

## 学校WLANの電波伝搬を題材としたエネルギー変換学習について

### On learning “Energy Conversion” as a subject based on radio wave propagation in school WLAN environment

佐藤亮一, 仁野平真美, 本間洸希, 宮崎孝祐, 鈴木賢治, 下保敏和, 平尾篤利

Ryoichi SATO, Manami NINOHIRA, Koki HONMA, Kosuke MIYAZAKI,  
Kenji SUZUKI, Toshikazu KAHO, and Atsutoshi HIRAO

#### Abstract:

In this paper, we propose a learning program for “Energy Conversion” in “Technology and Home Economics (Technology)” at Junior high school. As an important subject, this program features a power flow between radio transmitter and radio receiver in Wireless LAN (WLAN) system, i.e. the conversion from electric power to radio wave, radio wave propagation in the space considered, and the conversion from radio wave to electric power. Students study all of the energy conversions within limited range of time, by using computer simulation tools for electromagnetic wave analyses (ray tracing analysis tool, FD-TD analysis tool, and so forth) for getting beautiful color image of electric field distribution in their school WLAN environment. By reading the image obtained, the students can easily understand whether or not they are in good positions for reception of the radio wave. This learning procedure is based on an application of the computer simulation technologies, so this can also be applicable to a program (algorithm and programming education) for “Information Study by Scientific Approach” in “Information” at High School. In the program, next, to validate the simulation results and detect insensitive zones of their school WLAN, actual electric field distribution (signal strength) in the school is simply measured by using ICT device as tablet PC, in which the FREE app with simplified field strength measurement function is installed. At the end of the program, a collaborative learning practice is carried out for the purpose to discuss a common problem among the students and evaluate it quantitatively. The collaborative group working may also be extended to a subject for “the Period for Integrated Studies”.

#### Key words:

Technology of energy conversion, radio wave propagation, Ray tracing method, FD-TD method, Programming education, Active learning, Collaborative learning, ICT utilization in education, Quantitative evaluation, Information Study by Scientific Approach, The Period for Integrated Studies

#### 1. はじめに

日本におけるスマートフォン（以下、スマホ）やタブレットPC等のスマート通信端末の普及は、3G/4G高速移動通信インフラ環境の迅速な整備に加え、2008年のiPhone3Gの日本での販売開始をき

かけに従来型携帯電話（フィーチャーフォン）からスマホへの移行が本格的にはじまったことで、大きく加速された。従来はPCや他の別々のツールで行っていたこと、例えば、電話、電子メール、Web閲覧、検索、音楽、写真、動画、テレビ、ラジオ、読書、辞書、言語学習、ショッピング、ゲームの全てがスマホ1台（あるいはタブレットPC1台）でできるようになり、利便性が大きく向上した。さら

に、ツイッター、LINE等SNSの日本でのサービス開始とも連動し、2015年には世帯あたりのスマホ普及率はフィーチャーフォンのそれを上回るようになった<sup>[1]</sup>。特に、中学生・高校生のスマホ普及率が高くなっている。さらに、スマホを所持していない生徒も、無線LAN(WLAN)機能付き音楽プレイヤーやゲームは所持していることが多く、公衆WLANエリアからスマホ所持者とほぼ同等のサービスを利用している。このように、スマホやタブレット、WLAN機能付き音楽プレイヤー等は、中学生・高校生にとって「日常生活の中で使用する製品」の中でも特に利用頻度の高い製品となっている。

以上のような状況となったため、中学校および高等学校の教育現場では、教科を問わず、スマホを安全に利用するための情報モラル教育(情報セキュリティ教育を含む)<sup>[2],[3]</sup>の充実がこれまで以上に求められている。さらに、情報技術に関連する教科、「中学校技術・家庭(技術分野)」、「高等学校情報」では、「日常生活の中で使用する製品」に関連する情報技術の基礎的な理解を図るため、およびそれらに係る技能を身につけるための教育が必要とされている<sup>[4],[5],[6]</sup>。しかし、現在の教育現場では、中学生・高校生にとって「日常生活の中で使用する製品」であるスマホ、タブレット、WLAN機能付き音楽プレイヤー等をPCと同様に情報ネットワーク端末の一つとして扱ってはいるが、それらが「いつでもどこでもネットにつながる」仕組み、電波を用いた通信技術に関する基礎的な教育(電気から電波へのエネルギー変換も含む)、関連する技能を身につけるための教育については、当該教科の授業時間の短さも影響してあまり行われていない<sup>[7]</sup>。

本稿では、「中学校技術・家庭(技術分野)」における「C エネルギー変換の技術」の電気分野の単元において、比較的少ない授業時間数で電波を用いた通信技術に関連する内容を題材として取り扱うことを提案し、上記問題の解決に貢献したい。ここでは、ほぼ全ての学校に整備されている学校WLAN環境を利用した「学校内WLANの電波伝搬」を主な題材とし<sup>[8]</sup>、コンピュータシミュレーション技術(理論)とタブレットPC等のICT機器を用いた簡易電波測定(実験)を組み合わせた学習教材を提案し、その実践のための準備方法、教育手順について説明する。本稿で扱う内容は、新潟大学教育学部技術科教育専修において中学校技術の教員を目指す学生に対して、教科の科目「電気」「電気実習」と、教職科目「技術教育研究」の一部において扱っている。

また、本題材はグループワークにも適しており、電波伝搬の解析結果を「数値化」して定量的に評価・考察できるので、科学技術の基礎を扱う全ての教科の「教科の指導法」にも活用可能である。さらに、情報ネットワークやコンピュータシミュレーション技術を含んでいるので、「高等学校情報」の「情報の科学」[「(1)コンピュータと情報通信ネットワーク」]、「(2)問題解決とコンピュータの活用」<sup>[6]</sup>等にも発展させて利用できる。

以下、2節ではエネルギー変換と無線通信で重要なアンテナ・電波伝搬についての基本について簡単に説明する。3節では、「見えない電波」を可視化するシミュレーション(理論)について述べ、その解析例を示す。4節ではシミュレーション結果を検証するためには、ICT機器を利用した簡易電波強度測定(実験)が有効であることを示す。5節ではシミュレーション結果と測定結果を「数値化」して評価する(定量的に評価する)ことの重要性についてふれる。最後に6節で本稿をまとめる。

## 2. エネルギー変換(電気)とアンテナ・電波伝搬

中学校技術・家庭(技術分野)(以下「中学校技術」)では、必修内容として「C エネルギー変換の技術」があり、エネルギーの『変換』や『伝達』等について扱う。火力発電、原子力発電、水力発電、風力発電等の各種発電の仕組み(発電機)を題材とした「機械エネルギーから電気エネルギーへの変換」の技術や、モータ(電動機)を題材とした「電気エネルギーから機械エネルギーへの変換」の技術が多くの学校で教えられている。また近年では、ロボットの制御等を題材に、「D 情報の技術」の「計測・制御のプログラミング」の内容と組み合わせ、「電気エネルギーから機械エネルギーへの変換」を教えている事例も見られる。一方で、「電気エネルギーから電波のエネルギーへの変換」、「電波のエネルギーから電気エネルギーへの変換」に関する技術<sup>[9]</sup>は、フィーチャーフォンが普及しはじめた1990年代後半から2000年代前半によく見かけられたが現在はあまり扱われていないようである。

本稿では、「アンテナからの電波放射」により電気から電波のエネルギーへの『変換』の基礎からはじめ、「日常生活の中で使用する製品」の代表格となったスマホやタブレットPC等のICT機器が、「目に見えない電波」を利用してネットワークにつながる仕組みについての学習に再注目する。本節では、その要素となる理論と技術について簡単にふれる。

### 2-1. アンテナによる電波の放射

電気から電波への変換(送信),あるいは電波から電気への変換(受信)は「アンテナ」を介して行われる<sup>[10]</sup>. アンテナによって放射される電界と磁界の大きさは,波源の(高周波電源を含む回路の)出力側の電圧および電流の大きさと比例関係にある. 給電線を介して高周波電源を送信アンテナに接続すると,給電端子に与えた電圧に比例して電流が流れ込み,アンテナに電力が供給される. アンテナの端子電圧 $V$ と端子電流 $I$ の比率をアンテナの入力インピーダンスと呼び, $Z=V/I$ で表す. 電力を最大限に取り出そうとする場合,高周波回路の出力インピーダンスとアンテナの入力インピーダンスの整合をとる必要がある. このことは電気から電波へのエネルギー変換において非常に重要である. しかし,「中学校技術」では,時間が経過しても電流の向きが変わらない「直流」と,電流の向きが時間とともに周期的に変化する「交流」という程度しか扱っていない<sup>[7]</sup>. より基礎から学ぶ「中学校理科」においても,2年次の単元「電流とそのはたらき」の最後に交流の周波数について少しふれられているだけで,交流回路のインピーダンスや電力までは扱っていない(「高等学校物理」ではじめて扱われる)<sup>[11][12]</sup>. 中学校技術においても十分な時間をとれないため,ここではコンピュータシミュレーションによる数値実験を行い,アンテナから放射する電波電力が,インピーダンスを変化させるだけで大きく変わる様子を確認させ,直感的な理解をうながす.

### 2-2. 電波の散乱と減衰

アンテナより放射された電波の基本特性について説明する. 電波も光(可視光)も電磁波の一部で,周波数が異なるだけである<sup>[12]</sup>(一般に周波数が3THz以下の電磁波を電波と呼んでいる). このため,電波は小学校で学習した光と似た特徴をもっている.

#### (1) 散乱(反射,透過,回折)

小学校4年次の「光と音」の単元で,直進性とともに,光の反射・透過(屈折)の性質を取り扱っている<sup>[13]</sup>. 電波も光も電磁波であるため,上記と同じ反射・透過の性質をもつ.

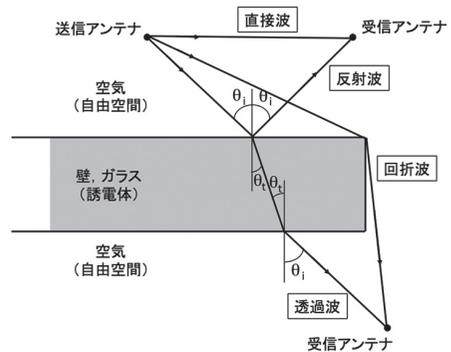


図1 電波の散乱(反射,透過,回折)

図1は,コンクリートや木材等の誘電体でできた壁に電波が当たった場合の例を示している. 受信アンテナの位置が送信アンテナと同じ側にある場合,直接波と反射波が主要な散乱波として受信される. 一方,受信アンテナが壁の反対側に置かれている場合は,透過波と回折波が受信される. なお,電波は金属を透過しないため,例えば黒板は(金属で裏打ちされているため)透過しない. 反射波,透過波,回折波の具体的な計算は若干難しいので,ここでは省略する(詳しくは文献<sup>[14]</sup>を参照のこと).

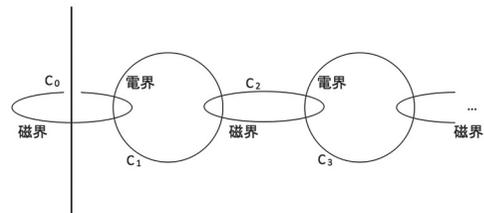


図2 高周波電流により発生する電磁界

#### (2) 伝搬距離と減衰

図2に示すように,高周波で振動する電流(導電電流と変位電流の和)により, $C_0$ に沿って磁界が発生する<sup>[10]</sup>. この電流は高周波で振動(変化)するので,発生する磁界もそれに応じて変化する. すると, $C_0$ に沿った磁界の時間的な変化が2次的な波源となり, $C_1$ に沿った電界を発生する. この電界もまた高周波で変化するので,この変化により新たに $C_2$ に沿った磁界を発生する. このように,磁界,電界を交互に発生させながら時間遅れをともなって伝搬していく. 発生した磁界,電界は,隣接する電界,磁界の副次的な波源となるため,伝搬距離に対する

減衰は比較的小さくなる。結果として、波源（アンテナ）からの伝搬距離が非常に小さい場合を除いて、電磁波の放射電力は伝搬距離の2乗に反比例して、すなわち[放射電力]～1/[伝搬距離]×[伝搬距離]で減衰する。

この内容についても「高等学校物理」で扱われるので、「中学校技術」では、「電波は少しずつ減衰するが比較的遠くまで伝搬する（電波の放射電力は伝搬距離の2乗に反比例する）」という特徴のみを意識させる。

### (3) 干渉

電波は波動（波）なので干渉を起こす。重なり合う2つの波の位相が同じ場合（ある時刻における周期的な振動が同じ場合）は互いに強め合い（振幅は2倍）、位相が逆の場合（ある時刻における周期的な振動が半波長分ずれている場合）は弱め合う。したがって、伝搬距離が比較的小さい（減衰があまり大きくない）場合でも、重なり合う波が互いにほぼ逆位相となると合成波の電力は非常に小さくなる。

波動の干渉についても「高等学校物理」で扱われているので、詳細な学習は困難だが、「半波長毎に明暗（強弱）のある干渉縞」ができていくことについては簡単に説明できる。WLANでよく用いられている2.4GHz帯の電波であれば、1波長が12.5cm(0.125m)なので、受信アンテナの位置が約6cmずれると、電波の受信状態に大きな変化がある。この干渉縞に起因する受信電波の変化については、コンピュータシミュレーションにより可視化された電力画像で確認する。

## 3. 「見えない電波」の可視化

前節の電波の特徴を全て考慮すると、任意の場所で「見えない電波」がどのように伝搬しているのか調べることができる。電波伝搬を数値解析する手法として、レイトレーシング法<sup>[15],[16]</sup>やFD-TD法<sup>[17]</sup>がある。本稿ではモデル化が容易なFD-TD法を使用する。電波伝搬は3次元ベクトルの解析となるが、ここでは計算量（の少なさ）を優先して2次元FD-TD法を用いる。3次元伝搬と2次元伝搬では伝搬距離に比例した減衰特性が大きく異なるが、ここでは大体の伝搬特性がわかれば良いと考え、2次元平面図モデルを用いた簡易2次元伝搬解析を利用する<sup>[18]</sup>。

以下においては、FD-TD法用のモデルの作成方法、実際のコンピュータシミュレーション結果の可視化した画像を示す。

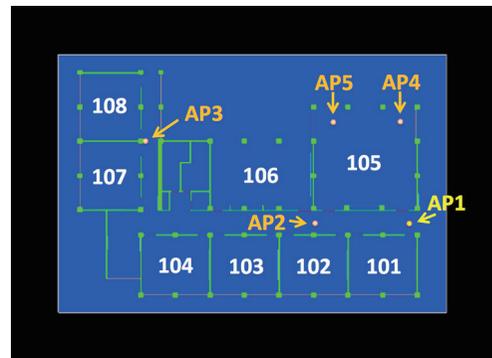


図3 建物の平面図とAP位置

表1 FD-TD法のパラメータ

|        |                            |
|--------|----------------------------|
| 解析領域   | 9000 × 6000 セル (45m × 30m) |
| セルサイズ  | 0.005 m                    |
| 時間ステップ | 11.7 ps                    |
| 吸収境界条件 | Mur2次                      |
| 波源     | 周波数2.4GHzの連続波              |

### 3-1. 学校平面図からのモデル化

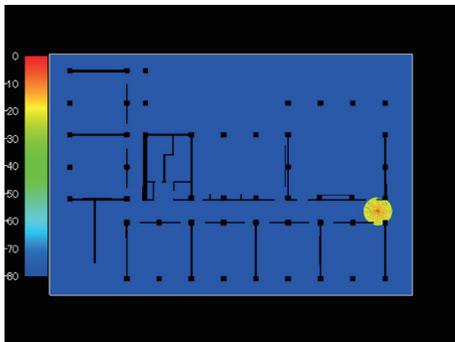
解析例として、新潟大学教育学部講義棟1階の屋内電波伝搬を解析した結果を示す。

図3は、講義棟1階の平面図から8つの講義室（101講義室～108講義室）を含む領域（45m × 30m）の壁とガラス窓部分を抽出して、FD-TD解析用に構築したモデル図である（このモデルは教員が用意しておく）。図のように、部屋や廊下を構成する散乱体の位置、形状、材質（コンクリート、ガラス等）の情報を組み込むだけでなく、あとは送信アンテナすなわちWLANのアクセスポイント（AP）の位置を指定すれば、解析プログラムにより屋内電波伝搬の様子が解析できる。より精密な解析を行う場合は、APのアンテナ指向性を考慮する必要があるが、2次元FD-TD法では組込むことができないため、ここでは無指向性を仮定している（アンテナ指向性の組込みはレイトレーシング法の方が容易である）。

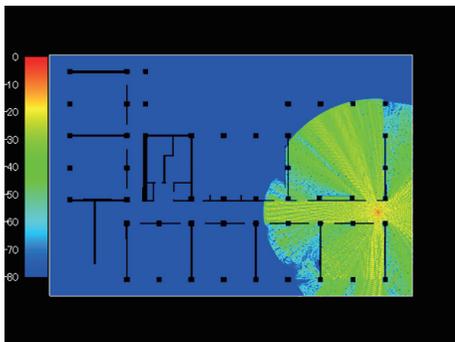
### 3-2. コンピュータシミュレーションとその可視化

本小節では、APから2.4GHzの電波が送信（放射）された場合について解析した結果を示す。計算に用いたパラメータは表1に示す。図4は、APを「AP1」の位置（図3参照）に指定した場合の解析結果である。

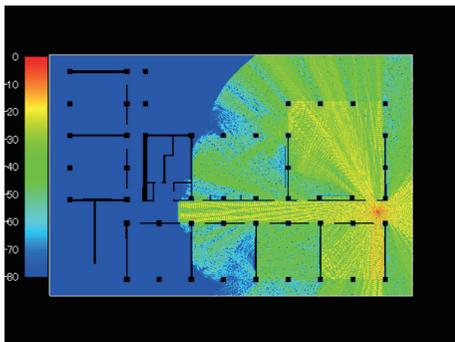
図4(a)-(c)は電波送信直後から特定時間経過後の



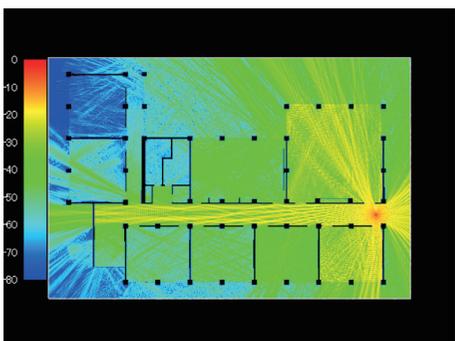
(a)  $t=500 \Delta t$



(b)  $t=4000 \Delta t$



(c)  $t=7000 \Delta t$



(d) 定常状態

図4 FD-TDシミュレーション結果 (AP1)

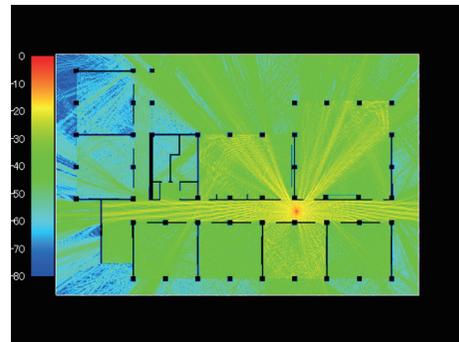


図5 FD-TDシミュレーション結果 (AP2)

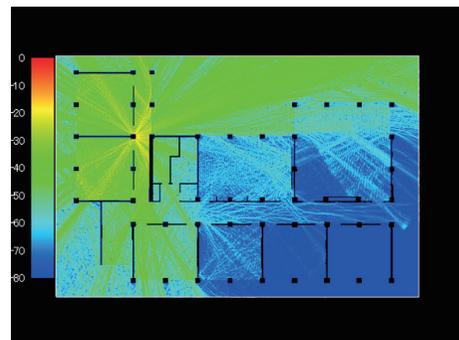


図6 FD-TDシミュレーション結果 (AP3)

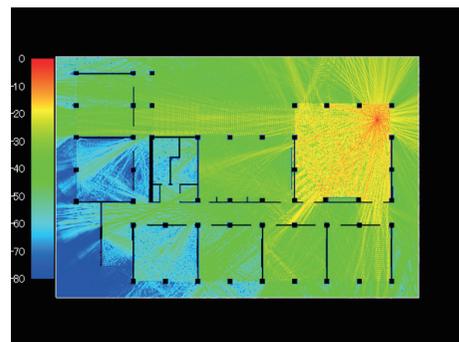


図7 FD-TDシミュレーション結果 (AP4)

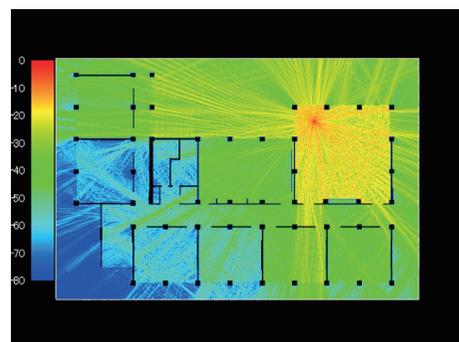


図8 FD-TDシミュレーション結果 (AP5)

スナップショットを示しており、時間経過とともに徐々に電波が廊下から講義室に伝搬している様子を示している。図4(d)は定常状態となった場合の結果である。この定常状態の結果を得るために要した計算時間は、最近のIntel CPU搭載のPCで30分程度(1スレッド)である。使用メモリは1GB程度である。図より、廊下ではAPの両脇の壁からの多重反射波の影響で干渉縞が発生している様子、APから遠い位置にある107, 108講義室ではあまり電波が届いていない領域(電波不感領域)が存在している様子が確認できる。

同様に、図5～図8はAPを「AP2」～「AP5」の位置にセットした場合の伝搬解析結果(定常状態)である。各図においても、干渉縞や電波不感領域がみられ、フロア全体を良感度で受信できるようにするには、複数のAPを配置する必要があることが、可視化した解析結果から容易にわかる。

### 3-3. コンピュータシミュレーションが困難な場合

学校によっては、コンピュータシミュレーションの実行が困難な(性能の低い)コンピュータしかないこともある。この場合は、2節2.2小節の(2)で扱った電波の反射・透過特性(スネルの法則)のみを考慮し、「手書き」の電波伝搬シミュレーションで推定してみるのもよい。

図10は、AP1の位置から10度刻みで電波を照射(放射)させた場合の手書きのシミュレーション結果である。

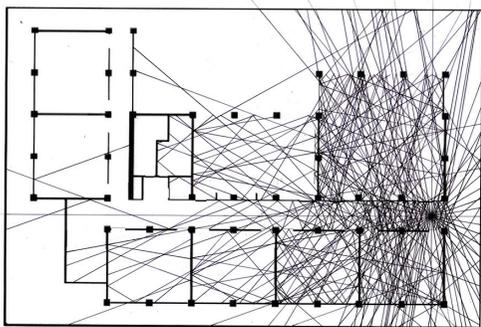


図9 手書きシミュレーション結果(AP1)

図4(d)のコンピュータシミュレーション結果ほどわかりやすくはないが、伝搬の傾向は似ており、どの位置に多くの多重反射波が届いているかが直感的にわかる。ここでは最大の反射回数を5としているが、トレース作業に比較的多くの時間を要した。実際に授業で実施する場合は、1回の授業時間で完結でき

るように、3回程度の反射回数を設定すると良い。

## 4. ICT機器を用いた簡易電波強度測定

前節のシミュレーション結果を観るだけでも電波の強度がわかるので、どのような位置がスマホやタブレットPCで受信しやすい位置かは理解できる。さらに理解を深めるために、「実験」による検証も理系教科の学習では必要である。

そこで次に、実環境での電波強度の測定を行う。ここでは、タブレットPC向けにリリースされている無料アプリケーションを用いた簡易測定を実行する。

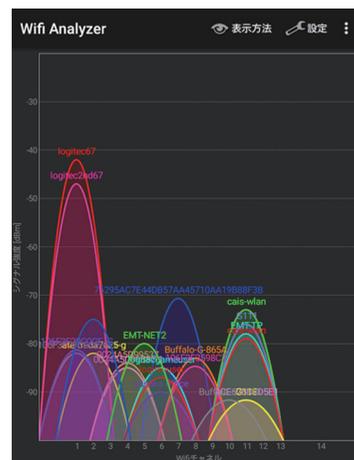


図10 簡易測定画面(WiFi Analyzer)

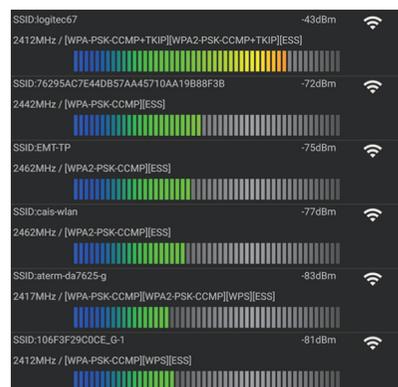


図11 簡易測定画面(電波強度チェッカー)

電波強度を測定できるアプリケーションは多数リリースされているので、どのアプリケーションを利用しても良いが、ここではAndroidタブレットPC用の「WiFi analyzer」と「電波強度チェッカー」の表示例を示す(図10, 図11)。測定は床と天井の中

間の高さ付近で行う。測定した箇所の電波強度は強, 中, 弱等で分類して平面図に印をつけていき (図12), 前節のコンピュータシミュレーション結果と比較する。実環境では, 人の往来, 机や椅子等の家具もあるため, シミュレーション結果と若干異なる結果となることが多いが, どのような場合に電波強度が変動するかを調べてまとめるだけでも, 考察のための良い資料となる。

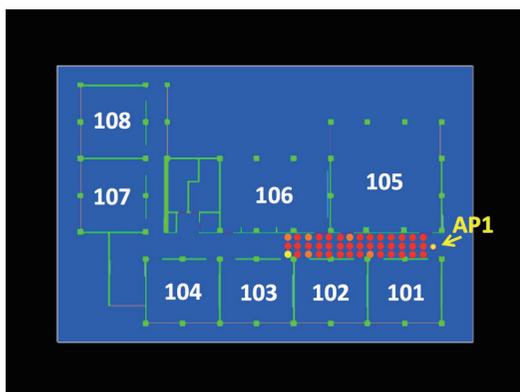


図12 測定結果の平面図へのプロット例

## 5. 定量的評価の重要性

簡易電波強度測定はグループワークとして実施してもらう。例えば, 部屋毎, 廊下毎に各班に責任をもって測定してもらい, 測定後に各班の情報を合わせて学校全体 (あるいはあるフロア全体) の電波強度分布図を作成する (協働作業)。さらに, 可能であれば, 比較的大きな試験用ファイル(100MB程度以上の大きさのファイル)を用意してダウンロードさせ, そのダウンロード時間を測定・記録させると良い。

測定後の次の授業では, 生徒に無線技術者の立場あるいはユーザの立場になってもらい, 目的に応じたAPの最適配置やその数量について検討する課題をだす。ここでは, コンピュータシミュレーションと簡易測定で得られた「数値」を基に検討させる。この演習を通して生徒らに, 「この場所はよくつながった気がする」, 「ここではダウンロードが遅かった気がする」という感覚 (主観) で議論しても人には伝わりづらいことを経験させ, 「この場所では電波強度が-45dBmだったので, よくつながった」, 「ダウンロードに10分もかかってしまったので, ダウンロードが遅かった」と, (共通で理解している)「数値」を用いて客観的な評価を行った上で伝えることが, 誰もが納得しやすいバターな手段であること,

科学技術の分野において基本的な手段であることを理解させ, 身につけさせる。

## 6. まとめ

本稿では, 「中学校技術・家庭 (技術分野)」における「C エネルギー変換の技術」の電気分野の単元において, 学校WLAN環境を利用した「FDTD法によるコンピュータシミュレーション」と「タブレットPCによる簡易電波測定」を組み合わせた教材を提供することで, 比較的少ない授業時間数で, 電気から電波へのエネルギー変換, 電波を用いた通信技術に関連する電波伝搬の内容を取り扱えることを示した。さらに, 教科の指導法に関連し, 本稿の題材により, グループワークを通して「数値」を用いて客観的に評価することの重要性も学べることも示した。

今後は, 本題材をより実践で活用しやすくするために, タブレットPCのみで電波伝搬のコンピュータシミュレーションが可能となるようなアプリケーションを開発する予定である。

## 謝辞

中学校理科, 高校物理のカリキュラムについてご助言いただいた本学教育学部の興治文字先生に感謝いたします。電気実習に熱心に取り組んでいる中, 本稿の資料作成に協力してもらった本学教育学部技術科教育専修の学生諸君, 電気研究室学生諸君に謝意を示します。

## 参考文献

- [1] 平成27年度 青少年のインターネット利用環境実態調査, <http://www8.cao.go.jp/youth/youth-harm/chousa/h28/net-jittai/pdf/sokuhou.pdf>.
- [2] 小木曾健, 11歳からの正しく怖がるインターネット: 大人もネットで失敗しなくなる本, 晶文社, 2017.
- [3] LINE安心安全ガイド, <https://line.me/safety/ja/index.html>.
- [4] 文部科学省, “学習指導要領「生きる力」第2章 各教科 第8節 技術・家庭,” [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/new-cs/youryou/chu/gika.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/youryou/chu/gika.htm).
- [5] 文部科学省, “学習指導要領「生きる力」>> 新学習指導要領 (平成29年3月公示),” [http://www.mext.go.jp/a\\_menu/shotou/new-cs/1383986.htm](http://www.mext.go.jp/a_menu/shotou/new-cs/1383986.htm).

- [6] 文部科学省, ``高等学校学習指導要領解説 情報編,``  
[http://www.mext.go.jp/component/a\\_menu/education/micro\\_detail/\\_/\\_icsFiles/afieldfile/2012/01/26/1282000\\_11.pdf](http://www.mext.go.jp/component/a_menu/education/micro_detail/_/_icsFiles/afieldfile/2012/01/26/1282000_11.pdf).
- [7] 新編 新しい技術・家庭 技術分野 未来を創る Technology, 2編 エネルギー変換に関する技術, 3 電気を供給する仕組みを知ろう (p.98), 技術のとびら その他のエネルギーへの利用 (p.105), 東京書籍, 2017年.
- [8] 佐藤亮一, “「見えない電波」の伝わり方を見る”, 技術教室, vol.637, pp.44-49, 2005年8月.
- [9] 村越一馬, “私の光るアンテナ製作秘話”, 技術教室, vol.637, pp.38-43, 2005年8月.
- [10] 虫明康人, 電波とアンテナのやさしい話 - 超ブロードバンド化の原理の発見 -, オーム社, 2001年8月.
- [11] 高等学校物理の教科書. 例えば, 物理 高等学校理科用 文部科学省検定済教科書, 数研出版, 2013年.
- [12] 中学校理科2年用の教科書. 例えば, 中学校科学2 文部科学省検定済教科書 中学校理科用, 学校図書, 2015年.
- [13] 小学校理科4年用の教科書. 例えば, みんなと学ぶ 小学校理科4年 文部科学省検定済教科書 小学校理科用, 学校図書, 2015年.
- [14] 白井宏, 幾何光学的回折理論, コロナ社, 2015年4月.
- [15] 今井哲郎, 電波伝搬解析のためのレイトレーシング法, コロナ社, 2016年8月.
- [16] R. Sato, H. Sato, H. Shirai, ``Novel usage of binary tree in SBR algorithm for efficient indoor propagation analysis,`` IEICE Electronics Express, Vol.9, No.7, pp.673-678, April 2012.
- [17] 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年3月.
- [18] 細野美保, 佐藤亮一, 白井 宏, “SBR法を用いた3次元室内空間の簡易伝搬解析” 電気学会電磁界理論研究会資料, EMT-11-120, 2011年11月.