

平成 27 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「光波長測定装置用小型波長掃引光源モジュールの開発」

研究開発成果等報告書

平成 28 年 3 月

委託者 関東経済産業局

委託先 公益財団法人長野県テクノ財団

内容

◆第1章 研究開発の概要.....	4
・1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標.....	4
・1-1-1 研究の背景.....	4
・1-1-2 研究概要.....	4
・1-1-3 研究目的.....	5
・1-1-4 研究目標.....	5
・1-2 研究体制.....	7
・1-2-1 研究組織（全体）.....	7
・1-2-2 管理体制.....	8
・1-2-3 管理員及び研究員.....	10
・1-2-4 指導・協力者及びその内容.....	11
・1-2-5 研究実施場所.....	12
・1-3 成果概要.....	13
・1-3-1 ① AOTF とディスクリット光学系との結合手法の確立.....	13
・1-3-1-1 ①-1 導波路の端面処理手法の確立（実施：長野計器株式会社）.....	13
・1-3-1-2 ①-2 光学系のアライメント，特性評価システムの開発（実施：ミマキ電子部品株式会社）.....	13
・1-3-2 ② 制御用ハードウェアの開発.....	13
・1-3-2-1 ②-1 電気制御回路の開発（実施：ミマキ電子部品株式会社，長野計器株式会社）.....	13
・1-3-2-2 ②-2 モジュール筐体の開発（実施：ミマキ電子部品株式会社）.....	13
・1-3-3 ③ 光源と導波路の結合技術の開発（実施：ミマキ電子部品株式会社）.....	13
・1-3-4 ④ 小型波長掃引光源モジュールの信頼性評価（実施：長野県工業技術総合センター，ミマキ電子部品株式会社，長野計器株式会社）.....	14
・1-3-5 ⑤ 光波長測定装置への適用と安定度評価.....	14
・1-3-5-1 ⑤-1 光波長測定装置の開発（実施：長野計器株式会社）.....	14
・1-3-5-2 ⑤-2 光波長測定装置の安定度および信頼性の評価（実施：ミマキ電子部品株式会社，長野計器株式会社，長野県工業技術総合センター）.....	14
・1-3-6 ⑥ 光波長測定装置の他分野への展開検討（実施：国立大学法人信州大学）.....	14
・1-4 該当プロジェクトの連絡窓口.....	15

◆第2章 本論 研究開発の内容と成果詳細	16
・2-1 ① AOTF とディスクリット光学系との結合手法の確立	16
・2-1-1 ①-1 導波路の端面処理手法の確立	16
・2-1-1-1 概要	16
・2-1-1-2 研磨治具の開発	16
・2-1-1-3 開発した研磨治具による端面処理	18
・2-1-1-4 光学損失評価結果, 研磨結果および研磨時間比較	20
・2-1-1-5 まとめ	21
・2-1-2 ①-2 光学系のアライメント, 特性評価システムの開発	21
・2-1-2-1 概要	21
・2-1-2-2 組立工程と装置構成	21
・2-1-2-3 装置導入とその特徴, 効果	23
・2-1-2-4 まとめ	24
・2-2 ② 制御用ハードウェアの開発	27
・2-2-1 ②-1 電気制御回路の開発	27
・2-2-1-1 概要	27
・2-2-1-2 開発仕様	27
・2-2-1-3 電気制御回路の構造	28
・2-2-1-4-1 高周波回路評価試験	29
・2-2-1-4-2 試験結果	30
・2-2-1-4-3 温度調整機能評価試験	31
・2-2-1-4-4 試験結果	31
・2-2-1-5 評価まとめ	33
・2-2-2 ②-2 モジュール筐体の開発	33
・2-2-2-1 概要	33
・2-2-2-2 モジュール筐体構造	33
・2-2-2-3 評価試験	36
・2-2-2-3-1 光学性能評価試験	36
・2-2-2-3-2 電磁両立性試験	37
・2-2-2-4 評価まとめ	45
・2-3 ③ 光源と導波路の結合技術の開発	46
・2-4 ④ 小型波長掃引光源モジュールの信頼性評価	46
・2-4-1 冷熱衝撃試験	46
・2-4-2 振動試験	47
・2-4-3 高温動作試験	48
・2-5 ⑤ 光波長測定装置への適用と安定性評価	49

• 2-5-1 ⑤-1 光波長測定装置の開発	49
• 2-5-1-1 概要	49
• 2-5-1-2 開発仕様.....	49
• 2-5-1-3 光波長測定装置の構成	50
• 2-5-1-4 光波長測定装置制御プログラム	53
• 2-5-1-5 測定性能評価試験.....	54
• 2-5-1-6 評価まとめ	62
• 2-5-2 ⑤-2 光波長測定装置の安定度および信頼性の評価.....	63
• 2-5-2-1 光波長測定装置の道路橋での安定度および信頼性の評価.....	63
• 2-5-2-1-1 光計測による橋梁モニタリングの目的・概要.....	63
• 2-5-2-1-2 実橋梁計測の概要.....	63
• 2-5-2-1-3 現場での使用結果.....	64
• 2-5-2-1-5 評価まとめ.....	65
• 2-5-2-2 冷熱衝撃試験.....	66
• 2-5-2-3 振動試験.....	66
• 2-6 ⑥ 光波長測定装置の他分野への展開検討.....	67
• 2-6-1 心拍数測定.....	67
• 2-6-2 呼吸測定	68
◆最終章 全体総括	69
• 3-1 研究開発成果.....	69
• 3-2 研究開発後の課題・事業化展開	71
• 3-2-1 小型波長掃引光源モジュールの事業展開	71
• 3-2-2 光波長測定装置の事業展開	73

◆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

・1-1-1 研究の背景

近年、高速道路や鉄道の橋梁やトンネルの経年劣化による安全性信頼性低下が顕在化してきている。このような状況の中、インフラ設備の劣化具合等の健全度を監視することは、保全作業などに対する負担を大幅に軽減することが可能となると同時に、災害時などでの迅速な健全度監視ニーズにも対応が可能となる。これらインフラの健全度監視のため光ファイバセンサ（FBGセンサ）が検討されている。

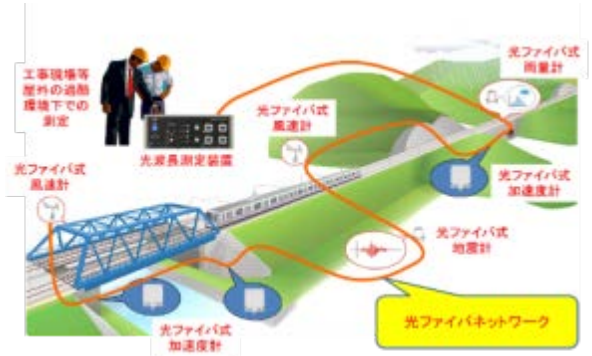


図 1-1-1-1 インフラ監視システム

FBG センサは一つの光ファイバに複数の測定箇所を製作でき、多点計測が可能になる他、電源の供給が必要ないので設置が容易になる。また、本質的に外来ノイズの影響を受けないなどインフラ構造物の監視用センサとして優れている。

一方、このような FBG センサを用いた測定には各センサに応じた波長の光を発生し、測定信号（光）を受け取る光波長測定装置が必要であるが、現在の光波長測定装置は非常に高価であり、大型であるために、普及には大きな障害となっている。そのため、低コスト・小型でありながら、信頼性の高い光波長測定装置が求められている。光波長測定装置の基幹部品は波長掃引光源モジュールであり、その波長掃引光源モジュールを低コスト・小型化することが課題となっている。

・1-1-2 研究概要

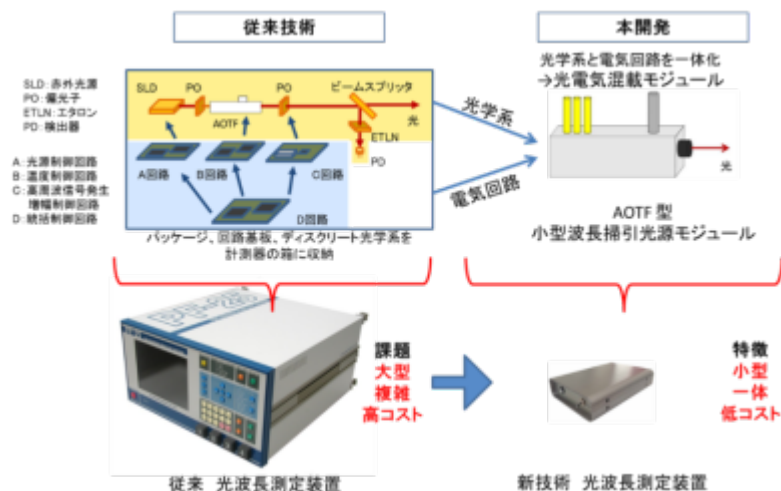


図 1-1-2-1 研究概要図

光波長測定装置を低コスト化するため、主要構成部品となる波長掃引光源モジュールを光学系と電子回路をコンパクトにまとめ、光電機混載モジュールとして小型化・低コスト化を行った。

・ 1-1-3 研究目的

光波長測定装置を、主要構成部品となる波長掃引光源モジュールの光結合の工程短縮によって低コスト化する。そのために、光学回路、特に AOTF (Acoustro-Optical Tunable Filter : 電気信号で光波長を選択できる光フィルタ) およびその他の光学系の精密な結合を簡便に行える方法および装置を開発する。さらに、AOTF 制御用電子回路を小型化し、光学系と電子回路をコンパクトにまとめ光電気混載モジュールとして完成し、モジュールを搭載した光波長測定装置の開発を行う。その際、光波長測定装置については耐環境性および実フィールドでの運用試験も含め、信頼性試験を行う。

・ 1-1-4 研究目標

①AOTF とディスクリット光学系との結合手法の確立

①-1 導波路の端面処理手法の確立 (実施：長野計器株式会社)

導波路とその他のディスクリット光学系を光結合する際に、導波路の端面はダイシング後、研磨処理を行う必要がある。従来の研磨処理 (1 チップずつ研磨) は時間が掛かり、AOTF を低コストで製作するに当たって課題であった。そこで、ウェハ一括研磨 (最大 14 チップ同時研磨) プロセスの開発を行い、研磨処理の時間を短縮することで、AOTF の低コスト化を図った。

初年度目標はダイシング工程のみで端面処理を行う事を目標としたが、中間ヒアリングにて研磨工程を導入して時間の短縮を図るようアドバイスを受けたため、目標を変更した。

①-2 光学系のアライメント、特性評価システムの開発 (実施：ミマキ電子部品株式会社)

本装置の機能を実現するために必要な AOTF とディスクリット光学素子 (例えば非球面レンズ、光ファイバ等) を結合する際には、光学損失を測定しながらそれぞれの光学素子をサブミクロンオーダの精度で最適位置調整し、かつ固定する必要がある。従来この作業には高い熟練と経験を必要とし、効率的な製造とコストの実現に課題を有していた。本開発ではこの課題を解決するため、高精度光学実装システムを構築する。このシステムを構築するために、その主要部分である位置調整機構や YAG レーザ溶接固定機構、制御装置の構成を決定し、装置を導入する。また、初期的なハードウェアの動作確認、YAG 溶接固定及び自動化のための制御ソフトウ

ウェアにおいて、効率的な位置調整方式と組立工程となるようアルゴリズムを構築する。

②制御用ハードウェアの開発

②-1 電気制御回路の開発（実施：ミマキ電子部品株式会社、長野計器株式会社）

AOTF の通過波長の温度依存性を補正する機能を有した高周波信号発生回路の設計、開発を行う。AOTF の温度依存の定量的な評価、印加する高周波信号の強度等は高周波回路解析装置を用いて行う。

②-2 モジュール筐体の開発（実施：ミマキ電子部品株式会社）

発熱により、光学系のアライメントが変化すること等で起こる損失の変動で信頼性を失いやすい光学系回路と、発熱する電気系回路を混在することが可能な小型低コストモジュール筐体の設計を行う。この際、ノイズの回り込み、熱設計等には十分な配慮を行う。

③光源と導波路の結合技術の開発（実施：ミマキ電子部品株式会社）

光源と導波路基板が同一モジュールの筐体内に配置されており、光源の発熱による影響を受けても光源と導波路基板間の結合損失の変動が 0.5 dB 以下、偏光消光比が 20 dB 以上ある結合技術の開発を行う。

④小型波長掃引光源モジュールの信頼性評価（実施：長野県工業技術総合センター、ミマキ電子部品株式会社、長野計器株式会社）

小型波長掃引光源モジュールの主要な寿命決定要素に対して、寿命加速試験計画を基に、高加速寿命試験、冷熱衝撃試験等を実施し、通電動作 10 万時間相当の信頼性を評価する。

⑤光波長測定装置への適用と安定度評価

⑤-1 光波長測定装置の開発（実施：長野計器株式会社）

小型波長掃引光源モジュールを搭載し、インフラ健全度監視に適した測定装置の開発仕様（サンプリング周波数、測定精度、使用温度範囲等）を満たす光波長測定装置二次試作品を開発する。

⑤-2 光波長測定装置の安定度および信頼性の評価（実施：ミマキ電子部品株式会社、長野計器株式会社、長野県工業技術総合センター）

光波長測定装置をアドバイザー（国立大学法人横浜国立大学）に一定期間貸与することにより、FBG センサによるインフラ健全度監視における装置の性能安定

度と有用性を評価する。これらの評価結果に基づき、必要に応じてモジュール及び装置にさらに改良を加える事により、製品レベルでの安定性・信頼性を実現する。

また、寿命加速試験による長期信頼性評価方法に基づき、5万時間相当の安定動作確認試験を実施する。

⑥光波長測定装置の他分野への展開検討（実施：国立大学法人信州大学）

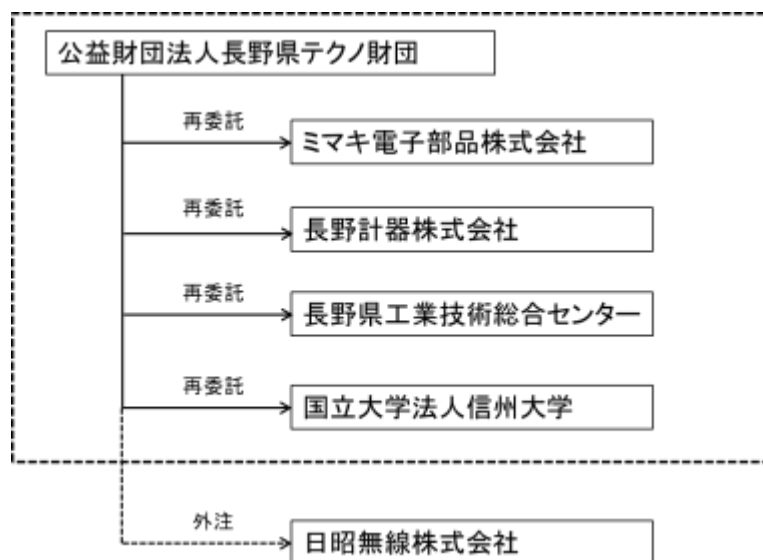
光波長測定装置を用いて、医療分野への適用可能性を検討する。具体的には、光波長装置を用いた光ファイバセンシングにより、生体の基本的な指標であるバイタルサイン（脈拍数，呼吸数）のデータ取得できることを確認する。

⑦プロジェクトの管理・運営（実施：公益財団法人長野県テクノ財団）

- ・事業管理機関・公益財団法人長野県テクノ財団において、本プロジェクトの管理を行う。プロジェクトの研究経緯と成果について取りまとめ、成果報告書1部及び電子媒体（CD-ROM）一式を作成する。
- ・本研究の実用化に向けた到達の度合いを検証するとともに、事業化に向けての課題等について研究実施者と調整を行う。

・1-2 研究体制

・1-2-1 研究組織（全体）



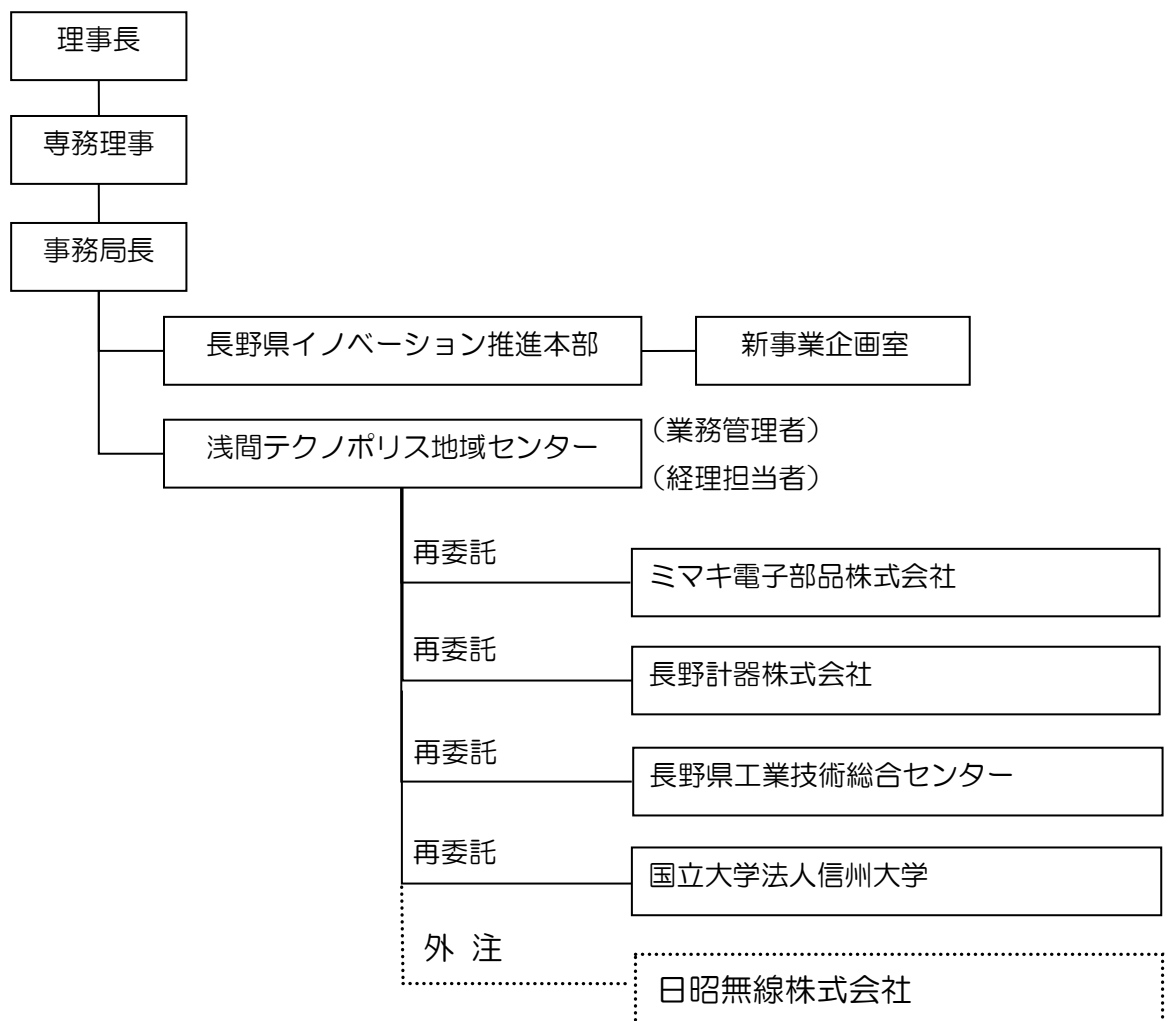
総括研究代表者 (PL)
 ミマキ電子部品株式会社
 光部品事業部
 副事業部長 田中 国夫

副総括研究代表者 (SL)
 長野計器株式会社
 FBG事業部
 次長 土屋 宗典

・ 1-2-2 管理体制

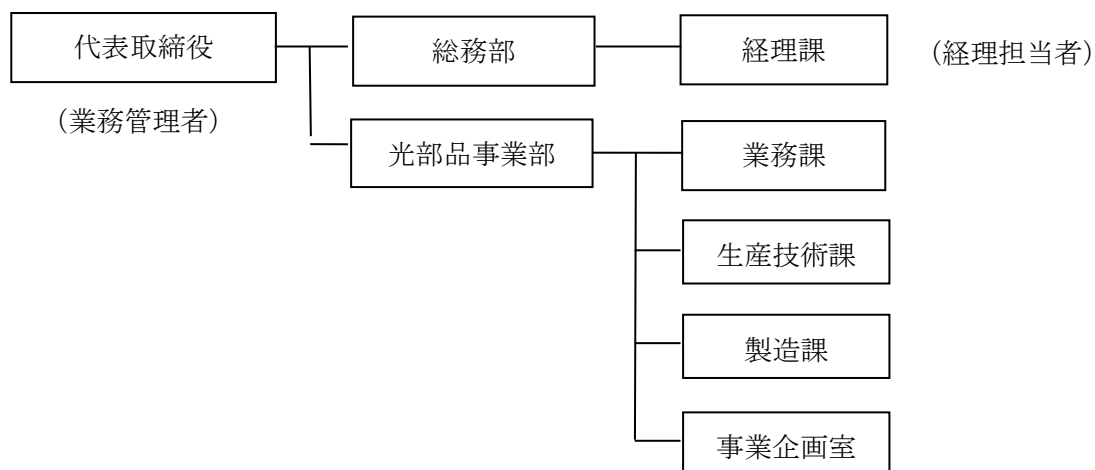
(1) 事業管理機関

[公益財団法人長野県テクノ財団]

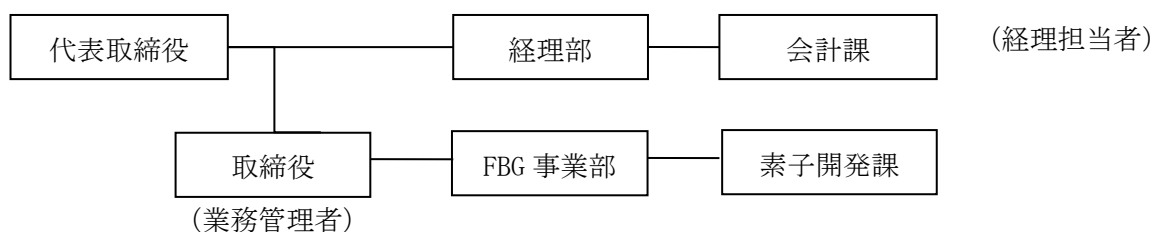


(2) 再委託先

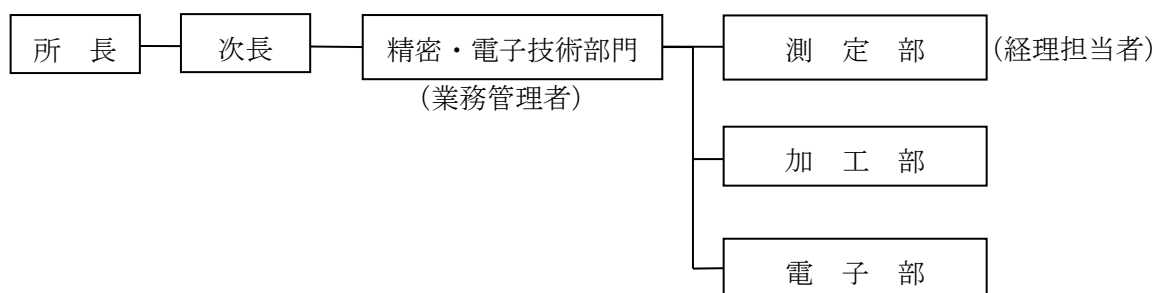
[ミマキ電子部品株式会社]



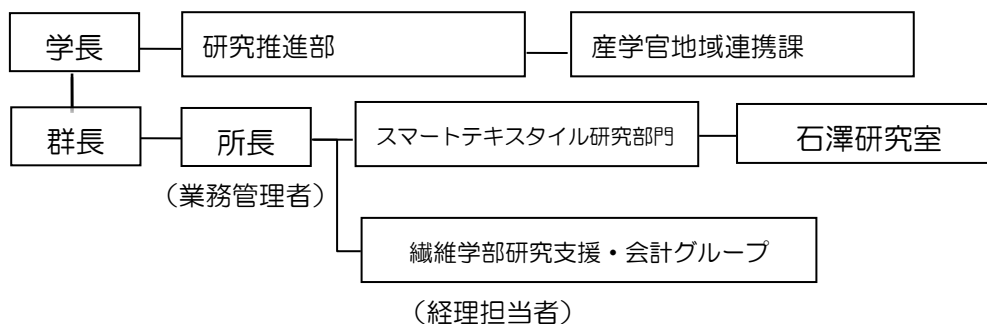
[長野計器株式会社]



[長野県工業技術総合センター]



[国立大学法人信州大学 (先鋭領域融合研究群国際ファイバー工学研究所)]



・ 1-2-3 管理員及び研究員

【事業管理機関】

公益財団法人長野県テクノ財団（管理員）

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
小林 幸	専務理事	⑦
塩入 良章	本部事務局 事務局長 長野県イノベーション推進本部 新事業企画室長	⑦
小林 幸	長野県イノベーション推進本部 新事業企画室長	⑦
大平 英明	浅間テクノポリス地域センター 事務局長	⑦
湯浅 正樹	浅間テクノポリス地域センター コーディネータ	⑦
柳澤 薫	浅間テクノポリス地域センター	⑦

【再委託先】（研究員）

ミマキ電子部品株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
内藤 勝好	光部品事業部 事業部長	①-2, ②-1, ②-2, ③, ④, ⑤-2
田中 国夫	光部品事業部 副事業部長	①-2, ②-1, ②-2, ③, ④, ⑤-2
堀田 一	光部品事業部 技術部 次長	①-2, ②-1, ②-2, ③, ④, ⑤-2
金子 哲	光部品事業部 技術部 量産設計課	①-2, ②-1, ②-2, ③, ④, ⑤-2
野本 英夫	光部品事業部 製造課 課長	①-2, ②-1, ②-2, ③, ④, ⑤-2
清水 亮太	光部品事業部 製造課	①-2, ②-1, ②-2, ③, ④, ⑤-2

長野計器株式会社

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
土屋 宗典	FBG 事業部 次長	①-1, ②-1, ④, ⑤-1, ⑤-2
藤田 圭一	FBG 事業部 素子開発課 課長	①-1, ②-1, ④, ⑤-1, ⑤-2
尾嶋 容	FBG 事業部 素子開発課 係長	①-1, ②-1, ④, ⑤-1, ⑤-2
小林 広樹	FBG 事業部 素子開発課	①-1, ②-1, ④, ⑤-1, ⑤-2

長野県工業技術総合センター

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
米久保 荘	精密・電子技術部門 化学部 専門研究員	④, ⑤-2
塩入 隆平	精密・電子技術部門 電子部 技師	④, ⑤-2

国立大学法人信州大学

氏名	所属・役職	実施内容（番号）
石澤 広明	先鋭領域融合研究群 国際ファイバー工学 研究所 スマートテキスタイル研究部門 長・教授	⑥

・1-2-4 指導・協力者及びその内容

研究開発推進委員会 委員

氏名	所属・役職	内容
田中 国夫	ミマキ電子部品株式会社 光部品事業部 副事業部長	P L
土屋 宗典	長野計器株式会社 FBG 事業部 次長	S L
米久保 荘	長野県工業技術総合センター 精密・電子技術部門 化学部 専門研究員	共同体
石澤 広明	国立大学法人信州大学 繊維学部感性工学系 准教授	共同体
西尾 真由子	国立大学法人横浜国立大学 大学院 先鋭領域融合研究群 国際ファイバー工学 研究所 スマートテキスタイル研究部門 長・教授	アドバイザー
高野 紘	ミマキ電子部品株式会社 代表取締役	主研究企業代表

山岸 一也	長野計器株式会社 取締役	共同体企業 部門責任者
湯浅 正樹	公益財団法人長野県テクノ財団 浅間テクノポリス地域センター コーディネータ	事業管理機関担当者

・ 1-2-5 研究実施場所

機関名	所在地	研究内容
ミマキ電子部品株式会社	長野県東御市 滋野乙 1382-1	①-2 光学系のアライメント, 特性評価システムの開発 ②-1 電気制御回路の開発 ②-2 モジュール筐体の開発 ③ 光源と導波路の結合技術の開発 ④ 小型波長掃引光源モジュールの信頼性評価 ⑤-2 光波長測定装置の安定度および信頼性の評価
長野計器株式会社 FBG 事業部	長野県上田市 生田 2150	①-1 導波路の端面処理手法の確立 ②-1 電気制御回路の開発 ④ 小型波長掃引光源モジュールの信頼性評価 ⑤-1 光波長測定装置の開発 ⑤-2 光波長測定装置の安定度および信頼性の評価
長野県工業技術総合センター 精密・電子技術部門	長野県岡谷市長地片間 町 1-3-1	④ 小型波長掃引光源モジュールの信頼性評価 ⑤-2 光波長測定装置の安定度および信頼性の評価
国立大学法人信州大学	長野県上田市常田 3-15-1	⑥ 光波長測定装置の他分野への展開検討

・1-3 成果概要

・1-3-1 ① AOTF とディスクリット光学系との結合手法の確立

・1-3-1-1 ①-1 導波路の端面処理手法の確立（実施：長野計器株式会社）

AOTF チップ上に設けられた光導波路の端面処理として、時間の短縮による低コスト化を図った。このため、ウェハー一括研磨（最大 14 チップ同時研磨）による研磨プロセスの開発を行った。従来の 1 チップずつの研磨と比較して、研磨時間約 60%の短縮が可能となり、低コスト化の目処がたった。

・1-3-1-2 ①-2 光学系のアライメント、特性評価システムの開発（実施：ミマキ電子部品株式会社）

AOTF チップを用いた光学モジュールの製作を行う。その際、AOTF とディスクリット光学素子（例えば非球面レンズ、光ファイバ等）を結合するには、光学損失を測定しながらそれぞれの光学素子をサブミクロンオーダの精度で最適位置調整し、かつ固定する必要がある。多点の光学素子を同時に位置調整でき、かつ YAG レーザ溶接固定できる高精度光学実装装置の開発を行い、効率的な製造と低コスト化の実現を図った。

・1-3-2 ② 制御用ハードウェアの開発

・1-3-2-1 ②-1 電気制御回路の開発（実施：ミマキ電子部品株式会社、長野計器株式会社）

光学モジュールの電気制御回路の開発を行った。電気制御回路に AOTF の通過波長の温度依存性を補正する機能を持たせることで、開発仕様である光掃引範囲変動 2.5nm 以内を満たしていることを確認した。また、高周波回路解析装置により周波数掃引範囲、高周波信号強度、高周波掃引周期の評価試験を行い、それぞれ開発仕様を満たしていることを確認した。

・1-3-2-2 ②-2 モジュール筐体の開発（実施：ミマキ電子部品株式会社）

光学モジュールや光源などの光部品と、電気部品である電気制御回路を一体の筐体内に収めることで、波長掃引光源モジュールの小型化を図った。開発に当たって、ノイズ耐性、熱設計等に十分な配慮を行った。

さらに開発した小型波長掃引光源モジュールについて光学性能評価試験、小型波長掃引光源モジュールを搭載した光波長測定装置について電磁両立試験を行い、開発仕様を全て満足する結果を得た。

・1-3-3 ③ 光源と導波路の結合技術の開発（実施：ミマキ電子部品株式会社）

本課題は発熱体である光源と、熱影響を受けやすいニオブ酸リチウム導波路を同一モジュール内で結合する際に、結合損失が発生すると言った課題であった。しかし光源を

モジュール外に設置し、最適な光源の選択することで熱影響を排除することが可能となり、課題を解決した。

- ・ 1-3-4 ④ 小型波長掃引光源モジュールの信頼性評価（実施：長野県工業技術総合センター，ミマキ電子部品株式会社，長野計器株式会社）

小型波長掃引光源モジュールの設計データと信頼性評価に関する IEC 規格等を基に検討した信頼性評価の試験計画を策定した。低温試験と高温試験で開発仕様温度範囲の上下限における小型波長掃引光源モジュールの劣化の程度を調査した。さらに、熱衝撃試験による加速劣化試験を実施し、通電動作 10 万時間相当の長期信頼性を確認した。

- ・ 1-3-5 ⑤ 光波長測定装置への適用と安定度評価

- ・ 1-3-5-1 ⑤-1 光波長測定装置の開発（実施：長野計器株式会社）

小型波長掃引光源モジュールを搭載した光波長測定装置二次試作品の開発を行った。開発仕様（サンプリング周波数，測定精度，使用温度範囲等）は実フィールドにおけるインフラ健全度監視に適した開発仕様とした。測定性能評価試験を行い，開発仕様を満足する結果を得た。

- ・ 1-3-5-2 ⑤-2 光波長測定装置の安定度および信頼性の評価（実施：ミマキ電子部品株式会社，長野計器株式会社，長野県工業技術総合センター）

光波長測定装置を横浜国立大学に貸与し，2015 年 11 月 17 日から道路橋に光波長測定装置を設置し、モニタリングを約 3 ヶ月行った結果、車両通過時の加速度波形を取得することができ、光波長測定装置およびセンサの信頼性・安定性分析が可能なデータが蓄積されてきている。年単位でデータ取得と分析を引き続き行うことで、さらに改良を進めていく。

また、寿命加速試験による長期信頼性評価方法に基づき、5 万時間相当の安定動作を確認した。

- ・ 1-3-6 ⑥ 光波長測定装置の他分野への展開検討（実施：国立大学法人信州大学）

光波長測定装置の他分野への展開検討として、人のバイタルサイン測定を実施した。ウェアラブルバイタルサインシステムの実現に向け、FBG システムの最適化に関する可能性を検証した。まず、被験者実験によって脈波を計測した後、脈波信号処理、計数によって、脈拍および呼吸数の実時間計測が可能であることを確認し、医療分野への展開の可能性を見出した。

・1-4 該当プロジェクトの連絡窓口

事業管理者	公益財団法人長野県テクノ財団
代表者	理事長 市川 浩一郎
所在地	〒386-8567 長野県長野市若里 1-18-1 長野県工業技術総合センター内 3階
担当者	浅間テクノポリス地域センター コーディネータ 湯浅 正樹 ma-yuasa@tech.or.jp
所在地	〒386-8567 長野県上田市常田 3-15-1 (信州大学繊維学部内)
連絡先	TEL : 0 2 6 8 - 2 3 - 6 7 8 8 FAX : 0 2 6 8 - 2 3 - 6 6 7 3

◆第2章 本論 研究開発の内容と成果詳細

- ・2-1 ① AOTF とディスクリット光学系との結合手法の確立
- ・2-1-1 ①-1 導波路の端面処理手法の確立

(実施：長野計器株式会社)

・2-1-1-1 概要

導波路とその他のディスクリット光学系を光結合する際に、導波路の端面はダイシング後、研磨処理を行う必要がある。従来の研磨処理（1チップずつ研磨）は時間が掛かり、AOTFを低コストで製作するに当たって課題であった。そこで、ウェハー括研磨（最大14チップ同時研磨）プロセスの開発を行い、研磨処理の時間を短縮することで、AOTFの低コスト化を図った。ウェハー括研磨を行うために、全てのチップの導波路端面に均等荷重を掛けることを可能とする研磨治具を開発し、研磨時間を短縮する。研磨治具を用いたサンプルのウェハー括研磨により、光学損失12dB以下および約60%の研磨時間の短縮を実現した。

・2-1-1-2 研磨治具の開発

複数のチップを同時に研磨するウェハー括研磨では、サンプルに掛かる荷重が不均一になり、端面が丸まってしまう（フチダレ）問題が顕著に現れる。（図2-1-1-2-1）

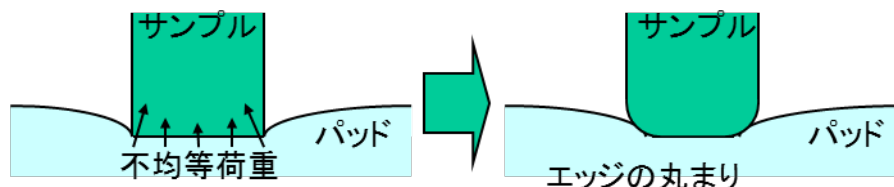


図2-1-1-2-1 サンプルウェハの研磨パッドへの沈み込みによるフチダレ

フチダレを抑えるためにはサンプル全体に均等荷重を加えることにより、サンプルのパッドへの沈み込みを防ぐことが重要である。（図2-1-1-2-2）そこで、極低荷重を掛け、均等荷重研磨を可能とする研磨治具の開発を行った。

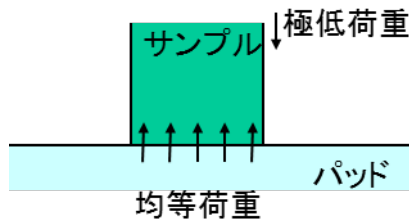


図2-1-1-2-2 極低荷重によるサンプルへの均等荷重研磨イメージ

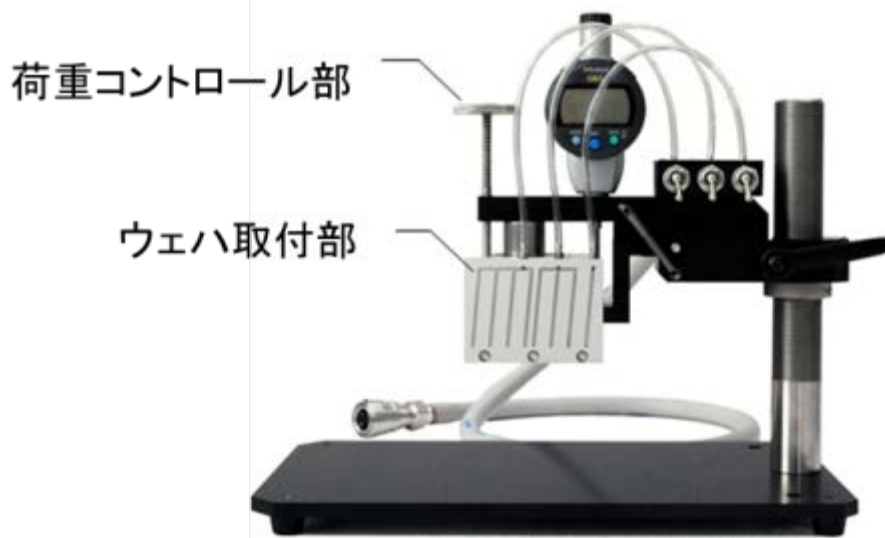


図 2-1-1-2-3 開発した研磨治具

開発した研磨治具を図 2-1-1-2-3 に示す。研磨治具の特徴と、その効果を図 2-1-1-2-4 に示す。サンプルウェハに掛かる荷重をコントロールする機構を持ち、複数のチップ全ての端面に均等な極低荷重を加える事が可能である。本研磨治具によりフチダレの軽減し、複数のチップを同時に研磨することで研磨時間の短縮を図った。

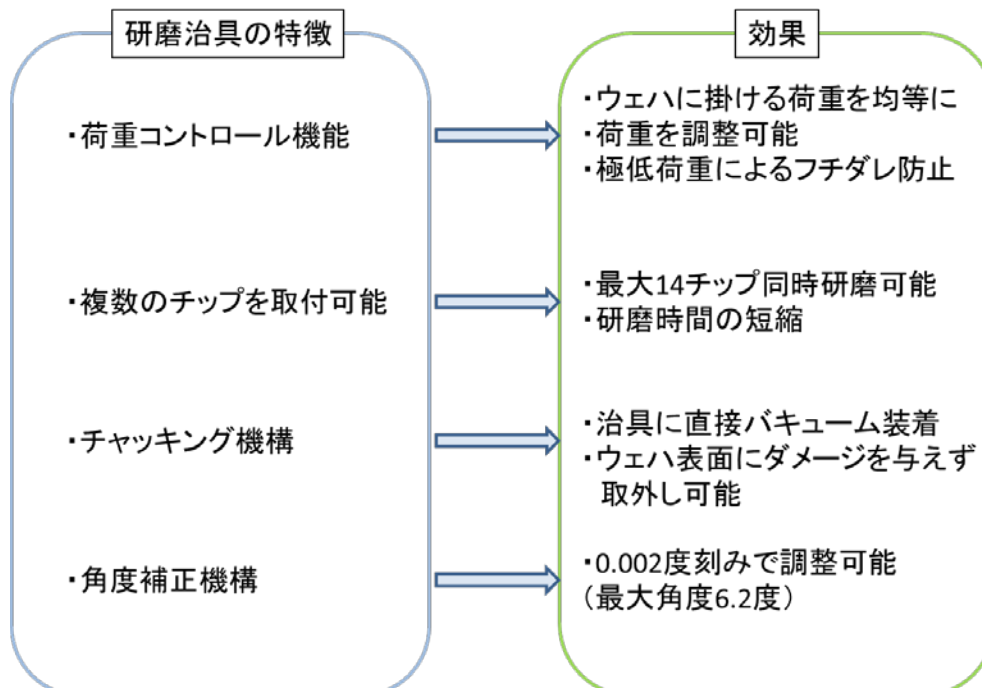


図 2-1-1-2-4 開発した研磨治具の特徴と効果

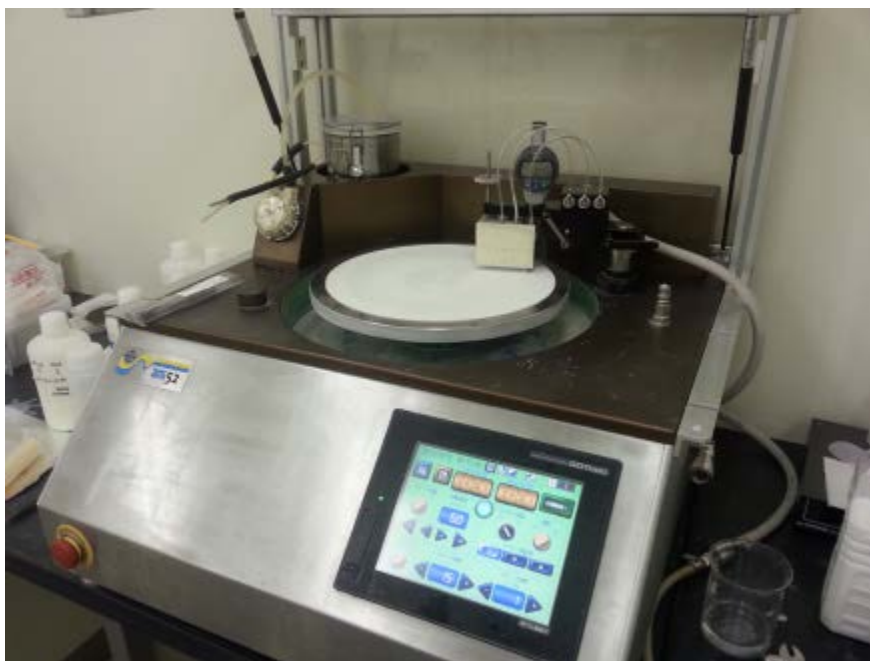


図 2-1-1-2-5 研磨装置 bni52 と研磨治具

・ 2-1-1-3 開発した研磨治具による端面処理

図 2-1-1-3-1 に研磨治具を用いてウェハ一括研磨を行ったサンプル端面の様子を示す。治具により、フチダレを軽減されたが、完全に抑えることは出来なかった。また、図 2-1-1-3-2 のように、研磨に用いるスラリーがウェハのパターニング面を汚染してしまったといった問題が新たに発生した。

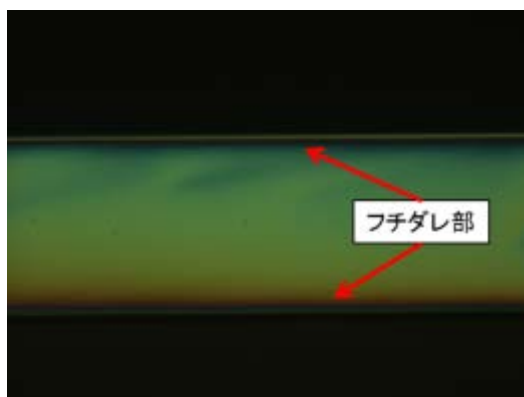


図 2-1-1-3-1 サンプルのフチダレの様子



図 2-1-1-3-2 スラリーによる汚染

そこで、更なるフチダレ対策およびスラリーによるウェハ汚染を防ぐため、図 2-1-1-3-3 の様にウェハ表面にダミーウェハを貼り付けて研磨加工を行った。

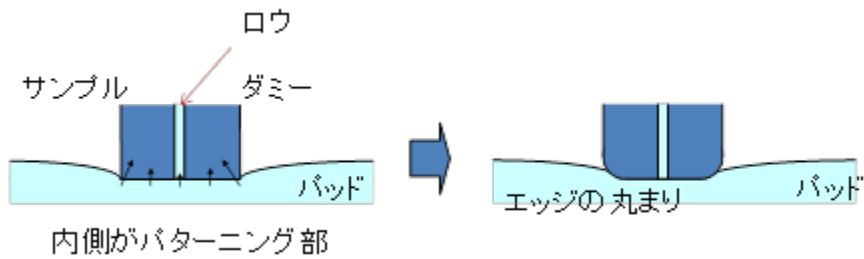


図 2-1-1-3-3 ダミーウェハ貼り付けによる研磨加工

サンプルウェハをホットプレート（60℃設定）に置き、パターニング面にロウを塗布する。そこにサンプルウェハと同素材であるニオブ酸リチウムダミーウェハを貼り付けることでフチダレおよびスラリーによる汚染を軽減する。



図 2-1-1-3-4 ダミーウェハ貼り付けによる研磨の様子



図 2-1-1-3-5 ダミーウェハ貼り付けによる端面研磨処理結果

ダミーウェハ貼り付けによる研磨加工の端面を図 2-1-1-3-5 に示す。観察結果からフチダレおよびウェハパターニング面のスラリー汚染を抑えた端面処理が可能となった。開発したウェハ一括研磨の条件を表 2-1-1-3-1 に示す STEP 1, 2 は AOTF チップの長さや端面角度を調整する研磨 STEP であり, 3, 4 仕上げ研磨 STEP である。研磨に用いた研磨装置等を表 2-1-1-3-2 に示す。

表 2-1-1-3-1 ウェハ一括研磨条件

	STEP 1	STEP 2	STEP 3	STEP 4
プレート	鋳鉄プレート	鋳鉄プレート	プレーンプレート	プレーンプレート
パッド	-	-	平坦加工用パッド 10mm 角 0.5mm 幅	平坦加工用パッド 10mm 角 0.5mm 幅
スラリー	SiC #800	SiC #3000	SiC #6000	コロイダルシリカ C
回転数	40rpm	40rpm	60rpm	60rpm
荷重	500 g	100 g	100 g	100 g
スイープ	5° 速度 1	5° 速度 1	15° 速度 1	15° 速度 1

表 2-1-1-3-2 研磨に用いた装置

装置	メーカー	型式・その他
研磨装置	ビーエヌテクノロジー	Bni52
研磨治具	ビーエヌテクノロジー	Bni52 専用研磨治具

・ 2-1-1-4 光学損失評価結果，研磨結果および研磨時間比較

表 2-1-1-2-2 にウェハー一括研磨（最大 14 チップ同時研磨）による光学損失評価結果を示す．本課題の目標光学損失である 12 dB 以下を満たしていることを確認した．

表 2-1-1-4-1 光学損失評価結果

Sample	光学損失 [dB]
1	5.0
2	4.6
3	9.1
4	5.3
5	6.2
6	4.1
7	6.0
8	7.1
9	8.6
10	8.2
11	6.5

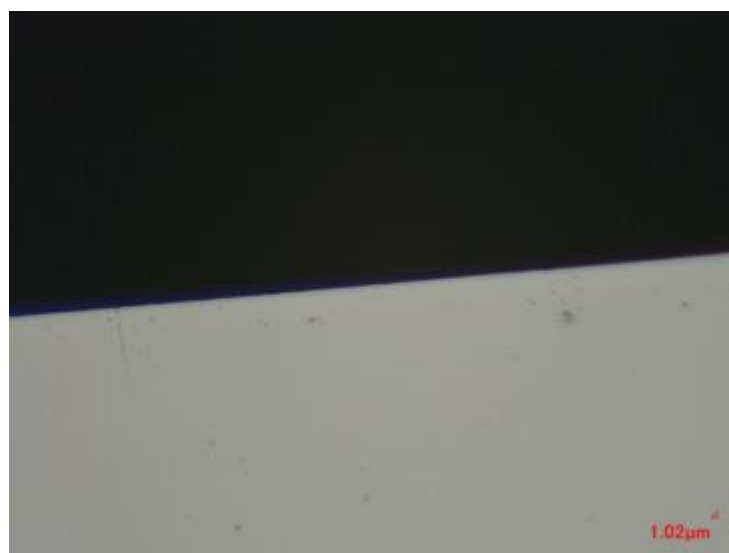


図 2-1-1-4-1 AOTF チップ端面の研磨画像(倍率 2000 倍)

このウェハー一括研磨（最大 14 チップ同時研磨）による研磨時間と従来の 1 チップずつの研磨との比較を以下の表 2-1-1-4-2 に示す．チップを 1 枚ごと研磨するのと比較し，研磨時間を約 60%短縮することが出来た．

表 2-1-1-4-2 研磨時間比較

	研磨時間 [h]				総時間 [h]
	STEP1	STEP 2	STEP 3	STEP 4	
1 チップ研磨	1	1	2	2	84(14 チップ分)
ウェハー一括研磨	3.5	3.5	14	14	35

・2-1-1-5 まとめ

研磨時間の短縮を図るため、ウェハ一括研磨（最大14チップ同時研磨）を行うための研磨治具の開発および研磨工程の開発を行った。研磨治具の開発と、ダミーウェハ貼り付けによる研磨手法により、目標光学損失12dB以下を達成し、従来の1チップずつの研磨と比較して研磨時間を約60%短縮することが可能となった。本開発により、AOTFチップの低コスト化に目処がついた。

・2-1-2 ①ー2 光学系のアライメント、特性評価システムの開発

(実施：ミマキ電子部品株式会社)

・2-1-2-1 概要

光学モジュールを組み立てるために高精度光学実装装置を構築した。光学モジュールの構成部品であるAOTF素子とディスクリット光学素子（非球面レンズ、光ファイバ等）を光学結合する際には、光学損失を測定しながらそれぞれの光学素子をサブミクロンオーダーの精度で最適位置調整し、かつ高信頼性を実現するためにYAGレーザスポット溶接を用いた固定が必要である。これらの要求を実現するために組立工程を考慮した装置構成並び仕様を検討し装置を導入した。そして光学モジュールを試作し、装置の機能を確認した。

・2-1-2-2 組立工程と装置構成

本モジュールの組立工程を工程順に大きく分けると以下の7つの工程からなる。

- (1) AOTF素子出射側 第1非球面レンズを調芯/YAG溶接固定。
- (2) AOTF素子入射側 第1非球面レンズを調芯/YAG溶接固定。
- (3) 光分岐素子, 偏光板, 光アイソレータ, エタロン, 電子冷却素子を固定。
- (4) 上記(1)~(3)のサブアッシーをパッケージ筐体内部に固定。
- (5) 光ファイバと第2非球面レンズを調芯/YAG溶接固定。
- (6) 赤外光源+非球面レンズを調芯/YAG溶接固定。
- (7) フォトダイオード+非球面レンズ(2箇所)を調芯/YAG溶接固定。

これらの内、(3)、(4)を除く5つ工程では、それぞれ異なった手順の高精度調芯/YAG溶接固定工程が必要となる。これら調芯/YAG溶接固定を実現するための装置構成の模式図と工程手順の例(上記(2)の工程)を図2-1-2-2-1に示す。この例に示したように装置には、各デバイスを調芯するため複数の多軸(最大6軸)ステージユニットが必要であり、それぞれの工程で複雑な手順を経て組立が実施される。

これら工程に対応するための装置構成を表2-1-2-2-1に示す。調芯ステージユニットA, B, CのX, Y, Z軸自動ステージ及び θ_x , θ_y , θ_z 回転軸自動ステージには、高精度調芯を

実現するため特に最小位置及び角度分解能がそれぞれ $0.025 \mu\text{m}$, 0.00005° を有するステージを採用した。また、非発光デバイスである AOTF 素子の初期調芯を容易に実行するため AOTF 素子端面の導波状態を観察する CCD カメラを調芯ステージユニット C に装備した。さらに従来、組立工程別に異なる装置が必要であったが 2 分岐及び 3 分岐 YAG 溶接光学ヘッドステージユニットを 1 つのシステムに統合した構成とした。

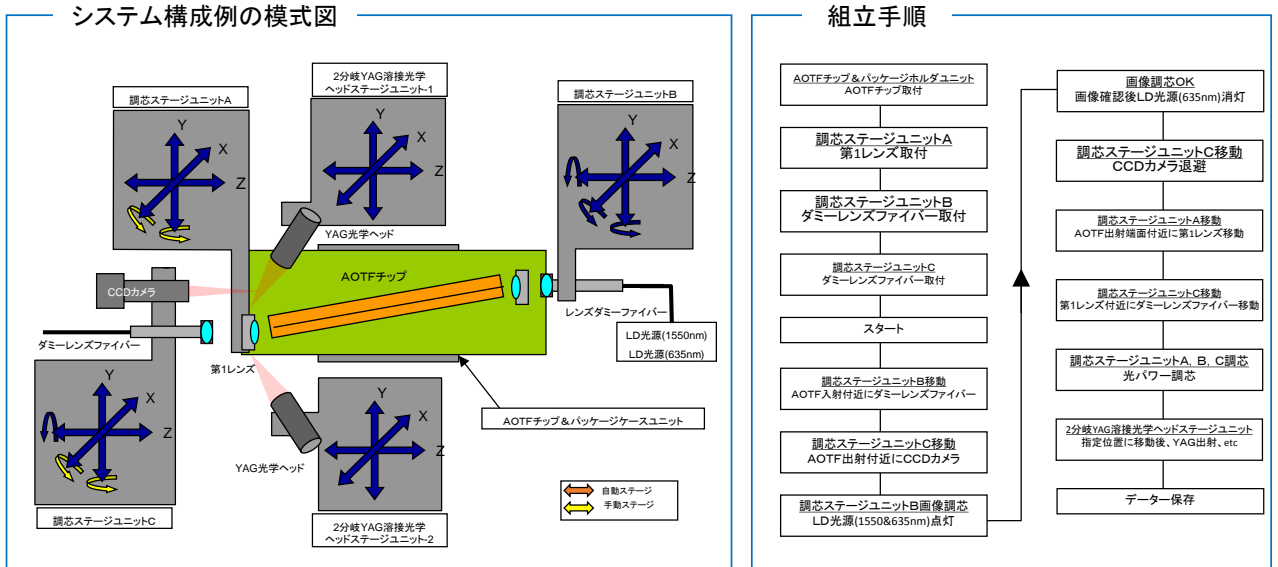


図 2-1-2-2-1 装置構成の模式図と工程手順の例 (工程(2))

表 2-1-2-2-1 装置構成

	構成品	機能	主な仕様
機構部	AOTF 素子&パッケージホルダユニット	AOTF 素子あるいはパッケージ筐体を保持する.	サンプル交換が容易な構造とする.
	調芯ステージユニット A	非球面レンズを保持し調芯する.	<ul style="list-style-type: none"> ・ X, Y, Z 高精度自動ステージ(※1) ・ θ_x, θ_y 手動ステージ
	調芯ステージユニット B	ファイバあるいは光半導体デバイスを保持し調芯する.	<ul style="list-style-type: none"> ・ X, Y, Z 高精度自動ステージ(※1) ・ $\theta_x, \theta_y, \theta_z$ 高精度自動ステージ(※1)
	調芯ステージユニット C	ファイバあるいは光半導体デバイスを保持し調芯する. CCD カメラにより AOTF 素子端面を観察する.	<ul style="list-style-type: none"> ・ X, Y, Z 高精度自動ステージ(※1) ・ θ_z 自動ステージ ・ θ_x, θ_y 手動ステージ

	2分岐 YAG 溶接光学 ヘッドステージユニット	2つの YAG 溶接光学ヘッドを 搭載し調芯ステージユニット A で調芯したデバイスの指定 YAG 溶接ポイントに位置調整 する.	<ul style="list-style-type: none"> • X, Y, Z 自動ステージ • 2分岐 90度配置, 出射傾き 0度
	3分岐 YAG 溶接光学 ヘッドステージユニット	3つの YAG 溶接光学ヘッドを 搭載し調芯ステージユニット B で調芯したデバイスの指定 YAG 溶接ポイントに位置調整 する.	<ul style="list-style-type: none"> • X, Y, Z 自動ステージ • 3分岐 120度配置 出射傾き 45度
	除振台	上記 ユニット全体を搭載し, 外部振動の影響を除去する.	<ul style="list-style-type: none"> • 固有振動数: 垂直 1.5Hz, 水平 1.8Hz • 除振方式: ダイヤフラム型空気 ばね
測定 /制 御部	制御コンピュータ	各ステージユニット, YAG 溶接機, O/E コンバータなどを 制御し, ステージ移動, 調芯 等実施する.	<ul style="list-style-type: none"> • OS: windows 系 • 専用ソフトウェア搭載 • 組立手順プログラミング 機能
	<ul style="list-style-type: none"> • LD 光源 (1550nm& 635nm) • O/E コンバータ 	調芯時の光源並びに AOTF 出力 光を受光し電気信号に変換す る.	<ul style="list-style-type: none"> • 635nm LD: 出力 1mW 以上 • 1550nm LD: 出力 10mW 以 上 • O/E コンバータ: 入力パワー -60dBm 以下
	ステッピングモータ ドライバ	各ステージユニットのステッ ピングモータを駆動する.	マイクロステップ対応型
	YAG レーザスポット 溶接機	YAG レーザ光を発振する.	<ul style="list-style-type: none"> • 最大 3分岐 • 最大出力 25W

※1: 高精度自動ステージの分解能は, 位置 $0.025\mu\text{m}$, 角度 0.00005°

・2-1-2-3 装置導入とその特徴, 効果

決定した仕様に従い導入した高精度光学実装装置の全体外観写真を図 2-1-2-3-1 に示す。また, 図 2-1-2-3-2 に調芯並びに YAG 溶接機能の主構成部である各調芯ステージユニットと YAG 溶接光学ヘッドステージユニット部の写真を示す。装置を立ち上げと初期動作を確認し, 実際に光モジュールを試作し, その機能が仕様を満たしていることを確認した。試作時の【工程(1)】出射側第1非球面レンズ調芯時の様子と【工程(5)】費光ファイバ+第2非球面レンズ調芯時の様子の写真をそれぞれ図 2-1-2-3-3, 図 2-1-2-3-4

に示す。

本装置の特徴とそれらが及ぼす効果を図 2-1-2-3-5 にまとめた。これらの効果によってこれまで必要であった高い熟練と経験を必要とせず、且つ効率的な製造と低コスト化が実現できるため量産、実用化への見通しが得られた。

・2-1-2-4 まとめ

光学モジュールを組み立てるために高精度光学実装装置を導入し、装置立ち上げとモジュール試作からその機能を確認した。本装置によって効率的な製造と低コスト化が実現でき量産、実用化への見通しが得られた。今後、調芯プログラムや機構部分の更なる改良によってより効率的な組立が可能となることを見込まれる。

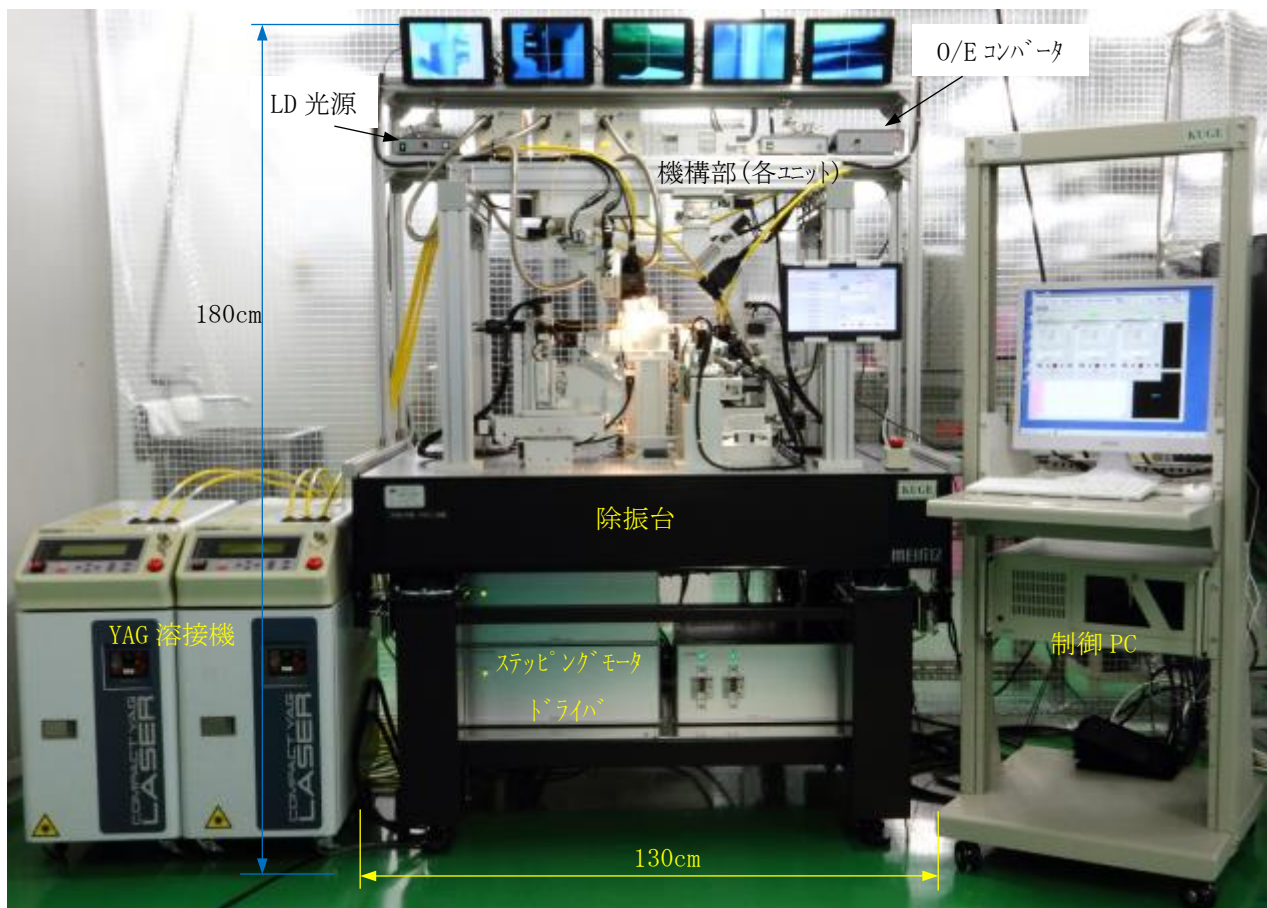


図 2-1-2-3-1 装置全体の外観写真

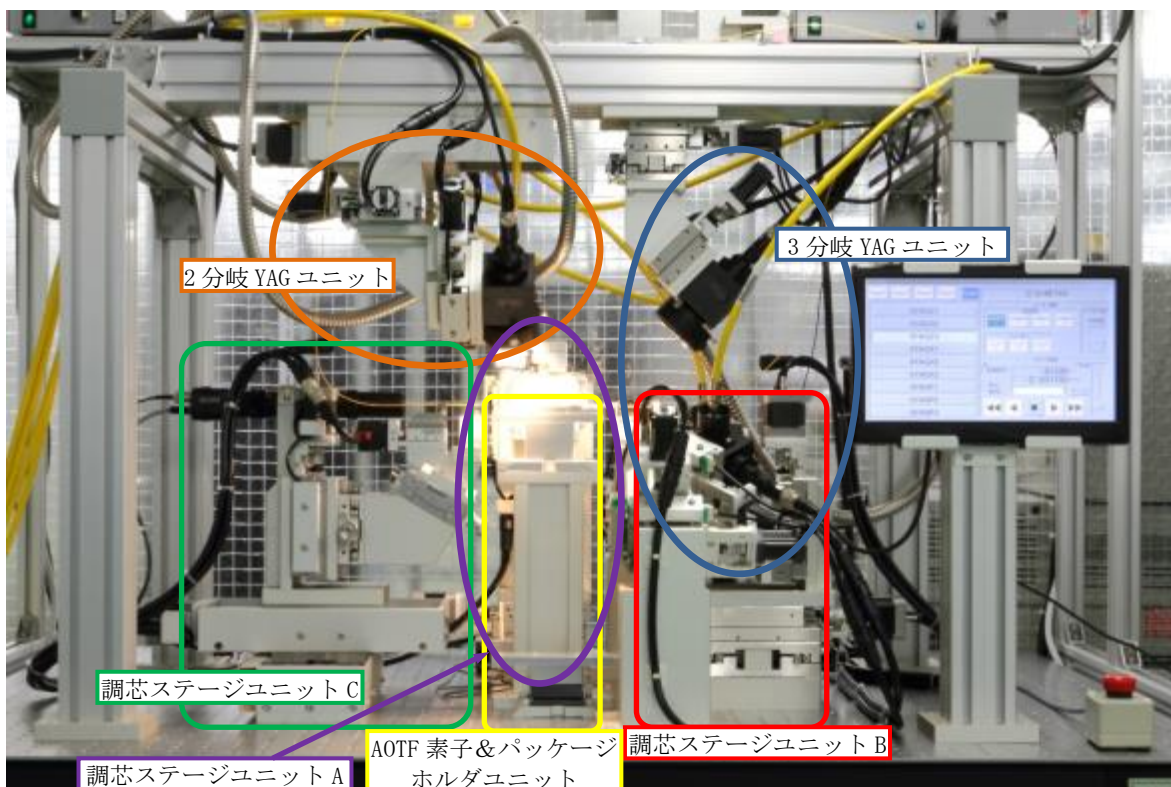


図 2-1-2-3-2 調芯ステージユニット&YAG 溶接光学ヘッドステージユニット部

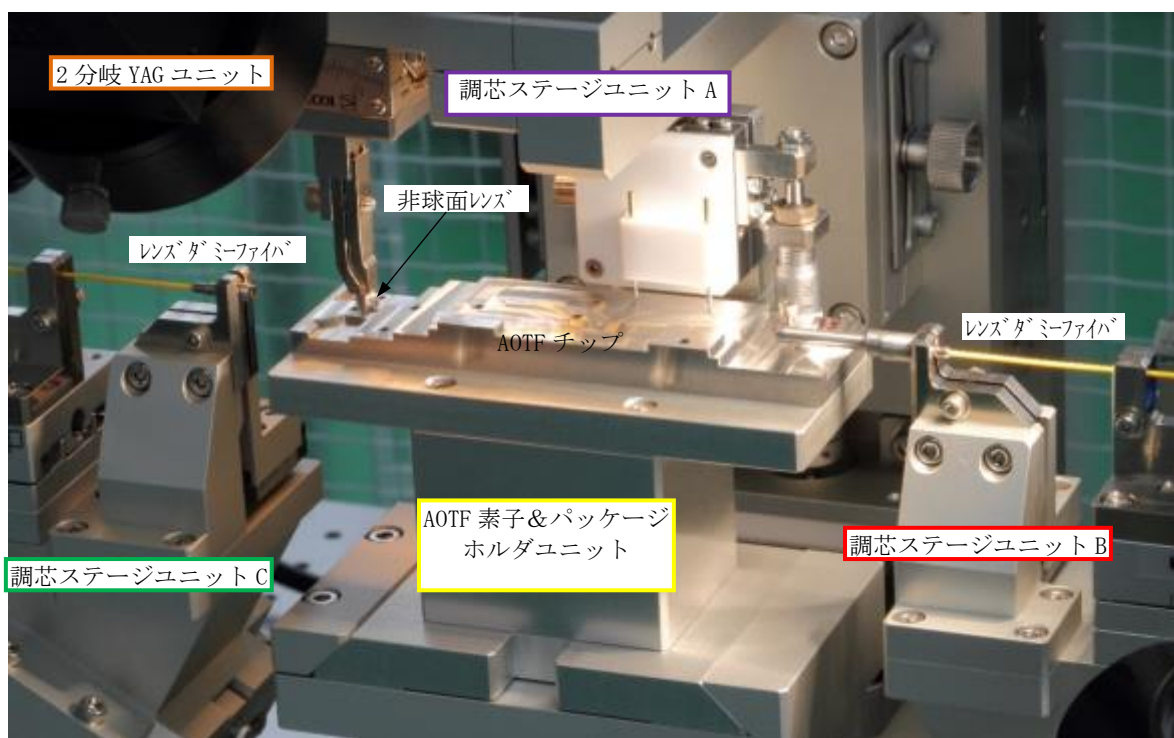


図 2-1-2-3-3 出射側第 1 非球面レンズ調芯時の様子 (工程(1))

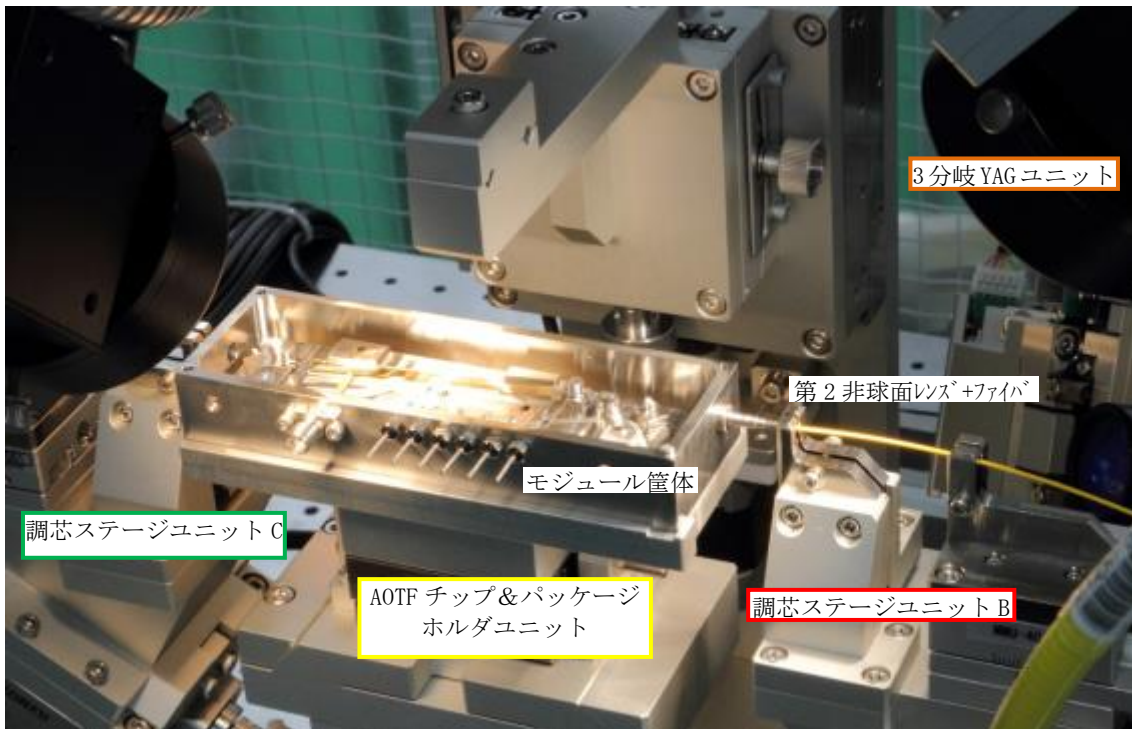


図 2-1-2-3-4 ファイバ+第2非球面レンズ調芯時の様子 (工程(5))

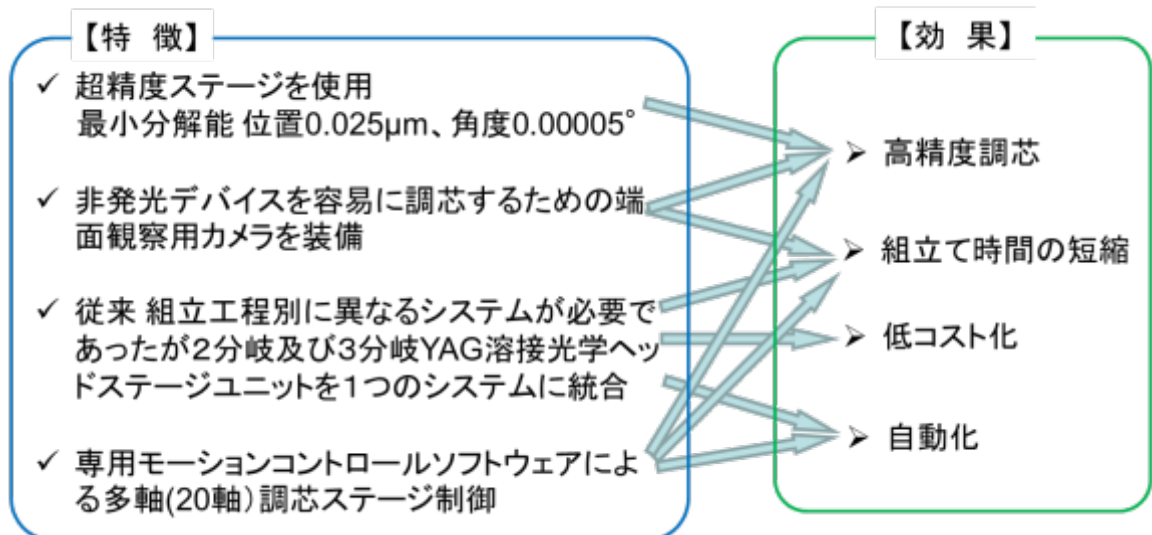


図 2-1-2-3-5 高精度光学実装装置の特徴とその効果

• 2-2 ② 制御用ハードウェアの開発

• 2-2-1 ②-1 電気制御回路の開発

(実施：ミマキ電子部品株式会社，長野計器株式会社)

• 2-2-1-1 概要

光学モジュールの電気制御回路の開発を行った。ノイズ発生源である高周波信号発生部については、信号増幅部の影響を避けるため、シールドケース内に収められた部品を用いた。高周波回路解析装置を用いて周波数掃引範囲，高周波信号強度，高周波信号掃引周期の測定を行い，高周波回路の評価を行った。評価の結果，それぞれ開発仕様を満たしていることを確認した。

また， -20°C ～ 60°C までの小型波長掃引光源モジュールの光出力掃引範囲の変化を測定し，電気制御回路に搭載した温度調整機能の評価を行った。その結果， -20°C ～ 60°C の温度範囲内で温度補正精度 2.5nm 以内であることを確認した。

• 2-2-1-2 開発仕様

小型波長掃引光源モジュール用電気制御回路の開発仕様を表 2-2-1-2-1 に示す。

表 2-2-1-2-1 電気制御回路の開発仕様

項目	開発仕様
周波数掃引範囲	$160 \pm 5 \sim 190 \pm 5\text{MHz}$
高周波信号強度	$>10\text{dBm}$
高周波掃引周期	$500 \pm 5\mu\text{s}$
温度補正精度	$< \pm 5\text{nm}$

・2-2-1-3 電気制御回路の構造

試作した小型波長掃引光源モジュール用電気制御回路の構成を図 2-2-1-3-1, 小型波長掃引モジュールに組み込んだ電気制御回路の写真を図 2-2-1-3-2 に示す.

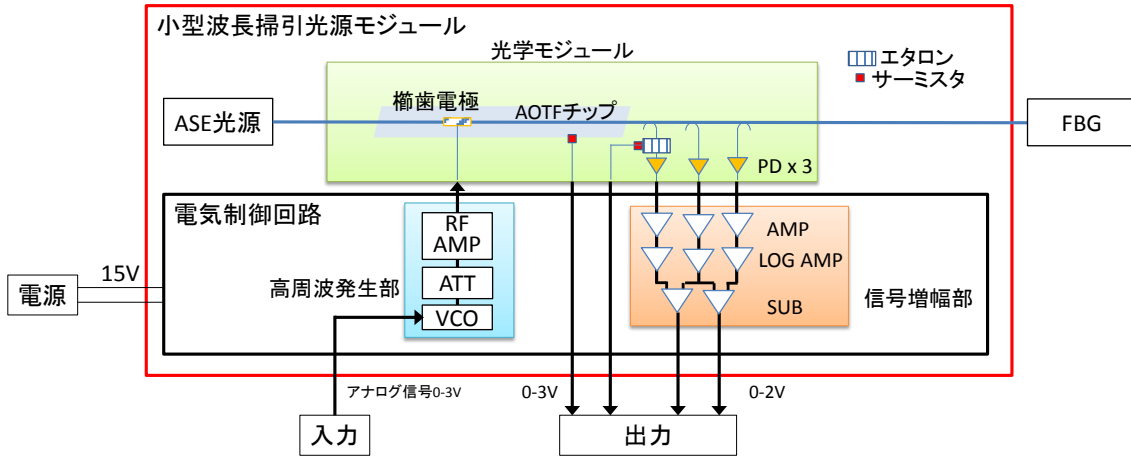


図 2-2-1-3-1 電気制御回路の構成図

電気制御回路は、AOTF に印加する高周波信号を発生する高周波発生部と、AOTF モジュールに実装されたフォトダイオードの信号を増幅する AMP 部、対数化を行う LOG AMP 部、減算を行う SUB 部の信号増幅部から構成される。電気制御回路の出力及び電源ラインにはフィルタを挿入し、小型波長掃引光源モジュール全体をケースに収納してノイズの影響を低減した。また、ノイズ発生源となる高周波発生部の VCO, ATT (アッテネータ), RF AMP をシールドケースに収めることにより、小型波長掃引光源モジュールケース内の信号増幅部への影響を考慮した。

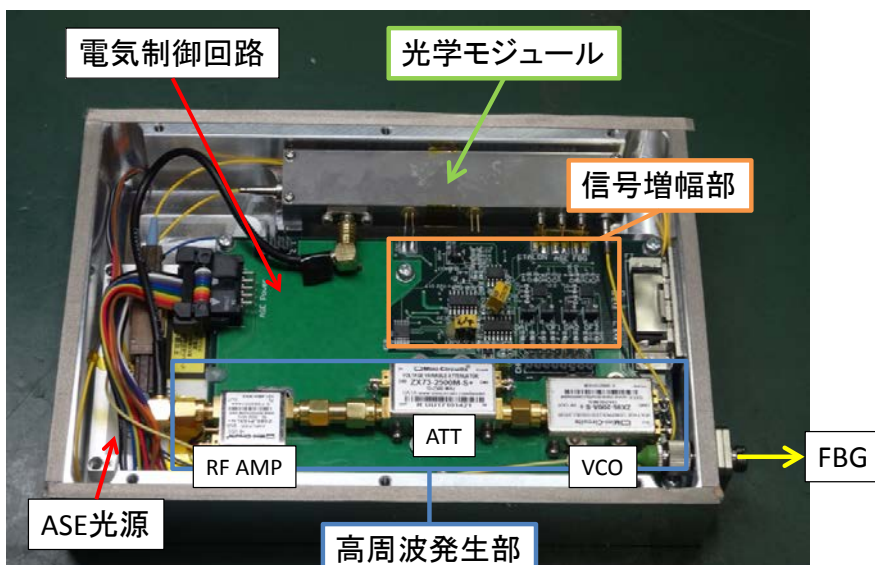


図 2-2-1-3-2 小型波長掃引光源モジュールに組み込まれた電気制御回路

・2-2-1-4 評価試験

・2-2-1-4-1 高周波回路評価試験

試作した小型波長掃引光源モジュール用電気制御回路の高周波発生部の特性について評価した。評価試験項目は(a)周波数掃引範囲、(b)高周波信号強度、(c)高周波掃引周期である。

高周波回路評価試験の試験の様子を図 2-2-1-4-1-1 に、試験に用いた装置を表 2-2-1-4-1-1 に示す。

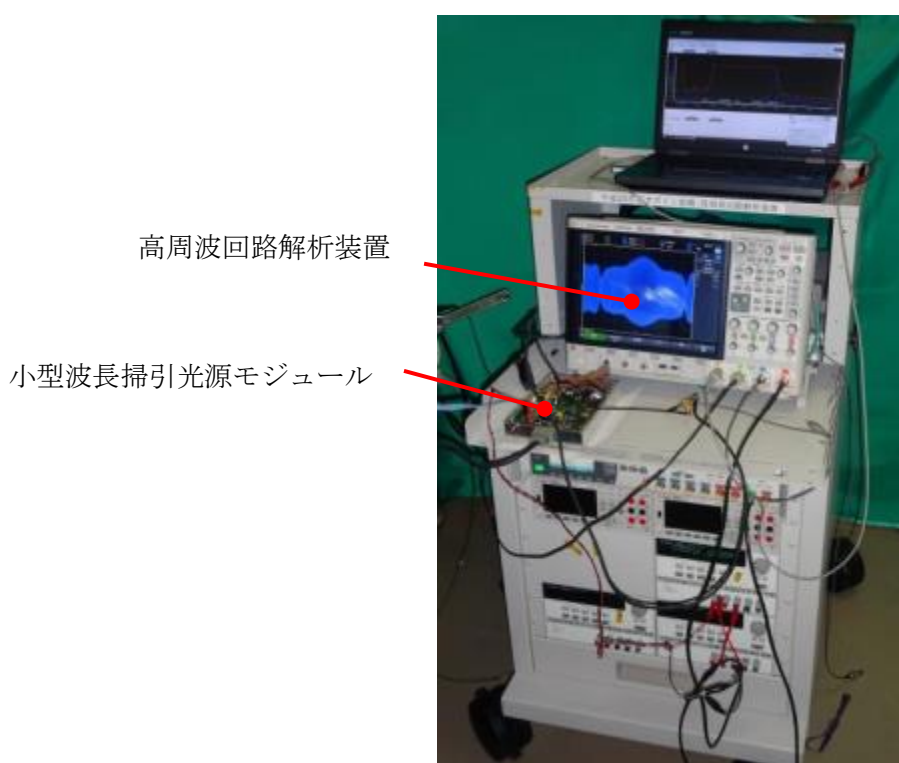


図 2-2-1-4-1-1 高周波回路評価試験の様子

表 2-2-1-4-1-1 高周波回路評価試験で用いた装置

装置	メーカー	型式・その他
高周波回路解析装置	日本電計	平成 25 年度サポイン事業導入設備

・2-2-1-4-2 試験結果

高周波回路評価試験の結果を表 2-2-1-4-2-1 に示す。

表 2-2-1-4-2-1 高周波回路評価試験結果

項目	開発仕様	結果
(a) 周波数掃引範囲	160~190MHz	158.8~191.1MHz
(b) 高周波信号強度	10dBm	13.5dBm
(c) 高周波掃引周期	500±10us	499us

(a) 周波数掃引範囲, (b) 高周波信号強度

周波数掃引範囲, 高周波信号強度は, 掃引中の高周波信号をピークホールドして, その軌跡より求めた。測定結果を図 2-2-1-4-2-1 に示す。



図 2-2-1-4-2-1 周波数掃引範囲と高周波信号強度の軌跡

(c) 高周波掃引周期

高周波掃引周期は, 後述の・2-2-2 ②-2 モジュール筐体の開発内の 2-2-2-3-1 光学性能評価試験にて確認した。

• 2-2-1-4-3 温度調整機能評価試験

試作した小型波長掃引光源モジュールの温度調整機能について評価を行った。小型波長掃引光源モジュールの出力光掃引範囲を 1542.9nm~1552.2nm に設定し、温度範囲-20~60℃の出力光掃引範囲の変化を測定することで評価を行う。

温度調整機能評価試験の試験の様子を図 2-2-1-4-3-1 に、試験に用いた装置を表 2-2-2-2-3-1 に示す。

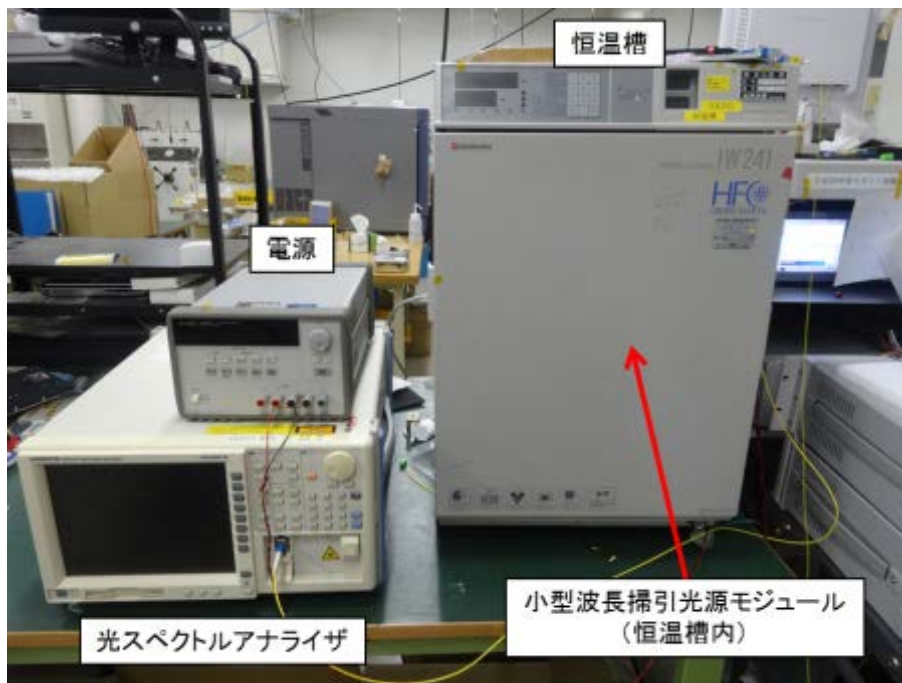


図 2-2-1-4-3-1 温度調節機能評価試験の様子

表 2-2-1-4-3-1 温度調整機能評価試験で用いた装置

装置	メーカー	型式・その他
光スペクトルアナライザ	横河電機	AQ6319
恒温槽	Yamato	IW241
電源	Agilent	E3632A

• 2-2-1-4-4 試験結果

温度調整機能評価試験の試験結果を表 2-2-1-4-4-1, 高周波測定装置で測定した信号増幅部の信号を図 2-2-1-4-4-1 に示す。

表 2-2-1-4-4-1 温度補正精度評価結果

項目	仕様	結果
温度補正精度	<±5nm	-2.5nm

各温度での設定波長と掃引開始波長・掃引終了波長との誤差を表 2-2-1-4-4-2, 図 2-2-1-4-4-2 に示す.

表 2-2-1-4-4-2 各温度での設定波長と掃引開始波長・掃引終了波長との誤差

温度[°C]	掃引開始波長[nm]	誤差[nm]	掃引終了波長[nm]	誤差[nm]
設定波長	1542.9		1552.2	
-20	1542.6	-0.3	1552.2	0.0
-10	1540.4	-2.5	1549.8	-2.4
0	1541.2	-1.7	1550.5	-1.7
10	1542.4	-0.5	1551.9	-0.3
20	1542.9	0.0	1552.5	0.3
25	1542.9	——	1552.2	——
30	1543.4	0.5	1552.7	0.5
40	1544.5	1.6	1553.9	1.4
50	1543.7	0.8	1553.1	0.9
60	1542.1	0.3	1550.7	-1.5
温度補正精度		-2.5		-2.4

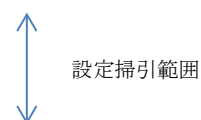


図 2-2-1-4-4-2 各温度での設定波長と掃引開始波長・掃引終了波長との誤差

図 2-2-1-4-4-2 中の青線範囲は小型波長掃引光源モジュールの出力光掃引範囲, 赤線範囲は温度補正精度の仕様である, 設定範囲から $\pm 5\text{nm}$ の範囲である. 全ての温度において, 温度補正精度の仕様範囲内(赤線範囲内)に収まっていることを確認した.

・ 2-2-1-5 評価まとめ

試験結果より，製作した小型波長掃引光源モジュール用電気制御回路は，開発仕様を満足できた．温度調整機能については， $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 範囲内における変動は開始波長，終了波長ともに 2.5nm 以内となっている．また，掃引幅の変動については， $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ 温度範囲で 1nm 以内であった．

・ 2-2-2 ②-2 モジュール筐体の開発

・ 2-2-2-1 概要

光学モジュールについて，熱影響低減，小型化を実現する筐体の開発を行った．

さらに，光学モジュールと ASE 光源，電気制御回路を組み込んだ小型波長掃引光源モジュールの筐体についても，ノイズ耐性，小型化を実現する開発を行った．小形波長掃引光源モジュールの構造と，光学性能，電磁両立性を評価した結果を以下に示す．

・ 2-2-2-2 モジュール筐体構造

I. 光学モジュール筐体の開発

開発した光学モジュールの構造を図 2-2-2-2-1 に示す．

【技術的ポイント】

- 発熱によりアライメントが変化し，光学的な損失の変動が発生するため，筐体の材質に AOTF ($16.7\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) と線膨張係数が近い SUS304 ($17.3\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) を用いることにより，アライメントの変化を少なくしている．
- 光学部品の固定を接着剤から溶接に変更したことによって，振動や熱によるアライメントのずれが生じにくい．
- 光ファイバ取り付け方向を最適化し小型化を実現した．
 - ・ 大きさ：105×20×12mm（初期試作品に比べ体積比約 60%）

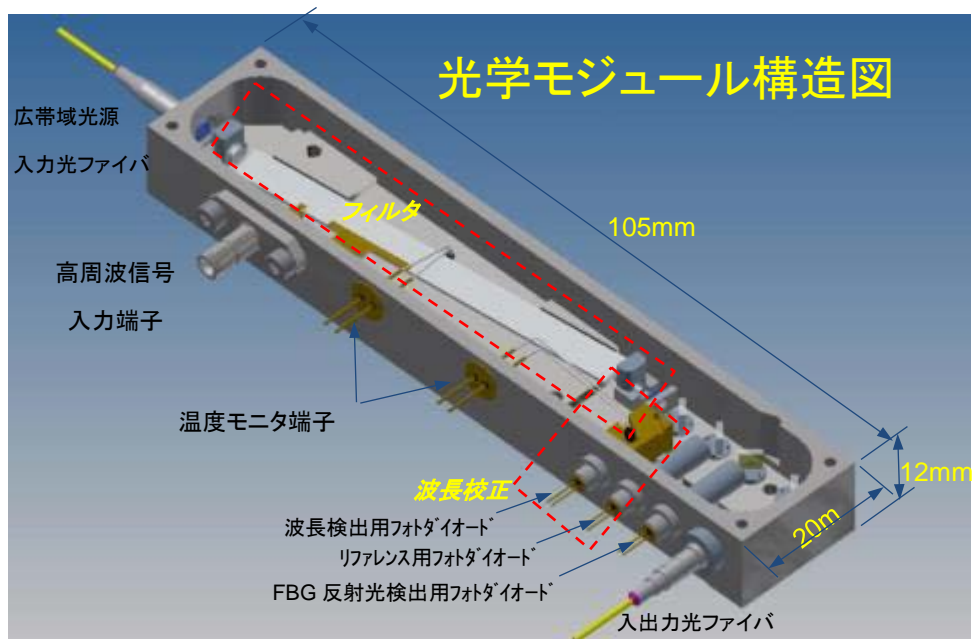


図 2-2-2-2-1 光学モジュール構造図

II. 小型波長掃引光源モジュール筐体の開発

開発した小型波長掃引光源モジュールの筐体を図 2-2-2-2 に筐体内部を図 2-2-2-3 に示す。

小型波長掃引光源モジュールは、光学モジュール、ASE 光源、電気制御回路で構成している。

【技術的ポイント】

- 外形寸法は、図 2-2-2-2 に示すようになっており、計画当初の対角 150mm に収まっていないが、最終的な計測器のサイズは計画の 250×120×100mm 以下になるような形状となっている。
- 小型波長掃引光源モジュールのケースは隙間・継ぎ目がなくなるような構造にし、光学モジュール・電気制御回路・ASE 光源をそのケースに収納することによってノイズの影響、放出を制限する構造とした。
- 各部品を適切な個所に配置して、内部の電線が少なくなるようにして、ノイズの影響が小さくなる構造とした。
- ノイズの発生源となる RF 信号発生器、RF ゲイン調整器、RF アンプをシールドケース内に収め、小型波長掃引光源モジュールケース内の信号増幅部への影響を少なくした。

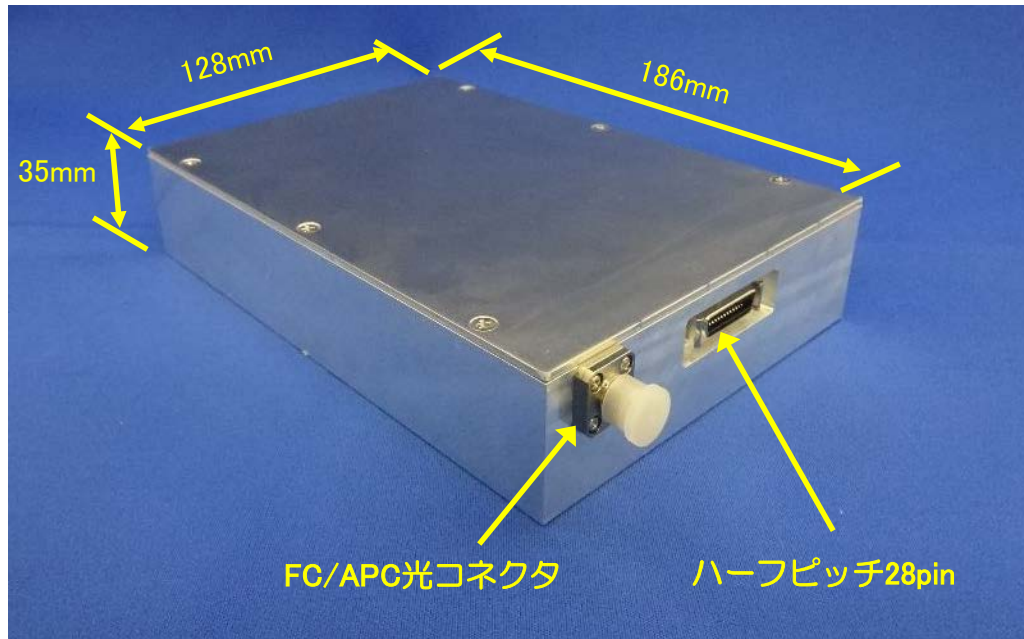


図 2-2-2-2-2 小型波長掃引光源モジュールの筐体

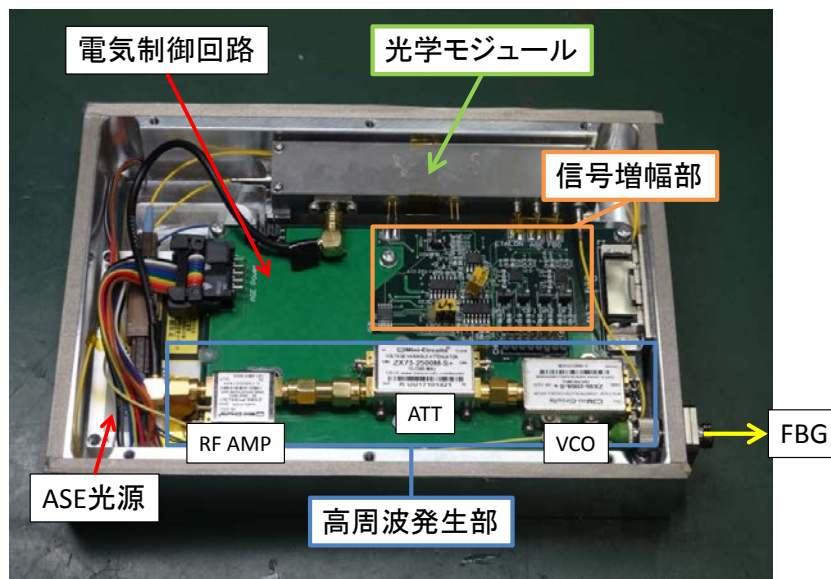


図 2-2-2-2-3 小型波長掃引光源モジュールの筐体内部

• 2-2-2-3 評価試験

• 2-2-2-3-1 光学性能評価試験

小型波長掃引光源モジュールの波長掃引範囲，光強度，掃引スペクトル，を「高精度スペクトル評価装置」にて測定を行った．開発仕様と評価試験結果を以下の表に記す．

表 2-2-2-3-1-1 小型波長掃引光源モジュール開発仕様と評価試験結果

	開発仕様	評価結果結果		
		-20℃	20℃	60℃
波長掃引範囲	1530～1560nm	1530～1560nm 以上		
光強度	>-23dBm	-19.9dBm	-19.5dBm	-20.2dBm
波長掃引時間	500±10us	499us		

表 2-2-2-3-1-1 より，全ての温度範囲内で波長掃引範囲，光強度および波長掃引時間の開発仕様を満たしていることを確認した．

光学性能評価試験の試験の様子を図 2-2-2-3-1-1 に，用いた装置を表 2-2-2-3-1-2 に示す．

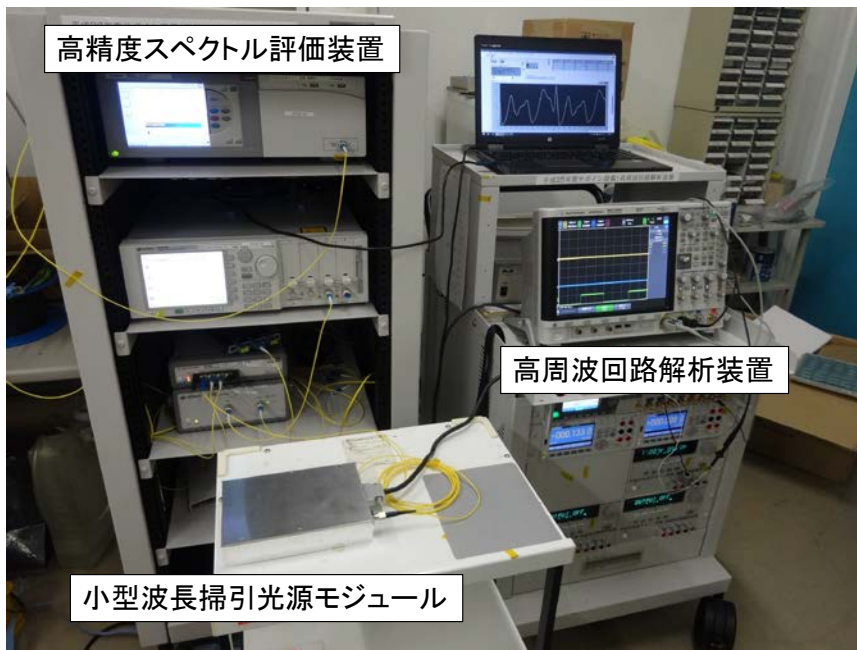


図 2-2-2-3-1-1 光学性能評価試験の様子

表 2-2-2-3-1-2 光学性能評価試験に用いた装置

装置	メーカー	型式・その他
高周波回路解析装置	日本電計	平成 25 年度サポイン事業導入設備
高精度スペクトル評価装置	日本電計	平成 26 年度サポイン事業導入設備

・ 2-2-2-3-2 電磁両立性試験

(a) 試験目的

開発した小型波長掃引光源モジュールの電磁両立性を確認するため、小型波長掃引光源モジュールを内蔵した光波長測定装置一次試作品を製作した。工業分野で使用する計測及び試験装置の電磁両立性仕様を規定した JIS C 1806-1 に従い、光波長測定装置一次試作品に対して表 2-2-2-3-2-1 に示す 3 項目の試験を行う。

表 2-2-2-3-2-1 電磁両立性試験項目

試験項目	目的	適応規格	ノイズ周波数	ノイズ強度
RF 伝導妨害 イミュニティ	周辺機器からの伝導性 ノイズに対する耐性確 認	IEC 6100-4-6	150k~80MHz	3V 1kHz 80%振幅変調
放射無線周波 電磁界イミュニティ	周辺機器からの放射電 磁ノイズに対する耐性 確認	IEC 6100-4-3	80M~1GHz	3V/m 1kHz 80%振幅変調
エミッション	装置自体が放出する電 磁ノイズ量確認	CISPR22	30M~1GHz	~230MHz 40dBuV/m 以下 ~1GHz 47dBuV/m 以下

(b) 供試験試料

試料名：光波長測定装置一次試作品

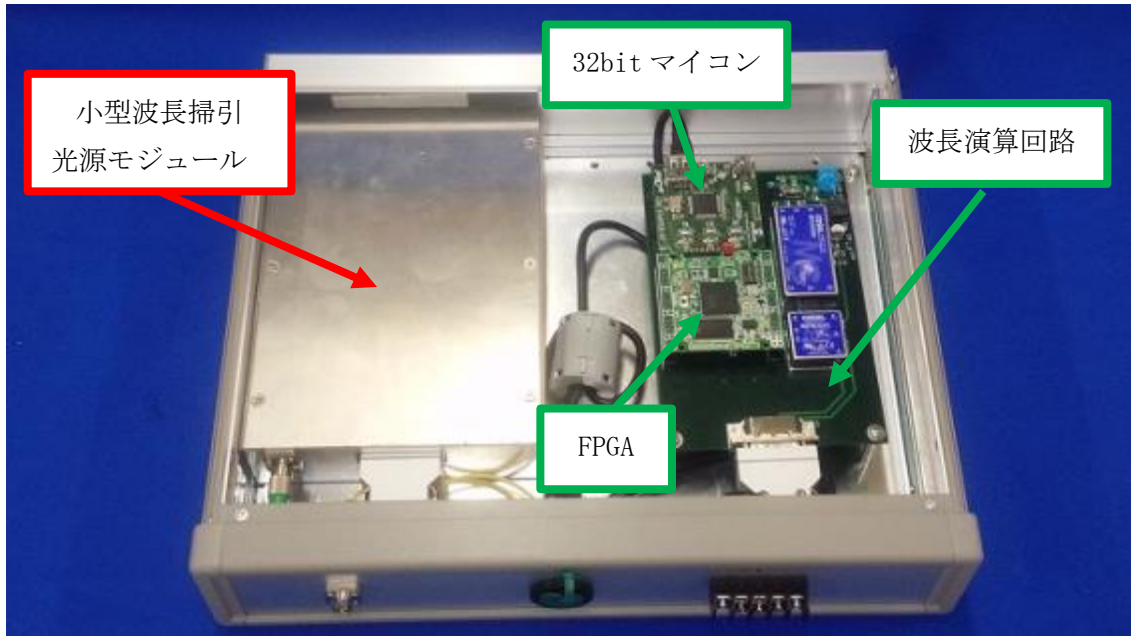


図 2-2-2-3-2-1 光波長測定装置一次試作品

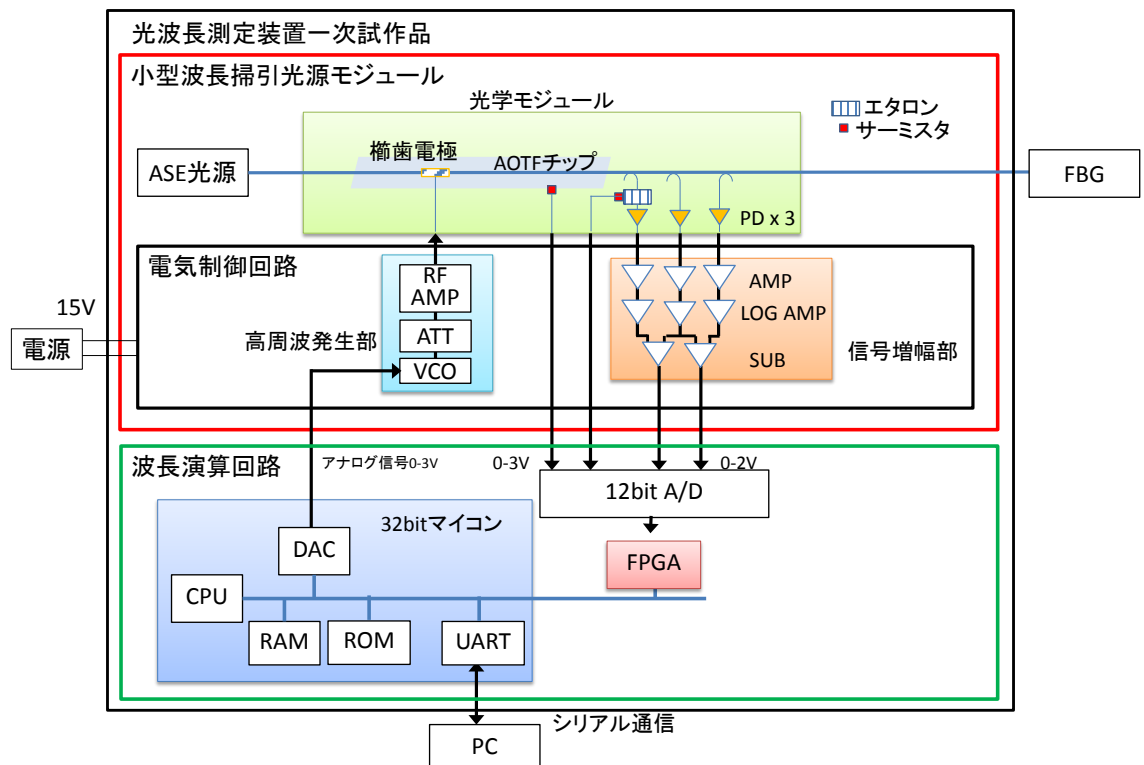


図 2-2-2-3-2-2 光波長測定装置一次試作品の構成図

(c) 合否判定基準

外部からの伝導性，電磁ノイズを受けるイミュニティ試験：
伝導性，電磁ノイズ印加中に誤動作無き事.

外部へ電磁ノイズを放射するエミッション試験：
国際的な規格である CISPR22 を満足すること.

(d) 結果

電磁両立性試験の結果を表 2-2-2-3-2-2 に示す.

表 2-2-2-3-2-2 電磁両立性試験結果

試験項目	適応規格	合否判定	データ
RF 伝導妨害 イミュニティ	IEC 6100-4-6	合格	図 2-2-2-3-2-2
放射無線周波電磁 界イミュニティ	IEC 6100-4-3	不合格	図 2-2-2-3-2-3 図 2-2-2-3-2-4
エミッション	CISPR22	合格	図 2-2-2-3-2-5

表 2-2-2-3-2-2 の電磁両立性試験結果より，小型波長掃引光源モジュールは RF 伝導妨害イミュニティ試験とエミッション試験において仕様を満足する結果が得られたが，放射無線週は電磁界イミュニティ試験において仕様を満足する事が出来なかった. 以下に，各試験における試験データを示す.

(d)-① RF 伝導妨害イミュニティ試験結果

図 2-2-2-3-2-2 に伝導性ノイズ周波数に対する測定 FBG 波長を示す.

なお，測定には 1 本の光ファイバに波長が異なる 6 個の FBG が製作された 6 連続 FBG を用いた.

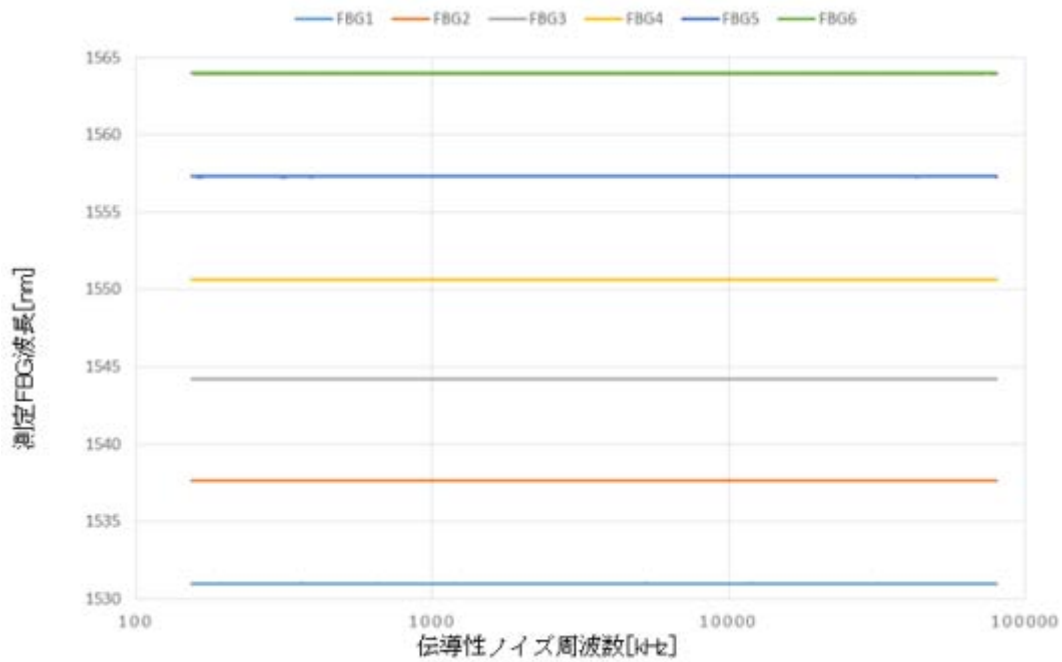


図 2-2-2-3-2-2 伝導性ノイズ周波数 vs 測定 FBG 波長

図 2-2-2-3-2-2 に示した RF 伝導妨害イミュニティ試験の結果より，試験をした全ての伝導性ノイズ周波数において，FBG 波長測定が可能であった。

(d)-② 放射無線周波電磁界イミュニティ試験結果

電磁ノイズ周波数に対する測定 FBG 波長を電磁ノイズ偏波別に図 2-2-2-3-2-3，図 2-2-2-3-2-4 に示す。なお，試料は規格に則り光波長測定装置一次試作品の 4 面（正面，背面，側面 1，側面 2）に電磁ノイズを照射した。

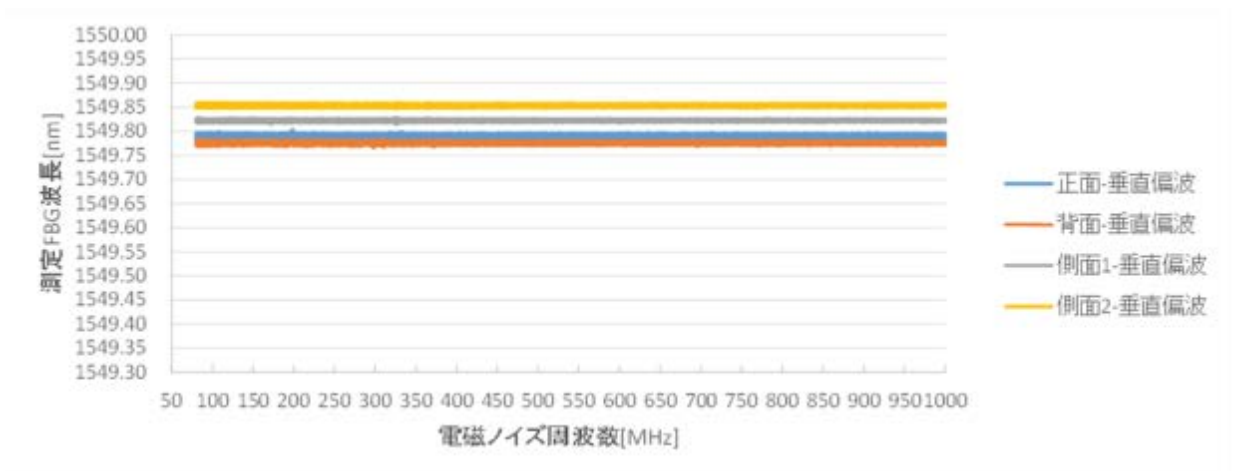


図 2-2-2-3-2-3 電磁ノイズ周波数 vs 測定 FBG 波長（垂直偏波）

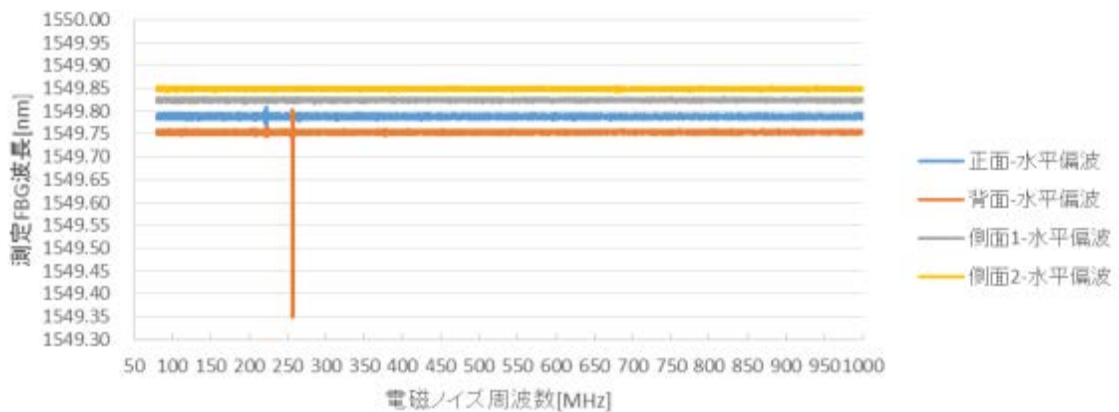


図 2-2-2-3-2-4 電磁ノイズ周波数 vs 測定 FBG 波長（水平偏波）

図 2-2-2-3-2-4 において、試料背面からの水平偏波電磁ノイズ印加時に FBG 波長が約 400pm 変動が生じているため、規格をクリアすることが出来なかった(電磁ノイズ周波数 200MHz 近傍)。

電磁ノイズ照射面により FBG 波長が変動しているが、これは照射面ごとに試験時刻が違うため試験環境（電波暗室）の温度が変化し、FBG の波長が変化したためである。

(d)-③ エミッション試験結果

図 2-2-2-3-2-5 に試料が放出した各周波数の電磁ノイズレベルと CISPR22 で定められた、閾値との関係結果を示す。

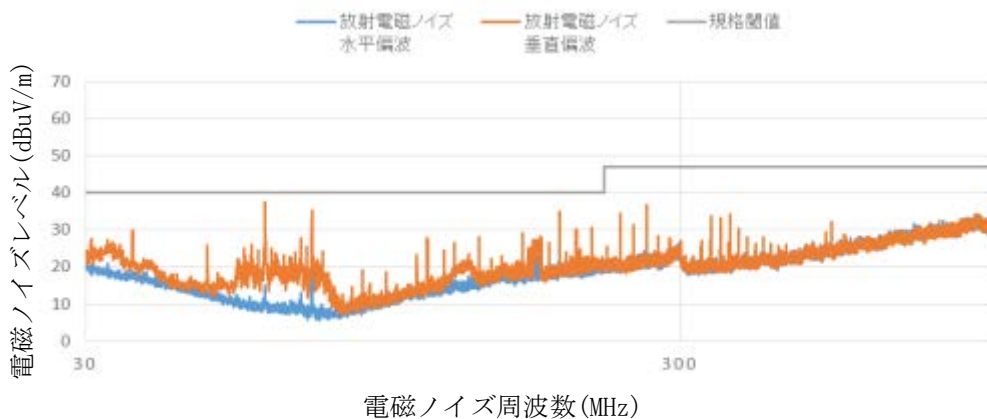


図 2-2-2-3-2-5 電磁ノイズ周波数 vs 電磁ノイズレベル

図 2-2-2-3-2-5 のエミッション試験の結果より、試料が放射したノイズレベルは、全ての周波数において国際的な規格の閾値を下回ったため、開発仕様を満足することを確認した。

(e) 試験方法

(e)-① RF 伝導妨害イミュニティ試験

RF 伝導妨害イミュニティ試験の試験の様子を図 2-2-2-3-2-6 に示す。

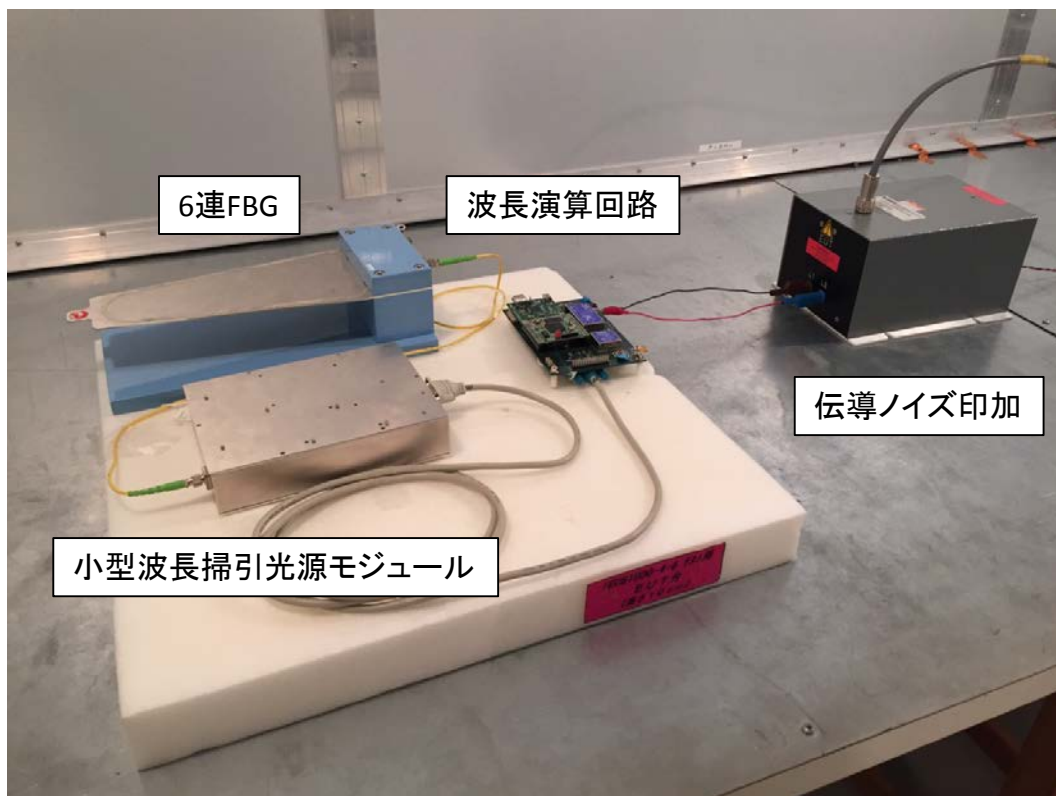


図 2-2-2-3-2-6 RF 伝導妨害イミュニティ試験の様子

RF 伝導妨害イミュニティ試験の使用機器を表 2-2-2-3-2-3 に示す。

表 2-2-2-3-2-3 RF 伝導妨害イミュニティ試験使用機器

	品名	メーカー	型式	仕様
試験システム (NAC101KG-75/10)	CDN (EUT)	FCC	FCC-801-M2-16A	<6Watts 50h~230MHz
	アンプ	AR	75A250M1	75Watts 10k~250MHz
	パワーメータ	AR	RM2002	—
	信号発生器	HP	8648B	9k~2G
その他	電源	KIKUSUI	PW26-1ATS	
	PC	HP	ProBook6570b	

(e)-② 放射無線周波電磁界イミュニティ試験

放射無線周波電磁界イミュニティ試験の様子を図 2-2-2-3-2-7 に示す。

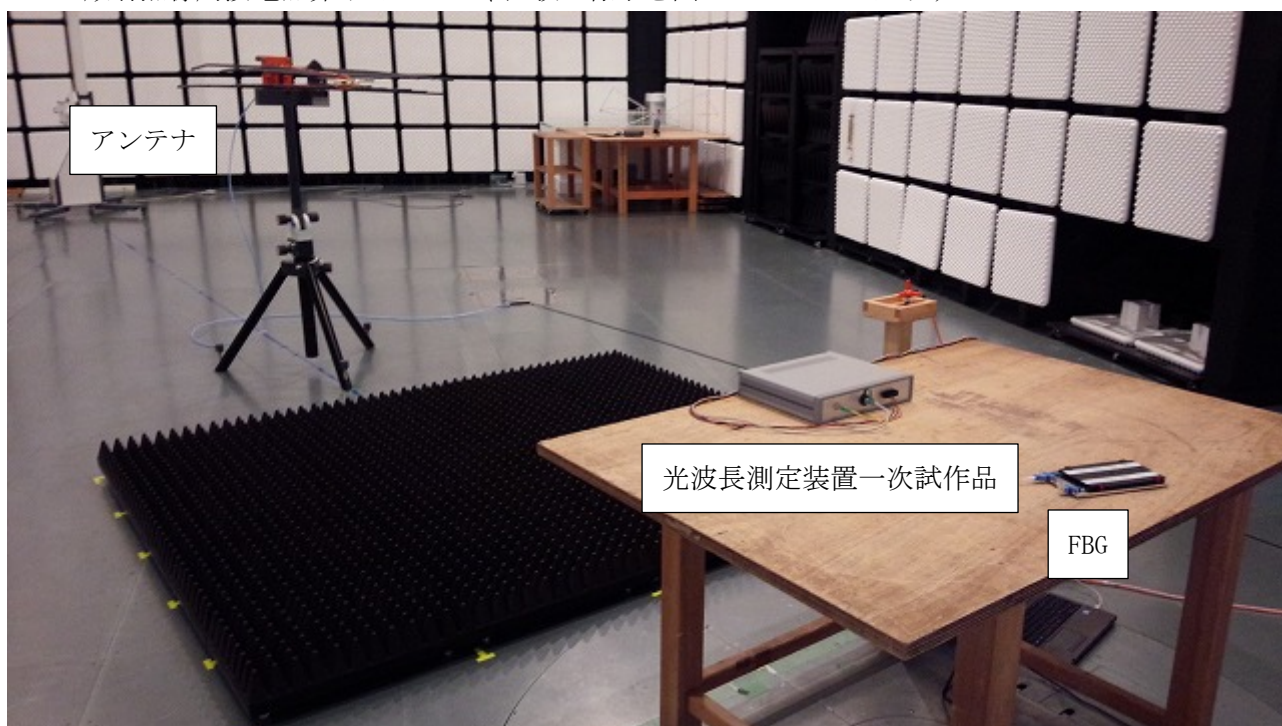


図 2-2-2-3-2-7 放射無線周波電磁界イミュニティ試験の様子

図 2-2-2-3-2-7 において、アンテナより発生させた電磁ノイズを試料に照射する。試料は規格に則り、90° 毎に回転させ 360° 全ての面に照射する。

放射無線周波電磁界イミュニティ試験の使用機器を表 2-2-2-3-2-4 に示す。

表 2-2-2-3-2-4 放射無線周波電磁界イミュニティ試験使用機器

	品名	メーカー	型式	仕様
ノイズ発生システム	信号発生器	Agilent	N5183A	100k-20GHz
	電力増幅器	AR	250W1000AM1	80M-1GHz, 250W
	カップラ	AR	DC6180M1	80M-1GHz, 600W
	パワーメータ	AR	PM2003	10k-40GHz
	パワーセンサ	AR	PH2004	0.03-18GHz
	アンテナ	AR	ATR80M6G	80M-6GHz
	電界モニタ	AR	FM7004	
	電界センサ	AR	FL7006	100k-6GHz
その他	電源	KIKUSUI	PW26-1ATS	
	PC	HP	ProBook6570b	

(e)-③ エミッション試験

エミッション試験の様子を図 2-2-2-3-2-8 に示す。

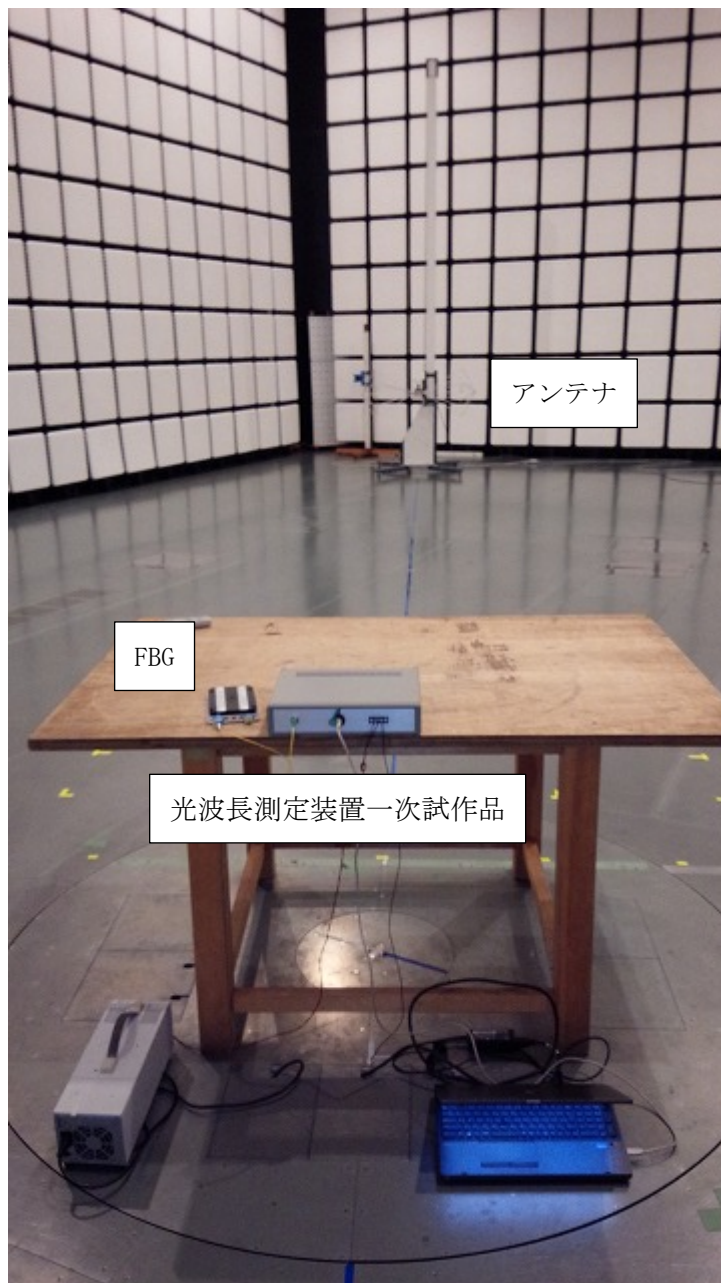


図 2-2-2-3-2-8 エミッション試験の様子

図 2-2-2-3-2-8 において、試料より発生した電磁ノイズをアンテナにて測定する。試料は規格に則り、360° 回転させ試料全面の電磁ノイズ発生量を確認する。

エミッション試験の使用機器を表 2-2-2-3-2-5 に示す。

表 2-2-2-3-2-5 エミッション試験使用機器

	品名	メーカー	型式	仕様
ノイズ受信システム	バイコニカルアンテナ	Schwarzbeck	VHA9113+BBA9106	30-300MHz
	ログペリオディックアンテナ	Schwarzbeck	UHALP9107	300-1000MHz
	プリアンプ	Agilent	8447D	0.1-1300MHz
	スペクトラムアナライザ	Rohde&Schwarz	ESCI	9k-3GHz
	レシーバー	Rohde&Schwarz	ESCI	9k-3GHz
	疑似電源回路網	Rohde&Schwarz	ESH2-Z5	9k-30MHz
	ループアンテナ	Rohde&Schwarz	HFH3-Z2	9k-30MHz
	ダブルリジッドガイドホーンアンテナ	EATON	96001	1-18GHz
	GHz用プリアンプ	東陽テクニカ	TPA0126-20	30-300MHz
その他	電源	KIKUSUI	PW26-1ATS	
	PC	HP	ProBook6570b	

・ 2-2-2-4 評価まとめ

開発した小型波長掃引光源モジュールを用いて光学性能評価試験を行ったところ、光学特性については開発仕様を満足する結果を得た。しかし、小型波長掃引光源モジュールを搭載した光波長測定装置一次試作品を用いて電磁両立性試験を行ったところ放射無線周波電磁界イミュニティ試験において水平偏波電磁ノイズ印加時、FBG 波長が約 400pm 変動し、IEC6100-4-3 規格をクリアすることが出来なかった。そのため、ノイズ対策を行った二次試作品の開発が必要である。

また、光波長測定装置一次試作品は、回路部分が小型波長掃引光源モジュールと波長演算回路の 2 枚構成になっていること、12bitA/D, FPGA, 32bit マイコンの 3 部構成を用いていることからサイズとコストに課題が残った。二次試作ではこれらの 3 つの課題について対策する。

・2-3 ③ 光源と導波路の結合技術の開発

本課題は発熱体である光源と、熱影響を受けやすいニオブ酸リチウム導波路を同一モジュール内で結合する際に、結合損失が発生すると言った課題であった。しかし光源をモジュール外に設置し、最適な光源の選択することで熱影響を排除することが可能となり、課題を解決した。

・2-4 ④ 小型波長掃引光源モジュールの信頼性評価

・2-4-1 冷熱衝撃試験

小型波長掃引光源モジュールの構成、構造から、電子部品・材料及びその各部材の接合部分の故障が支配的であると推測出来る。加速劣化試験として最も効果的である熱衝撃試験を実施した。

熱衝撃試験を実施した際の高温と低温の温度差によるストレスと寿命の関係が(1)式のアイリングモデルで表現されることを仮定する。

$$\ln N = \ln A - n \cdot \ln \Delta T \quad (1)$$

ここで、N：サイクル数(寿命)，A：定数，n：正数， ΔT ：温度差[°C]である。(1)式より $N = A \Delta T^{-n}$ となることから、実使用と加速試験を実施した際のそれぞれのサイクル数の比である加速係数 K は

$$K = N1/N2 = (\Delta T2/\Delta T1)^n \quad (2)$$

である。ここで N1：実使用における寿命（サイクル数），N2：加速試験における寿命（サイクル数）である。n は一般的に用いられる正数 $n=3$ とした。

小形波長掃引光源モジュールの仕様温度範囲は-20°C～70°Cである。実使用環境における寒暖差を多めに見積もって、一日に1サイクル $\Delta T1=30^\circ\text{C}$ の温度変化が生じるとし、これに対して、高温70°Cと低温-20°Cで熱衝撃試験を実施する。すなわち $\Delta T2=90^\circ\text{C}$ である。n=3を仮定すると、(2)式より加速係数 $K=27$ となる。目標とする実使用时间10万時間は約4225日間であるので、試験サイクル数は、実使用サイクル数÷加速係数であり、 $4225 \div 27=157$ サイクルとなる。高温(+70°C)と低温(-20°C)における保持時間は、試験規格 MIL-STD-202G 及び JEITA ED-4701 を参考に、それぞれ60分間に設定した。



図 2-4-1-1 冷熱衝撃試験機

高温 70°C60 分間，低温-20°C60 分間保持の冷熱衝撃試験を，160 サイクル実施後，光源モジュールの動作を確認した結果，正常に動作していた．この結果，実使用における 10 万時間に相当する冷熱サイクルに対する信頼性が確認できた．

・ 2-4-2 振動試験

実使用時における振動に対する信頼性を評価するため，より過酷な条件として，トラック等による輸送に相当する振動試験（MIL-STD 810）を実施した．

輸送試験 MIL-STD 810

- ・ 1 時間の試験で 1000 マイル（約 1609km）輸送と同等
- ・ XYZ 3 方向で試験を実施
- ・ オーバーオール rms 値 垂直方向：1.04G

振動試験の実施において，基板の固定の不具合が発生したが，小型波長掃引光源モジュールの光学系及び電子系の動作を確認した結果，正常に動作している事が確認できた．

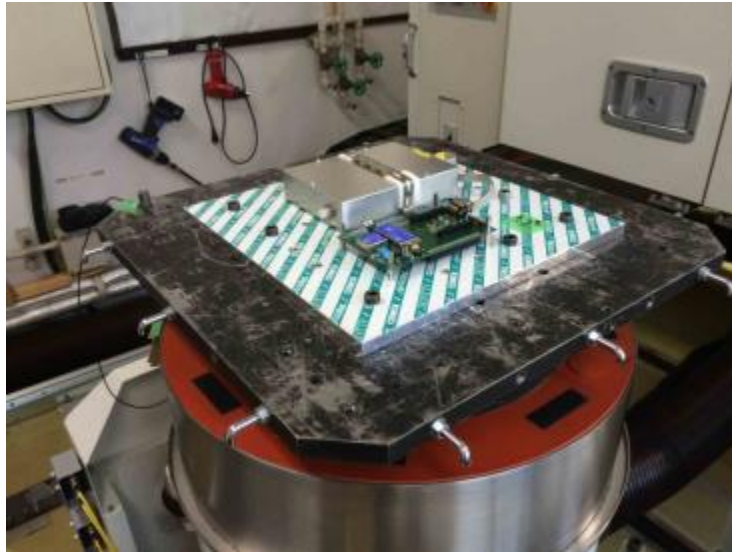


図 2-4-2-1 小型波長掃引光源モジュールの振動試験の様子

実使用における外部振動を橋脚の実測値から推定した結果, 輸送試験の振動の 1/30000 程度の負荷と考えられるので, 実使用における外部振動が小型波長掃引光源モジュールに加わった場合は, 試験時間は 1 時間であるので, 3 万時間以上の安定動作が推定できた。

・ 2-4-3 高温動作試験

通電動作 10 万時間の信頼性を評価するため, 連続通電における小型波長掃引光源モジュールの光出力の変化を, 室温 (25°C) と使用上限温度 50°C において, 測定した。室温と 50°C における光出力の変化の比較から, 室温における通電動作の信頼性を推定した。

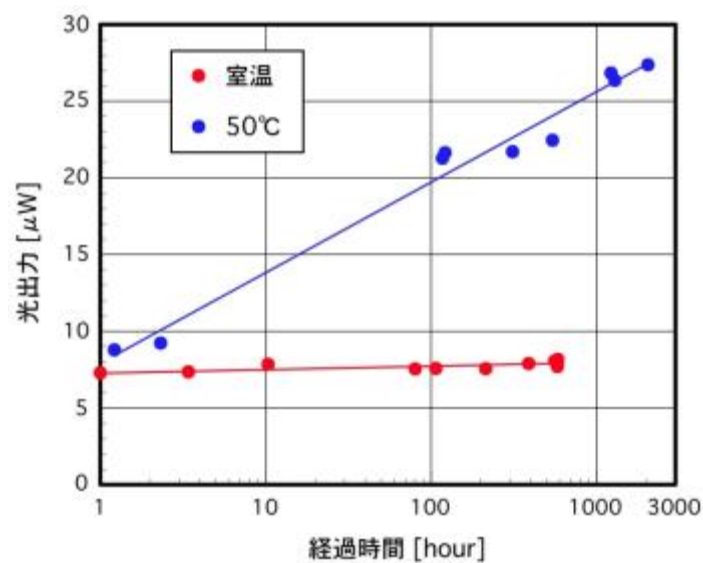


図 2-4-3-1 小型波長掃引光源モジュールの光出力の変化

光出力変化の要因が解明できていないが、室温、50℃共に、光出力は上昇しており、室温に対して、50℃においては、約25倍の出力変化を示した。50℃において、通電2000時間後も、安定動作が確認できているので、室温においては、少なくとも、その25倍（5万時間）以上の時間安定動作すると推定できた。

・2-5 ⑤ 光波長測定装置への適用と安定性評価

・2-5-1 ⑤-1 光波長測定装置の開発

・2-5-1-1 概要

光波長測定装置一次試作品の課題であったサイズ、低コスト化、電磁両立性試験（放射無線周波電磁界イミュニティ）を解決するため、汎用16bitマイコンを用いた1チップ構成の小型波長掃引光源モジュールを用いて、光波長測定装置二次試作品の開発を行った。また、光波長測定装置二次試作品の開発仕様は、インフラ健全度監視に適した開発仕様とした。

・2-5-1-2 開発仕様

表2-5-1-2-1に光波長測定装置二次試作品の開発仕様を示す。

表2-5-1-2-1 光波長測定装置二次試作品の開発仕様

機能名	仕様項目	開発仕様
光学要素	光チャンネル数	1
	サンプリング周波数	200Hz
	波長掃引範囲	1530～1560nm
	波長安定性	<±15pm
	波長再現性	<5pm @1kHz 2σ値
	光コネクタ	FC/APC
機械, 環境, 電気	サイズ	100mm × 150mm ×250mm
	動作温度範囲	-20～50℃

・2-5-1-3 光波長測定装置の構成

光波長測定装置二次試作品の構成と、一次試作品からの変更点を図 2-5-1-3-1 に示す。

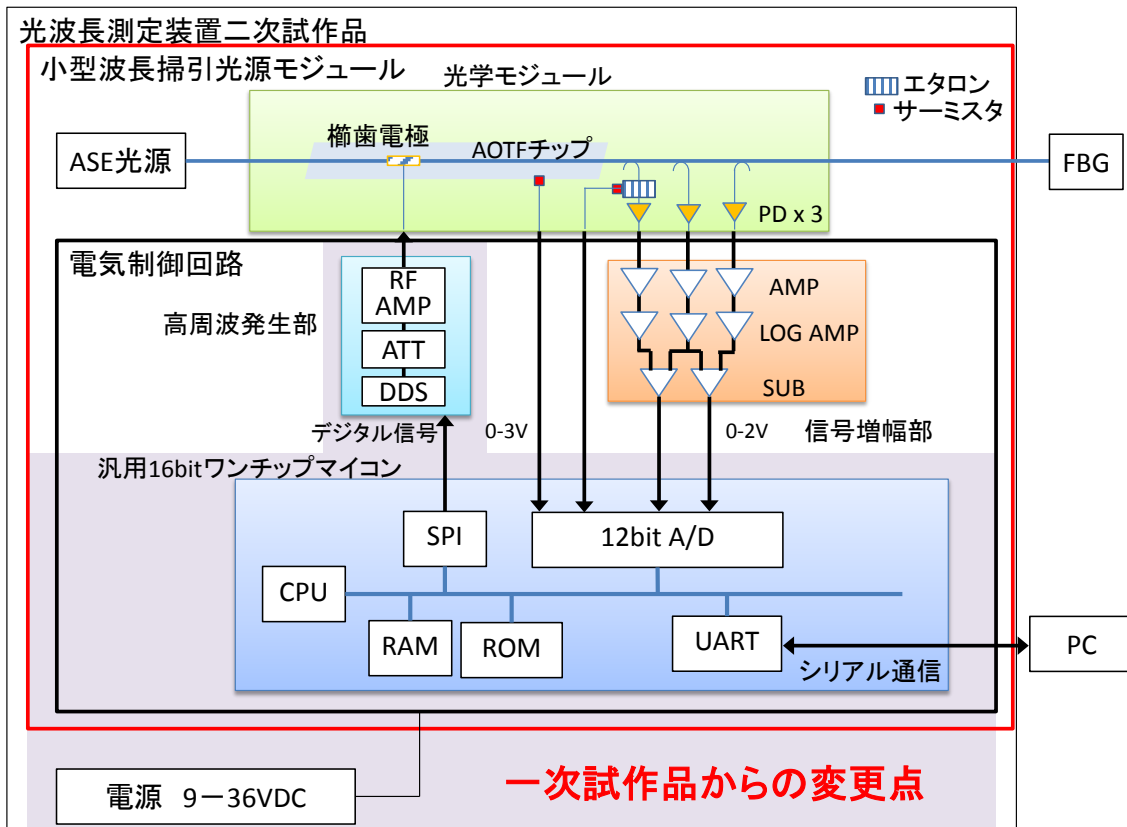


図 2-5-1-3-1 光波長測定装置二次試作品の構成図

光波長測定装置二次試作品では小型化・低コスト化を図るため、一次試作品で用いた 32bit マイコンを、より安価な汎用 16bit マイコンに変更し、図 2-5-1-3-1 による 1 チップ構成を取ることで、光波長測定装置の小型化・低コスト化を実現した。

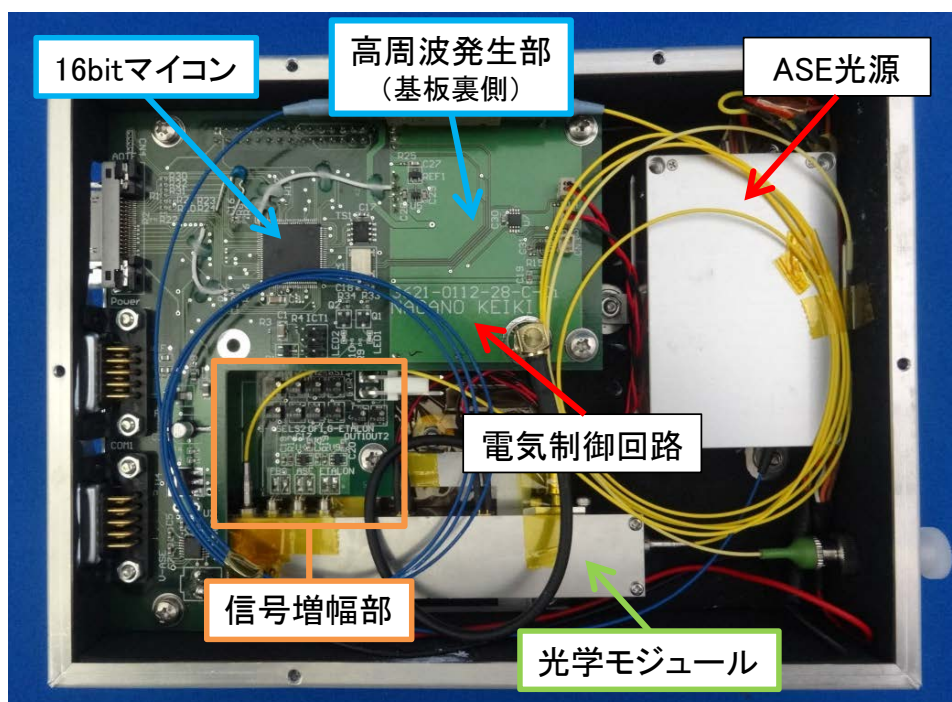


図 2-5-1-3-2 汎用 16bit ワンチップマイコンを用いた小型波長掃引光源モジュール

小型波長掃引光源モジュールの高周波発生部は、発生信号周波数を 1kHz 以下の分解能で設定可能で自動掃引が可能な DDS, ATT (アッテネータ), 周波数増幅を行う RF AMP で構成されている。高周波発生部を全てシールドケース内に納めることにより、ノイズ対策を行い、ノイズの低減を図った。電源は、一般産業用途 24V やバッテリー駆動を考慮して 9~36VDC の範囲で使用可能な設定とした。

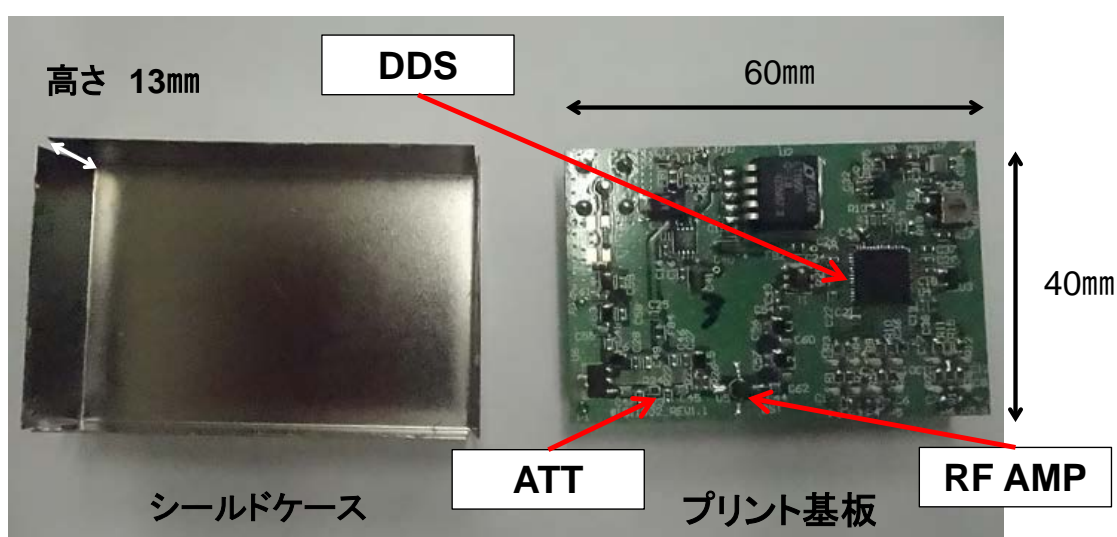


図 2-5-1-3-3 高周波発生部

図 2-5-1-3-4 に開発した光波長測定装置二次試作品の外観を示す。開発仕様であるサイズ 100mm×150mm×250mm を達成し、従来品と比較して小型化を行うことが出来た。(図 2-5-1-3-6)

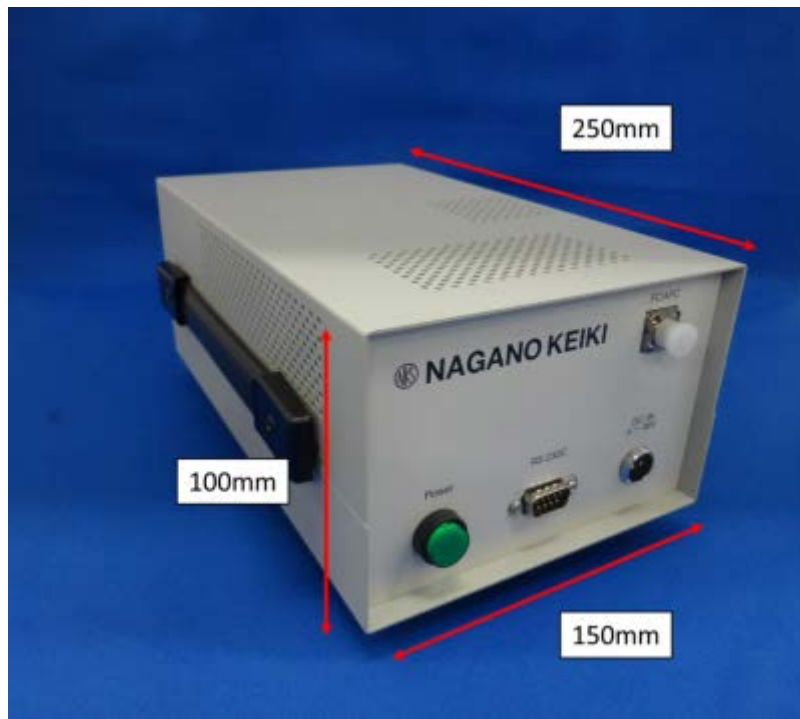


図 2-5-1-3-4 光波長測定装置二次試作品の外観

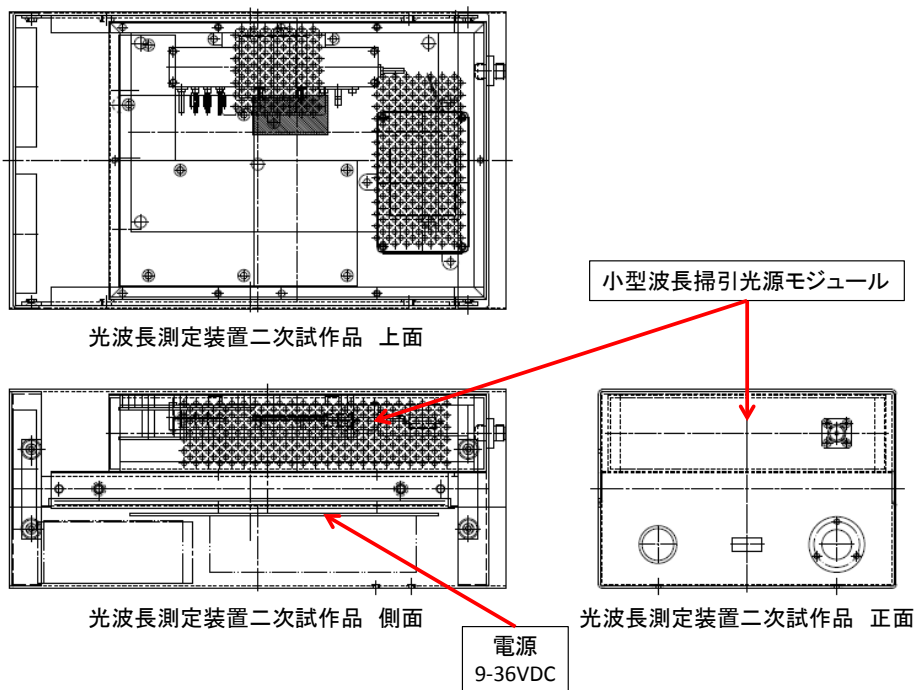


図 2-5-1-3-5 光波長測定装置二次試作品の構造図

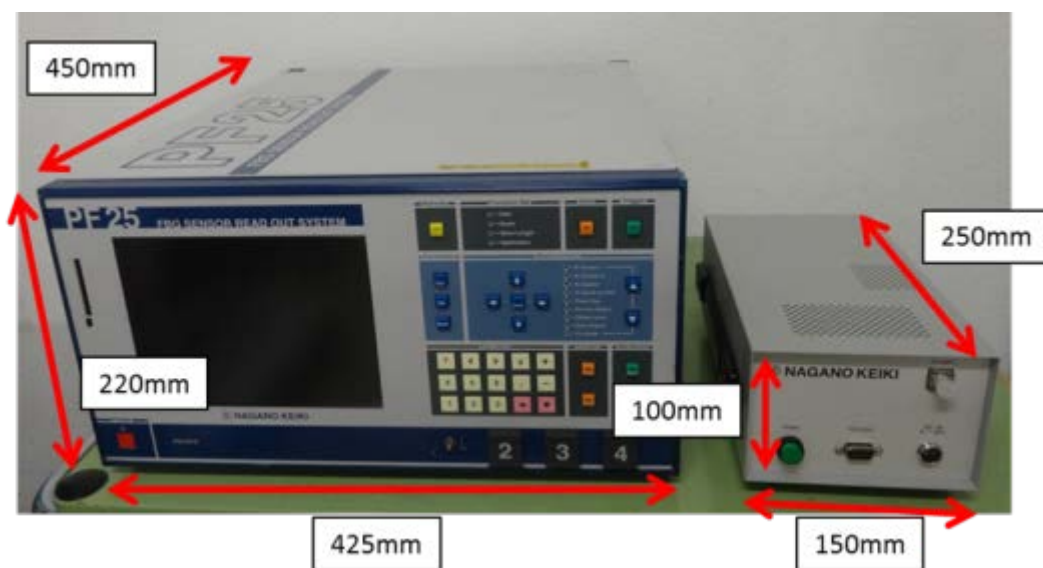


図 2-5-1-3-6 従来品 (左) と光波長測定装置二次試作品 (右)

・ 2-5-1-4 光波長測定装置制御プログラム

二次試の光波長測定装置では汎用の 16bit マイコンを使用し、接続された FBG センサの波長を求めシリアル通信経由で出力する。まず、高周波信号の上りスイープにおいて、マイコン内蔵の AD コンバータで接続された FBG センサ、基準波長のスペクトル波形を測定する。下りスイープでは、測定したスペクトルデータから波長を演算によって求め、シリアル通信により接続した PC へと測定結果を転送する。また、下りスイープでは、AOTF モジュールの温度を測定し、マイコン内蔵のメモリに記録した高周波信号の温度係数から高周波信号の掃引範囲を求め、SPI 通信によって DDS へ転送する。AOTF に印加する高周波信号の掃引パターンとマイコンの処理タイミングを図 2-5-1-4-1 で示す。

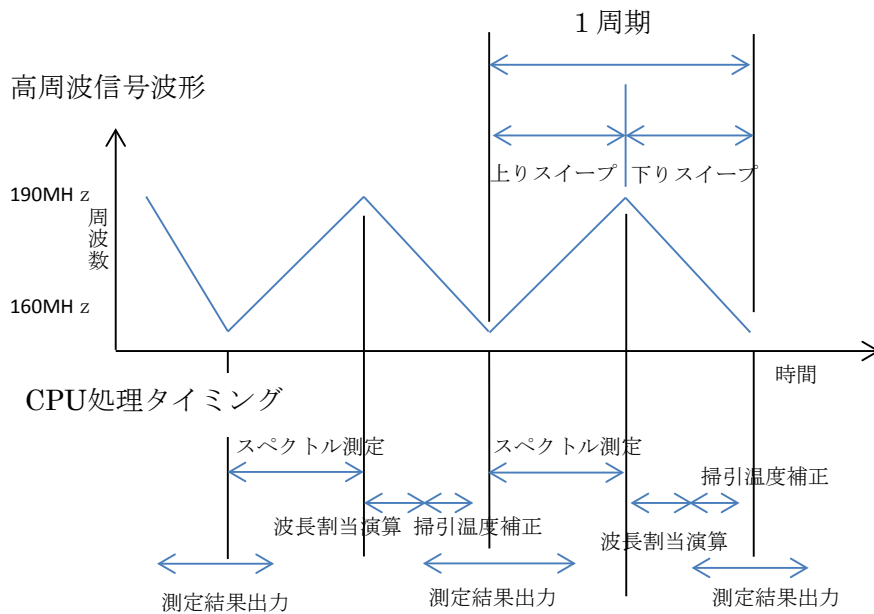


図 2-5-1-4-1 高周波信号の掃引周波数と CPU の処理タイミング

・ 2-5-1-5 測定性能評価試験

光波長測定装置二次試作品の測定性能評価試験結果一覧を表 2-5-1-5-1 に示す。

表 2-5-1-4-1 測定性能評価結果一覧

機能名	仕様項目	開発仕様	評価結果
光学要素	光チャンネル数	1	1
	サンプリング周波数	200Hz	200Hz
	測定波長範囲	1530~1560nm	1528.98~1561.34nm
	波長安定性	<±15pm	<±15pm
	波長再現性	<5pm @1kHz 2σ 値	<5pm @1kHz 2σ 値
	光コネクタ	FC/APC	FC/APC
機械, 環境, 電気	サイズ	100mm × 150mm × 250mm	100mm × 150mm × 250mm
	動作温度範囲	-20~50°C	-20~50°C

表 2-5-1-5-1 に示した各仕様について、開発仕様を満たしていることを確認した。
 詳細結果を以下に示す。

(A) 波長掃引範囲確認試験

本試験では、測定器の性能が仕様波長測定範囲の 1530～1560nm を満たしていることを確認した。

波長掃引範囲確認試験の試験の様子を図 2-5-1-5-1 に、用いた装置を表 2-5-1-5-1 に示す。

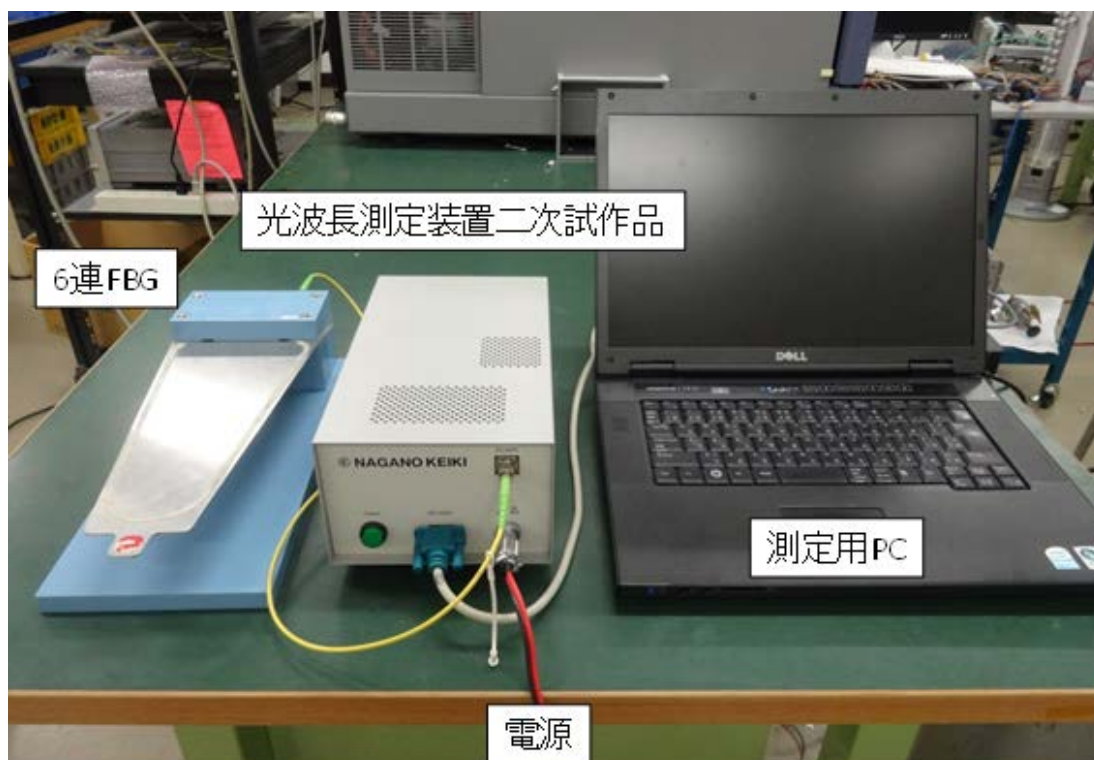


図 2-5-1-5-1 波長掃引範囲確認試験の様子

表 2-5-1-5-1 波長掃引範囲確認試験の装置

装置	メーカー	型式・その他
測定用 PC	DELL	Vostro 1510
6 連 FBG	伸興電線, 長野計器	1530～1560nm
電源	Agilent	E3632A

6 連 FBG は、1530nm から 1560nm まで 6 点の FBG が金属板の上に接着固定されている。この 6 点の FBG を測定できれば、1530nm から 1560nm までの範囲の FBG を測定できることになる。金属板を手動で動かし、FBG の波長を人為的に変化させながら波長データを取得した。

得られた試験結果を図 2-5-1-5-2 に示す。

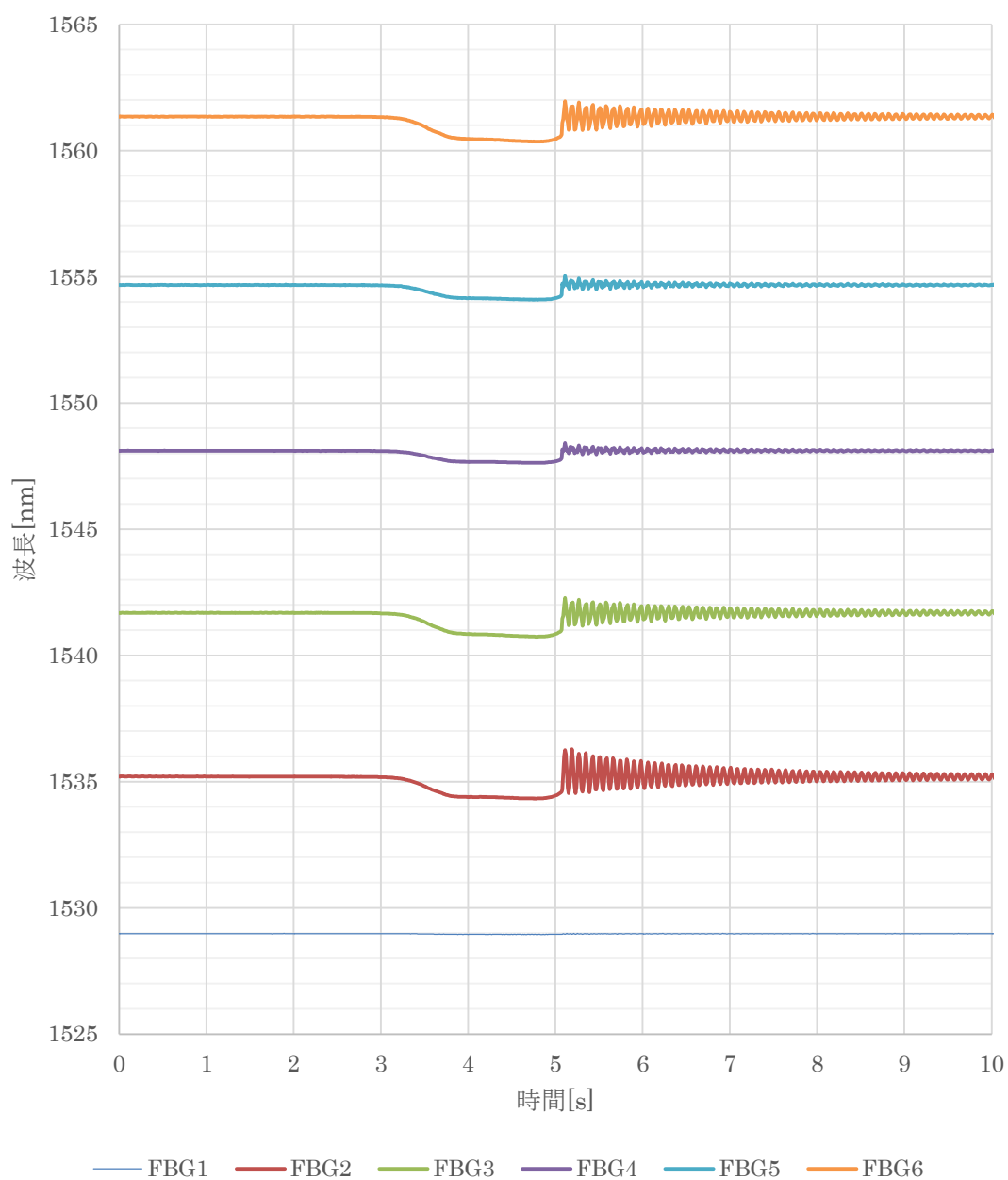


図 2-5-1-5-2 6 連続 FBG の反射波長の測定結果

図 2-5-1-4-2 より、各波長の FBG の反射波長及びその変化が測定できていることが確認できる。途中、5 秒付近で振動を加えたが、その振動も計測されている。なお、それぞれの FBG で振動の現れ方が異なるが、これは板バネ上の位置が異なるためである。

(B) 波長再現性確認試験

波長再現性確認試験では、波長変化しない状態のFBGの波長を光波長測定装置で測定し、波長の測定値にどの程度の再現性があるかを測定し、開発仕様を満たすことを確認する。

試験の様子は、波長掃引範囲確認試験で用いたものと同一である(図2-5-5-1)。本試験では、板バネに振動を加えない状態でFBG反射波長を得た。得られたデータ2500点に対し、再現性の確認を実施した。再現性の確認は、データの標準偏差 σ を計算し、標準偏差の2倍値を再現性の値とした。

波長再現性試験の結果を、表2-5-1-5-2に示す。

表 2-5-1-5-2 波長再現性試験結果

	FBG1	FBG2	FBG3	FBG4	FBG5	FBG6	平均値
測定波長[nm]	1528.977	1535.179	1541.684	1548.102	1554.67	1561.342	1544.992
2 σ 値[μ m]	3.0	2.0	3.5	4.3	6.5	4.2	3.9

FBG5については、2 σ 値が6.5 μ mとなり、仕様の範囲を逸脱したが、その他のピークについては、仕様の波長再現性を満たしており、平均値は3.9 μ mであった。

全体として、波長再現性は概ね満足するものと判断する。

(C) 波長安定性、動作温度範囲確認試験

本試験では波長安定性が $\pm 15\mu$ m、動作温度範囲が $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$ の仕様を満たしているか確認した。試験系を図2-5-1-5-3に、使用装置を表2-5-1-5-3に示す。

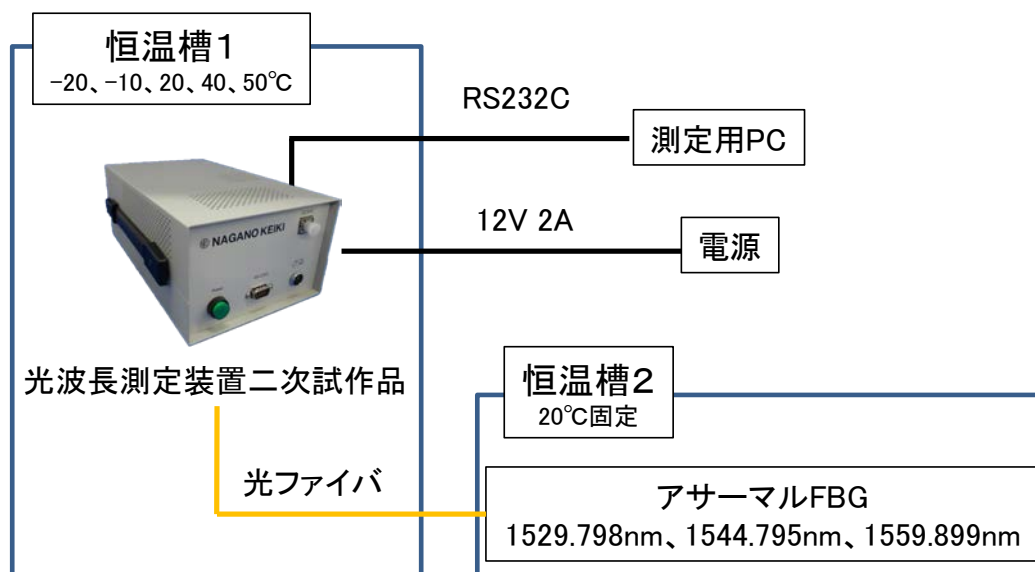


図 2-5-1-5-3 性能評価試験 (波長安定性、動作温度範囲) 試験系

表 2-5-1-5-3 波長安定性，動作温度範囲確認試験に用いた装置

装置	メーカー	型式・その他
測定用 PC	ASUS	U38N
電源	Agilent	E3632A
恒温槽 1	Yamato	IW241
恒温槽 2	ESPEC	SH-240
アサーマル FBG	伸興電線	1529.798nm, 1544.795nm, 1559.899nm

図 2-5-1-5-3 で示したアサーマル FBG は 20°C に保った恒温槽 2 内に放置した。光波長測定装置二次試作品は -20~50°C の恒温槽 1 内に設置，測定用 PC と RS232C で接続し，測定を行った。図 2-5-1-5-4，2-5-1-5-5，2-5-1-5-6，表 2-5-1-5-4 にアサーマル FBG の波長安定性の測定結果を示す。また各基準ピーク値との誤差を表 2-5-1-5-5 に示す。図中の赤線は波長安定性の仕様値範囲 (±15pm) を示す。

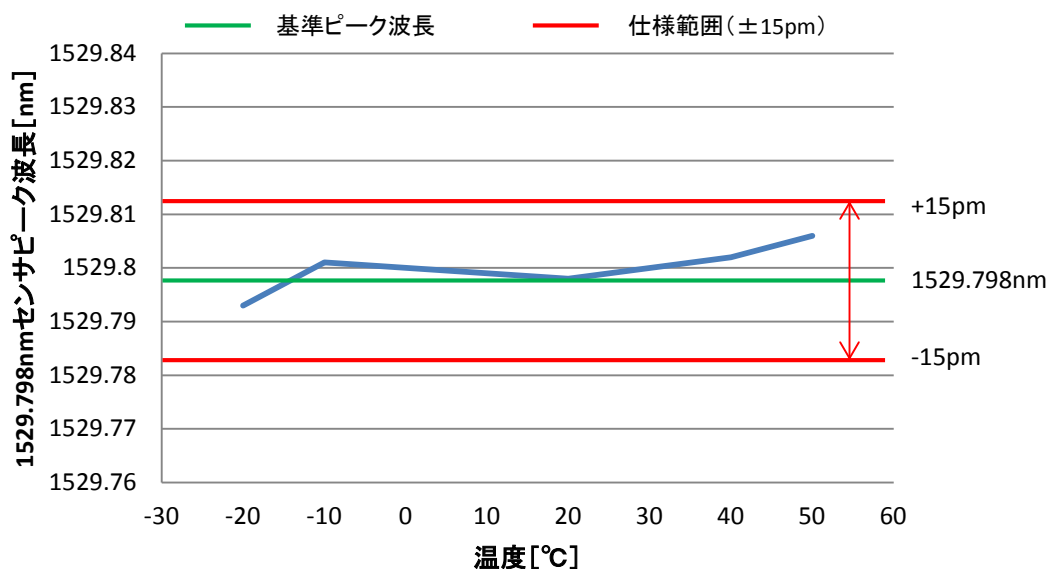


図 2-5-1-5-4 1529.798nm センサのピーク波長測定

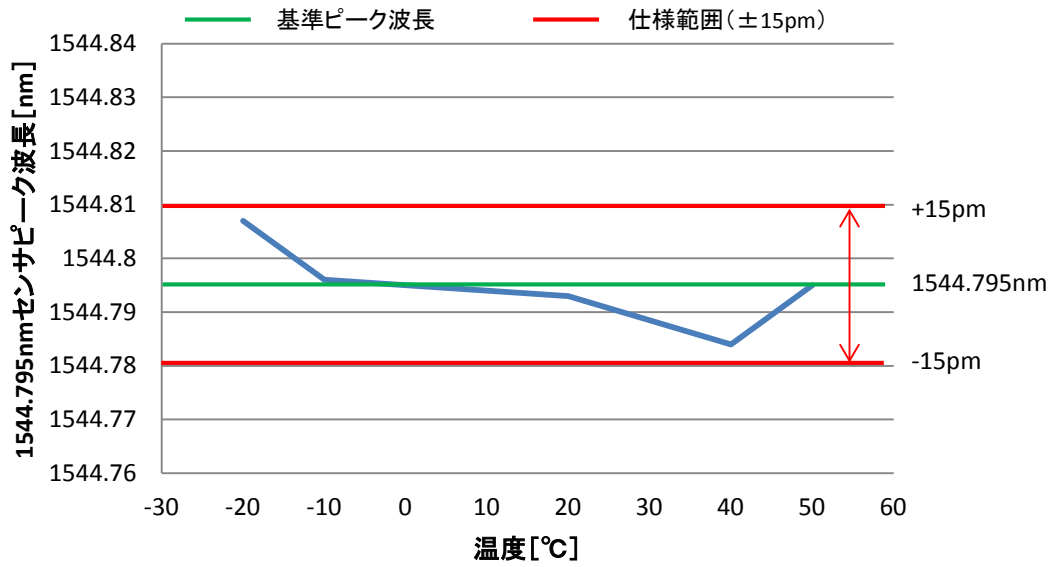


図 2-5-1-5-5 1544.795nm センサのピーク波長測定

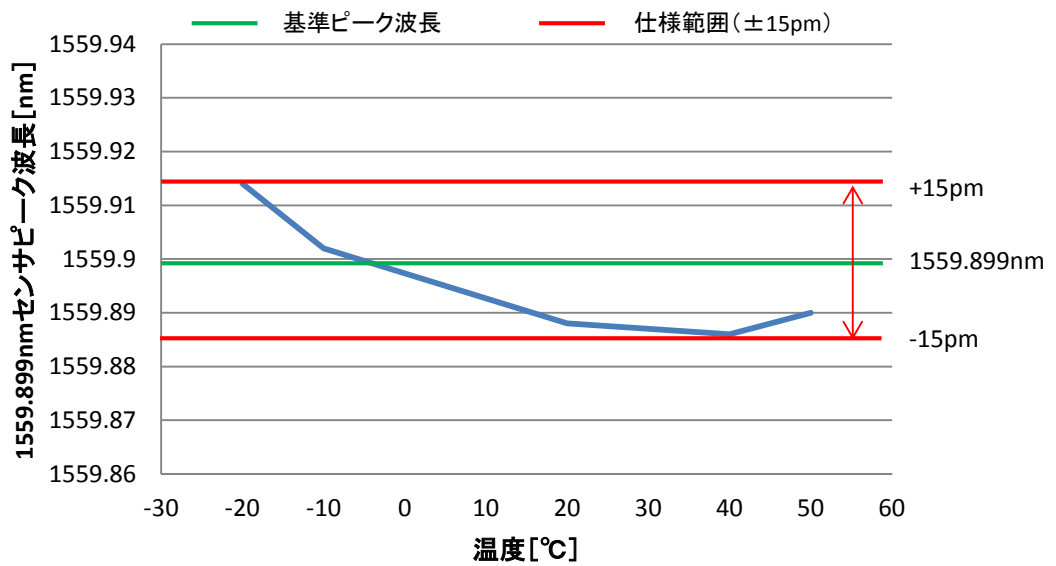


図 2-5-1-5-6 1559.899nm センサのピーク波長測定

表 2-5-1-5-4 各温度での各 FBG センサピークの測定波長

温度 [°C]	センサピーク [nm]		
	1529.798nm センサ	1544.795nm センサ	1559.899nm センサ
基準ピーク値	1529.798	1544.795	1559.899
-20	1529.793	1544.807	1559.914
-10	1529.801	1544.796	1559.902
20	1529.798	1544.793	1559.888
40	1529.802	1544.784	1559.886
50	1529.806	1544.795	1559.89

表 2-5-1-5-5 各 FBG センサピークの誤差

温度 [°C]	ピーク誤差 [pm]		
	1529.798nm センサ	1544.795nm センサ	1559.899nm センサ
-20	-5	12	15
-10	3	1	3
20	0	-2	-11
40	4	-11	-13
50	8	0	-9

動作温度範囲-20°C~50°Cによるセンサピークの誤差は、表 2-5-1-5-5 より最大 15pm であった。波長安定性の仕様値（±15pm）を満たしており、波長安定性および動作温度範囲は開発仕様に収まっていることを確認した。

(d) 放射無線周波電磁界イミュニティ

一次試作の光波長測定装置で不合格であった放射無線周波電磁界イミュニティについて、二次試作の光波長測定装置で再度評価を行った。二次試作品では、DDS による高周波発生部をパッケージ化しシールドケース内に収めており、高周波発生部で発生している 200MHz 近傍の高周波信号の電気制御回路への影響を低減している。

表 2-5-1-5-6 二次試作電磁両立性試験項目

試験項目	目的	適応規格	ノイズ周波数	ノイズ強度
放射無線周波電磁界イミュニティ	周辺機器からの放射電磁ノイズに対する耐性確認	IEC 6100-4-3	80M~1GHz	3V/m 1kHz 80%振幅変調

供試験試料

試料名：光波長測定装置二次試作品

合否判定基準

外部からの電磁ノイズを受けるイミュニティ試験：電磁ノイズ印加中に誤動作無き事

結果

電磁両立性試験の結果を表 2-5-1-5-7 に示す。

表 2-5-1-5-7 二次試作電磁両立性試験項目

試験項目	適応規格	合否判定	データ
放射無線周波電磁	IEC	合格	図 2-5-1-5-7
界イミュニティ	6100-4-3		図 2-5-1-5-8

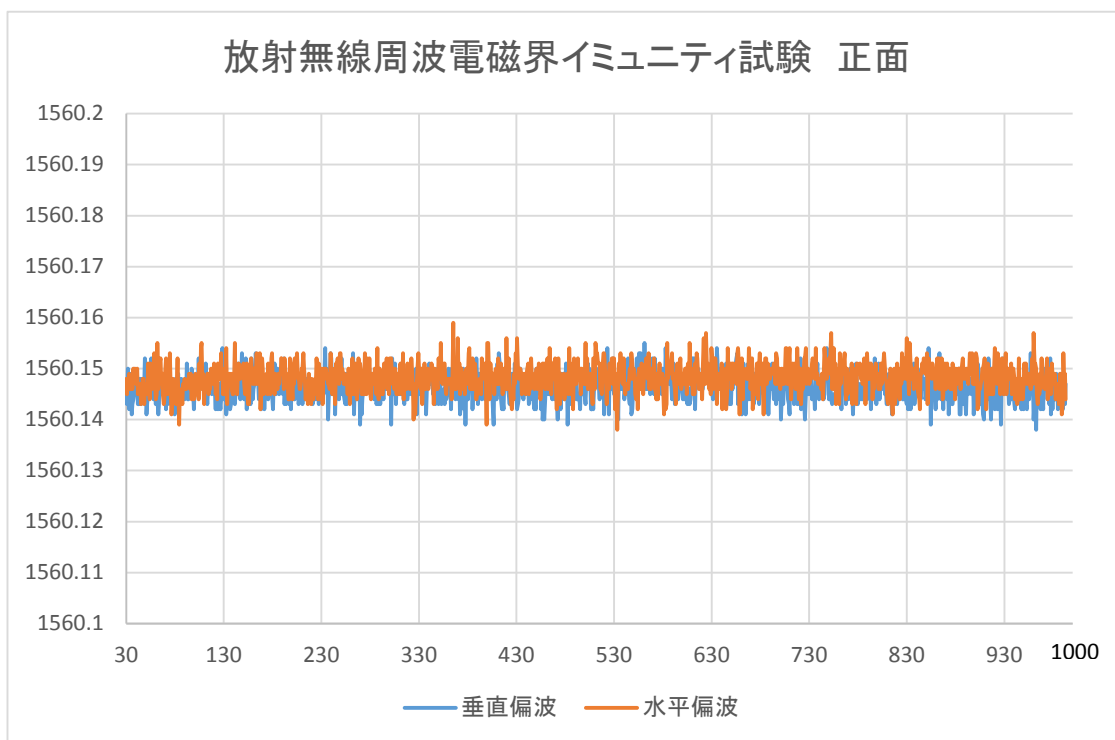


図 2-5-1-5-7 放射無線周波電磁界イミュニティ 正面

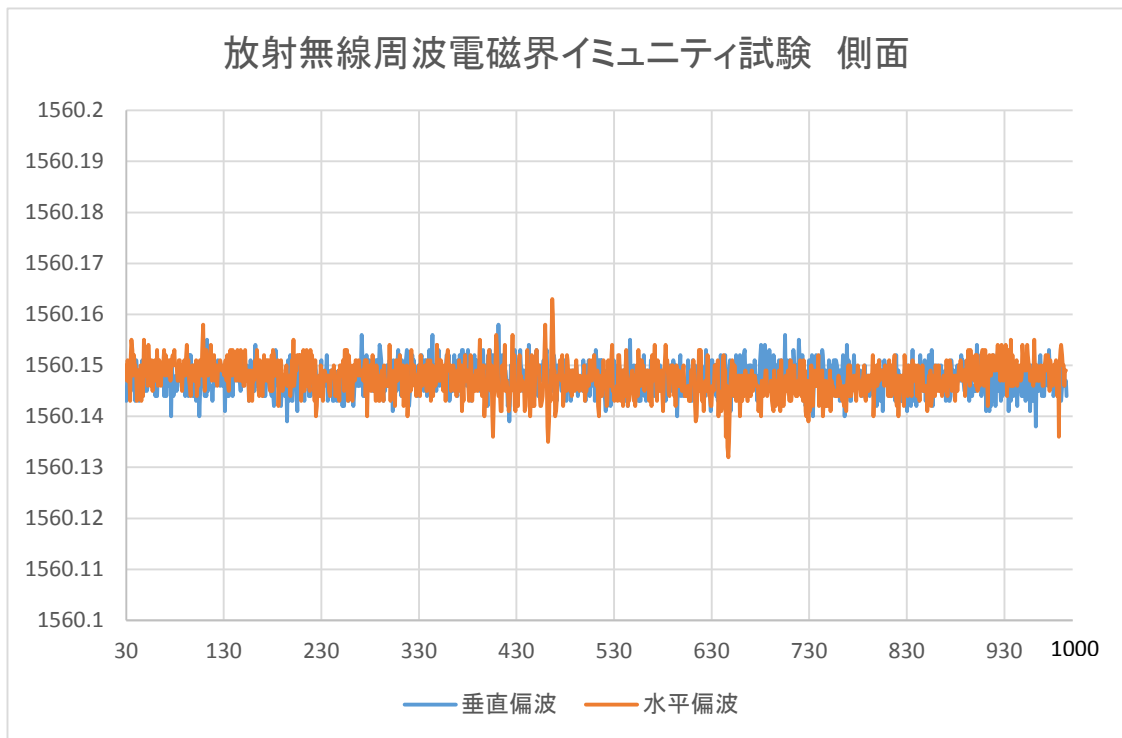


図 2-5-1-5-8 放射無線周波電磁界イミュニティ 側面

・ 2-5-1-6 評価まとめ

小形波長掃引光源モジュールを内蔵した FBG センサ用の光波長測定装置二次試作品の開発を行った。光波長測定装置一次試作品の課題であったサイズ，低コスト化，電磁両立性試験（放射無線周波電磁界イミュニティ）については，小型波長掃引光源モジュールを汎用 16bit マイコンによる 1 チップ構成にし，高周波発生部をシールドケース内に一括することにより解決することが出来た。また，光波長測定装置二次試作品の性能は，インフラ健全度監視に適した開発仕様に対して，概ね満足する事を確認した。

・2-5-2 ⑤-2 光波長測定装置の安定度および信頼性の評価

・2-5-2-1 光波長測定装置の道路橋での安定度および信頼性の評価

・2-5-2-1-1 光計測による橋梁モニタリングの目的・概要

橋梁をはじめとする道路インフラの維持管理の重要性は既に広く認識されており、平成26年に義務化された定期点検の実施も進むなか、実際に重大な事故につながりうる損傷事例も報告されてきている。そのような中で、構造物にひずみや加速度等のセンサを取り付け、得られるデータからその状態を把握しようとする構造モニタリングは、定量的・客観的な情報に基づく維持管理を可能とするとして、国内外で研究・実務の両フェーズで活発な取り組みがなされている。光ファイバセンサ（FBGセンサ）を用いた構造モニタリングの利点は、数十～数百 m オーダーの橋梁をシンプルな配線でデータ取得を行える点とされている。開発する光測定器による光ファイバ加速度センシングシステムにおいても、実証を実橋梁で行う。対象橋梁において、多点加速度センシングシステムを設置し、維持管理現場に活用できる情報の提供を目指し、振動モード特性の時系列データ分析、地震時応答の分析、さらに加速度振動波形からの通過車両数推定に取り組んでいる。

・2-5-2-1-2 実橋梁計測の概要

実証試験の対象橋梁は橋長約 300m、幅員約 10m(対向 2 車線)の 4 径間連続 PC 箱桁橋である。光加速度計測システムを設置している。システムは、図 2-5-2-1-2-1 のように、4 つの各径間中央に加速度センサを設置し、光ケーブルで直列に配線しているものである。

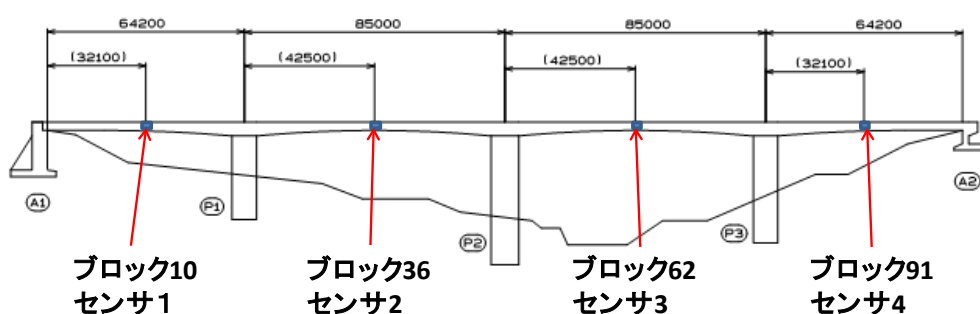


図 2-5-2-1-2-1: システム 1 (全径間直列接続) のセンサ配置

設置した光ファイバ加速度センサの様子を図 2-5-2-1-2-2 に示す。



図 2-5-2-1-2-2 設置した光ファイバ加速度センサ

・ 2-5-2-1-3 現場での使用結果

光波長測定装置を含む光ファイバ加速度測定システムは、11月からデータ取得を開始した。図 2-5-2-1-3-1 に、11/19 日 0 時に取得した加速度の時系列データを示す。

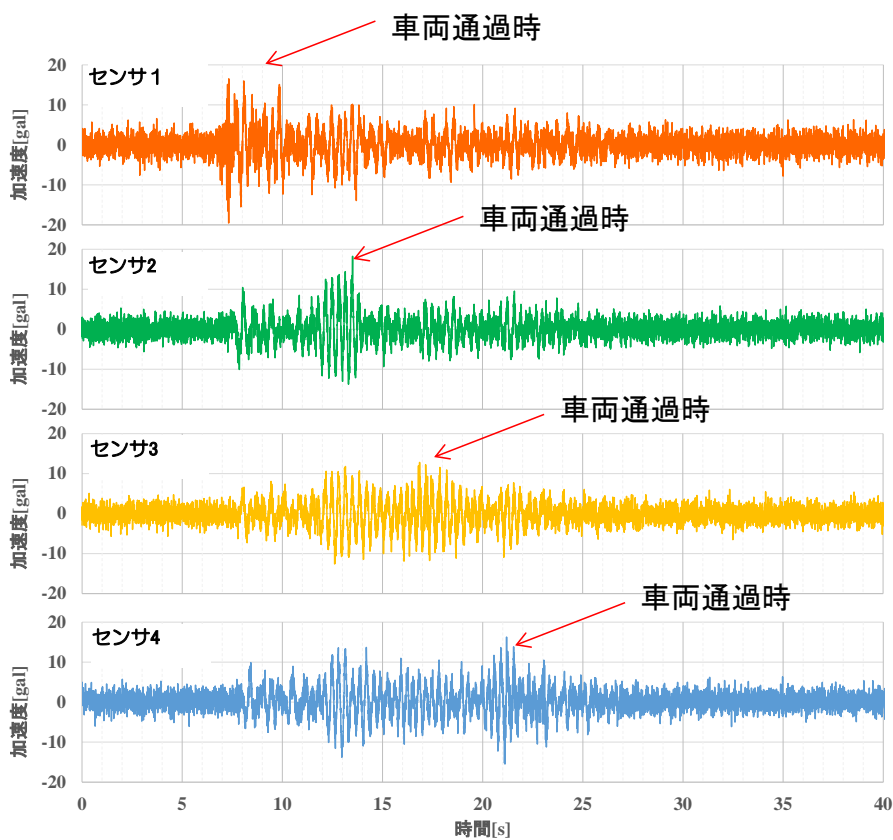


図 2-5-2-1-3-1 車両通過時に測定した加速度の時系列データ

図 2-5-2-1-3-1 において、センサ 1～センサ 4 の振動波形の振幅が大きくなる時間が異なるのは、センサの設置位置が異なるため、車両がセンサ 1 から 4 の方向に走行し、揺れる時間が異なるためと考えられる。

今後は地震時の全体的な振動特性同定、各径間での振幅比較といった分析を行いながら、光波長測定装置の安定性などを検証していく。

さらに取得したデータ活用の一例として、横浜国立大学では橋梁通過車両数の推定を行っている。橋梁の供用時に得られる加速度波形は、ホワイトノイズで正規分布となる常時微動に、車両通行による減衰振動波形が重なったものである。人間の体感でも、大型車が通過すれば大きく揺れ、全く通過車両がなければ揺れないといった点を、加速度波形の振幅に関する特徴量を用いて確率モデルを構築した。具体的には、常時微動の正規分布成分からの外れ値の数や振幅を特徴量として用いて、通過車両数の推定式を得た。その結果の 1 つを図 2-5-2-1-3-2 に示す。図 2-5-2-1-3-2 は、2015 年 11 月 17 日から 11 月 26 日までの、10 分間あたり通過車両数のプロットである。黒線が実測値であり、赤線および青線が、圧電加速度センサで得られた加速度データを用いて構築した推定式での値である。常時加速度モニタリングデータからの、新しい情報提供として今後検証を進めていく。

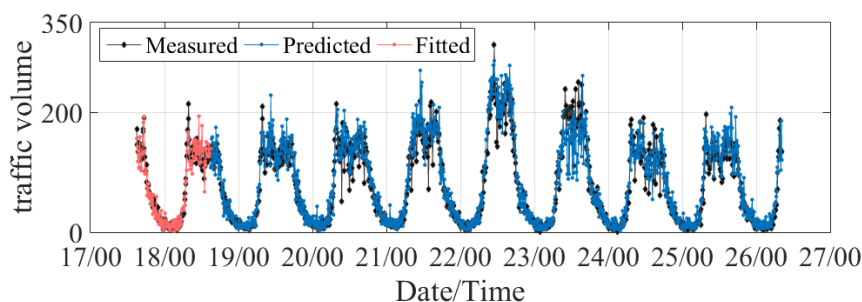


図 2-5-2-1-3-2 常時加速度データ活用の一例
(橋梁通過車両数推定[伊藤, 西尾, 生井, 2016])

・ 2-5-2-1-5 評価まとめ

光ファイバ計測の橋梁モニタリングへの活用に向けて、実橋梁での検証を行っている。要求されるのは、屋外環境での長期間の安定したデータ取得である。2015 年 11 月からのデータ取得によって、光波長測定装置およびセンサの信頼性・安定性分析が可能なデータが蓄積されてきている。対象橋梁は冬季に積雪量も多い地域であり、年単位での計測したデータ取得と分析を引き続き行うことで、道路インフラにも展開できる光波長測定装置へ改良ができていくと期待される。また、取得データを活用した橋梁維持管理現場への有意義な情報提供についても、継続して検証を行って行く。

・2-5-2-2 冷熱衝撃試験

光波長測定装置の構成，構造から，光波長測定装置は電子部品，材料及びその各部材の接合部分の故障が支配的であると推測出来る．加速劣化試験として最も効果的である熱衝撃試験を実施した．

熱衝撃試験を実施した際の高温と低温の温度差によるストレスと寿命の関係が(1)式のアイリングモデルで表現されることを仮定する．

$$\ln N = \ln A - n \cdot \ln \Delta T \quad (1)$$

ここで，N：サイクル数(寿命)，A：定数，n：正数， ΔT ：温度差[°C]である．(1)式より $N = A \Delta T^{-n}$ となることから，実使用と加速試験を実施した際のそれぞれのサイクル数の比である加速係数 K は

$$K = N_1 / N_2 = (\Delta T_2 / \Delta T_1)^n \quad (2)$$

である．ここで N1：実使用における寿命（サイクル数），N2：加速試験における寿命（サイクル数）である．n は一般的に用いられる正数 n=3 とした．

波長掃引光源モジュールの仕様温度範囲は-20°C～70°Cである．実使用環境における寒暖差を多めに見積もって，一日に1サイクル $\Delta T_1 = 30^\circ\text{C}$ の温度変化が生じるとし，これに対して，高温70°Cと低温-20°Cで熱衝撃試験を実施する．すなわち $\Delta T_2 = 90^\circ\text{C}$ である．n=3を仮定すると，(2)式より加速係数 K=27 となる．目標とする実使用时间5万時間は約2113日間であるので，試験サイクル数は，実使用サイクル数÷加速係数であり， $2113 \div 27 = 79$ サイクルとなる．高温(+70°C)と低温(-20°C)における保持時間は，試験規格 MIL-STD-202G 及び JEITA ED-4701 を参考に，それぞれ60分間に設定した．

高温70°C60分間，低温-20°C60分間保持の冷熱衝撃試験を，80サイクル実施後，光源モジュールの動作を確認した結果，正常に動作していた．この結果，実使用における5万時間に相当する冷熱サイクルに対する信頼性が確認できた．

・2-5-2-3 振動試験

実使用時における振動に対する信頼性を評価するため，より過酷な条件として，トラック等による輸送に相当する振動試験（MIL-STD 810）を実施した．

輸送試験 MIL-STD 810

- ・1時間の試験で1000マイル（約1609km）輸送と同等
- ・XYZ 3方向で試験を実施
- ・オーバーオール rms 値 垂直方向：1.04G

振動試験の実施後、測定装置の動作を確認した結果、正常に動作している事が確認できた。

実使用における外部振動を橋脚の実測値から推定した結果、輸送試験の振動の1/30000程度の負荷と考えられるので、実使用における外部振動が光波長測定装置に加わった場合は、試験時間は1時間であるので、3万時間以上の安定して動作すると推定できた。

・2-6 ⑥ 光波長測定装置の他分野への展開検討

・2-6-1 心拍数測定

FBG センサを右肘の上腕動脈上の皮膚表面に医療用テープで固定し、20秒間の脈波を測定する。脈波の測定と同時に、日本光電社製のベッドサイドモニタ PVM-2701により心拍数を測定し参照値とした。測定回数は3回とする。また、被験者は健康な20代男性1名とし、座位で測定した。サンプリング周波数は500Hzである。測定した脈波のピーク数を求め、1分間の平均呼吸数を算出し参照値と比較した。測定した脈波はノイズ除去のためバンドパスフィルタ処理 ($0.5 < f < 3$) を施した。

測定された脈波のバンドパスフィルタ処理後の例を図2-1-8-1-1に示す。ピークは明瞭に観察されており、心拍数を算出するのに十分な精度で脈波測定ができておりといえる。表2-1-8-1-1に心拍数の算出値と予測値の比較結果を示す。2,3回目は参照値と同様の心拍数を算出することができたのに対し、1回目は参照値との差が5bpmとなった。これは20秒間の脈波から心拍数を算出しているために生じた誤差であると考えられる。

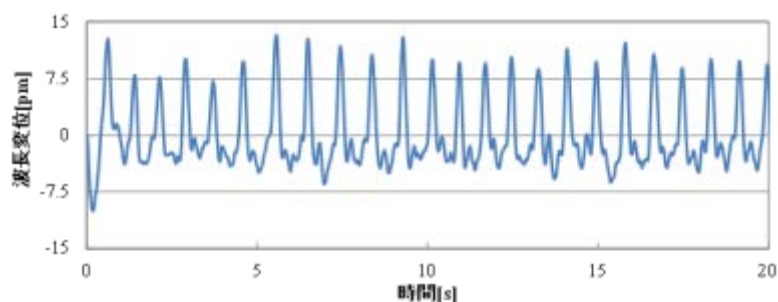


図 2-6-1-1 FBG を用いて測定した脈波の例
(バンドパスフィルタ処理後)

表 2-6-1-1 心拍数算出結果

測定回数	参照値[bpm]	算出値[bpm]
1回目	64	69
2回目	66	66
3回目	72	72

・2-6-2 呼吸測定

被験者の呼吸数を意図的に 6bpm, 7bpm, 10bpm, 15bpm, 20bpm の 5 段階に変化させた。さらに、温度データロガーを用いて息の温度変化を測定した。この時、FBG センサを用いてそれぞれの段階において 30 秒間の脈波を測定した。被験者 A は健康な 20 代男性であり、測定部位は肘である。被験者 B は健康な 20 代男性であり、測定部位は手首である。2 名の被験者共に座位で測定を行った。サンプリング周波数は 500Hz である。測定した脈波の RRI の変動を算出し、1 分間の平均呼吸数を求め、その時の参照値と比較した。測定した脈波はノイズ除去のためバンドパスフィルタ処理 ($0.5 < f < 3$) を施した。

図 2-1-8-2-1 に脈波間隔の変動（脈波ピーク間隔）と呼気の温度変化の一例を示す。呼吸性不整脈による脈波間隔の変化と、呼吸による息の温度変化が対応していることが判明した。図 2-1-8-2-2 に呼吸数の算出結果と測定結果の比較を示す。全体として誤差は小さいが、被験者 A における参照呼吸数 20bpm の時に誤差が 3.1bpm と大きくなった。これにはサンプリング周波数が不足している可能性が考えられる。

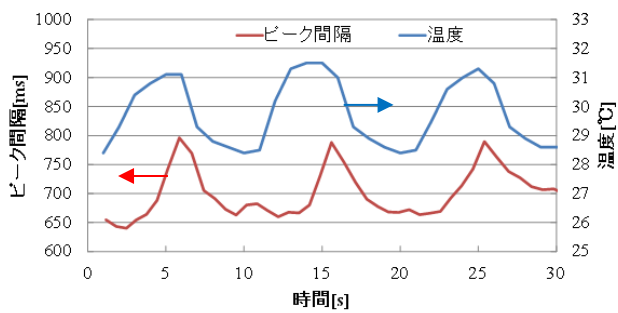


図 2-6-2-1 RRI と呼気温度変化
(呼吸数が 6bpm の場合)

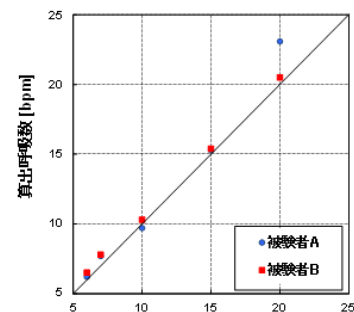


図 2-6-2-2 被験者実験による呼吸数測定

以上、光波長測定装置を適用した FBG センサシステムにより心拍数測定、および呼吸数測定が可能であることが確認された。また、サンプリング周波数を最適化することにより、本手法によって血圧や血糖値などの他項目の測定が可能と考えられ、さらに心理ストレス状態、循環器系疾患などの診断にも応用でき、マルチバイタルサインセンサシステムへの展開見通せる。

◆最終章 全体総括

・3-1 研究開発成果

各課題に関する研究開発成果は表 3-1-1 の通りである。課題⑤-2 光波長測定装置の安定度および信頼性の評価について、実フィールドによるモニタリングは今後も継続して行う。これらの評価結果に基づき、必要に応じて改良を加えていくことにより、製品レベルでの安定性・信頼性を実現することで、事業化につなげていく。

表 3-1-1 研究開発成果

課題 No.	課題名	研究開発成果
① -1	導波路端面処理手法の確立	<ul style="list-style-type: none"> ウェハ一括研磨による研磨時間短縮を目的として、ウェハ端面全域において均等圧研磨が可能な、研磨治具を開発した。更に、研磨ジグを用いて最適な研磨工程を開発することで、単チップ研磨と比較して、研磨時間を約 60%削減した。
① -2	光学系のアライメント、特性評価システムの開発	<ul style="list-style-type: none"> 光学モジュールを組み立てるための高精度光学実装装置を導入し、装置立ち上げとモジュール試作からその機能を確認した。本装置によって効率的な製造と低コスト化が実現でき量産、実用化への見通しを得た。
②-1	電気制御回路の開発	<ul style="list-style-type: none"> 製作した小型波長掃引光源モジュール用電気制御回路は、開発仕様を満足した。波長掃引範囲の温度調整機能についても-20℃～60℃の温度範囲において、開始終了波長ともに 2.5nm 以下の制御能力を有することを確認。また、掃引幅の変動についても 1nm 以内を確認した。
②-2	モジュール筐体の開発	<ul style="list-style-type: none"> 光波長測定装置に必要なすべての光学部品を YAG 溶接固定により光学モジュールに組み込み、更に、光学モジュール筐体に AOTF チップと線膨張整数を適合させた SUS304 を採用することで、温度変化による AOTF チップへの応力を低減させ、熱衝撃や温度サイクルに対する耐性をもたせた光学モジュールを開発した。 光学モジュールと AOTF チップを駆動する回路を光電気混載モジュールとして同一筐体内にモジュール

		化し、光学性能、電磁両立性脳を共に満足した。
③	光源と導波路の結合技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ● 光源をモジュール外部に設置することで課題を解決した。
④	小型波長掃引光源モジュールの信頼性評価	<ul style="list-style-type: none"> ● 信頼性を確認するため、冷熱衝撃試験$-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$における160サイクルの冷熱衝撃試験を実施、10万時間相当の信頼性を確認した。 ● 振動試験 MIL-STD810（トラック輸送1000マイル相当）の試験前後で動作異常が無いことを確認した。 ● 高温動作試験にて通電状態で50°C2000時間の試験を実施し、安定動作を確認した。
⑤-1	光波長測定装置の開発	<ul style="list-style-type: none"> ● 試作した光波長測定装置は、インフラ健全度監視に適した開発仕様（使用温度範囲$-20^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$、波長再現性3.9pm、波長精度$\pm 15\text{pm}$）に対して満足していることを確認した。
⑤-2	光波長測定装置の安定度および信頼性の評価	<ul style="list-style-type: none"> ● 信頼性を確認するため、冷熱衝撃試験$-20^{\circ}\text{C}\sim 70^{\circ}\text{C}$における160サイクルの冷熱衝撃試験を実施、10万時間相当の信頼性を確認した ● 振動試験にて MIL-STD810（トラック輸送1000マイル相当）の試験前後で動作異常が無いことを確認した。 ● 2015年11月17日から道路橋に光波長測定装置を設置し、モニタリングを約3ヶ月行った結果、車両通過時の加速度波形を取得することができ、光波長測定装置およびセンサの信頼性・安定性分析が可能なデータが蓄積されてきている。 ● 年単位でデータ取得と分析を引き続き行うことで、さらに改良を進めていく。
⑥	光波長測定装置の他分野への展開検討	<ul style="list-style-type: none"> ● 試作した光波長測定装置を適用したFBGセンサシステムにより心拍数測定、および呼吸数測定が可能であることが確認した。また、サンプリング周波数を最適化することにより、本手法によって血圧や血糖値などの他項目の測定が可能と考えられ、さらに心理ストレス状態、循環器系疾患などの診断にも応用でき、医療応用への展開を見通せる。

・ 3-2 研究開発後の課題・事業化展開

・ 3-2-1 小型波長掃引光源モジュールの事業展開

本開発の成果である小形波長掃引モジュールの特徴を生かした事業化の検討を開始した。本モジュールの特徴は近赤外から中赤外に渡る小型でかつ高分解能の光スペクトルを、分光器を用いることなく発生させることができることである。

この方式で実現可能な波長帯域は、環境、医療、エネルギー、農業等の分野でその優位性を発揮できる。事業化を行うに当たり、小型波長掃引光源モジュール装置の市場及び適用産業領域の調査を行うと同時に販売上の課題、事業拡大の課題について検討した。

1. 市場及び適用産業調査

本装置の適用領域は、波長特性を中心とする装置仕様に大きく依存する。ここでは開発の中心である 1.5 μ m 帯波長域を前提に波長要望も合わせて調査した。調査にもとづくこの光源の主な適用領域を次に示す。

- 化学合成産業 反応過程分析, 不純物分析, 組成分析, 反応プロセス管理
- 製紙産業 水分含有量分析, 組成分析
- 食品産業 組成分析, 不純物分析, 製造プロセス管理, 添加物分析管理
- 医療産業 血液分析, 病理分析, 細胞観察
- エネルギー産業 原材料分析, 組成分析, ガス分析
- 環境産業 大気組成分析, 排気ガス分析, 廃棄プラスチック分別, 分析
- 農業 植物育成度評価, 土壌及び水中養分分析, 熟成度評価

このように非常に多くの適用領域を有し、それぞれの要求仕様を実現するなら光源事業として充分成立する市場である。またその産業エリアは日本のみならず世界的な基幹産業をカバーしており今後のこれら産業の技術開発に合わせてその適用領域も拡大すると予測される。

2. 販売上の課題

この製品は我々のこれまでの主力製品である通信用デバイス及びセンサーデバイスと異なる市場領域であるため新たな販売モデルを構築する必要がある。このため次のように、この取り組みを進める。

- 1). 既存の分析機器及びプラント制御メーカーとの協業推進
- 2). 欧米を中心とする海外市場進出
- 3). OEM ビジネスの積極展開

3. 市場の創出

これまでに開発している近赤外線領域の光源に加えて可視域及び中赤外域までの波長域に適用できる光源モジュールの開発を検討した。これを実現できるなら新市場を創出し事業規模の拡大を図ると同時に、事業リスクの低減が可能となる。

中赤外ではそれを発生する有効な広帯域光源が必要である。このためこの波長域光源の研究開発に強みを持つ大学研究機関との技術協業の検討を開始した。

また 1.5 μm 帯を中心とする近赤外線領域では、光増幅器の適用が可能であり、この適用の可能性を検討し見通しを得た。これにより、これまでにない高出力の光スペクトルが実現できる。この開発では、これまでミマキ電子部品株式会社が保有する光増幅技術を最大限に活用可能で、世界に類のない差別化製品を実現できる。

・ 3-2-2 光波長測定装置の事業展開

最終年度である 2015 年度は, 本開発の成果である小形波長掃引モジュールを組み込んだ光波長測定装置の積極的な PR 活動を開始した.

1. 展示会出展による PR とユーザーの反応調査活動

サポイン事業 2 年度目に試作した光波長測定装置を展示会に出展し, 川下ユーザーへの PR とユーザーの反応を調査した.

表 3-2-2-1 に出展した展示会の一覧を示す.

表 3-2-2-1 展示会での PR とリサーチ

2015 年	展示会	会場	ブース来場者数
7 月 22 日～ 7 月 24 日	インフラ検査・維持管理展	東京ビックサイト	約 300 名
8 月 27 日～ 8 月 28 日	鉄道総研フォーラム	(公財) 鉄道総合技術研究所	約 100 名
9 月 16 日～ 9 月 18 日	センサエキスポジャパン	東京ビックサイト	約 300 名

7 月 22 日から出展したインフラ検査・維持管理展は, 光波長測定装置の主要なターゲットであるインフラの維持管理に関心のあるユーザーが多く集まる展示会であるため, インフラモニタリング用の光波長測定装置としての PR とニーズの調査を実施した. 図 3-2-2-1 に出展時の様子を示す.

FBG センサのための光波長測定装置を使用または認知しているユーザーからは, 従来の装置と比較してフィールド使用を意図した装置仕様, 装置コストに対して非常に好意的な意見が多く, 早期の市場投入を望む声が多く聞かれた. しかしながら, 大きな市場の創出に向けては, 現時点において FBG センサと光波長測定装置によるインフラモニタリングの認知度自体がまだそれほど高くはなく, 認知度向上が課題といえる.

8 月 27 日から出展した鉄道総研フォーラムは, 鉄道事業者と鉄道事業者に対して設備機材を提供しているメーカーが多く出展する展示会である. この展示会では, 鉄道インフラの維持管理に PR する目的で出展した.

9 月 16 日より出展したセンサエキスポジャパンは, センサメーカーとユーザーが集まる展示会で, 主に工業用途の PR とニーズの調査を実施した. 工業用途のニーズは多岐にわたっているが, 従来の電気式のセンサでは測れないものを測りたいユーザーが多く, FBG センサ

と光波長測定装置による光ファイバ測定の強みを活かしたアプリケーションの構築および、認知度の向上が課題であるといえる。



図 3-2-2-1 インフラ検査・維持管理展への出展

2. 具体的な引き合い案件について

展示会への出展などにより、国内外を含めて既に何件かの引き合い案件が生じており、これらの案件を皮切りに事業展開すべく、製品レベルの光波長測定装置開発を継続して行う。表 3-2-2-2 に光波長測定装置引き合い案件一覧を示す。

表 3-2-2-2 光波長測定装置引き合い案件一覧

分野	ユーザー	内容
土木インフラ 健全度監視	大手ゼネコン	<ul style="list-style-type: none"> ● 新規インフラの維持管理 ● 道路トンネル変位・沈下計測
	鉄道事業者	<ul style="list-style-type: none"> ● 鉄道橋の維持管理 ● 既存インフラの健全度評価
	大手コンサルタント	<ul style="list-style-type: none"> ● 既存インフラの健全度評価 ● 加速度，変位，傾斜を使った橋全体のモニタリング
	土木コンサルタント	<ul style="list-style-type: none"> ● 新規インフラの維持管理 ● 橋梁の歪計測
工業計測	計測システムコンサルタント	<ul style="list-style-type: none"> ● 強電磁下の計測
	半導体製造メーカー	<ul style="list-style-type: none"> ● パイプの高温計測

表 3-2-2-2 において、大別すると、土木インフラ系と、工業計測系の引き合い案件に別れる。土木インフラ系は国内外を問わずニーズがあるが、目的は新規インフラの維持管理用途、既存インフラの健全度評価などであった。これらのニーズは開発当初よりターゲットとして設定していた市場ニーズである。

工業計測系の引き合い案件は、強電自家での計測や、非常に高温な箇所の計測であり、従来のセンサでは測定困難な測定ニーズであった。

3. 事業化に向けて

PR 活動の結果、インフラ用途では、当初より想定していたニーズでの引き合いが実際に存在し、ユーザーの反応も良好であった。工業用途では、光波長測定装置による光ファイバ測定の強みを活かして行くことが重要であることが明らかとなった。今後、本開発における光波長測定装置を市場投入することで、事業化に繋がることはもとより、我が国の安心安全に寄与し、大きく社会貢献できるものと確信する。平成 28 年には 10 億円規模の事業展開を目指す。

