

「テラヘルツ波に関する基礎研究」研究報告

～GaPテラヘルツ信号発生装置による分光吸収測定技術～

財団法人 半導体研究振興会 半導体研究所

名誉所長 西澤 潤一 氏
所長 須藤 建 氏
主任研究員 佐々木 哲朗 氏

西澤潤一名誉所長 略歴

1948年 東北大学工学部電気工学科卒業
1960年 工学博士（東北大学）
1968年 (財)半導体研究振興会 半導体研究所 所長
1990年 東北大学総長 東北大学名誉教授
1998年 岩手県立大学学長
2004年 (財)半導体研究振興会 半導体研究所 名誉所長
2005年 首都大学東京学長 岩手県立大学名誉学長

1989年 文化勲章受章

2000年 IEEE エジソンメダル受賞

2002年 勲一等瑞宝章受章

須藤建所長 略歴

1968年 東京大学大学院工学研究科電子工学専攻
博士課程修了
1968年 東北大学 電気通信研究所 助手
1969年 東北大学 電気通信研究所 助教授
1991年 東北大学 工学部 材料物性学科 教授
2004年 (財)半導体研究振興会 半導体研究所 所長

JR東日本研究開発センターでは、未開拓領域の電磁波として可能性が注目されている「テラヘルツ波」を鉄道分野へ適用するための研究について、2004年度から3年間にわたり財団法人半導体研究振興会半導体研究所と進めてきました。この研究成果に関する半導体研究所からの報告会を2007年2月23日に開催しました。当日は西澤名誉所長よりテラヘルツ波に関する展望等について御講演をいただいたあと、以降の研究報告が行われました。

1. テラヘルツ波の発生技術

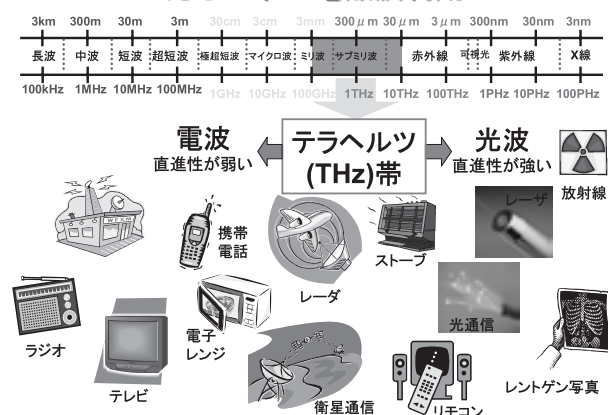
次の図は私達のくらしの中の電磁波利用について示したものです。周波数が高くなると同じ電磁波でも光の波になり、非常に高くなれば紫外線・光となり、例えばX線であればレントゲン写真、紫外線であれば化学反応、赤外線・可視光であれば発光ダイオードや光通信に使われています。それから少し周波数が低くなったところが1テ

ラヘルツ、10の12乗ヘルツなのですが、このあたりが従来はほとんど検討されてこなかった領域でした。なぜかというのを測定するのに必要な電磁波の装置そのものがなかったからです。

テラヘルツ波の特徴を3つにまとめます。1番目は有機化合物の分子における原子間の振動信号がテラヘルツ帯であるということで、具体的には生体分子（例えばアミノ酸とかDNA）や薬剤の固有振動からこれらの分子を検出・識別することができるので、最終的にはガンの診断にも利用できるということになります。

2番目ですが、テラヘルツ波は周波数を低くした光の波であると同時に、電波の周波数が特別に高いものですから、電波と光との間の性質を持っており、例えば紙や布など光を通さないものを透過して中を見ることができます。これを使えばX線に代わって安全な検査ができるということになります。X線に比べてなぜ安全かということ、テラヘルツ波の持っている光の粒子がエネルギーを持って

くらしの中の電磁波利用



いるのですが、強度が非常に強くてもエネルギー的には非常に小さく、人間の体に悪影響を与えないのです。

3番目ですが、マイクロ波に比べて100~1000倍くらい周波数が高いので、一つ一つの周波数が情報を持つと考えたとテラヘルツはギガヘルツに比べて1000倍の情報を持つことになり、超高速あるいは超広帯域の通信にも使えるということになるわけです。

テラヘルツ波の特徴

★テラヘルツ帯に存在する原子間振動

- ・ 生体分子・薬剤分子の固有振動数 → 分子の検出・識別
- ・ 生体分子間結合の振動数 → 生命活動の解明
- ・ 生体温度36℃の周波数換算は約6THz

★光波の直進性と電波の透過性を併せ持つ

プラスチック、ビニール、布、紙などを透過する

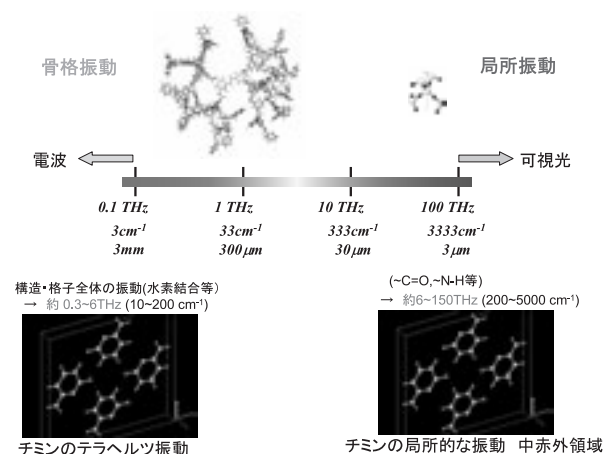
成分識別もできるX線に代わる安全な非破壊検査用光源

★超高速通信キャリア

先程の原子間の振動についてですが、次の図は例えばたんぱく質といった分子をイメージしたもので、周波数1テラヘルツというのは300 μm くらいの波長なのですが、その辺で振動しているのかを見てみると、分子の集合全体にわたって振動しているのがわかります。

従来からある近赤外あるいは中赤外の領域での赤外分光法というものがあるのですが、それで見えるのは分子のごく一部分の局所的振動になってしまいます。これに対して半導体研究所で開発したテラヘルツを分光できる

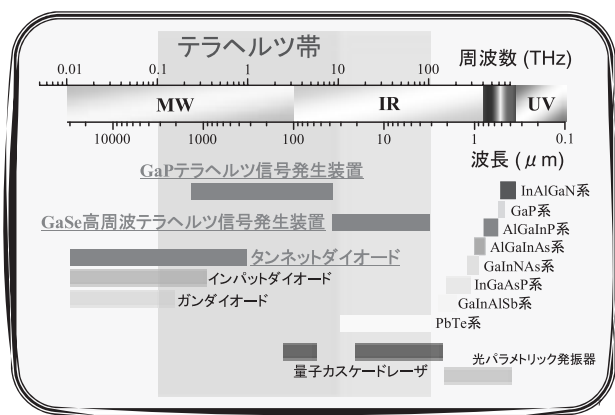
原子間振動



新光源の場合、0.3~6THzというテラヘルツ振動の主要な領域をカバーできるものになっています。この場合分子全体が振動しており、振動の周波数は分子の種類によって違います。

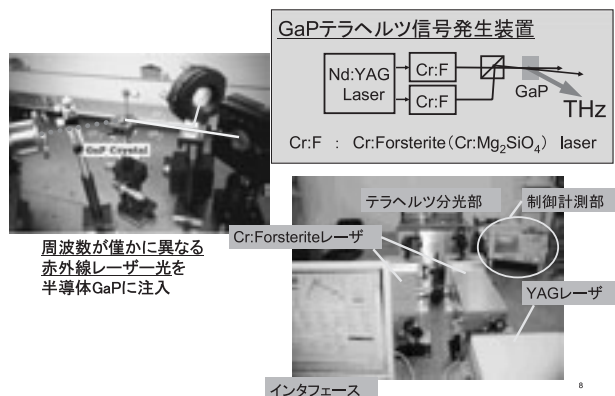
テラヘルツ帯の信号発生装置について詳しく説明すると、1~10THz辺りの周波数をカバーしているのが、材料にGaP (ガリウム・リン) を使っている信号発生装置です。それからさらに周波数の高いGaSe (ガリウム・セレン) という材料も検討しておりますが、それを使用した装置では100THzくらいまでを発生させることができます。

テラヘルツ帯の信号発生装置



装置について説明します。次の図は先程のガリウムリン・ガリウムセレンを使った信号発生装置です。これは試作品ですが非常にコンパクトなものになってきました。

GaPテラヘルツ信号発生装置



Topic-1

我々の発生装置は非常に広い周波数まで対応しており、また純粋な単色光になっています。さらに直進性や偏光といった特徴もあります。

GaPテラヘルツ信号発生装置の特長

- 広帯域 0.3~7.5THz (GaSeで~100THz)
- コヒーレント単色光
レーザ光のようなビーム形状と偏光特性
- ナノ秒パルス

・高周波数精度 0.0005THz以下

- ★分子欠陥の検出
- ★気体の検知・分析
- ★大容量通信
等が可能になる

・高強度 max. 1.5W

- ★長距離伝播
- ★化学反応誘起
等が可能になる

・直進性、偏光

- ★光学設計が容易
- ★分子の配向制御
等が可能になる

2. テラヘルツ波の計測技術

テラヘルツの分光測定については、いくつかの測定方法があります。例えば、一番基本的なのは透過測定ですが、これはテラヘルツ波が物質の中でどれだけ吸収されたかを見るものです。ところが全く透過しないものなどもあるので、その場合には反射波の値を測定するなどの工夫が必要です。その他にも、偏光測定、低温測定、ATR測定などがあります。また分光測定以外でテラヘルツイメージングという測定方法があります。これはモノを透過して中に何が入っているかを調べるような、セキュリティ分野への応用が考えられます。それだけではな

計測技術の種類

■ テラヘルツ分光測定

- 透過測定 → 物質特性評価、薬品検査など
- 反射測定 → 透過しないものの評価など
- 偏光測定 → 樹脂や液晶など配向性物質の評価など
- 低温測定 → 振動解析など
- ATR測定 → 溶液や微量物質の検出
- 気体測定 → 危険ガスの検知、環境検査など
- 液体測定 → 可燃性液体スクリーニング、潤滑油チェックなど

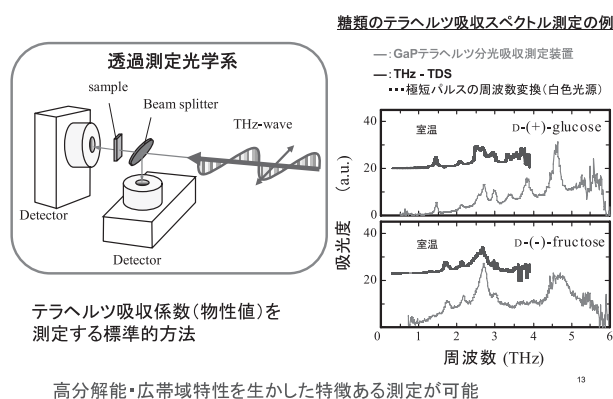
■ テラヘルツイメージング

- イメージング測定
 - 分光イメージング測定
- { 透過 → 物質分布計測
 { 反射 → 危険物所持検査
 構造物内部検査
 など

く物質が何かというところまでわかる分光イメージングという測定もあります。

まず分光測定の中の透過測定ですが、放出されるテラヘルツ波を2つに分け、一つは参照用のディテクター、もう一つはサンプルを通し、もうひとつのディテクターに入れます。この2つの比から透過率を求めます。この方法を用いて測定した結果を一例として示します。

透過測定法

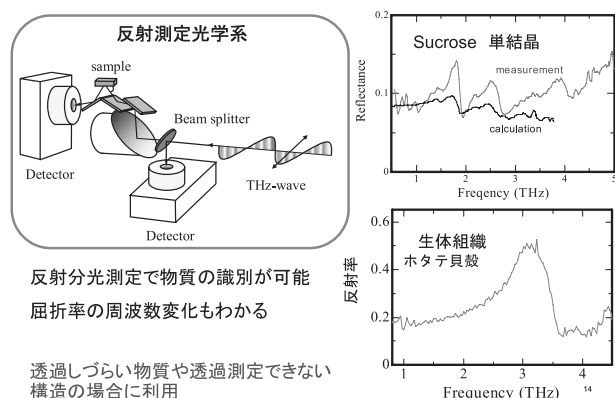


これはグルコースという糖の一種を測定したものです。縦軸は吸光度というもので、これはその物質の特性を示しているものです。我々の測定結果が図の波形です。例えば波形が上にピンと出ている部分については、そこで吸収が強いということを示しており、例えばこここの吸収があればこれはグルコースである、と判別することができます。

反射測定については、先程サンプルを透過させていた光を測定対象で反射させて、それを測るというものです。この場合は反射率を測定することになります。反射率も周波数によって変化するという特性が見られるので、例えばスクロースという砂糖の成分については、特定の周波数で反射率が変化するという特性が見えるので、どこで変化するかを見ることによって、やはりこれが何の物質なのかということがわかります。このような対象は身のまわりにも結構あり、例えばホタテの貝殻は全然透過しないのでこれを反射で測定すると、きれいにテラヘル

ツ帯の3THzあたりで大きな反射が見え、炭酸カルシウムが主成分だということがわかります。

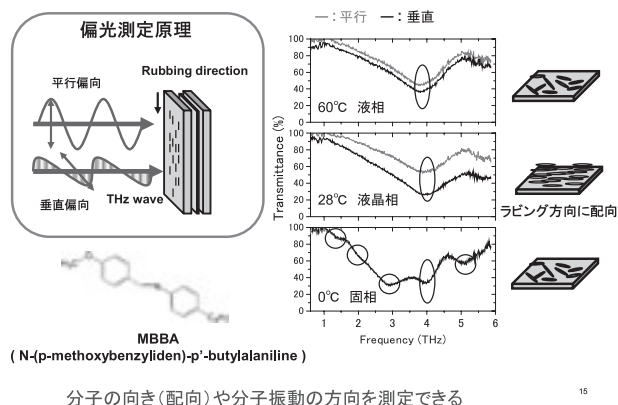
反射測定法



次は偏光測定です。普通の光というのは偏光方向が色々な方向を向いているのですが、レーザーになると、サインウェーブがこの面だけというような形で出すことができます。これを偏光と言います。我々の光源もその偏光がしっかりしているので、横の偏光をあてたものか、それとも縦の偏光をあてたものかによって、テラヘルツ波に対する物質の特性が変わってくるので、その物質の方向による差を見ることができます。これを非常に適用しやすいのが液晶と呼ばれるもので、例えば細長い分子が一定方向に並ぶかそれともバラバラに並ぶかで、一定の偏光方向の光を通したり通さなかったりします。そのようなこともテラヘルツ波で調べることができます。今回はMBBAという液晶を選んでおり、それが固体の状態から温度を上げていくと液体の状態になります。次の図のように固体だとテラヘルツ帯の吸収がたくさん見えているのですが、これが液晶層になってくると分子が一定方向にずっと並んでいるので、並んでいる方向に対して縦に光を入れた場合、横に光を入れた場合で、はっきり特性が変わってきます。さらに温度を上げていくと今度は液体になり、ばらばらなところを向いているというか、どんどん方向が変わっていて、ランダムな方向を向いています。液体では縦偏光でも横偏光でも、同じ特性にな

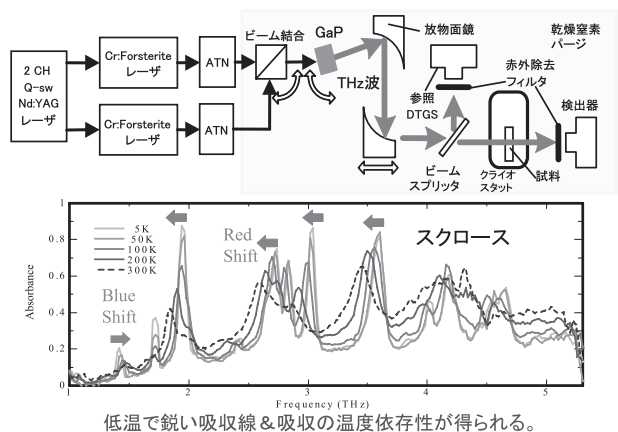
らなければいけないと思っていたのですが、予想に反して縦に入れた場合と横に入れた場合で少し差が出るということがわかりました。これはこの入れ物のごく表面側のところは液体であっても実は分子が整然と並んでいる、ということを示しているようです。

偏光測定法



その他に、分子振動の起因を調べる際などによく使われる方法が、試料を低温にするという低温試料測定です。

低温試料測定法



これは測定試料を極低温まで冷やせるクライオスタットの中に入れてしまうものです。先程も出ましたが、スクロールの温度特性をこのようにして調べますと、だんだん温度を上げていくにつれ吸収が低周波側にシフトしていくものと高周波側にシフトしていくものが見えます。

全反射分光法（ATR法）というものもあります。これは液体を感度よく測定する方法の一つです。例として測

Topic-1

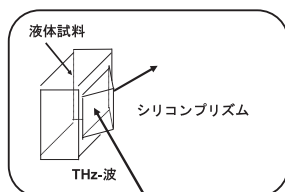
ったのがアルコールで、アルコールは次の図の右のようにC（炭素）が増えていくとメタノール、エタノール、ブタノール、プロパノールとなります。このCの数によって反射率が大きく変わるので、メタノール、アルコールといった種別がわかります。

全反射分光(ATR)法

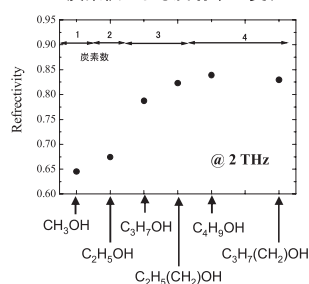
Attenuated Total Reflection(全反射分光法)

試料表面で全反射する光を測定

- ・試料表面を分析
- ・溶液の測定が可能



炭素価による反射率の変化



アルコールや油類の炭素価の識別が可能

ここからは実際にどのように使えるかを3例ほど説明します。1例目ですが、処方される薬の成分分析等に使うことができます。医者から処方された薬について薬局の薬剤師がその場で調合して渡す場合がありますが、その配合は人間が行っていることなので間違えることがあるそうで、これを簡単にチェックできる方法がないかというニーズがありました。紙の袋に処方薬が入ってもテラヘルツ波は紙を透過するので中身を見ることができます。市販の薬品である抗がん剤の一つを測ったのが次の図のテラヘルツのスペクトルで、これは透過率スペクトルになっており、横軸が周波数というのは先程と一緒にですが、縦軸は先程と違い上にいくほど透過が大きく下にいくほど光が透過しないという見方になります。例えば市販の抗がん剤に対して成分表の中にある成分の一つ、ウラシルというものがどのくらい入っているかわかります。ぴったり合わない部分を調べていくと、他の成分もわかります。これだけではなく町の薬局で売っているビタミン剤について測ってみたものを右のグラフに示しました。

テラヘルツ分光測定の利用例 1

— 透過法による市販薬品中の成分分析 —

・薬剤の成分分析

・光学異性体・結晶形のチェック

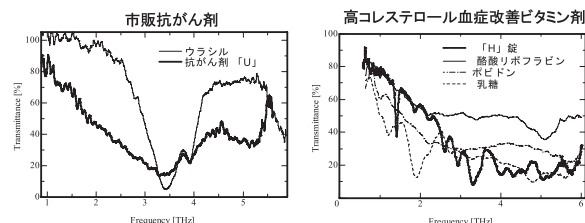
・薬剤の反応モニタリング

➡

・混合ミスのチェック

・異物混入チェック

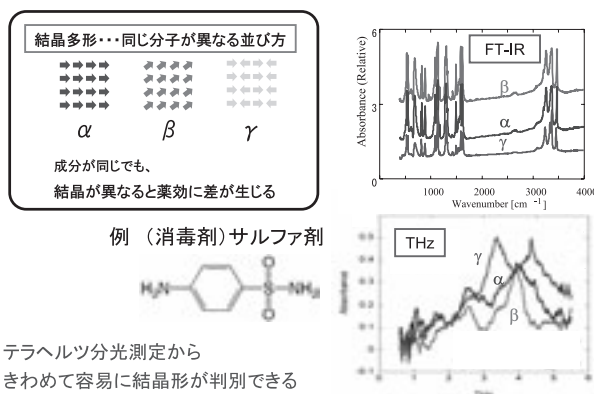
・新機能創薬



2例目ですが、薬剤でも結晶多形というものがあります。薬において結晶形が違っていると、例えば飲み薬を飲んだときの溶けやすさが違ってきます。結晶形を変えて溶けにくくすると、飲んだ後に胃あるいは腸の中に入ってから溶けて効きたいところに効いてくれたり、持続時間が長くなるということがあるので、これは重要なパラメータだそうです。次の図はこの例を示したものです。サルファ剤という物質は消毒剤で使われているものですが、この物質については α 、 β 、 γ と3種類の結晶形があり、それらについて従来法で測ってみるとほとんど差が出ません。ところがテラヘルツ波で測るとその差が一目瞭然となります。

テラヘルツ分光測定の利用例 2

— 透過法による多形分析 —

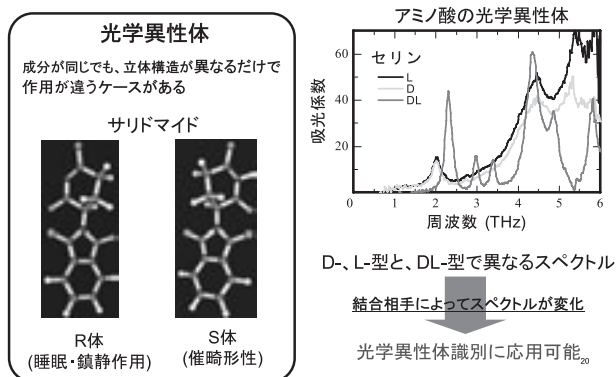


テラヘルツ分光測定から
きわめて容易に結晶形が判別できる

3例目ですが、光学異性体というものがあり、薬にとって重要な要素となります。皆様もご存知とは思いますがサリドマイドという薬があり、分子が次の図のような形をしています。これが光学異性体というものを持っています。そのうちの一方が鎮静剤や抗がん剤に使われているのですが、もう一方については妊婦が薬を使用するとその子供に影響が生じてしまう可能性があります。この2つを完全に分けて供給できなかったことが、かつて薬害をもたらしたということになります。テラヘルツ分光を使えばそれがわかります。サリドマイド自身は測定していないのですが、例えばアミノ酸の一つであるセリンというもので測ると、図の黒線のようなスペクトルが出ます。しかし、ちょっとでもR体に対してS体が入ってくると、まったく違うスペクトルとなり、つまり光学異性体が混ざっているかどうかわかります。

テラヘルツ分光測定の利用例 2

ー透過法による光学異性体ー



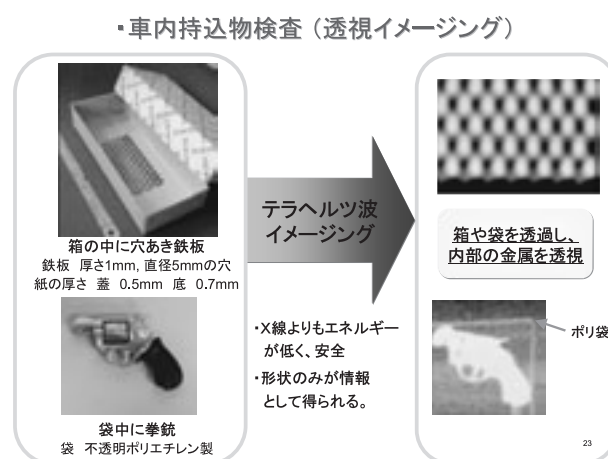
3. 鉄道応用の基礎研究

次にこの技術を用いた鉄道応用について報告します。
検討したのは次の図のような内容です。

鉄道応用分野の検討

- セキュリティ分野
 - 車内持込物検査
 - ガス検出
 - 切符・印刷物の偽造防止
- メンテナンス分野
 - ゴム・プラスチック部品の劣化判定
 - 座席の状態検査
 - 油脂類の品質管理
 - 探傷検査

まずセキュリティ分野について説明します。最初の車内持込物検査の件ですが、例えば次の図のような紙の箱の中に穴あき鉄板を入れておきテラヘルツで見ると、内部の金属を透視した形で見ることができます。また拳銃を不透明なポリエチレンの袋に入れてテラヘルツ波で見ると拳銃の形がシルエットで出てきます。これはX線と同じような効果ですがX線よりはエネルギーが低いので安全といわれています。

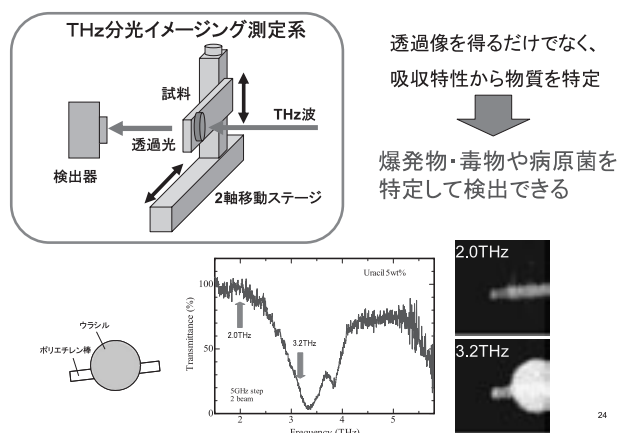


テラヘルツ波のもう一つの特徴は、成分までわかることです。例えば次の図のようなスペクトルを持っている物質があったとします。これは3.2THzのところで吸収が大きくなっています。3.2THzで見るとそのものが見え、他の周波数のテラヘルツ波で見ると何も見えないということになり、先程のように何かの中に隠してテラヘルツ

Topic-1

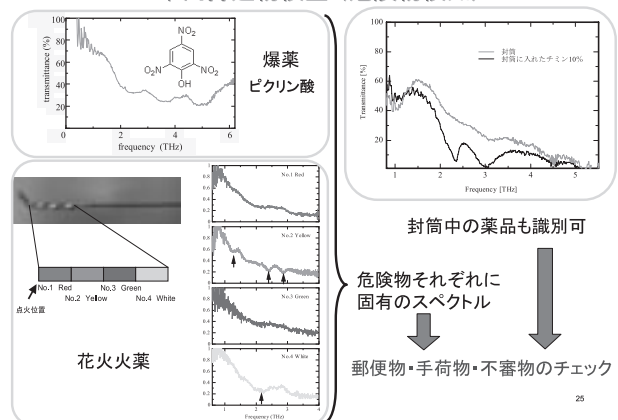
の分光イメージングをすると形が見えるだけでなく、物質が何であるかというところまでわかります。

・車内持込物検査（THz分光イメージング）



例えば爆薬について我々が手に入れられるものでピクリン酸というものがあり、これはテラヘルツ帯に吸収スペクトルを持っているので、判別ができるようになります。また容易に手に入るものでは花火の火薬を試しました。火をつけるとだんだん赤から黄色、緑、白と色が変わっていく4色花火を使いましたがそれぞれ固有の特徴的なスペクトルを検出することができました。また封筒の中に物が隠されていても、図のように封筒のスペクトルに重なって内容物のスペクトルもきちんと出てくるので、中に入っているものを見ることができます。

・車内持込物検査（危険物検知）



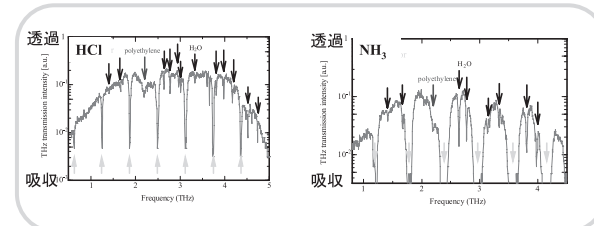
ガス検出についてもテラヘルツを利用することができます。例えば次の図は、塩酸とアンモニアという刺激臭

のあるガスの検知について示したのですが、これはテラヘルツ帯にスペクトルを持っていて周期的に吸収があるというのが特徴です。塩酸とアンモニアで違うところに吸収が出てくるので、例えば1点で測ればそれが塩酸かアンモニアかを判別することができます。従来は吸着式的气体センサを使っていますが、そういった反応が必要となるようなセンサに比べて、スペクトルで見ただけなので瞬時に測定することができます。車内の定常的な環境チェックに利用できますし、またテロの際に危険ガス・サリン等が散布された場合、それが何であるかをモニタすることができます。

・ガス検知（センシング）

テラヘルツ波センシングの特徴

- ①気体分子固有のスペクトルがテラヘルツ帯域に存在する
- ②吸着式ガスセンサと異なり、大気中のガスを瞬時に識別・感知可能



テラヘルツ波センシング

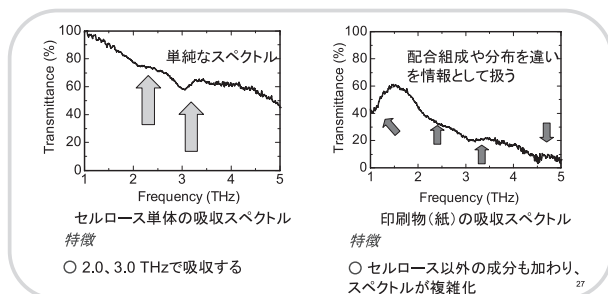
- ・刺激性の強い臭い等について、車内空調の高精度モニタを行う。
- ・危険性ガス等によるテロなどに迅速な対応を可能とする。

安全で快適な空間を提供

切符・印刷物の偽造防止についてですが、紙の主体成分であるセルロースを測定すると2THzと3THzのところで吸収が特徴的に出てきます。この中へさらに何か混ぜてみると、印刷物つまりインクがついているといったイメージになりますが、そのスペクトルを測ると紙のスペクトル以外のところに吸収ができます。つまり何か混ぜものをするとテラヘルツ帯に特徴が出ることになり、これを暗号にすると分析ができないものとして偽造されず、認証ができるのではないかと考えています。

・切符・印刷物の偽造防止①（物質配合）

切符や定期券、プリペイドカードに印字・磁気以外で情報を識別する技術
 ・紙やプラスチックの中にテラヘルツ波吸収物質を配合し、
 吸収する物質の配合組成やスペクトル分布を情報として認識する。
 ・配合は容易だが、分析して模倣することは技術的に困難なため、
 偽造されにくい。

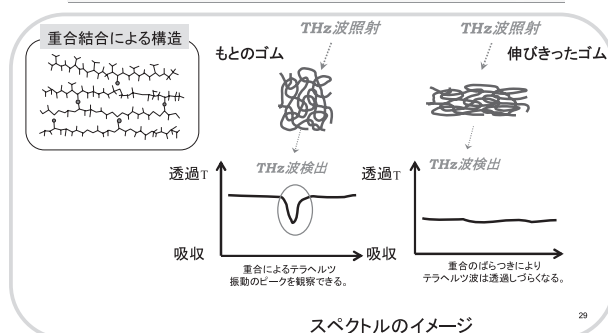


次にメンテナンス分野について説明します。

ゴム・プラスチック部品の劣化判定についてですが、
 例えばゴムは引っ張っているときとそうでないときでス
 ペクトルが変わってきます。引っ張っていると分子と分
 子の間が離れるのでテラヘルツ帯でその違いを見ること
 ができると思います。

・ゴム・プラスチック部品の劣化判定

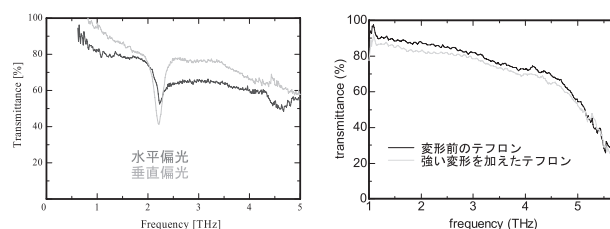
・ゴムやプラスチック材料は、多数の基本分子が重合結合した構造。
 ・劣化はこれらの結合の断絶や置換によって引き起こされる。
 ・テラヘルツ波により劣化の進行程度を調べる、新しい計測技術。



次の図で示したのは、ポリエチレン樹脂について引っ
 張り試験をした結果ですが、引っ張った方向と引っ張っ
 ていない方向とで2種類別の特徴が出てきます。それにつ
 いてテラヘルツ波の偏光方向を引っ張り方向に対して垂
 直にしたり平行にしたりして測定するとスペクトルが変
 わってきます。これにより樹脂が圧迫されるような力学的
 なダメージが入っているかを診断するときに使えると思
 われます。テフロンという物質についても、曲げたり

伸ばしたりを繰り返すとそれだけでもスペクトルが変わ
 ってきますので、他にも色々な使い道があるのではない
 かと考えています。

・ゴム・プラスチック部品の劣化判定 （変形による影響）



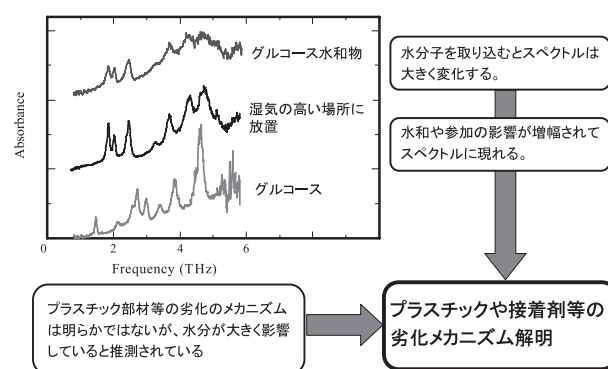
ポリエチレンを引き伸ばし
 偏光スペクトル測定
 ⇒ 水平偏光と垂直偏光で差がある

厚さ1mmのテフロンを
10回折り曲げた前後で透過測定
 ⇒ 3～6% 透過率が減少

樹脂部材の変形、変質、疲労の検査に応用できる

もうひとつ劣化について説明します。例えばゴム・プ
 ラスチックに紫外線が当たってだんだん化学的に変化し
 たりといったときにも、その変化を検出できます。グル
 コースを普通の環境に置いておくと勝手にスペクトルが
 変わっていきます。これはグルコースの水和というもの
 で、水分子が取り込まれていった結果、スペクトルが変
 化します。つまり水が少しでも入っていると、その影響
 が増幅されて、テラヘルツ帯のスペクトルが大きく変化
 するのです。一方で、プラスチック部材や接着剤につい
 ては劣化のメカニズムがよくわかっていない面があり、
 これを調べたいというニーズもあります。このようなニ
 ーズとテラヘルツ分光というシーズを加え合わせることで

・ゴム・プラスチック部品の劣化判定 （水和の影響）

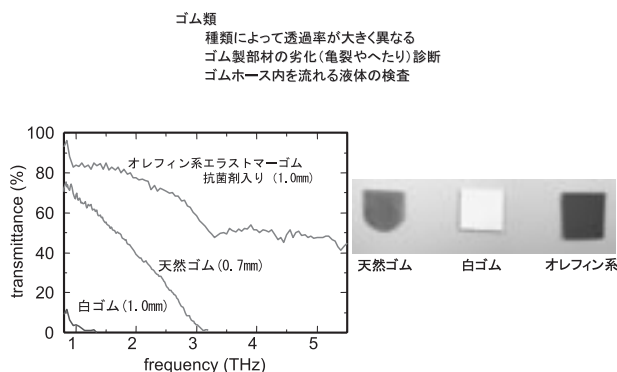


Topic-1

によって、接着剤等の劣化のメカニズム解明等につながっていくのではないかと考えています。

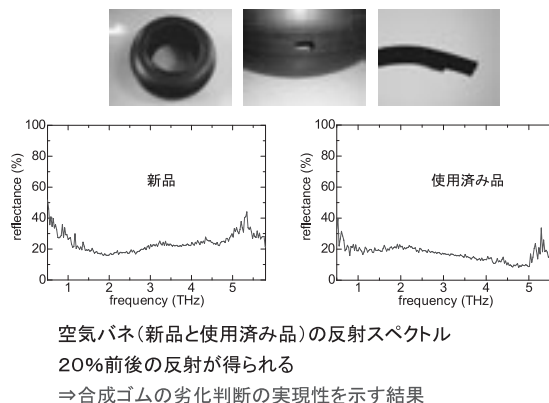
ゴム・プラスチックをいくつか測定した例を示します。測定には3種類のゴムを用意しました。白ゴムは低い周波数のところで非常に吸収が大きくなっています。実際はわずかにテラヘルツ波が透過しているくらいです。ただしもっと低い周波数にすれば大きく透過するので例えばこのゴムの奥にあるもの等も見ることができます。天然ゴムではさらに透過が大きく、特に低周波側は中を見やすくなります。もうひとつのエラストマーゴムというのは特徴的で、3.3THzくらいのところで吸収ピークが見えます。これを伸び縮みさせると、変化する様子が見えると思いますし、この特性を使うと、劣化の様子もみることができます。それ以外にも例えばゴムの中に入っている液体の様子を見ることもできます。

・ゴム・プラスチック部品の劣化判定 (ゴム類のテラヘルツ透過スペクトル)



また車両用の空気バネを頂き、反射で測定を行いました。次の図のような空気バネの一部を切り取り、新品と使用済のものについてスペクトルを測ると高周波側で反射率が20%程度変わってくるので、新品かどうかの区別ができると思われます。

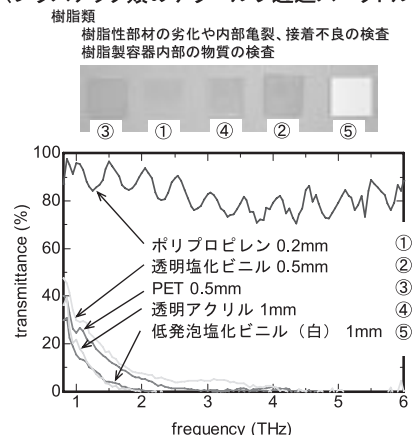
・ゴム・プラスチック部品の劣化判定 (車両用空気バネのテラヘルツ反射測定<非破壊的>)



33

次はプラスチックですが、5種類について測定した結果を次の図に示します。特徴的なのがポリプロピレンで、透過が大きすぎて図のようなグラフになります。このシートは表と裏で反射しやすく、反射したテラヘルツ波同士が強めあったり弱めあったりしています。

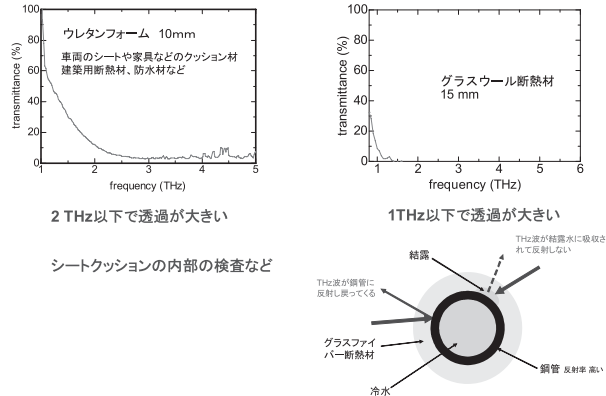
・ゴム・プラスチック部品の劣化判定 (プラスチック類のテラヘルツ透過スペクトル)



座席の検査などを考えた場合、ウレタンフォームがクッション剤として使われているようですが、これについて調べると次の図の左のグラフのように低周波側になって透過率が大きくなるので、座席の中は低い周波数を使うと見ることができます。断熱材のグラスウールなども低い周波数で透過率が大きくなるので、例えば次の図の右下のように鉄管の周りによく断熱材が巻かれています。中の物質の変化(結露等)をテラヘルツの低い周波数を使って見ることができます。

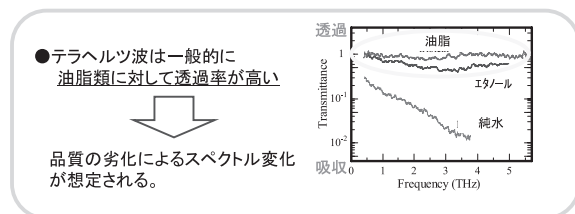
・座席の状態検査

(クッション材・断熱材の内部検査＜非破壊的＞)



テラヘルツ波は油脂類の品質管理にも利用することができます。水はなかなかテラヘルツ波を通しにくい性質ですが、油やアルコールは比較的よく通るのでアルコールの中身なども見るすることができます。

・油脂類の品質管理(センシング)



潤滑用油脂の劣化状態の定量評価

テラヘルツ
分光

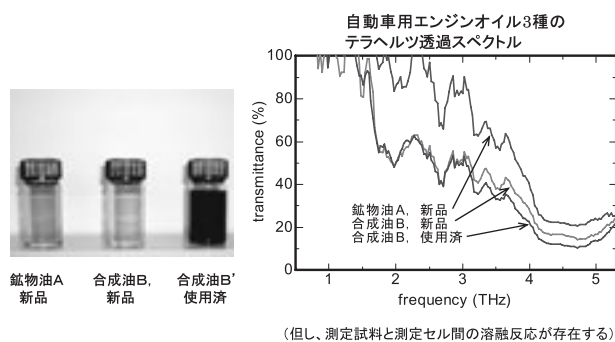
潤滑油交換時期の
適正

廃棄物の低減
劣化潤滑油の使用回避

自動車用のエンジンオイルについて鉱物油・合成油を比較してみると透過率が随分違うことがわかります。また新品と使用済の合成油で見ると高周波側で差が出てきます。

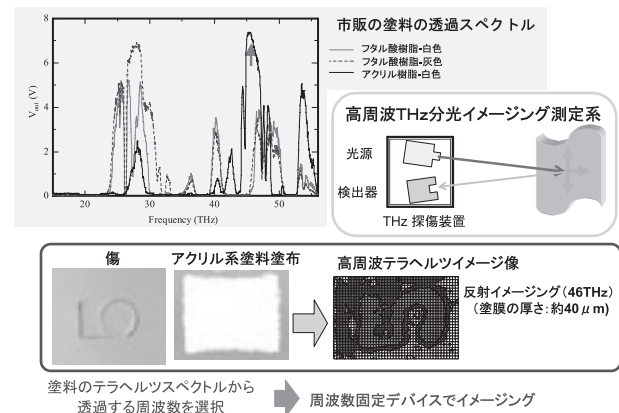
・油脂類の品質管理

(エンジンオイルのテラヘルツ吸収スペクトル)



最後になりますが、塗料の下の傷を見ることもできます。塗料自身がテラヘルツ帯を吸収するため、例えばフタル酸樹脂塗料とアクリル樹脂塗料と調べてみると、アクリル樹脂塗料については46THzで塗料の裏側まで見るができます。次の図にあるように5という数字を横にした傷を付けてその上にアクリルの塗料を塗っても、反射でイメージング測定すれば目には見えないものが見えます。このようなアプリケーションもあります。

・探傷検査



ここまでの、GaP（ガリウムリン）テラヘルツ信号発生装置の紹介と、これを用いた高性能なテラヘルツ分光測定の結果、また多種多様な測定対象に対応することができる測定方法と、さらに鉄道応用について次の図のような検討を行った結果を報告しました。次の段階では、より実用化に向けてこれらの結果を発展させようと考えております。

まとめ

- ・ GaPテラヘルツ信号発生装置により、高精度なテラヘルツ分光測定を行った。
- ・ 多種多様な測定対象に対応することのできる、透過や反射などの各種測定技術を確認した。
- ・ 鉄道応用への展開を検討し、下記の項目を実施した。

評価対象	適用技術	結果	今後の課題
樹脂・ゴム・接着剤・油脂	テラヘルツ透過・反射分光、偏光分光	スペクトルデータベースを作成し、材質毎に測定方法の選択が可能となった	樹脂・ゴムの劣化や接着剤の経時変化のモニタへの適用可能性評価
爆発物・可燃物・危険ガスの検知・識別	高分解テラヘルツ分光 ATR分光	爆発物・危険ガスの検知、アルコールの種類判別が可能	・より具体的な毒劇物・危険物への適用 ・大気中水蒸気の効果除去
塗装膜及び塗装下探傷	高周波テラヘルツ分光イメージング	周波数選択により、各塗装膜の評価、および塗装膜下探傷が可能	高速測定化

- ・ 次の段階では、より実用化に向けてこれらの結果を発展させる。