

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
成 果 報 告 レ ポ ー ト
No. 22-4

研究テーマ

新たな超高周波電磁波を用いた道路構造物欠陥診断の研究開発

研究代表者：東北大学教授 小山 裕
共同研究者：東北大学教授 久田 真
東北大学准教授 田邊 匡生
東北大学助教 齋藤恭介

平成26年6月

新道路技術会議

目次

内容

| | |
|--|----|
| 研究概要 | 1 |
| 第1章 はじめに | 3 |
| 1-1 コンクリート構造物等における非破壊検査の現状 | 3 |
| 1-2 構造物非破壊検査法 | 3 |
| 1-3 テラヘルツ波およびそのイメージング応用 | 4 |
| 1-4 テラヘルツ発振器 | 5 |
| 1-5 テラヘルツ検出器 | 7 |
| 1.6 共焦点光学系 | 8 |
| 1-7 本研究の目的 | 10 |
| 第2章 国内・海外の既存研究状況 | 11 |
| 2.1 はじめに | 11 |
| 2.2 国内の研究状況 | 11 |
| 2.2.1 コンクリート表層クラックに対するミリ波イメージングシステムの開発 | 11 |
| 2.2.2 電線シールド金属表面の腐食状態のテラヘルツイメージングに関する基礎的研究 | 12 |
| 2.2.3 東日本大震災による被災家屋の電磁波計測ケーススタディ集の提供 | 13 |
| 2.2.4 人体および物体から放射されるミリ波の受動イメージング装置の開発 | 14 |
| 2.3 海外の研究状況 | 15 |
| 2.3.1 炭素繊維強化プラスチック(CFRP)で被覆された橋梁コンクリート表面の密着性の診断 | 15 |
| 2.3.2 塗膜下の鋼板表面の腐食状態の診断 | 17 |
| 2.3.2 スペースシャトル燃料タンク用発砲断熱材とタンク表面に存在する空隙の検出 | 18 |
| 2.3.2 ミリ波レーダーによる空港滑走路上の異物の検出に関する基礎研究 (LEAT France, ENRI:Japan) | 18 |
| 第3章 テラヘルツ波による道路構造物欠陥イメージング調査実験 | 20 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3-1 | テラヘルツ発振器と検出器の整備 | 20 |
| 3-2 | 透過測定 | 21 |
| 3-3 | 反射測定 | 21 |
| 3-4 | テラヘルツ光源の高安定化 | 22 |
| 3-5 | 検出器信号取得ソフトウェアの高機能化 | 23 |
| 3-6 | さび模擬供試体作成のための供用コンクリート PC 橋及び鋼橋の外観調査 | 23 |
| 3-7 | かぶり 40 mm 超の埋設鉄筋供試体の作成 | 24 |
| 3-8 | 二種類の異形鉄筋を配筋したコンクリート供試体のテラヘルツイメージング | 25 |
| 3-9 | コンクリート埋設腐蝕鉄筋撮像についてのまとめ | 26 |
| 3-10 | テラヘルツ波のコンクリート透過特性 | 26 |
| 3-11 | コンクリート試験体透過強度の周波数依存性 | 28 |
| 3-12 | コンクリート構造物中の空洞欠陥イメージング | 28 |
| 3-13 | コンクリート中の異物のテラヘルツイメージング | 28 |
| 3-14 | コンクリート内部の模擬鉄筋イメージング | 29 |
| 3-15 | テラヘルツ波透過率の周波数依存性 | 30 |
| 3-16 | 塗装膜下の金属構造物亀裂の検出 | 30 |
| 3-17 | コンクリートへの水の浸潤測定 | 32 |
| 3-18 | セラミックタイルの接着不良欠陥 | 33 |
| 3-19 | 模擬赤錆供試体（鉄酸化化合物）を用いた さび化合物のテラヘルツ透過特性 | 33 |
| 3-20 | 鉄さびのテラヘルツ波反射透過特性 | 34 |
| 3-21 | コンクリートに埋設したさび鉄骨材料のテラヘルツイメージング | 36 |
| 3-22 | グラウト空隙の浸水（融雪剤混入水）検出 | 36 |
| 3-23 | 融雪剤塩化カリウム水溶液のテラヘルツ波反射特性 | 37 |
| 3-24 | ラウトの充填不良を模擬したコンクリート空隙中の融雪剤水溶液検出 | 37 |
| 3-25 | 錆進行度の色分析による定量化 | 38 |
| 3-26 | コンクリートの透過率（低周波テラヘルツ） | 39 |
| 第 4 章 | 実験結果から得た所見 | 40 |
| 4-1 | かぶり 40mm でコンクリート埋設鉄筋の腐蝕状況を把握。 | 40 |
| 4-2 | テラヘルツ波のコンクリート透過特性 | 40 |
| 4-3 | コンクリート埋設鉄構造物の腐蝕程度の非破壊測定 | 40 |
| 4-4 | コンクリート構造物内の空洞可視化 | 41 |

| | | |
|------|-----------------------------------|----|
| 4-5 | コンクリート構造物内の異物検出 | 41 |
| 4-6 | 目に見えない塗装膜下の金属表面のさび可視化 | 41 |
| 4-7 | コンクリート内部への水の浸潤可視化 | 41 |
| 4-8 | セラミックスタイルの接着不良検出 | 41 |
| 4-9 | グラウト空隙の浸水（融雪剤混入水）検出 | 42 |
| 4-10 | エクストラドーズド鋼橋等の外ケーブル健全度診断への応用 | 42 |
| 第5章 | まとめ（今後の道路政策への提言など） | 43 |
| 参照 | | 44 |
| | 研究成果の発表状況 | 44 |
| | 研究成果の社会への情報発信 | 46 |

研究概要

【様式 3】

「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」(平成 23 年度採択) 研究概要 (イメージ)

| 番号 | 研究課題名 | 研究代表者 |
|---------|------------------------------|--------------|
| No.22-4 | 新たな超高周波電磁波を用いた道路構造物欠陥診断の研究開発 | 東北大学 教授 小山 裕 |

道路構造物の安全性向上を実現するため、超高周波電磁波を用いた新方式による道路構造物欠陥の非破壊検査方法の適用可能性と適用限界を調査することを研究目的として、各種コンクリート埋設構造物欠陥供試体を作成してテラヘルツイメージングを実施する研究開発。

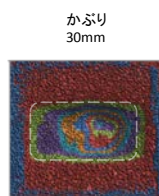
1. 研究の背景・目的

光と電波の中間の周波数帯に当たるテラヘルツ(Tera Hertz)波とは、 10^{12} ヘルツ周波数を意味し、現在の携帯電話使用周波数より数 100 倍から数 1000 倍高い周波数の電波である。近年、小型で実用的な種々のテラヘルツ光源の開発に成功し、その応用範囲も拡大しつつある。テラヘルツ波が持つセメント・コンクリートの高い透過性や人体に無害であること、そして金属には反射され、水に吸収されるという他の波長の光や電波には無い特徴を生かす応用として、安全に作業性高く実施出来る道路構造物の内部欠陥検査への適用可能性が高まったので、本研究開発課題に想達した。テラヘルツ波研究は世界的にも端緒についたばかりであり、道路構造物を構成する材料の基礎的なデータが整備されていない。本研究では、テラヘルツ帯での道路構造物材料データベースを構築し、模擬的な欠陥を含む供試体のイメージング可能性を調査する。

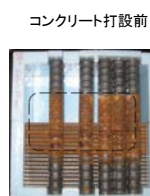
2. 研究内容 (研究の方法・項目等)

道路構造物内部の欠陥を非破壊で検出する新規な手法を開発する事が目的である。そのため、これまで殆ど使われなかった透過性が高く人体に安全な新しい光である独自の超高周波電磁波(テラヘルツ波)を用いて、作業性が高く安心・安全で高精度な構造物欠陥検出方法の実用化を目指して、テラヘルツ帯の材料特性データベース及び道路構造物内部の欠陥を模擬した試験体の計測結果を踏まえ、高出力光源を備えた可動型の計測ヘッドによる高速測定を可能にする診断装置を開発する。それを用いて、各種コンクリート埋設構造物欠陥イメージングを行い、その適用可能性と適用限界について調査を行う。

3. 研究成果



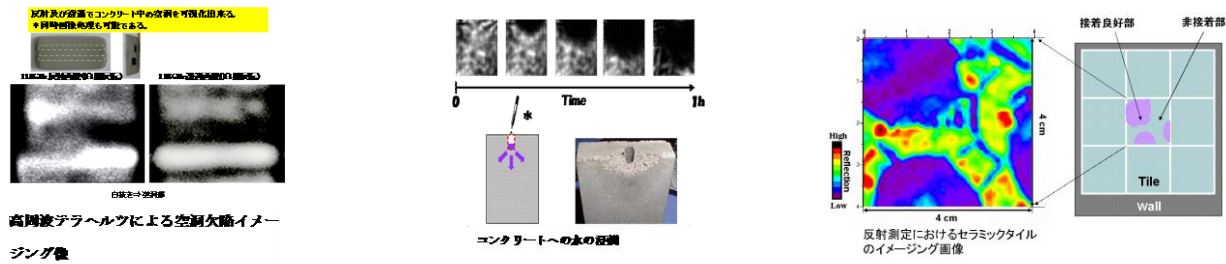
イメージング像 (D6とD22鉄筋)
点線内が赤錆領域



コンクリート打設前の鉄筋の配筋状況。
点線内領域が赤錆領域となる。

かぶり 40mm 以下のコンクリート埋設鉄筋の腐蝕領域を撮像することに成功した。しかし、かぶり 50mmを越えるとテラヘルツイメージングは困難であった。

テラヘルツイメージングは、各種コンクリート構造物欠陥の撮像に成功した。例として、コンクリート中の空洞、コンクリート中の水の浸潤、セラミックスタイルの接着不良部検出等を示す。



4. 主な発表論文

学術論文

テラヘルツ波の非破壊検査応用.[日本工業出版 検査技術,18(5), (2013), 1-5]高橋星也、小山裕

Observation of damage in insulated copper cables by THz imaging, NDT & E International, Volume 61, January 2014, Pages 75-79, Seiya Takahashi, Tomoyuki Hamano, Kaori Nakajima, Tadao Tanabe, Yutaka Oyama

学会発表 国際会議

SUB-TERAHERTZ INSPECTION OF DEFECTS IN BUILDING BLOCKS, Yutaka Oyama* and Kyosuke Saito, First International Conference on Advances in Structural Health Management and Composite Structures (ASHMCS2012) 2012年8月28日-31日, 韓国 全州市, Chonbuk National University (CBNU) in Jeonju, Jeonbuk, South Korea.

出崎光, 田邊、小山, Joint Symposium on Materials Science and Engineering 2011, Nanyang Technological University Singapore, 2011.6.18, Material science and technology as a basis for device realization for THz, Oral

仮屋英孝, 佐藤、田邊、齋藤、西原、谷山、小山, Honolulu Prime 2012_The Electrochemical Society, Hawaii Convention Center and the Hilton Hawaiian Village, 2012.10.7~10.12, Non-Destructive Evaluation for Evaluation for Corroded Metal Surface Using Terahertz Wave, Poster

仮屋英孝, 齋藤、山形、田邊、小山, Honolulu Prime 2012_The Electrochemical Society, Hawaii Convention Center and the Hilton Hawaiian Village, 2012.10.7~10.12, Application to Non-Destructive Inspection of Copper Corrosion via Coherent Terahertz Light Sources , Poster

国内会議

高橋星也, 中村、田邊、前田、中嶋、浜野、小山, 電子情報通信学会・電子デバイス研究会, 東北大学電気通信研究所, 2013.12.16~2013.12.17, テラヘルツ波方式による絶縁被覆電線の素線断線可視化技術 など

5. 今後の展望

本研究成果は、コンクリートを主体とする道路構造物欠陥検査に留まらず、広く木材や樹脂等の非極性物質に埋設された金属構造物の腐蝕や破壊劣化等の検査に適用する事が出来る。例えば、現在有効な検査方法が無いと言われているエクストラドーズド鋼橋等の外ケーブル検査である。樹脂に対する高い透過性と内部金属からの高い反射そして反射特性が腐蝕状態に敏感に反応するテラヘルツ波の特性を高度に利用する事で、画期的な検査手法が確立されるものとする。

6. 道路政策の質の向上への寄与

現段階では具体的に実務への反映を行うためには適用限界があり、装置構成の改良が必要であるので、更に基礎的な側面を調査する必要がある。しかし、本研究は、道路構造部検査への、これまでと全く異なる新規な検査手法の可能性を示したものであり、その寄与は大きいと考える。

7. ホームページ等

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~denko/lab.html>

第1章 はじめに

1-1 コンクリート構造物等における非破壊検査の現状

セメント・コンクリートの起源は古くエジプト・ローマ時代まで遡り、現在まで数多くの研究がなされてきた。科学的な手法による研究は赤外分光やカロリメトリ的手法等によって行なわれ、その結果、微視的なセメント・骨材水和反応過程の解明と強度形成過程が解明された。さらに、それにより得られたデータに基づいて経験的に強度・劣化の状況が把握され、十分な強度を持つ工程管理がなされたコンクリート構造物が作成されてきたわけである。

しかし、近年その経験則が脅かされる事態が多く発生している。1960年代に建造された米国ミネアポリスの橋梁崩壊は記憶に新しいが、日本の援助で建造していた海外で建造中の橋梁崩壊や、国道7号線の本庄市の橋梁破壊、北海道や九州のトンネル内壁崩落等、コンクリート構造物の崩壊事故が多発している。そのため、世界的に強度劣化調査が行われているが、その手法は人体に危険なX線や γ 線を用いた透視や、コア抜きによる破壊的な手法に頼っているのが現状である。コンクリート構造物中の鉄筋構造の把握には高周波誘導電流法が用いられ、安価で容易にコンクリート中の鉄筋を特定することができる。しかし、更に厳密な鉄筋の二次元的構造を把握するためには、X線や γ 線といった放射線源を用いた方法

が適用されている。このような背景を受けて、非破壊で構造物欠陥あるいは劣化の程度を安全に高精度で把握する手法に対するニーズは大変高まっており、市場的にも計り知れないものが継続的にあると考えられる。

1-2 構造物非破壊検査法

構造物の健全性評価は、内部および表面に存在する欠陥や劣化部分を検出し、材料が構造物の重量を支えるのに十分な機械的強度を有しているかを調べることにより行われる。欠陥が表面に現れている場合など、劣化部分が明瞭な場合は目視による検査が可能であるが、材料内部に存在する欠陥に対しては、機械試験や非破壊試験を行う必要がある。

機械試験では、試験片を材料から切り出した後、引っ張り試験、曲げ試験、および衝撃試験を行い、試験片に加えられた荷重によって生じた変形や、破壊時の荷重を検査することによって材料の機械的強度を評価する。すなわち、機械試験では試験片の試験結果により試験対象全体の性質を予測する。このような破壊による検査方法では、構造物の健全性に影響を与える可能性がある。

一方、非破壊試験では、超音波や電磁波等の媒体を材料内部へ伝播させ、伝播の仕

方の異なる部分を検出する。媒体の伝わり方の違いは物体内における物理的性質の変化により生ずるものであり、そのような変化が起こっている部分を欠陥とみなす。ここでの物理的性質とは、具体的には、誘電率、透磁率、電気抵抗、音響インピーダンス等のことを指す。非破壊試験を実施することによって、破壊試験で検査するよりも広範な部分（試験法によっては全体積）を、傷つけることなく評価することが可能である。

従来行われてきた非破壊試験法には、放射線透過試験、超音波探傷試験、電磁波レーダー法等がある。放射線透過試験では、X線またはγ線を検査対象物に照射し、透過放射線の強度分布をフィルム等により可視化して観察する。波長の短い電磁波を用いているため、広範囲を短時間かつ高解像度で検査可能であるが、人体に非常に有害であるため、厳密な養生の必要性から作業性が悪く、高所での検査はほとんど行われていないのが現状である。また、現実には透過による検査は実施が極めて困難である事が多い。超音波探傷試験では、探触子（超音波の発信、受信を行う圧電振動子）を試験体の表面上で走査し、欠陥から反射してきた超音波を受信することで欠陥検出の検出を行う。超音波を用いていることで人体には無害であり、さらに最近の研究によって、閉じたき裂の検出も可能になっている。

しかしながら、超音波を用いた非破壊検査法では、構造物内部の鉄筋やコンクリートに含まれる砂による散乱が問題であり、作業者が検査に習熟している必要がある。さらに、コンクリートに使用される材料の品質や構成比率は建造物あるいは部材によって異なるため、超音波の伝播速度にばらつきが生じてしまうという欠点も存在する。電磁波レーダー法は、送信アンテナから放射した電波が鉄筋や空洞など比誘電率の異なる界面で反射されるとき、受信アンテナに届くまでの時間を計測して深度を算定する手法である。測定可能な深さは15cm程度までで、1GHz前後の周波数の電磁波を使用する。ただし、コンクリート部材は、コンクリートと鉄筋（または鋼材）から成り立つ複合材料であり、鉄筋量は測定箇所によって必ずしも一定でないことが電磁波レーダー測定範囲を限定してしまう。

いずれの方法も特有の長所・短所を有しており、あらゆる対象に対して精度よく試験を行える方法はない。したがって、非破壊検査においてはその背景にある物理的意味を十分理解し、試験対象の材料、存在すると考えられる欠陥の種類、試験環境等を総合的に考慮した上で試験を行っていくことが重要である。

1-3 テラヘルツ波およびそのイメージング応用

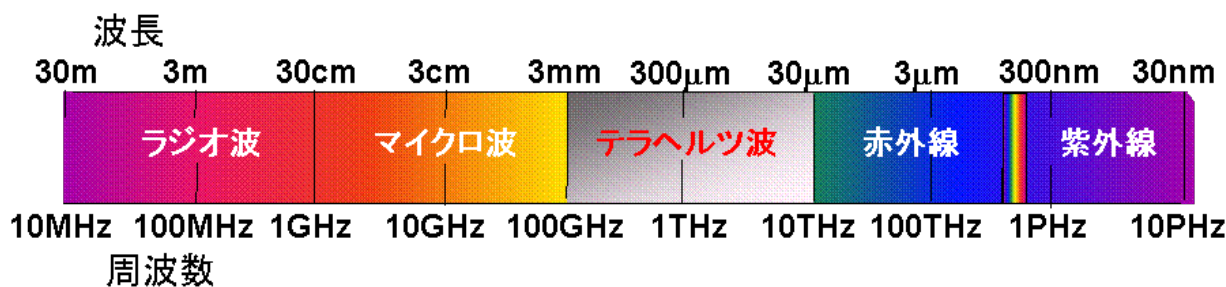


図 1.1 各波長・周波数帯における電磁波の名称。テラヘルツ波は 0.1 THz から 10THz 程度の周波数領域に属する。

テラヘルツ波は 0.1 THz から 10 THz 程度の周波数を有する電磁波であり（図 1.1），その周波数帯は分子振動，分子間相互作用，固体の格子振動などの現象のエネルギー領域と一致することから，物質の様々な情報を反映させることが可能である。テラヘルツ帯は発生・検出の困難性から「未踏の電磁波領域」とされてきたが，近年の研究による急速な技術改新によって，テラヘルツ波応用の実用化が進められている。

テラヘルツ波の応用分野は，工業，医療，バイオ，農業，セキュリティなど多岐にわたるが，本研究では，道路等のコンクリート構造物内部の欠陥のイメージング応用に着目している。テラヘルツ波はちょうど電波と光波の中間に位置するため，電波の透過性を有しながらも同時に高解像度の撮像を実現することが可能である。さらに，光波のようにレンズやミラーで光路を操作することもできるため，イメージング光源として期待されている。テラヘルツ波の周波数は 0.1~10 THz 程度であるため，X 線や γ 線に比べてエネルギーが極めて小さく，

人体への害が少ないということも安全で作業性が高い計測を行う上での大きな利点である。また，テラヘルツ帯には水や様々な有機物の指紋スペクトル（吸収スペクトル）が存在するため，その性質を利用したユニークな応用の可能性も示されている。水に対しての高い吸収特性を利用した例として，植物の葉に含まれる水分量の計測などが行われている。また，逆に水への吸収が小さい波長領域を用いることによって，霧や小雨などの悪天候に影響されずに目標物をイメージングすることも可能である。

1-4 テラヘルツ発振器

テラヘルツ波発生の提案は 1963 年に西澤により半導体や誘電体のフォノンを励起・振動させることによるテラヘルツ帯の電磁波の発生や周波数変換の可能性が示された。その後，この提案を受け，1980 年に西澤と須藤は半導体による誘導ラマンレーザーの発振を実現した。この方法では励起源として YAG レーザーを利用しており，光波側からのテラヘルツ帯へのアプローチである。このような光波からのアプローチには，他に，差周波発生法，パラメトリック

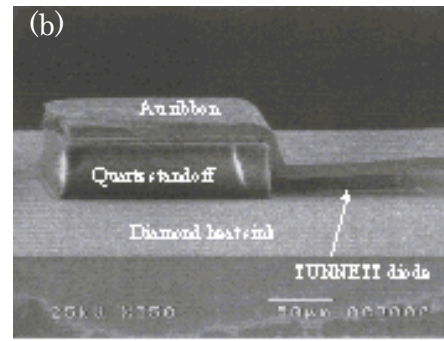
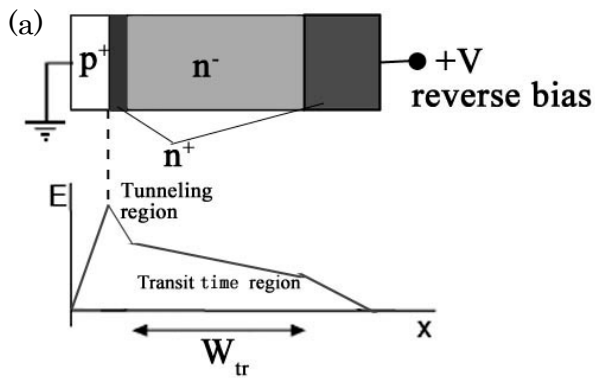


図 1.2 タンネットダイオードの構造：(a) 模式図および内部電界，(b) ダイヤモンドヒートシンク上にボンディングされたタンネットダイオード

発振器による発生法，光伝導アンテナなどがある。

一方，電子デバイスの高周波限界を破ることでテラヘルツ波を発生する方法も存在し，これは電波側からのテラヘルツ帯へのアプローチであると言える。そのひとつに，1958年に提案されたタンネット

(TUNNETT : TUNNEL injection Transit Time effect) ダイオードがある。

タンネットダイオードは走行時間効果を用いた負性抵抗ダイオードであり，走行キャリアの生成源としてトンネル注入を利用している。そのため，低電圧・低雑音の特性を有し，高周波領域での発振において有益な小型電子デバイスとして期待されている。

図 1.2 にタンネットダイオードの構造を示す。タンネットダイオードの発振特性はキャリアが走行領域を通り抜ける周期で決まる。その発振周波数は走行領域の厚さに逆比例し，原理的には以下のように表される。

$$f_{osc} = 3v_s / 4W_{tr} \quad (1)$$

ここで， v_s は飽和ドリフト速度， W_{tr} は走行領域の厚さである。上記の式の中に温度項が含まれていないことからわかるように，タンネットダイオードの温度変化に対する安定性は非常に高く，当然室温で動作が可能である。

1968年に提唱された初期のタンネットダイオードは，液相エピタキシー法により製造されていた。しかし，近年それに代わって分子層エピタキシー (MLE : Molecular Layer Epitaxy) 法が利用されている。MLEとは，原料ガスを交互に導入し，それらを基板表面において化学反応させることによって分子層を成長させる手法である。このMLEを用いることによって，各層の厚さをナノメートルサイズで制御することができ，さらなる高周波化が可能となった。本研究で使用されている GaAs タンネットダイオードにおいては，これまでに基本波周波数で 50 GHz から 700 GHz までの室温連続発振が実現されており，理論的には 1 THz 以上の高周波発振が可能であることが示され

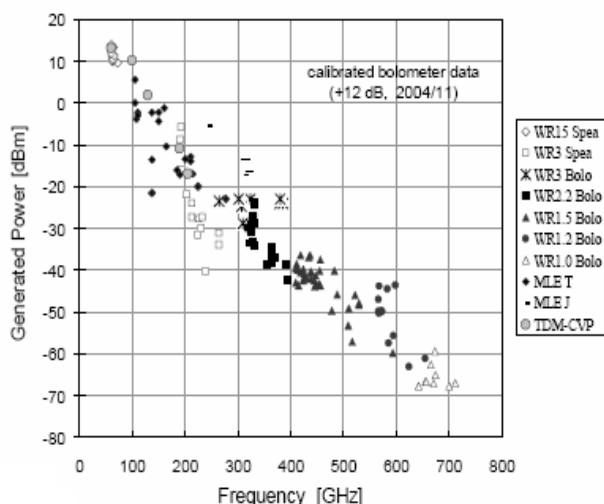


図 1.3 GaAs タンネット発振器出力の周波数依存性

ている。

図 1.3 にタンネットダイオード発振器を基本波発振させた場合の出力の周波数依存性を示す。この図より、100 GHz, 200 GHz および 600 GHz において、出力はそれぞれ 10 dBm (10 mW), 0 dBm (1 mW), -44 dBm 程度であることがわかる。さらに、8 V, 350 mA を印加した WR3 タンネット発振器において 1 mW の出力が確認され、このときの周波数安定性は ± 1 MHz/hr, 出力安定性は ± 1 %/hr であった。この結果より、GaAs タンネット発振器を用いた高出力・高安定性のテラヘルツイメージング装置を構築できると考えられる。

コンクリート試験体のテラヘルツイメージングでは、透過性が高い低周波数のタンネット発振器を用いるのがよい。低周波の光源を用いても、共焦点光学配置を用いる事により、波長限界を超える解像度を得る事が期待できる。コンクリートにおいてはテラヘルツ波の減衰が木材より大きいため、

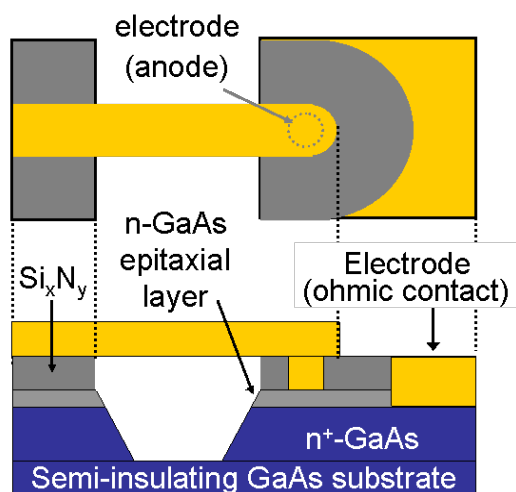


図 1.4 平面型 GaAs SBD

より低周波の発振器が適している。

1-5 テラヘルツ検出器

テラヘルツ波応用には、常温の背景輻射よりも強い高輝度テラヘルツ光源だけでなく、S/N 比に優れた検出器が必要である。現在用いられているテラヘルツ検出器としては、単一光子検出器のような量子型検出器、超伝導 SIS ミクサのような超伝導検出器、ボロメータなどがある。しかしながら、これらの検出器では使用時に低温～極低温 (~ 4 K) に冷却する必要があるため、実用性に欠ける。

常温で動作し、高速で、かつ感度の高い実用的なテラヘルツ検出器として、ショットキーバリアダイオード (SBD) がある。テラヘルツ帯の SBD は、半導体 (GaAs) と金属 (一般にプラチナ等) の接触により生じるダイオード特性を利用し、テラヘルツ帯の電磁波を整流検波している。高い周波数帯で高い検出感度を維持するためには、

金属-半導体接触容量を減少させる必要があるため、当初は接触面積を $0.1 \mu\text{m}^2$ 以下にできる点接触型（ウィスカ型）の SBD が製造・使用されていた。点接触型 SBD は、金属導波管に装着してミクサとして用いることで、600 GHz 以上の周波数においてミクサ等価雑音温度 2000 K 以下の低雑音性を示している。しかし、点接触型 SBD は高い性能を示す一方で、振動などにより容易に破損しやすいことや、導波管回路とのインピーダンス整合が難しいという欠点もある。その問題点を解決するために開発されたのが平面型構造 SBD である。この方式ではエアブリッジ構造が採られ、配線下部の基板を除去することで配線-基板間の静電容量を極力減らしている。現在では点接触型と同等の性能が実現されており、2.5 THz でミクサ雑音温度 5000 K 以下となっている。図 1.4 に平面型構造 SBD の模式図を示す。導波管装着型の SBD のほとんどはこの平面型構造のものを用いている。

1.6 共焦点光学系

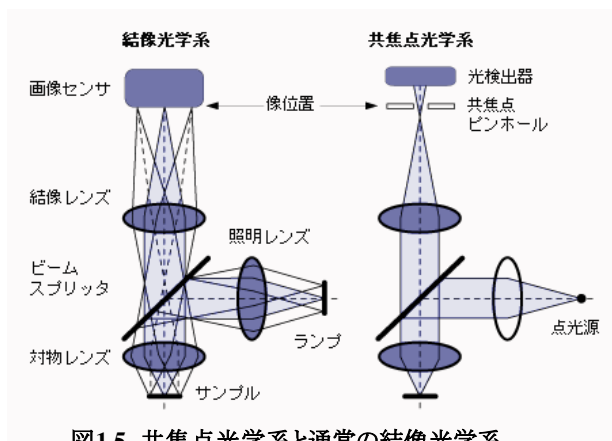


図1.5 共焦点光学系と通常の結像光学系

テラヘルツイメージングの空間分解能を向上するために、本研究開発では、共焦点光学系を採用した。これは波長回折限界を超える分解能を達成する事が出来るため、道路構造体の主要素であるコンクリートに対する高い透過能を持つ低周波数（即ち長波長）テラヘルツ波を用いながら、その波長（～数 mm）を超える分解能を実現する事が可能となる。実際に、図 1.6 に示すように、光源波長（～3mm）の限界を超える 1mm 以下の空間分解能を得る事が出来た。

ステンレス・ステンシルを用いて解像度の試験：
解像度 < 1mm
波長（～3mm）分解能を超える高解像度

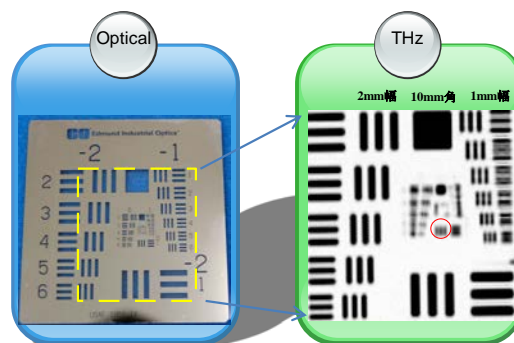


図1.6 波長～3mm (0.1THz) のテラヘルツ光源を用いてイメージングしたステンシルパターン。共焦点光学配置を用いて、波長限界を超える高い分解能を得る事が出来る。

共焦点光学系の起源は、光学顕微鏡の発展とともにある。光学顕微鏡の歴史は 400 年の長きにわたっており、1590 年のヤンセン父子による発明に始まり、ロバート・フックによる細胞の発見（1665 年）、コッホによる結核菌発見（1882 年）など、人間の持つマイクロ世界への探究心と相まって、生命科学の発展に多大な貢献をしてきた。その後も、フリッツ・ゼルニケ（Frits Zernike）による位相差顕微鏡の発明（1935 年）、当時マサチューセッツ工科大学の学生であつ

たマービン・ミンスキー (Marvin Minsky) による共焦点顕微鏡の発明 (1957 年) などが続き、光学顕微鏡の発展を支えてきた。光学顕微鏡というと、古典的なイメージでは分解能が電子顕微鏡に及ばないという印象を持たれがちであるが、光を用いることにより、試料の持つ情報を非侵襲で比較的容易に取り出せるという大きなメリットを有しており、将来においてもその重要性はますます増大していくものと期待されている。

このような流れの中で共焦点 (コンフォーカル) 顕微鏡は重要な地位を占めている。医学研究分野ではポストゲノムの動きと相まって、2008 年ノーベル賞で話題になった緑色蛍光タンパク質 (GFP : Green Fluorescent Protein) を用いた生命機能解析に用いられ、その高い分解能や定量性により研究に必須な機器となりつつある。また産業用途においても、微細化の一途を辿る半導体の検査などに用いられ、高精度な表面微細形状測定 (段差・線幅・粗さ) に有効な機器として定着している。

共焦点顕微鏡の原理かつ最大の特徴として、共焦点光学系が挙げられる。図 1.5 に共焦点光学系と通常の光学系を示す。共焦点光学系ではピンホール 1 (点光源 : 本研究ではタンネットダイオード光源) を試料に投影し、さらに試料の像位置にピンホール 2 と検出器 (本研究ではショットキー検出器あるいは DTGS 検出器) を配置する。ここ

で、ピンホール 1 (点光源)・試料・ピンホール 2 (像位置) がすべて共役位置にあることから共焦点 (コンフォーカル) 光学系と呼ばれる。検出器と光源の位置を交換しても同じである。

1957 年にミンスキーが発明した当時はレーザー光源がなかったため、通常のランプ光源に続いてピンホール 1 を配置する構成となっているが原理的な違いはない。その後、1969 年にレーザーが共焦点顕微鏡に用いられ、1977~1980 年にかけてオックスフォード大学のコリン・シェパード (C. J. R. Sheppard)、トニー・ウィルソン (Tony Wilson) らにより共焦点顕微鏡に関する結像特性の研究が進み、1985 年には市販品が発売されて今日に至っている。

共焦点顕微鏡は図に記載した共焦点光学系を基本としており、下記のように、通常の顕微鏡と比べてコントラストや分解能が向上するという特徴を有している。

その理由は、

1. 照明が点状であるため試料に隣接する横方向からの迷光が生じない。
 2. 焦点位置だけの情報がピンホールを通過して検出器に到達し、焦点位置以外の光はピンホールでカットされるため、焦点を結ばない滲み像が検出器に到達しないから、波長限界を超えるクリアな像が得られる。
- 以上の理由により、本研究開発の反射型イメージングでは共焦点光学系を用いている。

1-7 本研究の目的

1-1 で述べたように、現在行われているいずれの非破壊試験法においても試験対象や判別可能な内部欠陥の種類には制限が存在する。このような制限から、従来の検査法とは異なった視点を持つ新たな試験方法を生み出し、それを実用化していくことは非常に有益であると言える。

本研究では、前述のタンネット発振器から発生したテラヘルツ波を用い、新しい道路構造物欠陥診断手法を確立すべく、コンクリート等の吸収係数等の光学基礎物性値を確定し、このテラヘルツ光源を用いた道路構造物欠陥のイメージングを行ない、道路構造物欠陥探傷の検出可能性を明確にする事を目的とする。

第2章 国内・海外の既存研究状況

2.1 はじめに

光波とマイクロ波の境界に位置するテラヘルツ電磁波領域は残された未開拓電磁波領域の一つとして注目されている。この超高周波電磁波を利用したテラヘルツ技術の一つとして、可視光では確認することができない構造物内部に対する非破壊検査(NDE: Non Destructive Evaluations)、周囲の環境の影響を受けないモニタリング技術に関する研究が国内および海外において行われている。

本章では、国内および海外における上記に関連する技術に関する動向調査を行ったので、その調査結果について述べる。

2.2 国内の研究状況

2.2.1 コンクリート表層クラックに対するミリ波イメージングシステムの開発

研究機関: NTTマイクロシステムインテグレーション研究所

NTTでは、通信サービスを支えるための局舎やとう道のコンクリート構造物が全国を網羅するように配備しており、これらの構造物の経年劣化状態を診断する技術が必要とされている。

コンクリート躯体がむき出しの状態では目視点検することができるが、建造物の壁等には壁紙や塗装が施されており、目視点検以外手法である、超音波探傷やX線による検査方法が用いられている。しかしながら、サブミリメートルサイズに微細な表面クラックを検知する用途には適さない。

NTT研究所では、既存のミリ波イメージングに近接撮像技術の利点を加えてサブミリメートル以下のコンクリートクラックを検出する高分解能化に成功している。通常、波長より小さな構造を見ることはできない。

これは2つの対象物が波長以下の間隔で並んでいる場合にそれらの識別することができないことを意味します。ここで、対象物が1つ、つまり1つのクラックであれば、波長以下のクラック幅でも多少輪郭がぼやけた像として認識することが可能ある。近接撮像技術はこの利点を応用している。

発振器 (GUNNダイオード、周波数:76 GHz) とホーン型送信アンテナから放射されたミリ波を検査対象物へ照射し、反射波を平面型受信アンテナを用いて検出する。また、アンテナを一次元状にアレイ化(32列)することにより測定時間の高速化にも成功している。

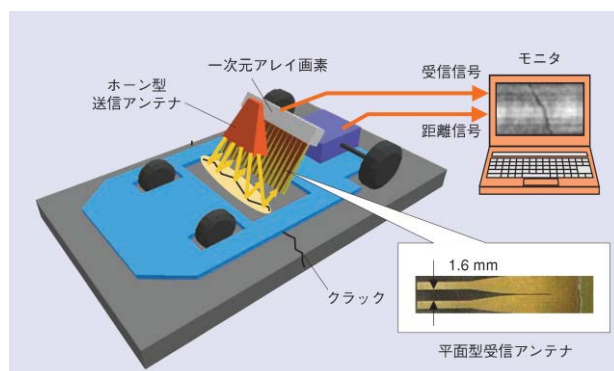


図2-1 1次元アレイ受信器によるクラックスキャンシステムの概略

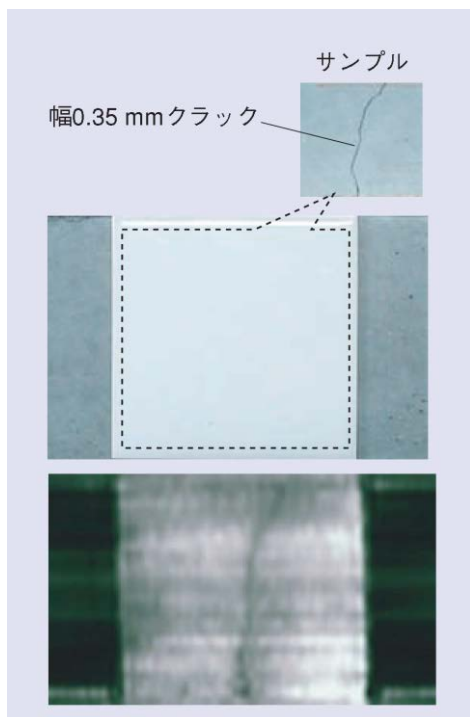


図2-2 コンクリートにあるクラック（幅0.35 mm）の可視像（上）とミリ波イメージング像（下）

出典：

- (1) 永妻 忠夫, 岡 宗一, “ミリ波イメージング技術と構造物診断への応用,” NTT技術ジャーナル, p. 25-28, 2006. 6.
- (2) 岡 宗一, 望月 章志, 都甲 浩芳, 久々津 直哉, “ミリ波イメージング技術によるコンクリート構造物診断,” NTT技術ジャーナル, p. 25-28, 2008. 12.

2.2.2 電線シールド金属表面の腐食状態のテラヘルツイメージングに関する基礎的研究

研究機関：独立行政法人情報通信研究機構 (NICT), 早稲田大学

電力インフラを支える電送ケーブルの健全性を診断する技術の開発は、電線の保守管理において重要な意義をもつ。電線は、腐食、短絡防止のため絶縁性の高いポリマーで被覆されている。しかしながら、長期間、様々な気候環境に曝されているため、たとえ被覆された状態であっても、腐食や

クラックなどの電線へのダメージを回避することができない。そのため、定期的な検査が行われているが、簡便な非破壊検査技術の開発が望まれている。

この研究事例では、銅に生成する腐食物のテラヘルツスペクトルデータベースの作成（図2-3）および電線の腐食状態を模した試料に対するテラヘルツ波を用いたイメージングに関する基礎研究を行っている。

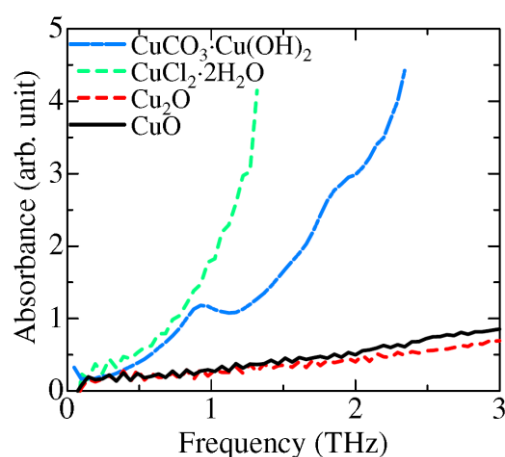


図2-3 各種銅腐食生成物のテラヘルツ波吸収係数測定結果

銅板表面に銅酸化物 (Cu_2O , CuO)、炭酸化・水酸化物 ($\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu(OH)}_2$)、そして塩化物 ($\text{CuCl}_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$) を生成させた試料を作成し、テラヘルツ時間領域分光法 (THz-TDS) に基づくイメージング測定を行なっている。各種腐食生成物によるテラヘルツ波の反射強度の低下、および生成物の同定に成功している（図2-3 から5）。

また、電線ケーブルの被覆材として用いられている塩化ビニル樹脂 (PVC) をコーティングした状態で同様のテラヘルツ波イメージング測定を行なっており、銅板の腐食領域の可視化に成功している。（図-6）

この成果は、電線ケーブルに対する外部との絶縁性の担保において重要な診断技術となることが期待できる。

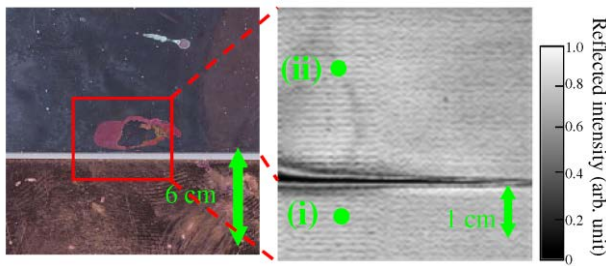


図2-3 腐食させた銅板表面写真(左：可視像、右：テラヘルツイメージ). (i)は腐食されていない領域、(ii)は腐食領域(腐食生成物 Cu_2O , CuO).

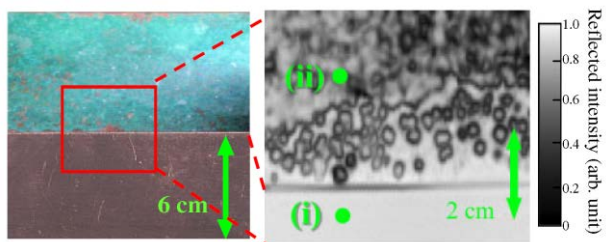


図2-4 銅炭酸・水酸化物を生成させた銅板表面写真(左：可視像、右：テラヘルツイメージ). (i)は腐食されていない領域、(ii)は腐食領域(腐食生成物 $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$).

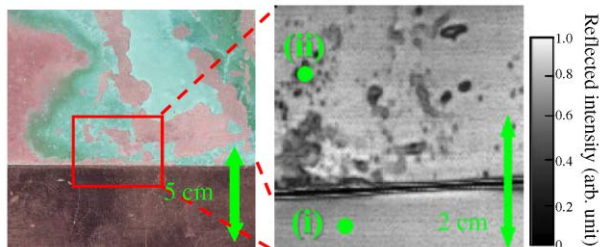


図-5 銅塩化物を生成させた銅板表面写真(左：可視像、右：テラヘルツイメージ). (i)は腐食されていない領域、(ii)は腐食領域(腐食生成物 $\text{CuCl}_2 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$).

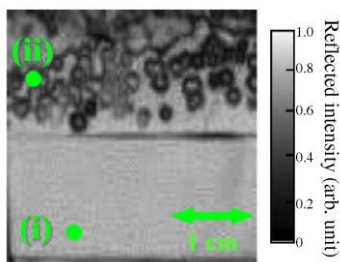


図2-6 ポリ塩化ビニール(厚さ $310 \mu\text{m}$)で被覆された腐食銅板表面に対するテラヘルツイメージング測定結果. (i)は腐食されていない領域、(ii)は腐食領域(腐食生成物 $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$).

出典：Marina Komatsu, Ryo Sato, Maya Mizuno,

Kaori Fukunaga, and Yoshimichi Ohki, “Feasibility Study on Terahertz Imaging of Corrosion on a Cable Metal Shield,” Japanese Journal of Applied Physics, 52 (2012), p. 122405

2.2.3 東日本大震災による被災家屋の電磁波計測ケーススタディ集の提供

研究機関：独立行政法人情報通信研究機構(NICT)

NICTは東日本大震災後の地震動により被災した建造物に対し“マイクロ波(1 - 5 GHz)、ミリ波(100 GHz)、テラヘルツ波(0.1 - 1.5 THz), および赤外光(> 100 THz)”を用いた非破壊センシングによる調査を実施し、その実測データを可視化処理したケーススタディ集を建築、土木、電磁波等の専門家向けに提供を開始した。

ケーススタディ集には、鉄筋コンクリート建造物、木造モルタル家屋を対象としており、測定周波数はマイクロ波から近赤外光までの広範に亘るデータベースが収録してある。

図2-7, 8にはミリ波(周波数 100 GHz)を用いた計測例を示す。図2-7では、コンクリート建造物の亀裂(左図) およびセラミックタイルの剥離および下地の損傷(右図)を検出している。図2-8では、木造モルタル構造物の内側の支柱の継ぎ目や釘の状態が観察できることが示されている。

また1 THz 程度のテラヘルツ波を用いるとタイルの剥離やモルタル表面のベニヤ板のずれを観察することができる。

マイクロ波から光波の広範にわたる周波数範囲のデータベースの利用により、目視検査では確認できない建築構造物内部の劣化状態の確認可能となり、建物の健全性診断に応用されることが期待できる。

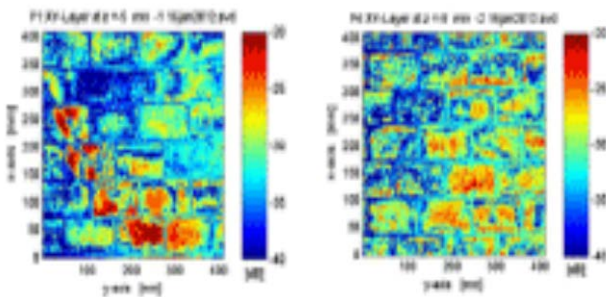


図2-7 地震後にヘアライン上のクラックが生じたタイル壁(上)、ミリ波によるタイルのイメージング像 (下左：タイル表面、下右：タイル-壁間に焦点を当てた場合)

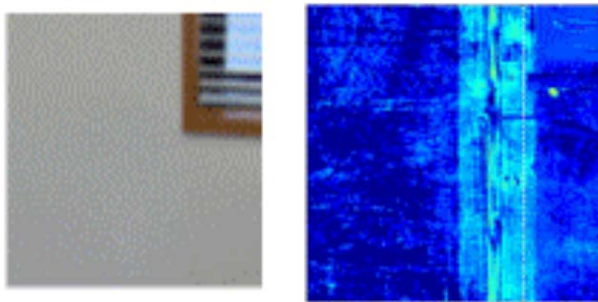


図2-8 地震後に若干の浮きが生じた木製モルタル壁(左)、ミリ波による壁のイメージング像

出典：独立行政法人情報通信研究機構HP, 2013. 2. 4

プレスリリース

“東日本大震災による被災家屋の“電磁波計測

ケーススタディ集”を提供開始”

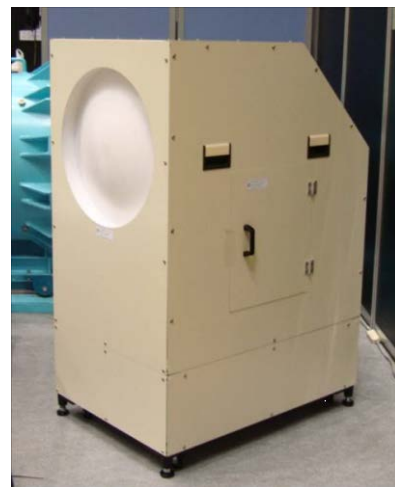
2.2.4 人体および物体から放射されるミリ波の受動イメージング装置の開発

研究機関：東北大学、マスプロ電気株式会社

衣服に隠された爆発性または毒性を有する液体および粉体を良く検出することは、空港でのセキュリティーチェックにおいて特に重要であり、9. 11の同時多発テロ事件以降、簡便かつ高感度なイメージング診断技術が開発されてきた。

この事例では、物体から放射される輻射をミリ波の周波数領域で検出して識別する技術である。

ミリ波領域における輻射の強度は、温度および物体表面からの放射率に依存する。その特徴を利用して人体と物体からの輻射強度差を検出し識別することが可能である。図2-9はミリ波受動イメージング装置の概観および測定原理の概略を示している。25列から構成される一次元ミリ波アレイ検出により図のあるy点におけるx方向の1次元イメージを測定する。装置内のミラーの角度を変化させることによりy軸方向へ走査し、2次元のミリ波輻射イメージ像を得る。



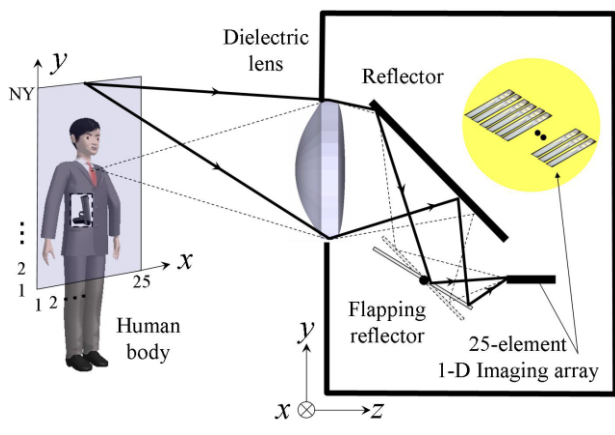


図2-9 ミリ波受動イメージング装置の概観 (上図)および測定原理の概略 (下図)

図2-10 は、ミリ波受動イメージングの例を示す。衣服内に隠されたプラスチック樹脂のCD-ROMや液体入りのペットボトルを可視化することに成功している。さらに、周波数35 GHzによる受動イメージングでは、火炎の向こうの人体を検知 (図2-11) することに成功している。

このイメージング技術は、空港のセキュリティスキャナーに応用できるだけでなく、火災現場での人命救助現場での利用が期待できる。

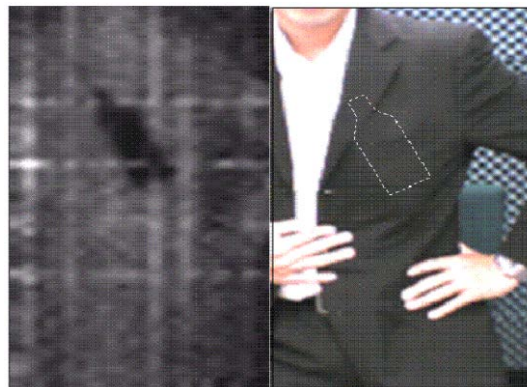
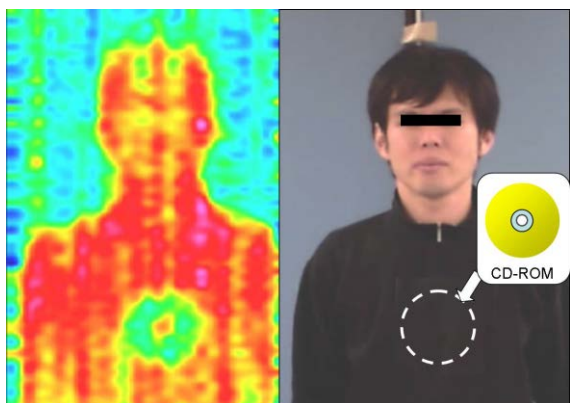


図2-10 ミリ波受動イメージング例:衣服内にあるCD-ROMディスク (上図)、液体入りのペットボトルの可視化 (下図)

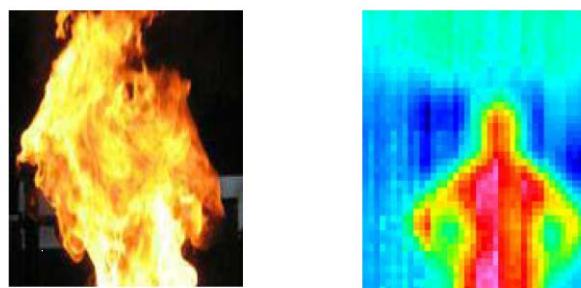


図2-11 火炎の向こう側にいる人体のミリ波受動イメージング

出典:

IEEE Sensors 2009 conference, p.1632-1635 October, 2009

IEEE International Vacuum Electronics Conference, 2007. IVEC '07., p.1-2, May, 2007

2.3 海外の研究状況

2.3.1 炭素繊維強化プラスチック (CFRP) で被覆された橋梁コンクリート表面の密着性の診断

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は橋梁構造物 (橋脚やラーメン) の補強材料として使用されており、橋脚の老朽化対策として修繕コストの面からも有用な複合材料である。橋脚や梁のコンクリート表面にCFRPを接着することでコンクリートに印加される引張応力やせん断応力を緩和することが

可能である。しかし、広い面積で補強する場合、コンクリートとの接着が不十分な箇所が生じ、補強材としての性能を活かす事はできない。さらに、周囲の環境や交通状況により剥離が進行する確率が高くなる。従来の密着性の評価は、目視検査や打診調査により行われている。しかしながらCFRP材とコンクリートとの間の小さな間隙を検知することは困難である。

この事例では、この課題を解決するためにマイクロ波発振器を用いた反射イメージング測定により未接着部分の検知を行っている。図2-12は、CFRP補強材が接着された橋脚表面に対するマイクロ波反射イメージング測定の外観である。

マイクロ波反射イメージング測定結果を図2-13に示す。測定範囲は縦330 mm x 横270 mm である。CFRP材の繊維方向に対して平行および垂直な偏波方向の2種類のイメージング測定を行ない、取得した画像を演算処理し図のイメージを得ている。図中の赤い矢印で示した箇所は未接着部分を表している。この測定手法を用いることにより数cmサイズの未接着箇所を検出することができ、従来の手法である打診法と合わせて診断結果を確実なものにすることができる。

本手法は、CFRP材料の機能の維持管理を通じて長期間にわたり橋梁の健全性を確保する上で基盤となる非破壊検査技術である。また、CFRP以外の複合材料に対しても適用可能な技術である。



図2-12 橋脚のCFRP接着部分に対する反射イメージング測定の外観

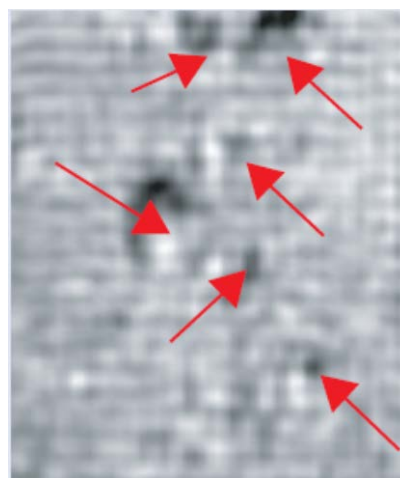


図2-13 マイクロ波反射イメージング測定結果。CFRP材の繊維方向に対して平行および垂直偏波のイメージング測定を行ない画像処理を行っている。図中の矢印は未接着部分を示す。

出典: O. Buyukozturk, J. Park, and C. Au, “Non-destructive evaluation of FRP-confined concrete using microwaves,” in Proc. Int. Symp. Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Berlin,

Sept. 16–19, 2003 [Online]. Available: <http://www.ndt.net/article/ndtce03/papers/v085/v085.htm> IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, p. 26-37, April, 2007

2.3.2 塗膜下の鋼板表面の腐食状態の診断

コーティングされた鋼板表面に存在する腐食の検知技術は、建造物や輸送機の構成材料の機能性担保において重要な非破壊診断技術である。

本事例では、矩形導波路プローブを用いた空間分解能に優れた近接ミリ波非破壊診断法を塗膜下の鋼板表面に存在する腐食の検知に適用している。

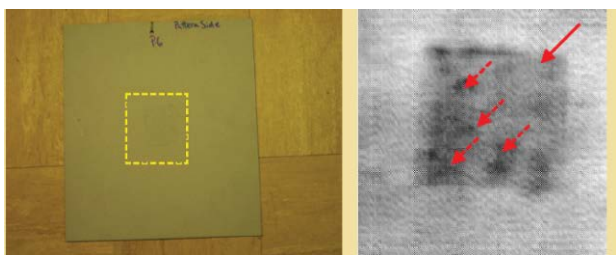


図2-14 塗装された鋼板表面の外観（左図）。破線で囲われた領域は測定領域。ミリ波反射イメージング測定結果（右図）実線の矢印は腐食領域であり、破線の矢印は腐食の前兆にあたるピットを示している。

図-14は、塗装された鋼板に対するミリ波反射イメージング測定結果を表している。実線の矢印は金属表面の酸化によるミリ波反射強度の減少を明瞭にとらえており、正常部分と腐食部分の識別が可能である。さらに、腐食の前兆である腐食ピット（破線の矢印）を検出することにも成功している。

腐食の前兆であるピットの検出は、腐食の早期発見において非常に重要である。著者らはアルミ板に腐食ピットを模した200～400 μm の直径および深さの円孔を形成し、その試験体に対して近接プローブを用いた

ミリ波反射イメージング測定を行なっている。

図2-15の上図は各種サイズのピットの配置図であり、下図は反射イメージング測定結果を表している。直径および深さが共に200 μm のサイズのピットを検出している。このサイズはミリ波発振器の波長の10分の1以下であり、回折限界以下のイメージングに成功している。

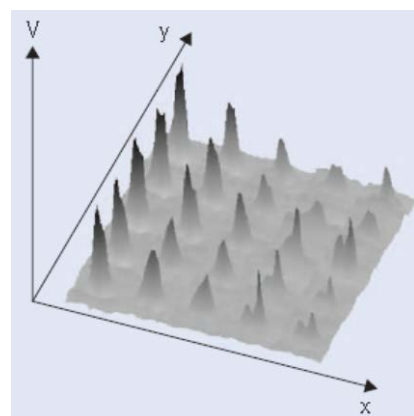
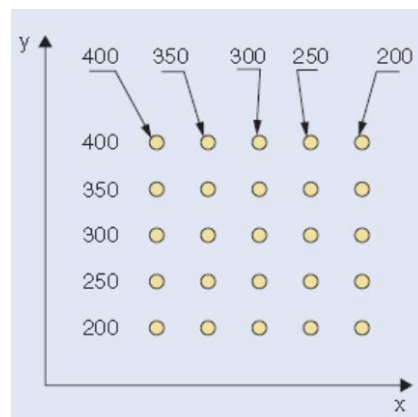


図2-15 腐食ピットを模した各種サイズの円孔の配置（上図）近接ミリ波反射イメージング測定結果（下図）Z軸は反射強度を表している。

本事例の技術は、建造物、輸送機などの塗装された金属表面の腐食状態の早期発見に応用可能であり、これらの建造物の安全性確保をさえる重要な技術である。。

出典: S. Kharkovsky and R. Zoughi, "Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation" 25B, AIP Conference Proceedings,

vol. 820, 2006, pp. 1277–1283.

M. Ghasr, S.Kharkovsky, R. Zoughi, and R. Austin from Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 25B, AIP Conference Proceedings, vol.760, pp. 547–553, 2005

2.3.2 スペースシャトル燃料タンク用発砲断熱材とタンク表面に存在する空隙の検出

2003年、スペースシャトル「コロンビア号」が大気圏に再突入する際、上空で空中分解する事故が発生した。事故原因は、発射の際に外部燃料タンクの発砲断熱材(SOFI)が振動、空力により剥落し、その破片がシャトル機体の主翼を直撃し耐熱システムを損傷させたことにあるとして報告されている。

そこで本事例では、燃料タンクと同じ構造のパネルを使用し、試験体と発砲断熱材との間に欠陥を導入した試験体を作製し、ミリ波によるイメージング測定を行ない、欠陥の可視化を試みている。



図2-16 欠陥が施された燃料タンクと同じ構造のパネル（左図）と発砲断熱材でコーティングされた試験体（右図）

各種欠陥が施された燃料タンクパネルと発砲断熱材でコーティングした後の試験体を図2-16に示す。発砲断熱材の厚さは3.1～7.65 cmである。

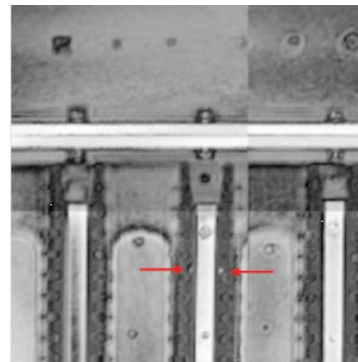
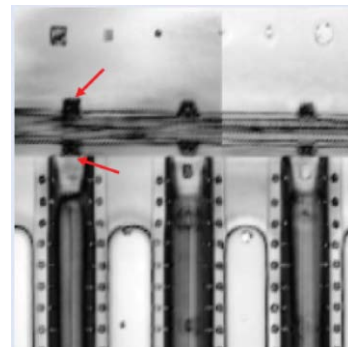


図2-17 周波数100 GHzのミリ波発振器による反射イメージング測定結果。焦点位置をパネル底部(上図)と上部(下図)に合わせたときの反射イメージ。赤い矢印は人為的に施された欠陥に対応している。

図2-16の右図の試験体に対するミリ波反射イメージング測定結果を図-17に示す。上図および下図はそれぞれ焦点位置を金属パネル底部および上部に合わせたときのイメージング結果である。図中の矢印が示しているように金属パネル発砲断熱材間に存在する欠陥を検出することが可能である。

出典：R.Zoughi, S. Kharkovsky, and F. Hepburn from Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation 25B, AIP Conference Proceedings, vol.820, pp. 439-446, 2006

2.3.2 ミリ波レーダーによる空港滑走路上の異物の検出に関する基礎研究 (LEAT France, ENRI:Japan)

空港滑走路にある異物は、たとえ数cmのものであっても、航空機の車輪による巻

上げによる胴体への損傷、エンジンへの吸込みによる故障や不具合を招き、墜落事故に至ることもあるため、滑走路状態の監視が必要不可欠である。

そこで、本事例では、滑走路監視用のミリ波レーダーシステムを開発している。図2-18は、ミリ波レーダー装置の外観であり、発振周波数は76.5 GHzである。



図2-18 ミリ波レーダー装置の外観

空港滑走路を模擬したミリ波レーダー測定領域の外観を図-19に示す。発振器から10 m～15 mの位置に金属製の異物を配置している。図2-20に、レーダー走査結果を示す。01から05に対応する金属製異物からのミリ波反射を検出している。

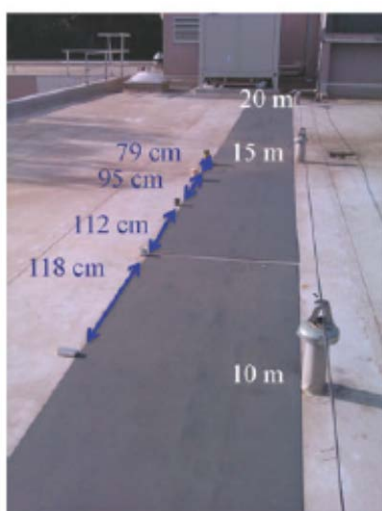


図-19 滑走路を模した、ミリ波レーダー測定領域。装置より10 m から 15 mの位置に金属製の異物を配置している。

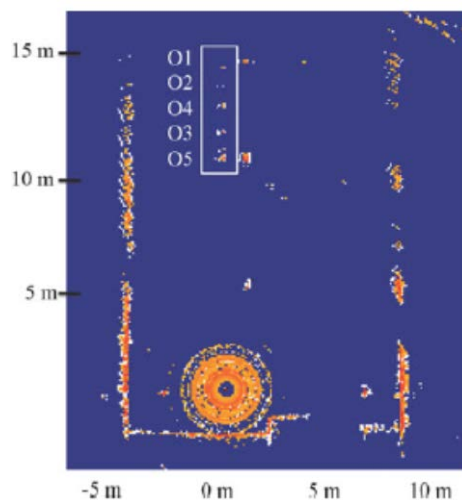


図2-19 ミリ波レーダーの測定結果 01～05の金属製の異物からの反射波を検出している

以上から発振器から約20 mの範囲において存在する異物の検出が可能であることを確認している。

更に、本事例を発展させ、滑走路の各場所に設置したレーダーシステムを光ファイバーで接続し、広範にわたる滑走路領域を一台の中央装置でコントロールすることにより、低コスト化を達成している。加えて赤外TVカメラとの連動によるハイブリッドセンサーシステムにより異物の特徴をとらえた画像として収集することが可能である。

出典: Karim Mazouni, Armin zeitler, Jerome Lanteri, Christian Pichot, Jean-Yves Dauvignac, Claire Migliaccio1, Naruto Yonemoto, Akiko Kohmura, and Shunichi Futatsumori, “76.5 GHz millimeter-wave radar for foreign objects debris detection on airport runways”, International Journal of Microwave and Wireless Technologies, 2012, 4(3), 317–326.

第3章 テラヘルツ波による道路構造物欠陥イメージング調査実験

3-1 テラヘルツ発振器と検出器の整備

テラヘルツ波を用いた構造物の欠陥検出の測定方法としては、透過測定および反射測定の一つがある。本章では、その二種類の測定方法と本研究で使用した測定装置の構成について言及する。なお、本研究では、小型かつ常温で稼動する高精度なイメージング装置の構築という観点から、テラヘルツ発振器および検出器として前述の GaAs タンネット発振器と SBD 検出器及び焦電検出器 (DTGS) をそれぞれ使用した。焦電検出器 (DTGS) は従来赤外分光光度計に用いられていたものであり、室温動作かつ高感度であるとともに、電磁波の偏波面依存性が無く、熱的に検出するため入射電磁波周波数に依存しない広帯域な検出が可能である特徴があるが、動作周波数が数 100GHz 程度と遅い難点がある。しかしイメージング応用に対しては十分高速な検出が実現できる。一方、SBD 検出器は数 10GHz 以上の高速応答が可能であり室温動作であるが、発振器と同様に共振器中にアセンブリされているため、入射電磁波の偏波面により検出感度が大きく左右される。加えて、検出する電磁波周波数に応じて用意する必要がある。電磁波が垂直に入射する場

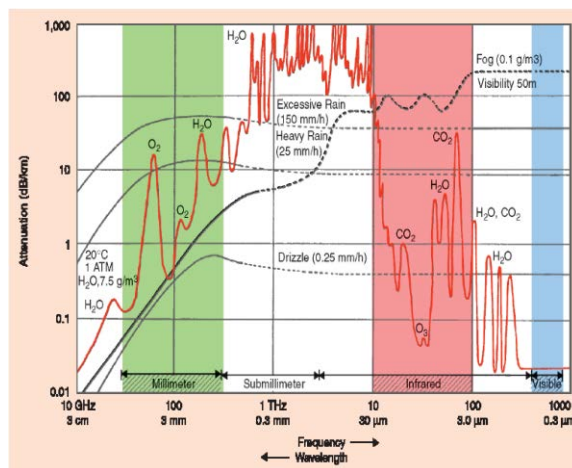


図 3.1 大気および大気中の水分による電磁波の吸収

合は、金属表面での偏波面変化は無いが、斜め入射の場合には入射波の偏波面と反射波の偏波面が変動する点がある点に注意する必要がある。

テラヘルツイメージングを行う上で、使用する周波数の選択は極めて重要な因子のひとつであり、空間分解能、タンネット発振器の出力、その周波数における試料の透過能、大気や水によるテラヘルツ波の吸収などを考慮し、適切な周波数を選択する必要がある。

図 3.1 は大気および大気中の水分による電磁波の吸収を表したものである。この図から、180 GHz 付近に水による吸収ピークが存在することが分かる。このような水によるテラヘルツ波の吸収が大きい周波数を選択することによって、コンクリートやセメント中の水分の分布を測定することが可能であると同時に、コンクリート中のその場水分計測やアルカリ骨材反応を検出出来る可能性がある。反対に、95 GHz のように吸収が小さい周波数では、試料中の水分

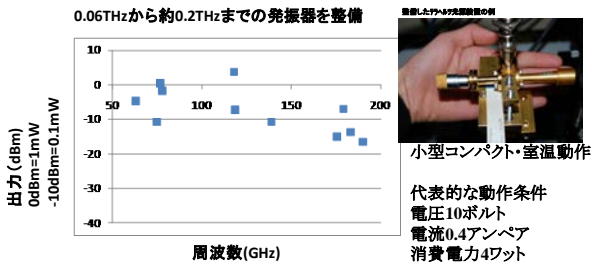


図3.2 本研究開発で整備したテラヘルツ光源

による透過強度の減少を抑えて測定することが可能であると考えられる。本研究では、解像度（波長が空間分解能に相当）、タンネット発振器の出力（図 1.3）および水による吸収（図 3.1），さらにコンクリート等における透過率を考慮した結果，30～200GHz帯のタンネット発振器を選択した。図 3.2 に本研究で新たに整備したテラヘルツ帯タンネット発振器の周波数と出力を示す。

3-2 透過測定

透過測定では，タンネット発振器から発生させたテラヘルツ波を試料にフォーカスし，その透過光の強度を SBD 検出器により検出するという作業を，測定範囲全体にわたって繰り返し行うことで透過強度の分布を得る。欠陥の存在しない部分における透

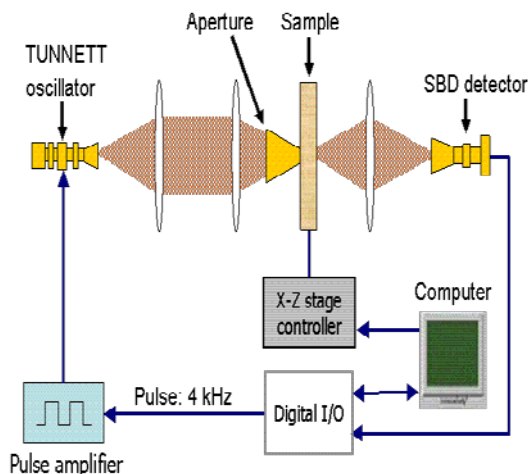


図 3.3 透過測定装置概

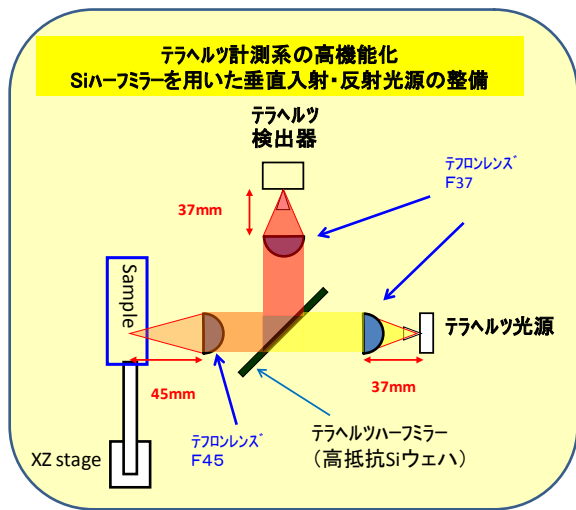
過強度は、ランベルト・ベールの法則に従い，以下のように表される。

$$I/I_0 = \exp(-\alpha x) \quad (2)$$

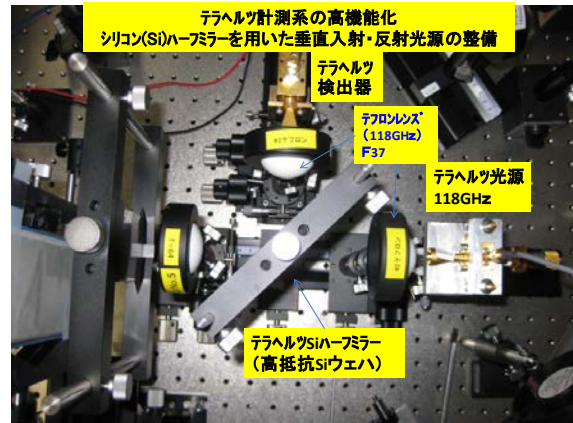
ここで， I は透過光の強度， I_0 は入射光の強度， α は吸収係数， x は透過距離を表す。試料内部に欠陥が存在する場合，試料内を透過するテラヘルツ波は，その箇所において散乱もしくは吸収される。このような透過強度の違いがコントラストとなり，欠陥の存在を判別することが可能となる。

本研究で用いた透過測定装置の概略図を図 3.3 に示した。タンネット発振器は 4 kHz で duty50%の矩形波で稼動しており，これにより発生したテラヘルツ波は，ポリエチレンあるいはテフロンレンズにより試料上で集光され，SBD 検出器へと到達する。このとき，ステージを一定のステップで移動させてスキャンを行った。試料上における集光度は，金メッキされた円錐形のアパーチャーを用いることによって高めることができる。63 GHz 透過測定においては，3 mm φのアパーチャー（絞り）を用いた。

3-3 反射測定



装置構成概略図



装置の構成写真

図3.4 本研究で構成した反射イメージング光学系(共焦点光学系)

反射測定では、欠陥が存在する部分の反射強度の違いを検出することにより、イメージング画像を得ている。透過測定では、発振器と検出器が試料の両側に位置するため、実際の構造物の欠陥検査を行う際に光路を正確に合わせるのは非常に困難である。一方、反射測定では、発振器・検出器ともに試料の片側に存在するため、より実用に即した測定方法であると言える。

図 3.4 に反射測定装置の概略図と光学系の写真を示す。共焦点光学系配置となっている。試料表面および内部で反射したテラヘルツ光を検出するため、前述の透過測定

とは光路が異なるが、それ以外は透過測定装置とほとんど同じである。試料からの反射光は、Si ハーフミラーによって検出器側へと光路を変えられる。今回行った反射測定においては、50~200GHz 帯の発振器を使用している。

3-4 テラヘルツ光源の高安定化

テラヘルツ光源に用いるタンネットダイオードは、電流注入型の電子デバイスである。逆バイアス電圧による電子トンネル注入により動作する原理であるため、出力は注入電流に依存する。その出力安定化を図るため、従来の一定電圧制御から一定電流制御法へと電源部分と制御ソフトウェアを改良した。一定電圧制御は制御回路形式が簡便であるが安定性に欠ける欠点があると言える。その結果、従来の一定電圧制御方式では出力変動幅が±1.5%であったものが、±0.2%程度まで向上する事が出来た。図 3.5

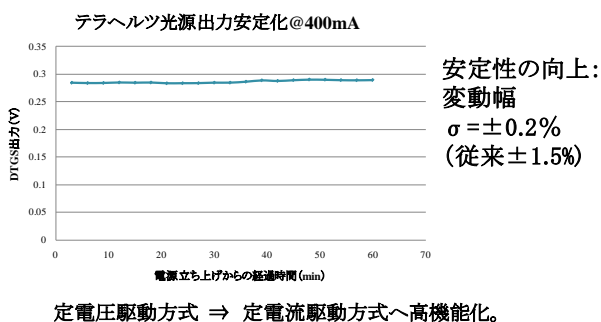


図3.5 テラヘルツ光源出力の安定化特性

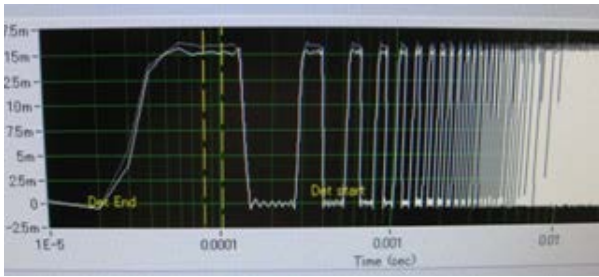


図3.6 テラヘルツ光源の出力波形(4KHzで変調時)ソフトウェアの高機能化を行い、出力波形の任意の時間幅でデータを取得できるようにした。数100パルス列の平均も行えるようにし、高精度計測が可能となった。

に電源投入からの光源出力安定化特性を示す。

3-5 検出器信号取得ソフトウェアの高機能化

試験体から反射あるいは透過されたテラヘルツ光は、ショットキーダイオードあるいはDTGS 検出器で検出され、パルス信号としてデータが取り込まれる。現有装置では、データパルス列の特定の一部の時間帯のみを取得する簡便なデータ取り込み方式であったが、本研究開発では、取得データ列を広範な時間帯で取得できるように改良し、多数のデータを取得する事でデータの信頼性を高めた。図 3.6 に検出パルス波形とデータ取得時間範囲指定の様子を示す。

この原理を基盤として発展させて構成したイメージング装置の概観を示す。

テラヘルツイメージングシステム装置(全体図)

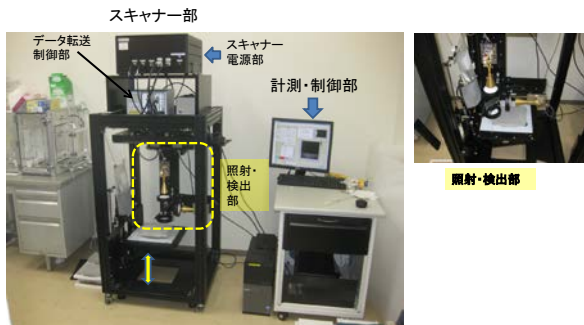
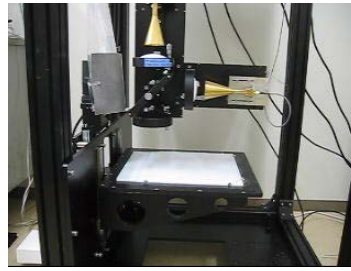


図 3-7 一部既存大型スキャナーを用いて構成したテラヘルツイメージングシステム装置

実際の動作の様子



最大掃引速度
~10cm/秒
10ミクロン毎にデータ収集
来年度は~40cm/秒が可能

走査領域の両端で一時的に止まる。
(2011年構成)
2012年、データ転送時間が殆ど無い。

FPGAで処理させる事に依り、データ転送なしに撮像を続ける事が出来る。

走査の制御もPC側で行わず、FPGAで行なう事が出来る。

~20cm x 20cm領域走査時間

2011年~9分⇒ 2012年~1分 ⇒ 2013年以降 15秒が可能

図 3-8 基本原理光学系を元に試作したテラヘルツイメージングシステムの試料走査部。計測電子回路部及び計測ソフトウェアの改良により、20cm 四方のイメージングにかかる時間を大幅に短縮することが出来た。更に4倍の高速化が可能である。

3-6 さび模擬供試体作成のための供用コンクリート PC 橋及び鋼橋の外観調査

鉄筋の測定対象さび程度を設定するための調査結果としたものを以下に示す。

主桁側面⑩: 鉄錆を含んだ遊離石灰など確認



図 3-9 供用 20 年コンクリート橋の外観調査 (山形県内)



図 3-10 供用 40 年の鋼橋腐食（さび）状態
外観調査。著しい腐食箇所では、腐食孔が
発生している場合もある。

検査対象となるコンクリート中の鉄腐食状態が、実際にはどの程度のものを把握するために、土木専門家の共同研究者と討論し、いくつかの具体的な供用コンクリート橋及び鋼橋の腐食状態を調査した。いずれも現役供用橋梁であるので、腐食部から試験体を採取することは出来ないが、その調査結果を元に、検査対象とすべき鉄さびの程度を把握する事が出来た。

コンクリート橋外壁には、遊離石灰を伴うひび割れや内部鉄骨構造が腐食したための考えられる赤さび様の液体がコンクリートひび割れ部から多数露出している事が分かる。土木専門家の共同研究者によれば、これはグラウトの充填不良によって形成された空隙に浸潤した水あるいは融雪剤成分による腐食であろうとの見解である。また、遊離石灰が見られた箇所破壊的な検査のためボーリング調査を行なった箇所から、酸化第二鉄を主とする赤さびがコンクリートクラック部より流れ出ている様子が見て取れる。同じく現役鋼橋の腐食調査を行った。鋼橋は、典型的な橋療用防錆塗装がなされているが、永年の侵食により塗膜面下の鋼材が腐食し、著しくは腐食孔にまで至っている。その腐食さびの厚さは、少なくとも1mm以上と計測される。これらを元に、検査対象とすべき「さび」の程度を想定した。



その結果、本研究ではコンクリート中の厚さ1mm程度以上の鉄筋さびの状態把握を検知対象とした。

3-7 かぶり 40 mm 超の埋設鉄筋供試体の作成

D6 及び D22 の異形鉄筋を配筋した供試体の例を二種類の異形鉄筋を組み合わせ配筋した供試体構造。コンクリート打設前の構造を上部から撮影した。コンクリート打設後、約一か月間、室温で養生したのち、イメージング測定を行った。全面剥離とは、サンドブラスト処理で鉄筋表面の黒錆を除去したものである。配筋後、コンクリートを打設し約一か月養生したのち、イメージング測定を行った。

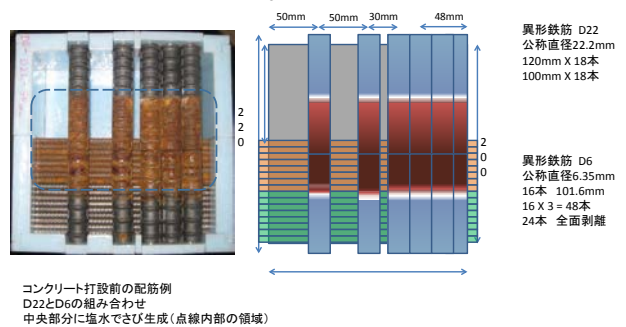
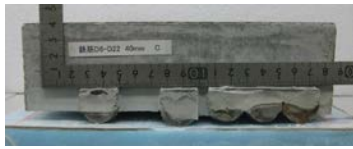


図 3-10 二種類の異形鉄筋を組み合わせ配筋した供試体構造。コンクリート打設前の構造を上部から撮影した。コンクリート打設後、約一か月間、室温で養生したのち、イメージング測定を行った。全面剥離とは、サンドブラスト処理で鉄筋表面の黒錆を除去したものである。



コンクリート打設後の配筋例
断面写真
D22とD6の組み合わせ
中央部に領域的にさび部を形成

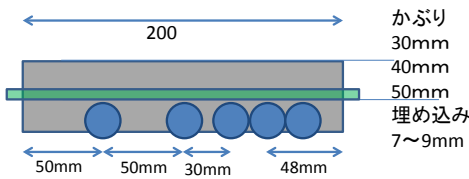
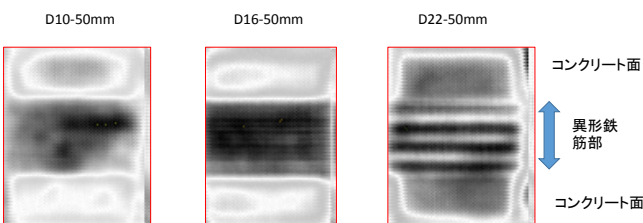


図 3-11 二種類の異形鉄筋を組み合わせた配筋供試体の断面構造写真と断面構造図。D6 と D22 の配筋構造の例。

図 3-11 は、上図のように異形鉄筋を型枠に配筋後、コンクリートを打設した供試体の断面構造写真と断面構造図である。かぶりは、30mm、40mm、50mm の 3 種類の供試体を作成した。

3-8 二種類の異形鉄筋を配筋したコンクリート供試体のテラヘルツイメージング

配筋した供試体のイメージングは、焦点深さを表面から内部鉄筋部まで 0.5mm ごとに変化して撮像した。そのうち最も鮮明に撮像された結果を示す。用いた光源波長は自由空間中で約 5mm であり、焦点深度はその 1/10 程度の精度で変化したことになる。また、テラヘルツビームはガウシアン形状のビームプロファイルを持っていて、テフロンレンズで集光しているが、そのビーム径は約 30mm 程度と広い。初めに、30GHz 共焦点配置のイメージング装置空間分解能を見積もるため、異形鉄筋そのもののイメージング画像を示す。



各種異形鉄筋を密に配置した供試体。異形鉄筋撮像分解能を見積もるため、鉄筋側からイメージングを行った。D22異形鉄筋は撮像できるが、D16及びD10異形鉄筋は、個々の鉄筋を撮像することはできない。ビームはガウシアン形状であり、ビーム径は約30mm程度あるためである。

図 3-12 異形鉄筋撮像空間分解能の見積

もり。D22 異形鉄筋は個々の鉄筋が撮像できるが、それ以下の鉄筋は、領域的な存在を確認できる。

その結果、D22 異形鉄筋はほぼ一本ずつの鉄筋の存在を個々に撮像可能であるが、それ以下の径の異形鉄筋は一本ごとでなく、領域的にその存在を撮像することが出来る。これは用いた光源の波長が空気中で約 10mm であり、テフロンレンズで収束しているが、そのビーム径は約 30mm 程度あるためである。

次に、二種類の異形鉄筋を配筋してコンクリート中に埋設した供試体のイメージング像を示す。かぶりは 30mm から 50mm であり、配筋は D6 と D10 及び D6 と D22 の二種類の異形鉄筋を配筋したものである。また、異形鉄筋はサンドブラスト処理により表面黒錆部を除去してあり、部分的に中央部に塩水浸潤による深刻な赤錆部を故意に形成した供試体である。

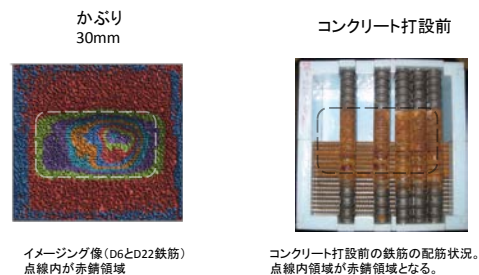


図 3-13 二種類の異形鉄筋で配筋し、中央部に赤錆部を形成した供試体のイメージング像。領域的なさび部（腐食部）の可視化が可能である。D22 鉄筋の場合、配筋間隔が密であるほど、明瞭に認識できる。

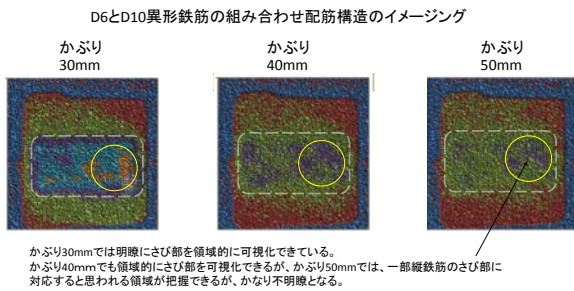


図 3-14 D6 と D10 の異形鉄筋で配筋した供試体のイメージング像。かぶり 30mm ではかなり明瞭にさび部を領域的に認識できる。かぶり 40mm でも領域的にさび部を認識することが可能であるが、かぶり 50mm では認識することが困難である。

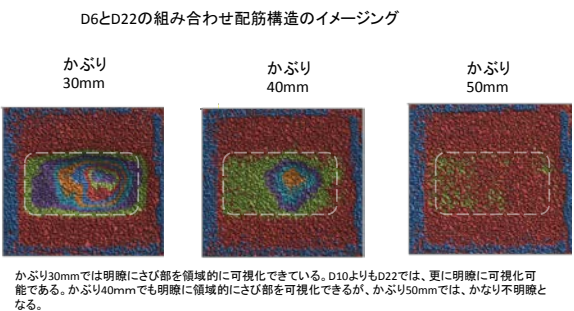


図 3-15 D6 と D22 の異形鉄筋によるコンクリート埋め込み配筋供試体のイメージング像。かぶり 30mm と 40mm では、D10 よりも明瞭にさび部を領域的に認識することが出来るが、かぶり 50mm では、困難である。

3-13 にみるように、実際の配筋状況に近い二種類の異形鉄筋を用いて配筋しコンクリートに埋設した供試体で、さび部に対応する領域を識別する事が可能であった。また図 3-14 及び図 3-15 に示すように、D6-D10 及び D6-D22 のいずれの組み合わせでも、かぶり 30mm 及び 40mm ではさび部を領域的に認識することが可能であるが、かぶり 50mm では、極めて困難であった。また D10 異形鉄筋よりも径が太い D22 異形鉄筋の方がより明瞭にさび部の領域を把握できることが分かった。これは、コンクリート内部からの反射強度が、行きと帰りの 2 倍増加する行路により、その指数関

数で強度が減少するためである。加えて、行路の長さが増加するとともに、コンクリート内部での骨材などによる散乱の影響も大きくなると考えられる。反射強度の減少は、更に高感度な検出器、例えば液体ヘリウム冷却のシリコンボロメーターなどを用いることで克服可能であると考えられるが、あまり現実的ではない。

以上の結果から、テラヘルツ波方式による鉄筋のさび状態検査は、かぶりが 40mm 程度以下で領域的に可能であると結論されたと考えている。実地に用いるためには、現在 40kg 以上ある装置の軽量化と走査面を制御する機械的機構が必要となるが、技術的な困難性は大きくないと考えている。

3-9 コンクリート埋設腐蝕鉄筋撮像についてのまとめ

コンクリート中の鉄筋構造物のさび部を把握出来る事を研究開発対象とした。

検出対象とすべきさびの程度を把握するために、供用年数が長い (20 年~40 年) 供用コンクリート橋及び鋼橋を実施調査し、厚さ 1mm 単位のさびを対象とする事が妥当であるとした。実際の配筋状態に近い二種類の異なる異形鉄筋をコンクリートに埋設し、故意に塩水浸潤により部分的な厚さ約 1mm 程度以下の赤錆腐食部を形成して、30GHz テラヘルツイメージングを行った。その結果、かぶり 40mm 以下程度のコンクリート埋設異形鉄筋の配筋であれば、一本ずつの鉄筋の腐食状況は把握できないが、領域的にはさび部を検出することが可能であった。国総研との議論では、領域的に腐蝕部分が認識可能であれば、非常に有効であるとの見解を得ている。かぶり 50mm 以上の構造物に対しては、更に高感度な検出器の適用など、検討が必要である。

3-10 テラヘルツ波のコンクリート透過特性

**コンクリート試験体の吸収係数
セメントに対する細骨材組成依存性**

細骨材の混入割合が高い程、透過しやすい。
* 通常施工混合比~3

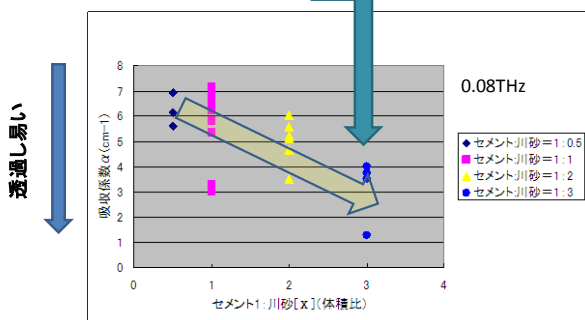


図 3-16 コンクリート供試体の吸収係数のセメント・細骨材組成依存性。表面反射の影響がない、真の吸収係数を求めている。

コンクリート材料の欠陥イメージング測定を行なうに先立ち、ポルトランドセメントと細骨材、粗骨材を配合したセメント材料の、JバンドからFバンドに亘る高周波電磁波透過特性を調査した。発生源はホーンアンテナを装着した空洞共振器型タンネットダイオード発振器であり、検出器は室温動作のゼロバイアス・ショットキー検出器である。電磁波集光系は吸収が少ないポリエチあるいはテフロンレンズである。

図 3-16 にコンクリート試験体の透過特性を示す。適用周波数は 80GHz(0.08THz)である。物質の吸収係数を求める場合、入射電磁波は空気と試料の屈折率の違いにより表面で反射される成分が存在する。従って、単に透過した電磁波強度を測定し試料厚さで除した値では、真の吸収係数とはならない。試験体の屈折率が既知であれば、計算により補正出来るが、通常試験体の屈折率は不明であるので、その場合は、二種類以上の厚さが異なる試験体を測定し、以下の要領で表面反射及び試験体内部での反射を考慮した計算により、真の吸収係数を求める事が出来る。本研究開発ではその手法を適用し、超高周波数帯域で初めてコンクリート試験体の真の吸収係数を求めた。

ほぼ平行な板状試料に光あるいは電磁波が入射する場合を想定する。透過係数 T は、入射光の電力 I_0 に対する透過光の電力 I の比、 I/I_0 で定義される。試料の厚さを x、吸

収係数を α 、反射係数を R であるとき、試料表面から試料内部へ入る光強度は

$$(1 - R)I_0$$

試料を透過して、試料の裏面に到達する光強度は、試料を透過する間に吸収されて指数関数 \exp 的に弱くなるから、

$$(1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)$$

試料裏面に到達した光は試料内部で再び試料内部側へ反射係数 R で反射され、その結果、試料裏面から出てくる光強度は

$$(1 - R)I_0 \exp(-\alpha x)(1 - R)$$

となる。この光は更に試料表面へ戻り、同じように反射と透過を繰り返して(多重反射条件)、最終的に試料裏面から放出される総透過量は、

$$T = \frac{(1 - R)^2 \exp(-\alpha x)}{1 - R^2 \exp(-2\alpha x)}$$

で求められる。もし αx が大きい場合は(仮定)、分母の第二項が無視出来て、

$$T \approx (1 - R)^2 \exp(-\alpha x)$$

とすることが出来る。あくまで仮定であって、常に正しいわけではない。

もし反射係数 R と x が分かっていたら、この式から吸収係数 α を直接求める事が出来

**コンクリート試験体の吸収係数
セメントに対する細骨材+素骨材組成依存性**

コンクリートは、組成により軽量木材のバルサや木材のスギと同程度の高い透過性がある。(粗骨材は細骨材の2倍容積混合)

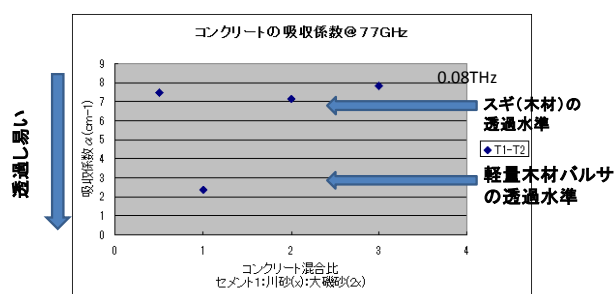


図 3-17 細骨材の2倍容量の粗骨材(大磯砂)を投入したコンクリート供試体の吸収係数の組成依存性

る。しかし一般に試料の反射係数 R は分からない場合が多い。

その場合は、厚さが x_1 と x_2 と異なる試料の透過強度 T_1 と T_2 を測定し、

$$\frac{T_1}{T_2} \approx \exp\{\alpha(x_2 - x_1)\} \Rightarrow \alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \ln \left\{ \frac{T_1}{T_2} \right\}$$

から吸収係数 α を求める事が出来る。 α は一般に $[cm^{-1}]$ 単位で表す。従って、試料の厚

さ x_1 と x_2 も cm 単位で計算する。
 図 0-3 の結果は、ポルトランドセメントに対して骨材組成が増加するほどテラヘルツ波の吸収係数は減少し透過しやすくなる事を示す。これはポルトランドセメントの比重が 3.15g/cc と骨材の比重 (1.5g/cc) よりも大きく、コンクリート材料中最も大きい事から理解できる結果である。

次に、細骨材の 2 倍容積の粗骨材 (大磯砂) を投入したコンクリート試験体の吸収係数の組成依存性を図に示す。組成により吸収係数は $2\sim 8\text{cm}^{-1}$ の間で変化するが、これは木材のスギ (吸収係数が約 7cm^{-1}) 及び軽量木材のバルサ (吸収係数が約 2cm^{-1}) に匹敵し、十分透過し易い材料である事を示している。

3-11 コンクリート試験体透過強度の周波数依存性

図 3-18 にコンクリート試験体の透過強度の周波数依存性を示す。骨材の種類や粒径などに依存すると思われるが、本研究で作成した試験体では、50 乃至 120GHz 帯域の透過能が高いことが分かる。本研究では、上記の周波数帯域のテラヘルツ光源を用いて、種々のコンクリート構造物欠陥イメージングを行った。

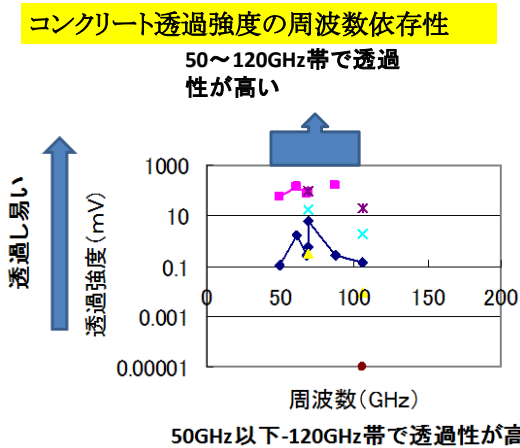


図 3-18 コンクリート透過強度の光源周波数依存性。

3-12 コンクリート構造物中の空洞欠陥イ

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出 (道路構造物試験体内部の亀裂・空洞)

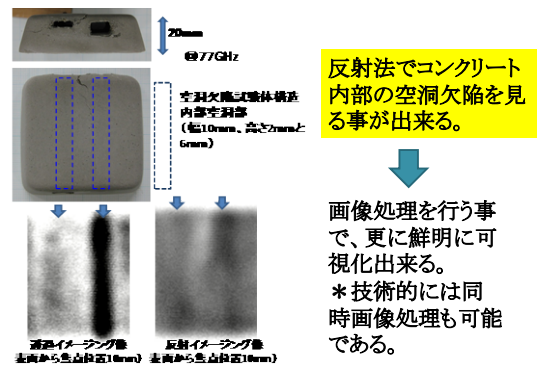


図 3-19 高周波テラヘルツによる空洞欠陥イメージング像

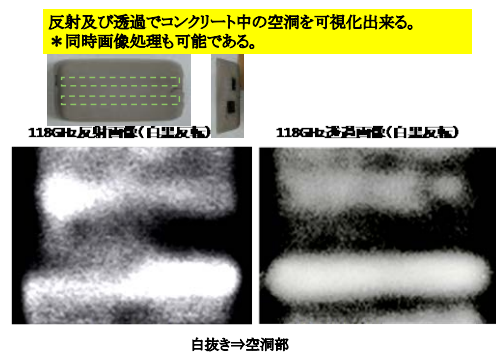


図 3-20 コンクリート供試体内部に形成した空洞のテラヘルツイメージング

図 3-19 及び図 3-20 にコンクリート試験体内部に形成した空洞欠陥のテラヘルツイメージング像を示す。透過法及び反射法でも、空洞欠陥を撮像することが可能である。これは、空洞部 (空気) とコンクリートの屈折率の違いから、空洞界面でテラヘルツ波の反射が生じるためであろうと思われる。また、空洞の隙間厚さは波長限界より小さな 2mm も撮像できている。光学顕微鏡でも同様であるが、波長が揃った単色光を用いた場合、縦方向 (高さ方向) の分解能は極めて高く (干渉顕微鏡法)、3A (オングストローム) の一分子層を解像できる。

3-13 コンクリート中の異物のテラヘルツイメージング

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(道路構造物試験体内部の異物)

コンクリート試験体中の異物 (ベニヤ板、段ボール板)

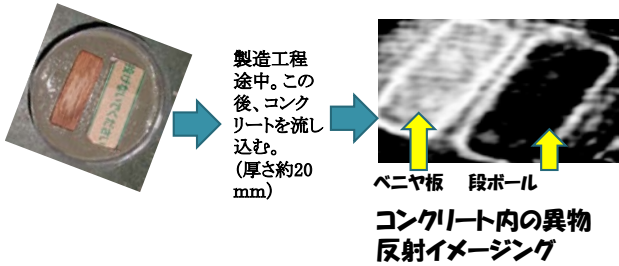


図 3-21 コンクリート中に埋設された異物(ベニヤ板と段ボール)のテラヘルツイメージング像。コンクリートとの屈折率の違いにより反射強度に違いが生じるものと考えられる。

図 3-21 に、コンクリート中に埋設したベニヤ板及び段ボールのテラヘルツイメージング像を示す。前述の空洞の場合と同様に、コンクリートと異物の屈折率に違いがあるため、その界面でテラヘルツ波の反射が生

図 3-22 より高周波光源で撮像したコンクリート中埋設模擬鉄筋像

コンクリート試験体中の模擬鉄筋 イメージング (@118GHz)

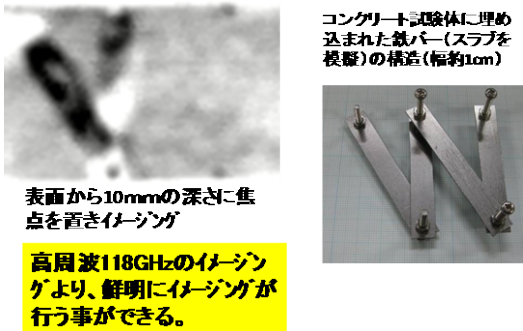


図4.9 より高周波テラヘルツで撮像したコンクリート中埋設模擬鉄筋像

じるため、反射法で異物の撮像が可能となっていると考えられる。

3-14 コンクリート内部の模擬鉄筋イメ

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(道路構造物試験体内部の金属構造物)

コンクリート試験体中の模擬鉄筋反射イメージング (@77GHz)

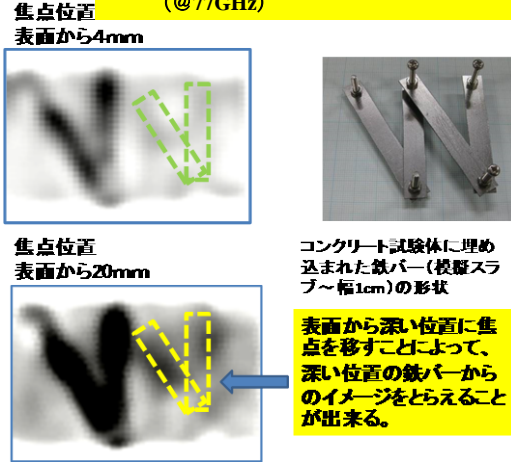


図 3-22 コンクリート供試体内部の模擬鉄筋構造物のテラヘルツ反射イメージング像

図 3-22 に、コンクリート試験体内部に埋設した鉄筋を模擬した金属構造物を反射テラヘルツイメージングした結果を示す。テラヘルツ光学系の焦点位置を変えることで、より深部の鉄筋構造物を撮像することが出来る。本研究では手動にて焦点位置を変化させたが、自動焦点機構を備えることで、イメージのコントラスト解析をすることが可能となり、表面からの距離も計測することが可能となろう。図 3-22 に更に高周波テラヘルツでイメージングしたコンクリート中埋設の模擬鉄筋像を示す。より高周波を用いることでより鮮明に撮像することが可能となる。

埋設した模擬鉄筋の交叉角度から推定すると、おおよそ 1mm 程度の亀裂が検出できると思われる。

3-15 テラヘルツ波透過率の周波数依存性

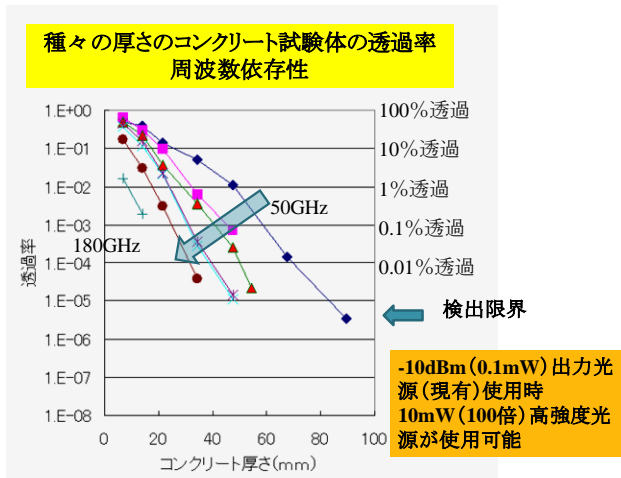


図 3-23 コンクリート透過率の周波数依存性。0.1mW 出力の微弱光源で、周波数により 20mm~80mm 透過することが可能。

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下模擬亀裂)

塗膜1.1mmのエポキシ樹脂塗装下の金属表面模擬クラック(溝)をイメージング出来た。樹脂塗料の影響は極めて少ない=樹脂塗料の透過性は高い。代表的な橋梁用塗料:フッ素樹脂塗料、エポキシ樹脂塗料、ポリウレタン樹脂塗料で行った。

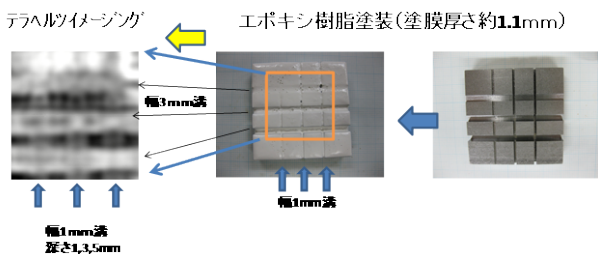


図 3-24 エポキシ樹脂塗料下の金属構造物模擬亀裂の反射テラヘルツイメージング像

図 3-23 にコンクリート厚さを変化した場合の、テラヘルツ波透過率の周波数依存性を示す。本研究開発で用いたテラヘルツ光源は、-10dBm (=0.1mW) 程度の微弱な光源であるが、それでも周波数により 20mm から 80mm の厚さのコンクリートを透過する事が分かった。市販レベルでは、これより 100 倍程度高出力な光源を使用する事が出来るので、その場合、反射法では入射と

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下模擬亀裂)

金属模擬亀裂試験体(溝加工品)からの反射強度分布

波長(〜3mm)限界を超える高解像イメージング

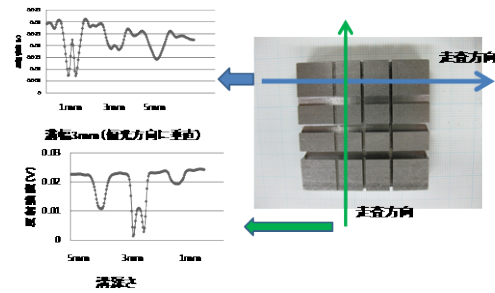


図 3-25 金属構造物の塗膜面下の亀裂を模擬した供試体構造とテラヘルツ反射強度分布

反射の往復であるので、それでも約 10 倍厚いコンクリート試験体からの情報を得る事が可能となる。今回コンクリート試験体の真の吸収係数を求める事が出来たので、構造物欠陥の対象により必要とされる光源を用いた検査装置を設計する事が可能である。

3-16 塗装膜下の金属構造物亀裂の検出

図 3-24 に、塗装された金属構造物の塗膜下の亀裂を模擬した試験体の構造と、テラヘルツ反射強度分布を示す。使用したテラヘルツ波の波長は約 3mm であるが、その波長限界を超える狭い溝 (1mm) の検出を行えることが分かる。これは前述のように、共焦点光学系を適用した結果、焦点を結ばない場所からの反射光が検出器の絞りを通過せず、ぼやけた像とならない効果である。この金属試験体へ、典型的な橋梁等の金属構造物へ適用される塗料である、ウレタン系・エポキシ系そしてフッ素樹脂系塗料を、最大厚さ 11mm 塗装してテラヘルツイメージングを行った。これら塗膜面はテラヘルツ波の透過能が極めて高く、塗装面の影響が小さい状態で、塗装面下の模擬亀裂を撮像することが出来た。それらの結果を図 3-23~エラー! 参照元が見つかりません。3-25 に示す。

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下模擬亀裂)

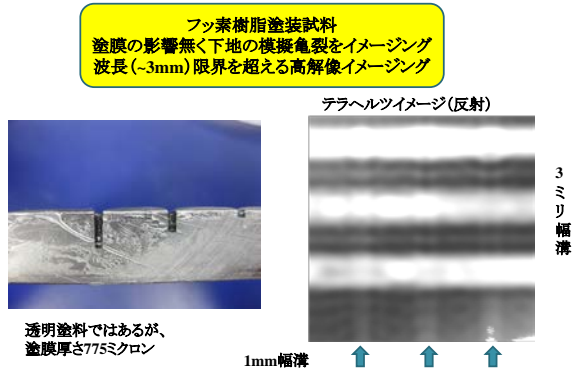


図 3-23 厚さ 0.8mm のフッ素樹脂塗料下の模擬金属亀裂の撮像

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下さび)

ウレタン樹脂塗膜下のさび

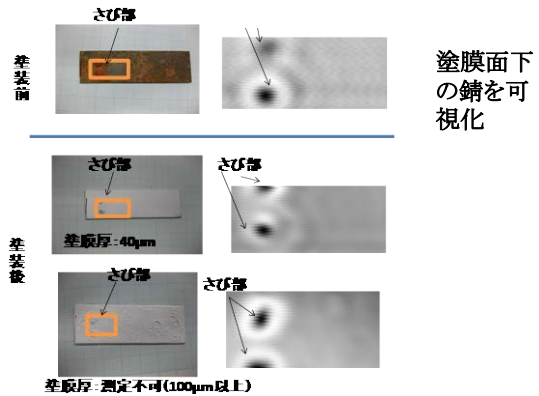


図 3-24 ウレタン樹脂塗膜下のさびイメージング

テラヘルツ波は、電波の一種類であるから金属に反射される。加えて鉄や銅等の酸化物(錆)により、その反射強度が大きく変化する。また、いくつかの酸化物ではテラヘルツ周波数帯に特有の吸収ピークを示すことを我々は既に明らかにしている。その特徴を生かして、通常の可視光や赤外光では見ることが出来ない着色塗膜面下の錆状態を検出することが可能となる。塗装面や樹脂等は透過し、内部の金属構造物表面からは強く反射され、しかも金属表面の錆により反射強度が変化する特徴を生かした、テラヘルツ波の重要な「キラアプケーション」の一つになるものと期待している。この種の樹脂等に内包された金属構造物には多種多様なものがあり、その応用範囲は極めて広い。

図 3-26 に本研究で人工的に鉄板上に形成した錆の成分分析結果を示す。この鉄さびの成分は、塩水の成分を反映して、ナトリウム・塩素、シリコン、鉄を主成分としている。

図 3-27～図 3-29 に、各種樹脂塗料で覆われた錆部のテラヘルツイメージング結果を示す。錆を覆った塗装面を通して、その下の錆を可視化することが可能である。

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下模擬亀裂)

ウレタン樹脂塗料 2回塗装 平面部分塗膜厚:約265μm

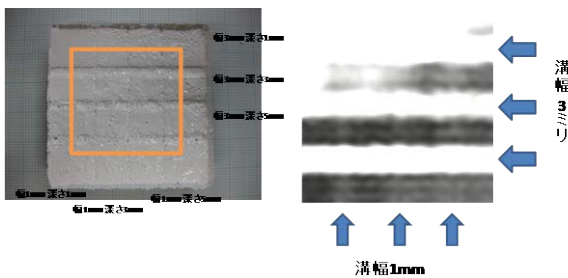


図4.13 ウレタン樹脂塗装された金属構造体の模擬亀裂テラヘルツ反射イメージング像

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下さび)

模擬さび部(50℃塩水付着鉄)の組成化学分析(蛍光X線分析)

RhはX線源由来。
錆部の組成は(鉄・塩素・ナトリウム・シリコン)から成り立つと思われる。
* 軽元素の酸素は検出出来ないが恐らく共存している。

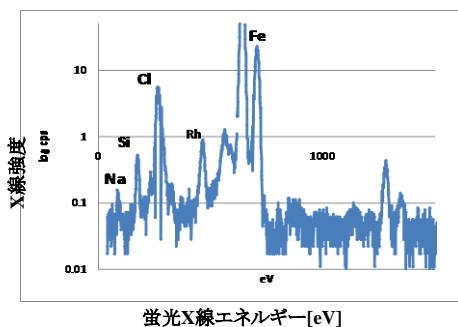


図 3-26 人工的に鉄板上に塩水浸潤により形成した「さび」の成分を化学分析した

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下さび)

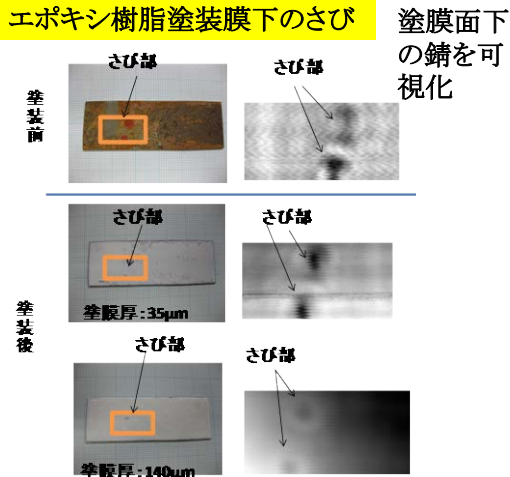


図 3-27 エポキシ樹脂塗料で覆われたさびのテラヘルツイメージング

人工的に形成された欠陥を含む道路構造物試験体の欠陥検出(金属構造体の塗膜下さび)

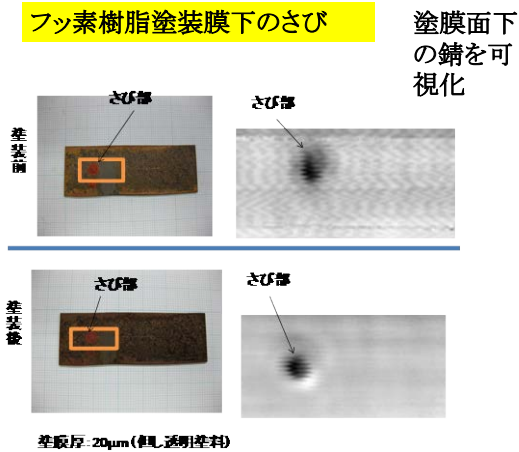


図 3-28 フッ素樹脂塗料下のさびイメージング

3-17 コンクリートへの水の浸潤測定

コンクリート建材の強度形成過程には、骨材（砂や砂利など、コンクリートの骨格をなすもの）との水和物形成が密接に関係している。コンクリートの強度劣化には脱アルカリ反応の影響が大きく、コンクリート中の水により引き起こされる脱アルカリ反応として炭酸化がある。コンクリートの炭酸化は内部を高アルカリから中性に近い環境に変化させ、鉄筋をさびやすくする。

セメント・コンクリートの炭酸化の原因は、主に、コンクリート中の液相に炭酸ガスが溶解し、それによって生じた炭酸イオンがセメント水和物と反応することで起こる。

また、コンクリートの膨張やひび割れの原因となるアルカリ骨材反応にも水が関与している。アルカリ骨材反応のうち最も被害が大きいのはアルカリ・シリカ反応であるが、これは十分な水、ある量以上の水酸化アルカリ濃度、反応性骨材の存在という三つの条件が揃ったときに起こる。逆に言えば、三つのうちどれかを防げば反応は起こらない。したがって、上記の条件のひとつであるコンクリートの過剰水分を迅速かつ精密に検出することで、建材破壊を早期に予防することが可能である。

100GHz 付近の電磁波は大気中の吸収係数が適度に小さいので、リモートイメージングに適している。さらに、この周波数領域では水分子による吸収が大きいため、建造物中の水の存在を高感度に検出することが可能である。図 3-29 は通常のポルトランドセメントで形成した試料内部に小径の孔を形成し、その孔から水を浸潤させて、試料内部の水の浸潤状態を透過イメージングしたものである。この図においては、透過が小さい、すなわち水による吸収が大きいところほど濃い色で表されており、時間が経過するにしたがってコンクリート中に水分が広がっていく様子が見て取れる。このようにテラヘルツイメージングを用いてコンクリートの含水量を計測することで、構造物の健全性の評価や建材破壊の原因の予測を容易に行うことができると考えている。

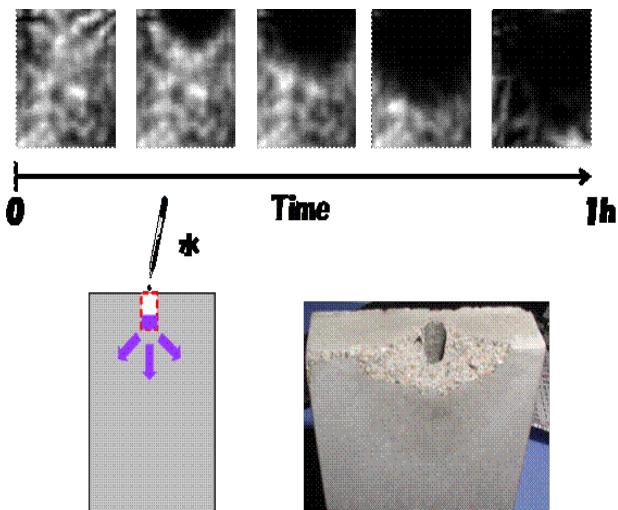


図 3-29 コンクリートへの水の浸潤イメージング

3-18 セラミックタイルの接着不良欠陥

コンクリートと同様に、外壁建材として広く用いられている各種セラミックタイルもテラヘルツ透過特性が良好である。テラヘルツ波を用いることで外壁とセラミックタイルの接着不良部を画像として把握することが出来る。図 3-30 は、コンクリートの表面にセラミックを接着し、それを反射測定することにより得られたイメージング画像である。この図より、画像の中心部から Y 字状に反射強度の強い部分が存在していることが分かる。これはこの領域でセラミックタイルとコンクリート表面の間に間隙が存在し、その間隙と試料の界面で反射が起こるためだと考えられる。従来、建築業界ではこの種の検査を行う場合、主に打診法が用いられており、壁を叩いた際の音響

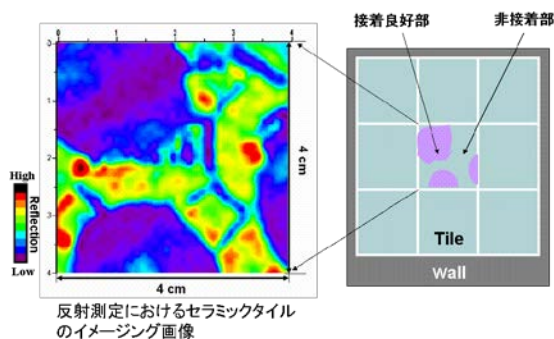


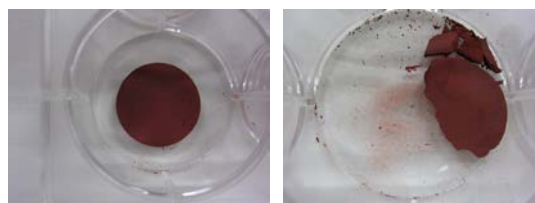
図 3-30 セラミックタイルの反射イメージング画像。モルタル接着工法、接着剤工法でも適用可能。

変化によって接着状態の良否を診断している。近年では発生する音響のスペクトル解析も行なわれているが、多くは熟練した検査技師の判断に頼っている。トンネル内壁の剥離状態も同様の手法が用いられるが、テラヘルツイメージングを適用することで誰でも定量的に接着・劣化状態を把握できるものと期待している。

3-19 模擬赤錆供試体（鉄酸化化合物）を用いた さび化合物のテラヘルツ透過特性

さび劣化が進行した供用中の PC 橋及び鋼橋の腐食状態調査から、橋梁の腐食層厚さは 1mm 以上も有る場合が見受けられ、著しく腐食が進行した部位では、腐食孔まで到達している事を把握出来た。橋梁用鉄鋼材料を供給しているメーカー担当部署から聴取した所、コンクリート橋を構成する鋼材は、特に表面腐食防止塗装や腐食防止膜の処理を行う事は少なく、自然の赤さび（酸化第二鉄主成分）が薄く形成された状態でコンクリート中に埋設される事もあるとの事であった。鉄さびの成分は複数の鉄酸化物及びその水酸化物によって構成されているが、さびが十分進行した場合の主要成分は酸化第二鉄（いわゆる赤さび）である。

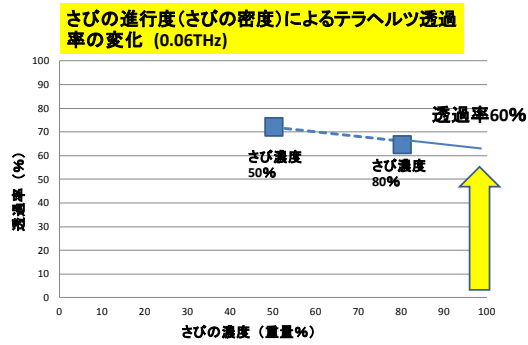
厚さ約 1mm の鉄さび



Fe₂O₃ 50wt% pellet(PE混) Fe₂O₃ 80wt% pellet(PE混)

さび成分の酸化第二鉄
+
さび以外の有機物成分(ポリエチレン粉)

図 3-31 酸化第二鉄と PE 扮による模擬さび供試体



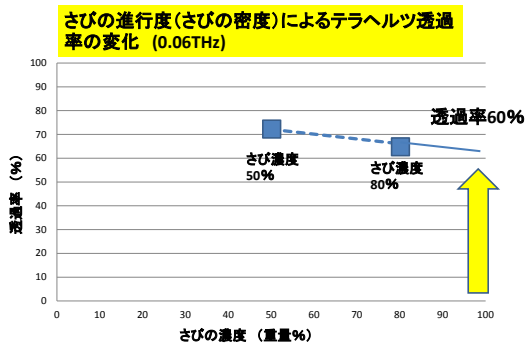
さび100%でも60%を超える高い透過率を示す(厚さ1.5mmのさび)

図 3-32 サブテラヘルツ波透過率の酸化第二鉄濃度依存性

さびの進行程度は、さび成分の濃度（密度・充填率）及びさび層の厚さで押し量られる。十分現実のさびに近い供試体として、酸化第二鉄とその他の水酸化物等の成分としてポリエチレン粉末を混入した板状のものを「さび」とした。さびの進行具合は、酸化第二鉄の濃度が高いものをさびが進行しているものとし、酸化第二鉄の板状試料の厚さが厚いものを、同じくさびが進行しているものとした。

様々なさび状態に対応した酸化第二鉄板状試料を用意し、テラヘルツ波透過基本特性を把握した。様々なさび状態とは、酸化第二鉄濃度が異なる試料と、酸化第二鉄の厚さが異なる試料である。さび濃度を変えた模擬さび供試体のサブテラヘルツ透過率の濃度依存性を

図に示す。酸化第二鉄を主剤とした模擬さび供試体の透過率は大変高く、100%濃度を



さび100%でも60%を超える高い透過率を示す(厚さ1.5mmのさび)

想定した場合でも、約60%の透過率を得ることができるものと推

図 3-33 模擬さび供試体（厚さ 1.5mm）のサブテラヘルツ波透過率のさび濃度依存性

板状さびをコンクリートに埋設してテラヘルツ透過強度を測定。さびの進行が進むにつれて、透過強度が減少する。

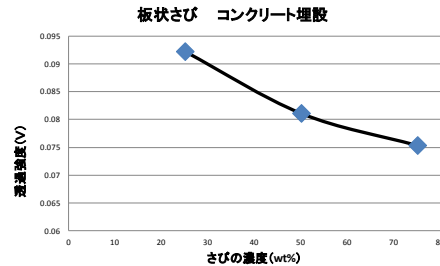


図 3-34 コンクリートに埋設した模擬さび供試体のサブテラヘルツ波透過率のさび濃度依存性

定できる。従って、この高い透過率を用いることにより、実用的な反射・透過配置によるさび状態把握が可能であると考えられる。

次に、この供試体をコンクリートに埋設し、その透過率を同様に測定した。その結果を図に示す。

コンクリートに埋設した状態でも、埋設していない状態と同様な透過率のさび濃度依存性を示している。

即ち、酸化第二鉄の濃度及び厚さ（さびの進行度とさびの厚さ）に対応して、透過率は減少していくが、100%酸化第二鉄濃度でも60%もの高い透過率を示している。この結果は、板状の模擬さび供試体をかぶり厚さ約1cm程度でコンクリート中に埋設して測定しても同じように得られた。

この結果から、コンクリート中のさびの進行程度を把握することが可能であることが分かるとともに、反射法によるさび状態の把握が可能である。鉄材上のさびがある状態で、さび表面からテラヘルツ波を照射し、さびの層を透過して下地の鉄表面で反射し、再びさびの層を透過して、さび状態の把握を行うことが可能である。

3-20 鉄さびのテラヘルツ波反射透過特性

図3-35は、テラヘルツ波が反射するステンレス鋼板上に模擬さび供試体を貼り付け、表面からテラヘルツ波を照射してさびの層を透過する強度を測定した結果である。

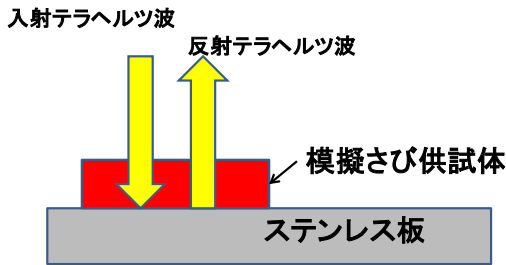


図 3-34 さびの透過反射強度測定用供試体の断面構造

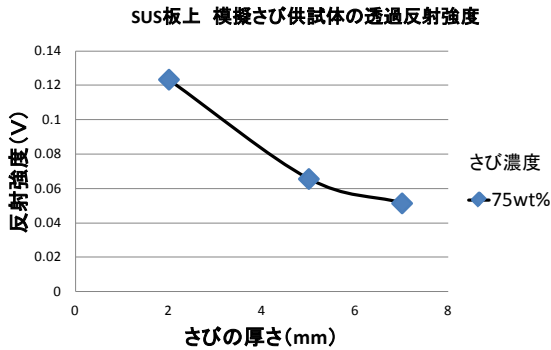


図 3-35 ステンレス板上に貼り付けた模擬さび供試体を透過して反射してくるテラヘルツ波強度のさび層厚さ依存性

透過測定結果と同様に、さびの進行度（濃度）とさび層の厚さが増加するとともに、テラヘルツ反射強度が単調に減少する結果が得られた。

次に、これらのさび試料をかぶり厚さ約1cm程度でコンクリート中へ埋設し、同様の測定を

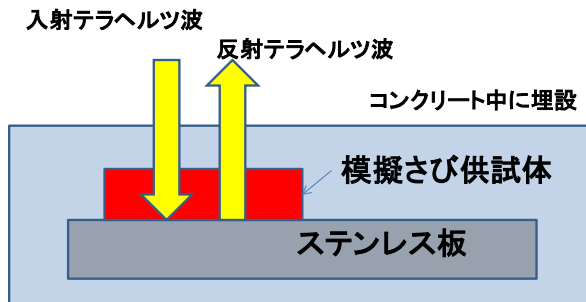


図 3-36 コンクリート中に埋設した模擬さび供試体の透過反射強度測定用供試体断面構造

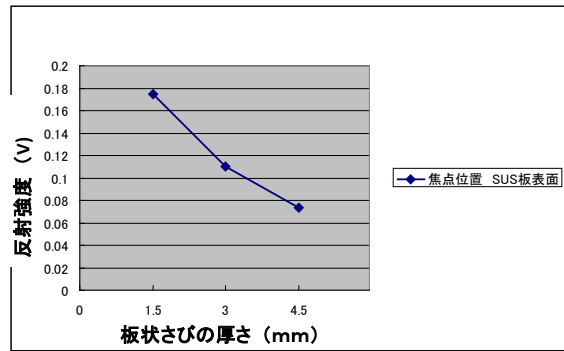


図 3-37 コンクリート中に埋設したステンレス板上に貼り付けた模擬さび供試体からのテラヘルツ反射強度の、模擬さび供試体厚さ依存性

行った。コンクリート中へ埋設した様々な酸化第二鉄濃度及び厚さの模擬さび供試体の透過強度測定を行った。その結果、テラヘルツ波透過強度は、さびの進行度（濃度の増加とさび層の厚さの増加）に伴い、単調に減少した。

透過測定結果と同様に、さびの進行度（濃度）と模擬さび供試体の厚さが増加するとともに、テラヘルツ反射強度が減少する結果が得られる。

次に、これらの模擬さび供試体をかぶり厚さ約1cm程度でコンクリート中へ埋設し、同様の測定を行った。コンクリート中へ埋設した様々な酸化第二鉄濃度及び厚さの模擬さび供試体の透過強度測定を行った。その結果、テラヘルツ波透過強度は、さびの進行度（濃度の増加と模擬さび供試体の厚さの増加）に伴い、単調に減少した。

また、反射透過測定用の、ステンレス鋼板上に貼り付けた様々な酸化第二鉄濃度が異なる模擬さび供試体も、かぶり厚さ約1cm程度でコンクリート中に埋設し、反射強度のさび進行度による変化を測定した。コンクリートを透過し、模擬さび供試体に到達して供試体を透過し、下地のステンレス鋼板表面で反射して表面に戻るテラヘルツ波強度は、コンクリートに埋設する前と同様に、模擬さび供試体の酸化第二鉄濃度の増加とともに単調に減少した。

これらの結果から、コンクリート中に埋設された金属のさびの進行度が把握できると考えられる。

3-21 コンクリートに埋設したさび鉄骨材料のテラヘルツイメージング

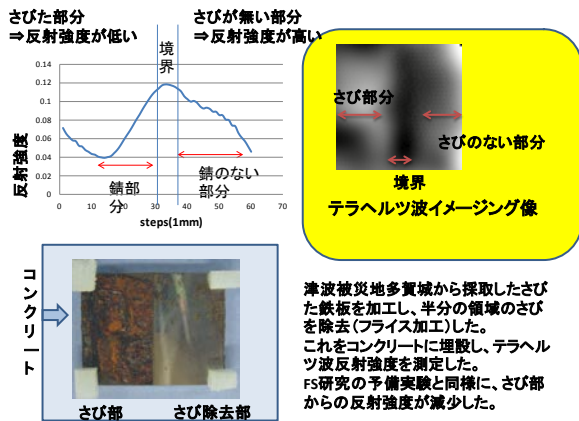


図 3-38 長期間海水中に浸潤した結果生じたさび部位を持つ鉄板供試体のサブテラヘルツイメージング画像。さびを除去した部位からの反射強度が高い。さび領域からの反射強度は減少する。

海水に約半年程の長時間曝された事によってさびた鉄鋼構造物のサンプルを採取する事が出来た。フライス加工によりさびの一部を除去し、一部にさびを残存した供試体をかぶり厚さ約1cm程度でコンクリートに埋設した。

この試験体のテラヘルツイメージングを行った結果を図に示す。

FS研究及び我々の予備実験から推察された通りに、鉄さび部からのテラヘルツ反射強度はさびていない部分からの反射強度より減少し、コンクリート中に埋設された金属のさび状態を把握する事が可能となる結果を示した。これは、さび層はテラヘルツ波の透過率は十分高いが、透過する間に有る程度減衰し、下地鉄部からの反射強度が減少しているためと思われる。

さび領域とさびを除去した領域の境界で反射強度が増加している理由は、フライス加工でさびを除去したため、境界領域にほぼ垂直な段差が生じ、その段差によるサブテラヘルツ波の光路差で干渉が生じるためである。しかし現実のさび領域を持つ金属構造物では、さび領域とさびが無い領域の境界は、この供試体のような垂直段差では無いと考えられるから、干渉効果により境界領域の反射強度が増加することは無いと考

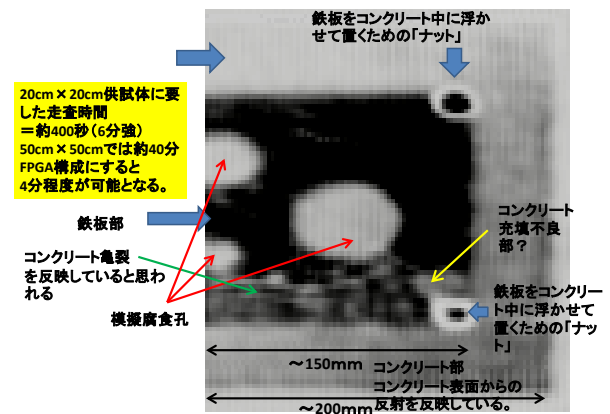


図 3-39 腐食孔を模擬した穴開き鉄板を埋設したコンクリート供試体のイメージングえられる。

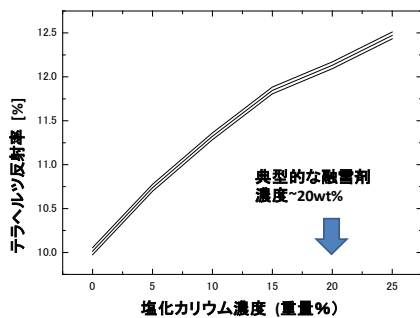
更に腐食孔を模擬した穴あき鉄板をコンクリート中に埋設した供試体を制作し、テラヘルツイメージングによってその模擬腐食孔を撮像した。

図 3-39 中、黒色部分が鉄板であり、白抜き部分が腐食孔を模擬した孔である。黒色部分の鉄板周辺に薄く灰色のイメージがあるのは、コンクリート表面からの反射・散乱テラヘルツ波である。その他、コンクリートのクラック及び内部の鉄板表面でのコンクリート充填不良に起因すると思われるイメージが表れている。供試体は 20cm x 20cm の大きさである。

3-22 グラウト空隙の浸水(融雪剤混入水)検出

供用中の PC 橋の腐食状態調査で示したように、PC 橋等のグラウト充填不良は、その不良箇所への永年に亘る水や融雪剤成分の浸入により、空隙周辺 PC 鋼材を腐食させる。また PC 橋のシースを浸食する可能性がある。本項では、典型的な融雪剤成分である塩化カリウム水溶液のテラヘルツ波反射透過特性を求め、その後、シーソ周辺の空隙を模擬したコンクリート供試体を作成し、空隙の一部に典型的な融雪剤濃度である 20 重量%の塩化カリウム水溶液を充填した領域を形成し、浸潤領域と浸潤していない領域の検出を行った。その結果、塩化カリウム水溶液によるテラヘルツ波の吸

図 3-40 融雪剤塩化カリウム水溶液からのサブテラヘルツ波の反射率、水溶液濃度依存性。水溶液濃度が高くなるほど、反射強度が増加し、透過しにくくなる。



収により、融雪剤水溶液の浸潤領域を把握することが出来た。

3-23 融雪剤塩化カリウム水溶液のテラヘルツ波反射特性

テラヘルツ波の透過率が十分高いポリスチレン製の液体セルを用いて、塩化カリウム水溶液の透過率及び反射率を求めた。その結果を用いて、塩化カリウム水溶液の屈折率を算出した。通常の古典的なマックスウェルによる電磁界方程式から導出される p 偏光のフレネルの式を用いている。

$$r_p = \frac{-\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_i + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}}{\left(\frac{n_2}{n_1}\right) \cos \theta_i + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2 - \sin^2 \theta_i}} \quad \begin{matrix} r_p \dots \text{反射係数} \\ R_p \dots \text{反射率} \\ n \dots \text{屈折率} \end{matrix} \quad R_p = r_p^2$$

図 3-41 屈折率を求める p 偏光に対するフレネルの式

ここで入射角度 θ は本測定では45度とした。

更にその結果から、より汎用性が高い実誘電率と複素誘電率の塩化カリウム水溶液濃度依存性を求めた。複素誘電率は屈折率・消衰係数と誘電率との関係を示す下記の一連の式から求めた。

✓複素誘電率

$$\epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$$

✓実数部、虚数部

$$\frac{\epsilon_1}{\epsilon_0} = n_2^2 - \kappa^2 \quad \frac{\epsilon_2}{\epsilon_0} = 2n\kappa \quad \kappa \dots \text{消衰係数}$$

✓消衰係数

$$\kappa = \alpha \times \frac{\lambda}{4\pi} \quad \alpha \dots \text{吸収係数} \quad \lambda \dots \text{波長}$$

✓吸収係数

$$\alpha = \frac{1}{(x_2 - x_1)} \ln \left(\frac{T_1}{T_2} \right) \quad \begin{matrix} T \dots \text{透過率} \\ x \dots \text{試料の厚さ} \end{matrix}$$

図 3-42 複素誘電率を求める一連の式

この超高周波数領域での液体試料の誘電的性質は、初めて明らかになった結果である。

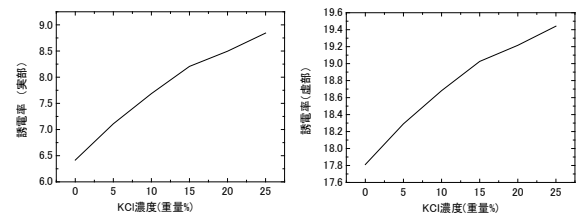


図 3-43 融雪剤成分（塩化カリウム）水溶液の複素誘電率 濃度依存性

塩化カリウム水溶液のテラヘルツ波反射率は、濃度の増加とともに単調に増加することが分かった。その結果と呼応する形で、透過率は減少する。しかし、水溶液のテラヘルツ波透過率は、コンクリート中の融雪剤（本研究では塩化カリウム）水溶液を検出する事が可能な程十分に小さいことがわかった。

また、これらの測定結果から、塩化カリウム水溶液の実誘電率と複素誘電率の濃度依存性を求めた。実誘電率は液体の屈折率を決め、複素誘電率は消衰係数とも言い、吸収損失を決定する物理量である。測定の結果、いずれの誘電率も濃度とともに単調に増加することがはじめて明らかになった。

3-24 ラウトの充填不良を模擬したコンクリート空隙中の融雪剤水溶液検出

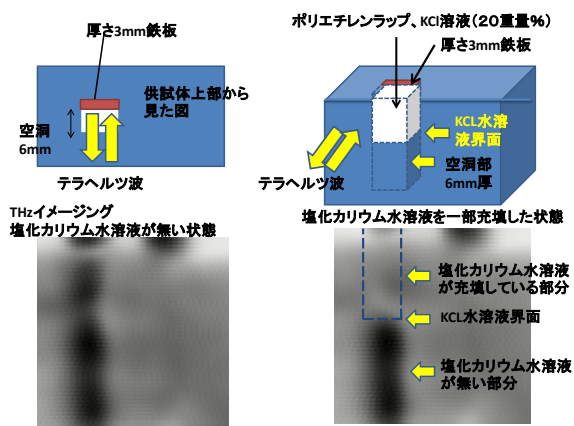


図 3-44 グラウト充填不良を模擬した鉄板上の空洞部を持つ供試体の構造と、そのサブテラヘルツイメージング像

以上の、塩化カリウム水溶液のテラヘルツ帯吸収反射特性から、グラウトの充填不良により存在する空隙に融雪剤水溶液（塩化カリウム水溶液）が浸潤した場合、コンクリートを透過し、金属表面で反射されるテラヘルツ波強度は、塩化カリウム水溶液により大きく吸収され、融雪剤水溶液が存在する場所としない場所を可視化することが出来ると予想される。

本項では、シース周辺の空隙を模擬したコンクリート供試体を作成し、空隙に典型的な融雪剤濃度である20重量%の塩化カリウム水溶液を一部充填して、その可視化を行った。

その結果、図グラウト充填不良を模擬した鉄板上の空洞部を持つ

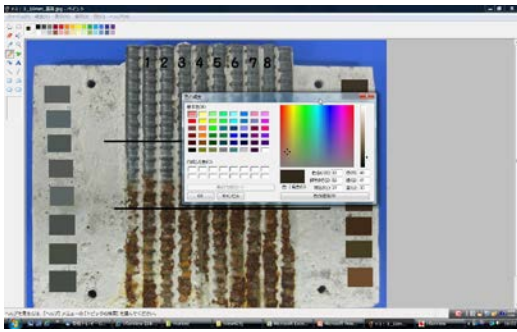
供試体の構造と、そのサブテラヘルツイメージング像に示すように、融雪剤水溶液が浸潤した空隙領域では、予想されたように、融雪剤水溶液が浸潤していない領域に比べてコンクリート内部の鋼材構造物からのテラヘルツ反射強度が大きく減少し、融雪剤水溶液の浸潤状態を可視化することが出来た。

3-25 錆進行度の色分析による定量化

コンクリート内の鉄構造物のさび状態を、構造物を破壊することなく評価するために

は、さび状態の定量評価を行う必要がある。従来の JIS 規格によるさび・腐蝕度の進行度の定義は、腐蝕による重量変化であるから、構造物を破壊して腐蝕度を測定しなければならない。そのための予備的な手法として、さびの色分析による腐蝕進行度の定量化を試みた。色分析は、さび供試体をデジタルカメラにより撮影し、そのカラー画像を、RGB（赤、緑、青）の三原色強度で定量化し、更に色相・明度・彩度も数値化する。一定の同じ撮影条件下で色分析することにより、さびの進行度を、破壊的な重量変化でなく、非破壊的な手法で評価できる可能性がある。

図は、標準的な色分析ソフトであるマイクロソフトのペイントを用いた色分析の手法である。RGB 及び色相・彩度・明度を数値化することが出来る。これを用いて、腐蝕していない部分と腐蝕部の二点で、色分析によるさび進行度を定量化した結果を示す。



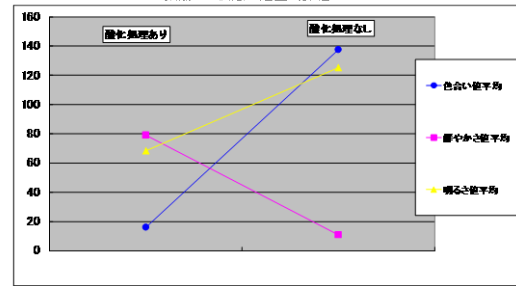
Microsoft windows付属の「ペイント」を用いて下記パラメータを測定
 ・色合い(0-240)
 ・鮮やかさ(0-240)
 ・明るさ(0-240)
 ・赤(0-255)
 ・緑(0-255)
 ・青(0-255)

17

図 3-45 腐蝕鉄筋を用いた腐蝕進行度の色分析による定量化の試み。

鉄筋さび状態の定量的評価

色の属性の種類: 色相(色合い) 明度(明るさ) 彩度(鮮やかさ)による
 鉄筋さび状態の定量的評価



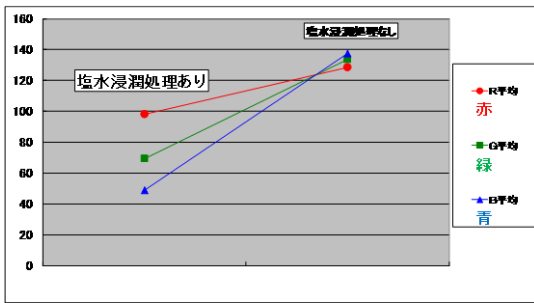
鉄筋さびの進行とともに、色相(色合い)が大きく低下する。明度(明るさ)も低下する。逆に彩度(鮮やかさ)は増加する。

19

図 3-47 さびの進行とともに、特に色合いの減少が目立つ。明るさも減少することがわかる。

鉄筋さび状態の定量的評価

鉄筋さび状態の色分析による定量的評価



さびが進行するに伴い、赤・R・緑・G・青成分のいずれも減少するか、特に青B成分の減少率が大きい。

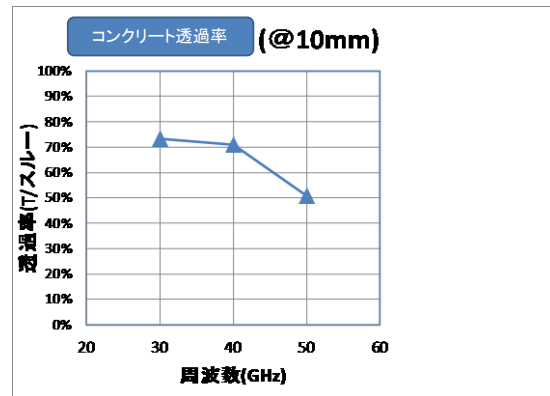
18

図 3-46 鉄筋さび部の腐蝕状態の色分析による数値化 (RGB 分析)。腐蝕が進行するに従い、特に B (青) 成分の減少が際立つ。

3-26 コンクリートの透過率 (低周波テラヘルツ)

コンクリート供試体の透過率周波数依存性 (低周波側) を図 3-48 に示す。

コンクリートのTHz波透過率



20

図 3-48 低周波領域のコンクリートの透過率

第4章 実験結果から得た所見

4-1 かぶり40mmでコンクリート埋設鉄筋の腐蝕状況を把握。

本目的を達成するために、共焦点配置等を採用したテラヘルツイメージング測定装置のプロトタイプを試作し、更に最終的には、FPGAプログラム構成を採用してイメージング測定時間の短縮を図り、FS段階より、約40倍の高速化を達成した。また、測定対象に適切に対応するため、30GHz～180GHzまでの広範囲な周波数範囲にわたるテラヘルツ光学系を構築した。

これを用い、部分腐蝕鉄筋埋設コンクリート供試体を作成し、テラヘルツイメージングを行った。

その結果、部分的に腐蝕したD6からD22鉄筋を埋め込んだコンクリート供試体に対して、かぶり10mm～40mmまでは、領域的に腐蝕鉄筋部を判別できることが示された。しかし、かぶり50mm供試体では腐蝕鉄筋部を判別する事が出来なかった。

この成果は、国内外の学術誌や学会にて発表するとともに、近々に発足となる、福島第一原子力発電所に係る、「文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業」『廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム委託費』（事業担当組織 東北大学

等）の検査技術部門の一つとして組み入れられることとなった。

4-2 テラヘルツ波のコンクリート透過特性

コンクリート構造物のテラヘルツイメージングの基本的なデータとなる、各種組成コンクリートのテラヘルツ物性値を明らかにした。コンクリートのセメント・砂・骨材組成に対するテラヘルツ波透過率、及び汎用的な組成コンクリートに対するテラヘルツ波透過率の周波数依存性を明らかにした。

4-3 コンクリート埋設鉄構造物の腐蝕程度の非破壊測定

テラヘルツ波の反射強度は、金属表面の酸化層の存在により減少する事が示されていた。この現象を用いることにより、金属表面の腐蝕（さび）状態を非破壊的に把握する事ができると考えられた。本研究では、鉄さびの模擬供試体を酸化第二鉄を用いて作成し、そのさび層厚さのテラヘルツ波反射強度依存性を明らかにした。更にさびの模擬供試体をコンクリート中に埋設して、テラヘルツ波反射強度測定から、コンクリート中の金属構造物表面のさび進行度を計測することに成功した。

加えて、本研究者らは、金属構造物の腐蝕進行度を非破壊で定量的に把握するため、鉄構造物表面のさびの色分析を行い、RGB分析と色相分析により、さびの進行度が定

量的に表現できることを示した。

4-4 コンクリート構造物内の空洞可視化

コンクリート構造物内の空洞は、コンクリート構造物欠陥の一つと考えられ、コンクリート充填不良から生じて水の蓄積を招き、コンクリート本体の劣化及び内部金属構造物の腐蝕を招きかねない。本研究では、人工的に空洞部を形成した供試体を作成し、透過法及び反射法で空洞の撮像を行うことに成功した。更に、空洞内の融雪剤成分を含む水溶液の存在も検出することに成功した。

4-5 コンクリート構造物内の異物検出

テラヘルツ波に対する屈折率の違いを用いることにより、コンクリート構造物に埋設された異物を検出することに成功した。コンクリート内に段ボール板やベニア板を埋設した供試体を作成し、これをイメージングすることで、これら異物を検出することに成功した。

4-6 目に見えない塗装膜下の金属表面のさび可視化

人間の目視では見ることが出来ない塗装膜下の金属表面のさびを、テラヘルツイメージングで可視化することに成功した。テラヘルツ波は、各種樹脂塗料に対しては透過性が高く、塗膜下の金属表面では良く反射される。加えて、反射テラヘルツ波強度は、

金属表面さびの程度により減衰する。この現象を用いることにより、肉眼では目視検査出来ない不透明樹脂塗装膜下の金属表面さび領域およびさび程度を非破壊的に検査することに成功した。

4-7 コンクリート内部への水の浸潤可視化

コンクリート構造物内部への水の浸潤は、コンクリート強度劣化や内部金属構造物腐蝕の主因となり、重大な検査対象である。テラヘルツ波は水分子等の極性物質に対しては大きな吸収及び反射特性を有する。本研究ではこれを利用して、コンクリートブロックに穿孔し、その中へ水を注入することでコンクリート内部へ水が浸潤する様子を撮像することに成功した。これは透過法でも反射法でも撮像可能である。同様の結果は、木材に対しても得ることが出来、木造建造物への水の浸潤も非破壊でとらえる事が可能である。

4-8 セラミックスタイルの接着不良検出

トンネル内壁や建物外壁などの構造物として用いられるセラミックスタイルの接着不良を、テラヘルツ波の反射を用いて非接触に検査することに成功した。これは、テラヘルツ波のセラミックスに対する高い透過性を利用したものである。故意に0.3mm程度の隙間をコンクリート板とタイルの間に

モルタル工法で形成した供試体を作成し、テラヘルツ反射イメージングにより撮像した。本方法は、従来のモルタル工法に対しても、近年の接着剤工法に対しても適用する事が出来る。

4-9 グラウト空隙の浸水（融雪剤混入水） 検出

融雪剤水溶液のグラウト空隙への侵入が、コンクリート鋼橋の腐蝕の大きな原因の一つであると指摘されている。そこで本研究では、まず、融雪剤水溶液のテラヘルツ波物性を明らかにした。融雪剤水溶液の屈折率と吸収係数（消衰係数）の濃度依存性を明らかにすることに成功した。

加えて、先にイメージングに成功していたコンクリート構造物内部の空洞欠陥部へ、融雪剤水溶液を封入し、その存在を検出することに成功した。

4-10 エクストラドーズド鋼橋等の外ケーブル健全度診断への応用

上記、外ケーブルの破断・腐蝕に対しては、現在、有効な検査手法が無い。そこで、外ケーブルと構造が酷似している絶縁被覆電線を模擬供試体としてテラヘルツイメージングを行い、被覆を剥ぐことなく、内部の金属素線を可視化することに成功した。

第5章 まとめ（今後の道路政策への提言など）

本研究により、従来この種の検査に適用されることが無かったテラヘルツ波の、コンクリート構造物内部の各種欠陥検査への適用可能性が示され、その適用限界についても調査することが出来た。

今後は、この結果を受け、以下の応用が特に有望であろうと考えている。

テラヘルツ波の透過能は、コンクリートより各種樹脂材料の方が圧倒的に高い事が示された。そして、金属に対する反射率が高く、その反射率は金属表面の腐蝕により低下する。

この、テラヘルツ波の特性を最も有効に発揮する事が出来る道路政策の質の向上へ向けた研究開発課題は、「エクストラドーズド鋼橋等の外ケーブル腐蝕・断線検出」であろうと考えている。

本提案課題については、既に外ケーブルとほとんど全く同じ構造を持つ絶縁電線の検査事例を得ており、極めて有望なテラヘルツ波のキラーアプリケーションの一つとなると確信している。

道路行政への実務への反映は今後の課題であるが、文部科学省「国家課題対応型研究開発推進事業」『廃止措置等基盤研究・人材育成プログラム委託費』（事

業担当組織 東北大学等）の検査技術部門の一つとして組み入れられることとなった。

また、本方式は、複数のインフラ関連企業から高い関心を持たれ、共同研究を通じて応用展開を図る端緒となっている。

参照

研究成果の発表状況

学術論文

テラヘルツ波の非破壊検査応用.[日本工業出版 検査技術,18(5), (2013), 1-5]高橋星也、小山裕

Observation of damage in insulated copper cables by THz imaging,
NDT & E International, Volume 61, January 2014, Pages 75-79
Seiya Takahashi, Tomoyuki Hamano, Kaori Nakajima, Tadao Tanabe, Yutaka Oyama

学会発表

国際会議

SUB-TERAHERTZ INSPECTION OF DEFECTS IN BUILDING BLOCKS,
Yutaka Oyama* and Kyosuke Saito
First International Conference on Advances in Structural Health Management and Composite Structures (ASHMCS2012) 2012年8月28日-31日韓国 全州市、Chonbuk National University (CBNU) in Jeonju, Jeonbuk, South Korea.

出崎光, 田邊、小山, Joint Symposium on Materials Science and Engineering 2011, Nanyang Technological University Singapore

2011.6.18, Material science and technology as a basis for device realization for THz, Oral

仮屋英孝, 佐藤、田邊、齋藤、西原、谷山、小山,Honolulu Prime 2012_The Electrochemical Society,
Hawaii Convention Center and the Hilton Hawaiian Village, 2012.10.7~10.12, Non-Destructive Evaluation for Evaluation for Corroded Metal Surface Using Terahertz Wave, Poster

仮屋英孝, 齋藤、山形、田邊、小山, Honolulu Prime 2012_The Electrochemical Society, Hawaii Convention Center and the Hilton Hawaiian Village, 2012.10.7~10.12, Application to Non-Destructive Inspection of Copper Corrosion via Coherent Terahertz Light Sources , Poster

国内会議

高橋星也, 中村、田邊、前田、中嶋、浜野、小山, 電子情報通信学会・電子デバイス研究会, 東北大学電気通信研究所, 2013.12.16~2013.12.17, テラヘルツ波方式による絶縁被覆電線の素線断線可視化技術

高橋星也, 中村、小山、田邊、浜野、中嶋, 第153回日本金属学会, 金沢大学角間キャンパス, 2013.9.17, テラヘルツ波方式による絶縁被覆電線の素線断線可視化技術

中村悠太, 仮屋、田邊(多元研)、西原(新日鉄住金)、谷山(新日鉄住金)、小山, 第74回応用物理学会秋季大会, 同志社大学京

田辺キャンパス, 2013.9.16～9.20, テラヘルツ分光イメージングによる溶融Znめっき鋼板の塗膜下腐食状態検査
など

研究成果の社会への情報発信

ウェブ（研究室HP）

<http://www.material.tohoku.ac.jp/~denko/lab.html>

新聞掲載（テラヘルツ波を用いた絶縁電線の内部素線可視化に関して）

1. 東北大学がテラヘルツ波で電線を「透視」、点検作業を大幅に効率化へ（資料提供 新聞 河北新報社）(2012.10)

2. 東北大学がテラヘルツ波で電線を「透視」、点検作業を大幅に効率化へ（資料提供 新聞 日本経済新聞）(2012.10)

3. 東北大学がテラヘルツ波で電線を「透視」、点検作業を大幅に効率化へ（資料提供 新聞 日経エレクトロニクス オンライン版）(2012.10)

公開イベント

2013.1.17 東北大学イノベーションフェアにて「テラヘルツ波応用」の展示を行いました。

2014.03.29 KDDI 財団賞を受賞しました。

（テラヘルツデバイス・結晶育成そして応用と、テラヘルツ光源開発から応用まで一貫した研究に対して）

学生の受賞

学会名：2013 Annual Meeting of Excellent

Graduate Schools for "Materials Integration Center" and "Materials Science Center" in conjunction with International Workshop on Advanced Materials Synthesis Process and Nanostructure

開催日： 2014年3月11日

題目：“Terahertz wave emission from S.I.-GaAs by below gap excitation”

発表者：出崎 光

受賞内容：Poster Presentation Award

学会名：電子情報通信学会

開催日： 2013年12月

題目：“誘電体クラッド層挿入によるスラブ導波路 GaP 結晶からのテラヘルツ放射”

発表者：出崎 光

受賞内容：学生発表奨励賞