講義・演習・実験・発表を統合したモジュール科目 「電気エネルギー統合特論Ⅰ」の拡充

Development and Expansion of Comprehensive Electrical Energy I for Postgraduate Students

大澤 直樹^{※1}
Naoki OSAWA

花岡 良一^{※1}
Ryoichi HANAOKA

In order to understand a weak point of electrical insulation of power apparatus for post graduate students, we developed an integrated class which consists of a high voltage seminar, high voltage testing, presentation and keynote lecture by a visiting lecturer. In 2009, as our institute increased coursework period from 10 weeks to 15 weeks, we added an electrical field analysis to this integrated class to increase further the depth of understanding of the weak point of electrical insulation. After the class was finished, we investigated a degree of satisfaction of this class. As the results, we found that the electrical field analysis is effective for further increase of the depth of understanding of the weak point of electrical insulation. This paper describes the detail of this integrated class.

Keywords : Postgraduate Education, High Voltage Testing, Electrical Field Analysis, Presentation

キーワード：大学院教育，高電圧実験，電界解析，プレゼンテーション

1. はじめに

金沢工業大学大学院（以下、本学大学院とする）は、「人間力豊かで自ら考え行動する高度専門技術者・研究者」を社会へ輩出するために、(1)問題を発見し、解決する能力、(2)創造性を発揮する高度な専門的能力、(3)確かなコミュニケーション能力とプレゼンテーション能力、(4)未知との遭遇においても敢然として挑戦する能力、ならびに、(5)国内外の動向やニーズを的確かつ広範囲に捉える能力を育成している¹⁾。2008年、本学大学院は従来型の大学院体制を改革し全国に先駆けて、入門、基盤、応用と流れるコースワークを構築すると同時に、総合能力養成型の科目を設定し、体系的に高度専門領域を学ぶカリキュラムを構築した。その中の目玉科目が「モジュール統合科目」である。この科目は、実社会で起こる問題をテーマに、講義、演習、実験、発表を統合した授業と、専門分野の異なる複数教員による指導により、(1)知識を取り込む力、(2)思考、推論、創造する力、(3)コラボレーションとリーダーシップ、(4)発表、表現、伝達する力、をスパイラル的に高め、分野横断的知識、幅広い視野およびスキルを修得することを目的としている。著者らは、人間力豊かで自ら考え行動する高度な電力

（高電圧）技術者・研究者を育成するために「電気エネルギー統合特論Ⅰ（本学大学院電気電子工学専攻で実施されるモジュール統合科目の名称）」を開講している。現在、我が国では電力機器・設備の障害検知技術や絶縁設計の更なる高度化と信頼性向上が以前に増して要請されている。この科目では、(1)セミナー、(2)高電圧実験、(3)レポートとプレゼンテーション、(4)外部講師による基調講演の聴講や外部講師との議論を行う。これらを通じて、電力機器・設備に用いられる複合誘電体系の高電圧環境下における電氣的弱点部や、電力機器・設備の絶縁耐力試験で使われる高電圧試験装置の動作原理、使用方法などの知識とスキルが修得できる教育プログラムになっている。2008年度の授業アンケートを実施した結果、ほとんどの履修者はモジュール統合科目の授業形式に満足していることがわかった²⁾。2009年、本学は3学期制（10週）から2学期制（15週）になり開講期間が1.5倍になった。そこで著者らは、履修者の理解度の更なる向上を考え、電界解析による電氣的弱点部の可視化を授業に追加した。本稿では、著者らが所属する本学大学院電気電子工学専攻で2009年度前学期（4－7月）に開講されたモジュール統合科目「電気エネルギー統合特論Ⅰ－高電圧試験と電界解析による複合誘電体系の電氣的弱点部の習得と絶縁設計法への応用－」の授業内容とアンケート結果について述べる。また、本科目における今

平成 23 年 1 月 19 日受付

※1 金沢工業大学工学部

後の課題やモジュール統合科目の教育効果を分析した結果についても述べる。

2. 電気エネルギー統合特論Ⅰの概要

2.1 授業科目の学習目標と教育方法

(1) 授業科目の学習目標

電気エネルギーは現代社会の基幹をなし益々多様化しているが、我が国では近年の人口減少などから、電力需要増加による設備更新は期待できない状況にあり、既設の高経年電力機器・設備を適切に管理することが重要な課題となっている。そのため、機器・設備の障害検知技術や絶縁設計の更なる高度化と信頼性向上が以前に増して要請されることを背景に、電力機器・設備に用いられる複合誘電体系の高電圧環境下における電氣的弱点部をセミナーと実験によって修得し、電気エネルギーの応用能力を養い、有効な絶縁設計法を考えることを教育目標とした。

(2) 授業の概要とスケジュール

授業は、セミナー、実験、解析、レポート発表ならびに外部講師による基調講演と外部講師との議論で構

成され15週で行われる。なお、各週の授業時間は135分(=45分×3コマ)であり、認定単位数は3単位である。表1は具体的な授業スケジュールと授業内容を示す。履修者の総合力を醸成させるために、2名の教員と1名の外部講師が異なる内容の授業を展開し、履修者を指導した。したがって、履修者は3名の教員から15週の授業を受講する仕組みとなっている。ここで、教員1は複合誘電体系で生じる高電圧(高電界)現象とレポート発表の指導を、教員2は高電圧の発生方法やその動作原理ならびに実験・解析の指導を、外部講師は実社会における電力機器・設備開発、絶縁設計の重要性などの指導を担当した。高電圧現象だけではなく、高電圧発生装置についても学ぶ理由として、実社会では電力機器・設備の安全性や絶縁耐力の限界を確認するために各種絶縁耐力試験が実施されており、技術者や研究者には各種高電圧発生装置に関する知識が要求されるためである。高電圧実験と電界解析は、授業がある程度進んだところで実施した。それは、セミナーで学んだ高電圧現象や高電圧発生装置の原理などについて、それらの理解度が向上すると考えたためである。

表1 授業スケジュールと内容

週	授業方式	教員1	教員2	外部講師
1	セミナー	授業ガイダンス (資料配布、授業の進め方解説など)		
2	セミナー		1. 交流・直流エネルギーの発生と輸送 2. インパルス電圧によるエネルギーの発生	
3	セミナー	1. 等質、等方性媒質中の静電界と電界分布制御 2. 各種電極系の組合せによる電界緩和効果と緩和法		
4	セミナー		3. 直流高電圧発生法 4. 静電的高電圧発生法	
5	セミナー	3. 導電性粒子による電界ひずみ効果 4. 複合誘電体系の電界分布と電気絶縁強度および電氣的弱点部		
6	セミナー		5. 試験用変圧器とその縦続接続法 6. 直流/交流変換法	
7	セミナー	5. 電界分布の相違による各種放電形態 6. コンデンサプッシングの原理と設計法 7. 電気絶縁設計法		
8	セミナー		7. 直列共振法 8. インパルス電圧発生法	
9	実験Ⅰ		1. 平等/不平等電界中の放電現象 2. 三重点の影響	
10	実験Ⅰ (レポート)	レポート指導とプレゼンテーション		
11	実験Ⅱ		複合誘電体系での放電現象	
12	実験Ⅱ (レポート)	レポート指導とプレゼンテーション		
13	解析		電界の可視化と実験結果の裏付け	
14	解析 (レポート)	レポート指導とプレゼンテーション		
15	基調講演	1. 我が国における電力機器・設備開発、絶縁設計の重要性、電力エネルギー事情など 2. 講演内容に対する議論とレポート作成		

(3) 各授業の目的、教育方法ならびに留意事項

(a) セミナー（1－8週）

本論文では、履修者が事前に英文テキスト（担当ページ数：約10ページ/履修者）の内容を理解して和訳レポートを作成し、授業時間中にその内容について、教員と他の履修者の前で発表する授業形式をセミナーと定義する。セミナーの目的は、高電圧現象の知識を獲得して電氣的弱点部を理解することと、電力機器・設備の絶縁耐力試験で使われる高電圧試験装置の動作原理や使用方法を正しく理解することである。次に、このセミナーの実施方法について述べる。履修者は英文テキストを一文ずつ音読した後、その和訳と内容を説明する。不完全な和訳の発表時や学習目標の達成に重要な部分の発表時には、教員が発表者に質問するようにした。発表者が質問に回答できない場合は、ヒントを与え自ら考えて正解を探すようにした。その際は、他の履修者との相談も許可した。このように、教員がセミナーのファシリテーター（調整役）に専念し³⁾、自ら考え自ら正解を探すアクティブ・ラーニング形式の授業を実施することにより、本学大学院の基本理念である「自ら考え行動できる高度専門技術者・研究者の育成」を達成できるよう務めた。なお、多くの履修者はこのような授業に慣れていないため、教育効果を高める工夫として、第1回目の授業で教員がセミナーの運営方法をしっかりと履修者全員に説明し、セミナーの方針を理解させた。

(b) 実験と解析（9，11，13週）

実験と解析の目的は、セミナーで獲得した知識をすぐに実験で確認し、高電圧現象や機器の使用方法などを深く理解することである。著者らは、セミナーと実験を有機的に結合しているモジュール統合科目だからこそできる指導方法であると考えている。実験と解析の詳細は後述2.2(2)実験機材で述べることにする。

高電圧実験は本学の光電磁場科学応用研究所の高電圧研究棟で実施した。また、解析は本学の講義室で実施した。実験Ⅰ，Ⅱならびに解析の授業時間はそれぞれ135分である。教育効果を高める工夫として、指導書に書いてあることを説明するだけでなく、セミナーで学んだ内容との関連性についても説明している。

(c) レポート指導とプレゼンテーション（10,12,14週）

レポート指導とプレゼンテーションの目的は、セミナー、実験ならびに解析を通じて正しく知識を獲得できているかを確認することである。授業時間中、教員は履修者の執筆したレポートの内容を確認し不備があれば指摘して授業時間内に修正させた。これを135分の授業時間の内60分程度行った。その後、授業時間が終了するまで、レポート発表と質疑応答

を行った。レポートの修正や質疑応答では、内容の指摘やヒントを与えるだけに留めた。これは、自ら考え自ら正解を探す能力を育成するためである。

(d) 外部講師による基調講演と講師との議論（15週）

外部講師による基調講演と講師との議論の目的は、履修者がセミナー、実験、解析ならびにレポート作成と発表を通じて獲得した知識の量と獲得した知識が実社会の技術ニーズにどれだけ整合しているかを確認してもらうことである。基調講演の講師は仲神芳武先生（工学院大学）である。仲神先生はメーカーで変電機器の開発に従事された経験があり、本科目の外部講師として適任である。基調講演の演題は「最近の高電圧絶縁技術と将来の電力エネルギー～油入変圧器の絶縁・劣化診断技術～」である。講演では、実際の電力用変電機器で起きた絶縁不良事故の写真や高経年電力機器で使用されていた絶縁油（変圧器油）の現物などを履修者に紹介して頂き、その後、電力用変圧器の有効な絶縁設計法や複合誘電体系における放電の様相や痕跡について履修者と議論する。学習目標の達成には欠かせない講演である。

2.2 使用教材

(1) テキスト

セミナーで使用したテキストは、E. Kuffel氏とW. S. Zaengl氏の共著「High Voltage Engineering : Fundamentals (1984, Pergamon press)」である。この英文テキストには、高電界現象の理論、高電圧発生技術、高電圧絶縁設計法などが図・写真入りで説明されている。著者らは、履修者が学習目標を達成するのに最適と判断し、これを授業テキストとして採用した。

(2) 実験機材

(a) 交流高電圧発生装置

実験では交流高電圧発生装置（TT-50k60、定格電圧50kV、変圧器容量3kVA、日新パルス電子社製）を使用した。図1にその写真を示す。図示し

図1 交流高電圧実験装置の写真

(a) 平行平板電極系（平等電界）

(b) 針－平板電極系（不平等電界）

(c) 絶縁物を挟んだ状態

図2 実験Ⅰで使用した電極セット

ないが、操作盤に備わったデジタル電圧計で火花放電が発生した時の印加電圧を表示できる。電極架台には各種電極がセットでき、セットされた電極の電極間距離をハンドルで微調整できるようになっている。この交流高電圧発生装置を用いて、履修者は複合誘電体系の高電圧環境下における電氣的弱点部や高電圧の発生原理を理解する。なお、交流高電圧発生装置は接地した金網フェンスで囲まれているため、修士研究で高電圧を扱っていない履修者でも安全に実験できる。

(b) 各種放電実験で使用する電極セット

1) 電極形状の影響

図2は実験Ⅰ（9週）で使用した電極セットの写真を示す。図2(a)と(b)は平行平板電極系（平等電界）と針－平板電極系（不平等電界）をそれぞれ示している。先のセミナーで履修者は、(1) 静電界の基礎「針の先端で高い電界が形成され、そこから放電が発生しやすいこと」、(2) 放電現象の基礎「平等電界では一気に全路破壊に至るが、不平等電界ではコロナ放電を経た後、全路破壊に至ること」、ならびに(3) 交流高電圧発生装置の基礎「ファラデーの電磁誘導法則により交流電圧の値を変えられること」を学んでいるため、それらの理論を実験で確認できる。

2) 三重点の影響

図2(c)は図2(a)の電極の間に固体誘電（絶縁）

(a) 針－誘電体－平板電極系

(b) 刃－平板電極系（誘電体の表面に刃電極がある）

図3 実験Ⅱで使用した電極セット

体（GFRP：Glass Fiber Reinforced Plastics、ガラス繊維強化プラスチックの略）を挟んだものである。これも実験Ⅰで使用する。先のセミナーで、履修者は三重点⁴⁾（三つの媒質が重なる点：気体誘電体、固体誘電体、電極）が複合誘電体系における電氣的弱点部となることを学んでおり、その理論を実験で確認できる。

3) 沿面ストリーマ放電の発生から沿面放電への転移

図3(a)、(b)に実験Ⅱ（11週）で使用した電極セットの写真を示す。図3(a)は、図2(b)に示した針－平板電極系の平板電極表面に誘電体板（ベークライト製）を接着したものである。一方の電極を誘電体で覆った状態で、針電極に交流高電圧を印加すると、(1) 針の先端部でストリーマ放電が発生すること、(2) ストリーマ放電が固体表面を四方八方に進展すること（沿面ストリーマという）、(3) 印加電圧を高くすると沿面ストリーマは誘電体板を回り込み、金属平板に到達した時点で火花放電に転移することを実験で深く理解できる。

4) 三重点と沿面放電

図3(b)は、平板電極に接着された誘電体表面に刃電極をセットしたものである。この電極セットでは、刃電極と誘電体との距離を変えることができる。これも実験Ⅱで使用する。刃電極を絶縁物に密着させた状態で高電圧を印加すると、電極（刃）、気体誘電体（空気）、固体誘電体（GFRP）の三重点が形成されるので、比較的低い電圧で沿面放電が発生する。しかし、刃電極と誘電体との距離を大きくすると沿面放電は起きなくなる。この実験を通じて、履修者は電極形状や絶縁物の形状が変わっても、電氣的弱点部が三重点にあることが理解できる。

(c) 電界解析ソフト

Microsoft社のOSで起動できる汎用の電界解析ソフトウェアを使用した。履修者には、比較的容易に解析できる図2(a),(c)の電界を解析してもらった。解析を通じて、履修者は電極端部や三重点で電界が明らかに高くなることを目で見て理解できる。

2.3 評価方法

レポートの配点を40点、成果発表の配点を60点とした。なお、単位の取得には60点以上の合計点が必要である。レポートは(1)英文テキスト和訳、(2)実験レポート(2種類)、(3)解析レポート、ならびに(4)基調講演の聴講ノートの内容や理解度から評価した。また、成果発表はセミナーでの発表態度や発表内容の理解度から評価した。

3. 授業アンケートの結果と分析

3.1 授業の満足度と解析導入の効果

授業終了後にアンケートを実施し満足度を調査した。アンケートによる調査項目は、(A) セミナー、(B) 実験、(C) 解析、(D) レポート作成とプレゼンテーションならびに (E) 英文テキスト使用の満足度である。履修者には、満足度(全100点)を調査項目別に分配してもらった。著者らは、それぞれの調査項目に対して履修者から得た満足度を平均化した。更に、満足度が最も高かった「実験」で満足度が100%になるように、各調査項目の満足度を換算した。これにより、履修者の満足度が低い項目を強調できるので、本授業科目の課題を抽出しやすくなると考えた。以後、このようにして求めた満足度を換算満足度と呼ぶ。図4は受講者12名中8名から得られた各調査項目に関する換算満足度を示す。セミナーと英文テキストの使用について、換算満足度は約60%であったのに対し、レポート作成と発表の換算満足度は90%と高かった。また、新しく追加した電界解析の換算満足度は80%と高かった。表

図4 換算満足度の相対評価の結果

2は履修者からの自由記述意見である。「解析を用いることにより、具体的に放電現象が把握できた」との意見が多かったことから、解析導入による更なる理解度の向上という目的は達成できたと思われる。

3.2 モジュール統合科目の教育効果と一般性

表2の自由記述アンケートの内容からモジュール統合科目の効果とこの教育プログラムの一般性について述べる。「実際に実験で現象を確認できたこと」、「解析を通じて現象を確認できたこと」、「実験毎にレポートの発表と説明があるため、内容を理解しやすかったこと」などの意見があったことから、開講期間が1.5倍になっても講義・演習・実験・発表を統合したモジュール統合科目の教育効果は高いことがわかった。また、それらの意見は高電圧現象、高電圧実験ならびに電界解析に特化したものではなく、一般的な教育方法に関連する。著者らは、講義で学んだことをすぐに実験で確認し、レポートを作成して発表する他の専門科目についても、講義・演習・実験・発表の統合化に

表2 自由記述アンケート

種類	内容
ネガティブな意見	<p>〈(A) セミナーと (E) 英文テキストの使用について〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ・セミナーでは自分の番以外は皆聞いていなかったこと。 ・英語の和訳でまわりの人が参加していなかったこと。 ・発表者以外の履修者がセミナーに活発に参加していないこと。 ・英語の教科書を使用した授業は、ほとんどの人が授業を聞いていない傾向にある。
	<p>〈(B) 実験について〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ・人数が多くて実験をやりづらかった。
ポジティブな意見	<p>〈(A) セミナーについて〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ・自身で翻訳した内容を発表させる形式。
	<p>〈(B) 実験と (C) 解析について〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実際に実験で現象を確認できたこと。 ・三重点での絶縁破壊を確認できたこと。 ・実験と解析の2つの視点から絶縁破壊をみることでできたこと。 ・様々な電極で放電実験を行うことができ、高電圧の分野について、とても興味を持つことができたこと。 ・実際に電界分布を見ることができたこと。 ・解析を通じて現象を確認できたこと。 ・解析を用いることでより具体的に放電の現象を把握できたこと。
	<p>〈(D) レポート作成とプレゼンテーションについて〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実験毎にレポートの発表と説明があるため、内容を理解しやすかったこと。
	<p>〈(E) 英文テキストの使用について〉</p> <ul style="list-style-type: none"> ・英語の教科書を使用したこと。

より、同様の教育効果が得られるものと考えている。

4. 今後の課題

4.1 セミナーの改善と満足度向上

表2に示した自由記述アンケートの内容から「発表者以外の履修者がセミナーに活発に参加していないこと」に対する不満が多く、セミナーと英文テキストの使用についての満足度が低かった。このことから、電気エネルギー統合特論Ⅰの教育効果を更に高めるには、セミナーの運営方法を改善する必要がある。今回のセミナーでは、履修者が事前に英文テキストの内容を理解して和訳レポートを作成し授業時間中に発表した。それを履修者全員に配布しなかった。教員によるファシリテーションを円滑にするために、履修者全員への配布を考えていきたい。

4.2 履修者数増加への対応

2008年度の本科目の履修者数は6名であったが、2009年度は12名（本論文の対象年度）、2010年度は16名と履修者が増加している。そのためと思われるが、表2に示したように「人数が多くて実験をやりづらかった」という意見があった。これに対して、書者らは、次のような対応方法を考えており、2011年度から実施する予定である。すなわち、セミナーの運営に関しては、英文テキスト和訳の分担量を減らし、和訳レポートを事前配布することにより、多くの履修者が発表・議論できるようにする。また、実験については、本学の光電磁場科学応用研究所にある衝撃電圧発生装置（雷インパルス電圧発生装置）も用いて実験内容をより充実する。

4.3 実験の高度化

第9、11週目に実施される実験（放電現象の観察）において、履修者は放電をスケッチしている。しかし、一瞬で終わる放電現象をしっかりと観察するためには、カメラによる放電の撮影が必要である。また、試験用変圧器の操作盤に備わったデジタル電圧計で絶縁破壊電圧を測定しているが、その正確な測定や高電圧測定のスキル獲得にはオシロスコープや高電圧プローブなどを用いた印加電圧波形の観測が必要である。

4.4 外部講師による基調講演の教育効果の調査

第15週目に外部講師による講演を実施したが、その教育効果はまだ明らかになっていない。今後、講演終了後にアンケートを実施し、教育効果を調べる予定である。

5. まとめ

我が国では、電力需要増加による設備更新は期待できない状況にあり、既設の高経年電力機器・設備を適切に管理することが重要な課題となっている。著者ら

は、2008年度にセミナー、高電圧実験、レポート作成とプレゼンテーションならびに外部講師による基調講演と外部講師との議論を統合したモジュール統合科目「電気エネルギー統合特論Ⅰ」を開始した。2009年度はその科目に電界解析を追加し、授業内容を拡充した。その結果以下の重要な知見が明らかとなった。

- (1) 実験、解析、レポート作成とプレゼンテーションで高い満足度が得られ、電界解析の導入目的が達成できた。
- (2) セミナーの内容よりも運営方法に対して、多くの履修者が不満を持っていた。
- (3) 開講期間が1.5倍になっても、講義、演習、実験、発表を統合したモジュール統合科目の教育効果は高い。

今後、この科目を履修する本学大学院生は更に増す可能性がある。多くの履修者に対応し、かつ全ての履修者が満足できる授業を展開するために、セミナーでは履修者が準備した和訳レポートを履修者全員に配布し、セミナーの充実を図る。また、実験では、衝撃電圧発生装置も用いて実験内容の充実を図る。

参 考 文 献

- 1) 金沢工業大学, 大学院案内, 2010
- 2) 大澤直樹, 花岡良一: 講義・演習・実験・発表を統合したモジュール統合科目「電気エネルギー統合特論Ⅰ」の実施－高電圧試験による複合誘電体系の電氣的弱点部の習得と絶縁設計法への応用－, 平成21年度工学・工業教育講演会講演論文集, pp.188-189, 2009
- 3) 大石加奈子: エンジニアリングデザイン教育を活性化するためのファシリテーション－話し合いの技術, 工学教育, 56-6, pp.176-180, 2008
- 4) 花岡良一, 石田隆弘: 高電圧工学, 日新出版, p.149, 2010

著 者 紹 介

大澤 直樹
学歴 金沢工業大学大学院工学研究科電気電子工学専攻博士後期課程修了
職歴 株式会社日立製作所電力電機開発研究所
現職 金沢工業大学工学部電気電子工学科講師
専門分野 大気圧プラズマ応用, 放電応用
学位 博士(工学)
所属学会 電気学会, 静電気学会, 放電学会, IEEE, 日本工学教育協会
連絡先 n.osawa@neptune.kanazawa-it.ac.jp