

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 9 月 18 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01443

研究課題名(和文) 壁面に衝突する噴流中に含まれている微小粒子群の壁面衝突現象の高速ビデオによる解析

研究課題名(英文) High-speed video image analyses on actions of sand particles in a water jet obliquely impinging against a solid surface

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) 10,500,000円

研究成果の概要(和文)：微細砂粒子による水力発電機器の壁面損傷の素過程の研究を行った。最も基本的な課題として、微細砂粒子の壁面への接触限界を明らかにすることにした。水中の平板とそれに近づく球体を対象として以下の3つのアプローチで研究を進めた：(1) 数値計算，(2) 水理実験，(3) 短波赤外光を使った球と底面間の薄層における水運動の可視化技術の開発。

第3の技術について説明する。例えば1,450nmの光で水槽を底面から照明すると、深さ約1mm以上離れた層では光が吸収されて真っ暗に映る。このように、これまで撮影が困難であった界面極近傍の微細トレーサ粒子の運動を明瞭に可視化できるようになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非常に狭い間隙におけるダイナミックな水運動の実験的評価は、微細な砂粒子による発電設備の摩耗の問題だけでなく、産業上の様々の技術で遭遇する課題である。10μm以下の微細な砂粒子は表面の帯電に吸引された水膜に保護されて、流路の固体壁面に与えるダメージは抑制されているものと予想される。それより少し大きい粒子については、粒子と固体壁面が近接することにより潤滑効果が働くと考えられる。このような現象について水運動を直接可視化することは困難であった。本研究で開発したSWIR光を使った界面近傍の水運動の可視化技術は、固体壁面近傍だけでなく、自由表面を持つ水面近傍の水運動の研究を含めて有効な研究手段になる。

研究成果の概要(英文)：Surfaces of pipes and vanes of hydraulic power facilities are damaged by fine sand particles carried by water. The following three approaches were used to analyze the motions of water and a sphere closely approaching to a solid plate: (1) numerical analyses, (2) hydraulic experiments, and (3) development of a flow visualization technique in a very thin space with illumination of SWIR light. The last one is a new technology developed specific to this research. For example, when a transparent water tank is illuminated from the bottom or surface with 1,400-nm light, fine tracer particles can be visualized in a very thin layer of less than 1 mm from the bottom or surface, and the rest of the water body is seen as completely darkness. By selecting the wavelength of the illumination, the water motion in the layer of any thickness can be uniquely visualized and analyzed, which is very useful in experimental analyses of motions of water when a sphere is closely approaching a solid surface.

研究分野：水工水理学

キーワード：水力発電 混相流 噴流 粒子 ジェット 高速ビデオカメラ 近赤外

1. 研究開始当初の背景

地球温暖化対策としてカーボンニュートラルが最重要課題の一つとなっている。再生可能エネルギーの利用が促進される中、水力発電も再生可能エネルギーの一つの有力エネルギー源として期待されている。特に水力による発電効率は約 80% と高効率であり、太陽光発電や風力発電に比べて出力変動が小さく安定しているという利点を有している。さらに火力等の余剰電力を揚水発電のために使うことでエネルギーの貯蓄としても使うことができる。

一方、水力発電の大きな問題点の一つとして堆砂や浮遊砂問題がある。水力発電施設で取水時に浮遊砂濃度が高くなると、発電装置の損傷予防のため取水が中止される。現段階の水力発電施設は濁りが収まるのを待って取水を再開しているが、具体的な取水制限に関する基準は存在しない。特に最近注目されている溪流などの小水力発電における砂問題については今後の重要な検討課題の一つである。

本研究では、発電施設に微粒子が混入した場合の影響について、素過程に遡って正確な知識を得ることを目的とした。特に微小粒子群を含んだ流れが固体壁面に衝突するときに、実際に個々の微小粒子がどのように運動し、どのように壁面に衝突するかを明らかにする。

2. 研究の目的

本研究では水中の微細な粒子の運動について、理論解析と実験的な検討を行った。実験については、当初の研究計画を修正して、SWIR (Short-Wave Infrared, 短波赤外) 撮影を使った研究に重点を移した。本報告は以下の 3 つの内容を含む。

- a. 底面へ接近する粒子運動の理論解析
- b. SWIR 光による界面極近傍の微細粒子の運動の可視化技術の開発
- c. SWIR 領域撮影の適用分野の拡大

最初に、流れの中で固体の近傍に静置された粒子の運動の式を作り、数値解析を行った。

後者の 2 項目は研究の途中で新たに追加した研究課題である。その経緯について補足する。界面極近傍の微細粒子の運動計測のために SWIR ビデオカメラを購入した。これまで界面極近傍の微細粒子の運動計測は極めて難しかった。底面近傍の粒子を観察するにはカメラの撮影軸を底面とほぼ平行にし、十分な拡大撮影を行う必要があった。それでも粒子が底面に接触したかどうかを判定するのは難しい。また水槽底面のプラスチック板と水の間の乱反射で底面付近全体がハレーションを起こす。従って、竹原らは以前、底面(に直角方向)から、絞りを開放して焦点深度を極力浅くして撮影し、底面付近の粒子だけを粒子として判別する技術を提案した。本研究もこれらの技術を使った可視化計測を中心とした研究から開始した。

しかし、本研究では撮影方式を大きく変えた。研究の過程で、赤外系の光で底面極近傍の薄層を撮影することを思いついたからである。1,450nm の光の水への平均侵入長(1/吸収係数)は 0.3mm である。従って、底面から照明した場合、底面から 1mm 以上離れた水中には光が届かず真っ暗に映るはずである。その背景の中で底面極近傍の粒子だけが明瞭に可視化されるのではないかと考えた。通常、赤外系の光を使う場合は、表層から深い位置にある情報を得るためである。本例では逆に、表層から薄い層の撮影に使うという、いわば逆転の発想であった。

幸いソニーから、高性能で比較的低価格の SWIR イメージセンサが供給され始めたところであった。このセンサを使ったビデオカメラが数社から一斉に販売され、SWIR カメラに価格破壊を起こした。因みに、私達は 30 年以上前から世界最高速のビデオカメラの開発を続けており、イメージセンサ等の分野の情報にいち早く触れることができる立場にあったことも幸いした。

本プロジェクトでもこのカメラを導入することにした。ただし、研究目的は変わらない。後述するように、1,450nm 光で試写すると、予想通り、界面近傍の粒子だけが見事に映し出された。

さらに、SWIR 撮影の用途について文献調査を行ったところ、これまでの可視光撮影ではできなかった幅広い用途があることがわかった。課題は撮影速度と照明強度である。微細な領域を撮影するためには領域サイズに逆比例した撮影速度が必要になる。また撮影速度に比例した照明強度が必要になる。

私達は元々、世界最高速のビデオカメラを開発してきた。これまで開発してきたカメラは全て Si イメージセンサを使った可視光撮影カメラである。これまで高速ビデオカメラの用途としては、衝突、破壊、衝撃波、爆発等の物理的な現象が多かった。これに SWIR による超高速温度計測が加わると、全く新しい技術分野が広がる。さらに、SWIR 撮影に超高速撮影を組み合わせると、これまで全く想定されていなかった生物・医療分野にも重要な用途があることがわかった。皮膚表層近くのガン検出や歯科応用である。将来の超高速 SWIR 超高速撮影技術の実現を想定して、SWIR 照明等を使って数 10 年前から基礎的な研究を続けている研究者たちがいることもわかった。

3. 研究の方法

(1) 底面へ接近する粒子運動の理論解析

貯水池において長期に懸濁する微粒子が水力発電における取水制限に大きな制限を加えるため、まず、長期間懸濁する場合の微粒子の粒径分布を文献調査により調べた。その結果、100 μm 以下の土粒子であることが分かった。そのような微粒子が流体中で運動する場合ストークス数が小さくなり、固体壁面との衝突においては、微粒子と固体壁面間の流動変化や潤滑効果により、固体間の流体力学的相互作用が微粒子の挙動に大きく影響を及ぼす。これらに関する研究はBrenner(1961)によって行われており、その研究をもとに水中での壁面近傍での微粒子の挙動を数値計算により求めた。

(2) SWIR カメラ

ソニーから SWIR イメージセンサが供給され、これまで赤外系のカメラを開発・販売していた各社がこぞってこのセンサを組み入れたカメラの販売を始めた。センサは InGaAs と InP を組み合わせたものである。撮影感度波長は下記の URL に示されている。

[ARTCAM-990SWIR-TEC.pdf \(artray.co.jp\)](http://ARTCAM-990SWIR-TEC.pdf(artray.co.jp))

この資料によれば、400nm から 1600nm (説明上は 1700nm) の近紫外光から SWIR 光にわたって、驚くほど高い量子効率(光電変換率)を達成している。しかし、実際に撮影すると可視光の感度は通常の Si イメージセンサに比べて著しく低い。これは InGaAs/InP 素子のノイズレベルがソニー製といえども Si 素子に比べて非常に高く、SN 比が低いことを示している。価格の都合で非冷却版を導入したが、実用上特に問題がないレベルで撮影できる。このことは、NIR, SWIR 領域については既存の InGaAs/InP カメラに比べてはるかに高い相対感度を達成していることを示している。

近畿大学で導入したカメラは Artray 社の初期の製品で ARTCAM-990SWIR である。基本性能を Table 1 に示す。最高撮影速度は 72 枚/秒である。併せて、近接場撮影のための C-マウントレンズ、NIR から SWIR 領域までの波長ごとのフィルター、LED 照明装置などを整備した。

Table 1 ビデオカメラの仕様

型式名	撮像素子	表示画素数	フレームレート	レンズマウント	検知周波数帯
ARTCAM-990SWIR	SONY 製 InGaAs センサ IMX990-AABJ-CI	1280(W) × 1034(H)	最大 72fps	C	400 ~ 1700nm

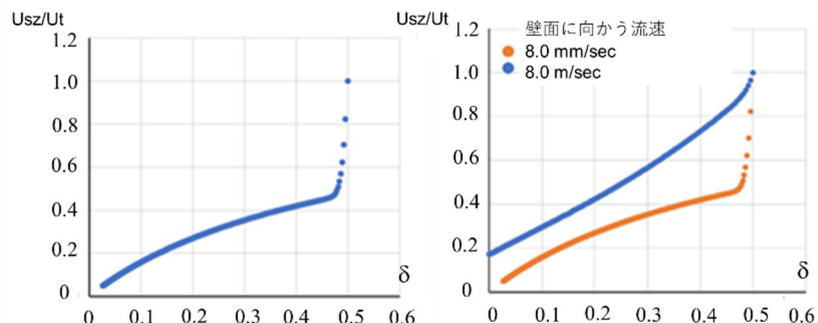
4. 研究成果

(1) 底面へ接近する粒子運動の理論解析

今回の解析では、(1)静止水中を沈降し底面に衝突する場合と、(2)ストークス近似におけるよどみ点流れでよどみ点付近の粒子の挙動の 2 ケースの計算を行った。微小粒径を $d=80\mu\text{m}$ 、密度 $\rho_p=2530.0\text{ kg/m}^3$ 、水の密度 $\rho_0=997.0\text{ kg/m}^3$ 、粘性係数 $\mu=0.00142\text{ Pa}\cdot\text{s}$ の条件で計算した。

Fig. 1 に解析結果を示す。縦軸は粒子の沈降速度を初期値の終端速度で無次元化した値で、横軸は底面から距離を粒径で無次元化した値である。Fig. 1(a)に示す通り、静止水中では粒子は底面付近で流速が 0 になることが分かる。また、よどみ点流れでの粒子の挙動は底面に向かう流れの速度に依存する結果となった。

オレンジの印で示す非常にゆっくりした流れでは静止水の場合と同様に粒子は底面付近で速度が 0 になる。一方、青色の印で示す早い流れの場合には底面付近で粒子の速度は低下するが、ある速度をもって底面に衝突する結果となった。



(a) 静止水中

(b) よどみ点流れ

Fig. 1 水中での底面付近での微粒子の挙動

(2) SWIR 光による界面極近傍の微細粒子の運動の可視化技術の開発

まず、水の中での近赤外光の浸透深さの計測を行った。1,450nm の LED で照明し、SWIR カメラを用いて水への光の侵入深さの実験を行った。装置の配置を Fig. 2 に示す。計測対象として、水槽とは分離した系で固定した長方形の白いプラスチックのターゲットを水の入ったアクリル製の水槽の中に浸け、前面の水槽のアクリル壁に接した状態にする。この状態では白いターゲ

ットは水槽壁面に密着している．水槽は微動台の上にセットされており，水槽自体をカメラ光軸方向に移動できる．移動した距離の分，水槽の亚克力壁内側と白いターゲット間に水が入る．微動台の最小移動間隔は 10 μm である．

撮影した画像の例を Fig. 3 に示す．画像のターゲット中の (100pixel, 300pixel) の位置で 9 \times 9pixel の領域で空間平均輝度を取り，壁からの距離を変化させたときの平均輝度の変化を計測した．Fig. 4 に計測結果を示す．縦軸は輝度 (16bit)，横軸は壁からの距離 (z) を取っている．

これまでの研究により，水の層厚に対して輝度は指数関数的に減少することが分かっている．計測結果に対して最小自乗法により指数関数をフィッティングさせた．フィッティングは Powell 法を用いた．水がない状態 ($z=0$) での輝度が $1/e$ になる距離が“浸透深さ”と呼ばれるが，フィッティング結果が 256.0 μm であった．文献によれば 1,450 nm に対する浸透深さは 300 μm 程度である．現段階では粗い実験であるので一応妥当な結果が得られたと言える．距離が長くなると本来，出力はゼロになるはずであるが一定値に収束している．原因としては実験室の露光やセンサのノイズレベル等が考えられる．原因については今後検討が必要である．

フィッティング結果を以下に示す．

$$I(z) = (I_0 - B)\exp(-z/\alpha) + B$$

$$= 26540.97\exp(-z/255.99) + 10357.97$$

ここで， $I(z)$ は z 位置におけるターゲット (100pixel, 300pixel) 上の輝度， I_0 は $z=0$ での輝度， B はターゲットのないベースの輝度を示している．

Fig. 5(a)には微細粒子で白濁した水槽を底面から撮影した例を示す．可視光撮影では全面が白く写り，個々の粒子は識別できない．1,450nm 光による照明を用いた撮影例を Fig. 5(b)に示す．底面から 1mm 未満の薄層にある微細粒子だけが強いコントラストで個々に識別できる．現在，PTV を用いた粒子追跡の実験を行っている．

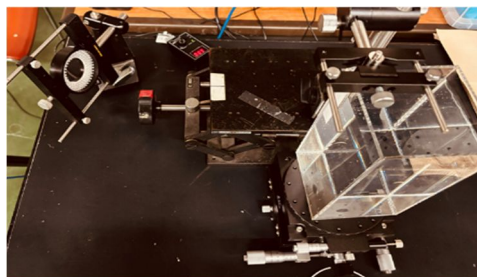
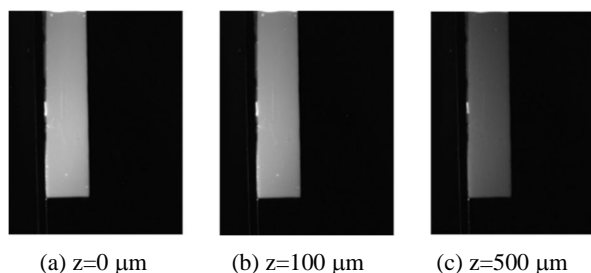


Fig. 2 装置の配置

水槽内の右上部分に白い縦長のターゲットが写っている．ターゲットを固定して水槽を載せた台を 10 μm のピッチで壁面から遠ざけながら撮影を繰り返す．



(a) $z=0 \mu\text{m}$ (b) $z=100 \mu\text{m}$ (c) $z=500 \mu\text{m}$

Fig. 3 水中のターゲットを撮影した画像の例 (z は水槽壁面からの距離)

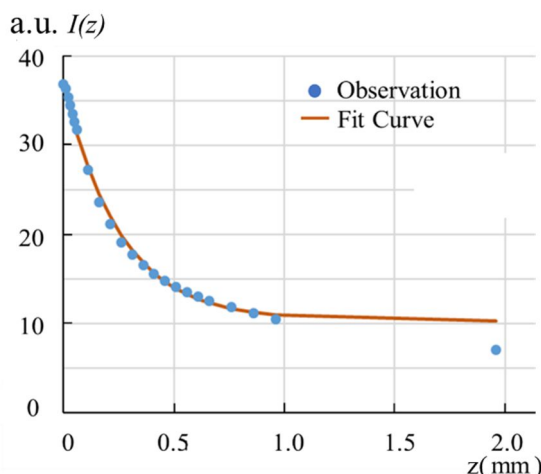
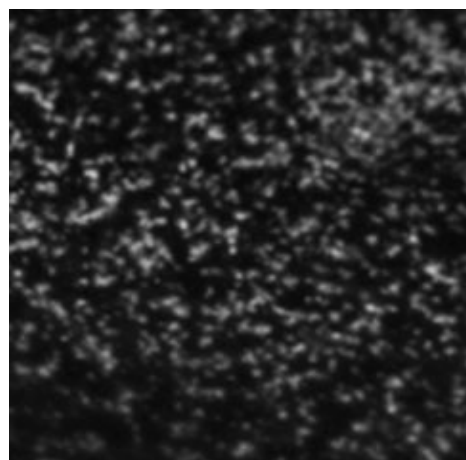


Fig. 4 水槽壁面からの距離と輝度の関係



(a) 可視光照明で通常のカメラで撮影



(b) 1,450nm LED 照明で SWIR カメラで撮影

Fig. 5 微粒子を水槽中で攪拌させた状態を水槽底面から撮影した画像

(3) 成果の概要

計画を途中で SWIR 撮影に変更したために、カメラは計画の2年度、照明やフィルターの納入は3年度の秋になってしまった。しかし、本報告で示したように、SWIR 撮影が今後の微粒子の壁面付近の運動の計測に非常に有効であることを示すことができた。PTV による粒子運動と流れ場の解析を現在鋭意進めている。

(4) 今後の課題

SWIR 撮影が固体壁面近傍の流れ計測に非常に有効であることがわかった。しかし、実際に運動計測を初めてみると、さらなる改善により、より強力な計測手段となることがわかった。大きく分けて3つの課題がある。項目を挙げた上で、それぞれの課題と解決の方針を説明する。

1,450nm 光による撮影では深さ z 方向の速度の計測ができない。

面に接触したかどうかを正確に判別することができない。

速度を正確に測定するには撮影領域の微細化に逆比例した高速撮影が必要である。

薄層場の水運動の3次元計測

次の2つの技術の導入を検討している。a. 視差の利用、b. 異なる SWIR 波長による撮影。

1,450nm 撮影では撮影領域の幅が狭すぎて視差を利用した3次元撮影の精度を上げることは困難である。SWIR 光の下限付近の1,000nm 撮影であれば、光の平均侵入深さは数 cm になる。この場合は視差計測を併用できる。また、1,000nm と1,450nm の中間付近の波長で同時撮影すれば、竹原らの開発した粒子追跡技術で同一粒子を同定して追跡できる。これにより深さ方向の速度を計測できる。このため上記の a. および b. の2つの技術を併用した粒子追跡技術を開発する。この技術は機械系の薄層の流れ計測等にも役立つ。

接触した瞬間の検出

近接場撮影等の適用を検討する。光を屈折限界で入射すれば光が波長程度の幅で界面から染み出す。また、水槽の底板を厚めにし、切断面に直角に光を入射しても光が界面の波長程度の厚さに沁みだす。近紫外光や可視光等の SWIR 光より波長の短い光を用いて接触の瞬間も撮影できるようにすることを試みる。この方法は以前から考えていたが、撮影深度が薄すぎるので、衝突の瞬間は撮影できても、その前後の粒子の運動を撮影するのは難しいと考えていた。上記のように、SWIR の波長を変えることにより運動の方も同時に計測できるので、近接場撮影も併用して、流れ場の中の微粒子がどのように底面に接触しているのか、素過程を明らかにしたい。

高速 SWIR 撮影

撮影領域が絞られると粒子の相対速度が逆比例して大きくなる。より高速の SWIR カメラが必要である。市販のもので最速1万枚/秒程度のものがあるが、撮影速度に逆比例して画素数、すなわち解像力が小さくなる。計測に使う場合の実質的最高撮影速度は1千枚/秒程度である。

(5) 超高速 SWIR カメラの用途と開発計画

我々は1991年に当時世界最高速の4,500枚/秒のビデオカメラを開発した。2018年には1億枚/秒のマルチフレーミングカメラを開発し、世界で初めて飛翔する光の連続撮影に成功した。しかしこれらは全て Si ベースの可視光撮影用のカメラであった。今回の経験で、可視光以外の波長による撮影が如何に効果的であるかを痛感した。これに触発されて、可視光以外の光による超高速撮影の用途について文献調査を行った。

現実的な画素数で1万枚/秒以上の撮影速度で温度場を連続撮影できるカメラはない SWIR 領域の高速撮影の場合は、爆発、衝突、衝撃波、放電等に伴う高速変形場と同時に、温度場の急激な変化を撮影できる。このような物理的な高速現象に伴う時空間的温度変化の計測技術の用途は広い。より広い分野での用途を検討していたところ、生物・医療分野でもいくつかの有望な用途があることがわかった。特に以下の2つの例では SWIR 超高速カメラの開発が20年以上前から強く望まれていたことがわかった。

a. ガン検出、および、b. 歯の透視撮影。

ガン検出については既に SPAD イメージセンサによる計測例がある。歯肉を透した撮影でも既に SWIR 撮影が使われているようである。しかし、人体による光の散乱は非常に大きいので、形状がわかる程度に可視化できる深さは高々3mm である。これに超高速カメラによる時間分解を組み合わせると、患部から直進してきた光がまず皮膚表面に現れる。次いで体内で散乱した光が皮膚表面を広がる。これを時間分解して逆解析すれば皮膚下20mm までのガンの検出ができる。歯科では X 線のかわりに SWIR 光で歯肉を透した撮影ができるようになる。本計画で SWIR カメラを導入したことを契機に、生物・医療分野を含む様々の被写体の撮影を行い、超高速 SWIR カメラの開発に関する基礎的な検討を開始した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 4件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Rack A., Sekiguchi H., Uesugi K., Yasuda N., Takano Y., Okinaka T., Iguchi A., Milliere L., Luki? B., Olbinado M.P., Etoh T.G.	4. 巻 1058
2. 論文標題 Recent developments in MHz radioscopy: Towards the ultimate temporal resolution using storage ring-based light sources	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 168812 ~ 168812
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.nima.2023.168812	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 Eguchi Go, Takagi Tsutomu, Torisawa Shinsuke, Takehara Kohsei	4. 巻 588
2. 論文標題 Drafting Behaviors in Fish Induced by a Local Pressure Drop Around a Hydrofoil Model	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Theoretical Biology	6. 最初と最後の頁 111821
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2139/ssrn.4566995	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 -
1. 著者名 T. Goji Etoh, Takayoshi Shimura, Heiji Watanabe, Taeko Ando, Kohsei Takehara	4. 巻 48-14
2. 論文標題 Toward the Super Temporal Resolution: Fundamental Performance of Stone-Circle Image Sensors	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 ITE Technical Report	6. 最初と最後の頁 25-28
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 無
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 G. Eguchi, S. Torisawa, K. Takehara, T. Takagi	4. 巻 10(1)
2. 論文標題 Fish balances flow resistance and high pressure in stagnation area	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Aero Aqua Bio-mechanisms	6. 最初と最後の頁 2-8
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 Ngo Nguyen Hoai, Etoh Takeharu Goji, Shimonomura Kazuhiro, Ando Taeko, Matsunaga Yoshiyuki, Shimura Takayoshi, Watanabe Heiji, Mutoh Hideki, Kamakura Yoshinari, Charbon Edoardo	4. 巻 69
2. 論文標題 Toward Super Temporal Resolution by Suppression of Mixing Effects of Electrons	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Electron Devices	6. 最初と最後の頁 2879 ~ 2885
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ted.2022.3168617	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 志村孝巧, Nguyen Hoai Ngo, 渡部平司, 下ノ村和弘, 武藤秀樹, 江藤剛治	4. 巻 46(14)
2. 論文標題 電子の水平運動が卓越するブランチングイメージセンサ	5. 発行年 2022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 21-24
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 無
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, 下ノ村和弘, 安藤妙子, 松長誠之, 廣瀬裕, 志村孝巧, 渡部平司, 鎌倉良成, 武藤秀樹	4. 巻 122(247)
2. 論文標題 信号電子の混合効果によるスーパー時間分解を目指して	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会技術報告	6. 最初と最後の頁 32-39
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 無
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 Abe S., Takagi T., Torisawa S., Abe K., Habe H., Iguchi N., Takehara K., Masuma S., Yagi H., Yamaguchi T., Asami S.	4. 巻 93
2. 論文標題 Development of fish spatio-temporal identifying technology using SegNet in aquaculture net cages	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Aquacultural Engineering	6. 最初と最後の頁 102146 ~ 102146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.aquaeng.2021.102146	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 Ngo Nguyen Hoai, Shimonomura Kazuhiro, Ando Taeko, Shimura Takayoshi, Watanabe Heiji, Takehara Kohsei, Nguyen Anh Quang, Charbon Edoardo, Etoh Takeharu Goji	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 TAKANO Yasuhide, SUGAKI Shoma, NAKAKITA Kazuyuki, ETOH T. Goji, TAKEHARA Kohsei	4. 巻 77
2. 論文標題 PRELIMINARY STUDY ON WIND PRESSURE MEASUREMENT ON SOLID WAVY BED WITH PRESSURE SENSITIVE PAINT	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_919 ~ I_924
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_i_919	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 HISASUE Nobuyuki, TAKEHARA Kohsei	4. 巻 77
2. 論文標題 EXPERIMENTAL STUDY ON RELATIONSHIP BETWEEN SUBMERGENCE DEPTH OF HORIZONTAL INTAKE PIPE AND OCCURRENCE OF INTAKE VORTEX	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. B1 (Hydraulic Engineering)	6. 最初と最後の頁 I_817 ~ I_822
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejhe.77.2_i_817	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 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 高木力、江口 剛、田中優斗、竹原幸生、鳥澤真介
2. 発表標題 高速度イメージングを魚類の遊泳メカニズムの理解に活用する
3. 学会等名 高速度イメージングとフォトニクスに関する 総合シンポジウム 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 江藤剛治
2. 発表標題 高速イメージセンサの来し方行方
3. 学会等名 高速度イメージングとフォトニクスに関する 総合シンポジウム 2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T.Goji Etoh
2. 発表標題 Beyond the temporal resolution limit of silicon image sensors
3. 学会等名 Ultrafast Imaging and Trcking Instrumentation, Methods and Applications Conference (ULTIMA 2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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)	大阪大学・大学院工学研究科・招へい教授 (14401)	

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
---------	---------