

航空宇宙分野における分子イメージング技術の可能性

渡辺 重哉
宇宙航空研究開発機構

1. はじめに ～ 分子イメージング技術の現状

分子イメージング技術について、当「分子イメージングフォーラム」では、「流体分野をはじめ幅広い分野でのブレークスルーとなりうる[機能性]分子を用いたイメージング技術」として定義してきた。

本技術の特徴は、1)光学計測が主体であること、2)非接触/非侵襲(non-intrusive)な計測が可能であること、3)供試体が簡易(物理的な細工が不要)であること、4)一般的に高解像度な計測が可能であること、5)面～空間計測(2～3次元)により多くの情報量を取得できること、5)定性的な可視化技術だけでなく定量計測技術も発達してきていること、である。

近年、本技術は理工学や医学など広範囲の分野において活用され、これまで取得することの出来なかった詳細な情報の提供を通じて、学術の発展および各種技術の向上に貢献しつつある。

航空宇宙分野においても、特に流体分野では、感圧色素を用いて表面圧力分布を計測する感圧塗料法(Pressure-Sensitive Paint: PSP)⁽¹⁾、同様に表面温度を計測する感温塗料法(Temperature-Sensitive Paint: TSP)、気流に導入した蛍光分子により気体の密度や温度を計測するレーザ誘起蛍光法(Laser-Induced Fluorescence: LIF)などが実用レベルで活用されつつある。これらの分子イメージング技術により、これまでの点計測を中心とした手法から面や空間の計測へと拡張され、現象の理解を助けるだけでなく、積分量等のより高精度な計測が可能となるとともに、センサを組み込むことが困難だった領域の計測が可能となるなど、学術的な価値だけでなく、製品開発などの実用面での技術的な貢献も非常に大きい。現在開発中の国産小型旅客機MRJ(Mitsubishi Regional Jet)の構造設計用データの取得のために感圧塗料技術が用いられたケースなどはその好例であろう⁽²⁾。

一方、エンジンの分野では、高温の反応性流れを対象とすることやファン、タービンなどの回転要素を含む内部流を扱うことになるために光学的アクセスが困難であることなどから、分子イメージング技術の適用は遅れており、上記のLIFに加え、CARS(Coherent Anti-Stokes Raman Spectroscopy)による燃焼流の温度測定(点計測)などが行われている程度に過ぎない。

また、構造/材料分野においても分子イメージング技術の適用は現状のところ稀である。

本稿では、航空宇宙分野における分子イメージング技術のさらなる活用の促進を目的として、将来の適用が期待される分野や技術課題について概観する。

2. 空力分野における可能性

空力分野において要求される計測状態量は、主なものだけでも1)空気力、2)圧力(表面、空間)、3)温度(表面、空間)、4)流速、5)表面剪断応力、6)熱伝達率、7)気体組成など多岐にわたる。

現状、この中で最も広く活用されている分子イメージング技術は、詳細表面圧力分布の計測が可能で前述のPSPであり、従来の遷音速以上の高速流だけでなく低速流への適用が進んでいる(図1)⁽³⁾とともに、定常流だけでなく非定常流の計測も可能となりつつある(図2)⁽⁴⁾。今後さらにその実用性を向上させるためには、1)塗料の改良(複合塗料、低温度感度PSPの開発など;化学分野との連携が重要)、計測機器の高度化による計測精度の向上や、2)塗装方法改善、計測機器/処理ソフトウェアの高度化、同時計測(PIV, 騒音, 遷移等との同時)の実現によるデータ生産性(効率)の向上が重要である。また、1～10kHzの応答性能を当面の目標とした非定常計測技術の開発が進めば、空力騒音、バフェット、ヘリブレード等の多くの領域への活用が可能となり、航空宇宙分野のみならず、自動車、鉄道などのその他の輸送分野からの期待も大きい。

一方、速度場計測については、現在最も広く用いられている粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry: PIV)は、照明の粒子による散乱光画像を用いる計測手法であり、分子イメージング技術ではない。本手法は実験室レベルから大型風洞までその適用範囲を拡大しつつある(図3)⁽⁵⁾が、1)個別の粒子ではなく粒子群の平均速度を算出するため空間分解能が低い、2)気流に混入するシード粒子の気流追従遅れによる誤差が存在する、3)シード粒子による風洞等の汚染や人体へ悪影響の問題があるなどのいくつかの欠点を抱えている。これらの欠点を解決する分子イメージング技術として、Molecular Tagging Velocimetry (MTV)法⁽⁶⁾の向上が期待される。ただし、まだ実験室レベルでいろいろな可能性が研究されている段階であり、実用化するためには、空間分解能向上、高精度化、3次元計測への拡張、乱れの強い流れへの適用性の向上、適切なTagging分子の選択(安全性を考慮)など課題も多い。

また、速度場と空間圧力(または温度)場を同時に計測する技術として、安部らがマイクロカプセル(粒径13 μm)にルテニウム錯体を付加した感圧/PIV粒子を用いる手法を提案しているが⁽⁷⁾、このような方法が実用化されれば、速度と圧力を独立に測る必要がないという意味でデータ生産性が向上するとともに、数値流体力学(CFD)の検証用の詳細データを取得するという観点でも有効である。

3. 構造・材料分野における可能性

構造・材料分野において要求される計測状態量としては、1)歪、2)応力、3)温度などがある。

これらの計測が可能な分子イメージング技術はほとんどないが、元Florida大のHubnerらによりLuminescent Brittle Coating (LBC)法とLuminescent Photoelastic Coating (LPC)法と呼ばれる歪計測法が提案されている⁽⁸⁾。ただし、まだ実用化のレベルにはないようである。

一方、分子イメージング技術ではないが、「熱弾性応力測定法」と呼ばれる、材料の変形による断熱膨張/圧縮に伴う温度変化から応力を計測する手法が「場の計測」手法として広く普及しつつある。ただし温度変化は1/100~1/1000 $^{\circ}\text{C}$ 程度のオーダーで高精度計測が困難である点が大きな課題であり、将来的に分子イメージング技術により、この微小な温度変化を光学的手法等により拡大することができれば、その有用性は高い。

4. 航空エンジン分野における可能性

航空エンジンに関する計測状態量としては、1)圧力(表面、空間)、2)温度(表面、空間)、3)流速、4)気体組成、5)歪などがあり、空力分野と共通のものが多い。一方、空力分野と異なる計測上の制約として、高速回転、高温、内部流(光学アクセス悪い)がある。

本分野での分子イメージング技術への期待の一つは、コンプレッサ動翼ブレードの非定常圧力計測である。静翼は回転しないため圧力分布は計測可能だが、高速回転する動翼には圧力センサの埋め込みは困難であり、非定常PSPの適用が期待される。静翼と動翼の干渉でブレード上の圧力が数十kHz程度の高周波数で変動するため、それに対応可能な高速応答PSPや高感度カメラ、高出力レーザの開発や、温度依存性の補償方法や光学アクセスの確保方法などの計測手法の工夫などがカギとなる。

5. まとめ

航空宇宙分野への分子イメージング技術の適用は、PSP、TSPを中心として確実に拡大しつつあり、本技術の導入による面/空間の高解像度計測、高効率/低コスト計測、非定常計測が期待されている。今後、多くのコンセプトレベルの手法を実用化して行くためには、更なる技術の向上が必須である。また、分子イメージング技術は多分野への適用可能性があり、流体分野だけでなく視野を広げて適用先を探すことが重要と考えられる。最後に、分子イメージング技術の上記のような発展を実現するためには、航空宇宙分野と化学分野の研究者・技術者、計測機器技術者との連携が不可欠であることを強調しておきたい。

謝辞 本稿の作成に当たっては、JAXA研究開発本部 石川隆司氏、坂上博隆氏、飯島由美氏、中北和之氏、加藤裕之氏、満尾和徳氏、栗田充氏、杉本直氏、武田真一氏、西澤敏雄氏から助言、協力を賜った。ここに厚く感謝の意を表する。

参考文献

- (1) Nakakita, K., Kurita, M., Mitsuo, K., and Watanabe, S., "Practical pressure-sensitive paint measurement system for industrial wind tunnels at JAXA," *Meas. Sci. Technol.* 17, 2006, pp. 359-366.
- (2) 栗田他, "感圧塗料計測技術の実用性向上による開発風洞試験への適用," 第44回飛行機シンポジウム講演集, 2006.
- (3) Mitsuo, K., et al., "PSP Measurement of a High-Lift-Device Model in JAXA 6.5m \times 5.5m Low-Speed Wind Tunnel," AIAA-2007-1065, 2007.
- (4) Nakakita, K. and Arizono, H., "Visualization of Unsteady Pressure Behavior of Transonic Flutter Using Pressure-Sensitive Paint Measurement," AIAA-2009-3847, 2009.
- (5) Watanabe, S., Kato, H., Kwak, D-Y., Shirotake, M., and Rinoie, K., "Stereoscopic PIV measurements of leading edge separation vortices on a cranked arrow wing," *Meas. Sci. Technol.* 15, 2004, pp. 1079-1089.
- (6) Koochesfahani, M. M., "Molecular Tagging Velocimetry (MTV) - Progress and applications," AIAA-1999-3786, 1999.

(7) 安部ら, “PIV-PSP hybrid systemによる空間の酸素濃度分布と速度分布の同時可視化計測,” 可視化情報, Vol. 24, Suppl. No. 1, 2004, pp. 399–402.

(8) Hubner, J., et al., “Luminescent Strain Sensitive Coatings,” AIAA-2003-1437, 2003.

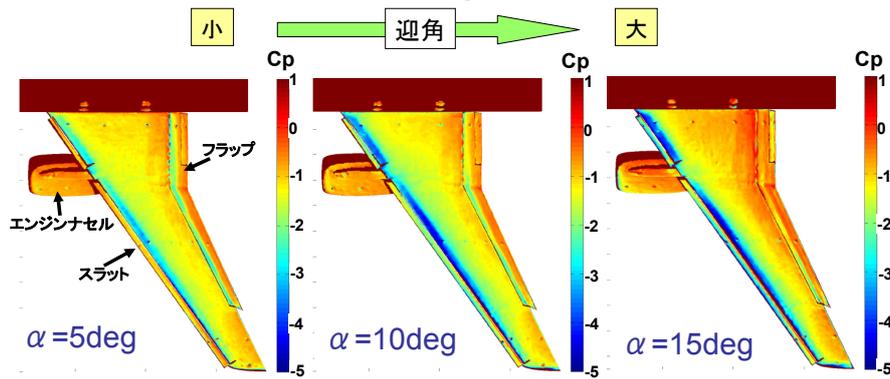


図1: 高揚力装置半載模型の低速PSP計測結果(風速60m/s)⁽³⁾。

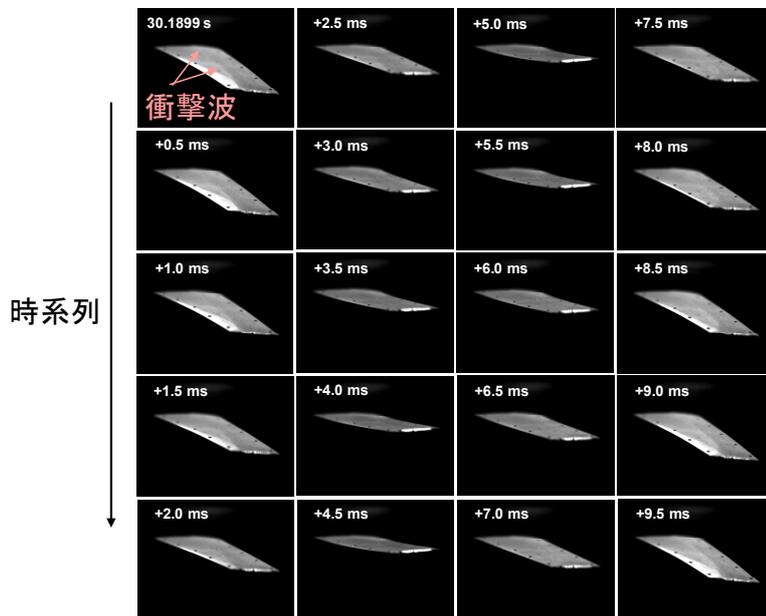


図2: 陽極酸化型非定常PSPによる後退翼の遷音速フラッター計測結果⁽⁴⁾
(白が圧力低、黒が圧力高)。

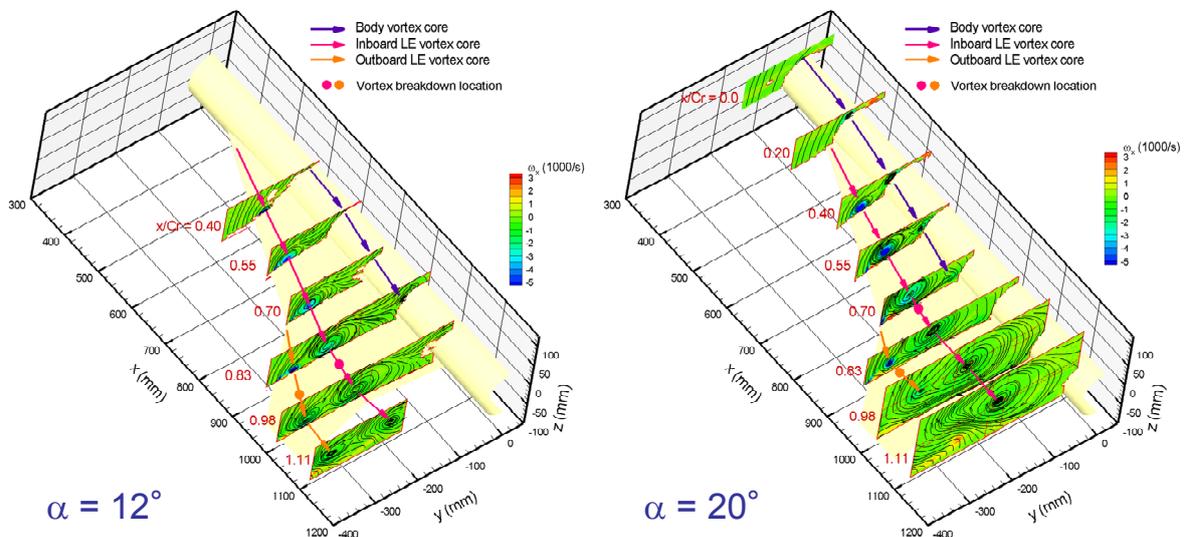


図3: PIVによるクランクアロー翼上面の前縁剥離渦の速度場計測結果(流線と渦度)⁽⁵⁾。