

降水粒子観測プローブ開発を題材にした計測制御・装置開発の 個とチーム力の強化（技術研鑽プログラム）

○民田晴也^{A)}、鈴木和司^{B)}、大西崇文^{B)}、叶哲生^{B)}、久島萌人^{A)}、足立匠^{A)}

^{A)} 教育・研究技術支援室 計測制御技術系

^{B)} 教育・研究技術支援室 装置開発技術系

概要

平成25年度の技術研鑽プログラム採択により、教育研究技術支援室 計測制御系と装置開発系の有志メンバーで高速レーザラインスキャナ方式の降水粒子形状計測プローブの作成機会を得ることができた。プローブはプログラム代表による開発機器で、このプロトタイプ型を再作成することで技術評価と共有を図り、野外運用で遭遇する様々な問題に対し異なる専門分野のメンバーで分析・議論を経て解決策を導き出すチーム力強化が目的であった。結果として、若手メンバーが主体となりハードウェアから計測アルゴリズムまでシステム全体設計（3Dプリンタ利用、電子回路設計、マイコンファームウェア、パソコンデータ受信および可視化プログラミング）で議論を重ねプローブを完成する技術共有は達成できたが、センサ実用化に向けた成熟過程を実践するには期間が短かった。

1 はじめに

より高度な技術提供は、高い専門技術と幅広い知識を持つ職員の相互協力による相乗効果、即ち、チーム力の強化が効果的である。今回、技術研鑽プログラムを利用して、計測制御と装置開発系（教育研究技術支援室）の協力メンバーで個人とチームのスキル向上を掲げた観測機器の共同開発の機会を得ることができた。実務に近い研鑽課題を設定、多様な専門分野からアイデアを出し合い、試行錯誤を繰り返すことで問題解決能力を強化できる環境整備を狙っている。課題には本研鑽プログラム代表が開発した高速レーザラインスキャナ方式の降水粒子形状とその粒径分布を計測するプローブの作成を選択した。^{[1][2]} 以下、代表開発機器をLLD（Low-cost Laser Disdrometer；付録2）、研鑽プログラム作成プロトタイプ型LLDを単にプローブと表記する。雨滴粒子は小さく透明で、撮影にハイスピードカメラが必要なほど落下速度が速い。平均的な直径1.5 mmの雨滴で5 m/sの終端速度で落下する（標準大気圧；無風）^[3]。初期型LLDは16mmの計測幅を水平分解能125 μm、スライスレート33 kHzでラインスキャンし降水粒子画像を取得する。LLDは気球観測を視野に廉価（使い捨て）、小型軽量のセンサ開発が目標であり、ハウジングを除く部品代は1万円強と勉強会の題材として最適と考えた。LLDは使い捨て設計であるが、数ヶ月間の連続観測に耐えることができる（図A2.4）。この研鑽プログラムでは、プローブ性能評価を含むシステム全体開発を経験することで技術共有とプロジェクト遂行能力の向上をはかり、センサ実用化に向けた野外試験で遭遇する問題（安定計測とセンサ校正）への改善策を議論し独創的なアイデアを生み出すチーム力強化に挑戦することに特色がある。

2 研鑽課題

① 観測機器のグループ開発と性能評価

専門分野が異なるメンバーで議論を繰り返し降水粒子形状計測プローブ（高速レーザラインスキャ

ナ)を作成する。具体的には、半導体レーザ駆動回路、平行ビームシート光生成、マイコン制御とUSB CDCを利用したデータ収録までのシステム総合開発を行う。センサ開発にはハードウェア設計に加え、安定計測アルゴリズム開発・物理量変換などソフトウェアのパッケージ開発が重要である。プローブでは、光学系付着物による計測不能状態(常に影を検出)の回避、取得粒子画像から等価直径算出、雨滴/非雨滴判別アルゴリズムなどが該当する。プローブは落下雨滴に加え、ハウジングで生じる非雨滴(雨滴がハウジングに衝突し弾けた水滴、ハウジングから計測シート光に滴り落ちる水滴)を計測するため雨滴と非雨滴の分離が必要である。非雨滴はノイズであり、非雨滴を生じないハウジングデザインもプローブ開発では重要である。このプログラムで野外運用実績はないが、LLDは降雨現象によるが1分間に500個以上の雨滴粒子画像を計測する。非雨滴を含めば1000個近いサンプルを取得する。画像計測とデータ転送は排他的動作であり、データ転送による計測デッドタイムがセンサ性能に与えるインパクトは大きく、“計測雨滴粒径分布は統計的に意味があるか?”とセンサ意義に直結し、実用センサ開発には測定量の絶対的な評価プロセスが欠かせない。

② 3Dプリンタ精密加工

理学部装置開発に導入された3Dプリンタ(KEYENCE Agilista-3100)の特性理解を深め、有効利用方法を考える。3Dプリンタは加工自由度は高いが、樹脂部品のみ成形、高ランニングコストであり、効果的な活用方法を模索する必要がある。この研鑽課題では、3Dプリンタを平行度再現性のあるシート光源モジュール(LDとレンズ距離が均一)の製作に利用した。プローブ光源故障時に、モジュール交換で計測分解能を保ち機能回復する設計である。

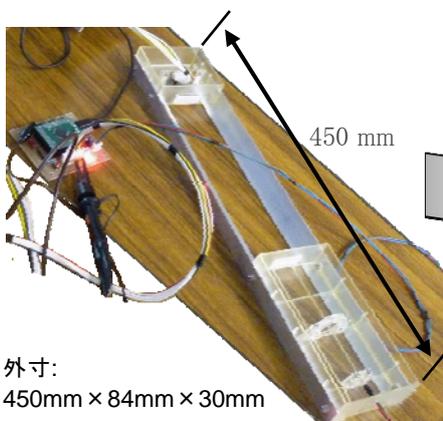
プローブの計測シート光はハウジングに囲まれ、ハウジング上下には降水粒子が通過する開口が開いている(図A2.1参照)。ハウジングは雨滴観測では非雨滴を誘発、落下速度の遅い降雪粒子観測では開口部周辺気流による計測シート光不通過の問題があり、この研鑽プログラムで3Dプリンタを利用した非雨滴低減とセンサ周辺気流を理想化する複雑な形状のハウジングデザインに期待した。3D CADデータはAUTODESK INVENTORなどでブロック遊び感覚で作図できるが、卵型など任意曲面の作図にはテクニックが必要であり(使用CADソフトやversionによる)、自由曲線を有すハウジング設計は見送り角型を基本に製図した。角型には樹脂成形時のサポート材を節約するメリットもある。実情は、プローブの野外運用実績が無くハウジング形状評価と再設計ができなかった。

3 プローブ製作

3.1 電子回路作成とマイコンプログラミング

図1にプローブ外観、図2にブロック図を示す。構成部品は、半導体レーザ(LD:Laser Diode;波長780 nm)、LD駆動APC回路、受光素子Linear Photo Diode-array (LPD)(分解能125 μ m、128素子)、PIC32MXマイコン(System, Peripheral clock 80 MHz駆動)である。電子回路は基板加工機で作成(CAD回路パターン設計、CAM加工機NCプログラム変換、CNC基板加工)、また、LD駆動回路とマイコンボードの部品は表面実装した(図3)。プローブは25mm径の非球面プラスチックレンズで16mm幅(LP D計測幅)以上のシート光を生成、シート光を通過する物体の影画を取得する。シート光の平行度はLDとレンズの距離が1mm変わるだけで劇的に変化し(集光 \leftrightarrow 発散)、計測分解能の均一化を実現するシート光源モジュールの製作には3Dプリンタ利用が有効である。LPDはスライス開始トリガ(SI)と受光素子切替CLK信号で制御を行い、各素子の受光強度に比例したアナログ電圧(AO)を出力する(図4)。このLPD(TAOS TSL202)は64素子の2つのブロックに分かれ、各ブロックをパラレル使用(AO1,AO2出力)することで1スライス(128素

子)を64 clockで取得できる。影判定はマイコンADC(アナログ信号入力)を使用せず、DI(デジタル入力)にAO1,AO2信号を入力しTTLレベル判定でモノクロ画像を取得することで高速スキャン(プローブのスライスレート20 kHz)を実現している。LPDを高速駆動し透明な雨滴粒子計測には、照射する光強度と受光素子の感光時間の最適化が必要である。また、シート光強度はガウス分布特性を持つが(図A1.2)、中心部とエッジ部の強度差が小さくなる分布が好ましい。画像取得は計測スライスに2ピクセル以上の影検出で計測開始、バッファ蓄積、2ピクセル未満で計測終了し、全取得スライスをUSB CDCシリアル通信(cf. LLDはLAN)を介してパソコンに転送する。プローブの電源はUSBバスパワーを利用した。マイコンプログラミングでは、MPLAB IDE 開発環境(C言語)とMicrochip Libraries for Applications(USB API)を利用した。技術研鑽にはLLDのマイコンプログラム、データ収録プログラム、解析プログラムのsource codeを提供したが、マイコンプログラムは敢えて高速化前でデータ転送にバグがあるversionを雛形に選んだ。電子回路は高速化対応など拡張性を組み込んだ設計となっている。データ収録・解析プログラムは、ハードウェア動作確認とGUI(Graphical User Interface)プログラミング研鑽の雛形である(3.3節参照)。



外寸:
450mm × 84mm × 30mm

図1 プローブ写真(ハウジング無)

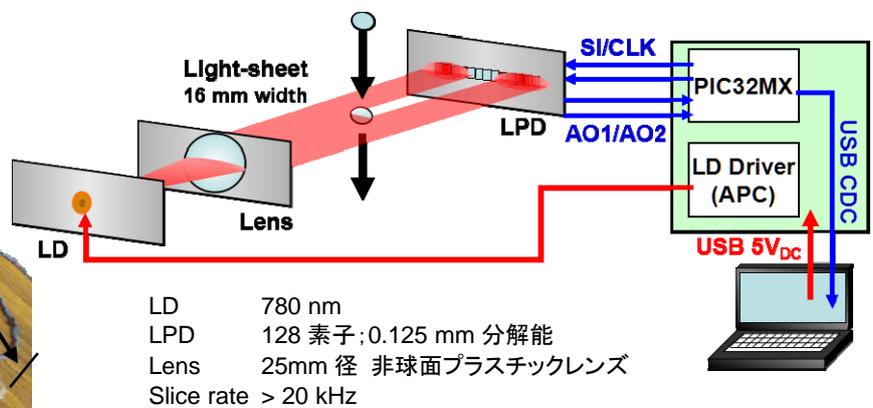


図2 ブロック図

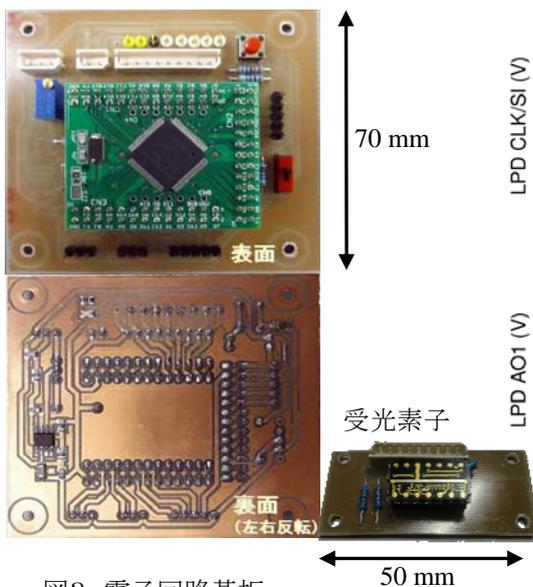


図3 電子回路基板

2.54 mm ピッチ間を通るパターン設計・加工と表面実装ハンダ付け練習。

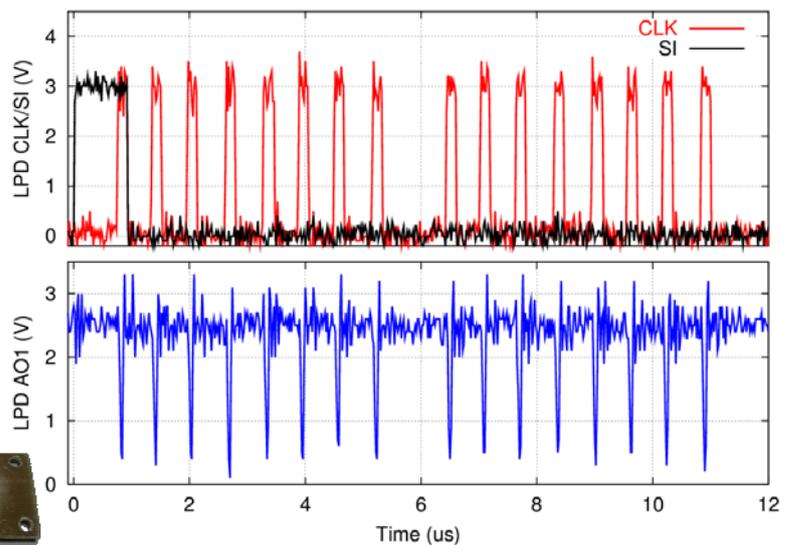


図4 LPD 制御信号(SI/CLK)と光強度(AO1)の時系列

LPD に光照射、スライス先頭から 16 clock 分を表示。8 clock 毎にサブルーチンのコール時間がある(cf. LLD にはない)。

3.2 光学モジュール作成 (3D プリンタ精密加工)

理学部 装置開発室には、水平A4サイズ、高さ200mmまでの樹脂部品を15 μ m厚積層で成形できる3Dプリンタがある(図A1.1)。15 μ mの積層精度はプローブ計測分解能(125 μ m)より細かく、レンズなど光学部品の成形を期待したが、透明度と表面粗さは期待外れであった。特にサポート材と接する面は粗い。また、成形部品が比較的柔らかいことを確認した。3Dプリンタで光学系を支えるフレーム一体型のハウジング成形を期待したが、材質強度から光学アライメント振動問題が顕著になると予想し樹脂ハウジング作成は見送り、光学モジュール筐体のみを作成した。図5にシート光源モジュール(レンズとLDホルダー)と受光モジュール筐体(受光素子電子基板取り付け)の立体図を示す。図6に3Dプリンタで成形した部品の写真を示す。図面作成は、開発コンセプトに従って各メンバーが全体設計を含めた部品図面をプレゼンするコンペティション(強度確保、部品数削減、材料費節約)を数回行い決定したため、図面作成時にモジュール内の部品取付イメージが不十分で、組立時に筐体の追加加工が必要となったが、機械加工が専門ではない計測制御系の若手メンバーには加工や組立を考慮した図面作成が必要であることが体験できた。

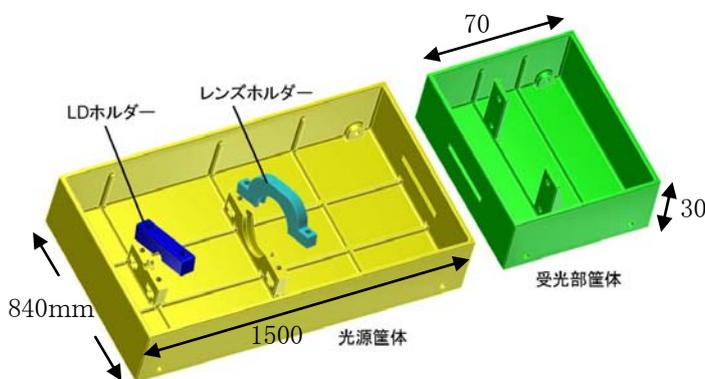


図5 3D CAD 立体図

筐体作成強度、スリット効果(水滴進入抑制)を評価するため、両筐体でスリットと光学部品の距離が異なる設計。

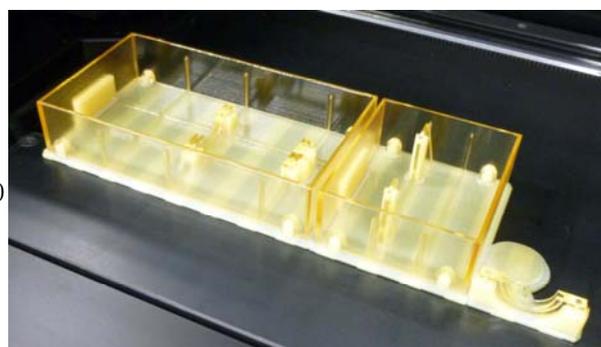


図6 3D プリンタ成形部品(レンズも同時試作)

白い物質はサポート材。樹脂形成は、最初にサポート材の薄い層を作成、その上に積層される。

3.3 PC データ収録プログラム作成

シリアルポート制御に特殊なデバイスドライバは不要でMicrosoft Windows、Linuxなど、何れのOSで容易に開発でき、コマンドラインアプリケーション(CUI: Character User Interface)であればsource codeに大差はない。今回は一般性の高いWindowsで、C言語(Visual C/C++やgcc)を利用して実運用仕様のデータ受信機能のみ有すCUIアプリケーションを作成した。計測中のリアルタイム画像表示はデータ取得率劣化の原因となり、データ可視化は、別途、画像表示アプリケーションを作成した(図7;降水粒子画像は図A2.2参照)。名古屋大学技術研修会ではプローブ展示を予定、デモンストレーションでは視認性が高いものが好ましく、現在、リアルタイム画像表示のGUIアプリケーションを作成している(図8)。

テキストベースは通信速度が遅い電話回線でも比較的安定した機器監視・制御を実現し、トラブル対応がとり易く、遠隔操作はCUIが好ましいと考える。システム安定性はUNIX OSの信頼性が高いが、通信切断時の回復作業を現地人員に委託する場合はWindowsの一般性・利便性は高い。WindowsでもCygwin+sshの利用でCUI remote login環境が容易に構築できる。遠隔操作の実例として、FOMA回線を利用したLLD監視例を紹介する。長期間の無人観測でHDD容量の確保とデータ転送時の負荷軽減のため、LLDデータ収録システムには自動データ圧縮スクリプト(cron)を仕込んでいるが、降水イベント前に機器の健康状態とHDD残量を確認し、必要

ならデータの自動圧縮、外付HDDに移動、または、破棄を行い観測に備えている。観測データや監視カメラ画像はrsyncで名古屋大学に転送している。観測データを学内Webサーバで公開することで準リアルタイムで現地の状況確認に対応できる。このような機器遠隔監視・制御・データ取得システム構築のノウハウ共有、情報収集も研鑽課題に考えていた。

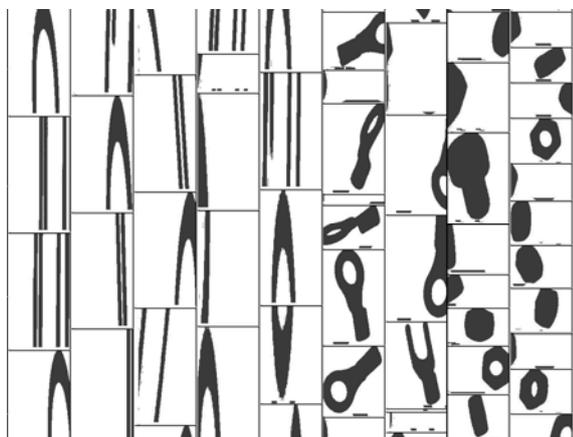


図7 計測画像の例(クリップ、ナットなど)
カラム幅は 16 mm (128 ピクセル)、鉛直分解能は通過速度に依存。

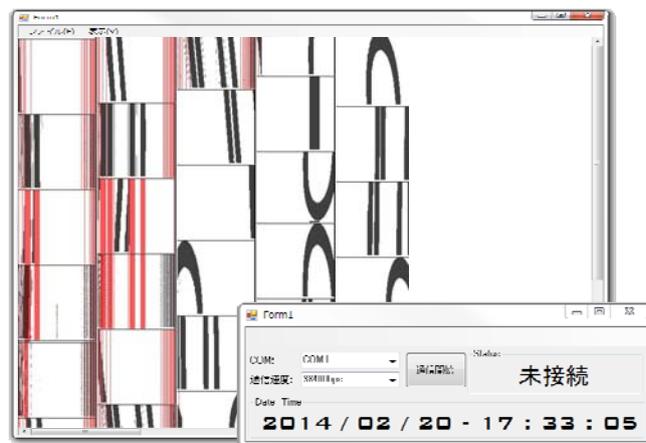


図8 データ取得アプリケーション(リアルタイム画像表示)
赤は計測マスクピクセル: 常時影で計測開始/停止トリガにカウントしないピクセル。光学系付着物の影を無視するアルゴリズム。

4 まとめ

この技術研鑽プログラムは、半導体レーザを利用した粒子形状計測システムの総合開発を経験することで、関連技術の習得は勿論、センサ実用化プロセスで遭遇する様々な問題にチーム議論を通じた問題解決能力の強化が目的であった。今年度の研鑽期間は半期と短かく、実用化プロセスまでは到達できなかったが、若手職員が主体となって、3D プリンタ精密加工 (3D CAD)、電子回路設計と基板加工機 (2D CAD/CAM) および表面実装ハンダ付、マイコンプログラミング (計測アルゴリズムと USB CDC データ送信; C 言語) と Microsoft windows OS 上でのデータ受信と画像処理 CUI/GUI プログラミング (C 言語) を経験しプローブを完成した。プローブの計測性能向上や校正は今後の課題であるが、プローブ製作でも 10 回以上の会合が開催でき、進捗報告と議論、研鑽課題を超えた活発な議論を通してエキスパート・中堅職員による助言・改善手法を示すことはできたと自負する。この研鑽プログラムで、計測制御および装置開発系のメンバーが互いの得意分野を理解し、より強力な業務協力につながれば幸いである。今回は装置開発系からの協力を頂いた感が強いが、今後も多様な課題で技術交流を継続し、より技術レベルの高い依頼業務を獲得・挑戦する強力なチームが形成できることを望む。最後に、本研鑽プログラムにご協力頂いた関係者各位に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] Minda, H., and N. Tsuda, 2012: Low-cost laser disdrometer with capability of hydrometeor imaging, *IEEJ TEEE*, **7(S1)**, 132-138.
- [2] Minda, H., T. Makino, and N. Tsuda, 2014: Performance of a new low-cost laser disdrometer with rainfall intensity correction in heavy rainfall, *IEEJ TEEE*, **9**, (in press).
- [3] Gunn, R., and G.D. Kinzer, 1949: The terminal velocity of fall for water drops in stagnant air, *J. Meteor.*, **6**, 243-248.

付録1 技術研鑽プログラム実施風景

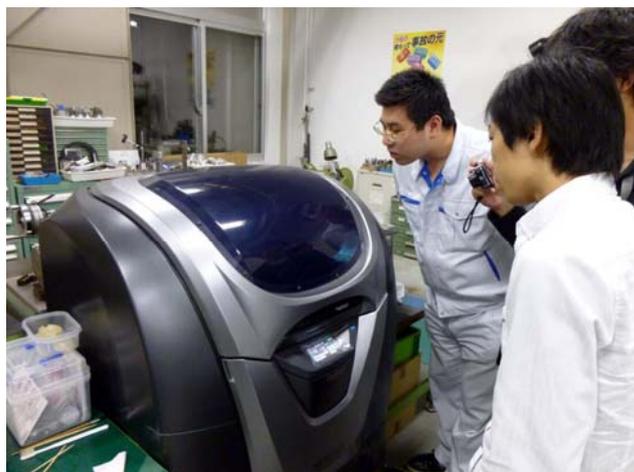


図 A1.1 (左) 光学モジュール筐体 3D CAD 設計議論 (右) 理学部装置開発 3D プリンタ KEYENCE AGILISTA

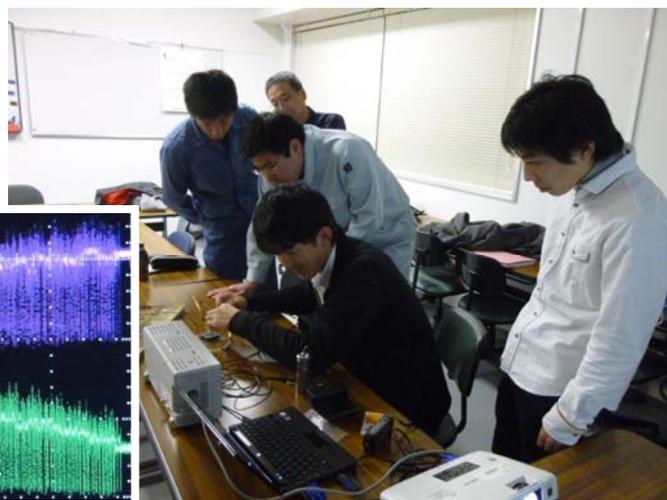
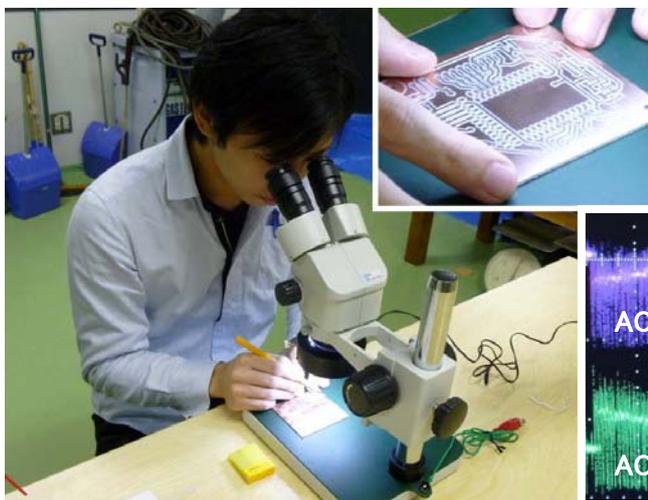


図 A1.2 (左) 作成電子回路パターンバリ取り作業 (右) プローブ組立、LD パワー調整、動作試験
受光素子に環境光が加わるため暗所でパワー調整。
オシロ波形はガウス分布光強度を示す(AO1/AO2)。



図 A1.3 (左) 組立作業で生じた問題の議論と対応 (右) 進捗報告プレゼンとディスカッション

付録2 LLD開発と観測事例

LLD 開発は 2010 年度から始め、雨滴観測性能は既製品の雨滴粒径分布計 (Distromet RD80) との同期観測実験を通して、数十 mm/h の強雨中も既製品と同等の雨滴粒径分布を計測できることを確認、センサ校正まで完了している。^{[1][2]} 現在は、降雪観測用 LLD と降雪観測技術向上に取り組んでいる。降雪粒子観測は開発当初から行い、2010 年度は LLD 試作機 (計測幅 8mm ; 高速落下する透明雨滴粒子の感度実験用) を用い北海道陸別町で -27°C の低温環境で過冷却水滴、氷晶や雪の単結晶を観測した。2011 年度は雨滴観測用 LLD (計測幅 16mm) の成熟に努め、冬季は長岡技術科学大学で新潟豪雪のタイミングで湿雪と霰粒子の観測ができた。2012 年度は白山市 (石川県)、北海道大学でシート光幅拡幅版 (単純に 16 mm 幅シート光を並列配置) を急造、計測幅拡幅に向け (受光素子変更のため)、実際の降雪粒子で基礎データ取得を行った。大粒径の雪片は 16mm 幅シート光では粒子全体形状計測が困難で計測幅の拡幅が必要である (図 A2.2 (左) LLD128)。分解能を保った計測幅拡幅は受光素子数を増やし、サンプリング時間を増大させ、スライスレートに低下バイアスがかかる。幸い、落下速度の遅い降雪粒子の形状計測にスライスレート低下が与えるインパクトは小さいが、落下速度の速い雨滴や霰粒子への対応はやや困難となり、降雪用 LLD 開発では雨滴や霰粒子計測に対応可能な分解能、計測幅など妥協点を見出す必要がある。ここで、最も困難な課題は 50mm 幅を超える廉価なシート光源開発である。今年度 (2013 年度)、蔵王 (山形県) で計測幅 48mm の LLD を実用化し、LLD による科学的成果を探索する降雪観測実験を行っている (図 A2.4 星取表)。降雪観測手法は研究段階で確立しておらず、LLD 取得データの評価方法も試行錯誤中である。蔵王観測の目的は、シート光拡幅 LLD384 (48 mm 幅) と旧型 LLD 128 (16 mm 幅) の同期観測によりシート光拡幅版 LLD 性能向上の定量的な評価、落下速度を計測可能な既製品レーザ雨滴粒径分布計との比較観測によりラインスキャナの欠点である鉛直分解能補正アルゴリズム開発の可能性調査、高レンジ分解能 (30 m) 24 GHz 鉛直ドップラレーダのレーダ反射因子との比較から固体降水粒子のマイクロ波散乱問題の観測的解決の糸口を模索している。図 A2.1 に LLD 設置写真を示す。LLD128 と LLD384 はセンサ周辺を準無風状態にする防風フェンスで囲われている。図 A2.2 に LLD128/LLD384 の計測結果の例を示す。2014 年 1 月 16 日の 1715 JST に観測した結果で、LLD128 は降雪粒子をシート光エッジ部に検出することが多いが、同時刻の LLD384 計測画像はシート光拡幅により粒子全体像が捉えやすくなっていることを示唆している (図 A2.3 の粒径分布時系列も参照)。



図 A2.1 LLD128/384 観測写真
防風フェンス内の LLD と降雪中の監視カメラ画像。カメラ画像の白い縦線は落下降雪粒子が映ったもので、防風フェンス内の準無風状態を示唆する。

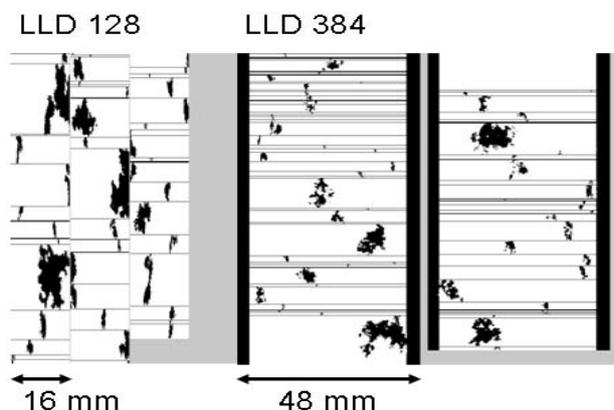


図 A2.2 LLD 計測降雪粒子画像例 (2014/1/16 17:15)
LLD128(左)/LLD384(右)。鉛直分解能は粒子通過速度と計測スライスレートに依存する。LLD384 画像の両エッジは LD 発光設定が弱く常に影 (光学系付着物に反応しないマスク機能の正常動作が確認できる)。

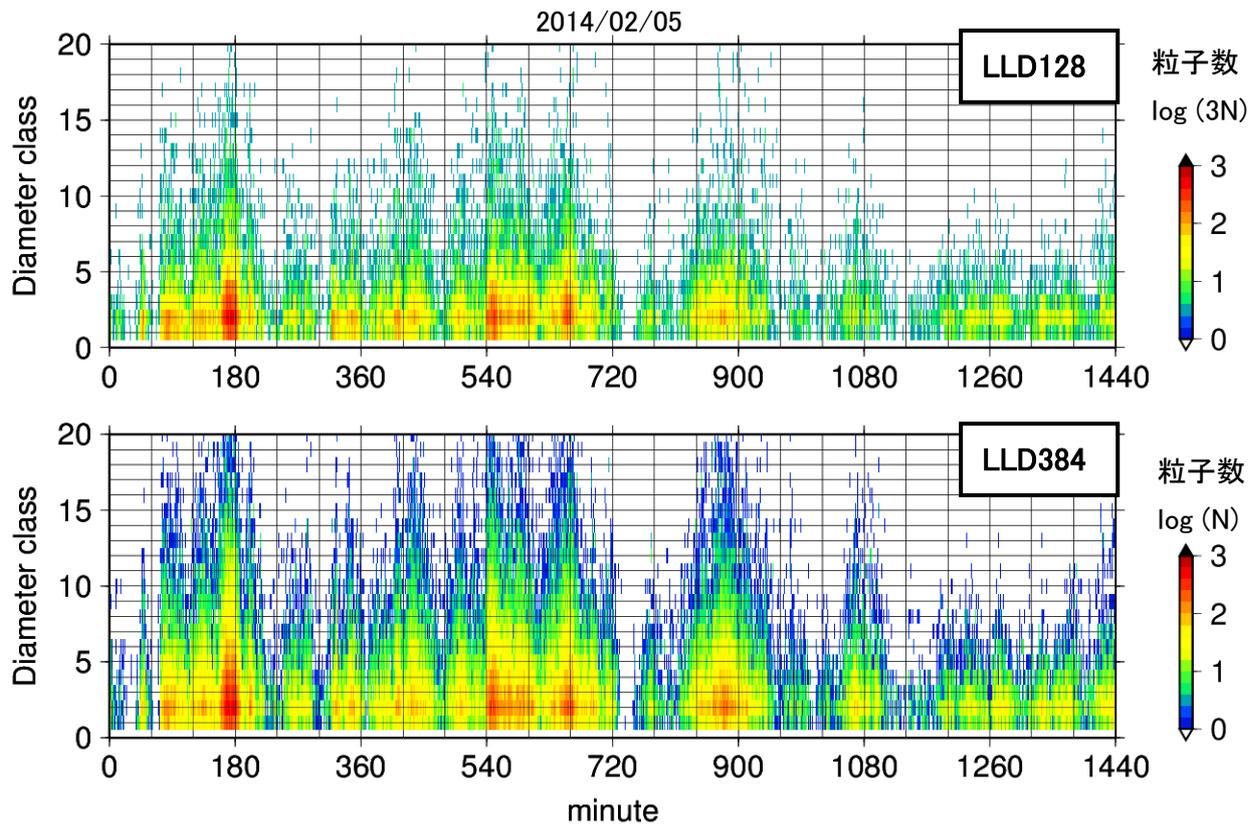


図 A2.3 蔵王観測 2014年2月5日に LLD128/384 が計測した1分間粒子粒径分布の時系列
 横軸：時刻（分）、縦軸：粒子クラス、カラー：粒子数（対数；128は計測幅差を考慮し3倍）、
 粒径クラス：0.5mm×(クラス番号-1)以上、0.5mm×(クラス番号)未満。
 LLD384はLLD128に比べ多くの大粒子を計測している（青シェード参照）。
 ここに結果を示さないが、センサエッジでの粒子検出率は LLD128 が20%台、LLD384 が数%。

		2013年12月																																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31								
LLD128										○	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲								
LLD384									○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○								
積雪													4	12	28	29	18	13	10	12	12	12	12	12	11	8	11	27	28	23	13									
備考										設置: LLD128/384に共通の問題発生。128で原因特定作業→LDに負荷をかけ128不安定。																														
		2014年1月																																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31								
LLD128		▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○									
LLD384		○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○									
積雪		9	23	20	13	13	11	10	10	9	14	13	11	11	11	10	10	10	10	18	16	15	12	17	15	13	14	14	8	5	5	7								
備考														1/14	LLD128交換																									
		2014年2月																																						
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28											
LLD128		○	○	○	○	○	○	△	×	×	×	×	○	○	○	△	×	×	×	○	○	観測継続中																		
LLD384		○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	○	△	×	×	×	○	○																			
積雪		5	3	0	1	7	5	3	24	41	32	29	23	22	23	53	54	47	38	37	34																			
備考									大雪(埋雪)						大雪(埋雪)																									

○：終日稼動。△：6時間以上停止。×：観測不可。▲：故障状態で運用（ノイズ多い）。

図 A2.4 蔵王観測 LLD128/384 運用実績（2月20日まで）

2月に2回大雪でLLDは雪に埋まり計測不能となったが、融雪後、機能回復、現在も観測を継続。
 LLDは使い捨て設計であるが、1/14のLLD128交換の他はメンテナンスフリーで遠隔運用中。