

RTM法を用いたマイクロ波吸収効率に対する局在波効果

秋山 省悟[†] 加藤 初弘[†] 杉山 順一[‡]

[†]山梨大学工学部 〒400-8511 山梨県甲府市武田 4-3-11

[‡]産業技術総合研究所 〒305-8565 茨城県つくば市東 1-1-1 中央第5

E-mail: [†]kato@yamanashi.ac.jp, [‡]sugiyama-j@aist.go.jp

あらまし マイクロ波照射による各種実験機器の高機能化を実現するには、電磁波吸収材の形状と設置位置が重要であることが知られている。本研究では、マイクロ波照射中も照射対象の様子を観察できる観察導波管を用いて、電磁波吸収材の温度上昇からマイクロ波吸収効率の場所依存を明らかにする。また、得られた実験結果から局在波の抽出が可能な新しい数値解析方法である逐次伝達法(RTM)を用いて解析することで、吸収の場所依存性の原因が局在波の存在にあることを明らかにする。この技術を用いると局在波と進行波を分離して、マイクロ波吸収のメカニズムを解析することができ、実験装置の一層の効率化を実現できる可能性がある。

キーワード RTM, 観察導波管, マイクロ波吸収効率, 局在波

The localized wave effect of the microwave absorption rate using Recursive Transfer Method

Shogo Akiyama[†] Hatsuhiro Kato[†] and Jun-ichi Sugiyama[‡]

[†]Faculty of Engineering, University of Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu, Yamanashi, 400-8511 Japan

[‡]National Institute of Advanced Industrial Science and Technology Chuo Central 5 1-1-1 Higashi, Tsukuba, Ibaraki, 305-8565 Japan

E-mail: [†]kato@yamanashi.ac.jp, [‡]sugiyama-j@aist.go.jp

Abstract It is known that the shape and placement of the electromagnetic wave absorption material are important in order to realize that each experiment equipment perform better by radiating microwave. In this research, we explained the dependence of the microwave absorption rate on the placement by observing the rise in temperature of the electromagnetic wave absorption material with the observation waveguide for gazing inside through the mesh structure during irradiation. We also demonstrate that the localized wave is the cause of the placement dependence of the microwave absorption analyzing through Recursive Transfer Method, which can extract the localized wave from the result of the experiment. By separating the localized wave and the progressive wave through this way, we can analyze the mechanism of the microwave absorption and there is a possibility to make experiment equipment more efficient.

Keyword Recursive Transfer Method, the observation waveguide, the microwave absorption rate, the localized wave

1. はじめに

ディーゼルエンジンから排出される炭素を主成分とする粒状物質(PM)や揮発性有機化合物(VOC)などの人体や環境に有害であることが知られている。これらの有害物質を分解するためにマイクロ波照射を利用すると効率的に装置の加熱を行うことができる[[1,2]。また、マイクロ波照射を利用することで、化学反応のメカニズムを制御することができ高機能な反応容器を実現する試みがなされている[3]。これらの装置を設計する際に、マイクロ波の吸収過程に関する知見を得る

ことが重要である。そのたの一助となるべく、観察導波管を用いた実験と数値計算による解析を試みた。

観察導波管は側面に多数の孔を設けることで内部の様子を広範囲に調べることができる装置である[4]。この装置を用いて、電磁波吸収の様子を吸収材の温度分布をサーモグラフにより明らかにする。また、新たに開発中である数値解析法である逐次伝達法(RTM)を用いて、実験的に得られた吸収材の温度分布や吸収率の場所依存を解析する。RTMは、既存の数値計算では考慮されることが少なかった、局在波を抽出すること

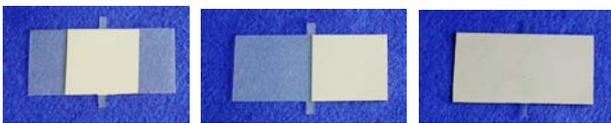
ができる数値計算法であり導波管内部の解析にも有効である[5]. この解析法を用いることで、吸収材の周辺に形成される局在波が、吸収率に大きな影響を与えることが分かった.

2. 波吸収材料および吸収率の場所依存

2.1. 装置の概要

実験で用いた3つの試料の外観とこれを装着する観察導波管の写真を図1に示す. 試料は、厚さ0.145 mmの電磁波吸材(星和電機(株)製 E10SA010)を、導波管の内側寸法を持つ厚さ0.130 mmのPETフィルムに貼り付けたものである. (a)および(b)図は50%の充填率で、それぞれ吸収材を片側および中央に貼り付けた試料、(c)図はPETフィルム全体を被覆した試料である. これらを、試料中央に設けたPETの突起を利用してマイクロ波の進行方向に対して表面が垂直になるように固定した. (d)図中に矢印で示した場所がこの設置位置である. 観察導波管は内側寸法109.2 mm×54.5 mmの矩形導波管であり、中央部分に直径7 mmの孔がその周辺に直径3 mmの孔が多数設けられている. これらの孔を通じて内部を直接観察することが可能である

吸収材およびPETの複素誘電率を、観察導波管とは独立に用意した円筒型共振器((株)関東電子応用開発製 CP481)により決定した. 図2はこの装置の外観である



(a) 中央被覆 (b) 片側被覆 (c) 全面被覆



(d) 観察導波管

図1 吸収材

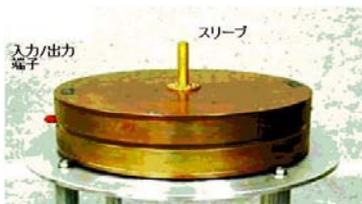


図2 TM₀₂₀モード円筒空洞共振器

り、試料を実装する前後でTM₀₂₀モードの共振周波数およびQ値の変化をネットワークアナライザにより計測する共振器である. 複素誘電率の実部および虚部は、これらの物理量の変化を用いて摂動法により決定した[6]. 円筒は直径215 mm, 高さ50 mmであり、マイクロ波の入力/出力端子は水平方向に設置されている. また、上下方向に内径5.8 mmのスリーブが設けられており、ここに短冊状に成形した試料を挿入する.

マイクロ波による試料の加熱状態を、観察導波管を出力20 Wのマグネトロンと接続しサーモグラフ装置で観測した. 図3(a)にこの実験装置の様子を示した.

また、試料の吸収率の測定は、同じ観察導波管を2端子のネットワークアナライザと接続しSパラメータを計測することで決定した. 図3(b)に吸収率の測定に用いた装置の様子を示す. ネットワークアナライザ(Rohde&Schwarz社製 ZVB14)に、同軸導波管変換器を介して観察導波管が接続されている.

2.2. 実験結果

円筒空洞共振器を用いて測定したPETフィルムおよび

表1. Sパラメータと吸収率(2.45GHz)

試料	S_{11}	S_{21}	S_{22}	S_{12}	P
(a)中央被覆	-6.226	-1.448	-6.386	-1.509	0.054
(b)片側被覆	-3.491	-4.030	-3.538	-4.116	0.163
(c)全面被覆	-4.202	-2.407	-4.357	-2.515	0.059



(a) 加熱観測用の装置配置



(b) Sパラメータ用の配置

図3 加熱および吸収率の測定装置

び電磁波吸収材の 2.45GHz における比複素誘電率の値は、 j を虚数単位として

PET フィルム	3.10 - j 0.022
吸収材	220.9 - j 13.4

であった。tan δ の値はそれぞれ、0.00710, および 0.0607 であり PET フィルムの吸収率は吸収材のほぼ 1/10 であることが分かる。

表 1 に図 1(a)~(c) で示した各試料を図 3(b) に実装して求めた S パラメータの値と、これらから決定したマイクロ波の吸収率 P をまとめた。吸収率 P は、S パラメータを用いて

$$P = 1 - \frac{1}{2}(|S_{11}|^2 + |S_{22}|^2 + |S_{21}|^2 + |S_{12}|^2) \quad (1)$$

で定義した。なお、試料の吸収材を載せない場合の吸収率即ち観察導波管自体の漏洩率は 0.004 であり、試料による吸収率の最小値より一桁小さいことを確認している。

最も吸収率 P が大きな試料は、吸収材を片側被覆したもので、全面被覆したものほぼ倍の吸収効率を持っている。

図 4 に、観察導波管内に設置した試料にマイクロ波を照射した際に生じる温度分布を、開孔部を通じサーモグラフで測定した例を示す。マイクロ波のパワーは 20W で、照射後 30 sec が経過し温度上昇がほぼ無くなり定常に達した状態での測定である。試料は図 1(a) に示した吸収材を片側被覆したもので、これを載せた PET フィルムの形状を白い破線で示した。照射したマイクロ波は TE₁₀ モードであり導波管断面の長手方向中央部が最も電界強度が強い。しかし、温度上昇が最も高い部分は側壁から 1/4 の場所で吸収材の中心部分に当たる個所である。このように発熱の位置が、入射波の振幅が最大になる位置と異なっている原因を明らかにするために、RTM 法を用いて局在波の様子を数值的に解析する。

3. 局在波の分布

3.1. RTM 法の概要

RTM 法は新たに開発中の数値計算法であり、波動を

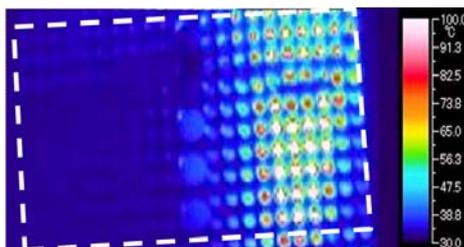


図 4 片面被覆試料の温度分布

電波方向に垂直な平面でフーリエ変換し一次元的な問題として解く方法である。導波管断面の長手方向に x 軸これに垂直な方向に y 軸、マイクロ波の進行方向に z 軸を設ける。TE モードを入力した導波管内で散乱波の電界もやはり y 軸方向に偏光している場合、 y 軸方向の電界強 $u(z,x)$ は次の式に従う。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \right) u + \omega^2 \mu_0 \epsilon(z,x) u = 0. \quad (2)$$

ここで、マイクロ波は角周波数 ω で振動している定常状態にあるとした。また、吸収材は磁性を有しないと仮定して、その特性が複素誘電率誘電率 $\epsilon(z,x)$ のみで決まるとした。また、 μ_0 は真空の透磁率であり定数とした。 $u(z,x)$ を x 軸方向に離散フーリエ変換し、その展開係数からなるベクトル $\Phi(z)$ を、更に z 軸方向に離散化すると、方程式(2)は次の 2 階の差分方程式

$$a_n \Phi(z_{n+1}) + b_n \Phi(z_n) + c_n \Phi(z_{n-1}) = 0 \quad (3)$$

に変換される。ここで、係数 a_n, b_n, c_n は行列であり導波管の側壁が完全導体であるという条件も考慮されて

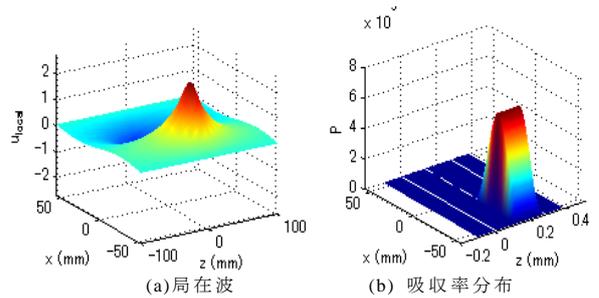


図 5 片面被覆試料の温度分布

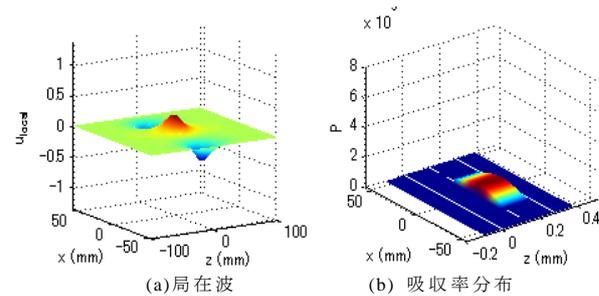


図 6 中央被覆試料の温度分布

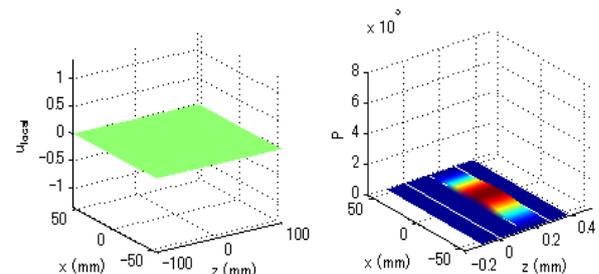


図 7 全面被覆試料の温度分布

いる[7]. 一様な導波管では $\epsilon(z,x) = \epsilon_0$ (真空の誘電率) であり場所依存がないことから係数行列も離散変数 n に依存しない定数行列となる. これらを, $a_n = c_n = a_{wg}$, $b_n = b_{wg}$ と表わすと, ベクトル $\Phi(z_n)$ は定数 λ と定ベクトル Φ_{wg} を用いて $\Phi(z_n) = \lambda^n \Phi_{wg}$ と表現できる. このとき方程式(3)は, 次の方程式で表わされる一種の固有値問題に帰着する.

$$(\lambda a_{wg} + b_{wg} + \lambda^{-1} a_{wg}) \Phi_{wg} = 0 \quad (4)$$

もしも, $|\lambda|=1$ ならば固有ベクトル Φ_{wg} は進行波を, それ以外は局在波を表わしている. 導波管内の波動を, これらの進行波が作る部分空間へ射影することで, 導波管内の散乱波を進行波と局在波に分解することが可能である.

3.2. 吸収体周辺の局在波

図 1(a)~(c)に示した 3 つの資料を, TE₁₀ モードで照射し加熱した場合の様子を, RTM 法を用いて散乱問題として解析した. 図 5, 図 6, 図 7 はその解析により得られた局在波の分布と吸収率の空間依存である. 局在波の振幅は, 入射波の最大振幅を 1 とした相対的な表示である. また, その表示領域は導波管の広い範囲に渡っているが, 吸収率は試料が充填され吸収が強い部分を強調して表示したので z 軸方向が拡大されている. 白い線で区切られた領域 $0 \text{ mm} < z < 0.130 \text{ mm}$ に PET フィルムが, $0.130 \text{ mm} < z < 0.275 \text{ mm}$ に吸収材が充填されている.

吸収率が最も高い試料は, 図 5 に示した片側被覆の試料である. その原因は, TE₂₀ モードと類似した局在波が試料の位置に形成されることにある. 入射波の駆動周波数である 2.45GHz は, TE₂₀ モードに対しては遮断周領域にあるため波は導波管内を進行することができない. このため, 入射波である TE₁₀ モードに駆動され得て励起するものの試料の位置にとどまる局在波となっている. 特に, その振幅が入射波に匹敵する大きな値を持っていることが吸収率が大きな原因である. 図 6 に示した中央被覆の試料でも同じく局在波が励起されるが, その形状は TE₃₀ モードに類似している. ただし, 遮断周波数が TE₂₀ モードと比較してより高いことから, 片側被覆の場合と比べると局在波の振幅が大きく発達していない. 一方, 全面被覆の場合には, ほとんど局在波が励起されずマイクロ波の吸収は入射波の振幅のみで行われる.

図 8 (a)に, 透過率 T と反射率 R の試料による変化を T - R 平面にプロットした. ここで, $T = (|S_{12}|^2 + |S_{21}|^2)/2$, $R = (|S_{11}|^2 + |S_{22}|^2)/2$ と定義した. 図 8 (b)は式(1)に従って求めた吸収率 P の試料依存である. 横軸は, 図 1 の (a), (b), (c) に対応し試料の違いを表わしている. いずれも, 実測値を黒丸(●)で理論値を白丸(○)で表わした.

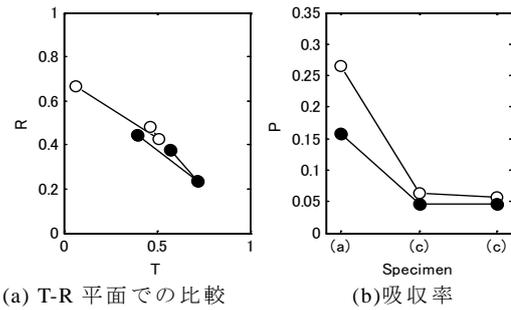


図 8 実験値(●)と理論値(○)の比較

実験値と理論値の間に差異があるものの, 試料の違いによる実験値の傾向が理論でも再現されており数値解析の信頼性を確認することができる.

4. まとめ

導波管の内部に設置した吸収材によるマイクロ波吸収のメカニズムを, 観察導波管を用いた温度分布の直接観測および RTM 法による局在波の数値的な抽出などを通じて検討した. 一般に, マイクロ波吸収は立体回路としてのインピーダンスの整合・不整合の問題に帰着する. このインピーダンスは波動と吸収材の間の複雑な干渉に依存するが, 吸収材の設置場所に励起される局在波の振幅を調べることで, 吸収率の変化を予測できることが分かった. 従って, 反応容器の設計に際して, 局在波の制御を取り込むとより効率的な設計を実施できる可能性がある.

文 献

- [1] 越島哲夫, 「マイクロ波加熱技術」, エス・エヌ・ティー, 2004.
- [2] H. Kato and Y. Kanno, "An analysis on Microwave Absorption of the Catalyst in a Thermal Decomposition Reaction by the Recursive Transfer Method", Jpn J. Appl. Phys., vol.47, no. 6, pp. 4846 - 4850, 2008.
- [3] 杉山 順一, 宮本 慎平, 田中 進, 町田 健治, 末松 俊造, 玉光 賢次, "ポリフルオレン合成におけるマイクロ波照射効果", 2010 信学ソ大会, エレクトロニクス(1), pp. S51-S52, Sep. 2010.
- [4] 杉山 順一, 山崎 利夫, 森池 徹, "マイクロ波照射中の内部を直視する観察導波管の作成(マイクロ波)", 信学技報. MW, vol.111, no.65, pp.51-56, May, 2011.
- [5] 加藤初弘, 木谷昌経, 加藤初儀, "電磁波散乱に対する逐次伝達法の基礎検討", 信学論 (C), vol. J94-C, no. 1, pp. 1-9, 2011.
- [6] 杉山 順一, "広域温度で誘電特性を測定する共振器の開発", 信学技 MW, vol. 109, no. 210, pp.31-36, Sep. 2009.
- [7] H. Kato, M. Kitani and H. Kato, "Proposal of recursive transfer method as an accurate numerical method for microwave scattering Problem", Asia-Pacific Radio Science Conference 2010, (22-26 Sep. 2010 in Toyama, Japan).