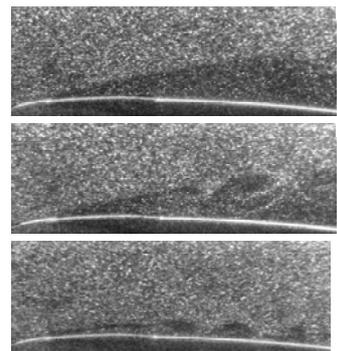


図4 バースト波の効果：PIV粒子画像
上：アクチュエータオフ
中：ノーマルモード
下：バーストモード

と，1KHz から 2.5KHz 付近で前縁付近で高い負圧域が存在し，かつ後縁付近でも圧力が回復している。興味深いのは「谷」がこの周波数領域に存在していることである。さらに，私たちの実験では 5%コード位置にアクチュエータを配置しているが，前縁につけた場合には $F^+=1$ （ここでは 100Hz 付近に相当）で高

い制御能力を得られることが知られている。5%位置に配置し、かつバーストを利用した私たちの実験や後に述べる数値シミュレーションでは $F^+=1$ ではなく、図5にも見られる

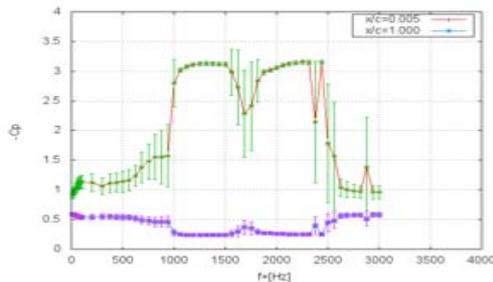


図5 バースト周波数を変化させたときの前縁直後と後縁における圧力係数変化

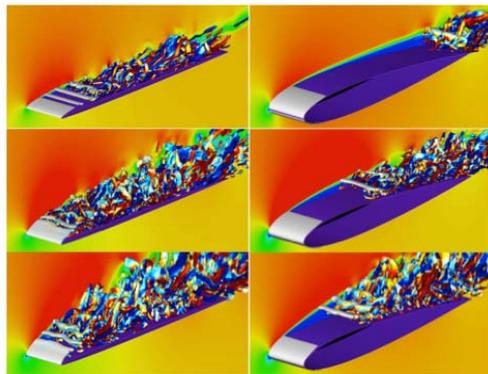
ように $F^+=10$ から20 (1KHzから2KHz)あたりでよりよい制御ができることがわかっている。さらなる確認が必要であるが、剥離制御のメカニズムとして乱流遷移を促すことで効果が出ている場合と大きな渦構造が存在することで剥離剪断層を引き寄せることで効果が出ている場合と考えられ、それぞれに適切な F^+ がある、すなわちDBDアクチュエータの剥離制御効果には複数のメカニズムがあり、それぞれに適切なパラメータが存在するのではないかと考えられる。この点は高いレイノルズ数流れへの適用において大切な点であり、今後も継続して研究を進める予定である。

数値シミュレーションの成果

以下、数値シミュレーションを主として実施した結果について述べる。

*基本流れ特性とシミュレーション手法の検証

低レイノルズ数流れにおけるDBDプラズマアクチュエータの流体制御流れの特性理解である。その基礎となるLES手法の信頼性は当然のことながらその前提となっているので、その検証を行った。また、制御効果がデバイスを付加する翼の形状に依存する可能性が高い。そのため、 10^4 レベルのレイノルズ数における種々の翼型廻りの流れのシミュ



NACA0002翼の瞬間流れ場

NACA0012翼の瞬間流れ場

図6 低レイノルズ数流れのLESシミュレーション結果：基本翼流れによる検証結果

レーションを行い、実験との比較を行うことによってその検証を、また検証に基づいて信頼性を確保した上で低レイノルズ数における特性把握を進めた。検証としてNACA0012翼型、レイノルズ数 2.3×10^4 、迎角6度で実験結果と計算結果を比較した。このレイノルズ数域では厚翼は迎角とともに強い非線形性を持って揚力に変化するが、特に6度は後

縁剥離から前縁剥離へと急激に変化する迎角であり、非常に小さな迎角変化で大きく流れ場が変化する最も予測が困難な条件下での計算である。実験における乱れの大きさなど正確な条件設定ができないことなどから、剥離位置が異なることから圧力分布に若干の違いを生じているが、現象は確実に捉えられていること、またその後の一連の計算から迎角変化による非線形性も評価できている。その他の翼型に対するシミュレーションも行ったので、参考に迎角3度、6度、9度の流れの瞬間場の様子を図2に示す。層流計算、RANS計算など複数の手法、 10^3 から 10^4 中盤にかけてレイノルズ数を変化させ多数のシミュレーションを実施し、iLESの有効性を確認するとともに他の手段の限界を明らかにした。同時に、iLES手法が低レイノルズ数域における薄翼、厚翼の特性を表現できることを

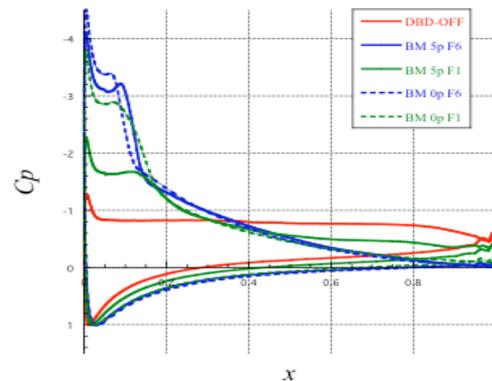


図7 DBDプラズマアクチュエータ設置による翼面上圧力分布設置位置(0%および5%)、無次元バースト周波数(1.0と6.0)

明らかにした。

*DBDプラズマアクチュエータの効果解析

プラズマが誘起する流れのモデル化は既存のものを組み込み、剥離流れから付着流に変化していく様子を詳細に検討した。特に電圧印加を連続的に行うノーマルモードと一部のみの時間印加し、それ以外はオフにするバーストモード(こちらがより剥離制御効果が高い)の2つに対して、剥離状態にある翼面流れがどのように変化していくのかを数値データから観測した。このような数値シミュレーションにはLESと呼ばれる手法の利用が不可欠であることは過去の私たちの研究から明らかにしている。LESは現象に特有の規模の渦流れ構造を直接的に捉えることを要求するため、コンピュータ負荷が大きい。それを軽減するため、既存の手法に比べて50-100倍程度の空間解像度を有するとされるコンパクト法を高次精度化し、それを利用した。

その結果、バーストモードの場合は形成された2次元的な渦構造が維持されているのに対して、ノーマルモードではそれが減衰することが明らかになった。剥離流れは、この2次元な渦構造が剪断層を翼面へと直線的に引き寄せる効果と渦構造が3次元的に変化してそれが流れの遷移へと至る効果の2つが存在することが明らかになってきた。さらに詳細を知るために、アクチュエータの設置位置を変え、無次元バースト周波数を2種類用意して、シミュレーションを行った。時間平均として圧力分布を図7に示す。5%位置の場合、 $F^+=1$ では剥離制御効果は弱く、 $F^+=6$ にするとかな

りの効果が期待できる。一方で、前縁（0%位置）の場合、 $F^+=1$ でも $F^+=6$ でもかなりの効果が期待できる。ほとんどの研究グループが前縁付近にアクチュエータを設置しており $F^+=1$ あたりで剥離制御効果が高いと報告している。分野の草分けであるCorke教授は高い F^+ では制御効果が弱いことを述べている。一方、私達のグループを含めて $F^+=5$ から20程度で優れた制御効果があることを示した結果が存在する。その中でも、5%位置に設置しているのは私たちのグループだけである。意見の違いを知るために数値シミュレーションによる詳細な流れ場の再現を試み、流れ構造の時間的な変化を調べた。

その結果、一連の数値シミュレーション結果はそれぞれに効果があるが、剥離を抑えるメカニズムに違いがあることを示した。図8

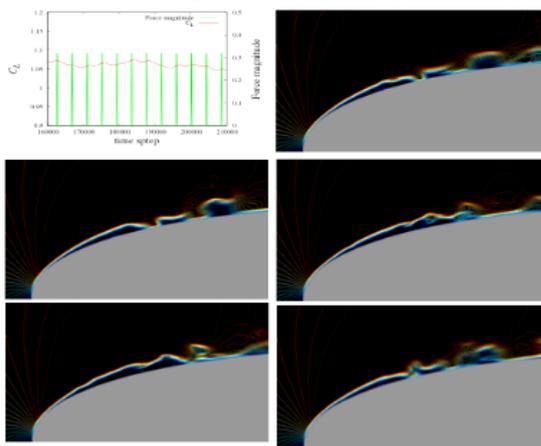


図9 前縁付近の流れ場と揚力の時間変化：バースト周波数6.0

に $F^+=1$ の場合の前縁付近の流れの時間変化と対応する揚力の時間変化を示す。比較的大きな渦構造が翼面から少し離れた場所に位置し、それらアクチュエータによって連続的に生成されるため停留的に同じ場所に渦構造が存在する。揚力は大きく上下している。図9に $F^+=6$ の結果を示す。渦構造はより翼面に近く、かつ個々の渦は小さい。揚力の時間

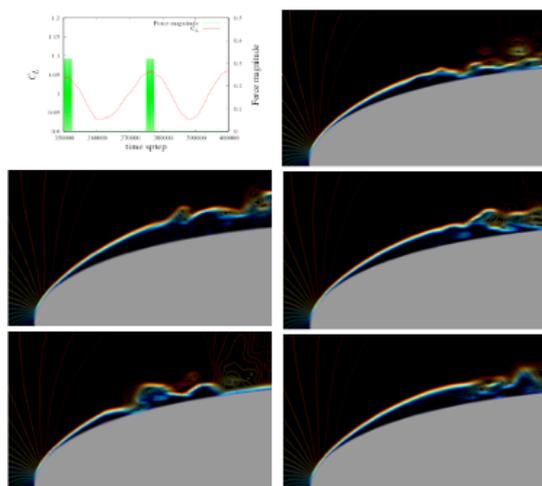


図8 前縁付近の流れ場と揚力の時間変化：バースト周波数1.0

的変動は小さい。

これらの結果はすでに説明した実験画像のノーマルモードとバーストモードの違いにも似ている。さらに詳細な解析と実験結果を総合すると、バーストモードの場合には2次元的な渦構造が乱流遷移を促し、その結果

流れが翼面付近に付着するように働いていることがわかっている。これらの結果を総合すると、制御メカニズムは1つではなく、 F^+ によって複数のメカニズムが働いていること、付着といっても実は細かい渦構造が存在し平均的に圧力が回復している状況であることなどが明らかになってきた。

最後の数値シミュレーションの利点を活かして以下のような仮想的なシミュレーションを実施した。アクチュエータが作る2次元的な渦構造から3次元の渦構造が生成され、遷移へとつながることから、さらに積極的に3次元的な渦構造を誘起することを念頭にintermittentなアクチュエータを翼面上に配置し、流れ場の違いを観測した。結果は予想通りで、剥離制御効果の改善が見られた。いくつかの間欠幅を確認した結果、ストリークの幅程度のケース（表示のケース）が最も効果的であることが確認できている。3つの

間欠幅に対する瞬時的な流れ場の様子を図10に示す。渦構造のスケールに違いが見える。図11に時間平均流れ場の様子を示す。上図は一定の印加電圧下でアクチュエータを機能させた場合の結果、下図は同じ条件下で、電極を間欠的にスパン方向に配置したときの結果である。簡潔幅は図10の中段のケースを取り出している。電極幅はスパン全体で半分程度なので投入エネルギーも下図の方が半分になっているが、それに関わらず剥離制御の効果を強く出ている。さらに、中が詳細な説明は発表論文などを参照されたい。

以上のように小さな流れスケール（低いレイノルズ数流れ）でもプラズマアクチュエータには複数のメカニズムで制御する機能があることがわかったが、一方で大きな流れスケール（高いレイノルズ数流れ）ではどうかについて答えることは実験的にも数値シミュレーション面でも容易ではない。

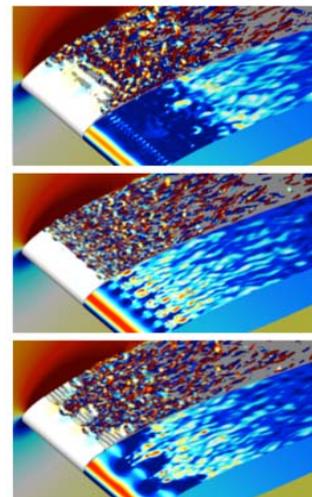


図10 電極の間欠的な幅を変化させた場合の結果
上：0.006、中：0.018、下：0.040

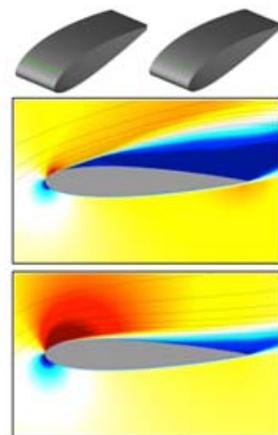


図11 間欠的DBDアクチュエータ電極配置の効果
上：2次元的な電極配置、下：間欠的な配置

本研究費の成果は、次世代スーパーコンピュータプロジェクトの戦略分野「次世代ものづくり」において「輸送機器・流体機器の流体制御による革新的高効率化・低騒音化に関する研究開発」としての提案につながり、H23年度から、これまでの成果を引き継ぎ形で数値シミュレーションによるアプローチを継続していく。同時に、産学連携の観点からNEDOプロジェクト「省エネルギー革新技術開発事業（先導研究フェーズ）」の中でJAXA研究開発本部（調布）と東芝が提案した「動的流れ場に対するプラズマ気流制御最適化の研究開発」に参画することにより、今回不十分だった高レイノルズ数の実験データを取得、今後も進める予定の私たちの低レイノルズ数実験と比較検討することでアクチュエータの制御機能の理解を高めることを予定している。これら2つの事業は資金利用に強い制約があるため、これらと連携する研究室内の小型風洞での試験を継続するための科学研究費補助金への研究提案を計画している。これら3つの研究（1. 巨大スーパーコンピュータによる数値シミュレーション、2. 大型風洞による試験データの取得、3. 低速小型風洞での試験データの取得）の有機的な連携と、私たちが有するデータ探査技術により産業利用へと結びつけるようにしたい。

研究背景にもあるように、本研究課題を対象としているマイクロデバイスはプラズマアクチュエータのみではない。他の有力候補としてシンセティックジェットがあり、参考文献に記載したように、プラズマアクチュエータの原理を理解する意味でもそれらの研究も進めている。その結果、上記のメカニズムとの共通性が見いだされ、手段によらず剥離流れを抑制するメカニズムに共通性があることがわかってきている。これらも含め実用性の高い流体制御技術を開発していきたい。

3 研究成果の総括

本科学研究費補助金によって、実験面でも数値シミュレーション面でも大きな成果が挙げたと考えている。流れ条件および機器配置のパラメータが多数存在するので、特定の条件下で得られることと汎用的な事実を区別することが難しく、慎重にデータを議論している。その結果、本研究課題における最大の成果に関しては現時点で学会発表に留まっているが、H23年度中にこれらをまとめ、数件の学術論文として公表していく予定である。なお、これらの成果に関しては今後の研究のために参考ウェブサイトを現在用意している。完成までには少し時間を要するが、以下のサイトアドレスにて情報発信することを予定している。

<http://flab.eng.isas.jaxa.jp/member/fujii/DBDkakenA2008-2010>

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13件）

1. 藤井孝藏, 浅田健吾 DBD プラズマアクチュエータによる翼剥離制御メカニズム—パースト波解析が語るもの—日本流体力学会誌, 29-4, 2010
2. Koichi Okada, Akira Oyama, Kozo Fujii, Koji Miyaji Computational Study on Effect of Synthetic Jet

Design Parameters International Journal of Aerospace Engineering International Journal of Aerospace Engineering, 2010 (online Journal) 2010

〔学会発表〕（計23件）

1. Kengo Asada and Kozo Fujii Computational Study of Aerodynamic Characteristics of an Airfoil with DBD Plasma Actuator AJK2011-15027ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, Hamamatsu, Japan, July 24-30, 2011.
2. Taku Nonomura, Satoshi Sekimoto, Kengo Asada, Akira Oyama, Kozo Fujii Experimental Study of Blowing Direction Effects of DBD Plasma Actuator on Separation Control of Flow Around an Airfoil AJK2011-15010 ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference, Hamamatsu, Japan, July 24-30, 2011.
3. Satoshi Sekimoto, Kengo Asada, Tatsuya Usami, Shinichirou Ito, Taku Nonomura, Akira Oyama, Kozo Fujii Experimental Study of Effects of Frequency for Burst Wave on DBD Plasma Actuator for Separation Control 41st AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Hawaii, U.S.A. June 27-30, 2011.

〔図書〕（計1件）

1. 藤井孝藏, 河合宗司 朝倉書店 流体工学ハンドブック 2009 628

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤井 孝藏 (FUJII KOZO)
宇宙科学研究所・教授
研究者番号：50209003

(2) 研究分担者

大山 聖 (OYAMA AKIRA)
宇宙科学研究所・准教授
研究者番号：10373440

船木 一幸 (FUNAKI IKKOH)
宇宙科学研究所・准教授
研究者番号：50311171

李家 賢一 (RINOIE KENICHI)
東京大学大学院工学研究科・教授
研究者番号：20175037

野々村 拓 (NONOMURA TAKU)
宇宙科学研究所・プロジェクト研究員
研究者番号：60547967