

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 19 日現在

機関番号：37105

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23501037

研究課題名(和文)「シャボン玉の科学」をテーマにした教材開発

研究課題名(英文)The science of soap bubbles as a means of teaching the pleasure of learning science

研究代表者

松村 敬治 (Matsumura, Keiji)

西南学院大学・人間科学部・教授

研究者番号：40157350

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円、(間接経費) 840,000円

研究成果の概要(和文)：シャボン玉が美しいと感じる理由の一つに、透き通った薄い膜が虹色に輝いて見える事が挙げられる。この虹色の輝きは、シャボン玉の膜の内側と外側の表面で光が反射するとき起きる干渉によるものであり、シャボン玉の膜の厚さに関する重要な情報を与える。

本研究は、このシャボン玉の膜厚を高速の分光器を使って簡単に高精度で測定する方法を開発した。これと同時に、測定の信頼性を保証するために、シャボン玉を含む薄膜の干渉実験の理論的な背景を整備した。本研究の成果は、高校物理の「光の干渉と回折」の単元での教材としての応用や、児童や保護者を対象にした自然科学のイベントでの公開実験の教材としての提供が期待される。

研究成果の概要(英文)： In this study, we constructed the measuring apparatus to observe the thickness of soap and soap-bubble films with a rapid-scan multichannel CCD optical spectrometer. By using this apparatus, we carried out the measurement of interference spectra of the light reflected from and transmitted through the soap-bubble film produced on the optical path to the spectrometer. The precise time-dependent changes in the thickness of the soap-bubble film were identified by the simulation analysis of the interference spectra observed. We also carried out the theoretical works for the analyses of the interference spectra of soap and soap-bubble films. These results will provide a teaching material suitable for the diffraction and interference experiment of light in the science education.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：科学教育

キーワード：しゃぼん玉の膜厚 セッケン膜の厚さ 薄膜の干渉 紫外可視分光 干渉スペクトル 高校物理教材

1. 研究開始当初の背景

シャボン玉は老若男女を問わず人々を引き付ける魅力を持っている。シャボン玉が人々を魅了する要素はたくさんあるが、その中で主なものをあげれば、ほぼ完全な球形をしていることや表面が光の干渉により虹色に輝いていることがあげられよう。また、今にもこわれそうな薄い膜や割れるときに感じる儂さもシャボン玉の魅力になっている。本研究は、学生や児童・生徒の理科離れが問題になっている昨今において、シャボン玉の魅力を科学的に解明する教材を開発し、提供することで理科に対する興味・関心を持つきっかけをつくることを目的としている。

シャボン玉は、身近な材料を用いて手軽につくることができるので、子どもを対象にした色々なイベントの企画として取り上げられたり、一般向けのテレビ番組の一場面に使われたりしている。その中で、米村でんじろう氏は、シャボン玉を用いた様々な実験を開発して、その成果を教養番組やバラエティ番組の中で実演したり、ホームページの中で紹介したりしている。シャボン玉を科学的に解説することを目的とした特集番組もいくつか放映されている。2008年7月にNHK-BSで放映された「アインシュタインの眼 シャボン玉～美しさに秘められた謎」という番組では、シャボン玉の持つ不思議な性質をいろいろな角度から取り上げ、科学的に解説した。その番組の中で、シャボン玉の膜厚を計測する方法として、小さく膨らませたシャボン玉を瞬間冷凍した後に割って、その破片の厚みを測定する方法の紹介があった。しかし、その方法で決定した3 μm の膜厚は、シャボン玉を膨らます前の小さなシャボン玉のときの値なのでシャボン玉の膜厚としては大きめの値であった。

一般に、プラスチックフィルムなどの膜厚を決定する方法としては、干渉スペクトルの測定が有効である。シャボン玉の干渉スペクトルの観測は、2000年に Chattopadhyay が在来型の可視分光器を用いて行い、その膜厚が1 μm から0.3 μm まで変化したことを報告した。一方、我々は2010年に同様な方法を用いてセッケン膜の干渉スペクトルの測定に成功し、その膜厚が時間と共に3 μm から0.3 μm まで変化したことを確認した。しかし、これらの実験法は、測定に時間がかかるために変化する膜厚を補足できないという問題や干渉次数が定まらないという問題を含んでいた。

そこで我々は、これらの問題を解決してシャボン玉の膜厚の測定法を確立することにより、「シャボン玉の科学」をテーマにした教材開発を進めることにした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、シャボン玉の測定法を確立し、シャボン玉の魅力を科学的に解明する教材を開発して提供することで、理科教育の振興を図ることである。具体的には、次の3つを行うことを目的とする。

- (1) シャボン玉の膜厚の測定を中心としたシャボン玉の測定法を確立する。特に、シャボン玉の干渉スペクトルの高速測定を実現することで、膜厚決定の確度と精度の向上を達成する。シャボン玉のさまざまな物性の中で、膜厚の測定にこだわる理由は、シャボン玉の美しさも、特殊な物性も、膜の厚さに由来しており、絶え間なく変動するシャボン玉の膜厚が正確に測定できれば、シャボン玉の魅力の解明につながるからである。
- (2) シャボン玉の膜厚を含めた測定システムを学校や地域社会の教材として提供するために、「シャボン玉の科学」の指導法を検討すると共に、操作性に優れた測定システムの開発を行う。
- (3) 作成した教材を地域社会へ向けた自然科学の啓蒙活動の中で公開し、理科教育の振興を図る。

3. 研究の方法

- (1) シャボン玉の膜厚の測定法の確立：従来の可視分光器を用いたシャボン玉の干渉スペクトルの測定と膜厚決定法は、シャボン玉膜の時間変化などの興味ある情報を与えたが、いくつかの問題を含んでいた。その中で最大のものは、シャボン玉膜の厚さが測定中に変動して干渉次数が定まらないという問題であった。そこで、本研究では光電気化学用に開発された分光光度計で測定系を構築することにより、干渉スペクトルの測定時間の大幅な短縮を図りこの問題を解決した。
- (2) シャボン玉の測定システムの自動化：測定システムの自動化は「測定の自動化」と「解析の自動化」の2つの要素を含んでいるが、本研究ではそれぞれについて最適な方法を検討して統合するという方法を採用した。具体的には、市販ソフトのOPwave+を用いて高速で取り込んだデータを、その場でそのまま利用できるように、エクセルVBAを用いて解析ソフトを自作した。
- (3) シャボン玉の反射スペクトルの測定と膜厚の決定：シャボン玉を球状のまま測定するためには反射スペクトルの測定が必要になる。一般に、反射スペクトルの測定は透過スペクトルの測定に比べて困難であるが、反射プローブとシャボン玉の位置関係を工夫することにより解決した。

(4) シャボン玉測定教材化に向けての検討：本研究で開発した測定システムを基に、「シャボン玉の科学」の教材化を検討した。また、この測定システムを学校の教材として普及させるために、測定系の構成を再検討して使い易さとコストダウンの方法を探った。

(5) 研究成果の公開：本研究の遂行により得られた研究成果は、学会講演および論文として発表した。また、今回製作した実験装置や教材は、地域社会に向けた自然科学の啓蒙活動の中で公開した。

4. 研究成果

(1) シャボン玉の測定装置の製作：シャボン玉やセッケン膜の干渉スペクトルを正確に測定するために、高速測定が可能な紫外・可視分光光度計を製作した。従来型の回折格子を稼働させる分光光度計は、200 nm から 1000 nm の波長領域を測定するのに 1 分程度の時間が必要のため、時間変化の激しい物には適用できなかった。本研究では、CCD アレイ検出器を搭載した分光器を用い、光ファイバーとコリメーティングレンズで光学系を構築することにより、最速 0.001 秒の高速測定が可能な分光装置を製作した。この装置を用いて、シャボン玉とセッケン膜の時間ごとの瞬間の干渉スペクトルを測定することができた。得られた干渉スペクトルは、時間的・空間的に分解能が十分高いため、干渉次数が正確に帰属できるだけでなく、屈折率の波長依存性も検出できた。また、この装置を改良することにより、透過光だけでなく、反射光の干渉スペクトルも観測できるようになった。

図 1 に初期段階で測定したセッケン膜の干渉スペクトルを示す。横軸が波長 (nm) で縦軸が透過率 (%) である。CCD アレイ検出器の特徴としてノイズが大きくなることが挙げられるが、それでも干渉次数を正確に帰属することが可能になり、膜厚を $2.19 \mu\text{m}$ と決定することができた。その後、ノイズの問題は、フィルターやスムージングなどを工夫することにより解決している。

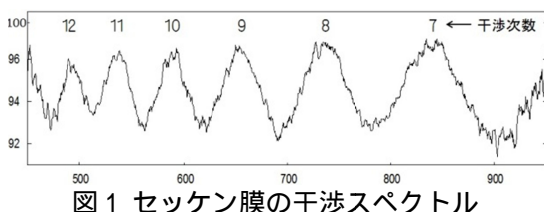


図 1 セッケン膜の干渉スペクトル

(2) 干渉スペクトルの解析ソフトの開発：シャボン玉の測定実験を学校や地域社会の教材として提供するために、高精度で簡単に膜厚を決定する解析ソフトを開発した。シャボン玉の干渉スペクトルの測定データから膜厚を決定する方法として干渉フリンジの極

値から決定する方法や、フーリエ変換を用いる方法も検討したが、いずれも決定精度に問題があることがわかった。そこで、干渉スペクトルを画面上に表示して、シミュレーションのパラメータとして膜厚を微動させながら計算スペクトルを実測スペクトルにフィットさせる方法を採用した。この方法は、ゲーム感覚で簡単に膜厚が決定でき、膜厚と干渉スペクトルの関係が一目でわかるので、小学生やその保護者を対象にした科学のイベントでの教材としても利用できることがわかった。プログラム言語にはエクセル VBA を用いており、詳細な画面表示や印刷はエクセル本体の機能を利用したので、屈折率の波長依存性の項などのパラメータを導入したにもかかわらず、軽量のソフトに仕上げることができた。この解析ソフトにより、約 $1 \mu\text{m}$ の厚さで変動するシャボン玉の膜厚を $\pm 0.001 \mu\text{m}$ の精度で簡単に決定できるようになった。

図 2 と図 3 にシャボン玉の干渉スペクトルを示す。黒の実線が実測スペクトルを示し、オレンジ色の実線がシミュレーションスペクトルを示す。いずれも横軸が波長 (nm) で縦軸が透過率 (%) である。図 2 は屈折率の補正を行う前の解析結果をスペクトルにしたもので、干渉フリンジの強度と位相が短波長側で再現できていないことがわかる。このとき決定した膜厚は $2.335 \mu\text{m}$ の値に対して、 $\pm 0.006 \mu\text{m}$ の誤差を生じた。一方、図 3 は屈折率の波長依存性の補正を行った後の解析結果をスペクトルにしたもので、干渉フリンジの位相が再現できたことがわかる。この結果、誤差は同じ膜厚に対して $\pm 0.001 \mu\text{m}$ まで改善した。

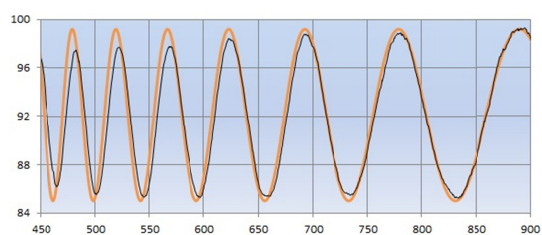


図 2 シャボン玉の干渉スペクトル：
屈折率の補正を行う前

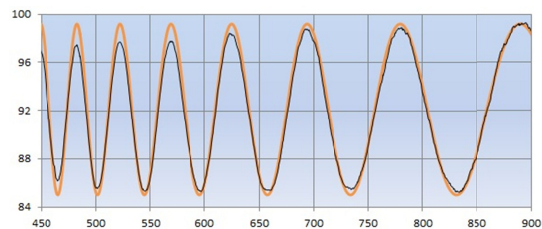


図 3 シャボン玉の干渉スペクトル：
屈折率の波長依存性による補正

(3) 教材化に向けた理論的背景の整理：シャボン玉の干渉実験については高校物理の「光の干渉と回折」の単元で扱っている。

我々は今回の成果を高校物理の教材として提供できるように、シャボン玉の干渉実験の理論的な背景をまとめた論文を発表した。ここでは、干渉スペクトルの解析に現れるすべての実験式が純粋に理論的に導出できることを示した。また、理論と実験のずれを2次微分まで踏み込んで補正することにより、実測したシャボン玉の干渉スペクトルがシミュレーションで完全に再現できることを実証した。

図4には、図3と同じ干渉スペクトルに対して、理論の結果を用いて補正を行ったシミュレーションスペクトルをオレンジ色の実線で示す。干渉フリンジの強度と位相がすべての波長領域にわたって正確に再現できており、本研究で行った理論が有効であることがわかる。

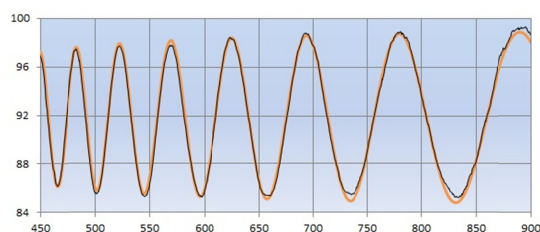


図4 シャボン玉の干渉スペクトル：
干渉スペクトルの理論による補正

(4) 研究成果の公開：今回製作した実験装置や教材は、地域社会に向けた自然科学の啓蒙活動の中で公開した。具体的には、夏休みに開催された自然科学のイベントで、「シャボン玉ができてから割れるまで」という題目で、小学生とその保護者を対象にシャボン玉の干渉実験を公開した。そこでは約3分間の鑑賞時間を設けてシャボン玉の色の変化と干渉スペクトルのフリンジの変化から膜厚を見積もってもらったが、理科好きの子供たちを中心に興味を持って観察してもらった。こうした自然科学の啓蒙のためのイベントは、年に2回以上開催しており、今後も継続して行く予定である。

(5) 最近の成果：最近の成果としては、シャボン玉の透過光と反射光の干渉スペクトルを同時に測定する装置を作成して、干渉スペクトルのフリンジの位相が透過光と反射光では逆転することを実験的に直接証明したことが挙げられる。この実験は、固定端反射と自由端反射の違いを示す教材になるので、教育的な価値がある。

図5には、同時測定で得られたシャボン玉の反射スペクトル(上側)と透過スペクトル(下側)を示す。実線が実測スペクトルを示し、点線が屈折率の波長依存性を補正しただけのシミュレーションスペクトルを示す。図中の数字は帰属した干涉次数で、このときの膜厚は $2.022 \mu\text{m}$ となった。この図から、反射光の干渉フリンジの位相が透過光のもの

に比べて だけずれていることが一目でわかり、位相の逆転が証明できた。図6には、シャボン玉の膜厚の時間変化のグラフを示す。1回目の測定で得られた透過光と反射光の干渉スペクトルからの膜厚を、それぞれ、と でプロットし、2回目の測定で得られた透過光と反射光の干渉スペクトルからの膜厚を、それぞれ、と でプロットした。この図により、シャボン玉の膜厚が時間変化も含めて正確に測定できるようになったことがわかる。

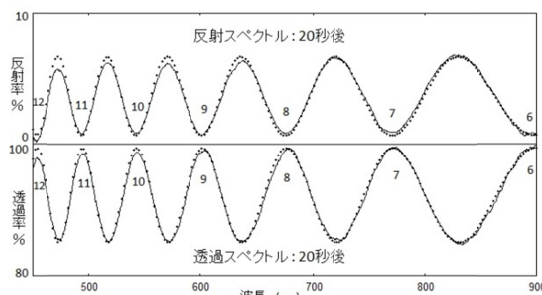


図5 シャボン玉の干渉スペクトル：
反射光と透過光の同時測定

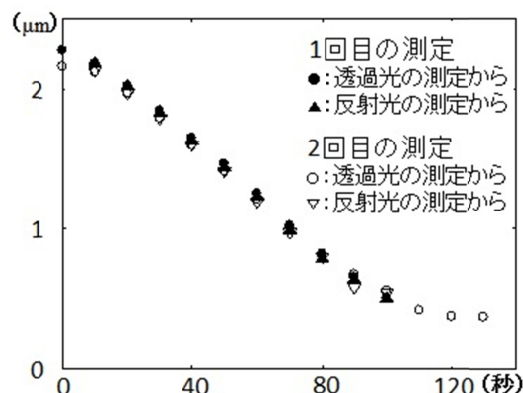


図6 シャボン玉の膜厚の時間変化

(6) 今後の展望：今後、これらの研究をまとめた論文を学術誌に発表すると同時に、「シャボン玉の科学」の教材化と普及のための活動を続けて行く予定である。また、これと並行して、西南学院大学のパートナーシップ・プログラム(http://www.seinan-gu.ac.jp/community_connect/)に、本研究の成果を盛り込んだ「しゃぼん玉の科学」を登録して、地域・社会への貢献を行う予定である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 7 件)

松村敬治、塩野正明、しゃぼん玉とセッケン膜の干渉スペクトルの解析のための理論

式、西南学院大学人間科学論集、査読無、Vol. 9、No. 2、2014、pp. 179-203.

松村敬治、塩野正明、シャボン玉の反射光と透過光の分光測定による膜厚の決定、西南学院大学人間科学論集、査読無、Vol. 8、No. 2、2013、pp.215-228.

塩野正明、磯望、松村敬治、西野祥子、久保田茉奈、山崎喜代子、中村奈良江、自然科学教育の充実と地域連携：概要と展望、西南学院大学人間科学論集、査読無、Vol. 8、No. 2、2013、pp.229-248.

松村敬治、塩野正明、光の干渉を用いたシャボン玉の膜厚の測定方法と教材化、日本理科教育学会 全国大会発表論文集、査読無、No. 10、2012、p.433.

松村敬治、塩野正明、分光測定の高速度化によるシャボン玉の膜厚の測定法の確立、西南学院大学人間科学論集、査読無、Vol. 8、No. 1、2012、pp.27-43.

松村敬治、シャボン玉の科学の教材化(1) 加法混色・減法混色と色の見え方について、西南学院大学人間科学論集、査読無、Vol. 7、No. 2、2012、pp.147-165.

塩野正明、松村敬治、小学校理科における「振り子の運動」の実験指導と誤差の扱いについて、西南学院大学人間科学論集、査読無、Vol. 7、No. 1、2011、pp.107-121.

〔学会発表〕(計 2 件)

松村敬治、塩野正明、しゃぼん玉の可視分光による干渉実験 反射光と透過光の干渉スペクトルの同時測定、日本科学教育学会第37回年会、2013年9月8日、三重大学.

松村敬治、塩野正明、光の干渉を用いたシャボン玉の膜厚の測定方法と教材化、日本理科教育学会第62回全国大会、2012年8月12日、鹿児島大学.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究代表者

松村 敬治 (MATSUMURA, Keiji)

西南学院大学・人間科学部・児童教育学科・教授

研究者番号：40157350

(2)研究分担者

塩野 正明 (SHIONO, Masaaki)

西南学院大学・人間科学部・児童教育学科・教授

研究者番号：80235499