

マイクロ波回路シミュレータの導入による高周波回路授業の実践

伊山 義忠* 永田 和生*

Practice Report of the High-Frequency Circuit Engineering Teaching
Using the Microwave Circuit Simulator

Yoshitada Iyama*, Kazuo Nagata*

Abstract: High frequency response of load which is connected to transmission line is complicated, so it's difficult to understand the response by relatively short time learning. As one of the solution of such problem, use of microwave circuit simulator is introduced. The class using the simulator is designed to deepen the understanding about behavior of a microwave circuit. This report describes contents and results of the teaching.

キーワード：シミュレーション，マイクロ波工学，アクティブラーニング，スミスチャート，分布定数回路

Keywords：Simulation, Microwave Engineering, Active Learning, Smith Chart, Distributed Circuits

1. まえがき

携帯電話に端を発した民生用移動体通信の分野は、近年のタブレット型スマートフォンの登場によってますます広がりを見せている。また、クラウドコンピューティング環境の実用化の中にあつて、いわゆる IoT 分野の成長が期待されている。また、無線電力伝送技術の実用化が、進展してきており、基礎的な研究から実用段階への移行が進んでいる。従来は主としてケーブルを介して行われていた電力供給を非接触に空間を介して行うものであり、国際規格による標準化が進められたことも相まって、家電製品をはじめとして自動車や玩具などの製品に市場投入が及んできている。このような状況の中にあつて、ハードウェアの要の一つであるフロントエンド部高周波回路が改めて注目を集めており、半導体デバイスや電子部品の高密度・高信頼性実装にかかわる新たな技術開発の期待も大きい。

これらの社会的な要請を背景にして、次世代を担う実践的なエンジニアの育成を目的として、本校では教育課程の中に平成 26 年度より「実装工学」を開講している⁽¹⁾。ここでは、この授業の中にアクティブラーニングの手法を取り入れて、市販のマイクロ波回路シミュレータを用いての自己学習を講義と併用する方法で授業を行ったので、その内容と結果について報告する。

2. 授業の方法

2.1 対象

「実装工学」は、5 年次学生を対象とする選択科目であり、原則として週 1 回（通年で 30 回）の授業が行われる。受講者数は、20 名（26 年度）、30 名（27 年度）、21 名（28 年度）で推移している。高周波回路に関わる授業は毎年前期に実施しており、マイクロ波回路シミュレータの導入は 27 年度に部分的に開始した。ただし、27 年度には設置環境の制限から全面的な使用ができず、本格的に使うことができるようになったのは、今年度（28 年度）からである。

2.2 学習

(1) 実装工学

マイクロ波帯以上の高周波数帯においては、電圧や電流を精度よく直接測定することが困難になることから、進行波と反射波に分離して考えることが行われる。伝送線路上を伝搬するこれらの波は、分布定数線路についての波動方程式の解として導かれ、さらに、その一般解に境界条件を適用することにより各種関係式が導かれている⁽²⁾。

図 1 に、マイクロ波帯における回路設計や解析において一般的に用いられる、反射係数とインピーダンスとの関係式、ならびに、伝送線路を介して接続された負荷のインピーダンス表示式を示す⁽²⁾。これらの式に、所定の定数を代入すれば、反射係数やインピーダンスがその答えとして求まることになるのだが、大多数の受講生にとっては、その意味について実感を持ちにくいところであろう。また、線路上の位置によって負荷側のインピーダンスが異なることが

* 情報通信エレクトロニクス工学科
〒861-1102 熊本県合志市須屋 2659-2
Dept. of Information, Communication & Electronic Engineering,
2659-2 Suya, Koshi-shi, Kumamoto, Japan 861-1102

明らかであるが、式からその変化の様子を把握することは難しい。また、マイクロ波回路の研究、設計においては、スミスチャートを利用して素子値の変化や周波数の変化に伴う反射係数やインピーダンスの変化を記述することが一般的であるが、このチャートになじみの薄い学生達にとっては、高周波回路の入り口付近でつまづく一因にもなる。さらに、回路パラメータも Z パラメータ、h パラメータなどに代わって、これまではあまりなじみのない S パラメータが用いられるようになるので、この S パラメータについても習熟することが同時に求められることになる。

(2) アクティブラーニング型授業^{(3)~(5)}

学習の目的が、分布定数回路固有の新しい概念や、特性値の変化についての理解であることから、従来の講義形式の授業方法ではもはやカバーすることが難しい。一方で、時代に即応した授業形態として、アクティブラーニングの実践が求められており⁽⁶⁾、教育機関からの報告も多い⁽⁷⁾。そこで、今回の授業においては、反転学習と協調学習の利点取り入れを図った、アクティブラーニング型の授業形態としている。

2.3 シミュレータ

企業や大学、研究機関等における回路設計や回路解析に CAD/CAE が用いられるようになって久しい。これらのシミュレータとしては、定常状態における線形回路網解析をルーツとするマイクロ波総合解析ソフトウェアの Microwave Office (MWO) や Advance Design System (ADS)、時間領域での解析を主体とする非線形解析ソフトウェアの SPICE⁽⁸⁾、Maxwell の方程式に基づく電磁界解析⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ソフトウェアの HFSS、などがよく知られており、それぞれの持つ特長に応じて使い分けられてきている⁽¹¹⁾。このうち、MWO や ADS はハーモニックバランス法⁽¹²⁾による非線形動作解析機能も有しており、度重なる改良によって実現されてきたシミュレーション精度の高さや機能の豊富さなどから、マイクロ波帯以上の高周波数帯におけるコンポーネントやシステムの研究・開発に広く用いられている。また、教育分野における利用についても、すでに大学や高専などの教育機関からの報告が行われている⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。ただし、その導入に要する費用が比較的高額となるため、資金準備の難しい教育機関においては、継続的に利用することが難しかった。

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

$$Z_\ell = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh \gamma \ell}{Z_0 + Z_L \tanh \gamma \ell}$$

$$\approx R_0 \frac{Z_L + R_0 \tan \beta \ell}{R_0 + Z_L \tan \beta \ell}$$

図1 反射係数とインピーダンスとの関係、線路を介した負荷のインピーダンス

しかし、MWO を含む複数の製品群から成るエデュケーションパッケージについて、教育機関向けとして、一定の要件を満たすことを条件とした無償提供制度が一昨年頃より新設⁽¹⁵⁾された。この制度を利用することにより、費用面での心配をすることなく、市販品と同一機能を持つマイクロ波回路シミュレータを授業での教育目的で利用することが可能になる。当学科では、一昨年に登録申請を行ってプログラムメンバーとなり、昨年度より、本学科において授業で使用することを条件としてその使用が認められている。現在は、本年度分のライセンス供与を受けて、学科管理下のホストコンピュータを経由して、授業用の各端末からアクセスして使用可能な状況である。

2.4 内容

(1) 授業の進め方

図2に、シミュレータ MWO を用いた授業(以下、シミュレータ演習と呼ぶ)を中心とした、科目「実装工学」の今年度の授業項目を時系列で示す。年度初めの4月~5月の期間は、分布定数回路に関する基本的事項の確認説明、ならびに紙ベースでの問題演習に充てている。このような比較的短期間としているのは、当学科のカリキュラムにおいて、すでに4年次における必修授業で、当該事項に関して履修してきているからである⁽¹⁾。

シミュレータ演習は、大きく2つの期間に分けられる。前半では、集中定数素子の素子値の変化、ならびに周波数の変化に伴う、反射係数の変化について習得する。この際に、スミスチャートの使い方や見方についての習得も同時に図る。後半では、伝送線路上の観測位置の変化による反射経緯数の変化と負荷側インピーダンスの変化について体得できるように習得する。これら2つの期間中の授業においては、学生達は相互にディスカッションや学び合いができるように配慮している。また、教員側からは、適宜必要な事前説明、質問応答や紙ベースでの解析・検討を実施することで支援を実施している。

集中定数素子	5月30日	シミュレータ演習 I [シミュレータ操作説明] [習得時間調査, 操作説明に対するアンケート]
	6月 6日	シミュレータ演習 II [L,C,Rの素子値が変化した場合の反射特性の変化]
	6月20日	前期中間試験
	6月27日	シミュレータ演習 III [周波数が変化した場合のL,C,R素子の反射特性の変化] [紙ベースでの説明だけの場合に比べた メリットについてのアンケート]
分布定数線路	7月 4日	シミュレータ演習 IV [負荷インピーダンスと整合]
	7月11日	シミュレータ演習 V [線路を介した負荷の反射特性とインピーダンス]
	7月23日	シミュレータ演習 V 補足 [シミュレータ演習 V の内容を紙ベースで演習]
	8月 6日	前期期末試験

図2 シミュレータ演習に関わる講義の概要

(2) 学習資料

図 3 に、シミュレータの基本操作を学ぶために用いた資料の一部を示す。今回は、製品版のシミュレータを使用することができるほか、製品に付随する各種マニュアルやテクニカルノート類の使用も認められている。そこでこれらの中から、MWO についての日本語スタートアップガイドを利用することとした。ただし、提供されているこの資料は全体で 186 ページにおよぶものであるため、最低限必要な箇所を教員側からピックアップしてシミュレータ操作の習得指示を行っている。

図 4 に、演習課題を与える際に作成・配布した補助説明資料の一部を示す。シミュレータ利用者向けに開催されているトレーニングに参加して得た知見や使用内容なども反映して補助資料を提供することで、シミュレータ操作という 2 次的な問題に惑わされることなく、高周波回路の振る舞いに関する基本事項の習得に専念できるよう配慮している。

図 5 に、素子値を可変する機能についての説明資料の一部を示す。図中の左上に示されているボックスが、[Variable Tuner]と呼ばれるものであり、この図に示す場合には、ボックス中に示されている 4 つのバーをそれぞれスライドさせることによって、図中右側に示されている等価回路中の各

素子値や線路パラメータを連続的に変化させることができる。この図で示す場合には、その変化値に対応した回路の反射周波数特性が、図中左下に示すスミスチャート上にリアルタイムで表示されることになる。このような機能を利用することで、素子値等の変化に伴う回路特性の変化の理解が深まることが期待される。

3. 学生の取り組みと今後の課題

インストラクショナルデザイン⁽¹⁶⁾に資する基本資料を得ることを目的として、今年度 (H28 年度) 授業において、学生からの情報をアンケート等によって収集した。ここでは、それらの結果ならびにその結果から考えられることについて述べる。

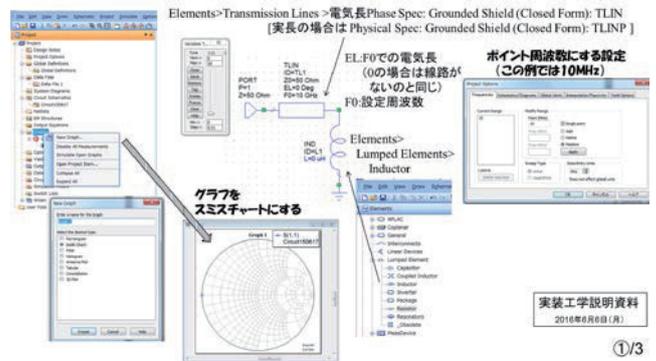
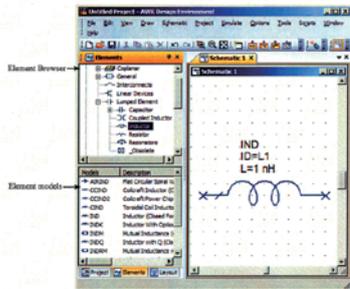


図 4 課題説明資料の一部

(MWO シミュレータの表示画面を部分引用)

集中定数エレメントを利用したフィルタの作成

2. 必要に応じて、[Circuit Elements]ノードの左側にある[+]記号をクリックして、エレメント・ツリーを展開します。
3. [Circuit Elements]の下に[Lumped Element]カテゴリを展開し、[Inductor]グループをクリックします。下部ウィンドウからINDモデルを選択し、下図に示すように回路図にドラッグします。



Element Browserで、ウィンドウをクリックしてモデル表示オプションを選択することにより、下部ウィンドウ内のモデルの表示を変更することができます。便利なモードとして[Details]オプションがあります。

4. さらに3個のINDエレメントを追加し、下図に示すように、各インダクタを位置揃えして接続します。

注: エレメントを移動してそれぞれのノードを相互にスナップさせても、エレメントを接続することができます。エレメントが適切に接続されると、色付きの小さい正方形が表示され、いずれかのエレメントを移動すると接続ワイヤが延長されます。緑色の正方形が表示されない場合は、エレメントを適切な位置にドラッグし直してください。



図 3 MWO トレーニング用資料の一部 (NI AWR ソフトウェア-日本語版スタートガイドより抜粋引用)

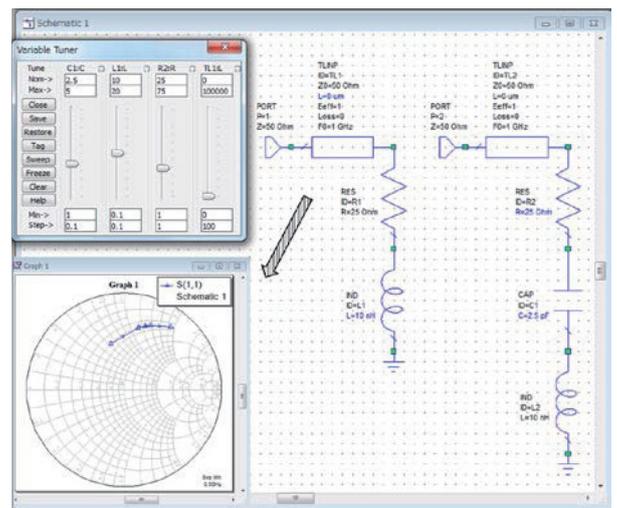


図 5 素子値可変機能説明用資料の一部

(MWO シミュレータの表示画面を部分引用)

3.1 シミュレータの基本操作習得

図 6 に、基本操作の習得に要した時間についての記名方式によるアンケート結果を示す。ここで、習得の定義については特に示さないで聞き取りを行っているので、回答の基準はあくまで、個々の学生自身の実感にある。

アンケートの結果では、1 時間程度で習得できたと答えた学生が最も多く、ほとんどの学生が 2 時間程度以内の時間で習得できている。この結果は、事前に想定していたものより短かった。このような結果になった要因としては、

①入学以来、様々な場面でいわゆるシミュレータというものに触れてきていることで、これまでの操作から類推できることが多い、②シミュレーションの対象となる内容の一部に 4 年次に一度学習したものであり、違和感が少ない、などのことが考えられる。

この習得時間に関するアンケートにあわせて、提示・配布資料についての要望を尋ねた結果から、補足説明の追加、説明図面数、印字サイズ、カラー化などについての指摘があり、次年度以降の資料作成に役立つ知見も得られている。

3.2 シミュレータ演習のメリット

前半の集中定数素子に関する学習を終えた段階で、メリットと感じた点についてのアンケートを実施した。授業の狙いが学生に伝わっているかを確認し、必要に応じて、後半学習の前に、注意喚起を促すことが目的である。

表 1 に、アンケートの回答例を、3 つの類型に分けて載せる (複数記載あり)。掲載に当たり、統一のため、語尾には修正を行っている。表 1 における第一の類型は、“変化”の把握が容易であることを述べているものであって、授業意図を汲んだものである。第二の類型は、“答えを得ることが容易”という側面に注目したものである。第三の類型は、シミュレータの表示機能に注目したものである。このうち、第二の類型の考え方のみの学生に対しては、注意を促す必要がある。それは、シミュレータでは端末操作によって、いわば半自動的に答えを得ることができるが、その答えの妥当性の判断には、相応の技術力、解析力が要求されるか

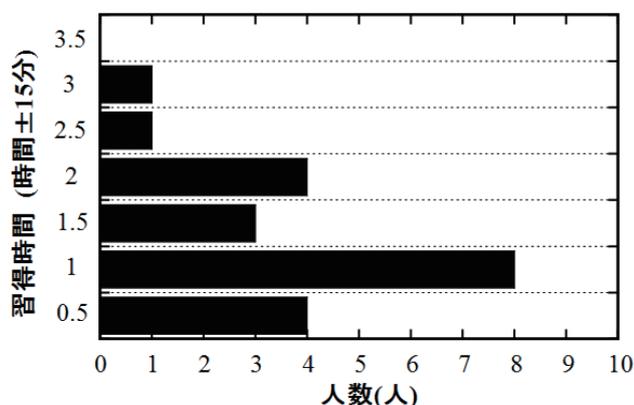


図 6 基本操作の習得時間アンケート結果

らである。また、どのような回路構成を用いて、その中に寄生要素をどこまで盛り込むか、などを決める必要があり、そのための相応な技術的な知見が必須である。

記名方式であったため、教員を意識した回答となっていることが考えられるものの、受講者全員 (欠者 1 名を除く) がアンケートの趣旨を踏まえた記述内容であった。その回答中に、授業意図を汲んだ第一の類型の内容を記載している学生の割合は 85% であり、認知度の高さを確認した。

3.3 学習の効果

シミュレータ演習の効果を定量的に見積もる手段の一つとして、演習があるときとないときでの、同一問題についての誤答率の比較を行った。シミュレータ演習を行っていない H26 年度の期末試験の問題の一部と同一の問題を H28 年度に出題して、その得点について比較した。図 7 に試験問題の回路構成を示す。設問は小問 4 問から構成されてお

表 1 シミュレータ演習のメリットについてのアンケート回答例

質問:「本日の配布プリント説明だけの場合に比べて、シミュレータを用いることでどのような点でメリットがあると感じるのかについて、シミュレーション結果を示したうえで述べよ」
<ul style="list-style-type: none"> ・シミュレータを用いると、素子の値を自由に变化させることができるため、スミスチャート上でどのように移動するのかがわかりやすい。また、複雑な回路でも簡単にスミスチャートを作成することができる。 ・プリントだけでは L1 を可変した場合の軌跡の図のイメージがあまりわからないが、シミュレータを用いることでプリントのみに比べ理解するのが容易である。また値も自分がシミュレーションしたい値に変更することができ、いろんなパターンのシミュレーションを行うことができるといった点をメリットであると感じる。 ・プリントに比べてシミュレータの tune 機能を用いることで動的な結果を目視できる。また、素子を入れ替えるのも容易なので素子を入れ替え瞬時に比較を行える利点がある。 ・変化がわかりやすい。周波数の開始、終了、間隔を設定することでスミスチャート上に周波数が変化した場合の反射係数を表示することができる。
<ul style="list-style-type: none"> ・シミュレータを使うことにより計算は必要がなくなり、チューナーを調整することのみによって容易に整合を取ることができる ・シミュレータを用いることによって回路の値を変化させながら調整の様子をリアルタイムで見ることができるので調整が容易である。また、値の変化のさせ方も必ず計算して調整するのではなく、チューナーのように変化の様子を見ながら操作することで、直感的に値を決定することが可能になるという利点がある。 ・スミスチャートを使うことで手計算をせずに、グラフを見ただけで正規化の値を計測できる。
<ul style="list-style-type: none"> ・シミュレータを用いて作成したスミスチャートは線が少ないため、配布されたスミスチャートに比べると見やすい。 ・紙面上のスミスチャートはインクがにじんだりして見えにくいところがあるが、シミュレーションは線がにじんだりしていないので、インピーダンス軌跡が確認しやすい。 ・図に色がついているため見やすい。 ・見たい部分を中心に拡大することができる。

り、線路に接続された負荷についてのインピーダンスや反射係数を、スミスチャートを用いて回答するものである。

この結果、H26年度の誤答率が25%（受験者数20名）であったのに対して、H28年度では12%（受験者数21名）と約半分に低下していることが分かった。受講者の学力等に関わる統計的な観点や過去問の学習による習熟性に関わる点など、吟味が必要と考えられる事項も残されていると考えられるが、今回の結果によって、シミュレータ演習の効果についての肯定的なデータが得られた。

3.4 学生による授業評価

アクティブラーニングの目的・効果の一つとして挙げられる、学生の自発的な取り組みに関わり、シミュレータ演習の有無と学生の意識との関係について調べた。

図8に、毎年全校的に実施されている無記名方式による授業評価の結果のうち、シミュレータ演習に関わる項目についての結果を示す。図中、黒塗りで示した棒グラフが専門教科である「実装工学」に対する評価（5点満点）である。一方、斜線で示した棒グラフは、開講学年が実装工学と同じ5年次学生のすべての専門教科に対する評価平均点である。図中で(a)に示した学生に関わる質問事項では、対照として示した平均がほぼ一定であるのに対して、「実装工学」では年度を経てシミュレータ演習を授業に取り入れる割合が増えるに従って、自主学習の割合が増加している。一方、図中で(b)に示した教員に関わる質問事項では、「実装工学」に対する評価が年度を経るに従って低下してきている。これは、宿題やレポートの分量が多いと学生が感じることで、満足度が減少してきていると受け取ることができる。

このアンケート結果を、前節で述べた試験結果と合わせて考えると、授業以外での勉強が増えて成績は向上したが、一方で、負担感が増している様子が感じられる。知識や能力の獲得のためにはたゆまぬ努力が必要なことはもちろんであるが、一方で、学習が自発的に継続されるためには、達成感や充実感が不可欠な要素である。アクティブラーニングの目的の一つもそこにあることを考えると、今後は、負担感を充実感に変えて行くような授業のデザインが重要となる。

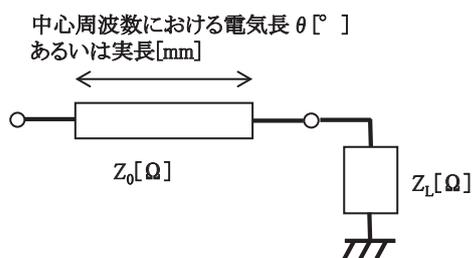


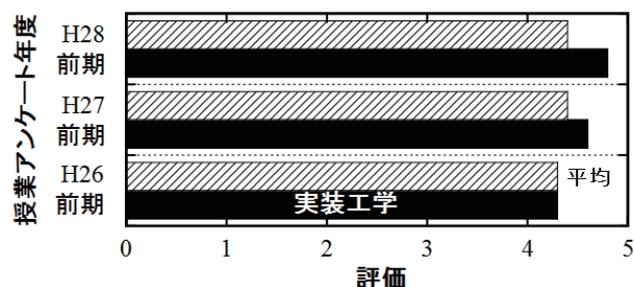
図7 試験問題の基本構成図

4. むすび

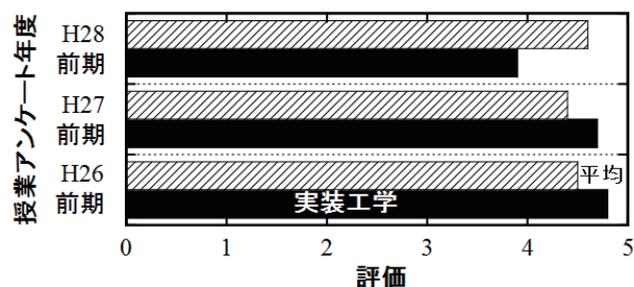
5年次の選択科目「実装工学」において、マイクロ波回路シミュレータを導入して行った授業の内容と結果について報告した。授業実践においては、導入のポイントを、一方向性の授業による説明では実感を得にくい、素子値の変化や周波数の変化に伴うインピーダンスと反射特性の変化、ならびに線路を介した負荷のインピーダンスと反射特性に絞った。学生達は比較的短時間にシミュレータ操作に慣れて、本来の演習に取り組むことが可能であることが確認された。さらに、授業時間以外での学習時間が増加し、成績の向上にも一定の効果がある様子も確認された。一方で、自ら進んで学習することが習慣づけられるまでは至っておらず、今後の授業方法改善の余地がある。

謝辞

本報告中の授業で使用した市販シミュレータのMWO（マイクロウェーブオフィス）は、AWRユニバーシティ・プログラムへの参画により無償提供されたものである。サポートをいただいたAWR Japan株式会社の各位に感謝する。



(a) 学生に関わる質問項目：「授業以外にこの科目の自主学習をしましたか」



(b) 教員に関わる質問項目：「宿題やレポートの分量は適当でしたか」

図8 授業時間外の学習に関する授業評価アンケートの結果（5段階評価）

（平成28年9月25日受付）
（平成28年12月7日受理）

参考文献

- (1) 独立行政法人 国立高等専門学校機構 熊本高等専門学校:「シラバス」,
<http://www.kumamoto-nct.ac.jp/shien/handbook.html>,
(2016.9 現在).
- (2) David M. Pozar: “Microwave Engineering” ,John Wiley & Sons, 2004.
- (3) 溝上慎一:「アクティブラーニングと教授学習パラダイムの転換」, 東信堂, 2015.
- (4) 松下佳代:「ディープ・アクティブラーニング」, 勁草書房, 2015.
- (5) 小林昭文:「アクティブラーニング入門」, 産業能率大学出版部, 2015.
- (6) 文部科学省:「教育課程部会(第98回) 配布資料 次期学習指導要領等に向けたこれまでの審議のまとめ(案)」,
http://www.mext.go.jp/b_menu/shingi/chukyo/chukyo3/004/siryu/1376580.htm, (2016.9 現在).
- (7) たとえば国立大学法人山梨大学:「アクティブラーニングの取り組み」,
http://www.che.yamanashi.ac.jp/modules/activelearning/index.php?content_id=1, (2016.9 現在).
- (8) John Keown 著, 町好雄 監訳:「SPICEによる電子回路設計」, 東京電機大学出版局, 2002.
- (9) 宇野亨:「FDTD法による電磁界およびアンテナ解析」, コロナ社, 2000.
- (10) 小西良弘 監修:「電磁波問題へのアタックの仕方」, 電子通信学会, 1977.
- (11) 小暮裕明:「電磁界シミュレータで学ぶ高周波の世界」, CQ出版社, 2001.
- (12) 牛田明夫, 森真作:「非線形回路の数値解析法」, 森北出版, 1987.
- (13) 本城和彦, 「マイクロ波 CAD を用いた高度技術研修—大学における社会人向け研修の新しい方向—」, 電気通信大学紀要, Vol.16, No.2, p169-177, 2004.
- (14) 独立行政法人 国立高等専門学校機構 沖縄工業高等専門学校:「沖縄高専グローバル交流プログラム」,
http://www.ic.okinawa-ct.ac.jp/chinen/2016_01_04/index.htm, (2016.9 現在).
- (15) AWR Japan 株式会社:「AWR ユニバーシティ・プログラム」,
http://www.awrcorp.com/sites/default/files/content/attachments/AWR_University_Program_Guide_JP-2016.01.pdf,
(2016.9 現在).
- (16) R.M.ガニェ, W.W.ウェイジャー, K.C.ゴラス, J.M.ケラー 著, 鈴木克明, 岩崎信 監訳:「インストラクショナルデザインの原理」, 北大路書房, 2007.