

平成23年度戦略的基盤技術高度化支援事業（第3次補正）

「非接触計測を可能にするシングルエンド型
光ファイバ高感度音波検知システムの事業化」

研究開発成果等報告書

平成25年 4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

この報告書には、委託業務の成果として、産業財産権等の対象となる技術情報（未出願又は未公開の産業財産権等又は未公開論文）、ノウハウ等の秘匿情報が含まれているので、通例の取扱いにおいて非公開とする。ただし、行政機関の保有する情報の公開に関する法律（平成11年法律第42号）に基づく情報開示請求の対象の文書となります。

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 光源位相補正技術の確認試験
- 2-2 音波復元時の空間分解能確認試験
- 2-3 音波測定システム処理速度確認試験
- 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 光源の位相ノイズを同期測定し補正する技術の開発
 - 3-1-1 位相分離受光部の実測、確定
 - 3-1-2 光源位相復元のソフトウェア開発
 - 3-1-3 光源位相処理モジュールの開発
- 3-2 サブテーマ② 後方散乱光の位相解析と圧縮信号の復元技術の開発
 - 3-2-1 光位相補正技術の開発
 - 3-2-2 6ch コヒーレント・デジタル受信及び信号処理の開発
 - 3-2-3 制御ソフトの開発および動作確認
- 3-3 サブテーマ③ 音波の周波数に追従可能な処理速度を有するシステムの開発
 - 3-3-1 外部トリガーおよび連続計測モジュールの開発
 - 3-3-2 システム GUI の開発
 - 3-3-3 リモート制御ソフトモジュールの開発
 - 3-3-4 音波検証システムの調整
 - 3-3-5 音波測定システムの性能確認

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

川下企業からは、1本の光ファイバで複数種類の情報を取得するといった多機能化、高機能化が要求されている。しかしながら既存品で得られるのは、ファイバが接している範囲の情報（温度、ひずみ、圧力など）に限られる。本開発によって、音波の伝搬を介して光ファイバが直接接触していない周辺情報も得ることが出来れば、光ファイバセンサの大幅な多機能化、高機能化が達成出来る。

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

本提案では、定量的に光源の位相ノイズの影響を排除する方法を開発することにより、通信用の汎用光源を用いても光源の位相を測定することを可能にする。従来の手法では、光源の出力を保ちながら光源の位相ノイズの影響を排除することが出来なかった。さらに受信部に光の偏波分離、分離後のIQ成分を6チャンネルで受信することで光位相の計算を行い、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。

【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、本開発では光源部で高速で光電変換し、かつ計算した結果を同期させて散乱光受信部にフィードバックしなければならない。その後、散乱光をホモダイン受信後、光導波路により光のIQ信号に分離し、それらをこれまで培った光部と電気回路間の光電気実装技術を用いて、微弱な光信号を正確に変換するアナログ部と、複素計算処理をこな

す高速のデジタル部を組合せてシステム回路設計技術、デジタル/アナログ 混在回路設計技術により仕上げ、小型のモジュールを開発する。このモジュール用いて、センサの高機能化、大容量情報化を達成する。

上記（３）について、本開発では、光信号とデジタル回路それぞれの特徴を活かし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、散乱光をホモダイン受信後、光導波路により光の IQ 信号に分離することを実現する。さらに電気に変換した信号をデジタル演算して位相を算出する処理部を開発する。整合フィルタ処理、位相のフィードバック補正などの複雑かつ正確な同期が必要な処理は、FPGA を搭載したデジタル専用基板で解決する。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によってシステム全体を、高速、高安定性、かつ小型のモジュールで実現し、超高密度実装を実現する。

【研究背景】

光ファイバセンシング技術は、光ファイバを対象に接触させることで温度・ひずみ・圧力を計測できるという特徴が市場で評価された結果、海外石油業界で数千億円の市場が生まれた。一方、音波探知のように光ファイバで非接触に計測する技術は未だ成熟しておらず、川下企業の簡易設置と非接触計測のニーズを満たしていない。更には震災・災害、電源の喪失といった突発事象に対し、速やかな情報収集が可能となる画期的な技術の出現が望まれているところである。光ファイバで音波を感知できれば、光ファイバの長距離計測と音波技術特有の非接触感知の特徴を同時に活かした画期的なセンシング技術が実現する。

【提案者の新たな知見】

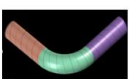
光パルスが光ファイバの片端から入射し、パルスの進行途中で少しずつ反射し光源側に戻ってくる光（後方散乱光）を測定する方法は OTDR と呼ばれている。光パルス幅は空間分解能に、後方散乱光が戻ってくるまでの時間遅れは距離（測定場所）に対応することが知られているが、提案者は散乱光の位相変化は、光ファイバを伝わる音波の粒子速度に比例することを発見した（特願 2011-221026）。位相を計測することにより、光ファイバに沿った桁違いに多くの測定箇所（センサ数）で音波計測が可能になる。

【研究開発の概要】

海外類似品：

- ・検知できる周波数範囲が狭く、空間分解能が低い
- ・距離と感度が不十分

提案者現行品：



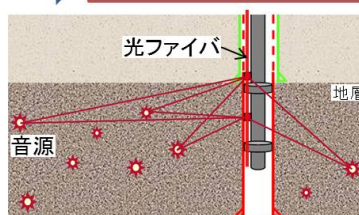
課題：

- ・直接設置が必須で大型の工事が必要
- ・災害時の迅速な設置に不向き

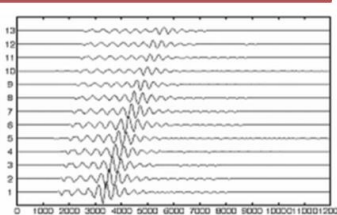
光ファイバ で音波受信

要素技術

1. 光源の位相ノイズを同期測定し補正する技術
2. 後方散乱光の位相解析と圧縮信号の復元技術
3. 音波の周波数に追従可能な処理速度を有するシステム



光ファイバの各場所で音波を受信



各場所で受信した音波（イメージ）

優位性：

1. 高周波対応による高い空間分解能
2. 簡易設置と非接触計測の実現（災害時の迅速設置も可能）

新技術

【開発目標】

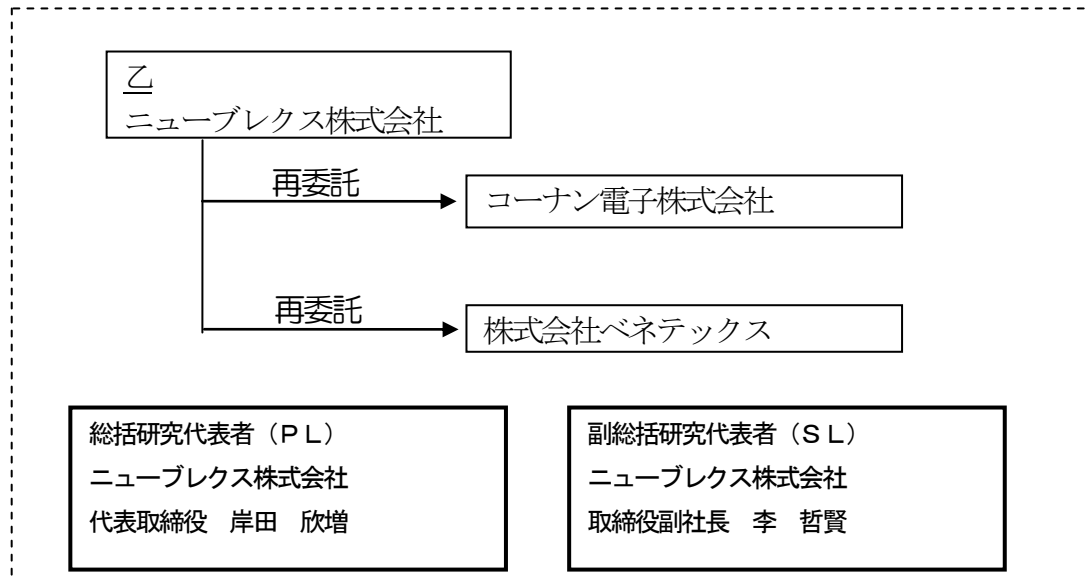
最大測定可能距離数キロ、最大音波周波数 5MHz、最高空間分解能 20cm を目標とする。海外類似技術と比べ、最高周波数で約 500 倍、空間分解能 5 倍の性能を達成する。

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

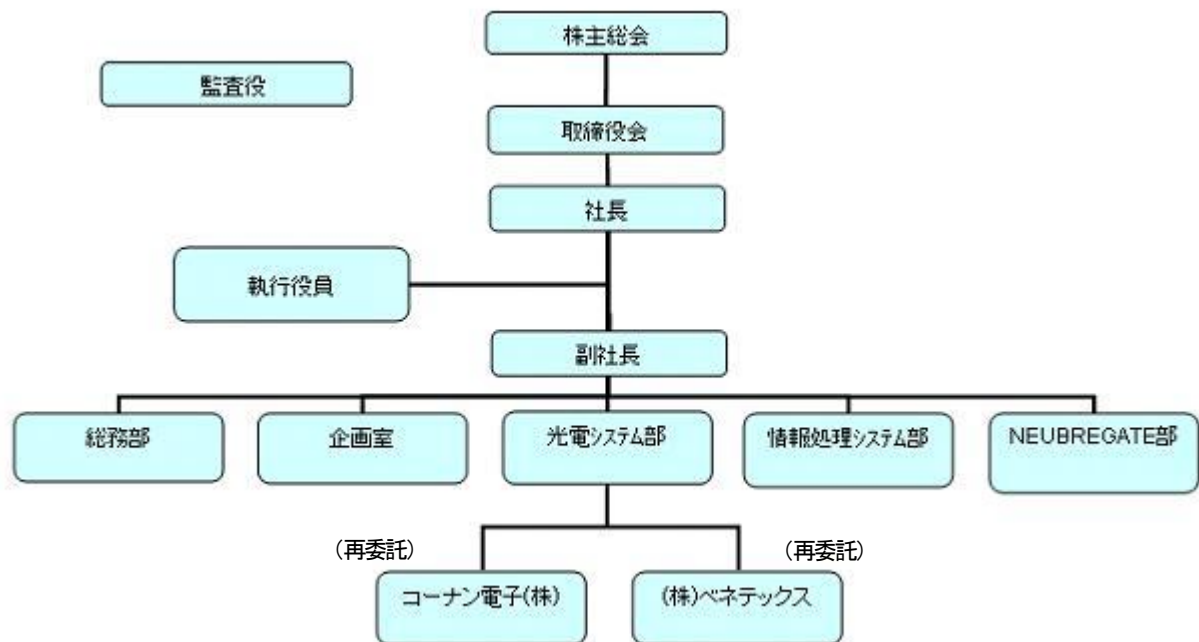
1) 研究組織(全体)



2) 管理体制

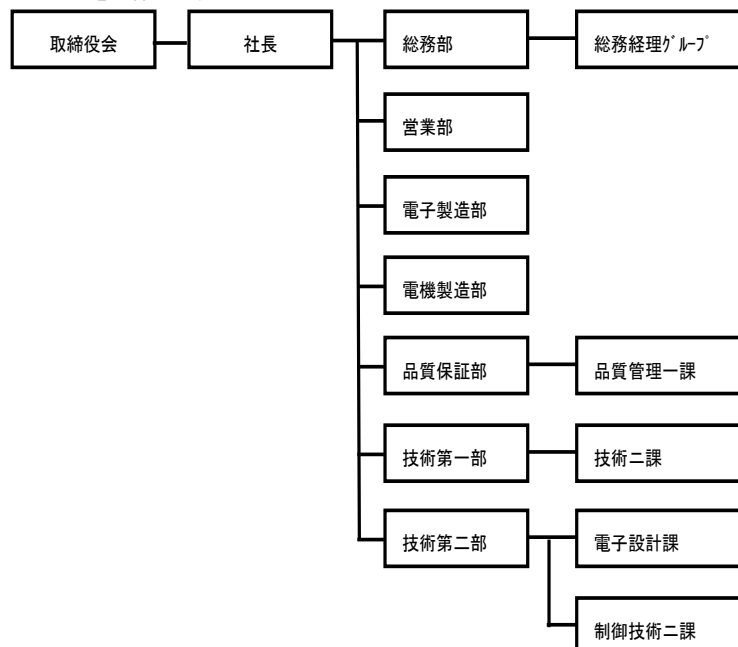
① 事業管理機関

ニューブレクス株式会社



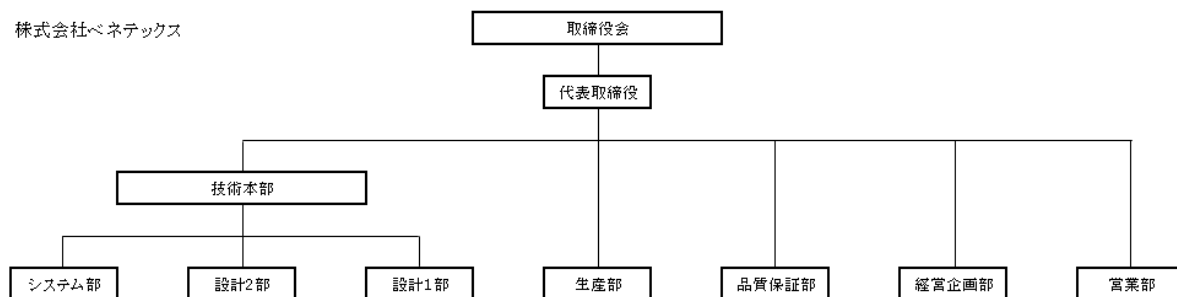
② (再委託先)

コーナン電子株式会社



株式会社ベネテックス

株式会社ベネテックス



(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	①、②、③
横山 光徳	NEUBREGATE部 部長	②、③
Guzik Artur	情報処理システム部 シニアエンジニア	①、②、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、③
高野 宏和	光電システム部 主任	①、②、③
岡林 泰広	光電システム部	①、②、③

齊 崗	光電システム部	①、②、③
高見 涼太郎	企画室	①、②、③

【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	①
臼井 康起	制御技術二課 主幹	①

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	②、③
高橋 静雄	技術本部 設計1部 主席	②、③
長谷川 正	技術本部 設計1部 主任	②、③
田中 等	技術本部 設計1部 主任	②、③
釘宮 誠	技術本部 設計1部 主任	②、③

(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)

実施内容①及び②に掲げる位相測定、パルス圧縮技術の理論構築について、下記のアドバイザーから助言を受ける。

所 属	役職・氏名
国立大学法人 大阪大学	先端科学イノベーションセンター 特任教授 西口憲一

また、実施内容③に掲げるシステムとして実装する機能や操作方法につき、各業界における川下側企業からフィードバックを受けて、より使い勝手の良いシステムとして完成させるため、次に記すアドバイザーからの意見聴取を行う。

所 属	役職・氏名	意見聴取の内容
公益財団法人 地球環境産業技術 研究機構	CO ₂ 貯留研究グループ 副主席研究員 薛自求	CO ₂ 貯留監視分野における技術 ニーズや開発の方向性について
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	石油開発分野での技術ニー ズや適用可能性について
千代田アドバンスト・ ソリューションズ株式会社	ビジネス戦略室 鈴木裕晶	広域ライフライン監視・河川管理分 野での技術ニーズや適用可能性 について
三菱化学株式会社	設備技術部 チームリーダー 松岡勲	化学プラント分野における現場か らの技術ニーズについて
ファイバーテック 株式会社	代表取締役社長 妻沼孝司	医療分野での技術ニーズや 適用可能性について

1-3 成果概要

【研究概要】

川下企業の簡易設置と非接触計測のニーズを踏まえ、光ファイバで音波を分布測定する技術を開発する。光源の位相ノイズを抑え、音波の周波数に追従する処理速度で、海外類似技術より約500倍の周波数範囲と5倍の空間分解能を達成する。桁違いに多いセンサ数と長距離計測の両立がもたらす豊富な音波情報により、石油開発及びCO₂貯留時の高精度かつ低コストの地層探査と、災害対策にも資する広域ライフライン評価ツールが実現できる。

【開発目標】

本研究開発の目標は、以下の2点である。

- 最大測定可能距離数キロ、最大音波周波数 5MHz、最高空間分解能 20cm を目標とする。
- 海外類似技術と比べ、最高周波数で約500倍、空間分解能5倍の性能を達成する。

【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。

開発課題1：光源の位相が測定できないため、光源の位相ノイズの影響を排除できていない

開発課題2：受信用デジタイザの6チャンネル化及び後方散乱光の高速大容量な位相演算が実現できていない

開発課題3：システムの処理速度が音波の周波数範囲に追従していない

サブテーマ① 光源の位相ノイズを同期測定し補正する技術の開発

サブテーマ② 後方散乱光の位相解析と圧縮信号の復元技術の開発

サブテーマ③ 音波の周波数に追従可能な処理速度を有するシステムの開発

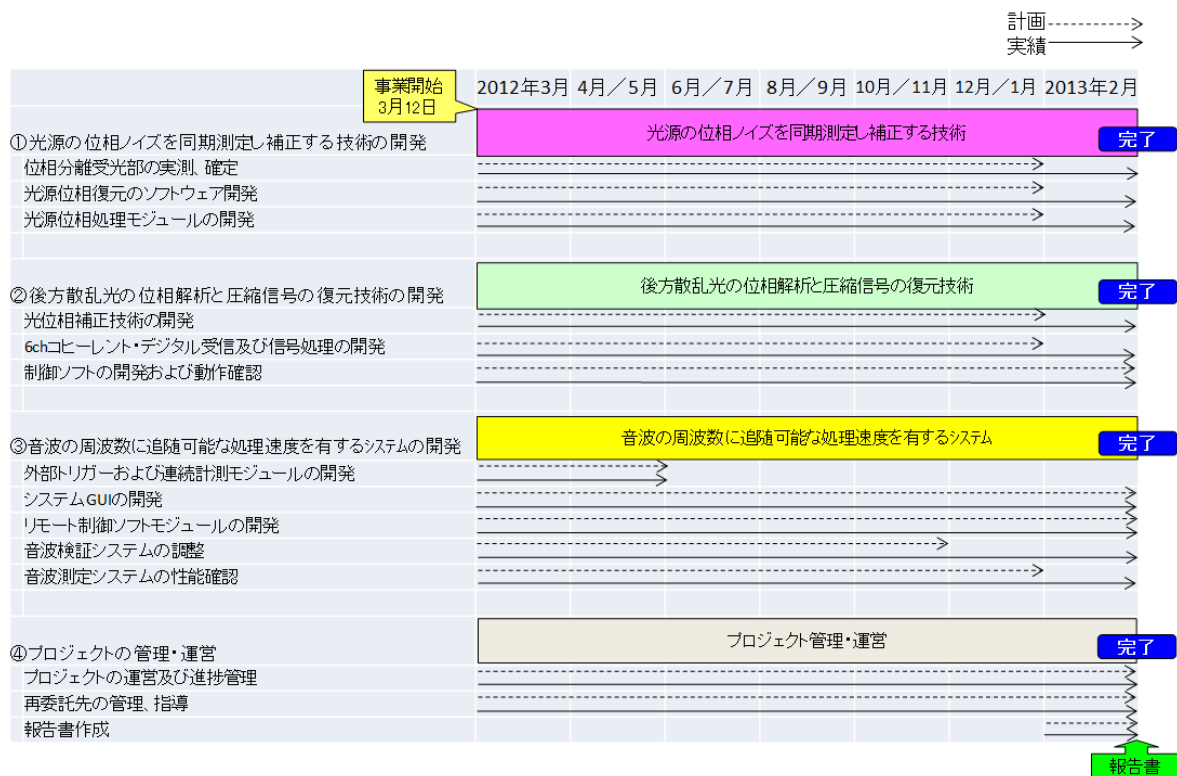
【サブテーマ毎の研究成果】

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、②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③については、目標 5MHz 以上に対し、50KHz 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 光源の位相ノイズを同期測定し補正する技術の開発	光源位相を10° 前後の精度に補正する	○	光源の位相を測定し、光源の位相ノイズの影響を排除する。【光源位相精度を10° を達成した。】
サブテーマ② 後方散乱光の位相解析と圧縮信号の復元技術の開発	20cm分解能の音波信号を復元する	○	受信用デジタイザの6チャンネル化及び後方散乱光の高速大容量な位相演算を実現する。【空間分解能20cmにて音波信号が復元できた。】
サブテーマ③ 音波の周波数に追従可能な処理速度を有するシステムの開発	最高5MHzのシステム処理速度を達成する	△	システムの処理速度を音波の周波数範囲に追従させる。【システムの処理速度は50KHzまで達成、実際の音波による検証は4KHzまで実施した。】

【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、光ファイバで音波を分布測定する技術を実現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、各サブテーマに記載している通り、1) 光源の位相を 10° 前後の精度で補正する技術を実現する、2) 音波復元時の空間分解能 20cm を実現する、3) システム処理速度 5MHz を実現する、ことである。それぞれの項目の達成状況について、以下の通り説明する。

2-1 光源位相補正技術の確認試験

従来は光源の位相ノイズを計測する技術が無かったため、光源の位相変化及び位相ノイズを計測することは不可能であったが、本研究によって、光源の位相を測定し、かつ、光源の位相ノイズを 10° 程度の精度で補正する技術を開発することに成功した。

図1は、本開発によって光源の位相ノイズを補正した結果である。光源の位相ノイズを補正することで、光ファイバ上の3カ所の測定点 (6m, 15m, 32m) の各地点において、 $\pm 10^\circ$ の範囲内にはほぼ補正できていることが確認できた。これにより、光源の位相補正技術を実現できたことがわかる。

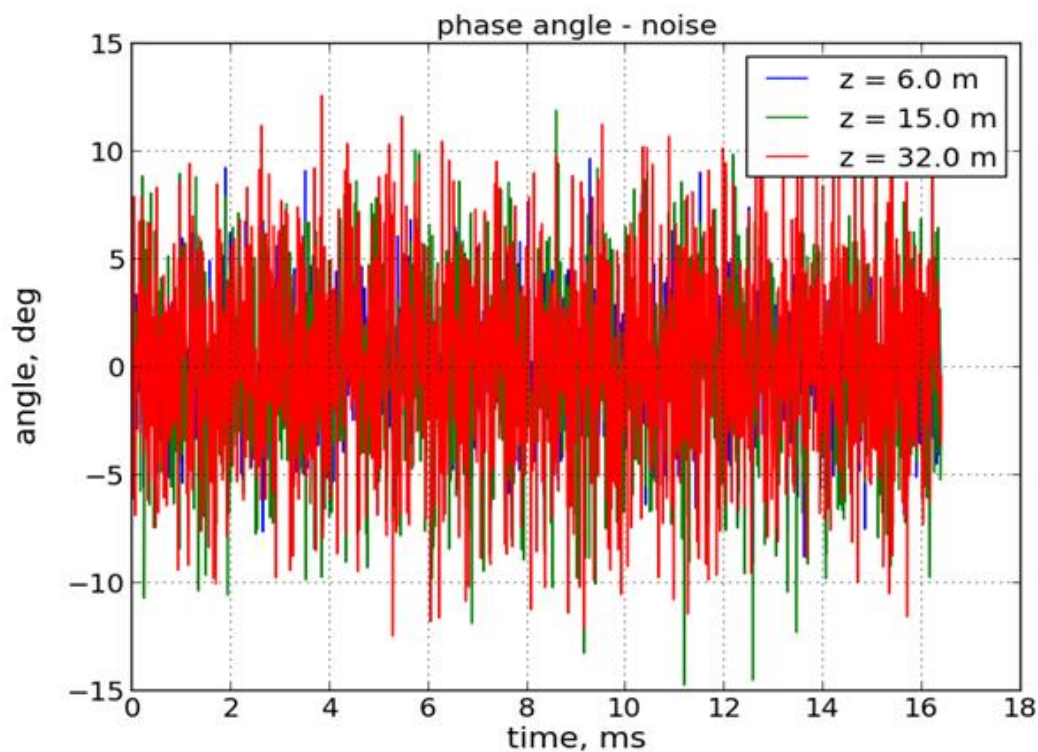


図1 光源の位相ノイズ補正結果

目標である光源の位相ノイズを 10° 程度までに補正する技術を達成した。

2-2 音波復元時の空間分解能確認試験

音波復元時の空間分解能を評価するため、下図に示すような測定系を構成して光ファイバによる音波計測を試みた（図2）。図中 DAS と記載されているのが今回試作した音波の測定システムである。光ファイバは、測定器から約 20cm 余長を残し遮音ケースに収めた。この遮音ケース内にて音波発生器を用いて音波を発生させ、その時の位相信号変化をとらえた。

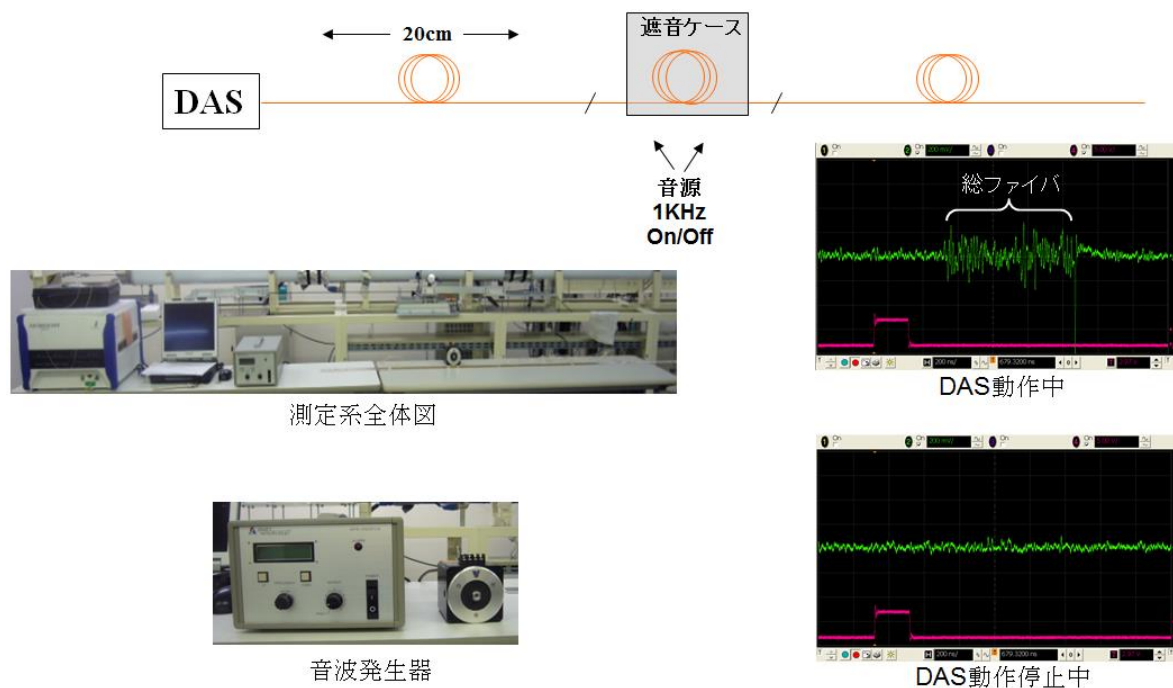


図2 音波測定試験系

その結果、周波数 1KHz の音波を与えた時には、それに対応した位相変化信号をとらえることが出来た。測定点1カ所の波形を上図に示し、それをフーリエ変換した結果を図3に示す。以下の図より、1KHz の音波が正しくとらえることが出来ていることが証明できる。

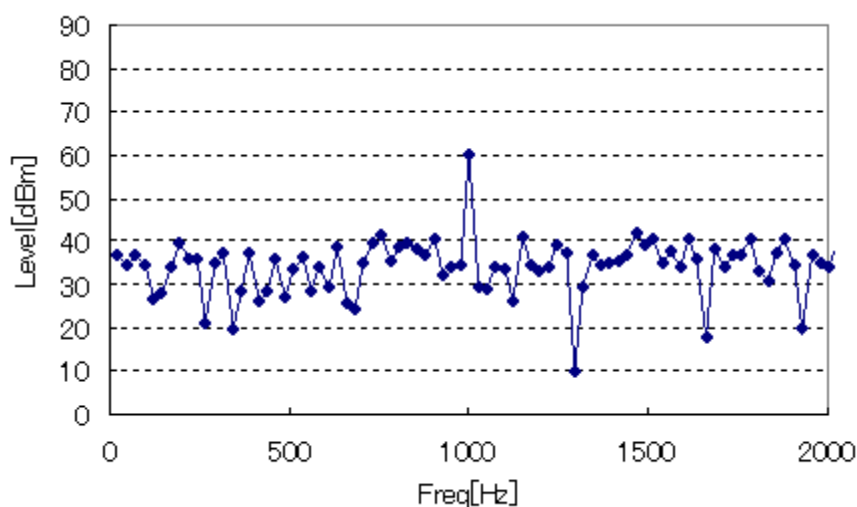


図3 測定した音波信号の周波数成分分析結果

次に、空間分解能について調べるため、復元した音波信号の3D解析を行った。結果を図4に示す。これは、50KHz サンプリング時に 1KHz の音波（正弦波）を与えた時の光ファイバの位相空間の時間変化を示したものである。遮音ケース内には約 20cm の長さでファイバが入っており、この場所에만音波が当たるように設定している。結果、約 1ms 間隔で正弦波状の空間分布変化がみられ、かつ、遮音ケース外では顕著な反応は無いことから、20cm 分解能で音波が測定できていることが確認できた。

これにより、空間分解能 20cm で音波計測を実現できていることが確認できた。これは、サブテーマ①及び②の開発成功を意味する。

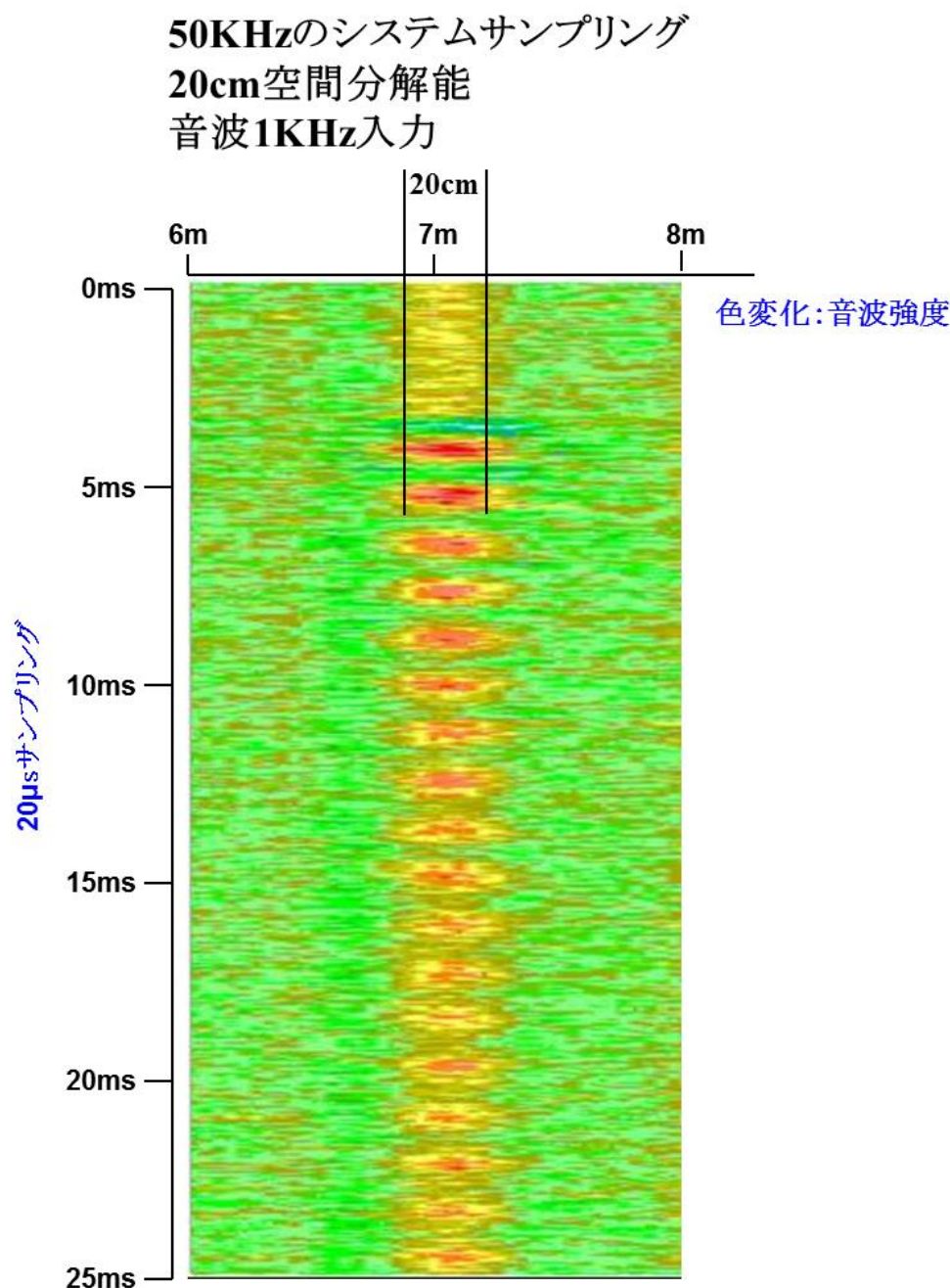


図4 音波信号復元結果
50KHz サンプリング時に 1KHz の音波（正弦波）を与えた時の
光ファイバの位相空間の時間変化を示す。

2-3 音波測定システム処理速度確認試験

2-2節で述べたとおり、50KHz サンプリング時に 1KHz の音波（正弦波）を与えた時の光ファイバの位相空間の時間変化を示すことができた。本研究開発期間内では音波周波数 4KHz まで証明することができた。目標の処理速度 5MHz の証明までには至らなかったが、測定原理としては本研究開発により確立させることができたことから、今後システムのパラメータを最適に調整すること等により目標を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節では光源の位相補正技術によって 10° 程度に位相誤差を抑制することが出来たこと、2-2節では音波測定時の 20cm 空間分解能を実現したこと、2-3節では、システム動作速度 50KHz まで達成したことについて記述した。

以上から、本研究開発によって、各サブテーマ①、②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③については、目標システム処理速度 50MHz 以上に対し、50KHz まで達成し、そのうち 4KHz 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である光源の位相ノイズを同期測定し補正する技術の開発には、位相分離受光部の実測、確定、光源位相復元ソフトウェアの開発、光源位相処理モジュールの開発を行う必要がある。さらに、サブテーマ②である後方散乱光の位相解析と圧縮信号の復元技術の開発には、光位相補正技術の開発、6ch コヒーレント・デジタル受信及び信号処理技術の開発、制御ソフトの開発および動作確認する必要がある。最後に、サブテーマ③である音波の周波数に追従可能な処理速度を有するシステムの開発には、外部トリガーおよび連続計測モジュールの開発、システム GUI の開発、リモート制御ソフトモジュールの開発、音波検証システムの調整、音波測定システムの性能確認を実施する必要がある。

本研究開発における音波検知システムの全体像を図5に示した。計測の流れは、①光源の位相情報を測定し、②位相圧縮パルスが発生させセンサ用の光ファイバに入力する。次に③音波がセンサ用光ファイバに到達し、④音波情報を含むレイリー後方散乱光は⑤コヒーレント受信ミキサーに入力され、⑥6チャンネル（P成分のIQ、S成分のIQ）A/D変換でデジタル信号に変換され⑦位相解析部で演算される。その後⑧パルス列内の光源位相を用いて⑨圧縮されたパルス列を復元し、⑩受信した散乱光の各位置の位相を取得する。⑪記録された光源の位相情報を⑩から引き去ることで、⑫正味の位相分布（音波分布）を得ることが出来る。以降、これらの測定の流れに基づき、各要素技術について開発した結果を記述する。

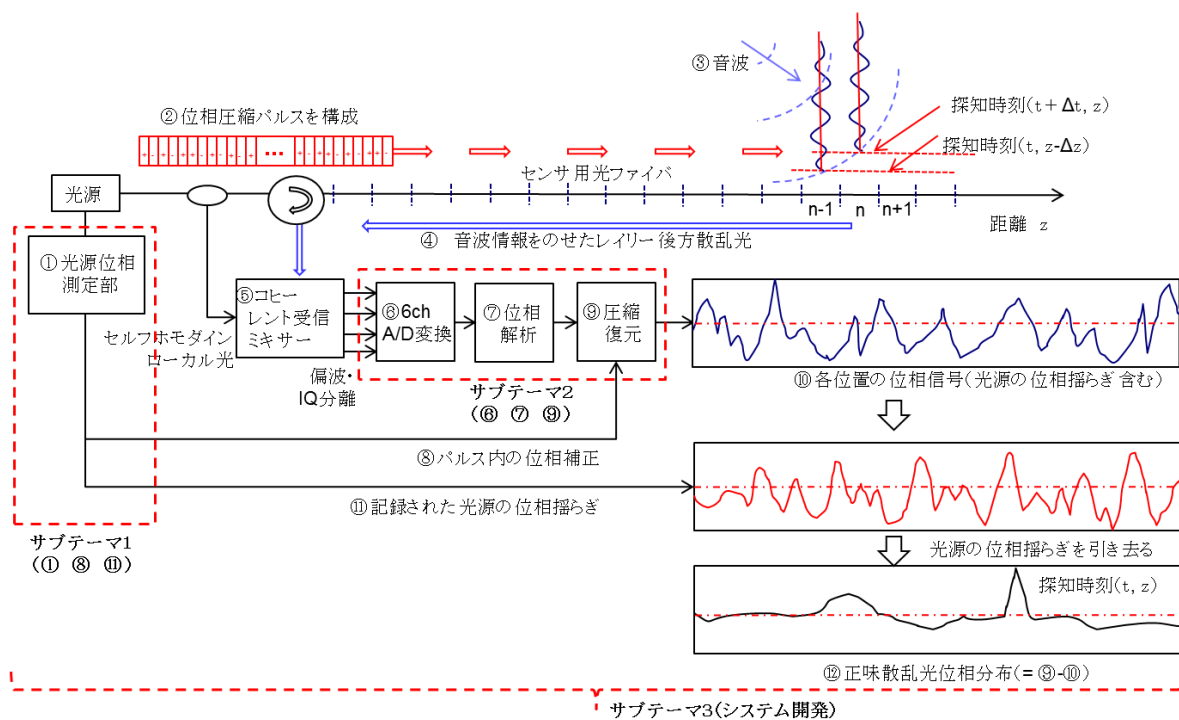


図5 本研究開発の全体像（計測の流れ）（提案書より転記）

3-1 サブテーマ① 光源の位相ノイズを同期測定し補正する技術の開発

これまでに用いられている汎用光源の位相が安定している時間は、測定に必要な時間に対して短いため（線幅は約4MHz）、そのまま用いた場合は、計測用の光ファイバ測定時間内に光源に位相ノイズが発生し、位相測定精度に影響する。本開発では、光源の位相を記録し、それを受信した散乱光の位相から引き去ることで位相を補正するモジュールを開発した。開発目標は、位相測定精度を 10° 前後に抑えることである。具体的な開発内容は、光源の位相（光源のPまたはS偏波成分のI及びQ成分の2チャンネル）を測定する位相分離受光部および2チャンネル高速デジタイザを構成することによって開発した。

3-1-1 位相分離受光部の実測、確定

本節では、位相分離受光部の実測、確定について記述する。測定方法についての考え方は、同期信号(trigger)の時間を基準として計測を開始し、 t_0 時間遅れて信号を入力する。このsignalが発生している間（ t 時間内）に発生したLDの位相ノイズを積分することによりsignalの位相を補償する。

位相分離受信を実施した結果、トリガー位置を開始位置として計測が開始され、位相ノイズと信号が分離計測できていることを読み取ることができた。

3-1-2 光源位相復元のソフトウェア開発

捕獲したトリガーデータ、位相雑音データ、および信号データより、レイリー散乱光の位相を復元するソフトウェアを開発した。まず、解析信号を生成し、位相雑音より中間周波数を推定した。それを用いてベースバンド信号に変換し、トリガーデータを参照して、各送出パルスに対応する部分を切り出した。それぞれの位相を計算し、位相雑音は積分と補間、信号は低振幅部分の位相圧縮と平均除去を行った。求めた信号の位相より位相雑音を取り除けば、レイリー散乱光の位相が復元することができた。

3-1-3 光源位相処理モジュールの開発

光源位相処理モジュールとしては、 2×8 コヒーレント光部品を採用した。これを信号光とローカル光に接続することによって、位相分離処理を行った。光源位相処理モジュールの内部処理イメージを図6に示した。ここでは、2つの入力に対して、そのまま干渉させた出力と、位相を 90° 遅らせて干渉させたものの合計8チャンネルの光出力を得ることができる。得られた信号を図7に示した。

2 x 8 Coherent Mixer Product Datasheet

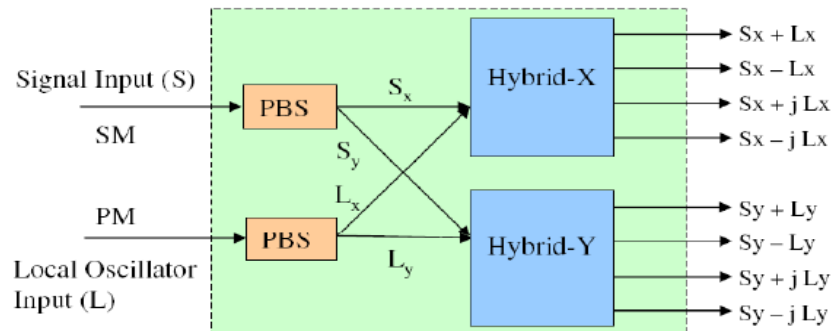


図6 コヒーレント光部品内における信号処理

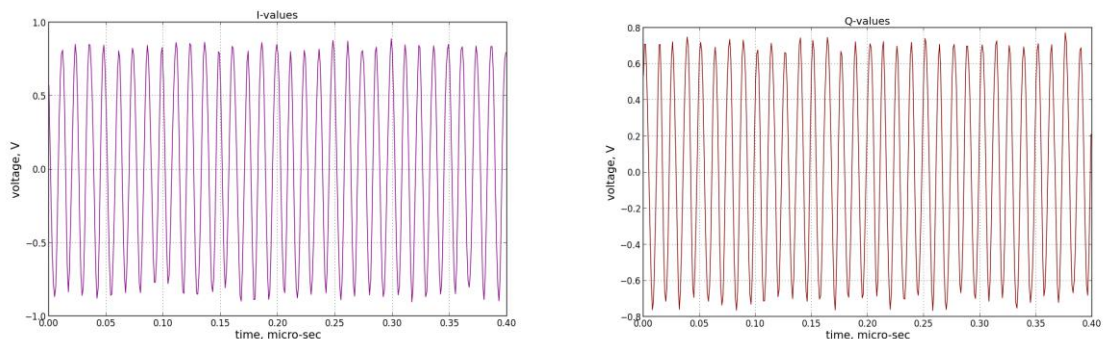


図7 I 信号 (左図) 及びQ 信号 (右図)

3-2 サブテーマ② 後方散乱光の位相解析と圧縮信号の復元技術の開発

音波測定の際、微弱な散乱光を確実に受信し、海外他社が抱える実用化への問題点を克服するためには、パルス圧縮手法の音波測定への適用が有効であることがこれまでのニューブレクス株式会社の検討によって明らかになった。本開発では、ニューブレクス株式会社が保有しているパルスジェネレータ（ハードウェア）を用いて発生させた電気パルスを、制御ソフトウェアを改良することにより、圧縮信号を含む光位相パルス列に変換する光駆動モジュールを開発した。パルス圧縮は、1つのパルスを複数のパルスに分割して送信し、受信側で複数のパルスから1つのパルスに復元することで、1つのパルスに比べて信号を大幅に増幅することができる。しかし、パルス系列は単一パルスより継続時間が長いため、この時間内に光源で位相ノイズが発生すると、元信号に復元できないため、復元の際に測定した光源位相情報を用いることで補正処理を行った。

後方散乱光の位相（後方散乱光のP及びS偏波成分のI及びQ成分の合計4チャンネル）を同時に受信することで、サブテーマ①で構成した光源側の2チャンネルと組み合わせて合計6チャンネルの高速デジタイザを構成する。コヒーレント偏波・IQ分離受信した4チャンネルの散乱光信号には、音波情報と光源の位相（2チャンネルで別途記録）が同時に含まれている。従って、受信した散乱光信号から光源の位相ノイズを引き去る処理を実行することにより、正味の音波情報を得た。

3-2-1 光位相補正技術の開発

測定時間を短縮するために、レーダーの業界で良く使用されているバーカー符号を使用し、さらに SNR を上げるために従来 13bit しか提案されていなかったバーカー符号を 39bit 疑似バーカー符号（光の位相を 0 又は π で変調する）に上げて使用することにより、パルス系列の発生および信号の復元（パルス圧縮）技術を開発した。

3-2-2 6ch コヒーレント・デジタル受信及び信号処理の開発

従来の計画では、コヒーレント偏波・IQ 分離素子の $I-1y+I-2y$ と $Q-1y+Q-2y$ を使用して光源の位相測定を行い、もう一個のコヒーレント偏波・IQ 分離素子の $I-1y+I-2y$ と $Q-1y+Q-2y$ と $I-1x+I-2x$ と $Q-1x+Q-2x$ を使用することで、音波の測定を行う予定であった。本研究により、I の信号からヘルベルト変換を用いることで Q の信号を測定することなく、計算のみで算出し、実測した I 信号と I 信号から計算により求めた Q 信号を用いることによって、位相の計算ができることが立証できた。

すなわち、測定した I 信号および Q 信号をそれぞれ図 8 及び図 9 に示す。図 10 において、Standard は、I 信号と Q 信号を測定し、位相を計算した結果である。一方、analytic (I) は、I 信号のみから Q 信号を計算し、位相を計算した結果であり、analytic (Q) は、Q 信号のみから I 信号を計算し、位相を計算した結果である。図より、3 種類とも大きな差はないことが明らかになった。従い、従来は 6ch のコヒーレント・デジタル受信が必要であったところ、同等の機能を 3ch コヒーレント・デジタル受信にて実現できることが明らかになった。

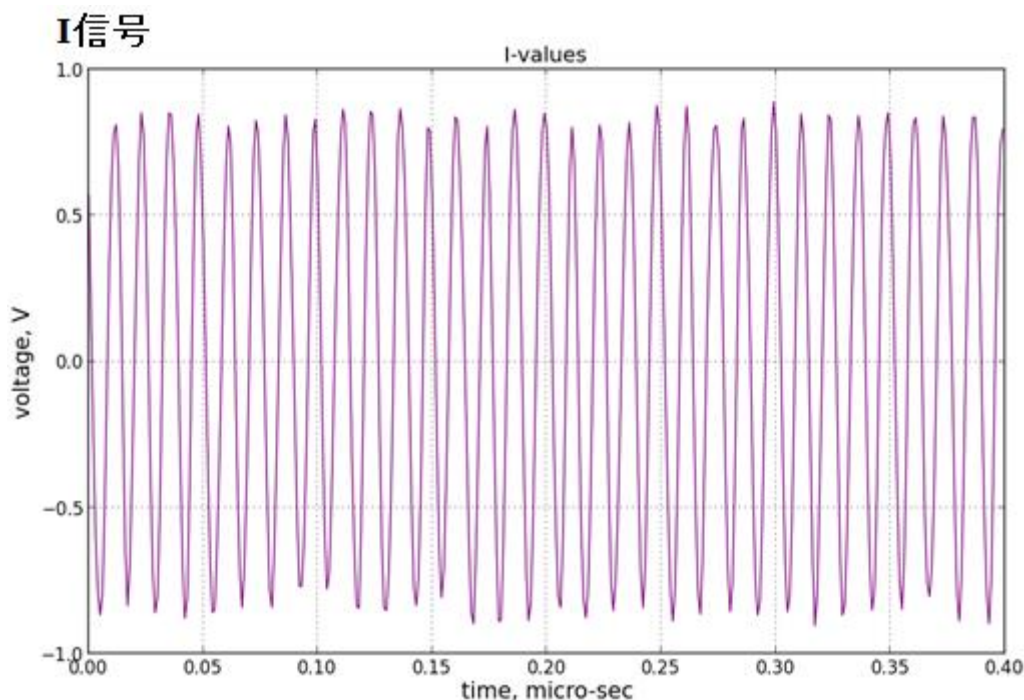


図 8 測定した I 信号

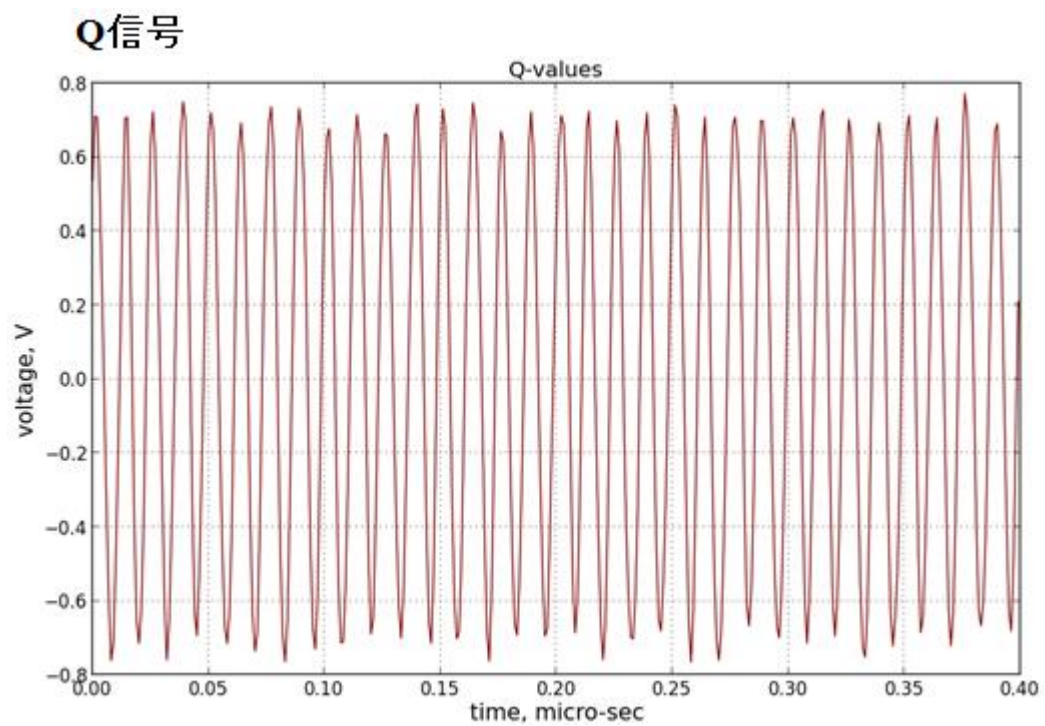


図9 測定したQ信号

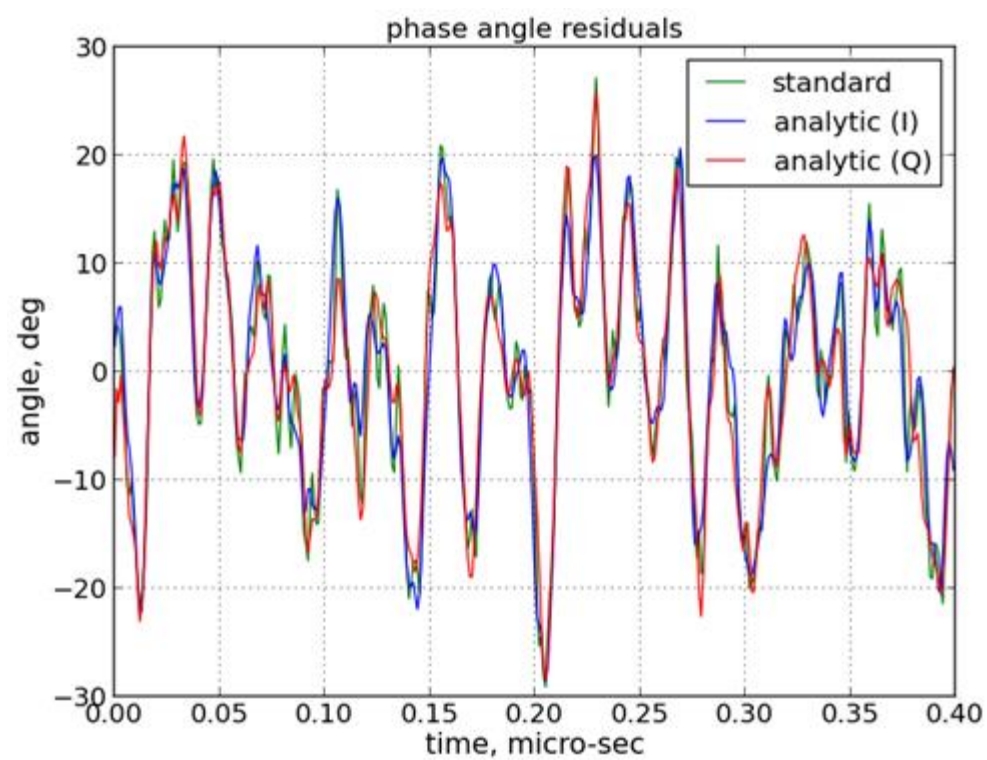


図10 ヘルベルト変換を用いた位相角の検証結果

3-2-3 制御ソフトの開発および動作確認

前節までに検証した開発内容をシステムと実現するため、制御ソフトウェアの開発と動作確認を実施した。この開発によって、信号強度を増幅することができ、20cm の空間分解能を実現するための基本技術を確立することが出来た。

3-3 サブテーマ③ 音波の周波数に追従可能な処理速度を有するシステムの開発

実用化を重視した開発を本開発で実施するために、システムのモジュール化を検討し、実施する。更に、音源から発生した信号を測定するため、外部からの信号に測定のタイミングを合わせる外部トリガーとの同期機能、並びに測定した音波を再生する機能を開発した。

システムとして、測定距離が 10m の時に最高 50KHz の処理速度を達成するために、各モジュールの同期動作を調整し、後方散乱光の位相測定システムを実現した。また、これに伴って、計測器をコンピュータから操作し、計測結果を表示する Graphical User Interface (GUI) ソフトウェア、外部からのシステム操作を可能にするリモート制御ソフトウェアを開発した。

3-3-1 外部トリガーおよび連続計測モジュールの開発

これまでの計測モジュールは、それぞれのデータ捕獲毎に PC から開始コマンドを送信し、終了を確認していた。このため、それぞれのデータ捕獲にはミリ秒単位の時間がかかり、間隔はばらついていた。新しく開発した連続計測モジュールでは、PC から連続捕獲開始コマンドを送信すると、供給される外部トリガー信号により、指定回数のデータを捕獲する。このモジュールにより、所要時間はマイクロ秒単位になり、また間隔が一定になった（図 1 1）。

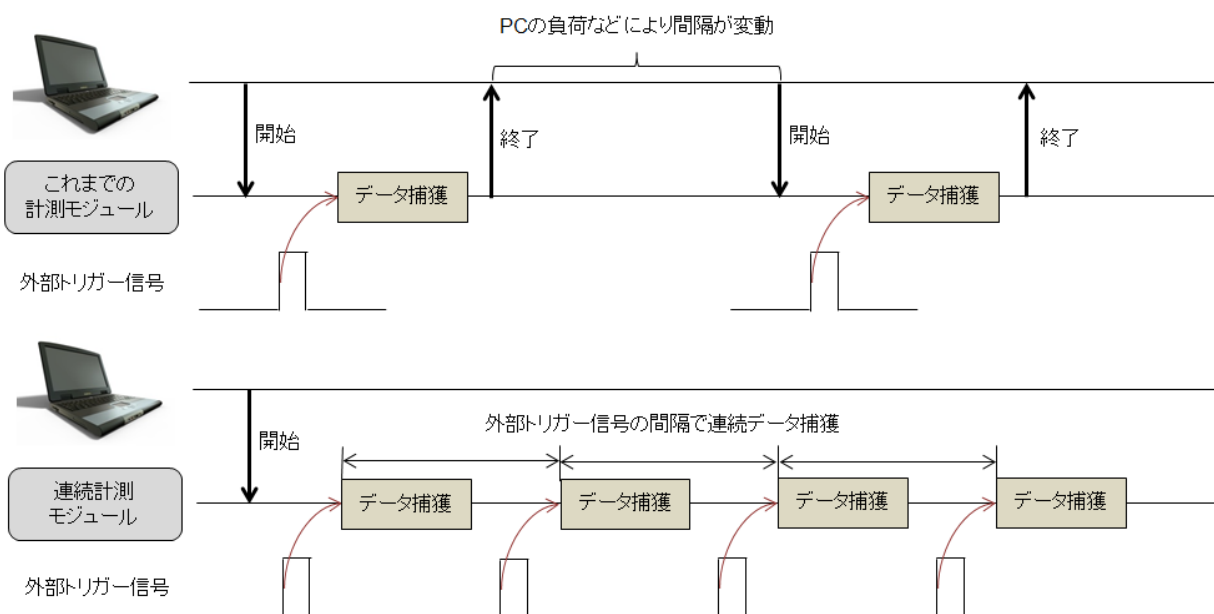


図 1 1 開発した連続計測モジュール

3-3-2 システム GUI の開発

今回開発した各要素技術をシステムとして統合化し、ユーザが操作できるようにするため、Graphical User Interface (GUI) ソフトウェアを開発した。ユーザは、これらを用いて、測定条件設定を行ない、実行し、結果を確認・保存することができる。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・保存できる(図12)。

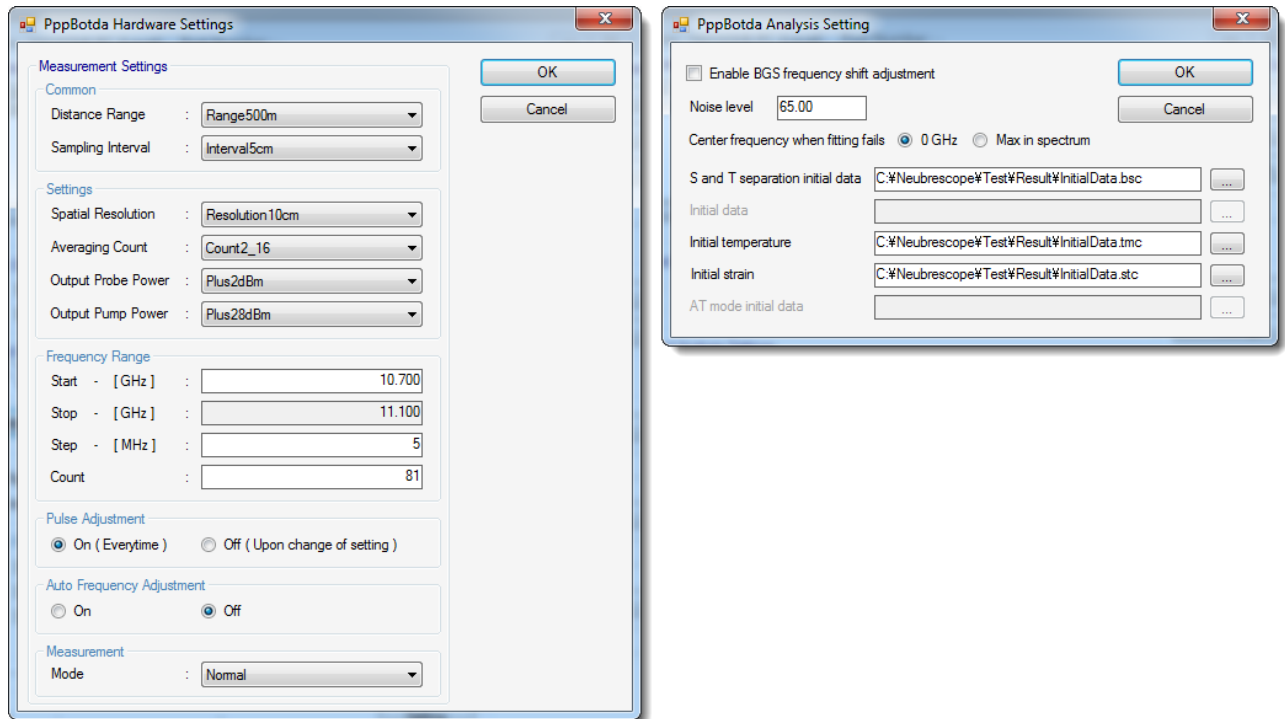


図12 開発したGUI モジュール

3-3-3 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った。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った。また、複数の装置を一つで集中して管理することも可能になった（図13）。

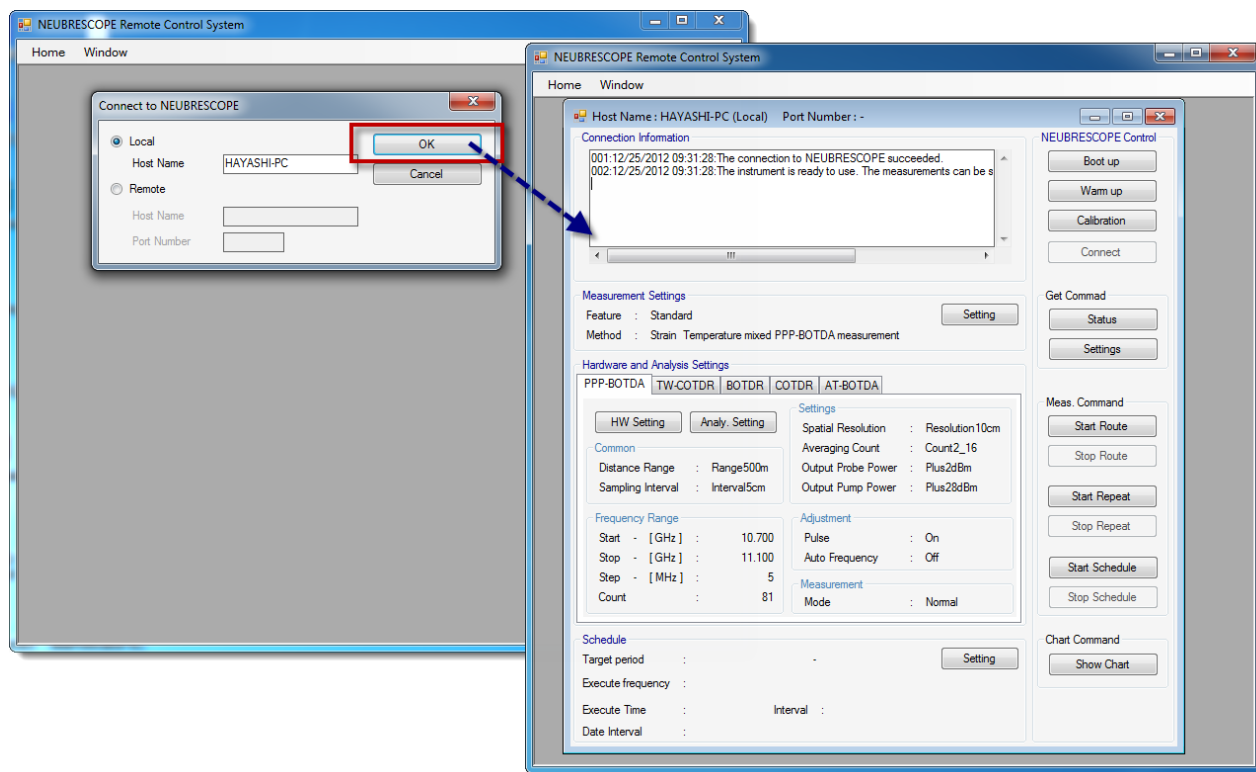


図13 リモート側の操作により計測器に接続するときの画面

3-3-4 音波検証システムの調整

音波復元時の空間分解能を評価するため、下図に示すような測定系を構成して光ファイバによる音波計測を試みた（図14）。図中 DAS と記載されているのが今回試作した音波の測定システムである。光ファイバは、測定器から約 20cm 余長を残し遮音ケースに収めた。この遮音ケース内にて音波発生器を用いて音波を発生させ、その時の位相信号変化をとらえた（図15）。

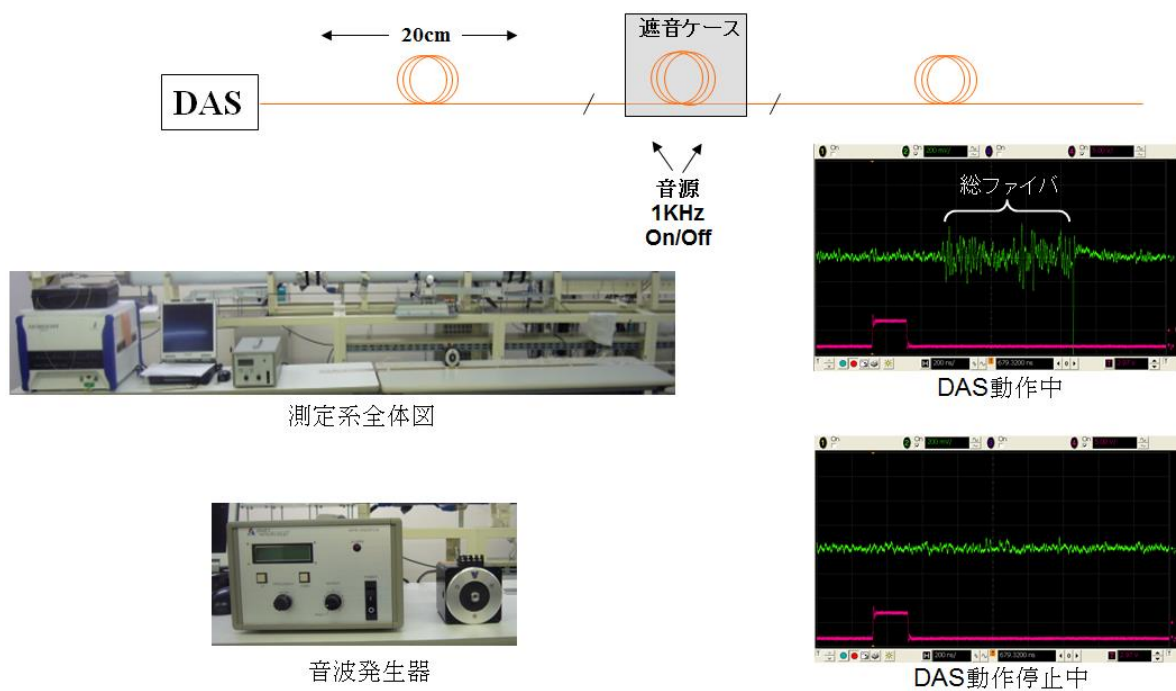


図 1 4 音波測定試験系

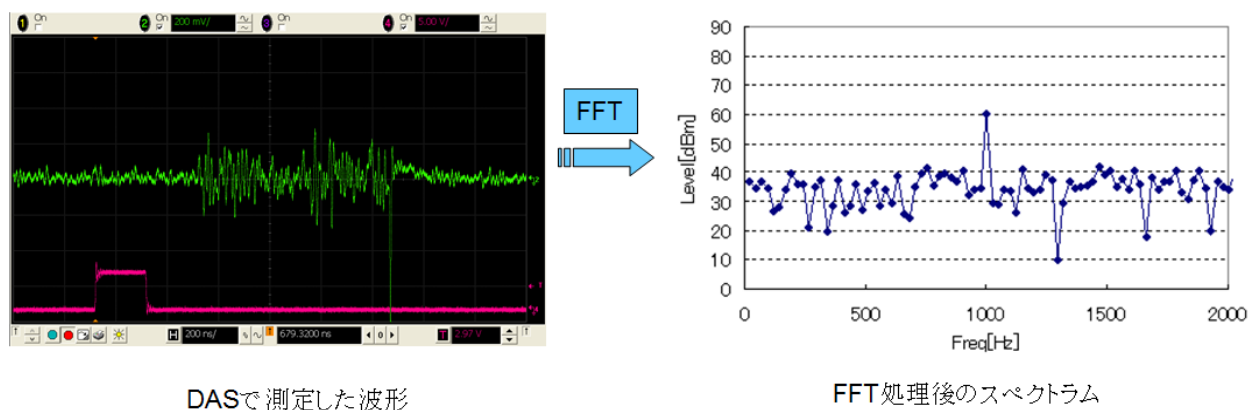


図 1 5 音波計測システムで得られた波形と周波数分析 (FFT)

3-3-5 音波測定システムの性能確認

音波測定システムは、試行錯誤の末、システムにて計測することがわかった。前節で述べた検証システムを用いて、周波数 1kHz または 4kHz の音波を与えた時に、それに対応した位相変化信号をとらえることが出来た。4kHz の音波を与え、フーリエ変換した結果を図 16 に示す。図より、4kHz の音波が正しくとらえることが出来ていることが証明できる。

上記より、本研究開発期間内では音波周波数 4kHz まで証明することができた。目標の処理速度 5MHz の証明までには至らなかったが、測定原理としては本研究開発により確立させることができたことから、今後システムのパラメータを最適に調整すること等により目標を達成できると考えている。

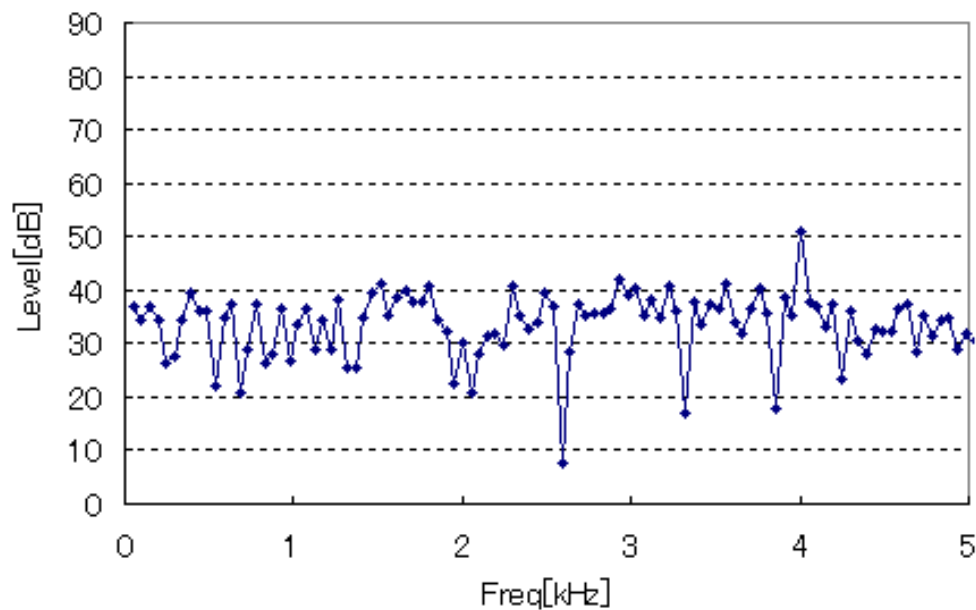


図 1 6 測定した音波信号の周波数成分分析結果 (4kHz)

第4章 全体総括

本開発により、

サブテーマ① 光源の位相ノイズを同期測定し補正する技術の開発

サブテーマ② 後方散乱光の位相解析と圧縮信号の復元技術の開発

サブテーマ③ 音波の周波数に追従可能な処理速度を有するシステムの開発

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。今後、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。

本提案における事業化体制は図17の通りである。共同体のうち、ニューブレクス(株)は、コーナン電子(株)および(株)ベネテックスから必要なモジュールを調達し、本製品を製造する。川下企業である(株)フジクラ、千代田アドバンスト・ソリューションズ(株)(現:千代田化工建設(株))、三菱化学(株)を通じて、エンドユーザに販売する計画である。提案者は、上図中の川下企業と既に販売や共同実証試験の実績を有し、提案者の技術開発に対する強固な協力体制を築いている。平成22年度戦略的基盤技術高度化支援事業の成果により応用範囲が大幅に拡大した新製品も、2012年1月に実証試験を実施済みであり、良好な成果が得られた。

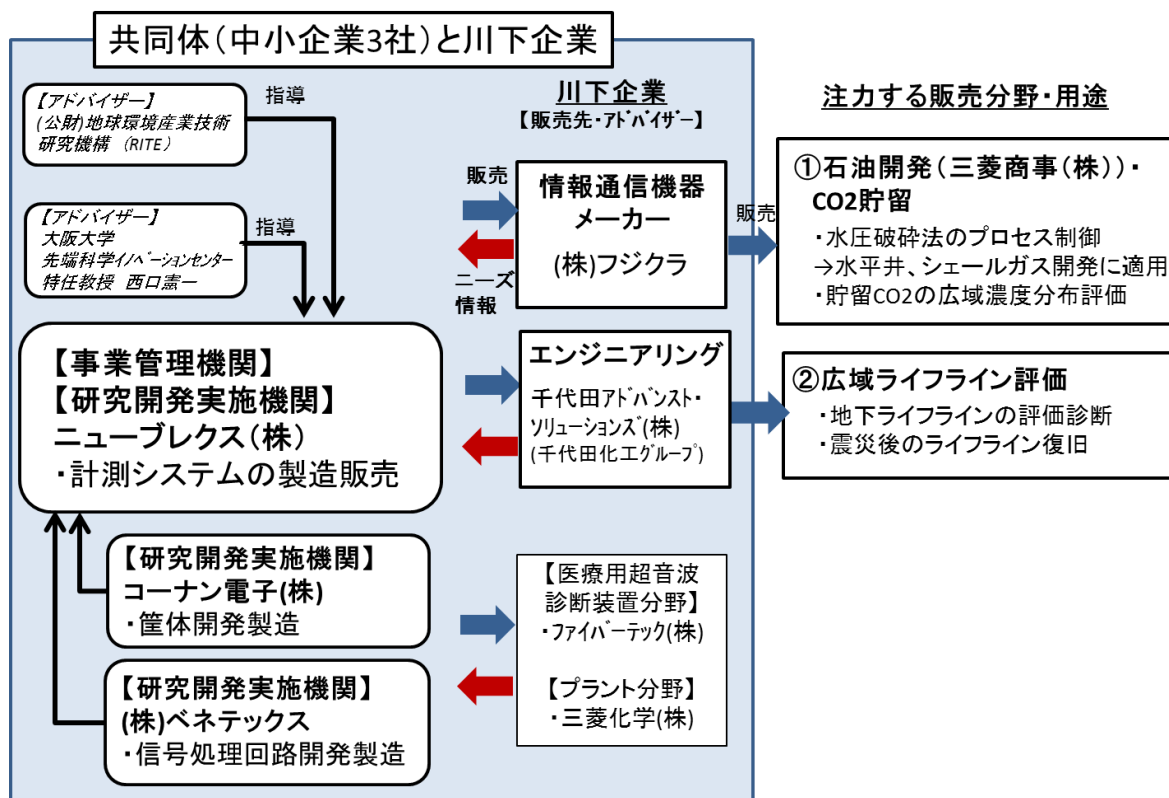


図17 本開発における共同体と川下企業