

平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「偏波及び位相一括処理技術による  
光ファイバ温度・ひずみ分布測定システムの高速化」

研究開発成果等報告書

平成23年 11月

委託者 近畿経済産業局

委託先 ニューブレクス株式会社

## 目 次

### 第1章 研究開発の概要

- 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標
- 1-2 研究体制
- 1-3 成果概要
- 1-4 当該研究開発の連絡窓口

### 第2章 総合性能試験結果

- 2-1 測定速度実証試験
- 2-2 ひずみ・温度分離試験
- 2-3 2.5Km 級ひずみ測定試験
- 2-4 まとめ

### 第3章 サブテーマ毎の研究成果

- 3-1 サブテーマ① 一括高速処理技術
  - 3-1-1 光導波路モジュールと Balanced Receiver の実装、確認
  - 3-1-2 高速受信処理の開発
  - 3-1-3 高速 A/D 変換実装及び FPGA ソフト開発
  - 3-1-4 整合フィルターの結果確認
- 3-2 サブテーマ② 信号強化技術
  - 3-2-1 既存機器を利用した動作確認
  - 3-2-2 高速パルス駆動モジュールの開発
  - 3-2-3 PC 光信号の動作確認
  - 3-2-4 LD 含む光部試作
- 3-3 サブテーマ③ 制御ソフト、操作ソフト及びシステム開発
  - 3-3-1 部品制御ソフト開発
  - 3-3-2 ブロード信号 DDC 処理
  - 3-3-3 整合フィルタ開発
  - 3-3-4 ハイブリッド情報処理モジュール
  - 3-3-5 GUI 開発
  - 3-3-6 リモート制御モジュール

### 第4章 全体総括

## 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

【当該特定ものづくり基盤技術において達成しようとする高度化の目標】

特定ものづくり基盤技術高度化指針のうち、以下の項目に対応。

#### (三) 電子部品・デバイスの実装に係る技術に関する事項

##### 1 電子部品・デバイスの実装に係る技術において達成すべき高度化目標

##### (1) 情報通信機器に関する事項

##### ①川下製造事業者等の抱える課題及びニーズ

#### イ. 多機能化・高機能・大容量高速情報処理化

川下企業のインテリジェント化に伴う光ファイバセンシング普及により、「稼働中」の対象物の測定が要求されている。既存品は測定速度の不十分さが課題となっており、高速化への要請が日々強くなっている。本提案は偏波及び位相を一括受信できる新技術を導入し、既存より約100倍速く温度・ひずみを測定するだけでなく、振動などの時系列情報、偏波情報を活かした光ファイバの走向情報、光ファイバによる音波情報の感知といった展望に道筋をつける。

##### ②上記を踏まえた高度化目標

#### ウ. 電気特性、デジタルノイズ対策の向上

従来の測定方法では、散乱光の偏波をノイズとして取扱い、その影響を受信結果の中から取り除くことが重要な課題であった。近年の研究により、ノイズとして取り扱っていた偏波や位相に多くの情報が含まれていることが明らかになったが、これまで偏波の実用的な処理方法がなかった。本開発では、光電変換モジュール、A/D変換部などを用いて光信号の一括処理を行うことで、システムの電気特性の向上とデジタルノイズ対策の両方を実現する。さらに先述の開発により、光ファイバから取得する情報量の大容量化も推進する。

#### 【高度化指針との対応】

特定ものづくり基盤技術高度化指針のうち、以下の2項目に対応。

#### (7) 光電気実装技術に対応した研究開発の方向性

##### ①大容量、低消費電力、低コスト化に資する電子実装技術の研究開発

ア. 波長多重技術、光導波路・光路変換ミラー・グレーティング等の光配線板技術、光ファイバ・導波路の端面精密加工技術、パッシブアライメント等の光結合技術、光コネクタ・フェルール・シリコンプラットフォーム・光デバイス等の光部品技術及び組立て治具・装置の研究開発

#### (3) 超高密度実装技術に対応した研究開発の方向性

##### ①超高密度実装の実現に資する電子実装技術の研究開発

エ. システム回路設計技術、デジタル/アナログ混在回路設計技術、インターフェイス回路設計技術、高精度位置合わせ・接合技術、システム機能検査技術の研究開発

上記(7)について、超高速で動作する光・電気変換技術が光通信のために開発されたが、デジタル信号の「クロック」を対象としているので高周波数帯域にしか対応していない。川下企業で使われる光ファイバには、途中の接続用の通信線部と、測定対象に「貼り

付けた」部分が混在するため、多くの DC に近い成分を含めた信号を扱うことが重要である。そのため光通信用品を簡単に転用できず、光部と電気回路間に光電気実装技術を用いて、精密なアナログフィルター部、複素計算処理をこなす高速のデジタル部と合わせてデジタル/アナログ 混在回路設計技術により仕上げる工夫が必要である。本提案では、これまで共同開発を続けてきた 3 社で蓄積した技術を最大限に活用し、量産に適応したモジュールを開発する。

上記（3）について、本提案では、光と電気手段それぞれの特徴を生かした最適な組合せを実現する技術路線を採用する。具体的には、偏波分離及びコヒーレント干渉（光ヘテロダイン）など「簡単・超高速」の処理を光導波路により実現する。温度と電気環境によらず安定した高い精度で目標を達成できる。一方、2 乗合成、周波数解析、整合フィルターのような「複雑だが汎用 FPGA 速度で可能」な処理は、デジタル専用基板上で解決する。システム回路設計技術、デジタル/アナログ 混在回路設計技術などによって全体的に、高品質、高速、高安定性、かつ小型のモジュールを実現する。

### 【研究背景】

社会の高度情報化の流れに伴い、各種産業設備にセンシング機能を備えることによるインテリジェント化の要請が高まり、個別電気センサに比べて、単一光ファイバが多くの情報を分布的に取得できる優位性が認められ、直近の 5 年間で数千億円の市場が生まれた。

かつての光ファイバセンサの予測市場としては、橋梁やトンネル等の動かないものの監視であると思われていたが、実際はプラントや石油開発の設備メーカーが市場を主導した。その結果、「稼働中」のセンシング機能が強く要求されている。稼働中の設備を監視するためには、その速度に対応した高速化が必要であるが、現行品では不十分であることが明らかになった。測定の高速度化は、川下市場の拡大につながると考える。

これまで提案者は、測定の位置精度を従来の 1m から最高 2cm にまで向上させ、温度とひずみの同時測定ハイブリッド技術の開発に成功するなど、多くの技術ギャップを乗り越えながら、産業界から大きな反響を得た。本開発では、川下市場のインテリジェント化の流れを加速させる起爆剤となるために、測定速度を抜本的に向上させる技術を確立し、更に部品のモジュール化、小型化を推進する。

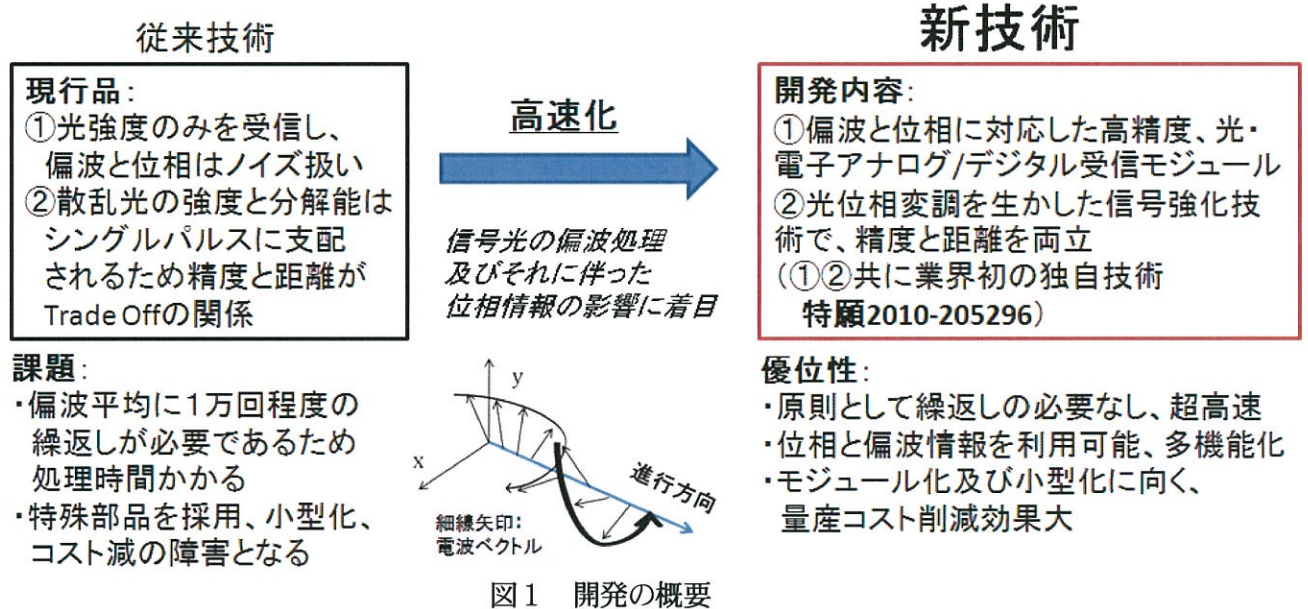
### 【新技術の概要】

現行の光強度の測定は、信号光の偏波平均に約 1 万回の加算処理が必要であるため、測定速度改善のボトルネックとなっている。本提案では偏波を直交分離して同時受信し、デジタル合成することで処理する。この新技術により、原則、加算処理の必要がなく、位相変調による散乱光信号の強化も可能となり、システム全体で約 100 倍の高速化が実現する。いわば、強度情報から周波数情報への技術革新は、白黒 TV から 3D デジタルハイビジョン TV 時代への進化と類似するともいえる。

## 【開発目標】

これまで1回の温度とひずみの分布測定に約1分間かかっていたものを、測定速度0.1秒を目標に高速化する。本開発により、川下企業に対して現行では10%程度しか満たせなかった対応範囲を90%にまで拡大する。

## 【研究開発のイメージ】

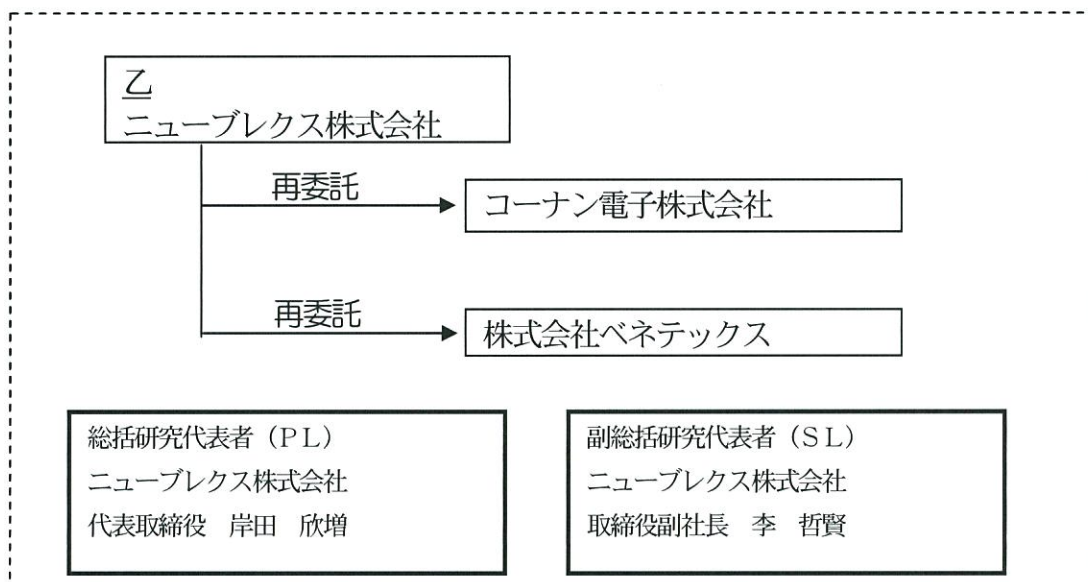


## 1-2 研究体制

(研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)

### (1) 研究組織及び管理体制

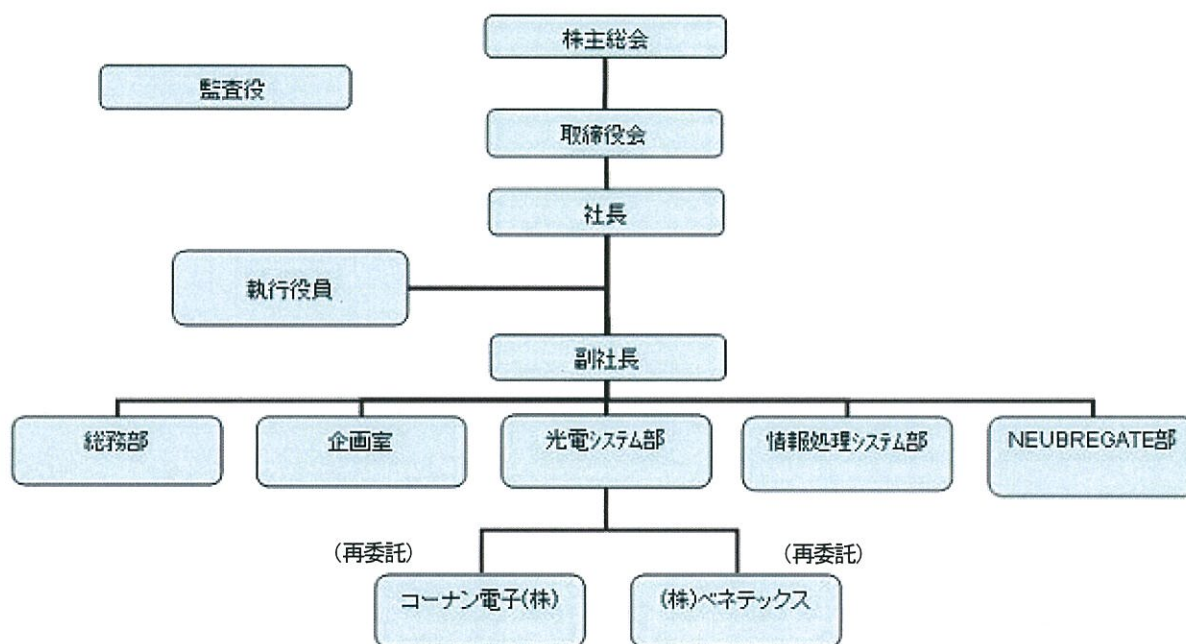
#### 1) 研究組織 (全体)



## 2) 管理体制

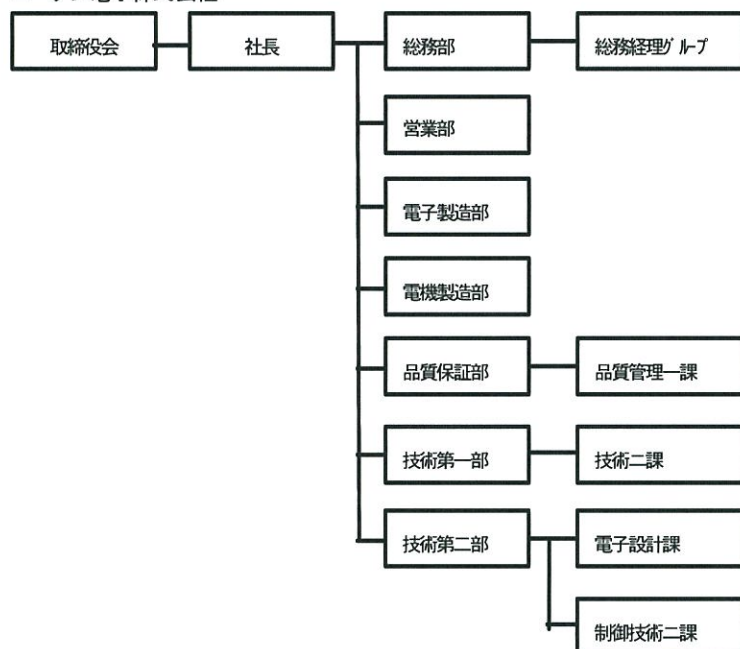
### ①事業管理機関

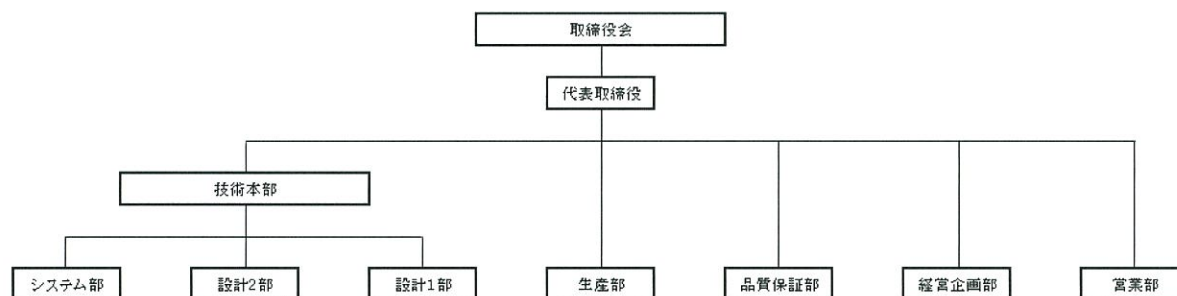
ニューブレクス株式会社



### ② (再委託先)

コーナン電子株式会社





## (2) 管理員及び研究員

【事業管理機関】 ニューブレクス株式会社

## ①管理員

| 氏 名   | 所属・役職  | 実施内容 (番号) |
|-------|--------|-----------|
| 岸田 欣増 | 代表取締役  | ④         |
| 筒井 真紀 | 総務部 課長 | ④         |
| 松田 公彦 | 企画室 室長 | ④         |

## ②研究員

| 氏 名         | 所属・役職              | 実施内容 (番号) |
|-------------|--------------------|-----------|
| 岸田 欣増(再)    | 代表取締役              | ①、②、③     |
| 李 哲賢        | 取締役副社長 光電システム部 部長  | ①、②、③     |
| 山内 良昭       | 情報処理システム部 部長       | ③         |
| 横山 光徳       | NEUBREGATE部 部長     | ③         |
| Guzik Artur | 情報処理システム部 シニアエンジニア | ③         |
| 津田 勉        | 光電システム部 課長         | ①、②、③     |
| 宮武 美由紀      | 光電システム部 主任         | ①、②、③     |
| 牧田 篤        | 光電システム部 主任         | ① ②       |
| 高野 宏和       | 光電システム部 主任         | ①、②       |
| 岡林 泰広       | 光電システム部            | ①、②       |

【再委託先】

コーナン電子株式会社

| 氏 名   | 所属・役職     | 実施内容 (番号) |
|-------|-----------|-----------|
| 永野 裕章 | 制御技術二課 課長 | ②、③       |
| 白井 康起 | 制御技術二課 主幹 | ②、③       |
| 岩田 信  | 電子設計課 主幹  | ②、③       |
| 山崎 裕二 | 電子設計課 主事補 | ②、③       |
| 三好 博  | 技術二課 課長   | ②         |
| 田畑 英恒 | 技術二課 主幹   | ②         |
| 橋本 英忠 | 技術二課      | ②         |
| 城尾 良人 | 品質管理一課    | ②、③       |

株式会社ベネテックス

| 氏 名   | 所属・役職        | 実施内容 (番号) |
|-------|--------------|-----------|
| 沢田 啓司 | 技術本部 設計1部 部長 | ①、②、③     |
| 高橋 静雄 | 技術本部 設計1部 主席 | ③         |
| 長谷川 正 | 技術本部 設計1部 主任 | ③         |
| 田中 等  | 技術本部 設計1部 主任 | ②         |
| 釘宮 誠  | 技術本部 設計1部 主任 | ①         |
| 末松 幸治 | 技術本部 設計1部    | ① ②       |

(3) 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

ニューブレクス株式会社

(経理担当者) 総務部 課長

筒井 真紀

(業務管理者) 企画室 室長

松田 公彦

(再委託先)

コーナン電子株式会社

(経理担当者) 総務部 次長

小東 昭

(業務管理者) 営業部 主幹

宮本 裕彦

株式会社ベネテックス

(経理担当者) 経営企画部 部長

阿部 美樹

(業務管理者) 営業部 部長

青木 信也

(協力者)

財団法人地球環境産業技術研究機構

CO2 貯留研究グループ 副主席研究員 薛 自求

株式会社フジクラ 光応用製品事業推進室 主席部員 須崎 慎三

三菱化学株式会社 設備技術部 チームリーダー 松岡 勲

### 1-3 成果概要

#### 【研究概要】

本研究開発では、「多機能化・高機能・大容量高速情報処理化」という川下企業のニーズを満たすため、現行の光強度のみを扱う技術から、偏波及び位相を一括受信できる最新の技術を開発し高速光ファイバ分布計測器を試作した。これにより、測定速度を100倍に高め、0.1秒間で温度・ひずみ分布を測定する技術を確立し、モジュール化による小型化、コスト削減を実現した。本開発成果は、市場拡大の起爆剤として大きな波及効果が期待できる。

#### 【開発目標】

本研究開発の目標は、以下の2点である。

- これまで1回の温度とひずみの分布測定に約1分かかっていたものを、測定速度0.1秒を目標に高速化する。
- 本開発により、川下企業に対して現行では10%程度しか満たせなかった対応範囲を90%にまで拡大する。

#### 【課題とサブテーマ】

本研究開発における解決すべき技術課題と、サブテーマは、以下のとおりである。

課題1：約1万回の繰り返し測定処理がボトルネックとなり、速度改善に限界がある。

課題2：（偏波スクランブラにより）信号の連続性を失うため、時間の前後関係の情報を取り出せない。位相や偏波光が光ファイバの曲げ、振動の情報を含んでいるにも関わらず、ノイズとして処理されてきた。また、光ファイバの敷設方向や、音波の情報を感知できない。

課題3：測定精度と測定距離がtrade off関係となり、両立できない。

サブテーマ① 一括高速処理技術の開発

サブテーマ② 信号強化技術の開発

サブテーマ③ 制御ソフト、操作ソフト及びシステムの開発

#### 【サブテーマ毎の研究成果】

各サブテーマにおける名称、目標値、内容、および本研究開発の成果について、下図のとおり取りまとめた。本研究開発によって、各サブテーマ①、③の技術課題をすべて解決することに成功した。サブテーマ②については、目標5Km以上に対し、2.5Kmまで検証することができた。

| サブテーマ名                         | 目標値                   | 成果           | 内容の説明                                          |
|--------------------------------|-----------------------|--------------|------------------------------------------------|
| サブテーマ①<br>一括高速処理技術の開発          | 測定速度 10Hz             | ○            | 偏波分離受信と周波数解析ソフトを開発し、繰り返し処理回数を削減することで速度を改善する。   |
| サブテーマ②<br>信号強化技術の開発            | 分解能に関わらず<br>測定距離5km以上 | △<br>(2.5Km) | パルス圧縮技術を導入して散乱光の強度を増強する。                       |
| サブテーマ③<br>制御ソフト、操作ソフト及びシステムの開発 | 測定速度 10Hz             | ○            | 上述の成果をシステム化し、測定精度と距離のtrade off関係を打破する計測器を開発する。 |

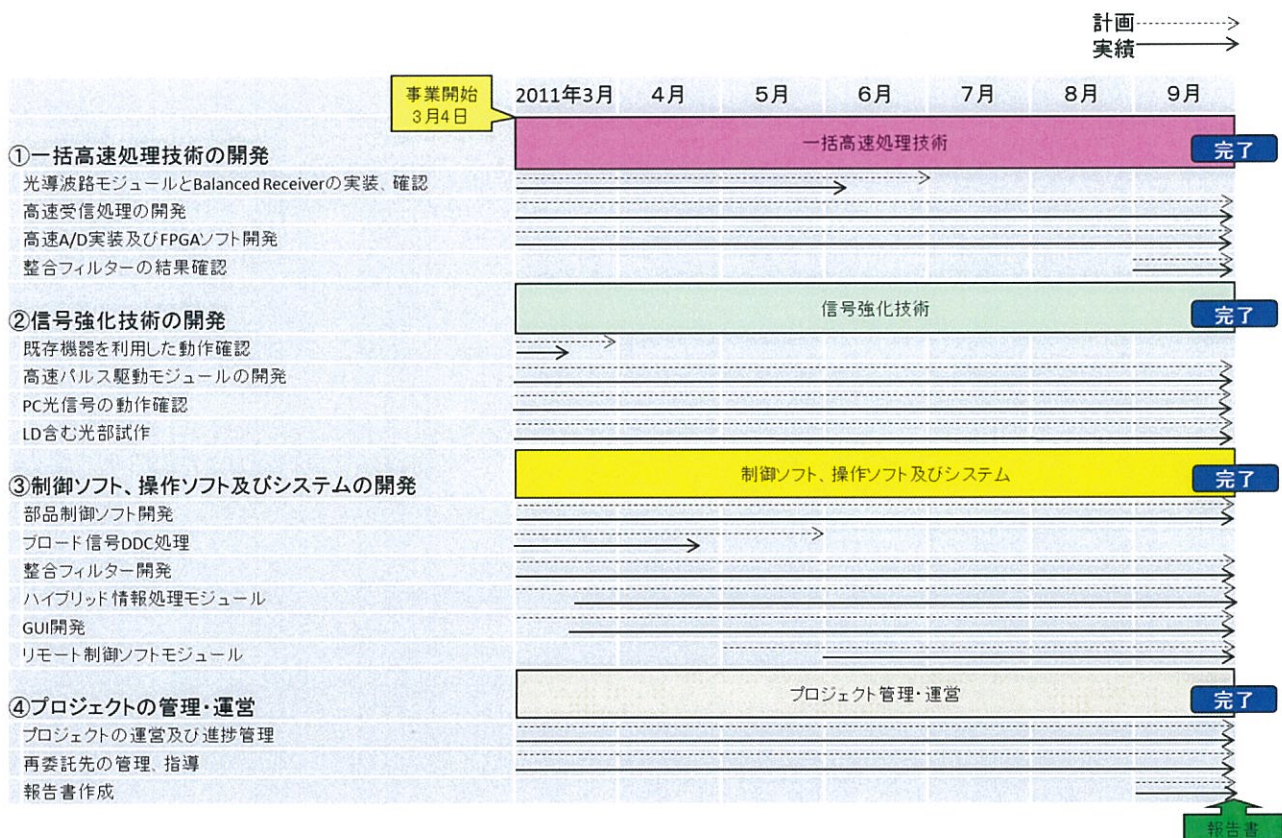
### 【性能指標毎の研究成果】

前述のサブテーマの開発成果を構成する性能指標の研究成果は、下図のとおりである。すなわち、測定速度、温度あるいはひずみを測定、温度とひずみの同時測定、振動測定、空間分解能について、計画した性能を達成することが出来た。測定距離については、シミュレーション解析及び試作機への実装まで完了し、2.5kmの光ファイバを用いて実証することが出来た。ただし、本研究目標であった5km以上の長さの光ファイバを用いた実証試験は、本研究期間内に実施することが出来なかったため、この項目については実証できなかった。

| 性能指標<br>(サブテーマ番号) | 競合他社品<br>(個別機能品のみ)    | 現行品<br>(申請グループ)   | 開発目標              | 本成果          | 将来目標           |
|-------------------|-----------------------|-------------------|-------------------|--------------|----------------|
| 測定速度(①②)          | 0.0001~0.01Hz         | 0.01Hz            | 10Hz              | 10Hz         | 100Hz          |
| 機能                | 温度あるいはひずみを測定          | x                 | ○                 | ○            | ○              |
|                   | 温度とひずみ同時測定            | x                 | ○                 | ○            | ○              |
|                   | 振動測定                  | ○                 | ○                 | ○            | ○              |
|                   | 音波検知(40dB)            | ○                 | x                 | -            | ○              |
| 空間分解能             | 最高100cm               | 基本10cm<br>(最高2cm) | 10cm              | ○            | 10cm           |
| 測定距離(①②③)         | 1kmから~約4km、<br>分解能に依存 |                   | 分解能に関わらず<br>5km以上 | △<br>(2.5Km) | 分解能に関わらず30km以上 |

### 【開発の進捗】

本開発の進捗推移は、下図のとおりである。3つのサブテーマの研究開発と管理法人としてのプロジェクト管理業務について、計画通りに実施し完了させることができた。



#### 1－4 当該研究開発の連絡窓口

住所：〒650-0023 神戸市中央区栄町通一丁目 1-24

名称：ニューブレクス株式会社

連絡担当者所属役職・氏名：企画室長 松田 公彦

Tel:078-335-3510 Fax:078-335-3515 E-mail:matsuda@neubrex.jp

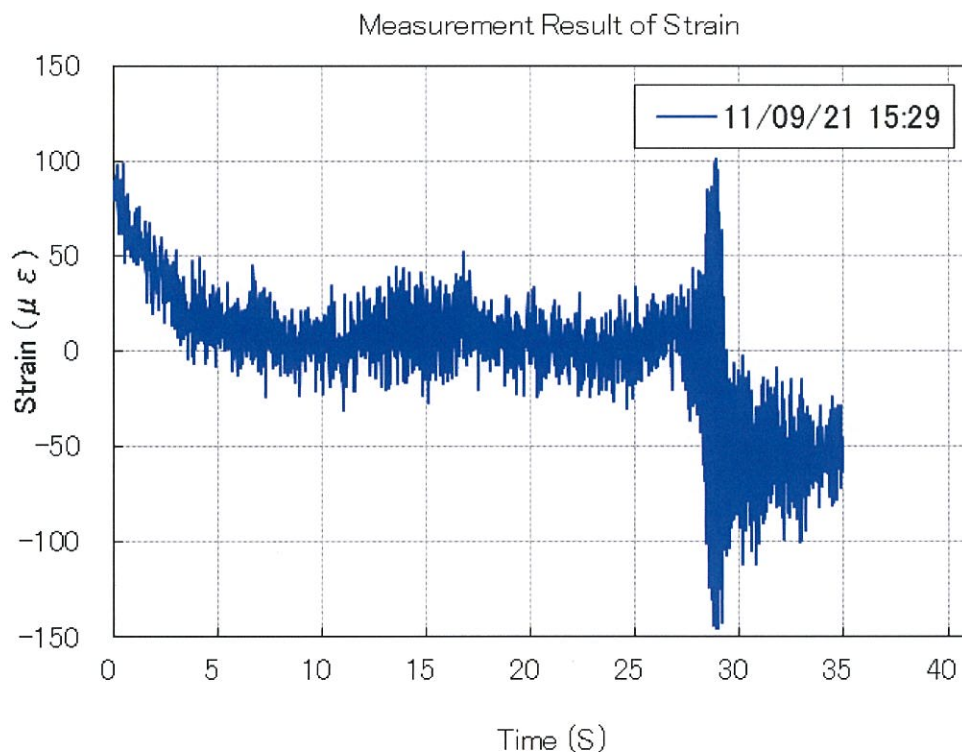
## 第2章 総合性能試験結果

本章では、本研究開発によって試作した計測器の総合性能試験結果について記述する。本研究開発で実現したい要求性能は、1) 測定速度 10Hz 以上、2) 温度とひずみ同時測定の実現、3) 振動測定の実現、4) 空間分解能 10cm 以下の実現、5) 測定距離 5km 以上の実現である。このうち、上記1)、3)、4) については2-1節で、上記2) については、2-2節で、上記5) については、2-3節で説明する。

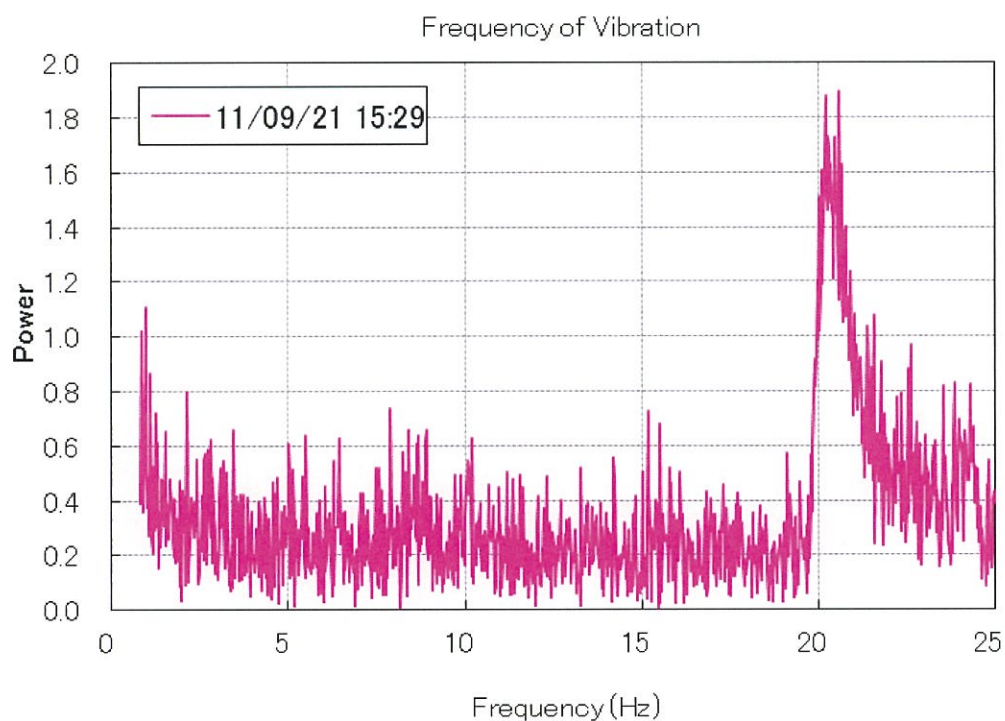
### 2-1 測定速度実証試験

従来の計測速度は 0.01Hz 程度であったため、加振機による振動を計測することは不可能であったが、本研究による高速化により、50Hz 程度まで計測速度を向上させることに成功した。

下図は、コンクリート製の実験用柱に対し、毎秒1Hz のランプ入力で加振した際のひずみを 5cm 分解能で計測した結果である。この試験片は、約 21Hz 前後に固有値（共鳴することで振動が増大する特定の周波数）があることがわかっている。従い、その振動の増大が計測できれば、計測速度が少なくとも 42Hz（固有値の倍）以上の計測速度が実現できたと証明することが出来る。



計測結果および計測結果のフーリエ変換した結果を下図に示す。時間の経過とともに、加振機の周波数が増大し、ある周波数でひずみの変動が急激に上昇していることが観察できた。一方、フーリエ変換した結果より、周波数 20Hz 前後で、振幅が増大したことが観察できている。以上より、このコンクリート片の固有値である 21Hz 近辺における振動の拡大過程が観測できた。



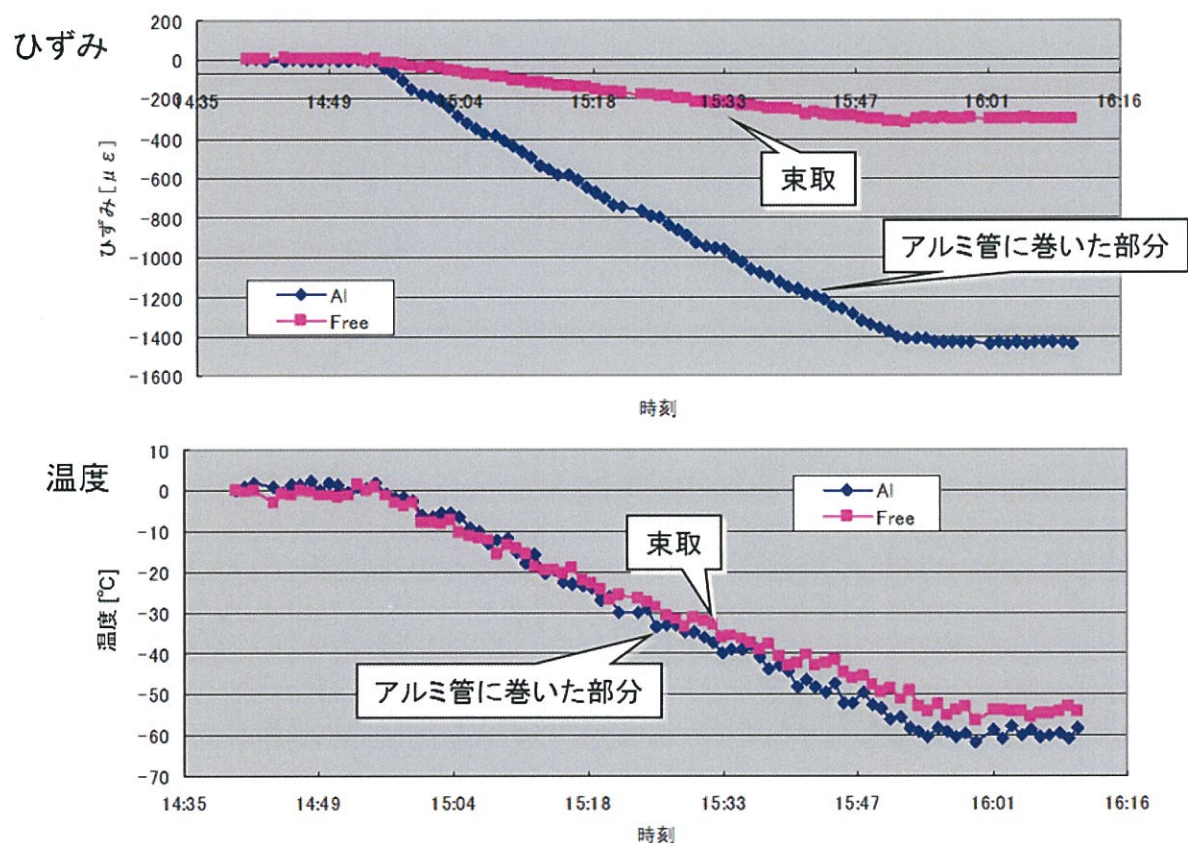
これにより、最大 50Hz の計測速度を実現することができた。これは、サブテーマ①及び③の開発成功を意味する。

## 2-2 ひずみ・温度分離試験

ひずみと温度の分離測定のパフォーマンスを評価するため、アルミ管に光ファイバを巻きつけて固定したものと、光ファイバの束どりをを用いて、計測を試みた。アルミ管に温度変化を加えると、熱膨張係数に従ってアルミ管が膨張または収縮するため、このとき光ファイバとアルミ管の間が固定されていれば、アルミ管の膨張または収縮をひずみとして計測することができる。

本実験では、アルミ管が入った恒温槽の温度を 60℃ 下げた時の温度とひずみ同時測定を実施し、アルミ管がある部分とファイバの束どりの部分（アルミ管の膨張または収縮を受けない）のひずみを比較した。

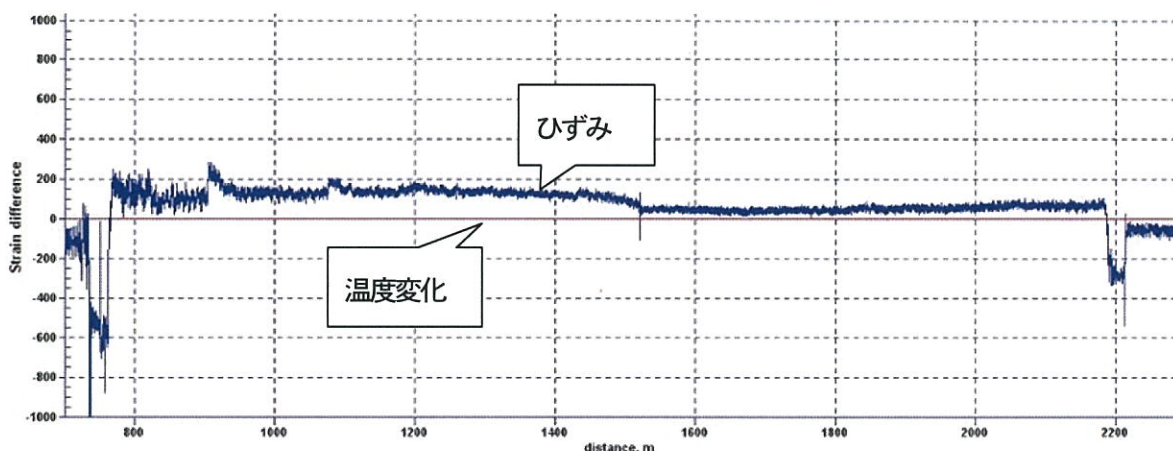
その結果、アルミ管に巻いたファイバでは、大きなひずみ変化が観測された。なおこの時、アルミ管と束どりの温度は同じであると考えられ、それを実証するデータが得られている。この結果より、ひずみと温度の分離測定が実現できていることを証明した。



### 2-3 2.5Km 級ひずみ測定試験

測定距離を検証するため、全長 2.5Km の光ファイバを接続し、ひずみの計測試験を行った結果、下図のとおり問題なく計測できていることが証明できた。

本研究開発期間内に目標の 5Km を証明することはできなかったが、原理は同様であるため、今後のシステムの操作パラメーターを最適に調整することにより速やかに目標達成できると考えている。



### 2-4 まとめ

本章では、本研究開発によって試作した計測器の総合性能試験結果について記述した。本研究開発で実現したい要求性能のうち、2-1節では、測定速度 10Hz 以上、振動測定の実現、空間分解能 10cm 以下の実現について記述した。2-2節では、温度とひずみ同時測定の実現、2-3節では、測定距離 2.5Km 以上の実現について記述した。

以上から、本研究開発によって、各サブテーマ①、③の技術課題をすべて解決することに成功した。サブテーマ②については、目標 5Km 以上に対し、2.5Km まで検証することができた。

### 第3章 サブテーマ毎の研究成果

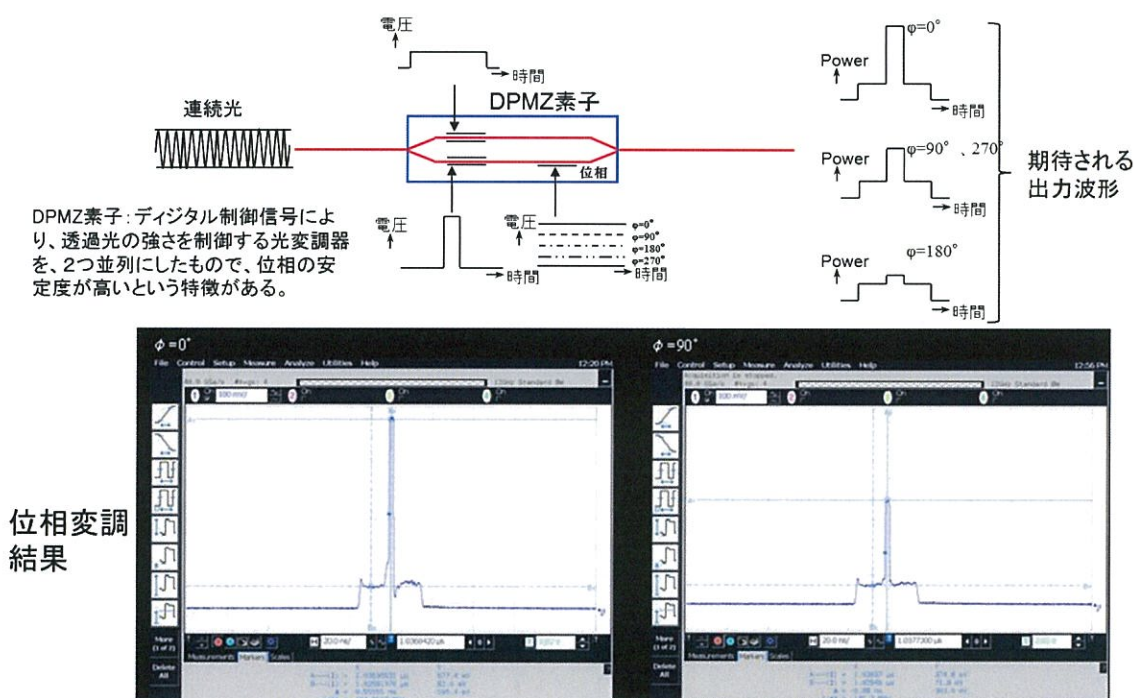
前章では、計測システムとしてまとめ上げた場合の性能について、各々のサブテーマの達成状況から研究成果を記述した。本章では、計測システムを構成する主要な要素技術について、本研究開発で推進した内容を個別に記述する。すなわち、サブテーマ①である一括高速処理技術の開発には、偏波分離と位相変調を導入することによる繰り返し周波数走査処理を行わない計測手法を開発する必要がある。さらに、サブテーマ②である信号強化技術の開発には、位相変調パルス圧縮手法を開発する必要がある。最後に、サブテーマ③である制御ソフト、操作ソフト及びシステムの開発には、前述のサブテーマ①②をシステムとして実現するためのソフトウェアを開発する必要がある。

### 3-1 サブテーマ① 一括高速処理技術

サブテーマ①では、偏波分離対応したデジタル・コヒーレント受信モジュールを開発した。市販の光モジュールに、光電転換 Balanced Photo Diode を実装し、信号光の特徴に対応したアナログアンプを開発、既存の高速デジタイザ NV-2010 を2台用いて、光信号の各成分をデジタルに変換した。その後 FPGA を用いて偏波合成及び周波数解析を行うソフトウェアを開発・実装することにより、散乱光の強度だけではなく、偏波の変化及び周波数情報の受信が可能になった。

### 3-1-1 光導波路モジュールと Balanced Reciever の実装、確認

位相変調送信に対応した入力光を生成するため、光強度変調器と光位相変調器で構成された光導波路モジュール DPMZ 素子 (Dual Parallel Mach-Zehnder) を導入し、安定した周波数情報を持った光出力を得ることに成功した。この成果によって、光源の光を位相変調できることを確認した。



### 3-1-2 高速受信処理の開発

位相変調送信に対応した受信を行うため、Coherent Mixer を導入し動作確認を行った。その結果、所望の安定した P と S 成分を得ることができた。さらに、光の P と S 成分を合成することにより結果的に信号が 2 dB 強化された効果も確認できた。この成果によって、偏波分離受信の動作を確認し、位相変調送信に必要なハードウェアを完成した。ブリルアン散乱の場合、フォノン熱雑音特性を持ちその雑音が位相成分にも出現するため、実部のみ受信した。

### 3-1-3 高速 A/D 変換実装及び FPGA ソフト開発

計測を高速化するために、光周波数の走査を行うかわりに、光の周波数を固定したまま、ブロードバンド受信で散乱光を一括受信する手法を開発した。この方法によって、実際に測定するデータの量は数十分の一に削減することができた。ただし、ブリルアンスペクトルを得るために必要な信号演算は従来と比べ、かなり複雑化した。本開発では、位相合成、偏波合成、スペクトル解析等の機能を融合し総合的に一括処理するアルゴリズムを開発し、最終的に FPGA（専用回路）を用いて 16 クロックで処理する方法を実現した。

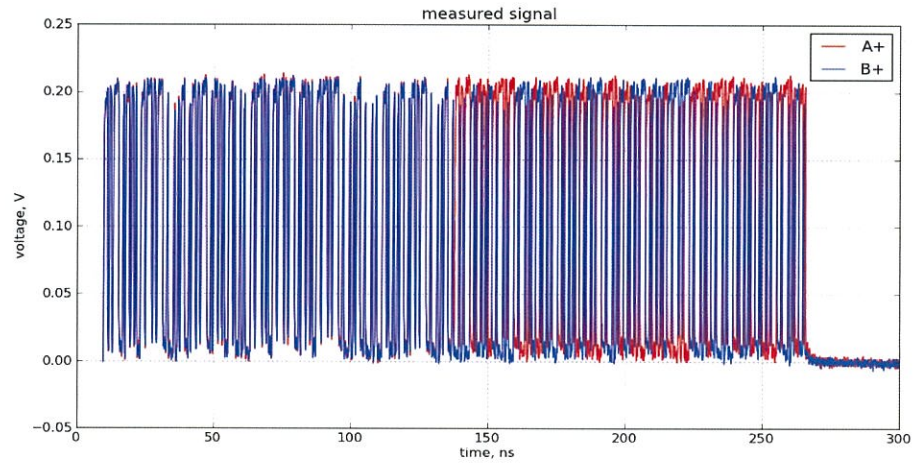
### 3-1-4 整合フィルターの結果確認

受光した P 波と S 波の信号を同時に処理するため、2 チャンネル増幅器及び 2 チャンネルサンプラ（アナログ信号をデジタル信号に変換）を開発した。位相変調信号はサンプラ内の FPGA（Field Programmable Gate Array）を用いて高速フーリエ変換（SFFT）を実行することで、位相情報を取り出せることを確認した。

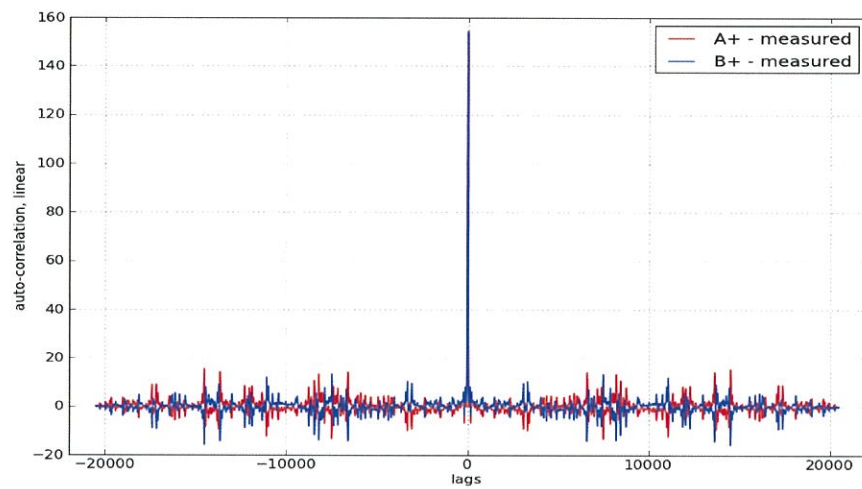
この成果により、位相変調送受信技術の確立とその基本動作を確認した。

## 3-2 サブテーマ② 信号強化技術

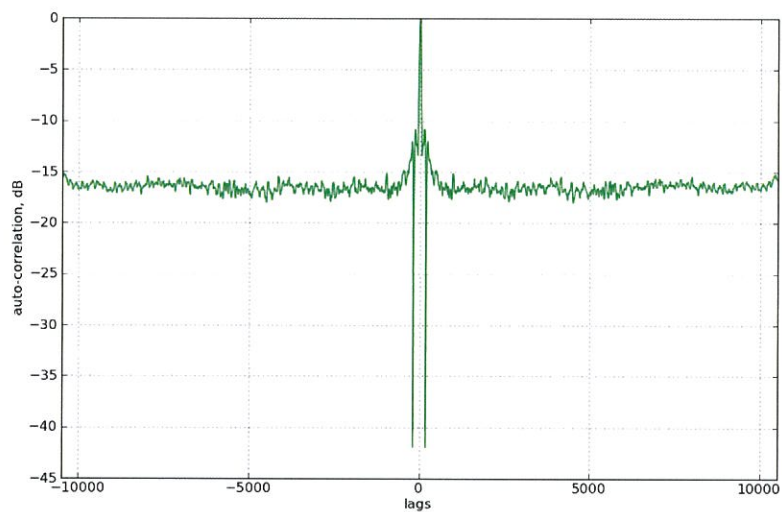
偏波対応受信モジュールの機能を生かし、散乱光の励起方法にレーダーの業界の要素技術として開発された位相変調によるパルス圧縮法を応用した。この方法は位相変調パルス「セル」によって、単一パルスによる数千倍の長さの「パルス系列」を光ファイバに入射し、受信後「デジタル逆系列」によって単一セルの時間情報を復元するため、光強度を維持することができる。数値モデルによる研究結果により、本手法を用いれば、分解能を維持したまま散乱光の強度を大幅に増幅できることが明らかになった。本開発ではこのサブシステムをモジュール化した。2つの異なる時系列で構成された 512 セルを持つ Golay 信号を生成した（図）。この2つの異なる Golay 信号をそれぞれ単独に変換すると、インパルス形状の信号を得ることが出来る（図）。さらにこれらの信号を合成することでシングルセル化すると、約 15 dB のシグナルノイズレシオ（以降、SN 比）を得ることが出来た。この結果により、位相変調手法による、信号強化の効果が確認できた。



512 セルを持つ Golay 信号の例



Golay (2 ペア-合成前) 系列の合成効果



シングルセルに相当する合成結果。15dB の SN 比を得ることに成功した。

### 3-2-1 既存機器を利用した動作確認

既存機器を用いて、測定速度を高速化するため、1 回の周波数の測定で中心周波数を推測する手法を開発し、処理手順の高速化について検討した。本検討の結果、ブリルアン散乱の計測については、従来の40倍以上の高速化が実現できる可能性を見出した。本検討により、これ以降の研究開発の方向性を定めることが出来た。

### 3-2-2 高速パルス駆動モジュールの開発

パルス圧縮法の実現に必要な光強度の高速制御を行う駆動モジュールとして、パターンジェネレータを開発した。パターンジェネレータの完成により、LN 変調器を高速に制御することが出来るようになり、高速のパルス生成と、その高速パルスで合成された信号の生成を確認することができた。

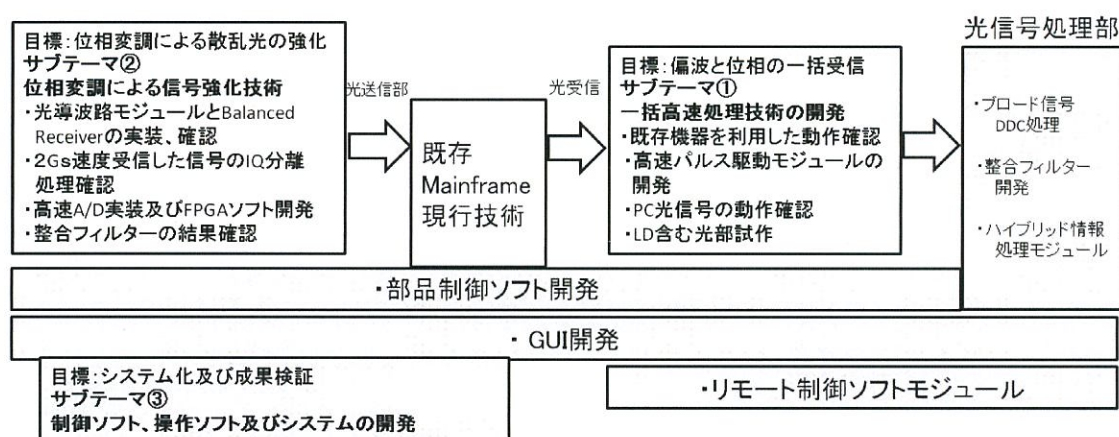
### 3-2-3 PC 光信号の動作確認

### 3-2-4 LD 含む光源部試作

本開発には、優れた性能を持つブロードバンド光源を採用した。この光源は12個のレーザをアレイにした導波路実装技術により構成されており、ブロードバンド周波数チューニングと同時に、絶対精度を1MHz程度に同時制御したまま、位相変調モジュールと巧みに組み立てました。出力パワーも想定より2dBm強く、この光源がすべての測定性能を発揮させることを実現した。

### 3-3 サブテーマ③ 制御ソフト、操作ソフト及びシステム開発

従来の光強度送受信システムから新たにコヒーレント位相システムを開発したことに伴い、デジタル制御システムと操作システム（GUI 及びリモート通信ソフト）を新たに開発した。制御ソフト及び操作ソフト、システムについて、構成するソフトウェアモジュールの開発手順とシステム化イメージを図に示す。

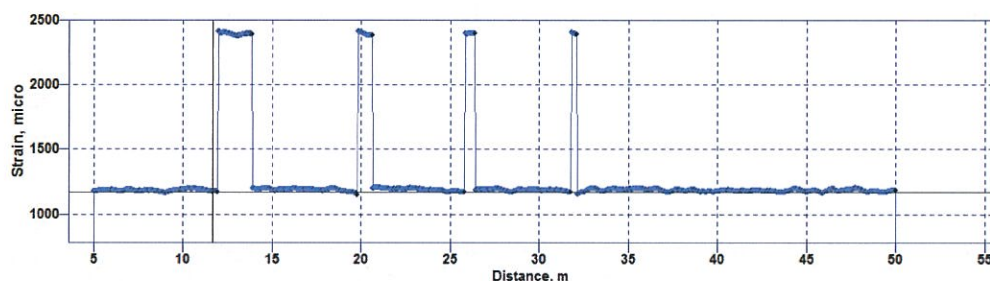


#### 3-3-1 部品制御ソフト開発

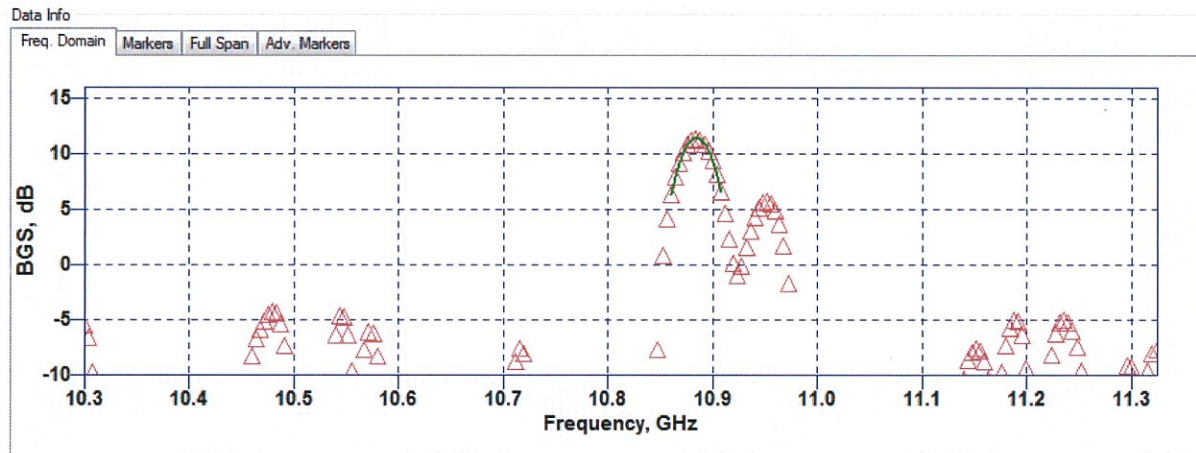
DPMZ 素子内の光強度変調器 LN1、LN4 と光位相変調器 LN3、その出力に接続される光増幅器（EDFA）と光強度変調器 LN2 を、測定する位相に応じて、以下の手順で調整し、所望の分解能に最適なピークパワーと長短パルスのパワー比（Rx）を持つ光パルスを生成するソフトウェアを開発した。

#### 3-3-2 ブロード信号 DDC 処理

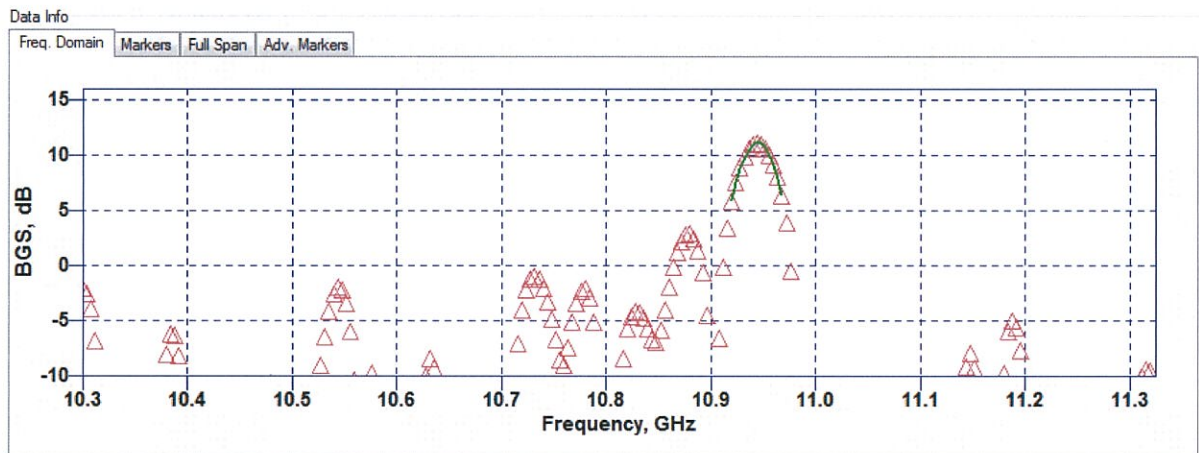
申請時においては、DDC 手法によるスペクトル処理を行うことを計画していたが、実際に実行すると、数時間の処理時間がかかることが明らかになった。そこで、位相合成、偏波合成、スペクトル解析を融合したアルゴリズムを開発し、数値演算を数十倍速くする方法を開発した。以下の実証結果より、十分な周波数精度を得られたことを確認した。



本開発で得られたひずみ分布の測定結果。ひずみ変化時の立ち上がりが急峻であったことから、安定且つ高精度の結果を得ることができた。



上図 1.1 m 近辺で得られたスペクトル分布。



上図 12.7 m 近辺で得られたスペクトル分布。最大値をとる成分が 1.1 m 近辺とは異なっており、期待通りのスペクトルとなった。

### 3-3-3 整合フィルタ開発

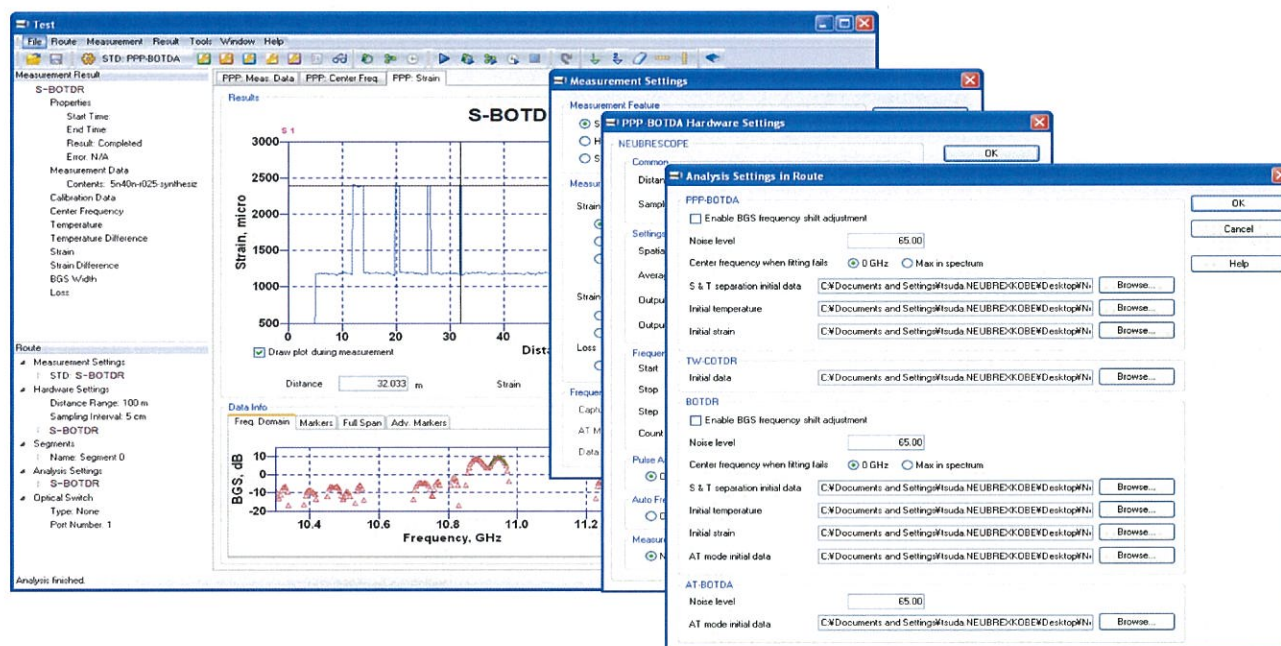
主ポンプ光と副ポンプ光を時間的にオーバーラップさせたとき、不要な成分が残るが、それを消去するような整合フィルタを導入し、高分解能と高 SN 比を同時に実現することを可能にした。整合フィルタは、図のように主ポンプ光と副ポンプ光の自己相関関数の和で実現した。さらに、整合フィルタの構成に必要な光ファイバ係数の取得実験を実施し、温度・ひずみと周波数変化の関係についての知見を得た。

### 3-3-4 ハイブリッド情報処理モジュール

今回開発したハイブリッド情報処理モジュールにより、ブリルアン散乱とレイリー散乱から得られた 2 つの生データを組み合わせて情報処理を実行する計算手順を開発した。また、これまで手作業で行っていたデータの位置補正や距離補正、補完等の機能についても、プログラムに盛り込んだ。

### 3-3-5 GUI 開発

今回開発した各要素技術をシステムとして統合化し、ユーザが使えるようにするため、Graphical User Interface (GUI) ソフトウェアを開発した。ユーザは、これを用いて、測定条件設定を行ない、実行し、結果を確認・保存する。ソフトウェアは、ユーザが設定した条件により、装置を制御し、データを捕獲し、転送・分析・表示・保存する。

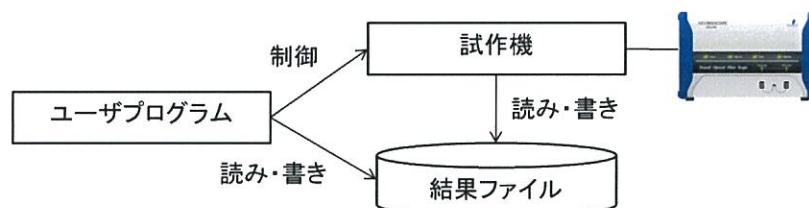


### 3-3-6 リモート制御モジュール

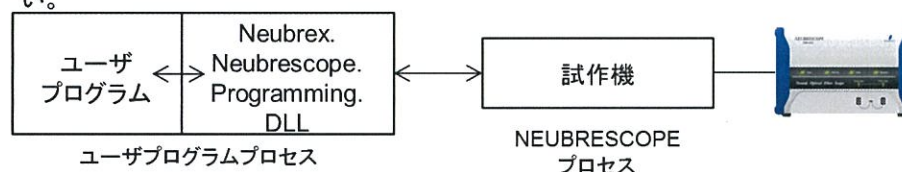
リモート制御ソフトモジュールにより、ユーザは人手を介さず、プログラムにより、測定器を制御し、データを取得し、その内容を分析できるようになる。これを用いて、自動でデータを収集し、その分析を行なうシステム等が構築可能になる。また、複数の装置を一か所で集中して管理することも可能になる。

- 以下の2つをユーザプログラムからできるようにする。

1. 試作機の動作の制御。
2. 試作機の結果ファイルの読み書き。



- ユーザプログラムと試作機は、お互いに影響をおよぼさないようにするため、それぞれ独立したプロセスで動作する。各プロセスはネットワークで接続された異なるPCで動作してもよい。



## 第4章 全体総括

本開発により、

サブテーマ① 一括高速処理技術の開発

サブテーマ② 信号強化技術の開発

サブテーマ③ 制御ソフト、操作ソフト及びシステムの開発

について、開発目標をほぼ達成し、基本原理について試作機で実証することが出来た。川下企業へ展開するための商品化開発、現場での実証試験によるさらなるブラッシュアップを進める必要がある。

これらの製品化開発により、本格的な事業展開が可能となり、産業のインテリジェント化という時代の流れの中で、共同体およびアドバイザー企業が本開発成果を生かすことで新たな事業分野への参入を果たすことができる。坑内ロギングや CO<sub>2</sub> 地下貯留監視、電力蒸気配管の減肉監視や化学プラント監視・制御などそれぞれの分野にて、実証試験を経て数千億円規模の市場に発展することが期待でき、事業化による大きな波及効果も見込むことができる。

