

平成29年度
戦略的基盤技術高度化・連携支援事業
戦略的基盤技術高度化支援事業

「小型可搬可視化プローブによる
濃密浮遊粒子群の簡便測定技術の研究開発」

研究開発成果等報告書

平成30年3月

担当局 関東経済産業局
補助事業者 公益財団法人横浜企業経営支援財団

目 次

第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

第2章 本論

- ・ 【1-1】非干渉性パルス背景照明技術の研究開発
- ・ 【1-2】可視化プローブ先端センサ部のクリーニング技術の研究開発
- ・ 【1-3】耐水性・耐圧性に関する研究開発
- ・ 【1-4】耐摩耗性に関する研究開発
- ・ 【1-5】可視化プローブの小型パッケージ化に関する研究開発
- ・ 【2-1】撮影条件の最適化技術の開発と検証
- ・ 【2-2】非球形粒子の形状測定アルゴリズムの開発と検証
- ・ 【2-3】透明／半透明／不透明粒子の形状測定アルゴリズムの開発と検証
- ・ 【2-4】高速かつ安定な粒子画像解析ソフトウェアの開発と検証
- ・ 【2-5】ユーザフレンドリーな GUI ソフトウェアの開発と検証

第3章 全体総括

- 3-1 補助事業の成果及びその効果
- 3-2 補助事業の成果に係る事業化展開について

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

【研究開発の背景】

現在、様々な製造現場・装置・施設において、流体中を濃密浮遊する粒子群の適切なハンドリングが課題となっており、そのために、濃密浮遊粒子群の「その場」特性を現場で簡便に測定することへのニーズがある。

例えば、自動車の静電塗装の現場では、塗料ミストの車体への付着状況が塗装品質を左右するとともに、付着割合が塗料の利用率を決定する。そのため、「静電塗装ノズルから高速気流とともに噴霧される塗料ミスト（液滴径：数10 μm ）が、どのように塗装面に到着するのか？」を“その場”で把握することが求められている。そのような情報は、コンピュータシミュレーションを検証するデータとしても貴重であり、生産技術の『見える化』や『技術伝承』へも寄与することとなる。濃密浮遊粒子群の“その場”特性の簡便測定へのニーズの具体例を以下に示すように、様々な製造現場・装置・施設において存在する。

- (1) 自動車の静電塗装や燃料噴霧の特性を測定したい
- (2) 熱交換器や原子力分野での飛翔する凝縮液滴の挙動を可視化計測したい
- (3) 水処理・下水処理施設での凝集粒子フィルタリングにおいて添加剤の適正量を知るために凝集しつつある微粒子の特性を把握したい
- (4) ファイバ状粒子原料からの材料製造装置において流動中のファイバ特性（長さ、数密度など）を把握したい
- (5) カーボン微粒子の製造装置において製造条件と微粒子特性（粒径、数密度など）をリアルタイムに関連付けたい
- (6) 屋外で用いる農業用噴霧ノズルの設計開発において噴霧特性を「その場」測定したい
- (7) マイクロバブルを用いた船体抵抗低減技術の開発において船底付近のマイクロバブルの挙動を把握したい

川下産業分野からの測定技術に対するニーズに共通していることは、「流れ場を濃密に浮遊・飛翔する微粒子が、どのような粒子特性（大きさ、形状）を有し、どのような流動特性（数密度、移動速度、移動方向）を示すのか」について、流れ場からサンプルした粒子を対象とするのではなく、流動中の「その場」で観察して、簡便に測定することである。そのような測定技術が備えるべき機能は次の通りである。

- (I) 製造現場や装置・施設内の「その場」の濃密粒子群を測定できること
- (II) 個々の微粒子の特性（大きさ、形状）と流動特性（数密度、移動速度、移動方向）を同時に測定できること
- (III) 耐水性を有し、液滴を測定対象とできるとともに、水中の凝集粒子やマイクロバブルのような微粒子を測定対象とできること
- (IV) 濃密に飛翔する固体微粒子への耐摩耗性を有すること
- (V) 現場への持ち込み・設置が容易に行える小型可搬性を有すること

現在市販されている微粒子測定装置は採取した「サンプル粒子」を対象とするものが多い。流動中の「その場」粒子を対象とするものは少なく、いずれも光・画像計測を応用した技術（例えば、レーザドップラ位相法、背景照明法など）であるため、(1) 照明や撮影が濃密粒子群に遮られてしまって測定できない、(2) レーザ光回折法やレーザ光散乱法は原理的に流動特性を測定できない、(3) センサ部を水中に設けることができず、水中の微粒子を測定することができない、(4) 固体粒子による摩耗や液滴による濡れに耐えられない、(5) 照明と撮影の設定に手間の掛かる調整を必要とする、(6) 照明装置と撮影装置のサイズが大きいため、可搬性に欠け、測定対象に近づけられない、といった問題を抱えている。

本研究開発では、照明系と撮影系を一体化した「可視化プローブ」による測定技術を開発させ、上記（I）～（V）の機能を与えることによって高度化目標を達成する。具体的には、『測定結果の信頼性向上』、『評価（分析・解析）の効率性向上』、『小型化と可搬化』である。この測定技術は、照明部と撮影部を小型に一体化した可視化プローブを粒子群に挿入することに基づく方法で、濃密粒子群に遮られる心配がない。また、濃密粒子群が飛翔・浮遊した状態のまま測定するため、微粒子の形状特性（大きさ、形状）と流動特性（数密度、移動速度、移動方向）を同時に測定することができ、『測定結果の信頼性』が担保される。さらに、固体粒子・液滴・気泡（例えば、浮遊微粉・噴霧液滴・マイクロバブルなど）の区別無く測定できるよう、可視化プローブに耐水性・耐圧性・耐摩耗性を与える。これにより、川下産業分野の様々な場面において、測定に関する専門知識の無い作業員でも簡単に測定結果を得ることができ、『評価（分析・解析）の効率性向上』が達成される。同時に、測定現場に容易に運べるよう、可視化プローブを組み込んだ測定システム全体をコンパクトにまとめることによって、『小型化と可搬化』を実現する。

図1.1 は、当社のこれまでの粒子計測システム（製品名：**FtrPIA**）を用いた粒子測定の様子の写真である。照明源であるパルスレーザと撮影装置であるデジタル CCD カメラを対向配置させる必要があり、“その場” 特性を簡単に測定できるものではなかった。それに対して、本研究で開発する小型可搬可視化プローブは、照明部と撮影部がコンパクトに一体化されており、既存の製品が抱える課題を克服することができる。



当社のこれまでの粒子計測システム（**FtrPIA**）



小型可搬可視化プローブの完成イメージ

（外径 35mm、長さ 300mm、重量 3kg 以内目標）

図1.1 これまでの粒子計測システムと小型可搬可視化プローブ

図1.2 は小型可搬可視化プローブの先端構造の概念図である。光ファイバから供給されるレーザ照明光を用いて蛍光体の蛍光を励起し、それを背景照明として撮影する。測定対象である粒子群を蛍光体と窓材との隙間（スリット：幅 2～3mm を予定）を通過させる。レーザ照明を、短時間閃光を特徴とするパルスレーザ（発光半値幅：10ns 程度）から供給するため、高速で飛翔する粒子群を凍結静止画として撮影することができる。粒子群をスリットに導くため、粒子群の飛翔方向とスリット方向を合致させる必要があるが、飛翔する粒子群は主流に乗って移動するため、主流方向とスリット方向を合致させることによって要求を満たすことが殆どである。

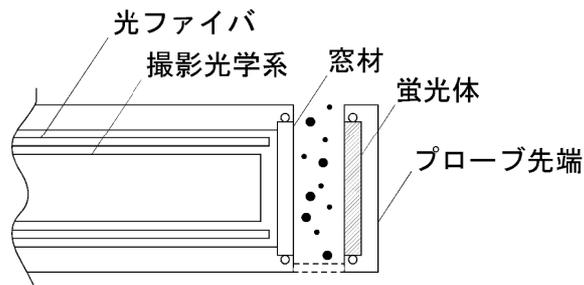


図 1.2 小型可搬可視化プローブ先端構造の概念図

図 1.3 は、小型可搬可視化プローブを鉛直方向に飛翔する粒子群に挿入し、その近くで制御部本体を操作しながら計測している様子のイメージである。このように、可視化プローブを挿入するだけで濃密浮遊粒子群の“その場”特性の測定が簡便に行えるようになる。



図 1.3 小型可搬可視化プローブを挿入して濃密浮遊粒子群の測定を行っているイメージ図

【研究目的及び目標】

本研究開発の具体的な技術的目標は、「収集可能なデータの増加」と「データ管理・分析技術の向上」に係わるものに分類し、次の通りである。

【1】「収集可能なデータの増加」について

【1-1】非干渉性パルス背景照明技術の研究開発

- 蛍光（励起光 530nm 程度、蛍光 620nm 程度）による非干渉光を利用する。
- 撮影対象粒子：固体粒子、液滴、マイクロバブル
- 粒径測定範囲：2.5~1000 μm 、最大分解能 2.5 μm
- 粒子形状：球状、フレーク状、ファイバ状、涙滴状、膜状
- 粒子性状：透明、半透明、不透明

【1-2】可視化プローブ先端センサ部のクリーニング技術の研究開発

- 気流については圧縮空気吹きつけ方式、液流については清浄水の噴射とする。
- クリーニングにより、微粒子付着の影響を受けることなく 5 分間の連続撮影を可能とする。

- 【1-3】耐水性・耐圧性に関する研究開発
 - ・ 可視化プローブに水深 5m までの耐水性・耐圧性を与える。
- 【1-4】耐摩耗性に関する研究開発
 - ・ 濃密固体微粒子が飛翔する 10m/s の気流中において 24 時間の耐摩耗性を与える。
 - ・ 可視化プローブ先端の摩耗部品を交換できる構造とする。
- 【1-5】可視化プローブの小型パッケージ化に関する研究開発
 - ・ 外径 35mm、全長 300mm、重量 3kg 以内に収める。
 - ・ 制御部本体を 480mm 以下、高さ 1200mm 以下にまとめる。

- 【2】「データ管理・分析技術の向上」について
 - 【2-1】撮影条件の最適化技術の開発と検証
 - ・ 微粒子画像の撮影の最適化を現場で行えるソフトウェアを開発する。
 - 【2-2】非球形粒子の形状測定アルゴリズムの開発と検証
 - ・ 上記【1-1】に記載の粒子の形状測定を可能とする。
 - 【2-3】透明／半透明／不透明粒子の形状測定アルゴリズムの開発と検証
 - ・ 上記【1-1】に記載の粒子の形状測定を可能とする。
 - 【2-4】高速かつ安定な粒子画像解析ソフトウェアの開発と検証
 - ・ 1000 枚の粒子画像の連続バッチ解析が 300 秒で行える機能を与える。
 - ・ 以下の粒子条件の解析を可能とする。
 - 数密度： 最大 20 個/mm³
 - 移動速度： 最大 40m/s、分解能 1m/s
 - 移動方向： 移動方向の面内成分が分解できること
 - 【2-5】ユーザフレンドリーな GUI ソフトウェアの開発と検証
 - ・ 上記【2-4】の解析を、GUI 機能を備えたソフトウェア上で実現する。

1-2 研究体制

【研究組織・管理体制】

事業管理機関：公益財団法人横浜企業経営支援財団



【研究者氏名】

● 株式会社フローテック・リサーチ (法認定機関)

所属・役職	氏名
技術部・SE 主任	大倉 靖栄 (PL)
技術部・技術営業主任	後藤 順一
技術部・主任研究員	崔 璋雲
技術部・主任	本田 真人
技術部・技術員	元 勝湖
技術部・技術員	横堀 浩史
技術部・SE	大森 恵一
技術部・開発管理主任	土井 加代子

● 学校法人立命館

所属・役職	氏名
立命館大学 理工学部機械工学科 准教授	吉岡 修哉

● 国立大学法人東京工業大学

所属・役職	氏名
東京工業大学 工学院機械系 助教	川口 達也

● 国立大学法人横浜国立大学

所属・役職	氏名
工学研究院・教授	西野 耕一 (SL)
工学研究院・助教	矢野 大志

◇ アドバイザー

所属・役職	氏名
マツダ株式会社 パワートレイン開発本部エンジン性能開発部PT解析グループマネージャー	横畑 英明
株式会社東芝 電力システム社電力・社会システム技術開発センター原子炉・量子応用技術開発部主幹	岩城 智香子

1-3 成果概要

【1-1】非干渉性パルス背景照明技術の研究開発

<平成 27 年度>

- ・ 蛍光板（励起光 532nm、蛍光 612nm）による非干渉光の背景照明技術を開発し、第 1 号試作機に搭載した。
- ・ 噴霧液滴を対象とした実験で、5 μ m までの分解能が得られることを確認した。
- ・ 専用撮影光学系の設計により、2.5 μ m までの分解能が得られる目処が付いた。
- ・ 非球形粒子であるアルミナ粒子への適用性を確認した。

<平成 28 年度>

- ・ 当該要素技術の研究開発を終え、可視化プローブ第 1 号試作機に搭載し、各研究機関（立命館大学、東京工業大学、横浜国立大学）における検証試験を実施し、当サブテーマの目標を達成した。

【1-2】可視化プローブ先端センサ部のクリーニング技術の研究開発

<平成 27 年度>

- ・ “圧縮空気吹きつけ方式”を搭載した可視化プローブの設計および部品選定を終え、第 1 号試作機に搭載した。
- ・ 汎用性を高めるため、気流と液流の両方に対して、“圧縮空気吹きつけ方式”を適用する方針を決定し、設計製作を終えた。
- ・ マイクロバブルに対する動作試験と検証を行うため、羽根車微細化方式のマイクロバブル発生装置を準備し（気泡径 20~30 μ m）、従来手法での計測を行って、比較データを蓄積した。
- ・ 液滴に対する動作試験と検証を行うため、噴霧発生装置を製作し、従来手法（干渉画像法）での計測を行って、比較データを蓄積した。
- ・ 固体粒子に対する動作試験と検証を行うため、複数の粒度のアルマイト粒子（非球形半透明）について従来手法での計測を行い、比較データを蓄積した。

<平成 28 年度>

- ・ 当該要素技術を可視化プローブ第 1 号試作機に搭載した。
- ・ 各研究機関での検証試験として、固体微粒子、噴霧液滴、マイクロバブルに対する機能評価試験を実施した。

<平成 29 年度>

- ・ クリーニング機能を改善した可視化プローブ第 2 号試作機を製作し、検証試験として、マイクロバブルと液滴に対する機能評価を実施し、目標を達成した。

【1-3】耐水性・耐圧性に関する研究開発

<平成 27 年度>

- ・ 可視化プローブの先端部と後端部に O リングを装着し、可視化プローブ先端部を取り外し・交換可能な構造とすることにより、所定の耐水性・耐圧性を有する可視化プローブの基本設計を終え、第 1 号試作機に搭載した。
- ・ 第 1 号試作機について、水深数 10cm 程度の耐水性性能を確認した。また、水深 5m への耐水性試験に向けて準備・検討を進めた。

<平成 28 年度>

- ・ 卓上水槽を用いた加圧試験によって当該要素技術の基礎試験を終えた。
- ・ 立命館大学における大型水槽を用いた検証試験の準備を終えた。

<平成 29年度>

- ・ 可視化プローブ専用の加圧試験装置を製作した。それを用いて耐水性・耐圧性試験を実施し、目標を達成した。

【1-4】耐摩耗性に関する研究開発

<平成 28年度>

- ・ 可視化プローブ第1号試作機を用いて、横浜国立大学における固体微粒子に対する耐摩耗性の評価を終えた。
- ・ 硬質材料部品の採用、外面塗装の見直しなどを盛り込んだ第2号試作機的设计・製作を終え、主要部品の製作および新仕様の光学部品の入手までを行った。

<平成 29年度>

- ・ 硬質材料部品の採用、外面塗装の見直しなどを盛り込んだ第2号試作機的设计・製作を終え、それを用いてサンドプラスタ粒子による耐摩耗性試験(連続 15 時間、累計 27 時間)を実施し、目標を達成した。

【1-5】可視化プローブの小型パッケージ化に関する研究開発

<平成 28年度>

- ・ 可視化プローブ寸法の目標値(外径 35mm、全長 300mm、重量 3kg 以内)を達成するため、PIA 用 2CCD カメラの製作を進めた。
- ・ より小型な可視化プローブの製作に向けて、各種の固体撮像素子カメラを検討した。

<平成 29年度>

- ・ 可視化プローブ第3号試作機を製作し、寸法の目標値(外径 35mm、全長 300mm、重量 3kg 以内)を達成した。
- ・ 計測システムの小型ラックへの搭載のための設計・製作を終え、目標を達成した。

【2-1】撮影条件の最適化技術の開発と検証

<平成 27年度>

- ・ 抽出対象の粒子像の輝度と面積の有効範囲を画像から直感的に指定できる機能を開発した。
- ・ PIA (Particle Image Analyzer) 解析の Tip 機能をコード開発し、粒子像にマウスカーソルを置くことによって、抽出粒子像に関する面積や速度、円形度など様々な情報を表示させ、粒子像の撮影が適切か否かの判断が簡単に行えるようにした。
- ・ 複数の照明方法の原理・優劣について基礎的評価を行い、画像処理技術を検討した。

<平成 28年度>

- ・ 当該要素技術の研究開発を終え、PIA 解析ソフトウェアとしてまとめた。
- ・ 各研究機関における検証試験に着手した。

<平成 29年度>

- ・ 各研究機関における検証試験を終え、目標を達成した。

【2-2】非球形粒子の形状測定アルゴリズムの開発と検証

<平成 27年度>

- ・ 非球形粒子へ適用できる二つのアルゴリズム(輝度勾配法と輪郭追跡法)を検討し、コーディングした。
- ・ 粒子抽出機能を用いて粒子像の輝度と面積の有効範囲を設定して PIA 解析を行うと、粒子の輪郭や速度の測定結果が得られ、それらが画面表示されるプログラムを作成した。
- ・ アルマイト粒子を、顕微鏡および自由落下で撮影した画像を処理し、プログラムの妥当性を確認した。

＜平成 28 年度＞

- ・ 当該要素技術の研究開発を終え、Grab Cut 法に基づくプログラム開発を終えた。
- ・ 各研究機関において、その機能の検証試験に着手した。

＜平成 29 年度＞

- ・ 各研究機関における検証試験を実施。目標を達成した。

【2-3】透明／半透明／不透明粒子の形状測定アルゴリズムの開発と検証

＜平成 28 年度＞

- ・ Grab Cut 法を発展させ、透明／半透明粒子を安定して検出できるプログラムを開発した。そのプログラムを用いて、透明真球固体粒子の検出が可能であることを確認した。

＜平成 29 年度＞

- ・ 大量の画像データを解析することにより粒子検出性能の安定性を確認し、目標を達成した。

【2-4】高速かつ安定な粒子画像解析ソフトウェアの開発と検証

＜平成 28 年度＞

- ・ CPU コア並列処理による高速化を実施。目標未達成のため継続検討。

＜平成 29 年度＞

- ・ GPGPU による並列処理プログラムを開発した。
- ・ それを用いて、1000 枚の粒子画像の連続バッチ解析が、300 秒以内に安定して行うことができることを示し、目標を達成した。

【2-5】ユーザフレンドリーな GUI ソフトウェアの開発と検証

＜平成 29 年度＞

- ・ 製品レベルの GUI ソフトウェアを開発し、目標を達成した。

1-4 当該研究開発の連絡窓口

株式会社フローテック・リサーチ

〒226-8510

神奈川県横浜市緑区長津田町 4259-3

中小機構・東工大横浜ベンチャープラザ W204

技術部 土井加代子

E-mail : doi@ft-r.jp

電話 : 045-982-1648

FAX : 045-982-1748

第2章 本論

【1-1】非干渉性パルス背景照明技術の研究開発

(1) 蛍光板の製作方法について

- 材料等
蛍光板の素材：透明アクリル
蛍光板固定プレートの素材：アルミ板
溝を設けた目的：位置決めと接着の容易さ
- 製作手順
蛍光板に蛍光スプレーを塗装する。
乾燥させた後、蛍光板と固定プレートを接着する（接着後は外せない）。

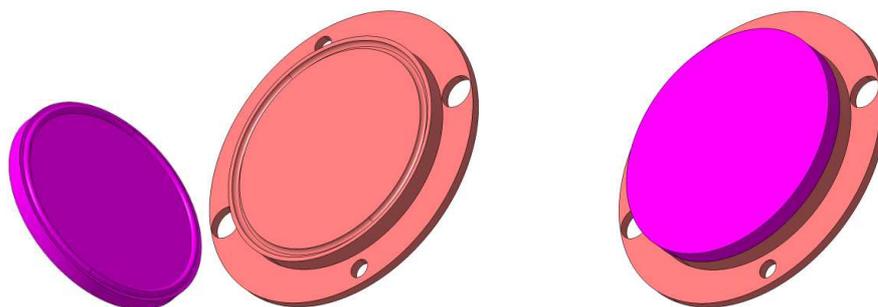


図2.1 蛍光板、蛍光板固定プレート（右：接着後の状態）

製作した蛍光板を用いて粒子画像を撮影した例を図2.2に示す。製作した蛍光板を用いて良好な粒子画像の撮影ができた。

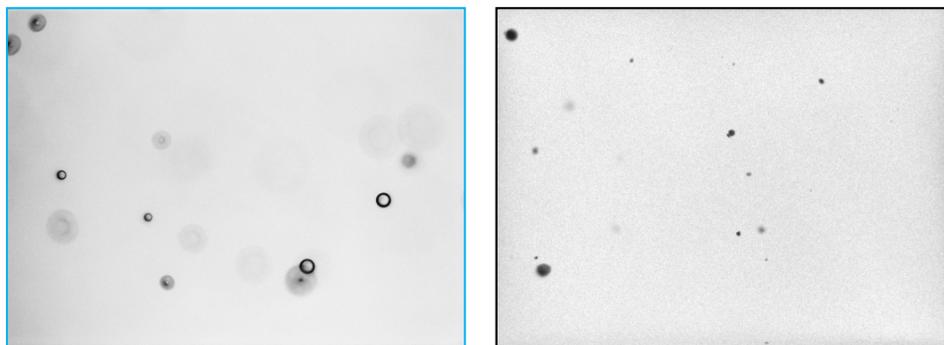


図2.2 蛍光板を用いた粒子撮影例：（左）マイクロバブル、（右）ナイロン12粒子

これらの撮影から得られた結果は次の通りである。

- スペックルノイズが完全に消失した。
- そのことにより、パルスレーザによる背景照明方式の弱点を解消することができた。
- 粒子と背景とのコントラスト（鮮明度）が若干低い。
- 蛍光板の改善と最適化が必要である。
- 認識可能な粒径は12~15 μm 程度である。
- 蛍光板と顕微鏡用の対物レンズを使用すれば、粒径5 μm のコントラストが良好な粒子像が期待される。
- 光学系の最適化を施せば、粒径2.5 μm への解像度が見込める。

(2) 撮影系の分解能の確認試験

- カメラ：AM-200GE (CCD Size : 8.8mm×6.6mm)
- 対物レンズ：オリンパス明視野用対物レンズ (LMPLFLN 10X)
- キャリブレーションプレートのドット間隔：0.125 μ m
- TCOCL：156mm
- WD：23mm、視野幅：1mm

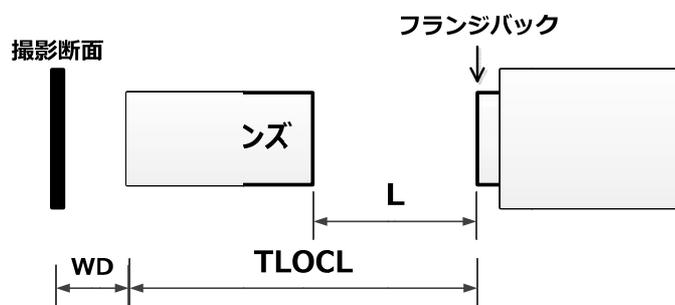


図 2.3 撮影系の分解能確認試験のレイアウト

その結果、リレーレンズ無しの CCD カメラと対物レンズとの組み合わせだけで、対物レンズの倍率通り結像出来ることがわかった。具体的には次の通りである。

- 設計仕様：粒径 2.5 μ m、流速 40m/s
- 視野幅：1.6mm
- スケーリングファクタ：0.00124mm/pixel (1.24 μ m/pixel)
- レーザ発光時間間隔：620ns
- 粒子最大移動量：20pixel

非球形粒子であるアルミナ粒子を背景照明で撮影し、解析に適した粒子画像が撮影されることを確認した（

図 2.4）。



代表粒径：355~300 μ m (46 番手) (左)

代表粒径：180~150 μ m (80 番手) (中)

代表粒径：75~63 μ m (150 番手) (右)

図 2.4 自由落下するアルミナ粒子の背景照明画像

【1-2】可視化プローブ先端センサ部のクリーニング技術の研究開発

(1) 可視化プローブの構造

3 パーツで構成される。

- 鏡筒後尾部：ケーブルを本体部分の後尾から取り出す構造
Oリングで防水

脱着式

気密維持手段：タッチコネクタとOリングを採用

- 鏡筒本体部：カメラ、対物レンズ、光学系を収容
- 先端部分：クリーニングと蛍光板用の部材で構成
保護用ガラス：石英ガラス
気密：Oリングと樹脂接着
内径 1.5mm の真鍮パイプを用いて圧縮空気を供給
8 個の保護ガラス用ノズル
6 個の蛍光板用のノズル
蛍光板

(2) クリーニングの仕組み

圧縮空気を内径 1.5mm の真鍮パイプを通してノズル用溝に供給し、溝に設けた多数のノズルから 2 方向にクリーニングガスを噴出する。

- ノズル(水色)：保護ガラスクリーニング用
- ノズル(赤色)：蛍光板クリーニング用



図 2.5 蛍光板を用いる非干渉性パルス背景照明技術と上述したクリーニング技術を搭載した可視化プローブ第 1 号試作機の外観写真

(3) クリーニング試験

試験の様子とクリーニング効果を示す。

ガラス水槽内にマイクロバブル発生装置を設置し、可視化プローブ先端を水中に挿入。時間が経過すると、可視化プローブの観察窓にバブルが付着する。バブルが付着すると粒子画像が暗くなり、最終的には真っ黒（計測不可能）になる。この状態で、0.2~0.5MPa の圧縮空気を供給（クリーニング処理）すると、観察窓に付着したバブルがほぼ完全に除去できる。

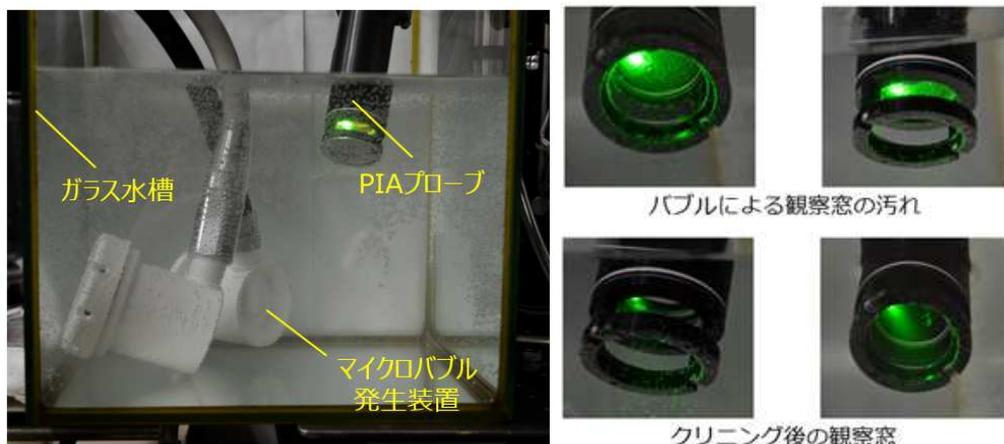


図 2.6 マイクロバブルへのクリーニングの効果

(4) マイクロバブル計測への適用の準備

図2.7にマイクロバブル発生装置と発生したマイクロバブルの外観写真を示す。マイクロバブルを含む水の発生流量は、毎分30リットル程度である。ガス流入量は、大気圧で毎分0.1-0.4リットル程度である。発生するマイクロバブルの平均直径は、水と空気の場合50 μm 程度である。界面活性剤を添加することで、さらに小さくする事もできる。

ポンプの流入部、インペラー直前には小孔が開いている。ポンプ流入口は負圧になっているので、この小孔からガスを自吸する。バブル内包ガスが空気の場合は、ここをチューブにより流量計と流量調整バルブを経由して、大気に開放する。空気以外の場合は、ガスボンベやガス発生機に接続する。ポンプに流入した水は、小孔から自吸されたガス塊と共にインペラーに導入される。インペラーは、通常のインペラーの外側にフィルターが装着されたものに改造されている。ここを通過し、ガスはマイクロバブルとなって水と共に出口から放出される。



図2.7 マイクロバブル発生装置と発生したマイクロバブル

図2.8はマイクロバブル挙動のPIA計測装置である。マイクロバブルは小型の水槽に入れる。水槽の背後にハロゲン光源を設置する。水槽前面に設置した「マイクロバブル測定検証用撮影システム」を用いてマイクロバブル画像を取得した。水槽には両端に電極が設置されている。ここに300Vの電圧をかけて、水槽内のマイクロバブルを移動させることができる。

図2.9に、マイクロバブルの画像、PIA解析結果の一例、気泡径のヒストグラムを示す。気泡径は、アニオン、カチオンを添加した場合の方が非イオン性の場合と比較して小さい傾向がみられる。これは、帯電した気泡同士が反発するため合-が起こりにくいため、気泡生成直後の直径を保ちやすいからである。非イオン性の場合、気泡の合-が進むため、50 μm 以上の大きな気泡も存在し、かつ、気泡数が少ないことが分かる。このような結果の再現性は良好で、本実証試験の対象として適切であると判断する。

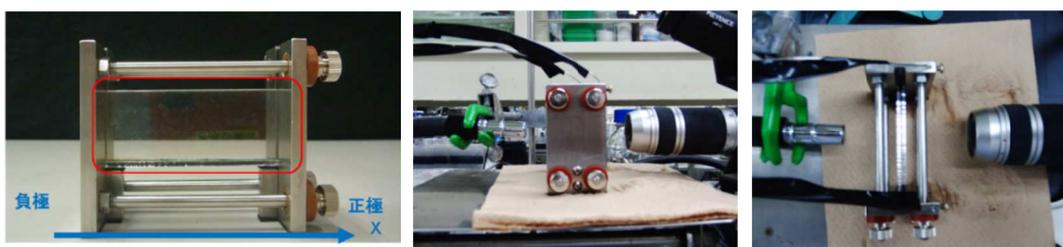
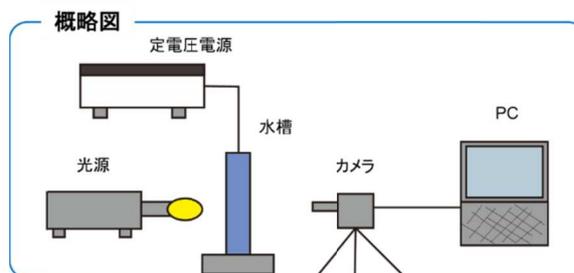
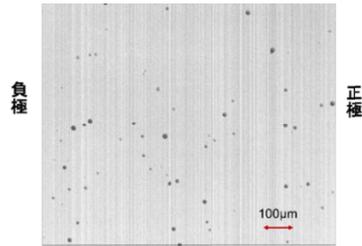
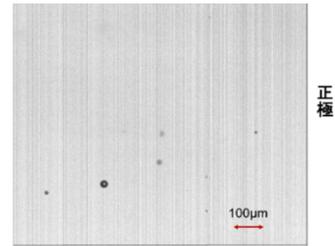


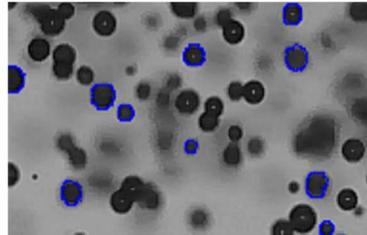
図2.8 マイクロバブル挙動のPIA計測装置



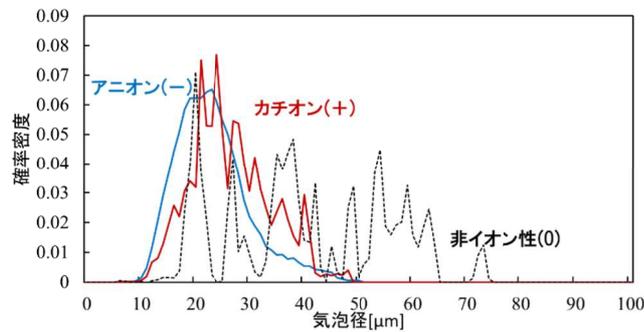
アニオン活性剤添加のマイクロバブル



非イオン性活性剤添加のマイクロバブル



PIA 解析結果の一例



気泡径のヒストグラム

図 2.9 マイクロバブルの画像、PIA 解析結果の一例、気泡径のヒストグラム

(5) 液滴計測への適用の準備

本研究項目では、可視化プローブの液滴流れへの適用性の実証試験を行うため、噴霧ノズルから微細液滴群を生成する噴霧装置を構築した。一般的に噴霧は専用の噴霧ノズルにより生成され、用途に応じて水や塗料、燃料などの種々の作動流体が用いられる。基本的な噴霧ノズルはノズル上流において加圧された高エンタルピー流体を微細孔から吐出する構造をとるが、噴霧液滴の粒径分布や空間への射出角度、流量、適用可能な流体種、環境温度などにより、その種類は極めて多岐に渡る。本研究では、開発する計測システムの適用可能性を実証する目的として、種々の噴霧ノズルを設置可能な交換式とした。今年度においては比較的low流量、小径の水噴霧を生成するノズルについて検討および検証を行った。

図 2.10 に構築した装置の外観図を示す。①の位置に設置した噴霧ノズルから微細液滴が連続的に射出される。図 2.11 に使用した噴霧ノズルを示す。液体を所定の圧力まで加圧するため、②に設置された空気圧縮機を用いた。加圧空気は③のバッファタンクに送られ、同タンク内に注入された液体を噴霧ノズルへと圧送する。噴霧ノズルの性質により液滴径、空間の数密度分布、初期速度などが異なるうえ、これらのパラメータはノズル上流の液体加圧圧力や作動流体の密度、表面張力、温度などの物性値にも影響される。



図2.10 噴霧生成システム全体図



図2.11 使用した噴霧ノズル

液滴の生成には空気との相対速度によるせん断、または液膜同士の衝突による分裂の促進が重要であり、圧力により粒径が変化するため、加圧圧力 0.5~0.7MPa 付近での再現性を確認した。この際の流量は、毎時約 4L であった。作動流体として蒸留水を用いた簡易測定の結果、平均粒径が 50 μm 程度のノズルのカタログスペックに相当する噴霧が得られることを確認した。平成 27 年度の研究においては構築した噴霧試験装置を用いて、単一のノズルによる定常噴霧の動作確認を行った。本噴霧装置を用いて撮影光学系及び照明系の動作確認を行い、画像処理に必要な基礎データの収集を行った。

可視化プローブの測定精度検証のため、噴霧液滴の粒径分布を予め把握しておく必要がある。一般に噴霧ノズルを決定しても作動流体の種類や温度、圧力など多岐に渡る要因により粒径分布は変化するため、カタログ値等に明示されることは稀である。したがって、特定の条件下における噴霧の特性評価を既存の噴霧解析手法である干渉画像法により試験的に計測した。本手法は可視化プローブと同様、粒径の分布を画像により計測する手法であるが、大出力レーザーや高速度・高解像度カメラを組み合わせた専用の大掛かりな計測システムを必要とするため、非常に高価であり、光学系の調整などに熟練を要する点が異なる。図2.12 に干渉画像法により得られる画像の一例を示す。本手法では、可干渉性の高いレーザー光源を用い、特定の散乱角に設置したカメラにより焦点外れ撮影を行うことにより得られる画像内の、各円形画像内の並行干渉縞の波数が液滴径に正比例することを利用して、液滴径を高精度に決定する。本実験条件においては、干渉縞 1 本あたり 10 μm の液滴径に相当する。



図2.12 干渉画像法による噴霧液滴撮影の例

(6) 固体粒子計測への適用の準備

固体粒子計測について、粉体連続落下装置を用いて5分以上の微粉計測を実証した。また、機器設備として導入した「固体粒子撮影システム」を用いて、プローブ先端での粒子挙動を観察した。図2.13は粉体連続落下装置と固体粒子撮影システムを設置した様子である。



図2.13 粉体連続落下装置と固体粒子撮影システムを設置した様子

撮影対象として、市販の非球形半透明のアルミナ粒子(サンドブラスター用粒子)を選択した。表面研磨に用いられるサンドブラスタ用粒子であり、耐摩耗性試験にも適した粒子である。三つの代表粒径のものを購入した(46番手:300~355 μm 、80番手:150~180 μm 、150番手:63~75 μm)。それらの顕微鏡写真を図2.14に示す。

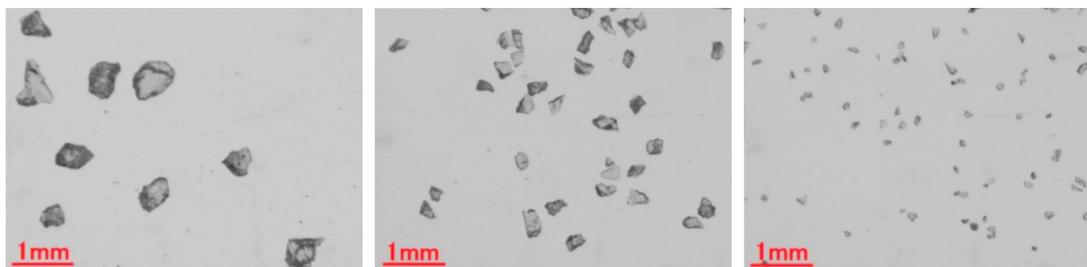


図2.14 アルミナ粒子の顕微鏡写真(左から、46番手、80番手、150番手)

これらの粒子を自由落下させて、固体粒子撮影システムで撮影した画像を図2.15に示す。



図2.15 自由落下するアルミナ粒子の撮影画像(左から、46番手、80番手、150番手)

(7) クリーニング機構の改善

可視化プローブ第2号試作機に対する試験では、クリーニング空気供給用チューブの長さが約3mあり、圧損による流量不足が発生した。このため、空気供給用×チューブを、内径2mm

×外径 4mm から内径 4mm×外径 6mm に交換した（一部、内径 2mm×外径 4mm のチューブが介在。図 2.16 参照）。これにより、流路面積が 4 倍になり、チューブの長さ 3m について十分にクリーニング出来るようになった。

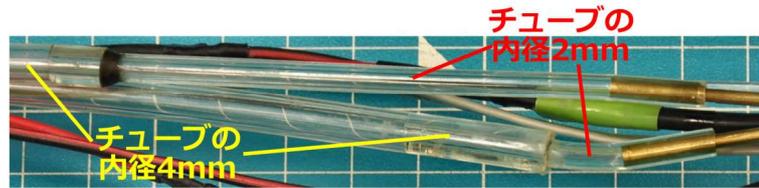


図 2.16 クリーニングチューブの改善

配線用チューブについても、内径 13mm×外径 16mm のタッチチューブから内径 19mm×外径 26mm のホースに交換した。その理由は次の通りである。

- ・ 変更後のクリーニングチューブが内径 13mm のタッチチューブを通らないため。
- ・ ホース内径を大きくして、配線作業性を向上させるため。
- ・ 柔らかいホース素材として、使用時も作業性を向上させるため。

(8) マイクロバブルに対するクリーニング技術の試験

以下 3 種類の液体を入れた透明アクリル水槽を準備した。

- ・ 水道水
- ・ 水道水+アニオン界面活性剤添加
- ・ 水道水+カチオン界面活性剤添加

多孔質素材から高圧空気を噴出する方法により、これらの水槽内にマイクロバブルを発生させた（図 2.17）。水槽内に可視化プローブを挿入し、発生させたマイクロバブルを撮影した。代表的な取得画像を図 2.18 に示す。可視化プローブ先端に気泡が溜まるため、定期的なクリーニングを施した。これにより、連続的な計測が可能になった。さらに、可視化プローブ先端形状の改善により計測可能時間が 10 秒から 30 秒程度に改善した。



図 2.17 可視化プローブを用いたマイクロバブルの計測の様子

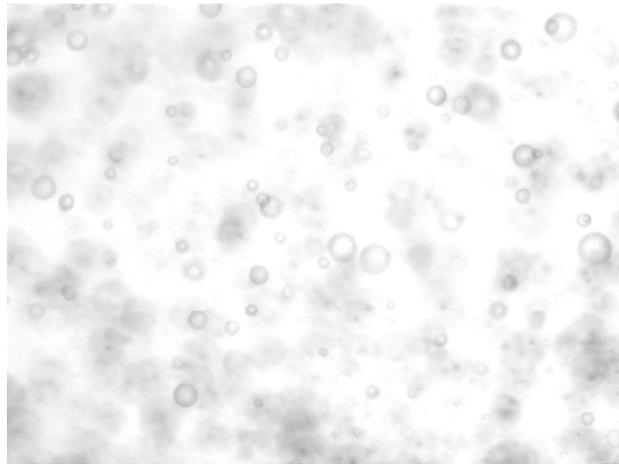


図2.18 マイクロバブルの撮影画像

クリーニングの効果を具体的に説明する。図2.19は、クリーニング直後から0.025秒間隔で取得した連続画像である。クリーニング直後は明るい領域が広く、視野全体で気泡を認識できた。気泡注入量大きい場合、暗い部分が短時間で広がり、全体を覆うようになる。30秒程度経過後は視野全域が暗くなり、気泡認識が出来なくなるが、クリーニングにより明るい画像に戻る。これを繰り返すことにより、計測を任意時間持続することができる。

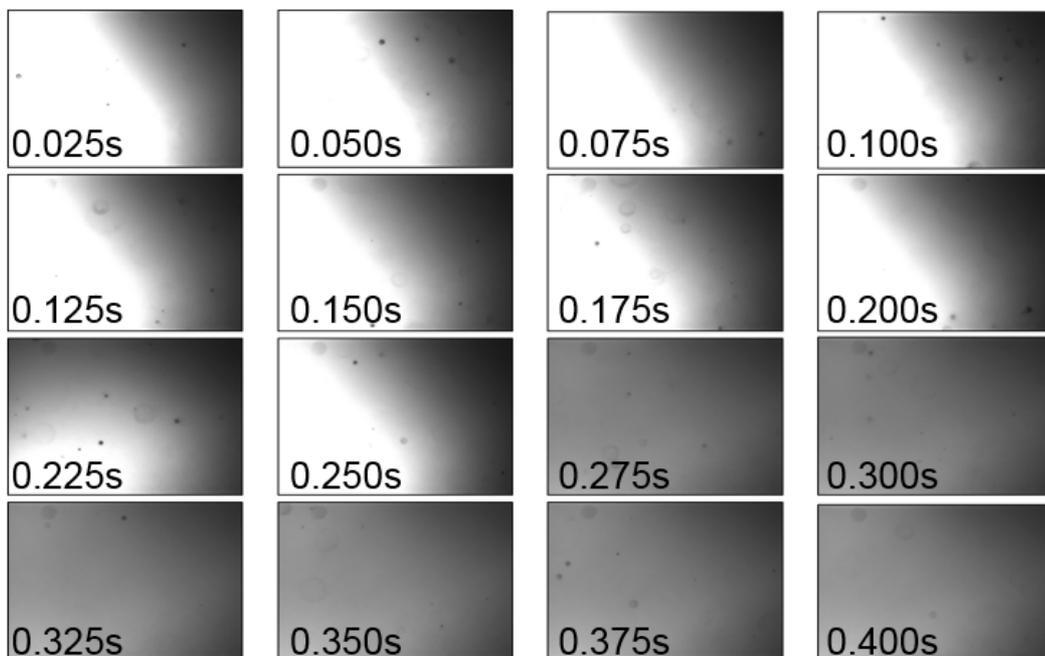


図2.19 気泡による背景照明低下の様子

撮影した画像を後述する GUI ソフトウェア（以下、PIA ソフト）で処理し、以下に示す気泡径のヒストグラムを得た（図2.20）。得られた平均気泡径及びヒストグラムの分布形状は、従来技術により得られるものと似ている。平成29年度までに、法認定企業によるセンサ部形状の改善により、気泡が滞留しにくくなり、撮影時間を30秒程度まで伸ばすことが出来た。撮影後に空気噴射によるセンサ部のクリーニングを行うことで、繰り返し連続的な計測が可能であることが確認できた。

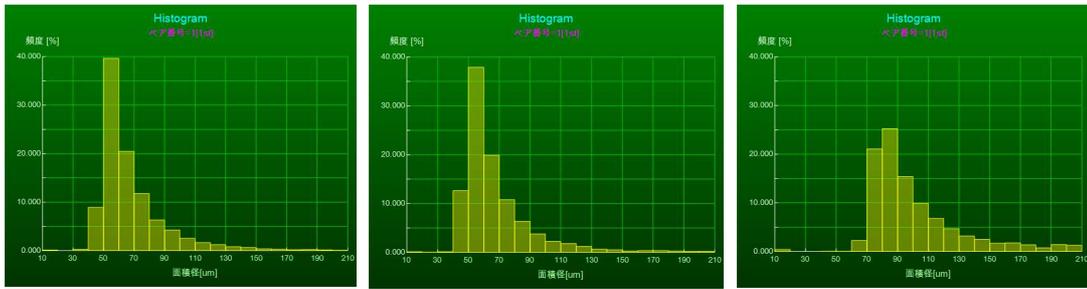


図 2.20 測定された気泡径のヒストグラム
左から、水道水、水道水+アニオン界面活性剤添加、水道水+カチオン界面活性剤添加

(9) 液滴に対するクリーニング技術

開発した可視化プローブを噴霧液滴計測へ適用するに際して想定される問題点および技術的に解決すべき課題は、水滴、油滴、アルコールなどの計測レンズおよび蛍光発光面への付着、表面の濡れによる光の乱反射および屈折などであり、これらが計測結果にどの程度の影響があるかを把握する必要がある。そこで、エア（空気）ジェット吐出によるクリーニング機構が、どの程度のプローブ先端の性能低下の抑制に寄与するかを評価した。具体的には、背景輝度の低下の抑止の可否、および最適なエア噴射シーケンスに関する知見を得ることを目的とした。

液滴計測においては、観察窓および蛍光発光面が噴霧液滴の付着により、画質の大幅な低下および背景輝度の著しい低下が生じ、適切な画像処理を行うことが困難となる。本実験においてエアによるクリーニングを実施したところ、速やかに可視化画像が改善する効果が見られた。噴霧液滴の粒径や数密度、飛翔方向及び速度にも依存するが、クリーニングの効果は数秒～数十秒間持続する結果が得られた。

噴霧液滴計測時の可視化プローブ先端付近の拡大図を図 2.21 に示す。一般に、噴霧液滴の数密度分布および粒径分布はノズルからの距離により変化するため、噴霧ノズル出口孔から測定プローブ上端までの距離をパラメータとした。作動流体は常温の蒸留水とし、噴霧圧力を 0.7MPa とした。噴霧ノズルは、いけうち社製一流体噴霧ノズルとした。噴霧液滴計測実験においては、新たに液滴付着抑制用スリットを設置した。スリット間隔は任意に調整可能な構造としているが、これが広すぎる場合は撮像レンズおよび蛍光発光面への液滴付着抑制効果が低下し、逆に狭くすればデータレート、即ち単位時間あたりに測定体積中に到達する検出可能な液滴サンプル数が低下するため、今回の実験ではその間隔を 6mm と設定した。設置したスリットを上部から撮影した画像およびスリット間隔測定の様子を図 2.22 に示す。

本実験では、噴霧ノズルから計測プローブ上端までの距離を変化させることによりプローブ近傍に到達する液滴数密度を変化させた。画像撮影枚数は 1 条件につき 5000～10000 枚とし、必要に応じてこれを複数回撮影した。図 2.23 に画像撮影中のレンズ面および蛍光発光面の液滴付着の様子を示す。図中、緑色の発行部分は蛍光面励起用のレーザー照射によるものである。レンズ面、蛍光発光面への付着液滴排障のためのエア噴射方法については、一定時間間隔とした。



図 2.21 噴霧ノズルと計測プローブ先端部の位置関係（図は 0mm の設定。）

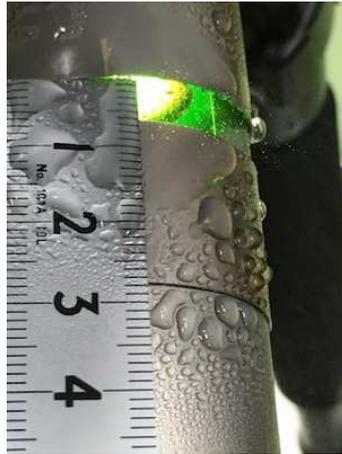


図 2.22 液滴付着抑制用スリット設置状況

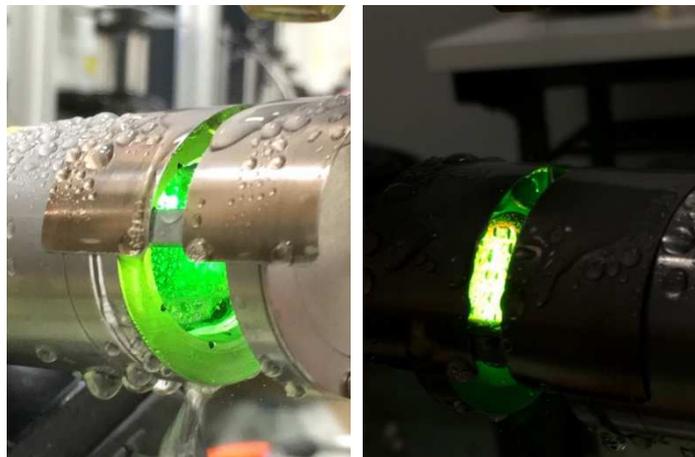


図 2.23 計測中のプローブへの液滴付着
 (左) 撮影用レンズ表面への液滴付着、(右) 背景照明用の蛍光発光面への液滴付着

次に、光学系に付着する液滴群を除去するエアの吐出頻度の影響を比較するために、撮影開始時に一度のみエアを噴射する場合と、撮影中に一定時間間隔でエアを断続噴射した場合を比較した。噴霧液滴数密度の影響を測定するため、噴霧ノズルから測定プローブまでの距離を 0mm、10mm、28mm の 3 条件で変化させた実験を実施した。図 2.24 に、クリーニング開始直後に撮影された画像、2 秒後、4 秒後に撮影された画像について、ノズルからの距離 0mm および 28mm の 2 種類について時系列で列挙した。また、図 2.25 に平均輝度値の時系列変化を示した。エア噴射間隔を 30 秒とした。また、エア噴射クリーニング 1 回あたりのエア吐出持続時間は 1~2 秒とするパルス噴射とした。撮影位置は、噴霧ノズル先端からスリット上端まで 0mm の位置とし、画像取得枚数は 10000 枚 (20fps×500sec) とした。これらの結果より、エア噴射直後においては、画像中から粒子影を検出するのに必要な高い背景輝度が得られているものの、噴霧液滴の空間数密度に応じて数秒以内に画面がブラックアウトしていることがわかる。この問題に対して、繰り返しのエア噴射により、蛍光面および撮影レンズ面上の付着液滴が排除され、画像処理に必要な背景輝度が回復することが実験により示された。従って、本事業により開発された、プローブ先端に具備した空気噴射によるクリーニング機構が、当初の設計通り機能を発揮していることが実証された。図 2.26 に画像処理により得られた粒径分布の比較を示す。画像記録条件は、20fps×50s×3 セットの 3000 枚の画像を処理することにより、粒径分布を得た。特に、各セットの最初にエアを噴射し、光学要素面上の液滴を排除した条件で測定を行った。本結果から、一般に測定が困難とされている噴霧ノズル直下の稠密液滴浮遊場においても、開発したクリーニング機構付きプローブを用いることで、安定した計測データの取得が可能であることが実証された。

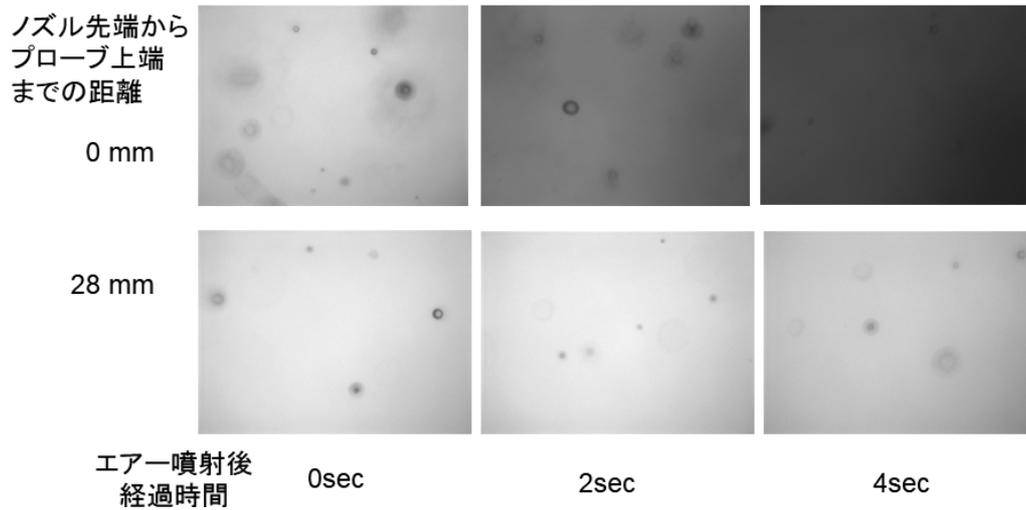


図 2.24 取得された画像の一例

噴霧ノズルと測定プローブ間距離は 0mm および 28mm の場合。ノズル直下の高数密度噴霧においては、エアースプレーによるクリーニング後、4 秒程度で液滴の判別処理が困難となる輝度レベルの低下が生ずる。

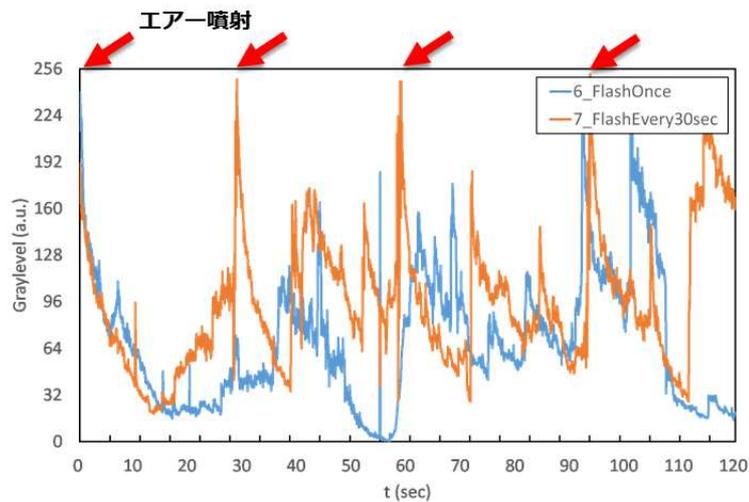
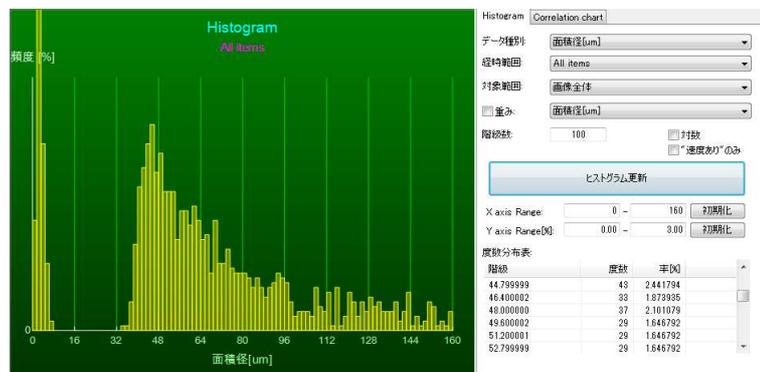


図 2.25 エアースプレーシーケンスの相違による画像の平均輝度の比較
(青色) 計測開始時に 1 度、エアースプレークリーニングを実行
(橙色) 30 秒間隔で断続的にエアースプレーをパルス噴射するクリーニングを実行



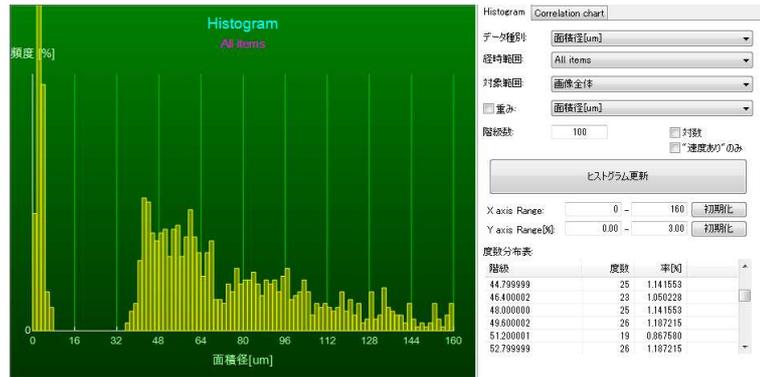


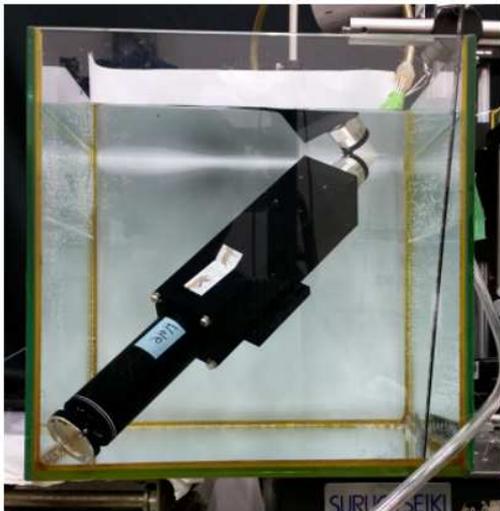
図 2.26 エアー噴射シーケンスの相違による測定結果の比較
 (上) 計測開始時に 1 度、エアー噴射クリーニングを実行
 (下) 250 秒間隔で断続的にエアーをパルス噴射するクリーニングを実行

【1-3】耐水性・耐圧性に関する研究開発

(1) 耐水性・耐圧性の予備試験

可視化プローブに所定の耐水性（水深 5m まで）と耐圧性（0.05MPa）を持たせるため、以下の仕様の設計を行った。

- 配線部の耐水・耐圧対策：
 タッチコネクタの使用
 タッチチューブの使用
- 面接触部の耐水・耐圧対策：
 重要な部分には O リングの設置
 それ以外の部分はテフロン製ガスケットを使用
 テフロン製ガスケットの厚みは 0.5~1mm
- 観察窓：石英ガラス



耐圧・防水実験の様子

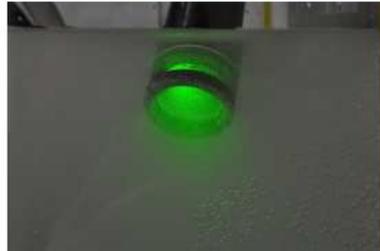


圧力センサー

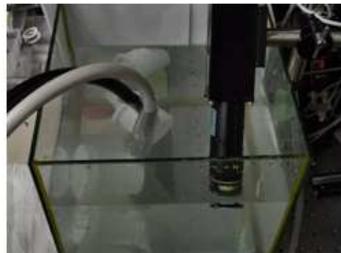


図 2.27 耐水性・耐圧性の予備試験の様子

耐水性・耐圧性の予備試験として、可視化プローブを水槽に入れて水深 5m に相当する圧力（即ち、0.05MPa）を、チューブを介した圧縮空気を与えた。その様子を図 2.27 に示す。ここで、クリーニング空気供給パイプは空気が漏れぬよう塞いだ。その結果、0.05MPa では漏れが生じないこと、0.1MPa では時間が経過すると僅かな漏れが生じるという結果を得た。0.1MPa で僅かな漏れが生じた原因は、ガスケットを 2 本の M3 ネジで固定しており、その締結力が弱いためと判断した。以上の予備試験によって、設計仕様である 0.05MPa に対して耐水性・耐圧性に問題ないことが示された。



実験の様子



実験様子(低密度)



実験様子(高密度)

図 2.28 マイクロバブル計測の様子

上述の予備試験を経た可視化プローブを用いてマイクロバブル予備計測を実施した（図 2.28）。この実験では、マイクロバブル発生装置を用いて数十 μm のマイクロバブルを発生させ、可視化プローブの先端を水中に挿入し、マイクロバブルを撮影する。解析画像枚数は 1500、認識粒子数 663、面積相当径の算術平均値は 42 μm となった。マイクロバブル画像と解析結果として得られた粒径ヒストグラムを図 2.29 に示す。

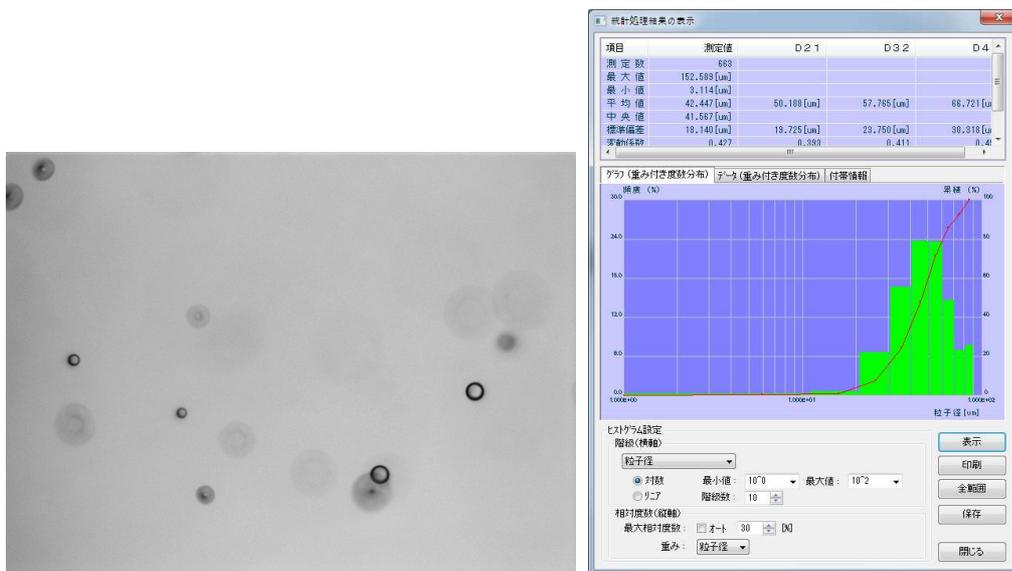


図 2.29 マイクロバブルの予備計測の結果（左：マイクロバブル画像、右：ヒストグラム）

(2) 耐水性・耐圧性の試験

水深 5 メートル (0.05MPa) の水圧環境下でプローブの耐水性・耐圧性を評価した。本予算により実験用の加圧容器 (図 2.30) を製作した。図 2.31 に示す通り、加圧容器にプローブを入れて容器内部を 0.05MPa まで勝木により手動で加圧する。容器内の圧力は、容器に接続された圧力計から読み取る。プローブを入れた加圧容器を密封し、水深 5 メートル相当 (0.05MPa) の水圧環境下まで加圧する。

時間経過と容器内部の圧力計の値を図 2.32 に示す。その結果、加圧後 60 分経過後も、内部圧力は 0.05MPa を維持していた。また、実験終了後のプローブの分解調査により、内部への水の侵入は見られなかった。従って、60 分間の加圧にプローブが耐えることが確認された。

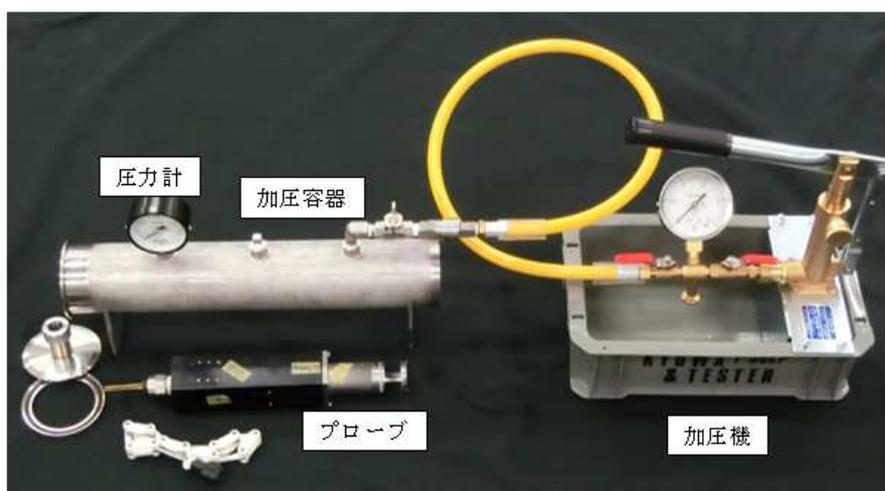


図 2.30 耐水性・耐圧性試験のための加圧試験装置

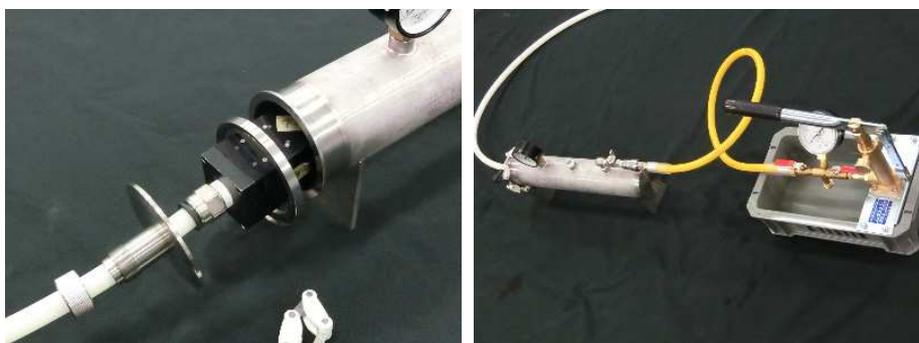


図 2.31 加圧の様子



実験前



加圧中



加圧終了 (0.05MPa)

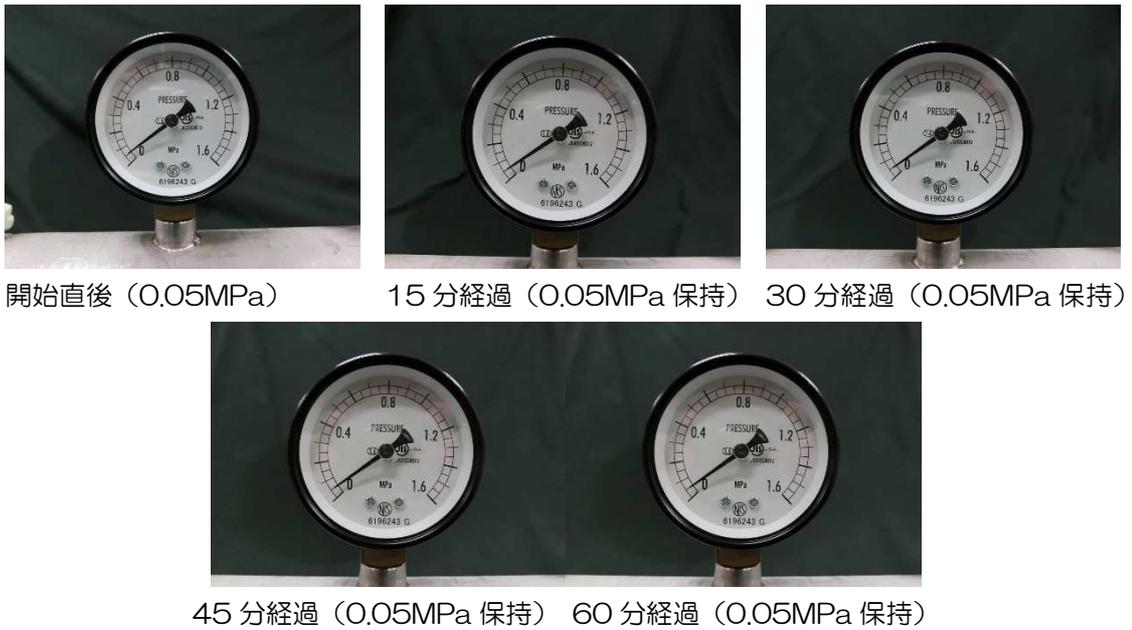


図 2.32 加圧試験の結果

【1-4】耐摩耗性に関する研究開発

(1) 試験装置

法認定企業が準備した可視化プローブ第2号試作機と周辺装置を使用した。第1号試作機から第2号試作機への改善点としては、スリット幅が大きくなったこと、カメラの被写界深度が深くなったことがある。今回の測定対象はサンドプラスタ粒子であるため、可視化プローブ先端の光学系を保護するため、プローブ先端の一部に金属カバーを取り付けた (図 2.33)。



図 2.33 (左) 金属カバー、(右) 金属カバーをプローブに装着した様子

サンドプラスタキャビネット内で、可視化プローブによる粒子計測を実施した (図 2.34)。本サンドプラスタでは、粒子吐出速度が目標値 (最大 10m/s) を大きく上回ってしまうため、ノズル下流にエルボを設置し、さらにその出口部に 3 種類の金網をつけることによって粒子速度を目標値以下まで低下させた (図 2.35)。



図2.34 (左) サンドブラスタキャビネット、(右) キャビネット内部の可視化プローブ



図2.35 粒子速度を低減させるためのエルボと金網

コンプレッサによる圧縮空気の供給時間には限度があるため、可視化プローブの耐久試験では、サンドブラスタの粒子吐出を断続的に行うこととした。そのために、コンプレッサとサンドブラスタの間に電磁バルブを挿入した(図2.36)。自作したMATLABコードを用いて、USB I/O Unit (株式会社コンテック) と直流安定化電源 (高砂製作所) の電圧のオンオフ制御により、電磁バルブを任意の時間間隔で開閉可能にした。この機能を用いて、サンドブラスタの粒子吐出を断続的に行わせた。



図2.36 (左) 電磁バルブ、(右) 電磁バルブのオンオフ制御装置

サンドブラスタ試験に用いた粒子は以下の通りである。

- 粒子型番 : WA - 80 - S, WA - 150 - S, WA - 220 - S

- メーカー名：不二製作所
- 商品名称：FJM ケンマザイ・ペースト
- 中心粒径（カタログ値）：
 - 粒度 80 (WA - 80 - S : 150~180 μm)
 - 粒度 150 (WA - 150 - S : 63~75 μm)
 - 粒度 220 (WA - 220 - S : 45~53 μm)

(2) 試験方法と試験条件

【可視化プローブによる固体粒子計測の試験】

サンドブラスタ内に可視化プローブを設置し、粒度 80、150、220 の粒子を用いて粒径計測を行った。試験手順は次の通りである。

- ① キャビネット内に粒度 150 の粒子を注入する。
- ② コンプレッサの手動バルブを 90 度程度の位置まで開く。
- ③ 電磁バルブを 15 秒周期 (=5 秒開+10 秒閉) で動作させる。
- ④ 電磁バルブが開いている 5 秒間に可視化プローブでの粒子撮影を行う (撮影速度は 20Hz)。
- ⑤ 電磁バルブが閉じている 10 秒間に、可視化プローブ先端センサ部に付着した粒子やデブリを可視化プローブのクリーニング機能で除去する。

※ 粒度 80、220 の粒子についても同様の手順で試験を行った。

【可視化プローブの耐久性試験】

可視化プローブの耐久性能を検証するために、合計 15 時間の実験を行った。実験手順を以下に示す。

- ① サンドブラスタキャビネット内に粒度 220 の粒子を入れる。
- ② コンプレッサのバルブを 90 度程度の位置まで開く。
- ③ 電磁バルブを 15 秒周期 (=5 秒開+10 秒閉) で動作させる。
- ④ 3 時間おき (噴射時間が 1 時間おき) に粒子撮影を行う。撮影時には適宜クリーニングを施す。
- ⑤ 合計 15 時間 (噴射時間 5 時間) になるまで繰り返す。

表 2.1 は、各実験における粒子と撮影画像枚数をまとめたものである。撮影画像枚数は、検出粒子がある程度確保できるように決定した。

表 2.1 実験ごとの粒子と撮影画像枚数

	使用した粒子	撮影画像枚数
可視化プローブによる固体粒子計測の試験	粒度 80 (WA - 80 - S)	5152 枚
	粒度 150 (WA - 150 - S)	4800 枚
	粒度 220 (WA - 220 - S)	3000 枚
可視化プローブの耐久性試験	粒度 220 (WA - 220 - S)	3000 枚×8 回

(3) 試験結果

【可視化プローブによる固体粒子計測の試験】

図 2.37 に固体粒子の面積径のヒストグラムを示す。粒度 80 (WA - 80 - S) のヒストグラムは二つのピークが存在する双峰的分布を示している。その傾向は、粒度 150 (WA - 150 - S) にも認められる。これは、ブラストした粒子が実験装置 (エルポー、金網等) を研磨して

生じたデブリや、粒子同士の衝突で生じたデブリによるものと予想される。
 実験後にプローブ先端の石英ガラスを確認したところ、撮影が困難なほど研磨された様子が見られた。加えて、クリーナーによっても削れている様子が確認された（図 2.38）。

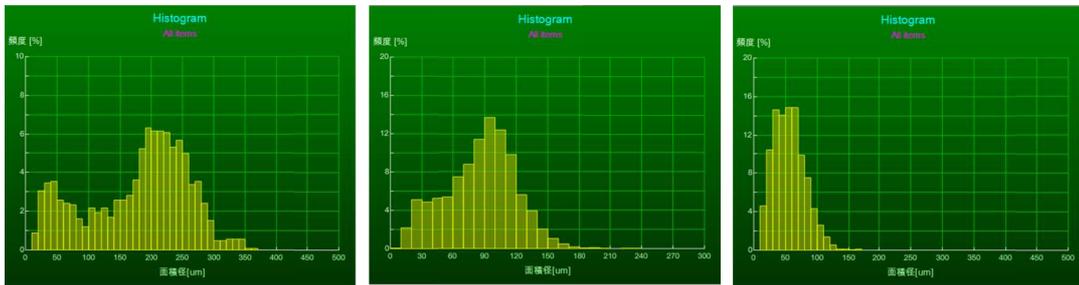


図2.37 固体粒子の面積径（左）粒度 80、（中）粒度 150、（右）粒度 220

表 2.2 可視化プローブによる固体粒子計測の試験結果

粒子	公称粒径 [μm]	平均面積径 [μm]	面積径の標準偏差[μm]
粒度 80 (WA - 80 - S)	150~180	179.0	80.5
粒度 150 (WA - 150 - S)	63~75	86.3	34.5
粒度 220 (WA - 220 - S)	45~53	55.8	24.1

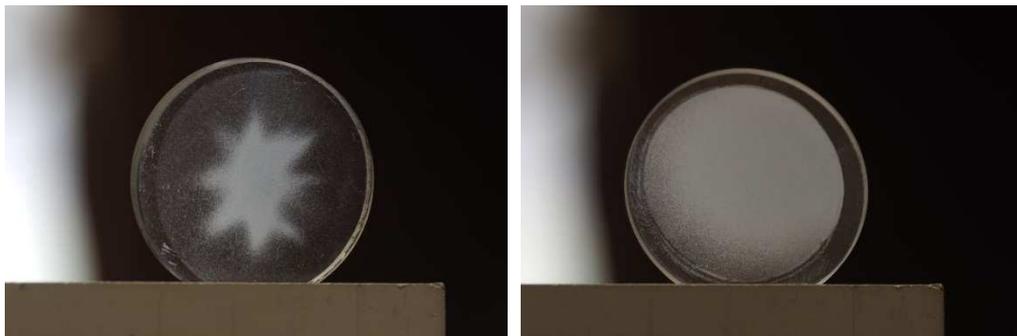
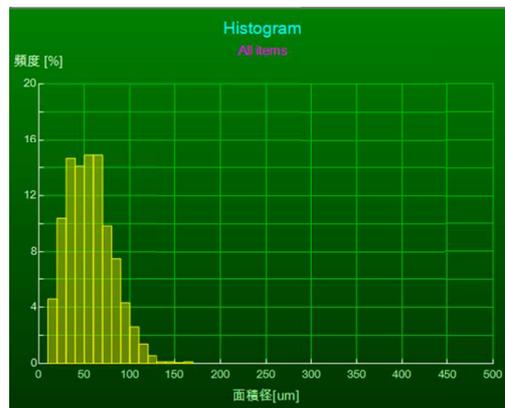


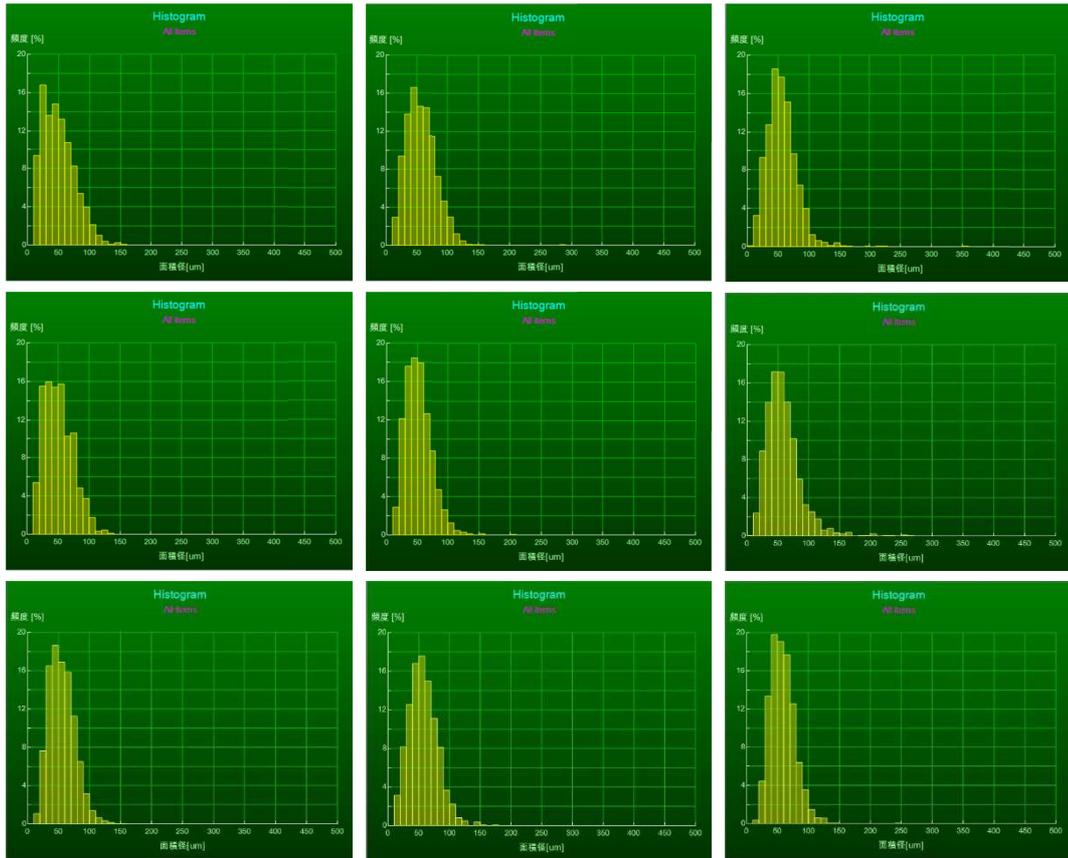
図 2.38 実験後の石英ガラスの様子：（左）カメラ側、（右）蛍光板側

【可視化プローブの耐久性試験】

12 時間程度使用した可視化プローブに対して、15 時間連続の耐久試験を実施した。実験開始から 1 時間おきに粒子画像を記録し、解析を行った。その結果を図 2.39 と表 2.3 に示す。



12 時間程度の使用後の可視化プローブで得られたヒストグラム

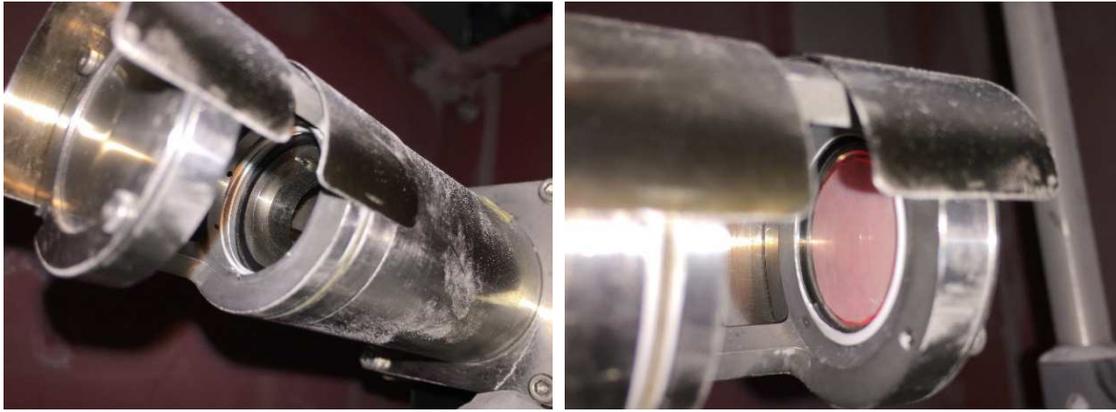


上段左から 1 時間、2 時間、3 時間、中段左から 4.5 時間、6 時間、7.5 時間、下段左から 9 時間、12 時間、15 時間後に得られヒストグラム

図 2.39 15 時間連続の耐久試験で得られた面積径のヒストグラム

表 2.3 可視化プローブの耐久性試験の結果

測定タイミング	平均面積径[μm]	面積径の標準偏差[μm]
12 時間程度使用后	55.8	24.1
耐久試験開始後 1 時間	50.3	25.5
2 時間	57.2	23.8
3 時間	55.7	24.2
4.5 時間	51.2	22.9
6 時間	51.8	21.2
7.5 時間	58.6	27.9
9 時間	55.6	20.5
12 時間	57.1	22.8
15 時間	58.3	19.8



耐久試験前の状態



15 時間耐久試験の後

図 2.40 カメラ側窓と蛍光板側窓の様子

図 2.39 のヒストグラムと表 2.3 の平均面積径・面積径の標準偏差を見ると、15 時間耐久試験の期間に測定結果に有意な違いは見られない。図 2.40 のカメラ側窓と蛍光板側窓の様子においても、摩耗の様子は認められない。以上の結果より、12 時間の通常測定+15 時間の連続測定について、可視化プローブが十分な耐摩耗性を有することが示された。

【1-5】可視化プローブの小型パッケージ化に関する研究開発

小型パッケージ化について次の目標を掲げている。

- ・ 外径 35mm、全長 300mm、重量 3kg 以内に収める。
- ・ 制御部本体を 480mm 以下、高さ 1200mm 以下にまとめる。

この目標を達成するため、可視化プローブ第3号試作機を設計製作した。その主要諸元は次の通りである。

- ・ ステンレス製（本体）
- ・ 撮影部外径φ35mm
- ・ 取り付け部 45mm×45mm
- ・ 全長 283.4mm
- ・ 重量 2.3kg（但し、プローブからのケーブルとホースの重量を除く）
- ・ クリーニングノズル直径 1mm
- ・ 光ファイバ：長さ 5m、外径 1.4mm、コア径 0.94mm
- ・ クリーニング空気供給用真鍮パイプ（内蔵）：長さ 300mm、外径 2.1mm、内径 0.3mm

可視化プローブ第3号試作機の外観を図2.41に示す。撮影部外径 $\phi 35\text{mm}$ 、全長 283.4mm 、重量 2.3kg （但し、プローブからのケーブルとホースの重量を除く）であり、目標を満たしていることが分かる。

撮影部は複数の部品から構成されているが、容易に交換可能な構造となっており、摩耗や汚れが生じた場合の部品交換が可能である。図2.42に可視化プローブを含む計測システム全体の写真を示す。計測システムとしてハードウェアは完成に至っている。

図2.43は、計測システム全体を可動式筐体に搭載することによって小型パッケージ化を実現するための設計である。可動式筐体は $W430\text{mm}\times H900\text{mm}\times D900\text{mm}$ であり、上記の目標を達成している。



図2.41 可視化プローブ第3号試作機の外観

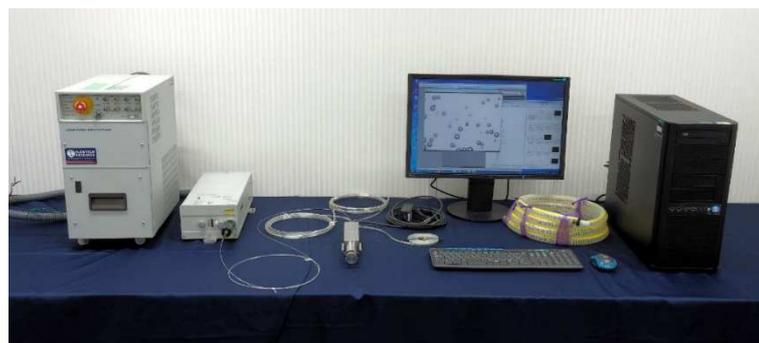


図2.42 可視化プローブシステムの全体

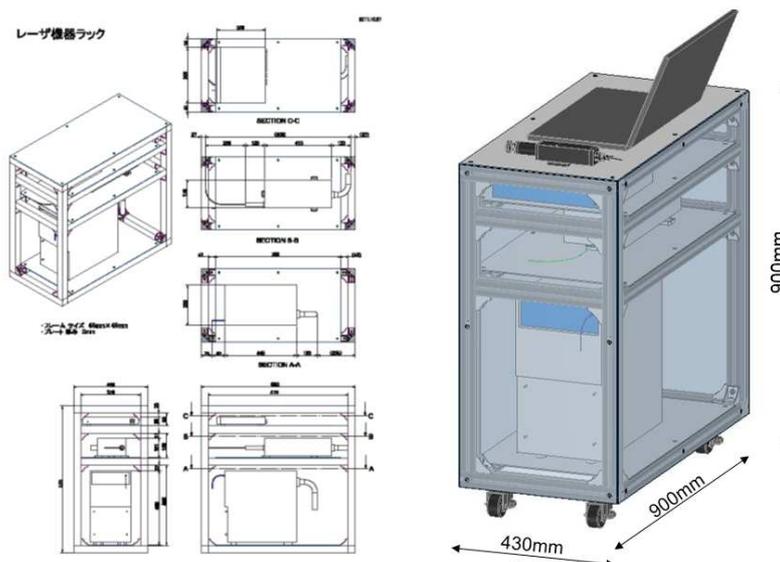


図2.43 可視化プローブシステムの小型パッケージ化の設計

【2-1】撮影条件の最適化技術の開発と検証

(1) 照明方法の原理・優劣の基礎的評価と画像処理技術の検討

流体中を飛翔する固体粒子、液滴、気泡などの微細分散粒子を光学撮影する際には、撮影用カメラのみならず、照明法が極めて重要となる。特に、粒子密度が増加する場合や、粒径が波長の数百倍程度まで低下する場合、可干渉性光源を用いる場合、液滴による散乱光の様態は極めて複雑となる。従って、高精度な粒子計測・解析システムを実現するためには、撮影光学系及び照明光学系の組み合わせの最適化と、それに応じた画像処理法を併せて検討する必要がある。

図2.44（左）は、背景光照明を用いて噴霧ノズル近傍の領域を撮影した画像である。この照明方法においては、背景光が受光光学系光軸に対して垂直に設置された拡散板を介して受光センサに到達するため、その間の検査体積を通過する液滴の像は、輝度の低下した影として記録される。一方、図2.44（右）は背景光を用いる点では同じであるが、カメラに背景光が直接入り込まないように工夫しているため、中央部の輝度値は低くなる。この領域において、液滴により散乱された光は、その方向が変化しカメラに到達するため、輝度値の高い輝点として記録される。



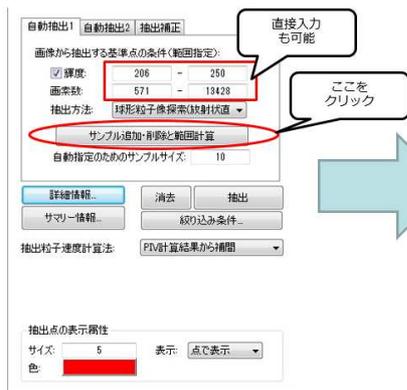
図2.44 （左）背景光照明を用いたシャドウイメージングによる噴霧液滴の撮影
（右）前方散乱光による可視化例

いずれの撮影法においても、計測の分解能を向上させるために数百万画素から数千万画素のセンサを用いるのが一般的である。特に、計測に用いられる撮影機器においては可逆圧縮または非圧縮画像の利用が前提となるため、画素数の増大が記録されるデータ量の増大に直結する。例えば、1千万画素の16 bit per pixel グレースケール画像のファイルサイズは1枚あたり20MBであり、これを1秒間に30枚の速度で撮影すると、そのデータレートは600MB/sに達し、その連続的な記録に特別なハードウェアが必要となる。同時に、画像処理ソフトウェアの処理負荷も著しく増加し、処理能力の高い多コアCPUやGPGPUなどの専用プロセッサの利用が望まれるが、一方、本研究で開発する小型可搬型プローブ装置においては、その空間的・重量的制約や消費電力の観点から、適切な妥協点の模索が必要となる。もちろんコストに関する考慮も重要であることは言うまでもない。

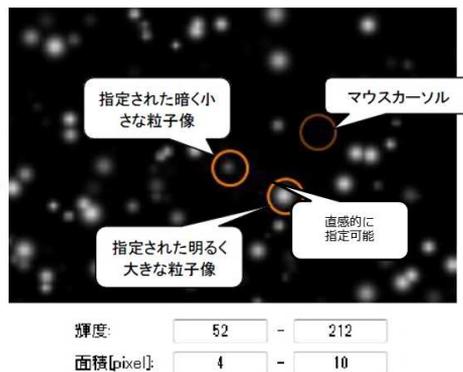
微粒子測定に適した撮影条件の最適化は、粒径分布や数密度など測定対象に依るものと、受光光学系の諸性質及び照明光学系の特性により決定されるものに大別される。前者については、試験的な撮影によりサンプル画像を何度か取得した後に予備解析を行い、画像の信号対雑音比や倍率などを最適化、本撮影のための撮影条件をパラメトリックに決定する方式の採用が望ましい。他方、後者については測定装置の特性として事前にある程度の調節が可能であると考えられるため、処理ソフトウェアにより例えばセンサーゲインや露光時間、ROI (Region Of Interest)、ビットデプスなど、事前に設定機能を付加しておく方式とする。

(2) 撮影条件評価機能を有する撮影ソフトウェアの開発

撮影条件の最適化をソフトウェアでアシストする機能として、抽出対象の粒子像の輝度と面積の有効範囲を画像から直感的に指定できる機能を開発した（図2.45）。



粒子抽出のGUI



粒子像の輝度と面積の有効範囲設定画面

図 2.45 粒子像の輝度と面積の有効範囲を直感的に指定できる機能

また、PIA 解析の Tip 機能をコード開発し、粒子像にマウスカーソルを置くことによって、抽出粒子像に関する面積や速度、円形度など様々な情報を表示させ、粒子像の撮影が適切か否かの判断が簡単に行えるようにした (図 2.46)。

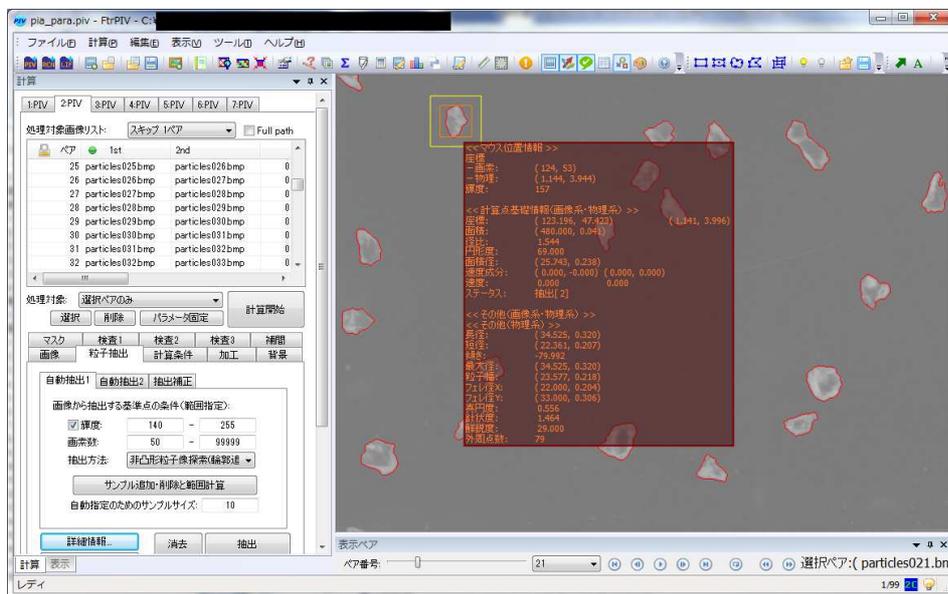


図 2.46 PIA 解析の Tip 機能

さらに、粒子径や速度以外に、粒子の面積や真円度、円形度など、様々な値に対してヒストグラムや相関図を作成できる機能を付与した。これにより、撮影された粒子像が適切であるかの判断を、複数の指標で行うことができる。一例として、図 2.47 は「径比=長径/短径」のヒストグラムを描いたものである。

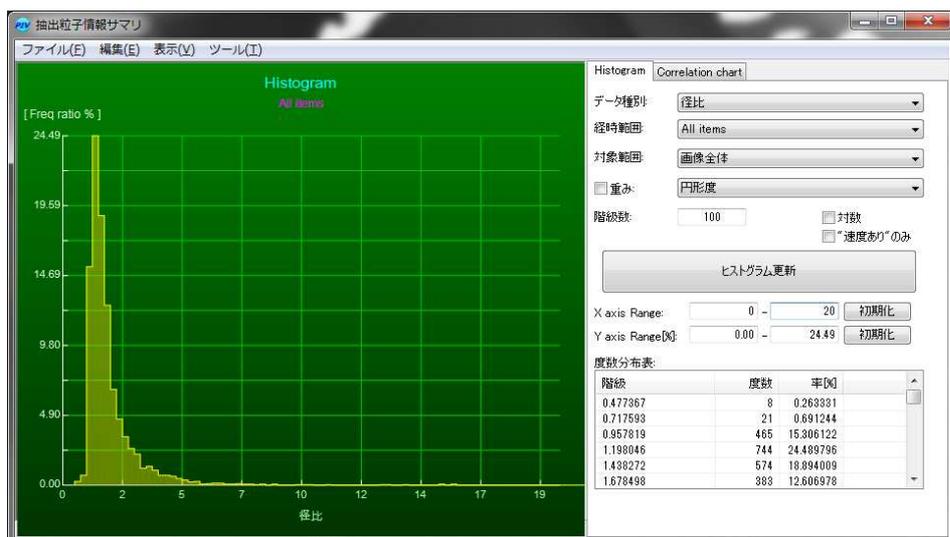


図 2.47 径比のヒストグラムの表示

【2-2】非球形粒子の形状測定アルゴリズムの開発と検証

(1) 輝度勾配法と輪郭追跡法の検討とコーディング

非球形粒子像の抽出へ適用できる二つのアルゴリズム（輝度勾配法と輪郭追跡法）を検討し、コーディングした。ここで、輝度勾配法の原理は横浜国立大学が検討したもので、図 2.48 に模式的に示すアルゴリズムである。抽出結果の一例を図 2.49 に示す。

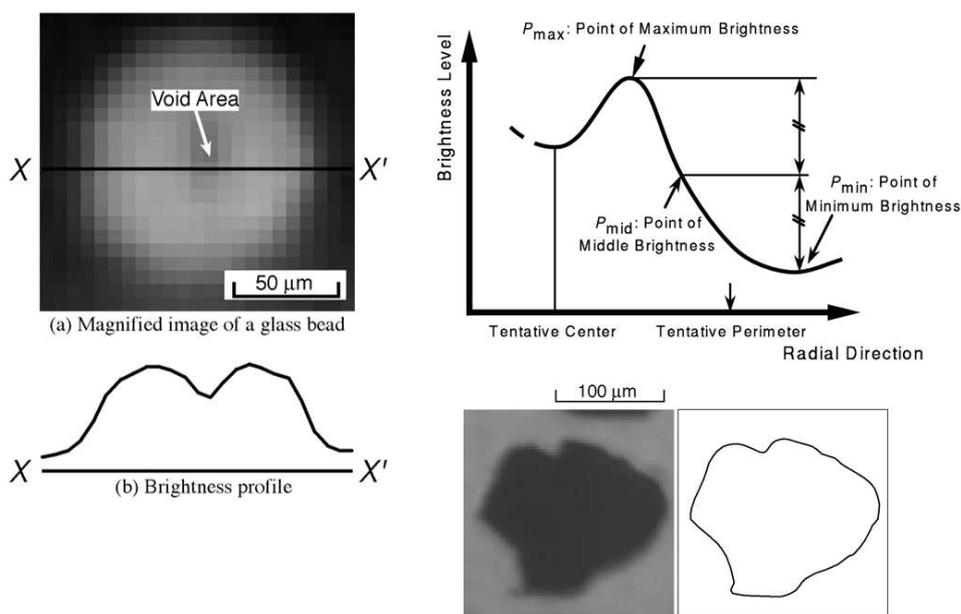


図 2.48 輝度勾配法の原理

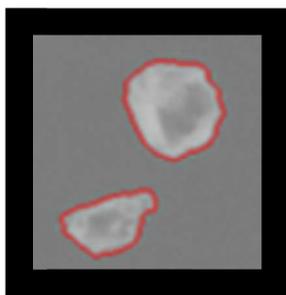


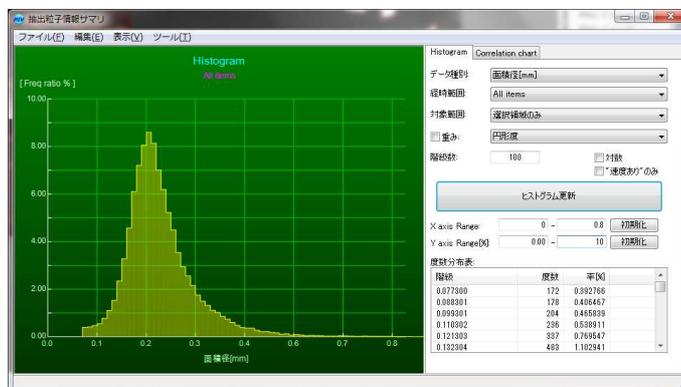
図 2.49 輝度勾配法と輪郭追跡法による非球形粒子像の抽出例（赤線が抽出された輪郭）

(2) アルマイト粒子像を用いた解析

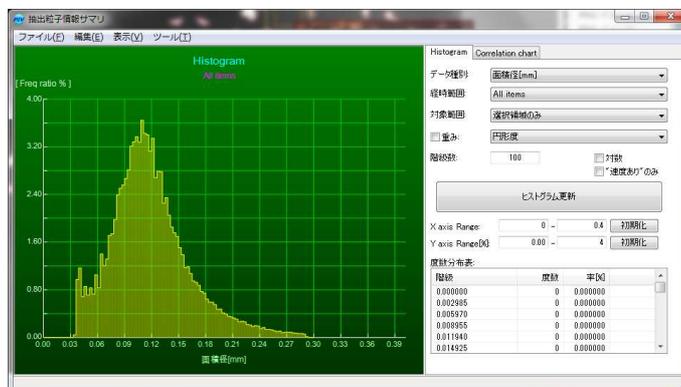
図 2.15 に示した自由落下するアルマイト粒子（非球形半透明）の画像を対象とした予備解析を行い、ソフトウェアとして正常に動作することを確認した。図 2.50 に得られたヒストグラムを示す。



46 番手



80 番手



150 番手

図 2.50 自由落下するアルマイト粒子の画像を用いた予備解析

【2-3】透明／半透明／不透明粒子の形状測定アルゴリズムの開発と検証

背景照明法による透明粒子(例:テクポリマー)の像は、その中心部に光が透過する領域が見られる。つまり、1つの粒子がドーナツ型の像となる(図2.51)。通常の抽出法では、粒子輪郭の内側にもう1つの輪郭(光透過領域の輪郭)が得られることになり不適切である。内側の輪郭線を排除し単一粒子として認識するようにした。そのような機能と Grab Cut 法を組み合わせることによって、従来の輪郭追跡法に比べて、粒子の形状測定が妥当に行えるようになった(図2.52)。このことにより、大量の画像データの解析における動作安定性を実現し、目標を達成した。

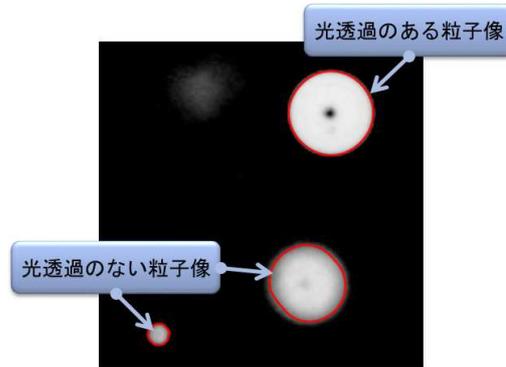


図 2.51 透明粒子の形状測定

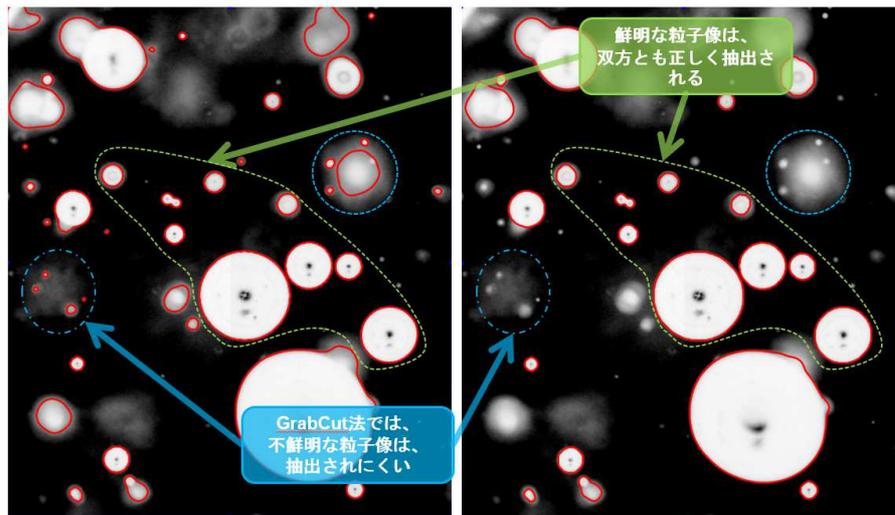


図 2.52 (左) 通常の輪郭追跡法の結果、(右) Grab Cut 法の結果

【2-4】高速かつ安定な粒子画像解析ソフトウェアの開発と検証

本サブテーマについて、次の目標を掲げている。

- 1000 枚の粒子画像の連続バッチ解析が 300 秒で行える機能を与える。
- 以下の粒子条件の解析を可能とする。
 - 数密度： 最大 20 個/mm³
 - 移動速度： 最大 40m/s、分解能 1m/s
 - 移動方向： 移動方向の面内成分が分解できること

Grab Cut 法は、輝度ムラが強い非球形粒子像の検出において利点を有するが、計算負荷が大きく、処理時間が長くなる欠点がある。そのため、処理コア部分を GPGPU により並列化した。

解析速度の評価のために、次の条件で人工粒子画像を作成した(図 2.53)。

- 粒子数密度：最大 20 個/mm³
- 粒子速度：最大 40m/s、分解能 1m/s
- 粒子移動方向：計測対象面内
- 粒子像数：47 個/画像
∴ 測定体積 W3.2mm×H2.4mm×D0.3mm=2.3mm³
→ 2.3mm³×20 個/mm³=46 個 → 47 個
- 粒子像移動距離：20pixel
∴ 画素分解能 0.002mm/pixel、時間間隔 1μs
→ 40m/s×1μs÷0.002mm/pixel=20pixel
- 2重露光画像
単露光画像から作成 (Offset (X, Y)=(+30, +20))
(元の単露光画像は実際に撮影されたもの)
画像サイズ (W, H) = (1600, 1200)、 Bit Per Pixel=8



図 2.53 作成された人工粒子画像

解析速度評価に用いた計算機のスペックは次の通りである。

- CPU : Intel Xeon E5-1680 v3 @ 3.20GHz
- Memory : DDR4 32.0GB
- Graphic card : NVIDIA GeForce GTX TITAN X (Core=3072、Memory=12GB)
- OS : Windows 7 Professional SP1 (x64)

解析速度評価の結果を図 2.54 に示す。1000 枚の粒子画像の解析が 3 分 42 秒 (=222 秒) で終了しており、当初の目標を十分に達成することが示された。

画像数 = 1000

抽出方法は Grab Cut法

粒子移動量[pixel/Δt] = H30 x W20 ≒ 36.05 > 20
 スケーリングファクタ = 0.002mm / pixel、Δt = 1μs
 ⇒ V(u, v) [m/秒] = (60, 40) ≒ 72.111
 ⇒ 速度推定分解能 = 0.5[pixel] [サブピクセル精度] = 1.0[m/秒/pixel]

計算時間 = 3分42秒 < 5分

速度計算された粒子数 = 55 > 47
 抽出粒子数 = 126(二重露光)

bat807.tmp - メモ帳
 2017/10/27 23:26:39 バッチ処理開始 タスク数=1
 2017/10/27 23:26:39 タスク:(1)PIA計算開始
 2017/10/27 23:30:21 タスク:(1)PIA計算終了
 2017/10/27 23:30:21 タスク完了 1/1
 2017/10/27 23:30:21 バッチ処理終了 完了タスク数=1/1

項目	値	X	Y	x	y	項目	値
z	812	812	10	584.080	814.62	1.106	-0.277
z-オフス	10	813	10	585.151	815.610	0.520	-0.580
Δp(z)	814.62	814	2	584.179	815.102	1.170	0.000
Δp(x)	815	2	1.180	816	2	1.180	816
Δp(y)	817	2	-0.180	818	2	818	2
Δp(x)	818	2	819	2	819	2	819
Δp(y)	819	2	820	2	820	2	820
Δp(z)	820	2	821	2	821	2	821
Δp(x)	821	2	822	2	822	2	822
Δp(y)	822	2	823	2	823	2	823
Δp(z)	823	2	824	2	824	2	824
Δp(x)	824	2	825	2	825	2	825
Δp(y)	825	2	826	2	826	2	826
Δp(z)	826	2	827	2	827	2	827
Δp(x)	827	2	828	2	828	2	828
Δp(y)	828	2	829	2	829	2	829
Δp(z)	829	2	830	2	830	2	830
Δp(x)	830	2	831	2	831	2	831
Δp(y)	831	2	832	2	832	2	832
Δp(z)	832	2	833	2	833	2	833
Δp(x)	833	2	834	2	834	2	834
Δp(y)	834	2	835	2	835	2	835
Δp(z)	835	2	836	2	836	2	836
Δp(x)	836	2	837	2	837	2	837
Δp(y)	837	2	838	2	838	2	838
Δp(z)	838	2	839	2	839	2	839
Δp(x)	839	2	840	2	840	2	840
Δp(y)	840	2	841	2	841	2	841
Δp(z)	841	2	842	2	842	2	842
Δp(x)	842	2	843	2	843	2	843
Δp(y)	843	2	844	2	844	2	844
Δp(z)	844	2	845	2	845	2	845
Δp(x)	845	2	846	2	846	2	846
Δp(y)	846	2	847	2	847	2	847
Δp(z)	847	2	848	2	848	2	848
Δp(x)	848	2	849	2	849	2	849
Δp(y)	849	2	850	2	850	2	850
Δp(z)	850	2	851	2	851	2	851
Δp(x)	851	2	852	2	852	2	852
Δp(y)	852	2	853	2	853	2	853
Δp(z)	853	2	854	2	854	2	854
Δp(x)	854	2	855	2	855	2	855
Δp(y)	855	2	856	2	856	2	856
Δp(z)	856	2	857	2	857	2	857
Δp(x)	857	2	858	2	858	2	858
Δp(y)	858	2	859	2	859	2	859
Δp(z)	859	2	860	2	860	2	860
Δp(x)	860	2	861	2	861	2	861
Δp(y)	861	2	862	2	862	2	862
Δp(z)	862	2	863	2	863	2	863
Δp(x)	863	2	864	2	864	2	864
Δp(y)	864	2	865	2	865	2	865
Δp(z)	865	2	866	2	866	2	866
Δp(x)	866	2	867	2	867	2	867
Δp(y)	867	2	868	2	868	2	868
Δp(z)	868	2	869	2	869	2	869
Δp(x)	869	2	870	2	870	2	870
Δp(y)	870	2	871	2	871	2	871
Δp(z)	871	2	872	2	872	2	872
Δp(x)	872	2	873	2	873	2	873
Δp(y)	873	2	874	2	874	2	874
Δp(z)	874	2	875	2	875	2	875
Δp(x)	875	2	876	2	876	2	876
Δp(y)	876	2	877	2	877	2	877
Δp(z)	877	2	878	2	878	2	878
Δp(x)	878	2	879	2	879	2	879
Δp(y)	879	2	880	2	880	2	880
Δp(z)	880	2	881	2	881	2	881
Δp(x)	881	2	882	2	882	2	882
Δp(y)	882	2	883	2	883	2	883
Δp(z)	883	2	884	2	884	2	884
Δp(x)	884	2	885	2	885	2	885
Δp(y)	885	2	886	2	886	2	886
Δp(z)	886	2	887	2	887	2	887
Δp(x)	887	2	888	2	888	2	888
Δp(y)	888	2	889	2	889	2	889
Δp(z)	889	2	890	2	890	2	890
Δp(x)	890	2	891	2	891	2	891
Δp(y)	891	2	892	2	892	2	892
Δp(z)	892	2	893	2	893	2	893
Δp(x)	893	2	894	2	894	2	894
Δp(y)	894	2	895	2	895	2	895
Δp(z)	895	2	896	2	896	2	896
Δp(x)	896	2	897	2	897	2	897
Δp(y)	897	2	898	2	898	2	898
Δp(z)	898	2	899	2	899	2	899
Δp(x)	899	2	900	2	900	2	900
Δp(y)	900	2	901	2	901	2	901
Δp(z)	901	2	902	2	902	2	902
Δp(x)	902	2	903	2	903	2	903
Δp(y)	903	2	904	2	904	2	904
Δp(z)	904	2	905	2	905	2	905
Δp(x)	905	2	906	2	906	2	906
Δp(y)	906	2	907	2	907	2	907
Δp(z)	907	2	908	2	908	2	908
Δp(x)	908	2	909	2	909	2	909
Δp(y)	909	2	910	2	910	2	910
Δp(z)	910	2	911	2	911	2	911
Δp(x)	911	2	912	2	912	2	912
Δp(y)	912	2	913	2	913	2	913
Δp(z)	913	2	914	2	914	2	914
Δp(x)	914	2	915	2	915	2	915
Δp(y)	915	2	916	2	916	2	916
Δp(z)	916	2	917	2	917	2	917
Δp(x)	917	2	918	2	918	2	918
Δp(y)	918	2	919	2	919	2	919
Δp(z)	919	2	920	2	920	2	920
Δp(x)	920	2	921	2	921	2	921
Δp(y)	921	2	922	2	922	2	922
Δp(z)	922	2	923	2	923	2	923
Δp(x)	923	2	924	2	924	2	924
Δp(y)	924	2	925	2	925	2	925
Δp(z)	925	2	926	2	926	2	926
Δp(x)	926	2	927	2	927	2	927
Δp(y)	927	2	928	2	928	2	928
Δp(z)	928	2	929	2	929	2	929
Δp(x)	929	2	930	2	930	2	930
Δp(y)	930	2	931	2	931	2	931
Δp(z)	931	2	932	2	932	2	932
Δp(x)	932	2	933	2	933	2	933
Δp(y)	933	2	934	2	934	2	934
Δp(z)	934	2	935	2	935	2	935
Δp(x)	935	2	936	2	936	2	936
Δp(y)	936	2	937	2	937	2	937
Δp(z)	937	2	938	2	938	2	938
Δp(x)	938	2	939	2	939	2	939
Δp(y)	939	2	940	2	940	2	940
Δp(z)	940	2	941	2	941	2	941
Δp(x)	941	2	942	2	942	2	942
Δp(y)	942	2	943	2	943	2	943
Δp(z)	943	2	944	2	944	2	944
Δp(x)	944	2	945	2	945	2	945
Δp(y)	945	2	946	2	946	2	946
Δp(z)	946	2	947	2	947	2	947
Δp(x)	947	2	948	2	948	2	948
Δp(y)	948	2	949	2	949	2	949
Δp(z)	949	2	950	2	950	2	950

図 2.54 解析速度評価の様子

【2-5】ユーザフレンドリーな GUI ソフトウェアの開発と検証

上記の GPGPU を用いた並列解析を含めて、全ての操作を GUI 環境で行えるソフトウェアを開発した。それを用いた操作の様子を図 2.55 に示す。ユーザフレンドリーな操作を実現するため、次のような機能が付与されている (図 2.56)。

- 粒子情報 Tip 表示：マウスをかざすだけで当該粒子像の特徴量を表示。
- 統計チャート表示：ヒストグラム、相関図を様々な特徴量で自由に表示。
- 詳細データリスト表示：個々の粒子情報・統計量を表示、Tip 対象に連動選択。

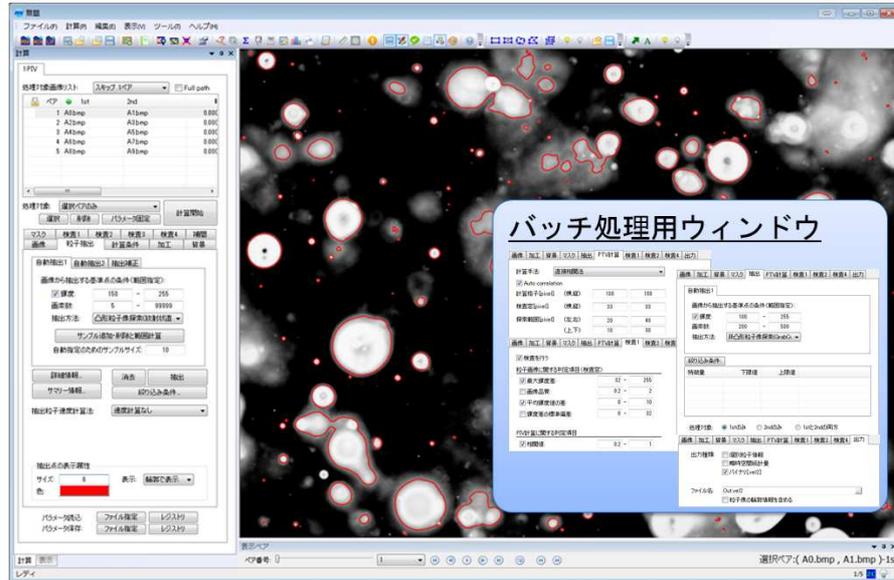


図 2.55 GUI ソフトウェアによる可視化プローブシステムの操作の様子

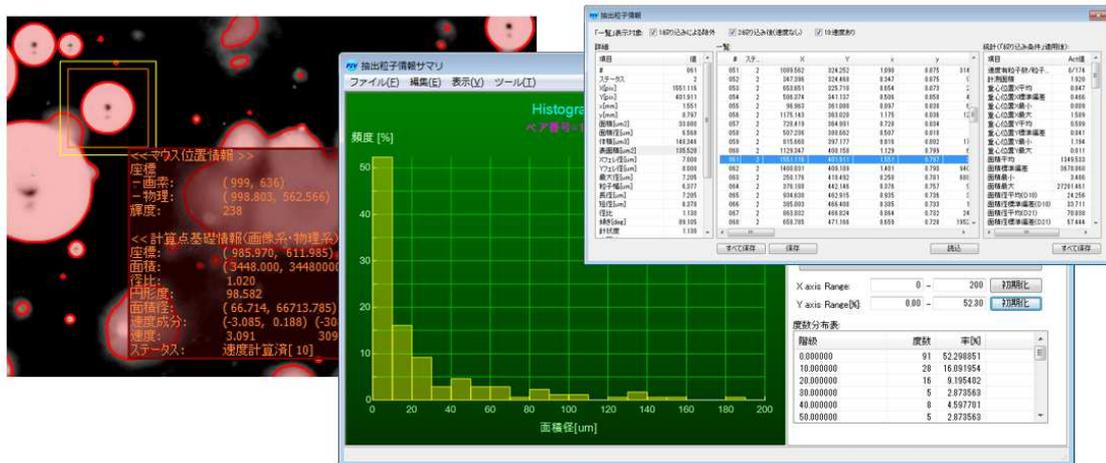


図 2.56 様々なユーザフレンドリーな機能

第3章 全体総括

3-1 補助事業の成果及びその効果

【実施状況】

各サブテーマの年度毎の実施状況を図3.1に示す。ここで、青矢印が平成27年度、黒矢印が平成28年度、赤矢印が平成29年度を表す。全てのサブテーマが完了した。

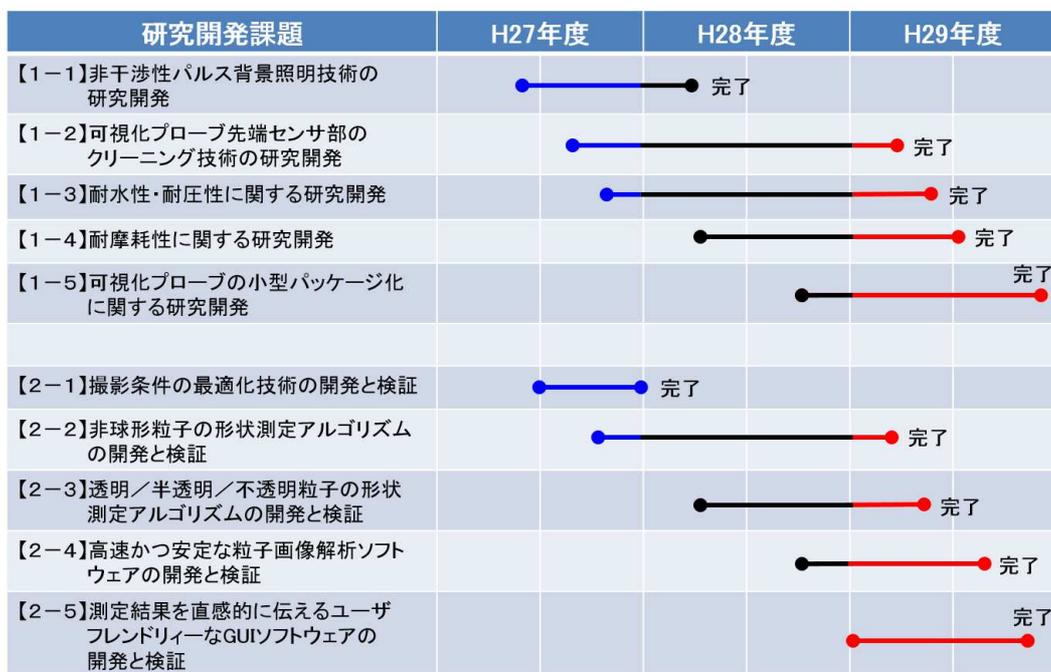


図3.1 各サブテーマの年度毎の実施状況

【成果】

各サブテーマの具体的な成果は「3. 補助事業の具体的な内容」に記載の通りであり、概ね実施計画通り進捗し、当初の目標を達成した。事業終了時の目標達成度を数値で表すと表3.1の通りである。

表3.1 平成29年度年末時点の達成度

サブテーマ	研究実施機関	達成度 (%)	備考
【1-1】	FTR	100%	当該要素技術の研究開発を完了した。
【1-2】	FTR、RU、TIT、YNU	100%	当該要素技術の研究開発を完了した。
【1-3】	FTR、RU	100%	当該要素技術の研究開発を完了した。
【1-4】	FTR、YNU	100%	当該要素技術の研究開発を完了した。
【1-5】	FTR	100%	当該要素技術の研究開発を完了した。
【2-1】	FTR、TIT	100%	当該要素技術の研究開発を完了した。
【2-2】	FTR、YNU	100%	当該要素技術の研究開発を完了した。
【2-3】	FTR、RU、TIT、YNU	100%	当該要素技術の研究開発を完了した。
【2-4】	FTR	100%	当該要素技術の研究開発を完了した。
【2-5】	FTR	100%	当該要素技術の研究開発を完了した。

FTR：株式会社フローテック・リサーチ、RU：立命館大学、TIT：東京工業大学
YNU：横浜国立大学

【効果】

濃密浮遊粒子群の粒子特性を「その場」測定することへの強いニーズが多くの川下産業分野に存在しているが、既存の測定技術は「その場」測定できるものが限られており、測定できるものであっても簡便性や可搬性に欠け、現場での面倒な設置・調整を要する高価なシステムであったため、川下産業分野のニーズを満たしていなかった。本研究開発する「小型可搬性可視化プローブ」を利用した粒子測定技術は、既存の測定技術が抱える問題点を克服できるものであり、川下産業分野のニーズに応えることによって、産業界への大きな波及効果が期待される。

具体的には、自動車分野（濃密飛翔する燃料噴霧や塗装噴霧など）、エネルギー・環境分野（原子力機器における飛翔する凝縮液滴、水処理における沈降する凝集粒子など）、材料製造分野（大量に落下するカーボンブラック粒子やファイバ状粒子）、産業機械分野や農業分野（水中を浮遊するマイクロバブルや散水・散布用の農業用噴霧ルなど）の分野に対して大きな波及効果が期待される。これらの川下産業分野では、粒子測定に対する独自の要求仕様が存在することが想定されるため（例えば、耐久性、温度・圧力条件、プローブ材質など）、本研究開発成果をベースにして、各産業分野からの要求を満たす測定技術への改良について継続して取り組む。

上記の川下産業分野では、製造現場や処理装置・設備において粒子群の特性を常時モニタしたい、というニーズもあり（例えば、環境分野や材料製造分野）、「小型可搬性可視化プローブ」利用のシステムが、製造現場や処理装置・設備における標準装置として採用され・設置される可能性がある。それによって、本研究開発成果が標準的な測定技術として産業界に幅広く利用されることになる。例えば、全国の下水处理装置に設置するといった状況も想定される。

更に、技術改良を継続することによって「小型化・可搬化」を推し進め、現状では「システム」と呼ぶべき寸法・重量を有する技術を、「器械・器具」と呼べる程度の寸法・重量の技術にまで革新させることによって、中小企業の現場や大学の研究室などへの普及も視野に入れることができる。

3-2 補助事業の成果に係る事業化展開について

次のような事業化展開を計画し、一部実施している。

【平成 29 年度】

- 小型可搬可視化プローブを用いた「可視化プローブ式 PIA システム」(**FtrPIA-Probe**)として製品化への準備を進めた。
- 「その場」粒子測定が可能な従来手法（レーザドップラ位相法、背景照明法など）に比べて、30～40%程度安価な価格設定を目指す。
- 当面（平成 32 年度頃まで）は国内マーケットでの販売を進め、製品として安定した後に、海外マーケットへの展開を狙う。
- 国内マーケットでの販売を進めるにあたり、マーケティング調査を実施した。そのための研究開発成果の広報のためのメディアとして「ホームページ、パンフレット、パネル」を作成した。それらを活用して、平成 30 年 2 月以降に 19 社の企業（潜在顧客）に研究開発成果を紹介し、ニーズ調査を行った

【平成 30 年度】

- 関心ある企業およびアドバイザー企業へのデモ機の短期貸し出しを行い、製品評価をお願いする。
- 並行して、研究実施機関へのデモ機の短期貸し出しを行い、製品評価を行うとともに、測定結果を学術論文として発表する。
- **FtrPIA-Probe** の技術開発を終え、マニュアル整備、ソフトウェアライセンス管理、メンテナンス体制と手順の確立、広報・営業を開始する。
- 学会やシンポジウムへの出展、有望顧客への訪問営業、HP 利用の宣伝を積極的に利用した広報・営業を展開する。

【平成 31 年度】

- 受注生産品となるため、受注に応じて製品生産を行う。

- 法認定企業の顧客への訪問営業を展開して、具体的な売り上げを目指す。
- 同時に、広報・営業を展開する。特に、関連学会での広告や機器展示に力を入れる。
- 研究実施機関へのデモ機の短期貸し出しによる製品評価と測定結果の学術論文への公表を継続する。

【平成 32 年度】

- 販売先の拡大を狙った営業活動を展開する。具体的なターゲットは次の通り。
 - (1) 自動車の静電塗装や燃料噴霧の液滴測定
 - (2) 熱交換器や原子力分野における液滴測定
 - (3) 水処理・下水処理施設での凝集粒子測定
 - (4) ファイバ状粒子を原料とする製造現場における粒子特性モニタリング
 - (5) カーボン微粒子の特性モニタリング
 - (6) 農業用噴霧ノズルの設計開発における噴霧測定
 - (7) マイクロバブルの特性評価

【平成 33 年度】

- 販売先の拡大を狙った営業活動を継続する。具体的なターゲットとして、前年度までの営業活動で得た情報を元に、拡大する。
- 大学や旧国立研究所への営業活動を広げるとともに、基礎研究分野からのニーズを調査する。
- 国内マーケットへの販売を通じて製品安定化を図り、海外マーケットへの展開を開始する。英文パンフレットや英文マニュアルを作成する。国際会議や国際シンポジウムでの機器展示を実施する。

【平成 34 年度】

- 国内マーケットを対象として営業活動を継続する。
- 更に、海外マーケットを対象とした広報・宣伝を継続する。

(以上)