

高電力下における電波吸収体の温度上昇に対する吸収特性の検討

渡邊 慎也[†]

[†] 青山学院大学 理工学部 電気電子工学科
〒 229-8558 神奈川県相模原市淵野辺 5-10-1
E-mail: †s-wata@ee.aoyama.ac.jp

Absorbing Characteristics of a Pyramidal EM-wave Absorber under High Power Injection.

Shinya WATANABE[†]

[†] Department of Electrical Engineering and Electronics, College of Science and Engineering,
Aoyama Gakuin University
5-10-1 Fuchinobe, Sagami-hara-shi, Kanagawa 229-8558, Japan
E-mail: †s-wata@ee.aoyama.ac.jp

あらまし

本研究では、FDTD法、Semi-Implicit Method for Pressure Linked Equations(SIMPLE)法、モンテカルロ(Monte Carlo)法およびRadiative Energy Absorption Distribution(READ)法をそれぞれ連成した、電磁界と全ての伝熱現象(熱伝導、熱対流、熱放射)を計算可能な電磁界伝熱連成解析手法(以下、FDTD-SIMPLE-MR法と呼ぶ。)を用い、高電力を照射した場合のピラミッド型電波吸収体の温度分布について計算を行った。また、製作したピラミッド型電波吸収体に高出力RF装置を用いて電力を照射し、得られた電波吸収体の温度分布を上記の解析値と比較検討した。この結果、FDTD-SIMPLE-MR法による温度分布の解析値と実験値の間には、平均して約4.0°C程度の差異が生じるものの、その温度分布の傾向が一致することを確認できた。更に、ピラミッド型電波吸収体の吸収特性を保証する使用限界を計算したところ、その照射電力密度は500[W/m²]であると推定できた。

1. まえがき

近年、高出力レーダの高ERP(Effective Radiation Power)測定等により、高電力下における電波吸収体の使用状況が増加している。この場合、吸収した電力により吸収体自体の温度が大きく上昇することから、発熱による延焼や温度変化に伴う吸収特性の変化が予想される。そのため、吸収体の温度分布を把握することは、その使用限界や特性変化への対策等を行うにあたり極めて重要となっている[1]。

このような背景のもと、従来、ピラミッド型電波吸収体の温度分布に対する研究として、FDTD法に熱伝導方程式および熱放射エネルギーを組み込んだ数値解析手法(以下、FDTD-HTE-MR法と称す)によって、高電力下のピラミッド型電波吸収体の温度上昇を、熱伝導方程式および熱放射エネルギーを計算することにより計算し、実験結果と比較した研究例がある[2]。

しかし、この手法においては、熱伝導物質とその周囲空気との間の熱の移動である熱伝達を、平均熱伝達率を用いて近似的に解析を行っているが、この値は熱伝導物質の大きさ、配置状況および周囲空気の対流の状態により異なること、および、実験については、内部温度を測定した温度計の材料が金属を用いていたことから、内部の電磁界分布に対する影響は無視できない問題があった。

以上の問題に対し、本研究においては、ピラミッド型電波吸収体に、電力を照射した場合の温度分布を、電磁界に対してはFDTD法を、吸収体の周囲空気の対流及び熱伝達に対してはSIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)法[3]、そして熱放射計算にモンテカルロ(Monte Carlo)法[4]およびREAD(Radiative Energy Absorption Distribution)法[5]を連成し(以下、FDTD-SIMPLE-MR法と呼ぶ[6])、ピラミッド型電波吸収体の温度分布を解析的に求めた。

さらに、実験的に吸収体の温度分布を求めるために、同電波吸収体を製作し、その吸収体に対して高出力高周波装置を用いて電波を照射した。そして、定常状態後の吸収体の内部温度を

吸収体側面に作成した穴に電磁界分布への影響が少ないと考えられる光ファイバ温度計を挿入することで、その温度分布を測定し、解析結果および実験結果の比較を行った。また、以上の検討を元にピラミッド型電波吸収体の吸収特性を保证する使用限界についても検討を行った。

なお、本研究報告は文献[7][8]にて、具体的な成果として論文発表されている。

2. 実験的検討

2.1 測定試料

図1に温度分布測定に用いたピラミッド型電波吸収体を示す。また、図2に中央のピラミッド型電波吸収体の上面図および正面図を示す。図1に示すように、本ピラミッド型電波吸収体を9つのピラミッドからなっており、1つあたりの寸法は縦×横=100mm×100mmである。また、図2に示すように中央軸上に内部温度を測定するための穴をピラミッド部の先端からそれぞれ25mm, 37.5mm, 50mm, 62.5mm, 75mm, 87.5mm, 100mm, 125mm および 150mmの位置に空けた。さらに、測定のためを検証するため、本吸収体を2つ制作し、試料番号1, 2とした。なお、両試料は共に実験を行った入力周波数6GHzにおいて50dBを越える吸収量を確認している。

2.2 照射電力分布の測定

図3に照射電力分布の測定系を示す。この図に示すように、発振器から出力した、周波数6GHz、-10dBmの電力を増幅器(Hi Co., Ltd.:T82-20)により、+48.9[dBm]に増幅した。そして、その電力を2.3dBと2.2dBの損失を有する2つのケーブルおよび30dBの結合度を有する方向性結合器(Narda Co., Ltd.:4244-30)を介して、パワーメータに入力した。この時のパワーメータの指示値は+14.5dBmであった。さらに、パワーメータにより測定した+46.7dBmの電力をホーンアンテナの給電点に入力し、照射した電力を、ホーンアンテナの給電点から101cm離れた地点に配置された半波長ダイポールアンテナ(Anritsu Co., Ltd.:MA5612C5)を介したパワーメータにより測定した。

図4に入力周波数が6GHzにおける照射電力密度の測定結果を示す。この結果、照射電力密度は吸収体の中央で480W/m²となり、理論値の500W/m²に近い値が得られ、その中央から離れる程、電力が低下することが確認できた。中央から離れる程電力が低下する理由は、アンテナにより収束された電波を照射したためと考えられる。

また、左右方向の対称性は確認できたが、上下方向では下部の方に高い電力が分布していることが確認できた。このように下部に高い電力が分布した理由は、アンテナが吸収体の中心よりも下側を向いていたことが考えられる。一方で、中央に位置するピラミッド型電波吸収体において、理論値に近い平均399.2W/m²の電力が照射されていることが確認できた。

2.3 温度分布の測定

図5に温度分布測定の測定系を示す。入力周波数が6.0GHzにおける、ホーンアンテナの先端からピラミッド型電波吸収体の先端までの距離を60cmとした。ここで、電力照射装置一式

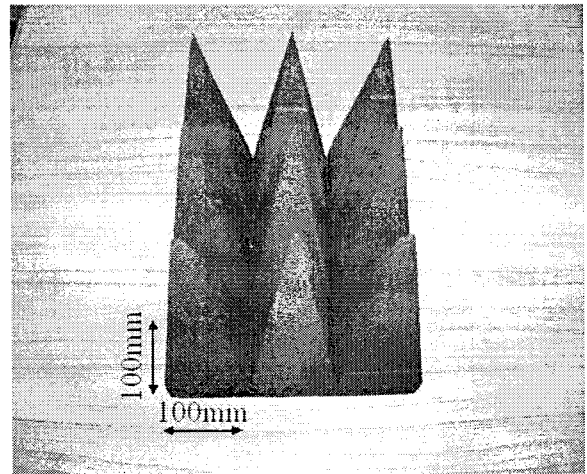
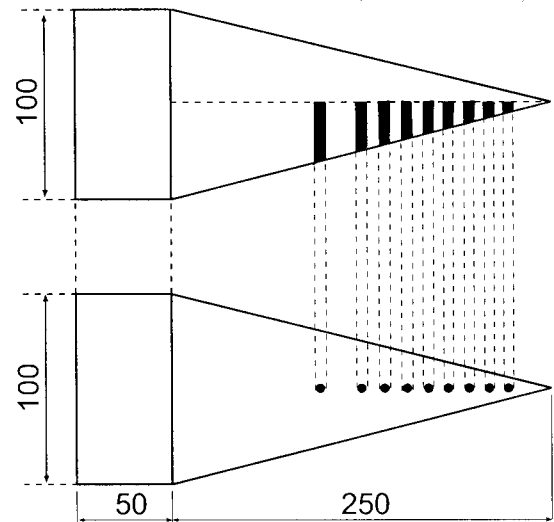


図1 使用したピラミッド型電波吸収体 (TDK 製:IS-030A)



unit [mm]

図2 中央のピラミッド型電波吸収体

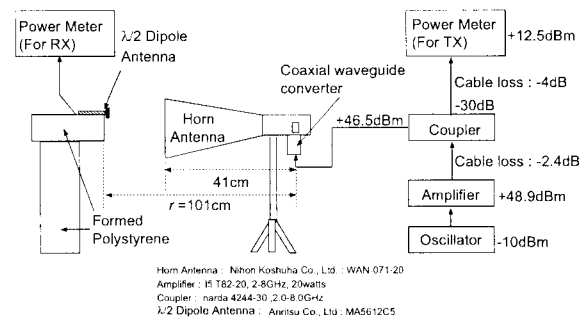


図3 照射電力分布の測定系

は図3と同様に設置した。また、中央のピラミッド部に空けた穴に、光ファイバ温度計 (AMOTH Co., Ltd.:FL-2000) を挿入し、中心軸上の内部温度を測定した。そして、光ファイバ温度計の校正は、熱電対によって測定した外部温度を光ファイバ温度計の基準として行った。

図6に各試料における中央軸上の内部温度の測定結果を示す。この図より、吸収体の先端付近で温度が急峻に変化し、先端か

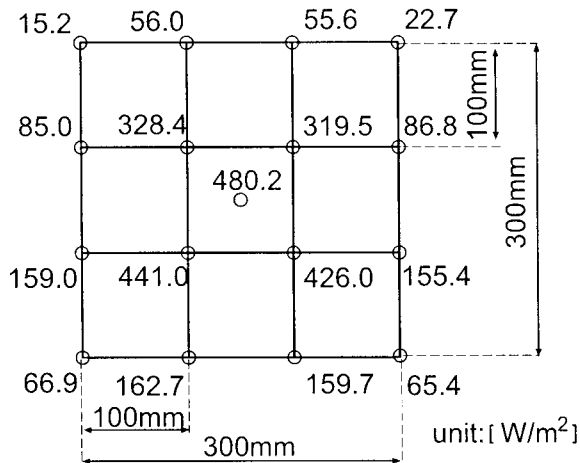


図4 照射電力分布の実験結果

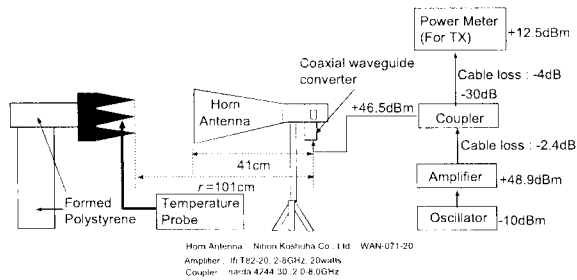


図5 温度分布測定の測定系

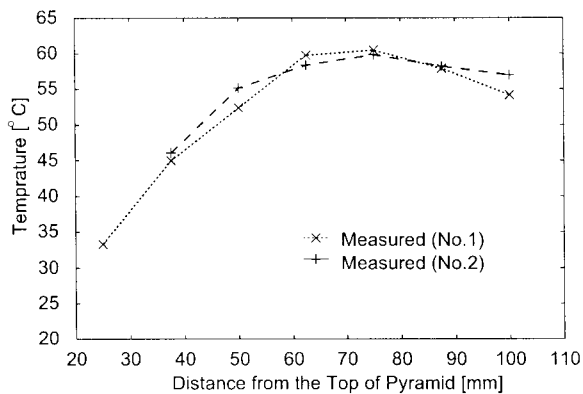


図6 内部温度の実験結果

ら75mm付近で最高温度を示し、ピラミッド部の後部では温度が緩やかに低下することが確認できた。また、各試料における測定結果を比較すると最高3°Cの差異が生じるものの、両測定結果が良好に一致していることが分かり、実験における再現性が確認できた。

3. 解析モデル

3.1 FDTD 法解析モデル

図7にFDTD法を用いた電波吸収体の解析モデルを示す。図7において、解析領域は $(x \times y \times z) = (182 \times 182 \times 384)$ [mm]であり、吸収体の台座部およびピラミッド部先端から解析領域の境界までの距離は、それぞれ $(du, dv, dw) = (40, 40, 40)$ [mm]とし

表1 吸収体構成要素の電気定数

Material	Electrical constants	Value
Pyramidal part	ϵ_r	1.74-j0.86 [2]
Pedestal part	ϵ_r	1.61-j1.16 [2]
Aluminium plate	σ [S/m]	5.7×10^8 [10]

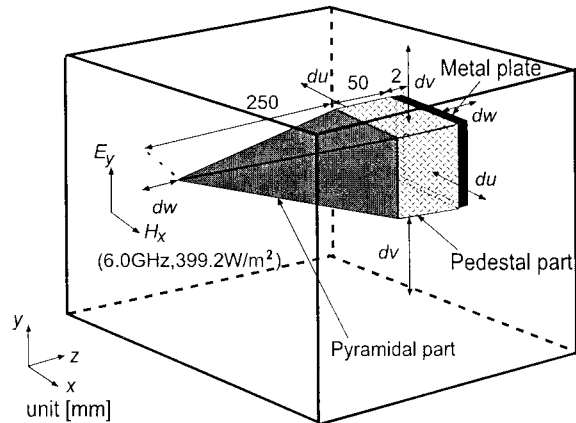


図7 FDTD法、SIMPLE-MR法の解析モデル

た。また、解析領域の中央に、先の図4で示した照射電力分布が集中しているピラミッド型電波吸収体の中央部を配置した。そして、入力波として、実験と同様にピラミッド型電波吸収体の中央部に照射した平均電力である 399.2 W/m^2 を有する、周波数6GHzの単一周波数の平面波を入射した。さらに、セルサイズは $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (1.0, 1.0, 1.0)$ [mm]とし、 Δt_{FDTD} [s] (FDTD法におけるタイムステップ) はCourant条件を考慮に入れて 1.9×10^{-12} [s]とした。

解析モデル中のピラミッド型電波吸収体は、炭素含有発泡ポリエチレンおよびアルミニウム板で構成され、その大きさは周波数6GHzにおいて、 $2\lambda \times 2\lambda$ である $(x \times y) = (100 \times 100)$ [mm]とした。表1に本吸収体の電気定数を示す。なお、境界条件は、入射波の電磁界に対しては電気壁および磁気壁を用いた無限空間を適用し、吸収体からの散乱波に対してはMurの一次の吸収境界を適用した[9]。これにより、実験とほぼ同様な有限の大きさを有する電波吸収体に平面波を照射した場合の電磁界を再現した。

3.2 SIMPLE-MR 法解析モデル

まず、SIMPLE法解析モデルにおいては、周囲空気の対流を計算するため、吸収体の台座部およびピラミッド部先端から解析空間の境界までの距離はそれぞれ $(du, dv, dw) = (20, 20, 20)$ [mm]とし、セルサイズはそれぞれ、 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (1.0, 1.0, 1.0)$ [mm]とした。表2及び表3に吸収体および周囲空気の熱定数をそれぞれ示す。ここで、吸収体は先に述べたようにピラミッド部および台座部ともに炭素含有発泡ポリエチレンを用いていることから、その熱伝導率は文献値[2]を用い、その放射率は本吸収体が黒体に近いため、0.95に設定した。背面のアルミニウム板は熱伝導率および放射率には、ともに文献値[10][11]を用いた。また、本解析モデルの境界条件については、周囲流体の流れ方を考慮に入れて設定した[12]。

表 2 吸収体構成要素の熱伝導率 λ と放射率 ϵ_{rad} .

Material	λ_{cond} [W/m/K]	ϵ_{rad}
Pyramidal part	0.041 [2]	0.95
Pedestal part	0.041 [2]	0.95
Aluminium plate	237.0 [10]	0.04 [11]

表 3 空気の熱定数 [10].

Thermal constants	Value
T_{ini} [K]	298.15
λ_{cond} [W/m/K]	26.1×10^{-3}
c [J/kg/K]	1.006×10^3
ρ [kg/m ³]	1.147
μ [Pa·s]	18.4×10^{-6}
ϵ_{rad}	0.0

次に、モンテカルロ法と READ 法解析モデルにおいては、解析領域の中央に配置された吸収体表面から境界までの距離はそれぞれ $(du, dv, dw) = (20, 20, 20)$ [mm] とした。また、境界条件として黒体壁を設置し、セルサイズをそれぞれ、 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z) = (1.0, 1.0, 1.0)$ [mm] とした。表 2 および表 3 に吸収体と周囲空気の熱放射係数を示す。さらに、Monte Carlo 法と READ 法における繰り返し回数である放射エネルギー粒子数は、その収束性を確認した 10^6 個に設定した。なお、FDTD-SIMPLE-MR 法においては、吸収体と周囲空気の熱定数は本論文中における温度範囲では変化しないことを確認していることから、 Δt_{SMR} [s] (熱解析におけるタイムステップ) の値を無限大にすることで定常解を求めた。

4. 解析結果と実験結果の比較

4.1 吸収電力分布

図 8 に電波吸収体中央軸上の定常状態における吸収電力分布を示す。この図より、入力周波数が 6GHz の場合は、吸収体の先端部に高い吸収電力量が観察でき、先端から 50mm 付近で最大吸収電力量である 30 kW/m^3 を示した。そして、後部ほど吸収電力量が徐々に低下することが確認できた。

図 9 に、実験において最も温度が高くなった、ピラミッド部先端から 75mm の断面における吸収電力分布を示す。この図より、吸収体の中央では最大吸収電力が 21 kW/m^3 であることを確認した。そして、吸収体の中央より離れる程、吸収電力も低下することが分かった。

4.2 温度分布

図 10 に FDTD-SIMPLE-MR 法による解析および実験による内部温度の結果を示す。この図より、解析結果と実験結果を比較して、平均 4.0°C 程度の差異が生じるものの、先端からの温度分布の傾向が一致することが分かり、本解析手法がピラミッド型電波吸収体における温度分布解析に有効であることが確認できた。ここで、実験結果との差異は、中央のピラミッド型電波吸収体に照射された電力の平均値を用いて解析を行ったためと考えられる。

次に、実験により求めることが困難な、ピラミッド型電波吸収体の内部温度分布を解析的に求めた。図 11 にピラミッド部中央における温度分布を示す。この図より、ピラミッド部先端

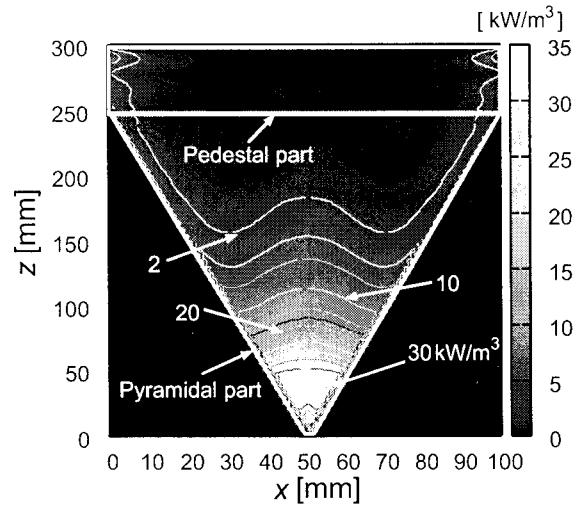


図 8 吸収体中央軸上の吸収電力分布

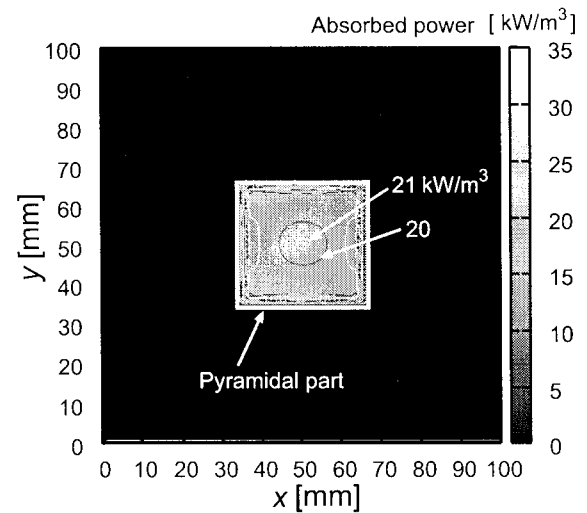


図 9 ピラミッド部先端から 75mm の断面における吸収電力分布

より、75mm 付近から 100mm 付近で最高温度 60°C を示すことが分かった。そして、等温線の密度からピラミッド部先端付近では温度が急峻に変化し、後部に近づくにつれて温度が緩やかに低下することが確認できた。

先端より 75mm 付近で温度が上昇した理由として、吸収電力量および熱伝導による熱の移動が考えられる。すなわち、図 8 では先端から 50mm 付近で高い吸収電力量を示されているが、吸収した電力が熱に変化し、熱伝導により吸収体内で熱が移動する。また、先端付近では周囲空気への温度勾配が急峻となるため、熱伝達により周囲空気へ熱が移動する。これらのことより、吸収電力が最大となった地点より後方で高い温度分布を示したものと考えられる。

また、図 12 に先端から 75mm の温度分布を示す。この図より、吸収体の中央に最高温度 59°C を示し、中央から離れる程温度が低下することが確認できた。この理由として、ピラミッド部中央における温度分布の場合と同様に、吸収電力分布および熱伝導による熱の移動のためと考えられる。すなわち、図 9

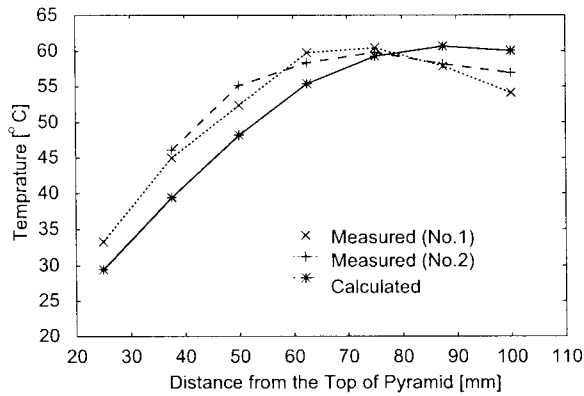


図 10 解析および実験による内部温度の比較

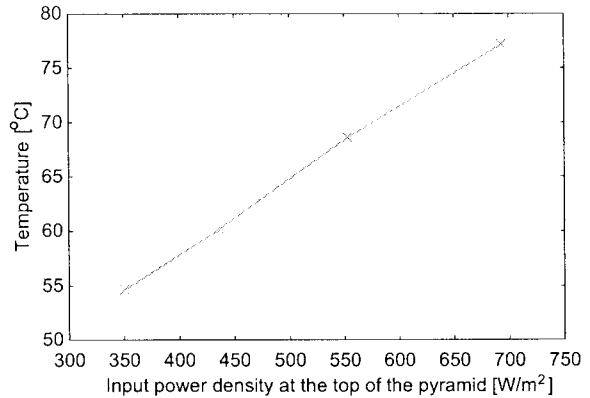


図 13 ピラミッド型電波吸収体への入力電力に対する最高温度

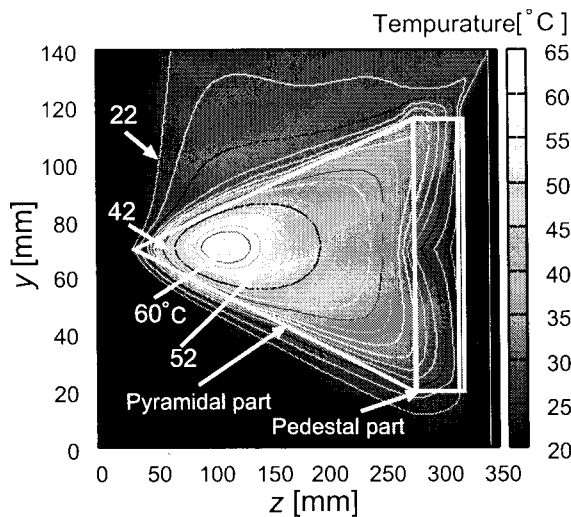


図 11 ピラミッド部中央における温度分布

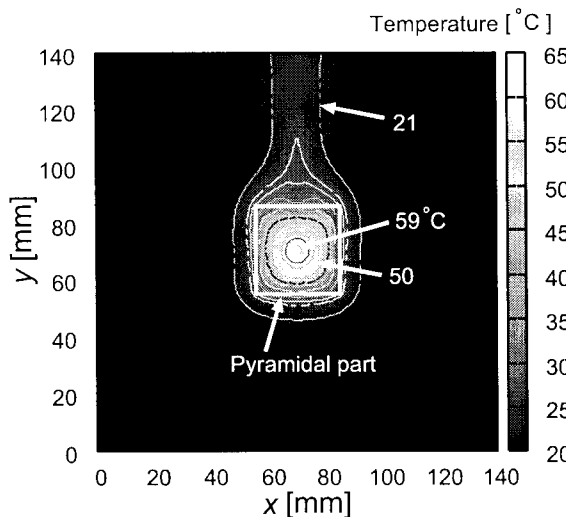


図 12 ピラミッド部先端から 75mm の断面における温度分布

より分かることとして、吸収体中央で高い吸収電力量を示し、その電力が熱に変化したため温度が上昇したためと考えられる。

5. 耐電力推定

更に、ピラミッド型電波吸収体の吸収特性を保証する使用限

界について検討を行った。図 13 に、ピラミッド型電波吸収体に入力した照射電力密度に対する最高温度の変化を示す。この結果、その電力が大きくなる程、吸収体の最高温度が上昇することが確認できた。この理由は、吸収する電力量が入力電力の上昇と共に上昇するためと考えられる。また、電力に対する温度の上昇する傾きが変化することが確認できた。この現象の一因として、照射電力密度の空間減衰が考えられる。すなわち、開口アンテナ付近では電力が急峻に減衰し、遠方では緩やかに電力が低下する。このため、吸収体内部の温度勾配に差異が生じることで入力電力に対する最高温度の傾きに変化が生じたと考えられる。また、本吸収体の使用限界温度は 65°C であるため、本解析結果より、その使用限界となる照射電力密度は 500[W/m²] であると推定できた。

6. まとめ

本研究では、電波吸収にともなうピラミッド型電波吸収体の温度分布を、FDTD-SIMPLE-MR 法を用いて解析的に求めた。また、高出力高周波装置を用いて、製作したピラミッド型電波吸収体に電波を照射し、その内部温度の解析値および実験値を比較検討した。

この結果、解析結果および実験結果の間に平均 4.0°C 程度の差異が生じるものの、先端からの温度分布の傾向が一致することが確認でき、全体の傾向が一致したことから本解析手法のピラミッド型電波吸収体の温度分布解析に対する有効性を示した。また、その差異の原因としては、中央のピラミッド型電波吸収体に照射した電力の平均値を用いて解析を行ったためと考えられる。さらに、吸収体内部の温度分布を本解析手法により求めた結果、ピラミッド型電波吸収体の中央軸上で温度が最も上昇することなど、温度分布を定量的に観察できた。また、ピラミッド型電波吸収体の吸収特性を保証する使用限界について検討を行った所、その使用限界となる照射電力密度は 500[W/m²] であると推定できた。

文 献

- [1] S.Udagawa, T.Haruyama, and N.Orime, "A LARGE-SCALE ANECHOIC CHAMBER WITH HIGH-POWER MICROWAVE ABSORBERS," IEICE Intl. Symp., ISAP JAPAN, vol.4, pp.929-932, 1989.

- [2] 渡邊 慎也, 飯野 一哉, 橋本修, 齊藤 寿文, 栗原 弘, "高電力下におけるピラミッド型電波吸収体の温度分布に関する検討" 信学技報, EMCJ2005-151, pp.77-82, Mar. 2006.
- [3] S.V.Patanker, Numerical Heat Transfer and Fluid Flow, Hemisphere Publishing Corp., 1980.
- [4] R.Siegel and J.R.Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, 2nd Edition, McGraw-Hill, 1980.
- [5] H.Taniguchi, W.J.Yang, K.Kudo, H.Hayasaka, M.Oguma, A.Kusama, J.Nakamachi and N.Okigami, "Radiant Transfer in Gas Filled Enclosures by Radiant Energy Absorptions Distribution Method.", 8th Heat Transf. Conf. pp.757-762, 1986.
- [6] 渡邊慎也, 齊藤耕太, 谷口品俊, 橋本修, 齊藤寿文, 栗原弘, "電磁界伝熱連成解析手法を用いた高電力下における $\lambda/4$ 型電波吸収体に関する検討" 信学論 (C), vol.J89-C, no.12, pp.1054-1065, Dec.2006.
- [7] 笹川哲宏, 渡邊慎也, 橋本修, 齊藤寿文, 栗原弘, "高電力下におけるピラミッド型電波吸収体の温度分布解析に関する基礎検討," 信学論 (C), Vol.91-C, No.10, pp.495-497, Oct. 2008.
- [8] T.Sasagawa, S. Watanabe, O.Hashimoto, T.Saito and H.Kurihara, "Study on the Temperature Limitation of the Injecting Power to a Pyramidal EM-wave Absorber," IE-ICE Trans. on Electron., vol.E92-C, no.10, pp.1319-1321, Oct. 2009.
- [9] 鈴木 秀俊, 田中 隆, 橋本 修, "反射特性における低損失誘電体試料の寸法に関する影響", 電気学会論文誌 (A), vol.119-A, no.8/9, pp.1164-1165, Aug. 1999.
- [10] 社団法人日本化学会, "化学便覧 基礎編 改訂 5 版", 丸善株式会社, 2004.
- [11] 日本機械学会, "伝熱工学資料 改訂 4 版", 丸善株式会社, 1986.
- [12] 渡邊慎也, 齊藤耕太, 倉形尚宏, 橋本修, 齊藤寿文, 栗原弘, "誘電損材料を用いた一層型電波吸収体の電力照射時における温度分布", 信学論 (C), vol.J89-C, no.12, pp.1054-1065, Mar.2007.