

太陽電池モジュールによる地上デジタル放送波の反射低減法

畠山 和徳[†] 高橋 応明^{††} 宇野 亨[†] 有馬 卓司[†]
黒川 浩助[†]A Reflection Reduction of the Digital Terrestrial Broadcasting Wave
Using the Solar Cell ModuleKazunori HATAKEYAMA[†], Masaharu TAKAHASHI^{††}, Toru UNO[†],
Takuji ARIMA[†], and Kosuke KUROKAWA[†]

あらまし 近年クリーンエネルギーの注目とともにビルなどの高層建造物の壁面に太陽電池モジュールを取り付けたものが見られるようになってきている。また高層建造物壁面の大部分を占める窓ガラスに太陽電池モジュールを埋め込むタイプが検討されている。しかしながら太陽電池モジュールは電磁波を反射しやすく、電磁波障害の影響が無視できない。そこで本論文では、窓ガラスに埋め込んだタイプの太陽電池モジュールを用いて、地上デジタル放送の周波数帯における電磁波障害を抑える方法について検討した。太陽電池モジュール構造や太陽電池セル同士を結ぶ配線の形状を適切に選ぶことにより、窓ガラスとしての採光の機能を保ちつつも地上デジタル放送の周波数 470 ~ 770 MHz において、10 [dB] 以上反射を抑えることが可能であることを示した。

キーワード EMC, FDTD, 地上デジタル放送, 電磁波障害, 太陽電池モジュール

1. ま え が き

近年クリーンエネルギーへの関心が高まり、一般家庭だけでなく、ビルなどの高層建造物の壁面にも太陽電池が取り付けられるようになってきている。一方、建造物の高層化とともに、その壁面で生じる反射電磁波による電磁波障害が問題となっている。具体的には、テレビ放送局から直接届いた電波と建造物の壁面から反射した時間遅れの波が受信されることにより、映像が二重、三重に見えるゴースト現象として現れる。特にビルなどの高層建造物付近の住宅などで発生する割合が大きい。地上デジタル放送では適切な信号処理によりある程度ゴースト現象を緩和することが可能になるが、近くで強い反射が発生する場合や遠方からの大きく遅延した反射波が到来するような環境では信号

処理だけでゴースト現象を緩和させるのは困難であると予想される。したがって、太陽電池が取り付けられた高層建造物による電磁波障害の対策が太陽電池モジュール自体でできれば、その社会的意義は大きい。この方法の一つとして太陽電池モジュールを斜めに傾けることによって反射波を上空に向けようとする方法等もあるが、設置スペースや美観の点で問題である。

一方、最近の建造物はコンクリートの壁面より窓ガラスの割合が多い。また窓ガラスに埋め込んだタイプの太陽電池モジュールの開発も進められており、採光の点でも大きな問題はないとされている [1]。そこで本論文では、窓ガラスに埋め込むタイプの太陽電池モジュールを取り上げ、モジュールの形状を変化させることによって地上デジタル放送波を透過させ、反射特性を改善することとした。この方法を採用することにより、屋内においても地上デジタル放送の受信が可能である。具体的な透過方法については、太陽電池モジュールを構成している太陽電池セルアレー間のインピーダンスを変化させる方法と、太陽電池セル間隔を変化させる方法の二つについて検討した [2] ~ [6]。太陽電池セルアレー間のインピーダンスの変化は、太陽電池セル間を結ぶ直流電力収集用配線の形状を変え

[†] 東京農工大学大学院共生科学技術研究部, 小金井市
Faculty of Engineering, Tokyo University of Agriculture
and Technology, 2-24-16 Naka-cho, Koganei-shi, 184-8588
Japan

^{††} 千葉大学フロンティアメディカル工学研究開発センター, 千葉市
Research Center for Frontier Medical Engineering, Chiba
University, 1-33 Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba-shi, 263-8522
Japan

ることによって行う方法をとっている．本手法の有効性はFDTD法[7]による解析によって確認する．なお本解析では，太陽電池セルは周期構造であるとしている[8],[9]．

2. 太陽電池のモデル化及び解析手法

本章では太陽電池の構造とFDTD法によるモデル化の具体的なパラメータを示す．図1は代表的な太陽電池アレーの構造とFDTD解析に用いる領域を示したものである．太陽電池モジュールは複数の太陽電池セルが配線によって結ばれた形状になっている．また近年の太陽電池モジュールは電力供給効率を向上させる目的で2本の平行配線が用いられている．このような無限周期構造をなす太陽電池モジュールに水平偏波の平面電磁波が垂直に入射するものとする．図に示したような完全電気壁(PEC: Perfect Electric Conductor wall)と完全磁気壁(PMC: Perfect Magnetic Conductor wall)で囲まれた枠内の電磁界を解析すればよいことになる．実際の太陽電池モジュールについては太陽電池セル間の配線が末端で処理回路などと結合しているが，高層建造物に太陽電池モジュールを埋め込む場合，大規模なものとなるため処理回路などの影響は無視できるものと考えられる．以上のモデルに水平偏波の平面電磁波を入射した際に生じる反射波と透過波の振幅の値を用いて反射係数及び透過係数を求めることにした．ここで本論文においては地上デジタル放送の水平偏波のみを対象としているため，垂直偏波による特性については検討していない．

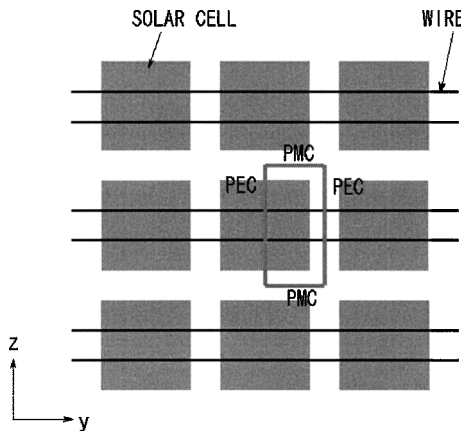
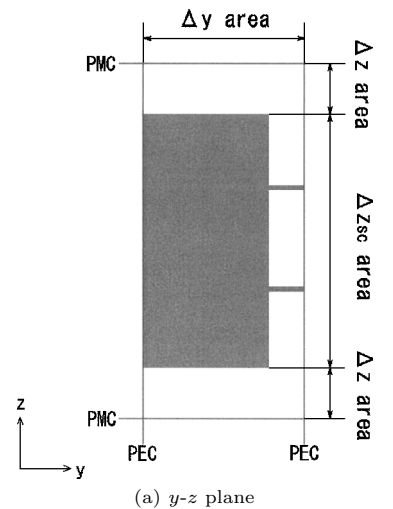
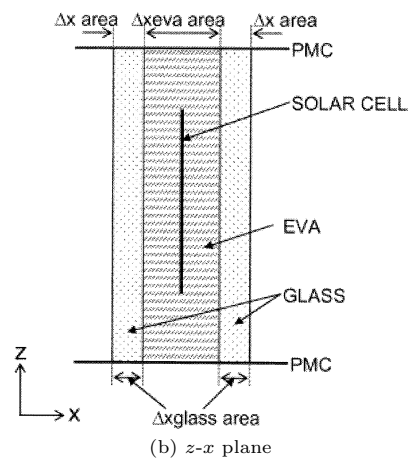


図1 太陽電池モジュールの構造と解析領域
Fig. 1 The structure and the computational region of a solar cell module.

具体的な解析モデルと計算パラメータを図2に示す．図2(a)は xy 平面，図2(b)は zx 平面の解析モデルである．通常太陽電池モジュールは太陽電池セルを固定するための充てん材である(EVA: Ethylene vinyl acetate ($\epsilon_r = 3.3$))の中に太陽電池(半導体)セルが置かれた構造となっており，モジュールを構成する際のカバー素材としてガラス($\epsilon_r = 3.9$)が使われている．本論文では窓ガラスに太陽電池を埋め込むことを想定しているため，太陽電池セルがガラス及びEVAで挟まれた構造となっている．また太陽電池は一般に太陽光が入射する日中と光が入射しない夜間とでその特性が異なる．しかし，太陽電池セル端子間のインピーダンスは図3に示すように高周波帯において



(a) $y-z$ plane



(b) $z-x$ plane

図2 解析モデルの概要

Fig. 2 The outline of FDTD analysis model.

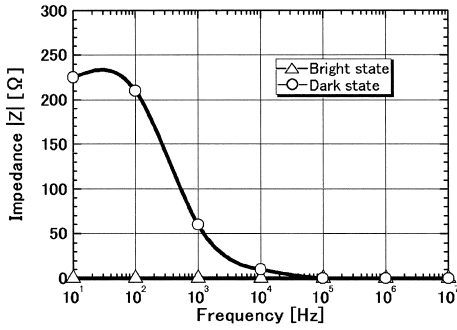


図 3 太陽電池の明暗状態による端子間インピーダンス [10]
 Fig. 3 Terminal impedance of a solar cell in dark and bright states [10].

表 1 FDTD セルサイズ
 Table 1 FDTD cell size.

Δt	6.0e-13 [s]
Δx	11.8 [mm]
Δy	2.0 [mm]
Δz	4.0 [mm]
Δz_{sc}	1.0 ~ 2.0 [mm]
Δx_{eva}	0.2 [mm]
Δx_{glass}	0.5 ~ 2.5 [mm]

はどちらの場合もほとんど 0Ω になることと [10], 物理的に非常に薄いことを考慮して, 本解析においては厚さ 0 の完全導体として扱った. また, z 方向の吸収境界には 16 層の PML [7] を用いた. 表 1 は解析に用いた FDTD セルサイズである. Δx は x 方向, Δy は y 方向, Δz は z 方向の FDTD セルサイズである. また Δz_{sc} は太陽電池セル, Δx_{eva} は EVA, Δx_{glass} はガラスの不均一メッシュ [11] を用いた FDTD セルサイズであり, 太陽電池のサイズに応じてそれを数十分割して解析している.

3. 反射特性

3.1 上下間隔に対する特性

通常の太陽電池モジュールは発電効率の面から太陽電池セル間隔を密にする傾向がある. しかし本論文のように窓ガラスに太陽電池セルを埋め込む場合, すき間なく太陽電池セルを埋め込むと光の透過性に問題が生じる. そのため太陽電池セル同士の間隔をある程度広くする必要がある. 間隔を広くするにあたって配線がある横方向の間隔を大きく広げることは困難なため, 配線の影響がない上下のセル間隔を広げることとし, 上下間隔に対する反射特性を解析した. 解析に用いるモデル及び寸法を図 4 及び表 2 に示す. ここで

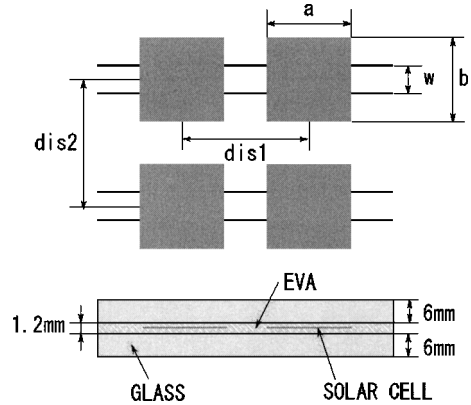


図 4 平行配線モデル
 Fig. 4 Parallel wiring model.

表 2 解析に用いたパラメータ
 Table 2 Parameters for analysis.

	dis2 = 26.64 [cm]	dis2 = 53.28 [cm]
a	5.08 [cm]	5.08 [cm]
b	5.08 [cm]	5.08 [cm]
w	1.02 [cm]	1.02 [cm]
dis1	8.33 [cm]	8.33 [cm]

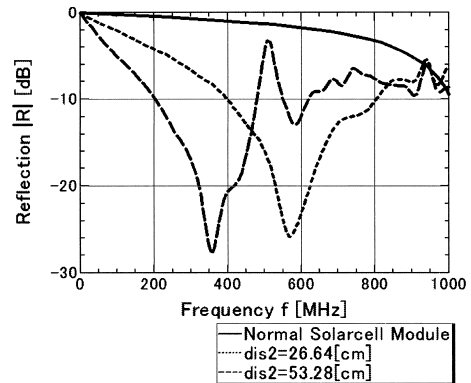


図 5 太陽電池セルの上下間隔変化による反射特性
 Fig. 5 Reflection by the formation of a vertical interval.

a, b は太陽電池セルの縦横の長さ, w は配線の間隔, $dis1, dis2$ は太陽電池セルの横及び縦の間隔である.

上下の間隔 $dis2$ を地上デジタル放送の周波数帯である $470 \sim 770$ MHz の中心周波数である 620 MHz に対する EVA 内の波長である 53.28 [cm] と半波長である 26.64 [cm] とした場合の反射特性を図 5 に示す. 図中の Normal solarcell module については現在普及している $dis1 = dis2 = 6.08$ [cm] の一般的な太陽電池モジュールに対する反射特性である. $dis2 = 26.64$ [cm] のと

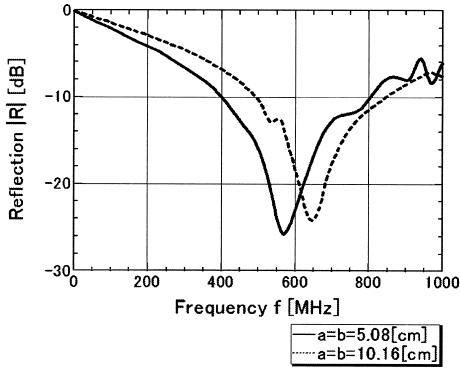


図 6 太陽電池セルサイズの違いによる反射特性
Fig. 6 Reflection by the difference in solar cell size.

きは 570 MHz, $dis2 = 53.26$ [cm] のときは 360 MHz で大きく反射波が低下しており、縦方向間隔 $dis2$ によって、すなわち太陽電池セル間隔を変化させることによって太陽電池モジュールの反射特性の変化を大きく変化させることができる。

3.2 太陽電池セルサイズに対する特性

太陽電池モジュールを構成する太陽電池セルには様々な大きさのセルが市販されている。そこで太陽電池セルサイズの変化に対する反射特性を検討した。ただしセルの上下間隔は $dis2 = 26.64$ [cm] とした。

広く用いられている 2inch 及び 4inch サイズの太陽電池セルに対する反射特性を図 6 に示す。ただし 2inch セルの配線間隔 w 及びセル間隔 $dis1$ には表 2 を同じとし、4inch セルに対してはそれぞれその 2 倍とした。2inch 及び 4inch を比較した場合、4inch サイズの太陽電池セルを用いた方が 2inch サイズに比べて反射特性が高周波側にシフトすることが分かる。

3.3 セル間配線形状に対する特性

本節では太陽電池セル同士を結んでいる配線形状を変化させてより反射特性が改善できるかどうかについて検討した。通常太陽電池モジュールの太陽電池セル間配線として 2 本の平行配線を用いられている。これは片方の配線が断線した際にも電力を取り出すためである。そこで本論文においても 2 本の配線を基本として、その配線形状を変化させることにした。

図 7 のように 2 本の配線のうち片側のみを折り曲げる方法と図 8 のように両方の配線を折り曲げる方法を検討した。ただし太陽電池セルは 4inch 角とし、折り曲げ高さ l_1, l_2 だけ変化させた。そのほかのパラメータは 3.2 と同じである。多くの計算結果の中から代表的

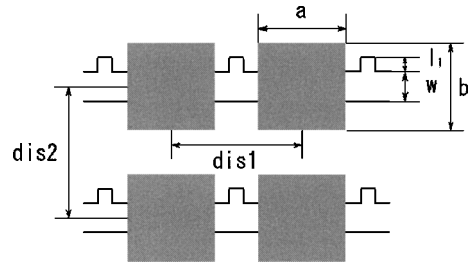


図 7 片側配線折り曲げモデル
Fig. 7 Single side bended wiring model.

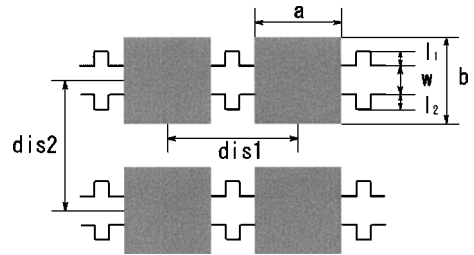


図 8 両側配線折り曲げモデル
Fig. 8 Both sides bended wiring model.

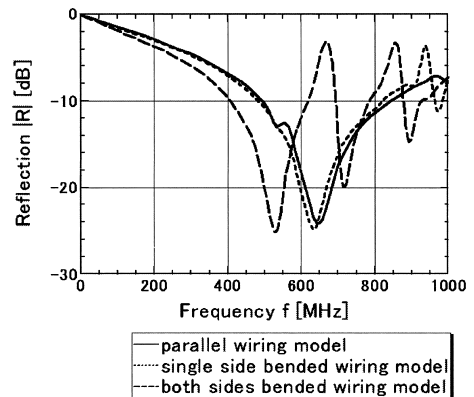


図 9 太陽電池セル間配線形状変化による反射特性
Fig. 9 Reflection by change of the wiring form.

なものを図 9 に示す。この例では $l_1 = l_2 = 4.06$ [mm] である。これより両側の配線を折り曲げるよりも片側だけを折り曲げた方が地上デジタル放送の中心周波数である 620 MHz 付近において反射減のピークが得られることが分かる。これにより太陽電池モジュールの寸法などが制限される環境における特性を配線形状により改善可能である。

3.4 透過特性

これまで太陽電池モジュールの構造や太陽電池セル自体を変化させることによる反射特性について検討し

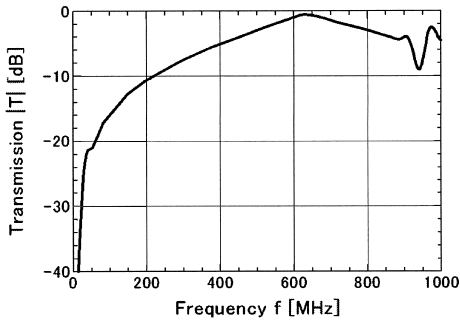


図 10 片側配線折り曲げ法による透過特性
Fig. 10 Transmission of single side bended wiring model.

てきた．その中で最も良い結果の得られたモデルである図 7 の片側配線折り曲げモデルにおける透過特性を図 10 に示す．このように地上デジタル放送の電磁波は窓ガラスに埋め込んだ太陽電池による反射はごくわずかであり，ほとんどが透過している．また本論文では窓ガラスに太陽電池セルを埋め込むことを想定しているため，窓ガラスとして採光の機能も果たさなければならない．最近では透明な太陽電池も開発されているが，光を通さない普通の太陽電池とした場合，本モデルの光の透過率はセルと空間比から 71% であり採光の点でもほとんど問題はないものと考えられる．

4. む す び

本論文では窓ガラスに埋め込むタイプの太陽電池モジュールによる地上デジタル放送波の反射・透過特性の解析と，モジュールの配置及び結線構造を変化させることによる反射波低減法について検討した．その結果，太陽電池セルの上下間隔によって反射特性が大きく変化するが，セルの大きさにはほとんど依存しないことが分かった．またその間隔を中心波長の 1/2 とすることにより 25 [dB] 以上反射を低減できることが分かった．

更に太陽電池セル同士の配線形状を変化させることによって反射の周波数特性を変化させることが可能であり，特に太陽電池セル同士を結ぶ配線のうち，片側のみを折り曲げたモデルでは地上デジタル放送の周波数帯にわたって 10 [dB] 以上反射を低減できることが分かった．なおこのモデルでは通常の窓ガラスと比較して光の透過率が 71% であり採光の面においても問題はないものと考えられる．

今回は垂直入射のみの解析を行ったが，今後は実際

に太陽電池を設置した際に影響が考えられる斜入射特性について検討を行っていく．

文 献

- [1] K. Tonooka, H. Bando, and Y. Aiura, "Photovoltaic effect observed in transparent p-n heterojunctions based on oxide semiconductors," *Thin Solid Films*, vol.445, pp.327–331, 2003.
- [2] R.J. Dinger, "Reactively steered adaptive array using microstrip patch elements at 4GHz," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.AP-32, no.8, pp.848–856, Aug. 1984.
- [3] J. Huang and R.J. Pogorzelski, "A Ka-band microstrip reflectarray with elements having variable rotation angles," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol.46, no.5, pp.650–656, May 1998.
- [4] J. Huang and A. Fera, "Inflatable microstrip reflectarray antennas at X and Ka-band frequencies," *IEEE AP-S/URSI Symp.*, pp.1670–1673, July 1999.
- [5] 畠山和徳, 高橋応明, 宇野 亨, 黒川浩助, "太陽電池モジュールを用いた反射波制御の基本的検討," *信学技報*, A・P2002-143, Jan. 2003.
- [6] 畠山和徳, 高橋応明, 宇野 亨, 黒川浩助, "太陽電池モジュールを用いた反射波制御の基礎的検討," *信学論 (B)*, vol.J86-B, no.9, pp.2025–2028, Sept. 2003.
- [7] 宇野 亨, *FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析*, コロナ社, 1998.
- [8] 佐藤 浩, 堂前洋幸, 高橋応明, 安部 實, "コンクリート壁の表面形状による電磁波の反射, 透過抑制," *信学論 (B)*, vol.J82-B, no.4, pp.674–682, April 1999.
- [9] 小林 豊, 高橋応明, 安部 實, "ガラス表面上金属導線の配置による電磁波遮断," *信学論 (B)*, vol.J83-B, no.10, pp.1446–1452, Oct. 2000.
- [10] 桜井康弘, 黒川浩助, "太陽光発電アレイ分布定数回路シミュレーション," *太陽/風力エネルギー講演論文集*, pp.307–310, Nov. 2000.
- [11] P. Monk and E. Suli, "Error estimates for Yee's method on nonuniform grids," *IEEE Trans. Magn.*, vol.30, no.12, pp.3200–3203, Dec. 1994.

(平成 15 年 12 月 25 日受付, 16 年 3 月 31 日再受付)



畠山 和徳 (正員)

平 14 東京農工大・工・電気電子卒．平 16 同大学院修士（電気電子）課程了．在籍中，太陽電池モジュールを用いた反射波制御法に関する研究に従事．



高橋 応明 (正員)

平元東北大・工・電気卒。平 6 東工大大学院博士課程了。同年武蔵工大・工・電気・助手。同大講師を経て、平 12 東京農工大・工・電気電子・助教授。平 16 千葉大・フロンティアメディカル工学研究開発センター・助教授。衛星放送受信アンテナ、平面アンテナ、小型アンテナ、RLSA、環境電磁工学、人体と電磁波の研究に従事。工博。IEEE シニア会員。



宇野 亨 (正員)

昭 60 東北大学院博士課程了。工博。同年同大工学部助手。平 3 同助教授。平 10 東京農工大・工・教授。平 10~11 ペンシルベニア州立大学客員研究員。この間、電磁波における逆問題、計算電磁気学、アンテナと人体との電磁相互作用等の研究に従事。平元本会篠原記念学術奨励賞。著書「FDTD 法による電磁界及びアンテナ解析」。AGU, ACES, 日本シミュレーション学会, 日本文化財探査学会各会員, IEEE シニア会員。



有馬 卓司 (正員)

平 12 東京農工大・工・大学院博士前期課程了。平 15 同博士後期課程了。同年同大・工・助手。分散性媒質、線状アンテナ、誘電体基板上アンテナの FDTD 解析に関する研究に従事。工博。IEEE 会員。



黒川 浩助

昭 40 早大・理工・電気卒。同年通産省工業技術院電気試験場(現・産業技術総合研究所)入所。同エネルギー情報技術研究室長を経て、平 8 東京農工大・工・教授。工博。電気学会会員。