

サーバを活用した物理実験支援システムの構築と実践例

古川 健一^{※1}

大後 忠志^{※2}

宇藤 茂憲^{※2}

福岡教育大学 教育学部

(平成26年9月30日受理)

The construction and examples of practice of physics experiment supporting system which utilized the server system

Kenichi FURUKAWA

Tadashi OHGO

Shigenori UTOH

Department of Education, Fukuoka University of Education

キーワード：ファイル共有, Ubuntu Linux, Samba, ICT活用, パソコン実験, 実験コンテンツ

概要

物理学実験では, 例年, 学生が提出したレポートの整理や提出済みかどうかのチェック, 最終的に提出されたレポートの採点と集計などで多くの時間が費やされ, その上, レポートの5年間の保管も義務付けられており, 年々提出済みレポートの保管場所も拡大するばかりとなっている。更に, 平成27年度からは, 初等教育教員養成課程(以下, 初等)の全学生に対して小学専門科目(以下, 小専)が必修化されることとなり, これまでと比べて受講生が250名以上増加することになった。このため, 従来のやり方では対応できないことが予想されることから, より効果的な学生実験が展開できるように, 更には物理学実験のICT(Information and Communication Technology)化も考慮して, サーバシステムを導入した物理学学生実験の再構築を図った。小専理科においては, 受講前のテキストや関係資料のサーバからの印刷, 受講後のレポート提出, 教育スタッフによる成績評価およびレポート保管の省力化も同時に実現できるように, また学生実験全般においてICT化に努め, 物理学実験の効率的かつ効果的な実践を試みたので報告する。

1. はじめに

カリキュラムにおいて物理学教室が管理・運営をおこなっている物理学実験は, 平成26年度現在, 授業科目で11種類である(表1)。一例を挙げると, 初等理科選修(以下, 初等理科)学生が受講する平成26年度の物理学実験I(初等理科必修)および物理学実験II A(初等理科選択)の実験課題および領域を表2(a)(b)に示す。物理学実験Iと物理学実験II Aを初等理科の学生が受講する時期はそれぞれ2年次の前期と後期である。必修である物理

表1 物理学教室が管理・運営するH26年度の学生実験

	H26年度物理学教室が管理・運営する実験	実験課題数	備考
1	物理学実験I(初等理科)	13	必修
2	物理学実験I(中等理科)※3	11	必修
3	物理学実験I(環境教育)※3	11	必修
4	物理学実験II A	10	選択
5	物理学実験II B	9	必修
6	物理学実験II C	9	選択
7	物理学実験III	10	選択必修
8	物理学実験IV	10	選択
9	小専理科(4クラス)	4	選択
10	環境情報処理	10	選択
11	コンピュータ物理学特別実験(3クラス)	- ※4	選択

※1 理科教育講座 教育工学教室

※2 理科教育講座 物理学教室

※3 中等教育教員養成課程理科専攻を, 以下, 中等理科と記載
環境教育課程環境教育コースを, 以下, 環境教育と記載

※4 年度によって実験課題数は変動する

表 2 (a) 物理学実験 I (初等理科必修) の実験課題

物理学実験 I (H26 年度に実施した初等理科選修用の実験内容)			備考	
番号	領域	実験名	製作※ 5	映像・画像※ 6
1	基礎	オリオンテーションと物理学実験基礎事項		
2	基礎(プログラム)	実験データの処理(パソコン活用)演習		
3	力学	自由落下運動と放物線運動	○	△
4	電磁気学	静電気実験と回路実験		△
5	力学	運動量保存則の実験	○	△
6	力学	振り子の周期と力学的エネルギー保存則の実験	○	△
7	基礎	固体と液体の比重		△
8	波動	音の発生と検出および正確な音速度実験(パソコン活用実験)	○	○
9	電磁気学	凸レンズ(光の屈折現象)の実験		△
10	力学	大気圧の実験	○	△
11	放射線	放射線の基礎と霧箱実験(講義・実験・データ解析で2回で実施)		○
12	物性(電磁気学)	磁石の原理を考える実験	○	○
13	力学, 熱力学	パソコン活用演習: 最小自乗法と「フックの法則」および「熱当量」		△
14	基礎(プログラム)	パソコン活用演習: 三角関数のグラフとリサージュ図形		○
15	力学(プログラム)	パソコン活用演習: 超音波距離計ビデオ実験「等速度運動」「等加速度運動」	○	○

表 2 (b) 物理学実験 II (初等理科選択) の実験課題

物理学実験 II A (H26 年度初等理科選修用の実験内容)			備考	
番号	領域	実験名	製作※ 5	映像・画像※ 6
1	基礎	オリオンテーションと実験データ解析(統計処理)の基礎 1		
2	基礎	実験データ解析(誤差論)の基礎 2		△
3	基礎	実験の操作ポイントの説明		
4	力学	ユースのヤング率実験(物理実験基礎操作 1)		
5	波動と力学	クントの実験(物理実験基礎操作 2)		
6	電磁気学	単色光を光源とする回折格子	○	△
7	電磁気学	白色光を光源とする回折格子と数値計算(パソコン活用実験)	○	△
8	電磁気学(回路)	コンデンサーの実験		
9	波動	音の共鳴現象から測定する音速度測定(パソコン活用実験)		
10	電磁気学	光の色の合成と偏光現象	○	○
11	放射線	β 線吸収実験(講義・実験・データ解析演習で2回で実施)		△
12	放射線	β 線吸収実験(講義・実験・データ解析演習で2回で実施)		△
13	電磁気学	パソコンオシロスコープと電磁誘導およびエネルギー変換(パソコン活用実験)	○	○
14	基礎(プログラム)	パソコン活用演習		△
15	基礎(プログラム)	パソコン活用演習		△

学実験 I の実験課題は、小学校理科のエネルギー(物理学)領域の基礎をベースにして、中学校での学習内容とその延長線上にある高等学校で学ぶ物理基礎および日常生活での物理的現象を理解できる内容へと展開させて構成している。表 1 に示す学生実験で、物理学教室が準備する実験課題の総数は年間約 100 項目以上になる。表 1 の各学生実験を受講する学生数で比較すると、物理学実験 I (初等理科) の約 43 名が最も多い。この場合、学生実験を教育スタッフ 1 名で担当しており、約 700 以上のレポートの評価および管理が必要となっている。講義時間における実験指導の外に、実験準備や事後処理(実験データやレポートの点検、成績評価等)に多くの時間を要するので教育スタッフの負担が著しく過度となっている。このような物理学教室における学生実験の実施状況下、次年(平成 27 年)度から本学の初等(学生定員 331 名)の 3 年次で必修化される「小専理科」の実施にあたり、実験を課しておこなう教授法に工夫が必要になると考えられる。

小専理科の実施にあたっては、理科教育講座ではエネルギー・物質・生命・地球宇宙(所謂、物理・化学・生物・地学)の各科目で複数の実験課題を準備する予定である。物理学教室では、実験 5 種類(1 課題は予備)を設定してその準備をおこなっている。小専理科のエネルギー領域の 4 課題の年間実施にあたっては、テキスト、関連資料、レポート等の配布にはそれぞれ 331(受講者数)×4(課題)=1,324 以上の印刷物を要するうえ、かつ提出レポートの評価および管理をおこなうこととなる。各課題は実験であるので、その実施には事故防止・安全教育も必要となる。これまでの物理学教室で管理・運営している実験に加えて、小

※ 5 本学の教員研修などの活動を経て製作した学生実験用教材

※ 6 ○: ビデオ・画像, △: データ解析(表計算ソフト)ファイルなど

専理科をおこなっていくには、予算的にもマンパワーにおいても従来通りの方法では、実施上の困難が伴うものと予想される。一方、小・中・高等学校での教育現場にも ICT 活用の波が押し寄せてきている状況下、教師育成を目的とする本学でもコンピュータを活用する積極的な取り組みを様々な局面でおこなっている。物理学実験においても、コンピュータを活用した実験課題の開拓、データ処理、数値計算など、コンピュータを学生実験に導入する試みをおこなって学生実験の質の向上にこれまで努めてきた。また、限られた実験時間（90分×1.5）内で、現象の原理や法則を受講生に効果的に修得させるには、画像や映像を提示し、データ処理に表計算ソフトを活用させることも必要である。しかし、初等理科2年生の物理学実験Ⅰの受講状態をみる限り、この2年生の段階でコンピュータを適切に使いこなしているとは言い難い状況である。これからの教育現場での ICT 活用の必要性を考慮すると、学生が物理学実験に対して主体的に取り組むための教育スタッフの積極的な働きかけと、学生実験へのコンピュータの積極的導入は、学生の意欲・関心、自主性を引き出すためにも不可欠とも考えられる。

本報告では、物理学実験を効率的かつ効果的に実践するため、サーバシステムを物理教室内に設置して、物理実験支援システムを構築したのでその概要を示し、またコンピュータを学生実験で活用する実践の工夫を提示する。

2. システム構成と操作手順

2-1. システム設計とシステムの概要

2-1-1. システム設計

現代の大学教育においては、Web ベースの CMS（Content Management System）を文章管理システムやグループウェアとして使用し、授業情報の公開、議論、レポート提出等を行う事例が多い。一方、将来、学生たちが教師として勤める小・中学校においては、情報共有の手段としてグループウェアが利用されることが増えてきたが、すべての学校で全教職員が使用しているまでには至っていない。校内文書や指導案等の共有については、Windows サーバ¹⁾もしくは同等の機能を提供する簡易サーバによるファイル共有を利用している場合が多く、通常の Windows OS のファイル操作で共有フォルダにアクセスし、ユーザー ID とパスワードを入力後、文書等を提出している現状がある。このような状況下、簡易サーバによるファイル共有の操作に慣れていることは、小・中学校教師として校務をおこなう上でも ICT 活用に直結するものといえる。

物理学実験を効果的に、また効率的に実践するための物理実験支援システムを構築するにあたっては、ユーザー ID とパスワードで個々に対して許可された保存領域にアクセスして、学生個人のレポート等を保存でき、他の受講生に操作されない環境を検討した。これらを実現する方法として、Windows サーバのファイル共有機能を使用することが考えられるが、ファイル共有機能を利用するための Windows サーバおよび使用人数に対するアクセスライセンスにかかる費用を考えると、導入コストが割高になる。一方、Windows サーバのファイル共有機能と同等の機能を簡易的に提供する NAS（Network Attached Storage）を使用した場合、導入コストの面においては Windows サーバを導入するよりも低く抑えることができる。しかし、製品によってはユーザー登録や個々に対する保存領域の確保等の管理面において、100人以上のユーザーで使用する製品仕様ではないため、使用するユーザーを一括で登録できても、さらに個々に保存領域を割り当てるなどの細かな設定をおこなうことが煩雑で難しい。²⁾ 導入コストを低くした分、登録作業等に時間を取られてしまう。補助ソフトを作成することで欠点を補う必要がある。今回導入した物理実験支援システムでは、

- ①年間最大500人程度の学生が利用でき、ユーザー ID、パスワードでアクセス制御できるファイル共有機能（ファイルサーバ）を有すること
 - ②学生情報を元に、ユーザー登録、削除およびアクセス制御を一括で行えること
 - ③ユーザー登録情報から各ユーザーに配布する利用許可書を発行できること
 - ④レポート回収用バッチファイルを生成する管理補助ソフトを有すること
 - ⑤授業情報、課題等の連絡事項を Web ブラウザから閲覧できること
 - ⑥ファイルサーバへの接続を容易にする補助ソフトを有すること
- を考慮してシステム設計を行った。

表3 システム構成一覧

	(1) ファイルサーバ兼 Web サーバ	(2) ファイルサーバ接続支援ソフト	(3) ユーザー管理ツール UMSS (User Management Supprt System)
役割	<ul style="list-style-type: none"> ・ファイル共有機能 ・Web サーバ機能 	<ul style="list-style-type: none"> ・ファイルサーバへの接続支援 	<ul style="list-style-type: none"> ・サーバへのユーザー登録・削除バッチファイルの生成 ・利用許可証発行 ・レポート回収用バッチファイル生成
台数	1	—	—
内容	HP Compaq dx7400 Microtower (GD384AV) IntelR Core2Duo CPU E6550 @ 2.33GHz × 2 RAM:3.2GB HDD:2TB OS:Ubuntu Linux 14.04LTS (サポート終了2019年4月) ファイル共有: Samba version 4.1.6-Ubuntu Samba2: 4.1.6+dfsg-1 ubuntu2.14.04.3 Web サーバ: lighttpd version 1.4.33-1+nmubuntu2	開発環境 Microsoft Visual Basic Express 2010 (無償版)	開発環境 FileMakerPro12
備考	Web サイトのコンテンツ作成には, Microsoft Excel 2010 を使用	必要に応じて, Web サーバよりダウンロード	

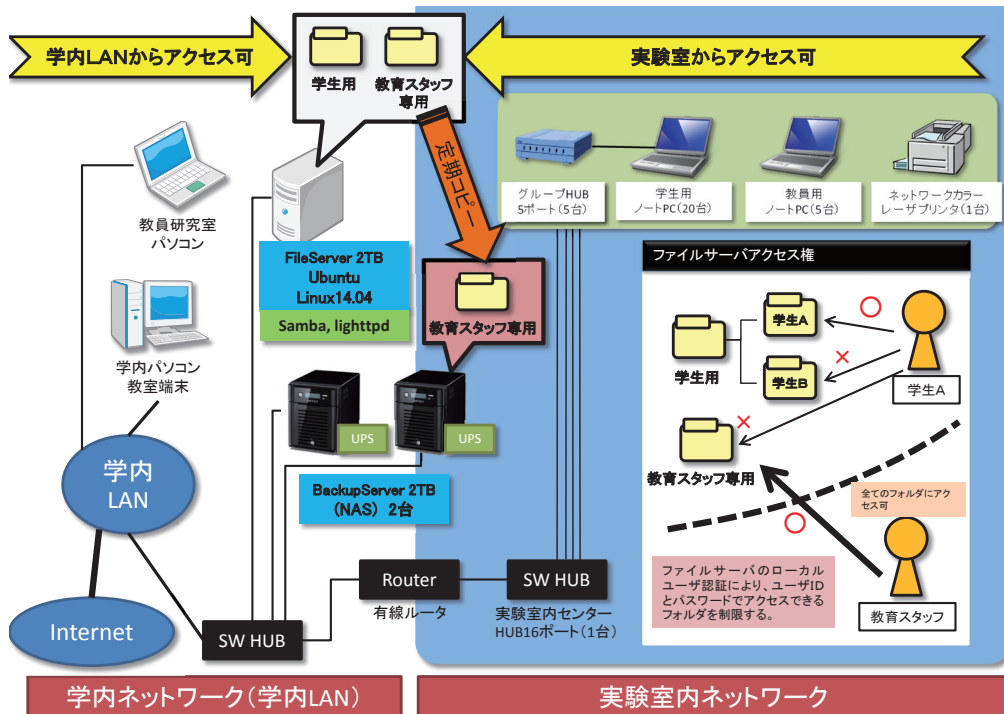


図1 システム構成図



図2 物理学実験用サイト

2-1-2. システムの概要

本システムを構築するために使用したハードウェア, ソフトウェアを表3に, システム構成図を図1に示す。³⁻⁸⁾

(1) ファイルサーバ兼 Web サーバ

学生が物理学実験レポートを提出するためのファイルサーバと, 学生実験テキスト, 関係資料, 写真説明書, 実験ビデオ等および連絡事項を掲載する Web サーバを一台に集約した。性能・機能およびコストを考慮し, OSは無償で利用できる Ubuntu Linux^{3,4)}を採用した。そのサーバ上にファイル共有サービス Samba,⁵⁾

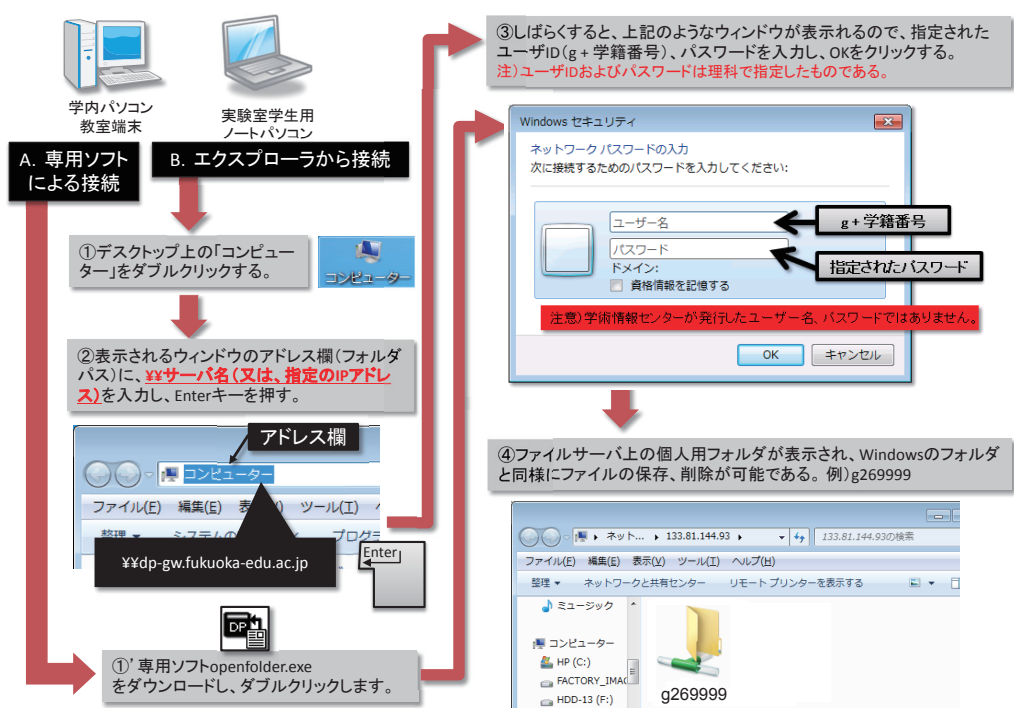


図3 ファイルサーバへの接続の流れ

Web サービスとして `lighttpd`⁶⁾ を動作させることにより、Windows サーバと同等の機能を担えるようにした。図2に示すのは、物理学実験用サイトのトップページである。コンテンツは、教育スタッフが使い慣れている汎用表計算ソフト (Microsoft Excel) で作成した。また、ネットワークで接続している他のコンピュータから SSH (Secure Shell)⁹⁾ によるリモート接続で操作できるようにした。

(2) ファイルサーバ接続支援ソフト

図3に示すように、通常ファイルサーバへの接続は、「B. エクスプローラから接続」の①、②に示すように、Windows の各フォルダの上部のアドレス欄に、ファイルサーバへのパスを入力してキーボードの「Enter」を押す。例えば、ファイルサーバ名が `test.fukuoka-edu.ac.jp`、ユーザー ID が `g269999` である学生がアクセスする場合のパスは、`¥¥test.fukuoka-edu.ac.jp¥¥g269999` となる。毎回、これらを入力する手間を軽減し、学生がパソコン教室や物理実験室のノートパソコン等の学内のコンピュータからファイルサーバへの接続を容易におこなえるように、「A. 専用ソフトによる接続」に示すファイルサーバ接続支援ソフトを作成した。①'に示すように、接続支援ソフトの起動後、③のユーザー ID とパスワードを入力して「OK」をクリックするだけで、受講する個々人のファイルサーバの保存領域に接続できる。

(3) ユーザー管理ツール UMSS (User Management Support System)

年度毎におこなうファイルサーバへのユーザー登録、或いはユーザーを削除する作業は、専門知識を要するだけでなく、その維持管理が大きな負担となる。そこで、図4の a に示すサーバへの「ユーザー登録・削除バッチファイルの生成」、b に示す「レポート回収用バッチファイル作成」および c に示す「利用許可証の発行」を一元的におこなうことのできるユーザー管理ツールを作成した。この管理ツールを使用することによって、毎年、年度の始めに本学の教育支援課より入手した学生情報ファイルを元に、図5の a'、b' に示すような各種バッチが登録時に生成される。これを教育スタッフによって、登録および削除する学生を検索し、必要なバッチファイルとして保存する。各種バッチファイルは、ファイルサーバへリモートで接続後、サーバ上で実行することで各種管理が容易になる。また、図5の c' に示す「物理レポート提出用サーバ利用許可証」の発行については、該当する学生に対して個別に配布する利用許可証を A4 サイズで印刷して渡すことになる。

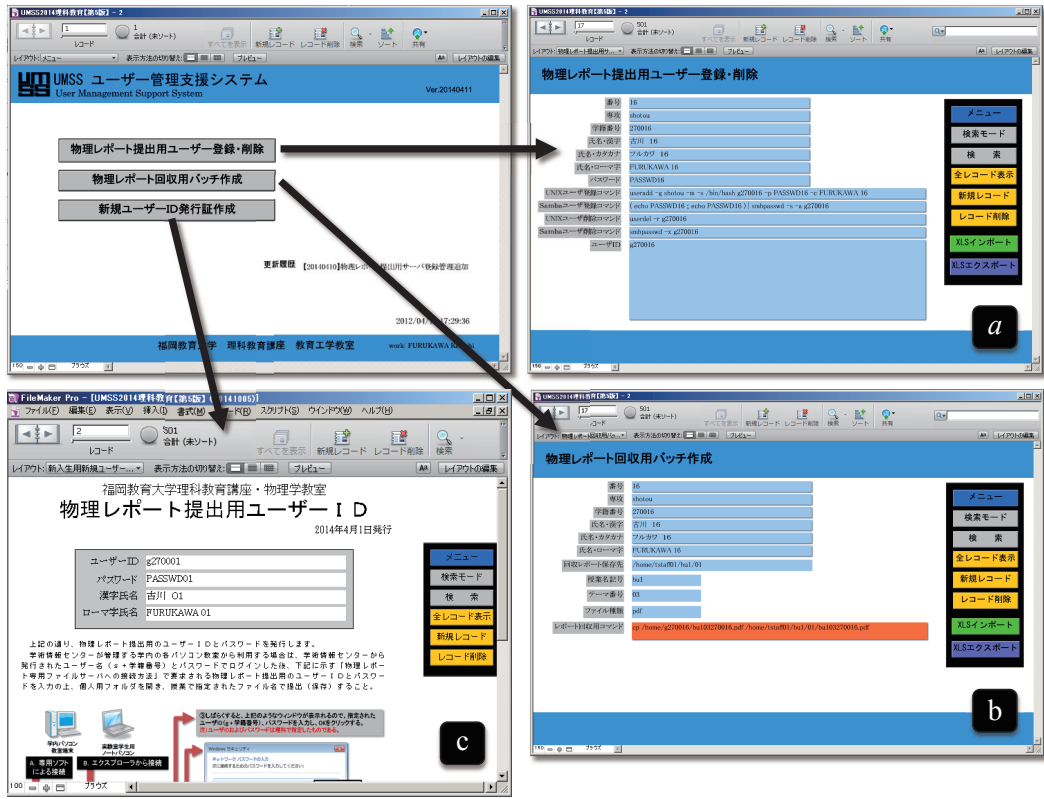


図4 ユーザー管理ツール UMSS

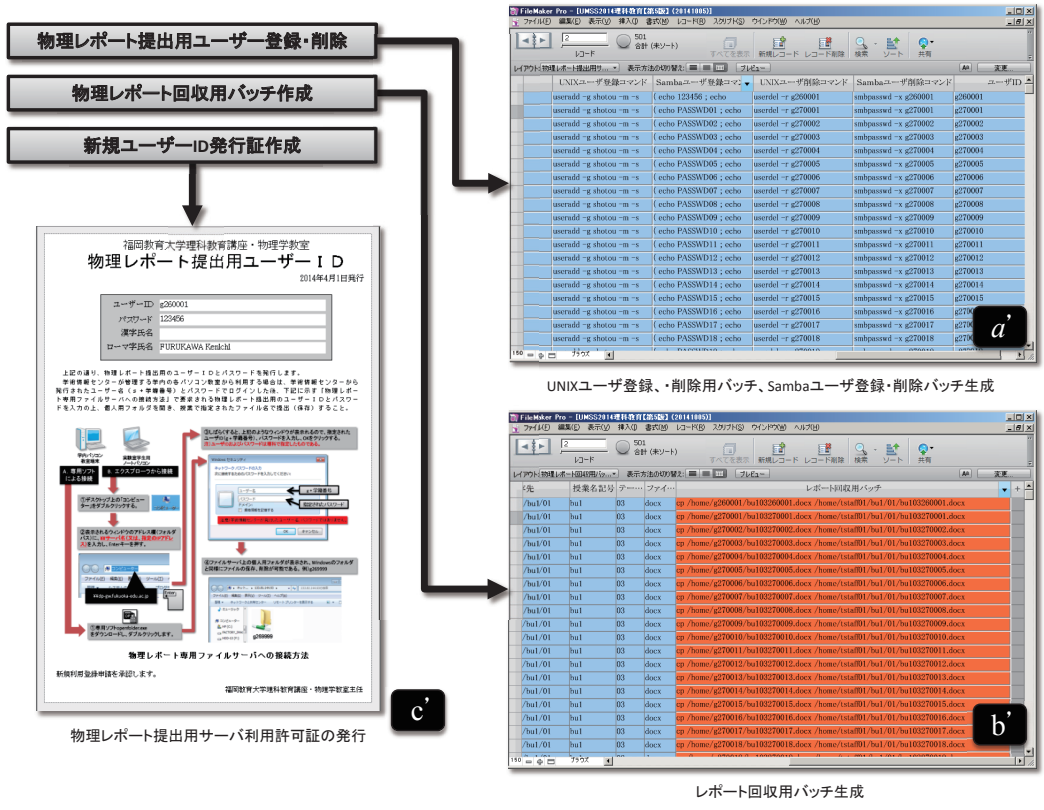


図5 ユーザー管理ツール UMSS によるバッチ生成、利用許可証の発行

表4 H27年度から実施予定の小専理科エネルギー（物理）領域の課題など

実験課題	振り子運動の実験	電気回路の実験	光の性質と凸レンズの実験	磁石の特性
実験目的	・実験で振り子運動の特性を検証して、振り子運動を理解する	・電圧・電流・抵抗の各値の測定法を習得し、オームの法則を理解する	・光屈折と凸レンズの特性を実験と作図で理解する ・光のエネルギー変換を実験で確かめる	・磁石で生じる磁力線を観察する ・磁石の有する特性を理解する
主要項目	①振り子運動の原理を理解する ②振り子の周期特性をまとめる ③微小角の周期より重力加速度を求める	①テスターとデジタルマルチメーターの使い方を習得する ②抵抗の接続を理解する ③金属薄膜抵抗の印加電圧の変化でオームの法則を理解する	①光の進み方を理解する ②凸レンズの性質を作図で理解する ③光のエネルギー変換を実験で確認する	①永久磁石の作る磁場の観察 ②実験で磁石の性質を理解する ③磁石の最小単位を考察する
実験方法	・同じおもりを用いて振り子の長さを変えて周期運動を測定する ・4種類のおもりを用いて振り子の周期運動を測定する（ビースビー使用）	・抵抗の直列と並列接続を測定する ・回路を組んでオームの法則を検証する	・空気から液体、或いは空気からガラスへ侵入する光の屈折現象を観察する ・LED光源を用いて、凸レンズの光進路を観察し、凸レンズの作図法を確認する ・光を集光させてエネルギー変換を検証する	・磁石が空間につくる磁場を観察する ・鉄製クリップの着磁を条件を変えて実験する ・電磁石の最小単位の極性を確認して、磁石の最小単位を考察する
データ解析	・汎用表計算ソフトを用いてデータを整理し、グラフ表示をおこなって評価する ・測定した重力加速度の標準値からのずれを評価して考察する	・抵抗の並列接続と直列接続の各合成抵抗を計算で求め、実験値と比較する ・実験で求めた抵抗の電流-電圧特性をグラフ表示してオームの法則を確認する	・ワークシートに観察した結果を示す ・凸レンズの基本的性質を作図し、ワークシートに従って各現象を作図で示す ・凸レンズ1と凸レンズ2で顕微鏡を作製して倍率を求める	・それぞれの条件での磁力線を観察する ・磁石の最小単位の実験と着磁実験より、磁石の特性を考察する
関連資料	・写真説明書 ・テキスト ・万有引力と振り子運動 ・自由落下と拘束運動 ・ワークシート	・写真説明書 ・テキスト ・抵抗接続の証明 ・ワークシート	・写真説明書 ・テキスト ・凸レンズの実像・虚像と作図 ・凸レンズ公式の証明 ・ワークシート	・写真説明書 ・テキスト ・磁石の基礎資料 ・ワークシート

3. サーバを活用する物理学実験の例

3-1. 小専理科での活用

表4に小専理科物理学領域の「実験課題」、「実験目的」、「実験項目」、「実験方法」、「データ解析」、「関連資料」を表示した。使用するテキスト、配布資料、ワークシートおよび写真説明書の一部を、例として図6(a)(b)(c)(d-1)(d-2)に示す。物理学教室の学生実験では、予習することなく実験に参加することを認めていないので、実験する課題の「目的」、「原理」および「実験方法」をテキストに基づいてまとめたものを予習レポートとして、実験を始める前に文書で提出しなければならない。このため、表4に記載する写真説明書以外の関連資料は受講前にダウンロードして準備することになる。各実験の手順はテキストに記載しているが、実験をおこなうポイントを明記した“写真説明書”にも示している。各実験課題の内容については、実験をおこなって得たデータを解析する過程で物理現象の原理を理解できるように構成している。受講後一週間以内に、ワークシートに基づいてレポートを作成し、4-2.の項で記載する手続きにもとづいてレポートファイルを提出する。教材製作の補助となることを考慮して、受講生が写真やビデオファイルを自由にダウンロードすることができるようにした。

3-2. ICT活用物理学実験の例

例1. 音の発生と検出および正確な音速度実験（物理学実験I，初等理科2年必修）

本実験の目的は、ダイナミックスピーカー（以下、DS）を用いて「音の発生と検出の原理」を実験で検証すること、DSとパソコンオシロスコープ（以下、PCオシロ）を活用して空気中を伝搬する音速度の正確な値を求めることにある。

本実験は、(i) 90φmmで長さ2mの透明アクリル製筒に静電気処理した発泡スチロール球（1～3φmm）を入れて、共鳴条件を満たす周波数（例、≒173Hz、≒253Hz、≒344Hz）でDSから音を発生（約22W）させて「音」が縦波〔写真1、写真2(a)(b)(c)〕であることを視覚的に捉える、(ii) パソコン発振器およびPCオシロを活用した実験で、DSとして紙コップスピーカーを用いて音の発生〔写真3：永久磁石（以下、磁石）と電磁石による連続した引力および斥力作用〕と音の検出（写真4：電磁誘導作用）を実験で検証して原理の理解を深める、(iii) 空気中を伝搬する音の速度を正確に測定〔写真5(a)(b)(c)〕する、の3部から構成されている。音に関する基礎的な実験を提示して、音の特性について説明をおこなうときに用いるビデオファイルを図7に示す。以下、(iii)について概説する。

小専理科テキスト 1 課題「振り子運動」(案)

1. 目的
 ① 「なぜ振り子は動くのか?」振り子運動の原理を理解する
 ② 「とき」を刻む振り子の周期特性を振り子の長さ(実験1)とおもりの質量の変化(実験2)で調べる
 ③ 振り子の振れ角度が微小角度領域で成立する周期の公式 $T = 2\pi\sqrt{L/g}$ より重力加速度 g を求めて、標準値 $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ と比較検討する。ここで、実験では振り子の振れ角度が約 14° 以下でほぼ成立する
 注意1: 振り子が往復運動をおこなう1回あたりに要する時間を周期という
 注意2: 重力加速度、或いは加速度については、「補足1」と「補足2」の項を参照せよ

2. 原理
 ○振り子運動の原理について
 地球上にある「物体」は万有引力の法則に基づいて地球に引きつけられている(或いは、地球を引付けている)。振り子のおもりの振り子の力(図1と図2)で引付けられているが、図3に示すように、糸で動きを拘束されているおもりに掛かる力は振り子の動きを進める(或いは、抑制する)力と糸を引く力とに分かれて振り子の運動を引き起こしている。前者を①推進力(或いは、抑止力)、後者を②張力と呼ぶ。ここで、推進力となるか、抑止力となるかは、振り子の振動の方向によって区別される。空気抵抗や糸を固定している場所の摩擦が無視できれば、振り子は、周期的な運動を続ける。最大振れの角度が 30° の場合の推進力(或いは、抑止力)と張力の $1/2$ 周期における時間変化のようすを図4に示す。

空間に2つの物体が存在するとき、お互いに引きあう力(引力)を作用しあう。これを万有引力の法則という
 m: 物体Aの質量 M: 物体Bの質量

$$F = G \frac{mM}{r^2}$$
 G: 万有引力定数
 r: 物体AとBの距離

地球と物体の万有引力の作用で → 重力加速度 g が生じる
 m: 質量
 M: 地球の質量
 r: 地球の半径

$$F = G \frac{mM}{r^2} = \left(G \frac{M}{r^2}\right) m = gm$$
 ここで、 G, M, r は定数であり、 $g = \left(G \frac{M}{r^2}\right)$ を重力加速度という。
 一方、ニュートンの運動法則より、物体に一定の力が加わり続けると、次の式に示す加速度(補足2参照)が生じる。

$$F = ma$$
 ここで、加速度 a とは速度の変化率(速度の増加率、或いは減少率)を意味する。

注意: 「質点」は、物質の大きさを点(大きさを無視)とみなして、物質の質量のみを考える物理の概念である

図6 (a) 小専理科のテキストの例

振り子の原理
 ※ 振れの角度 θ が小さい(約 14° 以下) 場合で実験をおこなう

振り子の振れの角度: θ とすると、
 ・重力の分力 ① $mg \sin \theta$ ⇒ ① 推進力 or ② 抑止力
 ・重力の分力 ② $mg \cos \theta$
 ここで、T(張力) = $mg \cos \theta$

ニュートンの第2法則: $f = am$
 恒し、 $a =$ 加速度
 $f = mg \sin \theta = am$
 $\therefore a = g \sin \theta$
 ↑ 振り子の軌道接線方向の加速度変化

ひもの張力の変化
 振り子推進力の変化
 振り子制動力の変化
 振れの角度 $\theta = 30^\circ \sim -30^\circ$

図6 (b) 小専理科の配布資料の例

小専理科: 物理学領域レポート: 日時 [], 実験器具番号 [], 初等教育 [] コース、学籍番号 [], 名前 []

テスターと電気回路
 ・抵抗の接続
 抵抗セットの「↑」印を上にして、上から順に、
 $R_1 = () \Omega, R_2 = () \Omega, R_3 = () \Omega, R_4 = () \Omega, R_5 = () \Omega,$
 R_1 と R_2 の並列接続: 測定値 = () Ω , 計算値 = ()
 R_3 と R_4 と R_5 の並列接続: 測定値 = () Ω , 計算値 = ()
 R_1 と R_3 と R_5 の直列接続: 測定値 = () Ω , 計算値 = ()

注意: テスターの抵抗レンジを変える場合、その都度、ゼロ補正を行うこと。
 ・電圧をかけない場合、豆電球の抵抗値を求めよ $R = () \Omega$

電圧	0.40	0.60	0.80	1.00	1.20	1.80	2.40	3.00	3.50		
電流											

単位: 電圧 [V]、電流 [mA]

注意1: 上記の電圧値は、目安である。最も近い値で測定し、その値を表に記録せよ。
 注意2: テスターのレンジは直流電流 600mA で、デジタルメーターのレンジは直流電圧 20V で測定すること。

電圧-電流の変化のようすをグラフで示せ。縦軸を電圧、横軸を電流とせよ

・豆電球の電圧-電流特性

電圧	0.05	0.07	0.09	0.11	0.13	0.16	0.20	0.30	0.40	0.70	1.20
電流											

電圧	1.70	2.20	2.70	3.20	3.50				
電流									

単位: 電圧 [V]、電流 [mA]

注意1: 上記の電圧値は、目安である。最も近い値で測定し、その値を表に記録せよ。
 注意2: テスターのレンジは直流電流 600mA で、デジタルメーターのレンジは直流電圧 20V で測定すること。

・豆電球の電圧-電流特性を考察せよ

注意: グラフ用紙も提出すること

図6 (c) 小専理科のワークシートの例

[1] テスターの取り扱い方:

テスター 説明
 ①: ACV (交流電圧)、DCV (直流電圧)、DC mA (直流電流) 測定のゼロ補正ネジ
 ②: 抵抗測定のゼロ補正ダイヤル (テスター正面に向かって右側面にあるダイヤル)
 ③: 抵抗測定の値 (右端が「ゼロ」: 青色表示)
 ④: 電圧、或いは、電流測定の値 (左端が「ゼロ」: 黒色表示)
 ⑤: 測定レンジ変更用回転レバー
 ⑥: 測定探針 (直流測定では「赤色」は「+」側)
 ⑦: 測定探針 (直流測定では「黒色」は「-」側)

抵抗の測り方
 ・回転レバー⑤を「 Ω (青色)」に合わせる
 注意: 各抵抗測定は、「 $\times 1k\Omega$ 」、或いは、「 $\times 10k\Omega$ 」のレンジで行うこと
 ・測定探針⑥と⑦を被験体(フォード)させて、②のダイヤルで抵抗ゼロ補正を实行
 注意: レンジ⑤を変えるたびに、抵抗ゼロ補正を行う
 ・テキストの指示に従って、抵抗を測定する
 注意: ⑥との探針を手で触れて測定しない
 ・抵抗測定での読み方: テスターの「針の示す値」 \times 「⑤のレンジ値」
 例: テスターの値が「8.2」で⑤のレンジが「 $\times 10k\Omega$ 」の場合 = $8.2k\Omega$

直流電流の測り方
 ・「+」と「-」の極性に気をつけて、回路にテスターを接続する (回路図・写真参照)
 ・⑤のレバーを「直流電流のレンジ: 600 mA」に合わせる
 ・テスターの④の目盛の「0 ~ 6」で値を読んで、「 $\times 100 \text{ mA}$ 」として記録する
 注意: 測定終了時には、⑤の回転ダイヤルを「チャイムOFF」と「抵抗測定レンジ」以外にセット
 理由: これらのレンジで測定探針⑥とのが接触した場合、テスターの電池が消耗する為

以上

図6 (d-1) 小専理科の写真説明書の例1

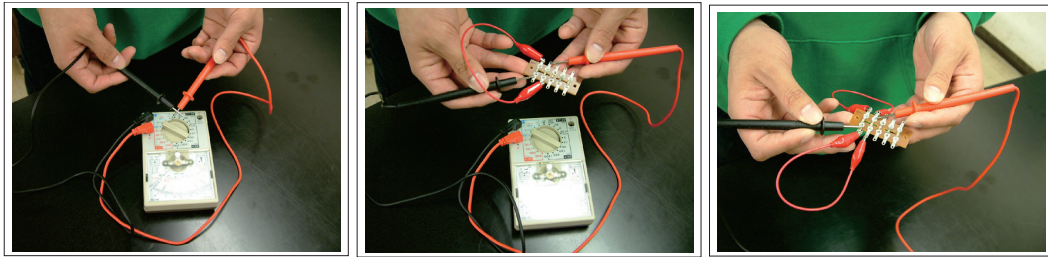


図 6 (d-2) 小専理科の写真説明書の例 2



写真1 音の縦波をバネを使ってイメージする実験ビデオ



写真3 紙コップ、永久磁石(写真中央上に示す紙コップ底部内側の黒丸部)、コイル(手前の紙コップ底部外側)でDSを作製し、パソコン発振器とパワーアンプ(5W)で音を出す実験ビデオ。パソコンのヘッドホン端子からの信号をパワーアンプに接続し、DSから音を発生させる。

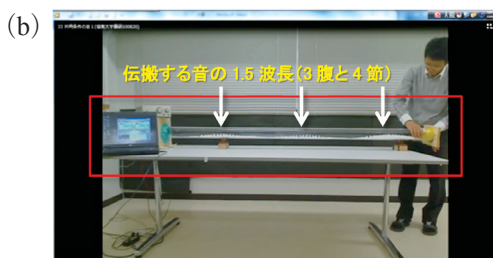
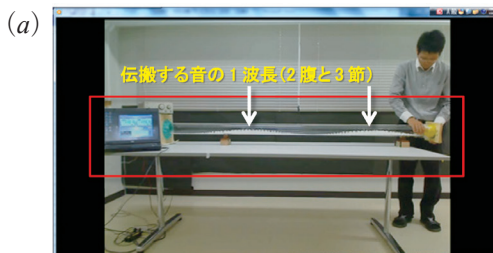


写真2 音の縦波を共鳴現象で視覚化する実験ビデオ。写真中の矢印は、音の「腹」の位置を示す。(a) 1波長共鳴現象、(b) 3/2波長共鳴現象、(c) 2波長共鳴現象

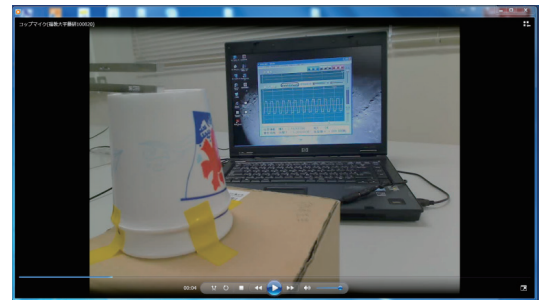


写真4 紙コップDSに音叉(写真左上金属)を近づけて、PCオシロで音の信号を測定する実験ビデオ。紙コップDSのコイルからの信号をパワーアンプ(1W)に接続し、パソコンのマイク端子経由で信号を入力してPCオシロで測定する。

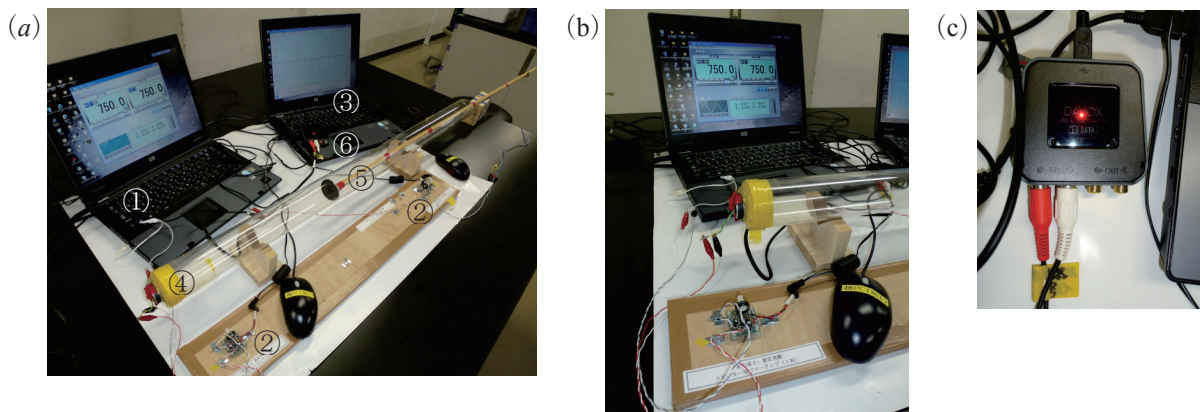


写真5 (a) 音速度実験装置。①パソコン発振器 (フリーソフト Genero), ②パワーアンプ (パソコンへの出力と入力ともに1W), ③PC オシロ (フリーソフト, ハンディオシロ), ④音発振用 DS を取り付けた透明アクリル製筒, ⑤音受信用 DS を取り付けた木製棒, ⑥PC オシロに音の2信号を取り込むデジタルサウンド, (b) 音発振部の拡大写真, (c) 実験で用いたデジタルサウンド。USB 接続で音の2信号 (④からの出力信号と⑤への入力信号) をパソコンに取り込む

音速測定実験は、60φmm で長さ1m の透明アクリル製筒の一端に音発生用 DS を設置し、また他端側に音検出用 DS を棒に固定して透明アクリル円筒内を移動できるようにする [写真5(a) (b)]。音が DS から出た瞬間および約1m 離れた DS で音を検出した瞬間を2チャンネル PC オシロ [ハンディオシロ (フリーソフト)] で観察し、その時間差を測定 (図8) して音速を求める。ここで、パワーアンプの信号端子とアース端子を DS の (+) と (-) の極性にそれぞれ接続することによって、図8の下図に示すように音を発する DS の電気信号がマイナス値から始まる場合、音を検出する図8の上図はプラス値から始まる。これは、DS からの音の発生が「空気を押すこと」から始まったとき、音を検証する DS は「空気を受けること」から始まることを意味している。DS の2つの電気信号をパソコンに入力するため、デジタルサウンド [I・O (株) 製 DAVOXL, 写真5(c)] を用いた。2つの DS 間距離を L [m], 音が伝搬する時間を Δt [s] とすれば、 V_{exp} [m/s] = $L/\Delta t$ であり、音速の公式 V_{cal} [m/s] = $331.5 + 0.6T$ (T:°C) と比較して、実験の精度を評価する。実験データは汎用表計算ソフト (Microsoft Excel) を用いて解析する。温度でもとめた公式の値と比べて、数%の差で実験値を得ることができた。

例2. 電磁誘導実験¹⁰⁾ と電気エネルギー (物理学実験Ⅱ A, 初等理科2年選択)

本実験の目的は、「レンツの法則 (コイルに誘導される電流の方向を規定)」と「ノイマンの法則 (コイルに誘導される起電力の大きさを規定)」を実験で検証して電磁誘導の特性を理解することである。また、電磁誘導で生じる交流を極性コンデンサーに蓄電する方法を考察し、ダイオードを用いた回路を組み上げて実証する。¹¹⁾ これらは PC オシロ (P&A Technologies, 型式 PA-S2000) [写真6(a) (b) (c) (d)] を用いた実

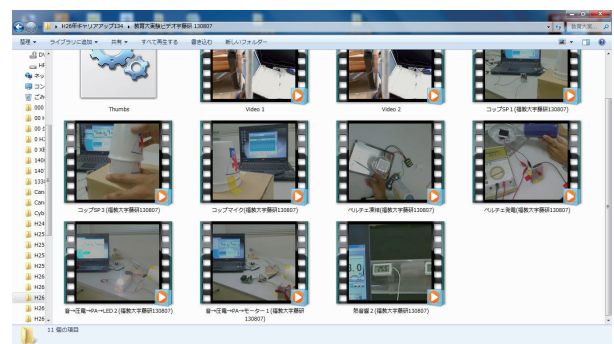


図7 音の実験ビデオファイルを格納したフォルダ

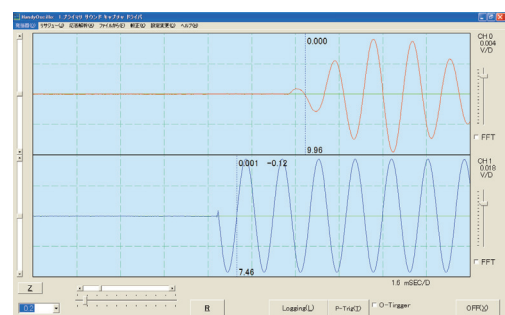


図8 写真5(a) の右側パソコンの PC オシロ (フリーソフト: ハンディオシロ) の画面。図の下は DS が音を発した瞬間からの信号を示す。図の上は DS が音を受信した瞬間からの信号を示す。上下の信号から、音が空気中 (約1m の距離) を伝搬する時間を測定する。数字の7.46 および9.96の単位は msec。

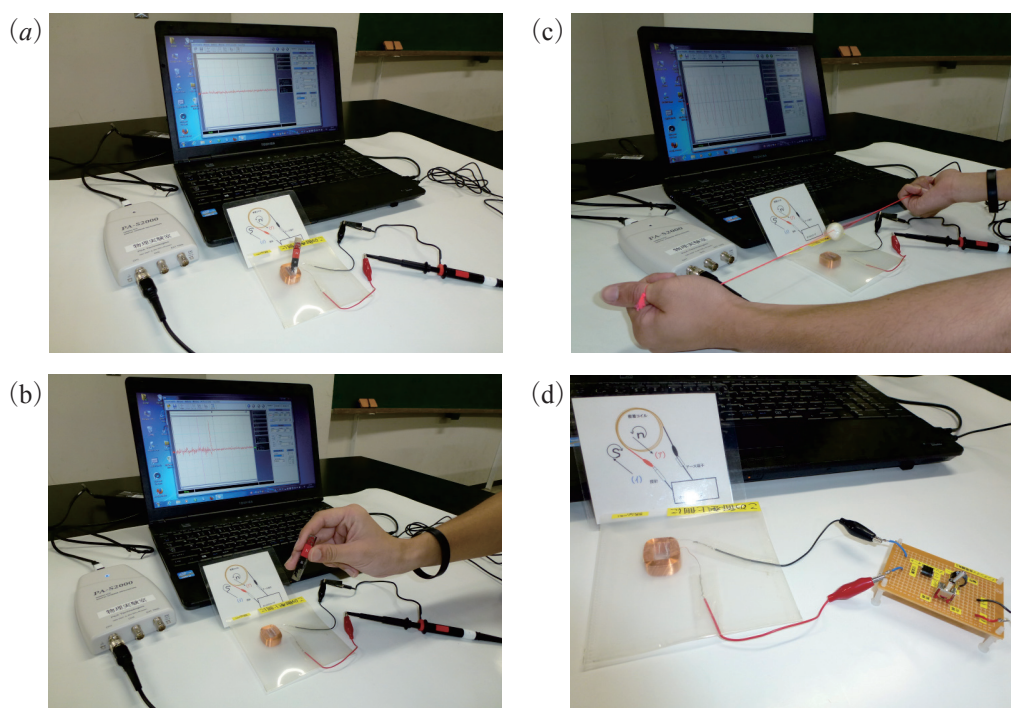


写真6 PCオシロを用いた電磁誘導実験 (a) アルニコ棒磁石のS極を密着コイルに接して置いたときのPCオシロ画面, (b) アルニコ棒磁石を密着コイルから急速に離れたときのPCオシロの画面 (+側にパルス状の信号が発生する), (c) 密着コイル近傍で円柱形状ネオジウム磁石を高速回転させて交流を発生させたときのPCオシロ画面, (d) ブリッジダイオードと極性コンデンサーを用いて交流を整流して蓄電する実験

験でおこない、写真や映像で記録しながらデータをまとめる。

本実験は、次に示す (i) から (iii) で構成する。(i) 乾電池の直流電圧値をPCオシロで測定 (図9) するなどして、PCオシロの基本操作を習得する、(ii) 写真6(a) および図10に示すように、800巻密着コイルの一面に磁石のS極とコイル面を向き合わせて置いた後、磁石を急速に遠ざけた場合 [写真6(b)], 電磁誘導によってコイルに流れる電流の向きをPCオシロの信号から判断する。(i) でおこなった結果を基準 (図9) にして磁石と向き合ったコイル面にどの極性が生じるかを判断する (図10)。磁石のN極とコイル面を向き合わせて同様の実験をおこなう。コイル磁石 (電磁石で鉄芯を除いたもの) に流れる電流の方向をPCオシロの信号で判断して表5に示すように電磁誘導の特性をまとめる。また、磁石をコイルから離す勢いを変えて電圧値の大きさを比較する。(iii) 交流を発生させ、これを極性コンデンサーに蓄電する方法を、回路を組み立てて検証する。コイル面に対して磁石を上下に、或いは左右に急速に位置を変化させることで (+)(-)極性が交互に変化する誘導電圧をPCオシロで測定することができ、交流を実験で得る。効率よく交流を発生させるため、ネオジウム製円柱形状 (20φmm, 10mm) 磁石を急速回転させて交流電圧の発生をPCオシロで測定 [写真9(a)(b)] する。電磁誘導で発生した交流電気を蓄電するため、ダイオードを組み合わせたブリッジダイオードを回路 [写真6(d)と写真7] で組んで、ブリッジダイオードの出力信号をPCオシロで測定 [写真9(c)] する。

磁石の最小単位のイメージを得るため、磁石に替えてコイル磁石を考える。コイル磁石の最小単位は1巻コイル (磁石では、例えば、鉄族の3d軌道のスピンのこれに対応) であるから、この1巻コイルに乾電池から電流を流して、写真8に示すように1巻コイルの両面の極性を小方位磁石で確認する。これより磁石の最小単位はN極とS極が対 (ペア) になって存在すること、つまり単独にN極、或いはS極が存在しないこと (図12) が確認できる。

何れの実験も写真やビデオを参照として実験をおこなうことができる。必要に応じて、ビデオ映像や写真をWebサーバからダウンロードして得ることができるようにしている。

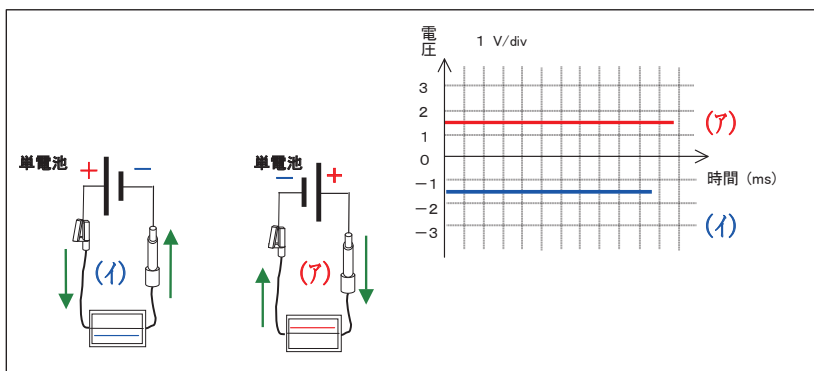


図9 乾電池を用いたPCオシロ操作の説明図。電磁誘導でコイルに生じる電流の向きを判断する基礎データとなる。

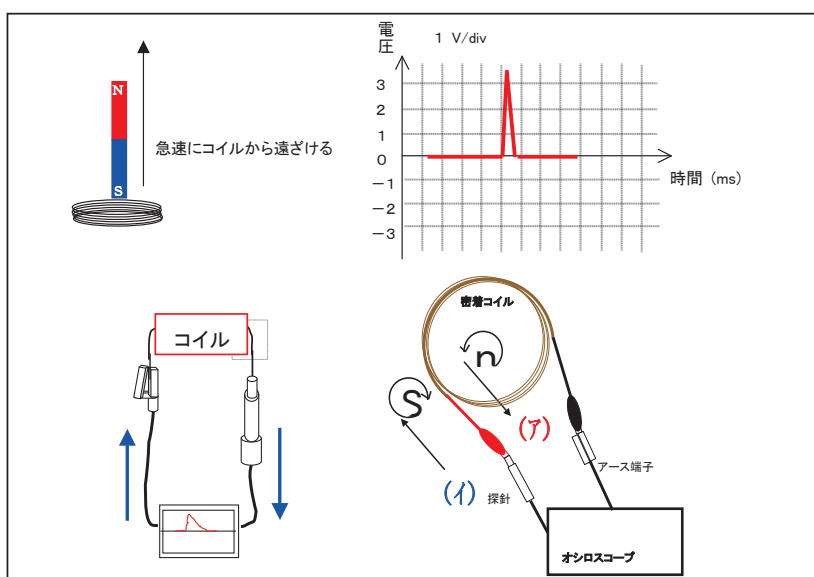


図10 電磁誘導の実験結果とコイルに生じる電流の向きの説明図1

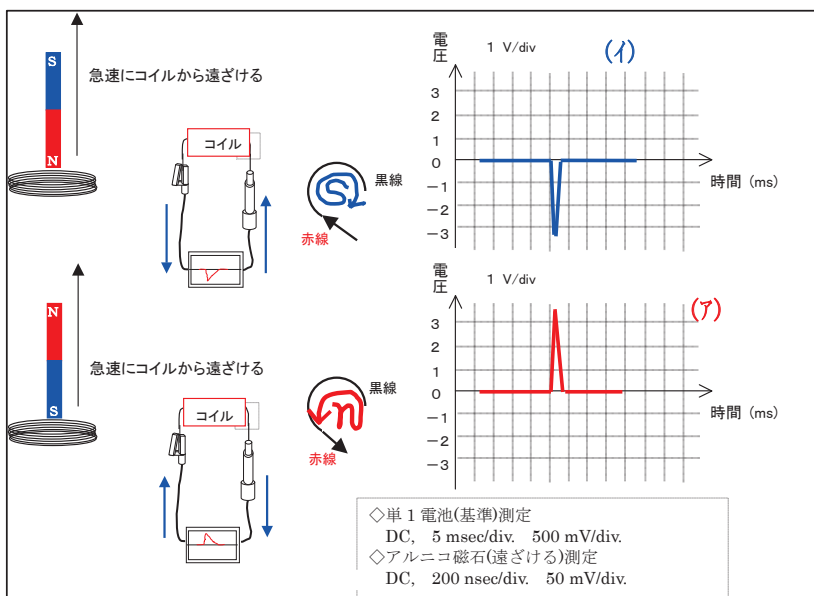


図11 電磁誘導のレンツの法則を証明するための実験結果の説明図2

例3. 単色光および白色光による回折格子の実験と数値計算演習 (物理学実験Ⅲ, 中等理科2年と環境教育2年および初等理科3年)

本実験の目的は, (可視) 光の波動性で生じる回折・干渉現象を実験で検証した後, 数値計算をおこなって現象をパソコンで再現し, 原理の理解を深めることにある。

本実験では, 回折格子 (500本/1mm) を用いて簡易回折格子実験器¹²⁾ (図13, 写真10) を作製し, 白色光を分光器に入射して観察できる干渉光を写真で記録 (写真11) する。各色 (例, 紫, 青, 水色, 緑, 黄, 橙, 赤) の波長を簡易回折格子実験器の目盛値から概算して文献値と比較する。次に, フラウンホーファの回折理論に基づいて回折・干渉の数値計算 (図14) をおこなう。単スリットによる回折を例として, フラウンホーファの回折を概説^{13,14)} すると, 入射光の波長 (例, 青色 $4.9 \times 10^{-9} \text{m}$) に比べて単スリット ($1.0 \times 10^{-4} \text{m}$) の幅が5桁異なる光学実験の場合, 回折現象の素 (以下, 素元波) は無数に存在し, 干渉縞の生じる平面で各素元波からの回折光が集光すると仮定して干渉強度を計算することができる。近似的に強度は $I = \sin^2 \beta / \beta^2$ で示せる。ここで, $\beta = \pi a \sin \theta / \lambda$, a : 回折格子の刻線幅, λ : 光の波長, θ : 入射光に対する角度。このフラウンホーファの回折を回折格子に適用すると, $I = \sin^2 \beta / \beta^2 \cdot \sin^2 N \gamma / \sin^2 \gamma$ で示せる。但し, $\gamma = \pi d \sin \theta / \lambda$, d : 回折格子の刻線間隔, N : 刻線総数とする。白色光 (蛍光灯) および単色光 (Na-D線) を入射光として回折格子で生じる回折・干渉光を実験および数値計算でもとめたものを写真11と図14および写真12と図15に示す。

波動特性 (屈折, 回折, 干渉) を示す光の回折・干渉の例として2重スリットの回折・干渉も取り上げ

表5 電磁誘導（レンツの法則）の実験結果

	永久磁石と固定したコイルの位置関係	永久磁石の動作	磁石に向けた面のコイルの極性
1	N 極をコイル面に接して磁石をコイル面に立てる	コイルから急速に離す	S 極
2	S 極をコイル面に接して磁石をコイル面に立てる	コイルから急速に離す	N 極
3	コイル面に N 極を向けて磁石をもつ	コイルに急速に近づける	N 極
4	コイル面に S 極を向けて磁石をもつ	コイルに急速に近づける	S 極

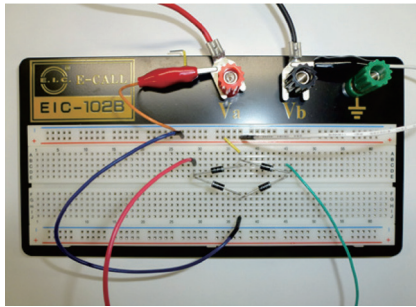


写真7 ダイオードを4本用いて、交流→直流変換器（整流器、ブリッジダイオード）の回路実験の配線

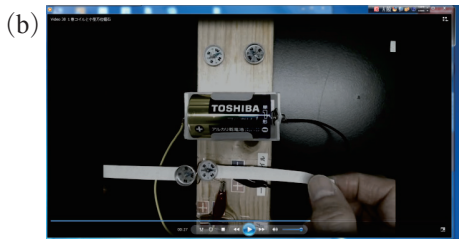


写真8 1巻コイルに直流電流を流し、コイルに生じるN極とS極を確認するビデオ (a) 1巻コイルに電流を流す前、(b) 1巻コイルに電流を流したとき、1巻コイルの両面に生じる磁極を小方位磁石で確認する

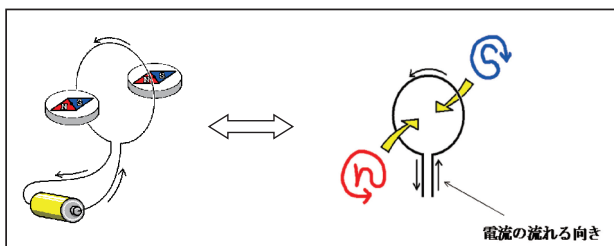


図12 1巻コイルに流れる電流の向きと1巻コイル両面に生じる極性の説明図。1巻コイルに流れる電流の向きは、紙面手前からみれば「反時計回り」だが、紙面裏側からみれば「時計回り」である。

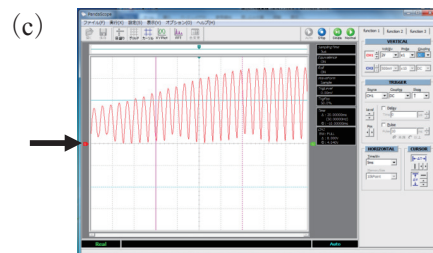
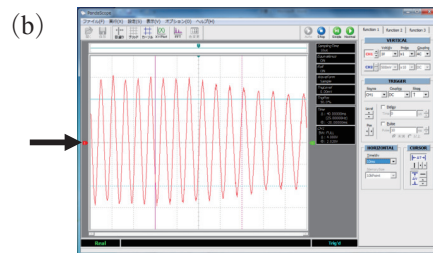
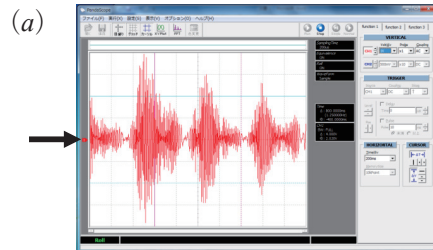


写真9 密着コイル近傍で円筒形ネオジウム磁石を高速回転させたときに電磁誘導で生じる電気信号 PC オシロ画面で確認する、(a) 交流電圧発生時の PC オシロ画面（縦軸は 1V/div、横軸は 200 msec/div）、(b) 交流電圧発生時の PC オシロ拡大画面（縦軸は 1V/div、横軸は 10 msec/div）、(c) 交流をブリッジダイオードに通して得た整流後の PC オシロ画面（縦軸は 1V/div、横軸は 10 msec/div）。PC オシロ画面左端の矢印が 0V である。

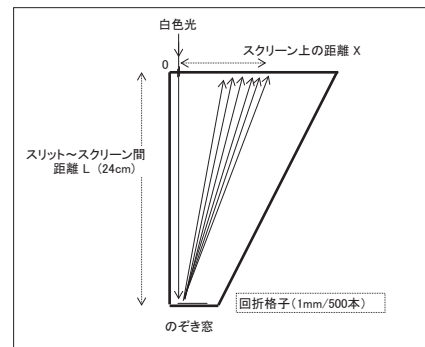


図13 市販されている組み立て式の簡易回折格子実験器の概略図

る。ヤング干渉とフラウンホーファ回折の理論の違いを、汎用表計算ソフト（Microsoft Excel）を用いた数値計算で提示し、2重スリットの干渉実験結果と比較して検討をおこなう。¹⁴⁾ ヤング干渉では、スリット幅は無視して1スリットあたり1素元波で計算をおこなうが、フラウンホーファ回折では素元波は無数存在するものとして取り扱う。この違いは回折・干渉強度に反映され、前者は強度が一定であるが、後者は周期的な強弱を繰り返す。後者の回折・干渉パターンが実験データと一致する。この点を確認して、実験および数値計算の演習をおこなう。

4. システムの運用について

H27年度以降の物理学実験の全体の開設状況、受講生のレポート提出のためのフォルダ構造および教育スタッフがレポートを評価するために提出されたレポートを回収する方法について記載する。

4-1. サーバ上での物理学実験の分類

物理学実験では、表6に示すように、16クラスを開設することになり、それぞれの学生実験では実験課題を14または4種類設定している。「対象クラス」の欄で、最初についている数字は学年を表し、続いて「初等理科」、「中等理科」、「環境教育」を、また「初等物理」、「中等物理」、「環境物理」は、理科のそれぞれのクラスの中でも物理を卒業研究のテーマとしている学生のクラスを表している。物理学実験Iから環境情報処理（表6の1～9）では、コンピュータ活用も含めて最大14課題のレポートを想定している。また、小専理科に関しては、物理だけでなく化学、生物、地学それぞれの課題があるため、物理に関しては最大4課題となっている。表6に示す10～15の「小専理科」はすべて初等3年生の必修であり、クラス名で指定された各選修が受講し、16の「選修小専理科」は初等理科3年生のクラスが受講する。尚、学生実験記号については、提出レポートの学生実験名を区別するためにレポートのファイル名の最初につける3桁の記号である。

4-2. 学生（受講者）の提出レポートのためのフォルダ構造

図16に物理学実験のためのファイルサーバ（NAS）のフォルダの構造を示す。ファイルサーバには、学生用フォルダ、教育スタッフ用フォルダおよび過去のレポート保存用フォルダがあり、学生用フォルダの中には受講生それぞれの学籍番号で区別されたフォルダが、教育スタッフ専用フォルダの中には教育スタッフそれぞれのフォルダが存在する。過去のレポート保存用フォルダの中には5年前までの各年度のフォルダがあり、その中には各学生実験の名前が付いたフォルダがある。教育スタッフはそのフォルダの中に受講学生の課題毎のすべてのレポートファイルを5年間保管し、各年度のフォルダは、5年を過ぎた時点で削除していくこととしている。

2-1-2.の(2)に示したように、学生がアクセスできるのは自分の学籍番号のついたフォルダのみであり、その他のフォルダにはアクセス権は与えられていない。学生は、ファイルサーバにアクセスしたときには、自分の学籍番号のついたフォルダ内にいるので、そこにMicrosoft WordまたはPDF（Portable Document Format）形式で保存したレポートをコピーすることで、その実験の1課題のレポートの提出となる。その際につけるレポートファイル名は、学生実験記号(3桁)＋課題番号(2桁)＋学籍番号とするように指定しており、ファイル名を見れば学生実験名と課題番号と学生が一目でわかるようになっている。「ファイルサーバ接続支援ソフト」を使用して学生が与えられたユーザーIDとパスワードを入力することでファイルサーバ内の学生自身のフォルダに簡単に接続できるようにしている。

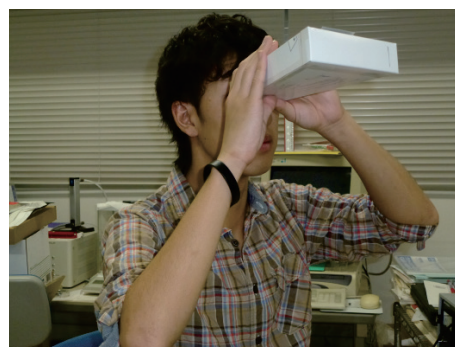


写真10 簡易回折格子実験器を用いて回折光を観察する



写真11 写真10で白色光を入射させて観察した回折光。左端の白い丸は白色入射光で、中央から右にかけての紫色から赤色の虹色状に変化している光が回折光である。

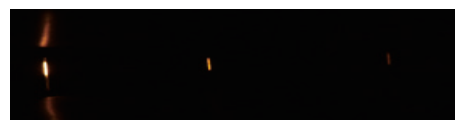


写真12 写真10で単色光（NaD線589nm）を入射させて観察した回折光。左端は入射光で、中央から右にかけての1次回折と2次回折が観察できる。

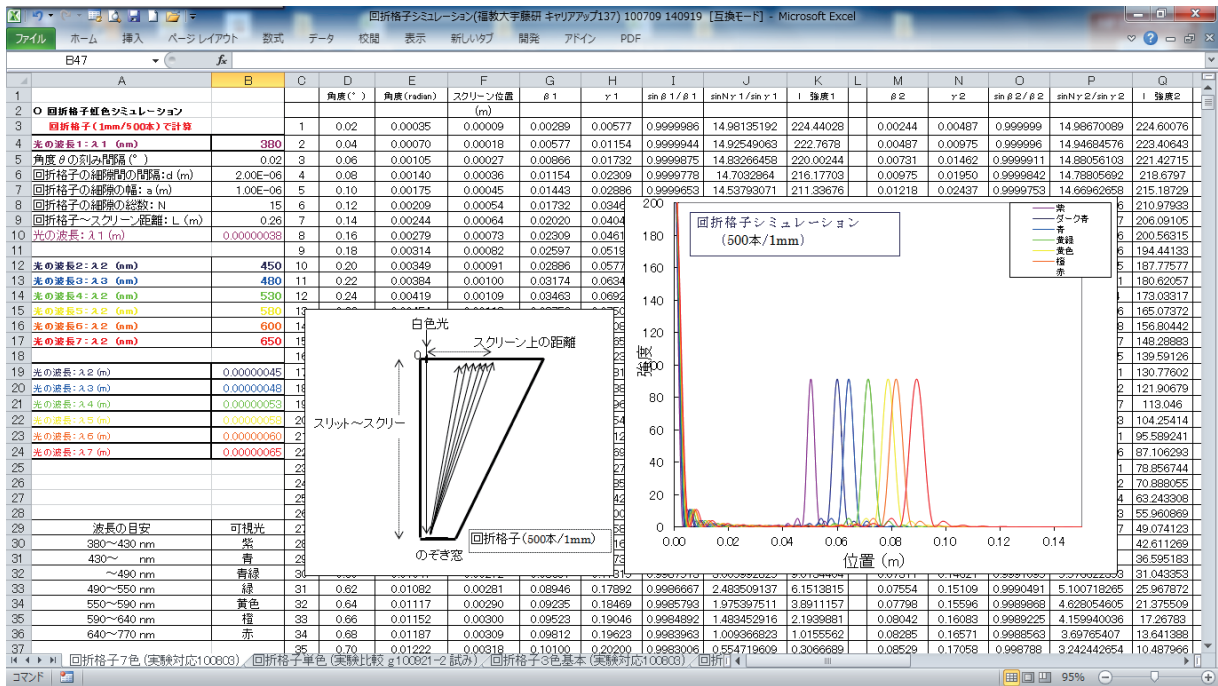


図 14 白色光（蛍光灯）を図 13 の簡易回折格子実験器に入射させた条件で数値計算したグラフ

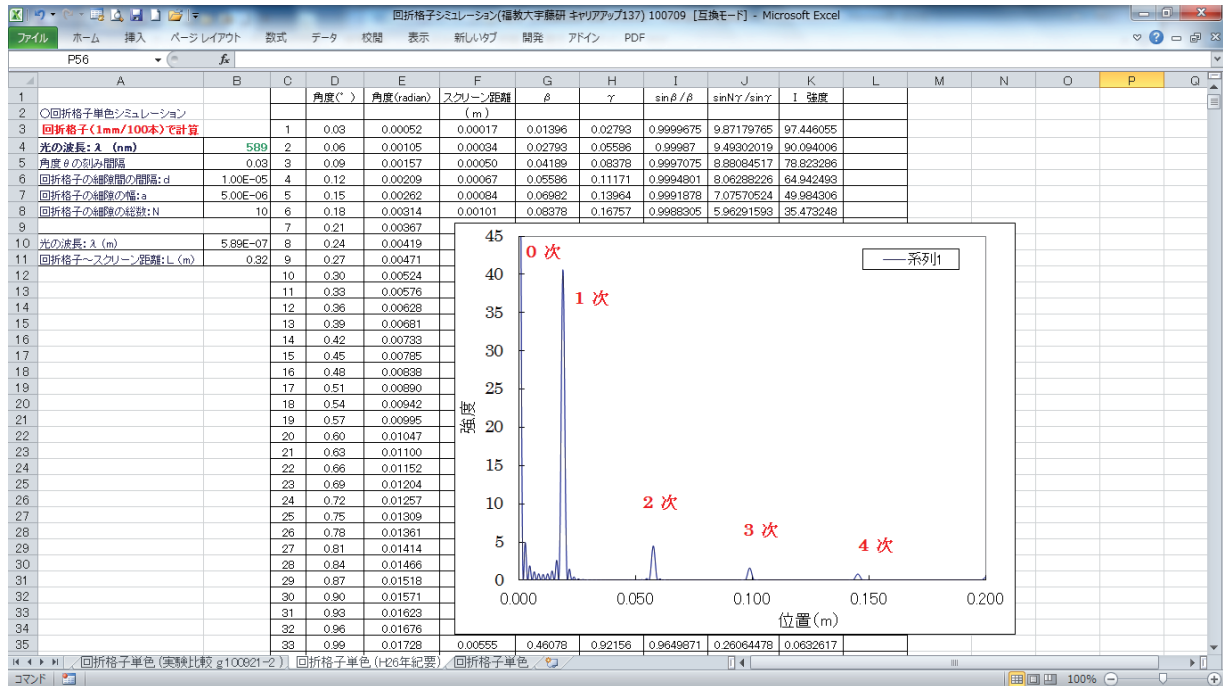


図 15 単色光（589 nm）を図 13 の簡易回折格子実験器に入射させた条件で数値計算したグラフ

一方、教育スタッフについては、教育スタッフ自身のフォルダだけでなく基本的にファイルサーバ中のどのフォルダにもアクセスできるようにアクセス権が設定されている。従って、教育スタッフは、各学生のフォルダの中から学生実験記号のついたファイルをすべて教育スタッフ自身のフォルダにコピーして採点することができる。

各学生のフォルダの中のレポートファイルは、レポートの採点が終わるまではそのまま置いておき、採点が終われば、学生のフォルダの中の当該レポートファイルは消去する。採点が終わったファイルは教育ス

スタッフのフォルダの中から過去のレポート保存用フォルダの中の当該年度のフォルダ内の学生実験のフォルダにコピーして保管することとする。

4-3. 提出されたレポートの回収について

実験担当の教育スタッフはレポートの採点をするとき、学生用フォルダの中の各学生のフォルダから担当する学生実験に関するレポートを回収しなければならない。しかし、レポートファイルの一つ一つコピーしていたのでは作業量が多すぎる。そこで、「2 システム構成と操作手順」の中の「2-1-2. (3)ユーザー管理ツール UMSS」の「レポート回収用バッチファイル生成」を用いてバッチファイルを作成し、実行することで、教育スタッフが指定するフォルダに受講生の提出したレポートを回収することができる。バッチファイルは、学生実験名と学生名簿から、コピーするファイル名を「実験授業記号+課題番号+学籍番号」で作成し、自動的に教育スタッフフォルダにコピーするように作成されている。図 17 に回収時のイメージを示す。左側にある学生用フォルダの中の受講生である学生のフォルダには、Word 形式で書かれたレポートが入っている。ここに示すのは、学籍番号が 270480 と 270481 の学生のフォルダで、あるクラス用の小専理科 (sh1) の課題番号 1~4 までのレポートがそれぞれの学生フォルダに入っている。その中から教育スタッフ用フォルダの中の小専理科の課題 1~4 までのそれぞれのフォルダに分けてレポートを回収した状態を右側に示している。フォルダ「sh101」には、学籍番号 270480~270488 までの学生の sh1 の課題番号 1 のレポートが回収されたようすがわかる。

5. まとめ

これまでに物理学教室で管理・運営してきた物理学実験は、教育スタッフ 1 名で様々な課題の実験指導をおこなわなければならない事情から数人、或いは 20 名程度の受講生を対象とせざるを得なかった。しかし、教育の質を維持したうえで年間 331 名 (初等) が受講する小専理科の学生実験を立ち上げる必要から、サーバを活用する学生実験支援システムを構築した。本システムを導入することによって、学生実験に留まらず講義・演習における ICT 活用をも視野に入れての「大学教育の質向上」を目指して

表 6 H27 年度以降、物理学教室が管理・運営する物理学実験のクラスとファイル記号

	学生実験名	対象クラス名	学生実験記号	実験課題数
1	物理学実験 I	2 初等理科	bu1	14
2	物理学実験 I	1 中等理科	bu1	14
3	物理学実験 I	1 環境	bu1	14
4	物理学実験 II A	2 初等理科	bu2	14
5	物理学実験 II B	2 中等理科	bu2	14
6	物理学実験 II C	2 環境	bu2	14
7	物理学実験 III	2 中等物理・3 初等物理	bu3	14
8	物理学実験 IV	3 中等物理	bu4	14
9	環境情報処理	3 環境物理	kj1	14
10	小専理科	初等 (国語, 保健体育)	sh1	4
11	小専理科	初等 (社会, 英語, 音楽)	sh2	4
12	小専理科	初等 (数学, 家庭)	sh3	4
13	小専理科	初等美術	sh4	4
14	小専理科	初等 (技術, 生活総合, 臨床教育, 心理)	sh5	4
15	小専理科	初等幼児教育, 特別支援	sh6	4
16	選修小専理科	初等理科	sh7	4

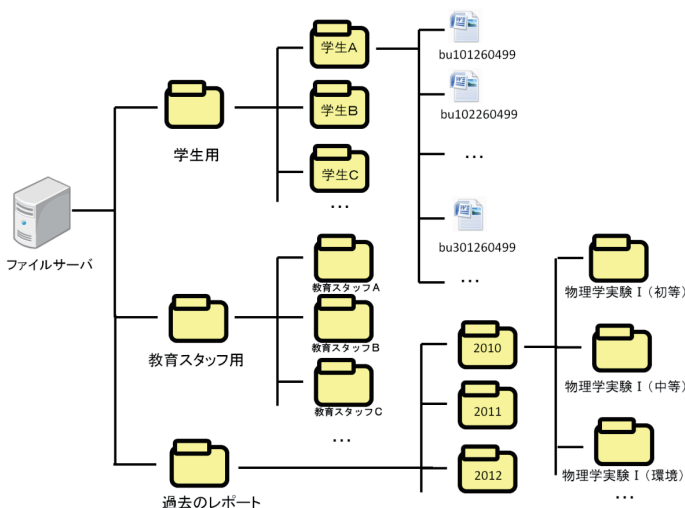


図 16 ファイルサーバのフォルダ構造の概念図

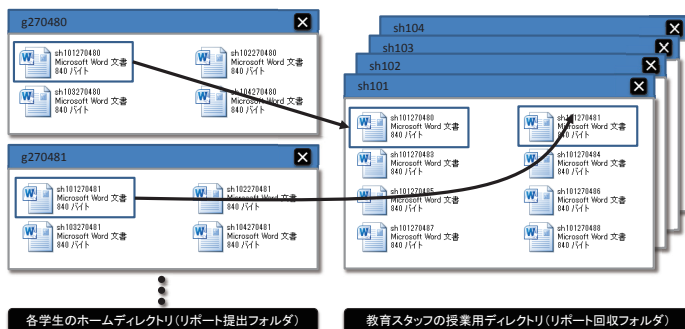


図 17 学生の提出した実験レポート (ファイル) の回収時のイメージ図

いる。本報告では、既存のシステムやソフトを組み上げ、かつ補助管理ソフトなどを作成して、本サーバシステムの管理・運営にサーバに関する専門的知識や経験を有しない教育スタッフでも運用できるように操作の簡便さを重視したシステムとした。また学生の立場からでもその操作性、利便性とセキュリティを重視したシステムとした。学生の利用できるフォルダに容量制限を加えないことで、例えば、ICTを活用した教材製作の環境を充実させることを本システムで可能としている。

本システムを学生実験で利用する事例として、小専理科の概要説明、また ICT 活用で、現在、実践している物理実験の「音」、「電磁誘導」、「光の回折・干渉」を図や写真で紹介した。実験コンテンツの自由なダウンロードによる教育現場での活用を期待している。

尚、サーバシステムの構築および学生実験課題は、文部科学省平成 24 年度国立大学法人施設設備費補助金「質の高い理科教育支援システムの整備」の補助を受けておこなったものである。

参考文献とサイト

- 1) Windows Server 2012 R2 として
<http://www.microsoft.com/ja-jp/server-cloud/products/windows-server-2012-r2>
- 2) Buffalo TeraStation TS5400D として
<http://d.buffalo.jp/ts5400d/?type=manual&dst=JP>
- 3) Ubuntu Linux として
<http://www.ubuntu.com/>
- 4) Ubuntu Japanese Team として
<https://www.ubuntulinux.jp/>
- 5) Samba として
<http://www.samba.org/>
- 6) lighttpd として
<http://www.lighttpd.net/>
- 7) MSDN Visual Studio として
<http://msdn.microsoft.com/ja-jp/vstudio/>
- 8) FileMaker として
<http://www.filemaker.co.jp/>
- 9) OpenSSH として
<http://www.openssh.com/>
- 10) 例えば、阿部龍蔵 著、新物理学ライブラリ 電磁気学入門、サイエンス社
山崎修一郎、後藤憲一 著、詳解電磁気学演習、共立出版 など
- 11) 例えば、H25 年度福岡県教育センター「ひと工夫！理科実験の基礎から発展（中理）」キャリアアップ講座「エネルギー変換実験（中物）」のテキスト など
- 12) 例えば、ケニス(株) 簡易分光器
- 13) 例えば、Max Born と Emil Wolf 著、草川徹 訳、光学の原理Ⅱ、東海大学出版会
大津元一、田所利康 著、光学入門—光の性質を知ろう—、朝倉書店
- 14) 例えば、工藤有華、永吉将人、宇藤茂憲、福岡教育大紀要 第 60 巻、第 3 分冊 (2011) p29
工藤有華、佐々木奈々、宇藤茂憲、物理教育、第 59 巻、第 2 号 (2011) p85
また、これらの参考文献参照

