

PEM

第4回 光応用電磁界計測研究会

—テラヘルツ波帯光応用計測技術と
その応用・一般—

PEM2018-12～16

2019年 2月28日(木)-3月1日(金)

於：宮崎市民プラザ

主 催：電子情報通信学会
光応用電磁界計測特別研究専門委員会
連 催：電気学会
計測技術委員会，光応用・視覚技術委員会

第4回 光応用電磁界計測研究会

プログラム

テーマ：「テラヘルツ波帯光応用計測技術とその応用・一般」

2019年 2月 28日（木） 16時05分～16時55分

16:05-16:55 PEM2018-12

〔特別講演〕 宮崎県の工業振興について

野間 純利（宮崎県工業技術センター）

2019年 3月 1日（金） 9時00分～10時55分

10:30-10:40 挨拶

9:05-9:30 PEM2018-13

〔招待講演〕 周波数シフトテラヘルツ波の発生と非破壊検査への応用

水津 光司・栗原 貴大（千葉工業大学）・碓 智文（電磁界応用株式会社）

9:30-9:55 PEM2018-14

〔依頼講演〕 光応用計測に向けた実用可能な有機非線形光学結晶の技術開発

内田 裕久（アークレイ株式会社）

10:05-10:30 PEM2018-15

〔一般講演〕 時間領域イメージングによる祭壇画の層構造観察

福永 香（NICT）・Hilkka Hiip（Estonian Academy of Arts）

Tarmo Saaret（Niguliste Museum）・Elvira Liiver Holmstrom（Tallinn Town Hall）

Andres Uueni（Archaeovision）

10:30-10:55 PEM2018-16

〔一般講演〕 VCSEL を用いた第5世代携帯電話通信周波数帯用光ファイバリンク

を用いたマイクロ波測定システムの開発

黒川 悟・廣瀬雅信（産総研）・西川憲次（京セミ）

場 所 : 宮崎市民プラザ
主 催 : 電子情報通信学会 光応用電界計測特別研究専門委員会
(<http://www.ieice.org/~pem/>)
連 催 : 電気学会
計測技術委員会, 光応用・視覚技術委員会

本予稿集に掲載された論文等の著作権は著者に帰属します。

発行年月日: 2019年 2月 28日

発 行 所 : (一社)電子情報通信学会

光応用電磁界計測(PEM)特別研究専門委員

宮崎県の工業振興について

野間 純利†

†宮崎県工業技術センター 〒880-0303 宮崎市佐土原町東上那珂 16500-2

E-mail: †noma-sumitoshi@pref.miyazaki.lg.jp

あらまし 宮崎県では、商工業の振興施策を戦略的に実行するため「みやざき産業振興戦略（推進期間：平成 28～30 年度）」を策定し、製造業についてはフードビジネス、医療機器関連、自動車関連など 5 分野を重点産業として推進することとしており、これらの施策を技術面からサポートするためのシステムとして産学金労官 13 団体で構成する「イノベーション共創プラットフォーム」を設立し、工業技術センターを事務局として先端技術セミナーや競争的資金の獲得支援などの事業を展開している。

工業技術センター及び食品開発センターでは、このような新たな取組とともに、基本業務である依頼試験や設備利用などの技術支援並びに地域の課題を解決するための研究開発についても一層の強化を図るため、本年度、EMC 評価の拠点となる「電磁環境試験棟」及び食品を五感で評価するための「おいしさ・リサーチラボ」を設置した。

両センターは、本年度、設立 20 周年（前身の工業試験場からは 70 周年）を迎えたところであり、今後とも地域の要請に応え、技術の発展に対応しながら、さらに本県の産業技術振興の拠点としての役割を果たしていきたいと考えている。

キーワード 地方創生, 産業振興戦略, 技術支援

About Industrial Promotion in Miyazaki Prefecture

Sumitoshi NOMA†

†Miyazaki Prefecture Industrial Tecnology Center 16500-2 Higashi-kaminaka, Sadowara-cho, Miyazaki City,
Miyazaki 880-0303 Japan

E-mail: †noma-sumitoshi@pref.miyazaki.lg.jp

Abstract In Miyazaki Prefecture, we are implementing “Miyazaki Industrial Promotion Strategy” in order to implement promotion of commercial and industrial strategically. In this plan, we are promoting five fields, such as food business, medical equipment, automobile related industries and more, as priority industries for the manufacturing industry. As a system to support these policies from the technical side, we established the “Innovation Co-creation Platform” consisting of 13 organizations (belong to the field of industry, academia, finance, labor and government). On this platform, we are engaged in technical seminars and support for acquiring competitive funds with Miyazaki Prefecture Industrial technology Center as the secretariat.

Along with these initiatives, the Industrial Technology Center and the Food Development Center are aiming at further strengthening technical support such as request tests and facility use, and research & development to solve regional problems. For this reason, we have opened “EMC testing laboratory” which is the base of EMC evaluation and “Oishisa research laboratory” to evaluate food with five senses, this fiscal year.

Both centers have just celebrated the 20th anniversary this year (the 70th anniversary from the industrial testing site of the predecessor). We will continue to respond to the needs of the local community and respond to the development of technology and further we will fulfill our role as a base for promoting industrial technology in this prefecture.

Keyword Regional creation, Industrial Promotion Strategy, Technical support

2019.2.28
光応用電磁界計測 (PEM) 特別研究専門委員会

宮崎県の工業振興について

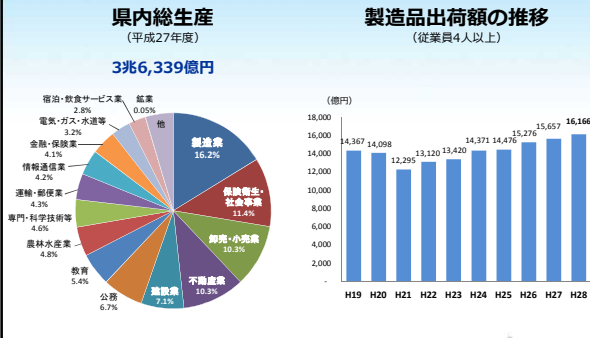
所長 野間 純利
MITC 宮崎県工業技術センター
Miyazaki Prefecture Industrial Technology Center



宮崎県の工業 ①

県内総生産 (平成27年度)
3兆6,339億円

製造品出荷額の推移 (従業員4人以上)



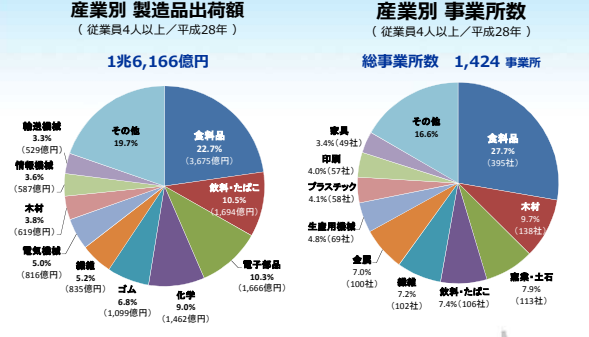
製造業 16.2%
卸売・小売業 10.3%
不動産業 11.4%
建設業 10.3%
運輸・郵便業 4.3%
情報通信業 4.2%
電気・ガス・水道等 2.8%
金融・保険業 4.1%
宿泊・飲食サービス業 2.8%
農業・畜産業 4.6%
林業 4.4%
教育 5.4%
公務 6.7%

出展: 宮崎県「平成27年度宮崎県県民経済計算」
出展: 宮崎県「宮崎県の工業、平成29年工業統計調査結果」

宮崎県の工業 ②

産業別 製造品出荷額 (従業員4人以上/平成28年)
1兆6,166億円

産業別 事業所数 (従業員4人以上/平成28年)
総事業所数 1,424 事業所



輸送機械 3.3% (529億円)
情報機械 3.6% (587億円)
木材 3.8% (619億円)
電気機械 5.0% (816億円)
繊維 5.2% (835億円)
ゴム 6.5% (1,099億円)
化学 9.0% (1,462億円)
電子部品 10.3% (1,666億円)
飲料・たばこ 10.5% (1,694億円)
食料品 22.7% (3,675億円)
その他 19.7%

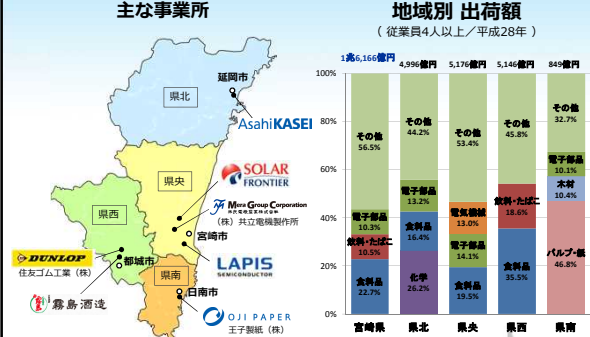
家具 3.4% (49社)
印刷 4.0% (57社)
プラスチック 4.1% (58社)
生産用機械 4.8% (69社)
金属 7.0% (100社)
繊維 7.2% (102社)
飲料・たばこ 7.4% (106社)
木材 9.7% (138社)
農業・土石 7.9% (113社)
その他 16.6%

出展: 宮崎県「宮崎県の工業、平成29年工業統計調査結果」

宮崎県の工業 ③

主な事業所

地域別 出荷額 (従業員4人以上/平成28年)



宮崎県 1兆6,166億円
宮崎県 4,996億円
宮崎県 5,176億円
宮崎県 5,146億円
宮崎県 849億円

宮崎県 56.5%
宮崎県 13.2%
宮崎県 10.3%
宮崎県 22.7%
その他 44.2%
食料品 16.4%
化学 26.2%
その他 45.8%
食料品 13.0%
食料品 19.5%
食料品 35.5%
その他 32.7%
電子部品 33.1%
木材 10.4%
たばこ 46.8%

出展: 宮崎県「宮崎県の工業、平成29年工業統計調査結果」

みやざき産業振興戦略

みやざき産業振興戦略の概要
～みやざき産品の新しい稼ぎ方への挑戦～

基本方針1: 企業による経済活動の活性化
基本方針2: 本県の特性を活かした成長産業の育成

戦略1: 「外貨」を獲得し、県内の経済循環に寄与する中核企業の育成
戦略2: 小規模企業の競争力・経営力の強化
戦略3: 商業・サービス業の振興
戦略4: 成長期待産業の振興

産学官連携によるサポートシステム

企業成長促進プラットフォームによる支援
産業人材育成プラットフォームによる支援
オープンイノベーションエンジンの構築

みやざき産業振興戦略

“みやざき産品の新しい稼ぎ方”への挑戦

プロジェクトの概要

基本方針1: 企業による経済活動の活性化
基本方針2: 本県の特性を活かした成長産業の育成

戦略1: 「外貨」を獲得し、県内の経済循環に寄与する中核企業の育成
戦略2: 小規模企業の競争力・経営力の強化
戦略3: 商業・サービス業の振興
戦略4: 成長期待産業の振興

産学官連携によるサポートシステム

企業成長促進プラットフォームによる支援
産業人材育成プラットフォームによる支援
オープンイノベーションエンジンの構築

イノベーション共創プラットフォーム

“産学金官の英知を結集してイノベーションを共に創る共通の基盤”

大手企業 開放特許

大学・高专 研究シーズ

中小企業 独自技術、事業ニーズ

国・研究機関 先端技術シーズ

金融機関 企業情報ファイナンス

支援機関 各種補助・相談

イノベーション共創プラットフォーム(事務局)
産学金官の連携強化

- ネットワーク会議の開催、運営
- 新産業創出研究会活性化
- 異分野・異業種連携促進
- 競争的資金獲得・活用等

技術相談、共同研究

体制

《構成団体》
商工団体、金融機関、
大学、産業振興機構、
宮崎県（ほか）（計13団体）

《事務局》
宮崎県工業技術センター内

主な事業

- 知財ビジネスマッチング
- 宮崎テックプラント
- コーディネーターミーティング
- 競争的資金の獲得支援
- 先端技術セミナー
- 新産業創出研究会 等

7

みやざき新産業創出研究会

みやざき新産業創出研究会

工業技術センター

- ICT利活用促進分科会
- ブランドデザイン分科会
- 販促ツールデザイン活用分科会
- バイオマス活用分科会
- マテリアル開発研究分科会
- 調湿技術分科会
- ウェルディング分科会
- 医療福祉技術分科会
- 次世代エネルギー活用技術分科会

食品開発センター

- 一次加工食品分科会
- 干したくあん・漬物分科会
- 本格焼酎製造技術分科会
- スポーツ・ヘルスクエア分科会

8

宮崎県工業技術センター・食品開発センター

組織図
職員数50名（うち技術職42名）

工業技術センター

- 管理課
- 企画・デザイン部
- 資源環境部
- 材料開発部
- 機械電子部

食品開発センター

- 管理課 [兼務]
- 企画・デザイン部 [兼務]
- 食品開発部
- 応用微生物部

主な業務
※平成29年度実績（食品開発センター含む）

技術支援

- 依頼試験 606件
- 設備利用 1,153件
- 技術指導・相談 4,145件
- 巡回企業訪問 456件

研究開発

- 県単研究 23件
- 県単共同研究 16件
- 外部資金導入研究 6件

9

保有する知財

保有知財 86件

➡

実施許諾 10件

（特許 42件、出願中 14件、著作権 28件、意匠 2件）

主な実施許諾中の特許

- 単分散金属球状粒子及びその製造方法**
当センターで開発したSPGという素材を用いて製造する1μmのオーダーの均一な球状の金属粒子とその製造方法
- リハビリテーション用片手操作式手押し車**
片麻痺の患者のリハビリを目的として開発した歩行補助器
- 新規醸造酵母『平成宮崎酵母』**
増殖性・アルコール発酵性が高く、焼酎等の製造に適した新規酵母及びこれを用いた焼酎等の製造方法

10

EMC評価のトータルサポート拠点 電磁環境試験棟

- 電子機器等の様々な電磁ノイズに関する評価を行う拠点
- 国内外の各種EMC規格に準拠した様々な試験に対応
- EMC評価のトータルサポートによりものづくり企業の製品開発、本県の産業振興に貢献

● GHz帯対応
● VCCI登録

高性能電波暗室

4

11

食品を五感で評価する おいしさ・リサーチラボ

- 五感を使って食品の味や香りなどの評価を行う施設
- ISO 8589（官能分析-試験室の設計に関する一般指針）準拠
- 試験条件を適切にコントロール可能
- 適切な官能評価により企業の商品開発を後押し

官能評価室

コンセプトミーティングルーム

5

12

宮崎の1番

安全・安心で
豊かな食材

農産物・調味料類 日本一
プロイラー

水産物・加工食品類 日本一
さんかん

水産物・加工食品類 日本一
日向夏

水産物・加工食品類 日本一
宮崎牛

水産物・加工食品類 日本一
さといも

水産物・加工食品類 日本一
宮崎の本格焼酎

水産物・加工食品類 日本一
シロチヨウザメ

水産物・加工食品類 日本一
近海かつお一本釣り・沿岸まぐろはえ縄漁・ひんながまぐろ・まかしき

水産物・加工食品類 日本一
ぼうれんもろ・だいこん

水産物・加工食品類 日本一
さといも

水産物・加工食品類 日本一
宮崎の本格焼酎

宮崎の1番

企業が元気な
みやざき

マイクログリッドセル (出力750W)

オンライン
宮崎から最先端技術を発信するモノ作り企業

世界最大級
太陽電池製造工場

普及率 日本一
太陽光発電システム 太陽熱温水器

保存期間
残留農薬検査

日本一
ひなた指数

暮らしやすい
みやざき

●平均気温 20℃
●日照時間 2000時間
●年間降水量 2000mm

スギ素材

水産物・加工食品類 日本一
Jリーグキャンプ

水産物・加工食品類 日本一
光熱・水道消費支出額

日本一
其の他世界における夫の家事関連時間

全国に誇る
宮崎県産品

周波数シフトテラヘルツ波の発生と非破壊検査への応用

水津 光司[†], 栗原 貴大[†], 碓 智文[‡]

[†] 千葉工業大学工学部 〒275-0016 千葉県習志野市津田沼 2-17-1

[‡] 電磁界応用株式会社計測技術部 〒324-0403 栃木県大田原市湯津上 285-1

E-mail: [†] suizu.koji@it-chiba.ac.jp

あらまし 光領域での距離計測では、FSF レーザー (Frequency Shifted Feedback laser : FSF レーザー) を用いた周波数領域リフレクトメトリ (Frequency Domain Reflectometry : FDR 計測) を実施することで、測定器からの距離に大きな幅のある対象であっても、ミリメートル未満の精度での精密距離計測が実現されている。FSF レーザーとは、超高速に周波数が変化する特殊なレーザー光源であり、パルスレーザーを光源とした距離計測に対して多くのメリットを有していることから、精密な距離計測や非接触 3次元計測などに応用されている。この FSF レーザーを励起光源としてテラヘルツ波を発生させると、瞬時的には単色でありながら超高速で周波数がシフトするテラヘルツ波 (Frequency Shifted Terahertz-wave : FS テラヘルツ波) 光源となり、テラヘルツ波による精密な遠隔距離計測が可能となる。かつ、テラヘルツ波の透過性を利用して、主に建築物などの非破壊検査への応用が期待できる。

FSF レーザーおよび単一周波数波長可変レーザーを励起光源として、単一走行キャリアフォトダイオード (Uni Traveling Carrier Photodiode : UTC-PD) による FS テラヘルツ波の発生に成功した。テラヘルツ波帯におけるマイケルソン干渉計を構築し、干渉信号をショットキーバリアダイオードによって計測することで、光路差に起因するビート信号の観測に成功した。観測されたビート周波数は光路差から見積もられる理論値と良く一致しており、距離計測法としての基礎特性を確認できた。

キーワード テラヘルツ波, 周波数シフトレーザー, 非破壊検査

Generation of Frequency Shift THz-wave and Application for Nondestructive Inspection

Koji SUIZU[†], Takahiro KURIHARA[†], Tomofumi IKARI[‡]

[†] Faculty of Engineering, Chiba Institute of Technology 2-17-1 Tsudanuma, Narashino-city, Chiba 275-0016 Japan

[‡] Spectra Design 285-1, Yuzukami, Otawara-city, Tochigi 324-0403 Japan

E-mail: [†] suizu.koji@it-chiba.ac.jp

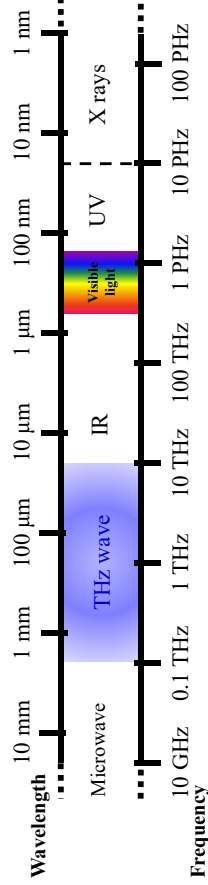
Abstract In the optical region distance measurement, frequency domain reflectometry (FDR measurement) using FSF laser (Frequency Shifted Feedback laser: FSF laser) is performed, and precise distance measurement in long range between the measuring device and the target are realized. FSF laser is a special laser light source whose frequency changes at ultra high speed and has many merits to distance measurement compared to that using pulsed laser as a light source, so FSF laser is applied to precise distance measurement and non-contact three dimensional measurement, and others. By using this FSF laser as a light source of terahertz wave (THz-wave) generation, generated THz-wave has frequency shifted character, so the FS THz-wave (Frequency Shifted THz-wave: FS THz-wave) can be used for precious distance measurement. And the FS THz-wave could be applied to nondestructive inspection for buildings, by using transmissivity of THz-wave for dielectric materials.

We successfully demonstrated FS THz-wave generation using UTC-PC (Uni Traveling Carrier Photodiode) pumped by FSF laser and single frequency tunable laser. And, we successfully measured beat frequency of interfered FS THz-waves by Michelson interferometer of THz-frequency range using Schottky Barrier Diode. The measured beat frequency agreed well with theoretical values calculated from optical path lengths in interferometer.

Keyword Terahertz-wave, Frequency Shifted Feedback Laser, Nondestructive Inspection

研究背景

テラヘルツ波とその利用



テラヘルツ波の特徴

- 電波と光波の両方の性質を併せ持つ
→電波の透過性と光波のミラーやレンズによる取り回しの良さ
- 指紋スペクトルが多く存在する帯域

昨今、問題とされていること

高度経済成長期の建造物の老朽化
震災による建造物の状態劣化

内部の欠陥、鉄骨の状態、壁面の剥離状況の検査が必要→電磁波が有用

THz波産業の主な分野

透過イメージング、
トモグラフィ、
物性計測、非破壊検査、
etc

テラヘルツ波による断層検査・計測が実際に行われている

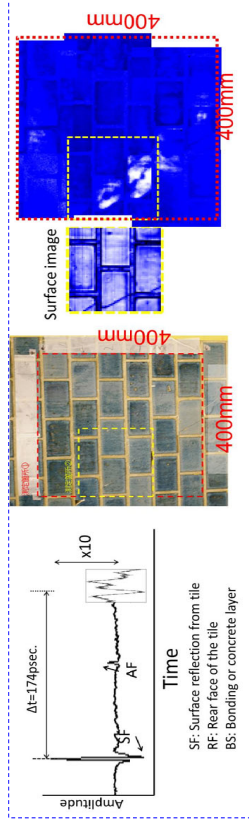
研究背景

テラヘルツ波による断層検査の現状

測定対象の材料に応じて得意な周波数帯が存在

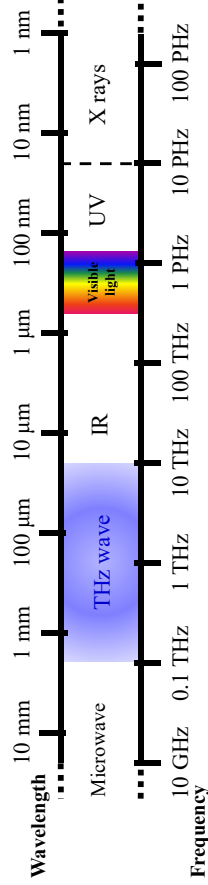
マイクログ波	ミリ波	テラヘルツ波
1~10 GHz	50~500 GHz	0.5~3 THz
コンクリート内部	木造建築	タイルの剥離

THz波の透過特性を生かした応用事例：TOF測定によるタイル裏面剥離イメージング



研究背景

テラヘルツ波とその利用



テラヘルツ波の特徴

- 電波と光波の両方の性質を併せ持つ
→電波の透過性と光波のミラーやレンズによる取り回しの良さ
- 指紋スペクトルが多く存在する帯域

昨今、問題とされていること

高度経済成長期の建造物の老朽化
震災による建造物の状態劣化

内部の欠陥、鉄骨の状態、壁面の剥離状況の検査が必要→電磁波が有用

THz波産業の主な分野

透過イメージング、
トモグラフィ、
物性計測、非破壊検査、
etc

テラヘルツ波による断層検査・計測が実際に行われている

研究背景

テラヘルツ波による断層検査の現状

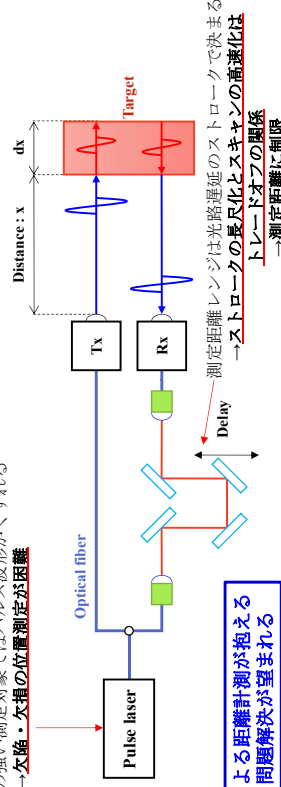
テラヘルツ時間領域分光法
THz-TDS(Terahertz-Time Domain Spectroscopy)

TOF(Time of Flight)測定
送波したTHz波パルスが測定対象で反射して戻るまでの時間から距離を測定する方法

THz-TDSによるTOF計測の抱える問題点

測定対象の材料に応じた周波数選択が可能
→THz波パルスエネルギーの大部分が計測に関与しない
屈折率分散の強い測定対象ではパルス波形がくずれ
→欠陥・欠損の位置測定が困難

dx/距離分解能
ex)10[cm]/5[μm] = 20000点
→膨大なデータ取得の必要性
→広範囲な測定は困難



THz波による距離計測が抱える
これら問題解決が望まれる

研究目的

光波帯における距離計測

周波数シフト帰還型レーザー(Frequency Shifted Feedback Laser : FSFレーザー)を用いた
光周波数領域リフレクトメトリ(Optical Frequency Domain Reflectometry : OFDR)による精密距離計測技術

THz波帯における距離計測へ要求

波長選択性・単色性の向上
より安価な光源
光路遅延を設けない簡便で高速な計測系
測定距離・範囲の制限を克服

光波帯の距離計測技術をTHz波帯に応用できれば現状の問題点を解決できる

到達目標

- FSFレーザーを励起光源として、周波数シフトテラヘルツ波(Frequency Shifted Terahertz wave : FSテラヘルツ波)を発生
- ショットキバリアダイオード(Schottky Barrier Diode : SBD)にてFSテラヘルツ波検出
- FSテラヘルツ波による距離計測有用性の検証

周波数シフトテラヘルツ波発生

FSテラヘルツ波発生に適した

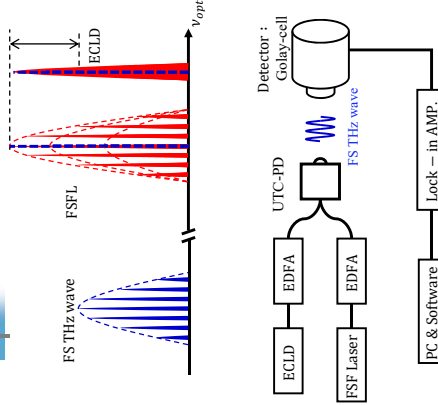
2波長のパワーバランスの構築

励起2波長のスペクトル線幅が異なる

2波の平均パワーが等しくても

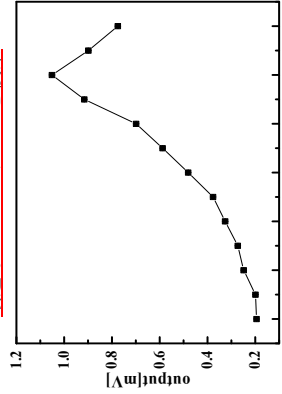
中心波長のピーク値に差が生ずる

最適なパワーバランスを構築



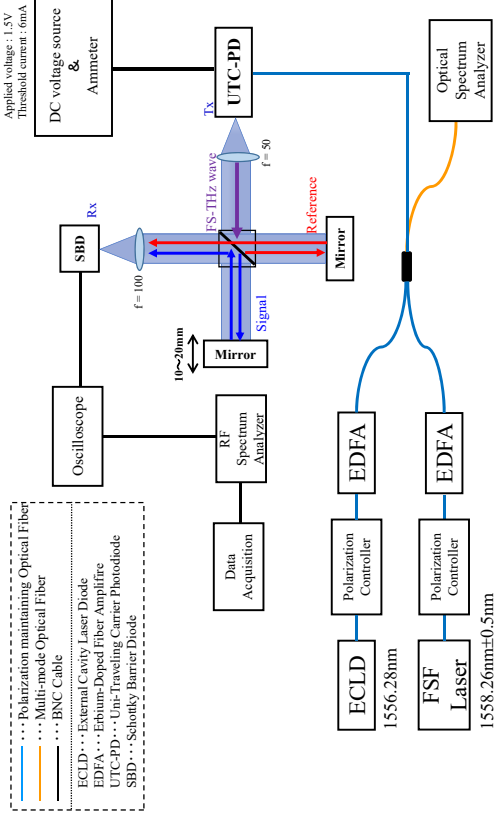
実験系概略図

The difference between the peak value of the spectrum [dB]
FSFLとECLDのピーク値を変更した際のFS-THz出力結果



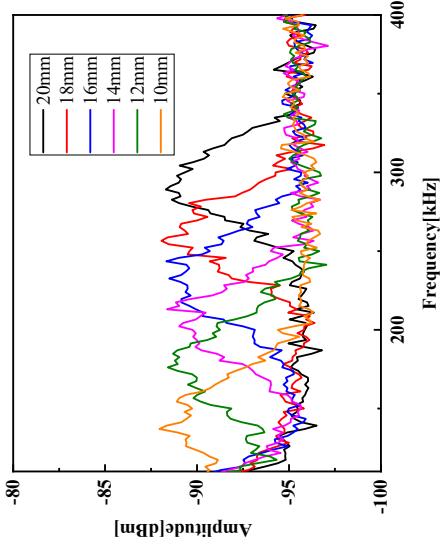
FSテラヘルツ波発生を確認

FSテラヘルツ波検出



Experimental setup for Detection of a FS-THz wave

FSテラヘルツ波検出

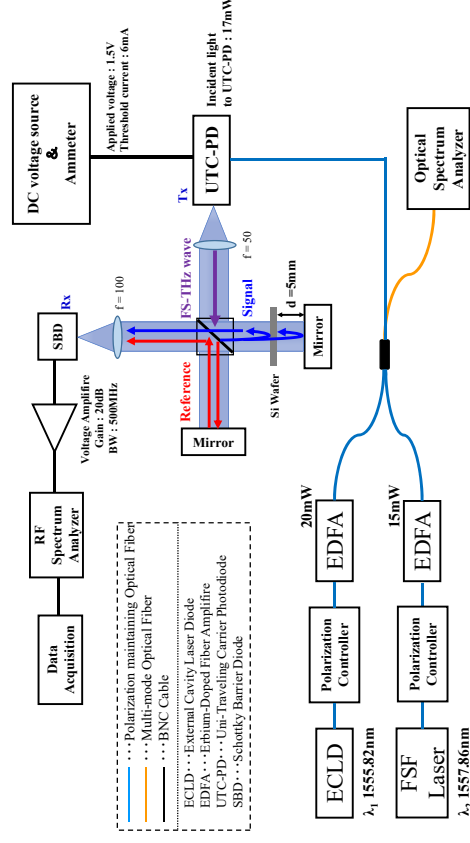


λ_1 (ECLD)=1556.28nm
 λ_2 (FSFL)=1558.26nm±0.5nm
 ν_{THz} =244.8GHz±60GHz
 λ_{THz} =1.225mm(0.98mm~1.62mm)

Path difference	Calculated	Experiment
10mm	146.0kHz	147.8kHz
12mm	175.2kHz	173.9kHz
14mm	204.4kHz	204.3kHz
16mm	233.6kHz	230.4kHz
18mm	262.8kHz	260.9kHz
20mm	292.0kHz	291.3kHz

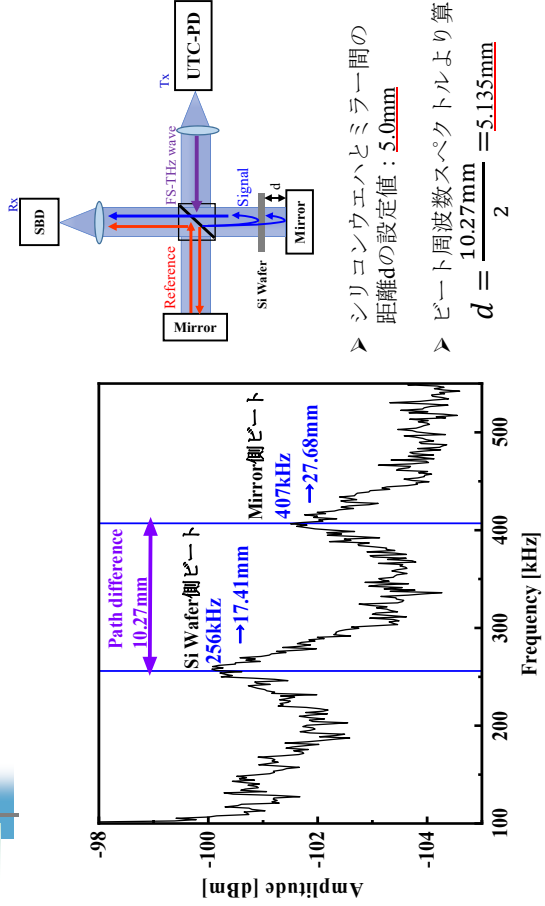
光路差に応じたピート周波数を確認

距離計測のデモンストラーション



Experimental setup for Detection of a FS-THz wave

距離計測のデモンストレーション



- シリコンウエハとミラー間の距離dの設定値：5.0mm
- ビート周波数スペクトルトルより算出
$$d = \frac{10.27\text{mm}}{2} = \underline{5.135\text{mm}}$$

結論・展望

結論

- FSPレーザーを励起光源としたFSテラヘルツ波発生を確認
- FSPレーザーの特性が転写されたFSテラヘルツ波によるビート信号を観測
→FSテラヘルツ波光源の開発に成功
- FSテラヘルツ波による距離計測のデモンストレーション

展望

- 距離計測の高速化
→ビート周波数スペクトルのSN比向上
- より簡便な実験系構築
→FS-THz波をEO検出することにより光学実験系を簡便

光応用計測に向けた実用可能な有機非線形光学結晶の技術開発

内田 裕久[†]

[†] アークレイ株式会社 〒602-0008 京都府京都市上京区岩栖院町 59 番地 擁翠園内

E-mail: [†] uchidah@arkray.co.jp

あらまし 有機非線形光学結晶は、非常に大きな非線形光学定数と電気光学係数を有する材料が数多く存在しており、電磁波イメージング用の電気光学プローブ、テラヘルツ波の発生・検出、光導波路の開発など幅広い応用が期待されている。本稿では、有機線形光学結晶の有する潜在性能を引き出すため技術として、溶液法によるバルク結晶成長、物理気相成長による薄膜作製、アニーリングによるレーザー耐久性の改善、有機非線形光学結晶への光学コーティング技術など、有機非線形光学結晶の実用化に向けた研究開発について報告する。

キーワード 有機非線形光学結晶, DAST, OH1, 結晶成長, 薄膜成長, アニーリング, 光学コーティング

Development of practical organic nonlinear optical crystals for photonics-applied measurement

Hirohisa Uchida[†]

[†] ARKRAY, Inc. Yosuien-nai, 59 Gansuin-cho, Kamigyo-ku, Kyoto, 602-0008 Japan

E-mail: [†] uchidah@arkray.co.jp

Abstract Many organic nonlinear optical crystals have large nonlinear optical constants and electro-optic (EO) coefficients. Therefore, organic nonlinear optical crystals are applied to the development of EO probe for electromagnetic wave imaging, terahertz wave generation and detection, optical waveguide. We report on research and development for practical application of organic nonlinear optical crystals. More specifically, we will discuss bulk crystal growth by solution method, growth of single-crystalline thin film by physical vapor deposition, improvement of laser damage threshold by annealing, and optical coating technology to organic nonlinear optical crystal.

Keyword Organic Nonlinear Optical Crystals, DAST, OH1, Crystal Growth, PVD, Annealing, Optical Coating

1. まえがき

光による計測技術において、非線形光学効果は広く応用されている光学現象の一つである。この非線形光学効果が確認された結晶の発見は、1960年代まで遡る[1]。まず無機材料である水晶でその効果が確認され、その後、有機材料においてもその効果が確認された[2]、[3]。特に有機化合物で構成された有機非線形光学結晶は、1980年代に中西らによって開発された4-N,N-dimethylamino-4'-N'-methyl-stilbazolium tosylate (DAST) 結晶[4]が、非線形光学結晶における有機材料の可能性を示す上で大きな影響を与える結晶となっている。実際に、電磁波イメージング用の電気光学プローブ[5]や、テラヘルツ波の発生・検出[6]、[7]、光導波路の開発[8]など、実用化に向けて様々な応用研究が進められている。ここで、産業界の視点から有機非線形光学結晶の実用化に着目すると、品質がひとつのキーワードになると考えられる。この品質には、厳密にはいくつかの種類と定義があり、ユーザーニーズに基づく企画品質、実現可能な狙うべき設計品質、製造

時に得られる品質に基づく製造品質、実際のユーザーの使用感に基づく使用品質という概念がある。論文などで示されるチャンピオンデータが企画品質、実際にユーザーの手元に届く製品としての結晶が使用品質であるとすれば、当然ながら使用品質を企画品質へ近づけるための技術開発が必要となる。

有機非線形光学結晶におけるベンチマークとなっているDAST結晶に着目すると、結晶が有する高い性能も然ることながら、光学素子として克服しなければならない課題を論文などで散見する。具体的には、大型の結晶育成が困難であること、水との結合による水和物の形成、レーザー照射に対する耐久性の低さ、結晶の加工が難しいことなどが挙げられる。しかしながら、有機材料の性質を理解し、材料に適した技術開発を行うことで、これらの欠点を克服することが可能である。本稿では、有機非線形光学結晶の実用化に向けて筆者らが検討を進めてきた結晶成長および光学コーティングを中心に、有機非線形光学結晶の潜在性能を十分に引き出すための研究開発について報告する。

2. 有機非線形光学成長技術

2.1. 溶液法によるバルク結晶育成

DAST 結晶は融点と分解点の温度差が小さく融液法による結晶育成が困難である。そこで大型のバルク結晶育成を行うために、溶液法による結晶育成を行っている。この溶液法は、溶解度に対して温度または溶媒の蒸発量を精密にコントロールすることで、良質かつ大型の結晶を育成する方法である。図 1 にメタノールに対する DAST の溶解度曲線を示す。現在弊社では、溶解度曲線を元に、徐冷速度を精密に制御することで結晶成長をコントロールしている。具体的な DAST 結晶の育成条件は、まず種結晶を作製するために、10.4 g の DAST 粉末を 400 g のメタノールへ溶解し、55 °C 以上の温度で 10 時間以上溶解した。その後、約 20 g ずつ溶液を分注し、一昼夜静置することで析出した種結晶を回収した。得られた種結晶は、約 200 g の 44 °C 飽和溶液に浸漬し、0.1 °C/day の冷却速度で徐冷することで、結晶を成長させた。図 2 に得られた DAST 結晶の一例を示す。個体差はあるものの、最大で厚み 2 mm 程度、面積 15 mm×15 mm 程度の DAST 結晶育成を実現している。

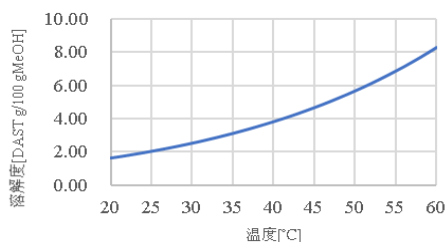


図 1 メタノールに対する DAST の溶解度曲線

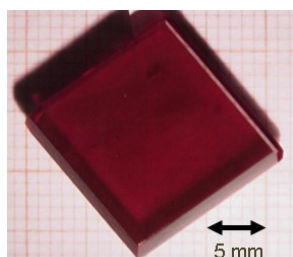


図 2 得られた DAST 結晶の一例

2.2. 気相成長による有機非線形光学薄膜作製

非線形光学結晶を用いた光学素子を作製する上で、効率良く光を伝播させることや、位相整合条件を満たすために、最適な形状の結晶を作製する必要がある。例えば、近年報告されているプリズム結合型チェレンコフ位相整合方式による THz 波発生では、任意の光学軸に対してポンプ光が入射可能な有機非線形光学結晶を作製することで、高効率な THz 波発生を確認している [9], [10]。さらに、使用する結晶を薄膜化することで、厚み方向に生じる位相不整合を解消しつつ、結晶

による THz 波の吸収をより効果的に抑制させるなど、最適な形状の結晶が得られると考えられる。また、有機非線形光学薄膜の実現は、THz 波発生素子だけでなく、光変調器などの情報通信用光学素子応用への期待も膨らむ。本節では、有用な有機非線形光学材料の 2-(3-(4-hydroxystyryl)-5,5-dimethylcyclohex-2-enylidene) malononitrile (OH1) を使用した薄膜作製技術と THz 波発生評価について述べる。

OH1 の物理気相成長法 (PVD) は、図 3 に示す実験装置で行った。OH1 の昇華および結晶成長を制御するため、炉内は 3 箇所の温度独立制御によって温度勾配をつけた。また酸化防止のために、炉内をアルゴン (Ar) ガスで置換した。OH1 成膜用の基板としては、半円状の石英ガラス管を円筒形の石英ガラス管の中に配置した。

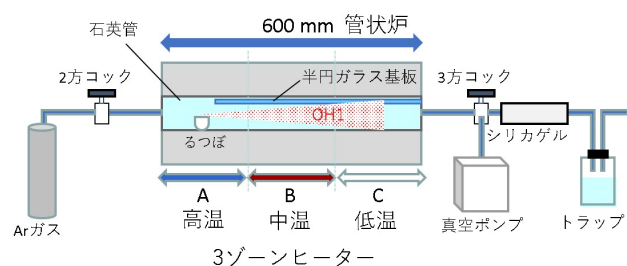


図 3 OH1 の物理気相成長用実験装置の概略図

OH1 の成膜方法は、まず OH1 を 0.2 g をるつぼへ入れ、OH1 が昇華する温度に設定した高温部位に配置した。その後、炉内を真空にし、ガラス管内へ一定圧力の Ar ガスを充填し、加熱・保温することで OH1 薄膜を作製した。炉内の温度は、高温部位は OH1 を昇華させるために 180 °C とし、中温部位は 120 °C、低温部位は 90 °C とした。成膜させるための保温時間は 24 時間とした。図 6 に得られた OH1 薄膜の顕微鏡観察像を示す。OH1 薄膜の平均的なサイズは、長さ約 20 mm、幅約 500 μm、厚さは 3 μm 程度であった。

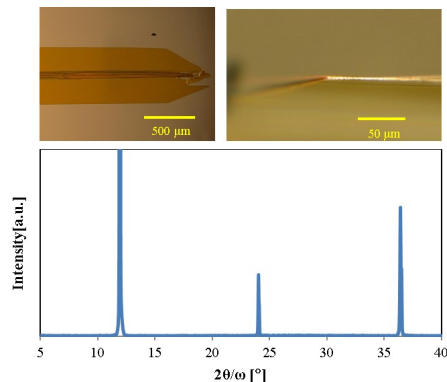


図 4 OH1 薄膜写真と XRD 測定結果

得られた薄膜が単結晶であるかを確認するため X 線回折測定を行った。X 線回折の測定は、Cu ターゲット

を備えた ATG-X (Rigaku 社製) を使用した。OH1 薄膜はスライドガラス上にマウントし、(100)面に対して Out of plane 測定を行った。図 4 に OH1 薄膜の一例と X 線回折測定結果を示す。測定結果から、得られた OH1 薄膜が単結晶であることを確認した。次に、作製した OH1 単結晶薄膜を用いてフェムト秒ファイバーレーザーを使用したプリズム結合型チェレンコフ位相整合方式による THz 波発生を行った。構築した光学系を図 5 に、得られた THz 波の時間波形とパワースペクトルを図 6(a),(b)に示す。発生した THz 波の発生帯域は、最大 5 THz、THz 波のパルス幅は 130 fs であった。特に、2 THz 以上の高周波数帯域において発生出力が減少しながらも 5 THz 付近まで THz 波が発生していることから、OH1 の薄膜化が結晶による THz 波の吸収抑制に効果があったこと、位相不整合が緩和されていることが示唆される。以上のように、有機非線形光学材料の物理気相成長によって光学素子として使用可能な薄膜が実現できた[11]。今後、情報通信を含めた光学素子応用の可能性を検討する。

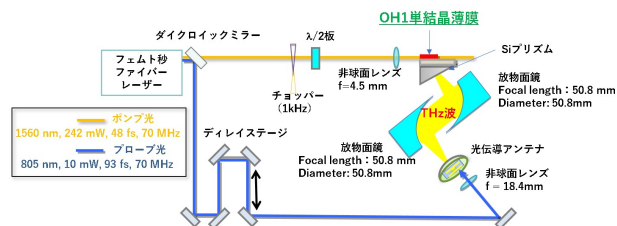


図 5 OH1 薄膜を評価した THz 波光学系の概略図

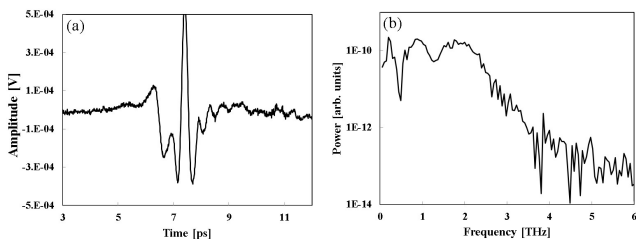


図 6 OH1 薄膜を使用した THz 波発生結果
(a)時間波形, (b)パワースペクトル

2.3. 結晶アニーリングによるレーザー照射耐性の改善

ここまでに述べた結晶成長技術をはじめ、結晶育成技術の開発および改良により、大型の結晶や薄膜が得られている。一方、光学素子として用いる場合は、レーザー光を結晶に入射する必要があるが、結晶の光に対する損傷閾値、つまりレーザー照射に対する耐久性の向上が望まれる。近年、DAST 結晶を使用した THz 波発生は、広帯域かつ高出力な THz 波が発生可能であることから、THz 波発生用の非線形光学結晶として産業応用が期待されている。本節では、DAST 結晶のレー

ザー照射に対する耐久性を向上させる技術として、結晶のアニーリングについて述べる。

DAST 結晶へのアニーリングは、結晶構造の均一性向上がレーザー照射に対してどの程度効果的かを確認するため、アニーリング前後でのレーザー照射に対する耐久性を実験的に検討した。レーザー照射に対する耐久性の確認は、ナノ秒レーザーを使用した差周波混合方式による THz 波発生と、結晶観察により行った。本検討で使用した DAST 結晶は、溶液法で育成した DAST 結晶を使用した。結晶のアニーリングは、真空加熱炉 (VACUUM OVEN VOS-201SD, EYALA 社製) を使用した。実験手順としては、DAST 結晶を炉内へ入れ、加熱炉内を 0.001 MPa まで減圧した。その後、室温環境で 0.06 MPa 減圧となるように Ar ガスを充填した。アニーリングの条件は、1 °C/min の加熱速度で 220 °C まで昇温させ、12 時間保温を行った後に、自然徐冷にて室温まで冷却した。その後、インキュベータ内に乾燥空気を注入し、アニーリング DAST 結晶を回収した。

DAST 結晶のレーザー照射耐性は、差周波混合方式による THz 波発生を行った。励起光源としては、角度位相整合により波長制御可能な 2 波長発振の光パラメトリック発振器 (KTP-OPO) を使用した。結晶へ入射するレーザー光波長は、 λ_1 を 1462 nm、 λ_2 を 1481 nm (差周波数 2.6 THz) とした。実験系の詳細は参考文献をご参照いただきたい[12]。アニーリング前後のレーザー照射耐性は、2 波長光のパワー密度と THz 波発生時間により比較した。まず始めに、As-grown の DAST 結晶にパワー密度約 300 MW/cm² の 2 波長光を照射し、DAST 結晶のレーザー照射耐性時間を確認した。レーザー光を照射した位置は、顕微鏡観察レベルで透過性が良好な位置とした。その後、レーザーを照射した DAST 結晶をアニーリングした。アニーリング後の結晶評価は、レンズによりビーム径を絞ることでパワー密度を約 1.5 GW/cm² に向上させた上で、レーザー照射耐性時間を確認した。アニーリング後のレーザー照射位置は、アニーリング前のレーザー照射により損傷した位置を避けて行った。図 7(a)にアニーリング前の DAST 結晶にパワー密度約 300 MW/cm² のレーザー光を照射して THz 波発生を行った実験結果、図 7(b)に、アニーリング後の DAST 結晶にパワー密度約 1.5 GW/cm² のレーザー光を照射して THz 波発生を行った実験結果を示す。アニーリング前はすべての DAST 結晶において、300 秒以内に THz 波出力が減少した。アニーリング後では、出力が減少した結晶を使用しているにもかかわらず THz 波出力が減少しないことを確認した。同様の実験を 26 個の DAST 結晶を使用して行った結果、26 個中 20 個の結晶で、同様の効果を確認し

た。以上より、DAST 結晶へのアニーリング処理がレーザー照射に対する耐久性向上に効果があることを実験的に確認した。

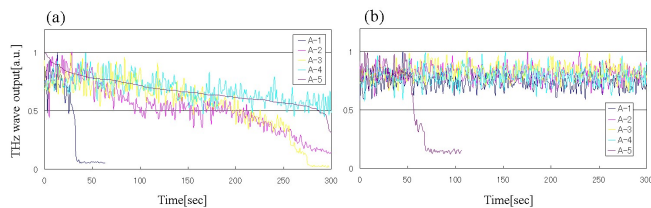


図7 アニーリング前後での THz 波出力比較
(a)アニーリング前 (パワー密度 300 MW/cm²)
(b)アニーリング後 (パワー密度 1.5 GW/cm²)

3. 有機非線形光学結晶への光学薄膜技術

As-grown 結晶を使用する上で避けられない光学現象がある。それは、入射層と結晶層での屈折率差により生じるフレネル反射に基づく入射光の損失である。結晶に対して垂直入射で励起光を入射する場合の、フレネルロス以下の計算式(1)で算出できる。

$$Reflection\ Loss = \frac{(n_0 - n_1)^2}{(n_0 + n_1)^2} \cdot \dots \cdot (1)$$

ここで、 n_0 は入射層の屈折率、 n_1 は基板層の屈折率を示す。例えば、空気層から DAST 結晶へ 1550 nm の直線偏光のレーザー光を a 軸に入射する場合、1550 nm における DAST 結晶 a 軸の屈折率 2.13 より、13.04 % の表面反射損失が生じる。この損失を低減させることができれば、光学素子としての性能向上に直結する。一般的な光学結晶は、酸化物などの無機化合物の誘電体 (TiO₂, Ta₂O₅, Al₂O₃, SiO₂, MgF₂ など) を使用して反射防止コーティング (AR コート) を行っている。一方、有機非線形光学結晶に対して無機化合物の誘電体によるコーティングを行った場合、コート層のクラックや剥離が発生し、実用的な AR コートを実現することが難しい。そこで本節では、CYTOP (AGC 社製) を使用した DAST 結晶への AR コートの効果と THz 波発生評価について述べる。

DAST への AR コートは非結晶性フッ素樹脂 CYTOP を使用した。CYTOP の特徴として、比較的低い屈折率であること、近赤外領域での透過率が非常に高いこと、非晶質であるため固化した後も光学的な特性が等方的であることなどが挙げられる。DAST 結晶への AR コートはディップコート法により行った。任意の濃度に調整した CYTOP 溶液を調整し、その中へ DAST 結晶を浸漬した。その後、1mm/sec の引き上げ速度で結晶を回収し、オープンにて 100 °C で 1 時間加熱することで AR コート DAST 結晶を作製した。AR コートの厚みは分光エリプソメータ (UVISEL2, 堀場製作所社製) を使用して評価した。ここで、通信波長帯や THz 波発

生でも用いられている波長である 1550 nm における CYTOP による AR コートの膜厚を、 $d_{AR} = \lambda / 4n_1$ の計算式で算出すると、290.589 nm となった。実際に DAST 結晶上に作製した CYTOP による AR コートの厚みは、溶液の濃度により厚みが増減しており、中でも、CYTOP 溶液濃度が 5 % のときにコーティング厚みが約 290 nm であることが確認できた。この厚みは、1560 nm における計算上の AR コート膜厚と良い一致を示している。そこで、同サンプルを使用して AR コート前後での固体分光光度計 (SolidSpec 3700DUV, 島津製作所社製) による透過率測定を行った。

図 8 に AR コート前後での DAST 結晶の透過率測定結果を示す。使用した結晶の厚みは 0.86 mm である。測定は、光路に偏光子を配置することで、DAST 結晶 a 軸と偏光方向が平行になるように調整した。AR コート前後での透過率を比較すると、AR コート後で透過率が上昇することが確認できた。また 1550 nm における AR コート前後での透過率を比較すると、AR コート前が 71.723 %, AR コート後が 89.848 % であり、この値は計算値の透過率と良い一致を示している。

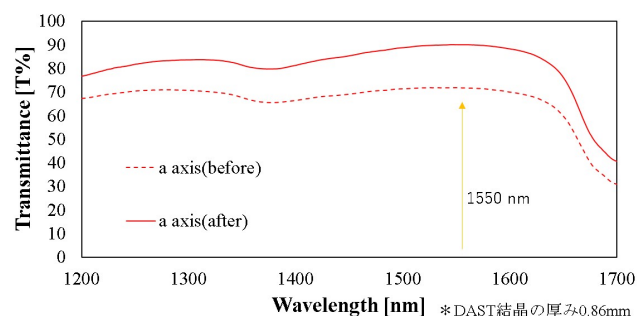


図8 CYTOP を使用した AR コーティング前後での DAST 結晶の透過率比較

以上の結果より、CYTOP を使用した AR コートが DAST 結晶の反射防止に効果的であることを示している。これまでに、実用化まで至っていない有機非線形光学結晶への AR コートであったが、ソフトマテリアルを使用することで実用的な品質のコーティング応用への可能性が示された。本技術を発展させることで、ソフトマテリアルをバッファ層とした高反射膜の検討や、励起光の反射防止効果による高効率 THz 波発生、耐環境性の向上など、有機非線形光学結晶への高付加価値化を実現する。本技術による光損失の低減が、これまでに敬遠されていた分野への応用を再度促す技術なることを期待したい。

4. むすび

本稿では、光学素子としての実用化に向けた有機非線形光学結晶関連技術に焦点を絞り、大型結晶育成の

ための溶液法による結晶育成，導波路化に向けた薄膜作製技術，レーザー照射耐性を改善するアニーリング技術，ソフトマテリアルを使用した有機非線形光学結晶への AR コートに関する研究開発を紹介した。有機非線形光学結晶が有する潜在性能の高さは，依然として無機材料を凌駕しており，優れた素材を使えるモノに仕立てる技術の出現が求められている。まえがきで述べた有機非線形光学結晶が抱える欠点は，技術開発の進展とともに解消されつつある。今こそ有機非線形光学結晶が潜在性能として有する，高効率，高速性の実現の期待に応えるべく，光学素子として実用化を進めていく時期を迎えつつあるのではないだろうか。

5. 謝辞

この研究は，JST「テラヘルツ波新時代を切り拓く革新的基盤技術の創出」，科研費基盤 S (25220606)，国立研究開発法人科学技術振興機構の研究成果展開事業「先端計測分析技術・機器開発プログラム」の補助を受けて実施した研究成果である。

文 献

- [1] P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters and G. Weinreich, "Generation of optical harmonics," *Phys. Rev. Lett.* Vol.7, No.4, pp.118-119, Aug. 1961.
- [2] G. H. Heilmeyer, N. Ockman, R. Braunstein and D. A. Kramer, "Relationship between optical second harmonic generation and the electro - optic effect in the molecular crystal hexamin," *Appl. Phys. Lett.* Vol.11, p.229, Dec. 1964.
- [3] P. M. Rentzepis and Y. R. Shen, "Laser - induced optical second harmonic generation in organic crystals," *Appl. Phys. Lett.* Vol. 5, p.156, Oct. 1964.
- [4] H. Nakanishi, H. Matsuda, S. Okada, M. Kato, "Organic polymeric ion-complexes for nonlinear optics," *Proceedings of the MRS International Meeting on Advanced Materials*, Vol. 1, pp.97-104, 1989.
- [5] H. Togo, H. Uchida, H. Yokota, A. Izumi, T. Nagatsuma and N. Fukasaku, "Highly sensitive optical electric-field sensor using DAST and its applications," *Proceedings of the European Microwave Association*, Vol. 4, pp.294-301, Dec. 2008.
- [6] S. R. Tripathi, K. Murate, H. Uchida, K. Takeya and K. Kawase, "A fiber-laser pumped, high-power terahertz wave source based on optical rectification of femtosecond pulses in 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate crystal," *Appl. Phys. Express*, Vol.6, No.7, 072703, July 2013.
- [7] H. Minamide, J. Zhang, R. Guo, K. Miyamoto, S. Ohno and H. Ito, "High-sensitivity detection of terahertz waves using nonlinear up-conversion in an organic 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazolium tosylate crystal," *Appl. Phys. Lett.* Vol.97, 121106, Sept. 2010.
- [8] T. Kaino, B. Cai and K. Takayama, "Fabrication of DAST channel optical waveguides," *Adv. Funct. Mater.*, Vol.12, No.9, pp.599-603, Sept. 2002.
- [9] K. Suizu, T. Shibuya, H. Uchida, and K. Kawase, "Prism-coupled Cherenkov phase-matched terahertz wave generation using a DAST crystal," *Opt. Express*, Vol. 18, pp.3338-3344, Feb. 2010.
- [10] H. Uchida, K. Oota, T. Minami, K. Takeya and K. Kawase, "Generation of single-cycle terahertz pulse using Cherenkov phase matching with 4-dimethylamino-N'-methyl-4'-stilbazolium tosylate crystal," *Appl. Phys. Express*, Vol.10, 062601, May 2017.
- [11] H. Uchida, R. Yamazaki, K. Oota, K. Okimura, T. Minami, K. Takeya and K. Kawase, "Organic nonlinear optical single-crystalline thin film grown by physical vapor deposition for terahertz generation," *Cryst. Growth Des.* Vol.18, pp.4029-4036, June 2018.
- [12] H. Uchida, H. Ochiai, K. Suizu, T. Shibuya and K. Kawase, "Improving the laser-Induced-damage tolerance characteristics of 4-dimethylamino-N-methyl-4-stilbazoliumtosylate crystals for THz wave generation by annealing," *Jpn. J. Appl. Phys.* Vol.51, 022601, Jan. 2012.

時間領域イメージングによる祭壇画の層構造観察

福永 香[†] Hilkka HIIOP[‡] Tarmo SAARET^{†‡} Elvira Liiver Holmström^{‡‡} Andres Uueni^{†‡‡}

[†] 情報通信研究機構電磁波研究所 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1

[‡]Estonian Academy of Arts Põhja puistee 7, 10412 Tallinn

^{†‡}Niguliste Museu Niguliste 3, 10146 Tallinn

^{‡‡}Tallinn Town Hall Raekoja plats 1, 10114 Tallinn,

^{†‡‡}Archaeovision Kentmanni 18-4, 10116 Tallinn

E-mail: [†]kaori@nict.go.jp

あらまし パルス波を用いるテラヘルツ波帯時間領域イメージング法は、欧州を中心に文化財の非破壊検査に応用されている。今回、エストニア、タリン市旧市街にある Niguliste 国立美術館所蔵の祭壇画の調査を行い、過去の透過 X 線による調査から推測される上塗り部分を検証した。その結果、紋章部分のみ 2 層で、下の層には別の幾何学的模様が描かれていることが明らかになった。

キーワード 非破壊検査, イメージング, 文化財科学

Internal structure observation of altarpiece by time domain imaging technique

Kaori FUKUNAGA[†] Hilkka HIIOP[‡] Tarmo SAARET^{†‡} Elvira Liiver Holmström^{‡‡} Andres Uueni^{†‡‡}

[‡]Estonian Academy of Arts Põhja puistee 7, 10412 Tallinn

^{†‡}Niguliste Museu Niguliste 3, 10146 Tallinn

^{‡‡}Tallinn Town Hall Raekoja plats 1, 10114 Tallinn,

^{†‡‡}Archaeovision Kentmanni 18-4, 10116 Tallinn

E-mail: [†]kaori@nict.go.jp

Abstract The authors applied terahertz time domain imaging to investigate the internal structure of the painting "Passion Altarpiece", which is a masterpiece of oil on wood panels by Adriaen Isenbrandt and is part of the permanent collection of Niguliste Museum. The wings of the altarpiece are reported to have been painted over, and X-ray radiography results suggested the presence of underlying paintings. Cross-sectional images obtained by terahertz time domain imaging proved that the regions depicting coats of arms comprise two layers. Geometric patterns that are not visible on the surface appear in the bottom layer and are considered to be the original coats of arms.

Keyword Nondestructive test, Imaging, Heritage science

1. はじめに

電磁波を用いた絵画の構造調査は欧州各国では実用化が進んでいる。これは修復の需要があることに加え、施政者および納税者の文化財への理解と感心が高く公的研究費を科学技術予算として得られることも大きな理由であろう。サンプルを抽出して破壊検査を実施できる大量生産品と異なり、文化財の調査は非破壊検査が必須である。（学術的調査のために極めて微量のサンプルを採取することはある。）マイクロ波から X 線までの電磁波（図 1）は、非破壊非接触で作品内部の構造を調査できることから広く用いられている。

電磁波の物質への透過し易さと一般的な絵画の構造と対比させた概略図を図 2 に示す。調査したい箇所に応じて適切な周波数帯を選ぶことで、修復計画の立案や美術史上の探求に対して有益な情報を得られる。ここで、X 線は電離放射線であることから、原子レベルでは非破壊とは言えないが、作品の価値を損なわないという点で非破壊検査として扱われている。今回の対象のような板に描かれた作品は、板と下地や下地と絵画層の間の状態が重要なため、テラヘルツ波帯が適している。特に層構造の観察には、パルス波を用いた時間領域イメージングが有効である。一方、材料の同定に関しては、蛍光 X 線による元素分析で主な情報が得られるため、得られたデータからのスペクトル解析は、計測技術開発側の興味以外には行われていない。

NICT では約 10 年前よりテラヘルツ波帯のパルス波を用いた時間領域分光法によるイメージング技術の世界に先駆けて文化財調査に応用し、エジプトのミイラからピカソの油絵まで、世界各国の美術館所蔵品の調査を行い、その成果は修復計画の立案や技法の解明等に役立てられた [1-3]。今回、エストニア共和国の Niguliste 美術館所蔵の祭壇画を調査し、その層構造を解析することにより、上描きされた紋章の下の幾何学的意匠を抽出することに成功したので報告する。

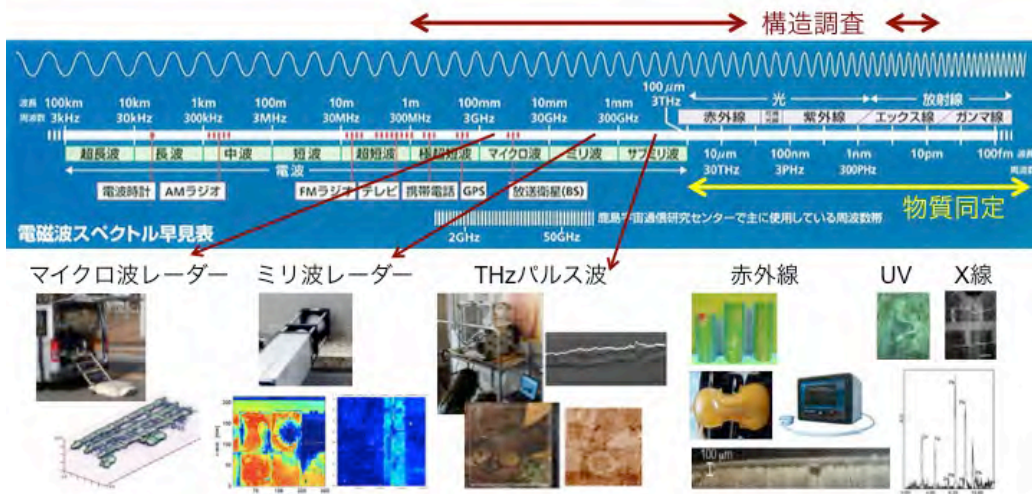


図 1 電磁波を用いた非破壊センシング例

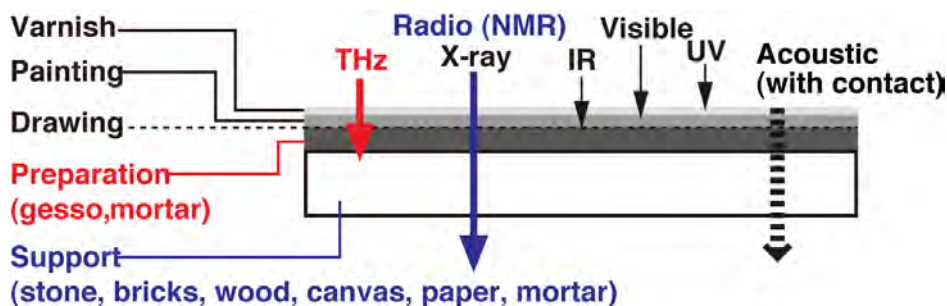


図 2 一般的な絵画の層構造と調査に用いる電磁波の周波数帯域の関係

2. 調査作品および実験装置の概要

今回調査した "Passion Altarpiece (1515-1520)" は北方ルネッサンスの画家 Adriaen Isenbrandt の代表作の一つで、板を支持体として油絵の具で描かれた、エストニア共和国タリン市にある国立 Niguliste 美術館の所蔵品である。この美術館はもとは教会 (St. Nicholas' Church) であり、今回あわせて調査した Bernt Notke の "Danse Macabre (15 世紀後半) や Hermen Rode の "High Altarpiece (1478-1484)" が世界的に有名である。図 3 に示すように、"Passion (受難)" のテーマは、祭壇画に磔刑図として描かれることが多く、周囲に絵のスポンサー (多くは土地の有力者) が描かれることもある。この作品は時代とともに有力者が描き足されていった記録が残されており、そのことから絵画層が複数あると予想されてきた。

1960 年代に美術史家の Mai Lumiste (1932-1985) により X 線透過撮影が実施され [4], さらに 2015 年から 2016 年の修復時に UV や赤外線等の写真調査も行われた [5]。図 3(b) に示す祭壇の左右翼の裏側にある紋章部分は、図 4 に示すように、主に X 線透過画像の結果から、目視で見える紋章とは異なる模様が内部の絵画層に存在する推定されている。



図 3 Passion Altarpiece (受難図祭壇画), (a) 表面, (b) 裏面

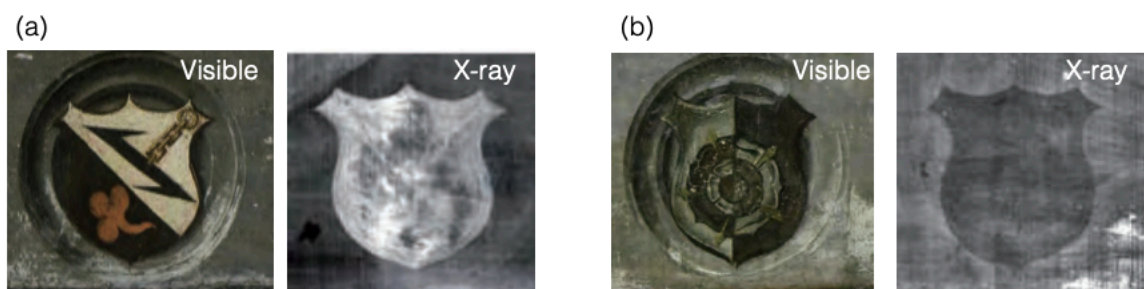


図 4 1960 年代の X 線透過画像による調査結果例 [5]

そこで今回 THz 波帯のパルス波を用いた時間領域イメージング法により、層構造を明らかにするとともに最初に描かれた紋章を抽出することを試みた。可搬型装置は、いくつか市販されており、今回は小型軽量 (本体約 8kg) なパイオニア社製の装置 (図 5(a)) を用いた。X-Y ステージを、センサヘッドが絵画表面から約 5cm 離れて、各扉に対して垂直になるように配置し、180 mm x 180 mm の範囲を 1mm ピッチで観測した。測定時間は約 1 時間である。測定結果の表示方法を図 5(b) に示す。縦軸と横軸を同じスケールにすると、断面が薄すぎて層構造を表示できないため、縦軸 (厚さ方向) を拡大している。また、任意の位置でスライスした面情報は、その位置からの反射波のみを抽出して描くことによって得られる。

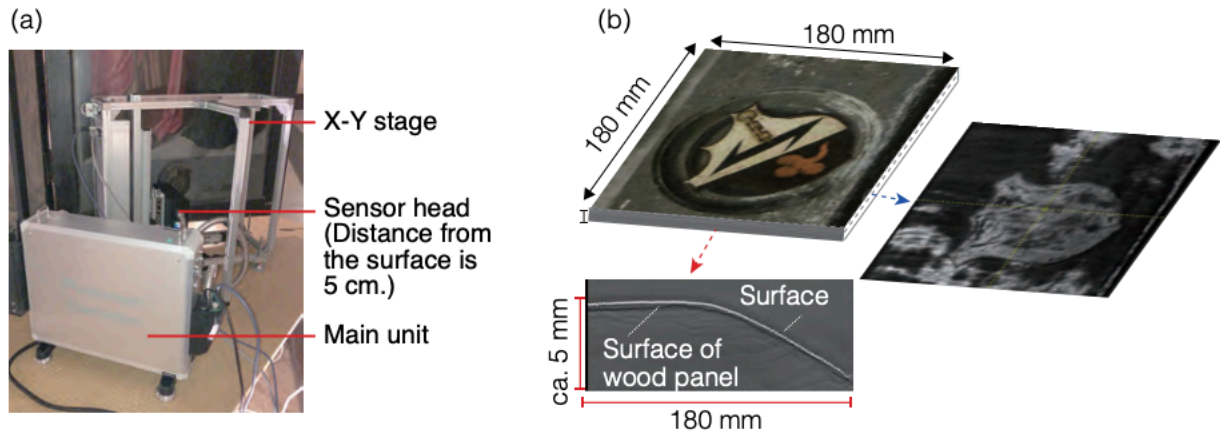


図5 実験装置 (a) THz 時間領域イメージング装置 (パイオニア製), (b) テータ表示例

3. イメージング結果

図 6(a) に紋章 A についての観測領域と抽出した断面を示す。2本の直線 p1, v1 は、紋章の無い部分で、絵画層は 1 層しか確認できない。最表面にはニス層があるはずであるが、THz 波帯では分解能が足りず、またニス層は THz 波をよく透過する。そのため、ニス層そのものの調査には、さらに周波数の高い近赤外領域のトモグラフィ (OCT) を用いる必要があるだろう。p2, v2 は紋章のある部分で、それぞれ 2 層あることが確認できる。図 6(b) に紋章 B についての観測領域と抽出した断面を示す。紋章 A と同様、紋章のない 2 本の直線 p1, v1 に沿った断面からは、絵画層は 1 層しか確認できず、紋章のある p2, v2 に沿った断面は 2 層あることが確認できた。一方、木の表面の削り痕によるものと推定される木の表面の凹凸や、木目によるとみられる縞模様も観測できた。これらは古典技法による板絵に共通して見られる特徴である。

今回用いたシステムでは、X-Y ステージ上に固定されたセンサヘッドを用いているため、紋章 A のように作品の板全体が曲がっていると、センサヘッドから作品表面までの距離の差がデータに反映されてしまうがため、今後は Fraunhofer が開発したようなロボットアーム付きのシステム開発が望まれる [6]。

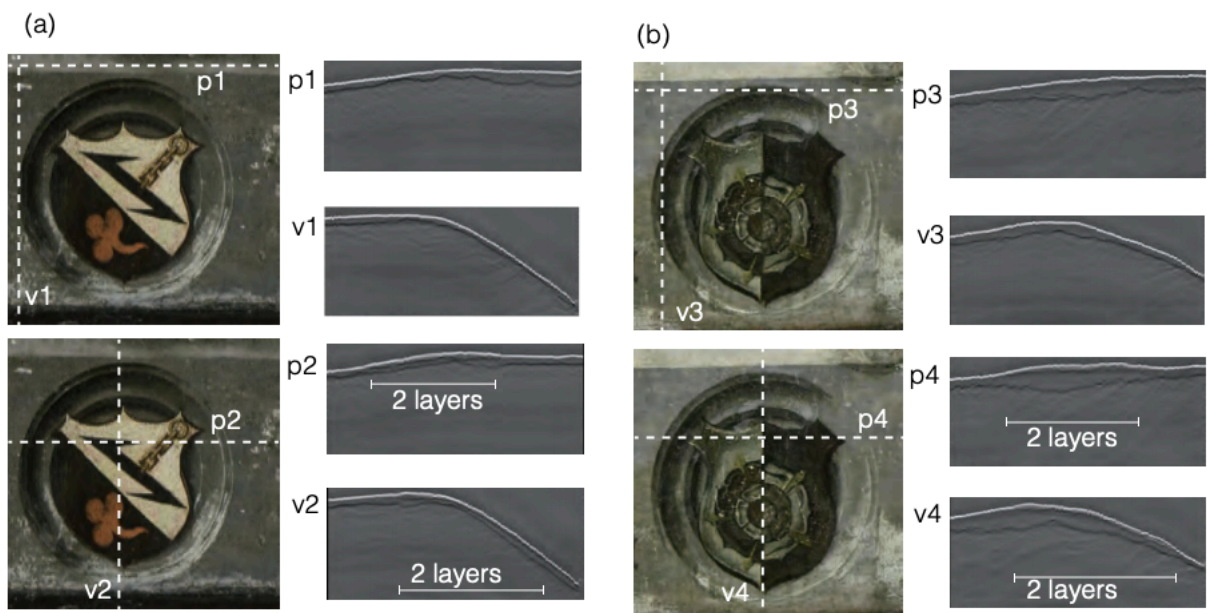


図 6 断面観察結果, (a) 紋章 A, (b) 紋章 B

図7に、紋章Aおよび紋章Bについて、表面から任意の距離の反射から得られた画像、すなわち、まるで表面から絵画をスライスしたように抽出した画像を示す。紋章Aについては表面から空気換算で約0.5mmの位置、Panel Bについては表面から空気換算で約0.7mmの位置から得られた画像の中に鮮明な幾何学模様が現れた。これらは、表面の目視できる紋章とは大きく異なっており、1960年代に撮影されたX線画像に基づいて美術史家が推定したオリジナルの紋章の推定スケッチとよく一致している(図8)。これらの意匠は紋章ができる前に、それぞれの家の違いを単純な幾何学模様を用いて示したHouse Markの可能性はあるが、詳細は美術史家による検証が必要となる。

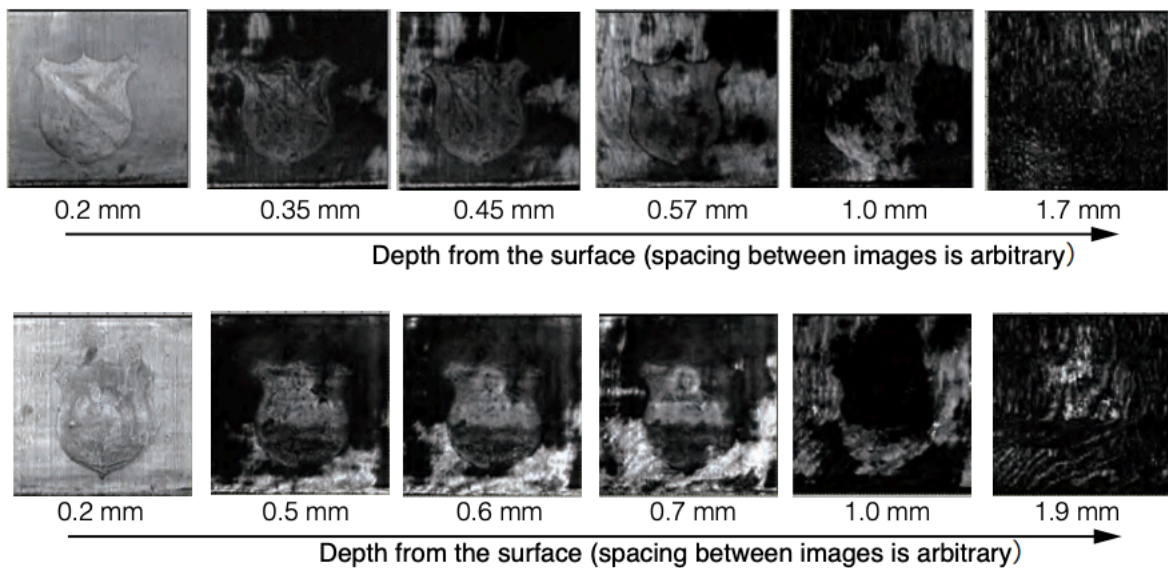


図7 表面から任意の距離からの反射による画像、(a) 紋章A、(b) 紋章B

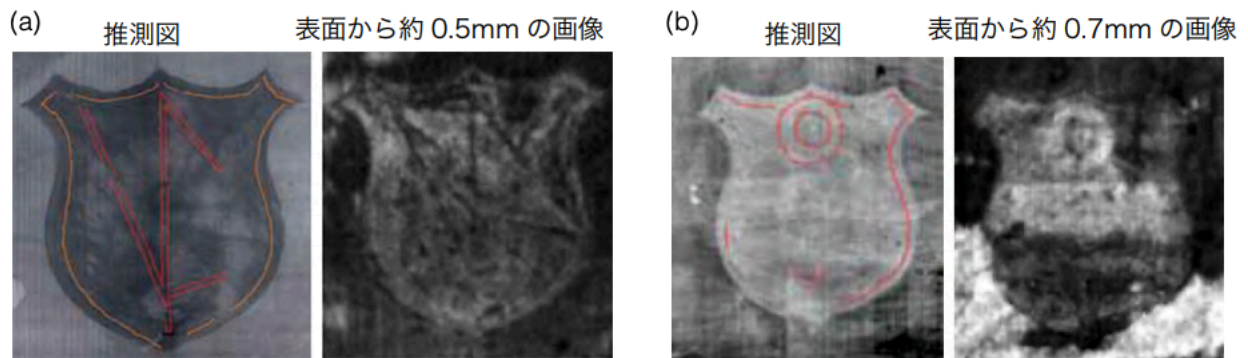


図8 美術史家による推測図(線描)と時間領域イメージング法により、内部の層から得られた画像の比較 (a) 紋章A、(b) 紋章B

以上紹介したように時間領域イメージング法を用いることにより、X線透過撮影等で予想された作品内部に存在する画像、および表面からの位置を、さらに詳細に推定できることが明らかになった。

4. おわりに

欧州の主要な工科大学や研究所では文化財調査に対して多くの研究者が、各国や欧州政府の公的予算で活動している。少しでも興味をもたれた方は Heritage Science など検索していただければ幸いです。

参考文献

- [1] D. M. Mittleman, "Twenty years of terahertz imaging", Optics Express, Vol. 26, pp. 9417-9431, 2018.
- [2] E. Abraham, K. Fukunaga, "Terahertz imaging applied to the examination of artistic objects", Studies in Conservation, Vol. 60, pp. 343-352, 2014.
- [3] K. Fukunaga, "THz Technology Applied to Cultural Heritage in Practice", Springer, 2016.
- [4] Anu Mänd, Alar Nurkse, Family Ties and the Commissioning of Art: On the Donors and Overpaintings of the Netherlandish Passion Altarpiece", Kunstiteaduslikke Uurimusi / Studies on Art and Architecture, Vol. 22, pp. 115-148, 2013.
- [5] <https://nigulistemuuseum.ekm.ee/hetkel-avatud-naitused/hetkel-avatud-naitused/kannatusaltari-konserveerimine/>
- [6] Fraunhofer Institute for Industrial Mathematics Ed. "Terahertz film thickness measurement for the self-programming painting cell", Fraunhofer Annual Report 2017/2018, pp. 96-97, 2018

VCSEL を用いた第 5 世代携帯電話通信周波数帯用 光ファイバリンクを用いたマイクロ波測定システムの開発

黒川 悟[†] 廣瀬 雅信[†] 西川 憲次[‡]

[†]産業技術総合研究所 物理計測標準研究部門 〒305-8563 茨城県つくば市梅園 1-1-1

[‡]株式会社京都セミコンダクター 〒612-8362 京都市伏見区西大手町 307 番地 21

E-mail: [†]{satoru-kurokawa, masa-hirose}@aist.go.jp, [‡]nishikawa@kyosemi.co.jp

あらまし 携帯電話や無線通信の多くは、およそ 6 GHz 以下の周波数が利用されていた。第 5 世代携帯電話通信では、日本国内では 3.7 GHz 帯、4.5 GHz 帯、28 GHz 帯が利用される予定である。そこで我々は、40 GHz 帯まで利用可能な光ファイバリンクシステムとして、光反射型 EA 変調器(EAM)とフォトダイオード(PD)を用いたシステムをすでに提案し、アンテナ測定への利用可能性を示した。しかし、40 GHz 帯まで利用可能な EAM と PD は、価格が高額なことから、安価で低消費電力な、アンテナ等マイクロ波デバイスの測定に利用可能な光ファイバリンクシステムとして、850 nm 帯のマルチモード光ファイバを用いて利用可能な VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser diode)と PD-TIA(PD with a Trans Impedance Amplifier:インピーダンス変換増幅器)を用いたシステムを検討した。検討システムは、24 GHz 程度まで、30 dB 以上のダイナミックレンジで測定可能である。

キーワード VCSEL, PD-TIA, アンテナ測定, マイクロ波測定, 光ファイバ無線, 光応用電磁界計測, マルチモード光ファイバ

Optical Fiber Link Microwave Measurement System for 5th Generation mobile network frequency band using VCSEL

Satoru KUROKAWA[†] Masanobu HIROSE[†] and Kenji NISHIKAWA[‡]

[†]National Metrology Institute of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, 1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8563 Japan

[‡] Kyoto semiconductor Co., Ltd 307-21 Nishiote-cho, Fushimi-ku, Kyoto, 612-8362 Japan

E-mail: [†]{satoru-kurokawa, masa-hirose}@aist.go.jp, [‡]nishikawa@kyosemi.co.jp

Abstract Recent mobile wireless system and wireless communication system have used up to 6 GHz. 5th mobile network will use 3.7 GHz band, 4.5 GHz band and 28 GHz band. For this reason, we have already proposed a simple optical fiber link microwave measurement system using zero biased optical reflection type electro absorptive intensity modulator with microwave amplifier and optical fiber that can measure measure microwave signal up to 40 GHz. In this paper, we newly propose a microwave measurement system using VCSEL and PD-TIA based low cost type microwave measurement system. Our proposed system can be measure the microwave signal up to 24 GHz with 30 dB dynamic range.

Keyword VCSEL, PD-TIA, antenna measurement, microwave measurement, optical fiber link, photonics applied electromagnetic measurement, multimode optical fiber.

1. はじめに

無線を利用するアプリケーションの増大、特に携帯電話通信の進展は目覚ましく、第 5 世代携帯電話通信(5G)は、2020 年のサービス開始を目指している[1]。5G では、日本国内では 3.7 GHz 帯、4.5 GHz 帯、28 GHz 帯が利用される予定で

あり、利用されるアンテナ、マイクロ波回路などのデバイス特性の測定が必要である。測定するマイクロ波の周波数が高くなればなるほど、測定に用いる同軸ケーブル内を伝送する信号の減衰が大きくなり、10 m で 20 dB 以上の減衰となる場合が一般的のため、高額なマイクロ波増幅器と組み合わせた測定が行われることが多い。そこで我々は、40 GHz 帯ま

で利用可能な光ファイバリンクシステムとして、光反射型 EA 変調器(EAM)とフォトダイオード(PD)を用いたシステムをすでに提案し、アンテナ測定への利用可能性を示した[2, 3]. しかし、40 GHz 帯まで利用可能な EAM と PD は、価格が高額なことから、安価で低消費電力な、アンテナ等マイクロ波デバイスの測定に利用可能な光ファイバリンクシステムとして、850 nm 帯のマルチモード光ファイバを用いて利用可能な VCSEL(Vertical Cavity Surface Emitting Laser diode)と PD-TIA(PD with a Trans Impedance Amplifier:インピーダンス変換増幅器)を用いたシステムを検討し、16 GHz 程度まで利用可能なシステムをすでに提案した[4]. 本報告では新たに、高周波帯の 5 G 用に利用可能なシステムの開発を目指した VCSEL と PDTIA を用いたシステムを検討したので、その概要を報告する。まずはじめに、検討したシステムの概要を報告する。次に、システムのダイナミックレンジ測定結果を示す。最後に、システムの時間安定性測定結果を示す。

2. 850nm 帯 VCSEL と PD-TIA を用いたマイクロ波受信システム

2.1 周波数特性とダイナミックレンジ

マイクロ波信号を光ファイバで伝送し、ベクトルネットワークアナライザ(VNA)やスペクトラムアナライザなどの測定器で測定可能なシステムとして、低消費電力で低コストな VCSEL を用いたシステムを検討した。マイクロ波信号を光強度変調信号に変換するデバイスとして、京都セミコンダクター社製の 850 nm 帯 VCSEL を用いた。光強度変調信号は、マルチモード光ファイバで伝送する。伝送した光強度変調信号は、インピーダンス変換プリアンプを内蔵した PD-TIA を用いてマイクロ波信号に変換し、測定機に入力する。システムの概念図を図 1 に、デバイスとそれを用いた測定装置の写真を図 2 に示す。提案システムをマイクロ波受信システムとして用いる場合の入力レベル特性をステップ減衰器を用いて測定した結果を図 3 に示し、システムのリニアリティ特性をステップ減衰器の値を 20 dB とした際の測定結果をリファレンスとして算出した結果を図 4 に示す。図中[ATT= x dB]は、設定したステップ減衰器の dB 値の場合の測定結果を示している。VCSEL への入力レベルは、ATT= 0 dB の場合に、-17 dBm(VNA 出力のデフォルト設定値)とした。ATT=20 dB を基準値として算出したリニアリティは、ATT= 0 dB の場合には、入力レベルでの飽和と考えられる結果となり、ATT= 30 dB の場合には、1 GHz-20 GHz で±0.2 dB 以下の差、1GHz - 24 GHz で±1.0 dB 以下の差となった。アンテナ利得が 25 dB 程度の標準利得ホーンアンテナ 2 本を対向して設置し、アンテナ間距離が 2 m - 5 m の場合、 $-20 \text{ dB} \leq S_{21} \leq -30 \text{ dB}$ である。図 4 に示す測定結果は、提案システムを受信システムとして用いた場合、1 - 20 GHz 以下では、±0.2 dB 以下のリニアリティ、1 - 24GHz 以下で±1.0 dB 以下のリニアリティで測定可能であることを示している。

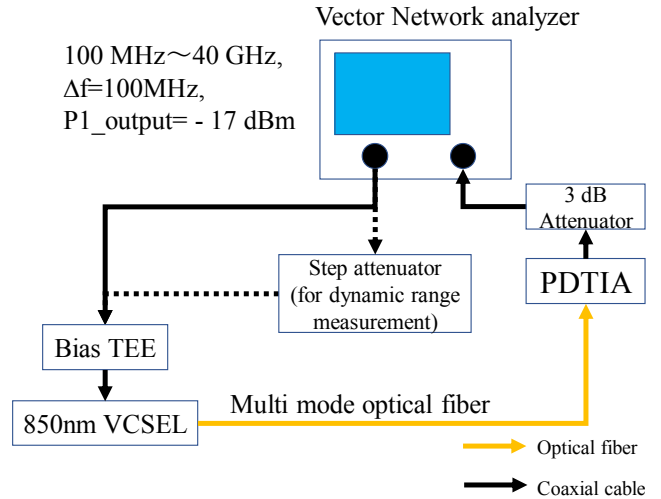


図 1 VCSEL,PDTIA を用いたマイクロ波受信システム概念図

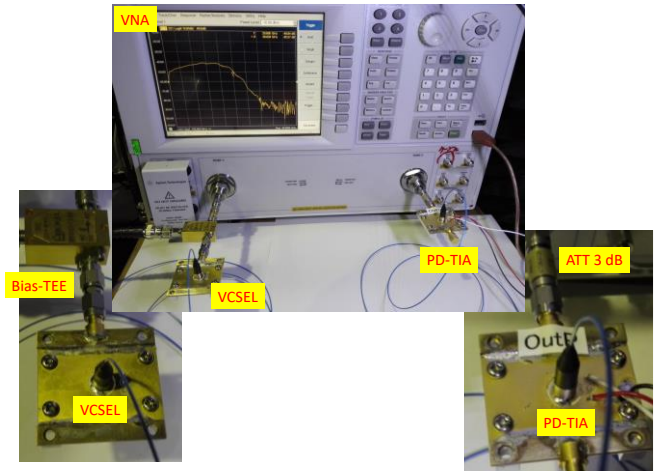


図 2 VCSEL, PD-TIA を VNA に接続した測定装置の写真

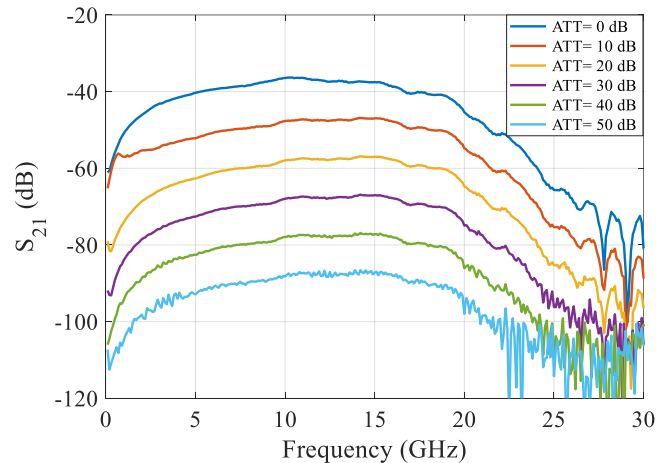


図 3 ステップ減衰器を用いた VCSEL への入力レベルによる S_{21} 周波数特性測定結果

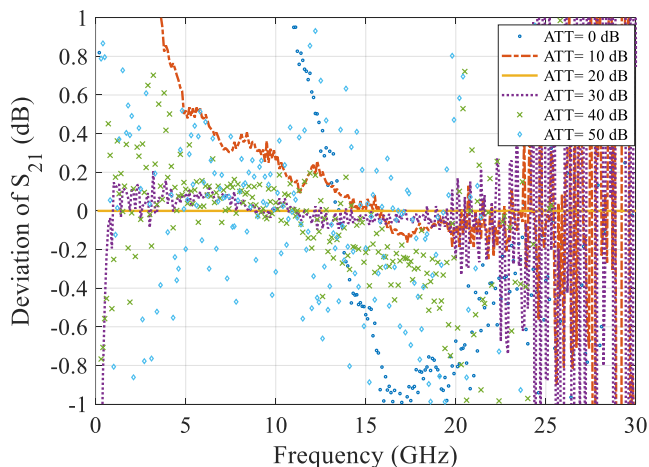


図4 VCSEL への入力レベルによるリニアリティ特性測定結果

2.2 S_{21} 周波数特性の短時間安定性

VCSEL への入力レベルによる S_{21} 周波数特性の短時間安定性の測定を実施した。測定は、VCSEL への入力レベルをステップ減衰器を用いて ATT= 10dB, 20 dB, 30 dB, 40 dB, 50 dB と変化させて各入力レベルで 5 回測定を実施し、測定結果の標準結果を算出した。 S_{21} 振幅と位相の安定性測定結果を図 5, 6 それぞれに示す。測定標準偏差は、ATT=20 dB, 30 dB の場合、1-20 GHz で測定 0.5 dB 以下、1-24 GHz で 0.9 dB 以下であった。それらの結果は、1-20 GHz では、アンテナ利得が 25 dB 程度の標準利得ホーンアンテナ 2 本を対向してアンテナ間距離が 2 m - 5 m として場合には、0.5dB 以下の標準偏差で測定が可能であることを示している。

3. 長時間安定性

VCSEL への入力レベルによる S_{21} 周波数特性の長時間安定性の測定を実施した。測定は、VCSEL への入力レベルをステップ減衰器を用いて ATT= 10dB, 20 dB, 30 dB, 40 dB, 50 dB と変化させ、800 分以上 S_{21} 振幅特性を測定した。測定結果を図 7 に示し、測定実施時の環境温度特性を図 8 に示す。測定結果は、環境温度変動が 0.5°C 程度の環境で、ATT= 40 dB 以下では、4-20 GHz で ±0.5 dB 以下の変動、ATT= 30 dB 以下では、4-20 GHz で ±0.3 dB 以下の変動となることが分かった。

測定結果は、電波暗室などの比較的温度が安定した環境で測定する場合、アンテナ利得が 25 dB 程度の標準利得ホーンアンテナ 2 本を対向してアンテナ間距離が 2 m - 5 m として場合には、±0.3 dB 以下の変動で測定が可能であることが分かった。

4. まとめ

本報告では、第 5 世代携帯電話通信で用いられる周波数帯として、4GHz 程度以上の周波数範囲で用いることを想定し、VCSEL と PD-TIA を用いた光ファイバリンクマイクロ波受信システムを検討した。システム

は、アンテナ利得が 25 dB 程度の標準利得ホーンアンテナ 2 本を対向してアンテナ間距離が 2 m - 5 m として場合、20 GHz 程度までの周波数において、システム短時間安定度の 5 回測定標準偏差、システムのリニアリティ、長時間安定度それぞれ 0.5dB 程度、±0.2 dB 程度、±0.3 dB 程度で測定可能であった。

今後、VCSEL, PD-TIA の実装基板などの見直しを行い、28GHz 程度まで利用可能なシステム開発を目指す。

文献

- [1] Leading towards Next Generation "5G" Mobile Services. Federal Communications Commission, <https://www.fcc.gov/news-events/blog/2015/08/03/leading-towards-next-generation-5g-mobile-services>.
- [2] S. Kurokawa, M. Hirose, "Microwave Receiving System for Antenna Measurement Using Optical Devices up to 40 GHz," in Proc. of EuMW2017, Oct. 2017.
- [3] S. Kurokawa, M. Hirose, "Antenna Reflection Coefficient Measurement Using Bi-Directional Optical Fiber Link Transceiver up to 40 GHz," in Proc. of EuCAP2018, April. 2018.
- [4] S. Kurokawa, M. Hirose, S. Murata, T. Mitus, "Microwave receiving system Using VCSEL Based Low Cost Photonics Applied Electromagnetic Measurement Technology," in Proc. of PIERS 2018, Aug. 2018.

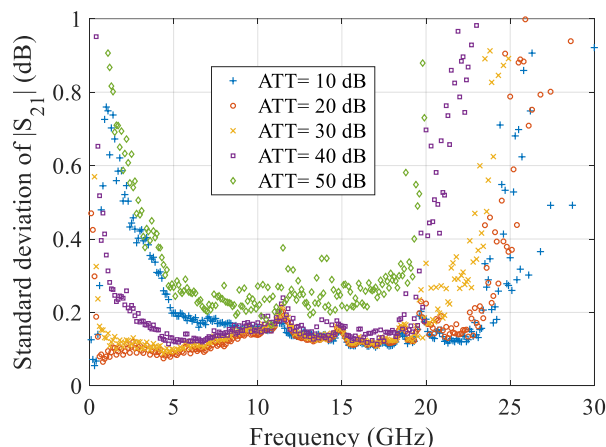


図5 S_{21} 振幅の入力レベルによる 5 回測定標準偏差

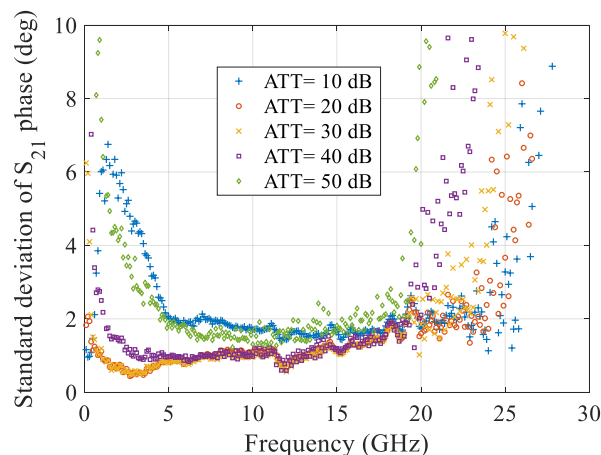
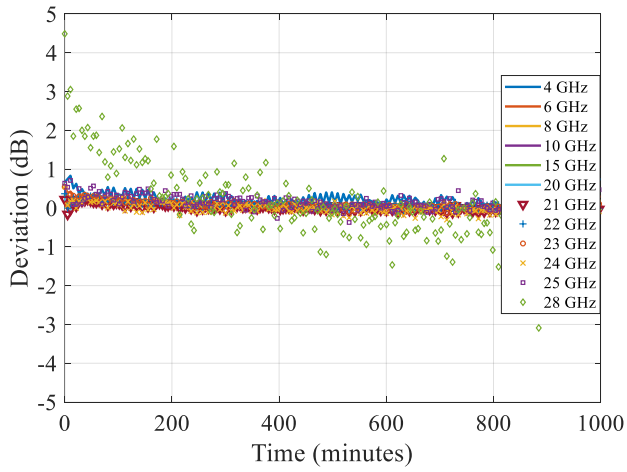
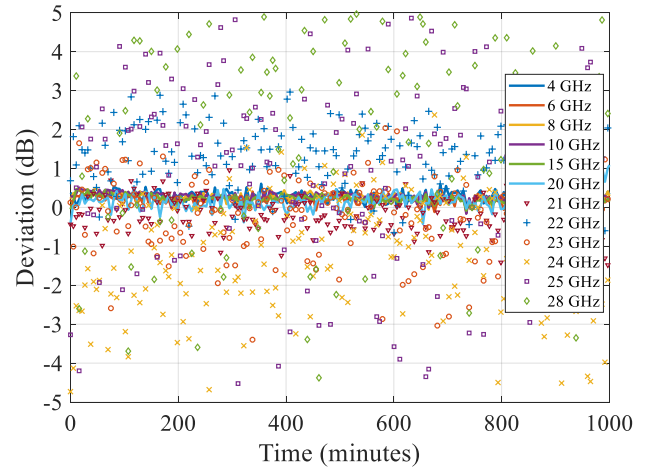


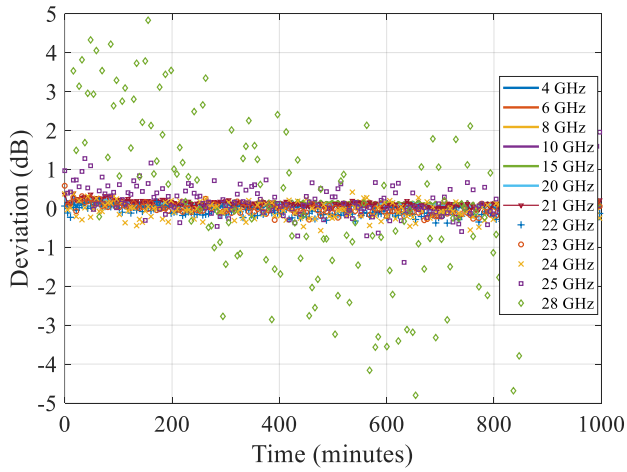
図6 S_{21} 位相の入力レベルによる 5 回測定標準偏差



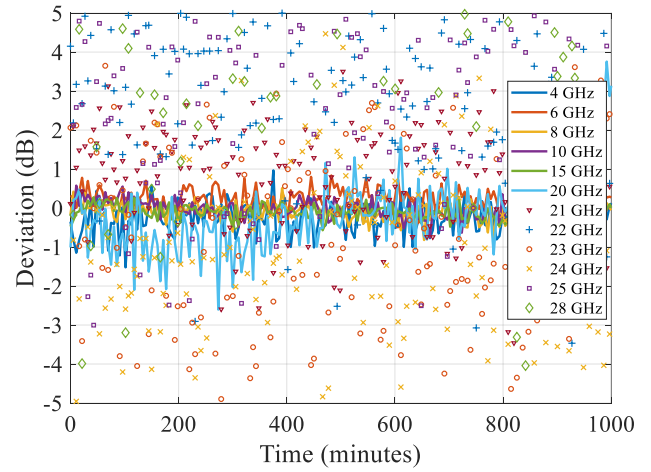
(a) ATT= 10 dB



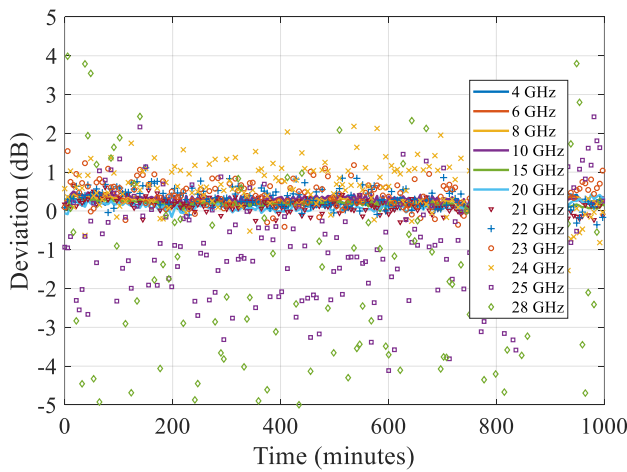
(d) ATT= 40 dB



(b) ATT= 20 dB



(e) ATT= 50 dB



(c) ATT= 30 dB

図 7 $|S_{21}|$ 時間変動測定結果 (ATT=10 dB, 20dB, 30dB, 40dB)

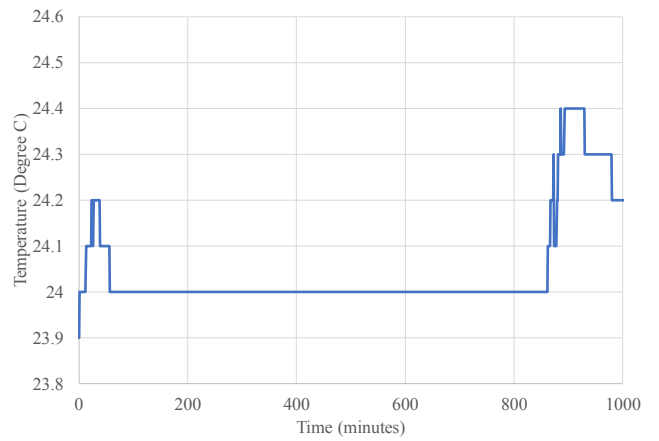


図 8 測定実施時の環境温度特性

光応用電磁界計測（PEM）特別研究専門委員会について

電子情報通信学会 光応用電磁界計測（PEM）特別研究専門委員会は、平成 24 年 4 月に発足した新しい研究専門委員会です。

PEM 研は、急速に進化・変貌を遂げつつある電磁界環境を正確に評価・計測するために、電磁界と光・物質との多彩な応答を利用した、新しい電磁界計測技術を追究することを目標としています。アンテナや電磁両立性等の電磁界計測分野と光センサ・光デバイス等の応用光学分野の専門家がコアメンバーです。対象とする電磁界は、アンテナや高周波回路だけでなく、プラズマ電磁界、宇宙到来電磁波など、人工および自然発生電磁界全般を含みます。また、それらと関連性の深い各種の現象についても議論したいと考えています。光・電磁界・マイクロ波・アンテナ等の様々な最先端研究分野を有機的かつ横断的に結びつけた新しい研究領域を開拓して、その成果を社会へ還元することを目指しています。

<委員名簿>

委員長	水野 麻弥	情報通信研究機構
副委員長	鈴木 敬久	首都大学東京
幹事（研究会運営）	久武 信太郎	岐阜大学
幹事（財務）	笹川 清隆	奈良先端科学技術大学院大学
幹事（総務）	佐々木 愛一郎	近畿大学
幹事補佐	チャカロタイ ジェドヴィスノブ	情報通信研究機構
専門委員	石井 望	新潟大学
	石山 和志	東北大学
	市川 潤一郎	住友大阪セメント株式会社
	今莊 義弘	スタック電子株式会社
	菅野 敦史	情報通信研究機構
	近藤 順悟	日本ガイシ株式会社
	齊藤 一幸	千葉大学
	佐藤 源之	東北大学
	余 元峰	産業技術総合研究所
	セツト ジイヨン	東京大学
	染野 薫	バイテックグローバルエレクトロニクス株式会社
	田上 周路	高知工科大学
	田島 公博	NTT アドバンステクノロジー株式会社
	土屋 明久	神奈川県立産業技術総合研究所
	鳥羽 良和	株式会社精工技研
	羽賀 望	群馬大学
	日景 隆	北海道大学
	平田 晃正	名古屋工業大学
	深沢 徹	三菱電機株式会社
	柳澤 幸樹	株式会社多摩川電子
顧問	大西 輝夫	株式会社 NTT ドコモ
	黒川 悟	産業技術総合研究所
	村田 博司	三重大学
	陳 強	東北大学

PEM

☆ Facebook “Pem 研究会（光で電波を測る）”

Facebook に PEM 研究会のページを作りました。
PEM 研究会の活動紹介や光応用電磁界計測の情報
発信を進める予定です。
フォロー、「いいね！」をよろしくお願いします。



☆ PEM 研究会コミュニティサイト “PEM-com”

PEM 研究会のコミュニティサイト「PEM-com」を開設しました。
このサイトは、PEM 分野の技術交流活性化のための
様々な情報発信に活用する予定です。現在、チュート
リアル記事等を公開しています。

URL : <http://pem.main.jp/>

