

球状粒子を含む構造体のテラヘルツ帯における透過特性

倉橋 直也*¹

服部 悟*²

【要 旨】

本研究では、テラヘルツ波の伝搬経路に存在する粒子が透過特性に及ぼす影響を明らかにするため、テラヘルツ帯の波長に相当する球形粒子を含んだ構造体を種々作成し、粒子径及び粒子素材をパラメータに透過特性との関係を検討した。その結果、伝播経路に粒子が存在することで Mie 散乱に起因する透過損失のピークが生じることが分かり、粒子径と屈折率が透過損失の損失ピークの発現波長及びピーク高さに対する主要な影響因子であることを明らかにした。

1 はじめに

2030 年以降とされる次世代情報通信規格の到来に向けて 70~300GHz 近傍のサブテラヘルツ帯に着目した技術開発が世界的に加速しつつあるなか¹⁾²⁾、将来的な普及を見据えて良好な通信環境を実現するために低反射・高吸収といった特性を持つ材料や構造の開発に関する取り組みが進んでいる^{3)~5)}。しかしながら、この帯域での材料及び構造の開発プロセスにおいて、リファレンスとなり得るデータベースが未だ十分に整備された状況では無いように、サブテラヘルツ帯の波長が数十~数百 μm 程度であることから、これと同等のスケールを持つ被入射物の表面の凹凸や内部のフィラー粒子といった形状的な要素が総体としての透過性などのマクロな特性に及ぼす影響も整理されておらず、特性理解及び評価の妨げとなっている。

このことから、本研究ではテラヘルツ波の伝搬経路に存在する粒子が全体としての透過特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的として、0.1~4THz の帯域を対象に、その波長に相当する球形粒子を含む構造体を種々作成し、粒子径及び粒子素材をパラメータとして透過特性との関係を

検討した。

2 実験方法

2.1 使用材料

検討には、径の異なる 5 種の球形ガラス粒子 (株不二製化所製サンドブラスト用研磨剤 FGB-30・FGB-60・FGB-80・FGB-120・FGB-180) を用いた。また、粒子素材の相違が透過特性に及ぼす影響を検討するため、球形ガラス粒子の FGB-80 の公称粒子径に相当する粒子としてビニルスチレン系樹脂球形粒子 (住友化学(株)製ミクロパール GS-L190) も併せて準備した。なお、FGB-80、GS-L190 については粒子径の同一性を検証するため、倒立顕微鏡を用いて各 500 個ずつ直径計測を行い、粒子径分布図からメディアン径を算出した。これらの粒子を担着させる基材には市販のセロハンテープ (3M 製) を使用した。表 1 に使用材料の詳細を示し、以降の議論においては表中のサンプル名により呼称する。

表 1 使用材料の詳細

	素材	メーカー	サンプル名	公称径 (μm)
粒子	ソーダ石灰ガラス	(株)不二製化所	#30	605
			#60	303
			#80	215
			#120	138
			#180	98
	ビニルスチレン系樹脂	住友化学 (株)	GS-L140	140
			GS-L190	190
基材	セロハンテープ	3M	Substrate	-

* 1 基盤技術課 副主査

* 2 基盤技術課 主任研究員



図1 試料断面の模式図

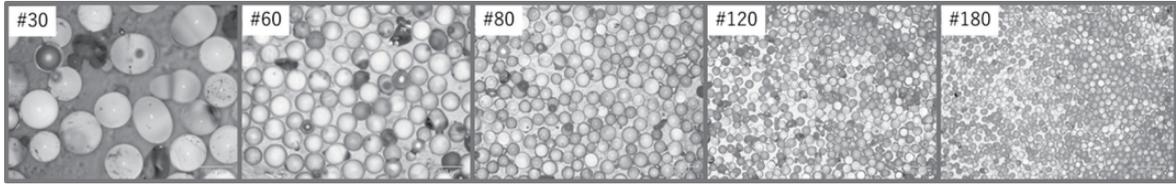


図2 ガラス粒子を用いた試料表面の顕微鏡像 (5倍)

2. 2 試料の作成

試料の作成は、まず基材とするセロハンテープの粘着面を上面として所定長さを引き出した上で両端を治具に固定し、次に、粒子を葉さじでセロハンテープ上に載せて隙間の生じないようにまんべんなく配した。その後、剥離紙を用いて粒子をセロハンテープの粘着面に十分に押し付けてから、エアブロウを用いて粘着面に付着していない粒子を取り除くことで測定試料とした。このようにして作成した試料はいずれも、図1及び図2に示すとおり、セロハンテープの粘着面上に明確な規則性を持たない粒子の層が1層だけ載った構造となる。

2. 3 透過特性の測定

透過特定の測定は、テラヘルツ分光・イメージング解析システム (株)アドバンテスト製 TAS7500TS) のイメージングユニット (測定周波

数 0.1~4THz) を使用した。測定条件は、スキャンピッチを X 軸 Y 軸方向ともに 1.5mm とし、周波数分解能は 3.8GHz、積算数を 64 回とした。透過特性は、試料中央部の 74 か所の透過パワースペクトルを平均したものを、バックグラウンドのパワースペクトルで除することで透過率を算出した。図3に測定時の外観とイメージング結果からのデータ採取位置を併せて示す。

2. 4 散乱解析

散乱解析には、オープンプラットフォームの Julia で公開されている Mie 散乱の解析ソフトウェア jlmie⁶⁾ を使用して散乱効率を計算した。

なお、散乱効率とは入射光のうちどの程度の割合が散乱されるかをあらわす指標⁷⁾である。本ソフトウェアは、Bohren らにより示された単一粒子に平行光が入射した場合の Mie 散乱に関する厳密解⁸⁾を基に粒子径及び相屈折率を主要

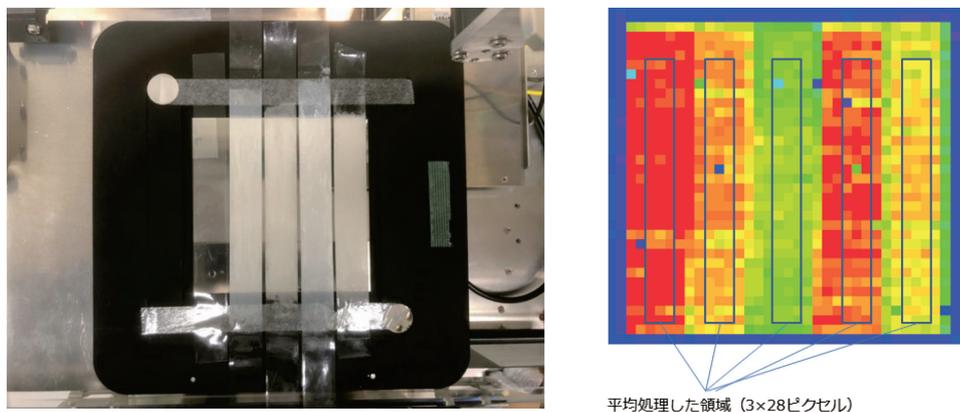


図3 イメージング測定時の外観及びイメージング結果からのデータ採取位置

なパラメータとして計算を行うものとなっている。本研究では、散乱効率を、①相対屈折率を一定に粒子径が変化した場合、②粒子径を一定に相対屈折率が変化した場合の二つのパターンについて解析を行った。ここで、①の解析にあたり相対屈折率を1.6として、粒子径をガラス粒子に対応した98~605umの範囲で変化させ、②の解析にあたっては粒子径を215um、相対屈折率を1.2~1.6の範囲で変化させて計算した。

3 結果及び考察

3. 1 粒子径が透過特性に及ぼす影響

ガラス粒子を用いた試料の透過率を図4に示す。まず、基材のセロハンテープについては全波長域に亘り平坦な透過特性であるのに対して、径に関わらず粒子を含む試料では入射光を約 1/100~1/1000 程度にまで減弱する局所的な損失のピークを示すことが分かる。また、径の相違に着目すると、粒子径が大きい場合には高波長域でブロードな形状の損失ピークを示すが、粒子径が小さくなることに従って損失ピークの発現する位置は低波長側にシフトしつつピークの形状も急峻なものとなっていく。

次に、粒子径と損失ピークの生じた波長との関係を検討するため、各々の粒子の円周長を損失ピークが最大となった点の波長で除することで得られる粒径パラメータ α を整理した結果を表2に

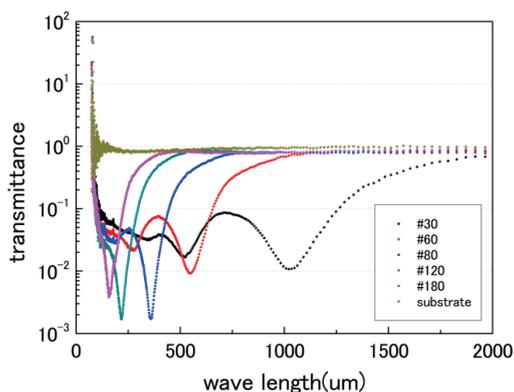


図4 ガラス粒子を用いた試料の透過率

表2 粒子径とピーク波長の関係

粒子	公称径 (um) d	ピーク波長(um) λ	粒径パラメータ α $\pi d / \lambda$
#30	605	1033	1.84
#60	303	545	1.75
#80	215	366	1.85
#120	138	218	1.99
#180	98	161	1.91

示す。表より、 α の値はいずれの粒子径でも概ね一定の値となっており、このことは透過率に生じた損失ピークが粒子径を問わずに共通のメカニズムによって生じたことを示唆している。

ここで、可視光をはじめとする電磁波が粒子に入射した場合には散乱現象が生じ⁹⁾、閾値には若干の相違があるものの、粒径パラメータの違いによって Rayleigh 散乱 ($\alpha \ll 1$)、Mie 散乱 ($1 \leq \alpha$) などの異なる散乱様態を示すことが知られている。テラヘルツ帯において材料中に波長に相当する粒子や気泡構造が含まれる場合に Mie 散乱が透過特性に影響したことを報告した例¹⁰⁾¹¹⁾もあり、本研究の試料系についても粒径パラメータの値を踏まえると、透過特性に見られた損失ピークの発現に Mie 散乱が寄与していることが窺われる。

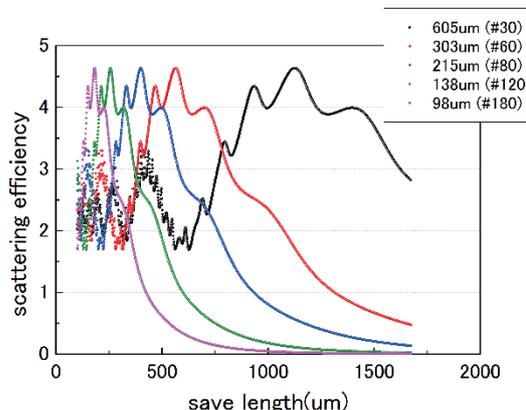


図5 散乱効率の計算結果

そこで、粒子径の異なるガラス粒子を用いた試料を模して、屈折率を一定として粒子径を変化させた場合の Mie 散乱の散乱効率を計算した結果を図5に示す。図より、粒子径に関わらず散乱効率にピークが生じ、粒子径が小さくなることで散乱効率のピークは低波長側にシフトしながらピーク形状も鋭角となっていくことが分かる。

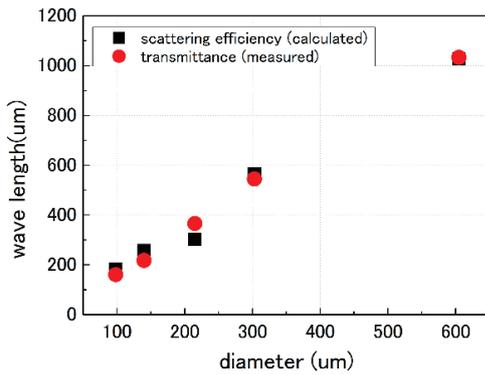


図6 ピーク発生波長と粒子径の関係

図4、5に示した透過率と散乱効率の傾向を比較するため、両者におけるピーク波長を粒子径を横軸にとって整理したものを図6に示す。図のとおり、両者のピーク発生波長と粒子径に見られる傾向は非常に良く対応していることが分かり、このことは、透過特性に見られた損失ピークが生じた原因として散乱効率が寄与していることを裏付けるものと考えられる。すなわち、散乱効率の低い波長では入射波のエネルギーがほぼ散逸することなく粒子を通過したために高い透過率を示し、散乱効率が高い波長では粒子を通過する過程で散乱によりエネルギーが散逸したことで透過率が低くなったものと説明できる。

以上のように、光と電波の隙間領域と言われるテラヘルツ帯においても粒子と入射波の波長には Mie 散乱による関係が成り立ち、本研究のガラス粒子の試料系の透過特性に見られた特徴的な損失ピークが Mie 散乱における散乱効率の粒子径への依存性に起因して生じたことが分かった。

3. 2 粒子素材の相違が透過特性に及ぼす影響

同等の粒子径を持つガラス粒子#80 及びビニルスチレン粒子 GS-L190 を用いた試料の透過率を図7に示す。図より、同等の粒子径を持ちながらも両者の透過特性には大きな違いが生じており、#80 に対し GS-L190 では損失ピークの発生波長が 200um 程度も低波長側にシフトするとともに、損失ピーク量も半分程度となった。

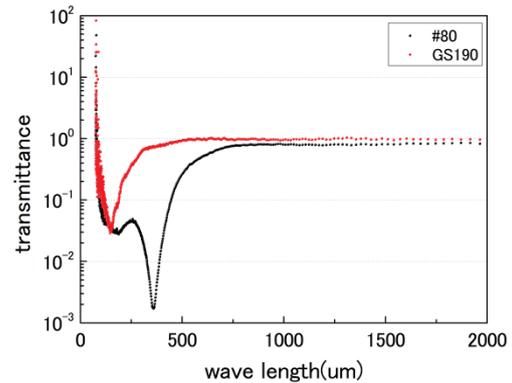


図7 粒子径と散乱効率の関係

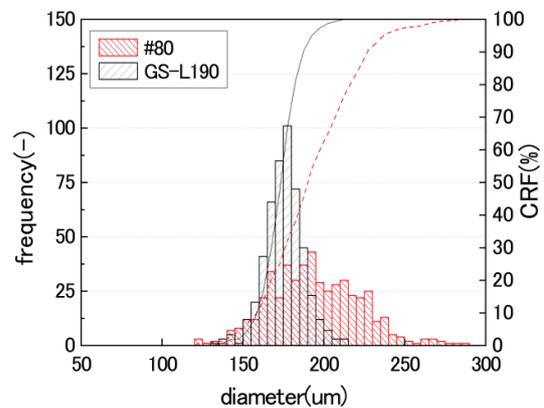


図8 粒子径分布の比較

この結果を解釈するにあたって、今回用いたガラス粒子#80 及びビニルスチレン粒子 GS-L190 に関して素材以外の両者の相違について粒度分布の観点から検証した。図8に示すように、公称径において両者には 25um の相違があったが、実測に基づくメディアン径では概ね 15um 程度の相違

でしかないことが分かった。また、ガラス粒子の#80 はなだらかな分布であるのに対して、ビニルスチレン粒子のGS-L190 では急峻な分布であることが分かる。前節の検討結果から、粒子径の相違は損失ピークの生じる波長のずれとして影響することが考えられるが、今回の両者の粒子径の相違の程度を勘案すると図7に示したほどの損失ピークの発生波長のずれとして影響したとは考え難い。また、粒度分布の尖度の違いは基材に付着させた際の粒子配列の規則性に影響するものと考えられるが、図9に示すように試料作成後の#80 及びGS-L190 の粒子配列の規則性には目立った相違は見られず、透過特性に対する粒度分布の尖度の影響はほぼ無視し得るものと考えられる。

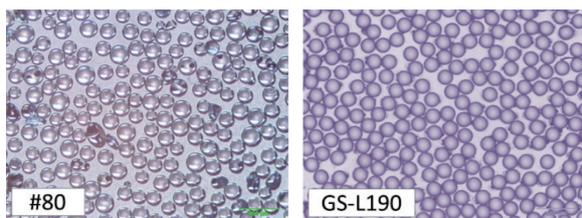


図9 異素材粒子の粒子配列状態

このようにガラス粒子#80 及びビニルスチレン粒子GS-L190 に関して、粒子径がわずかに異なり、粒度分布の尖度にも相違はあるものの、図7に示した両者の透過特性の違いを説明するには十分なものでは無く、素材自体の物性の相違が大きな影響因子となっているものと推察される。

そこで、素材の相違を屈折率の相違として捉え、粒子径を一定に屈折率が変化した場合の散乱効率を解析した結果を図10に示す。図に示すように、屈折率の減少に伴って散乱効率のピークは低波長側にシフトし、ピーク高さも徐々に小さくなっていくことが分かる。ガラス粒子の#80 に対して屈折率が低いGL-S190 において、低波長側への損失ピークのシフトと損失量の低下が生じており、解析における屈折率の低下に伴う散乱効率

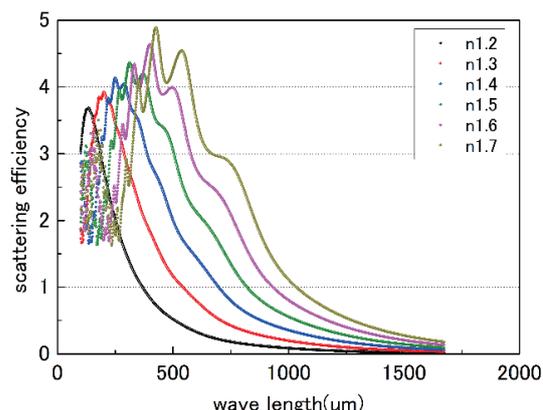


図10 屈折率が変化した時の散乱効率

の変化とも符合する。すなわち、屈折率が高い粒子については散乱効率が高いために透過損失のピークが大きくなり、屈折率の小さな粒子では散乱効率が小さいために粒子を電磁波が通過するために透過損失のピークも小さくなったものと考えられる。

このように粒子径のみならず粒子の屈折率も透過特性に大きく影響を及ぼしており、屈折率が変動することでも損失ピークの発生波長及び損失量が変化することが分かった。

4 まとめ

本研究では、テラヘルツ帯の波長に相当する球形粒子を含む試料を作成し、粒子径及び素材をパラメータとして透過特性に及ぼす影響を検討した。その結果、以下に示す知見を得た。

①テラヘルツ波の波長に相当する粒子が伝搬経路上にあるとき、Mie 散乱に起因する透過損失のピークが生じる。

②損失ピークの発生する波長及びピーク高さに粒子径及び屈折率が強く影響しており、粒子径が小さくなることでピークの発生波長は低波長化し、屈折率が小さくなることでピーク発生波長の低波長化とピーク高さの低下が生じる。

5 謝辞

本研究の実施にあたり、テラヘルツ解析用のマクロプログラムをご提供頂いたほか、ディスカッションの機会を賜りました同志社大学ハリス理化学研究所の彌田智一教授に感謝申し上げます。

(参考文献)

- 1) 大谷 知行, 表面技術, “テラヘルツ波センシング・イメージング技術と応用”, 2021, vol. 72, No. 8, pp429-432
- 2) 情報通信研究機構, “Beyond 5G ホワイトペーパー”, 2021
- 3) 彌田 智一ら, Electrochemistry, “バイオテンプレート技術:らせん藻類の無電解めつきによる金属マイクロコイルの作製と電磁波応答特性”, 2016, Vol. 84, No. 9, pp715-720
- 4) 小堀 裕司ら, 表面技術, “微細藻類由来マイクロコイルを利用したギガヘルツ・テラヘルツ帯電磁波吸収体”, 2021, vol. 72, No. 8, pp439-441
- 5) 石井 雄大ら, 電気学会論文誌E, “THz 帯におけるメタマテリアル・アブソーバの製作と吸収特性の評価”, 2016, Vol. 136. No. 5, pp172-179
- 6) <https://github.com/Hinamooon/jlmie>
- 7) 多加谷 明広, 成形加工, “プラスチック成形加工技術者のための光学講座”, 2015, vol. 27, No. 8, pp332-336
- 8) Bohren, C. et.al, Wiley-VCH Verlag GmbH “Absorption and scattering of Light by Small Particles”, 1998
- 9) 中田 博保, 科学と教育, “透明結晶の粉末はなぜ白いのか?—微粒子による光散乱—”, 2017, Vol. 65, No. 12, pp636-639
- 10) Xing Liyun et. al, IEEE ACCESS “terahertz Scattering and Spectroscopic Characteristic of Polymethacryl Imide Microstructures”, 2019, Vol. 7, pp41737-41745
- 11) Garet Frederic et.al, Applied Physics letters, “Evidence of Mie Scattering at terahertz frequencies in powder materials”, 2014, vol. 105, No. 3, pp031106-031106-4