

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H04050

研究課題名(和文) 4次元風圧場の感圧塗料計測技術の開発と風波表面の圧力変動場の解明

研究課題名(英文) Development of a 4D-measurement technology of wind pressure with PSP and its application to the pressure field over wind waves

研究代表者

竹原 幸生 (TAKEHARA, Kohsei)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号：50216933

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,000,000円

研究成果の概要(和文)：①多重露光Lifetime-PSP計測による動的剛体振動模型上の圧力変動の計測技術を確立した。振動周波数に合わせて位相を同期させ、画像信号を積算することで高精度の圧力計測ができた。②この技術を発展させてLT-PSP法により弾性振動模型上のマッハ0.89の気流中の弾性翼のフラッタ(約100Hz振動)発生時の圧力変動計測に成功した。③時間分解能10 nsのイメージセンサを開発した。これを用いて飛翔する光の連続撮影に成功した(NHKニュースで全国放送された)。④小型波形模型上の風速10mの低速気流による圧力変化を強度法で検出することを試みた。風洞の幅方向平均値を使うことで流れ方向の圧力変化を捉えた。

研究成果の概要(英文)：(1) A Lifetime (LT) PSP measurement of the areal pressure distribution on a solid wing model under a periodic up-and-down motion was developed with multiple illuminations and the signal accumulation method. (2) Furthermore, the pressure distribution on a flexible wing under a high-speed air flow of Mach 0.89 was successively and successfully imaged with the LT-PSP method. (3) An image sensor operating at the time interval of 10 ns with ten consecutive frames was developed. The sensor successfully captured "The Light-in-Flight image" for the first time in the world as an silicon image sensor. (4) A pressure measurement on a small wavy model under a low speed air flow, such as 10 m/s, was tested. The PSP intensity method captured a general tendency of the pressure distribution in the flow direction.

研究分野：水工学

キーワード：感圧塗料計測 高速ビデオカメラ 波面上の圧力分布

1. 研究開始当初の背景

風と、風波直下の水運動の干渉を明らかにするには、波面上の圧力場の面的、かつ時間的変動の計測が重要である。本研究では航空流体力学で実用化されつつある感圧塗料による時空間圧力変動計測技術を適用することを試みる。

感圧塗料(PSP:Pressure-Sensitive Paint)計測は機体や翼表面の3次元圧力計測のための強力なツールである。従来の計測技術はPSP励起光源による連続照射条件下でのPSP発光強度の測定(強度法)に基づいていた。強度法では既知圧力下でのPSP発光画像である基準画像がPSP発光量の規格化のために必須であるが、近年、パルス照明で生じたPSP発光強度の減衰の圧力依存性に基づく圧力評価技術(寿命法, LT-PSP)の開発が積極的に進められている。寿命法によれば、原理的にはPSP発光寿命の時間内での位置変動が無視できる限り、被写体が変位、変形、振動しても基準画像無しに圧力算出ができる。

一方LT-PSPではイメージセンサへの入射光量が激減するので非常に高い感度のカメラが必要である。そのためにはLT-PSPに最適なビデオカメラを開発する必要がある。このカメラは以下の特徴を備えることが望ましい。

- (1) 撮影速度 100 万枚/秒以上
- (2) 連続撮影枚数 50 枚以上
- (3) 裏面照射
- (4) 冷却,
- (5) 画素内画像信号積算 (ISAS: Image Signal Accumulation Sensor).

ISASは多数回の撮影で得られた画像信号を素子外に読み出すことなく画素内積算する機能である。

2. 研究の目的

最近開発されている旅客機、例えばボーイング787のカーボン繊維でできた主翼のように、大きな変位を伴う物体の表面圧力の時空間変動を計測する場合は、レーザのパルス照射で生じる発光の急激な減衰特性を画像計測し、圧力に換算する方法が有力な計測手法となる。このような計測にはLT-PSPが有効であると考えられる。

LT-PSPには100万枚/秒以上の超高速、かつ超高感度で、多数回の撮影に対して画像信号を画素内で積算できるイメージセンサによる撮影が理想的である。

PSPと超高速ビデオカメラの専門家の協力を得て、このような4次元(t, x, y, z)風圧場の画像計測技術を開発する。

研究代表者はこの技術を風波面上の風圧場の計測に適用し、風波表面の気体輸送のダイナミクスの解明に役立てる。分担者は最近の旅客機等で実用化されている大変形翼の風圧場の計測に適用する。

3. 研究の方法

水工学、航空流体力学、高速ビデオカメラ開発という異分野の研究者がそれぞれの得意とする映像計測技術を提供して共同研究を行う。

4. 研究成果

4. 1 成果の概要

以下の研究成果が得られた。

- (1) 多重露光Lifetime(LT)-PSP計測による動的剛体振動模型上の圧力変動の計測技術を確立した。短時間の燐光の発光強度は弱いので、振動周波数に合わせて位相を同期させ、画像信号を積算することで高精度の圧力計測ができる。
- (2) この技術を発展させてLT-PSPによる弾性振動模型での動的大変形発生時の圧力変動を計測した。短パルス発光LD(Laser Diode)を光源とし、高速度ビデオカメラと組み合わせてSingle Shot極短時間LT-PSP計測システムを構築した。これによりマッハ数0.89の気流中の弾性翼のフラッタ(約100Hz振動)発生時の圧力変動計測に成功した。
- (3) 時間分解能10ns(1億枚/秒相当)のイメージセンサを開発した。画素数60万画素で連続5枚、30万画素で連続10枚撮影できる。画素内信号積算もできる。これを用いてシリコンイメージセンサとしては世界で初めて飛翔する光の連続撮影に成功した(NHKのニュースで全国放送された)。
- (4) 設計速度5千万枚/秒(時間分解能20ns)のISAS(画像信号積算素子)のテストセンサを開発した。32×32画素で連続1,220枚撮影できる。現在のテストカメラでは2,500万枚/秒が達成され、画像信号機能を検証した。
- (5) アクリル製の波形模型を作り、小型風洞中にセットし、PSP法による圧力測定を試みた。航空機等への応用の場合と比べて風速が極度に小さい。高い精度を出すことは難しいのでまず強度法を適用した。風洞の幅方向の圧力の平均値を使うことで、流れ方向の圧力変化を捉えることができた。

4. 2 大変形翼面4次元圧力計測技術の開発

大変形する模型では従来の強度方PSPでは大気圧下での模型静止状態の基準画像との位置合わせが難しく、定量的な圧力値推定が困難だった。基準画像を必要としないLifetimePSPでは、このような場合でも圧力値を求めることができる。

Fig. 1は強制仰角振動模型で実施したフェーズ・ロックLife TimePSPによる感圧塗料の輝度の積算による計測例を示す。模型仰角のサイクル振動の1周期を示す。翼前縁の低圧部分から後縁に向かい圧力回復しており、90°最大仰角では翼の中央に衝撃波が発生する。位相が進むにつれ衝撃波は前縁に移動、

270°では消滅し、360°で復元している。このようにまず、強制仰角振動モデルではLifetime PSPによる計測例を得ることができた。

これを弾性振動モデルから可撓性表面に展開し、さらに計測精度、計測周波数を拡張しつつある。30Hzで強制仰角振動する剛体物体については既にLifetime PSPによる計測を行い、既存の強度法との比較を行った。

測定システムの概略をFig. 2に、結果の例をFig. 3に示す。斜め方向から計測しており、上が模型前縁、下が後縁、左右はPSP励起光源の照射範囲端である。Lifetime PSPの測定精度は強度法に比べて遜色ないことがわかる。ただし、Lifetime PSPにおいても無風時の基準画像で校正することで精度が向上するため、現時点では無風時画像による校正も併用している。

4.3 1億枚/秒の裏面照射マルチ電荷収集ゲートイメージセンサと光の飛翔の撮影

Fig. 4は開発した裏面照射マルチ電荷収集ゲートイメージセンサ(BSI MCG image sensor)の構造を示す。以下の特徴を持つ。

- (1) 裏面照射イメージセンサである。図の上方が裏面で、上から光が入射する。開口率(受光面積/画素面積)100%で高感度。
- (2) 表面側の各画素の中心の周りに6個の電荷収集ゲートがある。これらに短時間間隔で数ボルトのゲート電圧VHを順次かけ

短時間間隔で連続5枚の画像信号を集めることができる(1個はドレイン)。

- (3) 厚さが約30μmである(通常のイメージセンサは数μm)。650nmの赤い光も99.9%光電変換され、量子効率(生成電子数/入射光子数)を100%に近づけることができる。また、表面側の電荷収集ゲートに残光が直入することをほぼ完全に防げる。

- (4) 薄いn層中にp型のpwell(図中のG)が設けられている。裏面側から表面側に降りた信号電子は、pwellの負電位で反発され、pwellの上を中央の孔に向かって集まる。孔を垂直に表面側に降り、VHのかけられた電荷収集ゲートで収集される。

- (5) 電荷収集ゲートで複数回の撮影による信号を積算することもできる。

- (6) 電荷収集ゲートの一つはドレインに接合しており、撮影前や後に流入する不要な電荷はドレインから素子外に排出できる。

Table 1に開発したセンサの仕様を示す。最高撮影速度1億枚/秒で60万画素に対して連続5枚、30万画素では10枚撮影できる。

1億枚/秒のイメージセンサで7.43m離れた2枚の鏡の間を往復する光の連続撮影に成功した。装置をFig. 5に、通常のビデオカメラに写ったレーザー光をFig. 6に、今回の撮影結果の例をFig. 7に示す。

これまでホログラフィ等を使ったいくつかの光の飛翔の撮影例がある。しかしイメージセンサで撮影された例はない

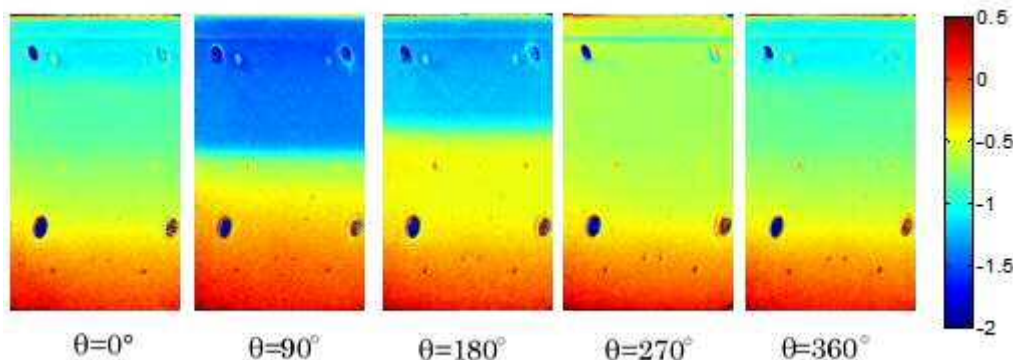


Fig. 1 強制仰角振動モデルのPSP計測例(1周期; 青が低圧; 多数回の画像の積算)

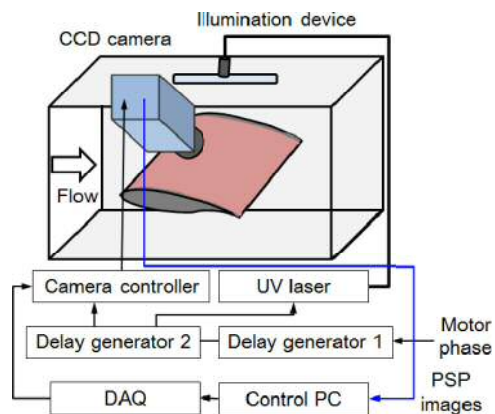


Fig. 2 Lifetime PSPによる強制仰角運動時の圧力計測実験のセットアップ

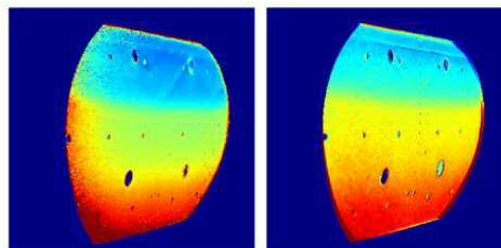


Fig. 3 Lifetime PSPによる強制仰角運動時の圧力計測結果
(左) Lifetime PSP, (右) 強度法

4. 4 画像信号積算素子 (MCG ISAS)

裏面照射マルチ電荷収集ゲートイメージセンサ (BSI MCG イメージセンサ) は撮影速度は速いが撮影枚数が 5 枚もしくは 10 枚と少ない。各電荷収集ゲートに画像信号メモリを接続し、1 個の電荷収集ゲートで信号電荷を収集した後、他の電荷収集ゲートで信号電荷を収集中に、最初の電荷収集ゲートで集めた信号電荷を隣接する画像信号メモリに移せば良い。これでこの電荷収集ゲートは空になるので新たな画像信号を収集できる。このような機能を備える撮像素子を画像信号積算素子 (MCG ISAS: Multi-collection-gate Image Signal Accumulation Sensor) と呼ぶ。

Fig. 8 は ISAS の 1 画素の例である。裏面照射撮像素子で、表面側の画素中心に 4 個の電荷収集ゲート (Collection Gates (CG)) を備えている。各電荷収集ゲートには画素内その場記録 (In-situ storage) のために 305 個の要素を持つ折りたたみ CCD が接続している。従って 1, 220 枚の連続画像を撮影できる。

この撮像素子は 2 種の画像信号積算モードを持っている。

(1) 1, 220 枚の連続画像の積算

各 CCD メモリは、先端と末端がつながったループになっている。従って 1, 220 枚の画像の繰り返し撮影で積算された連続 1, 220 枚の画像信号を記録できる。

(2) 4 枚の連続画像の積算

4 個の CG からメモリ CCD に信号を転送せずに 4 フレームずつ撮影を続け信号を積算する。基本性能は以下の通りである。

- ・最高撮影速度：5 千万枚/秒
- ・連続撮影枚数：1, 220 枚
- ・画素数：32×32 画素

これは原理実証用テストセンサである。実用センサは 256×256 画素を予定している。

超高速画像信号積算センサ (ISAS: Image signal accumulation sensor) の信号積算効果を検証した。結果を Fig. 9 に示す。ND フィルターを用いて LD 強度を下げ、1 回の撮影ではほとんど写らないようにし、1, 250 万枚/秒の超高速で撮影した。

レーザは 4 フレームごとに照射した。各横 1 列の 10 フレームの画像が、1 回の撮影で撮影した連続 1, 220 枚の画像から抽出したものである。1 回の撮影では何も写っていない。2 回ループ撮影以降はレーザ像が明るくなる。

Table 1 開発した裏面照射マルチ電荷収集ゲートイメージセンサの仕様

Structure	Functional Backside Illumination
Maximum Frame rate	100 Mfps
Pixel Count	588,736pixels
Pixel Size	12.73 μ m x 12.73 μ m
Fill factor	100%
Sensor Size	12 mm x 12 mm
Number of collection gates	5
Number of consecutive frames	5 frames
Temperature of the Sensor	- 10°C

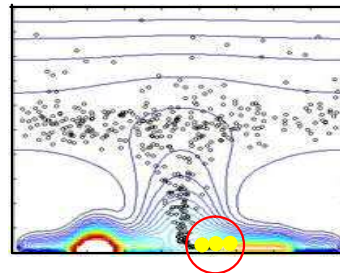
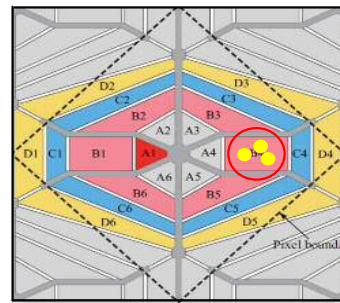
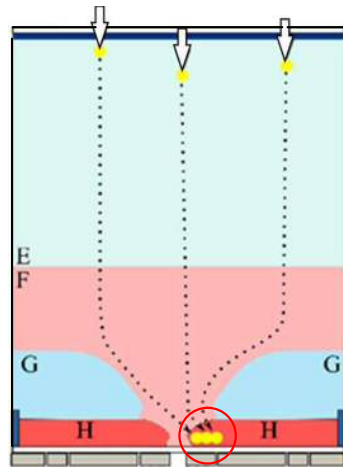


Fig. 4 $\Delta t = 10$ ns のイメージセンサの構造 (上) 断面構造, (中) 表面の電極配置, (下) パルス照明後のある時点の信号電子分布

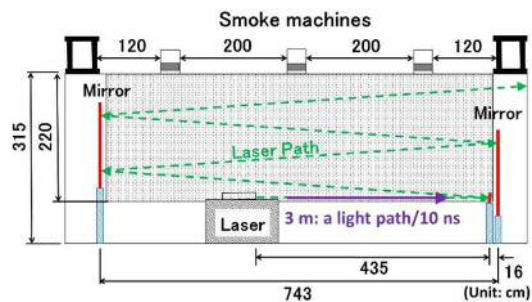


Fig. 5 光の飛翔の実験セットアップ



Fig. 6 ビデオ画像の 1 枚に映ったレーザ光

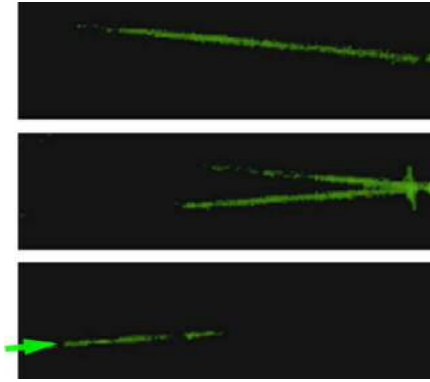


Fig. 7 1億枚/秒の撮影速度で捉えられた飛翔する光（連続10枚の中の3枚）

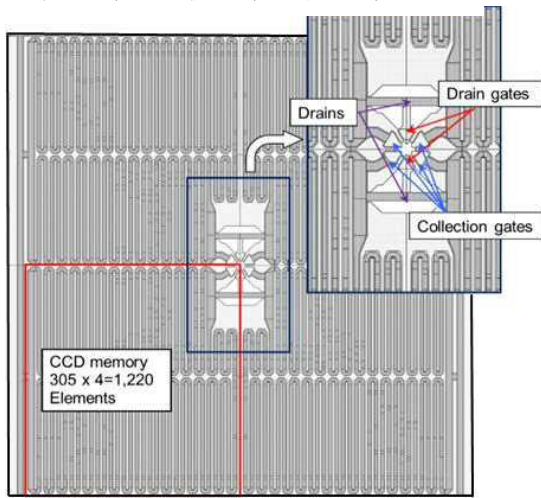


Fig. 8 ISAS の1画素の平面構造の例（中央に4個の電荷収集ゲートと2個のドレーンゲートが配置されている。各電荷収集ゲートに折りたたみ CCD がその場信号記録のために接続されている。

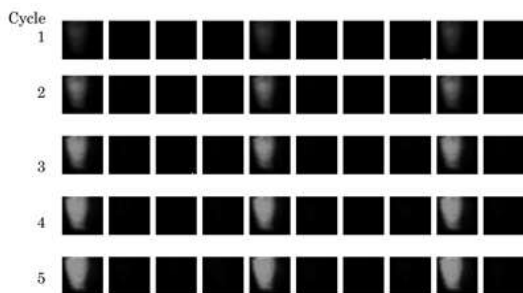


Fig. 9 超高速画像信号積算の例(12.5Mfps) 4フレーム毎にLD入射, 5回積算した例

4. 5 波面上の圧力分布のPSP測定

PSP計測技術の1分野に低流速PSP測定がある。気流の速度が数10 m/s程度以下であると圧力低下効果が小さく、測定精度を上げることが難しい。従って低流速PSP測定はPSP技術の挑戦分野の一つになっている。自然界の風速は界面でも最大数10 m/sであるから、

本課題は低流速PSP技術の範疇に属する。従って本適用例ではまず強度法を用いる。

模型にいくつかの静圧測定孔を設けておき、点計測の静圧測定結果を使ってPSP発光強度から面的な圧力分布を求める。

実験装置の概要をFig. 10に示す。静圧測定孔付近の圧力と発光強度の関係の測定結果をFig. 11に示す。この結果と波面上での発光強度画像から圧力換算した図をFig. 12に示す。Fig. 12には画像を幅方向に平均化した図も併記している。

Fig. 11の相関関係から、ある程度の精度で圧力を測定できることがわかる。しかし実際にはFig. 12に示すように、ノイズ成分が非常に大きく、圧力特性を観察するレベルの圧力分布を得ることはできなかった。平均化された値には傾向が見えている。

今回の実験でわかった主な課題は以下の通りである。

- (1) 通常の高速度ビデオカメラではカメラのノイズレベルが高い。
- (2) PSP発光強度が低い。
- (3) PSPの塗りムラ、等。

今回開発したイメージセンサを搭載したカメラを冷却カメラにする。これによりカメラのノイズは大きく下がる。また画素内画像積算でノイズレベルを上げることなく、信号レベルを上げることができる。また単純に、より強力なレーザを使うことで信号強度は上がる。PSP材料は年々改善されている。

今回の実験で、微弱ではあるが、このような低流速PSP計測でもPSP発光と圧力との関係を検出できることがわかった。引き続き関連技術の開発・改良・工夫により、低流速PSP計測技術の実用化努力を継続する。

www.plus ^

Fig. 10 実験装置

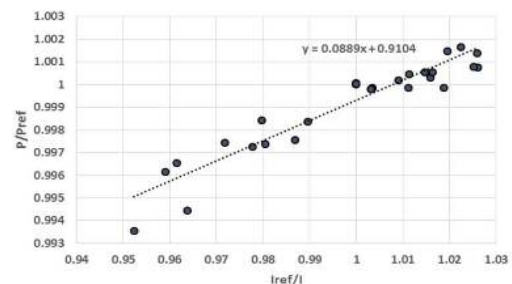


Fig. 11 静圧測定値と孔周辺PSP発光強度

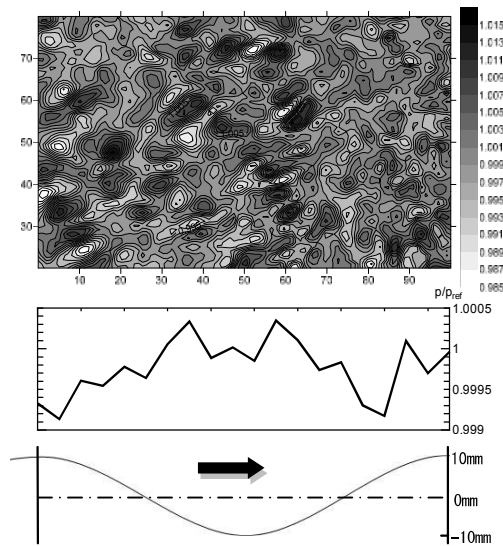


Fig. 12 低速 PSP による波面上の圧力測定例
上：測定結果，中：幅方向平均値，下：波形
再付着点（70～80 mm）以降の加速域で圧力
低下が生じていること等がわかる．測定技術
の開発が必要であるが，測定可能性が見えた．

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者, 連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 11 件)

- ①久末 信幸, 竹原 幸生, 傾斜壁を用いた鉛直取水設備の渦対策工の渦抑制効果に関する実験的検討, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, 74 巻, No. 4, 2018, I_691-I_696
- ②江藤 剛治, 究極の超高速イメージセンサー, 0 Plus E, 査読無, Vol. 40, No. 3, 2018, 289-294
- ③江藤 剛治, 下ノ村 和弘, 竹原 幸生, 他, 究極の時間分解能のイメージセンサを目指して—10 ns から 50 ps へ—, 映像情報メディア学会技術報告, 査読無, 42 巻, No. 10, 2018, 9-12
- ④T. G. Etoh, K. Shimonomura, A. Q. Nguyen, K. Takehara, et al. (全 13 名), 100 Mfps image sensor for biological applications, Proc. of SPIE, High-Speed Biomedical Imaging and Spectroscopy III, 査読無, Vol. 10505, 2018, 1050506
- ⑤ Y. Sugioka, K. Nakakita, K. Saito, T. Nonomura, K. Asai, First Results of Lifetime-Based Unsteady PSP Measurement on a Pitching Airfoil in Transonic Flow, AIAA Paper, Vol. 2018, 査読無, 2018, 1-12 (AIAA 2018 Aerodynamics Measurement Technology (AMT) Best Paper Award)
DOI:10.2208/jscejhe.73.I_673
- ⑥竹原 幸生, 松井 一彰, 微分干渉顕微鏡と単一カメラを用いた微生物まわりの 3 次元流れ場計測法の開発, 土木学会論文集 B1(水工学), 査読有, 73 巻, No. 4, 2017, I_673-I_678
DOI: 10.2514/6.2018-1030
- ⑦K. Takehara, T. G. Etoh, Direct Evaluation Method of Vorticity Combined with PTV, Selected Papers from the 31st International Congress on

High-Speed Imaging and Photonics, Proc. Of SPIE, 査読有, 10328, 2017, 103280Z-1-7

DOI:10.1117/12.2270541

⑧S. Abe, T. Takagi, K. Takehara, et al. (全 8 名), Constructing an Automated Fish Counting System by Using PTV Analysis, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, Proc. Of SPIE, 査読有, 10328, 2017, 103281T-1-5

DOI:10.1117/12.2270541

⑨K. Nakakita, Simultaneous Visualization of Transonic Buffet on a Rocket Faring Model Using Unsteady PSP Measurement and Schlieren Method, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, Proc. Of SPIE, 査読有, 10328, 2017, 1032810-1-5, DOI:10.1117/12.2270541

⑩A. Q. Nguyen, V. T. S. Son, K. Takehara, T. G. Etoh, Crosstalk in Multi-Collection-Gate Image Sensors and its improvement, Selected Papers from the 31st International Congress on High-Speed Imaging and Photonics, Proc. Of SPIE, 査読有, 10328, 2017, 1032808-1-6

DOI:10.1117/12.2270541

⑪T. G. Etoh, and et al. (全 6 名), The Theoretical highest frame rate of silicon image sensors, Sensors, 査読有, Vol. 17, No. 3, 2017, E483, DOI: 10.3390/s17030483

[学会発表] (計 16 件)

[図書] (計 1 件)

T. G. Etoh, A. Q. Nguen, Springer, The Micro-World Observed by Ultra High-Speed Cameras, 81-101(総頁 415)

[その他]

ホームページ等

① 近畿大学, 世界ではじめてイメージセンサーで光の飛翔の撮影に成功

<http://kindaipicks.com/article/001404>

② Flying light captured by a silicon image sensor

<https://youtu.be/GYrvkcoou54>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

竹原 幸生 (TAKEHARA, Kohsei)

近畿大学・理工学部・教授

研究者番号: 50216933

(2) 研究分担者

中北 和之 (NAKAKITA, Kazuyuki)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・次世代航空イノベーションハブ・研究領域主幹
研究者番号: 50358595

(3) 研究分担者(最終年度は研究協力者)

江藤 剛治 (ETOH, Takeharu)

立命館大学・総合科学研究機構・教授

研究者番号: 20088412