

高速・高SNR撮像素子による 流体濃度分布その場計測デバイスの開発

国立大学法人東北大学
アストロデザイン株式会社
株式会社フジキン

国立大学法人東北大学
未来科学技術共同研究センター／大学院工学研究科 教授

黒田 理人

◆事業の目標

本研究開発ではこれまでにない高速・高SNR(信号対雑音比)性能を両立し、様々な物質の発光・吸光特性波長を捉えることのできる紫外-可視-近赤外光帯域に高い感度を有するCMOSイメージセンサを基盤とした、ガス・液体の微量な濃度分布を非破壊・非侵襲で可視化できる実用的なその場計測デバイスの実現を目指す。

流体濃度分布その場計測デバイスの実用化構想

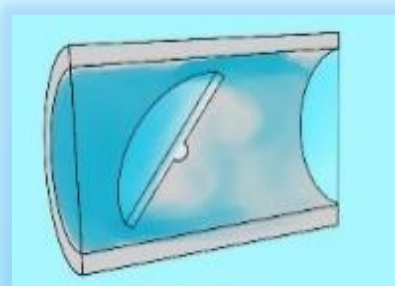
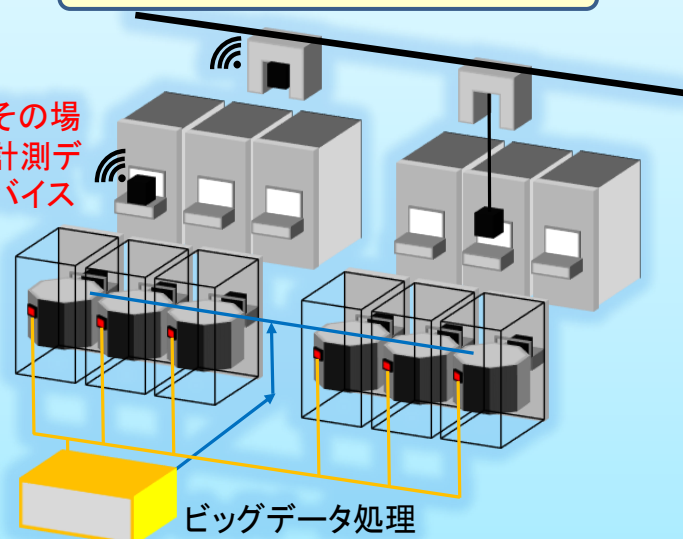
半導体集積回路製造分野

環境分野

農業・畜産分野

ヘルスケア・認証分野

その場計測デバイス



装置・プロセス早期異常検出／歩留まり向上／完全自動化

河川／排液の微量不純物可視化

品質の見える化・病
気早期検出

非侵襲血流・血液
成分モニタリング
／生体認証

実施体制と開発経緯

- ・広光波長帯域・高耐光性フォトダイオード技術，高容量密度キャパシタ技術を各画素に配備し，線形応答で照度範囲7ケタ超の広ダイナミックレンジかつグローバルシャッタ動作が可能な革新的なCMOSイメージセンサ技術を開発し，
- ・フェーズA(前半3年)では，①1000枚／秒の高速フレームレート・70dB超の高SNRを有するグローバルシャッタCMOSイメージセンサを設計・試作し，これを搭載した②小型分光イメージングデバイスのプロトタイプを開発して，③半導体製造装置内流体濃度分布計測を実証する．
- ・フェーズB(後半2年)では，・製造プロセスリアルタイム流体濃度分布計測およびデータ解析の実証，さらに，・高解像度・小型イメージングモジュールの開発を行い，先進半導体製造技術分野での事業化を見据えた展開や、多画素化対応のマルチユースカメラモジュール、ハイパースペクトルカメラシステムの開発を通じた多分野展開を図る．

実績・保有設備

- ・高性能イメージセンサ技術
- ・クリーンルーム設備



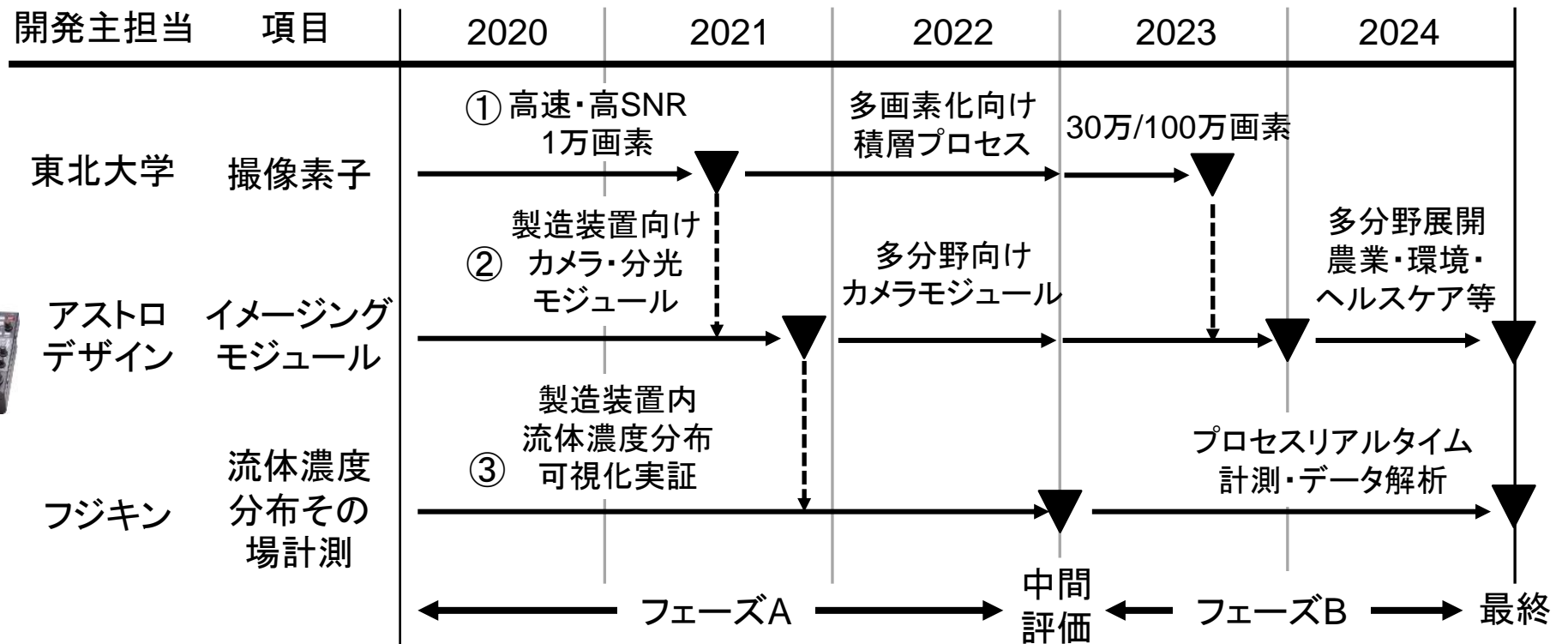
- ・高速デジタル信号処理
- ・8Kカメラ



- ・高性能バルブ
- ・流量制御器
- ・ガス濃度計



開発スケジュール

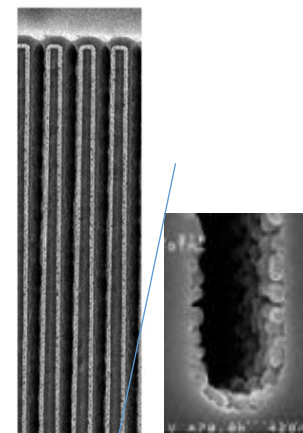
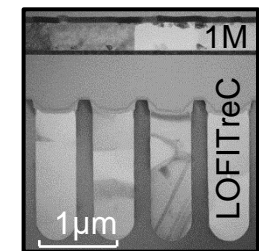
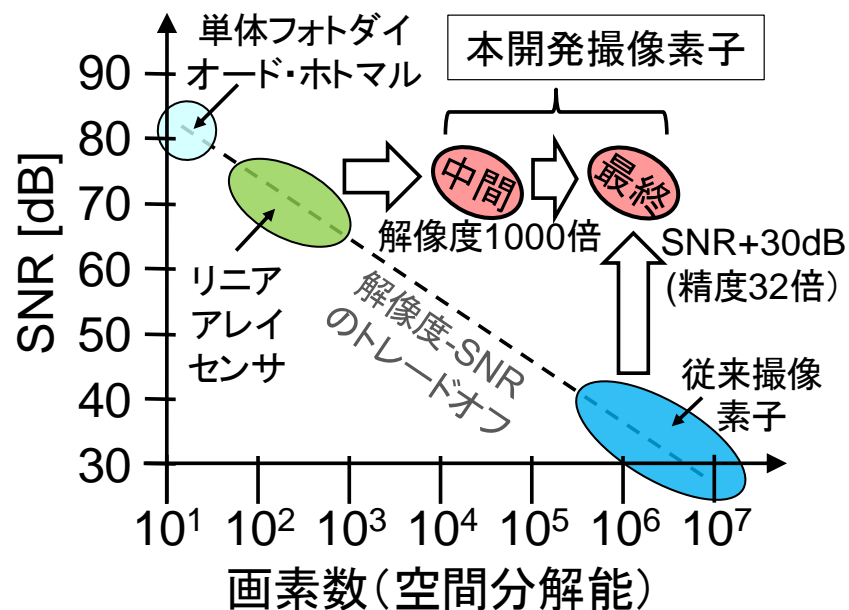
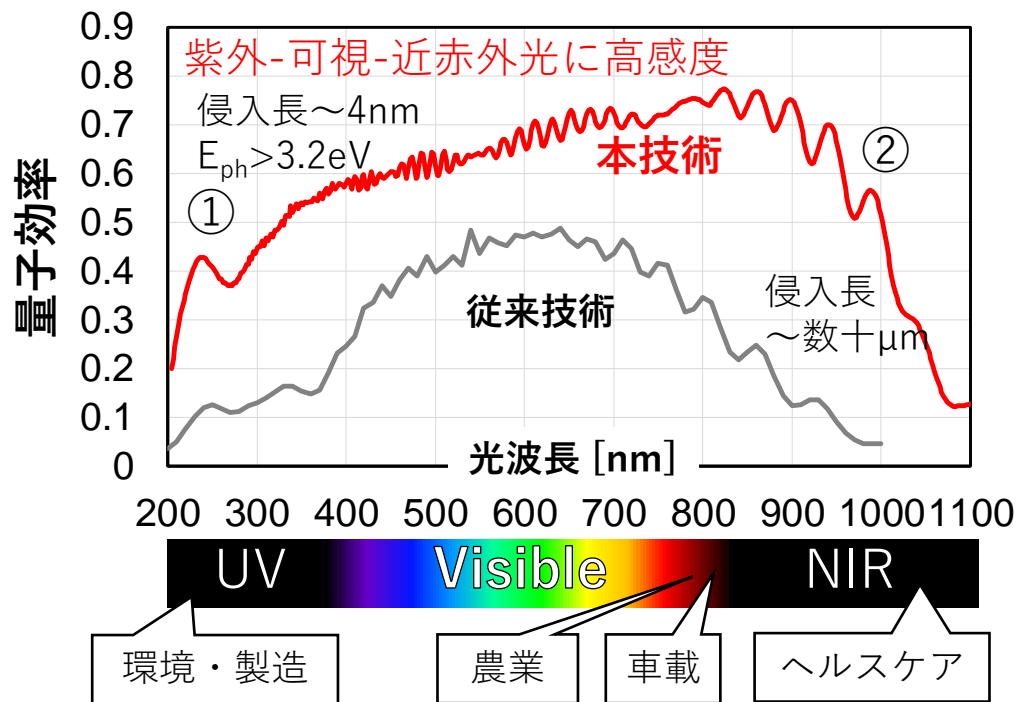


2022年度(フェーズA終了時点)の目標

- 画素数1万超・SNR70dB超・撮像速度1000fpsの線形応答グローバルシャッタCMOSイメージセンサ
 - [従来比30倍超の精度(ppm～サブppmの流体濃度分布)をグローバルシャッタで実現
・紫外光耐光性は実証済みで、高い耐環境性を備える。センサ製造コストは従来のまま]
- 小型分光イメージングデバイスのプロトタイプ
 - [センシング原理実証へ]
- 半導体製造装置内ガス・薬液濃度分布可視化実証
 - [専用チャンバーを用いて実証]

撮像素子コア技術

- ① 平坦化Si表面形成技術を導入し，侵入長の**短い**紫外光感度を向上，表面高濃度層の構造最適化で実使用10年超の耐光性を達成。
- ② 極低不純物濃度Cz基板を導入し，侵入長の**長い**近赤外光帯域の感度を向上，世界最高レベルの量子効率を達成。
- ③ 画素内に**3次元構造高容量密度キャパシタ**を集積し，2000万電子を超える高飽和性能・70dB超のSNRを達成。



>230fF/ μm^2

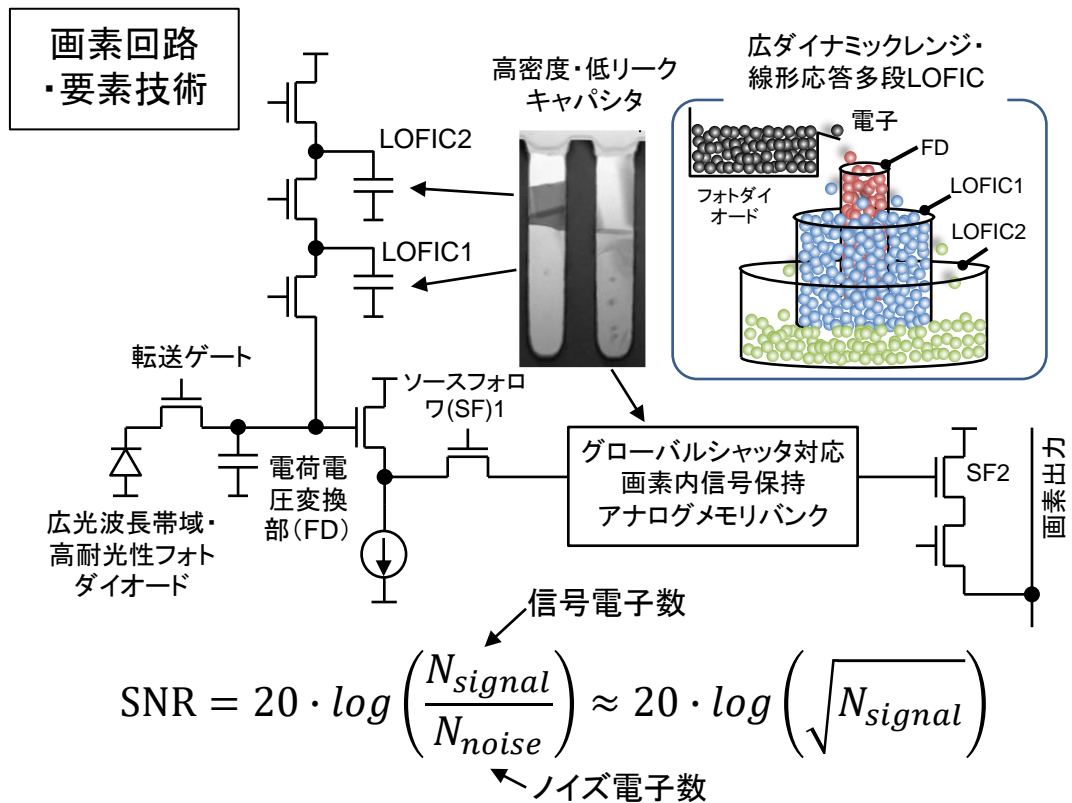
190~1100nmの広光波長帯域に高い感度を有し，様々な応用へ

分析機並みの精度を有するイメージセンシングデバイスを創出！

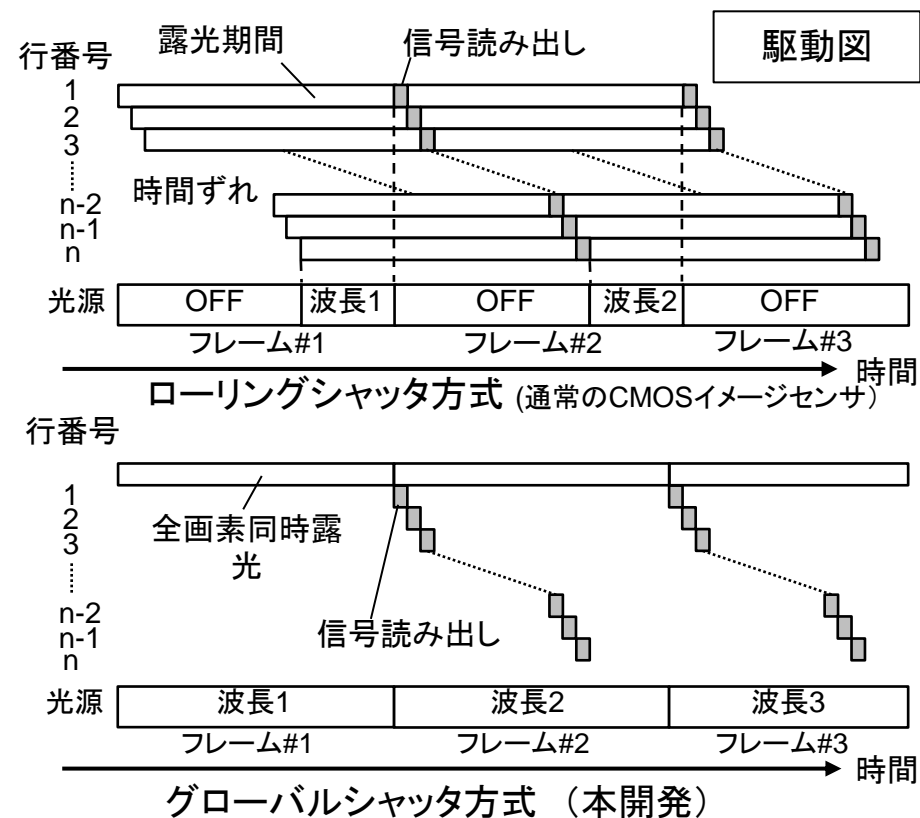
撮像素子コア技術

高容量密度キャパシタを用いた2段LOFICグローバルシャッタCMOSイメージセンサ

- 実用化技術の横型オーバーフロー蓄積容量(LOFIC)を多段化し, 照度範囲7ケタを単一露光・線形応答で撮像.
- 画素内に信号を保持するアナログメモリバンクを搭載し, 全画素同時露光を行うグローバルシャッタ化.
- 3次元構造の高容量密度キャパシタを導入してLOFIC・アナログメモリを高密度に集積.



1000万個超の飽和信号電子数で光検出精度(SNR)を向上させ, ppm~サブppmの流体濃度分布を1000コマ/秒で検出.



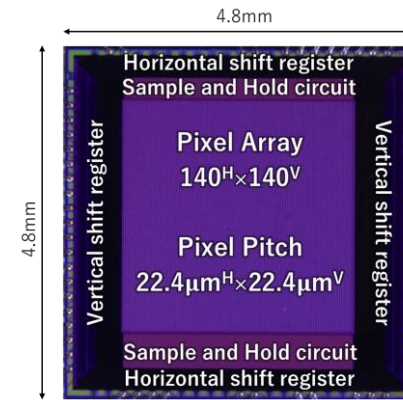
高速移動の被写体を歪みなく撮像可能. 多波長光源時分割切り替え方式にて光の利用効率が高い.

研究開発実績

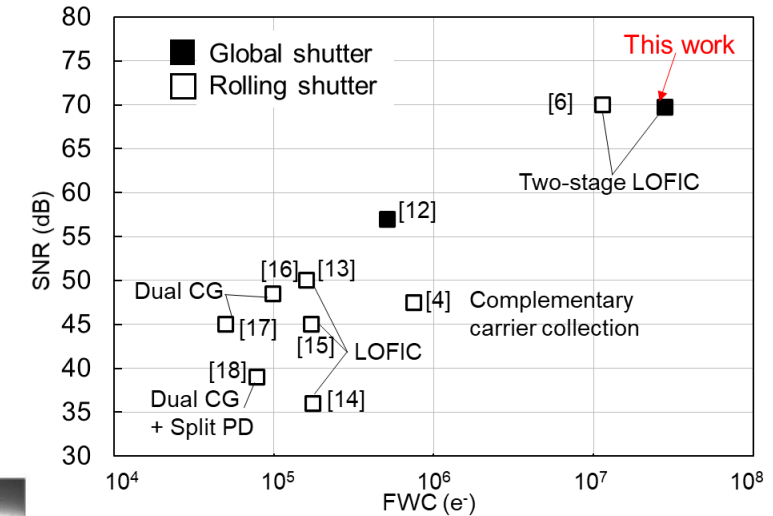
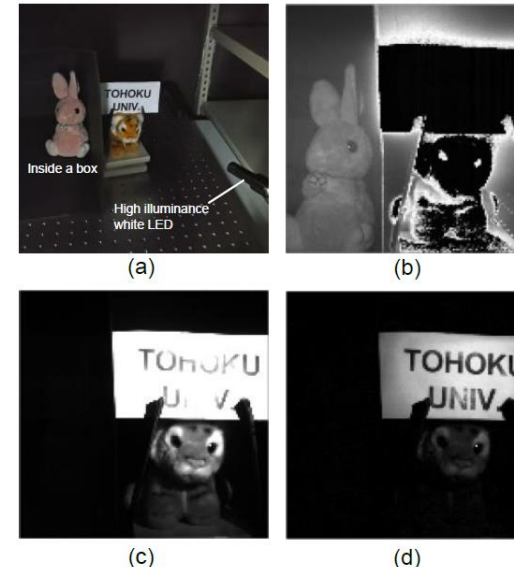
研究項目	目標	成果
①高速・高SNR撮像素子の開発	・画素数1万超・SNR70dB超・撮像速度1,000枚／秒のグローバルシャッタCMOSイメージセンサ	・画素数19600のイメージセンサの設計・試作を完了し, 最高SNR70dB, 1000枚／秒のグローバルシャッタ動作を達成

Performance summary.

Process technology	0.18 μm 1-poly-Si 5-Metal CMOS with pinned PD	
Power supply voltage	3.3 V	
Die size	4.8 mm ^H × 4.8 mm ^V	
# of effective pixels	140 ^H × 140 ^V	
Pixel size	22.4 μm ^H × 22.4 μm ^V	
Fill factor	41 %	
Electronic Shutter	Global Shutter	
Maximum Frame rate	1,000fps@40 MHz	
Conversion gain	S1	94.4 $\mu\text{V}/e^-$
	S2	2.19 $\mu\text{V}/e^-$
	S3	60.1 nV/ e^-
FWC	S1	14.7 ke ⁻
	S2	757 ke ⁻
	S3	27.8Me ⁻
PLS	to S1	-145 dB
	to S2	-113 dB
	to S3	-81.7 dB
Maximum SNR	69.7 dB	
Dynamic range	123 dB	



広ダイナミックレンジ撮像



1000fps 動画撮像



モーター回転数~540rpm
再生速度:10fps

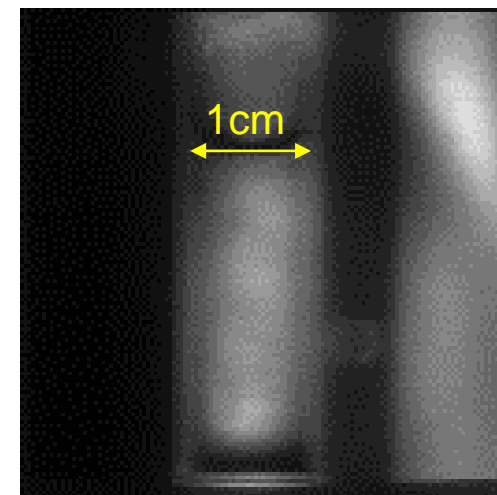
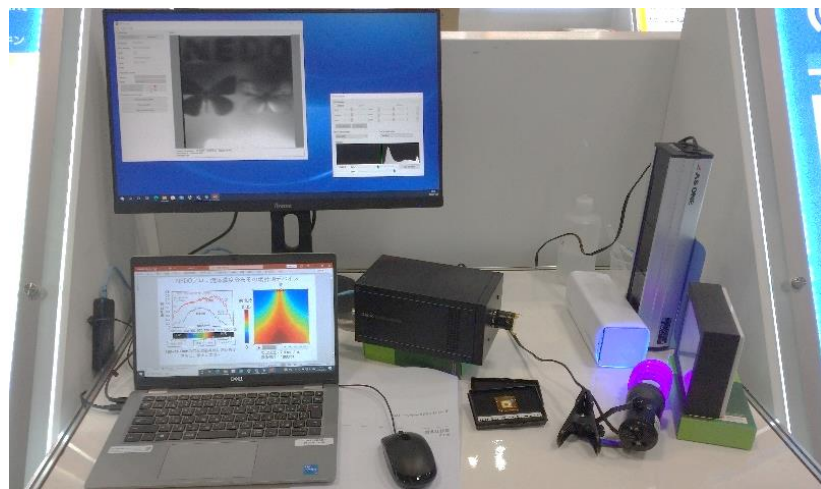
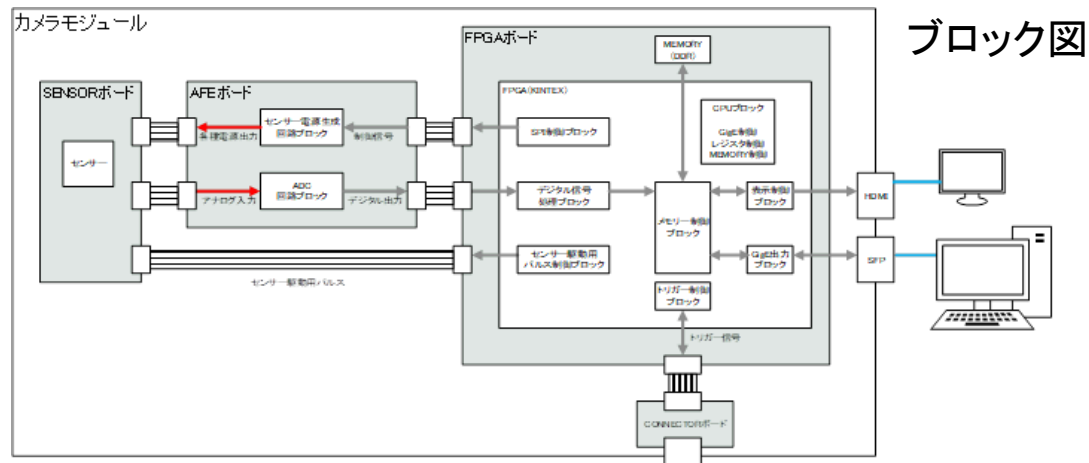
研究開発実績

研究項目	目標	成果
②小型分光イメージングデバイスの開発	<ul style="list-style-type: none"> 小型分光イメージングデバイスのプロトタイプ 	<ul style="list-style-type: none"> 半導体製造チャンバに取り付け可能とする最高10Gbpsの通信レートに対応したイメージングモジュールと、EtherCAT通信に対応した制御システムを構築した。

カメラモジュール概要
 サイズ: W124 × D210 × H105
 通信IF: 1G/10G GigEVision
 FPGA, 3ペア差動信号ADC搭載
 レンズマウント: Cマウント



外観写真



オキシドール滴下の紫外吸光イメージング

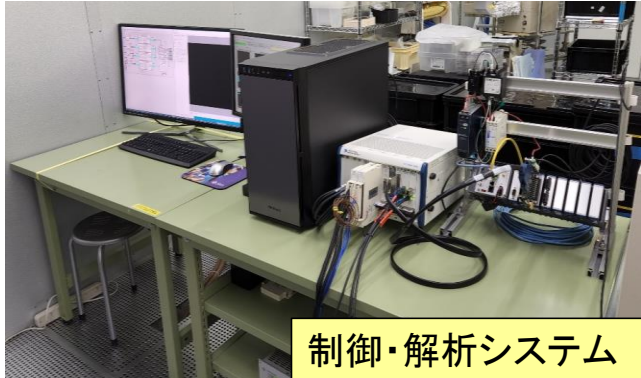
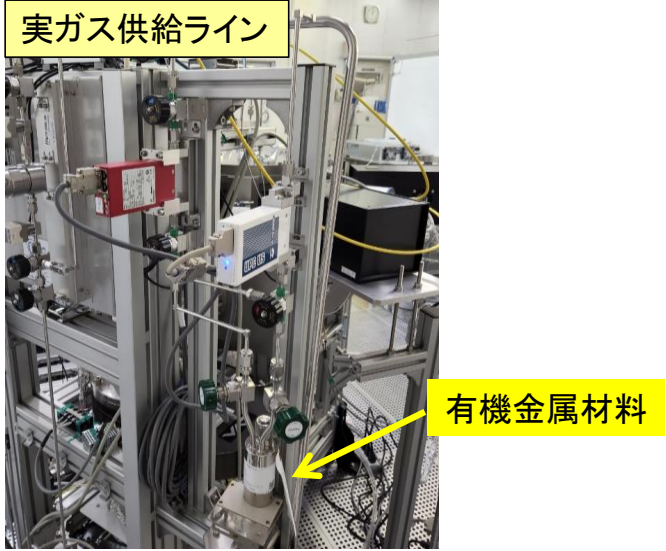
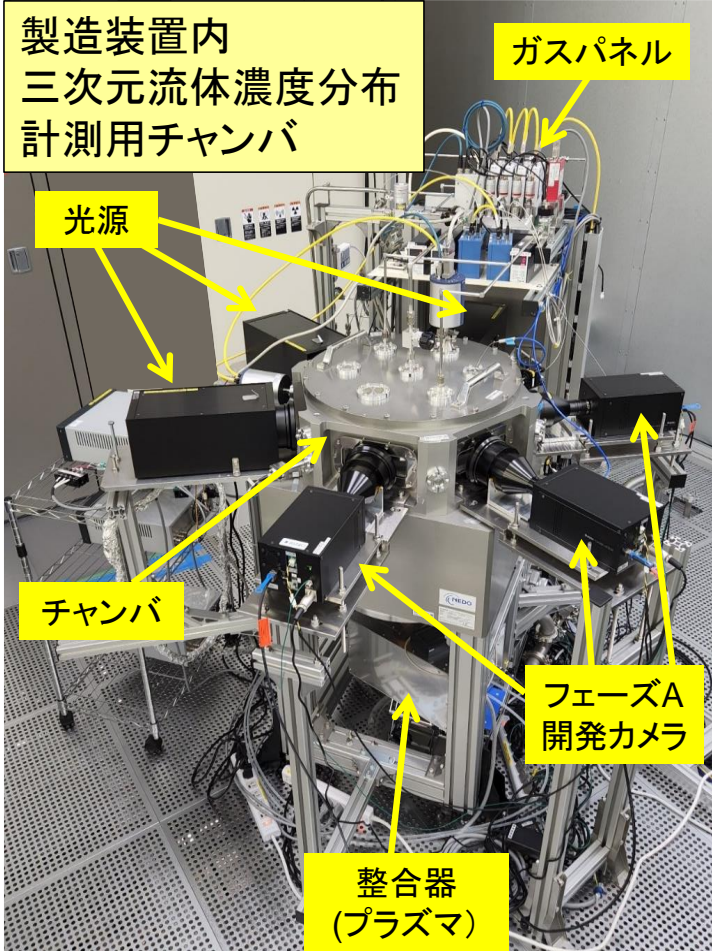
研究開発実績

研究項目	目標	成果
②小型分光イメージングデバイスの開発	・小型分光イメージングデバイスのプロトタイプ	・プロトタイプ撮像素子と同期して駆動する光源モジュールを開発し、その動作を確認した。また、多波長光源モジュールのmsecオーダの時分割発行切り替え動作を確認した。さらに、バンドパスフィルターを用いたプラズマ撮像を可能とした。

	三次元用	実ガス用
波長	405nm	265nm, 280nm
光源	405nmLED	265、280nm。LEDは同期して1ms毎に切り替え
出射光	平行光	集光／並行光
光の形状	Φ45.6mm以上	Φ23mm
レンズ	テレセントリックレンズ	25mmレンズ／UVテレセントリックレンズ
多軸	3軸(3セット)	1軸

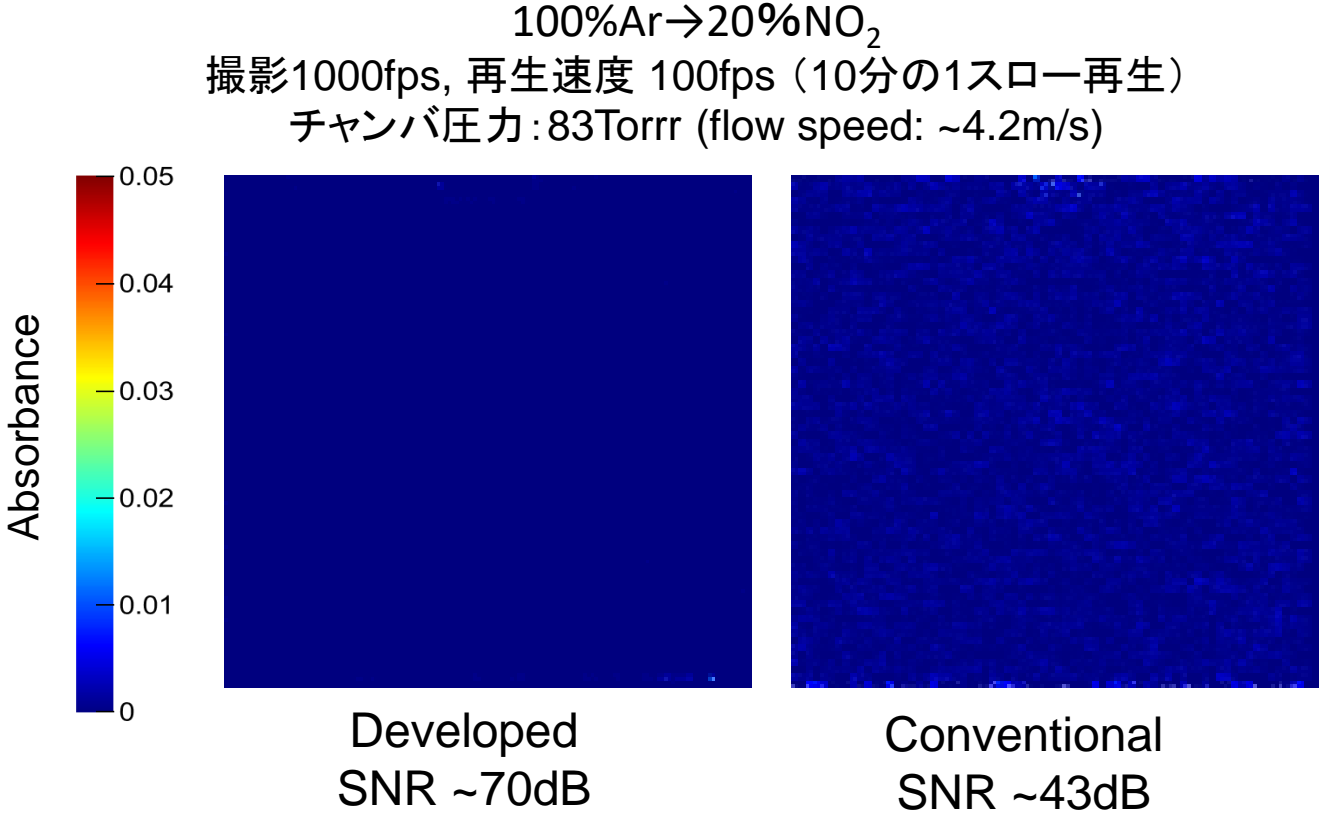
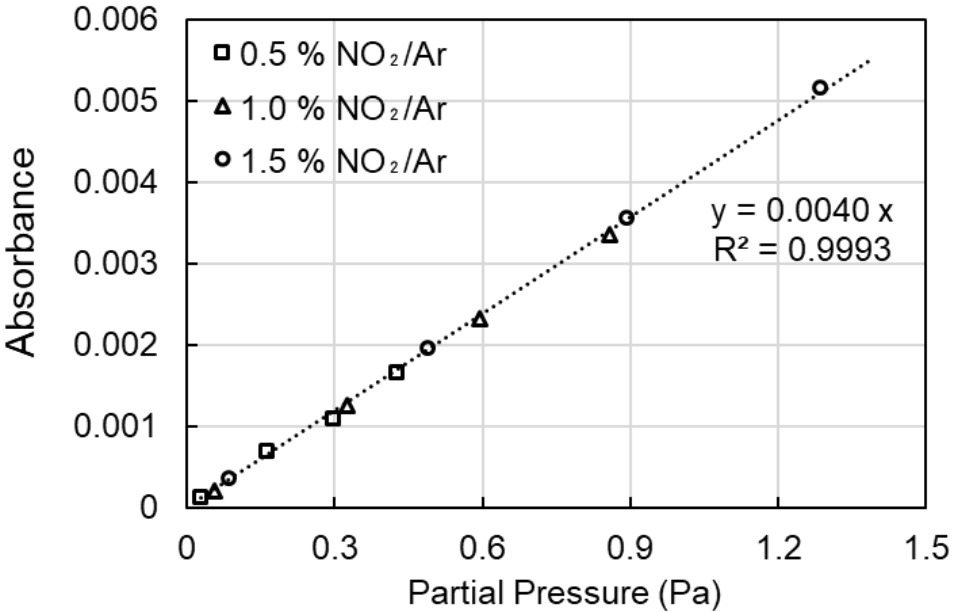
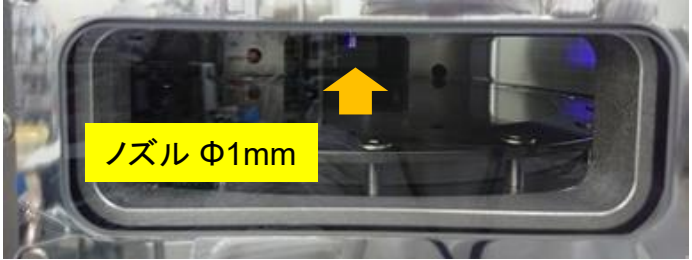
研究開発実績

研究項目	目標	成果
③製造装置内流体濃度分布計測の実証	<ul style="list-style-type: none"> 半導体製造装置内ガス・薬液濃度分布可視化実証 	<ul style="list-style-type: none"> 光源モジュール及びイメージングモジュールを試験チャンバ及び薬液層に取り付けて吸光撮像およびプラズマ撮像を達成した。また、3軸方向から同時に撮像し、3次元分布を計算するための撮像データを取得した。



研究開発実績

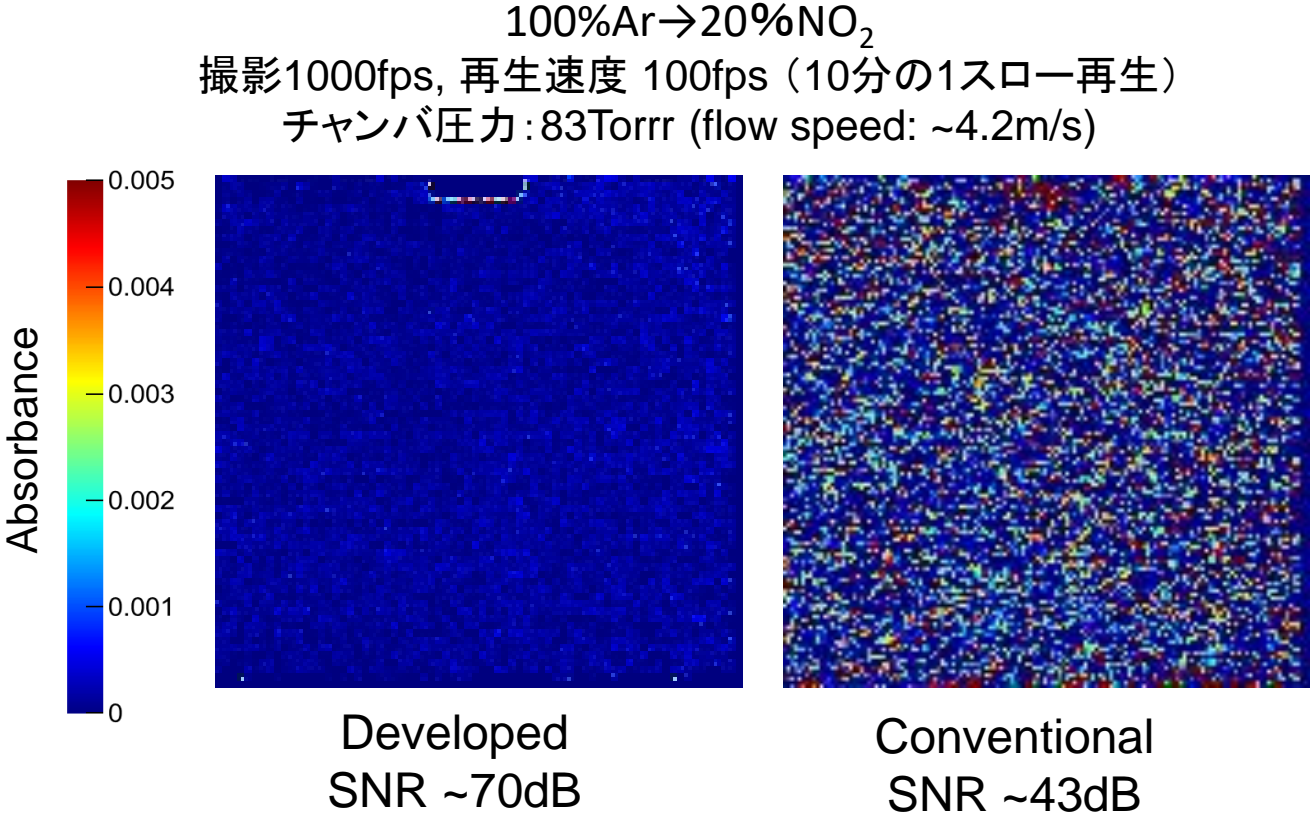
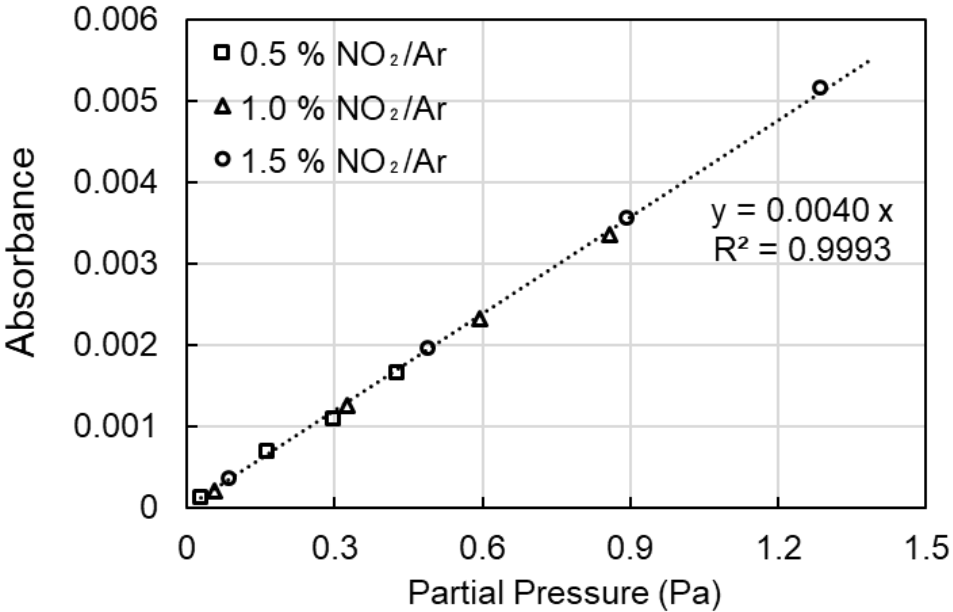
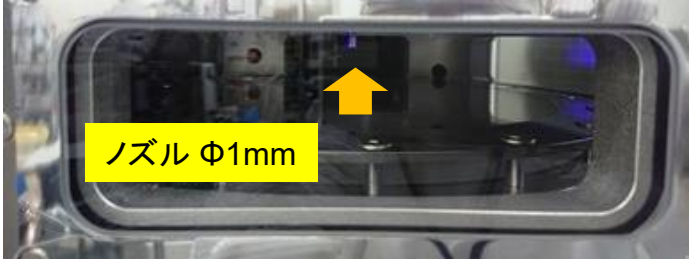
研究項目	目標	成果
③製造装置内流体濃度分布計測の実証	<ul style="list-style-type: none"> 半導体製造装置内ガス・薬液濃度分布可視化実証 	<ul style="list-style-type: none"> 取得された2次元画像から2次元ガス濃度分布を可視化するためのデータ解析フローを構築した。さらに、3軸の撮像結果から3次元ガス濃度分布を行うための逆投影計算及び可視化を実証した。



シャワープレートからの吹出流速の見積もり(133 Pa)
 (穴径Φ1mm、穴長さ1mm、穴个数4218個)
 1000sccm → 0.2730 sccm/個, 4.2 m/s(4.2mm/ms)

研究開発実績

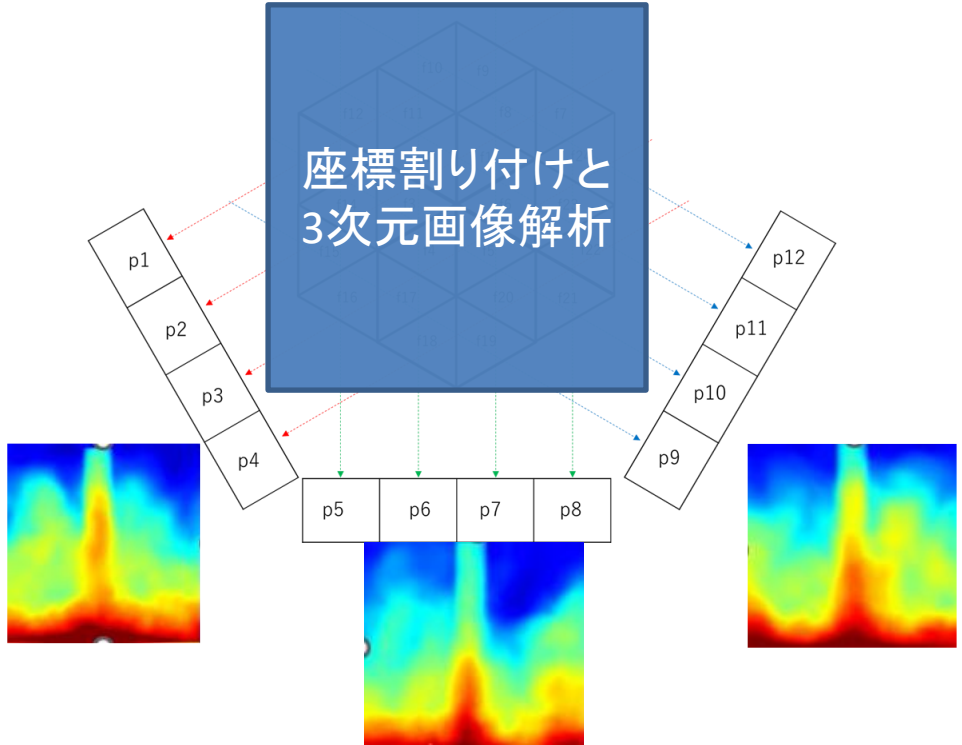
研究項目	目標	成果
③製造装置内流体濃度分布計測の実証	<ul style="list-style-type: none"> 半導体製造装置内ガス・薬液濃度分布可視化実証 	<ul style="list-style-type: none"> 取得された2次元画像から2次元ガス濃度分布を可視化するためのデータ解析フローを構築した。さらに、3軸の撮像結果から3次元ガス濃度分布を行うための逆投影計算及び可視化を実証した。



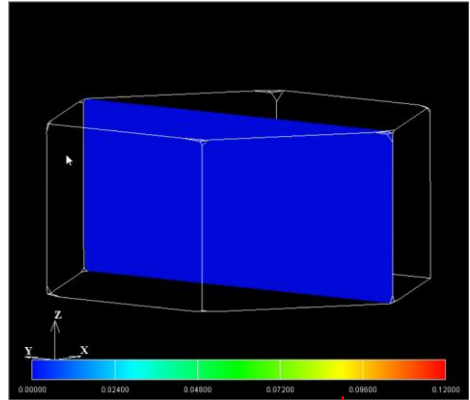
シャワープレートからの吹出流速の見積もり(133 Pa)
 (穴径Φ1mm、穴長さ1mm、穴个数4218個)
 1000sccm → 0.2730 sccm/個, 4.2 m/s(4.2mm/ms)

研究開発実績

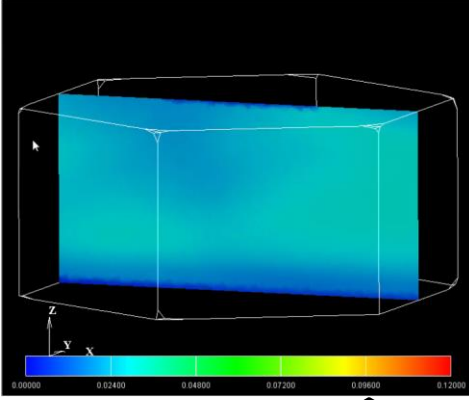
研究項目	目標	成果
③製造装置内流体濃度分布計測の実証	<ul style="list-style-type: none"> 半導体製造装置内ガス・薬液濃度分布可視化実証 	<ul style="list-style-type: none"> 取得された2次元画像から2次元ガス濃度分布を可視化するためのデータ解析フローを構築した。さらに、3軸の撮像結果から3次元ガス濃度分布を行うための逆投影計算及び可視化を実証した。



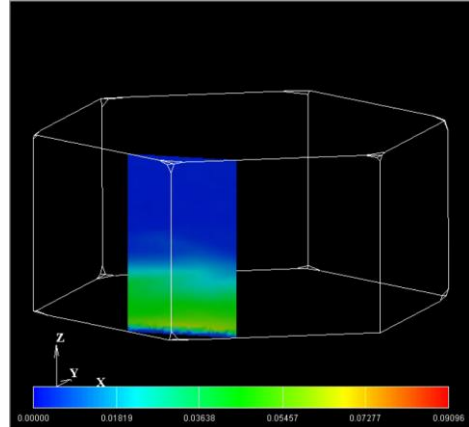
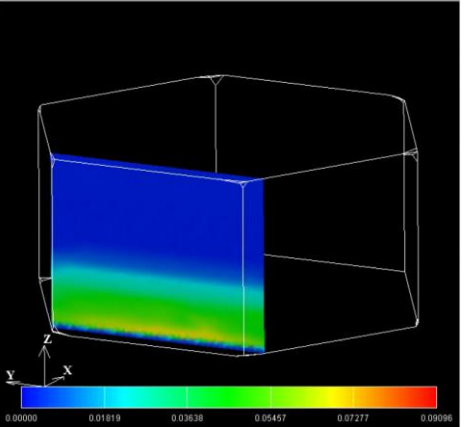
逆投影模式図



$x=0$



$y=0$



研究開発実績

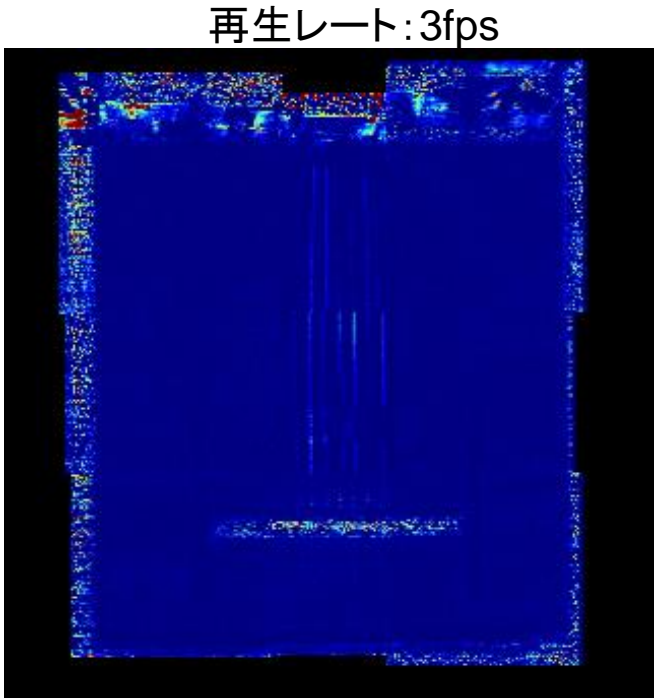
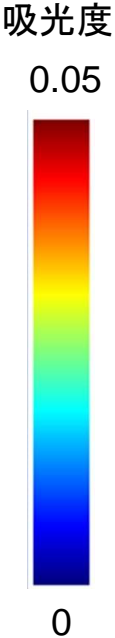
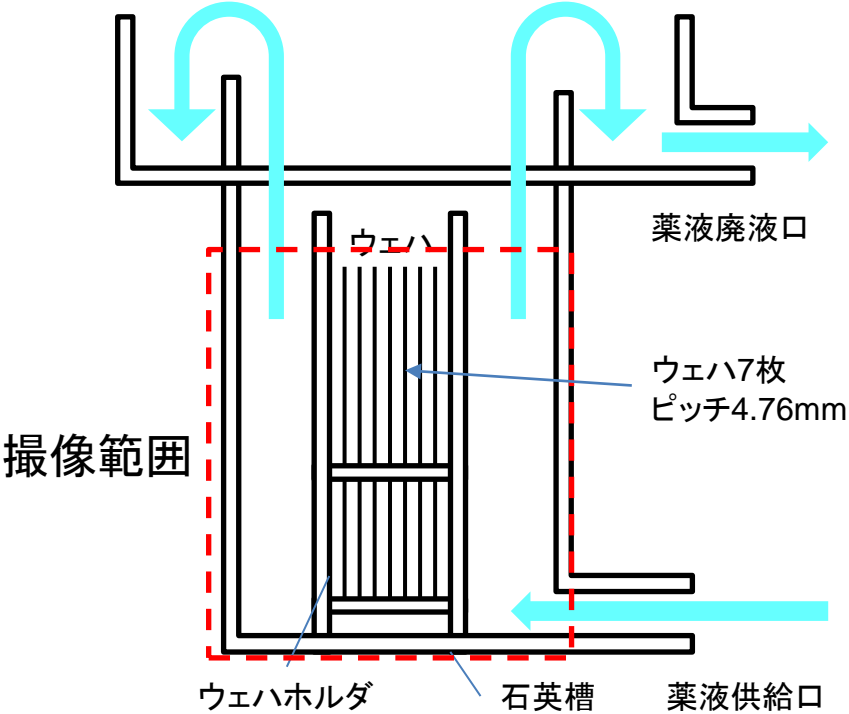
研究項目	目標	成果
③製造装置内流体濃度分布計測の実証	<ul style="list-style-type: none"> 半導体製造装置内ガス・薬液濃度分布可視化実証 	<ul style="list-style-type: none"> 取得された2次元画像から2次元ガス濃度分布を可視化するためのデータ解析フローを構築した。さらに、3軸の撮像結果から3次元ガス濃度分布を行うための逆投影計算及び可視化を実証した。

【実験方法】

石英槽に供給する液をUPW(オーバーフロー)から0.31% H_2O_2 に切り替え
 石英槽上部からオーバーフローして廃液

【撮像条件】

260nm面光源、UVC12mmレンズ
 フィルターなし、拡散板あり
 フレームレート:2.6fps



成果のまとめ

研究項目	目標	成果
①高速・高SNR撮像素子の開発	<ul style="list-style-type: none"> 画素数1万超・SNR70dB超・撮像速度1,000枚／秒のグローバルシャッタCMOSイメージセンサ 	<ul style="list-style-type: none"> 画素数19600のイメージセンサの設計・試作を完了し、最高SNR70dB、1000枚／秒のグローバルシャッタ動作を達成
②小型分光イメージングデバイスの開発	<ul style="list-style-type: none"> 小型分光イメージングデバイスのプロトタイプ 	<ul style="list-style-type: none"> 半導体製造チャンバに取り付け可能とする最高10Gbpsの通信レートに対応したイメージングモジュールと、EtherCAT通信に対応した制御システムを構築した。 プロトタイプ撮像素子と同期して駆動する光源モジュールを開発し、その動作を確認した。また、多波長光源モジュールのmsecオーダの時分割発行切り替え動作を確認した。さらに、バンドパスフィルターを用いたプラズマ撮像を可能とした。
③製造装置内流体濃度分布計測の実証	<ul style="list-style-type: none"> 半導体製造装置内ガス・薬液濃度分布可視化実証 	<ul style="list-style-type: none"> 光源モジュール及びイメージングモジュールを試験チャンバ及び薬液層に取り付けて吸光撮像およびプラズマ撮像を達成した。また、3軸の撮像を行った。 取得された2次元画像から2次元ガス濃度分布を可視化するためのデータ解析フローを構築した。さらに、3軸の撮像結果から3次元ガス濃度分布を行うための逆投影計算及び可視化を実証した。

まとめ・今後の展望

・フェーズAの委託事業によって、高精度・高速を撮像特性を有する撮像素子を基盤としたイメージングデバイスを創出し、半導体製造装置を模したガス・液体濃度分布の高精度・高速なその場計測を実証しました。

・フェーズBにおいてはさらに実用的な撮像素子、システム開発を推進し、半導体製造装置のみならず、農業・畜産業、環境消毒、滅菌、ヘルスケア等の多分野で高付加価値生産、完全自動化生産、非侵襲・非破壊計測を可能とするセンシングデバイスとデータ活用技術を産業界に提供します。