

空と宙

2012 JAN/FEB
<http://www.ard.jaxa.jp/>

隔月刊発行 ISSN 1349-5577

研究開発

時々刻々の流れを捉える「時系列 PIV」
燃焼器の内部を光を使って測る方法「LIPS」

和輪広場

JAXA が取り組む光学計測

空宙情報

石川隆司本部長

ICAS Award for Innovation in Aeronautics 受賞
ICCM 終身委員と World Fellow の称号を授与

49 年間ありがとう。ビーチ、引退

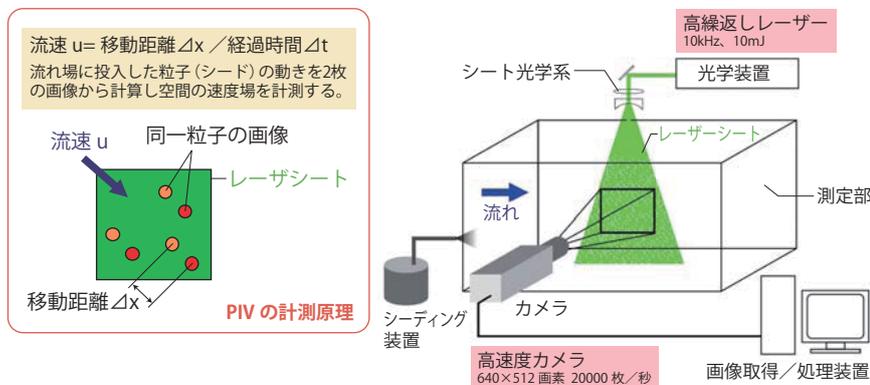


時系列 PIV 計測時の様子 (P.02)

No. **45**

研究開発本部
Aerospace Research and Development Directorate

時々刻々の流れを捉える「時系列PIV」



左に示したのは PIV 計測の原理です。一定経過時間内での粒子（シード）の動きから気流速度を求める大変簡単な原理を使っています。JAXA 風洞技術開発センターでは 10 年ほど前より、風洞試験での気流速度計測として、PIV 計測法の実用化を進めてきました。数年前からはこの PIV 計測法をさらに発展させて、時々刻々と変化する流れに対して、その時間変化も計測することができる時系列 PIV 計測法の風洞試験での実用化に取り組んでいます。

図1 時系列PIV計測システム

“流れ”を知ることは大きな意味がある

地球を取り巻く大気、蛇口をひねると溢れだす水道水、血管内を巡る血液・・・世の中は様々な流れで満たされています。流れを知ることは、世の中の様々な現象を理解する助けになると考えられます。

航空宇宙の分野でも“流れ”はとても重要です。飛行機を例にとると、機体を浮かせるための力である「揚力」は翼周りの空気の流れ（気流）によって発生しますし、飛行を妨げる向きに働く抵抗の一部も気流によって生じます。機体周りの気流の様子は、機体模型に対して気流を発生させる「風洞」によって模擬できます。その際、模型に加わる揚力などの力や表面圧力などの気流によって生じる現象は、模型内に埋め込まれたセンサーによって点計測しています。

近年、模型周りの気流状態を計測する方法として「粒子画像流速測定法 (PIV)」が注目されています。PIVの原理はとても簡単です。気流中に流れに沿って動く微小な粒（シード）を入れて、一定経過時間内での移動距離を計測することで、ある平面の速度場を求めます。PIVに必要なのはシードを光らせる光学装置と、その動きを記録するカメラです。カメラに

記録した画像情報をパソコンに取り込んで解析することで、ある平面の速度場を得ることができます (図1左)。

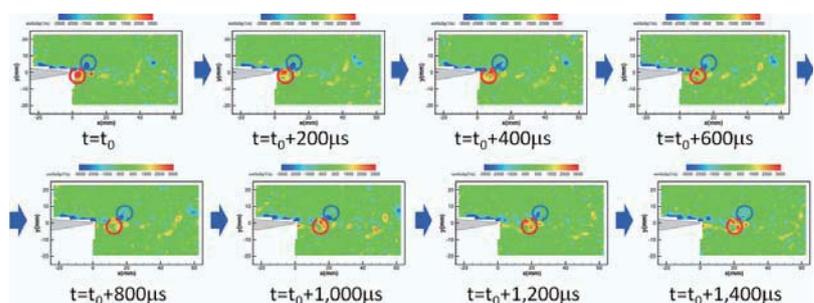
時々刻々の変化を知りたい

通常の PIV 計測では 1 秒間に 10 枚程度の間隔で画像を記録し、瞬間瞬間の速度場の平均を取ることで、ある条件での速度場の様子を求めることができます。PIVの撮影間隔をもっと短く、例えば 1 秒間に 1000 枚という超高速で画像を記録することができると、時々刻々の

速度場の状態を求めることができます。そこで考案されたのが「時系列 PIV 計測 (図1)」です。

従来の PIV 計測では、翼のどの位置で気流が剥離し、それによってどう渦が発生しているか、といった瞬間の流れの様子を捉えることができます。これに対して時系列 PIV で計測を行うと、気流が剥離する位置はもちろん、発生した渦が流れて行く様子までも捉えることが可能です (表紙、図2)。

時系列 PIV では、各装置に求められる性能が大きく変わってきます。時々刻々と流れを追いかけるためには、それを追えるだけの高速度カメラと、短い露出でもカメラに写り込めるだけの強い光を発生させる装置が必要です。時系列 PIV は近年の装置の発達により可能となりました。

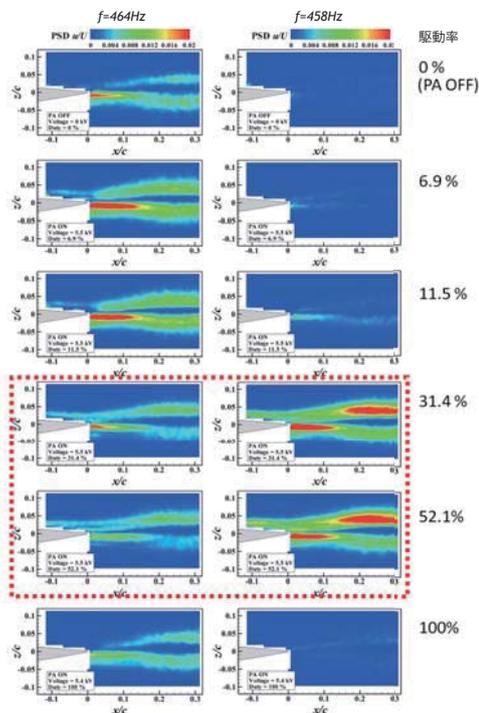


模型翼端上面で発生した渦（青矢印で示したもの）と下面で発生した渦（赤矢印で示したもの）とが下流へと流れていく様子を捉えることができました。

図2 時系列PIVで計測した矩形翼周りの速度場の様子

時系列PIVで撮った！！

JAXAでは機体から発生する「空力騒音」を低減するための研究に取り組んでいます。騒音を低減するためには、どこからどのような音が出ているかを正確に捉えることが重要です。ある空間の速度場を時々刻々と求めることができる時系列PIVであればそれが可能になると考え、空力騒音低減の研究に導入しています。



空力騒音を低減するひとつの方法として、気流を制御するプラズマアクチュエータを翼に取り付ける方法が考えられます。プラズマアクチュエータを動作させることで騒音が低減できることや、他音域の音が強くなってしまふことなどがこれまでの音響

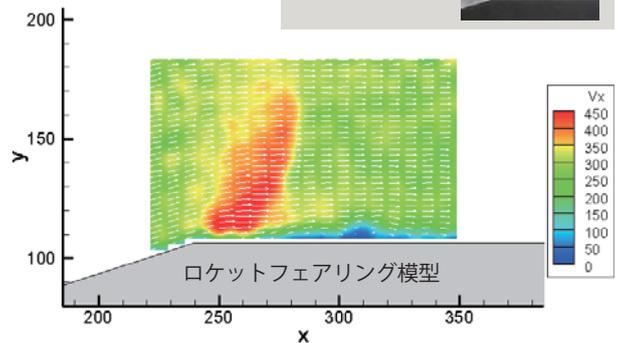
プラズマアクチュエータを駆動させることで、464Hzの音に対応する速度の変動は小さくなりますが、458Hzの音に対応する速度の変動は、アクチュエータを31.4%および52.1%駆動させることで大きくなるのが分かりました。これは、実際の騒音の発生と良い対比を示しています。

図3 時系列PIVより算出した速度場の変動

計測によって判明しています。時系列PIV計測によって計測した各速度場のデータ解析を行うことで、ある音域に対する速度場の変動を求めることができます。それらと実際に計測した音の情報とを組み合わせることで、騒音源の特定やプラズマアクチュエータなどの低騒音化デバイスの評価に有効であることが分かりました(図3)。他にも、ロケット打上げ時にフェアリングに発生する衝撃波振動などの気流状態を時系列PIV計測で求める研究も行っています(図4)。このような現象は遷音速と呼ばれる音速前後の速い流れの時に起こります。遷音速風洞での時系列PIV計測はまだほとんど行われておらず、その計測技術はJAXAが先導しています。

ここまで見てきたように、時系列PIVは「動き」に対して非常に有効な計測手法です。そこで、今後は飛行時に翼がバタバタと振動してしまうフラッター現象の解明などを行いたいと考えています。

シュリーレン可視化法による気流計測結果



従来より行われているシュリーレン可視化法同様、模型に発生した衝撃波の様子を捉えることに成功しました。

図4 ロケットフェアリング模型に対する時系列PIV計測



【風洞技術開発センター】

加藤 裕之

燃焼器の内部を光を使って測る方法「LIPS」

低NO_xな燃焼方式

飛行機のエンジン（ジェットエンジン）の役目は、飛行機が前進するための力（推力）を作ることです。エンジン前方から空気を取り込んで圧縮し、圧縮した空気を燃焼器内で燃料と混ぜて燃やすことで発生する燃焼ガスを後方に高速で排出して推力を生みだしています（図1）。ジェットエンジンの排気ガスには二酸化炭素（CO₂）や煤、窒素酸化物（NO_x）などの人体に良くない物質が僅かに含まれています。通常、高温高压で燃焼を行った方がエンジンの燃費は良く、CO₂を減らすことも可能です。しかし、高温下ではNO_xが多く発生してしまうという問題があります。

私たちJAXAでは、エンジンの燃費は保ちつつNO_xを減らす燃焼方式として、燃料に対して多量の空気を取り込み、燃焼前に予め混合させることで、燃焼器内の温度を低く保ちつつ燃費の良い燃焼を行うことができる「希薄予混合燃焼方式」に着目しています。これまでの研究により、希薄予混合燃焼をさせることで高い燃焼効率を維持しつつNO_xを低減

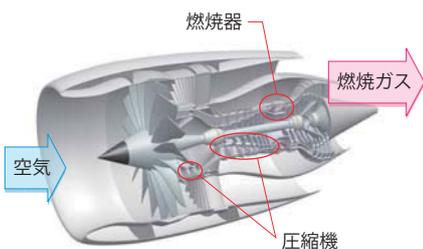


図1 ジェットエンジンの推力発生原理

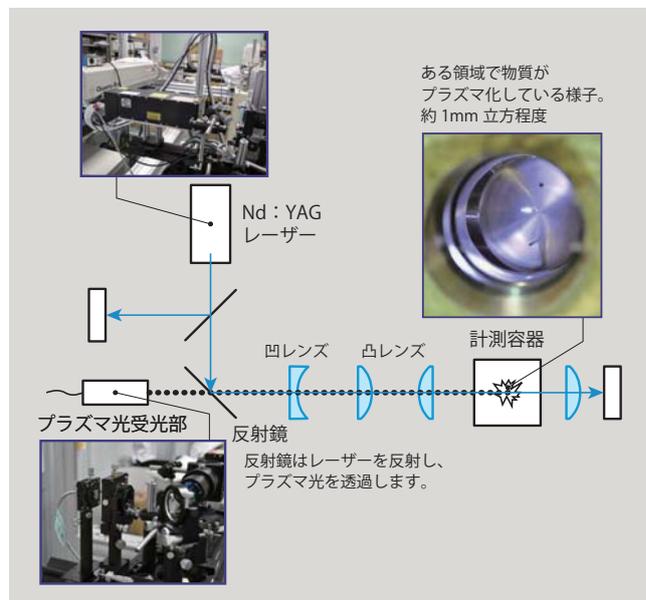
できることは分かっています。しかし、燃焼器内でどのような燃焼が起きているのかは、実はまだ良く分かっていません。

燃料と空気の割合が知りたい

希薄予混合燃焼時に、燃焼器内にどのように燃料が分布し、どの程度の希薄状態で燃焼が起これ、それによってどうNO_xが低減されているのか。それを知ることができれば、低燃費かつ低NO_xなエンジンの設計が効率良く行えるようになります。

燃焼器内の物質分布量（当量比）を計測する方法として従来より行われているのは、「プローブ」と呼ばれる管を燃焼器内へ入れて燃焼ガスを採取し、分析する方法です。この方法だと、燃焼器内の様々な場所を計測するためにプローブを移動させる必要があるため燃焼器後方などにプローブを通すための大きな孔を開ける必要があり、実際の燃焼器の様に内部を高圧に保つことは困難です。いかに実環境に近い状態で燃焼器内の当量比を計測するか？ そのひとつの方法として導入しているのが「レーザー誘起プラズマ分光分析法（LIPS）」です。

LIPSの原理は、物質が励起状態から基底状態へと戻る時に発する光を計測するというシンプルなものです。レーザー光をレンズで集光させてその焦点領域にある物質をプラズマ化させて励起状態にし、基底状態に戻る時に発せられる原子固有の光を計測することで、その領域にある物質の当量比を算出します（図2）。



レーザーは反射鏡やレンズを通過して計測容器内のある領域へ集光されます。その領域の物質はレーザーの強力なエネルギーによって分子から原子、そして原子と電子が分離しプラズマ化した状態（励起状態）になります。その後、直ぐに原子固有の光（プラズマ光）を発して基底状態に戻ります。その時発せられたプラズマ光はレンズを通してプラズマ光受光部を経て分光計測されます。

図2 レーザー誘起プラズマ分光分析法「LIPS」の計測原理

「レーザー誘起プラズマ分光分析法 (LIPS)」による局所当量比計測研究

LIPSによる当量比算出の構築を実現

プラズマ光は物質によって異なるため、当量比が変わればプラズマ光のスペクトルも変化します。また、計測環境によってもスペクトルは変化するため、LIPSにて燃焼器内の当量比を計測するためには、高温高压環境下で各当量比に対してどのようなスペクトルが得られるかを調べる必要があります。そこで、密封できる箱型の容器に当量比が分かっている

燃焼ガスを模したガスを流し込み、そのスペクトルを計測しました(図3)。得られた計測結果を基に、スペクトルに対する当量比算出方法を2種、構築することに成功しています。現在は、同容器中に高温高压の燃焼ガスを直接流し込み、試験法や当量比算出法の検証を進めています(図4)。今後は、LIPS試験用の燃焼器モデルを製作し、LIPSによる当量比計測試験を行いたいと考えています。

航空機用ジェットエンジンの燃焼は灯油に近い性質を備えており、ほぼ炭化水素(炭素原子と水素原子だけで構成される物質)でできています。また、大気的主要成分は窒素と酸素のため、燃焼後に生成される物質の多くは炭素原子(C)、水素原子(H)、窒素原子(N)、酸素原子(O)によって構成されています。そこで、C、N、Oを混合したガスを計測容器内に流し込み、各当量比ごとに得られるスペクトルを計測しました。

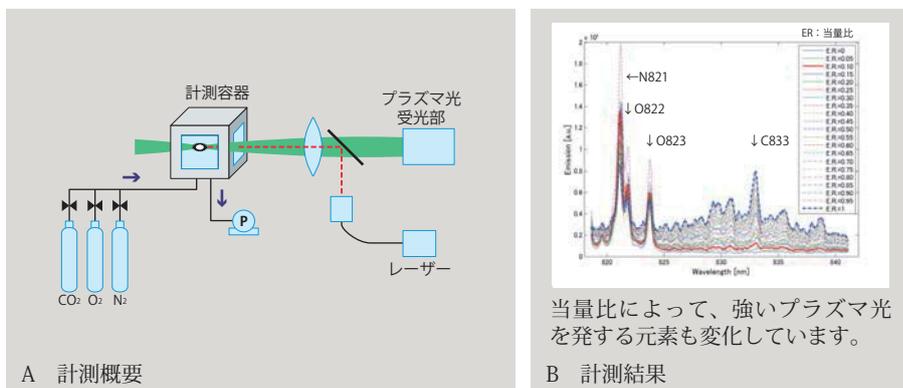


図3 高温高压下での当量比算出法を構築するためのLIPS試験

構築した解析法を用いて、実際のエンジン燃焼によって得られる高温高压のガスを直接容器内に流し込み、得られたスペクトルによって当量比を求める試験を行っています。

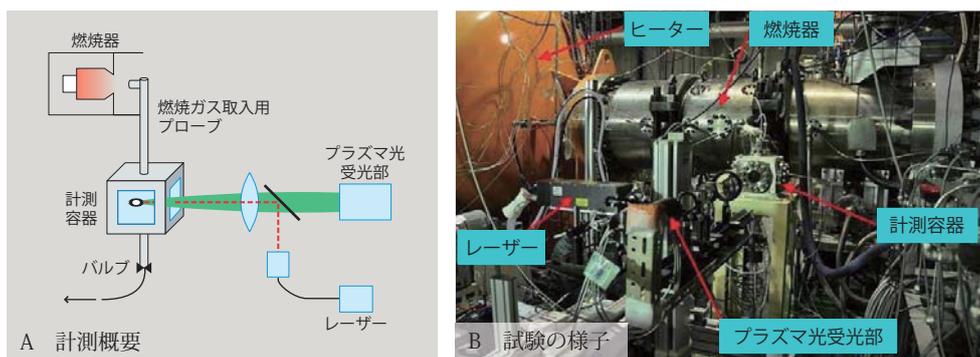


図4 実際の燃焼ガスを使ったLIPS試験



【ジェットエンジン技術研究センター】

吉田 征二、福本 敦 (研修生)



加藤裕之
Kato Hiroyuki

風洞技術開発センター
高度化セクション
2003年入社
※2001年から2年間、航空宇宙特別研究員として勤務。

Q 仕事の合間の息抜きは？
A 自宅でのペランダ菜園。最近はいちごを育てています。

中北和之
Nakakita Kazuyuki

風洞技術開発センター
高度化セクション
1994年入社
Q 自分を動物に例えると？
A 睡眠好きの熊かな。

Q 今、一番乗ってみたい飛行機は？それは何故？
A MRJ。(今のところ)自分が関わった世界唯一の飛行機だから。

立花繁
Tachibana Shigeru

ジェットエンジン技術開発センター
燃焼技術セクション
2002年入社
※2000年から2年間、航空宇宙特別研究員として勤務。

Q 仕事の合間の息抜きは？
A コーヒー。JAXA 調布 コーヒー倶楽部の名誉会長です(笑)

吉田征二
Yoshida Seiji

ジェットエンジン技術開発センター
燃焼技術セクション
1999年入社
Q JAXAで働きたい老若男女に一言(一言)
A ぜひ、一緒に働きましょう。様々な難問(研究課題)が皆さんを待っています。

時代からPIVを専門としており、気流計測用の三次元PIVに関するテーマで研究をしていました。NALがPIV計測技術の風洞試験での実用化を目指すというタイミングで、ぜひ大型風洞設備でもPIVを使えるようにしたいと考え、航空宇宙特別研究員として入社しました。それ以来、様々な風洞試験で活用できる計測技術となるように、PIVの実用化に関する研究開発を行っています。

立花：私はジェットエンジン技術開発センターの燃焼技術セクションに所属しています。学生時代、

それぞれの信念のもとに光学計測に取り組む

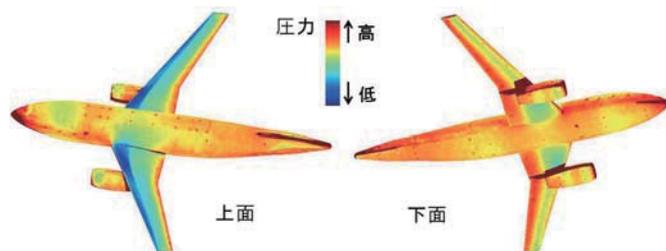
—まずは簡単な自己紹介をお願いします。

中北：風洞技術開発センターの高度化セクションに所属しています。「感圧塗料 (PSP)」と呼ばれる塗料を使い、航空機表面の圧力を計測する画像計測を専門としています。大学時代は衝撃風洞という、1/100～1/200秒という非常に短い時間だけ極超音速の流れを作ることができる風洞を使い、計測技術の研究を行っていました。JAXAの前身機関のひとつである航空宇宙技術研究所 (NAL) 入所後も衝撃風洞での計測技術の研究から始まり、ずっと計測技術の研究開発に携わっています。



全面にPSPが塗布された模型

加藤：私も風洞技術開発センターの高度化セクションに所属しています。「粒子画像流速測定法 (PIV)」が専門です。学生



PSP計測結果：機体全面の圧力の様子が一目で分かる

NALに技術研修生として来ており、数値解析による乱流の研究をしていました。その後、航空宇宙特別研究員として入社し、数値流体力学 (CFD) に従事していたのですが、入って2年目ぐらいから「現実の現象を見る実験に携わりたい」という思いが芽生え、文部科学省の乱流燃焼の知的制御に関するプロジェクトにJAXAが参画したのをきっかけに、実験としての燃焼研究に携わるようになりました。現在は燃焼の安定化やレーザー計測による燃焼診断の研究を行っています。

吉田：ジェットエンジン技術開発センターの燃焼技術セクションに所属しています。私が入社した頃というのは、実用的に使えるPIVの装置が市販されて世の中に出回り始め、多くの研究者が計測に取り入れ始めた時期でした。NALで燃焼器の研究に携わっていたグループでも、ちょうどPIVを使い始めた頃だったため、入って直ぐにPIVを使った燃焼器内の流れの計測に携わっています。

—風洞技術開発センターのおふたりは風洞で使う計測技術の開発、ジェットエンジン技術開発センターのおふたりは燃焼器内などの火炎を調べるための道具として「光学計測」に係わっている。

中北：私たちの風洞設備はJAXA内外含めて様々なユーザーが利用しています。

加藤：そのため、新しい計測手法を開発することはすごく大事だと思います。しかも、ただ開発するのではなく、その原理を理解したうえでユーザーの使いやすい形で提供する、つまり「使える計測手法を提供する」というのが大きな目標だと考えています。

中北：ユーザーのために使いやすい、役立つ道具を作りたいと思っており、そう言った点では「早く・簡単に・短い時間で計測できる」というのも研究課題になります。ただ、技術の開発だけでなく、開発した技術を活かして自分たちでも研究を行いたいと思っています。

立花：エンジンセンターの場合、まず環境に優しい低NOx化技術の研究開発があり、そのための計測技術として光学計測を取り入れています。

吉田：計測技術はあくまでも道具であり、計測したデータから「どう燃焼器の性能を良くするか」に重点を置いています。ですから、計測自体はできるだけ簡単にできる方がよいと考えています。

様々な光学計測

——「模型変形計測」という光学計測があると聞いたのですが。

加藤：駐機中の飛行機の翼は重力によって下にたわんでいますが、飛行している時には加わる揚力により翼は上向きにたわみます。風洞試験でもそれは一緒です。その変形量を計測できるのが模型変形計測です。私が行っている手法は、模型表面にシールなどで計測の目印を付けてカメラ2台を使ってステレオ視することで、模型の変形量を三次元計測するという方法です。風洞試験中に模型の変形を測りたいと思っても、直に規程を当ててその変形量を測るわけにはいきません。非接触でないと計測できないわけです。そういう意味で光（模型変形計測の場合、可視光）は非常に有効な手段ですね。他にも、模型表面にプロジェクターで光の模様を映し出し、模型の変形によって現れる模様の変化を解析することで翼なら翼の三次元的な変形を計測できる手法などがあります。これらの研究で分かる様に、“非接触”というのは光学計測の大きな特長です。

吉田：燃焼器の研究では、測りたいものがたくさんあります。ひとつは流れを測りたい。それから温度。燃料の分布も測りたいですね（4ページ参照）。それらの中でもやはり一番難しいと感じているのは温度を測ることです。そこで、温度を測る良い方法は無いかと探しているのですが、中々無くて。燃焼の研究をしている者にとって“非接触で温度を測る”というのは悲願ですよ。まあ、手間や精度を度外視すれば測る方法はあるのですが・・・

立花：JAXAは実際のジェットエンジンの燃焼状態での試験を行うために、高温高圧の燃焼試験設備を運用しています。その様な厳しい環境下でも精度よく使える計測法となると、中々難しいのが現状です。例えば、シンプルで小さなバーナーの炎について高精度に計測する、というのであれば行われている例があります。ただ、ジェットエンジン燃焼器試験の様な実機開発に近い条件になると、色々と制約が多く、レーザー計測の適用はハードルが高くなります。

吉田：そうですね。

立花：今、レーザー計測の世界では“高速化”技術の発展が目覚ましく、高時間分解能で燃焼状態を計測するのに今すぐにも高速化に対応したいという気持ちがあります。PIVについて、風洞センターでは既に取り組んでいますよね？

加藤：はい。我々は3年ほど前から「時系列PIV（2ページ参照）」に取り組んでいます。レーザーシートやカメラなどのハードの部分に関しては、かなり整備することができました。ただ、時系列では短い時間に連続して何枚も画像を撮るため、光量の制限があり、一般的なPIVに比べると計測できる範囲が狭くなってしまふという問題があります。でも、ハードウェアや解析技術が年々改良され、より広い範囲をより短い時間間隔で計測することが可能になってきています。

立花：ジェットエンジン燃焼器で問題となる燃焼振動は1秒間に1000回程程度の周期で振動するので、その10倍の1秒間に1万枚程度の計測が行えるだけの時間分解能があれば、火炎が時々刻々と変化する振舞いをしっかり見る事ができるんです。私は、燃焼によって生じる化学種の分布を計測できる「平面レーザー誘起蛍光法（PLIF）」、その中でもOHという化学種に着目したOH-PLIFによる燃焼計測を行っています。高線り返しレーザーと高速度カメラの組み合わせによって、このOH-PLIFに關しても高速の計測が行えるようになってきています。

——以前『空と宙』でPSPによる実機試験について紹介したことがあり

ました。

中北：翼面の一部にPSPシートを貼り、圧力分布を計測しました。飛んでいる飛行機の翼の圧力はぜひ知りたいのですが、飛行機に圧力センサーなどを付けるのはリスクが多くなります。PSPであれば塗料を塗るだけですので、実飛行時にPSP計測が行えるかを試しています。将来的には、機体全面にPSPを塗布して試験を行いたいと考えています。

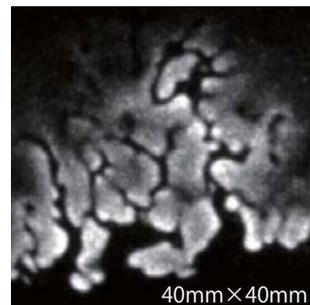
光学計測の楽しさと可能性

——光学計測の面白さって何なのでしょう？

中北：例えば圧力計測であれば、一般的なのは圧力センサーを使った点計測です。計測が終わるとグラフに点をプロットしていくのですが、これでは何が起きているのが直観的にはなかなか分からない。対してPSPによる圧力計測であれば、模型全体の圧力の様子を一目で捉えることができます。そういう意味での楽しさはありますね。

加藤：PIVでも同様で、実際にどんな現象が起きているのかが一目で分かります。実験中、これまで予想でしかなかったことがPIVの結果から明確になったときは、嬉しいですね。また、流れが絶えず変化している様子を観察しているだけでも、飽きることがありません。

立花：見えないものが見えた時というのは純粋に嬉しいです。私の場合は水素の燃焼かな。希薄条件での水素・空気混合ガスの炎は、ほとんど目には見えないんです。燃えているからボーっという音は聞こえてくるし、炎の辺りが陽炎のようにゆらゆらしているのは分かるけれど、目でその色を確認することはできません。その様な見えない炎をどうやって見るかというと、紫外光のレーザーを当ててるんですね。紫外光も人の目で捉えることはできない



希薄水素—空気予混合火炎のOH-PLIF画像：紫外光を当てて特殊なカメラで観測することで、見ることでできなかった水素の火炎が姿を現す

ため、やはり目には見えないのですが、見えない炎に見えない光をあてて特殊なカメラで見ると、その姿がはっきりと見えるんです。

——みなさん、顔を合わせた時にはどんな話をするのでしょうか？

吉田：「最近、新しい装置を導入したんだって？」とか。

加藤：光学計測という点で、カメラやレーザーといった共通の計測装置を使っていることが多いので。

中北：実験に従事していると、どこの部署でどの様な装置を持っているのかという情報は大変貴重なんです。

吉田：カメラをお貸ししたこと有りましたね。

加藤：ええ、風洞試験中にカメラが故障したことがあり、その時は、急遽、代わりのカメラをお借りすることで、無事、風洞試験を継続できました。

立花：私たちのいるJAXA調布航空宇宙センター全体の計測装置を全部集めたらこういうものすごい計測ができる、という提案を考えてみるのも面白いのではないのでしょうか。この機会に貴重な意見交換ができれば良いですね。

中北：面白いですね。JAXAの計測研究者を繋ぐネットワーク作りにも役立ちそうですね。

空 宙 情 報

石川隆司本部長 ICAS Award for Innovation in Aeronautics受賞 ICCM終身委員とWorld Fellowの称号を授与

2011年9月、当本部の石川本部長が国際航空科学会議（ICAS）より「ICAS Award for Innovation in Aeronautics」を受賞することが決まりました。ICASは、航空に関する科学技術の発展と国際交流の促進を目的とする国際組織です。今回受賞するのは、航空分野において世界的なインパクトを与えるような革新的技術開発と統合とを、設計と製造の視点も含めて完遂した個人または団体に与えられる賞のため、設計と製造が密接に関連する分野である先進複合材料の技術研究を専門とする同本部長にふさわしい賞と言えます。2006年に設立された新しい賞ということもあり、歴代4人目、日本人としては初の受賞となります。2012年9月に開催されるICAS 2012 Brisbane大会にて授賞式が執り行われます。

また、2011年10月には国際複合材料委員会（ICCM）より「終身委員」と「World Fellow」の称号を授与されることが決まりました。ICCMは世界中の複合材料関連の学会を束ねる組織であり、終身委員の称号は、先進複合材料工学の発展に尽くしただけでなく、その学術の国際交流に大きな貢献を果たした人物に贈られています。その中でも特に功績の高い人物に贈られるのがWorld Fellowの称号です。ICCMの36年の歴史の中で石川本部長は16人目の終身委員となります。World Fellowの授与は5人目、日本人としては初の名誉です。授与式は、2013年にカナダのモントリオールで開催される第19回ICCM国際大会にて執り行われる予定です。

49年間ありがとう。ビーチ、引退

2011年10月26日の秋晴れの空へと小さな飛行機が一機、独特な音を響かせながら能登空港を目指して調布飛行場から飛び立ってゆきました。その飛行機は「ビーチクラフト式65型クイーンエア」。49年間という長きにわたり実験用航空機として活躍し続けたベテランの機体です。この日は、彼女のラストフライトの日でした。その姿が小さく小さく、空にまぎれて見えなくなるまで、彼女と共に過ごしてきたJAXA職員たちはその姿を見送りました。

JAXA内では「ビーチ」とも呼ばれていたこの機体が実験用航空機として導入されたのは1962年のことです。導入当初は主に防水実験や飛行特性試験に用いられていました。1970年には機体改修を行いインフライト・シミュレータの機能を持たせ、航空宇宙技術研究所（JAXAの前身機関のひとつ）が開発した低騒音STOL実験機「飛鳥」の開発に貢献しました。近年では、小型ゆえに手軽な観測飛行に適していることを活かし、飛行状態を高精度に計測できる各種センサーや大気観測センサーなどの実験用システムを搭載して、相模湾上空での定期大気採取飛行や突風軽減装置の評価などに活躍してきました。これからは、学校法人日本航空学園日本航空専門学校の能登空港キャンパスにて保管され、学生たちの教育などに活用される予定です。

ビーチの引退に合わせ、JAXAでは新たな実験用航空機としてジェット飛行実験機「飛翔」を導入します。今後はこの機体が様々な場面で活躍することでしょう。



49年間の長きにわたり実験用航空機として活躍し続けた。
ビーチクラフト式65型