

共同利用(産業利用トライアルユース:先端研究施設共用促進事業
『みんなのスパコン』TSUBAME によるベタスケールへの飛翔)
成果報告書 平成 24 年度 課題種別

利用課題名 FPU の周波数移行に向けたアンテナの特性解析
英文: Analysis of Antenna Performance for Spectrum Reorganization of FPU

小郷 直人 池田 哲臣
Naoto Kogo Tetsuomi Ikeda

NHK 放送技術研究所
NHK Science & Technology Research Laboratories
<http://www.nhk.or.jp/str/>

邦文抄録(300 字程度)

移動中継用の 700MHz 帯 FPU はマラソンや駅伝の中継で映像、音声を伝送するために用いられているが、総務省の周波数再編アクションプランにより 1.2GHz 帯、2.3GHz 帯へ周波数を移行することが検討されている。移行先の周波数は現行の周波数より高く波長が短くなることから、中継車屋上にアンテナを設置した際、車両屋上の形状による送信アンテナの放射特性への影響がより大きくなることが懸念される。今回、700MHz 帯、1.2GHz 帯、2.3GHz 帯 FPU の送信アンテナ、中継車をモデル化し、それぞれについて解析、比較した。また、移行先の周波数は現行の周波数より高くなることから、その伝搬損失を補償するために送信出力を大きくすることを検討している。そのため、送信アンテナの近傍にいるアナウンサーやドライバーの電磁波曝露の影響が懸念されるが、FPU の周波数移行を考慮した電磁波曝露の影響の検討例は少ない。今回、中継車に乗っているアナウンサー、ドライバーを対象に、700MHz 帯、1.2GHz 帯、2.3GHz 帯 FPU の運用を考慮して送信アンテナをモデル化し、数値人体モデルを用いて電磁界解析することで人体の比吸収率を解析した。

英文抄録(100 words 程度)

During live outside broadcasting (OB) of road races, such as marathons and ekiden, video images are taken using cameras on moving OB vans and the signals of the video images are transmitted by FPU in 700 MHz band. The frequency band for the FPU is planned to migrate to 1.2 and 2.3GHz bands by the action plan for radio spectrum reallocation developed by the ministry of internal affairs and communications. After the frequency migration of FPU, the transmission frequency-band will be higher than that of 700MHz band; however, few studies have been performed concerning the effect of OB van on the radiation patterns due to the shape of the OB van. In this report, we designed transmission antennas and OB van and calculated radiation patterns. Moreover, after the frequency migration of FPU, the transmission power will be higher than that of 700MHz band; however, few studies have been performed concerning the SAR on the human body due to the FPU considering the frequency migration. In this report, we designed a transmission antenna and calculated SAR with a numerical model of the human body.

Keywords: 700MHz 帯周波数移行, FPU(Field Pick-up Unit), 放射パターン, 比吸収率(SAR), コーリアアンテナ

はじめに

現在、マラソンや駅伝などの移動中継では 700 MHz 帯(770 – 806 MHz)の移動中継用 FPU[1]を用いて映像、音声を伝送しているが、総務省の周波数再編アクションプランにより、移動中継用 FPU の周波数を 1.2GHz 帯(1.24 – 1.3GHz)と 2.3GHz 帯(2.33 – 2.37GHz)へ周波数を移行することが検討されている[2]。

移動中継用 FPU の周波数移行を考慮すると、移行

後の周波数は現行の周波数に比べて波長が短くなるため中継車の形状の影響をより大きく受けることが懸念される。また、その評価においては、中継車に送信アンテナを載せて測定することが困難なため、電磁界解析を行うことが有効であるが、波長が短くなるにつれて解析規模が大きくなり解析が困難になる課題がある。

一方、移行先の周波数では 700MHz 帯に比べて自由空間損失や回折損失が大きいため、その補償のために STTC-MIMO 方式の導入[3]や、現行の FPU よ

りも送信出力を増大することを検討している。そのため、現行の FPU と比較して送信アンテナ近傍のスタッフへの電磁波曝露量が大きくなるのが懸念される。放送事業用などの特殊な無線機器については電波防護指針の“管理環境”の適用範囲と考えられることが一般的である[3,4]。電波防護指針において管理環境は 10g 平均局所 SAR が 10[W/kg]以下、全身平均 SAR が 0.4[W/kg]以下と一般環境に対して 5 倍の指針値が示されている。しかし、FPU の運用においては送信アンテナの近傍にアナウンサーやドライバーが乗車しているため、一般環境で評価する必要があると考えられる。しかし、周波数移行を考慮し、実際に FPU を運用する環境において電磁波曝露について検討された例はない。

さらに、移動中継用 FPU の運用を考慮した電磁波曝露について検討する場合、中継車の形状など人体近傍の環境も含めた評価が必要になることから測定による評価が困難である。したがって、電磁界解析による評価が有効であるが、移動中継車の構造が大きい上、FPU の周波数移行に伴い波長が短くなることから、計算規模が非常に大きくなるため、解析が困難になる課題がある。

本報告では、移動中継用 FPU の周波数移行を考慮し、SISO(Single Input Single Output)運用時の各周波数における送信アンテナの放射パターンを計算機シミュレーションで解析し、700MHz 帯での放射特性の改善手法の有効性を 1.2GHz 帯、2.3GHz 帯において評価した。解析においては試作した送信アンテナ、および NHK が所有する移動中継車をモデル化し、電磁界解析を行うことで比較、評価した。

また、電磁波曝露については、移動中継用 FPU の周波数移行を考慮し、SISO(Single Input Single Output)運用時の FPU による人体への電磁波曝露量の評価として SAR を計算機シミュレーションで解析し、700MHz 帯、1.2GHz 帯、2.3GHz 帯の周波数帯で比較、評価した。解析においては日本人の成人男性の平均体型を有する数値人体モデルを用いて、中継車屋上に搭載した送信アンテナの近傍にアナウンサーとドライバーが乗車する環境を想定し、人体モデルの姿勢を変形して計算した。

特に 1.2GHz 帯、2.3GHz 帯については解析規模が

大きくなり一般的なワークステーションでは解析が困難なため、東京工業大学が運用しているスーパーコンピュータの TSUBAME2.0 を用いて解析を行った。

放射パターンの解析モデル

図 1 に本報告において検討に用いる送信用アンテナの 2 段コーリニアアンテナの構造を示す。700MHz 帯については、現在、NHK の駅伝やマラソン中継で使用している 2 段コーリニアアンテナをモデル化した[4]。

1.2GHz 帯、2.3GHz 帯については 700MHz 帯とほぼ同じ条件で比較するために同等のアンテナ利得、放射パターンを持つ 2 段コーリニアアンテナを試作した[5]。図 1 の送信アンテナの放射パターンを図 2～4 に示す。なお、本稿において 700MHz 帯は 800MHz、1.2GHz 帯は 1.27GHz、2.3GHz 帯は 2.35GHz を解析対象とした。

図 2～4 において、振幅値はアンテナ利得[dBi]を表し、実線が計算値、点線が測定値を示す。これより、計算モデルと測定値がほぼ一致しており、十分な精度で解析ができています。さらに、2 素子のアンテナをアレー化し同相給電する場合があるため[5]、x-y 面で半値角が約 50 度となる場合について、各周波数における放射パターンを図 5～7 に示す。

図 5～7 より、2 素子の場合についても各周波数帯においてほぼ同等の放射パターンを有していることがわかる。また、2 素子の場合についても、計算モデルと測定値がほぼ一致しており、十分な精度で解析ができています。

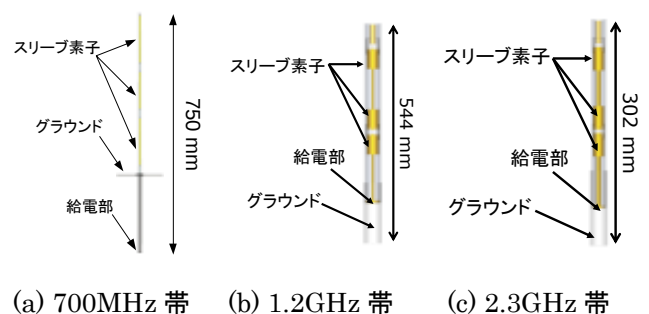
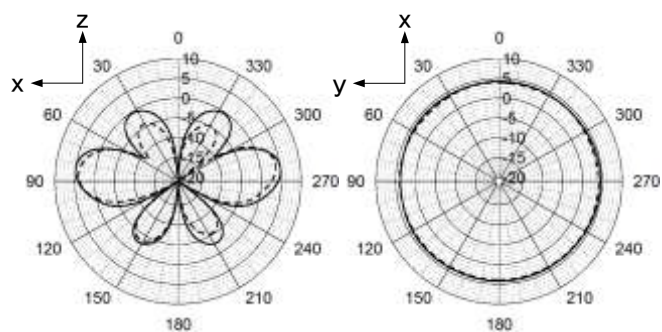


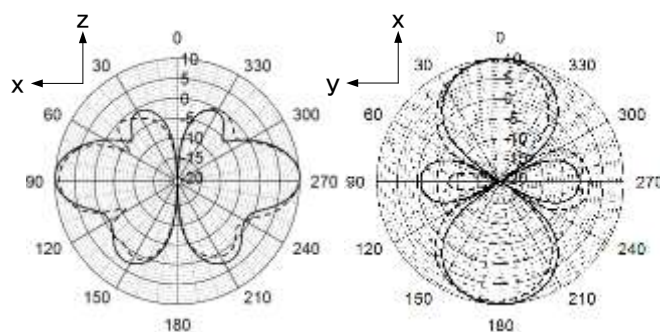
図 1 アンテナ構造と配置



(a) 垂直面

(b) 水平面

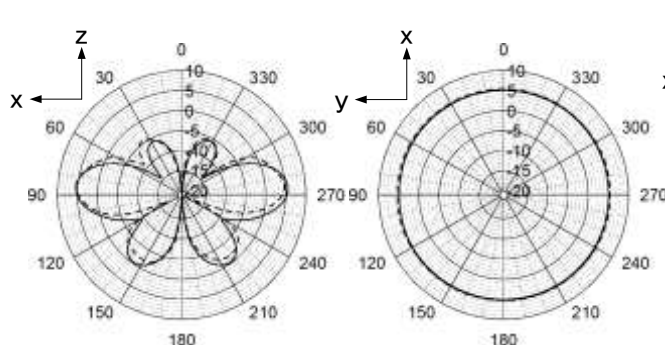
図 2 放射パターン(700MHz 帯:800MHz)



(a) 垂直面

(b) 水平面

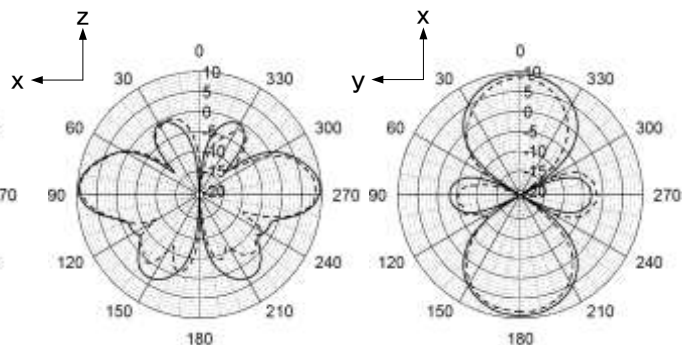
図 6 放射パターン(1.2GHz 帯:2 素子 140mm 間隔)



(a) 垂直面

(b) 水平面

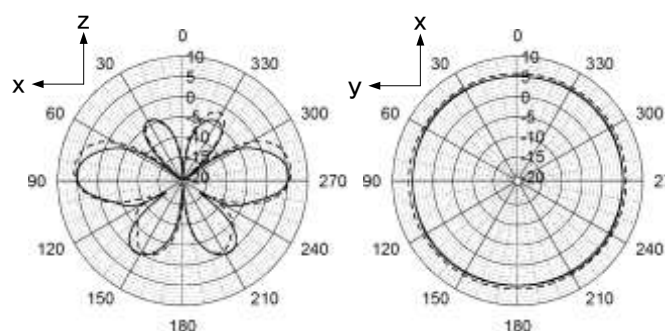
図 3 放射パターン(1.2GHz 帯:1.27GHz)



(a) 垂直面

(b) 水平面

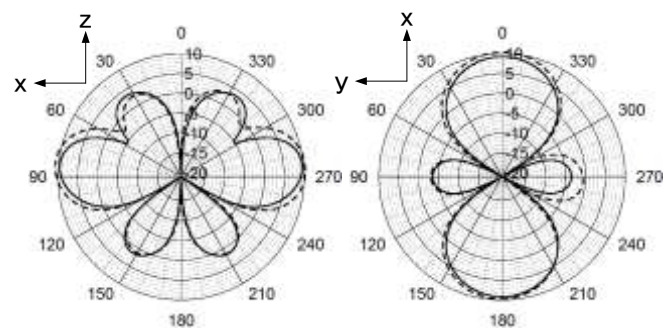
図 7 放射パターン(2.3GHz 帯:2 素子 75mm 間隔)



(a) 垂直面

(b) 水平面

図 4 放射パターン(2.3GHz 帯:2.35GHz)



(a) 垂直面

(b) 水平面

図 5 放射パターン(700MHz 帯:2 素子 220mm 間隔)

図 8 に本稿において検討に用いる解析モデルを示す。NHK で使用している移動中継車「RS-1」(3450×2350×3090mm)を車両屋上に搭載している機材を含めて CAD で詳細にモデル化した。送信アンテナの設置位置は現在、放送で使用する際に設置する位置とした。過去の検討結果から、移動中継車に送信アンテナを搭載する場合、放射特性に影響を与えるパラメータとしてアンテナ高が重要であることがわかっている[6]。そのため、送信アンテナを 1 素子用いる場合(図 2～4)と、2 素子を同相合成してアレー化して用いる場合(図 5～7)について、アンテナ高が地上から 3.8m の位置を基準とし、170mm ずつ下げて最大で 510mm 下げた位置までの 4 パターンについて(図 9)、各周波数において放射特性を解析、比較する。なお、放射特性の解析には CST 社の MW Studio 2012 を用いた。

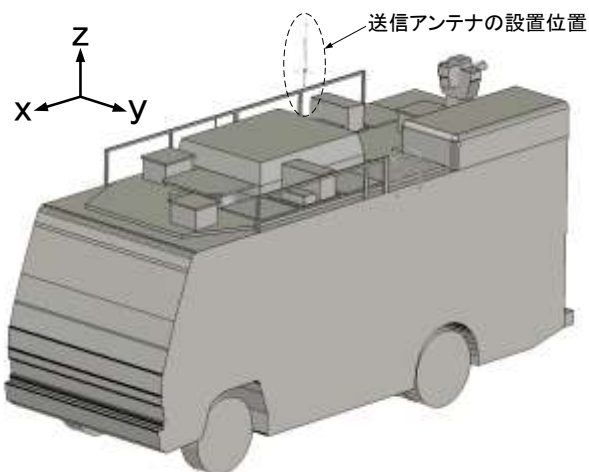


図 8 解析モデル

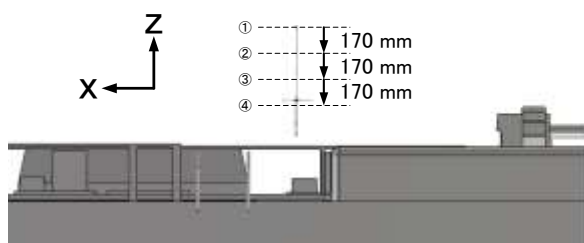
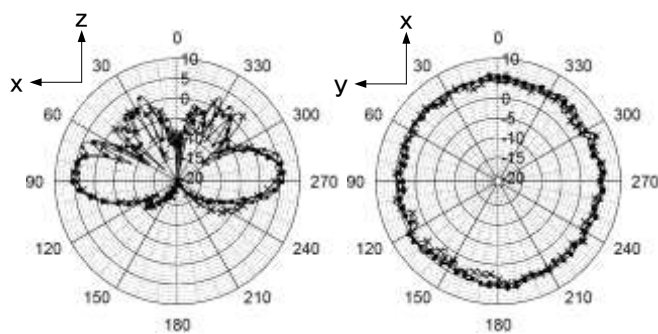


図 9 アンテナ高

放射パターンの解析結果

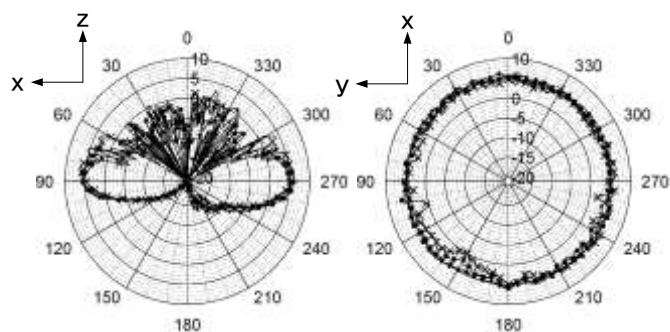
1 素子での運用の場合

図 1 に示した送信アンテナを 1 素子用いた場合について、図 8, 9 の解析モデルを用いた各周波数における解析結果を図 10～12 に示す。図 9 の設置位置①は●, ②は▼, ③は■, ④は×で示す。



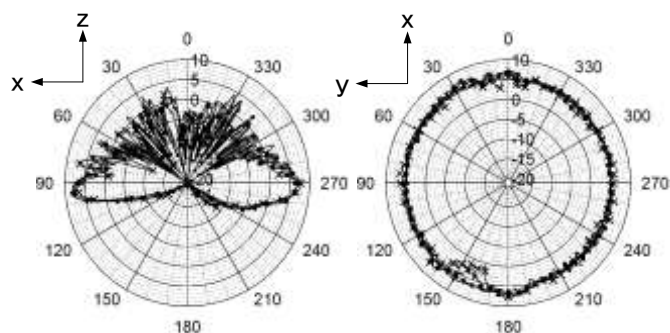
(a) 垂直面 (b) 水平面

図 10 800MHz における放射パターン



(a) 垂直面 (b) 水平面

図 11 1.27GHz における放射パターン



(a) 垂直面 (b) 水平面

図 12 2.35GHz における放射パターン

図 10～12 より、アンテナ高が低くなるにつれて、図 2～4 で示した放射パターンに対する差が大きくなること がわかる。垂直面についてみると、周波数が高くなるにつれて、波長に対する中継車の大きさが大きくなるため、車両屋上の影響を受けてアンテナ上方への反射成分が大きくなる。特に2.3GHz帯では送信アンテナ近傍の機器の反射の影響から放射パターンへの影響が大き いことがわかった。また、中継車の形状の影響から、周波数が高くなるにつれて垂直面におけるメインビームの半値角が小さくなる傾向がわかる

2 素子での運用の場合

図 1 に示した送信アンテナを 2 素子用いた場合について、図 8, 9 の解析モデルを用いた各周波数における解析結果を図 13～15 に示す。1 素子の運用の場合と同様に図 9 の設置位置①は●, ②は▼, ③は■, ④は×で示す。

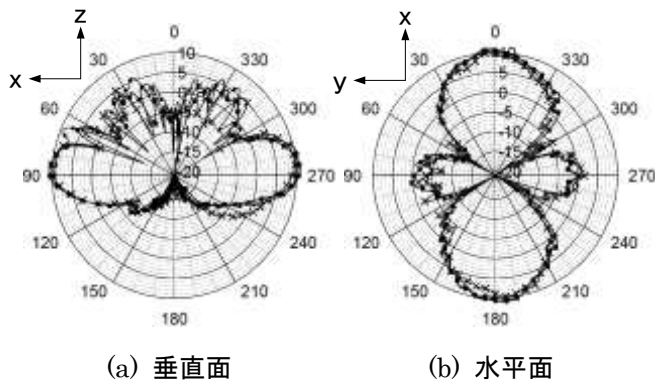


図 13 800MHz における放射パターン

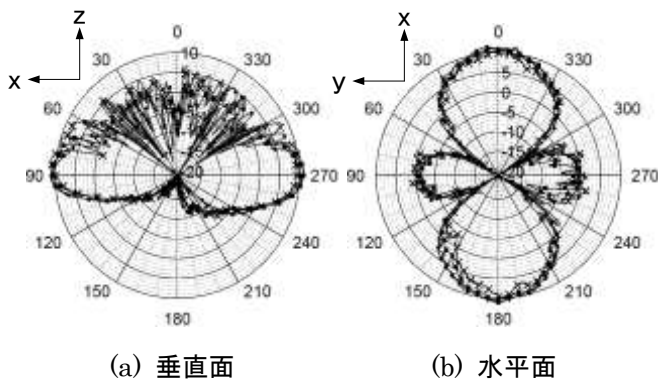


図 14 1.27GHz における放射パターン

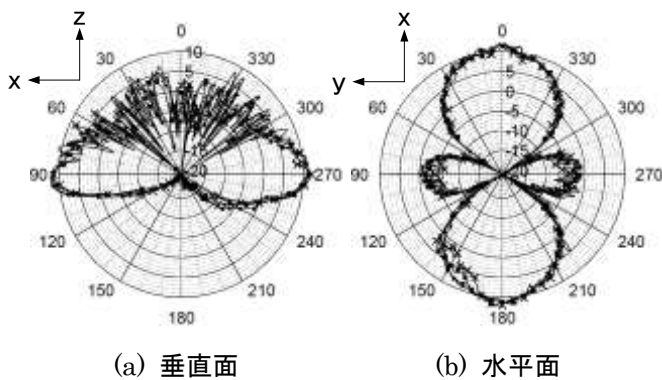


図 15 2.35GHz における放射パターン

図 13～15 より、2 素子の場合についても 1 素子の場合と同様にアンテナ高が低くなるにつれて車両形状による放射パターンへの影響が大きいことがわかる。特に、水平面における半値角は送信アンテナ単体の場合(図 5～7)では各周波数の送信アンテナで約 50 度なのに対し、アンテナ高が最も低い場合(図 9 の④)、各周波数で 25～35 度に小さくなることがわかった。また、アンテナ高が高い場合(図 9 の①)についても各周波数で 40 度程度に小さくなることから、アンテナ高だけではな

く、設置位置についても検討が必要と考えられる。

電磁波曝露 (SAR) の解析モデル

中継車に搭載された送信アンテナから出た電磁波が、アナウンサー、ドライバーに曝露される状態を実際の運用を考慮して解析するため、NHK が使用している移動中継車「RS-2」(5980×2300×3300mm)を CAD モデルから詳細にモデル化した。また、アナウンサー、ドライバーについては数値人体モデル[7]を用いた。さらに、中継車の車両形状の影響を評価するため、図 16,17 から車両を削除した図 18,19 のモデルについても解析する。図 18,19 において、アンテナと数値人体モデルの位置関係は図 16,17 と同一であり、車両形状のみがなくなっている。

図 16,18 は、中継車後方のアナウンスブースにアナウンサーが座っているモデルで、アンテナはほぼ人体と同じ高さにある。図 17,19 はドライバーが運転席に座っているモデルである。

送信アンテナには 2 つあり、地上基地局に向けて送信するアンテナとそこから 1.87m 後方に設置したヘリに向けて送信するアンテナがある。送信アンテナの設置位置は現在 NHK が駅伝やマラソンの中継で運用している位置[4]とし、どちらも送信出力は同じで常時送信している条件とした。どちらの送信アンテナも周波数に応じて図 1 に示したアンテナを用いる。なお、図 16,18 において、人体と地上基地局用送信アンテナの距離は約 3.3m、ヘリ用送信アンテナとの距離は約 1.4m である。また、図 17,19 において、人体と地上基地局用送信アンテナの距離は約 1.3m、ヘリ用送信アンテナとの距離は約 2.5m である。

なお、アンテナの高さは道路交通法で地上から 3.8m 以下にする必要があるため、地上基地局用送信アンテナ、およびヘリ用送信アンテナの上部先端が地上から 3.8m の高さになるように設置することとした。

図 16～19 のそれぞれの条件で、地上基地局用および、ヘリ用送信アンテナについて各周波数帯について電磁界解析する。なお、電磁界解析、および SAR の計算には CST 社の MW Studio を用いた。

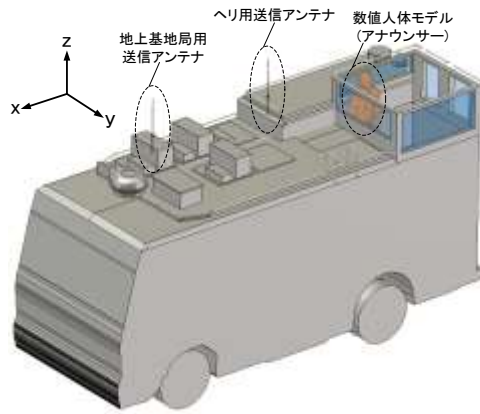


図 16 解析モデル(条件 A)

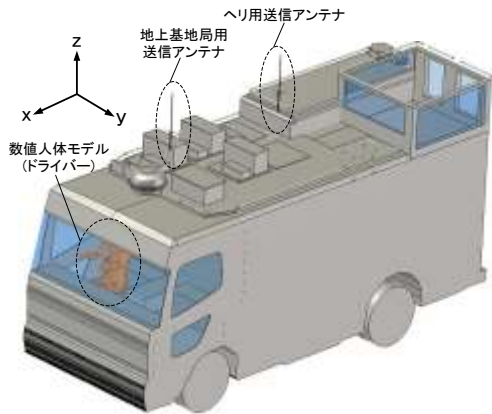


図 17 解析モデル(条件 B)

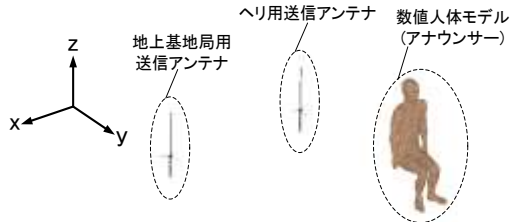


図 18 中継車のない解析モデル(条件 C)

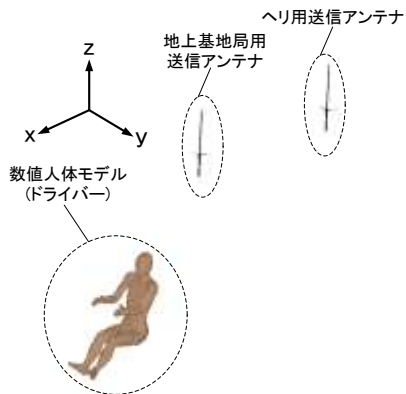


図 19 中継車のない解析モデル(条件 D)

SAR の計算方法

SAR については式(1)が国際的に用いられているため [8], 本稿でも式(1)に基づいて計算を行う。

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} E^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (1)$$

ここで, σ は生体組織の導電率[S/m], ρ は生体組織の密度[kg/m³], E は電界強度の実効値[V/m]である。なお, SAR の評価は, 人体局所の任意の 10g にわたり平均した 10g 平均局所 SAR [6], および全身平均 SAR で評価する。ここでは, 電波防護指針のうち一般環境を対象とする。一般環境では 10g 平均局所 SAR の指針値が 2[W/kg] 以下, 全身平均 SAR の指針値が 0.08[W/kg] 以下となっている。

SAR の解析結果

図 16～19 の条件について, 700MHz 帯, 1.2GHz 帯, 2.3GHz 帯のそれぞれについて, 地上基地局用送信アンテナから送信した場合の SAR を解析した。各条件での 10g 平均局所 SAR の最大値の結果を表 1 に, 全身平均 SAR の結果を表 2 に示す。送信出力はそれぞれの周波数帯で利用できる最大値として, 700MHz 帯は 5W, 1.2GHz 帯は 25W, 2.3GHz 帯は 40W とした。

表 1 10g 平均局所 SAR の最大値[W/kg](地上基地局用)

解析モデル	800MHz	1.27GHz	2.35GHz
条件 A	0.0032	0.018	0.038
条件 B	0.000014	0.00048	0.00049
条件 C	0.0028	0.012	0.03
条件 D	0.0035	0.029	0.042

表 2 全身平均 SAR[W/kg](地上基地局用)

解析モデル	800MHz	1.27GHz	2.35GHz
条件 A	0.00014	0.00077	0.00075
条件 B	0.0000016	0.000021	0.000017
条件 C	0.00011	0.00052	0.00043
条件 D	0.00011	0.00074	0.0011

表 1 において, 周波数で比較すると, 1.2GHz 帯, 2.3GHz 帯の方が送信出力が高く, SAR もそれに伴っ

て大きくなっていることがわかる。

一方、人体とアンテナの位置関係と車両の有無に関して条件 A～D で比較すると、条件 A、C のアナウンサーの SAR については中継車の有無によって大きな違いはどの周波数についてもなかった。これは、アナウンサーの周囲には窓枠などがあるもののほぼ開放された状態になっているため、SAR に違いがほとんどなかったと考えられる。それに対して、条件 B、D のドライバーの SAR については、車両がある場合は無い場合の SAR に比べて 1/100 程度まで小さくなっている。これはアナウンサーの場合と異なり、車両による遮蔽が大きいためであると考えられる。

次に、表 2 についてみると、10g 平均局所 SAR と同様の傾向を示しており、ドライバーに関しては車両の遮蔽の影響が大きいことがわかる。

以上のことから、10g 平均局所 SAR については最大でも 0.04[W/kg] 以下、全身平均 SAR については最大でも 0.001[W/kg] 以下になることがわかった。

図 16～19 の条件について、700MHz 帯、1.2GHz 帯、2.3GHz 帯のそれぞれについて、ヘリ送信用送信アンテナから送信した場合の SAR を解析した。各条件での 10g 平均局所 SAR の最大値の結果を表 3 に、全身平均 SAR の結果を表 4 に示す。送信出力は地上基地局用送信アンテナと同様に、それぞれの周波数帯で使用できる最大値として、700MHz 帯は 5W、1.2GHz 帯は 25W、2.3GHz 帯は 40W とした。

表 3 10g 平均局所 SAR の最大値[W/kg](ヘリ用)

解析モデル	800MHz	1.27GHz	2.35GHz
条件 A	0.0071	0.034	0.023
条件 B	0.00013	0.0001	0.000025
条件 C	0.0087	0.029	0.036
条件 D	0.00021	0.0041	0.0033

表 4 全身平均 SAR[W/kg](ヘリ用)

解析モデル	800MHz	1.27GHz	2.35GHz
条件 A	0.00021	0.0012	0.0011
条件 B	0.0000012	0.0000033	0.000001
条件 C	0.00018	0.0011	0.00093
条件 D	0.000013	0.0003	0.0002

表 3 についてみると、条件 A、C のアナウンサーの SAR については、地上基地局用送信アンテナよりもヘリ用送信アンテナの方がアナウンサーに近いので、表 1 の結果よりも SAR が全体的に大きいことがわかる。一方、条件 B、D の場合はドライバーから送信アンテナが遠くなるため、10g 平均局所 SAR が小さくなることがわかる。また、中継車の有無によるドライバーの SAR への影響は表 1 と同様の結果であり、中継車の遮蔽の影響が大きいことがわかった。また、表 4 より全身平均 SAR についても表 3 と同様の傾向であることがわかった。

以上のことから、10g 平均局所 SAR については最大でも 0.04[W/kg] 以下、全身平均 SAR については最大でも 0.001[W/kg] 以下になることがわかった。

現行の 700MHz 帯の FPU の運用では、地上基地局用送信アンテナとヘリ用送信アンテナから同時に常時送信しているため、同様の運用形態を想定すると、10g 平均局所 SAR、および全身平均 SAR はそれぞれの送信アンテナによる SAR 値の合計値で評価する必要がある。

表 5 に条件 A、B における表 1 と 3 の 10g 平均局所 SAR の合計値、表 6 に条件 A、B における表 2、4 の全身平均 SAR の合計値を示す。

表 5 10g 平均局所 SAR の合計値[W/kg]

解析モデル	800MHz	1.27GHz	2.35GHz
条件 A	0.01	0.052	0.06
条件 B	0.00014	0.00058	0.038

表 6 全身平均 SAR の合計値[W/kg]

解析モデル	800MHz	1.27GHz	2.35GHz
条件 A	0.00035	0.002	0.0018
条件 B	0.0000028	0.000024	0.00075

表 5、6 から、ドライバーよりもアナウンサーの方が、10g 平均局所 SAR、全身平均 SAR のどちらについても 100 倍程度大きいですが、どちらについても電波防護指針の一般環境における指針値よりも大幅に下回ることがわかった。

なお、今回は移動中継車の中にいる技術スタッフや制作スタッフに対する電磁波曝露の検討は行わなかったが、スタッフのいる空間の窓(開口部)はフロントガラスよりも小さいことなどからドライバーの SAR よりかなり小さくなっていると予想されるため、電波防護指針の指針値に対して下回ると考えられる。

まとめ、今後の課題

移動中継用 FPU の周波数移行を考慮して、SISO 運用時の中継車屋上に設置した送信アンテナの放射特性について解析、比較した。その結果、高い周波数になるほど中継車の形状の影響を受けることがわかったが、アンテナ高をとる効果が大きく、できるだけ高くアンテナを設置することが重要であることがわかった。また、これらの結果から、できるだけ車両高の低い移動中継車を用いること、およびできるだけ屋上の凹凸を小さくすることによってアンテナの放射パターンへの影響を小さくできることを示唆しており、移動中継車の設計への指針と考えられる。

一方、電磁波曝露については、現行の 700MHz 帯と同様のアンテナ設置、運用をするという想定の下に検討を行った結果、特に 1.2GHz 帯は送信出力が 25W、2.3GHz 帯は 40W と非常に大きいこと、また、人体組織の導電率が 700MHz 帯に比べて大きいことから 10g 平均局所 SAR、および全身平均 SAR が大きくなることがわかった。しかし、電波防護指針の一般環境における指針値に対しては非常に小さい値であることがわかった。

今後、放射パターンについては、アンテナ高だけでなく、アンテナ配置についても検討する予定である。また、電磁波曝露については、アンテナの設置位置による SAR の違いや、MIMO にした場合の検討、および SAR の低減手法について検討する予定である。

参考文献

- [1] テレビジョン放送番組素材伝送用可搬型 OFDM 方式デジタル無線伝送システム,” 社団法人電波産業会, ARIB STD-B33, 1.1 版, (Nov.2005)
- [2] 総務省周波数再編アクションプラン(平成 23 年 9 月改訂版)
http://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/02kiban09_03000089.html

- [3] 中川孝之, 池田哲臣, “ 2×2 STTC-MIMO-OFDM システムの性能改善,” 映情学技報, vol.36, no.10, BCT2012-48, pp.69-72, Feb. 2012.
- [4] 小郷直人, 池田哲臣, “700MHz 帯移動中継用 FPU の運用における SAR の解析,” 映情学技報, vol.36, no.37, BCT2012-83, pp.25-28, Sep. 2012.
- [5] 小郷直人, 池田哲臣, “移動中継用 FPU の周波数移行に向けた SAR の検討,” 映情学技報, vol.36, no.42, BCT2012-94, pp.37-40, Oct. 2012.
- [6] 小郷直人, 矢田貝昌宏, 村上文弘, 池田哲臣, “700MHz 帯ロードレース中継用送信アンテナのアンテナ高の検討,” 映情学冬大, 4-6, Dec. 2011.
- [7] T. Nagaoka, S. Watanabe, “Postured voxel-based human models for electromagnetic dosimetry,” Phys. Med. Biol., 53(24), pp.7047-7061, Dec. 2008.
- [8] “Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3kHz to 300GHz,” ANSI/IEEE Standard C95.1-2005, October 2005.

本課題に関する発表文献

- [1] 小郷直人, 池田哲臣, “移動中継用 FPU の周波数移行に向けた送信アンテナの放射特性の比較,” 映情学技報, vol.37, no.4, BCT2013-31, pp.123-126, Jan. 2013.
- [2] 小郷直人, 池田哲臣, “移動中継用 FPU の運用における SAR の解析,” 映情学技報, vol.37, no.6, BCT2013-37, pp.57-62, Feb. 2013.
- [3] 小郷直人, 池田哲臣, “移動中継用 FPU の周波数移行を考慮した SAR の低減手法の検討,” 映情学技報, vol.37, no.14, BCT2013-58, pp.67-72, Mar. 2013.
- [4] N. Kogo, T. Ikeda, “Reduction of SAR due to FPU for Marathon Races Considering Its Operations,” Joint Meeting of the Bioelectromagnetics Society and the European BioElectromagnetics Association 2013 (BIOEM 2013), PB-44, Jun. 2013.
- [5] 小郷直人, 池田哲臣, “2.3GHz 帯 FPU 用パッチアレーアンテナの設計と伝搬実験,” 映情学技報, Jul. 2013.(発表予定)
- [6] N. Kogo, T. Ikeda, “Comparison of Radiation Patterns of Transmission Antennas for Marathon Race Considering Frequency Migration of Field Pick-up Units,” 34th Progress In Electromagnetics Research Symposium (PIERS 2013), Aug. 2013. (発表予定)

本課題に関する受賞

- [1] 研究奨励賞(小郷直人), 映像情報メディア学会
- [2] 第 24 回電波功績賞総務大臣賞(代表:池田哲臣), 電波産業会