

令和 6 年度 防衛装備庁
安全保障技術研究推進制度

研究成果報告書

超小型ロバストテラヘルツ波 イメージング装置の研究開発

令和 7 年 5 月

国立研究開発法人理化学研究所

本報告書は、防衛装備庁の安全保障技術研究推進制度による委託業務として、国立研究開発法人理化学研究所が令和2年度から令和6年度にかけて実施した「超小型ロボステラヘルツ波イメージング装置の研究開発」の成果を取りまとめたものです。

1. 委託業務の目的

本研究では、ロボット搭載可能なテラヘルツ波イメージングの達成を最終目的とし、5年間の業務においてバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振を基軸とした、超小型非線形光学テラヘルツ波光源、テラヘルツ波・アップコンバージョン検出、テラヘルツ波・イメージング計測、テラヘルツ波用周期分極反転非線形光学結晶、ロボット搭載に関する研究を実施し、最終的には試作した超小型ロボストテラヘルツ装置をロボット等に搭載した実証機の仮作を行うことで、ロボット搭載テラヘルツ波イメージングに関する知見を得ることを目指す。

なお、本研究での具体的な目標性能は以下の通りである。

(1) 超小型非線形光学テラヘルツ波光源

- ・テラヘルツ波パルス光源 ピーク出力：100 W以上
- ・低閾値バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振：1 GW/cm²以下
- ・連続周波数可変性：0.3～0.8 THz
- ・サイズ：励起光発生部とテラヘルツ発生部併せて両手のひら程度（20 cm平方程度）
- ・開発されたテラヘルツ波装置を用いたロボット搭載の実証

(2) テラヘルツ波・アップコンバージョン検出

- ・テラヘルツ波検出エネルギー：1 pJ /pulse以下
- ・検出可能周波数範囲：0.3～0.8 THz
- ・パルス応答時間：500 ps以下

(3) テラヘルツ波イメージング計測

- ・深さ分解能：500 μm以下

(4) テラヘルツ波用周期分極反転非線形光学結晶

- ・結晶の長さおよび幅：50 mm × 50 mm
- ・結晶の厚み：5 mm
- ・周期分極反転の周期長さ：35 μm

2. 研究開始時に設定した研究目標の達成度

(1) 超小型非線形光学テラヘルツ波光源

- ・テラヘルツ波パルス光源 ピーク出力100 W以上の目標に対して、**約200 W**を達成した。
- ・低閾値バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振1 GW/cm²以下に対して、**0.8 GW/cm²**を達成した。
- ・連続周波数可変性0.3～0.8 THzに対して、周波数範囲**0.245～1.008 THz (可変幅763 GHz)**をモードホップフリーで達成した。
- ・テラヘルツ波光源のサイズとして、励起光発生部とテラヘルツ発生部併せて両手のひら程度(20 cm平方程度)を目標にして、より小さい**約14 cm×5.5 cm**のフットプリントサイズに納めることに成功した。
- ・開発されたテラヘルツ波装置を用いて**ロボット搭載**を実証した。

(2) テラヘルツ波・アップコンバージョン検出

- ・テラヘルツ波検出エネルギー1 pJ/pulse以下を目標にして、極めて高感度な**約50 aJ/pulse**と5桁程度さらに向上させた。
- ・検出可能周波数範囲0.3～0.8 THzを目標にして、**同範囲のアップコンバージョン検出**に成功した。
- ・パルス応答時間500 ps以下に対して、**パルス幅273 ps**のアップコンバージョン信号光が得られた。

(3) テラヘルツ波イメージング計測

- ・深さ分解能500 μm以下を目標にして、**CT方式で奥行き分解能 300 μm、段差計測での奥行き分解能 20 μmの超高分解能**が得られた。

(4) テラヘルツ波用周期分極反転非線形光学結晶

- ・結晶の長さおよび幅50 mm×50 mm、結晶の厚み5 mm、周期分極反転の周期長さ35 μmの巨大分極反転ニオブ酸リチウム結晶の製作に目標どおり成功した。

3. 委託業務における研究の方法及び成果

① 超小型非線形テラヘルツ波光源の基礎検討（担当：理化学研究所）

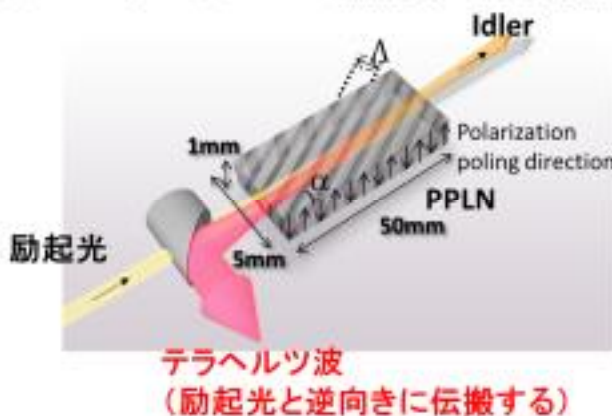
● バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の原理の検討

図1-1にバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の光学配置の概略図を示す。近赤外レーザー光（励起光）を周期分極反転ニオブ酸リチウム（PPLN）結晶に入射すると、励起光の伝搬方向と同じで、かつ励起光の光軸とは1°以下の角度をもった光軸上にアイドラー近赤外光（励起光より若干長波長）と、励起光の伝搬方向とは逆方向にテラヘルツ波が発生する。この光学配置は、非線形光学波長変換において、バックワード・光パラメトリック・ダウンコンバージョンの構成となっている。バックワード・光パラメトリック・ダウンコンバージョンは、1966年にS.E.Harrisが理論提案した原理であるが、テラヘルツ波発生を伴うフォノンポラリトンを利用した実施例は、我々が初めてである。

特に、我々が発見したバックワード・光パラメトリック波長変換は、斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶（以下、周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶と略す。）を用いた際に、図1-1（右）に示すような特殊な位相整合条件（運動量保存則）とエネルギー保存則を満たす。図中には、各運動量ベクトルを励起光ベクトル k_{pump} 、アイドラー光ベクトル k_{idler} 、テラヘルツ波ベクトル k_{THz} 、格子ベクトル k_A と示している。テラヘルツ波とアイドラー光は、励起光に対して1°以下の角度を持ったノンコリニア位相整合条件となる。一方で、仮想の励起光ベクトル k'_{pump} （励起光ベクトルと格子ベクトルの合成）を定義すると、仮想の励起光はテラヘルツ波およびアイドラー光とコリニア位相整合条件を満たす。バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振が効率よく発生するのは、結晶内部での3光波の空間的な重なりが非常に大きいためである。結果として、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振は大きな相互作用体積のもとで高い光パラメトリック利得を受ける。また、励起光とは逆向きに伝搬するテラヘルツ波は、デプリッション前（変換前）の励起光と相互作用するため、高い光パラメトリック増幅を受けることができ有利である。さらに、テラヘルツ波とアイドラー光が励起光へバックコンバージョン（逆変換）することによるテラヘルツ波光子の減少も少ない。これらの特長は、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振が本質的に高出力テラヘルツ波発生可能であることを示唆しており、高い潜在能力があると分かった。

一方、フォワード方向にもテラヘルツ波が発生する過程が内在している。これは仮想励起光ベクトルが励起光ベクトルと格子ベクトルの和によって生成する過程で、テラヘルツ波が励起光伝搬方向と同じフォワードに発生する。励起光、アイドラー光、テラヘルツ波のエネルギー保存則は、この過程においても満たされるため、実在する非線形波長変換過程である。なお、フォワード・テラヘルツ波の周波数は、バックワード発振のものより高周波数であり約1THzとなる。とこ

バックワード・テラヘルツ波光源の光学配置図



位相整合条件

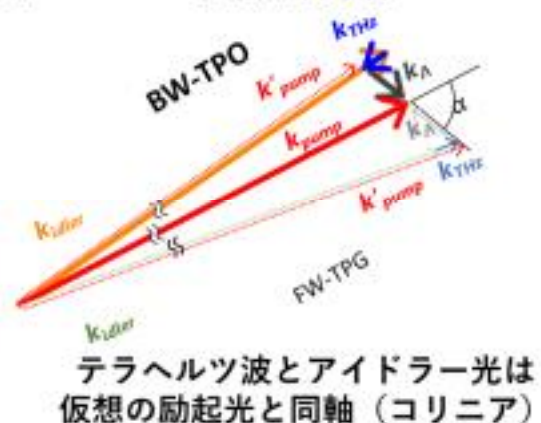


図 1-1. バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の光学配置と位相整合条件。

ろで、仮想励起光の光子エネルギーは、入射励起光の光子エネルギーより大きくなるため発振閾値が高くなる。このため、基本の非線形波長変換過程がバックワードとなり、次の変換過程がフォワードの関係になる。

一つの非線形波長変換素子で、2つのテラヘルツ波周波数を発生できることは有利である側面をもつが、本研究ではバックワード発振を利用したいため、選択的に発振できるように研究を行う必要があり、これに関しては後述に報告する。

● 結晶冷却による位相整合条件への影響の検討（研究内容①、④共通）

ニオブ酸リチウム結晶を用いたテラヘルツ波発生は、横光学フォノンモードと励起光電磁場の混成場であるフォノンポラリトンを介した誘導ラマン散乱現象を利用している。横光学フォノンモードの A_1 最低次モードは 7.5 THz (248 cm^{-1}) にあり、本研究の周波数領域はフォノンモードの中心周波数から遠く離れているものの、フォノンのダンピングストレングスは大きく、スペクトルの裾野においても吸収の影響は無視できない。吸収を抑制する方法はいくつ考えられるが、本質的に結晶のフォノンダンピングの周波数広がりを見窄化し、テラヘルツ波周波数帯の吸収係数を抑制することが効果的である。そのため、本研究では結晶の冷却について考える。

結晶冷却によるバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の波長変換条件への影響は、光学特性の変化による影響を検討する必要がある。そこで、光波とテラヘルツ波の屈折率の温度変化を考慮した位相整合条件を試算し、冷却による影響を検討した。なお、本項は研究内容④のテラヘルツ波検出の基礎検討にも共通する内容である。また、エネルギー保存則は常に満たすものとして考え、下記には特段必要な状況でない限りは位相整合条件のみを検討し取り扱う。

図1-2に結晶温度に対するテラヘルツ波周波数および励起光とテラヘルツ波の伝搬方向のなす角度の結果を示す。屈折率温度依存性は先行研究論文の報告から引用し、斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶(分極反転周期 $53\text{ }\mu\text{m}$ 、斜周期角度 67°)による位相整合条件の計算を行った。計算の温度範囲は室温から液体窒素温度以下までの $300\text{ K}\sim 50\text{ K}$ の範囲で計算を行った。計算の結果、この温度範囲においてはバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の位相整合条件が満たされることを確認した。テラヘルツ波発振周波数は温度によってわずかに変化するものの、室温付近の変化を線形近似した結果、変化量は約 70 MHz/K と極めて小さいとわかった。この変化量はテラヘルツ波発振周波数に対して約4桁小さく、温度変動に極めて安定な光源であるとわかった。

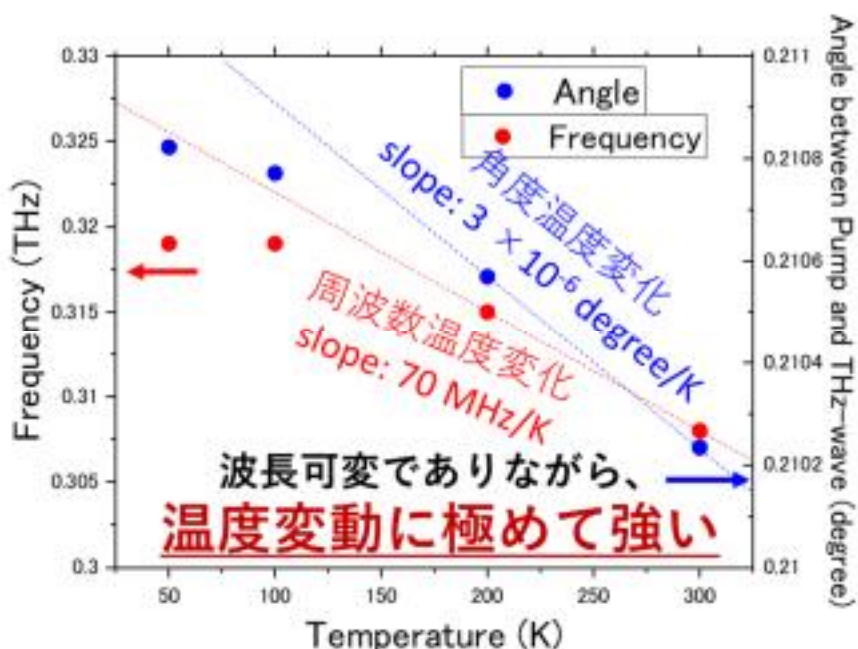


図 1-2. バックワード発振周波数の結晶温度依存性。

また、励起光とテラヘルツ波のなす角度の変化量も同様に約 $3 \times 10^{-6} \text{ deg/K}$ と極めて小さく、テラヘルツ波および光波のガウシアン広がりに対して十分小さいとわかった。この結果は、波長可変光源でありながら温度変動に対して極めて安定であることを示しており、例えば非破壊検査を実施する現場環境温度が変化してもテラヘルツ波計測への影響がほとんどないことが確認できた。

位相整合条件に関しては、冷却によっても条件を満たすことが導かれ、次に冷却によるテラヘルツ波吸収係数の低下について検討した。図1-3に結晶冷却によるテラヘルツ波吸収係数の変化について示す。吸収係数の温度変化は先行研究の報告を引用した。結果としてテラヘルツ波吸収係数は温度低下に従ってほぼ線形に低下することがわかり、温度変化量は約 $7.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}/\text{K}$ であった。例えば、液体窒素温度まで冷却するとテラヘルツ波吸収係数は半分以下に抑えることができ、吸収係数は電磁波伝搬の指数部にあたる係数のためテラヘルツ波出力向上が期待できる。一例として励起光と逆向きに伝搬するテラヘルツ波が結晶長10 mmを通過して出力されるとき、300 Kから50 Kへ冷却すると、結晶出力端面に到達するテラヘルツ波は3.7%から27%と約7倍向上する。また実際には、単純な吸収の低下だけではなく、励起光との相互作用によって光パラメトリック増幅効果を受けるため、テラヘルツ波がより強く増強される。このため、計算結果以上の高出力化が期待される。

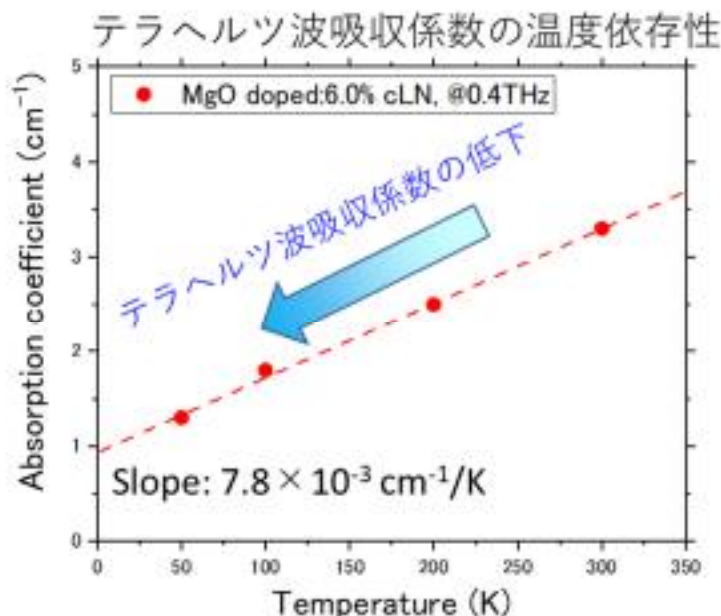


図 1-3. ニオブ酸リチウム結晶におけるテラヘルツ波吸収係数の温度依存性。

● 光注入による低閾値化の検討

バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振では、フォノンポラリトンを介した誘導ラマン散乱が種光の起源である。この種光をもとに光パラメトリック発振の非線形波長変換過程によって励起光からテラヘルツ波とアイドラー光が強く発生するが、テラヘルツ波の伝搬が双対のアイドラー光とは逆方向になるため、互いは空間的に分離される。このため、励起光が周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶に入射した直後の初期変換過程では、発生タイミングが不安定となることが予想される。そこで、過去の研究実績による知見を利用すると、光注入効果によって初期過程に十分な光子を与えることによって安定化させることが可能である。また同時に、発振閾値を低下させることが期待できるため、光注入効果に関して過去の予備実験結果をもとに理論検討を行った。

まず、図1-4 (a) に高強度励起光を与えた条件下で、光注入を行わない場合の模式図を示す。周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶では励起光が入射されると、基本の非線形波長変換過程であるバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振が起きる。励起光強度を高めると、より強い変

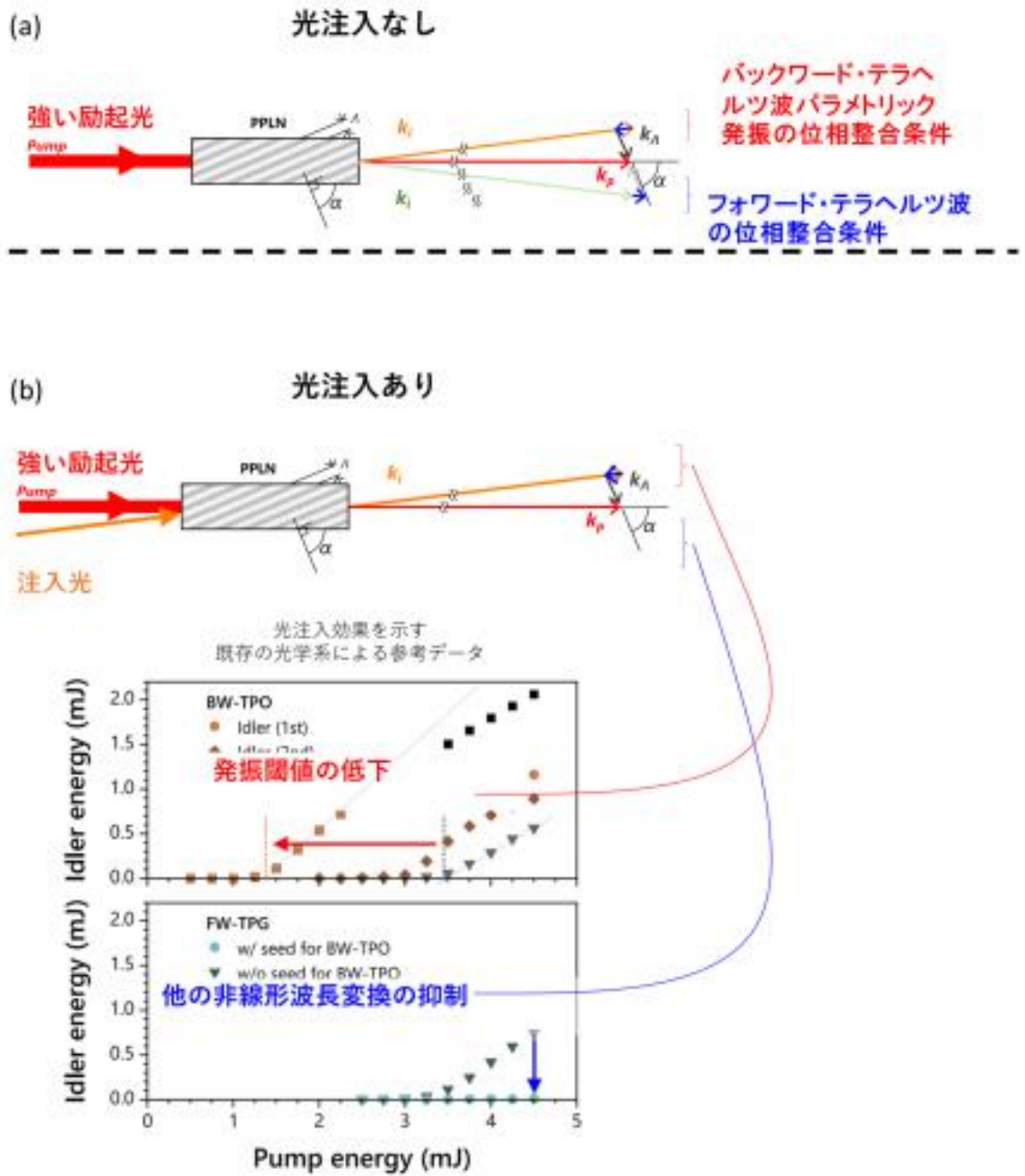


図 1-4. (a)光注入を行わない場合の模式図、(b)光注入を行った場合の模式図と予備実験結果。

換が起きる一方で、次の変換過程の閾値を超えるため、フォワード・テラヘルツ波が発生し始める。これは高強度励起条件下においてバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の出力スロープ効率を低下させる原因となる。そこで、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振とフォワード・テラヘルツ波発生それぞれの位相整合条件を比較し、光注入によるフォワード・テラヘルツ波発生の抑制が可能かどうか検討した。

位相整合条件の計算は斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶(分極反転周期 $53\ \mu\text{m}$ 、斜周期角度 67°)、励起光波長は $1064\ \text{nm}$ を用いて行った。計算結果から、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振のアイドラー光波長、アイドラー光と励起光のなす角度、はそれぞれ $1065\ \text{nm}$ 、 -0.5° であった。一方で、フォワード・テラヘルツ波発生ではそれぞれ $1067\ \text{nm}$ 、 $+0.5^\circ$ であった。角度の正負は図中の斜周期角度 α を正とした。計算の結果、フォワード・テラヘルツ波発生のアイドラー光はバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振のアイドラー光と波長が異なっていることを確認した。また、発生角度も約 1° と大きく異なることから、波長と入射角度を区別することが

可能であり、光学的に光注入が可能であるとわかった。

この予想をもとに、図1-4 (b) に光注入を行った場合の模式図と予備実験結果を示す。予備実験では光注入光源として波長可変半導体レーザーの出力を用いた。注入光の波長はアイドラー光の波長に合わせ、注入光は光ファイバー増幅器で増幅した後、周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶に入射させた。このときアイドラー光の位相整合条件を満たすように角度を調整し入射させた。実験ではアイドラー光の入出力特性について、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振とフォワード・テラヘルツ波発生でそれぞれ測定した。光注入による低閾値化の効果を試算するため、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振のアイドラー光入出力特性に対して線形近似し、発振閾値を調べた。結果として、光注入によって約1/3と大幅に低下させることができた。また、フォワード・テラヘルツ波発生のアイドラー光エネルギーは光注入によって約2桁低下した。これは、光注入によって光パラメトリック利得がバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振へ集中した結果と考えられる。予備実験結果から光注入による低閾値化および利得集中の効果が確認でき、光注入の有効性が確かめられた。

● カスケード過程実現可能性について位相整合条件の計算（研究内容①、④共通）

非線形波長変換では、理論的にマンリー・ロー関係から単一励起光からテラヘルツ光子とアイドラー光子それぞれ一光子ずつしか発生しないため変換効率に上限がある。一つの変換過程を連続的な多段の過程に拡大することができれば、一回の変換で多数のテラヘルツ波光子を取り出せるため有効である。これを満たす方法がカスケード過程であり、省電力や小型化につながる技術原理である。ただし、カスケード波長変換は、人工的に設計するなどによる特殊な条件下において実現するため、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック変換においても実現可能であるか検討する必要がある。

図1-5にバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振におけるカスケード過程の概念図を示す。カスケード波長変換では、励起光によって発生したアイドラー光が次段での励起光として利用され、新たなアイドラー光とテラヘルツ波を発生する。これを繰り返すことで、実効的に励起光子一個から複数のテラヘルツ波光子が発生させることが可能になり、量子変換効率が向上する。このカスケード過程で検討すべきことは、各段においてアイドラー光の波長は異なることである。変換が進むと長波長化するが、それぞれでの過程で変換条件を満たすことが必要条件であるため、連鎖的に起こる波長変換の位相整合条件について理論検討した。

計算は、0.3 THz波発生用の周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶の設計値（周期53 μm , 角度67°）を用いて行った。まず初段の変換として、励起光波長はNd:YAGレーザーの発振波長である約1064 nmとし、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の位相整合条件の計算を行った。次に、得られたアイドラー光の波長と角度を用いて、次段の条件を計算し、これを繰り返して条件を求めた。

図1-6 (左) は、各カスケード過程におけるテラヘルツ波周波数とアイドラー光（ストークス光）波長を示す。横軸がカスケード波長変換の次数を示している。結果からバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振において、カスケード過程の条件が存在することが分かった。ここでは5次までの計算結果を示している。計算上ではさらなる高次カスケード波長変換も位相整合条件を満たす。テラヘルツ波発振周波数は、次数が増えるごとにわずかな周波数変化（約6 GHz）を伴って低い周波数にシフトすることがわかった。この周波数シフトは中心周波数に対して約2%程度と小さく、意外な効果を発揮することが理解された。つまり、テラヘルツ波周波数シフトが小さいため、最初に発生したテラヘルツ波が次段で発生するテラヘルツ波の発生を誘発する利得引き込み効果（光注入効果）を潜在的に有する可能性がある。

そこで、この新たな光注入効果について追加検討するために周波数線幅を考慮したテラヘルツ波スペクトル強度分布を試算した。図1-6 (右) に3次までのカスケード過程で発生するテラヘルツ波スペクトル計算の結果を示す。横軸はテラヘルツ波周波数、縦軸はテラヘルツ波スペクトル強度を示す。各テラヘルツ波の周波数線幅はガウシアン波形を想定し、周波数線半値全幅を約6 GHzとした。結果よりカスケード波長変換における中心周波数シフトと周波数線幅がほぼ等しいため、カスケード過程で発生した各テラヘルツ波スペクトルは互いに一部重なることが分かった。

量子カスケード波長変換による高効率テラヘルツ波発生 の概念図

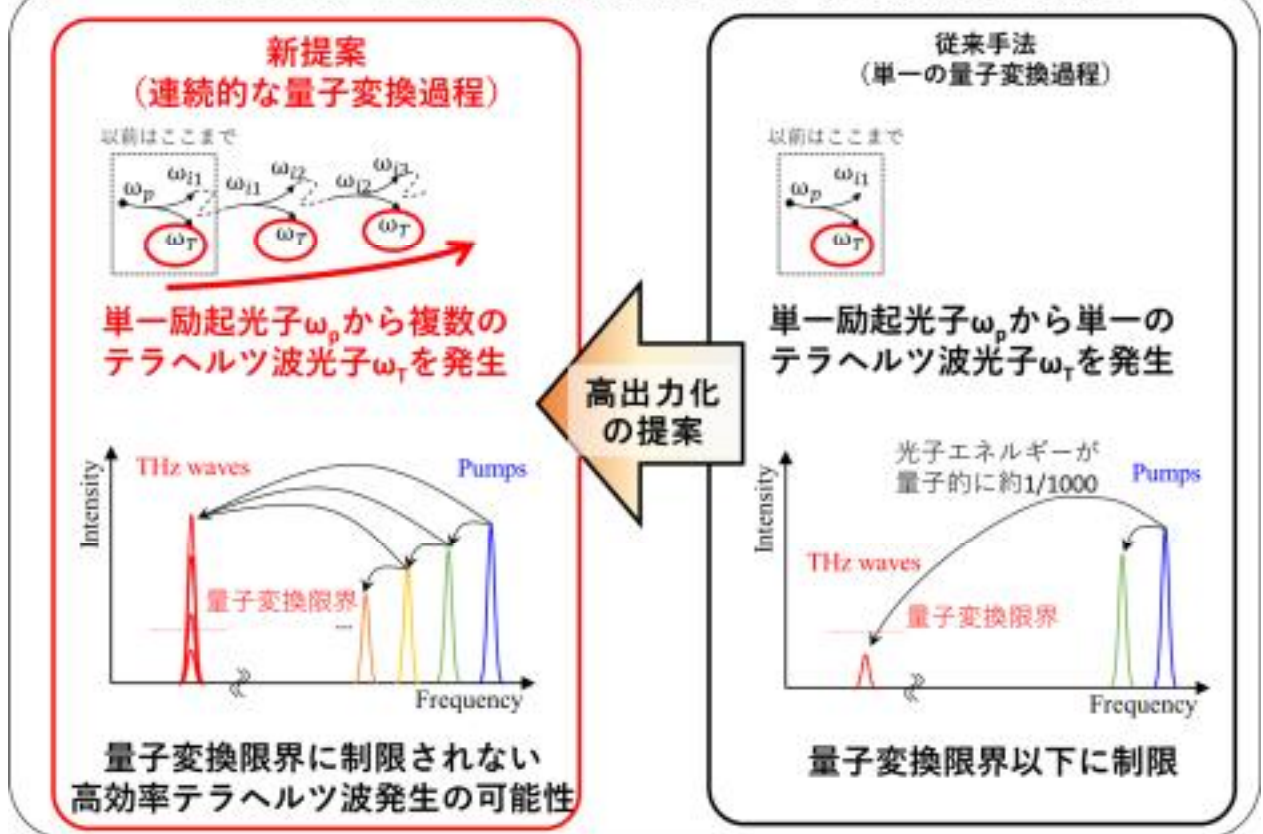


図 1-5. 量子カスケード波長変換による高効率テラヘルツ波発生 の概念図。

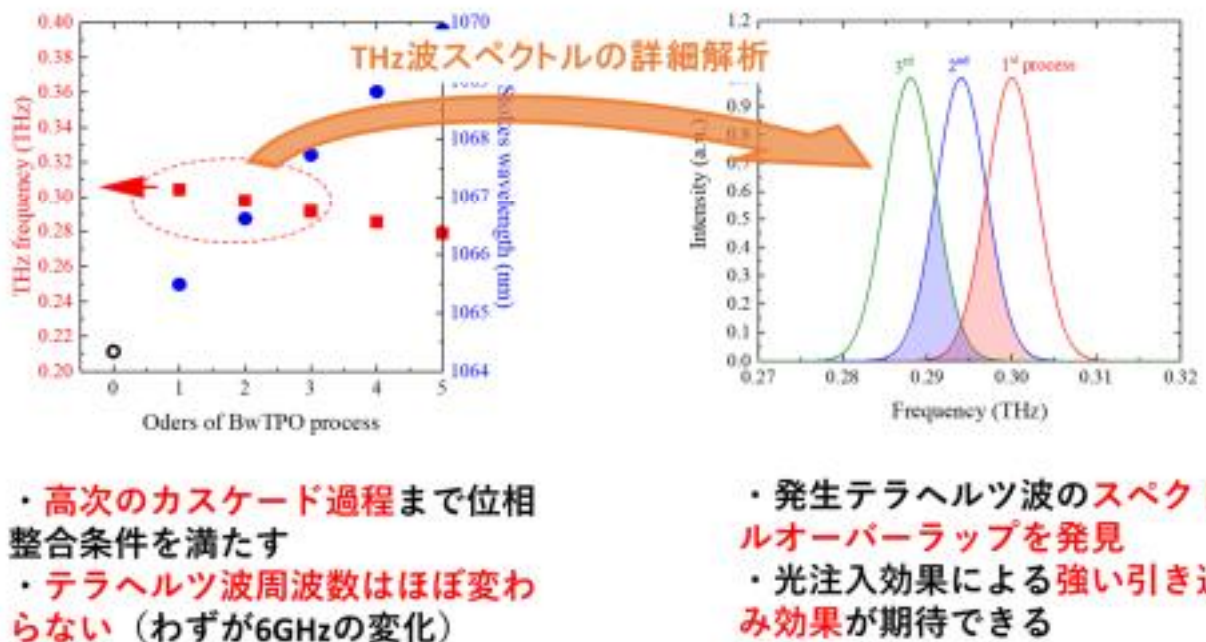


図 1-6. (左) 各カスケード過程におけるテラヘルツ波周波数とアイドラー光波長の計算結果と、(右) 各過程の発振テラヘルツ波スペクトルの計算結果。

これは発生したテラヘルツ波による自発的な光注入効果がカスケード波長変換では発生することを示唆しており、光注入と同様の理由で、ここではテラヘルツ波が注入光となり発振閾値の低下

や他の波長変換抑制効果が得られると分かった。

一方、カスケード過程が進むと、ノンコリニア位相整合条件によって伝搬方向が若干シフトすることも分かったため、空間的な分離の影響について検討を行った。計算の結果、励起光とテラヘルツ波のなす角度は結晶内で約 0.5° であり、結晶の物理長 50 mm を伝搬した後の空間的な分離距離は約 0.5 mm であることが分かった。これは周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶内で変換に十分な相互作用体積が得られることを示唆しており、実際にカスケード波長変換が起きることが期待できる。

● 励起光源の仕様設計

仕様を検討する上で必要な励起光の要素としては、パルス幅、尖頭出力（エネルギー）、波長（波長幅）が挙げられる。この中でまず、発生効率に大きく寄与する重要な要素として励起光パルス幅の設定を行った。

励起光パルスがニオブ酸リチウム結晶に入射すると緩和時間の短い誘導ラマン散乱が起きる。その後、より緩和時間の長い音響フォノンによるブリルアン散乱利得が 1 ns 程度の時間だけ遅れて立ち上がり始める。テラヘルツ波発生に寄与する誘導ラマン散乱利得と比較して誘導ブリルアン散乱利得は約3桁大きく、 1 ns 以降はテラヘルツ波発生効率が大きく低下する。このため、高効率テラヘルツ波発生には誘導ブリルアン散乱の影響を抑制することが重要である。具体的には、励起光パルス時間をサブナノ秒程度に短くすることでタイミングを外すことができ、誘導ブリルアン散乱が起きる前にテラヘルツ波変換ができる。一方で、パルス幅が短すぎると、空間的な相互作用体積の低下や波長線幅広がりによってバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の効率が低下すると考えられる。そこで、パルス幅 $0.5\sim 1.0\text{ ns}$ 程度のパルス励起光を利用することとした。

次に、励起光源の尖頭出力（パルスエネルギー）およびビームサイズについて検討した。特に、ニオブ酸リチウム結晶の光損傷閾値は約 5 GW/cm^2 であるため、励起光パルス幅、パルスエネルギー、ビームサイズを用いて実験条件を試算した。結果を図1-7に示す。周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶の厚みを 1 mm として考え、パルス幅 1 ns 、励起光ビームサイズ $0.5\text{ mm}\phi$ と典型的な実験条件に設定すると、パルスエネルギー約 10 mJ で励起光強度 5 GW/cm^2 に達することが分かった。また、パルス幅を 0.5 ns にした場合、より小さいパルスエネルギー約 5 mJ で同様の励起光条件に達すると分かった。これらの検討結果から、例えばマイクロチップNd:YAGレーザーを用いれば、サブナノ秒パルスと高い尖頭出力を同時に得ることができ、具体的な実験を実施することが可能である。

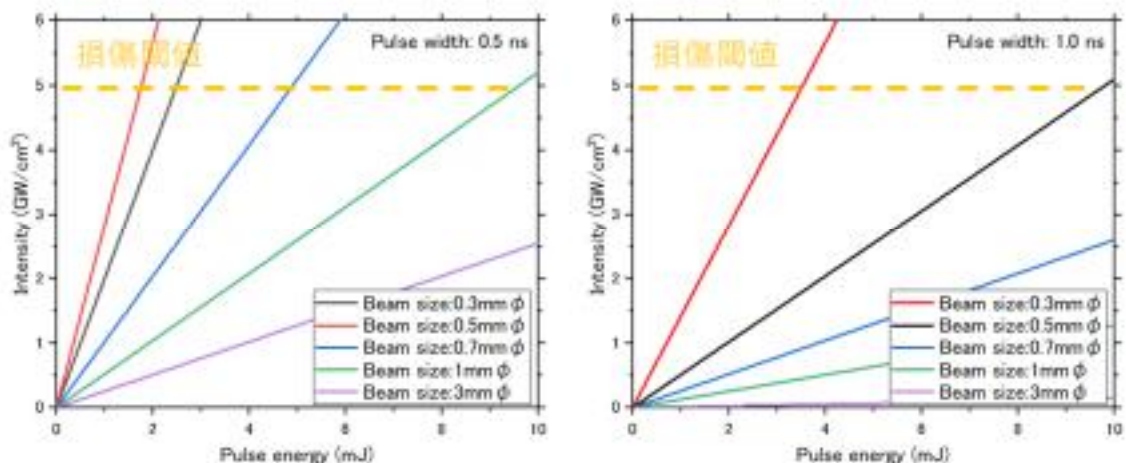


図 1-7. ビームサイズをパラメータとした励起光のエネルギーとパワー密度の関係。

● 広帯域周波数可変性の光学条件の検討

バックワード・テラヘルツ発振の周波数を変える方法は、温度同調あるいは角度同調による方法が考えられる。このうち、上記の検討でテラヘルツ波周波数の変化は温度変化に対して極めて小さいことが分かったため、角度同調による光学条件の検討を行うこととした。また、角度同調の方法には大きく分けて、励起光の光軸を変える方法と結晶自体を回転させる方法の二つが考えられる。励起光の光軸の変更には、ガルバノスキャナミラー、MEMSミラー、ビームスキャナーなどいくつか考えられるが、どの場合も角度変化を大きくとる場合には光学系が大型化する。そこで、結晶を回転する角度同調による光学条件の検討を進めることとした。

図1-8にテラヘルツ波周波数の可変性に関する説明図を示す。計算結果から結晶角度を 0° から 90° まで連続的に変化させることで、検討の条件では原理上0 THzから0.8 THzまでの可変範囲が達成できると分かった。ただし、実際には利得幅がこの計算結果に付加されるため範囲が限定されるが、少なくとも格子ベクトルと励起光ベクトルのなす角が有効に働く範囲では、目標範囲は実現可能である。また、周波数の可変範囲は結晶開口サイズによって物理光学的に決定されるため、結晶の形状を検討する必要がある。このため、図1-8の(a)~(c)の3種類の形状に関して検討を行った。図1-8 (a)は比較的容易に準備できる矩形形状である。この場合、結晶の入射面は回転によって大きく傾くため、回転させると有限の入射面の開口では、励起光は出射面に届くまでに結晶内で側面に当たってしまう。準備できる結晶など具体的な検討をすれば、周波数可変幅は約100 GHz程度であると試算された。次に図1-8 (b)のような多角形状の結晶を用いれば、一つの入射面では上述のように100 GHz程度の連続周波数可変に留まるが、別の入射面を使うことでステップ的に幾つかの周波数を選択できる。不等間隔サンプリング方式などに利用できる方法として有効と考える。さらに図1-8 (c)のように円形状にすれば、シームレスに全体帯域の周波数可変性が得られる。ただし、この場合は(a)や(b)とは異なり、カーブした入射面を持つためにレンズ効果があり、円形結晶専用の光学系を設定する。

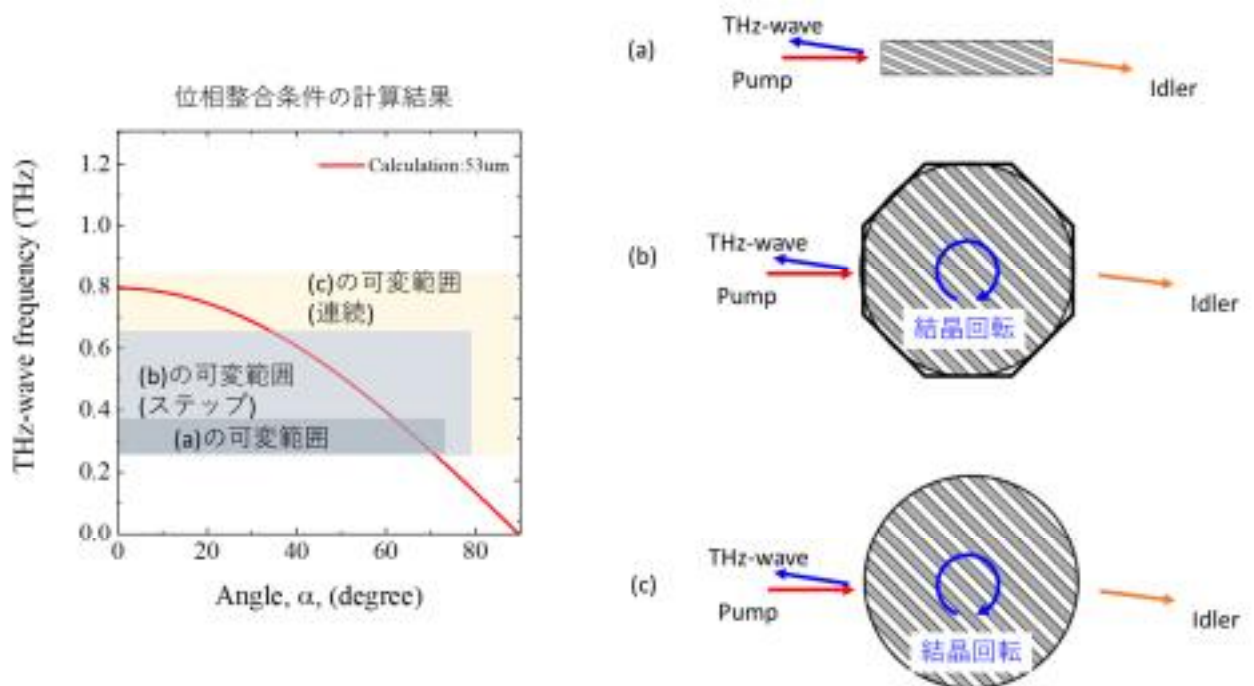


図 1-8. 広帯域波長可変性に対応する各種結晶形状の検討。

- 非線形光学材料の差異の検討（研究内容①、④共通）

最後に非線形光学結晶材料の差異について検討する。検討には性能指数(FOM)を評価して行う。性能指数は表1中の式を用い、各種パラメータとして二次の非線形係数、および光学係数として屈折率、吸収係数、3光波の波長を用いて計算する。式中のGは損失を無視した光パラメトリック利得係数、 α_T はテラヘルツ波吸収係数、 d_{eff} は実効非線形係数、 λ および n は波長および屈折率である。光波帯の計算に用いる各種結晶の物性値を表1に記載する。励起光の波長を1064 nm、テラヘルツ波波長を1 mm(0.3 THz)およびアイドラー光の波長を1065 nmと固定して、実際に性能指数を計算した。

表中にはFOMを記載しているが、熔融一致組成の無添加ニオブ酸リチウム結晶（CLN）の性能指数を1として比較したFOM relativeで説明する。結果として、マグネシウム添加ニオブ酸リチウム結晶で熔融一致結晶（MgO:CLN）と定比組成結晶（MgO:SLN）の性能指数を求めると、それぞれFOMrelative=1.22と1.28で両者はほぼ同等であることが分かった。これはすべての定数はほぼ両者で一致していることによるものである。実際に、両者の違いは1 THz以上の周波数領域ではフォノン振動モードの程度が違ふことから差異が生じるが、注目している低周波では差異が小さいことによる結果である。一方で、無添加タンタル酸リチウム結晶（CLT）を用いた場合でもバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の波長変換条件を満たすことが分かった。しかし、性能指数を計算するとFOM relative=0.639となり、MgO:CLNの性能指数と比べて約1/2となった。この結果はタンタル酸リチウム結晶の横光学フォノンモードが、マグネシウム添加ニオブ酸リチウム結晶より低周波数側にあるため、テラヘルツ波吸収係数および屈折率が相対的に大きいためと考えている。結果として、性能指数の大きいマグネシウム添加ニオブ酸リチウム結晶を利用するほうが有効であるため、実際にはマグネシウム添加ニオブ酸リチウム結晶を用いることとする。

表 1-1. 各非線形光学結晶の性能指数。

$$FOM = \left(\frac{\Gamma}{\alpha_T} \right)^2 \propto \frac{d_{\text{eff}}^2 / \alpha_T^2}{\lambda_s \lambda_{\text{THz}} n_s n_T n_p}.$$

	MgO:CLN	MgO:SLN	CLN	CLT
deff/deffCLN	1	1	1	0.92
α_T/α_{TCLN}	0.92	0.9	1	1.02
n	2.2	2.2	2.2	2.1
nTHz	5.2	5.2	5.4	7.2
FOM	0.103	0.107	0.0841	0.0538
FOM relative	1.22	1.28	1	0.639

② 超小型非線形テラヘルツ波光源の実験（担当：理化学研究所）

本研究項目は、令和3年度から実施し、前年に行った実施項目①の設計を基にテラヘルツ波発生実験系の構築を行い、テラヘルツ波発生を実現した。具体的には、カスケード変換の実証、冷却装置の構築、発振周波数の広帯域化、連続波長可変光学系の構築、光注入系の簡略化、ニオブ酸リチウム結晶とタンタル酸リチウム結晶の比較検証を行った。

図2-1にカスケードバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の光学配置概略図と位相整合条件を示す。励起光を斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶に入射するとバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振が起きる。テラヘルツ波とアイドラ光が逆向きに伝搬し、テラヘルツ波は励起光入射面から出力される。さらに強い励起光を入射すると、励起光と逆方向に伝搬するテラヘルツ波のフィードバック効果によって、効率的にカスケード変換が起きる。一般的にカスケード変換は複雑な光学条件を満たす特殊な光学設計を必要とするが、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振では一つの結晶内でカスケード変換が起き、簡便な光学系のままでテラヘルツ波出力を高出力化することができる。簡便な光学系は小型で堅牢なテラヘルツ波光源構築に重要であり、将来のロボット搭載光源として重要である。

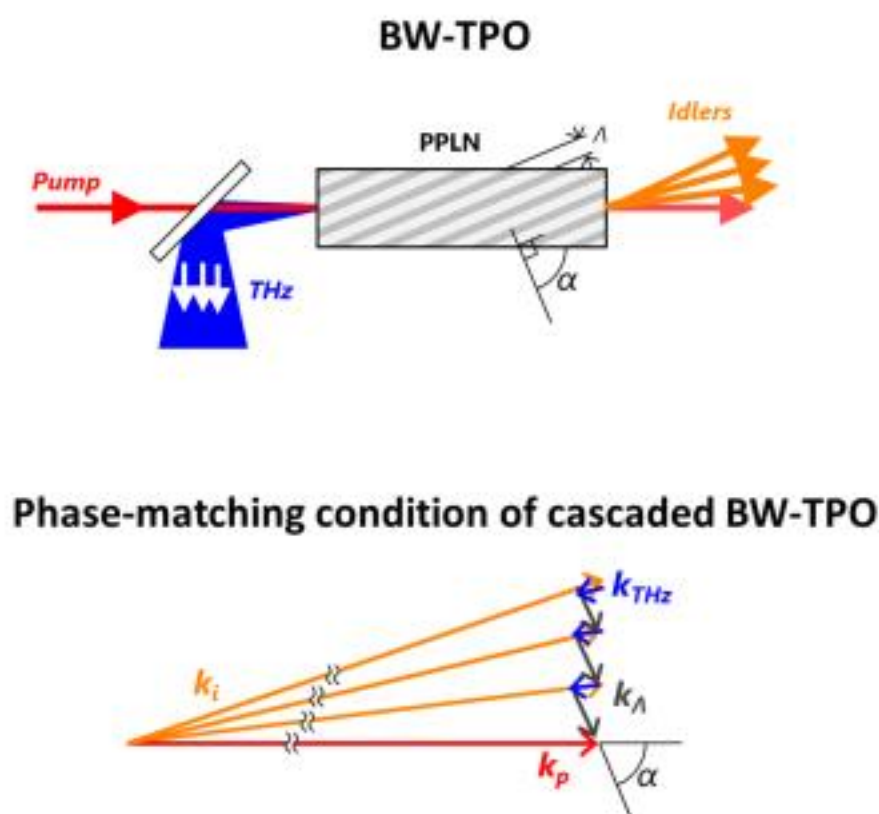


図2-1. カスケードバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の光学配置概略図と位相整合条件。

図2-2にカスケード変換の実験光学系の写真を示す。まずは、光学定盤上に各種光学素子を配置し、原理検証を行った。近赤外レーザー光（励起光）は、光増幅器を内蔵した小型マイクロチップレーザーを用いた。レーザー出力エネルギーは15 mJ、パルス幅は0.84 ns、波長1064.3 nmであった。励起光の光学的パラメータは、ニオブ酸リチウム結晶の性能を引き出すため、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振を効果的に起こすため重要である。特に、ニオブ酸リチウム結晶における誘導ブリルアン散乱を抑制し、誘導ラマン散乱を起こすためにサブナノ秒パルス光を利用した。出力光のビームサイズはレンズ系で調整し、結晶位置で0.8 mm × 0.4 mm（半値全幅）と横長の楕円形で入射した。カスケード変換では空間的に横方向に僅かに異なる方向へ伝搬するため、励起光の利得を効果的に得るために横長のビームとした。カスケード変換されたアイドラ

一光はそれぞれ光スペクトルアナライザーを用いて波長を測定した。結晶から出力されたテラヘルツ波は、テラヘルツ波反射板で励起光と分離し、ツルピカレンズでコリメートした後、テラヘルツ波検出器で検出した。

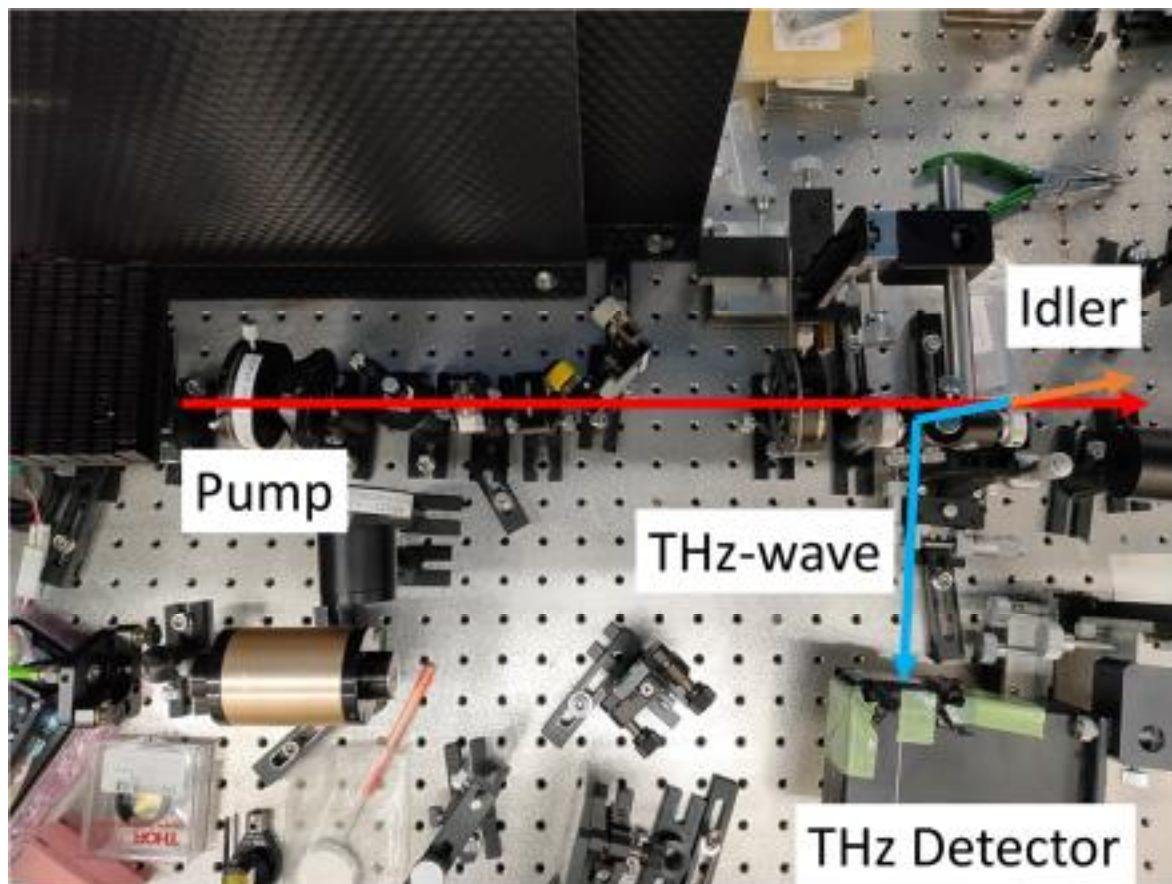


図2-2. カスケード変換の実験光学系。

図2-3にカスケード変換されたアイドラー光をIRビジュアライザーで観察した写真を示す。励起光の入射エネルギーは12 mJとした。写真では、近赤外光の当たった場所で第2高調波が発生し、緑光として確認できる。光点4つのうち1つは励起光である。この実験では3次のアイドラー光まで確認できた。理論検討の通り、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振では強い励起光を入射するだけでカスケード変換の位相整合条件を満たし、効率的な波長変換を簡便な光学系のままで実現できるとわかった。この結果は、高出力かつ小型テラヘルツ波光源の実現に重要である。

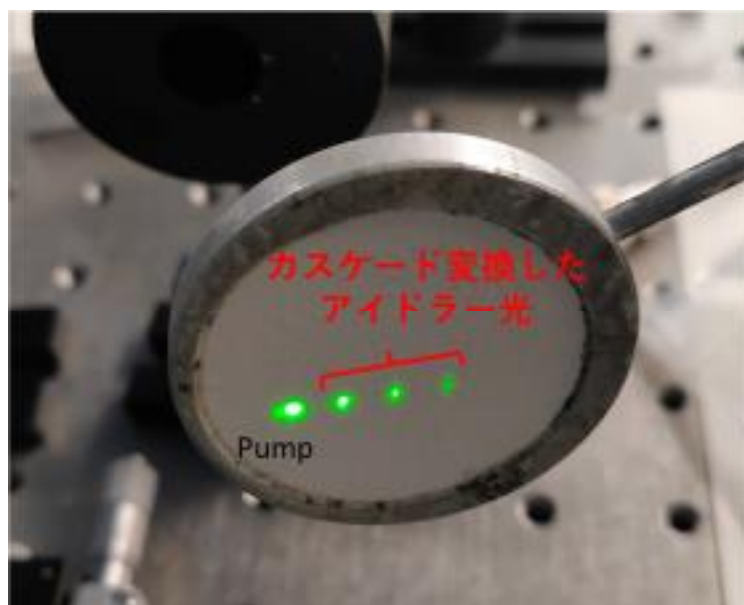


図2-3. カスケード変換されたアイドラー光のIRビジュアライザーによる観察写真。

図2-4にカスケード変換で発生したアイドラー光波長の測定結果を示す。一般的に、共振器構造を持たない光パラメトリック発生 (OPG: Optical Parametric Generation) では、非線形光学結晶の広い利得帯域幅による波長広がりがある。一方で、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振では逆向きに伝搬するテラヘルツ波による光注入効果のため、共振器構造なしにテラヘルツ波利得を特定の波長へ集中し、高効率変換が実現できる。実験結果において、アイドラー光のスペクトル線幅は、励起光の線幅と同等の約0.01 nmを維持していたことから、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振が高い効率で変換できていることがわかる。高変換効率は非破壊検査に必要な装置要件を緩和し、省エネルギーに重要である。

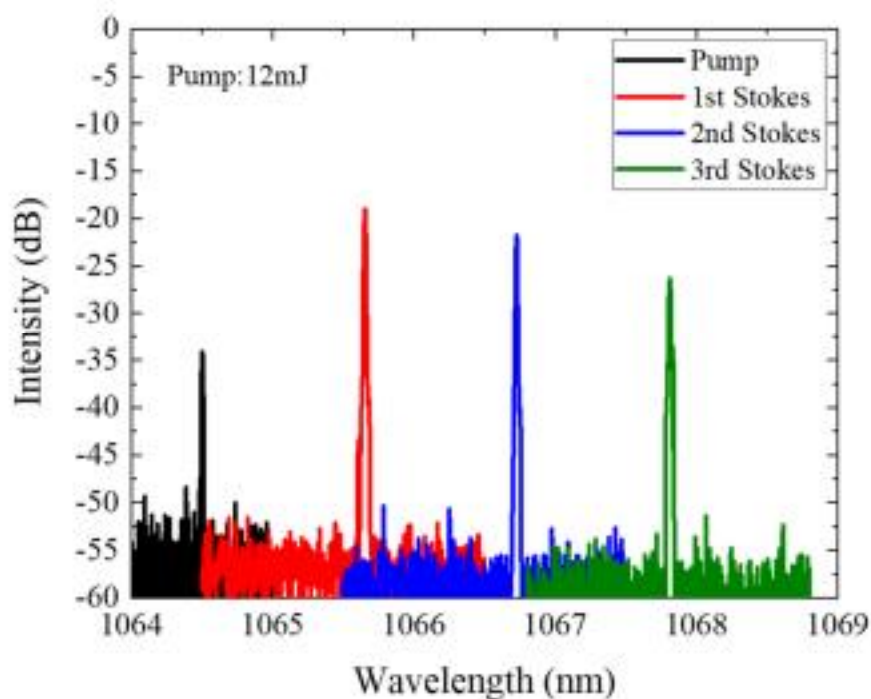


図2-4. スペクトラムアナライザで波長を測定したアイドラー光波長。

バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振に用いたニオブ酸リチウム結晶は、最低次 A_1 横光学フォノンモードが7.5 THzに存在し、発生したテラヘルツ波は結晶中を伝搬する際にフォノンの影響を受けている。特に、フォノンダンピングによるテラヘルツ波吸収損失は発振閾値の低エネルギー化、および高次カスケード変換に大きくかかわると考えられる。そこで、結晶の冷却によるフォノンモードの狭帯域化を行うため、電子冷却器を用いたバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の装置設計を行い、実験系の構築を行った。図2-5に装置設計と光学配置を示す。電子冷却器はクローズドサイクルのヘリウムガスによる冷却であり、液体窒素温度である77 Kより低い温度まで冷却できる設計とした。ニオブ酸リチウム結晶の近赤外光に対する吸収係数は約 $10^{-3}/\text{cm}^{-1}$ と極めて小さくほとんど発熱しないため、冷却能力1 Wの装置を用いた。冷却部には熱伝導率の高い銅製結晶ホルダを配置し、周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶を効率よく冷却できるようにした。冷却時の結露を抑制するため、冷却部を真空チャンバー内に配置し、真空ポンプで断熱できるようにした。励起光およびアイドラー光はそれぞれ光学窓から入出射できるようにし、テラヘルツ波はツルピカレンズを窓に利用し、コリメートして取り出す光学配置とした。結果としては、装置全体が大型になるため冷却より光注入の方法で効率化を進めることにした。

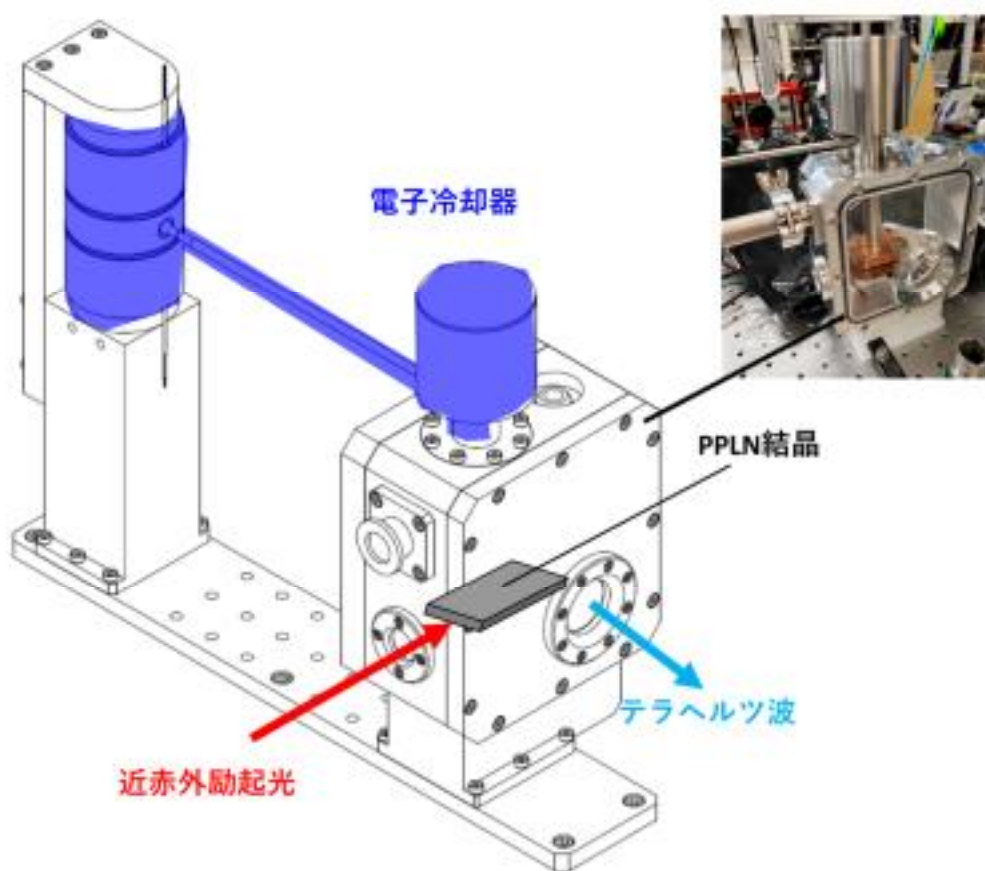


図2-5. (左)冷却装置の設計とバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の光学配置概略図。
(右)冷却型バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の外観写真。

図2-6に、広帯域化の検証として励起光と格子ベクトルのなす角を変えてバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振を行った結果を示す。励起光と格子ベクトルのなす角はそれぞれ27°、40°、50°とした。それぞれの角度でアイドラー光が確認でき、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振が起きた。アイドラー光の発振波長は、なす角が27°、40°、50°のとき、それぞれ1065.5 nm、1066.3 nm、1066.6 nmであった。テラヘルツ波発振周波数に換算すると、0.3 THz、0.5 THz、0.6 THzであった。なお実験は、励起光パルスエネルギー8.9 mJ、パルス幅0.66 nsの光学系で行った。結果として、周波数範囲0.3~0.6 THzにおいてステップ可変性を確認できた。

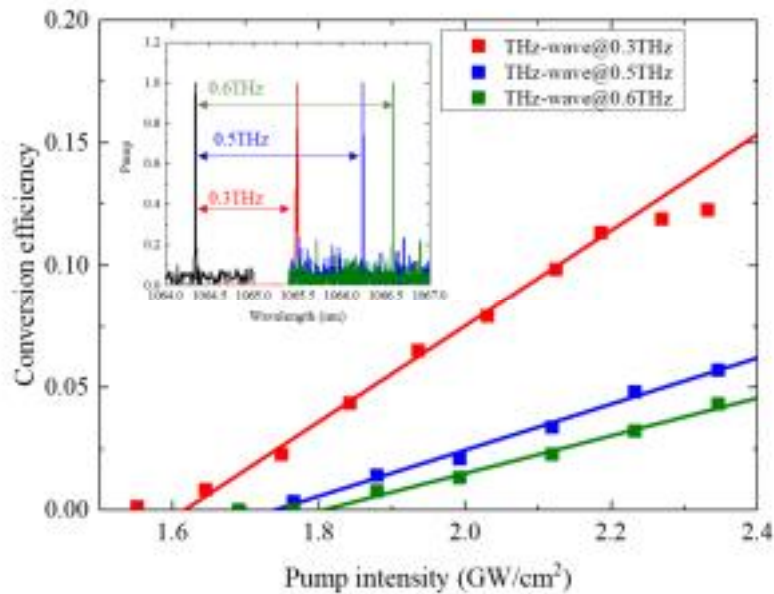


図2-6. バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の広帯域化。

図2-7に、連続波長可変性の検証として、波長可変バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器の光学系写真および広帯域注入光スペクトルを示す。波長可変バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振における光注入は、発振閾値の低閾値化やテラヘルツ波パルス出力安定性を向上させることができ、非破壊センシングにおいて重要である。従来の実験手法では、外部共振器型波長可変半導体レーザーを光注入光源として用いていたため、結晶角度の回転に合わせてレーザー波長を1 nm程度の精密制御を行う必要があった。そこで、広帯域な注入光を用いて、結晶角度によらず光注入可能な光学系を新たに構築した。結晶は回転ステージ上に配置し、電気的に角度制御できるようにした。広帯域注入光はスペクトル輝度が低下するため、半導体光増幅器の自然放出光をバンドパスフィルタによって狭帯域化し、光ファイバー増幅器で増幅して利用した。帯域は、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の波長可変範囲に合わせて1065 nmから1070 nmまでの約1 THzとした。

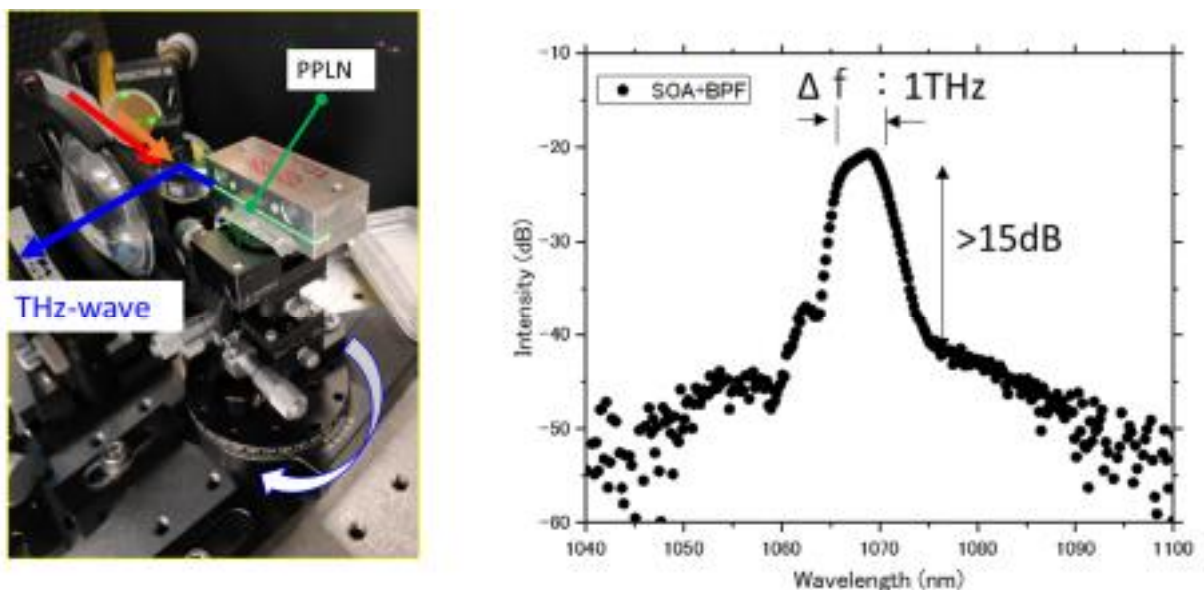


図2-7. 波長可変バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器の光学系写真および広帯域注入光スペクトル。

図2-8に広帯域光注入時のアイドラー光スペクトルを示す。結晶は、励起光垂直入射時に対して $\pm 4^\circ$ の範囲で回転させた。広帯域注入光は光ファイバー増幅器によって300 mWまで増幅して入射した。広帯域光による注入の結果、結晶回転角度によらず光注入効果が確認できた。アイドラー光はバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の位相整合条件によって狭帯域化され、発振周波数が同調できているとわかった。実験ではテラヘルツ波周波数で0.42 THzから0.5 THzの約80 GHzの連続周波数同調に成功した。結果として、広帯域光注入によってテラヘルツ波発振周波数を連続的に同調でき、計測制御を簡略化できた。これは、迅速な非破壊検査に向けた高速周波数同調に重要である。

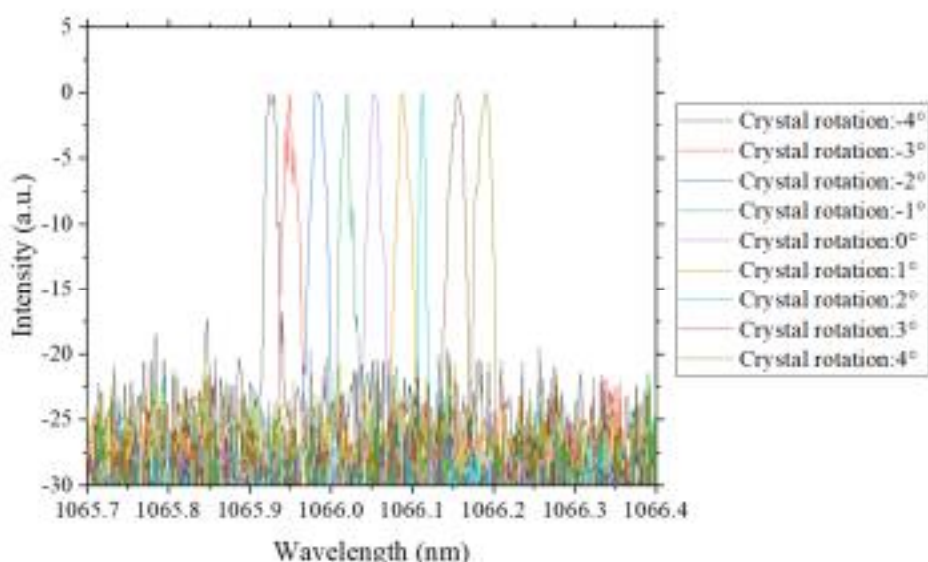


図2-8. 広帯域光注入時のアイドラー光スペクトル。

非線形光学結晶の比較検証として周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶と周期分極反転ストイキオメトリック組成タンタル酸リチウム結晶を比較した。分極反転構造はどちらも周期53 μm 、励起光となす角 63° の結晶を用いた。実験の結果、タンタル酸リチウム結晶より低い励起光強度でニオブ酸リチウム結晶ではバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振が起きた。原因としてはタンタル酸リチウム結晶の最低次フォノンモードが約4 THzと比較的低周波数に存在しており、フォノンダンピングの影響を強く受けた結果、発振閾値が高くなったと考えられる。結果として、本研究ではニオブ酸リチウム結晶を利用することに決定した。

令和4年度は、令和3年度に構築した実験系でカスケード波長変換や光注入法の研究を実施し、中間目標である尖頭出力10 Wを大幅に上回る出力を達成した。また、広帯域波長可変性に関しては、周波数範囲0.3 THzから0.6 THzの中間目標を上回る周波数範囲でテラヘルツ波発振を実現した。下記に詳述する。

まず、光パラメトリック非線形波長変換では、励起光（近赤外光）からアイドラー光（近赤外光）とシグナル光（テラヘルツ波）へと変換する際、理論上、単一変換過程においてManly-Rowe関係で決定される変換上限、つまり励起光源であるレーザーから変換される光子数に上限がある。また、光子エネルギーが光波とテラヘルツ波では約3桁の違いがあり、変換後のアイドラー光とテラヘルツ波が同じ光子数でもテラヘルツ波のエネルギーは約3桁小さくなる。さらに、実験上の変換効率やニオブ酸リチウム結晶が持つ大きなテラヘルツ波吸収を考慮すると、単一過程で発生できるテラヘルツ波エネルギーは小さい。この時、入力エネルギーと出力エネルギーの関係は線形的に増加するに留まるため、下記に示す特殊なカスケード波長変換による発生方法の発見は、極めて重要である。

カスケード波長変換は、励起光から変換されたアイドラー光とテラヘルツ波のうち、アイドラー光のエネルギーが次の波長変換過程の励起光となって、連続してアイドラー光とテラ

ヘルツ波を発生させる変換である。その結果として、単一過程と比べて複数過程でテラヘルツ波を発生できるため高出力化が実現できる。一方、カスケード波長変換は、連鎖的な条件が整わなければならず、一般的には実現が難しい。本研究では、取り扱うテラヘルツ波の光子エネルギーが光波と比べて格段に小さいことや、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の位相整合条件が特殊であることなどの理由からカスケード波長変換を実現することができた。

実験では、PPLN結晶（厚さ1 mm、長さ50 mm、分極反転周期53 μm ）を用いて、カスケード変換によるテラヘルツ波の高出力化を行った。励起光と格子ベクトルのなす角は 63° とし、テラヘルツ波周波数は0.3 THzであった。カスケード変換が起きる実験条件の詳細を明らかにするために、励起光エネルギーを1/2波長板とPBSからなるパワーコントローラで制御して、入出力特性を測定した。

結果として、図2-9に示すように、励起光エネルギーが6 mJを超えたところで、1次アイドラー光の発振が確認できた。さらに、励起光入力エネルギーを増加させると、7 mJを超えたところで2次アイドラー光の発振、および10 mJを超えたところで3次アイドラー光の発振に成功した。励起光からアイドラー光への変換効率は、最大で、14%（1次）、7.6%（2次）、1.4%（3次）が得られ、励起光エネルギーを高効率に変換できた。なおアイドラー光は空間的に分離しているため、各カスケード変換過程によるアイドラー光エネルギーを個別に測定できた。このように単一の結晶で特殊な制御なく実現できたことは、他にはない優位的な特長である。

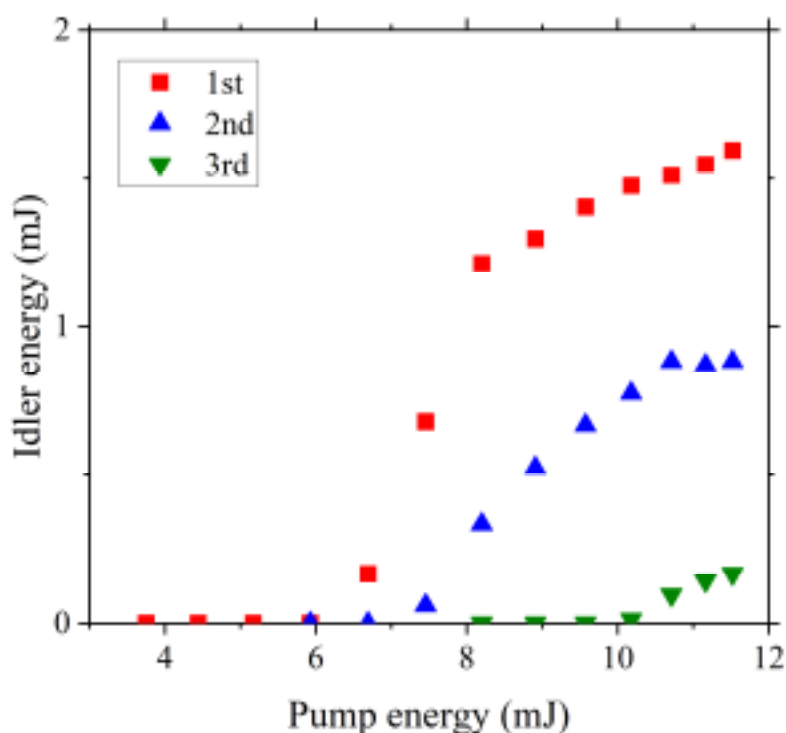


図2-9. カスケード波長変換により発生したアイドラー光出力の励起光エネルギー依存性の測定結果。

次に、テラヘルツ波出力の測定結果を図2-10に示す。光注入を行わない場合、テラヘルツ波出力は励起光エネルギー6.7 mJから確認でき、励起光の増加に伴って出力が増加した。最大テラヘルツ波エネルギーは60 nJであった。テラヘルツ波パルス幅は0.78 nsであったため、ピークパワーに換算すると76 Wに達した。カスケード変換を有効活用していなかった以前の光学系では、尖頭出力が1 W程度であったことから本成果によって70倍以上の高出力化に成功しており、結果として中間目標である10 Wの7倍以上のテラヘルツ波発生を実現した。室温動作するサブテラヘルツ波光源としては極めて高い尖頭出力を得られており、テラヘル

ツ波応用に十分有効である。

さらに、後述する光注入の研究を実施した結果、テラヘルツ波ピーク出力の結果は顕著であり、最大200 W以上の巨大出力を達成した。この出力は、大型装置であるジャイロトン級であり、手のひらサイズのコンパクトな単色光源からの出力としては、世界トップの出力である。

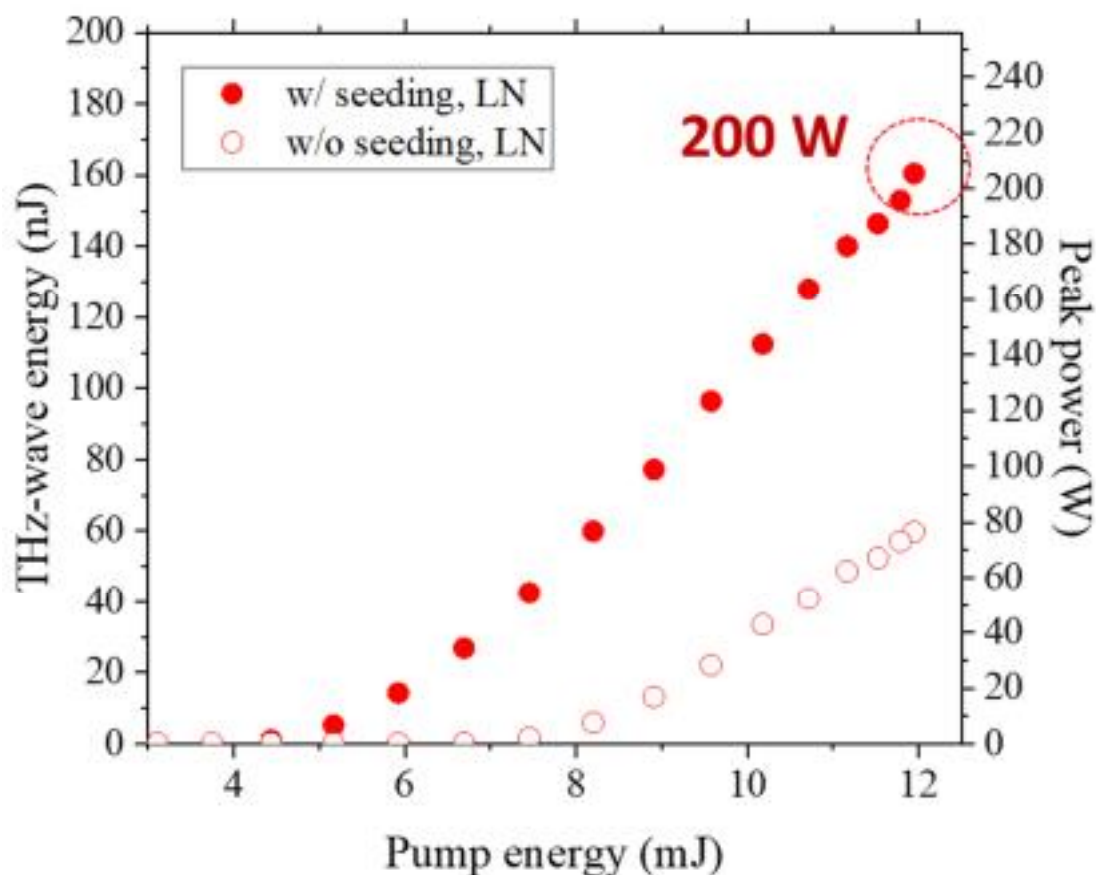


図2-10. テラヘルツ光出力エネルギーおよび尖頭値の励起光エネルギー依存性の測定結果。

次に光注入効果による発振の低閾値化に関して報告する。バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振では、共振器（鏡）がないことが大きな特長である。これは、機械的に堅牢な発振器であるとともに、光学的にも高い優位性がある。一つは、外部より励起光や注入光などの波長の異なる光をニオブ酸リチウム結晶に入射する場合、通常透過率に波長依存性がある鏡が発振器に使用していないため、損失なく結晶に光を導入できる。この時、励起光と注入光の波長差は、わずか数nmであるため、共振器のない構造の優位性は高い。加えて、通常、共振器が持つ固有の縦モードから連続的に波長を同調できないモードホップ現象が発生するが、本光源には共振器がないため、連続同調が原理的に可能であるという点で優位性がある。このように、光注入も簡単にでき、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振は、他に類を見ない優れた性能を有している。

まず、実験結果でポイントとなるのが、図2-9から1次の発振閾値が励起光エネルギー約6 mJであるのに対し、2次、3次の発振は、おおよそ1次の発振閾値から励起光エネルギーが2 mJ毎の増加程度で発振していることである。これは、1次変換過程で発生したテラヘルツ波の発振スペクトルが、2次変換過程でのテラヘルツ波スペクトルとオーバーラップしているため、2次の低閾値化につながっていると考えられる。3次過程に対しても同様に起こっている。この結果より、1次変換過程の発振閾値を低下させることができれば、高次過程での変換も有効にテラヘルツ波発振を実現できる。このため、光注入効果に関して、別途実験を行った結果について次に報告する。

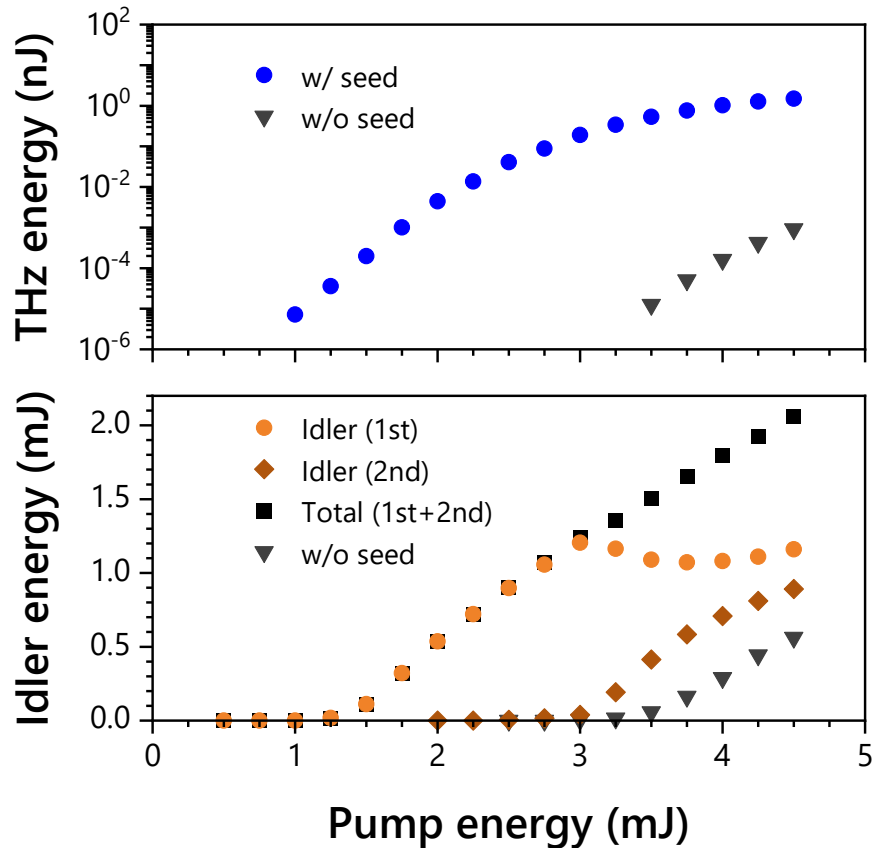


図2-11. 光注入の有無によるテラヘルツ波出力およびアイドラー光出力の励起光エネルギー依存性、および発振閾値の変化。

図2-11に、実測したバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振のテラヘルツ波出力とアイドラー出力の励起光エネルギー依存性を示す。テラヘルツ波出力に関しては、光注入の有無による違いを示しており、アイドラー光出力に関しては、注入光の有無以外に注入光があった場合の1次および2次のアイドラー光出力とアイドラー光の総合出力を示している。結果から注入光480 mW（連続波）を入射した場合、アイドラー光の発振は1.3 mJで起こり、注入光がない場合の発振閾値3.5 mJと比べ、約63%低減でき量子変換効率を47%と大幅に向上することに成功した。励起光エネルギーの上限は、周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶の高強度入力による光損傷を防ぐため最大で4.5 mJにした。低閾値化の結果として、注入光によって同じ励起光エネルギーでもテラヘルツ波出力を向上させることに成功し、励起光エネルギーが最大時にテラヘルツ波出力を約1,000倍に高めることができた。本結果によって光注入が効果的に発振閾値を低減でき、カスケード波長変換の促進を経てテラヘルツ波出力の増強が可能であることがわかった。本手法の導入により図2-10で示した結果ように、最大入力エネルギーの時、テラヘルツ波出力の尖頭値が約200 Wに達することが実験結果で得られ、極めて良好な成果を得た。

一方、副次的な効果として、光注入により発振の初期条件が外部より決定論的に定められるため、パルス毎の発振安定性が格段に向上できることも分かった。その測定結果を図2-12に示す。テラヘルツ波パルスは、光注入がない場合6%程度出力が揺らいでいるのに対し、光注入がある場合出力ゆらぎを1%以下に抑えることができた。出力ゆらぎの低減は、テラヘルツ波応用において重要な意味を持つ。本研究課題の応用としてテラヘルツ波による非破壊検査を考えているが、例えば、テラヘルツ波イメージング（可視化）を行う際、計測ごとにテラヘルツ波出力が揺らぐと、クリアな画像が得られず明暗が揺らぐことになる。テラヘルツ波応用まで考えると、出力安定性は重要な要素となるため、本成果は極めて有用である。

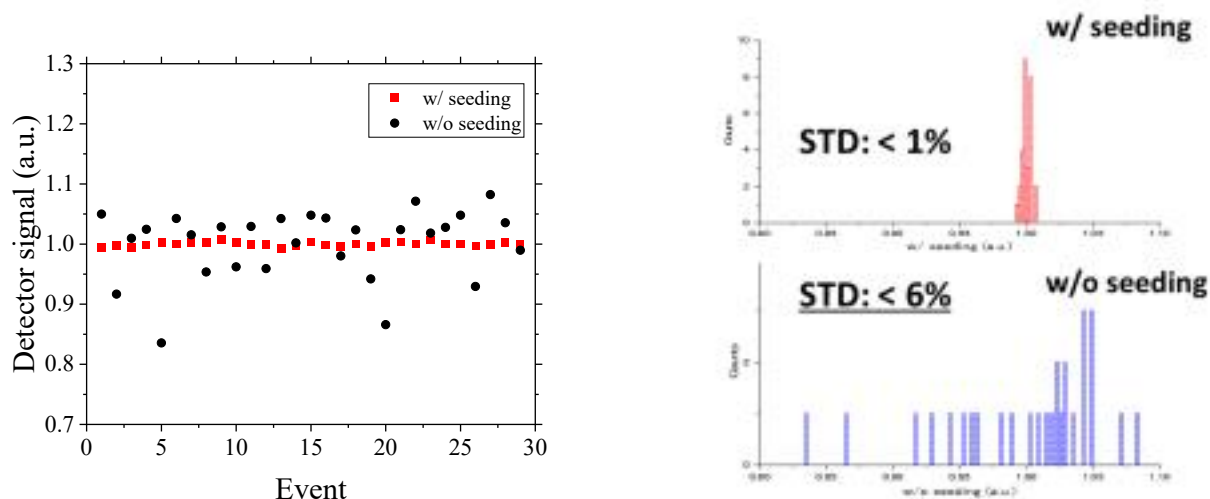


図2-12. 光注入の有無によるテラヘルツ波パルスの出力値の時間変化（左図）と、統計手法によるパルス出力ゆらぎの評価結果（右図）。

次に、広帯域周波数可変の研究について報告する。バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振現象を発見した時、その発振周波数は、独自に考案した位相整合条件から広帯域に可変であることがわかった。その周波数可変性能を確かめるために実験を行い、令和3年度は、周波数0.3 THz、0.5 THz、0.6 THzの発振に相当するアイドラー光を計測し確認された。一方、これまでの実験は主に周波数0.3 THzで実施しており、更なる広帯域化を目指すためには、高周波化でどのような課題があるかを明らかにする必要がある。このため、周波数0.5 THzで動作するように設計および製作した周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶（ピッチ35 μm 、励起光ベクトルと格子ベクトルがなす角が約67°、結晶サイズ50 x 5 x 1 mm^3 ）を用いて、図2-13に示す新しい実験系を構築して研究を行った。

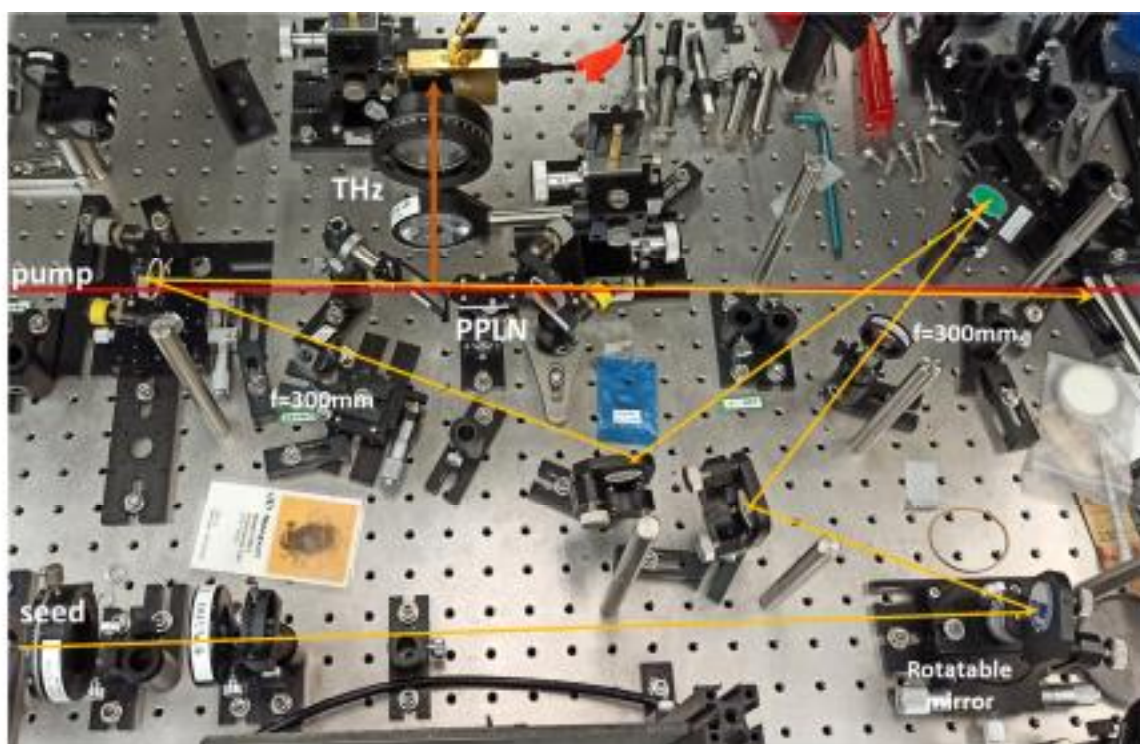


図2-13. バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の広帯域周波数可変性を研究するために構築した実験系の写真。

実験結果を図2-14に示す。励起光はマイクロチップレーザーを使用し、その波長およびパルス時間幅は、それぞれ1064.43 nm、860 psであった。結果は、2次のカスケード波長変換までアイドラー光の発振から確認でき、図2-14左図のように光注入の有無で、これまで同様に発振閾値の低下が認められ、約26%の減少を実現した。光注入によってアイドラー光の出力エネルギーは、最大励起光入力時で約1.5倍に増強できた。量子変換効率も10%を超える約14%を達成した。また、光注入がない場合では、2次のバックワード・カスケード波長変換は起こらず、代わりに本実験では不要なフォワード発生（FW1）が起こっていた。一方、光注入を行った場合には、効果的に閾値低減と2次のカスケード波長変換を誘発させることができ、フォワード発生を消滅させることに成功した。

発振したテラヘルツ波周波数は、図2-14右図のように光スペクトラムアナライザーで計測した結果から得られる。励起光、1次および2次アイドラー光の波長は、それぞれ1064.43 nm、1066.16 nm、1067.89 nmであった。それぞれの光子エネルギーの差分が、発振したテラヘルツ波に相当するため、励起光と1次アイドラー光、1次アイドラー光と2次アイドラー光の差分から、それぞれ周波数0.458 THz、0.456 THzのテラヘルツ波が発振していることを示している。この2つの周波数を持つテラヘルツ波スペクトルは、その差が約2 GHzと狭いため、スペクトルが重畳して実際には一体となって発振していると考えられる。

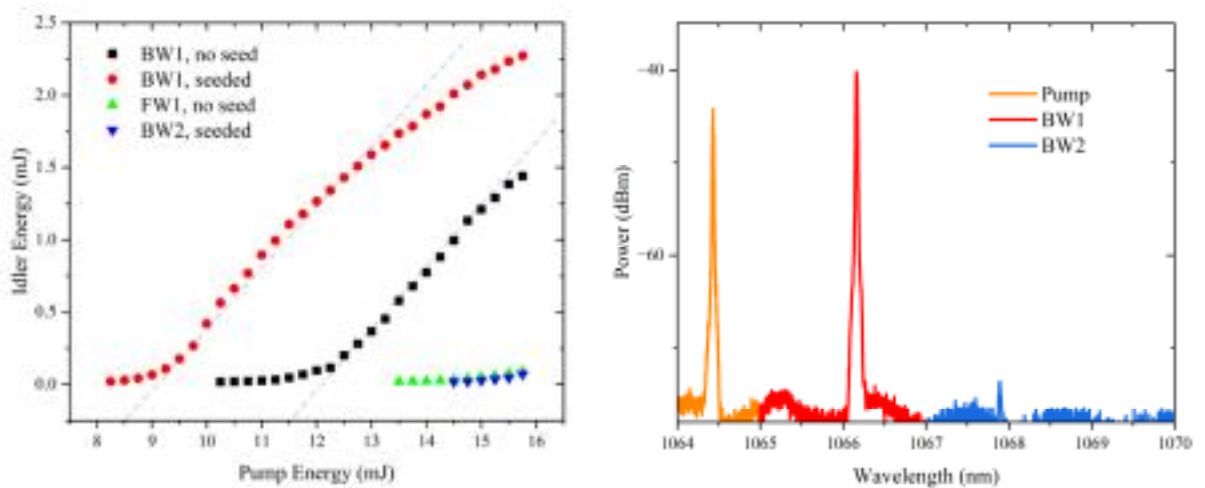


図2-14. 光注入の有無による励起光入力エネルギーとアイドラー光の出力エネルギーの関係（左図）、光注入時の励起光およびアイドラー光のスペクトル（右図）。

次に、発振したテラヘルツ波の特性について述べる。まず、発振したテラヘルツ波の周波数を直接計測する実験を行った。計測では、2枚の半導体シリコン基板を平行に配置したFabry-Perot干渉計を構築し、それらの基板面を貫くようにテラヘルツ波を入射させた。2枚の半導体シリコン基板の間隔を変化させながら、透過テラヘルツ波出力を検出すると干渉透過波形が得られ、その物理的間隔から波長（周波数）が分かる仕組みである。ここで、半導体シリコン基板を用いる理由は、テラヘルツ波領域で適度な反射率と透過率を有するためである。

図2-15に結果を示す。半導体シリコン基板の間隔を変化させると、透過テラヘルツ波出力が周期的に変化するのが計測された。それぞれの出力ピークは、波長の半分と一致したときに現れるため、2つのピーク間の物理的距離が発振したテラヘルツ波の波長に対応する。結果として、波長0.66 mm（周波数0.454 THz）が発振していることが計測できた。前述のアイドラー光の波長から見積もった結果と若干の違いがあるが、理論上で物理長5 μm の差が約0.0035 THzの差に相当するため、結果は計測誤差範囲内であると考えられる。また、非線形量子変換の観点からエネルギー保存則が満たされているため、励起光とアイドラー光の波長がわかれば、残るテラヘルツ波の周波数は一意に決定される。

結果として、今回使用したFabry-Perot干渉計はカスケード発振する2つのテラヘルツ波周波数の周波数を分離できる性能がないため、本結果にはその特徴は見られなかった。一方、滑らかな干渉波形から目的以外の他の発振がなく、良好なテラヘルツ波発振が得られていることを確認できた。

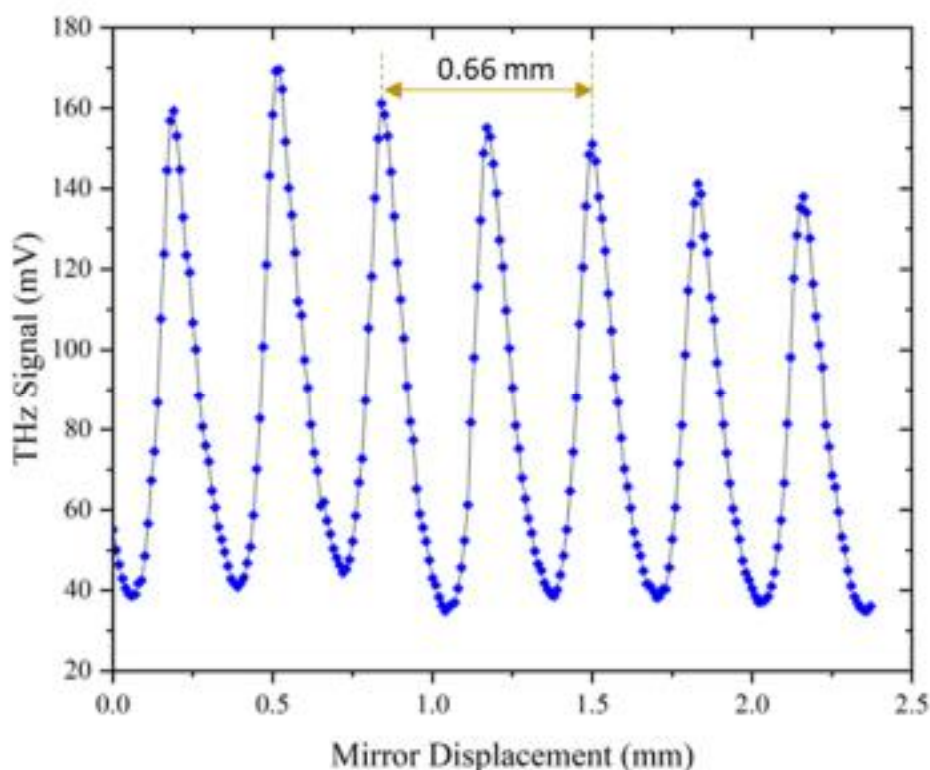


図2-15. 2枚の半導体シリコン基板で構成されたFabry-Perot干渉計を用いたテラヘルツ波波長（周波数）計測の実験結果。シリコン基板の間隔を変換させながら、透過したテラヘルツ波出力を検出した。各ピークはテラヘルツ波の波長の半分毎に現れる。

次に、発振した周波数0.454 THzのテラヘルツ波出力の励起光エネルギー依存性について、図2-16に実験結果を示す。光注入によるテラヘルツ波の発振効率は、周波数が異なった条件でも有効であり、格段に向上できることが確認された。最大励起光エネルギー約15.8 mJの時、光注入なしの場合に比べて、光注入を行った場合には約22倍のテラヘルツ波出力増加が得られた。このように、これまでの研究で開発した出力増強の手法は、周波数を変化させても有効に働き、大きな効果を発揮することが確認できた。

この結果を得て、最終目標に向けた周波数0.8 THz以上の未踏領域の発振を実現すべく、新たに周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶（ピッチ35 μm 、励起光ベクトルと格子ベクトルがなす角が約43°、結晶サイズ40 x 10 x 1 mm^3 ）を設計・製作し、実験を行った。結果として、図2-17に示すように、アイドラー光の発振が確認でき、光スペクトラムアナライザーで波長1067.74 nmと測定できた。バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振としては、最高の周波数である約0.87 THzが得られた。

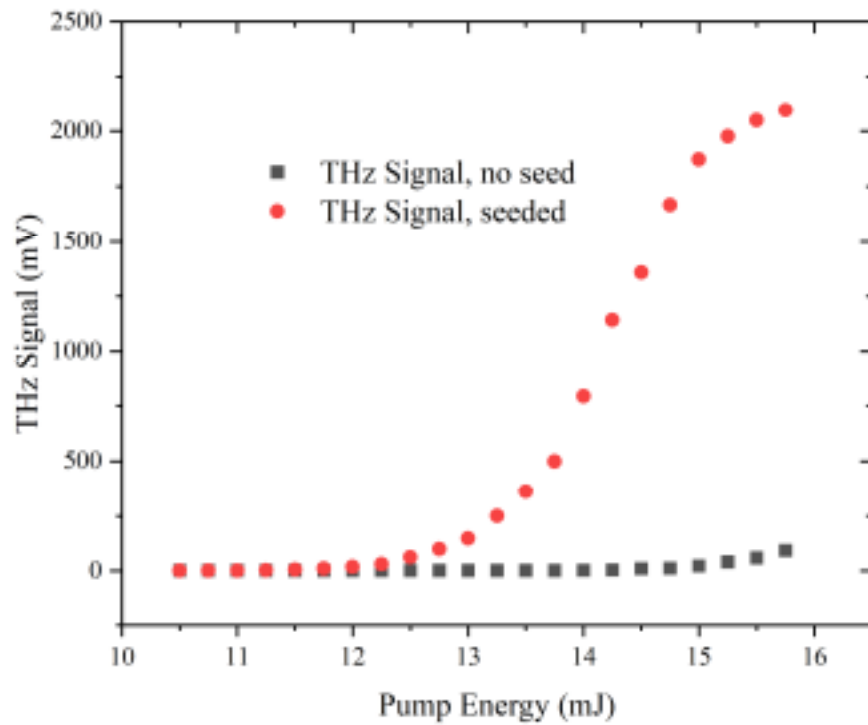


図2-16. 光注入の有無による周波数0.454 THzのテラヘルツ波出力の励起光エネルギー依存性。

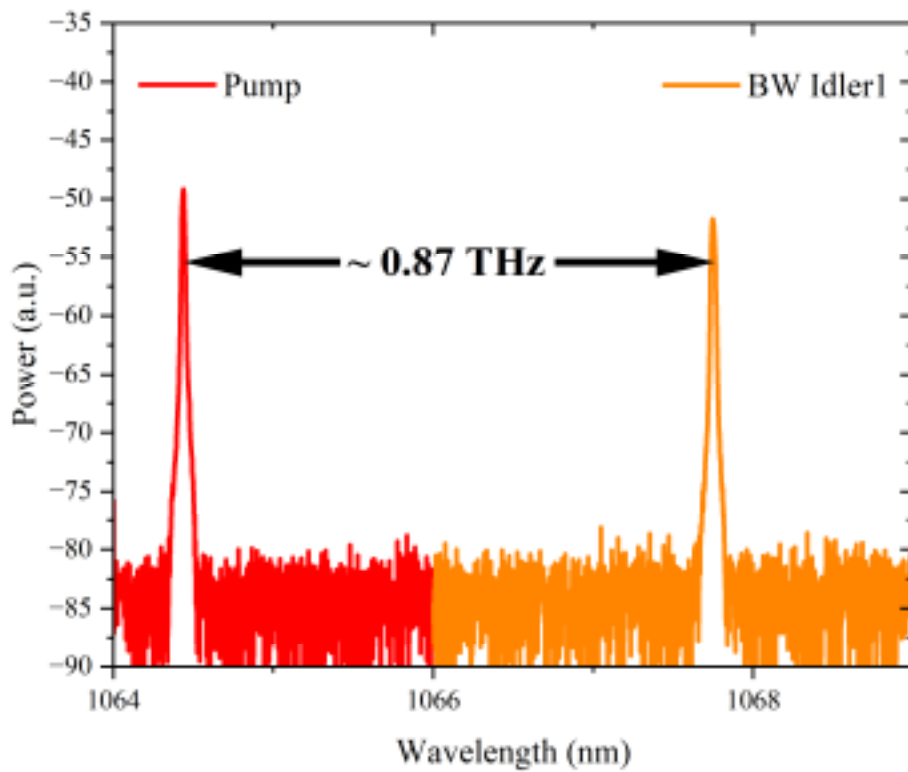


図2-17. バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の最高周波数を目指した実験で、周波数0.87 THzに相当するアイドラー光の発振が確認できた実験結果。

一方、上記の広帯域化の実験中に、発振の原理とは異なるところで課題があることがわかった。バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振は、周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶に励起光およびアイドラー光への注入光を入射することで、バックワード方向にテラヘルツ波が発振する。このため、光波とテラヘルツ波を分離するための光学素子（ダイクロイックミラー）が必要である。これまでは、主に周波数0.3 THz付近の実験で最適化を行っていたが、周波数を大きく変化させると、上記分離光学素子の特性（テラヘルツ波反射特性）が大幅に変化し、発振したテラヘルツ波を外部に取り出しにくくなることが判明した。一般的には周波数可変範囲は30%程度であり、本研究が目指すようなオクターブ変化する光源は極めて珍しい。このため、特別な分離光学素子の開発を行う必要がある。

解決方法として次に示す方法を提案・検証した。まず、励起光や注入光が透過する素材で、かつテラヘルツ波を反射する素材として、ニオブ酸リチウム結晶に着目した。ニオブ酸リチウム結晶は、本研究でも利用している素材であり、既に近赤外光を透過し、高強度の近赤外光でも光損傷がないことが実証されている。一方、テラヘルツ波を高反射させる特性に関しては、ニオブ酸リチウム結晶の常光線に対するテラヘルツ波領域の屈折率が大きいこと、高反射に適している。光源開発では、実験条件から異常光線の配置を利用しているが、常光線の配置を用いることで、近赤外光を透過し、テラヘルツ波を反射させるダイクロイックミラーの提案を行った（特願2022-021012）。

図2-18に、ダイクロイックミラーのテラヘルツ波の反射率、透過率の計算結果を示す。厚さ20 μm 、テラヘルツ波入射角45°の結果である。厚さを薄く制御することで、自由スペクトルレンジ(FSR)が大きくなり、結果のように広い周波数にわたって高反射率を実現できる。実際に作製したダイクロイックミラーの写真を図2-19に示す。広帯域化の研究を実施した結果、本研究課題で取り扱う光源の周波数帯域が超広大であることがあらためて理解でき、必要な素子開発も実現できた。素材としてタンタル酸リチウムなども検討を行ったが、本素材が現状最も優れた性能であると検討結果から得られている。開発した光学素子は、周波数帯域や耐光損傷などの性能の点で他に類をみない能力を有しており、光波とテラヘルツ波を扱う応用や研究で重要な道具であると考えている。

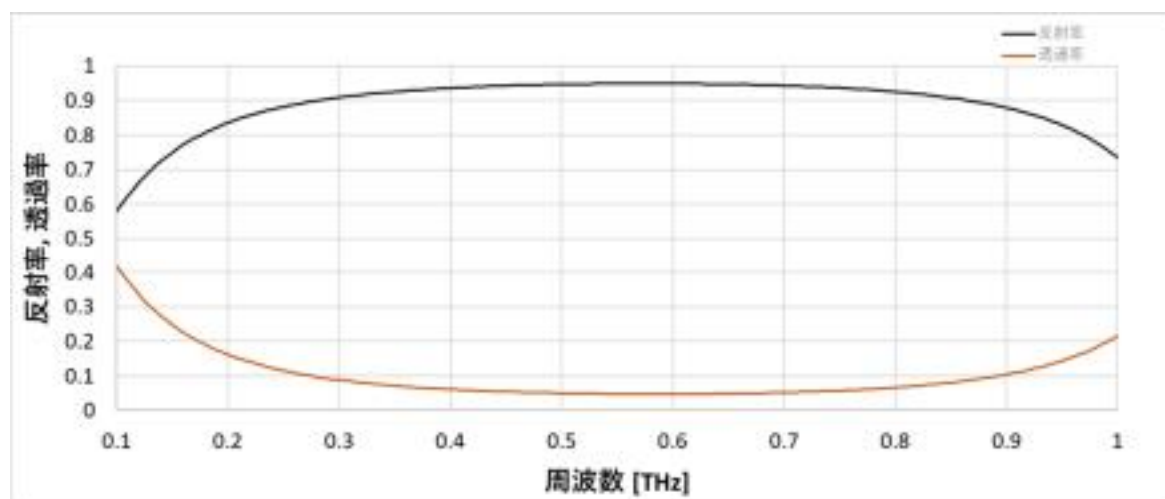


図2-18. 薄膜ニオブ酸リチウム結晶を用いたダイクロイックミラーのテラヘルツ波反射特性および透過特性。



図2-19. 開発したダイクロイックミラー（近赤外光とテラヘルツ波を分離する光学素子）の写真（特願2022-021012）。

次に、励起光源一体型のバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器の研究開発について述べる。本研究課題では、独自に発見したバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の現象や性能に関して、そのメカニズムと優れた性能を解明し、実用的なテラヘルツ波光源とすべく物理的、光学的な基礎科学研究を光学定盤に展開した実験系で行っている。一方、これらをコンパクトな筐体に納める光源にするには、本来、その開発に特化した追加研究が必要となる。しかし特筆すべきことに、発見したテラヘルツ波発振現象は、基本的には励起光を特別に設計した周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶に照射することで得られるという極めてシンプルな現象であることから、要点を絞った形で集中的に小型化の設計や工夫を施すことで、基礎研究を実施しながら成果を逐次導入する形で、応用に向けた光源開発を並行して実施できる。実際に現時点で得られている研究成果をもとに様々な工夫を導入し、設計・製作した励起光源一体型のバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器を図2-20に示す。内部に励起光源も導入し、周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶やその他必要な光学部品や開発部品などをすべて含み、スマートフォンと同程度のフットプリントサイズで実現できた。



図2-20. 開発した励起光一体型バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器の写真。

令和5年度は、令和4年度に実施した実験結果、および中間評価で達成したマイルストーンの成果をもとに、励起光源一体型バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器の超小型化を実現するためのモジュールを構築した。また、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の基礎実験について更に研究を行った。加えて、実施項目⑨の大型結晶を用いたテラヘルツ波発生についても研究を実施した。さらに、最終目標達成に向けた光源としての性能評価を開始した。具体的な内容について、下記に報告する。

はじめに、励起光源一体型バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器 (BW-TPO) の超小型化モジュールについて、令和4年度に構築したモジュールの構成内容の見直しを行った。図2-21 (左) に、令和5年度に開発した励起光源一体型 BW-TPO モジュールを示す。励起レーザー光源の変更、より高機能な光学素子の採用、電動回転ステージの導入などの改良を施した。光学素子の配置にも工夫を凝らした結果、手のひらサイズのモジュールの開発に成功し、令和4年度のモジュールと比較して令和5年度のモジュールは体積比で30%の削減を達成した。図2-21(右) に示すように、実際にこの BW-TPO モジュールを自動移動ステージ上に搭載し、励起レーザー光源の動作安定性の確認試験を行った結果、パルスエネルギーやビームパターンなどの出力が安定して得られることを確認した。

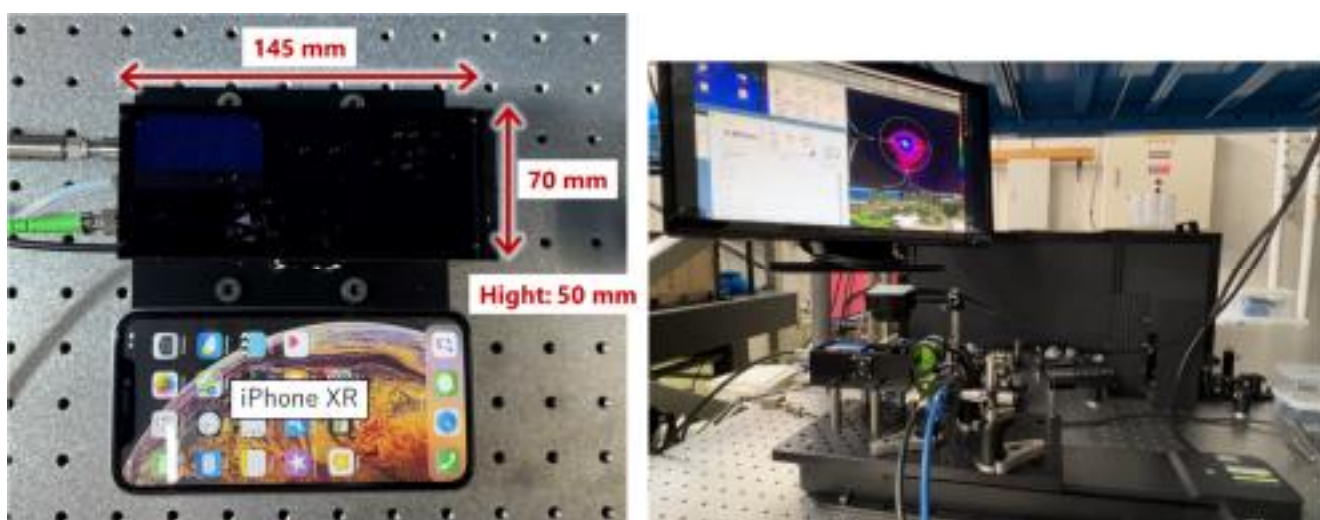


図2-21. (左) 励起光源一体型BW-TPOモジュールの写真と (右) 移動ステージに搭載した際の励起レーザー光源の動作安定性試験の様子。

図2-22 に、開発した励起光源一体型 BW-TPO モジュールから得られた THz 波パルス信号の時間波形を示す。高速応答のショットキーバリアダイオード検出器と広帯域オシロスコープを用いて測定を行った。その結果、1 ns 程度のパルス幅を有する THz 波パルスを観測することに成功した。ポンプ光とアイドラー光の波長差から、THz 波の周波数はおよそ 0.3 THz に相当する。令和6年度は、この励起光源一体型 BW-TPO モジュールに対して、詳細な性能評価および改良を行い、最終的には移動ステージ (ロボット) 上に搭載し、THz 波イメージング試験を行う予定である。



図2-22. 励起光源一体型BW-TPOモジュールから得られたTHz波パルス信号。

一方で、BW-TPO の基礎実験として、動作周波数をこれまで実証してきた約 0.3~0.6 THz から最大約 0.9 THz のより高い周波数に拡張し、周波数同調特性と発振しきい値特性について実験を行った。ニオブ酸リチウム結晶の THz 波に対する吸収係数は、周波数 0.9 THz では 0.3 THz の場合と比べると約 5 倍増加する。そのため、高周波数での BW-TPO 発振は、挑戦的な研究である。

実験配置は基本的に図 2-13 と同じである。一方、PPLN 結晶は異なり、分極反転周期 35 μm 、傾斜角度 43°、サイズ 40 x 10 x 1 mm³ (長さ、幅、厚さ)、入出射端面に反射防止コーティングが施された結晶を使用した。この PPLN 結晶を、波長 1064.44 nm、パルス幅 0.86 ns、繰り返し周波数 20 Hz の縦シングルモードのマイクロチップ Nd:YAG パルスレーザーを用いて励起した。このときのポンプ光のビームサイズは、半値全幅 (FWHM) で約 850 μm (H) x 295 μm (V)の平行楕円ビームに設定した。さらに、CW 波長可変レーザーを用いて、アイドラー光に対する光注入シーディングも行った。すべてのビーム偏光は PPLN 結晶の z 軸方向に設定した。バックワード方向に伝搬する THz 波は、LN ダイクロイック・ビームスプリッターを用いてポンプ光から分離した。ポンプ光とアイドラー光のエネルギーは、エネルギーメーターを用いて、一方 THz 波信号強度は校正されたショットキー・バリア・ダイオード (SBD) を用いて、それぞれ測定した。ポンプ光とアイドラー光のスペクトルは、光スペクトルアナライザを用いて測定した。THz 波の波長は、一對のシリコンウエハから構成される走査型ファブリーペロー (FP) エタロンを用いて測定した。

図2-23 (左) に、得られたTHz波出力のポンプ光エネルギー依存性を示す。THz波信号は、シード光を用いた場合は9.25 mJのポンプ光エネルギーから観察され、その後ポンプ光エネルギーの増加とともに増加した。最大ポンプ光エネルギー時のTHz波エネルギーは157 pJと測定され、THz波のパルス幅をポンプ光のパルス幅の半分であると仮定すると、THz波のピーク出力は365 mWに相当する。シード光が無い場合のTHz波出力は、最大ポンプ光エネルギー時でも約0.15 pJであった。この結果は、光注入時に 1000 倍程度の増強係数が得られるというこれまでの結果と一致する。因みに、シード光がない場合にはTHz波出力は確認できなかった。これは後述するカスケード変換の寄与が大きく、そのカスケード変換を実現したのがシード光注入による低発振閾値化であり、極めて重要な手法であることが分かった。

図2-23 (右) に、走査型FPエタロンを用いて測定したTHz波の干渉波形の結果を示す。フィッティングの結果から、周波数0.878 THzに相当する波長0.341 mmが得られた。この結果は、BW-TPO の位相整合条件の計算結果と一致している。また、この測定から、THz波の周波数線幅は11 GHz 以下であると推定された。

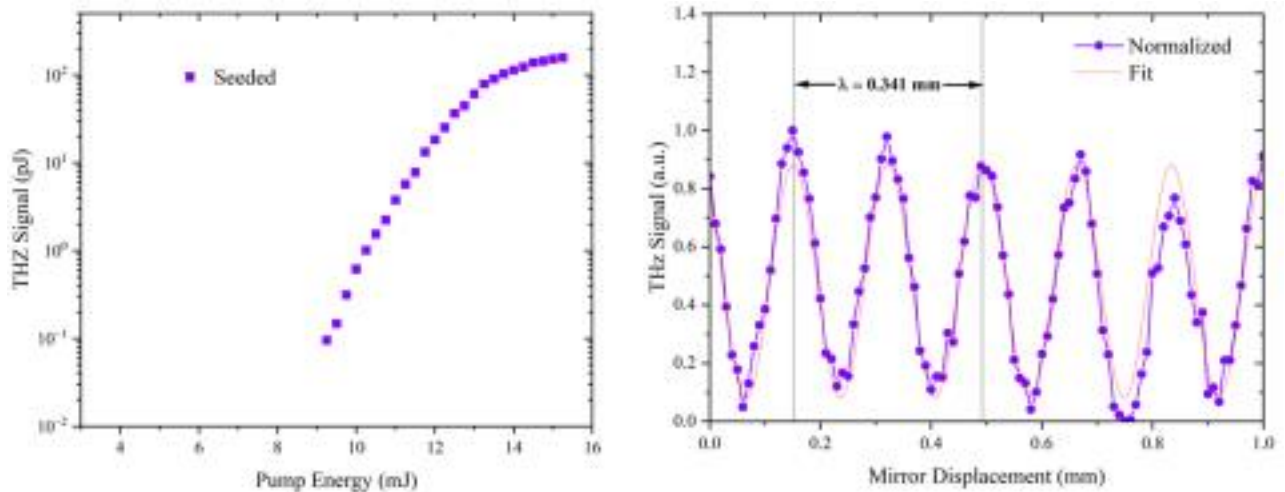


図2-23. (左) 光注入時のTHz波出力のポンプ光エネルギー依存性。(右) 走査型FPエタロンを用いた測定したTHz波の干渉波形。THz波周波数は0.878 THzに相当する。

この実験では、高次の BW-TPO過程に対応して複数のアイドラー光ビームが生成されていることをIR ビジュアライザを用いて観測した。図2-24 (左) に、1次のアイドラー光に対して光注入を行った際に、最大ポンプ光エネルギー時におけるポンプ光とアイドラー光のスペクトルを示す。ポンプ光は1064.43 nmに観測され、一次のアイドラー光は1067.75 nmに観測された。これらの周波数差は0.872 THzであり、BW-TPOの発振周波数に対応し、位相整合条件とよく一致している。加えて、1071.03 nm、1074.34 nm、および1077.61 nm のピークも観測され、カスケード変換過程による高次のアイドラー光も観測された。このカスケード過程では、1次のアイドラー光が2次のアイドラー光とTHz波のペアを生成する新しいポンプ光として機能し、さらに2次のアイドラー光が次のペアを生成する。このときの位相整合条件としては、一定の分極反転周期に対して斜周期角度が変化しながらアイドラー光とTHz波の運動量ベクトルが各高次カスケード過程に応じて変化するため、カスケード過程ごとにTHz波周波数が低下していく様子が観測された。

図2-24 (右) に示すように、BW-TPOの周波数同調特性は、PPLN結晶を回転させることによって得られる。垂直入射時のポンプ光と格子ベクトルの成す角 $\alpha = 43.0^\circ$ から、PPLN結晶を時計回りおよび反時計回りの方向に 4.5° 回転させたとき、ポンプ光の屈折を考慮すると α が 40.9° から 45.1° に変化することに相当する。これにより、1次と2次のアイドラー光の両方を考慮すると、0.836~0.905 THzの62 GHzの周波数範囲で連続同調特性が得られた。この結果は、BW-TPOの位相整合モデルによく一致している。これまでの結果を含めて、PPLN結晶の分極反転周期や結晶サイズなどの設計パラメータによって、BW-TPOは0.3~0.9 THzの広帯域な周波数範囲で同調可能であることを示した。

図2-25に、 $\alpha = 43.0^\circ$ でのシード光を用いた場合と用いない場合の両方のケースについて、ポンプ光エネルギーに対するアイドラー光エネルギーの入出力特性を示す。図2-25 (左) に各カスケード過程における個々のアイドラー光エネルギーを、図2-25 (右) に全アイドラー光エネルギーを示す。ポンプ光強度が閾値を超えて増加すると、アイドラー光の直線的な増加が観測された。BW-TPO の発振閾値は、シード光が無い場合は9.67 mJ (5.65 GW/cm^2) であった一方で、シード光が有る場合は5.25 mJ (3.06 GW/cm^2) となり、アイドラー光に対する光注入により45.7%の発振閾値の低減を達成した。最大ポンプ光エネルギー15.25 mJでの変換効率は、シード光無しの場合は12.3%、シード光有りの場合は18.3%に達し、光注入により変換効率は48.8%向上しました。このように、アイドラー光に対する光注入を用いることで、BW-TPOの発振特性を顕著に改善できることがわかった。

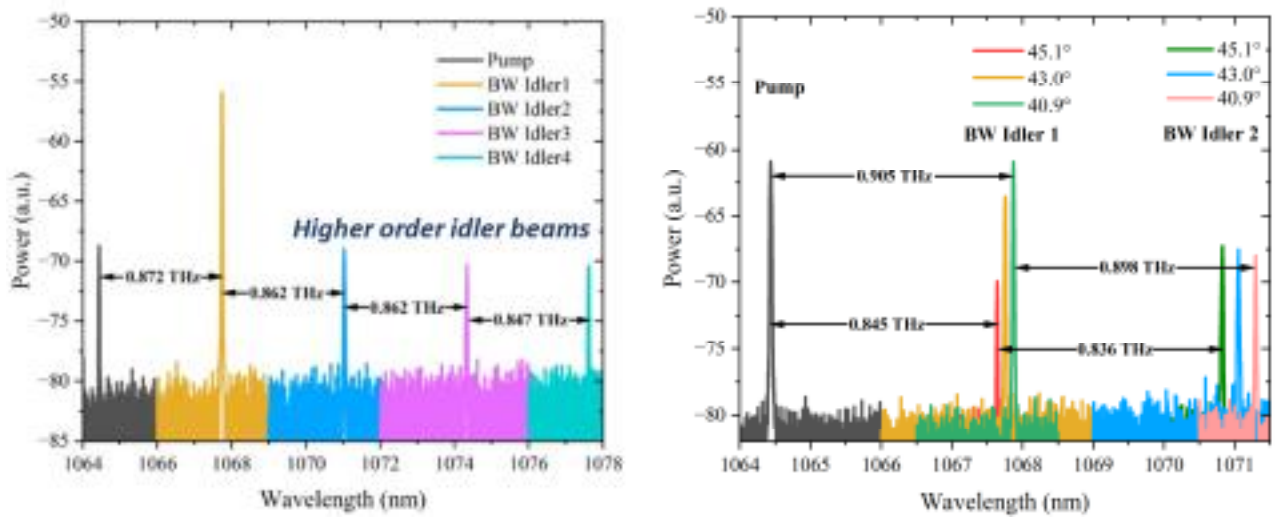


図2-24. (左) カスケード過程により観測されたアイドラー光スペクトル。
(右) 周波数0.9 THzのBW-TPOの周波数同調特性。

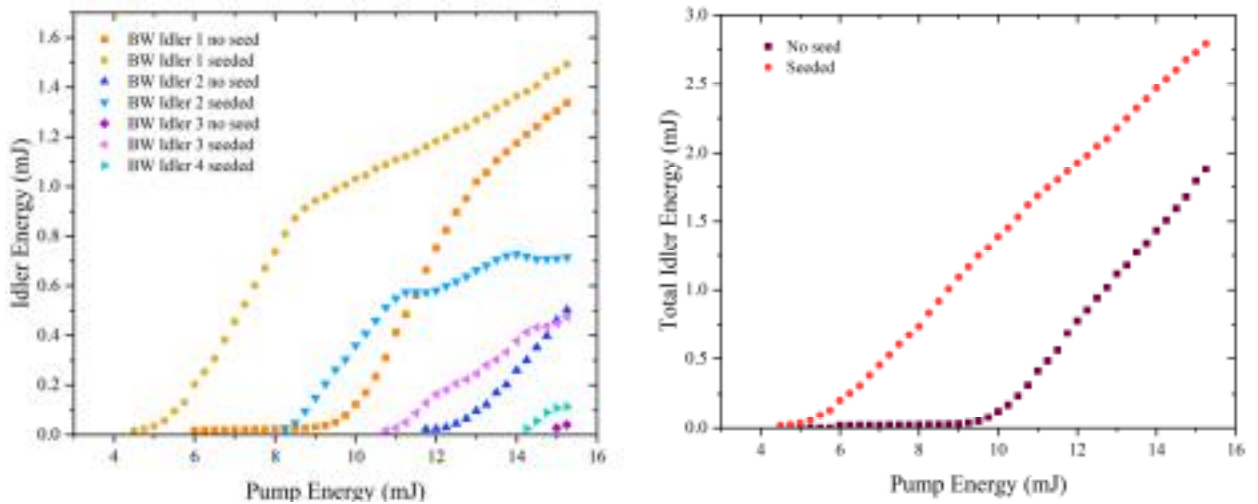


図2-25. シード光の有無に対する入出力特性。(左) 各カスケード過程におけるアイドラー光エネルギーと (右) 全アイドラー光エネルギー。

さらなる低閾値化のため、導波路構造を持つPPLN結晶を作製し、BW-TPOの発振閾値についての実験を行った。導波路への入射光の調整を行った結果、発振閾値として 0.8 GW/cm^2 が得られ、最終目標である 1 GW/cm^2 を達成した。導波路構造の最適化については、今後の課題である。

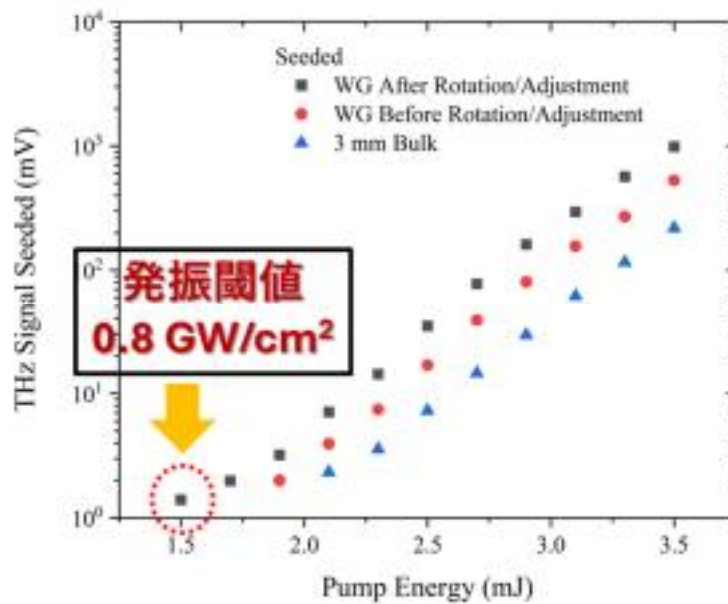


図 2-26. 導波路 PPLN 結晶を用いた BW-TPO の発振閾値の測定結果。

加えて、平等 G が作製した大型 PPLN 結晶を用いた THz 波発生について研究を行った。PPLN 結晶の厚さは 5 mm、周期分極反転領域は 36 x 36 mm、分極反転周期は 35 μm である。波長 1064 nm のマイクロチップレーザーを用いてこの大型 PPLN 結晶を励起した結果、様々な波長のストークス光や 2 次と 3 次高調波が観測された。図 2-27 に示すように、ストークス光の波長を光スペクトラムアナライザで測定したところ、1080~1082 nm の間にピークが観測され、ポンプ光との波長差から THz 波周波数として 4.0~4.5 THz に相当する。この結果は、これまでの通常の PPLN 結晶（厚さ 1 mm）とは全く異なる結果であることから、通常の PPLN 結晶では導波路効果が内在している可能性が示唆された。大型 PPLN 結晶を用いた実験については、今後の継続的な解析が必要である。

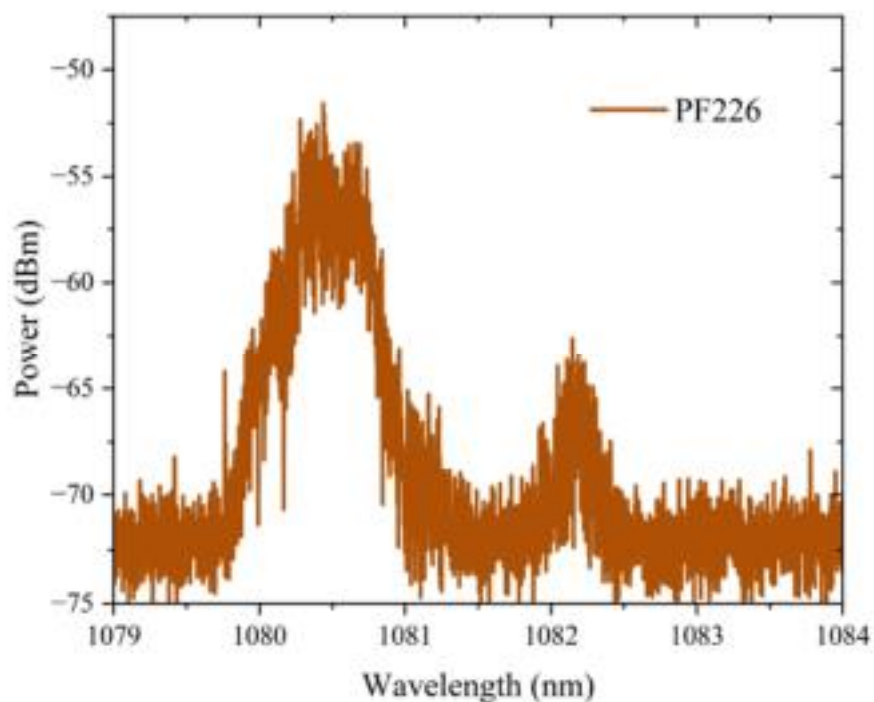


図2-27. シード光の有無に対する入出力特性。（左）各カスケード過程におけるアイドラー光エネルギーと（右）全アイドラー光エネルギー。

上記のように、励起光のみでバックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振を試みたが、テラヘルツ波およびアイドラー光の発振は確認できなかった。そのため、パラメトリック発振ではなく、同一移動整合条件を用いた差周波発生を試みた。具体的には、励起光パルスに加えて、別に用意したアイドラー光パルスを同軸にPPLN結晶に入射させた。その結果、図2-28に示すように、バックワード位相整合条件を満たす1.2 THzにおいて、バックワード方向にテラヘルツ波発生、および、フォワード方向にアイドラー光のパラメトリック増幅を確認することに成功した。

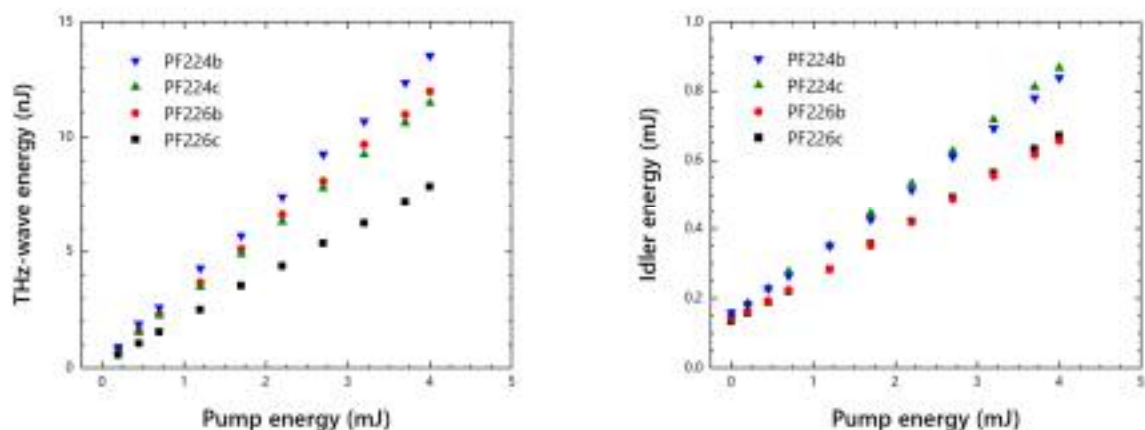


図2-28. 平等Gが作製したPPLN結晶を用いた差周波発生によるテラヘルツ波発生（左）とアイドラー光の増幅（右）の実験結果。

続いて、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器 (BW-TPO) の広帯域波長可変性を活用した 3 次元 THz 波計測の実現可能性を実験的に調べるため、周波数同調可能な BW-TPO を用いて波長掃引光源型光コヒーレンストモグラフィー (SS-OCT) システムの開発を行った。図 2-29 に、実験配置を示す。Nd:YAG マイクロチップレーザー（中心波長 1064.4 nm、繰り返し周波数 20 Hz、パルス幅 650 ps）を用いて、斜周期 PPLN 結晶（サイズ 1 mm x 5 mm x 50 mm、分極反転周期 35 μ m）を励起した。バックワード位相整合条件に基づき、ポンプ光はアイドラー光と THz 波に波長変換された。THz 波は、LN 結晶を用いたダイクロイックミラー (LN DM) を用いてマイケルソン干渉計に導入した。マイケルソン干渉計では、シリコンビームスプリッターを用いて THz 波ビームをリファレンスアームとサンプルアームに分割し、金コートミラーを用いて反射させた。得られる THz 波の干渉信号は、デジタルオシロスコープに接続されたショットキーバリアダイオード検出器を用いて測定した。

BW-TPOの周波数掃引は、PPLN 結晶を回転させることによって得られる。本研究では、PPLN 結晶を電動回転ステージに搭載することで、位相整合条件の正確な制御を実現した。これにより、異なる波長／周波数でアイドラー光とTHz波を発生させることが可能となる。図2-30（左）に、光スペクトルアナライザを用いて測定したアイドラー光のスペクトルを示す。PPLN結晶の角度 α を71.2°から62.8°に調整した結果、アイドラー光波長は1065.9 nmから1066.2 nmにシフトした。図2-30（右）に、実験的に得られたテラヘルツ波出力スペクトルを示す。THz波の周波数掃引は、0.378~0.538 THzで得られた。スペクトル形状はガウス波形であり、中心周波数は 0.500 THz、FWHMは0.090 THzであった。

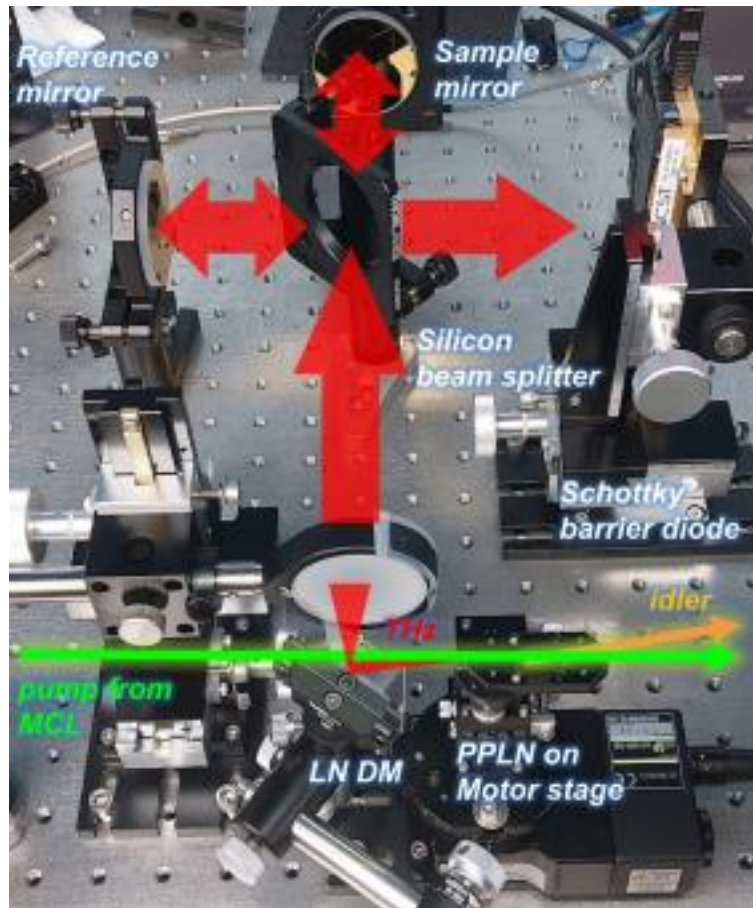


図2-29. バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器を用いた波長掃引光源型光コヒーレンストモグラフィーの実験系の写真。

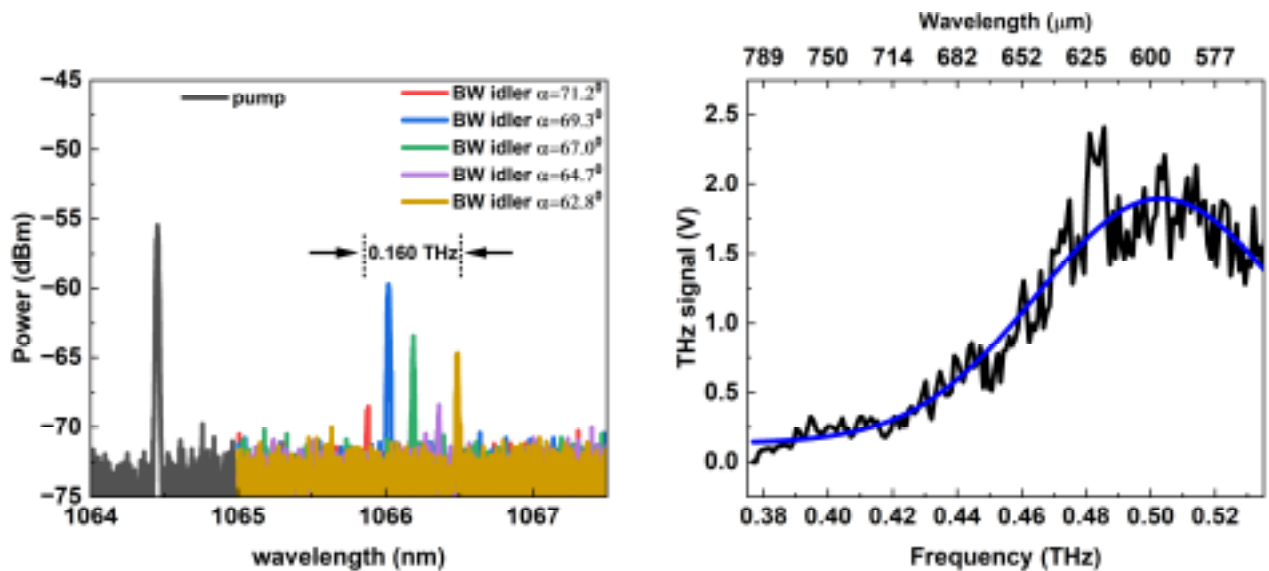


図2-30.. PPLN結晶を回転させることによって得られるBW-TPOの周波数掃引時の (左) アイドラー光スペクトルと (右) THz波出力スペクトル。

図2-31に、マイケルソン干渉計を用いて得られたTHz波干渉波形を示す。このSS-OCTシステムの特性を特徴付けるために、干渉信号に対して逆高速フーリエ変換（iFFT）を適用して点拡がり関数（PSF）を計算した。その結果、鋭いピークが $z_0=17.5$ mmの位置に観察され、これはマイケルソン干渉計のリファレンスアームとサンプルアーム間の初期光路差に対応する。このPSFのピーク形状はガウス波形でよくフィッティングされ、2 mmのFWHMが得られた。この値は、構築したSS-OCTシステムの実験的な深さ分解能に対応する。

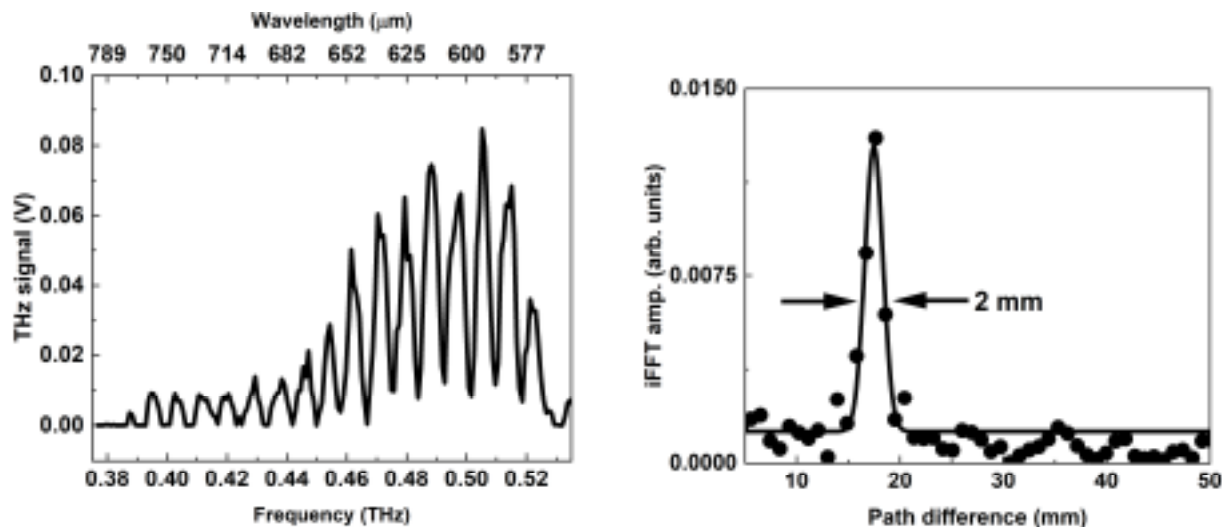


図2-31. （左）測定されたTHz干渉信号と（右）そのiFFTスペクトル。

図2-32に、SS-OCTシステムの深さプロファイリング機能が検証した結果を示す。サンプルアームミラーの位置を初期位置 $z_0=17.5$ mmから $z_1= z_0+\Delta z=30.0$ mmおよび $z_2= z_0+2\Delta z=42.5$ mmまで移動させることで、3つの異なる位置でSS-OCT測定を行い、各位置でのTHz波干渉信号に対してiFFTを実行してPSFを計算した。光路差を大きくするに従って、PSFのピーク位置がシフトすることを確認した。この結果は、BW-TPOを用いたSS-OCTシステムが非破壊検査応用のための3次元THz波イメージングに有用であることを示している。

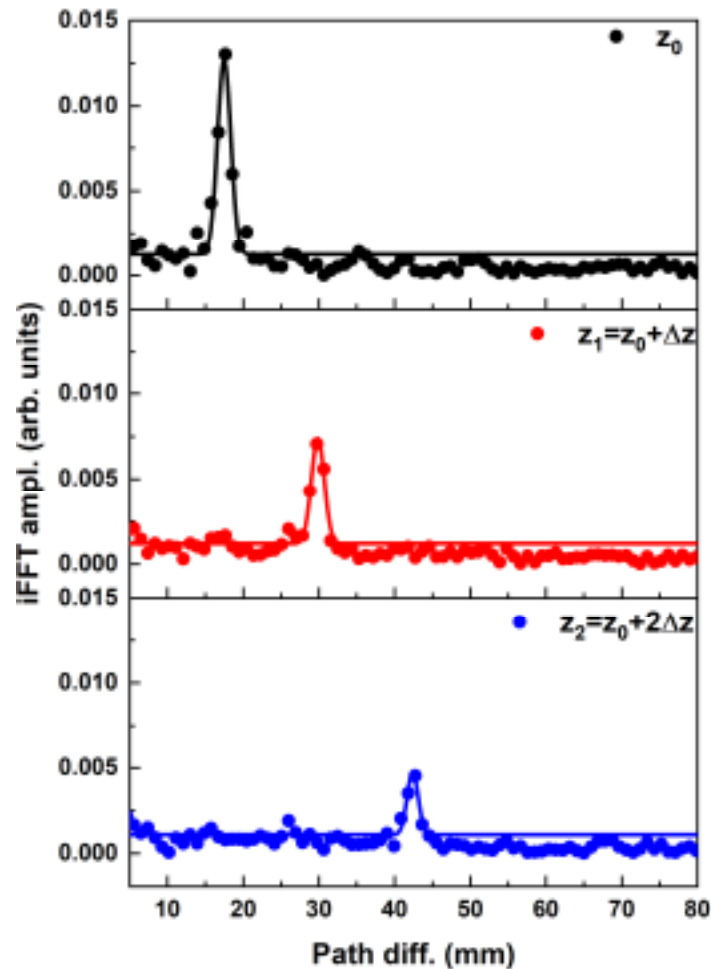
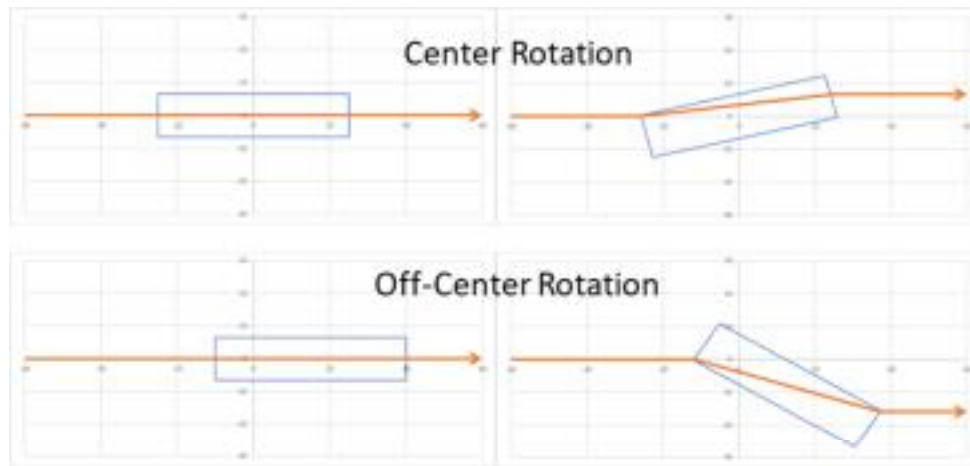


図2-32. サンプルアームを3つの異なる位置に設定して測定したTHz干渉波形のiFFTスペクトル。

令和6年度は、超小型の励起光源一体型バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振器(BW-TPO)の性能評価および改良で最終目標を達成した。またテラヘルツ波発生実験を通じて高度化を検討した。下記に詳述する。

前者の最終目標として実現すべき改良は、広帯域周波数可変性(0.3~0.8 THz)の実現である。具体的な対処方法は、実施項目①で検討した幾つかの方法である。周波数同調は、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振の原理から非線形結晶を回転させるのが簡便で実用的である。一方、連続的に回転させ、かつ周波数可変範囲を最大化する方法については検討の余地があった。そのため、幾何光学的な理論検討を行ったところ、図2-33に示す新方式が有効であることが判明した。励起光が非線形結晶へ入射する際の屈折を考慮して、かつ結晶回転で物理的な回転リミットがあることも計算したところ、非常に広帯域な周波数同調が可能であることが分かった(特願2024-107103)。

この理論を基に実験を行った結果を図2-34に示す。実験系は、これまでとほぼ同様であり、非線形パラメトリック利得媒質は、特別に設計された4つのスラントストライプ型周期分極ニオブ酸リチウム(PPLN)結晶で構成され、それぞれが異なる周波数帯域に最適化されている。広帯域同調を向上させるため、長方形のPPLN結晶をオフセンター回転させ、結晶内外のポンプビームの屈折を考慮することで、最適化されたビーム経路と非同軸位相整合を実現した。結果として、超広帯域幅400GHzの連続モードホップ・フリーの周波数可変帯域幅を実現し、1つの利得結晶から最大1.7オクターブの周波数スパンを達成した。全ての結果では、周波数範囲0.245~1.008 THz(可変幅763 GHz)の極めて広い帯域が得られ、2オクターブ以上のスペクトルカバレッジに相当する顕著な成果を達成した。



$$L_o = -\frac{L}{2} + \frac{\sqrt{L^2 + W^2(1 - n_{pump}^2)}}{2n_{pump}}$$

L_o = off-center translation

n_{pump} = refractive index of pump in PPLN

L = length of the crystal

W = width of the crystal

図2-33. サブTHz波領域をフルカバレッジするための同調方法（結晶回転方法） L_o が結晶の回転中心で、その値にセットすることで上式から最大同調が得られる。特願2024-107103。

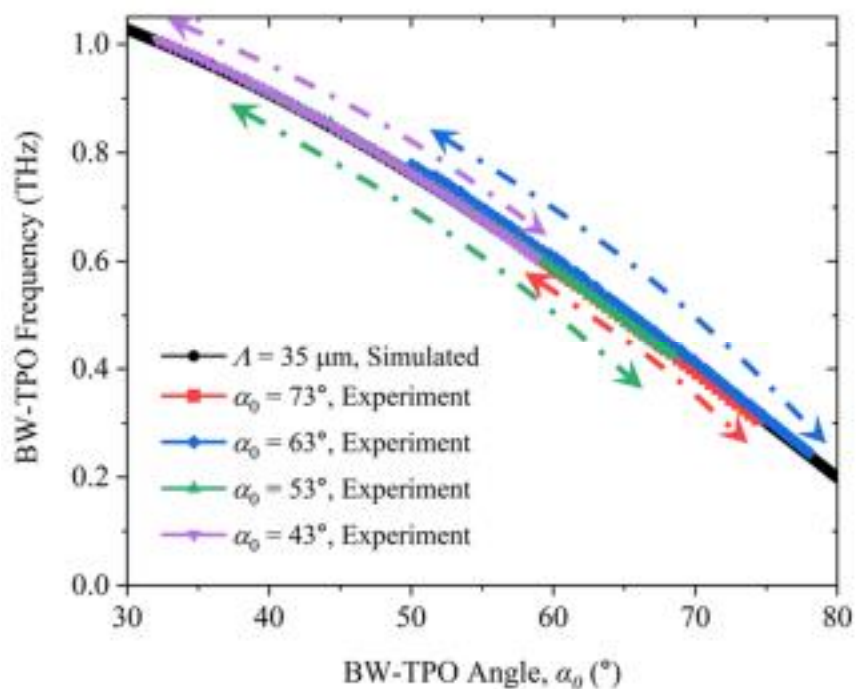


図2-34. サブTHz波領域をフルカバレッジした実験結果と理論計算結果。

上記のように、極めて広帯域な周波数可変性が得られたことで、テラヘルツ波コヒーレント・トモグラフィーの性能アップも期待できる。そのため、図 2-29 から図 2-32 までで説明した三次元計測の実験を改良した。

図 2-35 に成果全体の概要を示す。同図(a)は、実験系の概略を示しており、バックワードテラヘルツ波パラメトリック発振器は、広帯域テラヘルツ波掃引光コヒーレンストモグラフィ (THz-SS-OCT) システムの光源として用いた。サンプルには、半導体シリコンを用いて THz-SS-OCT の評価を行った。テラヘルツ波光源の性能は、実験系との整合や制約もあり、システム値として周波数同調範囲 $\Delta f=259.5\sim797.1\text{GHz}$ 、中心周波数 $f_c=580\text{GHz}$ 、帯域幅 $\delta f=180\text{GHz}$ が得られた。本システムは、コンパクトで広帯域、かつチューナブルなシステムであり、長いコヒーレンス範囲にわたって安定したモードホップのない発振を保証している。理論的なシステムの深さ分解能は $800\mu\text{m}$ であるが、同図(b)の実測結果には 2 つのピークが見られ、その間隔が基板厚さである。屈折率効果もあって高分解能 $275\mu\text{m}$ が得られた。また、広帯域周波数可変特性から周期的な信号変動を解析することで、半導体シリコンの屈折率を 3.4 と求めることができた。

次に、同図(c)に示す反射型三次元イメージングを実施した。サンプルは、金属で表面段差が 3.5mm から 0.4mm まで変化するものである。2次元イメージングを測定した結果、同図(c)左枠のように可視光ではクリアには見えないが、テラヘルツ波では L 字の形状がはっきりと確認できた。また、同図(c)右枠の左図のように、奥行分解能を評価するために THz-SS-OCT を行った。単純な THz-SS-OCT 測定でも奥行分解能として 0.4mm 以下 ($400\mu\text{m}$) と良い結果が得られ、システムの性能が優れていることが分かった。

さらに、奥行分解能を高めるために、消滅フィルターに基づく数値処理アルゴリズムを分担者である大谷グループと連携して開発した結果、深さ分解能 $13\mu\text{m}$ とテラヘルツ波の波長より 2 桁程度向上させることができ、顕著な成果が得られた。

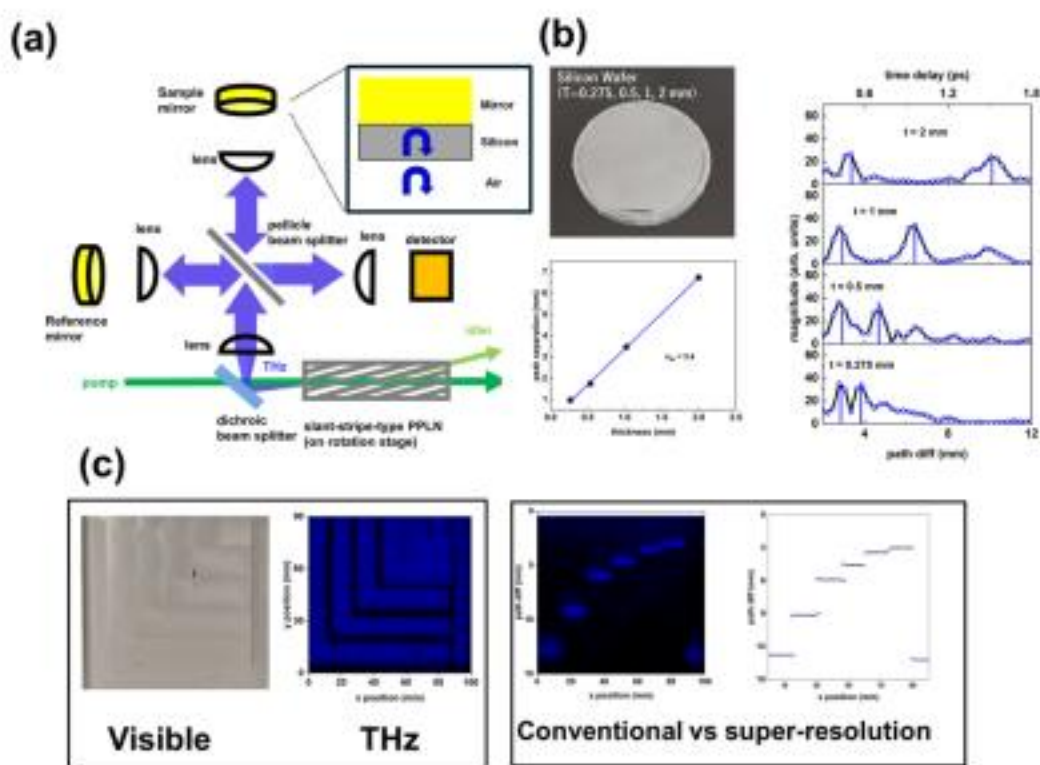


図 2-35. (a) BW-TPO に基づく THz-SS-OCT システムの概略図。(b) シリコンウェーハの屈折率と厚さの測定。(c) 金属段差試料の深さプロファイリング。

● メタマテリアルデバイスに関する研究（発展的研究）

本研究では、独自の超小型 BW-TPO 光源を非破壊検査システムに応用することを念頭に研究開発を行ってきた。研究序盤からシステムの軽量化や、偏光を使った計測の高度化に着目してきた。一方で、テラヘルツ波領域では機能性の高い光学材料や透過性の良い材料は多くなく、限られた材料で強引とも思える方法でデバイス開発をすることになる。そのため、我々は人工材料であるメタマテリアルやメタサーフェスの導入の重要性を考え、将来必要なテラヘルツ波光学技術の研究を行った。

令和 5 年度は、超小型な BW-TPO 光源システムを用いた応用研究を進めるにあたって、従来のかさばるバルキーな光学素子を置き換えるために、サブ波長構造のメタマテリアルを用いた超薄型・高効率なフレネルゾーンプレート（FZP）レンズの設計を行った。設計したユニットセルは、二層金属共振器で構成されており、金属層として厚さ 300 nm のアルミニウム、分離層として厚さ 135 μm のベンゾシクロブテン（BCB）を用いた。図 2-36 (a) に、ユニットセルの詳細を示す。周波数 0.305 THz でのシミュレーション結果では、二層金属構造がある（ない）部分の透過率は 88% (91%) に達し、二層金属構造の位相シフトは二層金属構造がない場合と比べて 90 度遅れることがわかった。

この二層金属ユニットセルに基づいて、FZP レンズの設計を行った。この FZP レンズは、8 つの同心ゾーンから構成されており、それぞれのゾーン半径は次の式で与えられる。

$$r_N = \sqrt{\left(N \cdot \frac{\lambda}{2}\right)^2 + Nf\lambda}$$

ここで、 N はゾーン番号、 r_N は半径、 λ は波長である。本研究では、設計上の焦点距離を $f = 78.7$ mm に設定した。図 2-36 (b) に示すように、二層金属ユニットは奇数番号のゾーンを周期的に配置した。図 2-36 (c) に、FZP レンズの集光特性の数値シミュレーションを示す。

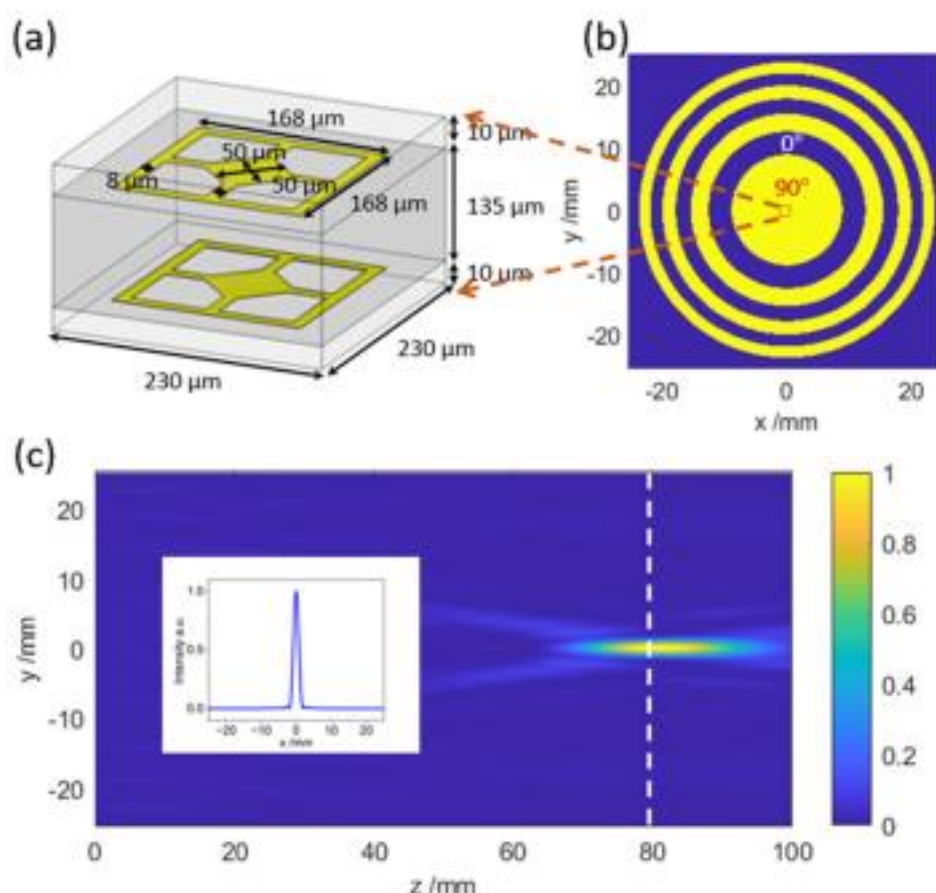


図2-36. 設計したFZPレンズの (a) ユニットセルと (b) 同心ゾーンのデザイン、および (c) 集光特性のシミュレーション結果。

設計したFZPレンズは、2つの方法を用いて作製を行った。まず1つ目として、液体BCBを用いて厚さ10 μm の BCB 層を石英基板上にスピコーティングし、最初の金属層パターンを形成した。その後、厚さ20 μm の BCB層を5回連続的にスピコーティングし、続いて2層目の金属層パターンを形成した。最後に、厚さ10 μm の BCB 層をスピコートした。2つの目として、市販の厚さ100 μm COPフィルムを用いて、その両面に同様の二重金属層パターンを作製した。図2-37に、それぞれの結果を示す。今後、これらの作製したFZPレンズの集光特性を実験的に測定する予定である。

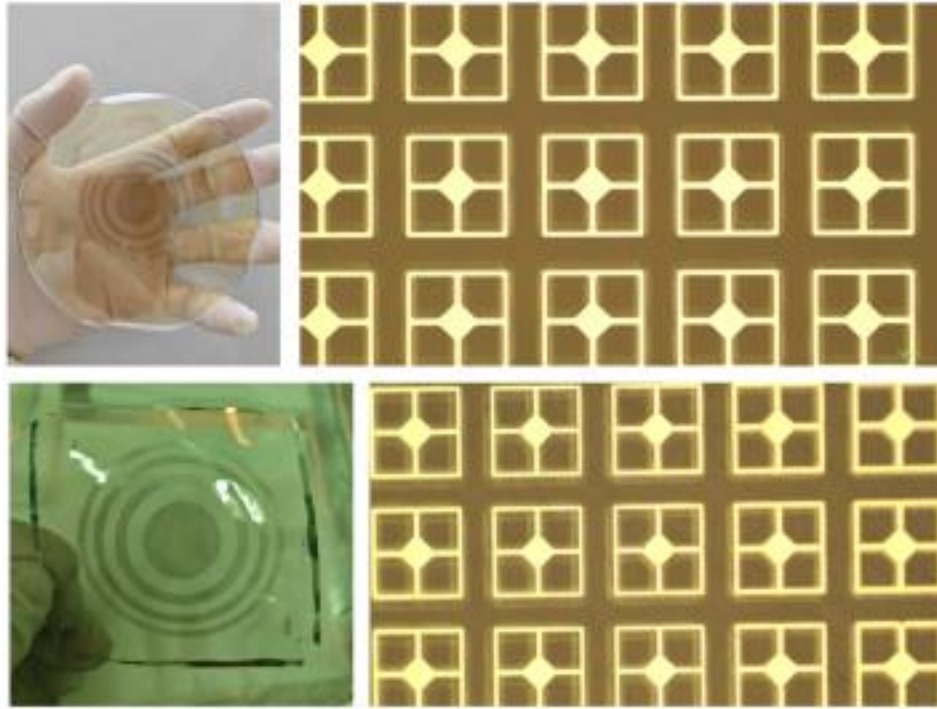


図2-37. (上) BCBフィルムと (下) COPフィルムを用いたFZPの作製結果。

また将来、通信、多偏波イメージング、生物医学センシングなどの THz 波応用を目指す場合を想定して、かつ開発しているバックワードテラヘルツ波パラメトリック発振の優れた直線偏光性を有効に利用するため、メタサーフェスを用いた小型・多機能・高性能な超薄型・高性能 THz 波デバイスの開発を行った。具体的には、スピンドカップル位相制御法を用いて、高度 THz 波偏光制御デバイスの開発を行った。この設計手法では、動的位相 (ϕ_f) と幾何学的位相 ($\pm 2\alpha$) の両方を、半波長板特性を備えた高抵抗シリコンピラーで構成される単一構造の設計パラメータに組み込んでいる。このスピンドカップル位相制御方式により、左回り (LCP、 $\phi_{rl} = \phi_f - 2\alpha$) および右回り (RCP、 $\phi_{rl} = \phi_f + 2\alpha$) の円偏波の THz 波の位相を独立して制御することが可能である。図 2-38 に、動的位相が $0 \sim 2\pi$ の範囲にある、半波長板条件を満たす 32 個の構造を示す。これら 32 個のユニット構造を利用して、様々な THz 波メタデバイスを設計することができる。

位相不連続原理に従い、 X 方向と Y 方向の両方に逆位相勾配を導入することで、1つの入射ビームから4つの出射ビームを生成することが可能となる。奇数行 (列) と偶数行 (列) の初期位相差 Ψ_{rl}^X, Ψ_{lr}^X (Ψ_{rl}^Y, Ψ_{lr}^Y) を調整することで、出力されるLCP波とRCP波の位相差を制御することができ、スピンド多重技術による出力波の偏光状態を自在に制御することができる。メタサーフェスによって変調された位相分布を以下に示す。

$$\begin{aligned} \Psi_{rl_odd}^X &= \frac{2\pi X}{nP}, \Psi_{rl_even}^X = -\frac{2\pi X}{nP} + \Psi_{rl}^X, \Psi_{rl_odd}^Y = \frac{2\pi Y}{nP}, \Psi_{rl_even}^Y = -\frac{2\pi Y}{nP} + \Psi_{rl}^Y \\ \Psi_{lr_odd}^X &= \frac{2\pi X}{nP}, \Psi_{lr_even}^X = -\frac{2\pi X}{nP} + \Psi_{lr}^X, \Psi_{lr_odd}^Y = \frac{2\pi Y}{nP}, \Psi_{lr_even}^Y = -\frac{2\pi Y}{nP} + \Psi_{lr}^Y \end{aligned}$$

ここで、 (X, Y) はメタ表面上の単位構造の位置座標、 P は単位構造の周期、 n は位相勾配の次数、 $\Psi_{rl}^X, \Psi_{rl}^Y, \Psi_{lr}^X, \Psi_{lr}^Y$ は初期の位相差である。4つの出射THz波ビームの偏波回転子を $P = 150 \mu\text{m}, n = 8, \Psi_{rl}^X = \pi, \Psi_{rl}^Y = \pi/2, \Psi_{lr}^X = 0, \Psi_{lr}^Y = 0$ で設計した。図2-39に、メタ表面によって変調された Ψ_{lr} and Ψ_{rl} の計算された位相分布を示す。

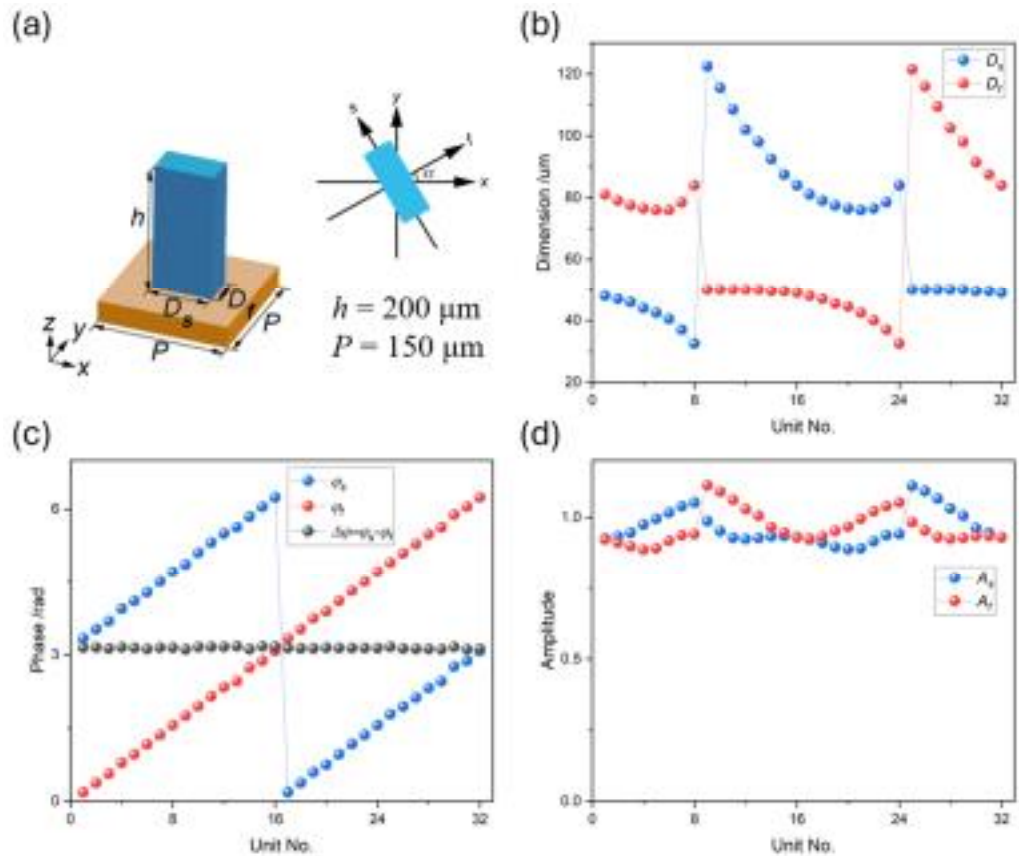


図2-38. (a) 直方体シリコンピラーのユニットセルと (b) その32個の構造サイズ。周波数1 THzにおける32個の構造の (c) 位相と (d) 透過率の計算結果。

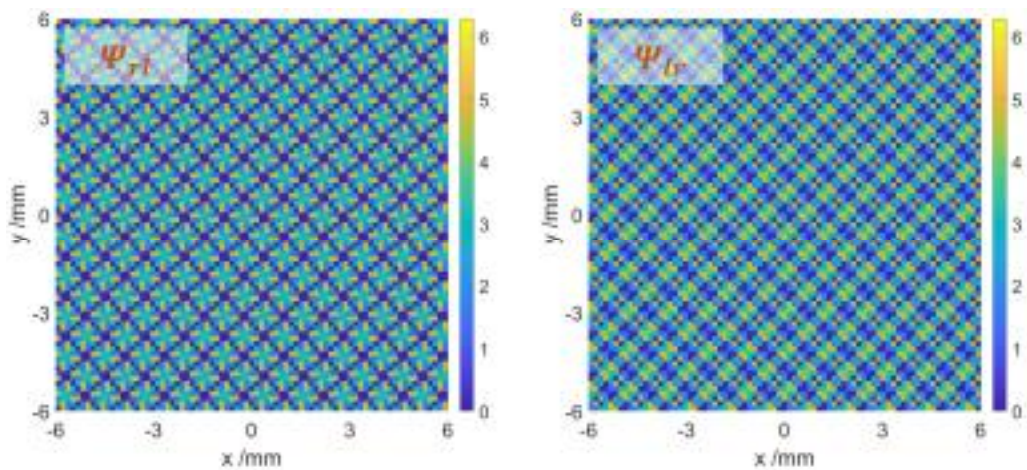


図2-39. メタサーフェスによって変調される位相分布の計算結果。

設計したメタサーフェスに対して、HFSSを用いてシミュレーションを行った。使用したPCメモリの制限により、 36×36 の構造サイズで計算を行った。励起波源は、ガウスビーム半径1 mmの周波数1 THzを設定した。完全吸収体を周囲に設定することで、シミュレーション中に境界反射によって引き起こされる干渉の影響を排除した。シミュレーションは異なる直線偏光励起源に対して実行し、メタサーフェスの上部から0.5 mm離れた位置の電場を抽出した。メタ表面の上部から60 mm離れた位置での様々な直線偏光の電場強度は、レイリー-サマーフィールド (RS) 回折式を用いて計算を行った。図2-40 (上) および (下) に、出射THzビームの空間強度分布およびその偏光状態の計算結果を示す。結果として、入射THz波ビームの偏光状態に応じて、4つ出射THz波ビームの偏光状態が変化することから、簡便に偏光計測を実現することが可能になると期待される。

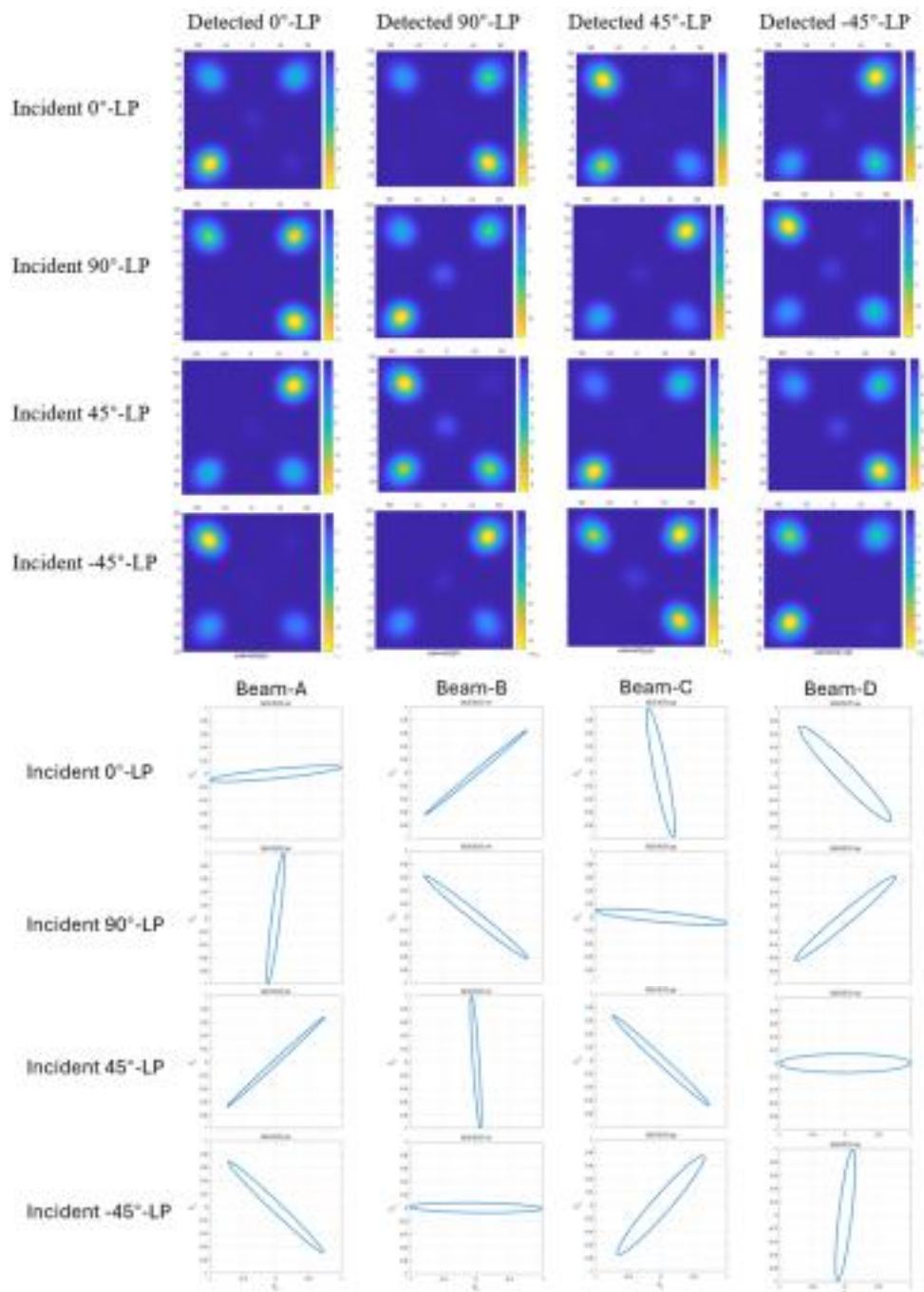


図2-40. 異なる入射偏光状態と検出偏光状態における（上）出射ビームの空間強度分布と（下）各出射ビームの偏光状態の計算結果。

令和6年度は、上記の4つの異なる偏光ビームを生成するデバイス（M-4D）を実際に作製し、その評価を行った。M-4Dは、従来のリソグラフィと深い反応性イオンエッチングを組み合わせ、高抵抗シリコンウェーハ上に作製された。M-4Dの性能評価は、光注入型THz波パラメトリック発生器とTHz波検出器からなる実験装置を用いて行った。図2-41にデバイスの顕微鏡表面観察像と、理論計算結果および実験結果を示す。直線偏光入射で偏光方向を 0 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$ とし、対応する γ_{in} 値を 0 、 $\pi/4$ 、 $\pi/2$ 、 $3\pi/4$ として検出した場合の電界強度成分を示している。実測されたパターンは、シミュレーションパターンとほぼ一致し、理論設計の有効性と実アプリケーションでの実用性が実証された。4本の偏向ビームの間隔は、x方向、y方向ともに28 mmであり、理論値およびシミュレーション値とほぼ一致している。わずかなずれは、走査ステップサイズ、分解能、z距離の測定誤差などの要因によるものである。結果として、4つのビームの平均総変換効率が約16.46%の変換効率を得られ、メタ材料による偏光分離素子製作の有効性が実証できた。

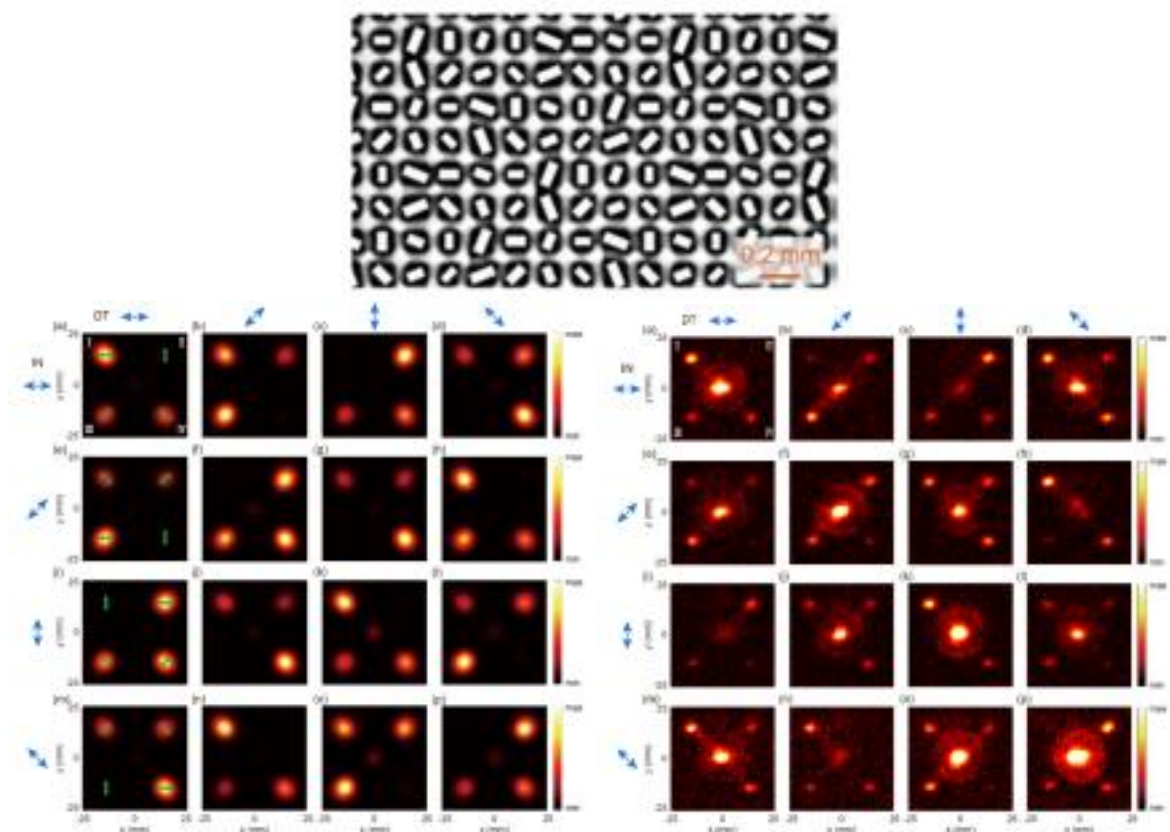


図2-41. 偏光分離素子(M-4D)の顕微鏡写真像（上）、理論計算結果（下左）、実験結果（下右）。

③ ロボット搭載テラヘルツ波システム開発（担当：理化学研究所）

令和6年度は、要素課題（1）に対応するため、これまでの実施項目の研究成果をまとめて、テラヘルツ波光源のロボット搭載システムの開発を行った。図3-1に開発したテラヘルツ波光源システムの外観写真を示す。励起レーザー光源と非線形光学結晶を含む必要最低限の光学系を筐体内に配置した。その結果、図3-2に示すように、スマートフォンと同等のフットプリントサイズであり、重量450g程度の手のひらサイズのテラヘルツ波光源システムの開発に成功した。ファイバー等のケーブル類を接続するのみで動作可能である。装置内部で発生させたテラヘルツ波は、筐体側面に配置したテラヘルツ波用レンズを通して外部に出力させた。高速応答のテラヘルツ波用検出器を用いて測定を行った結果、得られたテラヘルツ波のパルス幅は0.60 nsであり、そのピーク出力は最大で15 Wが得られた。したがって、手のひらサイズの装置から、ピーク出力が10 Wを超える高輝度なテラヘルツ波パルス出力を得ることに成功した。

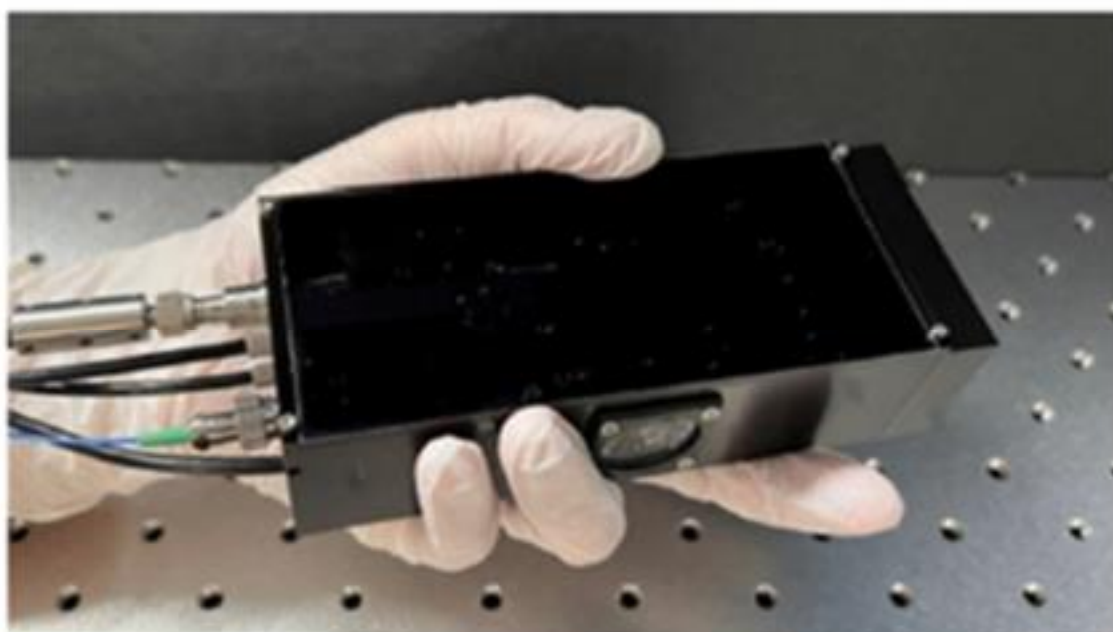


図3-1. 開発した手のひらサイズのテラヘルツ波光源システムの写真。

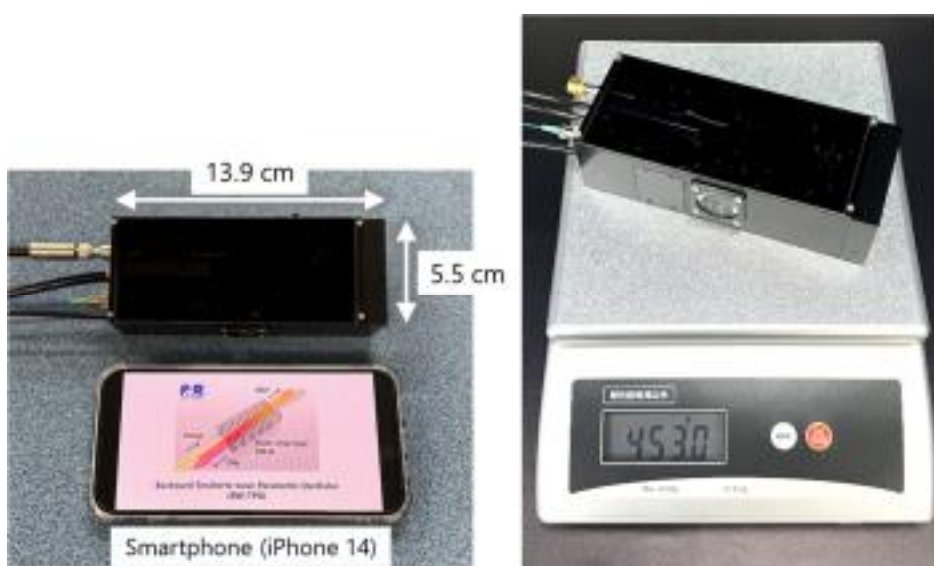


図3-2. 開発したテラヘルツ波光源とスマートフォンの比較（右）と重量測定の結果（左）。

ロボット搭載による非破壊検査イメージングの実証として、開発したテラヘルツ波光源と反射イメージング光学系を小型ブレッドボード（30 cm×15 cm）上に構築し、これを2軸自動移動ステージ上に搭載した（図3-3）。一般的には、テラヘルツ波光源だけでなく計測光学系についても精密な調整を必要とすることから、計測光学系は固定して測定サンプルを移動させて測定を行う必要がある。それに対して、本研究ではテラヘルツ波光源が小型軽量である強みを生かしたロボット搭載により、測定サンプルの位置を固定したまま、テラヘルツ波光源を含めた計測光学系全体を移動させ、実計測の場面に合わせた反射イメージング計測を実施した。

測定サンプルは、図3-4（左）に示すように、ガラス基板上に金属コーティングされたテストターゲットパターン（USAF1951）であり、それをテラヘルツ波の散乱や吸収が無視できないタオル地繊維布で隠した状態で反射測定を行った。

測定の結果、図3-4（右）に示すように、タオル地繊維布で隠されたテストターゲットパターンの反射イメージを明瞭に可視化することに成功した。この結果は、今回開発したテラヘルツ波光源の高輝度特性、高い出力安定性、および高い堅固性を示している。

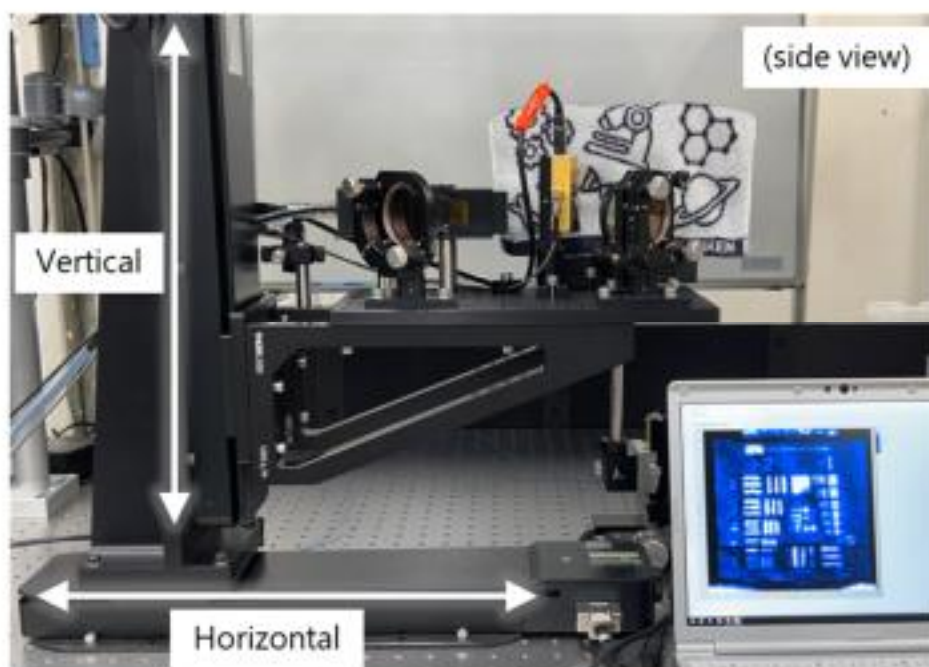


図3-3. ロボット搭載を想定した反射イメージング測定系の写真。

Visible camera image



0.3-THz reflection image

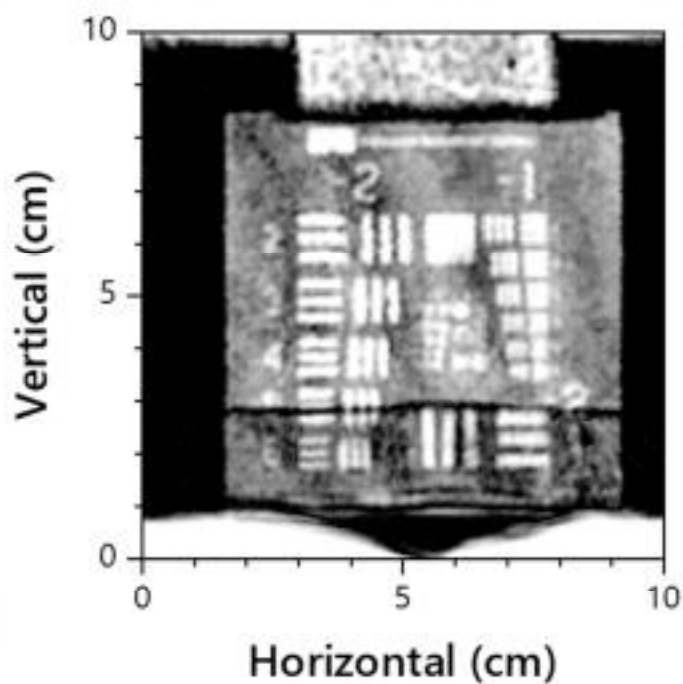


図3-4. 測定サンプル（USAF1951テストターゲットパターンとそれをタオル地繊維布で隠した状態で反射イメージング計測を行った（左）。得られたテラヘルツ波反射イメージング結果（右）。

④ テラヘルツ波検出の基礎検討（担当：理化学研究所）

本研究項目は、令和2年度から実施し、まずテラヘルツ波検出について動作条件の基礎検討を行った。特に、テラヘルツ波検出感度は、非破壊検査において高い信号ノイズ比で計測するために重要な性能である。照射対象からの透過あるいは反射してくるテラヘルツ波信号が微弱な場合でも計測するためにはテラヘルツ波検出感度の向上が課題である。これを解決するために、本研究では新しく発見したバックワード位相整合場を用いることで課題解決を考えている。一方で、新しい位相整合場による検出のため、検出感度に影響する光学条件やノイズレベルは未解明の部分が多い。そこで基礎検討は下記の内容について研究を行った。

● バックワード位相整合条件を用いたアップコンバージョン検出の検討

バックワード位相整合条件を用いたアップコンバージョン検出の光学配置を図4-1に示す。周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶に励起光とテラヘルツ波を波長変換の光学条件を満たすように入射する。具体的には、近赤外励起光とテラヘルツ波は別々の結晶面から逆向きに入射させる。パルスの励起光およびテラヘルツ波を用いる場合、時空間的な重なりを結晶中で満たすため、タイミングを合わせて入射する。テラヘルツ波から変換された近赤外信号光は励起光と同方向にわずかに角度を持って伝搬する。実施項目①で詳述した光学条件の下で、テラヘルツ波、励起光、信号光のすべての光波がほぼ同軸上を伝搬するため、結晶内部での光波とテラヘルツ波の空間的な重なりは非常に大きい。テラヘルツ波および信号光は大きな相互作用体積のもとで高い光パラメトリック利得を受けるため、アップコンバージョン検出に有利である。加えて、信号光は光学条件に従って励起光からわずかに角度を持って発生するため、強い励起光と空間的に分離した位置で計測できる。これらの特長は、バックワード位相整合場を用いたアップコンバージョン検出が原理的に高感度なテラヘルツ波検出を実現できることを示唆しており、高い潜在性能があると分かった。

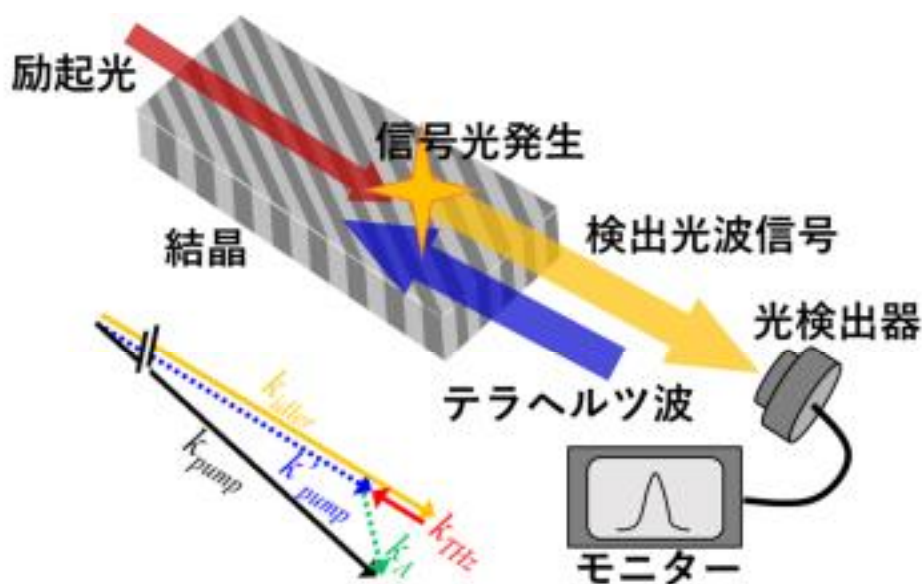


図 4-1. アップコンバージョン検出の光学配置。

- 冷却による位相整合条件への影響の検討（研究内容①、④共通）

温度安定性はテラヘルツ波検出において顕著に性能に影響する要素であり、テラヘルツ波検出周波数の温度変化の試算は重要である。冷却による位相整合条件への影響については研究項目①で詳述したとおり、影響は極めて小さく、検出テラヘルツ波周波数においてもほぼ変わらないことが分かった。高い温度安定性は検出信号光の強度揺らぎを抑制し、検出ノイズが小さいことを示唆している。結果として、高信号ノイズ比を得ることができるため、高感度なテラヘルツ波検出ができる。

- 微弱信号光のコヒーレント増幅の検討

微弱な信号光のコヒーレント増幅を試算するためには、結晶中で単位長さ当たりの光パラメトリック増幅に基づいて考えることで検討できる。そこで、予備実験から信号光の増幅指数を試算した。

図4-2に光波とテラヘルツ波が直交する光学配置（本研究のバックワード位相整合条件とは異なる配置）におけるアップコンバージョン検出の予備実験結果を示す。横軸は検出信号光と励起光の相互作用長、縦軸は検出信号光強度である。相互作用長は信号光の結晶出力端面を0として、テラヘルツ波の結晶入射位置で調整した。入射位置を変えながら検出信号光強度を測定した結果、検出信号光強度は相互作用長の2乗に比例して向上した。これは変換された微弱な信号光が結晶中を伝搬しながら光パラメトリック増幅された結果である。なお、相互作用長14 mm以上の位置ではテラヘルツ波が結晶（物理長15 mm）から外れたため、信号光強度が低下した。この時の最小検

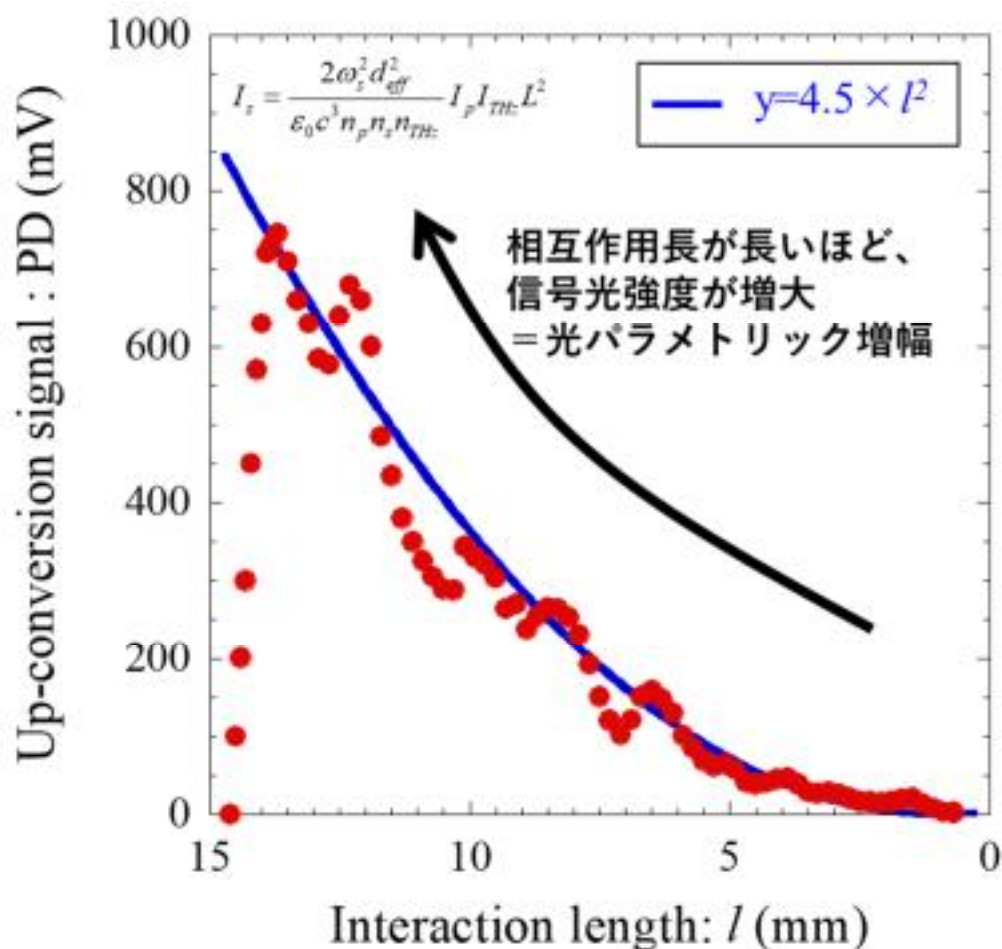


図 4-2. 周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶を用いたテラヘルツ波アップコンバージョン検出の予備実験結果。

出テラヘルツ波エネルギーは約10 pJ程度であった。バックワード位相整合条件では、約50 mmの結晶長全体で光パラメトリック増幅を受けることができ、過去実績より約4倍長い相互作用長を得ることができる。結晶長の2乗に比例することを考えると、最小検出エネルギーは1/16の約0.6 pJ程度が期待できる。実際には、全光波がほぼ同軸上で伝搬するため、より大きな相互作用体積による高い光パラメトリック増幅が期待できる。そのため、目標数値より微弱なテラヘルツ波の検出ができる。

- **カスケード過程を利用した検出の検討（研究内容①、④共通）**

周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶はカスケード波長変換の光学条件を満たすことから、アップコンバージョン検出においても同様に信号光から高次ストークス光（アイドラー光と同波長）の発生が可能である。この光学条件において、テラヘルツ波から変換された信号光がさらに変換され、通常では発生しない高次ストークス光が得られれば高い信号光パワーを計測できる。また、高次ストークス光の波長は励起光波長からより離れており、スペクトル上で高い信号ノイズ比が得られると考えられる。結果として、高次ストークス光の利用は有効である。

- **非線形光学材料の差異（研究内容①、④共通）**

非線形光学材料の差異はアップコンバージョン検出においても実施項目①で詳述した通り同様である。テラヘルツ波発生と同じく性能指数の大きい結晶を利用するほうが有効であるため、実際にはマグネシウム添加ニオブ酸リチウム結晶を用いることとした。

⑤ テラヘルツ波検出の実験（担当：理化学研究所）

令和3年度は、前年度に行った周波数アップコンバージョンによるテラヘルツ波検出に関する実施項目④を基に、実際にアップコンバージョン検出の検証実験を遂行するための実験光学系の構築を行った。

まず、後進波パラメトリック位相整合過程を用いたテラヘルツ光発生および検出の双方に必要となる、波長1064 nmのサブナノ秒パルス励起光源の開発に取り組んだ。今後の様々な応用を見据えて、小型でロバストな可搬型励起光源とするために、バッテリー駆動型のレーザーダイオードからの出力をエンドポンプ光源とするマイクロチップレーザーの開発を行った。用いたエンドポンプ用レーザーダイオードの波長は808 nmで出力は250 Wである。レーザーダイオードの出力を光ファイバーでガイドし、長さ9 mmかつ直径3 mmの Cr^{4+} ドープNd:YAG結晶へ照射する。Nd:YAG結晶のエンドポンプ光入射面には波長1064 nmに対しHRコートを施し、レーザー発振側には透過率50%程度の反射コートを施すことでパッシブに発振させることで、パルス幅約900 ps、波長1064.3 nm、線幅0.01 nm以下のパルス光を得た。この発振により得られた出力はおおよそ2 mJ程度であるが、全体としてレーザー部は長さ10 cm程度に収まる非常なコンパクトなシステムで、YAG結晶へのエンドポンプ光もファイバー仕様でかつバッテリー型のハンディな電源であるために、極めて使いやすい励起光源となっている。この励起光源全体の様子を図5-1に示す。

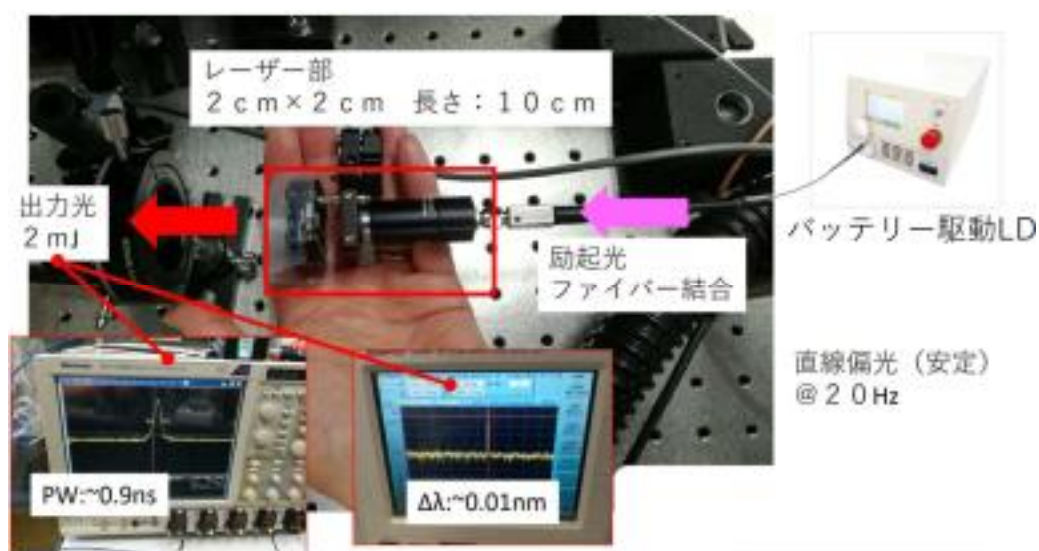


図5-1. 開発したマイクロチップレーザー。

しかしながら、出力2 mJの光源では、周波数アップコンバージョンの検証実験にはパルスエネルギーが不十分である。そこで図5-2に示すように、マイクロチップレーザー発振出力をさらにサイドポンプのNd:YAG増幅器を用いて増幅した。図5-3に増幅特性を示す。Nd:YAG増幅器のLD電流値が7 A程度の時に、繰り返し周波数30 Hzでアベレージ出力として600 mW程度が得られた。この時のパルスエネルギーは20 mJ程度であり、入力に対しておよそ10倍の増幅率である。この20 mJの光を二つに分岐し、一方を発生用、もう一方をアップコンバージョン用の励起光とすることで検証実験の光学系を構築した。

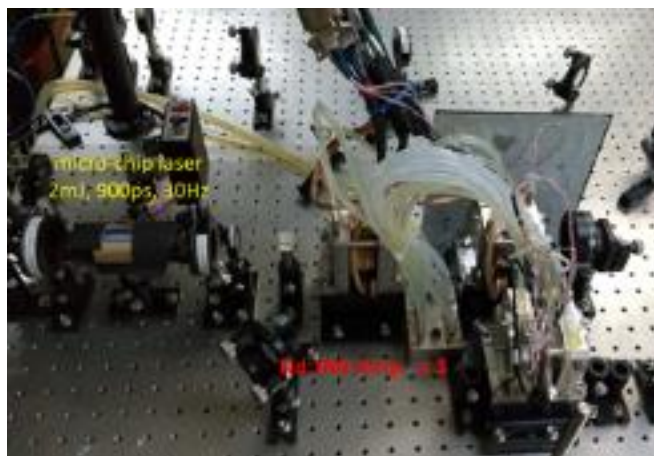


図5-2. マイクロチップレーザー+Nd:YAG増幅器。

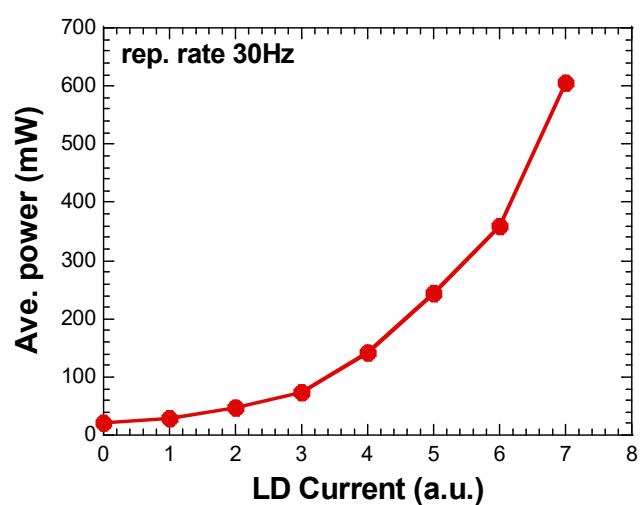


図5-3. Nd:YAG増幅器の増幅特性。



図5-4. 周波数アップコンバージョン検出の検証実験光学系。

周波数アップコンバージョン検証実験系の全体像を図5-4に示す。Nd:YAG増幅器によって増幅された励起光は偏光ビームスプリッターにより2つに分岐され、一方はバックワード位相整合によるサブテラヘルツ光発生用の斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶へと導く(図5-4中の赤線)。発生用の光学系にはCWの光注入光も組み込み、安定して高出力な波長可変サブテラヘルツ光が発生可能となるシステムとした。図5-5に発生光学系において得られたサブテラヘルツ光及びアイドラー光の入出力特性を示す。ここでCWの光注入光の平均出力は500 mWであり、テラヘルツ光検出には室温動作するパイロ検出器を用いた。励起エネルギーが3 mJを超えたあたりからアイドラー光とテラヘルツ光のバックワード発振が始まり、励起エネルギー6 mJあたりでカスケード過程による第二アイドラー光が観測されている。6 mJを超えると第一アイドラー光のエネルギーは減少するが第二アイドラー光によるテラヘルツ光発生が重畳されてテラヘルツ出力は増大を続ける。しかし同時にバックワードではない位相整合を満たす高周波数領域のテラヘルツパラメトリック発生も開始している事が分かる。

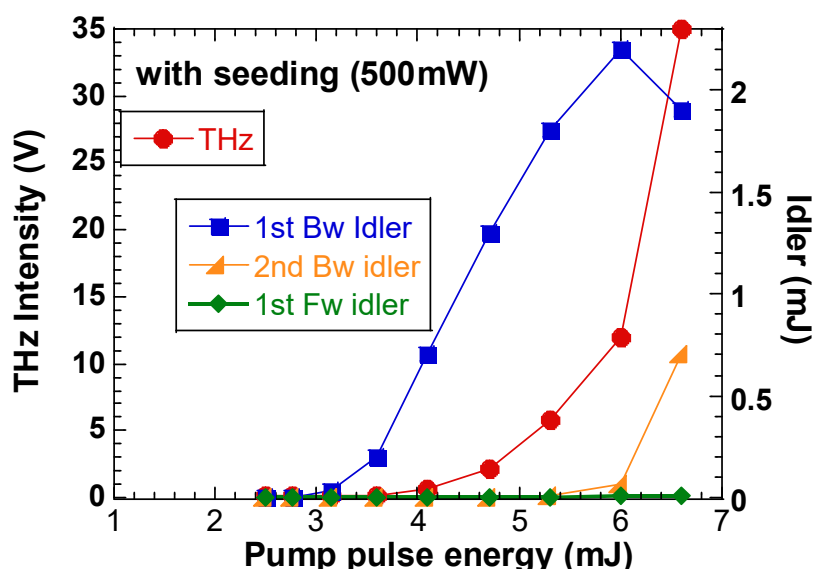


図5-5. 発生側の励起エネルギーに対するテラヘルツおよびアイドラー光出力特性。

一方、偏光ビームスプリッターにより分岐されたもう一方の励起光は、周波数アップコンバージョンによるサブテラヘルツ光検出を実現するための、検出用斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶へと導く(図5-4中のピンク線)。発生側の斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶から後進波として発振したテラヘルツ光を、テラヘルツ光に対して高い屈折率を持ち、かつ励起光の波長1064 nmに対してAR処理を施したニオブ酸リチウム基板を用いて90度反射させて取り出す。その後、再びニオブ酸リチウム基板で反射させることで90度光軸を変えて、検出用の斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶へと入射する(図5-4中の緑線)。この際にテラヘルツ用凸レンズを用いてテラヘルツ光を収束させ、断面1 × 5 mmのニオブ酸リチウム結晶へ効率よく結合させることが必要となる。また、検出用斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶へ入射する励起光、テラヘルツ光ともに繰り返し30 Hz、パルス幅0.9 ns以下のパルス光であるため、両者のタイミングを励起光の光学系に組み込んだ遅延ステージを用いて精密に合わせなければ、バックワード位相整合によるアップコンバージョン光の検出は難しい。更に、発生側のバックワードパラメトリック発振で発生しているアイドラー光の波長と、検出側のバックワードパラメトリック発振で発生するアイドラー光の波長が一致するような条件下でなければ、検出側の斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶において効率良くテラヘルツ光から近赤外光への周波数アップコンバージョンが生じないことも明らかになった。これらの問題を全てクリアすることで図5-6に示すように、周波数アップコンバージョン信号の初検出に成功した。ここで周波数アップコンバージョン光の検出にはシリコンのアバランシェフォトダイオードを用いた。検出用の斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶へのテラヘ

ルツ光入射をアルミや透過率の低いガラス等で遮断するとアップコンバージョン信号はほぼ消えるが、ブラックポリエチレンなどで遮断してもアップコンバージョン信号は消えないことから、間違いなくテラヘルツ光が近赤外光へと周波数アップコンバージョン変換した信号であることが確認できた。この時のテラヘルツ入力パルスエネルギーとしては1 pJ程度と予想されるが、今後さらなる最適化により高感度化を目指す。

また、実際にアップコンバージョン信号をスペアナで計測したデータを図 5-7 に示す。アップコンバージョン信号の波長は 1065.53 nm であり、励起光波長 1064.4 nm と入力したテラヘルツ周波数 308 GHz の差に一致している。さらに、サブテラヘルツ光発生側の斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶において発生しているアイドラー光の波長を計測した結果も重畳して示しているが、両者は一致していることも分かる。

図 5-8 に周波数アップコンバージョン光のパルス波形を帯域 40GHz の高速オシロスコープで計測した結果を示す。励起光のパルス幅と比較して若干パルス幅が短くなっており、非線形光学効果に特徴的なパルス波形が得られている。

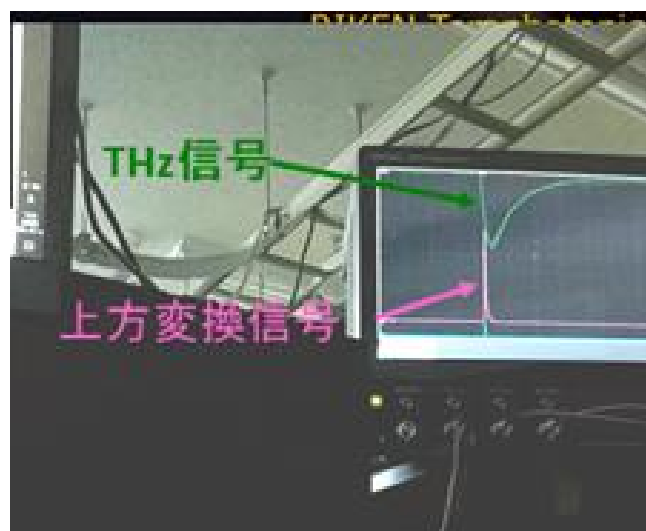


図 5-6. アップコンバージョン初検出信号。

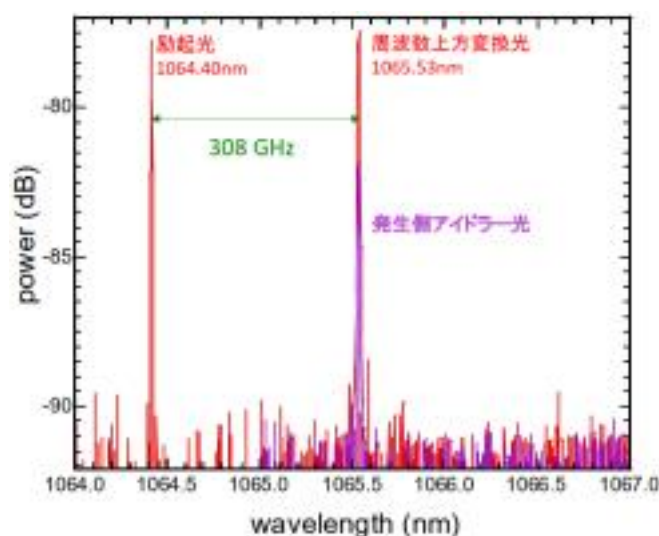


図 5-7. アップコンバージョン光スペクトル。

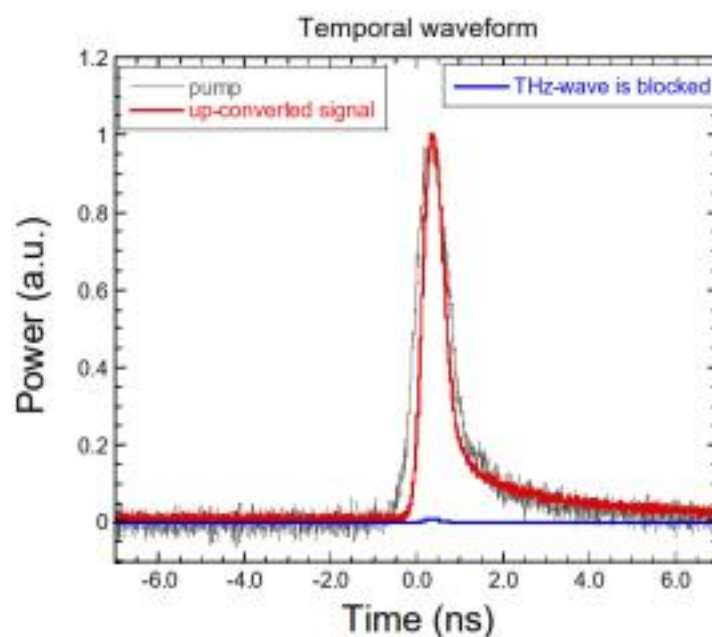


図 5-8. 周波数アップコンバージョン光の時間波形。

次に、周波数アップコンバージョンにおける検出テラヘルツ光周波数可変性の検証実験を行った。周波数を制御するために、図 5-9 に示すように発生および検出用の斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶をステッピングモータ駆動の回転ステージ（角度分解能 0.025° ）上に設置し精密に制御した。最初に発生・検出用の斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶からのアイドラー光波長が完全に一致するように調整し、その後、発生側の回転角に合わせて検出側の回転角も同じパルス数だけ回転させて、検出周波数の可変性を検証した。図 5-10 に結果を示す。横軸は発生・検出側双方のステージの回転角を表しており、縦軸は発振し、アップコンバージョン検出に成功したテラヘルツ周波数を示している。本実験によりアップコンバージョン検出の周波数可変性も実証できたが、検出周波数可変範囲としては 35 GHz 程度である。これは斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶の断面形状の面積の制約で、回転に伴い励起光の位置が入射しているテラヘルツ光に対して相対的にずれていき変換効率が低下していることが原因と考えられる。今後ディスク上の結晶加工などが成功すれば、さらに広範囲な連続周波数可変アップコンバージョン検出は十分期待できると思われる。

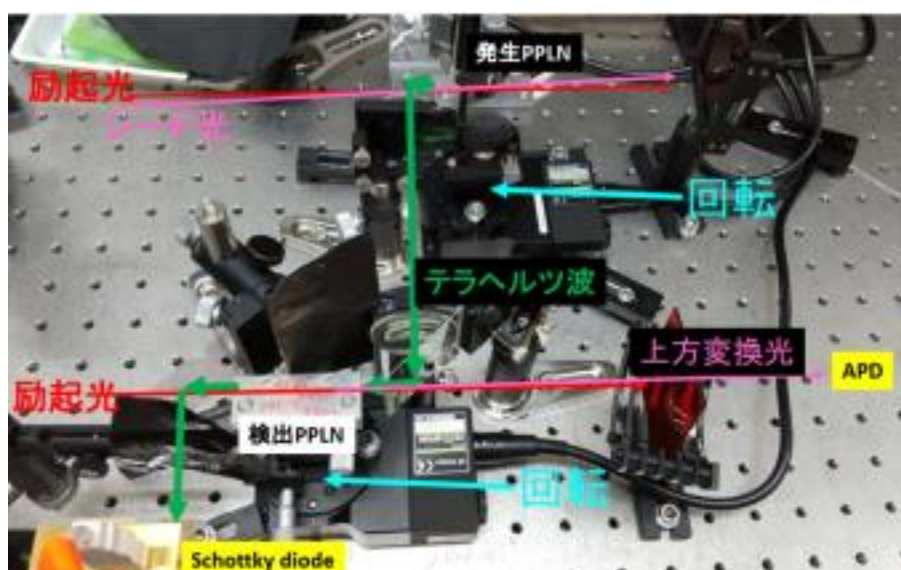


図 5-9. ステッピングモータ駆動回転ステージ上に設置された分極反転 LN 結晶。

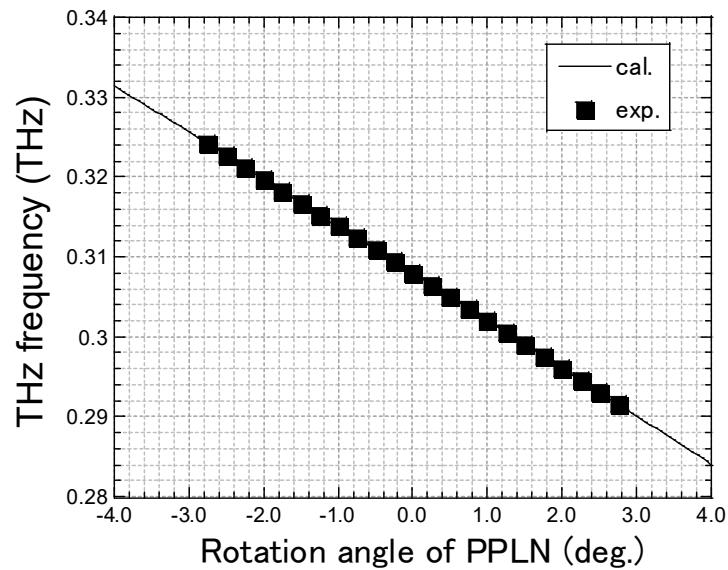


図5-10. アップコンバージョン検出周波数可変性。

次にアップコンバージョン検出におけるテラヘルツパラメトリック増幅効果の検証を行った。図5-11に示すように検出用斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶の後段にパラメトリック増幅用のバルクニオブ酸リチウム結晶を設置し、検出用斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶を通り抜けてきた励起光とアップコンバージョン光を入力することで、アップコンバージョン光のパラメトリック増幅が生じるかを検証した。結果として、バルクのニオブ酸リチウム結晶がない場合の検出限界よりも少し高感度化に成功したが、バルクのニオブ酸リチウム結晶で300 GHz帯の位相整合が本当に成立しているかは更なる検証が必要であり、今後の課題である。また、理想的にはバルクでなく斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶をもう一つ用いたパラメトリック増幅が理想であり、今後さらなる実験を進める。

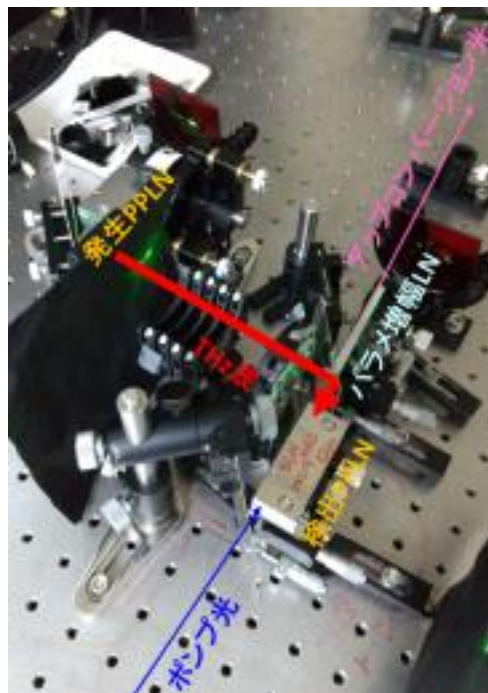


図 5-11. バルクニオブ酸リチウム結晶を用いたアップコンバージョン光のパラメトリック増幅検証。

令和4年度は、令和3年度に構築したテラヘルツ波光源を用いてバックワード位相整合を利用したテラヘルツ波アップコンバージョン検出を行った。具体的には、バックワード・テラヘルツ波発振器の出力を検出用の周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶へと入射し、発生するアイドラー光（検出光）を近赤外光検出器で測定した。また、異なるテラヘルツ波周波数におけるアップコンバージョン検出の研究をするため、新たな実験系の構築を行った。

テラヘルツ波は、電磁波スペクトル上で光波と電波（ミリ波）の間にある電磁波である。つまり、電波側から見れば超高周波領域にあり、フォトン側から見ればミリeVの微小光子エネルギー領域に存在する。このため、テラヘルツ波の高感度検出器の開発は難しく、特に常温で動作する検出器は、室温の黒体輻射を考慮に入れると、特殊なデバイス開発が必要となる。しかし、高感度テラヘルツ波検出は、実用上、極めて重要な技術であるため研究開発が必要である。

本研究課題では、非線形光学効果を用いたテラヘルツ波と光波の光量子変換によって、開発が格段に進んでいる光波領域にテラヘルツ波信号を変換して検出する方法の確立を目指している。非線形光学効果を利用した場合、位相整合条件に基づいた光のコヒーレンスを利用しているため、高い信号ノイズ比と常温検出が期待できる。特に、本研究でのバックワード・テラヘルツ波パラメトリック位相整合による検出は独自の方式であり、世界に類する研究はない。また、基本的には発振器となる変換メカニズムを用いるため、効率の良い光量子変換場の形成が考えられ、他の非線形光学変換方式とは異なる優位性が見込まれる。

令和4年度は、前年度までに実証したバックワード位相整合によるテラヘルツ波アップコンバージョン検出の最適化による高感度化の研究を行った。実験系を図5-12に示す。

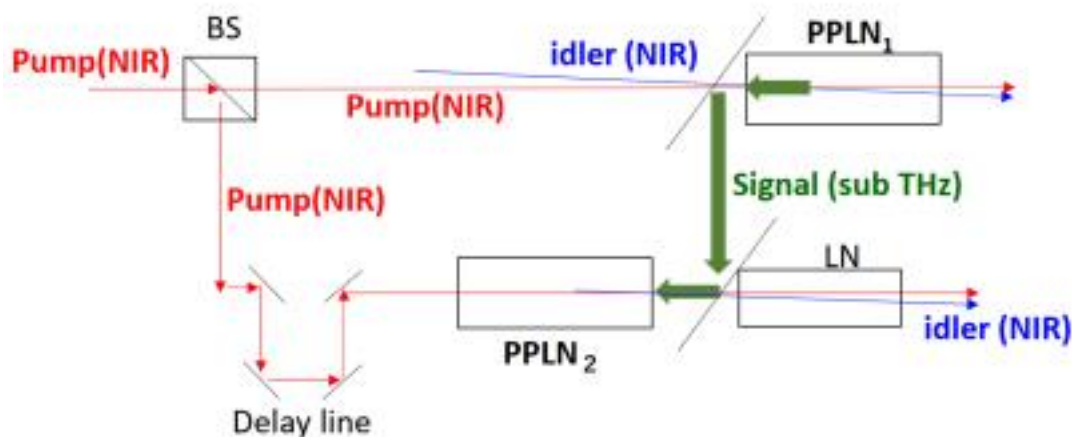


図5-12. 高感度検出の実現に向けたアップコンバージョン検出の実験系の概略図。

自作の受動QスイッチマイクロチップNd:YAGレーザー（パルス幅約0.9 ns、パルスエネルギー0.5 mJ、波長1064.4 nm）を単一縦モードで発振させ、さらにこのレーザー出力をNd:YAG光増幅器で15 mJのパルスエネルギーまで増幅して励起光源として使用した。増幅後の励起光スペクトル線幅は、光スペクトラムアナライザーの測定限界以下である0.01 nm以下である事を確認した。増幅された励起光ビームは、図5-12に示したビームスプリッター（BS）にて2つのビームに分割された後、テラヘルツ発生用の周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶であるPPLN₁（分極反転周期53 μm、傾斜角67°）とアップコンバージョン検出用のPPLN₂へと導かれる。図5-12では励起光を赤線で示しており、青線は発生用の光注入種光とアイドラー光を表している。励起光と光注入種光がPPLN₁へ照射すると、バックワード光パラメトリック過程により緑線で示したようにテラヘルツ波がPPLN₁内にて後進波として発振する。発振周波数は励起光の波数ベクトルとPPLN₁の周期分極グレーティングの波数ベクトルとの成す角度に依存する。今回の実験におけるテラヘルツ発生では、励起光のパルスエネルギーが6 mJ、光注入種光は連続波であり平均パワーは500 mW、発振したテラヘルツ周波数0.308 THz、テラヘルツ波出力エネルギー

約10 nJである。

別途、ビームスプリッタ (BS) で分割された励起光は、アップコンバージョン検出のために PPLN₂へ照射された。PPLN₁で発振したテラヘルツ波は、2枚のダイクロイックミラーを用いて反射されPPLN₂に励起光と対向した形で入射された。PPLN₂に入射する励起光とテラヘルツ波はいずれもパルス幅約0.9 nsのパルス光であるため、励起光経路に設置した遅延ステージにより、両者の入射タイミングを正確に合わせる必要がある。また、PPLN₁で発生するアイドラー光の波長と、PPLN₂でテラヘルツ波の検出信号として発生する光波の波長が一致していないと、テラヘルツ波検出時に入射テラヘルツ波に対する位相整合条件が満たされず、アップコンバージョン信号が生じない。さらに、テラヘルツ波の理論回折限界とPPLN₂結晶の厚さ (1 mm) がほぼ等しいために、凸レンズを用いてテラヘルツ波を十分集光し効率よくPPLN₂へ結合させる事が重要である。

さらにアップコンバージョン検出の高感度化を目指して、検出用PPLN₂の後段に長さ50 mmのバルクニオブ酸リチウム結晶を設置し、アップコンバージョンしたアイドラー光と、検出用PPLN₂を透過した励起光を入射した。バルクのニオブ酸リチウム結晶でバックワード位相整合は満たされないため、検出の背景ノイズとなるアイドラー光は発生せず、アップコンバージョンした信号光のみがパラメトリック増幅される。以上のように高感度検出のために、アップコンバージョン検出の実験系を最適化し、十分なアップコンバージョン信号を得られるようにした。結果を次に述べる。

図5-13にアップコンバージョン検出の入力依存性の結果を示す。実験ではまず、校正済みテラヘルツパワーメーター (Gentec社製) を用いて、入力されるテラヘルツ波のパルスエネルギーを評価した。次に、0.308 THzのテラヘルツ波に対して透過率23%の厚さ1 mmのガラスプレートを順次挿入し、PPLN₂に入力されるテラヘルツ光子数を段階的に減衰させた。アイドラー光はシリコン製のアバランシェフォトダイオード検出器で検出した。テラヘルツ波検出性能は、励起光が与える変換利得に依存すると考えられるため、励起光エネルギーを3.7 mJ、5.5 mJ、6.5 mJと変化させて、それぞれテラヘルツ波検出限界を調べた。

結果として、検出された信号光強度は、すべての励起光エネルギーの条件でテラヘルツ波検出を実現できた。一方、励起光エネルギーによって最小検出感度が異なることも判明した。必ずしも高い励起光エネルギーで高感度検出が実現するわけではなく、適した励起光条件があることが示唆された。基本的に検出限界を決める主要なノイズは、強力な励起光の散乱光と、バックワード・パラメトリック過程によって励起光によりPPLN₂内で発生する自然発生光である。これらのノイズ強度を低減することが重要であり、励起光強度を弱めることが有効であるが、同時にアップコンバージョンの変換効率も低下してしまう。そのため、アップコンバージョン検出のための最適な励起光強度が存在すると考えられる。実験では、励起光エネルギー5.5 mJ程度の励起光強度が最も良好な結果となった。

本成果の特筆すべき点は、最小テラヘルツ波検出感度として、テラヘルツ波エネルギー約50 アトジュールの極微小エネルギーを検出できたことである。この検出レベルは極低温冷却したシリコンボロメータよりも数桁高感度である。さらに、検出ダイナミクスレンジが最大で約90 dBと極めて広いテラヘルツ波エネルギー範囲にわたって検出を実現できたことも顕著な成果である。一般的には30 dBや40 dB程度が検出ダイナミクスレンジであることから、驚くべき検出エネルギー範囲であると言える。

検出限界には、ポンプ光強度だけでなく、ポンプ光のパルス幅やビームサイズ、PPLN₂結晶長さなども影響する可能性があり、検出感度のさらなる向上の余地がある。一方、最小検出ではテラヘルツ光子の入射数が約 10^5 レベルと格段に少ない状況である。このような驚異的な成果が得られたことを考察すると、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック変換が、光量子変換であることから、量子力学に基づく研究に発展する可能性があると考えている。

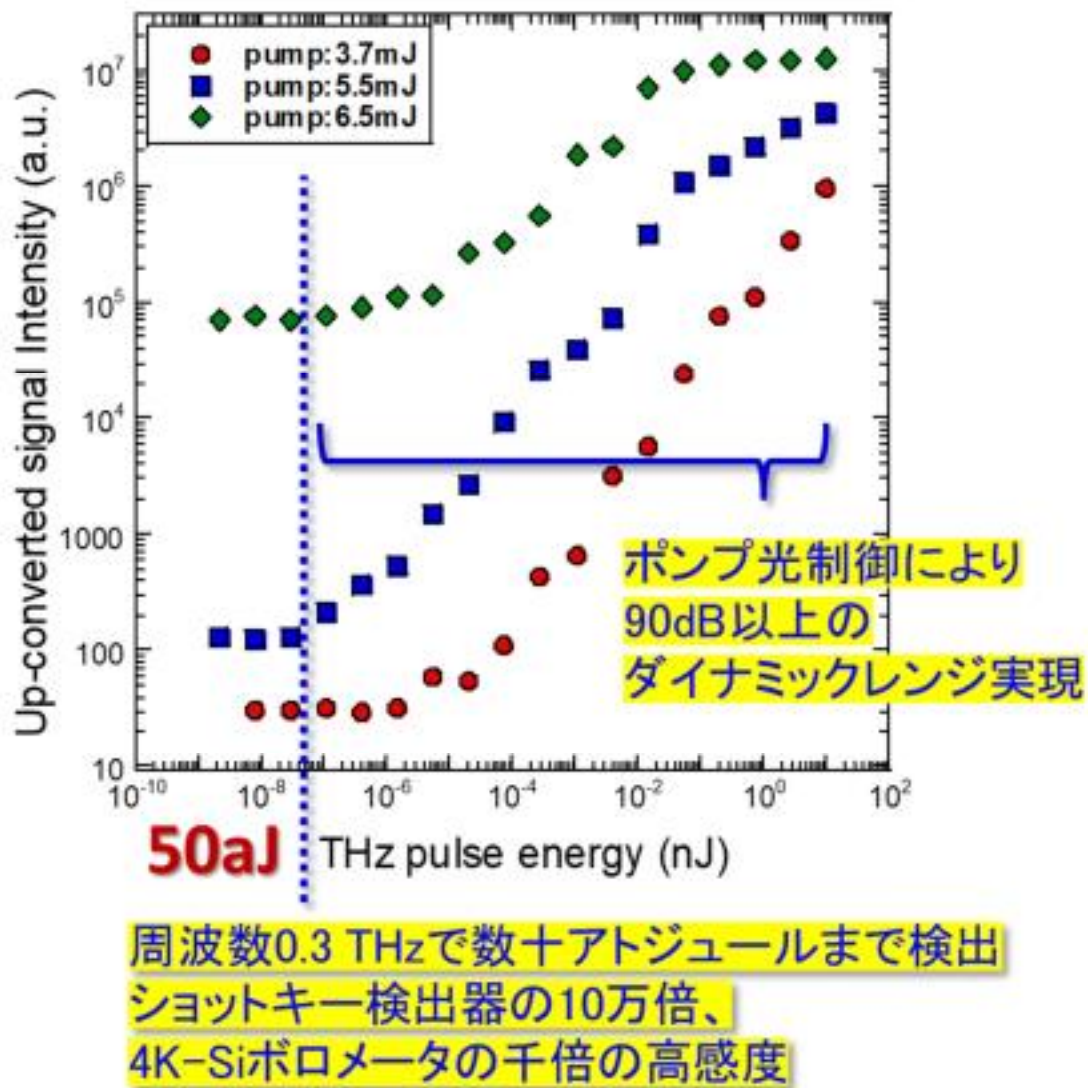


図5-13. 超高感度テラヘルツ波アップコンバージョン検出の実験結果。励起光エネルギーが3.7 mJ、5.5 mJ、6.5 mJと異なる場合について測定した結果を示している。各軸は対数表示している。

令和5年度は、中間評価で達成したマイルストーンの成果をもとに、バックワード位相整合を利用したテラヘルツ波アップコンバージョン検出の高感度化の検討を行った。また、同位相整合場による異なる周波数でのテラヘルツ波検出について、周波数可変性の検討を行った。さらに、バックワード位相整合条件に加えて、有機非線形光学結晶を用いたフォワードの光量子変換によるアップコンバージョン検出を検討し、実験系の構築を行った。具体的な成果について、下記に報告する。

バックワード位相整合を利用したアップコンバージョン検出の感度をさらに高めるには、ポンプ光強度の影響だけでなく、ポンプ光のパルス幅や検出側のPPLN結晶の長さなどの他のパラメータも検討することが重要である。アップコンバージョン検出の動作周波数をより高い周波数に拡張するために、2つの同一パラメータを有する斜周期PPLN結晶を使用して、周波数0.45 THzのための別の実験セットアップを構築した。PPLN結晶は、傾斜角 $\alpha=67.0^\circ$ 、50.0 (長さ) x 5.0 (幅) x 1.0 (厚さ) mm³で、入出射端面にポンプ光波長用の反射防止コーティングが施されたものを使用した。

図5-14に、実験の概略図を示す。まず、ポンプ光源として、単一縦モードマイクロチップレーザー (0.46 ns、100 Hz、1064.44 nm) とNd:YAG増幅器を使用して、光注入型バックワード

THz パラメトリック発振器 (BW-TPO) を構築した。このポンプ光ビームは、シリンドリカル レンズペアによって直径約 $690\text{ }\mu\text{m} \times 695\text{ }\mu\text{m}$ (FWHM) のほぼ円形のビームにコリメートした。CW 分布帰還型半導体レーザーの波長は、アイドラー光の波長に同調し、Yb ドープファイバー 増幅器と組み合わせて光注入光源として使用した。ポンプ光ビームとシード光ビームの直線偏 光方向は、両方とも PPLN 結晶の z 軸方向に沿って設定した。PPLN-1 結晶を 7 mJ のポンプ光 エネルギーで励起した場合、 20 nJ の出力 THz 波パルスエネルギーが得られた。THz 波出力は、 入射ポンプ光ビームとは反対の方向から別の PPLN-2 結晶に集光した。

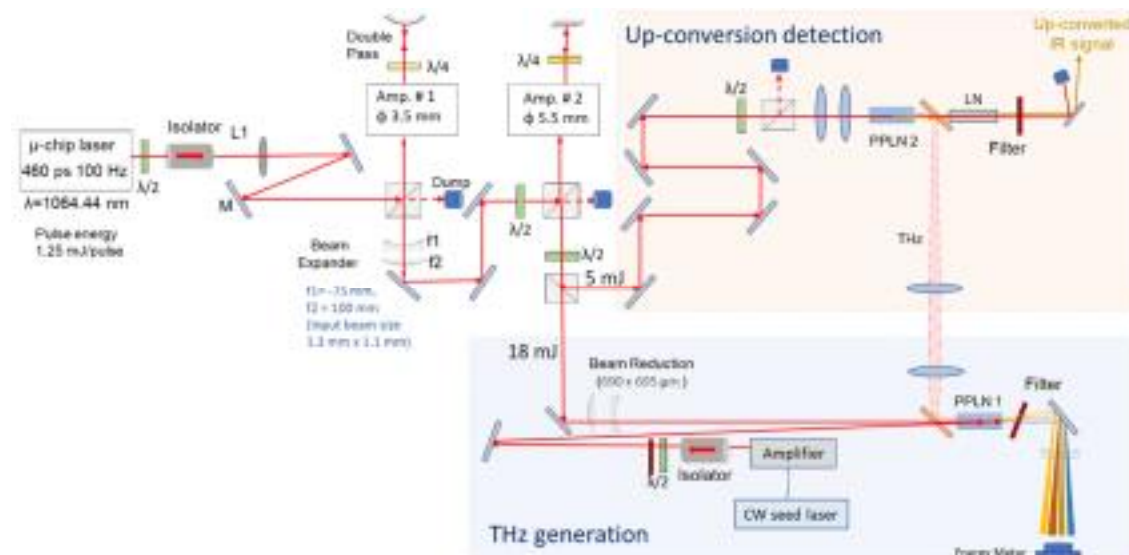


図5-14. 周波数0.45 THzにおけるTHz波アップコンバージョン検出の実験系。

実験では、興味深いことに、PPLN 結晶からバックワード、フォワード、および PPLN 結晶の光学軸に対して横方向にも高次のカスケードアイドラー光が観察した。図 5-15 (a) 示すように、 $53\text{ }\mu\text{m}$ の分極反転周期と 67° の傾斜角を持つ PPLN 結晶から得られるバックワード・アイドラー光とフォワード・アイドラー光は、それぞれ 0.3 THz と 0.79 THz の THz 波周波数に対応する。また、PPLN 結晶の光学軸に対して横方向に、それぞれの励起光ビームから周波数で約 1.5 THz 離れたビームペアも観察された。図 5-15 (b) 示すように、分極反転周期 $35\text{ }\mu\text{m}$ の別の PPLN 結晶からは、対応する周波数としてそれぞれ 0.45 THz (バックワード)、 1.2 THz (フォワード)、 2 THz (横方向) であった。バックワード方向とフォワード方向の両方で測定されたアイドラー光波長は、位相整合条件の計算結果とよく一致した。現在、横方向の位相整合の背後にある根本的なメカニズムを理解するための実験を進めている。光注入した場合については、測定されたアイドラー光波長に影響を及ぼさないことが観察された。ポンプ光ビームに対して PPLN 結晶を回転させると、バックワードおよびフォワードのアイドラー光波長は変化するのに対して、横方向の分離周波数には影響を及ぼさないことを確認した。今後は、PPLN 設計パラメータを変更することにより、発振周波数を変更できるため、様々な THz 波周波数の汎用光源になることが期待される。

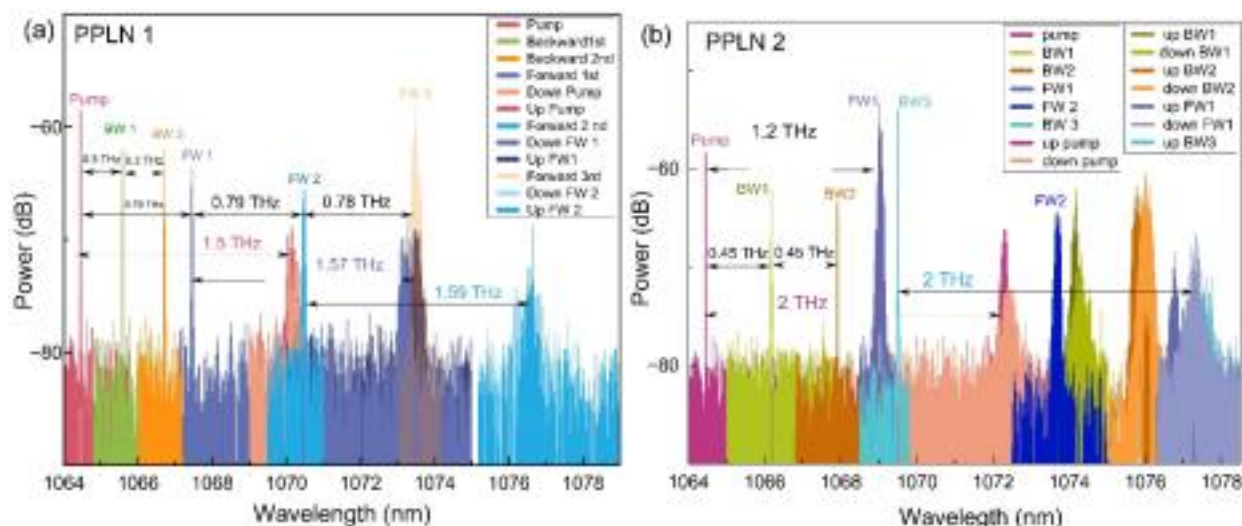


図5-15. 観測された様々なアイドラー光スペクトル。PPLN結晶の分極反転周期は (a) 53 μm 、 (b) 35 μm 。

PPLN 結晶に加えて、有機非線形光学結晶である DAST や OH1 などを用いた THz 波アップコンバージョン検出はこれまでに実証されており、室温で極低温ボロメータのよりも3桁程度高い検出感度が得られている。有機非線形光学結晶が有するコリニア位相整合条件と広い動作周波数範囲は、無機結晶と比較して利点である。しかしながら、従来の実験は、すべて1 THzを超える高周波数側に焦点を当てており、DAST および OH1 結晶の最適位相整合条件を満たすために1250~1650 nmの波長範囲でポンプ光源を用いていた。そこで本研究では、有機結晶の検出周波数範囲をさらに拡大するために、波長1 μm 帯のポンプ光およびサブ THz 波周波数で実験を行った。

この実験では、厚さ2.8 mmのBNA結晶を用いて、周波数0.46 THzのアップコンバージョン検出を達成することに成功した。光スペクトラムアナライザを用いて、差周波発生 (DFG) 信号と和周波発生 (SFG) 信号の両方を観測した。BNA結晶は分子性結晶であり、非線形性が高く (1 μm で $d_{33}=231\pm5$ pm/V)、DAST結晶と比較して700~1000 nmの波長範囲で直接励起可能であるため、追加の光パラメトリック発振器等のセットアップを必要とせず、Ti:sapphire レーザーまたは Nd:YAG レーザーを直接使用することができる。

図 5-16 に、有機非線形光学結晶を用いたアップコンバージョン検出の実験系を示す。図 5-14 に示す実験系をわずかに変更し、検出側の PPLN-2 結晶を BNA 結晶に置き換えた。ポンプ光とアップコンバート信号光の波長差は約1.78 nmと非常に近接しているため、追加でラマンフィルターや回折格子を使用して、強力なポンプ光ビームからアップコンバート信号光を分離した。

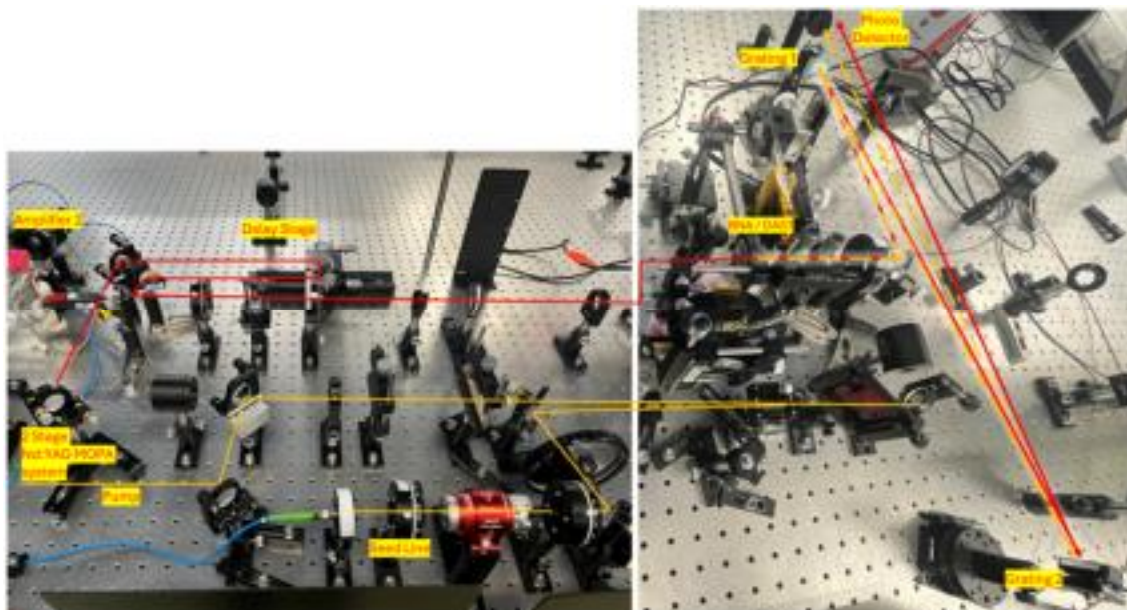


図5-16. 有機非線形光学結晶を用いたアップコンバージョン検出の実験系。

図 5-17 に、リアルタイムスペクトルアナライザを用いて測定した、0.1 mJ のポンプ光エネルギーおよび 16 nJ の THz 波エネルギー時のスペクトルを示す。青色プロットで示すように、アップコンバージョンされた SFG 信号の測定波長は $\lambda_{\text{SFG}} = 1062.51 \text{ nm}$ 、DFG 信号の測定波長は $\lambda_{\text{DFG}} = 1065.97 \text{ nm}$ で得られた。BNA 結晶へのサブ THz 波の入射を遮ると、赤色プロットで示すように、アップコンバージョン信号光である SFG 信号と DFG 信号が消失した。

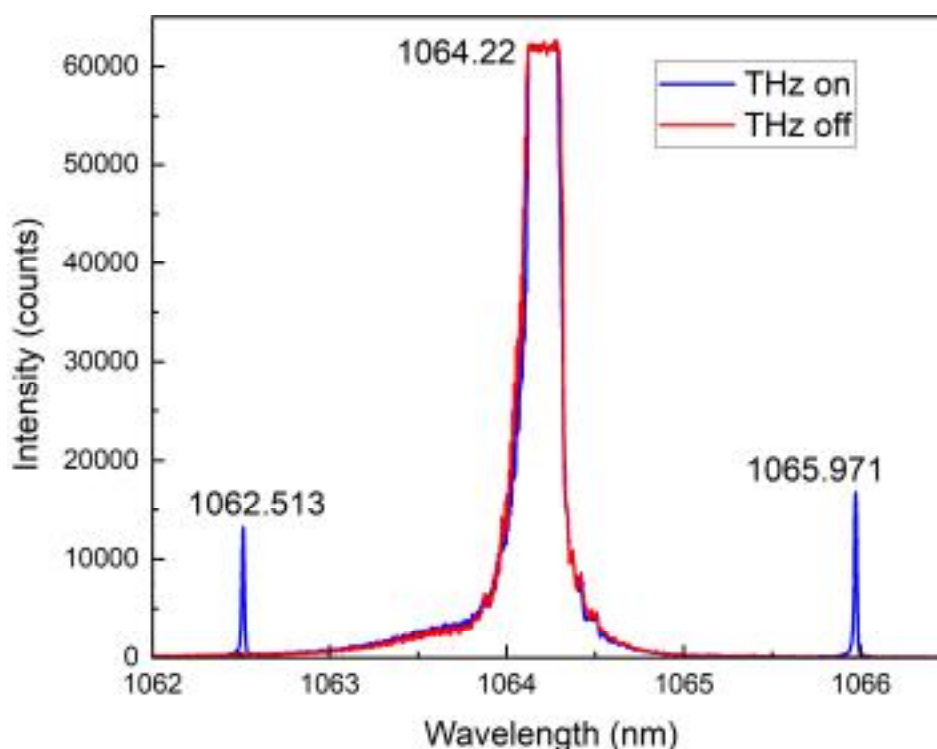


図5-17. 測定したアップコンバージョン信号光のスペクトル。

図5-18に、入射THz波エネルギーを16 nJで一定に保ちながら、SFG信号光強度のポンプ光エネルギー依存性を測定した結果を示す。ポンプ光エネルギーが大きいほど、アップコンバージョン信号光強度が強くなることが確認できた。注目すべき点は、6.5 μJ という非常に微弱なポ

ンプ光エネルギーでもアップコンバージョン光を観測することができ、効率的なアップコンバージョン変換が達成できた点である。同様の結果が、DAST結晶を用いた場合にも得られた。

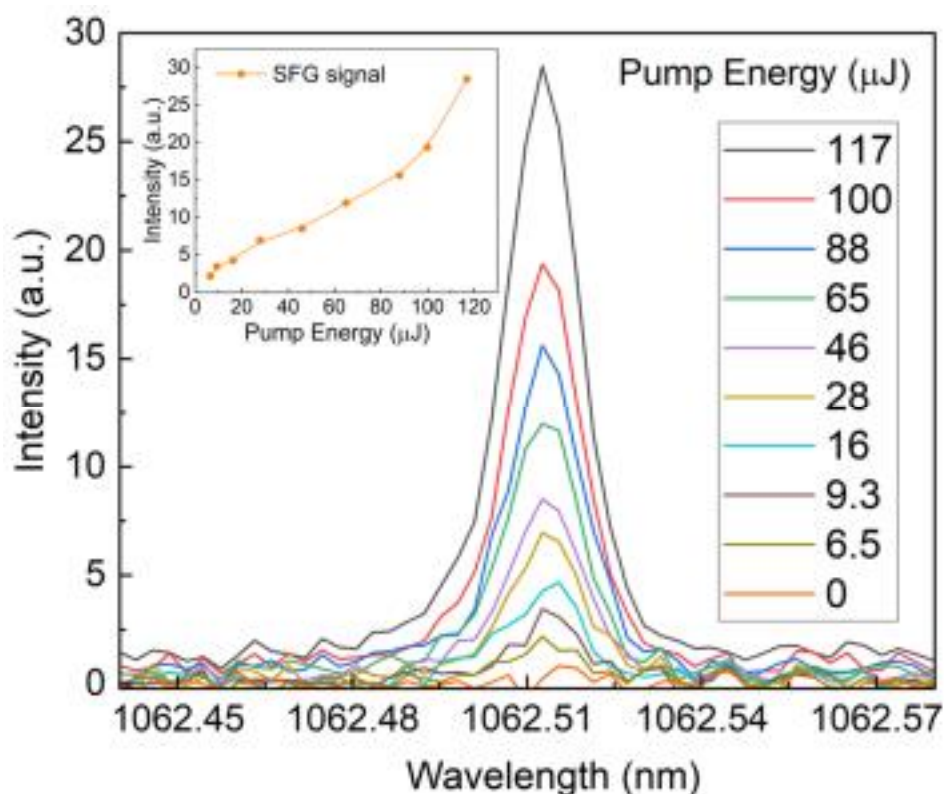


図5-18. SFGアップコンバージョン信号光のポンプ光エネルギー依存性。

テラヘルツ波アップコンバージョン高感度検出に関する研究は、これまで周波数0.3 THz帯から0.5 THz帯までは実現してきた。一方で、最終目標ではテラヘルツ波検出の周波数範囲（0.3 THzから0.8 THz）としており、さらなる高周波数化の研究が必要である。

令和6年度は、周波数0.8 THz帯のアップコンバージョン検出について研究を実施した。高周波数0.8 THz帯では、非線形結晶であるニオブ酸リチウムの吸収損失が大きくなる。このため、これまでの実験のセットアップについて最適化を行った。テラヘルツ波と光波の相互作用について、実験パラメータを最適化した結果、図5-19に示すように、励起光条件4.41 mJ（発生側）、1.47 mJ（検出側）の時、周波数0.86 THzを光波にアップコンバージョン変換して、信号雑音比138と2桁のSNRで検出することに成功した。これによって最終目標である周波数範囲（0.3 THzから0.8 THz）のテラヘルツ波アップコンバージョン検出を達成することができ、幅広い周波数で高感度計測が可能となった。

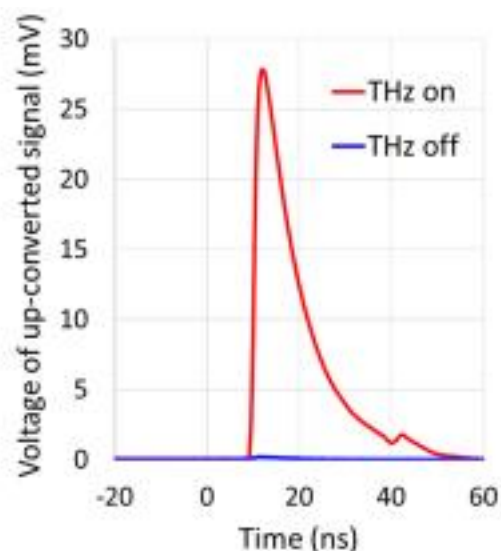


図5-19. 周波数0.8THzのテラヘルツ波を光波にアップコンバージョンして検出した信号光。

また、応答速度の最終目標は500 ps以下であり、高速性について実測を行った。本結果は、プロジェクト途中の研究で十分な応答速度が得られていると予測していたが、実際に計測して評価していなかったため、実験を行った。結果として図5-20に示すように、励起光パルスの時間幅 (FWHM) を596 psとした場合、周波数0.3 THzのテラヘルツ波を光波に変換し計測したところ、時間幅 (FWHM) で273 psが得られた。結果として数GHzのバンド幅を持つことが判明し、高速センシングに使える技術である。

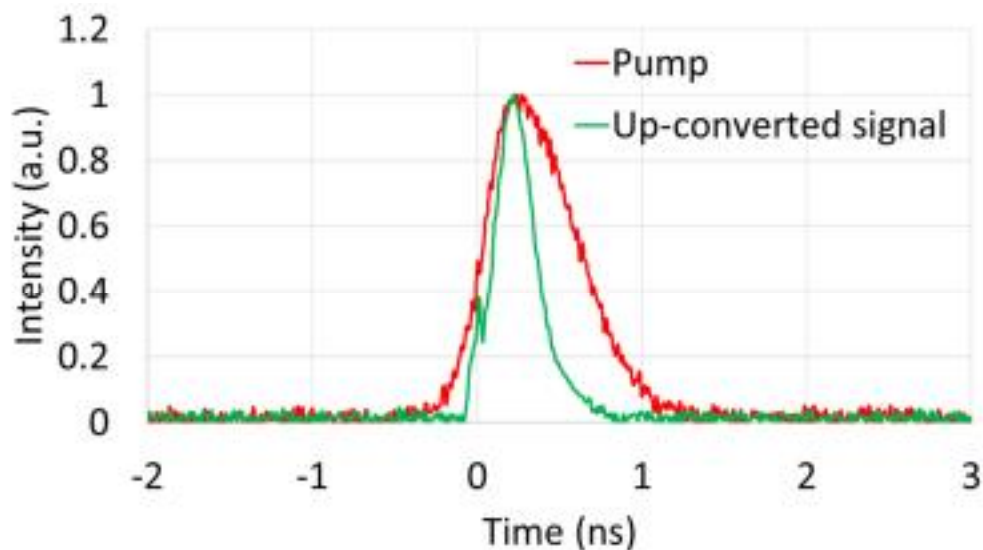


図5-20. テラヘルツ波を光波にアップコンバージョンして検出した信号光パルスと、励起光パルスの時間応答の計測結果。

⑥ テラヘルツ波イメージング計測の設計（担当：理化学研究所）

【令和2年度】

令和2年度は、ロボット搭載を目指した小型堅牢なテラヘルツ波イメージング計測システムを実現するために、実施項目①の光源開発に先行して半導体逓倍器による波長可変テラヘルツ光源を用いた3次元イメージング光学系の設計を行った。具体的には、高速テラヘルツ波計測に向けた空間掃引手法の検討および小型ロバストなテラヘルツ波干渉計を設計した。これにより、将来実施項目①及び②で開発するフォトンクス光源に置き換え可能なイメージング系を設計した。また、周波数可変光源・ヘテロダインシステムの構築を開始した。

（1）光学系設計

本課題では、テラヘルツ波を用いた小型でロバストな光学系をロボットに搭載して配管内部を検査することを目的としている。実際に光学系設計を行うにあたり次のような条件を満たすことを要件とした。

- 光学系の大きさ（40 cm立方に収まること、中間目標値）
- 光学系の重量（軽量化が重要）
- 測定範囲の広さ（できる限り広範囲をモニタしたい）
- 干渉計を組み込んだ光学系（奥行き分解能5 mm程度）

我々のグループではこれらの項目をクリアにして小型でロバストな光学系を実現するために光学系設計を進めている。以下にその内容を詳述する。

（1-1）光学系の大きさに関する検討

本研究開発で中間目標値として想定している光学系システムのサイズは30-40 cm立方である。そのため、実験室ベースからロボット搭載に耐え得る光学系の設計を繰り返し行った。光学系の大きさの制約があることを前提に検討を重ねた結果、光学部品の使用は最低限として、スキャン方法は回転ステージを用いる構成とした。また、回転方向で用いるミラーは放物面ミラーを導入することとして設計を進めた。放物面ミラーは、例えば配管のようなターゲットまでの距離に応じて、実効焦点距離（EFL）が異なる放物面ミラーを交換すれば、様々なサイズの配管に対応可能である。

今回設計した光学系では、軽量化の観点にも配慮して、できるだけシンプルな構成とした。送受信機のTxアンテナからのビームをレンズにより平行光に成形する。その平行ビームは、ビームスプリッタを介して回転ステージ上の放物面ミラーに入射され、放物面ミラーによりターゲットに入射される。そして、回転ステージの回転により視野が確保されたエリアにビームが到達する。次に、ターゲットからの反射・散乱ビームは再び放物面ミラーに到達して平行光に戻される。そこで作られた平行ビームのうち、ビームスプリッタで反射された成分が集光レンズによって集光され、Rxアンテナに到達して信号が検出される。

本課題で用いる予定の330-500 GHz送受信機は令和3年度に調達する予定であるが、その想定サイズは現在理研で使用しているACST社の275-325 GHz送受信機（[図6-1](#)）とほぼ同じである。そのため、[図6-2](#)の写真のように実際の光学系を模した配置に光学部品を置いてみることで全体のサイズの妥当性を検証した。その結果、[図6-2（左）](#)の光学系は元寇で横45 x 奥行45 cmであり、さらなる小型化も可能であることから、目標とする40 cm立方のサイズに収まる見通しが得られた。さらに、[図6-3](#)に示すCAD図面のように光学系の高さの変更、光学部品や光学素子の改良・変更や削減を繰り返して検討した結果、次第に小型化されている変遷がわかる。最終的に設計上では横40 x 奥行40 x 高さ20 cmのサイズが実現可能であると確かめられた。

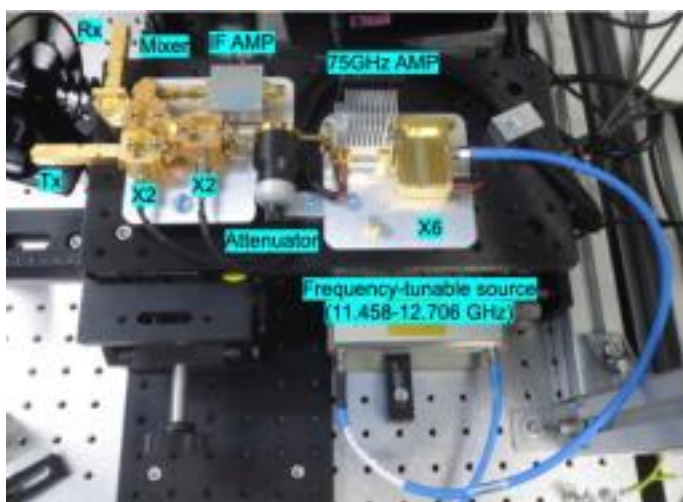


図6-1. 理研で保有している類似の光源・ヘテロダイン検出システム。



図6-2. 初期の光学系レイアウトの写真および図面。

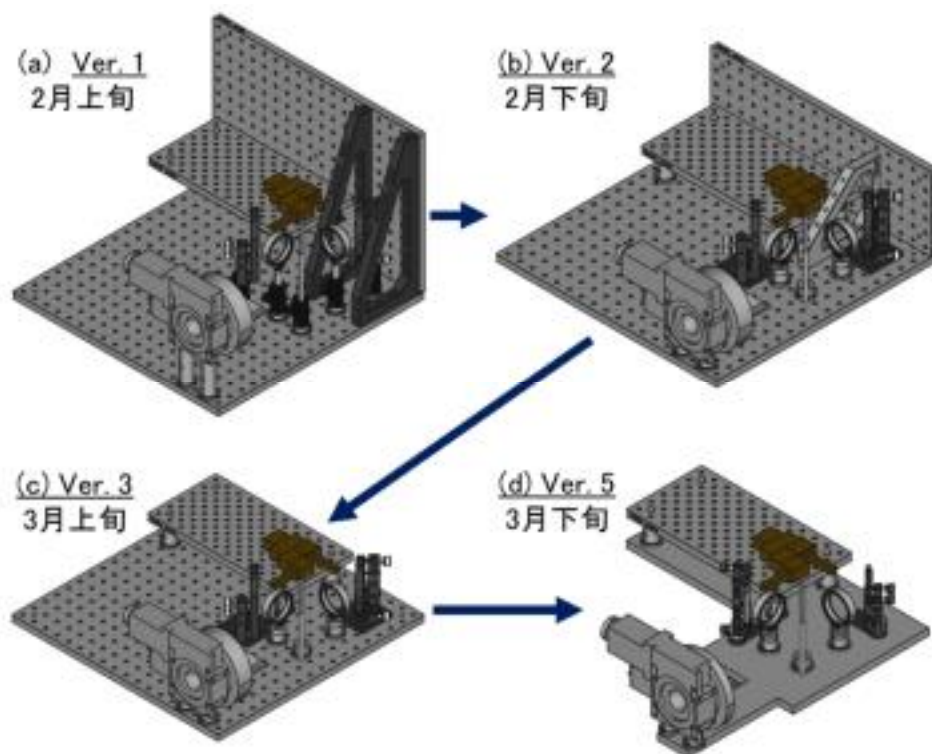


図6-3. CAD図面による光学系小型化の検討結果。
(図6-2の写真は、(a)のVer. 1に相当する)

(1-2) 光学系の重量に関する検討

ロボットへの搭載を想定した場合、光学系システムの小型化に加えて軽量化も重要である。そのため、前節の図6-3(a)のような実験室で一般に構築される光学系（Ver. 1）から、小型化してロボット搭載に耐え得るような光学系（Ver. 5）に至るまで光軸の高さの変更、光学部品や光学素子の小型化や改良・変更を行ない、設計を繰り返しながら軽量化の実現性について検討を進めてきた（表6-1）。

この結果、図6-3(a)のVer. 1のような実験室ベースの光学系では総重量が23 kgであったのに対し、改良を重ねることで直近のVer. 5（図6-3(d)）においては9.6 kg程度まで軽量化できることが明らかになった。これは、Ver. 1の総重量から比較して58 %の重量削減が可能であることを示す。しかし、運営会議においてロボット搭載で求められる総重量は5 kg程度が望ましいとの議論を受けて、さらなる軽量化の可能性も引き続き検討していく。具体的には、ベースプレートのさらなる軽量化やパンチ穴を開けるなどの軽量化、回転ステージのさらなる小型化、放物面ミラーの小型化や固定方法などが挙げられる。

表6-1. 光学系の軽量化の検討。

	Ver. 1(300 x 450)			2Ver. 2(150 x 450)			Ver. 3(Ver. 2の軽量化)			Ver. 4(150 x 450全周)			Ver. 5(150 x 450全周)		
総重量(kg)	23.00			20.09			15.59			10.49			9.64		
Ver. 1基準のパーセント	100.00(基準)			87.23			67.89			45.55			41.88		
部品内訳	長さ	数量	小計	長さ	数量	小計	長さ	数量	小計	長さ	数量	小計	長さ	数量	小計
300 OH(送受信機(標準))	0.50	1	0.50	0.50	1	0.50	0.50	1	0.50	0.50	1	0.50	0.50	1	0.50
ベースプレートMR4545/M	7.42	1	7.42	7.42	1	7.42	7.42	1	7.42						
ベースプレート(軽薄)										2.84	1	2.84	2.80	1	2.80
ベースプレートMR3045/M	5.01	1	5.01												
ベースプレートMR1545/M				2.55	1	2.55									
ベースプレートMR1520F/M	2.16	1	2.16	2.16	1	2.16	2.16	1	2.16	2.16	1	2.16	2.16	1	2.16
垂直ブラケットVR01/M	0.63	2	1.26												
垂直ブラケットVR01A/M				0.39	2	0.78									
ミラーマウントKS3	0.25	2	0.50	0.25	2	0.50	0.25	2	0.50	0.25	2	0.50			
直角ブラケットAR05	0.04	3	0.12	0.04	3	0.12									
ホストホルダ9901-M	0.07	3	0.21	0.07	3	0.21									
ホストホルダ9902-M	0.09	2	0.18	0.09	2	0.18									
ペディスタルベース9910	0.05	5	0.25	0.05	5	0.25									
フォーク9918-M	0.08	7	0.56	0.08	7	0.56	0.08	7	0.56	0.08	5	0.40			
ホストTR50/M	0.05	5	0.25	0.05	5	0.25									
レンズホルダLR2-M	0.02	2	0.04	0.02	2	0.04	0.02	2	0.04	0.02	2	0.04	0.02	2	0.04
角型素子ホルダKS-C2													0.06	2	0.12
ペリカルビームスプリッタ	0.20	1	0.20	0.20	1	0.20	0.20	1	0.20	0.20	1	0.20	0.20	1	0.20
放物面ミラー① 径	0.50	1	0.50	0.50	1	0.50	0.50	1	0.50						
放物面ミラー② 径										0.25	1	0.25	0.25	1	0.25
放物面ミラー③マウント	0.27	1	0.27	0.27	1	0.27	0.27	1	0.27						
スベアサロ②-M	0.12	1	0.12	0.12	1	0.12	0.12	1	0.12						
スベアサロ③M	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04	0.01	4	0.04
テーブルクランプCL3-M	0.01	2	0.02	0.01	2	0.02	0.01	2	0.02						
ペディスタル75mm9956M	0.31	2	0.62	0.31	2	0.62									
回転ステージAR5-906-HP	2.40	1	2.40	2.40	1	2.40	2.40	1	2.40	2.40	1	2.40	2.40	1	2.40
ベースプレートUBP2-M				0.09	2	0.18	0.09	2	0.18	0.09	2	0.18	0.09	2	0.18
ペディスタルR5075P/M				0.06	5	0.30	0.06	5	0.30	0.06	5	0.30	0.06	5	0.30
スベアサロ①M							0.05	2	0.10	0.05	2	0.10	0.05	2	0.10
放物面ミラー④スベアサロ(軽薄)										0.30	1	0.30	0.30	1	0.30
2倍アルミミラー	0.08	2	0.16	0.08	2	0.16	0.08	2	0.16	0.08	2	0.16	0.08	2	0.16
2倍レンズ	0.06	2	0.12	0.06	2	0.12	0.06	2	0.12	0.06	2	0.12	0.06	2	0.12

(1-3) 測定範囲の広さに関する検討

ロボットにシステムを搭載して配管内部を測定するケースを想定した場合、視野をできるだけ広く確保することが望まれる。そのため、図6-3(c)、(d)に示すように設計途中から小型化および軽量化を進めながら、可能な限り視野を拡げる検討を進めた。例えば、図6-3(c)における光学系では、ベースプレートに視野が妨げられる問題がある。具体的には、図6-3(c)では片側の視野がベースプレートに遮られ、もう片側も視野は確保されるものの左右非対称となって、最大でも240度しか視野が確保できない。そこで、さらに視野を拡げるよう工夫した構成が図6-3(d)および図6-4である。図6-4左上は図面裏側からの図であり、(1-2)節で行なった軽量化とともにベースプレートに改良を加えた。ベースプレートの板厚は12.7 mmである。図のようにステージ設置のために伸ばした箇所では最低でも60 mm幅が必要だが、放物面ミラーが回転する箇所はさらに細くても問題ないと考えられる。その結果、図6-4下のような左右対象の視野が確保可能であるとともに、最大308度の視野角のイメージングが実現可能であることがわかった。

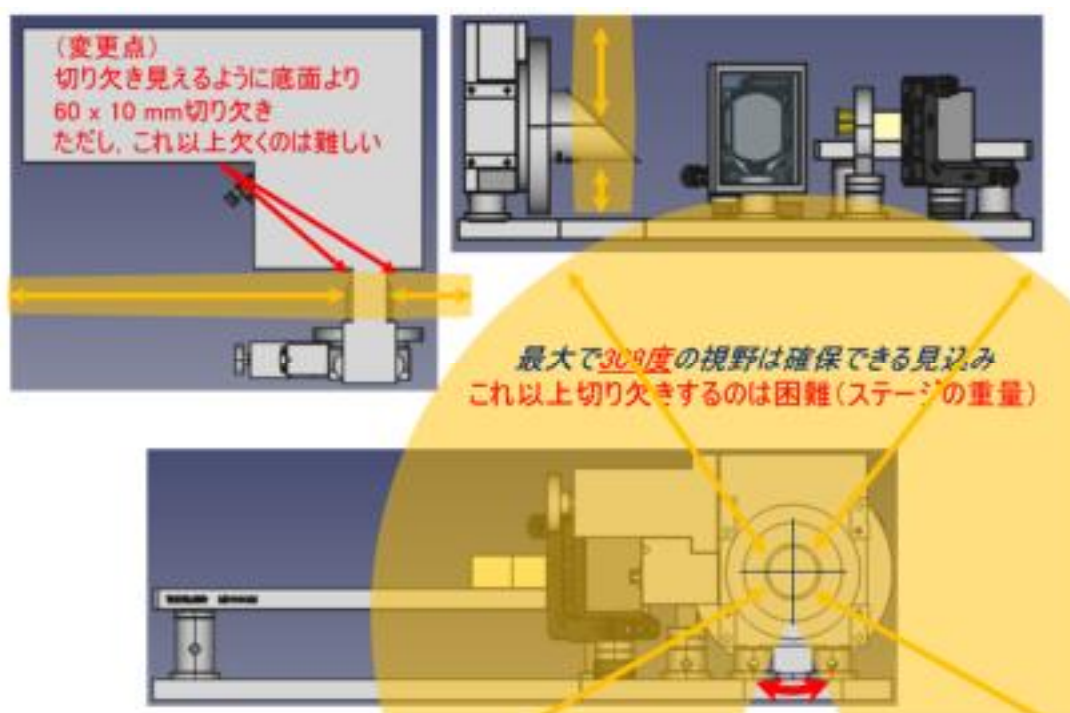


図6-4. 測定可能な視野拡大の検討。

(1-4) マイケルソン干渉計を組み込んだ光学系

上記の光学系に加え、テラヘルツ波の干渉の影響を可視化するには干渉計の導入が非常に有効である。この干渉計を構築する場合、(1-1)節で設計した光学系に参照ミラーと自動ステージを配置すれば実現可能である。この場合、送信側の周波数は固定し、ヘテロダイン検出器の代わりに、別途ショットキーバリアダイオード検出器などを導入して実験を行うことで実現可能である。その設計図を図6-5に示す。このように、図6-3のシステムに最小限の変更を加えることで干渉計の実現が可能であることが明らかとなった。

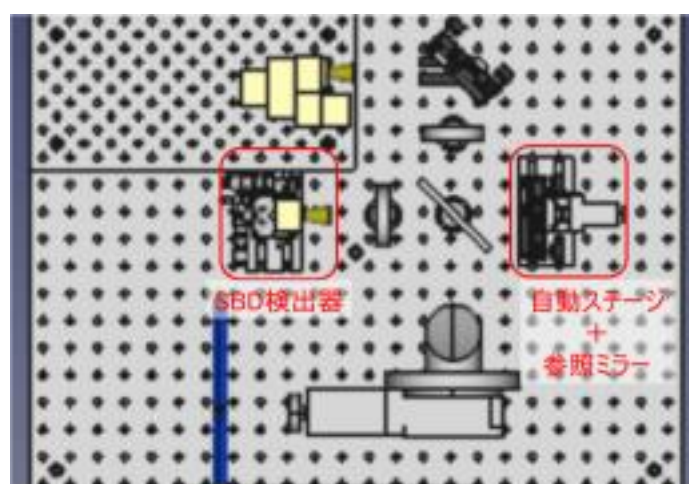


図6-5. マイケルソン干渉計を組み込んだ場合の概要図。

(2) 広視野測定のための実験系の設計

本課題で使用する330-500 GHzについては、導入の手続きや実際の開発期間を考慮すると、システムの納期は令和4年1月頃になる見込みであった。このため、光学系のシステムの開発を並行して行う必要があった。そこで、理研所有で半導体ダイオードベースの308 GHz単色光源を用いて検証実験を進める予定で研究を進めた。具体的には、図6-3(d)の設計をもとに図6-6のような光学系を構築し、手動回転ステージにて任意の角度に金属ロッドやさまざまなサンプルを

配置することとした。そして、それぞれの角度から取得される画像から、次のような検証実験を進めることとした。

- サンプルからの反射信号強度
- サンプルの回転角度ごとの検出精度
- 光源からサンプルまでの光軸ずれによる影響の調査
- 干渉などの影響

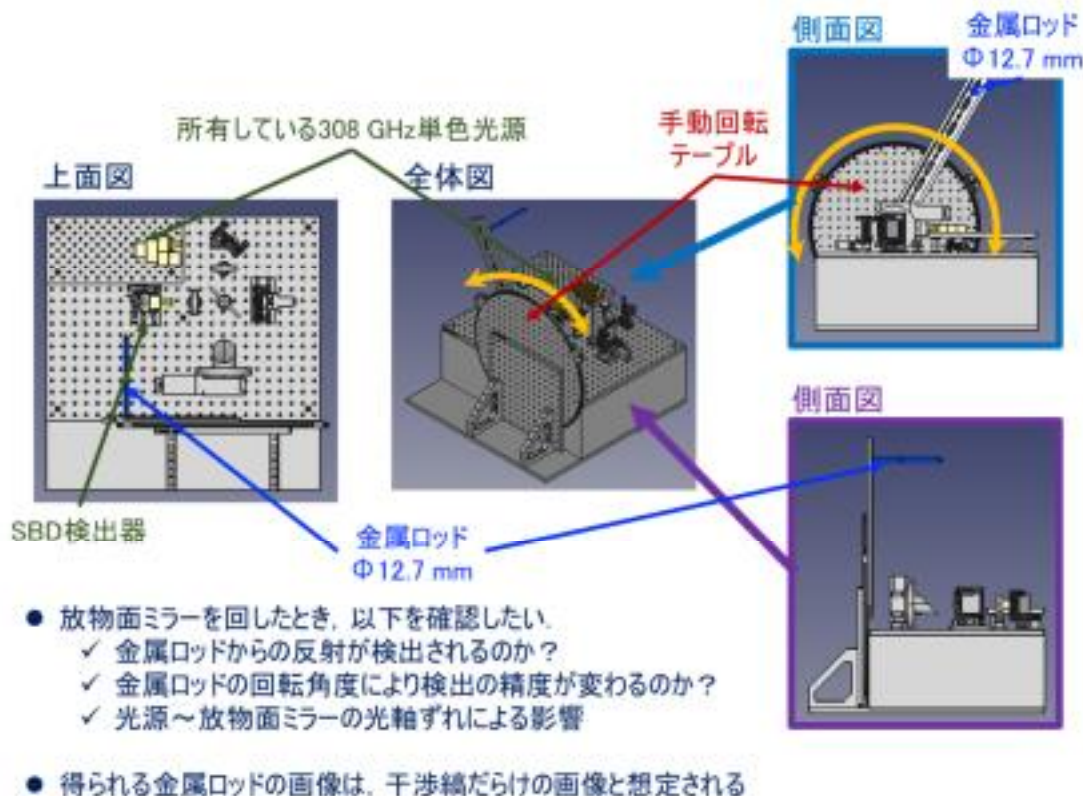


図6-6. 広視野測定のための実験系の設計。

(3) 300 GHz帯周波数可変光源・ヘテロダインシステムの構築の開始

周波数可変光源・ヘテロダインシステムに用いる光源は、周波数が300 GHz帯であり、かつ、高い奥行き分解能を得るためにできるだけ帯域幅の広い周波数可変光源を用いる必要がある。このため、まず周波数の選定を行った。本システムは、周波数掃引を実現するチャープ光源と周波数通倍器・ヘテロダイン検出システムに大別されるが、特に開発が難しいのが後者である。そこで、後者の開発想定企業であるドイツ・ACST社と意見交換を行ったところ、300 GHz近傍の周波数で帯域幅を広く取れ、かつ、上記のシステムとして令和3年度に納入が可能な通倍器・ヘテロダインシステムとして330-500 GHzが最も適していることが明らかとなった。そこで、ターゲット周波数を330-500 GHzとし、令和2年度はそれを想定したチャープ光源の導入とシステム構成の検討を進めた。

図6-7にそのシステム構成図を示す。具体的には、チャープ光源からの出力は周波数掃引されながら通倍器を介してTxアンテナより330-500 GHzのビームが出力される。この出力は現在設計中の光学系を介してターゲットに入射する。この反射光は再び光学系に戻ってきてRxアンテナにより受光され、ミキサによりミキシングされ受信信号として検出される。光源の詳細仕様や小型化を実現する部品構成についてACST社と打合せを進めた。また、これと並行して図6-7のシステムと組み合わせて用いるチャープ光源（シンセサイザー）の導入を行った。具体的には、周波数可変範囲を13.75-20.8 GHzとし、周波数掃引時間が最速で10 μ sとなるチャープ光源を導入した。図6-8にその外観とシステム構成を示す。

⑦ テラヘルツ波イメージング実験（担当：理化学研究所）

（１） 概要

令和3年度は、令和2年度に行った検討をもとに、300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムを完成させた。また、3次元イメージング光学系の設計をもとに、3次元テラヘルツ波イメージング光学系を構築するとともに、3次元テラヘルツ波イメージング試験システムを構築した。さらに、これらのシステムを組み合わせたイメージング性能の評価を開始した。

令和4年度は、令和3年度に完成した300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムを用いたイメージング性能の評価を進め、中間評価までにマイルストーンに示した数値目標を実現した。

令和5年度は、実用的システムのイメージング性能評価と応用例の開拓と共に、600 GHz帯において250 GHzの帯域幅を持つ高解像度システムを導入した。また、企業とも連携して、マイクロコイル吸収体からの反射散乱信号の角度依存性などの特性を明らかにした。

令和6年度は、令和5年度に完成した600 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムを用いた実用的システムのイメージング性能評価を進めた。特に、奥行き分解能の目標値である500 μm を下回る300 μm を達成した。また、150 GHz、300 GHzのシステムを用いた応用可能性の開拓を進めた。具体的には、位相シフト断層法を用いた分解能評価を150 GHzシステムと300 GHzシステムで行い、特に300 GHzシステムで20 μm の精度で奥行き分解能の最良値を得た。これは挑戦的目標であった100 μm を下回る値である。さらに、300 GHzシステムを用いた企業との共同研究を実施した。

以下、記載した概要について、年度を追って詳細を記す。なお、申請書に記載した最終目標値は以下のとおりである。

① コンパクトな光源と組み合わせることが可能な小型かつロバストな光学系の設計と評価。最終的にロボット搭載が可能なサイズの光学系の達成を目指し、サイズの目標値として、光源と併せて約30 cm立方以下とする。（達成済）

② 高精度の3次元イメージングの実現。深さ分解能の目標値として、500 μm 以下を達成する。さらに、挑戦的目標として、深さ分解能 $\sim$ 100 μm に挑む。（達成済）

③ スキャン光学系の実現。測定速度の目標値として、1測定点あたり10 ms以下。（達成済）

④ コヒーレント光源を用いる時に擾乱成分として生じる干渉の影響を可視化する技術の開発（達成済）

【令和3年度】

（１） 300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムの構築と基本性能評価

本システムは、周波数13.75-20.83 GHzの周波数可変シンセサイザーの信号を元に、その周波数を18通倍した330-500 GHzという超広帯域（帯域幅170 GHz）の通倍器光源と、12通倍した165-250 GHzをローカル信号（LO）とするサブハーモニックヘテロダイン検出器で構成される。当初は、光源側と検出側とで165-250 GHzまでを共通化し、そこから信号を2分岐して光源側に2通倍器を追加することで光源と検出器を構成することとしていた。しかし、その検討の段階で、上記のような非常に幅広い帯域と光源出力を両立させることが技術的に困難であることがわかった。そこで、シンセサイザー出力の周波数13.75-20.83 GHzの段階で出力を増強して2分岐し、後段の光源と検出器を独立させた構成を採用することにより、当初予定に沿った性能を実現するシステムを構築することとした。図7-1にその構成図を示す。このように、新たに策定した構成を元に、シンセサイザーに強度増強を図る改良を施すとともに、光源部（Txモジュール）と検出部（Rxモジュール）を導入した（図7-2）。

次に、これらの基本性能評価を行った。まず、シンセサイザーについては、上記のように強度増強を行った後の周波数掃引特性評価を実施し、仕様通りの強度（+15 dBm）と周波数掃引幅（13.75-20.83 GHz）が実現していることを確認した（図7-3）。

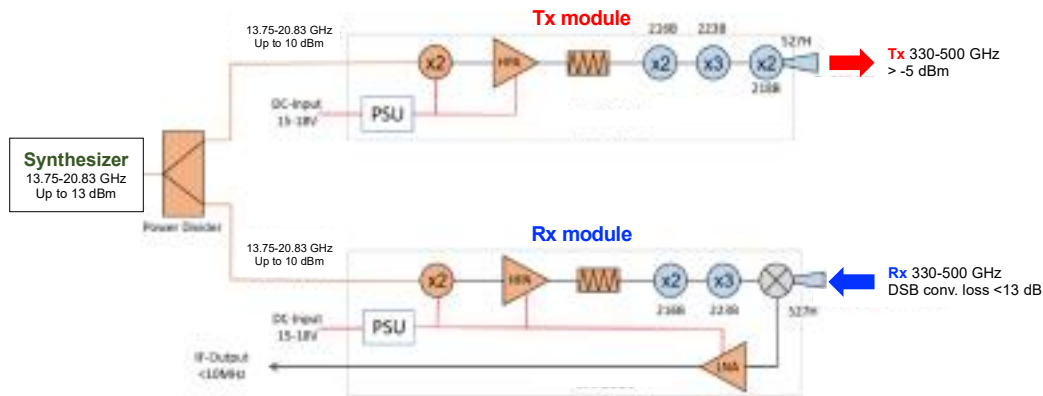


図7-1. 300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムの構成図。

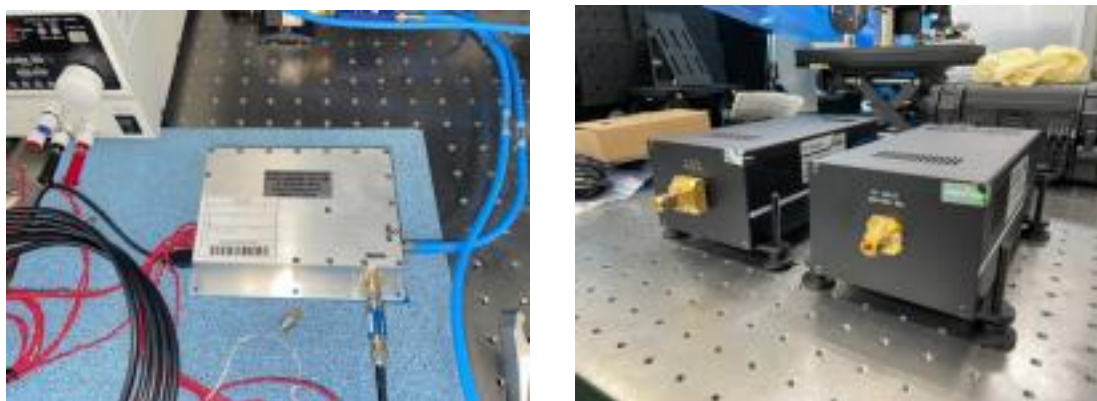


図7-2. (左) 強度増強を行ったシンセサイザー、(右) 光源部と検出部。

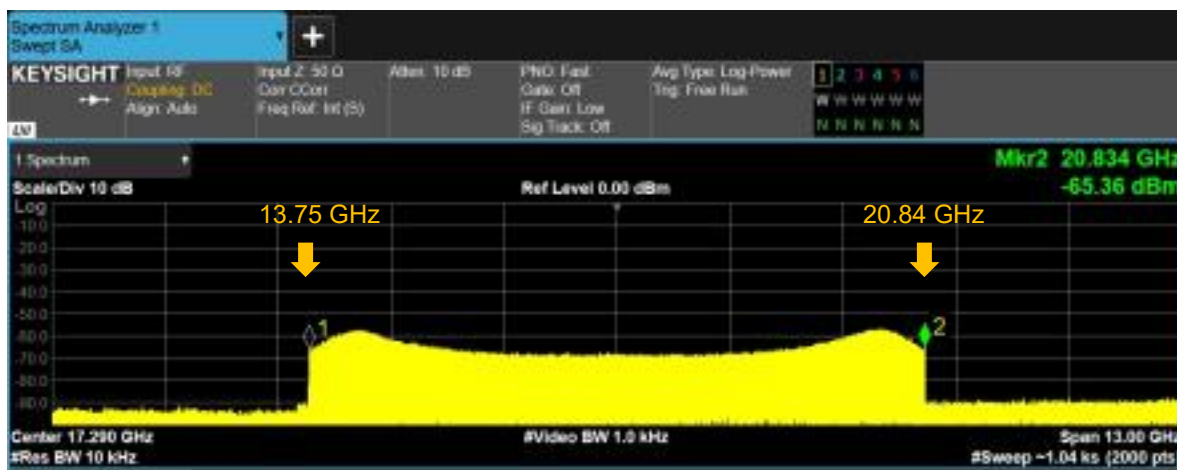


図7-3. シンセサイザーの周波数掃引特性の測定結果。なお、この測定ではスペクトラムアナライザーへの入力強度を抑制するために、減衰器で強度を落として測定している。

次に、300 GHzの光源・検出システムとシンセサイザーを組み合わせ動作させて光源強度と周波数掃引幅の評価を行った。その結果、330-500 GHz（帯域幅170 GHz）の90%以上の帯域において出力-5 dBm以上、かつ、残りの10%の帯域で-10 dBm以上という当初の仕様を満たしていることが確認された（図7-4）。また、このように構成した光源部と検出部を組み合わせた評価用光学系を構築して、0.8 m離れた位置に置いた導体球からの反射信号のヘテロダイン検出により距離測定を行う実験（FMCW測定）を行い（図7-5）、図7-6のように、得られたヘテロダインIF信号を高速フーリエ変換（FFT）することで距離情報が得られることが確認された。その詳細な奥行きイメージング特性については令和4年度に本格的に行う予定であるが、図7-5の実験系

で導体球を光軸方向に移動させたときのIFスペクトルの線幅から、奥行き分解能は1.5 mm以下であることが確認された（図7-7）。中間評価におけるマイルストーンとしては、この空間分解能の目標値は1 mm以下となっており、令和3年度より詳細な測定実験とデータ解析を施すことで目標性能の達成を目指すこととした。

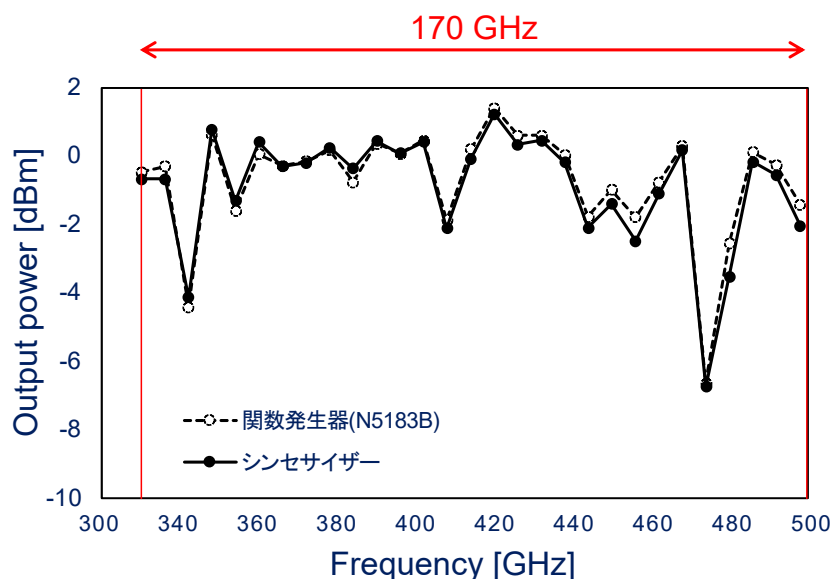


図7-4. シンセサイザー及び関数発生器を入力信号源に用いたときの光源部からの周波数ごとの信号出力。

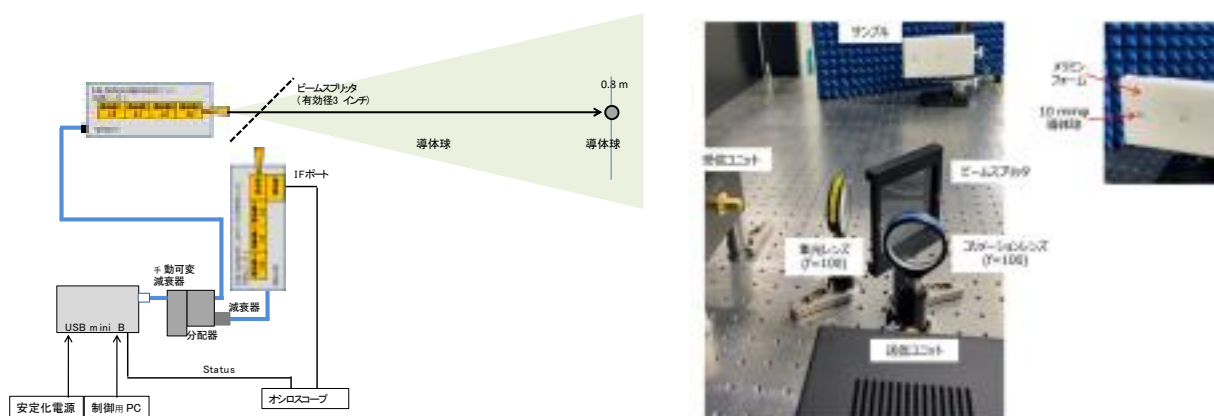


図7-5. （左）300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムのヘテロダインIF信号取得のための実験系の配置図、（右）実際の実験系の写真。

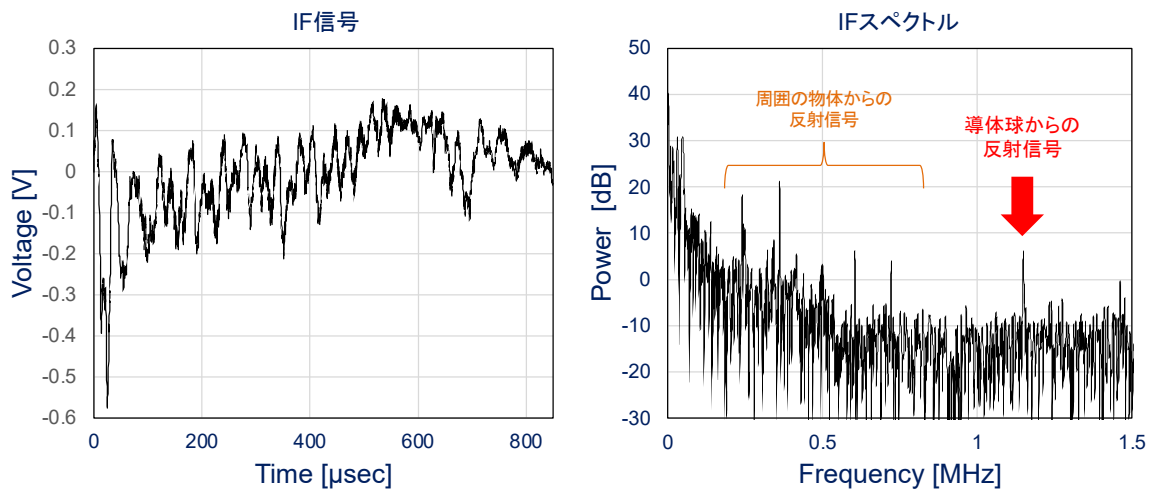


図7-6. (左) 300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムで得られたヘテロダインIF信号、(右) IF信号をFFTして得られた奥行き情報。

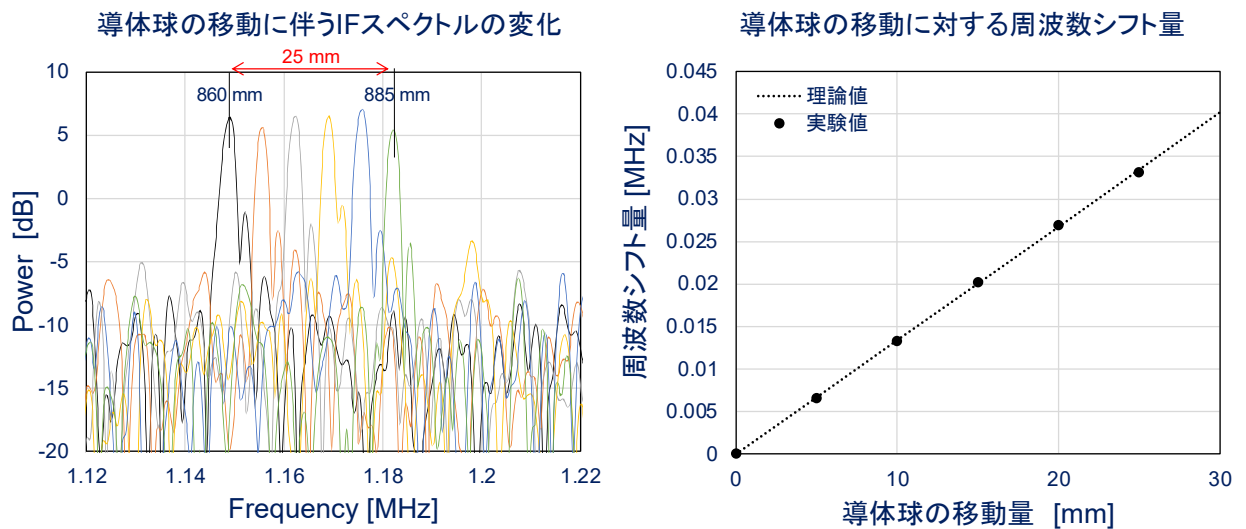


図7-7. (左) 導体球を距離方向に移動したときのIFスペクトルの変化、(右) 導体球の移動量と周波数シフト量の関係。

(2) 3次元テラヘルツ波イメージング光学系とイメージング試験システムの構築

上記の光源・検出システムの開発と並行して、令和3年度の検討をベースとして、3次元テラヘルツイメージング光学系を構築した。ただし、この光学系の構築にあたり、小型化の目処は立っているため、まずシステム評価実験の簡便性の観点から、光学系の構成は同一としつつも小型化する前の段階の光学系を構築して評価を行うこととした。また、この光学系の構築・評価は300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムと並行して進めたため、ここで用いる光源・検出システムとしては理化学研究所が所有する帯域幅30 GHzの300 GHz光源・検出システムを活用した。構築した3次元イメージング光学系と円環サンプルを図7-8に示す。回転型ステージに搭載した放物面鏡は円環の奥行方向に移動する直動ステージに搭載されており、円環の回転方向と奥行方向の2軸での測定が可能である。これに加えて、周波数掃引による連続波周波数変調 (FMCW) 方式により、円環に向けた奥行方向を測定できるシステムとなっており、これらを合わせて3次元のイメージングが可能なシステムとなっている。

さらに、光源・検出システムの制御、ステージの制御、及び、データ処理を一貫して行うことで3次元イメージングを実現するイメージング試験システムを構築した。図7-9にその構成図、図7-10と図7-11に測定用ソフトウェアと解析用ソフトウェアの画面をそれぞれ示す。これらのソフトウェアにより測定のための機器の制御、及び、取得データの解析が可能となっている。

Figure 1 consists of two photographs of the experimental setup. The left photograph (a) shows the transmitter (Tx) and receiver (Rx) setup. The Tx includes a collimation lens, a beam splitter (BS), a rotational parabolic mirror, and a linear motion stage. The Rx includes a focusing lens, a mirror, and a linear motion stage. The torus sample is positioned between the Tx and Rx. The right photograph (b) shows the torus sample and the absorber sample. The torus sample is a blue ring-shaped object, and the absorber sample is a blue rectangular object. The rotational parabolic mirror is also shown.

The schematic diagram illustrates the experimental setup for measuring the time delay of a THz wave. It features a central computer system (PC) labeled "ディスプレイ" (Display) and "制御・データ集積部" (Control/Data Acquisition Unit). This PC is connected via cables to several key components:

- データ取得機** (Data Acquisition Board): Receives signals from the photomixer and the heterodyne-based THz generation system.
- シンクサイザ** (Photomixer): Generates THz waves by mixing RF signals.
- 300 GHz帯基波源・ヘテロダイン検出システム+FM-CW距離計測光学系**: The core measurement system, which includes:
 - イメージング光学部** (Imaging Optics Section): Contains a **自動定位ステージ** (Automatic Positioning Stage) and a **自動・軸運動ステージ** (Automatic/Axial Motion Stage).
 - 検出器** (Detector): Measures the received THz signal.
- 電源** (Power Supply): Provides the necessary electrical power to the system.

Software components are also shown as insets: **制御用ソフトウェア** (Control Software) and **データ解析ソフトウェア** (Data Analysis Software), both displaying graphical representations of the measured data.

73

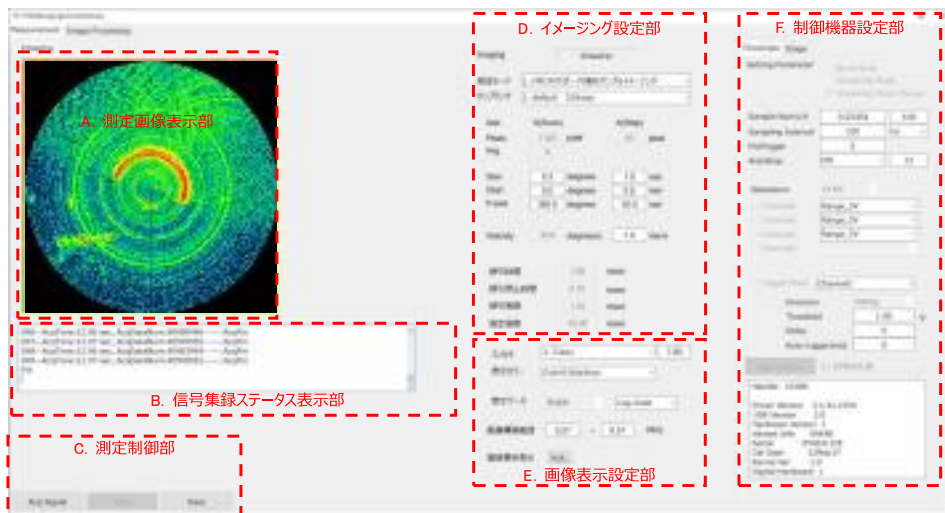


図7-10. 測定用ソフトウェアの画面。

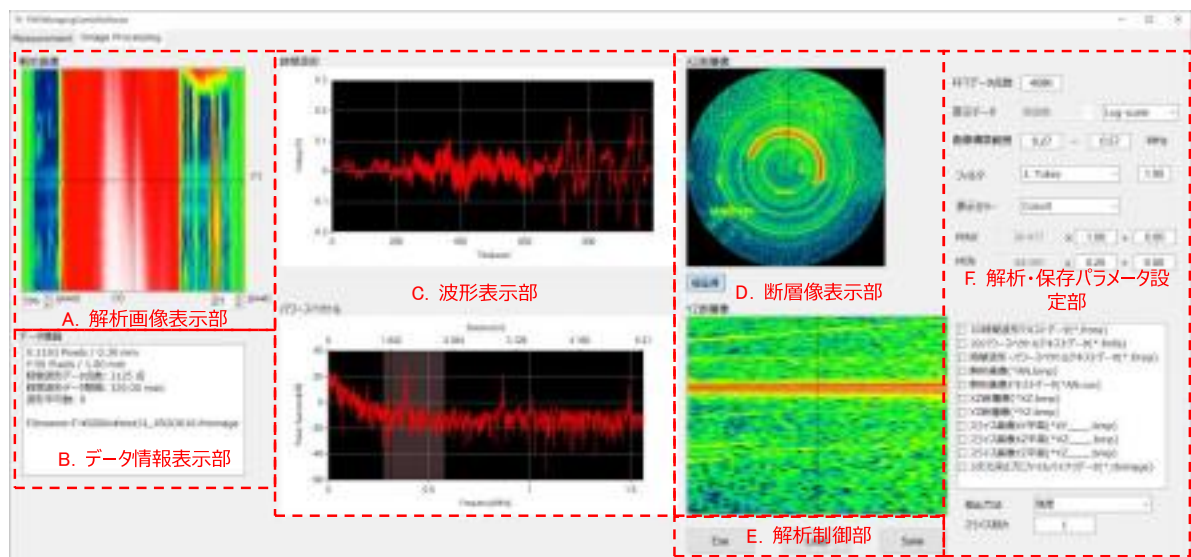


図7-11. 解析用ソフトウェアの画面。

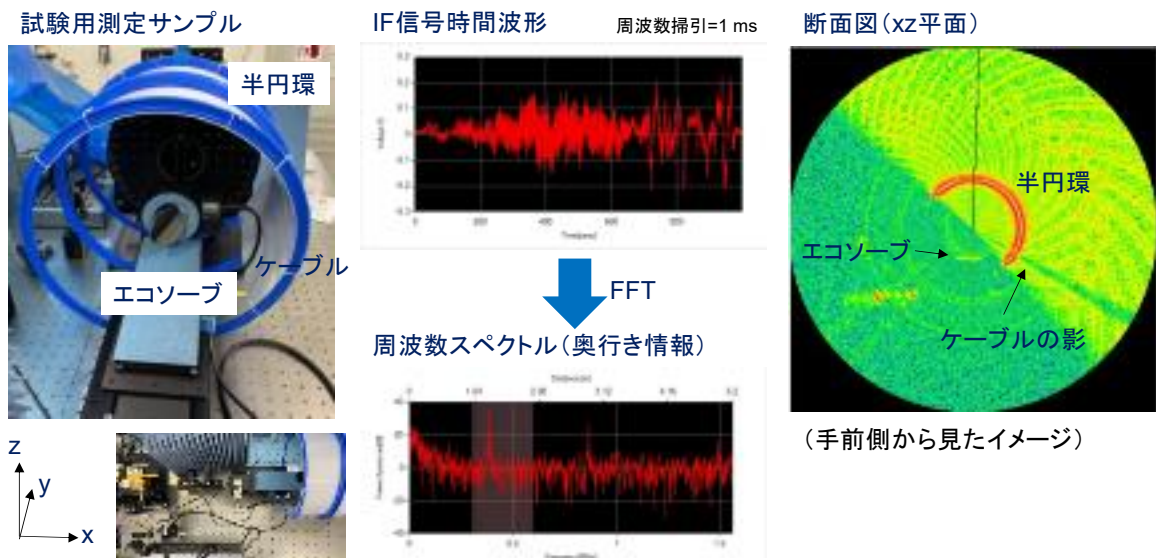


図7-12. 解析ソフトで得られたイメージと実際のサンプルの状況の比較。

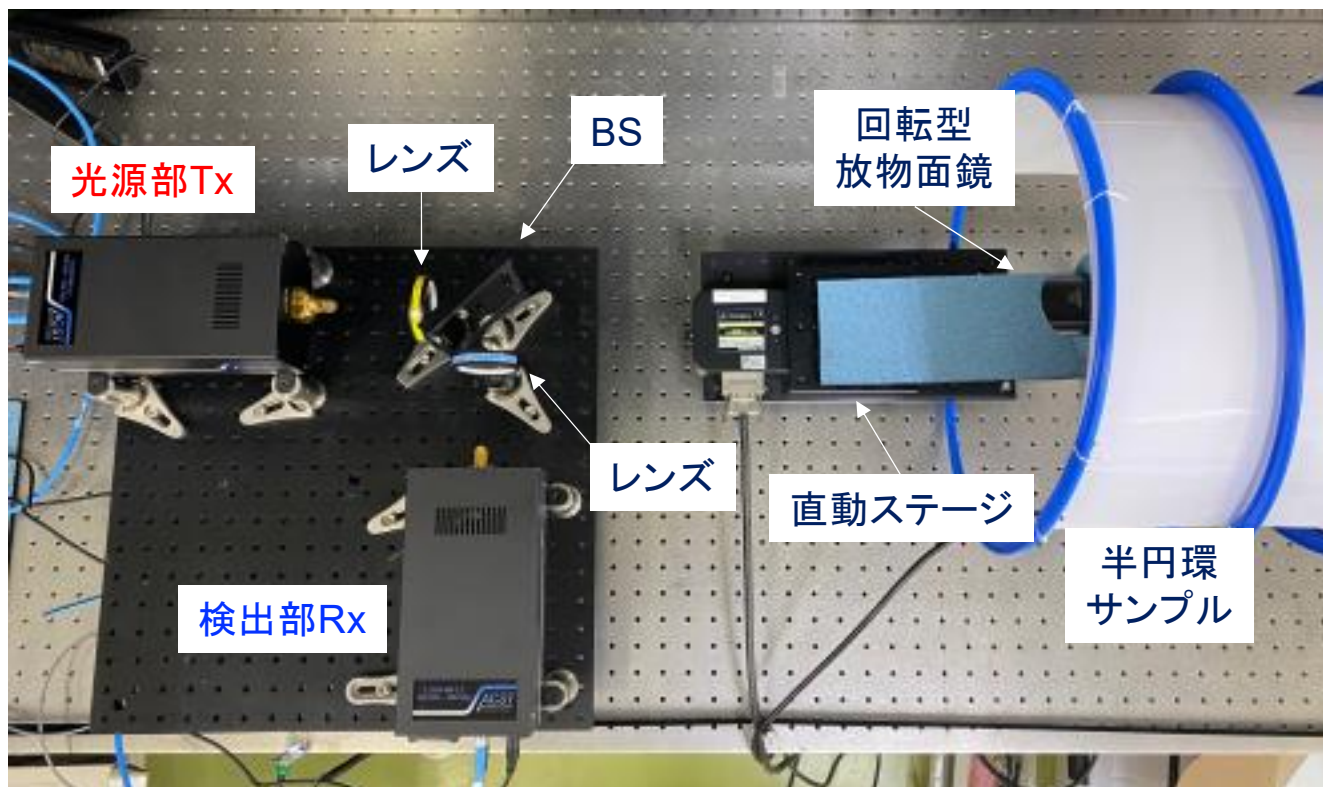


図7-13. 300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムと3次元イメージング光学系を組み合わせた実験セットアップ。

【令和4年度】

令和4年度は、令和3年度に完成した300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムを用いたイメージング性能の評価を進め、中間評価までにマイルストーンに示した数値目標を実現した。

まず、300 GHz周波数可変光源による3次元イメージング試験システムを構築した。図7-14に構築したシステムの写真を示す。マイルストーンの試験システムサイズの数値目標として「光源と併せて30-40 cm立方程度」を掲げていたのに対し、実現した3次元イメージングシステムでは、図のように「 $40 \times 40 \times 23.5 \text{ cm}^3$ 」を実現し、体積比で目標値の58%となるシステムを実現した。このシステムでは、FMCW方式で奥行方向、回転ミラーで回転方向、1軸ステージで図の左右方向の情報をそれぞれ取得でき、これらを合わせて3次元のイメージングを実現している。

また、1点あたりの測定時間は令和3年度末までに1 msを達成しており、すでに中間目標での目標値である100 ms以下を達成していたが、さらに改良を加えて、0.85 msまで短縮した（「③最終目標値10 ms以下」を達成）。図7-15に1点の測定で得られたIF信号とそのフーリエ変換で得られた奥行き分布を示す。

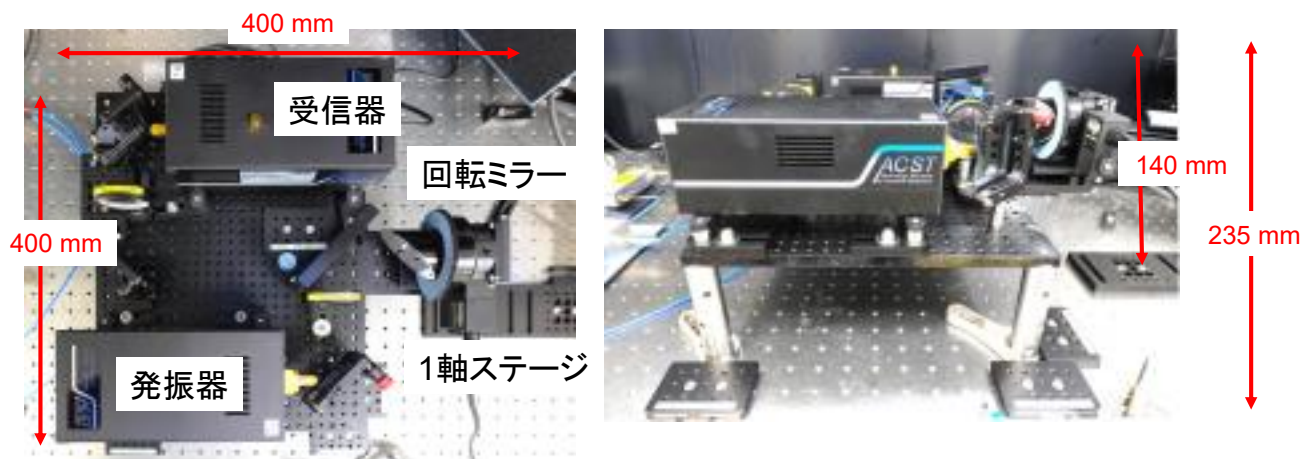


図7-14. 300 GHz周波数可変3次元イメージング試験システム。

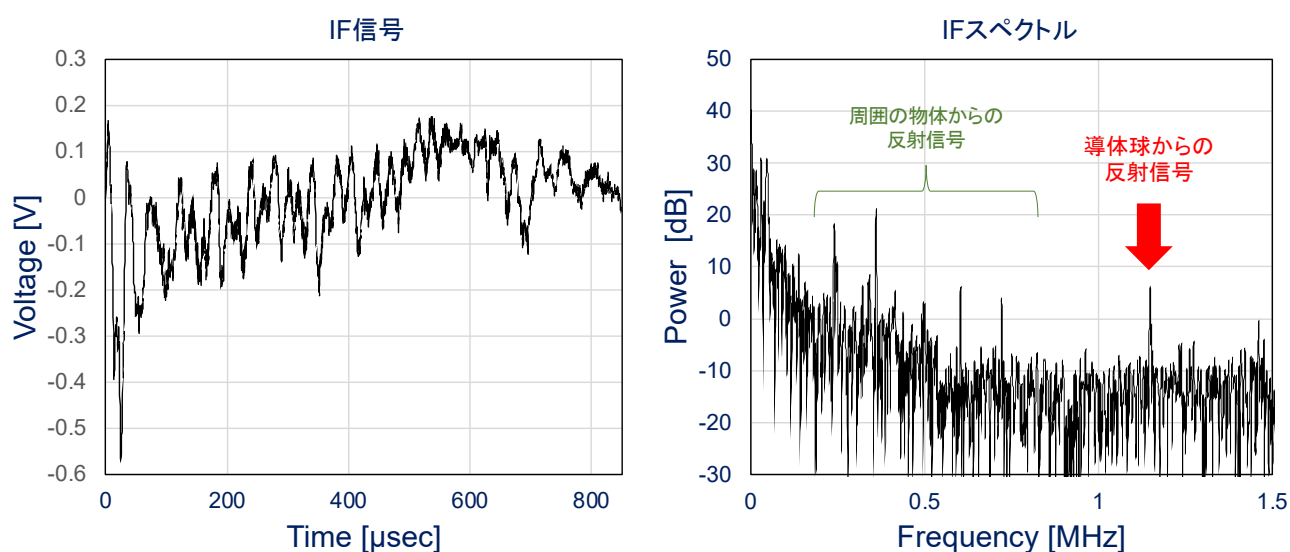


図7-15. 300 GHz周波数可変3次元イメージング試験システムのFMCW測定を行うための周波数増院により得られたIF信号の時間波形 (0-850 μsec) とそのフーリエ変換で得られた奥行き分布を表すIFスペクトル。

次に、実際に得られた3次元像を示す。測定に用いたサンプルは図7-16 (左) のような半円環のもので、動径方向のデータはFMCW測定で、回転方向は回転ステージの回転で、半円環の奥行方向は1軸ステージによる移動で取得することができる。図7-16 (右) が3次元データから2次元ずつの情報を取り出したプロットである。

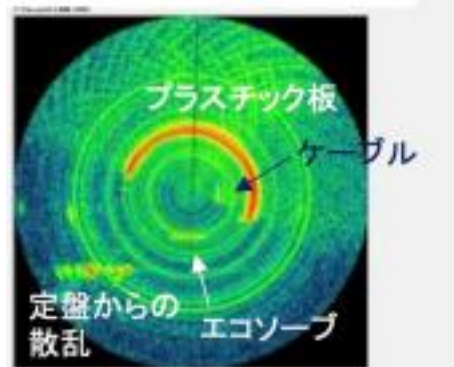
3次元測定用サンプル



動径距離



回転 x 動径距離



奥行き x 動径距離

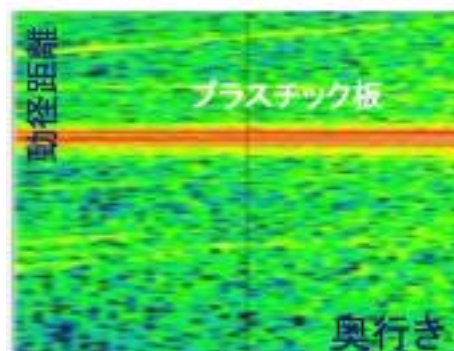


図7-16. (左) 3次元測定のために用いた測定用サンプル。(右上) 3次元データから回転方向と動径距離の情報を取り出してプロットしたもの。(右下) 奥行き方向(横軸)と動径距離(縦軸)の情報を取り出してプロットしたもの。図で赤く見えているのがサンプルの白い半円周を覆っているプラスチック板からの反射成分である。

次に、図7-16の3次元プロットについて条件を変えながら見ていくと図7-17のように干渉パターンが変化する様子が確認できることがわかった。（「④擾乱成分として生じる干渉の影響を可視化(最終目標)」を達成。）さらに、この3次元プロットでは、測定した3次元空間中において、動径方向 r 、角度 θ 、奥行き z のうちの任意の2つの2次元平面上のプロットを得ることができた。

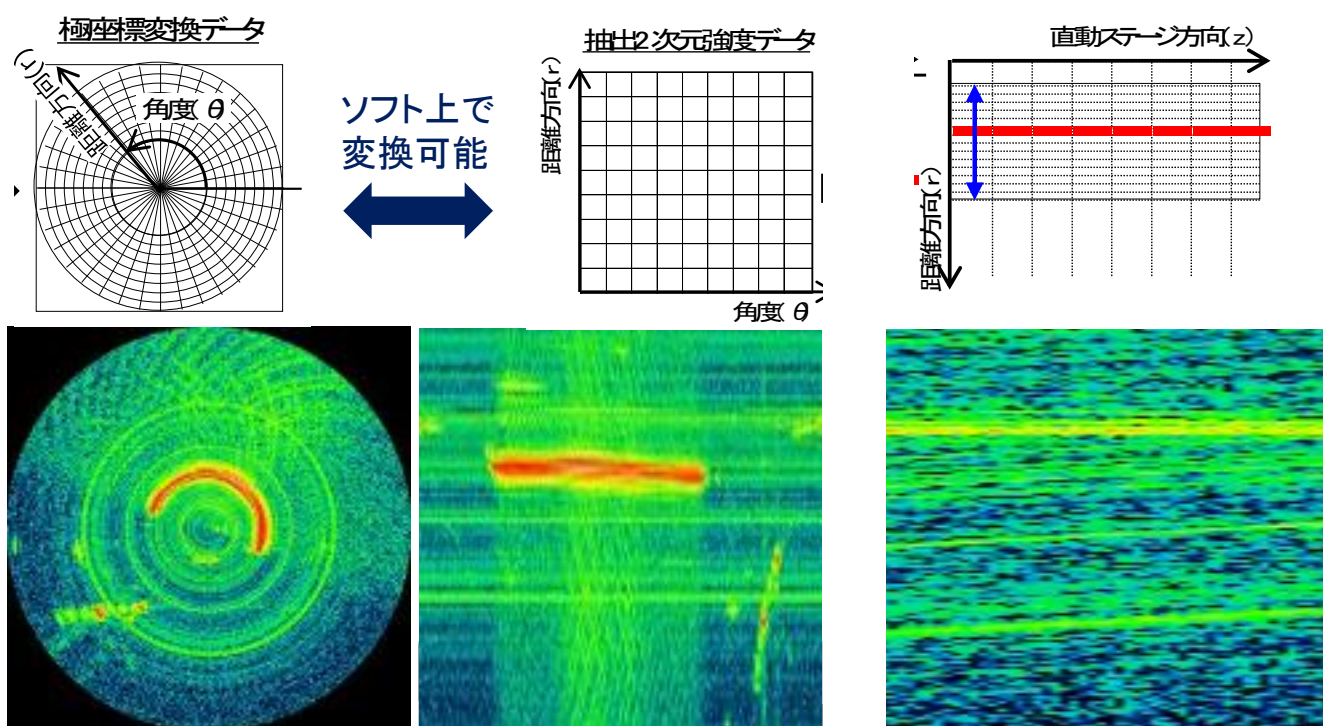
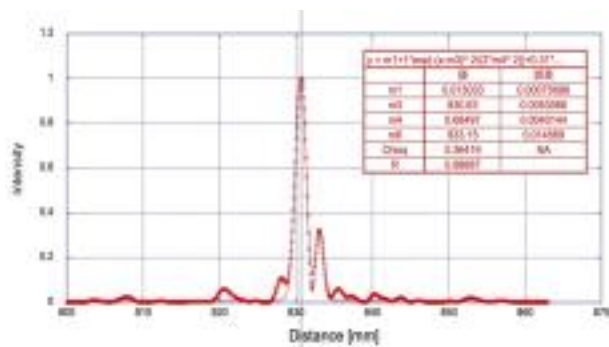


図7-17. (左) 特定の奥行き z における動径方向の距離 r と回転角 θ の2次元平面での信号強度分布。(中) 左図を2次元に変換して表示した図。(右) 特定の角度 θ における動径方向の距離 r と奥行き方向 z の2次元平面での信号強度分布。それぞれの図で縞状のパターンが見えており、干渉パターンが可視化されていることがわかる。このように、1つのパラメータの変化に応じて2次元プロットが変化していく様子が可視化できている。

次に、このシステムの奥行き分解能の評価を行った。具体的には、導体棒をターゲットとして反射信号を測定した。その結果、反射信号のFWHMは1.6 mmと想定よりも広がっていたが(図7-18 (左))、得られた信号のS/Nが非常に高く、1 mm離れたところに別の反射体があった場合のモデルに比べて有意に幅が狭く、1 mm以下の分解能を確実に達成していることが確認された。

また、当該技術を活用した実用的システムとして、透過性のより高い150 GHz帯を用いた150 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムを導入した。図7-19に導入したシステムの写真、図7-20に性能評価試験の実験セットアップ、図7-21にデータ取得実験の際にデジタルオシロスコープで取得した生信号を示す。このように、システムを導入して動作を確認した。さらに、新たなテラヘルツ応用のためのツール開発のために、企業と共同して2種の吸収体の性能評価を開始した。この評価は令和5年度にも継続して行うこととした。

導体棒からの反射信号



1 mm離れた場所にも別の反射体があるとした場合のモデルとデータの比較

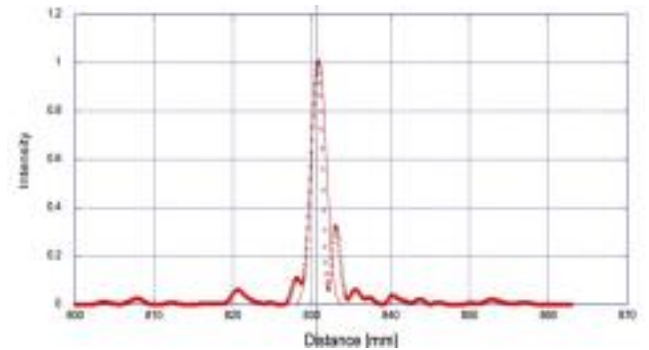


図7-18. (左) 胴体棒からの反射信号の奥行き方向の信号。(右) 得られた奥行き方向の信号(ドット)が1 mm離れたところに別の反射体があるとした場合のモデル(赤の実線)に比べて有意に狭いことを示した図。

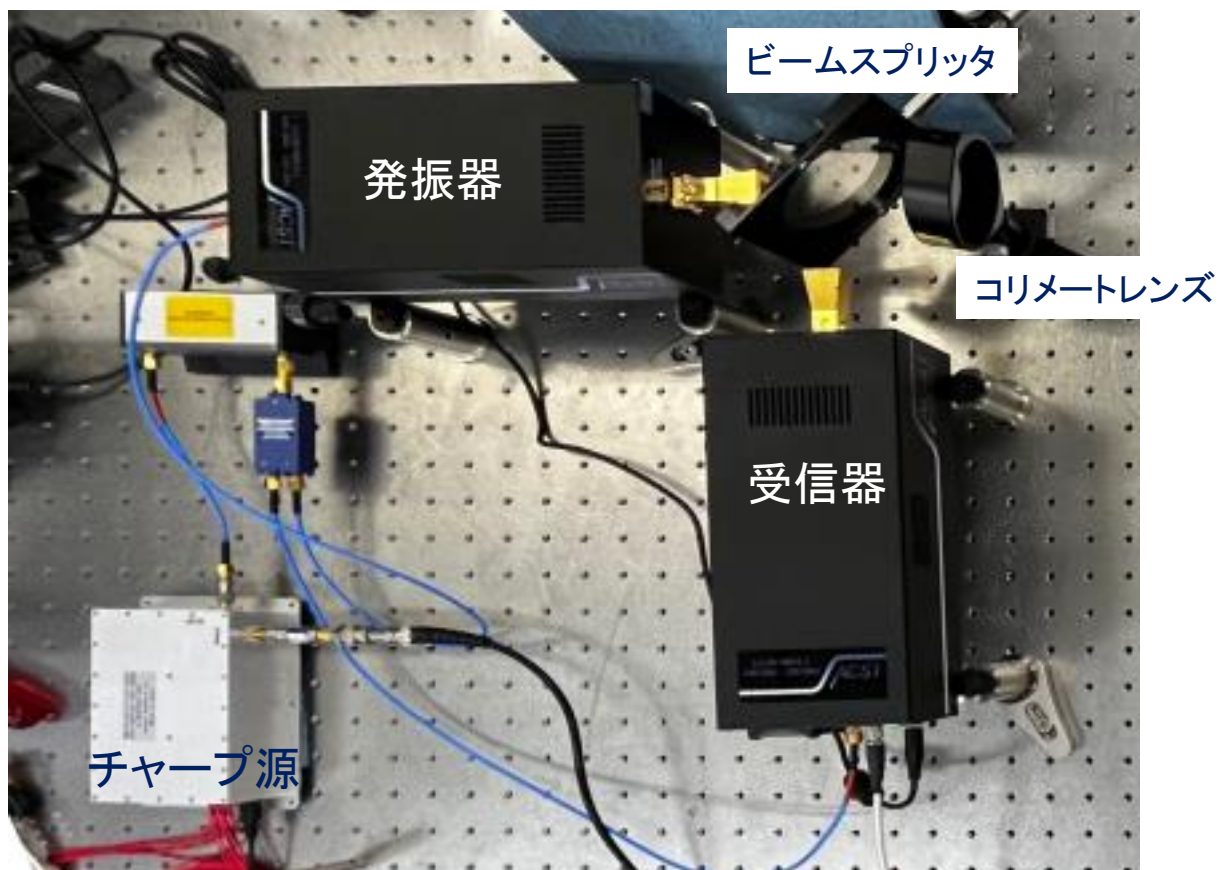


図7-19. 導入した150 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システム。

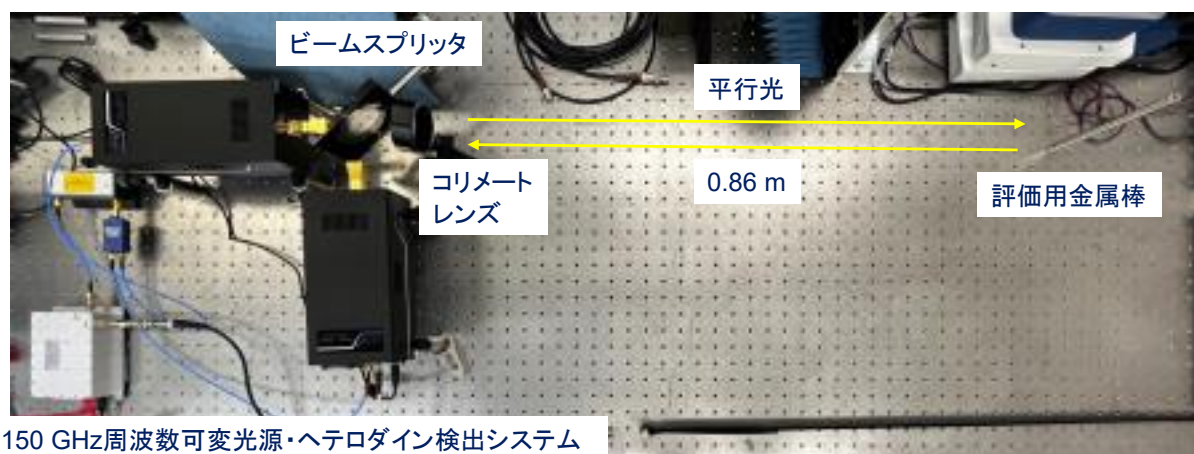


図7-20. 150 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムの性能評価のための実験セットアップ。

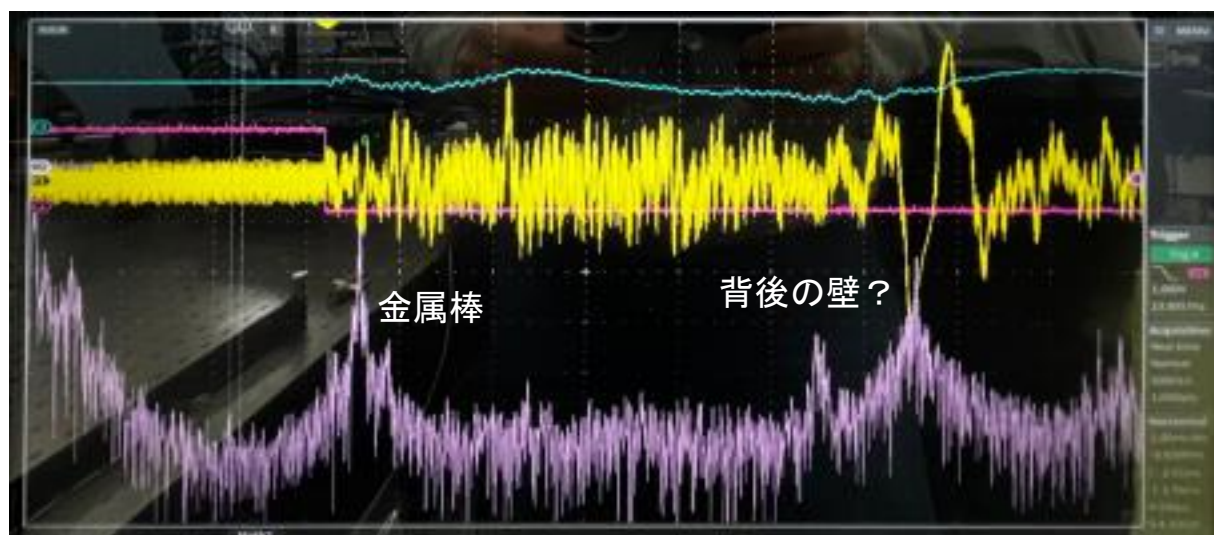


図7-21. 150 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムの評価実験でのデータ取得の様子。黄色はデジタルオシロスコープで得られたIF信号の生波形、ピンクがそのFFTした奥行き情報の信号。

【令和5年度】

(1) 600 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムの構築と基本性能評価

本システムは、周波数13.88-20.84 GHzの周波数可変シンセサイザーの信号を元に、その周波数を36通倍した500-750 GHzという超広帯域（帯域幅250 GHz）の通倍器光源と、18通倍した250-375 GHzをローカル信号（LO）とするサブハーモニックヘテロダイン検出器で構成される。当初は、光源側と検出側とでシンセサイザを共通化し、そこから信号を2分岐して光源側と検出側とでそれぞれ12通倍したのち、光源側は3通倍し、検出器側では3倍ハーモニックヘテロダイン検出器を構成することとしていた。しかし、その製作の段階で、光源側・検出器側でそれぞれ18通倍したのち、光源側は2通倍し、検出器側では2倍（サブ）ハーモニックミキサ）検出器を構成する方が効率がよく、動作も安定することが明らかとなったため、このように構成を変更することとした。なお、本変更で当初の仕様通りの性能が実現しており、この変更による性能の変更はない。図7-22にその構成、図7-23に導入したシステムを示す。

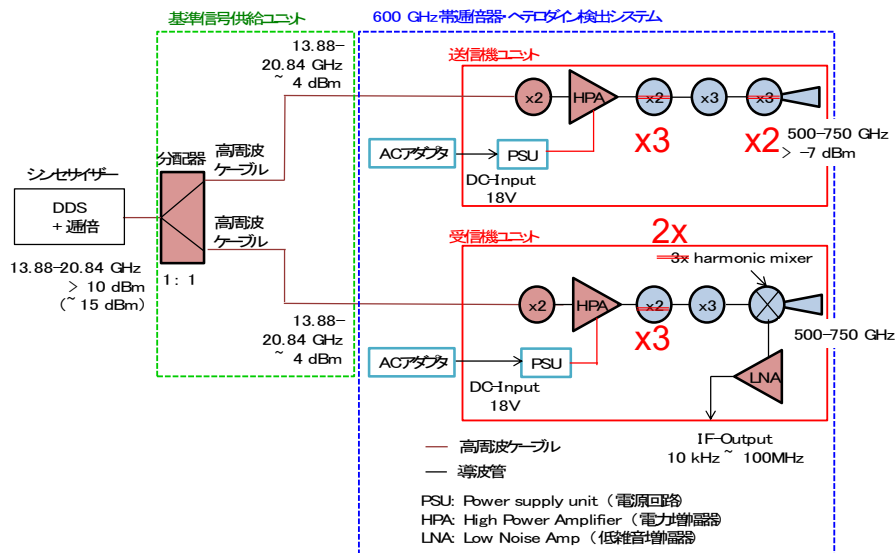


図7-22. 600 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムの構成図。

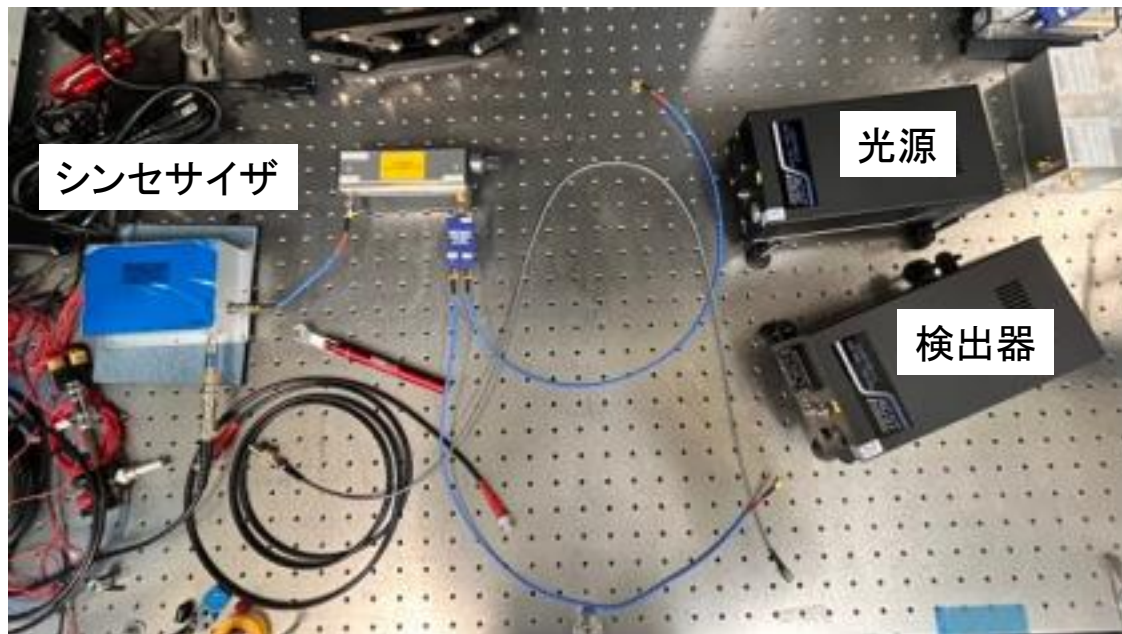


図7-23. 導入した600 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システム。

次に、600 GHzの光源・検出システムとシンセサイザを組み合わせ動作させて光源強度と周波数掃引幅の評価を行った。その結果、500-750 GHz（帯域幅250 GHz）の90%以上の帯域（トータルで225 GHz幅以上）において出力-7 dBm以上、かつ、残りの10%の帯域（25 GHz幅）で-10 dBm以上という当初の仕様を満たしていることが確認された。

また、このように構成した光源部と検出部を組み合わせた評価用光学系を構築して、約0.5 m離れた位置に立てた金属ロッドからの反射信号のヘテロダイン検出により距離測定を行う実験（FMCW測定）を行い（図7-24）、図7-25のように、得られたヘテロダインIF信号を高速フーリエ変換（FFT）することで距離情報が得られることが確認された。その詳細な奥行きイメージング特性については令和7年度に本格的に行うこととした。

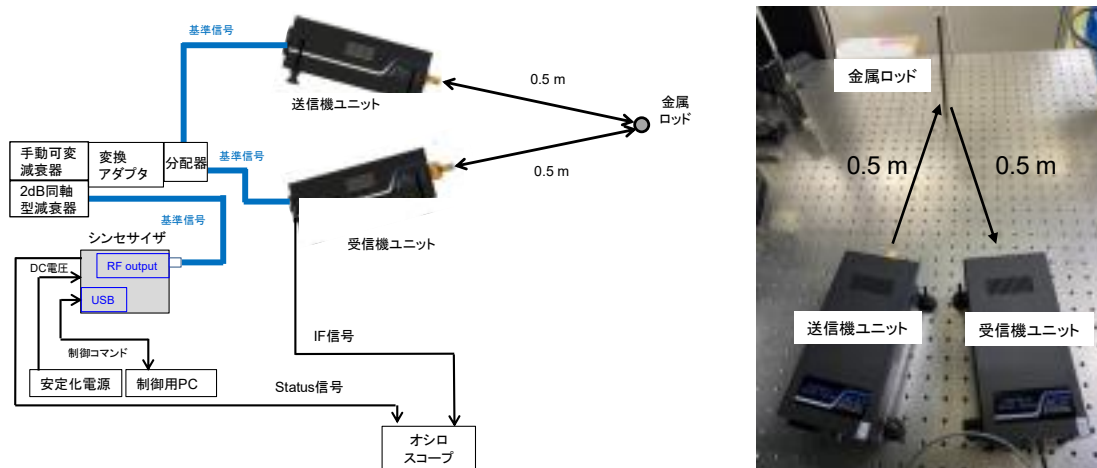


図7-24. (左) 600 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムのヘテロダインIF信号取得のための実験系の配置図、(右) 実際の実験系の写真。

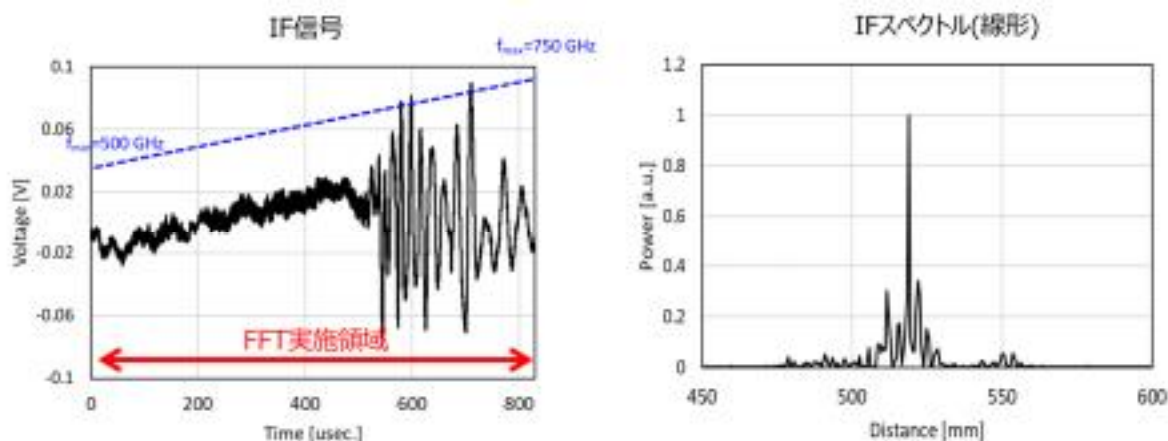


図7-25. (左) 600 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムで得られたヘテロダインIF信号、(右) IF信号をFFTして得られた奥行き情報。

(2) マイクロコイル吸収体からの反射散乱信号の特性評価と特許申請

上記の光源・検出システムの開発と並行して、金属めっきしたスピルリナ由来マイクロコイル（以下、金属マイクロコイルと称する。図7-26）を用いたテラヘルツ吸収体の研究開発を企業（PANAC社ほか）と連携して進めた。テラヘルツ帯の様々なシステムでは光源からの漏れ光を遮るためのテラヘルツ吸収体が必須である。このような吸収体には、十分な遮断特性とともに低反射特性が求められる。したがって、良好な吸収体の研究開発も様々な研究機関や企業で進められている。我々は、上記の金属マイクロコイルが300 GHzを中心とする広い帯域でテラヘルツ波を良好なインピーダンスマッチングで吸収し、マイクロコイル内に高周波電流を発生させ、ジュール熱でエネルギーを効率的に損失しながら、再放射の方向分布を分散させるという我々の研究結果（T. Notake et al. Scientific Reports, 11, 3310 (2021)）を基盤として、この金属マイクロコイルを低反射の母材に多数分散させた吸収体を試作した。特に、この金属マイクロコイルは植物由来であり、安価に大量生産が可能であり、また、様々な母材の材料や形状に合わせて分散可能であるため、使用場面に合わせて吸収体を構築可能である（図7-27）。

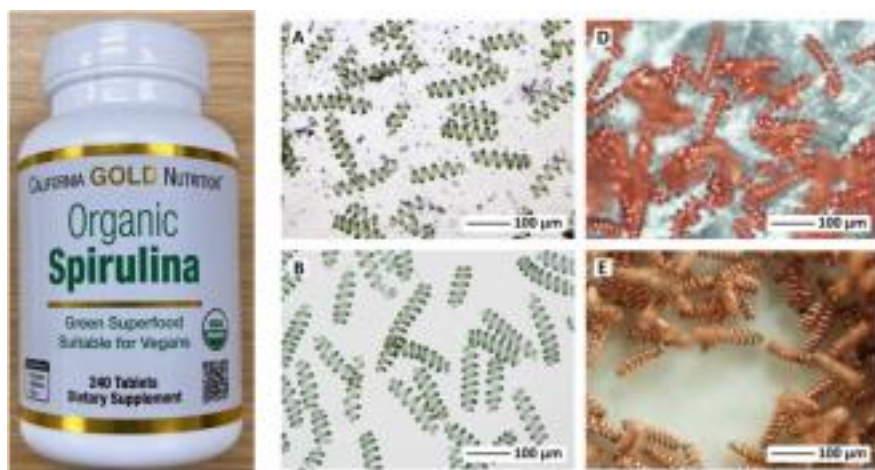


図7-26. 健康食品として販売されているスピルリナ（タブレット）とその拡大写真、及び、金属メッキしたものの画像（K. Kamata et al. Scientific Reports, 4, 4919 (2014) より）。

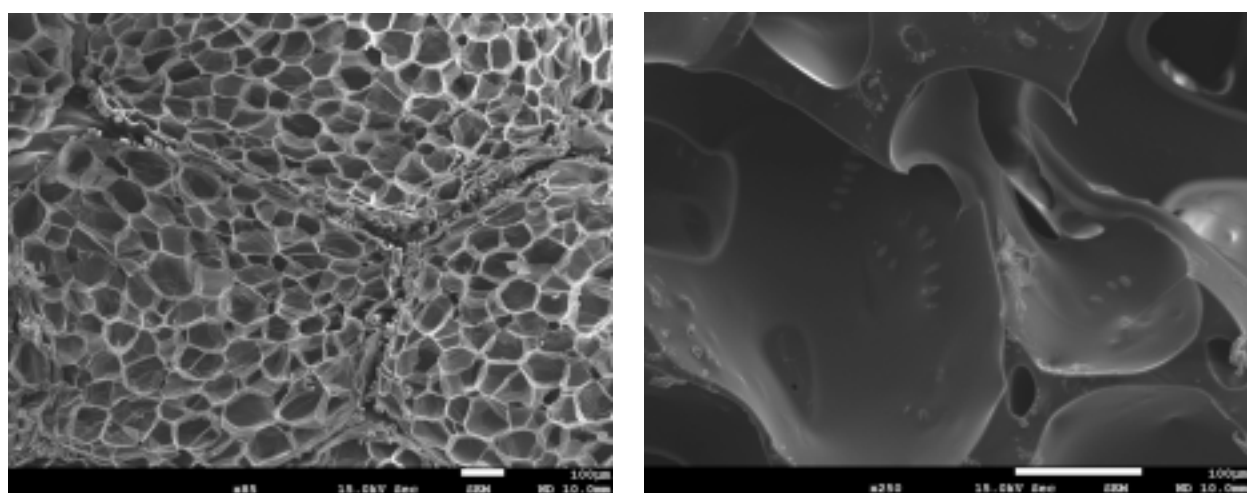


図7-27. 金属マイクロコイルを発泡スチロール（左）、発泡ウレタン（右）の母材に分散させた際の電子顕微鏡画像。母材の隙間や材質の中にマイクロコイルが埋もれて分散していることがわかる。（京都府中小企業技術センターにて撮影）

この金属マイクロコイル吸収体は、従来のデファクトスタンダードであるEccosorb®と同等かそれ以上の低反射特性を示すことが知られていたが、我々は新たにこの吸収体に反射波の位相を乱す位相乱雑化効果があることを見出し特許申請も行った（大谷ほか,特願2023-200044, 2023.11.27）。図7-28は実際に製作した発泡ウレタンの試験試料とテラヘルツ時間領域分光法（THz-TDS）による反射測定の実験系である。図7-29はこのサンプルとEccosorb®とで正反射のスペクトルを比較したものである。特に、将来の無線情報通信で重要な300 GHz近傍の帯域で比較すると、我々のサンプルではEccosorb®に比べて反射成分が低減されていることがわかる。さらに、その時間応答関数を見てみると、単パルスの入力に対してEccosorb®では単パルスの大きな信号反射が見られ、信号強度が強いだけでなく反射波で位相が保持されていることがわかる（図7-30（右））。一方、我々のサンプルでは、信号強度が小さくなっているのに加えてパルスが多数に分割されている（図7-30（左））。これは、散乱体となるマイクロコイルがサンプルの深さ方向に分散しているため位相情報が乱されていることを意味している。このような位相乱雑化に着目した吸収体はこれまで報告されておらず、テラヘルツ吸収体の新たな機能性の提案に繋がったと考えている。

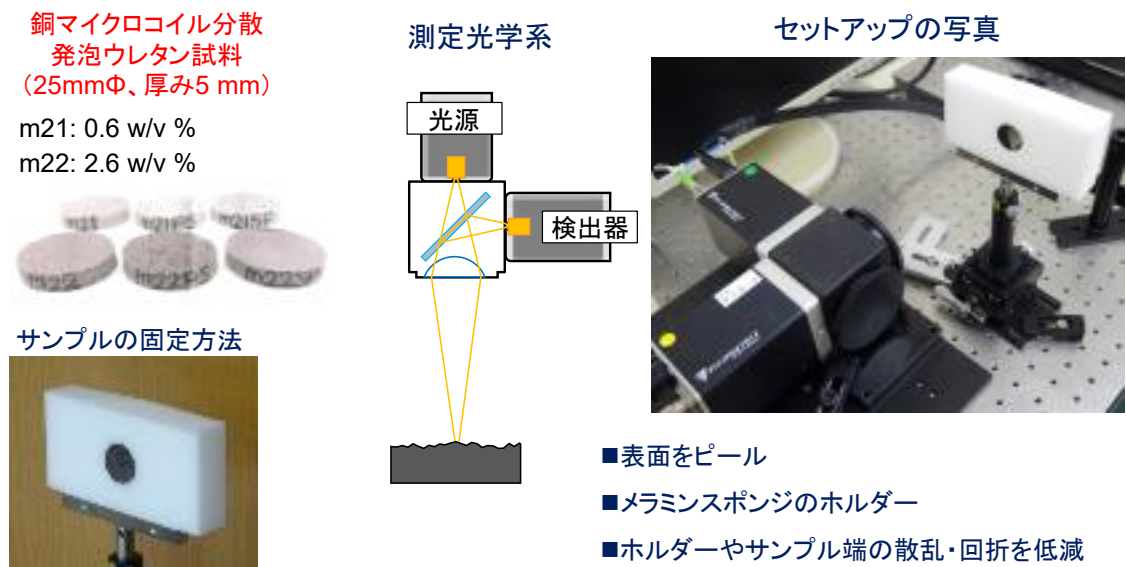


図7-28. 金属マイクロコイルを分散させた発泡ウレタン母材のサンプル写真とTHz-TDSによる反射測定実験のセットアップ。

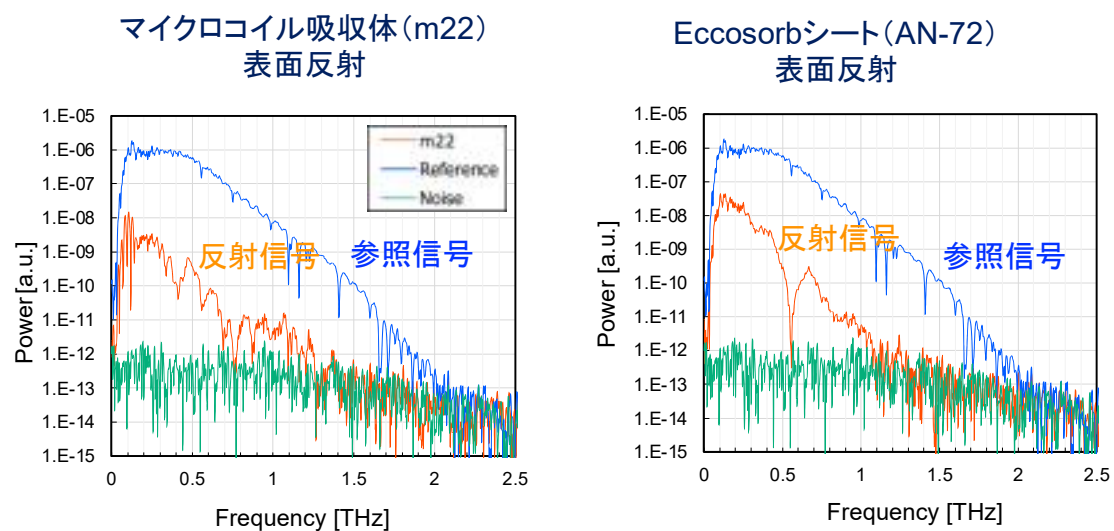


図7-29. 金属マイクロコイルを分散させたウレタン母材のサンプルの吸収体とEccosorb®とのTHz-TDSによる反射スペクトルの比較。

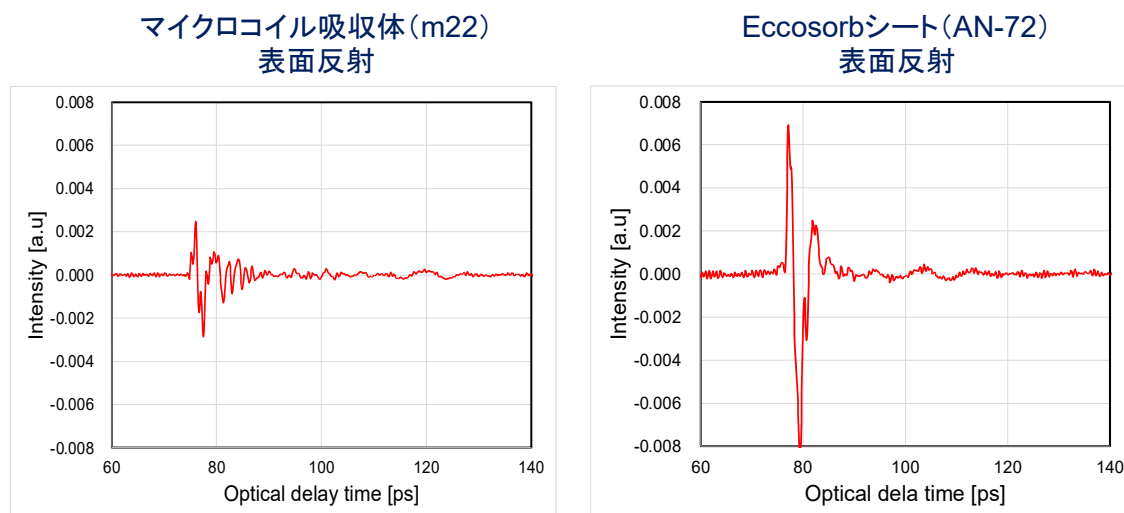
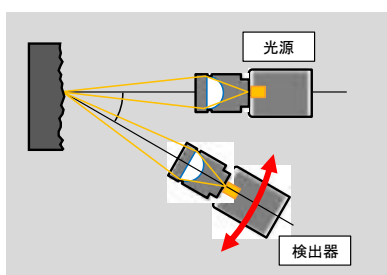


図7-30. 金属マイクロコイルを分散させたウレタン母材のサンプルの吸収体とEccosorb®とのTHz-TDSによる時間波形（参照波形によるデコンボリューション処理後）。

さらに、このサンプルについて、図7-31のような光学系を用いて反射・散乱特性の角度依存性を調べた。図7-32と図7-33に散乱スペクトルと時間波形をそれぞれ示す。これらの図より、正反射から角度がずれた場合、金属マイクロコイル吸収体とEccosorb®では、スペクトル・時間波形とも同様の特性を示した。言い換えると、両者の違いは正反射が大きく出るか否かという点で最も大きく異なると言える。また、金属マイクロコイル吸収体では散乱強度そのものの大きさが正反射でもオフセット散乱でも大差なかった（図7-33）。このことも、金属マイクロコイル吸収体では、信号が出てくる時点ですでに十分な散乱を受けていることがわかる。その意味でも、位相乱雑化効果が生じていることと今システマティックな結果が得られた。

■光学系の配置

- ・ 使用レンズ : 差動距離 152.4mm
- ・ 偏光状態 : 地面に水平な直線偏光(P偏光)
- ・ 焦点位置 : サンプル表面
- ・ 計測角度 : 30° ~ 80°
- ・ 角度の刻み幅 : 10°



■光学系の外観



図7-31. 金属マイクロコイル吸収体の反射・散乱特性の角度依存性の実験セットアップ。

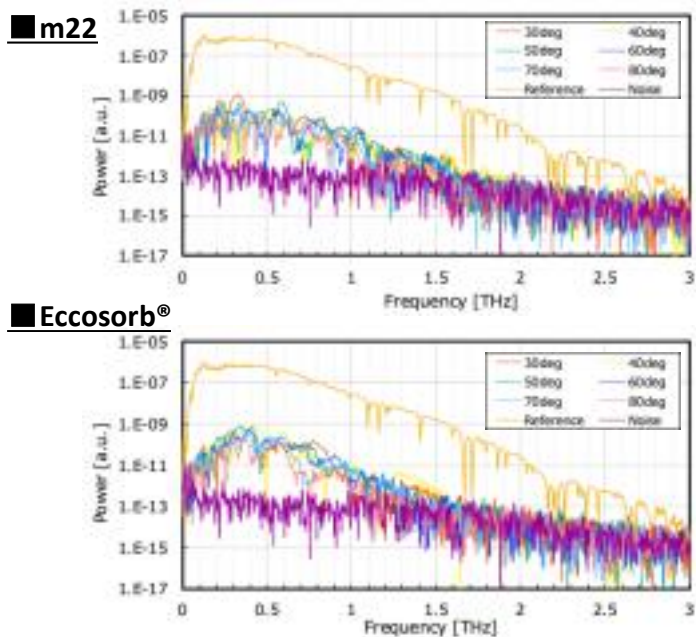


図7-32. 金属マイクロコイル吸収体とEccosorb®の散乱特性の角度依存性（スペクトル）。

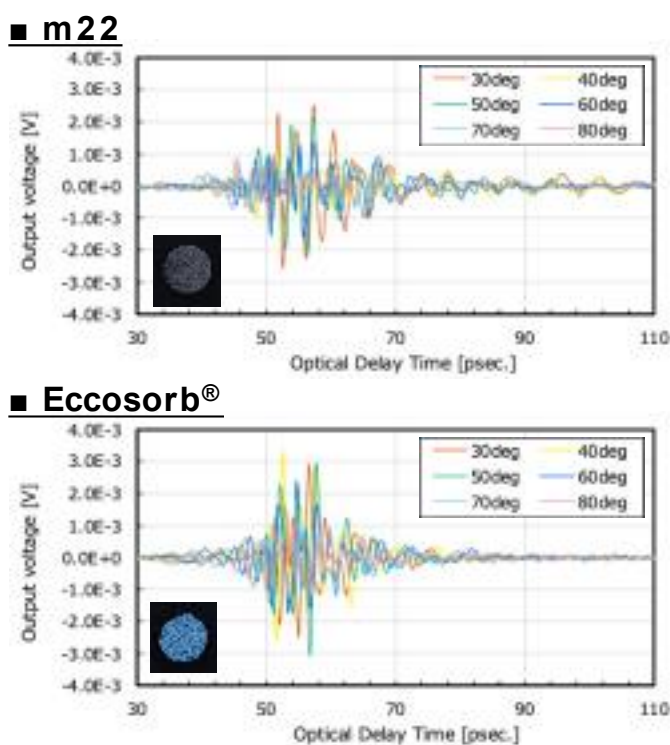


図7-33. 金属マイクロコイル吸収体とEccosorb®の散乱特性の角度依存性（時間波形）。

【令和6年度】

令和6年度は、まず、システムサイズに関する最終目標である $300 \times 300 \times 300 \text{ mm}^3$ の達成に向けて、システムの小型化を進めた。送受信機には300 GHzのものを用いて、最終的なシステムサイズとして、 $300 \times 300 \times 280 \text{ mm}^3$ を実現した（図7-34）。また、このシステムを用いたイメージングが可能であることも確認した（図7-35）。このことから、当初の目標の一つであった「①ロボット搭載が可能なサイズの光学系の達成を目指し、サイズの目標値として、光源と併せて約30 cm立方以下とする。」を達成した。

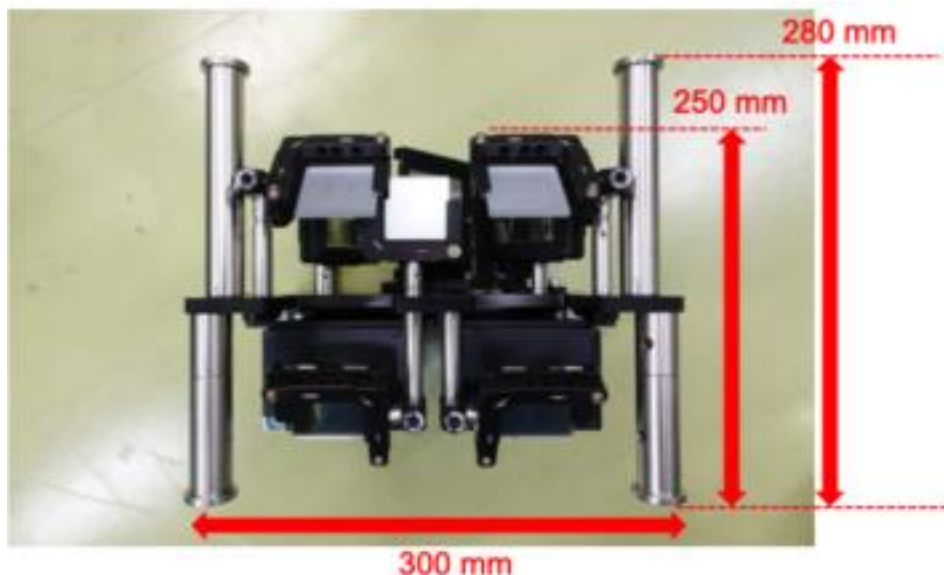


図7-34. 小型化を実現した300 GHz送受信機システム。

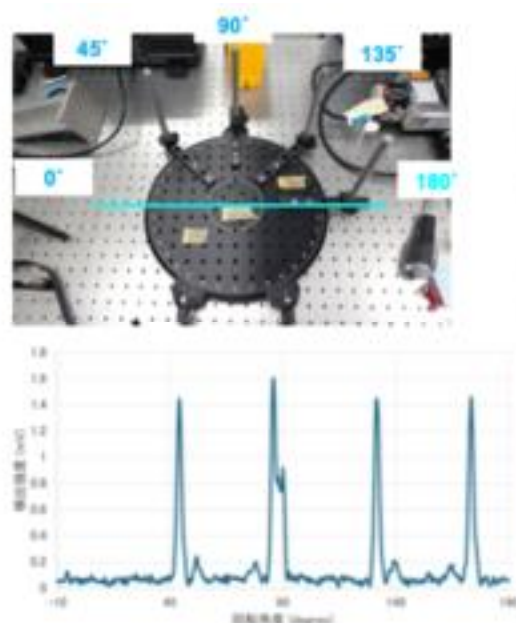
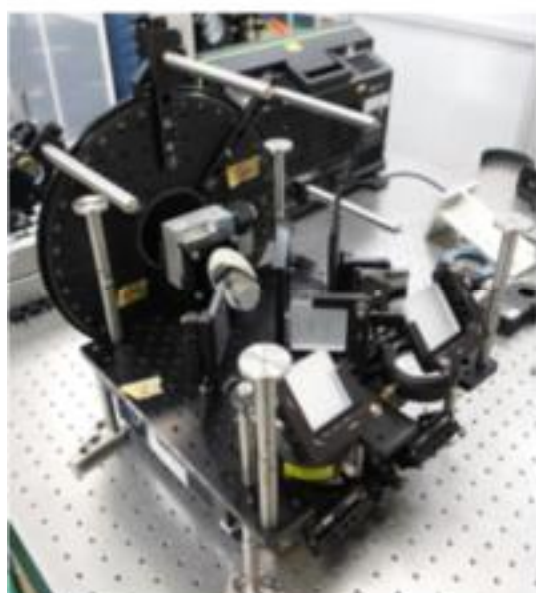


図7-35. 小型化したシステムによるイメージング試験。

次に、高精度の3次元イメージングの実現を目指して、令和5年度に完成した600 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムを用いた実用的システムのイメージング性能評価を進めた。特に、本プロジェクトの当初に掲げた「深さ分解能の目標値として、500 μm 以下を達成する。さらに、挑戦的目標として、深さ分解能 $\sim 100 \mu\text{m}$ に挑む。」の達成を目指した。具体的には、600 GHzシステムを用いて厚み500 μm の高抵抗Siウェハの深さ方向のデータを取得し、表と裏の面からの反射信号の分離実験を行った。なお、このシステムのバンド幅 (250 GHz) から得られる深さ分解能のフーリエ限界は600 μm であった。そこで、取得した測定データにデコンボリューションを適用して、深さ分解能500 μm 以下を目指した。その結果、FWHMにして約90 μm の奥行き分解能を有する奥行きイメージングを達成した (図7-36)。ただし、Siウェハは屈折率が3.41であり、これは屈折率1に換算した場合、FWHM $\sim 300 \mu\text{m}$ に相当するため、目標値である「500 μm 以下」を達成したと言えるが、挑戦的目標である「 $\sim 100 \mu\text{m}$ 」を達成したとは言い切れない。そこで、さらに位相シフト干渉法を用いた表面形状の測定を150 GHzシステムと300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムを用いて実施した。図7-37に実験に用いたミツトヨ製標

準段差サンプル（段差マスター）、図7-38に構築した実験システム、図7-39に測定結果をそれぞれ示す。（実験は150 GHzと300 GHzの両方で実施したが、ここでは300 GHzシステムを用いた結果のみ示す。）その結果、実際の段差と比較して2-19 μm のズレで段差の測定値がサンプルの段差値と一致していることが確認された。なお、図からわかるように、測定場所の違いによる不定性はこのズレ値よりも低く、この最大約20 μm 程度のズレは主として系統誤差によるものである。このような系統誤差を生む要因としては、このレベルになると測定サンプルの設置そのものに高い精度が求められ、それが解消していないために系統誤差となって表れていると考えられる。したがって、理想的なサンプル設置が実現した場合にはさらにこの精度は向上すると予想されることを申し添えておく。以上のことから、挑戦的目標としていた「深さ分解能 $\sim$ 100 μm 」を達成した。

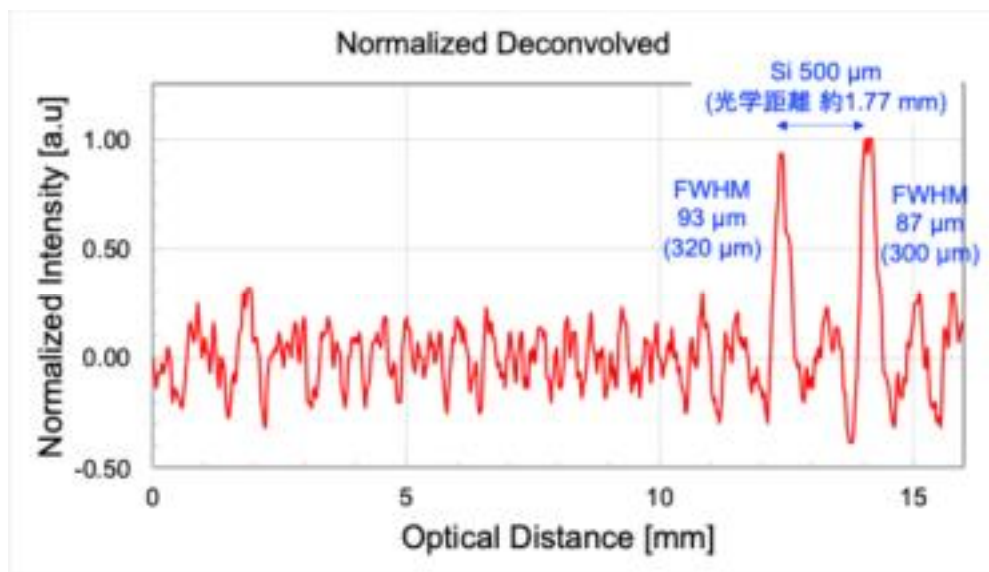


図7-36. 600 GHzシステムを用いたSiウェハからの表裏両面からの反射信号の測定結果（デコンボリューション適用後）。

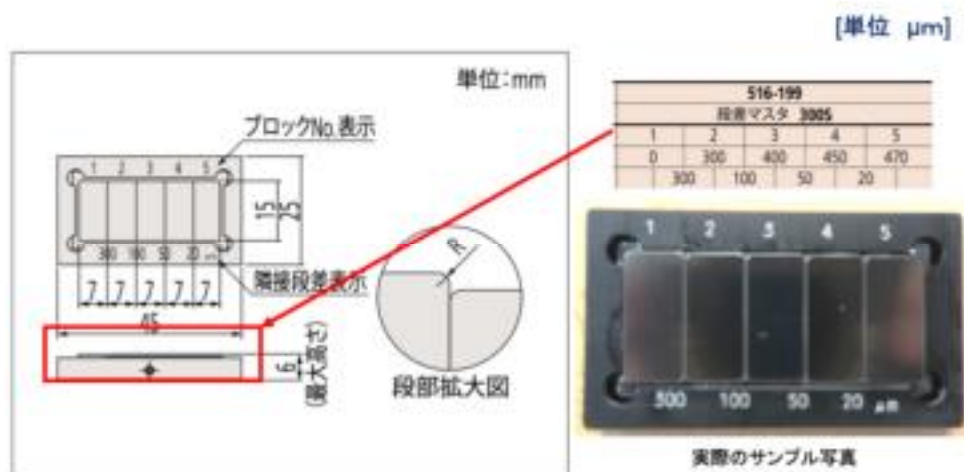


図7-37. 実験に用いたミツトヨ製段差標準サンプル（段差マスター）。

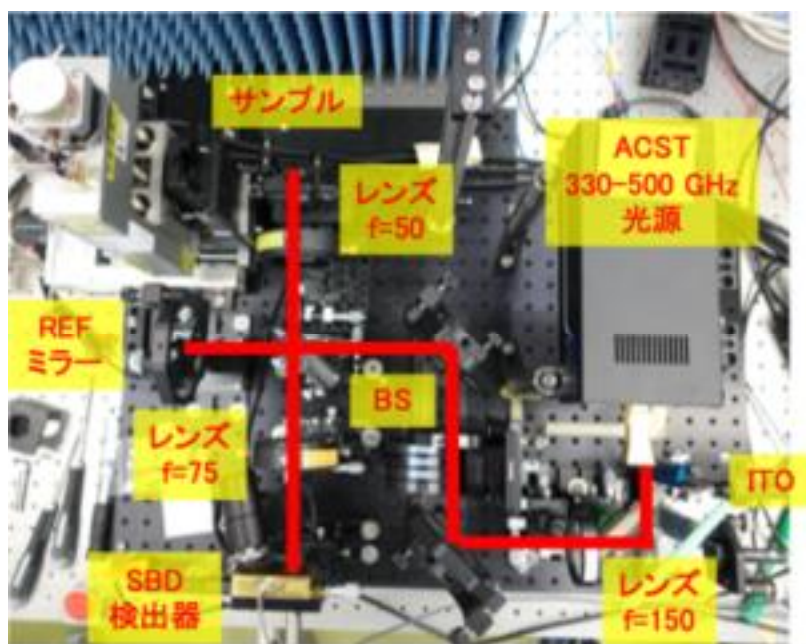


図7-38. 段差の奥行き測定に用いた位相シフト干渉法の実験システム。
光源・検出器には300 GHz周波数可変光源・ヘテロダイン検出システムを用いた。

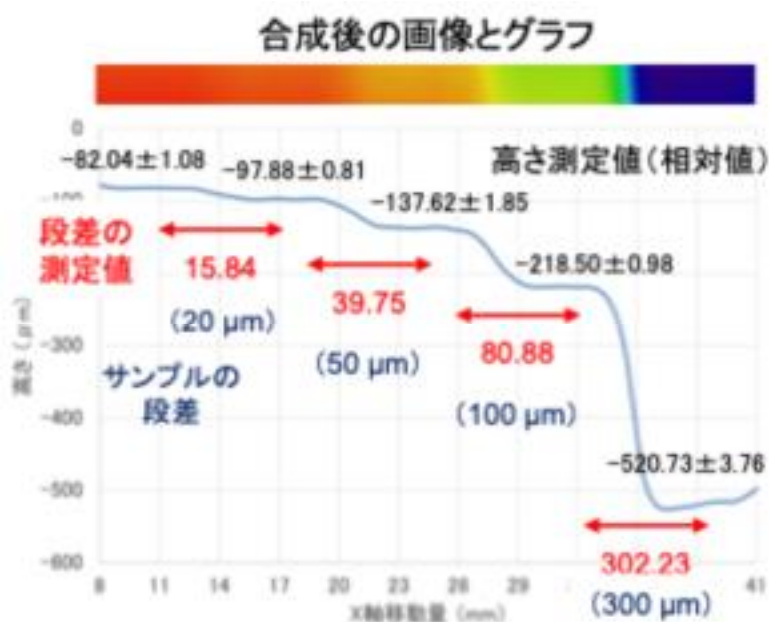


図7-39. 300 GHzシステムを用いた段差の測定結果（図7-37とは左右逆転して表示）。

さらに、300 GHzのシステムを用いた応用可能性の開拓を進めた。特に、本プロジェクトを契機に2024年4月より始まったT社との共同研究では、同社の技術者を研究員として受け入れ、小型波長可変300 GHz光源を用いた実験を実施した。実験結果については守秘義務があるためここでは触れられないが、試験システムを構築する前の予備実験光学系を示す（図7-40、同社に了解を取得済）。さらに、実際の装置開発のために、図7-40を模した実験系をT社内でも構築し（図7-41）、令和7年度より本格的な実験を開始する予定である。本共同研究は、同社の次世代のビジネス展開に関係するものであり、本プロジェクトがテラヘルツ波の実際の応用開拓に貢献していることを表している。

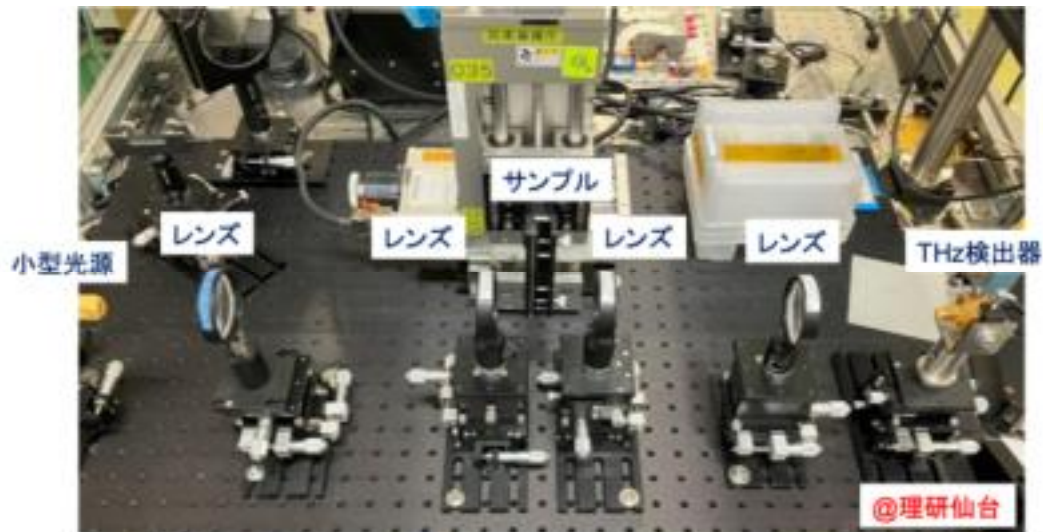


図7-40. T社との共同研究で構築した300 GHz小型光源を用いて理研内に構築した予備実験システム。（T社の承諾を得て掲載）

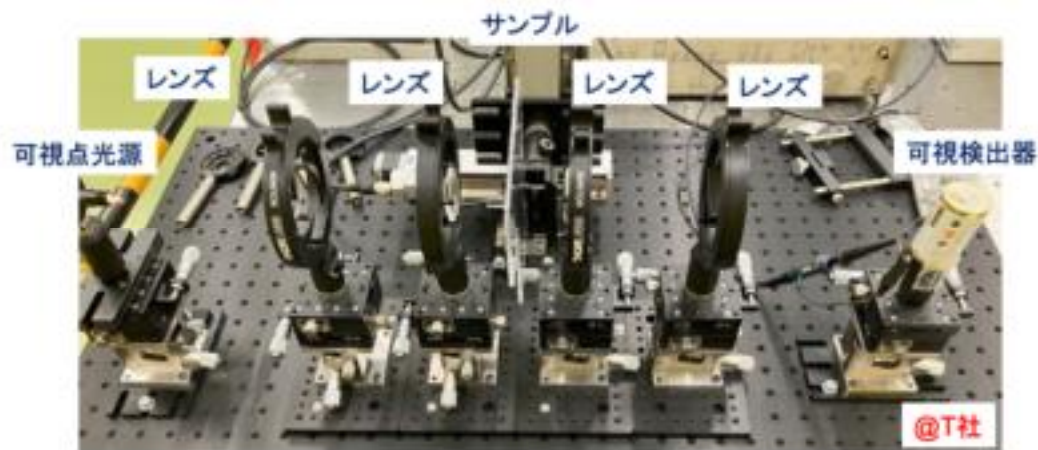


図7-41. T社内で構築されたテラヘルツ用光学系。光学アライメントは可視光の光源・検出器を用いて構築している。（T社の承諾を得て掲載）

以上、当初の最終目標に対する結果は、

① コンパクトな光源と組み合わせることが可能な小型かつロバストな光学系の設計と評価。最終的にロボット搭載が可能なサイズの光学系の達成を目指し、サイズの目標値として、光源と併せて約30 cm立方以下とする。（結果：30 cm×30 cm×28 cm、最終目標達成）

② 高精度の3次元イメージングの実現。深さ分解能の目標値として、500 μm 以下を達成する。さらに、挑戦的目標として、深さ分解能 $\sim$ 100 μm に挑む。（CTでの奥行き分解能300 μm 、段差での奥行き分解能20 μm 、最終目標達成）

③ スキャン光学系の実現。測定速度の目標値として、1測定点あたり10 ms以下。（1点あたりの測定時間0.85 ms、最終目標達成）

④ コヒーレント光源を用いる時に擾乱成分として生じる干渉の影響を可視化する技術の開発（開発に成功、最終目標達成）

となり、当初の目標値をすべて達成した。

⑧ 周期分極反転素子の作製装置準備（担当：理化学研究所）

要素課題（４）に対応するため、大口径結晶を作製可能な装置開発に関して、高電圧パルス印加などによる特殊な装置を構築ための詳細な設計および装置作製を行う。

〔前半：令和２～３年度〕

本項目⑧は、前半（令和２～３年度）において、まず大口径周期分極反転非線形結晶に関しての高電圧パルス印加法による作製装置の設計と開発、および装置の動作条件検討を行なった。図8-1は電界印加による分極反転非線形結晶作製装置の構成である。強誘電体非線形光学結晶の極性を周期的に反転させるため、オイルバス中に配置した結晶に数十キロボルトの高電圧パルスを印加可能な構造となっている。特に、本PJの最終目的である大型大口径結晶に対応可能とすべく、各部装置の形状やサイズ、さらに結晶取扱機構その他の詳細部品に至るまでの検討を行った。特に、従来より平面サイズや全体重量で数倍になる結晶に対応しつつ、作成精度を維持する点に重点をおいて検討を行った。なお、前半期間での素子サイズは、40 mm×5 mm開口サイズ、長さ40 mmとした。

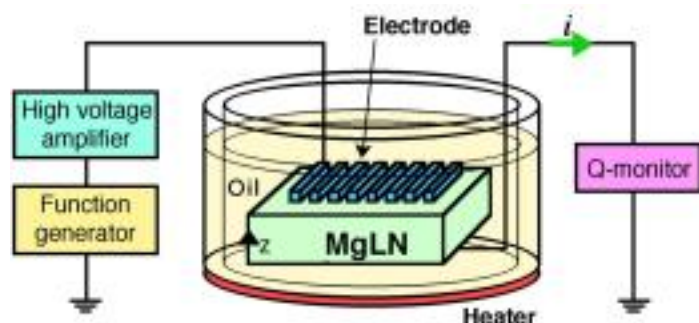


図8-1. 分極反転非線形結晶作製装置の構成

図8-2は実際の極性反転処理時の印加電圧や、電圧印加時に発生する反転電荷などを観測モニターする信号の一例である。信号発生器で生成するミリ秒級の短パルス信号を高電圧増幅器でキロボルト級に増幅し、これを上述のオイルバス中の結晶に印加する。そしてその際の反転電荷（電流）などを観測しつつ反転処理を継続実施するのが極性反転処理の基本構成となる。

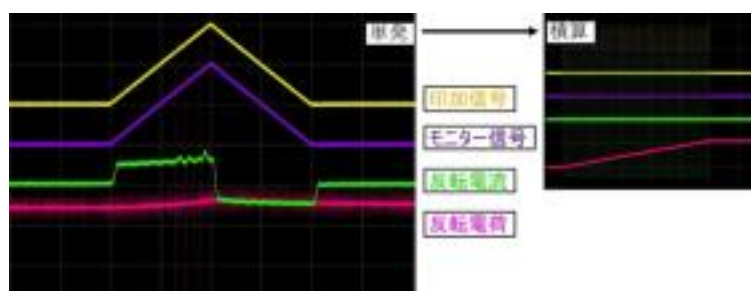


図8-2. 極性反転処理時のモニター信号例

図8-3は高電圧パルス印加分極反転装置の配置写真である。上述図8-1で示した各構成部品から成り立っていることがわかる。



図8-3. 結晶作製装置一式とその信号波形

作製装置の検討と並行して、周期分極反転結晶用材料の新規探索を目的に、従来とは異なる強誘電体非線形光学結晶の検討も行った。図8-4（左）は従来のMg添加LiNbO₃（MgLN）結晶、図8-4（右）はMg添加LiTaO₃（MgLT）結晶である。いずれも可視域では無色透明のガラス状で差異は見えないが、MgLTはMgLNに比して初期効率が劣る一方で高耐久性が期待出来ることから、高強度THz波発生に適していると考え、検討を行った。

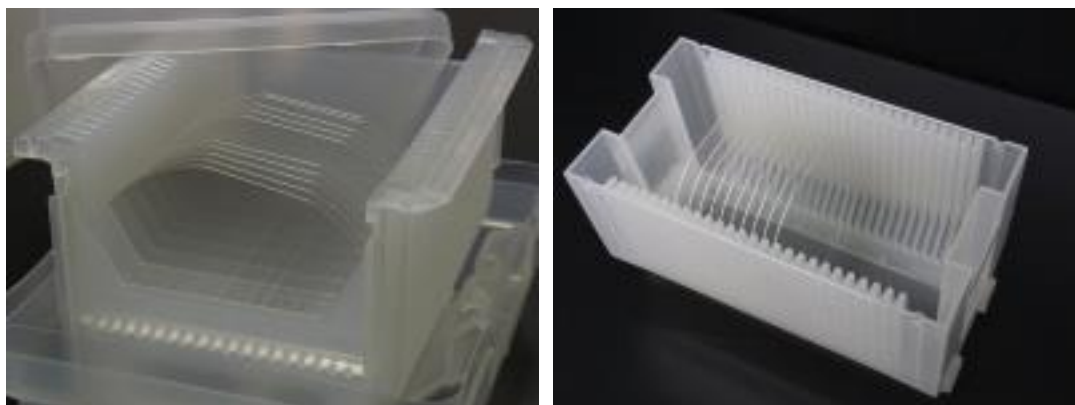


図8-4. 強誘電体結晶、（左）MgLN、（右）MgLT

[後半：令和5～6年度]

後半（令和5～6年度）の内の令和5年では、最終目標である50 mm×5 mm開口サイズ、長さ50 mmの周期分極反転ニオブ酸リチウム（PPLN）素子作製を目的とした装置準備と条件検証を行った。

PPLN作製装置は、当初計画である50 mm×50 mm×厚み5 mmの結晶に対応させることに加えて、図8-5（a）に示す従来の垂直配置（励起光伝搬軸(Pump)とQPM構造 k ベクトルが並行配置）と、図8-5（b）に示す6回対称配置（Pump- k ベクトル角 $\theta=60^\circ$ ）にも対応可能な構成とした。これは $\theta=60^\circ$ 構造が実際の光学実験時の結晶配置に近いためである。

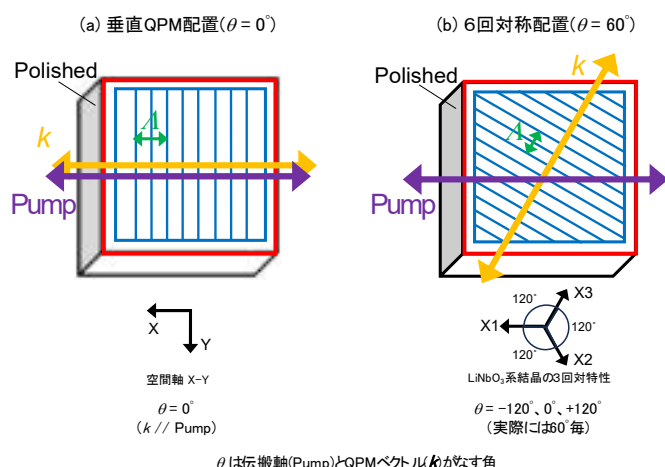


図8-5. PPLN素子の構造、(a)垂直構造と(b)傾斜構造

図8-6に、利用した50 mm×50 mm×厚み5 mmのMgLN結晶を示す。これまでの検討を元に、本研究に適した結晶育成メーカーを選定し、サイズや加工精度等を指定して入手した。図8-7および図8-8は、50 mmサイズ用に新たに準備したフォトマスクと結晶カバーである。

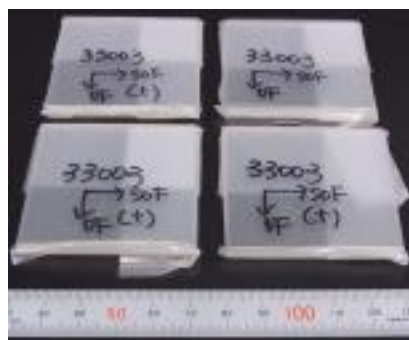


図8-6. MgLN結晶

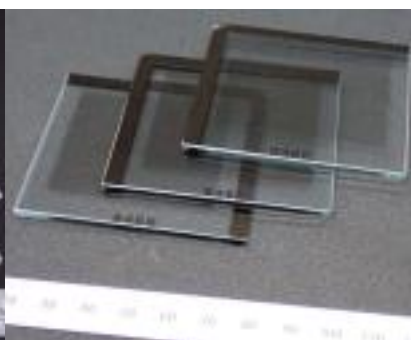


図8-7. フォトマスク

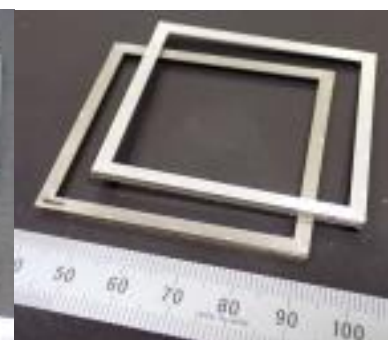


図8-8. 結晶カバー

これらの結晶および部品等と、それまでに構築した分極反転装置と組み合わせ、50 mmサイズのPPLN素子実現に必要なプロセス条件の検討を行った。

典型的な分極反転条件として、

- ・結晶温度 : $\sim 110^\circ\text{C}$
- ・最大印加電圧 : $\sim 16\text{ kV}$
- ・電圧印加方式 : 連続パルス印加
- ・反転構造周期 : $\Lambda = 35\text{ }\mu\text{m}$

の条件下で、周期反転構造を有する50 mm×50 mm×厚み5 mmサイズのPPLN素子を実現できる装置構成であることを確認した。

後半（令和5～6年度）の内の令和6年では、形成したPP構造のエッチング処理による物理的構造評価を行い、その結果をフィードバックすることで素子作成条件の改善を図った。

PPLN素子における周期分極反転(PP)構造はその素子結晶内部に形成されているが、この構造の直接観察は通常は不可能である。ここではPP構造が酸に対して異なるエッチングレートを持つことを利用してその構造可視化を実施した。図8-9に示すように、作製したPPLN素子の一部を棒状にカット切断し(a～e)、さらに棒状結晶の一部の切断面を光学研磨した後に、強酸を利用したエッチング処理を施した(a～d)。

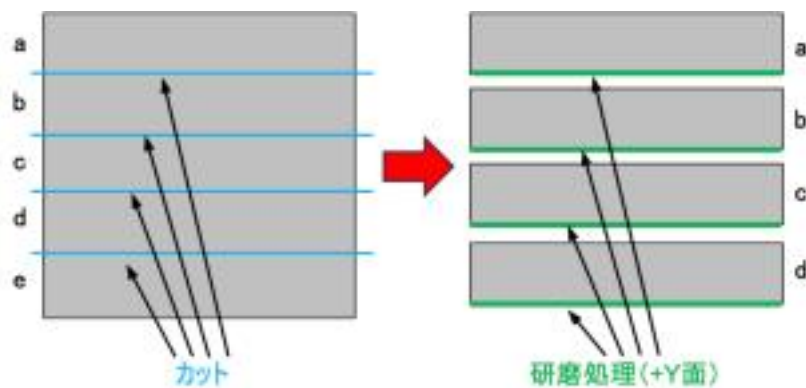


図8-9. PPLN素子の切断と端面研磨

図8-10に、切断研磨後の棒状PPLN素子（素子番号PF222,224,226,228,230）の写真を示す。PF222はテスト用の40 mm×16 mm素子、PF224～230は40 mm×40 mm素子である（いずれも5 mm厚）。1つのPPLN素子の異なる位置から切り出した複数の棒状結晶の+Y面（断面）をエッチング処理後に観察評価することで、大口径PPLN素子全体でのPP構造を可視化し、その構造評価を実施した。



図8-10. 切断加工後の棒状PPLN素子

図8-11にテスト用素子であるPF222から切り出した棒状素子PF222aの+Y切断面（PF222の中央部付近に相当）のエッチング処理後断面全体写真、図8-12にその拡大写真1を示す。図8-11両端の±X側白色部（PP構造が存在しない部分）は、分極反転実施のための高電圧印加に必要な余白部である。図8-11および図8-12で示すように、+Z面から-Z面に至る反転構造がエッチング異方性により可視化されて、その構造が観察できていることがわかる。



図8-11. 断面全体写真（PF222a）

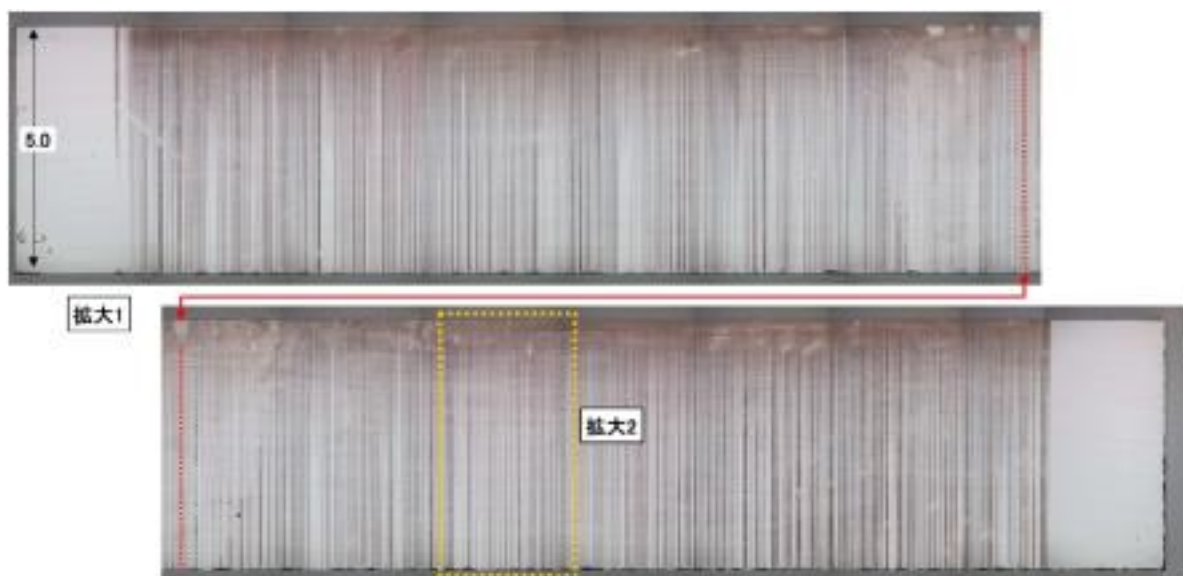


図8-12. 断面拡大写真 1 (PF222a)

図8-13には、図8-12の一部をさらに拡大した写真を示す。その上部(3 a)、中央部(3 b)、下部(3 c)を比較すると、分極反転構造が+Z面から-Z面に向かって全体として楔型構造を成していることがこの観察からわかる。また部分的には、パターンが潰れているベタ領域、構造が乱れた不均一領域、もしくは構造が消失している抜け領域などの不完全構造が存在することも確認できる。楔型構造や上述3種の不完全構造はPPLN素子の性能低下の要因となるため引き続き改善の必要があるが、ここではこの断面観察結果を、光学評価に依らないPPLN素子性能予測の指標とし、これを素子作製条件にフィードバックした。

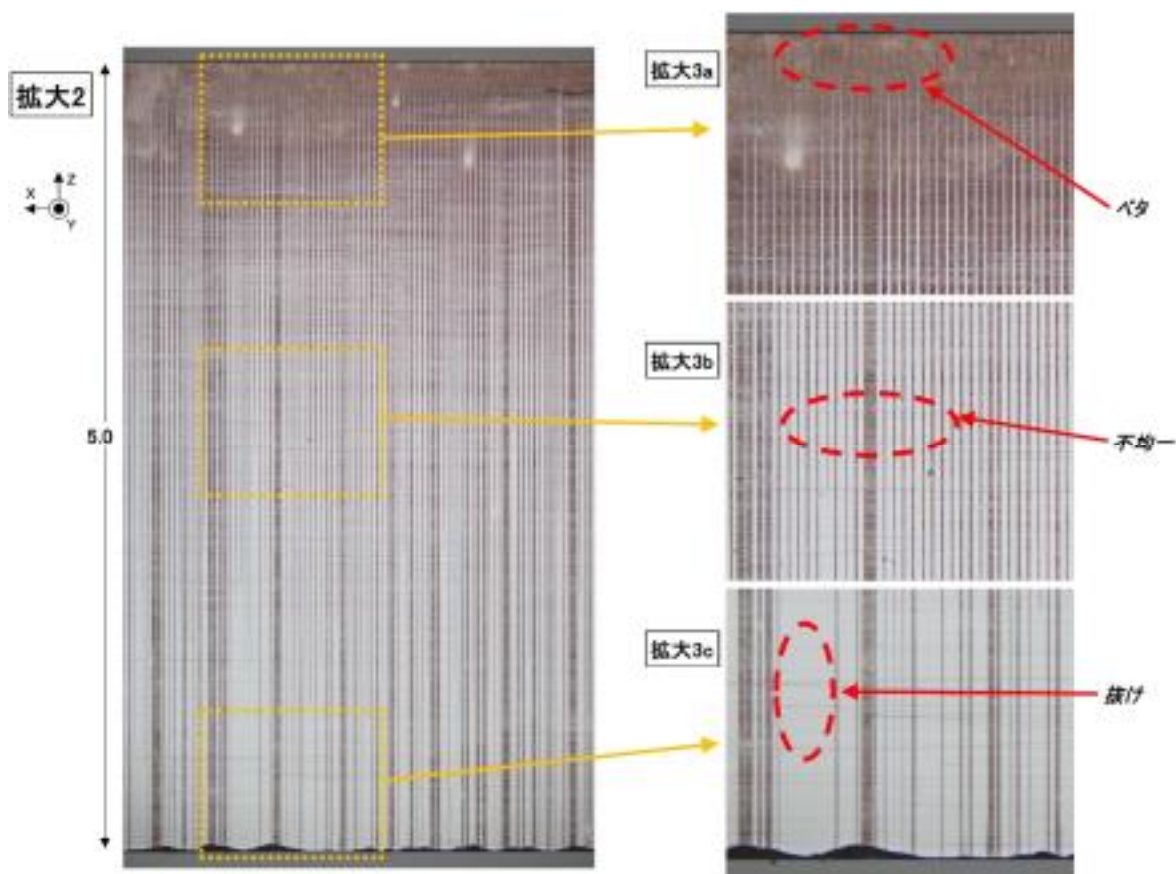


図8-13. 断面拡大写真 2 (PF222a)

図8-14および図8-15は、それぞれ40 mm×40 mm素子のPPLN素子PF224およびPF226の棒状チップa～dの切断面エッチング処理後の断面写真を示す。ここでa～dの断面写真は、図8-9に示したように40 mm×40 mm素子のPPLN素子内各部の+ Y切断面を約8 mm間隔で観察していることに相当する。

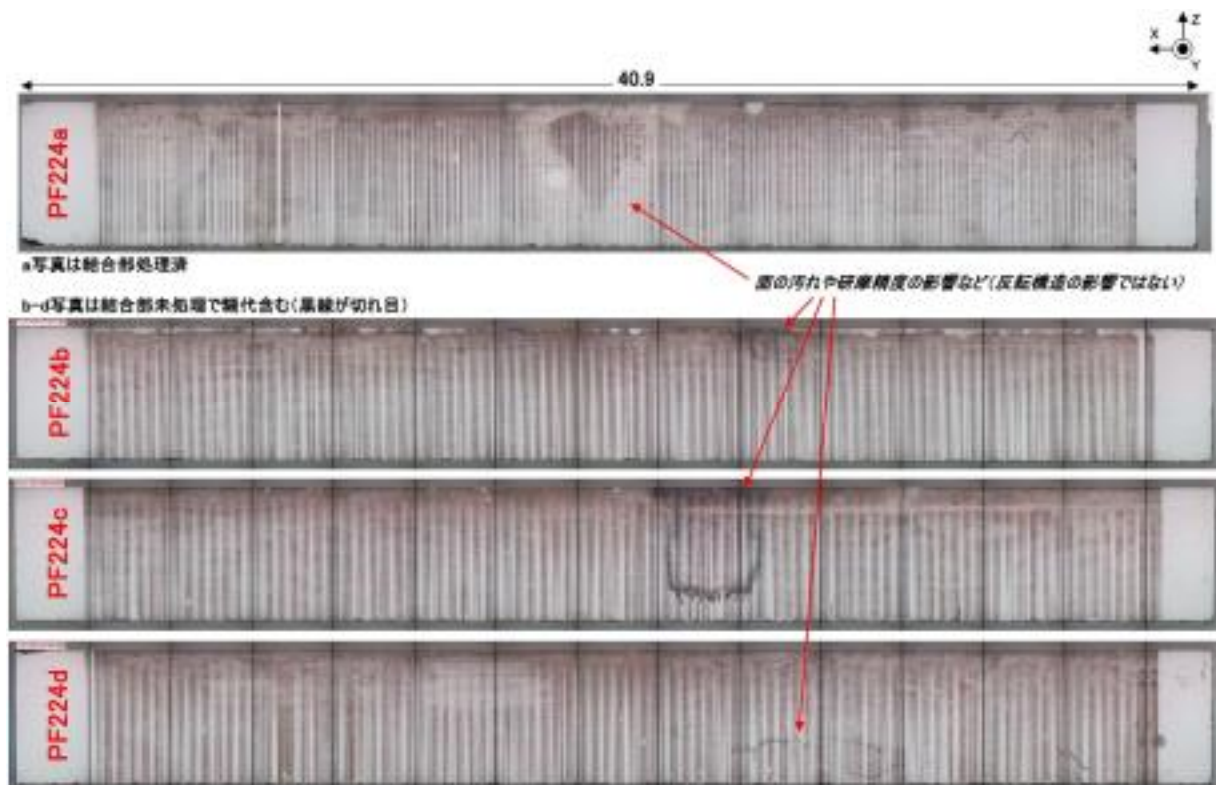


図8-14. PF224断面写真 (PF224a～d)

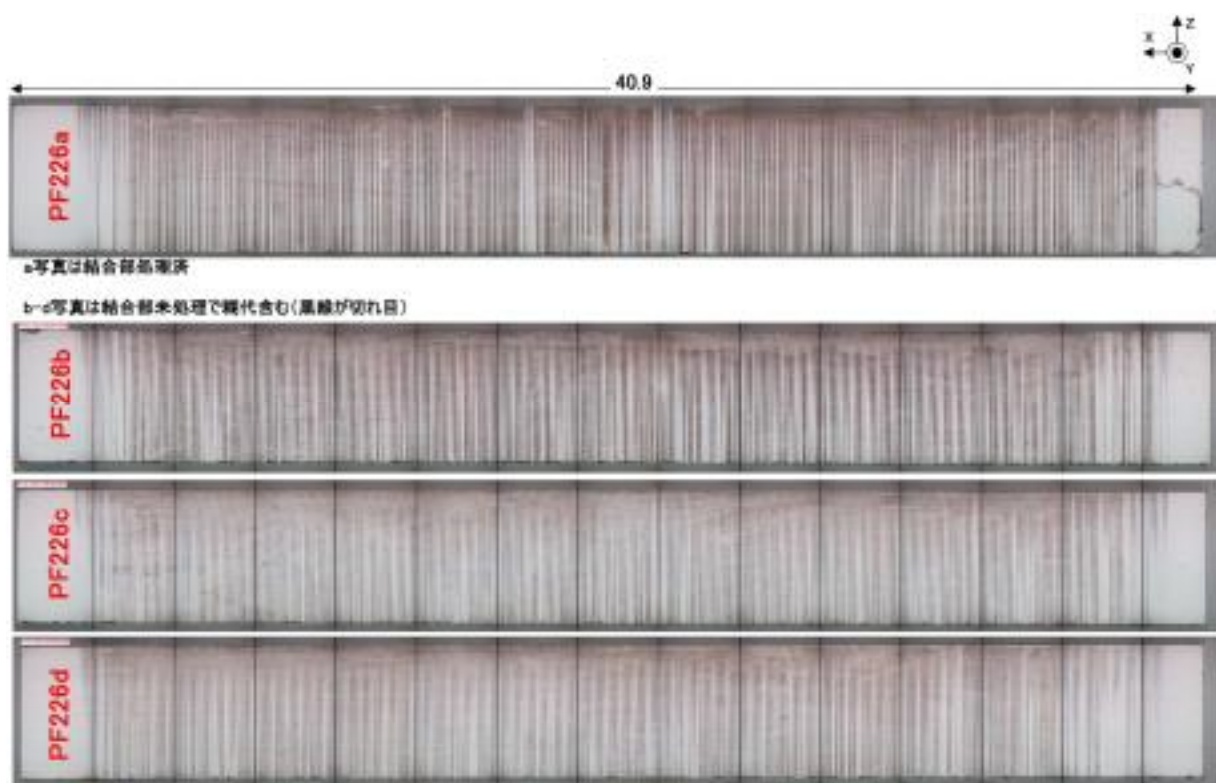


図8-15. PF226断面写真 (PF226a～d)

PF224およびPF226のいずれにおいても、+Z面から-Z面に向かって貫通するPP構造が、40 mm×40 mm素子のほぼ全域にわたって形成できていることが確認できた。

この項目⑧での評価結果を分極反転時の条件にフィードバックすることで、最終目的の一つである項目⑨での50 mm×50 mm素子の作製を達成した。

⑨ 周期分極反転素子の開発（担当：理化学研究所）

要素課題（４）に対応するため、実施項目⑧で開発した大型周期分極反転結晶の作製装置を用いて、実際に大口径サイズの周期分極反転結晶開発を行う。最終目標の周期分極反転結晶を実現するためには、周期分極領域の広さと結晶の厚みに対して独自の製法と条件を実験的に求め、最適化が必要である。これらをふまえ、実利用可能な結晶作製の研究を実施する。

実施項目⑧及び⑨の中間評価(令和4年10月)に向けたマイルストーンとしては、40 mm×5 mm、長さ40 mmの周期分極反転結晶を周期35 μm で実現する。

最終目標として50 mm×5 mm開口サイズ、長さ50 mmの周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶を実現する。

項目⑨では、主目的である（９－１）50 mm×5 mm開口サイズ、長さ50 mmの周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) 素子作製に加えて、発展的内容として（９－２）レーザー耐性評価システムによる結晶の耐性評価、（９－３）テラヘルツ波での時間領域分光（TDS）計測システムによる結晶の特性評価、を実施している。

以下では、（９－１）～（９－３）の小項目毎に年度を追って成果を記す。なお、本項目は前半期（令和２～３年度）は未実施である。

（９－１）50 mm×5 mm開口サイズ、長さ50 mmの周期分極反転ニオブ酸リチウム (PPLN) 素子作製

[令和４年度]

令和４年度は、項目⑧の前半期間(令和２～３年度)において検討および準備した、40 mm×5 mm開口サイズで長さ40 mm用の分極反転非線形結晶作製装置を利用して、素子作製を行った。

図9-1は作製したPPLN素子の基本構成である。外形40 mm角、厚み5 mmのMgLN結晶板の中央部に、約36 mm角の擬似位相整合（QPM）用分極反転構造領域を形成する。このQPM構造のグレーティングベクトル k の方向はMgLN結晶のX軸方向に並行配置、QPM構造周期 Λ は35 μm である。

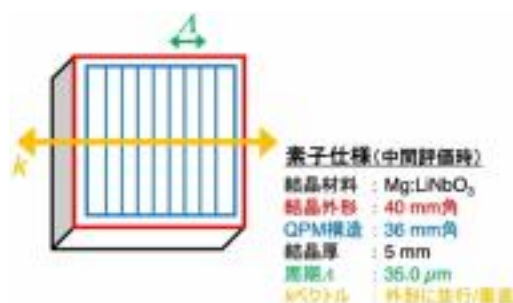


図9-1. PPLN素子の基本構成

図9-2に利用したMgLN結晶写真を示す。これまでの検討から、結晶の品質や安定性、入手時の供給体制など、幾つかの要因をもとに本研究に適した結晶メーカーを選定し、サイズや加工精度等を指定して入手した。

図9-3は周期分極反転構造形成に利用したフォトマスク例である。今回はQPM構造周期 $\Lambda = 35 \mu\text{m}$ で、厚み5 mm厚PPLN素子作製に適したフォトマスク構造を設計して準備した。

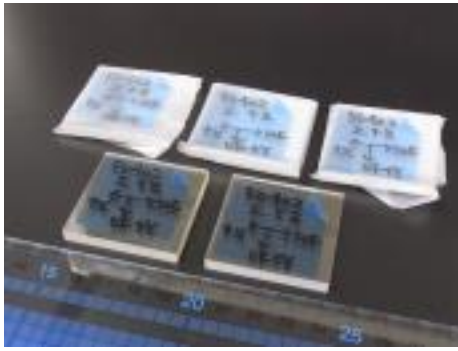


図9-2. MgLN結晶

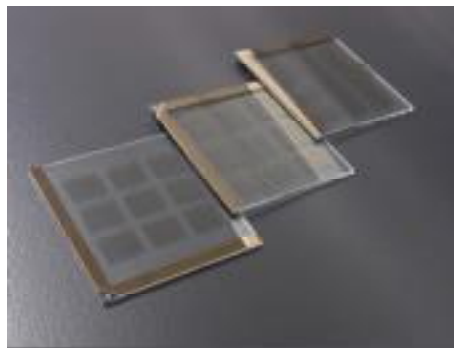


図9-3. フォトマスク

図9-4～図9-6は周期分極反転構造形成プロセスに利用したプロセス装置である。図9-4の真空蒸着装置は、高電圧印加用アルミ電極形成に利用した。図9-5のリソグラフィーシステムは、前述のフォトマスクを利用した微細QPMパターン形成に使用した。図9-6のドラフト設備は、電極および結晶のエッチング処理等に利用した。それぞれ、大型結晶利用に適合するように部分的な改修や部品追加等を行っている。



図9-4. 真空蒸着装置

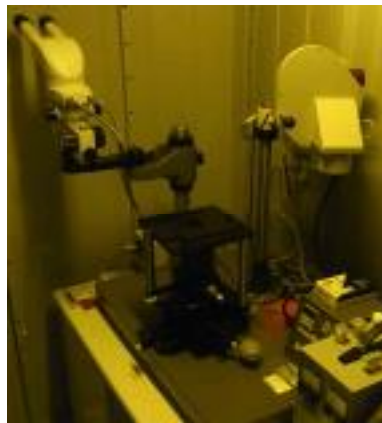


図9-5. リソグラフィーシステム



図9-6. ドラフト設備

図9-7～図9-8は周期分極反転構造形成用の高電圧印加システムである。図9-7の高電圧電源装置は、最大40 kVの高電圧を結晶に印加可能であり、大面積結晶の分極反転を可能とする。図9-8の高電圧印加システムは、所望の波形をファンクションジェネレータで生成し、図9-7の高電圧電源で増幅した高電圧パルスを高温条件下で結晶に印加する。



図9-7. 高電圧電源装置

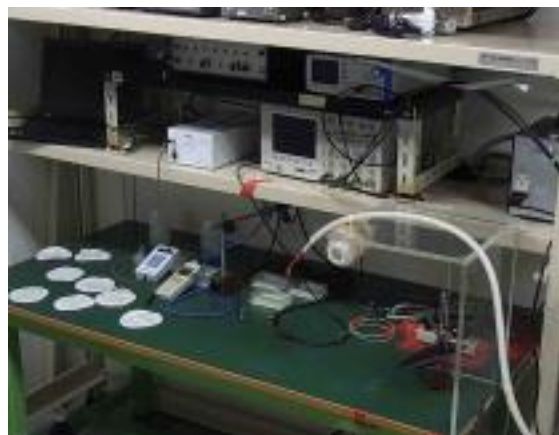


図9-8. 高電圧印加システム

図9-9に完成した40 mm角PPLN素子の外観を示す。入出力端面（ $\pm X$ 面）は光学研磨処理が施されている。令和4年度での計画通り、40 mm×5 mm開口サイズ、長さ40 mmの素子を完成した。



図9-9. 完成した40 mm角PPLN素子（外形40 mm角、厚み5 mm、周期35 μm ）

[令和5～6年度]

令和5～6年度は、項目⑧で準備した50 mm×50 mm×厚み5 mmの結晶に対応した素子作製装置を利用し、項目⑧および項目⑨のそれまでに確認した分極反転条件を基本に、50 mmサイズPPLN素子の作製を行った。

図9-10に作製した50 mmサイズPPLN素子を、令和4年度までの40 mmサイズ素子と並べて示す。いずれも結晶厚5 mmで反転構造周期 $\Lambda=35 \mu\text{m}$ である。

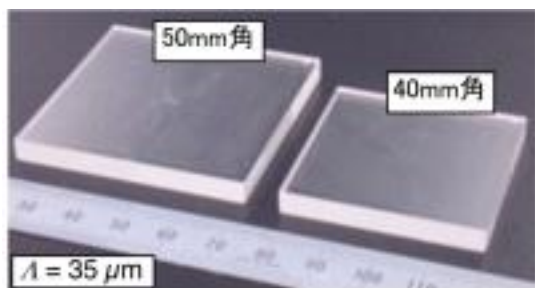


図9-10. （左）50mmサイズPPLN素子、（右）40mmサイズPPLN素子

また、項目⑧で検討したように、通常の垂直構造のPPLN素子（図9-11(a)）に加え、傾斜構造を有するPPLN素子（図9-11(b)）についても、50 mmサイズでの作製を行った（図9-12）。傾斜角 $\theta=60^\circ$ である。

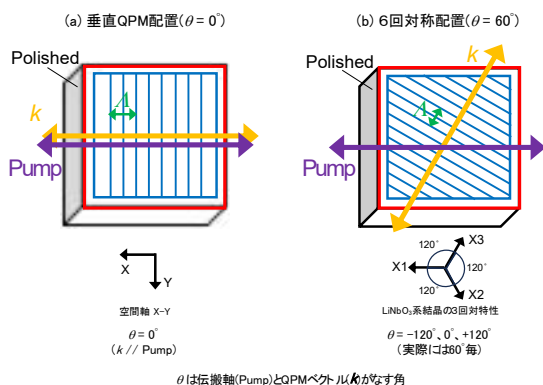


図9-11. (a)垂直構造と(b)傾斜構造

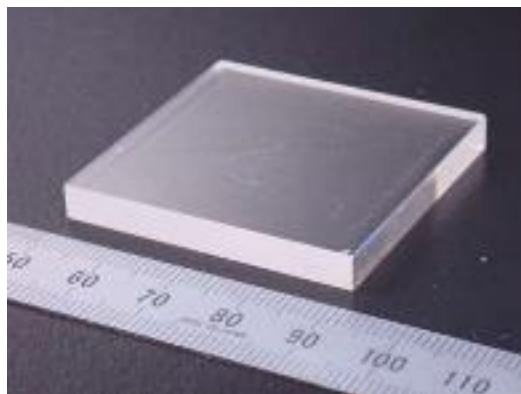


図9-12. 傾斜構造の50 mm角PPLN素子

以上のように、項目⑧による周期分極反転素子の作製準備を基盤として、最終目標であった50 mm×50 mm×厚み5 mmの周期分極反転ニオブ酸リチウム（PPLN）素子の実現を達成した。

(9-2) レーザー耐性評価システムによる結晶の耐性評価

結晶のレーザー耐性評価を行うための3軸走査かつエネルギー可変の自動レーザー照射装置の開発を進めた。レーザー照射装置は、オプトクエスト社製の受動QスイッチマイクロチップNd:YAGレーザー（最大パルスエネルギー2.7 mJ、繰り返し50 Hz）を基本波1064 nm光源に使用し、LBO（5x5x10 mm）で波長変換することで得られる532 nmの第二高調波を試料に集光する構成としている。図9-13に装置オプティクス全体構成を示す。

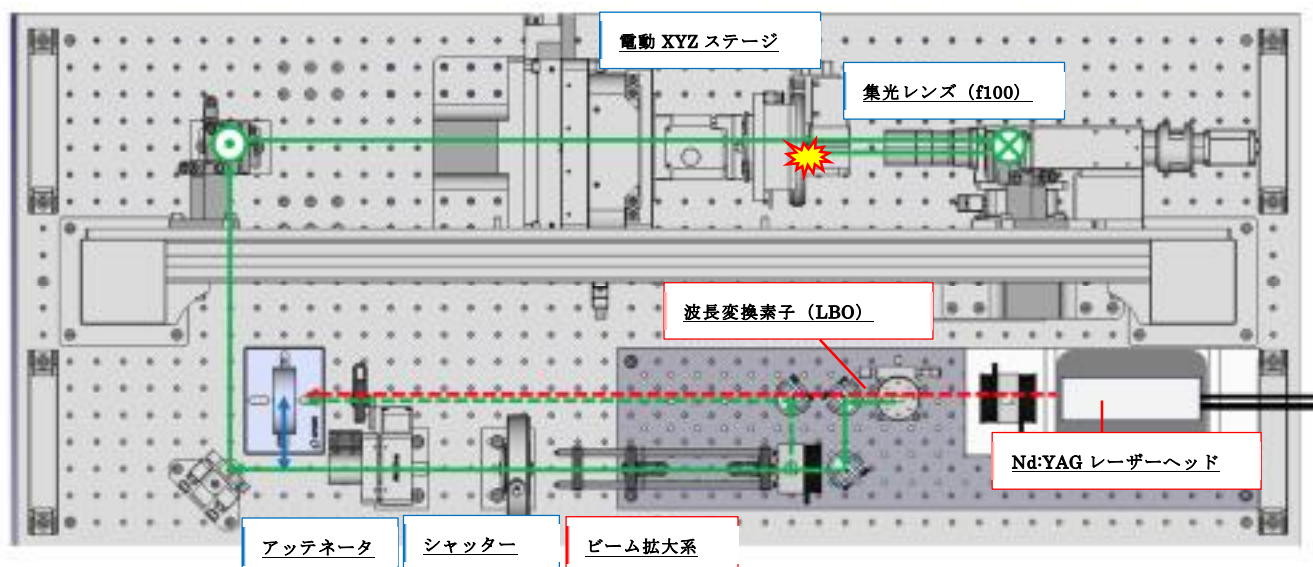


図9-13. レーザー照射装置オプティクス全体構成

基本波レーザーヘッド、波長変換部、ビーム拡大系は1つのブレッドボード上に構築し、照射装置本体に対して着脱式としており、光源を本体から分離して容易調整できるようにしている。光源調整時と組合せ試験時の様子を図9-14および図9-15に示す。組合せ試験では、アッテネータ透過後のレーザーパルスエネルギーはおよそ1.1 mJとなった。続いて装置の動作確認として自動シーケンスによる照射と撮像のテストを行ったところ、レーザー損傷閾値が高いとされるサファイア、水晶でも設定エネルギー範囲でレーザー損傷を生じさせられることを確認した（図9-16）。今後、レーザー耐性測定のための照射ビーム条件を定め、本研究プロジェクトで使用するテラヘルツ波発生結晶等についてレーザー耐性評価を行う予定である。



図9-14. ブレッドボード（600x150 mm）上に構築した第二高調波発生部

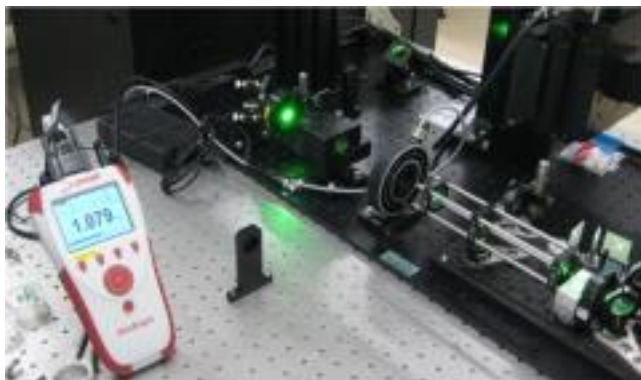


図9-15. 照射装置本体と光源との組合せ試験



図9-16. 自動照射シーケンスで撮像した結晶のレーザー損傷状態
サファイア（左） 水晶（右）

次に、レーザー損傷耐性の評価方法について非線形結晶を作製する立場として検討した。まず、図9-17に標準的な測定プロトコルと評価方法を示す。測定プロトコルとしては1点あたり500ショットの手続きを採用し、電動ステージに取り付けられた試料は、入射するレーザービームに垂直な平面内で隣接する照射点で判定に影響を及ぼさない程度の刻み（0.5 mm～1.0 mm）で動かす。つまり、ある地点で500ショットのレーザーを照射した後に新たな照射地点へ横移動するということである。このとき、レーザーのフルエンスは一定に保たれている。レーザー照射の平面内で縦横の方向は任意であるが、便宜上一定フルエンスで特定の向きへ動かし続ける方向を横、それに垂直なフルエンスの変更を伴う方向を縦とする。所定の点数で照射が完了すると損傷した点の数に応じて損傷確率が算出され、その後にフルエンスを変更し新たな地点へ縦移動する。一連の計測の後、試料の損傷は以下のシグモイド型関数(式9.2.1)で表される損傷確率分布曲線 $f(x)$ として図示される。

$$f(x) = \frac{1}{1 + \exp\{-a \times (x - b)\}} \quad (9.2.1)$$

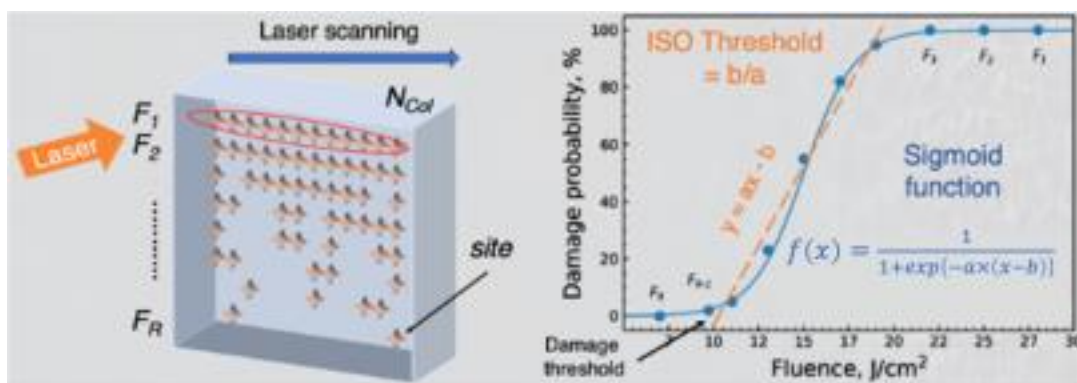


図9-17. レーザー集光位置捜査による損傷フルエンス閾値の測定評価

非線形結晶のレーザー損傷耐性の評価にあたり、損傷要因の分離に適した方法として我々が独自に開発した多段シグモイド関数による評価法を適用した。例えば2段のシグモイド関数による評価では、

$$f(x) = p \times \frac{1}{1+\exp\{-a_1 \times (x-b_1)\}} + (1-p) \times \frac{1}{1+\exp\{-a_2 \times (x-b_2)\}} \quad (9.2.2)$$

となる。ここで、 p は各損傷要因による損傷確率、 a_n と b_n は n 番目のシグモイド型関数における傾きと中点を与えるフィッティングパラメータである。

評価用の非線形結晶としては厚さ5 mmと1 mmの水晶基板を準備し、これらを結晶のX軸方位を反転して接合したものを使用した。つまり、極性反転面を挿入した結晶とバルクで比較した。光源には、今回は基本波1064 nmでパルス幅は900 psのレーザーを使用し、最終的に22 μm×20 μmに集光した。結果を図9-18に示す。各接合試料は内在する損傷要因に対して非線形効果がどのように作用するのかを確認するため、接合界面での損傷が生じやすい状態で使用しているが、5 mm厚2枚の接合水晶ではビーム偏光に対して大きな違いは見られなかった。一方で、1 mm厚2枚の接合水晶ではビーム偏光に対して違いが見られ、特に100%損傷閾値の低下が顕著である。どちらのケースでも220 J/cm²付近での損傷確率の上昇が見られるのは興味深い。多段シグモイド関数を用いた損傷耐性評価は非線形結晶に対しても効果的な評価方法であることが確認された。

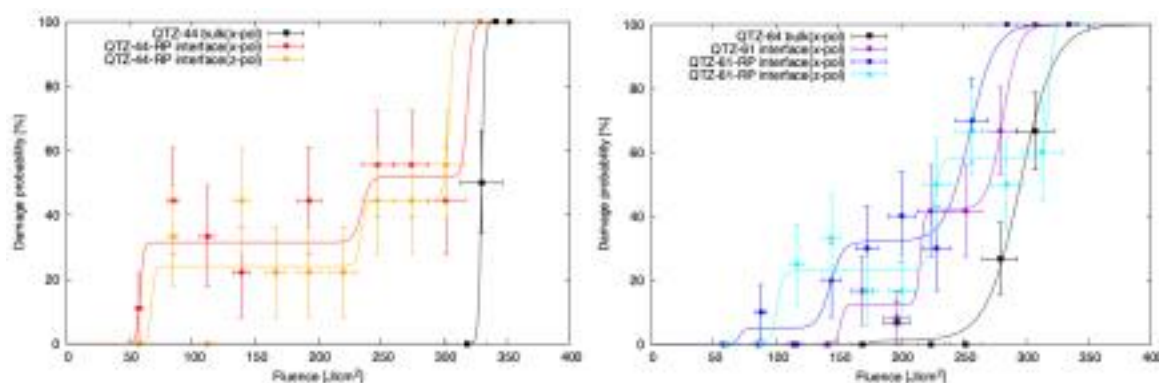


図9-18. 異なるビーム偏光に対する水晶のレーザー耐性評価

5 mm厚水晶を接合した試料とバルクの結果 (左)

1 mm厚水晶を接合した試料とバルクの結果 (右)

(9-3) テラヘルツ波での時間領域分光 (TDS) 計測システムによる結晶の特性評価

概要：バックワード位相整合型周期分極反転素子の設計・開発に向けて、テラヘルツ波領域における光学定数を高精度に評価可能な コリメート型テラヘルツ時間領域分光 (THz-cTDS : Terahertz Collimated beam Time-Domain Spectroscopy) システム を構築した。本システムにより、誤差の小さい精密なパラメータ測定が可能であることを実証した。

従来のTHz-TDSでは、測定サンプル上でビームを集光する構成が一般的であったが、この構成では集光点での非線形効果や、試料内部でのビーム蹴られなどの問題が生じやすい。これに対し、本研究では、発生したテラヘルツビームをコリメートし、ほぼ平行光の状態でサンプルに照射するTHz-cTDS構成を採用した (図9-19, 図9-20)。また、光学系全体を簡易的にパージし、ドライエアーを導入することで、水蒸気によるテラヘルツ波吸収の影響を低減している。

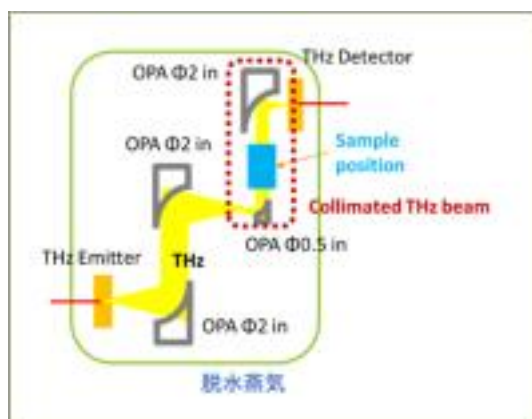


図9-19. THz-cTDSの模式図

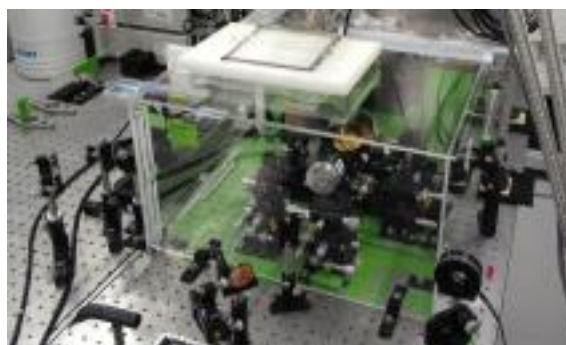


図9-20. THz-cTDS実験系

THz-cTDSシステムを用いた測定により、吸収係数が 0.2 cm^{-1} 以下の領域においても評価が可能であることが確認された。図9-21には予備実験として行った 10 mm 長の LiNbO_3 (LN) 結晶の測定結果を示す。高精度な測定には一定以上の試料長が望ましいが、長すぎるとテラヘルツ波が減衰してしまうため、 10 mm の試料で透過性を確認したところ、 0.5 THz 程度までの帯域で十分な透過が得られた。したがって、 10 mm 長の長さのLN結晶においてもサブテラヘルツ帯における光学特性評価が可能であることが分かった。

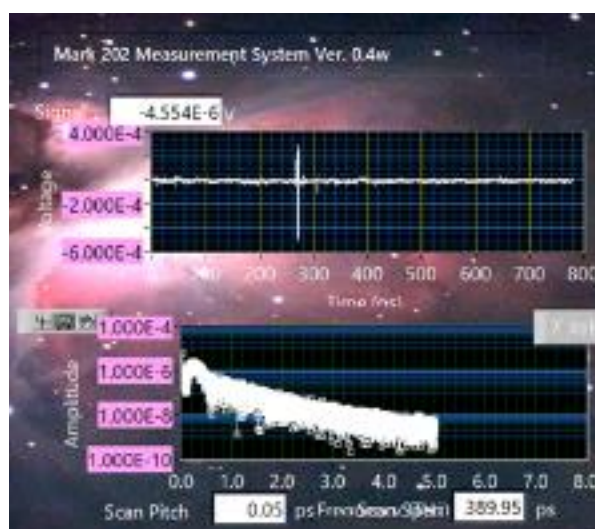


図9-21. 10 mm 長LNのTHz-cTDS測定結果 (上) 時間波形 (下) 周波数スペクトル

本THz-cTDSシステムを用いて、LNおよびタンタル酸リチウム (LiTaO_3 : LT) のテラヘルツ波領域における屈折率および吸収係数の評価を行った。まず、システムの測定精度を検証するために、ZカットLN結晶のX軸およびY軸方向、XカットLN結晶のY軸方向に対して屈折率の測定を行った。これにより、異なる結晶カット面および軸に対する屈折率 (常光: n_o) の一致性を評価した。測定結果は $0.3 \sim 2.0 \text{ THz}$ の範囲で一致しており、特に $0.7 \sim 1.4 \text{ THz}$ の範囲では $\Delta n = 0.004$ 以内の誤差で再現された (図9-22)。これにより、本システムが異なる試料・異なる軸に対しても高い精度で屈折率を測定できることが示された。

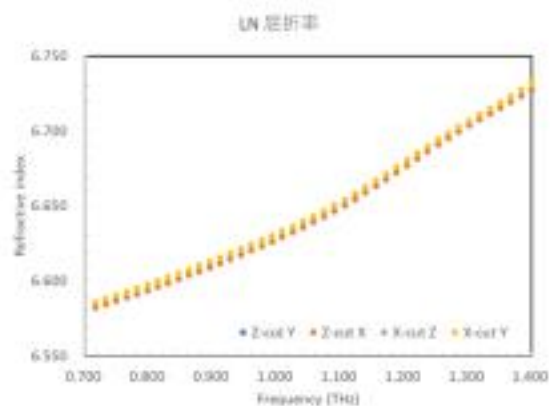


図9-22. LNの0.7-0.9THzでの屈折率 n_o 測定の再現性確認

続いてLN、LTの光学パラメータ測定を行った（図9-23、図9-24）。LNでは $n_e \approx 6.5\text{--}7.0$ 、 $n_o \approx 5.0$ 付近であるのに対し、LTでは $n_e \approx 6.4\text{--}6.7$ 、 $n_o \approx 6.3\text{--}6.5$ と計測され、LTの方が複屈折 Δn が小さいことが確認された。また、吸収係数の比較（0.3～1.7 THz）では、LTおよびLNともに高周波数側（数THz）に吸収と異常分散が存在し、今回の測定領域はその裾野に相当する。周波数とともに吸収が増加する傾向が見られ、次のような大小関係が得られた：

$$\alpha_e(\text{LN}) < \alpha_o(\text{LN}) < \alpha_o(\text{LT}) < \alpha_e(\text{LT})$$

これらの計測結果を利用して最適な周期分極反転素子の設計を進める。

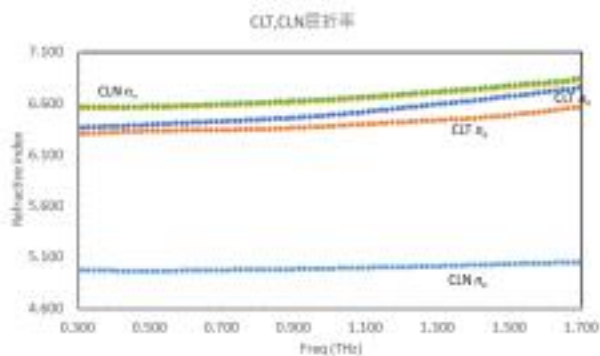


図9-23. CLT、CLNの屈折率

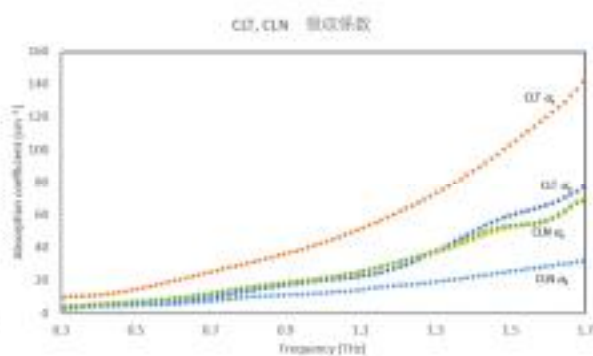


図9-24. CLT,CLNの吸収係数

⑩ ロボット仕様検討（担当：三菱重工業株式会社）

小型・高出力のテラヘルツ波光源の適用先として、発電プラント等に使用されるポリエチレンまたはゴム製のライニング配管の検査と、タービン翼の遮熱コーティング越しの検査を対象に、適用性を検討した。いずれもテラヘルツ波による検査が可能である見込みを得られたが、その中から、テラヘルツ波の透過性が良いポリエチレンのライニング配管に対し、ロボットの詳細仕様検討を進めた。

(a) ポリエチレンライニング配管への適用性検討

小型・高出力なテラヘルツ波イメージング技術の適用先としては、図10-1に示すような、ライニング鋼管内壁の腐食検査など、人が立ち入れない狭隘箇所における点検自動化が考えられる。本項では、ライニング材の1種であるポリエチレン材越しの腐食イメージングを実施した。

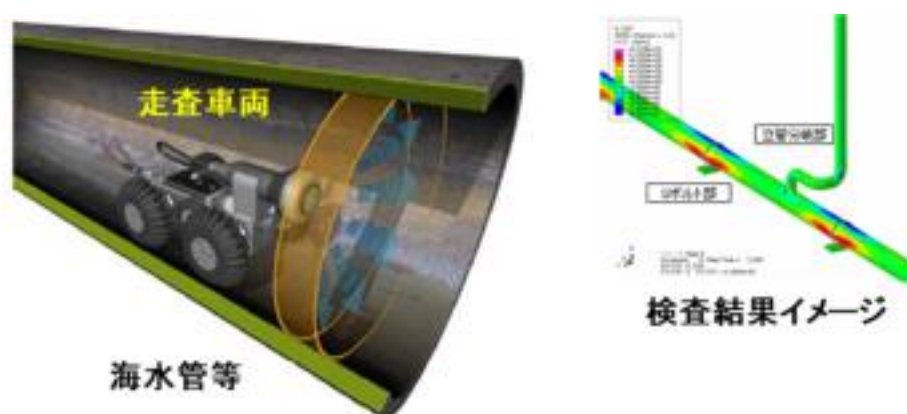


図10-1. 配管検査への適用イメージ

金属板上にポリエチレン材を施工した試験片を用いたイメージング試験を実施した。試験構成図を図10-2に示す。近赤外励起光源は波長1064 nm、パルス幅約0.8 ns、パルスエネルギー約10 mJのパルス光を繰り返し周波数20 Hzで発生した。平均出力はパルスエネルギーと繰り返し周波数から求められ、約240 mWであった。一方、パルス尖頭出力はパルスエネルギーとパルス幅から求められ、約15 MWであった。非線形光学結晶は斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶（PPLN結晶）を用いた。結晶サイズは長さ50 mm、幅5 mm、厚さ1 mmであった。

励起光はテラヘルツ波発生のため非線形光学結晶へ導入され、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振によってテラヘルツ波へと変換された。発生したテラヘルツ波の中心周波数は約0.3 THzであり、周波数線幅はパルス光のフーリエ変換限界に近い ± 3 GHzであった。また、テラヘルツ波出力の安定性を高めるため光注入を行った。得られたテラヘルツ波尖頭出力は約100 Wであった。出力テラヘルツ波はTHz用レンズ(材料：ツルピカ)を用いて平行光にして同図の反射測定系に入力した。

イメージングの対象物は5 mm厚のポリエチレンにてライニング施工された配管を想定し、図10-2の右図に示すように、腐食を施工した炭素鋼上に5 mm厚のポリエチレンを施工した一体型の試験体を配置してイメージングを実施した。実機計測を想定して、テラヘルツの光源から片道500 mm以上離れた位置にサンプルを配置した。検出にはショットキーバリアダイオードを用いた。

イメージングの結果を図10-3に示す。 $\Phi 13$ mmまでの腐食は明瞭にイメージング出来ることが確認できた。

以上の結果より、光源からの伝搬距離が500 mm以上であっても、ポリエチレン越しに金属母材の腐食がイメージング可能であることが確認できた。

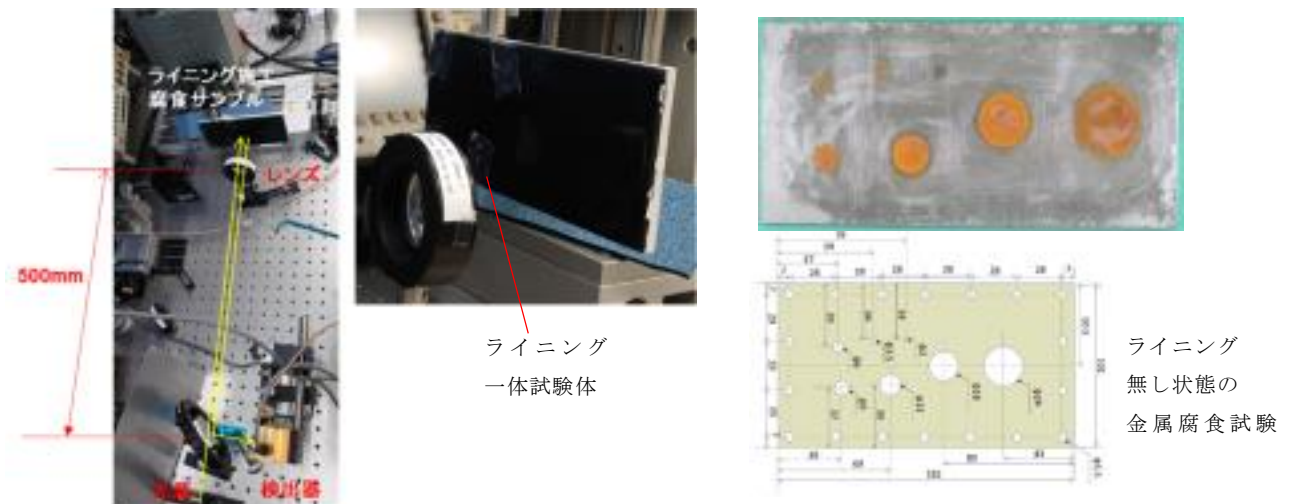


図10-2. 試験構成図

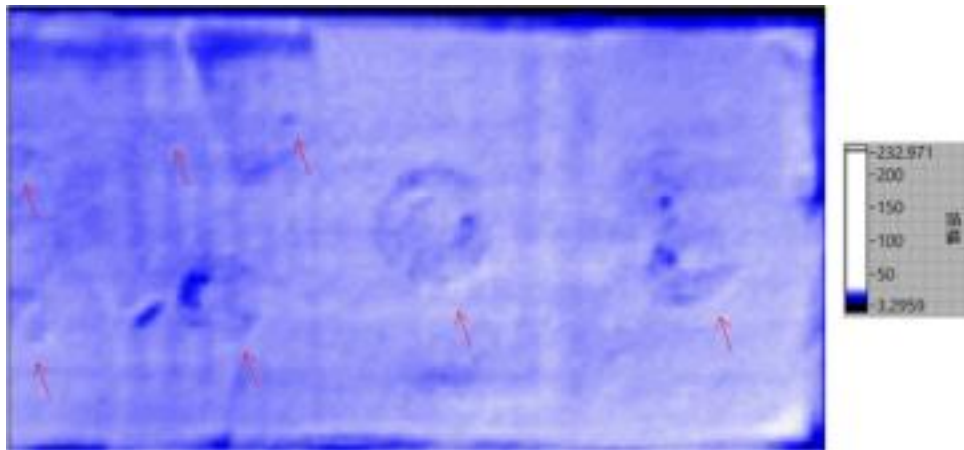


図10-3. イメージング試験結果（ポリエチレン材）

(b) ゴムライニング配管への適用性検討

ライニング配管に適用されているもう1つの材料であるゴム材を対象にイメージング試験を実施した。ライニング材に使用されているゴムはカーボン含有しているため、ポリエチレンと比較するとテラヘルツ帯の透過性が大きく悪化する。そのため、最初にバックワード・テラヘルツ光源を用いてゴムライニングの透過可否を確認した。試験構成図を図10-4に示す。ゴムライニングは4mm板厚のものを用意し、金属板とは分離させて配置させた。これは、ゴムの減衰が大きくゴム透過後の金属からの反射と比較するとゴム表面反射が大きく、表面反射をダイオードに検波させないようにゴムを斜め配置させるためである。光源はポリエチレン試験の時と同様の機器を使用した。



図10-4. 試験構成図

試験結果を図10-5に示す。0.3 THz、100 Wのバックワード・テラヘルツ光源を用いることで4 mm厚さのゴムライニングを反射測定可能であることが確認できた。

ただし、前述の通り、ゴム表面における反射波が大きいいため、反射成分を抑圧する対策を取る必要がある。

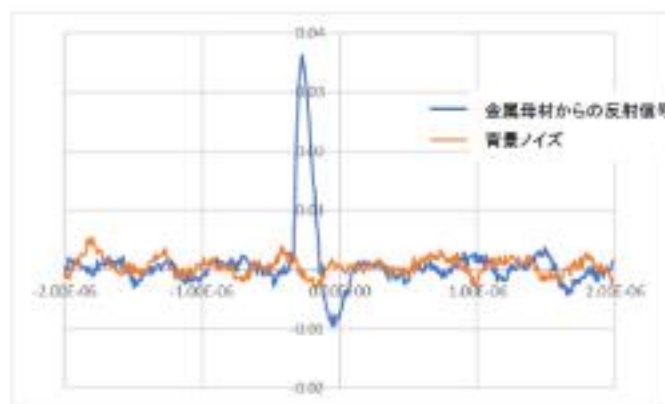


図10-5. ゴムライニング反射信号
(横軸：時間[s]、縦軸：検波電圧[V])

ここでゴムの偏光特性に着目した。前述の通り、一般的に黒色ゴムは、ゴム素材にカーボンブラック凝集体を添加して成型されるが、成型・施工の過程において、カーボンブラック凝集体の整列度合を均質に維持することは難しく、特定の方向に配向性が生ずる。そのため、配向方向に対して平行な偏波面と直角な偏波面で見た場合、それぞれの屈折率には差異が生ずる。このような異方性を持った黒色ゴムに対してテラヘルツ波を透過させた場合、カーボンブラック配向方向と平行な偏波成分と直交する偏波成分の間には、屈折率の違いから、位相回転量に差異が生ずる。このため、材料透過後の偏波面は、入射時の偏波面から回転することが予想される。即ち、ゴム表面で反射する不要成分と、ゴムを透過して金属母材から反射される信号成分の間には、偏波面の違いが生ずることが予想される。またバックワード・テラヘルツ光源は、軸比が10000:1の非常に良好な直線偏波を持っており、この光源特性とゴムの偏光特性を活用して偏波分離することで、表面反射の抑圧を検討した。

ゴムの偏光特性を把握するために、簡単な試験を実施した。試験構成図を図10-6に示す。WGはワイヤーグリッド、SBDはショットキーバリアダイオードを示している。この測定系では直線偏光のバックワード光源の出力端に波長板(Quartz)を設けて、円偏光に変換し、WGを通過してSBDで受光している。ゴム無しの状態ではそのまま円偏光でWGに入射されるため、WGの偏光方向を変えても一定の電圧となることが予想される。一方でWGの手前にゴムを挿入すると、ゴムの偏波特性に応じて円偏光も軸比が変化するため、WGの偏光方向に応じて信号強度が変化することが予想される。

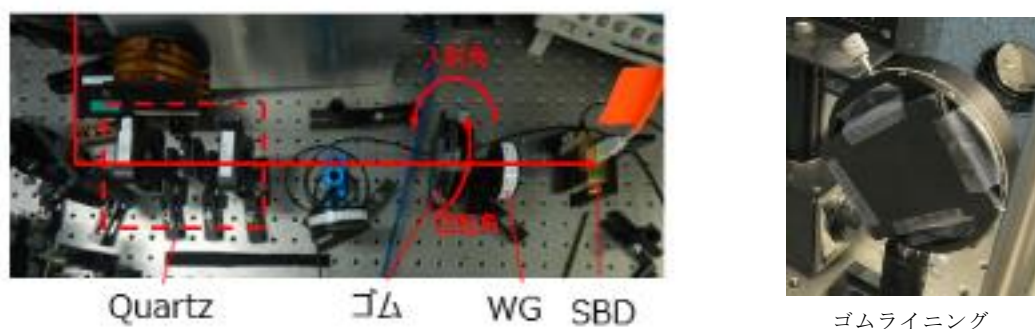


図10-6. 試験構成図

試験結果を図10-7に示す。前述の予想通り、ゴム無しの場合は概ね一定（40 mV）であり、Quartzによって良好な軸比を持った円偏光が得られていることが確認できた。一方で、ゴム有りの場合は、綺麗なサインカーブのような特性が得られており、ゴムを透過することで、円偏光から直線偏光へ変化することが確認できた。ここで、検波電圧の最小値が概ね0に漸近していることから、良好な直線偏光へ変換されていることがわかる。

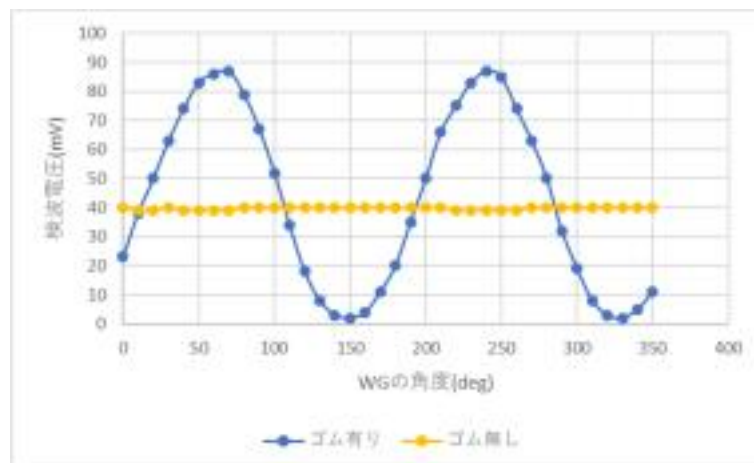


図10-7. ギム有無による信号強度変化

以上の結果から、ゴムに偏波特性があることが確認できたため、偏波分離によるゴム表面反射と母材反射の切り分けを検討した。

偏波分離が可能か確認するために、金属母材の代わりにミラーを配置して試行した。測定系を図10-8に示す。赤い線はテラヘルツの光路を示しており、WGはワイヤグリッド、SBDはショットキーバリアダイオードを示している。ミラーの手前にゴムを設置し、WG2枚を用いて偏波が変化した成分のみが検出器（SBD）に入射するように設置した。アライメントの順番は、まずミラーのみを設置し、WG2で信号強度が最小になるように調整したのち、ゴムを挿入している。ゴム挿入後、ゴムとミラーの間を遮蔽し、ゴム表面からの反射波が最大となるようにアライメントを実施した。

ゴムの面内角度を変えながら、ゴムライナの配向方向と入射テラヘルツ波の偏波方向のなす角度を単調に変化させながら、信号強度を測定した結果を図10-9に示す。各測定点において、ゴムとミラーの間の遮蔽の有無で信号強度を測定している。遮蔽が有る時は、ゴム表面からのみの反射が計測され、遮蔽が無い時は、ゴムを通過したミラーからの反射も含んで計測される。遮蔽が無い時は最大で約12 mV出力されており、遮蔽有りの時の約2 mVと比較すると6倍の強度で計測された。

以上の結果から、表面反射の信号強度は抑えられた状態で検波出来ており、偏波による分離は可能であることが確認できた。

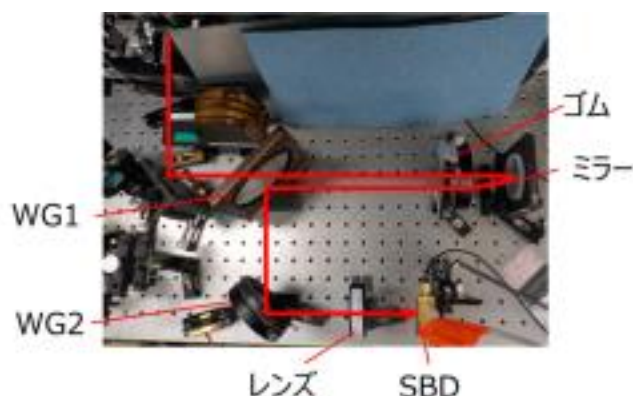


図10-8. 偏波分離測定系

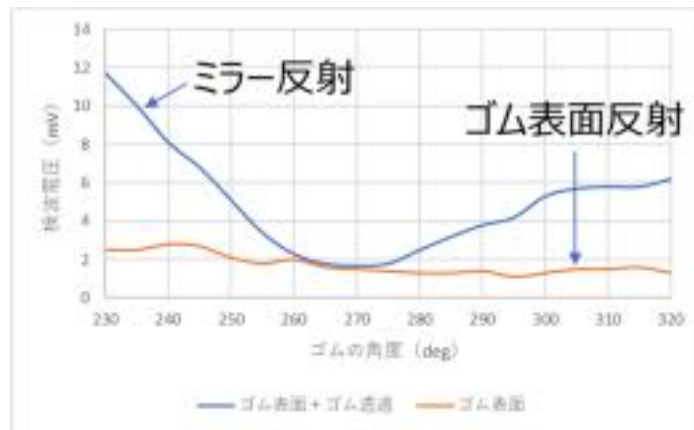


図10-9. ゴム材の面内角度と検波電圧の関係

次に、ミラーの代わりに腐食を施工した金属を配置したイメージング試験を実施した。測定系は図10-8と同様に2台のWGを用いた交差偏波分離回路を用いた。テラヘルツの偏波面に対するゴムライニングの配向方向は、透過時にテラヘルツの偏波面が最も回転する方向(傾き45度)で設定した。図10-10に試験結果を示す。(a)は用いた腐食試験体を示しており、腐食部が中心になるように画像を取得した。イメージング結果を(b)に示す。また図中赤線(画像の下から25 mm位置)のラインに沿って、検波電圧を一次プロットした変化を(c)に示す。このグラフから腐食有無によって約4 mV変化していることが分かる。

一方で健全部となる図中橙線枠の中(画像下から4 mmまでの範囲)の信号強度の標準偏差は1.3 mVとなった。よって腐食による変化 $4 \text{ mV} / 1.3 \approx 3$ となるので、腐食はS/N3で検出可能であることが確認できた。

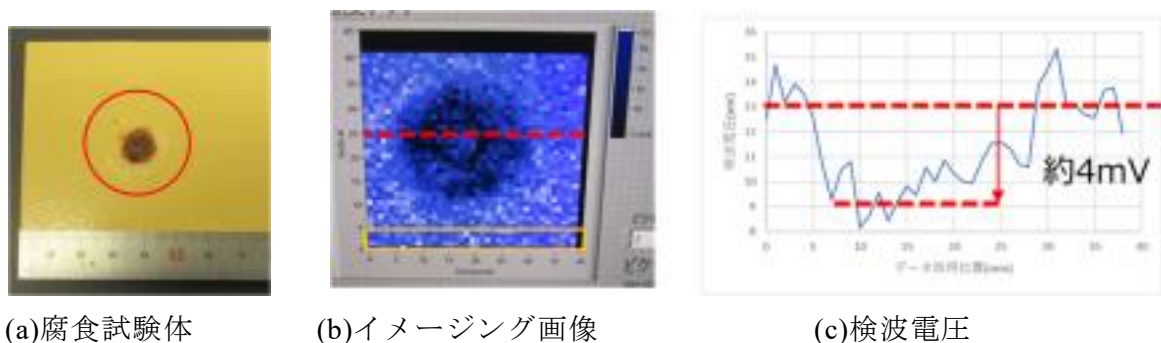


図10-10. イメージング試験結果

以上の結果より、偏波分離を用いることにより、難透過材であるゴムライニングでも腐食イメージングが可能であることを確認できた。

(c)タービン翼検査への適用性検討

タービンに使用される翼の検査について検討した。タービン翼は高温になるため、通常サーマルバリアコーティング(TBC)という遮熱コーティングが施されるが、翼にき裂等の欠陥の疑いがある時に、逐一TBCを剥がして、翼母材に欠陥が進展していないか確認する必要がある。もし翼母材にき裂が進展していない場合は、TBCを剥がしたり再施工したりという工程は完全は無駄作業となるため、TBCを剥がすことなく検査できるようになれば、工程を省略することが出来る。そこで、TBCのテラヘルツ透過性の確認とき裂検出手法の検討を実施した。

タービン翼に施工されるTBC(0.5 mm厚を想定)について、テラヘルツ周波数帯における透過特性、反射特性を、THz-TDS計測装置(ADVANTEST社TAS7500)にて測定した。反射、透過測定における、計測装置のカatalog仕様値を以下に記す。

周波数帯域 : 0.5～7 THz
 ダイナミックレンジ : 70 dB以上

適用先の条件を想定し、TBCにベースコートおよび金属を裏あてした供試体条件にて、入射波、表面反射波、境界反射波を計測した結果（周波数スペクトラム）を図10-11に記す。

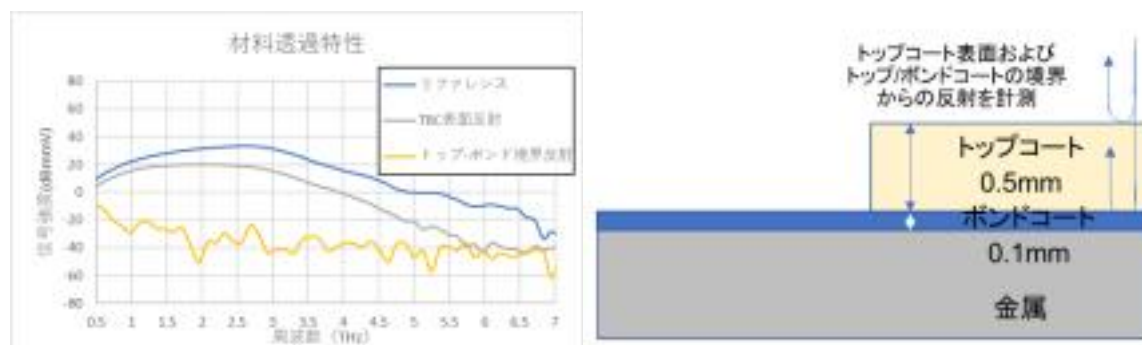


図 10-11. THz-TDS による材料の透過特性結果

図10-11のグラフを基に、入射波を基準にとり、TBC表面反射波（不要波）とトップ-ボンド境界反射波（信号）の強度比率を求めた結果を図10-12に記す。

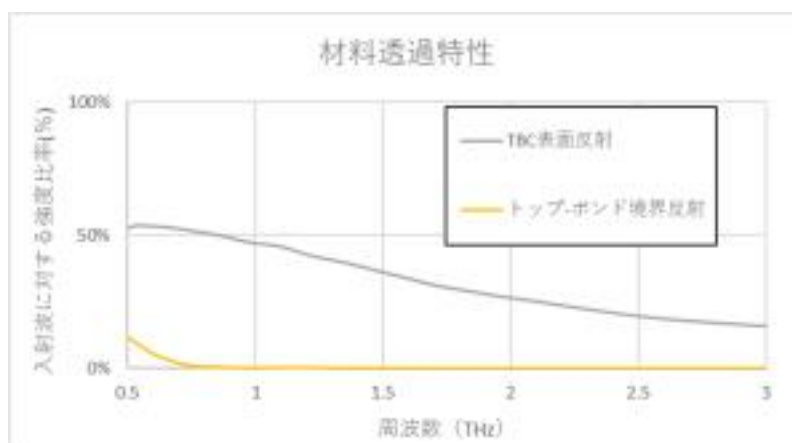


図10-12. 入射波に対するTBC表面反射波(不要波)と
 トップ-ボンド境界反射波(信号)の強度比率

図10-12より、本研究で扱うバックワード発振の周波数帯（0.3 THz～0.8 THz）においては、透過特性が得られていることから、イメージング可能な対象と判断した。ただし、TBC表面反射と比較すると比率が低くなっていることから、TBC越しの欠陥イメージングでも表面と境界（またはき裂）の信号の分離が必要不可欠となる。

次に、金属試験体上に施工したスリットのイメージング試験を実施した。テラヘルツ波をき裂に照射した時に、偏波面が回転することを利用して表面反射とき裂からの反射を切り分ける手法を検討した。図10-13に試験構成図を示す。左図に測定系を示す。光源として0.5 THzのバックワード・テラヘルツ発振を用いた。WGを配置することで、偏波が変化した成分だけがSBDに入射されるようになっており、欠陥で偏波が変化した成分のみを検出する測定系となっている。右図は用いた試験体を示しており、き裂を模擬した3種類の中のスリットを2個ずつ、計6個のスリットを挿入している。

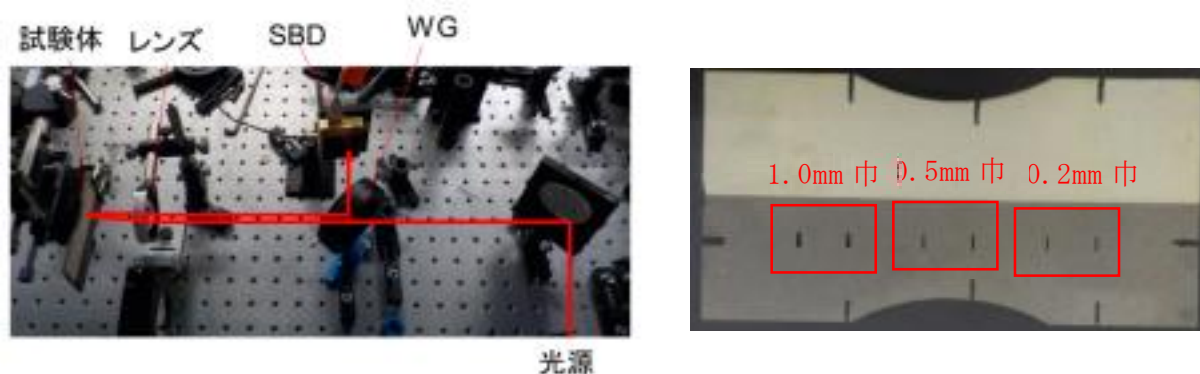


図10-13. 試験構成図

イメージング結果を図10-14に示す。全てのスリット巾において信号強度の変化が検出されており、偏波分離によって、欠陥の変化のみを検出することが可能であることが確認できた。

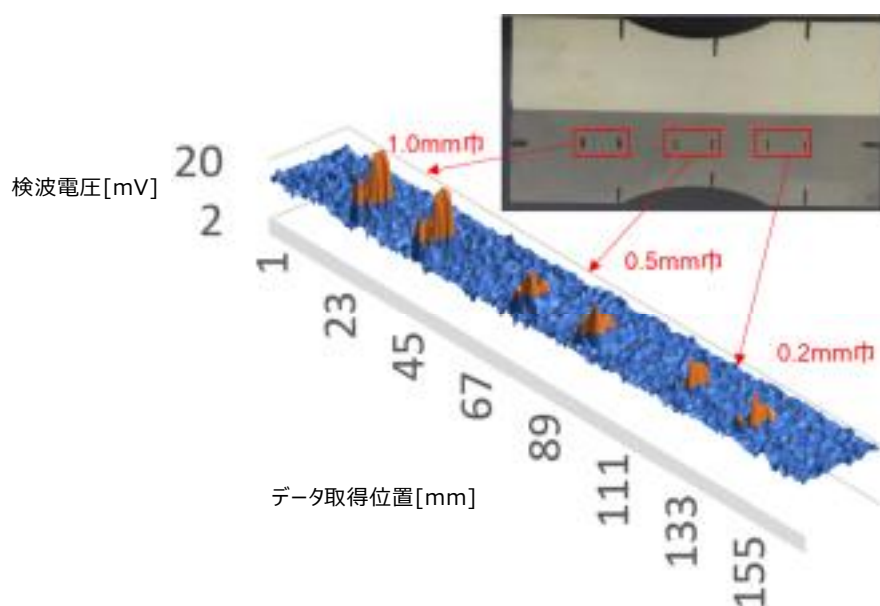


図10-14. スリットイメージング結果

(d) ロボット化の仕様検討

本結果を踏まえ、検査装置に関する特許を2件出願（特願2022-036002、特願2022-036204）しており、それらを入れたライニング鋼管を対象とした場合の装置化イメージを図10-15に示す。

動作環境としては、様々な呼び径の配管へ対応させる必要がある。従い、自走ロボットは、パンタグラフ式に伸縮する複数の車輪機構を持った構造を基本とした。テラヘルツ光源および検出器は、自走ロボットに搭載され、小型テラヘルツ光源からの出力光は、配管の軸中心にて回転する反射ミラーにより配管内壁に向けて走査され、配管内壁からの反射信号を、集光し、ダイオード検波の後に、A/Dにて記録する。

特許の1つは、出射口のレンズとミラーを回転アーム機構内（図10-15右図橙線内）に格納し、その前段の光学系は別とすることである。イメージングの際に、空間分解能の良い明瞭な画像を得るためには、テラヘルツ波のスポット径が十分小さいことが必要となる。しかし、レンズの焦点距離が長いと集光が十分小さくならず画像が不鮮明になる原因となる。そこでミラーの回転機構と連動する回転アーム機構を具備し、その先端にレンズを設けることで、より検査対象に近い位置にレンズを配置することで十分小さいスポット径のテラヘルツ波を

照射することの出来る機構とした。

もう1つは、ゴムやスリットイメージング時のワイヤーグリッドを用いた偏波分離の測定系（右図水色線内）とした。ワイヤーグリッドを2つ介することで、検査対象によって変化した偏波成分のみ検出することで、表面反射との分離を可能とする。

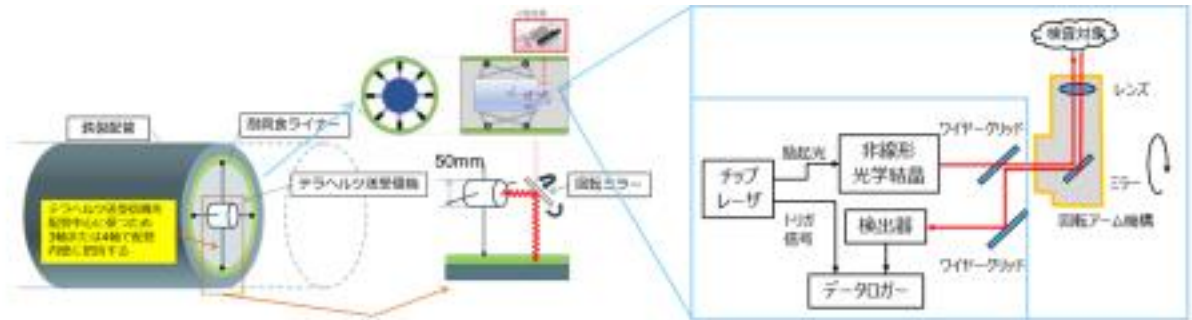


図10-15. 装置化構想案

ペイロードの搭載条件について、ロボットへ格納する構成部品は、図10-16のブロック構成図の青鎖線で囲まれた範囲を基本とした。

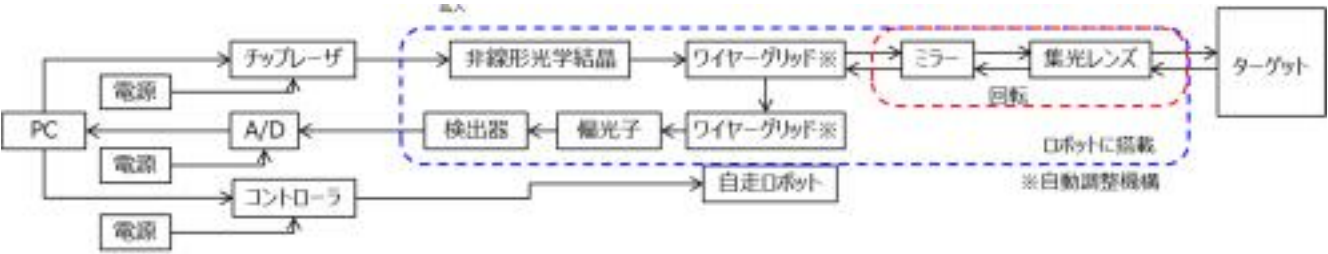


図10-16. ライニング検査装置のブロック構成案

⑪ 搭載機仮作（担当：三菱重工業株式会社）

⑩項の成果を踏まえ、ポリエチレン材に対してより実機に近い配管形状のモックアップを製作し、イメージング試験を実施した。まず、光学系は光学盤上に固定したままで、配管を軸方向に動かしてイメージング可否を検討した。次に、テラヘルツ波光源含む光学系をロボットに搭載し、配管を固定し、光源側を動かす形態でイメージング可否を検討した。

配管モックアップについて記載する。試験体形状を図11-1に示す。材質は炭素鋼を用い、形状は内径 $\Phi 304.7$ mm（外径 $\Phi 318.5$ mm）の配管形状としている。長さは300 mmとした。腐食は3サイズ（ $\Phi 6$ mm、 $\Phi 13$ mm、 $\Phi 25$ mm）、腐食度も3段階とした。図中の腐食の大中小は、腐食液への浸漬日数により区別しており、大は10日、中は5日、小は2日である。

本研究では、イメージングの可否が形状によるものかライニングによるものかを切り分けるため、配管モックアップを2種類製作し、片方をライニング無し、もう片方をライニング有りとして製作した。ライニング材はポリエチレンとし、ライニング厚さは3 mm程度とした。製作したモックアップを図11-2に示す。

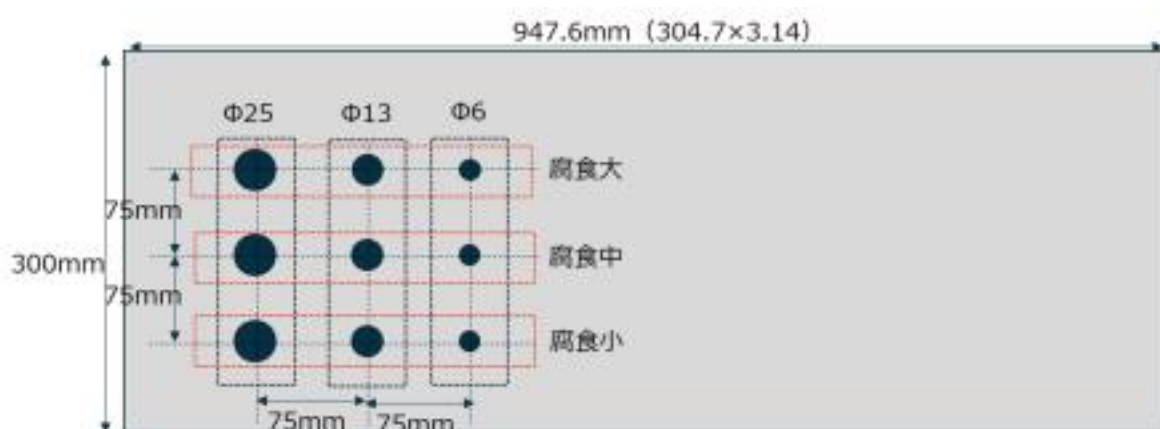
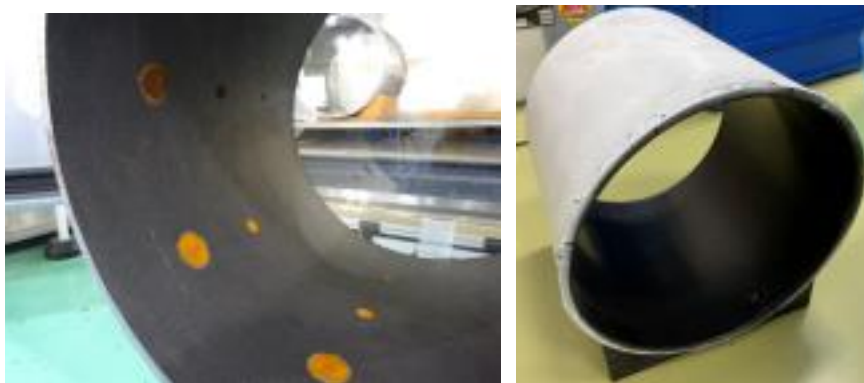


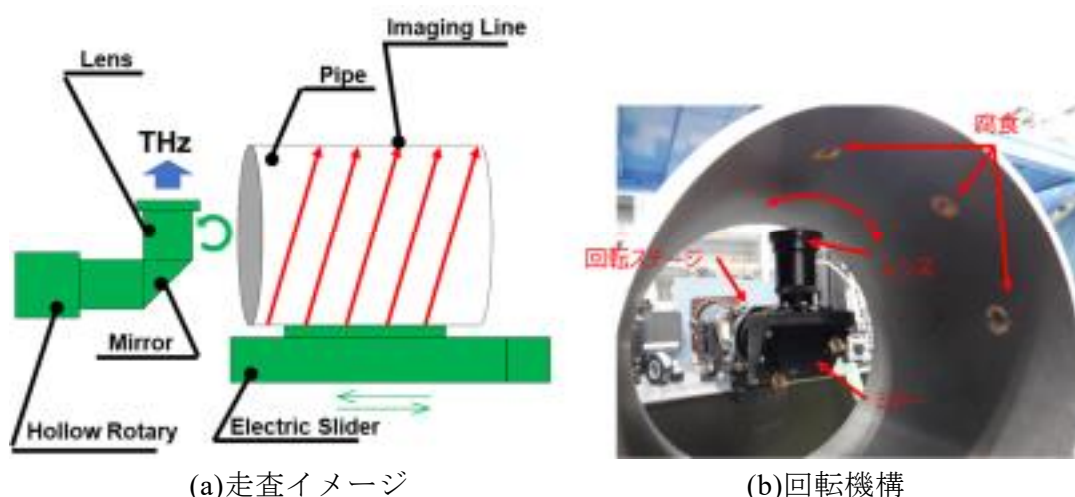
図11-1. 配管モックアップ形状



(a)素管モックアップの腐食部分 (b)ライニングモックアップ

図11-2. 製作した配管モックアップ

次に試験構成を示す。図11-3に走査のイメージ図を示す。THz波は図中左側から照射され、ミラーを介して90°反射し配管壁面へ向かって伝搬していく。この時、中空ロータリとミラーが接続されており、ロータリを走査することで360°回転しながら周方向のイメージングを実施する。配管軸方向の走査は、配管を1軸走査ステージに乗せて、走査させた。この時、周方向に回転させながら、軸方向も動作させることで、螺旋状に走査してイメージングを実施した。



(a)走査イメージ

(b)回転機構

図11-3. データ取得イメージ

配管を乗せた治具を図11-4に示す。前述したように軸方向に走査するための自動ステージを配管直下に配置している。配管の中心に中空ロータリを配置するために高さ及び水平方向の調整が可能となる手動ステージもそれぞれ設置した。

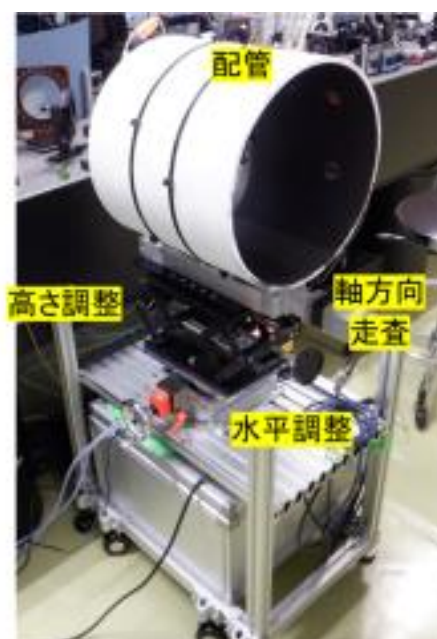
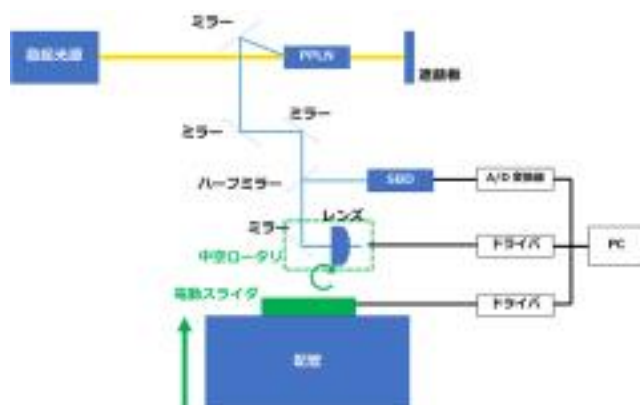


図11-4. 配管走査及び位置調整治具

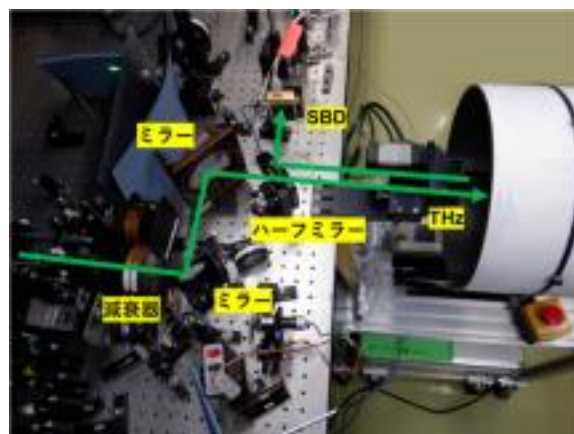
光学系を含めた試験構成図を図11-5に示す。近赤外励起光源は波長1064 nm、パルス幅約0.8 ns、パルスエネルギー約10 mJのパルス光を繰り返し周波数20 Hzで発生させている。非線形光学結晶は斜周期分極反転ニオブ酸リチウム結晶（PPLN結晶）を用いた。結晶サイズは長さ50 mm、幅5 mm、厚さ1 mmであった。

励起光はテラヘルツ波発生のため非線形光学結晶へ導入され、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振によってテラヘルツ波へと変換された。発生したテラヘルツ波の中心周波数は約0.3 THzであり、周波数線幅はパルス光のフーリエ変換限界に近い ± 3 GHzであった。また、テラヘルツ波出力の安定性を高めるため光注入を行った。得られたテラヘルツ波尖頭出力は約100 Wであった。出力テラヘルツ波はTHz用レンズ(材料：ツルピカ)を用いて平行光にして伝搬させた。

伝搬したテラヘルツ波は前述の通り中空ロータリに接続された90°反射させるミラーにより配管壁面へ照射される。壁面で反射されたテラヘルツ波は再び同様の伝搬経路を戻り、ハーフミラーによってショットキーバリアダイオード（SBD）に入射させた。



(a)イメージ図

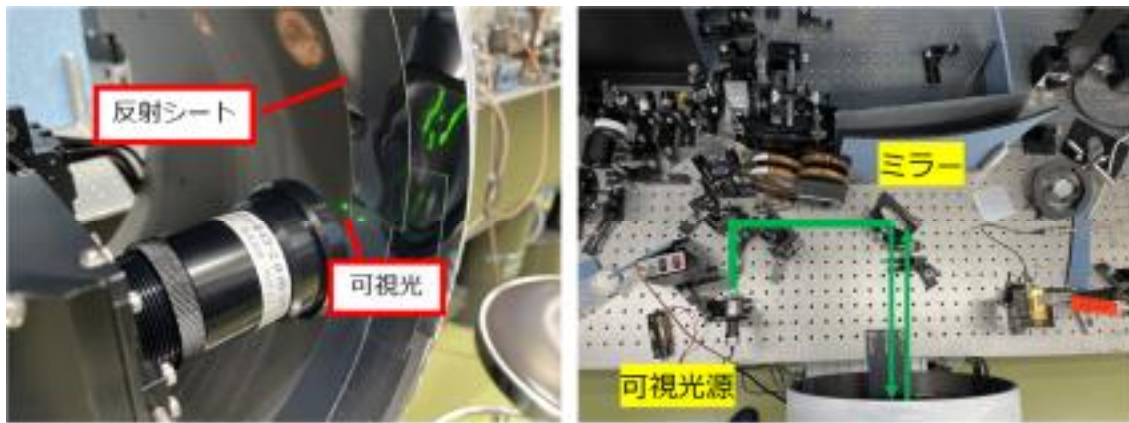


(b)光学系の写真

図11-5. 試験構成図

周方向のアライメントについて詳述する。前述の通り、中空ロータリによってテラヘルツ波を回転させながら走査するが、ミラーやレンズの照射位置、配管と中空ロータリの位置関係により、回転角度によって反射経路が変化してしまい、周方向位置ごとに検波電圧に大きな差が生じる。腐食の検出には検波電圧の変化（減衰）を基準に判断するが、周方向走査によっても電圧変化する場合、腐食による変化が埋もれてしまうため、腐食検出が困難となる。そこで、可視光源をテラヘルツ波と同じ伝搬経路になるように配置し、モックアップに反射シートを貼り入反射の光路を可視化してアライメントを実施した。可視光によるアライメントの様子を図11-6に示す。可視光アライメントにより、入反射する光点、角度による入射路のずれを一致させた。

さらに手動によるアライメントを改善するために、導入したレーザ測距計及び高さ調節用のステージと、それらを組み込んだ装置の図面を図11-7に示す。レーザ測距計は、回転するレンズ固定用の筒に装着することで、回転機構に対してTHz波と同軸上を測距できる系とした。レーザ測距計はPCに接続され、配管までの距離や平坦度の測定が可能である。本試験では、0°から90°間隔で測距し、試験系が配管の中心に配置されるよう調節した。調節には、高さ調節機構を用いた。測距を行い、試験系が配管の中心に配置されたことを確認したのち、THz波による周方向走査を行った。



(a)可視光と反射シートを用いたアライメント

(b)可視光の入射経路



(c)入射光と反射光のずれ

(d)回転機構の角度による光路のずれ

図11-6. 可視光によるアライメント

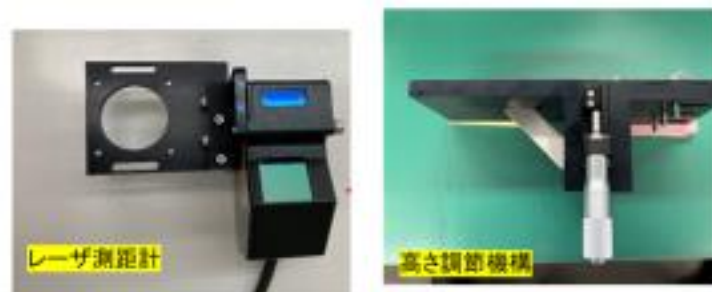


図11-7. レーザ測距計と高さ調節機構

周方向走査による信号強度の変化を図11-8に示す。アライメント無は青線、可視光によるアライメントは緑線、レーザー測距計を用いたアライメントは赤線でそれぞれ示す。健全部の平均に対して、最も検波電圧値が低下する箇所（ライニング繋ぎ目による段差は除く）でも低下率は50%以下であった。また、アライメント無しの平均検波電圧と比較して、レーザー測距を用いた時の平均検波電圧は2.4倍、目視のみのアライメントと比較しても平均検波電圧が1.8倍と、アライメント改善によって全体的に検波電圧値が向上した。レーザー測距及びステージを追加しアライメント改善した結果、周方向信号強度変動抑制可能であることを確認した。

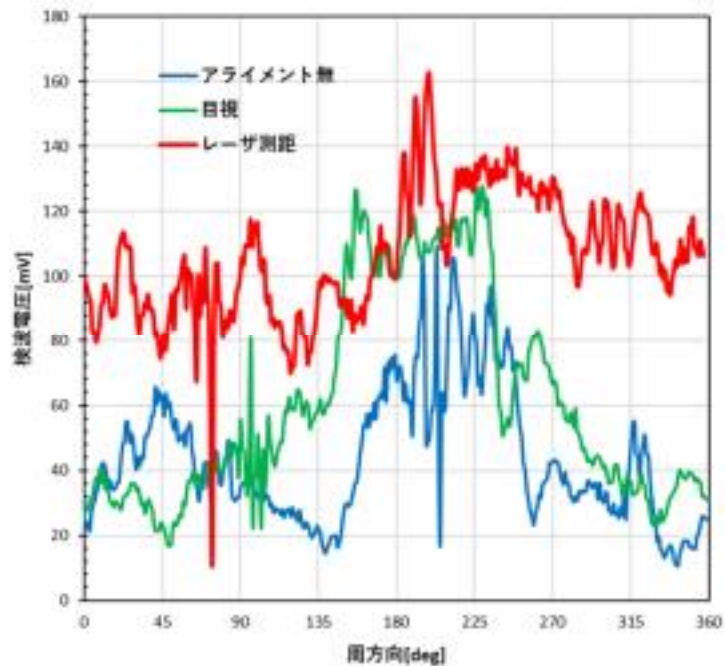


図11-8. アライメントごとでの周方向走査時の検波電圧値の比較

配管中心からアライメントがずれた時の影響を調査するために、高さ調節機構を用いて、中空ロータリを中心からずらした。上下方向に軸をずらした際の影響を図11-9に示す。この結果によって上下方向に対し、4～6 mm程度中心からずらすことで、平均信号強度が半減以上することも確認した。同様に、左右方向に中空ロータリをずらした際の影響を図11-10に示す。この結果によって、左右方向に対し4～6 mm程度中心からずらすことで、平均信号強度が半減以上することも確認した。そのため、イメージング装置化においては、アライメント用にレーザ測距を用い、断面方向を調整するためのステージが必要であることが分かった。

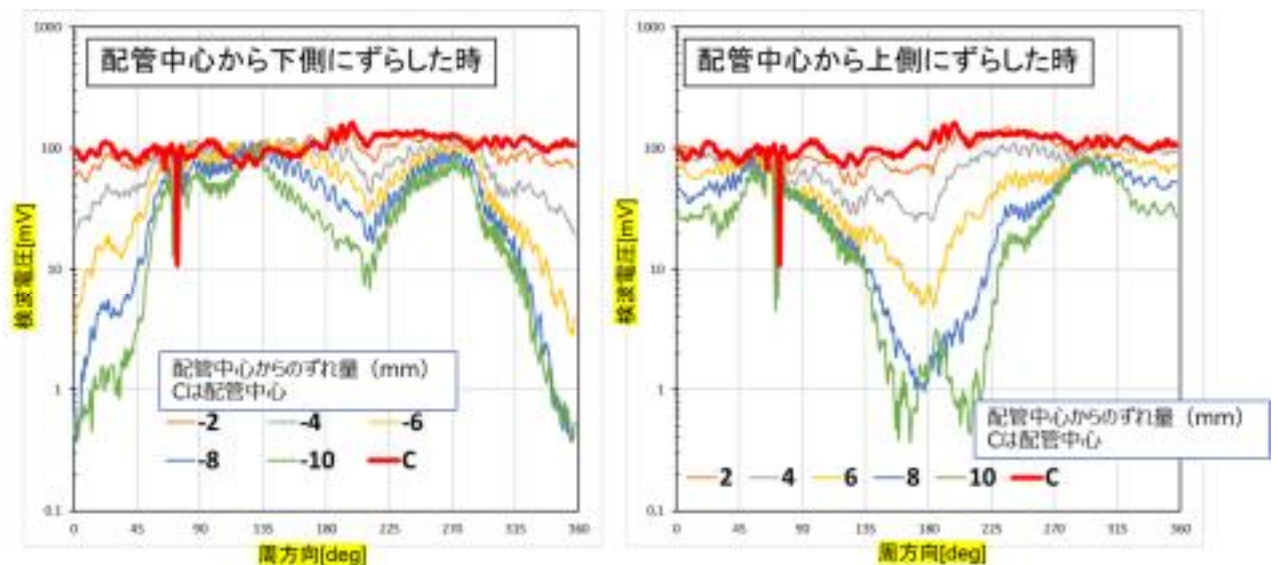


図11-9. 上下方向に光軸をずらした際の周方向検波電圧

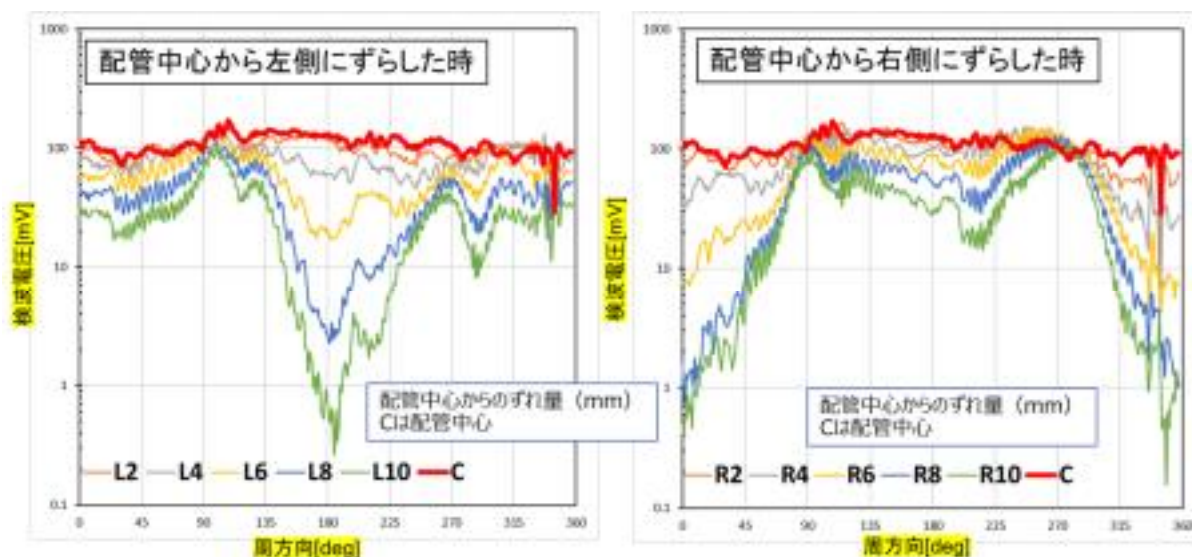


図11-10. 左右方向に光軸をずらした際の周方向検波電圧

光軸のあおり角によるロボット走査時の影響を確認するため、図11-11に示す試験系を構築し、中空ロータリのあおり角度を変更することで受ける影響を確認する試験を実施した。実機では装置が傾くことが想定されるが、当該試験でそれを再現することは困難なため、配管と台座の間に厚さの違う金属プレートを含むことで傾きを変化させた。あおり角度の計測にはデジタル角度計測器を用いた。

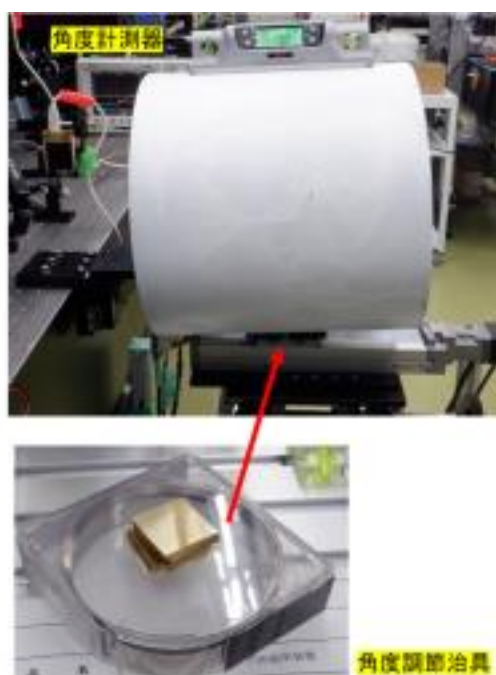


図11-11. あおり影響の確認試験系

配管を傾けた時の周方向の信号強度変化を図11-12に示す。傾きがおおよそ1.5度から信号強度の変化が50%を越え始めることが確認された。そのため、ロボット搭載の光源には、あおり角度調整用にステージが必要であると分かった。ただし、実際は光源と中空ロータリは近い位置に配置されるため、影響は緩和されると考えられる。

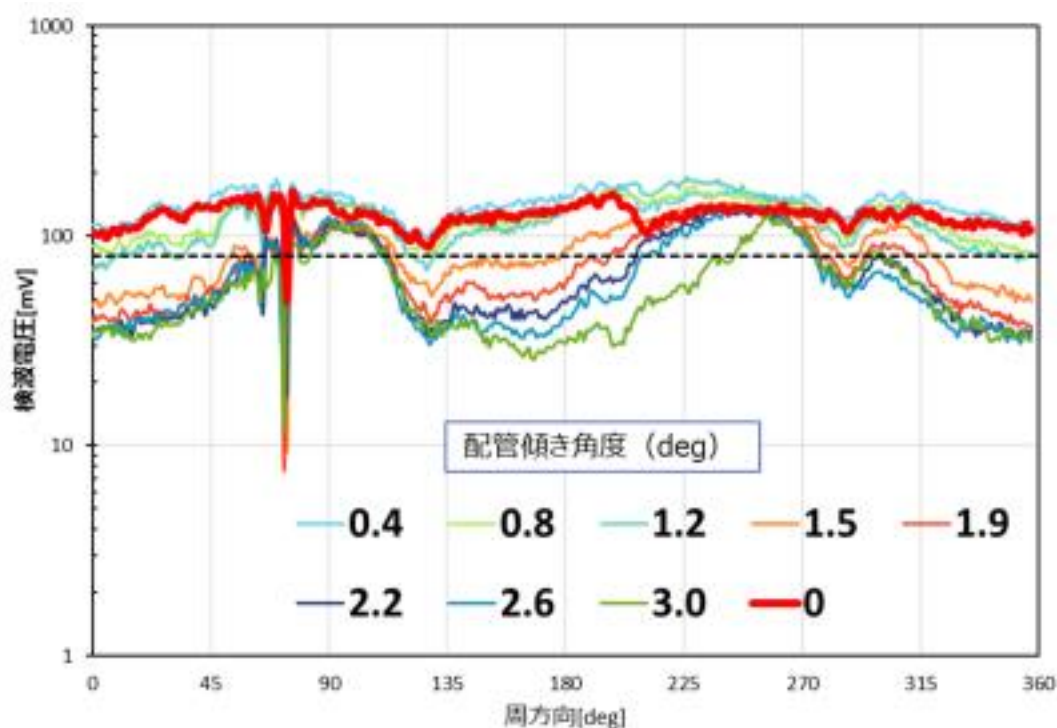


図11-12. あおり角による周方向走査の影響

図11-13に2値化した腐食イメージングマップを示す。腐食が存在しない箇所を健全部とし、平均信号強度を算出した。その平均信号強度に対して閾値を決め、それ以上であれば灰色に、それ以下であれば黒く表示した。健全部の平均値に対して、50%程度であれば、腐食程度が小レベルでも観測することができた。そのため、レーザ測距計を用いてアライメントすれば、2値化以外のデータ処理を用いずに周方向全体のマッピングが可能である。なお、腐食はいれもΦ25 mmであり、大中小は腐食度合（腐食液につけた日数の違い）を示している。

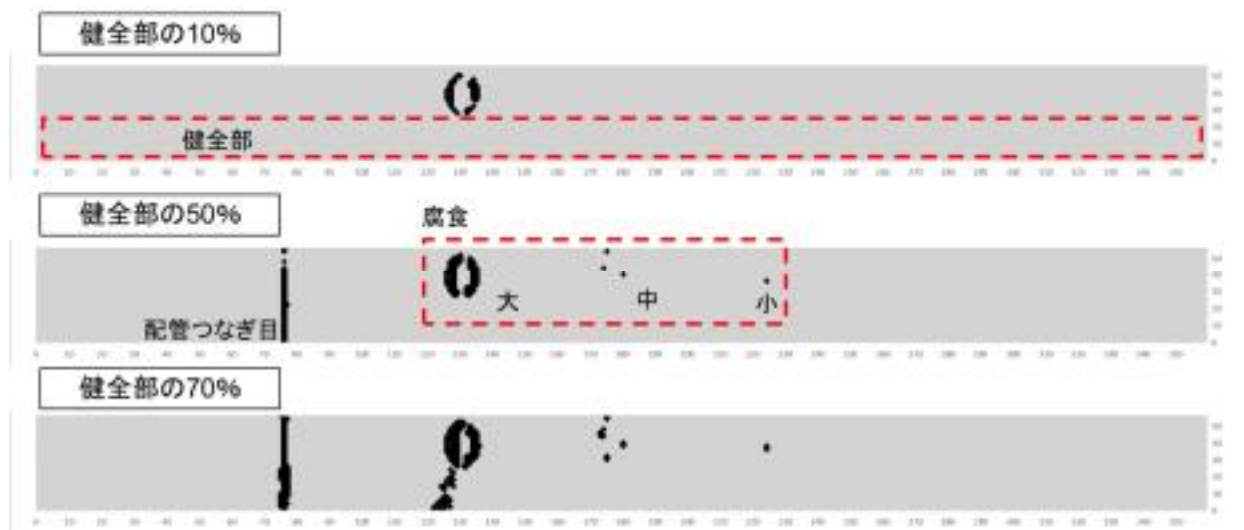


図11-13. 2値化の比較

図11-14にアライメント改善前後の2値化した腐食イメージングマップを示す。健全部の平均信号強度を算出し、平均信号強度の50%以上であれば灰色に、それ以下であれば黒く表示した。改善前の結果では両端が黒くなっており、腐食ではない部分も腐食と同様な表示の色付けがなされており、区別がつかない状態であったが、周方向のアライメントが改善されたことにより、配管繋ぎ目による段差以外の部分で腐食以外は黒く表示される部分が消失しており、腐食部分の判断が容易となった。

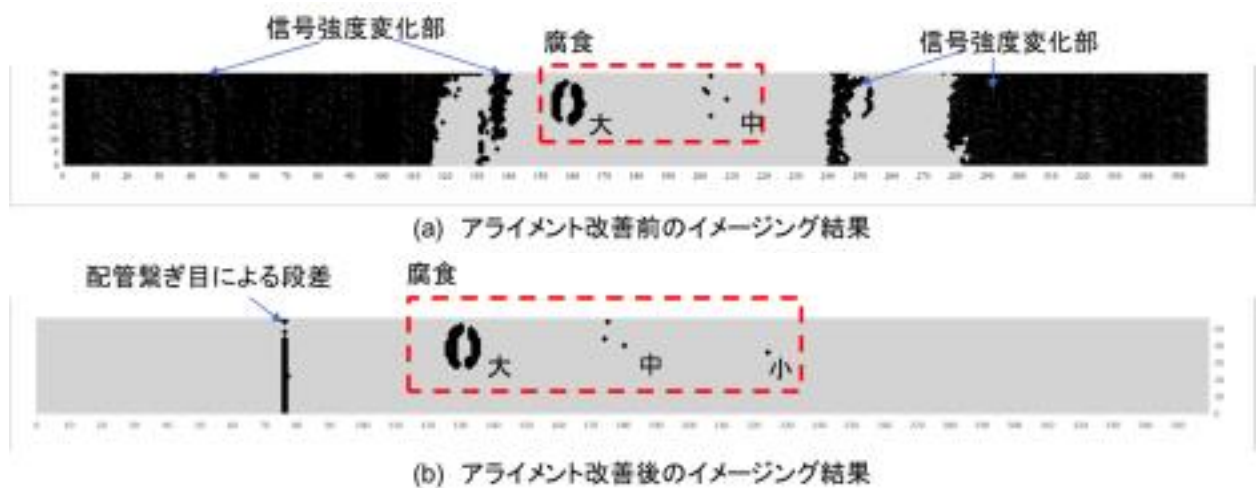


図11-14. アライメント改善前後での比較

以上の結果を踏まえ、自走式のイメージング装置を仮作した。装置全体を図11-15、テラヘルツ波の伝搬光路と走査のイメージを図11-16に示す。理研で開発された可搬式のテラヘルツ光源システムおよび光学部品を1軸ステージに搭載し、自走式のイメージング装置を構成した。可搬式光源から出射されたテラヘルツ光源はミラー2枚と中空ロータリを介して配管壁面に向かって照射される。配管壁面から反射したテラヘルツ波は、中空ロータリ手前に配置されたハーフミラーによってショットキーバリアダイオード（SBD）で受光する。可搬式光源を含めた光学部品は、配管軸方向に動作する1軸自動ステージ上に乗せている。配管の芯出しはレーザ測距と配管断面方向に稼働する2軸ステージにより実施した。

ステージ上に乗せている部品の他に、可搬式テラヘルツ光源に接続している励起光源の電源、シード光アンプおよびシード光励起光源、励起光源用のチラーがあり、装置を移動させる場合はこれらも一緒に移動させることで現場での計測が可能である。

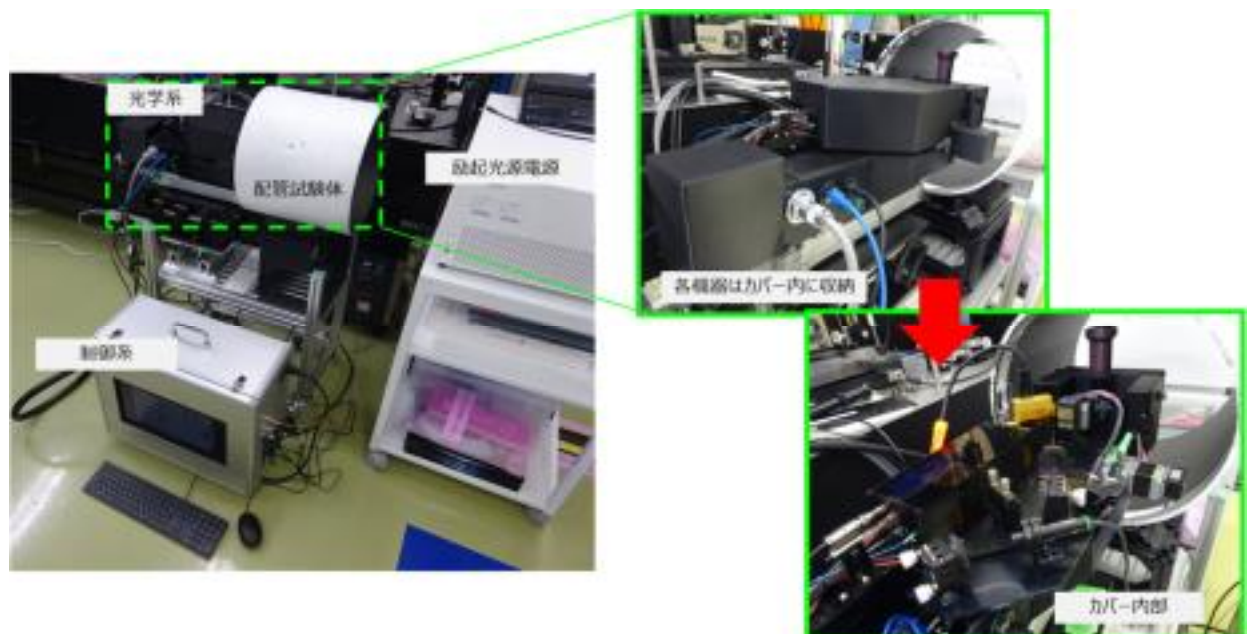


図11-15. 仮作した自走式テラヘルツ波イメージング装置

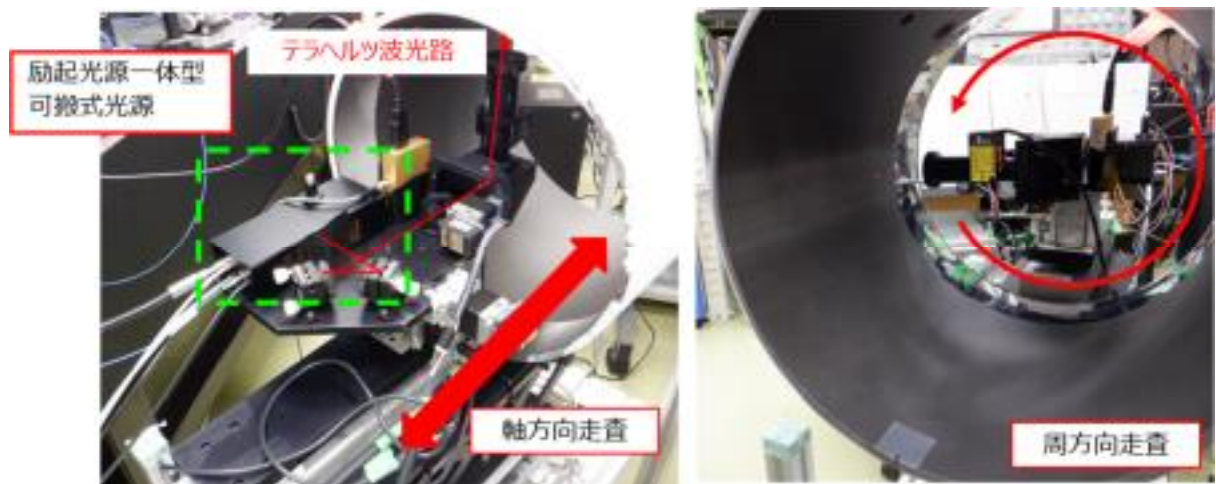


図11-16. テラヘルツ波光路と周軸方向の走査イメージ

前述の試験と同様、自走式装置でも配管中心からのずれや傾きの影響を確認した。ずれの方向のイメージを図11-17に示す。回転中心と配管中心のずれを再現するために、光源を搭載しているステージを左右と下方向（ステージの都合で上方向は省略）に動かした。またあおり角を再現するために、配管の下にシムを入れて配管を傾けた。

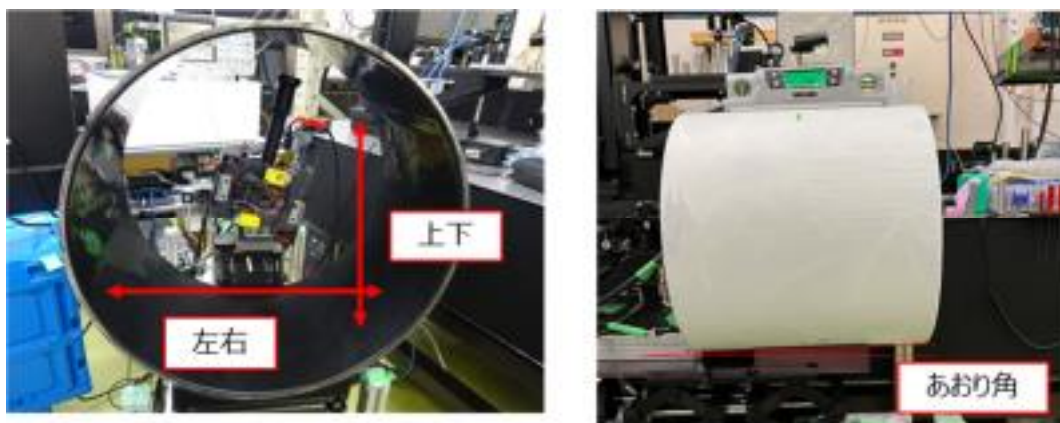
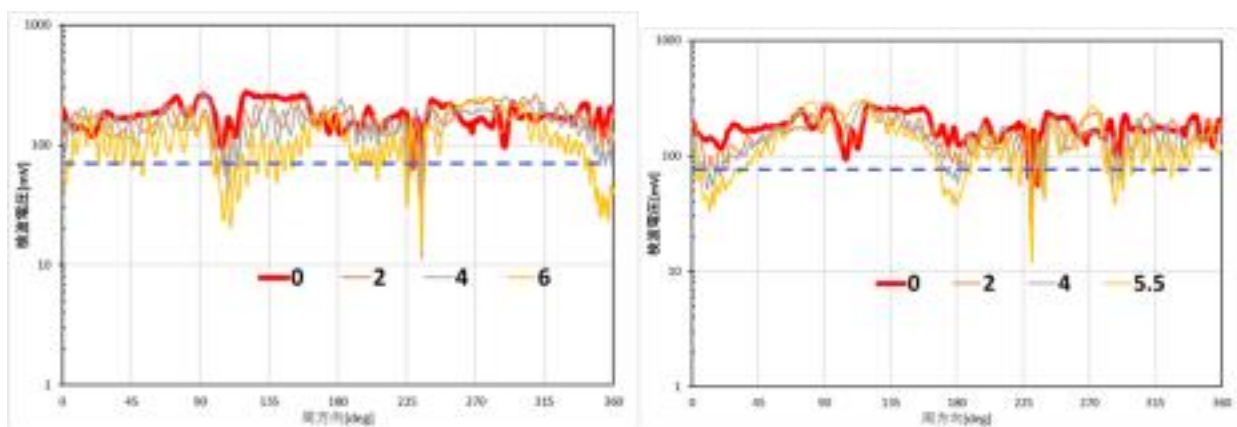


図11-17. 配管の中心からのずれ方向とあおり角イメージ

周波数方向の信号強度変化に対する左右方向のずれの影響を図11-18、下方向のずれの影響を図11-19、傾きの影響を図11-20に示す。この結果、左右下方向に対しては、軸ずれが4 mmを超すと電圧の変化が50%以下となることが分かった。また、あおり角度は1.5 degを超すと電圧の変化が50%を超すことが分かった。今後装置のさらなる改修を行うにあたっては、装置の走行に合わせて軸ずれやあおり角を調整できるステージを装備することが必要になるが、本試験によりその設計仕様を明確にすることができた。



(a)配管右側に中心をずらした時

(b)配管左側に中心をずらした時

図11-18. 左右方向に光軸をずらした際の周方向検波電圧

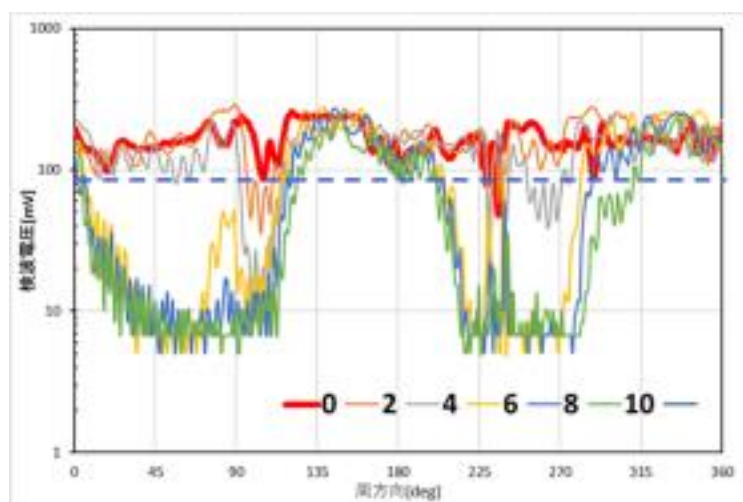


図11-19. 下方向に光軸をずらした際の周方向検波電圧

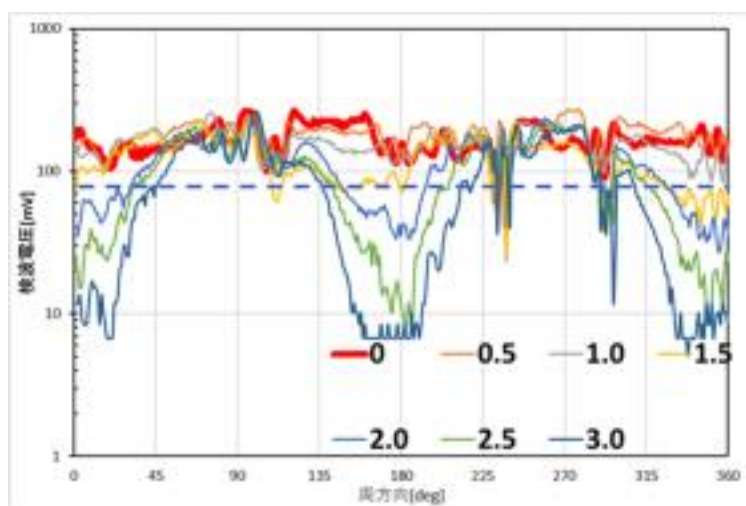


図11-20. あおり角度を変えた際の周方向検波電圧

次に、自走式イメージング装置を用いて腐食のイメージングを試行した。配管は図11-2に示すものを使用した。イメージング結果を図11-21に示す。周方向は1 deg (約3 mm) ピッチ、軸方向は1 mmピッチで走査した。健全部の検波電圧の平均値を基準とし、検波電圧が平均値の30%以下になった部分を白塗りで表すことにより、二値化したイメージング結果を表示している。図中の緑線の周方向の電圧変化を図下側に示す。この結果から健全部の電圧変化は $\pm 50\%$ 以内となることを確認できた。また、健全部電圧平均値と腐食部電圧変化の差をS (signal)、健全部

電圧平均値と健全部信号強度の差の最大値をN (Noise) と定義すると、腐食部は $S/N \approx 4.7$ で検出出来ており、比較的变化が捉え易い $S/N=2$ 以上で検出可能であることが示された。

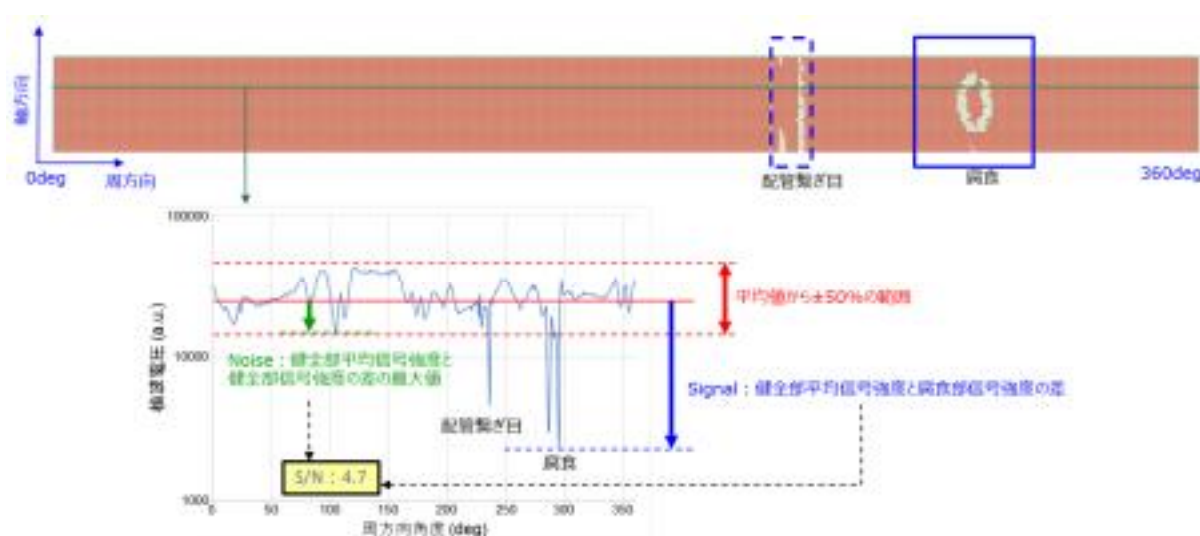


図11-21. 配管腐食のイメージング結果

検査対象である配管は長大であり、検査速度は速い方が望ましい。そこで、データ採取の走査ピッチを変化させながら試験を行い、検出性を確保しつつ、検査速度を高速化させることのできるパラメータを検討した。走査ピッチを変えた時のイメージング結果を図11-22に示す。周方向のみピッチを変化させ、軸方向はいずれも1 mmで固定した。いずれのデータも健全部の検波電圧の平均値の30%以下を白塗りにして二値化しており、腐食部と配管継ぎ目を検出できている。この試験結果から、 $\Phi 25$ mmの腐食の場合、3 degピッチのような粗い検査でも、腐食が検出可能であることが分かった。

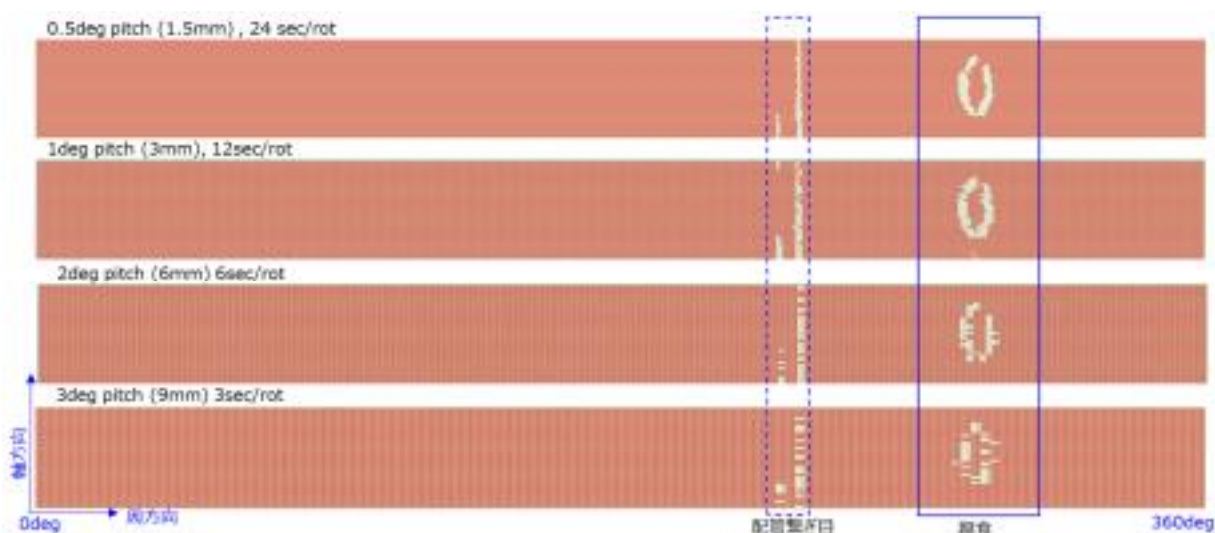


図11-22. 走査ピッチを変化させたときのイメージング結果比較

以上、当初の目標であった、「ロボットにテラヘルツ波イメージング装置を仮搭載し、性能評価を行う」に対し、次のような成果を得ることができ、目標を達成できた。

- 配管ライニング検査をターゲットに、テラヘルツ波光源をロボットに搭載することで配管内を自動で走査できるイメージング装置を製作
- レーザ測距や配管断面方向の2軸ステージを設置することで健全部の検波電圧変化を50%以内に抑制し、 $\Phi 25$ mmの腐食に対して、 $S/N \approx 4.5$ で検出可能
- 周方向3 degピッチで走査することで、一周3秒の速さでイメージング可能

⑫ プロジェクトの総合的推進（担当：理化学研究所）

月1回程度で運営会議を行い、プロジェクト全体の進捗状況を確認した。運営会議は全46回実施し、「7. 研究発表、知的財産権等の状況 （3）その他特記事項」にまとめている。頻度の高い運営会議によって本委託業務が確実に進展するよう議論できた。その結果、問題や成功を互いに分かち合い理解し、効率よく研究ができた。また本委託業務の実施により得られた研究成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、また多くの招待講演等も受けることができた。

4. 委託業務全体の成果

4. 1 計画時に想定していなかった成果（副次的成果）や、目標を超える成果

バックワード・テラヘルツ波パラメトリック発振は、我が国の技術として我々が世界で初めて単色近赤外レーザー光からテラヘルツ波とアイドラー近赤外光を発振させた独自技術である。Society5.0で新しいサービスを提供するインフラ技術として光電融合デバイス（通信やセンシング）や技術の研究開発が注目されているが、本研究の技術はまさに光波とテラヘルツ波を直接相互変換する上記の重要な技術である。本研究計画時には、光波とテラヘルツ波が対向して発生し伝搬する新しい現象に対して多くの部分が不明であり、想定していなかった副次的成果を期待していたところがあった。下記に幾つかの成果を列記する。

まず、最も特筆すべき点として、励起光レーザーの光子が非線形変換によってアイドラー光（1次のストークス光）とテラヘルツ波光子が生成されるが、アイドラー光が更に変換され2次、3次のストークス光と、ほぼ同周波数のテラヘルツ波光子を生成するカスケード変換が発見されたことである。この現象は、高出力化には極めて重要であり、レーザー1光子から複数個のテラヘルツ波光子の発生と、発生した光子による発振現象に基づくフィードバック効果で、総合的視点から格段の高効率化が実現できたことである。結果として、手のひらサイズのシステムからジャイロトン級のピークパワー200 Wもの出力が得られた。一方、使用しているニオブ酸リチウム結晶は周波数7.5 THz付近にフォノン吸収のピークがあるため、高周波数発生はテラヘルツ波吸収のため困難となる。しかし、カスケード変換によって実際に1 THz付近までテラヘルツ波を発生することができた。実験でもカスケード変換なしでは発生出来ないことが分かっており、本成果は重要な発見であった。コンパクトなテラヘルツ波光源が世界トップレベルの輝度を誇り、テラヘルツ波を用いた非破壊検査応用の道を切り開いたことは顕著な成果である。

また、優れた成果として、テラヘルツ波を光波へと逆変換する方法によって、超高感度なテラヘルツ波検出を実現できた。計画当初は、小さい非線形結晶であることから変換効率も格段に悪いことが予想され、最小検出感度を一般的な検出よりは良い1 pJ/pulseを想定していた。しかし結果は、この想定をはるかに超え、約50 aJ/pulseと5桁程度も目標を更新する結果が得られた。この成果は、常温動作の優秀なテラヘルツ波検出より3桁以上優れていて、将来のテラヘルツ波センシングにおいて極めて重要な結果である。本成果が得られた理由は、物理的な考察からコヒーレンスを最大限利用した検出であり、また非古典的な動作も関係していることがわかってきた。元々、2次の非線形効果を利用した光量子変換であるため、もつれ光子対の発生になっていることは推論できる。そのため、光量子干渉として、従来のビームスプリッターを用いた干渉系でなく、非線形結晶をビームスプリッターの代わりに使用するSU(1,1)系の新しい光量子干渉を実現できるのではないかと量子研究への展開が見えてきた。光波中心の現在の量子研究をテラヘルツ波領域まで展開し、フォノンやマグノンなど準粒子との相互作用の研究も期待できる。光源自体もブライトスクイーズド状態である可能性も含め、非古典的な研究や技術開発をテラヘルツ波領域に展開できるため、この点も目標を超える成果である。

テラヘルツ波イメージング実験では、本研究課題の実施に伴って、新たに企業との共同研究を2件進めることができた。1つ目は、位相乱雑化の機能を有するマイクロコイル吸収体に関する研究開発であり、従来の標準的なテラヘルツ波吸収体であるEccosorb®(市販品)と比較して、1桁程度低い低反射性能が確認されるとともに、その反射信号が位相を乱雑化する特性を明らかにした。この機能性の発見をもとに、特許申請を行った。また、この吸収体は、NICTが研究開発を進めている人工衛星搭載機器の吸収体の候補としても新たに検討されることとなった。もう一つは、T社と研究開発を行ってきている300 GHz光源の応用展開であり、新たに理研と同社での光学系を構築して、今後、装置開発に向けた実験を進めることとなった。

周期分極反転素子の開発において、コリメート光を用いた新たなTHz-TDS測定系（THz-cTDS）を構築した結果、従来の集光型光学系では困難であった厚い試料の測定が可能となった。これにより、LN, LTなどの非線形光学結晶に対して高精度な光学パラメータ計測が実現し、文献値より真値に近いと思われる計測結果を得た。この結果は、既存の文献値の正確性や測定限界に疑問を投げかけるものであり、THz分光における基礎物性値の見直しを促す重要な成果である。

4. 2 研究課題の発展性（間接的成果を含む）

Society5.0を支える周波数インフラとして、テラヘルツ波は重要な技術である。光波とテラヘルツ波を直接光量子変換できることは、通信のボトルネックを解消し低遅延に貢献する役割を果たす。一方、テラヘルツ波の物質への透過性、特に本研究で取り扱ったサブテラヘルツ波領域は物質への透過性が良く、非破壊検査を行った場合の空間分解能がマイクロ波やミリ波よりも格段に向上するため高く期待されている。また、安心安全な社会を持続させるためには、新材料や複雑な構造など高度化する社会において保守管理なども重要な要素である。これまでの非破壊検査技術に加えて新しいテラヘルツ波非破壊検査を普及させるには、やはり輝度の高い光源を簡単に使えることが重要である。本成果では、最大ピーク出力（200W）、モードホップフリーの連続周波数可変性（0.245から1.008 THz）、そして手のひらサイズの小さい約14 cm×5.5 cmのフットプリントサイズや光源部の重量450gなど、世界トップの性能を実現している。

また、励起光源一体型テラヘルツ波光源の開発には、必要な部品を独自に開発できる日本の企業と共に実施してきた。オールジャパンの装置であることも重要なポイントであり、かつ成果の技術移転や発展・普及が容易にできることも配慮して実施した。ロボット搭載に限らず、幅広いテラヘルツ波非破壊検査応用への利用が期待される。

さらに、開発したテラヘルツ波光源などの技術は、今後、Beyond5G/6Gでデバイス開発の研究を行うグループなどと共同して、デバイスの特性評価などに利用可能であるため、広く利用することを見込んでいる。

周期分極反転素子の開発において確立したTHz-cTDS測定系は、非線形光学結晶だけでなく、THz工学用のデバイス、オプティクス材料に対しても有効であり、これらの結晶に対してTHz領域の複素屈折率や吸収係数の精密な評価が可能となった。さらに、温度を変化させた測定を行うことで、吸収係数に対する温度依存性が明確に示され、冷却による吸収低減の有効性が実証された。これにより、今後のTHz波長変換素子の低損失化・高効率化設計への応用が期待される。また、Mgドープ濃度や結晶組成（CLN、CLT、SLNなど）に依存した光学特性の評価も視野に入っており、得られた知見は非線形光学デバイスの高性能化やTHz光源開発へと波及することが見込まれる。従って、本研究の成果は、波長変換材料開発全体の精度向上と指針構築に大きく寄与する間接的な効果を持っている。

4. 3 研究成果の発表・発信に関する活動

年月日	開催名称	実施場所	備考
令和6年11月25-26日 令和6年12月16-17日	集中講義「先端光計測特論—テラヘルツ科学—」	千葉大学 〒263-8522 千葉市稲毛区 弥生町 1-33	将来の若手研究者の育成、またはアウトリーチ活動の一環として、本課題研究代表の南出が主に大学院の学生に対して本研究課題の成果の一部を紹介した。
令和6年7月14日	学都「仙台・宮城」サイエンス・デイ』2024	東北大学川内北キャンパス 講義棟 宮城県仙台市青葉区川内41	子どもから大人まで参加する体験型・対話型の科学イベントで本研究課題の成果の一部としてランダム・高速波長可変テラヘルツ波光源を展示した。
令和5年11月27-28日 令和5年12月18日	集中講義「先端光計測特論—テラヘルツ科学—」	千葉大学 〒263-8522 千葉市稲毛区 弥生町 1-33	将来の若手研究者の育成、またはアウトリーチ活動の一環として、本課題研究代表の南出が主に大学院の学生に対して本研究課題の成果の一部を紹介した。

令和5年7月16日	学都「仙台・宮城」サイエンス・デイ』2023	東北大学川内北キャンパス講義棟 宮城県仙台市青葉区川内41	子どもから大人まで参加する体験型・対話型の科学イベントで本研究課題の成果の一部としてBW-TPOモックアップを展示した。
令和4年12月1-2日 令和5年1月16-7日	集中講義「先端光計測特論ーテラヘルツ科学ー」	千葉大学 〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33	将来の若手研究者の育成、またはアウトリーチ活動の一環として、本課題研究代表の南出が主に大学院の学生に対して本研究課題の成果の一部を紹介した。

5. プロジェクトの総合的推進

5. 1 研究実施体制とマネジメント

本研究期間は、まさに新型コロナウイルスによるパンデミックとそこから回復し5類感染症に移行するまでの期間に相当した。確りとした研究運営を実施するために、限られた選択肢の中でWEB会議ツールによる会議は有効であった。そのような状況のなかで、効率的な研究実施のため、ひと月に1度ペースで運営会議を実施し、本研究に関わる研究者も参加して互いの研究進捗について理解と議論を行ってきた。また、運営会議と合わせて適宜、各研究拠点に訪問して現場説明を受け、実際の研究環境や実施体制についても互いに視察して情報共有を図った。結果としては良い成果につながったと考えている。

5. 2 経費の効率的執行

本研究では、基礎研究とその実用化として手のひらサイズのテラヘルツ波光源の開発を並行して実施した。基礎研究だけに偏らず、応用に際して必要な開発を毎年の研究進捗に合わせ調整し、必要な経費の執行に無駄がないように取り組んだ。

6. まとめ、今後の予定

本研究では、バックワード・テラヘルツ波パラメトリック変換を用いたテラヘルツ波検出の成果に極めて顕著な成果が得られた。高感度テラヘルツ波センシングにつながる重要な技術として、また光波とテラヘルツ波を繋いだ量子研究への発展も見えてきた。今後は、対向相互作用する特殊な非線形場を用いたテラヘルツ波量子センシングの研究を行い、革新的な技術発展を目指したいと考えている。

7. 研究発表、知的財産権等の状況

(1) 研究発表等の状況

種別	件数
学術論文	8件
学会発表	118件
展示・講演	19件
雑誌・図書	2件
プレス	2件
その他	5件

(2) 知的財産権等の状況

発明の名称	発明者	出願登録区分	出願番号（出願日）	出願区分	出願国	登録番号（登録日）
テラヘルツ波生成装置	南出泰亜、瀧田佑馬、縄田耕二	出願	特願2024-107103 (2024年7月3日)	国内	日本	
検査装置	梶川敬介、安井潤、阿久津壮希、南出泰亜	出願	PCT/JP2024/24696 (2024年7月9日)	外国	PCTルート(国内優先権主張のため日本は指定取り下げ)	
検査装置	南出泰亜、梶川敬介、安井潤、阿久津壮希	出願	2023-139490 (2023年8月30日) (特願2022-036002に関連した新規出願)	国内		
テラヘルツ波拡散体およびその製造方法	大谷 知行、彌田 智一、佐藤 剛毅、小堀裕司、小出 昌弘、大木 利哉	出願	2023-200044 (2023年11月27日)	国内		
検査装置	山本修作、梶川敬介、神納祐一郎、南出泰亜、縄田耕二	出願	18/170855 (2023年2月17日)	国外	米国	-
検査装置	山本修作、梶川敬介、神納祐一郎、南出泰亜、縄田耕二	出願	202310118397.3 (2023年2月3日)	国外	中国	-
検査装置	山本修作、梶川敬介、神納祐一郎、南出泰亜、縄田耕二	出願	18/170865 (2023年2月17日)	国外	米国	-
検査装置	山本修作、梶川敬介、神納祐一郎、南出泰亜、縄田耕二	出願	202310129033.5 (2023年2月3日)	国外	中国	-

ダイクロイックミラー及び光学調整方法	縄田耕二、南出泰亜	出願	特願2022-021012 (2022年2月15日)	国内	日本	-
検査装置	山本修作、梶川敬介、神納祐一郎、南出泰亜、縄田耕二	出願	特願2022-036002 (2022年3月9日)	国内	日本	-
検査装置	山本修作、梶川敬介、神納祐一郎、南出泰 亜、縄田耕二	出願	特願2022-036204 (2022年3月9日)	国内	日本	-

(3) その他特記事項

年月日	開催名称	実施場所	備考
2020年12月24日	第1回運営会議	オンライン	
2021年1月25日	第2回運営会議	オンライン	
2021年3月26日	第3回運営会議	オンライン	
2021年4月26日	第4回運営会議	オンライン	
2021年5月31日	第5回運営会議	オンライン	
2021年6月28日	第6回運営会議	オンライン	
2021年7月29日	第7回運営会議	オンライン	
2021年9月8日	第8回運営会議	オンライン	
2021年10月14日	第9回運営会議	オンライン	
2021年11月22日	第10回運営会議	仙台市（理化学研究所）	
2021年12月16日	第11回運営会議	岡崎市（分子科学研究所）	
2022年1月20日	第12回運営会議	オンライン	
2022年2月24日	第13回運営会議	オンライン	
2022年3月29日	第14回運営会議	オンライン	
2022年4月26日	第15回運営会議	オンライン	
2022年5月30日	第16回運営会議	オンライン	
2022年6月28日	第17回運営会議	オンライン	
2022年7月29日	第18回運営会議	オンライン	
2022年9月12日	第19回運営会議	オンライン	
2022年10月31日	第20回運営会議	岡崎市（分子科学研究所）	
2022年11月28日	第21回運営会議	高砂市（三菱重工業）	
2022年12月26日	第22回運営会議	仙台市（理化学研究所）	
2023年2月10日	第23回運営会議	オンライン	
2023年3月22日	第24回運営会議	オンライン	
2023年4月25日	第25回運営会議	オンライン	
2023年5月25日	第26回運営会議	仙台市（理化学研究所）	
2023年6月26日	第27回運営会議	オンライン	
2023年8月1日	第28回運営会議	岡崎市（分子科学研究所）	
2023年8月30日	第29回運営会議	オンライン	
2023年10月2日	第30回運営会議	オンライン	
2023年11月6日	第31回運営会議	オンライン	
2023年12月11日	第32回運営会議	仙台市（理化学研究所）	
2024年1月12日	第33回運営会議	仙台市（理化学研究所）	
2024年2月22日	第34回運営会議	オンライン	

2024年3月18日	第35回運営会議	オンライン	
2024年4月23日	第36回運営会議	東京都（理化学研究所）	
2024年5月20日	第37回運営会議	オンライン	
2024年6月19日	第38回運営会議	岡崎市（分子科学研究所）	
2024年7月25日	第39回運営会議	オンライン	
2024年9月9日	第40回運営会議	オンライン	
2024年10月8日	第41回運営会議	仙台市（理化学研究所）	
2024年11月11日	第42回運営会議	高砂市（三菱重工業）	
2024年12月10日	第43回運営会議	和光市（理化学研究所）	
2025年1月15日	第44回運営会議	オンライン	
2025年2月17日	第45回運営会議	オンライン	
2025年3月24日	第46回運営会議	オンライン	