

ERATO「美濃島知的光シンセサイザ」プロジェクト

追跡調査概要

本プロジェクトは「光周波数の物差し」で知られる光周波数コム(櫛)の基本原理と従来提案された多くの応用への実用化技術との間に横たわる大きなギャップを埋める多くの斬新な技術を創出するとともに、それによって新たな応用領域を開拓することを目標とした。

本プロジェクト終了後、科研費基盤研究(S)等の競争的研究資金等を得て、研究成果をさらに継続・展開させている。

プロジェクト終了後の発表論文は90報(期間中は334報)、特許出願は国内14件(同23件)、海外5件(同12件)、特許登録は国内3件(同20件)、海外0件(同4件)、受賞(研究総括のみ)は5件(同6件)であった。

特に注目すべき研究成果として、(i)実用化を目指した光源の開発、(ii)瞬時無走査3次元イメージング応用、(iii)高機能デュアルコム分光応用、(iv)デュアルコム光源を用いた蛍光寿命顕微鏡/バイオセンシング応用、(v)Kerr マイクロコムを用いた THz 通信応用、(vi)世界標準を目指す不確かさ 10^{-18} の超精密フェムト秒光コム開発、(vii)広帯域可視域アストロ(天文)コム開発などが挙げられる。

以上

国立研究開発法人 科学技術振興機構
戦略的創造研究推進事業
ERATO
追跡調査報告書

「美濃島知的光シンセサイザ」
プロジェクト
(2013.10～2020.3)

研究総括： 美濃島 薫

2025 年 2 月

目次

要旨	1
プロジェクトの展開状況および波及効果(まとめ図)	2
第 1 章 プロジェクトの概要	3
1.1 研究期間	3
1.2 プロジェクトのねらい	3
1.3 研究体制	3
1.4 プロジェクト終了時点での研究成果	4
第 2 章 プロジェクト終了から現在に至る状況	7
2.1 追跡調査について	7
2.1.1 調査方法	7
2.2 プロジェクトの終了後の状況に関する基礎データ	8
2.2.1 競争的研究資金の獲得状況	8
2.2.2 論文の発表状況	9
2.2.3 特許の出願・公開・登録状況	9
2.2.4 受賞状況	10
2.2.5 スタートアップの設立状況	11
2.3 プロジェクト終了後の発展状況	11
2.3.1 知的時空間統合化グループ(電気通信大学)の発展状況	11
2.3.2 テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ(徳島大学)の発展状況	26
2.3.3 周波数極限化グループ(産業技術総合研究所)の発展状況	30
2.4 プロジェクト参加研究者の活動状況	32
2.5 第 2 章のまとめ	33
第 3 章 プロジェクト成果の波及と展望	34
3.1 科学技術や社会・経済への波及と展望	34
3.1.1 新規な理論や概念の提唱	34
3.1.2 新たな研究領域や研究の潮流の形成	36
3.1.3 国際共同研究の展開	38
3.1.4 基礎科学分野～精密周波数計測～への展開	39
3.1.5 学術分野への貢献	39
3.1.6 社会への貢献	40
3.1.7 世界の光コムの市場と展望	44
3.2 科学技術および社会経済への波及のまとめと展望	46

要旨

本報告書は、国立研究開発法人科学技術振興機構 (JST) の戦略的創造研究推進事業ERATOの研究領域「美濃島知的光シンセサイザ」プロジェクト(研究代表者：美濃島薫、2013年度～2019年度)において、研究終了後一定期間を経過した後、副次的効果を含めて研究成果の発展状況や活用状況等を明らかにし、JST事業および事業運営の改善等に資するために、追跡調査を実施した結果をまとめたものである。

本 ERATO の研究領域の目標は、「光周波数の物差し」で知られる光周波数コム(櫛)の基本原理と従来提案された多くの応用への実用化技術との間に横たわる大きなギャップを埋める多くの斬新な技術を創出するとともに、それによって新たな応用領域を開拓することにある。このため「知的光シンセサイザの開発」と「革新的応用の開拓」の2大柱のもとで、3大技術:知的時空間統合化技術(電気通信大学)、周波数極限化技術(産業技術総合研究所)、テラヘルツ・広帯域スペクトル操作技術(徳島大学)の研究開発が3グループでなされた。

プロジェクト終了後もこれらの研究課題は継続・展開された。特に光コムを2台併設したデュアルコム技術を再定義し、周波数軸の4つのフリーパラメータの精密制御により、時間軸上で現れる超精密なコヒーレント制御性に着眼し、特に分光などで周波数・モード・時間操作および波形・多重性制御の卓越した特性を生かし、多岐にわたって応用研究が行われた。具体的な成果は、(i)実用化を目指した光源の開発、(ii)瞬时无走査3次元イメージング応用、(iii)高機能デュアルコム分光応用、(iv)デュアルコム光源を用いた蛍光寿命顕微鏡/バイオセンシング応用、(v)Kerr マイクロコムを用いた THz 通信応用、(vi)世界標準を目指す不確かさ 10^{-18} の超精密フェムト秒光コム開発、(vii)広帯域可視域アストロ(天文)コム開発など、宇宙/科学技術、医療/バイオ応用、次世代移動通信など多分野にわたる。

プロジェクト終了後の、本研究領域の成果の発展論文は90報(期間中発表論文は334報)、特許出願は国内14件(同23件)、海外5件(同12件)、特許登録は国内3件(同20件)、海外0件(同4件)、受賞(研究総括のみ)は5件(同6件)であった。

プロジェクト終了後に獲得した主な研究助成金プロジェクト事業は、JSTさきがけ研究(2020年度～2022年度)、科研費基盤研究(B)(2021年度～2023年度)、科研費基盤研究(S)(2021年度～2025年度)、科研費基盤研究(B)(2023年度～2025年度)、JSTさきがけ研究(2024年度～)である。

プロジェクトの展開状況および波及効果(まとめ図)

戦略目標、達成目標/プロジェクトの目標(わらい)	インプット	アクティビティ/アウトプット	アウトカム (short/mid-term)		アウトカム (long-term)/インパクト																																										
			～進捗調査時点	今後予想される展開																																											
<p>目的・目標</p> <p>戦略目標: 情報デバイスの超低消費電力化や多機能化の実現に向けた、素材技術・デバイス技術・ナノシステム最適化技術等の融合による革新的基盤技術の創成。</p> <p>プロジェクトのわらい: 「知的光シンセサイザ」の開発: 光コムを用いてエレクトロニクスと光の融合による光の全パラメータ(時間/空間/周波数/位相/強度/偏光)の自在な制御/操作を可能にする。</p> <p>「革新的応用」の開拓: 先端科学から社会応用の様々な分野で、従来相容れない超高速性と超精密性、高精度性と広範囲性の壁を打破して超広ダイナミックレンジと超広波長域がもたらす新規な応用を開拓する。</p> <p>プロジェクト終了後、更に重点化して ・瞬時3次元計測技術 ・デュアルコム新機能分光技術 ・光コム光源新技術のテーマで戦略目標の深掘りが図られている</p>	<p>研究体制</p> <p>美濃島 薫(電気通信大学 教授)</p> <p>グループ:GL</p> <p>① 知的時空間統合化グループ:美濃島 薫 ② 周波数極限化グループ:稲場 肇 ③ テラヘルツ広帯域スペクトル操作グループ:安井 武史</p>	<p>研究成果のまとめ</p> <p>論文投稿</p> <table border="1"> <tr> <td>① 成果論文数</td> <td>② 発展論文数</td> </tr> <tr> <td>334 (22)</td> <td>90 (4)</td> </tr> </table> <p>①の割合はTop10%以内論文数</p> <p>特許申請・登録</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">出願</th> <th colspan="2">期間中</th> <th rowspan="2">終了後</th> </tr> <tr> <th>国内</th> <th>海外</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>出願</td> <td>23</td> <td>12</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>登録</td> <td>20</td> <td>4</td> <td>3</td> </tr> </tbody> </table> <p>受賞(研究総括)</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>賞の名称</th> <th>受賞年</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>科学技術への顕著な貢献</td> <td>2013</td> </tr> <tr> <td>応用物理学会フェロー表彰</td> <td>2014</td> </tr> <tr> <td>The Optical Society (OSA) Fellows Awards</td> <td>2015</td> </tr> <tr> <td>中国科学院光电研究院(AOE) 荣誉證書</td> <td>2016</td> </tr> <tr> <td>レーザー学会上級会員</td> <td>2017</td> </tr> <tr> <td>MIT Hermann Anton Haus Lecturer</td> <td>2019</td> </tr> <tr> <td>泰山賞 レーザー進歩賞</td> <td>2021</td> </tr> <tr> <td>レーザー学会 フェロー表彰</td> <td>2021</td> </tr> <tr> <td>光工学業績賞(高野第一賞)</td> <td>2023</td> </tr> <tr> <td>SPIE Senior member</td> <td>2024</td> </tr> <tr> <td>SPIE Fellow</td> <td>2025</td> </tr> </tbody> </table>	① 成果論文数	② 発展論文数	334 (22)	90 (4)	出願	期間中		終了後	国内	海外	出願	23	12	14	登録	20	4	3	賞の名称	受賞年	科学技術への顕著な貢献	2013	応用物理学会フェロー表彰	2014	The Optical Society (OSA) Fellows Awards	2015	中国科学院光电研究院(AOE) 荣誉證書	2016	レーザー学会上級会員	2017	MIT Hermann Anton Haus Lecturer	2019	泰山賞 レーザー進歩賞	2021	レーザー学会 フェロー表彰	2021	光工学業績賞(高野第一賞)	2023	SPIE Senior member	2024	SPIE Fellow	2025	<p>終了後を含む本プロジェクトの成果(要約)</p> <p>言字は終了後の発展成果</p> <p>瞬時無走査3次元(3D)イメージング法の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・チャープ/非チャープパルス光コムのスペクトル干渉を用いた新手法がプロジェクトで開発された。しかし、回折格子(1D分光器)を用いた検出手法では、3D情報の同時検出が困難であった。 ・これに対し、2種の光コム周波数の巧みな制御に基づく全光ヒルベルト変換/光演算手法の新原理で課題を解決。パッケージ化モジュールの3Dイメージングを確認。 ・デッドゾーンフリー3Dイメージングを実現。 ・超高速現象の可視化を達成。 ・ハイパー・スペクトル・イメージングを実現。 ・光コムOPAによる空間波形操作に成功。 <p>新コヒーレント制御デュアルコムの開発と新分野の開拓</p> <ul style="list-style-type: none"> ・従来型デュアルコム(DC)に対し、4パラメータを多彩に制御して、高コヒーレント制御パルス列を実現(新DC)。これにより周波数/モード/時間操作に多種の優れた特性を創出して新たな研究領域・潮流を形成。 ・新DCにより、固体材料の磁気/電気光学効果の評価、偏光スイッチおよび円二色性分光の実現、光コムへの適用による時空間位相の制御、など新たな応用を開拓。 ・中赤外広帯域・新DCの開発による実用ガス(N₂O)分析への応用に成功 ・従来型DCで蛍光寿命顕微鏡(44,400ピクセル)を開発、迅速/高感度バイオ検出(新型コロナウイルス)に成功。 <p>光コム光源新技術の開発</p> <p>[実用化光源]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・機械共有型DC光源を開発 ・実用的な小型簡易型中赤外広帯域DC光源を開発 ・Kerrマイクロ(μ)ソリトンコムでTHz通信に成功 <p>[極限化光源]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・10MHz-光周波数リンク超精密光周波数計測を達成 ・30GHzモード間隔/可視広帯域アストロコムを開発 <p>プロジェクト終了後の競争的研究資金の展開</p> <ul style="list-style-type: none"> ・2020~2022:加藤 JSTさきがけ研究 ・2021~2023:浅原 科研費基盤研究(B) ・2021~2025:美濃島 科研費基盤研究(S) ・2023~2025:加藤 科研費基盤研究(B) ・2024~ :浅原 JSTさきがけ研究 	<p>科学技術的な展望</p> <p>イメージング・センシング・産業計測に応用展開</p> <p>広範囲/高速/高精度な性能を備えた高度3次元計測技術が実現。 具体的事例: ・大型物体形状/構造の超精密計測、センシング/LiDAR ・材料変形/加工状態の瞬時計測 ・微細構造の形状/表面計測 ・細胞の形状観察/解析 etc</p> <p>医療/バイオ/環境/物質材料分光/次世代光・THz通信に応用展開</p> <p>新DCの活用で高精度/高分解能/広帯域分光の応用が大幅に拡大。 具体的事例: ・多種材料(磁性/誘電体/複素屈折率/旋光性/メタマテリアル) ・超高速現象(単一光子時間分解) ・多次元分光(光コムで光格子の回転操作/光ピンセット効果) ・蛍光寿命顕微鏡の新規応用(生命現象/機能解析の迅速化、新型コロナウイルスの大量自動検査) ・広帯域中赤外コムによる実用ガス分析(環境負荷低減) ・THzコム無線通信(片方のコムに通信信号、周波数の限界打破)</p> <p>実用化/極限化光源に応用展開</p> <p>[実用化光源]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実用型機械共有DC光源(小型/低価格/環境安定) ・μ共振器ソリトンコム光源(超小型化、応用拡大を牽引) <p>[極限化光源]</p> <ul style="list-style-type: none"> ・超精密光コム(不確かさ10⁻¹⁸で「秒」の世界標準候補に期待) ・アストロコム(天文観測の精度向上に大幅貢献) 	<p>科学技術的および社会・経済的な波及効果</p> <p>光コムの潜在力</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ヘテロな多次元物理量(時間/空間/周波数/強度/偏光/パターン)をコヒーレントにリンク。 ・都合の良い軸で測定/操作できる知的光シンセサイザ。 <p>究極の光コム機能集積システムの実現</p> <p>分光/分析/評価の従来システムでは目的に固有の機能/構成が必要。 これに対し光コムシステムでは、機能集積化光源と、光応答の直接取得に基づく分光/分析/評価技術との合体により、計測の精密制御/自在操作一体型の革新的機能集積化システムの構築が期待される。特徴と具体的応用分野は以下の通り。</p> <p>システムの特徴</p> <ul style="list-style-type: none"> ・機能の一体化 ・マルチモーダル ・高精度な相関 ・時間短縮/操作性向上 ・超小型化 etc <p>システムの応用分野</p> <p>電場波形/位相制御を活用した計測/分光の分野</p> <ul style="list-style-type: none"> ・瞬時無走査3D計測 ・DC利用高機能分光 ・偏光自在制御系 ・光コムシステム ・超高速単一光子検出 etc
① 成果論文数	② 発展論文数																																														
334 (22)	90 (4)																																														
出願	期間中		終了後																																												
	国内	海外																																													
出願	23	12	14																																												
登録	20	4	3																																												
賞の名称	受賞年																																														
科学技術への顕著な貢献	2013																																														
応用物理学会フェロー表彰	2014																																														
The Optical Society (OSA) Fellows Awards	2015																																														
中国科学院光电研究院(AOE) 荣誉證書	2016																																														
レーザー学会上級会員	2017																																														
MIT Hermann Anton Haus Lecturer	2019																																														
泰山賞 レーザー進歩賞	2021																																														
レーザー学会 フェロー表彰	2021																																														
光工学業績賞(高野第一賞)	2023																																														
SPIE Senior member	2024																																														
SPIE Fellow	2025																																														

第 1 章 プロジェクトの概要

本調査の対象である ERATO「美濃島知的光シンセサイザ」プロジェクト(以後、本プロジェクトと記載)の概要を下記に示す。

1.1 研究期間

本プロジェクトは 2013 年 10 月～2020 年 3 月に実施された。最後の 1 年(2019 年 4 月～2020 年 3 月)は特別重点期間として継続された。

1.2 プロジェクトのねらい

光コムは、時間軸では超短光パルス列、周波数軸では等間隔(櫛、すなわちコム状)に並ぶ多数の光周波数モード列であり、様々な色の CW(連続発振)レーザーが集まった光源と言える(図 1.1 を参照)。

光コムは、数 100THz 程度にも達するレーザー光周波数の絶対値を計測するために超短パルスレーザーをもとに開発され、精密な「周波数物差し」として 2005 年のノーベル物理学賞に輝いた。以後、マイクロ波から光波までの超広帯域電磁波領域のコヒーレントな繋がりを利用して、光周波数が利用可能な様々な分野を開拓してきた。研究総括の美濃島は、光コムの持つポテンシャルにいち早く注目し、光コムを高精度距離計測に適用したが、これは「周波数物差し」以外の応用では世界初であり、この分野の研究を牽引してきた。

本プロジェクトでは、光コムを、電気と光の融合により時間・空間・周波数・位相・強度・偏光など全ての光のパラメータの自在な制御・操作の手段、すなわち「知的光シンセサイザ」へと進化させるとともに、先端科学から社会応用に至る様々な未踏分野への「革新的応用の開拓」を目指した。ここでは、光コムをそれまでの「周波数物差し」を大きく超えて、光を自在に操ることが可能な光源とする新たな潮流の創出を目指した。こうして、従来の計測技術では相いれない超高速性と超精密性、高精度性と広範囲性の壁を払拭し、超広ダイナミックレンジと超広波長域がもたらす広範で新規な応用を開拓した。

「知的光シンセサイザ」の開発では、天文コムなど科学技術での利用を見据えた光コム周波数性能の極限的高度化と可視域への波長域拡大、光計測技術の高度化を見据えたパルス発振のモード間隔 10GHz 級の高繰り返し化、THz 領域での高精度 THz コム、およびこれらを支える光コム装置の堅牢・単純・小型化に加え、基盤的な光信号制御・処理技術、光コムの持つ優位な特性を活用する新しい技術の創出を目指した。一方「革新的応用の開拓」では、時空間イメージング、天文、物性/燃焼計測への応用の確立から開始し、画期的な応用分野の創出につなげることを目指した。特に時空間イメージング応用では、超短パルスの時間・空間・周波数の精密な融合による物体の瞬時 3 次元形計測の実現を目指した。また物性・燃焼計測応用では、光コムによる周波数絶対値が判別可能な狭線幅光源を用いた分子識別能力・検出感度の向上を目指したモード制御性の利用技術の開発を目指した。

1.3 研究体制

本プロジェクトでは以下の 3 グループ体制で相互に連携しながら研究を進めた。

- (1) 知的時空間統合化グループ(電気通信大学)
- (2) 周波数極限化グループ(産業技術総合研究所)
- (3) テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ(徳島大学)

これらの中核グループとともに、要素技術および応用・実装に重点を置いた研究は、4研究機関(慶應義塾大学、横浜国立大学、国立天文台、ネオアーク株式会社)に委託され、中核グループと連携した研究が実施された。

表 1-1 研究グループと人員および実施場所(2019年3月時点)

グループ名	知的時空間統合化グループ	周波数極限化グループ	テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ	ヘッドクォーター
実施場所	電気通信大学	産業技術総合研究所	徳島大学	電気通信大学
リーダー	美濃島 薫	稲場 肇	安井 武史	研究総括補佐(兼)研究員 中嶋 喜晶
研究員	7名	6名	8名	
技術員	0.25名	0名	0名	研究推進主任 大平 博之
研究補助員	0名	0名	0名	
リサーチアシスタント	14名	0名	5名	研究推進員 2.75名
研究協力員	2名	0名	0名	
研究推進員	0名	0名	0名	
計	24.25名	7名	14名	4.75名
総計	50名			

1.4 プロジェクト終了時点での研究成果

(1) 知的時空間統合化グループ(電気通信大学)の成果

本グループは、主として様々な応用に適した光コム光源、光コムの特性を十分に生かした利用技術、および新分野への応用開拓につなげる基礎技術の開発を行った。

光コム光源では、標準的光源であるモード同期ファイバーコムに対して、

- ・光通信波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯でGHzレベルの高繰り返し化
- ・波長 $1\mu\text{m}$ 帯で高繰り返し(750MHz)と高出力(10W)化

を行った。また、2台のモード同期レーザーを用いるデュアルコム光源については、繰り返し周波数 f_{rep} およびキャリアエンベロープオフセット周波数(以後単にオフセット周波数と記す) f_{ceo} が僅かに異なる2つのコム出力を共通のレーザー共振器から出力する新たな構成に着目し、

- ・共通な雑音の抑制
- ・コヒーレンス・安定性・品位の改良

により高度な実用化を図った。

図1. 1は光コム の時間軸および周波数軸の基本的描像を示す¹。

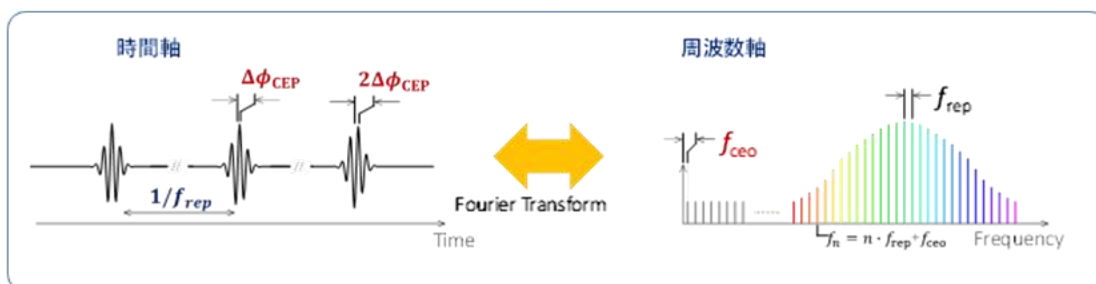


図1. 1 光コム の時間軸および周波数軸の描像と、繰り返し周波数 f_{rep} およびキャリアエンベロープオフセット周波数 f_{ceo} の定義¹。

更に、複数の光コム の同期制御・合成により光波のコヒーレンスを自在に制御・活用する新たなスキームを見出し、光源技術として、

- ・ 広帯域・高感度分光測定用の高速偏光変調光コム
- ・ 時空間位相制御型高性能光渦コム

を開発した。

一方、光コム の時間軸特性を生かした時間分解デュアルコム分光の開発では、

- ・ 様々な固体材料の複素光学特性を直接評価する固体物性研究への貢献
- ・ 磁気光学測定装置の製品開発

を行い、光コム 応用の社会実装に大きな一歩をもたらした。

また、チャープコム を利用したパルス間スペクトル干渉に基づく超高速で高精度の瞬時3次元形状測定法が開発され、精密段差形状測定や粗面/内部構造のイメージングに適用された。ここでは光コム の高精度な周波数・位相制御に基づくパルス内光電場波形制御を可能にする世界初の全光演算(光ヒルベルト変換)信号処理技術が提案されたが、本成果はプロジェクト終了後に、様々な新技術の提唱と共に瞬時無走査3次元イメージング技術として大きく成長している(2.3.1(1)を参照)。

(2) 周波数極限化グループ(産業技術総合研究所)の成果

本グループは、天文・分子科学・温度計測分野への光コム 適用を目指し、高繰り返し化・高安定化のための基礎技術による天文コム・高分解能デュアルコム分光を開発した。

天文コム の開発では、横浜国立大学・電気通信大学・国立天文台との連携により1~2号実機を国立天文台岡山天体物理観測所に設置し、高分解能分光器(HIDES-F)による天文コム のスペクトル評価や試験観測を行った。特に、可視波長変換を含むスペクトル広帯域化により世界最高レベルの広帯域天文コム を実現し、国内外の多くの天文台に大きな波及の可能性を示した。

¹ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p.68(2024年9月)。

高分解能デュアルコム分光による測定対象の拡大では、徳島大学、横浜国立大学、および慶應義塾大学と連携して、分子科学・ガスの精密温度測定などの研究に貢献した。

一方、光コムの要である繰り返し周波数 f_{rep} とオフセット周波数 f_{ceo} (図1.1)の新たな安定化制御技術の研究に取り組み、 f_{ceo} をゼロにするオフセットフリーコムや f_{rep}/N (N は整数)安定化などに新技術を創出した。こうした光コムの新たな安定化技術はいずれも独創的で、世界最高の周波数安定度を持つ光コムが実現され、世界標準に使われる可能性のある技術群として期待されている。

(3) テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ(徳島大学)の成果

本グループでは、光コムの波長域の拡大を目的として、テラヘルツ (THz) コムが開発され、新たな幅広い応用が展開された。これまでの光コムではモード間隔がマイクロ波帯(数10MHz)であるのに対し、THz コムでは数100GHzと大きく、超離散的なスペクトルを呈するため、緻密な分光が困難になる。この問題解決のため、モード同期周波数を走査してTHz コムモードを横ずらししながらスペクトル波形を逐次取得し、最終的に全てのスペクトルを重畳させることにより、THz コムモードの間隙部分を緻密に補完するギャップレス・デュアル THz コム分光法を開発した。またパルス列の極めて安定な時間周期性を離散フーリエ変換に取り込むことで、測定データを大幅に削減する高精度・離散フーリエ変換 THz 分光法を開発し、高分解分光技術としての有用性を実証した。さらに、コスト低減に貢献する非制御レーザーの利用が可能なアダプティブ・サンプリング式分光法を開発し、デュアル THz コム分光の実用化の促進に貢献した。

一方、広帯域スペクトル利用イメージングの研究では、走査が不要な共焦点・高位相コントラスト・デュアルコム顕微鏡を世界で初めて実現した²。これは入力光コムを波長/空間変換光学素子によって2次元のイメージ(振幅・位相)画素に変換(各々のモードと画素は1:1に対応)して試料に照射する。試料からのイメージ情報(反射・吸収・屈折率など)が反映された2次元イメージ画素は同じ波長/空間変換光学素子によって光コムモードに1:1に対応付けられる。これらはデュアルコム分光計測により、個々の画素に対応した振幅/位相の値が振幅/位相スペクトルとして得られる。光源・検出光はピンホールで共焦点化されている。さらに、デュアル光コムのビートと高密度周波数多重化イメージングの融合による蛍光デュアル光コム顕微鏡を実現し、蛍光強度/寿命の同時計測を可能にした。これにより生体分子の発光が蛍光寿命から分離可能となり、細胞の動態観察への道が開かれた。

これらの成果はいずれも新規性・革新性・簡便性を備えており、今後の実用化や新分野への展開に期待が高まっている。

² 徳島大学・電気通信大学・JST プレスリリース(2018年5月14日)

第 2 章 プロジェクト終了から現在に至る状況

2.1 追跡調査について

2.1.1 調査方法

調査は、文献調査(プロジェクト終了報告書、解説、原著論文など)、インターネットによる調査、各種データベースによる業績(論文・特許・受賞他)の調査からなる基礎データ調査と、プロジェクト関係者や外部有識者へのインタビュー調査を行った。

(1) 基礎データ調査の方法

研究総括(一部グループリーダーも含む)を基本的に対象とした。利用したデータベースと調査範囲等を下記に記す。

①競争的研究資金の獲得状況

データベースとしては、調査対象者の所属する研究室や本人の WEB サイト及び KAKEN 科学研究費助成事業データベース等の競争的研究資金に関する検索サイトと、補助的に Google 等の検索サイトを利用し、調査対象者(研究総括グループ)が当該研究助成金の研究代表者でかつ、競争的研究資金の総額が 1 千万円/件以上のものを抽出した。

②論文

プロジェクト期間中の成果論文は、以下 2 つのどちらかの条件に合うものをプロジェクト期間中の成果論文(①)と定義する。

- (a) プロジェクト終了報告書に成果論文としてリストアップされている論文および会議録(in press と表示されて終了後発表されたものを含む)。
- (b) 2013 年 10 月以降 2020 年 12 月までに研究総括が著者となっている論文であり、Scopus の項目の助成金もしくは、著者アドレスに当該 ERATO の記載のある論文。

プロジェクト終了後の論文は、プロジェクト終了年である 2020 年については成果論文(①)とマークされなかったもの、および 2021 年以降検索日時点までに発表された論文とし、「成果論文(①)」を引用しているものを発展論文(②)、それ以外を展開論文(③)に分類し、リスト化した。なお、本プロジェクトでは、プロジェクトの特性により、グループリーダーが終了後に発表した論文についてもプロジェクト終了後の論文として含めた。

データベースは、主としてエルゼビア社の Scopus を利用し、文献タイプは Book(Book chapter、Book review)、Editorial、Erratum を除く全文献タイプとした。

各論文についての評価の一つである FWCI(Field-Weighted Citation Impact)³、及び Journal の指標となる CiteScore についても収集した。

³ 1 文献あたりの被引用数を世界平均(年別・分野別・文献タイプ別に算出)で割った数値。

③特許の出願・登録状況

プロジェクト期間中の特許は、プロジェクト終了報告書の成果リスト記載の特許とした。本プロジェクト終了後の特許は2020年4月以降に出願され、かつプロジェクトメンバーが発明者の特許とし、データベースは、主にPatentSQUAREを利用し、補助的に特許情報プラットフォームとEspacenetを利用し、国内外の登録状況などを確認した。

④受賞

プロジェクト期間中、終了後の受賞を調査対象者(研究総括、グループリーダー)の所属する研究室や本人のWEBサイトの調査、Google等の検索サイトで調査を行い、研究総括に関する受賞のみをリストにした。

⑤スタートアップ

インターネット検索やスタートアップ情報の記載のあるDBを用いて検索し、研究総括及びグループリーダーに確認し、本プロジェクトとの関係をインタビューで確認した。

⑥参加研究者の動静

終了報告書を元にプロジェクト参加研究者を特定し、プロジェクト参加時の職位及び、終了時の職位、現在の職位の調査を行った。

(2) インタビュー調査の方法

インタビュー調査は研究総括及び、プロジェクトの主なメンバー数名に実施した。

2.2 プロジェクトの終了後の状況に関する基礎データ

2.2.1 競争的研究資金の獲得状況

電気通信大学の美濃島グループは、終了後、以下の競争的研究資金を獲得した。

2020年度～2022年度:加藤 JST さきがけ研究「光周波数コムによる光フェーズドアレイの開発」

2021年度～2023年度:浅原 科研費基盤研究(B)「光コム分光を駆使した光渦メタマテリアル物性の研究」

2021年度～2025年度:美濃島 科研費基盤研究(S)「光応答関数の直接取得に立脚する分光原理が拓く材料評価技術」

2023年度～2025年度:加藤 科研費基盤研究(B)「光周波数コムによる広帯域背景光除去手法と応用の開発」

2024年度～ :浅原 JST さきがけ研究「光コムを駆使した多機能な時空間コヒーレント分光技術の開拓」

2.2.2 論文の発表状況

成果論文および発展論文の全論文の Field-Weighted Outputs in Top Citation Percentiles⁴の論文数を表 2.1 に示す。

成果論文数は 334 報であり、Top10%はそのうち 22 報である。一方、発展論文数 90 報のうち 4 報が Top10%である。

表 2.1 本プロジェクトの論文投稿状況一覧

成果論文数	発展論文数	FWCI TOP0.01%以内		FWCI TOP0.1%以内		FWCI TOP1%以内		FWCI TOP10%以内		TOP10%圏外	
		成果論文	発展論文	成果論文	発展論文	成果論文	発展論文	成果論文	発展論文	成果論文	発展論文
334	90	0	0	0	0	2	1	22	4	312	86

検索日：2024年4月17日 更新日：2024年7月5日
指標取得日：2024年8月1日

(1) プロジェクト成果に直接関わる論文

プロジェクトの成果論文数は 334 報であり、22 報が FWCI TOP10%、22 報の中で 2 報が TOP1%の論文となっている。

(2) プロジェクト成果の発展、またはプロジェクトから波及した研究内容の文献

プロジェクト終了後に発表された発展論文数は 90 報であり、90 報のうち 4 報が FWCI TOP10%、1 報が TOP1%の論文となっている。研究終了後も順調に論文が投稿されていることが判る。

2.2.3 特許の出願・公開・登録状況

プロジェクトの期間中と終了後の調査時点に至るまでの特許出願状況を表 2.2 に示す。

表 2.2 本プロジェクトの特許出願状況一覧

	出願件数		登録件数	
	国内	海外 ⁵	国内	海外
プロジェクト期間中	23	12	20	4
プロジェクト終了後	14	5	3	0
合計	37	17	23	4

検索日：2024年4月26日 再検索日：2024年8月27日

(1) プロジェクト期間中に特許の出願した特許の登録状況

プロジェクト期間中の国内および海外特許の出願件数は各々23 件および 12 件である。国内、登録件数は各々20 件および 4 件である。

⁴ 出版年別の FWCI が世界全体の上位 X%に含まれる文献数/率 0.01%は、0.01%以内に含まれる論文の数を示し、0.1%は、0.01%より大きく、0.1%以内のものを示す。

⁵ 海外は国内出願に優先権主張をかけて、海外に出願した特許を示す。

(2) プロジェクト終了後に出願した特許

プロジェクト終了後、出願した 14 件の特許を、美濃島(電気通信大学)、稲場(産業技術総合研究所)、安井(徳島大学)の各グループごとに、出願番号・名称・出願日・PCT 出願の有無とともに下記に列記する。

- 1 特願 2023-543952「波面制御装置及び補償光学装置」2022.08.24 PCT 出願済
- 2 特願 PCT/JP2023/006392「光計測装置」2023.02.22 PCT 出願済
(以上美濃島グループ)
- 3 特願 2020-10693「光周波数掃引レーザ光源」2020.01.27 登録(権利有)
- 4 特願 2020-59885「光学測定装置、光学測定方法、及び光学測定プログラム」2020.03.30 登録(権利有)
- 5 特願 2020-110357「光周波数コム生成のための変調信号源、光周波数コム装置、変信号生成方法、及び光周波数コム生成方法」2020.06.26 登録(権利有)
(以上稲場グループ)
- 6 特願 2021-27937「分光偏光特性測定装置及び分光偏光特性測定方法」2021.02.24
- 7 特願 2021-128669「ファイバーセンシング装置」2021.08.05
- 8 特願 2022-5612「ファイバーセンシング装置」2022.01.18
- 9 特願 2022-82054「光電気変換装置」2022.05.19
- 10 特願 2022-82057「周波数多重無線伝送装置」2022.05.19
- 11 特願 2022-89430「表面プラズモン共鳴センサー」2022.06.01
- 12 特願 2022-115259「コヒーレント合成光電気変換装置」2022.07.20 PCT 出願済
- 13 特願 2022-134378「無線受信装置」2022.08.25 PCT 出願済
- 14 特願 2022-134397「無線受信装置」2022.08.25 PCT 出願済
(以上安井グループ)

※2020年1月～3月(プロジェクト期間中)に出願された特許でプロジェクト終了報告書の成果リストに含まれなかった特許(3件)については、プロジェクト関連のため終了後の特許として集計した。

2.2.4 受賞状況

美濃島の受賞に関しては添付資料「D.受賞リスト」にまとめた。

(1) プロジェクト期間中の受賞

プロジェクト期間中の美濃島の受賞は6件であった。受賞者・賞名・授賞機関(国)・受賞年を下記に列記する。

- 1 美濃島薫「科学技術への顕著な貢献(ナイスステップな研究者)」文部科学省 科学技術・学術政策研究所(2013年)

- 2 美濃島薫「応用物理学会フェロー表彰」応用物理学会(2014年)
- 3 Kaoru Minoshima「The Optical Society (OSA) Fellows Awards」アメリカ光学学会(OA)(2015年)
- 4 Kaoru Minoshima「中国科学院光電研究院(AOE) 榮譽証書」中国科学院光電研究院(AOE)(2016年)
- 5 美濃島薫「レーザー学会上級会員」レーザー学会(2017年)
- 6 Kaoru Minoshima「MIT Hermann Anton Haus Lecturer」MIT(2019年)

(2) プロジェクト終了後の受賞

プロジェクト終了後の美濃島の受賞は5件であった。受賞者・賞名・授賞機関(国)・受賞年を下記に列記する。

- 1 美濃島薫「泰山賞 レーザー進歩賞」公益財団法人レーザー技術総合研究所(2021年)
- 2 美濃島薫「レーザー学会 フェロー表彰」レーザー学会(2021年)
- 3 美濃島薫「光工学業績賞(高野榮一賞)」応用物理学会(2023年)
- 4 美濃島薫「Senior member」SPIE(2024年)
- 5 美濃島薫「SPIE Fellow」SPIE(2025年)

2.2.5 スタートアップの設立状況

本プロジェクトでは、研究成果をベースとしたスタートアップ企業は設立されなかった。

2.3 プロジェクト終了後の発展状況

2.3.1 知的時空間統合化グループ(電気通信大学)の発展状況

本プロジェクトでは、「知的光シンセサイザの開発」と「革新的応用の開拓」の2大柱のもとで、光コムの基本原則と応用を実現する実用化技術の間に横たわる大きなギャップを埋めるために、多くの斬新な成果を創出したが、プロジェクト終了後もこの思想は引き継がれ、(1)光コムの瞬時無走査3次元イメージングへの応用、(2)デュアルコムによる高機能分光への新規応用、(3)光コム光源の実用性拡大、の3大テーマのもとで、光コム実用化技術の更なる高度化を目指した。これらのテーマごとに具体的な研究成果を報告する。

(1) 光コムの瞬時無走査3次元イメージングへの応用

① 全光ヒルベルト変換を用いた瞬時無走査3次元イメージング⁶

⁶ T. Kato, H. Ishii, K. Terada, T. Morito, K. Minoshima, Fully non-scanning three-dimensional imaging using an alloptical Hilbert transform enabled by an optical frequency comb, arXiv:2006.07801 2020.

本プロジェクトで美濃島グループが開発した光コムによる瞬時3次元イメージング法は、図2.1に示すように、光コム発のチャープパルス列と参照用チャープフリーパルス列のスペクトル干渉を用いて距離情報を時間情報に、さらに波長情報に超高速で変換し、ビームやタイミングの走査なしに3次元形状を計測する手法である⁷。照射チャープパルスの反射光は対象物の3次元形状に応じた時間遅延を含み、これに依存して波長軸上で変化するスペクトル干渉パターンで、2パルスの重畳タイミングに対する波長が距離情報を与える。ここで、分光情報の取得に回折格子を用いた1次元分光器を導入すると、1次元空間情報を波長分散検出に使用するため、3次元情報の同時検出ができない欠点があった。

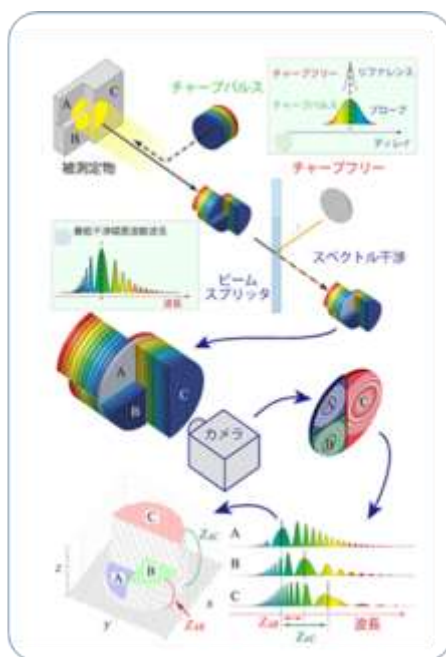


図 2.1 本プロジェクトで開発した瞬時 3 次元イメージング法の説明⁷。

美濃島グループの加藤らは本課題の解決のために、上記の回折格子による1次元分光器の代わりに、図2.2(a)に示すような全光ヒルベルト変換(AOHT)による光演算法を新たに開発し、高解像度を有する2次元分光にもとづく瞬時無走査3次元イメージ計測法を開発した⁸。本手法は新規な理論の提唱であるため、原理の骨子と技術的な意味合いを改めて3.1.1で詳述し、ここでは概要を説明する。本手法では、光コムの繰り返し周波数 f_{rep} とオフセット周波数 f_{ceo} の間に $f_{\text{rep}} = 4f_{\text{ceo}}$ なる関係を導入することで、パルス間位相差が 90° となる光パルス列を発生させる。これを2分岐して計測用干渉計を構成する。一方を参照光として、さらにこれを2分岐した後、一方のパルス列を1パルス分の遅延回路に経由させて安定な位相差パルス列対を生成する。これを参照パルス対として、各々とプローブ信号光との間で位相差スペクトル干渉像を生成する。これにより、画素ごとに直交位相をもつ干渉光波形信号を検出し光演算を行う。本過程が全光ヒルベルト変換法であり、本原理によって2次元分光器を実

⁷ 電気通信大学・JST プレスリリース(2017年6月16日)

⁸ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p.67(2024年9月)

現することで光画像素子と同等の高度な空間解像度を有する瞬時3次元形状計測を実現した。図2.2(b)は、本手法で取得したパッケージICモジュールの3次元イメージングの実証例である⁹。本手法は、大型から微小に至る静止/動的物体から内部構造に至る対象に対して無走査で3次元に計測できる極めて斬新な手段であり、今後の発展が期待される。

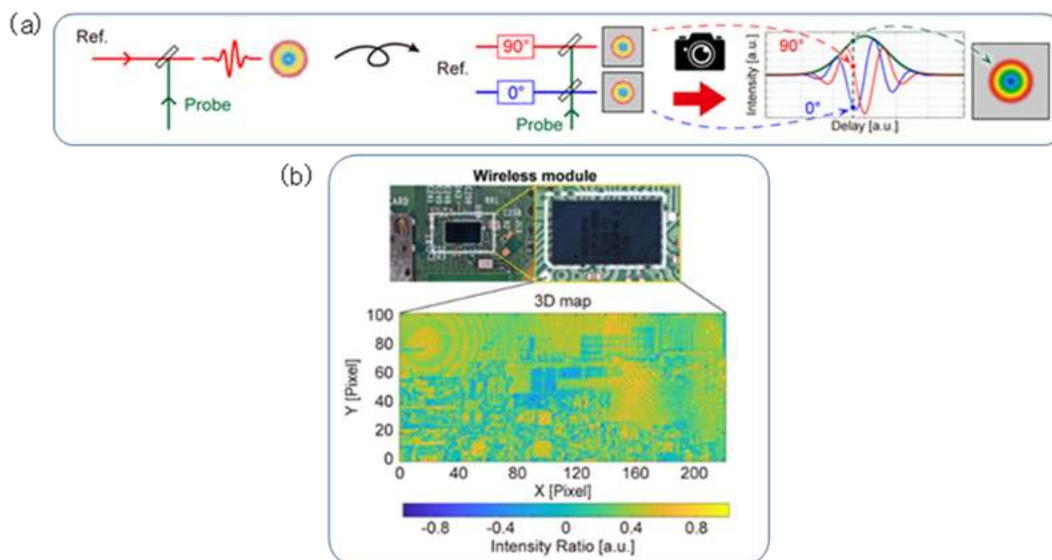


図 2.2 (a)全光ヒルベルト変換による瞬时无走査 3 次元イメージング法の原理⁸。(b)本手法で取得したパッケージ IC モジュールの 3 次元イメージングの実証例⁹。

② デッドゾーン・フリー瞬時 3 次元イメージング¹⁰

瞬時 3 次元イメージングに用いる標準的なモード同期レーザーでは、図 2.3(a)に示すようにパルス間隔が広い(例えば $f_{\text{rep}}=50\text{MHz}$ でパルス往復 3m)ため、参照用レーザーパルスによる光干渉スペクトルには干渉縞のデッドゾーンが生じる(左図)¹¹。このような光源で任意の大きさの対象に対し瞬時計測を実現するためには、用いるパルスは非常に大きなチャープを要し(右図)、波長の分解能で測定距離の分解能が制限される難点があった。美濃島グループの蔵田らは、この課題解決のために高繰り返し Yb ファイバーコムを導入し、図 2.3(b)のようにデッドゾーン・フリー(切れ目のない)パルス列を形成することで任意位置での高精度な瞬時 3 次元測定を実現し、瞬時測定範囲の拡大に成功した。本技術を用いて、2 段の段差(71.5mm および 199mm)を有する試料を用いた瞬時 3 次元イメージングを行った。その結果、本手法の原理に基づく入射・反射光パルス列が示す段差距離の測定結果は、事前に実測した結果と良好に一致し、本手法の有効性が確認された。

⁹ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p. 71(2024年9月)

¹⁰ S. Kurata, H. Ishii, K. Terada, T. Morito, H. Tian, T. Kato and K. Minoshima, Dead-zone free single-shot three-dimensional measurement using a high-repetition-rate Yb: fiber comb, Optics Continuum Vol.1, No. 11/15 Nov 2022.

¹¹ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p. 74(2024年9月)

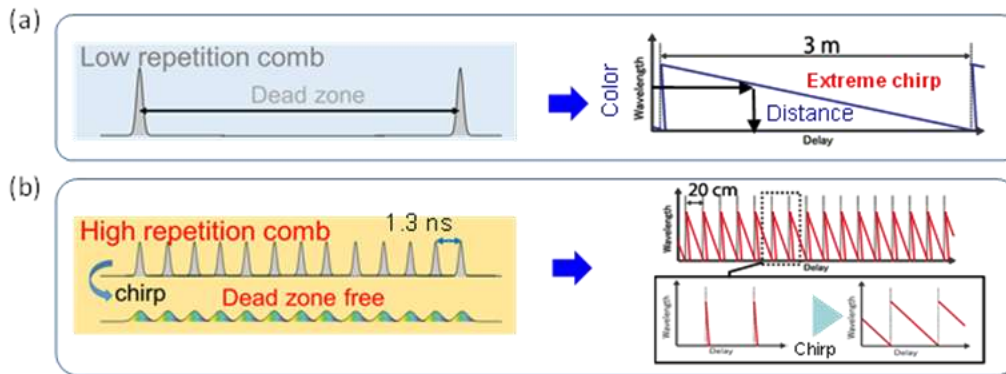


図2.3 (a)従来のデッドゾーンの大きなパルス列と大きなチャープ。(b)本方式によるデッドゾーン・フリーパルス列によるチャープの縮小化¹¹。

③ 超高速現象の可視化およびハイパースペクトル・イメージング^{12, 13}

美濃島グループの加藤らは、超短パルス(15ps)を用いた瞬时无走査 3 次元イメージング法を電気光学結晶 LiNbO_3 の動的特性の検出に用い、結晶中の超高速現象の可視化に成功した。図 2.4 の上部中央に示す LiNbO_3 結晶に電圧を印加した時、下部に示すように同結晶のピエゾ効果に基づく歪による衝撃波が結晶中を伝搬する¹⁴。

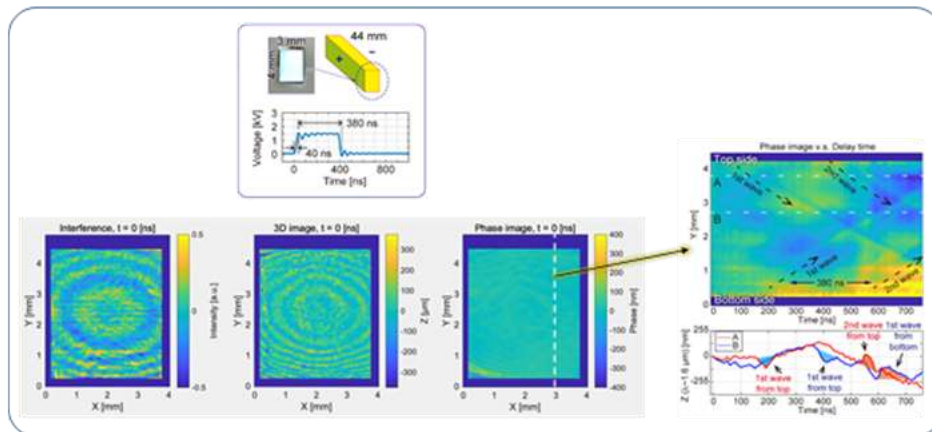


図 2.4 電圧印加によるピエゾ効果で LiNbO_3 結晶中に発生した歪の衝撃波の超高速伝搬を、瞬时无走査 3 次元イメージング法で可視化した実証例¹⁴。

この試料に光コムの発する超短パルスを照射することで、光コムの振幅強度と位相の 2 次元スペクトルを瞬時に取得し、超高速の過渡現象として発生したナノメートルレベルの歪

¹² T. Kato, T. Morito, K. Terada, S. Kurata, and K. Minoshima, Ultrafast phenomena induced in crystal by one-shot three dimensional imaging with optical frequency comb, CLEO Proceedings, JW1A.85, 2021.

¹³ T. Kato, T. Morito, Y. Nekoshima, and K. Minoshima, High-resolution hyperspectral imaging including amplitude and phase spectra using chirped optical frequency comb, CLEO Proceedings, SS1A.5, 2022.

¹⁴ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p.79(2024年9月)

を可視化できる。本結果は、ナノメートル級 3 次元構造に対して超高速現象の高精度な解析に新技術をもたらすものである。

加藤らはまた、瞬时无走査 3 次元イメージング法を用いて、高解像度のハイパースペクトル・イメージングを実現した¹³。ハイパースペクトル・イメージングとは、分光情報を持った画像を取得することで、人間の目では評価が困難な材料の物性の違いや見えない現象を可視化する技術である。本研究では、上述した様に、対象物の振幅および位相スペクトルの測定が可能な、位相が精密に制御された光コムを用いたチャープパルスの利用で、1.8nm の解像度と 100nm のスペクトル帯域でのハイパースペクトル・イメージングを実現した。

④ 光コムのフェーズドアレイ (OPA) による空間波形操作¹⁵

加藤らは、光コムによる超高速・広帯域な光フェーズドアレイ (OPA) を構築し、位相制御された超短パルス群による任意の波面発生技術の研究を行った。フェーズドアレイ (PA) は、アレイ状に配置したアンテナから位相制御した電波を出射し、その位相パターンで電波の伝搬方向を制御する技術である。

OPA は PA の光版であり、図 2.5(a) に示すように、光アンテナからの光波を利用する¹⁶。近年、中赤外～近赤外～青色領域で Si 導波路やフォトニック結晶の光集積回路を用い、LiDAR やプロジェクターへの応用研究が盛んに行われている。従来例では、結合効率が悪く、多数のパラメータ (アンテナ数の約 2 倍) の独立な制御を要し、単色光のみの利用のため広帯域化には回路規模と制御数が増大する、などの課題が指摘され、少ない制御で双方向に動作する広帯域 OPA の実現が望まれている。

本研究では、広帯域・超短パルス光を、電気的な光コムの共振器制御で位相制御することにより、光周波数で空間を直接制御するという新たな光技術の創出を目指している。図 2.5(b) の光コムの位相制御部 (左図) では、繰り返し周波数 f_{rep} とオフセット周波数 f_{ceo} 比の調整でパルス間の位相が設定できる。一方、マルチパスキャビティ (MPC) の光アンテナアレイ部 (右図) では、ミラー間での繰り返し反射でパルス列が円周状に形成され、各出射点が光アンテナとして機能する。本手法では、上記のパラメータ f_{rep} および f_{ceo} のみで波面が広帯域に制御できる。即ち、光の空間的波面を電子工学制御で自在に操作できる。実験では、3～5 個の光アンテナを用い、光コム周波数の制御で光ドットパターンの形成および環境からの揺らぎ制御によって広帯域の光ドットを走査し、本提案の動作を確認した。

本提案は、光周波数 (縦モード) で光波面 (横モード) を制御するという革新的な光技術であり、多光子励起顕微鏡、超精密 3 次元測量、超広帯域・高速補償光学系などへの応用を通じて、生命科学・物質材料分野・光通信分野などへの多様な展開が期待されている。

¹⁵ T. Kato and K. Minoshima, Optical phased array using phase-controlled optical frequency comb, arXiv:2405.03053 2024

¹⁶ 加藤峰士「光周波数コムによる光フェーズドアレイの開発」、電気通信大学・JST さきがけ、新技術説明会 (2022 年 5 月 10 日)

本研究は、2020 年度に加藤が JST さきがけ研究領域「革新的光科学技術を駆使した最先端科学の創出」における研究課題「光周波数コムによる光フェーズドアレイの開発」（グラント番号 JPMJPR2005)に採択されて実施されたものである。

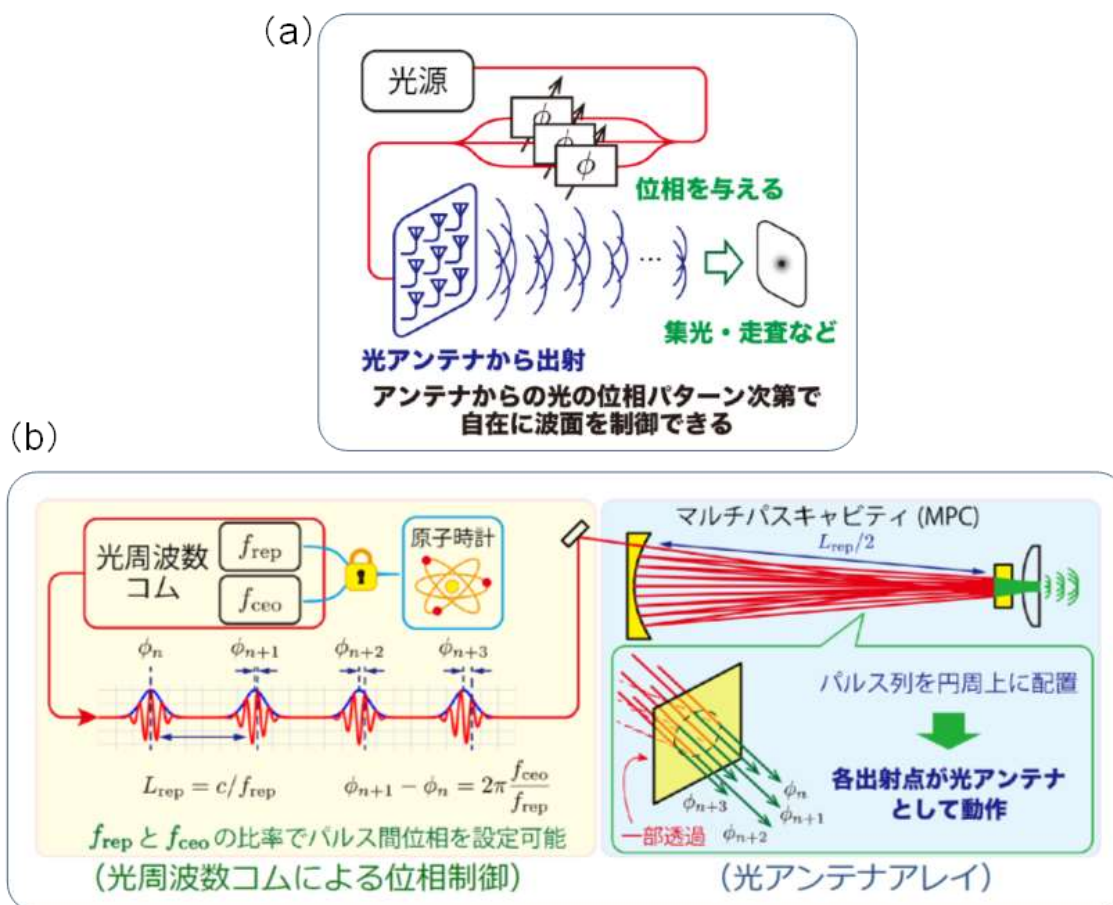


図 2.5 (a)OPA の概念図。(b)光コムを用いた OPA の原理と構成¹⁶。

(2) デュアルコムによる高機能分光への新規応用

光コムは、多数のパルスからなる列のコヒーレンスが 2 種のパラメータ f_{rep} および f_{ceo} のみで電氣的に制御可能な超短パルス光源である。デュアルコム(ここでは以後 DC と呼ぶ)は、図 2.6 に示すように、2 つの光コム(Comb1 および Comb2)の間で、 f_{rep} および f_{ceo} とその差に関わる周波数軸の 4 つのフリーパラメータを制御する事により、周波数軸ではモード分解可能な RF 周波数モード列が発生し、時間軸ではパルスの相対遅延および相対位相の操作に基づく多彩なコヒーレント制御が可能となる¹⁷。干渉縞の形成に光路長を変えるための機械ステージの走査を必要とする従来のフーリエ分光と異なり、DC 分光は f_{rep} に相対差を与えることにより、機械ステージの走査が不要であり、超高速パルス列の自動的な干渉作用により高速分光が可能である。さらに、本プロジェクト期間中に、美濃島グループは、従来の DC

¹⁷ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p. 86(2024 年 9 月)

においては積極的に活用されてこなかった f_{ceo} とその相対差というパラメータに注目し、4つのフリーパラメータをフルに活用して、世界に先駆けた新しいコヒーレント制御を活用した高機能デュアルコム分光の概念を提唱した¹⁸。これにより、光波の瞬時位相や波形自体を操作して活用する高機能なDCが可能となりその適用性が大きく広がった。

本技術は、新たな研究領域や研究の潮流の形成に大きく貢献するため、技術の背景と仕組みを改めて3.1.2(1)で詳述した。

本プロジェクト終了後、美濃島グループではこの様な高機能なDC分光を用いて周波数・モード・時間操作および波形・多重性制御の優れた特性を創出した。以下に、主要な具体的研究成果を報告する。

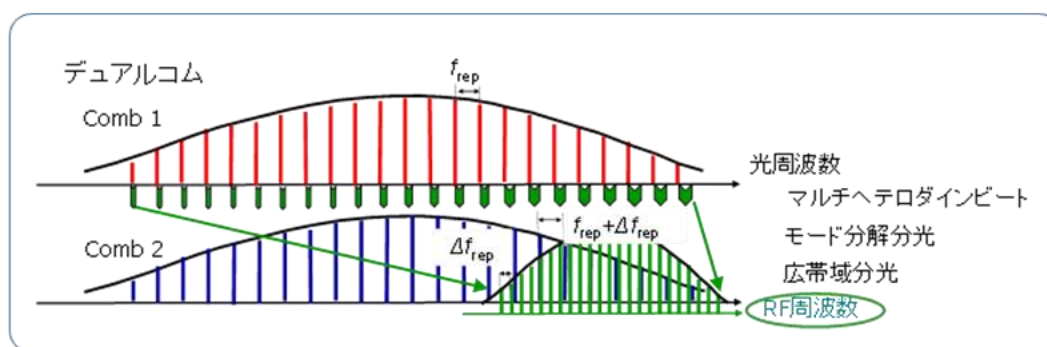


図2.6 2つの光コムを用いたデュアルコムの描像およびRF周波数発生¹⁷

① デュアルコムによる固体材料の特性評価¹⁹

美濃島グループは、本プロジェクト期間中、デュアルコム分光による固体物性評価装置を企業(ネオアーク株式会社)と共同で開発し、磁性材料の磁気光学特性の取得に成功した²⁰。本装置をもとにした分光計は、プロジェクト終了後、同企業から販売された。この時の実験では、図2.7(a)に示すように、偏光を精密に制御したデュアルコム分光装置を開発した。測定光路を通過したシグナルコムおよび参照用コムから得られた振幅・位相特性は、ローカルコムとの合波による干渉パターンとして受光器で検出された後、フーリエ変換および偏光解析からファラデー回転角の外部磁場依存性として取得された²⁰。本プロジェクト終了後、美濃島グループの足立らは同装置を用い、希土類鉄ガーネット単結晶を用いて、磁場印加による複素誘電率テンソル(ϵ'_{xy} , ϵ''_{xy})の高速観測に成功したほか、図2.7(b)に示すように、ファラデー回転角応答の可視化や飽和/ヒステリシス応答の観測にも成功した²¹。さらにLiNbO₃の電気光学効果も明瞭に観測された。これらの測定は、デュアルコム分光のみで得られるパラメータを用いて詳細な物性情報を直接得られる点に特徴がある。本研究では、今後

¹⁸ A. Asahara, and K. Minoshima, Coherent multi-comb pulse control demonstrated in polarization-modulated dual-comb spectroscopy technique, Applied Physics Express 12, 072014 (2019).

¹⁹ T. Adachi, R. Zhu, S. Akiyama, A. Asahara, Y. Odagiri, Ch. Ishibashi, S. Hatano, and K. Minoshima, Highly Functional Dual-comb Spectroscopy for Versatile Physical Property Evaluation of Solid Samples, CLEO Proceedings, SM1C.1, 2021

²⁰ JST・電気通信大学・ネオアーク株式会社プレスリリース(2019年6月)

²¹ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p.93(2024年9月)

用途に応じて装置の広帯域化・高速化・機能の拡大を図り、将来のさらなる製品化を目指すと共に、本装置が超精密・超高速の偏光分光測定により多様な材料開発に資することを目指している。

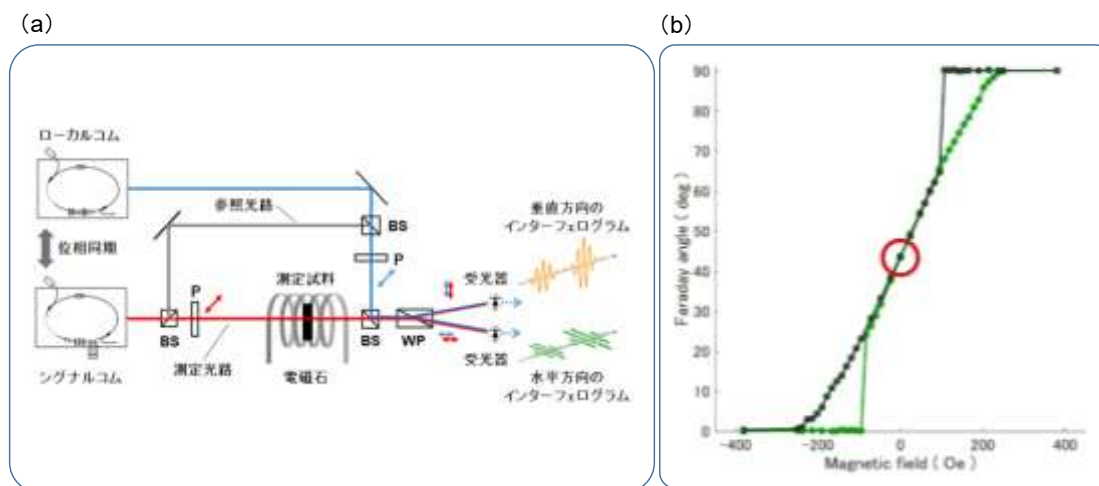


図2.7 (a)デュアルコム分光による固体物性評価装置の構成図²⁰。(b)鉄ガーネット単結晶における磁場印加によるファラデー回転角応答の可視化結果²¹。

② デュアルコムによる偏光変調および円2色性分光²²

美濃島グループの浅原らは、本プロジェクト期間中、従来のデュアルコムでは積極的に活用されてこなかった4つの周波数パラメータ： f_{rep} , Δf_{rep} , f_{ceo} , Δf_{ceo} (詳細説明は3.1.2(1)および図3.2を参照)の制御により多様な偏光変調(PM)コムを実現した。即ち、光コムがもたらす2つの超短パルスの位相差 $\Delta \phi_{\text{CEP}}$ (CEP: Carrier envelope phase)の時間変化を $\Delta \phi_{\text{CEP}}(t) = 2\pi \Delta f_{\text{ceo}} \cdot t$ とした上で、 Δf_{ceo} を $\Delta f_{\text{rep}}/4$, $\Delta f_{\text{rep}}/2$, $f_{\text{rep}}/2$ などに設定することで、2つの直線偏光(垂直/水平)および2つの円偏光(右回り/左回り)の間で多様な変調を実現した²³。因みに図2.8(a)は $\Delta f_{\text{rep}}=0$ の時の2つの直線偏光の合成状態を示す²⁴。

プロジェクト終了後、美濃島グループのZhuはPMコムを用いて高速円偏光スイッチを実現し、円2色性(Circular Dichroism:CD)分光計測への適用実験を行った²²。図2.8(b)は本装置の構成図である²⁴。実験には信号および参照用に2台のErファイバーコム光源が用いられた。信号コムは音響光学変調器(AOM)を用いてゼロ次の透過コムおよび一次の直交偏光回折コムに分岐される。AOMは f_{AOM} を通して2つの光コムの位相差 $\Delta f_{\text{ceo}} (= f_{\text{AOM}} - n f_{\text{rep}}; n$ は整数)を制御する。ゼロ次透過コムが通過するピエゾ駆動遅延素子は、上述の超短パルス

²² R. Zhu, R. Nagasaki, T. Kato, H. Tian, A. Asahara, and K. Minoshima, Advanced Circular Dichroism Measurement Method with Circular Polarization Switching Dual-comb Spectroscopy, CLEO: Science and Innovations, SF3F.3, 2023.

²³ A. Asahara, K. Minoshima, Coherent multi-comb pulse control demonstrated in polarization-modulated dual-comb spectroscopy technique, Appl. Phys. Express 12, 072014 (2019)

²⁴ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p.101, p.102(2024年9月)

列の初期位相差 $\Delta \phi_{\text{CEP}}$ を制御する ($\Delta \phi_{\text{CEP}}=0$ または $\pi/2$ は各々直線および円偏光に対応)。その後、ゼロ次透過コムおよび一回折コムは偏光ビームスプリッター (PBS) で合波され、 Δf_{ceo} に応じて偏光状態間のスイッチングが起こる。ここでは $\Delta f_{\text{ceo}} = \Delta f_{\text{rep}}/2$ に設定することで、高速かつ精緻な円偏光の繰り返しスイッチング (右回り \leftrightarrow 左回り) が実現する。この後 PM コムは、45°直線偏光に設定された参照用コムとビームスプリッター (BS) で合波された後、ウォラストンプリズムにより水平/垂直偏光に分離されて InGaAs 検出器で干渉パターン (IGM) として検知される。

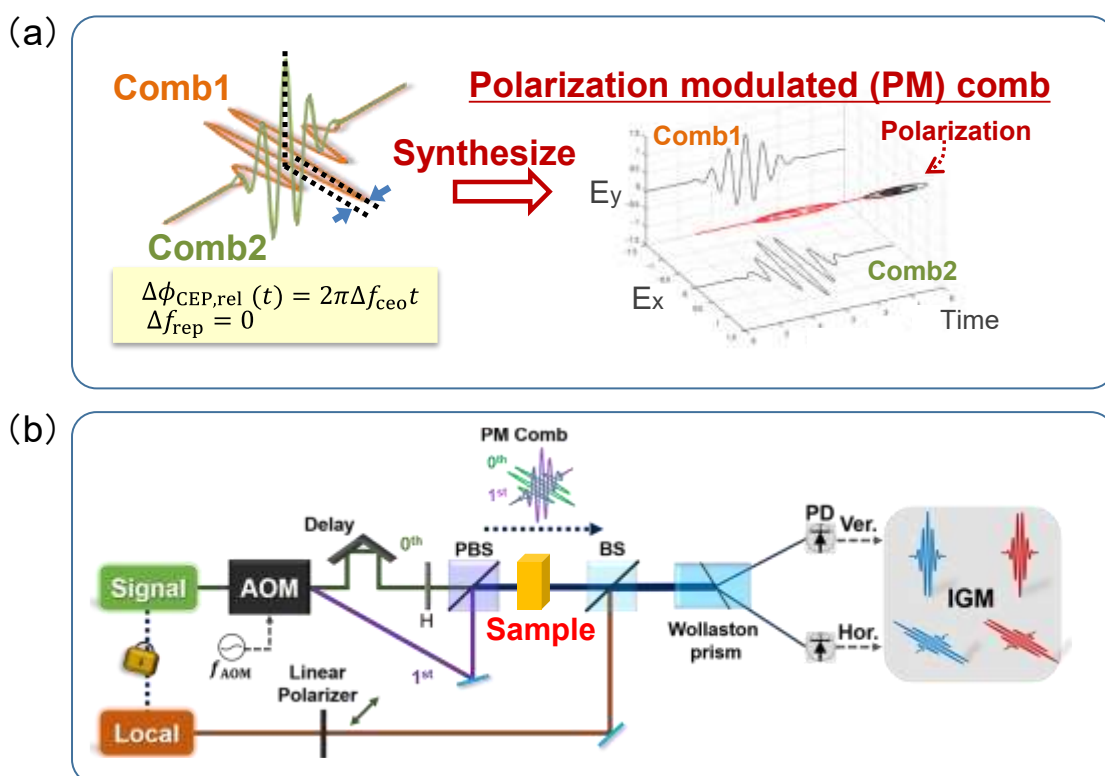


図 2.8 (a) 偏光変調コムの概念図。(b) 円 2 色性分光に用いる円偏光スイッチの構成図²⁴。

本装置を用いた円 2 色性分光計測への適合実証には、図 2.8(b)に示した PBS/BS 間の Sample 位置に挿入した円偏光素子が試料として用いられた。ここで本試料は右手系または左手系の 1/4 波長板および線形偏光板の複合構造物である。因みに本試料が左手系に構成された偏光板の場合、左手系の入射円偏光のみが試料を透過して直線偏光として出力され、右手系の入射円偏光は阻止される。実験では右手系および左手系偏光板に対し、左右一方の円偏光入射に対する透過率の違いが確認されたことから、本装置の円 2 色性分光計測への適合性が実証された。本 PM コムは、特徴的な CD スペクトルを示すタンパク質、核酸や一方向巻きに偏ったらせん構造を有する高分子の溶液中の立体構造やその動的振る舞いを調べる分光手法として高度の威力を発揮することが期待される。

③ 光渦コムによる時空間位相制御^{25, 26, 27}

通常の光では、軌道角運動量(Orbital Angular Momentum:OAM)は進行方向に垂直な方向を向く(但し光子のスピンのみ進行方向を向く)が、光渦ではビーム軸を中心に進行方向に沿って渦を巻く螺旋構造で軌道角運動量を運ぶため「軌道角運動量を持つ光」と言われる。本プロジェクトでは、図2.9に示すように、光渦のもつ空間方向(方位角 θ)の制御性を光コムと組み合わせることで、精密な時空間位相制御を可能にする光渦コムという世界初の概念が提案された²⁸。通常の光コムでは、2つの周波数パラメータ f_{rep} および f_{ceo} により、超短パルス列の精密な時間軸上の位相制御が可能となるが、光渦コムでは、これに加えて光渦特有のパラメータ(トポロジカルチャージ ℓ)による空間構造の位相も精密に制御されるため、時空間位相制御が可能となる。



図2.9 光渦コムの概念²⁸

プロジェクト終了後、浅原らはデュアルコム技術を光渦コムに拡張したデュアル光渦コムを積極的に活用した技術を創出した。まず、 Δf_{ceo} と $\Delta \ell$ を制御することで、4回対称のリング状光格子パターンの生成および回転運動の観測に成功した。リング状光格子の回転運動は、前述の偏光変調コムの場合と同様、2つの光渦コムの位相差に時間変化: $\Delta \phi_{\text{CEP}}(t, \theta) = 2\pi \Delta f_{\text{ceo}} \cdot t + \Delta \ell \theta$ を付与することで観測された。更に、顕微鏡システムにおいてリング状光格子を光ピンセット光源として用い、スライド/カバーガラス(隙間150 μm)の水溶液に浸されたポリスチレンビーズから成る微小球に照射して任意の回転操作を実現した²⁵。本結果は、光トラッピングや1次元物性研究などへの応用を可能にする。

²⁵ A. Asahara, S. Shoji, and K. Minoshima, Optical Combs and Optical Vortices Combined for Spatiotemporal Manipulation of Light and Matter, arXiv: 2005. 04075 (2020).

²⁶ A. Asahara, S. Akiyama, T. Adachi, and K. Minoshima, Orbital Angular Momentum-dependent Phase Detection using Single-pixel Dual-comb Spectroscopy towards Versatile Manipulation of Optical Vortex Light-wave, CLEO Proceedings, SThIC.7 (2021).

²⁷ A. Asahara, R. Zhu, and K. Minoshima, Coherent OAM Modulation Technique using Versatile Phase Controllability of Multi-optical-comb towards Sensitive and Rapid Spatiotemporal Spectroscopy, CLEO Proceedings, SMO.5 (2023)

²⁸ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p.105(2024年9月)

上述のリング状光渦パターンの精密な空間位相情報は、その後、シングルピクセルイメージング(SPI)手法²⁹に基づいて新たに開発されたSPIデュアル光渦コム分光(光渦SPI-DCS)法により取得された。ここでは、デュアルコム的一方を光渦コム(被撮影物体)として生成した後参照コムと合波し、光渦SPI-DCSシステム(アダマール型コード化光源を使用)で得られた干渉パターン(Interferogram)をアダマール変換とフーリエ演算することで、光周波数軸と軌道角運動量(OAM)軸(位相を含む)から成る2次元複素スペクトル情報が取得される。本情報には光渦コムの異なるパラメータを特徴づける振幅・位相情報が含まれることから、本手法は光渦の時空間位相情報の精密な取得手段であると同時に、空間構造に敏感な物性研究などへの有効な応用手段であると言える²⁶。

一方、前述のデュアルコムによる円2色性分光²²の成果は、浅原らにより、図2.10(a)に示すように光渦コムを用いたOAM変調・スイッチングとして発展した³⁰。ここでは、信号用光コムから生成された、変調に関わる右回り/左回りの円偏光が、1/4波長板(q-plate)を經由して $\ell=+1$ および -1 の光渦コムに変換された後、参照用光コムとの干渉後に、図2.10(b)に示すようにOAM変調のスイッチングとして観測された²⁷。

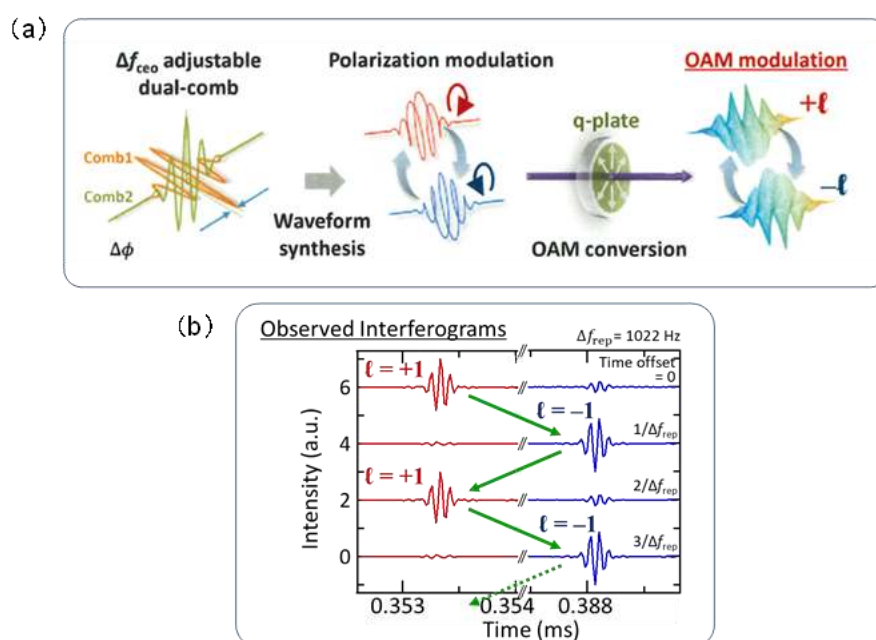


図 2.10 (a)光渦コムを用いた軌道角運動量(OAM)変調。(b)同OAMの高速スイッチング³⁰。

²⁹ 2次元撮像素子(CCDなど)の利用が困難なTHz波/中赤外領域などのイメージングで、2次元走査を回避する方法として、空間的にコード化された多数の照明パターン(アダマール行列など)を被撮影物体に順次投影し、CCDなどではなく点型検出器で得られた被測定光パワーと照明パターンとの積をその都度演算して2次元物体像を再構成する手法。水谷康弘「シングルピクセルイメージングの現状と応用展開」レーザー研究、第47巻、第5号、頁267-270(2019年5月)。光コムのシングルピクセルイメージングは本プロジェクトで開発された。K. Shibuya, T. Minamikawa, Y. Mizutani, H. Yamamoto, K. Minoshima, T. Yasui, and T. Iwata, Opt. Express 25, 21947-21957 (2017).

³⁰ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p.107(2024年9月)

また、浅原らは、デュアル光渦コムを用いた角度測定手法を開発した³¹。光渦コムを対象物に照射し、デュアル光渦コム分光による位相測定を行うことによって、対象物の回転角度を精密に取得できる。従来法のように対象物にロータリーエンコーダを機械的に装着することなく、非接触で測定できる利点がある。

以上の結果は、光渦コムを特徴づけるパラメータ： Δf_{ceo} 、 Δf_{rep} 、 $\Delta \theta$ の制御により、角度軸情報を含む物体の任意回転の光操作や、構造敏感な物性計測・操作などに適用可能な精密分光計測を実現したものであり、デュアル光渦コムによる新たな時空間位相制御法が提唱された。

④ デュアルコムによる超高速・超高感度量子計測³²

超高速現象の計測にポンプ-プローブ時間分解計測技術は極めて有用である。本プロジェクト終了後、美濃島グループのKoviriらは、特に極微弱光検出が求められる単一光子レベルの計測に対し、Er および Yb ファイバーレーザーからなる 2 波長デュアルコム光源を用いた非同期光サンプリング (ASOPS) 法³³を導入してフェムト秒時間分解能をもつ超高速時間分解計測技術を開発した。2 波長レーザーコム (Er : 1560nm、Yb : 1040nm) のうち、pW レベルに減衰せしめた Er レーザーコムを単一光子相当の微弱なプローブ信号として実証実験に用い、高強度 (1W レベル) Yb : ポンプコムを超高速ゲート光として用いて極微弱光の非線形光学効果を実現した。両者を非線形結晶 (PPLN) に入力して可視光コム (624nm) を発生し、アップコンバージョンによって、ASOPS による超高速時間分解ゲート検出を実現した。同時に、ASOPS の適用に当たり、2 波長レーザーコムを分岐し、高強度の Er コム (mW) と Yb コムを用いて同様に可視光に波長変換した信号を形成し、ASOPS 原理によって超高速光応答を時間延伸した電気信号をトリガー信号として用いることで長時間積算を可能にした。これにより、単発では微弱なフェムト秒相互相関波形を、長時間 (100s) の積算により、強度の 9 桁異なるトリガー信号に近いヒストグラムの波形として検出することに成功した。また、これらの信号による ASOPS では、波長の大きく異なる 2 波長コムの周波数 f_{rep} を各々高精度に制御することで、機械走査では不可能な超高速遅延時間走査を実現するとともに、高強度ポンプ光からの散乱光をスペクトルフィルタリングによって大きく低減して高感度化を実現した。本結果は、機械走査が不要で高安定・高時間分解能・広時間ダイナミックレンジを有する高速スキャンが可能なデュアルコム技術によって、新たに超高感度検出という価値が生まれる実証例である。微弱信号の超高速計測が有効な生体計測や量子光学に応用が可能である。最近では、本技術を用いて、量子技術を担う量子もつれ光子と光コムを結び付け、量子もつれ光子

³¹ A. Asahara, S. Akiyama, and K. Minoshima, Dual-comb spectroscopy for in-plane angle measurement using OAM vortex light, *Opt. Express* 31, 11695-11704 (2023).

³² P. Koviri, H. Komori, H. Tian, M. Ishizeki, T. Kato, A. Asahara, R. Shimizu, T. R. Schibli, and K. Minoshima, Single-photon level ultrafast time-resolved measurement using two-color dual-comb-based asynchronous linear optical sampling, *Appl. Phys. Exp.* 17, 022001 (2024).

³³ 超高速かつ高精度な時間領域分光法の技術。機械的な遅延ラインを使用せずに、数ナノ秒の遅延時間にわたる高速スキャンが可能。安井武史「テラヘルツ帯周波数コムの発生と応用」*応用物理*、第 81 巻、第 4 号、頁 308-311 (2012 年)。

の詳細な時間・周波数特性評価とその操作を実証する、世界に先駆けた研究が進められている。

(3) 光コム光源の実用性拡大

① 実用化を目指す機械共有型マルチコム光源^{34, 35, 36}

デュアルコム分光は応用性が高いものの、2台の独立したレーザー光源と双方の高い相互コヒーレンス性および周波数安定性を保持するための複雑な制御系が必要で、装置が大型・複雑・高価となり実用化の妨げとなっていた。本プロジェクト期間中に、美濃島グループによって、実用性の高いファイバーレーザーをもとに、双方向共振器型、偏光多重型共振器を用いて一台の光コムでデュアルコムを発生する「デュアルコムレーザー」が開発された。本プロジェクト終了後、美濃島グループの中嶋らは堅牢化と動作の安定性、低ノイズ化の観点から新たな装置構成を開発し、偏波保持ファイバーから構成される独立共振器を機械的構成の工夫によって受動安定化した、機械共有型デュアルコム光源を開発した³⁴。図 2.11 (a) に示すように、モード同期機構は Er ドープファイバー (EDF)、偏光ビームカップラー (PBC) などを含む低ノイズ化が見込まれる非線形増幅ループミラー (NALM) から成る³⁷。2台の光コムの主要なファイバー部は共通化された構成をとり同じ雑音を共有する。また共振器外部の自由空間領域は半波長板、45°ファラデー回転素子 (FR)、1/4 波長板 (QWP)、ミラーなどから構成されるが、小型化・一体化が図られている。そのため、外部の雑音や環境外乱に影響されにくく、フリーラン動作 (無制御動作) でも非常に高い相対安定性を示す。

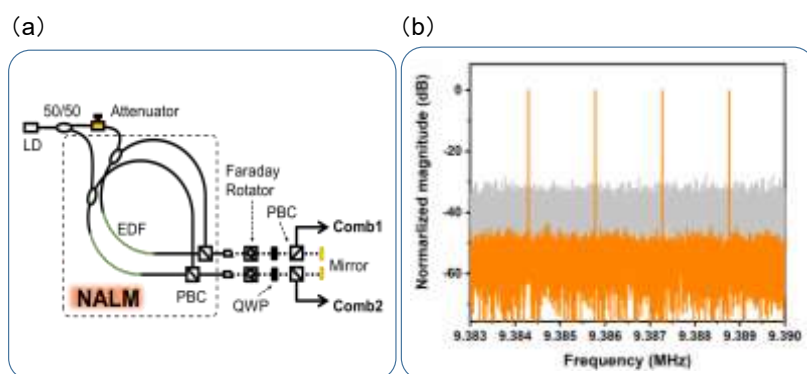


図 2.11 (a)実用化を目指す機械共有型デュアルコム光源の構成。(b)フルデジタル位相補正によるデュアルコム信号の SN 比の大幅改善³⁷。

³⁴ Y. Nakajima, Y. Kusumi, and K. Minoshima, Mechanical sharing dual-comb fiber laser based on an all-polarization-maintaining cavity configuration, *Opt. Lett.* 46, 21, 5401-5404 (2021)

³⁵ H. Tian, R. Li, T. Endo, T. Kato, A. Asahara, L. A. Sterczewski, and K. Minoshima, Dual-comb spectroscopy using free-running mechanical sharing dual-comb fiber lasers, *arXiv 2022*, APL 121, 211104 (2022).

³⁶ 遠藤健, 長尾康生, 田昊晨, 浅原彰文, 美濃島薫, 機械共有型トライコム光源システムの開発と相対安定性評価, 応用物理学会 講演予稿集, 22a-C206-10 (2022)

³⁷ 美濃島 (電気通信大学) 提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p. 115, p117 (2024 年 9 月)

その後 Tian らは、同様の機械共有型デュアルコム光源の出力をもちいてフリーラン動作でデュアルコム分光を行い、単一ではなく 2 個のバランス型フォトダイオードで検出した後、デジタル位相補正技術を用いて SN 比の向上を図った³⁵。これにより、図 2.11 (b) に示すように、フリーラン動作にかかわらずコムモードが明瞭に分解された結果が得られ、その結果、SN 比は補正前 (SNR=411) に比べて、補正後 (SNR=13960) 30 倍以上改善されている³⁷。

さらに遠藤らは、上記の機械共有型デュアルコム装置に、同様の単一モード Er ファイバーレーザーを更に結合することで、複雑な制御が不要で高い実用性を有する機械共有型トライコム光源を開発した³⁶。

これらの装置は、超高速ダイナミクスや非線形分光、多機能センシングを対象とした高機能な多次元計測を目指しており、従来のように複雑な制御を必要とせず、偏波保持ファイバー構成のため小型・堅牢で実用性の高い光コム分光装置の光源として期待される。

② 中赤外 (MIR) 広帯域デュアルコム実用光源³⁸

近年、地球温暖化による環境問題が指摘されるなか、温室効果/大気汚染ガス (二酸化炭素や二酸化硫黄など) における分子吸収スペクトルの吸収強度/幅の迅速かつ正確な計測の重要性が叫ばれている。吸収スペクトルには、光のフロンティア領域と呼ばれる中赤外 (MIR) 領域 (波長 $3\mu\text{m}$ より長波) に固有の強い吸収線が多数存在 (指紋領域) するため、これらの中赤外に拡大したデュアルコム分光の開発が急務となっている。これに呼応して、光コム光源もそれまでの大型で複雑な 2 台のモード同期レーザーから、実用を目指した小型・簡素化が図られつつある。前項①で述べた一体型レーザー共振器による「デュアルコムレーザー」は、小型・簡素化の一例であり、本プロジェクト期間には、レーザー共振器から直接発生する近赤外光を用いたガス分光やイメージングへの適用例を示した。しかし、中赤外光領域に波長領域を拡大するには、スペクトル拡大や波長変換などの高次の非線形光学過程を必要とするため、複雑な高精度制御を廃したために残留するわずかなノイズが増大されて、デュアルコム分光に必要な十分なコヒーレンスが保たれない可能性があった。

それに対し、美濃島グループでは、本プロジェクト終了後にデュアルコムレーザーの波長領域の拡大を進め、波長 $3.2\sim 4.4\mu\text{m}$ におよぶ中赤外広帯域デュアルコムの発生に成功した。

図 2.12 は、開発された一体型中赤外広帯域デュアルコム光源の構成である³⁹。本装置は、波長 $1.5\mu\text{m}$ 帯の双方向型共振器のデュアルコムレーザー出力をもとに、高非線形ファイバー (HNLF) でスペクトル拡大を行った後、導波路型非線形結晶 (PPLN) を用いて高効率な差周波発生を行い、中赤外広帯域デュアルコムを発生した。モード同期には高精度発振のための非線形偏波回転に加え、安定発振のための半導体可飽和吸収ミラー (SESAM) が用いられた。双方向型共振器を含めたこれらの構成要素は一体化されているため、本光源は実用を目指した小型・簡素化がなされている。これを、実際にデュアルコム分光に適用し、レーザー共振器と非線形光学過程の最適化を行って、広帯域波長領域にわたり高いコヒーレンスを保

³⁸ Y. Nakajima, Y. Hata, Y. Kusumi, K. Yoshii, and K. Minoshima, CLEO:2020 (2020): J. Li, A. Asahara, H. Tian, K. Yoshii, T. Kato, Y. Nakajima, K. Minoshima, CLEO-PR:2022 (2022): A. Asahara, G. Fukawa, T. Shimizu, T. Kato, K. Minoshima, CLEO:2024 (2024).

ったデュアルコムを実証した。実証例としての中赤外デュアルコムによる N_2O への環境ガス分光応用については、社会への貢献例として 3.1.6(1)②に詳述する。

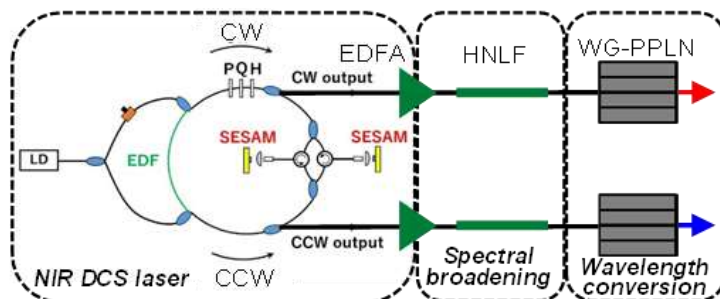


図 2.12 双方向デュアルコムレーザーによる一体型中赤外デュアルコム光源の構成³⁹。

③ 微小共振器ソリトンコム光源^{40, 41}

現在最も普及している光コムは光ファイバコムであるが、近年、外部励起光源としての単一周波数発振CWレーザーと非線形光学材料を含む微小光共振器で構成されるマイクロコム(特に安定なモード同期状態であるソリトンコム)が注目されている。マイクロコムは半導体製造装置で作製可能であり、将来的には量産可能な小型で安価な光コムとして期待され、実社会に広く普及していく可能性を持つ。図2.13は1990年代の大型レーザーからソリトンコムを含むマイクロコムに至る将来に向けた光コム光源の微細化の流れを示す⁴²。

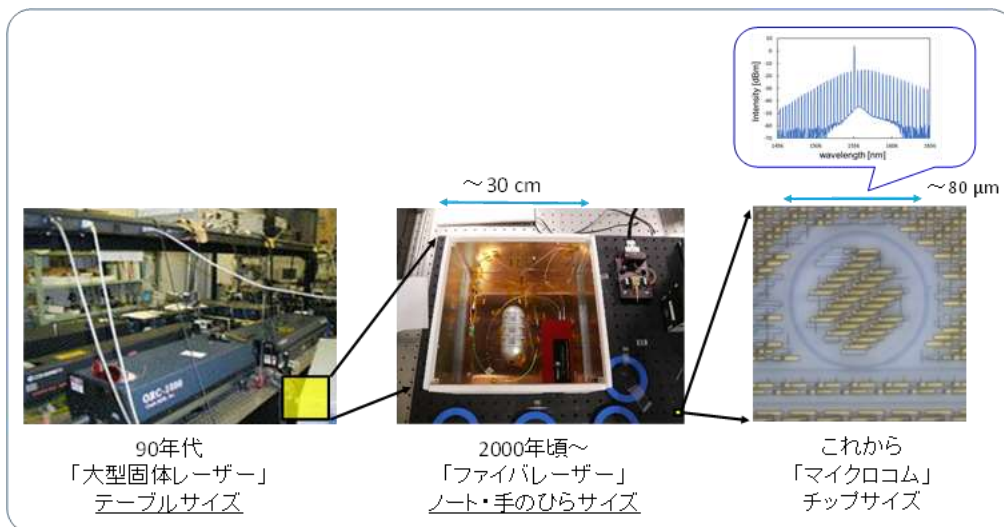


図 2.13 大型レーザーからマイクロコムに至る光コム光源の微細化の流れ⁴²。

本プロジェクト関連研究者によるマイクロコムの開発は、プロジェクト終盤から徳島大

³⁹ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p.122(2024年9月)

⁴⁰ K. NISHIMOTO, K. MINOSHIMA T. YASUI, AND N. KUSE, Generation of a microresonator soliton comb via current modulation of a DFB laser, OSA Continuum, 3, 11, 3218-3224 (2020).

⁴¹ N. Kuse, K. Nishimoto, Y. Tokizane, S. Okada, G. Navickaite, M. Geiselmann, K. Minoshima, and T. Yasui, Communications Physics 2022. <https://doi.org/10.1038/s42005-022-01100-0>

⁴² 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p.124(2024年9月)

学に新設されたポストLEDフォトンクス研究所(pLED研究所)(美濃島研究室:3.1.5(2)参照)において、久世らとともに開始された。なお、美濃島は、プロジェクト成果普及の一環として本研究に参画し注力した。

マイクロコムの特徴である大きなコムモード間隔(100GHz以上)は、分光応用ではサンプルの吸収線の正確な測定を妨げる。この課題を解決するコムモードの周波数掃引はマイクロコム励起用外部CWレーザーが担うが、CWレーザーは、大型・高価に加えて周波数掃引速度が遅く、掃引範囲が狭いという問題がある。

pLED研究所美濃島研究室の西本・久世らは、この課題解決のため、CWレーザーの代わりに分布帰還型(DFB)レーザーの電流変調を用いたソリトンコム発生を行った⁴⁰。励起に必要な光出力の増幅にErドープ・ファイバーアンプを利用することで、DFBレーザーと微小共振器のみによる小型のマイクロコムシステムを構築した。

一方、久世らは、2台の微小共振器ソリトンコムと、新たに開発したMach-Zehnder型2波長自己遅延ヘテロダイン干渉計を用いて単一走行キャリアフォトダイオード(UTC-PD)に照射することで、世界最高レベルの低位相雑音THz波(560GHz)の発生に成功した⁴¹。THz波の位相雑音は、発生させた2つのTHz波をショットキーバリアダイオードで2乗検波して得られるマイクロ波の位相雑音から測定できることを実証した。

これらの成果は、プロジェクト終了後に新設された徳島大学pLED研究所(美濃島研究室:3.1.5(2)参照)の研究成果と位置付けることが出来る。

2.3.2 テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ(徳島大学)の発展状況

徳島大学は、本プロジェクト終了後、電気通信大学グループのデュアルコムによる新応用の開拓や、産業技術総合研究所グループの光コム光源の超精密化の各テーマに対し、(i)「医光融合」を目指すデュアルコムのバイオ計測応用、(ii)THz～赤外(および深紫外)の小型・広帯域コムの開発、の切り口で世界初の成果実現を目指した。主な研究成果を以下に纏める。

① デュアルコムを用いた蛍光寿命顕微鏡の開発⁴³

従来の蛍光顕微鏡は、生きたままの細胞等に付着せしめた蛍光標識の蛍光強度を観測する技術として広く利用されるが、標識の濃度や励起光強度などの条件に左右され、観測値の定量性が不十分である。一方、蛍光寿命顕微鏡は、標識の蛍光寿命が環境に左右されず定量性に優れた高感度計測技術であるが、蛍光寿命が超高速現象のため高速光検出器による点計測を余儀なくされ、焦点スポットに機械走査を要するためイメージの高速計測が困難であった。

安井らは、焦点スポット用機械走査無く蛍光寿命画像を高速に一括取得できるデュアルコム蛍光寿命顕微鏡を開発した⁴⁴。これは、デュアルコム・ビート(周波数多重化電気信号)

⁴³ T. Mizuno, E. Hase, T. Minamikawa, Y. Tokizane, R. Oe, H. Koresawa, H. Yamamoto, T. Yasui, Full-field fluorescence lifetime dual-comb microscopy using spectral mapping and frequency multiplexing of dual-comb optical beats, Science Advances 2021;7: eabd2021 1 January (2021). 徳島大学プレスリリース(2021年1月)

⁴⁴ 宇都宮大学オプティクス教育研究センターの山本裕紹教授グループとの共同研究。

と多次元変換を用いて、44,400ピクセルに及ぶ点滅画素を2次元空間に並べて同時測定するものである。蛍光物質に瞬間的な光を照射すると、発生した蛍光は直ちには減衰せず、物質特有の減衰時間で減衰する。この時、蛍光強度がピーク値から $1/e$ (=36.8%)に減衰する時間を蛍光寿命 τ という。一方、正弦波状の光を照射すると、蛍光の強度は同じ周波数で正弦波変調されるが、蛍光の位相は蛍光寿命に応じて励起光から遅れる。この位相遅れ ϕ と蛍光寿命 τ に関する関係式から蛍光寿命 τ を算出できる。

安井らは、装置の有用性確認のため、蛍光性テストチャートを計測し、デュアルコム・ビート群の振幅と位相の周波数スペクトルの2次元イメージ情報を取得した。これらの周波数多重化信号群と2次元蛍光スポット群の1対1の対応関係に基づいて画像化した。図2.14はデュアルコム蛍光寿命顕微鏡像の概念図である⁴³。

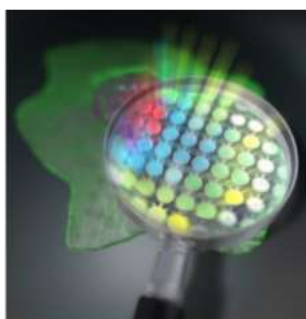


図 2.14 デュアルコム蛍光寿命顕微鏡像の概念図⁴³。

これらのイメージは、蛍光性テストチャートの蛍光強度及び蛍光寿命を反映しており、機械走査の無い本手法によって蛍光の強度・寿命の両イメージの同時取得が可能であることを実証した。本技術は、生きた細胞内の分子の挙動観察による生命現象・機能の解析や、新型コロナウイルス抗体の大量自動検査などへの応用が期待される。なお本装置の構成は、3.1.2(2)および図3.3に詳述した。

② デュアルコムを用いたバイオセンシング⁴⁵

バイオセンサーは、生体の巧みな分子識別機能を利用あるいは模倣した生体分子センサーで、医療・食品・環境分野など幅広い分野に応用される。測定対象分子と分子識別部の相互作用を光学的に読み出す光バイオセンサーは、高い定量性や簡易・迅速計測が特徴だが、新型コロナウイルスやがん細胞などの早期検出を実現するためには感度が不十分である。

安井は、上記の課題解決のため、光コムをセンサーとした世界初のバイオセンシングを行った⁴⁶。本研究では、光周波数で高感度にセンシングを行い、電気周波数で高精度に読み

⁴⁵ S. Miyamura, R. Oe, T. Nakahara, H. Koresawa, S. Okada, S. Taue, Y. Tokizane, T. Minamikawa, T. Yano, K. Otsuka, A. Sakane, T. Sasaki, K. Yasutomo, T. Kajisa, and T. Yasui, Scientific Reports (2023) 13-14541. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41436-3>, 徳島大学プレスリリース2023年9月

⁴⁶ 徳島大学安井武史教授、加治佐平客員准教授、宮村祥吾大学院生、高知工科大学システム工学群田上周路准教授らとの共同研究。

出すと共に、デュアルコムを用いて環境温度の影響を抑えることにより、新型コロナウイルスの迅速・高感度検出を実現した。

図 2.15 に装置の構成を示す⁴⁵。センサー信号は、検出対象であるサンプルの濃度変化以外に、環境温度変化の影響(温度ドリフト)を受ける。この影響を排除するため、アクティブ・ダミー温度補償法と呼ばれるデュアルコム配置法が採用された。本手法では、同一性能を有する一対のファイバー共振器において、サンプル濃度と温度の両変化に反応するアクティブ・センシング光コム(センサー信号 f_{rep1})と、温度変化のみに反応するダミー・センシング光コム(センサー信号 f_{rep2})を併用し、両信号の差分信号($\Delta f_{rep}=f_{rep1}-f_{rep2}$)から温度ドリフトの影響を相殺してサンプル濃度依存信号のみを抽出する。今回、リン酸緩衝生理食塩水(PBS)中の新型コロナウイルス N(ヌクレオカプシド)たんぱく質抗原濃度を 10 分刻みでステップ状に変化させながら計測を行い、理論モデル関数を用いた実験値のカーブフィッティング解析を通して実験結果の妥当性を確認した。本成果の応用の背景と社会への展開については 3.1.6(1)①を参照されたい。

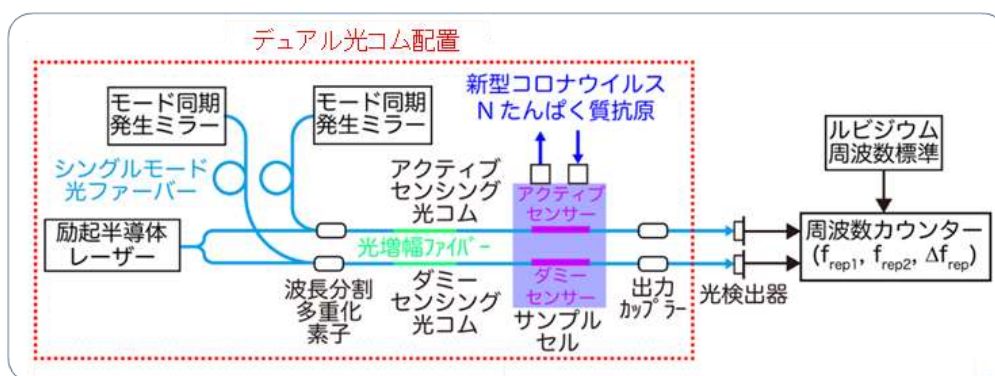


図2.15 デュアル光コムを用いたバイオセンシング装置の配置図⁴⁵。

③ 小型化機械共有型デュアルコム・ファイバーレーザーの開発⁴⁷

電気通信大学美濃島グループで開発された機械共有型マルチコム光源(2.3.1(3)①参照)は、徳島大学(安井)グループでも引き継がれた⁴⁸。図 2.16(a)に、新規開発の Micro-optic component を用いたデュアルコム・ファイバーレーザーの構成を示す⁴⁷。本レーザーは、偏波保持ファイバー(PMF)、Er ドープ光ファイバー(EDF)、可飽和吸収体ミラー(SESAM)、部分反射ミラー(PRM)で構成される線形型の共振器を 2 台用いる。EDF は、SESAM と集光光学系および波長分割多重カプラを含む Micro-optic component に接続され、波長 976nm の励起用レーザーダイオード(LD)で励起される。同図(b)に示すように、2 台のモード同期ファイバーレーザーの各部品は、小さな箱のほぼ同じ位置に配置・固定されることで、環境変動の

⁴⁷ T. YUMOTO, W. KOKUYAMA, S. MATSUBARA, T. YASUI, AND Y. NAKAJIMA, All-polarization-maintaining dual-comb fiber laser with mechanically shared cavity configuration and micro-optic component, Optics Continuum 2, 8, 1867-18784 (2023). 徳島大学プレスリリース 2023年8月

⁴⁸ 東邦大学理学部の中嶋善晶講師、同大学大学院理学研究科の湯本拓実大学院生との共同研究。

影響が最小限に留まり、2台の光コムとの相対的な安定性が高まる。本装置を用い、近赤外 1.5 μm 波長領域でシアン化水素(HCN)分子の吸収スペクトルが得られることが確認された。本レーザーは小型・堅牢であり、今後、実用的な分光装置の光源としての活用や、ガス計測、センシングなどの分野での適用が期待される。

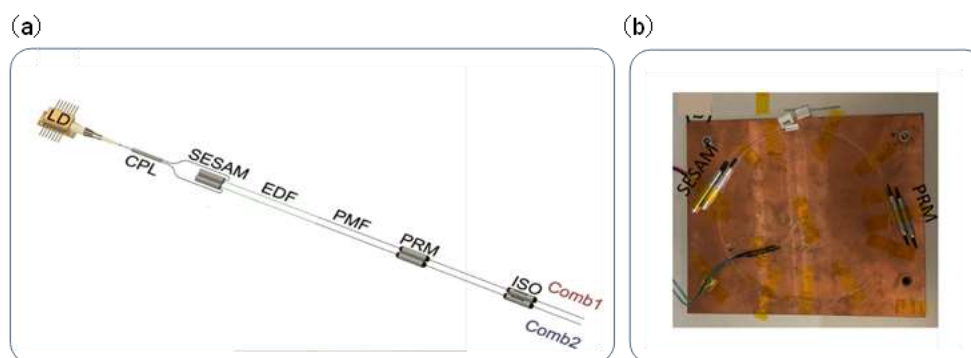


図 2.16 (a)機械共有型デュアルコム・ファイバーレーザーの構成。(b)小箱に構成部品と共に収納された装置の全景写真⁴⁷。

④ Kerr マイクロコムを用いた THz 通信⁴⁹

従来の移動通信(5G 以下)は主としてエレクトロニクス(電気的手法)による高周波化に依存してきた。将来(6G 以上)の周波数帯(THz 帯)は、電気的手法の技術的限界が指摘され、超高周波信号の低出力化・低品質化・信号伝送損失の増大などの問題が顕在化し始めている。

安井はこの課題解決を目指し、Kerr マイクロコム(微小共振器を用いたマイクロコム)を用いて THz 波を発生させ、無線通信に応用した⁵⁰。本研究では、マイクロコムの光周波数モード間隔が 6G キャリア周波数と等しい特徴に着目し、これを超高周波光電気周波数信号(近赤外光)として光/電気変換で THz 波を発生させ、無線通信に使用した。本手法により、上限周波数の限界を越えるだけでなく、振幅・位相の高度変復調における超高速・大容量化や、光通信との高い親和性を有する 6G が期待される。

図 2.17 は、マイクロコムにおける光/電気変換による THz 発生の構成図である⁴⁹。等間隔で複数の光周波数モード列が並ぶマイクロコムから、隣接する 2 つのモード(周波数 ν_1 および ν_2)を光フィルタで抽出すると、時間領域で光ビート信号(繰り返し周波数 $f_{\text{rep}} = \nu_2 - \nu_1$)が生成される。これを光/電気変換素子(単一走行キャリア・フォトダイード)に入射すると、周波数 f_{THz} が f_{rep} に等しく位相が極めて安定な THz 波が発生する。隣接する 2 モードの一方に、伝送情報を光変調器で重畳させると、変調 THz 波が発生する。本実験では、2Gbps で On-Off-Keying(OOK) 振幅変調された THz 波(周波数 560GHz)で無線通信を行い、明瞭な eye パターンを観測して良好なデータ伝送が確認された。本研究による移動通信応用の背景と

⁴⁹ Y. TOKIZANE, S. OKADA, K. NISHIMOTO, Y. OKAMURA, H. KISHIKAWA, T. MINAMIKAWA, E. HASE, J. FUJIKATA, M. HARAGUCHI, A. KANNO, S. HISATAKE, N. KUSE, AND T. YASUI, *Optics Continuum* 2, 5, 1267-1275 (2023). 徳島大学プレスリリース2023年5月

⁵⁰ 徳島大学 pLED 研究所時実悠講師・久世直也准教授・岸川博紀准教授、徳島大学大学院岡村康弘元助教、岐阜大学工学部久武信太郎教授、および NICT・名古屋工業大学大学院菅野敦史教授と共同研究。

社会への展開については 3.1.6(2)を参照されたい。本研究は、内閣府・地方大学・地域産業創生交付金事業、総務省および徳島県の支援を受けてなされている⁵¹。

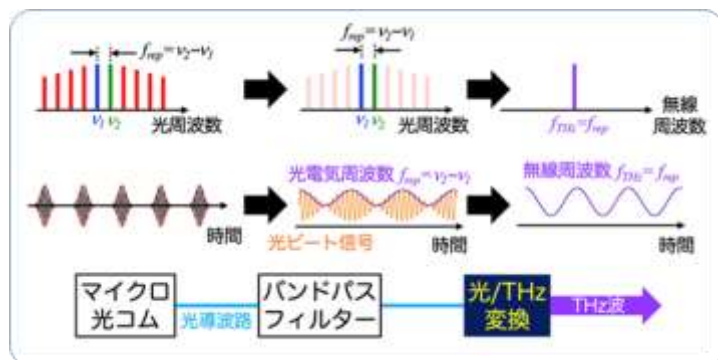


図2.17 マイクロコム光/電気変換によるTHz発生⁴⁹。

2.3.3 周波数極限化グループ(産業技術総合研究所)の発展状況

本プロジェクト終了後、産業技術総合研究所グループは高精密光周波数コムを中心に、(i)世界標準を目指す超精密フェムト秒光コム、(ii)天文コムを念頭に置いた可視広帯域・30GHz モード間隔 Er ドープファイバーレーザーコム、(iii)デュアルコムを用いた厚さ・屈折率の同時精密計測、の各技術を開発した。以下に成果の概要を報告する。

① 不確かさ 10^{-18} の 10MHz-光周波数リンク超精密フェムト秒光コム⁵²

国際単位系(SI)における時間の単位「秒」は、現在、時間標準器としてのセシウム原子時計によって定義付けられており、その原子時計の精度の不確かさは 10^{-15} のレベルにある。科学技術の進展に伴い精度向上への要望が高まりつつあり、秒の再定義の機運が増している。近年注目の光格子時計や光コムの出現により、これらの光技術が新しい秒の定義を提供する次世代の周波数標準として、世界各国の標準機関で開発が進められている。

稲場は、光周波数コムの RF(10MHz)-光周波数リンク機能による絶対測定の高精度化を目指し、2台のフェムト秒レーザー光コムから成るシステムを用いて光周波数の絶対測定における不確かさを 10^{-18} レベルに低減することに成功した。これには、不確かさの成因をもたらす部品/回路の検討項目として、繰り返し周波数 f_{rep} の合成/位相ロック/検出部、周波数カウンター、温度無依存ケーブルの導入部、温度安定化機器など、細部にわたる多くの要因の追及が成功の秘訣と考えられている。本研究の背景と精密周波数計測分野への展開に関しては、3.1.4を参照されたい。本成果により、世界標準の有力候補としての光周波数コムの可能性が高まったことで、今後の展開が注目される。

⁵¹ 内閣府・地方大学・地域産業創生交付金事業「徳島県：次世代“光”創出・応用による産業振興・若者雇用創出計画」、総務省「無線・光相互変換による超高周波数帯大容量通信技術に関する研究開発」および「Beyond 5G 時代に向けた戦略的な知財・標準化、事業化等促進支援プロジェクト」徳島県地方大学・地域産業創生事業補助金

⁵² M. Wada, and H. Inaba, Femtosecond-comb based 10 MHz-to-optical frequency link with uncertainty at the 10^{-18} level, Metrologia 59, 065005 (2022)

② 可視広帯域・30GHz モード間隔 Er ドープファイバーによるアストロコム⁵³

天体視線速度⁵⁴の精密測定は天文観測の重要な技術であり、恒星スペクトルのドップラーシフトからその恒星を周回する惑星の存在が分かる。視線速度測定用の一般的な分光器の波長標準は、系外惑星探査や宇宙加速膨張の直接観測には精度が1~3桁足りない。このため、広帯域・高均一・高出力スペクトル線に加えて最適波長帯を含む理想的な波長標準が求められ、アストロコム(天文コム)は有望な手法と目されている。要求性能は、輝線間隔が高分散分光器の波長分解能より広い(> 10 GHz)、波長域が広い、輝線強度が高い、高均一である、時間変化が少ない、天文台での長期間安定稼働に耐える、などである。これに対し、繰り返し周波数(輝線間隔に相当)が300 MHz程度のモード同期ファイバーレーザー光コムは、多くの高分散分光器の分解能(8-15 GHz)には遠く及ばない。

稲場は、堅牢な Er ドープファイバーによるフェムト秒レーザーを用い、30GHz モード間隔の可視広帯域アストロコムを開発した。新たに創出した技術は、モードフィルタリング用新設計の光共振器と不要モード抑制によるモード抜き出し法の採用、高非線形ファイバーによるスペクトル平坦化、チャープ型非線形素子(PPLN)による可視域への波長変換などに及ぶ。本装置は、国立天文台ハワイ観測所岡山分室の高分散分光器「HIDES-F」や、すばる望遠鏡の高分散分光器「HDS」のための波長校正用光コムに活用される。本成果は、太陽系外惑星探査やダークエネルギーによる宇宙加速膨張の直接検証に向けた「天文コム」として、視線速度測定精度の向上に貢献することが期待されている。

③ デュアルコムを用いた平板の厚さ・屈折率の同時精密計測⁵⁵

光学素子の設計には、構成物質の正確な屈折率の把握が不可欠である。高精度の屈折率測定法として旧来知られた最小偏角法⁵⁶では、物質をプリズム形状に加工する必要があり、煩雑な前処理を必要とした。

本プロジェクト中には、デュアルコム分光法を用いて、物質をプリズム形状に加工することなく、平板のままで広い波長域における屈折率および厚さを同時に計測する手法が、美濃島グループで開発された。プロジェクト終了後、本研究潮流は様々なグループで継続発展された。稲場らは、さらに高精度化を行う手法を開発し、デュアルコム分光法を用いて、屈折率および厚さを同時に高精度に計測した⁵⁷。実験にはシリコン平板を用い、デュアルコム分光により波長 1.52 μm ~1.57 μm にわたって平板透過光の透過率と位相変化を調べた。超短

⁵³ K. NAKAMURA, K. KASHIWAGI, S. OKUBO, AND H. INABA, Erbium-doped-fiber-based broad visible range frequency comb with a 30 GHz mode spacing for astronomical applications, Optics Express 31, 12, 20274-20285 (2023)

⁵⁴ 天体の空間運動速度の視線方向成分(Radial velocity)。ドップラー効果によるスペクトル線のずれから測定できる。観測者から遠ざかる向きを正(赤方偏移)、近づく向きを負(青方偏移)と定義する。

⁵⁵ K. A. SUMIHARA, S. OKUBO, M. OKANO, H. INABA, AND S. WATANABE, Optics Express 30, 2, 2734-2747 (2022). 産総研プレスリリース(2022年1月18日)。

https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2022/pr20220118/pr20220118.html.

⁵⁶ プリズム形状の物質に入射する単色平行光線の入射光線と射出光線のなす角(偏角)の最小値を調べることで、物質の屈折率を高精度に計測する方法

⁵⁷ 慶應義塾大学大学院理工学研究科住原花奈、同大学理工学部物理学科岡野真人元専任講師(現防衛大学校准教授)、渡邊紳一教授、産業技術総合研究所物理計測標準研究部門大久保章主任研究員との共同研究。

パルス照射による試料表面/裏面での多重反射(エコー)から得られる光の位相変化量を詳細に解析して、各波長での屈折率を求めた。その結果、平板の加工を施すことなく、同時計測法として最高の厚さ測定精度(相対値 3×10^{-6})および屈折率測定精度(相対値 2×10^{-5})を達成した。

今後、各種光学材料の正確な屈折率計測に応用することで、光学素子の高精度設計につながることを期待される。

2.4 プロジェクト参加研究者の活動状況

プロジェクト参加者の多くは、プロジェクト終了後に職位の昇格など活動状況の動静があった。代表的なプロジェクト参加者の動静を下表にて列記する。

(1) 知的時空間統合化グループ(電気通信大学)

氏名	(プロジェクト時の職位)	[調査時点 (2024/5/14) の職位]
美濃島薫	研究総括/グループリーダー	電気通信大学 教授/副学長/副理事 徳島大学 pLED 研究所 特別招聘教授
中嶋善晶	研究総括補佐/研究員	東邦大学理学部物理学科 准教授
吉井一倫	研究員	龍谷大学先端理工学部 講師
大饗千彰	研究員	電気通信大学量子科学研究センター 准教授
徐博	研究員/協力研究員	KLA Product Development Engineer (USA)
浅原彰文	研究員	電気通信大学 准教授
加藤峰士	研究員	電気通信大学 准教授
服部雅之	研究員	国立天文台先端技術センター 特任助教
西山明子	協力研究員	産業技術総合研究所計量標準総合センター 研究員

(2) 周波数極限化グループ(産業技術総合研究所)

氏名	(プロジェクト時の職位)	[調査時点 (2024/5/14) の職位]
洪鋒雷	グループリーダー	横浜国立大学大学院工学研究院 教授
稲場肇	サブグループリーダー/グループリーダー	産総研計量標準総合センター 研究グループ 長
柏木謙	研究員	産総研計量標準総合センター 主任研究員
大久保章	研究員	産総研計量標準総合センター 主任研究員
和田雅人	研究員/協力研究員	産総研計量標準総合センター 主任研究員
小林拓実	研究員	産総研計量標準総合センター 主任研究員
中村圭佑	研究員	産総研計量標準総合センター 主任研究員

(3) テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ(徳島大学)

氏名	(プロジェクト時の職位)	[調査時点 (2024/5/14) の職位]
安井武史	グループリーダー	徳島大学理工学部理工学科 教授 pLED 研究所 所長/教授
水谷康弘	サブグループリーダー	大阪大学大学院工学研究科 准教授
吉井一倫	研究員	龍谷大学先端理工学部 講師
ダヒ・イブ ラヒーム	研究員	National Institute of Standards, Egypt
ハルソノ・ チャフヤデ イ	研究員/協力研究員	Endofotonics Pte. Ltd., Singapore
長谷栄治	研究員	徳島大学 pLED 研究所 特任助教

2.5 第2章のまとめ

美濃島を研究総括とした「美濃島知的光シンセサイザ」プロジェクトは、プロジェクト終了後も継続して3大グループ: 知的時空間統合化グループ(電気通信大学)、周波数極限化グループ(産業技術総合研究所)、テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ(徳島大学)が光コム技術の実用化を目指した。電気通信大学グループは、光コムの瞬时无走査3次元イメージングへの応用、デュアルコムによる高機能分光への新規応用、光コム光源の実用性拡大とその中赤外領域を中心とした波長拡大における様々な高度な実用化技術、などを創出した。徳島大学グループは、THz 波～赤外領域への周波数帯域拡大と新規応用の開拓、「医光融合」を目指したデュアルコムのバイオ計測応用の拡大、の切り口で多くの世界初の成果を達成した。産業技術総合研究所グループは、高精密光周波数コムを中心に、世界標準を目指す超精密フェムト秒光コム、天文コムを目指す可視広帯域・30GHz モード間隔 Er ファイバーレーザーコム、デュアルコムを用いた厚さ・屈折率の同時精密計測、の各技術を開発した。

本プロジェクトの成果論文数は334報であるが、その中で22報がFWCI TOP10%の論文となっている。発展論文数は90報であり、このうち4報がFWCI TOP10%の論文となっている。

特許については、プロジェクト期間中の国内および海外の出願件数は各々23件および12件、登録件数は各々20件および4件である。プロジェクト終了後の国内および海外の出願件数は14件および5件、登録件数は国内3件である。

本プロジェクト終了後、美濃島は光科学・工学の業績に対してレーザー学会、応用物理学会などから5件の著名な学術賞を獲得した。また、美濃島研究室学生の受賞は13件であった。

本プロジェクトに係わった研究員のうち、浅原、加藤の電気通信大学准教授への昇格など、15名以上の若手研究員が公的研究機関で昇格した職位のもとで研究を継続している。

第3章 プロジェクト成果の波及と展望

3.1 科学技術や社会・経済への波及と展望

3.1.1 新規な理論や概念の提唱

本プロジェクト終了後、美濃島グループは 2.3.1(1)①で概要を報告したように、高品位な形状計測を実現する瞬时无走査 3次元イメージング技術を開発した。本技術は、新たに提唱された高解像度 2次元分光を実現する全光ヒルベルト変換・光演算法により達成された。ここでは、本手法の技術内容を以下に詳述する^{6,58,59}。

遅延時間とともに変化する干渉縞の波長情報を強度情報に変換するには、干渉スペクトルの包絡線が必要であるが、この取得に要する直交信号の生成にヒルベルト変換を用いる。しかし従来技術では、遅延時間走査画像とフーリエ変換等の後処理演算が必要なため、瞬時の取得が出来ない。加藤らは、90°の位相差を持つ参照パルス列と信号パルス列とのスペクトル干渉により包絡線を求める新規の全光ヒルベルト変換法を提唱した^{6,58}。

最初に、無線通信への応用を念頭にしたヒルベルト変換の骨子を示す⁵⁹。一般のデジタル/アナログ信号伝送において、“ベースバンド信号” $x(t)$ は時間依存の振幅 r と位相 ϕ を含む複素数信号、 $x(t) = r(t) \exp\{j\phi(t)\} = x_1(t) + jx_0(t)$ で表現できる。ここに、 $x_1(t)$ 、 $x_0(t)$ は夫々複素平面上の実数軸(I成分)、虚数軸(Q成分)である。これに対し、実際の伝送信号である“帯域通過信号”は、キャリア波 f_c の振幅・位相を r 、 ϕ に対応させた変調信号(バンドパス信号) $s(t)$ であり、 $s(t) = \text{Re}[x(t) \exp(j2\pi f_c t)] = x_1(t) \cos(2\pi f_c t) - x_0(t) \sin(2\pi f_c t)$ で表される。 $s(t)$ のフーリエ変換後は周波数域の正負領域に複素共役の関係を持ち、且つ各々に全情報を含むスペクトルが現れる。この一般表現はヒルベルト変換により複雑になるのに対し、正の周波数成分のみを表現する“解析信号” $s^{(+)}(t)$ は簡略であり、且つ全情報を失わないため便利である。即ち、 $s^{(+)}(t) = r(t) \exp\{j(2\pi f_c t + \phi(t))\} = s(t) + j s'(t)$ 、 $s'(t) = x_1(t) \sin(2\pi f_c t) + x_0(t) \cos(2\pi f_c t)$ となる。注目すべきは、 $s'(t)$ は $s(t)$ のキャリア波の位相を90°遅らせたもの、すなわち、 $s(t)$ の $\cos(2\pi f_c t)$ を $\sin(2\pi f_c t)$ に、 $\sin(2\pi f_c t)$ を $-\cos(2\pi f_c t)$ に置き換えたものである。これがヒルベルト変換と呼ばれる。

加藤らは、図3.1に示すように簡略化された解析信号に基づく全光ヒルベルト変換手法を提唱した⁶⁰。全光ヒルベルト変換をするためには、精密に90度の位相差を持つパルス列が必要である。このため、同図(a)の左上図に示すように、光源の超短パルス列コム(2つの周波数パラメータの間に $f_{ceo} = (1/4) f_{rep}$ の関係が付与することにより、波形1、2、3、4で示した隣り合うパルスとの間に精密に90°の位相差が発生する。これらの超短パルス列は分岐され

⁵⁸ 加藤峰士「高精度瞬時3次元形状計測のためのFPGA制御による全光ヒルベルト変換手法の開発」公益財団法人電気通信普及財団研究調査助成報告書、第37号、2022年度

⁵⁹ 唐沢好男「無線技術者のためのヒルベルト変換～比帯域の広い実数信号を処理したいときに～」 Technical Report YK-013 July 24, 2018. http://www.radio3.ee.uec.ac.jp/ronbun/Hilbert_TR-YK-013.pdf

⁶⁰ 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p.69, p.70(2024年9月)。なお本資料の当該図面左下に挿入されていた、互いに90°異なるパルス波形1~4の図は参照用チャープフリーパルス列の説明であるため、誤解を回避するため本図では上方の参照光エリアに移動している。

て、計測用プローブパルスと参照用パルスで形状計測用の干渉計を構成する。分岐後の一方の参照用パルス列はさらに分岐され、その一方には、多重反射型遅延素子により、他方に対してパルス間隔分の遅れを与えられる。即ち、同じタイミングでは他方のパルス列との間に90°の位相差が生ずる。このことは、1対のパルス列が、 $A\sin\theta$ 型および $A\cos\theta$ 型の時間変化を伴うことを意味するため、全光ヒルベルト変換が達成される。これらのパルス列対は、参照用チャープフリーパルス列としてプローブ用チャープパルス列と干渉してスペクトル干渉 (IGM) を形成する。各干渉縞は $A\sin\theta$ 型、 $A\cos\theta$ 型に対応し、包絡線は $\sqrt{(A\sin\theta)^2 + (A\cos\theta)^2}$ で表される。こうして複雑な計算や遅延時間の走査をすることなく、包絡線を求めることができる。これを全光ヒルベルト変換と呼ぶ。

ただし、得られた遅延時間 (波長) に対する干渉縞強度の包絡線を単色カメラで検出しても波長を決定することができない。このため加藤らは、図3.1 (b) に示すように、90°の位相差を持つパルス列対をそれぞれショートパスフィルタおよびロングパスフィルタに通して波長に対して単調増加関数に変換し、遅延に対する透過率を一意に決める近赤外領域のカラーカメラに相当する手法を提唱した。実験にはカメラで4枚の干渉画像を同時取得し、同じフィルタを通過した画像同士の2乗和を求め、さらにそれらを除算することで3次元形状の計測に成功した。これは、画像のピクセルごとに瞬時に光演算を行う手法と言える。こうした全光ヒルベルト変換手法による瞬时无走査3次元イメージング法の提唱は画期的である。

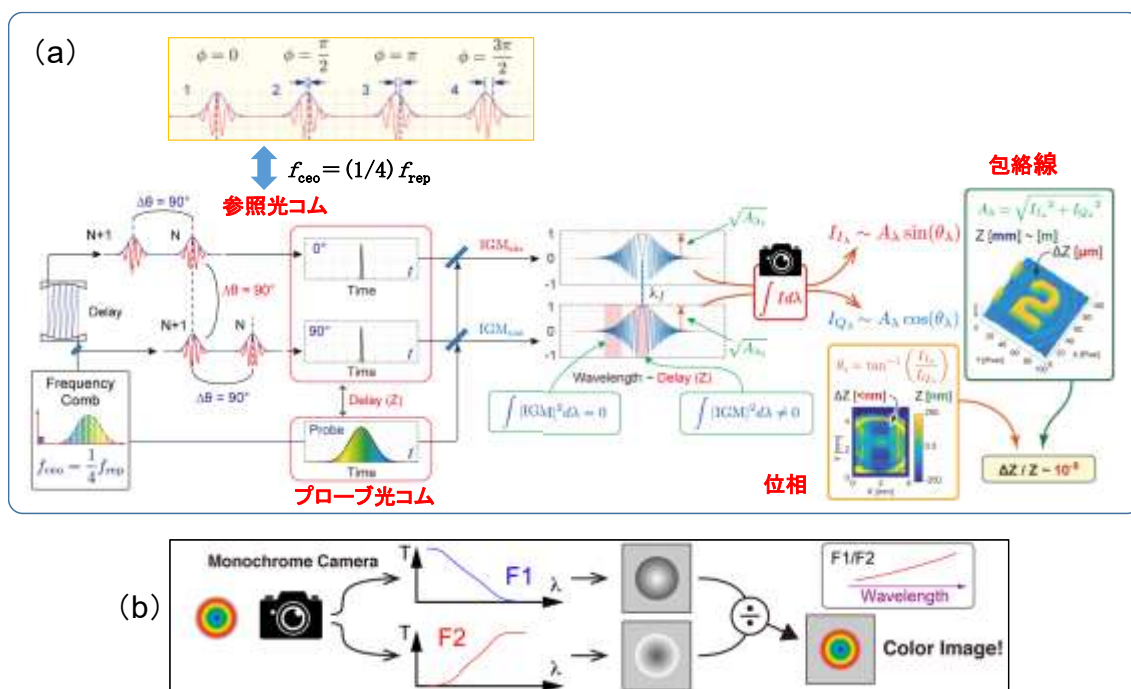


図3.1 全光ヒルベルト変換法を用いた瞬时无走査3次元イメージング法。
 (a)90°の位相差を有する超短パルス列の発生。(b)90°位相差を有するパルス列対のペアフィルタによる単調増加関数への変換と遅延に対する透過率の一意的な決定法⁶⁰。

3.1.2 新たな研究領域や研究の潮流の形成

本プロジェクト終了後、2.3節で報告した様に光コムに関する新たな提唱が多数もたらされた。これらのうちで新たな研究領域や研究の潮流の形成に多大な貢献をもたらした成果として、デュアルコムによるコヒーレント制御の基本概念の提唱と、デュアルコム分光法の代表的な応用例としての蛍光寿命顕微鏡の開発を本項で取り上げる。

(1) 4つのフリーパラメータ制御による高コヒーレント制御性デュアルコムの提唱^{17,61}

分光法には、グレーティングで光を波長ごとに空間的に分割する分散法と、マイケルソン型干渉計で光の位相情報を利用するフーリエ分光法がある。後者は単一の検出器で多波長を同時に分光できる長所を持つため分子の吸収線が多い赤外領域で多用されるが、周波数分解能とデータ取得速度が遅延ステージの走査距離と速度で決定され、高速分光には難点がある。

光コムは、パルス列のコヒーレンスが2種の光周波数パラメータ f_{rep} および f_{ceo} で電氣的に変調出来る極めて特異な超短パルス光源である(図 1.1)。デュアルコム(ここでは以後 DC と記す)は、光コムを2台用いることでコヒーレンス特性と活用性を一気に高める優れた分光法を提供する(図 2.6)。本項では、図 3.2 を用いて、本プロジェクトで提唱された新たな光波のコヒーレント制御性を持つ DC の概要を説明する⁶²。

DC は、図 3.2(a) に示す 2 台の光コム(Comb1 および Comb2)において、周波数軸(右図)の f_{rep} および f_{ceo} に関わる 4 つのフリーパラメータ ($f_{\text{rep}1}$, Δf_{rep} , $f_{\text{ceo}1}$, Δf_{ceo}) の制御で、時間軸(左図)のパルス周期の差分 (ΔT_{rep}) および相対的なパルス内位相 (CEP) のズレ ($\Delta \phi_{\text{CEP, rep}}$) に基づく新たなコヒーレント制御性を実現するものである。ここで、 $\Delta f_{\text{rep}} = f_{\text{rep}1} - f_{\text{rep}2}$ 、 $\Delta f_{\text{ceo}} = f_{\text{ceo}1} - f_{\text{ceo}2}$ 、 $\Delta T_{\text{rep}} = 1/f_{\text{rep}1} - 1/f_{\text{rep}2}$ 、 $\Delta \phi_{\text{CEP}} = 2\pi f_{\text{ceo}}/f_{\text{rep}}$ 、 $\Delta \phi_{\text{CEP, rep}} = \Delta \phi_{\text{CEP}1} - \Delta \phi_{\text{CEP}2}$ である。時間軸上に現れる分光時のスペクトル(Interferogram)では、2 台の光コムの出力パルスが完全に時間的に重なったのち、以後のパルス対は上述のパルス周期の差分 (ΔT_{rep}) に起因して順次時間的にずれる(図 3.2(b) 参照)。即ちパルス列に Δf_{rep} を与えれば、機械ステージの走査は不要で、2 つのパルスの遅延時間(干渉位相)を走査でき、フーリエ分光に比べてデータ取得時間は桁オーダーで短縮される。さらに、遅延時間変化量、即ち周波数分解能の拡大も極めて容易になる。このように DC は高速性・広帯域性に優れた新たなフーリエ分光法として、広範な応用が期待されている。

しかし、従来の DC においては、その相対パラメータのうち、パルスの相対遅延を制御する Δf_{rep} のみが主として活用されており、パルス波形の内部位相を決める Δf_{ceo} はゼロに固定されていた。それは、常に同じ干渉波形を得られるように条件を設定し、干渉縞の単純な積算を可能にするためである(コヒーレント積算と呼ばれる)。それに対し、本プロジェクト期間中に、世界に先駆けた新しいコヒーレント制御を活用したデュアルコム分光の概念を

⁶¹ 久世直也、小澤陽、小林洋平「実験技術：デュアルコム分光～FT-IR にかわる高速広帯域精密分光～」日本物理学会誌、69 巻、(2014)1 号

⁶² 美濃島(電気通信大学)提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p. 85, p. 89(2024 年 9 月)

提唱した。これは、 Δf_{ceo} を積極的にゼロ以外の値に設定し、 Δf_{ceo} と Δf_{rep} や、 Δf_{ceo} と f_{rep} の比率を精密に制御することによって、パルス光波の瞬時位相や波形自体を操作して活用する手法である。すなわち、光のコヒーレンスを積極的に操作して、光と物質との相互作用をも操作し、分光計測に活用するという画期的なコヒーレント制御の概念である。プロジェクト終了後は、そのコヒーレント制御の概念をさらに大きく発展させ、高速かつ広帯域な円偏光変調や、空間位相をも制御した光渦コムの操作や変調を実現して、新たな高機能分光法を多数生み出し、様々なコヒーレント制御性を追求する新たな研究領域/潮流が形成された。

この結果、本プロジェクトとその終了後に開発された新しい高機能なDCは、光学特性評価のための光ネットワークアナライザーとして、固体(磁気・電気)材料やデバイスの複素分光特性の高速評価、超高速時間分解多次元測定、偏光変調、光渦コム、などを含む時空間制御、超高速・超高感度量子計測など、幅広い応用分野に波及効果をもたらしつつある。

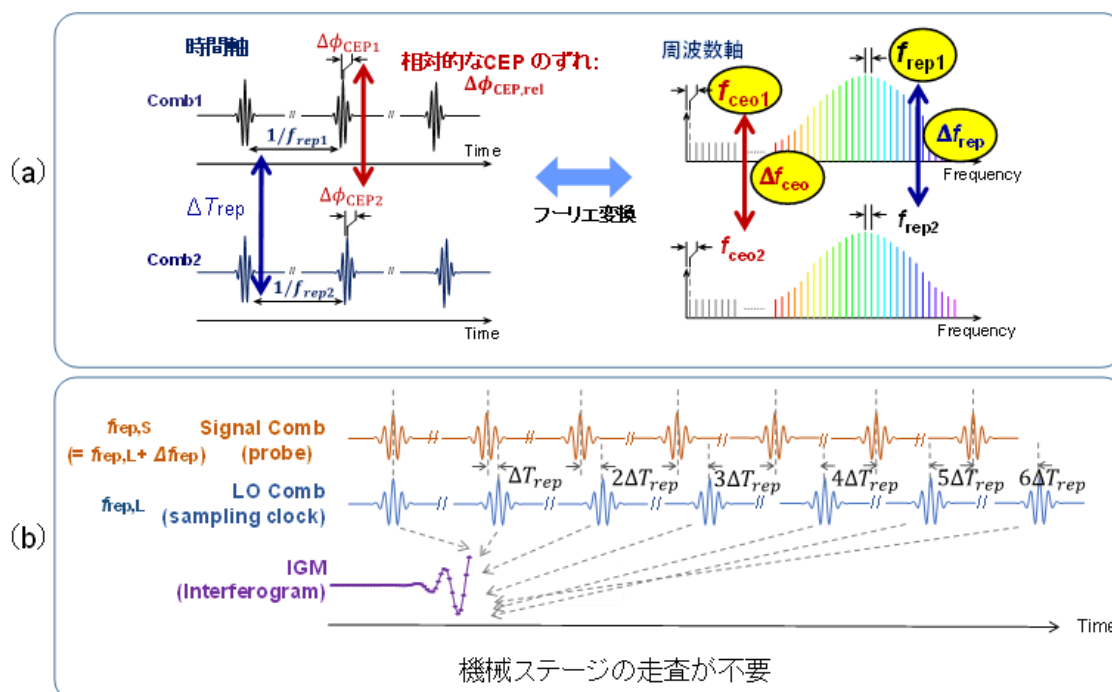


図 3.2 デュアルコムによるコヒーレント制御。(a)時間軸の超短パルス列と周波数軸の光周波数列。2つのコムにおける4つのフリーパラメータ制御により、光パルスの瞬時位相を自在に操作したコヒーレント制御が可能となる。(b)DC 分光の時間軸描像。相対的な CEP のズレにより機械ステージの走査が不要となる⁶²。

(2) デュアルコムを用いた蛍光寿命顕微鏡の開発⁴³

2.3.2①で報告したデュアルコムを用いた蛍光寿命顕微鏡は、多数の斬新な技術の導入により、新たな研究の潮流の形成に貢献している。

従来の蛍光寿命顕微鏡では、ミラーの走査によるレーザー光のサンプル焦点の計測のため、サンプル全面の順次照射に時間を要した。新たに開発したデュアルコムを用いた手法を図 3.3 に示す⁴³。図中、2つの光コム(繰り返し周波数 $f_{\text{rep}1}$, $f_{\text{rep}2}$)が僅かに異なる OFC1 および OFC2 の干渉により、変調周波数が僅かに異なる多数(44,400 個)の光明滅(変調)信号群

が 2 次元平面状の画素として生成される。これらの信号群は Virtually Imaged Phased Array (VIPA) と Grating により各々垂直および水平方向に配列され(L1、L2)、ミラー(DM)および対物レンズ(OL)を経て試料を同時に照射して蛍光を励起する。試料の各画素は異なる光周波数信号で明滅するので、周波数の計測で画素の位置が特定される。この時、蛍光寿命は光信号の位相ズレを誘起するため、PMT2 で検出される 2 次元蛍光スポット群では、スキャンレスで蛍光強度および位相の両イメージが一括取得され、蛍光寿命空間分布の高速顕微計測が実現する。

本技術は、ライフサイエンス分野での利用が期待される。例えば、同時計測性が担保された蛍光寿命イメージの取得が可能となるので、生きた細胞内部における分子の動きの精密な観察が可能となり、生命現象や生命機能解析に関する新たな知見を迅速に取得できることが期待される。また、新型コロナウイルス診断で利用される抗原検査などで、膨大なサンプルの並列同時計測が可能のため、大量自動検査システムへの応用が期待される。

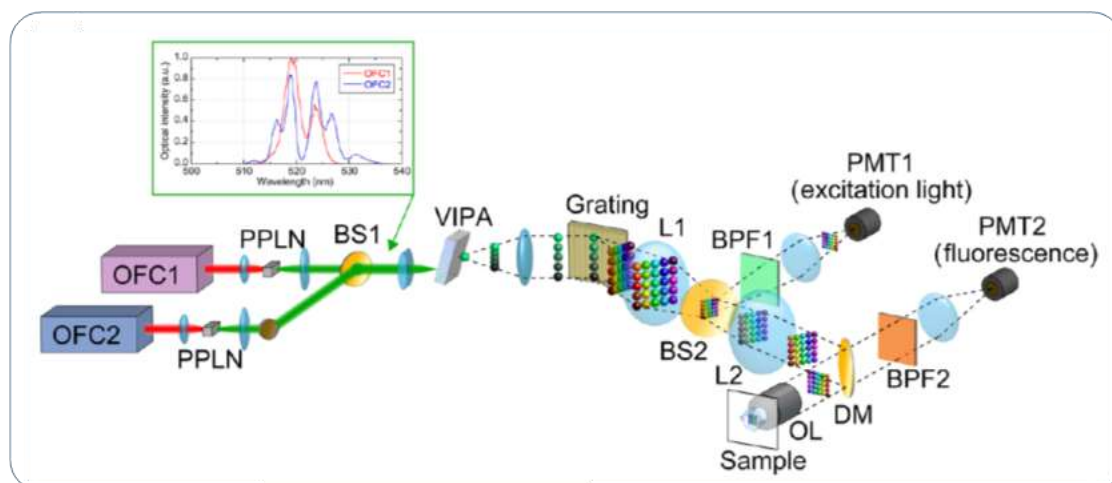


図 3.3 デュアルコムを用いた蛍光寿命顕微鏡の構成⁴³。

3.1.3 国際共同研究の展開

本プロジェクト終了後、電気通信大学および徳島大学のグループで展開された代表的な国際共同研究を以下に列挙する。

(1) 知的時空間統合化グループ(電気通信大学)

(国際共同研究)

- ・米国コロラド大学 Prof. Thomas Schibli : 量子光源・信号検出への応用研究
- ・ポーランド ワルツコー大学 Prof. Lukasz Sterczewski : 位相補正の研究

(国際交流事業)

- ・2022 年、JSPS 学術国際交流事業：諸外国の優秀な研究者の招聘「量子もつれ光子検出のための異波長光コムの高精度タイミング同期」がなされた。
- ・2023～2025 年、JSPS 学術国際交流事業：国際的な共同研究等の促進「中空光ファイバーと中赤外デュアルコム分光による高感度ガスセンシング技術の研究」がなされた。

(2) テラヘルツ・広帯域スペクトル操作グループ(徳島大学)

(国際共同研究)

- ・2024年度：徳島大学 pLED 研究所の医光連携研究の推進の一環として、光コム顕微鏡の研究がアストン大学(英国)との国際共同研究契約締結のもとでなされた。
- ・高精度性と汎用性を備えた THz コムガス分光の国際共同研究が、北京航空航天大学(中国)およびリトラル・コート・ド・パール大学(フランス)との間で展開中。

3.1.4 基礎科学分野～精密周波数計測～への展開^{63, 64, 65}

国際単位系(SI)における7つの基本単位の1つである時間の単位「秒」は、1967年に、それまでの地球の公転による定義から「Cs¹³³原子の特定遷移間放射の周期の9192631770倍の継続時間」(原子時計)に改定された。時間標準器としての一次周波数標準器の不確かさは10⁻¹⁶台に達するが、世界で希少(~10台)なため、実用的な周波数標準は一次周波数標準器から世界中の多数の原子時計を用いて校正される時系、即ち協定世界時(UTC)として運用されている。ただし、原子時計によるクロックはマイクロ波(9GHz)領域であるため高精度の取得には長期間(~1ヶ月)を要するため秒の再定義が叫ばれた。

一方、近年レーザー冷却技術を用いた光格子時計は光周波数標準の可能性を切り開き、フェムト秒光コム技術は、光とマイクロ波を直結し光周波数の絶対測定を容易にした。このため2003年の国際度量衡総会で、産業技術総合研究所が光とマイクロ波周波数標準の創生と比較のため高信頼性の技術開発を勧告し、秒の再定義の検討を続けるよう要請した。

光コムは繰り返し周波数とオフセット周波数を、マイクロ波周波数標準を基準に安定化することで光周波数領域の正確な目盛りになる。また周波数未知のレーザーの周波数とのビート周波数から、光の絶対周波数が10⁻¹⁸の精度で容易に決定できることが分かってきた。これらを背景に、不確かさ10⁻¹⁸を達成した産業技術総合研究所の光コム(2.3.3①参照)は、今や「秒」の世界標準の候補になっている。光コムの基礎科学分野への展開の代表例と言える。

3.1.5 学術分野への貢献

(1) 多くの論文発表と国際会議における基調/招待講演

美濃島グループの研究成果は、本プロジェクト終了後の2020~2024年の間に、主要論文誌(国際会議Proceedingsを含む)に多数(~120件)掲載され、世界の光・レーザー科学分野で注目を浴びた。この間、美濃島は多くの国際会議に招聘され多数の基調講演(Optics & Photonics Africa 2023ほか5件)/招待講演(CLEO-PR 2024ほか13件)を行った。これらは、国内外の光科学技術の普及に対する本研究の多大な貢献が反映されたものと捉える事ができ

⁶³ 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 物理計測標準研究部門 ホームページ
<https://unit.aist.go.jp/ripm/ja/teams/>

⁶⁴ 盛永篤郎「21世紀の国際単位と標準」応用物理、第74巻、第6号、718-725(2005)。

⁶⁵ 松本弘一「計量標準とトレーサビリティ」光学、39巻、3号、114-121(2010)。

る。

(2) 国内外の各種学術研究開発組織から多数の招聘

プロジェクト終了の2019年、徳島大学内に「pLED研究所」が設立された。同研究所内に「美濃島研究室」が創設され、美濃島は光コムの実用化に向けた精力的な研究実績のゆえに特別招聘教授に任命され、新規な光コム分光のテーマのもとで連携研究に貢献した。このほか、美濃島は2021年電気通信大学内の量子科学研究センター長、2022年同大副学長、2023年浜松ホトニクス株式会社社外取締役、2024年同大副理事および教育研究評議会評議員に任命された。

3.1.6 社会への貢献

本プロジェクト終了後、高機能を備えたデュアルコムへと転身した光コムは光源の一層の小型化・堅牢化・高性能化を展開し、これに伴う通信、医療/バイオ、分光応用への機運の高まりとともに社会への普及に大きく貢献した。ここでは、2.3節で報告したプロジェクト終了後のデュアルコム研究成果のうち、特に、(1)バイオ/分光計測への応用、(2)マイクロコムの移動通信システムへの応用、に関わる代表的な社会貢献への具体的成果3件を報告する。

(1) バイオ/分光計測への応用

① デュアルコムのバイオセンシングへの応用⁴⁵

バイオセンサーは、酵素や抗体など生体由来の分子をセンサー表面に固定し、ターゲット分子の結合に伴う入力電気/光信号の出力変化を検出する。血糖・たんぱく質などの健康・疾病関連物質、環境や食品における有害物質、新型コロナウイルスを含む細菌などの検出に利用され、高感度で迅速な検出能力が求められる。近年の光バイオセンサーは、入射光に対してセンサー表面に吸着する物質の屈折率変化を反映した反射光スペクトルの変化により、吸着物質の挙動を簡便にリアルタイムで検出できる利点を有するが、光スペクトル変化の感度が十分でない。

安井(徳島大学)は、本課題解決に向けてアクティブ・ダミー温度補償法を採用したデュアルコム・バイオセンサーを開発した(2.3.2②を参照)。一般の光バイオセンサーではビームの伝搬波モードでセンサー表面の屈折率変化を検知するが、本装置は定在波(共振)モードで検知するため検出感度は著しく増大する特長を有する。

図3.4は、本装置を用いた新型コロナウイルスN(ヌクレオカプシド)たんぱく質抗原の計測結果を示す⁴⁵。実験ではリン酸緩衝生理食塩水(PBS)中の抗原濃度を10分刻みでステップ状に変化させた。図3.4(a)は、アクティブ・センシング・光コムとダミー・センシング・光コムのセンサー信号(f_{rep1} 、 f_{rep2})の変化を示す。両信号とも温度ドリフトによる緩やかな変化が確認される一方で、アクティブ・光コムではサンプル濃度依存性のステップ状変化が確認されない。これは、サンプル濃度変化による f_{rep} シフトよりも温度ドリフトによる f_{rep} 変

動が大きいことに起因する。図 3.4(b)に示す両者の差分信号(Δf_{rep})では、温度ドリフトが抑制され、サンプル濃度依存性のステップ状変化が確認できた。図 3.4(c)に、モル濃度とセンサー信号の関係を赤丸プロットで示す。実験結果の妥当性を評価するため、理論モデル関数を用いたカーブフィッティング解析(紫ライン)、10 分の測定時間で、検出限界のモル濃度が 37aM であることを確認した。現状は、コロナウイルス関連の特異的吸着物質のみに対する理想的条件での計測に留まるが、今後は非特異的物質の吸着の影響を回避する表面修飾法の導入などにより、より現実に近い条件での性能評価が望まれる。

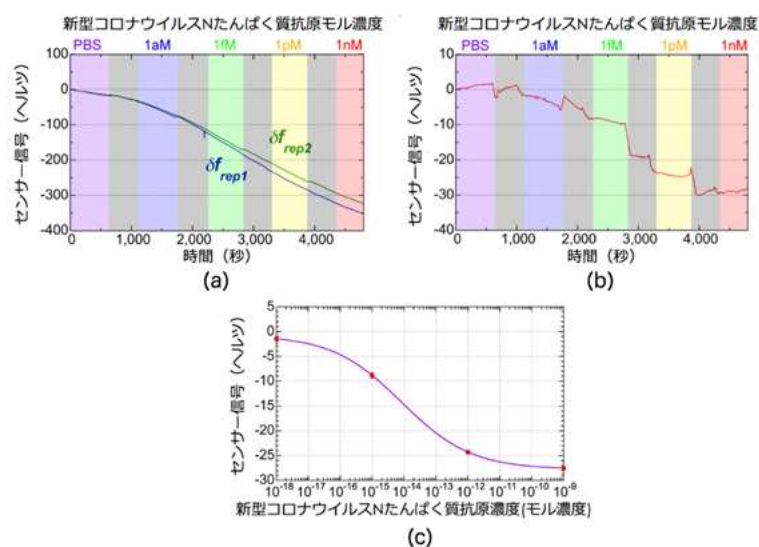


図3.4 デュアルコムによる新型コロナウイルスのバイオセンシング実験例⁴⁵。

② 中赤外(MIR)広帯域実用デュアルコムレーザーによる N_2O 分光への応用³⁸

中赤外領域(波長 $3\mu m$ 以上の長波長帯)に強い吸収線が多数存在する温室効果/大気汚染ガスの分子吸収スペクトルを迅速かつ正確に計測するため、小型・簡素な構成による実用的な中赤外広帯域デュアルコム分光の開発が急務である。

美濃島グループは、2.3.1(3)②で報告した様に、本プロジェクト終了後に実用化を目指した小型・簡素なデュアルコムレーザーによる波長域拡大に取り組み、広帯域にわたって高いコヒーレンスを保つデュアルコムの発生に成功した。これを中赤外デュアルコムガス分光に適用し、環境ガス N_2O の低圧ガスセルに対して波長 $4\mu m$ 帯の吸収分光を行い、HITRAN(大気吸収線)データベースの値と吸収線幅内で一致する良好な測定結果を示した。さらに、実用的なガス分光の高精度・高感度化を目指し、中赤外デュアルコム光源に、フルデジタル位相補正と簡易制御のみを導入することで、従来のような高精度制御を不要とした実用的な光源を用いながら、光コムの高精度特性を活かした高精度中赤外デュアルコムガス分光を実現した。環境ガス N_2O の分光を実施し、大幅な SN 比向上によって絶対光周波数値を決定し、HITRAN データベースの値と高精度に一致する結果を得た。

図 3.5 は、こうして得られたガスセル透過後の N_2O 吸収スペクトルの計測結果である⁶⁶。本結果は、上述のように、実用的な簡易光源でありながら、フルデジタル位相補正とコヒーレント積算を行っているため、高い SN 比を有し、右上のパネルに示すように HITRAN データベースと吸収波長が良い一致を示した絶対光周波数測定を実現している。

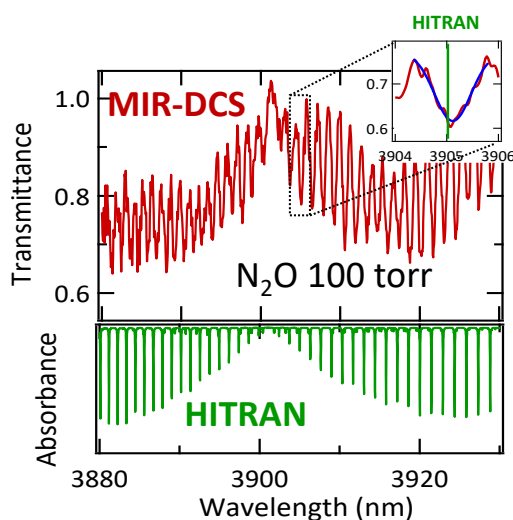


図3.5 一体型小型・簡易デュアルコム中赤外デュアルコムレーザーで得られた N_2O の吸収スペクトル⁶⁶。

なお、美濃島グループはデュアルコムレーザーを用いて、可視光領域への波長域拡大も図り、高非線形ファイバーと波長変換用非線形結晶を可視光領域で最適化して、波長 450～820nm におよぶ広帯域光コムを実現した。

(2) マイクロコムの移動通信システムへの応用⁴⁹

安井は、オール光型 THz 通信 (Photonic 6G) を目指したマイクロコムを開発した (2.3.2④を参照)。これを用いて、On-Off-Keying (OOK) 振幅変調された THz 波 (周波数 560GHz) を用いた無線伝送通信を行った。

図 3.6(a) は、マイクロコムを用いて生成した超高周波光電気周波数信号の光スペクトルであり、近赤外波長 1550nm 帯においてモード間隔 560GHz で複数の光モード列が並んでいる⁴⁹。同図(b)は発生した THz 波のスペクトルを示す。周波数はマイクロコムのモード間隔と厳密に一致している。OOK 振幅変調された THz 波を空間伝播させた後、THz 検出器で受信するデータ伝送実験を行った。同図(c)は、受信信号の時間波形 (eye-pattern) であり、時間波形信号の中央部分に eye 状の空間が観測できることから、データ伝送実験の成功が確認された。

⁶⁶ 美濃島 (電気通信大学) 提供。インタビュー補足資料「知的光シンセサイザの研究」p. 123 (2024 年 9 月)

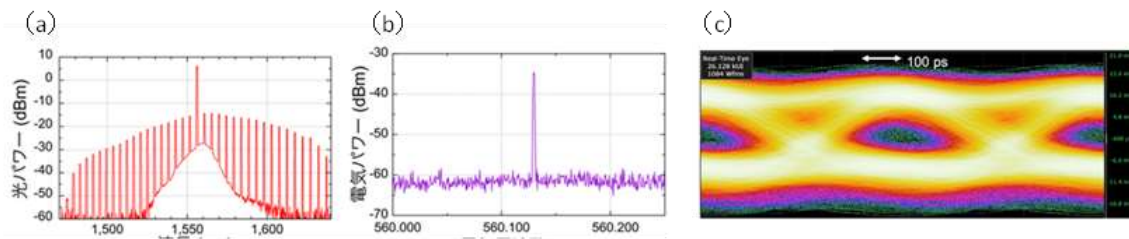


図3.6 マイクロコムによるTHz波無線通信実験結果。(a)マイクロコムの近赤外領域スペクトル、(b)発生したTHz波のスペクトル、(c)00K振幅変調時の受信時間波形：eye-pattern⁴⁹。

本マイクロコムは、より良好な光伝送実験を目指し、非制御(free-running)レーザーがもたらす位相ノイズの改善のために、高出力DFBレーザーによる光注入同期を導入して位相ノイズ、S/N比の改善を図った。これによりBPSK、QPSK、16QAMなどの高度な変調方式⁶⁷による光伝送実験で、明瞭なconstellation diagram⁶⁸の実現に成功した⁶⁹。また、高シンボルレート(変調速度)の16QAMの実験で指摘された位相ノイズの問題も、THz発生および超低位相ノイズ実現の両立が可能なKerrマイクロコムの新技術^{70,71}の開発により、早期の課題解決が期待される。これらノイズ低減の受動的新技术では、微小共振器の共鳴周波数の長波長側に位置する励起レーザーの周波数に対し、短波長側に電気光学変調器で新たに光サイドバンドを導入することで、熱雑音に伴う微小共振器の共振器長揺らぎを抑制して低位相雑音化を図るものである。また能動的新技术では、新たに導入した2波長マッハツェンダー干渉計(TWDI)で測定したコムモード間位相雑音をエラー信号として、励起レーザーの周波数をエラー信号がゼロになるようにフィードバックループを構成する手法である。本手法により、560GHzのキャリア周波数に対して世界最高品質となる40dB以上の位相雑音低減化を実現できたことは注目に値する。

本研究成果は6Gの移動通信に対しても、超高速・大容量・超低遅延・超カバレッジ拡張・超低消費電力/低コスト化・超多接続/センシング、などの多くの課題解決に貢献することが期待される。

⁶⁷ BPSK: Binary-phase-shift-keying, QPSK: Quadrature phase-shift-keying, 16QAM: 16-quadrature-amplitude-modulation

⁶⁸ 信号空間ダイアグラムの意。デジタル変調によるデータ信号点を2次元の複素平面上に表現した図であり、信号点配置図とも呼ばれる。

⁶⁹ Y. TOKIZANE, S. OKADA, T. KIKUHARA, H. KISHIKAWA, Y. OKAMURA, Y. MAKIMOTO, K. NISHIMOTO, T. MINAMIKAWA, E. HASE, J. FUJIKATA, M. HARAGUCHI, A. KANNO, S. HISATAKE, N. KUSE, AND T. YASUI, Optics Continuum 3, 1, 1-8 (2024).

⁷⁰ N. KUSE, AND K. MINOSHIMA, Amplification and phase noise transfer of a Kerr microresonator soliton comb for low phase noise THz generation with a high signal-to-noise ratio, Optics Express 30, 1, 318-325 (2022). 光サイドバンド利用および2波長マッハツェンダー干渉計(TWDI)を採用。

⁷¹ 久世直也「マイクロ光周波数コムを用いた超低位相雑音THz発生に関する研究」公益財団法人電気通信普及財団、研究調査助成報告書、第37号、2022年度。

3.1.7 世界の光コムの市場と展望

最近の世界の光コムの市場と展望に関しては、2023年 YH Research 株式会社発行の「光周波数コム市場調査レポート」で概要が把握できる⁷²。また、大容量コヒーレント光通信に関する2024年国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)発行のプレスリリースから、光コムの超広帯域テラビット光通信応用に関する最新情報が把握できる⁷³。これらを以下に紹介する。

(1) 光コム市場調査レポート⁷⁴

(i) 世界の光コム市場：

- ・2022年に売上高2億8700万ドルに達し、2029年には4億700万ドルに達することが予測されている。年平均成長率(CAGR)は5.16%(2023～2029年)である。

(ii) 地域別市場：

- ・消費者レベルでは北米が世界最大で2022年の市場シェアは34.36%、次いで欧州が26.38%、中国が25.15%。中国は今後数年間で最も急成長する地域で、2023～2029年のCAGRは約10.01%と予想される。
- ・生産面では北米と欧州が主要生産地域であり、2022年の市場シェアはそれぞれ44.17%と27.61%。中国は2029年の予測シェアが16.14%であり、今後数年間で最も速い成長率を維持すると予想される。

(iii) 製品タイプ別市場：

- ・フェムト秒ベース・モードロックレーザーが主要位置を占め、2029年の予測シェアは96.10%である。
- ・近年、集積型マイクロ共振器光コム技術が飛躍的に進歩しており、LiDAR、コヒーレント通信、精密分光、マイクロ波フォトニクス、集積型光クロック、量子光源などの分野で優位性を発揮しつつある。

(iv) 世界の主要企業：

- ・主要プレーヤーは、Menlo Systems、IMRA America、TOPTICAなどである。2022年の世界第1ティア(最大)プレーヤーは主にMenlo Systemsで、これらの市場シェアは約24.35%である。第2ティアプレーヤーはIMRA America、TOPTICA、Neoarkが続き、これらのシェアは36.39%である。
- ・日本国内の主たる市場は研究機関であり、殆どの光コムがMenlo SystemsのFC1500-ULNシリーズを使用している。
- ・一方中国では、近年政府の支援と有利な政策により研究成果が加速している。統合型マルチバンド超短パルスレーザーの国内生産は比較的成熟しているが、商業用光コム

⁷² Press Walker(無料プレスリリース配信サービス)のプレスリリース記事から引用。

<https://presswalker.jp/press/15836>.

⁷³ NICT プレスリリース(2024年7月24日)。https://www.nict.go.jp/press/2024/07/24-1.html.

⁷⁴ YH Research 株式会社調査レポート(2023年6月25日)

に関しては、ほとんどの機関でまだ研究段階である。現在、国内企業では LangYan Optoelectronics や Guodun Quantum などいくつかが台頭している。

(2) NICT が大容量コヒーレント光コム通信を発表⁷³

- NICT のフォトニックネットワーク研究に関する国際共同研究グループは、2024 年 7 月、現在の商用光通信装置 200 台分の伝送容量に相当する 336Tbps の光コム通信を実証した。
- 新たな波長帯での通信方式の開発を目指し、S 帯～C 帯～L 帯(1460～1625nm)の波長帯を使用してコヒーレント光通信を採用し、基準光配信(安定な光周波数で高品質のまま遠隔地へ配信する技術)と光コム技術を組み合わせて世界で初めて成功した。
- 実験では、図 3.7 に示すように、650 波長のコヒーレント光通信チャンネルを構築し、3 モード光ファイバーの 1 コアのみで構築した通信チャンネルで、偏波多重 16QAM 方式の信号変調とモード多重を行い、 $200\text{Gbps} \times 650 \times 3 \times$ 誤り訂正率(平均 86%程度) = 336Tbps の大容量伝送を実現した⁷³。
- 基準光と光コムの組み合わせによる変調・伝送・復調の概略を以下に述べる。
 - i) 基準光(1559nm)が送信側光コムと 39 コアファイバーのシングルモードコアに入力すると、光コムが S～L 波長帯で 25GHz 間隔・650 波長のコヒーレント光を生成。
 - ii) 光コムの出力光から波長分離されたコヒーレント光は、偏波多重 16QAM 変調を受けた後に 3 経路に分岐され、遅延回路を経て波長多重信号系列となり、3 モード信号変換の後、39 コアファイバーの 1 コアのみを用いた 3 モードコアに入力される。
 - iii) 光信号と基準光が 39 コアファイバーを 13 キロメートル伝搬する。
 - iv) 伝搬後の 3 モード信号は、従来型光ファイバー出力に変換後、基準光(同じく 39 コアファイバーで伝搬)から、受信側の光コムで S～L 波長帯の 650 波長光となる。
 - v) 波長多重された 3 モード分の受信信号と受信側光コムの出力光は波長分離され、後者は局部発振光として 3 モード同時のコヒーレント受信を行う。
 - vi) 電気信号に変換された受信データは、オフライン MIMO 信号処理を経て送信信号に復調される。
- この技術は S 帯通信用光源モジュールの商用化開発・実装を代替するものであり、光通信装置の光源削減・低コスト化に資する。更に、将来のマルチバンド波長多重通信の商用化の加速に貢献すると期待されている。

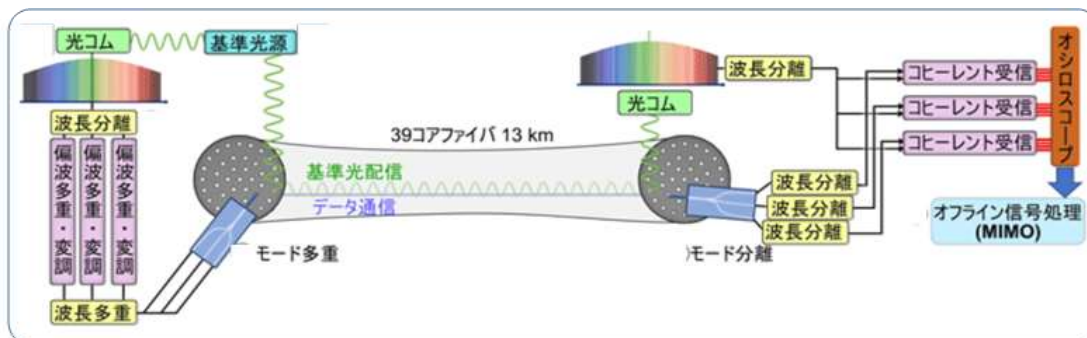


図3.7 大容量コヒーレント光コム通信⁷³

以上の市場調査レポートおよびプレスリリースは、光コムが、高精度・高感度・高分解能への期待度から、光クロック・レーザー測距・アト秒科学・精密分光学・天体観測・量子操作・生命科学など、今後多くの分野に信頼性の高い測定ツールを提供するであろうと指摘している。また国内向けの情報として、光コム技術を産業応用レベルにまで引き上げた日本の最初の企業である XTIA は現在、製造業向けに光コムベースの 3D スキャナーと 3D 検査システムを提供していると報告している。更に、科学技術分野に関して、2022 年の科学研究のシェアは約 93.80%、今後数年間の年平均成長率は約 4.48%と予測している。以上の事から、光周波数コムは、導入後 20 年間で全く新しい科学的展望が開かれていることが伺われる。

3.2 科学技術および社会経済への波及のまとめと展望

第3章では、プロジェクト終了後の研究成果(2.3節参照)のうち、注目すべき成果を、科学技術・社会・経済への波及と展望の視点から研究の背景と共に詳述した。図3.8は、3大テーマ：瞬時高分解3次元イメージング、デュアルコムによるコヒーレント制御分光、光コム光源の新技术、における具体的成果を本章の各視点でまとめたものである。

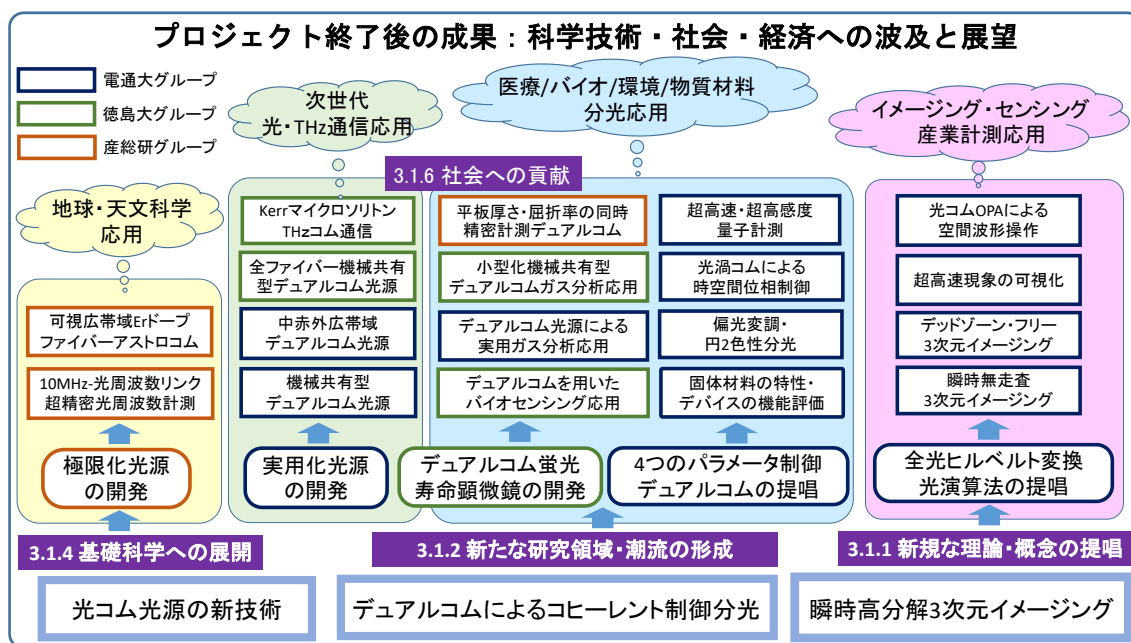


図 3.8 プロジェクト終了後の研究成果の科学技術・社会・経済への波及と展望

光コムは、特徴的な2つの光周波数： f_{rep} と f_{ceo} の精緻な操作で、時間軸では超短光パルス列、周波数軸では等間隔に並ぶ光周波数モード列が目的に応じて巧妙に再構築される。

本プロジェクト終了後、実用化を目指した新規応用の開拓に重点化し、まず瞬時高分解3次元イメージングで革新的な新理論を提唱した。 $f_{rep}=4f_{ceo}$ なる関係を骨子とした全光ヒルベルト変換法と呼ばれる光演算法を提唱し、光画像素子と同等の高空間解像度を有する瞬

時無走査 3次元形状計測技術を確立して、斬新な原理の提唱に基づく多彩な科学技術への波及に踏み出した。

同様の f_{rep} と f_{ceo} の巧みな操作は、2台の光コムにおける4つの周波数パラメータの多様な操作に拡張されてコヒーレント制御デュアルコム概念へと発展し、新たな研究領域や研究の潮流の形成に大きく貢献した。代表的成果は、蛍光寿命顕微鏡への応用をはじめ、小型・簡素構成一体型中赤外デュアルコム光源の開発とこれを用いた N_2O ガス中の中赤外吸収スペクトルの計測応用、偏光変調を利用した円2色性高分子の分光計測応用、THz コム移動通信応用などで、社会経済へ多大な貢献をもたらした。

一方基礎科学分野においても顕著な成果が創成された。絶対周波数精度 10^{-18} を達成した光周波数コムは「秒」の再定義を実現するための新たな世界標準の候補となり、非線形素子を含む多くの新技術を導入した可視広帯域コムは新たな天文コムとして期待を高めている。

こうした光コム応用の科学技術・社会経済への普及には、国際共同研究(米国・ポーランド・英国・中国・フランス)、学術国際交流事業(2022~2025年: JSPS)、国内新設 pLED 研究所(徳島大学)などの幅広い支援がある。美濃島は学術面での幅広い活躍により、本プロジェクト終了後、多くの国際会議の基調講演(5件)・招待講演(13件)に招聘され、世界の光・レーザー科学分野で多大な注目を浴びた。

世界のコム市場の調査レポートによれば、光コムの世界市場は、2022年の2億8700万ドルから年平均成長率5.16%を経て2029年に4億700万ドルに成長するとの予測がある。製品は、現在モード同期レーザーが主流だが、近年 LiDAR、コヒーレント通信、精密分光などに向けた未来型マイクロコムの飛躍的な進展が予想されている。また最近発表の大容量コヒーレント光コム通信は、本報告での THz コム移動通信とは異なる新たな光コムの利用法である。光コムを取り巻く社会は新たな光技術を取り入れた変革の到来が予測されている。