

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01548

研究課題名(和文) 燐光分子計測と専用特殊高速ビデオカメラによる波面の4次元圧力計測

研究課題名(英文) Phosphorescent Lifetime Imaging with a Customized Ultra-high-speed Video

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) 13,500,000円

研究成果の概要(和文)：代表者(竹原)は海面での物質輸送の研究を行ってきた。本研究の目的はその研究の一環で、感圧塗料を用いた波面上の圧力分布の計測技術を開発することである。分担者(中北)は航空流体力学分野で感圧塗料を用いた圧力変動の計測技術の開発を進めてきた。また分担者(江藤)は超高速カメラの開発を行ってきた。異分野の研究者の協働で気流による曲面上の時空間的圧力変動の計測技術の開発を行った。旅客機の飛行速度である250m/s程度的高速風洞では時空間的変動までが計測できるようになった。風速30m/s程度の波面風洞では圧力変動が小さく、温度変化の同時計測による補正等のより高度な計測技術の開発が必要であることがわかった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

面上の気圧の変動は圧力計による点計測で行われてきた。感圧塗料の短パルス照明に対する発光の減衰時間(発光寿命)は気圧が低いほど長い。発光寿命の計測により曲面上の気圧の時空間的変動を計測する技術を、波や砂丘のような自然界連続波面の模型上の圧力変動の計測に適用するための基礎研究を行った。航空機の翼面のような亜音速流に対しては翼と周りの流れの振幅が自動的に増幅するフラッタ発生時でも圧力の時空間的変動が計測できるようになった。最大風速が30m/s程度の自然風に対しては、風による発熱と冷却が圧力の変化と同程度に発光寿命に影響することがわかった。同時計測による補正技術等のさらなる技術開発が必要である。

研究成果の概要(英文)：K. Takehara is conducting researches on transfer processes through a sea surface. This paper targets development of a measurement technology of air pressure on a wavy surface with a PSP (pressure sensitive paint). K. Nakakita has developed PSP technologies to measure distributions of air pressure on aerofoils. T. G. Etoh has updated the world highest frame rate of high-speed cameras. These researchers in different scientific fields collaborate for evolution of the PSP measurement technologies. For a relative wind speed of about 250 m/s at which airliners fly, the PSP technology has progressed in this project to be able to measure the spatiotemporal distribution of the air pressure on a deforming aerofoil. However, for a wind speed about 30m/s, the air pressure deviation is not large enough to be measured only by the PSP measurement. Advanced technologies such as a simultaneous measurement of pressure and temperature to modify the pressure data have to be further developed.

研究分野：環境水理学

キーワード：燐光 寿命計測 圧力計測 超高速カメラ

1. 研究開始当初の背景

1.1 異分野の研究者の協力

代表者(竹原)は風と、風波直下の水運動の干渉を明らかにするための研究を続けてきた。このためには波面上の風で生じる圧力場の時間的変動を面的に計測したい。このため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の適用を検討してきた。

本研究の分担者の中北は感圧塗料 (PSP: Pressure Sensitive Paint) による航空機翼面の圧力場の画像計測に関する研究の第一人者である。

同じく分担者の江藤は1991年以来、高速イメージセンサカメラの撮影速度の世界最高記録を更新してきた。2019年には1億枚/秒で30万画素の画像を連続10枚撮影できるカメラを開発し、イメージセンサカメラ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。

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、動的な圧力変化の計測が可能なLifetime PSP技術の向上を目指すとともに、それぞれの分野での応用技術の向上を目指して共同研究を行う。

1.2 PSP計測の原理

燐光色素は酸素分圧が上がると減光する。風速が大きくなると圧力低下に伴って酸素分圧も下がり、発光強度が上がる。強度法と呼ばれる通常のPSP計測では無風時に参照画像を撮影しておき、有風時の画像上の同じ点(小領域)の発光強度比を圧力に換算する。

近年の旅客機のように炭素繊維などでできた翼は大きく撓む。実験室でこのような現象をPSP計測する場合、参照画像を撮ることができない。酸素濃度が下がると発光強度が大きくなるだけでなく、パルス照明するときのPSPの消光の時定数(寿命, Lifetime)も長くなる。従ってLifetimeを計測し、圧力に換算する方法がLifetime (LT) PSP法である。LT PSP法は、被写体が動的に変化し、参照画像の撮影が難しい現象でも面的な圧力変化を計測できる。

1.3 研究開始時点の研究の状況

(1) 波面風洞での圧力計測

Fig. 1に近畿大学で設置した小型風洞の概形を示す。50 cm×50 cm 風洞の口径を絞り、10 cm×10 cmの超小型風洞を設置し最高風速を32.2 m/sにした。通常、航空分野では風速50 m/s (180 km/h)の風洞を低速風洞と呼ぶのでそれ以上の風速を目標としていたが2/3程度の風速となった。壁面の摩擦と空気の漏れが予想以上に大きかったためと考えられる。ベルヌーイの式が成り立つ場合32.2 m/sでは圧力低下は最大0.63%である。かなり厳しい条件下の実験である。

(2) 翼面の圧力変動のPSP計測

強度法は実用化段階に達した。LT PSP法では1回の照明時間はPSPの立ち上がり時間である30 μsである。1パルスでは発光強度が不十分で圧力の推定精度が低い。動的現象であっても剛体振動模型上の圧力変動であれば、位相を合わせて繰り返し撮影し、LT PSP法で計測ができる(多重露光Lifetime (LT) PSP計測)。これにより振動剛体翼上の圧力変動計測にも成功した。

ただし、ある限界以上の風速や迎角で翼の振動が増幅するフラッタ時の圧力計測では繰り返し撮影による積算ができない。1回の連続撮影中に多数のパルスを照射して、その都度減衰定数を推定することができれば、LT PSP法の利点を活かすことができる。

(3) 高感度超高速カメラ

開発したカメラはアストロデザイン(株)製HC-4502である。私達が開発した裏面照射マルチ電荷収集ゲート(Backside-illuminated Multi-collection-gate)構造で、時間分解能10 ns (1億枚/秒相当)で撮影枚数10枚のイメージセンサを備える。

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高い感度と低ノイズのカメラが必要である。そのために以下の特徴を備えることが望ましい。

(a) 撮影速度100万枚/秒以上、(b) 連続撮影枚数50枚以上、(c) 開口率100%で高量子効率(生成電子数/入射光子数)、(d) 低ノイズ(冷却可)、(e) 画素内画像信号積算機能。

1億枚/秒のカメラは撮影枚数が10枚であることを除けば他の条件は満たしている。

2. 研究の目的

2.1 波面風洞での圧力計測

- 1) 近畿大学に設置した小型波面風洞でLT PSP法による時空間的圧力変動計測技術を開発する。
- 2) 計測によって得られた圧力変動に関する知見を風波による物質輸送過程の理解に役立てる。

2.2 翼面の圧力変動のPSP計測

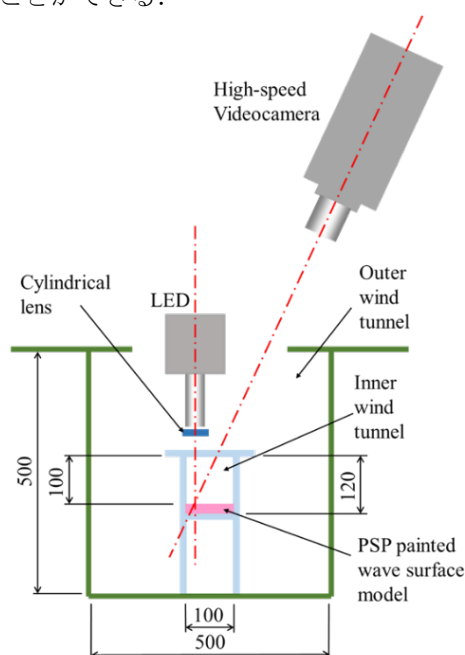


Fig. 1 小型風洞、波形模型、および照明機器とカメラの設置の概要

- 1) LT PSP による翼面の圧力変動計測を多重露光によらず 1 パルス露光で計測できるようにし、これを繰り返してフラッタのような時間発展型の現象の圧力変動が計測できるようにする。
- 2) 変位と温度も同時計測できるようにする。

2.3 高感度超高速カメラ

- 1) 1 億枚/秒のカメラは原理実証カメラであったので撮影枚数は最大 10 枚である。撮影枚数を 50 枚以上にしたイメージセンサを設計する。
- 2) PSP 計測への適用を通じて実際の計測への適用上の課題や改良点を明らかにし、イメージセンサの設計に活かすとともに、それを活かす制御技術を開発する。

3. 研究の方法

3.1 波面風洞 (近畿大学)

断面が 10 cm×10 cm の風洞の底面に波長 20 cm 波高 2 cm の波型模型を設置し、2 波長分に励起帯が 308 nm~530 nm の PSP 剤 (白金ポルフェリン PtTFPP) をポリマーと混合して塗布した。

LED 光源は, HARDsoft Microprocessor Systems 製 IL-104X である。発光波の中心波長は 460 nm ~470 nm, 連続発光とパルス発光が可能で, 連続光の最大放射照度は 7.2 W, パルス幅は 0.2 μs ~300 μs, パルス周波数は 1 Hz~1,000,000 Hz である。

LED から照射される光は, 実験区間の風洞上部に置いたシリンドリカルレンズにより, 流れ方向に拡大した長い長方形領域にした。

Fig. 2 にパルス照明時の発光の例を示す。発光強度は約 30 μs で一定の飽和強度に達する。65 μs 照射し, 発光が十分一定強度に達する 40 μs 後から撮影を始める。Δt = 5 μs で 10 枚撮影する。前半の 25 μs は一定強度でその後 25 μs の減光部分を含めて撮影する。

撮影は単発撮影の場合と積算撮影を行う。積算回数は 5 回~40 回とした。

高速ビデオカメラのレンズには, カット波長 560 μm および 570 μm のロングパスフィルターを 3 枚取り付け, LED 光のカメラへの入射を遮断し, PSP から発光のみを撮影した。

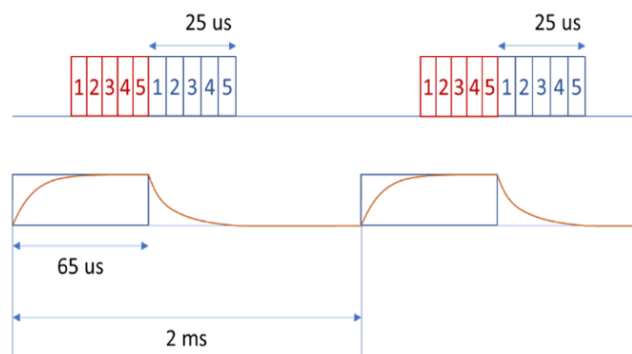


Fig. 2 パルス照明, 発光, 撮影パターン

3.2 亜音速フラッタ風洞での計測 (JAXA)

断面は 0.6 m×0.6 m でマッハ 0.5~1.2 の低乱れ風洞であり, JAXA での計測技術の開発等に使う。本研究で紹介する実験では風速はマッハ 0.89 とした。実験装置のセッティングを Fig. 3 に示す。

圧力と変位の同時計測のために 2 台の高感度高速度カメラをセットしている。

Fig. 4 に LT PSP 法による圧力計測時の照明・発光パターンと圧力の推定手順を示す。発光がほぼ飽和状態に達するまでの遷移状態で照明を止め, その前後の発光強度の積分値の比から圧力を推定する。照明が発光が飽和する前に止めるのは照明による昇温の影響を最小限にするためである。Fig. 2 の近畿大学の照明パターンでは温度影響についての注意が不十分であった。

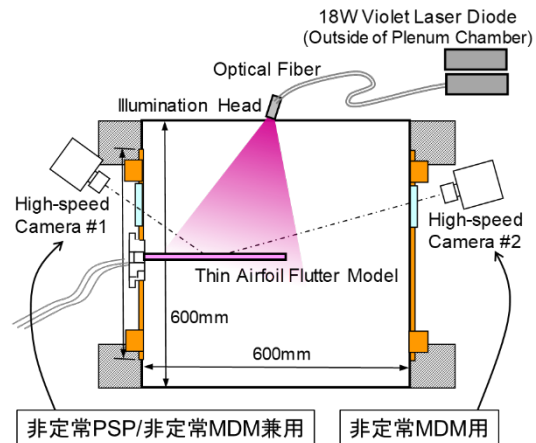


Fig. 3 JAXA における実験の概要

圧力計測と同時に Model Deformation Measurement (MDM) 法による変位計測を行った。翼は弾性体であるので, 適切に配置した翼面上の数点の 3 次元の変位から全面的変位を実用精度で推定できる。

本研究の開始時点では, 最低限の変形モードとして, 曲げ 2 次, 捩じり 1 次までを考慮して, 変位 z を以下の式で近似していた。

$$z = (ax+b) \cdot (cy^2+dy+e)$$

6 個の係数 a, b, c, d, e を時間の関数とし, 各時間ごとに推定する。フラッタ計測では各時間で 1 点のデータしか取れないので, 不自然な動きが出るがあった。

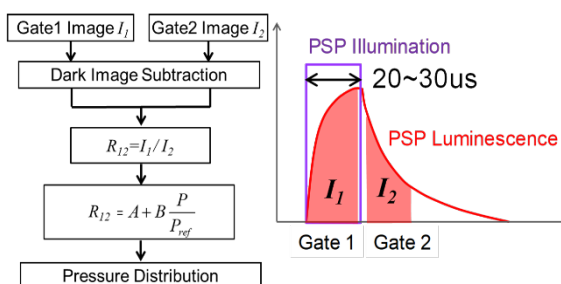


Fig. 4 LT PSP 法によるフラッタ時の圧力計測時の照明・発光波形と圧力推定手順

$$z|_{y=0}, dz/dy|_{y=0} \text{の条件を考慮し,}$$

$$z = axy^2 + by^2$$

を条件とすることで位置推定の精度は少し下がるものの安定した推定値を得ることが出来た。

3.3 高感度超高速カメラと照明装置

LT PSP 計測を行うために Fig. 2 のタイミングで撮影するためのプログラムを用意した。10 枚撮影し、一定時間を置いて 10 枚撮影を繰り返して信号を積算する。繰り返し回数の単位を 5 回とする。すなわち照明と位相を合わせて 5 回、10 回、15 回、・・・、5×N 回積算撮影ができる。

事前の検討でカメラについては 1 枚から 10 枚目までの画像間の大きなクロストークがあることが明らかになった。2 種の原因がある。

- 1) 光が入射する裏面に近い層で電界が小さいために生じる遅れ。
- 2) シリコン層と裏面のシリコン酸化膜絶縁層の界面でトラップされる信号電子の放出による撮影時間単位に比べて非常に長い遅れ。

これらの課題をポストデータ処理で解決するための式を導いた。しかし今回はまだ原理実証段階であるので、比較的大きな信号を用いて、前もって測定した画像枚数毎の画像信号強度と出力強度との直線関係部分を用いて換算した。

照明強度についても課題が見つかった。

- 1) 入力電流強度と出力光強度の関係が直線ではなく、強度レベルによって途中でずれる。
- 2) 照明時間と出力光強度については正確に直線関係になった。

最長パルス長は 300 μs であるので、それ以上の照明強度が必要なときは電流を増やし、1)のずれに対しては前もってキャリブレーションカーブを用意した。

4. 研究成果

4.1 波面風洞での圧力計測

Table 1 に気圧と 25 μs 間の発光強度の関係を示す。平均発光強度は安定的な値が得られており、積算無しでも圧力の測定が可能である。

Table 2 に気圧の変化に対する減衰定数の変化の比を示す。受光面の中心周りの 4 ブロックについての平均値である。積算無しの場合の値のバラツキは大きい。積算回数が増えるに従って 4 ブロックの値の差は縮小している。ただし値が徐々に大きくなっている。理由としては温度影響等が考えられる。

Fig. 5 に LT PSP による圧力の推定例を示す。気流は右から左方向である。1 波長は 200 mm で、これが 8 ブロックの画素グループからなる。従って 1 ブロックは 25 mm である。地点 1~8 は各ブロックの中心として図化している。

地点 1 と 8 の両側が波形の峰で 4 と 5 の中央が谷の底である。以下がわかる。

- 1) 気流が速い波形の峰では気圧が低く、谷では高いという傾向が再現されている。
- 2) 気圧が 100 kPa を超え、20 回積算の方がさらに大きい。

以上より今回のカメラと照明装置で LT PSP 法で積算により圧力計測できる可能性がある。

図示していないが以下の点も明らかになっている。

- 1) Table 1 より通常の方法で積算無しで空間的圧力分布を計測できる可能性が高い。
- 2) 別途、1 波長にわたる無照明時の温度計測も行っている。この場合、峰部分でやや温度が低く、谷部分で高いので Fig. 5 と同傾向の変化が観測される。従って Fig. 5 は圧力と温度の効果の合成である可能性が高い。さらに、パルス照明による昇温効果がある可能性もある。

以上より、この技術を実用化するには以下のさらなる研究を進める必要がある。

- 1) 温度の精密な同時計測で圧力を補正する技術の開発。
- 2) より高感度で撮影枚数の多いカメラの開発。
- 3) より強力な照明装置。高繰り返し短パルスレーザが望ましい（ただし高価）。

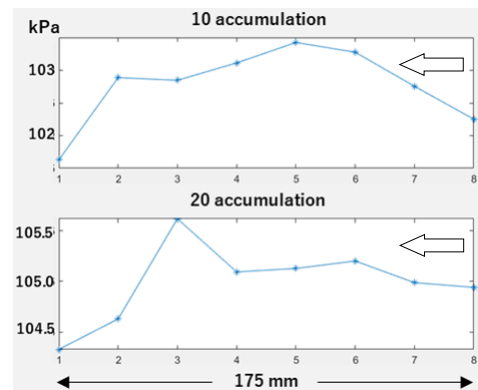


Fig. 5 LT PSP 法による圧力の推定例

Table 1 気圧と 1~20 パルスの平均出力

kPa	Accumulation				
	1	5	10	15	20
90	48.72	49.38	48.86	48.76	48.61
94	47.29	47.92	47.53	47.45	47.38
98	46.04	46.67	46.25	46.16	46.13
100	45.20	45.68	45.46	45.32	45.38

Table 2 減衰定数 (μs) / 気圧 (kPa)
中心周りの 4 画素(T: top, B: Bottom,
R: right, L: left)

	5	10	15	20
TL	-0.035	-0.043	-0.043	-0.047
BL	-0.030	-0.038	-0.046	-0.051
TR	-0.026	-0.037	-0.047	-0.046
BR	-0.025	-0.036	-0.033	-0.050

4.2 亜音速フラッタ風洞での計測 (JAXA)

Fig. 6 に実験に用いた翼模型を示す。Fig. 7 は、圧力計と非定常 LT PSP により計測した圧力を比較している。この場合はフラッタが起こっているので MDM 計測に基づく圧力測定位置の整合も行っている。フラッタの生起により時間と共に気圧の振幅が大きくなっているが、PSP 計測結果は高い精度で気圧計の値に追従している。

すなわち変位と気圧の 4 次元 (時間+空間 3 次元) 同時画像計測技術が確立された。この技術に温度計測までが加わると実用価値はさらに高まる。

4.3 高感度超高速カメラ

(1) 課題

今回開発したカメラは速度的には世界最高速であり、画素数、感度ともに従来の高速度カメラと同程度以上の性能があるが、以下の 2 つの課題がある。

- 1) 基本的課題：撮影枚数が少ない。
- 2) 具体的課題：信号の取り残しによるクロストーク等が大きい。

以下、解決のための研究成果を述べる。

(2) 撮影枚数の増加

撮影枚数を増やすために Fig. 8 の新画素構造を提案し、シミュレーションで性能を検討した。

末端の 12 個のフローティングディフュージョン (FD) は、各画素内のその場メモリ (in-situ memory) であると同時に、近い将来 3 次元チップ接合技術でセンサチップに接合されたメモリチップに連続的に画像信号を送るための信号転送機能を併せ持つ。

このセンサにより以下の性能が達成される。

- 1) 3 次元接合無しの場合：100 万画素；時間分解能 200 ps，撮影枚数 12~48 (隣接 4 画素を 1 マクロピクセルとして使う場合)
- 2) メモリの 3 次元接合時：100 万画素；時間分解能 1 ns，連続撮影枚数 1,000 枚。

(3) クロストークの軽減

裏面プロセスに起因する 2 種の原因がある。

- 1) 光が入射する裏面側のシリコン層での低電界による垂直ドリフト速度の大幅な低下。
- 2) シリコン層と酸化膜界面間のトラップ。

これらを仕分けして推定するための式を作った。時間的な都合でこれらをデータに適用することが出来なかった。これからその課題に挑戦する。

4.4 成果の概要

(1) 波面風洞での圧力計測

断面 10 cm×10 cm で風速 32.2 m/s の小型風洞に、アクリル製で波長 20 cm,波高 2 cm の連続波形を設置し、PSP 法による圧力計測技術の開発を試みた。

- 1) 強度法により圧力計測ができることがわかった。
- 2) LT PSP 法では多数回の積算による圧力計測の可能性が示唆された。
- 3) しかし風や照明による温度変化などが圧力と同程度に作用する。従ってこれらの同時計測により、圧力を補正する技術の開発が必要である。

(2) 亜音速フラッタ風洞での計測 (JAXA)

亜音速領域では LT PSP 法による非定常な圧力変動と MDM 法による変位計測を連成して行うことに成功した。温度計測まで連成して行うことが出来るようにすると実用性がさらに高まる。

(3) 高感度超高速カメラ

- 1) 撮影枚数を増やすための画素構造を提案した。
- 2) クロストーク低減のためのデータ解析方法を準備した。

4.5 今後の課題

- 1) LT PSP による圧力計測技術の改善，および変位や温度の同時計測技術の実用化。
- 2) これらの技術による計測の積み重ねによる風波による界面の物質輸送現象の理解の深化。
- 3) 撮影枚数増，クロストークの低減等の技術開発と，それを反映したイメージセンサの開発。

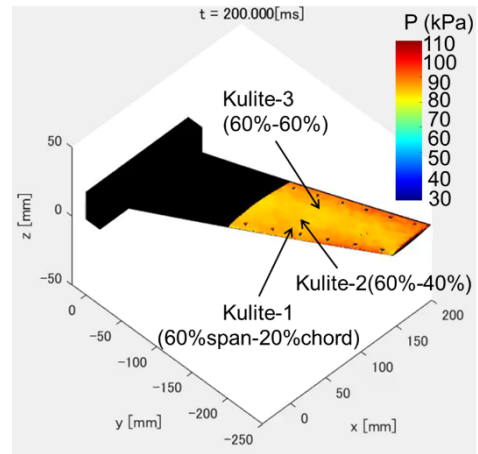


Fig. 6 翼模型，圧力計 (Kulite) 位置
M: 0.98, P₀=150kPa

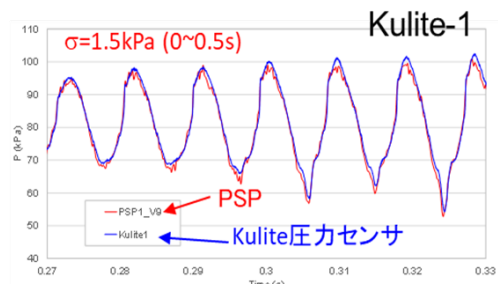


Fig. 7 圧力計と非定常 LT PSP 計測結果
の比較

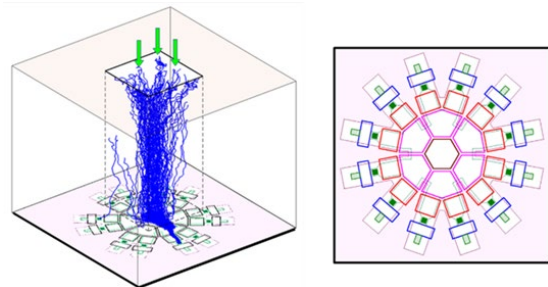


Fig. 8 ブランディングイメージセンサ「花火」立体的な構造と信号電子の軌跡 (左)；表面側の電極配置 (右)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 15件 / うち国際共著 13件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Nguyen Hoai Ngo, Takayoshi Shimura, Heiji Watanabe, Kazuhiro Shimonomura, Hideki Mutoh, Takeharu Goji Etoh	4. 巻 45(17)
2. 論文標題 Super-temporal-resolution Image Sensor - Beyond the Theoretical Highest Frame Rate of Silicon Image Sensors -	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ITE Technical Report	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nguyen H. Ngo, Takayoshi Shimura, Heiji Watanabe, Kazuhiro Shimonomura, Yoshinari Kamakura, T. Goji Etoh	4. 巻 45(17)
2. 論文標題 A Branching Image Sensor for Sub-nanosecond Burst Imaging	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ITE Technical Report	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nguyen Hoai Ngo, Kazuhiro Shimonomura, Taeko Ando, Takayoshi Shimura, Heiji Watanabe, Kohsei Takehara, Nguyen Anh Quang, Edoardo Charbon, Takeharu Goji Etoh	4. 巻 21
2. 論文標題 A Pixel Design of a Branching Ultra-Highspeed Image Sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2506 ~ 2506
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/s21072506	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Nguyen Hoai Ngo, Quang Nguyen Anh, Son Dao Vu, Kazuhiro Shimonomura, Takeharu Goji Etoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Simulation Study on a Backside -Illuminated Cascade-Collection-Gate Image Sensor	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of IEEE International Conference on Communications and Electronics (ICCE2020)	6. 最初と最後の頁 151-156
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Nguyen Hoai Ngo, Nguyen Anh Quang, Fabian M. Bufler, Yoshinari Kamakura, Hideki Mutoh, Takayoshi Shimura, Takuji Hosoi, Heiji Watanabe, Philippe Matagne, Kazuhiro Shimonomura, Kohsei Takehara, Edoardo Charbon, Takeharu Goji Etoh	4. 巻 20
2. 論文標題 Toward the Super Temporal Resolution Image Sensor with a Germanium Photodiode for Visible Light	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 6895 ~ 6895
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20236895	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 久末信幸, 竹原幸生	4. 巻 75(2)
2. 論文標題 鉛直取水設備における取水管の吸込流速と渦発生に関する実験的検討	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 土木学会論文集B1	6. 最初と最後の頁 1_787-1_792
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 高野保英, 沖中知雄, 竹原幸生, 中野人志, 下ノ村和弘, 林直樹, 三井鷹, 江藤剛治	4. 巻 39(9)
2. 論文標題 1億枚/秒のマルチフレーミングセンサによる飛翔する光の撮影	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 可視化情報学会論文集	6. 最初と最後の頁 35-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. G. Etoh, N. N. Ngo, A. Q. Nguyen, Y. Matsunaga, T. Ando, K. Takehara, and K. Shimonomura	4. 巻 -
2. 論文標題 Evolution of BSI Multi-Collection-Gate Image Sensors -From Light-in-Flight Imaging to Giga-fps Continuous Imaging-	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 2019 International Image Sensor Workshop (IISW)	6. 最初と最後の頁 274-277
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kazuki Hiraoka, Katsushige Tsuno, Taeko Ando, Kazuhiro Shimonomura, Takeharu Etoh	4. 巻 11051
2. 論文標題 Focusing an electron-beam array with a multi-hole permanent magnet	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE	6. 最初と最後の頁 110510N-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2525291	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Harald Kleine, Herbert Olivier, Goji Etoh	4. 巻 11051
2. 論文標題 Time-resolved polychrome Mach-Zehnder interferometry of diffracting shock waves	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of SPIE	6. 最初と最後の頁 1105108-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2523566	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Takeharu Etoh, Tomoo Okonaka, Yasuhide Takano, Kohsei Takehara, Hitoshi Nakano, Kazuhiro Shimonomura, Taeko Ando, Nguyen Ngo, Yoshinari Kamakura, Dao Vu, Anh Nguyen, Edoardo Charbon, Chao Zhang, Piet De Moor, Paul Goetschalckx, Luc Haspeslagh	4. 巻 19
2. 論文標題 Light-In-Flight Imaging by a Silicon Image Sensor: Toward the Theoretical Highest Frame Rate	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2247-2247
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s19102247	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 江藤剛治, ゴグエン, 松長誠之, 安藤妙子, 下ノ村和弘	4. 巻 43(31)
2. 論文標題 光の飛翔の連続撮影を超えて～X線・赤外線超高速撮影に向けて～	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会技術報告	6. 最初と最後の頁 37-40
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 N. N. Ngo, A. Q. Nguyen, Y. Matsunaga, T. Ando, K. Takehara, K. Shimonomura, T. G. Etoh	4. 巻 43(31)
2. 論文標題 A Simulation study on a Cascade-pipeline BSI Multi-Collection-Gate Image Sensor	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会技術報告	6. 最初と最後の頁 33-36
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 江藤剛治, Anh Quang NGUYEN, 下ノ村和弘	4. 巻 42(19)
2. 論文標題 開口率100%の裏面照射マルチ電荷収集ゲートイメージセンサ	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 映像情報メディア学会技術報告	6. 最初と最後の頁 37-41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 S. T. Thoroddsen., K. Takehara, Nguyen H. D., T. G. Etoh	4. 巻 848
2. 論文標題 Singular jets during the collapse of drop-impact craters	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 R3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2018.435	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計5件(うち招待講演 2件/うち国際学会 3件)

1. 発表者名 中北和之, 岩本紘樹, 中島努
2. 発表標題 フラック発生時の非定常圧力・変形同時計測
3. 学会等名 第16回学際領域における分子イメージングフォーラム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Nakakita, K. Saitoh, H. Iwamoto, T. Nakajima
2. 発表標題 Simultaneous unsteady aerodynamics and structural measurement for flutter phenomena using unsteady lifetime-PSP and MDM measurement
3. 学会等名 7th Japanese-German Joint Seminar, Molecular Imaging Technology for Interdisciplinary Research (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中北和之, 中島努
2. 発表標題 非定常Single-shot Lifetime PSP計測のフラッタ現象への適用
3. 学会等名 第50回流体力学講演会/第36回航空宇宙数値シミュレーション技術シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Goji Etoh
2. 発表標題 A Silicon Image Sensor Captured Flying Light with a Silicon Image Sensor; A Step toward the Ultimate-high-speed X-ray Image Sensor
3. 学会等名 Workshop on Ultrafast X-ray Studies on Dynamic Irreversible Processes, Institute of High Energy Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Goji Etoh
2. 発表標題 Capturing Flying Light with a Silicon Image Sensor- A Step toward the Temporal Resolution Limit -
3. 学会等名 ULITIMA2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 高速イメージセンサ	発明者 江藤剛治	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-197034	出願年 2018年	国内・外国の別 外国

産業財産権の名称 高速撮像手段	発明者 江藤剛治・松長誠之	権利者 江藤剛治
産業財産権の種類、番号 特許、特願2019-73808	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

〔解説〕 江藤剛治, 超高速カメラ開発の歴史と展望, 応用物理, 90(6), 2021. 江藤剛治, 下ノ村和弘, 志村考功, 渡部平司, 光の飛翔を捉えた超高速イメージセンサと今後の展開, 映像情報メディア学会誌, 74(6), 936-941, 2020. 江藤剛治, 下ノ村和弘, 志村考功, 渡部平司, イメージセンサによる超高速撮像, 光学, 49(10), 417-422, 2020. 江藤剛治, 究極の超高速イメージセンサ, 特集:ますます高度化するイメージセンサ, 0 plus E, 40(3), 286-295, 2018. 竹原幸生, 下ノ村和弘, 沖中知雄, 高野保英, 江藤剛治, 1億枚/秒のイメージセンサによる光の飛翔の撮影, 0 plus E, 40(4), 2018, 378.

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	江藤 剛治 (Etoh Takeharu) (20088412)	立命館大学・総合科学技術研究機構・教授 (34315)	
研究分担者	中北 和之 (Kazuyuki Nakakita) (50358595)	国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主幹研究開発員 (82645)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------